

N. Marinković, N. Zavaljevski, M.V. Mataušek
 Institut za nuklearne nauke "Boris Kidrič", Vinča

MOGUĆNOSTI KORIŠĆENJA MEŠANOG OKSIDNOG
 GORIVA U POSTOJEĆIM LWR ELEKTRANAMA

ON THE POSSIBILITIES OF MOX FUEL UTILIZATION
 IN EXISTING LWRs

SADRŽAJ - Za zemlje koje ne raspolažu većim resursima prirodnog uranijuma, a istovremeno su upućene na plaćanje usluga obogaćivanja, reciklacija plutonijuma u postojećim termičkim energetskim reaktorima je posebno značajna. U ovom radu su razmatrani neki problemi vezani za proračune neutronske-fizičkih parametara gorivnih elemenata od mešanih U-Pu oksida i izvršena je analiza parametara jezgra reaktora tipa NE Krško sa različitim količinama MOX goriva u ravnotežnom ciklusu rada.

ABSTRACT - Plutonium recycling in existing nuclear power plants is of special importance for countries having no significant sources of natural uranium and high enrichment costs at the same time. This paper deals with some problems of computing the MOX fuel assemblies parameters. An analysis of core parameters was performed for Krško type reactor with different amounts of MOX fuel in equilibrium cycle.

UVOD

Opšte je poznato da se optimalno iskorišćenje energetskog potencijala urana postiže njegovim korišćenjem u termičkim energetskim reaktorima u prirodnom ili slabo obogaćenom vidu i reciklacijom generisanog plutonijuma u brzim oplodnim reaktorima. Prvobitne procene razvoja nuklearne energetike su sugerisale da će najkasnije do kraja ovog veka brzi nuklearni reaktori ući u široku komercijalnu upotrebu, te da će svojim mogućnostima oplodnje nuklearnog goriva praktično rešiti svetske probleme snabdevanja energijom.

Razvoj i komercijalizacija brzih oplodnih reaktora, medjutim, kasne u odnosu na prvobitna predviđanja, kako iz tehnoloških, tako i iz niza ekonomskih i političkih razloga. Količine fisibilnog plutonijuma koje se proizvode u do sada izgradjenim termičkim energetskim reaktorima i koje se mogu izdvojiti u raspoloživim postrojenjima za preradu isluženog nuklearnog goriva daleko premašuju potrebe postojećih brzih reaktora ili onih čije se puštanje u pogon planira u doglednoj budućnosti. S druge strane, skladištenje isluženog nuklearnog goriva, kao i skladištenje plutonijuma dobijenog njegovom preradom, predstavljaju poseban tehnički i bezbedonosni problem.

Relativno visok sadržaj fisibilnog ^{241}Pu u isluženom gorivu termičkih energetskih reaktora vremenom se smanjuje njegovim spontanom prelaskom u ^{241}Am , što dovodi do značajnog smanjenja potencijalnih energetskih rezervi u slučaju dužeg skladištenja nepreradjene goriva. Pored toga, gama zračenje u lancu spontanog radioaktivnog raspada ^{241}Am jako komplikuje i poskupljuje kasniju preradu isluže-

nog goriva i fabrikaciju MOX gorivnih elementa od mešanog U-Pu oksida. Tehnički i bezbedonosni problemi skladištenja plutonijumskih materijala u bilo kom vidu su složeni i njihovo rešavanje značajno povećava cenu nuklearnog gorivnog ciklusa u celini.

Iz navedenih razloga, mnoge zemlje koje raspolažu razvijenom nuklearnom tehnologijom već duže vreme rade na ispitivanju mogućnosti korišćenja plutonijumskog goriva u postojećim komercijalnim nuklearnim elektranama. Pokazalo se da se plutonijum može reciklirati u praktično svim termičkim energetskim reaktorima tako što se deo standardnih gorivnih elemenata zamenjuje MOX gorivom. Pogonske karakteristike reaktora se time bitno ne menjaju, a post-iradijacioni testovi pokazuju da nema bitne razlike u uticaju izgaranja na performanse gorivnih elemenata od čistog uranijum oksida i mešanog uranijum-plutonijum oksida.

Reciklacija plutonijuma u termičkim energetskim reaktorima posebno je značajna za zemlje koje ne raspolažu većim resursima prirodnog uranijuma, a istovremeno su upućene na plaćanje usluga obogaćivanja. Imajući u vidu da je veći deo tehnoloških problema vezanih za prerađivanje isluženog nuklearnog goriva i proizvodnju MOX goriva u principu rešen, u ovom radu su razmatrani problemi vezani za proračune neutronske fizičke parametara gorivnih elemenata od mešanih U-Pu oksida. Potom je izvršena analiza parametara jezgra reaktora tipa NE Krško sa različitim količinama MOX goriva u ravnotežnom ciklusu rada.

GORIVNI ELEMENT OD MEŠANOG OKSIDNOG GORIVA

Mehanička i termodinamička koncepcija gorivnog elementa sa mešanim oksidom ista je kao i za referentni gorivni element odredjenog tipa LWR. Neutronska koncepcija zasniva se na kriterijumu da sadržaj plutonijuma bude takav da se iz gorivnog elementa dobije ista energija kao iz referentnog elementa sa uranijum oksidom.

Kao referentni uzet je standardni gorivni element koji se koristi u francuskim elektranama tipa PWR, snage 900 MW gde je obogaćenje uranijuma 3,25%. Ukoliko se gorivo za MOX gorivni element proizvodi mešanjem osiromašenog uranijuma (0,225% ^{235}U) i plutonijuma iz elektrana PWR-900, procenat plutonijuma u gorivu iznosi 5,3%. Prilikom proizvodnje MOX gorivnog elementa, meša se prah uranijuma i plutonijum oksida i sinteruje se. Pri tome se dobija heterogena struktura goriva, koju je potrebno uzeti u obzir u neutronske fizičkom proračunu parametara gorivnog elementa. Heterogenost je dvostruka: na nivou gorivne šipke i na zrnima goriva^{/2/}. Multigrupnim transportnim računarskim programom APOLLO^{/3/} izvršen je proračun uticaja veličine zrna PuO_2 na faktor umnožavanja neutrona u beskonačnoj sredini. Na slici 1. prikazano je odstupanje k_{00} nehomogenog goriva za različite prečnike zrna, pri nul-tom izgaranju. Na slici 2. prikazano je ovo odstupanje u toku izgaranja. Za poluprečnik zrna do 500 μm što su realne veličine zrna koje se javljaju pri proizvodnji goriva, vidljivo je povećanje k_{00} u odnosu na homogeno gorivo. Uzrok ovome je povećanje verovatnoće izbegavanja rezonancije usled jakog prostornog samozaklanjanja. Istovremeno, unutar zrna dolazi do smanjenja fluksa, te faktor iskorišćenja goriva opada. Ovaj efekat je veći pri velikim poluprečnicima zrna i dovodi do smanjenja k_{00}

nehomogenog goriva. Usled uzimanja u obzir koegzistencije plutonijuma i uranijuma u jezgru i razlika u njihovim efikasnim preseccima, gorivne šipke u gorivnom elementu sa plutonijumom rasporedjene su u tri zone obogaćenja koje raste od periferije ka centru. Ova obogaćenja odredjena su tako da novi gorivni element ima srednje obogaćenje plutonijuma ekvivalentno gorivnom elementu sa konstantnim obogaćenjem. Raspodela obogaćenja odredjuje se tako da se u jezgru izbegnu pikovi snage koji se javljaju na granici gorivnih elemenata sa MOX gorivom.

Ukoliko se umesto plutonijuma iz lakovodnih reaktora za proizvodnju goriva koristi plutonijum iz druge vrste reaktora, procenat plutonijuma se menja. Kao primer uzet je plutonijum iz reaktora sa prirodnim uranijumom, hladjenog gasom, moderiranog grafitom. U tom slucaju, zbog povoljnijeg saatava plutonijuma (manji sadržaj ^{240}Pu) srednji procenat plutonijuma u gorivu iznosi 3,2%. Gorivni element sa 3 obogaćenja plutonijuma prikazan je na slici 3, a uporedjenje zavisnosti k_{00} od izgaranja za gorivne elemente sa plutonijumom iz lakovodnih i gasom hladjenih reaktora prikazane su na slici 4.

UTICAJ GORIVNIH ELEMENATA OD MOX GORIVA NA PARAMETRE JEZGRA

Korišćenje MOX goriva u jezgru postojeće LWR i njegovo ponašanje u toku izgaranja analizirano je na primeru jezgra reaktora tipa Krško. Proračuni parametara jezgra vršeni su za slucaj kada je sadržaj fisibilnog plutonijuma 1,5% a ostatak je prirodni UO_2 . Ovaj sastav izabran je sa ciljem da neutronske karakteristike odgovaraju gorivu obogaćenja 3,4% što je ravnotežno obogaćenje. Proračuni su vršeni sprengnutim raspoložim računarskim paketom programa: WIMSD-4¹⁴/ za proračun dvogrupnih parametara gorivnog elementa i VAMPIR¹⁵/ za dvodimenzioni dvogrupni proračun parametara jezgra. U našem slucaju proračuni su vršeni u x-y geometriji kako bi se utvrdilo koliki je uticaj gorivnih elemenata sa mOX gorivom na raspodelu snage u jezgru jer se očekuje depresija fluksa na mestima ovih elemenata što nepovoljno utiče na efikasnost kontrolnih apsorbera u njihovoj blizini. Razlog je veći presek za apsorpciju neutrona u slucaju plutonijuma u poredjenju sa uranijumom.

Za potrebe analize pretpostavljeno je da je dužina ciklusa 300 dana i da se pri svakoj izmeni goriva unosi 1/3 svežih gorivnih elemenata u jezgro reaktora. To iznosi 40 gorivnih elemenata u svakom ravnotežnom ciklusu. Razmatrano je više slucajeva, od 20% do 100% svežih gorivnih elemenata sa mOX gorivom. Na slikama 5, 6, 7, 8, 9 i 10 prikazana je prostorna raspodela form-faktora koja odgovara početku i kraju ciklusa za jezgro bez svežeg MOX goriva i sa 20%, 40%, 60%, 80% i 100% udelom MOX goriva u svežem gorivu respektivno. Može se zaključiti da jezgra sa 20%, 40% i 60% svežeg MOX goriva na početku ravnotežnog ciklusa zadovoljavaju uslov maksimalno dozvoljenog form-faktora koji za jezgro tipa Krško iznosi 1,3. Konfiguracije sa više od 60% svežeg MOX goriva nisu prihvatljive.

Sa druge strane neophodno je uporediti dužine trajanja ciklusa za navedene slucajeve, odnosno količine svežeg MOX goriva na početku ciklusa. Ovo je prikazano u Tabeli 1. zajedno sa promenom izgorelosti obogaćenog uranijumskog goriva u jezgru u poredjenju sa slucajem bez MOX goriva. Ako se razmotre podaci o izgorelosti obo-

gaćenog UO_2 koje se sveže unosi u jezgro na početku ravnotežnog ciklusa može se zaključiti da je najpovoljniji slučaj kada se najmanja količina MOX goriva koristi jer je tada i izgorelost UO_2 iz prethodnih ciklusa najmanje uvećana. Pored toga može se zaključiti da slučaj sa 40% svežeg MOX goriva daje povoljne rezultate sa aspekta skraćanja ciklusa (manje od 2 dana) i izgorelosti obogaćenog UO_2 .

Tabela 1. Karakteristike jezgra sa različitim sadržajem svežeg MOX goriva na početku ravnotežnog ciklusa.

Sveže UO_2 (%)	80	60	40	20	0
Sveže MOX (%)	20	40	60	80	100
Skraćenje ciklusa (%)	0,54	0,59	0,90	1,38	1,98
Porast srednje izgorelosti UO_2 na kraju ciklusa (%)	4,50	11,00	18,10	26,20	35,80
Promena izgorelosti svežeg UO_2 na kraju ciklusa (%)	-6,5	-0,3	11,3	17,9	-

Ako se ima u vidu ušteda od 40% u količini potrebno obogaćenog UO_2 goriva i navedene karakteristike jezgra sa ovom količinom MOX goriva može se zaključiti da konfiguracija sa 40% svežeg MOX goriva na početku ravnotežnog ciklusa ima opravdanja sa aspekta reaktorskog dela gorivnog ciklusa.

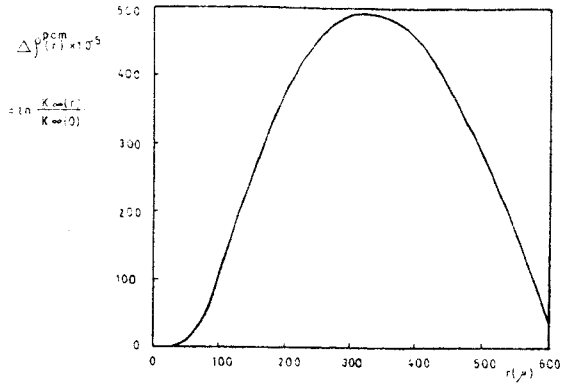
ZAKLJUČAK

Plutonium se može reciklirati u praktično svim termičkim energetskim reaktorima tako što se deo standardnih gorivnih elemenata zamenjuje MOX gorivom. Pogonske karakteristike reaktora se time bitno ne menjaju. Šta više, većina tehničkih mera, kojima se može poboljšati iskorišćenje goriva kad elektrane rade u otvorenom gorivnom ciklusu, mogu se uspešno koristiti i u slučaju da se plutonium reciklira.

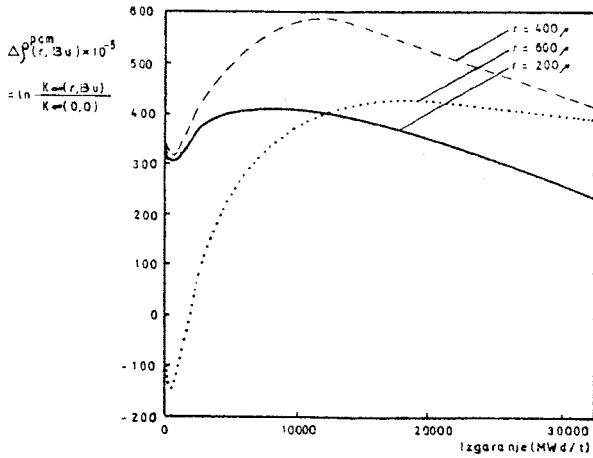
Rezultati prezentirani u ovom radu predstavljaju prvi korak u izučavanju i analizi efekata reciklacije plutonijuma u termičkim nuklearnim reaktorima na ekonomiju gorivnog ciklusa u našoj zemlji.

LITERATURA

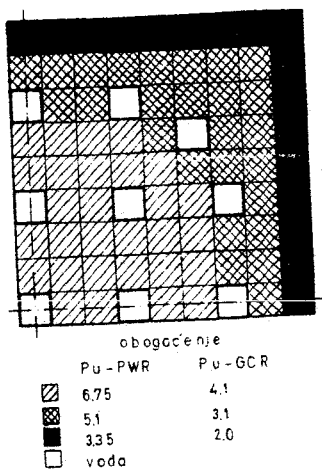
1. M.V. Mataušek et.al. Ekonomija izgaranja nuklearnog goriva, I knjiga, Beograd Vinča, 1986.
2. A. Hebert, Estimation des probabilités de collision pour des geometries contenant des grains, Rapport SERMA No.404 "T", Saclay 1979.
3. A. Hoffman et.al. APOLLO Code multigruppe de resolution de l'equation du transport pour les neutrons thermiques et rapides, Note CEA-N, 1690, 1979.
4. M.J. Halsall, A Summary of WIMSD-4 Input Options, AEEEW.M. 1327, 1980.
5. I. Zmijarević, I. Petrović, VAMPIR - Dvogrupni dvodimenzioni difuzioni program za proračun izgaranja nuklearnog goriva, XXIX Jug. Konf. ETAN-a 1985.



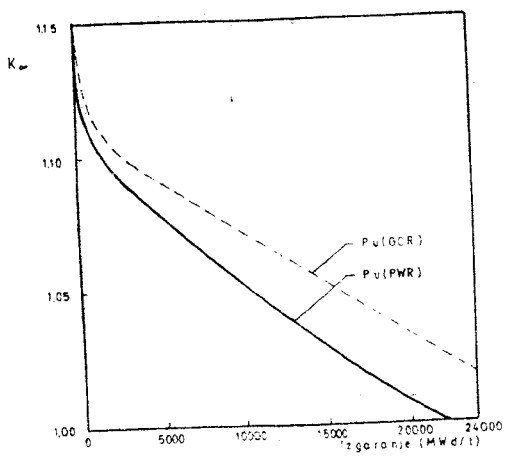
Slika 1. Uticaj poluprečnika zrna na K_{∞} gorivne šipke od mešanog oksida, nulta izgaranje.



Slika 2. Uticaj poluprečnika zrna na K_{∞} u toku izgaranja gorivne šipke od mešanog oksida



Slika 3. MOX gorivni element sa tri obogaćenja Pu



Slika 4. Efektivni faktor umnožavanja neutrona za MOX gorivni element sa Pu iz PWR i GCR

1.034	1.028	1.111	1.171	1.156	0.965	U02
1.066	1.019	1.088	1.139	1.16	0.996	0.561
						0.640
						MOX
						0.978
						0.944
						0.522
						U02
						0.825
						0.875
						MOX
						0.547
						0.578
						U02
						0.762
						0.844
						MOX
						MOX

Slika 7. Relativna raspodjela snage u jezgru sa 40% svetlog MOX goriva na početku i na kraju ravnotežnog ciklusa.

1.053	1.050	1.133	1.191	1.153	0.620	MOX
1.053	1.073	1.139	1.181	1.163	0.620	0.483
						0.962
						0.986
						MOX
						0.911
						0.453
						0.934
						0.494
						U02
						0.849
						0.874
						MOX
						0.563
						0.583
						0.527
						MOX
						0.606
						0.613
						MOX
						MOX

Slika 8. Relativna raspodjela snage u jezgru sa 60% svetlog MOX goriva na početku i na kraju ravnotežnog ciklusa.

0.870	0.872	0.975	1.074	1.115	0.996	U02
0.940	0.923	1.001	1.065	1.096	1.013	0.682
						0.740
						U02
						0.658
						0.672
						0.713
						U02
						0.915
						0.931
						U02
						0.730
						0.751
						U02
						0.870
						0.838
						U02
						MOX

Slika 5. Relativna raspodjela snage u jezgru sa 100% svetlog goriva od UO2 na početku i na kraju ravnotežnog ciklusa.

0.980	0.975	1.069	1.114	1.115	0.989	U02
1.020	1.003	1.072	1.121	1.122	1.017	0.669
						0.752
						U02
						0.514
						0.680
						MOX
						0.699
						0.712
						U02
						0.658
						0.750
						0.751
						U02
						0.807
						0.815
						0.840
						U02
						MOX
						U02

Slika 6. Relativna raspodjela snage u jezgru sa 20% svetlog MOX goriva na početku i na kraju ravnotežnog ciklusa.

1.149	1.156	1.223	1.264	1.139	1.307	MOX
1.174	1.137	1.210	1.233	1.133	0.960	MOX
	1.211	1.287	1.321	1.223	0.835	MOX
	1.208	1.254	1.274	1.213	0.989	MOX
		1.349	1.376	1.143	0.537	MOX
		1.284	1.310	1.135	0.684	MOX
			1.292	0.964	0.479	MOX
			1.242	0.173	0.311	MOX
				0.353		MOX
				0.613		MOX
MOX	MOX					

Slika 9. Relativna raspodela snage u jezgri sa 803 svetlog MOX goriva na početku i na kraju ravnotežnog ciklusa.

1.296	1.272	1.345	1.361	1.247	0.957	MOX
1.274	1.246	1.296	1.311	1.236	1.015	MOX
	1.343	1.307	1.307	1.253	0.868	MOX
	1.293	1.233	1.236	1.211	0.647	MOX
		1.407	1.366	1.379	0.611	MOX
		1.355	1.331	1.363	0.653	MOX
		1.126	0.781	0.841	0.394	MOX
		1.126	0.762	0.401		MOX
				0.483		MOX
				0.419		MOX
MOX	MOX					

Slika 10. Relativna raspodela snage u jezgri sa 1003 svetlog MOX goriva na početku i na kraju ravnotežnog ciklusa