

OSIROMAŠENI URANIJUM I – Uranijum, radioaktivnost i zakonska regulativa

Osiromašeni uranijum je toksičan, nus proizvod procesa obogaćivanja uranijuma i predstavlja vrlo opasan radioaktivni otpad. Sve do sedamdesetih godina XX veka bio je skladišten, da bi početkom sedamdesetih počeo da se koristi za izradu tvrdog jezgra (penetratora) projektila. Međutim, osim trenutne efikasnosti koja nije sporna, osiromašeni uranijum, u vidu veoma sitnih čestica i aerosola predstavlja opasnost po ljude i životnu sredinu gotovo veći (4,5 · 10⁹ godina).

To je i razlog velikog publiciteta koji je poslednje decenije XX veka, od Zalivskog rata 1991. god. kada su projektili sa osiromašenim uranijumom prvi put masovno upotrebljeni, prerastao u pravu kampanju protiv ove municije koja je neselektivna, nehumana i izaziva posledice i kod pobednika i kod poraženih. U ime zaštite ljudi, životne sredine i života na Zemlji uopšte, vodi se kampanja za potpunu zabranu korišćenja osiromašenog uranijuma, koji je, sa druge strane, po vojnim kriterijuma – idealan.

U nekoliko radova prikazaće se ciklus kretanja osiromašenog uranijuma, od odvajanja kao beskorisnog materijala pri procesu obogaćivanja nuklearnog goriva do primene za izradu municije. Poslednja etapa – posledice primene municije punjene sa osiromašenim uranijumom jesu i biće predmet mnogih izučavanja i analiza u budućnosti.

U ovom radu dati su osnovni pojmovi vezani za proces zračenja kojem je čovek neprekidno izložen, kao i zakonska regulativa koja se odnosi na zaštitu čoveka od zračenja. Takođe, dat je prikaz svih pojmova koji se odnose na zračenje, kao i normativi stepena izloženosti čoveka zračenju. Analiziraju se, između ostalog, svojstva uranijuma kao poslednjeg elementa u periodnom sistemu elemenata koji se nalazi u prirodi, njegovo poreklo i migracija u životnoj sredini, pri čemu su upoređeni podaci vezani za prirodni i osiromašeni uranijum. Na kraju, daje se nastanak i sastav osiromašenog uranijuma koji nastaje pri procesu kruženja u nuklearnom gorivnom ciklusu, gde se deciderano podvlači da je to otpadni materijal.

Čovek je neprekidno izložen zračenju, koje potiče od radionuklida iz životne sredine. Izvori su različiti, kao i vrste energije zračenja kojima je izložen. Iako ih svojim čulima ne zapauža, raspolauže se sa pouzdanim tehnikama za izučavanje i merenje, što i omogućava uvid u prirodu procesa koji se odigravaju u ozračenim sredinama, kao i podatke o tome koliko je i kako čovek izložen zračenju [1].

Kosmos je značajan izvor zračenja za ljude na Zemlji. Kosmičko zračenje je posledica elektromagnetnih talasa (i naelektrisanih čestica) koje potiče sa zvezda, ili su izbačeni velikim brzinama prilikom gigantskih eksplozija supernova. Dodatno ubrzanje dobijaju na putu kroz magnetna polja u kosmičkom prostanstvu koja deluju kao džinovski akceleratori.

Kosmičko zračenje je jonizujuće zračenje kao i zračenje koje emituju radioaktivne supstance, međutim, postoje razlike u pogledu energije i intenziteta ove dve vrste zračenja. Energija primarnog kosmičkog zračenja, onog koje se rađa u eksplozijama, visoka je i često ogromna: milijarde elektronvolti (eV), a u nekim slučajevima i od milijarde milijardi eV. Energija radioaktivnog zračenja neke radioaktivne čestice je reda veličine milion elektronvolti. Sa intenzitetom jonizujućeg zračenja je suprotno: može da bude vrlo visoko za radioaktivne supstance, dok je intenzitet primarnog kosmičkog zračenja koje dospeva u normalnim uslovima na površinu Zemlje mali, usled magnetnog polja Zemlje i atmosfere [2].

IZVORI I VRSTE ZRAČENJA

Jedan od izvora zračenja su radioaktivni elementi koji se nalaze u telu čoveka i u čovekovojoj okolini: u prirodi, u tlu, vodama i vazduhu. U grupu radioaktivnih elemenata ubrajaju se svi hemijski elementi čiji su izotopi radioaktivni, a takođe i svi elementi sa kraja tablice peri-

odnog sistema elemenata, uključujući kako prirodne radioaktivne elemente, sve do uranijuma (⁹²U),¹⁾ tako i veštačkim putem dobijene *transuranske elemente*.²⁾ Veštačkim putem, u laboratorijama proizvedeno je oko 400 radioaktivnih jezgara. Istovremeno u prirodi postoji samo oko 300 stabilnih jezgara. Kada se ide u dubinu Zemlje, temperatura pojedinih slojeva Zemljine kore raste za 1°C svakih 100 m. Smatra se da zagrejanost Zemljine kore uglavnom posledica radioaktivnog raspada uranijuma, torijuma, kalijuma i drugih hemijskih elemenata. Debljina sloja sa povišenom radioaktivnošću iznosi nekoliko kilometara. Svi elementi koji se nalaze u prirodi sa rednim (atomske) brojem većim od 83 su radioaktivni. Prilikom radioaktivnog raspada višak energije jezgra atoma se oslobađa emitovanjem nuklearnog zračenja.

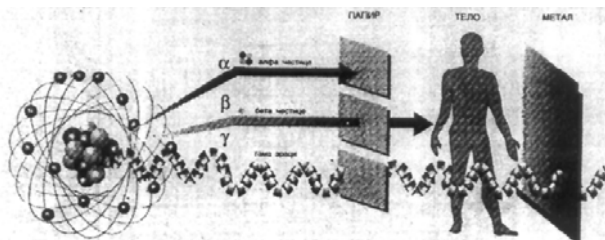
Radioaktivni elementi se *spontano* raspadaju sa emisijom više vrsta zračenja, a najpoznatiji su α -, β - i γ -zraci: α -zraci su pozitivno naelektrisane čestice (sa strukturom koja je adekvatna jezgru helijuma ⁴He, koje čine dva protona i dva neutrona), β -zraci su elektroni ili pozitroni visokih energija. Alfa čestice imaju najviše energije i vrlo gusto lokalno jonizuju, pa su posebno opasni za čoveka, dok β -čestice ne jonizuju tako gusto, ali imaju veću prodornost. Obe vrste radioaktivnog ras-

¹⁾ **Uranijum** ili **uran**? Treba istaći da se u nomenklaturi na našem jeziku, kao i shodno preporukama Komisije za nomenklaturu Srpskog hemijskog društva elemenat rednog broja 92 naziva **uran**. U anglosaksonskoj literaturi naziv je **uranijum**, ali to nije drugo ime (kao npr. u slučaju azota – nitrogen, volframa – tungsten, kalijum – potasium), već pun naziv (na engleskom). Međutim, **osiromašeni uranijum** je postao naziv koji se veoma koristi u literaturi na našem jeziku umesto **osiromašeni uran**. Što se tiče imena **osiromašeni uranijum**, to je stvar samo definicije. Reč je o onome što ostane posle hemijske separacije iz sirovog uranijuma kada se izvadi izotop ²³⁵U, koji se koristi kao **obogaćeno nuklearno gorivo**. Ostaje tzv. **osiromašeni ²³⁸U** koji više nije ekonomski isplativ i koji ima status **radioaktivnog otpada**. Motiv za korišćenje termina **osiromašeni uranijum** u ovom radu je što se većinski koristi, naročito u popularnoj literaturi i vojnoj terminologiji.

²⁾ **Transuranski elementi** su radioaktivni hemijski elementi koji se periodnom sistemu elemenata nalaze posle uranijuma (Z > 92). Većina **transuranskih elemenata** pripadaju **aktinoidima**.

pada mogu biti praćene emisijom γ -zračenja, ukoliko je radioaktivni potomak nastao u ekscitovanom stanju. Gamma(zraci su elektromagnetni talasi slični rendgenskom zračenju, samo imaju veću energiju, tako da su najprodorniji i prolaze kroz telo čoveka.

Uopšte uzev, prodornost radioaktivnih zraka je različita, što zavisi od vrste i energije zračenja. Tanak sloj kože na ruci je dovoljan da asporbuje α -zrake, dok je nekoliko santimetara debelo olovo, potrebno da se praktično zaustave α -zraci. Prodornost radioaktivnih zraka prikazana je na slici 1.



Slika 1. Prodornost radioaktivnih zraka
Figure 1. Penetration of radioactive rays

Prilikom α -raspada, atomski broj Z (broj protona) se smanjuje za 2, a maseni broj A (ili M_b , zbir protona i neutrona) za 4. Sa druge strane, negativno β -zračenje smanjuje atomski broj Z za 1 (transformacijom jednog neutrona u atomskom jezgri u proton), dok je maseni broj A konstantan.

Radioaktivne serije (nizovi)

Postoje četiri prirodne serije (niza) raspada: uranijumov, aktinijumov, torijumov i neptunijumov (Tabela 1).

Tabela 1. Prirodne radioaktivne serije (nizovi) [3]
Table 1. Radioactive decay series [3]

Seriya (Niz)	Prvi izotop	Vreme poluraspada (god)	Poslednji izotop
Uranijum	^{238}U	$4,49 \cdot 10^9$	^{206}Pb
Aktinijum	^{235}U	$7,10 \cdot 10^8$	^{207}Pb
Torijum	^{232}Th	$1,39 \cdot 10^{10}$	^{208}Pb
Neptunijum	^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6$	^{209}Bi

Tri od ova četiri radioaktivna niza su nastali posle raspada izotopa sa dugim vremenom poluraspada. Samo tri od ovih serija raspada su nađene u prirodi: **uranijum**, **aktinijum** i **torijum**. Izotop ^{237}Np ima poluvreme raspada mnogo kraće od geološkog života Zemlje – oko 5 biliona godina. Virtualno, svi raspadu neptunijuma su unutar prvih 50 miliona godina posle formiranja Zemlje. Sa aspekta osiromašenog uranijuma (*depleted uranium*, skraćena oznaka DU), dve serije su važne: uranijumova serija (Tabela 2) i serija aktinijuma (Tabela 3). Ove tabele ne uključuju raspad sa verovatnoćom 1% ili manje [4].

Tabela 2. Uranijumova serija
Table 2. Uranium series

Izotop	Vreme poluraspada	Raspad
^{238}U	$4,49 \cdot 10^9$ godina	α
^{234}Th	24,1 dan	β^-
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1,17 min	β^-
^{234}U	$2,48 \cdot 10^5$ godina	α
^{230}Th	$7,7 \cdot 10^4$ godina	α
^{226}Ra	1600 godina	α
^{222}Rn	3,82 dana	α
^{218}Po	3,05 min	α
^{214}Pb	26,8 min	β^-
^{214}Bi	19,8 min	β^-
^{214}Po	162 μsec	α
^{210}Pb	22,3 godina	β^-
^{210}Bi	5,01 dan	β^-
^{210}Po	138,4 dana	α
^{206}Pb	stabilan	–

Aktivnost radioaktivnih izvora

Broj raspada koji se u radioaktivnom izvoru desi u jedinici vremena (sekundi) naziva se **aktivnost izvora**. Aktivnost izvora zavisi od broja neraspadnutih jezgara u datom trenutku $N(t)$ i od vremena poluraspada izotopa $T_{1/2}$:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} = \lambda \cdot N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = \frac{0,693}{T_{1/2}} \cdot N_0 \cdot e^{-\frac{0,693}{T_{1/2}} t} \quad (1)$$

gde je: $N_0 = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, Avogadrov broj; A , g/mol ili kg/kmol, maseni broj; $T_{1/2}$ s vreme poluraspada. Na primer, $A = 235 \text{ g/mol}$ za ^{235}U i 238 g/mol za ^{238}U .

Jedinica za aktivnost radioaktivnih izvora je *Beke-rel* (1 Bq): 1 Bq = 1 raspad u sekundi. Vansistemska jedinica je Kiri (1 Ci).³⁾

Vreme poluraspada ($T_{1/2}$) je vreme za koje se raspadne polovina od broja atoma jednog radionuklida.

Biološko vreme poluraspada ($B_{1/2}$) je vreme u kome se inkorporirana aktivnost, posle jednokratnog unošenja, svede na polovinu putem biološke eliminacije.

Efektivno vreme poluraspada je vreme koje je potrebno da se aktivnost nekog radioizotopa vezanog u organizmu, kombinovanim delovanjem biološke eliminacije i prirodnim radioaktivnim raspadom, svede na polovinu. $E_{1/2} = \frac{T_{1/2} B_{1/2}}{T_{1/2} + B_{1/2}}$

Kritični organ je organ ili kompleks tkiva koji u najvećoj meri fiksira neki radioizotop u organizmu.

³⁾Jedinica radioaktivnog zračenja je do 1980. god. nosila naziv *kiri* (u čast supruge Kiri, Marije i Pjer, koji su otkrili radijum i polonijum). Ona se definiše kao količina nekog radioaktivnog materijala koji daje $3,7 \cdot 10^{10}$ raspada u sekundi: 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ raspada/s. Manje jedinice su *milikiri*, hiljaditi deo *kirija* (mCi = 10^{-3} Ci) i *mikrokiri*, milioniti deo *kirija* ($\mu\text{Ci} = 10^{-6}$ Ci). Međutim, današnja jedinica za radioaktivnost naziva se *bekerel* (oznaka Bq) i jednaka je jednoj dezintegraciji, ili nekoj drugoj vrsti transformacije u sekundi: Bq = sek^{-1} . Veza između *kirija* i *bekerela* je: 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq.

Tabela 3. Serija aktinijuma
Table 3. Actinium series

Izotop	Poluvreme života	Raspad
^{235}U	$7,1 \cdot 10^8$ godina	α
^{231}Th	25,5 časa	β^-
^{231}Pa	$3,25 \cdot 10^4$ godina	α
^{237}Ac	21,8 godina	β^-
^{227}Th	18,5 dana	α
^{223}Ra	11,4 dana	α
^{219}Rn	4,0 sec	α
^{215}Po	1,78 msec	α
^{211}Pb	36,1 min	β^-
^{211}Bi	2,13 min	α
^{207}Tl	4,77 min	β^-
^{207}Pb	stabilan	–

Radiološki efekti zračenja

Činilac za koji se sigurno može reći da izaziva maligno oboljenje jeste **zračenje** ili **radijacija**. **Zračenje** je emisija ili prostiranje energije kroz prostor ili tkivo u obliku talasa. Obično se izražava kao elektromagnetno zračenje, i klasifikuje se prema svojoj frekvenci na: radio-, infracrveno-, vidljivo-, ultravioletno- (UV ili ultraljubičasto), X-, gama- i kosmičko zračenje.

– *Prirodno zračenje* je emisija radioaktivnih supstanci koje nisu proizvod čoveka. U ove supstance ubrajaju se uranijum, radon, kalijum i drugi retki elementi. Oni su veoma opasni po zdravlje čoveka kada se kopaju ili melju, odakle prelaze u hranu, vazduh ili vodu. Doza zračenja koju neki čovek prima zavisi od radioaktivnosti tla i vazduha kraja u kojem živi, kao i od namirnica i vode koje unosi u svoj organizam. Od mesta boravka, blizu mora ili u visokim planinama, zavisi intenzitet kosmičkog zračenja. Primljena doza može da bude 3–4 puta veća na planini nego na morskoj površini (godišnja doza kosmičkog zračenja na morskoj površini iznosi od 0,1 do 1,0 mSv, a na visini od npr. 10 km između 1 i 10 mSv). Ovo je slučaj i prilikom putovanja avionom. Posebno na visinama na kojima se kreću nadzvučni avioni kada doza može da bude i stotinak puta veća (godišnja doza kosmičkog zračenja na visini oko 10 km iznosi do 100 mSv, a na visini od 15 km oko 150 mSv). Boravak ljudi u kosmičkim stanicama udaljenim nekoliko stotina kilometara od Zemlje zahteva posebnu brigu oko zaštite, jer intenzitet kosmičkog zračenja može da bude hiljadu puta veći od onog na površini Zemlje (godišnja doza kosmičkog zračenja iznosi preko 1000 mSv). Obilje kosmičkog zračenja predstavlja ozbiljnu prepreku za duži boravak kosmonauta izvan letilice. Nacionalne komisije za zaštitu od zračenja prate zbivanja u svojoj sredini, sakupljaju podatke o merenjima vazduha, voda i namirnica, kao i o izlaganju stanovništva zračenju u standardnim uslovima življenja i korišćenja medicinskih usluga. Povremeno se objavljuju informacije o prosečnom

izlaganju čoveka u toku jedne godine. Ono je različito u zavisnosti od države, od njenog geografskog položaja ali i stepena tehničkog razvoja na kojem se društvo nalazi.

– *Veštačko zračenje* koje uključuje emisiju radioaktivnih supstanci koje se ne nalaze u prirodi ili su rezultat nuklearnih fisijonih procesa. Značenje ovog izraza je nejasno, a u sebi uključuje sve vrste zračenja iz svih izvora osim onih koji delimično potiču od nuklearnih postrojenja, pa se čak i u izvor zračenja ubraja i nuklearno postrojenje [5].

Osnovna karakteristika delovanja bilo kog vida radioaktivnog zračenja, na sredinu kroz koju prolazi, je energija koju zračenje predaje jedinici mase (ili zapremine) date supstance za vreme ozračivanja. Pri emitovanju, zraci nailaze na atome i molekule i pri tome im predaju deo svoje energije. Posledice su različite, a ponekad dolazi do raspada molekula na manje delove. Nastale hemijski veoma reaktivne čestice nazivaju se *slobodni radikali*. Češće dolazi samo do otkidanja elektrona i nastajanje naelektrisanih atoma – *jona*. Zato se ovaj tip zračenja još naziva i **jonizujuće zračenje**.

Nastali joni i slobodni radikali reaguju među sobom i sa obližnjim atomima i molekulima. Tako dolazi do hemijskih promena u ozračenoj sredini. Posle ozračivanja, npr. u čistoj vodi nalaze se molekuli vodonik–peroksida i gasa vodonika. Hemijske promene izazvane zračenjem su često nepoželjna razaranja, ali često dolazi i do korisnih promena.

Kada je reč o živoj materiji, za hemijskim slede biološke promene i zbog toga je i sama priroda procesa složena. Vrste i količine nastalih hemijskih i bioloških promena zavise od količine energije koju je primila ozračena sredina. Kao posledica zračenja dolazi do određenih promena u ćelijama tela čoveka, koje sa svoje strane podstiču umnožavanje ćelija i javljanje novog, stranog, maligno izmenjenog tkiva. Ta kritična veličina ozračivanja naziva se **doza ozračivanja** ili **apsorbovana doza zračenja (D)**.

Delovanje jonizujućeg zračenja, posebno na tkiva organizma ne zavisi samo od doze apsorbovanog zračenja nego i od vremena za vreme koga je ta doza zračenja primljena. Ova veličina zove se **brzina doze** ili **snaga doze** ili **jačina doze** (jedinica W/kg). **Doza zračenja** koju čovek može da primi, u uslovima kada je ozračivanje ravnomerno raspoređeno po celom telu naziva se **maksimalna dozvoljena doza**.

Radiološki efekti su: *somatski efekat* koji se odnosi direktno na ozračenu osobu i koji se pojavljuje bez ikakvog ograničenja (individualno) ili *genetski*, koji se odnosi na potomstvo ozračene osobe (pri ekvivalentnoj dozi od $5 \cdot 10^{-2}$ Sv) i *deterministički efekat* iznad praga koji je označen kao:

– 1 Sv za efektivnu dozu (smrt)

– 5 Gy za kritični organ, organ ili kompleks tkiva koji u najvećoj meri fiksira neki radioizotop u jednom or-

Tabela 4. Efekti na čovekovom organizmu nastali izlaganjem jonizujućem zračenju
Table 4. Probable health effect resulting from exposure to ionising radiation

Doza za celo telo (u Sv)	Efekat na čovekov organizam – trenutni –	Konsekvence – posledice –
10 i više	Trenutna smrt ("Prženje mozga")	–
6 – 10	Slabost, mučnina, povraćanje i dijareja (proliv), praćena sa vidljivim poboljšanjem. Posle nekoliko dana: groznica, dijareja, krv u stolici, krvarenje iz grkljana, bronhija ili pluća, povraćanje krvi ili krv u urinu.	Smrt za 10 dana. Autopsija pokazuje destrukciju (razaranje) histološkog tkiva, uključujući koštanu srž, limfne čvorove i slezinu; povećanje i degeneracija epitelnih ćelija creva, genitalnih organa i endokrinih žlezda.
2,5 – 6	Mučnina, povraćanje, dijareja, opadanje kose, slabost, nelagodnost (uznemirenost), povraćanje krvi, krvarenje iz creva ili bubrega, krvarenje iz nosa, krvarenje desni i iz genitalija, potkožno krvarenje, groznica, zapaljenje (upala) ždrela i stomaka, poremećaj menstrualnog ciklusa. Zapaža se destrukcija koštane srži, limfnih čvorova i slezine, što dovodi do smanjivanja ćelija krvi naročito granucita i trombocita.	Zračenje – prouzrokuje atrofiju endokrinih žlezda uključujući hipofizu, tiroidnu i adrenalnu žlezdu. Za tri do pet nedelja po izlaganju, dolazi do smrti i to u korelaciji sa stepenom povećanja leukocita. Više od 50% umire u ovom periodu. Preživeli doživljavaju oftamološke smetnje, slabljenje krvne slike, maligne tumore i psihosomatske smetnje.
1,5 – 2	Mučnina i povraćanje prvog dana. Dijareja i verovatno zapaljenje kože. Vidljivo poboljšanje otprilike dve nedelje kasnije. Dolazi do uginuća ploda.	Simptomi nelagodnosti. Lica slabijeg zdravlja koja su izložena ili ona koja imaju ozbiljne infekcije, mogu umreti. Zdravlje odraslih se vraća u normalno stanje posle 3 meseca. On ili ona mogu imati permanentne zdravstvene probleme, može doći do razvitka kancera ili benignog tumora i smanjuje se životni vek. Genetski i teratogenetski efekti.
0,5 – 1,5	Akutna "radijaciona bolest" i zapaljenja su mnogo manje izražena nego pri visokoj ekspozicionoj dozi. Spontani pobačaj ili rađanje mrtve dece.	Poremećaji tkiva su manje izraženi. Redukcija u limfocitima i nefrologija dovodi do individualne privremene veoma izražene osetljivosti prema infekciji. Može dovesti do pojave genetskih poremećaja kod potomaka, benignih ili malignih tumora, prerane smrti ili kraćeg životnog veka. Genetski i teratogenetski efekti.
0,1 – 0,5	Veći deo ljudi pokazuje male ili trenutne reakcije. Osetljive osobe mogu pokazivati simptome "radijacione bolesti".	Prolazni efekti kod limfocita i neutrofila. Prerana smrt, genetski efekti i rizik od pojave tumora.
0 – 0,1	–	Prerana smrt, srednje mutacije kod potomstva i rizik od pojave tumora.

ganizmu, pri čemu dolazi do otkazivanja organa, upala kože).

Iste vrednosti važe i za životinje.

Pojmovi koji su od značaja za utvrđivanje uticaja zračenja na zdravlje čoveka su [6]:

– **Radijaciona doza** (*Radiation dose*) data je u *si-vertima* i obeležava se sa **Sv**. Imena dobijena po švedskom fizičaru Sivertu (Rolf Maximilian Sivert). Zbog toga što je 1 Sv veoma visoka (letalna) doza, koriste se manje jedinice: **mSv** (milisivert = 10^{-3} Sv) i **μSv** (mikrosivert = 10^{-6} Sv).

– **Prirodno zračenje** (*Natural radiation*) od zemlje, zgrada, iz kosmosa, hrane, vode i ljudskog tela, varira od mesta do mesta, ali je, u srednjem opsegu, između 1–2 mSv/god.

– **Dozvoljeni limit** (*Recognised limits*) za totalno izlaganje zračenju za sve ljude koji su profesionalno izloženi zračenju (izuzev za medicinsku i prirodnu radijaciju) je 1 mSv/god za stanovništvo i 20 mSv/god za radnike koji su profesionalno izloženi zračenju.

– **Akcionni nivo** (*Action levels*) se koristi kada je dozvoljeni nivo značajno prekoračen, ili usled nekog ak-

cidenta, prirodnom nepogodom ili usled rata (do 10 mSv).

– **Gama-zračenje** kratko talasno elektromagnetno zračenje od neke nuklearne transformacije. Slično je X-zracima i prolazi kroz ljudsko telo. Izotop ^{131}I emituje γ -zračenje. I γ - i X-zračenje prouzrokuju jonizaciju.

– **Jonizacija** je višak energije koja se deponuje u neutralnom molekulu sa emitovanjem (ili premeštanjem) elektrona, što rezultuje da neutralni molekuli postaju pozitivni ili negativni joni.

Efekti na čovekov organizam koji se zapažaju izlaganju jonizacionom zračenju sumirani su u tabeli 4 [7–27].

Dozimetrija radioaktivnog zračenja

Efekat zračenja na supstancu karakteriše se **apsorbovanom dozom** ili apsorbovanom energijom po jedinici mase.⁴⁾ **Apsorbovana doza** se u međunarodnom sistemu mera definiše kao količina energije koju jonizujuće zračenje preda jedinici mase ozračene supstance.

⁴⁾Saglasno ABCC *Atomic Bomb Casualty Commission*. Danas se naziva *Radiation Effects Research Foundation* (RERF).

Apsorbovana doza definiše se kao $D = \frac{dE}{dm}$, gde je dE – srednja vrednost koja je predata jonizujućem zračenju masi dm [28]. Jedinica za merenje apsorbovane doze je *grej* (*Gray*) ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$), nazvana po jednom od pionira radiobiologije, britanskom fizičaru i radijacionom biologu Greju (*Louis Harold Gray*). Apsorbovana doza od 1 Gy predstavlja energiju od 1 J koja je apsorbovana u 1 kg materijala ili tkiva. Ranija "jedinica za apsorpciju jonizujućeg zračenja" bila je *rad* (skraćeniica od *radijaciona apsorbovana doza*) (*rad*, $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$) ($1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 10.000 \text{ erg/g}$ ili $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 10^{-2} \text{ Gy}$ [29]).

Kada je reč o živoj materiji (biološki efekat), pored apsorbovane doze i vrste energije, zračenje ima značajnu ulogu. Jedna ista doza, npr. od 1 Gy , izazvaće različite biološke promene u zavisnosti od vrste zračenja. Tako deponujući istu količinu energije (dozu), α -čestice više razaraju od elektrona ili γ -zračenja. Razlog je što efikasnije reaguju sa atomima i molekulima sredine, tako da je količina oštećenja duž njihove putanje veća. Za α -zračenje količina oštećenja je 20 puta veća od količine oštećenja koju proizvodi ista doza brzih elektrona ili γ -zračenja.

Zato se, kada je reč o dozi i živoj materiji, apsorbovana doza množi *Relativnim biološkim efektivnim faktorom* – RBE (*Relative Biological Effectiveness*), pa se dobija *ekvivalentna doza zračenja*, H , koja se izražava jedinicom *sivert* (*sievert*, oznaka Sv)⁵⁾ ($1 \text{ Sv} = \text{RBE} \cdot 1 \text{ Gy}$), ili *rem* ($1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$). RBE faktor⁶⁾ je 1 rem/rad (1 Sv/Gy) za β - i γ -radioaktivnost, 20 rem/rad za α -čestice sa energijom manjom od 2 MeV , sa skokom na $2,5 \text{ rem/rad}$ za α čestice sa energijom od 100 MeV [30]. Pošto je energija α -čestica nastala radioaktivnim raspadom uvek između 2 – 9 MeV , jednostavno se uzima RBE faktor od 20 rem/rad za sve α -emitere [31].

Prema ICRU (Međunarodna komisija za radijacione jedinice i merenja, *International Commission on Radiation Units and Measurements*) i ICRP (Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja, *International Commission on Radiological Protection*), **ekvivalentna doza**, H , je proizvod apsorbovane doze (D) i faktora modifikacije (Q , DF , N): $H = D \cdot Q \cdot DF \cdot N = Q \cdot N \cdot D = Q$, gde je Q – faktor kvaliteta, čija je vrednost određena za pojedine vrste zračenja, DF (*distribution factor*) – faktor distribucije, N – geometrijski faktor koji se uzima da je jednak jedinici.

Vrednosti faktora kvaliteta, za pojedine vrste zračenja prikazane su u tabeli 5.

Pošto su faktori modifikacije bezdimenzioni, i ekvivalentna doza se izražava u jedinicama kao i apsorbovana doza, J/kg : $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$. Ovom jedinicom se mere i *kollektivna ekvivalentna doza*, S_k , *uslovna doza*, H_c , *vezana ekvivalentna doza*, H_{50} i *efektivna doza*, E [32].

⁵⁾Ranija jedinica energetske doze jonizujućeg zračenja bio je *rem* (*roentgen equivalent man* – rentgen ekvivalentan čoveku). Veza stare i nove jedinice je: $1 \text{ Rem} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 10^{-2} \text{ Sv}$.

⁶⁾Druga oznaka je $\text{rem} = \text{rad} \times Q$, gde je Q kvalitativni faktor koji pokušava da konvertuje rad iz različitih tipova radioaktivnosti u opštu skalu biološke opasnosti: $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rad}$.

Tabela 5. Vrednosti faktora kvaliteta u zavisnosti od vrste zračenja

Table 5. Values of the quality factor as a function of the type of radiation

Vrsta zračenja	Q
X-zračenje, γ -zračenje, β -zračenje	1
neutroni, protoni i druge jonizujuće čestice nepoznate energije čija je masa mirovanja $> 1 \text{ ajm}$	10
α -zračenje i višestruko naelektrisane čestice poznate energije	20

Ekvivalentna doza omogućava upoređivanje učinka različitih vrsta radioaktivnog zračenja. Doza od prirodnog radioaktivnog zračenja iznosi 1 – $2,5 \text{ mSv}$ godišnje. U blizini nuklearne elektrane prima se ekvivalentna doza zračenja od oko $0,01$ do $0,02 \text{ mSv}$ godišnje. To je oko 1 – 2% od ekvivalentne doze koja se prima od ukupnog prirodnog radioaktivnog zračenja, kojem je čovek *uvek i svuda* izložen. U organizmu svakog čoveka, zbog prisustva radioaktivnih elemenata u njemu, dolazi svakog sekunda do oko 7000 radioaktivnih raspada (pretežno ^{40}K). Prema tome, *interna radioaktivnost čovekovog tela* daje godišnju dozu od $0,25 \text{ mSv}$, što je oko 10% od ukupne doze koja se prima godišnje od prirodne radioaktivnosti Zemlje.

Efektivna ekvivalentna doza izražava se jednačinom: $H_i = \sum W_i H_i$, gde je H_i srednja ekvivalentna doza u i -tom tkivu, a W_i je težinski faktor koji predstavlja deo štetnosti od stohastičkih efekata koja dolazi od i -tog tkiva u odnosu na ukupnu štetnost od stohastičkih efekata kad je celo telo ravnomerno ozračeno.⁷⁾

Štetne posledice zračenja zavise od ekvivalentne doze koju je čovek primio. Ukoliko je veća, i posledice su teže. Težina posledica zavisi i od drugih okolnosti, kao što su doba života, pol, zdravstveno stanje i uslovi u kojima je do ozračivanja došlo. Deca su u svakom pogledu puno osetljivija na zračenje od starijih osoba.⁸⁾

Jedan od zaključaka savremene nauke je da ne postoji bezbedno izlaganje jonizujućem zračenju. I najmanja doza predstavlja izvestan rizik. To je sasvim razumljivo, ako se ima na umu da svaka doza znači stvaranje odgovarajuće količine hemijskih reaktivnih je-

⁷⁾Klasifikacija štetnih efekata: *stohastički* i *nestohastički*. *Stohastički efekti* su oni efekti čija verovatnoća nastajanja zavisi od doze zračenja, bez praga doze. *Nestohastički efekti* su oni efekti čija jačina zavisi od veličine doze i za njih postoji prag doze. Cilj zaštite od zračenja je da spreči *nestohastičke* efekte, a da *verovatnoću stohastičkih efekata ograniči na nivoe koji se mogu smatrati prihvatljivim*. Sprečavanje nestohastičkih efekata može da se postigne usvajanjem dovoljno niskih granica za doze, kako se ne bi dostigao prag doze koji obuhvata izlaganje zračenju u toku celog života ili za radni vek.

⁸⁾Prve žrtve prekomernog ozračivanja su bili pioniri istraživanja radijacije i radioaktivnosti, među kojima Rentgen (*W.K. Röntgen*), Bekerel (*A-H. Becquerel*) i Marija Kiri (*M. Curie*). Nepotpune su statistike o pionirima atomskih projekata u SAD-u i Rusiji, koji su bili žrtve zračenja tokom Drugog svetskog rata i 50-tih godina prošlog veka.

dinki, a time i mogućnost za nepoželjne hemijske, odn. biološke promene u ozračenom organizmu. Na sreću, zahvaljujući mehanizmima reparacija koji deluju u živoj materiji, svako oštećenje ćelije nije trajno.

Proračun za godišnje **ekvivalentne doze** (DE) u odnosu na specifičnu aktivnost 1 pCi/kg čistoga α -emitera, kao što je npr. ^{235}U , dato je jednačinom (2):

$$\begin{aligned} \text{DE} &= \text{RBE} \times \text{E}\alpha \times \text{R} \times \text{Y} = 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/god} = \\ &= 1,32 \text{ mrem/god} \end{aligned} \quad (2)$$

gde je: RBE = 15 rem/rad = 15 Sv/Gy relativna biološka efektivnost; $\text{E}\alpha = 4,678 \text{ MeV} = 7,527 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ energija α -čestica; $\text{R} = 1 \text{ pCi/kg} = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Bq/kg}$ specifična α -aktivnost prema razmatranju, i $\text{Y} = 3,156 \cdot 10^7 \text{ s/god}$, broj sekundi u godini dana.

Za izračunavanje DE za β -zračenje, uzima se u obzir da 2/3 energije potiče od β čestica koje se ne apsorbuju u supstanci. DE za α -emitere je mnogo važnija od β -emitera, kada se izvor radioaktivnosti nalazi u telu.

Zakonska regulativa za izlaganje zračenju

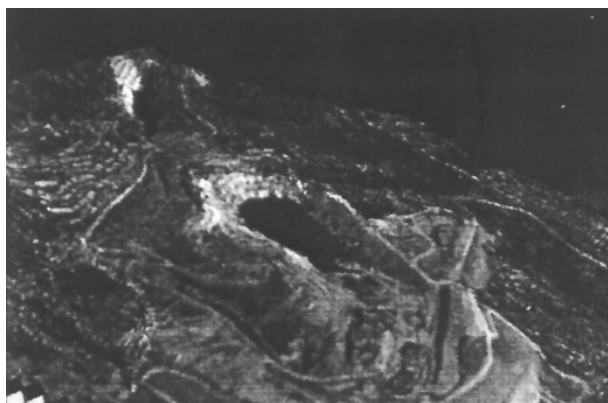
ICRP preporučuje NCR da određuje DE za profesionalnu izloženost (za celo telo) koja iznosi 0,05 Sv/god ili ne više od 0,1 Sv za 10 godina [31,33,34]. Pri ovoj DE ne zapažaju se nikakvi kratkotrajni efekti na čoveka (tj. nema promene u krvi). Godišnja DE za očno sočivo je 0,15 Sv/god a za ostale organe i ekstremitete (ruke i noge) je 0,5 Sv/god. DE za celo telo (0,05 Sv/god) se dalje smanjuje u zavisnosti od različitih zemalja (ili federalnih jedinica unutar jedne zemlje), npr. administrativni kontrolni nivo DOE iznosi 0,02 Sv/god za radnike koji su profesionalno izloženi zračenju [35,36].

Na primer, početak akutnih oboljenja od zračenja (prvi znaci akutnih oboljenja izazvanih zračenjem), kao što su povraćanje, proliv, opadanje kose, anemija, hemofilija, oštećenje očnog sočiva, privremena sterilnost kod muškaraca i dr. zapažaju se pri kratkotrajnom izlaganju dozi od 0,5–1 Sv. Bez medicinske pomoći, 50% smrtnosti je zabeležen pri izlaganju 2,5–3 Sv, primarno zbog toga što je opao imunitet organizma i oštećenje kičmene moždine. Sa modernom medicinskom pomoći 100% šansi da prežive imaju oni koji su kratkotrajno izloženi dozi od 10 Sv [28,29].

DE doze koje ne pokazuju ili imaju veoma mali rizik za dugotrajne posledice po čoveka, npr. pojava kancera [37,38], iznosi 1 mSv/god, koji su analogni za srednji unos od 3,63 mSv/god (2 mSv/god za radon, 1 mSv/god iz kosmičkog zračenja, terestijalnog i spoljašnjeg zračenja i 0,63 mSv/god iz veštačkih izvora kao što su medicinski uređaji (kao npr. rendgen i prehrambeni proizvodi) [39,40].

PRIRODNI URANIJUM

Uranijum (lat. *Uranium*, od naziva planete Uran) je radioaktivni elemenat, srebrno beli metal kada je u svom čistom obliku i pripada grupi *aktinoida* elemenata VII pe-



riode Periodnog sistema elemenata i relativne atomske mase 238,03. Uranijum je prvi otkrio Klaprat 1789. pri ispitivanju minerala *uraninita* u obliku UO_2 , a Francuz Pelligo (*E.M. Peligot*) je čist metal dobio 1841. Ime je dobio u čast (tada) "nove" tek otkrivene planete Urana. Uranijum je najteži elemenat koji je pronađen u prirodi. Stabilnih izotopa uranijuma nema. Objašnjenje zašto je to tako, rešio je Bekereel (*Antoine-Henri Becquerel*) otkrivši radioaktivnost 1896. U prirodi je našao, pored stabilnih elemenata, njihove radioaktivne izotope, čija se jezgra raspadaju utvrđenim brzinama, deleći se na ona sa manjom masom. Tablica periodnog sistema završava se sa uranijumom, zato što su mogući teži elementi, ako su postojali, doživeli raspad starenjem Zemlje i Vasiona. Talozenje poslednjih izotopa u prirodnim objektima, koji sadrže uranijum (stene, minerali, meteoriti i dr.), omogućava da se ustanovi apsolutna geološka ili kosmička starost ispitivanog objekta. Izotopi uranijuma sposobni su da se dele pri zahvatu neutrona, i koriste se kao nuklearno gorivo u nuklearnoj energetici, a kao eksploziv u nuklearnom oružju. Uranijum je hemijski veoma aktivan, temperature topljenja 1132°C i ključanja 3818°C , atomske zapremine⁹⁾ $12,59 \text{ cm}^3/\text{mol}$, gustine $18,9 \text{ g/cm}^3$ (uranijum se ubraja u teške metale, a skoro je dva puta veće gustine od olova – $11,3 \text{ g/cm}^3$), relativne elektronegativnosti 1,38.

Sa metalima uranijum obrazuje niz legura. Dobija se redukcijom UF_4 kalcijumom ili magnezijumom pri zagrevanju. Soli uranijuma primenjuju se u fotografiji, proizvodnji stakla, u analitičkoj hemiji. Nemački hemičar Klaprat je 1797. izolovao uranijum(VI)-oksid sledeći Lavoazijev kvantitativni laboratorijski rad i tako postavio osnove analitičke hemije.

Svojstva, poreklo i migracija uranijuma u životnoj sredini

Uranijum se javlja u prirodi u vidu brojnih čvrstih, tečnih i gasovitih jedinjenja. Osnovna ruda, uranijumova smola (*smolinac, uraninit, pehblend*) U_3O_8 , odn. uran(IV)–

⁹⁾ **Atomska zapremina elementa** u čvrstom stanju (u cm^3) je zapremina koju zauzima 1 mol ($6,02 \cdot 10^{23}$ njegovih atoma), a izračunava se deljenjem molske mase atoma elementa njegovom gustinom.

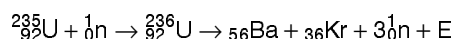
uranat(VI), $U(VO_4)_2$, susreće se u prirodnim vodama i zemljištu. Brzo se jedini sa drugim elementima i formira uranijum okside, silikate, karbonate i hidrokside. Najvažnija ležišta uranijuma nalaze se u Kongu, Kanadi, Koloradu, Australiji i Joahimovu (Češka). Kod nas su ležišta uranijumovih ruda nađena na više mesta, a najznačajnije ležište je na Staroj Planini (Mezdreja) istočno od Kalne. Ova jedinjenja mogu biti kako *veoma pokretljiva* (rastvor-na), tako i relativno *inertna* (nerastvorna) u životnoj sredini i čovekovom organizmu. Nekoliko uslova utiče na formiranje ovih jedinjenja, kao što su: relativna količina kiseonika, prisustvo drugih metala legiranih uranijumom, vlažnost i kiselost sredine i "temperaturska istorija" čvrstog uranijuma [41].

Uranijum se u prirodi, tzv. prirodni uranijum (*natural uranium*, skraćena oznaka NU), nalazi kao smesa izotopa $^{238}_{92}U$, $^{235}_{92}U$ i $^{234}_{92}U$, nastalih u procesima formiranja Zemljine kore¹⁰⁾ [42].

Tabela 6. Izotopski sastav prirodnog uranijuma [43]
Table 6. Isotopic composition of natural uranium [43]

	$^{234}_{92}U$	$^{235}_{92}U$	$^{238}_{92}U$
Maseni udeo, u %	0,0053%	0,71%	99,285%
Vreme poluraspada, god.	$244 \cdot 10^3$	$703,8 \cdot 10^6$	$4,468 \cdot 10^9$
Udeo u ukupnoj aktivnosti, u %	48,9%	2,2%	48,9%
Aktivnost po 1 g NU, Bq	12,356	568	12,356
Specifična aktivnost, Bq/g	$231,1 \times 10^6$	80,011	12,445
Osiromašeni uranijum	0,0008	0,202	99,797

Sva tri izotopa su radioaktivna i u više uzastopnih raspada emituju α -, β - i γ - zračenje. Izotopi $^{238}_{92}U$ i $^{235}_{92}U$ su "roditelji" – prethodnici radioaktivnog raspada, dok je izotop $^{234}_{92}U$ – "potomak" radioaktivnog raspada $^{238}_{92}U$. Izotop uranijum–235 najlakše podleže cepanju (**fisiji**) posle apsorpcije sporih neutrona. Ovaj izotop se još naziva *fisibilan* uranijum (koji podleže fisiji). Nastali uranijum–236 odmah se raspada na dva manja atoma, oslobađajući pri tome dva do tri neutrona i veliku količinu energije. Ukupan proces fisije $^{235}_{92}U$ opisan je jednačinom:



Ne grade se uvek izotopi barijuma i kriptona, već nastaje oko 23 različita hemijska elementa koji se javljaju kao 80 različitih radioaktivnih izotopa. Obično se ovi izotopi nazivaju fisioni proizvodi.

¹⁰⁾ Uranijuma u Zemljinoj kori ima u srednjem iznosu od 3 ppm (= 3 g/t) a u morskoj vodi oko. 3 ppb (3 mg/t).

Najznačajniji potomci uranijuma su radijum–226 ($^{226}_{88}Ra$ sa poluvremenom radioaktivnog raspada 1.602 god), olovo–210 ($^{210}_{82}Pb$ – 0,4 god.), polonijum–210 ($^{210}_{84}Po$ – 38,4 dana) i radioaktivni gas radon–222 ($^{222}_{86}Rn$ –3,8 dana). Biološko vreme poluraspada uranijuma je 15 dana za bubrege, kao kritični organ, a 100 dana za ceo organizam [44].

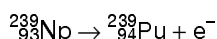
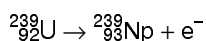
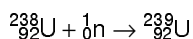
U rudi uranijuma U_3O_8 (u kojoj se nalaze pomešani UO_2 i UO_3 u odnosu 1:2, poznat kao *pehblend* ili "žuti kolač"), izotop $^{238}_{92}U$ je u radioaktivnoj ravnoteži sa 14 drugih radioaktivnih izotopa, od kojih svaki ima istu aktivnost kao i izotop $^{238}_{92}Ra$ uključujući i izotop uranijuma $^{234}_{92}U$. Jedan procenat U_3O_8 je ekvivalentan sa 0,848% U a 0,453 miliona tona U_3O_8 je ekvivalentno sa 385 tona U_3O_8 [45–47]. Vađenje rude uranijuma i njeno pretvaranje u uranijum–oksid, U_3O_8 , čini *ulaz* u nuklearni gorivni ciklus. Prirodni uranijum se obično koristi u nuklearnim reaktorima sa teškom vodom kao moderatorom. Lakovodni reaktori koriste uranijum obogaćen u sadržaju uranijuma–235 od 1,7 do 3,5%. Opodni reaktori su tako konstruisani da im je *faktor konverzije* (brzina stvaranja fisibilnog materijala podeljena sa brzinom trošenja fisibilnog materijala) veći od jedan.

U procesu ekstrakcije uranijuma (sva tri izotopa) iz rude, svi radioaktivni potomci u oba radioaktivna niza su eliminisani (sa izuzetkom radiogenetskog izotopa $^{234}_{92}U$). Nova radioaktivna ravnoteža se uspostavlja u periodu od nekoliko meseci između $^{238}_{92}U$ i dva druga radioaktivna potomka ($^{234}_{90}Th$ i $^{234m}_{90}Pa$). Radioaktivna ravnoteža između izotopa uranijuma $^{238}_{92}U$ i $^{234}_{92}U$ se ne prekida za vreme procesa ekstrakcije. Slično ovome, nova radioaktivna ravnoteža se uspostavlja u periodu od nekoliko dana između $^{235}_{92}U$ i drugog radioaktivnog potomka $^{231}_{90}Th$. Na taj način, aktivnost $^{238}_{92}U$ posle ekstrakcije je multiplicirana sa faktorom 4, a aktivnost $^{235}_{92}U$ sa faktorom 2. Ukoliko se uzme u obzir samo α -aktivnost, aktivnost $^{238}_{92}U$ je multiplicirana sa faktorom 2, a aktivnost $^{235}_{92}U$ je praktično nepromenjena [48–50].

Slično, izotop $^{235}_{92}U$ je u radioaktivnoj ravnoteži sa 11 drugih radioaktivnih izotopa. Na taj način, aktivnost $^{238}_{92}U$ može biti multiplicirana sa faktorom 15 (u poređenju sa čistim $^{238}_{92}U$), a aktivnost $^{235}_{92}U$ sa faktorom 12 (u poređenju sa čistim $^{238}_{92}U$). Ukoliko se uzme u obzir samo α -aktivnost, onda se ubraja u α -emitere, a aktivnost $^{238}_{92}U$ može biti multiplicirana sa faktorom 8 i aktivnost $^{235}_{92}U$ sa faktorom 7.

Uranijum–238 podleže procesu fisije samo pod dejstvom brzih neutrona. Koristi se kao nuklearno gorivo u brzim reaktorima u kojima se lančana reakcija uspostavlja bez prisustva **moderatora**.¹¹⁾

¹¹⁾ **Moderatori** su supstance koje se upotrebljavaju za usporavanje neutrona. Za tu svrhu najčešće se upotrebljavaju: grafit, teška voda (D_2O), obična voda, parafin i berilijum. Laki atomi ovih supstanci apsorbuju nešto energije neutrona, sa kojima su se sudarili, a ne apsorbuju same neutrone [64].



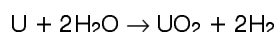
Fisijom ${}^{235}_{92}\text{U}$ oslobađaju se brzi neutroni koji, da bi proizveli fisiju sledećih atoma izotopa ${}^{235}_{92}\text{U}$, moraju u međuvremenu da se uspore. To se postiže moderatorima koji se smeštaju između gorivih elemenata. Uporedo sa fisijom izotopa ${}^{235}_{92}\text{U}$ javlja se i interakcija prisutnog ${}^{238}_{92}\text{U}$ i sporih neutrona, pri čemu ne dolazi do fisije ${}^{238}_{92}\text{U}$, već se gradi plutonijum (Pu)-239, *novo* nuklearno gorivo. Uranijum-238 naziva se **fertilni** (plodonosan) **materijal**. U navedenim jednačinama lančane jednačine, e^- označava β -zrak, odn. elektron. Taj elektron nastaje pretvaranjem neutrona u jezgru atoma u proton, pri čemu se odgovarajući hemijski element pretvara u element sa rednim brojem većim za jedan. To je prikazano u jednačinama u kojima nastaje Np i Pu.

Prirodni uranijum u jedinjenjima ima oksidaciona stanja +2, +3, +4, +5 i +6, mada se najčešće nalazi u obliku U(VI). Takođe, u prirodi, uranijum se najčešće nalazi u obliku **uranil jona** UO_2^{2+} [51]. Različiti izotopi uranijuma su hemijski identični, što znači da pokazuju iste hemijske i toksikološke efekte. Na taj način, diskusija o osiromašenom uranijumu i njegovim hemijskim efektima, biće fokusirana na uranijumu i na njegovim jedinjenjima. Osiromašeni uranijum hemijski reaguje na isti način kao i prirodni uranijum, za koga se kaže da je reaktivan materijal. On reaguje sa svim nemetalima i gradi različita inter-metalna jedinjenja. Generalna hemijska karakteristika uranijuma je da je **to jako redukciono sredstvo, naročito u vodenim rastvorima** [52].

U vazduhu i na sobnoj temperaturi, čvrst uranijum oksiduje sporo, obrazujući niz oksida: UO_2 , U_3O_8 , UO_3 . Pri brzom oksidaciji dobija zlatno žutu boju. Kada se oksidacija produžava, oksidni sloj (sloj oksida uranijuma) postaje tamniji, dok posle 3 do 4 nedelja metal dobija crnu boju. Oksidni sloj koji se formira na uranijumu na vazduhu ne štiti metal od dalje oksidacije i ne pruža mu hemijsku zaštitu. Ključala voda reaguje sa čvrstim uranijumom sporo. Vodonič ubrzava koroziju jer gradi hidride. U destilovanoj vodi brzina reakcije je za jedan red veličine manja nego u vodi zasićenoj vodonikom. *Razblažena* sumporna kiselina ne reaguje sa uranijumom. Na temperaturi ključanja, reakcija je ista kao i sa ključalom vodom. Međutim, uranijum brzo reaguje sa HCl. Brzina je mnogo manja u 1 mol/dm³ kiselinu nego u 6 mol/dm³ kiselinu. Smeša HCl i oksidacionih supstanci može se primeniti za kompletno rastvaranje uranijuma [52].

Različita jedinjenja uranijuma razlikuju se po svojim hemijskim i fizičkim svojstvima, pa se, na taj način, razlikuju i po toksikološkom efektu [53]. Jedinjenja kao što su uranil-hlorid, uranil-nitrat [51,54] i uranil-etanoat su rastvorni, uranijum di- i tri-oksidi (UO_2 i UO_3) i triuranijum-oktaoksid (U_3O_8) su slabo rastvorni.

Reakcija uranijuma sa vodom je kompleksna. U početku reaguje na taj način da gradi uranijum-dioksid i vodonik:



Pri oksidaciji uranijum gradi UO_2 . Uobičajena brzina oksidacije za uranijum je prodiranje od 0,005 mm/dan (0,19 mg/cm² po danu). Značajna oksidacija UO_2 se ne zapaža do temperature od 275°C. Prisustvo nečistoća u UO_2 , naročito vode ima značajan uticaj na reakciju [55]. Oksidi uranijuma su slabo rastvorni, ali pod uticajem vlage u prirodnim uslovima grade hidratizane okside. Pod takvim uslovima, dodatak od 0,75% titanijuma [56] u DU dovodi do smanjivanja brzine oksidacije sa faktorom od oko 16 [57].

Uranijum je radioaktivni element i nalazi se u svim rudama i zemljištima. Normalna aktivnost ${}^{238}\text{U}$ u zemlji je 5–125 Bq/kg (0,5–10 ppm, 1 ppm = 1 g/tona) i 0,2–5 Bq/kg ${}^{235}\text{U}$. Aktivnost ${}^{238}\text{U}$ u nekim rudama koje su bogate uranijumom npr. *alum shale* je od 600–5000 Bq/kg (50–400 ppm). Koncentracija uranijuma u rudama dobrog kvaliteta (1–30% uranijuma) je $1,2 \cdot 10^5$ – $3,6 \cdot 10^6$ Bq/kg.

Koncentracija čistog uranijuma koji je u radioaktivnoj ravnoteži sa svojim produktima radioaktivnog raspada je $50,23 \cdot 10^6$ Bq/kg.

Opseg koncentracije uranijuma u vodi je za [58–60]:

- svežu vodu 1–90 mBq/dm³
(0,1–8 µg/dm³) [61]
- podzemne vode < 1–140 mBq/dm³ [48]
najviša vrednost je do 150 Bq/dm³
(12.400 8 µg/dm³) [49]
- srednja vrednost za Jugoslaviju
0,5–510 mBq/dm³
(0,04–41 µg/dm³) [48]
- morska voda 40,5 mBq/dm³ (3,3 µg/dm³).

Ukupna koncentracija uranijuma u vazduhu je oko 1 µBq/m³ [49].

Uranijum dospeva u životnu sredinu i kao posledica tehnoloških postupaka i agrotehničkih mera. Uranijum se u zemljištu uglavnom nalazi u rastvornom obliku i biljke ga lako usvajaju, te tako, preko namirnica biljnog porekla i stočne hrane, dospeva u organizam životinja i čoveka. Putem namirnica se dnevno unese 10 do 100 mBq uranijuma, od toga putem mesa, ribe i jaja 40%, povrća oko 27%, a žitarica oko 25% [44]. Najznačajniji izvori tzv. "tehnološki povećane prirodne radioaktivnosti" su rudnici uranijuma, olova, kamenog uglja, termoelektrane, njihovi nus-proizvodi: šljaka, pepeo i elektrofilter-ski materijal, i fabrike fosforne kiseline i mineralnih đubriva. Za širu populaciju stanovništva, unošenje uranijuma inhalacijom je zanemarljivo. Međutim, ovo predstavlja značajan rizik za stanovništvo uz termoelektrane, jer u šljaki i pepelu uranijuma ima više od 100 Bq/kg [63]. Prema podacima UNSCEAR-a [65], srednje ozračivanje stanovništva uranijumom i potomcima u "normalnim" uslovima iznosi 1,04 mSv/god. Ova vrednost ulazi u

prosečnu godišnju vrednost ozračivanja stanovništva iz svih prirodnih izvora jonizujućeg zračenja (2 mSv) i osnova je za razmatranje i procenu efekata svih dodatnih izvora ozračivanja [66]. Literaturni podaci ukazuju da se nivo prirodnog zračenja usled tehnološkog povećanja prirodne radioaktivnosti za poslednjih 30 godina uvećao 30–40 puta [62, 63]. Radioaktivnost čistih izotopa $^{238}_{92}\text{U}$ i $^{235}_{92}\text{U}$ navedena je u tabeli 7.

Tabela 7. Specifična aktivnost uranijuma
Table 7. Specific activity of uranium

Uranijum	Aktivnost		α -aktivnost	
	(MBq/kg)	(mCi/kg)	(MBq/kg)	(mCi/kg)
$^{238}_{92}\text{U}$	12,4	0,335	12,4	0,335
$^{235}_{92}\text{U}$	78,4	2,12	78,4	2,12
NU i njegovi radioaktivni potomci	50,4	1,36	25,2	0,681
DU i njegovi radioaktivni potomci	39,3	1,05	14,4	0,389
Olovo iz XVI veka	0,035	0,00095	–	–
Savremeno olovo	0,35	0,0095	–	–

Granične vrednosti za udisanje uranijuma

Komisija za nuklearno zakonodavstvo SAD (NRC) preporučuje godišnji limit inhaliranja i unošenja čestica od DU za radnike koji su profesionalno izloženi uranijumu [31] (Tabela 8) koja je bazirana na godišnjoj DE od 50 mSv/god i na brzini ekstrakcije uranijuma u urin. Granica za inhalirani uranijum je znatno niža nego za inhalirani rastvorni uranijum, koji ulazi u krvotok i ekstrahuje se u urin. Inhalirane nerastvorne čestice ostaju u plućima godinama (kaže se da "svakog minuta prouzrokuje isti efekat kao kada se ide na snimanje pluća" (*hot pots*)). Pošto nerastvorni uranijum ne može ući u krvotok ingestijom, dat je limit samo za ingestovani uranijum.

Granične koncentracije za NU i DU su identične. Radiološki limit masene koncentracije izračunava se deljenjem limita koncentracije α -aktivnosti sa specifičnom α -aktivnošću NU ili DU (Tabela 5). Kako je specifična α -aktivnost DU niža za 43%, radiološki limit masene koncentracije je $1 / (1 - 0,43) = 1,75$ puta viši u poređenju sa vrednošću za NU.

Profesionalni godišnji limiti izvedeni za koncentraciju uranijuma u vazduhu [68] bazirani su na profesionalnim godišnjim limitima preporučenim od strane NRC za unošenje uranijuma inhalacijom, na srednjoj zapremini izdahnutog vazduha (6500–8400 m³/god) i na maksimalnom vremenu izlaganja radnika koji su profesionalno izloženi zračenju (2000 časova/god ili 40 časova nedeljno za 50 nedelja) (Tabela 9).

Godišnji limit unošenja inhalacijom za stanovništvo može se dobiti jednostavnim deljenjem profesionalnog

limita sa faktorom 50, i dolazi se do podatka da je godišnja DE manja od 1 mSv/god. Izvedena koncentracija uranijuma u vazduhu za stanovništvo može se dobiti deljenjem profesionalne koncentracije sa faktorom 50 i sa još jednim faktorom od 4,4 radi dobijanja iznosa za maksimalno vreme (2000 časova/god) za radnike koji su profesionalno izloženi zračenju za ukupan faktor 220 (NRC uzima faktor 220–330).

Tabela 8. Profesionalni godišnji limiti propisani od strane NRC za unošenje uranijuma inhalacijom i ingestijom
Table 8. NRC occupational annual limits on uranium intake

Način unošenja	Rastvorljivost	α -aktivnost (kBq/god)	NU Masena koncentracija (g/god)	DU Masena koncentracija (g/god)
Inhalacija	Nerastvoran	1,85	0,074	0,13
Inhalacija	Rastvoran	37	1,5	2,6
Ingestija	?	370	15	26

Tabela 9. Profesionalni godišnji limiti propisani od strane NRC za unošenje uranijuma koji se nalazi u vazduhu
Table 9. NRC occupational derived air concentrations

Rastvorljivost	α -aktivnost (Bq/m ³)	NU Masena koncentracija (μg/m ³)	DU Masena koncentracija (μg/m ³)
Nerastvoran	0,74	30	52
Rastvoran	18,5	740	1300

Preporučene vrednosti propisane od strane Ministarstva energetike SAD (DOE – *Department of Energy*) za kontaminirane nepokretne i pokretne površine za α -aktivnost uranijuma [28, 35], navode se u tabeli 10.

Profesionalni godišnji limiti propisani od strane NRC za vodu za piće [67] (Tabela 11) bazirani su na godišnjoj DE uranijuma od 1 mSv/god preporučenoj za stanovništvo i bazirane na srednjem dnevnom unošenju vode (2,5 dm³/dan, polovinu sa vodom a drugu polovinu sa hranom) i na brzini ekstrakcije uranijuma u urin. Nije dat granični nivo za radnike koji su profesionalno izloženi zračenju, jer profesionalci ne smeju unositi kontaminiranu vodu u višem iznosu.

Tabela 10. Profesionalni godišnji limiti propisani od strane DOE za unošenje uranijuma koji se nalazi na kontaminiranoj površini
Table 10. DOE occupational limits for surface contamination

Kontaminacija	α -aktivnost (kBq/m ³)	NU Masena koncentracija (μg/m ³)	DU Masena koncentracija (μg/m ³)
Pokretan	1,665	66	116
Fiksiran	8,325	330	580

Tabela 11. Profesionalni godišnji limiti propisani od strane NRC za unošenje uranijuma koji se nalazi u vodi

Table 11. NRC limit for drinking water

Voda	α -aktivnost (Bq/dm ³)	NU Masena koncentracija (μ g/dm ³)	DU Masena koncentracija (μ g/dm ³)
Voda za piće	11,1	440	770

U praktičnom smislu, preporučeni nivoi specifične aktivnosti su 0,1 Bq/dm³ za ukupnu α - i 1 Bq/dm³ za ukupnu β -aktivnost.

Ekvivalentne doze za pojedine izotope uranijuma i njegove radioaktivne proizvode koji se unošenjem uniformno distribuiraju u pojedine organe ili celo telo, prikazani su u tabeli 12 [36].

Tabela 12. Ekvivalentne doze procenjene za izotope uranijuma i njegove radioaktivne potomke

Table 12. Dose equivalent estimated for isotopes of uranium and its radioactive descendant

Izotop	Radioaktivnost	Energija* (keV)	Efekat (%)	RBE (rem/rad)	Ekvivalentna doza (μ Sv/god)	Aktivnost Bq/kg
²³⁸ ₉₂ U	α	4.267	77	16	12,8	4,736·10 ⁻²
	α	4.219	23	16		
	γ	48	23	1		
²³⁴ ₉₀ Th	β^-	193	67	1	0,028	1,036·10 ⁻⁴
	β^-	100	33	1		
	γ	93	33	1		
^{234m} ₉₁ Pa	β^-	2.290	98	1	0,146	5,402·10 ⁻⁴
	β^-	1.480	1	1		
	β^-	1.250	1	1		
	γ	810	2	1		
	γ	230	1	1		
²³⁴ ₉₂ U	α	4.856	72,5	15	13,0	4,81·10 ⁻²
	α	4.803	27,5	15		
	γ	53	27,5	1		
²³⁵ ₉₂ U	α	4.678	100	15	13,2	4,884·10 ⁻²
²³⁰ ₉₀ U	β^-	387	100	1	0,024	8,88·10 ⁻⁵

* Za β -zračenje, maksimalna energija β -spektra

Ekvivalentne doze i za α - i β -emitere za prirodni i osiromašeni uranijum koji se nalazi u celom telu ili individualnim organima prikazane su u tabeli 13. DE za osiromašeni uranijum je oko 43% manja od one koja se odnosi na prirodni uranijum iste masene koncentracije.

Tabela 13. Ekvivalentna doza procenjena za uranijum

Table 13. Dose equivalent estimated for uranium

Uranijum	Ekvivalentna doza/ α -aktivnost (μ Sv/god)/(Bq/kg)	Ekvivalentna doza/aktivnost (μ Sv/god)/(μ g/kg)
Prirodni uranijum sa radioaktivnim potomcima	13,0 (4,81·10 ⁻²)	8,85
Osiromašeni uranijum sa radioaktivnim potomcima	13,0 4,81·10 ⁻²	5,05

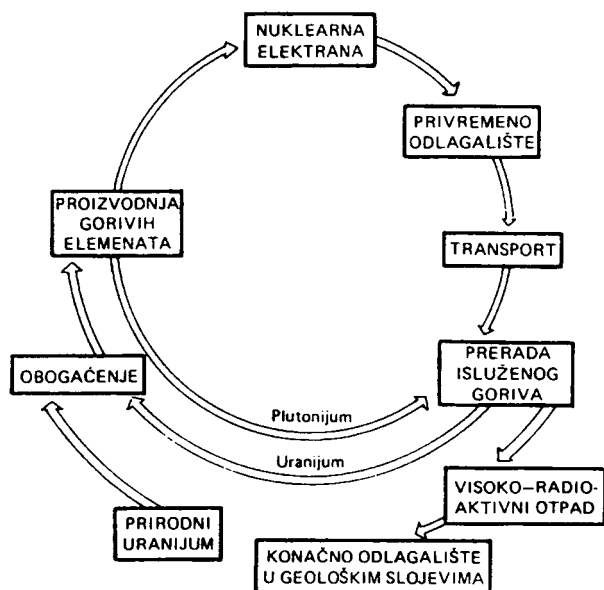
TEHNOLOGIJE NUKLEARNOG GORIVOG CIKLUSA

Nuklearno gorivo koje se koristi za lakovodne reaktore sastoji se od uranijum–dioksida oblikovanog u sitne tablete. One se stavljaju u tanke cevi izrađene od metala ili neke legure, koje ne apsorbuju neutrone, a bolje odvođaju toplotu. Obično se izrađuju od nerđajućeg čelika ili neke legure cirkonijuma. Te cevi se povezuju u čvrstu celinu koja se naziva gorivni element.

Nuklearna fisija je egzoterman proces. Oslobođanje energije nastaje kada dođe do tzv. *lančane reakcije*, uzastopnog ponavljanja reakcije fisije uranijuma. Za održavanje lančane reakcije konstruisan je **nuklearni reaktor**. U njemu se uslovi za njeno odvijanje strogo kontrolišu i tako podešavaju da se ona tek održava. To se postiže šipkama od kadmijuma koji je veliki apsorber neutrona. Ako se lančana reakcija ubrzava, kadmijumske šipke se spuštaju između gorivih elemenata, ili izvlače iz reaktorskog jezgra ako se lančana reakcija usporava ili gasi. Fisija jednog atoma uranijuma–235 oslobađa, pored energije, tri neutrona¹²⁾. Oni, teorijski, mogu da reaguju sa tri susedna atoma uranijuma–235 prouzrokujući fisiju tri nova atoma uranijuma–235, koji dalje oslobađaju novih devet neutrona. I tako, geometrijskom progresijom, dolazi u vrlo kratkom vremenu do fisije svih prisutnih atoma uranijuma–235. Praktično, ne učestvuju svi oslobođeni neutroni u održavanju lančane reakcije. Jedan deo odlazi iz sistema, drugi deo zahvataju atomi uranijuma–238, prelazeći na kraju u plutonijum–239, a tek treći deo oslobođenih neutrona uspeva da ostvari lančanu reakciju. Samo održavanje lančane reakcije nastaje ako nešto više od jednog neutrona proizvede nove fisije u okolnim atomima uranijuma–235, tj. ako je faktor multiplikacije veći od jedan.

Isluženo nuklearno gorivo sastoji se iz neutrošenog fisibilnog materijala, novostvorenog nuklearnog goriva (plutonijum–239 ili uranijum–233, ako je nuklearno gorivo torijum–232) i hemijskih elemenata – proizvoda nuklearne fisije. Ovi fisioni proizvodi su jako radioaktivni i apsorbuju neutrone. Zbog toga se isluženo nuklearno gorivo preraduje. Hemijsko-tehnološkim procesima razdvajaju se neutrošen uranijum–235, nagrađeni plutonijum–239 i fisioni proizvodi.

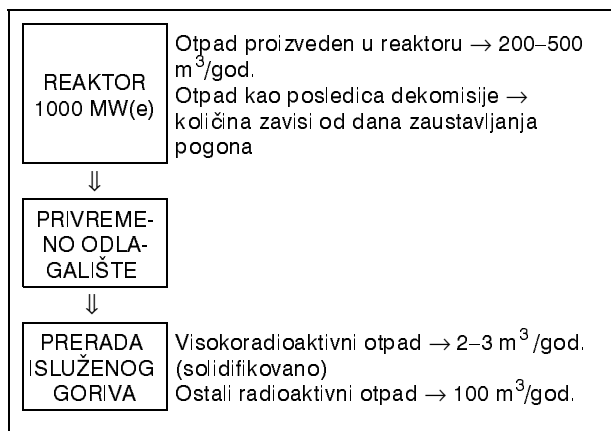
¹²⁾Kada se uranijum–235 ili plutonijum–239 koriste u čistom stanju, nastaje nekontrolisana lančana reakcija, naglo oslobađanje ogromnih količina energije i, kao posledica, eksplozija. Uslov za nastajanje eksplozije je kritična masa fisibilnog materijala. To je količina fisibilnog materijala u kojoj je, pri lančanoj reakciji, broj neutrona koji odlaze iz sistema manji od broja neutrona koji ostvaruju lančanu reakciju. Zbog toga se atomska bomba sastoji od dve odvojene mase fisibilnog materijala, koje zajedno imaju veću masu od kritične mase. Prvo se dešava eksplozija klasičnog eksploziva, pri čemu se oba dela kritične mase fisibilnog materijala sabijaju jedan u drugi. U tom trenutku stvorena kritična masa ostvaruje lančanu reakciju i nastaje **nuklearna eksplozija**. Snaga atomske bombe je ograničena veličinom kritične mase fisibilnog materijala. Minimalna masa fisibilnog materijala kojom može da se ostvari lančana reakcija fisije, iznosi za uranijum–235 oko 23 kg, za uranijum–233 oko 3,2 kg, a za plutonijum–239 oko 2,6 kg. Ovakva ograničenja ne postoje za vodoničnu bombu.



Slika 2. Zatvoreni gorivi ciklus
Figure 2. Closed nuclear cycle

Kruženje uranijuma i plutonijuma u nuklearnom gorivom ciklusu prikazano je na slici 2, na kojoj je dobijanje uranijuma iz rudnika *ulaz* u nuklearni gorivni ciklus, a izdvajanje fisijnih proizvoda *izlaz* iz njega.

Dugoročna strategija u ostvarivanju nuklearnog gorivog ciklusa ima tri mogućnosti. Isluženo nuklearno gorivo se, odmah po njegovom vađenju iz nuklearnog reaktora, upućuje u postrojenje za preradu isluženog nuklearnog goriva, ili se upućuje u bazene sa vodom na privremeno čuvanje. U njima ono može da ostane nekoliko decenija i da bude na raspolaganju za naknadnu odluku, bilo da se uputi u postrojenje za preradu ili na trajno uskladištenje u stabilne geološke formacije. Posle prerade, neutrošeni uranijum-235 i uranijum-238 upućuju se u postrojenje za obogaćenje uranijuma, a plutonijum direktno u postrojenje za proizvodnju gorivih elemenata. Gorivi ciklus može, teorijski, da se ponavlja sve dok se sav prirodni uranijum ne istroši (slika 3).



Slika 3. Radioaktivni otpadi nastali kao rezultat godišnje proizvodnje nuklearne elektrane od 1000 MW

Figure 3. Radioactive waste originating as a result of the annual production of a 1000 MW nuclear power station

Ako se isluženo nuklearno gorivo ne preraduje, odn. ako se nepovratno odlaže na trajni smeštaj, svet-ske rezerve uranijuma mogu da posluže za proizvodnju energije u svetu za sledećih 50 godina. Preradom isluženog nuklearnog goriva izdvaja se stvoreni plutonijum, novo nuklearno gorivo, i na taj način iskorišćen prirodni uranijum omogućava proizvodnju energije u svetu za sledećih 1.000 godina.

Ekonomске procene pokazuju da dugoročno odlaganje isluženog nuklearnog goriva (kada se fisibilni materijali nepovratno gube) nije jeftinije od troškova prerade tog isluženog goriva. U Francuskoj i Velikoj Britaniji postoje komercijalna postrojenja za preradu isluženog nuklearnog goriva, tako da npr. postrojenje u Velikoj Britaniji ima već porudžbine za sledećih 15 godina. Cena prerade je oko 1,5 miliona dolara za tonu isluženog goriva.

Do danas zemlje koje poseduju energetske nuklearne reaktore (elektrane) nisu odlučile da svoje isluženo nuklearno gorivo upute na trajno odlaganje. Preradu svog isluženog nuklearnog goriva, na svojim postrojenjima, ostvaruju Japan, Nemačka, Francuska, Velika Britanija, Belgija i Izrael. Poseban vojni program koji obuhvata i preradu isluženog goriva nuklearnih elektrana imaju Pakistan, SAD, Francuska, Velika Britanija, Kina, Indija i Rusija.

Obogaćivanje uranijuma u sadržaju izotopa uranijuma-235

Obogaćivanje prirodnog uranijuma, tj. povećanje sadržaja izotopa uranijuma-235, obavlja se uglavnom fizičkim metodama.

Proces obogaćivanja uranijuma sa fisijnim izotopom ^{235}U , nazvan *gasovita difuzija*, korišćen je u toku Drugog svetskog rata za proizvodnju atomske bombe u SAD. Proces gasovite difuzije zahteva uranijum u obliku uranijum-heksafluorida (UF_6), uglavnom zbog toga što ovo jedinjenje može biti korišćen u gasovitom agregatnom stanju za proces, kao tečnost za punjenje kontejnera i kao čvrsta supstanca za čuvanje. Čvrsti UF_6 je bela, kristalna supstanca u tečnom agregatnom stanju, pri temperaturama iznad 64°C i na povišenom atmosferskom pritisku (151,95 kPa). UF_6 je veoma reaktivan u kontaktu sa vodom, pri čemu nastaju rastvori i toksični uranil-fluorid (UO_2F_2) i vodonik-fluorid (HF) [69] (Tabele 14 i 15).

Tabela 14. Sastav izotopa uranijuma u osiromašenom uranijumu koji je dobijen obogaćivanjem prirodnog uranijuma
Table 14. Composition of uranium isotopes in depleted uranium obtained by enrichment of natural uranium

	$^{234}_{92}\text{U}$	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{238}_{92}\text{U}$	Ukupno
Maseni udeo, u %	0,0008976%	0,2%	99,799%	100%
Udeo u ukupnoj aktivnosti, u %	14,2%	1,1%	84,7%	100%
Aktivnost po 1 g NU	2,076 Bq	166 Bq	12,42 Bq	14,656 Bq

Tabela 15. Sastav izotopa uranijuma u osiromašenom uranijumu koji se dobija procesom obogaćivanja uranijuma koji je dobijen iz recikliranog nuklearnog goriva [45]

Table 15. Composition of uranium isotopes in depleted uranium obtained by enrichment of uranium previously obtained from recycled nuclear fuel [45]

	$^{232}_{92}\text{U}$	$^{233}_{92}\text{U}$	$^{234}_{92}\text{U}$	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{236}_{92}\text{U}$	$^{237}_{92}\text{U}$	$^{238}_{92}\text{U}$	Ukupno
Maseni udeo, u %	–	–	0,001939	0,2	0,2266	–	99,571	100%
Udeo u ukupnoj aktivnosti, u %	–	–	20%	0,71%	24,1%	–	55,2%	100%
Aktivnost po 1 g NU	–	–	4,485 Bq	160 Bq	5,429 Bq	–	12,396 Bq	22,470 Bq

Ova metoda zasniva se na pojavi da prolaz gasa kroz poroznu membranu zavisi od različitih brzina molekula gasa. Uranijum–oksid se prvo pretvori u uranijum–heksafluorid, koji se na temperaturama iznad 57°C nalazi u gasovitom stanju. Pri proticanju gasa kroz membranu prolazi više molekula UF_6 sa uranijumom–235 nego sa uranijumom–238. Učinak razdvajanja je vrlo mali i prolaženjem gasa kroz hiljade komora, vezanih u kaskade, dolazi se do odgovarajućeg stepena obogaćenja u sadržaju izotopa uranijuma–235. U novije vreme koriste se i gasne centrifuge za razdvajanje uranijumovih izotopa.

Gradovi u kojima se odlaže osiromašeni uranijum

Od juna 1998. Ministarstvo energetike (DOE) iz SAD je saopštilo da je 12,7 tona mase UF_6 koja se može maksimalno zadržati. Osiromašeni uranijum je od ove ukupne mase predstavljao 67,6%. Ukupna radioaktivnost od osiromašenog UF_6 je aproksimativno 318 GBq/cilindru, a ukupno za 52 cilindra iznosi 7142 TBq. Osiromašeni UF_6 je bio proizveden u kontinuitetu od 150 cilindra godišnje [69].

Ovi cilindri su smešteni u 3 gasovita difuziona postrojenja blizu Oak Ridža (Oak Ridge), Tenesi. Oak Ridž K–25 postrojenje bilo je zatvoreno 1985., dok je najstariji nuklearni cilindar bio tamo skladišten još 1956. DOE planira da skladišti ove cilindre uprkos intenzivnoj koroziji, na otvorenom (slika 4) i između 1990–1992. na 8 cilindra



Slika 4. Skladišteni cilindri sa UF_6

Figure 4. Stored cylinders with UF_6

ra je usled korozije ustanovljeno probijanje zaštitnog oklopa.

DOE predlaže alternative za ultimativnu preradu uranijuma (nerastvoren u vodi), dok je danas njegovo dugotrajno odlaganje od prioritarnog zadatka, kao i konstrukcija operativnih fabrika na svim lokacijama pod nadzorom NEP–a (*National Environment Policy Act*).

Drugi procesi obogaćivanja

Ogledno postrojenje K–1220 Centrifuge Plant je izgrađeno u Oak Ridžu za proces obogaćivanja [70]. Novo postrojenje je zasnovano na postupku centrifugalnog obogaćivanja. Ovaj proces je u sadašnjoj upotrebi u Evropi za dobijanje urana u Britaniji, Holandiji i Nemačkoj, a takode i u četiri fabrike u Rusiji [71].

Pilot–postrojenje za testiranje novog procesa obogaćivanja uranijuma (AVLIS, *Atomic Vapor Lase Isotope*) počelo je sa radom oktobra 1998. [72,73] na lokaciji (Lawrence Livermore National Laboratory) u Livermore Corp. (USEC), pri čemu je primenjen jedan od dva postojeća procesa gasovite difuzije obogaćivanja uranijuma koji se nalaze još u Kentakiju i Portsmautu u državi Ohaio. Novi procesi ne daju povoljne rezultate obogaćivanja uranijuma u ovim postrojenjima za komercijalnu upotrebu. Zbog toga je proces AVLIS bio suspendovan [74].

Laserski metod za obogaćenje prirodnog uranijuma zasniva se na korišćenju laserskog zračenja za selektivno pobuđivanje atoma ili uranijumovih jedinjenja. Pobuđeni atomi ili molekuli se tada u električnom ili magnetnom polju odvajaju od nepobuđenih. Primenom ove metode omogućava se vrlo visok stepen separacije.

Hemijski metodi obogaćenja prirodnog uranijuma zasnivaju se na ekstrakciji uranil–nitrata organskim ekstragensima ili procesu izmene jona uranijuma na nekom jono–izmenjivaču. Ovaj metod nije pogodan za postizanje visokog stepena obogaćenja. U Francuskoj se danas primenjuje komercijalni postupak zasnovan na procesu ekstrakcije.

Prerada isluženog nuklearnog goriva

Dugoročno rešenje nuklearne energije u termalnim i oplodnim reaktorima ne može se ostvariti bez prerade isluženog nuklearnog goriva. Prerada isluženog nuklear-

nog goriva je neizbežan put za povećanje iskorišćenja prirodnog uranijuma.

Isluženo nuklearno gorivo je vrlo radioaktivno. Tehnološkim postupcima prerade mora da se upravlja sa daljine i iza debelih zaštitnih zidova radi radioaktivnog zračenja, uz maksimalnu automatizaciju procesa. Izdvojeni uranijum i plutonijum moraju da budu vrlo čisti (stepen "nuklearna čistoća"), kako bi mogli da se upotrebe za izradu novog goriva. Posebna pažnja mora da se obrati u cilju sprečavanja nagomilavanja fisibilnog materijala (pojave kritične mase) u cevovodima, reakcionim sudovima i sudovima za čuvanje rastvora.

Danas su najčešći tzv. vodeni postupci prerade goriva. Najpoznatiji je i najviše se upotrebljava vodeni postupak nazvan PUREX, razvijen još 50-tih godina prošlog veka u SAD. Sam hemijsko-tehnološki postupak sastoji se iz više faza.

Prvo se rastavlja gorivi element u uranijumske šipke, koje se dalje seku u male komade. Tako "iseckano" isluženo gorivo se uvodi u sud za rastvaranje, gde se obično rastvara u azotnoj kiselini visoke koncentracije. Metalna košuljica se posebno rastvara, ili ostaje nerastvorena, i odvaja se kao radioaktivni otpad. Nagrađeni vodeni rastvor sadrži uranil-nitrat, $UO_2(NO_3)_2$, plutonijum-nitrat, $Pu(NO_3)_4$, nitrata fisionih proizvoda i višak azotne kiseline.

Sljedeća operacija je tretiranje nagrađenog azotno-kiselog vodenog rastvora tri-n-butil fosfatom (TBP), rastvorenim u nekom organskom razblaživaču (obično kerozinu). Snažnim mešanjem vodene i organske faze dolazi do ekstrakcije uranil-nitrata i plutonijum(IV)-nitrata sa TBP, pri čemu u organsku fazu prelaze $UO_2(NO_3)_2$ š. 2TBP i $Pu(NO_3)_4$ š. 2TBP. Na taj način su uranijum i plutonijum odvojeni od proizvoda fisije, koji ostaju u vodenoj fazi i tretiraju se kao nuklearni otpad.

Razdvajanje uranijuma od plutonijuma obavlja se tretiranjem organske faze nekim redukcionim sredstvom (npr. Fe(II)-jonom u *razbl.* HNO_3). Tada se $Pu(NO_3)_4$ -2TBP pretvara u $Pu(NO_3)_3$ i prelazi u vodenu fazu. U organskoj fazi ostaje $UO_2(NO_3)_2$ -2TBP, koji se iz nje izdvaja tretiranjem vrlo razblaženom HNO_3 . Na kraju se dobija vodeni rastvor uranil-nitrata.

Na ovaj način zasebno se dobijaju vodeni rastvori uranil-nitrata, plutonijum-nitrata i fisionih proizvoda. Uranijum i plutonijum idu u proizvodnju nuklearnog goriva, a fisioni proizvodi, kao nuklearni otpad, na dugotrajno odlaganje.

DU se takođe može dobiti pri procesu ekstrakcije plutonijuma odgovarajućim tehnološkim rešenjem (Rocky Flats Environmental Technology). Izotopi ^{238}U , ^{235}U i ^{234}U i osiromašeni uranijum dobijeni na ovaj način takođe sadrže 0,003% člana torijumovog radioaktivnog niza. Ovaj izotop se raspada u ^{232}Th sa poluvremenom života od $1,39 \cdot 10^{10}$ godina [42]. Na taj način DU iz potrošenog goriva ima aktivnost 0,15% veću nego dobijen kao sporedni proizvod pri obogaćivanju uranijuma (Tabela 6).

Trajno odlaganje fisionih proizvoda

Dugoročno odlaganje, odn. trajno odlaganje fisionih proizvoda (koji se tretiraju kao radioaktivni otpad) završna je etapa, *izlaz* iz nuklearnog gorivog ciklusa. Ovaj nuklearni otpad je veoma radioaktivan, a proizvodi i toplotu.

Radioaktivnim otpadom (RAO) smatraju se one otpadne materije koje sadrže radioaktivne izotope u granicama iznad dozvoljene koncentracije radionuklida u čovekovoj okolini.

Pod čvrstim radioaktivnim otpadom podrazumeva se sve otpadne materije čija je specifična aktivnost veća od 10^8 Bq/m³ za β i γ ili 10^7 Bq/m³ za α emitere, odn. čija je površinska kontaminacija veća od 5000 Bq/m² za β i γ ili 500 Bq/m² za α emitere [75].

Pod *tečnim* i *gasovitim* RAO podrazumevaju se otpadne materije u tečnom i gasovitom stanju koje sadrže radionuklide u količinama većim od izvedenih koncentracija za vazduh i vodu za piće za grupu pojedinaca i stanovništvo [76].

Kategorije RAO materijala, temeljene na preporukama međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) [76,77] navode se u tabeli 16.

Tabela 16. Kategorije radioaktivnih materija (RAO)
Table 16. Radioactive waste material categories

Kategorije radioaktivnih otpadnih materija	Specifična aktivnost A_{sp} (Bq/m ³)	Opis kategorije
I Visoko radioaktivni otpad	$A_{sp} > 5 \cdot 10^{14}$	- Visoko β , γ -zračenje, značajno α zračenje - Visoka radiotoksičnost, - znatna toplotna snaga (potrebno hlađenje)
II Srednje radioaktivni otpad sa α emiterima	$5 \cdot 10^{14} > A_{sp} > 5 \cdot 10^9$	- Srednje β , γ -zračenje, značajno α -zračenje - Srednja radiotoksičnost, - znatna toplotna snaga (potrebno hlađenje)
III Srednje radioaktivni otpad sa β/γ emiterima	$5 \cdot 10^{14} > A_{sp} > 5 \cdot 10^7$	- Srednje β , γ -zračenje, - Zanimljiva količina α emitera - Srednja radiotoksičnost, - Neznatna toplotna snaga
IV Nisko radioaktivni otpad sa α emiterima	$5 \cdot 10^9 > A_{sp}$, $\sum \frac{A_i}{ KI } > 1$	- Nisko/srednje β , γ -zračenje - Nisko α -zračenje - Srednja radiotoksičnost, - Neznatna toplotna snaga
IV Nisko radioaktivni otpad sa β/γ emiterima	$5 \cdot 10^7 > A_{sp}$, $\sum \frac{A_i}{ KI } > 1$	- Nisko β , γ -zračenje - Beznačajno α -zračenje - Niska radiotoksičnost, - Beznačajna toplotna snaga

gde je:

A_i = izmerena zapreminska aktivnost pojedinačnog radionuklida, KI (ili $|KI|$) (Bq/m³) = izvedena koncentracija radionuklida u vodi za piće za grupu pojedinaca iz stanovništva

Međunarodna agencija za atomsku energiju Ujedinjenih nacija procenila je 1980. da je radioaktivnost bezbedno i trajno smeštenih fisionih proizvoda samo mali doprinos ukupnom ozračivanju stanovništva koje potiče od prirodne radioaktivnosti.

Fisioni proizvodi, dobijeni preradom isluženog nuklearnog goriva, nalaze se u vodenom rastvoru azotne kiseline. Posle pretvaranja u čvrsto stanje uparavanjem, fisioni proizvodi se ustakljuju u blokove po tehnologiji koja je već komercijalna. Ovi blokovi se stavljaju u kontejnere od nerđajućeg čelika, zavaruju se i smeštaju u vazduhom hlađena suva skladišta u toku 50 godina. Kada se radioaktivnost ovih kontejnera i oslobađanje toplote smanje, kontejneri se razmeštaju bliže jedan drugom. U toku 30–120 godina površina za privremeni smeštaj smanjuje se deset puta. U toku nekoliko stotina godina radioaktivnost fisionih proizvoda smanji se za više od milion puta. Tada može da se pristupi njihovom trajnom odlaganju.

Konačno odlaganje RAO materija na centralna odlagališta, 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 300 do 500 godina, odn. 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 [78–80].

Za trajno odlaganje fisionih proizvoda razmatrani su smeštanje kontejnera u dubine okeana, u duboke bušotine, u stabilne geološke formacije (napušteni rudnici soli), kao i slanje u vasionu ili na nebeska tela.

LITERATURA

- [1] I. Draganić, "Kroz svet radijacija i radioaktivnosti – sto godina atomske ere", Muzej nauke i tehnike SANU, Beograd, 1995.
- [2] N.G. Gusev i P.P. Dimitrev, "Kvantno zračenje radioaktivnih nuklida", Spravočnik, Atomizdat, Moskva, 1977
- [3] C.M. Lederer, "Table of Isotopes", John Wiley and Sons Inc., 1978
- [4] E.I. Hamilton, "Applied Geochronology", Academic Press, London and New York, 1965.
- [5] R. Bertell, "No Immediate Danger, Prognosis for a Radioactive Earth", The Book Publishing Company–Summertown, Tennessee, 1990. <http://www.ratical.com/radiation/NRBE/NRadBioEffectsPh.html>
- [6] UNEP/UNHCS Balkans Task Force (BTF), "The Potential effects on human health and the environment arising from possible use of depleted uranium during the 1999 Kosovo conflict", Apreliminary assessment, October, 1999.
- [7] K.Z. Morgan, "Hazards of Low-Level Radiation", Yearbook of Science and the Future, Supplement of the Encyclopedia Britannica, 1980.
- [8] K.Z. Morgan, "Reducing Medical Exposure to Ionizing Radiation", American Industrial Hygiene Association Journal, May 1975, pp. 361–362.
- [9] H. Müller, "Radiation and Heredity", American Journal of Public Health, 54 (1964) 42–50.
- [10] R. Bertell, "X-ray Exposure and Premature Aging", Journal of Surgical Oncology, 9 (1977) 379–391.
- [11] N. Kochupillai, I.C. Verma et al., "Down's Syndrome and Related Abnormalities in the Area of High Background Radiation in Coastal Kerala", Nature, 262 (1976) 60.
- [12] P.M.E. Sheehan and I.B. Hillary, "An Unusual Cluster of Down +s Syndrome, Born to Past Students of an Irish Boarding School", British Medical Journal, 287, 12 November (1983). Also Letters and Author's reply, British Medical Journal, 288, 14 January 1984.
- [13] L.S. Penrose and G.F. Smith, Down's Anomaly, Churchill, London, 1966.
- [14] C.J. Johnson, "Cancer Incidence in an Area of Radioactive Fallout Downwind from the Nevada Test Site", Journal of the American Medical Association, 251, 13 January 1984.
- [15] H.B. Jones, "Estimation of Effect of Radiation Upon Human Health and Life Span", Proceedings of the Health Physics Society, June 1956.
- [16] L.H. Gray, "Biological Damage by Different Types of Ionizing Radiation", in Biological Hazards of Atomic Energy, Clarendon Press, Oxford, 1950.
- [17] K.Z. Morgan, "Risk of Cancer from Low Level Exposure to Ionizing Radiation", American Association for the Advancement of Science, Washington, DC, 17 February 1978.
- [18] R.M. Sievert, "Tolerance Levels and Swedish Radiation-protection Work", Proceedings of the Health Physics Society, June 1956, p. 181.
- [19] M. Eisunbud, "Radioactive in the Environment – Radioactive Concentration in the Fetal Thyroid", Pediatrics (Supplement), 41, Part II (1968) 174.
- [20] H. Muleer, "Radiation and Heredity", American Journal of Public Health, 54 (1964) 42–50.
- [21] "Biological Effects of Ionizing Radiation", BEIR III, US National Academy of Science, National Academy Press, 1980, pp. 74–75.
- [22] R. Bertell, "Ionizing Radiation Exposure and Human Species Survival", Canadian Environmental Health Review, 25, No. 2, June 1981.
- [23] "Basic Radiation Protection Criteria", US National Council on Radiation Protection Report No. 39, pp. 58–60.
- [24] A.M. Stewart, "Delayed Effects of A-Bomb Radiation: A Review of Recent Mortality Rates and Risk Estimates for Five-year Survivors", Journal of Epidemiology and Community Health, 36 (1982) 80–86.
- [25] R. Bertell, Letter to the Interagency Task Force on Low-Level Ionizing Radiation (director F.Peter Libassi); published in Public Comments on the Work Group Reports, US Department of Health, Education and Welfare, June 1979.
- [26] R. Mole, "Radiation Effects on Pre-natal Development and their Radiological Significance", British Journal of Radiology, 52 (1979) 89–101.
- [27] "Sources and Effects of Ionizing Radiation", UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, nos. 90–91, 1977.
- [28] "Brookhaven National Laboratory Radiological Control Manual", Brookhaven National Laboratory, December 1995, revised March 1999.
- [29] "Acute Radiation Syndrome", Radiation Effects Research Foundation (RERF), Hiroshima, April 1999.
- [30] W.R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments", Springer-Verlag, New York, Berlin and Heidelberg, 1987.
- [31] "Standards for Protection against Radiation", Title 10 of the Code of Federal Regulations (CFR), Part 20 (10 CFR 20); Nuclear Regulatory Commission (NRC), May 1991.

- [32] I. Tomljenović, M. Baroš, M. Mitrović, "Rolf Maksimilijan Sivert (1986–1966)", XX simpozijum JDZZ, Tara 99, 3–5. novembar 1999. god., Zbornik radova, s. 35–38.
- [33] "Limits for Intakes of Radionuclides by Workers", ICRP Publication No.30, Part I; International Commission on Radiological Protection (ICRP), Pergamon Press, New York, July 1978.
- [34] IAEA, "International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources", 1996.
- [35] "Occupational Radiation Protection", Title 10 of the Code of Federal Regulations (CFR), Part 835, (10 CFR 835), Department of Energy (DOE), 1993.
- [36] D. Bjarnason, "Silver Bullet: Depleted Uranium", <http://www.tv.cbc.ca/national/pgminfo/du/index.html>
- [37] B. Rostker, "Environmental Exposure Report: Depleted Uranium in the Gulf", Department of Defense, July 1998.
- [38] J.W. Gofman, "Radiation-Induced Cancer from Low-dose exposure – an Independent Analysis", Committee for Nuclear Responsibility, 1990.
- [39] H. Harley, E.C. Foulkers, L.H. Hilborne, A. Hudson and C.R. Anthony, "A Review of the Scientific Literature As it Pertains to Gulf War Illnesses: Vol.7, Depleted Uranium, MR-1018/7-OSD", RAND, 1999.
- [40] B. Busby, "Radiation and Us", Faculty of Nuclear Engineering, Oregon State University, June 1999.
- [41] S.R. Arsenijević, "Hemija – opšta i neorganska", Naučna knjiga, Beograd, 1994, s. 651.
- [42] D.J. Horen et al., "Nuclear Level Schemes A = 45 through A = 257 from Nuclear Data Sheets", Academic Press, New York and London, 1973.
- [43] "Uranium Radiation Properties", INTERNET adresa: [http://www.antenna.nl/\(wise/uranium/rup.html](http://www.antenna.nl/(wise/uranium/rup.html)
- [44] I.M. Fisenne, "Long lived radionuclides in the environment, in food and human beings", in Final report from the V International Symposium on the Natural Radiation Environment, CEC, 1993, Luxemburg.
- [45] [Neghabian 1991] Verwendung von wiederaufgearbeitetem Uran von angereichertem Uran, von A.R. Neghabian, H.J.
- [46] A. Becker, H. Baran und W. Binzel, "Der Bundesminister für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU–1992–332, November, 186 S.
- [47] [IAEA 1989] In Situ Leaching of Uranium: Technical, Environmental and Economic Aspects, IAEA-TECDOC-492, IAEA Vienna 1989, 172 p.
- [48] UNSCEAR, 1993: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with scientific annexes. New York, United Nations 54. ISBN 92–1–142200–0. 1993
- [49] UNSCEAR, 1999: Exposures from natural radiation sources. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Forty-eight session of UNSCEAR Vienna, 12 to 16 April 1996. Preliminary report. Draft. 1999.
- [50] C.H. Wayne et al., "Long-term Ecological Effects to Exposure to Uranium", Los Alamos Scientific Laboratory, UC–11, 1976.
- [51] R.H. Lin et al., "Cytogenetic toxicity of uranyl nitrate in Chinese hamster ovary cells", Mutation Research, **319** (1993), 197–203.
- [52] E.B. Blasch, G. Stuckenbroeker and R. Lusky, "The use of uranium as a shielding material", Nuclear Engineering and Design, North-Holland Publishing Company, **13** (1970) 146–182.
- [53] M.E. Wrenn et al., "Metabolism of ingested U and Ra", Health Physics, **48** (1985) 601–633.
- [54] C.K. McDonald-Taylor, A. Singh and A. Gilman, "Uranyl nitrate – induced proximal tubule alterations in rabbits: a quantitative analysis", Journal of toxicologic pathology, **25**(4) (1997) 381–389.
- [55] E.J. Bennelick, "A review of the toxicology and potential hazards of natural, depleted and enriched uranium", United Kingdom Atomic Energy Authority, Health and Safety Branch, Report AHSB (RP) R. 58.1966.
- [56] NELLIS, "Resumption of use of depleted uranium rounds at Nellis Air Force Range", Target 63–10, U.S. Army Corps of Engineers, Nebraska, Draft June 1997.
- [57] R.L. Erikson et al., "A review of the environmental behavior of uranium derived from depleted uranium alloy penetrators", Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, PNL–7213, 1990.
- [58] U.S. EPA, "Proposed drinking water standards", U.S. Environmental Protection Agency, 1991.
- [59] WHO, "Guidelines for drinking water Quality", 2nd edition. Addendum to Volume 2: Health criteria and other supporting information, Geneva, Switzerland, 1998.
- [60] Y. Mao et al., "Inorganic components of drinking water and microalbuminuria", Environmental Research, **71** (1995) 135–140.
- [61] M.A. Moss et al., "Uranium in drinking water – report on clinical studies in Nova Scotia", In: Brown S.S. and Savory J., eds, "Chemical toxicology and clinical chemistry of metals", London, Academic Press, 1983, 149–152.
- [62] M. Eisenbud, "Environmental Radioactivity", Academic Press, New York, 1989.
- [63] G.D. Đurić, D.Lj. Popović, "Uranijum u životnoj sredini", Hemijska industrija (Beograd), **54**(2) (2000) 50–52.
- [64] ICRU Report 33, 1980.god. Washington D.C.USA, "Radiation quantities and units".
- [65] ICRP Publ., "Principles for Limiting Exposures of the Public to Natural Sources of Radiation", Pergamon Press, Oxford, UK, **29** (1984).
- [66] R. Puls, "Mineral levels in animal health. Diagnostic Data", Sherpa int. Clearbrook, BC, Canada, 1990.
- [67] "Standards for Protection against Radiation", Title 10 of the Code Federal Regulation (CFR), Part 20 (10 CFR 20); Nuclear Regulatory Commission (NRC), May 1991.
- [68] ICRP Publ., "Principles for Limiting Exposures of the Public to Natural Sources of Radiation", Pergamon Press, Oxford, UK, **29** (1984).
- [69] "Final Programmatic Environmental Impact Statement for Alternative Strategies for the Long-Term Management and Use of Depleted Uranium Hexafluoride, DOE/EIS-0269", Department of Energy (DOE), April 1999.
- [70] P.L. Goddard, A.J. Legeay, D.S. Pesce and A.M. Stanley, "Site Descriptions of Environmental Restoration Units at the Oak Ridge K-25 Site, K/ER-47/R1", Oak Ridge National Laboratory, November 1995.
- [71] V. Mikhailov, "The Enrichment Industry in the Russian Federation", 1995 Uranium Institute Symposium Abstract, Russian Ministry for Atomic Energy (Minatom), Moscow, 1995.
- [72] B. Grant, "Lasers Improve Uranium Enrichment", Photonics Spectra, December 1997.
- [73] J. Tomkovic, "USEC Begins Process of Siting New AVLIS Uranium Enrichment Facility", USEC News Release, October 1998.
- [74] W.H. Timbers, "USEC Inc. Suspends AVLIS Technology Development", USEC News Release, June 1999.
- [75] I. Plečaš, "Optimization of Concrete Containers Composition in Radioactive Waste Technology", Radioactive Waste Management and Nuclear Fuel Cycle, **6**(2), June 1985.

- [76] Službeni list SFRJ, br. 40, 1986: Pravilnik o načinu sakupljanja, evidentiranja, obrađivanja, čuvanja, konačnog smeštaja i ispuštanja radioaktivnih otpadnih materijala u čovekovu sredinu.
- [77] I. Plečaš i A. Perić, "Obrada i odlaganje radioaktivnog otpada u Jugoslaviji", Internacionalni simpozijum "Otpadni materijal i životna sredina", Vrnjačka Banja, 13.–15. maj 1996, Zbornik radova, s.395–403.
- [78] I. Plečaš, "Some Important Characteristics of Concret Containers in Radioactive Waste Package", XI Regional Congress of IRPA, Vienna, 1983.
- [79] Technical Reports Series No. 253, "Operational Experience in Shallow Ground Disposal of Radioactive Wastes", IAEA, 1985.
- [80] "Shallow Land Disposal of Radioactive Waste", Reference Levels for the Acceptance of Long-Lived Radionuclides, Report by A New Expert Group, 1986.

SUMMARY

DEPLETED URANIUM

I – Natural uranium, radioactivity and legal regulation

(Professional paper)

Miloš B. Rajković

Institute of Food Technology and Biochemistry, Faculty of Agriculture,

University of Belgrade, 11081 Belgrade–Zemun, Nemanjina 6, P.O. Box 127, Serbia, Yugoslavia

Depleted uranium is a highly toxic and low radioactive waste; an off-product of the uranium enrichment process and represents dangerous radioactive waste for man and the environment. Up to the 1970–ies was stored, but from the beginning of the seventies it has been used for missile hard core production which seems to be very efficient for armor brakes (penetration). But except for its immediate efficiency, for which there is no doubt, depleted uranium remains at the licitioi in the form of tiny particles and smog as an "invisible threat", being almost permenently dangerous for people and environment ($4.5 \cdot 10^9$ years).

That is the reason of the great publicity, which in the last decade, from the Gulf War (1991) when munition with depleted uranium was massively used for the first time, which grew into a real campaign against this munition which is unselective, inhumane and causes consequences for both the conquered and conquerors. In the name of humanity, the environment and finally the protection of life on Earth, the campaign has lead to a proposal to ban its usage. On the other – hand, from the military viewpoint, these are – ideal weapons.

As the ideal – does not exist, in a series of papers we shall try to present the cycle of depleted uranium movement, from the separation of unusable material (which implies expensive for storage, but cheal almost free of cost, for giving to possible users) in the process of nuclear fuel enrichmant to use for munitions production. The last stage is not complete consequences of the use of munition with depleted uranium, because they are unpredictable, unselective and eternal.

In the first part of the serial the fundamental terms connected with the process of radiation to which people are permanently exposed are given and also legal regulations for heath protection. Also, a review of all the terms connected with radiation are given, as well as the scale of degrees of human exposure to radiation. A review of the properties of uranium, as the last element of the periodica system of elements which can be found in nature, its origin and migration in the environment are also given, and the data for natural and depleted uranium compared. Finally, the origin and structure of nuclear fuel is given with strict emphasis of the fact that it is waste material.

Key words: Natural Uranium • Depleted Uranium • Radioactivity • Ionising Radiation • Radiological Effects •

Ključne reči: Prirodni uranijum • Osiromašeni uranijum • Radioaktivnost • Jonizujuće zračenje • Radiološki efekti •