

Uloga mineralogije u dugoročnom odlaganju nuklearnog otpada

Županić, Daria

Undergraduate thesis / Završni rad

2009

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/um:nbn:hr:217:378960>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEU ILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATI KI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK
STUDIJSKI PROGRAM : Znanosti o okolišu (Environmental sciences)

Seminarski rad:

ULOGA MINERALOGIJE U DUGORO NOM ODLAGANJU
NUKLEARNOG OTPADA

(Mineralogy in long-term nuclear waste management)

MENTOR: dr.sc. Nenad Tomaši , doc.

STUDENTICA: Daria Župani

Zagreb, 2009.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. RADIOAKTIVNI OTPAD I ZRA ENJE	2
3. KARAKTERISTIKE I PODJELA RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	4
4. GLAVNE STRATEGIJE ZA DUGORO NO ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	5
4.1. OTPAD IZ REPROCESIRANJA.....	5
4.2. UPOTREBLJENO GORIVO.....	6
4.3. PRIMJERI IZ PRIRODE.....	6
5. STRATEGIJE POHRANE I MINERALOGIJA OKOLIŠA.....	8
5.1. PRIMARNO POHRANJIVANJE.....	9
5.2. MINERALI KOJI DOLAZE U SUSTAVU BARIJERA.....	12
5.3. ZAŠTITNI MINERALI U PRIRODNOM OKRUŽENJU.....	14
6. ZAKLJU AK.....	15
7. LITERATURA.....	16
8. SAŽETAK.....	17
9. SUMMARY	17

1. UVOD

Prema definiciji Meunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA-International Atomic Energy Agency) radioaktivni otpad je « *bilo koji materijal koji sadrži ili je one iš en radionuklidima u koncentracijama ili pri razini radioaktivnosti većoj od one minimalne dozvoljene od strane nadležnih tijela i za koji ne postoji nikakova predviđena upotreba*».

U današnje vrijeme nuklearni otpad predstavlja poseban problem, budući da su najveći proizvođači nuklearne elektrane, ije su izgradnje u porastu, te danas zadovoljavaju 17% svjetskih potreba za električnom energijom. S porastom broja nuklearnih elektrana, raste i količina radioaktivnog otpada koji zahtjeva zbrinjavanje i uz sebe veže niz komplikiranih procesa.

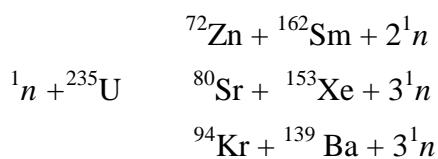
Briga o radioaktivnom otpadu kao primarni cilj ima zaštitu ljudskog zdravlja i okoliša, te odlaganje s dugoročnim aspektom. Baš taj dugoročni aspekt bazira se na znanjima iz mineralogije. Razni kemijski i fizikalni procesi vezani za skladištenje radioaktivnog otpada i zaštitu od njegovih negativnih posljedica vezani su uz razne minerale i njihove mogućnosti da inkorporiraju, apsoriraju kemijski promijene ili inaktiviraju te uglavnom, da spriječe djelovanje štetnih radionuklida.

2. Radioaktivni otpad i zrajenje

Većina radioaktivnog otpada potječe iz nuklearnih elektrana u obliku iskorištenog goriva. Osim nekoliko ranijih tipova reaktora, koji su koristili uranov metal, većina reaktora koristi skup goriva koja su bazirana na mikrokristalini nom UO_2 . Mali broj reaktora ima dozvolu za korištenje miješanog oksidnog goriva (mixed oxide fuel – MOX) koje je bazirano na UO_2 i PuO_2 . Jedan dio iskorištenog goriva prolazi procese u kojima se izdvajaju preostali U i Pu za proizvodnju miješanog oksidnog goriva. Pri tome dobivene visoko radioaktivne otopine koncentriraju se, kalciniraju i inkorporiraju u staklo, dok su u budućinosti za to predviđene razne mješavine sintetičkih minerala (SYNROC- Synthetic Rock i slični materijali). Takva razmatranja okrenuta su prema stabilnijim oblicima otpada, koji će manje vjerojatno otpustiti radionuklide u okoliš.

Minerali glina ispituju se radi upotrebe u upravljanim sustavima za pohranu zbog onemogućavanja prodiranja podzemnih voda, te na taj način onemogućuju kretanje radionuklida. Koncept dubokog geološkog odlaganja temelji se kemijskim reakcijama između minerala stijena i otopljenih radionuklida pomoću kojih se sprječava njihov prodror u podzemne vode.

Problemi koji se javljaju s iskorištenim gorivom su izrazito visoke razine radijacije koje takove ostaju desetica godina nakon odstranjenja iz reaktora; značajna proizvodnja topline zahtjeva neprestano hlađenje desetica godina (aktivno upravljanje); proces fizijske je uglavnom nasumičan: ^{235}U i ^{239}Pu razdvajaju se i tvore izotope većine elemenata periodnog sustava, na primjer, tipični tokovi fizijske su:



Iako se njihova prisutnost, vrsta i radijacija mogu determinirati bez ikakvih problema, kemija i biokemija radionuklida, te njihovo ponašanje u okolišu i biosferi potencijalno je komplikirano kao i sama kemija. Kada dolaze u biosferu, mogu nastati njihovih migracija u druge organizme postaju mnogobrojne.

Realna prijetnja se javlja pri znatnim koncentracijama doza radijacije. Doza ovisi o vrsti radijacije i podložnosti organa na koji ona djeluje (Tablica 1.). Tada se doza pretvara u

rizik – rizik smrti od raka ili promjene u genetskom sustavu. Zemlja je radioaktivna planet s odre enim pozadinskim zra enjem. Rizik od doze pozadinskog zra enja je $1 \text{ u } 10^5$ - puno manji od mnogih rizika s kojima se suo avamo svaki dan.

Tablica 1. : *Definicija doze i vezanih pojmove (Izvor: Curtis, 2000)*

doza	energija koju tijelo apsorbira
faktor kvalitete	«faktor štetnosti»; $x 20 ()$, $x 1 (,)$
u inkovita doza	doza x faktor kvalitete [Sievert]
ukupna doza	ukupna radijacija koju primi populacija tijekom odre enog vremena iz definiranog izvora
ograni enje doze	sprje avanje u inka doze iz bilo kojeg izvora radijacije
limit doze	doza radijacije u odnosu na zakonski odre eni maksimum (u godini)
Sievert	jedinica koja ozna ava potencijalnu štetu od radijacije

Cilj upravljanja radioaktivnim otpadom mora biti osiguravanje sveukupne javnosti od dodatnih doza u kombinaciji s pozadinskim zra enjem. Zakonsko ograni enje za dodatnu dozu zra enja jednako je riziku od otprilike $1 \text{ na } 10^6$ - za red veli ine niži od pozadinskog zra enja. (Curtis, 2000)

3. Karakteristike i podjela radioaktivnog otpada

Nuklearne elektrane su odgovorne za gotovo sav radioaktivni otpad koji trenuta no nastaje. Radioaktivni otpad iz postrojenja nuklearne energetike sa injavaju sve otpadne radioaktivne tvari koje nastaju u procesima nuklearnog gorivnog ciklusa i tijekom pogona nuklearnih elektrana.

Radioaktivni se otpad prema Zakonu o zaštiti od ioniziraju eg zra enja (Narodne novine 53/91) dijeli u tri osnovne kategorije:

- 1) Nisko radioaktivni otpad - karakterizira ih niska specifi na i aktivnost (ispod 5×10^9 Bq/m³) i sa zanemarivim sadržajem aktinida (aktinidi su teški elementi, -emiteri, s rednim brojem ve im od aktinija, tj. od rednog broja 89).
- 2) Srednje radioaktivni otpad – tako er sadrži samo i emitere (sadržaj aktinida i u ovoj vrsti otpada je zanemariv), ali je specifi na aktivnost viša nego kod niskoaktivnog otpada (do 5×10^{14} Bq/m³).
- 3) Visoko radioaktivni otpad – karakteriziraju ga više spacifici ne aktivnosti od navedenog i viša koncentracija aktinida.

Tako er postoji i podjela na:

- 1) Radioaktivni otpad koji potje e iz pogona nuklearnih elektrana - toj kategoriji pripadaju gore navedeni niskoaktivni i srednjoaktivni otpad.
- 2) Radioaktivni otpad koji potje e iz postrojenja za preradu nuklearnog goriva - taj se radioaktivni otpad svrstava u kategoriju visokoaktivnog otpada.(Fereti , 1995)

4. Glavne strategije za dugoro no odlaganje radioaktivnog otpada

Primarna potreba za zaštitom ljudi (pogotovo radnika koji su u kontaktu sa zrajenjem) je zaštita tijela od radijacije. Na prvi pogled izgleda jednostavno: manje prodiruće radijacije mogu biti apsorbirane listom papira, a one koje više prodiru zaustavlja zaklon od teškog metala ili deblji sloj stijena ili betona. Na žalost, to se odnosi samo na one izvore radijacije koji nisu pokretni.

Za radionuklide koji su mobilni postoje dvije strategije. Prva i najoiglednija je skladištenje te je najkorištenija kada se govori o nuklearnom otpadu. Metoda «dilute and disperse» podrazumijeva da se radionuklidi disperzijom svedu na malu koliku radijaciju, koja je kao dodatna doza zrajenja beznačajna u odnosu na pozadinsko zrajenje. Danas se koristi prva strategija, budući da je disperzija poprilično nesigurna.

Većina radioaktivnog otpada dolazi kao kruti otpad. Tehnologija kojom trenutačno raspolaćemo dozvoljava sigurno pakiranje i odlaganje i u inkovitu zaštitu od radijacije. Problem je u tome što je takvo odlaganje samo kratkoročno rješenje. Spremnici u kojima je pohranjen otpad trebali bi se zamjenjivati svakih 50 – 100 godina uz znatna finansijska izdvajanja i problem izlaganja radnika zrajenju. Takav oblik aktivnog upravljanja otpadom potrajat će najmanje 10^4 godina uz pretpostavku da će ga buduće generacije moći obavljati. (Curtis, 2000)

4.1. Otpad iz reprocesiranja

Nuklearni otpad predstavlja veliku opasnost za okoliš budući da sadrži veliku koncentraciju različitih radionuklida u izrazito mobilnim oblicima. Najvažnije je pretvoriti te tekuće u stabilniju formu, a to se radi procesom vitrifikacije. Kao matriks koristi se borosilikatno staklo, koje se zajedno sa otpadnim produktima zatvara u eli ne spremnike i hlađi se zrakom.

Alternativna rješenja podrazumijevaju istraživanja stijena sa slijedećim svojstvima temeljena na otpornosti minerala. Poznato je da su vulkanska stakla puno manje otporna od nekih stijena. Stijena koja bi zadovoljavala kriterije sastojala bi se od minerala koji su otporni na trošenje te imaju fleksibilne strukture koje mogu primiti znatne količine fizijskih produkata. Istraživanja su rađena sa keramikama na bazi titanita (CaTiSiO_3), te SYNROC-a koji predstavlja određeni broj formulacija baziranih na nekoliko titanovih minerala zajedno s

dodacima stakla. Temelj tog pristupa je dobivanje taljevinskih kompozicija iz kojih će iskristalizirati perovskit (CaTiO_3), cirkonolit ($\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$) ili spojevi barija i aluminija s titanatima. Njihova zadaća je da inkorporiraju što više produkata fisije i aktinidnog otpada.

4.2. Upotrebljeno gorivo

Takva vrsta otpada zaprećati se u relativno inertne spremnike od nehranljivog elika ili cirkonijeve legure (zircalloy) (Slika 1.) Upotrebljeno gorivo sadrži izotope nastale fisijom te radionuklide transurana nastale generiranjem neutrona. Oba oksida koja sadrži (PuO_2 i UO_2) su poprilično stabilna u reduktivnim uvjetima s pH vrijednošću od 4 do 9. U oksidativnim uvjetima UO_2 prelazi u UO_2^{2+} (uranil) koji je više topiv. PuO_2 prelazi u Pu^{3+} pri niskim Eh i pH vrijednostima (Curtis, 2000).

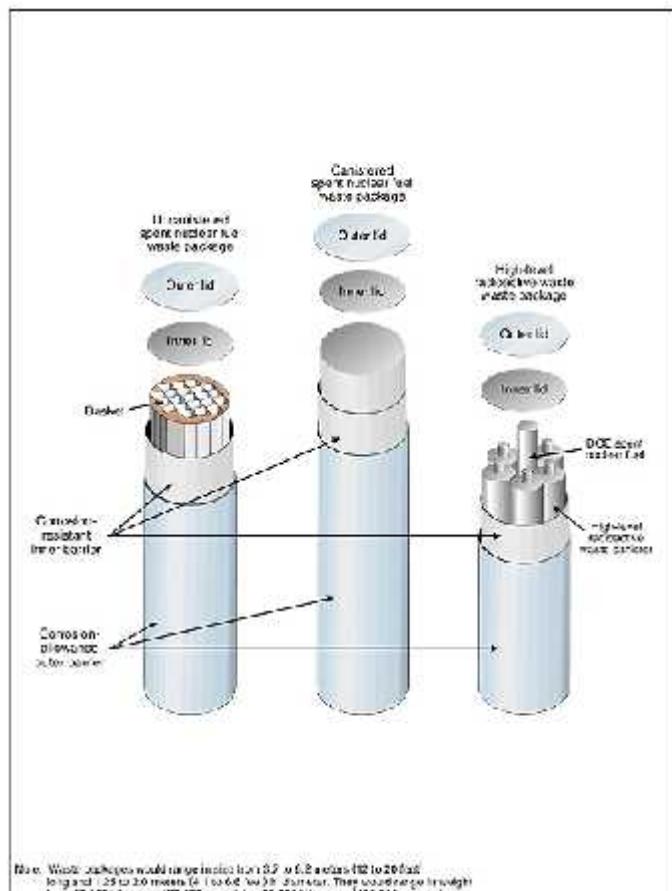


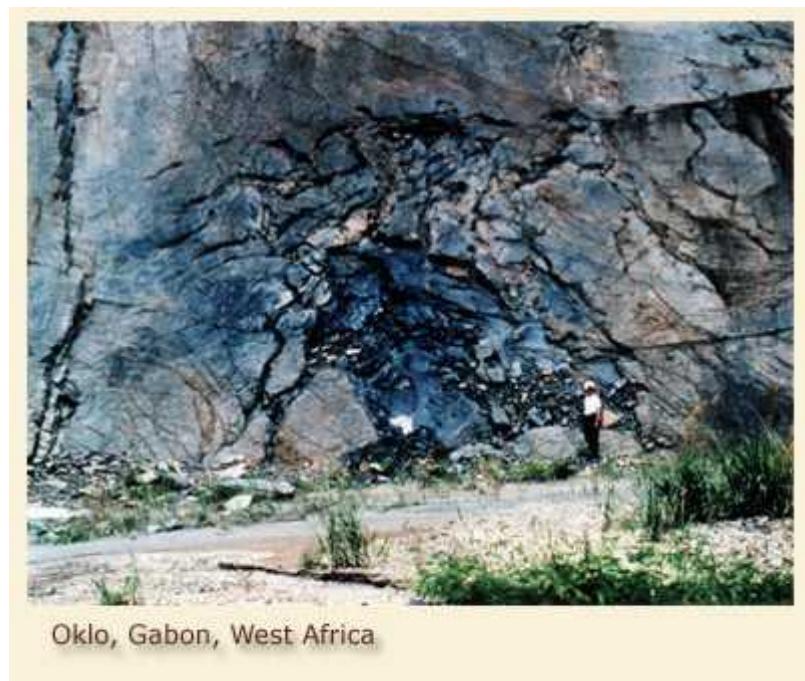
Figure S-5. Potential waste package designs for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste.

Slika 1. : Spremnici za odlaganje upotrebljenog goriva (Izvor: <http://www.nei.org/filefolder/deis15.jpg>)

4.3. Primjeri iz prirode

Strategije upravljanja otpadom uglavnom su temeljene na laboratorijskim istraživanjima u kojima je nemoguće simulirati posljedice koje nuklearni otpad ima na geološki okoliš u dužem periodu vremena. Radi toga, koristi se pristup kojim se traže prirodne analogije kojima bi se moglo predvidjeti ponašanje mobilnih elemenata tijekom dužih geoloških perioda u okolišima koji se razmatraju kao prikladni za skladištenje radioaktivnog otpada.

U prirodi uran se u većim koncentracijama javlja kao uraninit (UO_2), te kao mikrokristalini ni ekvivalent uranov oksid (pitchblende). U oksidativnim uvjetima nastaje topivi ion uranil (UO_2^{2+}) koji je mobilan u tom obliku ili u sastavu karbonatnih ili sulfatnih kompleksa. Sekundarno obogaćenje ruda urana događa se kada se uranil nađe u podzemnim vodama u reduktivskim uvjetima. Uraninit se tada reprecitipira. Postoje mnogi primjeri uraninita koji je ostao odložen na jednome mjestu milijunima godina (Slika 2.) (Curtis, 2000).



Slika 2. : «Prirodni reaktor» u Oklu – dokaz zadržavanja radionuklida u prirodi (Izvor:
http://www.ocrwm.doe.gov/factsheets/images/0205_oklo.jpg)

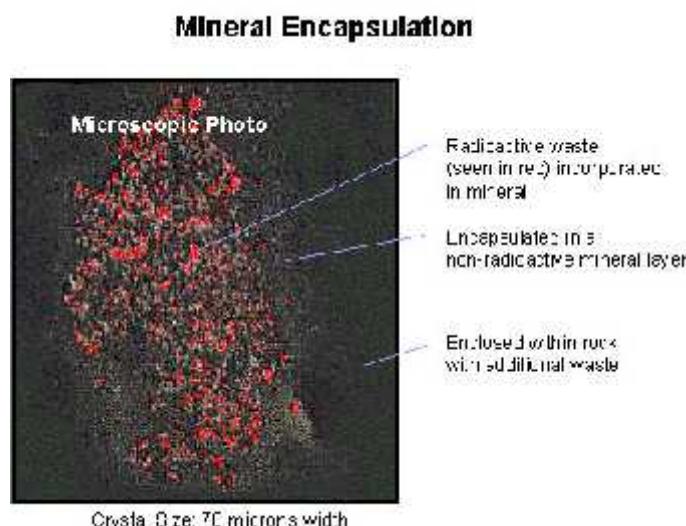
5. Strategije pohranjivanja i mineralogija okoliša

Prema svojim sposobnostima pri odlaganju nuklearnog otpada, minerali se dijele na dvije skupine:

- 1) minerali (prirodni ili sintetički) koji se koriste pri izvedbi spremnika za opasne radionuklide:
 - a) stopa otpuštanja radionuklida u slavaju da minerali koji služe za pohranjivanje dođu u kontakt s okolišem, a posebno podzemnim vodama koje prenose topive elemente,
 - b) usporavanje radionuklida raznim mineralima koji se koriste u konstrukciji spremnika.
- 2) prirodni minerali u geosferi i biosferi i njihove sposobnosti da uspore radionuklide kada ti radionuklidi uspiju probiti dizajnirane spremnike
 - a) mineralno usporavanje u blizini dizajniranih spremnika, kao i na svim mogućim putevima kojima bi radionuklidi mogli doći natrag u biosferu (Slika 3.).

Analogno tome, postoje tri načina sveukupnog pohranjivanja:

- 1) primarno pohranjivanje (analogno sa 1.a)
- 2) minimalizacija propusnosti (analogno sa 1.b i 2.a)
- 3) usporavanje radionuklida (analogno sa 1.b i 2.a) (Curtis, 2000)



Slika 3.: Inkorporiranje radioaktivnog otpada unutar minerala (Izvor:
http://www.geomatrixsolutions.com/mineral_encapsulation.jpg)

5.1. Primarno pohranjivanje

Planiranje koje uključuje pohranjivanje radioaktivnog otpada u periodu od 10^4 godina mora zadovoljavati zakonske regulative o zaštiti javnog zdravlja, uz prepostavku da će projektirani spremnici prije ili kasnije popustiti te izložiti otpad površinskim ili uvjetima ispod površine. Pitanje koje se tada postavlja je kojom brzinom će otpad degradirati u radionuklide koji će kao mobilni elementi dospjeti u hidrosferu te možemo li predvidjeti ponašanje različitih minerala u tim vremenskim okvirima.

Najbitniji imbenik u ovom slučaju je otpornost minerala na trošenje. Degradacija stijena u tlu događa se pod utjecajem fizike, kemijske i biološke erozije. Tla koja nastaju sastoje se od zaostalih mineralnih zrna, zajedno sa precipitiranim hidroksidima aluminija i željeza te organskih tvari. Njihov kemijski sastav i stopa kemijske erozije najvećim dijelom ovise o vrsti klime, a zatim i o debljini slojeva, dubini na kojoj se nalaze te nadmorskoj visini. Poznato je da toplije klime pogoduju kemijskoj eroziji stijena te su tla bogatija crvenim oksidima i hidroksidima, dok su povećanjem nadmorske visine utjecaj kemijske erozije pada.

Ovisno o temperaturi i tlaku pri kojima su nastali, minerali se razlikuju po tome u kojima su nastali. Minerali koji su nastali pri visokim temperaturama manje su otporni od onih koji su nastali pri niskim temperaturama. Minerali koji originalno tvore stijene od kojih su tla nastala mogu se naći na dubinama većim od 10 metara u tropskim područjima, dok u područjima s hladnom klimom nalaze se praktički na površini. Važnost ovih saznanja je u predviđanju ponašanja umjetno dizajniranih materijala koji bi se koristili u upravljanju nuklearnim otpadom.

Otpornost minerala može se promatrati i kroz razlike termokemijske uvjete. Curtis (1976) je izračunao standardne vrijednosti Gibbsove (slobodne) energije za reakcije u kojima se istraživani minerali raspadaju samo u stabilne forme koje su pronađene u gotovo svim površinskim okolišima. Te vrijednosti su blisko povezane uz otpornost minerala. Tom metodom može se predvidjeti stabilnost različitih faza radioaktivnog otpada tokom dugih vremenskih perioda u slučaju da dođe do nefunkcionalnosti spremnika.

Tablica 2. : Otpornost pojedinih spojeva na temelju izra une slobodne Gibbsove energije
(preuzeto i prilago eno iz Curtis, 2000)

	Metali i oksidi radioaktivnog otpada	G_r^0 , kJ gatom ⁻¹
1.	$U(m) + 1,5O_2(g) + 2H^+(aq) = UO_2^{2+}(aq) + H_2O(l)$	- 198,45
2.	$U(m) + 2 H_2O(l) = UO_2(s) + 2H_2(g)$	-76,64
3.	$Mg(m) + 0,5O_2(g) + 2H^+(aq) = Mg^{2+}(aq) + H_2O(l)$	-172,99
4.	$Mg(m) + 2H^+(aq) = Mg^{2+}(aq) + H_2(g)$	-151,80
5.	$UO_2(s) + 0,5O_2(g) + 2H^+(aq) = UO_2^{2+}(aq) + H_2O(l)$	-26,48
6.	$UO_2(s) + 4H^+(aq) = U^{4+}(aq) + 2 H_2O(l)$	+3,79
7.	$PuO_2(s) + 4H^+(aq) = Pu^{4+}(aq) + 2 H_2O(l)$	+6,10
8.	$4PuO_2(s) + 12H^+(aq) + C(s) = 4 Pu^{3+}(aq) + HCO_3^- + 5 H_2O(l)$	-3,86
Feldspatska stakla kao vitrificirani analozi visokoaktivnog otpada		
9.	$CaAl_2Si_2O_8(s) + 2H^+(aq) + H_2O(l) = Al_2Si_2O_5(OH)_4(s) + Ca^{2+}(aq)$	-8,71
10.	$2NaAlSi_3O_8(s) + 2H^+(aq) + H_2O(l) = Al_2Si_2O_5(OH)_4(s) + 4SiO_2 + 2Na^+(aq)$	-5,75
11.	$2KAlSi_3O_8(s) + 2H^+(aq) + H_2O(l) = Al_2Si_2O_5(OH)_4(s) + 4SiO_2 + 2K^+(aq)$	-4,64
Minerali koji sadržavaju Ti; analozi «synroc»-a		
12.	$CaTiO_3(s) + 2H^+(aq) = Ca^{2+}(aq) + H_2O(l) + TiO_2(s)$	-14,94
13.	$CaTiSiO_5(s) + 2H^+(aq) = Ca^{2+}(aq) + H_2O(l) + TiO_2(s) + SiO_2(s)$	-8,20

Jednadžbe 1-4 (Tablica 2.) istražuju postojanost uranovog metala i jednog od reaktivnijih oklopnih materijala. Slobodne energije ovih reakcija su za red veli ine ve od oksidacije pirita ili izgaranja hidrokarbonata koji su za red veli ine ve i od tipi nih energija raspada minerala koji tvore stijenu. Ovi rezultati govore u prilog skladištenja otpada budu i da se iz njih ne može o itati niti jedna prednost dugoro nog odlaganja otpada koji bi morao biti strogo nadziran i u slu aju pogreške došlo bi do brzih negativnih rekacija.

Jednadžbe 9-11 (Tablica 2.) prikazuju karakteristike alumosilikatnih stakla. Ona su manje stabilna od odgovaraju ih kristalnih faza, ali puno stabilnija od metala, što nas navodi da su razuman izbor za skladištenje otpada. Problem se javlja jer ta metoda nije dovoljno istražena, a i injenica da je vitrificirani otpad manje stabilan.

Jednadžbe 12 i 13 (Tablica 2.) prikazuju stabilnost razli itih sinteti kih stijenskih masa koje su bazirane na mineralima koji prirodno imaju sposobnost inkorporiranja stranih estica te su stabilni u prirodi. Iako nemaju nikakvu prednost pred vitrificiranim oblicima, minerali na bazi titana se ine kineti ki stabilnijima.

Jednadžbe 5-8 (Tablica 2.) prikazuju kako se iskorišteno gorivo ponaša ako se direktno odlaže, kao u «once-through» ciklusu nuklearnog goriva. Nestabilnost UO_2 prema topivom UO_2^{2+} je očita te se mora izbjegavati odlaganje u oksidativnim i vlažnim uvjetima jer bi radionuklidi momentalno bili otpušteni u okoliš. U reduktivnim uvjetima UO_2 je izrazito stabilan i ne prelazi u topivu formu a time nadmašuje sve prirodne minerale od kojih su stijene granitne. To ide u prilog odlaganju nuklearnog otpada u posve anoksim uvjetima, koji bi tražili neprestano nadziranje na površini Zemlje, ali ne i uz duboko zakopavanje ispod saturirane zone podzemnih voda.

Za razliku od UO_2 , PuO_2 je mnogo stabilniji u oksidativnim uvjetima, nešto manje stabilniji u reduktivnim uvjetima, ali i dalje stabilniji od ostalih oblika otpada. Istošeno gorivo podvrgava se izrazitoj iradijaciji i pritom se u rešetku hvataju značajne količine fizijskih produkata. Zbog toga je ono nestabilnije od istih oksida ovdje razmatranih.

Prema dobivenim podacima može se ustanoviti:

metalne faze su vrlo nestabilne i jedina primjenjiva strategija je održavanje s određenim silikatnim ili oksidnim matricama;

vitrificirani oblici otpada i sintetički stijenski materijali nešto su nestabilniji od prirodnih, ali mogu poslužiti svrsi;

oksidi U i Pu su vrlo stabilni, ali samo u isključivo anoksim uvjetima

dugorođena stabilnost svih faza, minerala, stakla, prirodnih ili sintetičkih je vrlo slaba u uvjetima površinskog zakopavanja u usporedbi s onima dubinskog zakopavanja ispod saturirane zone podzemnih voda (zbog slabe ionske snage povrhinskih voda) (Slika 4.).



Slika 4. : Model dubokog zakopavanja radioaktivnog otpada (Izvor:

http://newsimg.bbc.co.uk/media/images/41610000/gif/_41610372_fin_nucewaste3416.gif

U razmatranje takođe treba uzeti slobodnu energiju za reakcije koje se događaju u vodama različitog saliniteta:

Tablica 3. : *Otpornost minerala na temelju slobodne Gibbsove energije (kJ g atom⁻¹) u različitim prirodnim vodama (Preuzeto i prilagođeno iz Curtis, 2000)*

	Standardna G_r^0	Kišnica pH = 5 $I = 0,0003$	Rije na voda pH = 6,5 $I = 0,002$	Morska voda pH = 8 $I = 0,618$
Mg ₂ SiO ₄ (s) forsterit	-4,00	-11,94	-7,63	-2,54
MgSiO ₃ (s) enstatit	-2,98	-8,37	-5,02	-0,98
CaMg(SiO ₃) ₂ (s) diopsid	-2,72	-7,52	-3,74	-0,14
CaAl ₂ Si ₂ O ₈ (s) anortit	-1,32	-4,11	-2,47	-1,23
NaAlSi ₃ O ₈ (s) albit	-0,75	-2,59	-1,77	-0,08
KAlSi ₃ O ₈ (s) ortoklas	-0,51	-2,22	-1,35	-0,04
KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂ (s) muskovit	-0,32	-0,96	-0,45	+0,31

Iz ovih podataka je vidljivo da su površinske vode puno agresivnije od podzemnih, pogotovo onih višeg saliniteta. Ovakvi rezultati govore u prilog strategiji dubokog zakopavanja u stijenama ispod razine podzemnih voda za razliku od površinskog zakopavanja. Dodatnu stabilnost daju podzemne vode visoke slanosti (Tablica 3.)(Curtis, 2000).

5.2. Minerali koji dolaze u sustavu barijera

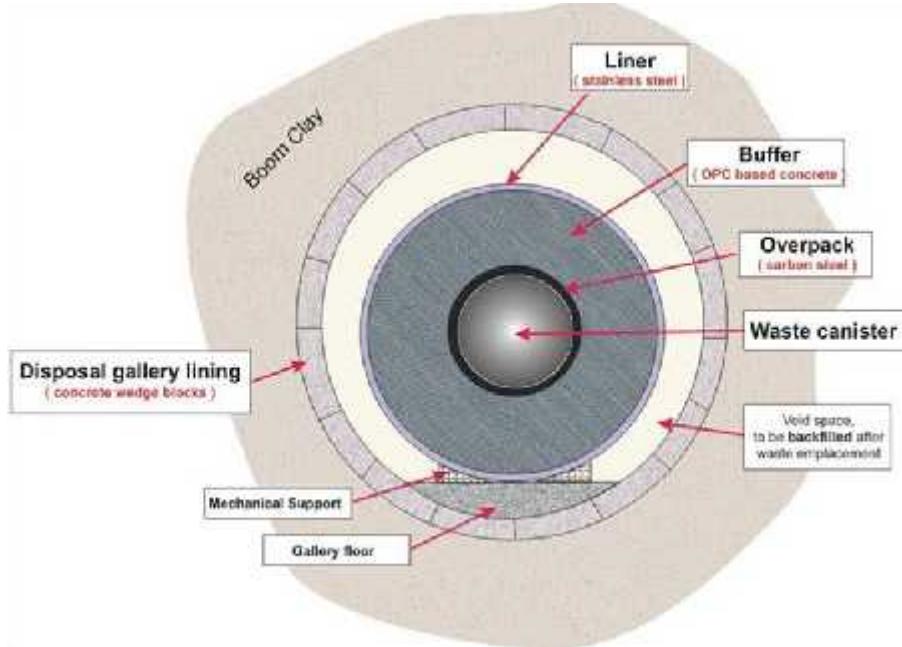
U ovom slučaju govorimo o srednje radioaktivnom otpadu (SRAO) i nisko radioaktivnom otpadu (NRAO). Volumno, oni su zastupljeniji od visoko radioaktivnog otpada (VRAO), ali su manje aktivni. Izvori su im nuklearne elektrane i tvornice za preradu goriva. Uključuju filtere za izmjenu iona i zaštitu koja je uklonjena tokom reprocesiranja iskorištenog goriva. Uz veći volumen i heterogenost, problem koji se javlja je nestabilnost organske tvari

u prisutnosti oksidanta. Proizvodi koji nastaju su metan i uglji ni dioksid pa odlagališta za takav otpad moraju imati plinske oduške.

Kako bi se heterogeni materijali stabilizirali, kompaktiraju se unutar eli nih ba vi ili kutija od betona i elika (površine nekoliko m³). Otpad se tada zatrپava, naj eš e betonom ili cementom budu i da se on može dizajnirati porozan kako bi propuštao plinove. Sami minerali cementa (hidratizirani kalcij i aluminijevi oksidi i silikati) vrlo su bazi ni (pH 10 do 12,5). To svojstvo je važno jer je topivost mnogih oksida (to jest njihova potencijalna mobilnost) bitno smanjena. Iako, na taj na in nisu imobilizirani neki važni radionuklidi, pogotovo oni negativnog naboja kao što su I⁻, Cl⁻ i TcO⁻⁴.

Izgra ene barijere

Dugoro no upravljanje preferira duboko odlaganje za VRAO i dugoživu i SRAO. VRAO koji zra i toplinu ili iskorišteno gorivo odlažu se u teške, nehr aju e metalne spremnike od nehr aju eg elika ili bakra. Spremnici se stavlju u tunele ili trezore te okružuju sa bentonitnim blokovima bez ikakvog slobodnog prostora izme u. Tuneli se tada zape ate , a podzemnoj vodi se dozvoljava da ispuni prostor pora. U slu aju bentonita, hidratacija uzrokuje 50 %-tno pove anje volumena te time stvaraju i izrazito nepropusnu plasti nu barijeru oko metalnih spremnika. Završnu barijeru ine same stijene, kao zaštita izgra enim barijerama ali i zaštita od prolaska radionuklida (Slika 5.) (Curtis, 2000).



Slika 5. : Zaštitni slojevi pri dubokom odlaganju u presjeku (Izvor:

http://www.sckcen.be/var/plain_site/storage/images/media/images/ehs_disposal/multibarrier_system_for_disposal/21170-8-eng-GB/multibarrier_system_for_disposal.jpg)

5.3. Zaštitni minerali u prirodnom okruženju

Geosfera na tri načina služi kao zaštita pri odlaganju nuklearnog otpada:

- zaklanja od zračenja
- štiti izgradene barijere
- produljuje put radionuklidima prema površini

Jedan od oblika zaštite su i reaktivni minerali koji se nalaze na migracijskim putevima podzemnih voda. Ovdje su važni minerali glina. Izmjenom iona, površinskim upijanjem i reakcijama minerala i vode zadržavaju radionuklide dalje od podzemnih voda. Iako, neki radionuklidi (kao Γ i Cl^-) imaju anionski karakter i ne mogu se kontrolirati. Odlaganje se vrši u različitim geološkim formacijama:

- kristalinske podloge
- sitnozrnate sedimentne stijene
- uslojene soli (evaporiti)

U kristalinskim podlogama javljaju se pukotine koje mogu postati putevi kojima se šire radionuklidi, a zaustavljanje tih radionuklida ovisiti će samo smjeru tih pukotina. Esto su korišteni jer su široko rasprostranjeni te se mogu naći na samoj površini ili neposredno ispod površine.

U evaporitima se javlja etrdesetak minerala koji su podijeljeni na karbonate, sulfate, kloride i borate. Perspektivni su za odlaganje nuklearnog otpada zato jer sadrže male koncentracije vode, imaju visoku toplinsku provodnost i ponašaju se plastično te se mogu sami zapeti ako dođe do puknute (Izvor: <http://books.google.hr/>).

Madstoni i šejlovi karakteristični su po svojoj nepropusnosti. Tako er su plastični i mogu se sami zapeti.

6. ZAKLJU AK

Pitanje nuklearnog otpada vrlo je aktualno te se na strategijama njegovog odlaganja i istraživanjima njegovih svojstava intenzivno radi. Realna prijetnja od nuklearnog otpada javlja se u vidu povišenih doza radijacije. Do toga dolazi kada oksidi urana i plutonija zbog svoje nestabilnosti prelaze u mobilne radionuklide.

Zaštita od štetnih radionuklida vrši se na više na ina, a najpoznatiji su plitko i duboko zakopavanje radioaktivnog otpada te vitrificiranje. Budu i da plitko zakopavanje i vitrificiranje ne nude dugoro na i potpuno sigurna rješenja, najbolji na in je duboko zakopavanje.

Pri dubokom zakopavanju najviše pažnje se posve uje kemijskim i fizikalnim svojstvima minerala s kojima bi radioaktivni otpad mogao do i u kontakt. Minerali moraju imati svojstva kojima bi sprije ili štetne radionuklide da do u u biosferu te na taj na in predstavljaju prijetnji ljudima i okolišu.

7. LITERATURA

Curtis, C, 2000. Mineralogy in long - term nuclear waste disposal, *EMU Notes in Mineralogy*, Vol. 2 (2000), 9. poglavlje, str. 333-350

Curtis, C, 1976. Stability of minerals in surface weathering reactions; a general thermochemical approach, *Earth Surface Processes*, 1. poglavlje, str 63 – 70

Fereti D, avlina N, Debrecin N, 1995. *Nuklearne elektrane*, Školska knjiga, Zagreb, str. 333-341

Internetski izvori:

<http://books.google.hr/>

[http://www.freewebs.com/hoseo_environmental_club/Rad-symbol%20\(Big\).JPG](http://www.freewebs.com/hoseo_environmental_club/Rad-symbol%20(Big).JPG)

http://www.geomatrixsolutions.com/mineral_enchhttp://newsimg.bbc.co.uk/media/images/41610000/gif/_41610372_fin_nucewaste3416.gif

<http://www.nei.org/filefolder/deis15.jpg>

http://www.ocrwm.doe.gov/factsheets/images/0205_oklo.jpg

http://www.sckcen.be/var/plain_site/storage/images/media/images/ehs_disposal/multibarrier_system_for_disposal/21170-8-eng-GB/multibarrier_system_for_disposal.jpg

8. SAŽETAK

Većina radioaktivnog otpada potječe iz nuklearnih elektrana u obliku iskorištenog goriva. Radioaktivni otpad podijeljen je u tri skupine: nisko radioaktivni, srednje radioaktivni i visoko radioaktivni otpad. Iako je to uglavnom kruti otpad, kemijskim reakcijama otpuštaju se pokretljivi radionuklidi koji mogu doći u biosferu. Zaštitu od visoko radioaktivnog otpada vrši se dubokim zakopavanjem samog otpada, ispod saturirane zone podzemnih voda. Razlog tome su Pu i U koji se najzastupljeniji elementi, a najstabilniji su u anoksičnim uvjetima.

Geosfera na tri načina služi kao zaštita pri odlaganju nuklearnog otpada: zaklanja od zračenja, štiti izgrađene barijere i produljuje put radionuklidima prema površini. Odlaganje se vrši u različitim geološkim formacijama: kristalinske podloge, sitnozrnate sedimentne stijene i uslojene soli (evaporiti) koje svojim karakteristikama osiguravaju najveću zaštitu.

9. SUMMARY

Most radioactive waste derives from nuclear power plants as spent fuel. Nuclear waste has been divided in three main groups: Low Level Waste, Intermediate Level Waste and High Level Waste. Although this waste is mainly solid, during various chemical reactions mobile radionuclides can be formed and find their way into the biosphere. Protection from HLW is provided with deep geological disposal, below water-saturated zone. The reason for that are Pu and U which are the most stable in completely anoxic conditions.

The geosphere provides three elements of containment: shielding, protection for the engineered barriers and long pathway for radionuclide return to the surface. Disposal has been considered in very different geological formations: crystalline basements, fine-grained sedimentary rocks and bedded salt deposits (evaporites).