

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

SEMINAR

**Visokoradioaktivni otpad**

*Gh0stbuster, Tyrannizer, ?*

Nositelj: *prof. dr. sc. Nenad Debrecin*

Zagreb, prosinac 2015.

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Porijeklo visokoradioaktivnog otpada .....	2
3. Načini zbrinjavanja visokoradioaktivnog otpada.....	4
3.1 Predobrada visokoradioaktivnog otpada.....	4
3.2 Obrada visokoradioaktivnog otpada.....	4
3.3 Odlaganje visokoradioaktivnog otpada .....	5
3.3.1 Kratkotrajno odlaganje visokoradioaktivnog otpada .....	5
3.3.2 Dugotrajno odlaganje visokoradioaktivnog otpada .....	6
4. Propisi o zbrinjavanju visokoradioaktivnog otpada.....	9
4.1 Propisi o zbrinjavanju visokoradioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj .....	9
4.1.1 Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti.....	9
4.1.2 Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva.....	10
4.2 Propisi o zbrinjavanju visokoradioaktivnog otpada u Sjedinjenim Američkim Državama .....	10
5. Usporedba s visokotoksičnim industrijskim otpadom .....	11
6. Zaključak.....	13
7. Literatura .....	14
7.1 Izvori slika .....	14
7.2 Izvori tablica .....	15

## 1. Uvod

Visokoradioaktivni otpad je vrsta nuklearnog otpada s visokim dozama zračenja, te zahtjeva visoku razinu zaštite prilikom rukovanja i zbrinjavanja. Tipično visokoradioaktivni otpad potječe iz procesiranja nuklearnih goriva ili korištenja nuklearnog goriva u nuklearnim elektranama procesom fisije. Nuklearna goriva su najčešće spojevi jako radioaktivnih elemenata urana i plutonija.

Proces dobivanja energije se zasniva na lančanoj reakciji raspada velikih jezgara, tj. na pucanju nuklearnih veza među protonima i neutronima u jezgri iz kojih nastaju manje jezgre. Procesom nastaje radioaktivna smjesa koja je štetna za ljude i okoliš. Prema našoj regulativi radioaktivnim se otpadom smatraju oni materijali koji su onečišćeni radioaktivnim izotopima.

Kao mjera za aktivnost radioaktivnog izvora se koristi mjerna jedinica Bekerel [Bq] koja odgovara broju raspadnutih jezgri u sekundi.

Radioaktivni otpad po razini zračenja svrstava se u 3 klase:

- niskoradioaktivni otpad od  $5 \times 10^6$  do  $5 \times 10^9$  Bq/m<sup>3</sup>;
- srednjeradioaktivni otpad od  $5 \times 10^9$  do  $5 \times 10^{14}$  Bq/m<sup>3</sup>;
- visokoradioaktivni otpad više od  $5 \times 10^{14}$  Bq/m<sup>3</sup>.

Većina radioaktivnih otpada su nisko i srednje radioaktivni otpadi u koji ponajprije spada zaštitna odjeća, kontaminirani metalni otpad, otpad od procesa čišćenja radioaktivne vode... Unatoč tome najopasniji je visokoradioaktivni otpad koji je izvor više od 90% radijacije, a većinom se sastoji od iskorištenog nuklearnog goriva. Jedini način da visokoradioaktivni otpad postane bezopasan je prirodnim procesom raspadanja, što može potrajati i po nekoliko tisuća godina, stoga ta vrsta otpada mora biti zbrinuta na način da nema doticaja s ljudima dug vremenski period.

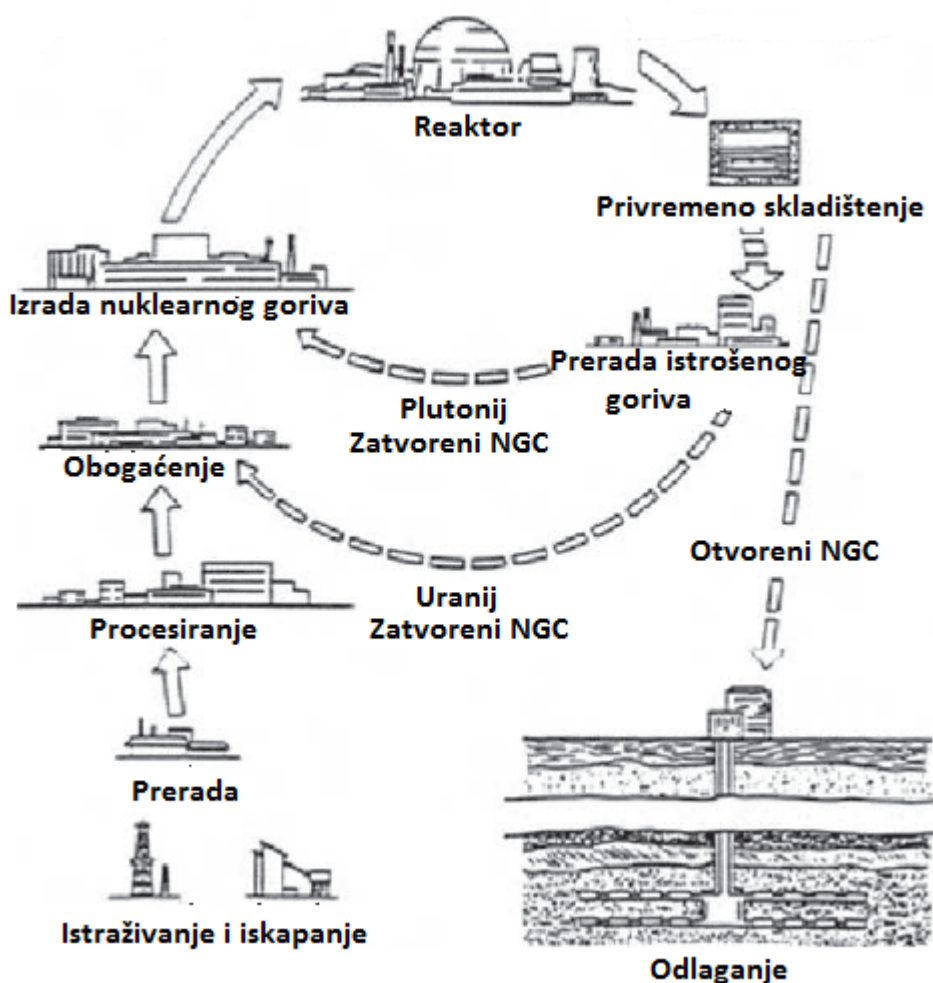
Ovaj rad bavi se porijeklom i zbrinjavanjem visokoradioaktivnog otpada te njegovom usporedbom s visokotoksičnim industrijskim otpadom.

## 2. Porijeklo visokoradioaktivnog otpada

Tipičan izvor visokoradioaktivnog otpada je iz nuklearnog gorivnog ciklusa. Nuklearni gorivni ciklus podrazumijeva sve djelatnosti u proizvodnji nuklearne energije uključujući i nalaženje sirovina i proizvodnju nuklearnoga goriva, uporabu nuklearnog goriva u nuklearnome reaktoru, prestanak rada i razgradnju nuklearnog postrojenja, zbrinjavanje radioaktivnoga otpada podrijetlom iz nuklearnih postrojenja, zbrinjavanje istrošenog nuklearnog goriva te sva istraživanja u vezi s tim djelatnostima.

Proces nuklearnog gorivnog ciklusa dijeli se na dvije podvrste, a to su otvoreni i zatvoreni gorivni ciklus. Kod otvorenog gorivnog ciklusa potrošeno nuklearno gorivo se odbacuje bez daljnjeg procesuiranja, dok se kod zatvorenog gorivnog ciklusa izdvajaju materijali koji mogu održati nuklearnu fisiju (uran, plutonij), a ostatak se odbacuje. Odbačeno nuklearno gorivo je visokoradioaktivni otpad. [1]

Slika 2.1 prikazuje razlike između otvorenog i zatvorenog nuklearnog gorivnog ciklusa.



Slika 2.1: Nuklearni gorivni ciklus

Jedan od izvora visokoradioaktivnog otpada je i vojska, gdje nastaje kao posljedica izrade nuklearnog oružja. Taj otpad je najčešće u „tekućem obliku“, to jest spremljen u bazene. Međutim neke zemlje poput Velike Britanije ovaj otpad smatraju resursom jer ga je moguće obraditi u gorivo koje se koristi za generiranje električne energije.

### 3. Načini zbrinjavanja visokoradioaktivnog otpada

Budući da visokoradioaktivni otpad mora biti zbrinut na dugi vremenski period, kako bi se završio proces nuklearnog raspada, pa se posebna pažnja dodjeljuje zbrinjavanju tog otpada. Proces zbrinjavanja visokoradioaktivnog otpada dijeli se na tri faze: predobrada otpada, obrada otpada i odlaganje otpada. [1]

#### 3.1 Predobrada visokoradioaktivnog otpada

Glavni ciljevi ove faze su razdvajanje otpada na aktivne i neaktivne dijelove, priprema za transport i daljnju obradu, te razdvajanje materijala koji se mogu reciklirati.

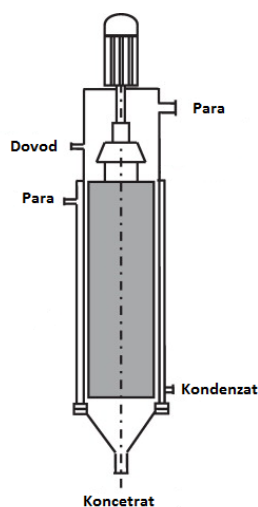
U predobradi vrši se razdvajanje otpada na temelju fizičkih karakteristika (agregatno stanje, koncentracija radioaktivnih elemenata, ...), kemijska obrada (neutralizacija kiselina, uništavanje neželjenih kemijskih spojeva), kompresija i pakiranje. Predobrada također može sadržavati i razdvajanje materijala koji je moguće reciklirati, pa se taj dio otpada mora dekontaminirati prije daljnje uporabe.

Rezultat ove faze je povećana sigurnost, smanjena radioaktivnost i niža cijena daljnjeg procesa zbrinjavanja. [1]

#### 3.2 Obrada visokoradioaktivnog otpada

Glavni ciljevi ove faze slični su prethodnoj: smanjenje volumena, uklanjanje radioaktivnih materijala i promjena fizičkog stanja otpada.

Sam proces ove faze ovisi o tipu otpada, tako se na primjer otpad tekućeg agregatnog stanja tretira destilacijom i filtriranjem, otpad krutog agregatnog stanja tretira mehaničkom obradom (najčešće kompresija, taljenje ili spaljivanje), a onaj u plinovitom agregatnom stanju se tretira filtriranjem. [1]



Slika 3.1: Shematski prikaz isparivača za otpad tekućeg agregatnog stanja



*Slika 3.2: Kompresor za otpad čvrstog agregatnog stanja*

### **3.3 Odlaganje visokoradioaktivnog otpada**

Postoje dva načina odlaganja visokoradioaktivnog otpada na temelju perioda na koji se otpad odlaže. To su kratkotrajno i dugotrajno odlaganje otpada.

#### **3.3.1 Kratkotrajno odlaganje visokoradioaktivnog otpada**

Kratkotrajno odlaganje otpada primjenjuje se kao priprema za dugotrajno odlaganje ili kao privremeno odlagalište otpada u nekom procesu, na primjer recikliranju, ili kod zatvorenog nuklearnog gorivog procesa za skladištenje iskorištenog goriva prije izdvajanja urana i plutonija.

Najčešća tehnika korištena kod ove vrste odlaganja je odlaganje u bazene. Ova metoda je pogodna jer se otpad hladi, što pojednostavljuje daljnju obradu ili ga priprema za dugotrajno odlaganje. Ovakvo odlaganje otpada može potrajati i po nekoliko desetaka godina.



*Slika 3.3: Bazen za kratkotrajno odlaganje visokoradioaktivnog otpada*

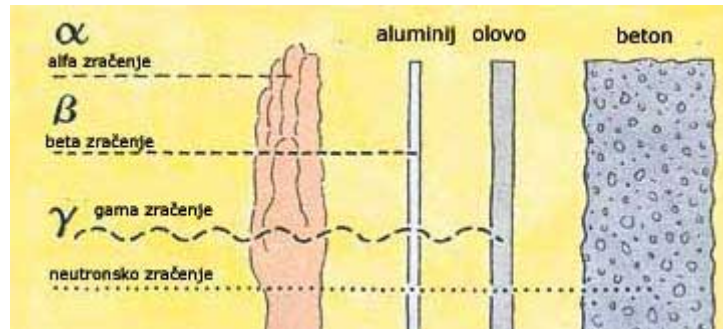
### **3.3.2 Dugotrajno odlaganje visokoradioaktivnog otpada**

Zbog izrazito dugog perioda odlaganja ova faza je izrazito važna. Način odlaganja otpada mora biti takav da on bude permanentan. Prije samog odlaganja potrebno je izvršiti imobilizaciju otpada u spremnik, a nakon toga ga odložiti. Imobilizacija otpada je proces kojim se otpad pretvara u čvrstu stabilnu masu. Najčešće se vrši imobilizacija u cementu, bitumenu i staklu. Jedan od razloga zašto se baš ovi materijali koriste za imobilizaciju, jest taj da zaustavljaju radioaktivno zračenje.



*Slika 3.4: Kapsula za odlaganje otpada imobiliziranog cementom*





*Slika 3.5: Vrste zračenja i otpornost materijala*

Otpad se dugotrajno može skladištiti nadzemno ili podzemno. Na primjer jedna od metoda nadzemnog odlaganja je odlaganje u suhe komore. Ona se primjenjuje nakon što je otpad bio ohlađen. Tada se otpad sprema u cilindre ispunjene inertnim plinom, a cilindri se spremaju u komore ispunjene betonom ili nekim drugim materijalom koji pruža zaštitu od zračenja. A metoda podzemnog odlaganja je odlaganje u podzemna skladišta. Zasniva se na odlaganju otpada u skladišta koja su obično 300 metara ispod zemlje. [4] [5]



*Slika 3.6: Skladištenje u suhe komore*



*Slika 3.7: Skladištenje u podzemlju*

Koja god se metoda skladištenja koristila, od iznimne je važnosti sigurnost tog skladištenja zbog štetnih posljedica koje visokoradioaktivni otpad ima na okoliš.

## **4. Propisi o zbrinjavanju visokoradioaktivnog otpada**

Razmotrit ćemo zakone o zbrinjavanju visokoradioaktivnog otpada u državama koje su najznačajnije iz naše pozicije, a to su Republika Hrvatska kao naše mjesto stanovanja, te Sjedinjene Američke Države kao jedne od država s najviše radioaktivnog otpada.

### **4.1 Propisi o zbrinjavanju visokoradioaktivnog otpada u Republici Hrvatskoj**

Republika Hrvatska kao članica Europske unije mora poštivati direktivu Direktiva o upravljanju radioaktivnim otpadom i istrošenim gorivom. Tom direktivom članice Europske Unije moraju:

- imati nacionalnu politiku o upravljanju radioaktivnim otpadom i istrošenim gorivom
- imati nacionalni program o zbrinjavanju nuklearnog otpada, koji uključuje planove za izgradnju ustanova za zbrinjavanje nuklearnog goriva
- informirati javnost o relevantnim informacijama o radioaktivnom otpadu
- kontrolirati zakone o radioaktivnom otpadu i njihovo provođenje barem jednom u deset godina

U Republici Hrvatskoj zbrinjavanje visokoradioaktivnog otpada regulirano je Zakonom o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Taj zakon također obavezuje Hrvatski sabor na donošenje strategije o zbrinjavanju radioaktivnog otpada. [2]

#### **4.1.1 Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti**

Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti Hrvatski je sabor donio 15. studenog 2013. Ovaj zakon određuje mjere radiološke sigurnosti, mjere fizičkog osiguranja te neširenja nuklearnog oružja pri obavljanju nuklearnih djelatnosti i djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja u svrhu omogućavanja primjerene zaštite pojedinaca, društva i okoliša, u sadašnjosti i budućnosti, od štetnih posljedica ionizirajućeg zračenja i omogućavanja sigurnog obavljanja djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, nuklearnih djelatnosti, zbrinjavanja radioaktivnog otpada i fizičkog osiguranja izvora ionizirajućeg zračenja i nuklearnih postrojenja. [7]

Zbrinjavanje radioaktivnog otpada definirano je člancima 49 – 59. Time se Republika Hrvatska obavezuje sav radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo koje je nastalo na teritoriju Republike Hrvatske zbrinuti na dugoročno održiv način na vlastitom teritoriju, a također je obavezna zbrinjavati radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo iz Nuklearne elektrane Krško, u mjeri koja je definirana bilateralnim sporazumom Republike Hrvatske i Republike Slovenije.

Temeljem ovog zakona zabranjuje se uvoz radioaktivnog otpada u Republiku Hrvatsku (osim ako nije drugačije definirano međunarodnim sporazumom).

#### 4.1.2 Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva

Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva donesena je 17. listopada 2014. godine od strane Hrvatskog sabora. Svrha ove strategije je izgradnja nacionalnog sustava za zbrinjavanje radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva. [6]

Prema bilatelarnom sporazumu Republika Hrvatska u razdoblju od 2023. do 2025. obavezna je fizički preuzeti polovicu pogonskog radioaktivnog otpada i polovicu raspoloživog istrošenog nuklearnog goriva s lokacije NE Krško.

Vrsta radioaktivnog otpada	2023.	2043.
Pogonski	4000 tona	4900 tona
Dekomisijski	5000 tona	5310 tona

Tablica 4.1: Predviđena količina inventara radioaktivnog otpada NE Krško

Karakteristike	2023.	2043.
Broj istrošenih gorivnih elemenata	1498	2282
Masa	870 tona	1330 tona

Tablica 4.2: Predviđena količina inventara istrošenog nuklearnog goriva NE Krško

#### 4.2 Propisi o zbrinjavanju visokoradioaktivnog otpada u Sjedinjenim Američkim Državama

Spomenuto je da su Sjedinjene Američke Države jedna od država s najviše radioaktivnog otpada, točnije imaju 13000 tona visokoradioaktivnog otpada koji potječe iz vojnih aktivnosti, te 70000 tona istrošenog nuklearnog goriva iz nuklearnih elektrana, s trendom porasta od 2200 tona godišnje. [8]

U Sjedinjenim Američkim Državama jedan od najvažnijih dokumenata vezanih uz upravljanje visokoradioaktivnom otpadom je Dokument o nuklearnom otpadu (engl. *Nuclear Waste Policy Act*), koji je donešen 1982. godine. Ovaj dokument obavezuje Ministarstvo energije (engl. *Department of Energy*) da pronađe lokaciju, izgradi i upravlja zbrinjavanjem visokoradioaktivnog otpada, te obavezuje Agenciju za zaštitu okoliša (engl. *Environmental Protection Agency*) na razvoj standarda za zaštitu okoliša od mogućih zagađenja tijekom skladištenja.

Primarna lokacija koja je bila razmatrana za skladištenje visokoradioaktivnog je planina Yucca, međutim ova lokacija je odbačena kao moguća lokacija. Trenutno je u planu da se do 2021. Izgradi ustanova za kratkoročno skladištenje, te do 2048. Ustanova za dugoročno skladištenje. Trenutno se otpad skladišti na 35 privremenih lokacija budući da ne postoji lokacija za dugoročno skladištenje. [8]

## 5. Usporedba s visokotoksičnim industrijskim otpadom

Visokotoksični otpad je onaj otpad koji može uzrokovati smrt, ozljede ili deformacije živih bića koji su u doticaju s njim ili u njegovoj neposrednoj blizini. Vrlo lako se rasprostire i može kontaminirati rijeke, jezera, mora pa i samu atmosferu. Od dvije milijarde tone otpada koji se godišnje proizvede u Europi 2% je kvalificirano kao visokotoksični industrijski otpad [5].

Industrijski otpad je onaj koji nastaje u procesu proizvodnje i nije više pogodan za vraćanje u proizvodni proces. Sastoji se od raznovrsnih stabilnih i nestabilnih elemenata organskog i anorganskog porijekla.

Visokotoksični i industrijski otpad u današnje vrijeme vrlo je teško kategorizirati i odrediti mu pripadnost jer se ova dva pojma često koriste kao sinonimi. No u novije vrijeme dogovorena je podjela. Industrijski otpad dijelimo na:

- kemijski otpad – nastaje u raznim tvornicama, industrijskim postrojenjima te centrima za pročišćavanje otpadnih voda. Kako sadrži razne kemikalije, među kojima su i neke vrlo opasne, pristupa mu se s velikim oprezom pri rukovanju i odlaganju. Zbrinjavanjem ovog otpada najčešće se brinu ekološke i vladine organizacije.
- kruti otpad – sačinjavaju ga razni materijali koji se koriste pri pakiranju raznih stvari poput kartonskih kutija i sl. Ova vrsta otpada se vrlo lako može reciklirati te je na samim pogonima koji ga proizvode da se pobrinu o ispravnom odlaganju i reciklaži.
- toksični otpad – uzrokuje smrt i bolesti kod živih bića, nastaje kao nusprodukt u raznim tvornicama, elektranama, poljoprivredi, pročišćavanju otpadnih voda te bolnicama. Provodi se pažljivo i planirano odlaganje i uništavanje ovakve vrste otpada.

Ukoliko pogledamo brojke i količinu generiranog otpada u svijetu godišnje nuklearne elektrane proizvedu oko 200,000 metara kubičnih slabo i srednje radioaktivnog otpada te oko 10,000 kubičnih metara visokoradioaktivnog otpada. Države članice OECD-a godišnje proizvedu ukupnu količinu radioaktivnog otpada od 81,000 metara kubičnih te oko 300 milijuna tona toksičnog otpada.

Vrlo je teško povući crtu između visokoradioaktivnog i visokotoksičnog industrijskog otpada koji je od njih opasniji i štetniji jer uz pravilno i kontrolirano odlaganje obje vrste otpada ne bi trebali predstavljati problem za okoliš i ljude, no naravno postoje vrste visokotoksičnog otpada koje nije moguće "uhvatiti" pa ni skladištiti. Za primjer možemo uzeti elektrane.

Ukoliko elektrana jakosti 1000 MWe radi na ugljen ona će proizvesti oko 400,000 tona opasnog pepela godišnje, kojeg je skoro pa nemoguće filtrirati i koji će kao takav otići u atmosferu i direktno naštetiti ljudima i okolišu. No elektrana iste snage koja se pogoni nuklearnim gorivom godišnje će proizvesti oko 300 metara kubičnih slabo i srednje radioaktivnog otpada te oko 20 metara kubičnih visokoradioaktivnog otpada što daje ukupnu količinu od oko 430 tona godišnje. Naravno, za razliku od

pepela taj otpad se može i mora kontrolirati i skladištiti u posebnim uvjetima. Ukoliko bi se sva električna energija potrebna jednoj osobi godišnje stvarala u nuklearnim elektranama stvorila bi se količina radioaktivnog otpada od 39,5 grama po osobi. No ukoliko bi se stvarala samo iz elektrana na ugljen ili prirodni plin po osobi bi se godišnje stvorilo 10 tona plina CO<sub>2</sub> kojeg je nemoguće skladištiti i odlagati, te je glavni uzročnik globalnog zatopljenja.

## 6. Zaključak

U seminaru smo pokušali prikazati kako se procesira i odlaže visokoradioaktivnim otpadom. Visokoradioaktivni otpad ima dugotrajan utjecaj na okoliš i društvenu sliku područja pa je jako važno kako i gdje će se otpad odlagati. U svijetu danas postoje velike količine radioaktivno otpada, ali kao što smo vidjeli postoje kapaciteti da se sav radioaktivni otpad imobilizira, skladišti i u konačnici odbaci. Unatoč velikoj opasnosti od visokoradioaktivnog otpada za čovjeka proces dobivanja energije iz nuklearne fisije je jedan od čistijih oblika. U budućnosti razvitkom tehnologije moguće je značajno smanjiti problem visokoradioaktivnog otpada ako se nađe rješenje kontroliranja nuklearne fuzije čijim postupkom bi nastajao visokoradioaktivni otpad čija radioaktivnost puno brže opada

## 7. Literatura

1. Ojovan, M. I., Lee, W.E., An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation, 2005
2. Radioaktivni otpad, <http://radioaktivniotpad.org/>
3. High-level waste, [https://en.wikipedia.org/wiki/High-level\\_waste](https://en.wikipedia.org/wiki/High-level_waste)
4. Dry cask storage, [https://en.wikipedia.org/wiki/Dry\\_cask\\_storage](https://en.wikipedia.org/wiki/Dry_cask_storage)
5. Deep geological repository, [https://en.wikipedia.org/wiki/Deep\\_geological\\_repository](https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_geological_repository)
6. Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, 2014. [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014\\_10\\_125\\_2382.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_10_125_2382.html)
7. Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti, 2013. [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013\\_11\\_141\\_3012.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_11_141_3012.html)
8. Disposal of High-level Nuclear Waste, [http://www.gao.gov/key\\_issues/disposal\\_of\\_highlevel\\_nuclear\\_waste/issue\\_summary](http://www.gao.gov/key_issues/disposal_of_highlevel_nuclear_waste/issue_summary)

### 7.1 Izvori slika

- Slika 2.1: An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation
- Slika 3.1: <http://www.cherd.ichemejournals.com/cms/attachment/2020819194/2041009035/gr1.jpg>
- Slika 3.2: [http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/Nuclear\\_Fuel\\_Cycle/Nuclear\\_Wastes/Appendicies/compaction.jpg](http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/Nuclear_Fuel_Cycle/Nuclear_Wastes/Appendicies/compaction.jpg)
- Slika 3.3: [http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/Nuclear\\_Basics/Storage\\_pool\\_Areva.jpg](http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/Nuclear_Basics/Storage_pool_Areva.jpg)
- Slika 3.4: [http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/Nuclear\\_Fuel\\_Cycle/Nuclear\\_Wastes/Appendicies/cement.jpg](http://www.world-nuclear.org/uploadedImages/org/info/Nuclear_Fuel_Cycle/Nuclear_Wastes/Appendicies/cement.jpg)
- Slika 3.5: <http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2003/klemencic/slike/prodornost.jpg>
- Slika 3.6: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/Nuclear\\_dry\\_storage.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/Nuclear_dry_storage.jpg)
- Slika 3.7: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e9/WIPP-04.jpeg>



## **7.2 Izvori tablica**

- Tablica 4.1: Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, 2014.
- Tablica 4.2: Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, 2014.