

UNIVERZITET U TUZLI
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
ODSJEK: FIZIKA

Samra Žigić

ZAVRŠNI RAD
Skladištenje i odlaganje radioaktivnog otpada

Tuzla, maj 2022. godine

Mentor: dr.sc. Amela Kasić, docent

Rad ima: 46 stranica

Redni broj završnog rada:

ZAHVALA

Veliku zahvalu, u prvom redu, dugujem svojoj mentorici dr.sc. Kasić Ameli, docentu, na stručnim savjetima, izdvojenom vremenu, te strpljenu i velikoj pomoći pri izradi ovog završnog rada.

Najveće hvala mojim roditeljima, bratu i momku na podršci i razumijevanju tokom cjelokupnog školovanja.

SAŽETAK

Radioaktivni otpad, predstavlja potencijalni rizik za zdravlje ljudi i životnu sredinu ukoliko nije kontrolisan. Budući da određeni radioaktivni materijali imaju veoma dug period poluraspada, tada je kontola radioaktivnog otpada neophodna u veoma dugom vremenskom periodu. Radijacija iz otpada širi štetni utjecaj na okolnu floru i faunu, ali i na samo zdravlje ljudi te zbog toga radioaktivni otpad mora biti adekvatno skladišten i odložen.

Ovim radom prikazana je klasifikacija radioaktivnog otpada, opisani su različiti izvori radioaktivnog otpada, nastajanje radioaktivnog otpada, te njegovo zbrinjavanje. Opisano je na koji način se radioaktivni otpad prerađuje, te na koje načine se radioaktivni otpad transportuje, spremi i odlaže. U radu se ukazuje i na poznata svjetska odlagališta, te problem odlaganja radioaktivnog otpada u regionu kao i u Bosni i Hercegovini.

Ključne riječi: *radioaktivni otpad, skladištenje radioaktivnog otpada, odlaganje radioaktivnog otpada*

ABSTRACT

Radioactive waste poses a potential risk to human health and the environment if left unchecked. Since certain radioactive materials have a very long half-life, then control of radioactive waste is necessary for a very long period of time. Radiation from waste spreads harmful effects on the surrounding flora and fauna, but also on human health itself, and therefore radioactive waste must be adequately stored and disposed of.

This paper presents the classification of radioactive waste, describes various sources of radioactive waste, the generation of radioactive waste, and its disposal. It describes how radioactive waste is processed, and how radioactive waste is transported, stored and disposed of. The paper also points out the world famous radioactive waste disposal sites, and the problem of radioactive waste disposal in the region as well as in Bosnia and Herzegovina.

Key words: *radioactive waste, radioactive waste storage, radioactive waste disposal.*

SADRŽAJ

UVOD.....	1
-----------	---

1. NASTANAK I PODJELA RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	2
1.1. Podjela radioaktivnog otpada na osnovu radioloških osobina.....	3
1.2. Podjela radioaktivnog otpada na osnovu fizičkih osobina.....	3
1.2.1. Tečni radioaktivni otpad.....	4
1.2.2. Čvrsti radioaktivni otpad.....	4
1.2.3. Gasoviti radioaktivni otpad.....	5
1.3. Podjela radioaktivnog otpada na osnovu bioloških i hemijskih osobina.....	5
1.4. Podjela radioaktivnog otpada prema IAEA.....	5
1.4.1. Izuzeti radioaktivni otpad (IRAO).....	6
1.4.2. Veoma kratkoživeći radioaktivni otpad (VKRAO).....	7
1.4.3. Veoma nisko radioaktivni otpad (VNRAO).....	7
1.4.4. Nisko radioaktivni otpad (NRAO).....	7
1.4.5. Srednje radioaktivni otpad (SRAO).....	8
1.4.6. Visoko radioaktivni otpad (VRAO).....	8
1.4.7. Primjeri radioaktivnog otpada klasifikovanog kao NRAO i SRAO.....	9
2. OBRADA I KONDICIONIRANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	10
2.1. Predobrada radioaktivnog otpada.....	10
2.2. Obrada radioaktivnog otpada.....	11
2.3. Obrada tečnog radioaktivnog otpada.....	13
2.4. Obrada čvrstog radioaktivnog otpada.....	14
2.5. Kondicioniranje radioaktivnog otpada.....	16
2.5.1. Kondicioniranje zatvorenih izvora jonizujućeg zračenja.....	16
3. SKLADIŠTENJE I TRANSPORT RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	18
3.1. Skladištenje radioaktivnog otpada.....	18
3.1.1. Elementi skladišta radioaktivnog otpada.....	19
3.1.2. Faze skladištenja radioaktivnog otpada.....	21
3.1.3. Kontejneri za skladištenje radioaktivnog otpada.....	22
3.1.4. Objekti za skladištenje radioaktivnog otpada.....	23
3.1.5. Sigurnost skladištenja radioaktivnog otpada.....	24
3.1.6. Skladište isluženog nuklearnog goriva.....	25
3.2. Transport radioaktivnog otpada.....	26
4. ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	29
4.1. Lokacije i vrste odlagališta.....	29
4.2. Odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada.....	31
4.3. Odlaganje visoko radioaktivnog otpada.....	32

5. NAJPOZNATIJA ODLAGALIŠTA RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	34
5.1. Španjolsko odlagalište El Cabril.....	34
5.2. Švicarski projekt tunelskog odlagališta RAO.....	35
5.3. Podzemno odlagalište Olkiluoto u Finskoj.....	35
5.4. Odlagalište radioaktivnog otpada Konrad, Njemačka.....	36
5.5. Odlagalište radioaktivnog otpada u Bugarskoj.....	36
5.6. Odlagalište radioaktivnog otpada u Mađarskoj.....	36
5.7. Odlagalište radioaktivnog otpada u Hrvatskoj.....	37
5.8. Odlaganje radioaktivnog otpada u Sloveniji.....	37
6. SKLADIŠTENJE I ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA U BOSNI I HERCEGOVINI.....	39
6.1. Lokacije za odlaganje radioaktivnog otpada u Bosni i Hercegovini.....	40
ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44

UVOD

Radioaktivni materijali koji su nastali u procesu proizvodnje ili korištenjem nuklearnog goriva ili drugi materijali koji su postali radioaktivni zbog toga što su bili izloženi zračenju emitovanom tokom navedenog procesa, isključujući radioizotope koji su nastali u završnoj fazi proizvodnje i koji se mogu koristiti u naučne, medicinske, poljoprivredne, trgovачke ili industrijske svrhe predstavljaju radioaktivni otpad.

Ogromne količine radioaktivnog otpada porijeklom iz oružja, upotrebe energetskih, istraživačkih i reaktora iz nuklearnih podmornica, kao i radioaktivni otpad iz primjene u medicini, industriji i istraživanjima nastali su u trenutku kada nije postojala jasna strategija za njihovo odlaganje.

Skladištenje i odlaganje radioaktivnog otpada zavisi od aktivnosti i agregatnog stanja, ali također zavisi i od vrste prisutnih radionuklida, njihove koncentracije i toksičnosti kao i samog oblika otpada. U skladištu se radioaktivni otpad čuva pod stalnim aktivnim nadzorom na određeno vrijeme, deset pa i do sto godina, nakon čega se uklanja iz skladišta, a skladište se razgradi. Tokom skladištenja može se na jednom dijelu radioaktivnog otpada aktivnost smanjiti toliko da postane komunalni otpad, a preostali radioaktivni otpad se premješta u odlagalište radioaktivnog otpada. Skladište radioaktivnog otpada je u cijelom periodu svog postojanja aktivno, može prihvati novi otpad, spremnici otpada su pod stalnim aktivnim nadzorom, moguće su intervencije dodatne obrade i pakovanja.

U odlagalištu se radioaktivni otpad zbrinjava na neodređeno vrijeme, bez namjere da ga se ikada vadi. I u slučaju odlagališta planira se institucionalni nadzor, ali samo u nekom početnom periodu i bez direktnog pristupa otpadu. Problematika odlaganja radioaktivnog otpada u mnogome je slična problematiki odlaganja opasnih, visoko toksičnih otpada, ali ipak ima svoje specifičnosti. Glavni cilj odlaganja je sigurno uskladištiti i izolovati radioaktivni otpad od biosfere, odnosno onemogućiti njegove štetne uticaje na zdravlje čovjeka i okolinu.

Zbog specifičnih svojstava koje radioaktivni otpad posjeduje, osobito visoko radioaktivni otpad, njegovo odlaganje zahtjeva poseban pristup i odgovarajuća, visoko pouzdana tehnička rješenja. Zbog velikog broja međudjelujućih procesa koji su uključeni u proces odlaganja radioaktivnog otpada, sistemi odlaganja i zaštite su vrlo kompleksni. Mogućnosti za sanaciju okoline u slučaju nuklearnih havarija, vrlo su ograničene.

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

1. NASTANAK I PODJELA RADIOAKTIVNOG OTPADA

Radioaktivni otpad stvara svaki rad sa radionuklidima. Radioaktivni otpad (RAO) je radioaktivni materijal u gasovitom, tečnom ili čvrstom stanju, koji se ne planira za dalju upotrebu, a čija je aktivnost veća od graničnih vrijednosti ili je jednaka tim vrijednostima, bez obzira na nivo pratećeg radijacionog rizika, shodno relevantnim propisima u određenoj državi. Radioaktivnost datog materijala se vremenom može smanjivati sve do momenta kad postaje neznatna, to može biti za nekoliko dana, mjeseci, ali materijal može ostati i opasno radioaktivno hiljadama godina. Također, treba imati u vidu da određena količina radioaktivnog otpada može da bude reciklirana ili korištena ponovo za određene namjene. Radionuklide koristimo u različitim djelatnostima kao što su medicina i industrija, te u nauci i poljoprivredi kao i prilikom proizvodnje nuklearne energije gdje se stvara najviše otpada.

U industriji radioaktivni otpad se dobiva najčešće eksploracijom ruda (iskopavanje, obrada te korištenje uglja, fosfatnih ruda i prirodnog plina), prilikom čega se stvara velika količina nisko radioaktivnog otpada koje posljedično treba odložiti, zatim korištenjem detektora dima, ali i pri sterilizaciji hrane.

U medicini radioaktivni otpad predstavljaju istrošeni radioaktivni izotopi koji su se koristili u radioterapiji ili za dijagnostičke svrhe, zaštitna odjeća na kojoj se nalaze tragovi radioaktivne supstance, kao i različite ampule i šprice na kojima se nalaze ostaci radioaktivnih tvari.

Prilikom istraživanja svemira, određivanja starosti arheoloških nalaza izvode se različiti eksperimenti u kojima se koriste izvori jonizujućeg zračenja. Različiti radioizotopi primjenjuju se i za rast usjeva kao i u stočarstvu. Pri proizvodnji oružja i opreme, kao i testiranju oružja nastaju različite vrste radioaktivnog otpada.

Radioaktivni otpad se može podijeliti prema njegovim:

- radiološkim
- fizičkim
- hemijskim i biološkim osobinama.

Podjela radioaktivnog otpada se vrši i na osnovu količine radioaktivnog materijala u otpadu, a poznata je i podjela radioaktivnog otpada prema preporukama Međunarodne agencije za atomsku energiju.

1.1. Podjela radioaktivnog otpada na osnovu radioloških osobina

Na osnovu radioloških osobina, radioaktivni otpad, se dijeli prema:

- periodu poluraspada
- sposobnosti da proizvede toplotu
- sposobnosti da proizvede kritičnost
- površinskoj kontaminaciji
- dozimetrijskim osobinama relevantnih radionuklida
- ukupnoj i specifičnoj aktivnosti radionuklida.

Klasifikacija radioaktivnog otpada prema vremenu poluraspada može se pokazati veoma korisnom jer se radiološke opasnosti povezane sa kratkoživećim radionuklidima značajno smanjuju već poslije nekoliko stotina godina. Prema vremenu poluraspada radioaktivni otpad podijeljen je u dvije kategorije. Prvu kategoriju čini onaj otpad čiji izotopi imaju vrijeme poluraspada manje ili jednako 30 godina i naziva se kratkoživeći otpad. U drugu kategoriju spada otpad čiji izotopi imaju vrijeme poluraspada veće od 30 godina i naziva se dugoživeći otpad. U Tabeli 1., su navedena vremena poluraspada najznačajnijih radionuklida koji se javljaju pri nastajanju radioaktivnog otpada.

Tabela 1. Vrijeme poluraspada određenih radioaktivnih izotopa

Radioizotop	Simbol	Vrijeme poluraspada
Ugljik - 14	$^{14}\text{C}_6$	5730 godina
Kobalt - 60	$^{60}\text{Co}_{27}$	5,3 godina
Vodonik - 3	$^3\text{H}_1$	12,3 godina
Jod - 131	$^{131}\text{I}_{53}$	8,1 dan
Stroncij - 90	$^{90}\text{Sr}_{38}$	28 godina
Tehnicij - 99 m	$^{90m}\text{Te}_{43}$	6 sati
Uranij - 235	$^{235}\text{U}_{92}$	710 000 000 godina

1.2. Podjela radioaktivnog otpada na osnovu fizičkih osobina

Prilikom određivanja mogućnosti za obradu radioaktivnog otpada jedna od najvažnijih osobina jeste podjela radioaktivnog otpada na osnovu fizičkih osobina.

Na osnovu fizičkih osobina, radioaktivni otpad, se može dijeliti prema:

- agregatnom stanju
- masi
- stišljivosti
- zapremini
- zapaljivosti
- rastvorljivosti
- isparljivosti.

Značajna podjela radioaktivnog otpada je prema agregatnom stanju pri čemu se radioaktivni otpad dijeli na: tečni, čvrsti i gasoviti.

1.2.1. Tečni radioaktivni otpad

Tečnosti koje sadrže značajne količine alfa emitujućih radionuklida ili tečnosti unutar kojih postoji visoka koncentracija radioaktivnih kontaminata kada se proglase radioaktivnim otpadom tada više ne mogu biti puštene u životnu sredinu bez prethodnog tretiranja (obrade). U Tabeli 2., date su smjernice za upravljanje tečnim radioaktivnim otpadom.

Tabela 2. Smjernice za upravljanje tečnim radioaktivnim otpadom

Podjela radioaktivnog otpada	Aktivnost (m^{-3}), β/γ emiteri	Napomena
RAO niske aktivnosti	< 37 kBq	Tretman nije potreban. Ovaj radioaktivni otpad moguće je ispustiti u okolinu nakon mjerena aktivnosti radionuklida.
	37 kBq – 37 MBq	Kod ovog otpada tretman je neophodan, međutim, nisu potrebne dodatne zaštitne mjere.
	37 MBq – 3,7 GBq	Kod otpada koji spada u ovu skupinu tretman je neophodan. U zavisnosti od prirode zastupljenih radionuklida dodatne zaštitne mjere mogu biti potencijalno potrebne.
RAO srednje aktivnosti	3,7 GBq – 370 TBq	Tretman ovog otpada je neophodan. Također su neophodne i dodatne zaštitne mjere.

1.2.2. Čvrsti radioaktivni otpad

Čvrsti radioaktivni otpad obuhvata sav radioaktivni otpad u čvrstom radioaktivnom stanju, kao što su kontaminirana oprema i alati, aktivirani i kontaminirani uzorci, korišteni filtri, kontaminirana lična zaštitna sredstva, kontaminirani dijelovi struktura sistema i komponenti i slično. Zbog cilja da se smanji zapremina čvrstog radioaktivnog otpada koristi se dekontaminacija.

Čvrsti radioaktivni otpad je dodatno klasifikovan kao:

- radioaktivni otpad niske aktivnosti, ukoliko je jačina doze manja od 2 mSvh^{-1}
- radioaktivni otpad srednje aktivnosti, ukoliko je jačina doze veća od 2 mSvh^{-1} i manja od 20 mSvh^{-1} .

1.2.3. Gasoviti radioaktivni otpad

Tokom proizvodnje i prerade nuklearnog goriva, rada nuklearnih elektrana i obrade radioaktivnog otpada nastaje gasoviti radioaktivni otpad. Ova vrsta radioaktivnog otpada je u najpokretljivijem stanju i kao takav ne može se skladištiti i obrađivati u takvom obliku, te mora biti adekvatno tretiran. Ovu vrstu radioaktivnog otpada poželjno je tretirati na mjestu nastanka pomoću sistema za obradu izlaznog gasa.

Tečni i gasoviti radioaktivni otpad se može ispustiti direktno u životnu sredinu nakon tretiranja. Međutim, čvrsti radioaktivni otpad ne može biti direktno odložen u životnu sredinu. Čvrsti radioaktivni otpad treba biti kontrolisan na mjestu nastanka, te čuvan dok se aktivnost radionuklida ne smanji u procesu radioaktivnog raspada.

1.3. Podjela radioaktivnog otpada na osnovu bioloških i hemijskih osobina

Od najvećeg značaja prilikom određivanja mogućnosti za obradu i odlaganje radioaktivnog otpada jeste podjela radioaktivnog otpada prema biološkim i hemijskim osobinama.

Prema biološkim osobinama, radioaktivni otpad, se može podijeliti prema:

- potencijalnom biološkom riziku
- brzini razgradnje
- svojstvima produkata razgradnje.

Prema hemijskim osobinama, radioaktivni otpad, se može podijeliti prema:

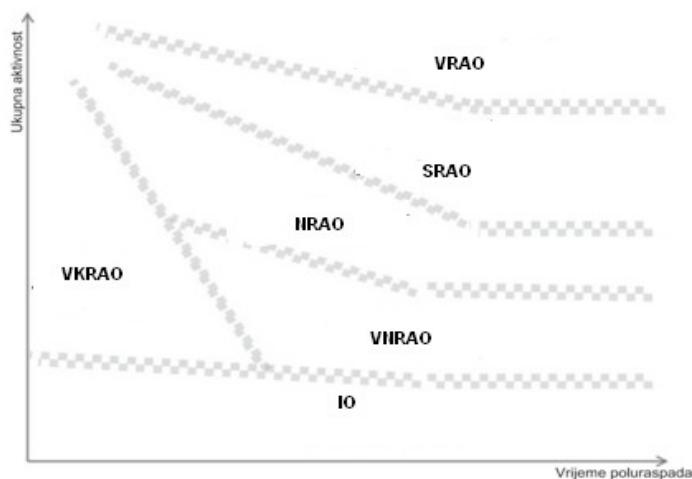
- potencijalnom hemijskom riziku
- reaktivnosti
- korozivnosti
- zapaljivosti
- apsorpciji radionuklida
- sposobnosti da generiše gas.

1.4. Podjela radioaktivnog otpada prema IAEA

Međunarodna agencija za atomsku energiju (eng. International Atomic Energy Agency - IAEA), je osnovana 1957. godine, u svrhu razvoja nuklearne energije i njeno iskorištavanje u tehničke, zdravstvene i ekonomске svrhe. Međunarodna agencija za atomsku energiju, uzimajući u obzir opcije za odlaganje radioaktivnog otpada, u svojim preporukama je definisala šest klase radioaktivnog otpada:

1. Izuzeti radioaktivni otpad (IO)
2. Veoma kratkoživeći radioaktivni otpad (VKRAO)
3. Veoma nisko radioaktivni otpad (VNRAO)
4. Nisko radioaktivni otpad (NRAO)
5. Srednje radioaktivni otpad (SRAO)
6. Visoko radioaktivni otpad (VRAO)

Na Slici 1., je dat grafički prikaz sheme klasifikacije radioaktivnog otpada prema IAEA.



Slika 1. Grafički prikaz sheme klasifikacije radioaktivnog otpada prema IAEA.¹⁴

1.4.1. Izuzeti radioaktivni otpad (IRAO)

Radioaktivni otpad koji sadrži dovoljno male koncentracije radionuklida da ne zahtijeva posebne mјere zaštite od zračenja bez obzira da li se odlaze u životnu sredinu ili ponovno koristi naziva se izuzeti radioaktivni otpad. U Tabeli 3., su navedeni nivoi za neke često korištene radionuklide. Kriterij na osnovu kojeg se izuzeti otpad ne smatra radioaktivnim bazira se na procijenjenoj dozi koja može nastati kao posljedica kontakta sa radionuklidima sadržanim u radioaktivnom otpadu pri čemu efektivna doza na godišnjem nivou ne može biti veća od $10 \mu\text{Sv}$ za pojedinca, dok kolektivna doza ne može biti veća od $1 \text{ čovjek}\cdot\text{Sv}$. Izuzeti otpad sadrži radionuklide male specifične aktivnosti koji ne zahtjevaju primjenu posebnih mјera zaštite od zračenja pa se izuzeti otpad i ne svrstava u radioaktivni materijal.

Tabela 3. Nivoi izuzimanja za neke često korištene radionuklide propisani direktivom Evropske komisije

Radioizotop	Specifična aktivnost (Bq g^{-1})	Ukupna aktivnost (Bq)
^{60}Co	10	10^5
^{131}I	100	10^6
^{90m}Tc	100	10^7
^{137}Cs	10	10^4
^{226}Ra	10	10^4
^{238}U	1	10^3
^{241}Am	1	10^4

1.4.2. Veoma kratkoživeći radioaktivni otpad (VKRAO)

Ovaj radioaktivni otpad sadrži samo radionuklide sa vrlo kratkim vremenom poluraspada i sa koncentracijama aktivnosti radionuklida iznad nivoa za ispuštanje u okolinu. Ovakav radioaktivni otpad se privremeno čuva dok aktivnost ne opadne ispod nivoa za ispuštanje u okolinu, omogućavajući upravljanje njim kao i sa svakim drugim komunalnim otpadom (ispuštanje u okolinu).

Kriterijumi na osnovu kojih se radioaktivni otpad klasificuje kao veoma kratkoživeći radioaktivni otpad su vremena poluraspada dominantnih radionuklida, prihvatljivo male količine aktivnosti i aktivnosti radionuklida sa dužim vremenima poluraspada koje su određene nivoima za ispuštanje u okolinu. Privremeno čuvanje radioaktivnog otpada se smatra održivom opcijom za radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide sa vremenom poluraspada reda 100 dana ili manje.

1.4.3. Veoma nisko radioaktivni otpad (VNRAO)

Otpad koji ne zadovoljava kriterijume za izuzeti radioaktivni otpad, ali takav da nema potrebe za visok nivo zaštite od zračenja i izolacije predstavlja veoma nisko radioaktivni otpad. Upravljanje veoma nisko radioaktivnim otpadom, za razliku od izuzetog otpada, zahtjeva veću pažnju kada je u pitanju zaštita od zračenja, ali su mjere zaštite manje nego što je to u slučaju radioaktivnog otpada iz viših klasa. Odlaganjem veoma nisko radioaktivnog otpada u površinska odlagališta postiže se dovoljan nivo sigurnosti. Tipičan otpad u ovoj klasi je zemlja i šut sa niskom specifičnom aktivnošću.

Način na koji se grade odlagališta u koja se odlaže radioaktivni otpad ove klase kreće se od jednostavnog prekrivanja radioaktivnog otpada slojem zemlje, do objekata koji imaju složene sisteme barijera koje blokiraju izlazak radionuklida u okolinu.

1.4.4. Nisko radioaktivni otpad (NRAO)

U radioaktivnom otpadu koji spada u ovu skupinu mogu se naći i male količine dugoživećih radionuklida. Ovakav otpad je najbolje odlagati u odlagališta bliska površini. Postoje razne opcije za projektovanje i izgradnju odlagališta za ovaj tip radioaktivnog otpada, jer može da sadrži širok opseg koncentracija aktivnosti, kao i širok spektar različitih radionuklida. Što se tiče samog objekta za skladištenje ove vrste radioaktivnog otpada on se može nalaziti na različitim dubinama. Te dubine se kreću od površine zemljišta pa sve do dubine od nekoliko desetina metara. Dubina odlagališta naravno zavisi od karakteristika radionuklida čije odlaganje se planira.

1.4.5. Srednje radioaktivni otpad (SRAO)

Radioaktivni otpad koji sadrži dugoživeće radionuklide u količinama koje zahtijevaju veći stepen zaštite od zračenja i veći nivo izolacije naziva se srednje radioaktivni otpad. Ovakav otpad se može odlagati bez posebnih sistema za odvođenje toplote. Kada je u pitanju odlaganje ovog radioaktivnog otpada u odlagališta, on mora biti na dubini između nekoliko desetina i nekoliko stotina metara. Odlaganje radioaktivnog otpada na ovim dubinama može obezbijediti dug period izolacije radioaktivnog otpada pod uslovom da su prirodne i inženjerske barijere odlagališta pravilno odabrane. Prednost odlaganja na ovim dubinama je ta što je vjerovatnoća slučajnog ulaska ljudi značajno smanjena. Ne postoji jasna i jedinstvena granica između nisko i srednje radioaktivnog otpada jer se granice aktivnosti i specifične aktivnosti razlikuju za različite radionuklide.

1.4.6. Visoko radioaktivni otpad (VRAO)

Radioaktivni otpad čija je aktivnost dovoljno visoka da zahtijeva dodatne specijalno dizajnirane zaštitne barijere u cilju dugoročne zaštite od spoljašnjeg izlaganja i dodatni sistem za hlađenje, uzimajući u obzir količinu generisane toplote, naziva se visoko radioaktivni otpad. Koncentracija aktivnosti radionuklida prisutnih u visoko radioaktivnom otpadu kreće se uglavnom u opsegu $10^4\text{--}10^6 \text{ TBqm}^{-3}$.

Otpad koji spada u ovu grupu najpoželjnije je odlagati u duboka geološka odlagališta sa inženjerskim barijerama. Važan faktor koji se mora uzeti u obzir pri projektovanju i izgradnji geoloških odlagališta radioaktivnog otpada su mjere za odvođenje toplote. U procesu prerade isluženog nuklearnog goriva nastaju značajne količine visoko radioaktivnog otpada. Ovaj otpad sadrži značajnu količinu alfa emitera, pretežno transuranskih elemenata sa veoma dugim periodom poluraspada, te različite fisione proizvode.

Visoko radioaktivni otpad zauzima svega 4% ukupne zapremine, to je 10 000 t godišnje, i njegova radioaktivnost čini 95% ukupne radioaktivnosti. Nisko radioaktivni otpad čini 90% zapremine ukupno proizvedenog otpada u svijetu, međutim, on sadrži svega 1% radioaktivnosti.

1.4.7. Primjeri radioaktivnog otpada klasifikovanog kao NRAO i SRAO

Tipični primjeri ove klase radioaktivnog otpada su:

- istraživačka oprema iz laboratorija u kojima se koriste radioaktivni materijali
- jonoizmjenjivačke smole i filteri korišteni prilikom prečišćavanja kontaminirane vode u nuklearnim elektranama
- kontejneri, odjeća, tečnosti i ostala oprema koja dolazi u kontakt sa radioaktivnim materijalima koji se koriste u bolnicama za liječenje određenih bolesti ili dijagnostiku
- filteri iz opreme za uzorkovanje kontaminiranog vazduha
- tečnosti u kojima su rastvoreni uzorci za potrebe određivanja aktivnosti radionuklida
- zaštitna sredstva za jednokratnu upotrebu korištena u laboratorijama u kojima se rukuje sa radioizotopima
- ostaci životinja korištenih u farmaceutskim i medicinskim eksperimentalnim istraživanjima.

2. OBRADA I KONDICIONIRANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Upravljanje radioaktivnim otpadom sačinjavaju različite administrativne i tehničke aktivnosti, kao i karakterizaciju i pripremne radove za transport, prijem radioaktivnog otpada, uvođenje u bazu podataka i izdavanje potvrde o prijemu ili skladištenju radioaktivnog otpada.

Odlaganje radioaktivnog otpada je završna faza upravljanja radioaktivnim otpadom, a da bi se došlo do nje, moraju se obraditi sljedeći koraci:

- predobrada
- obrada
- kondicioniranje
- skladištenje
- transport.

2.1. Predobrada radioaktivnog otpada

Obrada radioaktivnog otpada obuhvata sve radnje kojima se mijenjaju karakteristike radioaktivnog otpada i uključuje predobradu i obradu radioaktivnog otpada. Početni korak kod obrade radioaktivnog otpada zove se predobrada radioaktivnog otpada. Ovaj korak se sastoji od:

- sakupljanja otpada
- razvrstavanja otpada
- dekontaminacije
- manjeg hemijskog prilagođavanja
- vremena privremenog skladištenja.

Predobrada radioaktivnog otpada, je veoma važna jer tada se vrši izdvajanje materijala za recikliranje, te otpada kojeg nije potrebno smatrati radioaktivnim. Kod razvrstavanja radioaktivnog otpada, radioaktivni otpad se dijeli na kratkoživeći i dugoživeći. Ova podjela je veoma bitna jer se ove dvije kategorije otpada različito skladište. Na Slici 2., je prikazano razvrstavanje radioaktivnog otpada. Dekontaminacija je jedan od postupaka smanjenja zapremine radioaktivnog otpada. U većini slučajeva površinski kontaminirani predmeti mogu se upotrebom mehaničkih, elektrohemihskih i kombinovanih metoda dekontaminirati do te mjere da više nisu radioaktivni materijali i nisu predmet upravnog nadzora. Mogu se ponovo koristiti i time se može smanjiti količina radioaktivnog otpada.



Slika 2. Razvrstavanje radioaktivnog otpada.¹⁵

2.2. Obrada radioaktivnog otpada

Cilj obrade radioaktivnog otpada je da se poveća sigurnost i ekonomičnost skladištenja otpada promjenom njegovih osobina.

Obrada radioaktivnog otpada se zasniva na:

- smanjenju obima otpada
- promjeni sastava otpada
- uklanjanju radionuklida.

Postupci kojima postižemo prethodno navedene stavke uključuju spaljivanje gorivog otpada, zbijanje suhog otpada (služi za smanjenje zapremine radioaktivnog otpada), isparavanje i propuštanje tečnog otpada kroz filtere i jonske izmjenjivače (služi za uklanjanje radionuklida i izdvajanje radionuklida). U Tabeli 4., su prikazani postupci smanjenja zapremine za nisko i srednje radioaktivni otpad. U slučaju dekontaminacije tekućeg otpada često se kombinuju spomenuti postupci, te u tom procesu dolazi do stvaranja sekundarnog otpada kao što su filteri, mulj i slično.

Tabela 4. Postupci smanjenja zapremine za nisko i srednje radioaktivni otpad

Postupak	Tvari	Faktor smanjenja zapremine
Sabijanje u bačvu presom sa niskim pritiskom	Plastika, lim, kablovi, tkanina, sitna oprema	4
Superkompaktiranje bačvi	Plastika, lim, papir, tkanina, manji metalni dijelovi	10
Paljenje	Sve tvari koje su zapaljive	30
Rezanje	Sve tvari	2

Najveći stepen smanjenja obima radioaktivnog otpada se dobije spaljivanjem zapaljivog nisko ili srednje radioaktivnog otpada, a pri tome se dobije i stabilniji oblik otpada (Slika 3.).

Posebno, tokom spaljivanja, potrebno je obratiti pažnju na:

- kiseline
- polihlorirane bifenile (PCB)
- te ostale tvari koje ne predstavljaju radioaktivnu opasnost, ali su opasni za ljude i okolinu.



Slika 3. Peć unutar koje se vrši spaljivanje RAO.¹⁶

Još jedna pogodna metoda za smanjenje zapremine nisko i srednje radioaktivnog otpada je i kompaktiranje (zbijanje) otpada. Kada je u pitanju čvrsti otpad prikladna je metoda kompaktiranja radioaktivnog otpada u bačvama. Međutim, u određenim slučajevima za odlaganje tako kompaktiranog otpada može se koristiti i cementna smjesa.

Što se tiče samog smanjenja zapremine, kod ove metode, zapremina radioaktivnog otpada može se smanjiti i do pet puta. Metoda kompaktiranja se vrši u kompaktoru koji je predstavljen na Slici 4.

Ocjena efikasnosti obrade radioaktivnog otpada računa se preko faktora smanjenja zapremine radioaktivnog otpada (VRF). Ovaj faktor se definiše kao odnos zapremine radioaktivnog otpada prije obrade (V_0) i zapremine radioaktivnog otpada poslije obrade (V_f), prikazano sljedećom jednačinom:

$$VRF = \frac{V_0}{V_f} \quad (1)$$



Slika 4. Kompaktor za kompaktiranje radioaktivnog otpada.¹⁷

Proces obrade radioaktivnog otpada je efikasniji ako je faktor smanjenja zapremine radioaktivnog otpada veći. Nakon obrade, u zavisnosti od karakteristika radioaktivnog otpada i sadržaja radionuklida u njemu, može se u nekim slučajevima dodatno kondicionirati da bi se ispunili uslovi za sljedeću fazu upravljanja radioaktivnim otpadom – skladištenje, odlaganje ili transport.

2.3. Obrada tečnog radioaktivnog otpada

Obrada tečnog radioaktivnog otpada ima za cilj da otpad koji se obrađuje (tretira) razdvoji na dva dijela:

- jedan dio koji je male zapremine i u kome je koncentrisana većina radionuklida
- drugi dio, koji je veće zapremine, unutar kog je količina radionuklida dovoljno mala (zanemariva) tako da omogućava ispuštanje takvog otpada u životnu sredinu.

Shema obrade tečnog radioaktivnog otpada je prikazana na Slici 5.

Kod tečnog radioaktivnog otpada faktor dekontaminacije (DF) postiže se obradom tečnog radioaktivnog otpada, te se definiše kao odnos koncentracije radionuklida u tečnom radioaktivnom otpadu prije obrade (A_0) i koncentracije radionuklida u onom dijelu radioaktivnog otpada koji je planiran za ispuštanje u životnu sredinu (A_f), prikazanog jednačinom (2).

$$DF = \frac{A_0}{A_f} \quad (2)$$



Slika 5. Obrada (tretman) tečnog radioaktivnog otpada.¹⁸

U Tabeli 5., su dati dekontaminacioni faktori nekih metoda za obradu tečnog radioaktivnog otpada.

Metode koje se najčešće koriste za obradu tečnog radioaktivnog otpada su:

- hemijska precipitacija
- apsorpcija
- jonska izmjena
- membranske metode (elektrodijaliza, mikrofiltracija, ultrafiltracija, nanofiltracija, reverzna osmoza).

Najčešće se koristi kombinacija nekoliko metoda da bi se postigao najbolji ukupni faktor dekontaminacije za ukupnu alfa i/ili ukupnu beta ili gama aktivnost radioaktivnog otpada koji se obrađuje. Npr. poslije uparavanja, uvijek slijedi jonska izmjena kako bi se postigao što veći koeficijent dekontaminacije.

Tabela 5. Dekontaminacioni faktori nekih metoda za obradu tečnog radioaktivnog otpada

Metoda	Faktor dekontaminacije
Uparavanje	$10^4 - 10^6$
Hemijska precipitacija	$10 - 10^2$ (β i γ emiteri), $10 - 10^3$ (α emiteri)
Jonska izmjena sa organskim jonoizmjerenjivačima	$10 - 10^3$
Jonska izmjena sa neorganskim jonoizmjerenjivačima	$10 - 10^4$
Elektrodijaliza	$10^2 - 10^3$
Ultrafiltracija	10^2
Reverzna osmoza	$10^2 - 10^3$

2.4. Obrada čvrstog radioaktivnog otpada

Cilj obrade čvrstog radioaktivnog otpada je smanjenje njegove zapremine. Najčešće metode koje se koriste za obradu čvrstog radioaktivnog otpada su:

- spaljivanje
- topljenje
- hemijske metode obrade
- termohemijske metode obrade
- kompaktiranje

➤ superkompaktiranje.

Rezultat obrade je radioaktivni otpad koncentrisan u manjoj zapremini, a zatim se kondicionira kako bi se dobio pogodan oblik za dalje tretiranje – skladištenje, odlaganje ili transport. Kada je u pitanju kompaktiranje, to je zapravo sabijanje čvrstog radioaktivnog otpada unutar kontejnera sa ciljem smanjenja zapremine. Postoji još jedan način kompaktiranja, to je sabijanje primjenom velike sile gdje se kompaktira otpad zajedno sa bačvom ili kontejnerom unutar kojeg je otpad upakovani. Ovaj način kompaktiranja se zove superkompaktiranje. Na Slici 6., je prikazan superkompaktor, a na Slici 7., je prikazano kompaktiranje.



Slika 6. Superkompaktor.¹⁹



Slika 7. Kompaktiranje.²⁰

2.5. Kondicioniranje radioaktivnog otpada

Poslije obrade nisko i srednje radioaktivnog otpada potrebno je otpad kondicionirati prije skladištenja. Kondicioniranjem radioaktivnog otpada dobija se prikladniji oblik za rukovanje samim otpadom, odlaganje, skladištenje i transport. Operacije kojima se dobija prikladniji oblik radioaktivnog otpada zovu se imobilizacija (Slika 8.) i pakovanje.

Postupak imobilizacije tečnog radioaktivnog otpada, zapravo podrazumijeva zalijevanje u bitumensku ili betonsku matricu (kada je u pitanju otpad manje radioaktivnosti), ili u staklenu matricu (kada je u pitanju otpad koji spada u visoko radioaktivni otpad). Samo cementiranje radioaktivnog otpada se najčešće koristi za kondicioniranje onog otpada koji sadrži dugoživeće radionuklide poput mulja koji je nastao taloženjem, ili poput jonskih izmjenjivača.

Imobilizirani i drugi čvrsti otpad najčešće se pakuje u spremnike koji su različitih vrsta. Ti spremnici se kreću od standardnih dvjestolitarskih čeličnih bačvi pa sve do posebno konstruisanih spremnika sa debelim zidovima. Odabir spremnika za radioaktivni otpad zavisi od vrste i koncentracije radionuklida unutar samog radioaktivnog otpada, uz eventualno zapunjavanje materijalima odgovarajućeg sastava.



Slika 8. Imobilizacija.²¹

2.5.1. Kondicioniranje zatvorenih izvora jonizujućeg zračenja

Kada su u pitanju zatvoreni izvori jonizujućeg zračenja koji predstavljaju radioaktivni otpad, podrazumijeva se da se oni pakuju u odgovarajuće kontejnere ili prepakuju iz njihovih originalnih kućišta u specijalne kapsule zbog lakšeg odlaganja u kontejnere za skladištenje ili odlaganje.

Kondicioniranje ove vrste otpada najčešće se obavlja na sljedeći način:

- smještanjem izvora u odgovarajući kontejner
- prepakivanjem izvora u specijalnu kapsulu.

Danas se smještanje izvora u odgovarajući kontejner najčešće izvodi tako što izvor u svom originalnom kućištu, bez ikakvih intervencija, smjesti u kontejner za skladištenje. Taj kontejner prethodno mora biti obložen pogodnim materijalom (najčešće je to u pitanju beton) čija je funkcija zaštita od zračenja. Od same aktivnosti izvora zavisi data debljina materijala u samom kontejneru.

Dodatni zaštitni materijal se nalazi na unutrašnjoj površini kontejnera i izvori zračenja se unose kroz namjenski ostavljen otvor u centralnom dijelu kontejnera. Kada se kontejner ispuni radioaktivnim otpadom postavlja se poklopac od identičnog (može i od kompatibilnog) zaštitnog materijala, te poklopac samog kontejnera. Taj kontejner je najčešće standardno 200 l bure u koje se sa svih strana postavi betonska zaštita, u sredini se ostavi prostor za radioaktivni otpad, te se to poklopi prvo sa dodatnom zaštitom, a tek onda poklopcem kontejnera ili bačve.

3. SKLADIŠTENJE I TRANSPORT RADIOAKTIVNOG OTPADA

Način skladištenja radioaktivnog otpada mijenja se u skladu sa napretkom nauke i tehnologije, te su danas spremnici i načini postupanja sa otpadom sveli nivo rizika na minimum. Sam pojam „radioaktivno“ često bude zamijenjen sa pojmom „nuklearno“, te se u medijima često povezuje sa „Černobilom“, „zračenjem“ ili „Fukušimom“ i dovodi do neosnovanog straha ljudi jer „radioaktivno“ ne mora nužno značiti opasno po okolinu i populaciju koja se nalazi neposredno u njegovoј blizini.

Načinu izbora lokacije za skladište radioaktivnog otpada se može prići na nekoliko različitih načina. Prvi način predstavlja traženje odgovarajuće lokacije te dogovor sa lokalnim stanovništvom oko ubacivanja te lokacije u program. Drugi način je suprotan, gdje se u okviru cijele države traže „općine dragovoljci“. Nakon što se općine prijave onda se dalje traže pogodne lokacije unutar općina. Dok treći način, predstavlja zapravo kompromis između inženjerskog i sociološkog pristupa, gdje se odbacuju lokacije koje nisu prihvatljive sa inženjerskog stajališta. Svaki od ovih pristupa ima naravno svoje prednosti i mane i inženjeri moraju osigurati izgradnju objekta koji će na duži period biti siguran, te osigurati zaštitu okoline i ljudi.

3.1. Skladištenje radioaktivnog otpada

Skladištenje radioaktivnog otpada je postupak privremenog smještanja radioaktivnog otpada u određeni objekat. Skladištenje se vrši na određeni vremenski period, s tim da moraju biti ispunjene sve mjere radijacione i nuklearne sigurnosti, te bezbjednosti skladištenog otpada. Ove mjere podrazumijevaju:

- izolaciju skladištenog radioaktivnog otpada od neželjenih vanjskih uticaja
- zadržavanje svih radionuklida unutar skladišta (sprječavanje širenja radionuklida izvan granica skladišta)
- stalni nadzor radioaktivnosti u životnoj sredini u okolini skladišta.

Prilikom skladištenja potrebno je obezbijediti i mogućnost da se skladišteni radioaktivni otpad može prema potrebi iznijeti iz skladišta zbog tretmana, odlaganja ili oslobođanja od regulatorne kontrole. Vremenski period skladištenja radioaktivnog otpada se kreće od veoma kratkog koji je reda nekoliko dana, dok se ne prikupi dovoljna količina za tretman ili odlaganje, pa sve do veoma dugog perioda koji može biti i do nekoliko decenija, najčešće u slučajevima kada pitanje odlaganja radioaktivnog otpada nije riješeno.

Prije samog skladištenja radioaktivnog otpada potrebno je izvršiti segregaciju, odnosno razdvajanje radioaktivnog otpada, prema tipu, vremenu poluraspada, te fizičkim i hemijskim svojstvima; kako bi otpad bez segregacije mogao da se uputi na dalji tretman, prenese u drugo skladište, odloži ili oslobodi od regulatorne kontrole. Sama segregacija radioaktivnog otpada je bitan faktor jer se tako može smanjiti izlaganje profesionalno

izloženih lica tokom normalnog pogona skladišta, te umanjiti posljedice eventualnog vanrednog događaja. Iskorišteni zatvoreni izvori ionizujućeg zračenja, koji se proglose radioaktivnim otpadom, prije samog skladištenja razdvajaju se na osnovu aktivnosti, vremena poluraspada radionuklida, te fizičkim i hemijskim svojstvima radionuklida, a zatim se poslije razdvajanja, tako razdvojeni, skladište. Ova kategorija izvora zračenja se najčešće prije samog skladištenja kondicionira.

3.1.1. Elementi skladišta radioaktivnog otpada

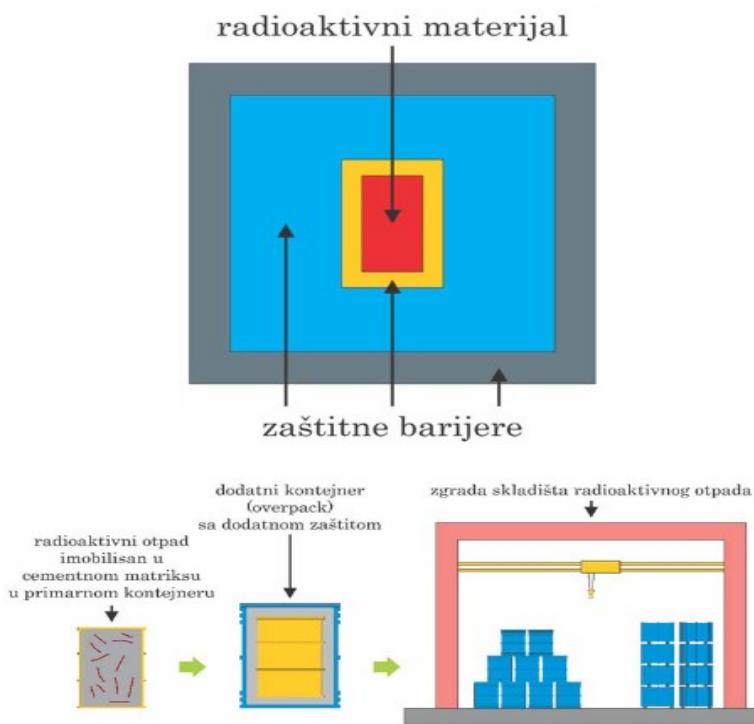
Pri skladištenju radioaktivnog otpada uzimaju se u obzir dva osnovna elementa skladištenja radioaktivnog otpada, a to su:

- pakovanje radioaktivnog otpada koje se sastoji od oblika u kojem se nalazi dati radioaktivni otpad i kontejnera u koji je radioaktivni otpad smješten. Pod oblikom u kojem se nalazi radioaktivni otpad smatra se otpad u njegovom fizičkom i hemijskom obliku nakon tretmana i/ili kondicioniranja, a prije samog pakovanja u odgovarajući kontejner
- skladište radioaktivnog otpada koje uključuje infrastrukturu objekta, opremu za manipulaciju radioaktivnim otpadom, te sisteme i opremu za zaštitu od zračenja i sve ostale sigurnosne sisteme.

Dva prethodno navedena elementa su komplementarni, te zajedno formiraju sistem višestrukih barijera prikazan na Slici 9. Zaštitne barijere su projektovane tako da u slučaju da otkaže jedna od njih automatski njenu ulogu preuzima druga barijera smještena unutar nje, te samim tim se dobije na vremenu za djelovanje i sanaciju barijere koja više ne pruža adekvatnu zaštitu.

Vrijeme koje je predviđeno za skladištenje radioaktivnog otpada mora biti u skladu sa životnim vijekom tretiranog radioaktivnog otpada i naravno samog skladišta. Ne postoji određeno vremensko ograničenje za skladištenje radioaktivnog otpada, međutim, ono zavisi od projektovanog vijeka trajanja elemenata skladištenja.

Kada pakovanje radioaktivnog otpada ne pruža dovoljnu zaštitu od zračenja, tada je potrebno taj radioaktivni otpad smjestiti u skladište projektovano tako da inženjerskim barijerama omogući dovoljan nivo zaštite. Ako kontejner, unutar kojeg je smješten radioaktivni otpad, pruža odgovarajući stepen zaštite od zračenja tada objekat skladišta može da bude i jednostavnije konstrukcije. U nekim slučajevima kontejnere se može skladištiti i na otvorenom.



Slika 9. Višestruke barijere.³

Uslovi postavljeni za skladišta radioaktivnog otpada odnose se na oba elementa skladištenja, a to su:

- sprječavanje pojave visoke jačine doze ionizujućih zračenja na vanjskoj površini kontejnera ili skladišta
- zadržavanje radionuklida unutar definisane zapremine (kontejnera i skladišta)
- adekvatna zaštita od vanjskih uticaja (prirodne nepogode, požar ili atmosferski uticaj)
- mogućnost iznošenja radioaktivnog otpada na kraju predviđenog perioda skladištenja
- dovoljna izdrživost i čvrstina kontejnera, hermetičnost, te otpornost na koroziju koje su od velikog značaja za sigurno i bezbjedno rukovanje i skladištenje radioaktivnog otpada
- odvođenje gasovitih efluenata, kontrola korozije i kontrola ambijentalnih uslova
- hemijska stabilnost radioaktivnog otpada tokom perioda skladištenja
- odvođenje toplote koju generiše radioaktivni otpad
- kontrola upakovanog otpada i prevencija curenja radionuklida
- prevencija bioloških rizika.

3.1.2. Faze skladištenja radioaktivnog otpada

Osnovne faze skladištenja radioaktivnog otpada su:

- prijem radioaktivnog otpada u skladište
- skladištenje i inspekcija skladištenog radioaktivnog otpada
- iznošenje radioaktivnog otpada iz skladišta i priprema radioaktivnog otpada za narednu fazu upravljanja istim.

Prijem radioaktivnog otpada podrazumijeva poređenje karakteristika radioaktivnog otpada sa kriterijumima za prijem u skladište, određivanje tačne pozicije radioaktivnog otpada unutar skladišta, svu potrebnu analizu i karakterizaciju radioaktivnog otpada ako je to potrebno, postavljanje kontejnera na tačno određeno mjesto i unošenje podataka o radioaktivnom otpadu zbog evidencije. Kriterijumi za prijem radioaktivnog otpada predstavljaju skup kvalitativnih i kvantitativnih osobina samog otpada definisanih pravnim ili internim aktima operatera objekta za upravljanje radioaktivnim otpadom i potvrđeni od strane nadležnog regulatornog tijela. Ovim kriterijumima se definišu radiološka, fizička, mehanička, hemijska i biološka svojstva pakovanja radioaktivnog otpada, ali i neupakovanih otpada.

Aktivnosti koje se obavljaju tokom skladištenja radioaktivnog otpada obuhvataju:

- zaštitu od zračenja
- monitoring (nadzor) radioaktivnosti u životnoj sredini u okolini skladišta
- inspekciiju stanja pakovanja radioaktivnog otpada
- inspekciiju opreme, komponenti i sistema samog skladišta
- održavanje skladišta
- obilježavanje i evidentiranje pakovanja radioaktivnog otpada.

Inspekcija skladištenog radioaktivnog otpada radi u cilju provjere svih barijera koje služe za zadržavanje radioaktivnog otpada unutar pakovanja. Pored same vizuelne inspekcije provjerava se još i jačina doze unutar skladišta, te prisustvo kontaminacije. Ako se radioaktivni otpad nalazi u tečnom, gasovitom ili praškastom stanju, on mora biti pod posebnim režimom kontrole zbog veće vjerovatnoće širenja kontaminacije uslijed curenja takvog radioaktivnog otpada. Ovaj otpad se skladišti tako da se olakša njegova inspekcija, pravovremena detekcija kontaminacije, te njegovo zadržavanje u slučaju da se neka od inženjerskih barijera, koje služe za njegovo zadržavanje, naruši ili izgubi svoju funkciju.

Kontejneri u kojima se skladišti tečni radioaktivni otpad moraju biti smješteni u odgovarajuće sudove koji su veće zapremine da bi se spriječilo kontaminiranje okoline ukoliko bi došlo do curenja radioaktivnog otpada. U slučaju kada se tečni radioaktivni otpad skladišti u bazenima, namijenjenim za tu upotrebu, oni moraju biti projektovani te izgrađeni tako da su nepropusni za tečni radioaktivni otpad.

Prilikom iznošenja radioaktivnog otpada iz skladišta, prvo se vrši pronalazak lokacije i identifikacije kontejnera koji se iznosi, zatim dolazi do samog postupka iznošenja i kontrole radioaktivnog otpada.

Sama kontrola radioaktivnog otpada se sastoji od:

- vizuelnog pregleda pakovanja
- radiološkog pregleda pakovanja (ovim pregledom se utvrđuje prisustvo kontaminacije i mjeri jačina doze na površini kontejnera)
- evidentiranja iznošenja radioaktivnog otpada.

Ako je potrebno, kontejner se dalje priprema za transport ukoliko pakovanje ispunjava kriterijume za sam transport, te potom šalje na dalji tretman ili skladištenje.

3.1.3. Kontejneri za skladištenje radioaktivnog otpada

Kontejneri za skladištenje radioaktivnog otpada, su dizajnirani i samim tim proizvedeni na takav način da spriječe širenje radioaktivnog materijala iz kontejnera tokom svih očekivanih radnih stanja u periodu u kojem je otpad skladišten. Tokom same izrade kontejnera za skladištenje radioaktivnog otpada treba uzeti u obzir posebne karakteristike radioaktivnog otpada i povezane aktivnosti tipa:

- zapaljivost otpada (opasnost od požara)
- kompatibilnost radioaktivnog otpada primjenjenoj metodi obrade i kondicioniranja prije skladištenja (npr. kompaktirani otpad može početi da se širi, vraća u prethodno stanje, u nekim slučajevima)
- hemijska kompatibilnost materijala kontejnera sa radioaktivnim otpadom za čije je skladištenje kontejner planiran (posebnu pažnju treba обратити na mogućnost pojave korozije, te generisanja gasova uslijed hemijskih i elektrohemskihs reakcija koje nastaju interakcijom kontejnera sa radioaktivnim otpadom).

Prilikom projektovanja i izrade kontejnera za skladištenje radioaktivnog otpada treba uzeti u obzir i same uslove unutar skladišta (vlažnost vazduha i temperatura). Sami kontejneri moraju biti dizajnirani tako da budu otporni na koroziju najmanje tokom planiranog perioda skladištenja i da njihova inspekcija bude jednostavna zbog mogućnosti ranog otkrivanja narušenih barijera kontejnera, te curenja radioaktivnih gasova ili tečnosti. Kada se skladišti određeni radioaktivni otpad, posebno tečni radioaktivni otpad, koji bi mogao izazvati koroziju materijala od kojeg je kontejner napravljen, tada se koriste posebne vrste kontejnera (kontejneri sa duplim zidovima ili kontejneri kod kojih su zidovi obloženi materijalom koji je otporan na koroziju ili nehrđajućim čelikom).

Međutim, i tečni otpad sadrži čvrste materije koje se talože na dnu kontejnera ili bazena u kojem je skladišten radioaktivni otpad. Zbog toga, kontejneri u kojima se skladišti ovakva vrsta radioaktivnog otpada imaju ugrađen sistem za miješanje otpada, poput mehaničke mješalice, pneumatskog miksera ili cirkulacione pumpe.

Kada je potrebno skladištiti kontaminirane oštре predmete, tada se koriste kontejneri otporni na proboj. Također, kod nekog radioaktivnog otpada postoji mogućnost da se tokom vremena desi generisanje gasova koji mogu biti radioaktivni ili neaktivni. Kada se takav radioaktivni otpad smješta u kontejnere potrebno je voditi računa da ti kontejneri imaju sistem ventilacije u cilju same prevencije skupljanja gasova unutar kontejnera jer to skupljanje gasova može da dovede do povećanog pritiska unutar kontejnera i da se ošteti sam kontejner.

Manipulacija (upravljanje) samim kontejnerima se odvija pomoću specijalne ili komercijalno dostupne opreme za upravljanje teretom. Ta oprema obično uključuje transportno sredstvo u vidu električnog ili motornog viljuškara, fiksног ili pokretnog krana, te odgovarajuću opremu za hvatanje kontejnera.

Prilikom rukovanja sa kontejnerom sa radioaktivnim otpadom i postavljanja na odgovarajuće mjesto u skladištu, potrebno je uzeti u obzir dinamička i statička opterećenja koja nastaju slaganjem kontejnera jedan na drugi ili na palete ili police predviđene za skladištenje. Samu debljinu zidova kontejnera, ukupnu masu i način slaganja kontejnera treba uzeti u obzir kada se radi o fazi projektovanja skladišta (Slika 10.).



Slika 10. Načini slaganja kontejnera sa radioaktivnim otpadom u skladištu.²²

3.1.4. Objekti za skladištenje radioaktivnog otpada

Svrha objekta za skladištenje radioaktivnog otpada jeste da obezbijedi odgovarajuće mјere zaštite od zračenja, da spriječi širenje radionuklida izvan prostora predviđenog za skladištenje, da omogući izolaciju radioaktivnog otpada i njegovo iznošenje iz skladišta radi daljeg tretmana, odlaganja i oslobađanja od regulatorne kontrole. Neki primjeri skladištenja prikazani su na Slici 11.

Skladišta, u zavisnosti od namjene i predviđenog vremena skladištenja, dijele se na:

- skladište za kratkoročno skladištenje radioaktivnog otpada u kojima se otpad može čuvati do:
 - sakupljanja određenih količina za tretman ili prebacivanje u drugo skladište
 - raspada radionuklida
 - smanjenja temperature
 - odlaganja.
- skladišta za dugoročno skladištenje radioaktivnog otpada
- skladišta radioaktivnog otpada koji je nastao u akcidentu.



Slika 11. Najčešći načini skladištenja radioaktivnog otpada.²³

3.1.5. Sigurnost skladištenja radioaktivnog otpada

Radijaciona i nuklearna sigurnost skladištenja radioaktivnog otpada podrazumijeva sigurnost operatera koji manipuliše radioaktivnim otpadom tokom njegovog skladištenja, te sigurnost stanovništva i zaštitu životne sredine u okolini skladišta. U toku skladištenja radioaktivnog otpada, bez obzira na dužinu njegovog trajanja, svi sigurnosni zahtjevi moraju biti ispunjeni u svakom trenutku. Što je trajanje skladištenja radioaktivnog otpada duže, to su sigurnosni uslovi strožiji. Sigurnost skladištenja radioaktivnog otpada treba da bude zasnovana na mjerama pasivne sigurnosti, kad god je to moguće.

Ove mjere, u svojim preporukama, navela je Međunarodna agencija za atomsku energiju i one uključuju:

- pokretljivost radioaktivnog materijala mora biti spriječena
- sva zaostala energija mora biti uklonjena iz radioaktivnog otpada
- pakovanje radioaktivnog otpada i kontejner u koji je spakovan moraju biti fizički i hemijski stabilni
- pakovanje radioaktivnog otpada i kontejner u koji je spakovan ne mogu biti podložni degradaciji
- uslovi unutar skladišta moraju biti takvi da optimizuju životni vijek pakovanja radioaktivnog otpada
- zadržavanje radioaktivnog materijala unutar skladišta mora biti obezbijeđeno primjenom višestrukih barijera
- potreba za aktivnim sistemima sigurnosti mora biti svedena na minimum
- potreba za ljudskim intervencijama mora biti svedena na minimum
- potreba za kontrolom i održavanjem mora biti svedena na minimum
- skladište radioaktivnog otpada mora biti projektovano tako da bude otporno na sve predvidive opasnosti
- brzo djelovanje u slučaju vanrednog događaja mora biti obezbijeđeno
- pakovanja radioaktivnog otpada trebaju biti dostupna za inspekciju
- pristup skladištu radioaktivnog otpada za potrebe djelovanja u slučaju vanrednog događaja mora biti obezbijeđen
- pakovanja radioaktivnog otpada je moguće iznijeti radi inspekcije ili zbog dodatnog tretmana
- skladište radioaktivnog otpada treba biti projektovano tako da je moguće iznošenje radioaktivnog otpada
- životni vijek skladišta radioaktivnog otpada treba da odgovara periodu skladištenja radioaktivnog otpada prije njegovog odlaganja
- pakovanje radioaktivnog otpada mora biti prihvatljivo za njegovo konačno odlaganje.

3.1.6. Skladište isluženog nuklearnog goriva

Isluženo nuklearno gorivo, sve dok se ne proglaši radioaktivnim otpadom, smatra se korisnim resursom zbog toga što se iz njega preradom mogu izdvojiti korisni elementi. Međutim, gorivo se nakon uklanjanja iz nuklearnog reaktora mora skladištiti na određeni način. Što se tiče opcija za skladištenje isluženog nuklearnog goriva, postoje dvije i to su:

- skladištenje u bazenu sa vodom
- skladištenje u suhom skladištu.

Kada se skladišti u bazenu sa vodom (Slika 12.), gorivni elementi nalaze se ispod površine vode koja omogućava hlađenje i odgovarajuću zaštitu od zračenja. Najčešće se isluženo nuklearno gorivo poslije uklanjanja iz nuklearnog reaktora skladišti u bazenu sa vodom nekoliko godina kako bi se smanjila njegova temperatura. Ti bazeni moraju biti dovoljno duboki kako bi nivo vode bio nekoliko metara iznad skladištenog goriva. Vanjski bazeni

imaju veći kapacitet, pa se u njih može smjestiti više istrošenih gorivih elemenata. Borirana voda koja se nalazi u bazenu ima višestruku namjenu, tj. da štiti od intenzivnog zračenja, a zatim i kao sredstvo za hlađenje i kao medij za apsorbaciju neutrona iz zaostale fisije. Dubine bazena su uglavnom 12 do 15 metara. Postupak izmjene gorivih elemenata mora se odvijati na dubini od 7 metara u cilju sprječavanja jonizujućeg zračenja izvan bazena. Zidovi i dno bazena moraju biti obloženi nehrđajućim čelikom zbog sprječavanja korozije. Sistem za hlađenje i čišćenje bazena mora uklanjati toplotu generisani u istrošenom gorivu, te održati odgovarajuću bistrinu i hemijsku čistoću vode. Istrošeni gorivi elementi koji su u bazenu proveli dovoljno dugo vremena, tj. najmanje 5 godina, mogu se vaditi iz bazena i podvrgnuti drugim postupcima kao što su suho skladištenje, prerada ili trajno odlaganje.



Slika 12. Skladištenje isluženog nuklearnog goriva u bazenu.²⁴

Nakon određenog perioda skladištenja u bazenu, gorivo se premjesti u suho skladište čija su zaštitna svojstva zasnovana na betonskim ili metalnim kontejnerima, te gdje je hlađenje obezbijeđeno prirodnom konvekcijom ili prisilnom cirkulacijom vazduha. Odlaganje je moguće u masivnim kontejnerima, tzv. nezavisnim skladištima (engl. Independent spent fuel storage installation-ISFSI) ili u bunkerima (podzemne ili nadzemne armirano betonske zgrade).

3.2. Transport radioaktivnog otpada

Transport radioaktivnog otpada podrazumijeva namjerno fizičko kretanje otpada u specijalno dizajniranom pakovanju sa jednog mesta na drugo. Neobrađeni otpad može se transportovati od mjesta prikupljanja otpada do skladišta ili postrojenja za obradu. Također, kondicionirani otpad može biti transportovan od samog postrojenja za obradu otpada pa do lokacije odlaganja radioaktivnog otpada. Najčešće se za transport radioaktivnog otpada koriste kamioni, željeznice (vozovi) i tankeri.

Svaki oblik pošiljke radioaktivnog otpada podliježe strogim propisima koje je preporučila IAEA u suradnji sa Ujedinjenim Nacijama (eng. United Nations-UN). Prije samog transporta otpada obavezno se provode sigurnosne kontrole i mjerena. Institucije koje provode transport moraju da zadovolje međunarodne sigurnosne regulative (tehničko

stanje prevoznog sredstva, osposobljenost radne snage, dokumentaciju, odabir rute i ostalo). Moraju se poštovati i pravila o gomilanju paketa i njihovom rasporedu.

Na paketima za prevoz radioaktivnog materijala (međunarodni prevoz) moraju da budu standardizovane romboidne oznake koje su minimalne veličine stranice 100 mm, u gornjoj polovici znaka treba da se nalazi znak za radioaktivnost otisnut crnom bojom (Slika 13.). Što se tiče oznaka i boja u donjoj polovici, one zavise od vrste radioaktivnog materijala koji se prevozi, te o nivou radioaktivnosti na površini samih paketa.

Kategorija transporta se označava crvenim crticama:

- **I** – bijela (vrlo niska radioaktivnost)
- **II** – žuta (niska radioaktivnost)
- **III** – žuta (visoka radioaktivnost).

Paketi se označe i UN brojem i odgovarajućim natpisom, u zavisnosti o kojem se radioaktivnom materijalu radi. Kada se prevozi fiselni materijal tada se paketi i same pošiljke označe posebnom oznakom, te indeksom kritičnosti. U međunarodnim propisima o prevozu opasnih tvari, nuklearni i radioaktivni materijali su u klasi „7“.



Slika 13. Transportne oznake radioaktivnog materijala.²⁵

Industrjski paketi, paketi tipa A, B i C, te izuzeti paketi su tipovi paketa koji se koriste za prevoz radioaktivnog materijala. Industrijki paketi ili kontejneri koriste se za prevoz materijala niske specifične aktivnosti. Paketi tipa A koriste se za prevoz manje količine radioaktivnog materijala umjerene aktivnosti. Paketi tipa B koriste se za prevoz većih količina radioaktivnog materijala ili radioaktivnih materijala više aktivnosti. Paketi tipa C koriste se za prevoz radioaktivnog materijala zračnim putem. Izuzeti paketi koriste se za prevoz vrlo malih količina radioaktivnih materijala npr. dojavljivači dima.

Transport materijala u nuklearnoj industriji se dijeli na prednji i zadnji transport. Prednji dio se zapravo odnosi na iskopavanje uranove rude i na proizvodnju svježih gorivih elemenata. Materijali često dolaze u određenim hemijskim spojevima i fizikalnim stanjima koji mogu da predstavljaju opasnost za okolinu. Uranov koncentrat (U_3O_8) je još poznat i

pod nazivom „žuti kolač“, i ima malu specifičnu aktivnost pa nema neke značajnije opasnosti po čovjeka. Transport uranovog koncentrata je najčešće u 200 litarskim bačvama koje se prenose u normalnim kontejnerima. Uranov heksafluorid (UF_6) koji nastaje konvertiranjem uranovog koncentrata, emituje toksične gasove. Transport se vrši u velikim čeličnim cilindrima čiji je prečnik 120 cm i zapremina preko 10 tona. Naravno, svi konstrukcijski materijali se podvrgavaju raznim testovima sigurnosti koji simuliraju nesreće (pad, poplave, potonuće, požar i ostalo).

Zadnji dio se odnosi na transport istrošenog nuklearnog goriva koje sadrži oko 96% urana, 1% plutonija i 3% fizijskih produkata. Ova vrsta radioaktivnog otpada se transportuje u specijalnim spremnicima. Ti spremnici su masivne čelične konstrukcije, mase oko 100 tona. Zavisno od njihovog sadržaja, mogu da imaju certifikat tipa A, B ili C za transport cestom, željeznicom ili brodom.

Od 2001. godine, stupio je na snagu Međunarodni zakon za transport istrošenog nuklearnog goriva, plutonija, te visokoaktivnog materijala brodovima. Zahtijevaju se posebni brodovi koji moraju imati oznaku INF (eng. Irradiated Nuclear Fuel-INF), te posebno dizajnirane spremnike. Zavisno od nivoa radioaktivnosti koju prenose, brodovi se svrstavaju u više kategorija, što je prikazano u Tabeli 6.

Tabela 6. Klasifikacija brodova za transport radioaktivnog materijala

Klasa broda	Kriterij
INF 1	Brodovi sa certifikatom za prevoz materijala sa aktivnosti manjom od 4000 TBq
INF 2	Brodovi sa certifikatom za prevoz ozračenog nuklearnog goriva i materijala čija je aktivnost manja od $2 \cdot 10^6 \text{ TBq}$ i brodovi za prevoz plutonija čija je aktivnost manja od $2 \cdot 10^5 \text{ TBq}$
INF 3	Brodovi za prevoz ozračenog goriva, visoko radioaktivnog materijala i plutonija bez ograničenja na aktivnost

4. ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Odlaganjem radioaktivnog otpada, prema svim propisima, se zapravo onemogućuje kontakt radioaktivnih izotopa sa podzemnim vodama i biosferom. Prije mnogo vremena, dok su količine radioaktivnog otpada bile jako male, nije se pridavalo previše pažnje samom načinu odlaganja radioaktivnog otpada. Tada se opasniji radioaktivni otpad u bačvama bacao u duboko more, a ostalo bi se zakopavalo u plitke rovove i prekrivalo zemljom ili bi se odvozio u neki od napuštenih rudnika. Ovom vrstom „odlaganja“ se otklonila opasnost od neposrednog ozračivanja ljudi, međutim, ovaj način odlaganja radioaktivnog otpada nije pružao garanciju da radioaktivni otpad neće vremenom doći u kontakt sa ljudima. Zbog toga se pojavila zabrinutost za sigurnost, posebno, jer se počela pojavljivati sve veća količina radioaktivnog otpada kojeg je trebalo adekvatno zbrinuti.

Pošto radioaktivni otpad posjeduje specifična svojstva, posebno visoko radioaktivni otpad, on zahtijeva poseban pristup i odgovarajuća tehnička rješenja. Sami sistemi odlaganja i zaštite su vrlo kompleksni. Osnovni zadatak kod odlaganja radioaktivnog otpada jeste osiguravanje dugotrajne stabilnosti radioaktivnih nuklida tako da se spriječi njihova migracija u okolinu. Stabilnost se osigurava fiksiranjem radionuklida u matrici unutar posuda u kojima su smješteni i samom čeličnom posudom, te postavljanjem višestrukih barijera koje se nalaze između radioaktivnog otpada i okolne geološke sredine.

Postoje dvije vrste barijera:

- prirodna barijera (ova barijera predstavlja geološku formaciju u kojoj se otpad odlaže)
- inženjerska barijera (ova barijera predstavlja umjetnu prepreku koja služi da spriječi migraciju radionuklida).

Postoje velike razlike za odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada, te visoko radioaktivnog otpada.

4.1. Lokacije i vrste odlagališta

Odabir lokacija za odlaganje radioaktivnog otpada je dugotrajan proces na koji utiču brojni faktori. Samo odlaganje otpada se planira na rok od nekoliko stotina do 10.000 godina, zavisno od vremena poluraspađa materijala i trajnosti barijera. Da bi se spriječilo ispuštanje radionuklida, pažljivo se bira način pakovanja i oblik otpada, vrste inženjerskih barijera kojima se otpad izoluje u odlagalištu, te sama vrsta stijene unutar koje se radioaktivni otpad odlaže.

Kada se razmatra sigurnost podzemnog odlaganja, u obzir se uzima niz mogućih faktora:

- prirodni faktori u koje spadaju iznenadna vulkanska aktivnost, pojava ledenog doba, udar meteora, blizina rijeke, klimatski uslovi i vodopropusno tlo
- ljudski faktor u koji spadaju sabotaže, nepredviđena geološka bušenja, nuklearni ratovi i podzemna gradnja.

Za lokaciju podzemnih odlagališta biraju se izrazito stabilne geološke formacije bez podzemnih voda poput granitne stijene, glinene naslage i ležišta soli. Kakvo će se odlagalište sagraditi u nekoj od država zavisi od količine i vrste radioaktivnog otpada, od geoloških uslova, od mogućnosti skladištenja, te o tome da li se prerada i kondicioniranje radioaktivnog otpada isplate, kakva je energetska strategija države i kakav stav država ima prema nuklearnoj energiji. Ako postoji više lokacija na raspolaganju onda je najvažniji kriterij prirodna pogodnost terena za lociranje odlagališta i izolaciju otpada radi sprječavanja širenja onečišćenja u okolinu. Kada dođe do konačnog odlaganja radioaktivnog otpada, ono podrazumijeva smještanje otpada u odlagališta bez namjere da se iz njega ikada vadi.

Odlagališta koja se planiraju moraju biti osmišljena i smještena da bi se osigurala izolacija radioaktivnog otpada od ljudi i od biosfere. Veoma bitne stvari na koje treba obratiti pažnju kod radioaktivnog otpada su intenzitet zračenja otpada prilikom rukovanja i odlaganja, količina topote koju oslobađa radioaktivni otpad, te hemijska svojstva radioaktivnog otpada.

Najbolje opcije za odlaganje radioaktivnog otpada su:

- površinska i pripovršinska odlaganja radioaktivnog otpada koja se koriste prilikom odlaganja nisko i srednje radioaktivnog otpada
- odlaganja u dubokim geološkim formacijama (za sve vrste radioaktivnog otpada, ali posebno se koristi kod visoko radioaktivnog otpada).

U površinska odlagališta se odlaže onaj otpad koji sadrži radionuklide sa kratkim vremenom poluraspada, dok se radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide sa dugim vremenom poluraspada odlaže u dubokim podzemnim odlagalištima. Za srednje i visoko radioaktivni otpad potrebna je izolacija i do nekoliko hiljada godina, dok je za niskoradioaktivni otpad potrebna izolacija do nekoliko stotina godina. Potrebno je navesti i da kratkoživeći nisko radioaktivni otpad može da se skladišti dok mu aktivnost ne opadne toliko da se može kontrolisano ispustiti u okolinu, reciklirati ili odlagati poput običnog komunalnog otpada; naravno u skladu sa propisima o upravljanju otpadom.

4.2. Odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada

Nisko i srednje radioaktivni otpad ne emituje značajne količine toplove zbog toga što su u njima uglavnom prisutni kratkoživeći radionuklidi kod kojih je aktivnost niska do umjerena. Ovaj otpad se uglavnom odlaže u površinskom ili pripovršinskom odlagalištu uz primjenu koncepta višestrukih barijera i odgovarajućeg drenažnog sistema. Otpad se odlaže iznad nivoa podzemne vode i izvan zone plavljenja, a posebno treba izbjegavati situacije pri kojima bi nivo podzemne vode oscilirao u zoni odloženog otpada. Otpad može biti odložen i ispod nivoa podzemne vode, ako je okolno tlo vrlo niske vodopropusnosti. Za razliku od visoko radioaktivnog otpada, ovi otpadi mogu proizvoditi znatne količine gasa koji je posljedica raspada organske materije i korozije metala u otpadu ili metalnih spremnika.

Konačno odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada često je površinskog tipa zbog jednostavnosti izrade, te smanjenih troškova u odnosu na podzemna odlagališta. U većini zemalja, površinska odlagališta se koriste preko 30 godina. Ako se odlagalište nalazi тамо gdje su suhi uslovi, gdje je zanemarivo proticanje podzemnih voda kroz ukopani otpad, onda ne postoji opasnost od širenja radionuklida u okolinu kroz vodu. Međutim, u vlažnijoj klimi je taj pristup odlaganju radioaktivnog otpada manje uspješan. Naročito u nekim okolnostima kao što su plivanje rovova zbog neodgovarajućeg izbora lokacije ili neodgovarajuća drenaža; radionuklidi se u tom slučaju mogu širiti prema dole ili bočno izvan rovova. Na ovaj način radionuklidi dospijevaju u vodotokove i u podzemnu vodu. Postoje dvije vrste površinskog odlaganja radioaktivnog otpada, a to su:

- plitki rov
- zidana betonska građevina.

Plitki rov je najjednostavnije površinsko odlagalište u kome se otpad prekriva slojem zemlje. Uobičajno je da se u plitkom odlagalištu postavi odgovarajuća izolacija na dno i da pokrivač od zemlje sadrži jedan nepropusni sloj. Također se postavljaju i drenažni kanali oko odlagališta.

Druga vrsta površinskog odlagališta je zidana betonska građevina. Ovaj tip odlagališta može biti sagrađen iznad površine zemlje ili plitko ukopan u zemlju. Sastoji se od prostorija koje se popunjavaju sa radioaktivnim otpadom, te kada se neka prostorija popuni ona se zatvara, međutim, prije samog zatvaranja, posude se mogu zaliti i betonom zbog dodatne zaštite. Varijanta odlagališta poznata kao betonski monolit predstavlja standardno rješenje odlaganja otpada srednje i niske aktivnosti.

Pripovršinska odlagališta su na relativno manjim dubinama. Proces njihove gradnje uključuje i zonu nedirnute stijene ili sedimenta iznad odlagališta koja fizički dijeli odloženi radioaktivni otpad od površine terena. Ovakav pristup znatno smanjuje rizik od nemamjernog upada ljudi. Ovaj vid odlagališta se nalazi na dubini od 70 do 100 metara ispod površine zemlje. Radioaktivni otpad se razvrstava prema aktivnosti, pakuje u

spremnike i kontejnere koji se potom smještaju u silose iskopane u granitu i obložene betonom, na dubini od 70 do 100 metara ispod površine zemlje, sa visinom i do 34 metra.

4.3. Odlaganje visoko radioaktivnog otpada

Nakon što se otpad dovoljno ohladi u suhom ili mokrom skladištenju tada počinje proces odlaganja visoko radioaktivnog otpada. Međunarodnim konsenzusom je potvrđeno da je duboko geološko odlaganje radioaktivnog otpada u stijeni najprikladniji način za dugotrajnu izolaciju takvog otpada od čovjekove okoline. Postojale su i druge metode odlaganja visoko radioaktivnog otpada a to su: odlaganje radioaktivnog otpada u okeanima, u ledenjacima i u svemiru.

Iako se još uvijek teorijski razmatra odlaganje radioaktivnog otpada u svemiru, bi se, zbog visokih troškova, moglo koristiti samo za male količine dugoživećih nuklida, kao što je ^{129}I . Pored toga, cijenu 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.

Opcija koja je bila aktuelna u mnogim zemljama, uglavnom za ograničene količine radioaktivnog otpada jeste odlaganje u okeane, posebno u sjeverni dio 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 praksa postepeno zabranjena Londonskom konvencijom o sprječavanju zagađenja mora bacanjem otpada i drugih materija iz 1972. godine, zatim Međunarodnom konvencijom o sprječavanju zagađenja za brodove iz 1973. godine i dopunjrenom 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.

Još uvijek se analizira jedna opcija, a to je zapravo bušenje pojedinačnih veoma dubokih bušotina unutar kojih bi se visoko radioaktivni otpad vertikalno spuštao sa površine, te odlagao u dijelu bušotine koji se nalazi između 3 i 5 km. Ovaj koncept je zapravo star preko pola vijeka, ali je ponovno pokrenut zbog razvoja tehnologije bušenja u naftnoj industriji. Pod dubokim geološkim odlaganjem podrazumijeva se smještanje radioaktivnog otpada u podzemne prostorije izgrađene duboko u prikladnim geološkim formacijama, bez namjere da se od tamo ikada vadi, te bez oslanjanja na dugoročni nadzor ili održavanje.

Prirodni ambijenti koji su pogodni za duboka odlagališta su: ležišta soli, karbonati, glina, škriljci i granitne stijene. Neke od ovih geoloških struktura mogu biti stabilne nekoliko miliona godina, te su najpogodnije za odlaganje visoko radioaktivnog goriva i istrošenog nuklearnog goriva. Glavni cilj duboke geološke formacije je izolovanje i zadržavanje radioaktivnog otpada od čovjekove okoline sve dok nivo radioaktivnosti ne opadne na prihvatljivi nivo. Dubine na koje se smješta ovaj otpad kreću se od 300 do 1500 metara.

Radioaktivni otpad se spušta o obliku paketa u donje nivoe okna ili se kosim tunelima transportuje u predviđene bušotine. Bušotine se nakon toga ispune prikladnim materijalom. Da bi spriječili kretanje radionuklida iz spremnika, geološke formacije oslanjaju se na sistem nezavisnih i višestrukih barijera

Sistem višestrukih barijera čine:

- struktura goriva (dolazi u obliku keramičkih tableta koje su smještene u metalnim košuljicama, te se na taj način radioaktivni produkt zadržava unutar goriva)
- metalni spremnici (osiguravaju mehaničku stabilnost, hemijsku inertnost i vodonepropusnost, te služe da se otpad pohrani na duži vremenski period)
- geološka struktura (predstavlja posljednju barijeru i pojačava se dodatnim tehnološkim rješenjima ukoliko je to potrebno).

Geološka matična formacija za odlaganje radioaktivnog otpada bi trebala imati:

- dovoljnu debljinu, dubinu i protezanje da izoluje odlagalište od potencijalnih prirodnih razornih procesa ili od neželjene ljudske intruzije
- tektonsku stabilnost (daleko od aktivnih rasjeda) i nisku seizmičku aktivnost
- malu strukturnu kompleksnost
- litološku homogenost
- nisku vodopropusnost i niski hidraulički gradijent.

Stijene koje najčešće ispunjavaju uslove za geološku matičnu formaciju su: eruptivne stijene, glinovite stijene (plastične gline i glinenci) i ležišta kamene soli. Eruptivne stijene karakteriše slaba propusnost (pod uvjetom niske ispucalosti), visoka hemijska stabilnost, niska ekonomski vrijednost, kao i značajna čvrstoća. Ova vrsta stijene je razmatrana od strane mnogih zemalja u Evropi (Češka, Finska, Švedska, Francuska, Španija, Švicarska, Ukrajina) kao i druge zemlje svijeta (Kanada, Kina, Indija). Glinovite stijene karakterišu niska vodopropusnost i značajna svojstva usporavanja prenosa otopljenih tvari. Prednost glinovitih stijena je što nemaju ekonomsku vrijednost. Njihova čvrstoća nije velika te je zbog toga potrebna značajna količina podgrade tokom iskopa i gradnje podzemnih prostorija. Ovi tipovi stijena se razmatraju za potrebe dubokog geološkog odlaganja u Bjelorusiji, Belgiji, Francuskoj, Mađarskoj, Španiji i Švicarskoj. Kamena sol također ima vrlo nisku propusnost. Neke zemlje razmatraju odlaganje svih vrsta radioaktivnog otpada, uključujući i nisko radioaktivni otpad, u duboka geološka odlagališta jer smatraju da će se veći troškovi odlaganja kompenzirati s povećanjem sigurnosti za okolinu i stanovnike.

5. NAJPOZNATIJA ODLAGALIŠTA RADIOAKTIVNOG OTPADA

Pojedine zemlje u svijetu imaju veliki broj odlagališta na svojoj teritoriji. Od kada je 1944. godine izgrađeno prvo odlagalište za radioaktivni otpad u nuklearnom centru Oak Ridge, u Sjedinjenim Američkim Državama, do sada je u svijetu izgrađeno više od stotinu konačnih odlagališta, koja su ili već zatvorena ili u radnoj fazi, a preko 40 odlagališta je u fazi izgradnje. Prvo odlagalište namijenjeno skladištenju slomljenog kontaminiranog stakla ili drugog materijala nedovoljno čistog da bi bilo ponovo korišteno u radu bilo je jednostavno zakopano u jame na samoj lokaciji centra Oak Ridge. U svijetu je izgrađeno nekoliko tipova odlagališta za radioaktivni otpad niske i srednje radioaktivnosti. Zbog različitih zakona u pojedinim zemljama, dobijanje dozvole za gradnju konačnog odlagališta je dugotrajan proces.

5.1. Španjolsko odlagalište El Cabril

Ovo odlagalište je odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada. Spada u kategoriju pripovršinskog odlagališta radioaktivnog otpada sa izgrađenim armirano betonskim strukturama unutar kojeg je moguće odlagati sve vrste nisko i srednje radioaktivnog otpada osim onog koje spada u kategoriju dugoživećeg otpada. Ovo postrojenje pored jedinica za odlaganje sadrži još i prateće objekte za obradu, kondicioniranje i ispitivanje radioaktivnog otpada. Što se tiče lokacije odlagališta, ono je izgrađeno u slabo naseljenom brdovitom području oko 100 km od Cordobe. Odlagalište može primiti oko 50 000 do 60 000 m³ otpada. Tokom odlaganja radioaktivnog otpada, krovna konstrukcija (pomična) zadržava se iznad određenog dijela sve dok ne bude popunjeno te se zatim zatvara. Predviđen je višestoljetni period institucionalne kontrole, nakon zatvaranja odlagališta, te će se vršiti kontrola vode koja se bude procjeđivala kroz odlagalište u dežurne kanale. Vađenje otpada je moguće iako se nešto takvo ne planira (Slika 14.).



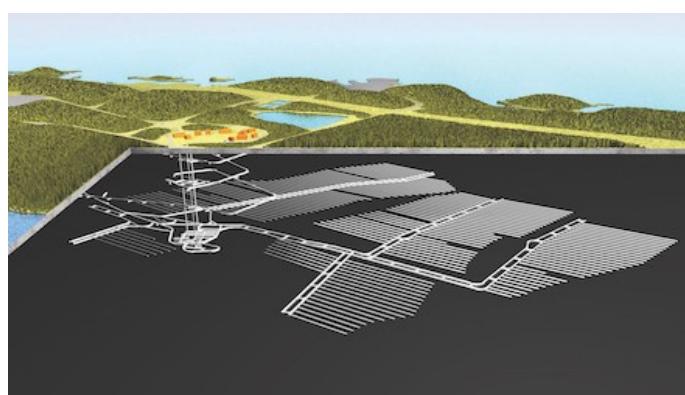
Slika 14. Odlagalište El Cabril, Španjolska.²⁶

5.2. Švicarski projekt tunelskog odlagališta RAO

U Švicarskoj se planira projekat tunelskog odlagališta koji bi trebao biti kapaciteta 80 000 m³, unutar kojeg bi se odlagao nisko i srednje radioaktivni otpad, bez dugoživećeg otpada jer se on prema Švicarskoj legislativi svrstava u istu kategoriju kao i VRAO. Pri projektu tunelskog odlagališta, planiran je horizontalni pristupni tunel koji bi trebao biti ukopan u padinu brijege, koji vodi do prijemnih, kao i do drugih pratećih prostorija, a iza njih se stiže do tunelskih jedinica za odlaganje radioaktivnog otpada. Na ovaj način se postiže pokrovni sloj od više stotina metara prirodne stijene iznad samog otpada. Otpad se kondicionira različitim materijalima, poput betona, bitumena, polimera i slično, prije samog pakiranja u bačve. Bačve se potom ugrađuju u betonske spremnike koji su veličine 1.63 m³. Kada su u pitanju tunelske jedinice za odlaganje one su obložene betonom, te nakon ubacivanja u spremnik zalijevaju se specijalnim cementom. Zatvaranje odlagališta radioaktivnog otpada uključuje potpuno zalijevanje svih pristupnih tunela i pomoćnih prostorija objekta.

5.3. Podzemno odlagalište Olkiluoto u Finskoj

Ovo podzemno odlagalište radioaktivnog otpada se nalazi, na lokaciji nuklearne elektrane, u neposrednoj blizini nastanka radioaktivnog otpada. U pogon je pušteno 1992. godine. Ovo odlagalište se sastoji od dva silosa na dubini od 60 do 95 m u tonalitima. Jedan silos se koristi za čvrsti nisko radioaktivni otpad, dok se drugi silos koristi za bitumenizirani srednje radioaktivni otpad. Silosi se međusobno razlikuju po tome što su zidovi silosa namijenjenog za odlaganje nisko radioaktivnog otpada izgrađene od mlaznog betona, dok zidovi silosa namijenjenog za odlaganje bitumeniziranog srednje radioaktivnog otpada izgrađeni su od betona. Oba ova silosa okružuje čvrsta i nepropusna stijena. Sam prečnik silosa iznosi 24 m, dok mu je visina 34 m. Odlagalište može da primi 42 000 bačvi zapremljene 200 l. Plan je da odlagalište uz pogonski otpad primi i otpad koji nastaje dekomisijom nuklearne elektrane. Kada se odlaganje radioaktivnog otpada završi, svi pristupni putevi i sve veze prema odlagalištu će biti zapečaćene (Slika 15.).



Slika 15. Podzemno odlagalište Olkiluoto, Finska.²⁷

5.4. Odlagalište radioaktivnog otpada Konrad, Njemačka

Odlagalište radioaktivnog otpada Konrad je bivši rudnik željezne rude. Smješten je u Njemačkoj pokrajini Donja Saska. Što se tiče same površine ona zauzima oko $1,7 \times 3 \text{ km}^2$ i ima 6 nivoa (najveća dubina doseže i do 1300 m). Rudnik je prestao sa proizvodnjom još 1976. godine.

Kako bi se provjerili uslovi za izgradnju odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada koji nije termički aktivan krenulo se u preliminarna istraživanja te lokacije. Lokacija je bila povoljna zbog velike dubine odlaganja (1000 m), debelih naslaga gline i lapora u krovini, te zbog suhih uvjeta koji vladaju unutar rudnika. Planira se iskoristiti jedno od dva postojeća okna za konstrukciju novog transportnog sistema što je neizbjegljivo za prenamjenu rudnika u samo odlagalište. Otpad bi se odlagao u 11 polja na dubinama od 800 do 1300 m. Godišnji kapacitet odlagališta bio bi $650\,000 \text{ m}^3$. Ovo odlagalište bi moglo primiti 90% otpada koji se proizvede u Njemačkoj i vijek odlagališta prema procjenama bio bi 40 godina.

5.5. Odlagalište radioaktivnog otpada u Bugarskoj

Osim skladišta nisko i srednje radioaktivnog otpada koja su u sklopu nuklearne elektrane i istraživačkog reaktora koji više nije u pogonu, Bugarska ima i odlagalište u blizini mjesta Novi Han. Trenutno je u izgradnji i Nacionalno odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada, na lokaciji Radiana u blizini nuklearne elektrane Kozloduy. Odlagalište Novi Han nalazi se 35 km jugoistočno od glavnog grada Sofije i 6,5 km od sela Novi Han na 960 m nadmorske visine, na planini Lozen. Projektovano je 1964. godine za odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada koji proizlazi iz primjene radioaktivnih izvora u medicini, industriji, nauci i obrazovanju.

Postrojenje pokriva površinu od $42\,500 \text{ m}^2$ i podijeljeno je ogradom u dva dijela. Prvi dio sadrži administrativne objekte, garažu i prostor za održavanje, dok se u drugom dijelu nalaze odlagališni i skladišni objekti, laboratorij za prihvat i obradu otpada, te objekt za dekontaminaciju.

5.6. Odlagalište radioaktivnog otpada u Mađarskoj

Mađarska proizvodi više od 50% svoje električne energije iz nuklearne elektrane Paks (Paks Atomeromu). Smješten 5 km od istoimenog grada na obali Dunava, pogon ove nuklearne elektrane se sastoji od 4 nuklearna reaktora. Uz niski i srednje radioaktivni otpad iz nuklearne elektrane, Mađarska stvara i nezanemarive količine tog otpada iz medicinskih, istraživačkih, industrijskih i drugih izvora.

Mađarska je ovom pitanju pristupila tako da je odredila da će institucionalni radioaktivni otpad odlagati u jednom odlagalištu (Puspokszilagy), a nisko i srednje radioaktivni otpad iz nuklearne elektrane Paks u drugom odlagalištu (Bataapati).

5.7. Odlagalište radioaktivnog otpada u Hrvatskoj

Nuklearna elektrana Krško se jednim dijelom nalazi na teritoriji Hrvatske pa zbog toga Hrvatska preuzima obavezu zbrinjavanja polovine radioaktivnog otpada nuklearne elektrane Krško na svojoj teritoriji. U Hrvatskoj postoji mala količina radioaktivnog otpada koja iznosi $7,5 \text{ m}^3$ i većinom je smještena u dva skladišta institucionalnog radioaktivnog otpada:

- skladište u sklopu Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada
- skladište Instituta Ruđer Bošković.

Oba skladišta se nalaze u Zagrebu i oba su zatvorena, odnosno, ne mogu primiti više radioaktivni otpad. Prve količine otpada iz nuklearne elektrane Krško trebale bi se zaprimiti 2023. godine, te razgradnja nuklearne elektrane Krško planirana je za 2043. godinu. Prema programu iz 1997. godine izabrane su četiri potencijalne lokacije i to su:

- Trgovačka gora
- Moslavačka gora
- Papuk
- Psunj.

2014. godine je izdvojena lokacija i to Čerkezovac na Trgovačkoj gori. Ako bi se ova lokacija odabrala za izgradnju odlagališta radioaktivnog otpada, centar za odlaganje radioaktivnog otpada bi obuhvatao sljedeće objekte: središnje skladište za radioaktivni otpad, odlagalište za nisko i srednje radioaktivni otpad i dugoročno skladište za nisko i srednje radioaktivni otpad iz nuklearne elektrane Krško.

5.8. Odlaganje radioaktivnog otpada u Sloveniji

Slovenija još nije riješila problem oko odlaganja nisko i srednje radioaktivnog otpada. Zbog toga je donesena odluka o izgradnji nacionalnog odlagališta na lokaciji Vrbina koja je prihvaćena od strane lokalne zajednice, te Vlade krajem 2009. godine. Lokacija Vrbina se nalazi u općini Krško u blizini elektrane (300 m istočno). Planirano je da se izgradi pod površinskim tip odlagališta gdje bi silosi bili izgrađeni unutar naslaga aluvijalnog pjeskovitog silita. Ovdje je planirano odlaganje institucionalnog radioaktivnog otpada (koji je trenutno uskladišten u središnjem skladištu Brinje), te polovica nisko i srednje radioaktivnog otpada iz nuklearne elektrane Krško. Silosi će se nalaziti na dubini od 15 do 55 m ispod površine zemlje, te ispod vodnog lica koje se nalazi na 3 m dubine unutar površinskog sloja šljunka. Silosi su cilindričnog oblika i prečnika 27,3 m.

U betonske spremnike će se smjestiti kondicionirani otpad koji će se potom odložiti u silose u slojevima. Svaki sloj sadrži 70 takvih spremnika gdje je međuprostor popunjen drenažnim materijalom. Kada se silos popuni prekrije se slojem cementa i 5 m debelim slojem gline koja sprečava vertikalnu infiltraciju.



Slika 16. Vrbina, u blizini NE Krško.¹²

6. SKLADIŠTENJE I ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA U BOSNI I HERCEGOVINI

Na osnovu Pravilnika o upravljanju radioaktivnim otpadom, izdatog od strane Državne regulatorne agencije za radijacijsku i nuklearnu sigurnost Bosne i Hercegovine, precizno su definisani postupci pri skladištenju i odlaganju radioaktivnog otpada. Ovim pravilnikom se propisuju obavezne mjere upravljanja radioaktivnim otpadom, odgovornost za upravljanje otpadom, način klasifikacije, procesiranja, skladištenja i evidentiranja radioaktivnog otpada, način ispuštanja radioaktivnih otpadnih tvari u okolinu, kao i druga značajna pitanja u vezi s upravljanjem radioaktivnim otpadom.

Prema Pravilniku za skladište je potrebno:

- generator radioaktivnog otpada i operator moraju definisati postupak verifikacije prikupljenog ili primljenog radioaktivnog otpada sa kriterijima prihvatljivosti
- generator radioaktivnog otpada i operator moraju definisati mjere postupanja u slučaju neusklađenosti prikupljenog ili primljenog radioaktivnog otpada sa kriterijima prihvatljivosti
- radioaktivni otpad koji sadrži veoma kratkoživeće radionuklide (sa vremenom poluraspada manjim od 100 dana) čuva se u spremištu na mjestu nastanka dok aktivnost radionuklida sadržanih u radioaktivnom otpadu ne padne ispod granice oslobođanja od regulatorne kontrole
- radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide čije je vrijeme poluraspada duže od 100 dana čuva se u skladištu radioaktivnog otpada
- radioaktivni otpad se može čuvati u spremištu, ali ne duže od godinu dana
- radioaktivni otpad mora se uskladištiti na takav način da se pri unošenju, rukovanju i iznošenju iz skladišta zadovolje uslovi zaštite profesionalno izloženih lica, stanovništva i okoliša u skladu s važećim propisima
- radioaktivni otpad koji se čuva u skladištu mora biti u stabilnoj formi koja osigurava dugotrajno čuvanje te pristup, rukovanje, prepakiranje i transport
- sljedivost podataka o uskladištenom radioaktivnom otpadu mora biti osigurana odgovarajućim označavanjem paketa radioaktivnog otpada i vođenjem evidencije za sve faze skladištenja.

Prema Pravilniku svako skladište mora biti projektovano i izgrađeno u skladu s važećim propisima o gradnji, te namjenski projektovano i izgrađeno za upravljanje radioaktivnim otpadom. Skladište radioaktivnog otpada mora biti izgrađeno u skladu s dokazom sigurnosti, kojim se demonstriraju radijacijska sigurnost i bezbjednost skladišta i aktivnosti upravljanja radioaktivnim otpadom za vrijeme rada (obavljanja djelatnosti) i dekomisioniranja skladišta, uključujući procjenu uticaja na okolinu u skladu s važećim propisima.

Prilikom izgradnje skladišta mora se osigurati dovoljan kapacitet za prijem, procesiranje i čuvanje postojećeg i predviđenog radioaktivnog otpada kako iz licenciranih djelatnosti, tako i iz vanrednih događaja. Za predviđeni period skladištenja potrebno je da se osigura

odgovarajuća izolacija radioaktivnog otpada, te omogući pristup radioaktivnom otpadu u cilju inspekcije, provjere stanja, oslobođanja od regulatorne kontrole ili transporta. Operator je dužan da jednom godišnje vrši analizu i procjenu adekvatnosti kapaciteta skladišta, uzimajući u obzir procjenu količine generiranja radioaktivnog otpada i predviđeni radni vijek skladišta.

Na osnovu Pravilnika spremište radioaktivnog otpada treba zadovoljavati sljedeće uslove:

- spremište radioaktivnog otpada za odležavanje i skladištenje radioaktivnog otpada može biti namjenski projektovan objekt ili dio objekta
- spremište radioaktivnog otpada mora biti izgrađeno u skladu s procjenom sigurnosti, kojom se demonstriraju radijacijska sigurnost i bezbjednost spremišta i aktivnosti upravljanja radioaktivnim otpadom

Skladište i spremište radioaktivnog otpada moraju biti označeni u skladu s važećim propisima.

Bezbjednost skladišta i spremišta radioaktivnog otpada prema Pravilniku treba biti:

- generator radioaktivnog otpada i operator su dužni da osiguraju odgovarajuće mjere bezbjednosti spremišta i skladišta u skladu s važećim propisima
- bezbjednost spremišta i skladišta radioaktivnog otpada s obzirom na karakteristike uskladištenog radioaktivnog otpada mora biti srazmerna potencijalnom riziku od neovlaštenog rukovanja i mora biti u skladu s važećim propisima
- bezbjednost spremišta i skladišta radioaktivnog otpada će se vrednovati prema procjenama ugroženosti i prijetnjama u saradnji s nadležnim tijelima i organima, odnosno relevantnim institucijama
- stepen tehničke zaštite spremišta i skladišta radioaktivnog otpada mora biti u skladu s dokazom sigurnosti i procjenom sigurnosti prema odredbama ovog pravilnika, materijalno-tehničkim standardima važećih propisa i standardima Međunarodne agencije za atomsku energiju.

6.1. Lokacije za odlaganje radioaktivnog otpada u Bosni i Hercegovini

Radioaktivni otpad u Bosni i Hercegovini je uskladišten na 19 lokacija. Od toga, na 11 lokacija je uskladišteno manje od pet radioaktivnih izvora, na šest lokacija je uskladišteno između pet i 50 izvora, dok je na preostale dvije lokacije uskladišteno više od 50 radioaktivnih izvora koji se ne koriste. Radioaktivni materijal uskladišten u privremenim skladištima je kategorizovan, odnosno znaju se njegova količina i tip.

Radioaktivni otpad u Bosni i Hercegovini čine uglavnom zatvoreni izvori zračenja za čiju dalju upotrebu su prestale tehničke ili druge pretpostavke. U Bosni i Hercegovini trenutno postoji oko 800 zatvorenih radioaktivnih izvora te nekoliko hiljada radioaktivnih izvora kao što su detektori dima i kalibracioni izvori. Takođe, postoji oko 270 zatvorenih radioaktivnih izvora koji su instalirani u gromobranima širom Bosne i Hercegovine, koje je

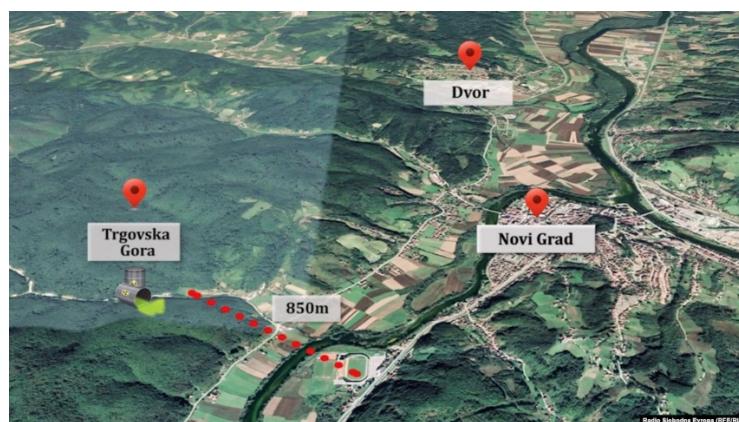
potrebno demontirati i uskladištitи u cilju poboljšanja radijacijske sigurnosti. Izvori iz gromobrana predstavljaju opasnost za stanovništvo u slučaju njihovog obaranja ili neovlaštenog demontiranja i neadekvatnog skladištenja.

Što se tiče radioaktivnog otpada, u Federaciji Bosne i Hercegovine, radioaktivni materijal koji se ne koristi, niti se predviđa njegovo dalje korištenje, se organizovano prikuplja i odlaže u privremeno skladište radioaktivnog materijala u dijelu kompleksa Rakovica, a u cilju smanjenja rizika po zdravlje stanovništva od jonizujućeg zračenja. Takođe, privremeno skladište radioaktivnog materijala, do rješenja problema trajnog skladišta, je odabранo kao najpovoljnije rješenje u datom trenutku, u okviru međunarodnog projekta tehničke pomoći „Upravljanje zatvorenim izvorima zračenja u područjima koja su bila pod uticajem ratnih dejstava“, kako bi se spriječila opasnost od izlaganja stanovništva. Privremeno skladište je pod redovnom kontrolom domaćih nadležnih organa u skladu sa pozitivnim zakonskim propisima iz oblasti zaštite od zračenja. Na osnovu dosadašnjih procjena radijacijske sigurnosti skladišta za okolno stanovništvo, rizici od izlaganja zračenju su znatno ispod dozvoljenih granica i na nivou su prirodnog zračenja.

Nakon što Hrvatska sa Slovenijom nije uspjela donijeti dogovor o zajedničkom skladištenju nuklearnog otpada iz Nuklearne elektrane Krško i formiranjem Fonda za finansiranje razgradnje Nuklearne elektrane Krško u Hrvatskoj 2007. godine krenule su intenzivnije aktivnosti u traženju potencijalne lokacije za odlaganje otpada. U prvoj fazi analiziralo se više potencijalnih lokaliteta, da bi na kraju ostala samo jedna lokacija, kasarna Čerkezovac neposredno uz granicu Bosne i Hercegovine u općini Dvor na Trgovskoj gori. Trgovačka gora je brdoviti teren čije južne padine završavaju na lijevoj obali rijeke Une, neposredno prije ušća rijeke Sane u Unu. Proteže se sjeverozapadno od Novog Grada (raniji naziv Bosanski Novi) u pravcu Gline. Prostor Trgovačke gore nalazi se u blizini iznimnih prirodnih i antropoloških vrijednosti. U području Trgovačke gore, neposredno oko lokaliteta, su dvije oblasti pod zaštitom: lijeva obala Une i dolina od naselja Trgovi ka Dvoru. Na prostoru Bosne i Hercegovine nalaze se područja od posebnog značaja, kao što su Nacionalni park Una, cijeli tok rijeke Une i ušće rijeke Sane u Unu.

Ulagana kapija u kasarnu Čerkezovac u kojoj se planira izgradnja odlagališta otpada nalazi se na udaljenosti od samo 850 m od zaštićene zone Natura 2000 u naselju Matijevići. Čitavo područje Trgovačke gore nalazi se na 200-1000 m udaljenosti od zaštićene zone Natura 2000 na pravcu Trgovi-Grmušani-Vanići-Dvor. U oba slučaja po ovim najkraćim pravcima prisutni su površinski vodotoci iz zone Čerkezovac prema zaštićenim zonama, sa padom terena ka ovim zonama. Ovisno od toga gdje će se locirati odlagalište unutar kasarne Čerkezovac, njena maksimalna udaljenost od zaštićene zone ne prelazi 1000 m, sa gradijentom pada terena i pravcem distribucije kontaminata vodom, tlom i vazduhom ka zaštićenim zonama. Sa prosječnim padavinama od 870 mm i maksimalnom količinom od 1086,9 mm, maksimalnom visinom snijega od 78 cm i sa 86,4% dana sa izraženim vjetrom može se konstatovati da se lokalitet Čerkezovac nalazi na području iz koga su mogući intenzivni pravci distribucije kontaminata. Tektonski uslovi ukazuju na postojanje prepostavljenog rasjeda pružanja skoro zapad-istok. Trasa rasjeda je oko 450 m južno od vojnog objekta Čerkezovac. Na ovom prostoru, vidljivo je postojanje nekoliko napuštenih rudnika kojima su se eksploratisali Fe, Pb, Cu, kao i barit. Rudarski iskopi i podzemne

prostorije posebno su pogodne za brzu distribuciju kontaminacije u prostoru. Odlaganje radioaktivnog i nuklearnog otpada u blizini granice Bosne i Hercegovine s Hrvatskom, na lokaciji Trgovska gora, u hrvatskoj općini Dvor, izazvalo bi niz problema, kao što je mogući rizik od incidenata i akcidenata koji bi mogli nastati uslijed zemljotresa, pomjeranja tla, poplava, požara i eventualnog ispuštanja radionuklida u okolinu. Ovakav način odlaganja radioaktivnog otpada stvara posebnu zabrinutost kod stanovništva Bosne i Hercegovine, a posebno onog uz donji tok rijeke Une.



Slika 17. Trgovska gora.²⁸

ZAKLJUČAK

Radioaktivni otpad može nastati na razne načine i on sadrži različite vrste materijala. Najvažnija svojstva radioaktivnog otpada određena su količinom i vrstom radionuklida koje sadrži, stoga o njima najviše zavisi i način zbrinjavanja radioaktivnog otpada. Radioaktivni otpad, u prvom redu, se razvrstava prema specifičnoj radioaktivnosti u tri grupe: nisko, srednje i visoko radioaktivni otpad. Radioaktivni otpad najčešće se stvara u nuklearnim procesima poput istrošenog nuklearnog goriva. Istrošeno nuklearno gorivo se skladišti u posebnim skladištima zbog toga što još uvijek u većini zemalja ne postoje odlagališta za visoko radioaktivni otpad.

Odlagališta radioaktivnog otpada moraju biti projektovana i izgrađena u skladu sa opće prihvaćenim standardom da odlagalište mora spriječiti bilo kakav nepovoljan uticaj na okolinu. U današnje vrijeme, odloženi nisko i srednje radioaktivni otpad u skladištima ne može uticati na ljudе i okolinu zbog načina izgradnje postrojenja za zbrinjavanje istog. Ovo podrazumijeva da nema direktnog zračenja niti isticanja radioaktivnih tvari u tečnom ili gasovitom obliku, niti širenja tvari kroz samo tlo postrojenja za zbrinjavanje otpada. Tokom rada postrojenja, i godinama nakon njegovog zatvaranja, provode se različita mjerena koja postrojenja da bi se pravovremeno zapazila bilo kakva odstupanja od normale. Odlagališta radioaktivnog otpada zapravo služe da bi se izolovao radioaktivni materijal od okoline (sprječavanje emisije radionuklida u biosferu). To se postiže kondicioniranjem otpada, odabirom najprikladnije geološke strukture u koju će otpad biti smješten, te postavljanje višestrukih barijera između samog radioaktivnog otpada i okolnog geološkog medija. Važan faktor u postizanju što veće sigurnosti odlagališta su istraživanja ponašanja barijernog sistema i okoline stijene koja se provode u podzemnim laboratorijima.

Prije nego što dođe do same izgradnje odlagališta, Zakonska regulativa Evropske Unije obavezuje države članice da urade izradu studije uticaja na okolinu još u fazi planiranja projekta odlagališta radioaktivnog otpada. Cilj same studije jeste da se utvrdi kakve su ekološke posljedice samog projekta. Na temelju procjene potencijalnog uticaja na ljudsko zdravlje i na okolinu biti će određena prihvatljivost planiranog odlagališta radioaktivnog otpada. S današnjom tehnologijom koja se konstantno razvija, te stvaranjem novih vrsta materijala može se očekivati bolja tehnička rješenja za zbrinjavanje radioaktivnog otpada u budućnosti.

LITERATURA

1. Brennecke P. „Introduction to the Konrad repository“, Federal Office for Radiation Protection, Salzgitter, 2010.
2. Briški F. „Zaštita okoliša“, Element d.o.o., Zagreb, ISBN: 978-953-197-589-6, 2016.
3. Ciraj – Bjelac O., Vujović M. „Upravljanje radioaktivnim otpadom“, Akademска misao, Beograd, ISBN: 978-86-7466-679-1, 2017.
4. Kučar – Dragičević S., Schaller A., Subašić D. „Moguća tehnološka rješenja odlaganja nisko i srednje radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj“, APO, Zagreb, 1996.
5. Lersow M., Waggitt P. „Disposal of All Forms of Radioactive Waste and Residues“, Springer Nature Switzerland AG, ISBN: 978-3-030-32909-9, 2020.
6. Pusch R. „Geological Storage of Radioactive Waste“, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-540-77332-0, 2008.
7. Schaller A. „Izbor mjesta odlagališta nisko i srednje radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj“, APO, 1997.
8. Veinović Ž. „Duboka Geološka odlagališta, predavanje: Podzemna odlagališta otpada.“ Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2013.
9. Veinović Ž. „Zbrinjavanje radioaktivnog otpada – svjetska praksa i hrvatski izvori“, Zaštita okoliša, 2016.
10. Pravilnik o upravljanju radioaktivnim otpadom, „Službeni glasnik BiH“, br. 32/02 i 102/09
11. Klasifikacija radioaktivnog otpada u Hrvatskoj, https://www.radioaktivnotpad.org/hrvatski/zbrinjavanje-rao-a_14/, pristupljeno 05.05.2022.
12. Odlaganje radioaktivnog otpada u Sloveniji, internetska adresa: https://www.radioaktivnotpad.org/hrvatski/slovenija_30/, pristupljeno 05.05.2022.
13. PRERAD, D. „Radioaktivni otpad skladištit će se u vojarni Čerkezovac na Trgovskoj gori.“, <http://www.vecernji.hr/hrvatska/radioaktivni-otpad-skladistit-ce-se-u-vojarnicerkezovac-na-trgovskoj-gori-999524>, 2015., pristupljeno 06.05.2022.

14. https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTCzQaAttBcf-G_VW4e9yDdnC5iSn7108GXudrl3g0CpnoVIWdcLX5cmU1R0-SHqUup1kl&usqp=CAU
15. <https://www.radioaktivniotpad.org/upload/images/contents/original/90-349g8081asml.jpg>
16. <https://www.radioaktivniotpad.org/upload/images/contents/original/94-pec-za-spaljivanje-otpada.jpg>
17. <https://www.radioaktivniotpad.org/upload/images/contents/original/93-kompaktor-rwc-250-sa-klipom-prikaz.jpg>
18. <https://docplayer.net/docs-images/82/85012791/images/99-0.jpg>
19. https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSgJYorj-DxM35YGGrSSK6oCi0KTa5s5Zch42Phd44QWD5dzcx5-iKsOVt8srPS_Sh3xtE&usqp=CAU
20. <https://html.pdfcookie.com/02/2019/10/17/3ld0j453n524/bg27.jpg>
21. <https://www.radioaktivniotpad.org/upload/images/contents/original/102-kondicioniranje-rao-a.jpg>
22. <https://www.radioaktivniotpad.org/upload/images/contents/original/48-drums-in-the-technology-building.jpg>;
<https://frontslobode.s3.amazonaws.com/media/images/650x433/47646.jpg>
23. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e9/WIPP-04.jpeg>;
<https://storage.bljesak.info/image/285853/1280x880/nuklearni-otpad2.jpg>;
<https://www.radioaktivniotpad.org/upload/images/contents/original/54-dsc0108.jpg>; <https://www.radioaktivniotpad.org/upload/images/contents/original/44-disposal-chamber-1.jpg>
24. <https://www.radioaktivniotpad.org/upload/images/contents/thumbs/1200x660-63-bazen-s-istrosenim-gorivom.jpg>
25. <https://www.radioaktivniotpad.org/upload/images/contents/thumbs/1200x500-85-radioaktivne-ikonice.jpg>
26. <https://www.radioaktivniotpad.org/upload/images/contents/thumbs/1200x660-157-kompleks-odlagalista-el-cabril.jpg>
27. http://image.digitalinsightresearch.in/Uploads/ImageLibrary/Active/2016June/NEI/NEI_p32_0521.jpg

28. https://gdb.rferl.org/AB57637D-BFEC-4214-9F35-FBCDB74B2E23_w1080_h608_s_b.jpg

Popis slika:

Slika 1. Grafički prikaz sheme klasifikacije radioaktivnog otpada prema IAEA.

Slika 2. Razvrstavanje radioaktivnog otpada.

Slika 3. Peć unutar koje se vrši spaljivanje RAO.

Slika 4. Kompaktor za kompaktiranje radioaktivnog otpada.

Slika 5. Obrada (tretman) tečnog radioaktivnog otpada.

Slika 6. Superkompaktor.

Slika 7. Kompaktiranje.

Slika 8. Imobilizacija.

Slika 9. Višestruke barijere.

Slika 10. Načini slaganja kontejnera sa radioaktivnim otpadom u skladištu.

Slika 11. Najčešći načini skladištenja radioaktivnog otpada.

Slika 12. Skladištenje isluženog nuklearnog goriva u bazenu.

Slika 13. Transportne oznake radioaktivnog materijala.

Slika 14. Odlagalište El Cabril, Španjolska.

Slika 15. Podzemno odlagalište Olkiluoto, Finska.

Slika 16. Vrbina, u blizini NE Krško.

Slika 17. Trgovska gora.

Popis tablica:

Tabela 1. Vrijeme poluraspada određenih radioaktivnih izotopa.

Tabela 2. Smjernice za upravljenje tečnim radioaktivnim otpadom.

Tabela 3. Nivoi izuzimanja za neke često korištene radionuklide propisani direktivom Evropske komisije.

Tabela 4. Postupci smanjenja zapremine za nisko i srednje radioaktivni otpad.

Tabela 5. Dekontaminacioni faktori nekih metoda za obradu tečnog radioaktivnog otpada.

Tabela 6. Klasifikacija brodova za transport radioaktivnog materijal.