

D. Smojver, K. Vitale*

ZBRINJAVANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA NAKON MEDICINSKE DIJAGNOSTIKE I TERAPIJE

UDK 621.039.7:616-079
PRIMLJENO: 8.1.2020.
PRIHVAĆENO: 24.8.2020.

Ovo djelo je dano na korištenje pod Creative Commons Attribution 4.0 International License



SAŽETAK: Apsorpcija ionizirajućeg zračenja u organizmu izaziva ionizaciju ili ekscitaciju molekula. Energija oslobođena tom ionizacijom dovodi do kemijskih promjena, prilikom čega se stvaraju slobodni radikali koji mogu uzrokovati ireverzibilna oštećenja molekula koje su esencijalne za biološko funkcioniranje stanice. Na takav način nastaju biokemijske (metaboličke) promjene, posljedica čega mogu biti fiziološka ili morfološka oštećenja i/ili mutacije stanice koje primarno djeluju na jezgru, ali i na druge stanične dijelove. Oštećenja stanice očituju se usporenjem stanične diobe, staničnom smrću ili preobrazbom u zloćudne stanice. Različite dijagnostičke metode koje se primjenjuju u medicini, poput rendgena (RTG), kompjutorizirane tomografije (CT) i scintigrafije pored svojeg pozitivnog, nažalost, imaju i negativan utjecaj na zdravlje čovjeka. Pozitivan utjecaj očituje se u brzoi i točnoj dijagnostici koja je neophodna pri liječenju mnogih bolesti, a negativan u tome što su ljudi izloženi tim dijagnostičkim metodama istovremeno izloženi i određenoj dozi zračenja koja se emitira njihovom primjenom i koja posljedično može dovesti do karcinoma. Osim toga, primjenom radionuklida u dijagnostičke i terapijske svrhe stvara se medicinski otpad koji je radioaktivan te potencijalno opasan. Stoga je potrebno prikladno zbrinjavanje medicinskog radioaktivnog otpada kako bi se na taj način osigurala zaštita zdravlja ljudi i okoliša od radijacije. Pri zbrinjavanju radioaktivnog otpada moraju se jasno definirati ciljevi tog postupka, osigurati zakonodavni okvir, raspodjela odgovornosti između nadležnih institucija, financijska sredstva te odgovarajući broj ljudi zadužen za ispunjavanje navedenog zadatka.

Ključne riječi: dijagnostičke metode, ionizirajuće zračenje, medicinski otpad, radioaktivni otpad

UVOD

Ionizirajuće zračenje je fotonsko ili čestično zračenje koje u međudjelovanju s tvarima u određenoj mjeri ionizira te tvari. Također, ono je i popratna pojava mnogih prirodnih događanja u mikrosvijetu (prirodno zračenje) i umjetno potaknutih procesa (umjetno zračenje). Pojedine vrste i područja energije zračenja povijesno su dobili nazive rendgensko - elektromagnetsko zračenje

malih valnih duljina u rasponu od 10 nm približno do 0,1 pm, gama - (γ -zračenje) elektromagnetsko zračenje valnih duljina manjih od 0,1 pm, alfa - čestično zračenje sastavljeno od brzih atomskih jezgara helija (α -čestice), beta - (β -zračenje) čestično zračenje sastavljeno od brzih elektrona (β^- čestica) ili pozitrona (β^+ čestica). Mjera za međudjelovanje ionizirajućeg zračenja i tvari je *apsorbirana doza*, određena omjerom energije zračenja apsorbirane u tijelu i mase ozračenog tijela, a SI jedinica apsorbirane doze je Gray J/kg (Gy). Razlikuju se dvije dozimetrijske veličine koje se koriste pri opisu izloženosti; ekvivalentna doza koja se odnosi na pojedina tkiva pomnoženo s određenim težinskim faktorima jer sva tkiva ne apsorbiraju jednako energiju i efektivna

*Dean Smojver, dr. med., (d_smojver@yahoo.com), Zavod za hitnu medicinu Koprivničko-križevačke županije, Trg Tomislava Bardeka 10, 48000 Koprivnica, osoba za kontakt: prof. dr. sc. Ksenija Vitale, (kvitale@snz.hr), Medicinski fakultet, Škola narodnog zdravlja „Andrija Štampar“, Katedra za zdravstvenu ekologiju i medicinu rada i sporta, Rockefellerova 4, 10000 Zagreb.

doza koja je zbroj svih ekvivalentnih doza koje se određuju za svako pojedino tkivo te pomnoženo s odgovarajućim faktorima koji se odnose na faktor kvalitete, tj. vrste radijacije i proizvoda ostalih čimbenika. Efektivna doza uvedena je zato što preciznije izražava štetne učinke na organizam jer uz ostalo ubraja i radionuklide unesene u organizam vodom, hranom i zrakom. Jedinica efektivne i ekvivalentne doze je Sivert J/kg (Sv); (Feretić, 2010.).

Apsorpcija ionizacijskog zračenja u organizmu izaziva ionizaciju ili ekscitaciju molekula, a oslobođena energija dovodi do kemijskih promjena koje mogu uzrokovati ireverzibilna oštećenja na molekulama bitnima za biološko funkcioniranje stanice. To može uzrokovati biokemijske (metaboličke) promjene, posljedica čega mogu biti fiziološka ili morfološka oštećenja i/ili mutacije (Dodig et al., 1999.). Dvije su teorije, a teorija izravnog djelovanja kaže da oštećenja na staniци nastaju izravnim pogotkom određenog kvanta energije u neki osjetljivi dio stanice, posljedica čega je inaktivacija ili smrt stanice. Teorija posrednog djelovanja objašnjava utjecaj ionizacijskog zračenja na živu tvar radiolizom vode i stvaranjem slobodnih H i OH radikala. Slobodni radikali vrlo su reaktivni jer nose nespareni elektron pa brzo reagiraju međusobno, ali i s drugim molekulama, mijenjajući ih pri tome. U organizmu, ionizacijsko zračenje djeluje na oba načina (Dodig et al., 1999.). Jezgra je najosjetljivija stanična meta za letalno oštećenje, nadalje stanična membrana, u prvom redu membrane lizosoma, endoplazmatskog retikuluma i mitohondrija (Dodig et al., 1999.). Na molekularnoj razini nastaju oštećenja makromolekula kao što su enzimi, RNK i DNK. Oštećenja na razini stanice očituju se usporenjem stanične diobe, staničnom smrću i preobrazbom u zloćudne stanice. Oštećenja na razini tkiva i organa su oštećenja krvotvornog, probavnog, krvožilnog i središnjeg živčanog sustava (Dodig et al., 1999.).

UVJETI ZA PRIMJENU IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA U MEDICINI

Pravilnikom o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u medicini i dentalnoj medicini propisuju se uvjeti, način i mjere zaštite

osoba izloženih ionizirajućem zračenju tijekom primjene izvora ionizirajućeg zračenja u dijagnostičke ili terapijske svrhe osoba ozračenih u sklopu zdravstvenog pregleda za radno mjesto, osoba ozračenih u sklopu sustavnog pregleda, osoba koje dragovoljno sudjeluju u medicinskim i biomedicinskim, dijagnostičkim ili terapijskim, istraživačkim programima koji uključuju uporabu izvora ionizirajućeg zračenja, osoba ozračenih u sklopu medicinsko-pravnih postupaka te osoba koje svjesno i dragovoljno pridržavaju i pomažu pacijentima tijekom dijagnostičkih ili intervencijskih pregleda ili postupaka u medicini i dentalnoj medicini uporabom izvora ionizirajućeg zračenja. Ozračivanje pacijenata mora biti opravdano, odnosno ukupna dobit pojedinca i društva od potencijalnog dijagnostičkog, intervencijskog ili terapijskog pregleda ili postupka uporabom izvora ionizirajućeg zračenja mora biti veća od osobne štete koju ozračivanje može uzrokovati, uzimajući u obzir učinkovitost, dobit i rizik drugih raspoloživih postupaka i tehnika koje ne uključuju uporabu izvora ionizirajućeg zračenja ili uzrokuju manje ozračivanje pacijenta. Ozračivanje u svrhu medicinskog ili biomedicinskog istraživanja mora odobriti odgovarajuće etičko povjerenstvo u skladu s posebnim propisima. Ozračivanje, osim u slučaju terapijskog postupka, mora biti toliko nisko koliko je razumno moguće postići uz zadržavanje potrebne kakvoće dijagnostičke informacije, uvažavajući ekonomske i socijalne čimbenike. Pravilnik definira i posebne kategorije kao što su:

- *klinička odgovornost*, tj. odgovornost nadležnog doktora medicine s obzirom na medicinsko ozračivanje pojedinca, posebice u odnosu na opravdanost, optimizaciju, kliničku evaluaciju ishoda, suradnju s ostalim doktorima medicine drugih specijalnosti i s drugim zaposlenicima, a u vezi s praktičnim aspektima, dobivanjem informacija o prethodnim pregledima i postupcima, davanjem postojećih informacija i/ili zapisa doktorima medicine drugih specijalnosti i/ili predlagateljima, davanjem informacija pacijentima i drugim uključenim osobama o rizicima povezanim s ionizirajućem zračenjem,
- *klinički audit* jest sistematsko ispitivanje ili provjera dijagnostičkih, intervencijskih ili terapijskih pregleda ili postupaka u medi-

cini uporabom izvora ionizirajućeg zračenja s ciljem unapređenja kvalitete i ishoda skrbi o pacijentu kroz strukturirani pregled, pri čemu se postupci, procedure i rezultati uspoređuju s prihvaćenim standardima dobrih medicinskih dijagnostičkih, intervencijskih ili terapijskih pregleda ili postupaka u medicini uporabom izvora ionizirajućeg zračenja, uz izmjenu načina postupanja gdje je tako naznačeno te primjenu novih standarda ako je potrebno,

- *praktični aspekt* jest fizičko provođenje ozračivanja osoba i bilo kojih dodatnih odgovarajućih aspekata, uključujući rukovanje i uporabu uređaja i opreme koja se koristi pri provođenju dijagnostičkih, intervencijskih ili terapijskih pregleda ili postupaka u medicini uporabom izvora ionizirajućeg zračenja, procjenu tehničkih i fizikalnih parametara, uključujući doze zračenja, umjeravanje i održavanje uređaja i opreme, pripremu i primjenu radioaktivnih tvari koje se unose u tijelo pacijenta, kao i razvijanje filmova.

RADIOAKTIVNI OTPAD

Radioaktivni otpad je, prema definiciji Međunarodne agencije za atomsku energiju, materijal koji sadrži ili je kontaminiran nuklidima u koncentracijama takvima da je razina radioaktivnosti veća od vrijednosti specificiranih od kompetentnih tijela, a da pri tome materijal nema uporabnu vrijednost (*IAEA, 2003.*). Prema Zakonu o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti, radioaktivni otpad definira se kao otpadna tvar u plinovitom, tekućem ili krutom stanju za koju nije predviđena daljnja uporaba, koji sadržava radioaktivne tvari čija je aktivnost ili koncentracija aktivnosti iznad granične vrijednosti za otpuštanje iz nadzora koju pravilnikom propisuje ministar.

Radioaktivni otpad nastaje u djelatnostima u kojima se koristi ionizirajuće zračenje, a to su: medicina, energetika, industrija, znanost i poljoprivreda. Radioaktivni otpad svrstava se, prema spomenutom Pravilniku o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora, u sljedeće razrede: otpušteni radioaktivni otpad, vrlo kratkoživi radioaktivni otpad, vrlo nisko i nisko radio-

aktivni otpad, srednje radioaktivni otpad i visoko radioaktivni otpad. Prema vremenu poluraspada, spomenuti Pravilnik definira i radioaktivni otpad kao kratkoživi otpad, čiji izotopi imaju vremena poluraspada manja ili jednaka 30 godina i dugoživi otpad čiji izotopi imaju vremena poluraspada veća od 30 godina. Važno je napomenuti da se klasifikacija radioaktivnog otpada podudara s klasifikacijom Međunarodne agencije za atomsku energiju (*IAEA, 2009.*).

RADIOAKTIVNI OTPAD U MEDICINI

Pri svakom procesu pružanja zdravstvene zaštite nastaje medicinski otpad koji može biti opasan i neopasan, što je regulirano pravilnicima o zbrinjavanju radioaktivnog otpada, gospodarenju medicinskim otpadom, katalogu otpada i o gospodarenju otpadom. Radioaktivni otpad je opasan otpad koji nastaje u djelatnosti nuklearne medicine (scintigrafija) i radionuklidnoj terapiji i ubraja se u institucionalni radioaktivni otpad. Prema konzistenciji, radioaktivni otpad dijeli se na kruti (stare generatore, kontaminirane igle, kontaminirane staklene bočice, vatu, posteljinu) i tekući (suspenzije, otopine te biološke izlučevine, kao što su urin i feces). Medicinski izvori zračenja su: otvoreni smješteni unutar bolnice, u prikladnim spremištima i zatvoreni (nakon brahiterapije i teleterapije) spremaju se izvan bolnice, u ovlaštenim postrojenjima. Otvoreni izvori obuhvaćaju dijagnostiku i terapiju u nuklearnoj medicini, analizu krvi u kliničkim laboratorijima te in vitro, in vivo i studije na životinjama u istraživačkim laboratorijima. Terapija otvorenim izvorima obuhvaća radiojodnu (I-131) i radionuklidnu (I-131, Y-90) terapiju. Pacijenti su, pri tome, veliki izvor zračenja, a osobito njihove tjelesne izlučevine. Kod zatvorenih izvora npr. kod radiojodne terapije pacijent je u izolacijskoj sobi nekoliko dana te ima sanitarni čvor povezan s podzemnim spremnikom za odlaganje/razrjeđenje urina. Njihov tekući otpad ne ide u kanalizaciju, već u spremnike koje se označavaju brojevima i svakodnevno im se provjerava radioaktivnost. Kad radioaktivnost padne ispod dopuštene razine, spremnici i/ili vreće sa spremnicima odlažu se u prostore za otpad koji se nalaze u krugu bolnice prema Pravilniku o akreditacijskim standardima za bolničke zdravstvene ustanove. Od ljudskih organa, najveće

ću izloženost zračenju ima mokraćni mjehur (*Dodig et al., 1999.*)

Radioaktivni materijali u medicini većinom su kratkoživi pa tako Tc-99m ima vrijeme poluraspada 6 sati, a I-131 ima vrijeme poluraspada 8,1 dan. Radioaktivnim raspadom u spremištu razina radioaktivnosti pada ispod propisane granice pa je moguće kontrolirano ispuštanje iz nadzora. Za razliku od njih, dugoživi radionuklidi nepraktični su za spremanje u ustanovama i trebali bi se odvoziti u licencirana odlagališta ili skladišta prema Pravilniku o akreditacijskim standardima za bolničke zdravstvene ustanove.

Radioaktivni otpad podvrgnut je kontroliranom nadzoru u ustanovi u kojoj se nalazi, a nakon raspada radioaktivnosti primjenjuju se postupci primjereni sanitarnom otpadu. Kontrolirani nadzor postiže se zadržavanjem radioaktivnih tvari u prikladnom spremniku sve do raspada aktivnosti na zanemarivu razinu. Pri kontroliranom nadzoru ne smije doći do suvišnog ozračivanja bilo koga pa je glavna svrha pri odlaganju radioaktivnog otpada u medicini zaštita osoblja i sprečavanje kontaminacije prostora i opreme, a svim postupcima rukovodi osposobljena stručna osoba. Svako spremište radioaktivnog otpada trebalo bi imati prikladan štiti od zračenja, adekvatnu ventilaciju, protupožarnu zaštitu, propisno označen prostor i biti pod ključem prema Zakonu o zaštiti okoliša. Prije konačnog odlaganja (ispuštanja iz kontroliranog nadzora) radioaktivnog otpada obvezatno je izmjeriti razinu radioaktivnosti te pritom treba voditi pisani zapis o podrijetlu spremljenog otpada. Otpad se prije odlaganja razvrstava ovisno o očekivanom vremenu trajanja poluraspada te fizičkom obliku otpada i materijalu. Kod biološkog otpada moguće je truljenje, kod infektivnog je nužna sterilizacija, a razbijeno staklo i igle skupljaju se u posebnim spremnicima kako bi se izbjegle ozljede prema Pravilniku o akreditacijskim standardima za bolničke zdravstvene ustanove (*IAEA, 1998.*)

Odlaganje radioaktivnog otpada

Tehnejijski (Tc-99m) radioaktivni otpad (bočice, šprice, stari generatori)

Bočice se skupljaju u kontejneru za radioaktivni otpad u "vruće" tehnejijskom Tc-HOT-la-

boratoriju. Kad se kontejner napuni do 3/4 svojeg kapaciteta, odlaze na odležavanje (7 dana) u kontejner u "vruće" jodnom laboratoriju (I-HOT laboratorij), a nakon odležavanja kontrolira se razina radioaktivnosti. Injekcijske štrcaljke odlaze se u kontejnere za radioaktivni otpad na radilištima. Kad se kontejner napuni (otprilike 40 štrcaljki), službujući tehničar poziva spremačicu koja ga odnosi na odležavanje (7 dana) u kontejner u I-HOT-laboratorij. Kontejneri u I-HOT laboratoriju obilježeni su po danima (ponedjeljak do petak). Kontejneri se prazne nakon propisanog odležavanja (kontejner označen ponedjeljak prazni se sljedeći ponedjeljak – nakon 7 dana itd.), nakon čega se kontrolira razina radioaktivnosti (*Khan et al., 2010., Ravichandran et al., 2011.*).

Jodni (I-131) radioaktivni otpad (bočice, injekcijske štrcaljke i slamke, kontaminirane jodom-131 i spojevima obilježenim njime)

Bočice se skupljaju u radnom tjednu u poseban kontejner u Tc-HOT-laboratorij, a nakon čega odlaze na odležavanje u kasu (90 dana). Injekcijske štrcaljke vraćaju se s radilišta u Tc-HOT-laboratorij i odlaze na odležavanje u kasu (90 dana). Nakon odležavanja, kontrolira se razina radioaktivnosti. Slamke odlaze na odležavanje u kasu (90 dana). Nakon odležavanja, kontrolira se razina radioaktivnosti (*Khan et al., 2010., Ravichandran et al., 2011.*).

Talijski (Tl-201) radioaktivni otpad (bočice i šprice)

Bočice se skupljaju u radnom tjednu u HOT-laboratoriju, a nakon čega odlaze na odležavanje u kasu (45 dana). Injekcijske štrcaljke skupljaju se na radilištu u poseban kontejner dok se on ne napuni (injekcijske štrcaljke od 2 radna dana te braunile). Službujući tehničar tada poziva spremačicu koja ga odnosi u Tc-HOT-laboratorij. Odlaze se na odležavanje u kasu (45 dana). Nakon odležavanja, kontrolira se razina radioaktivnosti (*Khan et al., 2010., Ravichandran et al., 2011.*).

Galijski (Ga-67) radioaktivni otpad (bočice i šprice)

Bočice se skupljaju u radnom tjednu u HOT-laboratoriju, a nakon čega odlaze na odležavanje u kasu (45 dana). Injekcijske štrcaljke skupljaju se na radilištu u poseban kontejner dok se ne napuni

(injekcijske štrcaljke od 2 radna dana te braunile). Službujući tehničar tada poziva spremačicu koja ga odnosi u Tc-HOT-laboratorij. Odlaze se na odležavanje u kasu (45 dana). Nakon odležavanja, kontrolira se razina radioaktivnosti (Khan et al., 2010., Ravichandran et al., 2011.).

Radioaktivni otpad koji sadrži jod-125

Skuplja se dnevno na radilištu na kojem nastaje u crvene vreće za otpad. Vreće se svakodnevno odnose u skladište radioaktivnog otpada. Odležavaju 60 dana te se mjeri razina radioaktivnosti. Radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide, kao što su fluor-18 i jod-123, zbrinjava se na isti način kao i radioaktivni otpad koji sadrži tehnecij-99m. Radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide kao što su itrij-90, indij-111, samarij-153 zbrinjava se na isti način kao i otpad koji sadrži galij-67 i talij-201. Kruti radioaktivni otpad kao posljedica kontaminacije i/ili dekontaminacije odlaze se prema propisima za radionuklid kontaminant. Ovisno o razini aktivnosti nakon odležavanja, otpad se pohranjuje u skladištu radioaktivnog otpada ili se ispušta iz nadzora i pohranjuje kao poseban, bolnički otpad. Razinu aktivnosti kontrolira ovlaštenu pripadnik odjela za biofiziku i odlučuje na temelju izmjerenih aktivnosti o daljnjem postupku (Khan et al., 2010., Ravichandran et al., 2011.).



Slika 1. Olovni ormar za pohranu istrošenih radionuklidnih generatora (fotografija: Smojver, D., 2017.)
Figure 1. Lead cabinet for storing used radionuclide generators, author D. Smojver, 2017



Slika 2. Kutija za zbrinjavanje kolona radionuklidnih generatora (žuto) i rastavljenog generatora (plavo); (fotografija: Smojver, D., 2017.)

Figure 2. Box for storing radionuclide columns (yellow) and disassembled generator (blue), author D. Smojver, 2017

ZBRINJAVANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA U REPUBLICI HRVATSKOJ

Republika Hrvatska ima obvezu zbrinuti radioaktivni otpad (RAO) i iskorištene izvore ionizirajućeg zračenja (II) koji su nastali 60-godišnjom primjenom izvora ionizirajućeg zračenja u medicini, industriji, znanosti, vojnoj ali i u napravama koje se još uvijek ponegdje nalaze u javnoj upotrebi (gromobrani i javljači dima). Objekti u kojima se do sada privremeno skladištio navedeni otpad su zatvoreni. Stoga se mora što prije uspostaviti središnje skladište RAO-a, a RH ima obvezu sanirati lokacije na kojima se nalaze prirodni radioaktivni materijali za koje je potreban kontinuirani nadzor prema Strategiji zbrinjavanja radioaktivnog otpada. Vlada RH je 2009. godine izradila Strategiju zbrinjavanja RAO u sklopu pristupnih pregovora o pristupanju RH Europskoj uniji. U međuvremenu, smjernice, ciljevi i zaključci te Strategije nisu provedeni. Stoga Vlada RH 2014. podnosi Hrvatskome saboru na prihvaćanje novu Strategiju zbrinjavanja RAO i II u kojoj se sustavno i dugoročno pristupa rješavanju ove problematike.

Načela na kojima se zasniva Strategija preuzeta su iz Zajedničke konvencije - iz temeljnog dokumenta IAEA o zbrinjavanju RAO-a, "Princi-

ples of Radioactive Waste Management¹¹, (IAEA, 1995., 1998., 2011.) su sljedeća:

- Zbrinjavanje radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora mora biti organizirano na način koji osigurava zaštitu pojedinaca, društva i okoliša od štetnih učinaka ionizirajućeg zračenja.
- Zbrinjavanje radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora mora biti organizirano na način kojim se uzima u obzir mogućnost prekograničnih štetnih učinaka ionizirajućeg zračenja na ljudsko zdravlje i okoliš.
- Zbrinjavanje radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora mora biti organizirano na način kojim se ne nameću nepotrebni tereti budućim naraštajima.
- Nastajanje radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora mora biti ograničeno na najmanju moguću količinu, koliko je to razumno ostvarivo, u smislu aktivnosti i volumena, organizacije tehnologije i načina zbrinjavanja te razgradnje, uključujući ponovne upotrebe materijala.
- Ovisnost između nastajanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora i njihova zbrinjavanja mora biti uzeta u obzir u smislu racionalizacije postupaka i povećavanja učinkovitosti te radiološke i nuklearne sigurnosti.
- Radioaktivni otpad i iskorišteni izvori moraju biti zbrinuti na siguran način, uključujući dugoročne pasivne mjere radiološke i nuklearne sigurnosti.
- Primjena mjera radiološke i nuklearne sigurnosti mora biti sumjerljiva riziku.
- Trošak zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora snose uzročnici radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora.
- Proces zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora mora biti dokumentiran u svim svojim fazama.
- Pravna ili fizička osoba koja obavlja djelatnost zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora odgovorna je za primjenu mjera radiološke i nuklearne sigurnosti.
- Učinkovit pravni okvir s institucionalnom infrastrukturom zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora mora biti dugoročno osiguran.

- Upravljanje radiološkom i nuklearnom sigurnošću mora biti uspostavljeno u objektima i nad instalacijama koji su uključeni u obavljanje djelatnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora.
- Obavljanje djelatnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora mora biti osigurano tako da je nedvojbeno demonstrirana dugoročna opravdanost odabranog načina obavljanja djelatnosti, a na osnovi doprinosa općem dobru.
- Radiološka i nuklearna sigurnost prilikom obavljanja djelatnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora mora biti optimizirana tako da osigurava najveću razinu radiološke i nuklearne sigurnosti koliko je to razumski moguće.
- Ograničenje rizika mora osigurati da je ozračivanje pojedinca ili opterećenje okoliša zbog obavljanja djelatnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora ispod dopuštenih granica.
- Mora se osigurati zaštita sadašnjih i budućih generacija od rizika nastalih obavljanjem djelatnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora.
- Moraju se poduzeti svi mogući napori zbog sprečavanja izvanrednih događaja do kojih može doći zbog obavljanja djelatnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora.
- Moraju se uspostaviti i održavati aranžmani potrebni za odgovor u slučaju nastanka izvanrednog događaja.
- Aktivnosti zaštite i/ili umanjivanja posljedica zbog izvanrednog događaja moraju biti opravdane i optimizirane tako da osiguravaju doprinos općem dobru.

Situacija u Hrvatskoj - institucionalni RAO i II

Praksa zbrinjavanja institucionalnog RAO-a i II-ja sastojala se od njihova privremenog pohranjivanja u dva skladišta. To su skladišta Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) i Instituta Ruđera Boškovića (IRB), oba smještena u Zagrebu prema spomenutoj Strategiji.

Skladište IMI-ja u svrhu prihvata institucionalnog RAO-a i II-ja korišteno je od 1959. do 2000.

godine. Danas je to skladište zatvoreno za prihvatanje novonastalog RAO-a i II-ja. Tijekom 2006. godine, uz pomoć IAEA-e i uz nadzor tadašnjeg Državnog zavoda za zaštitu od zračenja, provedena je sanacija skladišta koja je obuhvaćala karakterizaciju, razvrstavanje i kondicioniranje dijela tada postojećeg inventara. Procjena je da je u skladištu IMI-ja pohranjeno oko 1,5 m³ institucionalnog RAO-a i II-ja, od čega približno 0,5 m³ zauzimaju paketi s kratkoživućim, dok 1 m³ zauzimaju paketi s dugoživućim radionuklidima.

Skladište IRB-a izgrađeno je 1967. godine s namjenom pohranjivanja RAO-a i II-ja proizvedenog u Institutu. Kako se s vremenom u skladište počeo dopremati i institucionalni RAO i II generiran izvan Instituta, kapacitet je postao nedostatan. Zbog toga je skladište 1987. godine prošireno. Uz postojeću prostoriju volumena 62 m³ izgrađena je nova prostorija za skladištenje volumena 73 m³, a iznad nje i prostorija za obradu i razvrstavanje RAO-a. Skladište IRB-a bilo je ovlašteno za sakupljanje, obradu i skladištenje svih vrsta krutih i tekućih II-ja i institucionalnog RAO-a u RH. Prema odluci Vlade RH iz 2009. godine, koja je uslijedila na temelju zaključka Strategije iz 2009. godine, taj objekt predložen je kao središnje nacionalno skladište. Međutim, zbog protivljenja javnosti i nemogućnosti postizanja dogovora s upravom Instituta, odluka Vlade RH nije provedena. U međuvremenu je skladište IRB-a, zbog neprimjerenog skladištenja institucionalnog RAO-a i II-ja, zapečatio Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS), a koje je ujedno 1. siječnja 2019. prestalo s radom. Prema trenutnoj procjeni u skladištu IRB-a pohranjeno je oko 6 m³ institucionalnog RAO-a i II-ja, od čega oko 5 m³ zauzimaju paketi s kratkoživućim radionuklidima, dok paketi s dugoživućim radionuklidima zauzimaju volumen od 1 m³. Znači, u skladištima IMI-ja i IRB-a ukupno je pohranjeno 7,5 m³ institucionalnog RAO-a i II-ja. Ukupno procijenjena aktivnost tog otpada iznosi oko 1,6×10¹³ Bq. Obje kategorije pripadaju nisko i srednje radioaktivnom otpadu. Klasifikacija RAO-a na kratkoživući (vrijeme poluraspada do 30 godina, α emiteri u koncentracijama do 4000 Bq/g po paketu) i dugoživući (vrijeme poluraspada dulje od 30 godina, α emiteri u koncentracijama većim od 4000 Bq/g po paketu) definirana je s obzirom na preferentne načine odlaganja. Tako se za kratkoživuće

pakete preferira površinski tip odlagališta, dok se za dugoživuće pakete preferira odlagalište smješteno u dubokim geološkim formacijama prema spomenutoj Strategiji.

Trenutačno se procjenjuje da će se u RH do 2040. godine dodatno generirati oko 10 m³ institucionalnog RAO-a i II-ja. Pri tome treba istaknuti da se navedena procjena odnosi isključivo na skladišne pakete institucionalnog RAO-a i II-ja, odnosno na pakete koji nisu kondicionirani tako da udovoljavaju kriterijima za odlaganje.

Ciljevi postavljeni Strategijom su kratkoročni i u roku od 2 godine potrebno je uspostaviti središnje skladište za RAO i II. U međuvremenu, Zavod je već inicirao stanovite aktivnosti u vezi s uspostavom središnjeg skladišta. Uspostavom središnjeg skladišta stvaraju se uvjeti za premještanje institucionalnog RAO-a i II-ja iz skladišta IMI-ja i IRB-a. U slučaju skladišta IMI-ja premještanje se svodi na transport. Slučaj skladišta IRB-a puno je zahtjevniji i prije svega podrazumijeva njegovu sanaciju. U međuvremenu je IRB, u skladu s odgovarajućom odlukom DZRNS-a, poduzeo stanovite aktivnosti na sanaciji svojeg skladišta. Programi sanacije lokacija na kojima se nalaze prirodni radioaktivni materijali prije svega moraju se temeljiti na zaštiti zdravlja ljudi i zaštiti okoliša od radiološkog utjecaja. Prilikom izrade programa sanacije lokacija na kojima se nalaze prirodni radioaktivni materijali potrebno je voditi računa o učinkovitosti već provedenih postupaka sanacije i mjera za zaštitu okoliša te o mogućoj zapaženosti postojećih deponija i o eventualnoj potrebi za njihovom obnovom. Ako se lokacije planiraju koristiti za daljnje deponiranje prirodnih radioaktivnih materijala, potrebno je razmotriti jesu li kapaciteti postojećih deponija dostatni. Jedan od glavnih ciljeva je i uspostava centara za informiranje i edukaciju javnosti o zbrinjavanju radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva. Do danas ovi kratkoročni ciljevi nisu postignuti te su bolnice prisiljene same donositi odluke kako i gdje u krugu bolnice skladištiti otpad koji nastane pri pružanju zdravstvene usluge. Dugoročni ciljevi su provedba dugoročnog kontinuiranog radiološkog nadzora lokacija na kojima se nalaze prirodni radioaktivni materijali. Iako ciljevi iz Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog

nuklearnog goriva nisu postignuti, 2018. godine Vlada Republike Hrvatske donijela je Nacionalni program provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, i to za razdoblje od 2025. do 2060., gdje se sve iz Strategije ponavlja uz navođenje lokacije Čerkezovac kao središnjeg skladišta za RAO i II te razgradnje skladišta u IRB-u. U međuvremenu DRNZS prestao je s radom i njegova prava i obveze preuzelo je Ministarstvo unutarnjih poslova na temelju Zakona o izmjenama i dopuna zakona o ustrojstvu i djelokrugu ministarstva i drugih središnjih tijela državne uprave, što je unijelo dodatne nejasnoće u sustav.

ZAKONODAVNI OKVIR

Zakonodavni okvir RH u području zbrinjavanja RAO-a i II-ja trenutačno okvirno čine 5 zakona o održivom gospodarenju otpadom, potvrđivanju Baselske konvencije, radioaktivnoj i nuklearnoj sigurnosti, zaštiti okoliša i o ustrojstvu i djelokrugu ministarstva, 1 odluka, 10 pravilnika, 1 strategija i 1 uredba. Zakon utvrđuje mjere radiološke sigurnosti, fizičkog osiguranja te neširenja nuklearnog oružja pri obavljanju nuklearnih djelatnosti i djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja. Definirane mjere omogućuju primjerenu zaštitu pojedinaca, društva i okoliša od štetnih posljedica ionizirajućeg zračenja, sigurno obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, nuklearnih djelatnosti, djelatnosti zbrinjavanja RAO-a i odgovarajuće fizičko osiguranje. RH potpisnica je niza međunarodnih ugovora, konvencija i sporazuma, tako da pri rješavanju problematike RAO-a mora provesti obveze preuzete u skladu s međunarodnim propisima. Zajednička konvencija potvrđuje da krajnju odgovornost za sigurnost zbrinjavanja RAO-a snosi država. RAO bi morao biti pohranjen u zemlji u kojoj je i proizveden. Uvoz radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora zabranjen je Zakonom. Ta odredba dugo-ročno se ne namjerava mijenjati. S druge strane, izvoz radioaktivnog otpada dopušten je u okvirima koje propisuju odgovarajuće direktive prema spomenutoj Strategiji.

Raspodjela odgovornosti

Hrvatski sabor, Vlada, Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, Ministarstvo zdravstva, Mini-

starstvo unutarnjih poslova, Ministarstvo gospodarstva te različite strukovne udruge surađuju u izradi zakonodavnog okvira u području radiološke i nuklearne sigurnosti. RH izgradit će nacionalni sustav zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora u kojemu će odgovornosti svih sudionika biti jednoznačno određene. Nacionalni sustav zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora bit će izgrađen tako da će osigurati visok stupanj koordinacije između svih relevantnih nadležnih tijela državne uprave. Zavod će uspostaviti središnje skladište za institucionalni radioaktivni otpad i iskorištene izvore. Paralelno s uspostavom središnjeg skladišta, Vlada će odrediti pravnu osobu koja će obavljati poslove zbrinjavanja radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora prema Strategiji. Financijska sredstva osigurana iz proračuna za provedbu, pojedinih djelatnosti u zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora moraju biti raspoloživa u trenutku provedbe djelatnosti zbrinjavanja. Financijska sredstva potrebna za zbrinjavanje novonastalog institucionalnog radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora osigurat će djelatnosti tog novonastalog institucionalnog radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora. Prema Strategiji iz 2014. i Nacionalnom programu iz 2018., financijska sredstva potrebna za sanaciju lokacija na kojima se nalaze prirodni radioaktivni materijali osigurat će vlasnici postrojenja koje je materijale proizvelo ili vlasnici lokacija na kojima se ti materijali nalaze.

Buduće zbrinjavanje

U RH uspostaviti će se centar za zbrinjavanje radioaktivnog otpada. Postupak odabira pogodne lokacije za smještaj centra za zbrinjavanje radioaktivnog otpada provest će se uz transparentno i cjelovito informiranje javnosti i uz njezino aktivno sudjelovanje u procesima odlučivanja. Vlada RH aktivno će podupirati razvoj lokalne zajednice na čijem se teritoriju nalazi centar za zbrinjavanje radioaktivnog otpada u skladu sa Strategijom. Odabir lokacije centra za zbrinjavanje RAO-a, na kojoj će se nalaziti objekti za skladištenje i odlaganje RAO-a i II-ja, dugotrajan je i skup postupak s neizvjesnim ishodom. Objekti o kojima je riječ pripadaju kategoriji kontroverznih objekata, tako da percepcija javnosti najčešće nosi negativne konotacije oko izgradnje potrebnih skladišta i potom odlagališta RAO-a. Pri tome treba voditi računa o

vrlo izraženoj međuovisnosti različitih djelatnosti zbrinjavanja RAO-a kao što su obrada, kondicioniranje, manipuliranje, skladištenje i odlaganje. Djelatnosti obrade i kondicioniranja RAO-a treba organizirati tako da se dodatno generiranje RAO-a ograniči na najmanju moguću razumno ostvarivu mjeru u smislu aktivnosti i volumena. Drugim riječima, primjena mjera radiološke, nuklearne i fizičke sigurnosti mora biti sumjerljiva granici zamenarivog rizika. Odabir jedne lokacije u skladu je i s Programom prostornog uređenja RH iz 1999. godine, u kojem stoji kako RH treba riješiti odlaganje nisko i srednje radioaktivnog otpada na jednoj lokaciji primjenjujući najsvremeniju tehnologiju i postupke koji će osigurati trajno odlaganje na siguran način. Programi sanacije lokacija bit će usklađeni s prostornim i urbanističkim planovima uređenja lokalnih zajednica na čijem teritoriju se lokacije nalaze. Postupcima sanacije uzet će se u obzir mogućnost ponovne upotrebe onih prirodnih radioaktivnih materijala koji se mogu osloboditi regulatornog nadzora. Na lokacijama na kojima se nalaze prirodni radioaktivni materijali provodit će se kontinuirani radiološki nadzor prema Nacionalnom programu iz 2018.

UMJESTO ZAKLJUČKA

Do danas nije proveden niti jedan postavljeni cilj iz Strategije, a zdravstvene ustanove su prepustene same sebi i unutar svojih institucija moraju skladištiti radioaktivni otpad do daljnjih odluka nadležnih vladinih tijela u Republici Hrvatskoj.

LITERATURA

Dodig, D., Ivančević, D., Kraljević, P., Kusić, Z., Medvedec, M., Poropat, M.: Zaštita od zračenja. Ur.: Ivančević, D., Dodig, D., Kusić, Z.: *Klinička nuklearna medicina*, Medicinska naklada, Zagreb, 1999.

Feretić, D.: *Uvod u nuklearnu energetiku*, Školska knjiga, Zagreb, 2010.

Hrvatska enciklopedija, Hrvatska leksikografski zavod., dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=27754>, pristupljeno: 11.6.2019.

International Atomic Energy Agency, (IAEA). Classification of Radioactive Waste. General Safety Gu-

ide No. GSG-1., IAEA., Vienna, 2009., dostupno na: <https://www.iaea.org/publications/8154/classification-of-radioactive-waste>, pristupljeno: 21.4.2020.

International Atomic Energy Agency, (IAEA). Clearance Of Materials Resulting From The Use Of Radionuclides In Medicine, Industry And Research. IAEA - TEC DOC - 1000. IAEA., Vienna, 1998., dostupno na: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1000_prn.pdf, pristupljeno: 1.5.2020.

International Atomic Energy Agency, (IAEA). Radioactive Waste Management Glossary. IAEA., Vienna, 2003., dostupno na: <https://www.iaea.org/publications/6682/radioactive-waste-management-glossary>, pristupljeno: 21.4.2020.

International Atomic Energy Agency, (IAEA): Radioactive Waste Management Objectives. Nuclear Energy Series. No.NW-O. IAEA., Vienna, 2011., dostupno na: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1521_web.pdf, pristupljeno: 21.4.2020.

International Atomic Energy Agency, Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals, Safety Series No. 111-F, IAEA., Vienna, 1995.

Khan, S., Syed AT., Ahmad, R., Rather, TA., Ajaz, M., Jan, FA.: Radioactive Waste Management in A Hospital. *International Journal of Health Sciences*, 4, 2010., 1, 39-46.

Nacionalni program provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva i to za razdoblje od 2025. do 2060., dostupno na: <https://civilna-zastita.gov.hr/strategija-zbrinjavanja-radioaktivnog-otpada-iskoristenih-izvora-i-istrošenog-nuklearnog-goriva/432>, pristupljeno: 21.4.2020.

Odluka o donošenju Nacionalni program provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva i to za razdoblje od 2025. do 2060., Narodne novine, br. 100/2018.

Pravilnik o akreditacijskim standardima za bolničke zdravstvene ustanove, Narodne novine, br. 92/2019.

Pravilnik o gospodarenju medicinskim otpadom, Narodne novine, br. 50/2015.

Pravilnik o gospodarenju otpadom, Narodne novine, br. 117/2017.

Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja, Narodne novine, br. 38/2018.

Pravilnik o katalogu otpada, Narodne novine, br. 90/2015.

Pravilnik o sadržaju te uvjetima, kriterijima i načinu odobravanja plana sanacije, Narodne novine, br. 38/2018.

Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, Narodne novine, br. 53/2018.

Pravilnik o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u medicini i dentalnoj medicini, Narodne novine, br. 89/2013.

Pravilnik o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u svrhu medicinskog i nemedicinskog ozračenja, Narodne novine, br. 42/2018.

Pravilnik o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora, Narodne novine, br. 12/2018.

Pravilnik o zdravstvenim uvjetima izloženih radnika i osoba koje se obučavaju za rad u području izloženosti, Narodne novine, br. 66/2018.

Ravichandran, R., Binukumar, JP., Rajan Sreera R., Arunkumar LS.: An overview of radioactive waste disposal procedures of a nuclear medicine department. *Journal of Medical Physics*, 36, 2011., 2, 95-99.

Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, Narodne novine, br. 125/14.

Uredba o mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja te postupanjima u slučaju izvanrednog događaja, Narodne novine, br. 24/18.

Zakon o održivom gospodarenju otpadom, Narodne novine, br. 94/13., 73/17., 14/19., 98/19.

Zakon o potvrđivanju Baselske Konvencije o nadzoru prekograničnog prometa opasnog otpada i njegovu odlaganju, Narodne novine, br. 3/94., 7/19., 8/19.

Zakon o radioaktivnoj i nuklearnoj sigurnosti, Narodne novine, br. 141/13., 38/15., 130/17., 118/18.

Zakon o zaštiti okoliša, Narodne novine, br. 80/13., 153/13., 78/15., 12/18.

Zakona o izmjenama i dopuna zakona o ustrojstvu i djelokrugu ministarstva i drugih središnjih tijela državne uprave, Narodne novine, br. 116/18.

DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE AFTER MEDICAL DIAGNOSTIC AND THERAPY

SUMMARY: Absorption of ionizing radiation in the organism causes ionization or excitation of molecules. Energy released by ionization leads to chemical changes, during which the free radicals are created, which can cause irreversible damage to molecules that are essential for biological functioning of a cell. This is how biochemical (metabolic) changes are made, result of which can be physiological or morphological damage and/or mutation of a cell that primarily influence the core, but also other cell parts. Cell damage manifests itself by slowing of the cell division, cell decay and transformation into malignant cells. Different diagnostic methods that are applied in medicine like X-ray (RTG), computerized tomography (CT) and scintigraphy, along with everything positive, also have negative effects on human health. Positive effects are manifested by accurate diagnostic which is necessary for treating many illnesses, while negative are that people who are exposed to these (and some other) diagnostic methods in the same time exposed to a certain amount of radiation which is emitted by their appliance and which can lead to cancer. The mentioned diagnostic methods generate radioactive medical waste that, as such, is very dangerous and has to be adequately disposed of in special warehouse, to ensure the safety of people environment from the radiation. The goals of disposal of radioactive waste have to be clearly defined, legislative frame ensured, responsibility of institutions in charge and financial funds allocated, as well as an adequate number of people engaged in fulfilling the mentioned task.

Key words: *diagnostic methods, ionizing radiation, medical waste, radioactive waste*

*Professional paper
Received: 2020-01-08
Accepted: 2020-08-24*