

PODKRITIČNI SISTEMI POKRETANI AKCELERATOROM ZA TRANSMUTACIJU RADIOAKTIVNOG OTPADA

Ivana Avramović, Milan Pešić, *Institut za nuklearne nauke "Vinča", Centar NTI, i.avramovic@vin.bg.ac.yu*

Sadržaj – Iskorišćeno nuklearno gorivo iz nuklearnih elektrana predstavlja najveći problem kod projektovanja trajnih odlagališta radioaktivnog otpada. Najveća opasnost potiče od samo nekoliko hemijskih elemenata čija se radiotoksičnost može efikasno smanjiti primenom postupka deljenja i transmutacije u brzim reaktorima i podkritičnim sistemima pokretanim akceleratorom.

1. UVOD

Opasnost od radioaktivnog otpada koji nastaje prilikom proizvodnje nuklearne energije je predmet stalne rasprave u mnogim zemljama [1]. Vremenski period čuvanja radioaktivnog otpada je sam po sebi najveći problem za dizajniranje odlagališta [2]. Skraćivanjem vremenskog intervala u kome se zahteva integritet odlagališta u mnogome će pojednostaviti njegov dizajn. Postoji samo nekoliko radionuklida u iskorišćenom nuklearnom gorivu koji su dugoživeći. Primenom deljenja i transmutacije (*partitioning and transmutation* – P&T) aktinida i nekih dugoživećih fisionih produkata, radiotoksičnost visokoaktivnog otpada (*high-level waste* - HLW) i sigurnosni zahtevi za geološka odlagališta ovog otpada se mogu značajno redukovati. Da bi razvoj te tehnologije bio ekonomski i tehnički prihvatljiv, potrebno je da se radiotoksičnost visokoaktivnog otpada smanji bar sto puta. Ovaj zahtev se može ispuniti korišćenjem veoma efikasnih reaktora i gorivnih ciklusa koji podrazumevaju primenu brzih reaktora, odnosno podkritičnih sistema pokretanih akceleratorom. Podkritični sistemi pokretani akceleratorom (*accelerator-driven system* - ADS) su privukli veliku pažnju stručnjaka zbog svojih mogućnosti da unaprede fleksibilnost i sigurnosne karakteristike sistema za transmutaciju.

2. RAZVOJ ADS

Prve studije vezane za P&T kao novi oblik upravljanja radioaktivnim otpadom pojavile su se sedamdesetih godina dvadesetog veka. Transmutaciju aktinida u iskorišćenom nuklearnom gorivu pomoću brzih neutrona prvi je predložio H.C. Claiborne 1972. godine [2]. Ideju da se transmutacija teških aktinida može obavljati u podkritičnom jezgru prvi je javno objavio D.G. Foster 1974. god. Program JAERI u Japanu se bavio razvojem u ovoj oblasti za potrebe tretmana visoko-radioaktivnog tečnog otpada kao i dizajniranjem sistema za transmutaciju. Mnogo individualnih istraživača i manjih grupa u SAD se bavilo ovim problemom. Grupa iz *Oak Ridge National Laboratory* se bavila istraživanjem deljenja i transmutacije u domenu teorije i perspektivama za primenu. *Argonne National Laboratory* (ANL) je razvio metod pirohemijskog reprocesinga koji i dalje igra veliku ulogu u svim opcijama za P&T. U isto vreme, *German Research Centre* u *Karlsruhe*-u, *CEA* u Francuskoj i Evropska Komisija u *JRC Ispra* započele su zajednički projekat na teorijskom i eksperimentalnom planu.

Period aktivnih istraživanja u oblasti P&T koji je započeo sedamdesetih godina prekinut je tokom 1982-1983 zato što nije bilo međunarodnog konsenzusa u vezi dobiti od primene

P&T kao alternativni ili dopunskoj opciji za upravljanje radioaktivnim otpadom.

Tokom osamdesetih godina, porasla je svest o teškoćama u projektovanju i licenciranju velikih odlagališta nuklearnog otpada. Kašnjenje u istraživačko-razvojnim projektima takvih odlagališta navelo je stručnu međunarodnu zajednicu da ponovo uzme u razmatranje mogućnosti P&T procesa, što je dovelo do razvoja druge generacije studija u ovoj oblasti.

Japanska vlada, u saradnji sa *Atomic Energy Commission* (AEC) je pokrenula 1988. godine ambiciozni istraživačko-razvojni projekat OMEGA čiji je cilj izgradnja pilot-postrojenja za transmutaciju. Paralelno sa ovim projektom, Japanska vlada je posredstvom OECD/NEA pozvala međunarodnu zajednicu da uzme učešće u razvoju P&T. Ova inicijativa je bila polazna tačka za obnavljanje interesa i rada u oblasti P&T. U to vreme se aktivira veliki broj projekata u Japanu (JAERI, JNC, CRIEPI) i u Francuskoj (CEA) u kooperaciji sa nekoliko evropskih zemalja uz podršku Evropske komisije. Eksperimentalni programi se rade u SAD u *Argonne National Laboratory* (ANL).

Početak devedesetih godina pojačano je interesovanje za obnovljive tehnologije kao što su podkritični sistemi pokretani akceleratorom što je dovelo do pokretanja niza novih projekata u više zemalja. Posebno je razvoj ADS postao veoma atraktivna oblast rada za mnoge istraživače pa je u toj oblasti obrazovano više međunarodnih istraživačkih i razvojnih grupa.

Izveštaj Međunarodne agencije za atomsku energiju (MAAE) iz 1995. godine [3] bavi se tehničkom izvodljivošću i radiološkim posledicama postupka P&T. Zaključak ovog izveštaja je da je postupak tehnički izvodljiv, ali da zahteva dodatni rad na istraživanjima i razvoju da bi se došlo do realnog industrijskog postrojenja. Što se dugoročnog radiološkog rizika tiče, njegovo smanjenje je manje nego što se očekivalo. Sve u svemu, ocena ovog je izveštaja da bi ovo bio ogroman poduhvat koji bi u najboljem slučaju doveo do malog napretka.

MAAE je i pored ovoga preduzela tokom devedesetih godina prošlog veka niz aktivnosti povezanih sa radom OECD/NEA kao što su izrada izveštaja o statusu projekata vezanih za ADS [4], pokretanje istraživačkih projekata i iniciranje razgovora o mogućnostima i motivaciji za razvoj hibridnih sistema za proizvodnju nuklearne energije i transmutaciju radioaktivnog otpada sa posebnim naglaskom na ADS.

Evropska Komisija je svojim Okvirnim programima od 1994-te godine pa nadalje, podržala istraživački rad na P&T pokretanjem više projekata u oblasti separacije dugoživećih radionuklida, merenja i proračuna nuklearnih podataka neophodnih za transmutaciju, osobina spalacione mete, podkritičnog jezgra i hladioca, kao i pitanja sigurnosti.

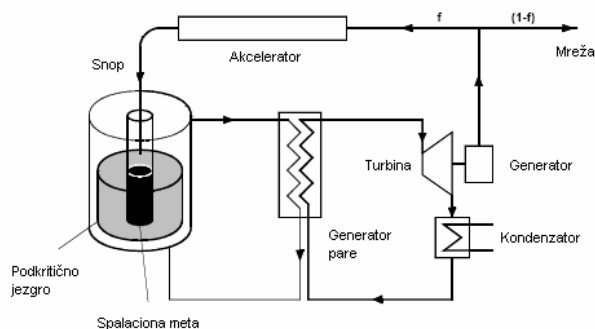
Danas je aktivno nekoliko nacionalnih, bilateralnih i multilateralnih projekata u ovoj oblasti. Najvažniji projekti su:

- OMEGA program u Japanu koji podrazumeva aktivnosti na procesu deljenja, dizajn reaktora za sagorevanje aktinida i ADS, razvoj tehnologija gorivnog ciklusa i osnovna istraživanja u oblasti nuklearnih podataka. Postrojenje TEF pri projektu J-PARC, koji zajednički rade JAEA-KEK, obuhvata konstrukciju superprovodnog protonskog linearnog akceleratora za dobijanje neutronskog spalacionog izvora i ADS za eksperimente sa transmutacijama (TEF).
- Peti okvirni program Evropske Komisije obuhvata aktivnosti koje se odvijaju u tri evropske zemlje: Francuskoj, Italiji i Španiji. Obrazovane su *Advisory Group* i *Technical Working Group on ADS* koje predvodi prof. Rubia sa zadatkom da se istraže potencijali ADS-a za transmutaciju otpada i koordinira rad između državnih tela i industrijskog sektora. Primarni zadatak je konstrukcija ADS demo-postrojenja koja treba da se realizuju kroz šesti i sedmi okvirni program.

3. ADS KONCEPT

Za razliku od uobičajenih nuklearnih reaktora u kojima postoji dovoljan broj neutrona za održavanje lančane reakcije, podkritično jezgro koje se koristi u ADS mora imati spoljašnji izvor neutrona da bi se održala lančana reakcija [5]. Ovi "extra" neutroni se dobijaju pomoću akceleratora, tačnije akcelerator proizvodi visokoenergetske protone kojima se bombarduje meta i u tom procesu dolazi do spalacije¹ jezgara materijala mete što kao rezultat daje neutrone. Osnovna šema sistema pokretanog akceleratorom data je na Slici 1 [1]. Spalaciona meta je okružena brzim ili termičkim podkritičnim jezgrom koje sadrži materijal za transmutaciju.

Kao što se vidi sa Slike 1. šema za proizvodnju energije u ADS je veoma slična konvencionalnim izvorima. Toplota proizvedena u jezgru se preko hladioca prenosi do izmenjivača toplote, a zatim na turbinu i generator. Razlika je u tome što se deo energije mora vratiti da bi se iskoristila za napajanje akceleratora. Struktura jezgra je vrlo slična klasičnoj, naime koncept ADS podržava korišćenje poznatih i isprobanih nuklearnih tehnologija kao što je primena goriva u obliku uobičajenih gorivnih šipki.



Sl.1. Šema ADS

¹ Reč *spallation* (engl.) se prevodi kao spalacija, rasprskavanje ili potpuno raspadanje atomskog jezgra [6].

Projektovani ADS treba da ima jedinstvenu mogućnost da troši, sagoreva "minorne aktinide"² i dugoživeće fisione produkte. Rad u podkritičnom režimu omogućava da se sigurnosni zahtevi vezani za kritičnost lakše ostvaruju nego kod kritičnih sistema. Oni takođe nude i veću fleksibilnost u radu. ADS može da obezbedi veći višak neutrona nego kritični reaktori pa se oni mogu upotrebiti za transmutaciju. Ova osobina može se iskoristiti za siguran i efikasan postupak transmutacije radioaktivnog otpada.

4. SPALACIONA META

Nema precizne definicije spalacije: taj termin obuhvata interakciju visokoenergetskih protona i neutrona ili lakih jezgara (deuteronu) sa energijama od nekoliko desetina MeV do nekoliko GeV sa metama od raznih materijala [7]. To bi odgovaralo mehanizmu reakcije u kojoj visokoenergetski projektil izbacuje iz mete neke nukleone, odnosno laka jezgra ostavljajući za sobom rezidualno jezgro (proizvod spalacije). U zavisnosti od uslova, broj emitovanih lakih čestica, posebno neutrona, može biti veoma veliki. Ova osobina je od velike važnosti za ADS.

Spalaciona meta je jedna od energetski najopterećenijih komponenta u ADS. Ona treba da bude projektovana tako da proizvede maksimalni broj neutrona pri čemu treba da omogući odvođenje toplote generisane u spalacionom procesu. Snaga snopa upadnih čestica može imati vrednost od nekoliko MW što dovodi do veoma velike gustine snage od nekoliko stotina kW/dm³ u materijalu mete. Ova energija se mora efikasno i sigurno odvesti iz materijala. Pored toga, mešovito protonsko-neutronsko polje zračenja u meti nameće veoma specifične zahteve kod dizajna i upotrebe mete i značajno utiče na njene termo-mehaničke osobine. Pokazalo se da dobre osobine za spalacione mete imaju teški metali kao što su volfram, tantal, uranijum, legura olova i bizmuta, olovo i živa. Za hlađenje mete mogu se koristiti gasovi, teška voda i tečni metali.

Pri projektovanju spalacionih meta postoje dve opcije: korišćenje čvrstih ili tečnih metala. Čvrste spalacione mete se već koriste u nekim postrojenjima pa već postoji izvesno iskustvo u njihovom projektovanju i upotrebi, posebno u impulsnim neutronskim spalacionim izvorima male snage. Imajući u vidu veoma velike gustine snage, primena čvrstih spalacionih meta za potrebe ADS nije pogodna. Glavna prednost spalacionih meta od tečnog metala je odlično hlađenje i veliki kapacitet odvođenja toplote što predstavlja inherentnu osobinu sistema sa hladiocima od tečnog metala. Ovo kao posledicu omogućuje postizanje i podnošenje većih gustina snage i značajno smanjenje radijacionog oštećenja mete i strukturnih materijala. Međutim, postoje drugi problemi koji potiču upravo od korišćenja mete i hladioca od tečnog metala kao što su olovo ili legura olova i bizmuta. To su pre svega korozija i erozija strukturnih materijala koji su u direktnom kontaktu sa tečnim metalom na visokim

² Ovaj izraz se najčešće odnosi na aktinide neptunijum, americijum i kirijum. To su "sporedni" radioaktivni produkti dobijeni u nuklearnim reaktorima. Izraz "minorni" označava da oni nastaju u malim količinama u poređenju sa "glavnim" aktinidom – plutonijumom.

temperaturama i pri velikim brzinama fluida, ponašanje (isparljivih) spalacionih produkata i potreba za postavljanjem prozora između vakuumirane cevi za protonski snop iz akceleratora i materijala spalacione mete.

5. AKCELERATOR

Da bi se protonski snop velikog intenziteta ubrzao do energija reda veličine GeV, na raspolaganju su dve potpuno različite akceleratorne šeme, linearni protonski akcelerator ("linac") i ciklotron. Izbor tipa akceleratora zavisi od mnogo faktora, ali je veoma važno da oba poznata konstrukciona rešenja moraju biti modifikovana da bi akceleratorni snop mogao da ispunjava zahteve neophodne za rad ADS. Režim rada akceleratora za ADS mora biti što bliže kontinualnom dok impulsni režim može da se koristi samo kod testiranja i podešavanja.

6. PODKRITIČNO JEZGRO

Podkritično jezgro je veoma slično kritičnom izuzev što je efektivni faktor umnožavanja neutrona manji od jedinice [8]. Podkritični režim omogućava veću slobodu u konstrukciji i radu postrojenja. Konfiguracija podkritičnog jezgra ADS može da omogućiti sagorevanje nekih netipičnih mešavina aktinida koje nisu pogodne za duge intervale ozračivanja. Sa takvom vrstom sistema nije neophodno postizanje određene reaktivnosti sistema da bi se on startovao jer se stacionarno stanje postiže spoljašnjim izvorom.

Kritičnost u konvencionalnim kritičnim reaktorima je ograničena osobinama goriva i dužinom gorivnog ciklusa. ADS može da prihvati i gorivo koje bi bilo nemoguće koristiti u kritičnim sistemima, a može i da se produži trajanje gorivnog ciklusa ukoliko je to potrebno.

Podkritični sistemi imaju veliku prednost u pogledu sigurnosti u odnosu na kritične sisteme zbog činjenice da su im margine za prilagođavanje brzim promenama reaktivnosti šire. Kod akcidenata koji su vezani za gubitak hladioca potrebno je obezbediti pouzdan sistem za zaustavljanje akceleratornog snopa kao i odgovarajući sistem za hlađenje jezgra (isto kao kod kritičnih sistema).

Evolutivan i inovativan prilaz transmutaciji koji podrazumeva ADS zahteva korišćenje podkritičnog jezgra sa brzim neutronima i gorivom u kome dominiraju transuranijski elementi. Karakteristika ovih jezgara je mala frakcija zakasnelih neutrona i veoma mali Doplerov koeficijent reaktivnosti. U principu, fizički procesi u ADS i podkritičnom jezgru su dobro poznati [9] međutim, neki koncepti predstavljaju potpunu novinu pa je za njihovo razumevanje potrebna i eksperimentalna potvrda.

7. AKTUELNA ISTRAŽIVANJA U EVROPI

Istraživanja ADS u Evropi su usmerena u četiri glavna pravca [5]:

- osnovna istraživanja u oblasti goriva (reprocesing, P&T i proizvodnja goriva),
- istraživanja u oblasti akceleratorne tehnologije (pouzdanost elektronskih sistema),
- istraživanja u oblasti spalacione mete (aspekti vezani za zaštitu od zračenja i doze) i

- istraživanja u oblasti podkritičnih sistema (korozija strukturnih komponenta).

Kao i svaki složeni sistem, ADS zavisi od efikasnosti integracije sistema. U tom kontekstu, neutronski izvor igra najznačajniju ulogu s obzirom na činjenicu da je on dvostrano povezan, sa akceleratorom sa jedne strane i sa podkritičnim jezgrom sa druge strane. Prvi pokušaj integracije ADS urađen je u CERN-u 1994-te godine u okviru projekta FEAT (*First Energy Amplifier Test*) [10] kada je uspešno provereno umnožavanje neutrona u podkritičnom reaktoru sa prirodnim uranijumom. Projekat MUSE je predstavljao mnogo složeniji i sveobuhvatniji eksperiment na polju podkritičnih sistema pokretanih akceleratorom. Od projekata MEGAPIE i MYRRHA [11-12] se očekuje da pruže nove relevantne informacije. Prvi eksperiment spajanja komponenta ADS treba da bude ostvaren u Italiji korišćenjem TRIGA reaktora u podkritičnom režimu.

Osnovna istraživanja na polju integracije sistema moraju da uzmu u obzir standardne zahteve nuklearne sigurnosti, koji se uglavnom odnose na:

- kritičnost sistema (u slučaju ADS to znači da sistem mora biti podkritičan u svakom trenutku) i
- zaštitu od zračenja.

Zadovoljenje oba zahteva su polazne tačke u procesu licenciranja ADS posebno u fazi izrade prototipa i eksperimentalnih reaktora.

8. ISTRAŽIVANJA U SRBIJI

Grupa istraživača iz Instituta Vinča, Centar za nuklearne tehnologije i istraživanja, priključila se projektu koji je pokrenut u Međunarodnoj agenciji za atomsku energiju "*Low-Enriched Uranium (LEU) Fuel Utilization in Accelerator-Driven Sub-Critical Assembly (ADS) Systems*". Rad se odvija na polju numeričkih simulacija neutronskog fluksa dobijenog iz mete koja je bombardovana snopovima protona i deuteronu, kao i neutronskog fluksa u podkritičnom jezgru čiji su materijalni sastav i geometrija projektovani na osnovu tipa goriva korišćenog u postojećem postrojenju RB [13 - 21].

Izgradnja nuklearnih postrojenja je u Srbiji zabranjena zakonom [22] pa je samim tim potpuno zamrlo interesovanje za bilo kakvu vrstu obrazovanja i studija u ovoj oblasti. Imajući u vidu činjenicu da je u Srbiji evidentan nedostatak električne energije, trebalo bi razmišljati o eventualnoj izgradnji nuklearne elektrane. Rad u oblasti ADS mogao bi da bude tačka okupljanja za izuzetno malu grupu preostalih nuklearnih inženjera. Na žalost ekonomska situacija u zemlji je takva da ne postoji nikakva realna mogućnost za značajno finansiranje projekata u oblasti ADS.

LITERATURA

- [1] *Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, A Comparative Study*, OECD/NEA Report, 2002.
- [2] Westlen D., "Reducing radiotoxicity in the long run", *Progress in Nuclear Energy*, No. 49, 2007, p.p. 597 – 605

- [3] IAEA, *Safety and Environmental Aspects of Partitioning and Transmutation of Actinides and Fission Products*, IAEA-TECDOC-783, Vienna, Austria, 1995
- [4] IAEA, *Accelerator-driven Systems; Energy Generation and Transmutation of Nuclear Waste*, IAEA-TECDOC-985, Vienna, Austria, 1997
- [5] *A European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration*, The European Technical Working Group on ADS, ENEA, 2001.
- [6] R. Popić, B. Loloć, N. Afgan, *Naučno-tehnički rečnik, Englesko-srpskohrvatski, peto dopunjeno izdanje, Privredni pregled, Beograd, 1982*
- [7] Y. Kadi and J.P. Revol, *Design of an Accelerator-Driven System for the Destruction of Nuclear Waste*, European Organization for Nuclear Research, CERN, Geneva, Switzerland, Lectures given at the Workshop on Hybrid Nuclear Systems for Energy Production, Utilisation of Actinides & Transmutation of Long-Lived Radioactive Waste, Trieste, 3 - 7 September 2001, LNS0212002
- [8] Technical Reports Series No. 435, *Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004
- [9] C. Rubbia et al., *An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Accelerator*, CERN/AT/93-47 (ET) 1993.
- [10] S. Andriamonje et al., *Phys. Lett. B* 348 (1995) 697.
- [11] Bauer G.S., Salvatores M., Heusener G, *MEGAPIE, a 1 MW Pilot Experiment for a Liquid Metal Spallation Target*, <http://megapie.web.psi.ch/documents/megapie.pdf>
- [12] Hamid Ait Abderrahim, P. Kupschus, Ph. Benoit, E. Malambu, V. Sobolev, Th. Aoust, K. Van Tichelen, B. Arien, F. Vermeersch, D. De Bruyn, D. Maes, W. Haeck, *MYRRHA, A Multipurpose Accelerator Driven System for R&D. State-of-the-art at mid-2003*. In Proceedings of the International Workshop on P&T and ADS development (ADOPT 2003), SCK•CEN club-house, October 6-8, 2003, Belgium
- [13] Avramović I., Pešić M., *Accelerator-Driven Sub-Critical Research Facility with Low-Enriched Fuel in Lead Matrix – Neutron Flux Calculation*, Nuclear Technology & Radiation Protection, Vol. XXII, No. 2, p.p. 3-9, Belgrade, December 2007.
- [14] Pešić M., Nešković N., Plećaš I.: "ADS Project in the Vinča Institute", Proceedings of International Meeting on Sub-Critical Accelerator Driven Systems, pp. 27-33, SSC RF ITEP, Moscow, Russia, October 11-15, 1999
- [15] Pešić M., Sobolevsky N.: "ADS with HEU in the Vinča Institute", Proceedings of the 10th International Conference on Emerging of Nuclear Energy Systems - ICENES 2000, paper no. 067, pp.420-428, Petten, The Netherlands, September 24-28, 2000
- [16] Pešić M.: "Feasibility Study on Accelerator Driven Sub-critical System with High Enriched Uranium Fuel", CD ROM Proceedings of the 3rd Yugoslav Nuclear Society International Conference -YUNSC 2000, invited paper, pp. 239-250, Belgrade, October 2-5, 2000
- [17] Pešić M., "Research on ADS in Vinča Institute", International Conference on 'Back-End of the Fuel Cycle: From Research to Solution' - GLOBAL 2001, CD ROM, pp. 1-8, Paris, France, September 9-13, 2001
- [18] Pešić M., "Calculation of Neutron Production in Selected Materials by Beam of Charged Particles of Intermediate Energies", *Nuklearna Tehnologija*, Vol. XVI, No. 1, pp. 34-38 (2001)
- [19] Pešić M., "SCG Program on ADS Study with HEU and LEU TVR-S Type Fuel", IAEA Technical Meeting on Use of LEU in ADS Assemblies, Vienna, 10-12 October 2005
- [20] Pešić M., Nešković N., Concept of an Accelerator Driven Subcritical Research Reactor within the TESLA Accelerator Installation, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A*, Vol. 562, Issue 2, pp. 642-645 (2006)
- [21] Pešić M., Avramović I., Beličev P., Nešković N., "H5B Accelerator Driven Sub-critical Research Facility with Low Enriched TVR-S Fuel in Lead Matrix – Basic Specification", A Material Prepared for the IAEA Sub-Coordinated Research Project on "Low Enriched Uranium (LEU) Fuel Utilization in Accelerator Driven Sub-Critical Assembly (ADS) Systems", Vinča-Centre NTI – 135/rev.1, Vinča Institute, August 2007.
- [22] Zakon o zabrani izgradnje nuklearnih elektrana u SRJ, Službeni list SRJ broj 12/95

Abstract – Spent nuclear fuel discharged from nuclear power plants is the main problem during design of radioactive waste disposal. Most of the hazard stems from only a few chemical elements. The radiotoxicity of these elements can be efficiently reduced using partitioning and transmutation in fast reactors and accelerator driven sub-critical systems.

ACCELERATOR DRIVEN SUB-CRITICAL SYSTEM FOR THE RADIOACTIVE WASTE TRANSMUTATION

Ivana Avramović and Milan Pešić