

M. V. Mataušek
Institut za nuklearne nauke
"Boris Kidrič" - Vinča

EKONOMIJA IZGARANJA NUKLEARNOG GORIVA

NUCLEAR FUEL BURN-UP ECONOMY

SADRŽAJ - U periodu od 1981-1985. godine, za potrebe Združene elektroprivrede Beograd, a uz finansijsku podršku Republičke zajednice nauke SR Srbije, radi se studija pod nazivom "Ekonomija izgaranja nuklearnog goriva". U prvoj fazi, završenoj sredinom 1983. godine, studija je obuhvatila: uporednu analizu karakteristika komercijalnih tipova nuklearnih elektrana sa stanovišta korišćenja nuklearnog goriva; razvoj i/ili usvajanje metodologije analize izgaranja nuklearnog goriva; definisanje podloga za izradu poziva za ponude sa stanovišta nuklearnog goriva. U ovom referatu su u osnovnim crtama prikazani cilj, sadržaj i dosadašnji rezultati rada na studiji.

ABSTRACT - In the period 1981-1985, for the needs of Utility Organization, Beograd, and with the support of the Scientific Council of SR Srbija, work has been performed on the study entitled "Nuclear Fuel Burn-up Economy". The first phase, completed during the year 1983, comprised: comparative analysis of commercial NPP from the standpoint of nuclear fuel requirements; development of methods for fuel burn-up analysis; specification of elements, concerning the nuclear fuel for the tender documentation. The present paper gives the short description of the purpose, content and results achieved in the up-to-now work on the study.

1. UVOD

U okviru programa finansiranog od strane Republičke zajednice nauke Srbije, posebno u okviru projekta "Energetski nuklearni reaktori" u periodu 1976. do 1980, sistematski je radjeno na razvoju metodologije analize izgaranja goriva u energetskim nuklearnim reaktorima i formiranju biblioteke odgovarajućih računskih programa /1-3/. Cilj rada na Studiji "Ekonomija izgaranja nuklearnog goriva" je bio da se do sada stečena znanja i iskustva upotpune i uobliče tako da odgovaraju potrebama elektroprivrede u fazi pripreme za gradnju i gradnje nuklearnih elektrana, pri čemu se posebno imaju u vidu aktivnosti kao što su: izbor tipa nuklearne elektrane, postavljanje zahteva potencijalnim isporučiocima, ocena ponuda i sl.

Predviđeno je da se Studija realizuje u dve faze. U prvoj fazi (1981-1983) su proučeni komercijalni tipovi nuklearnih elektrana i izvršena je uporedna ana-

liza njihovih karakteristika sa stanovišta iskorišćenja nuklearnog goriva. Prikupljeni su i sistematizovani podaci koji su od značaja za ekonomičnost reaktorskog dela nuklearnog gorivnog ciklusa. Bilansi fisibilnih i nefisibilnih materijala, pogonske karakteristike nuklearnih elektrana vezane za gorivo koje koriste kao i drugi trenutno važeći tehno-ekonomski pokazatelji. Takođe su proučene mogućnosti uvođenja usavršenih varijanti korišćenja nuklearnog goriva, te su sa tog stanovišta definisane i podloge za izradu poziva za ponude potencijalnim isporučiocima nuklearne elektrane.

Drugi deo rada na studiji, koji zbog svoje obimnosti neće biti izlagan u ovom referatu, ima za cilj razvoj i usvajanje metodologije analize izgaranja nuklearnog goriva. NET IBK paket računarskih programa upotpunjen je u proteklom periodu sa više novih računarskih programa /4/ koji su instalisani na računarima CDC 3600 i IBM 370/3031. Posebna pažnja posvećena je verifikaciji rezultata proračuna upoređenjem sa rezultatima eksperimenata radjenim na istraživačkim reaktorima RA i RB i na NE Krško. Analizirane su različite varijante modularnih šema za nuklearno-fizičku analizu izgaranja nuklearnog goriva i kao najpodesnija i najtačnija odabrana je u ovoj fazi šema WIMSD/4-TWENTY GRAND. Na računaru IBM ostvaren je automatizovani prenos podataka između ova dva programa u obliku jedinstvenog koda IZGOR.

Ovladavanje metodama i odgovarajućim računarskim programima za višegrupni tro-dimenzioni proračun reaktora i povezivanje nuklearno-fizičkog i termo-hidrodinamičkog proračuna parametara reaktora predviđeno je za drugu fazu izrade Studije. S obzirom da su već dostupna i određena pogonska iskustva NE Krško, predviđa se verifikacija razvijene metodologije na osnovu radnih parametara i iskustava u korišćenju nuklearnog goriva na ovoj elektrani. Konačno, kada bude izvršen izbor jedinstvenog tipa reaktora za buduće nuklearne elektrane u našoj zemlji, biće definitivno formirana i modularna računarska šema za analizu izgaranja nuklearnog goriva, projektovanje reaktorskog jezgra, optimizaciju korišćenja nuklearnog goriva i proračun ekonomskih pokazatelja potrebnih elektroprivredi za globalno planiranje i optimizaciju nuklearnog gorivnog ciklusa u celini.

2. UPOREDNA ANALIZA KARAKTERISTIKA KOMERCIJALNIH NUKLEARNIH ELEKTRANA SA STANOVIŠTA NUKLEARNOG GORIVA

Sa stanovišta vrste goriva koje koriste, termalni energetske reaktori koji se danas nalaze u komercijalnoj upotrebi mogu se podeliti u dve široke grupe. To su reaktori koji koriste gorivo od prirodnog uranijuma i reaktori sa gorivom od slabo obogaćenog uranijuma. Za sada skoro svi rade u otvorenom gorivnom ciklusu, mada se gorivo nekih od ovih reaktora preradjuje. Izbor tipa energetskog nuklearnog reaktora u zemljama koje su prve započele sa radom na nuklearnoj energetici bio je u velikoj meri uslovljen specifičnim nacionalnim okolnostima, to jest prethodnim iskustvom stečenim u okviru vojnih programa i raspoloživim postrojenjima.

U Tabeli I navedene su /5.6/ ukupne potrebe za uranijumom kod različitih tipova termalnih energetskih reaktora, pod pretpostavkom da je vek trajanja elektrane 30 godina i da ona radi sa faktorom opterećenja od 70 %. Očigledno je da se recikliranjem uranijuma može postići bolje iskorišćenje goriva nego uvođenjem savršenijeg tipa reaktora. U neposrednoj budućnosti, dok prerada isluženog goriva i njegovo recikliranje bilo u termalnim bilo u brzim reaktorima ne postanu šire dostupni, posebno će biti značajni efekti koji se mogu postići različitim merama za ekonomičnije korišćenje nuklearnog goriva.

TABELA I

Tip reaktora	Ukupne potrebe za uranijumom (t/GWe)		Količina proizvedenog ^{239}Pu (kg)
	Otvoreni ciklus	Sa reciklacijom U	
CANDU	4 200	-	490
MAGNOX	5 700	3 700	620
AGR	4 700	3 200	170
PWR	4 600	3 500	270

U Tabeli II dat je opšti pregled mogućnosti za postizanje ušteda u potrebnoj količini uranijuma za nuklearne lektrane različitog tipa. Kod reaktora koji koriste obogaćeno gorivo smanjenjem ostatka obogaćenja u isluženom gorivu sa 0,25% na 0,2%, potrebna količina prirodnog uranijuma smanjuje se za oko 10%. Povećanjem ukupnog izgaranja isluženog goriva mogu se takođe postići značajne uštede, posebno kod reaktora koji koriste prirodno-uranijumsko gorivo, ali i kod reaktora sa obogaćenim gorivom ukoliko nije praćeno povećanjem obogaćenja svežeg goriva. Prerada ozaćenog goriva u cilju recikliranja uranijuma ima smisla samo za reaktore koji koriste obogaćeno gorivo, jer isluženo gorivo CANDU reaktora sa drži manje ^{235}U nego osiromašeni uranijum koji odbacuju postrojenja za obogaćivanja. Trenutno su vrlo aktuelna istraživanja u cilju recikliranja plutonijuma u termalnim reaktorima. Ušteda u ukupnim potrebama za prirodnim uranijumom koja se postiže na ovaj način znatno je manja nego kada se proizvedeni plutonijum koristi u brzim oplodnim reaktorima, ali ova mogućnost svakako zaslužuje posebni pažnju u periodu dok brzi brideri ne udju u širu komercijalnu upotrebu.

TABELA II

Mera za smanjenje ukupnih potreba za uranijumom	Tip reaktora	Vremenska skala	Procenjena ušteda (%)
Smanjenje ostatka obogaćenja u isluženom gorivu	LWR	kratkoročno	10
Povećanje ukupnog izgaranja isluženog goriva	HWR LWR	srednjeročno	10-30
Recikliranje plutonijuma u termalnim reaktorima	LWR HWR	srednjeročno	12
Recikliranje plutonijuma u brzim oplodnim reaktorima	HWR LWR	dugoročno	95

Zbog velikih investicionih ulaganja u gradnju nuklearnih elektrana, kao i zbog činjenice da one po pravilu rade u baznom režimu, raspoloživost i iskorišćenje nuklearnih elektrana su od prvorazrednog značaja za ekonomičnost njihovog rada. Prema podacima Međunarodne agencije za atomsku energiju /7/ za više od 40% neplanirano izgubljenog vremena krivicu snose kvarovi na centralnom sistemu za odvođenje toplote, parogeneratorima i turbogeneratorima, dok su kvarovi na opremi specifičnoj za nuklearne elektrane (reaktor, gorivo, kontrolni sistem i instrumentacija) uzrok za svega 12,4% ukupno izgubljenog vremena. U Tabeli III dati su podaci o razlozima i efektima planiranih i neplaniranih ispada, posebno za reaktore sa kontinualnom izmenom goriva i za reaktore sa diskontinualnom izmenom goriva. Prirodno je da je kod reaktora sa kontinualnom izmenom goriva znatno manje planiranih ispada vezano za izmenu goriva, održavanje i popravke. S obzirom da se za vreme izmene goriva kod elektrana LWR tipa uvek vrši i redovni remont, statistički podaci ustvari pokazuju da su zahtevi za planiranim ispadima reaktora sa kontinualnom izmenom goriva stvarno znatno niži, posebno kada se ima u vidu i ukupno veća raspoloživost ovih elektrana.

TABELA III

Razlog ispada		Izgubljeni časovi (%)	
		GCR, AGR, PHWR	PWR i BWR
Planirani ispadi	Zamena goriva i održavanje	49.1	60.6
	Testiranje	1.0	1.1
	Regulatorna ograničenja	0.8	1.7
	Ostalo	1.7	0.7
Neplanirani ispadi	Kvarovi na opremi	29.1	23.8
	Razno	18.2	12.1

S obzirom da vreme utrošeno na izmenu goriva i održavanje čini više od 50% ukupno, planirano i neplanirano, izgubljenog vremena rada nuklearnih elektrana, čine se naponi da se ovo vreme skрати. To se, u principu, može postići na dva načina: Poboľšanjem performansi goriva, produžavanjem vremena boravka goriva u reaktoru i povećanjem srednje dubine izgaranja isluženog goriva i/ili boljim planiranjem postupka izmene i skraćivanjem trajanja same operacije izmene.

3. MOGUĆNOSTI BOLJEG KORIŠĆENJA NUKLEARNOG GORIVA KOD POSTOJEĆIH TIPOVA KOMERCIJALNIH NUKLEARNIH ELEKTRANA

Uzimajući u obzir i elektrane koje se nalaze u gradnji ili u planu, može se očekivati da će do 1990. instalisana snaga svih nuklearnih elektrana iznositi oko 480 GWe, pri čemu će udeo lakovodnih reaktora porasti sa sadašnjih 81% na 85%. To znači da će i u neposrednoj budućnosti lakovodni reaktori, snage 1000 do 1300 MWe, igrati apsolutno dominantnu ulogu u nuklearnoj energetici. S obzirom na izuzetno visoku cenu i relativno dug vremenski interval koji su potrebni za

razvoj i uvodjenje u komercijalnu upotrebu novih tehnoloških rešenja, ne treba očekivati da će postojeći lakovodni reaktorski sistemi u dogledno vreme pretrpeti bitnije modifikacije. Razvoj će prvenstveno biti usmeren na usavršavanje postojećih rešenja, i u nenuklearnom i u nuklearnom delu elektrane, a u cilju povećanja pouzdanosti i raspoloživosti, odnosno povećanja ekonomičnosti.

I pored vrlo povoljnih podataka o ponašanju nuklearnog goriva u radnim uslovima, proizvođači već najavljuju nove tipove gorivnih sklopova. Da bi se minimizirali efekti na osnovni projekat reaktorskog jezgra i nuklearne elektrane, zadržavaju se globalne dimenzije gorivnih sklopova, a povećava se broj mesta u rešetki gorivnih šipki (18x18 za PWR, 9x9 za BWR) i smanjuje se njihov prečnik. Odnos mase gorivo/hladilac i količina strukturnog materijala gorivnog sklopa tipa 18x18 zanemarljivo se razlikuju od vrednosti za standardni sklop tipa 16x16, ali je znatno smanjen iznos srednje podužne generisane snage koja direktno utiče na interakciju gorivna tableta-košuljica, osnovni uzrok oštećenja goriva.

Srednje izgaranje isluženog goriva lakovodnih nuklearnih elektrana kreće se danas oko 30 GWD/tU, nešto je veće kod elektrana PWR tipa, a nešto niže kod BWR. Eksperimenti koji su u toku pokazuju /8/ da već danas savršenija koncepcija gorivnih sklopova dopušta postizanje srednjeg izgaranja do 40 GWD/tU za PWR i do 34 GWD/tU za BWR elektrane. Pri tome se lokalne vrednosti izgaranja kreću i do 52 GWD/tU, odnosno 45 GWD/tU, respektivno. Očekuje se da će već u neposrednoj budućnosti nivo izgaranja moći da se podigne do 45-50 GWD/tU za LWR, odnosno do 40 GWD/tU za BWR elektrane.

Povećanje ukupnog srednjeg izgaranja nuklearnog goriva ima za posledicu smanjenje potrebe za uranijumom i smanjenje zahteva za uslugama i predreaktorskog i postreaktorskog dela gorivnog ciklusa. Pri tome je najdirektniji način za povećanje ukupnog izgaranja isluženog goriva produženje vremena koje ono proboravi u reaktoru. To se može postići ili povećanjem dužine ciklusa ili povećanjem broja ciklusa, uz zadržavanje njegove nominalne dužine. Prva alternativa je povoljnija sa stanovišta raspoloživosti elektrane, naravno pod uslovom da nije ugrožena pouzdanost samog goriva. U oba slučaja dolazi do povećanja lokalnih vrednosti generisane snage, jer je za održavanje dužeg ciklusa neophodno uvodjenje većeg početnog obogaćenja, dok je u drugom slučaju smanjena mogućnost izravnjanja snage zbog manjeg broja sklopova koji se zamenjuju ili izneštaju na kraju ciklusa.

Teorijske analize pokazuju da bi se produženjem dužine ciklusa od 12 na 18 meseci kod PWR elektrane ukupno izgaranje goriva moglo povećati za jednu polovinu, što bi uz povećanje početnog obogaćenja goriva imalo za rezultat smanjenje ukupnih potreba za uranijumom od oko 5%. Povećanje vremena boravka goriva u reaktoru od 3 na 5 ciklusa uz zadržavanje sadašnje dužine ciklusa od 12 meseci imalo bi za rezultat uštedu u uranijumu čak do 15%. Prirodno da su uštede u transportu i odlaganju isluženog goriva direktno proporcionalne povećanju ukupnog izgaranja goriva.

U Tabeli IV dat je sumarni pregled različitih mogućnosti boljeg iskorišćenja nuklearnog goriva u postojećim tipovima komercijalnih nuklearnih elektrana, uz navodjenje odgovarajućih ekonomskih efekata.

TABELA IV

Tip poboljšanja	Tip elektrane	Ušteda u potrebnosti za U	Uticaj na cenu NGC	Prateći efekti
1. Povećanje ukupnog izgaranja isluženog nuklearnog goriva	PWR	8-12%	-5-8%	Povećan unutrašnji pritisak u gorivnom elementu, povećana interakcija gorivo-košuljica, promena dimenzija gorivnog sklopa, povećana spoljašnja korozija košuljice
2. Promena konstrukcije gorivnog sklopa				
- povećanje odnosa usporavanja smanjenjem prečnika gorivne šipke i povećanjem broja šipki u sklopu	PWR	5%	-3%	Povećanje cene goriva
- smanjenje prečnika gorivne šipke bez smanjenja odnosa usporavanja	BWR	1%	-1%	Smanjenje cene goriva omogućilo bi primenu drugih poboljšanja
- povećanje odnosa usporavanja i smanjenje rezonantnog zahvata usled povećanog prečnika gorivne šipke	PWR	3-6%	-	Nema negativnih uticaja ukoliko se ne smanjuje snaga
- povećanje odnosa usporavanja, koraka rešetke, prečnika gorivne šipke; prstenaste tablete	PWR	4%	-	Promena konstrukcije goriva
3. Promena spektra usled:				
- šupljina u jezgru	BWR	8%	-8%	Ograničena mogućnost primene u sadašnjim elektranama
- mehaničke izmene šupljina ili temperature hladioca	LWR	2-10%	-	Promena konstrukcije goriva
4. Uvodjenje zona različitog obogaćenja u aksijalnom i/ili radijalnom pravcu, sa prirodnim ili osiromašenim uranijumom	LWR	2-10%	-	Promena konstrukcije i rasporeda goriva u jezgru
5. Potpuno iskorišćenje gorivnih sklopova iz početnog jezgra	BWR	1%	-1%	Dobijanje dozvole za ponovno korišćenje goriva iz početnog jezgra

TABELA IV - nastavak

Tip poboljšanja	Tip elektrane	Ušteda u potrebnama za U	Uticaj na cenu NGC	Prateći efekti
6. Poboljšanje iskorišćenja goriva i konstrukcije kontrolnog sistema				
- odstojnici od cirkaloja	PWR	2%	-2%	-
- poboljšanje rasporeda gorivnih sklopova sa ciljem da se smanji isticanje neutrona iz sistema	BWR	3%	-3%	-
- ravnomerno izgaranje, smanjeno isticanje, smanjena koncentracija bora	LWR	2-10%	-	-
7. Smanjenje snage				
- pri kraju ciklusa 2-3 meseca rada na 90% nominalne snage elektrane	BWR	5%	-5%	Raspoloživost drugih energetskih izvora
- pri kraju ciklusa uključujući i smanjenje temperature hladioca	LWR	2%	-	Način rada različit od rada sadašnjih elektrana
8. Rekonstrukcija/inverzija goriva				
	BWR	4%	-	Promena konstrukcije goriva, složeno rukovanje gorivom
9. Povećana učestanost izmene goriva				
- 6 ciklusa po 6 meseci	PWR	7%	povoljno	Dobijanje dozvole za rad: mogućnost brze izmene goriva; uticaj na raspoloživost

4. MOGUĆNOSTI RECIKLIRANJA URANIJUMA I PLUTONIJUMA U POSTOJEĆIM KOMERCIJALNIM NUKLEARNIM ELEKTRANAMA

Prvobitne procene razvoja nuklearne energetike sugerirale su da će najkasnije do kraja ovog veka brzi nuklearni reaktori ući u širu komercijalnu upotrebu, te da će svojim mogućnostima oplodnje nuklearnog goriva praktično rešiti problem snabdevanja energijom. Opšta svetska ekonomska recesija, međutim, usporila je razvoj nuklearne energetike, a posebno razvoj i komercijalizaciju brzih oplodnih reaktora.

Za sada se uranijum koristi skoro isključivo u otvorenom gorivnom ciklusu u termalnim energetskim reaktorima. S obzirom na trenutno relativno nisku cenu rude uranijuma na svetskom tržištu, s jedne strane, i s obzirom na izuzetno visoku cenu izgradnje postrojenja za preradu isluženog goriva i relativno visoku cenu usluga prerade, s druge strane, otvoreni gorivni ciklus može biti ekonomski opravdan u sadašnjem trenutku, posebno za zemlje koje raspolažu većim sopstvenim rezervama uranove rude. Međutim, zemlje koje su prinudjene da uvoze uranijum suočene su već sada sa velikom zavisnošću od spoljašnjih izvora. Za

njih je stoga veoma atraktivna reciklacija i uranijuma i plutonijuma u postojećim komercijalnim termalnim energetskim reaktorima.

Ponovnim obogaćivanjem i korišćenjem uranijuma, dobijenog preradom isluženog goriva lakovodnih nuklearnih elektrana, smanjuju se zahtevi za uslugama obogaćivanja i postižu se uštede u ukupnim potrebama za prirodnim uranijumom od oko 18%. Negativni prateći efekti ogledaju se u nagomilavanju novih izotopa uranijuma (^{232}U , ^{234}U i ^{236}U), koji svojim radioaktivnim raspadom dovode do znatnog povećanja ukupnog nivoa gama zračenja, a utiču i na ekonomiju neutrona u reaktoru jer se veoma jak apsorber ^{236}U ne može u potpunosti eliminisati u procesu ponovnog obogaćivanja uranijuma. Precizne analize ovih efekata još uvek nisu moguće zbog nedovoljnog poznavanja svih potrebnih nuklearnih podataka.

Plutonium se može reciklirati u praktično svim postojećim termalnim energetskim reaktorima tako što se deo standardnih gorivnih elemenata zamenjuje tzv. MOX gorivom, to jest gorivnim elementima od mešanog plutonijum-uranijum oksida. Dosadašnji eksperimenti pokazuju da se time pogonske karakteristike reaktora ne menjaju bitno, a post-iradijacioni testovi pokazuju da nema bitne razlike u uticaju izgaranja na performanse gorivnih elemenata od čistog UO_2 i mešanog UO_2 - PuO_2 . Jedini efekat o kome treba voditi računa pri korišćenju plutonijumskog goriva u standardnim lakovodnim reaktorima je uticaj ovog goriva na efikasnost kontrolnih šipki. Naime, ako se mešano gorivo locira u blizini kontrolnih apsorbera njihova se efikasnost smanjuje zbog depresije neutronskega fluksa uslovljene većom apsorpcijom neutrona u plutonijumu u odnosu na apsorpciju u ^{235}U .

U Tabeli V cena proizvodnje gorivnih sklopova od mešanog oksida upoređena je sa cenom proizvodnje standardnih gorivnih sklopova za PWR elektrane. Zbog neophodnih posebnih mera zaštite, koje se moraju preduzimati u radu sa plutonijumom, proizvodnja i transport gorivnih sklopova od mešanog oksida višestruko su skuplji od proizvodnje i transporta standardnih gorivnih sklopova. Ovo se međutim kompenzuje time što nema troškova obogaćivanja uranijuma.

TABELA V

Troškovi proizvodnje (US \$) gorivnih sklopova za PWR	Gorivni sklop od UO_2	Gorivni sklop od UO_2 - PuO_2
uranijum i obogaćivanje	525 000	110 000
fabrikacija	60 000	280 000
transport, prerada i odlaganje	320 000	500 000
fisibilni materijal dobijen posle prerade	- 25 000	- 20 000
ukupno	880 000	870 000

Kada se razmatra mogućnost recikliranja plutonijuma, bilo u termalnim bilo u brzim oplodnim reaktorima, značajan je njegov izotopski sastav koji zavisi od

tipa energetskog reaktora u kome je plutonijum nastao. U Tabeli VI je dat izotopski sastav plutonijuma u prvoj šarži isluženog goriva za različite tipove termalnih energetskih reaktora. Termalni neutroni mogu izazvati samo fisiju ^{239}Pu i ^{241}Pu .

TABELA VI

Tip reaktora	Izotopski sastav Pu (% atoma)				
	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
MAGNOX	0.2	71.3	23.0	4.7	0.8
AGR	1.0	57.0	30.0	8.0	4.0
PWR	1.0	58.0	25.0	10.0	6.0

Važna je činjenica da se izotopski sastav plutonijuma dobijenog preradom isluženog mešanog U-Pu goriva iz PWR reaktora ne razlikuje bitno od izotopskog sastava plutonijuma dobijenog preradom standardnog isluženog goriva ovih reaktora. Naime, sastav plutonijuma koji se dobija preradom jednog punjenja termalnog energetskog reaktora sa 20-25 % gorivnih sklopova od mešanog U-Pu oksida približno je isti kao sastav plutonijuma dobijenog preradom jezgra i omotača brzog oplodnog reaktora. To znači da se plutonijum može jedanput reciklirati u termalnim energetskim reaktorima, a da se njegov kvalitet, sa stanovišta budućeg korišćenja u brzim oplodnim reaktorima bitno ne degradira.

Plutonijum i uranijum se mogu reciklirati i u teškovodnim reaktorima, čak efikasnije nego u lakovodnim. Naime, korišćenjem teške vode i kao moderatora i kao hladioca, smanjuje se neželjena apsorpcija neutrona u jezgru reaktora i postiže se ekonomičnije korišćenje nuklearnog goriva. Analize pokazuju da je u CANDU reaktorima moguće reciklirati plutonijum sa prirodnim uranijumom, sa osiromašenim uranijumom ili sa torijumom. Pri tome gorivo koje se reciklira može poticati bilo iz HWR, bilo iz LWR. Procenjuje se da bi reciklacijom plutonijuma u CANDU reaktorima mogle da se postignu uštede u potrebnom uranijumu od oko 50-60%. Recikliranje sa osiromašenim uranijumom zahtevalo bi podršku više reaktora koji koriste prirodni uranijum i veće preradjivačke kapacitete. Ovakva šema bi praktično značila sagorevanje plutonijuma, dok se recikliranjem plutonijuma sa prirodnim uranijumom količina plutonijuma održava.

Većina tehničkih mera kojima se može poboljšati iskorišćenje goriva kad elektrane rade u otvorenom gorivnom ciklusu mogu se koristiti i kada se uranijum i plutonijum recikliraju. Gorivo od mešanog uranijum-plutonijum oksida obezbedjuje istu dužinu perioda u kome je reaktivnost reaktora pozitivna kao i gorivo od obogaćenog uranijuma. Pošto je opadanje reaktivnosti sa izgaranjem manje kod mešanog nego kod uranijumskog goriva, poboljšanje iskorišćenja goriva je veće kad se plutonijum reciklira.

Iz Tabele VII se može videti kako mere predložene za bolje korišćenje goriva kod lakovodnih elektrana koje rade u otvorenom ciklusu utiču na iskorišćenje goriva ako ove elektrane rade u samopodržavajućem ravnotežnom režimu sa recikliranjem plutonijuma.

TABELA VII

Mera	Efekat
Promena rešetke reaktora	Ušteda prirodnog uranijuma raste sa smanjenjem odnosa moderator/gorivo
Pomeraj spektra	Ušteda uranijuma slična kao kod odgovarajućeg otvorenog LWR ciklusa
Uvodjenje zona različitog obogaćenja po aksijalnom pravcu i slojeva od oplodnog materijala	Povećava se faktor konverzije i postižu se uštede u prirodnom uranijumu
Ponovno korišćenje nedovoljno izgorelog goriva iz prve šarže	Nema uštede u prirodnom uranijumu
Poboljšanje načina zamene i izmeštanja goriva i poboljšanje kontrole reaktivnosti	Ušteda uranijuma slična kao kod otvorenog LWR ciklusa
Smanjenje snage pri kraju ciklusa	Nema uštede u prirodnom uranijumu
Rekonstrukcija i inverzija BWR goriva	Nema uštede u prirodnom uranijumu

Kao kod otvorenog, tako i kod zatvorenog gorivnog ciklusa, pojedina od ovih mogućih poboljšanja su međusobno povezana i njihov doprinos ukupnoj uštedi u prirodnom uranijumu nije jednak zbiru pojedinačnih ušteda. Procenjuje se da bi, ako bi se i otvoreni i zatvoreni gorivni ciklus lakovodnih reaktora unapredili u najvećoj mogućoj meri, recikliranje plutonijuma donelo uštedu u prirodnom uranijumu od 20 do 30%.

5. PODLOGE ZA IZRADU POZIVA ZA PONUDE SA STANOVIŠTA NUKLEARNOG GORIVA

Na osnovu svega izloženog može se zaključiti da u pozivu za ponudu od potencijalnog isporučioaca nuklearne elektrane i nuklearnog goriva posebno treba tražiti odgovore na sledeća pitanja:

- tip gorivnih elemenata.
- broj gorivnih elemenata u jezgri reaktora
- način zamene goriva i broj gorivnih elemenata koji se zamenjuju u jednoj godini rada elektrane.
- početno obogaćenje goriva za prvo jezgro.
- početno obogaćenje goriva za zamenu.
- predviđeno izgaranje goriva koje napušta reaktor.

Pored ovih osnovnih podataka od potencijalnog isporučioaca nuklearnog goriva treba tražiti i određenu dokumentaciju koja se odnosi na nuklearno gorivo i to:

- projektne analize.
- proračune parametara jezgra i sigurnosne analize.
- procedure i podloge potrebne za ispitivanje goriva i fizičkih parametara reaktora u fazi puštanja u pogon i u fazi normalnog rada elektrane.
- pogonska uputstva vezana za nuklearno gorivo.
- osnovnu metodologiju i odgovarajuće računarske programe potrebne za praćenje pogona, proračun izgaranja i predviđanje načina zamene i izmeštanja goriva.

U vezi sa obezbeđenjem i kontrolom kvaliteta goriva od isporučioaca treba tražiti određene garancije u pogledu dozvoljene dubine izgaranja, tehničkih performansi i kvaliteta izrade. Takođe treba definisati uslove pod kojima ove garancije važe u slučaju da je deo reaktorskog jezgra ispunjen gorivom drugog proizvođača. Ovi se uslovi odnose na način proračuna parametara reaktorskog jezgra, način izvođenja pogona, kao i na definisanje graničnog oštećenja goriva, to jest gornjeg nivoa radioaktivnosti primarnog rashladnog kruga nakon koga se prekida rad postrojenja. Isporučilac takođe mora da specificira način praćenja performansi goriva u garantnom periodu, dokumentaciju i vrste merenja koja u tom periodu treba obaviti u cilju dobijanja dokaza o postignutim garantovanim performansama.

Uobičajeno je da se od isporučioaca nuklearnog goriva traže dokazi da ponudjeni gorivni elementi imaju reference u odnosu na projekat, tehničke performanse, kvalitet i dubinu izgaranja. Ukoliko su ponudjeni gorivni elementi izmenjeni u odnosu na referentne gorivne elemente zbog napretka u tehnologiji, isporučilac treba to detaljno da obrazloži i dokumentuje, kao i da pruži dopunske garancije. Sa svoje strane investitor mora da definiše uslove pod kojima će prihvatiti ovakve izmene.

Kod nabavke goriva za lakovodne reaktore posebno treba definisati način i uslove određivanja obogaćenja svežeg goriva, kao i uslove za naknadne izmene obogaćenja.

Od isporučioaca nuklearnog goriva treba tražiti i specifikaciju ostalih komponenta ili materijala koji ulaze u njegov opseg isporuke. To su sagorivi apsorbenti, čepovi, neutronske izvori, makete gorivnog elementa za potrebe testiranja i slično.

Konačno, za potrebe proračuna ekonomskih parametara reaktorskog dela nuklearnog gorivnog ciklusa, parametara nuklearnog gorivnog ciklusa u celini, te cene jedinice proizvedene energije, potrebno je da isporučilac nuklearnog goriva, pored osnovnih podataka o gorivnom elementu obezbedi i ekonomske pokazatelje kao što su: cena proizvodnje gorivnih elemenata, cena isporuke ostalog materijala, usluga i dokumentacije vezanih za gorivo, dinamika plaćanja ugovorene cene, veza na rokove isporuke goriva, porezi i takse koji se odnose na fabričaku i

transport goriva u zemlji isporučioaca, u zemljama kroz koje se obavlja transport goriva i u zemlji naručioca, indeksi klizne skale za pojedine materijale i ostale troškove izrade gorivnih elemenata.

6. LITERATURA

1. M. V. Mataušek i dr. "Analiza izgaranja nuklearnog goriva u reaktoru tipa Voronjež". Zbornik radova XXI jugoslovenske konferencije ETAN-a. IV.11.1977.
2. M. V. Mataušek i dr. "NET IBK paket računarskih programa za potrebe planiranja, gradnje i eksploatacije nuklearnih elektrana". Konferencija o korišćenju nuklearnih reaktora u Jugoslaviji. Zbornik radova. 1978.
3. M. V. Mataušek i dr. "Energetski nuklearni reaktori". Izveštaj o radu na projektu u periodu 1976-1980. IBK raport. 1980.
4. Studija "Ekonomija izgaranja nuklearnog goriva". Vol. II. Zdržena elektroprivreda Beograd, 1983.
5. NUCLEAR POWER - OPTION FOR THE WORLD? Proceeding of an International Conference. ANS/ENS. Hamburg. 1979.
6. INTERNATIONAL FUEL CYCLE EVALUATION. IAEA. Jan. 1980
7. INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPERIENCE IN NUCLEAR POWER. IAEA. Sept. 1982.
8. NEW DIRECTIONS IN NUCLEAR ENERGY WITH EMPHASIS ON FUEL CYCLES. Proceedings of an International Conference ENC-3. 1982.