ALTERNATOR
Misliti znanost.

Jedrsko gorivo iz druge roke

5. 5. 2022

Number: 18/2022

Author:

- Jan Malec

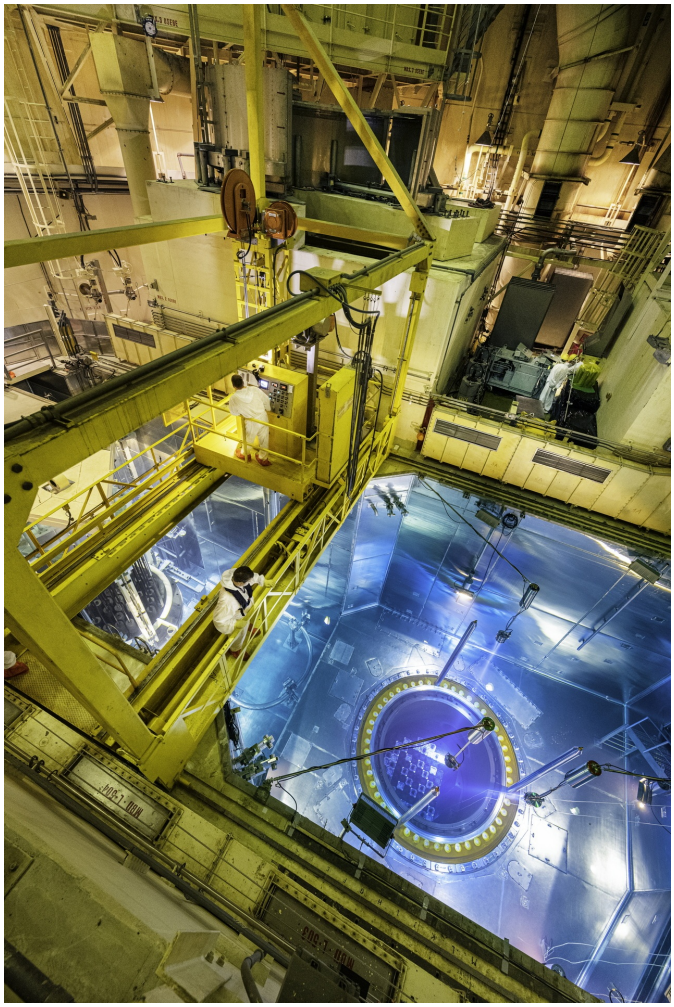


Foto: Arne Hodalič in Katja Bidovec, NEK - Nuklearna elektrarna Krško

Jedrsko gorivo ostaja v 21. stoletju ena osrednjih tem, povezanih s širitvijo pridobivanja energije iz jedrskih elektrarn. Današnje tlačnovodne jedrske elektrarne za gorivo uporabljajo uran, ki je nastal med eksplozijami supernov in zlivanjem nevtronskih zvezd s procesom hitrega zajetja nevtronov (angl. *r-process*). Do hitrega zajetja nevtronov pride takrat, ko jedro atoma sprejema nove nevtrone in s tem povečuje svoje masno število tako hitro, da med zaporednimi zajetji ne pride do radioaktivnega razpada – procesa, pri katerem nestabilno jedro razpade v drugo jedro, pri tem pa izseva visokoenergijski delec. V zemeljski skorji se uran nahaja s povprečno koncentracijo 3 grame na tono, najdemo pa ga tudi v obliki raztopine v oceanih. Na Zemlji je naravni uran sestavljen iz izotopov, ki se razlikujejo po svoji masi. Izotop ^{235}U je v jedrski fiziki najbolj zanimiv, saj se ob srečanju s termičnim (počasnim) nevtronom pogosto cepi v dve ali več manjših jeder, ki jih imenujemo cepitveni produkti, pri tem pa proizvede še nove nevtrone in energijo. Večina urana v zemlji je v obliki izotopa ^{238}U, ki se ob trku z nevtronom spremeni v ^{239}U, iz katerega z radioaktivnim razpadom nastaja plutonij ^{239}Pu, ki je podobno kot ^{235}U cepljiv s termičnimi nevtroni. Pridobljeni uran pred uporabo najprej predelamo v prečiščen koncentrat s kemijsko formulo U_3O_8, bolj znan kot t. i. *rumena pogača* (angl. *yellowcake*) (prikazana na spodnji sliki). Za uporabo v reaktorjih, ki so sposobni uporabiti naravni uran, lahko rumeno pogačo neposredno predelamo v gorivo, za večino reaktorjev pa ga najprej spremenimo v plinasti uranov heksafluorid. V plinastem stanju najlažje ločimo atome urana z različnimi masami in tako povečamo delež ^{235}U, s čimer olajšamo njegovo uporabo v reaktorjih. Za uporabo v civilnih tlačnovodnih reaktorjih delež ^{235}U povečamo z naravnih 0,7 % na 1–5 %.



Rumena pogača je prvi korak procesiranja uranove rude. V naslednjem koraku jo bodo pretvorili v plinasti uranov heksafluorid, ki je primeren za obogatitev. Vir: OECD/NEA

V Nuklearni elektrarni Krško (NEK) tipični sveženj goriva odsluži enega, dva ali tri zgorevalne cikle, med katerimi se uran cepi in sprošča energijo. Vsak cikel praviloma traja 18 mesecev, lahko je tudi krajši. Po največ treh ciklih gorivo konča v bazenu za izrabljeno gorivo, v katerem nekateri cepitveni produkti v gorivu nadalje počasi razpadajo, gorivo pa s časom oddaja manj toplote in radioaktivnega sevanja. Izrabljeno gorivo lahko po uporabi v reaktorju že čez pet let odložimo v suho skladišče, kjer naslednjih nekaj deset let čaka na nadaljnjo usodo. V nekaterih državah potekajo testni projekti, ki za shrambo uporabljajo različne tehnologije, kot je globok geološki repozitorij in shramba gorivnih elementov v vrtinah. Med njimi izstopa Finska, ki v času pisanja članka gradi globoko geološko odlagališče, ki bo kmalu prešlo v komercialno uporabo. Taki uporabi jedrskega goriva pravimo *odprti cikel*, geološko odlagališče pa spada med končna odlagališča.

Vendar tako gorivo ni zares izrabljeno, saj se med obratovanjem jedrske elektrarne sprostijo le štirje odstotki energije, ki je na voljo v jedrih atomov. Zaradi cepitvenih produktov, ki preprečujejo nadaljevanje jedrske reakcije, je gorivo v taki obliki neprimerno za nadaljnjo uporabo. V Franciji pa rabljenega goriva ne pojmujejo kot odpadek, temveč kot surovino. Gorivo reciklirajo tako, da kemijsko ločijo elemente v gorivu in iz dobljenega urana in plutonija naredijo novo gorivo, ki ga lahko znova uporabijo v naslednjem gorivnem ciklu. Na tak način bistveno povečajo izkoristek goriva in s trenutnimi postopki zmanjšajo količino odpadkov za okoli dve tretjini. Poleg količine se ob predelavi zmanjša tudi radiotoksičnost odpadkov. Tako delujejo trajnostno.



Jedrskega goriva ne shranjujemo v luknjastih sodih, kot bi lahko pogosto sklepali iz filmov, temveč v trdnem stanju v posebnih zabojnikih, ki ne potrebujejo aktivnega hlajenja in minimalno obremenjujejo okolje. Vir: OECD/NRC

Razlogov, zakaj se vse države ne odločajo za tak pristop, je več in med njimi je gotovo tudi pomanjkanje ekonomske motivacije. Uran predstavlja majhen del stroškov obratovanja jedrskih elektrarn, reprocesiranje pa je drag in tehnološko zapleten proces, zato se predelava goriva ponekod ekonomsko manj izplača kot pridobivanje svežega urana iz rude. Tudi shramba nepredelanega izrabljenega goriva prestavlja manjši problem, kot je pogosto mogoče sklepati iz medijev, saj jedrske elektrarne proizvedejo volumsko malo goriva. Vse gorivo, ki so ga v zgodovini uporabe proizvedle ameriške elektrarne, bi lahko spravili na površino enega nogometnega igrišča v višino dobrih sedem metrov, vse slovensko uporabljeno jedrsko gorivo pa se prav v času pisanja prispevka nahaja v enem samem bazenu znotraj Jedrske elektrarne Krško in bo v naslednjih letih prestavljeno v pasivno varne suhe zabojnike, kot prikazuje zgornja slika.

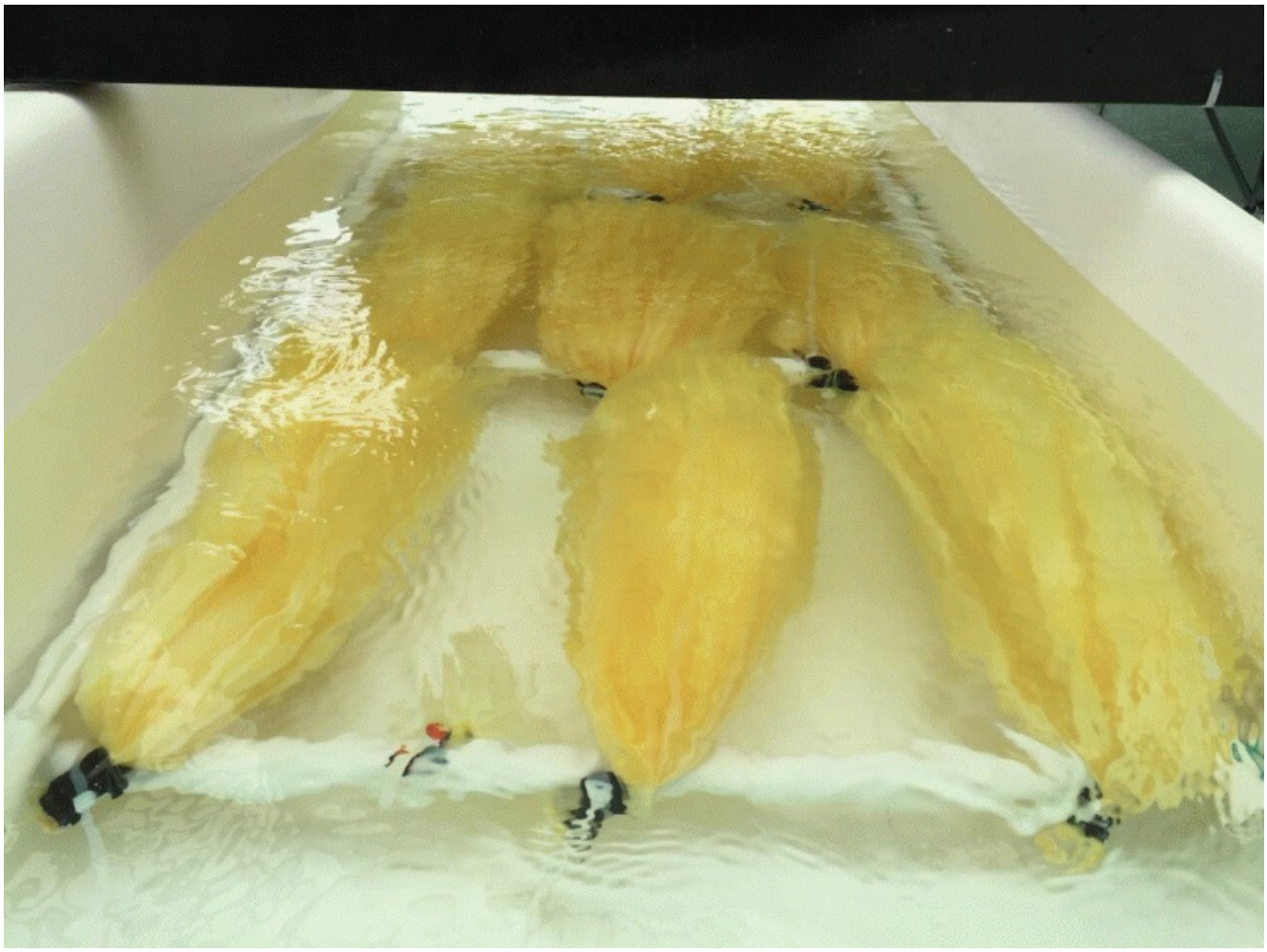
Jedrska industrija je posebna v tem, da vse svoje uporabljeno gorivo shranjuje in zanj skrbi. Nekatere druge industrije, med katerimi je najbolj zloglasna industrija fosilne energije, za odlagališče uporabljajo skupno atmosfero in morja, saj proizvedejo preveč odpadkov, da bi zanje lahko skrbeli po tako visokih standardih, kot so vzpostavljena v jedrski industriji. Izrabljeno jedrsko gorivo ravno tako ni bolj nevarno kot ostali industrijski odpadki. Tudi če bi vse izrabljeno gorivo (https://www.iaea.org/publications/14739/status-and-trends-in-spent-fuel-and-radioactive-waste-management) , ki je bilo kadarkoli proizvedeno na svetu, homogeno zmešali v ocean (tega seveda ne bomo naredili!), bi naravno koncentracijo urana (https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_uranium) povečali za manj kot 1 %. Poglejmo še, kaj bi se zgodilo z aktivnostjo. Taka količina uporabljenega goriva ima po dvajsetih letih aktivnost okoli 10^{22} Bq (https://arhiv.djs.si/proc/nene2015/pdf/NENE2015_410.pdf) , kar je podobnega velikostnega reda kot aktivnost vseh nuklidov v morskih vodah. Jedrska industrija za svoje gorivo torej ne skrbi tako vestno zato, ker bi bilo bolj nevarno od odpadkov ostalih industrij, temveč zato, ker za razliko od ostalih industrij operira z obvladljivimi količinami.

Z uporabo urana, ki se naravno nahaja v oceanu, bi jedrska energija postala vsaj tako obnovljiva kot vetrna in sončna, saj se ob njegovi ekstrakciji količina urana lahko obnavlja prek geoloških procesov (https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2016/03/24/is-nuclear-power-a-renewable-or-a-sustainable-energy-source/?sh=1d0c4c98656e) . Spodnja slika prikazuje primer procesa ekstrakcije urana iz morja z uporabo umetnih materialov. V naravi urana seveda ni neomejeno, ga je pa veliko več, kot ga lahko porabimo v naslednjih tisoč letih. Podobno, kot je izraba jedrske energije teoretično omejena s količino urana, je izraba sončne in vetrne energije omejena s količino snovi, ki jo potrebujemo za izgradnjo sončnih celic, vetrnic in baterij za shrambo energije.

Jedrska energija lahko veliko pripomore k večji energetski neodvisnosti držav – tudi v primeru, če njeno gorivo uvažamo iz tujine. Jedrska elektrarna Krško na gorivni cikel, ki traja 18 mesecev, porabi okoli 20 ton goriva. To pomeni, da ga lahko v majhnem skladišču shrani za več let obratovanja. V primeru, da se dobava jedrskega goriva prekine, imamo vsaj do konca gorivnega cikla čas, da najdemo njegovo zamenjavo. Naredimo še primerjavo z drugimi energenti: zemeljski plin je glede energetske neodvisnosti bistveno bolj problematičen, saj nam ga lahko ob prekinitvi dobave zmanjka že čez nekaj ur. Današnja omrežja z velikim deležem sončne in vetrne energije, kot je nemško, vrzeli v proizvodnji energije dopolnjujejo s

fosilnimi gorivi, kar pomeni, da so ohranili vse probleme, povezane z uvozno odvisnostjo fosilnih goriv. Tudi v idealnem omrežju obnovljivih virov, ki zaradi velike kapacitete za shranjevanje energije v obliki črpalnih hidroelektrarn in baterij ne potrebuje pomoči fosilnih goriv, ne moremo govoriti o popolni energetski neodvisnosti. Na zahodu namreč sončne celice, vetrne elektrarne in baterije uvažamo iz držav z nižjimi okoljskimi standardi. Na zahodu imamo z vzpostavitvijo lokalnih kapacitet za proizvodnjo težave, kot je razvidno iz težav z odpiranjem rudnikov litija. Vse uvožene komponente pa je potrebno vsakih nekaj let zamenjati.

V Sloveniji obrata za predelavo goriva nimamo, vendar je v energetskem dovoljenju za nov blok jedrske elektrarne zahtevano, naj bo elektrarna kompatibilna z reprocesiranim gorivom. Tako bi v Sloveniji tudi brez svojega obrata svoje gorivo namesto v odlagališče pošiljali v tujino na reprocesiranje, kjer ga bodo prečistili in predelali v sveže gorivo. Na ta način bomo lahko predelali in ponovno uporabili tudi gorivo, ki smo ga uporabili v prvi jedrski elektrarni.



Z uporabo novih materialov pridobivanje urana iz oceanov postaja cenovno vse bolj učinkovito. Slika prikazuje umetna vlakna, v katerih se nabira uran iz morske vode. Foto: PNNL

V prihodnosti bomo jedrsko gorivo lahko izkoristili še učinkovitejše. V hitrih reaktorjih, kakršni so načrtovani v četrti generaciji, bomo lahko uporabili tudi preostali del goriva, ki ga v trenutnih reaktorjih ni mogoče. Na ta način bomo lahko dosegli popoln zaprti cikel, v katerem ne bomo proizvedli dolgoživih radioaktivnih odpadkov.

Skladiščenje jedrskega goriva naj torej ne bo zadržek pred širitvijo jedrske energije. Tako za začasno skladiščenje kot dolgotrajne rešitve skladiščenja ali predelave goriva obstajajo že razvite, preizkušene in praktične rešitve. Čakanje na razvoj drugih rešitev, kot so masovna shramba elektrike ali zajem ogljika iz zraka, je s podnebnega vidika zelo tvegano. Člani mednarodnega foruma za podnebne spremembe (IPCC (https://www.ipcc.ch/)) v drugem delu svojega šestega poročila ocenjujejo, da bomo segrevanje ozračja za 1,5 °C glede na predindustrijsko obdobje tudi po najbolj optimističnih scenarijih verjetno dosegli že pred letom 2040. Verjetnost za tako povečanje bi lahko znižali samo s takojšnjim masovnim zmanjšanjem izpustov ogljikovega dioksida, pri čemer izpusti zadnja leta še vedno rastejo (https://ourworldindata.org/co2-emissions) . Jedrska energija se ne zanaša na tehnologije prihodnosti in nam že danes ponuja stabilno ter nizkoogljično proizvodnjo električne energije.