

# Nastanak i zbrinjavanje radioaktivnog otpada

---

**Besednik, Marina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:300173>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-06**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Marina Besednik

# **NASTANAK I ZBRINJAVANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2018.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department  
Professional undergraduate study of Safety and Protection

Marina Besednik

# **GENERATION AND DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE**

FINAL PAPER

Karlovac, 2018.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Marina Besednik

# **NASTANAK I ZBRINJAVANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Slaven Lulić, dr. sc.

Karlovac, 2018.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
 KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
 Trg J.J.Strossmayera 9  
 HR-47000, Karlovac, Croatia  
 Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
 Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Stručni studij sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, 2018.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Marina Besednik

Matični broj: 0415615032

Naslov: Nastanak i zbrinjavanje radioaktivnog otpada

Opis zadatka:

Ovim radom nastoji se prikazati što je to zapravo radioaktivnost i radioaktivni otpad. Razlikujemo više vrsta radioaktivnog otpada stoga su prikazane klasifikacije takvog otpada te njihove međusobne razlike. Opisuju se različiti izvori i nastajanje radioaktivnog otpada te njegovo zbrinjavanje različitim tehnologijama. Prikazuje se princip rada nuklearnih elektrana i na koji način se istrošeno nuklearno gorivo prerađuje te na koje se sve načine različite vrste radioaktivnog otpada transportiraju i na kraju spremaju i odlažu. U radu se ukazuje na problem nastajanja i skladištenja radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

Veljača, 2018.

Lipanj, 2018.

Lipanj, 2018.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Slaven Lulić, dr. sc.

Ivan Štedul, prof.

## PREDGOVOR

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći se navedenim izvorima podataka i stečenim znanjem za vrijeme studija.*

*Ovom prilikom želim se zahvaliti svim profesorima koji su mi predavali tijekom mog školovanja i nesebično mi prenijeli dio svog znanja i iskustva.*

*Zahvaljujem svom mentoru Slavenu Luliću, dr. sc. na ukazanom povjerenju, susretljivosti i pruženoj pomoći tijekom izrade završnog rada.*

*Na kraju, posebno bih zahvalila cijeloj svojoj obitelji, svim kolegama i prijateljima, a posebice svojim roditeljima na razumijevanju, potpori i pomoći tijekom cijelog studija.*

## SAŽETAK

Ovim radom nastoji se prikazati što je to zapravo radioaktivnost i radioaktivni otpad. Razlikujemo više vrsta radioaktivnog otpada stoga su prikazane klasifikacije takvog otpada te njihove međusobne razlike. Opisuju se različiti izvori i nastajanje radioaktivnog otpada te njegovo zbrinjavanje različitim tehnologijama. Prikazuje se princip rada nuklearnih elektrana i na koji način se istrošeno nuklearno gorivo prerađuje te na koje se sve načine različite vrste radioaktivnog otpada transportiraju i na kraju spremaju i odlažu. U radu se ukazuje na problem nastajanja i skladištenja radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj.

Ključne riječi: radioaktivni otpad, radioaktivnost, nuklearne elektrane, odlagalište radioaktivnog otpada.

## SUMMARY

This paper seeks to show what radioactivity and radioactive waste are actually. There are different types of such waste therefore the classifications of radioactive waste and their differences are shown. Different sources and the emergence of radioactive waste and their disposal by different technologies are described. It shows the principle of nuclear power plants and the way radioactive nuclear fuel is used, and what are the various types of radioactive waste transport and eventually store and dispose. This paper shows the problem of the creation and storage of radioactive waste in the Republic of Croatia.

Key words: radioactive waste, radioactivity, nuclear power plant, radioactive waste repository

## SADRŽAJ

## STRANICA

|   |     |
|---|-----|
| ZAVRŠNI ZADATAK.....  | I   |
| PREDGOVOR .....   | II  |
| SAŽETAK .....   | III |
| SADRŽAJ .....   | IV  |
| 1. UVOD.....  | 1   |
| 2. RADIOAKTIVNI OTPAD .....                                       | 2   |
| 2.1. Klasifikacija radioaktivnog otpada.....                      | 2   |
| 2.1.1. IAEA.....  | 4   |
| 2.1.2. Klasifikacija radioaktivnog otpada u Hrvatskoj .....       | 6   |
| 3. NASTANAK RADIOAKTIVNOG OTPADA .....                            | 8   |
| 3.1. Izvori radioaktivnog otpada .....                            | 9   |
| 4. NUKLEARNE ELEKTRANE .....                                      | 10  |
| 4.1. Princip rada nuklearne elektrane .....                       | 10  |
| 4.2. Nuklearni reaktor .....                                      | 11  |
| 4.3. Nuklearni gorivni ciklus .....                               | 12  |
| 4.3.1. Privremeno skladištenje istrošenog nuklearnog goriva ..... | 12  |
| 4.3.2. Prerada istrošenog nuklearnog goriva.....                  | 14  |
| 5. TEHNOLOGIJA ZBRINJAVANJA RADIOAKTIVNOG OTPADA.....             | 18  |
| 5.1. Predobrada radioaktivnog otpada.....                         | 18  |
| 5.2. Obrada radioaktivnog otpada.....                             | 19  |
| 5.3. Kondicioniranje radioaktivnog otpada .....                   | 21  |
| 5.4. Transport radioaktivnog otpada .....                         | 22  |
| 6. ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA.....                            | 27  |
| 6.1. Izbor lokacije odlagališta.....                              | 28  |
| 6.2. Načini odlaganja radioaktivnog otpada .....                  | 29  |
| 6.3. Odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada .....         | 30  |
| 6.3.1. Površinsko odlaganje .....                                 | 30  |
| 6.3.2. Pripovršinsko odlaganje .....                              | 32  |
| 6.3.3. Podzemna odlagališta.....                                  | 33  |
| 6.3.4. Odlaganje visoko radioaktivnog otpada.....                 | 34  |



|   |    |
|---|----|
| 6.3.5. Odlaganja u dubokim geološkim formacijama .....        | 35 |
| 6.4. Utjecaj odlagališta radioaktivnog otpada na okoliš ..... | 38 |
| 7. RADIOAKTIVNI OTPAD U REPUBLICI HRVATSKOJ.....              | 39 |
| 8. ZAKLJUČAK .....  | 41 |
| LITERATURA .....  | 42 |
| POPIS SLIKA .....   | 43 |
| POPIS TABLICA.....  | 44 |

## 1. UVOD

**Radioaktivnost** je proces u kojem se jezgre nestabilnih atoma spontano raspadaju, njihovim raspadom nastaju druge jezgre i oslobađa se energija u obliku zračenja. To je slučajan proces i ne može se točno znati kad će se pojedine jezgre raspasti. Radioaktivnost je često povezana s korištenjem nuklearne energije, ali je također prirodni fenomen. Iako ne razmišljamo o tome, radioaktivnost je sastavni dio našeg okoliša, odnosno jedan od okolišnih uvjeta.

Prirodnu radioaktivnost otkrio je Antoine Henri Becquerel 1896. uočivši da uranijeve soli emitiraju nevidljivo zračenje koje djeluje na fotografsku ploču kroz zaštitni papir te da pod utjecajem toga zračenja elektroskop gubi električni naboj.

Jedinica kojom se mjeri radioaktivnost nazivamo becquerel. Radioaktivnost od jednog becquerela označava raspad jedne atomske jezgre u sekundi.

Radioaktivno zračenje je zračenje nastalo kao posljedica spontanog raspada nestabilnih jezgra. Sastoji se od elementarnih čestica (alfa zrake i/ili beta zrake) ili elektromagnetskih valova malih valnih duljina.

Radionuklidi su vrste jezgri koje su radioaktivne i nestabilne. Takvih atoma ima svugdje: u tlu, u vodi, u zraku, u građevinskom materijalu, u biljkama i životinjama. Primarni radioaktivni elementi u prirodi su: uran, torij, kalij i njihovi radioaktivni derivati. I u naše su tijelo ugrađeni radionuklidi koji se neprestano raspadaju i zrače. Postoji oko 60 radionuklida koji su glavni izvori prirodne radioaktivnosti.

Radioaktivni raspad je spontani proces putem kojega nestabilne jezgre atoma emitiranjem energije prelaze u stabilniji oblik.

**Radioaktivni otpad** su 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 emitiranom tijekom navedenog procesa, isključujući radioizotope koji su nastali u završnoj fazi proizvodnje i koji se mogu koristiti u znanstvene, medicinske, poljoprivredne, trgovačke ili industrijske svrhe.

## 2. RADIOAKTIVNI OTPAD

Radioaktivni otpad podrazumijeva materijale koji nisu predviđeni za daljnje korištenje, a koji sadrže radioaktivne izotope takvih specifičnih aktivnosti koje premašuju granične vrijednosti propisane pripadajućom zakonskom regulativom. Njegova radioaktivnost će se s vremenom smanjivati te postati neznatna za nekoliko dana ili mjeseci, ali može ostati i opasno radioaktivno i do tisuća godina. Zbog toga je bitno pravilno obraditi i skladištiti otpad, ovisno o vrsti štetnosti radioaktivnog otpada.

### 2.1. Klasifikacija radioaktivnog otpada

Klasifikacija radioaktivnog otpada osnovni je alat za razvoj nacionalne strategije upravljanja radioaktivnim otpadom, kao i za planiranje i projektiranje tehnologija i odlagališta. Klasifikaciju radioaktivnog otpada moguće je napraviti na osnovi udjela radioaktivnog materijala u otpadu.

Međunarodno su općenito prihvaćene sljedeće kategorije:

- **Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO)** – sadrži zanemarivu specifičnu aktivnost pa nije opasan za okoliš i zdravlje pučanstva i može se zbrinjavati na isti način kao i standardni komunalni otpad.
- **Nisko radioaktivni otpad (NRAO)** – sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada, male specifične aktivnost i zanemariv udjel radionuklida s dugim vremenom poluraspada, a zbrinjava se u površinskim odlagalištima.
- **Srednje radioaktivni otpad (SRAO)** – otpad koji sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada zbrinjava se u površinskom odlagalištu, dok se otpad koji sadrži radionuklide s dugim vremenom poluraspada zbrinjava u (plitkim ili dubokim) podzemnim odlagalištima.
- **Visoko radioaktivni otpad** – sadrži velik udjel radionuklida u obliku fizijskih produkata i transuranskih (dugoživućih) elemenata koji se stvaraju u jezgri reaktora, a zbrinjava se u dubokim podzemnim odlagalištima.

Dodatno, nisko i srednjeradioaktivni otpad možemo podijeliti s obzirom na agregatno stanje na:

- **plinoviti** – radioaktivni plinovi koji se do raspadanja čuvaju u posebnim spremnicima.
- **tekući** – tekućine kontaminirane radionuklidima; za smanjenje volumena koristi se filtriranje, isparavanje i sušenje u bačvi (zagrijavanjem bačve izvlači se voda) i tako nastaje čvrsti i suhi talog.
- **čvrsti** – kontaminirane otpadne tvari (plastika, papir, krpe, osobna zaštitna oprema, alati i filterski ulošci). Kod čvrstog otpada koristi se dekontaminacija zbog cilja da se smanji zapremnina otpada.

Na slici (1) prikazana je približna volumna klasifikacija nisko, srednje te visoko radioaktivnog otpada. Iako visoko radioaktivni otpad čini svega 4% ukupnog volumena, a to je otprilike 10 000 t/god njegova radioaktivnost čini 95% sveukupne radioaktivnosti. Nasuprot njemu je nisko radioaktivni otpad koji čini 90% volumena ukupno proizvedenog otpada u svijetu, ali pri tome sadrži samo 1% radioaktivnosti.



Sl. 1 Volumna klasifikacija radioaktivnog otpada

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/klasifikacija-radioaktivnog-otpada/>

Prema vremenu poluraspada (vrijeme za koje se raspadne polovina početnog broja jezgara), 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 kratkoživi otpad. U drugu kategoriju spada otpad čiji izotopi imaju vrijeme poluraspada veće od 30 godina i naziva se dugoživi otpad.

Tab. 1 Vrijeme poluraspada odabranih radioaktivnih izotopa

| Ime           | Simbol                        | Vrijeme poluraspada |
|---------------|-------------------------------|---------------------|
| ugljik-14     | $^{14}_6\text{C}$             | 5730 godina         |
| kobalt-60     | $^{60}_{27}\text{Co}$         | 5,3 godina          |
| vodik-3       | $^3_1\text{H}$                | 12,3 godina         |
| jod-131       | $^{131}_{53}\text{J}$         | 8,1 dan             |
| stroncij-90   | $^{90}_{38}\text{Sr}$         | 28 godina           |
| tehnicij-99 m | $^{99\text{m}}_{43}\text{Te}$ | 6 sati              |
| uranij-235    | $^{235}_{92}\text{U}$         | 710 milijuna godina |

### 2.1.1. IAEA

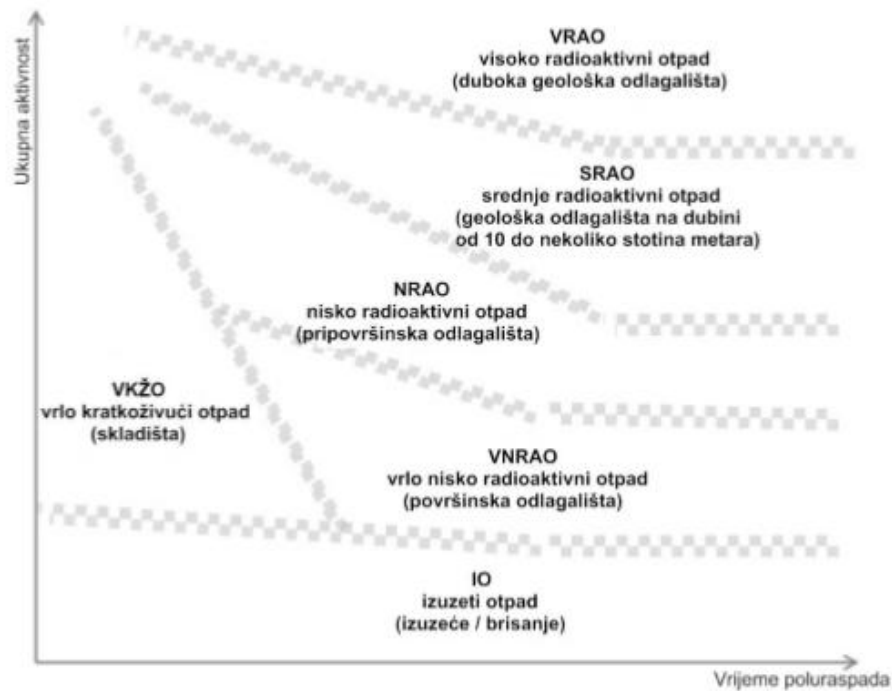
IAEA ( International Atomic Energy Agency) je agencija osnovana 1957. Godine u sklopu organizacije Ujedinjenih Naroda čiji je cilj suradnja na području nuklearne energije između država članica, te promoviranje sigurnog korištenja nuklearne tehnologije. Agencija redovito izdaje preporuke i smjernice državama članicama koje potom te preporuke uključuju u svoju nacionalnu regulativu. Tako je izdana preporuka klasifikacije radioaktivnog otpada čiji je cilj prvenstveno dugoročna sigurnost, odnosno uspješna strategija odlaganja otpada. Shema klasifikacije radioaktivnog otpada modificirana je kroz rad agencije nekoliko puta kako bi se ispravili nedostaci, te primijenila nova iskustva stečena kroz razvoj i rad postrojenja za odlaganje radioaktivnog otpada.

Prema dokumentu „Classification of Radioactive Waste“ ( IAEA, 2009. ) radioaktivni otpad, s obzirom na koncentraciju aktivnosti ili ukupnu aktivnost i vrijeme poluraspada radionuklida sadržanih u radioaktivnom otpadu, svrstava se u sljedeće razrede:

Tab. 2 Klasifikacija radioaktivnog otpada (IAEA, 2009)

|  |   |
|--|---|
| <b>Izuzeti otpad (IO)</b>                    | Otpad koji zadovoljava kriterije za brisanje, izuzeće ili isključenje iz regulatornog nadzora za zaštitu od zračenja.   |
| <b>Vrlo kratkoživići otpad (VKRAO)</b>       | Otpad koji može biti skladišten radi raspada tijekom ograničenog perioda do nekoliko godina te postupno brisan iz regulatornog nadzora. Sadrži radionuklide s vrlo kratkim vremenom poluraspada često korištenim u istraživanjima u medicinske svrhe.   |
| <b>Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO)</b> | Nije potrebna izolacija većeg stupnja. Prikladno skladištenje na površinskim odlagalištima s ograničenom regulatornom kontrolom.  |
| <b>Nisko radioaktivni otpad (NRAO)</b>       | Otpad koji sadrži ograničenu količinu dugoživićih radionuklida. Takav otpad zahtjeva izolaciju visokog stupnja te odlaganje na period od nekoliko stotina godina. Prikladan za odlaganje u površinskim odlagalištima. Ovaj razred sadrži široki spektar otpada. Od kratkoživićih radionuklida do s višom koncentracijom aktivnosti do dugoživićih radionuklida s relativno niskim stupnjem koncentracije aktivnosti.  |
| <b>Srednje radioaktivni otpad (SRAO)</b>     | Otpad, koji zbog svog sastava, djelomično od dugoživićih radionuklida, zahtjeva veći stupanj izolacije nego što je moguće postići kod površinskih odlagališta. Međutim kod otpada ovog razreda nije potrebna briga zbog otpuštanja topline tijekom skladištenja i odlaganja. Može sadržavati dugoživiće radionuklide, pogotovo koji emitiraju alfa zračenje, te koji se neće raspasti do stupnja koncentracije aktivnosti koji je prihvatljiv za odlaganje u površinskim odlagalištima tijekom vremena u kojem se možemo osloniti na institucionalni nadzor. Stoga otpad ovog razreda zahtjeva odlaganje na većim dubinama, reda veličine od nekoliko desetaka pa do nekoliko stotina metara. |
| <b>Visoko radioaktivni otpad (VRAO)</b>      | Otpad čiji je stupanj koncentracije aktivnosti dovoljno visok da generira značajne količine topline nastale procesom radioaktivnog raspada ili otpad s velikim količinama dugoživićih radionuklida na što treba obratiti pozornost prilikom projektiranja odlagališta za takav otpad. Mogućnost odlaganja u dubokim, stabilnim geološkim formacijama najčešće na dubini od nekoliko stotina ili više metara ispod površine.   |

Konceptualna ilustracija klasifikacijske sheme prikazana je na Slici 2. Os ordinata predstavlja ukupnu aktivnost otpada dok os apscisa predstavlja vrijeme poluraspada radionuklida u otpadu.



Sl. 2 Grafički prikaz sheme klasifikacije RAO (IAEA, 2009)

Izvor: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419_web.pdf)

### 2.1.2. Klasifikacija radioaktivnog otpada u Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj radioaktivni otpad je klasificiran prema Pravilniku o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora (NN, 12/2018). Klasifikacija radioaktivnog otpada u Hrvatskoj podudara se s klasifikacijom IAEA 2009.

S obzirom na tipična svojstva radioaktivnog otpada te predviđeni način zbrinjavanja, otpad se razvrstava u klase prikazane u tablici (3).

Tab. 3 Klasifikacija radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj (NN, 12/2018)

| <b>Klasa</b>                                      | <b>Tipična svojstva</b>   | <b>Načini zbrinjavanja</b>  |
|---|---|---|
| <b>Otpušteni radioaktivni otpad (ORAO)</b>        | Radioaktivni otpad koji udovoljava uvjetima za otpuštanje iz regulatornog nadzora.  | Otpuštanje iz regulatornog nadzora. Jednom otpušten iz nadzora ovaj se materijal više ne smatra radioaktivnim otpadom.  |
| <b>Vrlo kratkoživi radioaktivni otpad (VKRAO)</b> | Sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 100 dana.  | Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom otpuštanje iz regulatornog nadzora. Ovom radioaktivnom otpadu će se skladištenjem kroz nekoliko godina koncentracija aktivnosti smanjiti na ili ispod vrijednosti propisanih u Prilogu 1 ovog Pravilnika.                   |
| <b>Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO)</b>      | Radioaktivni otpad s većim koncentracijama aktivnosti od VKRAO. Koncentracije dugoživućih radionuklida u ovoj kategoriji su zanemarive.   | Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom otpuštanje iz regulatornog nadzora. Ovom radioaktivnom otpadu će se skladištenjem kroz nekoliko desetaka godina granične koncentracija aktivnosti smanjiti na ili ispod vrijednosti propisanih u Prilogu 1 ovog Pravilnika. |
| <b>Nisko radioaktivni otpad (NRAO)</b>            | Radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 30 godina i ograničene koncentracije aktivnosti dugoživućih radionuklida (4.000 Bq/g u pojedinom pakiranju, odnosno 400 Bq/g za kompletnu masu radioaktivnog otpada). Proizvodnja topline u ovom otpadu niža je od 2 kW/m <sup>3</sup> . | Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u površinskom ili podzemnom odlagalištu.  |
| <b>Srednje radioaktivni otpad (SRAO)</b>          | Radioaktivni otpad koji sadrži veće koncentracije aktivnosti od NRAO.   | Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu na dubini od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara ispod površine.   |
| <b>Visoko radioaktivni otpad (VRAO)</b>           | Radioaktivni otpad u kojemu je proizvodnja topline iznad 2 kW/m <sup>3</sup> .  | Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu smještenom u stabilnoj geološkoj formaciji na dubini od nekoliko stotina metara ispod površine.   |



### 3. NASTANAK RADIOAKTIVNOG OTPADA

Svaki rad s radionuklidima stvara radioaktivni otpad. Ljudi koriste radionuklide u različitim djelatnostima: u industriji, medicini, istraživanjima, znanosti, poljoprivredi, a najviše otpada stvara se prilikom proizvodnje nuklearne energije.

**Industrija:** detektori dima, istrošeni gromobrani, eksploatacija ruda (iskopavanja, obrade te korištenja ugljena, prirodnog plina i fosfatnih ruda uzrokuje stvaranje velikih količina nisko radioaktivnog materijala koje posljedično treba odložiti), kao i ostali uređaji koji nisu u upotrebi, a sadrže radioaktivne izvore. Radioaktivnost ima primjenu i u mjerenju gustoće vlage, industrijskoj radiografiji, sterilizaciji hrane, brojanju i mjerenju mase na tekućoj traci, te u energetici (proizvodnja električne energije).

**Medicina:** dijagnostika (SPECT, PET, CT, MR), liječenje malignih bolesti, nuklearna medicina, radioterapija. Pacijentu se najprije injektira radioaktivni izotop s kratkim vremenom poluraspada, a nakon toga je upotrebom specijalne opreme moguće vizualizirati i snimiti aktivnost odrađenog organa, naprimjer mozga. Koristi se za liječenje od kratkoživućih izotopa  $^{131}\text{I}$  i  $^{90}\text{Y}$ , a u dijagnostici  $^{18}\text{F}$  i  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Pri svim tim aktivnostima nastaje radioaktivni otpad koji traži poseban tretman. Radioaktivni otpad nastaje uporabom radioaktivne tvari. U medicini to mogu biti istrošeni izvori zračenja, epruvete, igle, štrcaljke, ampule, rukavice i ostala zaštitna odjeća na kojima su ostali tragovi radioaktivne tvari. Tjelesne tekućine, sekrete i ekskrete pacijenata kojima je apliciran radionuklid.

Po položaju izvora zračenja u odnosu na pacijenta terapije ionizirajućim zračenjem možemo podijeliti na:

- **teleterapiju** - zatvoreni izvor zračenja izvan pacijenta
- **brahiterapiju** - zatvoreni radioaktivni izotop precizno postavljen u ili blizu tretiranog mjesta
- **terapiju otvorenim radioaktivnim izotopima** - otvoreni radioaktivni izotop apliciran pacijentu infuzijom ili oralno

**Znanost:** eksperimenti u kojima se koriste izvori ionizirajućeg zračenja, istraživanje svemira, određivanje starosti arheoloških nalaza, istraživanje utjecaja na živa bića, aktivacijska analiza.

**Poljoprivreda:** radioizotopi se primjenjuju za rast usjeva, u stočarstvu i u sterilizaciji kod prehrambene industrije.

**Vojne aktivnosti:** proizvodnja oružja i opreme, njihova razgradnja i testiranje, nuklearni pogon.

Izvorima zračenja, koji sadrže radionuklide, vremenom se smanjuje intenzitet (ovisno o poluživotu korištenog radionuklida). Takvi se izvori zračenja u radioterapijskim napravama, radioaktivnim gromobranima ili mjernim spravama u industriji povremeno zamjenjuju novima. Iskorišteni izvori zračenja obično su još uvijek toliko aktivni da ih smatramo radioaktivnim otpadom. Štoviše, nekima od njih aktivnost je tako velika da ih ubrajamo u srednjeaktivni otpad.

Neki se radionuklidi koriste kao otvoreni izvori zračenja, što znači da nisu posve izolirani od okoline, naprimjer u zatvorenim posudama. U postupku njihove pripreve i korištenja nastaje radioaktivni otpad koji se najvećim dijelom sastoji od radioaktivnih šprica, kontaminiranih rukavica ili epruveta koje se koriste u laboratorijima. Taj je otpad u pravilu niskoaktivan.

### 3.1. Izvori radioaktivnog otpada

- NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) je pojam koji obuhvaća radioaktivne materijale koji se mogu naći u prirodi. Dijele se u dvije skupine, zemljine izvore i kozmičke izvore. Zemljini izvori čine većinu ove skupine i u njih su svrstani minerali koji sadrže uran, torij, cirkon i elemente rijetkih zemalja. U kozmičke izvore spada radioaktivno zračenje odnosno pozadinsko zračenje iz svemira, kod kojeg se dio radioaktivnih zraka odbija ( reflektira ) od Zemljinog magnetskog polja pri čemu samo mali dio uspije prodrijeti na površinu Zemlje.
- TENORM je „tehnološki poboljšani“ NORM. Pod pojmom TENORM-a obuhvaćeni su svi radioaktivni materijali čija je radioaktivnost povećana (koncentrirana) industrijskim i tehnološkim procesima, kao npr. jalovina nastala pri eksploataciji i obogaćivanju urana, proizvodnji nafte i plina, mineralnih gnojiva i slično.

## 4. NUKLEARNE ELEKTRANE

Nuklearne elektrane su postrojenja u kojima se energija fisije atoma transformira u električnu energiju i to posredstvom toplinske energije proizvedene u nuklearnom reaktoru. Toplina koja se dobiva ovim postupkom služi za proizvodnju pare koja pokreće parnu turbinu spojenu na električni generator.

Najviše radioaktivnog otpada stvara se radom nuklearnih elektrana i u svim fazama nuklearnog gorivnog ciklusa, počevši od kopanja uranske rude do razgradnje nuklearnih postrojenja:

- rudarenje uranovih ruda,
- proces obogaćivanja urana za korištenje u nuklearnim reaktorima,
- reprociranje goriva – fisijski produkti koji nastaju u procesu prerade istrošenog nuklearnog goriva
- nuklearni otpad nastao tijekom pogona, održavanja i razgradnje nuklearnih elektrana (istrošeno nuklearno gorivo i pogonski otpad uključuje različite dijelove opreme, otpad nastao pročišćavanjem vode i plinova te različitu zaštitnu opremu).

### 4.1. Princip rada nuklearne elektrane

Toplinska se energija u nuklearnoj elektrani iskorišćuje slično kao i u svakoj termoelektrani, posredstvom Rankineova kružnog procesa voda – para u parnoj turbini.

Da bi se oslobodila dovoljna količina energije nužno je koristiti moderatore nuklearne reakcije. U nuklearnim elektranama kao moderator se najčešće koristi teška voda koja je dobila takav naziv zato što je teža od obične vode za otprilike 10%, ali još se može koristiti i obična voda, grafit, itd. Takva vrsta vode koristi se zbog toga što teška voda sadrži veću koncentraciju deuterija, izotopa atoma vodika. U trenutku sudara slobodnog neutrona i atoma urana  $U - 235$  dolazi do cijepanja atoma  $U - 235$  na dva manja atoma i nekoliko slobodnih čestica uz oslobađanje ogromne količine energije. Teška voda koja se nalazi unutar reaktora skuplja tu energiju u obliku topline i prenosi je do rezervoara koji sadrži običnu vodu.

Obična voda tom se prilikom pretvara u paru koja pokreće turbine rotora generatora električne energije. Para se zatim nakon prolaska kroz turbine hladi i vraća u reaktor.

U tom je smislu nuklearna elektrana u osnovi termoelektrana, samo što se u njoj toplinska energija ne proizvodi izgaranjem fosilnih goriva, nego fisijom atoma urana i plutonija. Gorivni elementi reaktora u kojima se odvija proces fisije i u kojima se neposredno oslobađa toplinska energija, imaju najvišu temperaturu u nuklearnoj elektrani. Ti elementi sadrže ujedno i fisijske proizvode, a time i najveći dio radioaktivnosti u postrojenju.

#### **4.2. Nuklearni reaktor**

Nuklearni reaktor je uređaj u kojem se zbiva kontrolirana lančana reakcija. Postoji nekoliko podjela energetske nuklearne reaktora. Dije se ili prema tipu fisije koja se koristi, ili prema vrsti goriva, hladioca i moderatora.

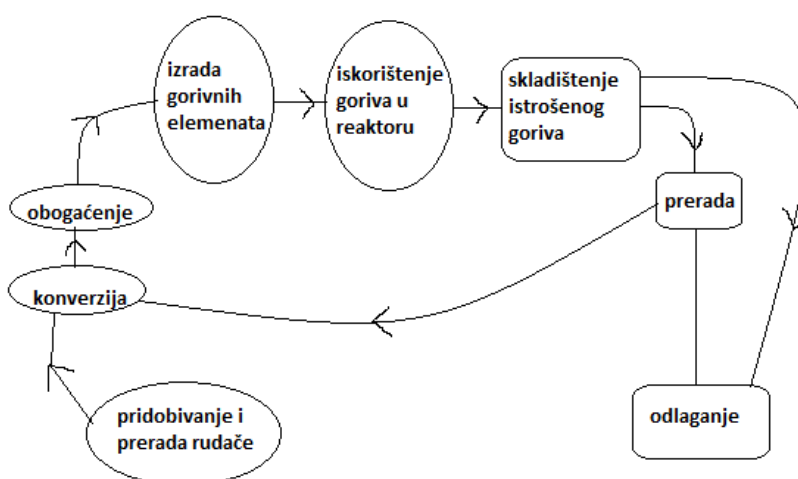
Nuklearni reaktori koriste se u nuklearnim elektranama za proizvodnju električne energije i za pogon brodova. Neki reaktori se koriste za izradu izotopa za medicinsku i industrijsku upotrebu, ili za proizvodnju plutonija koji se koristi za oružje. Neki se koriste samo za istraživanje za dobivanje radioaktivnih izotopa i pokuse s neutronske zračenjem

U nuklearnim procesima u reaktoru stvara se u gorivu velika količina umjetnih radionuklida (od kojih je većina mnogo aktivnija od uranija), a radioaktivnost u trenutku vađenja iz reaktora je oko  $10^9$  x veća nego pri ulasku goriva u reaktor. Radioaktivnost poslije vađenja nuklearnog goriva iz reaktora se smanji nekoliko puta isti dan, više od sto puta u prvoj godini, te oko dvadeset puta u sljedećih sto godina.

Radom nuklearnog reaktora nastaju radioaktivni fisijski produkti čije bi ispuštanje ugrozilo stanovništvo i okoliš. Stoga se pri projektiranju, izgradnji i pogonu nuklearnih reaktora velika pažnja posvećuje njihovoj sigurnosti.

### 4.3. Nuklearni gorivni ciklus

Nuklearni gorivni ciklus su svi tehnološki postupci koji se primjenjuju u procesu proizvodnje električne energije iz nuklearnih elektrana. To su aktivnosti kojima se dobiva sirovina za gorivo, izrađuje gorivo, upravlja njegovim korištenjem i brine o iskorištenom gorivu, što uključuje spremanje, preradu i odlaganje radioaktivnog otpada.



Sl. 3 Shema nuklearnog gorivnog ciklusa

Izvor: <https://www.google.com/imghp?hl=hr>

#### 4.3.1. Privremeno skladištenje istrošenog nuklearnog goriva

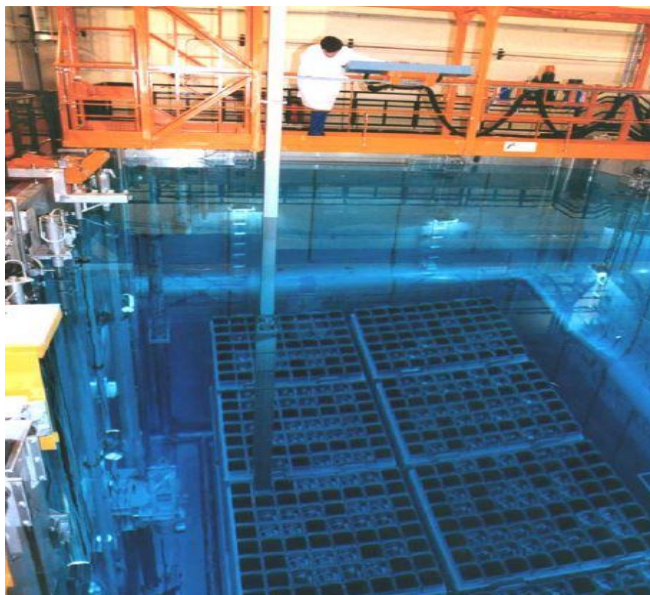
Kod zbrinjavanja radioaktivnog otpada javljaju se dva različita pojma: "skladištenje" i "odlaganje". Skladište služi za čuvanje radioaktivnog otpada na određeno vrijeme (10 do 100 godina) pod stalnim aktivnim nadzorom, nakon čega se radioaktivan otpad uklanja iz skladišta, a skladište se razgradi, dok odlagalište služi za zbrinjavanje otpada na neograničeno vrijeme, bez namjere da ga se ikad vadi.

Nakon što je istrošeno gorivo, odnosno visokoaktivni otpad izvađen iz reaktora, privremeno se odlaže i hladi u bazenu za istrošeno gorivo.

Privremeno skladištenje podrazumijeva čuvanje radioaktivnog otpada pri čemu se radioaktivnost s vremenom smanjuje, pa je transport i rukovanje lakše i sigurnije.

Dva su načina privremenog skladištenja visoko radioaktivnog otpada:

- **Mokro skladištenje** je držanje iskorištenih elemenata u bazenu s vodom u krugu nuklearne elektrane (Slika 4.). Dubine bazena su uglavnom 12 do 15 metara, a napunjeni su bornom vodom koja štiti od intenzivnog zračenja, djeluje kao sredstvo za hlađenje te kao medij za apsorpciju neutrona iz zaostale fisije. Zidovi i dno bazena obloženi su nehrđajućim čelikom zbog sprečavanja od korozije. Istrošeno nuklearno gorivo u bazenu se drži najmanje pet godina nakon čega mogu biti podvrgnuti suhom skladištenju, preradi ili trajnom odlaganju.



Sl. 4 Bazen s istrošenim gorivom

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/skladistenje-ing-a-i-vrao-a/>

- **Suho skladištenje** služi za držanje gorivih elemenata koji su proveli najmanje 5 godina u bazenima za hlađenje ili ako je kapacitet bazena nedovoljan za sve istrošeno gorivo tijekom rada elektrane. Iskorišteno gorivo nalazi se u plinovitom stanju. Ohlađeni se gorivni elementi mogu staviti u posebno napravljene masivne kontejnere i odložiti u suha odlagališta. Gorivo se u suhim spremištima može skladištiti stotinjak godina. Suho spremište može biti na lokaciji elektrane ili izvan nje. U svijetu su dostupni različiti dizajni spremnika i sustava za suho skladištenje, ali zajedničko svojstvo im je da osiguravaju integritet goriva, održavajući gorivo u potkritičnom stanju te predstavljaju barijeru ispusta radioaktivnosti.



Sl. 5 Spremnik za iskorišteno nuklearno gorivo kod suhog skladištenja

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/skladistenje-ing-a-i-vrao-a/>

#### 4.3.2. Prerada istrošenog nuklearnog goriva

Nakon što je gorivo odležalo propisani period vremena u bazenu za hlađenje, slijedi reprocesiranje (prerada) u posebnim tehnološkim postrojenjima.

Osnovna svrha prerade istrošenog goriva sastoji se u izdvajanju urana i plutonija, te neželjenih fisijskih produkata i aktinida i to radi njihove ponovne uporabe, čime taj gorivni ciklus postaje zatvoren. Tako nastaje MOX gorivo koje se ponovo koristi u nuklearnim reaktorima. Takva vrsta reprocesiranja proizvodi velike količine otpada, a jedan dio predstavlja visoko radioaktivna tekućina koja treba biti propisno kondicionirana (najčešće vitrifikacija) prije odlaganja.

Ako se istrošeno gorivo ne reciklira tada govorimo o otvorenom ciklusu te takvo gorivo ide na trajno odlaganje. Ipak, prije samog odlaganja istrošenog nuklearno gorivo se privremeno skladišti radi hlađenja u vremenu od 40 do 50 godina kako bi se ujedno smanjila radioaktivnost, također i pružilo dovoljno vremena za gradnju odgovarajućeg odlagališta. Neke zemlje planiraju povećati vremenski period skladištenja istrošenog nuklearnog goriva na 50 do 100 godina.

Prerada istrošenog goriva iskorištava se u različite svrhe: izdvajanje urana za ponovno obogaćivanje, stvaranje plutonija za izradu nuklearnog oružja, izdvajanje plutonija za proizvodnju MOX goriva, te se time dobiva 25% do 30% više energije iz originalnog goriva i doprinosi općoj energetskej sigurnosti, također se i izdvajaju korisni radionuklidi koji se mogu koristiti u industriji i medicini.

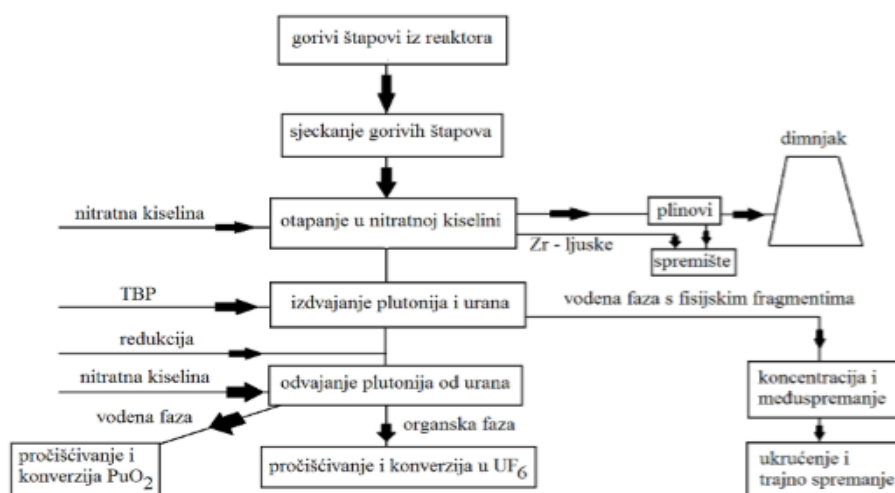
Sam postupak prerade uključuje demontiranje istrošenih gorivnih elemenata, rezanje gorivnih šipki, odvajanje materijala obloge, otapanje gorivnih tableta dušičnom kiselinom i odvajanje urana i plutonija kemijskim PUREX postupkom koji omogućuje iznimno visoku purifikaciju i separaciju fisibilnih izotopa.

Uran izdvojen u postupku prerade istrošenog nuklearnog goriva prevodi se u formu uranovog heksafluorida, zatim se prevozi u postrojenje za obogaćenje i potom u postrojenje za proizvodnju svježeg uranskog goriva.

Plutonij izdvojen u procesu, prerađuje se u formu oksida  $\text{PuO}_2$  od kojega se mogu izrađivati gorivne tablete za gorivne šipke termičkih ili brzih oplodnih reaktora odnosno za izradu MOX goriva.

Najpoznatija metoda za preradu istrošenog goriva je PUREX metoda. Ona omogućuje iznimno visoku čistoću i separaciju fisibilnih izotopa u svrhu proizvodnje MOX goriva koje se daljnje koristi u nuklearnim reaktorima. Ostale metode za preradu istrošenog goriva:

UREX metoda, TRUEX metoda, UNEX metoda i SANEX metoda.

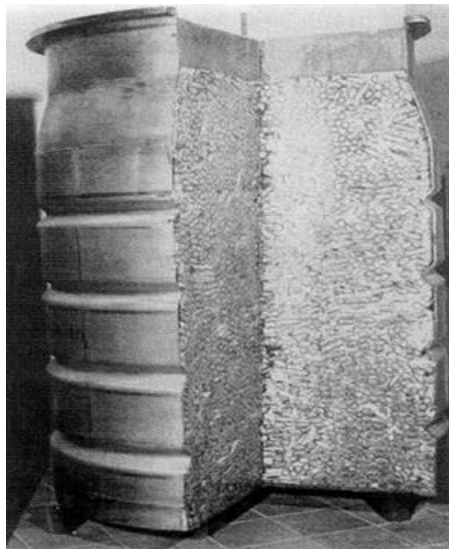


Sl. 6 PUREX metoda

Izvor: <http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivni-otpad/prerada-istrošenog-goriva.html>



Proces prerade istrošenog nuklearnog goriva započinje demontiranjem istrošenih gorivnih elemenata i rezanjem njegovog kostura i gorivnih šipki. Na taj se način izdvajaju materijali gorivnih elemenata kontaminirani visokim sadržajem aktivacijskih produkata kao što su  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Co}$  i drugi. Izdvojeni radioaktivni materijali najčešće spadaju u kategoriju srednjeaktivnog otpada koji se sprema u posebne metalne kontejnere i imobilizira cementnom ispunom čime se postiže vrlo stabilna fizička i kemijska forma otpada, otporna na koroziju i izlučivanje radionuklida koja je pogodna za skladištenje, transport i za odlaganje. Slika (7) prikazuje presjek jednog takvog metalnog kontejnera s kondicioniranim strukturnim otpadom koji se koristi u postrojenju za preradu Sellafield u Velikoj Britaniji.



Sl. 7 Kontejner s kompaktiranim strukturnim otpadom

Izvor: <http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivni-otpad/prerada-istrošenog-goriva.html>

Nakon izdvajanja urana i plutonija iz kisele otopine preostaju u njoj fizijski i transmutacijski produkti visoke radioaktivnosti kao što su  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{242}\text{Cm}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{241}\text{Am}$ . Ovaj tekući visokoaktivni otpad se postupkom **vitifikacije** pretvara u kompaktnu i stabilnu formu, za potrebe konačnog odlaganja te kako bi se spriječilo njihovo izlučivanje u zemlju i podzemne vode. Vitificiranjem otpad ne postaje manje aktivan, pa se ne umanjuje ni toplina koju proizvodi. Imobiliziraju se tako što se miješaju s rastaljenom staklenom masom, dobivena masa koja sadrži radioaktivni materijal se odlaže u čelične spremnike otporne na koroziju koji se hlade zbog ostatne topline na toj samoj lokaciji postrojenja za obradu istrošenog goriva te se zatim transportiraju nazad vlasniku otpada.

Vitrificirani otpad sadrži 98% ukupne radioaktivnosti iz istrošenog goriva, pa prilikom njegova skladištenja treba uvažavati vrlo stroge kriterije sigurnosti i zaštite kao i za slučaj skladištenja neprerađenog istrošenog nuklearnog goriva.

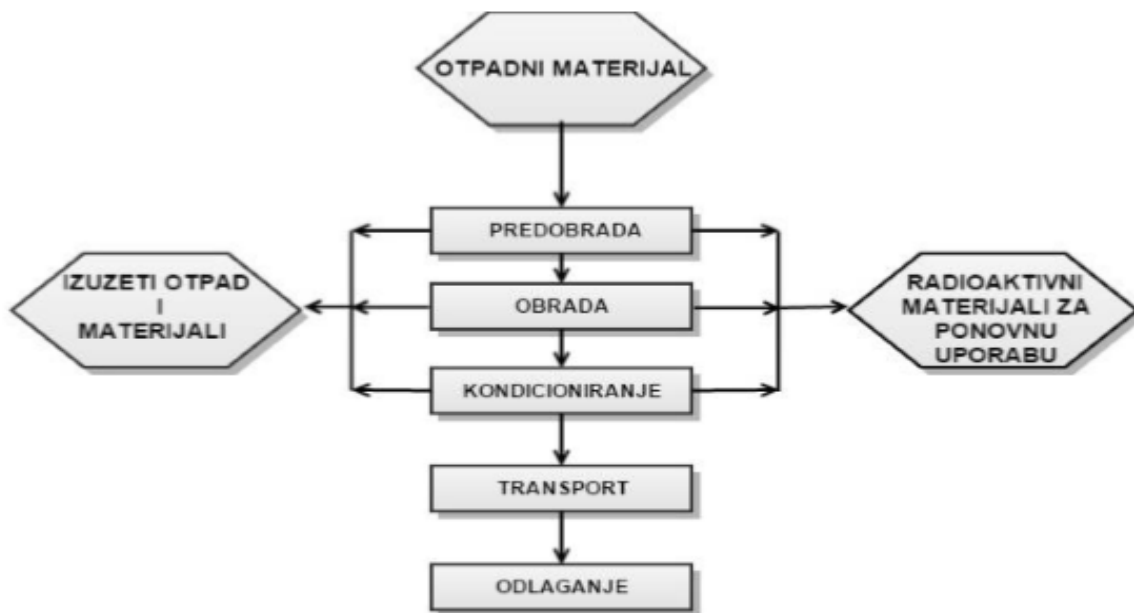


Sl. 8 Spremnici s vitrificiranim materijalom

Izvor: <http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivni-otpad/prerada-istrošenog-goriva.html>

## 5. TEHNOLOGIJA ZBRINJAVANJA RADIOAKTIVNOG OTPADA

Odlaganje radioaktivnog otpada je završna faza gospodarenja otpadom, a toj fazi prethodi priprema otpada za odlaganje, koja se sastoji četiri koraka kao što možemo vidjeti na slici (9); predobrada, obrada, kondicioniranje i transport radioaktivnog otpada.



Sl. 9 Operativni koraci zbrinjavanja otpada  
Izvor: <https://www.google.com/imghp?hl=hr>

### 5.1. Predobrada radioaktivnog otpada

Predobrada radioaktivnog otpada početni je korak koji se sastoji od sakupljanja i razvrstavanja otpada, te dekontaminacije i manjeg kemijskog prilagođavanja, a može uključivati i vrijeme privremenog skladištenja. Osobito je važna jer je u pravilu upravo tada najbolja prilika za moguće izdvajanje materijala za recikliranje, kao i otpada koji nije potrebno smatrati radioaktivnim. Na slici (10) možemo vidjeti razvrstavanje otpadnih radioaktivnih materijala zbog potreba kasnijeg odlaganja na kratkoživući i dugoživući jer se različito skladište.



Sl. 10 Razvrstavanje otpadnih radioaktivnih materijala

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/predobrada-i-obrada/>

## 5.2. Obrada radioaktivnog otpada

U procesu obrade zadatak je povećati sigurnost i ekonomičnost pohranjivanja otpada promjenom njegovih osobina. Temeljni koncepti obrade su smanjivanje obujma otpada, uklanjanje radionuklida i promjena sastava otpada. Tipične operacije kojima se to postiže uključuju spaljivanje gorivog otpada i prešanje suhog otpada koji služe za smanjivanje volumena radioaktivnog otpada, zatim operacije isparavanja ili propuštanja tekućeg otpada kroz filtere i ionske izmjenjivače koje služe za uklanjanje radionuklida te izdvajanje radionuklida. Također tu ubrajamo i precipitaciju ili flokulaciju koje služe za promjenu sastava radioaktivnog otpada. Za dekontaminaciju tekućeg otpada često treba kombinirati nekoliko spomenutih postupaka, a u procesu može nastati sekundarni otpad, kao mulj, filteri i ostalo.

Tab. 4 Postupci smanjenja volumena nisko i srednje radioaktivnog otpada

| Postupak                              | Tvari za koje se koristi postupak                     | Faktor smanjenja volumena |
|---------------------------------------|---|---------------------------|
| Sabijanje u bačvu niskotlačnom prešom | Tkanina, plastika, lim, kabeli, sitna oprema          | Do 4 puta                 |
| Super-kompaktiranje bačvi             | Tkanina, plastika, papir, lim, manji metalni dijelovi | Do 10 puta                |
| Paljenje                              | Sve zapaljive tvari                                   | Do 30 puta                |
| Rezanje                               | Sve tvari   | Do 2 puta                 |

**Spaljivanjem** zapaljivog krutog nisko ili srednje aktivnog otpada obično se postiže najviši stupanj smanjenja obujma, a pri tome se dobije i stabilniji oblik otpada. Produkti spaljivanja na koje treba obratiti pažnju su kiseline, poliklorirani bifenili (PCB) i razne druge tvari koje ne predstavljaju radioaktivnu opasnost, ali su jednako opasni za ljude i okoliš.



Sl. 11 Peć za spaljivanje radioaktivnog otpada

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/predobrada-i-obrada/>

**Zbijanje** (kompaktiranje) je pogodna metoda za smanjenje volumena nisko i srednje radioaktivnog otpada. Metoda zbijanja otpada u bačvama je prikladna za čvrsti stlačivi otpad, a u određenim slučajevima za oblaganje tako zbijenog otpada može se koristiti i cementna smjesa. Kompaktiranjem se volumen radioaktivnog otpada može smanjiti do 5 puta, uz porast specifične aktivnosti. Metoda kompaktiranja vrši se u kompaktoru, kojeg vidimo na slici (12).



Sl. 12 Kompaktor

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/predobrada-i-obrađa/>

### 5.3. Kondicioniranje radioaktivnog otpada

Nakon obrade nisko i srednje radioaktivni otpad je potrebno prije pohranjivanja u skladišta kondicionirati. Kondicioniranje radioaktivnog otpada čine operacije kojima se otpad prevodi u oblik prikladniji za rukovanje, prijevoz, skladištenje i odlaganje. To su operacije imobiliziranja i pakiranja.

Postupak imobilizacije (Slika 13) tekućeg otpada predstavlja zalijevanje u bitumensku ili betonsku matricu (solidifikacija) za otpad manje radioaktivnosti (nisko i srednje radioaktivan otpad), odnosno u staklenu matricu (vitifikacija ili ostakljivanje) za visokoaktivni otpad. Cementiranje je prikladno za kondicioniranje otpada koji sadrži dugoživeće radionuklide kao što su mulj nastao taloženjem i istrošeni ionski izmjenjivači.





Sl. 13 Postupak imobilizacije-solidifikacija

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/kondicioniranje-rao-a/>

Solidifikacijom se treba postići kompatibilnost (fizička i kemijska) otpada, matrice spremnika, homogenost, mala propusnost, kemijska, toplinska, strukturna, mehanička i radijacijska stabilnost za 1 dani vremenski period, otpornost na kemijske tvari i organizme.

Imobilizirani i drugi kruti otpad obično se pakira u spremnike različitih vrsta, od standardnih dvjestolitarskih čeličnih bačvi, do posebno konstruiranih spremnika s debelim stijenkama, ovisno o vrstama i koncentraciji radionuklida, uz eventualno zapunjavanje materijalima odgovarajućih svojstava .

#### **5.4. Transport radioaktivnog otpada**

Transport podrazumijeva namjerno fizičko kretanje otpada u specijalno dizajniranom pakiranju s jednog mjesta na drugo. Recimo neobrađen otpad može biti transportiran s mjesta prikupljanja do skladišta ili postrojenja za obradu. Kondicionirani otpad može biti transportiran od postrojenja za obradu do lokacije odlaganja. Najčešći načini transporta otpada su kamionima, tankerima i željeznicom.

Svaki tip pošiljke radioaktivnog otpada podliježe strogim propisima koje je preporučila IAEA u suradnji s UN-om, zbog toga ova aktivnost ima uspješnu povijest od nekoliko desetljeća. U tom vremenu je dokazana pouzdanost: za 45 godina nije se desila niti jedna transportna nesreća koja bi prouzročila značajne radiološke utjecaje na čovjeka ili okoliš.

Transport radioaktivnih materijala je s obzirom na prostornu razdvojenost postrojenja (tvornica) koje sudjeluju u raznim fazama proizvodnje, obrade i odlaganja radioaktivnog otpada i nuklearnog goriva često međunarodnog karaktera i odvija se na velike udaljenosti, a obavljaju ga kompanije s potrebnom licencom. Prije transporta obavezno je provesti sigurnosne kontrole i mjerenja. Same institucije koje provode transport, odnosno koje se brinu o transportu moraju zadovoljiti međunarodne sigurnosne regulative, kao što je tehničko stanje prijevoznog sredstva, sam odabir rute, osposobljenost radne snage, dokumentaciju i ostalo. Radnici moraju poštivati pravila o gomilanju paketa i njihovom prostornom rasporedu.

S obzirom na prisutnost terorizma u modernom dobu, poduzimaju se razne mjere zaštite, od početne faze sigurnosne kontrole materijala i spremnika u tvornici preko sigurnosnih kontrola zaposlenika i osoblja pa sve do satelitskog praćenja pošiljki. U tom cijelom procesu štiti se sigurnost podataka koji se odnose na detalje transporta (dan, vrijeme, odredište i sl.) i teži se smanjenju ukupnog vremena potrebnog za transport takvih pošiljki.

Na paketima za prijevoz radioaktivnog materijala (u međunarodnom prijevozu) moraju se nalaziti standardizirane romboidne oznake minimalne veličine stranice 100 mm. U gornjoj polovici znaka mora se nalaziti znak za radioaktivnost otisnut crnom bojom. Oznake i boje u donjoj polovici ovise o vrsti radioaktivnog materijala koji se prevozi i razini radioaktivnosti na površini paketa. Ovisno o vrsti paketa koji se prevozi, naljepnice se stavljaju na vanjskom dijelu vozila na istaknutom mjestu.

Kategorija transporta označena je crvenim crticama:

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



Paketi moraju biti označeni i UN brojem i odgovarajućim natpisom o kojem se radioaktivnom materijalu radi. U slučaju prijevoza fisilnog materijala, paketi i pošiljke označavaju se posebnom oznakom i indeksom kritičnosti. U međunarodnim propisima o prijevozu opasnih tvari nuklearni i radioaktivni materijali su u klasi “7”.



Sl. 14 Transportne oznake radioaktivnog materijala

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/transport-nsrao-a/>

Za prijevoz radioaktivnog materijala obično se koriste sljedeći tipovi paketa (spremnika):

- **Industrijski paketi/kontejneri** - prijevoz materijala niske specifične aktivnosti
- **Paketi tipa A** - prijevoz manje količine radioaktivnog materijala umjerene veličine
- **Paketi tipa B(U) i B(M)** - prijevoz većih količina radioaktivnog materijala ili radioaktivnih materijala više aktivnosti
- **Paketi tipa C** - prijevoz radioaktivnog materijala zračnim putem
- **Izuzeti paketi** - prijevoz vrlo malih količina radioaktivnog materijala (npr. dojavljivači dima) koji predstavljaju vrlo malu radiološku opasnost

Transport radioaktivnih materijala u nuklearnoj industriji dijeli se na dva dijela: prednji i zadnji.

**Prednji dio** odnosi se na iskop uranove rude i proizvodnju svježih gorivnih elemenata. Materijali dolaze u raznovrsnim kemijskim spojevima i fizikalnim stanjima koji predstavljaju potencijalnu opasnost za okoliš.

Uranov koncentrata  $U_3O_8$  poznat pod nazivom „žuti kolač“, dobiva se kemijskom obradom uranove rude. Ima malu specifičnu aktivnost pa prema tome nema značajnije opasnosti za čovjeka.

Transportira se u standardnim 200 litarskim bačvama (Slika 15) koje se prenose u normalnim kontejnerima. Za ove aktivnosti pakiranja i transporta nije potrebna radiološka zaštita.



Sl. 15 Uranov koncentrat u standardnoj 200-litarskoj bačvi

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/transport/>

Uranov heksafluorid  $UF_6$  nastaje konvertiranjem uranovog koncentrata te emitira toksične plinove. Transportira se u velikim čeličnim cilindrima, 120 cm u promjeru, zapremnine preko 10 tona. Čelični cilindri moraju proći stroge testove i ispitivanja kako bi se na vrijeme otkrila oštećenja i defektni varovi.

Obogaćeni uranov heksafluorida  $UF_6$  se prevozi u manjim univerzalnim cilindrima i grupno su pakirani u posebnoj konstrukciji koja sprečava pojavu neželjene lančane reakcije. Svi konstrukcijski materijali su podvrgnuti raznim sigurnosnim testovima koji simuliraju moguće nesreće u stvarnosti – pad, požar, poplave, potonuće i slično.

**Zadnji dio** odnosi se na transport istrošenog nuklearnog goriva koji sadrži oko 96% urana, 1% plutonija i oko 3% fisijskih produkata.

Istrošeno nuklearno gorivo transportira se posebnim spremnicima u postrojenja za obradu ili odlaganje. Spremnici su masivne čelične konstrukcije, težine oko 100 tona, a ovisno o svom sadržaju, imaju certifikat tipa A, B ili C za transport cestom, željeznicom ili brodom.



Sl. 16 Transport spremnika istrošenog nuklearnog goriva

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/transport-ing-a/>

Od 2001. godine na snagu je stupio poseban međunarodni zakon za transport istrošenog nuklearnog goriva, plutonija i visokoaktivnog materijala putem mora. Zakon zahtjeva posebne brodove s oznakom INF (Irradiated Nuclear Fuel), te dizajn posebnih spremnika za radioaktivni materijal. Brodovi su svrstani u kategorije ovisno o razini radioaktivnosti koju prenose. Podjelu možemo vidjeti u tablici 5.

Tab. 5 Klasifikacija broda za transport radioaktivnog materijala

| Klasa broda           | Kriterij   |
|-----------------------|--|
| INF1                  | Brodovi sa certifikatom za prijevoz materijala sa aktivnosti manjom od 4000 TBq  |
| INF2                  | Brodovi sa certifikatom za prijevoz ozračenog nuklearnog goriva i materijala sa aktivnosti manjom od $2 \cdot 10^6$ TBq i brodovi za prijevoz plutonija sa aktivnosti manjom od $2 \cdot 10^5$ TBq |
| INF3                  | Brodovi za prijevoz ozračenog goriva, visokoradioaktivnog materijala i plutonija bez ograničenja na aktivnost  |
| (1TBq = $10^{12}$ Bq) |  |

Vitrificirani otpad se privremeno odlaže u postrojenju za reprocesiranje kako bi se smanjila ostatna toplina do propisane dozvoljene granice te se zatim transportira za trajno odlaganje. Transportira se u spremnicima masivne konstrukcije od čelika i za prijevoz se koristi željeznica i more.

## 6. ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA

Cilj zbrinjavanja radioaktivnog otpada je odlaganje otpada kojim bi se onemogućio kontakt radioaktivnih izotopa s biosferom i podzemnim vodama.

Nekad, dok su količine radioaktivnog otpada bile neznatne, nije se njegovom odlaganju posvećivala osobita pažnja. Opasniji se otpad u bačvama bacao u duboko more, a ostalo se zakopalo, obično u plitke rovove koji su se prekrivali zemljom. U nešto boljem slučaju, radioaktivni otpad se odvezio u neki napušteni rudnik. Iako se takvim „odlaganjem“ otklonila opasnost od neposrednog ozračivanja ljudi, ovakvi postupci nisu pružili jamstvo da dio radioaktivnog otpada neće vremenom doći u kontakt s ljudima, stoga je porasla zabrinutost za dugoročnu sigurnost, posebice zato što je trebalo zbrinuti sve više radioaktivnog otpada.

Problematika odlaganja radioaktivnog otpada u mnogome je slična problematici odlaganja opasnih, visoko toksičnih otpada, ali ipak ima svoje specifičnosti. 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, sustavi odlaganja i zaštite su vrlo kompleksni.

Osnovna zadaća kod odlaganja radioaktivnog otpada sastoji se u osiguranju dugotrajne stabilnosti (imobilizacije) radioaktivnih nuklida tako da se spriječi njihova migracija u okoliš. Stabilnost se osigurava fiksiranjem nuklida u matrici unutar posuda u kojima su smješteni (kondicioniranje) i samom čeličnom posudom, te postavljanjem višestrukih barijera između radioaktivnog otpada i okolnog geološkog medija.

Razlikujemo dvije vrste barijera:

- **Prirodna barijera** predstavlja geološku formaciju u kojemu se otpad odlaže
- **Inženjerska barijera** je umjetna prepreka koja sprječava migraciju radionuklida

Odnos ovih dvaju sustava je komplementaran u pogledu da će geološka formacija izrazito dobrih izolacijskih svojstava tražiti manje zahtjevan tehnički sustav inženjerskih barijera i obrnuto.

Kod pristupa odlaganju nisko, srednje i visoko radioaktivnom otpadu treba uskladiti djelovanje barijera u odlagalištu, protiv eventualnog širenja radioaktivnosti. Ipak, postoje dramatične razlike između zahtjeva za odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada, te visoko radioaktivnog otpada.

### 6.1. Izbor lokacije odlagališta

Odabir lokacije budućeg odlagališta radioaktivnog otpada je dugotrajan proces na koji utječu brojni čimbenici. Odlaganja se planiraju na rok od nekoliko stotina do 10.000 godina, ovisno o trajnosti barijera te vremenu poluraspada materijala. Da bi se osiguralo što manje ispuštanje radionuklida, pomno se odabire način pakiranja i oblik otpada, vrste inženjerskih barijera kojima se otpad izolira u odlagalištu te vrsta stijene u kojima se otpad odlaže. Razmatrajući sigurnost podzemnog ukapanja, stručnjaci su uzeli u obzir niz mogućih faktora:

- **Prirodni faktori:** udar meteora, iznenadna vulkanska aktivnost, pojava ledenog doba, klimatski uvjeti, blizina rijeke, vodopropusno tlo...
- **Ljudske aktivnosti:** nuklearni ratovi, sabotaze, nepredviđena geološka bušenja, podzemna građenja...

Treba paziti da sastav tla ne pogoduje nagrizanju posuda u kojima se otpad odlaže. Za lokaciju mogućih podzemnih spremišta izabiru se izrazito stabilne geološke formacije bez podzemnih voda, kao što su : ležišta soli, granitne stijene i glinene naslage. Te podzemne formacije nepromijenjene su već stotinu milijuna godina i velika je vjerojatnost da će još dugo i ostati takve. Važan čimbenik u postizanju veće sigurnosti odlagališta su istraživanja ponašanja barijernog sustava i okolne stijene koja se provode u podzemnim laboratorijima.

Kakvo će se odlagalište radioaktivnog otpada sagraditi u nekoj državi ovisi o različitim čimbenicima: o količini i vrstama otpada, o lokalnim geološkim uvjetima, o mogućnosti skladištenja, o tome da li se prerada i kondicioniranje radioaktivnog otpada gospodarski isplate, kakva je energetska strategija države i kakav je stav prema nuklearnoj energiji.

Ako je na raspolaganju više potencijalnih lokacija, među kriterijima koji utječu na odabir, najvažniji je kriterij prirodne pogodnosti terena za lociranje odlagališta i izolaciju otpada radi sprječavanja širenja onečišćenja u okoliš.

## 6.2. Načini odlaganja radioaktivnog otpada

Konačno odlaganje radioaktivnog otpada je smještanje otpada u odlagalište, bez namjere da se iz njega ikada vadi.

Otpad koji sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada zbrinjava se u površinskom odlagalištu, a otpad s radionuklidima s dugim vremenom poluraspada zbrinjava se u dubokim podzemnim odlagalištima. Za nisko radioaktivni otpad potrebna je izolacija do nekoliko stotina godina, a za srednje i visoko radioaktivni otpad i do nekoliko tisuća godina.

Odlagališta moraju biti smještena i osmišljena kako bi osigurala izolaciju radioaktivnog otpada i od ljudi i od biosfere. Svrha odlaganja je da budući naraštaji ne budu opterećeni problemima koje nisu sami prouzročili.

Intenzitet zračenja otpada važna je značajka pri rukovanju i odlaganju radioaktivnog otpada, također je bitna i količina topline koju oslobađa radioaktivni otpad, te kemijska svojstva radioaktivnog otpada.

Dugogodišnja praksa odlaganja otpada u svijetu urodila je međunarodnim dogovorom koji ističe najbolje opcije odlaganja radioaktivnog otpada:

- **Površinska i pripovršinska odlaganja** za nisko i srednje radioaktivni otpad
- **Odlaganja u dubokim geološkim formacijama** za sve vrste radioaktivnog otpada, ali posebno za visoko radioaktivni otpad.

Najbolje rješenje bilo bi sav radioaktivni otpad zbrinuti na isti način, u dubokom i geološki stabilnom odlagalištu. Zbog različitih vrsta radioaktivnog otpada i manjka dubokih geoloških formacija, preskupo je održavati i graditi takva odlagališta, da bi se u njih smjestio sav otpad.

Kratkovječni nisko radioaktivni otpad može se skladištiti dok mu aktivnost ne opadne toliko da se smije kontrolirano ispuštati u okoliš, reciklirati ili odlagati kao običan otpad u skladu s propisima o gospodarenju otpadom.

### 6.3. Odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada

Problemi koji se javljaju pri odlaganju nisko i srednje radioaktivnog otpada razlikuju se od odlaganja visoko radioaktivnog otpada i znatno ih je lakše riješiti. Osnovna razlika je u tome da nisko i srednje radioaktivni otpad ne emitira značajne količine topline jer su u njima uglavnom prisutni kratkoživi radionuklidi čija je aktivnost niska do umjerena. Odlaganje ovih otpada je u glavnom površinsko ili pripovršinsko uz primjenu koncepta višestrukih barijera i odgovarajućeg drenažnog sustava.

#### 6.3.1. Površinsko odlaganje

Konačno odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada najčešće je površinskog tipa, zbog jednostavnosti izrade i smanjenih troškova u odnosu na podzemni tip odlagališta. Tome u prilog idu i suvremena tehnološka rješenja za sigurno i ekološki prihvatljivo odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada. Površinska odlagališta koriste se u mnogim zemljama više od 30 godina. U suhim uvjetima malo je ili zanemarivo protjecanje podzemnih voda kroz ukopani otpad pa ne postoji opasnost od širenja radionuklida vodom u okoliš. U vlažnijoj klimi takav je pristup manje uspješan. Štoviše, u nekim osobitim okolnostima (plavljenje rovova zbog neodgovarajućeg izbora lokacije ili neodgovarajuća drenaža) radionuklidi se mogu širiti prema dolje, a ovisno o vrsti stijena i bočno izvan rovova. Tako radionuklidi iz otpada mogu dospjeti u vodotokove i u podzemnu vodu.

Postoje dvije vrste površinskog odlaganja, a to su plitki rov i zidana betonska građevina. Najjednostavnije površinsko odlagalište je običan **plitki rov** u kojem se otpad prekriva zemljom. Danas je uobičajeno da se u takvom plitkom odlagalištu postavi odgovarajuća izolacija na dno, te da zemljani pokrov sadrži jedan nepropusni sloj, osim toga postavljaju se oko odlagališta drenažni kanali. Radioaktivni otpad obično se obrađuje prije odlaganja i dodatno izolira u nepropusnim posudama ili betonskim spremnicima ili kontejnerima.

Druga varijanta površinskog odlagališta je **zidana betonska građevina**. Može biti plitko ukopana ili sagrađena iznad površine zemlje. Građevina se sastoji od prostorija koje se redom popunjavaju posudama s otpadom. Kada se neka prostorija popuni, zatvara se, a prije toga posude se mogu zaliti i betonom ili ispuniti drugim materijalom za popunu i stabilizaciju. Metalne posude s radioaktivnim otpadom polažu se na armirano-betonsku podlogu i zatrpavaju šljunkom, pijeskom i glinom.

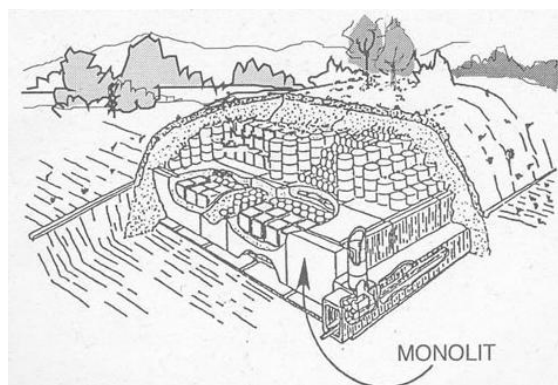




Sl. 17 Površinsko odlagalište u El Cabrilu, Španjolska

Izvor: <https://nuclear-energy.net/nuclear-waste>

Varijanta odlagališta poznata kao **betonski monolit** predstavlja standardizirano rješenje odlaganja otpada srednje i niske aktivnosti. Razlika je u tome što su metalne posude s radioaktivnim otpadom smještene u armirano-betonske kontejnere koji se po određenom rasporedu polažu na armirano-betonsku podlogu opremljenu drenažnim sustavom. Nakon popune predviđenog prostora, armirano-betonski kontejneri ograđuju se betonskim zidom čime se dobiva monolitna struktura koja se obično prekriva s nekoliko slojeva prirodnih i umjetnih materijala.



Sl. 18 Površinsko odlagalište s monolitnom strukturom

Izvor: <http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivni-otpad.html?start=1>



Kao materijali za izradu pokrova uglavnom se koriste različiti šljunkoviti, pjeskoviti i glinoviti prirodni materijali s lokacije i sintetičke folije visokih hidroizolacijskih svojstava. Time se dodatno formira još jedna inženjerska barijera. Slojevi pijeska i šljunka koriste se za drenažu, tj. prikupljanje oborina i površinskih voda kako bi se spriječio njihov prodor u odlagalište i omogućila kontrola kvalitete. Odlagalište se vizualno uklapa u okoliš ozelenjavanjem površinskog sloja humusa (Slika 19).



Sl. 19 Površinsko odlagalište „Centre de la Manche“ u Francuskoj

Izvor: <https://www.lamanchelibre.fr/actualite-187533-nucleaire-greenpeace-porte-plainte-contre-l-andra-dans-la-manche>

### 6.3.2. Pripovršinsko odlaganje

Pripovršinska odlagališta ispod su razine tla, ali na relativno manjim dubinama. Njihova izvedba uključuje zonu nedirnute stijene ili sedimenta iznad odlagališta koja fizički dijele odloženi otpad od površine terena. Osim što se time koriste prednosti pogodnih hidrogeoloških i geokemijskih svojstava prirodnih geoloških formacija, takav pristup znatno smanjuje rizik od nenamjernog upada ljudi.

Pripovršinska odlagališta nalaze se na dubini od 70 do 100 metara ispod površine zemlje. Sve izgrađene inženjerske barijere u pripovršinskim odlagalištima slične su onima koje se grade oko spremnika za plitka odlaganja. Otpad je razvrstan prema aktivnosti, pakiran u spremnike i kontejnere (Slika 20) koji se smještaju u betonom obložene silose iskopane u granitu, na dubini od 60 do 100 metara ispod površine. Promjer silosa je 24 metara, a visina 34 metara .



Sl. 20 Kontejner sa spremnicima za radioaktivni otpad u odlagalištu Olkiluoto, Finska

Izvor: <http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivni-otpad/upravljanje-nisko-i-srednje-radioaktivnim-otpadom.html>

### 6.3.3. Podzemna odlagališta

Podzemna odlagališta mogu biti na različitim dubinama, od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara. Negdje se adaptiraju napušteni rudnici soli ili željeza u prikladnim geološkim formacijama, zbog naročito pogodnih izolacijskih svojstava i izostanka podzemnih voda, primjer su rudnici Konrad i Morsleben (Slika 21) u Njemačkoj. Odvođenje nastalog plina iz otpada je puno teže riješiti u podzemnim odlagalištima jer je otpad odložen na velikoj dubini.



Sl. 21 Odlagalište NSRAO-a u napuštenom rudniku soli Morsleben, Njemačka

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/odlaganje-nsrao-a/>

Alternativna tehnološka varijanta odlaganja nisko i srednje radioaktivnog otpada, koja je usvojena u nekim zemljama je tunelsko odlaganje. Ta se tehnološka varijanta odlaganja izvodi tako da se u čvrstoj stijeni buši glavni horizontalni tunel s nekoliko bočnih odvojaka (galerija). U galerije, a potom i u glavni tunel odlažu se metalne posude i armirano betonski kontejneri s radioaktivnim otpadom. Nakon što se popune, galerije se, isto kao i u glavni horizontalni tunel ispunjavaju betonom.



Sl. 22 Shema podzemnog tunelskog tipa odlagališta, Forsmark, Švedska

Izvor: <http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivni-otpud/upravljanje-nisko-i-srednje-radioaktivnim-otpudom.html>

#### **6.3.4. Odlaganje visoko radioaktivnog otpada**

Proces odlaganja visoko radioaktivnog otpada započinje nakon što se otpad dovoljno ohladi u suhom ili mokrom skladištenju. Između nekoliko različitih koncepata odlaganja visoko radioaktivnog otpada, međunarodnim je konsenzusom potvrđeno da je duboko geološko odlaganje u stijeni najprikladniji način za dugotrajnu izolaciju takvog otpada od čovjekove okoline.

Razmatrane su i druge metode odlaganja visoko radioaktivnog otpada koje se danas ne razvijaju, a to su:

- Odlaganje u oceanima – više nema međunarodne suglasnosti i podrške za taj pristup odlaganju. Opcija odlaganja u oceanima može biti višestruka: odlaganje u duboke vode, odlaganje u bušotine u morskom dnu, odlaganje u oceanske tektonske rovove.
- Odlaganje u ledenjacima – trenutno je zabranjeno međunarodnim zakonom odlaganje otpada na Antarktici te su stoga metode takvog odlaganja slabo istražene.
- Odlaganje u svemiru – glavni problem takvog odlaganja su veliki troškovi te visok rizik neuspjeha pri lansiranju s posljedicom radiološke katastrofe u svijetu.

Osim prihvaćenog koncepta dubokog geološkog odlagališta još uvijek se analizira opcija bušenja pojedinačnih vrlo dubokih bušotina u koje bi se visoko radioaktivan otpad vertikalno spuštao s površine i odlagao u dijelu bušotine između 3 i 5 kilometara. Inicijalni koncept je star preko pola stoljeća, a ponovo je aktualiziran zahvaljujući razvoju tehnologije bušenja u naftnoj industriji. Otpad se odlaže u inženjerski projektiranim paketima zbog nemogućnosti da se osiguraju odgovarajući sigurnosni uvjeti u bušotini.

### **6.3.5. Odlaganja u dubokim geološkim formacijama**

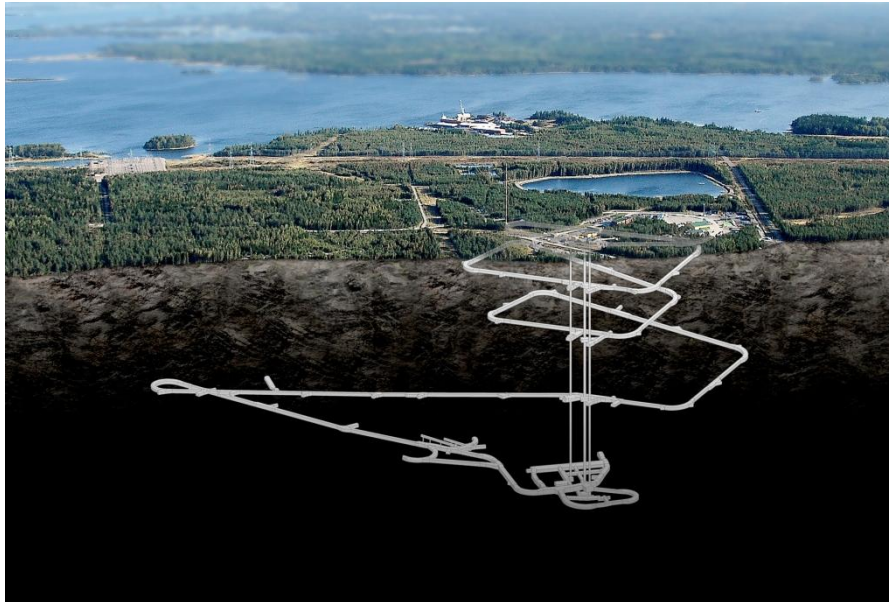
Pridjev „geološko“ označava da se taj koncept u najvećoj mjeri oslanja na izolacijska svojstva same lokacije. Vremenski period za koji je potrebno dokazati sigurnost trajnog odlagališta prema regulativnim zahtjevima u većini zapadnih država iznosi 10 000 godina. U tako dugom vremenskom periodu većina će umjetnih materijala degradirati i neće osigurati tako dugoročnu izolaciju, pa se zbog toga vrlo velika pozornost pridaje izboru lokacije, odnosno geološkog medija u kojem će odlagalište biti izgrađeno. Prirodni ambijenti pogodni za takve projekte su npr. ležišta soli, karbonati, škriljci i granitne stijene, glina, neke od tih geoloških struktura stabilne su nekoliko milijuna godina pa su stoga najprimjerenije za odlaganje visoko radioaktivnog goriva i istrošenog nuklearnog goriva.

Glavna zadaća duboke geološke formacije izoliranje je i zadržavanje radioaktivnog otpada od čovjekove okoline sve dok razina radioaktivnosti ne padne na prihvatljivu razinu. Planirane dubine za smještaj otpada kreću se od 300 do 1500 metara. Radioaktivni otpad spušta se u obliku paketa u donje razine okna ili se transportira kosim tunelima u predviđene bušotine. Bušotine se ispunjuju prikladnim materijalom nakon čega slijedi brtvljenje.



U budućnosti, duboka geološka odlagališta neće biti ograničena samo na odlaganje visoko radioaktivnog otpada, već će se u njih odlagati i dugoživi nisko i srednje radioaktivni otpad.

Propisno odlagalište civilnog visoko radioaktivnog otpada još uvijek ne postoji u svijetu, no nekoliko projekata prošlo je dugogodišnje pripremne faze. Projekt odlagališta „Onkalo“ u Finskoj najbliži je realizaciji (Slika 23). Do sada su iskopani pristupni tuneli i podzemna galerija (Slika 24) na dubini od 455 metara, a 2020. godine trebao bi se pohraniti visoko radioaktivni otpad.



Sl. 23 Lokacija dubokog geološkog odlagališta Onkalo

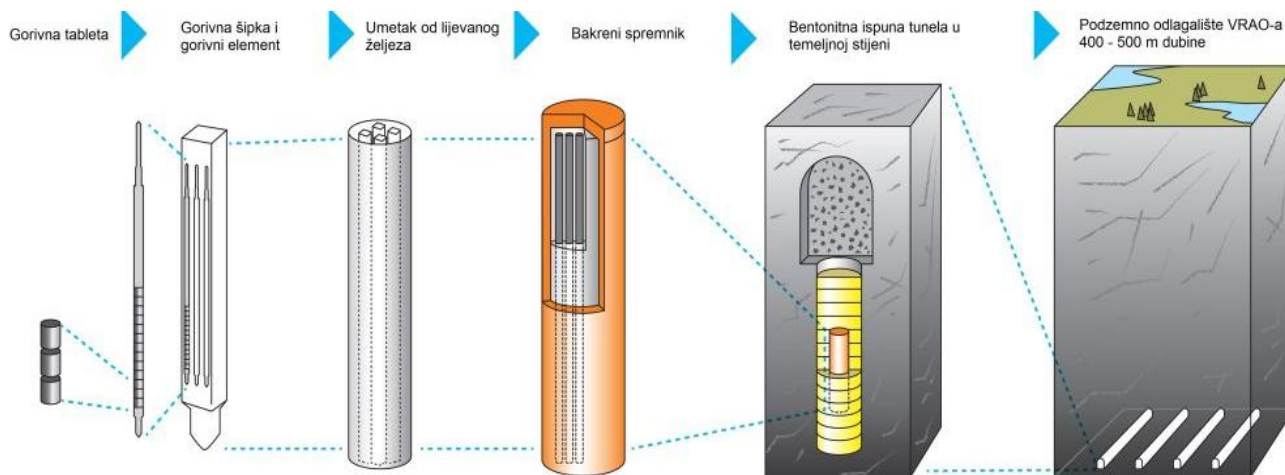
Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/odlaganje-vrao-a/>



Sl. 24 Odlagališna galerija (Odlagalište Onkalo)

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/odlaganje-vrao-a/>

Da bi se spriječilo kretanje radionuklida iz spremnika, geološke formacije oslanjaju se na sustav nezavisnih i višestrukih barijera (Slika 25).



Sl. 25 Sustav višestrukih barijera odlagališta visoko radioaktivnog otpada

Izvor: <http://radioaktivniotpad.org/odlaganje-vrao-a/>

Sustav višestrukih barijera čine:

- Struktura goriva - dolazi u obliku keramičkih tableta smještenih u metalnim košuljicama, a na taj se način radioaktivni produkt zadržava unutar samog goriva.
- Metalni spremnici - služe za pohranjivanje otpada na duži vijek trajanja, osiguravaju mehaničku stabilnost, kemijsku inertnost i vodonepropusnost.
- Geološka struktura - posljednja barijera, pojačava se dodatnim tehnološkim rješenjima ako je potrebno.

Uz ovakav sustav barijera, realna opasnost za stanovništvo ne postoji.

#### **6.4. Utjecaj odlagališta radioaktivnog otpada na okoliš**

Odlagališta radioaktivnog otpada moraju biti projektirana i izgrađena u skladu s opće prihvaćenim standardom da odlagalište mora spriječiti bilo kakav nepovoljan utjecaj na okoliš.

Odloženi nisko i srednje radioaktivan otpad u skladištima u današnje vrijeme ne može utjecati na okoliš i ljude zbog načina na koji su izgrađena postrojenja za zbrinjavanje. To podrazumijeva da nema izravnih zračenja niti istjecanja radioaktivne tvari u tekućem ili plinovitom obliku ni širenja tvari kroz tlo postrojenja za zbrinjavanje otpada.

Da bi se postigla takva razina sigurnosti u postrojenjima za zbrinjavanje radioaktivnog otpada, pri planiranju građevina i rada postrojenja identificiraju se različiti kritični putevi, mehanizmi i količine radioaktivne tvari, čak i u izuzetno malo vjerojatnim situacijama u kojima bi moglo doći do prodiranja u okoliš (požar, plavljenje ili eksplozija). Tijekom rada postrojenja, a i godinama nakon njegova zatvaranja, izvode se različita mjerenja oko postrojenja da bi se pravovremeno zapazila bilo kakva odstupanja od normale.

Prije same izgradnje odlagališta, Legislativa Europske Unije obvezuje države članice na izradu studije utjecaja na okoliš još u fazi planiranja projekta odlagališta radioaktivnog otpada. Cilj studije je utvrditi kakve su ekološke posljedice projekta odlagališta radioaktivnog otpada. Prihvatljivost planiranog odlagališta radioaktivnog otpada bit će određena na temelju procjene potencijalnog utjecaja na ljudsko zdravlje i na okoliš.

## 7. RADIOAKTIVNI OTPAD U REPUBLICI HRVATSKOJ

Republika Hrvatska je kao članica Europske unije preuzela odgovornost za uspostavu nacionalnog sustava za sigurno zbrinjavanje RAO-a, koji nastaje na njenom teritoriju.

Isto tako, Hrvatska je suvlasnik polovine Nuklearne elektrane Krško (NEK), koja se nalazi u susjednoj Sloveniji pa je tako preuzela obvezu zbrinjavanja polovine količine radioaktivnog otpada NEK-a na svom teritoriju.

U Republici Hrvatskoj postoji relativno mala količina radioaktivnog otpada (7,5 m<sup>3</sup>), koji je većinom smješten u dva skladišta institucionalnog radioaktivnog otpada:

- skladište u sklopu **Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI)**
- skladište **Instituta Ruđer Bošković (IRB)**

Oba spomenuta skladišta nalaze se u Zagrebu i oba su zatvorena (ne mogu više zaprimati otpad), a otpad u njima je kondicioniran i pohranjen u spremnicima predviđenim za skladištenje, odnosno odlaganje.

Sljedeća tablica prikazuje volumen i aktivnosti različitih vrsta radioaktivnog otpada u Hrvatskoj.

Tab. 6 Procjena postojećeg institucionalnog radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj

| Vrsta RAO     | Skladište IMI, 2006.      |                            | Skladište IRB, 2011.      |                            | UKUPNO                    |                            |
|---------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
|               | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Aktivnost (Bq)             | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Aktivnost (Bq)             | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Aktivnost (Bq)             |
| Kratkoživući  | 0,5                       | 6,0x10 <sup>11</sup>       | 5,0                       | 1,3x10 <sup>13</sup>       | 5,5                       | 1,4x10 <sup>13</sup>       |
| Dugoživući    | 1,0                       | 9,1x10 <sup>11</sup>       | 1,0                       | 4,9x10 <sup>11</sup>       | 2,0                       | 1,5x10 <sup>12</sup>       |
| <b>UKUPNO</b> | <b>1,5</b>                | <b>1,5x10<sup>12</sup></b> | <b>6,0</b>                | <b>1,4x10<sup>13</sup></b> | <b>7,5</b>                | <b>1,6x10<sup>13</sup></b> |

Tipovi otpada koji se nalaze u tim skladištima su: radioaktivni gromobrani, radioaktivni javljači požara, medicinski izvori i drugi radioaktivni otpad iz medicine, industrijski izvori, izvori iz istraživačkih ustanova, svjetleća boja, dijelovi optičkih uređaja.

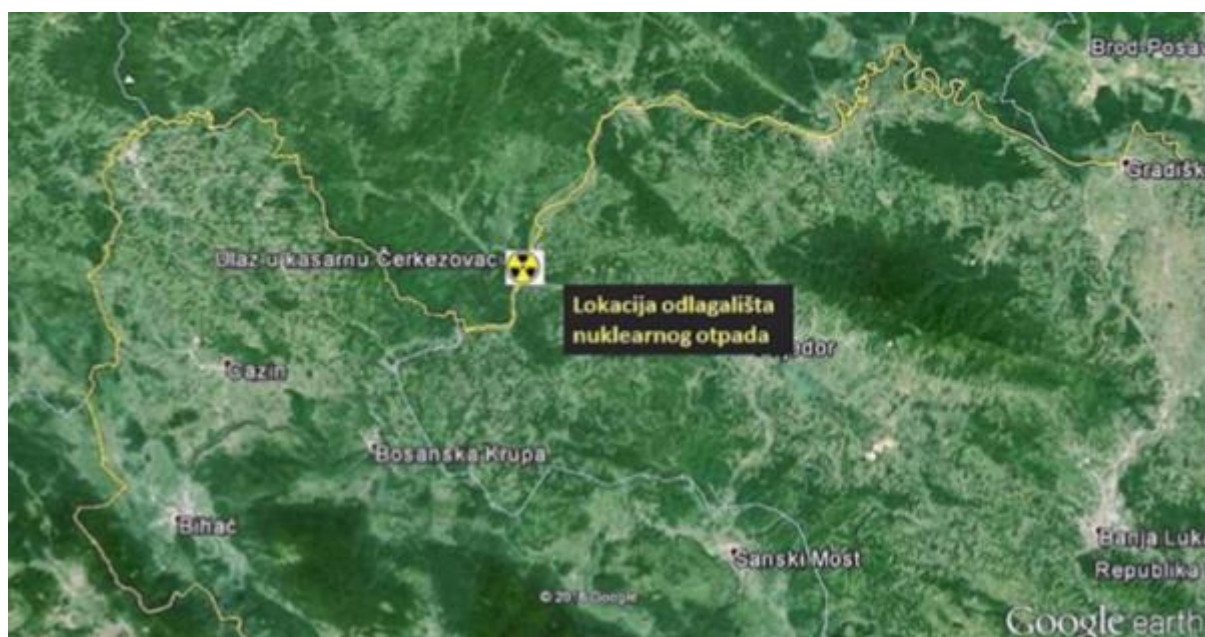
Prve količine otpada iz NEK-a planiraju se zaprimiti 2023. godine, a razgradnja NEK-a u 2043. godini.



Republika Hrvatska još uvijek nema definitivnu lokaciju bilo centralnog skladišta ili odlagališta. Istrošeno nuklearno gorivo, odnosno 2283 gorivna elementa koji će se iskoristiti do kraja životnog vijeka NEK-a planiraju se skladištiti na lokaciji elektrane predvidivo do kraja stoljeća. Hrvatska nakon toga mora preuzeti brigu za polovinu gorivnih elemenata.

Prema programu iz 1997. godine izabrane su četiri potencijalne lokacije za izgradnju odlagališta: Trgovačka gora, Moslavačka gora, Papuk i Psunj. Nakon toga, dugi niz godina proces izbora lokacije je mirovao, sve do 2014. godine kada je bila izdvojena samo jedna lokacija na Trgovačkoj gori, odnosno Čerkezovac u vlasništvu Hrvatske vojske. Tom izboru lokacije veoma se protivi lokalna zajednica, kojima je glavni argument protiv izbora te lokacije blizina rijeke Une i granica s Bosnom i Hercegovinom.

Ukoliko bi se lokacija Čerkezovac na Trgovskoj gori (Slika 26) odabrala za izgradnju odlagališta, centar za zbrinjavanje RAO-a obuhvaćao bi 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.



Sl. 26 Potencijalna lokacija odlagališta radioaktivnog otpada u Hrvatskoj, Čerkezovac

Izvor: <http://www.frontslobode.ba/vijesti/ekologija/76882/edin-delic-radioaktivna-opasnost-na-drzavnoj-granici-trgovska-gora-za-pocetnike>

## 8. ZAKLJUČAK

Radioaktivni otpad nastaje na različite načine i sadrži različite vrste materijala. U njemu su radionuklidi tek dio volumena, a ostalo su tvari koje nisu radioaktivne. Ipak, najvažnija svojstva radioaktivnog otpada određena su količinom i vrstom radionuklida koje sadrži te o njima najviše ovisi i način njegova zbrinjavanja. Zato se radioaktivni otpad u prvom redu razvrstava prema svojoj specifičnoj radioaktivnosti i to u tri osnovne skupine: nisko, srednje i visokoradioaktivan otpad.

Radioaktivni otpad je najčešće otpad koji nastaje u nuklearnim procesima kao što je istrošeno nuklearno gorivo. Za sada se istrošeno nuklearno gorivo skladišti u posebnim skladištima s obzirom na to da za visoko radioaktivni otpad još ne postoje odlagališta, dok su za nisko i srednje radioaktivan otpad već izgrađena i operativna.

Osnovna zadaća odlagališta radioaktivnog otpada je izolirati radioaktivni materijal od okoliša, odnosno spriječiti emisiju radioaktivnih nuklida u biosferu. To se postiže kondicioniranjem otpada, postavljanjem višestrukih barijera između radioaktivnog otpada i okolnog geološkog medija te odabirom što prikladnije geološke strukture u koju će otpad biti pohranjen. Važan čimbenik u postizanju veće sigurnosti odlagališta su istraživanja ponašanja barijernog sustava i okolne stijene koja se provode u podzemnim laboratorijima.

S današnjom tehnologijom koja je u konstantnom razvoju te stvaranjem novih vrsta materijala možemo očekivati i bolja tehnička rješenja za zbrinjavanje radioaktivnog otpada u budućnosti.

## LITERATURA

- [1] Feretić D., Tomšić Ž., Škanata D., Čavlina N., Subašić D.: „Elektrane i okoliš“, Element d.o.o., Zagreb, (2000.), ISBN: 953-197-127-7
- [2] Feretić D., Čavlina N., Debrecin N.: „Nuklearne elektrane“, Školska knjiga, Zagreb, (1995.), ISBN: 953-0-31651-8
- [3] Lokner V.: „Radioaktivni otpad: što je to? : kako nastaje i što učiniti s njim?“, Agencija za posebni otpad, Zagreb, (1993.), ISBN: 953-6061-02-3
- [4] Mikuličić D.: „Nuklearne elektrane: činjenice za razmišljanje“, ZEOH: Samoupravna interesna zajednica potrošača električne energije Hrvatske, Zagreb (1988.),
- [5] Tišma S., Maleković S.: „Zaštita okoliša i regionalni razvoj: iskustva i perspektive“, Institut za međunarodne odnose, Zagreb (2009.), ISBN: 978-953-6096-51-0
- [6] Puntarić D., Miškulin M., Bošnjir J. i suradnici: „Zdravstvena ekologija“, Medicinska naklada, Zagreb, (2012.), ISBN: 978-953-176-538-1
- [7] Paar V.: „Energetska kriza: gdje (ni)je izlaz?“, Školska knjiga, Zagreb, (1984.)
- [8] Briški F.: „Zaštita okoliša“, Element d.o.o., Zagreb, (2016.) ISBN: 978-953-197-589-6

### Internet izvori:

- [9] Radioaktivnost, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=51474>, pristupljeno 03.05.2018.
- [10] IAEA, <https://www.iaea.org/topics/radioactive-waste-and-spent-fuel-management>, pristupljeno 04.05.2018.
- [11] Klasifikacija radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018\\_02\\_12\\_271.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_02_12_271.html) 03.05.2018.
- [12] Nuklearne elektrane, <http://www.nemis.hr/>, pristupljeno 04.05.2018.
- [13] Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, <http://radioaktivniotpad.org/>, pristupljeno 04.05.2018.

## POPIS SLIKA

## STRANICA

|   |    |
|---|----|
| Sl. 1 Volumna klasifikacija radioaktivnog otpada .....                                      | 3  |
| Sl. 2 Grafički prikaz sheme klasifikacije RAO (IAEA, 2009).....                             | 6  |
| Sl. 3 Shema nuklearnog gorivnog ciklus.....   | 12 |
| Sl. 4 Bazen s istrošenim gorivom.....   | 13 |
| Sl. 5 Spremnik za iskorišteno nuklearno gorivo kod suhog skladištenja .....                 | 14 |
| Sl. 6 PUREX metoda.....   | 15 |
| Sl. 7 Kontejner s kompaktiranim strukturnim otpadom.....                                    | 16 |
| Sl. 8 Spremnici s vitrificiranim materijalom.....   | 17 |
| Sl. 9 Operativni koraci zbrinjavanja otpada .....   | 18 |
| Sl. 10 Razvrstavanje otpadnih radioaktivnih materijala.....                                 | 19 |
| Sl. 11 Peć za spaljivanje radioaktivnog otpada .....  | 20 |
| Sl. 12 Kompaktor .....  | 21 |
| Sl. 13 Postupak imobilizacije-solidifikacija.....   | 22 |
| Sl. 14 Transportne oznake radioaktivnog materijala.....                                     | 24 |
| Sl. 15 Uranov koncentrat u standardnoj 200-litarskoj bačvi .....                            | 25 |
| Sl. 16 Transport spremnika istrošenog nuklearnog goriva.....                                | 26 |
| Sl. 17 Površinsko odlagalište u El Cabrilu, Španjolska .....                                | 31 |
| Sl. 18 Površinsko odlagalište s monolitnom strukturom.....                                  | 31 |
| Sl. 19 Površinsko odlagalište „Centre de la Manche“ u Francuskoj .....                      | 32 |
| Sl. 20 Kontejner sa spremnicima za radioaktivni otpad u odlagalištu Olkiluoto, Finska ..... | 33 |
| Sl. 21 Odlagalište NSRAO-a u napuštenom rudniku soli Morsleben, Njemačka.....               | 33 |
| Sl. 22 Shema podzemnog tunelskog tipa odlagališta, Forsmark, Švedska .....                  | 34 |
| Sl. 23 Lokacija dubokog geološkog odlagališta Onkalo .....                                  | 36 |
| Sl. 24 Odlagališna galerija (Odlagalište Onkalo).....                                       | 37 |
| Sl. 25 Sustav višestrukih barijera odlagališta visoko radioaktivnog otpada .....            | 37 |
| Sl. 26 Potencijalna lokacija odlagališta radioaktivnog otpada u Hrvatskoj, Čerkezovac ..... | 40 |

## POPIS TABLICA

## STRANICA

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1 Vrijeme poluraspada odabranih radioaktivnih izotopa .....                            | 4  |
| Tab. 2 Klasifikacija radioaktivnog otpada (IAEA, 2009) .....                                | 5  |
| Tab. 3 Klasifikacija radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj (NN, 12/2018) .....         | 7  |
| Tab. 4 Postupci smanjenja volumena nisko i srednje radioaktivnog otpada.....                | 20 |
| Tab. 5 Klasifikacija broda za transport radioaktivnog materijala .....                      | 26 |
| Tab. 6 Procjena postojećeg institucionalnog radioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj..... | 39 |