

Olivera Ciraj-Bjelac i Milan Vujović

Upravljanje radioaktivnim otpadom

Beograd, april 2017.

Dr Olivera Ciraj-Bjelac, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet i Institut za nuklearne
nauke „Vinča“
e-mail: ociraj@vinca.rs

MSc Milan Vujović
Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije
e-mail: milan.vujovic@gmail.com

UPRAVLJANJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM

Recenzenti:

Dr Predrag Marinković, redovni profesor
Dr Koviljka Stanković, docent

Nastavno-naučno veće Elektrotehničkog fakulteta odobrilo je objavljivanje
ovog udžbenika odlukom broj 526/2 od 25.4.2017. godine.

Izdavači:

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet
Akademska misao, Beograd

ISBN: 978-86-7466-679-1

Tiraž: 100 primeraka

Štampa: Akademska misao, Beograd

elektronski udžbenik

http://www.etf.bg.ac.rs/index.php?option=com_content&task=view&id=1217&Itemid=178&lang=sr

PREDGOVOR	5
I. UPRAVLJANJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM	7
DEFINICIJA RADIOAKTIVNOG OTPADA	7
CILJ UPRAVLJANJA RADIOAKTIVNIM OTPADOM	7
MINIMIZACIJA NASTALOG RADIOAKTIVNOG OTPADA	8
OSNOVNI PRINCIPI UPRAVLJANJA RADIOAKTIVNIM OTPADOM	9
II. POREKLO I VRSTE RADIOAKTIVNOG OTPADA	13
RADIOAKTIVNI OTPAD IZ PROCESA EKSPLOATACIJE URANIJUMSKE RUDE	18
RADIOAKTIVNI OTPAD NASTAO TOKOM RADA I DEKOMISIJE NUKLEARNIH ELEKTRANA	18
PRERADA ISLUŽENOG NUKLEARNOG GORIVA	19
RAD I DEKOMISIJA ISTRAŽIVAČKIH NUKLEARNIH REKATORA	20
PRIMENA IZVORA ZRAČENJA U MEDICINI I INDUSTRIJI	21
PROIZVODNJA I PROBE NUKLEARNOG ORUŽJA	24
NUKLEARNI I RADIOLOŠKI AKCIDENTI	25
III. KLASIFIKACIJA RADIOAKTIVNOG OTPADA	30
PODELA RADIOAKTIVNOG OTPADA NA OSNOVU RADIOLOŠKIH OSOBINA	31
PODELA RADIOAKTIVNOG OTPADA NA OSNOVU FIZIČKIH OSOBINA	32
PODELA RADIOAKTIVNOG OTPADA NA OSNOVU HEMIJSKIH I BIOLOŠKIH OSOBINA	34
MEĐUNARODNI SISTEM ZA KLASIFIKACIJU RADIOAKTIVNOG OTPADA	35
IV. DEKOMISIJA OBJEKATA U KOJIMA SE KORISTE RADIOAKTIVNI MATERIJALI	43
RAZLOZI ZA DEKOMISIJU	44
STRATEGIJE DEKOMISIJE	46
PLANIRANJE I PRIPREMA DEKOMISIJE	52
TEHNIKE DEKOMISIJE	56
TEHNIKE DEMONTIRANJA	67
DALJINSKE TEHNIKE DEKONTAMINACIJE I DEMONTIRANJA	77
REMEDIJACIJA	78
V. FAZE UPRAVLJANJA RADIOAKTIVNIM OTPADOM	79
PREDTRETMAN	82
KARAKTERIZACIJA RADIOAKTIVNOG OTPADA	84
TRETMAN	85
KONDICIONIRANJE	88
SKLADIŠTENJE RADIOAKTIVNOG OTPADA	88
ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA	89
VI. OBRADA RADIOAKTIVNOG OTPADA	93
PREDTRETMAN RADIOAKTIVNOG OTPADA	94
TRETMAN RADIOAKTIVNOG OTPADA	96
KONDICIONIRANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA	117
VII. SKLADIŠTENJE RADIOAKTIVNOG OTPADA	128

Upravljanje radioaktivnim otpadom

ELEMENTI SKLADIŠTA	129
FAZE SKLADIŠTENJA RADIOAKTIVNOG OTPADA	131
KONTEJNERI ZA SKLADIŠTENJE RADIOAKTIVNOG OTPADA	134
OBJEKTI ZA SKLADIŠTENJE RADIOAKTIVNOG OTPADA	136
SIGURNOST SKLADIŠTENJA RADIOAKTIVNOG OTPADA	144
SKLADIŠTENJE ISLUŽENOG NUKLEANOG GORIVA	148
VIII. TRANSPORT RADIOAKTIVNIH MATERIJA.....	150
VELIČINE DEFINISANE TRANSPORTNOM REGULATIVOM	151
VRSTE RADIOAKTIVNIH PAKETA	154
OPŠTI ZAHTEVI ZA TRANSPORT RADIOAKTIVNIH MATERIJA.....	157
KATEGORIZACIJA I OBELEŽAVANJE RADIOAKTIVNIH PAKETA	158
IX. ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA.....	162
MOGUĆE OPCIJE ZA ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA	163
TIPOVI ODLAGALIŠTA ZA ODLAGANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA	172
IZBOR METODE ZA ODLAGANJE OTPADA.....	181
OCENA PERFORMANSI ODLAGALIŠTA	185
ISPUŠTANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA U ŽIVOTNU SREDINU.....	196
NIVOI IZUZIMANJA I NIVOI OSLOBAĐANJA	203
X. REGULATORNI OKVIR ZA UPRAVLJANJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM	210
MEĐUNARODNE ORGANIZACIJE.....	210
STANDARDI MEĐUNARODNE AGENCIJE ZA ATOMSKU AGENCIJU	213
FUNKCIJE REGULATORNIH TELA	215
ZAJEDNIČKA KONVENCIJA O SIGURNOSTI UPRAVLJANJA ISLUŽENIM GORIVOM I OSIGURNOSTI UPRAVLJANJA RADIOAKTIVNIM OTPADOM	216
REGULATORNI OKVIR EVROPSKE UNIJE	218
XI. LITERATURA	221
XII. PRILOG A.....	227
PROCENA DOZA KOJU PROFESIONALNO IZLOŽENA LICA I STANOVNIŠTVO PRIME PRI NORMALNIM OPERACIJAMA I ODSUPANJIMA OD NORMALNOG RADA OBJEKATA ZA UPRAVLJANJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM	227
PROCENA DOZA KOJE STANOVNIŠTVO PRIMI TOKOM VANREDNOG DOGAĐAJA	237
XV. PRILOG B.....	248
KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI ZA NIVOE IZUZIMANJA I NIVOE OSLOBAĐANJA KOJE MOGU PO DEFINICIJI BITI PRIMENJENE NA BILO KOJI ČVRST RADIOAKTIVNI MATERIAL.....	248
XVI. REGISTAR POJMOVA.....	251

Primena radioaktivnih materijala u industriji, medicini, naučno-istraživačkom radu, kao i proizvodnja električne energije u nuklearnim elektranama, pored ogromne koristi za čovečanstvo ima za posledicu generisanje radioaktivnog otpada. Kao i svi drugi radioaktivni materijali, i radioaktivni otpad emituje jonizujuće zračenje koje potencijalno predstavlja opasnost po zdravlje ljudi i životnu sredinu te je stoga sigurno upravljanje radioaktivnim otpadom od suštinskog značaja za zaštitu zdravlja ljudi i životne sredine, kako sadatako i u budućnosti. Iz ovog razloga radiološki rizik, prisutan u svim fazama upravljanja radioaktivnim otpadom, mora biti kontrolisan na odgovarajući način. Značaj sigurnog upravljanja radioaktivnim otpadom u smislu zaštite zdravlja ljudi i zaštite životne sredine odavno je prepoznat, dok su posebno značajna iskustva u ovoj oblasti stečena u proteklih nekoliko decenija.

Problematika upravljanja radioaktivnim otpadom je savremena naučna i tehnička disciplina za koju se vezuje velik broj publikacija objavljenih u proteklih nekoliko decenija. Ova oblast je oformljena kao posebna oblast u drugoj polovini XX veka a doživela poseban pomak u proteklih 20 godina.

Radioaktivni otpad se može nalaziti u tri agregatna stanja: gasovitom, tečnom i čvrstom agregatnom stanju, dok opseg koncentracije aktivnosti može biti od bliske nivoima izuzimanja iz regulatorne kontrole pri kojima se materijal može ispustiti u životnu sredinu pa do veoma velike koja zahteva primenu složenih mera zaštite od zračenja. Pored aktivnosti i agregatnog stanja, opcije za skladištenje i odlaganje radioaktivnog otpada zavise i od oblika otpada, od vrste prisutnih radionuklida, njihove koncentracije i toksičnosti.

Ovaj udžbenik nastao je na osnovu dugogodišnjih predavanja u okviru kursa Obrada i odlaganje toksičnih i radioaktivnih otpadnih materijala na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Način izlaganja materije oslanja se na znanja koja su studenti stekli na kursovima Nuklearna fizika, Nuklearna tehnika i Dozimetrija i zaštita od zračenja koji se realizuju na Elektrotehničkom fakultetu u Univerziteta u Beogradu.

Udžbenik je prevashodno namenjen studentima master studija smera Biomedicinsko i ekološko inženjerstvo na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu koji prate kurs Obrada i odlaganje toksičnih i radioaktivnih otpadnih materijala, ali može biti koristan i drugim studentima osnovnih i

Upravljanje radioaktivnim otpadom

doktorskih studija, studentima drugih fakulteta i široj naučnoj i stručnoj javnosti koja ima potrebu za dubljim razumevanjem ove problematike.

Zahvaljujemo se profesoru Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu dr Predragu Marinkoviću i docentu Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu dr Kovički Stanković na recenziji i korisnim sugestijama.

I. Upravljanje radioaktivnim otpadom

Radioaktivni materijali predstavljaju potencijalnu opasnost za ljude i životnu sredinu ukoliko nisu kontrolisani na odgovarajući način. Pored kontrole primene radioaktivnog materijala, jednako je važno i da način upravljanja ovakvim materijalima, nakon prestanka njihovog korišćenja, bude takođe, na odgovarajući način kontrolisan. Efikasna kontrola radioaktivnog otpada sprečava potencijalna izlaganja jonizujućem zračenju koja mogu biti štetna po zdravlje ljudi i životnu sredinu.

Definicija radioaktivnog otpada

Radioaktivni otpad je radioaktivni materijal koji se ne planira za dalju upotrebu. Definicija radioaktivnog otpada je regulatornog karaktera i odnosi se na svaki radioaktivni materijal odnosno na svaki materijal čija je aktivnost i/ili specifična aktivnost veća ili jednaka od graničnih vrednosti koje su propisane pravnim okvirom u svakoj državi, bez obzira na nivo pratećeg radijacionog rizika.

Iako značajan udeo radioaktivnog otpada može biti identifikovan, u skladu sa definicijom radioaktivnog otpada, kao materijal koji nije predviđen za dalju upotrebu, ovakvu definiciju treba primenjivati sa oprezom, imajući u vidu da određena količina radioaktivnog otpada može biti i reciklirana ili ponovo korišćena u druge namene. Primeri potencijalno reciklažnog otpada su: kontaminiran metalni otpad, radioaktivni izvori koji mogu dobiti drugu namenu i dalja upotreba uranijuma i plutonijuma iz isluženog nuklearnog goriva.

Cilj upravljanja radioaktivnim otpadom

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

Upravljanje radioaktivnim otpadom

na odgovarajući način. Za efikasnu kontrolu rizika, pored kontole procesa upotrebe radioaktivnih materijala, od velikog značaja jeste i kontola radioaktivnog otpada nastalog tokom ovog procesa. Kontrola radioaktivnog otpada umanjuje rizik po zdravlje ljudi i rizik po životnu srednu. Budući da određeni radioaktivni materijali imaju veoma dug period poluraspada, to je kontola radioaktivnog otpada neophodna u veoma dugom vremenskom periodu koji se meri vekovima.

Najznačajnija pitanja u problematici upravljanja radioaktivnim otpadom su:

- Oslobođanje od regulatorne kontole, odnosno ispuštanje životnu sredinu bez posebnih ograničenja;
- Kontolisano ispuštanje u životnu sredinu ili kontolisana upotreba recikliranih radioaktivnih materijala;
- Regulisano odlaganje radioaktivnog otpada u namenska odlagališta.

Minimizacija nastalog radioaktivnog otpada

Minimizacija radioaktivnog otpada predstavlja proces smanjenja količine i aktivnosti radioaktivnog otpada do nivoa koji se razumno mogu postići u svim fazama objekta ili aktivnosti, od planiranja do prestanka rada odnosno dekomisije, i može se ostvariti kroz smanjenje količine radioaktivnog otpada koja se generiše, recikliranjem i ponovnim korišćenjem radioaktivnog materijala i obradom radioaktivnog otpada kojom se smanjuje njegova aktivnost pri čemu se mora u obzir uzeti i sekundarni otpad koji se generiše tokom njegove obrade. Efikasno upravljanje radioaktivnim otpadom podrazumeva minimizaciju količine nastalog radioaktivnog otpada još u samoj fazi generisanja pravilnim planiranjem aktivnosti. Ovo dalje omogućava minimizaciju radijacionog rizika i efikasno korišćenje prostora predviđenog za njegovo skladištenje a potom i odlaganje.

Minimizacija radioaktivnog otpada može se postići različite načine. Najčešće se primenjuje jedna ili kombinacija dve ili više tehnika, kao što su:

- Čuvanje radioaktivnog materijala koji sadrže kratkoživeće radioizotope do smanjenja aktivnosti ispod nivoa oslobođanja;
- Revizija radnih procedura u smislu smanjenja nastalog radioaktivnog otpada, uvođenje novih postupaka, tehnologija i procesa koji dovode do smanjenja generisanja radioaktivnog otpada;

Upravljanje radioaktivnim otpadom

- Sprečavanje širenja kontaminacije tokom obavljanja bilo koje aktivnosti koliko god je to praktično moguće;
- Planiranje i primena odgovarajućih metoda obrade radioaktivnog otpada.

Minimizaciju radioaktivnog otpada ne treba mešati sa postupkom smanjenja zapremine koji predstavlja jedan od metoda obrade radioaktivnog otpada a o kom će više reči biti u delovima IV i V.

Osnovni principi upravljanja radioaktivnim otpadom

Primarni cilj upravljanja radioaktivnim otpadom jeste postupanje sa radioaktivnim otpadom na način koji je siguran, odnosno kojim se sprečavaju negativni efekti jonizujućeg zračenja po ljudsko zdravlje i životnu srednu, kako danas tako i ubuduće, bez dodatnog opterećenja budućih generacija.

Radioaktivni otpad je materijal koji sadrži ili je kontaminiran radionuklidima aktivnosti veće od nivoa izuzimanja. Usled prisutva radionuklida, radioaktivni otpad emituje značajnukoličinujonizujućeg zračenja i zato, u opštem slučaju, zahteva imobilizaciju u cilju prevencije širenja radionuklidau životnu sredinu i adekvatnu zaštitu od spoljašnjeg zračenja. Radioaktivni otpad u kojem je sadržaj radionuklida manji od nivoa izuzimanja smatra se neradioaktivnim otpadom.

Radioaktivni otpad utiče na ljude ali i na druge organizme u prirodi. Imajući u vidu da je ljudska vrsta najsenzitivnija na efekte jonizujućeg zračenja, to se smatra da su standardi radijacione sigurnosti prihvatljivi za ljude dovoljno restriktivni i za druge vrste.

Radijacioni rizik koji potiče od radioaktivnog otpada zavisi od koncentracije i prirode radionuklida, uključujući i njihovu radiotoksičnost. Jonizujuće zračenje poreklom iz radionuklida prisutnih u radioaktivom otpadu utiče na žive organizme a dejstvo zavisi od vrste i energije zračenja, vremena zadržavanja u organizmu i deponovane energije zračenja. Alfa čestice deponuju veliku količinu energije po jedinici pređenog puta i u kontaktu sa živim organizmima mogu izazvati neželjene hemijske reakcije i biološka oštećenja. Alfa zračenje nije značajno u ukupnoj radijacionoj šteti ukoliko nije uneto u organizam putem ingestije ili inhalacije. Beta zračenja deponuje energiju u živim organizmima putem radijacionih ili jonizacionih gubitaka. Iako je manje radiotoksično u odnosu na alfa zračenje, može izazvati značajnu biološku štetu na subćelijskom nivou. Gama zračenje ima najveću

Upravljanje radioaktivnim otpadom

prodornu moć. Interaguje sa materijom na više različitih načina i uglavnom je, ali ne uvek, prateća pojava alfa i beta raspada. Takođe može izazvati biološka oštećenja, iako je manje radiotoksično u odnosu na alfa i beta zračenje.

Upravljanje radioaktivnim otpadom u širem smislu obuhvata niz tehničkih mera i aktivnosti kojima se nastali radioaktivni otpad pretvara u forme pogodne za skaldištenje i odlaganje. Najveće količine radioaktivnog otpada nastaju tokom rada nuklearnih i radijacionih objekata ili u procesu njihove dekomisije. Upravljanje radioaktivnim otpadom odnosi se na različite vremenske okvire i razodblja koja se mere godinama, koliko traje intreval od nastanka do momenta obrade otpada, ili decenijama i vekovima, koliko traje monitoring odlagališta radioaktivnog otpada nakon zatvaranja.

Osnov za upravljanje radioaktivnim otpadom jeste princip jednakosti, imajući u vidu da generacija koja uživa benefit od proizvodnje električne energije i korišćenja radioaktivnih materijala, ima obavezu da snosi odgovornost za odlaganje nastalog radioaktivnog otpada u svojoj životnoj sredini. Vodeći se ovim principom, Međunarodna Agencija za Atomsku Energiju (MAAE) definisala je osnovne principe upravljanja radioaktivnim otpadom, uzimajući uobzir prihvatljiv nivo rizika, potreban nivo zaštite od štetnih dejstava radioaktivnog otpada i njegov uticaj na buduće generacije.

Osnovni principi upravljanja radioaktivnim otpadom prikazani su u Tabeli 1.1.

Svi principi navedeni u Tabeli 1.1. su u osnovi etičke prirode, posebno princip broj 5. Generacija koja raspolaže nuklearnim tehnologijama, koja planira, gradi i koristi nuklearne objekte i koristi radioaktivne materijale ima obavezu i da obezbedi sredstva i uspostavi program za upravljanje radioaktivnim otpadom koji od ovih tehnologija potiče.

Upravljanje radioaktivnim otpadom predstavlja veliki izazov za čovečanstvo. U neposrednoj je vezi sa drugim izazovom – kontrolom brojnosti svetske populacije, imajući u vidu da povećanje broja stanovnika neminovno nameće zahteve u pogledu korišćenja prirodnih resursa. Nuklearna fisija je u proteklih 50 godina obezbedila čovečanstvu zanačajan deo električne energije na način koji je povoljan za životnu sredinu. Međutim, strah od miroljubive primene nuklearne energije postoji i dalje i u velikoj meri je posledica akcidenata iz prošlosti i posledica proba i upotrebe nuklearnog oružja.