

ность ядерных энергетических реакторов. Атомиздат, Москва 1975. — J. J. Duderstadt, L. J. Hamilton, Nuclear Reactor Analysis. John Wiley, New York 1976. — A. E. Profio, Experimental Reactor Physics. John Wiley, New York 1976. — E. E. Lewis, Nuclear Reactor Safety. John Wiley, New York 1977.

D. Popović

NUKLEARNO GORIVO, materijal što sadrži atomska jezgra nekih teških elemenata, kojima se mogu ostvariti nuklearni procesi za oslobođanje energije. U nuklearnom gorivu takvi se procesi podržavaju sami i odvijaju lančano, prenoseći se od jednih na druga atomska jezgra kada se u nuklearnom reaktoru nađe dovoljna količina nuklearnog goriva (v. *Nuklearni reaktori*).

U nuklearna goriva ubrajaju se tri fisisna materijala: uranijum 233 (^{233}U), uranijum 235 (^{235}U) i plutonijum 239 (^{239}Pu). Samo jedan od njih nađen je u prirodi više nego u tragovima. To je izotop ^{235}U . On čini samo ~0,7% prirodног elementa uranijuma. Stoga se taj materijal zove prirodno ili primarno nuklearno gorivo. Druga dva nuklearna goriva, ^{239}Pu i ^{233}U , dobijaju se veštački u nuklearnim reaktorima. Bombardovanjem neutronima od ^{238}U nastaje ^{239}Pu , a od ^{232}Th nastaje ^{233}U . To su sekundarna nuklearna goriva. ^{238}U i ^{232}Th od kojih nastaju sekundarna goriva zovu se *oplodni materijali*.

Izvorni materijali za nuklearno gorivo, uranijum i torijum, široko su rasprostranjeni u Zemljinoj kori i veliki su energetski potencijali. Njihova ukupna količina do dubine od ~5 km procenjena je na ~ $12 \cdot 10^{12}$ t. Najveći deo tih elemenata retko se sreće u koncentracijama ekonomičnim za eksploraciju. Međutim, moguće je iz umereno siromašnih ruda, sa sadržajem od ~0,1% uranijuma, dobiti $20 \dots 25 \cdot 10^6$ t uranijuma i nekoliko miliona tona torijuma. Oni imaju više od deset puta veći energetski potencijal nego sve postojeće zalihe fosilnih goriva (ugalj, nafta, gas i škriljci).

Osobine i vrste nuklearnih goriva. Nuklearno gorivo mora biti veoma čisto i bez primesa koje apsorbuju neurone. Pre nego što se stavi u nuklearni reaktor, gorivo se oblaže košuljicom koja treba da zadrži proizvode fisije (fisione fragmente) za sve vreme izgaranja u nuklearnom reaktoru, pa i posle toga, sve do njegove prerade. Budući da se u nuklearnom reaktoru stvara toplotna energija, nuklearno gorivo je izloženo visokim temperaturama i temperaturnim gradijentima, te zračenju koje menja fizičke i hemijske osobine materijala. Stoga, pored čistoće, nuklearno gorivo mora biti postojano i izdržljivo u takvim uslovima.

Cisti metalni uranijum retko se upotrebljava kao nuklearno gorivo i pored nekih svojih dobrih osobina (npr. dobra toplotna provodnost), jer pri zagrevanju na dosta niskoj temperaturi menja kristalnu strukturu, a time fizičke i mehaničke osobine. Legiranjem uranijuma s drugim metalima, niobijumom, molibdenom, cirkonijumom, aluminijumom i drugima, mogu se poboljšati osobine metalnog uranijuma kao nuklearnog goriva, ali ne toliko da bi se mogao svrstati u šire upotrebljavana nuklearna goriva.

Sinterovani uranijum-dioksid najčešće se upotrebljava kao nuklearno gorivo u energetskim nuklearnim reaktorima. Za izradu gorivnih elemenata prah se uranijum-dioksida presuje u obliku tableta i sinteruje na visokim temperaturama, obično u atmosferi vodonika. Uranijum-dioksid ima znatnih prednosti u odnosu na metalni uranijum. Može se upotrebiti na visokim radnim temperaturama, a otporan je i na radijaciona oštećenja. Otporniji je na koroziju i u normalnim uslovima rada reaktora ne reaguje s materijalima od kojih se pravi košuljica gorivnog elementa. Ne reaguje ni s vodom. Nedostatak mu je, međutim, što ima malu toplotnu provodnost i relativno malu gustinu u odnosu na metalni uranijum. Pored uranijum-dioksiда postoje još i druga keramička goriva koja se još ne primenjuju, kao što su uranijum-karbidi (UC) i uranijum-nitrid (UN). Postoji i dispergirano nuklearno gorivo koje je u sitnim česticama, obično kao keramičko gorivo, ugrađeno u veću, najčešće metalnu matricu. Takvo se gorivo zove *kermet* (keramika-

-metal). Kao matrica može poslužiti i moderatorski materijal (grafit, berilijum-oksid, cirkonijum-hidrid).

Zbog promene kristalne strukture na dosta niskim temperaturama metalni plutonijum ne upotrebljava se kao nuklearno gorivo, već njegove legure ili oksidi. Obično se upotrebljava sinterovana smeša uranijum-dioksida i plutonijum-dioksida. Posebnu teškoću predstavlja opasnost da se tokom izrade gorivnih elemenata ne stvari kritična masa već s malom količinom plutonijuma. Zbog emisije jakog α -zračenja, u plutonijumu se stalno stvara toplotna energija.

Torijum se kao oplodni materijal upotrebljava slično kao ^{238}U . Torijum se obično kombinuje s uranijumom u obliku čvrste smeše njihovih dioksida ili dikarbida.

URANIJUMSKE RUDE

Uranijum je široko rasprostranjen. Ima ga u stenama (od nekoliko miligrama do nekoliko stotina grama po toni), u vodama (oko tri miligrama po toni u morskoj vodi) i u materijalima biljnog i životinjskog porekla.

Između tako dispergovanih uranijuma i koncentracija pogodnih za ekonomsku eksploraciju postoje pretkoncentracije sa sadržajem od nekoliko desetaka do nekoliko stotina grama uranijuma po toni koje se mogu iskoristiti. To su fosfati i rude iz kojih se vade uranijum i drugi metali kao sporedni proizvodi.

Ležišta uranijuma imaju dosta različite koncentracije, ali se smatra da su, prema postojećim tržišnim uslovima, ekonomična ona u kojima ima ~1000 grama uranijuma po toni rude.

Rasprostranjenost uranijumskih ruda. Ležišta uranijuma ne pojavljuju se ravnomerno u svim geološkim formacijama. Nema nalazišta iz arhajskog doba. Nasuprot tome, u proterozoiku, a naročito u donjem proterozoiku i na prelazu u srednji proterozoik nalaze se skoro dve petine do sada otkrivenih ležišta. Računa se da u primaru ima nešto manje od petine ležišta, dok su preostale dve petine nastale u sekundaru i tercijaru.

Ležišta iz sekundara i tercijara nalaze se na starom prekambrijskom platou Colorada i u bazenu Wyominga (SAD) i Nigera (Afrika; sl. 1), a nastala su najvećim delom erozijom. Najveći deo kanadskih rezervi uranijuma leži severno od jezera Huron pored reke i jezera Elliot i pripadaju tipu kvarcnih konglomerata. Australija je poslednjih godina pronašla velike zalihe uranijuma u oblasti Northern Territory, dok je na jugu i zapadu zemlje pronađeno po jedno veliko sedimentno ležište. Najveći deo rezervi uranijuma Južnoafričke Republike spada u orudnjenja tipa *konglomerata* u oblasti Witwatersrand. Tu se uranijum dobija kao sporedni proizvod u rudnicima zlata. U Namibiji se nalazi ležište uranijuma u granitnim stenama s malim sadržajem metala, ali je pogodno za eksploraciju.



Sl. 1. Površinski kop rudnika uranijuma u Arlitu (Niger)

Obogaćenja uranijumom u fosfatima odvijala su se u permu (Florida) i na prelazu iz krede u tercijar (severna Afrika). Obogaćenja uranijumom u crnim škriljcima nastala su u paleozoiku (kambrij, silur, devon). Uranonosna zona zapadne i srednje Evrope bez evidentne je veze s prekambrijem i nalazi se u formaciji hercijena.

Oblasti u kojima su zalihe veće od 100000 t uranijuma malobrojne su i ima ih samo desetak u svetu. One imaju malu površinu, a prostiru se unutar kruga s prečnikom koji nije veći od 100 km. Ležišta su obično malih dimenzija i šire se diskontinualno. O rezervama uranijuma v. *Nuklearna energija*.

Istraživanja uranijuma u zemljama u razvoju. Početkom sedamdesetih godina poraslo je interesovanje za istraživanje uranijuma u zemljama u razvoju zbog porasta cena nafte i zbog povećanog interesovanja za uranijum i porasta njegove cene. Oko trideset zemalja u razvoju u toj dekadi obratilo se Međunarodnoj agenciji za atomsku energiju (MAAE) za saradnju u istraživanjima uranijumske ruda, a najviše njih doobile su i tehničku pomoć od Programa za razvoj Ujedinjenih nacija (UNDP).

Iako do sada poznate rezerve uranijuma u zemljama u razvoju predstavljaju samo mali procenat svetskih rezervi, očigledno je da se najveći deo neotkrivenih rezervi nalazi baš u tim zemljama. Oko 60% zemalja u razvoju obuhvaćeno je istraživanjima uranijumske ruda. Do sada su u nekoliko od tih zemalja pronađene rezerve između 1000 i 5000 t, a u 6 zemalja i po više od 20000 t uranijuma.

Istraživanje uranijuma u Jugoslaviji. Istraživanja uranijumske rude u SFR Jugoslaviji započeta su 1948. god. i obavljena su sa različitim intenzitetom, izmenama programa i konцепциjama istraživanja, uz povremeno obustavljanje skoro svake aktivnosti. Aktivnije istraživanje uranijuma u svim našim republikama, sem u SR Sloveniji gde se terenska istraživanja nisu obustavljala, obnovljeno je 1976. god. Smatra se da je do sada regionalnim metalogenetskim ispitivanjima obuhvaćeno više od polovine perspektivnih površina (oko 65000 km²), a još treba ispitati oko 50000 km² potencijalnih uranonosnih površina. Međutim, prospективno-istražni radovi radi ocene mogućnosti otkrivanja industrijskih rezervi uranijumske rude provedeni su samo na nekoliko rudnih polja, tako da je stepen istraženosti naše zemlje minimalan.

Ukupan potencijal rudnih rezervi uranijuma u našoj zemlji, na sadašnjem stepenu istraženosti, ocenjen je na nekoliko desetaka hiljada tona uranijumskog koncentrata. Taj potencijal obuhvata rezerve kategorija B, C i D.

Rezerve B i C₁ koje spadaju u rezerve viših kategorija ograničene su na desetak nalazišta, ali u ukupnom bilansu uranijuma čine samo ~6%. Rezerve C₂ čine ~17%, što je posledica niskog stepena istraženosti. Rezerve D kategorije ocenjene su na osnovu metalogenetskih kriterijuma i čine ~77% od ukupnog potencijala.

U SR Sloveniji i SR Srbiji ima nešto više od 30% ocenjenih rezervi uranijuma, u SR Makedoniji nešto manje od 20%, dok u SR Hrvatskoj i SR Bosni i Hercegovini ima nešto manje od 10% od ukupnih rezervi. U SR Crnoj Gori nema utvrđenih rezervi, iako ima potencijalnih formacija.

Može se očekivati da će prospekcija neistraženih i nedovoljno istraženih područja, uz paralelno istraživanje poznatih rudnih polja, omogućiti otvaranje novih rudnika uranijuma, pored rudnika Žirovski vrh u SR Sloveniji, koji ima početni kapacitet od 120 t/god. uranijumskog koncentrata. Uranijski koncentrat iz tog rudnika služi kao polazna sirovina za gorivo nuklearne elektrane Krško.

Priprema i otvaranje rudnika uranijuma. Istraživanja uranijuma, iako su slična istraživanjima drugih retkih metala, razlikuje se od ostalih po tome što je uranijum radioaktiv. Stoga su razvijene metode merenja γ -zračenja proizvoda raspada uranijuma tako da oblasti sa povećanim zračenjem ukazuju na prisustvo uranijuma.

Poznavanjem geoloških formacija i primenom geochemijskih i geofizičkih metoda lokalizuje se koncentracija uranijuma, pa se istražnim bušenjem procenjuje rentabilnost nalazišta.

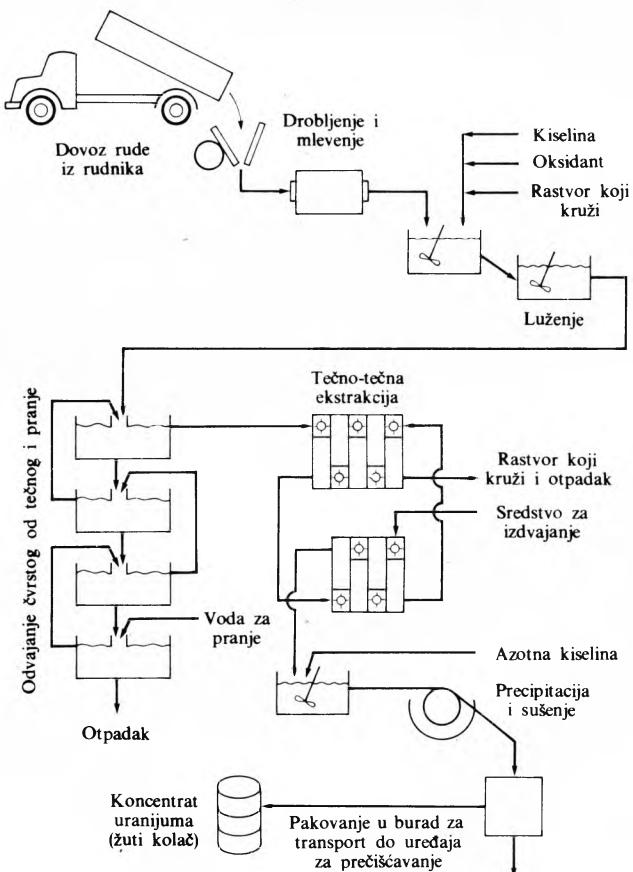
U istraživanjima uranijumske rude aktivnosti se mogu podeliti u pet faza: a) prikupljanje raspoloživih podataka i izrada geološko-metalogenetskih karata, b) prethodno odabiranje lokacija na kojima se očekuje ležište, c) regionalni prospективno-istražni radovi, d) poludetaljna i detaljna istraživanja rudnih po-

java i ležišta i e) projektovanje i gradnja rudnika i postrojenja za dobivanje uranijumskog koncentrata.

Spomenuti se postupci primjenjuju kad su istraživanja bila uspešna. U praksi od stotinu projekata samo desetak njih dostignu do izvođenja bušotina, a samo jedan ili dva do otvaranja ležišta.

Od dubine rudnih jezgara zavisi da li će se uranijum vaditi površinskim ili jamskim radovima. Budući da u rudnicima uranijuma postoji zračenje proizvoda raspada uranijumovog lanca elemenata koje je štetno za zdravlje rudara, potrebna je stroga kontrola vazduha kojom se prati radioaktivnost. Sem toga, mora se osigurati povećana ventilacija koja je u rudnicima uranijuma nekoliko puta veća nego u ostalim rudnicima.

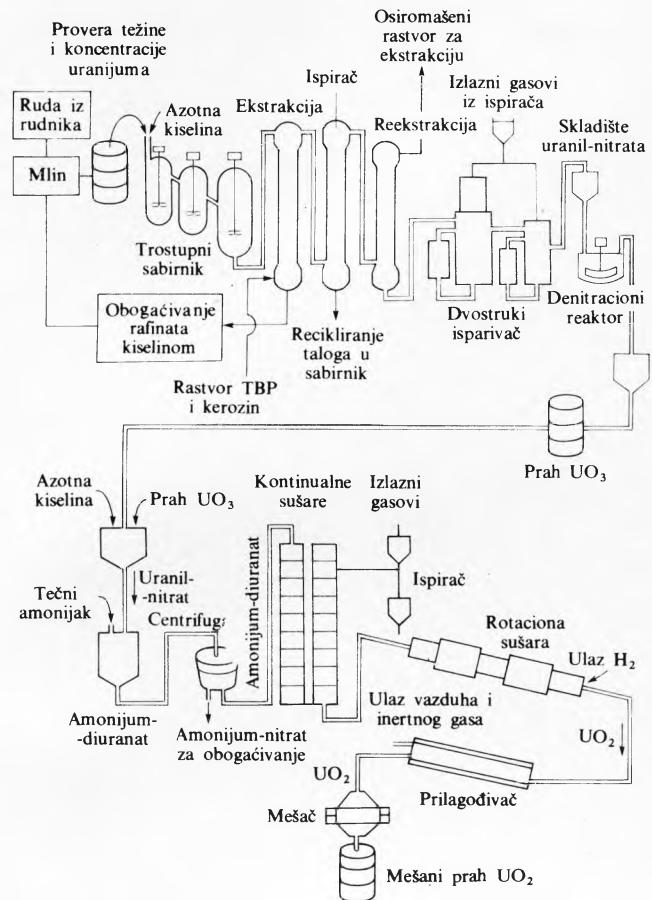
Prerada uranijumske rude i dobijanje koncentrata. Posle vađenja uranijumske rude ona se radiometrijski meri i prema sadržaju uranijuma razvrstava. Zatim se ruda drobi i melje. Ruda se rastvara alkalinim ili kiselim postupkom. Rastvor s uranijumom od sterilnog čvrstog materijala odvaja se u dva stepena, i to sedimentacijom i filtriranjem. Za čišćenje i koncentraciju uranijuma iz rastvora upotrebljavaju se jonski izmjenjivači. Izdvajeni uranijumski koncentrat oslobođa se vode u dobrošastim filtrima ili centrifugama, a zatim se suši u etažnim pećima na temperaturi od ~400 °C i kao žuti kolač posle hlađenja pakuje u burad (sl. 2).



Sl. 2. Postupak proizvodnje koncentrata uranijuma

Žuti kolač sadrži 60–70% uranijuma. Da bi bio pogodan za upotrebu u nuklearnim reaktorima, posebnim se postupcima prečišćava u UO_3 . Zatim se prah UO_3 pretvara ili neposredno u prah UO_2 ili u gas UF_6 (sl. 3). UO_2 je pogodan za sintezu i izradu tableta za gorivne elemente teškovodnih reaktora, dok se UF_6 vodi u postrojenja za obogaćivanje uranijuma.

Procenjuje se da je do kraja 1981. god. u svetu proizvedeno ukupno ~800000 t uranijuma. Proizvodnja poslednjih godina iznosila je ~50000 tona. Proizvodni kapaciteti rudnika bili su za



Sl. 3. Prečišćavanje koncentrata uranijuma i dobijanje uranijum-dioksida

približno 10000 t/god. veći. Očekuje se da će oko 1990. godine kapaciteti rudnika biti povećani na 80000–90000 t/god.

OBOGAĆIVANJE URANIJUMA IZOTOPOM ^{235}U

Obogaćivanje uranijuma izotopom ^{235}U postupak je u kom se povećava sadržaj izotopa ^{235}U koji u prirodnom uranijumu iznosi samo 0,7%. Ako se sadržaj izotopa ^{235}U poveća na 2–4%, dobija se slabo obogaćeno gorivo, koje se može iskoristiti u energetskim nuklearnim reaktorima s običnom vodom (v. *Nuklearni reaktori*).

Budući da se sada grade pretežno reaktori s običnom vodom, procesi obogaćivanja dobijaju sve veće značenje. Najviše postrojenja za obogaćivanje uranijuma bilo je izgrađeno u vojne svrhe. U njima se može proizvoditi i visoko obogaćeno gorivo, sa sadržajem ^{235}U u većim od 80%, koje se upotrebljava za izradu atomskog oružja (v. *Nuklearno oružje*). Stoga postrojenja za obogaćivanje uranijuma spadaju u najosetljiviju fazu predreaktorskog dela nuklearnog gorivnog ciklusa, s velikim ograničenjima i zabranom prenosa tehnologije iz zemalja koje ih poseduju.

Razvijeno je nekoliko postupaka za izotopsku separaciju uranijuma. To su uglavnom fizičke metode i postupci koji iskoristavaju razliku masa izotopa ^{235}U i ^{238}U . Za separaciju najčešće se upotrebljava gas uranijum-heksafluorid (UF_6). U nekim postupcima taj se gas razređuje vodonikom ili helijumom, iako postoje metode koje rade s parama uranijuma.

Zajednička je karakteristika svih procesa za izotopsko obogaćivanje uranijuma relativno nizak efekat separacije u jednom stepenu. Zbog toga je za obogaćivanje uranijuma potrebna serija više sukcesivnih stupnjeva (kaskada), a paralelnim se vezivanjem separacionih elemenata obezbeđuje željeni kapacitet postrojenja.

Između stepena obogaćivanja uranijuma, potrebnog prirodnog uranijuma i sadržaja ^{235}U u ostatku nakon separacije

postoji određeni odnos. Naime, ako se želi da u ostatnom materijalu (osiromašenom uranijumu) ostane što niža koncentracija ^{235}U (ona može biti 0,05–0,30%), potrebno je više separacionog rada, ali je potrebljano manje prirodnog uranijuma. I obrnuto, ako u ostatnom materijalu ostaje više ^{235}U , potrebno je manje separacionog rada, ali zato više prirodnog uranijuma. Optimalna koncentracija ^{235}U u osiromašenom uranijumu zavisi od cena prirodnog uranijuma i troškova separacionog rada.

Najveća postrojenja za gasnu difuziju postoje u SAD, SSSR i Francuskoj. Poslednjih godina izrađeno je postrojenje za separaciju pomoću centrifuga (holandsko-britansko-nemačka firma Urenco). Sem toga, u SAD se gradi postrojenje s centrifugama, koje treba izgraditi u osam etapa do 1994. godine.

Metoda elektromagnetske separacije. Prvi pokušaj razdvajanja izotopa uranijuma bio je izveden metodom elektromagnetske separacije, pri čemu su jonizovani atomi uranijuma ubrzavani u električnom polju, a zatim dejstvom homogenog magnetnog polja kretani po krivini obrnuto сразмерноj masi jona. Tako se snop jona razdvaja na onoliko delova koliko je bilo izotopa. Na kolektoru postavljenom na putu čestica sakupljali su se na različitim mestima različiti izotopi, tako da su se odjednom, u jednom stepenu, izotopi separisali. Budući da se celokupna masa materijala morala jonizovati i propustiti kroz elektromagnetski separator, pokazalo se da je potrebno mnogo energije, te da je ta metoda neekonomična u odnosu na metodu gasne difuzije, pa se od nje odustalo u industrijskoj primeni.

Metoda gasne difuzije zasniva se na činjenici da je srednja energija termičkog kretanja iz molekula ista bez obzira da li molekuli sadrže lakši ili teži izotop uranijuma. Budući da će molekuli koji sadrže lakši izotop ^{235}U imati veću brzinu, kroz membranu s malim rupicama prolaziće više tih molekula, jer će češće udarati u membranu i s više pokušaja ostvariti i više prolaza kroz rupice membrane. Da bi prolaz čestica bio ostvaren samo udaranjem u membranu, a ne zbog gasne difuzije, mora prečnik rupice da bude desetak puta manji od srednjeg slobodnog puta molekula gasa koji uz atmosferski pritisak iznosi $\sim 10^{-5}$ cm.

Budući da molekuli gasa na istoj temperaturi imaju jednakе kinetičke energije, vredi relacija

$$\frac{m_{235} v_{235}^2}{2} = \frac{m_{238} v_{238}^2}{2}, \quad (1)$$

gde je m masa, a v brzina molekula sa ^{235}U i ^{238}U . Koncentracijski faktor α jednak je odnosu brzina, pa je

$$\alpha = \frac{v_{235}}{v_{238}} = \left(\frac{m_{238}}{m_{235}} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Zapravo se radi o molekulima gasa UF_6 , pa teoretski koncentracijski faktor iznosi

$$\alpha = \left(\frac{238 + 6 \cdot 19}{235 + 6 \cdot 19} \right)^{1/2} = 1,0043. \quad (3)$$

Stvarni je koncentracijski faktor $\alpha \approx 1,002$.

Ako se sa y_p označi odnos broja lakših i broja težih atoma u prirodnom uranijumu, nakon prolaza kroz prvi stepen difuzije odnos će lakših i težih atoma iznositi

$$y_1 = \alpha y_p. \quad (4)$$

Nakon prolaza kroz drugi stepen taj odnos iznosi

$$y_2 = \alpha y_1 = \alpha^2 y_p, \quad (5)$$

a nakon n stepena

$$y_n = \alpha^n y_p. \quad (6)$$

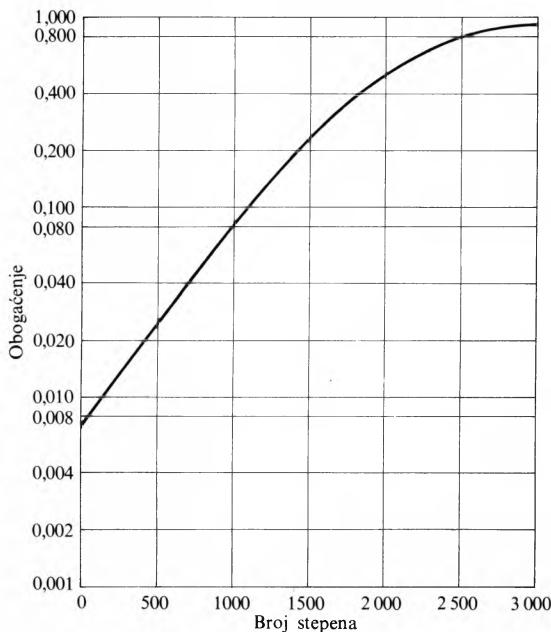
Uobičajeno je da se obogaćenje prikazuje kao udio ^{235}U u ukupnom uranijumu. Ako se taj udio označi sa x , međusobni je odnos veličine y (odnos težih i lakših atoma) i veličine x dan relacijom

$$y = \frac{x}{1-x}, \quad (7)$$

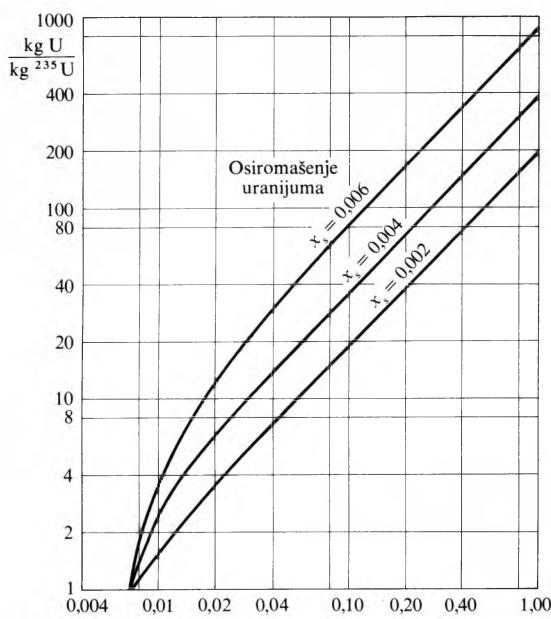
pa je, prema relaciji (6), potreban broj difuzionih stepena

$$n = \frac{1}{\ln \alpha} \ln \frac{x_b(1-x_p)}{x_p(1-x_b)} = \frac{1}{1-\alpha} \ln \frac{x_b(1-x_p)}{x_p(1-x_b)}, \quad (8)$$

gde je x_b udeo ^{235}U u obogaćenom, a x_p udeo ^{235}U u prirodnom uraniju. Zbog malog koncentracionog faktora potrebno je vrlo mnogo difuzionih stepena već i za malo obogaćenje (sl. 4).



Sl. 4. Potreban broj difuzionih stepena za obogaćivanje uranijuma uz koncentracioni faktor $\alpha = 1,0025$



Sl. 5. Potrebna količina prirodnog uranijuma za proizvodnju 1 kg obogaćenog uranijuma za različito osiromašenje uranijuma

Ukupan dotok prirodnog uranijuma P u postrojenje za obogaćivanje mora biti jednak zbroju količina obogaćenog B i osiromašenog uranijuma S koji napuštaju postrojenje, pa je

$$P = B + S. \quad (9)$$

To vredi i za količine ^{235}U , pa mora da vredi relacija

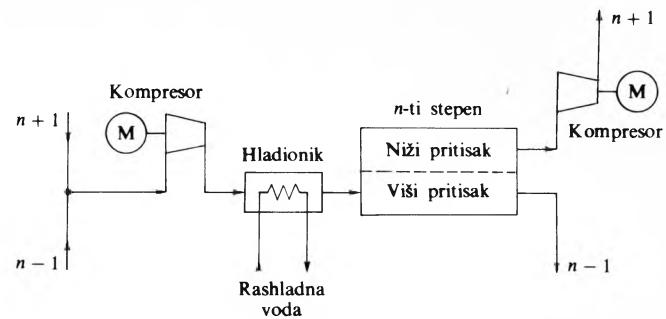
$$x_p P = x_b B + x_s S, \quad (10)$$

gde je x_s udeo ^{235}U u osiromašenom uranijumu. Iz jednačina (9) i (10) dobija se

$$P = B \frac{x_b - x_s}{x_p - x_s}. \quad (11)$$

Iz te relacije može se izračunati potrebnii prirodni uranijum po kilogramu obogaćenog uranijuma (sl. 5).

Da bi se osigurao protok gase kroz komore s membranama, mora se kompresorima održavati niži pritisak s jedne strane membrane i viši pritisak s druge strane (sl. 6). Gas iz pretvodnog stepena ($n-1$) i osiromašeni gas iz sledećeg stepena ($n+1$) sabija se i hlađi da bi se odvela toplota sabijanja pre uvođenja u difuzionu komoru.



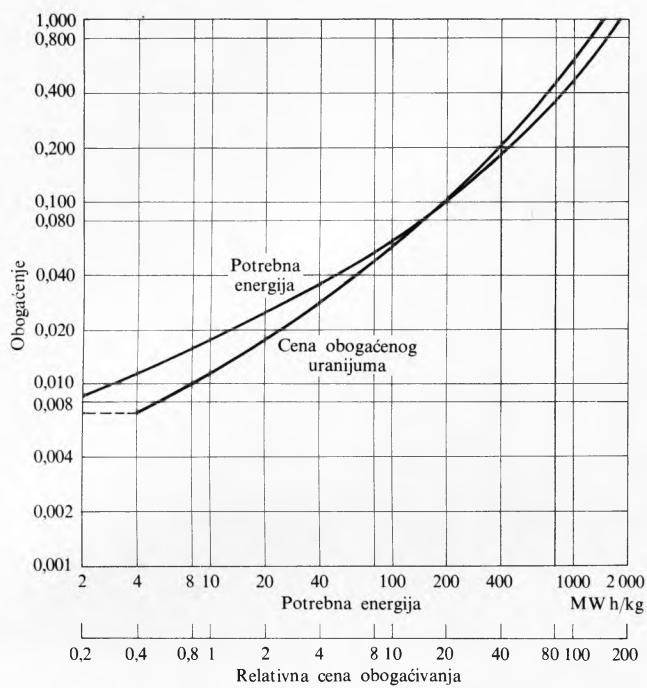
Sl. 6. Stepen kaskade za gasnu difuziju

Zbog potrebnog velikog broja stepena, velikog protoka gasa, velikih površina membrana, velike snage za kompresiju gasa i složene tehnologije membrana, takva su postrojenja velika i složena (sl. 7), pa je ekonomski opravdano graditi samo postrojenja velikog kapaciteta. Za obogaćivanje uranijuma potrebne su velike količine energije, a cena je obogaćenog uranijuma visoka (sl. 8).



Sl. 7. Procesni deo postrojenja za difuzionu separaciju uranijuma

Metoda gasnih centrifug iskorišćuje centrifugalne sile da bi se ostvarila separacija izotopa. Gas UF_6 okreće se u rotoru velikom brzinom, pri čemu se ostvaruje i kaskadni efekat u protivstupnom toku, koji još zavisi i od prečnika i dužine rotora. Rotor je smešten unutar omotača koji istovremeno služi kao zaštitu pri lomu rotora, a održava se i u vakuumu da bi se smanjilo trenje zbog obrtanja rotora. Gas se u rotor dovodi i odvodi aksijalno s gornje strane centrifuge.



Sl. 8. Potrebna električna energija za obogaćivanje uranijuma i relativne cene obogaćenog uranijuma

Moć separacije centrifuge teorijski je srazmerna četvrtom stepenu obimne brzine rotora. Pronađeni su materijali koji su mehanički čvrsti i hemijski stabilni.

Centrifuge imaju mnogo veću moć razdvajanja po stepenu od gasne difuzije, pa je dovoljno desetak centrifuga povezanih u seriju da bi se dobio obogaćeni uranijum sa 3% ^{235}U . Međutim, budući da je protok kroz centrifugu malen, potrebitno je staviti više centrifuga paralelno, tako da u kaskadi ima i do hiljadu mašina. Zapravo, postrojenje za centrifugalnu separaciju sastavljeno je od više autonomnih kaskada, pa se postrojenje može graditi u etapama, što nije moguće kad se primenjuje gasna difuzija.

Postrojenja s centrifugama (sl. 9) troše relativno malo energije. Potrošnja energije iznosi $\sim 4\%$ od one energije potrebne

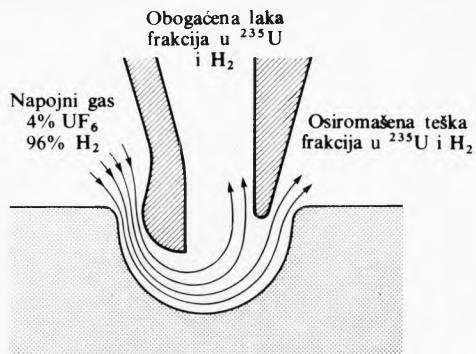


Sl. 9. Procesni deo postrojenja za centrifugalnu separaciju uranijuma

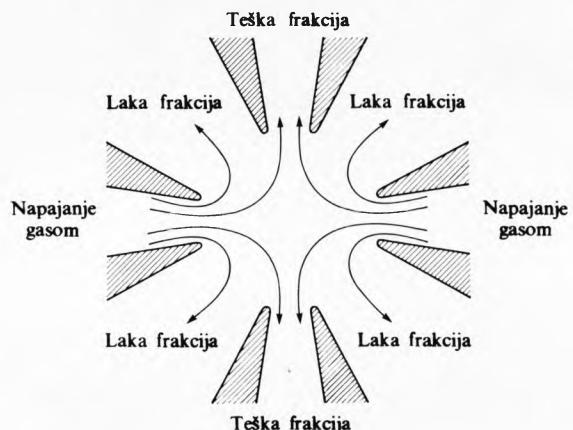
za pogon difuzionog postrojenja ($\sim 80 \text{ kWh/kg}$ separacionog rada). Usavršavanje centrifuga još nije završeno.

Aerodinamički postupci zasnivaju se na izdvajanju izotopa pomoću pogodno usmerenih gasnih mlazova.

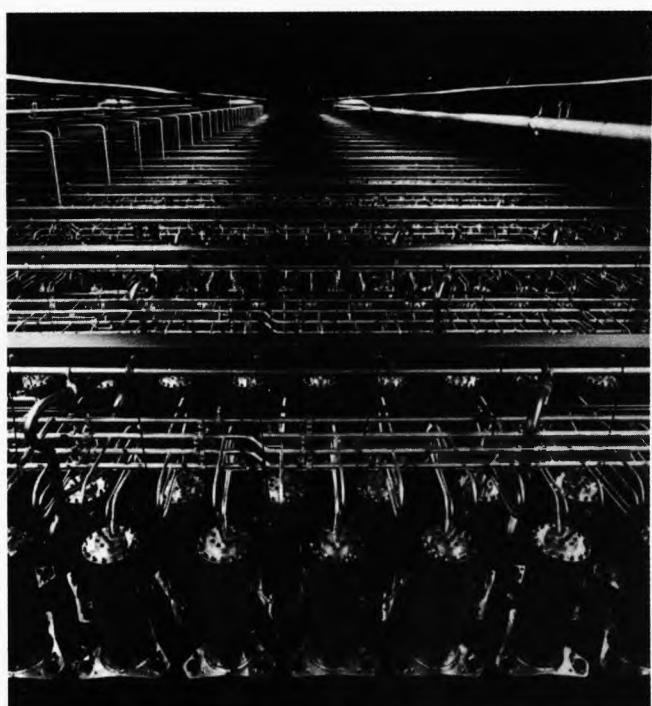
Orientacija mlaza ostvaruje se pomoću jedne (sl. 10) ili više pregrada (sl. 11). Gas UF_6 razređen je lakis nosivim gasom, vodonikom ili helijumom, što omogućuje povećanje brzine mlaza pri određenoj razlici pritisaka, čime se povećava i separacioni faktor na $1,015 \cdots 1,030$.



Sl. 10. Presek separacione mlaznice



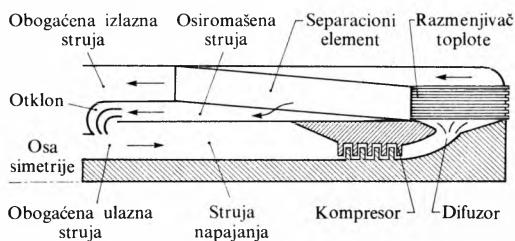
Sl. 11. Presek sistema mlaznica sa suprotnim mlazovima



Sl. 12. Kaskade nemačkog probnog postrojenja u Almelou

Proces pomoću separacione mlaznice ili *Beckerov postupak* razvijen je u SR Nemačkoj (sl. 12), a zasnovan je na principu centrifugalne sile koja deluje na zakriviljeni mlaz smeše gasova. Relativno visoki separacioni faktor po stepenu dozvoljava gradnju postrojenja za obogaćivanje uz niske specifične troškove i uz umerenu potrošnju energije. Prvo demonstraciono postrojenje biće sagrađeno u Brazilu i biće pušteno u pogon 1988. godine. Puni kapacitet postrojenja iznosiće oko 300000 jedinica separacionog rada (jsr) godišnje.

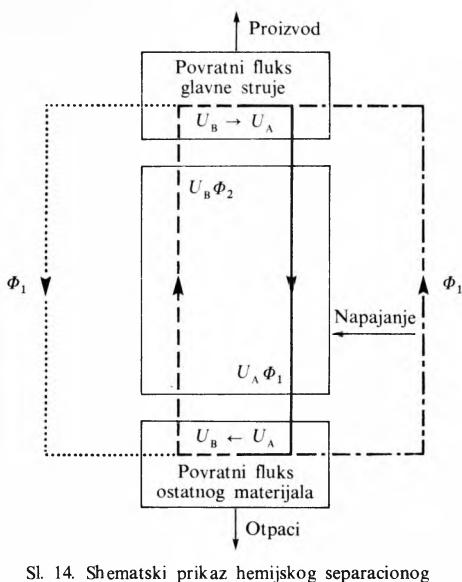
Vrtložni sistem *helikon* razvijen je u Južnoafričkoj Republici. Separacioni element je centrifuga sa stacionarnim zidovima (sl. 13). Faktor separacije je dosta visok i iznosi 1,025–1,030, ali je količina obogaćene frakcije mala i iznosi samo 5% od ukupnog napajanja.



Sl. 13. Presek helikon-modula

Postupak hemijske izmene često primenjivan za separaciju izotopa lakih elemenata, počeo se za obogaćivanje uranijuma razvijati u Francuskoj od 1968. god.

Za hemijsku izmenu iskorišćuje se razlika brzine hemijskih reakcija prisutnih izotopa. Vrednost koeficijenta separacije zavisi od izabranih jedinjenja, ali je u načelu vrlo malen, reda veličine 10^{-3} . Prvi je uslov za efikasnu primenu da se nađu jedinjenja koja daju najbolji mogući izotopski efekat. Drugi je uslov da se ostvare suksesivne ravnoteže, da bi se multiplicirao osnovni faktor obogaćenja, pa je stoga potrebno povezati mnogo elemenata u seriju. Treći je uslov da ukupna kinetika, koja obuhvata ne samo kinetiku hemijske reakcije već i kinetiku međusaznog transporta, mora da bude prihvatljiva. To su prethodni uslovi da bi postupak hemijske izmene bio primenljiv na separaciju uranijuma. Da bi se postigla hemijska izmena, upotrebljavaju se neuobičajena jedinjenja uranijuma, od kojih je jedno u vodenoj, a drugo u organskoj tečnosti (sl. 14).

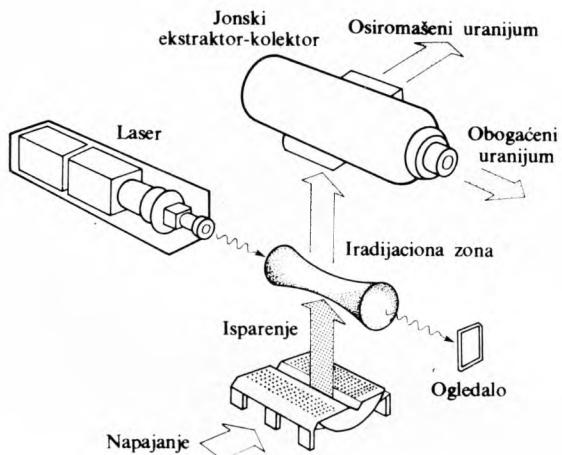


Sl. 14. Shematski prikaz hemijskog separacionog elementa

Do sada nije sagrađeno nijedno industrijsko postrojenje, ali postoji prototipni uređaj i dva probna postrojenja. Osnov izotopske izmene čine pulsne kolone prečnika ~ 1 m i visine ~ 20 m sa separacionom moći od ~ 3000 jsr/god. Moduli bi imali kapacitet od ~ 200000 jsr/god.

^{235}U bi se obogaćeni uranijum sa $3\cdots 4\%$ ^{235}U , a osiromašeni uranijum sadržavao bi $0,15\cdots 0,30\%$ ^{235}U . Potrošnja energije iznosila bi oko četvrtinu od one koja se utroši u difuzionom postrojenju.

Nove metode. Da bi se smanjili troškovi i obezbedilo zadovoljenje potreba za obogaćivanjem, razvijaju se nove metode: separacioni proces s plazmom, laserski izotopni proces i molekularni laserski proces.



Sl. 15. Shema laserske separacije izotopa

Te se metode zasnivaju na činjenici da uranijumovi izotopi selektivno apsorbuju zračenje na različitim energetskim razinama. Kada se uranijumovi izotopi nađu na različitim energetskim razinama, prolaskom kroz magnetsko polje različito skreću i sakupljaju se u različitim koletorima. U separacionom procesu s plazmom jonska ciklotronska rezonancija energetski pobuđuje ^{235}U , dok u laserskom procesu atomskih para laser pobuđuje atom ^{235}U (sl. 15). U oba procesa metalni je uranijum u obliku pare ili plazme. U molekulском laserskom procesu takođe laser pobuđuje ^{235}U , ali je radni fluid gas UF_6 . Na razvoju takvih ili sličnih metoda separacije danas se mnogo radi, ali se rezultati istraživanja uglavnom ne objavljuju.

GORIVNI ELEMENTI I SKLOPOVI OD URANIJUMA

Osobine uranijuma. Prirodni ili obogaćeni uranijum kao nuklearno gorivo upotrebljava se u obliku čistog ili lako legiranog metalnog uranijuma u obliku oksida ili karbida.

Izbor vrste goriva zavisi od vrste nuklearnog reaktora i njegove namene, od uslova hlađenja goriva u reaktoru i stepena izgaranja.

Metalni se uranijum upotrebljava u prvom razdoblju građenja nuklearnih reaktora. Metalni uranijum, naime, ima veliku gustinu i relativno dobru toplotnu provodnost u odnosu na druga jedinjenja. Kasnije se njegova upotreba sve više ograničava zbog slabih mehaničkih osobina i male otpornosti na oštećenja zračenjem.

Jedno od ograničenja primene metalnog uranijuma jest njegova pojava u tri kristalne faze: α , β i γ . U α -fazi kristalna je struktura uranijuma ortonombična, a već na temperaturi $\sim 660^\circ\text{C}$ prelazi u β -fazu, tako da se samo do te temperature metalni uranijum može upotrebiti kao gorivo.

Kristali α -faze pri hlađenju i grejanju, a i zbog zračenja, imaju veliku distorziju. Pri tom su karakteristične dve pojave: dimenzionalna nestabilnost, kada se gustina ne menja, i bubrenje, praćeno promenom gustine, što se događa na povišenim temperaturama (iznad 450°C).

Da bi se te pojave izbegle, izrađuju se sitnozrnaste strukture postupkom metalurškog praha. Tako se delimično kompenzuju dimenzione promene u sva tri kristalografska pravca. Tako pripremljeno gorivo ima bolje osobine. To vredi i za gorivo koje se dobija naglim hlađenjem β -faze, ali tada u gorivu ostaje nešto malo nečistoća.

Da bi se izbegla promena dimenzija u metalnom uraniju, legira se sa hromom, molibdenom, niobijumom ili cirkonijumom. Sem cirkonijuma, ostali elementi imaju veliki presek za zahvat termičkih neutrona, pa njihov deo u leguri sme biti vrlo malen. Legure uranijuma s aluminijumom upotrebljavaju se u istraživačkim reaktorima. Te legure imaju dobru toplotnu provodnost, a obično s aluminijumskom košuljicom čine sendvić s gorivnim slojem u sredini.

Materijali koji se dobijaju sinterovanjem na visokim temperaturama praha oksida, karbida i nitrida najčešće se upotrebljavaju kao goriva u nuklearnim energetskim reaktorima. Od svih oksida najviše se upotrebljava uranijum-dioksid, kojemu je gustina $10,97 \text{ g/cm}^3$. Nije svaki prah uranijum-dioksida pogodan za sinterovanje, pa se posebnim postupcima povećava njegova aktivna površina da bi se postigao željeni stepen sinterovanja. Sinteruje se na temperaturi do 1700°C , obično u atmosferi vodonika i traje nekoliko sati.

Sinterovani uranijum-oksid ima visoku temperaturu topanja (2880°C) i ne podleže faznim promenama kao metalni uranijum, pa se može iskoristiti kao nuklearno gorivo i na povišenim temperaturama. Otporniji je na radijaciona oštećenja od metalnog uranijuma. Oporan je i na koroziju, s cirkonijumom reaguje na temperaturi višoj od 800°C , s nerđajućim čelikom višoj od 600°C , a s aluminijumom višoj od 500°C . Zbog niske toplotne provodljivosti pri velikom toplotnom opterećenju u gorivnim elementima nastaju visoki temperaturni gradijeni i nedozvoljeno visoke temperature u njihovu središtu. Drugi je nedostatak relativno niska gustoća, tako da se uranijum-dioksid od prirodnog uranijuma ne može upotrebiti kao nuklearno gorivo, jer se zbog niske gustoće teško može ostvariti kritična masa za održavanje lančane reakcije (v. *Nuklearni reaktori*).

U visokotemperaturnim reaktorima našao je primenu uranij-monokarbidi (UC). Njegova je gustoća $13,63 \text{ g/cm}^3$ i ima bolju toplotnu provodljivost od uranijum-dioksida, ali mu je temperatura topanja nešto niža (2587°C). Dobija se livenjem ili sinterovanjem. Kao nuklearno gorivo upotrebljava se i zajedno s plutonijum-monokarbidom.

Dispergovano nuklearno gorivo nalazi primenu u visokotemperaturnim reaktorima. To je nuklearno gorivo u obliku keramičkih čestica, obloženih nepropustljivim slojem i dispergovano u matrici. Matrica može biti metalna, pa se takvo gorivo zove kermet (keramika-metal), a može biti neka keramika, najčešće silicijum-karbidi ili aluminijum-oksidi. Kao matrica može poslužiti moderatorski materijal (cirkonijum-hidrid, berilijski-oksidi ili grafit), pa se mogu dobiti različite kombinacije čvrstih homogenih i heterogenih reaktorskih sistema. Konstrukcija takvih tipova reaktora i postupak izrade gorivnih elemenata vrlo su složeni i nisu do sada našli širu primenu.

Gorivni elementi. Najviše do sada izgrađenih nuklearnih reaktora imaju nuklearno gorivo u obliku gorivnih elemenata. U eksperimentalnim homogenim nuklearnim reaktorima gorivo je rastvoreno u moderatoru. Dispergovano nuklearno gorivo

ravnomerno raspoređeno u čvrstom moderatoru upotrebljava se u nekim tipovima visokotemperaturnih reaktora.

Ima više razloga za oblikovanje goriva u gorivne elemente. Pre svega, fisioni proizvodi ostaju u njima i ne raznose se po reaktorskom jezgru i rashladnom sredstvu. Fisioni proizvodi takođe ne oštećuju radijaciono ostale materijale u reaktoru, a i ne raznose se po ostalim komponentama i reaktorskim sistemima. Gorivni elementi se oblikuju tako da se toplota razvijena u njima odvodi na najpogodniji način. Najčešće se spajaju u složenje gorivne sklopove. U nekim nuklearnim reaktorima kanalnog tipa i moderator je deo gorivnog sklopa.

Izbor nuklearnog goriva sa stanovišta nuklearnih procesa ograničen je nizom uslova koji moraju biti zadovoljeni. Energetski nuklearni reaktori hlađeni gasom i moderirani grafitom s prirodnim uranijumom kao gorivom moraju imati jako koncentrisani uranijum, dakle, metalni uranijum. Ako je moderator teška voda, može prirodni uranijum biti u obliku uranijum-dioksida. Konstrukcionalni materijal gorivnog elementa mora imati mali udarni presek apsorpcije neutrona. Pored toga, gorivni element mora bez oštećenja obezbediti izgaranje goriva u reaktoru da se lako može zamjeniti posle izgaranja i mora biti dovoljno otporan da zadrži proizvode fisije do prerade ozračenog goriva.

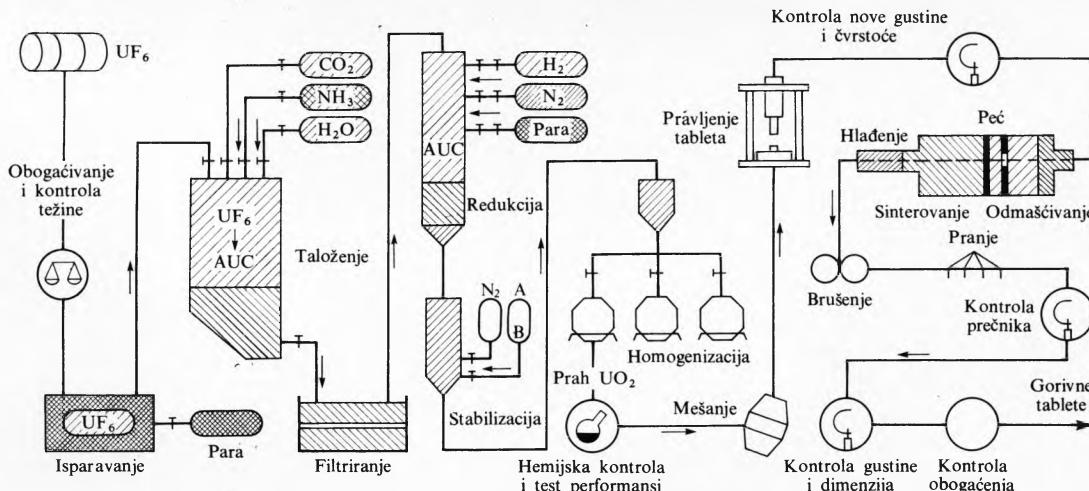
Sa stanovišta termičkih osobina gorivni elementi moraju biti postojani na radnim temperaturama, kako u normalnim uslovima hlađenja, tako i u uslovima prinudnog hlađenja reaktora, kada je protok rashladnog sredstva ograničen. Promene temperaturu u gorivnim elementima ne bi trebalo da utiču na promenu njihova geometrijskog oblika, a konstrukcija treba da bude takva da se ne deformišu u toku rada. Gorivni elementi moraju biti otporni na koroziju.

Gorivni elementi za lakovodne reaktore sadrže nuklearno gorivo u obliku sinterovanih cilindričnih tableta. Ako se upotrebljava samo uranijum, sadržaj izotopa ^{235}U iznosi $2\ldots4\%$. Kao polazni materijal za dobijanje uranijum-dioksida služi UF_6 .

Postoji nekoliko postupaka za konverziju UF_6 u prah uranijum-dioksida, pogodan za sinterovanje. U SAD se pretežno primenjuje postupak pomoću amonijum-diuranata, dok je u SR Nemačkoj razvijen postupak pomoću međuproizvoda amonijum-uranil-karbonata (AUC) (sl. 16) kojim se dobija prah veće čistoće i koji se bolje sinteruje.

Sinterovane tablete od uranijum-dioksida izrađuju se različitim postupcima, što zavisi od kvaliteta praha. Često je za izradu granulata potrebno prethodno pretkompaktiranje, mlevenje i prosejavanje. Za postupak AUC te prethodne radnje nisu potrebne, pa se prah odmah može presovati mehaničkim ili hidrauličkim presama. Predsinterovanjem se dobija željena gustoća presovanih tableta, a potom se sinteruju u kontinualnim pećima u atmosferi vodonika, na temperaturi od 1700°C . Tablete u visokotemperaturnoj zoni ostaju dva do tri časa.

Precnik tableta koriguje se (tolerancija $\pm 10 \mu\text{m}$) brusilicama bez centriranja. Posle toga se tablete suše, a oštećene tablete



Sl. 16. Shema postrojenja za konverziju UF_6 u UO_2 i fabrikaciju tableta od UO_2

odvajaju za ponovnu izradu. Sinterovane se tablete ispituju pre nego što se ubace u košuljice. Ispituje se čistoća, sadržaj uranijuma, odnos kiseonika prema uraniju, sadržaj vlage, gusina, dimenzije i mikrostruktura poliranjem površina tableta.

Gorivo se oblaže košuljicom da bi se zaštitilo od hemijskih i mehaničkih oštećenja, a naročito da bi se sprečilo prodiranje fisionih proizvoda iz goriva u rashladni i druge sisteme nuklearnog reaktora.

Nerđajući čelik i legure cirkonijuma najpogodniji su materijal za košuljice gorivnih elemenata lakovodnih reaktora. Zbog vrlo niskih apsorpcionih karakteristika za termičke neutrone legure cirkonijuma najčešće se upotrebljavaju u teškovodnim reaktorima. One imaju veliku korozionu otpornost, i dobru potojanost u reaktoru.

Za lakovodne reaktore košuljice su vučene bešavne cevi od legure cirkonijuma. Pre upotrebe sve se cevi ispituju ultrazvukom da bi se utvrdilo da nemaju pukotinu i ogrebotinu, a zatim se kontroliše debljina zidova, te spoljašnji i unutrašnji prečnik (sl. 17).

Posle završenih ispitivanja košuljica se na jednom kraju zavaruje čepom. Cevi se pune tabletama UO_2 . Dužina stupca tableta mora biti u granicama tolerancije. Potom se gorivni elementi zatvaraju drugim čepom i pune helijumom. Posle rendgenskog ispitivanja zavarenih prstenova na čepovima ispituje se zaptivenost gorivnih elemenata na propuštanje helijuma u vakuumskom sudu.

Reaktorsko jezgro reaktora s vodom pod pritiskom, snage oko 1000 MW, sadrži oko 200 sklopova gorivnih elemenata. Obogaćenje goriva u prvom jezgru iznosi $2,2\cdots 3,2\%$ ^{235}U , dok za ostala punjenja sadržaj ^{235}U iznosi 3%.

Srednja je gustina toplotnog fluksa $\sim 57 \text{ W/cm}^2$, opterećenje reaktorskog jezgra $\sim 87 \text{ kW/dm}^3$, a srednje specifično toplotno opterećenje goriva $\sim 35 \text{ kW/kg}$.

Tipičan gorivni sklop sadrži 236 gorivnih elemenata u kvadratičnoj rešetki. Tablete su visoke 10 mm, srednje gustine $10,35 \text{ g/cm}^3$. Elementi su ispunjeni helijumom pod pritiskom od $3,0 \text{ MPa}$.

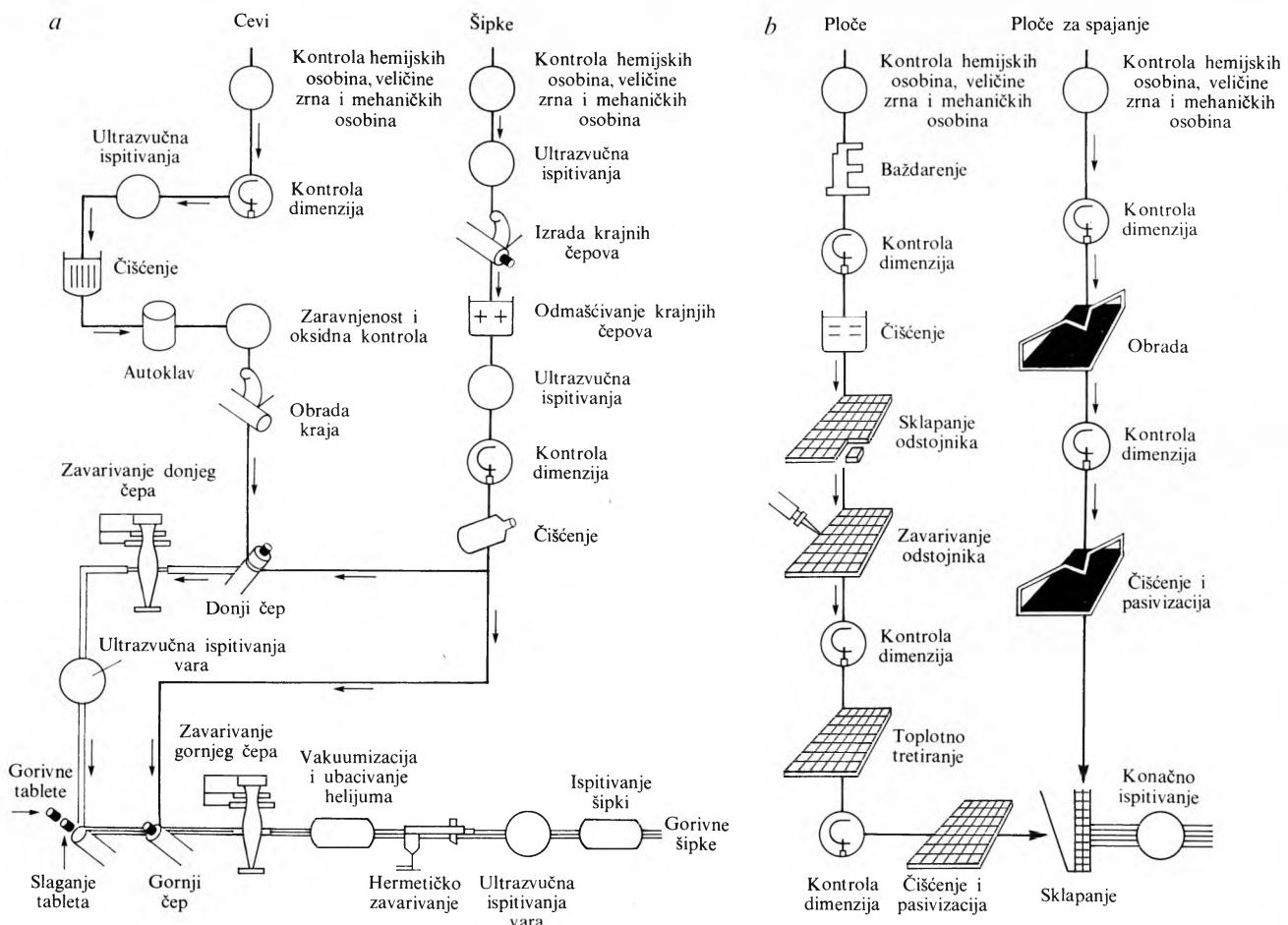
Tipični sklop ima sledeće karakteristike: ukupna dužina 4905 mm, presek sklopa $230 \times 230 \text{ mm}$, broj mesta za gorivne elemente i kontrolne štapove (16×16) 256, broj gorivnih elemenata 236, broj vođica za kontrolne štapove 20, broj odstojnika 9, ukupna masa 830 kg, materijal za košuljicu legura cirkonijuma, spoljni prečnik košuljice 10,75 mm i debljina zida košuljice 0,72 mm.

Gorivni elementi drže se pomoću opruga u nosećoj strukturi i mogu se poduzno slobodno istezati. Noseća struktura sastoji se od devet mreža držača odstojnika koji su ravnometerno raspoređeni od glave do stopala sklopa (sl. 18), a zavreni su zajedno sa 20 cevi vođica (sl. 19) kojima prolaze kontrolni štapovi koji se s gornjeg dela poklopca reaktorskog suda preko magnetnog pogona zajedno pokreću.

Reaktorsko jezgro reaktora s ključalom vodom snage 1000 MW ima više od 500 sklopova gorivnih elemenata ukupne mase više od 100 t. Aktivna je visina reaktorskog jezgra 366 cm. Obogaćenje prvog jezgra iznosi oko $2,26\%$ ^{235}U , a ostalih $2,66\%$. Gustina toplotnog toka iznosi $\sim 50 \text{ W/cm}^2$, opterećenje u jezgru je $\sim 50 \text{ kW/dm}^3$, a srednje specifično opterećenje goriva $\sim 22 \text{ kW/kg}$ urana.

Rad reaktora reguliše se s više od 100 kontrolnih ukrštenih ploča koje klize između kasete sklopova gorivnih elemenata koji se s donje strane reaktorskog suda uvlače u reaktor. Postoje još i dodatni limovi kao neutronski otrov za kompenzaciju viške reaktivnosti u prvom jezgru, ali se ovi posle izmene prve šarže goriva uklanjaju.

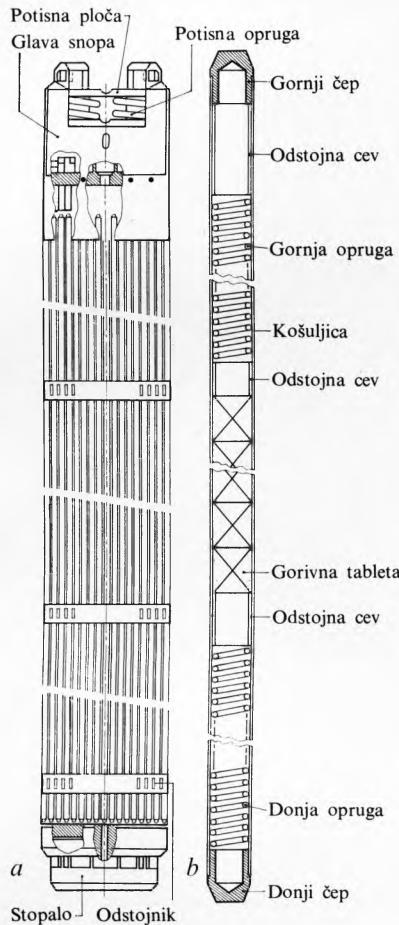
Gorivni sklop sastoji se od 49 gorivnih elemenata raspoređenih u sedam redova obloženih kasetom od legure cirkonijuma, veličine $230 \times 230 \text{ mm}$.



Sl. 17. Shema proizvodnje gorivnih elemenata (a) i sklopova gorivnih elemenata (b)

nijuma. Košuljice gorivnih elemenata takođe su od legure cirkonijuma, a po dužini od 3660 mm ispunjene su tabletama uranijum-dioksida.

Tipični sklop ima sledeće karakteristike: ukupna dužina 4470 mm, broj gorivnih elemenata (7×7) 49, ukupna masa 277 kg, spoljni prečnik košuljice 14,3 mm, debljina zida košuljice 0,81 mm, prečnik tableta 12,37 mm i gustina prvog jezgra 10,42 g/cm³.



Sl. 18. Sklop gorivnih elemenata (a) i gorivni element (b) za reaktore s vodom pod pritiskom

Gorivni element sastavljen je od tableta sinterovanog uranijum-dioksida koje su ubaćene u košuljice od legure cirkonijuma. Košuljica je s obe strane zatvorena čepovima koji hermetički zatvaraju košuljicu. Za vreme rada reaktora u gornjem, za to predviđenom prostoru elemenata sakupljaju se fisioni gasoviti proizvodi.

Svaki gorivni element obložen je kasetom od legure cirkonijuma koja deli tok rashladne tečnosti na sklopove gorivnih elemenata. Svaka kaseta ima stopalo s vođicom koja upada u za nju određeno mesto na donjem delu reaktorskog suda. Kasetama se za gornju rešetkastu ploču pričvršćuje zavrtnjima. Kasetama se osigurava vođenje kontrolnih ploča koje se kreću između sklopova. Četiri sklopa gorivnih elemenata s kontrolnom pločom sačinjavaju kontrolnu ćeliju. Kontrolne se ploče sastoje od srednjeg centralnog stuba i četiri krila. Na svako krilo su zavarene ćelične cevi ispunjene tabletama od bor-karbida za regulaciju rada reaktora. Brzina je podešavanja tih cevi 3 cm/s.

Gorivni elementi za visokotemperaturne reaktore. U visokotemperaturnim reaktorima uranijum i torijum (kao oplodni materijal) u obliku čestica prečnika manjeg od 0,8 mm ugrađeni su u grafitnu matricu. Budući da je grafitna matrica porozna, a nastali radioaktivni fisioni proizvodi ne bi difundovali u rashladni gas, čestice goriva su prevučene sa tri različite prevlakе od pirolitičkog ugljenika (PyC) koji ne propušta gasove. Unutrašnja prevlaka je napravljena od sloja koji je vrlo porozan

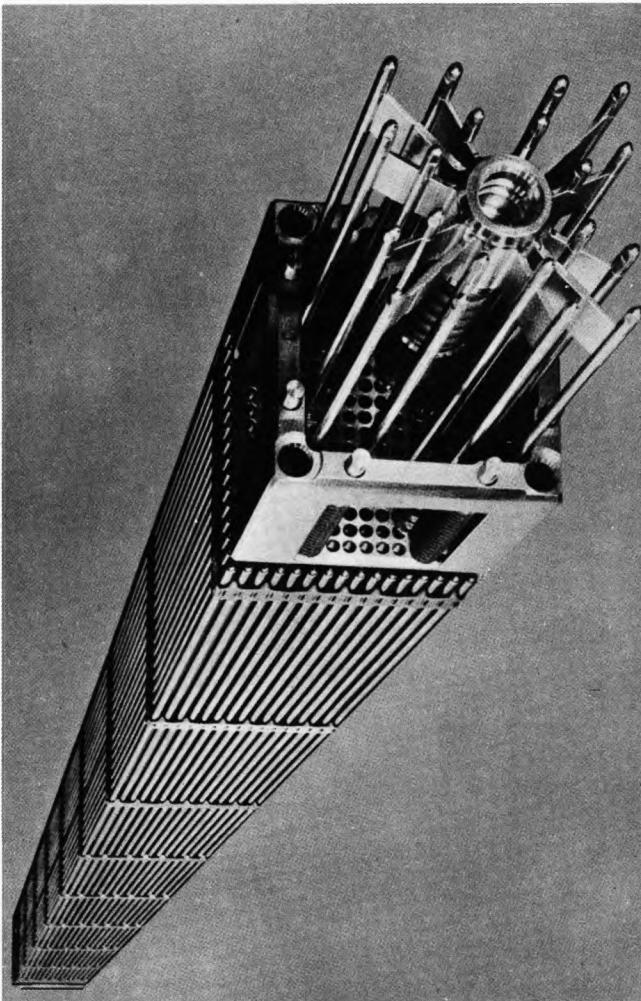
da bi u sebe mogao primiti gasovite fisione proizvode, dok su druga dva spolja sloja takva da mogu izdržati pritisak gasovitih fisionih proizvoda koji može da dostigne i 10,0 MPa. Pored toga spoljni slojevi ne smiju da popucaju zbog bubrežnja jezgra koje nastaje zbog visokih doza zračenja, a moraju biti postojani. Takvi izotropni slojevi nastaju pirolizom ugljen-dioksida na temperaturama 1300–2000 °C kada se gorivne čestice u lebdećem sloju odvoje jedne od drugih. Sastav gasa, temperatura i pogonski uslovi lebdećeg sloja utiču na kvalitet pojedinih slojeva pirolitičkog ugljenika.

Na visokim temperaturama na kojima nastaju slojevi ne može se u potpunosti izbeći da uranijum i torijum u postupku oblaganja ne difunduju u te slojeve.

Kontaminacija slojevitih omotača uranijumom treba da bude što je moguće manja kako se ne bi povećala aktivnost rashladnog gasa. Smanjenje kontaminacije uranijumom može se izbeći pirolizom propana koji na temperaturi između 1200 i 1350 °C stvara izotropne i gусте slojeve pirolitičkog ugljenika koji su postojani u uslovima zračenja.

U toku razvojnih istraživanja goriva za istraživački reaktor AVR u SR Nemačkoj i za prototipni reaktor THTR snage 300 MW izrađene su optice spoljnog prečnika od 6 cm. Grafitna matrica u kojoj se nalazi gorivo ima prečnik od 5 cm, a obložena je grafitnom oblogom bez goriva. Element za reaktor AVR ima 1,1 g obogaćenog goriva sa 93% ^{235}U i oko 5 g torijuma, dok element za reaktor THTR ima 10 g torijuma.

Gorivni elementi u nuklearnoj elektrani Fort St. Vrain u SAD imaju oblik šestorostrane grafitne prizme širine 36 cm i dužine ~80 cm. Gorivni elementi su od grafitne matrice u kojoj su čestice goriva koji se ubacuju u cilindrične otvore koji služe kao kanali za hlađenje. Reaktor u elektrani Fort St. Vrain



Sl. 19. Sklop gorivih elemenata za reaktor s vodom pod pritiskom

prvi je komercijalni visokotemperaturni reaktor koji je krajem 1981. godine radio s punom snagom i dosegao efikasnost između 38 i 39%. Izlazna je temperatura helijuma iz reaktora 767°C , a pritisak 4,8 MPa. Snaga je elektrane 300 MW.

Zahvaljujući visokom stepenu sigurnosti, elektrana Fort St. Vrain pokazala je dobre osobine. Gorivni elementi mogu izdržati visoke temperature, tako da bi pogonsko osoblje imalo dovoljno vremena za intervenciju i kad bi jezgro reaktora ostalo bez prinudne cirkulacije helijuma.

Za rad na visokim temperaturama (višim od 800°C) reaktori s kuglama imaju prednosti, jer se u kugličnim elementima maksimalna temperatura gorivnih čestica može održati na nižoj razini nego kad su elementi u bloku.

Kugle gorivnih elemenata izrađuju se od smeše različitih grafita, praha fenolne smole, koja služi kao vezivo, i obloženih čestica. Smeša se hladno presuje pod velikim pritiskom u gumene matrice. Jezgro s gorivom oblaže se grafitnom ljskom debljine 0,5 cm, koja se takođe upresuje i koksuje na temperaturi od 800°C . Matrica se elementa zatim grafitira da bi se dobila velika čvrstoća i dobra topotna provodljivost.

Kao gorivo u elementima u obliku kugli upotrebljavaju se mešani oksidi koji su u reaktoru AVR i u ispitivanjima ozračivanjem pokazali dobre rezultate u zadržavanju fisionih proizvoda. U priznatičnim gorivnim elementima pojavljuje se aksijalna i radialna promena gustine fisljnog materijala, pa se upotrebljavaju tzv. napojno-oplodne čestice da bi se izbegla upotreba goriva s različitim obogaćenjem. Napojne čestice imaju prečnik od 0,2 mm i sadrže visoko obogaćeni (93%) uranijum-karbid. Oplodne su čestice (prečnik 0,5 mm) od torijum-dioksida koji služi kao oplodni materijal.

Napojne čestice, zbog velike gustine fisionih proizvoda i zbog povećanih temperatura u njima, imaju troslojne obloge (unutrašnja i spolja obloga su od pirolitičkog ugljenika, a srednja od silicijum-karbida), dok oplodne čestice imaju dvo-slojni omotač (oba su sloja od pirolitičkog ugljenika). Kad su gorivni elementi u obliku kugli, nije potrebno da imaju različite sastave fisljnog materijala, jer bi se izgubio uticaj različitih gustina materijala mešanjem s grafitnim kuglama u reaktoru. Tek kad obimni eksperimenti s napojno-oplodnim česticama pokažu dobro ponašanje, biće moguć razvoj takva tipa reaktora.

Gorivni elementi za brze oplodne reaktore vrlo su opterećeni ($\sim 300 \text{ kW/dm}^3$), nalaze se u jakom neutronskom fluksu (10^{16} neutrona u sekundi po cm^2) i imaju visoki stepen izgaranja ($\sim 100000 \text{ MW d/t}$).

Reaktorsko jezgro sastoji se od dva dela. U srednjem delu nalazi se smeša od uranijum-oksida i plutonijum-oksida, a oko njega je oplodni omotač od prirodnog ili osiromašenog uranijuma. Aktivni i oplodni materijal smešten je u čelične cevi poređane u snopove. Reaktorsko jezgro hlađi se tečnim natrijumom.

Proučava se mogućnost upotrebe karbidnog goriva (smeša UC i PuC) koje bi trebalo da ima veći faktor konverzije i bolje osobine za odvođenje topote.

OZRAČENO GORIVO

Radiaciono oštećenje goriva nastaje interakcijom nuklearnog zračenja s atomskim omotačima ili atomskim jezgrima nuklearnog goriva.

Na nuklearno gorivo u nuklearnom reaktoru deluju čestice α i β , γ -zračenje, neutroni i fisioni fragmenti, a verovatno i protoni. Iako se delovanje fisionih fragmenata ne može smatrati nuklearnim zračenjem, njihovo je delovanje slično delovanju nanelektrisanih α -čestica i protona. Razlika je samo u tome što fisioni fragmenti imaju mnogo veću masu. Pored toga, gasni fisioni proizvodi, npr. kripton i ksenon, stvaraju dodatne probleme u čvrstom materijalu goriva. Gorivo koje dostiže visoki stepen izgaranja bubre zbog nagomilavanja gasovitih proizvoda fisije. Efekat zračenja na kristalnu strukturu goriva zavisi od strukture goriva i od vrste zračenja. Ionizacija i elektronska pobuda koje nastaju delovanjem β -čestica i γ -zračenja uzrokuju vrlo male trajne promene u metalima, dok teže čestice, protoni,

neutroni, α -čestice i fisioni proizvodi uzrokuju znatne promene u kristalnoj strukturi i u osobinama metala. U elastičnim sudarima s jezgrima goriva te čestice mogu predati energiju koja je dovoljna da se atomi pomere iz svog stalnog mesta u kristalnoj rešetki, pa nastaju trajne promene u metalu. Taj se efekat stoga i zove *radiaciono oštećenje*.

Može se dogoditi da pomereni atom ne nađe novo ravnotežno stanje u kristalnoj rešetki, pa se zadrži u nekom neravnotežnom položaju. Takav međuprostorni (intersticijalni) atom uvek ostavlja prazno mesto u rešetki, što trajno oštećuje materijal i menja njegove fizičke osobine.

Može se dogoditi da proizvod fisije prenese energiju na okolne atome. Pogodeni atom obično dobije toliku energiju da vibrira oko svog položaja velikom amplitudom, ali ipak ne napušta svoje mesto u kristalnoj rešetki. Nešto od vibracione energije prenese se na susedne atome. Tako se u ograničenoj oblasti pojave atomi s vibracionom energijom koja je veća od normalne, što se odražava u visokoj temperaturi. Ta se oblast naziva *termičkim klinom*. Za vrlo kratko vreme ($\sim 10^{-10} \text{ s}$) temperatura oko hiljade atoma poraste za $\sim 1000^{\circ}\text{C}$, pa se može pojaviti distorzija materijala. Brzim hlađenjem može nastati zamrzavanje dela kristalne rešetke, jer se svi atomi ne mogu vratiti u svoj ravnotežni položaj. Zbog toga nastaju dodatna naprezanja u materijalu. Ako zbog vibracija mnogo atoma napusti svoje mesto u rešetki, nastaju *potisni klinovi*. Tako u materijalu nastaju klinovi sastavljeni od mnoštva međuprostornih atoma (intersticijala) i praznina (vakancija) te drugih nepravilno usmerenih delova.

Dejstvo zbog zahvata neutrona. Kad jezgro zahvati neutron, može nastati atom nečistoće ili uzmak atoma zbog sudara. Tada uvek jezgro pogodeno neutronom emituje γ -zrak. Neposredni je proizvod takve reakcije izotop, ali on ne oštećuje ozračeni materijal. Ako je, međutim, jezgro radioaktivno, što je najčešće, emituje se β -čestica, pa nastaje drugi element. Sem toga, brzi neutroni mogu i neposredno proizvoditi druge elemente tako da odmah nastaju nečistoće u kristalnoj rešetki. Posle dužeg zračenja u reaktoru akumulišu se atomi nečistoća, pa se menjaju fizičke osobine materijala.

Pored proizvodnje atoma nečistoća, pomeraju se jezgra pogodena neutronom prilikom emisije γ -zraka. Radijaciono oštećenje zbog te pojave može biti znatno, a pretežno se pojavljuje na površini materijala, dok oštećenja delovanjem brzih neutrona više nastaju u dubljim delovima.

Sve te pojave i promene koje uzrokuju zračenje deluju na metale i druge materijale, a njihovo delovanje zavisi od osobina materijala i od temperature. Delovanje je zračenja najčešće manje na povišenim temperaturama, a ponekad se oštećenja mogu i ukloniti, *odgrejati*, s porastom temperature. Tada atomi difunduju mnogo brže, te poneki pomereni atom može da dođe u prazninu i da tako obnovi normalnu strukturu kristalne rešetke kakva je bila pre ozračivanja.

Međutim, fisije u nuklearnom gorivu, kad se proizvode fragmenti visoke energije i vrlo malog dometa, teško oštećuju kristalnu strukturu i trajno deformišu gorivne elemente. U keramičkom gorivu te su pojave manje izražene zbog toga što se gorivo nalazi na vrlo visokim temperaturama, pa se kristalne rešetke dobro obnavljaju.

Sadržaj nuklida u ozračenom gorivu. U toku rada nuklearnog reaktora *izgara* nuklearno gorivo, pri čemu se menja njegov celokupni izotopski sastav. Ta promena utiče na održavanje lančane reakcije fisije i smanjuje reaktivnost nuklearnog reaktora do granice kritičnosti, što utiče na upravljanje i stabilnost nuklearno-energetskog postrojenja, pa je konačno potrebna izmena ozračenog goriva svežim gorivom.

Izgaranjem nuklearnog goriva smanjuje se koncentracija polaznog fisljnog izotopa ^{235}U , stvaraju se novi fisljni materijali ^{239}Pu i ^{241}Pu koji se i sami delimično troše izgaranjem, stvaraju se proizvodi fisije i stvaraju se zahvatom neutrona ili radioaktivnim raspadom novi nefisljni nuklidi.

Integralno posmatrano, izgaranjem nuklearnog goriva smanjuje se reaktivnost reaktora. Tokom rada reaktora koncentracija se fisljnih izotopa u gorivu smanjuje, dok se presek za apsorpciju neutrona stalno povećava, čemu najviše doprinose

proizvodi fisije. To utiče na faktor umnožavanja neutrona u gorivu (v. *Nuklearni reaktori*) i na brzinu izgaranja koja nije jednaka u svim delovima reaktorskog jezgra i zavisi od prostorne raspodele snage u reaktoru. Budući da je izgaranje zavisno od neutronskog fluksa, koji je manji na krajevima nego u sredini reaktora, brzina je izgaranja gorivnih elemenata i njihovih delova nejednaka. S vremenom zbog neravnomerne brzine izgaranja izravnava se neutronski fluks u jezgru, pa gorivo ravnomernije izgara, što doprinosi ekonomičnjem iskorišćenju goriva. Stoga se i nastoji da se gorivo zamjenjuje prema određenom programu da bi se održavala što ravnomerija raspodela neutronskog fluksa i tako ostvarilo što ravnomerije opterećenje nuklearnog goriva.

Kad reaktivnost reaktora postane bliska minimalnoj vrednosti neophodno za rad reaktora, ozračeno gorivo se mora zamjeniti novim.

Merilo za iskorišćenje nuklearnog goriva je količina proizvedene energije po jedinici mase goriva. Ta vrednost zavisi od ozračivanja goriva u reaktoru i izmene goriva. Praćenje izgaranja goriva važno je za ekonomično iskorišćavanje goriva i za ekonomičnu proizvodnju električne energije.

Stepen izgaranja α može se definisati na nekoliko načina. Prema jednoj od definicija to je odnos između broja raspodnutih jezgara ΔN_f u posmatranom vremenu i broja atomskih jezgara fisionog i oplodnog materijala N stavljenih u reaktor, pa je

$$\alpha = \frac{\Delta N_f}{N}. \quad (12)$$

Može se, takođe, stepen izgaranja odnositi i na energiju oslobođenu pri fisiji po jedinici mase goriva, pa je

$$\alpha_e = \frac{E_{ft}}{M} = \frac{E_f \Delta N_f}{M}, \quad (13)$$

gde je E_{ft} energija dobijena fisijom iz mase goriva M , a E_f energija oslobođena jednom fisijom. Budući da je $M = N A_m / N_A$, gde je A_m atomska masa, a N_A Avogadrovo broj, to je

$$\alpha_e = \frac{\Delta N_f N_A}{N A_m} E_f = \alpha \frac{N_A}{A_m} E_f = \alpha e. \quad (14)$$

Uobičajeno je da se izgaranje izražava u MW d/kg. Za skoro sve fislne izotope faktor e ima približno jednaku vrednost:

$$e = E_f \frac{N_A}{A_m} \approx 950 \text{ MW d/kg}. \quad (15)$$

Nastanak novih nuklida tokom izgaranja. Tokom izgaranja u gorivu se stvaraju novi teški i lakši nuklidi. Teški nuklidi nastaju neutronskim zahvatom, odnosno reakcijama (n, γ) ili β^- -radioaktivnim transformacijama fisionog i fertilnog materijala, dok su lakši nuklidi proizvodi fisije koji podležu transformacijama kao i teški nuklidi.

U ozračenom gorivu ima više stotina različitih primarnih fisionih proizvoda koji su neposredno proizvodi fisije, ali i sekundarnih procesa koji nastaju radioaktivnim raspadom primarnih proizvoda. Svi oni različito utiču na izgaranje nuklearnog goriva. Fisioni proizvodi koji imaju visoke udarne preseke za apsorpciju neutrona nazivaju se otrovima. U prvu grupu otrova spadaju fisioni proizvodi koji imaju udarne preseke mnogo veće od preseka ^{235}U za apsorpciju neutrona. U drugoj su grupi fisioni proizvodi koji imaju preseke za apsorpciju neutrona poredljive s onima fislinskih izotopa, dok u treću grupu otrova spadaju fisioni proizvodi nižih udarnih preseka. U prvoj su grupi: ^{135}Xe , ^{149}Sm , ^{113}Gd , ^{151}Sm , ^{155}Eu , ^{157}Gd , a u drugu spadaju ^{83}Kr , ^{99}Tc , ^{103}Rh , ^{131}Xe , ^{134}Nd , ^{152}Sm , ^{153}Eu .

Posebne teškoće stvaraju ^{149}Sm i ^{135}Xe (v. *Nuklearni reaktori*). Zatrovanje samariumom 149 raste posle zaustavljanja reaktora, ali ne zavisi od neutronskog fluksa, dok zatrovanje ksenonom 135 naglo raste posle zaustavljanja reaktora, da bi posle nekog vremena počelo da opada dok potpuno ne nestane, ali mu je ravnotežno zatrovanje srazmerno neutronskom fluksu.

Pored fisionih proizvoda u ozračenom gorivu nastaju i teški nuklidi, i to od jezgara fisionog i oplodnog materijala. Trans-

formacije teških nuklida u druge teške nuklide nastaju zahvatom neutrona i β^- -radioaktivnim raspadom, prema određenim lancima (v. *Nuklearni reaktori*).

Izgaranje goriva u reaktoru teško je analizirati i pratiti, iako je to potrebno radi poznavanja stepena iskorišćenja nuklearnog goriva i radi uvida u izotopski sastav goriva pre njegove prerade. Stoga su razvijene destruktivne i nedestruktivne metode određivanja stepena izgaranja označenog goriva. Masena spektrometrija jedna je od najviše upotrebljavanih metoda destruktivne analize. Na osnovu razlaganja uzorka ozračenog goriva mogu se dobiti relativni odnosi masâ izotopâ uranijuma i plutonijuma, pa se može odrediti stepen izgaranja goriva, i to tačnije što je stepen izgaranja veći. Od nedestruktivnih metoda najčešće se upotrebljavaju detektori γ -zračenja pomoću kojih se određuje prisutnost pojedinih proizvoda fisije. Ta se metoda mnogo primenjuje.

Izmeštanje i izmena nuklearnog goriva. Da bi se najekonomičnije iskoristilo gorivo u nuklearnom reaktoru, trebalo bi da se što potpunije iskoriste svi gorivni snopovi, što znači da bi trebalo nastojati da se oni što ravnomerije opterete.

U lakovodnim reaktorima gorivni se snopovi zamjenjuju obično jedanput godišnje, pa se tada menja u reaktorima PWR trećina, odnosno u reaktorima BWR četvrta svih snopova. Reaktorsko jezgro podeljeno je u zone u kojima su gorivni snopovi s različitim obogaćenjem, odnosno s različitim stepenom izgaranja. Pri zameni gorivnih snopova u spoljašnju se zonu stavlja sveže nuklearno gorivo, a ozračeno gorivo iz centralne zone vadi se iz reaktora. Ostali gorivni snopovi pomeraju se ka centru po zonama, tako da prije nego što se izvade iz reaktora mogu promeniti dva do četiri položaja.

Ugrađeni višak reaktivnosti kompenzuje se pokretnim kontrolnim šipkama koje su deo gorivnih snopova, apsorberima ugrađenim u snopove, te apsorbujućim materijalima rastvorenim u moderatoru ili rashladnom sredstvu.

U teškovodnim reaktorima gorivo se izmenjuje u toku rada reaktora i bez njegova zaustavljanja, pri čemu se u isti kanal s jedne strane ubacuje sveže gorivo, a s druge vadi snop ozračenog goriva. To se radi pomoću dve istovetne mašine za izmenu goriva koje su postavljene na oba kraja kanala. Takvom zamjenom goriva povećava se raspoloživost nuklearnih elektrana sa teškovodnim u odnosu na lakovodne reaktore.

Odlaganje ozračenog goriva. Ozračeni gorivni elementi moraju se posle uklanjanja iz nuklearnih reaktora čuvati u bazenama za odležavanje koji se nalaze u elektrani. Oni ostaju u bazenama najmanje godinu dana, ali ne ostaju duže od tri do četiri godine. Posle toga moguće je sledeće: a) privremeno odlaganje ozračenog goriva u posebne kontejnere, približno deset godina, što prepostavlja i transport ozračenog goriva u istim kontejnerima do skladišta u kome će se ozračeno gorivo čuvati do prerade; b) duže ili trajno odlaganje ozračenog goriva u kontejnerima; c) prerada ozračenog goriva i obrada uz konačno odlaganje srednje i visokoradioaktivnih otpadaka.

Mnoge zemlje, koje nemaju obimni nuklearno-energetski programi, nisu dovoljno ekonomski motivisane da odmah prerade ozračeno gorivo, pa planiraju da ga i dalje čuvaju i posle odležavanja u bazenama u nuklearnim elektranama.

Za privremeno odlaganje ozračenog goriva grade se centralna skladišta, i to obično na lokacijama na kojima se planira gradnja postrojenja za preradu ozračenog goriva. Gradnja je takvih skladišta potrebna da se u nuklearnim elektranama, zbog bezbednosti, ne nagomilava ozračeno gorivo, ali i zbog toga jer bazi za odležavanje goriva u elektranama nisu projektovani da prime ukupno gorivo potrebno za čitav radni vek elektrane. Treba spomenuti da prema propisima u elektranama mora uvek biti prazan prostor u bazenama za barem jedno punjenje goriva.

Skladište za ozračeno gorivo sačinjavaju pojedinačne građevine u koje se smešta oko 500 t goriva. Svaka građevina ima prijemni i skladišni deo. U prijemnom delu su uređaji za utočvar i istovar kontejnera, odelenje za merenje, servisna radio-nica za kontejnere i garderobera, a u skladišnom prostoru su obeležena mesta na koja se postavljaju kontejneri. Pod i zidovi su od armiranog betona. Na zidovima su ventilacioni otvori

s prirodnim strujanjem vazduha, čime se obezbeđuje hlađenje kontejnera, odnosno gorivnih elemenata u njima. U istim kontejnerima moguće je preneti ozračeno gorivo do postrojenja za preradu kada je to potrebno.

Prerada ozračenih gorivnih elemenata

Prerada ozračenog nuklearnog goriva započela je sredinom četrdesetih godina u SAD radi izdvajanja plutonijuma iz ozračenog metalnog uranijumskog goriva u hanfordskim reaktorima hlađenim vodom.

Savremeni procesi prerade mnogo su složeniji i usavršeniji. Odeljuju se uranijum i plutonijum od fisionih proizvoda, te se toliko očiste da bi se mogli ponovno upotrebiti kao nuklearno gorivo. Osiromašeni uranijum pre nego što se upotrebni za izradu novih gorivnih elemenata obogaćuje se u postrojenju za obogaćivanje. Plutonijum se izdvaja da bi se iskoristio u brzim oplodnim ili termičkim reaktorima. Ako se plutonijum čuva u skladištu, mora se paziti da ne nastane kritična masa, a da bi mogao lako da se prečisti, treba ga čuvati u pogodnom obliku, jer se s vremenom plutonijum raspada. Zbog toga plutonijum pre upotrebe treba oslobođiti proizvoda raspada.

U procesu prerade izdvajaju se i fisioni proizvodi i koncentrišu u pogodnom obliku, kako bi mogli da se bezbedno uskladište uz male izdatke. Međutim, nije moguće izdvojiti sve aktinide koji emituju α -zračenje, tako da su oni prisutni i posle dugog vremena. Gledano kratkoročno, ekonomično skladištenje omogućava koncentraciju dosta visokih specifičnih aktivnosti, uz umerenu proizvodnju topote (do $\sim 15 \text{ kW/m}^3$). Pri tom je potreban minimalni nadzor uz mogućnost naknadnog trajnog bezbednog odlaganja.

Prerada goriva treba da prati razvoj nuklearnih elektrana. Za 1 GW snage elektrana potrebno je da se preradi $25\cdots30 \text{ t}$ uranijuma godišnje, srednjeg stepena izgaranja $30\,000\cdots40\,000 \text{ MWd/t}$, s proizvodima fisije između 30 i 40 kg/t uranijuma ako je početno obogaćenje goriva bilo $2,5\cdots3,8\%$. Sadržaj plutonijuma u gorivu iznosi $7\cdots10 \text{ kg/t}$ uranijuma. Prosečno je vreme hlađenja ozračenog goriva oko godinu dana i za to vreme radioaktivnost goriva opadne na 2% vrednosti od radioaktivnosti koju je gorivo imalo kad je izvađeno iz reaktora.

Skidanje košuljice. U prvoj fazi prerade nuklearnog goriva postojala su dva postupka za skidanje košuljica ozračenog goriva. Aluminijumske su košuljice rastvarane u alkalnim rastvorima, pa su se dobijale velike količine kontaminiranog otpada, ili su košuljice skidane mehanički. Nedostatak je mehaničkog skidanja u tome što su se često lomili gorivni elementi, pa je prevladao hemijski postupak.

Kad se upotrebljava oksidno gorivo, košuljice su obično od nerđajućeg čelika ili cirkonijumove legure. Kad se uklanjuju košuljice goriva s malim stepenom izgaranja, gubici su uranijuma u rastvoru mali. S porastom stepena izgaranja povećavaju se gubici, pa se gorivni elementi režu na komade od $\sim 5 \text{ cm}$ dužine. Tako izrezani elementi hemijski se obrađuju. Delovi košuljice koji ostaju nerastvoreni izvlače se iz rastvarača i otpremaju u skladište radioaktivnog metala, obično bazena ispunjenog vodom.

Takvo uklanjanje konstrukcionog materijala zahteva nekontinualni postupak prerade goriva. Budući da se u šaržama nalazi velika količina goriva, moraju se radi bezbednosti, u rastvor staviti nuklearni otrovi, kadmijum ili gadolinijum, što povećava troškove prerade, a i količinu visokoradioaktivnih otpadaka.

Prerada goriva počinje hemijskim razlaganjem i razdvajanjem ozračenog nuklearnog goriva u tok koji sadrži plutonijum, u tok koji sadrži uranijum i u tok u kome se nalaze svi radioaktivni otpaci.

Gorivo iz hanfordskih reaktora preradivalo se precipitacijom plutonijuma bizmut-fosfatom. Precipitati su uklanjani pomoću centrifuga, a postupak se ponavlja nekoliko puta da bi se dobio što čistiji plutonijum.

Kasnije je uvedena tečno-tečna ekstrakcija, pri čemu se upotrebljava heksol kao rastvarač. Budući da su se primenjivali postupci redukcije i oksidacije plutonijuma, postupak je prozvan

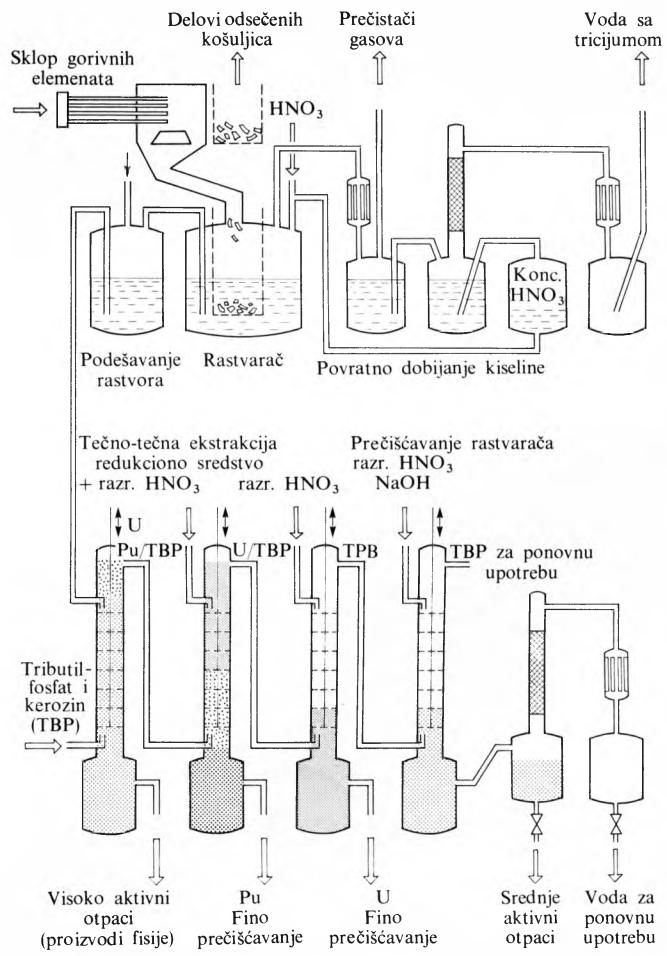
REDOX. Postupak je omogućio visok stepen razdvajanja uranijuma i plutonijuma od proizvoda fisije, a uveden je 1951. godine. Heksol kao rastvarač zahteva je visoko *zaslanjivanje* vodene faze da bi se uranijum i plutonijum uveli u rastvor, pa je zbog toga bila potrebna velika količina aluminijum-nitrita. Engleski istraživači, međutim, uveli su postupak *BUTEX*, gde su se samo pomoću azotne kiseline izdvajali uranijum i plutonijum u rastvoru, a ostale soli s visokoradioaktivnim otpacima, u kojima je bilo više od 99,9% fisionih proizvoda, ostajale su u legiranim elementima u gorivu i u korozionim proizvodima.

Novi postupak bio je skuplji od postupka heksonom, ali je ipak bio osnov za preradu goriva u Engleskoj (postrojenje Windscale, 1952) pa i u novijem postrojenju (1969) za preradu oksidnog goriva.

Istovremeno je u SAD razrađen postupak s tributil-fosfatom (TBP), postupak *PUREX*. Kao i u postupku BUTEX, nije potrebno dodavati soli da bi se pospešilo razdvajanje. Postupak PUREX ima bolje separacione osobine, jeftiniji je i hemijski stabilniji. Prvi put je primenjen 1954. godine, a kasnije prihvaćen u Francuskoj (1958), Engleskoj (1956), Belgiji, SR Nemačkoj, Indiji i Japanu.

U principu moguće je postići povoljne separacione performanse jonskom izmenom, ali je mnogo lakše ostvariti protivstrujni postupak u tečno-tečnom sistemu.

Ekstrakcija. Za izdvajanje proizvoda fisije od uranijuma i plutonijuma danas se primenjuje postupak PUREX, zasnovan na principu ekstrakcije (sl. 20). Vodenim rastvorom goriva i proizvoda fisije meša se s organskom tečnošću koja je smeša tributil-fosfata (TBP) i čistog petroleum-a. To nije lako zapaljiva tečnost, čime je izbegнутa mogućnost eksplozije, ali se ipak ćelije moraju graditi tako da se požar ne može širiti, a svaka ćelija mora izdržati pritisak eksplozije. Električne instalacije moraju



Sl. 20. Shema prerade isluženog (ozračenog) goriva

biti kapslovane da ne bi nastala eksplozija, a moraju biti eliminisani i ostali izvori varničenja.

Uranil-nitrat i plutonijum-nitrat u organskoj se smeši dobro rastvaraju, dok su proizvodi fisijske praktički nerastvorljivi. Razdvaja se u ekstraktorima. To su aparati u kojima obe faze teku u suprotnim smerovima, intenzivno se mešaju, a zatim se u izlaznim komorama opet razdvajaju.

U prvoj fazi ekstrakcije dospevaju još uvek ostaci produkata fisijske zajedno s uranijumom i plutonijumom u organski rastvarač. Zbog toga se ekstrakcija mora ponoviti, pri čemu se uranijum i plutonijum opet prevode u vodenu fazu (povratna ekstrakcija), a onda ponovo ekstrahuju u organsku fazu. Tako ponovljeni postupci ekstrahovanja nazivaju se ciklusima i moraju se ponoviti 2-3 puta da bi se postigla zahtevana čistoća uranijuma i plutonijuma.

Prema tome, ekstrakcioni deo prerade može se podeliti u četiri dela: a) koekstrakcioni ciklus, b) drugi i treći ciklus uranijuma, c) drugi i treći ciklus plutonijuma i d) ispiranje rastvorenih sredstava.

Koekstrakcioni ciklus. U tom visokoaktivnom delu ekstrakcije glavna je količina produkata fisijske (~99,9%) izdvaja od goriva. Goriva se nalaze u organskoj, a produkti fisijske u vodenoj fazi. Ta se visokoradioaktivna vodena faza uparavanjem svodi na malu zapreminu i privremeno skladišti do definitivnog odlaganja.

Organska faza koja sadrži uranijum i plutonijum dovodi se do ekstraktora u kome se odvaja plutonijum od uranijuma. Pri tom se iskorističava činjenica da trovalentni plutonijum nije rastvorljiv u organskoj fazi, tj. da iz nje vodena faza ističe.

Da bi se to postiglo, četvorovalentni se plutonijum mora hemijski ili elektrolitički pretvoriti u trovalentni plutonijum i tako prevesti u vodenu fazu (govori se o nekoj vrsti redukcije plutonijuma). Tako se plutonijum odvaja od uranijuma koji ostaje u organskoj fazi.

Vodena faza koja sadrži plutonijum dovodi se u drugi i treći plutonijumski ciklus. U sledećoj koloni kroz zgusnutu azotnu kiselinsku uranijum se iz organske faze reekstrahuje i odvodi u drugi i treći uranijumski ciklus.

Drugi i treći uranijumski ciklus. Uranijum i plutonijum što se dovode iz koekstrakcionog ciklusa sadrže još male količine fisionih produkata koji treba da se uklone u narednim ciklusima.

U drugom uranijumskom ciklusu uranijum se opet ekstrahuje u organsku fazu, pri čemu preostali fisioni proizvodi ostaju u vodenom rastvoru i zajedno se s azotnom kiselom vraćaju u koekstrakcioni ciklus. Povratna ekstrakcija uranijuma završava se u vodenoj fazi. U trećem uranijumskom ciklusu uranijum se podvrgava još jednom istom ekstrakcionom postupku. Posle toga uranijum je oslobođen od proizvoda fisijske, pa se može dalje obrađivati kao gotov proizvod.

Drugi i treći plutonijumski ciklus. Oba ciklusa sastoje se iz ekstrakcije plutonijuma u organsku fazu i njegove reekstrakcije u vodenu fazu, analogno drugom i trećem uranijumskom ciklusu. Uvek se mora najpre trovalentni plutonijum prevesti u četvorovalentni (povratna oksidacija plutonijuma). Za povratnu ekstrakciju u vodenu fazu plutonijum se opet redukuje. Plutonijum u prolazu kroz treći ciklus gubi sve proizvode fisijske, pa se može smatrati gotovim proizvodom.

Pranje sredstava za rastvaranje. Sredstvo koje se upotrebljava za ekstrakciju (30-postotni TBP) pod dejstvom zračenja delimično se razlaže (radioliza). Proizvodi radiolize moraju se ukloniti da ne bi otežavali razdvajanje fisionih proizvoda od goriva.

Za otklanjanje razloženih produkata iz rastvora takođe se primenjuje ekstrakcija. Kao sredstvo za pranje uzima se zgusnuti rastvor natrijum-karbonata, koji sakuplja proizvode radiolize i sredstva za rastvaranje. Očišćeno sredstvo za rastvaranje vraća se ponovo u proces.

Finalni proizvodi su koncentrovani rastvori uranil-nitrata, odnosno plutonijum-nitrita ili čvrsti plutonijum-oksidi. Koncentracija se obavlja u isparivačima. Ako proizvođač gorivnih elemenata posebno zahteva, rastvori se mogu još jednom prečistiti. Pri tom se oni provlače kroz specijalne kupke.

Kad se zahteva plutonijum-oksid, plutonijum se iz nitratskog rastvora uz pomoć oksalne kiseline pretvori u čvrst plutonijum-oksalsat, pa se on zagrevanjem prevodi u plutonijum-oksid (*kalcinacija*).

Tehnologija prerade ozračenog goriva danas je tako usavršena da je moguće iz njega izdvojiti više od 98% uranijuma i više od 99% plutonijuma. I vrlo male količine plutonijuma mogu se pratiti tokom procesa prerade goriva, tako da praktički nije moguće nekontrolisani gubitak plutonijuma u toku prerade.

Prerada torijumskog goriva. Pri preradi torijumskog goriva potrebna je mnogo veća koncentracija azotne kiseline u prisutnosti fluorida kao katalizatora u odnosu na preradu uranijumskog goriva, a prilikom rastvaranja goriva potreban je pretvodno podešavanje rastvora da bi se odstranila suvišna kiselina.

Održavanje fazne ravnoteže pri tečnom razdvajaju i teškoće pri obrazovanju treće faze traže da se torijumsko gorivo preradi u postrojenju određene veličine i u mnogo manjoj količini nego uranijumsko gorivo, što smanjuje proizvodnju i iskorističenje postrojenja.

Torijumska goriva imaju veće fisiono obogaćenje i viši stepen izgaranja od uranijumskog goriva, što ograničava količine koje se mogu preradivati u postojećim postrojenjima za preradu zbog opasnosti od stvaranja kritične mase.

Zbog svega toga povećavaju se troškovi prerade torijumskog goriva u postrojenjima za preradu uranijumskog goriva za dva i više puta. Ali zbog višeg stepena izgaranja, pa i zbog većeg termodinamičkog iskorističenja, neka torijumska goriva mogu biti ekonomičnija od uranijumskih. S druge strane, moguće je izgraditi postrojenja za preradu samo torijumskih goriva, što bi nešto povećalo troškove prerade, koji bi se nadoknadi u većim stepenom izgaranja torijumskog goriva. Pored toga, razvijaju se i neki suvi postupci za preradu goriva koji bi se mogli primeniti na torijumsko gorivo. Takav je postupak fluorinacije ozračenog goriva, uz odvajanje fisionog od fertilnog materijala i proizvoda fisijske, pri čemu se iskorističuje različita volatilnost fluorida. Radi se još na iskorističavanju različite volatilnosti hlorida, izdvajajuš topnjim metalima (npr. bizmutom) i na nekim drugim postupcima.

Bezbednosne mere. Uređajima za preradu ozračenog goriva upravlja se daljinski. Zbog toga se primenjuje automatska kontrola s visoko integrisanim zaštitnim sistemima, uz analizu mogućih akcidentalnih situacija i otklanjanje njihovih posledica.

Sigurnost procesa prerade podrazumeva: a) zaštitu operatora od neposrednog zračenja, gutanja ili udisanja radioaktivnog materijala, b) kontrolisano čuvanje radioaktivnog materijala i sprečavanje kontaminacije radne i životne sredine, c) sprečavanje stvaranja kritične mase fisionog materijala u bilo kom delu sistema za preradu i d) kontrolu odlaganja radioaktivnih materijala u okolinu tako da ne ugrožava ljudе i biosferu.

Zaštita od neposrednog zračenja obezbeđuje se kombinacijom zaštitnih pregrada i daljinskom manipulacijom uz pomoć manipulatora. Zaštitne su pregrade debeli betonski zidovi pojačani čeličnim ili olovnim pločama. Gorivni sklopovi vade se iz transportnih sudova u bazenim pod vodom, gde se i čuvaju, a voda služi ne samo za hlađenje već i kao zaštita od zračenje.

Kad se fisioni proizvodi uklone, zračenje ne predstavlja više veliki problem. Tada se sva pažnja posvećuje jedinjenjima plutonijuma, jer se tada može pojaviti γ -zračenje od nastalog američijuma 241.

Zaštita se obezbeđuje i ventilacijom.

Rad s plutonijumom je posebno složen zbog njegove radio-toksičnosti. Obavlja se u rukavicama u čelijama gde se održava pritisak niži od atmosferskog. Postoji uređaj koji automatski isključuje čeliju ako prsne rukavica ili ako se pogrešno manipuliše. Održavanje opreme obavlja osoblje u skafanderima.

Kritičnost se kontroliše pomoću više metoda. Ograničena je veličina sudova, a potrebno je da budu dovoljno međusobno udaljeni. Sem toga, ograničeno je punjenje sudova u koje se, radi sprečavanja koncentrovanja rastvora, obično dodaju neutronski apsorberi ili otrovi.

Postrojenje za preradu opremljeno je instrumentima koji upozoravaju operatore ako se približava kritičnost ili ako se

pojavi radioaktivnost u radnom prostoru. Sistem se obično podešava tako da dva od tri istovremeno pokrenuta instrumenta daju alarm.

Prerada nuklearnog goriva znatno se izmenila od pre skoro četrdeset godina. Postupci su postali kompleksniji. U prvo vreme preradivalo se nisko ozračeno metalno gorivo, a sada se prerađuje oksidno gorivo u vrlo složenim sklopovima i visokog stepena izgaranja. Ranije su se primenjivale precipitacione metode, a sada protivstupni, tečno-tečni ekstrakcioni postupci.

Iako su zdravstveni i bezbednosni uslovi veoma teški, postignuta je do sada takva zaštita osoblja da nema nikakvih pritužbi. Postignuti uspesi su ne samo rezultat razvijenih standarda za zaštitu operatora i okoline postrojenja već i razvijenih postupaka koji su međunarodno prihvaćeni.

U budućnosti će se povećavati rizik kako zbog povećane radioaktivnosti u gorivu, nastale zbog većeg stepena izgaranja goriva, tako i zbog većih količina fisilnog materijala koji će se preradivati. Pretpostavlja se, međutim, da će novi procesi, instrumentacija i postupci omogućiti da se prevlada taj povećani rizik, te da se osigura bezbedni rad i u budućim postrojenjima za preradu.

Obrada i odlaganje visokoradioaktivnih otpadaka. Više od 99% visokoradioaktivnih otpadaka iz nuklearnog gorivnog ciklusa izdvaja se u procesu prerade ozračenog goriva. Te otpadke najpre treba pretvoriti u nerastvorljive, čvrste materijale, a zatim smestiti u duboke stabilne geološke formacije. Oba se postupka proučavaju u mnogim zemljama.

Borosilikatna stakla pokazala su se kao pogodna za inkorporaciju visokoradioaktivnih otpadaka. Demonstraciono postrojenje podignuto je u Marcoule u Francuskoj i u pogonu je od 1978. godine. Na istom principu u La Hagueu treba da bude pušteno u pogon novo postrojenje za vitrifikaciju (ugradivanje u staklo) otpadaka nakon prerade oksidnog goriva nuklearnih elektrana. U SR Nemačkoj prihvaćen je francuski postupak vitrifikacije, a Velika Britanija namerava adaptirati svoje planove takođe prema francuskom postupku, kao alternativu svom vitrifikacionom postupku Harvest. Postoje i drugi pokušaji da se visokoradioaktivni otpaci ugrađuju u keramičke, vitrokeramičke i druge kompozitne materijale, te u veštačke minerale ugrađene u korozionski otporne metalne matrice.

Za konačno uskladištenje visokoradioaktivnih materijala najviše obećava zakopavanje u stabilne geološke formacije, iako se u nekim zemljama suprotstavljaju takvu postupku. Ima predloga da se takav materijal spusti u okeanske dubine (Francuska, Engleska, Japan i SAD).

Nekoliko je studija ukazalo da je moguća uspešna izolacija radioaktivnih otpadaka za period od više hiljada godina, ako se odabere stabilna geološka formacija za odlaganje, ako su dobre fizičke i hemijske osobine materijala u koji se ugraduju radioaktivni otpaci, ako su dobro izvedene ostale barijere, kao što je sud otporan prema koroziji i ako oko skladišta postoji materijal koji dovoljno apsorbira zračenje. Odabran je nekoliko pogodnih geoloških formacija (naslage soli, škriljci i granitne stene) koje treba detaljno ispitati (naprezanja u stenama, permeabilnost i termička provodnost stena) probnim bušenjima na dubinama i većim od 500 m. Posle istraživanja koja će potrajati i desetak godina, treba da se konačno donesu zaključci o podobnosti lokacija.

Švedska studija (KBS) pošla je od prepostavke da će visokoradioaktivni otpaci biti vitrifikovani, odloženi u sudove od olova i titanijuma, te ubačeni u granitne stene na dubini od ~500 metara. Laboratorijska istraživanja su pokazala da bi neznatni deo aktivnosti preko podzemnih voda mogao da dođe do biosfere posle 30000 godina, a to bi proizvelo maksimalno zračenje od 0,13 mSv. Pojedinci bi mogli da se ozrače tek 200000 godina posle zakopavanja. Dodatna doza, kad bi skladište izbilo na površinu zemlje, bila bi u granicama prirodnog zračenja i mogla bi se uporediti s radioaktivnošću nekih voda za piće. Švedska studija zaključuje da bi radijacione doze bile zanemarljive kad se promatraju dugoročni efekti koji bi mogli biti od uticaja na zdravlje u velikim ljudskim naseljima. Do sličnih zaključaka došle su i studijske grupe engleskih naučnika i Komisija Evropske zajednice. U Švedskoj studiji se tvrdi da

bi slične efekte imalo i konačno uskladištenje neprerađenog ozračenog goriva.

Transport radioaktivnog materijala i ozračenog goriva

Obezbeđenje sigurnih sredstava za transport radioaktivnih ruda, koncentrata, radioaktivnog goriva ili drugih radioaktivnih materijala između nuklearnih postrojenja osobito je važno u nuklearnoj industriji.

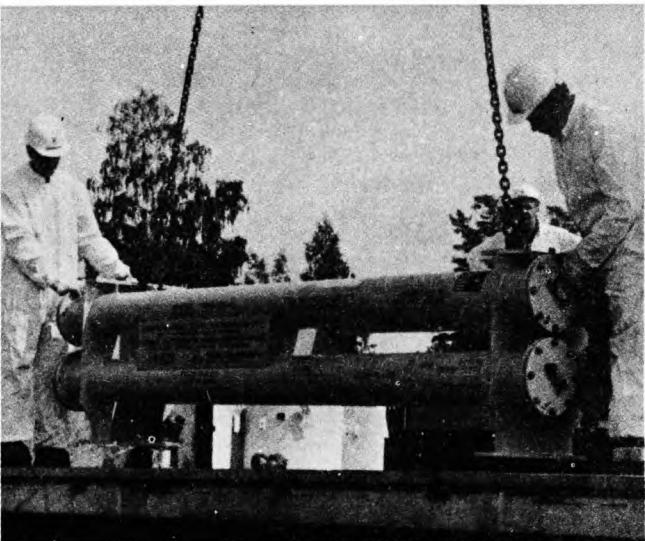
Pre 1961. godine postojali su različiti nacionalni i međunarodni propisi koji su se odnosili na takav transport.

Godine 1961. Međunarodna agencija za atomsku energiju (MAAE) izdala je prve propise koji se odnose na transport radioaktivnih izotopa, ruda i otpadaka niske radioaktivnosti, te na transport velikih radioaktivnih izvora i fisionog materijala. Agencijski propisi poslužili su kao osnov za sve međunarodne i nacionalne propise. Posle desetogodišnjeg iskustva pristupilo se reviziji tih propisa, pa je 1973. godine MAAE izdala revidovane propise kojima su se nastojala obezbediti četiri osnovna sigurnosna zahteva: a) upotreba sigurnog suda za transport radioaktivnog materijala, b) adekvatna kontrola radioaktivnosti koju emituje materijal, c) sigurno uklanjanje toplove koja se odaje u toku zračenja ako je materijal fisilan i d) sprečavanje nastajanja kritičnosti.

Važan deo propisa odnosi se na stroge akcidentalne testove kojima se moraju podvrgnuti prototipni sudovi za transport pre nego što se dobije dozvola za njihovu upotrebu.

Efikasnost propisa, briga operatora i pažnja koja se posvećuje izradi opreme za transport dali su dobre rezultate. Za više od trideset godina, koliko se obavlja transport širom sveta, uz primenu tih propisa nije bilo nijednog smrtnog slučaja ni povrede zbog radioaktivnosti. To je ohrabrujuće za budućnost, kada se očekuje znatno povećanje transporta radioaktivnih materijala. Pretpostavlja se da će se propisi o transportu i dalje usavršavati. Treba razlikovati transport neozračenog (sl. 21) i ozračenog goriva.

Najintenzivniji transport radioaktivnog materijala odvija se između nuklearnih elektrana i postrojenja za preradu goriva.

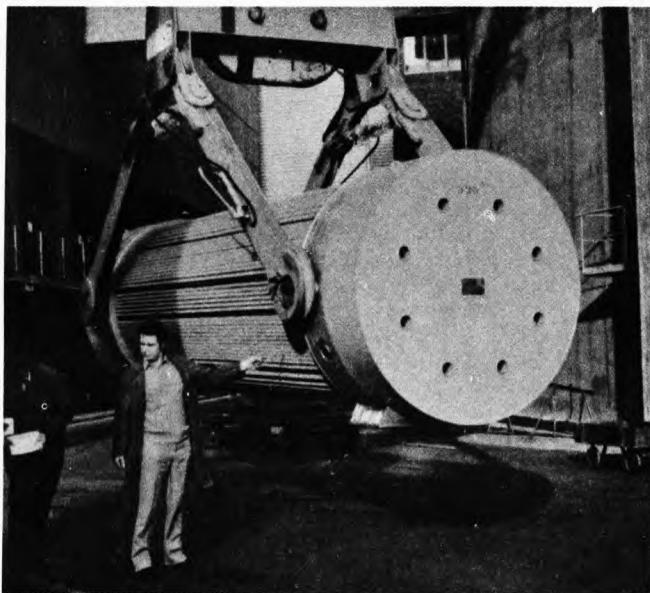


Sl. 21. Transport neozračenog goriva za reaktore sovjetske proizvodnje



Sl. 22. Transport ozračenog nuklearnog goriva

Ozračeno gorivo transportira se u teškim čeličnim sudovima (sl. 22 i 23) koji imaju zaštitnu oblogu od zračenja ojačanu olovom ili osiromašenim uranijumom. Spoljne površine suda su razuđene da bi se mogla što bolje odvoditi toplota koja se stvara u gorivu. Oblik, veličina i kapacitet sudova su različiti, već prema tipu goriva i uslovima transporta. Sud za transport goriva iz reaktora hlađenih sa CO₂ teži 50 t, napravljen je od čelika, a može primiti ~2,5 t goriva. Sud za transport goriva iz lakovodnih reaktora teži ~70 t, može primiti ~3 t goriva (četiri snopa), a prilagođen je za transport putem, železnicom i brodom. Napravljeni su od čelika, olova i osiromašenog uranijuma.

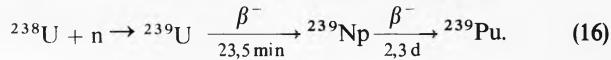


Sl. 23. Transportni kontejner s ozračenim nuklearnim gorivom

Smatra se da je 1980. godine bilo oko 1000 transporta goriva u svetu. Transport će se bar upetorostručiti do kraja ovog veka. Očekuje se da će standardi i propisi za transport ozračenog goriva osigurati, i pored povećanog prometa, da taj transport ne ugrozi javnu sigurnost.

PLUTONIJUMSKO NUKLEARNO GORIVO

Plutonijum se dobija u nuklearnim reaktorima kada se ²³⁸U izloži neutronima. Jedan od izotopa plutonijuma nastaje posle dvostrukog β -raspada:



Metalni plutonijum je tvrd i krt. Može se liti, topiti i obradivati. Legiran s drugim metalima može se izvlačiti u žice i valjati u tanke folije. Međutim, metalni plutonijum ne može se upotrebiti kao nuklearno gorivo zbog toga što se topi na temperaturi od 640 °C i što prelazi iz α -faze u β -fazu već na temperaturi od 122 °C, pri čemu gustina znatno opada. Nijedan od postojećih projekata ne predviđa metalni plutonijum kao gorivo. Najčešće se upotrebljava u obliku dioksida koji se topi na temperaturi od 2200 °C. Zbog α -radioaktivnosti plutonijum je uvek topao.

Plutonijum je radioaktivno toksičan materijal. Veće količine plutonijuma mogu uzrokovati rak posle mnogo godina ako se unesu u organizam. Za skoro četrdeset godina rada sa plutonijumom pokazalo se da su zaštite bile efikasne i da nije bilo povreda od plutonijuma.

Korist od upotrebe plutonijuma može biti vrlo velika, jer se u brzim oplodnim reaktorima iz jednakе količine uranijuma dobija 60...70 puta više energije nego u termičkim nuklearnim reaktorima.

Od brojnih izotopa plutonijuma koji nastaju u nuklearnim reaktorima samo ²³⁹Pu i ²⁴¹Pu podležu fisiji. U toku nastajanja

u termičkom reaktoru skoro se polovina tih izotopa raspade fisijom, pa se porastom stepena izgaranja goriva energetski prinos plutonijuma mnogo ne razlikuje od prinosa ²³⁵U.

Prinos plutonijuma, odnosno neto-proizvodnja plutonijuma zavisi od tipa termičkog reaktora. Tako u reaktorima tipa PWR, električne snage 1 GW, koji radi godinu dana s nominalnom snagom, nastaje ~710 kg fisiognog plutonijuma, od čega u reaktoru izgori ~440 kg, a ~270 kg ostaje u ozračenom gorivu. U teškovodnom reaktoru tipa Candu, uz iste uslove, ostaje skoro 500 kg plutonijuma u gorivu, a u reaktoru GCR više od 600 kg.

Sedamdesetih godina zahtevalo se da se obustavi prerada goriva, naročito u SAD, i da se ozračeno gorivo ostavlja nepregrađeno u bazenima za odležavanje, kako plutonijum koji bi se iz njega izdvojio ne bi bio zloupotrebljavan u vojne ili neke druge nedozvoljene svrhe. Tako bi gorivni ciklus ostao *otvoren*, a nuklearno bi gorivo bilo iskorišćeno samo u jednom prolazu kroz reaktor.

Alternativa je da se ozračeno gorivo preradi, da bi se uranijum i plutonijum iskoristili kao gorivo, odnosno kao oplodni materijal.

Otpad je samo mali deo ozračenog goriva. To su fisioni proizvodi od ~30% početne količine ²³⁵U koja je pretrpela fisiju i fisioni proizvodi od plutonijuma nastalog u reaktoru.

Izdvojeni uranijum i plutonijum mogu se upotrebiti na dva načina: a) izraditi tablete od uranijum-dioksida, a plutonijum sačuvati za upotrebu u budućim oplodnim reaktorima ili b) izraditi mešano oksidno gorivo od uranijuma i plutonijuma koje se može iskoristiti u termičkim reaktorima kao i uranijum-diok sid.

Gorivni elementi od mešanih oksida. Izrada gorivnih elemenata od mešanih oksida (MOX-gorivo) može se podeliti u četiri glavne faze: izrada polaznih materijala, izrada tableta, ubacivanje goriva u košuljice i njihovo zatvaranje, izrada sklopova gorivnih elemenata.

Ceo proces izrade strogo je kontrolisan sveobuhvatnim meraima i obezbeđenjem kvaliteta. Na taj deo aktivnosti otpada oko 40% ukupnih troškova izrade.

Uranijum-oksid proizvodi se kao za lakovodne reaktore. Plutonijum se dobija iz postrojenja za preradu ozračenog goriva rastvoren u azotnoj kiselinji. Plutonijum se najpre odvaja kao talog u obliku četvorovalentnog oksalata, a zatim se žarenjem na temperaturi od 300 °C prevodi u PuO₂.

Fisioni se materijali mehanički mešaju, a tablete se izrađuju hladnim presovanjem pomešanog praha i sinterovanjem na temperaturi višoj od 1700 °C. Gustina je tako dobivenih zelenih tableta 92...96% teorijske gustine koja iznosi ~5,5 g/cm³. Pre sinterovanja mora se nadstehiometrijski uranijum-dioksid redukovati na stehiometrijski. To se odvija u redukovanoj atmosferi na temperaturi do 1000 °C.

Da bi se zadržao što ravnomerniji zazor između unutrašnjeg zida košuljice i tableta, tablete se obrađuju na točno određeni prečnik na brusilici bez centriranja pod vodom, a zatim se suše na temperaturi višoj od 500 °C i podvrgavaju brižljivom pregledu. Ispituju se geometrijski oblik, površina, odnos Pu:U, veličina Pu čestica, hemijska čistoća i sadržaj zaostalog gasa.

Osobine košuljica i materijala za košuljice, njihovo ispitivanje i postupak zavarivanja prvog čepa (zatvarača) isti su kao i za košuljice lakovodnih reaktora.

Tablete se ubacuju tako da ne zaprljavaju spoljnju stranu košuljice radioaktivnim materijalom. Posle ubacivanja svih tableta i drugih konstrukcionih delova (opruge i sl.) uglavljuje se drugi zatvarač, gorivni element se puni helijumom i zavaruje.

Ispitanje kvaliteta obuhvata testove umicanja helijuma koji je u gorivni štap bio doveden pod pritiskom od 3,0 MPa, provere varova, geometrijskog oblika, ugiba štapova i kontaminacije. Tako ispitani štapovi upotrebljavaju se za izradu sklopova po postupku za izradu ostalih vrsta gorivnih elemenata.

Pored proizvodnje energije, oplodni reaktori će pretvarati velike količine nefisiognog ²³⁸U u fisijni ²³⁹Pu. Čak će i više fisiognog materijala biti proizvedeno nego što je utrošeno. Prevara i recikliranje ozračenog goriva štedi uranijumske zalihe.

Upotreboom mešanih oksida smanjiće se potrošnja uranijuma za ~23%. Sem toga recikliranjem se smanjuje potreba za obogaćivanjem. Reciklirani uranijum nešto je bogatiji uranijumom 235 nego prirodni uranijum, dok reciklirani plutonijum nije potrebljivo obogaćivati.

Najveća se ušteda ostvaruje ako se plutonijum upotrebni u brzim oplodnim reaktorima.

Brzi oplodni reaktori imaju jezgro od obogaćenog goriva i omotač od osiromašenog uranijuma. Ako se ne želi iskoristiti ^{235}U za početno punjenje jezgra, potrebno je sakupiti plutonijum proizveden u termičkim reaktorima. Potrebno je ~2 t plutonijuma za puštanje u rad brzog reaktora snage 1 GW, odnosno ~3,5 t za zamenu prvog punjenja i za zatvaranje celog ciklusa. U jezgru takva reaktora izgara ~80 kg plutonijuma više nego što nastaje, a u omotaču nastaje ~190 kg plutonijuma više nego što izgara. To znači da se godišnje u oplodnom reaktoru stvara ~110 kg novog plutonijuma, pa je potrebno ~30 godina da se u takvu reaktoru stvari novo gorivo potrebno za drugi oplodni reaktor. Moguć je i brzi reaktor koji brže proizvodi plutonijum (npr. ako se upotrebni metalno gorivo), ali ipak brzi oplodni reaktori ne proizvode toliko plutonijuma koliko mogu proizvesti neki termički reaktori.

Ipak su brzi oplodni reaktori ekonomski vredni, jer jednom izgradeni reaktor postaje sam sebi dovoljan. Proizvodi, naime, sopstveno gorivo uz dodavanje odbačenog ^{238}U . Budući da će brzi reaktori upotrebljavati tečni natrijum za hlađenje, investicioni će troškovi brzih reaktora biti viši od termičkih, ali, s obzirom na neznatnu izmennu goriva (visoki stepen izgaranja) i niže troškove izrade i prerade goriva, može se očekivati da će proizvodni troškovi električne energije biti niži.

TORIJUM U NUKLEARNOJ ENERGETICI

Torijum je dosta rasprostranjen metal u Zemljinoj kori (0,001–0,002%), a ima ga oko četiri puta više nego uranijuma (v. *Torij*).

Torijum se uglavnom dobija iz minerala monazita. Monazita ima u permatitima, granitu i gnajsu, ali u koncentracijama i suviše malim za komercijalnu eksploataciju. Raspadanjem stena i delovanjem vode nastajale su veće koncentracije monazitnog peska, uglavnom u rečnim nanosima i na morskim obalama, gde se torijum može naći zajedno s drugim teškim mineralima. Torijum se može dobiti i kao sporedni proizvod prilikom izdvajanja titana, kalaja i cirkonijuma.

Godišnja proizvodnja monazita u svetu iznosi 15–16 hiljada tona. Kako je sadržaj torijuma u njemu 4–7%, moglo bi se izdvojiti do hiljadu tona, ali se izdvaja samo ~300 tona, i to obično kao torijum-nitrat.

Proizvođači torijuma su Australija, Brazil, Indija, Indonezija, Južna Afrika i Šri Lanka. Najveće rezerve torijuma nalaze se u Indiji, Brazilu i SAD. Procenjuje se da rezerve torijuma iznose ~2,7 · 10⁶ t. Smatra se da bi se torijum iz tih rezervi mogao dobiti po ceni 40–80 \$/kg prema vrednosti dolara u 1980. godini. Torijum se nalazi i u uranijumskim rudama. Procenjuje se da će oko 2000. godine potrošnja torijuma za

nenuklearne potrebe iznositi 450–600 t/god., a za nuklearne potrebe 750–6500 t/god., što zavisi od razvoja torijumskih nuklearnih reaktora.

Torijumova jedinjenja i legure. Torijum se topi na temperaturi od 1755 °C, a temperatura je fazne transformacije 1363 °C.

Izotropna kubna kristalna struktura torijuma ima znatnu prednost u odnosu na ortorombične kristale uranijuma koji se nejednako šire u različitim pravcima. Toplotna je provodnost torijuma ~30% veća od uranijuma na temperaturi 100 °C, a samo ~8% na temperaturi 650 °C. Gustina je torijuma manja od uranijuma i iznosi 11,7 g/cm³.

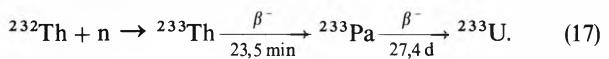
Torijum ima nešto slabije elastične i mehaničke osobine od uranijuma na sobnoj temperaturi. Hladno obrađeni metalni torijum odgreva se i rekristalizuje na temperaturi nešto višoj od 500 °C.

Torijum se lako legira. Ispitivane su brojne njegove legure da bi se dobili materijali s boljim mehaničkim osobinama koji bi se upotrebili za gorivne elemente. Istraživanja su bila usmerena i da bi se poboljšale visokotemperaturne osobine torijuma.

Torijum-dioksid je najviše istraživano torijumsko keramičko jedinjenje. Ima teorijsku gustinu od 10 g/cm³ i temperaturu topljenja 3300 °C. Do te temperature ima samo jednu kubnu fazu s fluoritnom kristalnom strukturu, izomorfna je i potpuno se meša s uranijum-dioksidom.

Sem toga, istraživani su karbidi torijuma, monokarbidi i dikarbidi. Kristalna je struktura monokarbida kubična, a dikarbida pseudoortorombična. Oba karbida tope se na temperaturi od ~2640 °C. Teorijska je gustina monokarbida 10,6, a dikarbida 9,6 g/cm³. Za razliku od oksida, karbidi se upotrebljavaju jedino u nuklearnoj tehnologiji.

Konverzija torijuma u ^{233}U . Upotreba je torijuma u nuklearnim reaktorima moguća, jer ^{232}Th (jedini izotop torijuma koji se nalazi u prirodi) može apsorbovati neutrone i proizvoditi fizički ^{233}U :



Stoga se torijum može, kao i ^{238}U , upotrebiti kao oplodni materijal. Budući da torijuma ima više od uranijuma, nastoje se razviti metode za iskorišćenje torijuma u energetici, iako još ne onoliko koliko se pažnje posvećuje ciklusu ^{238}U - ^{239}Pu .

Najveća je prednost ciklusa ^{232}Th - ^{233}U u odnosu na ciklus ^{238}U - ^{239}Pu što ^{233}U ima veći neutronski prinos po fisiji, pa je potrebno manje goriva za istu snagu reaktora. Međutim, ciklus ^{232}Th - ^{233}U ima i velik nedostatak, jer je za početno punjenje potreban visoko obogaćeni uranijum ili plutonijum, a postoje i dodatne teškoće u preradi goriva zbog γ -zračenja ^{228}Th koјi emitira i α -čestice.

Za razliku od uranijuma što ima izotop ^{235}U koji je proizvođač neutrona, torijum nema prirodnog izotopa koji ih može emitovati. Zbog toga mora da se ^{232}Th iskorišćuje u sprezi sa ^{235}U da bi se dobio ^{233}U . Jezgra ^{233}U , međutim, mogu da održavaju lančanu reakciju fisije. Kad nastane fisija, emituju se dva

Tablica 1
VISOKOTEMPERATURNI TORIJUMSKI REAKTORI

	Toplotna snaga MW	Električna snaga MW	Oblik gorivnih elemenata	Sastav goriva	Početak i kraj pogona
Dragon (Vel. Britanija)	20	—	cilindrični	torijum-dikarbidi i uranijum-dikarbidi	1966/1975.
Peach Bootom (SAD)	115	40	cilindrični	torijum-dikarbidi i uranijum-dikarbidi	1967/1974.
AVR (SR Nemačka)	46	15	sferni	torijum-oksidi i uranijum-oksidi	1968.
Fort St. Vrain (SAD)	837	330	heksagonalni	torijum-dikarbidi i uranijum-dikarbidi	1976.
THTR (SR Nemačka)	750	300	sferni	torijum-oksidi i uranijum-oksidi	1984.

ili tri neutrona, a za lančanu reakciju dovoljan je jedan od neutrona. Ako se taj višak neutrona iskoristi za proizvodnju ^{233}U iz ^{232}Th , moguće je dobiti faktor konverzije i veći od jedinice, što torijum u nuklearnoj energetici čini posebno atraktivnim. Nuklearnim torijumskim reaktorima mogao bi se, gledano dugoročno, ostvariti ekonomičniji nuklearni gorivni ciklus nego upotreboom ostalih tipova reaktora.

Neki unapređeni tipovi torijumskih konvertora izgleda da mogu uspešno proizvoditi dovoljno ^{233}U da bi se mogao ostvariti sistem koji bi se samo održavao i u koji ne bi trebalo dodavati obogaćeni uranijum. Takav sistem bio bi pogodan za zemlje koje raspolažu s malo fisionog materijala i koje nastoje da se brzo oslobole uvoza uranijuma.

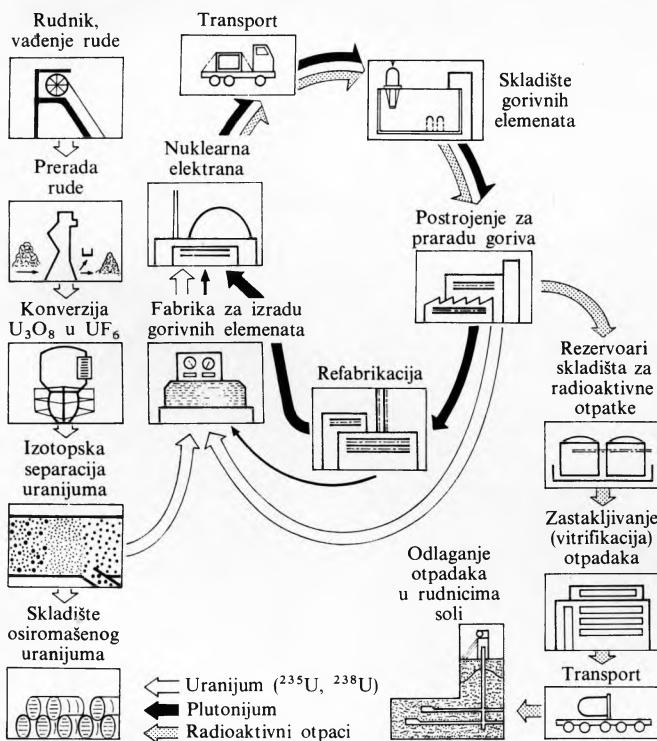
Neke najrazvijenije zemlje sveta, međutim, nisu imale ekonomskog interesa da ulažu dodatna i značajna sredstva u razvoj još jednog nuklearnog gorivnog ciklusa, prepustajući inicijativu zemljama koje nisu razvile ciklus uranijum-plutonijum.

U tabl. 1 dat je pregled nekih izvedenih nuklearnih reaktora u kojima se iz torijuma dobija ^{233}U .

Termički torijumski oplodni reaktori mogu biti alternativa oplodnim plutonijumskim reaktorima i zbog manje potrebne količine fisionog goriva po jedinici instalisane snage, što bi moglo smanjiti troškove proizvodnje energije.

GORIVNI CIKLUSI

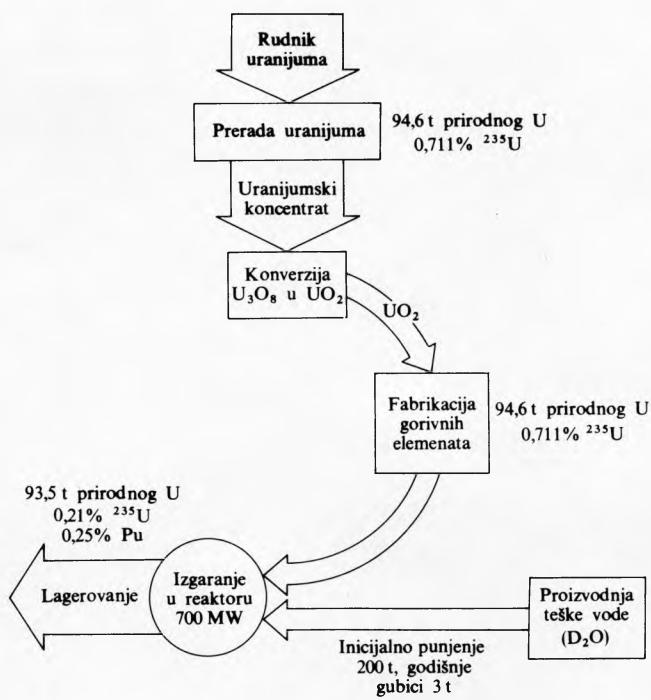
Da bi se iskoristio energetski potencijal nuklearnih goriva, potrebne su različite faze obrade. Taj se tok goriva naziva nuklearnim gorivnim ciklusom (sl. 24).



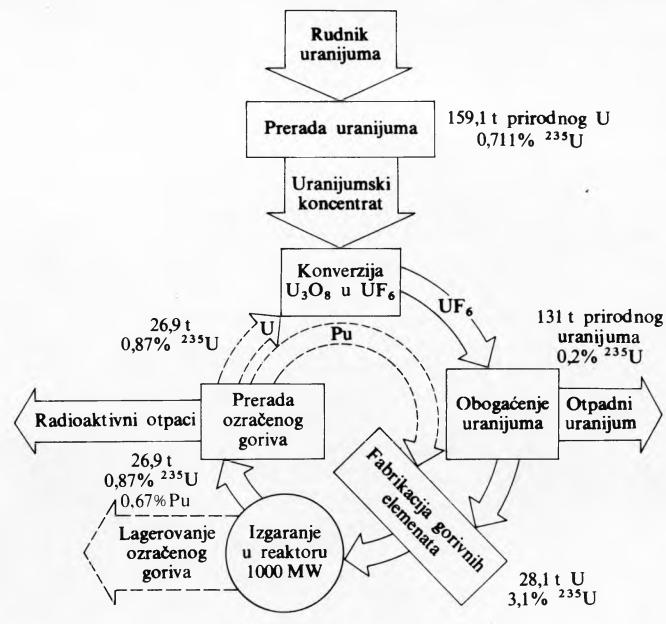
Sl. 24. Shema gorivnog ciklusa

Gorivni ciklus počinje proizvodnjom fisionog i oplodnog materijala, a završava se odlaganjem ozračenih gorivnih elemenata ili visokoradioaktivnih proizvoda fisijske izdvojenih iz njih u procesu prerade.

Gorivni ciklus današnjih reaktora. Do sada je najviše primenjivan uranijumska ili otvoreni ciklus, koji se naziva i polazni ciklusom, iako to zapravo nije ciklus, već samo prolaz goriva kroz reaktor (sl. 25 i 26). U tom se ciklusu ^{235}U , ^{238}U i ^{239}Pu ne uvode ponovo u proces, već se čuvaju u ozračenim gorivnim elementima u kojima je izvesna količina plutonijuma i mnogo osiromašenog uranijuma.



Sl. 25. Gorivni ciklus s prirodnim uranijumom



Sl. 26. Gorivni ciklus s obogaćenim uranijumom

U nuklearnom gorivu koje je bilo obogaćeno sa $\sim 3\%$ ^{235}U , koje se obično upotrebljava u lakovodnim reaktorima, posle rada od $\sim 30000 \text{ MWd/t}$ sadrži, pored plutonijuma, još otprilike i onoliko ^{235}U koliko ga ima u prirodnom uranijumu. Taj je uranijum upotrebljiv i kad se grade samo termički reaktori i kad se osiromašeno gorivo ne upotrebljava u brzim oplodnim reaktorima.

U tabl. 2 nalaze se podaci o potrebnom nuklearnom gorivu za 30 godina rada reaktora snage 1000 MW, uz iskorištenje od 70% i uz pretpostavku da se tokom obogaćivanja uranijuma preostali uranijum osiromaši na 0,2% ^{235}U .

Izbor gorivnog ciklusa i tipa nuklearnih reaktora zavisi od ukupno potrebnog uranijuma i drugih usluga u gorivnom ciklusu, od ekonomskih uslova i tehničkih ostvarenja, te od mnogih drugih faktora. Ako bi se, npr., odlučilo za recikliranje goriva ili za gradnju oplodnih reaktora, bilo bi potrebno da

Tablica 2

POTREBNI URANIJUM ZA OSNOVNE TIPOVE REAKTORA SNAGE 1000 MW (ISKORIŠĆENJE 70%) ZA 30-GODIŠNJI POGON

Tip reaktora	Potrebni uranijum t
Lakovodni reaktor s jednim prolazom goriva:	
— savremena tehnologija	4260
— usavršeni za ~15%	3720
— usavršeni za ~30%	3080
Lakovodni reaktor s recikliranjem plutonijuma:	
— savremena tehnologija	2665
— usavršena tehnologija	1850
Teškovodni reaktor s jednim prolazom goriva:	
— sadašnja tehnologija, prirodnji uranijum	3655
— usavršena tehnologija, nisko obogaćen uranijum	2505
Teškovodni reaktor s recikliranjem plutonijuma	
— prirodnji uranijum	1820
Torijumski teškovodni reaktor:	
— ^{233}U pomešan s visoko obogaćenim uranijumom	1685
— recikliranje visoko obogaćenog goriva	1520
— recikliranje visoko obogaćenog goriva i upotreba plutonijuma	1220
Torijumski visokotemperaturni reaktor*:	
— ^{233}U pomešan s visoko obogaćenim uranijumom	2375
— recikliranje visoko obogaćenog goriva	1656
Brzi oplodni reaktor U-Pu:	
— tehnologija XX veka	35
— tehnologija XXI veka	45
— usavršena tehnologija XXI veka	49

*Uključen sav prirodni uranijum potreban za gorivni ciklus za prvu generaciju reaktora.

**Pored uranijuma potreban je i plutonijum. Podaci se odnose na osiromani uranijum. Potreban uranijum zavisi od prinosa plutonijuma, jer s povećanim prinosom raste i potrebbi dodatni uranijum uz istovremeno povećanje neto-proizvodnje plutonijuma.

se izgrade velika postrojenja za preradu ozračenog goriva. Ako bi se, međutim, odlučilo za samo jedan prolazak goriva kroz reaktor, morala bi se izgraditi skladišta za čuvanje ozračenog goriva i postrojenja za uklanjanje radioaktivnih otpadaka većeg kapaciteta.

Gorivni ciklus visokotemperaturnih reaktora. Kad se grade visokotemperaturni reaktori, mogući su gorivni ciklusi uranijum-torijum (U-Th) i uranijum-uranijum (U-U). Za ciklus U-U potrebno je obogaćenje uranijuma od 6...10% ^{235}U , a za ciklus U-Th do 93%. U ciklusu U-Th potrebno je nešto manje ^{235}U po jedinici snage. Za taj je ciklus ^{235}U pomešan s torijumom sa ^{238}U . U ciklusu U-Th od ^{232}Th nastaje fizički izotop ^{233}U , a u ciklusu U-U od ^{238}U nastaje ^{239}Pu . S aspekta neutronske ekonomije ^{233}U je vrlo koristan fizički materijal. U do sada izgrađenim visokotemperaturnim reaktorima s gorivnim ciklусом U-Th poboljšana je ekonomija fisionog goriva u odnosu na sisteme s ciklусом U-U . Tako je za ciklus U-U potrebno 65% više prirodnog uranijuma nego za ciklus U-Th , a neto-potrošnja fizičkog materijala u ciklusu U-Th manja je za ~25%.

Gorivni ciklus U-Th omogućava da se postigne konverzionalni odnos i do 0,95, što znači da takav sistem može stvoriti skoro isto toliko goriva koliko ga potroši.

Ekonomičan ciklus U-Th mogući je naročito s gorivom u obliku kugli, pri čemu se reaktor puni mešavinom više tipova gorivnih elemenata. Tako oko 30% kugli sadrži reciklirani ^{233}U , a oko 10% kugli visoko obogaćene polazne čestice koje mogu ostati u sistemu do visokog stepena izgaranja. Sve ostale kugle sadrže čist torijum-oksid (ThO_2). Te su kugle mnogo manje opterećene ozračivanjem.

Za preradu goriva visokotemperaturnih reaktora za oba moguća ciklusa moraju se najpre ukloniti grafitne obloge. Za preradu gorivnih elemenata koji sadrže torijum služi proces tzv. THOREX. Za preradu goriva iz ciklusa U-U primenjuje se proces PUREX, koji nije moguće obaviti u prostorijama za preradu goriva lakovodnih reaktora bez većih adaptacija. Pored toga, zbog visokog stepena izgaranja uranijuma, sastav plu-

tonijumovih izotopa nešto je drukčiji nego u lakovodnim reaktorima, što otežava njegovu upotrebu kao goriva.

Gorivni ciklus brzih reaktora. Glavne karakteristike gorivnog ciklusa za brze reaktore nalaze se u tabl. 3.

Glavne osobine gorivnog ciklusa (izrada gorivnih elemenata, izgaranje u reaktoru, prerada goriva, ponovna fabrikacija goriva) zavise od količine plutonijuma koji kruži. U gorivnom ciklusu brzih reaktora ima otprilike četiri puta više plutonijuma nego u ciklusu lakovodnih reaktora.

Tablica 3
Karakteristike gorivnog ciklusa brzih reaktora (SNAGA 2000 MW)

	Oksidno gorivo	Karbido gorivo
Odnos stvorenog i utrošenog goriva	1,12...1,25	1,30...1,40
Maksimalni lokalni stepen izgaranja (MWd/t)	100 000	100 000
Količina goriva		
— u reaktorskom jezgru (t)	3,5...5,5	2,5...4,0
— u celom ciklusu (t)	6...12	5...10
Godišnji višak plutonijuma (t)	0,1...0,3	0,3...0,5

Hemski postupci prerade nešto se razlikuju od onih za gorivo lakovodnih reaktora. Gorivo lakovodnih reaktora ima ~1% Pu, gorivo koje se reciklira ~3% Pu, dok gorivo brzih oplodnih reaktora u proseku ima ~10% Pu kad se istovremeno prerađuje gorivo iz aktivne zone, aksijalne i delimično radikalne oplodne zone reaktora. Kad se prerađuje gorivo samo iz aktivne zone, sadržaj Pu može iznositi do 30%. Zbog toga se u postrojenjima za preradu takva goriva mora sprečiti nastanak kritične mase u bilo kojem delu postrojenja.

LIT.: J. W. Clegg, D. D. Foley, Uranium Ore Processing, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass. 1958. — A. M. Weinberg, E. P. Wigner, The Physical Theory of Neutron Chain Reactors. The University of Chicago Press, Chicago 1958. — A. N. Holden, Physical Metallurgy of Uranium. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass. 1958. — G. T. Seaborg, The Transuranium Elements. Yale University Press, 1958. — F. L. Guthbert, Thorium Production Technology. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass. 1958. — S. Glassstone, A. Sesonske, Nuclear Reactor Engineering. D. van Nostrand Company, New Jersey 1963. — Zur friedlichen Nutzung der Kernenergie. Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Bonn 1977. — D. Popović, Nuklearna energetika. Naučna knjiga, Beograd 1978. — A. M. Petrović, Problemi atomne nauke i tehnike. Atomizdat, Moskva 1979. — M. W. Graves, Nuclear Fuel Management. John Wiley & Sons, New York 1979. — Obvezivanje, korišćenje i prerada nuklearnog goriva u Jugoslaviji. Institut za nuklearne nauke Boris Kidrić, Vinča 1980. — P. Anastasijević, D. Spasojević i sar., Strategija gorivnog ciklusa nuklearno-energetskih postrojenja. Institut za nuklearne nauke Boris Kidrić, Beograd, Vinča 1981.

P. Anastasijević

NUKLEARNO ORUŽJE, ponekad ranije nazivano *atomskim oružjem* ili *atomskom bombo*, obuhvata više ubojitih sredstava, uključujući i sredstva za njihov prenos do cilja, čije se dejstvo zasniva na brzom oslobođanju veoma velike energije u nuklearnim procesima. Nuklearno oružje pripada grupi oružja za masovno uništavanje ljudi (u vojnoj terminologiji žive sile) i ostalih živih bića, borbenih i neborbenih tehničkih sredstava, za rušenje vojnih utvrđenja u borbenim zonama protivnika, za uništavanje vitalnih industrijskih i energetskih postrojenja, komunikacijskih čvorova uopšte, za destrukciju funkcionisanja telekomunikacija i privremenu paralizu sistema veza, upravljanja i komandovanja, te za izazivanje straha i dezorganizacije u odrbani i aktivnim dejstvima branjocu. Pored te vojne primene, nuklearno oružje je u proteklim decenijama služilo kao sredstvo pritiska u ostvarivanju vojno-političkih ciljeva, podsticalo trku u naoružavanju, ali je istovremeno uticalo i na razvoj nuklearnih i fizičko-tehničkih nauka.