

Olivera Ciraj - Bjelac, Milan Vujović

# UPRAVLJANJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM



Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet  
Akademska misao

Olivera Ciraj-Bjelac i Milan Vujović

# **Upravljanje radioaktivnim otpadom**

Beograd, april 2017.

Dr Olivera Ciraj-Bjelac, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet i Institut za nuklearne  
nauke „Vinča“  
e-mail: [ociraj@vinca.rs](mailto:ociraj@vinca.rs)

MSc Milan Vujović  
Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije  
e-mail: [milan.vujovic@gmail.com](mailto:milan.vujovic@gmail.com)

## UPRAVLJANJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM

elektronski udžbenik

[http://www.etf.bg.ac.rs/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1217&Itemid=178&lang=sr](http://www.etf.bg.ac.rs/index.php?option=com_content&task=view&id=1217&Itemid=178&lang=sr)

Recenzenti:

Dr Predrag Marinković, redovni profesor  
Dr Koviljka Stanković, docent

Nastavno-naučno veće Elektrotehničkog fakulteta odobrilo je objavljivanje  
ovog udžbenika odlukom broj 526/2 od 25.4.2017. godine.

Izdavači: Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet  
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija  
Akademska misao, 11120 Beograd, Srbija

Štampano izdanje:

ISBN: 978-86-7466-679-1

Štampa: Akademska misao, Beograd

Tiraž: 100 primeraka

<b>PREDGOVOR .....</b>	<b>5</b>
<b>I. UPRAVLJANJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM.....</b>	<b>7</b>
DEFINICIJA RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	7
CILJ UPRAVLJANJA RADIOAKTIVNIM OTPADOM .....	7
MINIMIZACIJA NASTALOG RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	8
OSNOVNI PRINCIPI UPRAVLJANJA RADIOAKTIVNIM OTPADOM .....	9
<b>II. POREKLO I VRSTE RADIOAKTIVNOG OTPADA .....</b>	<b>13</b>
RADIOAKTIVNI OTPAD IZ PROCESA EKSPLOATACIJE URANIJUMSKE RUDE .....	18
RADIOAKTIVNI OTPAD NASTAO TOKOM RADA I DEKOMISIJE NUKLEARNIH ELEKTRANA .....	18
PRERADA ISLUŽENOG NUKLEARNOG GORIVA.....	19
RAD I DEKOMISIJA ISTRAŽIVAČKIH NUKLEARNIH REKATORA .....	20
PRIMENA IZVORA ZRAČENJA U MEDICINI I INDUSTRIJI .....	21
PROIZVODNJA I PROBE NUKLEARNOG ORUŽJA .....	24
NUKLEARNI I RADIOLOŠKI AKCIDENTI.....	25
<b>III. KLASIFIKACIJA RADIOAKTIVNOG OTPADA .....</b>	<b>30</b>
PODELA RADIOAKTIVNOG OTPADA NA OSNOVU RADIOLOŠKIH OSOBINA .....	31
PODELA RADIOAKTIVNOG OTPADA NA OSNOVU FIZIČKIH OSOBINA .....	32
PODELA RADIOAKTIVNOG OTPADA NA OSNOVU HEMIJSKIH I BIOLOŠKIH OSOBINA .....	34
MEDUNARODNI SISTEM ZA KLASIFIKACIJU RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	35
<b>IV. DEKOMISIJA OBJEKATA U KOJIMA SE KORISTE RADIOAKTIVNI MATERIJALI.....</b>	<b>43</b>
RAZLOZI ZA DEKOMISIJU.....	44
STRATEGIJE DEKOMISIJE.....	46
PLANIRANJE I PRIPREMA DEKOMISIJE .....	52
TEHNIKE DEKOMISIJE .....	56
TEHNIKE DEMONTIRANJA.....	67
DALJINSKE TEHNIKE DEKONTAMINACIJE I DEMONTIRANJA .....	77
REMEDIJACIJA .....	78
<b>V. FAZE UPRAVLJANJA RADIOAKTIVNIM OTPADOM .....</b>	<b>79</b>
PREDTRETMAN .....	82
KARAKTERIZACIJA RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	84
TRETMAN.....	85
KONDICIONIRANJE .....	88
SKLADIŠTENJE RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	88
ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	89
<b>VI. OBRADA RADIOAKTIVNOG OTPADA .....</b>	<b>93</b>
PREDTRETMAN RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	94
TRETMAN RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	96
KONDICIONIRANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	117

<b>VII. SKLADIŠTENJE RADIOAKTIVNOG OTPADA .....</b>	<b>128</b>
ELEMENTI SKLADIŠTA .....	129
FAZE SKLADIŠTENJA RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	131
KONTEJNERI ZA SKLADIŠTENJE RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	134
OBJEKTI ZA SKLADIŠTENJE RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	136
SIGURNOST SKLADIŠTENJA RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	144
SKLADIŠTENJE ISLUŽENOG NUKLEANOG GORIVA .....	148
<b>VIII. TRANSPORT RADIOAKTIVNIH MATERIJA.....</b>	<b>150</b>
VELIČINE DEFINISANE TRANSPORTNOM REGULATIVOM .....	151
VRSTE RADIOAKTIVNIH PAKETA .....	154
OPŠTI ZAHTEVI ZA TRANSPORT RADIOAKTIVNIH MATERIJA.....	157
KATEGORIZACIJA I OBELEŽAVANJE RADIOAKTIVNIH PAKETA .....	158
<b>IX. ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA.....</b>	<b>162</b>
MOGUĆE OPCIJE ZA ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	163
TIPOVI ODLAGALIŠTA ZA ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA .....	172
IZBOR METODE ZA ODLAGANJE OTPADA.....	181
OCENA PERFORMANSI ODLAGALIŠTA .....	185
ISPUŠTANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA U ŽIVOTNU SREDINU.....	196
NIVOI IZUZIMANJA I NIVOI OSLOBADANJA .....	203
<b>X. REGULATORNI OKVIR ZA UPRAVLJANJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM .....</b>	<b>210</b>
MEDUNARODNE ORGANIZACIJE .....	210
STANDARDI MEDUNARODNE AGENCIJE ZA ATOMSKU AGENCIJU .....	213
FUNKCIJE REGULATORNIH TELA .....	215
ZAJEDNIČKA KONVENCIJA O SIGURNOSTI UPRAVLJANJA ISLUŽENIM GORIVOM I OSIGURNOSTI UPRAVLJANJA RADIOAKTIVNIM OTPADOM .....	216
REGULATORNI OKVIR EVROPSKE UNIJE .....	218
<b>XI. LITERATURA .....</b>	<b>221</b>
<b>XII. PRILOG A.....</b>	<b>227</b>
PROCENA DOZA KOJU PROFESIONALNO IZLOŽENA LICA I STANOVNIŠTVO PRIME PRI NORMALNIM OPERACIJAMA I Odstupanjima od normalnog rada objekata za UPRAVLJANJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM .....	227
PROCENA DOZA KOJE STANOVNIŠTVO PRIMI TOKOM VANREDNOG DOGAĐAJA .....	237
<b>XV. PRILOG B.....</b>	<b>248</b>
KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI ZA NIVOE IZUZIMANJA I NIVOE OSLOBADANJA KOJE MOGU PO DEFINICIJI BITI PRIMENJENE NA BILO KOJI ČVRST RADIOAKTIVNI MATERIAL.....	248
<b>XVI. REGISTAR POJMOVA.....</b>	<b>251</b>

## Predgovor

---

Primena radioaktivnih materijala u industriji, medicini, naučno-istraživačkom radu, kao i proizvodnja električne energije u nuklearnim elektranama, pored ogromne koristi za čovečanstvo ima za posledicu generisanje radioaktivnog otpada. Kao i svi drugi radioaktivni materijali, i radioaktivni otpad emituje jonizujuće zračenje koje potencijalno predstavlja opasnost po zdravlje ljudi i životnu sredinu te je stoga sigurno upravljanje radioaktivnim otpadom od suštinskog značaja za zaštitu zdravlja ljudi i životne sredine, kako sadatako i u budućnosti. Iz ovog razloga radiološki rizik, prisutan u svim fazama upravljanja radioaktivnim otpadom, mora biti kontrolisan na odgovarajući način. Značaj sigurnog upravljanja radioaktivnim otpadom u smislu zaštite zdravlja ljudi i zaštite životne sredine odavno je prepoznat, dok su posebno značajna iskustva u ovoj oblasti stečena u proteklih nekoliko decenija.

Problematika upravljanja radioaktivnim otpadom je savremena naučna i tehnička disciplina za koju se vezuje velik broj publikacija objavljenih u proteklih nekoliko decenija. Ova oblast je oformljena kao posebna oblast u drugoj polovini XX veka a doživela poseban pomak u proteklih 20 godina.

Radioaktivni otpad se može nalaziti u tri agregatna stanja: gasovitom, tečnom i čvrstom agregatnom stanju, dok opseg koncentracije aktivnosti može biti od bliske nivoima izuzimanja iz regulatorne kontrole pri kojima se materijal može ispustiti u životnu sredinu pa do veoma velike koja zahteva primenu složenih mera zaštite od zračenja. Pored aktivnosti i agregatnog stanja, opcije za skladištenje i odlaganje radioaktivnog otpada zavise i od oblika otpada, od vrste prisutnih radionuklida, njihove koncentracije i toksičnosti.

Ovaj udžbenik nastao je na osnovu dugogodišnjih predavanja u okviru kursa Obrada i odlaganje toksičnih i radioaktivnih otpadnih materijala na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Način izlaganja materije oslanja se na znanja koja su studenti stekli na kursovima Nuklearna fizika, Nuklearna tehnika i Dozimetrija i zaštita od zračenja koji se realizuju na Elektrotehničkom fakultetu u Univerziteta u Beogradu.

Udžbenik je prevashodno namenjen studentima master studija smera Biomedicinsko i ekološko inženjerstvo na Elektrotehničkom fakultetu u

---

Beogradu koji prate kurs Obrada i odlaganje toksičnih i radioaktivnih otpadnih materijala, ali može bitikoristan i drugim studentima osnovnih i doktorskih studija, studentima drugih fakulteta i široj naučnoj i stručnoj javnosti koja ima potrebu za dubljim razumevanjem ove problematike.

Zahvaljujemo se profesoru Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu dr Predragu Marinkoviću i docentu Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu dr Koviljki Stanković na recenziji i korisnim sugestijama.

## I. Upravljanje radioaktivnim otpadom

---

Radioaktivni materijali predstavljaju potencijalnu opasnost za ljude i životnu sredinu ukoliko nisu kontrolisani na odgovarajući način. Pored kontrole primene radioaktivnog materijala, jednako je važno i da način upravljanja ovakvim materijalima, nakon prestanka njihovog korišćenja, bude takođe, na odgovarajući način kontrolisan. Efikasna kontola radioaktivnog otpada sprečava potencijalna izlaganja jonizujućem zračenju koja mogu biti štetna po zdravlje ljudi i životnu sredinu.

### Definicija radioaktivnog otpada

Radioaktivni otpad je radioaktivni materijal koji se ne planira za dalju upotrebu. Definicija radioaktivnog otpada je regulatornog karaktera i odnosi se na svaki radioaktivni materijal odnosno na svaki materijal čija je aktivnost i/ili specifična aktivnost veća ili jednaka od graničnih vrednosti koje su propisane pravnim okvirom u svakoj državi, bez obzira na nivo pratećeg radijacionog rizika.

Iako značajan udeo radioaktivnog otpada može biti identifikovan, u skladu sa definicijom radioaktivnog otpada, kao materijal koji nije predviđen za dalju upotrebu, ovakvu definiciju treba primenjivati sa oprezom, imajući u vidu da određena količina radioaktivnog otpada može biti i reciklirana ili ponovo korišćena u druge namene. Primeri potencijalno reciklažnog otpada su: kontaminiran metalni otpad, radioaktivni izvori koji mogu dobiti drugu namenu i dalja upotreba uranijuma i plutonijuma iz isluženog nuklearnog goriva.

### Cilj upravljanja radioaktivnim otpadom

Radioaktivni materijali, pa samim tim i radioaktivni otpad, predstavljaju potencijalni rizik za zdravlje ljudi i životnu sredinu ukoliko nisu kontrolisani

---



na odgovarajući način. Za efikasnu kontrolu rizika, pored kontrole procesa upotrebe radioaktivnih materijala, od velikog značaja jeste i kontrola radioaktivnog otpada nastalog tokom ovog procesa. Kontrola radioaktivnog otpada umanjuje rizik po zdravlje ljudi i rizik po životnu srednu. Budući da određeni radioaktivni materijali imaju veoma dug period poluraspada, to je kontrola radioaktivnog otpada neophodna u veoma dugom vremenskom periodu koji se meri vekovima.

Najznačajnija pitanja u problematici upravljanja radioaktivnim otpadom su:

- Oslobađanje od regulatorne kontrole, odnosno ispuštanje životnu sredinu bez posebnih ograničenja;
- Kontrolisano ispuštanje u životnu sredinu ili kontrolisana upotreba recikliranih radioaktivnih materijala;
- Regulisano odlaganje radioaktivnog otpada u namenska odlagališta.

### Minimizacija nastalog radioaktivnog otpada

Minimizacija radioaktivnog otpada predstavlja proces smanjenja količine i aktivnosti radioaktivnog otpada do nivoa koji se razumno mogu postići u svim fazama objekta ili aktivnosti, od planiranja do prestanka rada odnosno dekomisije, i može se ostvariti kroz smanjenje količine radioaktivnog otpada koja se generiše, recikliranjem i ponovnim korišćenjem radioaktivnog materijala i obradom radioaktivnog otpada kojom se smanjuje njegova aktivnost pri čemu se mora u obzir uzeti i sekundarni otpad koji se generiše tokom njegove obrade. Efikasno upravljanje radioaktivnim otpadom podrazumeva minimizaciju količine nastalog radioaktivnog otpada još u samoj fazi generisanja pravilnim planiranjem aktivnosti. Ovo dalje omogućava minimizaciju radijacionog rizika i efikasno korišćenje prostora predviđenog za njegovo skladištenje a potom i odlaganje.

Minimizacija radioaktivnog otpada može se postići na različite načine. Najčešće se primenjuje jedna ili kombinacija dve ili više tehnika, kao što su:

- Čuvanje radioaktivnog materijala koji sadrže kratkoživeće radioizotope do smanjenja aktivnosti ispod nivoa oslobađanja;
  - Revizija radnih procedura u smislu smanjenja nastalog radioaktivnog otpada, uvođenje novih postupaka, tehnologija i procesa koji dovode do smanjenja generisanja radioaktivnog otpada;
-

- Sprečavanje širenja kontaminacije tokom obavljanja bilo koje aktivnosti koliko god je to praktično moguće;
- Planiranje i primena odgovarajućih metoda obrade radioaktivnog otpada.

Minimizaciju radioaktivnog otpada ne treba mešati sa postupkom smanjenja zapremine koji predstavlja jedan od metoda obrade radioaktivnog otpada a o kom će više reči biti u delovima IV i V.

### Osnovni principi upravljanja radioaktivnim otpadom

Primarni cilj upravljanja radioaktivnim otpadom jeste postupanje sa radioaktivnim otpadom na način koji je siguran, odnosno kojim se sprečavaju negativni efekti jonizujućeg zračenja po ljudsko zdravlje i životnu srednu, kako danas tako i ubuduće, bez dodatnog opterećenja budućih generacija.

Radioaktivni otpad je materijal koji sadrži ili je kontaminiran radionuklidima aktivnosti veće od nivoa izuzimanja. Usled prisutva radionuklida, radioaktivni otpad emituje značajnukoličinujonizujućeg zračenja i zato, u opštem slučaju, zahteva imobilizaciju u cilju prevencije širenja radionuklida u životnu sredinu i adekvatnu zaštitu od spoljašnjeg zračenja. Radioaktivni otpad u kojem je sadržaj radionuklida manji od nivoa izuzimanja smatra se neradioaktivnim otpadom.

Radioaktivni otpad utiče na ljude ali i na druge organizme u prirodi. Imajući u vidu da je ljudska vrsta najsenzitivnija na efekte jonizujućeg zračenja, to se smatra da su standardi radijacione sigurnosti prihvatljivi za ljude dovoljno restriktivni i za druge vrste.

Radijacioni rizik koji potiče od radioaktivnog otpada zavisi od koncentracije i prirode radionuklida, uključujući i njihovu radiotoksičnost. Jonizujuće zračenje poreklom iz radionuklida prisutnih u radioaktivnom otpadu utiče na žive organizme a dejstvo zavisi od vrste i energije zračenja, vremena zadržavanja u organizmu i deponovane energije zračenja. Alfa čestice deponuju veliku količinu energije po jedinici pređenog puta i u kontaktu sa živim organizmima mogu izazvati neželjene hemijske reakcije i biološka oštećenja. Alfa zračenje nije značajno u ukupnoj radijacionoj šteti ukoliko nije uneto u organizam putem ingestije ili inhalacije. Beta zračenja deponuje energiju u živim organizmima putem radijacionih ili jonizacionih gubitaka. Iako je manje radiotoksično u odnosu na alfa zračenje, može izazvati značajnu biološku štetu na subćelijskom nivou. Gama zračenje ima najveću

prodornu moć. Interaguje sa materijom na više različitih načina i uglavnom je, ali ne uvek, prateća pojava alfa i beta raspada. Takođe može izazvati biološka oštećenja, iako je manje radiotoksično u odnosu na alfa i beta zračenje.

Upravljanje radioaktivnim otpadom u širem smislu obuhvata niz tehničkih mera i aktivnosti kojima se nastali radioaktivni otpad pretvara u forme pogodne za skaldištenje i odlaganje. Najveće količine radioaktivnog otpada nastaju tokom rada nuklearnih i radijacionih objekata ili u procesu njihove dekomisije. Upravljanje radioaktivnim otpadom odnosi se na različite vremenske okvire i razodblja koja se mere godinama, koliko traje intreval od nastanka do momenta obrade otpada, ili decenijama i vekovima, koliko traje monitoring odlagališta radioaktivnog otpada nakon zatvaranja.

Osnov za upravljanje radioaktivnim otpadom jeste princip jednakosti, imajući u vidu da generacija koja uživa benefit od proizvodnje električne energije i korišćenja radioaktivnih materijala, ima obavezu da snosi odgovornost za odlaganje nastalog radioaktivnog otpada u svojoj životnoj sredini. Vodeći se ovim principom, Međunarodna Agencija za Atomsku Energiju (MAAE) definisala je osnovne principe upravljanja radioaktivnim otpadom, uzimajući uobzir prihvatljiv nivo rizika, potreban nivo zaštite od štetnih dejstava radioaktivnog otpada i njegov uticaj na buduće generacije.

Osnovni principi upravljanja radioaktivnim otpadom prikazani su u Tabeli 1.1.

Svi principi navedeni u Tabeli 1.1. su u osnovi etičke prirode, posebno princip broj 5. Generacija koja raspolaže nuklearnim tehnologijama, koja planira, gradi i koristi nuklearne objekte i koristi radioaktivne materijale ima obavezu i da obezbedi sredstva i uspostavi program za upravljanje radioaktivnim otpadom koji od ovih tehnologija potiče.

Upravljanje radioaktivnim otpadom predstavlja veliki izazov za čovečanstvo. U neposrednoj je vezi sa drugim izazovom – kontrolom brojnosti svetske populacije, imajući u vidu da povećanje broja stanovnika neminovno nameće zahteve u pogledu korišćenja prirodnih resursa. Nuklearna fisija je u proteklih 50 godina obezbedila čovečanstvu zanačajan deo električne energije na način koji je povoljan za životnu sredinu. Međutim, strah od miroljubive primene nuklearne energije postoji i dalje i u velikoj meri je posledica akcidenata iz prošlosti i posledica proba i upotrebe nuklearnog oružja.

---

Tabela 1.1. Osnovni principi upravljanja radioaktivnim otpadom  
Međunarodne agencije za atomsku energiju

I princip	Zaštita zdravlja ljudi	Radioaktivnim otpadom se mora upravljati na način koji obezbeđuje prihvatljiv nivo zaštite zdravlja ljudi
II princip	Zaštita životne sredine	Radioaktivnim otpadom se mora upravljati na način koji obezbeđuje prihvatljiv nivo zaštite životne sredine
III princip	Zaštita izvan nacionalnih granica	Radioaktivnim otpadom se mora upravljati na način koji uzima u obzir potencijalne efekte na ljudsko zdravlje i životnu sredinu izvan nacionalnih granica
IV princip	Zaštita budućih generacija	Radioaktivnim otpadom se mora upravljati na način koji garantuje da procenjeni uticaj na zdravlje budućih generacija nije veći od nivoa koji su danas prihvatljivi
V princip	Opterećenje budućih generacija	Radioaktivnim otpadom se mora upravljati na način koji ne ostavlja nepotrebno opterećenje za buduće generacije
VI princip	Nacionalni regulatorni okvir	Radioaktivnim otpadom se mora upravljati u skladu sa važećim nacionalnim pravnim okvirom, uključujući pravilnu raspodelu odgovornosti i nezavisnu regulatornu kontrolu
VII princip	Kontrola nastanka radioaktivnog otpada	Generisanje radioaktivnog otpada mora biti što je (praktično) moguće manje
VIII princip	Međuzavisnost generisanja i upravljanja RAO	Međuzavisnost svih koraka u generisanju i upravljanju radioaktivnim otpadom mora biti uzeta u obzir na adekvatan način
IX princip	Sigurnost objekata	Sigurnost objekata za upravljanje radioaktivnim otpadom mora biti obezbeđena tokom celokupnog životnog veka objekta

Lokacije na kojima su se odvijale nadzemne i podzemne nuklearne probe, kao i lokacije na kojima je došlo do neželjenog ispuštanja radionuklida u životnu sredinu kao posledica akcidenata na različitim nuklearnim objektima, predstavljaju nasleđe u formi kontaminiranog zemljišta i materijala. Ogromne količine radioaktivnog otpada poreklom iz oružja, upotrebe energetske, istraživačke i reaktora iz nuklearnih podmornica kao i radioaktivni otpad iz primene u medicini, industriji istraživanjima nastali su u trenutku kada nije postojala jasna strategija za njihovo odlaganje. Prve generacije nuklearnih elektrana dostigle su kraj predviđenog radnog veka, i danas se nalaze se u dugotrajnom procesu dekomisije. Nedostatak resursa, političke volje i percepcije značaja ove problematike u trenutku početka rada ovih objekata učinili su da programi za dekomisiju nuklearnih objekata postanu veoma složeni.

U proteklih 20 godina, međutim, došlo je do značajnog pomaka u oblasti upravljanja radioaktivnim otpadom. Nacionalne organizacije pred koje je postavljan jasan cilj rešavanja problema dekomisije, sanacije stanja na lokacijama i upravljanja istorijskim radioaktivnim otpadom, intenzivno učestvuju, nadziru i koordiniraju dekomisije nuklearnih elektrana i drugih kontaminiranih lokacija sa ciljem da se radioaktivni otpad dovede u formu pogodnu za skladištenje u dužem vremenskom periodu, i kasnije za odlaganje u odgovarajućim namenskim odlagalištima. Napredak u oblasti upravljanja radioaktivnim otpadom razlikuje se od države do države, ali u većini situacija sa stanovišta javnog menjnja nije dovoljno brz i efikasan i zahteva ogromna finansijska ulaganja.

---

## II. Poreklo i vrste radioaktivnog otpada

---

Prema definiciji, radioaktivni otpad je svaki materijal koji nije planiran za dalju upotrebu. Prema tome, svaki izvor zračenja i radioaktivni materijal bez obzira na njegovu primenu može jednog dana postati radioaktivni otpad ako pre toga, usled radioaktivnog raspada ne dostigne nivoe za oslobađanje od regulatorne kontrole. Radioaktivni otpad nastaje u nuklearnoj industriji, u procesu proizvodnje električne energije kao i u nizu radijacionih delatnosti kao što su primena izvora zračenja u medicini, industriji, poljoprivredi ili naučno-istraživačkom radu.

Radioaktivni materijali koji se koriste u različitim primenama postaju, nakon nekog vremena, delimično ili potpuno neupotrebljivi za svrhu kojoj su namenjeni, ali često i dalje zadrže značajan deo radioaktivnosti koju su imali za vreme upotrebe (npr. iskorišćeni izvori zračenja ili isluženo nuklearno gorivo), te je definicija radioaktivnog otpada regulatornog karaktera. S druge strane, materijali koji sadrže radionuklide aktivnosti ili koncentracije aktivnosti jednake ili manje od granice oslobađanja se i dalje smatraju radioaktivnim, ali se radiološki rizik u ovom slučaju smatra zanemarljivim. Iako se u većini situacija dalja upotreba radioaktivnog materijala ne može lako identifikovati, postoje situacija kada se radioaktivni materijal može reciklirati i dalje koristiti. Primeri ovakve upotrebe su korišćenje zatvorenih izvora zračenja na način koji se razlikuje od prvobitnog ili dalja upotreba uranijuma i plutonijuma iz iskorišćenog nuklearnog goriva za proizvodnju MOX goriva.

U ovom poglavlju su opisane radijacione i nuklearne aktivnosti tokom kojih nastaje radioaktivni otpad.

Radioaktivni otpad može biti kontrolisan ili nekontrolisan. Ovaj vid podelradioaktivnog otpada prikazan je u Tabeli 2.1. Kontrolisan radioaktivni otpad moženastatiu nuklearnom gorivnom ciklusu, odnosno u procesu proizvodnje električne energije za civilne potrebe ili iz aktivnosti u

---

kojima se koriste različiti radionuklidi, kao što su medicina, industrija, naučno-istraživački rad i svim drugim aktivnostima gde se pod kontrolisanim i nadgledanim uslovima koriste radioaktivni materijali. Nekontrolisan radioaktivni otpad nastaje kao posledica vanrednih događaja, incidenata i akcidenata ili na mestima gde kontrola radioaktivnog otpada nije adekvatna.

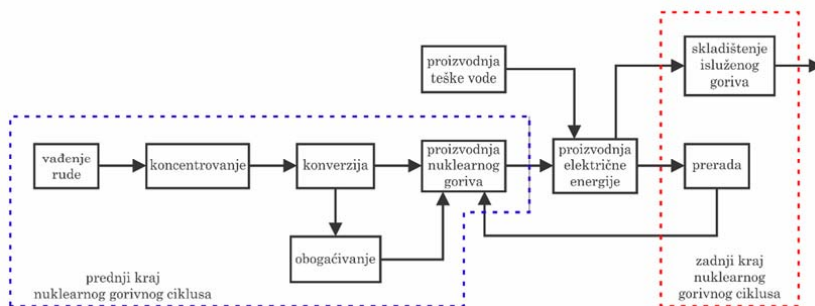
Tabela 2.1. Izvor radioaktivnog otpada

Kontrolisan radioaktivni otpad	Nuklearni gorivni ciklus	Prednji kraj ciklusa	LLW
		Operativna faza	ILW, LLW
		Zadnji kraj ciklusa	HLW, ILW, LLW
Kontrolisan radioaktivni otpad	Aktivnosti izvan ciklusa nuklearnog goriva		Iskorišćeni zatvoreni izvori, ILW, LLW
Nekontrolisan radioaktivni otpad	Akcidenti		HLW, Iskorišćeni zatvoreni izvori, ILW, LLW

Radioaktivni otpad iz nuklearnog gorivnog ciklusa nastaje prilikom iskopavanja rude uranijuma i njene obrade u procesu dobijanja metalnog uranijuma, uranijum oksida ili uranijum heksafluorida, zatim, otpad nastaje u procesu obogaćivanja izotopske smeše uranijuma, sinteze nuklearnog goriva, izgaranja u nuklearnom reaktoru i na kraju, u procesu uklanjanja isluženog nuklearnog goriva iz nuklearnog reaktora, njegovog skladištenja, obrade i odlaganja koje predstavlja kraj nuklearnog gorivnog ciklusa<sup>1</sup>. Shematski prikaz nuklearnog gorivnog ciklusa dat je na Slici 2.1.

<sup>1</sup> Nuklearni gorivni ciklus je skup svih aktivnosti povezanih za primenom nuklearne energije. Aktivnosti koje su deo nuklearnog gorivnog ciklusa su dobijanje sirovine za proizvodnju nuklearnog goriva, proizvodnja nuklearnog goriva, njegovo korišćenje i upravljanje isluženim nuklearnim gorivom, uključujući i skladištenje, obradu i odlaganje radioaktivnog otpada koji nastane u nuklearnom gorivnom ciklusu. Aktivnosti u okviru nuklearnog gorivnog ciklusa su: istraživanja ležišta uranijuma, iskopavanje i prerada rude, konverzija rude, obogaćivanje uranijuma, proizvodnja nuklearnog goriva, izgaranje goriva u nuklearnom reaktoru, skladištenje isluženog nuklearnog goriva u nuklearnoj

Kako bi uranijum bio pripremljen za upotrebu u nuklearnom reaktoru, neophodno je da prođe fazu iskopavanja i mlevenja rude, zatim konverziju, obogaćivanje i proizvodnju nuklearnog goriva, tj. spajanja u gorivne elemente i sklopove. Ove faze predstavljaju „prednji kraj“ nuklearnog gorivnog ciklusa.



Slika 2.1 Shematski prikaz nuklearnog gorivnog ciklusa

Nakon završetka upotrebe nuklearnog goriva u nuklearnom reaktoru, za proizvodnju električne energije, nuklearno gorivo postaje isluženo i kao takvo može se smatrati resursom iz kog se preradom izdvajaju uranijum i plutonijum koji se mogu ponovo koristiti u nuklearnom gorivnom ciklusu ili se može proglasiti radioaktivnim otpadom i sa njime kasnije postupati kao i sa drugim radioaktivnim otpadom. Isluženo nuklearno gorivo može se, po uklanjanju iz reaktora, skladištiti a potom ili prerađivati i ponovno vraćati u nuklearni gorivni ciklus ili odložiti kao radioaktivni otpad. Nacionalne politike i strategije država koje koriste nuklearne elektrane za proizvodnju električne energije definišu na koji način će se postupati sa isluženim nuklearnim gorivom po njegovom uklanjanju iz nuklearnih reaktora. Dok se neke države odlučuju za njegovu preradu, značajna količina isluženog nuklearnog goriva je trenutno uskladištena na lokacijama nuklearnih elektrana u kojima je korištena čekajući puštanje u rad odgovarajućih skladišta ili odlagališta. Zajedno, navedene aktivnosti formiraju „zadnji kraj“ nuklearnog gorivnog ciklusa.

---

elektrani, prerada isluženog goriva i odlaganje radioaktivnog otpada nastalog u okviru nuklearnog gorivnog ciklusa.

---



Tokom eksploatacije, drobljenja i prerade rude uranijuma, kao i tokom obogaćivanja uranijuma nastaje otpad kontaminiran prirodnim radionuklidima, dok u fazi korišćenja nuklearnog goriva nastaje otpad kontaminiran fisionim produktima ili otpad aktiviran nuklearnim reakcijama u nuklearnom reaktoru. Radioaktivni otpad koji nastaje u tzv. „prednjem kraju“ nuklearnog gorivnog ciklusa je uglavnom niske i srednje aktivnosti (LLW) a u manjoj meri i otpad srednje aktivnosti (ILW). Radioaktivni otpad iz procesa korišćenja nuklearnog goriva u nuklearnom reaktoru obuhvata filtre, jonoizmenjivačke smole, suve ostatke koji ostaju nakon isparenja tečne faze, aktivirani i kontaminirani grafit i druge slične materijale. Radioaktivni otpad koji nastaje tokom rada nuklearne elektrane spada u veoma nisko (VLLW), nisko (LLW), srednje (ILW) i visoko (HLW) aktivni radioaktivni otpad. Na kraju nuklearnog gorivnog ciklusa, po uklanjanju isluženog nuklearnog goriva iz nuklearnog reaktora, nastaje srednje ili visoko aktivni radioaktivni otpad kao i značajne količine isluženog nuklearnog goriva. Posebno značajne količine visoko aktivnog otpada nastaju tokom prerade i obrade isluženog nuklearnog goriva.

U ranim danima razvoja i korišćenja nuklearne energije, problematici radioaktivnog otpada nije posvećena dovoljna pažnja. Posledica ove činjenice jesu značajne količine istorijskog radioaktivnog otpada koji često nije adekvatno karakterisan i čuvan u adekvatnim uslovima. Ovakav otpad sadrži spektar različitih materijala, od kontaminiranog papira, drveta i delova opreme, do gorivnih elemenata, često već zahvaćenih korozijom. Različite vrste radioaktivnog otpada često nisu razdvojene, a veoma je česta i pojava veoma kontaminiranih taloga i muljeva na dnu bazena za skladištenje isluženog nuklearnog goriva ili tečnog radioaktivnog otpada.

Kontrolisani radioaktivni otpad koji ne pripada ciklusu nuklearnog goriva potiče iz aktivnosti u kojima se koriste različiti radionuklidi, kao što su medicina, industrija inaučno-istraživački rad. Ovde posebno treba napomenuti i zatvorene izvore jonizujućeg zračenja koji se koriste ili su se koristili u ovim aktivnostima a sa kojima se ukoliko se proglašavaju za radioaktivni otpad, takođe mora postupati na odgovarajući način. Karakteristike radioaktivnog otpada koji nastaje u ovim aktivnostima razlikuju se od jedne do druge aktivnosti i on obično spada u veoma nisko (VLLW), nisko (LLW) i u ređim slučajevima srednje aktivni radioaktivni otpad (ILW).

---



Slika 2.2. Lokacija Hanford gdje je smešten radioaktivni otpad poreklom iz vojnog nuklearnog programa Sjedinjenih Američkih Država

Kao što je rečeno, nekontrolisani radioaktivni otpad nastaje i kao posledica vanrednih događaja, incidenata i akcidenata ili na mestima gde kontola radioaktivnog otpada nije adekvatna. Primer takve lokacije je Hanford, jedna od nekoliko lokacija na kojima je smešten radioaktivni otpad poreklom iz vojnog nuklearnog programa Sjedinjenih Američkih Država dat in a Slici 2.2. Neadekvatno karakterisan, radioaktivni otpad različitog tipa smešten je u masivnim kontejnerima sa jednostrukim zidom koji su vremenom postali propusniji za radioaktivne materije. Slični problemi postoje i u Velikoj

---

Britaniji na lokaciji Sellafield gde je radioaktivni otpad u otvorenim sudovima izložen atmosferskim padavinama. Nekontrolisan radioaktivni otpad postoji i kao posledica akcidenata u Černobilju u Ukrajini i u Fukušimi u Japanu. Cena dekontaminacije i remedijacije ovakvih lokacija je veoma velika, međutim iskustva stečena na ovim lokacijama dovela su do razvoja programa za zabrinjavanje radioaktivnog otpada razvijenog za potrebe nuklearne industrije tako da je upravljanje nekontrolisanim otpadom danas postalo daleko efikasnije nego što je to bilo u prošlosti.

### Radioaktivni otpad iz procesa eksploatacije uranijumske rude

Iskopavanje rude uranijuma i njena prerada u cilju ekstrakcije metala sastavni su deo procesa proizvodnje nuklearnog goriva. Ruda uranijuma obično sarži uranijum u obliku uranijum oksida, u udelu koji se kreće od 0,1 do 0,3 %.

### Radioaktivni otpad nastao tokom rada i dekomisije nuklearnih elektrana

Radioaktivni otpad koji nastaje tokom rada nuklearnih elektrana potiče iz procesa tretmana vode iz reaktorskog suda, bazena za čuvanje iskorišćenog nuklearnog goriva i dekontaminacije. Standardne opcije za obradu tečnog otpada jesu uparavanje, jonska izmena, filtracija i centrifugiranje. U ovakvim procesima nastaje sekundarni radioaktivni otpad u obliku taloga, mulja, filtra i organskih jonoizmenjivačkih smola, isl. Radioaktivni otpad iz redovnog održavanja nuklearnih reaktora je uglavnom u čvrstom agregatnom stanju i obuhvata isluženu, oštećenu i kontaminiranu opremu koja ne može biti reparirana ili reciklirana, kontaminiranu odeću i zaštitna sredstva korišćena tokom aktivnosti na održavanju opreme. Otpad iz operacija održavanja dalje obuhvata demontirane delove jezgra reaktora uključujući i kontrolne šipke. Tečni tehnološki radioaktivni otpad obuhvata lubrikante, ulja i organske rastvarače korišćene za dekontaminaciju. Dominantni kontaminanti otpada iz operativne faze nuklearnih reaktora su kratkoživeći radionuklidi kao što su  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , dok dugoživeći radionuklidi mogu biti prisutni u otpadu koji potiče iz jezgra reaktora.

Obogaćeni  $\text{UF}_6$  se u procesu proizvodnje nuklearnog goriva konvertuje u uranijum dioksid  $\text{UO}_2$  i komprimuje u keramičke tablete. Ove tablete se potom slažu u tanke metalne šipke, obično načinjene od cirkonijuma ili nerđajućeg čelika, kako bi se formirale gorivne šipke. Gorivne šipke su zatim

---

raspoređene u klastre, kako bi formirali gorivni elementi, koji su spremni za postavljanje u jezgro reaktora. Reaktor, koji ima snagu od oko 1000 MW na godišnjem nivou tipično iskoristi oko 25-30 t svežeg goriva. Na kraju radnog veka gorivnih elemenata, oni bivaju uklonjeni iz reaktora i smatraju se isluženim nuklearnim gorivom (SNF). Isluženo nuklearno gorivo sadrži oko 95%  $^{238}\text{U}$ , oko 3% fisioh produkata i transuranskih izotopa, oko 1% Pu i 1%  $^{235}\text{U}$ . U otvorenom ciklusu nuklearnog goriva, isluženo nuklearno gorivo se smatra otpadom koji se dalje može obrađivati za potrebe skladištenja i odlaganja dok se u zatvorenom gorivnom ciklusu ono tretira kao resurs i preraduje sa ciljem izvlačenja uranijuma i plutonijuma. Tablete  $\text{UO}_2$  na kraju svog radnog veka zadržavaju radionuklide i neisparljive fisione produkte u obliku polikristalnih mikrostrukture. Metalni omotač gorivnih elemenata obezbeđuje dodatnu zaštitu za ove tablete.

### Prerada isluženog nuklearnog goriva

Isluženo nuklearno gorivo tipično sadrži oko 94-95% prvobitne količine uranijuma, od čega samo nekoliko procenata  $^{235}\text{U}$  i oko 1% Pu nastalog tokom izgaranja goriva u nuklearnom reaktoru preradom može da se izdvoji i vrati u nuklearni gorivni ciklus. Prerada (reprocessing) obuhvata skup aktivnosti tokom kojih se uranijum i plutonijum izdvajaju iz isluženog nuklearnog goriva. Dobijen uranijum se može ponovo konvertovati u uranijum heksafluorid i obogatiti. Plutonijum se može mešati sa obogaćenim uranijumom u cilju dobijanja MOX goriva (MOX – Mixed OXide). Preostalih 3% isluženog goriva predstavlja otpad koji može da se skladišti u tečnom stanju i kasnije solidifikuje za potrebe daljeg skladištenja i odlaganja.

Prerada isluženog nuklearnog goriva podrazumeva uklanjanje metalnih omotača, rastvaranje ostatka u azotnoj kiselini i hemijsku ekstrakciju uranijuma i plutonijuma. Ostatak rastvora predstavlja visokoaktivni radioaktivni otpad a u sebi sarži rastvorene fisione proizvode i nečistoće poreklom iz metalnog omotača (Zr, Mo, Nb, Mg), transuranske elemente (Np, Am, Cm) nastale u procesima neutronske aktivacije i tragove neizdvojenog plutonijuma. Visokoaktivni radioaktivni otpad sadrži i hemikalije korišćene tokom prerade, kao što je kerozin, tributil-fosfat i druge organske materije. Zapremina ovakvog otpada se obično koncentriše u procesu isparavanja a ostatak se čuva u rastvoru azotne kiseline u kontejnerima od nerđajućeg čelika.

Otpad iz nuklearne dekomisije nastaje u završnoj fazi nuklearnog gorivnog ciklusa. Određeni delovi nuklearnog reaktora postaju radioaktivni tokom rada reaktora usled neutronske aktivacije. Od posebnog značaja u pogledu neutronske aktivacije jesu delovi koji sadrže Co, Nb, Ni i Mo. U fazi dekomisije nastaju velike zapremine radioaktivnog otpada različitih klasa. Zapremina otpada koja nastaje u dekomisiji jednog energetskog reaktora kreće se od 10000 t do 15000 t. Samo jedna desetina ove zapremine odnosi se na otpad srednje i visoke aktivnosti, dok je ostatak radioaktivni otpad niske aktivnosti.

### Rad i dekomisija istraživačkih nuklearnih reaktora

U cilju podrške programima nuklearnih istraživanja, u svetu postoji veliki broj istraživačkih nuklearnih reaktora. Ovakva postrojenja predstavljaju bazu za obuku i istraživanja u oblasti nuklearne energetike. Pored toga, neutroni iz istraživačkih reaktora koriste se za ispitivanje i analizu materijala, proizvodnju radioizotopa i različite akademske programe. Mnogi od ovih reaktora koriste visoko obogaćen uranijum (HEU) koji zbog potencijalne primene u proizvodnji nuklearnog oružja predstavlja pretnju u smislu nuklearne bezbednosti i terorizma. Neki od istraživačkih nuklearnih reaktora više nisu funkcionalni ali njihova dekomisija nije sprovedena, odnosno njihovo nuklearno gorivo i dalje se nalazina lokaciji reaktora. Zahvaljujući programu za smanjenje primene visoko obogaćenog uranijuma u civilnim postrojenjima, deo ovih reaktora konvertovan je iz reaktora koji koriste gorivo koje sadrži visoko obogaćen uranijumu reaktore koji rade sa gorivom napravljenim na bazi nisko obogaćenog uranijuma (LEU).

Iako se ne koriste za proizvodnju električne energije već u istraživačke, naučne i obrazovne svrhe kao i za proizvodnju radioizotopa, istraživački nuklearni reaktori predstavljaju značajan izvor radioaktivnog otpada. U otpad koji nastaje tokom rada i dekomisije istraživačkog nuklearnog reaktora spadaju kontaminirani predmeti i oprema, aktivirane komponente, otpad koji nastane prilikom dekontaminacije, jonoizmenjivačke smole, isluženo nuklearno gorivo, radioaktivni otpad nastao u proizvodnji radioizotopa, kao i radioaktivni otpad nastao tokom naučno-istraživačkih aktivnosti kao što su aktivirani uzorci i nosači uzoraka. Dekomisija istraživačkih nuklearnih reaktora takođe predstavlja značajan izvor radioaktivnog otpada. Radioaktivni otpad koji nastaje tokom rada i dekomisije istraživačkog nuklearnog reaktora spada u veoma nisko (VLLW), nisko (LLW), srednje

---

(ILW) i visoko (HLW) aktivni radioaktivni otpad. Količine radioaktivnog otpada razlikuju se zavisno od tipa istaživačkog reaktora, perioda korišćenja i aktivnosti koje su se na njemu obavljale.

### Primena izvora zračenja u medicini i industriji

Primena radionuklida u lečenju bolesti starija je od jednog veka, zahvaljujući zapažanju P. Kirija (P. Curie) da radijumski izvor u direktnom kontaktu sa kožom izaziva opekotine. Već 1915. godine zabeležena je primena zatvorenih izvora  $^{226}\text{Ra}$  u radioterapiji ali je ova disciplina doživela pravu ekspanziju pedesetih godina dvadesetog veka kada je usvojena daljinska manipulacija izvorima zračenja i kad su postali dostupni i reaktorski radionuklidi, pre svih  $^{60}\text{Co}$ . Imidžing radioizotopima je predmet dijagnostičke nuklearne medicine. Slike nastaju emisijom zračenja iz radiofarmacetuka vezanog za anatomske regije od interesa reflektujući prostornu i vremensku raspodelu radionuklida, i to emisijom fotona u tehnici koja se naziva SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) ili anihilacionih fotona iz elektrton-pozitron anihilacije u tehnici koja se naziva PET (Positron Emission Tomography).

Nuklearne dijagnostičke imidžing metode pružaju dragocenu informaciju o fiziološkim i biohemijskim procesima i komplementarne su drugim imidžing metodama kao što su konvencionalna radiologija, magnetna rezonantna tomografija (MRI) i ultrazvuk. Jedna od najrasprostranjenijih medicinskih primena nuklearnih metoda u medicini u osnovi ima primenu gama kamera ( $\text{NaJ}$  scintilator) kojima se detektuje zračenje koje emituje radiofarmaceutik selektivno vezan za region od interesa.

U nuklearnoj medicini po svojoj masovnosti dominira radionuklid  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , ali se pored ovog najznačajnijeg dijagnostičkog radionuklida, u dijagnostici i terapiji koriste i drugi radionuklidi navedeni u Tabeli 2.2 i Tabeli 2.3. Radionuklidi koji se koriste u medicini su obično proizvedeni u akceleratorima ili istraživačkim nuklearnim reaktorima. Radioizotopi sa deficitom neutrona ( $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ) proizvode se u proton-akceleratorima (medicinski ciklotroni) dok se oni sa viškom neutrona (deficitom protona) proizvode u istraživačkim nuklearnim reaktorima.

Tabela 2.2. Najznačajniji radioizotopi u dijagnostičkoj nuklearnoj medicini

Organ	Radionuklid
Pluća	$^{81m}\text{Kr}$ , $^{99m}\text{Tc}$ , $^{133}\text{Xe}$
Kosti	$^{99m}\text{Tc}$
Štitasta žlezda	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{123}\text{I}$ , $^{131}\text{I}$
Bubrezi	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{131}\text{I}$
Mozak	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{123}\text{I}$ , $^{133}\text{Xe}$
Jetra, pankreas	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{111}\text{In}$
Abdomen	$^{67}\text{Ga}$ , $^{99m}\text{Tc}$
Krvotok	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{111}\text{In}$
Srce	$^{82}\text{Rb}$ , $^{99m}\text{Tc}$ , $^{201}\text{Tl}$

Najznačajnija primena radionuklida u radioterapiji odnosi se na korišćenje zatvorenih izvora zračenja za terapiju eksternim snopovima, korišćenje implanta za terapiju prostate, u intravaskularnoj brahiterapiji ili primenu radiofarmaceutika u terapijske svrhe. Pored navedenih metoda, u bliskoj budućnosti očekuje se veoma brz razvoj i primena niza novih i efikasnih tehnika, kao što je radioimunoterapija i terapija jonskim snopovima.

Tabela 2.3. Radioizotopi u radioterapiji i njihova osnovna svojstva

Radionuklid	Čestica	Period poluraspada	Maksimalna energija (MeV)	Maksimalni domet u tkivu
$^{90}\text{Y}$	$\beta$	2.7 dana	2.28	12 mm
$^{131}\text{I}$	$\beta$	8.0 dana	0.61	2.4 mm
$^{177}\text{Lu}$	$\beta$	6.7 dana	0.50	1.8 mm
$^{188}\text{Re}$	$\beta$	17 h	2.1	11 mm
$^{186}\text{Re}$	$\beta$	3.8 dana	1.1	5.0 mm
$^{153}\text{Sm}$	$\beta$	2.0 dana	0.81	3.0 mm
$^{212}\text{Bi}$	$\alpha$	1.0 h	8.8	87 $\mu\text{m}$
$^{211}\text{At}$	$\alpha$	7.2 h	6.8	65 $\mu\text{m}$

U radioterapiji eksternim snopovima, kada doza jonizujućih zračenja potiče iz izvora izvan organizma, koriste se fotoni ili elektroni energija od nekoliko MeV, koja je dovoljna za prodor zračenja do lokacije tumora u organizmu. Izvori zračenja u radioterapiji su ili zasnovani na radionuklidima, pre svih na  $^{60}\text{Co}$  ili na linearnim akceleratorima. U novije vreme se koriste i uređaji koji sadrže velik broj izvora  $^{60}\text{Co}$ , poznati pod nazivom "Gama nož" (Gamma Knife) a koji omogućava veoma sofisticiranu i visoko lokalizovanu terapiju tumora mozga.

Stotine hiljada pacijenata je svake godine podvrgnuto brahiterpijskom tretmanu (na grčkom jeziku brachys ima značenje blizak). U ovoj tehnici, zatvoreni izvor zračenja se uvodi u telesne šupljine ili tkivo i zahvaljujući blizini tumoru, obezbeđuje potrebnu dozu za tumor i minimalnu dozu za okolno zdravo tkivo. Pomoću brahiterpijskih implanta, moguće je ostvariti uspešan tretman pomoću fotona veoma niskih energija (20 keV,  $^{103}\text{Pd}$ ). U uobičajene brahiterpijske izvore ubrajaju se gama emitujućim radionuklidima ( $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{103}\text{Pd}$ ) čije zračenje ima domet u tkivu reda veličine cm. Kraći dometi, reda veličine mm, postižu se primenom beta emitujućih radionuklida kao što su  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{188}\text{Re}$  i  $^{32}\text{P}$ .

Kao što je prikazano u Tabeli 2.3 radionuklidi koji se koriste u nuklearnoj medicini uglavnom pripadaju grupi kratkoživećih, pa se radioaktivni otpad nastao iz ovakve radijacione delatnosti čuva u privremenim spremištima do raspada ispod nivoa oslobađanja. Neki radionuklidi kao  $^{14}\text{C}$ ,  $^{57}\text{Co}$  ili  $^3\text{H}$  imaju i duži period poluraspada. Radioaktivni otpad iz radioterapijskih primena je najčešće u obliku iskorišćenih zatvorenih izvora koji obično sadrže značajne količine radionuklida.

Primena izvora zračenja je od neprocenjivog značaja u industriji, pre svega u oblasti kontrole industrijskih procesa kao i u radioaktivnim merilima, za merenja nivoa, debljine i gustine različitih proizvoda. Izvori zračenja se koriste i za detekciju defekata u materijalima, za detekciju prisustva korozije, kao i za kontrolu ispravnosti varova na zavarenim spojevima. Radiografije slične industrijskim su danas od neprocenjivog značaja i u oblasti bezbednosti i prevencije nelegalnog prometa roba. Industrijska primena izvora zračenja bazira se na primeni različitih izotopa među kojima su i  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{60}\text{Co}$  i  $^{137}\text{Cs}$ .

Pored primene u medicini i industriji, radioizotopi se često koriste i u naučno-istraživačkom radu, za monitoring različitih metaboličkih procesa u živim organizmima i praćenje transportnih procesa u atmosferi. U toksikološkim



istraživanjima, za praćenje kretanja različitih hemijskih procesa najčešće se koriste  $^{14}\text{C}$  i  $^3\text{H}$ , imajući u vidu da mogu biti inkorporirani u različite hemijske komplekse u žvim organizmima. Za obeležavanje proteina senajčešće koristi  $^{125}\text{I}$ . U istraživačkim centrima najčešće nastaje kartkoživeći radioaktivni otpad, iako mogu biti zastupljeni i neki dugoživeći radionuklidi kao  $^{14}\text{C}$  i fisioni produkti.

Prema gore navedenom, radioaktivni otpad iz medicinske i industrijske primene obuhvata širok spektar tipova i zapremina a razlikuje se pogledu svojih radioloških, hemijskih i radiohemijskih osobina. U Tabeli 2.4 su prikazani neki od tipova radioaktivnog otpada koji nastaje prilikom primene izvora zračenja van nuklearnog gorivnog ciklusa.

Tabela 2.4. Vrste radioaktivnog otpada iz primene izvora zračenja van nuklearnog gorivnog ciklusa

<b>Čvrst otpad</b>	Metalni otpad, sorbenti, građevinski materijal, staklo, filtri, plastika, papir, brisevi, zaštitna sredstva
<b>Tečni otpad</b>	Efluenti iz laboratorija, vrućih čelija, otpad iz dekontaminacije
<b>Organske tečnosti</b>	Maziva, scintilacione tečnosti, kerozin.
<b>HLW</b>	Zatvoreni radioaktivni izvori, radijumske igle, materijali ozračeni u reaktoru

### Proizvodnja i probe nuklearnog oružja

Radioaktivni otpad poreklom iz vojne primene nuklearnih materijala je po pravilu jednostavnije strukture i sastava u odnosu na otpad iz komercijalnih nuklearnih programa. Ovaj otpad ne sadrži značajne količine fisionih produkata. Tipičan sastav radioaktivnog otpada iz komercijalnih i vojnih programa dat je u Tabeli 2.5.

Tokom atmosferskih nuklearnih proba koje su od 1945. pa do 1963. godine izvedene na različitim lokacijama u svetu, u Kazahstanu, Rusiji, Kini, Australiji, Pacifičkim ostvima, Indiji, Pakistanu i Koreji, kao i tokom kasnije sprovedenih podzemnih i podvodnih nuklearnih proba, generisana je velika

količina radioaktivnih materija uključujući tricijum, fisione produkte, aktinide i proizvode neutronske aktivacije. Kontaminacija lokacije na kojoj se eksplozija dogodila i kontaminacija okolnog zemljišta je na određenim mestima proširena u zavisnosti od hidroloških i hidrogeoloških svojstava terena.

Tabela 2.5. Sastav radioaktivnog otpada iz vojnih i komercijalnih nuklearnih programa (maseni udeo)

Komponenta	Komercijalni nuklearni programi (%)	Vojni nuklearni programi (%)
Na <sub>2</sub> O	0-39	0-16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-38	24-35
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-2	0-1
NiO	0-4	0-3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-83	5-9
MgO	0-36	0-1
MnO <sub>3</sub>	0-35	0-1
ZrO <sub>2</sub>	0-38	0-13
SO <sub>4</sub>	0-6	0-1
NO <sub>3</sub>	5-25	0
Fisioni produkti u obliku oksida	3-90	2-10
Aktinidi u obliku oksida	<1	2-23
Ostalo	-	17-27

### Nuklearni i radiološki akcidenti

Radioaktivna kontaminacija i radioaktivni otpad mogu biti posledica akcidenta na različitim radijacionim i nuklearnim objektima ili tokom korišćenja izvora zračenja. Sastav i količina nastalog radioaktivnog otpada zavisi od vrste, obima i ozbiljnosti nastalog akcidenta.

Međunarodna skala nuklearnih i radioloških događaja (INES) razvijena je za potrebe klasifikacije, komunikacije i razmene informacija o vanrednim događajima. INES se odnosi na događaje koji mogu nastati tokom transporta, skladištenja i upotrebe radioaktivnih materijala. Događaji su klasifikovani u sedam nivoa: nivoi 1-3 se odnose na incidente a nivoi 4-7 na akcidente. Ozbiljnost akcidenata definiše se na osnovu obima i stepena posledica na zdravlje ljudi i životnu sredinu. Izgled INES skale prikazan je na Slici 2.3.



Slika 2.3. Međunarodna skala nuklearnih i radioloških događaja (INES)

Prema podacima MAAE, sedmi nivo akcidenta, kojim je okarakterisan događaj u Černobilju, SSSR, podrazumeva značajno oslobađanje radionuklida u atmosferu uz rasprostranjen uticaj po zdravlje ljudi i okolinu. Kao događaj nivoa 7 klasifikovan je i akcident na nuklearnoj elektrani Fukušima, Japan. Topljenje reaktorskog jezgra na nuklearnoj elektrani Ostrvo Tri Milje (Three Mile Island) u SAD 1979. godine klasifikovano je kao akcident nivoa 5.

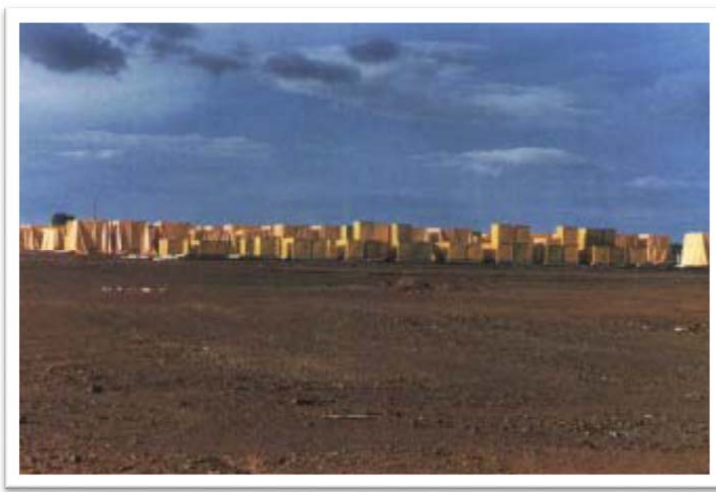
U Tabeli 2.6. su prikazani najznačajniji akcidenti sa radioaktivnim i nuklearnim materijalima.

Tabela 2.6. Najznačajniji akcidenti sa radioaktivnim i nuklearnim materijalima

Godina	Lokacija	Izvor	Procenjena doza	Prekomerno izlaganje/smrtni ishodi
1945/46	Los Alamos, USA	kritičnost	≤ 13 Gy	10/2
1961	SSSR	Nuklearna podmornica	1-50 Gy	≥30/8
1961	Ajdaho, SAD	Reaktor	≤ 3,5 Gy	7/3
1962	Meksiko siti, Meksiko	Zatvoren izvor, <sup>60</sup> Co	9,9-52 Gy	5/4
1963	Kina	Zatvoren izvor, <sup>60</sup> Co	0,2-80 Gy	6/2
1964	Nemačka	<sup>3</sup> H	10 Gy	4/1
1964	Rod ajland, SAD	Kritičnost	0,3 -46 Gy	4/1
1984	Maroko	SRS, <sup>192</sup> Ir	-	11/8
1986	Černobilj, SSSR	Nuklearna elektrana	1-16 Gy	134/31
1987	Gojana, Brazil	Zatvoren izvor, <sup>137</sup> Cs	≤ 7 Gy	50/4
1992	Kina	Zatvoren izvor, <sup>60</sup> Co	0,25 – 10 Gy	8/3
1996	Kosta Rika	Zatvoren izvor, <sup>60</sup> Co	-	115/13
2011	Fukušima, Japan	Nuklearna elektrana	0,25 Sv	6/0

Među značajnim akcidentima navedenim u Tabeli 2.6, posebno se ističe broj onih sa iskorišćenim radioaktivnim izvorima. Ovi akcidenti se inače ubrajaju u najfrekventnije neželjene događaje. Do sada je evidentirano nekoliko hiljada događaja u kojima su radioaktivni izvori pronađeni u metalnom otpadu, dok je u više od 60 slučajeva zabeleženo topljenje zatvorenih

radioaktivnih izvora u železarama širom sveta. Najznačajniji u nizu ovakvih događaja vezuje se za Brazilski grad Goiana, gde je radioterapijski izvor sa radioaktivnim izotopom  $^{137}\text{Cs}$  ostavljen bez nadzora u napuštenoj bolnici, odnosno nije zbrinut u skladu sa principima upravljanja radioaktivnim otpadom. Krađa glave radioterapijskog uređaja i nestručna demontaža imali su za posledicu oštećenje kapsule radioaktivnog izvora i veoma značajnu kontaminaciju ljudi i životne sredine. Iz akcidenta su proistekla 4 smrtna ishoda, dok je radiološkom monitoringu bilo podvrgnuto 112000 ljudi, od kojih je kod preko 300 utvrđena kontaminacija. Sanacija je trajala 6 meseci i generisano je oko 5000 m<sup>3</sup> radioaktivnog otpada različitih klasa.



Slika 2.4. Radioaktivni otpad u kontejnerima, nastao prilikom sanacije posledica akcidenta u Goiani (THE RADIOLOGICAL ACCIDENT IN GOIANA

IAEA, VIENNA, 1988, [http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub815\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub815_web.pdf))

Radioaktivni otpad nastao tokom sanacije stanja akcidenta u Goiani je klasifikovan na osnovu fizičkog oblika, zapaljivosti, stišljivosti i jačine doze koje potiče od eksternog izlaganja. Čvrst radioaktivni otpad je dodatno klasifikovan kao:

- Neradioaktivni, ukoliko je koncentracija aktivnosti manja od 74 kBq/kg;

- Radioaktivni otpad niske aktivnosti, ukoliko je jačina doze manja od 2 mSv/h;
- Radioaktivni otpad srednje aktivnosti, ukoliko je jačina doze veća od 2 mSv/h and manja do 20 mSv/h.



Slika 2.5 Skladište radioaktivnog otpada, Fukušima, Japan,

<http://mainichi.jp/english/articles/20151210/p2a/00m/0na/020000c>

Isti sistem klasifikacije je primenjen i na prethodno solidifikovan tečni radioaktivni otpad. Radioaktivni otpad niske aktivnosti smešten je u metalnu burad i metalne kutije zapremine od 40 l, 100 l i 200 l, prethodno zaštićene od korozije u koje je dodat cement zbog apsorpcije vode. Sva burad zapremine 40 l i 100 l kasnije je smeštena u burad zapremine 200 l. Radioaktivni otpad niske aktivnosti velike zapremine smešten je u transportne kontejnere i privremeno uskladišten dok se ne donese odluka o njegovoj reciklaži. Radioaktivni otpad srednje aktivnosti smešten je u metalnu burad zapremine 200 l, dodatno ojačanu slojem betona.

Za potrebe privremenog čuvanja nastalog radioaktivnog otpada, dizajnirano je privremeno skladište kapacitete a 4000-5000 m<sup>3</sup>. Odabran je koncept otvorene platforme na kojoj su distribuirana metalna burad i metalne kutije. Burad i kutije su dekontaminirane i pokrivene plastičnom folijom. Obezbeđen je radiološki monitoring u uzorcima padavina, vegetacije, zemljišta, nadzemnih voda. Slika 2.4. prikazuje radioaktivni otpad u kontejnerima, nastao prilikom sanacije posledica akcidenta u Goiiani, dok je na Slici 2.5. prikazan radioaktivni otpad nastao u Fukušimi.

### III. Klasifikacija radioaktivnog otpada

---

Prikladan sistem klasifikacije radioaktivnog otpada omogućava jednostavnije upravljanje i donošenje odluka u smislu opcija za njegovo odlaganje. Klasifikacija može biti zasnovana na radiološkim, fizičkim, hemijskim ili biološkim osobinama odnosno na osnovu kriterijuma kao što su agregatno stanje (čvrst, tečni i gasovit radioaktivni otpad), period poluraspada ili koncentracija aktivnosti radionuklida prisutnih u radioaktivnom otpadu. Složenije sheme klasifikacije baziraju se na koncentraciji aktivnosti i periodu poluraspada zastupljenih radionuklida.

Ovakve klasifikacije radioaktivnog otpada od izuzetno velikog su značaja u upravljanju radioaktivnim otpadom gde se on može klasifikovati i time razdvojiti u više tokova sa kojima se postupa na različit način. Tako se veoma kratkoživeći otpad može odvojiti od drugog radioaktivnog otpada i privremeno čuvati dok se dostignu nivoi za njegovo oslobađanje u životnu sredinu. Sa druge strane dugoživeći radioaktivni otpad se mora dodatno obraditi što podrazumeva i njegovo kondicioniranje kako bi se mogao sigurno skladištiti i odlagati na dug period.

Klasifikacija radioaktivnog otpada u različite klase praktične je prirode i zavisi od potreba u procesu upravljanja radioaktivnim otpadom. Sistemi klasifikacije radioaktivnog otpada, iako većinom zasnovani na preporukama Međunarodne agencije za atomsku energiju, razlikuju se od države do države i većinom su prilagođeni uslovima koji u državi postoje. Različiti parametri mogu biti razmotreni u procesu klasifikacije, a neki od njih prikazani su u Tabeli 3.1.

---

Tabela 3.1. Značajne osobine radioaktivnog otpada

Osobina	Parametar
<b>Poreklo</b>	Izvor Genrator
<b>Radiološke osobine</b>	Kritičnost, Period poluraspada, Generisanje topolote, Intenzitet emitovanog zračenja, Aktivnost i koncentracija aktivnosti radionuklida, Površinska kontaminacija, Dozimetrijske osobine relevantnih radionuklida.
<b>Fizičke osobine</b>	Agregatno stanje (čvrsto, tečno, gasovito), Zapremina, Masa, Stišljivost, Rastvorljivost, Isparljivost.
<b>Hemijske osobine</b>	Potencijalni hemijski rizik, Korozivnost, Reaktivnost, Zapaljivost, Generisanje gasa, Sorpција radionuklida.
<b>Biološke osobine</b>	Potencijalni biološki rizik, Brzina razgradnje, Produkti razgradnje.

### Podela radioaktivnog otpada na osnovu radioloških osobina

Radioaktivni otpad se na osnovu radioloških osobina može deliti prema sposobnosti da proizvede kritičnost, periodu poluraspada, sposobnosti da proizvede topolotu, ukupnoj i specifičnoj aktivnosti radionuklida, površinskoj kontaminaciji kao i dozimetrijskim osobinama relevantnih radionuklida.

Vreme poluraspada radionuklida sadržanih u radioaktivnom otpadu može biti u rasponu od veoma kratkog (reda nekoliko sekundi) do veoma dugog (reda miliona godina). U smislu sigurnog upravljanja radioaktivnim otpadom, radionuklidi su podeljeni na kratkoživeće i dugoživeće, pri čemu se dugoživećim smatraju radioizotopi sa periodom poluraspada dužim od 30 godina, dok se oni sa periodom poluraspada kraćim od 30 godina smatraju



kratkoživećim. Klasifikacija radioaktivnog otpada prema vremenu poluraspada može se pokazati veoma korisnom jer se radiološke opasnosti povezane sa kratkoživećim radionuklidima značajno smanjuju već posle nekoliko stotina godina. Period od nekoliko stotina godina može se smatrati periodom u kom će i dalje postojati svest o postojanju plitko ukopanog odlagališta i u kom će institucionalna kontrola odlagališta i dalje postojati.

Sadržaj radionuklida je generički pojam koji se odnosi na specifičnu aktivnost i ukupnu aktivnost radionuklida zastupljenih u radioaktivnom otpadu i uzima u obzir heterogenu prirodu radioaktivnog otpada. Aktivnost i specifična aktivnost radionuklida može biti u opsegu od zanemarljive do veoma velike i posmatra se u odnosu na definisanje nivoa izuzimanja (*exemption levels*). Značajniji sadržaj radionuklida u odnosu na nivo izuzimanja nameće strože zahteve u pogledu zbrinjavanja radioaktivnog otpada i njegove izolacije u odnosu na životnu sredinu.

Sa radioaktivnim otpadom koji ima sposobnost da dovede do kritičnosti mora se tokom svih faza upravljanja postupati tako da se ni u kom slučaju, čak ni prilikom odstupanja od normalnog pogona objekta u kom se on obrađuje, skladišti ili odlaze, ne dogodi da se na istom mestu nađe količina ovakvog materijala dovoljna da dovede do kritičnosti.

Otpad koji ima sposobnost da generiše toplotu mora se smeštati u odgovarajuće kontejnere napravljene tako da svojom konstrukcijom odvede toplotu ili se, ukoliko to njegova fizička i hemijska svojstva dozvoljavaju, smestiti u odgovarajuće bazene gde se toplota odvodi vodom.

Ograničenja, vezana za aktivnost (ukupna aktivnost, specifična aktivnost ili koncentracija aktivnosti) otpada koji se može odložiti u datom odlagalištu zavise od radioloških, hemijskih, fizičkih i bioloških osobina radioaktivnog otpada kao i od radionuklida koji su u njemu sadržani. O odlaganju radioaktivnog otpada biće više reči u poglavlju IX .

### Podela radioaktivnog otpada na osnovu fizičkih osobina

Radioaktivni otpad se na osnovu fizičkih osobina može deliti prema agregatnom stanju, zapremini, masi, stišljivosti, zapaljivosti, rastvorljivosti i isparljivosti. Radioaktivni otpad se prema agregatnom stanju deli na čvrsti, tečni i gasoviti radioaktivni otpad. Podela radioaktivnog otpada prema fizičkim osobinama od najvećeg je značaja prilikom određivanja mogućnosti za njegovu obradu. Ovde su od posebnog značaja stišljivost, zapaljivost i

---

isparljivost radioaktivnog otpada jer omogućavaju primenu tehnika obrade koje vode najefikasnijem smanjenju njegove zapremine.

Tečni radioaktivni otpad

Tečnosti u kojima postoji visoka koncentracija radioaktivnih kontaminanata ili tečnosti koje sadrže značajne količine alfa emitujućih radionuklida kada se proglase radioaktivnim otpadom ne mogu biti ispuštene u živonu sredinu bez prethodne obrade. Opcije za obradu ovakvog otpada opisane su u delu VI. Smernice za upravljanje tečnim radioaktivnim otpadom, izuzev onog koji sadrži alfa emitujuće radionuklide, date su u Tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Smernice za upravljanje tečnim radioaktivnim otpadom

Klasa radioaktivnog otpada	Aktivnost ( $m^{-3}$ ), Bq/y emiteri	Napomena
<b>RAO niske aktivnosti</b>	< 37 kBq	Tretman nije potreban. Moguće ispuštanje u životnu sredinu nakon merenja aktivnosti radionuklida.
	37 kBq – 37 MBq	Tretman je neophodan. Nisu potrebne dodatne zaštitne mere.
	37 MBq – 3.7 GBq	Tretman je neophodan. Dodatne zaštitne mere su potencijalno potrebne, u zavisnosti od prirode zastupljenih radionuklida.
<b>RAO srednje aktivnosti</b>	3.7 GBq – 370 TBq	Tretman je neophodan. Dodatne zaštitne mere su neophodne.

Čvrst radioaktivni otpad

Čvrst radioaktivni otpad obuhvata sav radioaktivni otpad u čvrstom agregatnom stanju, kao što su kontaminirana lična zaštitna sredstva,

kontaminirana oprema i alati, aktivirani i kontaminirani uzorci, upotrebljeni filtri, aktivirani i kontaminirani delovi struktura, sistema i komponenti, islično. Opcije za obradu ovakvog otpada opisane su u delu VI.

#### Gasovit radioaktivni otpad

Gasovit radioaktivni otpad nastaje tokom proizvodnje i prerade nuklearnog goriva, rada nuklearnih elektrana, i obrade radioaktivnog otpada. Ovakav radioaktivni otpad je u najpokretljivijem stanju i kao takav ne može se skladištiti i obrađivati u takvom obliku. Gasovit radioaktivni otpad mora biti obrađen, poželjno na mestu nastanka pomoću sistema za obradu izlaznog gasa o kojima je više rečeno u poglavlju IV.

Tečni i gasoviti radioaktivni otpad može biti ispušten direktno u životnu sredinu, uzimajući u obzir značajno razblaženje ovih efluenata do kog dolazi prilikom ispuštanja. Čvrst radioaktivni otpad, međutim, ne može biti direktno odložen u životnu sredinu ali zato može biti kontrolisan na mestu nastanka i kasnije čuvan dok se aktivnost radionuklida ne smanji u procesu radioaktivnog raspada. Alternativno, otpad može biti smešten u odgovarajuće kontejnere i čuvan na lokaciji odlagališta radioaktivnog otpada.

U opštem slučaju, tečni i gasoviti efluenti mogu biti ispušteni u životnu sredinu na samom mestu nastanka. Primer ovakvog otpada je tečni otpad iz laboratorijskog odvodnog sistema ili kontaminirani materijali iz odvodnih linija u industriji fosforne kiseline. Ispuštanje efluenata u atmosferu se odnosi na gasovite radioaktivne materijale ispuštene kroz dimnjačke sisteme radijacionih i nuklearnih objekata.

#### Podela radioaktivnog otpada na osnovu hemijskih i bioloških osobina

Prema hemijskim osobinama radioaktivni otpad se može podeliti prema potencijalnom hemijskom riziku, korozivnosti, reaktivnosti, zapaljivosti, sposobnosti da generiše gas i sorpciji radionuklida.

Prema biološkim osobinama radioaktivni otpad se može podeliti prema potencijalnom biološkom riziku, brzini razgradnje i količini i svojstvima produkata razgradnje.

Podela prema hemijskim i biološkim osobinama od najvećeg je značaja prilikom određivanja mogućnosti za obradu radioaktivnog otpada. Ovde su od posebnog značaja hemijska i biološka svojstva koja omogućavaju efikasniju primenu nekih tehnika obrade. Takođe, prilikom određivanja

---

metoda skladištenja i odlaganja, treba voditi računa o hemijskim i biološkim svojstvima kao što su reaktivnost sa drugim materijama prisutnim u odlagalištu, genersanju gasova i razgradnji.

### Međunarodni sistem za klasifikaciju radioaktivnog otpada

Kao što je opisano u prethodnom delu, radioaktivni otpad se klasifikuje na osnovu opcija za njegovo dalje upravljanje, odnosno mogućnosti za njegovo izuzimanje iz regulatorne kontrole, opcija za skladištenje ili odlaganje.

Međunarodna agencija za atomsku energiju, uzimajući u obzir opcije za odlaganje radioaktivnog otpada, u svojim preprukama je definisala šest klasa radioaktivnog otpada na kalse prikazane u Tabeli 3.3.

#### Izuzet radioaktivni otpad (EW)

Izuzet radioaktivni otpad je onaj otpad koji sadrži dovoljno male koncentracije radionuklida da ne zahteva posebne mere zaštite od zračenja bez obzira da li se odlaže u životnu sredinu ili vraća u ponovnu upotrebu. Takav otpad nije ili je prestao da bude predmet regulatorne kontrole, u skladu sa zanemarljivim radijacionim rizikom. Nivoi izuzimanja u pogledu ukupne i specifične aktivnosti definisani su nacionalnom regulativom iz oblasti zaštite od zračenja i nuklearne sigurnosti, odnosno preporukama MAAE i Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja (ICRP). Iako su novim setom propisa Evropske komisije nivoi izuzeća od regulatorne kontrole izjednačeni sa nivoima pri kojima se materijal može osloboditi u životnu sredinu ova dva koncepta ne treba mešati.

Nivoi izuzimanja za neke najčešće korišćene radionuklida prikazani su u Tabeli 3.4.

---

Tabela 3.3. Klasifikacija radioaktivnog otpada prema preporukama Međunarodne agencije za atomsku energiju

Kategorija	Tipične osobine i način odlaganja
<b>Izuzeti RAO EW</b>	Specifična aktivnost ili ukupna aktivnost u radioaktivnom otpadu jednaka ili niža od propisanih nivoa za isključenje ili izuzeće od regulatornog nadzora.
<b>Veoma - kratkoživeći RAO VSLW</b>	Otpad koji se može skladištiti do raspada u toku ograničenog vremenskog perioda od nekoliko godina nakon čega se može osloboditi regulatorne kontrole u skladu sa odobrenjem nadležnog regulatornog telaradi odlaganja bez kontrole, korišćenja ili ispuštanja u životnu sredinu. Ova klasa podrazumeva otpad koji sadrži radionuklide sa veoma kratkim vremenom poluraspada obično korišćene u istraživanjima i medicini.
<b>Veoma-nisko aktivni RAO VLLW</b>	Otpad koji ne zadovoljava kriterijume za izuzeti RAO ( <i>EW</i> ), ali takav da nema potrebe za visok nivo zaštite od zračenjai izolacije, pa je zbog toga pogodan za odlaganje u nisko ukopanim odlagalištima sa ograničenom regulatornom kontrolom. Ovakva odlagališta mogu sadržati i druge vrste opasnog otpada. Tipičan otpad u ovoj klasi je zemlja i šut sa niskom specifičnom aktivnošću. Koncentracije dugoživećih radionuklida u <i>VLLW</i> su veoma ograničene.
<b>Nisko aktivni RAO LLW</b>	Otpad koji je iznad nivoa izuzeća ali sa ograničenom količinom dugoživećih radionuklida. Ovaj otpad zahteva zaštitu od zračenja i izolaciju u periodu dužem od nekoliko stotina godina i pogodan je za odlaganje u inženjerskim niskoukopanim odlagalištima. Ova klasa pokriva široki spektar otpada. <i>LLW</i> može da sadrži kratkoživeće radionuklide sa visokom specifičnom aktivnošću, kao i dugoživeće radionuklide ali sa relativno niskom specifičnom aktivnošću.
<b>Srednje aktivni RAO ILW</b>	Otpad koji, zbog svog sadržaja, posebno dugoživećih radionuklida, zahteva viši nivo kontejmenta i izolacije nego što to pruža niskoukopano odlagalište. <i>ILW</i> ne zahteva, ili samo u ograničenom obimu zahteva, mere za odvođenje toplote tokom skladištenja i odlaganja. <i>ILW</i> može da sadrži dugoživeće radionuklide, posebno alfa emitere koji se neće raspasti do nivoa specifične aktivnosti pogodne za nisko ukopna odlagališta tokom vremena za koje je predviđena institucionalna kontrola. Otpad u ovoj kategoriji zahteva odlaganje na većim dubinama, u rasponu od nekoliko desetina do nekoliko stotina metara.
<b>Visoko-aktivni RAO HLW</b>	Otpad sa specifičnom aktivnošću koja je dovoljno visoka da generiše značajnu toplotu u toku procesa radioaktivnog raspada ili otpad koji sadrži značajne količine dugoživećih radionuklida koji se moraju posebno razmatrati pri planiranju odlagališta takvog otpada. Odlaganje u duboka stabilna geološka odlagališta dubine više stotina metara je opšte priznata opcija za <i>HLW</i> .

Tabela 3.4. Nivoi izuzimanja za neke često korišćene radionuklide propisani direktivom Evropske komisije

Radionuklid	Specifična aktivnost (Bq/g)	Ukupna aktivnost (Bq/g)
<sup>60</sup> Co	$1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^5$
<sup>131</sup> I	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^6$
<sup>99m</sup> Tc	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^7$
<sup>137</sup> Cs	$1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^4$
<sup>226</sup> Ra	$1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^4$
<sup>238</sup> U	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^3$
<sup>241</sup> Am	$1 \cdot 10^0$	$1 \cdot 10^4$

Nivoi ispod kojih se material ne smatra radioaktivnim koji su kriterijum za izuzeti otpadbaziraju se na procenjenoj dozi koja može nastati kao posledica kontakta sa radionuklidima sadržanim uradioaktivnomotpadu, pri čemu efektivna doza na godišnjem nivou ne može biti veća od 10  $\mu$ Sv za pojedinca, dok kolektivna doza ne može biti veća od 1  $\mu$ Sv. Nivoi izuzimanja su utvrđeni u smislu ukupne aktivnosti i specifične aktivnosti radionuklida i procenjene individualne i kolektivne doze uzimajući u obzir sve moguće puteve izlaganja jonizujućim zračenjima. U skladu sa ovim kriterijumima, izuzetiotpad sadrži radionuklide male specifične aktivnosti koji ne zahtevaju primenu posebnih mera zaštite od zračenja pa se izuzeti otpad i ne svrstava u radioaktivni materijal.

Nivoi oslobađanja i nivoi izizumanja detaljno su opisani u poglavlju IX.

Veoma kratkoživeći radioaktivni otpad (VSLW)

Veoma kratkoživeći radioaktivni otpad (VSLW) sadrži samo radionuklide sa vrlo kratkim vremenom poluraspada i sa koncentracijama aktivnosti radionuklida iznad nivoa za ispuštanje u životnu sredinu. Takav otpad može se privremeno čuvati dok aktivnost ne opadne ispod nivoa za ispuštanje u životnu sredinu, omogućavajući njegovo ispuštanje u životnu sredinu i upravljanje njime kao i sa svim drugim konvencionalnim otpadom. Primer veoma kratkoživećeg radioaktivnog otpadaje otpad koji nastane korišćenjem izvora <sup>192</sup>Ir i <sup>99m</sup>Tc i otpad koji sadrži ostale radionuklide sa kratkim vremenom poluraspada koji su primenu našli u industriji i medicini. Osnovni kriterijum da se radioaktivni otpad klasifikuje kao VSLV su dakle vremena

poluraspada dominantnih radionuklida i prihvatljivo male količine i aktivnosti radionuklida sa dužim vremenima poluraspada koje su određene nivoima za ispuštanje u životnu sredinu. Granica za vremena poluraspada dominantnih radionuklida ne može se odrediti za opšti slučaj, jer ona zavisi od planiranog trajanja privremenog čuvanja i početne aktivnosti radionuklida prisutnih uradioaktivnom otpadu. Međutim, u opštem slučaju, privremeno čuvanje se smatra održivom opcijom za radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide sa vremenom poluraspada reda 100 dana ili manje.

Veoma niskoaktivni radioaktivni otpad (VLLW)

Značajne količine radioaktivnog otpada koje nastaju tokom rada i dekomisije nuklearnih objekata sadrže radionuklide koji imaju nivo aktivnosti bliske ili nešto iznad nivoa za oslobađanje materijala iz regulatorne kontrole. Pored toga radioaktivni otpad koji sadrži prirodne radionuklide koji imaju aktivnosti bliske ili nešto iznad pomenutih nivoa, može nastati u prilikom vađenja ili prerade ruda i minerala. Upravljanje ovakvim otpadom, za razliku od izuzetog otpada, zahteva veću pažnju sa stanovišta zaštite odzračenja, ali je obim potrebnih zaštitnih mera manji nego što je to u slučaju upravljanja radioaktivnim otpadom iz viših klasa (LLV, ILV ili HLV). Ovakav radioaktivni otpad naziva se veoma nisko aktivni otpad.

Dovoljan nivo sigurnosti za odlaganje veoma nisko aktivnog otpada može se postići njegovim odlaganjem u površinska odlagališta. Ovakav način odlaganja je uobičajena praksa za radioaktivni otpad koji nastane iz eksploatacije ruda kao i za drugi radioaktivni otpad koji sadrži prirodne radionuklide iz različitih aktivnosti u koje spadaju prerada minerala, proizvodnja veštačkog đubriva, proizvodnja stočne hrane, naftna industrija i slično. U pojedinim državama na ovakav način odlaže se i radioaktivni otpad koji spada u ovu klasu a koji nastane u radu i tokom dekomisije nuklearnih objekata. Načini izvedbe odlagališta u koja se odlaže ova klasa radioaktivnog otpada kreću se od jednostavnog prekrivanja radioaktivnog otpada slojem zemlje do objekata koji imaju složene sisteme barijera koji sprečavaju izlazak radionuklida u životnu sredinu. Ono što je zajedničko za sve njih je sto odlagališta veoma niskoaktivnog radioaktivnog otpada moraju sadržati aktivne i pasivne elemente institucionalne kontrole. Osim odlaganja neki otpad koji spada u klasu veoma niskoaktivnog, kao što je kamen i jalovina koji nastanu iz eksploatacije rude mogu biti korišćeni u druge svrhe, npr. kao podloga za puteve ali tek onda kada se posle odgovarajućih analiza pokaže da će posledice po stanovništvo i životnu sredinu biti na nivou onih koje bi

---

prouzrokovao i materijal čija je aktivnost ispod granica ispušanja u životnu sredinu.

#### Niskoaktivni radioaktivni otpad (LLW)

Niskoaktivni radioaktivni otpad (LLW) obuhvata veoma širok opseg aktivnosti radioaktivnog otpada koje se kreću od nivoa malo iznad nivoa veoma nisko aktivnog radioaktivnog otpada (VLLW) koji, praktično ne zahtevaju značajne mere zaštite od zračenja i izolacije od životne sredine pa do takvih da zahtevaju značajne mere zaštite od zračenja i izolaciju od životne sredine u veoma dugom periodu. U nisko aktivnom radioaktivnom otpadu mogu se naći i male količine dugoživećih radionuklida. Nisko aktivni radioaktivni otpad najpodesnije je odlagati u odlagališta bliska površini. Ovakav način odlaganja odgovarajuća je opcija za nisko aktivni radioaktivni otpad koji sadrži takve količine radioaktivnog materijala da su značajne mere zaštite od zračenja i izolacija od životne sredine neophodni u periodu od nekoliko stotina godina. Pošto nisko aktivni radioaktivni otpad može sadržati širok opseg koncentracija aktivnosti kao i širok spektar različitih radionuklida, postoje razne opcije za projektovanje i izgradnju odlagališta bliskih površini. Ovi objekti mogu biti projektovani i izrađeni sa jednostavnijim ili složenijim zaštitnim barijerama, zavisno od karakteristika radionuklida čije odlaganje se planira. Sam objekat se može nalaziti na različitim dubinama, obično od površine zemljišta pa do dubine od nekoliko desetina metara. Dubina odlagališta takođe zavisi od karakteristika radionuklida čije odlaganje se planira i procene sigurnosti odlagališta. Kako niskoaktivni radioaktivni otpad može da sadrži velike količine kratkoživećih radionuklida, značajan deo ovih radionuklida će se raspasti u periodu u kom će odlagalište, njegove inženjerske barijere i uspostavljena institucionalna kontrola i dalje biti prisutni i efikasno sprečavati migraciju radionuklida u životnu sredinu.

#### Srednjeaktivni radioaktivni otpad (ILW)

Srednjeaktivnim radioaktivnim otpadom smatra se onaj radioaktivni otpad koji sadrži dugoživeće radionuklide u količinama koje zahtevaju veći stepen zaštite od zračenja i veći nivo izolacije u odnosu na životnu sredinu nego za nisko aktivni radioaktivni otpad. Genrisanje toplote u slučaju ILW nije značajno, pa se ovakav otpad može odlagati bez posebnih sistema za odvođenje toplote. Prihvatljiva opcija za odlaganje ove klase radioaktivnog otpada je odlaganje u odlagališta na dubini između nekoliko desetina i

---



nekoliko stotina metara. Odlaganje na takvim dubinama može obezbediti dug period izolacije radioaktivnog otpadapod uslovom da su i prirodne barijere i inženjerske barijere odlagališta pravilno odabrane. Odlagališta na ovakvim dubinama posebno su pogodna zato što u njima ne postoje negativni uticaji erozije u značajnom vremenskom periodu. Još jedna važna prednost odlaganja na ovim dubinama je što je, u poređenju sa odlagalištima koja se nalaze blizu površine, verovatnoća slučajnog ulaska ljudi značajno smanjena. Shodno tome, dugoročna sigurnost odlagališta otpada koja se nalaze na ovakvim dubinama ne zavisi od primene institucionalnih kontrola. Jasna i jedinstvena granica između nisko i srednje aktivnog radioaktivnog otpada se ne može postaviti, imajući u vidu da se granice aktivnosti i specifične aktivnosti razlikuju za različite radionuklide.

Visokoaktivni radioaktivni otpad (HLW)

Visokoaktivni radioaktivni otpad (HLW) je radioaktivni otpad čija je aktivnost dovoljno visoka da zahteva dodatne specijalno dizajnirane zaštitne barijere u cilju dugoročne zaštite od spoljašnjeg izlaganja i dodatni sistem za hlađenje, imajući u vidu količinu generisane toplote. Koncentracija aktivnosti radionuklida prisutnih u ovakvom otpadu obično se kreće u opsegu  $10^4 - 10^6$  TBq/m<sup>3</sup>. Visoko aktivni radioaktivni otpad usled radioaktivnog raspada generiše značajne količine toplote i proces generisanja toplote obično traje nekoliko vekova. Upravo zbog ovih karakteristika, otpad koji spada u ovu klasu je najpoželjnije odlagati u duboka geološka odlagališta sa inženjerskim barijerama. Mere za odvođenje toplote su važan faktor koji se mora uzeti u obzir pri projektovanju i izgradnji geoloških odlagališta radioaktivnog otpada. Značajne količine visokoaktivnog radioaktivnog otpada nastaju u procesu prerade isluženog nuklearnog goriva. Ovakav otpad sadrži značajnu količinu alfa emitera, uglavnom transuranskih elemenata sa veoma dugim periodom poluraspada, kao i različite fisione produkte.

Potrebno je naglasiti da međunarodni sistem klasifikacije koji je uspostavila Međunarodna agencija za atomsku energiju, omogućava pojedinim državama da uspostave sopstevne sisteme klasifikacije radioaktivnog otpada. Jedan od primera klasifikacije koje su usvojile neke države zasniva se na prethodnim preporukama za klasifikaciju koje je Međunarodna agencija za atomsku energiju donela 1994. godine. Takav sistem klasifikacije prevaziđen je u korist novog sistema koji u obzir uzima dugoročnu sigurnost radioaktivnog otpada koja uključuje i odgovarajuće načine njegovog

---

odlaganja (Tabela 3.3.). Stari sistem klasifikacije predviđao je nekoliko klasa radioaktivnog otpada i to:

- Izuzeti radioaktivni otpad (EW)
- Nisko i srednje aktivni radioaktivni otpad (LILW) koji se dalje deli na kratkoživeći (SL) i dugoživeći (LL):
  - Kratkoživeći nisko i srednje aktivni radioaktivni otpad (LILW-SL), koji sadrže radioaktivne izotope kratkog vremena poluraspada (<30 god.), niskog i srednjeg nivoa aktivnosti, i čija je termalna snaga manja od  $2 \text{ kW/m}^3$ . Koncentracija dugoživećih alfa emitera za ovu kategoriju RAO materijala je ograničena na  $400 \text{ Bq/g}$  u pojedinačim paketima RAO materijala, odnosno na  $400 \text{ Bq/g}$  u ukupnoj količini RAO materijala;
  - Dugoživeći nisko i srednje aktivni radioaktivni otpad (LILW-LL), koji sadrži radioaktivne izotope dugog vremena poluraspada (>30 god.), niskog i srednjeg nivoa aktivnosti i termalne snage manje od  $2 \text{ kW/m}^3$ . Koncentracija dugoživećih alfa emitera za ovu kategoriju RAO prevazilazi vrednosti graničnih koncentracija dugoživećih alfa emitera za kratkoživeći nisko i srednje aktivni radioaktivni otpad;
- Visokoaktivni radioaktivni otpad (HLW) - RAO materijali visokog nivoa aktivnosti kod kojih je koncentracija dugoživećih radioaktivnih izotopa veća od graničnih vrednosti za kratkoživeći nisko i srednje aktivni radioaktivni otpad i termalna snaga veća od  $2 \text{ kW/m}^3$  i za koje je potrebno obezbediti hlađenje.

Kratkoživeći RAO (LILW-SL) ne sadrži značajan udeo radionuklida čiji je period poluraspada duži od 30 godina. Kriterijum na osnovu koje se otpad klasifikuje kao SL bazira se na specifičnoj aktivnosti dugoživećih alfa emitera koja ne može biti veća od  $400 \text{ Bq g}^{-1}$ , dok ukupna specifična aktivnost paketa ne može biti veća od  $4000 \text{ Bq g}^{-1}$ . Za ovu klasu RAO, prikladan tip odlagališta jesu odlagališta bliska površini.

Dugoživeći radioaktivni otpad (LILW-LL) sadrži dugoživeće radionuklide koji zahtevaju viši stepen izolacije u odnosu na životnu srednu. Za ovu klasu RAO, prikladan tip odlagališta jesu duboke geološke formacije.

Ukoliko je aktivnost ili specifična aktivnost RAO iznad nivoa izuzimanja, može se klasifikovati kao LILW. Tipični primeri ove klase RAO su:

- Jonoizmenjivačke smole i filtri korišćeni prilikom prečišćavanja kontaminirane vode u nuklearnim elektranama;

- Istraživačka opreme iz laboratorija u kojima se koriste radioaktivni materijali;
  - Zaštitna sredstva za jednokratnu upotrebu (laboratorijski mantili, ubrusi, rukavice...) korišćena u laboratorijama u kojim se rukuje sa radioizotopima;
  - Kontejneri, odeća, tečnosti i druga oprema koja dolazi u kontakt sa radioaktivnim materijama koji se koriste u bolnicama za dijagnostiku ili lečenje bolesti;
  - Filtri iz opreme za uzorkovanje kontaminiranog vazduha;
  - Scintilacione tečnosti u kojima su rastvoreni uzorci za potrebe određivanja aktivnosti radionuklida;
  - Ostaci eksperimentalnih životinjakorišćeni u medicinskim i farmaceutskim istraživanjima.
- 
-

## IV. Dekomisija objekata u kojima se koriste radioaktivni materijali

---

Dekomisija se definiše kao skup administrativnih i tehničkih mera preduzetih sa ciljem da omoguće potpuno ili delimično oslobađanje objekta od regulatorne kontrole.

Ove mere imaju za cilj da obezbede dugoročnu zaštitu ljudi i životne sredine i obično uključuju mere za smanjivanje prisustva radionuklida kako u materijalima koji nastanu dekomisijom tako i na lokaciji objekta koji je predmet dekomisije. Ove mere treba da obezbede da se materijal nastao dekomisijom može ponovo koristiti, sigurno odložiti kao radioaktivni otpad ili osloboditi od regulatorne kontrole odnosno da se lokacija objekta koji je predmet dekomisije može koristiti ili nesmetano ili sa postavljenim ograničenjima.

Proces dekomisije sprovodi se na kraju životnog veka objekta sa ciljem uklanjanja svih radioloških i neradioloških opasnosti povezanih sa njegovim radom kao i svih sistema iz samog objekta i njegove okoline a za cilj imaju oslobađanje objekta ili njegove lokacije od regulatorne kontrole i zaštitu profesionalno izloženih lica, stanovništva i životne sredine tokom postupka dekomisije.

Proces dekomisije uključuje dekontaminaciju i demotiranje ili rušenje objekta ili dela objekta sa ciljem smanjenja radijacionog rizika koji on nosi. U nekim slučajevima proces dekomisije može da uključi i samo dekontaminaciju bez demontiranja ili rušenja ukoliko se tim postupkom uklone svi radijacioni rizici. Objekat se u tom slučaju može osloboditi od dalje regulatorne kontrole a njegova namena promeniti.

Iako se pojam dekomisija u većini slučajeva odnosi na nuklearne objekte kao što su nuklearne elektrane i istraživački reaktori, u ovom tekstu on se odnosi i na sve druge objekte u kojima se obavljaju aktivnosti koje uključuju korišćenje i čuvanje radioaktivnog materijala. U ove objekte pored nuklearnih objekata (nuklearne elektrane, istraživački reaktori, objekti koji se koriste za proizvodnju nuklearnog goriva i slično) spadaju i objekti za

---

tratman i skladištenje radioaktivnog otpada, laboratorije u kojima se za potrebe istraživanja koriste radioaktivni materijali i svi drugi objekti koji koriste radioaktivne materijale.

Važno je napomenuti da se pojam dekomisije ne može primeniti na odlagališta radioaktivnog otpada u koje je radioaktivni otpad već smešten kao ni na odlagališta materijala sa prirodno povišenim sadržajem radioaktivnosti ili rudarske jalovine iz postupka eksploatacije radioaktivnih ruda. Ovakvi objekti se na kraju svog životnog veka na odgovarajući način zatvaraju pri čemu svi radioaktivni materijali ostaju unutar objekta i uspostavlja se institucionalna kontrola sa ciljem izolacije radioaktivnih materijala od životne sredine.

### Razlozi za dekomisiju

Razlozi koji dovode do trajnog prestanka rada a potom i dekomisije nekog objekta mogu biti različiti i obično uključuju jedan ili više od sledećih:

1. Neekonomičan rad;
2. Tehnološku zastarelost;
3. Završetak istraživačkih aktivnosti;
4. Sigurnosne probleme;
5. Promenu državne politike;
6. Akcident ili neki drugi neplanirani događaj.

Kada se govori o neekonomičnom radu objekta, misli se na objekte koji su građeni sa ciljem ostvarivanja ekonomske koristi, kao što su na primer nuklearne elektrane. Sa druge strane, objekti kao što su istraživački nuklearni reaktori i kritična postrojenja kao i objekti za upravljanje radioaktivnim otpadom, iako često rade neekonomično, daju značajan doprinos kroz proizvodnju radiofarmaceutika, istraživačke aktivnosti i sigurno upravljanje radioaktivnim otpadom.

Tehnološka zastarelost objekta je razlog za dekomisiju objekta u slučajevima kada je prihvatljivo da se postojeći objekat zameni drugim, efikasnijim objektom u kom se obavljaju iste aktivnosti ili aktivnosti većeg obima.

Nuklearni objekti se često grade sa ciljem korišćenja u istraživačkim aktivnostima. Jedan od primera su kritična postrojenja koja se koriste za izučavanje ponašanja nuklearnog reaktora pri različitim konfiguracijama njegovog jezgra. Po završetku istraživačkih aktivnosti ovi objekti mogu, sa ili bez modifikacije, biti usmereni na novu komercijalnu ili istraživačku primenu ili, ukoliko ovo nije moguće, trajno prestati sa radom i biti dekomisionirani.

---

Sigurnosni problemi takođe mogu biti uzrok za prestanak rada objekta. Ukoliko nije moguće ispuniti regulatorne zahteve za siguran rad objekta ili njihovo ispunjenje nije ekonomično, nuklearni objekat može trajno prestati sa radom i potom biti dekomisioniran. Nuklearne elektrane Bohunjice u Slovačkoj, Ignalina u Litvaniji kao i četiri bloka nuklearne elektrane Kozloduj u Bugarskoj samo su neki od primera prestanka rada usled nemogućnosti ispunjavanja propisanih uslova sigurnosti. Ove nuklearne elektrane prestale su sa radom po ulasku njihovih država u Evropsku uniju jer nisu mogle da ispunе uslove sigurnosti postavljene od strane unije.

Promena državne politike u oblasti nuklearne energije i odustajanje od razvoja nuklearnih programa može da rezultuje trajnim prestankom rada nuklearnih elektrana ali i prekidom istraživačkih programa u oblasti nuklearne energetike i tehnike.

U slučajevima kada je objekat usled akcidenta oštećen do te mere da je saniranje njegovog stanja nemoguće ili neisplativo dekomisija objekta je jedino rešenje koje dovodi do umanjenja posledica akcidenta do nivoa prihvatljivog za stanovništvo i životnu sredinu u okolini nuklearnog objekta.



Slika 4.1. Razlozi za dekomisiju

U određenim situacijama, posebno u slučaju istraživačkih reaktora i drugih manjih objekata, dekomisija nije započeta ni posle nekoliko decenija od prestanka njihovog rada. Ovo je čest slučaj i sa objektima koji su privremeno

prestali sa radom zbog modernizacije ili planiranog održavanja i potom nikada više nisu pokrenuti ali i sa objektima čija je dekomisija bila planirana ali zbog nedostatka finansijskih sredstava nije izvršena. Ovakvo stanje obično rezultuje gubitkom znanja o objektu usled odlaska osoblja koje je radilo u njemu. Takođe, dolazi i do povećanja rizika odvanrednih događaja usled starenja i propadanja materijala korišćenih u izgradnji i modifikacijama objekta posebno u slučajevima kada se ne sprovodi odgovarajuće održavanje objekta.

### Strategije dekomisije

Glavni cilj dekomisije je dovođenje objekta stanje u kom onne predstavlja neprihvatljiv rizik za zaštitu profesionalno izloženih lica, stanovništva i životne sredine za vreme i posle završetka dekomisije i sanacije njegove lokacije. Kako bi ovaj cilj bio postignut, neophodno je usvojiti strategiju dekomisije.

Izabrana strategija dekomisije razlikuje se od slučaja do slučaja, ali uvek uključuje određene pripremne aktivnosti manjeg ili većeg obima i, pre ili kasnije, dekontaminaciju i demontiranje delova objekta. Međunarodna agencija za atomsku energiju usvojila je u svojim preporukama tri strategije dekomisije i to:

1. Neodložno demontiranje (*Immediate dismantling / DECON*)
2. Odloženo demontiranje (*Differed dismantling / SAFSTOR*)
3. Pretvaranje objekta u odlagalište (*Entombment / ENTOMB*)

Kao što je već rečeno, neopravdano odlaganje dekomisije može dovesti do degradacije objekta do te mere da može predstavljati opasnost po stanovništvo i životnu sredinu. Iz ovoga sledi da napuštanje objekta po prestanku njegovog rada nije prihvatljivo sa stanovišta sigurnosti i zaštite životne sredine te samim tim nije prihvatljivo ni kao krajnje stanje objekta kom se teži. S tim u vezi, potrebno je razlikovati prethodno navedenu strategiju odloženog demontiranja objekta kod koje se sprovodi redovno održavanje objekta i napuštanja objekta.

Bez obzira na odabranu strategiju i njen obim, važno je napomenuti da će ona u svakom slučaju rezultovati određenom količinom radioaktivnog otpada sa kojim se mora upravljati na odgovarajući način.

#### Neodložno demontiranje

Neodložno demontiranje je strategija kod koje se, što je to pre moguće po prestanku rada objekta, oprema, komponente i delovi objekta koji su

---

radioaktivni, kontaminirani ili aktivirani uklanjaju ili dekontaminiraju omogućavajući na taj način oslobađanje objekta ili dela objekta iz regulatorne kontrole. U slučajevima kada objekat ili njegovu lokaciju nije moguće u potpunosti osloboditi iz regulatorne kontrole oni se mogu delimično osloboditi uz dodatne uslove u pogledu daljeg korišćenja. Implementacija ove strategije počinje ubrzo po prestanku rada objekta, obično u periodu od dve do pet godina. Kratak vremenski period između prestanka rada objekta i početka dekomisije omogućava korišćenje postojeće radne snage. Sa stanovišta upravljanja radioaktivnim otpadom kako zbog kratkog vremena ne dolazi do značajnog raspada radionuklida, i samim tim i do značajnog smanjenja količine radioaktivnog otpada, neodložno demontiranje garantuje smeštanje radioaktivnog otpada u odgovarajuća skladište ili odlagalište u najkraćem mogućem roku. Kao preduslov za početak dekomisije mora biti obezbeđeno adekvatno postrojenje za upravljanje radioaktivnim otpadom i isluženim nuklearnim gorivom kao i finansijska sredstva neophodna za sigurno i bezbedno sprovođenje dekomisije. Ova strategija smatra se najboljim rešenjem sa stanovišta sigurnosti i bezbednosti i preporučuje se u svim okolnostima, ukoliko ne postoji dovoljno dobro opravdanje da se primeni alternativna strategija.

#### Odloženo demontiranje

Odloženo demontiranje je strategija kod koje se demontiranje objekta odlaže, na duži vremenski period reda veličine nekoliko decenija. U ovakvoj situaciji objekat se stavlja u stanje koje podseća na dugoročno skladištenje, pri čemu se sve vreme održava prihvatljiv nivo sigurnosti i bezbednosti objekta. Iako se ovom strategijom demontiranje većeg dela objekta odlaže na duži vremenski period, neophodno je obaviti određene inicijalne aktivnosti koje uključuju uklanjanje procesnih tečnosti iz sistema i radioaktivnog otpada kao i neophodne aktivnosti dekontaminacije ili demontiranja, ključne za sigurnost objekta. Lokacija i sam objekat se tokom vremenskog perioda do početka demontiranja obezbeđuju odgovarajućim merama fizičke zaštite koje garantuju neophodnu bezbednost objekta i lokacije. Ukoliko u objektu postoji isluženo nuklearno gorivo, to može predstavljati poseban sigurnosni i bezbednosni problem i njegovom rešavanju se mora pristupiti u najkraćem roku posle prestanka rada nuklearnog objekta. Kao što je gore navedeno, vremenski period između trajnog prestanka rada i demontiranja može da varira od nekoliko godina do nekoliko decenija, nakon čega će dekomisijabiti završena a objekat ili njegova lokacija oslobođeni od regulatorne kontrole. Tokom ovog vremenskog perioda može doći do značajnog raspada radionuklida te samim tim i do smanjenja količine radioaktivnog otpada koji treba uskladištiti i potom odložiti. Nedostatak ove strategije je što tokom



vremenskog perioda proteklog između trajnog prestanka rada i demontiranja dolazi do gubitka radne snage koja je radila na objektu tokom perioda njegovog rada. Ovo ne znači samo gubitak radne snage već i operativnih iskustava stečenih tokom rada objekta kao i podataka o odstupanjima od redovnog pogona i načinjenim modifikacijama ukoliko one nisu propisno dokumentovane. Takođe, troškovi održavanja objekta i radne snage tokom perioda između prestanka rada i dekomisije značajno povećavaju cenu dekomisije. Delovi objekta, kao što su vruće ćelije na istraživačkom reaktoru mogu se, tokom perioda u kom je objekat zatvoren i čeka demontiranje, koristiti za druge svrhe. Ovakav pristup korišćenju dela objekta, iako sa sobom nosi određeni radijacioni rizik, može naterati operatera objekta da održava sisteme od značaja za sigurnost i bezbednost tokom trajnog prestanka rada objekta.

Odluka da se odloženo demontiranje odabere kao strategija nekada može biti doneta na osnovu nedostatka neophodnih preduslova za početak dekomisije. Ovo se prvenstveno odnosi na situacije u kojima postrojenja za upravljanje radioaktivnim otpadom i isluženim nuklearnim gorivom nisu dostupna ili ne ispunjavaju neophodne uslove, ili kada finansijska sredstva neophodna za sigurno i bezbedno sprovođenje dekomisije nisu obezbeđena. Vremenski period između trajnog prestanka rada i demontiranja omogućiće neophodno vreme za uspostavljanje odgovarajućeg sistema upravljanja radioaktivnim otpadom i prikupljanje neophodnih finansijskih sredstava. Ovakva opcija je pogodna za objekte koji se nalaze na lokacijama zajedno sa drugim objektima koji se i dalje nalaze u operativnoj fazi, posebno kada je moguće deliti infrastrukturu između objekata koji rade i objekata koji čekaju dekomisiju.

#### Pretvaranje objekta u odlagalište

Pretvaranje objekta u odlagalište je strategija kod koje sesvi kontaminirani i aktivirani materijali i delovi sistema fiksiraju na mestu gde se nalaze i tako ostavljaju sve dok njihova aktivnost ne dostigne nivo na kojima mogu biti oslobođeni od regulatorne kontrole. Ovo praktično znači da će se objekat pretvoriti u odlagalište pri čemu je neophodno obezbediti sve propisane regulatorne uslove koje odlagalište treba da ispuni. Kontrolisana zona objekta se na ovaj način smanjuje ali njegova lokacija ostaje pod regulatornom kontrolom u znatno dužem vremenskom periodu, u odnosu na dekomisionirane objekte. Ova strategija, iako neprihvatljiva za većinu država, može biti razmotrena u državama koje imaju isključivo jedan ili mali broj nuklearnih objekata npr. istraživački reaktor i nemaju odlagalište za radioaktivni otpad. Na ovaj način, problem odlaganja i drugog radioaktivnog otpada može biti rešen, ali je takva opcija moguća samo kada se može

---

pokazati da uticaj ovakvog odlagališta na stanovništvo i životnu sredinu nije neprihvatljiv.

Kriterijumi za izbor strategije dekomisije

Na donošenje odluke o strategiji dekomisije može uticati više faktora od kojih se mogu izdvojiti sledeći:

1. Tip objekta, njegovo fizičko stanje i zaostala aktivnost u objektu;
2. Željeno krajnje stanje objekta ili njegove lokacije;
3. Državna politika i regulatorni okvir;
4. Sigurnosni razlozi;
5. Finansijski aspekti dekomisije;
6. Generisanje radioaktivnog otpada;
7. Dostupnost tehnologija za dekomisiju;
8. Dostupnost infrastrukture za upravljanje radioaktivnim otpadom;
9. Socio-ekonomski razlozi.

Tip objekta, njegovo fizičko stanje i zaostala aktivnost u objektu mogu imati značajan uticaj na izbor strategije dekomisije. Postoji mogućnost da određene obavljene aktivnosti ili odstupanja od normalnog pogona tokom rada objekta nisu propisno dokumentovane što se može negativno odraziti tokom implementacije strategije dekomisije bez obzira na njen izbor. Prikupljeni podaci o objektu, njegovom radu, odstupanjima od normalnog pogona, modifikacijama objekta i operativnim iskustvima mogu biti ne samo dobra osnova za donošenje odluke o strategiji dekomisije već i za donošenje odluke o tehnikama dekomisije koje će biti primenjene, procenu količine generisanog radioaktivnog otpada, doza koju primaju profesionalno izložena lica i za procenu cene dekomisije.

Kod pojedinih tipova objekata neodložno demontiranje se, zbog prirode objekata nameće kao najbolja strategija dekomisije. U ovakve objekte spadaju oni u kojima su korišćeni isključivo zatvoreni izvori zračenja i kod kojih se dekomisija svodi na uklanjanje zaostalih izvora, eventualno dekontaminaciju i pregled objekta u cilju potvrđivanja da u njemu nema zaostale radioaktivnosti. Takođe, u ovakve objekte spadaju i objekti u kojima se koriste dugoživeći radioizotopi poput uranijuma, torijuma i transuranijumskih elemenata kao što su objekti iz nuklearnog gorivnog ciklusa, objekti za preradu nuklearnog goriva i slični. U ovakvim situacijama, odlaganje demontiranja ne doprinosi smanjenju ukupne aktivnosti a značajno uvećava cenu dekomisije. Pored ovih objekata, neodložno demontiranje je primenljivo i na objekte koji se nalaze na lokaciji pored drugih objekata koji ne sadrže radioaktivne materijale i imaju drugu

namenu. Sa druge strane, objekti koji sadrže isključivo kratkoživeće radionuklide mogu biti na siguran način zatvoreni i njihova dekomisija odložena dok se radionuklidi ne raspadnu do nivoa da mogu biti oslobođeni u životnu sredinu. U slučajevima kada se na lokaciji nalazi više od jednog objekta, može biti korisno da se za objekte koji prvi prestanu sa radom odredi strategija odložene demontaže sve dok i drugi objekti ne dođu do faze blizu dekomisije. Ovo omogućava da se dekomisije više objekata obavljaju sukcesivno, korišćenjem iste radne snage, opreme i infrastrukturnih sistema. Pretvaranje objekta u odlagalište nije od značaja za objekte koji sadrže pretežno dugoživeće radionuklide jer se ovakav otpad ne može smestiti u odlagališta koja su blizu ili iznad površine tla. Ovaj tip strategije primenljivije za objekte koji imaju kratkoživeće radionuklide pri čemu bi se oni na taj način fiksirali na lokaciji dok njihova aktivnost ne opadne do nivoa da mogu biti oslobođeni od regulatorne kontrole.

Krajnje stanje objekta i lokacije na kojoj se objekat nalazi jedan je od faktora koji može značajno uticati na odluku o strategiji dekomisije. Najpoželjnije krajnje stanje objekta i lokacije je takvo da se objekat može osloboditi od regulatorne kontrole. Pored toga objekat ili njegovu lokaciju moguće je osloboditi od regulatorne kontrole delimično, odnosno pod određenim uslovima koje propiše nadležno regulatorno telo. I neodložno i odloženo demontiranje jesu strategije koje mogu rezultovati u oba moguća krajnja stanja. U smislu efikasnosti, prednost ima neodložno demontiranje jer dovodi do potpunog ili delimičnog oslobađanja od regulatorne kontrole u kraćem vremenskom periodu. U slučaju odloženog demontiranja, period između prestanka rada i dekomisije objekta ne utiče na krajnje stanje objekta. Pretvaranjem objekta u odlagalište, krajnje stanje koje bi podrazumevalo oslobađanje od regulatorne kontrole se ne može postići u bliskom vremenskom periodu, imajući u vidu da se po zatvaranju odlagališta uspostavlja sistem regulatorne kontrole u vidu monitoringa životne sredine u okolini odlagališta. Budući da se u odlagalište ne pretvara ceo objekat već samo jedan njegov deo, moguće je ostatak objekta ili lokacije osloboditi od regulatorne kontrole ali, uzimajući u obzir blizinu odlagališta, oni se mogu koristiti samo za ograničene primene povezane sa odlagalištem.

Radionuklidi prisutni u objektu posle prestanka njegovog rada mogu značajno uticati na doze koje profesionalno izložena lica prime tokom dekomisije. Ukoliko se kao strategija razmatra neodložno demontiranje, većina radionuklida neće imati dovoljno vremena da se raspadne do nivoa koji bi omogućili manje doze koje profesionalno izložena lica prime tokom dekomisije. U ovom slučaju, insistira se na dodatnim merama zaštite od zračenja koje povećavaju cenu dekomisije. Sa druge strane, iako odloženo demontiranje omogućava da aktivnost nekih radionuklida značajno opadne,

---

ova strategija se može smatrati povoljnijom sa stanovišta sigurnosti isključivo u slučajevima kad se može pokazati da će doze profesionalno izloženih lica biti znatno manje.

Važno je napomenuti da svaka od pomenutih strategija dekomisije podrazumeva uklanjanje kontaminiranih površina, procesnih tečnosti kao i radioaktivnog otpada ili iskorišćenih izvora zračenja, predmeta i materijala koji se mogu ukloniti tokom priprema za dekomisiju ili u početnoj fazi dekomisije. Iz navedenih razloga, profesionalno izložena lica primaju određenu dozu jonizujućih zračenja, uzimajući u obzir sve faze, bez obzira na izabranu strategiju dekomisije.

Sa stanovišta upravljanja radioaktivnim otpadom njegovo generisanje i dostupnost infrastrukture za upravljanje radioaktivnim otpadom mogu imati presudan uticaj u izboru strategije dekomisije. Pri određivanju strategije neophodno je u razmatranje uzeti: državnu politiku u oblasti upravljanja radioaktivnim otpadom, procenjenu količinu generisanog radioaktivnog otpada, njegove karakteristike, prisutvo drugih vrsta otpada, posebno opasnog otpada, kao i dostupnost, stanje i kapacitet infrastrukture za obradu, skladištenje i odlaganje radioaktivnog otpada. Radioaktivni otpad koji nastane u toku dekomisije može biti smešten u skladište ili odlagalište radioaktivnog otpada što implicira da odlagalište nije isključivi preduslov za obavljanje dekomisije. Kao što je već pomenuto, u državama sa malom količinom radioaktivnog otpada strategija pretvaranja objekta u odlagalište može biti način za rešavanje problema odlaganja radioaktivnog otpada. Ne treba zaboraviti da i u tom slučaju odlagalište treba da ispunji sve uslove koje bi ispunilo i novoizgrađeno odlagalište, uključujući i dostupnost infrastrukture neophodne za rad odlagališta.

Tehnologije koje se koriste u dekomisiji objekata ne razlikuju se u velikoj meri između različitih strategija ali njihova dostupnost može značajno uticati na izbor strategije. Glavne razlike ogledaju se u tehnikama demontiranja primenjenim u slučaju neodložnog i odloženog demontiranja. U slučaju odloženog demontiranja, usled dužeg vremenskog perioda koji omogućava raspad radionuklida, količina radioaktivnog otpada može biti manja. U slučaju neodložnog demontiranja, visok nivo jačine doze može zahtevati korišćenje tehnika koje se daljinski kontrolišu ili dodatne mere zaštite od zračenja. Suprotno tome, u slučaju odloženog demontiranja, kada se očekuje smanjenje jačine doze usled radioaktivnog raspada, moguće je koristiti tehnike demontiranja koje ne zahtevaju dodatne mere zaštite od zračenja. Dalje, određeni alati i oprema korišćeni tokom rada objekta mogu se koristiti i u pripremnim ili početnim fazama dekomisije. Međutim, u slučaju odloženog demontiranja realno je očekivati da ovi alati i oprema neće više ispunjavati potrebne uslove. U slučaju konverzije objekta u odlagalište,

tehnike koje se koriste zavise od toga da li se pretvaranje vrši odmah po zatvaranju objekta ili posle značajnog vremenskog perioda. Tehnike koje se koriste u ova dva slučaja iste su kao i tehnike koje se koriste kod neodložnog i odloženog demontiranja.

Pored navedenih razloga u nekim slučajevima značajan uticaj mogu imati i državna politika u oblasti ne samo dekomisije već i u oblastima upravljanja radioaktivnim otpadom i nuklearne energije, kao i regulatorni okvir uspostavljen u državi. Takođe, nedostatak finansijskih sredstava za dekomisiju može dovesti do usvajanja odloženog demontiranja kao prihvaćene strategije dekomisije, sa idejom da se sredstva obezbede u budućnosti.

### Planiranje i priprema dekomisije

Planiranje dekomisije po pravilu počinje već prilikom početnog projektovanja objekta a završava se pripremom objekta ili njegove lokacije za oslobađanje iz regulatorne kontrole. Tokom svih faza životnog veka objekta, od projektovanja do dekomisije, njegov rad mora biti praćen pripremom odgovarajuće dokumentacije koja će omogućiti sprovođenje dekomisije na siguran i efikasan način. Ovde se prvenstveno misli na sakupljanje podatka o radu objekta, radioaktivnim materijalima korišćenim u njemu, operativnim iskustvima, odstupanjima od normalnog pogona i svim drugim događajima koji su imali ili mogli imati uticaj na objekat. Ovi podaci pomažu prilikom planiranja dekomisije kako bi se ona obavila na najsigurniji i najefikasniji način.

#### Plan dekomisije

Osnovni dokument koji operater nuklearnog objekta priprema za potrebe dekomisije naziva se plan dekomisije. Ovaj dokument je uvek praćen većim ili manjim brojem dodatnih dokumenata zavisno od složenosti objekta i dekomisije. Plan dekomisije i sva prateća dokumentacija, iako u velikom broju slučajeva širom sveta to nije bila praksa, po pravilu bi trebalo da se pripremaju već u fazi projektovanja objekta i da se ažuriraju kasnije, tokom operativne faze objekta što garantuje raspoloživost adekvante dokumentacije u momentu kada se donese odluka o njegovoj dekomisiji.

Plan dekomisije i dodatna dokumentacija imaju za cilj da obezbede sigurnu dekomisiju objekata u kojima se koriste radioaktivni materijali. Njihov obim i sadržaj prilagođavaju se tipu objekta, količini radioaktivnog materijala u objektu, količini aktiviranih i kontaminiranih predmeta, površina i sistema. Ovakva dokumentacija se odnosi na dekomisiju kompletnog objekta, dela

---

objekta ili samo pojedinih sistema, struktura ili komponenata unutar objekta.

Međunarodna agencija za atomsku energiju dala je preporuke o sadržaju plana dekomisije. Prema ovim preporukama, u planu dekomisije mora biti razmotreno sledeće:

- Opis objekta i lokacije, njegov radiološki status, kontaminirane površine, delovi, sistemi i oprema, podaci o radu objekta, odstupanja od normalnog pogona;
- Strategija dekomisije;
- Upravljanje projektom dekomisije;
- Opis dekomisionih aktivnosti;
- Nadzor, kontrola i održavanje sistema i opreme tokom dekomisije;
- Upravljanje radioaktivnim i neradioaktivnim otpadom;
- Procena cene dekomisije i načina finansiranja;
- Analiza sigurnosti dekomisije;
- Procena uticaja na životnu sredinu;
- Zaštita od zračenja tokom dekomisije;
- Zaštita na radu tokom dekomisije;
- Upravljanje sistemom kvaliteta;
- Plan za delovanje u slučaju vanrednog događaja;
- Fizička zaštita i bezbednost objekta;
- Evidencija nuklearnog materijala;
- Završni radiološki pregled objekta i lokacije.

Ovde je važno napomenuti da iako postoje međunarodno prihvaćene preporuke u vezi sadržaja plana dekomisije i ostalih dokumenata od značaja za sigurnost, svaka država ima ekskluzivno pravo da svojim pravnim aktima odredi obim i sadržaj dokumenata kojima se dokazuje sigurnost dekomisije.

#### Prelazni period

Prelaznim periodom naziva se period između prestanka rada objekta i početka implementacije dekomisije. Ovaj period predstavlja prelaz iz redovnog pogona objekta tokom kog se obavljaju aktivnosti za koje je objekat prvenstveno namenjen u proces dekomisije objekta, obavljajući pritom aktivnosti neophodne za sigurnu i bezbednu implementaciju odabrane strategije. Aktivnosti koje se obavljaju tokom ovog perioda u velikoj meri ne zavise od odabrane strategije dekomisije i imaju za cilj pripremu objekta za sledeću fazu uz uklanjanje potencijalnih rizika za profesionalno izložena lica, stanovništvo i životnu sredinu. Od velike je važnosti da planiranje prelaznog perioda, kao i u slučaju planiranja dekomisije, počne još tokom rada objekta

---

i da se sve planirane aktivnosti sprovode u najkraćem mogućem roku nakon prestanka rada objektakako bi se obezbedio efikasan prelazak uz efikasno korišćenje resursa.

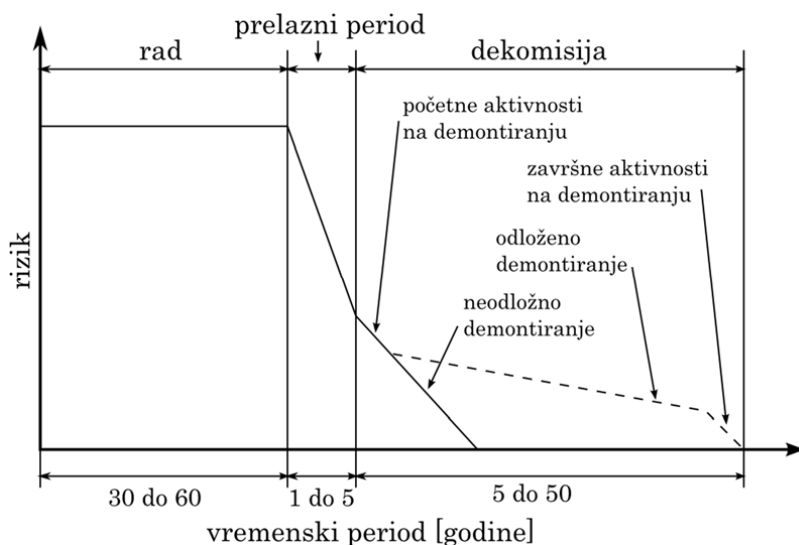
Aktivnosti koje se obavljaju tokom prelaznog perioda uključuju:

- Radiološku karakterizaciju objekta;
- Uklanjanje svih nuklearnih materijala i isluženog nuklearnog goriva iz objekta. Ovo je od posebnog značaja za nuklearne reaktore i kritična postrojenja i ima cilj da spreči dostizanje kritičnosti;
- Uklanjanje radioaktivnog otpada iz objekta;
- Uklanjanje procesnih tečnosti;
- Stabilizacija kontaminiranih i aktiviranih površina delova, opreme i sistema;
- Gašenje i uklanjanje opreme i sistema čije korišćenje nije dalje planirano;
- Uklanjanje komunalnog otpada i nepotrebnih predmeta. Ovo je od posebnog značaja zbog smanjenja rizika od nastanka i širenja požara.
- Uspostavljanje uslova neophodnih za prelazak u sledeću fazu životnog veka objekta. Ove aktivnosti sastoje se ili od mera dugoročnog zatvaranja objekta koje uključuju i kontrolu i održavanje objekta ako je odloženo demontiranje odabrano kao strategija dekomisije ili od priprema za obavljanje neodložnog demontiranja.

Trajanje prelaznog perioda iznosi od jedne do pet godina iako postoje slučajevi kada je iz određenih razloga kao što su nedostatak finansijskih sredstava, nedostak strategije dekomisije i nedostak ovladavanja tehnologija dekomisije, prelazni period trajao i znatno duže. Odnos rizika i tipične dužine trajanja rada, prelaznog perioda i dekomisije objekta dati su na Slici 4.1.

Aktivnosti koje se obavljaju tokom prelaznog perioda i njihovo planiranje zavise i od strategije dekomisije. Ukoliko je odloženo demontiranje izabrano kao strategija dekomisije, pažnju treba posvetiti izmeni i nadogradnji sistemaneophodnih za sigurnost nuklearnih objekta u dužem vremenskom periodu a pre početka dekomisije. U ove sisteme obično spadaju svi infrastrukturni elementi kao i elementi nuklearne bezbednosti. Ukoliko je kao strategija dekomisije izabrano neodložno demontiranje onda se već tokom prelaznog perioda može početi sa demontažom pojedinih sistema.

---



Slika 4.2. Odnos rizika i tipične dužine trajanja rada, prelaznog perioda i dekomisije objekta

#### Radioloska karakterizacija

Planiranje i implementacija dekomisije zahteva poznavanje osobina kontaminiranih i aktiviranih površina, delova, opreme i sistema unutar objekta. Za potrebe planiranja dekomisije potrebno je odrediti ne samo prisustvo aktivacije ili kontaminacije već i inventar prisutnih radionuklida i njihovu aktivnost. Da bi se svi neophodni podaci pribavili, neophodno je po prestanku rada objekta izvršiti radiološku karakterizaciju. Kako je aktivacija ograničena samo na objekte u kojima se koriste nuklearni materijali, kao što su na primer nuklearni reaktori, upotrebom računarskih kodova za simulaciju transporta čestica može se, sa određenom tačnošću, odrediti stepen aktivacije. S druge strane, kontaminacija može biti posledica redovnog rada ali i odstupanja od redovnog rada i njeno prisustvo se može očekivati na svim mestima na kojima su postojali, ili i dalje postoje, radioaktivni materijali. Iz tog razloga, kontaminaciju je moguće odrediti samo praktičnim metodama utvrđivanja prisustva radionuklida i određivanjem njihove aktivnosti.

Cilj radiološke karakterizacije je prikupljanje podataka o prostornoj raspodeli, aktivnosti, fizičkom i hemijskom stanju svih radionuklida prisutnih u objektu. Radiološkakarakterizacija se sastoji od pregleda postojećih podataka o objektu, proračuna, *in situ* merenja, i uzorkovanja i



analize uzoraka. Na osnovu podataka prikupljenih tokom radiološke karakterizacije mogu se planirati aktivnosti koje će biti obavljene tokom dekomisije kao što su:

- Metode i tehnike dekontaminacije i demontiranja;
- Mere zaštite profesionalno izloženih lica, stanovništva i životne sredine tokom obavljanja dekomisije;
- Karakteristike generisanog radioaktivnog otpada;
- Cena dekomisije.

Prilikom planiranja radiološke karakterizacije u obzir se moraju uzeti činiooci kao što su potrebno vreme i finansijska sredstva. Takođe ne treba zaboraviti da se radiološka karakterizacija obavlja sa ciljem pronalaženja i identifikovanja aktivnosti radionuklida i kontaminacije što zahteva da se mere zaštite od zračenja moraju sprovesti i tokom karakterizacije.



Slika 4.3 Radiološka prospekcija zidova u nuklearnom objektu,  
<https://www.orau.org/environmental-assessments-health-physics/success-stories/georgia-tech-neely-research-center.aspx>

### Tehnike dekomisije

Proces dekomisije sastoji se od postupaka dekontaminacije i demontiranja. Dekontaminacija je postupak uklanjanja ili smanjenja nivoa kontaminacije sa površina, premeta, opreme i sistema. Korišćenje odgovarajućih tehnika dekontaminacije može dovesti do smanjenja doza koje prime profesionalno izložena lica tokom aktivnosti koje slede u okviru dekomisije kao i do smanjenja količine generisanog radioaktivnog otpada.

---

Razlozi za sprovođenje dekontaminacije su:

- Smanjenje aktivnosti radionuklida prisutnih u objektu, na opremi ili sistemima a sa ciljem smanjenja nivoa radijacionog polja u objektu i smanjenja rizika od neželjenog oslobađanja radioaktivnosti u životnu sredinu. U slučaju kada je kao strategija dekomisije odabrano odloženo demontiranje, dugotrajna konzervacija objekta i potrebe za održavanjem zahtevaju da se sva nevezana kontaminacija ukloni a da se vezana kontaminacija fiksira ili zakloni odgovarajućim zaštitnim sredstvima kako bi se smanjila mogućnost neželjenog uticaja na okolinu;
- Smanjenje količine radioaktivnog otpada koji se generiše tokom dekomisije. Dekontaminacija kontaminiranih površina, predmeta, opreme i sistema može dovesti do njihove klasifikacije u nižu kategoriju otpada (npr. nisko aktivni umesto srednje aktivnog otpada) ili do nivoa koji omogućava oslobađanje od regulatorne kontrole;
- Potreba za demontiranjem u kasnijim fazama dekomisije koje može biti značajno olakšano ukoliko se demontiraju prethodno dekontaminirane površine, predmeti, oprema ili sistemi.

Tokom postupka dekontaminacije potrebno je voditi računa o generisanju sekundarnog radioaktivnog otpada. Pre početka dekontaminacije, pitanje upravljanja radioaktivnim otpadom koji tokom ovog procesa nastane mora biti rešeno a svaka tehnika dekontaminacije mora biti opravdana sa stanovišta upravljanja radioaktivnim otpadom odnosno količina generisanog sekundarnog radioaktivnog otpada mora biti onoliko mala koliko je to moguće. Kako svaki postupak dekontaminacije uključuje izlaganje profesionalno izloženih lica, i ovaj vid izlaganja mora biti onoliko nizak koliko je to razumno moguće, i to u svim fazama dekomisije. Bitno je i da prilikom sprovođenja dekontaminacije ne dođe do njenog širenja ili do pretvaranja kontaminacije u formu kojom je daleko teže upravljati.

Postoji velik broj tehnika dekontaminacije. One variraju od jednostavnih i lako dostupnih tehnika korišćenih u svakodnevnom životu, preko tehnika koje su primenu našle i u drugim oblastima industrije do tehnika specifičnih za primenu u dekontaminaciji radiološki kontaminiranih površina. Izbor tehnike dekontaminacije različit je od slučaja do slučaja i zavisi od vrste kontaminanta, njegove rasprostranjenosti (i površinski i u dubinu), dostupnosti infrastrukture za upravljanje generisanim sekundarnim radioaktivnim otpadom itd. Tehnike dekontaminacije se dele na:

- Neinvazivne;
  - Hemijske;
-

- Elektrohemijske;
- Mehaničke;
- Termičke.

#### Neinvazivne tehnike dekontaminacije

Neinvazivne tehnike dekontaminacije su one tehnike koje isključuju trenje i samim tim ne dovode dooštećenja kontaminiranih površina. Ove tehnike su najefikasnijena površinama koje nisu porozne a obuhvataju jednostavne metode čišćenja koje se primenjuju u svakodnevnom životu ali i neke naprednije tehnike i to:

- Usisavanje – primenljivo u svim delovima i svim tipovima objekata. Industrijski usisivači koji se koriste kod ove tehnike moraju biti opremljeni odgovarajućim filtrima. Korišćenjem samohodnih usisivača sa daljinskim komandama moguće je dodatno smanjiti doze profesionalno izloženih lica;
  - Brisanje – koristi se za dekontaminaciju površina različitih veličina. Dostupan je veliki broj različitih tehnika koje se mogu koristiti zavisno od dimenzija i karakteristika površine koja je predmet dekontaminacije. Moguće je korišćenje i različitih tečnosti za brisanje ali samo u slučajevima kada je rešenoupravljanje tečnim sekundarnim radioaktivnim otpadom;
  - Pranje – pošto ova tehnika generiše tečni sekundarni radioaktivni otpad može se koristiti samo u slučajevima kada je rešeno upravljanje tečnim radioaktivnim otpadom;
  - Ribanje – tehnika koja se koristi za dekontaminaciju glatkih površina. Nedostatak ove tehnike je što tokom ribanja kontaminanti mogu prodreti u pukotine;
  - Gelovi za dekontaminaciju – ovom tehnikom kontaminant postaje vezan u gel koji se potom jednostavno ukloni sa površine odnoseći sa sobom i kontaminante. Osim za dekontaminaciju, ova tehnika može biti primenjena i za vezivanje kontaminanata koji se ne mogu ukloniti;
  - Ultrazvučno čišćenje – koristi se za čišćenje malih komponenti i delova sistema i opreme potapanjem u vodu koja pod dejstvom ultrazvuka mehanički uklanja kontaminaciju;
  - Čišćenje parom – u praksi se ova tehnika pokazala efikasnijom od običnog pranja.
-



Slika 4.4 Neinvazivna dekontaminacija gelom

Ranije su korišćene i neke druge metode dekontaminacije od kojih se odustalo ili zbog nedovoljne efikasnosti ili zbog drugih faktora. Jedan od primera je dekontaminacija freonom od koje se odustalo zbog negativnih efekata freona po životnu sredinu.

Hemijske tehnike dekontaminacije

Hemijske tehnike dekontaminacije osim kontaminanata uklanjaju i sloj kontaminirane površine. Dubina do koje se vrši dekontaminacija odnosno

uklanja sloj kontaminirane površine zavisi od dubine na kojoj se kontaminacija nalazi. U nekim slučajevima dovoljno je ukloniti samo sloj boje sa kontaminirane površine i sa njom i svu kontaminaciju.

Cilj hemijske dekontaminacije je uklanjanje radioaktivnosti koja je ugrađena ukontaminiranu površinu. Ovo se postiže rastvaranjem sloja površine koja se dekontaminira a koji se nalazi ispod kontaminacije. Radioaktivni materijal će pritom biti ili rastvoren u korišćenom sredstvu zajedno sa određenom količinom podloge.

Za potrebe hemijske dekontaminacije koristi se veći broj sredstava čiji izbor zavisi od hemijskih svojstava kontaminanata, hemijskih svojstava podloge i generisanja sekundarnog radioaktivnog otpada i dostupnosti metoda za upravljanje otpadom. Najčešće se za dekontaminaciju koriste neorganske kiseline kao što je azotna kiselina adodavanje kompleksirajućih sredstava pomaže u rastvaranju nekih radionuklida. Postoji više metoda korišćenja hemijskih sredstava za dekontaminaciju od kojih su najčešće korišćena:

- Propuštanje hemijskog sredstva za dekontaminaciju kroz sistem – ova metoda primenljiva je samo u slučajevima kada je kontaminirani sistem već namenjen prolasku hemikalija;
- Prskanje sredstva – ova metoda mora biti praćena odgovarajućim sakupljanjem sredstvaza dekontaminaciju posle prskanja;
- Primena sredstva u formi pene – sredstvo u formi pene duže ostaje na kontaminiranoj površini povećavajući time vreme delovanja. Pena se potom može sakupiti usisavanjem a kada se zapremna pene smanji, smanjuje se i količina sekundarnog otpada;
- Primena sredstva u formi gela – deluje slično kao i kada je sredstvo u formi pene, jedina razlika je što se gel ne može usisavati već se uklanja ispiranjem;
- Potapanje kontaminiranog predmeta u hemijsko sredstvo – koristi se za kontaminirane predmete i delove opreme koji se mogu potopiti u hemijsko sredstvo. Ova metoda nije pogodna za *in situ* primenu.

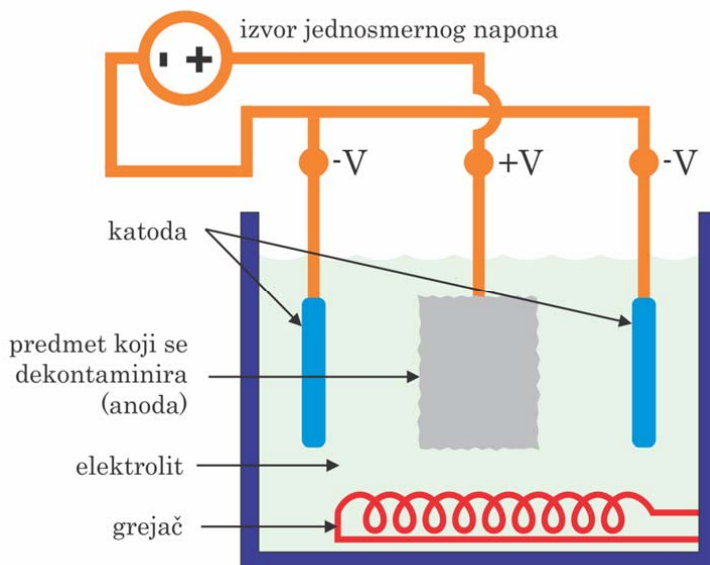
Treba imati u vidu da hemijske tehnike dekontaminacije mogu dovesti do hemijskih reakcija, pri čemu nastaju nove supstance (npr. helacioni agensi) koji mogu imati negativan uticaj na generisani sekundarni otpad (radioaktivni i neradioaktivni) sprečavajući njegovo neograničeno ispuštanje u životnu sredinu.

Elektrohemijske tehnike dekontaminacije

Poput hemijskih tehnika dekontaminacije i elektrohemijskm tehnikama uklanja se površinski sloj kontaminirane površine zajedno sa prisutnom

---

kontaminacijom. Postupak koji se koristi za dekontaminaciju naziva se elektrolitičko poliranje i sličan je postupku koji se koristi za oblaganje metala niklom ili plemenitim metalima. Materijal koji se dekontaminira i koji ima ulogu anode potapa se u elektrolit dok funkciju katode ima elektroda od nerđajućeg čelika ili bakra ili posuda u kojoj se vrši dekontaminacija. Tokom dekontaminacije određena količina materijala sa površine predmeta koji se dekontaminira ostaje rastvorena noseći sa sobom i vezanu kontaminaciju iz površinskog sloja.



Slika 4.5. Elektrolitičko poliranje

Elektrohemijske tehnike dekontaminacije pogodne su za dekontaminaciju čelika, nerđajućeg čelika i aluminijuma a sam postupak generiše malu količinu sekundarnog radioaktivnog otpada. Najčešće korišćeni elektroliti za elektrohemijsku dekontaminaciju su:

- Fosforna kiselina ( $H_3PO_4$ );
- Azotna kiselina ( $HNO_3$ );
- Oksalna kiselina ( $H_2C_2O_4$ );
- Sumporna kiselina ( $H_2SO_4$ ).

### Mehaničke tehnike dekontaminacije

U poređenju sa drugim tehnikama dekontaminacije, mehanička dekontaminacija može biti primenjena za dekontaminaciju hrapavih površina ali i materijala kao što su beton i gips a koji se često koriste u izgradnji objekata. Ove metode najčešće se koriste u dekontaminaciji građevinskih delova nuklearnih objekata i omogućavaju kasnije oslobađanje objekta od regulatorne kontrole ili njegovo rušenje konvencionalnim metodama rušenja.

Mehaničke tehnike pogodne su za dekontaminaciju svih vrsta kontaminanata, od slabo vezanih do onih koji su duboko prodrli u kontaminiranu površinu. Količina generisanog sekundarnog otpada je relativno mala a neke metode se mogu uzastopno primenjivati više puta dok se ne dobije željeni stepen dekontaminacije. Moguća je i delimična dekontaminacija delova površina kako bi se uklonila kontaminacija koncentrisana na malim površinama (tzv. *Hot spots*). Mehaničke tehnike se mogu koristiti nezavisno od drugih tehnika ili u kombinaciji sa abrazivnim ili hemijskim tehnikama.

Prilikom primene mehaničkih tehnika dekontaminacije, oslobađa se prašina koja se, ako se ne sakupina pravilan način, može proširiti kroz objekat i time zapravo povećati ukupnu kontaminaciju. Najčešće korišćene mehaničke tehnike dekontaminacije su:

- Dekontaminacija suvim ledom;
- Dekontaminacija ledom;
- Dekontaminacija vodom pod pritiskom;
- Dekontaminacija abrazivnim sredstvima
- Dekontaminacija brušenjem i poliranjem;
- Obijanje;
- Glodanje;
- Upotreba hidrauličnih i pneumatskih čekića.

Dekontaminacija suvim ledom funkcioniše na principu prskanja površine koja se dekontaminira sitnim komadima suvog leda (zaleđenog CO<sub>2</sub>) koji se kreću velikom brzinom. Suvi led se ubrzava uz pomoć vazduha pod pritiskom. Sitni komadi suvog leda prilikom udara u kontaminiranu površinu proizvode abrazivni efekat praćen isparavanjem kojim se uklanja i površinski sloj kontaminirane površine bez upotrebe vode, hemijskih ili abrazivnih sredstava koji bi vezali kontaminaciju i formirali sekundarni radioaktivni otpad. Sva kontaminacija se posle isparavanja CO<sub>2</sub> taloži na podovima

---

prostorije u kojoj je vršena dekontaminacija ili odlazi kroz ventilaciju do odgovarajućih filtra. Ova metoda se primenjuje za dekontaminaciju blaže kontaminiranih površina ili u slučajevima kad kontaminacija nije čvrsto vezana.

Dekontaminacija ledom slična je dekontaminaciji suvim ledom, osim što se umesto suvog leda koriste kristali zaleđene vode ubrzani vazduhom pod pritiskom. Voda koja nastane topljenjem leda uklanja kontaminaciju u vezanom ili rastvorenom obliku. Budući da kontaminacija može biti zadržana u vodi, ova metoda zahteva i da upravljanje tečnim sekundarnim radioaktivnim otpadom bude rešeno. Međutim, ova metoda kao i metoda dekontaminacije suvim ledom nije pogodna za temeljno uklanjanje vezane kontaminacije.



Slika 4.6. Dekontaminacija vodom pod pritiskom

Dekontaminacija vodom pod pritiskom se može primeniti na više načina, u zavisnosti od pritiska vodenog mlaza. Što je pritisak vode veći, veća je i efikasnost dekontaminacije. Ova metoda se može koristiti i za inicijalnu dekontaminaciju veoma kontaminiranih površina. Efikasnost dekontaminacije se može povećati dodavanjem abrazivnih sredstava u vodu kao i dodavanjem sistema za prečišćavanje vode koja se posle prečišćavanja ponovo može upotrebiti za dekontaminaciju. Nedostatak ove tehnike je stvaranje kontaminiranih aerosola usled udara vode velikom brzinom u kontaminiranu površinu.



Dekontaminacija abrazivnim sredstvima bazira se na mehaničkom uklanjanju kontaminacije abrazivnim sredstvima. U cilju smanjenja generisanja sekundarnog otpada, abrazivno sredstvo koje sadrži kontaminaciju je neophodno sakupiti i reciklirati. Zavisno od primene, kaoabrazivna sredstava mogu se koristiti sledeći materijali:

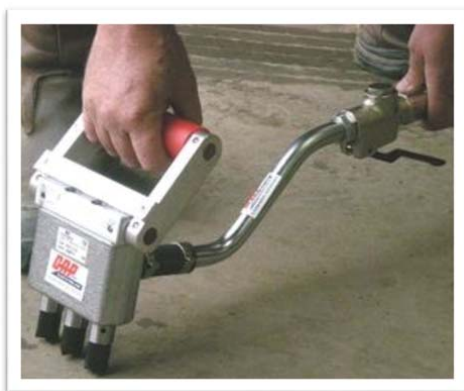
- Minerali (magentit ili pesak);
- Čelik;
- Staklo;
- Plastika;
- Prirodni materijali (npr. pirinčane ljuske, mlevena kora kokosovog oraha itd.).

U cilju povećanja efikasnosti ove metode, bitno je izabrati abrazivno sredstvo koje, uzimajući u obzir površinu koja se dekontaminira, ima dug životni vek i veliku snagu dekontaminacije. Ova metoda se može primeniti na svim površinama, osim površina koje abrazivno sredstvo može da ošteti. Najefikasnija je na ravnim površinama a primenljiva je i na površinama koje su teško dostupne.

Prilikom dekontaminacije ovom metodom, bitno je kontrolisati kontaminaciju vazduha. Ovo se obično postiže usisavanjem nastale prašine usisvačem sa odgovarajućim filterima. Kako bi problemi sa statičkim električitetom bili izbegnuti, površina koja se dekontaminira ovom metodom mora biti uzemljena.

Dekontaminacija brušenjem i poliranjem koristi dostupne alate i nastavke za ove alate u vidu abrazivnih traka, papira i brusnih ploča a primenjiva je na različite tipove površina. Usled značajnog stvaranja prašine, ova metoda dekontaminacije mora se sprovesti u zatvorenom prostoru opremljenom adekvatnom ventilacijom.

---



Slika 4.7. Alat za dekontaminaciju obijanjem (klesanjem)

Obijanje ili klesanje je suva, mehanička metoda dekontaminacije tokom koje se gornji sloj betona namenjen za dekontaminaciju drobi. Ova metoda je bazirana na primeni alata koji ima radne glave od čvrstog materijala (kao što je volfram-karbid) koje se velikom brzinom translaciono ili rotaciono kreću. Prilikom obijanja ne koriste se voda, abrazivna ili hemijska sredstva. Iz navedenog razloga, generisani sekundarni otpad sastoji se samo od izdrobljenog kontaminiranog betona koji se sakuplja usisivačem opremljenim filterskom jedinicom i pakuje u odgovarajuće kontejnere. Metoda je najefikasnija za uklanjanje tankih slojeva betona debljine do 25 mm.

Ova metoda posebno se preporučuje u slučajevima kada je:

- potrebno ograničiti ili izbegavati generisanje kontaminacije u vazduhu;
- planirano ponovo koristiti betonsku površinu posle dekontaminacije;
- potrebno smanjenje zapremine sekundarnog radioaktivnog otpada;

potrebno dekontaminirati materijal posle demontiranja kako bi se mogao ispustiti u životnu sredinu.

Površina dekontaminirana ovom metodom je hrapava a hrapavost zavisi od glave alata koja se koristi.



Slika 4.8. Dekontaminacija glodanjem

Glodanje je još jedna pretežno mehanička metoda koja se koristi za dekontaminaciju betonskih površina. Alat koji se koristi sastoji se od većeg broja dijamantskih diskova poređanih jedan pored drugog i čije rotiranje izaziva eroziju betona do dubine od nekoliko milimetara. Alat kojim se vrši glodanje skida sloj po sloj podloge koja se dekontaminira dok se ne dostigne željeni stepen dekontaminacije i vrlo često ima primenu u dekontaminaciji podova objekta. Dijamantski diskovi usled brzog okretanja čine dekontaminiranu površinu glatkom omogućavajući tako lakše proveru efikasnosti dekontaminacije.

---

Za kontaminaciju pozicioniranu duboko u površini materijala, do sada navedene metode nisu dovoljno brze i zahtevaju značajno radno angažovanje. Iz ovog razloga, za dekontaminaciju podova i zidova kod kojih je kontaminacija stigla do dubina od nekoliko desetina centimetara koriste se hidraulični i pneumatski čekići.

Pregled tehnika dekontaminacije dat je u Tabeli 4.1

Termičke tehnike dekontaminacije

Velike količine nisko kontaminiranog metala mogu se dekontaminirati procesom topljenja. Tokom topljenja kontaminacija se izdvaja i ostaje u šljaci omogućavajući da se pretopljeni metal reciklira i ponovo upotrebi. Nedostatak ove metode je njena visoka cena.

Tabela 4.1 Alternativne tehnike dekontaminacije

Tehnika	Tipična primena
Uklanjanje površinskog sloja mehaničkim putem	Beton
Primena abrazivnih sredstava	Beton, drugi građevinski materijali
Glodanje	Metal, olovne cigle
Vodeni mlaz, sa i bez abrazivnih sredstava	Beton i drugi materijali
Vibracioni sekač	Beton
Mikrotalasi	Beton
Ekspozivna sredstva	Beton
Peskiranje	Obojene površine

### Tehnike demontiranja

Proces demontiranja predstavlja rasklapanje ili rušenje i uklanjanje bilo kog elementa, sistema ili komponente tokom dekomisije. Demontiranje se odnosi na bilo koji deo objekta, od delova infrastrukturnih sistema pa sve do rušenja kompletne građevinske konstrukcije. Elementi koje se demontiraju se obično sastoje od armiranog betona velike debljine ili metala kao što su čelik, nerđajući čelik, liveno gvožđe i aluminijum, različitog oblika i debljine, a stepen kontaminacije i aktivacije kontaminiranih struktura varira od blago kontaminiranih do veoma aktivnih.

Svrha demontiranja može biti:

- Uklanjanje sistema i komponenti ili njihovih delova;
- Uklanjanje visokoaktivnih delova;
- Smanjenje dimenzija;
- Prilagođavanje kriterijumima za transport ili prijem radioaktivnog otpada.

Tehnike demontiranja svode se na sečenje i usitnjavanje struktura, sistema i komponenti. One se prema načinu na koji deluju mogu podeliti na:

- Mehaničke tehnike;
- Termičke tehnike;
- Električne tehnike.

Tabela 4.2. Tehnike za demontiranje i njihova osnovna svojstva

Tehnika	Materijal	Debljina (mm)	Brzina demontiranja	Kontrola sekundarnog radioaktivnog otpada
Sečenje plamenom	Čelik, metal	5-600	Brza	Srednja ili dobra
Sečenje plazma lukom	Metal	≤130	Brza	Srednja
Sečenje laserom	Metal	≤10	Brza	Srednja
Termičko koplje (autogeno sečenje)	Beton, metal	≤2000	Srednja	Veoma visoka
Sečenje testerom	Metal	10-3000	Srednja	Loša
Mlevenje	Beton, metal	5-500	Niska ili srednja	Srednja ili visoka
Dijamantaska ploča	Beton, metal	≥50	Niska ili srednja	Srednja ili visoka
Vodeni mlaz sa abrazivima	Beton, metal	≤500	Niska ili srednja	Srednja ili visoka

Ove tehnike mogu se klasifikovati i prema materijalu od kog su načinjene strukture koje se demontiraju i to na:

- Tehnike za demontiranje metalnih struktura;

- Tehnike za demontiranje betonskih struktura.

Pregled tehnika demonstriranja dat je u Tabeli 4.2.

Mehaničke tehnike za demontiranje

Mehaničke tehnike za demontiranje koriste mehaničku silu za razdvajanje metalnih ili betonskih struktura na manje delove, generišući pri tom relativno malu količinu sekundarnog radioaktivnog otpada.

U mehaničke tehnike za demontiranje metalnih struktura ubraja se primena sledećih alata:

- Hidrauličnih i pneumatskih makaza;
- Lančanih, tračnih, kružnih i ubodnih testera i testera sa dijamantskom žicom;
- Brusilica;
- Glodalica za metal;
- Kružnih sekača cevi.

U mehaničke tehnike za demontiranje betonskih struktura spada korišćenje sledećih alata:

- Testera sa dijamantskim sečivima;
- Hidrauličkih i pneumatskih čekića;
- Ostalih konvencionalnih građevinskih mašina za demontiranje i rušenje.

Različite vrste makaza za metal koriste se za pravolinijsko sečenje metalnih predmeta, cevi i raznih komponenti. Pored makaza koje seku pravolinijski, za sečenje metalnih ploča koriste se i makaze koje rade na principu bušenja niza rupa razdvajajući tako metalnu ploču na dva dela. Obe vrste makaza pogodne su za sečenje metalnih predmeta debljina do 10mm. Za deblje predmete koriste se pneumatske makaze.

Za demontiranje metalnih struktura koriste se i različite testere i to: lančane, tračne, kružne, ubodne i testere sa dijamantskom žicom. Ove testere se koriste za sečenje metalnih predmeta dimenzija i do 3 metra koliko može iznositi dužina testere.



Slika 4.9. Makaze i uređaji za sečenje metala



Slika 4.10. Testere za sečenje metala

Za demontiranje betonskih predmeta koriste se testere sa dijamantskim sečivima u obliku žica, lanca i kružnih noževa. Testere sa dijamantskom žicom našle su veliku primenu zbog svoje sposobnosti da se lako prilagode strukturi koja se demontira. Ovim metodama može se seći beton debljine do 30 cm.



Slika 4.11. Testere za sečenje betona

Ravne i ugaone brusilice primenu su našle u sečenju metalnih predmeta debljine do 5 mm a koriste se i za korekciju oštih ivica koje nastaju posle upotrebe drugih metoda sečenja. Upotrebom ove tehnike obično se stvaraju varnice kojima se može proširiti kontaminacija.



Slika 4.12. Ravna i ugaona brusilica za sečenje metala



Glodalice za metal pored primene koje imaju dekontaminaciji, koriste se i za formiranje manjih otvora u predmetu koji se demontira uklanjajući na taj način kontaminaciju skoncentrisanu na tom mestu. Ova tehnika se obično koristi kod tanjih metalnih predmeta.



Slika 4.13. Noževi glodalice za metal

Kružni sekači se koriste za sečenje metalnih cevi. Ovi sekačirotiraju oko cevi skidajući u svakoj rotaciji tanak sloj metala. Na ovaj način odvajaju se kontaminirani delovi cevi ili se cevi seku na manje delove dimenzija pogodnih za smeštanje u kontejnere za skladištenje ili odlaganje.



Slika 4.14. Kružni sekač cevi

Hidraulički i pneumatski čekići koji su primenu našli u dekontaminaciji koriste se i za demontiranje betonskih delova objekata. Ove metode rade na principu usitnjavanja betona i posebno su korisne kod demontiranja velikih betonskih delova.

Ostala konvencionalna građevinskamehanizacija za demontiranje i rušenje koristi se u završnim fazama demontiranja ili na delovima objekta gde je kompletna kontaminacija uklonjena. Ona je u procesu dekomisije obično primenu našla u rušenju pojedinih strukturailičitavih objekata.



Slika 4.15. Pneumatski čekić

Termičke tehnike za demontiranje

Termičke tehnike za demontiranje su obično brže od mehaničkih tehnika a i oprema je manjih dimenzija što omogućava njihovo lakše postavljanje na robotizovne sisteme za potrebe daljinske manipulacije. Nedostaci ove tehnike su stvaranje aerosola i praškastih kontaminanata koji mogu biti potencijalno štetni po profesionalno izložena lica i životnu sredinu a mogu dovesti i do širenja kontaminacije. Iz ovoga sledi da objekti namenjeni za termičku dekontaminaciju moraju biti opremljeni ventilacionim sistemima sa odgovarajućim filtrima za vazduh. U termičke tehnike za demontiranje metalnih struktura spadaju:

- Sečenje plazmom;
- Sečenje plamenom;
- Toplotno sečenje;
- Kontrolisane eksplozije.

U termičke tehnike za demontiranje betonskih struktura spadaju:

---

- Toplotno sečenje
- Kontrolisane eksplozije.

Sečenje plazmom koristi princip stvaranja mlaza jonizovanog gasa (plazme) prolaskom struje između volframske elektrode i površine provodnog metala. Električni luk koji se na taj način stvara izaziva lokalno topljenje metala koji tada može biti uklonjen. Ovo je brz proces koji se može obavljati i u prisutvu vode. Glavni nedostatak ove metode predstavlja teško sakupljanje aerosola koji u značajnim količinama nastaju topljenjem kontaminiranog metala.



Slika 4.16. Oprema za sečenje plazmom



Slika 4.17. Oprema za sečenje plamenom

Sečenje plamenom ili gasno sečenje koristi smešu gorivnog gasa (obično acetilen, propan ili vodonik) i kiseonika kako bi se stvorio plamen visoke temperature. Obično se koristi za sečenje čelika dok je za sečenje nerđajućeg čelika znatno manje efikasna zbog visoke tačke topljenja oksida hroma

---

prisutnog u nerđajućem čeliku. Ova metoda se zbog svoje jednostavnosti i brzine često koristi za nekontaminirane ili slabo kontaminirane predmete i površine. Princip rada metode je baziran na oksidaciji metala, a oksid se potom plamenom uklanja sa površine čime se stvara rez. Gasno sečenje može se koristiti za sečenje čelika debljine do 60 cm. Ova metoda može se koristiti i za sečenje u prisustvu vode.

Toplotno sečenje naziva se i sečenje toplotnim kopljem (thermic lance) zbog velike dužine čelične cevi koja se koristi za sečenje betona, čelika, livenog gvožđa i ostalih metalnih predmeta. Od posebne je koristi prilikom rušenja objekata, u radovima gde su vibracije i buka neprihvatljivi ili gde je brzina obavljana posla od velikog značaja. Ova metoda je posebno efikasna za armirani beton. Oprema koja se koristi je jednostavna, a sastoji se od čelične cevi kroz koju prolazi kiseonik i u kojoj se nalaze čelične šipke. Veoma često se dodaju i aluminijumske šipke i šipke od magnezijuma kako bi povećale toplotnu snagu. Kada se na jednom kraju sistema njemu preda dovoljna temperatura on postaje snažan toplotni izvor u kom se stvara tečna šljaka koja seče materijal kroz koji prolazi. Ovako stvorena temperatura kreće se i do 2500 stepeni celzijusa omogućavajući topljenje betona. Ova metoda nije preporučljiva za demontiranje veoma aktiviranih ili kontaminiranih predmeta, imajući u vidu da dolazi do stvaranja velike količine aerosola.



Slika 4.18. Rušenje rashladnog tornja kontrolisanom eksplozijom

Iako često zastupljene u konvencionalnom građevinarstvu, kontrolisane eksplozije nisu toliko zastupljene pri dekomisiji objekata u kojima su bili ili su i dalje prisutni radioaktivni materijali i to zbog sigurnosnih ograničenja.

Ove metode ipak su našle primenu za demontiranje dekontaminiranih metalnih cevi i rezervoara kao i betonskih struktura kao što su rashladni tornjevi u nuklearnim elektranama i slično.

Električne tehnike za demontiranje

Električne tehnike za demontiranje primenjlive su samo za provodne odnosno metalne strukture. U ove metode spadaju:

- Elektroerozivna obrada;
- Sečenje laserom.

Sečenjemetalapostupcima elektroerozivne obrade se ostvaruje putem učestalihelektričnih pražnjenja između predmeta koji se seče i alata, koji u ovom slučaju imaju ulogu elektroda. U zaavisnosti od sredine u kojoj se odvija pražnjenje, moguće je razlikovati dva vida ovog postupka i to:

- Elektroimpulsno sečenje;
- Elektrolučno sečenje.

Elektroimpulsno sečenje je proces u kojem se materijal uklanja periodičnim (impulsnim) električnim pražnjenjima u dielektričnoj tečnosti. Nedostaci ovog procesa su mala brzina, velika zavisnost od kvaliteta dielektrične tečnosti kao i značajan uticajrastojanja između elektrode i predmeta koji se seče. Ova metoda ima posebno značajnu primenu tokom pripreme za korišćenje drugih metoda i to za demontiranje spojeva, varova ili manjih komponenti.

Elektrolučno sečenje je električna tehnika za demontiranje metalnih struktura koja funkconiše na principu sečenja metala prolaskom struje između elektrode i predmeta koji se seče. Jačina električne struje koja se koristi u ovom procesu je i do 2000 A. Električni luk koji se stvori izmeđuelektrode i predmeta, razvija visoku temperaturu i topi metal. Otopljeni metal se uklanjavodom koja teče duž elektrode.U ovom postupku koriste se elektrode različitih prečnika, od grafita ili metala. Ova metoda se može primeniti na materijale debljina većih od 10mm, cevi,sklopove cevi, predmetesložene geometrije i slično.

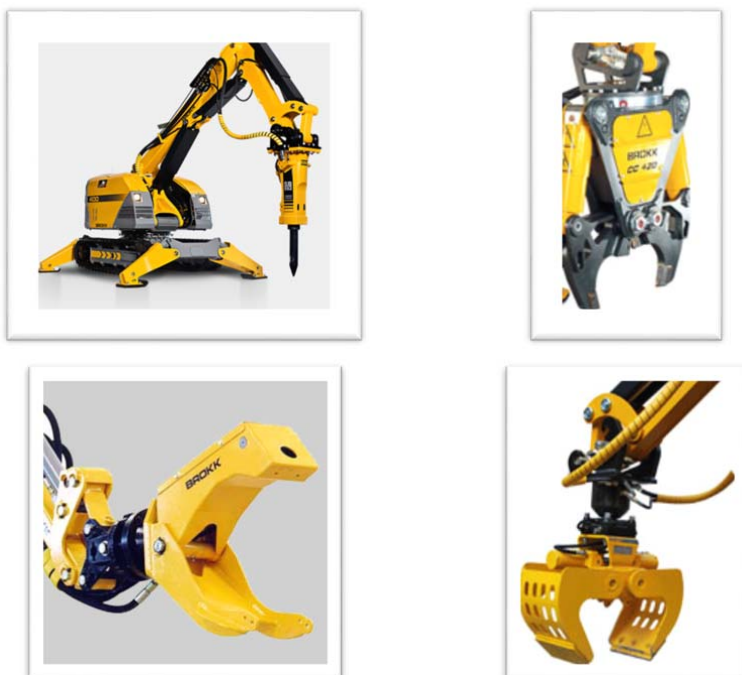
Laseri se mogu koristiti za veoma precizno sečenje gotovo svih vrsta materijala. Ova metoda se bazira na principu topljenja metala usmerenim laserskim snopom. Otopljeni metal se sa mesta sečenja uklanja pomoću vazduha ili nekog drugog gasa. Ova metoda veoma je korisna u dekomisiji, prvenstveno zbog svoje efikasnosti, mogućnosti da seče gotovo svaki materijal, na primer beton, čelik i gvožđe, ne stvara vibracije a osim sistema

---

za uklanjanje otopljenog materijala, ne stavra ni buku. Ova metoda generiše veoma male količine sekundarnog radioaktivnog otpada. Korišćenje ove metode u dekomisiji, iako veoma korisno, ograničeno je malom dubinom sečenja, malom brzinom i visokom cenom.

#### Daljinske tehnike dekontaminacije i demontiranja

U slučajevima kada jačina doze u radnoj sredini ograničava vreme boravka profesionalno izloženih lica, za dekontaminaciju ili demontiranje površina, sistema ili komponenti mogu se koristiti daljinski kontrolisani alati. Postoji više varijanti ovih alata koje uključuju i specijalizovane robote za rad u poljima sa povšenom jačinom doze zračenja od kojih su neke prikazane na Slici 4.19. Raznovrsnost veličina u kojima se ovi alati izrađuju omogućavaju i da se manjim alatima precizno uklanja kontaminacija sa manjih površina odnosno demontiraju komponente manjih dimenzija.



Slika 4.19. Robotizovani sistem za rad u poljima sa visokom jačinom doze sa dodacima

## Remedijacija

Remedijacijom se nazivaju mere koje se sprovode sa ciljem uklanjanja ili smanjenja izlaganja zračenju koje je posledica kontaminacije zemljišta. Posebno su od značaja za lokacije na kojima su se pre dekomisije nalazili objekti u kojima su korišćeni ili čuvani radioaktivni materijali. Ove mere sprovode se kroz aktivnosti koje se odnose na samu kontaminaciju ali i na puteve kojima dolazi do izlaganja. Postoje različite tehnike remedijacije a izbor tehnike zavisi od kontaminanata i puteva kojima dolazi do izlaganja u svakom konkretnom slučaju. Moguća je i kombinacija nekoliko tehnika kako bi se postigao postavljeni cilj u pogledu remedijacije.

Prva faza remedijacije je detaljna radiološka karakterizacija lokacije sa ciljem određivanja površina zemljišta kojese kontaminirane, kontaminanata i njihove aktivnosti kao i potencijalnih područja kontaminiranih drugim vrstama kontaminanata kao što su opasne materije.

Posle detaljne karakterizacije, potrebno je doneti odluku o daljem statusu lokacije odnosno načinu na koji će se postići ciljevi remedijacije. Ovo se može postići izborom jedne od sledećih opcija:

- Ostavljanje lokacije u postojećem stanju uz uspostavljanje programa monitoringa kojim bi se pratilo stanje lokacije. Ova opcija primenljiva je u slučajevima kada se karakterizacijom pokaže da se prirodnim procesima može postići cilj remedijacije. Primena ove opcije mora biti pažljivo praćena kako bi se u slučaju neočekivanog razvoja situacije mogla pokrenuti alternativna opcija;
  - Imobilizacija ili ograničavanje kretanja radioaktivnih kontaminanata što uključuje zadržavanje kontaminanata na mestu na kom se i sad nalaze čime se smanjuje potencijal daljeg širenja kontaminacije i ulazak kontaminanata u aktivne puteve izlaganja;
  - Uklanjanje radioaktivnih kontaminanata sa lokacije, korišćenjem odgovarajućih tehnika što uključuje izdvajanje i koncentraciju kontaminanata a onda njihovo sigurno i bezbedno skladištenje ili odlaganje na drugoj lokaciji.
-

## V. Faze upravljanja radioaktivnim otpadom

---

Mehanizmi za upravljanje radioaktivnim otpadom definisani su nacionalnom zakonskom regulativom a zasnovani su na opštim principima upravljanja radioaktivnim otpadom i međunarodno prihvaćenim standardima. Međutim, sam pristup upravljanju radioaktivnim otpadom može serazlikovati u zavisnosti od konkretne situacije, potreba i specifičnosti svake zemlje, postojećih i planiranih količina radioaktivnog otpada, postojeće i planirane infrastrukture i percepcije stanovništva i drugih faktora.

Upravljanje radioaktivnim otpadom sačinjavaju različite administrativne i tehničke aktivnosti u koje se ubrajaju sakupljanje, obrada koja uključuje predtretman, tretman i kondicioniranje, zatim skladištenje, transport i odlaganje radioaktivnog otpada, uključujući i ispuštanje efluenata u životnu sredinu i oslobađanje radioaktivnog otpada u životnu sredinu. Upravljanje radioaktivnim otpadom podrazumeva i karakterizaciju i pripreme radove za transport, prijem radioaktivnog otpada, uvođenje u bazu podataka i izdavanje potvrde o prijemu/uskladištenju radioaktivnog otpada.

Efikasan program upravljanja radioaktivnim otpadom obuhvata niz koraka koji su shematski prikazani na Slici 5.1. Prema prikazanoj shemi, upravljanje radioaktivnim otpadom počinje kontrolom generisanja otpada na mestu nastanka a završava se njegovim odlaganjem, pri čemu karakterizacija, obrada, skladištenje i transport mogu biti zastupljeni u bilo kojoj fazi upravljanja radioaktivnim otpadom.

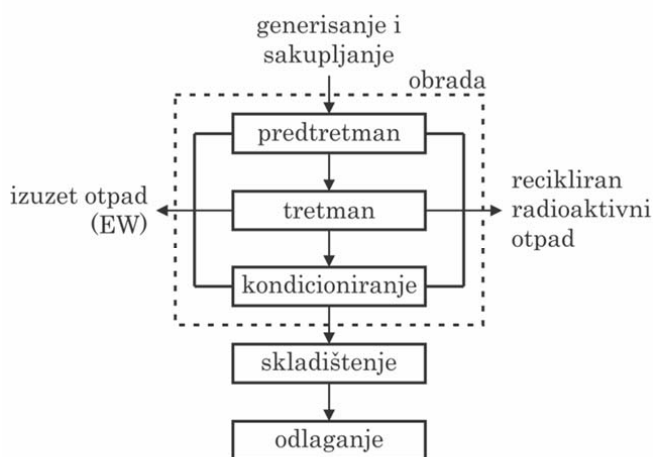
Pored odlaganja, na Slici 5.1 su prikazane četiri osnovne faze u upravljanju radioaktivnim otpadom a koje se odnose na period pre njegovog odlaganja. U faze pre odlaganja ubrajaju se predtretman, tretman i kondicioniranje koje zbirno nazivamo obradom radioaktivnog otpada a koje su detaljno opisane u poglavlju V. Skladištenje radioaktivnog otpada detaljno je opisano u poglavlju VI. Kao posledica obrade, radioaktivni otpad može biti

---



reklasifikovan kao izuzet, i kao takav biti uklonjen iz procesa upravljanja u bilo kom trenutku.

Niz koraka koji prethode odlaganju obuhvataju sve aktivnosti koje moraju biti sprovedene pre nego što radioaktivni otpad bude smešten u odlagalište. Za svaki od ovih koraka vezuje se određeni radijacioni rizik i on zahteva pažljivu primenu potrebnih mera zaštite od zračenja u cilju zaštite profesionalno izloženih lica i stanovništva. Mere zaštite od zračenja odnose se na kontrolu spoljašnjeg izlaganja i prevenciju širenja kontaminacije.

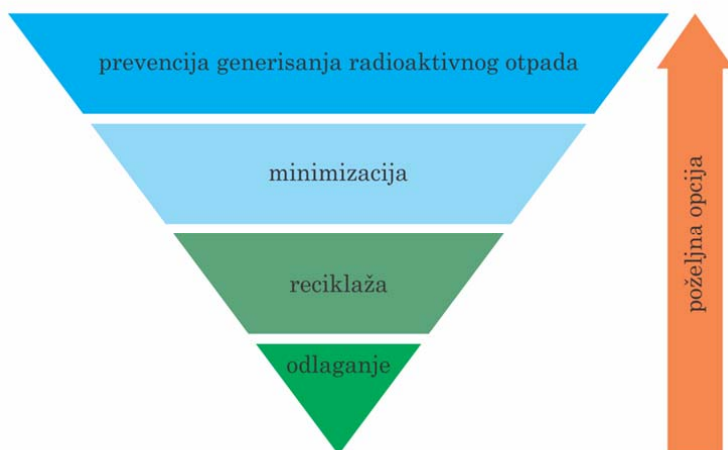


Slika 5.1. Osnovne faze upravljanja radioaktivnim otpadom

Odlaganje predstavlja finalni korak u upravljanju radioaktivnim otpadom a podrazumeva i ispuštanje efluenata u životnu sredinu ili smeštanje otpada u odlagalište, bez namere da se on ponovo iznosi. Shema na Slici 5.2 ukazuje da je odlaganje najbolja opcija samo u slučajevima kada se sve opcije iscrpe odnosno kada se jedino odlaganjem može obezbediti dugoročna sigurnost. Praktično, odlaganje je poželjna opcija samo kada je jedina moguća.

Pod minimizacijom radioaktivnog otpada podrazumevaju se aktivnosti, postupci i procedure koje se preduzimaju sa ciljem smanjenja njegove količine i aktivnosti do granice do koje je to razumno moguće. Minimizacija se primenjuje u svim fazama životnog veka nuklearnog ili radijacionog objekta od projektovanja do dekomisije kao i tokom svih aktivnosti u kojima se koriste radioaktivni materijali. Sastoji se od kontrole i smanjenja generisanja

radioaktivnog otpada, tretmana sa ciljem smanjenja aktivnosti, reciklaže, dekontaminacije i ponovnog korišćenja materijala, uzimajući u obzir količinu sekundarnog radioaktivnog otpada nastalog u procesu dekontaminacije. Programi minimizacije radioaktivnog otpada postali su značajni 70-tih godina 20. veka i dominantno su usmereni na smanjenje generisanjanisko aktivnog radioaktivnog otpadačija je zapremina najveća u nuklearnom gorivnomciklusu. Minimizaciju radioaktivnog otpada ne treba mešati sa postupcima za smanjenje zapremine radioaktivnog otpada.



Slika 5.2. Shema poželjnih opcija u upravljanju radioaktivnim otpadom

Reciklaža podrazumeva regeneraciju i ponovno korišćenje materijala za nove proizvode i ima pozitivan uticaj na eksploataciju mineralnih sirovina i zagađenje životne sredine koje nastaje kao posledica eksploatacije prirodnih resursa. Međutim, u slučaju kontaminacije radioaktivnim materijama, reciklaža ima ograničenu primenu, pre svega zbog veoma komplikovanog postupka izdvajanja radionuklida iz kontaminiranog materijala. Jedan od primera reciklaže u nuklearnom gorivnom ciklusu jeste reciklaža isluženog nuklearnog goriva. Više od 400 nukleranih reaktora u više od 30 zemalja proizvede oko 400 GW električne energije godišnje. Tipično, nuklearna elektrana prizivede oko 30 t isluženog nuklearnog goriva za svaki GW proizvedene električne energije. Tokom eksploatacije u nuklearnim reaktorima izgara samo deo nukleranog goriva, dok značajan deo ostaje na kraju upotrebe u formi isluženog nuklearnog goriva. Ekstrakcija preostalog uranijuma i plutonijuma iz isluženog nuklearnog goriva je jedan od najboljih

primera reciklaže u nuklearnoj industriji, i bez obzira na složenost postupka, značajno doprinosi smanjenju toksičnosti radioaktivnog otpada. Drugi primer je dekontaminacija metalnog radioaktivnog otpada pretapanjem. Ovako dobijeni odlivci se mogu, ako nigde drugo, koristiti ponovo u nuklearnoj industriji za izradu kontejnera za radioaktivni otpad, delova nuklearnih reaktora i opreme i slično.

## Predtretman

Inicijalna faza u upravljanju radioaktivnim otpadom obuhvata aktivnosti koje se sprovode neposredno nakon nastanka radioaktivnog otpada a u koje spadaju sakupljanje, minimizacija<sup>2</sup>, razvrstavanje (segregacija), hemijsko prilagođavanje i dekontaminacija praćenom skladištenjem ukoliko postoji takva potreba.

Ova faza je veoma značajna u upravljanju radioaktivnim otpadom, budući da obuhvata efikasnu segregaciju otpada na onaj koji može biti izuzet, onaj koji može biti dekontaminiran, onaj koji može biti skladišten do raspada radionuklida kao i na one tokove radioaktivnog otpada kojima se kasnije upravlja na specifičan način kao što su npr. stišljiv ili zapaljiv radioaktivni otpad.

## Razvrstavanje

Razvrstavanje (segregacija) radioaktivnog otpada se obično obavlja na mestu njegovog nastanka. Dalja segregacija može biti neophodna i u kasnijim fazama upravljanja radioaktivnim otpadom. Kriterijumi za segregaciju radioaktivnog otpada baziraju se na sledećim osobinama:

- Aktivni i neaktivni otpad;
- Period poluraspada;
- Vrsta i energija emitovanog zračenja;
- Moguće opcije za obradu.

Segregacija na osnovu perioda poluraspada radionuklida omogućava opciju za privremeno čuvanje radioaktivnog otpada koji sadrži kratkoživeće radionuklide do smanjenja aktivnosti ispod nivoa oslobađanja, kada se

---

<sup>2</sup> Minimizacija predstavlja smanjenje količine i aktivnosti generisanog radioaktivnog otpada kroz procedure i postupke koji dovode do manjeg generisanja radioaktivnog otpada kao i reciklazu i ponovnu upotrebu materijala.

radioaktivni otpad može smatrati izuzetnim, obično bez dodatnog tretmana što smanjuje troškove upravljanja. Čuvanje do raspada radionuklida umanjuje ukupnu zapreminu radioaktivnog otpada koja zahteva specijalno zbrinjavanje, u smislu odlaganja ili ispuštanja u životnu sredinu. Na primer, kratkoživeći radioizotop  $^{99m}\text{Tc}$  perioda poluraspada od 6 h može biti čuvan u određenom vremenu, nakon čega može biti odložen bez posebnih zahteva. Tipično, nakon 10 perioda poluraspada početna aktivnost se smanji 1000 puta ali potrebno naglasiti da vreme neophodno za smanjenje aktivnosti do nivoa oslobađanja zavisi od početne aktivnosti radionuklida.

#### Hemijsko prilagođavanje

U procesu hemijskog prilagođavanja, primenom hemijskih metoda radioaktivni otpad postaje sigurnijiza dalje upravljanje. Primer ovakvog prilagođavanja je dodavanje puferatečnom radioaktivnom otpadu u cilju izmene njegove kiselosti, odnosno smanjenja pH vrednosti.

#### Dekontaminacija

Kontaminacija je svako neplansko ili neželjeno prisustvo radioaktivnih supstanci na površinama ili unutar čvrstih materija, tečnosti ili gasova. Dekontaminacija jeste postupak uklanjanja ili smanjenja nivoa kontaminacije, koji uključuje i mere uklanjanja neposredne opasnosti nastupanja kontaminacije, mere kontrole daljeg širenja kontaminacije, izolacije, sigurnog i bezbednog uklanjanja izvora kontaminacije, kao i radnje vezane za procenu i analizu rizika nastupanja kontaminacije i procenu i analizu štete u životnoj sredini usled kontaminacije. Provera prisustva kontaminacije obavezan je korak prilikom manipulacije kontejnerima za čuvanje radioaktivnog otpada. Pre svake upotrebe kontejnera neophodno je utvrditi prisustvo konatminacijeuzimanjem brisa sa spoljne površine posebno ukoliko je transportovani radioaktivni otpad u tečnom agregatnom stanju. Različiti agensi za dekontaminaciju, počev od blagog rastvora detrdženta do agresivnijih metoda dekontaminacije koje uključuju upotrebu složenih alata, hemijskih jedinjenja i postupaka, mogu biti upotrebljeni za dekontaminaciju ukoliko je prethodno potvrđeno njeno prisustvo.

Različite metode dekontaminacije detaljno su opisane u poglavlju IV.

## Karakterizacija radioaktivnog otpada

Karakterizacija radioaktivnog otpada je određivanje fizičkih, hemijskih i radioloških osobina otpada. Cilj karakterizacije je donošenje odluke o potrebama za prilagođavanjem, obradom, kondicioniranjem, skladištenjem ili odlaganjem radioaktivnog otpada.

Radiološka karakterizacija radioaktivnog otpada podrazumeva kvalitativno i kvantitativno određivanje prisutva pojedinih radionuklida u radioaktivnom otpadu. U zavisnosti od vrste otpada, radionuklida i potrebne tačnosti, različite tehnike mogu biti upotrebljene za radiološku karakterizaciju radioaktivnog otpada. Na primer, merenje jačine doze pruža informaciju o ukupnoj količini gama emitujućih radionuklida u pakovanju radioaktivnog otpada. Međutim, ova metoda ne daje informaciju o vrsti radionuklida i njihovoj aktivnosti. Gamaspektrometrijska merenja daju podatke o vrsti i sadržaju pojedinih radionuklida. Druge tehnike, kao što neutronska radiografija (određivanje količine fisionih produkata pomoć snopa neutrona proizvedenog u neutronskom generatoru), alfa spektroskopija, i metoda tečnog scintilacionog brojača (LSC) mogu biti primenjene za druge klase radionuklida. Nedestruktivne metode su obično poželjnije u odnosu na destruktivne, imajući u vidu da ove metode ne zahtevaju uzorkovanje ili otvaranje pakovanja radioaktivnog otpada.

Hemijska karakterizacija radioaktivnog otpada podrazumeva određivanje hemijskih komponenti i hemijskih osobina radioaktivnog otpada. Najčešće se oslanja na hemijske analize uzoraka radioaktivnog otpada.

Radiološka i hemijska karakterizacija može biti zamenjena informacijom koja potiče iz poznavanja procesa. Na primer, poznavanje vrste i količine radionuklida korišćenih tokom pojedinih radnih operacija, kao i njihovog hemijskog oblika može pomoći u procesu karakterizacije radioaktivnog otpada.

Fizička karakterizacija radioaktivnog otpada obuhvata određivanje fizičkog oblika, čvrstoće, agregatnog stanja i drugih fizičkih osobina koristeći veoma širok spektar tehnika u koje se ubrajaju različite radiografske i ultrazvučne imidžing metode.

---

## Tretman

Tretman radioaktivnog otpada obuhvata aktivnosti čiji je cilj unapređenje radijacione sigurnosti i ekonomičnije upravljanje radioaktivnim otpadom. Tretman podrazumeva izmenu fizičkih i hemijskih svojstava radioaktivnog otpada. Osnovni koncepti u ovom slučaju su:

- Smanjenje zapremine;
- Izmena sastava;
- Uklanjanje radionuklida.

Kao posledica tretmana radioaktivnog otpada može nastati i sekundarni radioaktivni otpad, najčešće u obliku kontaminiranih filtera, jonoizmenjivačkih smola, kontaminiranih tečnosti, alata i zaštitne opreme. Nakon tretmana, neki materijali mogu biti pogodni za dalju upotrebu a neki mogu biti oslobođeni od regulatorne konole kao izuzet otpad. Radioaktivni otpad koji nakon tretmana i dalje sadrži značajne količine radionuklida može biti dodatno tretan ili kondicioniran, uskladišten i potom smešten u odgovarajuće odlagalište. Ovi postupci su detaljno opisani u poglavljima V-VIII.

### Smanjenje zapremine

Smanjenje zapremine je uobičajena aktivnost u okviru tretmana radioaktivnog otpada. Sprovodi se u cilju efikasnijeg tretmana i dalje manipulacije radioaktivnim otpadom. Najčešće se primenjuju dve metode: kompaktiranje (sabijanje) i insinercija (spaljivanje). Faktor smanjenja zapremine (VRF) je parametar kojim se kvantifikuje efikasnost tretmana:

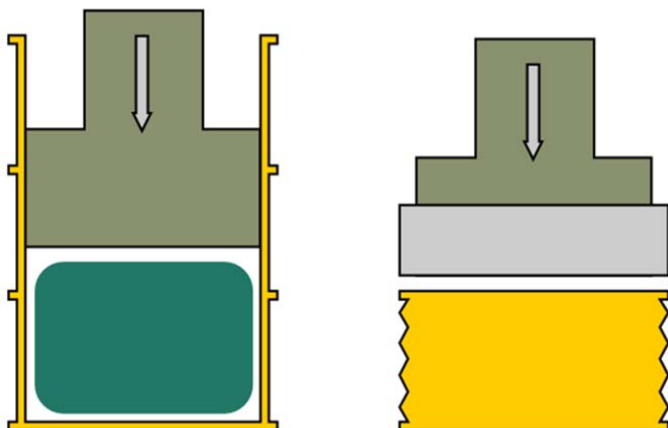
$$VRF = \frac{V_o}{V_f} \quad (5.1)$$

gde je  $V_o$  inicijalna zapremina otpada a  $V_f$  zapremina radioaktivnog otpada nakon tretmana.

### Kompaktiranje

Smanjenje zapremine radioaktivnog otpada primenom visokog pritiska u specijalnim presama naziva se kompaktiranje. Ova metoda smanjenja zapremine može biti primenjena isključivo na stišljive materijale kao što su

papir, staklene ili plastične boce, odeća i tkanine, drvo, aluminijum i drugi metali i metalna burad. U procesu kompaktiranja se ne smanjuje ukupna aktivnost radioaktivnog otpada već samo zapremina, čime se njegova zapreminska aktivnost povećava.

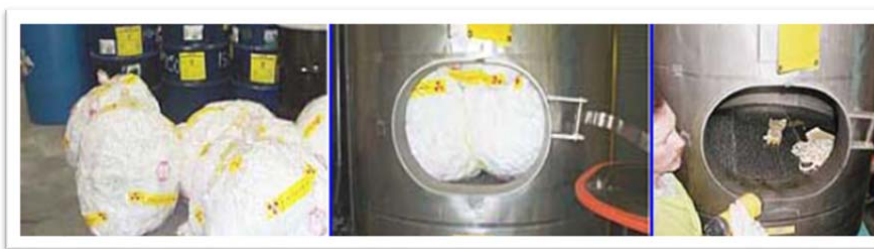


Slika 5.3. Kompaktiranje buradi sa radioaktivnim otpadom

#### Insineracija

Ukoliko se radioaktivni otpad sastoji od zapljivih materijala, insineracija može biti opcija za smanjenje njegove zapremine. Proces insineracije mora biti autorizovan i u skladu sa osnovnim principima zaštite od zračenja. Posebna pažnja mora biti usmerena na doze za profesionalno izložena lica, stanovništvo, kao i na kontrolu ispuštanja gasovitih efluenata.

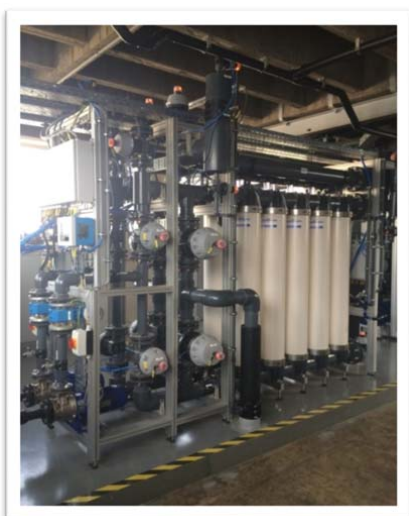
Sekundarni radioaktivni otpad koji nastaje nakon insineracije, a koji se sastoji od pepela i kontaminiranih filtara i sadrži koncentrovane radioaktivne materije, nalazi se u čvrstom stanju i može biti dodatno tretiran, uskladišten i odložen. Međutim, ukoliko je radioaktivni otpad spaljen zajedno sa većim zapreminama neaktivnog otpada, koncentracija aktivnosti ostatka može biti umanjena usled efekta razblaživanja.



Slika 5.4. Insineracija radioaktivnog otpada

#### Izmena sastava

Izmena sastava vrši se primenom različitih hemijskih metoda za izmenu sastava radioaktivnog otpada kao što su precipitacija rastvorenih čvrstih materija iz velikih zapremina tečnog radioaktivnog otpada. Nakon precipitacije, može biti primenjen i postupak flokulacije u kojem se sitne čestice iz procesa precipitacije grupišu u veće formacije. Ovakav vid tretmana primenjuje se uglavnom na veće zapremine tečnog radioaktivnog otpada nastalog u proizvodnji radioizotopa ili prizvodnji elementa retkih zemalja iz ruda koje sadrže prirodne radionuklide.



Slika 5.5. Oprema za tretman tečnog radioaktivnog otpada jonskom izmenom



### Uklanjanje radionuklida

Uklanjanje radionuklida iz radioaktivnog otpada moguće je u procesima sedimentacije, isparavanja, filtracije ili jonske izmene. Posledica ovakve obrade radioaktivnog otpada koncentrisanje radionuklida u manjim zapreminama u vidu taloga ili jonoizmenjivačkih smola.

### Kondicioniranje

Kondicioniranje radioaktivnog otpada predstavlja transformaciju otpada u oblik pogodan za dalju manipulaciju, transport, skladištenje i odlaganje. Najčešće metode korišćene za kondicioniranje radioaktivnog otpada jesu imobilizacija i pakovanje.

Imobilizacija ima za cilj prevenciju migracije radionuklida u životnu sredinu i postiže se konverzijom radioaktivnog otpada u čvrste forme koje sadrže radionuklide, zadržavaju ih i sprečavaju kontaminaciju životne sredine. Imobilizacija obuhvata solidifikaciju i vitrifikaciju, odnosno pakovanje radioaktivnih materijala običnom cementne, bitumenske ili staklene formacije. Ovi procesi se nazivaju i cementiranje, bitumenizacija i vitrifikacija, respektivno.

Imobilisan radioaktivni otpad se za potrebe manipulacije, skladištenja i transporta radionuklida pakuje u odgovarajuće kontejnere. Ukoliko prvi kontejner ne može da obezbedi potreban nivo zaštite od zračenja, upotrebljava se i drugi, dodatni kontejner.

U bilo kom procesu imobilizacije u kojem se koriste radioaktivni materijali, operativni uslovi mogu postati veoma komplikovani, posebno ukoliko se primenjuje daljinsko upravljanje i ukoliko oprema zahteva specijalno održavanje. Stoga se prednost daje opremi koja je robusnija i jednostavnija. Metode imobilizacije radioaktivnog otpada mogu biti veoma raznovrsne a izbor najpogodnije metode zavisi od osobina radioaktivnog otpada i kriterijuma za prihvatanje radioaktivnog otpada u slučaju dugoročnog skladištenja ili odlaganja.

### Skladištenje radioaktivnog otpada

Prilikom izbora opcije za skladištenje radioaktivnog otpada neophodno je razmotriti celokupan lanac faza u upravljanju radioaktivnim otpadom, imajući u vidu da prosto razmatranje objekta namenjenog za skladište i

---

načina skladištenja kontejnera sa radioaktivnim otpadom nije dovoljno. Različiti faktori doprinose izboru najpogodnije opcije koja garantuje robusno, sigurno i bezbedno skladištenje radioaktivnog otpada.

Skladištenje radioaktivnog otpada može biti zasnovano na dva različita koncepta:

- a) ukoliko je radioaktivni otpad smešten u kontejnere koji obezbeđuju adekvatnu zaštitu od zračenja, onda samo skladište može biti projektovano i izgrađeno kao običan industrijski ili montažni objekat jer nema značajnu funkciju u smislu zaštite od zračenja;
- b) ukoliko je radioaktivni otpad nije kondicioniran ili su kontejneri u koje je smešten takvi da ne pružaju adekvatnu zaštitu od zračenja (neadekvatan šilding, narušena hermetičnost itd), onda skladište mora biti projektovano tako da obezbedi adekvatnu zaštitu od zračenja.

Skladištenje radioaktivnog otpada sačinjavaju različiti elementi kao što su oblik radioaktivnog otpada koji može biti prihvaćen za skladištenje, kontejneri, struktura objekta skladišta, ventilacioni sistem, oprema za manipulaciju radioaktivnim otpadom, radiološki monitoring i režim inspekcije i održavanja. Različiti koncepti skladišta zahtevaju i različite kombinacije ovih parametara, posebno uzimajući u obzir i evoluciju skladišta tokom njegovog rada. Problematika skladištenja radioaktivnog otpada detaljno je opisana upoglavljju VII.

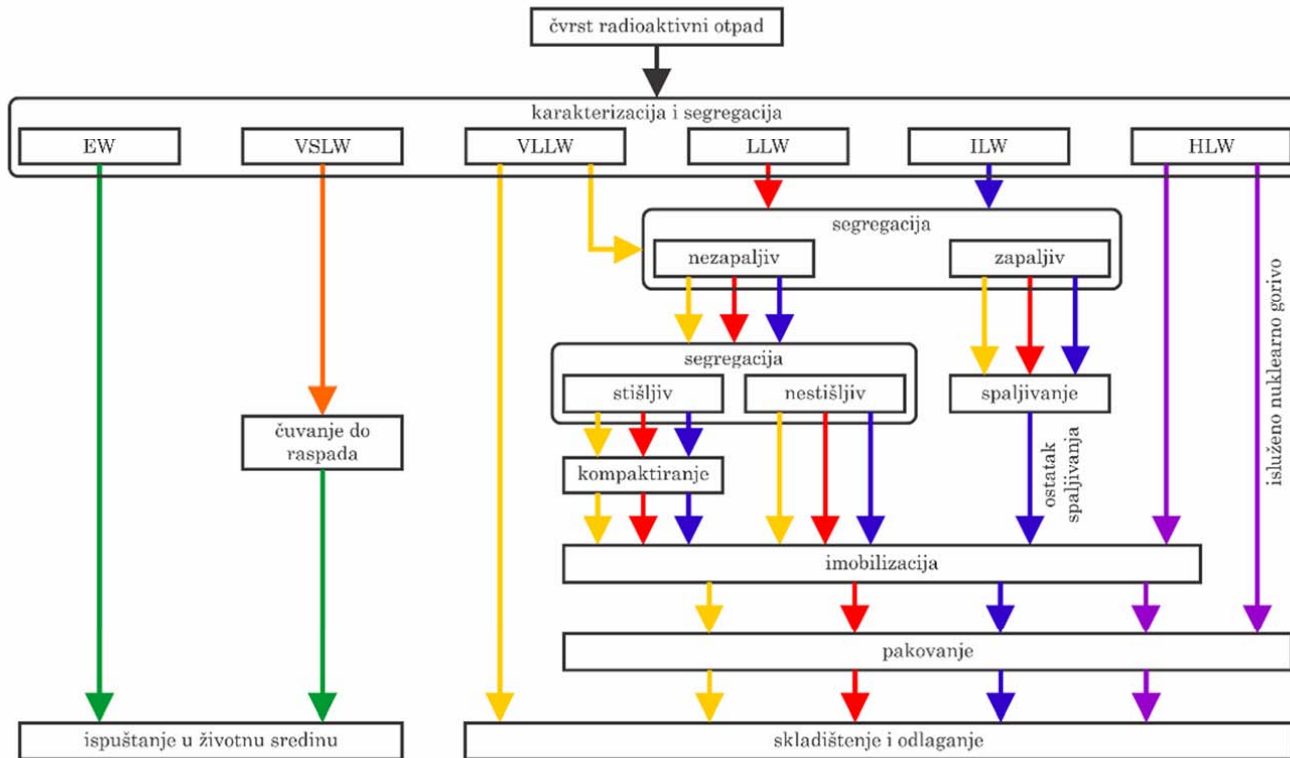
## Odlaganje radioaktivnog otpada

Odlaganje radioaktivnog otpada je skup aktivnosti za trajno smeštanje radioaktivnog otpada, bez namere za njegovo ponovno iznošenje.

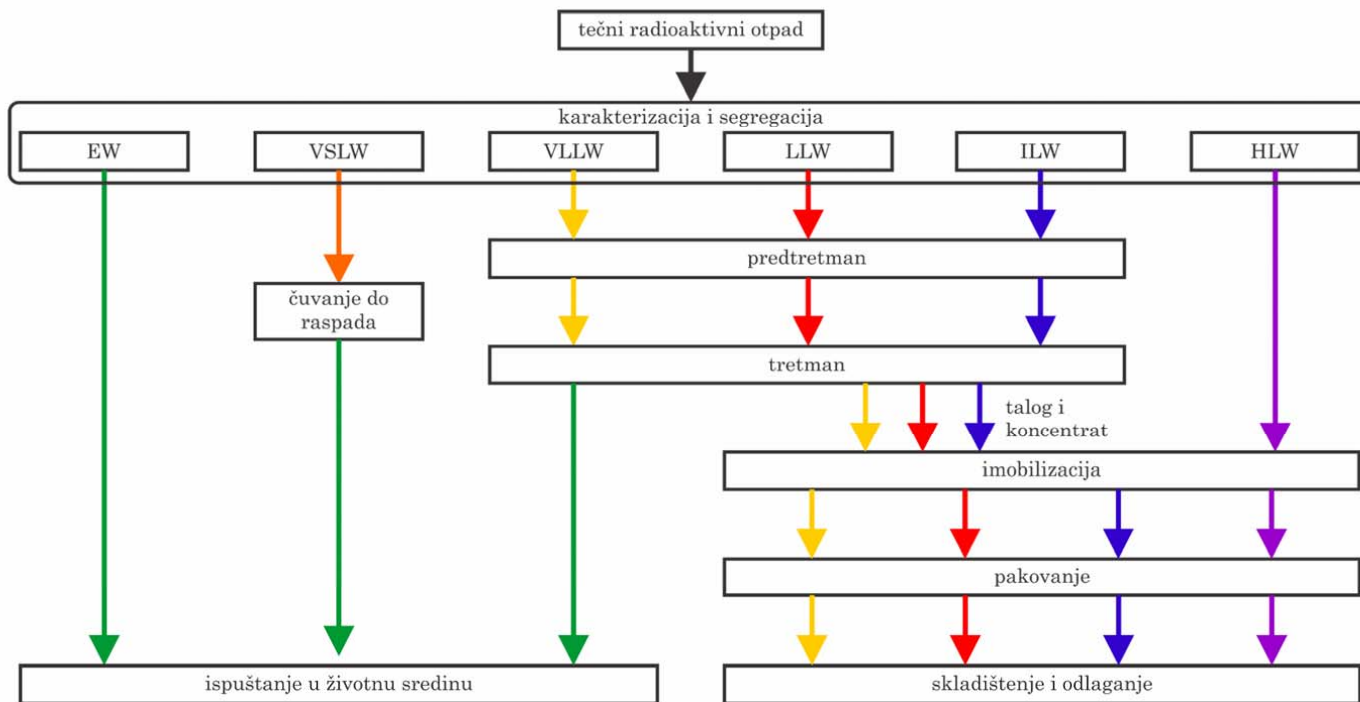
Opcije za odlaganje radioaktivnog otpada zavise od vrste otpada i perioda poluraspada radionuklida zastupljenih u radioaktivnom otpadu. Radioaktivni otpad niske aktivnosti može biti smešten u odlagališta bliska površini, dok npr. dugoživeći visoko aktivni radioaktivni otpad zahteva odlaganje u duboka geološka odlagališta, pozicionirana na dubini koja obezbeđuje dugoročnu, efikasnu izolaciju radioaktivnih materija od životne sredine. Većina odlagališta koncipirana je koristeći sistem višestrukih barijera koji garantuje adekvatnu radijacionu sigurnost i bezbednost. Koncept višestrukih barijera obuhvata oblik radioaktivnog otpada, kontejnere, blisko okruženje odlagališta (*near field*) i geološku formaciju u kojoj se odlagalište

nalazi (*far field*), pri čemu svaki od ovih elemenata ima funkciju u prevenciji migracije radionuklida u životnu sredinu.

Na Slici 5.6 i 5.7 prikazana je osnovna shema upravljanja čvrstim i tečnim radioaktivnim otpadom, respektivno. Problematika odlaganja radioaktivnog otpada detaljno je opisana u poglavlju VIII.



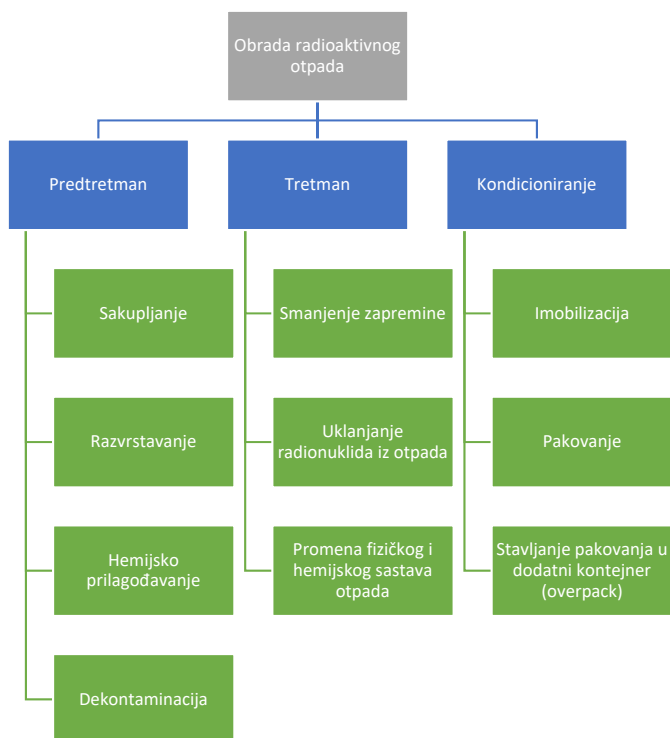
Slika 5.6. Shematski prikaz procesa upravljanja čvrstim radioaktivnim otpadom



Slika 5.7. Shematski prikaz procesa upravljanja tečnim radioaktivnim otpadom

## VI. Obrada radioaktivnog otpada

Obrada radioaktivnog otpada podrazumeva sve radnje kojima se menjaju njegove karakteristike i uključuje aktivnosti predtretmana, tretmana i kondicioniranja radioaktivnog otpada. Na Slici 6.1 prikazane su pojedine faze obrade radioaktivnog otpada.



Slika 6.1. Pojedine faze obrade radioaktivnog otpada

Pod predtretmanom radioaktivnog otpada podrazumevaju se one aktivnosti koje prethode tretmanu radioaktivnog otpada kao što su sakupljanje, razvrstavanje (segregacija), hemijsko prilagođavanje radioaktivnog otpada i dekontaminacija. U okviru tretmana radioaktivnog otpada obavljaju se aktivnosti promene njegovih karakteristika sa ciljem povećanja njegove sigurnosti ili ekonomičnosti upravljanja radioaktivnim otpadom.

Osnovni ciljevi tretmana su smanjenje zapremine, uklanjanje radionuklida iz otpada i promena njegovog fizičkog i hemijskog sastava. Kondicioniranje predstavlja one aktivnosti koje imaju za cilj pakovanje radioaktivnog otpada na takav način da ispunjava uslove za transport, skladištenje ili odlaganje. U okviru kondicioniranja mogu se vršiti imobilizacija otpada, pakovanje otpada u odgovarajuće kontejnere ili, ukoliko je to potrebno, stavljanje celih pakovanja radioaktivnog otpada u dodatne kontejnere (tzv. *overpack*).

### Predtretman radioaktivnog otpada

Predtretman je prvi korak u upravljanju radioaktivnim otpadom nakon njegovog generisanja. Ova faza upravljanja uključuje sakupljanje, razvrstavanje, hemijsko prilagođavanje radioaktivnog otpada i dekontaminaciju a u nekim slučajevima uključuje i njegovo privremeno čuvanje do sakupljanja dovoljnih količina za tretman. Cilj predtretmana je da se razvrstaju različiti tokovi radioaktivnog otpada odnosno skupovi radioaktivnog otpada koje se mogu tretirati na isti ili sličan način kao i da se potpuno odvoji neradioaktivni otpad i oni materijali koji se, sa ili bez tretmana, mogu reciklirati.

Sakupljanje je postupak koji ima za cilj pakovanje radioaktivnog otpada u odgovarajuće kontejnere u trenutku njegovog generisanja. Iako bi najbolja opcija bila da se tokom sakupljanja obavi i razvrstavanje radioaktivnog otpada to nije uvek slučaj. Ipak, i u takvim situacijama, kada razvrstavanje nije planirano i obavljeno pri sakupljanju, treba voditi računa o razdvajanju nekompatibilnih tipova radioaktivnog otpada i korišćenju odgovarajućih i pogodnih kontejnera. Na ovaj način smanjuje se potreba za kasnijim razdvajanjem ili prepakivanjem radioaktivnog otpada.

Razvrstavanje ili segregacija je postupak u okviru kojeg se radioaktivni otpad razvrstava prema svom agregatnom stanju, kategoriji i tipu. Tip radioaktivnog otpada određuje se uzimajući u obzir kompresibilnost (stišljivost), isparivost, rastvorljivost, zapaljivost, korozivnost i druge fizičke, hemijske i biološke osobine, ukoliko je to od značaja za njegov dalji tretman. Karakteristike radioaktivnog otpada koje mogu biti uzete u obzir prilikom određivanja njegove kategorije su:

- poreklo;
- mogućnost nastanka kritičnosti;
- radiološke karakteristike kao što su karakteristike najznačajnijih radionuklida uključujući njihovu aktivnost, vrstu zračenja, vreme poluraspada kao i produkte njihovog raspada, zatim mogućnost generisanja toplote i prisustvo površinske kontaminacije;
- fizičke osobine kao što su fizičko stanje (tečno, čvrsto ili gasovito), zapremina i masa, mogućnost kompaktiranja, mogućnost disperzije, rastvorljivost, mogućnost mešanja, sadržaj slobodnih tečnosti i slično;
- hemijske osobine kao što su: hemijski sastav, rastvorljivost, potencijalna hemijska štetnost, otpornost na koroziju, korozivnost, organski sastav, zapaljivost, hemijska reaktivnost, mogućnost bubrenja, stvaranje gasova, sorpcija radionuklida i slično;
- biološke osobine u koje spadaju potencijalna biološka štetnost i biološko nagomilavanje;
- ostali faktori kao što su količina generisanja u jedinici vremena i fizička rasprostranjenost.



Slika 6.2. Razvrstavanje radioaktivnog otpada

Kao što je već naglašeno, najefikasnija opcija jeda se razvrstavanje obavi tokom sakupljanja radioaktivnog otpada, na mestu na kom je on i nastao. Na taj način se smanjuje izlaganje profesionalno izloženih lica i izbegava neželjeno mešanje različitih klasa radioaktivnog otpada koje može značajno



otežati kasniji tretman. I pored ovoga, u značajnom broju slučajeva, radioaktivni otpad se razvrstava u objektima gde se on tretira ili skladišti. Razvrstavanje se u takvim slučajevima vrši u posebnim prostorijama, montažnim šatorima ili digestorima u kojima se održava pritisak niži od atmosferskog i pritiska u okolnim prostorijama ili na stolovima za razvrstavanje zavisno od radioloških osobina otpada.

Hemijsko prilagođavanje se vrši radi prilagođavanja hemijskog sastava radioaktivnog otpada kasnijem tretmanu, kondicioniranju, skladištenju, transportu ili odlaganju. U svrhu hemijskog prilagođavanja vrši se promena kiselosti ili baznosti (pH vrednost), uklanjanje nekih komponenti iz radioaktivnog otpada, dodavanje hemikalija radi promene ponašanja otpada tokom kasnijih faza upravljanja i slično.

Dekontaminacija omogućava uklanjanje radioaktivnosti sa predmeta ili objekata sa ciljem njihovog dovođenja u stanje u kom ispunjavaju uslove za ponovno korišćenje, ispuštanje u životnu sredinu ili narednu fazu upravljanja radioaktivnim otpadom. Dekontaminacijom se generiše sekundarni radioaktivni otpad koji takođe treba tretirati. Pre donošenja odluke o dekontaminaciji u obzir treba uzeti i odnos cene dekontaminacije i cene svih kasnijih faza upravljanja radioaktivnim otpadom, mogućnost i dostupnost infrastrukture za upravljanje sekundarnim otpadom i doze koje tokom dekontaminacije prime lica koja je obavljaju. O dekontaminaciji je više reči bilo u poglavlju IV.

### Tretman radioaktivnog otpada

Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima, osnovni ciljevi tretmana radioaktivnog otpada su:

1. smanjenje zapremine radioaktivnog otpada;
2. uklanjanje radionuklida iz radioaktivnog otpada;
3. promena fizičkog i hemijskog sastava radioaktivnog otpada.

Primeri tretmana radioaktivnog otpada su spaljivanje (insineracija) i kompaktiranje čvrstog radioaktivnog otpada kao postupci u kojima dolazi do smanjenja zapremine, zatim uparavanje, filtriranje ili jonska izmena tečnog radioaktivnog otpada u kojima se uklanjaju radionuklidi i neutralizacija, taloženje ili flokulacija tečnog radioaktivnog otpada kojima dolazi do promene njegovog fizičkog i hemijskog sastava. Često se nekoliko ovakvih tehnika koriste u kombinaciji kako bi obezbedili efikasan tretman radioaktivnog otpada.

---

Za potrebe ocene efikasnosti tretmana radioaktivnog otpada uveden je i ranije pomenut faktor smanjenja zapremine radioaktivnog otpada (*waste volume reduction factor* - *VRF*) koji se definiše kao odnos zapremine radioaktivnog otpada pre tretmana  $V_0$  i zapremine radioaktivnog otpada nakon tretmana  $V_f$ :

$$VRF = V_0/V_f \quad (6.1)$$

Što je faktor smanjenja zapremine radioaktivnog otpada veći to je proces tretmana efikasniji. Sa druge strane, smanjenje zapremine radioaktivnog otpada neminovno dovodi do povećanja koncentracije radionuklida u preostaloj zapremini što može negativno uticati na sigurnost i cenu upravljanja radioaktivnim otpadom.

Tokom tretmana radioaktivnog otpada dolazi do generisanja nekoliko vrsta sekundarnog radioaktivnog otpada, kao što su kontaminirani filtri, potrošene jonoizmenjivačke smole, lična zaštitna oprema i slično. I ovaj, sekundarni radioaktivni otpad može zahtevati dodatni tretman.

Posle tretmana, radioaktivni otpad, u zavisnosti od njegovih karakteristika i sadržaja radionuklida u njemu, može, ali i ne mora, zahtevati dodatno kondicioniranje kako bi ispunio uslove za sledeću fazu upravljanja – transport, skladištenje ili odlaganje.

Tretman tečnog radioaktivnog otpada

U većini slučajeva, tretman tečnog radioaktivnog otpada ima za cilj da tretirani otpad razdvoji na dva dela: jedan deo male zapremine u kojoj je skoncentrisana većina radionuklida i drugi deo veće zapremine u kojem je količina radionuklida dovoljno mala da omogući njegovo ispuštanje u životnu sredinu.

Faktor dekontaminacije (*DF*) koji se postiže tretmanom tečnog radioaktivnog otpada definiše se kao odnos koncentracije radionuklida u tečnom radioaktivnom otpadu pre tretmana ( $A_0$ ) i koncentracije radionuklida u delu veće zapremine koji je posle tretmana planiran za ispuštanje u životnu sredinu ( $A_f$ ):

$$DF = A_0/A_f \quad (6.2)$$

---



Slika 6.3. Tretman tečnog radioaktivnog otpada

Najčešće korišćene metode za tretman tečnog radioaktivnog otpada su uparavanje, hemijska precipitacija, sorpcija i jonska izmena i membranske metode kao što su elektrodijaliza, mikro-filtracija, ultra-filtracija, nano-filtracija i reverzna osmoza. U Tabeli 6.1. prikazani su faktori dekontaminacije nekih metoda za tretman tečnog radioaktivnog otpada. U praksi se obično koristi kombinacija nekoliko navedenih metoda, kako bi se postigao najbolji ukupni faktor dekontaminacije za ukupnu alfa i/ili ukupnu beta/gamma aktivnost radioaktivnog otpada koji se tretira, na primer uparavanje, iza kog sledi jonska izmena kako bi se postigao što veći koeficijent dekontaminacije.

Tabela 6.1. Dekontaminacioni faktori nekih metoda za tretman tečnog radioaktivnog otpada

Metoda	Faktor dekontaminacije
Uparavanje	$10^4 - 10^6$
Hemijska precipitacija	$10 - 10^2$ za $\beta$ i $\gamma$ emitere, $10 - 10^3$ za $\alpha$ emitere
Jonska izmena sa organskim jonoizmenjivačima	$10 - 10^3$
Jonska izmena sa neorganskim jonoizmenjivačima	$10 - 10^4$
Elektrodijaliza	$10^2 - 10^3$
Ultra-filtracija	$10^2$
Reverzna osmoza	$10^2 - 10^3$

## Uparavanje

Uparavanje je metoda za tretman tečnog radioaktivnog otpada, kojom se postiže visok faktor dekontaminacije reda  $10^4$  do  $10^6$  i dobro koncentrisanje radionuklida u suvom ostatku posle uparavanja. Čista voda uklanja se iz radioaktivnog otpada u vidu pare, ostavljajući suvi ostatak koji ne može da ispari a u kom ostaju skoncentrisane soli i većina radionuklida. Prisustvo isparivih radionuklida kao što su tricijum i neki oblici joda u radioaktivnom otpadu smanjuje faktor dekontaminacije uparavanja.



Slika 6.4. Oprema za uparavanje radioaktivnog otpada

Uparavanje tečnog radioaktivnog otpada sa niskim sadržajem soli (1 – 5 g/l) obično se izvodi u dve faze. U prvoj fazi se vrši dekontaminacija a u drugoj koncentrisanje radionuklida. Uparavanje tečnog radioaktivnog otpada sa visokim sadržajem soli (do 400 g/l) obično se sprovodi u jednoj fazi.

Postrojenja u kojima se vrši uparavanje proizvode tokom tretmana tečnog radioaktivnog otpadaparuru koja se posle kondenzovanja obično može direktno ispustitiu životnu sredinu, i suvi ostatak u kom je zadržan najveći deo radionuklida i koji se za potrebe skladištenja ili odlaganja može dodatno tretirati i potom smestiti u odgovarajuće kontejnere.

Glavni nedostaciovie tehnike tretmana su visokacena opreme i njene velike dimenzije, troškovi za utrošenu električnuenergiju i održavanje,visoka temperatura koja se razvija tokom rada, pojava korozije i taloženje neželjenog materijala, posebno soli, na dnu uređaja za uparavanje.

Uparavanje je jedna od najefikasnijih tehnika za tretman radioaktivnog otpada sa relativno visokim sadržajem soli kao i za tretman efluenta koji sadrže azotnu kiselinu, posebno u slučajevima kada je neophodno postići veliki faktor dekontaminacije.

Hemijska precipitacija

Procesom hemijske precipitacije talože se nečistoće promenom pH vrednosti, elektrooksidacijom ili koprecipitacijom korišćenjem koagulanata kao što su gvožđe- ili aluminijum-sulfat.

Tipičan postupak hemijske precipitacije uključuje četiri faze:

1. Dodavanje reagenasa i prilagođavanje pH vrednosti kako bi se formirao talog;
2. Koagulacija i flokulacija;
3. Sedimentacija;
4. Izdvajanje čvrstih materija iz tečnosti.

Oksidacija primenom reagenasa je poseban slučaj koagulacije u kojoj se oksidirajući reagensi, na primer kalijum permanganat, dodaju tečnom radioaktivnom otpadu koji se tretira ciljem uništavanja organskih nečistoća ili promene valentnosti multivalentnih jona posle precipitacije. Elektrokoagulacija je proces pod kojim se podrazumeva odvajanje čvrstih čestica od rastvora, uz stvaranje koagulanata elektrolitičkim rastvaranjem anode sačinjene od aluminijuma ili gvožđa. Tokom procesa elektrokoagulacije na katodi dolazi do izdvajanja vodonika koji izlazi iz sistema i čestica koje se sa koagulantima izdvajaju na površini vode, zbog čega se ovaj proces često naziva elektroflotacija. Prednosti elektrokoagulacije su visoka parcijalna efikasnost uklanjanja, jednostavnost tretmana, relativno mali troškovi i mogućnost automatizacije. Elektrooksidacija koristi razlaganje organskih nečistoća pod dejstvom hipohlorita, nastalih na anodama pri prolasku električne struje između elektroda u rastvoru koji sadrži hloride – anjone hlora nastale priključivanjem elektrona atomu hlora. Ozonizacija se primenjuje u cilju razlaganja organskih nečistoća ubacivanjem ozona u tečni otpad koji se tretira. Ozon ima jako oksidišuće dejstvo i brzo oksidiše organske materije.

Hemijskom precipitacijom dolazi do formiranja taloga te se stoga moraju primeniti dodatne fizičke metode njegovog odvajanja od ostatka tečnosti. Jedna od metoda razdvajanja taloga od tečnosti je i sedimentacija koja podrazumeva držanje otpada u odgovarajućem sudu kako bi se suspendovane čvrste čestice iz rastvora koncentrisale na dnu pod dejstvom gravitacije. Radionuklidi prisutni u tečnom radioaktivnom otpadu su posle

tretmanaskoncentrisani u vlažnom čvrstom talogu znatno manje zapremine koji se lako odvaja od ostatka tečnosti. Ovako dobijen talog ima znatno veću specifičnu aktivnost od radioaktivnog otpada pre tretmana.

Faktor smanjenja zapremine radioaktivnog otpada i faktor dekontaminacije koji se mogu postići hemijskom precipitacijom značajnoj meri zavise od načina na koji se izdvaja talog. Tipične metode izdvajanja su sedimentacija i dekantovanje, filtracija ili centrifugiranje. Jedan od problema koji se pojavljuje pri odvajanju većine taloga koji sadrže gvožđe je što se ovakvi talozi izuzetno teško filtriraju zbog svoje želatinaste forme, što zahteva korišćenje znatno složenije i skuplje opreme. Poredeći finansijske aspekte, ukoliko je koncentracija radionuklida u materijalu posle izdvajanja taloga dovoljno niska onda on može biti ispušten u životnu sredinu bez daljeg tretmana, hemijska precipitacija je, kao tehnika tretmana, znatno jeftinija od uparavanja tečnog radioaktivnog otpada.

Hemijska precipitacija je našla značajnu primenu u tretmanu nisko i srednje aktivnog radioaktivnog otpada, u preradiisluženog nuklearnog goriva, u istraživačkim ustanovama i nuklearnim elektranama. Ona se obično koristi za tretman velikih zapremina niskoaktivnog radioaktivnog otpada. Ova metoda se takođe koristi ako efikasnije tehnike tretmana, kao što su uparavanje ili jonska izmena nisu moguće, na primer kada je potrebno tretirati otpad koji sadrži visoke koncentracije soli ili koji sadrži čvrste čestice. Ova tehnika može prethoditi drugoj tehnici tretmana kao što je uparavanje ili jonska izmena.

Na hemijsku precipitaciju može uticati i prisustvo kompleksirajućih agensa, organskih materija ili čestica u radioaktivnom otpadu koji se tretira. U takvim slučajevima radioaktivni otpad je tokom predtretmana neophodno filtrirati primenom membranskih metoda kao što su mikro-filtracija ili ultra-filtracija. Membranske metode predstavljaju proces prečišćavanja tečnosti zasnovan na filtraciji kod koje se tečnost propušta kroz sloj kristalnog materijala kao što su pesak ili izdrobljena ekspandirana glina ili kroz makroporozni materijal kao što je pletena tkanina ili filter papir sa porama veličine do nekoliko desetina  $\mu\text{m}$ . Ovakvi filterski materijali sprečavaju prolazak nečistoćama fizičkom blokadom ili svojim adhezivnim dejstvom. O ovim metodama biće više reči u nastavku teksta.

#### Sorpcija i jonska izmena

Sorpcija je proces prečišćavanja tečnosti kod koje se tečnost propušta kroz sloj granuliranog materijala kao što su aktivni ugalj ili zeoliti. Uklanjanje nečistoća iz tečnog radioaktivnog otpada rezultat je njihovih fizičkih i hemijskih interakcija sa materijalom kroz koji se otpad propušta. Jonska

izmena je poseban slučaj sorpcije kod kojeg se joni iz tečnosti koja se tretira vezuju za jonoizmenjivački materijal dok joni do tada vezani za jonoizmenjivački materijal prelaze u tečnost koja se tretira. Materijali koji se koriste u procesu sorpcije su prirodni i veštački neorganski sorbenti poput heksacijanoferata ili zeolita, dok se za jonsku izmenu koriste jonoizmenjivači najčešće u formi jonoizmenjivačkih smola. Sa ciljem uklanjanja i pozitivno i negativno naelektrisanih jona iz rastvora, tečni radioaktivni otpad koji se tretira mora se propustiti i kroz katjonske jonoizmenjivače koji tom prilikom sakupljaju pozitivno naelektrisane jone i kroz anjonske jonoizmenjivače koji sakupljaju negativno naelektrisane jone.

Efikasnost tretmana jonskom izmenom zavisi od karakteristika jonoizmenjivačkog materijala kao što su sorpciona izotermajonske izmene, koeficijent distribucije, faktor razdvajanja i koeficijent selektivnosti. U značajne parametre jonoizmenjivača spadaju i njegov kapacitet jonske izmene kao i njegova hemijska i mehanička izdržljivost.

Kapacitet jonske izmene određenog jonoizmenjivača opisan je kao broj funkcionalnih grupa u njemu. Ova vrednost je konstantna za dati jonoizmenjivački materijal i izražena umilliekvivalentima po gramu (meq/g). Kapacitet jonske izmene definisan je kao:

$$K = (C_0 - C_e)VM \quad (6.3)$$

gde je:

$C_0$  – početna koncentracija jona u rastvoru (meq/ml)

$C_e$  – ravnotežna koncentracija jona u rastvoru (meq/ml),

$V$  – zapremina rastvora (ml)

$M$  – masa sorbenta (g)

Za opisivanje karakteristika kapaciteta jonske izmene obično se koriste dva parametra: ukupan statički kapacitet izmene određen pod statičkim uslovima i dinamički kapacitet izmene utvrđen propuštanjem rastvora kroz jonoizmenjivački materijal.

Koeficijent distribucije  $K_d$  (ml/g) opisuje sposobnost jonoizmenjivača mase  $M$  (g) da apsorbuje jone iz rastvora tečnosti zapremine  $V$  (ml):

$$K_d = (C_0 - C_e)/C_e \cdot V/M \quad (6.4)$$

U dinamičkim uslovima, u kojima se jonoizmenjivački materijali koriste npr. u vidu kolone mase  $M_{kol}$  (g), uz pomoć koeficijenta distribucije može se izračunati teoretski maksimalni kapacitet  $V_{tot}$  (ml) jonoizmenjivačke kolone koja može da prečisti rastvor zapremine:

$$V_{tot} = K_d \cdot M_{bed} \quad (6.5)$$

Vrednost  $V_{tot}$  se u praksi nikada nedostiže jer se proces uvek zaustavlja zbog smanjivanja difuzionog faktora.

Selektivnost sorbenata  $K^{M1/M2}$  za jon  $M_1$  u odnosu na drugi jon  $M_2$  je određena odnosom koeficijenata distribucije:

$$K^{M1/M2} = K_d(M1)/K_d(M2) \quad (6.6)$$

gde je:

$K_d(M_1)$  – koeficijent distribucije za jon  $M_1$

$K_d(M_2)$  – koeficijent distribucije za jon  $M_2$ .

Mehanička izdržljivost jonoizmenjivača je njihova sposobnost da izdrže mehaničke uticaje izazvane protokom tečnosti koja se tretira. Mehanička izdržljivost jonoizmenjivača je od značajna jer njihova mehanička oštećenja mogu dovesti do prodora finih čestica u tečni otpad koji se tretira. Organske jonoizmenjivačke smole obično imaju najveću mehaničku izdržljivost od svih jonoizmenjivača.

Hemijska stabilnost jonoizmenjivača određuje se njihovom hemijskom prirodom ali i hemijskim svojstvima otpada za čiji tretman se on koristi. Organske jonoizmenjivačke smole su hemijski najstabilnije u širokom opsegu pH vrednosti. Neorganski sorbenti zasnovani na fosfatima i oksihidratima obojenih metala, kao i prirodnih i veštačkih zeolita, su nestabilni, posebno u kiseloj sredini sa pH vrednošću manjom od 3. Neorganski sorbenti na bazi ferocijanida su nestabilni u baznoj sredini sa pH vrednošću većom od 10.

Materijali koji se koriste u metodama sorpcije i jonske izmene dele se na organske i neorganske. U organske materijale ubrajaju se različite organske jonoizmenjivačke smole i biosorbenti zasnovani na drvetu, ligninima, hitinu i sličnim materijalima. U neorganske jonoizmenjivače spadaju prirodni zeoliti kao što je klinoptiolit, veštački zeoliti sa većim sadržajem silicijum dioksida kao što su Na–Y zeoliti, zatim aluminosilikati i silika gelovi, ferocijanidi prelaznih metala, oksihidrati i fosfati titanijuma ili cirkonijuma



u sfernim granulama, prirodni piroluzit ( $MnO_2$ ), modifikovani  $MnO_2$  i aktivniugalj. Veštački zeoliti sa većim sadržajem silicijum dioksida, koriste se jer obično daju veću hidrotermičku stabilnost, jaču kiselinu katalitičku aktivnost i veću hidrofobnost.

Organske jonoizmenjivačke smole imaju široku primenu u sistemima za tretman tečnog radioaktivnog otpada. Praktično, svi nuklearni reaktori koriste organske jonoizmenjivače. Organski jonoizmenjivači mogu se, u zavisnosti od tipa funkcionalne grupe, podeliti na: jako kisele, jako bazne, slabo kisele i slabo bazne. Organski jonoizmenjivači koji sadrže sulfo- i fosfo-kisele grupe su veoma kiseli, dok oni koji sadrže kvartenarnu amonijum-baznu grupu su jako bazni. Oni izmenjivači koji sadrže fenolne i primarne amino-grupe su slabo kiseli i slabo bazni jonoizmenjivači, respektivno. Izmenjivači sa karboksi-grupama i tercijarnim amino-grupama su između jako i slabo kiselih i baznih izmenjivača, respektivno.

Iskorišćeni jonoizmenjivački materijali koji se uklanjaju iz upotrebe moraju se tretirati kao radioaktivni otpad. Prednost neorganskih jonoizmenjivačkih materijala u odnosu na organske je njihova veća izdržljivost i jednostavnija imobilizacija tokom kasnije obrade. Imobilizacija jonoizmenjivačkih materijala može se obaviti njihovim kondicioniranjem u matrikse od cementa, bitumena, stakla ili keramike.

#### Membranske metode

Najčešće korišćene membranske metode za tretman tečnog radioaktivnog otpada su mikrofiltracija, ultrafiltracija, nanofiltracija, reverzna osmoza i elektrodijaliza. Na Slici 6.5. dati su opsezi veličina nečistoća koje su uklonjene iz tečnosti korišćenjem nekih od ovih metoda.

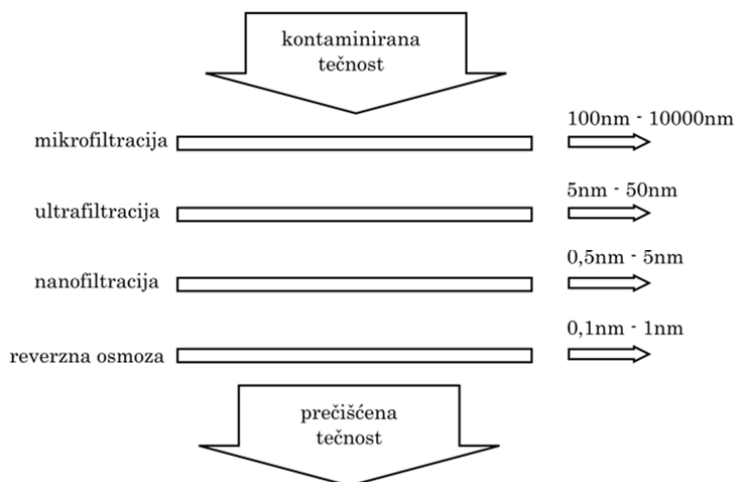
Mikrofiltracija predstavlja membransku metodu kod koje setečni radioaktivni otpad, pri radnom pritisku do 0.1 MPa, propušta kroz membranukoja ima pore dimenzija od  $0,1\mu m$  do nekoliko  $\mu m$ . Mikrofiltracijom se uspešno izdvajaju čestice prečnika većeg od 50 nm.

Pri ultrafiltraciji se tečni radioaktivni otpad, pri radnom pritisku do 0.5 MPa, propušta kroz membranu sa porama veličine od  $0,01\mu m$  do  $0,1\mu m$ . Na taj način iz otpada koji se tretira uklanjaju se koloidne čestice, emulzije, većina velikih molekula i bakterije. Ultrafiltracijom se uspešno izdvajaju čestice prečnika većeg od 3 nm.

Nanofiltracija je metoda filtracije kod koje se tečni radioaktivni otpad propušta kroz membranu sa porama dimenzija od  $0,001\mu m$  do  $0,01\mu m$ . Nanofiltracijom se uspešno izdvajaju čestice prečnika većeg od 1 nm.

---

Kod reverzne osmoze tečni radioaktivni otpad se pri radnom pritisku do 10 MPa propušta kroz membrane sa porama veličine od  $0,0001\mu\text{m}$  do  $0,001\mu\text{m}$  uklanjajući na taj način praktično sve nečistoće iz tečnog otpada. Reverznom osmozom se uspešno izdvajaju čestice prečnika većeg od  $0,1\text{ nm}$ .



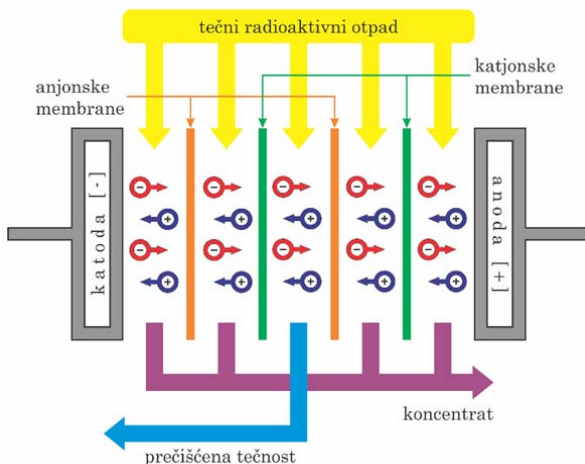
Slika 6.5. Membranske metode

Tabela 6.2. Pregled membranskih metoda za tretman tečnog radioaktivnog otpada

Metoda	Veličina pora	Veličina čestica koje se izdvajaju
<b>Mikrofiltracija</b>	$0,1\mu\text{m}$ – nekoliko $\mu\text{m}$	$> 50\text{ nm}$
<b>Ultrafiltracija</b>	$0,01\mu\text{m}$ – $0,1\mu\text{m}$	$> 3\text{ nm}$
<b>Nanofiltracija</b>	$0,001\mu\text{m}$ – $0,01\mu\text{m}$	$> 1\text{ nm}$
<b>Reverzna osmoza</b>	$0.0001\mu\text{m}$ – $0.001\mu\text{m}$	$> 0.1\text{ nm}$

Membrane koje se koriste u navedenim metodama obično su napravljene ili od organskih polimernih materijala kao što su celulozni acetat, aromatični poliamid, polisulfonamid, polietilen, polipropilen, fluoroplastike, polietilentereftalat (PET) i poliakrilonitril ili od neorganskih materijala kao što su keramike i kompozitni materijali metal-keramika.

Elektrodijaliza, prikazana na Slici 6.6., je membranska metoda tretmana tečnog radioaktivnog otpada kod koje se nečistoće izdvajaju propuštanjem tečnosti koja se tretira preko niza jonoizmenjivačkih membrana koje se nalaze u električnom polju. Katjonske i anjonske jonoizmenjivačke membrane su u procesu elektrodijalize naizmenično poredane jedna pored druge. Sa oba kraja niza jonoizmenjivačkih membrana postavljena je po jedna elektroda na koje je dovedeno električno polje, dovoljne jačine da omogući transport jona ka elektrodama kroz prostor između membrana.



Slika 6.6. Elektrodijaliza

#### Tretman organskog tečnogradioaktivnog otpada

Tečni radioaktivni otpad koji ne sadrži organske materije može se ispustiti u životnu sredinu nakon što se radionuklidi raspadnu do dovoljno niske aktivnosti ili nakon što su prethodno uklonjeni tretmanom. Nasuprot tome, organski tečni radioaktivni otpad zahteva dodatni tretman koji u obzir uzimane samo njegovu radioaktivnost, već i organski sadržaj, koji može imati negativan uticaj na životnu sredinu. Tretman organskog tečnog radioaktivnog otpada je, sa tehnološkog stanovišta, zahtevan postupak koji pri tom zahteva i značajna finansijska sredstva.

Glavni ciljevi tretmana organskog tečnog radioaktivnog otpada su:

- pretvaranjeu čvrst oblik (solidifikacija otpada);
- pretvaranjeu neorganskioblik čime bi se olakšalodalje upravljanje;
- smanjenje zapremine;
- dekontaminacija radi ponovne upotrebe.

Glavne metode tretmana organskog tečnog radioaktivnog otpada su:

- spaljivanje;
- emulgovanje (stvaranje emulzije) sa ciljem lakše enkapsulacije u cement;
- apsorpcija u matriks;
- destilacija;
- mokra oksidacija.

Spaljivanje je metoda pogodna za tretman organskog tečnog radioaktivnog otpada zbog njegove lake zapaljivosti. Primenom ove tehnike može se postići visokfaktor smanjenja zapremine radioaktivnog otpada koji iznosi između 500 i 1000. Glavna poteškoća pri primeni ove metode je obezbeđivanje potpunog sagorevanja otpada i održavanje emisija efluenta u prihvatljivim granicama. Pored toga što mora da zadrži sve radioaktivne čestice oslobođene tokom tretmana spaljivanjem, sistem kontrole emisija mora da kontroliše i ispuštanje hemijski toksičnih ili štetnih efluenta prisutnih u otpadu koji se tretira. Jedna od tehnika spaljivanja je i spaljivanje korišćenjem praškastih metalnih goriva koja prilikom tretmana organskog tečnog radioaktivnog otpada potpuno uništavaju organska jedinjenja, ne stvaraju hemijske otrove i zadržavaju sve radionuklide u pepelu i šljaci koji ostanu nakon sagorevanja.

Apsorpcija u matriks je metoda tretmana organskog tečnog radioaktivnog otpada pretvaranjem tečnosti u čvrst oblik uz pomoć apsorbenata. Prednost ove metode je i to što se ona može primeniti i na mestu generisanja otpada. Na isti način na koji se tečnom otpadu dodaje apsorbenat, tečni otpad se pri generisanju može smestiti u kontejnere u koje je prethodno stavljen apsorbenat.

Apsorbenti koji se najčešće koriste u tretmanu tečnog organskog radioaktivnog otpada su:

- prirodna vlakna (piljevina, pamuk);
- sintetička vlakna (polipropilen);
- vermikulit;
- gline;
- dijatomejska zemlja.

Efikasnost apsorpcije različitih apsorbenata varira do faktora 2 ili 3, a zapreminsko povećanje otpada može biti i do 300%.

Destilacija je metoda tretmana organskog tečnog radioaktivnog otpada koja se sastoji iz dve faze – uparavanje i kondenzovanje. Kod ove metode se zagrevanjem tečni radioaktivni otpad uparava ostavljajući većinu organskih kontaminanata u suvom ostatku posle čega se kondenzovanjem on ponovo

vraća u tečno stanje. Ova metoda je od posebnog značaja u slučajevima kada je tečnost koja se tretira poželjno na kraju tretmana ponovo koristiti. Mana ove metode je što, kao ni uparavanje, nije efikasna za isparive radionuklide kao što je tricijum.

Vlažnom oksidacijom se organske materije u tečnom radioaktivnom otpadu razdvajaju na ugljen dioksid i vodu.

Tretman čvrstog radioaktivnog otpada

Osnovna svrha tretmana čvrstog radioaktivnog otpada je smanjenje njegove zapremine. Najčešće tehnike za tretman čvrstog radioaktivnog otpada uključuju:

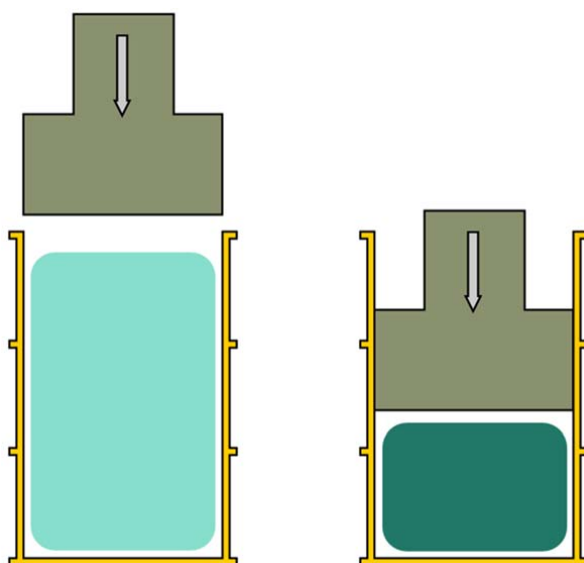
- kompaktiranje i super-kompaktiranje;
- spaljivanje (insineraciju);
- topljenje;
- hemijske i termohemijske metode tretmana.

Radioaktivni otpad skoncentrisan u manjoj zapremini koji je rezultat tretmana se potom kondicionira kako bi se dobio konačni oblik pogodan za transport, skladištenje ili odlaganje.

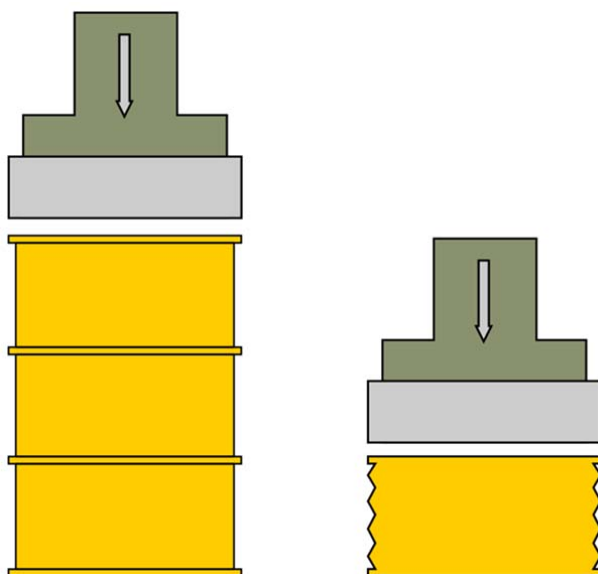
Kompaktiranje i super-kompaktiranje

Kompaktiranje predstavlja sabijanje čvrstog radioaktivnog otpada unutar kontejnera sa ciljem smanjenja njegove zapremine. Sile kojima kompaktori kakvi se danas koriste kompaktiraju čvrsti radioaktivni otpad kreću se uopsegu između 10 t i 50 t i imaju tipičan faktor smanjenja zapremine radioaktivnog otpada od 2 do 5. Na Slici 6.7. prikazan je kompaktor koji sabija radioaktivni otpad smešten u standardno čelično bure.

Dok kompaktori sabijaju otpad unutar pakovanja, super-kompaktori primenom veće sile kompaktiraju otpad zajedno sa kontejnerom u koji je on upakovan. Sile kojima super-kompaktori kompaktiraju čvrsti radioaktivni otpad najčešće su u opsegu od 1200 t – 1500 t. Na Slici 6.8. prikazan je super-kompaktor i burad koja su sabijena ovim super-kompaktorom. U zavisnosti od vrste otpada, faktor smanjenja zapremine radioaktivnog otpada koje postiže super-kompaktorom može biti i do 100.



Slika 6.7. Kompaktor za bure sa radioaktivnim otpadom



Slika 6.8. Superkompaktor

## Spaljivanje

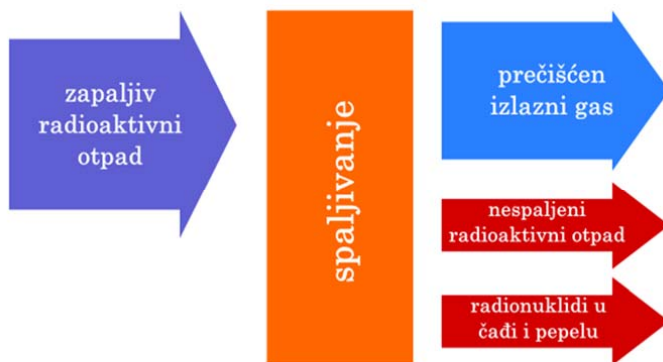
Spaljivanje ili insineracija je termička metoda tretmana čvrstog radioaktivnog otpada zasnovana na principu sagorevanja zapaljivih delova otpada. Ova metoda decenijama se uspešno primenjuje u tretmanu čvrstog radioaktivnog otpada.

Spaljivanje se vrši u posebnim uređajima za spaljivanje – insineratorima koji mogu raditi u režimu sa viškom vazduha (kiseonika), za koji važi da je koeficijent viška vazduha za proces spaljivanja –  $\alpha > 1$ , zatim insineratori koji rade u režimu sa kontrolisanim snabdevanjem vazduha za koje važi da je  $\alpha = 1$ , i insineratori koji rade u režimu sa smanjenim snabdevanjem vazduha za koje važi da je  $\alpha < 1$  kod kojih dolazi do procesa pirolize i gorivi gasovi se spaljuju u posebnoj komori za sagorevanje. Koeficijent viška vazduha ( $\alpha$ ), definiše se kao odnos količine dovedenog vazduha  $M_{\text{air}}$  i stehiometrijske količine vazduha  $M_{\text{st}}$  potrebne za postizanje potpunog sagorevanja otpada:

$$\alpha = M_{\text{air}} / M_{\text{st}} \quad (6.7)$$

Efikasnost sagorevanja  $E_c$  (%) određuje se merenjem koncentracija ugljen dioksida  $[\text{CO}_2]$  i ugljen monoksida  $[\text{CO}]$  u izlaznim gasovima insineratora:

$$E_c = ([\text{CO}_2] \cdot [\text{CO}]) / [\text{CO}_2] \cdot 100 \quad (6.8)$$



Slika 6.9. Shematski prikaz spaljivanja radioaktivnog otpada

Idealno sagorevanje organskih materijala postignuto je kada u ispuštenim efluentima nije prisutan ugljen-monoksid. Spaljivanjem se obično postiže najveće smanjenje zapremine i njime se otpad pretvara u oblik koji je pogodan za kasnije kondicioniranje. Pored gasovitih efluenata, ova metoda tretmana proizvodi iostatke u vidu pepela, čađi i kondenzata iz sistema za prečišćavanje izlaznog gasa.

Faktor smanjenja zapremine radioaktivnog otpada koji se postiže spaljivanjem se obično definiše kao odnos zapremine radioaktivnog otpada pre spaljivanja ( $V_{rao}$ ) i zapremine pepela koji nastane spaljivanjem ( $V_p$ ):

$$VRF = V_{rao} / V_p \quad (6.9)$$

Tipičan raspon faktora smanjenja zapremine čvrstog radioaktivnog otpada koji se postižu spaljivanjem je između 50 i 100. U pepelu je posle tretmana obično sadržano između 90% i 95% radionuklida iz otpada, u čađi između 1% i 5%, a u kondenzatu između 0,1 % i 2%.

Sadržaj alfa i beta emitera u radioaktivnom otpadu prihvatljivom za spaljivanje je obično ograničen na 3,7 MBq/kg za beta emitere, odnosno 0,37 MBq/kg za alfa emitere. Spaljivanje otpada koji sadrži količine radionuklida veće od navedenih zahteva posebne sisteme za prečišćavanje izlaznog gasa koji sa sobom povlače i dodatne troškove.

Značajan deo postrojenja za spaljivanje čini sistem za prečišćavanje izlaznog gasa, koji uklanja radioaktivne čestice i hemijske otrove iz izlaznog gasa, obezbeđujući time da ispuštanja efluenata iz postrojenja budu ispod propisanih granica. Ovaj sistem treba da obezbedi što veći faktor smanjenja specifične radioaktivnosti u izlaznim gasovima.

#### Insineratori

Spaljivanje radioaktivnog otpada se obavlja u posebnom uređaju – insineratoru a sam proces spaljivanja se obično vrši u dve faze. Prva faza obavlja se u primarnoj komori za sagorevanje gde otpad prolazi kroz kombinaciju pirolize, gasifikacije i sagorevanja pod kontrolisanim uslovima. Izlazni gasovi koji sadrže i zapaljive gasove, čađ i ugljen monoksid se zatim šalju u posebnu komoru za sagorevanje gde se obavlja druga faza spaljivanja odnosno gde se oni dodatno spaljuju razdvajajući se tako dooksidnih komponenti kao što su  $CO_2$  i  $H_2O$ . Čvrsti ostatak u vidu pepela ostaje u primarnoj komori za spaljivanje dok se potpuno sagorevanje komponenti tretiranog otpada koji spaljivanjem u primarnoj komori pređu u gasovito stanje ostvaruje u posebnoj komori za sagorevanje. Sve komore incineratora su obično ispunjene vatrostalnim materijalima čija je svrhada katalitički



potpomognu potpunu dezintegraciju organskih materijala i njihovo sagorevanje. Tipične temperature u primarnoj komori za sagorevanje su između 900 i 950 °C, dok su temperature u posebnoj komori za sagorevanje znatno veće. Efikasnost sagorevanja u insineratorima zavisi od temperature, vremena spaljivanja i mešanja nesagorelih gasova i kiseonika, koji treba da ispune sledeće zahteve:

- Temperatura mora biti dovoljno visoka da omogući raspad i potpuno sagorevanje organskih materija;
- Obe komore za spaljivanje treba da imaju dovoljno velikuzapreminu da omogućépotrebno vreme za potpuno spaljivanje otpada, pepela i dimnih gasova;
- Uslovi u komorama treba da budu takvi da omoguće intenzivno mešanje nesagorelih gasova i kiseonika omogućavajući nataj način potpuno sagorevanje.



Slika 6.10. Spaljivanje radioaktivnog otpada

Insineratori u vidu peći opremljenih plazma gorionicima su posebno efikasni i mogu da tretiraju i organski i neorganski radioaktivni otpad bez prethodnog predtretmana. Radioaktivni otpad ubačen u ovakve peći kreće se naniže, prolazeći kroz nekoliko temperaturnih zona, tako da se postepeno zagreva od ambijentalne temperature u gornjem delu peći do temperature dovoljne da istopi pepeo u najnižem delu peći. Prenos lako pokretljivih radionuklida u ovakvim pećima sveden je na minimum filtracijom izlaznih gasova postepenim hlađenjem u peći tokom prolaska iz zona sa najvećom temperaturom kroz slojeve na nižim temperaturama. U ovakvim insineratorima sa plazma gorionicima lako se postižu temperature od 1400°C – 1600 °C koje omogućavaju topljenje i pepela. Ovakve peći generišu tečnu šljaku koja se hlađenjem pretvara u čvrst, hemijski otporan materijal koji je pogodan za dugoročno skladištenje i konačno odlaganje.

Spaljivanje je takođe prihvatljiva opcija i za tretman velikih količina grafita kontaminiranog radu nuklearnih reaktora u kojima je služio kao moderator ili reflektor iako korišćenje ove metode sa sobom povlači i poteškoće kao što

su drobljenje i spaljivanje grafita visoke čistoće, oslobađanje radioaktivnih gasova i imobilizacija nastalog pepela.

Jedna od opcija tretmana nastalog pepela je i njegovo topljenje plazma-tehnikama u kompozitni materijal nalik na mineral ili stakleni kompozitni materijal.

Hemijske i termohemijske metode tretmana

U hemijske i termohemijske metode tretmana čvrstog radioaktivnog otpada spadaju:

- Hemijsko razlaganje;
- Vlažna oksidacija;
- Oksidacija rastopljenim solima;
- Termohemijsko razlaganje.

Hemijsko razlaganje predstavlja razgradnju organskih materija u kiselinama pri čemu se izbegavaju visoke temperature ali se postiže mali faktor smanjenja zapremine otpada.

Vlažna oksidacija je, pored primene u tretmanu tečnog organskog radioaktivnog otpada, primenu našla i u tretmanu čvrstog radioaktivnog otpada. Vlažna oksidacija je, kao što je već navedeno hemijska metoda tretmana radioaktivnog otpadakojom se organske materije razdvajaju na ugljen dioksid i vodu. Glavne prednosti ove metode su niska temperatura i upotreba tečnosti koja se kasnije lako tretira.

Oksidacija rastopljenim solima je termalni proces bez plamena kod kog se otpad stavlja u posudu sa rastopljenom soli, tipično na temperaturama između 500 °C i 950 °C. Ovo ima efekat oksidacije organskih sastojaka otpada. Ovim postupkom stvaraju se ugljen dioksid, azot i voda. Krajnji proizvod je talog sa povišenim sadržajem soli iz kog su uklonjene sve organske materije a zadržana je većina radionuklida iz otpada. Stvaranje i emisija gasova sa značajnim sadržajem CO<sub>2</sub> sprečavaju formiranjem stabilnih soli. Oksidacija rastopljenim solima je jedan od najperspektivnijih metoda za tretman radioaktivnog grafita. Prednost ove metode ogleda se u zadržavanju radionuklida i neutralizaciji emisije gasovasa značajnim sadržajem CO<sub>2</sub>. Pored toga, mogućnost fiksiranja preostalih soli u staklo po završetku procesa je jedna od prednosti sa stanovišta sigurnosti kasnijeg skladištenja i odlaganja.

Termohemijsko razlaganje je metoda razvijena za obradu iskorišćenih jonoizmenjivačkih smola, mešovitog radioaktivnog otpada koji pored radioaktivnih sadrži i druge štetne materije, polimernog otpada i otpada koji

sadrži hlor (npr PVC) ili biološke komponente koji se teško spaljuju u konvencionalnim insineratorima. Ove vrste otpada spaljuju se korišćenjem praškastih metalnih goriva čiji je sastav određen tako da, uzimajući u obzir hemijski sastav otpada, obezbedi i potpuno razlaganje organskih materija u otpadu kao i da zadrži opasne radioaktivne i hemijske materije u pepelu i šljaci kojinstaju kao ostatak posle tretmana. U ovom procesu otpad koji se tretira, na primer vlažne jonoizmenjivačke smole, meša se u odgovarajućoj razmeri, sa praškastim metalnim gorivima. Takva mešavina se unosi u peć gde dolazido egzotermne reakcije pri čemu se oslobađa velika količina toplote koja dovodi do isparavanja i prelaska organskog otpada u gasovitu fazu. Kako bi svi proizvodi gasifikacije otpada i vodonik iz reakcije praškastih metalnih goriva sa vodom sagoreli, u primarnu komoru za sagorevanje mora se dovesti vazduh ( $\alpha > 1$ ). Proces u peći je kontrolisan tako da se radionuklidi sadržani u otpadu pretvaraju u jedinjenja niske pokretljivosti koja ostaju u pepelu. Tipične temperature ovog procesa su u rasponu od 800 °C do 1000 °C.

Tretman gasovitog radioaktivnog otpada i gasovitih efluenata

Gasoviti radioaktivni otpad je, kao što je već navedeno, radioaktivni otpad u najpokretljivijoj formi i kao takav teško se može zadržati da ne dospe u životnu sredinu. Takođe, aktivnosti povezane sa upravljanjem radioaktivnim otpadom mogu dovesti do prisustva radioaktivnih čestica u vazduhu. Osnovna razlika između gasovitog radioaktivnog otpada i radioaktivnih efluenata u vazduhu i tečnog ili čvrstog radioaktivnog otpada je u tome što radioaktivni materijal u gasovitom stanju nema ograničenu zapreminu i što je njegovo širenje u okruženje veoma brzo. Upravo iz ovih razloga neophodno je posebnu pažnju posvetiti lokalizaciji, sakupljanju i tretmanu radioaktivnih efluenata u vazduhu. U Tabeli 6.3 prikazani su opsezi dimenzija tipičnih čestica u vazduhu i oprema koja se obično koristi za njihovo uklanjanje iz vazduha.

Sistemi za ventilaciju i prečišćavanje vazduha značajan su deo svakog nuklearnog objekta, uključujući i objekte za upravljanje radioaktivnim otpadom. Kombinacija dobro projektovanog ventilacionog sistema i adekvatnog prečišćavanja izlaznog vazduha sprečava radioaktivnu kontaminaciju vazduha u radnom prostoru i životnoj sredini u okolini objekta. Uopštem slučaju, vazduh koji dolazi iz visoko kontaminiranih područja, kao što su npr. vruće ćelije ili procesni sudovi (izlazni tokovi gasa) može da sadrži značajno uvećane koncentracije radionuklida u odnosu na vazduh koji se ventilacijom ubacuje u radni prostor i koji eventualno može biti kontaminiran samo od opreme ili curenja iz hermetički zatvorenog prostora. Stoga se vazduh iz ovih, izlaznih, tokova mora tretirati pre mešanja

sa vazduhom iz ventilacije zbog zaštite od zračenja prostorija u kojima borave profesionalno izložena lica i zaštite životne sredine.

Tabela 6.3. Osnovne osobine opreme za uklanjanja aerosola

Tip	Veličina čestice [μm]	Brzina gasa [m/min]	Efikasnost [%]
Vlažni filtri	0.1-25	30	90-99
HEPA	<1	1.5	99.95-99.98
Elektrostatički precipitatori	<1	60-120	90-99

Zadatak sistema za ventilaciju i prečišćavanje vazduha je da:

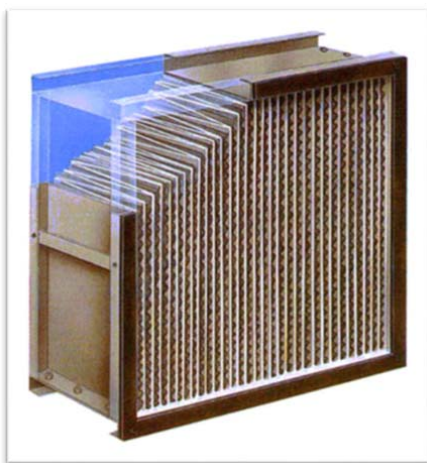
- kontroliše prisustvo radioaktivnih čestica u vazduhu i održava njihovu koncentraciju unutar dozvoljenih granica;
- filtrira i vrši monitoring ulaznog vazduha;
- održava smer protoka vazduha iz područja najmanje ka području najveće kontaminacije;
- prečišćava izlazni vazduh pre ispuštanja u životnu sredinu;
- vrši monitoring radioaktivnosti u vazduhu u radnoj sredini i preispuštanja u životnu sredinu.

Sistemi za ventilaciju i prečišćavanje koji se koriste u objektima za tretman radioaktivnog otpada moraju da obezbede sigurne nivoe kako radioaktivnih tako i štetnih hemijskih kontaminanata koji se mogu osloboditi tokom tretmana. Upravo iz navedenih razloga, tretman efluenta iz objekata za tretman radioaktivnog otpada u procesu rada je složen i skup proces. Ovi sistemi sastoje se obično od nekoliko filtarskih jedinica kao, kao što su vlažni i HEPA filtri kojima se uklanjaju aerosoli i gasoviti kontaminanti. U Tabeli 6.3. prikazana je efikasnost prečišćavanja opreme za uklanjanje aerosola.

HEPA filtri (koji se često nazivaju i apsolutni filteri) se najčešće koriste za uklanjanje radioaktivnih čestica i aerosola iz vazduha. Za gasovite kontaminante kao što su  $^{14}\text{CO}_2$ , radioaktivni jod i plemeniti gasovi, koriste se i apsorberi i skruberi (ispiraći). Filtracija zasnovana na aktivnom uglju se često koristi za uklanjanje lako pokretljivih čestica i plemenitih gasova. Vlažni filtri iskruberiprimenjuju se za uklanjanje gasovitih hemikalija, čestica i aerosola iz procesnih izlaznih gasova. Oni uklanjaju ciljane jedinjenja ili čestice kontaktom sa filtarskim rastvorom koji može biti samo voda ili rastvor reagensa kojim se postiže vezivanje određenog hemijskog

jedinjenja. Kriogeno zadržavanje je metoda koja se koristi za apsorpciju  $^{85}\text{Kr}$  izlaznih gasova uz pomoć čvrstih sorbenata. Ova metoda funkcioniše na povišenom pritisku i smanjenoj temperaturi. Zadržani  $^{85}\text{Kr}$  se može izdvojiti iz sorbenta i sorbent ponovo koristiti. Uklanjanje plemenitih gasova vrlo kratkih vremena poluraspada kao što su  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{41}\text{Ar}$  postiže se njihovim zadržavanjem dok se ne raspadnu do nivoa pogodnih za ispuštanje u životnu sredinu.

Sistemi za prečišćavanje vazduha sastoje se od nekoliko filtara, od kojih neki rade na visokim temperaturama (suva filtracija) i načinjeni su od vatrostalnog metala i keramike dok drugi (vlažna filtracija) koriste vodene rastvore. Primeri filtara prikazani su na slici 6.11. Skruberi i katalitički reaktori se koriste za uklanjanje sumpora i azotnih oksida iz gasova. Dodatne komponente sistema za prečišćavanje vazduha uključuju predfiltre, sisteme za kontrolu temperature i vlažnosti i opremu za kontrolu rada celokupnog sistema. Hlađenje i razređivanje se koristi za smanjenje temperature izlaznih gasova kao i da olakša uklanjanje kontaminanata iz gasnih tokova. Završni korak prečišćavanja vazduha obično uključuje njegovo propuštanje kroz HEPA filtre.



Slika 6.11. HEPA filtar,

[https://www.iaea.go.jp/english/04/ntokai/backend/backend\\_01\\_02\\_09.html](https://www.iaea.go.jp/english/04/ntokai/backend/backend_01_02_09.html)

Kao i u slučaju čvrstog i tečnog radioaktivnog otpada i tretmanom gasovitih efluenata nastaje sekundarni radioaktivni otpad, koji je u čvrstom obliku (iskorišćeni filtri ili sorpcioni materijal) ili u tečnom obliku (skruberi).

---

## Deljenje i transmutacija

Deljenje je metoda tretmana radioaktivnog otpada zasnovana na odvajanju dugoživećih radionuklida iz otpada koji se tretira, obično hemijskim sredstvima. Ova metoda se često koristi za izdvajanje dugoživećih radionuklida iz visoko aktivnog radioaktivnog otpada.

Transmutacija je metoda zasnovana na transformaciji dugoživećih i/ili radiotoksičnih radionuklida u kratkoživeće ili stabilne radionuklide u procesu nuklearnih reakcija u reaktorima ili uz pomoć akceleratora naelektrisanih čestica.

Kombinacija metoda deljenja i potom transmutacije, iako još u fazi razvoja, jeste povoljna opcija za smanjenje inventaradugoživećih i radiotoksičnih radionuklida. Otpad tretiran na ovaj način zahteva izolaciju u periodu od oko 1000 godina što je dug vremenski period, ali znatno kraći od prvobitnog perioda od  $10^5$  ili  $10^6$  godina. Problem šire primene ovih metoda predstavlja i činjenica da samo ograničen broj radionuklida može biti odvojen i izložen transmutaciji. Stoga većina dugoživećih radionuklida zahteva primenu drugih metoda tretmana. Odvajanje i transmutacija ipak mogu da doprinesu smanjenju količine radioaktivnog otpada koji zahteva odlaganje u duboka geološka odlagališta kao i vreme potrebno za institucionalni nadzor takvih odlagališta.

## Kondicioniranje radioaktivnog otpada

Kondicioniranje radioaktivnog otpada predstavlja sve one aktivnosti čiji je cilj pakovanje radioaktivnog otpada na takav način da ispunjava uslove transporta, skladištenja ili odlaganja. U najvećem broju slučajeva kondicioniranje je tesno povezano sa tretmanom radioaktivnog otpada. Kondicioniranje obično uključuje sledeće aktivnosti:

- imobilizaciju radioaktivnog otpada;
- pakovanje otpada u odgovarajuće kontejnere;
- obezbeđivanje dodatne zaštite postavljanjem kompletnih pakovanja radioaktivnog otpada u dodatne kontejnere.

Imobilizacija radioaktivnog otpada je postupak u okviru kog se radioaktivni otpad solidifikuje, smešta u odgovarajući čvrst matriks ili enkapsulira. Ovim postupkom smanjuje se rizik od širenja radionuklida tokom rukovanja, transporta, skladištenja i odlaganja radioaktivnog otpada. Tehnike imobilizacije koje se primenjuju obično uključuju solidifikaciju nisko i srednje aktivnog radioaktivnog otpada u cement, bitumen, polimerni ili geopolimerni matriks ili staklo, zalivanje čvrstog nisko i srednje aktivnog radioaktivnog

otpada cementnim materijalom, vitrifikaciju tečnog visoko aktivnog radioaktivnog otpada u staklo ili njegovo smeštanje u metalni matriks. Ovakvo kondicionirani otpad potom se pakuje u odgovarajuće kontejnere.



Slika 6.12. Tehnike imobilizacije radioaktivnog otpada cementom

Pakovanje radioaktivnog otpada u odgovarajuće kontejnere sprovodi se u cilju sigurnog transporta, skladištenja i odlaganja radioaktivnog otpada njegovim smeštanjem u kontejnere koji ispunjavaju određene uslove. Izgled i karakteristike kontejnera zavise od tipa radioaktivnog otpada koji se u njega pakuje kao i od toga da li se otpad pakuje za transport, skladištenje ili odlaganje. Pored različitih vrsta kontejnera dostupnih na tržištu proizvode se i specijalizovani kontejneri, obično za radioaktivni otpad koji zahteva posebne uslove upravljanja kao što je na primer iskorišćeno nuklearno gorivo.

Stavljanje jednog ili više pakovanja radioaktivnog otpada u dodatne kontejnere (tzv *overpack*) vrši se sa ciljem sigurnog transporta, skladištenja i odlaganja radioaktivnog otpada. Ovakav koncept je posebno našao primenu u slučaju kada je potrebno otpad dodatno upakovati kako bi ispunio kriterijume u pogledu jačine doze koje je neophodno ispuniti za transport, prijem u skladište ili odlagalište.

Tabela 6.4. Pregled tehnika za kondicioniranje radioaktivnog otpada

	Tehnike za kondicioniranje																		Smeštanje u kontejnere	
	Solidifikacija dodavanjem cementa / Enkapsulacija u cementni matriks					Solidifikacija upotrebom sorbenata		Enkapsulacija u polimerni matriks			Uklanjanje tečnosti		Stabilizacija			Topljenje u metalni matriks		Vitrifikacija u stakleni matriks		
	Portland cement	Kalcijum aluminatni cement	Kalcijum sulfor- aluminatni cement	Fosfatni cement	Geopolimeri	Neorganski sorbenti (gline)	Super-apsorbirajući polimeri	Termoplastični polimeri	Termostabilni polimeri	Bitumen	Isušivanje / Kristalizacija	Kalcinacija	Pirroliza / Parno reformiranje	Keramika i kompozitni staklo-	Toplo izostatičko presovanje	Normalizacija	Prškasta vezivna sredstva	Metali / Legure		Silikatno staklo
<b>Tečni radioaktivni otpad</b>																				
<b>Tečnosti</b>	+	+	R	+	+	+	+	-	+	+	+	R	+	-	-	-	-	+	R	-
<b>Talozi</b>	+	R	R	+	+	+	+	R	R	+	+	R	R	+	-	-	-	+	R	-
<b>Vlažan čvrsti otpad (npr. jonoizmenjivačke smole)</b>	+	R	R	R	R	-	-	+	+	+	+	+	R	+	-	-	-	R	R	-
<b>Organske tečnosti, muljevi</b>	+	-	R	R	+	+	+	R	+	-	-	R	-	-	-	-	-	-	R	-
<b>Mešane organsko-neorganske tečnosti i muljevi</b>	+	-	-	R	+	+	+	R	-	-	+	R	-	-	-	-	-	R	-	-
<b>Čvrst radioaktivni otpad</b>																				
<b>Suv praškasti otpad (npr. pepeo posle spaljivanja)</b>	+	R	R	R	R	-	-	+	+	+	-	R	R	+	-	-	-	R	R	+
<b>Različit suv čvrst radioaktivni otpad</b>	+	R	-	R	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	R	-	+
<b>Organski čvrst radioaktivni otpad</b>	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<b>Metalni čvrst radioaktivni otpad</b>	+	-	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	R	-	+
<b>Čvrst radioaktivni otpad u rasutom stanju, korišćena zaštitna oprema, predmeti i sabijeni radioaktivni otpad</b>	+	-	-	R	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	R	-	+
<b>Isluženi zatvoreni izvori zračenja</b>	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+



## Upravljanje radioaktivnim otpadom

“Problematični radioaktivni otpad”	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Reaktivni metali (npr. Mg, Al, U)	+ (Mg) R (U)	R (Al)	R (Al)	R (Mg, U)	R (Mg)	-	-	-	-	-	-	-	Oksidacija				R	-	R (Mg)	-	+		
Mešoviti otpad (toksični i radioaktivni, npr. Be, Hg, azbest, Polihlorovani bifenili (PCB))	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	R	-	-	-	-	-	-	+	(azbest)	-	+
Čvrsti radioaktivni otpad koji sadrži tricijum	+	-	-	-	R	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	
Tečni radioaktivni otpad koji sadrži tricijum	+	R	-	R	R	+	R	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	
Grafitni blokovi	+	-	-	-	R	-	-	-	R	R	-	-	R	-	-	+	-	-	R	-	-	R	
Otpad koji sadrži Na I K	R	-	-	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	R	-	-	-	-	-	R	-	-	
Biološki radioaktivni otpad	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	Uništavanje spaljivanjem ili hemijskim metodama				-	-	-	-	-	-	+	
NORM i otpad iz procesa iskopavanja i prerade rude	+	-	-	-	R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	
Radioaktivni otpad iz procesa dekomisije	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	
Zemlja, talozi, muljevi, sediment i slično	+	-	-	R	R	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	
Velike zapremine otpada nastale tokom akcidenta	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	

(+) = Tehnika se primenjuje

(R) = Tehnika u fazi istraživanja i razvoja

(-) = Tehnika se n primenjuje



Slika 6.13. Čvrst, metalni radioaktivni otpad ugrađen u cementni matriks (IAEA TRS 390, [http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS390\\_scr.pdf](http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS390_scr.pdf))

#### Kondicioniranje zatvorenih izvora jonizujućeg zračenja

Upravljanje zatvorenim izvorima jonizujućeg zračenja koji su proglašeni radioaktivnim otpadom podrazumeva njihovo pakovanje u odgovarajuće kontejnere ili prepakivanje iz njihovih originalnih kućišta u posebne kapsule radi lakšeg smeštanja u kontejnere za skladištenje ili odlaganje. Kriterijumi u pogledu kondicioniranja ovakvog otpada ne razlikuju se od zahteva koji se postavljaju u pogledu kondicioniranja drugih tipova otpada. Poseban rizik pri kondicioniranju zatvorenih izvora jonizujućeg zračenja predstavlja činjenica da je aktivnost radionuklida skoncentrisana u relativno maloj zapremini – samom izvoru. Velika specifična aktivnost postavlja dodatne zahteve u pogledu zaštite od zračenja tokom kondicioniranja zatvorenih izvora jonizujućeg zračenja.

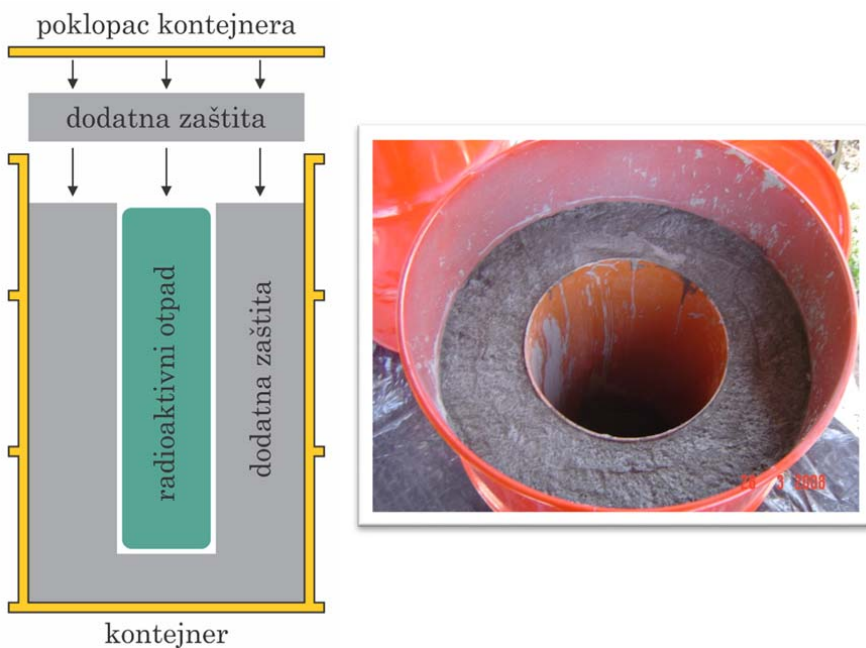
Kondicioniranje zatvorenih izvora jonizujućeg zračenja najčešće se obavlja:

- Smeštanjem izvora u odgovarajući kontejner;
- Prepakivanjem izvora u namensku kapsulu.

Smeštanje izvora u odgovarajući kontejner danas se najčešće izvodi tako što se izvor u svom originalnom kućištu, bez ikakvih intervencija, smešta u

standardni kontejner za skladištenje ili odlaganje. Kontejner mora prethodno biti obložen nekim pogodnim materijalom, najčešće betonom, koji ima funkciju u pogledu zaštite od zračenja. Debljina dodatnog materijala u kontejneru zavisi od aktivnosti izvora a određuje se u skladu sa kriterijumima za prijem kontejnera u skladište i odlagalište. Ovi kriterijumi najčešće su iskazani kroz jačinu doze na površini kontejnera i kroz masu kontejnera.

Struktura kontejnera je najčešće takva da se dodatni zaštitni materijal nalazi na unutrašnjoj površini kontejnera, pri čemu se izvori zračenja unose kroz namenski ostavljen otvor u centralnom delu kontejnera. Kada je kapacitet kontejnera popunjen, na isti se postavlja poklopac od identičnog ili kompatibilnog zaštitnog materijala i poklopac samog kontejnera. Primer ovakvog kontejnera dat je na Slici 6.14. Na ovoj slici može se videti standardno 200 l bure u koje se sa svih strana postavljena dodatna betonska zaštita.



Slika 6.14. Kontejner sa dodatnom zaštitom

Masa ovakvog kontejnera ima pozitivan efekat i na bezbednost izvora imajući u vidu da otežava pomeranje kontejnera bez dodatne opreme za manipulaciju. Radi povećanja strukturne čvrstoće i omogućavanja

skladištenja ovakvih kontejnera u vertikalnom rasporedu, dodaje se i armatura kojapovećava čvrstoću kontejnera.

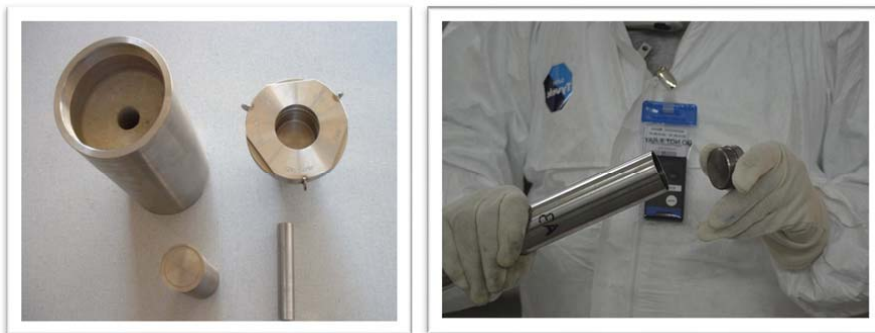
Prepakivanje izvora u namensku kapsulu podrazumeva premeštanje izvora iz njegovog originalnog kućišta u kapsulu od nerđajućeg čelika, smeštanje kapsule u olovnikontejnerkoji se potom smešta u odgovarajući standardni kontejner za skladištenje ili odlaganje. Standardni kontejneri koji se koriste u ovakvim slučajevima obično sudodatno obloženi u smislu zaštite od zračenja. Zbog relativno visoke doze za profesionalno izložena lica koja može nastati tokom manipulacije izvorom zračenja, kondicioniranje visokoaktivnih izvora se moraobaviti u posebnim namenskim prostorijama, tzv. vrućim ćelijama, koje omogućavaju dovoljnu zaštitu za lica koja vrše kondicioniranje. Vruće ćelije sastoje se od zatvorene strukture čiji su zidovi napravljeni od materijala koji pruža dobru zaštitu od zračenja, najčešće olova, na koje su postavljeni dodatni otvori na koje je montiran alat koji se koristi za daljinsku manipulaciju kondicioniranje izvora unutar vruće ćelije. Izgled jedne vruće ćelije dat je na Slici 6.15.



Slika 6.15. Vruće ćelije

Operater nadgleda proces kroz prozor od olovnog stakla ili daljinski, putem kamere. Prilikom demontiranja u vrućoj ćeliji, nosač sa izvorom se uklanja iz originalnog kućišta, potom se izvor uklanja iz nosača i smešta u unapred pripremljenu kapsulu. U jednu kapsulu može se smestiti i više izvora ukoliko

to dozvoljava dozimetrijski kriterijum za njegovo dalje upravljanje. Nakon smeštanja izvora u kapsulu i njenog zavarivanja, kapsula se podvrgava testiranju u smislu provere zaptivenosti i integriteta. Primer jedne ovakve kapsule od nerđajućeg čelika prikazan je na Slici 6.16.



Slika 6.16. Primer capsule u koju se mogu smestiti izvori jonizujućeg zračenja (izvor: Mladen Novaković, Ekoteh dozimetrija)

#### Mobilne jedinice za obradu radioaktivnog otpada

Mobilne jedinice za obradu radioaktivnog otpada nalaze različite primene u upravljanju radioaktivnim otpadom. To može biti obrada specifičnog otpada ili otpada male zapremine ili redovna primena u nuklearnim elektranama i drugim objektima iz nuklearnog gorivnog ciklusa. Procena primenljivosti i efikasnosti mobilnih jedinica za obradu radioaktivnog otpada bazira se na poređenju sa objektima i fiksnim sistemima za obradu radioaktivnog otpada.

Sa stanovišta tehnologije, tehnike obrade radioaktivnog otpada koje se primenjuju u mobilnim jedinicama su identične ili slične tehnikama koji se primenjuju u fiksnim sistemima. Najznačajnija razlika je zapravo prednost mobilnih jedinica da se jednostavno mogu zameniti ili premestiti na drugu lokaciju. Sa stanovišta efikasnosti, mobilne jedinice imaju isti nivo performansi u pogledu faktora smanjenja zapremine i faktora dekontaminacije kao i fiksni sistemi istog kapaciteta. Međutim, fleksibilnost koju pružaju mobilne jedinice omogućava njihovu ili nadogradnju ili promenu konfiguracije, što može dovesti do poboljšanja njihovih performansi.

Sigurnosni zahtevi koji se primenjuju za mobilne jedinice razlikuju se u zavisnosti od njihove primene. Obično su povezani sa zahtevima za okolne strukture, sisteme i komponente. U nekim slučajevima, kao što je na primer seizmička stabilnost, sigurnosni zahtevi koji se postavljaju za mobilne jedinice mogu biti manje restriktivni od zahteva postavljenih pred fiksne sisteme.

Troškovi korišćenja mobilnih jedinica u nekim slučajevima mogu biti manji od troškova potrebnih za projektovanje, analizu sigurnosti, izgradnju, proizvodnju komponenti i rad fiksnog sistema. Ovo se posebno značajno u slučajevima kada količina radioaktivnog otpada koju treba obraditi nije velika ili kada jedna mobilna jedinica može biti u funkciji više korisnika ili više objekata.

Jedna od značajnih prednosti mobilnih jedinica je i njihova mogućnost brze primene u okviru delovanja u slučaju vanrednog događaja. Takođe, mobilne jedinice mogu služiti kao nadogradnja ili zamena postojećih, dotrajalih fiksnih sistema kada se to pokaže neophodnim.



Slika 6.17. Mobilna vruća ćelija

Mobilne jedinice su našle primenu i u dekomisiji nuklearnih objekata. Koristeći mobilne vruće ćelije, moguće je određenu količinu ili vrstu radioaktivnog otpada obraditi na samoj lokaciji objekta na kojoj se vrši dekomisija. Takođe, tokom remedijacije lokacije objekta nakon dekomisije, sanacija kontaminiranog zemljišta može da se realizuje upotrebom mobilne jedinice.

Konstrukcija mobilne jedinice mora biti takva da ona pored svih elemenata zaštite od zračenja, može jednostavno biti spakovana i preneta. Stoga, u obzir treba uzeti i broj komponenata sistema za obradu koje treba transportovati kao i izvodljivost njihovog postavljanja na željenoj lokaciji. Posebno treba uzeti u obzir maksimalne dimenzije i masu radioaktivnog otpada koje strukturni elementi mobilne jedinice mogu da podnesu kao i dodatne zahteve za njihovu strukturnu stabilnost. Pred mobilne jedinice postavlja se i zahtev

u pogledu mogućnosti za transport dostupnim vozilima. Transport korišćene, kontaminirane opreme unutar zemlje i preko državnih granica može predstavljati značajan problem pooštavajući uslove transporta i tako podižući njegovu cenu. U takvim slučajevima, poželjno je pre transporta obaviti dekontaminaciju kompletne ili dela kontaminirane opreme ukoliko je to moguće.

Mobilne jedinice za obradu radioaktivnog otpada tokom rada mogu osloboditi određenu količinu tečnih ili gasovitih efluenata, što zahteva stalan monitoring ventilacionih o odvodnih sistema, odnosno kontrolu tečnih i gasovitih efluenata.

Mobilni sistemi za prečišćavanje vazduha koriste se prilikom dekomisije nuklearnih i drugih objekata u kojima se radi sa radioaktivnim materijalima, kao i tokom sanacije posledica nuklearnih akcidenata. Ovakvi sistemi imaju prednost u odnosu na stacionarne, posebno u situacijama kada se količina i karakteristike otpada menjaju. Kapacitet modularnih mobilnih sistema za tretman izlaznog gasa može se nadograditi prema potrebama, odnosno u skladu sa strategijom tretmana radioaktivnog otpada.

Mobilne jedinice se mogu koristiti u sve tri faze obrade radioaktivnog otpada: predtretmanu, tretmanu i kondicioniranju. Pregled tehnika koje se koriste u mobilnim jedinicama za obradu radioaktivnog otpada, faza obrade u kojoj se one primenjuju i tipovi radioaktivnog otpada za koji se u tim jedinicama vrši obrada dati su u Tabeli 6.5.

Tabela 6.5. Pregled tehnika koje se koriste u mobilnim jedinicama za obradu radioaktivnog otpada, faza obrade u kojoj se one primenjuju i tipovi radioaktivnog otpada za koji se u tim jedinicama vrši obrada

Faza obrade	Tehnika	Tip radioaktivnog otpada
<b>Predtretman</b>	Kompaktiranje kompaktorima sa manjom silom	čvrst RAO
	Mehanička dekontaminacija	čvrst RAO
	Hemijska neutralizacija/precipitacija	tečni RAO
<b>Tretman</b>	Ispiranje zemljišta	čvrst RAO
	Odvajanje izolacije sa kablova	čvrst RAO
	Dekontaminacija radioaktivnih ulja	tečni RAO
	Filtracija	tečni RAO

	Filtracija i jonska izmena	tečni RAO
	Filtracija, primena membranskih metoda i jonska izmena	tečni RAO
	Uklanjanje radionuklida selektivnom jonskom izmenom	tečni RAO
	Sušenje istrošenih jonoizmenjivačkih smola i filterskih materijala	vlažni čvrst RAO
	Isušivanje unutar bureta tečnog i vlažnog čvrstog otpada	tečni i vlažni čvrst RAO
	Tretman izlaznog gasa	gasoviti RAO
<b>Kondicioniranje</b>	Prepakivanje iskorišćenih zatvorenih izvora zračenja u kontejner podesan za skladištenje ili odlaganje	čvrst RAO
	Solidifikacija (cementiranje)	tečni RAO
	Pakovanje iskorišćenih jonoizmenjivačkih smola u polimerne matrikse	vlažni čvrst RAO
<b>Tretman i kondicioniranje</b>	Superkompaktiranje	čvrst RAO
	smanjenje zapremine i pakovanje aktiviranih komponenti	čvrst RAO
	Rasklapanje i prepakivanje visokoaktivnih zatvorenih izvora zračenja	čvrst RAO
	Vitrifikacija zemlje	čvrst RAO
<b>Karakterizacija</b>	Sistemi za karakterizaciju	tečni i čvrst RAO



## VII. Skladištenje radioaktivnog otpada

---

Skladištenje radioaktivnog otpada predstavlja postupak privremenog smeštanja radioaktivnog otpada u namenski objekat – skladište na određeni vremenski period i to na takav način da su ispunjene sve mere radijacione i nuklearne sigurnosti i bezbednosti uskladištenog otpada. Ove mere podrazumevaju:

- zadržavanje svih radionuklida unutar skladišta, odnosno sprečavanje njihovog širenja van granica skladišta;
- izolaciju uskladištenog radioaktivnog otpada od neželjenih spoljnih uticaja;
- stalni monitoring radioaktivnosti u životnoj sredini u okolini skladišta.

Pored navedenih mera, neophodno je sačuvati i mogućnost da se uskladišteni radioaktivni otpad može, prema potrebi, izneti iz skladišta radi tretmana, odlaganja ili oslobađanja od regulatorne kontrole.

Radioaktivni otpad se može čuvati u skladištu pre tretmana, odlaganja ili oslobađanja od regulatorne kontrole. Vremenski period skladištenja radioaktivnog otpadakeće se od veoma kratkog, reda nekoliko dana, dok se ne sakupi dovoljna količina za njegov tretman ili odlaganje, pa do veoma dugog perioda, od nekoliko decenija, obično u slučajevima kada pitanje odlaganja radioaktivnog otpada nije rešeno.

Pre skladištenja, neophodno je izvršiti segregaciju (razdvajanje) radioaktivnog otpada prema tipu, vremenu poluraspada i fizičkim i hemijskim svojstvima, kako bi se otpad bez dodatne segregacije kasnije mogao uputiti na dalji tretman, preneti u drugo skladište, odložiti ili osloboditi od regulatorne kontrole. Segregacijom radioaktivnog otpada može se smanjiti izlaganje profesionalno izloženih lica tokom normalnog pogona skladišta i umanjiti posledice eventualnog vanrednog događaja.

Iskorišćeni zatvoreni izvori jonizujućeg zračenja, koji su proglašeni radioaktivnim otpadom, pre skladištenja razdvajaju se prema aktivnosti, vremenu poluraspada radionuklida, fizičkim i hemijskim svojstvima radionuklida a potom se tako razdvojeni skladište. Ova kategorija izvora

---

zračenja se obično pre skladištenja kondicionira. Kondicionirani izvori, smešteni u skladište u dužem vremenskom period, moraju biti provereni periodično u smislu nepropusnosti i intergriteta njihovih kapsula. Ovo je posebno bitno, imajući u vidu da je česta praksa da iskorišćeni izvori za koje je predviđena dalja upotreba ili za koje se planira reciklaža, iako nisu proglašeni radioaktivnim otpadom, budu privremeno smešteni u skladište radioaktivnog otpada zbog sigurnosti i bezbednosti koju ovakvi objekti pružaju.

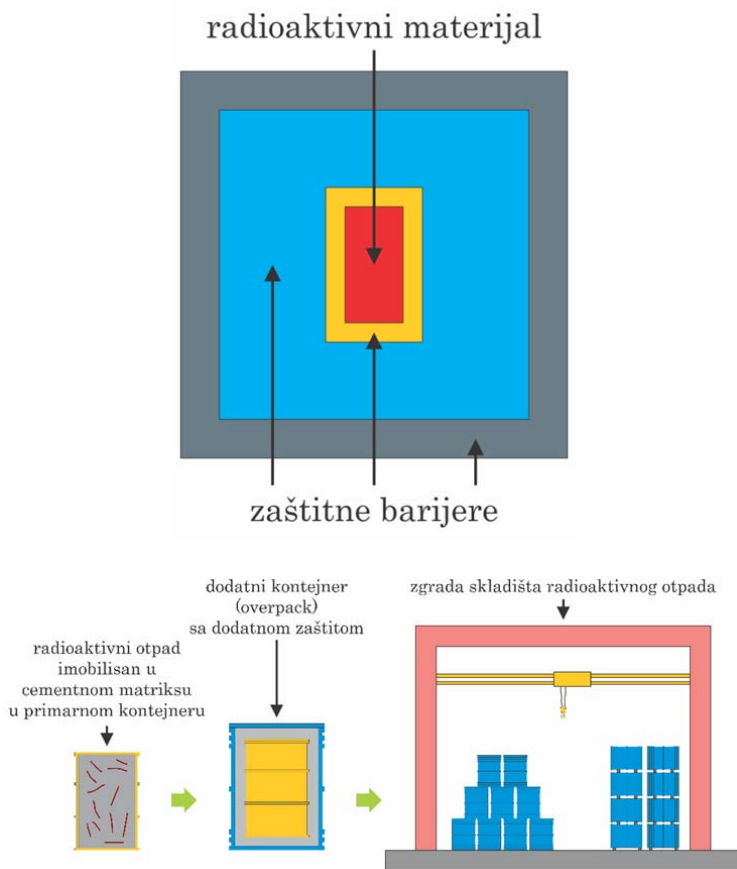
### Elementi skladišta

Dva osnovna elementa koji imaju jednako važnu ulogu u obezbeđivanju adekvatnog skladištenja radioaktivnog otpada su:

1. Pakovanje radioaktivnog otpada koje se sastoji od oblika u kojem se nalazi radioaktivni otpad i kontejnera u koji je otpad smešten. Oblik u kom je radioaktivni otpad (eng. *wasteform*) jeste otpad u njegovom fizičkom i hemijskom obliku nakon tretmana i/ili kondicioniranja a pre pakovanja u odgovarajući kontejner;
2. Skladište radioaktivnog otpada koje uključuje infrastrukturu objekta, opremu za manipulaciju radioaktivnim otpadom, sisteme i opremu za zaštitu od zračenja i ostale sigurnosne sisteme.

Osnovni elementi skladištenja su međusobno povezani i ne mogu se posmatrati nezavisno. Dva gore navedena elementa su komplementarni i zajedno formiraju sistem višestrukih barijera prikazan na Slici 7.1, odnosno obezbeđuju potpunu sigurnost uskladištenog otpada. Zaštitne barijere projektuju se tako da u slučaju otkaza jedne od njih njenu ulogu preuzima druga barijera, smeštena unutar nje ostavljajući time dovoljno vremena za delovanje i sanaciju barijere koja više ne pruža adekvatnu zaštitu. Zahvaljujući ovakvom konceptu, može se reći da su barijere redundantne.

Predviđeno vreme skladištenja radioaktivnog otpada mora biti u skladu sa životnim vekom obrađenog radioaktivnog otpada i samog objekta skladišta. Predviđeno vreme skladištenja može se smatrati održivim ukoliko je projektovani životni vek dva elementa skladišta duži od predviđenog vremena skladištenja a njihovo održavanje se obavlja u skladu sa propisanim zahtevima. Posledično, ne postoji propisano vremensko ograničenje u pogledu skladištenja radioaktivnog otpada ali ono zavisi od projektovanog životnog veka elemenata skladištenja.



Slika 7.1. Koncept višestrukih barijera

Uzimajući u obzir navedene elemente skladišta radioaktivnog otpada, moguće je izdvojiti dva osnovna koncepta skladišta:

1. Ukoliko pakovanje radioaktivnog otpada ne pruža dovoljnu zaštitu od zračenja, onda je potrebno ovakav radioaktivni otpad smestiti u skladište projektovano tako da inženjerskim barijerama omogućava dovoljan nivo zaštite;
2. Ukoliko pakovanje, odnosno kontejner u koji je radioaktivni otpad smešten, pruža odgovarajući stepen zaštite od zračenja onda objekat skladišta može biti i jednostavnije konstrukcije. U određenim slučajevima kontejneri se mogu uskladištiti i na otvorenom.

Zahtevi koji se postavljaju u pogledu skladišta radioaktivnog otpada odnose se na oba elementa skladištenja, i to:

- Zadržavanje radionuklida unutar definisane zapremine, odnosno kontejnera i skladišta;
- Sprečavanje pojave visoke jačine doze jonizujućih zračenja na spoljnoj površini kontejnera i/ili skladišta;
- Adekvatna zaštita od spoljašnjih uticaja, kao što su atmosferskih uticaji, prirodne nepogode ili požar;
- Dovoljna čvrstina kontejnera, izdržljivost i druge osobine (hermetičnost, otpornost na koroziju) a koje su od značaja za sigurno i bezbedno rukovanje i skladištenje radioaktivnog otpada;
- Mogućnost iznošenja otpada na kraju predviđenog perioda skladištenja;
- Hemijska stabilnost otpada tokom perioda skladištenja;
- Odvođenje gasovitih efluenata, kontola ambijentalnih uslova i kontrola korozije;
- Odvođenje toplote koju generiše radioaktivni otpad;
- Prevencija bioloških rizika;
- Kontrola upakovanog otpada i prevencija curenja radionuklida.

### Faze skladištenja radioaktivnog otpada

Osnovne faze skladištenja radioaktivnog otpada su:

- Prijem radioaktivnog otpada u skladište;
- Skladištenje i inspekcija uskladištenog otpada;
- Iznošenje radioaktivnog otpada iz skladišta i njegova priprema za narednu fazu upravljanja.

Skladištenju radioaktivnog otpada prethodi prijem koji podrazumeva poređenje karakteristika radioaktivnog otpada sa kriterijumima za prijem u skladište, neophodne analize i karakterizaciju radioaktivnog otpada ukoliko je to potrebno, određivanje tačne pozicije otpada unutar skladišta, postavljanje kontejnera na definisanu poziciju i unošenje podataka o radioaktivnom otpadu u evidenciju.

Kriterijumi za prijem radioaktivnog otpada predstavljaju skup kvalitativnih i kvantitativnih osobina radioaktivnog otpada definisanih pravnim ili internim aktima operatera objekta za upravljanje radioaktivnim otpadom i potvrđenih strane nadležnog regulatornog tela. Svako pakovanje radioaktivnog otpada, odnosno oblik radioaktivnog otpada i kontejner u

kojem se on nalazi, mora da ispuni kriterijume za prijem kako bi mogao biti smešten u skladište. Kriterijumima za prijem radioaktivnog otpada definišu se radiološka, mehanička, fizička, hemijska i biološka svojstva pakovanja radioaktivnog otpada i neupakovanog otpada. Pored navedenog, ovi kriterijumi uključuju i ograničenja u pogledu ukupne ili specifične aktivnosti pakovanja radioaktivnog otpada ili pojedinačnih radionuklida ili tipova radionuklida (npr. prema tipu raspada), ograničenja po pitanju jačine doze na površini pakovanja ili na određenoj udaljenosti od pakovanja i ograničenja po pitanju emisije toplote.

Aktivnosti koje se sprovode tokom skladištenja radioaktivnog otpada uključuju zaštitu od zračenja, monitoring radioaktivnosti u životnoj sredini u okolini skladišta, inspekciju stanja pakovanja radioaktivnog otpada i inspekciju opreme, komponenti i sistema skladišta, održavanje skladišta i obeležavanje i evidentiranje pakovanja radioaktivnog otpada.



Slika 7.2 Primeri različitih načina slaganja kontejnera sa radioaktivnim otpadom u skladištu

Prilikom rukovanja i postavljanja kontejnera sa radioaktivnim otpadom na odgovarajuće mesto u skladištu, u obzir posebno treba uzeti dinamička i statička opterećenja koja nastaju slaganjem kontejnera jedan na drugi ili na palete ili police predviđene za skladištenje. Debljina zidova kontejnera, njihova ukupna masa i način slaganja treba da budu uzeti u obzir u fazi

projektovanja skladišta. Na ovaj način izbegavaju se kasniji problemi sa skladišnim prostorom i uticajem kontejnera na samo skladište. Neki od načina slaganja kontejnera prilikom skladištenja dati su na Slici 7.2.

Inspekcija uskladištenog radioaktivnog otpada vrši se u cilju provere celovitosti svih barijera koje služe da zadrže radioaktivni otpad unutar pakovanja. Pored vizualne inspekcije proverava se i jačina doze unutar skladišta i prisustvo kontaminacije.

Radioaktivni otpad u tečnom, gasovitom ili praškastom stanju mora biti pod posebnim režimom kontrole zbog veće verovatnoće širenja kontaminacije usled njegovog curenja. Ovakav otpad trebaskladištiti na takav način da se olakša njegova inspekcija, pravovremena detekcija kontaminacije i njegovo zadržavanje u slučaju da se bilo koja od inženjerskih barijera namenjenih njegovom zadržavanju naruši. Kontejneri u kojima se skladišti radioaktivni otpad, a posebno tečni otpad, moraju biti smešteni u odgovarajuće sudove veće zapremine, pre svega u cilju dodatne prevencije curenja radioaktivnog materijala. U slučaju kada se tečni otpad skladišti u namenskim bazenima, oni moraju biti projektovani i izgrađeni tako dabudu nepropusni za tečni radioaktivni otpad. Međutim, u skladu sa principima pasivne sigurnosti, tečni radioaktivni otpad mora biti solidifikovan što je ranije moguće.



Slika 7.3. Rezervoari za tečni radioaktivni otpad (IAEA TECDEC1714, [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1714\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1714_web.pdf))

Iznošenje radioaktivnog otpada iz skladišta podrazumeva pre svega prepoznavanje lokacije i tačnu identifikaciju kontejnera koji se iznosi, a zatim sam postupak iznošenja i kontrolu radioaktivnog otpada. Ova kontola

---

se sastoji od vizuelnog pregleda pakovanja, radiološkog pregleda kojim se utvrđuje prisustvo kontaminacije i meri jačina doze na površini kontejnera i evidentiranja iznošenja radioaktivnog otpada. Kontejner se, ukoliko je to potrebno, pakuje za transport tako da pakovanje ispunjava kriterijume za transport i potom šalje na dalji tretman ili na skladištenje.

Nakon skladištenja radioaktivni otpad se, zavisno od svojih radioloških karakteristika može preneti u drugi objekat zbog tretmana, skladištenja ili odlaganja, ili može biti oslobođen od regulatorne kontrole, ponovno korišćen u druge svrhe ili recikliran.

### Kontejneri za skladištenje radioaktivnog otpada

Kontejneri za skladištenje radioaktivnog otpada dizajnirani su i proizvedeni na takav način da spreče migraciju radioaktivnog materijala iz kontejneratokom svih očekivanih radnih stanja u periodu tokom kojegje otpad uskladišten. U slučajevima gde sam kontejner predstavlja primarnu prepreku za zadržavanje radionuklida, njegove karakteristike treba da odgovaraju tipu otpada i očekivanim koncentracijama radionuklida.

Pri izradi kontejnera za skladištenje radioaktivnog otpada, kao i u slučaju samih skladišta, u obzir treba uzeti posebne karakteristike radioaktivnog otpada i povezane aktivnosti kao što su:

- Hemijska kompatibilnost materijala kontejnera sa radioaktivnim otpadom za čije se skladištenje kontejner planira. Ovde posebnu pažnju treba obratiti na mogućnost pojave korozije ili generisanja gasova usled hemijskih i elektrohemijskih reakcija nastalih interakcijom kontejnera sa otpadom. U obzir treba uzeti i hemijsku razgradnju otpada kao i hemijsku reaktivnost materijala koji se skladišti;
  - Zapaljivost otpada odnosno potencijalna opasnost od požara. Ovde je takođe bitno uzeti u obzir imogućnost stvaranja zapaljivih gasova hemijskom razgradnjom otpada (npr. organskog otpada);
  - Kompatibilnost otpada primenjenoj metodi obrade i kondicioniranja pre skladištenja. Na primer, kompaktni otpad može, u nekim slučajevima, početi da se širi odnosno vraća u pređašnje stanje. Pored toga, kompaktiranje različitih materijala u istom kontejneru može dovesti hemijski reaktivne materijale u bliski kontakt, što bi moglo dovesti do pojačane korozije, spontanog sagorevanja ili drugih neželjenih efekata.
-

Prilikom projektovanja i izrade kontejnera za skladištenje u obzir treba uzeti i uslove unutar skladišta kao što su, temperatura i vlažnost vazduha. Skladištenje kontejnera na površinama gde postoje ili se mogu očekivati negativni klimatski uticaji treba izbegavati. Kontejneri moraju biti otporni na koroziju najmanje tokom planiranog perioda skladištenja. Bitno je i da kontejneri budu dizajnirani tako da njihova inspekcija bude jednostavna, a u cilju ranog otkrivanja narušenog integriteta kontejnera i curenja radioaktivnih gasova ili tečnosti.

Za skladištenje pojedinih vrsta radioaktivnog otpada, posebno tečnog otpada koji može izazvati koroziju materijala, koriste se posebne vrste kontejnera, kao što su kontejneri sa duplim zidovima i/ili kontejneri čiji su zidovi su obloženi nerđajućim čelikom ili materijalom otpornim na koroziju. Takođe, ispod kontejnera za skladištenje tečnog otpada mogu se postaviti i dodatni sudovi za sakupljanje tečnog otpada u slučaju njegovog curenja.

Tečni radioaktivni otpad potencijalno sadrži i čvrste materije koje se mogu nataložiti na dnu kontejnera ili bazena u kom se tečni radioaktivni otpad skladišti. U pojedinim slučajevima, neophodno je sprečiti taloženje čvrstih materija na dnu, posebno u slučaju sprečavanja kritičnosti ili koncentracije aktivnosti i velike jačine doze na dnu kontejnera. Kontejneri u kojima se skladište ovakve vrste otpada zato imaju ugrađen sistem za mešanje otpada, kao što su mehanička mešalica, pneumatski mikser ili cirkulacione pumpe.

Veće formacije kao što su bazeni i kontejneri za skladištenje tečnog radioaktivnog otpada moguće je projektovati tako da sadrže prelivne ustave koje omogućavaju taloženje čvrstih čestica i njihovo uklanjanje.

Za skladištenje kontaminiranih oštih predmeta, kao što su npr. špricevi kontaminirani tokom upotrebe u nuklearnoj medicini, koriste se kontejneri otporni na proboj.

Kod nekih vrsta otpada moguće je, tokom vremena generisanje gasova koji mogu biti radioaktivni ili neaktivni. Kod ovakvih kontejnera neophodno je predvideti sistem ventilacije u cilju prevencije nakupljanja gasova unutar kontejnera koje može dovesti do povećanog pritiska i oštećenja kontejnera.

Ukoliko kontejner tokom skladištenja pokaže znake degradacije, neophodno je preduzeti odgovarajuće mere sa ciljem ispitivanja integriteta kontejnera. U obzir treba uzeti i ispitivanje svih drugih, istih ili sličnih kontejnera. U slučaju da dođe do curenja, sadržaj kontejnera mora biti prepakovan u novi kontejner.

Hemijska kompatibilnost kontejnera sa uskladištenim otpadom je od velikog značaja za dugoročnu sigurnost uskladištenog otpada. Jedan od primera hemijske nekompatibilnosti je skladištenje aluminijumskog radioaktivnog



otpada u kontejner dodatno zaštićen betonskom zaštitom. U ovakvoj kombinaciji dolazi do reakcije aluminijuma sa baznim jedinjenjima prisutnim u betonskim i cementnim materijalima, a zatim do oslobađanja vodonika koji povećava pritisak u kontejneru i dovodi do njegovog pucanja ili otvaranja. Iz navedenog razloga, svaki kontakt aluminijumskog otpada i betonskih ili cementnih materijala u upravljanju radioaktivnim otpadom nije dozvoljen.

U Tabeli 7.1. dati su primeri kontejnera za skladištenje nisko i srednje aktivnog otpada koji se najčešće koriste u svetu.

Manipulacija kontejnerima je odvijala se pomoću specijalizovane ili komercijalno dostupne opreme za manipulaciju teretom. Primena određene klase opreme zavisi od tipa kontejnera, njegovih dimenzija i mase, tačnog mesta i visine skladištenja. Oprema za manipulaciju kontejnera obično uključuje transportno sredstvo u vidu električnog ili motornog viljuškara, fiksiranog ili pokretnog krana i odgovarajuću opremu za hvatanje kontejnera.

### Objekti za skladištenje radioaktivnog otpada

Objekat za skladištenje radioaktivnog otpada obezbeđuje odgovarajuće mere zaštite od zračenja, sprečava širenje radionuklida van prostora predviđenog za skladištenje, omogućava izolaciju radioaktivnog otpada i njegovo iznošenje iz skladišta radi daljeg tretmana, odlaganja ili oslobađanja od regulatorne kontrole. Ovakvi objekti projektovani su tako da su verovatnoća neželjenih događaja i posledice incidenata i akcidenata minimalne. U zavisnosti od namene i predviđenog vremena skladištenja skladišta se mogu podeliti na:

- Skladištaza kratkoročno skladištenje radioaktivnog otpada u kojima se otpad može čuvati do:
  - sakupljanja dovoljnih količina za tretman ili prebacivanje u drugo skladište;
  - raspada radionuklida;
  - odlaganja;
  - smanjenja temperature otpada;
- skladišta zadugoročno skladištenje radioaktivnog otpada;
- skladišta radioaktivnog otpada nastalog u akcidentu.

Primeri skladišta radioaktivnog otpada dati su na Slici 7.4

Tabela 7.1. Primeri kontejnera za skladištenje nisko i srednje aktivnog otpada

Tip kontejnera i Primena	Napomena/Slika
<p>Standardno metalno bure</p> <p>Metalna, komercijalno dostupna burad standardnih dimenzija, najčešće zapremine 200 l, 320 l, 400 l i 500 l su najčešćekorišćeni tip kontejnera. Ovakvi kontejneri najčešće se koriste za skladištenje čvrstog srednje i nisko aktivnog radioaktivnog otpada a načinjeni su i od nerđajućeg čelika. Stišljivi radioaktivni otpad često se kompaktira zajedno sa buretom. Burad od 320 l i 400 l se često koristi i kao dodatna zaštita za kompaktiranu burad od 200l ili burad sa visokom jačinom doze. U metalnu burad često se dodaje dodatna betonska ili olovna zaštita u cilju bolje zaštite od zračenja.</p>	<div data-bbox="1275 269 1521 589" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="1206 609 1594 681">IAEA TRS 390, <a href="http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RS390_scr.pdf">http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RS390_scr.pdf</a></p>
<p>Cilindrični metalni kontejner</p> <p>Ovakvi kontejneri izrađuju se sa različitim prečnicima i zapreminama. U njih se može skladištiti čvrsti i solidifikovani tečni nisko i srednje aktivni otpad. Kontejneri manjih dimenzija primenu su našli kao primarni kontejneri za skladištenje radioaktivnog otpada koji se potom mogu smestiti unutar standardnog buretaali i kao dodatni kontejneri koji pružaju dodatne barijere. Kao i druge vrste kontejnera i u njih je moguće dodati dodatnuzaštitu.</p>	

#### Pravougaoni metalni kontejner

Ovakvi kontejneri izrađuju se u različitim dimenzijama i zapreminama. U njih se može skladištiti čvrsti kao i solidifikovani tečni nisko i srednje aktivni otpad. Ovakvi kontejneri često se koriste i kao dodatni kontejneri sa povećanim stepenom zaštite od zračenja. Kao i u metalnuburad, i u ovakve kontejnere se može dodati dodatni sloj zaštitnog materijala.



#### Standardni ISO (International Organisation for Standardization) transportni kontejner

Standardni ISO transportni kontejneri (čest naziv je i Intermodal kontejneri) su komercijalno dostupni u više standardnih dimenzija. Dimenzije osnovnog kontejnera su standardizovane a proizvode se i kontejneri drugih dimenzija od kojih su najčešći kontejneri dužine jednake polovini dužine osnovnog kontejnera (Half Length – HLISO), kontejneri visine jednake polovini visine osnovnog kontejnera (Half Height – HHISO) i kontejneri i visine i dužine jednakih polovini visine i dužine osnovnog kontejnera (Half Length Half Height – HL-HHISO). Ovakvi kontejneri koriste se najčešće za otpad u rasutom stanju i otpad velikih zapremina ali i kao dodatni kontejner kada je potrebna istovremena manipulacija sa više manjih kontejnera za potrebe transporta i skladištenja. I ovom tipu se može dodati dodatna zaštita. Dimenzije tipičnog osnovnog ISO kontejnera su 6,058m x 2,438m x 2,591m



#### Cilindrični betonski kontejner

Ovakvi kontejneri mogu biti različitih prečnika i zapremine. Betonski zidovi kontejnera služe i kao zaštita od zračenja. Ovakvi kontejneri se obično koriste za skladištenje srednje aktivnog radioaktivnog otpada kao i za dodatni kontejner u koji se postavljaju drugi tipovi kontejnera.



#### Pravougaoni betonski kontejner

Ovakvi kontejneri izrađuju se u različitim dimenzijama i zapreminama a betonski zidovi kontejnera služe i kao zaštita od zračenja. Ovakvi kontejneri obično se koriste za skladištenje srednje aktivnog radioaktivnog otpada kao i za dodatni kontejner u koji se stavljaju drugi tipovi kontejnera.



#### Plastični kontejner

Plastični kontejneri izrađuju se u različitim dimenzijama i zapreminama a mogu biti i cilindričnog i pravougaonog oblika. Često se koriste kao unutrašnji kontejneri ili barijere unutar većih kontejnera. Izbor su za skladištenje tečnog radioaktivnog otpada. Kontejneri izrađeni od polietilena visoke gustine (HDPE) koriste se i za skladištenje srednje aktivnog radioaktivnog otpada a odlikuju ih i veoma pouzdani sistemi zatvaranja.



#### Tankovi i bazeni

Izrađuju se u različitim dimenzijama prema potrebi i obično su obloženi nerđajućim čelikom. Koriste se za skladištenje tečnog i vlažnog radioaktivnog otpada i mogu biti pokretni ili fiksirani u objektu.



Slika 7.4. Najčešći načini slaganja različitih tipova kontejnera sa radioaktivnim otpadom u skladištu

Skladišta u kojima se radioaktivni otpad skladišti do raspada radionuklida posebno suznačajna za oslobađanje od regulatorne kontrole radioaktivnog otpada koji sadrži kratkoživeće radioizotope. Oslobađanje radioaktivnog materijala od regulatorne kontrole moguće je samo pod uslovom da su specifična i ukupna aktivnost radionuklida ispod propisanih granica. Ovakav pristup najpogodniji je za radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide sa vremenom poluraspada manjim od 100 dana kao što je otpad nastao upotrebom  $^{99m}\text{Tc}$  u nuklearnoj medicini. Period skladištenja radioaktivnog otpada u ovakvim skladištima mora biti dovoljno dug da smanji početnu aktivnost do nivoa ispod nivoa izuzeća. Kao i u slučaju drugih vrsta skladišta radioaktivnog otpada i pri projektovanju i radu ovakvog skladišta računa treba voditi i o drugim svojstvima radioaktivnog otpada kao što su hemijskaili biološka toksičnost. Ovakvi materijali se obično mogu osloboditi u životnu sredinu bez dodatnog tretmana,.

U skladištima u kojima se radioaktivni otpad skladišti do odlaganja skladišti se i tretiran i kondicioniran ali i neobrađen radioaktivni otpad koji ispunjava uslove za odlaganje.

Skladišta u kojima se radioaktivni otpad skladišti do smanjenja njegove temperature služe da omoguće smanjenje temperature radioaktivnog otpada pre njegovog odlaganja.

Dugoročno skladištenje radioaktivnog otpada odnosi se na situacije u kojima se otpad čuva u periodima dužim od perioda prvobitno projektovanog životnog veka kontejnera i skladišta. Ovo je česta situacija u slučajevima kada odlagalište radioaktivnog otpada nije dostupno. Dodatni tehnički uslovi koje objekat za dugoročno skladištenje radioaktivnog otpada treba da ispuni su:

- Objekat, sistemi, oprema i institucionalna kontrola moraju biti robusni i dobro održavani pri čemu treba koristiti pasivne mere sigurnosti u meri u kojoj je to moguće;
- Podatke o uskladištenom radioaktivnom otpadu treba čuvati u takvom formatu i na takav način da oni budu dostupni, čitljivi i razumljivi i nakon dugog vremenskog perioda skladištenja;
- Mere bezbednosti treba sprovesti tokom čitavog perioda skladištenja a posebno u slučajevima kada je objekat prvobitnim projektom planiran za kraći operativni period.

Ukoliko skladište nije prvobitno predviđeno za dugoročno skladištenje radioaktivnog otpada, neophodno je sprovesti ponovnu analizu sigurnosti objekta, njegovih sistema i komponenti i izvršiti eventualne zamene ili nadogradnje postojećih sistema kako bi se obezbedio adekvatan nivo sigurnosti i u produženom periodu skladištenja. Ovaj proces mora biti praćen

---

inspekcijom svih barijera, počevod oblika u kojem je otpad, njegovog kontejnera pa do strukturne stabilnosti skladišta. Ukoliko se utvrdi da pakovanje radioaktivnog otpada ne ispunjava ili u produženom vremenu predviđenom za skladištenje neće zadržati potreban integritet, neophodno je pristupiti prepakivanju otpada ili smeštanju čitavog pakovanja u novi kontejner (tzv. overpack). U državama koje raspolažu sa većim brojem skladišta moguć je transfer otpada, sa ili bez dodatnog tretmana, u ono skladište za koje je potvrđeno da ispunjava sve neophodne mere sigurnosti.



Slika 7.5. Manipulacija budarima od 200 l u skladištu radioaktivnog otpada (IAEA TRS 390, [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS390\\_scr.pdf](http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS390_scr.pdf))

Pri planiranju dugoročnog skladištenja odnosno u slučaju nepredviđenog produženja vremena skladištenja, posebno treba obratiti pažnju i na potencijalne promene svojstava samog radioaktivnog otpada koje u dugom vremenskom periodu mogu negativno uticati na sigurnost skladištenja. U ova svojstva i promene ubrajaju se:

- stvaranje gasa unutar kontejnera radioaktivnog otpada usled kog dolazi do povećanog pritiska u kontejneru;
  - generisanje zapaljivih ili korozivnih supstanci;
  - korozija metalnih struktura (npr. kontejnera od čelika);
  - degradacija radioaktivnog otpada.
-



Skladišta radioaktivnog otpada nastalog kao rezultat akcidenta ili drugog neplaniranog događaja ili tokom saniranja stanja ovakvih događaja iako se grade u kompleksnim uslovima koje takvi događaji mogu da izazovu moraju da ispune sve navedene zahetve. Primer skladišta radioaktivnog otpada nastalog kao rezultat akcidenta ili drugog neplaniranog događaja ili tokom saniranja stanja ovakvih događaja dat je na Slikama 2.4 i 2.5.

U pogledu konstrukcije, izgradnja objekata za skladištenje radioaktivnog otpada moguća je u nekoliko varijanti. Izbor tipa objekta zavisi od karakteristika radioaktivnog otpada, njegove količine, dostupne infrastrukture, opšteg nivoa sigurnosne kulture i finansijskih mogućnosti.

U Tabeli 7.2. navedeni su najčešći tipovi objekata za skladištenje radioaktivnog otpada.

### Sigurnost skladištenja radioaktivnog otpada

Radijaciona i nuklearna sigurnost skladištenja radioaktivnog otpada podrazumeva sigurnost operatera koji manipuliše radioaktivnim otpadom tokom njegovog skladištenja ali i sigurnost stanovništva i zaštitu životne sredine u okolini skladišta. Sigurnost skladištenja se u značajnoj meri oslanja na uslov da pakovanje radioaktivnog otpada tokom skladištenja mora da sačuva svoj integritet i spreči migraciju radionuklida u životnu sredinu.

Svi sigurnosni zahtevi moraju biti ispunjeni u svakom trenutku tokom skladištenja bez obzira na dužinu njegovog trajanja. Što je trajanje skladištenja duže, to su sigurnosni uslovi koji se pred njega postavljaju, strožiji. Ovi uslovi odnose se kako na dugotrajnost svih navedenih elemenata skladištenja tako i mogućnost inspekcije uskladištenog radioaktivnog otpada i održavanje objekta, opreme i sistema koji omogućavaju sigurno skladištenje radioaktivnog otpada. Skladišta i pakovanja radioaktivnog otpada treba da obezbede sigurno skladištenje otpada uzimajući u obzir njegovo fizičko stanje (čvrsto, tečno ili gasovito), sadržaj radionuklida u njemu i njihovo vreme poluraspada, koncentraciju aktivnosti, ukupnu količinu radioaktivnosti, neradiološke karakteristike i očekivani period skladištenja. Projektovane karakteristike i rad skladišta treba da budu takvi da obezbede da prijem, rukovanje, skladištenje i iznošenje radioaktivnog otpada mogu da se obave bez nepotrebnog izlaganja profesionalno izloženih lica i stanovništva kao i bez negativnog uticaja na životnu sredinu.

Tabela 7.2. Tipovi objekata za skladištenje radioaktivnog otpada

Tip objekta	Opis i namena
<b>Ukopani i podzemni objekti</b>	Ukopani i podzemni cilindrični i pravougaoni objekti mogu se koristiti za skladištenje nisko, srednje i visoko aktivnog radioaktivnog otpada. Otpad se u ove objekte smešta upakovan u odgovarajuće kontejnere ili u rasutom stanju. Ovi objekti grade se ili oblažu sa vodonepropusnim slojevima ukoliko to okolno zemljište zahteva a okolno zemljište pruža dodatni vid zaštite od zračenja. Ovi objekti mogu se graditi iz više segmenata (čelija, modula, jedinica). Iako svojom konstrukcijom podsećaju na određene tipove odlagališta o kojima će više reći biti u poglavlju IX otpad smešten u njih ne mora ispunjavati uslove za odlaganje jer se njegovo iznošenje planira.
<b>Nasipi</b>	Iako nisu objekti u punom smislu te reči, ovakve građevine se zbog svojih inženjerskih barijera, u smislu upravljanja radioaktivnim otpadom mogu smatrati objektima. Vodonepropusni slojevi postavljaju se i ispod i iznad otpada a cela struktura se potom nasipa zemljom koja služi i kao dodatna zaštita od zračenja. Ovi jednostavni objekti služe za skladištenje veoma nisko i nisko aktivnog otpada u rasutom stanju (zemlja, šut, beton itd.). Iako oni svojom konstrukcijom podsećaju na odlagališta veoma nisko aktivnog radioaktivnog otpada, važno je napomenuti da je svrha smeštanja otpada u ovakvo skladište njegovo privremeno čuvanje dok se ne steknu uslovi za njegovu obradu.
<b>Bazen sa vodom</b>	Bazeni sa vodom obično su povezani sa reaktorima i postrojenjima za preradu isluženog nuklearnog goriva. U njima se obično skladišti isluženo nuklearnog gorivo, otpad koji emituje značajnu količinu toplote ili dovodi do pojave visokedoze gama zračenja. Voda u bazenima služi za zaštitu od zračenja.
<b>Prostorija ili objekat bez dodatne zaštite od zračenja</b>	Prostorija unutar objekta, skladišni objekat čija je namena promenjena u skladište radioaktivnog otpada ili objekat bez dodatne zaštite od zračenja. Ovakvi objekti mogu se koristiti za skladištenje veoma nisko aktivnog i nisko aktivnog otpada a u ovakve objekte je moguće skladištiti i srednje i visoko aktivni otpad kada je on prethodno smešten u kontejnere koji omogućavaju dodatnu zaštitu. Ovakvi objekti grade se u različitim dimenzijama zavisno od količine radioaktivnog otpadakoja je planirana da se u njih uskladišti a mogu se graditi i u formi modularnih skladišta gde je moguće dodavati dodatne jedinice kada se neke od njih popune. Iako zidovi mogu biti građeni od lakših materijala samo sa ciljem

	sprečavanja izlaska radionuklida iz objekta pod objekta mora biti dovoljno čvrst da izdrži pritisak kontejnera sa radioaktivnim otpadom i opreme neophodne za manipulaciju otpadom.
<b>Prostorija ili objekat sa dodatnom zaštitom od zračenja</b>	Prostorija ili objekat posebno projektovani i izgrađeni sa dodatnim zaštitnim barijerama u vidu zidova veće debljine ili dodatnih pregrada unutar objekta. Ovakvi objekti koriste se za skladištenje srednje i visoko aktivnog otpada. Kao i objekti bez dodatne zaštite i ovi objekti grade se u većem broju dimenzija zavisno od količine radioaktivnog otpada koja je planirana da se u njih uskladišti a mogu se graditi i u formi modularnih skladišta gde je moguće dodavati dodatne skladišne jedinice.
<b>Skladišni kontejneri</b>	Skladišni kontejneri se kao zasebni, samostojeći, objekti često koriste za skladištenje isluženog nuklearnog goriva ili drugog visoko aktivnog otpada koji generiše toplotu. Ovakvom rešenju često se pribegava kad odlaganje ili prerada isluženog goriva nisu obezbeđeni ili predviđeni. Ovakvi kontejneri izrađuju se od betona ili čelika a projektovani su na takav način da efikasno odvede toplotu sa uskladištenog otpada u okolnu atmosferu. U slučajevima kada je potrebno ovakve kontejnere dodatno zaštititi od atmosferskih uticaja oni se mogu smestiti u odgovarajuće skladišne objekte.

Pri projektovanju skladišta radioaktivnog otpada, težište mora biti na zaštitnim barijerama kojima se sprečava širenje radioaktivnih materijala iz radioaktivnog otpada van skladišta. Kao što je već opisano, to je integritet skladišta i njegove opreme, kao i integritet pakovanja radioaktivnog otpada tokom celokupnog očekivanog perioda skladištenja. U obzir treba uzeti i interakcije između različitih tipova otpada, kontejnera i njihovog okruženja (npr. pojava hemijske ili elektrohemijske korozije). Za pojedine vrste otpada (npr. tečni otpad) u obzir treba uzeti posebne mere predostrožnosti kao što su upotreba kontejnera sa dvostrukim zidovima ili nepropusnim oblogama. Sigurnost skladištenja radioaktivnog otpada treba, u meri u kojoj je to moguće, da bude zasnovana na merama pasivne sigurnosti. Ove mere je, u svojim preporukama, navela Međunarodna agencija za atomsku energiju i one uključuju:

- pokretljivo radioaktivnog materijala mora biti sprečena;
- pakovanje radioaktivnog otpada i kontejner u koji je upakovan moraju biti fizički i hemijski stabilni;
- sva zaostala energija mora biti uklonjena iz radioaktivnog otpada;
- zadržavanje radioaktivnog materijala unutar skladišta mora biti obezbeđeno primenom višestrukih barijera;
- pakovanje radioaktivnog otpada i kontejner u koji je on upakovan ne mogu biti podložni degradaciji;
- uslovi unutar skladišta moraju biti takvi da optimizuju životni vek pakovanja radioaktivnog otpada;
- potreba za aktivnim sistemima sigurnosti mora biti svedena na minimum;
- potreba za kontrolom i održavanjem mora biti svedena na minimum;
- potreba za ljudskim intervencijama mora biti svedena na minimum;
- skladište radioaktivnog otpada mora biti projektovano tako da bude otporno na sve predvidive opasnosti;
- pristup skladištu radioaktivnog otpada za potrebe delovanja u slučaju vanrednog događaja mora biti obezbeđen;
- brzo delovanje u slučaju vanrednog događaja mora biti obezbeđeno;
- pakovanja radioaktivnog otpada treba da budu dostupna za inspekciju;
- pakovanja radioaktivnog otpada je moguće izneti radi inspekcije ili dodatnog tretmana;
- životni vek skladišta radioaktivnog otpada treba da odgovara periodu skladištenja radioaktivnog otpada pre njegovog odlaganja;
- skladište radioaktivnog otpada mora biti projektovano tako da je moguće iznošenje radioaktivnog otpada;

- pakovanje radioaktivnog otpada mora bitiprihvatljivo za njegovo konačno odlaganje.

Prilikom projektovanja skladišta ali i odabira načina tretiranja radioaktivnog otpada u obzir se mora uzeti i mogućnost da objekat za odlaganje radioaktivnog otpada neće biti dostupno u momentu u kom je to planirano. Ovo znači da postoji mogućnost da će radioaktivni otpad biti uskladišten u dužem vremenskom periodu u odnosu na to kako je prvobitno planirano, odnosno da je nastavak skladištenja jedina dostupna mogućnost za dalje sigurno upravljanje radioaktivnim otpadom. Iz ovog razloga, u državama gde pitanje odlaganja radioaktivnog otpada nije još rešeno, prilikom projektovanja skladišta radioaktivnog otpada u obzir treba uzeti i ovu mogućnost. Na taj način može biti obezbeđena dodatna sigurnost uskladištenog otpada i nakon vremena prvobitno predviđenog za skladištenje.

Aktivnosti koje se odvijaju tokom planiranja i rada skladišta projektovanog za dugoročno skladištenje radioaktivnog otpada a posebno zahtevi za njegovo kondicioniranje, moraju biti sprovedene na takav način da ne utiču negativno na njegovo kasnije odlaganje. Dugoročno skladištenje radioaktivnog otpada mora obezbediti što je moguće veću fleksibilnost u pogledu kasnijih faza upravljanja radioaktivnim otpadom, vodeći pri tom računa o sigurnosti skladištenja radioaktivnog otpada.

Neradiološki rizici usled specifičnih fizičkih, hemijskih ili bioloških karakteristika radioaktivnog otpada treba takođe da budu uzeti u obzir u svakoj fazi skladištenja radioaktivnog otpada.

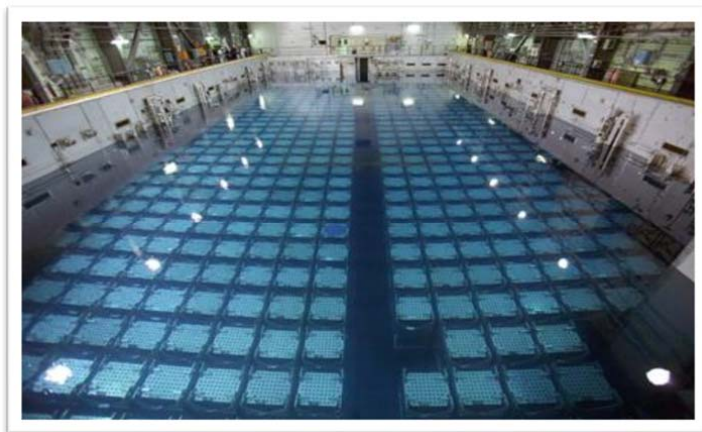
### Skladištenje isluženog nuklearnog goriva

Isluženo nuklearnogorivo se, sve dok se ne proglasi radioaktivnim otpadom, smatra korisnim resursom jer se iz njega preradom mogu izdvojiti korisni elementi. Ipak, gorivo se posle uklanjanja iz nuklearnog reaktora mora uskladištiti na odgovarajući način.

Postoje dve opcije skladištenja isluženog nuklearnog goriva – skladištenje u bazenu sa vodom i skladištenje u suvom skladištu.

Prilikom skladištenja u bazenu sa vodom gorivni elementi nalaze se ispod vode koja omogućava i hlađenje i odgovarajuću zaštitu od zračenja. Skladištenje u bazenu sa vodom prikazano je na slici 7.6. U većini slučajeva, isluženo nuklearno gorivo se posle uklanjanja iz nuklearnog reaktora skladišti u bazenu sa vodom nekoliko godina kako bi se postiglo smanjenje njegove temperature. Bazeni u koje se isluženo nuklearno gorivo smešta

moraju biti dovoljno duboki, kako bi nivo vode bio nekoliko metara iznad uskladištenog goriva.



Slika 7.6. Skladištenje isluženog nuklearnog goriva u bazenu

Posle definisanog perioda skladištenja u bazenu, gorivo se premešta u suvo skladište čija se zaštitna svojstva zasnivaju na betonskim ili metalnim kontejnerima i gde je hlađenje obezbeđeno prirodnom konvekcijom ili prisilnom cirkulacijom vazduha. (Slika 7.7).



Slika 7.7. Skladištenje isluženog nuklearnog goriva u suvom skladištu

## VIII. Transport radioaktivnih materija

---

Transport radioaktivnih materija obuhvata sve aktivnostikoje podrazumevanju pomeranje radioaktivnog otpada. Ove aktivnosti obuhvataju konstrukciju, proizvodnju i održavanje transportnih kontejnera kao i pripremu, slanje, manipulaciju, skladištenje i prijem paketa sa radioaktivnim sadržajem.

Transport radioaktivnog otpada sa mesta nastanka do lokacije za njegov tretman i kasnije do lokacije za odlaganje u radiološkom smilsu predstavlja značajan segment u upravljanju radioaktivnim otpadom. Radiološki uticaj odnosi se na izlaganje profesiolno izloženih lica i stanovništva koje boravi u blizini transportne rute. Kako bi radiološki rizik bio što bolje kontrolisan, veoma je važno da radioaktivni otpad pre transporta bude adekvatno tretiran i kondicioniran.

Kao što je ranije objašnjeno, radioaktivni materijali mogu biti u gasovitom, tečnom ili čvrstom agregatnom stanju. Međutim, transport se vezuje uglavnom za radioaktivni otpad u čvrstom agregatnom stanju, i ređe, za radioaktivni otpad u tečnom agregatnom stanju. Najčešći vid transporta radioaktivnog otpada je drumski ili železnički saobraćaj, iako mogu biti zastupljeni i drugi vidovi transporta kao što su vodeni i vazdušni. Uslovi za sve vidove transporta definisani su međunarodnom trasnportnom regulativom.

Osnovni cilj standarda koje regulištu transport radioaktivnih materija je adekvatna kontola rizika u vezi ove vrste transporta putem sledećih zahteva:

- Održavanje radioaktivnih matreijala u definisanoj zapremini;
  - Kontrola nivoa spoljašnjeg izlaganja;
  - Prevencija termičkih oštećenja;
  - Prevencija kritičnosti.
-

Transporna regulativa definiše opšte zahteve u pogledu zaštite od zračenja, delovanja u vanrednim događajima, osiguranja kvaliteta transportnih kontejnera i svih operacija u procesu transporta. Pored navedenih opštih zahteva, moguće je definisati i neke dodatne zahteve u pojedinačnim slučajevima kada direktna primena transportne regulative nije moguća ili nije praktična.

Efikasna kontrola radijacionog rizika tokom transporta radioaktivnih materija oslanja se na nekoliko specifičnih zahteva, od kojih su najznačajniji:

- Utvrđivanje nivoa izuzimanja u smislu aktivnosti radioanuklida. Radioaktivni materijali čija je aktivnost manja od ovih nivoa mogu se transportovati bez posebnih zahteva, imajući u vidu da radijacioni rizik nije značajan;
- Utvrđivanje nivoa aktivnosti radionuklida u cilju definisanja količine i vrste radioaktivnih materija koje mogu biti transportovane na određen način;
- Postavljanje ograničenja u smislu ukupne i specifične aktivnosti radionuklida za određenu vrstu paketa u okviru transporta radioaktivnih materija;
- Postavljanje zahteva u smislu dizajna i metoda za ispitivanje transportnih kontejnera;
- Definisanja pravila u pogledu kategorizacije i obeležavanja paketa.

### Veličine definisane transportnom regulativom

Veličine  $A_1$  i  $A_2$

Veličine  $A_1$  i  $A_2$  odnose se na granične vrednosti aktivnosti radionuklida (u Bq) u specifičnom i nespecifičnom obliku koje mogu biti transportovane u određenom tipu radioaktivnog paketa. Primeri vrednosti  $A_1$  i  $A_2$  prikazani su u Tabeli 8.1.

Kontaminacija

Pojam kontaminacija se odnosi na situacije kada je prisutvo radionuklida dokazano na površini nekog objekta. Kontaminacija može biti vezana i slobodna. Iako fizički nije jednostavno razdvojiti ova dva pojma, sa praktičnog stanovišta ona kontaminacija koja se zadržava tokom rutinskog transporta može se smatrati fiksnom ili vezanom. Ovaj vid kontaminacije ne doprinosi dozi od unutrašnjeg izlaganja u normalnim uslovima ali može biti

---



od značaja u akcidentalnim uslovima. Slobodna kontaminacija doprinosi dozi od unutrašnjeg izlaganja i u normalnim i u akcidentalnim uslovima.

Tabela 8.1. Vrednosti  $A_1$  i  $A_2$  za različite radionuklide

Radionuklid	Period poluraspada	$A_1$ (TBq)	$A_2$ (TBq)
$^{14}\text{C}$	5730 g	$4 \cdot 10^1$	3,0
$^{55}\text{Fe}$	2,7 g	$4 \cdot 10^1$	$4 \cdot 10^1$
$^{60}\text{Co}$	5,27 g	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$
$^{59}\text{Ni}$	$7,5 \cdot 10^4$ g	neograničeno	neograničeno
$^{90}\text{Sr}$	29 g	$3 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$
$^{93}\text{Mo}$	3500 g	$4 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$
$^{131}\text{I}$	8 d	3,0	$7 \cdot 10^{-1}$
$^{137}\text{Cs}$	30 g	2,0	$6 \cdot 10^{-1}$
$^{106}\text{Ru}$	368 d	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
$^{192}\text{Ir}$	74 d	1,0	$6 \cdot 10^{-1}$
$^{238}\text{U}$	$4,47 \cdot 10^9$ g	Neograničeno	Neograničeno
$^{239}\text{Pu}$	24065 g	$1 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^{-3}$
$^{241}\text{Am}$	432 g	$1 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^{-3}$

U smislu transportne regulative, kontaminiranim objektima smatraju se oni čija je površinska kontaminacija veća od  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$  za  $\beta/\gamma$  emitere i niskotoksične alfa emitere ili  $0,04 \text{ Bq/cm}^2$  za sve ostale alfa emitere.

Indeks kritičnosti (CSI)

Indeks kritičnosti de odnosi na pojedinačni transport komada koji sadrže fisibilne materije i odgovara parametru kojim se kontroliše njihova akumulacija. Indeks kritičnosti se izračunava kao količnik broja 50 i broja N kojem se pripisuje vrednosti koja obezbeđuje podkritičnost i svim transportnim uslovima. Što je rizik od kritičnosti niži, to je i broj N veći. Na primer, ukoliko je  $N=11$ , to je  $\text{CSI}=50/11=4,6$ . Broj paketa koji se mogu istovremeno transportovati je onda  $50/4,6 \approx 10$ .

### Niskodisperzivni radioaktivni materijali

Niskodisperzivni radioaktivni materijali su oni koji u svom osnovnom obliku ne mogu izazvati širenje kontaminacije. Ovi radioaktivni materijali su učvrstom agregatnom stanju ili su smešteni u zatvorenu kapsulu. Ukupna količina radioaktivnog materijala u ovom slučaju definisana je kriterijumom po kome doza na rastojanju od 3 m ne može biti veća od 10 mSv/h.

### Radioaktivni materijali niske specifične aktivnosti

Po definiciji, radioaktivni materijali niske specifične aktivnosti (LSA) su oni kod kojih je specifična aktivnost dovoljno niska da ne predstavlja poseban radijacioni rizik u procesu transporta. Granična vrednosti specifične aktivnosti za LSA materijale iznosi  $10^{-4} \text{A}_2/\text{g}$  a tipičan primer LSA jesu rude koje sadrže U i Th. U opštem slučaju postoje tri kategorije LSA materijala:

- LSA-I materijali, odnosno rude i materijali koji sadrže prirodne radionuklide čije je specifična aktivnost relativno mala;
- LSA-II materijali, čije je specifična aktivnost manja od  $10^{-4} \text{A}_2/\text{g}$  a sačinjava ga uglavnom otpad iz operativne faze i dekomisije nuklearnih reaktora;
- LSA-III materijali, odnosno solidifikovani materijali kao što su tečnosti u kapsulama od čvrstog materijala, solidifikovane smole i filteri u čvrstim matriksima. Granična aktivnost u ovom slučaju iznosi  $2 \cdot 10^{-3} \text{A}_2/\text{g}$ , pri čemu radioaktivnost mora biti uniformno distribuirana.

### Pakovanja i paketi

Pojam pakovanje se odnosi na kontejner koji zajedno sa radioaktivnim sadržajem sačinjava paket koji je predmet transportne regulative.

### Dodatni kontejner (over-pack)

Dodatni kontejner predstavlja dodatnu spoljašnju oblogu koja sarži jedan ili više radioaktivnih paketa i predmet je transportne regulative.

### Specifični oblik radioaktivnih materijala

Specifični oblik radioaktivnih materijala odnosi se na materije u čvrstom agregatnom stanju ili druge materije smeštene u kapsule i kod kojih je verovatnoća za širenje kontaminacije mala. Svaki drugi oblik radioaktivnih materijala se smatra nespecifičnim.

---

### Površinski kontaminirani objekti (SCO)

Površinski kontaminirani objekti (SCO) su objekti kod kojih je utvrđeno prisutvo slobodne ili vezane kontaminacije na spoljašnjoj površini. Kontaminirani objekti semogu dalje podeliti u dve kategorije:

- SCO-I: objekti sa slobodnom ili fiksnom kontaminacijom kod kojih je slobodna površinska kontaminacija  $\beta/\gamma$  emiterima ili niskotoksičnim alfa emiterima manja od  $4 \text{ Bq/cm}^2$  ili manja od  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$  za ostale alfa emitere. U slučaju fiksne kontaminacije ove vrednosti se množe faktorom 10000;
- SCO-II: objekti sa slobodnom ili fiksnom kontaminacijom kod kojih je slobodna površinska kontaminacija  $\beta/\gamma$  emiterima ili niskotoksičnim alfa emiterima manja od  $400 \text{ Bq/cm}^2$  ili manja od  $40 \text{ Bq/cm}^2$  za ostale alfa emitere. U slučaju fiksne kontaminacije ove vrednosti iznose 800 kBq i 80 kBq, respektivno.

### Transportni indeks

Transportni indeks (TI) je indikator nivoa doze jonizujućih zračenja u blizini radioaktivnog paketa ili dodatnog kontejnera. Odgovara jačini doze na rastojanju od 1 m od spoljašnje površine paketa u jedinicama mSv/h, pomnoženog faktorom 100. TI jedne pošiljke ne može biti veći 10.

### Vrste radioaktivnih paketa

Jedan od najznačajnijih preduslova za bezbedan transport radioaktivnih materija odnosi se na uslove za kontejnere u kojima se ove materije transportuju u funkciji predviđenog radioaktivnog sadržaja. U opštem slučaju, za transport radioaktivnih materija koristi se nekoliko različitih vrsta paketa: izuzeti paketi, industrijski paketi i paketi tipa A, B i C.

Male količine radioaktivnih materijala mogu biti transportovane u jednostavnim formama koji se nazivaju izuzeti paketi. Bez obzira na mali radiološki rizik, i ovi paketi moraju ispuniti opšte zahteve sigurnosti u smislu dizajna i robusnosti u odnosu na radioaktivni sadržaj koji se transportuje. Granične aktivnosti radionuklida za ove pakete prikazane su u Tabeli 8.2. Vrednosti  $A_1$  i  $A_2$  date su u Tabeli 8.1. Jačina doze na bilo kojoj spoljnoj površini paketa koji se transportuje kao izuzet ne može biti veća od  $5 \mu\text{Sv/h}$ . Primeri radioaktivnih paketa koji se transportuju kao izuzeti su: radioaktivni materijali male specifične aktivnosti, delovi instrumenata i

opreme koji sadrže radioaktivne materije niske aktivnosti, predmeti od osiromašenog uranijuma i prazni kontejneri ranije korišćeni za transport radioaktivnih materija.

Tabela 8.2. Granične vrednosti aktivnosti radionuklida za izuzete pakete

	<b>Instrument ili deo instrumenta</b>		<b>Materijal</b>
<b>Sadržaj</b>	Granična vrednost za jedan komad	Granična vrednost za paket	Granična vrednost za paket
<b>Čvrsto agregatno stanje</b>			
<b>Specifični oblik</b>	$1,0 \cdot 10^{-2} A_1$	$A_1$	$1,0 \cdot 10^{-3} A_1$
<b>Ostali oblici</b>	$1,0 \cdot 10^{-2} A_2$	$A_2$	$1,0 \cdot 10^{-3} A_2$
<b>Tečnosti</b>	$1,0 \cdot 10^{-3} A_2$	$1,0 \cdot 10^{-1} A_2$	$1,0 \cdot 10^{-4} A_2$
<b>Gasovi</b>			
<b>Tricijum</b>	$2,0 \cdot 10^{-2} A_2$	$1,0 \cdot 10^{-1} A_2$	$2,0 \cdot 10^{-2} A_2$
<b>Specifični oblik</b>	$1,0 \cdot 10^{-3} A_1$	$1,0 \cdot 10^{-2} A_1$	$1,0 \cdot 10^{-3} A_1$
<b>Ostali oblici</b>	$1,0 \cdot 10^{-3} A_2$	$1,0 \cdot 10^{-2} A_2$	$1,0 \cdot 10^{-3} A_2$

Kao što je prikazano u Tabeli 8.1, transportnom regulativom ograničena je aktivnost svakog pojedinačnog komada za transport. Ove granice zavise od agregatnog stanja, oblika radioaktivnog materijala i informacije da li je radioaktivni materijal deo nekog instrumenta ili proizvoda, kao na primer radionuklid  $^{241}\text{Am}$  koji može biti deo jonizacionog detektora dima. U ovom slučaju postoji posebna ograničenja za aktivnost radionuklida u pojedinačnom instrumentu.

Industrijski paketi sadrže LSO ili SCO. Ovaj vid paketa seobično odnosi na velike zapremine radioaktivnih materijala koje mogu biti predmet transporta. Granične aktivnosti za industrijske pakete prikazane su u Tabeli 8.3.

Tip A radioaktivnih paketa odnosi se na transport pojedinačnih radionuklida u skladu sa vrednostima  $A_1$  i  $A_2$  datim u Tabeli 8.1. Paketi tipa A mogu da

sadrže pojedinačne radionuklide i mešavinu radionuklida, pri čemu mora biti ispunjen sledeći zahtev:

$$\sum_{j,k} \left( \frac{A_{1,j}}{A_1} + \frac{A_{2,k}}{A_2} \right) \leq 1 \quad (8.1)$$

Veličina  $A_{1,j}$  se odnosi na aktivnost određenog radionuklida  $j$  u specifičnom obliku a  $A_{2,k}$  na aktivnost drugih radionuklida u nespecifičnom obliku.

Paketi tipa A su namenjeni za ekonomičan i siguran i bezbedan transport velikog broja pošiljki relativno male pojedinačne aktivnosti. Ovi paketi ne zahtevaju dozvole za svaku pojedinačnu pošiljku.

Tabela 8.3. Granične aktivnosti za transport industrijskih paketa

Radioaktivni sadržaj	Aktivnost radionuklida (za sve vidove transporta osim vodnog saobraćaja)	Aktivnost radionuklida (za transport vodnim saobraćajem)
<b>LSA-I</b>	Bez ograničenja	Bez ograničenja
<b>LSA-II i LSA-III</b> Nezapaljive čvrste materije	Bez ograničenja	100 $A_2$
<b>LSA-II i LSA-III</b> Zapaljive čvrste materije	100 $A_2$	10 $A_2$
<b>SCO</b>	100 $A_2$	10 $A_2$

Radioaktivne materije čija aktivnost prevazilazi kriterijume za tip A, odgovaraju paketima tipa B koji se dalje mogu klasifikovati u dve kategorije: B(U) i B(M). Za ovu vrstu pošiljki neophodna je posebna dozvola za svaki transport, shodno većem radijacionom riziku u odnosu na pakete tipa A. Paketi tipa C se odnose na transport fisibilnih materijala i drugih radioaktivnih materija visoke specifične aktivnosti u skladu sa strožim kriterijumima srazmernim radijacionom riziku i potencijalnoj kritičnosti.

Različiti tipovi radioaktivnih paketa sumirani su u Tabeli 8.4.

Tabela 8.4. Tipovi radioaktivnih paketa

Tip paketa	Granična aktivnost	Granična vrednost jačine doze
<b>Izuzeti</b>	Kao u Tabeli 7.3	$\leq 5 \mu\text{Sv/h}$ na bilo kojoj spoljnoj površini $\leq 0,1 \text{ mSv/h}$ na rastojanju od 10 cm od instrumenta bez dodatne zaštite
<b>Industrijski</b>	Kao u Tabeli 7.3	$\leq 10 \text{ mSv/h}$ na bilo kojoj spoljnoj površiniza drumski i železnički transport $\leq 2 \text{ mSv/h}$ na bilo kojoj spoljnoj površini za vazdušni transport
<b>Tip A</b>	Specifični oblik: A <sub>1</sub> Ostali oblik: A <sub>1</sub>	Kao za industrijske pakete
<b>Tip B</b>	Veća u odnosu na granične vrednosti za tip A, zavise od dizajna kontejnera	Kao za industrijske pakete
<b>Tip C</b>	Veća u odnosu na granične vrednosti za tip A, zavise od dizajna kontejnera	Kao za industrijske pakete

### Opšti zahtevi za transport radioaktivnih materija

Transport radioaktivnih materija odvija se skladu sa opštim zahtevima koji se odnose na radioaktivne materije i kontejnere u kojima se ove materije transportuju. Neki od ovih zahteva su:

- Kontejner mora obezbediti bezbednost radioaktivnih materija tokom transporta;
- Kontejneri moraju biti dizajnirani tako daverovatnoća za mehanička oštećenja bude minimalna;
- Spoljašnja površina kontejnera mora biti dizajnirana tako da dekonaminacija bude jednostavna;

- Spoljašnja površina kontejnera mora biti dizajnirana tako da nema mogućnosti za zadržavanje vode;
- Kontejner mora biti otporan na spoljašnje mehaničke uticaje kao što su potresi i vibracije koji mogu nastati u normalnim uslovima transporta;
- Materijali od kojih su napravljeni kontejneri moraju biti kompatibilni sa radioaktivnim materijama koje se u tim kontejnerima transportuju.

Pored navedenih kriterijuma, za pakete kategorije A, kao i za kategorije B i C, postoje dodatni zahtevi, srazmerni radijacionom riziku. Na primer, kontejneri za transport paketa kategorije A moraju ispuniti sledeće dodatne zahteve:

- Najmanja spoljašnja dimenzija kontejnera ne može biti manja od 10 cm;
- Kontejner mora posedovati robustan sistem za zaključavanje;
- Kontejner mora biti otporan na varijacije temperatura u opsegu od -40 do 70 °C;
- Ukoliko je kontejner predviđen i za transport tečnih radioaktivnih materija, dizajn kontejnera mora biti prilagođen mogućim temperaturnim varijacijama samog radioaktivnog sadržaja i mora biti opremljen dodatnim unutrašnjim spoljašnjim kontejnerom za zadržavanje tečnosti u slučaju potencijalnih oštećenja;
- Kontejner mora biti otporan na spoljašnje uticaje kao što su padavine, slobodan pad i prodor oštih predmeta.

Svako od navedenih svojstava proverava se standardnim testovima za ovu kategoriju kontejnera. Kriterijumi za kontejnere kategorije B i C su progresivno stroži i odnose se na dodatne zahteve u pogledu otpornosti na generisanu toplotu, spoljašnje atmosferske uticaje i akcidentalne situacije.

### Kategorizacija i obeležavanje radioaktivnih paketa

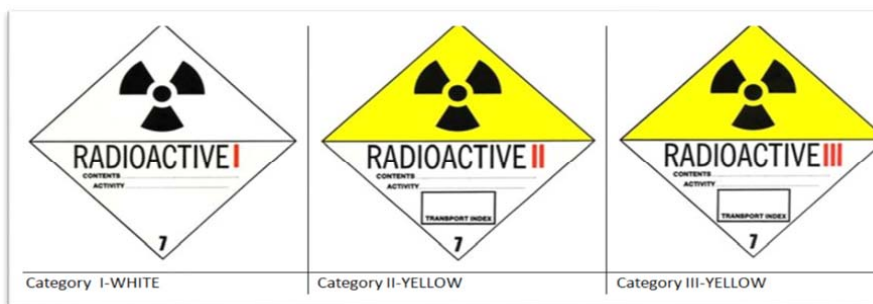
Radioaktivni paketi pre slanja moraju biti kategorisani i adekvatno obeleženi. Kategorizacija i obeležavanje je u funkciji radijacione sigurnosti tokom transporta radioaktivnih materija.

U zavisnosti od jačine doze na površini paketa i transportnog indeksa, paketi mogu biti obeleženi jednom od sledećih oznaka: I-WHITE, II-YELLOW, III-YELLOW, kao što je prikazano u Tabeli 8.5.

Tabela 8.5. Moguće oznake na transportnim paketima

Transportni indeks (TI)	Maksimalna jačina doze na spoljašnjoj površini (mSv/h)	Kategorija
0	≤0,005	I-WHITE
>0 do 1	>0,005 do 5	II-YELLOW
>1 do 10	>0,5 do 2	III-YELLOW
>10	>2 do 10	III-YELLOW (ekskluzivan transport)

Osim u slučaju izuzetih paketa, svaka radioaktivna pošiljka mora biti obeležena. Informacija koja ovom prilikom mora biti obezbeđena sadrži transportni indeks, oznaku radionuklida i aktivnost radionuklida. Oznake za radioaktivne pakete prikazane su na Slici 8.1.



Slika 8.1. Oznake za radioaktivne pakete



Transport radioaktivnog otpada niske aktivnosti

Radioaktivni otpad niske aktivnosti sadrži male količine radioaktivnih materija koje se mogu transportovati bez posebnih ograničenja, obično u metalnim buradima i kontejnerima.

U slučaju radioaktivnog otpada srednje aktivnosti u najvećem broju slučajeva koriste se kontejneri od nerđajućeg čelika a većina takvih kontejnera nema dodatne zaštitne barijere za zaštitu od spoljašnjeg izlaganja. Odsustvo dodatne zaštite utemeljeno je u činjenici da se manji kontejneri transportuju u većim kontejnerima, tako da ulaganje u zaštitu svakog manjeg kontejnera ne bi bilo ekonomično. Potrebno je naglasiti da zbog odsustva zaštite, manipulacija ovakvim kontejnerima mora biti pažljivo isplanirana i sprovedena upotrebom daljinskih manipulatora i drugih ličnih zaštitnih sredstava. Visokoaktivni radioaktivni otpad transportuje se u robusnim kontejnerima koji pored pružanja adekvatne zaštite od zračenja omogućavaju hermetičnost i u slučaju vanrednog događaja tokom transporta.

Tabela 8.6. Kontejneri za transport radioaktivnog otpada srednje aktivnosti (NIREX)

Opis	Primena	Spoljašnje dimenzije	Masa (kg)
500 l bure	Radioaktivni otpad iz operativne faze	d=0,8 m h=1,2 m	2000
3 m <sup>2</sup> ILW kontejner	Radioaktivni otpad u čvrstom agregatnom stanju	1,72 m x 1,72 m x 1,2 m	12000
3 m <sup>2</sup> ILW bure	Radioaktivni otpad u čvrstom agregatnom stanju, mulj za imobilizaciju	d=1,72 m h=1,2 m	12000
4 m ILW kontejner	Veliki komadi iz procesa dekomisije	4,0 m x 2,4 m x 2,2 m	65000



Slika 8.2. Način transporta nisko i srednje aktivnog radioaktivnog otpada u standardnom ISO kontejneru



Slika 8.3. Način transporta isluženog nuklearnog goriva  
([http://www.alphabetics.info/international/wp-content/uploads/2012/05/Nuclear\\_waste\\_container\\_2010\\_nevada.jpg](http://www.alphabetics.info/international/wp-content/uploads/2012/05/Nuclear_waste_container_2010_nevada.jpg))

## IX. Odlaganje radioaktivnog otpada

---

Odlaganje je poslednja faza u upravljanju radioaktivnim otpadom. Odlaganje je trajno smeštanje radioaktivnog otpada u odlagalište, bez namere da se da se otpad ponovo iznosi. Odrednica koja isključuje mogućnost ponovnog korišćenja radioaktivnih materijala nedavno je neznatno modifikovana, uzimajući u obzir nesigurnost predviđanja performansi odlagališta u dugom vremenskom intervalu. Takva modifikacija ostavlja mogućnost iznošenja radioaktivnog otpada radi prepakivanja i prenošenja na alternativnu lokaciju, ukoliko sigurnost prvobitnog odlagališta ili odloženog radioaktivnog otpada bude ugrožena.

Uz prethodnu obradu koja uključuje i kondicioniranje radioaktivnog otpada a koja je detaljno opisana u poglavlju V, sistem prirodnih i višestrukih inženjerskih barijera unutar i u okolini odlagališta pruža garanciju da će se bilo kakvo ispuštanje radionuklida u životnu sredinu, ukoliko do njega uopšte dođe odvijati veoma sporo, odnosno prihvatljivom dinamikom. Neke od barijera koje čine sastavni deo odlagališta, poput metalnih kontejnera, obezbeđuju potpunu izolaciju otpada u određenom vremenskom intervalu. Drugi materijali, kao što je bazična stena u kojoj se smešteno odlagalište, usporavaju prodor radionuklida u okolinu.

Iako je osnovna razlika između skladišta i odlagališta upravo u odrednici da je skladištenje privremeno a odlaganje trajno, redefinisane koncepta odlagališta utiče da ova granica više nije jasna kada je u pitanju vremenski period čuvanja radioaktivnog otpada. Ipak, ključna razlika između skladištenja i odlaganja i dalje ostaje neizmenjena i ogleda se u nameri da skladište bude izgrađeno kao privremeni a odlagalište kao trajni objekat odnosno da se u skladište radioaktivni otpad smešta sa namerom da se iz njega iznese, ukoliko treba dodatno tretira ili kondicionira ili ispusti u životnu sredinu dok se u odlagalište stavlja bez namere da se iz njega iznosi.

Prethodno odlaganju, radioaktivni otpad prolazi kroz niz koraka, kao što su predtretman, tretman, kondicioniranje, skladištenje i transport. Funkcija

---

ovih aktivnosti koje prethode odlaganju jeste obezbeđivanje dugoročne izolacije radioaktivnog otpada u odnosu na životnu sredinu. Treteman i kondicioniranje radioaktivnog otpada opisani su u Poglavlju V, dok su skladištenje i transport opisani u Poglavljima VI i VII.

U ovom poglavlju opisane su opcije za odlaganje radioaktivnog otpada svih klasa uključujući radioaktivni otpad veoma niske, niske, srednje i visoke aktivnosti kao i radioaktivni otpad kratkog i dugog perioda poluraspada. Kratkoživećim radioaktivnim otpadom smatra se onaj koji sadrži radionuklide perioda poluraspada do 30 godina. Ovakva kvantitativna kvalifikacija je u velikoj meri proizvoljna, ali ima svoj praktičan značaj imajući u vidu da su periodi poluraspada najznačajnijih fisionijskih produkata  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , upravo 20 i 30 godina, respektivno.

Osnovni ciljevi odlaganja radioaktivnog otpada su:

- Zaštita ljudi iz životne sredine od štetnog radiološkog i neradiološkog uticaja;
- Čuvanje otpada na način koji ostavlja minimalnu odgovornost za upravljanje radioaktivnim otpadom budućim generacijama.

Principi na kojima se bazira dizajn odlagališta proistekli su upravo iz namere da gore navedeni ciljevi budu ispunjeni.

Sigurnosni standardi kojima je regulisano odlaganje radioaktivnog otpada mogu biti podeljeni na:

1. Operativnu fazu odlagališta (pre zatvaranja). Ova faza seodnosi na period namenjen za prijem radioaktivnog otpada i može biti duga i 100 godina;
2. Post-operativna faza odlagališta (nakon zatvaranja).

### Moguće opcije za odlaganje radioaktivnog otpada

Sigurne, bezbedne i efikasne opcije za odlaganje radioaktivnog otpada u vezi su sa vrstom i karakteristikama radioaktivnog otpada predviđenog za odlaganje. Primarna funkcija odlagališta je dugoročna izolacija radioaktivnog otpada u odnosu na životnu sredinu i to onoliko dugo koliko je potrebno da se radionuklidi za koje se vezuje značajan radiološki rizik značajno raspadnu. To ujedno znači i dakoncepti odlagališta namenjenih za različite kategorije otpada mogu biti različiti. Tako radioaktivni otpad veoma niske aktivnosti i kratkoživeći otpad niske aktivnosti mogu biti smešteni u površinska ili plitka

odlagališta. Dugoživeći otpad niske aktivnosti i kratkoživeći otpad srednje aktivnosti odlažu se u namenska odlagališta ispod površine zemlje, dok se dugoživeći otpad srednje aktivnosti i radioaktivni otpad visoke aktivnosti odlažu u duboka geološka odlagališta.

Za pravilno funkcionisanje odlagališta ključna je klasifikacija radioaktivnog otpadana osnovu koje nadalje mogu definisati kriterijumi za prijem radioaktivnog otpada u odlagalište.



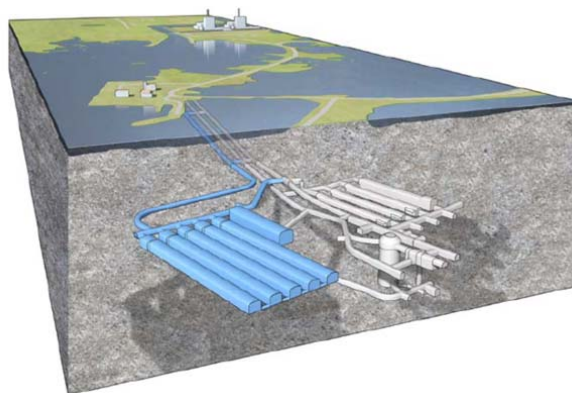
Slika 9.1. Rudnik soli kao odlagalište radioaktivnog otpada u Nemačkoj,  
<https://nuclear-news.net/2016/07/28/>

Prva rešenja za odlaganje radioaktivnog otpada u geološke formacije razvijana su šezdesetih godina 20. veka a sastojala su se od direktnog odlaganja tečnog radioaktivnog otpada u slane geološke formacije. Ovo rešenje je daleko od onog što se danas smatra prihvatljivom opcijom za odlaganje radioaktivnog otpada. Koncept savremenih odlagališta, zasnovanih na kombinaciji izgrađenih i prirodnih barijera poznat je nešto više od 40 godina.

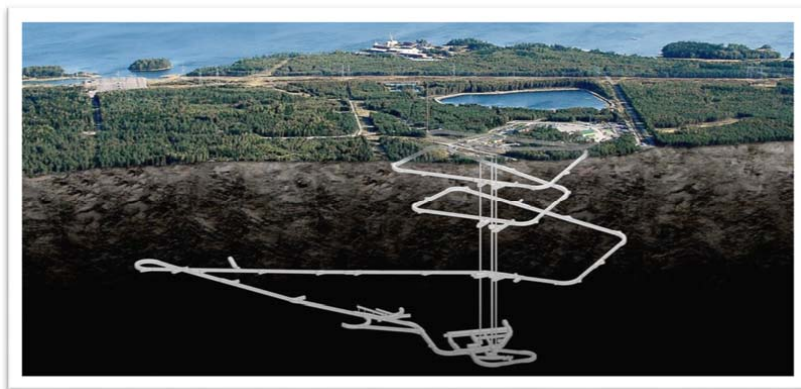


Slika 9.2 Plitko odlagalište El Cabril, Španija

Zahvaljući intenzivnim istraživanjima u ovoj oblasti, koncept više tipova odlagališta značajno je unapređen u poslednjih nekoliko decenija. Sve to dovelo je do značajnih pomaka u razvoju odlaganja radioaktivnog otpada i puštanja u rad nekoliko plikatih odlagališta, a jedno takvo je dato na Slici 9.2. kao i značajnih istraživanja na polju dubokih geoloških odlagališta gde je u prethodnih nekoliko decenija razvijen veći broj projekata izgradnje dubokih geoloških odlagališta od kojih su neki prikazani na Slici 9.3 i 9.4.



Slika 9.3. Prmer rešenja za geološko odlagalište radioaktivnog otpada (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co), <http://www.skb.com>



Slika 9.4. Prmer rešenja za geološko odlagalište radioaktivnog otpada (Onkalo, Finska), <http://news.vattenfall.com/en/article/positive-decision-finnish-spent-nuclear-fuel-repository>

#### Sistem višestrukih barijera

Izbor opcije za odlaganje radioaktivnog otpada zavisi od vrste otpada, pri čemu je ograničavanje doze za stanovništvo osnovni zahtev zajednički za sve tipove odlagališta.

Dugoročna izolacija radionuklida od životne sredine postiže se primenom opšteg principa „odbrane po dubini“ (defence in depth) koji predstavlja hijerarhijsko postavljanje različitih nivoa opreme i procedura sa ciljem sprečavanja eskalacije očekivanih operativnih događaja i održavanja efikasnosti fizičkih barijera postavljenih između radioaktivnog materijala i životne sredine, u normalnim pogonskim stanjima i, za neke barijere, u uslovima odstupanja od normalnih pogonskih stanja. Što je aktivnost i period poluraspada veći, to je i primena ovog principa rigoroznija. Kao što je opisano u poglavlju VI, princip može biti implementiran pomoću sistema višestrukih barijera (multi-barrier concept), u kojem se kombinacija različitih nivoa zaštite primenjuje kao odgovor na potencijalne rizike koji postoje u odlagalištu.

Sistem višestrukih barijera sastoji se od:

- Inženjerskih, proizvedenih ili izgrađenih, barijera koje obuhvataju oblik radioaktivnog otpada, kontejnere i izolacioni sloj od prirodnih materijala (backfill);

- Prirodnih barijera koje formiraju geološke formacije, biosfera i geofera u kojoj je odlagalište locirano.

Prirodne barijere su odabrane na takav način da nakon izvesnog vremena, kada inženjerske barijere više ne budu mogle da na adekvatan način zadrže širenje radionuklida, preuzmu njihovu funkciju. Pretpostavka je daje ovaj proces veoma spor, a kombinacija različitih barijera garantuje robusnost odlagališta u dovoljno dugom vremenskom intervalu. Potrebno je, međutim, naglasiti da sistem višestrukih barijera, na današnjem nivou znanja, sadrži određene pretpostavke koje nisu dovoljno ispitane. Pored toga, različiti događaji, bilo da su izazvani ljudskim delovanjem, bilo seizmičkim ili drugim prirodnim katastrofama, takođe mogu uticati na dugoročnu stabilnost odlagališta. Svi ovi faktori smatraju se uticajnim veličinama koje utiču na nesigurnost procene dugoročnog ponašanja sistema višestrukih barijera primenjenog u nekom odlagalištu radioaktivnog otpada. To ujedno implicira da deterministička ocena ponašanja odlagališta, po kojoj će radionuklidi biti izolovani u odnosu na biosferu neograničeno dugo nije moguća.

#### Sistem inženjerskih barijera

Sistem inženjerskih barijera se sastoji od radioaktivnog otpada u čvrstom agregatnom stanju, kontejnera, dodatnog kontejnera i izolacionog sloja od prirodnih materijala (backfill). Ove barijere su izgrađene ljudskim aktivnostima tokom projektovanja, izgradnje, rada i zatvaranja odlagališta.

Tabela 9.1. Inženjerske barijere i njihova osnovna funkcija.

Inženjerska barijera	Funkcija	Kategorija radioaktivnog otpada	
		HLW	ILW/LLW
<b>Oblik otpada</b>	Imobilizacija radionuklida	Staklo, keraminka	Cement, bitumen, smole
<b>Kontejner</b>	Zadržavanje radionuklida	Nerdajući čelik, gvožđe, bakar, keramika, titan	Čelična burad
<b>Izolacioni sloj</b>	Stabilizacija procesa ispod površine zemlje	Glina, melvena stena	Beton, glina, peesak



Osnovni faktori koji utiču na način konstrukcije inženjerskih barijera jesu osobine podzemnih voda, pre svega njihov tok i hemijski sastav, kao i termičke i mehaničke osobine geološkog okruženja. Tako proizvedene inženjerske barijere zadržavaju radionuklide u definisanoj zapremini najmanje nekoliko stotina godina, putem različitih mehanizama kao što su sorpcijaili usporavanje transportnih procesa. U Tabeli 9.1. su prikazane inženjerske barijere i njihova osnovna funkcija.

#### Oblik radioaktivnog otpada

Oblik radioaktivnog otpada sastoji se od matriksa u kojem se nalaze radionuklidi. Funkcija takvog matriksa je osnovna funkcija upravljanja radioaktivnim otpadom, odnosno održavanje radioanuklidau definisanoj zapremini. Visokoaktivan radioktivni otpad je najčešće smešten u stakleni ili keramički matriks. Radioaktvni otpad srednje i niske aktivnosti imobilise se pomoću cementnih matriksa i smešta se u dodatne betonske ili čelične kontejnere. Metalni komadi, kao što su delovi cevi, mašina i alata, pakuju se u metalnu burad i fiksiraju betonom. Aktivirani metalni delovi koji sadrže dugoživeće radionuklide kao što su izotopi nikla  $^{59}\text{Ni}$  i  $^{63}\text{Ni}$  kao i  $^{94}\text{Nb}$ , imobilisu se na sličan način, uz prethodno pretapanje u homogene metalne odlivke, tzv ingote<sup>3</sup> u obliku šipki ili blokova.

Stepen fizičke i hemijske degradacije u svim opisanim slučajevima mora biti što je moguće manji a glavni faktor koji može uticati na degradaciju jeste kretanje podzemnih voda. U gornjim slojevima geološkog profila, posebno u zonama iznad nivoa podzemnih voda, kretanje podzemnih voda može biti značajno. Međutim, na većim dubinama, posebno na lokacijama koje senalaze nekoliko stotina metara ispod površine zemlje, tok podzemnih voda je spor i stabilan. Ovakvi uslovi odgovaraju uspostavljanju hemijske ravnoteže u stenama i mineralima, usled čega podzemne vode postaju slane i imaju redukciona svojstva. Odsustvo kiseonika tada značajno usporava koroziju metalnih delova i struktura inženjerskih barijera.

Radionuklidi imobilisani u matrikse mogu biti rastvoreni u podzemnim vodama. Iako je ovaj proces relativno spor, u izvesnoj meri doprinosi migraciji radionuklida. Brzina ovog procesa zavisi od površine matriksa izložene vodi, lokacije radionuklidau matriksu, hemijskog sastava vode i brzine vodenih

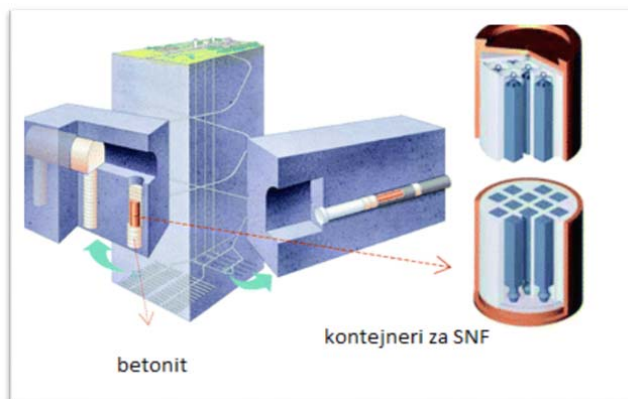
---

<sup>3</sup>Ingot je komad ili deo relativno čistog materijala, obično metala, koji je izliven u oblik pogodan za dalju obradu

tokova, rastvorljivosti radionuklida i verovatnoće za radioloizu. Potrebno je naglasiti da je rastvorljivost većine radionuklida u vodi izuzetno mala.

#### Kontejneri

Kontejneri predstavljaju drugi nivo inženjerskih barijera. Za visokoaktivan radioaktivni otpad i isluženo nuklearno gorivo koriste se metalni kontejneri, koji mogu biti smešteni i u dodatne kontejnere. Radioaktivni otpad niske i srednje aktivnosti može direktno biti smešten u metalne ili betonske kontejnere. Kontejneri koji sadrže imobilisan radioaktivni materijal doprinose integritetu inženjerskih barijera u veoma dugom vremenskom intervalu čije trajanje zavisi od brzine dezintegracije kontejnera, pre svega procesom korozije. Međutim, upotrebom materijala otpornih na koroziju vek kontejnera može biti produžen do nekoliko stotina hiljada godina. U cilju poboljšanja mehaničkih svojstava kontejnera danas se, u raspoloživim odlagalištima, koriste betonski kontejneri ojačani čeličnom armaturom kao i kompozitni metalno-keramički kontejneri, čija se otpornost na mehničke potrese značajno bolja dok su u razvoju i kompozitni kontejneri na bazi polimera i geopolimera a sa ciljem obezbeđivanja što dugoročnije stabilnosti odloženog radioaktivnog otpada.



Slika 9.5. Kontejneri za iskorišćeno nuklearno gorivo , KBS-3 koncept, Švedska, <http://www.skb.com/>

### Izolacioni sloj od prirodnih materijala

Izolacioni sloj se upotrebljava za popunjavanje šupljina u geološkoj formaciji u kojoj se nalazi odlagalište. Ovi materijali se koriste u prostoru koji okružuje kontejnere (buffer) i u širem prostoru koji okružuje odlagalište za popunjavanje većih otvora i tunela (backfill). Funkcija izolacionog sloja je sledeća:

- Popunjavanje šupljina u okolni radioaktivnog otpada, čime je očuvana stabilnost odlagališta;
- Prevencija prodiranja vode u odlagalište;
- Očuvanje hemijske stabilnosti odlagališta;
- Potencijalno sprečavanje migracije radionuklida iz kontejnera;
- Odvođenje toplote.

Izolacioni materijali moraju biti homogeni i moraju obezbediti uniformno fizičko-hemijsko okruženje za radioaktivni otpad. Za ovu namenu seobično koriste prirodni materijali kao što je mešavina gline i bentonita ili izmrvljena granitna stena iz procesa izgradnje odlagališta. Pomenuti materijali izoluju radioaktivni materijal od geoloških procesa i amortizuju tektonske aktivnosti. Pored toga, bentonit je hemijski stabilan i ima posebno povoljno svojstvo da apsorbuje vodu i širi se, šupljine postaju bolje ispunjenje pa je dalji prodor vode sprečen.

### Prirodne barijere

Prirodna barijera ili geosfera je neizmenjena stena koja pruža stabilno okruženje za odlagalište radioaktivnog otpada. Originalna svojstva geosfere mogu biti izmenjena izgradnjom samog odlagališta. Za izgradnju odlagališta se biraju stene povoljnih svojstava i bez seizmičke aktivnosti. Analiza povoljnih svojstava stena obuhvata pored toga i hidrogeološke, geofizičke i geochemijske osobine. Stabilnost okruženja međutim ne znači da u dužem vremenskom intervalu nema izmena geoloških uslova ali je bitno da te izmene budu spore i predvidljive. Dugoročna stabilnost zavisi od tektonskih i magmatskih aktivnosti koje semogu relativno pouzdano predvideti ali i od prirodne erozije koja je teže predvidljiva i merljiva.

### Transportni mehanizmi

Ukoliko dođe do rastvaranja radioanuklida u vodi i njihovog transporta kroz oštećene kontejnere, rastvor koji sadrži radionuklide mora proći i kroz

---

izolacioni sloj od prirodnih materijala koji je odabran tako da ima malu propusnu moć za vodu. Ipak, prepoznaju se dva osnovna mehanizma transporta tečnih rastvora: dominantna molekularna difuzija i manje značajan proces kretanja prenosom mase (advekcija). Pored toga, različiti radionuklidi formiraju različite katjonske i anjonske vrste ili elektroneutralne komplekse koji se kroz vodu kreću različitom brzinom u različitim elektrohemijskim okruženjima. Ovaj transportni proces naziva se disperzija.

#### Migracija radionuklida

Rastvoreni radionuklidi se kroz zemlju transportuju pretežno difuzijom. Priroda difuzije zavisi od tipa bazične stene, pa se kroz granitne stene ona odvija kroz pukotine između susednih kristalnih struktura, dok se u slučaju sedimentnih stena transport odvija između slojeva u stenama. Poroznost sedimentnih stena iznosi do 10%, dok je u slučaju granitnih stena ona manja od 0,5%. Pored poroznosti stena, za transport radionuklida bitna je i povezanost pora u stenama. Transport radionuklida se pored navedenog odvija i kroz pukotine u stenama koje postoje čak u čvrstim granitnim strukturama kao posledica različitih tektonskih poremećaja. Ove pukotine formiraju finu trodimenzionalnu mrežu kanala kroz koje se kreće voda.

#### Biosfera

Biosfera obuhvata atmosferu, zemljište, površinske vode kao što su reke, jezera, mora i okeani kao i njihovi sedimenti u kojima borave živi organizmi. Iako se ne može jasno definisati, granica između biosfere i geosfere tipično se nalazi se dnu sedimentnih slojeva i zemljišta koji mogu biti izmenjeni ljudskim aktivnostima.

Biosfera ne pripada sistemu prirodnih barijeraali procesi u njoj utiču na kretanje i rastvaranje radionuklida, pa se ona takođe posmatra u kontekstu analize dugoročne izolacije radioaktivnog otpada od životne sredine. U smislu ovakvih analiza bitno je razlikovati dva tipa biosfere: biosferu koja obuhvata retko naseljene ekosisteme u kojima je verovatnoća za izlaganje ljudi mala i gusto naseljene oblasti sa većom verovatnoćom za izlaganje ljudi.

Kako je transport radionuklida podzemnim vodama najznačajniji u pogledu migracije radionuklida u biosferu, bitno je da za lokaciju odlagališta bude odabrana ona u kojoj je kretanje podzemnih voda u smislu protoka i brzine dovoljno nisko.

---

### Tipovi odlagališta za odlaganje radioaktivnog otpada

Odlagališta mogu biti locirana ili na površini zemlje ili ispod površine zemlje na različitim dubinama. Kao što je već opisano, posebnu grupu odlagališta čine duboka odlagališta u geološki stabilnim i nepropusnim slojevima, namenjena za odlaganje visokoaktivnog radioaktivnog otpada. Institucionalna kontrola prati sve faze postojanja odlagališta radioaktivnog otpada od njegovog lociranja, preko izgradnje i rada do zatvaranja.

U razvoju strategije za odlaganje radioaktivnog otpada, period poluraspada radionuklida glavna je odrednica prilikom odlučivanja o načinu odlaganja. Otpad koji sadrži pretežno kratkoživeće radionuklide i čija se aktivnost smanjuje sa vremenom, posle dovoljno dugog vremena, koje može biti i nekoliko stotina godina, postaje relativno siguran za životnu sredinu. Stoga se opcije za odlaganje kratkoživećeg radioaktivnog otpada oslanjaju na institucionalni nadzor odlagališta i/ili na izgrađene sisteme inženjerskih barijera kojetraju nekoliko stotina godina i za to vreme obezbeđuju izolaciju radioaktivnog otpada. U tom vremenu većina kratkoživećih radionuklida koji postoje u radioaktivnom otpadu raspadne se do zanemarljive aktivnosti.

Međutim, neke vrste radioaktivnog otpada kao što je isluženo nuklearno gorivo i visokoaktivni radioaktivni otpad nastao pri preradi isluženog nuklearnog goriva, sadrži niz radionuklida s veoma dugim periodom poluraspada. Iz današnje perspektive se ne može očekivati da institucionalna kontrola odlagališta i sistem višestrukih barijera mogu obezbediti izolaciju takvog otpada od životne sredine u dovoljno dugom vremenskom periodu potrebnom da se dugoživeći radionuklidi raspadnu do sigurnih granica.

Osnovna podela tipova odlagališta načinjena je prema dubini na kojoj je odlaganje radioaktivnog otpada predviđeno. Kako je dubina odlaganja direktno povezana sa karakteristikama radioaktivnog otpada koji se odlaže to se može reći da je tip odlagališta direktna posledica karakteristika radioaktivnog otpada. Osnovna podela predviđa dva tipa odlagališta:

- Površinska i plitka odlagališta – odlagališta na površini zemlje ili ispod površine na dubinama do nekoliko desetina metara
- Duboka geološka odlagališta – odlagališta planirana na dubinama od nekoliko stotina pa do par hiljada metara za bušotine

Pored dva osnovna tipa može se prepoznati još tipova koji su izvedeni iz osnovnih koncepata a o kojima će više reči biti u nastavku.

---

### Površinska i plitka odlagališta

Površinska i plitka odlagališta koriste se za odlaganje veoma nisko i nisko aktivnog radioaktivnog otpada. Ovakva odlagališta smeštena su na površini ili blisko ispod površine zemlje na dubinama do nekoliko desetina metara. Iako postojanje inženjerskih barijera nije obavezno kod ovakvog tipa odlagališta i zavisi od postojanja prirodnih barijera i karakteristika otpada predviđenog za odlaganje, pokrivanje odlagališta odgovarajućim barijerama kako bi se odvojio od životne sredine je neizostavno.

### Površinska odlagališta

U slučaju površinskih odlagališta, radioaktivni otpad se smešta na površinu, delimično ispod površine ili vrlo blizu ispod površine zemlje. Ovakva odlagališta se smatraju podesnim samo za veoma nisko i delimično za nisko aktivni radioaktivni otpad za koji se očekuje da će se raspasti do nivoa koji ne predstavlja rizik po životnu sredinu u unapred isplaniranom vremenskom intervalu tokom kog se vrši institucionalna kontrola odlagališta. Ovo vreme najčešće iznosi između 100 i 300 godina. Konačni cilj odlaganja radioaktivnog otpada u ovakav oblik odlagališta je da po isteku institucionalne kontrole u odlagalištu ne ostane materijal čija aktivnost u tom momentu može naškoditi okolini za slučaj da dođe do otvaranja odlagališta.

Najjednostavnija varijanta površinskog odlagališta je smeštanje radioaktivnog otpada na površinu ili u plitki rov i njegovo prekrivanje slojem zemlje. Ovakav način odlaganja pogodan je za veoma nisko aktivni radioaktivni otpad kao i adekvatno kondicioniran niskoaktivni radioaktivni otpad mada se ovakva mogućnost izbegava ako dodatne inženjerske barijere nisu predviđene. Ovakav način odlaganja primenjivan je još odsredine prošlog veka. Povećanjem svesti o sigurnosti odlaganja radioaktivnog otpada osnovni koncept je donekle napredovao po pitanju dugoročne sigurnosti tako da se danas pri uspostavljanju ovakvog odlagališta na njegovo dno postavlja odgovarajuća hidro-izolacija a takođe se i prilikom pokrivanja odlagališta postavlja nepropusni sloj sa drenažnim kanalima. Ovakav tip odlagališta danas se najviše koristi za skladištenje veoma nisko aktivnog radioaktivnog otpada kao što je rudarska jalovina, otpad nastao tokom proizvodnje veštačkog đubriva i sličan otpad.

Druga varijanta površinskog odlagališta je betonski objekat, izgrađen na površini ili delimično ukopan. Ovakav objekat može se sastojati od jedne ili više prostorija, tzv. jedinica koje se redom popunjavaju kontejnerima sa

kondicioniranim otpadom. Kada se neka od jedinica popuni, kontejneri se mogu dodatno zaliti betonom i potom se jedinica može zatvoriti.

Bušotine i jame bliske površini smatraju se alternativom odlagalištima bliskim površini a posebno su podesne za odlaganje izvora zračenja koji se mogu odlagati u manjim kontejnerima. Bušotine i jame u principu predstavljaju isti oblik odlagališta ali su jame veće širine pa samim tim složenije i skuplje za izgradnju. Prednosti ovakvog načina odlaganja su niža cena i bolja zaštićenost od neželjenog ulaska u odlagalište. Po potrebi je moguće bušotini dodati inženjerske barijere radi poboljšanja zaštite od migracije radionuklida i od neželjenih ulazaka u odlagalište. Odlagališta ovakvog tipa kao prvi stepen zaštite od neželjenog ulaska imaju predviđenu ploču od armiranog betona, debljine i do jedan metar koja služi kao svojevrsni poklopac otvoru bušotine. Ovakva zaštita odlagališta podesna i je u slučaju prestanka institucionalne kontrole odlagališta u nekom momentu pre isteka predviđenog vremena . Ipak, uprkos svojoj veličini smatra se da ovakav način zaštite nije dovoljna garancija za sprečavanje neželjenih ulazaka pa se ovakva odlagališta ne koriste za odlaganje radioaktivnog otpada veće aktivnosti ili dužeg vremena poluraspada od radioaktivnog otpada koji se odlaže u površinska odlagališta.

Uspešan je primer plitkog odlaganja je odlagalište Beatty u Nevadi, koje je sada zatvoreno. Sličan način odlaganja planira se izgradnjom postrojenja u Ward Vallyu, u pustinji Mojave, gdje je nivo podzemnih voda oko 200 m ispod površine zemlje. U vlažnim klimatskim uslovima, ova opcija može biti manje uspešna. Posebno u slučaju plavnih područja ili područja sa neodgovarajućom drenažom, radionuklidi mogu migrirati u životnu sredinu nošeni kretanjem podzemnih i atmosferskih voda. Primeri odlagališta za veoma nisko aktivni radioaktivni otpad dati su na Slici 9.6.

---



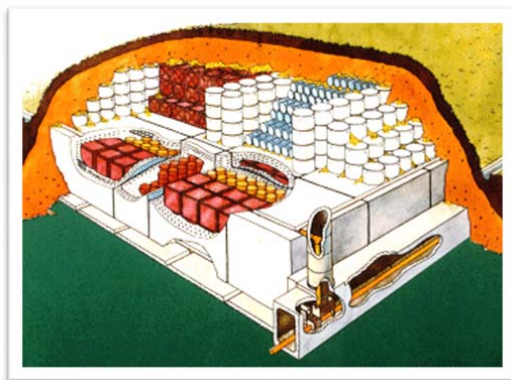
Slika 9.6 Primeri odlagališta za veoma nisko aktivni radioaktivni odpad, <http://www.arao.si/uploads/podobe/Jazbec%20fotomonta%C5%BEa%20end5.jpg>



Slika 9.7. Planirano odlagalište za nisko i srednje aktivan radioaktivan odpad, Vrbina, Slovenija, <http://www.arao.si/nase-dejavnosti/odlagalisce-nsrao>



Jedan od primera ovakvog tipa odlagališta je i francusko odlagalište Center de la Manche, pušteno u rad 1969. godine za odlaganje nisko i srednje aktivnog radioaktivnog otpada. Ovo odlagalište prikazano je na slici 9.8. U donjem delu su uskladišteni zaliveni betonski kontejnera kojisadržesrednje aktivni radioaktivni otpad. Na ove kontejnere se slažu kontejneri sa niskoaktivnim radioaktivnim otpadom.



Slika 9.8. Koncept odlagališta Center de la Manche,  
<http://www.wmsym.org/archives/1998/html/sess01/01-01/01-01.htm>

#### Plitka odlagališta

Plitka odlagališta grade se ispod površine zemlje i mogu biti na različitim dubinama, od nekoliko desetina do nekoliko stotina metara. Plitka odlagališta omogućavaju sigurno odlaganje srednje aktivnog radioaktivnog otpada. Konstrukcija ovakvih odlagališta podrazumeva i zonu neizmenjene stene ili sloj sedimenta iznad samog odlagališta, čime je odlagalište udaljeno od površine zemlje. Na ovaj način se koriste pogodna hidrogeološka i geohemijska svojstva prirodnih barijerai obezbeđuje dodatna fizička zaštita odlagališta. Ova odlagališta mogu se sastojati od niza horizontalnih tunela u koje se unosi prethodno kondicionirani otpad.

Radioaktivni otpad i isluženi radioaktivni izvori koji nisu podobni za odlaganje u površinska odlagališta iz razloga što njihova aktivnost neće opasti na dovoljno nisku vrednost za vreme predviđeno institucionalnom kontrolom moraju se odlagati u odlagališta na većim dubinama. Pod srednjim dubinama smatraju se dubine veće od nekoliko desetina metara na kojima je rizik od neželjenog ulaska sveden na minimum. Iz tog razloga je i rizik od

izlaganja usled neželjenog ulaska u odlagalište veoma mali pa su ovakva odlagališta podesna za odlaganje radioaktivnih izvora visokih aktivnosti. Pravljenje bušotina dubine do nekoliko desetina metara je relativno jednostavno a sam oblik bušotine je podesan za odlaganje radioaktivnog otpada male zapremine kao što su radioaktivni izvori. Ukoliko se bušotina napravi na podesnom tlu, u stenama sa niskom propustljivošću i bez podzemnih voda koje bi mogle doći u kontakt za radionuklidima, moguće je postići dovoljan nivo izolacije i bez dodavanja inženjerskih barijera. Prilikom izrade bušotina potrebno je uzeti u obzir stabilnost hidrogeološkog sistema tokom perioda institucionalne kontrole koji može trajati i do nekoliko hiljada godina zavisno od vrste izvora koji se odlažu. Izolacija ovakvih odlagališta u velikoj meri zavisi od mogućnosti da se kvalitetno uradi popuna praznog prostora u bušotini a potom i završni sloj. Poželjno je koristiti prirodne materijale koji imaju svojstva jednaka materijalu u kome je napravljena bušotina.

U slučaju da se bušotina ne može napraviti u tlu koje omogućava hidrogeološku stabilnost u potrebnom vremenskom periodu potrebno joj je dodati inženjerske barijere koje bi omogućile sigurno odlaganje radioaktivnog otpada dovoljno dug vremenski period. Dodatne inženjerske barijere mogu se postaviti prilikom izgradnje odlagališta ali se mogu i kasnije dodati po potrebi kao i prilikom konačnog zatvaranja odlagališta.



Slika 9.9. Radioaktivni otpad u rudniku Asse II, Nemačka,

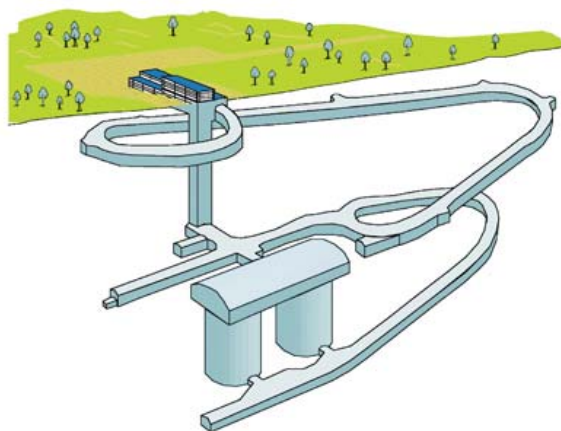
[http://www.asse.bund.de/Asse/EN/topics/what-is/radioactive-waste/radioactive-waste\\_node.html?jsessionid=EF7952218DE29DC EE74CD03B366DE925.2\\_cid349](http://www.asse.bund.de/Asse/EN/topics/what-is/radioactive-waste/radioactive-waste_node.html?jsessionid=EF7952218DE29DC EE74CD03B366DE925.2_cid349)

Pojedine države su razvile odlagališta za radioaktivni otpad u velikim šupljinama u čvrstim kristalnim stenama ili granitu na dubinama od nekoliko desetina metara. Ova odlagališta predviđena su za odlaganje kratkoživećeg nisko i srednje aktivnog otpada. Pećine i rudnici iz kojih se više ne vrši eksploatacija mogu se prepraviti u podesna odlagališta ako se nalaze na dovoljnoj dubini i ako su svi sigurnosni uslovi ispunjeni. Ovaj način odlaganja pogodan je za odlaganje i skoro svih tipova radioaktivnih izvora. Jedna od opcija je i pretvaranje napuštenih rudnika u odlagališta za radioaktivni otpad. Primeri ovakve prenamene rudnika su rudnik soli Asse II u Nemačkoj i rudnik gvožđa Konrad takođe u Nemačkoj. Rudnik Asse II se pokazao kao loše rešenje jer je u više navrata došlo do prodiranja vode.

Plitka odlagališta locirana dubinama većim od 50 metara su izgrađena i funkcionišu u nekoliko zemalja. U Švedskoj, pored Forsmarka, izgrađeno je odlagalište na dubini od 60 metara ispod površine Baltičkog mora. Odlagalište je predviđeno za odlaganje niskoaktivnog i srednjeaktivnog radioaktivnog otpada. U Finskoj, na ostrvu Olkiluoto, 1992. godine takođe je izgrađeno odlagalište za nisko i srednjeaktivni radioaktivni otpad. Radioaktivni otpad je razvrstan prema klasi aktivnosti i smešten u betonom obložene kompartmane izgrađene u granitnoj stenina dubini od 70 m do 100 m ispod površine mora.



Slika 9.10. Rudnik Konrad, Nemačka, upotrebljen kao odlagalište za radioaktivni otpad, [http://www.endlager-konrad.de/Konrad/EN/home/home\\_node.html](http://www.endlager-konrad.de/Konrad/EN/home/home_node.html)



Slika 9.11. Koncept odlagališta za nisko i srednje aktivni radioaktivni otpad, Olkiluoto, FInska, <http://www.tvo.fi/operatingwaste>

#### Duboka geološka odlagališta

Duboka geološka odlagališta sačinjena od kaverni i tunela sa različitim sistemima inženjerskih barijera razvijaju se danas u većini zemalja koje imaju razvijenu nuklearnu energetiku kao najprihvatljiviji način odlaganja radioaktivnog otpada i isluženog nuklearnog goriva. Pogodna su za odlaganje dugoživećeg nisko i srednje aktivnog radioaktivnog otpada, visoko aktivnog radioaktivnog otpada i isluženog goriva. Izolacija kakvu pružaju ovakva odlagališta je i više nego dovoljna za odlaganje i svih tipova radioaktivnih izvora tako da države koje poseduju ovakvo odlagalište mogu da u njega, kao najekonomičnije rešenje, odlože i sve islužene radioaktivne izvore.

Radioaktivni otpad visoke aktivnosti može biti odložen u objekat izgrađen duboko ispod površine zemlje u pogodnim geološkim formacijama, bez namere da se iz tih formacija ikada iznese. Duboka geološka odlagališta seobično ne oslanjaju na dugoročni institucionalni nadzor ili održavanje već na izolaciju i nedostupnost koju im omogućavaju velike dubine na kojima se njihova izgradnja predviđa. Ovakav tip odlagališta pogodan je za skladištenje visoko aktivnog radioaktivnog otpada i isluženog nuklearnog goriva.

Dugoročna sigurnost geološkog odlaganja bazira se na sistemu višestrukih barijerakoje čine: stabilan oblik radioaktivnog otpada, dugovečnost kontejnera u kojima seotpad nalazi i trajnost ostalih izgrađenih struktura (inženjerskih barijera) ili prirodnih barijera karakterističnih za izabranu

lokaciju odlagališta. Ove barijere, posmetrane integralno, kao jedinstven sistem, omogućavaju dugoročnu izolaciju otpada od životne sredine u periodu koji se meri hiljadama godina.

Ako se pretpostvi da će se efikasnost sistema višestrukih, prirodnih i inženjerskih, barijera u smislu sprečavanja migracije radionuklida postepeno opadati, ovaj proces odvijace se veoma sporo. Takva dinamika može objasniti smanjenjem ukupne aktivnosti usled radioaktivnog raspada i efektom razblaživanja na velikim dubinama.

Dubina na kojoj će se graditi ovakav tip odlagališta zavisi od specifičnih osobina lokacije i prirode radioaktivnog otpada za koji se odlagalište gradi. Uopšteno govoreći, planovi postoje da se duboka geološka odlagališta izgrade na dubinama od nekoliko stotina do par hiljada metara ispod površine zemljišta.

Cilj korišćenja bušotina čija dubina ide do dubine tipične za geološka odlagališta je postizanje veće izolacije za ograničenu količinu radioaktivnog otpada. Glavne odlike dubokih bušotina su slab protok podzemnih voda, stabilno hemijsko okruženje i duži povratni put u biosferu za potencijalno ispuštene radionuklide. U takvim uslovima i uz adekvatan završni sloj na otvoru bušotine izolacija radionuklida je obezbeđena prirodnim, geološkim, barijerama tako da inženjerske barijere praktično nisu potrebne. Jedine inženjerske barijere potrebne u ovom slučaju su one koje služe za postavljanje radioaktivnih izvora u bušotinu i druge koje se koriste za održavanje stabilnosti bušotine tokom ubacivanja matriksa i zatvaranja. Ovakav tip odlagališta je posebno pogodan za radioaktivne izvore sa najvećim aktivnostima i najdužim vremenima poluraspada za koje je potreban veoma dug period izolacije (npr 10 ili 20 vremena poluraspada). Uzmimo kao primer jake izvore koji sadrže  $^{226}\text{Ra}$  i koji zahtevaju izolaciju 20 do 30 hiljada godina. Takođe sama dubina odlagališta znatno umanjuje mogućnost neželjenog ulaska koje bi, ako uzmemo u obzir jačinu izvora za koje je predviđeno, moglo rezultovati primanjem izuzetno velike doze. Ako bi ovakvo odlagalište bilo napravljeno da zadovoljava zahteve za odlaganje izvora visoke aktivnosti i dugog vremena poluraspada u njega bi se mogli odlagati i svi izvori manjih aktivnosti i kraćih vremena poluraspada što bi sa ekonomske strane kao i sa strane upravljanja isluženim izvorima bilo razumno rešenje.

Duboke bušotine mogu se graditi i sa sistemom inženjerskih barijera. Cilj ovakvih odlagališta je isti kao i kod odlagališta bez sistema inženjerskih barijera odnosno odlaganje radioaktivnog otpada u okruženje okarakterisano

manjim protokom vode, većom hemijskom stabilnošću i dužim povratnim putem u biosferu za potencijalno ispuštene radionuklide u odnosu na odlagališta na malim ili srednjim dubinama. U ovom slučaju, dodatne inženjerske barijere postavljaju se oko kontejnera sa radioaktivnim izvorima tako da je osigurana potrebna zaštita i na mestima gde je protok podzemnih voda povećan ili gde je veća propustljivost geoloških formacija. Kao i za duboke bušotine bez sistema inženjerskih barijera i u ovom slučaju je prihvatljivo, u isto odlagalište, odlagati izvore manje aktivnosti ili kraćeg vremena poluraspada od izvora za koje je odlagalište predviđeno.

### Izbor metode za odlaganje otpada

Prepoznaju se tri opcije za odlaganje kondicioniranog otpada ispod površine zemlje. Ove formacije mogu biti u obliku: a) tunela, b) kaverni i c) dubokih bušotina. Za navedene opcije važi zadovoljavajući stepen fleksibilnosti koji omogućava njihovo prilagođavanje datom tipu radioaktivnog otpada i datom geološkom okruženju.

#### Koncept tunela

Koncept tunela je trenutno najpoželjnija opcija za lociranje kondicioniranog otpada ispod površine zemlje i impelmentirana je u planove za izgradnju podzemnih odlagališta u većini zemalja. Kondicionirani otpad u odgovarajućim kontejnerima može biti postavljen:

- Horizontalno, paralelno sa osom tunela kao što je to slučaj u Belgiji, Švajcarskoj i SAD; ili  
Vertikalno, u bušotine locirane normalno na osu tunela kao što je to slučaj u Švedskoj, Finskoj i Francuskoj.

Prostor u tunelima koji okružuje kondicionirani otpad ispunjen je izolacionim materijalom, obično glinom, bentonitom, ili peskom. Funkcija ovog sloja jeste hidoizolacija i obezbeđivanje geohemijski stabilnog okruženja za radioaktivni otpad.

#### Koncept kaverni

Masivni kontejneri koji sadrže dodatne slojeve za zaštitu od spoljašnjeg izlaganja postavljaju se u kaverne. Ovaj concept može biti dizajniran i kao skladište tako da poseduje ventilaciju, drenažu i omogućava povremenu inspekciju i kontrolu otpada za vreme perioda skladištenja koje može trajati i

nekoliko stotina godina. Nakon raspada kratkoživećih radionuklida, otvori korišćeni za ventilaciju, drenažu i inspekciju mogu biti ispunjeni izolacionim slojem a skladište na taj način pretvoreno u odlagalište.

#### Koncept dubokih bušotina

U slučaju dubokih bušotina, kondicioniran radioaktivni otpad postavlja se vertikalne bušotine obložene slojem čelika. Dodatno, u prostor između radioaktivnog otpada i čelične obloge postavlja se sloj izolacionog materijala. Ovi tuneli se protežu do dubine od 1000 m, gde postoji stabilno geološko okruženje. Na Slici 9.12. su prikazane različite varijante dubokih bušotina: vertikalne bušotine, horizontalna galerija iznad zone odgalaganja i dve horizontalne galerije iznad i ispod zone odlaganja.

Potrebno je razlikovati koncept odlaganja zatvorenih radioaktivnih izvora u bušotine (Borehole concept) od ovakvog tipa geološkog odlagališta. Iako im je namena i princip gotovo isti, važno je razlikovati da se koncept odlaganja zatvorenih izvora u bušotine odnosi samo na izvore i na tip generičkog odlagališta kod koga su unapred poznate i dimenzije i tip kontejnera i gde je jedino potrebno odrediti dubinu bušotine. Kod koncepta odlaganja radioaktivnog otpada u duboke bušotine, karakteristike odlagališta, njegovih inženjerskih barijera i predviđenih kontejnera biće određene na osnovu karakteristika otpada.



Slika 9.12. Različite varijante dubokih bušotina

#### Ostali tipovi odlagališta

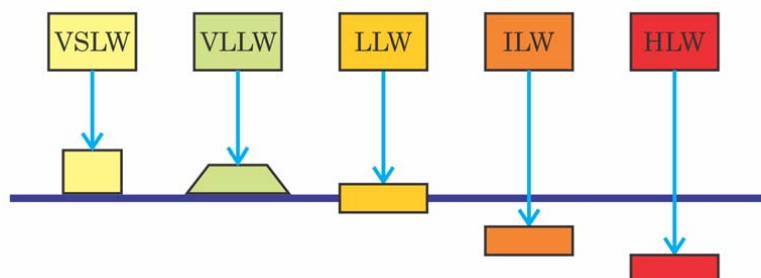
Pored navedenih tipova odlagališta u svetu su tokom prethodnih decenija predlagana i druga rešenja od kojih su se neka kao što je odlaganje radioaktivnog otpada u okeane pokazala kao štetna, neka su ostala u fazi planiranja budući da nisu mogla da se pokažu kao održivo rešenje kao što je

odlaganje u svemir dok su neka kao što je koncept odlaganja izvora zračenja u bušotine prošla značajne faze razvoja i eksperimenata i neke države su ozbiljno krenule u izgradnju ovakvih odlagališta.

Odlaganje radioaktivnog otpada u okeane

Opcija koja je bila aktuelna u mnogim zemljama, uglavnom za ograničene količine radioaktivnog otpada jeste odlaganje u okeane, posebno u severni deo Atlantskog okeana. Briga zbog uticaja na životnu srednu proizvela je da za ovu opciju odlaganja radioaktivnog otpada više ne postoji međunarodna saglasnost, pa je takva praksapostepeno zabranjena Londonskom konvencijom o sprečavanju zagađenja mora bacanjem otpada i drugih materija iz 1972. godine, zatim Međunarodnom konvencijom o sprečavanju zagađenja za brodova iz 1973. godine i dopunjenom 1978. godine i Bazelskom konvencijom o kontroli prekograničnog prometa opasnih materija i njihovom odlaganju iz 1989. godine i da bi bila potpuno zabranjena od 1993. godine.

Odlaganje u okeane treba, naravno, razlikovati od odlaganja u geološke formacije ispod površine mora. Ova opcija smatra se jednom od varijanti dubokih geoloških odlagališta.



Slika 9.13. Opcije odlagališta u zavisnosti od klase radioaktivnog otpada

Odlaganje radioaktivnog otpada u svemiru

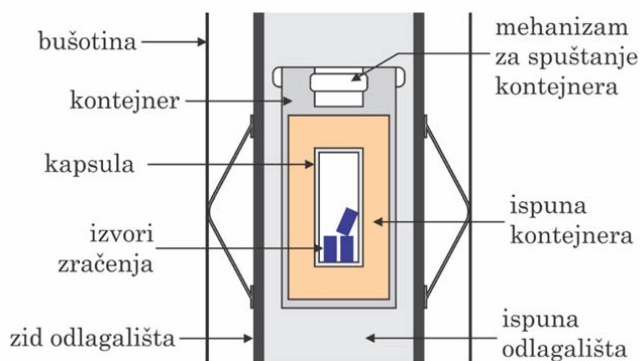
Odlaganje radioaktivnog otpada u svemiru, iako na nivou teorijskog razmatranja, bi se, zbog visokih troškova, moglo koristiti samo za male količine dugoživećih nuklida (npr.  $^{129}\text{I}$  sa periodom poluraspada od 15,7 miliona godina). Pored toga, cenu ovakvog odlaganja bi povećala i potreba da



se naprave posebni transportni kontejneri koji bi morali da izdrže udes rakete i da pritom očuvaju integritet i hermetičnost.

Koncept bušotine za odlaganja izvora zračenja

Koncept bušotine za odlaganje izvora zračenja (*Borehole concept*) razvila je južnoafrička kompanija Necsa (*Nuclear Energy Corporation of South Africa*) i namenjen je isključivo skladištenju izvora zračenja. Koncept je zasnovan na korišćenju komercijalno dostupne opreme za bušenje dubokih bušotina (npr za bušenje bunara) i prilagođavanja ostalih inženjerskih barijera i kontejnera za skladištenje ovim dimenzijama. Ovakvo rešenje posebno je pogodno za države sa ograničenim inventarom izvora zračenja.



Slika 9.14. Koncept odlaganja iskorišćenih zatvorenih izvora zračenja u bušotine koji je razvila južnoafrička NECSA

Projektom bušotine za odlaganje izvora zračenja predviđeno je da se u pogodnom tlu upotrebom odgovarajuće opreme kakva se već decenijama koristi za kopanje bušotina načini bušotina prečnika 260 mm i dubine dovoljne da se izvori mogu smestiti u zonu pogodnu za odlaganje. Potom se načine inženjerske barijere u vidu dna bušotine, čeličnih ili polimernih zidova bušotine i ispuna koja se stavlja između zidova i okolnog tla u kom je bušotina načinjena. Izvori će se pre odlaganja smeštati u kontejnere namenski projektovane za ovakav tip odlagališta, načinjene od nerđajućeg čelika i olova i spoljnih dimenzijha 114 mm. Kontejneri će se u bušotinu spuštati dizalicom sa specijalno izrađenom hvataljkom a predviđeno je da se potom bušotina ispuni ispunom na bazi cementa do visine na kojoj je predviđeno smeštanje sledećeg kontejnera. Projektom je predviđeno da se kontejneri smeštaju od dna bušotine dodubine koja bi omogućila najmanje 30 metara od poslednjeg kontejnera do vrha bušotine. Ova zona bi se ispunila

cementnom ispunom i zatvorila odlagalište omogućavajući na taj način adekvatnu sigurnost i bezbednost odloženih izvora zračenja.

Iako je još u fazi testiranja, predviđa se da će ova metoda odlaganja zatvorenih izvora zračenja omogućiti državama sa ograničenim brojem izvora sigurno i bezbedno rešavanje problema njihovog odlaganja.

### Ocena performansi odlagališta

U fazi planiranja odlagališta radioaktivnog otpada, ključno pitanje na koje morabiti dat odgovor odnosi se na njegovu sigurnost i bezbednost. Odgovor na ovo pitanje očekuju regulatorna tela ali i šira javnost. Ocena performansi odlagališta upravo ima za cilj da da odgovor na ovo pitanje i to u vremenskom intervalu koji obuhvata rad odlagališta i period nakon njegovog zatvaranja za prijem radioaktivnog otpada. U fazi rada, performanse odlagališta moraju biti u skladu sa prihvaćenim standardima radijacione i nuklearne sigurnosti i bezbednosti i u tom smislu slične su kao i performanse bilo kod drugog nuklearnog objekta. Međutim, period nakon zatvaranja odlagališta predstavlja daleko veći izazov, imajući u vidu da radioaktivni otpad u odlagalištu može ostati i milione godina, dakle u periodu koji je daleko duži od istorije ljudske civilizacije pri čemu treba sprečiti izlazak radionuklida u životnu sredinu tokom čitavog tog perioda.

Ponašanje geoloških odlagališta ne može biti procenjeno primenom determinističkih metoda, pa se za potrebe procene radijacionih i drugih osobina odlagališta u ovom slučaju koriste različite probabilističke metode. Ove metode se zasnivaju na poznatim naučnim principima iskaznim matematički. Ocena performansi odlagališta zapravo je procena njegove radijacione sigurnosti i bezbednosti u dugom vremenskom intervalu.

Procena radijacione sigurnosti podrazumeva analizu verovatnoće za ispuštanje radioanuklida u funkciji vremena i prostora. Analize drugih osobina odlagališta obuhvataju analizu ponašanja odlagališta u zavisnosti od ranije pretpostavljenih osobina.

Procena performansi odlagališta jeste iterativni postupak čiji su rezultati u funkciji određivanja lokacije, projektovanja, izgradnje, licenciranja i puštanja u rad odlagališta radioaktivnog otpada. Pre svake procene neophodno je definisati adekvatne indikatore i za svaki od njih odrediti kriterijume prihvatljivosti. Na primer, u mnogim zemljama je indikator doza koju primi stanovništvo na godišnjem nivou. Na osnovu preporuke MAAE, doza na

---

godišnjem nivou ne bi trebalo da bude veća od 0,3 mSv, ali se u različitim zemljama koriste vrednosti u intervalu od 0,1 do 1 mSv/god.

Rezultati procene performansi odlagališta moraju biti u skladu sa prihvatljivim standardima zaštite od zračenja. Vremenski interval na koji se odnosi procena varira od nekoliko destina hiljada godina, pa do milion godina, imajući u vidu da neki od radionuklida kao  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{94}\text{Nb}$  i  $^{99}\text{Tc}$  imaju veoma dug period poluraspada. Ovaj interval obuhvata fazu rada odlagališta i fazu nakon njegovog zatvaranja.

Metod za ocenu performansi odlagališta

Iako kompleksna, ocena performansi odlagališta se može sumirati u nekoliko koraka. Ovi koraci predstavljaju nezavisne faze koje se mogu implementirati postepeno:

1. Definicija osnovnih osobina odlagališta;
2. Identifikacija procesa i događaja koji mogu nastati nakon zatvaranja odlagališta i koji mogu imati uticaj na radijacionu sigurnost;
3. Razvoj modela i računarskih kodova, uključujući i modelovanje nesigurnosti procene;
4. Izračunavanje indikatora i poređenje sa prihvatljivim standardima.

Imajući u vidu ove faze, procena performansi odlagališta se bazira na algoritmu prikazanom na Slici 9.15.

Osnovni elementi ovog algoritma su:

- Razvoj scenaria, koji obuhvata predviđanje svih mogućih vidova migracije radionuklida iz radioaktivnog otpada;
  - Razvoj modela, koji obuhvata formiranje baze podataka i računarskih kodova za predviđanje ponašanja odlagališta;
  - Analiza posledica, zasnovana na gore pomenutim prediktivnim modelima. Posledice su značajne u smislu aktivnosti radionuklida ispuštenih u životnu sredinu u funkciji vremena;
  - Senzitivnost modela, obuhvata analizu uticaja različitih parametara i pretpostavki na rezultat analize;
  - Nesigurnost procene, uzimajući u obzir uticajne veličine koje doprinose ukupnoj nesigurnosti scenaria, nesigurnosti poznavanja osobina odlagališta, nesigurnosti poznavanja parametara i nesigurnosti matematičkog modela korišćenog za analizu.
-

Ocena performansi odlagališta ima različite funkcije pre, tokom rada i nakon zatvaranja odlagališta. U fazi planiranja odlagališta, ocena performansi daje odgovor na pitanje da li je planirano odlagalište uopšte moguće sa stanovišta sigurnosti i koja vrsta inženjerskih barijera je najpogodnija za datu geološku formaciju.



Slika 9.15. Pojednostavljena shema metodologije procene performansi odlagališta

#### Definicija relevantnih parametara odlagališta

Kao što je ranije rečeno, odlagalište se sastoji od oblika otpada, inženjerskih barijera i geološkog okruženja koje sačinjavaju prirodne barijere.

Značajni parametri obuhvataju sve navedene elemente i mogu se sumirati kao: radionuklidi prisutni u radioaktivnom otpadu i njihove osobine, fizičke i hemijske osobine matriksa u kojima se nalaze radionuklidi, kao što su toplotna provodljivost, gustina, struktura i distribucija radionuklida u matriksu. Hemijske reakcije koje mogu nastati u kontaktu delova metalnih kontejnera sa podzemnim vodama su takođe od značaja.

Inženjerske barijere obuhvataju različite izolacione slojeve i imaju za cilj očuvanje stabilnog okruženja na mestu gde se nalazi radioaktivni otpad. Bitna osobina u ovom slučaju je sastav podzemnih voda koji može uticati na

svojstva metalnih kontejnera i imobilisanog otpada. Pored toga, geološko okruženje bitno utiče na proizvedene ili izgrađene inženjerske barijere. Prirodne barijere predstavljaju treći nivo izolacije radionuklida u odnosu na biosferu, pa su osobine koje u ovom slučaju treba razmotriti hemijski sastav i hidrologija podzemnih voda kao i interakcija podzemnih voda, geoloških struktura i ispuštenih radionuklida.

Ukoliko je indikator odlagališta jačina doze, onda je neophodna i informacija o migraciji radionuklida u biosferu. Doza mora biti izračunata za unapred definisanu kritičnu grupu stanovništva, uzimajući u obzir sve moguće puteve izlaganja jonizujućim zračenjima.

Identifikacija verovatnih procesa i događaja koji utiču na sigurnost i bezbednost odlagališta

Veoma je teško, gotovo nemoguće, predvideti i analizirati sve buduće događaje. Broj potencijalnih događaja koji mogu biti uzeti u obzir tokom analize je ograničen, a oni koji budu uzeti u obzir prilikom analize moraju biti reprezentativni za buduće ponašanje odlagališta. Skup takvih događaja senaziva scenario. Pouzdana ocena performansi obuhvata optimalan broj sistematski razvijenih scenaria.

Razvoj modela i računarskih programa

Na bazi pretpostavljenih scenaria, razvijaju se modeli ponašanja odlagališta i odgovarajući softver. Bitni elementi u ovim modelima su: degradacija inženjerskih barijera, ispuštanje radionuklida iz radioaktivnog otpada, kretanje radionuklida kroz inženjerske i prirodne barijere, migracija radionuklida u biosferu i konačno, izlaganje ljudi.

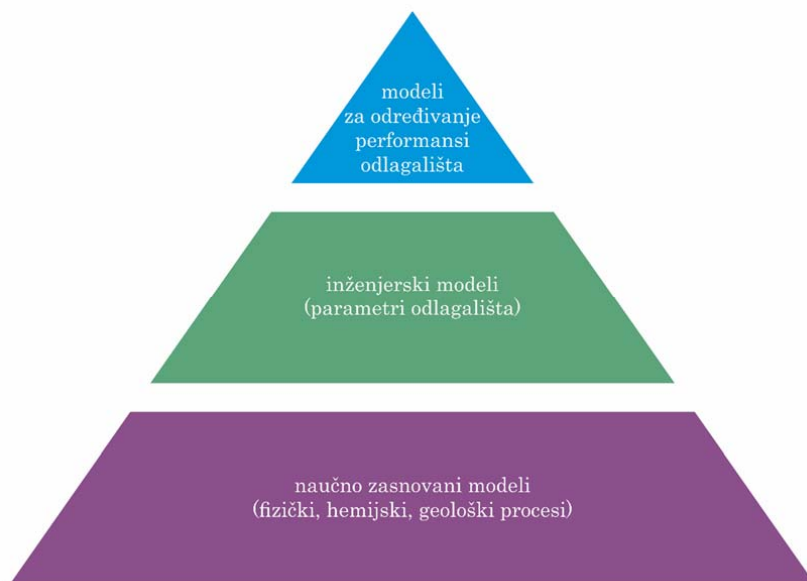
U proteklih nekoliko decenija došlo je do značajnog napretka u razvoju modela, pre svega u pogledu simultanog rešavanja velikog broja jednačina, uglavnom koristeći numeričke metode. Većina modela funkcioniše tako što različite spregnute procese posmatra odvojeno, a kasnije povezuje ovako odvojeno dobijena rešenja. Time je značajno poboljšana pouzdanost procene ponašanja odlagališta.

Određivanje pokazatelja odlagališta i poređenje sa standardima radijacione i nuklearne sigurnosti i bezbednosti

Eksperimentalno iskustvo je veoma značajno za modelovanje procesa u geološkim odlagalištima. Međutim, iskustva iz eksperimentalnih podzemnih

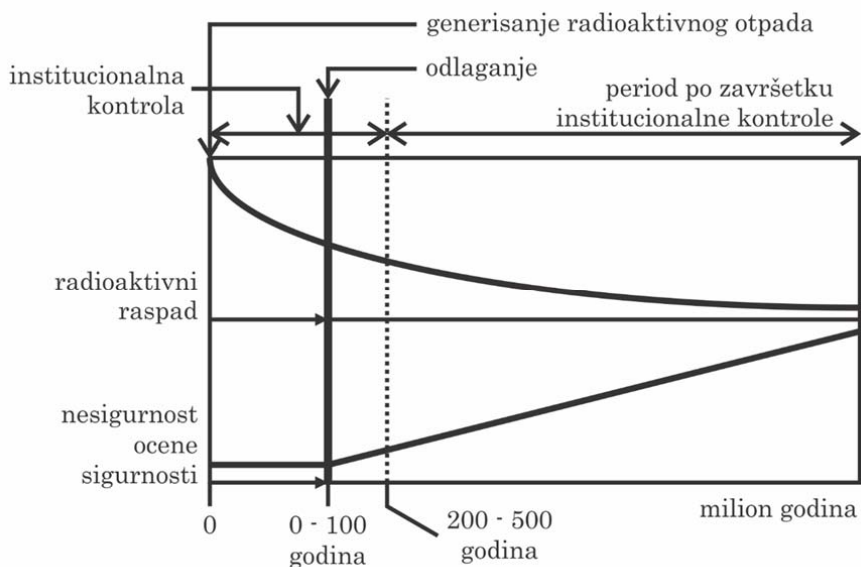
---

istraživanja stečena su u periodu koji traje nekoliko desetina godina i daleko je kraći u odnosu na vreme u kojem je potrebno predvideti ponašanje odlagališta. Razumevanjem fundamentalnih procesa u geološkim formacijama moguće je razviti modele za uspešno predviđanje dugotrajnog ponašanja odlagališta. Ove modele, međutim, treba razlikovati od modela za izračunavanje indikatora odlagališta. Shematski prikaz razvoja modela za ocenu performansi odlagališta dat je na Slici 9.16.



Slika 9.16. Shematski prikaz razvoja modela za ocenu performansi odlagališta

Ocenu performansi odlagališta moguće je sprovesti u nekom momentu u skladu sa trenutnim naučnim i tehnološkim saznanjima. Oblasti koje u datom momentu nisu dovoljno istražene modeluju se koristeći najgore moguće pretpostavke odnosno one koje rezultuju u najgorim mogućim posledicama. Stoga je očekivano da se ocena performansi ponovi nakon određenog vremena i uskladi sa novim naučnim i tehnološkim saznanjima.



Slika 9.17. Shema kontrole odlagališta radioaktivnog otpada

#### Neisigurnost ocene performansi odlagališta

Nesigurnost ocene performansi odlagališta pripisuje se različitim uticajnim veličinama, a može se klasifikovati u četiri osnovne kategorije:

- Nesigurnosti u vezi nerazumevanja karakteristika odlagališta;
- Nesigurnosti u vezi pretpostavljenih scenaria;
- Nesigurnost u vezi izbora modela za procenu bitinih performansi odlagališta;
- Nesigurnost procene svakog pojedinačnog parametra odlagališta.

Nesigurnost nekih od parametara može biti poboljšana novim naučnim i tehnološkim saznanjima, dok za neke druge nesigurnosti to nije slučaj. Na primer, bolja saznanja o osobinama bazične stene i veći broj istraživačkih bušotina mogu uticati na smanjenje nesigurnosti, dok je sa druge strane, nesigurnost procene magnitude potencijalnog zemljotresa koji može pogoditi lokaciju odlagališta praktično nemoguće umanjiti.

Metode za da procenu nesigurnosti različitih uticajnih veličina mogu biti probabilističke, kada se nesigurnost procenjuje na osnovu gustine funkcije

rapodele pripisane nekoj uticanoj veličini, ili na drugi način, kada se model i parametri biraju konzervativno, na osnovu najgoreg mogućeg scenarija.

Probabilistički metod, najčešće primenom Monte Carlo simulacija, kao rezultat daje kvantitativnu vrednost parametra i odgovarajuću nesigurnost procene.

Modeli za ocenu performansi odlagališta

### Kretanje podzemnih voda

Najznačajniji scenario u oceni performansi odlagališta jeste scenario kretanja podzemnih voda. U opštem slučaju, pretpostavka je da će do kretanja podzemnih voda gotovo sigurno doći (verovatnoća iznosi jedan). Jačina doze se pri tome pripisuje ratvorenim radionuklidima koji migriraju zahvaljujući kretanju podzemnih voda i stižu do biosfere. Prvi korak u proceni doze je vezan za informaciju o hidrologiji podzemnih voda u blizini odlagališta, posebno o brzini protoka i mreži kanala kojima se voda kreće. Tipično, voda se kreće iz tačke više ka tački niže potencijalne energije, kao na primer, sa grebena ka dolini, prolazeći kroz pukotine i otvore u stenama. Ova vrsta kretanja uslovljena je topografskim gradijentom, a matematički se može opisati sledećim izrazom:

$$Q = AKi \quad (9.1)$$

gde je:

$Q$  [m<sup>3</sup>/s] – brzina prolaska vode kroz medijum,

$A$  – poprečni presek vodenog toka,

$i$  – hidraulični gradijent ( $i = \Delta h/s$ ),

$\Delta h$  – rastojanje između tačke ulaska i izlaska vode u medijum

$s$  – debljina medijuma.

Konstanta proporcionalnosti  $K$  [m/s] je hidraulična provodnost.

Porozni medijumi kao što su sedimentne stene sadrže matrikse pora kroz koje se voda sa lakoćom kreće. U ovom slučaju hidrodinamička konstanta ima izraz:

$$K = \rho g k / \mu \quad (9.2)$$



gde je:

$\rho$  – gustina vode,

$\mu$  – kinematička brzina [kg/ms]

$k$  – sopstvena propustljivost [ $m^2$ ].

Sopstvena propustljivost se dalje može opisati izrazom:

$$k = \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \frac{d^2}{180} \quad (9.3)$$

gde je:

$d$  – srednji prečnik čestica

$\varepsilon$  – poroznost.

Kroz granitne stene, podzemne vode se kreću kroz pukotine u kompaktnoj strukturi. Ovakve pukotine su modelovane pomoću dve malo razmaknute paralelne ravni, pa se ovde umesto hidrauličke konstante  $K$  koristi parametar  $T$  [ $m^2/s$ ] koji se naziva i propustljivost koja se može prikazati izrazom:

$$T = Kb \quad (9.4)$$

gde je  $b$  rastojanje između dve susedne ploče.

Pored hidrauličnog gradijenta, uzrok kretanja podzemnih voda može biti i toplotna konvekcija i kretanje usled razlike u gustini materijala. Primer kretanja usled toplotne konvekcije jeste kretanje vodepod uticajem toplote magme. Usled raspada radionuklida, pre svega  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$ , generisanje toplote u vitrifikovanoj otpadu nije značajno, tako da ova toplota ne može biti uzrok kretanja podzemnih voda.

U kontaktu fluida različitih gustina, kretanje usled razlike gustina fluida postaje značajno. Ovakvo kretanje može nastati u kontaktu morske i sveže tekuće vode. Ovaj fenomen mora biti uzet u obzir prilikom izgradnje odlagališta u blizini morske obale.

Hidraulična provodnost dominantno zavisi od fizičkih osobina stene. Tipične vrednosti za različite medijume nalaze se u opsegu od  $10^{-5}$  do  $10^{-3}$  m/s za peskovite medijume i od  $10^{-3}$  do  $10^{-1}$  m/s za šljunkovite medijume. Za magmatske stene i slične komadne strukture, provodnost je veoma mala i iznosi oko  $10^{-8}$  m/s. Na većim dubinama ispod površine zemlje, tipično nekoliko stotina metara ispod površine zemlje, usled zanemarljivog uticaja

površinskih formacija, kretanje podzemnih voda nije značajno, tipično nekoliko centimetara ili nekoliko metara na godišnjem nivou.

U opštem slučaju, kretanje podzemnih voda posmatra se kao zatvoreni ciklus, počevši od atmosferskih padavina, preko transmisione doze, do ponovnog odlaska vode na površinu zemlje, odnosno do sjedinjavanja sa rekama, jezerima i morima. U hidrologiji podzemnih voda, značajnu ulogu ima položaj nivoa podzemnih voda. Nivo podzemnih voda je po definiciji sloj u zemlji u kome egzistiraju i voda i vazduh. Slojevi iznad nivoa podzemnih voda nazivaju se nezasićena zona, dok slojevi ispod nivoa podzemnih voda formiraju zasićenu zonu (zonu saturacije). Položaj nivoa podzemnih voda u velikoj meri utiče na odluku o dubini ispod površine zemlje na kojoj će biti locirano odlagalište, imajući u vidu da se površinska odlagališta lociraju tako da radioaktivni otpad bude u nezasićenoj zoni, dok se geološka odlagališta po pravilu nalaze u zoni saturacije.

#### Geochemija podzemnih voda

Hemijske osobine podzemnih voda primarno zavise od valentnosti, odnosno redoks potencijala. Hemijsko ponašanje elemenata zavisi od koncentracije jona vodonika ( $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$ ) i hemijske reakcije sa drugim prisutnim jonima. Za modelovanje ponašanja odlagališta veoma je bitno poznavanje geochemijskih karakteristika kao što su pH, redoks potencijal i sastav geološke formacije.

Geochemijske osobine rezultat su reakcije nadzemnih voda sa zemljištem i stenama u veoma dugom vremenskom intervalu. Sa povećanjem dubine, menjaju se i osobine vode, pa se tako voda iz precipitacije menja od  $\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}(\text{Mg}^{2+})\text{-HCO}_3^-$  do  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ . Imajući u vidu da koncentracija jona kalcijuma i magnezijuma opada, pH vrednost se menja od neutralne do balgo bazne. Ukoliko je podzemna voda poreklom iz mora, onda ostaje bogata jonima hlora i natrijuma.

Podzemna voda poreklom iz padavina sadrži male količine rastvorenih aerosola, odnosno jona  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  i  $\text{NO}_3^-$ . Ove vode sadrže i rastvorene atmosferske komponente kao što su  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  i  $\text{CO}_2$ . Razlaganjem organskih materijala u površinskim slojevima pod dejstvom mikroorganizama i sedimentnim bakterijama, sadržaj kiseonika opada, sadržaj  $\text{CO}_2$  raste a njegovim rastvaranjem raste i koncentracija jona ugljenika.

Na dubinama od nekoliko stotina metara ispod površine zemlje, sadržaj kiseonika je gotovo iscrpljen, a zahvaljujući dejstvu bakterija dolazi do redukcije jona  $\text{NO}_3^-$  do  $\text{N}_2$  i redukcija  $\text{SO}_4^{2-}$  do  $\text{H}_2\text{S}$  a dolazi i do fermentacije organskih materijala u sedimentima. Kao rezultat, dolazi do porasta koncentracija jona  $\text{HCO}_3^-$  i  $\text{Cl}^-$ . Katjoni reaguju sa mineralima iz gline a izmena jona  $\text{Na}^+$  i  $\text{Ca}^{2+}$  postepeno raste. Na ovaj način, podzemna voda postaje dominantno  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$  tipa.

Iako su podaci o sastavu vode uglavnom poznati, pouzdanih podataka o redoks potencijalu i pH vrednostima na velikim dubinama nema, u najvećojmeri zbog teškoća prilikom uzorkovanja, imajući u vidu da samo uzorkovanje izaziva hemijski poremećaj u uzorku.

Međutim, nizak sadržaj kiseonika na velikim dubinama pogoduje sporoj koroziji i rastvaranju metala. Ovakav podatak je veoma značajna tehnološka osnova za izgradnju odlagališta. Odsustvo korozije i slabo kretanje podzemnih voda predstavljaju povoljno okruženje za izgradnju odlagališta.

Modelovanje migracije radionuklida u biosferu

Radioaktivni otpad smešten u odlagalište predstavlja izvor radionuklida koji različitim mehanizmima mogu migrirati iz odlagališta (inženjerska barijera) do bazične stene ili zemljišta (prirodna barijera). Ovi procesi su značajno usporeni u situacijama kada postoje višestruke barijere, kao što je prethodno navedeno.

Modelovanje procesa migracije radionuklida uzima u obzir strukuru odlagališta, počev od oblika otpada pa do inženjerskih i prirodnih barijera, kao i dominantne procese migracije radionuklida koji mogu nastati u datim okolnostima. U najvećem broju slučajeva, u pitanju su pojednostavljeni modeli u odnosu na realne okolnosti.

Na primer, ukoliko atmosferske padavine dolaze u kontakt sa kavernama u kojima se nalazi solidifikovan radioaktivni otpad, moguće je vertikalno kretanje radionuklida, od vrha ka dnu kaverne:

$$\frac{dC_s}{dt} = - \left( \lambda + \frac{v}{L\theta_s R_s} \right) C_s \quad (9.5)$$

gde je:

$C_s$  – koncentracija radionuklida u vodenoj fazi,

$\lambda$  – konsanta radioaktivnog raspada,

$v$  – brzina atmosferskih padavina,

$L$  – debljina kaverne

$\theta s$  – poroznost mešavine pozadinskog sloja zemlje i radioaktivnog otpada

$Rs$  – factor retardacije koji uzima u obzir sorpcione osobine zemljišta za pojedine radionuklide.

Radioaktivni raspad nije uzet u obzir. Brzina transporta radionuklida obrnuto je srazmerna faktoru retardacije, imajući u vidu da on označava sposobnost zemljišta da zadrži radionuklide.

Radionuklidi iz odlagališta radioaktivnog otpada migriraju putevima podzemnih voda. Putanje podzemnih voda su generalno veoma složene i komplikovane za modelovanje. U ovoj situaciji se za potrebe modelovanja trodimenzionalnog kretanja koristi jednodimenziono kretanje a koje predstavlja srednju brzinu kretanja podzemnih voda. Na primer, kretanje podzemnih voda kroz porozni medijum kao što je zemljište može se predstaviti sledećim izrazom:

$$R_i \frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} - D \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + R_i \lambda_i C_i - R_{i-1} \lambda_{i-1} C_{i-1} \quad (9.6)$$

gde je:

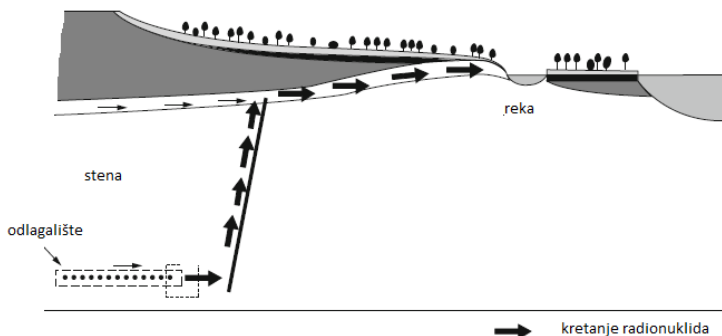
$C_i$  – koncentracija radionuklida  $i$  u podzemnim vodama,  $i$  to  $i$  tog radionuklida u nizu,

$u$  – brzina kretanja podzemnih voda,

$R_i$  – factor retardacije zemljišta koji zavisi od sorpcionih osobina, gustine i poroznosti zemljišta.

Vreme  $t$  odgovara vremenu početka migracije radionuklida  $ax$  odgovara rastojanju.

Kretanje radionuklida putem podzemnih voda prikazano je an Slici 9.18.



Slika 9.18. Kretanje radionuklida putem podzemnih voda.

Transfer radionuklida u biosferu putem podzemnih voda ima za posledicu izlaganje stanovništva. Analiza posledica ovog procesa bazira se na proceni doze, na isti način kao što je opisano u Prilogu ovog udžbenika. Međutim, neophodno je naglasiti da nesigurnost predviđanja u ovom slučaju velika, pre svega usled nepoznavanja procesa u biosferi u dalekoj budućnosti. Procena performansi odlagališta odnosi se na period koji je daleko duži od ljudskog veka, ali je neke događaje saodređenom sigurnošću moguće predvideti koristeći iskustva iz prošlosti. U ovakvim procenama koriste se modeli i scenaria opisani u prilogu ovog udžbenika a koji se odnose na procenu doze za stanovništvo ili za određivanje nivoa oslobađanja.

Procenjena vrednost doze u funkciji vremena nakon početka migracije radionuklida od kondicioniranog otpada, kroz inženjerske barijere, putem podzemnih voda do biosfere iznosi tipično nekoliko nSv nakon 800 000 godina od početka migracije. Doprinos različitih radionuklida zavisi od proteklog vremena, a najveći doprinos se pripisuje radionuklidu  $^{137}\text{Cs}$  nakon 6 miliona godina. Potrebno je naglasiti da se ovakve procene odnose na vremensku skalu od nekoliko stotina miliona godina i da promene u životnom stilu u ovako dugom vremenskom intervalu nije moguće uzeti u obzir. Procena performansi odlagališta vrši se putem poređenja sa sigurnosnim kriterijuma koje su postavila regulatorna tela.

### Ispuštanje radioaktivnog otpada u životnu sredinu

Tečni i gasoviti radioaktivni otpad može biti ispušten direktno u životnu sredinu, u strogo kontrolisanim uslovima. Čvrst radioaktivni otpad,

međutim, ne može biti direktno odložen u životnu sredinu ali zato može biti kontrolisan na mestu nastanka i kasnije čuvan dok se aktivnost radionuklida ne smanji u procesu radioaktivnog raspada ili smešten u odgovarajuće kontejnere i potom u odlagalište radioaktivnog otpada.

Ispuštanje radioaktivnog otpada u životnu sredinu je poseban vid odlaganja radioaktivnog otpada i moguć je isključivo uz veoma strogu regulatornu kontrolu i nadzor. U ovom procesu, radioaktivni otpad se ispušta u životnu sredinu i potencijalno može doprineti izlaganju stanovništva, direktno ili putem lanca ishrane.

Ukupno izlaganje pojedinaca koji potencijalno mogu biti u kontaktu sa tečnim i gasovitim radioaktivnim efluentima ne može biti veće od granice doze za stanovništvo. Strože govoreći, ovo izlaganje mora biti manje od parcijalnih granica doze i što je moguće niže, u skladu sa osnovnim principima zaštite od zračenja. Iako je granica doze primarni limitirajući faktor, procenjena doza tokom odobrenog ispuštanja radioaktivnih efluenata je obično manja od te granice doze. Aktivnost radionuklida koja može biti ispuštena određena je na osnovu željene parcijalne granice doze i ponašanja datih radionuklida u životnoj sredini. Iskazuje se kao ukupna aktivnost radionuklida na godišnjem, mesečnom ili nedeljnom nivou. Odobravanje ispuštanja bazira se na sledećim faktorima:

- Vrsta radionuklida koji je predmet ispuštanja;
- Podaci o tipu radioaktivnog otpada i metodi ispuštanja. Na primer, tečni radioaktivni otpad može biti ispušten u reku kroz sistem za ispuštanje otpadnih voda;
- Aktivnost radioaktivnog otpada koja će biti ispuštena i dinamika ispuštanja;
- Informacija o potencijalnom razblaživanju radionuklida posle ispuštanja;
- Procena doze za stanovništvo i profesionalno izložena lica;
- Analiza opravdanosti ispuštanja radionuklida u odnosu na druge opcije kao što su tretman i skladištenje.

Odobrena aktivnost tečnih i gasovitih efluenata zasniva se na procenjenoj dozi za pojedinca koji potencijalno konzumira kontaminiranu vodu ili udiše kontaminiran vazduh.

Kritične grupe

---

Konzumiranje kontaminirane vode ili udisanje kontaminiranog vazduha vezuje se po pravilu za grupu stanovnika koji mogu biti u kontaktu sa radioaktivnim efluentima. To ne mora da bude realna grupa, već hipotetička grupa radioosetljivog stanovništva za koju je verovatnoća kontakta sa radioaktivnim materijama najveća i za koju se pretpostavlja najgori mogući scenario izlaganja. Ova grupa se naziva i kritična grupa. Uzimajući u obzir radioizotop, puteve unošenja radionuklida u ljudski organizam kao i verovatnoću da kritična grupa dođe u kontakta radioaktivnim materijama, moguće je predvideti najgori mogući scenario izlaganja i izračunati potencijalnu dozu koja je posledica ispuštanja radioaktivnih efluenata u životnu sredinu.

Kritična grupa je odabrana tako da pojedinci koji je sačinjavaju primaju najveću moguću potencijalnu dozu. Doza od unutrašnjeg izlaganja u ovom slučaju može biti izračunata kao proizvod doznog konverzionog faktora u funkciji uzrasta pojedinca i procenjene dinamike disanja ili unošenja vode za datu starosnu grupu. Imajući u vidu da je radioosetljivost dečje populacije veća u odnosu na radioosetljivost odraslog stanovništva, to se kritična grupa uglavnom formira od dečje populacije. Na ovaj način se ispuštanje radioaktivnih efluenata ograničava prema prihvatljivom riziku za dečju populaciju koji je značajno manji u odnosu na rizik za odraslu populaciju. Potrebno je naglasiti da su kritične grupe hipotetičke prirode i da procena doze za ovakvu grupu ne implicira i njeno realno izlaganje radioaktivnim materijama.

U Tabeli 9.2 su dati osnovni parametri za autorizaciju ispuštanja gasovitog radioaktivnog izotopa  $^{131}\text{I}$  u biosferu. Ovaj efluent je u gasovitom stanju i može biti ispušten kroz dimnjak nekog nuklearnog objekta.

Tabela 9.2. Parametri od značaja za određivanje doze za kritičnu grupu prilikom ispuštanja gasovitog radioaktivnog izotopa  $^{131}\text{I}$  u biosferu

Starosna grupa	Dozni konverzioni factor (Sv/Bq)	Brzina inhalacije (m <sup>3</sup> /dan)
Novorođenče (1 g)	$7,2 \cdot 10^{-8}$	5,16
Dete (10 g)	$1,9 \cdot 10^{-8}$	15,3
Odrasli (muškog pola)	$7,4 \cdot 10^{-9}$	22,2

U cilju određivanja granica za ispuštanje radioaktivnih efluenata, potrebno je razmotriti sledeće:

Odabrati model izlaganja	Pretpostaviti najgori moguć scenario izlaganja, koristeći relativno jednostavan koncept koji omogućava brzu procenu doze. U ovoj fazi je moguće oceniti da li je ispuštanje realno ili ne. Ukoliko je neophodno, ponoviti modelovanje koristeći kompleksnije modele izlaganja koji zahtevaju više ulaznih podataka.
Odabrati najznačajniji vid izlaganja jonizujućim zračenjima i najznačajniji put unošenja radionuklida	Moguće je spoljšnje ili unutrašnje izlaganje. U slučaju unutrašnjeg izlaganja, putevi unošenja mogu biti inhalacija, ingestija putem pijaće vode ili ingestija putem hrane. Dominantan put unošenja zavisi od vrste radionuklida i dinamike ispuštanja. Određivanje dominantnog puta unošenja može biti trivijalno a ponekad može zahtevati i proračun u cilju određivanja relativnog značaja puteva unošenja radionuklida.
Određiti kritičnu grupu	Kritičnu grupu odabrati tako da pojedinci koji je sačinjavaju primaju najveću moguću potencijalnu dozu od izlaganja ispuštenim efluentima. Nije realna već hipotetička grupa.
Prikupiti relevantne podatke	Relevantni podaci mogu biti: ukupna aktivnost ispuštenih radionuklida, protok vodenih tokova u koje je efluent ispušten, protok dimnjaka za ispuštanja gasovitih efluenata, dozni konverzioni faktori, parametri unošenja radionuklida...
Primeniti parcijalno ograničavanje doza	Parcijalnu granicu doze obično definiše regulatorno telo. Na osnovu prethodno opisanih koraka i definisane granice izlaganja odrediti maksimalnu aktivnost radionuklida koja može biti ispuštena u biosferu. Primer parcijalne granice doze jeste frakcija godišnje granice



	izlaganja za stanovništvo i može biti 0.1 mSv ili 0.3 mSv na godišnjem nivou.
Odrediti maksimalnu aktivnost radionuklida koja može biti ispuštena.	Doza odgovara dozi za članove kritične grupe koja je pretpostavljena modelom.

Primer 1: *Ispuštanje tečnog radioaktivnog otpada*

Laboratorija ima nameru da ispusti vodu kontaminiranu radioaktivnim izotopom tricijumom ( $^3\text{H}$ ) u reku. Rečna voda dalje odlazi u fabriku vode u kojoj se tretira bez razblaživanja i koristi kao voda za piće. Laboratorija mora obezbediti informaciju o aktivnosti tricijuma koja će biti ispuštena kao i o dinamici ispuštanja datog radionuklida. Ispuštanje mora odobriti nadležno regulatorno telo uzimajući u obzir potencijalna izlaganja stanovništva i profesionalno izloženih lica. Kontaminirana voda će biti ispuštena kroz sistem za odvođenje otpadnih voda, dok je planirana zapremina za ispuštanje oko 10 000 m<sup>3</sup> na nedeljnom nivou. Protok rečne vode iznosi 100 000 m<sup>3</sup> nedeljno. Parcijalna granica doze koja predstavlja osnov za određivanje aktivnosti tricijuma iznosi 0.1 mSv na godišnjem nivou.

Ukoliko primenimo gore opisanu metodologiju, dolazimo do sledećeg razmatranja:

Model izlaganja	Ispuštanje u reku implicira da je izvor izlaganja članova kritične grupe konzumiranje pijaće vode bez prethodnog razblaživanja. Voda se ne koristi za navodnjavanje, pa tricijum ne može da uđe u lanac ishrane.
Najznačajniji vid izlaganja jonizujućim zračenjima i najznačajniji put unošenja radionuklida	Ingestija – unošenje vode za piće
Kritična grupa	Novorođena deca starosti do 1 godine
Relevantni podaci	Brzina ispuštanja tricijuma: 10000 m <sup>3</sup> nedeljno

	<p>Brzina rečnog toka: 100000 m<sup>3</sup>nedeljno</p> <p>Dozni konverzioni faktor (uzrast 1 g): 6,4 10<sup>-11</sup> Sv/Bq</p> <p>Godišnju unos pijaće vode (uzrast 1 godina): 0,260 m<sup>3</sup></p>
Parcijalna granica doze	0,1 mSv
Maksimalna aktivnost radionuklida koja može biti ispuštena	<p>Odrediti maksimalnu aktivnost (A) koja može biti ispuštena na godišnjem nivou u jedinicama Bq/godina.</p> <p>Ukupna zapremina vode na mestu ispuštanja na godišnjem nivou iznosi:  <math>V = 52 \cdot (10000 \text{ m}^3 + 100000 \text{ m}^3) = 5,72 \cdot 10^6 \text{ m}^3 = 6 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math></p> <p>Koristeći dozni konverzioni faktor od 6,4 10<sup>-11</sup> Sv/Bq i parcijalnu granicu doze, dobija se:</p> $0,1 \text{ mSv} = \frac{0,26 \text{ m}^3 \cdot 6,4 \cdot 10^{-11} \text{ Sv/Bq} \cdot A}{6 \cdot 10^6 \text{ m}^3}$ <p>odnosno, A=36 TBq na godišnjem nivou.  Ova aktivnost odgovara maksimalnoj koja može biti ispuštena u životnu sredinu.</p>

### Primer 2: Ispuštanje gasovitog radioaktivnog otpada

Laboratorija za proizvodnju radioizotopa zatražila je dozvolu za ispuštanje gasovitog radioizotopa joda <sup>131</sup>I kroz dimnjak laboratorijskih postrojenja. Dimnjak je visok 60 m, dok površina njegovog poprečnog preseka iznosi 0,7 m<sup>2</sup>. Brzina ispuštanja gasa iznosi 15 m/s.

Ukoliko primenimo gore opisanu metodologiju, dolazimo do sledećeg razmatranja:

Model izlaganja	Koncentracija radionuklida na mestu kritične grupe odgovara koncentraciji na mestu ispuštanja gasovitog efluenta. Frakcija vremena u kojem vetar duva u pravcu kritične grupe
-----------------	---

	iznosi $P=0,25$ . Ovaj model ne uzima u obzir visinu dimnjaka, dok složeniji modeli ne zanemaruju ovaj parametar.
Najznačajniji vid izlaganja jonizujućim zračenjima i najznačajniji put unošenja radionuklida	Inhalacija. Izlaganje spoljašnjem zračenju nije značajno. U slučaju složenijih modela moguće je uzeti u obzir i ingestiju kroz lanac ishrane, na primer konzumiranje kontaminiranog mleka.
Kritična grupa	Novorođena deca starosti do 1 godine
Relevantni podaci	Brzina ispuštanja: 15 m/s Poprečni presek dimnjaka: 0,7 m <sup>2</sup> Dozini konverzioni faktor (uzrast 1 g): $7,2 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq Godišnja inhalacija (uzrast 1 godina): 5,16 m <sup>3</sup>
Parcijalna granica doze	0,1 mSv
Maksimalna aktivnost radionuklida koja može biti ispuštena	Odrediti maksimalnu aktivnost (A) koja može biti ispuštena na godišnjem nivou u jedinicama Bq/godina. Dominantna vid izlaganja je inahalcija radioaktivnog izotopa <sup>131</sup> I. Protok na mestu ispuštanja kroz dimnjak iznosi $15 \text{ m/s} \cdot 0,7 \text{ m}^2 = 10,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a ukupna zapremina na godišnjem nivou $V = 10,5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 3600 \text{ s/h} \cdot 24 \text{ h/dan} \cdot 365 \text{ dan/g} = 3,3 \cdot 10^8 \text{ m}^3/\text{g}$ Koristeći dozni konverzioni faktor od $7,2 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ i parcijalnu granicu doze, dobija se:

	$0,1 \text{ mSv} = \frac{0,25 \cdot \text{m}^3 \cdot 7,2 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq} \cdot A}{3,3 \cdot 10^8 \text{ m}^3}$ <p>odnosno, <math>A=1\text{GBq}</math> na godišnjem nivou. Ova aktivnost odgovara maksimalnoj koja može biti ispuštena u životnu sredinu.</p>
--	--

### Nivoi izuzimanja i nivoi oslobađanja

Nivo izuzimanja (exemption level) je granična vrednost izražena kao koncentracija aktivnosti i/ili ukupna aktivnost iznad koje se materijal, koji sadrži jedan ili više radionuklida, smatra radioaktivnim.

Nivo oslobađanja (clearance level) označava graničnu vrednost specifične ili ukupne aktivnosti radioaktivne supstance ili materijala pri kojoj, ili ispod koje, radioaktivna supstanca ili materijal mogu da se oslobode od dalje regulatorne kontrole.

Pojmovi nivo izuzimanja i nivo oslobađanja su formalane prirode i definisani u cilju efektivne implementacije regulatorne kontrole nad izvorima jonizujućih zračenja. Radioaktivni izvor može biti izuzet iz regulatornog režima ukoliko ne može biti predmet istog i ukoliko isti nije moguće sprovesti. Ovaj uslov ispunjavaju prirodni izvori zračenja kao što je kosmičko zračenje ili terestrijalno zračenje.

#### Nivoi izuzimanja

Radioaktivni material i izvori zračenja jesu izuzeti iz regulatorne kontrole (exempted) ukoliko su ispunjeni sledeći kriterijumi:

- Radijacioni rizik za pojednca je dovoljno nizak i nije predmet regulatornog režima;
- Kolektivna doza je mala;
- Radijaciona delatnost nije značajna u smislu potencijalnih izlaganja i verovatnoće za vanredne događaje.

Navedeni kriterijumi su generičke prirode ali mogu biti prevedeni u radiološke kriterijume koristeći sledeće razmatranje, u skladu sa preporukama Međunarodne agencije za atomsku energiju (Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards, GSR Part 3, 2014.):

- Efektivna doza za člana kritične grupe je manja od  $10 \mu\text{Sv}$  godišnje;

- Ekvivalentna doza za kožu je manja od 50 mSv godišnje;
- Kolektivna doza na godišnjem nivou nije veća od 1 čovek ·Sv.

Nivoi izuzimanja za oko 300 različitih radionuklida utvrđeni su na osnovu gore navedenih kriterijuma i deo su međunarodne i nacionalne regulative iz oblasti zaštite od zračenja. Prilikom izračunavanja nivoa izuzimanja u obzir je uzet fizički oblik radionuklida i tri moguća scenarija izlaganja: normalno korišćenje, vanredni događaji i odlaganje u životnu sredinu kao i svi potencijalni vidovi izlaganja pojedinca (inhalacija, ingestija, kontaminacija kože i spoljašnje izlaganje).

#### Nivoi oslobađanja

Nivoi oslobađanja se nalaze u vezi sa nivoima izuzimanja. Izuzeti radioaktivni materijali po svojoj definiciji nikada i nisu bili predmet regulatorne kontrole, dok nivoi oslobađanja definišu kriterijume na osnovu kojih se izvori koji se nalaze pod regulatornom kontrolom iz iste mogu isključiti. Nivoi oslobađanja mogu biti specifični i vezani za pojedinačan slučaj ili opšti, primenjeni bez posebnih ograničenja u pogledu korišćenja materijala.

Naime, kada je materijal oslobođen od regulatorne kontrole na osnovu opštih nivoa oslobađanja, on može biti recikliran i ponovo korišćen za nove proizvode bez ikakvih ograničenja. Tipičan primer ovakvog vida reciklaže je prerada neradioaktivnog metalnog otpada u čeličanama kada se recikliran metalni otpad meša sa nekontaminiranim metalnim otpadom. S druge strane, ukoliko su primenjeni specifični nivoi oslobađanja, efekat razblaženja ne može biti uzet u obzir. Određivanje nivoa oslobađanja jeste proces u kome se u obzir mora uzeti radiološki uticaj na stanovništvo i profesionalno izložena lica. Primenjeni radiološki kriterijumi, slično onima za određivanje nivoa izuzimanja, baziraju se na radiološkom riziku tokom normalnih aktivnosti, akcidenata i odlaganja kao i na svim mogućim vidovima spojašnjeg i unutrašnjeg izlaganja. Dozni kriterijumi za nivoe oslobađanja su identični kao i gore navedeni kriterijumi za nivoe izuzimanja i iznose 10  $\mu$ Sv godišnje za člana kritične grupe, 50 mSv godišnje za kožu i 1 čovek ·Sv godišnje u smislu kolektivne doze.

Koristeći ove kriterijume, nivoi oslobađanja mogu biti određeni za svaki od potencijalnih vidova izlaganja, pri čemu se kao konačna vrednost uzima ona najmanja.

## Inhalacija

Ukoliko je put unutrašnjeg izlaganja inhalacija, to se očekivana efektivna doza od inhalacije može izračunati na osnovu izraza:

$$H_{inh} = h_{inh} t_e f_d C_c V e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2} \quad (9.7)$$

gde je:

$H_{inh}$  – očekivana efektivna doza od inhalacija na godišnjem nivou po jedinici aktivnosti radionuklida ( $\text{Svy}^{-1}$ )/( $\text{Bqg}^{-1}$ );

$h_{inh}$  – dozni konverzioni koeficijent za inhalaciju ( $\text{Sv/Bq}$ );

$t_e$  – vreme izlaganja;

$f_d$  – faktor razblaživanja aktivnosti radionuklida u vazduhu;

$C_c$  – koncentracija suspendovanog materijala u vazduhu ( $\text{kgm}^{-3}$ );

$V$  – Brzina respiracije;

$\lambda$  – konstanta radioaktivnog raspada;

$t_1$  – vreme pre početka scenaria;

$t_2$  – vreme trajanja scenaria.

Koristeći jednačinu 5.2, moguće je izračunati  $H_{inh}$  za specifične situacije i scenario. Ukoliko je granica doze od  $10 \mu\text{Sv/godina}$  podeli vrednošću  $H_{inh}$ , dobijeni količnik predstavlja indikaciju koncentracije aktivnosti u  $\text{Bq/g}$ .

## Ingestija

Ingestija je jedan od potencijalnih puteva unošenja radionuklida za stanovništvo i profesionalno izložena lica. U slučaju stanovništva put unošenja je lanac ishrane, dok je za profesionalno izložena lica to kontakt radionuklida sa usnom dupljom. Doza od ingestije se tada može izračunati na osnovu izraza:

$$H_{ing} = h_{ing} q f_d f_c V e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2} \quad (9.8)$$

gde je:

$H_{ing}$  – očekivana efektivna doza od ingestije na godišnjem nivou po jedinici aktivnosti radionuklida ( $Sv\cdot y^{-1}$ )/(Bqg<sup>-1</sup>);

$h_{ing}$  – dozni konverzioni koeficijent za ingestiju (Sv/Bq);

$q$  – količina unetog materijala na godišnjem nivou u kg;

$f_d$  – faktor razblaživanja aktivnosti radionuklida;

$f_c$  – faktor koncentracije aktivnosti radionuklida u materijalu unetom ingestijom;

$\lambda$  – konstanta radioaktivnog raspada;

$t_1$  – vreme pre početka scenaria;

$t_2$  – vreme trajanja scenaria.

#### Spoljašnje izlaganje

Spoljašnje izlaganje može nastati nako posledica različitih aktivnosti, kao što su na primer rad u zoni u kojoj je ispušten radioaktivni materijal. Doza od spoljašnjeg izlaganja može izračunati na osnovu izraza:

$$H_{ext} = h_{ext} f_d t_e V e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2} \quad (9.9)$$

gde je:

$H_{ext}$  – očekivana efektivna doza od spoljašnjeg izlaganja na godišnjem nivou po jedinici aktivnosti radionuklida ( $Sv\cdot y^{-1}$ )/(Bqg<sup>-1</sup>);

$h_{ext}$  – konverzioni koeficijent za spoljašnje izlaganja ( $Sv\cdot h^{-1}$ /Bqg<sup>-1</sup>);

$f_d$  – faktor razblaživanja aktivnosti radionuklida;

$t_e$  – vreme izlaganja tokom jedne godine izraženo u satima;

$\lambda$  – konstanta radioaktivnog raspada;

$t_1$  – vreme pre početka scenaria;

$t_2$  – vreme trajanja scenaria.

Vrednost  $h_{ext}$  zavisi od geometrije izvora i upotrebe zaštitnih ekrana rastojanja od izvora zračenja. Više detalja o izračunavanju doze dato je u Prilogu A ovog udžbenika.

Kontaminacija kože

Kontaminacija kože nastaje kao posledica kontakta sa radioaktivnim materijama i može biti značajna u radnom okruženju sa značajnim prisutvom prašine. Doza u ovom slučaju se može izračunati na osnovu izraza:

$$H_{skin} = h_{skin} w_{skin} f_{skin} t_e L_{dust} f_d \rho e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2} \quad (9.10)$$

gde je:

$H_{skin}$  – efektivna doza od kontaminacije beta i gama emiterima na godišnjem nivou po jedinici aktivnosti radionuklida ( $Sv\cdot y^{-1}$ )/(Bq $g^{-1}$ );

$h_{skin}$  – zbir doznih konverzionih koeficijenata za beta i gama emitere ( $Sv\cdot h^{-1}$ /Bq $cm^{-2}$ );

$w_{skin}$  – težinski factor za kožu (ICRP);

$f_{skin}$  – frakcija kože koja je kontaminirana;

$t_e$  – vreme izlaganja iskazano u broju sati na godišnjem nivou;

$f_d$  – faktor razblaživanja aktivnosti radionuklida;

$L_{dust}$  – je debljina sloja prašine na koži;

$\rho$  – površinska gustina površinskog sloja ( $g\cdot cm^{-3}$ );

$\lambda$  – konstanta radioaktivnog raspada;

$t_1$  – vreme pre početka scenaria;

$t_2$  – vreme trajanja scenaria.

Određivanje nivoa oslobađanja

Za određivanje prihvatljive koncentracije radioaktivnog materijala koji može biti oslobođen, neophodno je uzeti u obzir sve gore navedene puteve izlaganja, odnosno inhalaciju, ingestiju, spoljašnje izlaganje i kontaminaciju kože. Parametar sa najvećom efektivnom dozom koristi se za određivanje aktivnosti oslobođenog materijala, i to na osnovu izraza:

$$C_c = \frac{10 \mu Sv\cdot y^{-1}}{H_{max}(\mu Sv\cdot y^{-1})/(Bq\cdot g^{-1})} \quad (9.11)$$



gde je  $C_c$  koncentracija oslobođenog materijala a  $H_{\max}$  maksimalna efektivna doza uzimajući u obzir sve puteve unošenja radionuklida.

U skladu sa gore navedenim, bezuslovni nivoi oslobađanja koji se mogu primeniti na čvrst radioaktivni otpad za potrebe reciklaže i ponovnog korišćenja materijala dati su u Tabeli 9.3. Svi proizvedeni radionuklidi su u ovom slučaju podeljeni u tri grupe.

Tabela 9.3. Nivoi oslobađanja za radioaktivne materijale u čvrstom agregatnom stanju

Grupa radionuklida	Nivo oslobađanja	Opis grupe radionuklida
I	0,1	Gama emiteri: $^{60}\text{Co}$ , $^{134}\text{Cs}$ , $^{137}\text{Cs}$
II	1	Alfa, i neki beta i gama emiteri: $^{239}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{106}\text{Ru}$ , $^{125}\text{I}$
III	10	Beta emiteri: $^3\text{H}$ , $^{14}\text{Cs}$ , $^{35}\text{S}$ , $^{63}\text{Ni}$

Potrebno je naglasiti da procenjen nivo oslobađanja za određene radionuklide zavisi od vrednosti  $H_{\max}$ , odnosno maksimalne vrednosti efektivne doze za inhalaciju, ingestiju, kontaminaciju kože i eksterno izlaganje. Dominantan vid izlaganja i vrednosti doze u ovom slučaju zavise od načina na koji je predviđen scenario izlaganja. Scenario izlaganja se može razlikovati u različitim zemljama, pa samim tim i različite nivoje oslobađanja. Primer različitih nivoa oslobađanja u različitim zemljama dat je u Tabeli 9.4 i u Prilogu B.

Tabela 9.4. Generalni nivoi oslobađanja (Bq/g) u različitim evropskim zemljama

Zemlja	$^3\text{H}$	$^{60}\text{Co}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{239}\text{Pu}$
Belgija	1.0E+02	1.0E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E-01
Nemačka	1.0E+03	1.0E-01	2.0E+00	5.0E-01	4.0E-02
Grčka	1.0E+03	1.0E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E-01
Francuska	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Irska	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Holandija	1.0E+06	1.0E+00	1.0E+02	1.0E+01	1.0E+00
Velika Britanija	1.0E+01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E+00	1.0E+00

U praktičnim situacijama, radioaktivni otpad najčešće sadrži mešavinu različitih radionuklida. Određivanje nivoa oslobađanja u ovakvim situacijama bazira se na sumi količnika koncentracije pojedinačnih radionuklida i odgovarajućih nivoa oslobađanja:

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{c_{ci}} \leq 1.0 \quad (9.12)$$

gde je  $c_i$  koncentracija radionuklida  $i$  u (Bq/g) a  $c_{ci}$  nivo oslobađanja radionuklida  $i$  u (Bq/g), dok je  $n$  broj radionuklida prisutnih u smeši.

## X. Regulatorni okvir za upravljanje radioaktivnim otpadom

---

Regulatorni okvir za upravljanje radioaktivnim otpadom ima za cilj sigurno i bezbedno upravljanje radioaktivnim otpadom u svim fazama, od generisanja do konačnog odlaganja.

Koncept regulatornog okvira se definiše na nivou države i različit je od jedne do druge države, iako je osnova regulatornih sistema zasnovana na preporukama relevantnih međunarodnih organizacija. Ove preporuke prenose se dalje na nacionalno zakonodavstvo pružajući donekle uniformnost osnovnih principa radijacione i nuklearne sigurnosti i bezbednosti.

### Međunarodne organizacije

Međunarodne organizacije koje postavljaju standarde u oblasti radijacione i nuklearne sigurnosti i bezbednosti kao i one koje postavljaju standarde u drugim oblastima ali se njihove odredbe odnose i na oblasti primene izvora zračenja, radioaktivnih materijala i nuklearne energije su:

- Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (International Commission on Radiological Protection - ICRP);
- Međunarodna agencija za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency - IAEA);
- Međunarodna organizacija rada (International Labour Organization - ILO);
- Međunarodna komisija za radiološke jedinice i merenja (International Commission on Radiological Units and Measurements - ICRU).

Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (International Commission on Radiological Protection - ICRP) osnovana je na Drugom međunarodnom kongresu radiologa, 1928. godine, pod imenom Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja X-zraka i Radijuma. Ona je osnovana sa ciljem da donese smernice po pitanju zaštite od zračenja. U to vreme, kao i dugo vremena

---

potom, ova ograničena najviše se bavila sigurnošću primene izvora i generatora zračenja u medicinske svrhe. Postepenim povećanjem upotrebe izvora zračenja van medicine proširile su se i oblasti u kojima je komisija našla svoj interes te je 1950. godine, njeno ime promenjeno u Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja. Od svog osnivanja, komisija je priznata kao vodeća organizacija za pružanje smernica u svim aspektima zaštite od zračenja. U opisivanju svoje filozofije rada, ICRP navodi: *"politika koju je usvojila Komisija u pripremi preporuka je da se bavi osnovnim principima zaštite od zračenja, a da je na različitim nacionalnim komitetima zaštite odgovornost za uvođenje detaljnih tehničkih propisa, preporuka, ili kodeksa prakse koji najviše odgovaraju potrebama njihovih zemalja"* ostavljajući na taj način državama da zasebno uredi oblast zaštite od zračenja u svojim nacionalnim pravnim sistemima. U početku njenog rada preporuke Komisije bile su zasnovane na prevenciji primetno štetnih efekata zračenja. U tom cilju, preporučena je doza od 3 Sv nedeljno za tkivo na dubini veća od 1 cm (duboka doza), odnosno doza od 6 Sv nedeljno za tkivo na dubini od 0,007 cm (plitka doza). Kada su genetska oštećenja prihvaćena kao efekat koji treba da bude sprečen, 1959. godine, preporučena je granica za duboku ekvivalentnu dozu od 0.05 Sv/god. Do 1977. godine, nastavljena posmatranja efekata zračenja na ljude koji su preživeli bombardovanje Japana, uključujući i nepostojanje bilo kakvih uočljivih genetskih efekata, dovela su do ažuriranja preporuka zaštite od zračenja. Ove nove preporuke, prihvatile su pojavu kancerogenih oboljenja kao glavni efekat zračenja koji treba izbeći. Ovom prilikom usvojeno je i da različiti organi i tkiva imaju različite verovatnoće razvijanja kancerogenih oboljenja izazvanih zračenjem. Ova činjenica dovela je do uvođenja koncepta efektivne doze, koji razmatra verovatnoću stohastičkih efekata neuniformnog zračenja u odnosu na verovatnoću ovih efekata prilikom izlaganja celog tela. Kao posledica, Komisija preporučuje maksimalnu efektivnu ekvivalentnu dozu od 50 mSv u 1 godini kao i da ovo ograničenje uključuje sumu spoljašnje doze zračenja i doze od interno deponovanih radionuklida. Do 1990. godine, nastavak posmatranja japanskih žitelja koji su preživeli bombardovanje ukazao je da je verovatnoća razvijanja malignih oboljenja izazvanih zračenjem uranijima u prethodnim preporukama potcenjena. Shodno tome, komisija u svojoj publikaciji 60, koja je izdata 1990. godine, preporučuje ograničenje efektivne ekvivalentne doze za profesionalno izložena lica na 20mSv godišnje, u proseku za 5 godina (100 mSv tokom 5 godina), sa ograničenjem od 50 mSv u toku bilo koje (jedne) godine.

Međunarodna agencija za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency - IAEA), je specijalizovana agencija Ujedinjenih Nacija, osnovana 1956. Godine u cilju promovisanja mirnodopskih primena nuklearne

energije. Ova Agencija preporučuje osnovne standarde zaštite od zračenja koji se, u meri u kojoj je to praktično moguće, zasnivaju na preporukama Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja. Po svom statutu Međunarodna agencija za atomsku energiju ovlašćena je da obezbedi primenu standarda zaštite od zračenja u sopstvenim delatnostima i delatnostima koje koriste njenu pomoć. U tom cilju države ili organizacije kojima Agencija pruža pomoć treba da poštuju relevantne sigurnosne mere i mere zaštite propisane od strane Agencije. Mere sigurnosti propisane od strane Agencije objavljene su u nizu publikacija pod nazivom Sigurnosni standardi koje izdaje Agencija a koji su podeljeni po tematskim oblastima. Prvi skup preporuka Agencija je objavila 1962. godine, a revidirani skup osnovnih standarda zaštite od zračenja, koji je zasnovan na preporukama Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja objavljen je 1982. godine. Pojava ICRP 60 publikacije 1990. dovela je do toga da Agencija, 1995. godine, objavi treću veliku reviziju osnovnih standarda sigurnosti.

Međunarodna organizacija rada (International Labor Organization – ILO), koja je osnovana 1919. godine, bila je prvo deo Lige naroda a potom postala i prva od specijalizovanih agencija Ujedinjenih Nacija po njihovom osnivanju. Ova institucija se generalno bavi socijalnim problemima rada. U njen rad je uključena i specifikacija međunarodnih radnih standarda koji se odnose na zdravlje i sigurnost radnika. Ove specifikacije navedene su u Modelu Kodeksa sigurnosnih propisa za industrijska postrojenja kojima se vode države u donošenju sopstvenih propisa, u preporukama stručnih komiteta, kao i tehničkim priručnicima. Što se tiče zaštite od zračenja, ovaj Kodeks je izmenjen tako da uključuje one preporuke Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja koje su od značaja za kontrolu rizika za profesionalno izložena lica, a objavljeno je i nekoliko priručnika koji se bave zaštitom radnika

Međunarodna komisija za radiološke jedinice i merenja (International Commission on Radiological Units and Measurements – ICRU), koja blisko saraduje sa ICRP, imala je, od svog osnivanja 1925, kao svoj glavni cilj, razvoj međunarodno prihvatljivih preporuka u vezi:

- veličina i jedinica zračenja i radioaktivnosti
- procedura pogodnih za merenje i primenu ovih veličina u kliničkoj radiologiji i radiobiologiji
- fizičkih podataka potrebnih u primeni ovih procedura, čija upotreba teži da osigura uniformnost u izveštavanju.

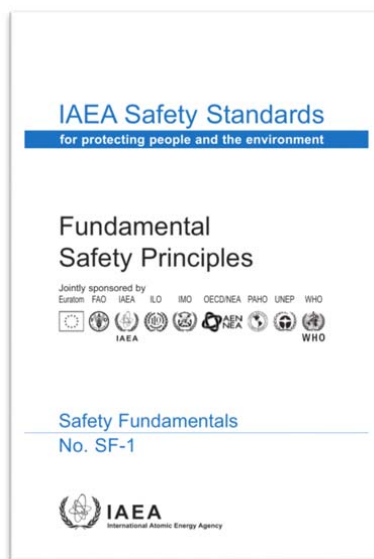
U smislu svoje poslovne politike ova organizacija smatra da je odgovornost nacionalnih organizacija da uvedu sopstvene detaljne tehničke procedure za razvoj i održavanje standarda. Međutim, ona se zalaže da sve zemlje poštuju

---

u najvećoj mogućoj meri, međunarodno preporučene osnovne koncepte veličina i jedinica zračenja.

### Standardi Međunarodne agencije za atomsku agenciju

Međunarodna agencija za atomsku energiju, još od svog osnivanja, počela je pripremu i objavljivanje standarda sigurnosti kojima je uspostavila osnovni okvir, zahteve i kriterijume koji se postavljaju pred nuklearnu i radijacionu sigurnost i bezbednost kako bi omogućili sigurno i bezbedno korišćenje izvora zračenja, radioaktivnih materijala i nuklearne energije. Međunarodna agencija za atomsku energiju redovnom revizijom sigurnosnih standarda i preporuka omogućuje njihovo poboljšanje u skladu sa novim naučnim otkrićima, stečenim znanjima, razvojem u oblasti primene jonizujućeg zračenja i nuklearne energije ali i incidentima i akcidentima.



Slika 10.1. Simbol Međunarodne agencije za atomsku energiju i naslova strana dokumenta Osnovni principi sigurnosti

Kao krovni dokument kojim se uspostavlja okvir za uspostavljanje svih ostalih standarda sigurnosti, Međunarodna agencija za atomsku energiju je zajedno sa još osam međunarodnih organizacija donela, 2006. godine, dokument pod nazivom Osnovni principi sigurnosti (Fundamental Safety Principles). Svrha ovog dokumneteta je da uspostavi osnovni cilj sigurnosti,

principe sigurnosti kao i koncepte koji pružaju osnov za sigurnosne standarde. Odredbe ovog dokumenta Međunarodna agencija za atomsku energiju, dalje je razradila u dokumentima koji se bave sigurnosnim zahtevima. Međunarodna agencija za atomsku energiju objavila je, takođe, i niz smernica kojima se bliže opisuje kako se u praksi sprovode postavljeni sigurnosni zahtevi.

Osnovnim principima sigurnosti propisano je da je osnovni cilj svih mera sigurnosti zaštita života i zdravlja ljudi i životne sredine od mogućih štetnih efekata jonizujućih zračenja. Kako bi se osiguralo da se postrojenja koriste, odnosno aktivnosti sprovode, uz primenu najviših standarda sigurnosti koji se razumski mogu postići, preduzimaju se sledeće osnovne mere:

- kontrola nivoa izlaganja lica i nivoa ispuštanja efluenta u životnu sredinu;
- ograničavanje verovatnoće događaja koji bi mogli dovesti do gubitka kontrole nad jezgrom nuklearnog reaktora, lančanom reakcijom unutar reaktora ili izvorima zračenja;
- smanjenje posledica takvih događaja, ukoliko do njih dođe.

Osnovni principi nuklearne sigurnosti koje ovaj dokument uspostavlja su:

- Odgovornost za sigurnost – Primarnu odgovornost za sigurnost mora da nosi lice odnosno organizacija odgovorna za postrojenje odnosno aktivnosti u kojima može doći do povećanja radijacionog rizika;
  - Uloga državnih organa – Efektivan zakonski i institucionalni okvir za sigurnost, uključujući i nezavisno regulatorno telo, mora biti uspostavljen i održavan;
  - Rukovođenje i upravljanje u sigurnosti – Efektivno rukovođenje i upravljanje svim pitanjima relevantnim za sigurnost mora biti uspostavljeno i održavano u organizacijama koje se bave pitanjima, objektima i aktivnostima kod kojih može doći do stvaranja radijacionog rizika;
  - Opravdanost objekata i aktivnosti – Objekti i aktivnosti koje generišu radijacioni rizik moraju imati pokazanu sveukupnu dobrobit;
  - Optimizacija zaštite – Zaštita mora biti optimizirana na takav način da obezbedi najviši nivo sigurnosti koji se razumski može postići;
  - Ograničavanje rizika za pojedinca – Mere za kontrolu radijacionog rizika moraju osigurati da nijedan pojedinac ne bude izložen neprihvatljivom riziku;
  - Zaštita sadašnjih i budućih generacija – Ljudi i životna sredina, danas i u budućnosti, moraju biti zaštićeni od radijacionog rizika;
-

- Prevenirija akcidenata – Svi praktični napori moraju biti učinjeni da bi se sprečio nastanak i umanjile posledice nuklearnih ili radijacionih akcidenata;
- Pripremljenost i delovanje u slučaju vanrednog događaja– Moraju se uspostaviti odgovarajuće mereradi obezbeđenjaspremnosti za delovanje i delovanja u slučaju nuklearnog ili radijacionog vanrednog događaja;
- Zaštitne mere za smanjenje postojećeg ili neregulisanog radijacionog rizika – Zaštitne mere za smanjenje postojećeg ili neregulisanog radijacionog rizika moraju biti opravdane i optimizirane.

### Funkcije regulatornih tela

Preporuke Međunarodne agencije za atomku energiju zahtevaju od država da uspostave adekvatan regulatorni okvir zasnovan na delotvornoj nezavisnosti regulatornih tela od svih mogućih uticaja koji bi se negativno odrazili po donošenje nezavisnih odluka i time negativno uticali na sigurnost i bezbednost radioaktivnih materijala i objekata u kojima se oni koriste.

Operater objekta ili aktivnosti u kojima se koriste radioaktivni materijali primarno je odgovoran za sigurnost tih objekata ili tokom sprovođenja aktivnosti. Primarni cilj regulatornog tela je da osigura da operaterna pravilan način ispunjava datu odgovornost kako bi osigurao zaštitu ljudskog zdravlja i životne sredine od mogućih štetnih efekata koji proizlaze iz rada sa radioaktivnim materijalima i upravljanja radioaktivnim otpadom. Kako bi ovaj cilj bio postignut, regulatorno telo mora da uspostavi pravni okvir i definiše principe i kriterijume sigurnosti koji predstavljaju osnov za siguran i bezbedan rad za radioaktivnim materijalima.

Regulatorno telo svoje funkcije uspostavlja kroz:

- Donošenje propisa;
- Analizu sigurnosti aktivnosti i objekata;
- Licenciranje i autorizaciju;
- Sprovođenje inspeksijskog nadzora;
- Nalaganje ispravljanja nedoslednosti utvrđenih inspeksijskim nadzorom;
- Kažnjavanje u slučaju kršenja propisa;
- Vođenje evidencija.

Regulatorna tela u svetu imaju manji ili veći stepen navedenih funkcija a sve zavisno od položaja u nacionalnom institucionalnom sistemu i rešenja

---



primenjenh u nacionalnim zakonima. Posebnu pažnju nezavisnosti regulatornih tela dala je Evropska unija koja je kroz svoje direktive razradila mehanizme efikasne nezavisnosti regulatornih tela u oblasti radijacione i nuklearne sigurnosti i bezbednosti i upravljanja radioaktivnim otpadom.

### Zajednička konvencija o sigurnosti upravljanja isluženim gorivom i osigurnosti upravljanja radioaktivnim otpadom

Zajednička konvencija o sigurnosti upravljanja isluženim gorivom i osigurnosti upravljanja radioaktivnim otpadom je međunarodna pravno obavezujuća Konvencija kojom se na međunarodnom nivou uspostavlja sistem sigurnosti upravljanja isluženim gorivom i radioaktivnim otpadom.

Ciljevi zajedničkekonvencije su:

- da se postigne i održi širom sveta visok nivo sigurnosti upravljanja isluženim gorivom i radioaktivnim otpadom, kroz unapređenje nacionalnih mera i međunarodne saradnje, uključujući, tamo gde je to primereno, tehničku saradnju vezanu za sigurnost;
- da se obezbedi da za vreme svih faza upravljanja isluženim gorivom i radioaktivnim otpadom postoji efikasna odbrana od potencijalnih opasnosti tako da pojedinci, društvo i životna sredina budu, sada i u budućnosti, zaštićeni od štetnih posledica jonizujućih zračenja na takav način da potrebe i težnje sadašnje generacije budu zadovoljene bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe i težnje;
- da se spreče akcidenti sa radiološkim posledicama i da se ublaže posledice, ako do njih dođe, u toku bilo koje faze upravljanja isluženim gorivom ili radioaktivnim otpadom.

Ova konvencija se primenjuje na sigurnost upravljanja isluženim gorivom iz civilnih nuklearnih reaktora. Isluženo gorivo koje se drži u objektima za ponovnu preradu kao deo postupka prerade ne potpada pod delokrug ove konvencije osim ako ugovorna strana ne proglasi preradu kao deo upravljanja isluženim gorivom. Ova konvencija se takođe primenjuje i na sigurnost upravljanja radioaktivnim otpadom koji nastaje u civilnim primenama. Međutim, ova se konvencija ne primenjuje na otpad koji sadrži samo prirodno nastale radioaktivne materijale, a koji nije nastao u nuklearnom gorivnom ciklusu, osim ako on predstavlja iskorišćeni zatvoreni izvor ili ga ugovorna strana, za potrebe ove konvencije, deklarise kao radioaktivni otpad. Ova konvencija se ne primenjuje na sigurnost upravljanja isluženim gorivom ili radioaktivnim otpadom u sklopu vojnih ili odbrambenih programa, osim ako

---

ga ugovorna strana deklariše za potrebe ove konvencije kao isluženo gorivo ili radioaktivni otpad. Međutim, ova konvencija se primenjuje na sigurnost upravljanja isluženim gorivom i radioaktivnim otpadom iz vojnih ili odbrambenih programa ukoliko i samo onda kada se takvi materijali trajno prevedu u civilne programe i njima isključivo upravlja u sklopu civilnih programa. Ova konvencija se primenjuje i na emisiju pri normalnom režimu rada objekata.

Zajednička konvencija propisuje i opšte sigurnosne zahteve kojih svaka država, ugovorna strana ove konvencije treba da se pridržava kako bi obezbedila da su, u svim fazama upravljanja isluženim gorivom i upravljanja radioaktivnim otpadom, pojedinci, društvo i životna sredina adekvatno zaštićeni od radioloških rizika.

U vezi upravljanja isluženim gorivom, svaka država, ugovorna strana konvencije treba da preduzme odgovarajuće korake kako bi:

- obezbedila da se kritičnost i uklanjanje ostatka toplote generisane pri upravljanju isluženim gorivom rešavaju na odgovarajući način;
- obezbedila da stvaranje radioaktivnog otpada povezanog sa upravljanjem isluženim gorivom bude na izvodljivom minimumu, u skladu sa usvojenom politikom gorivnog ciklusa;
- uzela u obzir međuzavisnosti različitih mera za upravljanja isluženim gorivom;
- obezbedila efikasnu zaštitu pojedinaca, društva i životne sredine, primenjujući na nacionalnom nivou odgovarajuće metode zaštite odobrene od strane regulatornog tela u okviru svog nacionalnog zakonodavstva koje je u skladu sa međunarodno priznatim kriterijumima i standardima;
- uzela u obzir biološke, hemijske i druge opasnosti koje mogu biti povezane sa upravljanjem isluženim gorivom;
- nastojala da izbegne aktivnosti koje bi mogle da na buduće generacije imaju razumno predvidive uticaje veće od onih dozvoljenih za sadašnju generaciju;
- težila da izbegne nametanje neprimerenih tereta za buduće generacije.

Takođe, u svim fazama upravljanja radioaktivnim otpadom svaka država, ugovorna strana konvencije treba da preduzme odgovarajuće korake kako bi:

- obezbedila da se kritičnost i odvođenje zaostale toplote nastale tokom upravljanja radioaktivnim otpadom rešava na odgovarajući način;
-

- obezbedila da se generisanje radioaktivnog otpada održava na izvodljivom minimumu;
- uzela u obzir međuzavisnosti različitih mera kod upravljanja radioaktivnim otpadom;
- obezbedila efikasnu zaštitu pojedinaca, društva i životne sredine, primenjujući na nacionalnom nivou odgovarajuće metode zaštite koje su odobrene od strane regulatornog tela, u okviru svog nacionalnog zakonodavstva koje poklanja dužnu pažnju međunarodno usvojenim kriterijumima i standardima;
- uzela u obzir biološke, hemijske i druge opasnosti koje mogu biti u vezi sa upravljanjem radioaktivnim otpadom;
- nastojala da izbegne činjenja koja nameću razumno predvidive uticaje na buduće generacije veće od onih koji su dozvoljeni za sadašnju generaciju;
- težila da izbegne uvođenje neprimerenih tereta za buduće generacije.

### Regulatorni okvir Evropske unije

Prema Ugovoru o funkcionisanju EU, u vršenju svoje nadležnosti odgovarajuće institucije EU donose obavezujuće akte – uredbе, uputstva i odluke i neobavezujuće akte – preporuke i mišljenja. Direktiva jeste pravni akt koji je obavezan za države članice na koje se odnosi u pogledu cilja koji treba ostvariti, s tim što je prepušteno državi članici da svojim propisom utvrdi način ostvarenja tog cilja. Pitanja upravljanja radioaktivnim otpadom na nivou Evropske unije rešena su Direktivom Saveta 2011/70/Euratom od 19. jula 2011. o uspostavljanju okvira Zajednice za odgovorno i sigurno upravljanje isluženim nuklearnim gorivom i radioaktivnim otpadom.

Ovom direktivom uspostavlja se okvir za obezbeđivanje odgovornog i sigurnog upravljanja isluženim gorivom i radioaktivnim otpadom u Evropskoj Zajednici kako bi izbeglo nepotrebno opterećivanje budućih generacija. Njom se takođe osigurava da države članice obezbede odgovarajuće nacionalne mere za visoki stepen sigurnosti, kada je reč o upravljanju isluženim nuklearnim gorivom i radioaktivnim otpadom, u cilju zaštite profesionalno izloženih lica i stanovništva od opasnosti koje potiču od jonizujućeg zračenja. Ovom direktivom se takođe osigurava obezbeđivanje informisanja javnosti i učešća javnosti u svim pitanjima u vezi sa upravljanjem isluženim nuklearnim gorivom i radioaktivnim otpadom vodeći u isto vreme računa o pitanjima bezbednosti i vlasništva nad podacima. Ova direktiva takođe dopunjuje osnovne standarde navedene u Ugovoru o

---

osnivanju Evropske zajednice za atomsku energiju kada je reč o sigurnosti isluženog goriva i radoaktivnog otpada.

Ova direktiva primenjuje se na sve faze upravljanja isluženim nuklearnim gorivom kada je ono rezultat mirnodopskih aktivnosti kao i na sve faze upravljanja radioaktivnim otpadom, od generisanja do odlaganja, kada je radioaktivni otpad rezultat mirnodopskih aktivnosti.

Ova direktiva ne primenjuje se na otpad iz ekstrativnih industrija koji može biti radioaktivan i odobrena ispuštanja u životnu sredinu kao ni na povraćaj zatvorenih izvora van upotrebe dobavljaču ili proizvođaču i isporuku isluženog goriva iz istraživačkih reaktora do zemlje u kojoj se gorivo za istraživački reaktor nabavlja ili u kojoj se proizvodi.

Ova direktiva, takođe nema uticaja na pravo države članice ili preduzeća u toj državi članici da nakon tretmana vrati radioaktivan otpad u zemlju porekla kada radioaktivan otpad treba isporučiti u tu državu članicu ili preduzeće u svrhu tretmana ili kada druge materijale treba isporučiti u tu državu članicu ili preduzeće u svrhu izdvajanja radioaktivnog otpada. Ova direktiva isto tako nema uticaja na pravo države članice ili preduzeća u državi članici, kojima se isluženo gorivo šalje na tretman ili preradu, da radioaktivni otpad izdvojen u postupku tretmana ili prerade vrati u državu porekla.

Ovom direktivnom propisano je da države članice uspostavljaju i održavaju nacionalni zakonodavni, regulatorni i organizacioni okvir za upravljanje isluženim nuklearnim gorivom i radioaktivnim otpadom kojim se raspodeljuje odgovornost i obezbeđuje koordinacija između relevantnih nadležnih tela.

Jedna od najznačajnijih odredbi ove direktive je i odredba kojom se propisuje da države članice uspostavljaju i održavaju nacionalnu politiku za upravljanje isluženim nuklearnim gorivom i radioaktivnim otpadom. Direktiva takođe propisuje da nacionalna politika treba da se zasniva na sledećim načelima:

- generisanje radioaktivnog otpada drži se na minimumu koliko je to moguće, i kada je reč o aktivnosti i kada je reč o količini, korišćenjem odgovarajućih projektovanih mera i odgovarajućih načina rada i dekomisije, uključujući recikliranje i ponovnu upotrebu materijala;
  - u obzir se uzimaju međusobne zavisnosti između svih koraka tokom stvaranja i upravljanja isluženim gorivom i radioaktivnim otpadom;
  - isluženim gorivom i radioaktivnim otpadom upravlja se na siguran način, uključujući, ako se posmatra dugoročno, pasivno garantovanje sigurnosti;
-

- mere se sprovode u skladu sa gradiranim pristupom;
- troškove upravljanja isluženim gorivom i radioaktivnim otpadom snose oni kod kojih su ti materijali nastali (poluter pays princip)
- primenjuje se dokumentovani proces donošenja odluka zasnovan na dokazima kada je reč o svim fazama upravljanja isluženim gorivom i radioaktivnim otpadom.

Način na koji države članice nameravaju da sprovedu svoju nacionalnu politiku utvrđuje se nacionalnim programima. Nacionalni programi su strateški dokumenti koji određuju način i metode sprovođenja nacionalne politike a u terminologiji Međunarodne agencije za atomsku energiju nazivaju se strategije.

Ova direktiva propisuje i odredbe koje se tiču nadležnih regulatornih tela. Ona propisuje da je svaka država članica dužna da osnuje i održava nadležno regulatorno telo u oblasti sigurnosti upravljanja isluženim nuklearnim gorivom i radioaktivnim otpadom. Takođe, država članica dužna je da obezbedi uslove da nadležno regulatorno telo bude funkcionalno odvojeno od svih drugih tela ili organizacija koje su uključene u promociju ili upotrebu nuklearne energije ili radioaktivnog materijala, uključujući proizvodnju električne energije i primenu radioizotopa, ili tela ili organizacija koje upravljaju isluženim nuklearnim gorivom i radioaktivnim otpadom, kako bi se obezbedila delotvorna nezavisnost kada je reč o nepotrebnim uticajima na regulatornu funkciju tog tela. Države članice treba da obezbede i uslove da nadležno regulatorno telo dobije zakonska ovlašćenja i ljudske i finansijske resurse koji su potrebni kako bi se ispunile obaveze u vezi sa nacionalnim okvirom.

## XI. Literatura

---

Aloy A, Amoravian S, Burcl R, et al. Strategy and methodology for radioactive waste characterization. IAEA TECDOC-1537, IAEA, Vienna, 2007

Bayliss CR, Langley KE, Nuclear decommissioning, waste management, and environmental site remediation, Elsevier, 2003

Berkhout F. Radioactive Waste Politics and Technology, Routledge, London, 1991

Bredell P, Drace Z, Hudson S, et al. Policies and strategies for radioactive waste management. IAEA Nuclear Energy Series, NW-G-1.1, STI/PUB/1396, 68 pp., IAEA, Vienna, 2009

Burclova J, Drace Z, Gonzales Gomez JL, et al. Categorizing operational radioactive wastes. IAEA TECDOC-1538, IAEA, Vienna, 2007

Chapman N, Mc Combie C, Principles and standards for the disposal of long-lived radioactive wastes, Elsevier, 2003

Dimovic S, Plecas I, Obrada organskog radioaktivnog otpada u projektu dekomisije, Zbornik radova XLVII Konf za ETRAN, Herceg Novi, 8-13 juna 2003, tom IV, 94-96

Drace Z, Ojovan MI. The behaviours of cementitious materials in long term storage and disposal: an overview of results of the IAEA coordinated research programme. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1193, 663–672 (2009)

European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization, United Nations Environment Programme, World Health Organization, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna, 2014

---

Feretić D. Uvod u nuklearnu energetiku, Školska knjiga, Zagreb, 2010

Gibb F.G.F. A new scheme for the very deep geological disposal of high level radioactive waste', J. Geol. Soc. (London), 157, 27 – 36, 2000

Health and Safety Executive, the Environment Agency and the Scottish Environment Protection Agency, Fundamentals of the management of radioactive waste. An introduction to the management of higher-level radioactive waste on nuclear licensed sites. Guidance from the Health and Safety Executive, the Environment Agency and the Scottish Environment Protection Agency to nuclear licensees, HSE, 2007

International Atomic Energy Agency, Techniques for solidification of high-level wastes. TRS 176, Vienna, 1977

International Atomic Energy Agency, Design and operation of off-gas cleaning systems at high level liquid waste conditioning facilities. IAEA TRS-291, Vienna, 1988

International Atomic Energy Agency, The radiological accident in Goiania, IAEA, VIENNA, 1988

International Atomic Energy Agency, Classification of Radioactive Waste, Safety Series No. 111-G-1.1, IAEA, Vienna, 1994

International Atomic Energy Agency, Issues in Radioactive Waste Disposal, Interface Issues between Nuclear Safeguards and Radioactive Waste Disposal, Second Report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-909, IAEA, Vienna, 1996

International Atomic Energy Agency, The Principles of Radioactive Waste Management, IAEA Safety Series, No. 111-F, 1996

International Atomic Energy Agency, Design and operation of high level waste vitrification facilities. IAEA TRS-339, Vienna, 1997

International Atomic Energy Agency, Radiological characterization of shut down nuclear reactors for decommissioning purposes, Technical reports series 389, Vienna, 1998

International Atomic Energy Agency, Interim storage of radioactive waste packages,

Technical reports series, 390, Vienna, 1998

International Atomic Energy Agency, State of the art technology for decontamination and dismantling of nuclear facilities, Technical reports series, no. 395, Vienna, 1999

---

International Atomic Energy Agency , Technologies for remediation of radioactively contaminated sites, IAEA-TECDOC-1086, Vienna, 1999

International Atomic Energy Agency, Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment, IAEA Safety Standards Series No. WS-G-2.3, IAEA, Vienna, 2000

International Atomic Energy Agency, Handling, conditioning and storage of spent sealed radioactive sources, IAEA-TECDOC-1145, Vienna, 2000

International Atomic Energy Agency, Methods for the minimization of radioactive waste from decontamination and decommissioning of nuclear facilities. Technical Reports Series No. 401, Vienna, 2001

International Atomic Energy Agency, Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications. Technical Reports Series No. 402, Vienna, 2001

International Atomic Energy Agency, Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances into the Environment, IAEA Safety Report Series No. 19, Vienna, 2001

International Atomic Energy Agency, Application of Ion Exchange Processes for the Treatment of Radioactive Waste and Management of Spent Ion Exchanges. IAEA Technical Reports, Series No. 408, Vienna, 2002

International Atomic Energy Agency, Scientific and Technical Basis for the Near Surface Disposal of Low and Intermediate Level Waste, Technical Reports Series No. 412 , Vienna, 2002

International Atomic Energy Agency, Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 413 , Vienna, 2003

International Atomic Energy Agency, Safety Standards Series, Safety Requirements No. WS-R-3, Remediation of Areas Contaminated by Past Practices , Vienna, 2003

International Atomic Energy Agency, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna, 2004

International Atomic Energy Agency, Application of Membrane Technologies for Liquid Radioactive Waste Processing. IAEA Technical Reports Series No. 431, Vienna, 2004

International Atomic Energy Agency, Remediation of sites with dispersed radioactive contamination, Technical reports series no. 424, Vienna, 2004

---



International Atomic Energy Agency, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities (ISAM), Vol. 1 Review and Enhancement of Safety Assessment Approaches and Tools, Vol. 2 Test Cases, IAEA, Vienna, 2004

International Atomic Energy Agency , Methodology for safety assessment applied to predisposal waste management, IAEA-TECDOC 1777, Vienna, 2005

International Atomic Energy Agency, Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Reports Series No. 44, 2005

International Atomic Energy Agency, Disposal Options for Disused Radioactive Sources, Technical Reports Series No. 436, Vienna, 2005.

International Atomic Energy Agency, Remediation of sites with mixed contamination of radioactive and other hazardous substances. Technical reports series 442, Vienna, 2006

International Atomic Energy Agency, Standard format and content for safety related decommissioning documents, Safety reports series no 45, Vienna, 2007

International Atomic Energy Agency, Fundamental safety principles: safety fundamentals, Vienna, 2006

International Atomic Energy Agency, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste. IAEA-TECDOC-1527, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006

International Atomic Energy Agency, Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, Vienna, 2007

International Atomic Energy Agency, Decommissioning strategies for facilities using radioactive material, Safety reports series no 50, Vienna, 2007

International Atomic Energy Agency, Nuclear Energy Basic Principles, IAEA Nuclear Energy Series No. NE-BP, IAEA, Vienna, 2008

International Atomic Energy Agency, Managing low radioactivity material from the decommissioning of nuclear facilities, Technical reports series, 462, Vienna , 2008.

International Atomic Energy Agency,, Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1, IAEA, Vienna, 2009

---

International Atomic Energy Agency , Geological disposal of radioactive waste : technological implications for retrievability, IAEA nuclear energy series, NW-T-1.19, Vienna, 2009

International Atomic Energy Agency, Security of Radioactive Sources, IAEA Nuclear Security Series No. 11, IAEA, Vienna, 2009

International Atomic Energy Agency, Classification of radioactive waste: General Safety Guide GSG-1. Vienna, 2009

International Atomic Energy Agency, Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements, No. SSR-5 DS354, 2009

International Atomic Energy Agency, Technological Implications of International Safeguards for Geological Disposal of Spent Fuel and Radioactive Waste, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.21, IAEA, Vienna, 2010

International Atomic Energy Agency, Guides Policies and Strategies for the Decommissioning of Nuclear and Radiological Facilities , IAEA Nuclear Energy Series NW-G-2.1, Vienna, 2011

International Atomic Energy Agency, Radioactive waste management objectives, IAEA Nuclear Energy Series, Vienna, 2011

International Atomic Energy Agency, Disposal of radioactive waste, IAEA safety standards series, SSR-5, Vienna, 2011

International Atomic Energy Agency, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2012 Edition, IAEA Safety Standards Series No. SSR-6, IAEA, Vienna, 2012

International Atomic Energy Agency, Management of discharge of low level liquid radioactive waste generated in medical, educational, research and industrial facilities, IAEA TECDOC 1714, Vienna, 2013.

International Atomic Energy Agency, The Safety Case and Safety Assessment for Predisposal Management of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSG-3, IAEA, Vienna, 2013

International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources : international basic safety standards, IAEA safety standards series, GSR Part 3. Vienna, 2014.

International Atomic Energy Agency, Planning and design considerations for geological repository programmes of radioactive waste, , IAEA TECDOC 1755, Vienna, 2014

International Atomic Energy Agency, Decommissioning of facilities, IAEA safety standards series, no. GSR part 6, Vienna, 2014

---

International Atomic Energy Agency, Mobile processing systems for radioactive waste management. IAEA nuclear energy series no. NW-T-1.8, Vienna, 2014

International Atomic Energy Agency, IAEA SAFETY GLOSSARY/TERMINOLOGY USED IN NUCLEAR SAFETY AND RADIATION PROTECTION 2016 REVISION, Vienna, 2016

International Atomic Energy Agency, INES, the International Nuclear and Radiological Event Scale, <https://www.iaea.org/sites/default/files/ines.pdf>, accessed 10.3.2017.

Lee WE, Ojovan MI, Jantzen CM (Ed). Radioactive waste management and contaminated site clean-up. Woodhead Publishing Limited, UK, 2013

Martin J, Physics for Radiation Protection. A Handbook, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2006

Miller W (Ed). Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues, Pergamon, 2000

Ojovan MI, Lee WE. New Developments in Glassy Nuclear Wasteforms, Nova Science Publishers, New York, 2007

Ojovan MI. Handbook of advanced radioactive waste conditioning technologies. Woodhead Publishing Limited, UK, 2011

Ojovan MI, Lee WE. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 2015

Pusch R, Geological Storage of Highly Radioactive Waste, Springer, 2008

Rahman A. Decommissioning and Radioactive Waste Management, CRC Press, 2008

Shapiro J, Radiation Protection. A Guide for Scientists, Regulators, and Physicians, Fourth Edition, Harvard University Press, 2002

Shinya Nagasaki, Shinichi Nakayama (Ed). Radioactive Waste Engineering and Management. Springer, 2015

SKB, RD&D Programme 2010: Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. SKB Report TR-10-63, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2010

Spence R, Shi C (Ed), Stabilization / solidification of hazardous, radioactive, and mixed wastes, CRC Press, 2005

Weston S, Nuclear reactor physics, John Wiley & Sons, 2001

---

## XII. Prilog A

---

Procena doza koju profesionalno izložena lica i stanovništvo prime pri normalnim operacijama i odstupanjima od normalnog rada objekata za upravljanje radioaktivnim otpadom

Procena doza koja profesionalno izložena lica i stanovništvo prime tokom normalnog pogona

Doza koju profesionalo izloženo lice ili pojedinac iz stanovništva primi kao posledicu rada u određenom polju zračenja ili direktnog izlaganja izvoru zračenja ili pakovanju radioaktivnog otpada može se odrediti iz karakteristika polja zračenja (jačina doze), karakteristika radionuklida u izvoru (aktivnost, tip raspada, energija emitovanih čestica itd.) i podataka o aktivnosti koja se obavlja (planirano vreme i udaljenost od izvora).

Ukoliko je poznata jačina doze u prostoru u kom lice obavlja određenu aktivnost, vrednost doze koju to lice primi u određenom vremenskom intervalu može se odrediti jednačinom:

$$E = \dot{E} \cdot t \quad \text{P.1}$$

gde je:

- $\dot{E}$  = jačina doze u prostoru u kom se obavlja aktivnost [Sv/h]  
 $t$  = vreme provedeno u prostoru sa poznatom jačinom doze [h]

Ukoliko je poznata jačina doze na određenoj udaljenosti od izvora, jačinu doze na bilo kojoj udaljenosti od tog izvora moguće je odrediti pomoću formule:

$$\dot{E} = \frac{\dot{E}_p}{(r/r_p)^2} \quad \text{P.2}$$

gde je:

- $\dot{E}_p$  = poznata jačina doze na udaljenosti  $r_p$  od izvora zračenja [Sv/h]  
 $r$  = udaljenost od izvora zračenja [m]
-

$r_p$  = udaljenost na kojoj je poznata jačina doze  $\dot{E}_p$  [m]

Doza koju lice primi od ovog izvora može se odrediti pomoću jednačina P1.

U slučaju direktnog izlaganja tačkastom izvoru, slika P.1, gama zračenja jačina doze kojoj je lice izloženo može se odrediti pomoću formule:

$$\dot{E} = 5,77 \cdot 10^{-4} \cdot \sum_{\gamma} \mu_a(\varepsilon_{\gamma}) \cdot p_{\gamma} \cdot \varepsilon_{\gamma} \cdot B_D \cdot Q \cdot \frac{e^{-b_1 \cdot \frac{r}{a}}}{4\pi \cdot r^2} \quad \text{P.3}$$

gde se sumiranje vrši po svim radionuklidima i gde je:

$\dot{E}$  = jačina doze na udaljenosti  $r$  od tačkastog gama izvora [mSv/h]

$\mu_a(\varepsilon_{\gamma})$  = maseni koeficijent slabljenja [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]

$p_{\gamma}$  = prinos fotona

$\varepsilon_{\gamma}$  = energija fotona [MeV]

$B_D$  = dozni faktor nagomilavanja (*dose buildup factor*)

$Q$  = aktivnost izvora [Bq]

$b_1$  = slabljenje usled zaklanjanja koje se izračunava prema formuli:

$$b_1 = \mu \cdot t$$

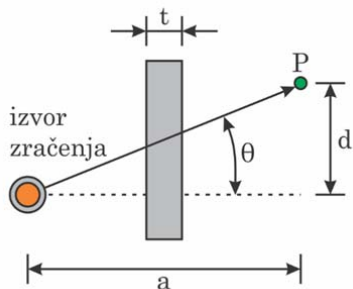
gde je:

$\mu$  – linearni koeficijent slabljenja [ $\text{cm}^{-1}$ ]

$t$  – debljina ekrana [cm]

$R$  = udaljenost od izvora [cm]

$A$  = udaljenost od ravni paralelne šildinga na kojoj se nalazi računaska tačka [cm]



Slika P1. Shema izlaganja tačkastom izvoru

Konstanta  $5,77 \cdot 10^{-4}$  je proizvod konstanti koje služe za konverziju jedinica ostalih činilaca u jednačini kako bi konačni rezultat bio iskazan u [mSv/h].

U pojedinim slučajevima kao konzervativna aproksimacija može se usvojiti da se celo pakovanje radioaktivnog otpada ili čitava kontaminirana površina, može modelovati tačkastim izvorom aktivnosti jednake ukupnoj aktivnosti i udaljenosti od lica jednake najmanjoj udljenosti pakovanja ili površine koji se modeluju.

Procena doza koja profesionalno izložena lica i stanovništvo prime tokom odstupanja od normalnog pogona

Ukupna efektivna doza ( $E$ ) za lica koja učestvuju u akcidentu je data kao suma efektivne doze koja potiče od eksternog izlaganja ( $E_{sub}$ ) i doze od unutrašnjeg izlaganja koja se tipično unosi inhalacijom ( $E_{inh}$ ), a posledica je akcidenta:

$$E = E_{sub} + E_{inh} \quad \text{P.4}$$

Efektivna doza koju lica prime od eksternog izlaganja ( $E_{sub}$ ) u toku akcidenta se izračunava prema formuli:

$$E_{sub} = \sum_j X Q_j e_{subj} \quad \text{P.5}$$

gde je:

$X$  = faktor razređenja u oblaku radionuklida [h/m<sup>3</sup>]

- $Q_j$  = oslobođena aktivnost radionuklida ( $j$ ) iz pakovanja radioaktivnog otpada zahvaćenih akcidentom [Bq]
- $e_{subj}$  = dozni faktor za direktno ozračivanje u zavisnosti od koncentracije radionuklida ( $j$ ) u oblaku [Sv Bq<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> m<sup>3</sup>]

Efektivna doza koju lica prime inhalacijom ( $E_{inh}$ ) u toku akcidenta se izračunava kao:

$$E_{inh} = \sum_j X Q_j B R F_j P F e_{inhj} \quad \text{P.6}$$

gde je:

- $X$  = faktor razređenja u oblaku radionuklida [h/m<sup>3</sup>]
- $Q_j$  = oslobođena aktivnost radionuklida ( $j$ ) iz pakovanja radioaktivnog otapda zahvaćenih akcidentom [Bq]
- $B$  = brzina disanja lica koja učestvuju u akcidentu [m<sup>3</sup>/s]
- $R F_j$  = udeo respirabilnih čestica za radionuklid ( $j$ ) oslobođenih u oblaku
- $P F$  = faktor zaštitne opreme
- $e_{inh}$  = dozni faktor za unošenje radionuklida ( $j$ ) u organizam inhalacijom [Sv/Bq]

Ako se jednačine (P.5) i (P.6) uvrste u jednačinu (P.4), dobija se izraz za izračunavanje ukupne efektivne doza:

$$E = \sum_j X Q_j (B R F_j P F e_{inhj} + e_{subj}) \quad \text{P.7}$$

Faktor razređenja u oblaku radionuklida ( $\chi$ )

Faktor razređenja u oblaku radionuklida –  $\chi$  zavisi od vremena izlaganja, zapremine prostorije u kojoj se izložena lica nalaze, brzine kretanja radioaktivnog oblaka kao i broja izmena vazduha u prostoriji. Ovaj faktor određuje se kombinovanjem dva modela kojima se modeluje širenje radioaktivnog oblaka u prostoriji, i to modela gradijentnog mešanja i modela potpunog mešanja. Ovaj model uzima u obzir pretpostavku da je oslobađanje radioaktivnog materijala trenutno i da materijal počinje da se širi konstantnom brzinom u svim pravcima čineći poluloptu čija se osnova

poklapa sa osnovom prostorije. Kada se oblak proširi i ispuni prostoriju, postignuti su uslovi za homogeno mešanje. Koncentracija radionuklida u prostoriji se zatim smanjuje zbog radioaktivnog raspada kao i uklanjanjem radionuklida ventilacionim sistemom. Prelaz sa jednog modela na drugi moguće ukoliko je ispunjen uslov:

$$\frac{2}{3}\pi\alpha^3 t_2^3 = V \quad \text{P.8}$$

gde je:

- $\alpha$  = brzina kretanja radioaktivnog oblaka [m/s]  
 vreme koje profesionalno izloženo lice provede u objektu  
 $t_2$  = između pojave vanrednog događaja i napuštanja objekta  
 odnosno postizanja uslova za homogeno mešanje [s]  
 $V$  = zapremina prostorije [m<sup>3</sup>]

odnosno u vremenskom trenutku:

$$t_2 = \sqrt[3]{\frac{3V}{2\pi\alpha^3}} \quad \text{P.9}$$

Za određivanje vrednosti faktora razređenja u oblaku radionuklida ( $\chi$ ) koristi se sledeća formula:

$$\chi = \chi_{GM} + \chi_{CM} \quad \text{P.10}$$

gde je:

- $\chi_{GM}$  = faktor razređenja u oblaku radionuklida izračunat prema modelu gradijentnog mešanja (*gradient mixing model*)  
 $\chi_{CM}$  = faktor razređenja u oblaku radionuklida izračunat prema modelu potpunog mešanja (*complete mixing model*)

Faktor razređenja u oblaku radionuklida izračunat prema modelu gradijentnog mešanja (*gradient mixing model*) računa se prema formuli:

$$\chi_{GM} = \frac{3}{4\pi\alpha^3} \cdot \left( \frac{1}{t_1^2} - \frac{1}{t_2^2} \right) \quad \text{P.11}$$

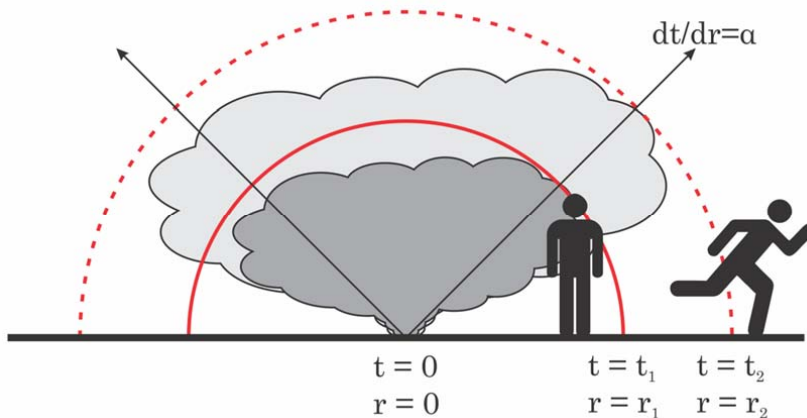
gde je:

- $\alpha$  = brzina kretanja radioaktivnog oblaka [m/s]



- $t_1$  = vreme potrebno radioaktivnom oblaku da stigne do profesionalno izloženog lica za koji se vrši analiza [s]. Veličina  $t_1$  dobija se deljenjem razdaljine na kojoj se profesionalno lice nalazi i brzine kretanja radioaktivnog oblaka  $\alpha$ .
- $t_2$  = vreme koje profesionalno izloženo lice provede u objektu između pojave vanrednog događaja i napuštanja objekta odnosno postizanja uslova za homogenu mešanje [s]

Za određivanje vrednosti brzine kretanja radioaktivnog oblaka  $\alpha$  potrebno je poznavanje brzine strujanja vazduha u objektu tokom vanrednog događaja. Raspoloživa istraživanja pokazuju da je prosečna brzina kretanja vazduha u prostoriji direktno proporcionalna broju izmena vazduha u prostoriji kao i da je turbulentno mešanje vazduha u prostoriji dominantan proces u odnosu na prirodnu konvekciju. Eksperimenti su pokazali da je brzina kretanja radioaktivnog oblaka takođe direktno proporcionalna broju izmena vazduha usled rada ventilacije i da se ona povećava sa povećanjem zapremine prostorije. Takođe na osnovu datih jednačina zaključuje se da je konzervativniji pristup da se uzmu što manje vrednosti  $\alpha$ .



Slika P.2 Širenje radioaktivnog oblaka

Faktorrazređenja u oblaku radionuklida izračunat prema modelu potpunog mešanja (*complete mixing model*) računa pomoću jednačine:

$$\chi_{CM} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{G}{V}(t_{ex} - t_2)\right)}{G} \quad \text{P.12}$$

gde je:

- $G$  = brzina izmene vazduha u prostoriji[m<sup>3</sup>/s]  
 $V$  = zapremina prostorije[m<sup>3</sup>]  
 $t_{ex}$  = vreme koje profesionalno izloženo lice provede u objektu između pojave vanrednog događaja i napuštanja objekta[s]  
 $t_2$  = vreme postizanja uslova za homogeno mešanje[s]

Najkonzervativnija pretpostavka je da u prostoriji nema izmena vazduha odnosno da broj izmena vazduha u prostoriji asimptotski teži nuli (uslov da je  $G = 0$  bi prethodnu jednačinu učinio besmislenom).

Oslobodena aktivnost radionuklida ( $j$ ) iz pakovanja RAO zahvaćenih akcidentom ( $Q_j$ )

Oslobodena aktivnost radionuklida ( $j$ ) iz pakovanja RAO koja su zahvaćena akcidentom ( $Q_j$ ) se izražava kao:

$$Q_j = N_{packages} \times A_{package}(n) \times ARF \quad \text{P.13}$$

gde je:

- $N_{packages}$  = broj pakovanja zahvaćenih akcidentom  
 $A_{package}(n)$  = aktivnost radionuklida ( $n$ ) u pakovanju[Bq]  
 $ARF$  = udeo oslobođene aktivnosti u vazduhu iz pakovanja koja su zahvaćena akcidentom (airborn release fraction)

Vrednost ARF (eng. airborne release fraction) definiše udeo aktivnosti koja se oslobodi kada je odgovarajuće pakovanje zahvaćeno akcidentom – požarom, padom ili drugim događajem koji izaziva otvaranje kontejnera i ispadanje otpada iz njega. Vrednosti ARF obično se određuju eksperimentalno u strogo kontrolisanim uslovima budući da je nekad neophodno, na uzorku, stvoriti iste uslove koji bi doveli do ispadanja otpada iz kontejnera.

Brzina respiracije (B)

Brzina respiracije (disanja) predstavlja brzinu kojom se radionuklid unosi u organizam respiratornim putem. Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (ICRP) definisala je u svojoj publikaciji broj ICRP 66 referentne vrednosti brzine disanja u zavisnosti od fizičke aktivnosti, obima rada i uzrasta. Ove referentne vrednosti date su u Tabeli P.1.

Tabela P.1. Referentne vrednosti respiratornih parametara za različite nivoe fizičke aktivnosti

Fizička aktivnost	Odmaranje (spavanje)	Sedenje u budnom stanju	Laki fizički rad	Težak fizički rad
Maksimalni obim rada (%)	8	12	32	64
Respiratorni parametar	B [m <sup>3</sup> /h]	B [m <sup>3</sup> /h]	B [m <sup>3</sup> /h]	B [m <sup>3</sup> /h]
Uzrast				
3 meseca	0.09	/	0.19	/
1 godina	0.15	0.22	0.35	/
5 godina	0.24	0.32	0.57	/
10 godina				
M. pol	0.31	0.38	1.1	2.2
Ž. pol	0.31	0.38	1.1	1.8
15 godina				
M. pol	0.42	0.48	1.4	2.9
Ž. pol	0.35	0.4	1.3	2.6
Odrasli				
M. pol	0.45	0.54	1.5	3
Ž. pol	0.32	0.39	1.3	2.7

Udeo respirabilnih čestica za radionuklid (j) oslobođenih u oblaku (RF<sub>j</sub>)

Ovim parametrom prikazuje se udeo čestica oslobođenih radionuklida koji se mogu transportovati kroz vazduh i potom inhalacijom uneti u organizam.

Ovaj parametar obično uključuje čestice čiji je aerodinamički ekvivalentni prečnik (aerodynamic equivalent diameter - AED) jednak  $10 \mu\text{m}$  i manji. Iako se ne očekuje da su sve oslobođene čestice respirabilne kao i da izloženi radnik neće udahnuti sve oslobođene čestice, u analizama se obično usvaja konzervativni, najnepovoljniji, pristup koji podrazumeva da su sve čestice respirabilne, odnosno za faktor  $RF_j$  se usvaja  $RF_j = 1$ .

Faktor zaštitne opreme (PF)

Faktor zaštitne opreme odnosi se na mogućnost zaštitne opreme da spreči ulazak radionuklida u organizam i obično se odnosi na respiratornu zaštitu. Podaci o ovom parametru uzimaju se iz specifikacije opreme.

Dozni faktor za direktno ozračivanje u zavisnosti od koncentracije radionuklida ( $j$ ) u oblaku ( $e_{subj}$ ) i dozni faktor za unošenje radionuklida ( $j$ ) u organizam inhalacijom ( $e_{inh}$ )

Dozni faktor za direktno izlaganje spoljašnjem zračenju u zavisnosti od koncentracije radionuklida ( $j$ ) u oblaku  $e_{subj}$  i dozni faktor za unošenje radionuklida ( $j$ ) u organizam inhalacijom  $e_{inhj}$  prikazuju koliki je doprinos dozi po jedinici unete aktivnosti. Vrednosti ovih parametara navedene su u Tabeli P.2 i to najkonzervativnije vrednosti uzete iz dokumenata MAAE i Nuklearne regulatorne komisije SAD.

Tablea P.2. Dozni faktor za direktno izlaganje u zavisnosti od koncentracije radionuklida ( $j$ ) u oblaku  $e_{subj}$  i dozni faktor za unošenje radionuklida ( $j$ ) u organizam inhalacijom  $e_{inhj}$

Radionuklid	$e_{subj}$	$e_{inh}$	Radionuklid	$e_{subj}$	$e_{inh}$
Ac-228	2.90E-08	4.90E-14	P-32	1.10E-09	5.50E-16
Ag-110m	6.70E-09	1.40E-13	Pa-231	1.30E-04	1.70E-15
Am-241	3.90E-05	8.30E-16	Pa-233	3.10E-09	9.50E-15
As-76	9.20E-10	2.20E-14	Pb-210	1.10E-06	5.80E-17
At-211	9.80E-08	1.60E-15	Pd-103	1.20E-10	8.10E-17
Au-198	3.90E-10	2.00E-14	Pd-107	3.30E-11	0.00E+00
Bi-206	2.10E-09	1.60E-13	Pd-109	2.10E-10	4.70E-16
Bi-210	8.40E-08	2.60E-16	Pm-147	4.70E-09	8.80E-18
Bi-212	3.90E-08	7.40E-14	Po-210	7.10E-07	4.20E-19
Br-82	8.80E-10	1.30E-13	Pu-238	4.30E-05	5.30E-18
C-14	5.80E-10	2.70E-18	Pu-239	4.70E-05	4.40E-18
Cd-109	9.60E-09	3.00E-16	Pu-240	4.70E-05	5.10E-18
Ce-141	3.10E-09	3.50E-15	Pu-241	8.50E-07	7.40E-20

<b>Ce-144</b>	3.40E-08	3.60E-15	Pu-242	4.40E-05	4.30E-18
<b>Cm-242</b>	4.80E-06	6.10E-18	Ra-224	2.90E-06	4.80E-16
<b>Cm-244</b>	2.50E-05	5.30E-18	Ra-225	5.80E-06	3.10E-16
<b>Co-58</b>	1.50E-09	4.80E-14	Ra-226	3.20E-06	3.20E-16
<b>Co-60</b>	9.60E-09	1.30E-13	Rb-86	1.30E-09	5.30E-15
<b>Cr-51</b>	3.00E-11	1.50E-15	Rh-105	1.50E-10	3.80E-15
<b>Cs-134</b>	9.60E-09	7.70E-14	Rh-107	1.60E-11	1.50E-14
<b>Cs-135</b>	9.90E-10	9.60E-18	Ru-103	6.80E-10	2.30E-14
<b>Cs-136</b>	1.90E-09	1.10E-13	Ru-106	9.80E-09	1.10E-14
<b>Cs-137</b>	6.70E-09	2.80E-14	S-35	1.30E-09	3.20E-18
<b>Cu-64</b>	6.80E-11	9.30E-15	Sb-124	1.90E-09	9.30E-14
<b>Eu-154</b>	5.00E-08	6.20E-14	Sb-125	1.70E-09	2.00E-14
<b>Eu-155</b>	6.50E-09	2.50E-15	Se-75	1.70E-09	1.90E-14
<b>Fe-55</b>	9.20E-10	0.00E+00	Sn-113	7.90E-10	3.90E-16
<b>Fe-59</b>	3.00E-09	6.00E-14	Sr-85	5.60E-10	2.40E-14
<b>Ga-67</b>	1.10E-10	7.30E-15	Sr-87m	2.20E-11	1.50E-14
<b>H-3</b>	1.80E-11	3.30E-19	Sr-89	1.40E-09	4.50E-16
<b>Hg-197</b>	2.80E-10	2.70E-15	Sr-90	3.00E-08	1.00E-16
<b>Hg-197m</b>	6.60E-10	4.20E-15	Tc-99	4.00E-10	2.90E-17
<b>Hg-203</b>	2.30E-09	1.10E-14	Tc-99m	2.00E-11	6.00E-15
<b>I-123</b>	1.10E-10	7.40E-15	Te-125m	6.70E-10	4.70E-16
<b>I-125</b>	7.30E-09	5.40E-16	Te-127m	2.00E-09	1.60E-16
<b>I-129</b>	5.10E-08	3.90E-16	Te-129m	1.80E-09	1.70E-15
<b>I-131</b>	1.10E-08	1.80E-14	Te-131m	1.20E-09	7.90E-14
<b>I-132</b>	2.00E-10	1.10E-13	Te-132	2.40E-09	1.00E-14
<b>I-133</b>	2.10E-09	3.00E-14	Th-228	3.10E-05	9.40E-17
<b>I-134</b>	7.90E-11	1.30E-13	Th-230	4.00E-05	1.80E-17
<b>I-135</b>	4.60E-10	8.10E-14	Th-232	4.20E-05	9.10E-18
<b>In-111</b>	2.20E-10	1.90E-14	Tl-201	7.60E-11	3.80E-15
<b>In-113m</b>	1.90E-11	1.20E-14	Tl-202	3.10E-10	2.20E-14
<b>Mn-54</b>	1.10E-09	4.10E-14	U-232	3.50E-05	1.50E-17
<b>Mo-99</b>	3.60E-10	1.30E-14	U-234	8.50E-06	8.10E-18
<b>Na-22</b>	2.00E-09	1.10E-13	U-235	7.70E-06	7.30E-15
<b>Na-24</b>	5.30E-10	2.20E-13	U-238	7.30E-06	3.70E-18
<b>Nb-95</b>	1.40E-09	3.80E-14	Y-87	5.20E-10	2.20E-14
<b>Ni-59</b>	2.20E-10	0.00E+00	Y-90	1.60E-09	8.10E-16

Ni-63	5.20E-10	0.00E+00	Y-91	6.70E-09	6.50E-16
Np-237	2.10E-05	1.00E-15	Zn-65	2.90E-09	2.90E-14
Np-239	1.10E-09	7.90E-15	Zr-95	3.00E-09	3.60E-14

### Procena doza koje stanovništvo primi tokom vanrednog događaja

Efektivna doza koju će primiti kritična grupa stanovnika procenjuje se na sličan način kao i doza koju prime profesionalno izložena lica u slučaju akcidenta. Za razliku od procene izlaganja profesionalno izloženih lica, u slučaju izlaganja stanovništva uzimaju se druge referentne vrednosti za brzinu disanja kao i dozni faktor za unošenje radionuklida u organizam inhalacijom ( $e_{inh}$ ). Pojedinci iz stanovništva za kojese izračunava doza pripadaju kritičnim grupama stanovnika (Videti poglavlje IV).

Efektivna doza koju pojedinac iz stanovništva primi eksternim izlaganjem ( $E_{sub}$ ) u toku akcidenta se izračunava pomoću izraza:

$$E_{sub} = \sum_j C_{Aj} e_{subj} \quad \text{P.14}$$

gde je:

$C_{Aj}$  = specifična koncentracija oslobođenog radioaktivnog materijala u vazduhu na nivou tla integrisana po vremenu [Bq·s/m<sup>3</sup>]

$e_{subj}$  = dozni faktor za direktno ozračivanje u zavisnosti od koncentracije radionuklida ( $j$ ) u oblaku [Sv· m<sup>3</sup>/Bq·h]

Specifična koncentracija oslobođenog radioaktivnog materijala u vazduhu

Metodologija za procenu uticaja vanrednog događaja na stanovništvo zasniva se na Gausovoj jednačini za visoki tačkasti izvor tzv. koncept dimne perjanice (eng. Gaussian plume model). Koncentracija oslobođenog radioaktivnog materijala u vazduhu  $c_j(x,y,z,He)$ , izražena u Bq/m<sup>3</sup>, izračunava se prema sledećoj jednačini:

$$c_j(x,y,z,He) = \frac{q_j}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-He)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+He)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad \text{P.15}$$

gde je:

$q_j$  = nivo oslobođene aktivnosti u funkciji od vremena [Bq/s]

$x$  = rastojanje računске tačke (kritične grupe stanovništva) od izvora uz pravac vetra [m]

$y$	= bočno rastojanje računске tačke od pravca vetra u "xy" ravni[m]
$z$	= visinska razlika između izvora i računске tačke[m]
$\sigma_y, \sigma_z$	= disperzioni paramteri, tj. standardne devijacije[m]
$u$	= brzina vetra[m/s]
$H_e$	= efektivna visina izvora, tj. visina sa koje se aktivnost oslobađa pri akcidentu[m]

#### Klasa atmosferske stabilnosti

Stabilnost atmosfere je parametar koji je posebno značajan za prostornu raspodelu zagađenja, jer utiče na intenzitet procesa turbulentnog mešanja u prizemnom sloju. U stabilnoj atmosferi ovaj proces je slab i svodi se na difuziju zagađenja zbog čega dolazi do pojave visokih koncentracija zagađenja. Sa druge strane, u nestabilnoj atmosferi je širenje zagađenja znatno brže, što dovodi i do bržeg pada koncentracije zagađenja.

Atmosferska stabilnost se najpreciznije može odrediti pomoću izmerenih meteoroloških podataka na lokaciji koja se analizira. U nedostatku realnih podataka, atmosferska stabilnost se može modelovati pomoću Paskvilovih klasa atmosferske stabilnosti. Stabilnost atmosfere određena je u prvom redu zagrevanjem i hlađenjem tla. Ukoliko se tlo intenzivnije zagreva atmosfera neposredno iznad tla biće nestabilnija. Ukoliko se tlo hladi atmosfera postaje sve stabilnija. Ekstremni slučajevi su formiranje olujnih oblaka prisunčanom vremenu i potpuno stabilna atmosfera u vedroj noći. Polazeći od navedenih uslova, kreirana je sledeća klasifikacija atmosferske stabilnosti.

Tabela P.3. Klase atmosferske stabilnosti

Brzina vetra na visini od 10	Dnevna insolacija			Noćni uslovi	
	Jaka	Umerena	Slaba	Oblačnost >3/8	Oblačnost <2/8
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

pri čemu su klase stabilnosti definisane na sledeći način:

- A- veoma nestabilno
- B – umereno nestabilno

- C – blago nestabilno
- D – neutralno
- E – slabo stabilno
- F – umereno stabilno
- G – veoma stabilno

Nivo oslobođene aktivnosti u funkciji vremena ( $q_j$ )

Nivo oslobođene aktivnosti u funkciji vremena ( $q_j$ ) najlakše je modelovati količnikom aktivnosti oslobođene tokom vanrednog događaja  $Q_j$  i vremena trajanja vanrednog događaja  $t$  što predstavlja konzervativnu pretpostavku da se aktivnost oslobađa kontinualno tokom svog vremena trajanja vanrednog događaja.

$$q_j = \frac{Q_j}{t} \quad \text{P.16}$$

Difuzioni paramteri ( $\sigma_y, \sigma_z$ )

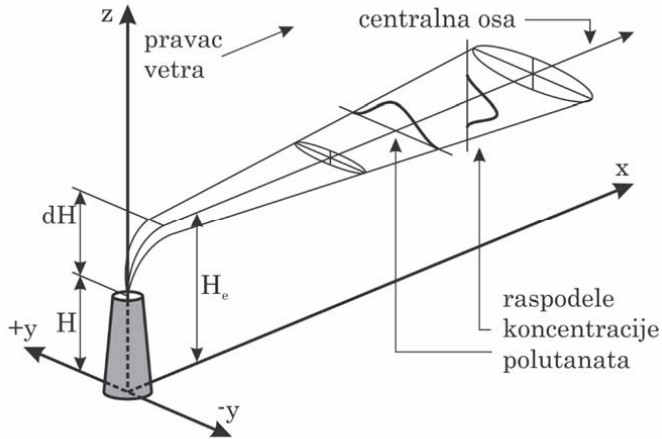
Difuzioni paramteri, tj. standardne devijacije ( $\sigma_y, \sigma_z$ ) su u funkciji rastojanja kritične grupe stanovništva od izvora u pravcu vetra ( $h$ ) i kategorije stabilnosti atmosfere. Standardne devijacije  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  računaju se prema sledećim formulama:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= p_y \cdot x^{q_y} \\ \sigma_z &= p_z \cdot x^{q_z} \end{aligned} \quad \text{P.17}$$

Gde su  $p_y, q_y, p_z$  i  $q_z$  difuzioni koeficijenti koji zavise od efektivne visine ispusta i uslova atmosferske stabilnosti tj. klase atmosferske stabilnosti. Ovi koeficijenti dati su u Tabeli P.4.

---





Slika P.3. Gausov model rasprostriranja

U slučaju da je efektivna visine manja od 50m, koriste se podaci za 50m. Takođe, uslučaju da je efektivna visina veća od 180m, koriste se podaci za 180m. Za visine između 50m i 100m odnosno 100m i 180m, potrebno je izvršiti logaritamsku interpolaciju vrednosti za  $p_y$  i  $p_z$ , odnosno linearnu interpolaciju vrednosti za  $q_y$  i  $q_z$  datih u Tabeli P.4. Ove interpolacije vrše se pomoću sledećih formula:

$$p_H = p_G \left( \frac{H - H_D}{H_G - H_D} \right) \cdot p_D \left( \frac{H_G - H}{H_G - H_D} \right)$$

P.18

$$q_H = \frac{(H - H_D) \cdot q_G + (H_G - H) \cdot q_D}{H_G - H_D}$$

gde je:

- $p_H$  = interpolirana vrednost parametara  $p_y$  i  $p_z$  za visinu H
- $p_G$  = vrednosti parametara  $p_y$  i  $p_z$  za visinu  $H_G > H$  iz tabele P.4.
- $p_D$  = vrednosti parametara  $p_y$  i  $p_z$  za visinu  $H_D < H$  iz tabele P.4.
- $q_H$  = interpolirana vrednost parametara  $q_y$  i  $q_z$  za visinu H
- $q_G$  = vrednosti parametara  $q_y$  i  $q_z$  za visinu  $H_G > H$  iz tabele P.4.
- $q_D$  = vrednosti parametara  $q_y$  i  $q_z$  za visinu  $H_D < H$  iz tabele P.4.

Difuzijski parametri zavise i od visine ispusta i blizine objekta i moraju se modifikovati ukoliko je izvor isuviše nisko ili blizu objekta na način opisan u delu teksta u kom se opisuju efektivna visina.

Tabela P.4. Vrednosti difuzionih parametara ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ) u zavisnosti od efektivne visine i klase stabilnosti

Efektivna visina ispusta,	Kategorija atmosfere	Difuzioni koeficijenti			
		$p_y$	$q_y$	$p_z$	$q_z$
50	A	1.503	0.833	0.151	1.219
	B	0.876	0.823	0.127	1.108
	C	0.659	0.807	0.165	0.996
	D	0.640	0.784	0.215	0.885
	E	0.801	0.754	0.264	0.774
	F	1.294	0.718	0.241	0.662
100	A	0.170	1.296	0.051	1.317
	B	0.324	1.025	0.070	1.151
	C	0.466	0.866	0.137	0.985
	D	0.504	0.818	0.265	0.818
	E	0.411	0.882	0.487	0.652
	F	0.253	1.057	0.717	0.486
180	A	0.671	0.903	0.0245	1.500
	B	0.415	0.903	0.0330	1.320
	C	0.232	0.903	0.104	0.997
	D	0.208	0.903	0.307	0.734
	E	0.345	0.903	0.546	0.557
	F	0.671	0.903	0.484	0.500

Brzina vetra ( $u$ )

Brzina vetra proračunava se pomoću sledeće formule:

$$u = u_1 \left( \frac{H_e}{z_1} \right)^m \quad \text{P.19}$$

gde je:

$u_1$  = brzina vetra [m/s] na referentnoj visini  $z_1 = 10$  m

$z_1$  = referentna visina  $z_1 = 10$  m

$H_e$  = efektivna visina izvora, tj. visina sa koje se aktivnost oslobađa pri akcidentu [m]

$m$  = koeficijent profila vetra u zavisnosti od klase stabilnosti atmosfere

Vrednosti brzine vetra  $u_l$  na referentnoj visini  $z_l = 10$  m određuju se iz meteoroloških podataka za datu lokaciju objekta za koji se vrši procena sigurnosti.

Koeficijent profila vetra  $m$  dat je u Tabeli P.5.

Tabela P.5. Koeficijent profila vetra  $m$  za različite uslove atmosfere stabilnosti i okolne terene

Okolni teren	Klasa stabilnosti					
	A	B	C	D	E	F
Jezeri i mora	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12
Poljoprivredno zemljište	0,10	0,15	0,20	0,25	0,35	0,40
Gradovi i šume	0,16	0,24	0,32	0,40	0,56	0,64

Efektivna visina izvora ( $H_e$ )

Efektivna visina izvora ( $H_e$ ) izračunava se kao zbir stvarne visine izvora (npr visina dimnjaka) i uvećanja ove visine zbog dodatnog uvećanja visine dimne perjanice usled momenta (npr zbog ventilacije) ili potiska za izvore visoke temperature:

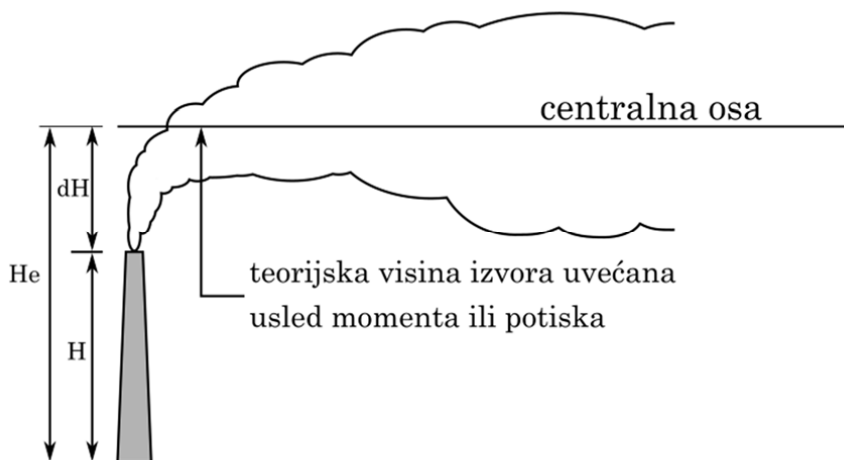
$$H_e = H + dH \quad \text{P.20}$$

gde je:

$$dH = d \left( \frac{v_s}{u} \right)^{1.4} \left( 1 + \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad \text{P.21}$$

gde je:

- $d$  = unutrašnji prečnik
- $v_s$  = brzina efluenta
- $u$  = brzina vetra
- $T_s$  = Temperatura u dimnjaku
- $T_a$  = Temperatura atmosfere



Slika P.4. Efektivna visina izvora ispuštanja polutanta

Efektivna visina izvora odnosno ispuštanja zavisi i od visine ispusta i blizine objekta ili drugih prepreka i mora se modifikovati ukoliko je izvor isuviše nisko ili blizu objekta. Ako je mesto ispuštanja nisko i blizu objekata, protok vazduha oko objekta može izazvati da oslobođeni materijal dođe bliže zemlji nego u slučaju kada njegovo kretanje nije ometano. Ovo se dešava u slučaju kada je:

- Efektivna visina izvora  $H_e < (H_g + I_g)$  gde se  $I_g$  definiše kao manja od dve vrednosti – ili širina objekta  $b_g$  ili visina  $H_g$ ;
- Izvor je ili na krovu (ili iznad krova) objekta ili negde na razdaljini ne većoj od  $I_g/4$  od objekta;
- Ili se izvor nalazi na razdaljini manjoj od  $3 \cdot I_g$  od objekta u smeru vetra.

Ako su ovi uslovi ispunjeni efektivna visina izvora  $H_e$  se mora modifikovati u novu vrednost  $h_e$  na sledeći način:

$$\begin{array}{ll} a) & H_e > H_g \quad h_e = 0.5[3H_e - (H_g + I_g)] \\ b) & H_e \leq H_g \quad h_e = H_e - 0.5I_g \end{array} \quad \text{P.22}$$

Takođe važi sledeće:

- Ako je  $h_e$  manje od  $I_G/2$  uzima se da je  $h_e = I_G/2$ ;
- Ako je  $h_e$  manje od  $H_G$ , difuzioni parametri  $\sigma_y$ , i  $\sigma_z$  menjaju se parametrima  $\Sigma_y$  i  $\Sigma_z$ :

$$\Sigma_y(x) = \left( \sigma_y^2(x) + \frac{I_G^2}{\pi} \right)^{0.5}$$

$$\Sigma_z(x) = \left( \sigma_z^2(x) + \frac{I_G^2}{\pi} \right)^{0.5}$$
P.23

Integracijom specifične koncentracije radionuklida po vremenu, dobija se:

$$C_j = \int_0^t c_{Aj}(x, y, z, H_e) dt$$

$$C_j = \frac{Q_j}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$
P.24

Kako bi model bio što je moguće realniji, u obzir se moraju uzeti i efekti smanjenja koncentracije koncentracija polutanata, uključujući suhu i vlažnu depoziciju, razblaživanje, radioaktivni raspad kao i dužinu trajanja ispuštanja radionuklida koji se nalaze u oblaku. Ako ovo uzmemo u obzir, dobija se sledeći izraz:

$$C_{Aj} = C_j \cdot f_{Aj} \cdot f_{Rj} \cdot f_{Zj} \cdot f_X$$
P.25

gde je:

- $f_{Aj}$  = faktor kojim se uračunava depozicija
- $f_{Rj}$  = faktor kojim se uračunava razblaživanje
- $f_{Zj}$  = faktor kojim se uračunava radioaktivni raspad
- $f_X$  = faktor kojim se uračunava trajanje ispuštanja

faktor kojim se uračunava spiranje računa se po formuli:

$$f_{Aj} = \exp\left(-\frac{v_{gj}}{u} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \frac{1}{\sigma_z} \exp\left(-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right) dx\right)$$
P.26

gde je:

- $v_{gj}$  = specifična brzina suve depozicije radionuklida (m/s)

Referentne vrednost specifične brzine suve depozicije radionuklida date su u Tabeli P.6.

Tabela P.6.. Referentne vrednost specifične brzine suve depozicije radionuklida

Materijal prisutan u vazduhu	Brzina suve depozicije (m/s)
Aerosoli	0.0015
jod	0.01
Organska jedinjenja joda	0.0001

Faktor kojim se uračunava razblaženje računa se pomoću sledeće jednačine:

$$f_{Rj} = \exp\left(-\frac{\Lambda_j \cdot x}{u}\right) \quad \text{P.26}$$

gde je:

$\Lambda_j$  = Specifičnikoefficient vlažne depozicije radionuklida (1/s). Ovaj koeficient računa se prema formuli:

$$\Lambda_j = \Lambda_{0j} \left(\frac{I}{I_0}\right)^K$$

gde je:

$\Lambda_{0j}$  = koeficient vlažne depozicije (1/s) za intenzitet padavina  $I_0 = 1$  mm/h

I = Intenzitet padavina (mm/h)

K = eksponencijalni factor kojizačestice I jodiznosi K = 0.8

Referentne vrednosti koeficienta vlažne depozicije  $\Lambda_{0j}$  date su u Tabeli P.7. dok su referentne vrednosti intenziteta padavina I date u Tabeli P.8.

Tabela P.7. Referentne vrednosti koeficienta vlažne depozicije  $\Lambda_{0j}$ 

Materijal prisutan u vazduhu	Koeficient vlažne depozicije (1/s) za intenzitet padavina
Aerosoli	7E-05
Jod	7E-05
Organska jedinjenja joda	7E-07

Tabela P.8.Referentne vrednosti intenziteta padavina I

Trajanje ispuštanja	Intenzitet padavina (mm/h)	Klasa atmosferske stabilnosti pri ispuštanju
do 8 časova	5	C, D, E
od 8 do 24 časa	2	D
od 24 do 72 časa	1	D
od 3 do 7 dana	0.5	D

Faktor kojim se uračunava radioaktivni raspad računa se prema formuli:

$$f_{z_j} = \exp\left(-\frac{\lambda_j \cdot x}{u}\right) \quad \text{P.27}$$

gde je:

$\lambda_j$  = konstanta radioaktivnog raspada za dati radionuklid

Faktor kojim se uračunava trajanje ispuštanja koristi se za ispravku vrednosti koncentracije materijala ju vazduhu dobijene gausovim modelom dimne perjanice na način koji je prethodno opisan. Primenjeni model podrazumeva konstantnu brzinu vetra i jednake atmosferske uslove tokom ispuštanja. Ovo se može smatrati ispravnim za ispuštanja koja traju kratko ali se u slučaju dužih vremena ispuštanja dobijena vrednost koncentracije može smanjiti usled promenljivog intenziteta i pravca vetra ili vremenskih uslova. Referentne vrednosti faktora kojim se uračunava trajanje ispuštanja date su u Tabeli P.9.

Tabela P.9. Referentne vrednosti faktora kojim se uračunava trajanje ispuštanja

Trajanje ispuštanja	Faktor kojim se uračunava trajanje ispuštanja	Klasa atmosferske stabilnosti pri ispuštanju
do 8 časova	1	A, B, C, D, E, F
od 8 do 24 časa	1/2	C, D, E, F
od 24 do 72 časa	1/4	C, D, E, F
od 3 do 7 dana	1/8	C, D, E

Konzervativan pristup, koji podrazumeva nanepovoljniji slučaj, procene izlaganja kritične grupe stanovništva ne uzima u obzir ni jedan od četiri navedena efekta.



## XV. Prilog B

Koncentracije aktivnosti za niveoe izuzimanja i niveoe oslobađanja koje mogu po definiciji biti primenjene na bilo koji čvrst radioaktivni material

Radionuklid	Koncentracija aktivnosti (kBq kg <sup>-1</sup> )	Radionuklid	Koncentracija aktivnosti (kBq kg <sup>-1</sup> )	Radionuklid	Koncentracija aktivnosti (kBq kg <sup>-1</sup> )
H-3	100	Ru-103 *	1	W-181	10
Be-7	10	Ru-105 *	10	W-185	1 000
C-14	1	Ru-106 *	0,1	W-187	10
F-18	10	Rh-103 m	10 000	Re-186	1 000
Na-22	0,1	Rh-105	100	Re-188	100
Na-24	1	Pd-103 *	1 000	Os-185	1
Si-31	1 000	Pd-109 *	100	Os-191	100
P-32	1 000	Ag-105	1	Os-191 m	1 000
P-33	1 000	Ag-110 m *	0,1	Os-193	100
S-35	100	Ag-111	100	Ir-190	1
Cl-36	1	Cd-109 *	1	Ir-192	1
Cl-38	10	Cd-115 *	10	Ir-194	100
K-42	100	Cd-115 m *	100	Pt-191	10
K-43	10	In-111	10	Pt-193 m	1 000
Ca-45	100	In-113 m	100	Pt-197	1 000
Ca-47	10	In-114 m *	10	Pt-197 m	100
Sc-46	0,1	In-115 m	100	Au-198	10
Sc-47	100	Sn-113 *	1	Au-199	100
Sc-48	1	Sn-125	10	Hg-197	100
V-48	1	Sb-122	10	Hg-197 m	100
Cr-51	100	Sb-124	1	Hg-203	10
Mn-51	10	Sb-125 *	0,1	Tl-200	10
Mn-52	1	Te-123 m	1	Tl-201	100
Mn-52 m	10	Te-125 m	1 000	Tl-202	10
Mn-53	100	Te-127	1 000	Tl-204	1
Mn-54	0,1	Te-127 m *	10	Pb-203	10
Mn-56	10	Te-129	100	Bi-206	1
Fe-52 *	10	Te-129 m *	10	Bi-207	0,1
Fe-55	1 000	Te-131	100	Po-203	10
Fe-59	1	Te-131 m *	10	Po-205	10
Co-55	10	Te-132 *	1	Po-207	10
Co-56	0,1	Te-133	10	At-211	1 000
Co-57	1	Te-133 m	10	Ra-225	10
Co-58	1	Te-134	10	Ra-227	100
Co-58 m	10 000	I-123	100	Th-226	1 000
Co-60	0,1	I-125	100	Th-229	0,1
Co-60 m	1 000	I-126	10	Pa-230	10
Co-61	100	I-129	0,01	Pa-233	10

Co-62 m	10	I-130	10	U-230	10
Ni-59	100	I-131	10	U-231 *	100
Ni-63	100	I-132	10	U-232 *	0,1
Ni-65	10	I-133	10	U-233	1
Cu-64	100	I-134	10	U-236	10
Zn-65	0,1	I-135	10	U-237	100
Zn-69	1 000	Cs-129	10	U-239	100
Zn-69 m *	10	Cs-131	1 000	U-240 *	100
Ga-72	10	Cs-132	10	Np-237 *	1
Ge-71	10 000	Cs-134	0,1	Np-239	100
As-73	1 000	Cs-134 m	1 000	Np-240	10
As-74	10	Cs-135	100	Pu-234	100
As-76	10	Cs-136	1	Pu-235	100
As-77	1 000	Cs-137 *	0,1	Pu-236	1
Se-75	1	Cs-138	10	Pu-237	100
Br-82	1	Ba-131	10	Pu-238	0,1
Rb-86	100	Ba-140	1	Pu-239	0,1
Sr-85	1	La-140	1	Pu-240	0,1
Sr-85 m	100	Ce-139	1	Pu-241	10
Sr-87 m	100	Ce-141	100	Pu-242	0,1
Sr-89	1 000	Ce-143	10	Pu-243	1 000
Sr-90 *	1	Ce-144	10	Pu-244 *	0,1
Sr-91 *	10	Pr-142	100	Am-241	0,1
Sr-92	10	Pr-143	1 000	Am-242	1 000
Y-90	1 000	Nd-147	100	Am-242 m *	0,1
Y-91	100	Nd-149	100	Am-243 *	0,1
Y-91 m	100	Pm-147	1 000	Cm-242	10
Y-92	100	Pm-149	1 000	Cm-243	1
Y-93	100	Sm-151	1 000	Cm-244	1
Zr-93	10	Sm-153	100	Cm-245	0,1
Zr-95 *	1	Eu-152	0,1	Cm-246	0,1
Zr-97 *	10	Eu-152 m	100	Cm-247 *	0,1
Nb-93 m	10	Eu-154	0,1	Cm-248	0,1
Nb-94	0,1	Eu-155	1	Bk-249	100
Nb-95	1	Gd-153	10	Cf-246	1 000
Nb-97 *	10	Gd-159	100	Cf-248	1
Nb-98	10	Tb-160	1	Cf-249	0,1
Mo-90	10	Dy-165	1 000	Cf-250	1
Mo-93	10	Dy-166	100	Cf-251	0,1
Mo-99 *	10	Ho-166	100	Cf-252	1
Mo-101 *	10	Er-169	1 000	Cf-253	100
Tc-96	1	Er-171	100	Cf-254	1
Tc-96 m	1 000	Tm-170	100	Es-253	100
Tc-97	10	Tm-171	1 000	Es-254 *	0,1
Tc-97 m	100	Yb-175	100	Es-254 m *	10
Tc-99	1	Lu-177	100	Fm-254	10 000
Tc-99 m	100	Hf-181	1	Fm-255	100
Ru-97	10	Ta-182	0,1		

\*Radionuklidi roditelji i njihovi potomci čiji je doprinos uzet u obzir prilikom izračunavanja doze dati su u sledećoj tabeli.

Roditelj	Potomak	Roditelj	Potomak
Fe-52	Mn-52 m	In-114 m	In-114
Zn-69 m	Zn-69	Sn-113	In-113 m
Sr-90	Y-90	Sb-125	Te-125 m
Sr-91	Y-91 m	Te-127 m	Te-127
Zr-95	Nb-95	Te-129 m	Te-129
Zr-97	Nb-97 m, Nb-97	Te-131 m	Te-131
Nb-97	Nb-97 m	Te-132	I-132
Mo-99	Tc-99 m	Cs-137	Ba-137 m
Mo-101	Tc-101	Ce-144	Pr-144, Pr-144 m
Ru-103	Rh-103 m	U-232	Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208
Ru-105	Rh-105 m	U-240	Np-240 m, Np-240
Ru-106	Rh-106	Np-237	Pa-233
Pd-103	Rh-103 m	Pu-244	U-240, Np-240 m, Np-240
Pd-109	Ag-109 m	Am-242 m	Np-238
Ag-110 m	Ag-110	Am-243	Np-239
Cd-109	Ag-109 m	Cm-247	Pu-243
Cd-115	In-115 m	Es-254	Bk-250
Cd-115 m	In-115 m	Es-254 m	Fm-254

## XVI. Registar pojmova

---

### A

#### Akcident

Neočekivani događaj, ljudska greška, otkaz opreme i druga nepravilnost čije posledice ili moguće posledice nisu zanemarljive sa aspekta zaštite od jonizujućih zračenja, nuklearne, odnosno radijacione sigurnosti ili bezbednosti;

#### Akcidentalno izlaganje

Izlaganje pojedinaca, izuzev radnika tokom vanrednog događaja, koje je posledica akcidenta;

#### Aktivacija

Proces u kojem se stabilni nuklid pretvara u radionuklid ozračivanjem materijala česticama (neutronima) ili visokoenergetskim fotonima. Aktivacija može biti nepoželjna kao što je to slučaj na primer kod aktivacije delova nuklearnog reaktora ili poželjna pri proizvodnji izvora zračenja;

#### Aktivnost (A)

Aktivnost neke količine radionuklida u određenom energetsom stanju u datom vremenu. To je količnik  $dN$  i  $dt$ , gde je  $dN$  očekivana vrednost broja prelaza u jezgrima atoma iz jednog energetsog stanja u drugo u vremenskom intervalu  $dt$ :

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Jedinica za aktivnost je bekerel (Bq); Jedan bekerel jednak je jednom raspadu u sekundi:  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ ;

#### Apsorbovana doza (D)

---

Energija apsorbovana po jedinici mase

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

gde je:

$d\bar{\epsilon}$  – srednja energija koju jonizujuće zračenje preda materiji po elementu zapremine

$dm$  – masa materije u tom elementu zapremine.

Apsorbovana doza označava dozu usrednjenu po tkivu ili po organu. Jedinica za apsorbovanu dozu je grej (Gy) pri čemu je jedan grej jednak jednom džulu po kilogramu:  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Jkg}^{-1}$ ;

B

Barijera

Fizička prepreka koja sprečava kretanje ljudi, radionuklida ili neke druge pojave (npr. požara) ili pruža zaštitu od zračenja;

Bafer

Materijal koji se postavlja oko pakovanja radioaktivnog otpada u odlagalištu sa ciljem da služi kao barijera koja sprečava pristup podzemnih voda pakovanjima i da smanji sorpciju i eventualnu precipitaciju u slučaju izlaska radionuklida iz pakovanja radioaktivnog otpada;

Č

Čuvanje radioaktivnog otpada do potpunog raspada ili do nivoa oslobađanja

Čuvanje radioaktivnog otpada koji sadrži samo radioizotope sa veoma kratkim vremenom poluraspada u toku definisanog vremenskog perioda za koji aktivnost radioaktivnog otpada usled radioaktivnog raspada padne ispod vrednosti propisane za nivo oslobađanja.

D

---

### Disperzija

Širenje radionuklida u vazduhu (aerodinamička disperzija) ili vodi (hidrodinamička disperzija) koja je rezultat većinom fizičkih procesa koji utiču na brziju različitih molekula u nekoj sredini;

### Dekomisija

Skup administrativnih i tehničkih aktivnosti preduzetih sa ciljem da omoguće potpuno ili delimično oslobađanje objekta od regulatorne kontrole;

### Dekontaminacija

Postupak potpunog ili delimičnog uklanjanja ili smanjenja nivoa kontaminacije korišćenjem fizičkih, hemijskih i bioloških procesa; Ovaj postupak uključuje i mere uklanjanja neposredne opasnosti nastupanja kontaminacije, mere kontrole daljeg širenja kontaminacije, izolacije, sigurnog i bezbednog uklanjanja izvora kontaminacije, kao i radnje vezane za procenu i analizu rizika nastupanja kontaminacije i procenu i analizu štete u životnoj sredini usled kontaminacije;

### E

#### Efektivna doza (E)

Zbir ponderisanih ekvivalentnih doza u svim tkivima i organima tela od unutrašnjeg i spoljašnjeg izlaganja. Ona je definisana izrazom:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

gde je:

$D_{T,R}$  – apsorbovana doza od zračenja R, usrednjena po tkivu ili organu T

$w_R$  – radijacioni težinski faktor

$w_T$  – tkivni težinski faktor za tkivo ili organ T.

Vrednosti za  $w_T$  i  $w_R$  date su tabelarno. Jedinica za efektivnu dozu je sivert (Sv);

#### Ekvivalentna doza ( $H_T$ )

Apsorbovana doza u tkivu ili organu T ponderisana po vrsti i kvalitetu zračenja R. Izračunava se na sledeći način:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R}$$

gde je:

$D_{T,R}$  – apsorbovana doza od zračenja R, usrednjena po tkivu ili organu T

$w_R$  – radijacioni težinski faktor

Kada se polje zračenja sastoji od vrsta i energija zračenja s različitim vrednostima  $w_R$ , ukupna ekvivalentna doza  $H_T$  se izračunava na sledeći način:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

Vrednosti za  $w_T$  i  $w_R$  date su u tabelarno. Jedinica za ekvivalentnu dozu je sivert (Sv);

## F

Fisibilni materijali (fissionable materials)

Izotopi kod kojih je uopšte moguće izazvati fisiju;

Fisilni materijali (fissile materials)

Izotopi kod kojih je moguće izazvati fisiju samo termalnim (sporim) neutronima; Fisilni materijali su podskup fisibilnih materijala; U-235 je i fisilni i fisibilni;

## G

Granica izlaganja

Vrednost efektivne doze (prema potrebi, očekivane efektivne doze) ili ekvivalentne doze u naznačenom periodu koja za pojedinca ne sme biti prekoračena;

Generator radioaktivnog otpada ili isluženog nuklearnog goriva

Pravno ili fizičko lice koje upravlja objektom ili obavlja aktivnost u okviru koje nastaje radioaktivni otpad ili isluženo nuklearno gorivo;

## I

### Isluženi izvor

Zatvoreni izvor koji se više ne koristi ili se ne namerava koristiti za delatnosti koje je odobrilo nadležno regulatorno telo, ali i dalje zahteva sigurno upravljanje;

### Isluženo nuklearno gorivo

Nuklearno gorivo, ozračeno i trajno uklonjeno iz jezgra nuklearnog reaktora; isluženo gorivo se može ili smatrati za upotrebljiv resurs koji se može prerađivati ili se smatrati radioaktivnim otpadom i trajno odložiti;

### Ispuna

Materijal kojim se popunjava prazan prostor u odlagalištu posle smeštanja radioaktivnog otpada;

### Izlaganje (jonizujućem zračenju)

Čin izlaganja ili stanje izloženosti jonizujućem zračenju emitovanom van tela (spoljašnje izlaganje) ili unutar tela (unutrašnje izlaganje);

### Izlaganja stanovništva

Izlaganja usled akcidenta i izlaganja usled odobrenih primena izvora jonizujućih zračenja, osim medicinskog i profesionalnog izlaganja i izlaganja osnovnom nivou zračenja iz prirode (fonu);

### Izvor zračenja

Materije, uređaji i predmeti koji može uzrokovati izlaganje emisijom jonizujućeg zračenja ili ispuštanjem radioaktivnog materijala;

### Inicijalni događaj

---



Događaj koji dovodi do predviđenih operativnih pojava ili vanrednog događaja;

## J

Jonizujuće zračenje

Prenos energije u obliku čestica ili elektromagnetnih talasa talasne dužine 100 nanometara ili manje (frekvencije  $3 \times 10^{15}$  herca ili veće) koje mogu direktno ili indirektno da proizvode jone;

## K

Kontaminacija

Neplanirano ili neželjeno prisustvo radioaktivnih supstanci na površinama ili unutar čvrstih materija, tečnosti ili gasova ili na ljudskom telu;

Kontejner za izvor

Sklop komponenti koje garantuju zadržavanje zatvorenog izvora, koji nije sastavni deo tog izvora, nego služi da zaštiti izvor tokom prevoza i rukovanja;

Kontrolisana zona

Područje koje podleže posebnim pravilima u svrhu zaštite od jonizujućeg zračenja ili sprečavanja širenja radioaktivne kontaminacije i kojem je pristup kontrolisan;

Kontejner

Predmet u koji se radioaktivni otpad smešta direktno ili posle tretmana, sa ciljem da se čuva i zaštiti u tokunjegovog čuvanja, skladištenja, pomeranja, transporta ili odlaganja a koji je i odobren za tu namenu; kontejner je sastavni deo pakovanja radioaktivnog otpada;

Kriterijumi za prijem radioaktivnog otpada

---

Kvalitativni ili kvantitativni fizički, hemijski i drugi parametri koje mora da zadovolji pakovanje radioaktivnog otpada da bi moglo da bude primljeno u objekat za upravljanje radioaktivnim otpadom. Kriterijume za prijem radioaktivnog otpada definiše ili regulatorno telo ili operater objekta uz saglasnost regulatornog tela;

## M

### Mere sanacije

Uklanjanje izvora zračenja ili smanjivanje njegove veličine (u smislu aktivnosti ili količine) ili prekid puteva izlaganja ili smanjivanje njihovog učinka kako bi se izbegle ili smanjile doze koje bi u suprotnom mogle biti primljene u situaciji postojećeg izlaganja;

### Monitoring životne sredine

Merenje spoljašnjih jačina doza zračenja zbog radioaktivnih supstanci u životnoj sredini ili koncentracija radionuklida u elementima životne sredine;

## N

### Nadgledana zona

Područje koje se nadzire u svrhu zaštite od jonizujućeg zračenja;

### Napušteni izvor

Radioaktivni izvor koji nije izuzet od regulatorne kontrole niti je pod njom, na primer zato što nikada nije bio pod regulatornom kontrolom ili zato što je napušten, izgubljen, zagubljen, ukraden ili na druge načine prenet bez odgovarajućeg odobrenja;

### Nivoizuzimanja (exemptionlevel)

Nivo izuzimanja je vrednost koju utvrdi nadležno regulatorno telo ili je utvrđena u nacionalnom zakonodavstvu i koja je iskazana u smislu specifične aktivnosti ili ukupne aktivnosti pri kojoj ili ispod koje izvor zračenja ne potpada pod obavezu prijavljivanja ili dobijanja odobrenja odnosno iznad koje se materijal, koji sadrži jedan ili više radionuklida, smatra radioaktivnim;

---

### Nivooslobađanja (klirens)

Nivoi oslobađanja su vrednosti koje utvrdi nadležno regulatorno telo ili su definisani u nacionalnom zakonodavstvu, izraženi u smislu specifičnih aktivnosti, do ili ispod kojih materijali, nastali iz bilo koje delatnosti koja podleže obavezi prijavljivanja ili dobijanja odobrenja, mogu biti oslobođeni dalje regulatorne kontrole;

### Normalno izlaganje

Izlaganje za koje se očekuje da se dogodi u normalnim operativnim uslovima objekta ili aktivnosti (uključujući održavanje, inspekciju, dekomisiju), uključujući i manje incidente koje se mogu održati pod kontrolom, odnosno tokom uobičajenog funkcionisanja i predviđenih operativnih događaja;

### Nuklearna sigurnost

Skup mera kojima se obezbeđuju uslovi za rad nuklearnog objekta, sprečavaju nuklearni akcidenti ili ublažavaju njegove posledice, odnosno smanjuje radijacioni rizik napropisan nivo;

### Nuklearni materijal

Svaki izvorni i svaki specijalni fisibilni materijal gde je:

- specijalni fisibilni materijal – Pu-239, U-233, uranium obogaćen izotopima 235 ili 233 i bilo koji materijal koji sadrži jedan ili više navedenih pri čemu je uranium obogaćen izotopima 235 ili 233 uranium koji sadrži izotope 235 ili 233 ili oba u količini većoj takvoj da je odnos zbira ovih izotopa i izotopa 238 veći od odnosa izotopa 235 i izotopa 238 koji se javlja u prirodi
- izvorni materijal – uranium koji sadrži smešu izotopa koji se nalaze u prirodi, uranium osiromašen izotopom 235, torijum i bilo koji od navedenih u formi metala, legure, hemijskog jedinjenja ili koncentrata. Termin izvorni materijal ne odnosi se na rude i ostatke obrade ruda

### Nuklearni objekat

Objekat (uključujući i njemu pridružene objekte i sisteme) u kojem se nuklearni materijali proizvode, prerađuju, obrađuju, koriste, skladište ili odlažu;

---

### Nuklearno postrojenje

Nuklearni objekat koji podleže autorizaciji od strane nadležnog regulatornog tela a koji je deo nuklearnog gorivnog izuzev objekata za vađenje i preradu rude uranijuma i objekata za odlaganje radioaktivnog otpada:

- a) nuklearna elektrana, objekat za obogaćivanje uranijuma, objekat za proizvodnju nuklearnog goriva, objekat za preradu nuklearnog goriva, istraživački nuklearni reaktor, skladište isliuženog nuklearnog goriva i
- b) objekti za skladištenje radioaktivnog goriva koji se nalaze na istom lokalitetu i direktno su povezani sa nuklearnim postrojenjima iz tačke a)

### O

Objekat za upravljanje isluženim nuklearnim gorivom

Bilo koji objekat ili postrojenje čija je primarna svrha upravljanje isluženim nuklearnim gorivom;

Objekat za upravljanje radioaktivnim otpadom

Bilo koji objekat ili postrojenje čija je primarna svrha upravljanje radioaktivnim otpadom;

Očekivana efektivna doza ( $E(\tau)$ )

Zbir očekivanih ekvivalentnih doza  $H_T(\tau)$  organa i tkiva koje su posledica unosa, svaka pomnožena odgovarajućim tkivnim težinskim faktorom  $w_T$ . Ona se definiše na sledeći način:

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau)$$

Kod utvrđivanja  $E(\tau)$ ,  $\tau$  predstavlja broj godina tokom kojih se vrši sumiranje. Za vrednost ( $\tau$ ) se obično uzima period od 50 godina nakon unosa za odrasle odnosno period do 70. godine života za novorođenčad i decu. Jedinica za očekivanu efektivnu dozu je sivert (Sv);

Očekivana ekvivalentna doza ( $H_T(\tau)$ )

---

Integral po vremenu ( $t$ ) jačine ekvivalentne doze u tkivu ili organu T koju će primiti pojedinac kao posledicu unosa.

Ona se definiše kao:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt$$

za unos u telo u vremenu  $t_0$  gde je:

$H_R(t)$  – relevantna jačina ekvivalentne doze u organu ili tkivu T u vremenu  $t$ ,

$\tau$  – vreme po kojem se vrši integraljenje.

Kod utvrđivanja  $H_T(\tau)$ , daje se broj godina tokom kojih se vrši integranjenje. Za vrednost ( $\tau$ ) se obično uzima period od 50 godina nakon unosa za odrasle odnosno period do 70. godine života za novorođenčad i decu. Jedinica za očekivanu ekvivalentnu dozu je sivert (Sv);

### Odlagalište

Objekat ili postrojenje čija je primarna svrha odlaganje radioaktivnog otpada odnosno u koji se radioaktivni otpad smešta trajno, bez namere da se iz njega iznosi;

### Odlaganje

Smeštanje isluženog nuklearnog goriva ili radioaktivnog otpada u odlagalište bez namere ponovnog iznošenja;

### Ograničenje doze

Ograničenje koje predstavlja moguću gornju granicu za pojedinačne doze, a koristi se za definisanje više razmatranih opcija u postupku optimizacije za zadati izvor zračenja u situaciji planiranog izlaganja;

### Obrada radioaktivnog otpada

Postupak ili skup postupaka kojim se RAO prevodi u forme pogodne za skladištenje odnosno odlaganje a koji ima za cilj unapređenje sigurnosti i/ili ekonomičnosti upravljanja radioaktivnim otpadom menjanjem njegovih

karakteristika. Tri osnovna cilja postupka obrade su: smanjenje zapremine, uklanjanje radionuklida iz otpada i promena sastava. Obrada se sastoji od predtretmana, tretmana i kondicioniranja

## P

### Pojedinac iz stanovništva

Pojedinac koji primi dozu reprezentativnu za više izložene pojedince u stanovništvu, osim pojedinaca koji imaju ekstremne ili retke navike;

### Potencijalno izlaganje

Izlaganje koje se ne može sa sigurnošću očekivati, ali može nastati usled događaja ili sleda događaja za koje postoji verovatnoća da će se dogoditi, uključujući i kvar na opremi i greške u rukovanju;

### Prerada isluženog nuklearnog goriva

Predstavlja postupak ili radnju koja za cilj ima izdvajanje fisionih materijala i materijala predviđenih za obogaćivanje iz isluženog nuklearnog goriva za dalju upotrebu;

### Pripadnici stanovništva

Pojedinci na koje se može odnositi izlaganje stanovništva;

### Prirodni izvor zračenja

Izvor jonizujućeg zračenja prirodnog, zemaljskog ili kosmičkog porekla;

### Profesionalno izlaganje

Izlaganje radnika, pripravnika i lica na školovanju tokom njihovog rada;

### Proizvod aktivacije

Radionuklid nastao aktivacijom;

---

### Pakovanje radioaktivnog otpada

Rezultat kondicioniranja radioaktivnog otpada koji uključuje oblik radioaktivnog otpada i kontejner ili kontejnere u koji je on smešten uključujući i unutrašnje barijere, apsorber i dodatnu zaštitu tog kontejnera pripremljen u skladu sa zahtevima za rukovanje, transport, skladištenje i/ili odlaganje;

### Pošiljka

Sve radnje uključene u transport ili premeštanje radioaktivnog otpada ili isluženog goriva od njegove početne do krajnje destinacije;

## R

### Radioaktivna supstanca

Svaka supstanca koja sadrži jedan ili više radionuklida čija se aktivnost ili specifična aktivnost ne može zanemariti sa stanovišta zaštite od zračenja;

### Radioaktivni izvor

Izvor zračenja koji sadrži radioaktivni materijal u svrhu korišćenja njegove radioaktivnosti;

### Radioaktivni materijal

Materijal koji sadrži radioaktivne supstance;

### Radioaktivni otpad

Radioaktivni materijal u gasovitom, tečnom ili čvrstom stanju čija se dalja upotreba ne predviđa ili ne razmatra i koji nadležno regulatorno telo smatra radioaktivnim otpadom u skladu sa zakonodavnim i regulatornim okvirom;

### Regulatorna kontrola

Svaki oblik kontrole ili propisa koji se primenjuje na ljudske aktivnosti radi sprovođenja zahteva za zaštitu od zračenja;

---

### Radijaciona i nuklearna bezbednost

Skup mera za sprečavanje neovlašćenog pristupa, oštećenja, gubitka, krađe i neovlašćenog prometa radioaktivnog i nuklearnog materijala, odnosno objekata u kojima su ti materijali smešteni ili se u njima koriste;

### Radijaciona sigurnost

Skup propisanih organizacionih i tehničko-tehnoloških mera koje obezbeđuju optimalno planirano izlaganje i optimalni rizik potencijalnog izlaganja jonizujućim zračenjima, koje je posledica korišćenja izvora jonizujućih zračenja, uključujući i mere zaštite od zračenja, mere za sprečavanje akcidenta, kao i mere za saniranje posledica akcidenta, ako do njega dođe;

### Radijacioni objekti

Objekti u kojima se nalazi jedan ili više izvora jonizujućih zračenja čiji je rizik ozračivanja takav da može dovesti do izlaganja zaposlenih i stanovništva iznad propisanih granica;

### Radijacioni rizik

Ugrožavajući zdravstveni efekat pri izlaganju jonizujućem zračenju, uzimajući u obzir i verovatnoću takvog izlaganja, bilo koji rizik vezan za sigurnost, uključujući i ekosisteme u životnoj sredini, koji može nastati kao posledica izlaganja jonizujućem zračenju, prisustvo radioaktivnih materijala, uključujući i radioaktivni otpad, ili njihovo ispuštanje u životnu sredinu, gubitak kontrole nad jezgrom nuklearnog reaktora, nuklearnom lančanom reakcijom, radioaktivnim izvorom ili bilo kojim drugim izvorom jonizujućih zračenja;

## S

### Situacija planiranog izlaganja

Situacija izlaganja koja nastaje usled planiranog korišćenja izvora zračenja ili usled ljudske aktivnosti koja menja putanje izlaganja, i time uzrokuje izlaganje ili potencijalno izlaganje ljudi ili životne sredine; Situacije

---



planiranog izlaganja mogu obuhvatati normalna izlaganja i potencijalna izlaganja;

Situacija vanrednog izlaganja

Situacija izlaganja zračenju zbog vanredne situacije;

Skladištenje

smeštanje isluženog nuklearnog goriva ili radioaktivnog otpada u objektu sa namerom iznošenja;

Sakupljanje radioaktivnog otpada

Postupak koji sprovodi generator radioaktivnog otpada koji ima za cilj pakovanje radioaktivnog otpada u trenutku nastanka u odgovarajuće kontejnere;

Skladište radioaktivnog otpada

Objekat, u koji se radioaktivni otpad smešta privremeno, sa namerom da se iz njega iznese

Specifična aktivnost

Za radionuklid – aktivnost po jediničnoj masi tog radionuklida; za materijal – aktivnost po jediničnoj masi ili zapremini materijala u kojij su radionuklidi uniformno raspodeljeni

Spremište radioaktivnog otpada

Namenski objekat ili prostorija, koji ispunjavaju standarde radijacione sigurnosti i bezbednosti za privremeno čuvanje RAO

U

Unošenje radionuklida

Ukupna aktivnost radionuklida koji ulazi u telo iz spoljašnje sredine;

Upravljanje isluženim nuklearnim gorivom

---

Sve aktivnosti koje se odnose na rukovanje, skladištenje, preradu, ili odlaganje isluženog nuklearnog goriva;

#### Upravljanje radioaktivnim otpadom

Sve aktivnosti, administrativne i operativne, koje se odnose na rukovanje radioaktivnim otpadom, obradu radioaktivnog otpada koja uključuje predtretman, tretman i kondicioniranje, skladištenje, ili odlaganje radioaktivnog otpada; Upravljanje radioaktivnim otpadom podrazumeva karakterizaciju, pripremne radove z transport, transport, prijem, obradu koja uključuje predtretman, tretman i kondicioniranje, skladištenje, uvođenje u bazu podataka i izdavanje potvrde o prijemu/uskladištenju kao i ispuštanje efluenata;

#### V

##### Vanredna situacija

Situacija koja nije rutinska ili događaj u koji je uključen izvor zračenja a koji traži brzo delovanje radi ublažavanja ozbiljnih štetnih posledica na zdravlje i sigurnost ljudi, kvalitet života, imovinu ili životnu sredinu, ili opasnost koja može uzrokovati takve ozbiljne štetne posledice;

##### Visokoaktivni zatvoreni izvor

Zatvoreni izvor za koji aktivnost radionuklida koje sadrži odgovara ili je veća od odgovarajuće vrednosti aktivnosti koje je propisalo nadležno regulatorno telo;

#### Z

##### Zatvaranje

Završetak svih aktivnosti nakon odlaganja isluženog goriva ili radioaktivnog otpada u odlagalište, uključujući mere i postupke za zatvaranje ili druge radove neophodne da se objekat dovede u stanje koje će obezbediti sigurnost u toku dugog vremenskog perioda;

---

#### Zatvoreni izvor

Radioaktivni izvor u kojem je radioaktivni materijal trajno zatvoren u kapsuli ili inkorporiran u čvrstom stanju sa ciljem sprečavanja svakog širenja radioaktivnih supstanci pri normalnim uslovima upotrebe;

#### Zaostala toplota

Toplota koja se generiše u radioaktivnom otpadu usled radioaktivnog raspada;

#### Zaštita od jonizujućeg zračenja

Skup mera kojima se sprečavaju štetni efekti izlaganja jonizujućem zračenju;

#### Zaštita životne sredine

Skup mera kojima se sprečava štetno dejstvo jonizujućih zračenja u životnoj sredini i otklanjaju posledice tih zračenja;

#### Ž

#### Životna sredina

Skup prirodnih i stvorenih vrednosti čiji međusobni odnosi čine okruženje odnosno prostor i uslove za život;

---

Izdavač

**Akadska misao**

Primorska 21, Beograd

Tel.: +381 11 3218 354

Fax: +381 63 298 027

Marko Vujadinović dipl. el. inž.  
+381 63 30 10 75  
marko.vujadinovic@akademska-misao.rs

Aleksandar Rašković, dipl. el. inž.  
+381 63 30 10 65  
sasa.raskovic@akademska-misao.rs

**www.akademska-misao.rs**  
**office@akademska-misao.rs**

---

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

621.039.7(075.8)

628.4.047(075.8)

**ЦИРАЈ-Бјелац, Оливера, 1972-**

Upravljanje radioaktivnim otpadom / Olivera  
Ciraj-Bjelac i Milan Vujović. - Beograd  
:Univerzitet, Elektrotehnički fakultet : Akademska  
misao, 2017 (Beograd : Akademska misao). - 266  
str. : ilustr. ; 24 cm

Tiraž 100. - Napomene uz tekst. - Prilozi: str. 227-  
250. - Rečnik: str. 251-266. - Bibliografija: str.  
221-226.

ISBN 978-86-7466-679-1

1. Вујовић, Милан, 1986- [аутор]  
а) Радиоактивни отпад - Управљање

---





[www.akademska-misao.rs](http://www.akademska-misao.rs)