



CS06RA729

Rad po pozivu

TRAJNO ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA - PITANJE BUDUĆNOSTI KORIŠĆENJA NUKLEARNE ENERGIJE

Ilija Plečaš, *Institut za nuklearne nauke "Vinča"*

Sadržaj - Dva bitna problema koja osporavaju i usporavaju razvoj nuklearne energetike su svakako sigurnost rada nuklearnoenergetskog postrojenja (NEP) i odlaganje radioaktivnog otpadnog materijala (RAO) iz pogona NEP-a i infrastrukturnih postrojenja nuklearnog gorivnog ciklusa. Iako najnovija svetska saznanja na osnovu 45-godišnjeg iskustva u upravljanju radioaktivnim otpadom, ne svrstavaju trajno odlaganje RAO u prvu kategoriju problema NGC, ova disciplina i dalje angažuje eksperte iz ove oblasti iz celog sveta posebno u razvijenim nuklearnoenergetskim zemljama. Za RAO niskog i srednjeg nivoa aktivnosti, postoje i uspešno se koriste sigurni načini konačnog odlaganja, dok se za visoko aktivni dugoživeći RAO razvijaju strategije i različite tehnologije za njihovu konačnu depoziciju.

U ovom radu dat je kratak prikaz načina trajnog odlaganja RAO materijala u svetu (niskog i srednjeg nivoa aktivnosti) gde dominiraju tri osnovna koncepta odlaganja radioaktivnog otpada: odlaganje na površinu zemlje, plitko ukopavanje u betonske inženjerske tranšeje i odlaganje u duboke geološke formacije.

U radu je takođe naglašena važnost fundamentalnih principa sigurnosti u oblasti rukovanja, tretmana i konačnog odlaganja RAO materijala koji su integrirani u dokumentima IAEA.

Sagledavajući sve činjenice vezane za problem konačnog odlaganja radioaktivnog otpada iz nuklearnoenergetskih postrojenja u svetu, izvesna je realnost korišćenja nuklearne energije u budućnosti.

1. U V O D

Radioaktivni otpad (RAO) su neiskoristive materije čija radioaktivnost premašuje zakonom utvrđene granice. S obzirom na agregatno stanje RAO može biti: gasovit, tečni i čvrst, a prema nivou radioaktivnosti: nisko, srednje i visokoaktivan. Prema fizičkim osobinama RAO može sadržavati kratkoživeće i dugoživeće izotope.

Nastajanje radioaktivnog otpada (RAO) vezano je za početak istraživanja i korišćenja radioizotopa i nuklearnih tehnika. U početku primene radioizotopa u svakodnevnom životu (medicina, industrija, naučna istraživanja) samo je manji broj ljudi bio svestan problema RAO. Uvođenjem nuklearne tehnologije u energetske svrhe i proizvodnje električne energije u nuklearnim centralama ovaj problem je postao izraženiji pa se o obradi, privremenom stokiranju i konačnom odlaganju RAO počelo intenzivnije razmišljati ali i konkretno delovati.

Jasno je da RAO predstavlja potencijalnu opasnost po čoveka i njegovu okolinu i da ga treba na stručan način izolirati i "trajno odložiti" u takvim uslovima koji će sprečiti njegov impakt sa čovekovom okolinom u narednih nekoliko stotina godina. Da bi se to postiglo nauka i njeni sledbenici razradili su i još uvek rade, na tehnologijama i metodama kojima bi se odnos između čoveka i RAO rešio na što bolji način. [1,2]

U zemljama sa razvijenim nuklearnoenergetskim programima iz nuklearnih termoeenergetskih objekata nastaje oko 50% od ukupno proizvedenog RAO materijala. Preostalih 50% potpada pod: bolnice, istraživački instituti oko 19%; industrijska upotreba oko 22% i razni proizvođači iz institucija državnog karaktera oko 9%. [3,4]

Ne dotičući u ovom radu nuklearno istrošeno gorivo dva su osnovna načina nastajanja radioaktivnih kontaminanata: nuklearna fisija i aktiviranje korozivskih produkata.

2. UPRAVLJANJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM

Nakon tehnološke obrade, *prva faza*, radioaktivnih otpadnih materijala (tečnih) u cilju smanjenja njihove zapremine uz koncentrisanje radioaktivnosti, i dovođenje u povoljniju hemijsku formu, što se postiže: hemijskim tretmanom, taloženjem, filtriranjem, centrifugiranjem, evaporacijom, jonskom izmenom itd. RAO materijali se podvrgavaju *drugoј fazi*, kondicioniranju (imobilizaciji) zbog sledećih faza: transporta i privremenog čuvanja (stokiranja). Čvrsti RAO materijali se pre imobilizacije podvrgavaju presovanju ili incineraciji u cilju smanjenja njegove zapremine pre solidifikovanja.

Kondicioniranje - Podrazumeva operacije transformisanja RAO materijala u forme pogodne za kasniju manipulaciju. Ove operacije uključuju imobilisanje RAO materijala u stabilne forme. Imobilizacija RAO materijala srednje i niske radioaktivnosti *cementom*, primenjuje se u više zemalja, poslednjih 30-tak godina i smatra se da je ovaj postupak najviše primenjivan zbog niza svojih prednosti. [3,4,5]

Stokiranje RAO materijala predstavlja privremeno odlaganje ovog otpada u odgovarajućim, privremenim skladištima (zatvoreni hangari, hale...), obično uz same nuklearne elektrane, sa kojih se u datom trenutku RAO materijal može transportovati na konačna odlagališta. [3,4,5]

Konačno odlaganje RAO materijala na centralna odlagališta (grobja), predstavlja njegovo nepovratno ostavljanje, uz kontrolu, da vremenom zbog poluraspada radionuklida, RAO materijal izgubi svoja opasna radioaktivna svojstva. Taj period za nisko i srednje RAO, iznosi 300 do 500 godina, odnosno 10 prosečnih perioda poluraspada radionuklida koji se svrstavaju u RAO niske i srednje radioaktivnosti. To znači da će se radioaktivnost

smanjiti oko 1000 puta nakon 300-500 godina, što je i osnovni cilj konačnog odlaganja. [3,4,5]

Prema podacima CEA iz 1990.godine, bilans kategorija RAO materijala i njihovih količina koje se stvaraju u gorivnom ciklusu, za klasičnu PWR elektranu 925 MWe-6000 h/god prikazan je na tabeli 1.

Tabela 1.
Radioaktivni otpadni materijali u gorivnom ciklusu

Faza gorivog ciklusa	Kategorija RAO	Zapremina spakovanog RAO (m ³ /god)
Vađenje rude i mlevenje	Jalovina (A)	35.000
Konverzija	Plastika, metal	6,5
	Mulj (A)	5,3
Obogaćivanje	Plastika, metal	8,8
	Razni talozi (A)	1,3
Fabrika gorivnih elemenata	Plastika, metal	8,3
	Razni talozi (A)	3,5
Rad reaktora - tehnološki otpad - procesni otpad	Plastika, metal	145,8
	Koncentrat	14,5
	Istr.smole	231,3
	Filtri (A)	75,0
Reprocessing - tehnološki otpad - procesni otpad košuljice gorivnih elemenata muljevi jonoizmenjivačke smole produkti fisije	Plastika, metal (A)	112,5
	(B)	42,5
	(B)	23,0
	(B)	13,5
	(A)	0,7
	(C)	3,5
	(C)	3,5

A: nisko i srednje radioaktivan otpad, bez dugoživećih elemenata

B: dugoživeći radioizotopi - α otpad

C: visoko aktivni otpad, dugoživeći

3. KONCEPCIJE ODLAGANJA RAO U SVETU

U nastavku rada daće se opisi konačnog odlaganja nisko i srednje RAO materijala u pojedinim nuklearno razvijenim zemljama sa primedbama i komentarom.

U svetu se na vrlo različit način konačno odlaže radioaktivni otpad. Osnovni koncepti su:

- veštačke, inženjerske barijere kojima se onemogućava odlazak radionuklida u čovekovu okolinu (betonske tranšeje, građevinski specijalni objekti), pri čemu odlaganje može biti na samoj površini zemlje i plitko ukopavanje u betonske inženjerske tranšeje i

- prirodne barijere (rudnici soli, rudnici gvozdene rude, pećine, kaverne, granitne šupljine...).

U sva tri slučaja predviđen je monitoring kojim se kontroliše stanje u okolini odlagališta, kao i na svim drugim nuklearnim objektima.

Na tabeli 2. prikazani su koncepti sadašnjeg (S), ranije korišćenog (RK) i predviđenog (P) načina odlaganja nisko i srednje RAO u svetu.

Tabela 2.
Načini odlaganja RAO materijala u svetu

Zemlja	Površinsko stokiranje	Ukopani grobovi za RAO	Geološke formacije	Odlaganje u okean	Zemlja	Površinsko stokiranje	Ukopani grobovi za RAO	Geološke formacije	Odlaganje u okean
Argentina	S				Japan	S	P		P
Belgija	P			RK	Republika Koreja		S		
Bugarska	S				Holandija				RK
Kanada	S	S			Poljska	S			
Kina		S			Rumunija	S			
Čehoslovačka	S				Južna Afrika		S		
Egipat		S	S		Španija			S	
Finska			P		Švedska			S	
Francuska	S	S			Švajcarska			P	RK
Dem. Rep. Nemačka			S		Velika Britanija		S		RK
Savez. Rep. Nemačka			S		Amerika		S		RK
Mađarska		S			Rusija	S	S		
Indija	S	S			Jugoslavija	S	P		
Italija	S	S							

Poznato je se da su zemlje: Belgija, Holandija, Švajcarska, Velika Britanija, Sjedinjene države a verovatno i bivši Sovjetski Savez, veliki deo svog RAO materijala odlagali u more, što je Londonskom Konferencijom zabranjeno, ali je velika nepoznanica da li se i dalje ovaj sigurno najlošiji i po okolinu katastrofalan način odlaganja RAO primenjuje u ovim zemljama (Sl.1.)



Sl.1. Bacanje RAO u more! - zabranjeno

Francuska

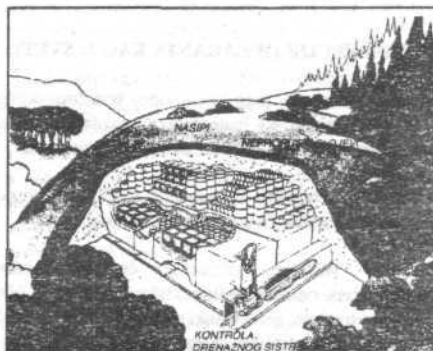
Krajem osamdesetih Francuska je zatvorila svoje prvo centralno odlagalište za RAO niske i srednje aktivnosti sa oko 800.000 m³ RAO iz 55 nuklearnih reaktora. Odlagalište "Manche" na La Hague-u je bilo tipa tumulusa i plitko ukopanih betonskih inženjerskih tranšėja. Ovo odlagalište bilo je uzor svim ostalim odlagalištima inženjerskog tipa u svetu i pokazalo je sve prednosti ovakve koncepcije (laka kontrola samog odlagališta, nemogućnost akcidentalnih situacija, na velikoj dubini,

relativno jeftina tehnologija, mogućnost kontrole isluženih radionuklida iz matriksa od betona i maltera. [6,7]

Istovremeno u Francuskoj je počeo sa radom Centar za odlaganje RAO materijala do 2035 godine u SOULAINE-u (centralna Francuska) koji ima potpuno isti princip tranšėja i tumulusa sa nekim poboljšanjima u tehničkom i sigurnosnom smislu.

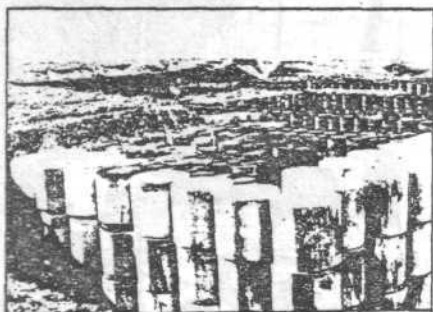
Na oba odlagališta princip odlaganja RAO materijala se sastoji u tome:

U inženjerskim tranšėjama (koje poprimaju formu monolita) sastavljenog iz tri komponente: betonskog kontejnera, RAO materijala imobilisanog i solidifikovanog malterom i tranšejski beton koji povezuje kontejner u monolit, RAO je "zatvoren" sa 3 barijere! (Sl.2.)



Sl.2. "Tumulusi" i "ing.tranšėje"- "soulaine" (Francuska)

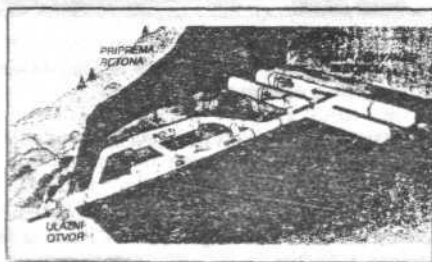
U tumulusima koji se formiraju od betonskih kontejnera težine 3-5 tona, tumulusi se grade na inženjerskim tranšejama, pa se po završetku prekrivaju slojem šljunka, gline, zemlje i humusom. (Sl.3.)



Sl.3. Odlagalište "La Manche" (Francuska)

Švajcarska

Švajcarska svoj radioaktivni otpadni materijal planira programom GEWAHR da odlaže u inženjerskim barijerama ukopanim u čvrstu stenu. Paket (keson) sa nekoliko betonskih i metalnih buriča se betonom fiksira i na taj način i zatvara svaki pojedinačni tunel. Očekivani kapacitet je oko 100.000 m³ RAO [7]. (Sl.4.)



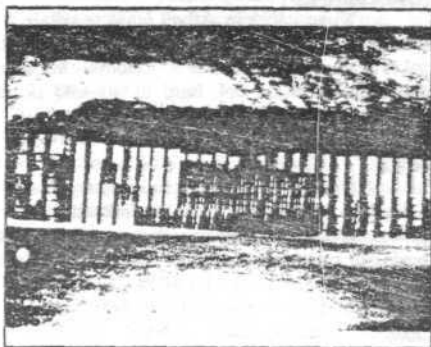
Sl.4. Splet tunela ukopanih u brdo (Švajcarska)

Nemačka

Radioaktivni otpad se u Nemačkoj odlaže na dve lokacije: GORLEBEN i KONRAD a na rudniku soli ASSE će se vršiti dalja ispitivanja. Ovaj metod dolazi sve više u sumnju zbog mogućnosti dešavanja tektonskih poremećaja koji bi doveli do prodiranja vode u tunele ukopane u soli (vlaga jednaka nuli) i njihovog obrušavanja. Na taj način bi se izgubila kontrola nad buradima i nepovratno bi ostali na dubini nekoliko stotina metara bez mogućnosti kontrole.

Drugi način odlaganja metalnih buradi za RAO nisko i srednjeg nivoa aktivnosti je njegovo "bacanje" u napuštene jame rudnika soli na kotama - 511 m, što se smatra za lošiji i nesigurniji način finalnog odlaganja sa istim razlozima kao i u predhodnom opisu za rudnik ASSE. Na ovaj način u ASSE-u je između 1967 i 1976 smešteno oko 42.000 m³ RAO. Ukupna potreba za

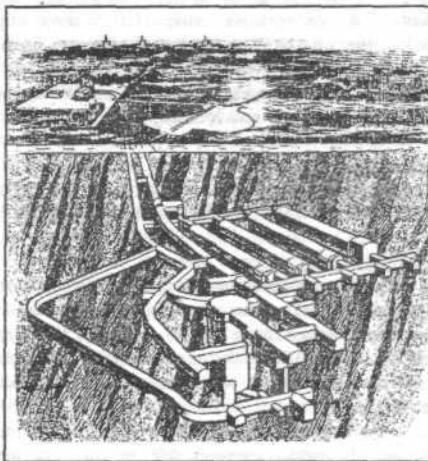
kapacitetom u Nemačkoj je oko 650.000 m³. [5,6,7] (Sl.5.)



Sl.5. Napušteni rudnik soli "Asse" (Nemačka)

Švedska

Odlagalište FOSMARK, se sastoji od spleta tunela, kaverni i silosa i nalazi se u granitnoj steni 60 m ispod nivoa Baltičkog mora. Radioaktivni otpaci spakovani u betonske kontejnere odlažu se u ove tunele i fiksiraju betonskim barijerama. Ovo odlagalište se smatra jednim od najboljih tehničkih rešenja za odlaganje otpada i ima kapacitet do 2035 g za svih 12 nuklearnih elektrana u Švedskoj. Trenutni kapacitet odlagališta je oko 90.000 m³. [6,7] (Sl.6.)



Sl.6. Odlagalište "Fosmark" (Švedska)

Kanada

U Kanadi se primenjuju metode plitkog ukopavanja u betonskim tunelima, i vertikalnim oknima zapunjenim betonom, kao i površinska skladišta tipa "tumulusa", Chalk River, Ontario. Takođe vrše se radovi na odlaganju RAO u dubokim geološkim formacijama na dubini nekoliko stotina metara sa horizontalnim tunelima

kapaciteta RAO materijala do 2030 godine. [6,7]

Velika Britanija

Nisko i srednje aktivni otpad se odlaže u plitko ukopanom tranšejskom odlagalištu "DRIGG". Koriste se za pakovanje metalnih buriča i betonski kontejneri za aktivnost manju od 0,4 Bq/g ili 40 kBq po artiklu. Kapacitet odlagališta je oko 700.000 m³ RAO. [6,7]

Indija

Nisko i srednje aktivni otpad odlaže se na odlagalištu "TARAPUR", 100 km od Bombaja. Koriste se plitko ukopane tranšeje za smestaj metalnih buradi i betonskih kontejnera. Kapacitet odlagališta je oko 60.000 m³. [7]

SAD

Nisko i srednje aktivni otpad odlaže se na površini u betonskim blokovima koji složeni predstavljaju monolit celinu. U SAD postoji više ovakvih odlagališta na mestima u blizini većeg broja nuklearnih elektrana. Najpoznatija su SAVANNAH RIVER, HANFORD i BARNWELL.

Intenzivno se radi i na tehnologijama konačnog odlaganja nisko i srednje radioaktivnog otpada u duboke geološke formacije obzirom na neograničene mogućnosti velikih i slobodnih teritorija SAD-a. Koriste se kako betonski kontejneri tako i metalna burad. Potreban kapacitet je oko 1.500.000 m³. [5,6,7]

Rusija

Nisko i srednje aktivni otpad odlaže se isključivo na površinskim odlagalištima tipa "inženjerskih tranšeja". Jedno od najpoznatijih odlagališta ovakvog tipa je odlagalište "RADON", u blizini Moskve. Koriste se isključivo metalna burad u kojima je solidifikovan RAO materijal. Kapacitet odlagališta je nepoznat ali se zna da je godišnji priliv RAO na ovo odlagalište oko 5.000 m³. [7]

Japan

Nisko i srednje aktivni otpad se odlaže na ROKKASHO skladištu i ima kapacitet 50.000 m³. [7]

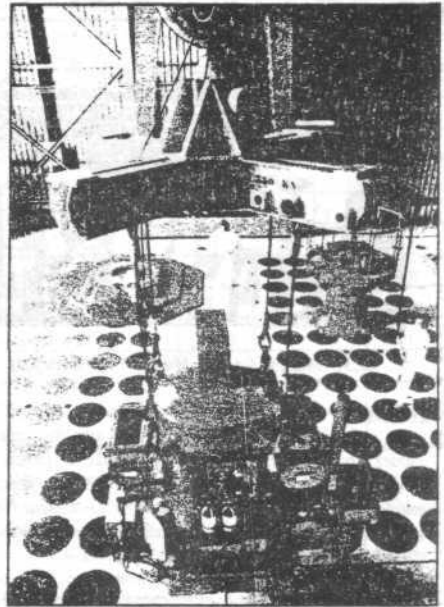
Istočnoevropske zemlje

Sve istočnoevropske zemlje: Češka, Slovačka, Poljska, Mađarska, Rumunija, Bugarska, isključivo koriste površinska odlagališta za konačno odlaganje nisko i srednje aktivni otpad RAO, spakovani u metalne buriče ili betonske kontejnera u zavisnosti od intenziteta zračenja na kontaktu ambalaže. [7]

Prema podacima iz 1993. g. [8] u svetu je trenutno radilo 429 nuklearnoenergetskih reaktora sa totalnim kapacitetom od 337 GWE, u izgradnji je bilo još 67 sa dodatnih 54 GWE.

Za proteklih 40 godina u svetu je proizvedeno između 7 i 10·10⁶ m³ nisko i srednje radioaktivnih otpadnih materijala (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ⁵⁹Fe ...) i oko 1,1·10⁶ t istrošenog nuklearnog goriva. Nema preciznih podataka koliki je procenat istrošenog goriva do sada prerađeno u postrojenjima za reprocessing, ali se predpostavlja da je u svetu privremeno na stokiranju preko

30.000 m³ visoko aktivnog otpada, preko 5·10⁶ m³ ostalog nisko i srednje aktivnog otpada u šta se ubraja i otpad iz dekomisije, RAO proizvedenog u postrojenjima za prerađivanje goriva i preko 0,4·10⁶ m³ otpada (ALFA dugoživećih ²³⁷Np, ²³⁹Po, ²⁴¹Am, ²⁴³Am), SI.7.



SI.7. Privremeno čuvanje visoko aktivnog otpada i α otpada (Marcoule-Francuska)

4. PERSPEKTIVE NOVIH KONCEPATA ODLAGANJA RAO

Godinama se istražuju načini novih tehnologija odlaganja RAO, ali i dalje se ostalo samo na idejama depozicije RAO u:

- svemir,
- ukopavanje u dno okeana
- u glečerima i na južnom polu

ili razvoj tehnologija transmucije radionuklida (konvertovanjem aktinida u fisione produkte neutronske bombardovanjem).

Sve ove ideje ostaju u domenu fantastike zbog nerešenih pitanja radijacione sigurnosti i ogromnih materijalnih troškova.

5. OSNOVNI PRINCIPI I STANDARDI SIGURNOSTI ZA TRETMAN RAO MATERIJALA

Fundamentalni principi sigurnosti u oblasti rukovanja, tretmana i zbrinjavanja RAO materijala razvijeni su na bazi iskustava članica IAEA i kontinualnog procesa uspostavljanja internacionalnog konsenzusa, kroz pripremu

brojnih IAEA dokumenata vezanih za probleme RAO materijala. *Radioactive Waste Safety Standards (RADWASS)* serije dokumenata integrišu ta iskustva u koherentan set principa, standarda, uputstava i procedura za ostvarivanje sigurnog rukovanja, tretmana i zbrinjavanja RAO materijala.

Problematika tretmana i zbrinjavanja RAO materijala IAEA obraduje kroz nekoliko hijerarhijski kategorizovanih iz dokumenata, kao što su: *Safety Fundamentals, Safety Standards, Safety Guides, Safety Practices i Safety Reports*. [5]

6. ZAKLJUČAK

Dugogodišnje iskustvo sa odlaganjem RAO materijala u "inženjerska betonska odlagališta"-tipa plitko ukopanih tranšeja izbacile su ovaj postupak u prvi plan i on se najčešće koristi u svetu. Prednost ovakvog načina konačnog odlaganja su pre svega bezbednost ljudi u tehnologiji samog odlaganja, veoma mali procenat izlučenih radionuklida (izmerenih u drenažnim kanalima), velika otpornost na tektonske poremećaje samog odlagališta (zbog kompaktnosti betonskog monolita), mogućnost kontrole svakog pojedinačnog kontejnera, bureta u bilo kom trenutku i svakako niža cena.

Odlaganja RAO u geološke formacije, uvek ostavljaju otvoreno pitanje "nepovratnog", pogotovo u nekim akcidentalnim, trusnim ili klimatskim promenama. U tom slučaju se gubi svaka kontrola nad RAO materijalom, što predstavlja najveći problem.

Odlaganje RAO materijala u more i okeane što je koristio znatan broj zemalja (Belgija, Holandija, Velika Britanija, Sjedinjene Države, Sovjetski Savez) i koji je Londonskom konvencijom zabranjen, je svakako najlošiji do sada način konačnog odlaganja RAO, tako reći katastrofalan.

Na kraju, navešće se ključni zaključak plenarne sednice najpoznatijeg internacionalnog simpozijuma WASTE MANAGEMENT-95 održanog februara 1995 u Tucson-u, Arizona, Sjedinjene Države na kom je učestvovalo 2438 stručnjaka u 62 sekcije sa preko 500 radova iz 30 zemalja, da: "...*Obzirom na dosadašnje iskustvo sa RAO materijalom, njegovim statusom u pojedinim zemljama, tehnološkim i naučnim saznanjima vezanih za obradu i konačno odlaganje, radioaktivni otpadni materijali, prestaju da budu u prvoj kategoriji problema u NGC-u*"...

Sagledavajući sve činjenice vezane za problem konačnog odlaganja radioaktivnog otpada iz nuklearnoenergetskih postrojenja u svetu, izvesna je realnost korišćenja nuklearne energije u budućnosti.

LITERATURA

- [1] Tang Y.S. and Saling, "Radioactive Waste Management", Hemisphere Publishing Corporation, 1990.
- [2] Gihnoze R.G., "Radioactive Waste Disposal, Low and High Level", Noyes Data Corporation, USA,

1977.

- [3] Krause H., "Present State and Future Problems of Disposal of Radioactive Wastes", Proc., of the Fourth International Summer School on Radiation Protection, Dubrovnik, 1979, str.1-16.
- [4] Plečaš I., Perić A., "Obrada i odlaganje radioaktivnog otpada", *Ecologica* (1994), br.3, str.24-27.
- [5] Technical Reports Series No.253, "Operational Experience in Shallow Ground Disposal of Radioactive Wastes", IAEA, 1985.
- [6] Radioactive Waste Management: A Status Report, IAEA, 1985.
- [7] Plečaš I., Drijača J., Perić A., Kostadinović A. and Glodić S. "Radionuclide Migration Through Porous Nuclear Waste Forms", *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle*, vol.14(3), 1990, p.p.195-205.
- [8] Gerton R.E., Burnum S.T. and Squires D.J., "Storage/Disposal Strategies in un Member States", "Waste Management-95" Symposia, Tucson, Arizona, USA, 26.Feb.-2.March 1995.

Abstract - Two main problems that are denning and slowing the process of nuclear energy development are safe work of the nuclear energy facilities (NEF) and disposal of the radioactive waste materials, that arises from the NEF and infrastructure facilities of the nuclear fuel cycle (NFC). Although nowadays knowledge worldwide, based on the 45 year experiences in handling the radwaste materials, do not treat the problems of the final disposal of the radwaste materials as a task of the primal importance in NFC, this discipline still engaged experts from this field of investigations, especially in the countries that developed all aspects of the nuclear fuel cycle. Techniques for final disposal of low and intermediate level radwaste materials, are well known and in phase of implementation. Strategy, techniques and processes for the final disposal of the long lived high level radwaste materials are still in the developing phase. In this paper, short overview of the different manners of the final disposal of the low and intermediate level radwaste materials worldwide, where three concepts are dominant: surface disposal, shallow land burial in the engineer trench systems and deep geological disposal, is presented. The importance of the fundamental safety principles, implemented in the IAEA documents, concerning handling, treatment and final disposal of the radwaste materials, is presented. Future usage of nuclear energy, taking into account all the facts that are dealing problems of the radwaste materials produced in the NFC, can be reality.

FINAL DISPOSAL OF THE RADWASTE MATERIALS-QUESTION OF THE NUCLEAR ENERGY IMPLEMENTATION AND APPLICATION PERSPECTIVES

Ilija Plečaš