

D. Djordjević

UNIS-INŽENJERING SARAJEVO

V. Knapp

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET ZAGREB

AKCELERATORSKA PROIZVODNJA FISIBILNIH NUKLIDA,
GRANIČNA CIJENA URANA I PERSPEKTIVE

ACCELERATOR BASED PRODUCTION OF FISSILE NUCLIDES,
THRESHOLD URANIUM PRICE AND PERSPECTIVES

SAHRŽAJ - U radu se razmatraju karakteristike akceleratorskog oplodnog sistema u kojem se proizvode fisibilni nuklidi. Jedan oplodni akcelerator može opskrbljivati fisijskim gorivom nekoliko termalnih reaktora čime ovaj sistem postaje analogan instalaciji za obogaćenje urana s tom razlikom što se fisibilni nuklidi produkuju konverzijom U-238 a ne izdvajanjem iz prirodnog urana. Ovaj koncept, uz ostale, nudi perspektivu dugoročnog korištenja fisijske tehnologije na bazi usvajanja samo jedne jednostavnije nuklearne tehnologije. Ispitan je uticaj osnovnih karakteristika i performansi sistema na graničnu cijenu urana i utvrđeni su uslovi po kojima bi ovaj mogao postići prihvatljivu ekonomiku proizvodnje.

ABSTRACT - Accelerator breeder system characteristics are considered in this work. One such system which produces fissile nuclides can supply several thermal reactors with fissile fuel, so this system becomes analogous to an uranium enrichment facility with difference that fissile nuclides is produced by conversion in U-238 rather than by separation from natural uranium. This concept, with others, offers longterm perspective for fission technology on the basis of development only one simpler nuclear technology. The influence of basic system characteristics on threshold uranium price is examined. Conditions for economically acceptable production are established.

1. UVOD

U prethodnim godinama došlo je do značajnog usporenja u razvoju nuklearne energetike u odnosu na rane prognoze. Ova činjenica traži i reviziju gledanja po kojima su nosioci dugoročnog razvoja fisijske nuklearne energetike trebali biti brzi oplodni reaktori, budući da je očekivani nuklearni razvoj već u 80-tim godinama trebao dovesti do teškoća u snabdjevanju uranom. Uz znatno usporenje gradnje nuklearnih elektrana bitno su povećane i procjene uranskih rezervi, sa tog stanovišta njihovo uvođenje nije potrebno u ovom stoljeću. Međutim, dugoročno gledano, iskorištavanje U-238 ostaje jedan od strateških pravaca razvoja nuklearne energetike.

Pomicanjem uvođenja na kasnije periode brzi oplodni reaktori postaju samo jedan od načina za iskorištavanje U-238, tu su fuzijsko-fisijski hibridi i oplodni akceleratori alternative. U ovim koncepcijama fuzijski uređaj odnosno akcelerator proizvode neutrone kojima se iz Th-232 ili U-238 proizvode fisibilni nuklidi za korištenje u konvencionalnim termalnim reaktorima.

Produžena pa i neograničena perspektiva koju bi termalni reaktori dobili razvojem umjetne proizvodnje fisijskog goriva vrlo je interesantna za mnoge manje zemlje za koje bi uvođenje naprednih nuklearnih tehnologija, kao što je tehnologija FBR, bilo prevelik teret, naravno uz pretpostavku regionalnih ili međunarodnih proizvodnih instalacija.

Rad koji se referira poduzet je sa krajnjim ciljem razjašnjenja realnosti dugoročne perspektive termalnih reaktora na bazi akceleratorске oplodnje goriva. Dugoročnost tehnologije termalnih reaktora omogućila bi da se razvoj i ulaganja raspoređuju prema potrebama i mogućnostima zemlje.

2. PROIZVODNJA NEUTRONA

U ranom periodu istraživanja proizvodnje neutrona u okviru MTA projekta 1947-1952. mjereni su neutronske prinosi za različite mete u ovisnosti o energiji upadnih protona i deutrona. Pokazalo se da je racionalno odabrati upadne čestice s energijom od više stotina MeV-a. To je razumljivo, jer se u području protonске energije od oko 1000 MeV nalazimo pri minimumu spec.ionizacije, tj. pri minimumu trošenja energije na atomske procese.

Empirička relacija Barašenkova [1] daje energiju upadnog protona po jednom proizvedenom neutronu u ovisnosti o energiji, za uransku metu promjera 10,2 cm i dužine 61 cm,

$$\frac{E_p}{\eta} = \frac{19,4}{1 - \frac{120}{E_p}} \quad (1)$$

gdje je E_p - energija upadnog protona η - neutronske prinos, tj. broj neutrona proizvedenih po jednom upadnom protonu. Relacija pokazuje da je asimptotska "cijena" jednog neutrona 19,4 MeV, da smo pri 1200 MeV na 10% većoj vrijednosti od minimuma, te da više energije ne mogu značajnije povećati prinos. Niže energije mogu ga zna-

čajno smanjiti, npr. pri 600 MeV energija po neutronu bi bila 25% iznad minimuma, a pri 240 MeV bi bila dvostruka. Prema tome, gledajući iskorištenje početne protonske energije, energija u području 1000-1500 MeV bi bila optimalan izbor.

Mnogo više nego povećanje energije povećanju neutronskeg prinosa doprinosi povećanje dimenzija mete. Vasilkov [2] je odredio prinos pri $E_p = 660$ MeV na meti dimenzija 56 x 56 x 64 cm od prirodnog urana u iznosu 45 neutrona /proton dok je za istu energiju prinos prema relaciji (1) jednak 28 neutrona/proton.

Pri energijama oko 1000 MeV protoni izazivaju spalacione reakcije sa emisijom većeg broja sekundarnih čestica koje mogu biti neutroni, protoni, gama kvanti i mezoni. Ako se želi veći udio neutrona onda treba kao metu upotrebiti jezgre velikog rednog broja. Neutroni energije oko 100 MeV, koji nastaju spalacijskom reakcijom, lako prodiru u teške jezgre, a iz pobudjenih složenih jezgara evaporacijom izlaze sekundarni neutroni s energijama najvećim dijelom u području 3-10 MeV. Ukoliko su bombardovane jezgre urana dolazi i do fisijske reakcije. Fisijski neutroni se usporavaju i na kraju apsorbiraju u U-238 konvertujući ga u Pu-239. Prinos je neizbježno ovisan ne samo o vrsti jezgri u meti, nego i o geometriji mete jer je prodornost primarnih i sekundarnih čestica velika.

3. AKCELERATOR I META

Za ubrzavanje naelektrisanih čestica (protona, deutrona) u akceleratorskoj proizvodnji fisibilnih nuklida linearni akcelerator je optimalan izbor s obzirom da može ubrzavati neprekidni snop visokog intenziteta (nekoliko stotina mA), može udovoljiti zahtjevu "radijacione čistoće" i najefikasnije transformiše električnu u energiju snopa[3,4].

Akcelerator je u višesekcijskoj izvedbi što je diktirano izborom optimalne šunt-impedance poenergiji medju raznim ubrzavajućim strukturama [4]. Ulaznu sekciju predstavlja Rf kvadrupol (RFQ) [5,6] koji omogućava rad sa 75 kV injektorom sa energijom injektiranja 50 keV i obezbjeđuje koeficijent zahvata od 80% bez uvećanja fazne gustoće u transverzalnem faznom prostoru. Optimalna izlazna energija snopa je 2 MeV. Ubrzavanje snopa do srednjih energija (oko 200 MeV) se ostvaruje u sekciji sa drift cijevima (DTL) a do konačne energije u sekciji sa vezanim zapreminama (CCL).

Tabela 1.: Karakteristike referentnog linearnog akceleratora

	INJEK.	REQ	DTL	CCL
Dužina (m)	-			
Prečnik aperture (mm)	-	46-40	40-50	50-60
Frekvencija (MHz)	-	74,25	148,5	445,5
Rf-snaga (MW)	-	0,58	81	292
Troškovi strukture (milijon \$) (US \$ 1984)	0,98	0,92	26,0	91,0
Troškovi Rf-napajanja (milijon \$)	-	3,68	65,6	255,0

Kako je konstatovano u tački 2., mete moraju imati velike dimenzije, kako bi se u njima generirani neutroni mogli usporiti i apsorbirati bez prevelikog bijega u okolinu. Njihove bi dimenzije trebale biti uporedive sa jezgrama nuklearnih reaktora, čije su dimenzije podložne sličnim razmatranjima. Već i vrlo preliminarno razmatranje ekonomije sistema oplodnog akceleratora ukazuje da se u metama moraju postići i slične vrijednosti gustoće snage. To vodi do zaključka da snaga protonskog snopa za komercijalan energetski sistem mora biti reda veličine snage srednjeg nuklearnog reaktora. Snop protona energije 1000 MeV intenziteta 1 mA predstavlja snagu od 1 MW u meti, ne računajući sa multiplikacijom uslijed oslobađanja fizijske energije. Faktor multiplikacije se kreće od 3,5 do 7 što znači da bi uz protonsku struju od oko 1 A termalna snaga u meti bila uporediva sa termalnom snagom velike nuklearne elektrane. Time smo dobili prvu procjenu približnih zahtjeva na akcelerator. Referentna meta je struktura slična rešetki LMFBR unutar koje se smiješta primarna meta iz PB-Bi eutektika, opasana grafitnim reflektorom sa dijametrom 420 cm i visinom 300 cm. Gorivi inventar iznosi 48.350 kg.

4. EKONOMSKI MODEL

Ekonomski model se definiše za simbiozu akceleratorski oplodni reaktor/fisioni reaktori koja je u pogledu fizijskog goriva samostalna.

Osnovne veličine u modelu su: 1. stalni (indirektni) troškovi vezani sa investicijom u postrojenje, 2. varijabilni (direktni) troškovi vezani za rad i održavanje postrojenja, 3. proizvodnja i potrošnja fizijskog goriva i 4. inventari fizijskog goriva.

Pregled vrijednosti ovih veličina je dat u tabeli 2.

Tabela 2.: Direktni i indirektni troškovi konvencionalnog LWR i AB

	Simbiotski sistem		
	Konven. LWR	Pripad. LWR	AB
DIREKTNI TROŠKOVI*			
U308	4,685	0,777	0,530
Konverzija	0,338	0,037	0,190
Obogaćivanje	4,640	-	-
Fabrikacija	1,828	5,050	1,210
Prerada	5,962	6,520	23,250
Transport	0,364	0,350	-
Spremanje otpada	0,062	0,450	0,143
Pogon i održavanje	13,000	13,000	33,000
	30,880	26,180	58,300
INDIREKTNI TROŠKOVI			
Ukupni kapitalni troškovi	2.179 mil. \$	2.179 mil. \$	1.785 mil. \$
Specifični troš. po termal. snazi	726 \$/kW	726 \$/kW	1174 \$/kW
Godišnji troškovi uz 15% troš. stopu po termalnoj snazi	109 \$/kW	109 \$/kW	176 \$/kW

* US \$ 1984.

Ekonomsko vrednovanje koncepta akceleratorne proizvodnje fisibilnih nuklida se vrši na bazi relacija za izravnatu cijenu električne energije za simbiotski sistem (AB/LWR) i konvencionalni LWR [7, 8]

$$S_{AB/LWR} = \frac{(C_{i,o}^{LWR} + a_d C_{d,o}^{LWR}) R + (C_{i,o}^{AB} + a_d C_{d,o}^{AB}) \left[1 + b(I_{tot}^{AB} + RI_{tot}^{LWR}) \right]}{8,76 R k^{LWR} k_{fi,g}}$$

$$\left[(a_d k^{AB} F^{AB} - b I_{tot}^{AB}) \right] \quad (2)$$

$$S^C = \frac{(C_{i,o}^C + a_d C_{d,o}^C + C_{inv,o}^C)}{8,76 k^C k_{fi,g}} \quad (3)$$

gdje su: $C_{1,c}^{AB,LWR,C}$ - ukupni indirektni godišnji troškovi oplođnog akceleratora (AB) i LWR (LWR = pripad.LWR, C-konven.LWR) na početku rada, $C_{d,c}^{AB,LWR,C}$ - ukupni direktni troškovi na početku rada, $C_{inv,c}^C$ - ukupni indirektni troškovi fisisjskog inventara, a_d - izravnavajući faktor za direktne troškove, b-fiksna troškovna stopa za fisisjski inventar, R - omjer snabdjevanja, F^{AB} - produkcija fisibilnih nuklida, $I_{tot}^{AB,LWR}$ - prosječni ukupni fisisjski inventar, $k_{AB,LWR,C}^{AB,LWR,C}$ - raspoloživost postrojenja, $k_{fi,g}$ - neto električna efikasnost LWR.

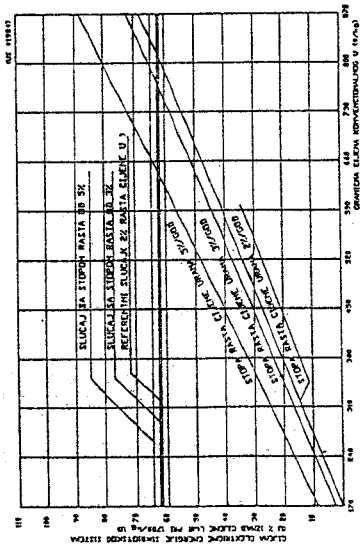
5. REZULTATI

Uslovi pod kojima akceleratorski oplođni sistem postaje ekonomičan se utvrđuju na bazi granične cijene urana koja predstavlja onu cijenu konvencionalno izvađenog urana kod koje se izjednačava izravna cijena električne energije iz simbiotskog sistema i konvencionalnog LWR. Na sl.1. prikazana je cijena el.energije LWR u funkciji cijene urana. Pretpostavljena je stopa rasta cijene el.energije od 8,5%/god. Ako se izravna cijena el.energije iz simbiotskog sistema i konvencionalnog LWR izjednače dobiva se granična cijena urana od 815 \$/kg, 770 \$/kg i 709 \$/kg za stopu rasta cijene urana 2%, 3% i 5% respektivno.

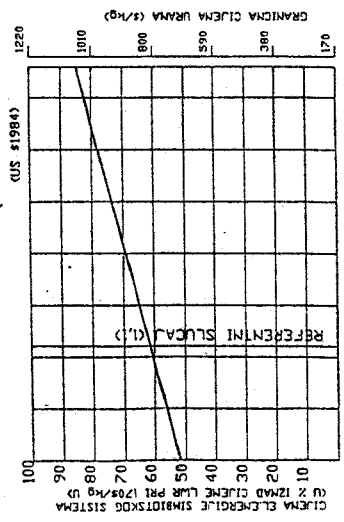
Na sl.2. je data ovisnost izravna cijena el.energije simbiotskog sistema i granične cijene urana o investicijskim troškovima oplođnog akceleratora. Uočava se prilična osjetljivost granične cijene urana na promjene investicijskih troškova oplođnog akceleratora. Povećanje investicijskih troškova za 30% (ekvivalentno investiciji za dva LWR) rezultira uvećanjem granične cijene urana od gotovo 15%. Istovremeno je utvrđeno da postoji mala osjetljivost vrijednosti granične cijene urana na promjene u troškovima gorivog ciklusa oplođnog akceleratora (sl.3), i jaka osjetljivost na promjene u količini proizvedenog fisisjskog goriva (sl.4), npr.povećanje proizvodnje fisisjskog goriva za 30% rezultira smanjenjem granične cijene urana za 20%.

6. ZAKLJUČAK

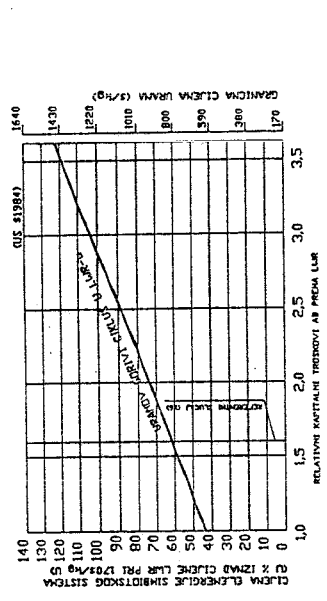
Granična cijena urana dobivena je s pretpostavljenim referentnim akceleratorom, koji je energetski neovisan, i referentnom metom, računajući s proizvodnjom Pu-239 od oko 967 kg/god. Rezultati nisu povoljni za koncepciju AB te je važno utvrditi u kojoj su mjeri utemeljene pretpostavke procjene.



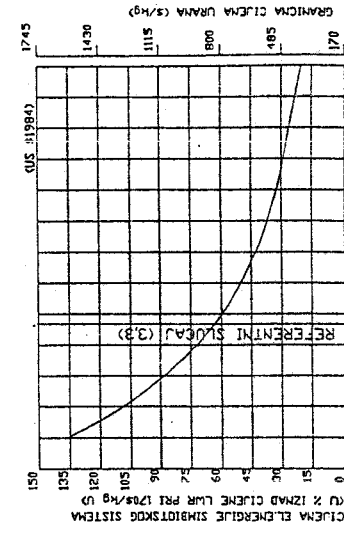
Slika 1 - Višak cijene el.energije smiotskog sistema prema cijeni energije IAR ovisno o cijeni urana.



Slika 2 - Višak cijene el.energije smiotskog sistema prema cijeni energije IAR ovisno o cijeni urana.



Slika 3 - Višak cijene el.energije smiotskog sistema prema cijeni energije IAR ovisno o cijeni urana.



Slika 4 - Višak cijene el.energije smiotskog sistema prema cijeni energije IAR ovisno o cijeni urana.

PROIZVODNJA Pu-239 U AB (€/kg)

Slika 5 - Višak cijene el.energije smiotskog sistema prema cijeni energije IAR ovisno o cijeni urana.

Analiza osjetljivosti pokazuje da specifične investicije AB i neutronske prinos igraju odlučnu ulogu. Prije no što bi se prihvatio pesimističan zaključak o AB kao definitivno trebalo bi utvrditi da li je nemoguće ostvariti povoljnije karakteristike referentnog akceleratora. Dobitak bi bio u povećanju struje snopa. Ako bi se ona povećala sa 0,3 A na 1 A, uz odgovarajuća usavršavanja na ionskom izvoru i sistemu fokusiranja snopa, moguć je znatan efekat na specifične investicijske troškove i graničnu cijenu urana.

Druga linija poboljšanja većim prinosom neutrona izgleda da je manje spekulativna. Takahashi i ostali [9] navode 100 uhvata po protonu. Sa 100 uhvata godišnja proizvodnja plutonija bila bi veća od 2 tone (približno 2300 kg). Takahashi i drugi čak govore o 3 tone. No, uzevši 2 t/god. dolazi se već na bitno drugačiju sliku od one koja slijedi iz referentne pretpostavke. Mogli bi stoga reći da konačan zaključak o perspektivi LAB traži:

- a) pažljivu analizu i procjenu mogućeg razvoja visoko-strujnog akceleratora,
- b) eksperimentalno i teorijsko utvrđivanje prinosa neutrona i plutonija u velikim metama.

L I T E R A T U R A :

- [1] V.S.Barašenkovi i ostali, "Krasčetu elektrojadernoga metoda generaciji neutronov", Atomnaja Energija, 6/37, s.475-479, Dec., 1974.
- [2] R.G.Vasilkov i ostali, "Razmnoženje neutronov v urane bombardiruemom protonami s energiej 300-600 MeV", Atomnaja Energija, 4/44, s.329-335, Apr., 1978.
- [3] M.Steinberg, "Accelerator spallation reactors for breeding fissile fuel and transmuted fission products", Nuclear technologies in a sustainable energy system IASA Workshop 1981, pp.203-223, 1983.
- [4] B.P.Murin, Linejnye uskoriteli ionov, Moskva: Atomizdat, 1978.
- [5] S.O.Schirber, Canadian accelerator breeder system development, Chalk River: AECL, 1982.
- [6] I.M.Kapchinsky, "O proekte linejnogo uskoritelja dlja ispitateljnogo neutronog generatora", Pribory i tehnika eksperimenta 4, s.23-26, Apr., 1977.
- [7] D.Djordjević, Akceleratorski oplodni sistem i procjena fizikalno-tehničkih karakteristika nužnih za ekonomičan rad, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1987.
- [8] V.Knapp, D.Angebrandt, "Fuzijsko fizijski hibrid: fizikalno tehničke karakteristike i ekonomsko-energetski potencijal", Elektrotehnika, 6/28, s.299-309, 1985.
- [9] H.Takahashi i ostali, Nuclear fuel breeding by using spallation and muon catalysis fusion reactions, Upton: BNL, 1980.