

Jedrski gorivni krog

Nuclear fuel cycle

Matjaž Valenčič
Zveza ekoloških gibanj Slovenije-ZEG
Krško, Slovenija
matjaz.valencic@gmail.com

Povzetek:

Atomska doba se je začela grozljivo, z eksplozijo atomskih bomb na Hirošimo in Nagasaki. Ameriškim atomskim bombam so z nekaj letno zamudo sledile sovjetske, britanske, francoske ...

Ameriški predsednik Dwight D. Eisenhower je leta 1953 z geslom »Atomi za mir« predstavljal mirnodobno rabo jedrske energije. Nekaj let kasneje je bila ustanovljena Mednarodna agencija za jedrsko energijo (IAEA), z dvema glavnima ciljema, spodbujanje miroljubne rabe jedrske energije in preprečevanje širjenja jedrskega orožja.

V mnogih državah številni jedrski znanstveniki upali, da bo jedrsko cepitev mogoče izkoristiti kot čist vir energije, ki bo tako obilna in poceni, da bo omogočila blaginjo človeštva. Uresničitev teh sanj pa je bila odvisna od reaktorjev za razmnoževanje plutonija, ki bi lahko v celoti izkoristili cepitveno energijo, skrito v uranu.

Pa vendar, napovedi jedrskih fizikov se niso uresničile. Predelave jedrskih odpadkov so drage, nevarne, bremenijo okolje in predstavljajo varnostno tveganje. Pri jedrski reakciji nastajajo visoko radioaktivni elementi, ki trajno bremenijo okolje, odlaganje teh elementov v globoka podzemna skladišča pa je tako drago, da jih nikjer na svetu še ne odlagajo. Teoretično je sicer možno v posebnih reaktorjih predelati večino visoko radioaktivnih odpadkov, vendar obstajajo prevelike ovire, tega nikoli ne bo.

V prispevku želimo utemeljiti trditev, da le odprt jedrski gorivni krog, pri katerem se celotno izrabljeno gorivo odloži neposredno in enkrat za vselej v globoko odlagališče, zagotavlja zadostno jedrsko varnost. To trditev so zapisali avtorji Frank von Hippel, Masafumi Takubo in Jungmin Kang v knjigi »Plutonium – How Nuclear Power's Dream Fuel Became a Nightmare«, prevod knjige v slovenščino pa bo izšel do konca leta.

Ključne besede: jedrski gorivni krog, atomi za mir, plutonij, nočna mora

Summary

The atomic age began horrifically, with the explosion of atomic bombs on Hiroshima and Nagasaki. American atomic bombs were followed by Soviet, British, French...

In 1953, US President Dwight D. Eisenhower introduced the peaceful use of nuclear energy with the slogan "Atoms for Peace". A few years later, the International Atomic Energy Agency (IAEA) was established, with two main objectives, promoting the peaceful use of nuclear energy and preventing the proliferation of nuclear weapons.

In many countries, many nuclear scientists hoped that nuclear fission could be used as a clean source of energy that would be so abundant and cheap that it would enable the well-being of humanity. The realization of this dream, however, depended on plutonium reactors that could take full advantage of the fission energy hidden in uranium.

And yet, the predictions of nuclear physicists did not come true. Nuclear waste recovery is expensive, dangerous, burdensome to the environment and poses a safety risk. A nuclear reaction produces highly radioactive elements that permanently burden the environment, and the disposal of these elements in deep underground storage facilities is so expensive that they are not disposed of anywhere else in the world. Theoretically, it is possible to process most of the high-level radioactive waste in special reactors, but there are too many obstacles, this will never happen.

In this paper, we want to substantiate the claim that only an open nuclear fuel cycle, in which all spent fuel is deposited directly and once and for all in a deep repository, provides sufficient nuclear safety. This claim was written by authors Frank von Hippel, Masafumi Takubo and Jungmin Kang in the book "Plutonium – How Nuclear Power's Dream Fuel Became a Nightmare", and the translation of the book into Slovene language will be published by the end of the year.

Keywords: Nuclear Fuel Cycle, Atoms for Peace, Plutonium, Nightmare

Ekonomika jedrske energije

Jedrska energija ni poceni, v mirnodobni rabi pa mora biti konkurenčna drugim virom energije. Zato jedrski upravljavci prelagajo stroške, ki jih lahko predstavijo v prihodnost kot nepotrebne. Eden od teh »nenujnih« stroškov je odlaganje izrabljenega jedrskega goriva (IG) oziroma visokoradioaktivnih odpadkov (VRAO) v globoko odlagališče. Še več, z odlašanjem gradnje odlagališča delajo vtis, da so skrbni, saj naj bi bilo možno izrabljeno jedrsko gorivo nekoč ponovno izrabiti, s tem pa bi se povečala ekonomika jedrskih elektrarn in zmanjšale količine visokoradioaktivnih odpadkov za odlaganje. Zamisli o ponovni rabi izrabljenega jedrskega goriva so prišle tudi v Resolucijo o nacionalnem programu ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom za obdobje 2023–2032 (ReNPROIG23–32). V uvodu tega pravilnika piše: »IG slovenska zakonodaja opredeljuje kot "jedrsko gorivo, ki je bilo obsevano v reaktorski sredici in je trajno iz nje odstranjeno". IG se lahko obravnava kot koristna snov, ki jo je mogoče predelati, ali kot radioaktivni odpadki, ki ga je treba odložiti. S predelavo IG lahko pridobimo predelan uran in plutonij, ki se lahko uporabljata kot koristna snov za novo jedrsko gorivo. RAO, nastale ob predelavi IG, štejemo med VRAO, ki vsebujejo radionuklide, katerih razpad sprošča toliko toplote, da jo je treba upoštevati pri ravnanju z njimi.«

V strokovnih in poljudnih medijih beremo, da ima jedrska energija vse možnosti, da jo označimo za trajnostno, da je izrabljeno jedrsko gorivo [državna strateška zaloga](#) in da izrabljeno gorivo ni odpadki. To je zgolj pragmatizem kot v pregovoru "If You Can't Beat Them, Join Them!". Menda je izrek "Fake it 'til You make it!", pisan na kožo zagovornikom jedrske energije.

Oba izreka je možno posloveniti. Prvega kot: "Če jih ne moreš premagati, se jim pridruži"; drugega pa kot "Potvarjaj, dokler ne postane resnica."

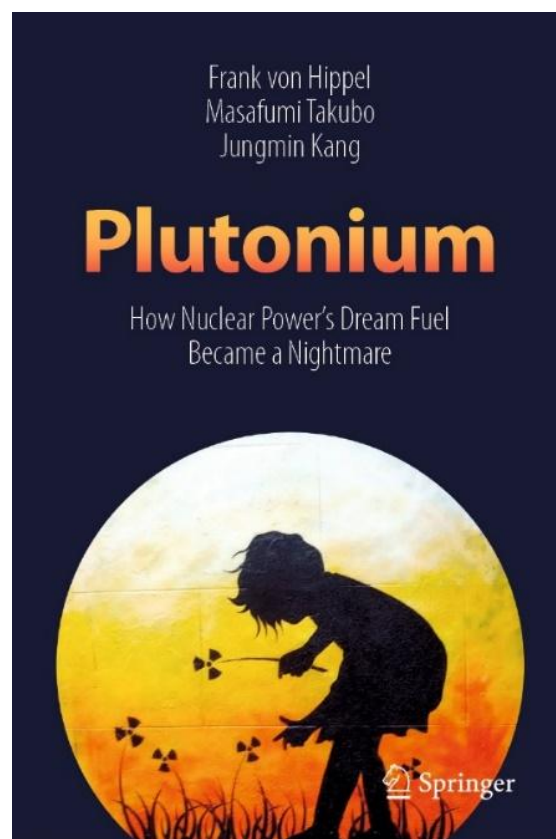
Odlaganje VRAO oziroma IG pač ni nepomembna malenkost, ki bi jo smeli jedrski lobisti spregledati.

- Nekdanji direktor je leta 2021 nedvoumno povedal, da za odlaganje VRAO nimamo tehničnih rešitev niti denarja: »morda bodo čez dvesto let zanesljivo našli tehnično rešitev«.
- Slovenija je ena redkih, če ne celo edina jedrska država na svetu, ki **nima urejenega odlaganja nobenih radioaktivnih odpadkov**. Avtor citata, da so jedrski odpadki [dragocena neprecenljiva dediščina zanamcem](#), je ekonomist, ki je bil upravitelj državnega jedrskega premoženja.

Na srečo pa je imelo vodstvo NEK dovolj modrosti. V okviru varnostne nadgradnje so postavili suho skladišče za izrabljeno jedrsko gorivo. Varnostna nadgradnja začasnega skladiščenja izrabljenega

goriva v bazenu je uvedba suhega skladiščenja in postopna prestavitev izrabljenih gorivnih elementov iz bazena v odporne, neprepustno zaprte zabojnike s pasivnim hlajenjem. Za zagotavljanje hlajenja niso potrebne dodatne naprave, sistemi ali energenti. IG se po približno petih letih hlajenja v bazenu dovolj ohladi, da ga je možno prestaviti v suho skladišče, kar je varnejše in cenejše. Seveda pa suho skladišče IG ni trajna rešitev, zato je gradnja globokega odlagališča nujna.

Plutonij – kako je sanjsko gorivo jedrske energije postalo nočna mora



Vsebina knjige podrobno prikazuje 200 milijard dolarjev izgubljenega truda pri razvoju reaktorjev za predelavo in razmnoževanje plutonija. Podaja pregled statusa globalnih programov predelave in obravnava družbena vprašanja, kot so širjenje jedrskega orožja, jedrska varnost, skladiščenje goriva, vpliv na okolje in jedrski terorizem. Poleg tega upošteva znanstvene, gospodarske in družbene dejavnike, napisano na ravni, primerni za oblikovalce politik in znanstveno pismene splošne bralce.

Ta knjiga spodbuja k razmišljanju analizo vprašanj v zvezi s predelavo jedrskega goriva in reaktorja na hitre nevtrone, vključno s razpravo o virih, ekonomiji, radiološkem tveganju in odpornosti proti širjenju jedrskega orožja. Opisuje zgodovino in znanost v ozadju ponovne obdelave ter daje pregled statusa programov ponovne obdelave po svetu. Še več,

ugotavlja, da je treba programe ponovne rabe izrabljenega goriva prekiniti. Mnogi predstavljajo jedrsko energijo kot edino možno rešitev za težave emisij ogljikovega dioksida, nekatere nacionalne jedrske ustanove si celo prizadevajo za razvoj in uvedbo natrijevo hlajenih reaktorjev za razmnoževanje in recikliranje plutonija. Njihovi zagovorniki trdijo, da bi ta sistem ponudil znatne prednosti glede na sedanjo tehnologijo lahkovodnih reaktorjev, v smislu večje učinkovitosti izkoriščanja urana, poleg tega naj bi ločevanje dolgoživega plutonija in drugih transuranov iz izrabljenega goriva ter njihova cepitev v hitrih reaktorjih močno skrajšala trajanje toksičnosti radioaktivnih odpadkov. Vendar so bila prizadevanja za komercialno uvedbo tega sistema v številnih državah v zadnjih šestih desetletjih gospodarsko in tehnično neuspešna, v nekaterih primerih pa so bila uporabljena za prikrivanje skrivnih programov razvoja jedrskega orožja.

...se nadaljuje...

Razprava o plutoniju še zdaleč ni končana. Pravzaprav so v Združenih državah Amerike zagovorniki ločevanja plutonija od izrabljenega jedrskega goriva in njegove ponovne uporabe v plutonijevo-uranovem gorivu spet na oblasti – upajmo, da ne za dovolj dolgo, da bi povzročili resnično škodo.

23. maja 2025 je predsednik Trump odredil »analizo pravnih, proračunskih in političnih vidikov, povezanih z učinkovitim prenosom izrabljenega jedrskega goriva iz reaktorjev v vladni, zasebno upravljani obrat za predelavo in recikliranje« ter ustavitev redčenja in odstranjevanja presežnega ameriškega plutonija iz orožja hladne vojne, da bi ga lahko »industriji dali na voljo v obliki, ki jo je mogoče uporabiti za izdelavo goriva za napredne jedrske tehnologije«.

Nič se ni spremenilo v moči argumentov ekonomike, okolja in neširjenja, proti ločevanju in ponovni uporabi plutonija. Celotna francoska nacionalna jedrska družba Électricité de France je prisiljena podpirati plutonijevo industrijo v Franciji, tega nočejo storiti v Združenem kraljestvu, katerega jedrske reaktorje tudi upravlja EDF. Britanska vlada je končala predelavo izrabljenega goriva in se je začasno odločila, da bo odstranila svoje nakopičene zaloge 117 ton ločenega civilnega plutonija, kar zadostuje za 15.000 jedrskih orožij, kar bo povzročilo precejšnje stroške z globokim zakopom po redčenju in imobilizaciji v keramiki – v bistvu v obliki, ki jo ima v izrabljenem gorivu iz vodno hlajenih reaktorjev.

Od 31 držav, ki danes upravljajo jedrske elektrarne, le štiri države z jedrskim orožjem: Kitajska, Francija, Indija in Rusija, predelujejo izrabljeno gorivo iz reaktorjev. Japonska gradi obrat za predelavo. Vsaka država ima za svojo izbiro poseben razlog, ki nima nobene zveze z ekonomijo ali okoljskimi vprašanji:

- Rusija je zgradila tri izolirana mesta za proizvodnjo plutonija za svoj ogromen jedrski arzenal iz hladne vojne. Zdaj ne potrebuje več plutonija za orožje, ker lahko plutonijeve »jame«, osrednje dele primarne jedrske bombe, v svojem močno zmanjšanem arzenalu jedrskega orožja predela iz plutonija, pridobljenega iz starih jam. Pravzaprav je Rusija leta 2000, vzporedno z ZDA, razglasila 34 ton presežnega plutonija za orožje. Rusija ima tudi 58 ton ločenega civilnega plutonija. Da bi ohranila zaposlenost, pa ROSATOM še naprej upravlja pilotne obrate za predelavo v dveh od treh mest, kjer predelujejo dodaten civilni plutonij iz izrabljenega goriva iz energetskih reaktorjev za gorivo prihodnjih demonstracijskih reaktorjev za razmnoževanje plutonija, zgrajenih za vzdrževanje drugega dela svojega ogromnega jedrskega kompleksa.

- Francija je zgradila ogromen kompleks za predelavo v Normandiji v upanju, da bodo druge države tam sklenile pogodbo za predelavo izrabljenega goriva. To se je zgodilo med sedemdesetimi in devetdesetimi leti prejšnjega stoletja. Druge države, ki niso videle prihodnosti v plutonijevem gospodarstvu, kasneje niso podaljšale svojih pogodb, podjetje Électricité de France in njegove stranke pa so bile prisiljene nositi skoraj celotno breme vzdrževanja kompleksa.

- Glavni namen kitajskih in indijskih obratov za predelavo naj bi bil zagotavljanje plutonija za njune rastoče arzenale jedrskega orožja.

- Japonska je leta 1993 začela graditi obrat za predelavo, ki ga je zasnovala Francija, z zmogljivostjo 800 ton/leto. V času pisanja tega besedila obrat še vedno ne obratuje, ker se upravljavec trudi izpolniti zahteve po posodobitvah japonskih predpisov o jedrski varnosti po dogodkih v Fukušimi. Vendar vlada noče spremeniti svoje politike s predelave na neposredno odlaganje izrabljenega goriva v globoko geološko odlagališče. Japonska trma je privedla do suma, da ohranja predelavo kot latentno zmogljivost proizvodnje jedrskega orožja, če bi se ameriško varnostno jamstvo izkazalo za nezanesljivo – čeprav bi bil za ta namen več kot zadosten veliko manjši objekt, kot je zaprti pilotni obrat za predelavo v Tokaiju.

Osnovno stanje, opisano v knjigi, torej ostaja nespremenjeno, razen odločitve Trumpove administracije, da »Ameriko spet naredi veliko« tako, da jo bo premaknila nazaj.

Tukaj in sedaj

Izrabljeno jedrsko gorivo (IG) nastaja v Sloveniji le v NEK in v raziskovalnem reaktorju TRIGA Mark II. Leta 2022 je bila količina IG približno 550 ton urana in 6,8 tone plutonija, v jedrskem žargonu je to »majhna količina«. V primerjavi z drugimi jedrskimi

državami bodo te količine izredno majhne tudi po prenehanju obratovanja obeh reaktorjev. Hkrati pa Slovenija načrtuje gradnjo nove jedrske elektrarne. Investitor GEN izbira med tremi, Westinghouse AP 1000 moči 1.117 MW, EDF moči 1.200 MW in EDF moči 1.650 MW, izbrana elektrarna pa naj bi delovala 60 do 80 let. Do konca obratovanja obeh jedrskih elektrarn naj bi nastalo več kot 2.000 ton IG (od tega več kot 25 t plutonija). Skrb vzbujajoče je, da investitorji načrtujejo obratovanje sedanje in gradnjo nove jedrske elektrarne brez načrtovanja odlagališča visokoradioaktivnih odpadkov. Pretvarjajo se, da so radioaktivni odpadki koristna snov, saj tako piše v Uradnem listu. Se motijo ali zavajajo?

Prevod knjige »Plutonium – kako je sanjsko gorivo jedrske energije postalo nočna mora« bo strokovni javnosti pojasnil nujnost trajnega odlaganja radioaktivnih odpadkov. Bo jedrska stroka hotela razumeti? Upton Sinclair, ameriški pisatelj in socialni reformator je zapisal: "Težko je prepričati človeka, da nekaj razume, če je njegova plača odvisna od tega, da tega ne razume."

Jedrski gorivni krog mora biti odprt. Ohlajeno izrabljeno gorivo, visokoradioaktivni odpadek, je treba trajno odložiti v globoko geološko odlagališče.

Literatura/References:

- Von Hippel, F., Takubo, M., & Kang, J. (2025); Plutonium – How Nuclear Power's Dream Fuel Became a Nightmare; Springer Singapore, december 2019
- Resolucija o nacionalnem programu ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom za obdobje 2023–2032 (ReNPROIG23–32); Uradni list RS, št. 14/23
- Valenčič, M.; Dragocena neprecenljiva dediščina zanamcem!;
<https://zaensvet.si/dragocena-neprecenljiva-dediscina-zanamcem/>; februar 2020