

TEHNOLOŠKE ZABILJEŠKE

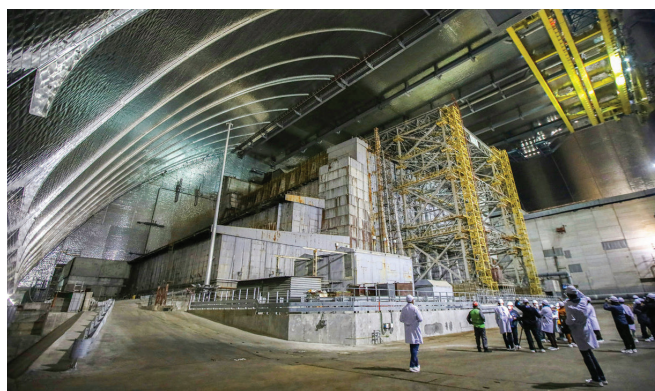
Uređuje: Marin Kovačić



M. Kovačić*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Sveučilišta u ZagrebuZavod za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku
tehnologiju procesa, Savska cesta 16, 10 000 ZagrebPovećanje razine radioaktivnosti
u ruševinama Černobila

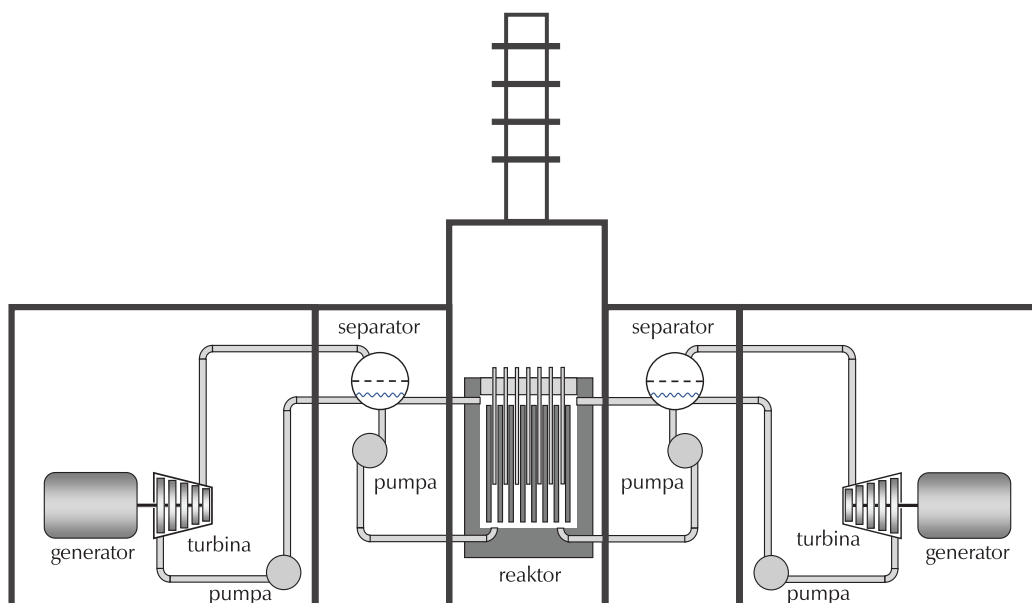
U mjesecu svibnju mediji su izvijestili o porastu radioaktivnosti, specifično neutronskog zračenja, unutar ruševina reaktora četiriju černobilskih nuklearnih elektrana. Porast fluksa neutronskog zračenja osobito zabrinjava, jer može ukazivati na povećanu fisijsku aktivnost u ostacima nuklearnog goriva zarobljenog u ruševinama reaktora.¹



Slika 1 – "Sarkofag" reaktora br. 4 černobilske nuklearne elektrane smješten unutar novog zaštitnog objekta¹

Katastrofa nezabilježenih razmjera dogodila se 26. travnja 1986. u četvrtom reaktoru černobilske nuklearne elektrane, pri čemu je uslijed eksplozije oslobođena iznimna količina radioaktivnih čestica u atmosferu. Do havarije je došlo uslijed neuspješnog ispitivanja učinkovitosti pogona rashladnog sustava reaktora u slučaju prekida opskrbe električnom energijom. U slučaju izvanrednog prekida opskrbe nuklearne elektrane električnom energijom pokreću se pomoćni dizel-električni agregati, koji proizvode električnu energiju za rad rashladnih pumpi i ostale vitalne opreme. Za postizanje pune brzine agregata te ostvarivanje potrebne snage za rad pumpi od čak 5,5 MW, bilo je potrebno razdoblje od 60 s do 75 s. Međutim, toliki interval nije bio sigurnosno prihvatljiv, jer je čak i u slučaju potpunog gašenja reaktora potrebno osigurati adekvatan protok rashladne vode da bi se uklonila tzv. rezidualna toplina nastala kao posljedica radioaktivnog raspada fisijskih nusprodukata. Štoviše, za dostatno hlađenje gorivnih elemenata u reaktoru nakon isključivanja potrebno je do 7000 m³ h⁻¹ vode, a u normalnom radu oko 8000 m³ h⁻¹.²

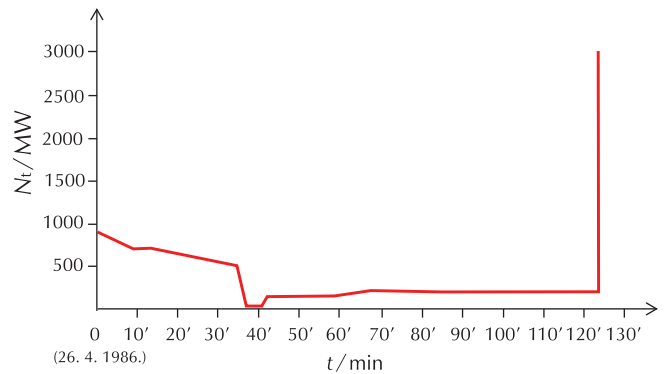
Ako sustav hlađenja zakaže, u kratkom razdoblju može doći do pregrijavanja reaktora i taljenja gorivnih elemenata. Željeni ishod ispitivanja bio je ustanoviti kako turbina pokretana rezidualnim tlakom vodene pare u sustavu i vlastitom inercijom rotora može proizvesti dovoljnu količinu električne energije za pokretanje cirkulacijskih pumpi sve dok dizelski agregati ne postignu potrebnu snagu. Za simulaciju takvih uvjeta reaktor je bilo potrebno dovesti



Slika 2 – Shematski prikaz izvedbe nuklearne elektrane s reaktorom RBMK-1000

* Doc. dr. sc. Marin Kovačić
e-pošta: mkovacic@fkit.hr

na relativno malu toplinsku snagu. Reaktori u Černobilu bili su tipa RBMK-1000, opremljeni s oko 1660 gorivnih elemenata, od čega se svaki gorivni element sastojao od 18 individualnih gorivnih šipki. U gorivnim šipkama peleti uranijeva oksida (UO_2) bili su smješteni u oblozi od legure cirkonija i niobija. Svaki gorivni element sadržavao je oko 115 kg UO_2 obogaćenog s oko 2 % ^{235}U . Prema specifikacijama, maksimalna dopuštena radna temperatura obloge gorivnih šipki iznosila je oko 700 °C.^{3,4} Nadalje, u reaktorima RBMK upotrebljavali su se grafitni moderatori, u svrhu upravljanja fluksom neutrona nastalim cijepanjem uranijevih jezgri te posljedično snagom, odnosno toplinskom dužnošću reaktora. Naime, neutroni nastali fisijom uranija posjeduju izrazito veliku kinetičku energiju, oko 2 MeV. Za učinkovitu fisiju uranija potrebno je usporiti neutrone na oko 0,025 eV pomoću moderatora, odnosno grafita i vode. Uz oko 190 t UO_2 u gorivnim elementima u reaktoru, u zaštitnoj zgradi reaktora u trenutku nezgode nalazilo se još oko 20 t UO_2 u vidu iskorištenog goriva. Prilikom izgradnje reaktora iskorišteno je oko 177 t cirkonijeve legure te 1760 t grafita. Nesretan splet okolnosti, zajedno s prešućenim manjkavostima dizajna reaktora RBMK i neadekvatnom obukom operatera doveli su do katastrofe. Reaktor je oko 12 sati prije početka ispitivanja, u iščekivanju odobrenja za provedbu testa, radio smanjenim kapacitetom. Uslijed toga došlo je do akumulacije najprije fisijskih nusprodukata ^{135}I , a zatim i ^{135}Xe , poluživota 6,2 h te 9,2 h. ^{135}Xe ima izraziti afinitet apsorpcije neutrona te se ponaša kao svojevrsan inhibitor fisije uranija. Tijekom normalnog režima rada koncentracija ^{135}Xe je ravnotežna. Međutim, neposredno prije početka testa reaktor je radio punom snagom te generirao znatne količine njegova prekursora, odnosno ^{135}I . Sam po sebi ^{135}I ne apsorpira neutrone, stoga ne djeluje inhibirajuće, no njegovim spontanim raspadom počela je drastično rasti koncentracija ^{135}Xe . Iznenadan pad snage reaktora, prikazan slikom 4, rezultat je apsorpcije neutronske fluksa ^{135}Xe . Operateri nisu bili svjesni intenziteta porasta koncentracije ^{135}Xe te su bili zatečeni novonastalom situacijom. Štoviše, snaga je toliko pala da je reaktor ušao u nestabilno tranzijentno područje rada. Operateri su potom pokušali brže-bolje povećati snagu reaktora izvlačenjem kontrolnih šipki iz jezgre, da bi snagu podigli na potrebnu razinu za provedbu ispitivanja. Ujedno su povećali i protok rashladne vode kroz reaktor, kako je bilo predviđeno prethodno zadanim protokolom ispitivanja. Povećanje protoka vode rezultiralo je daljnjim smanjenjem snage reaktora, s ciljem održavanja potrebne snage reaktora, operateri su reagirali daljnjim izvlačenjem kontrolnih šipki. Kako je padao dotok pare u turbinu, postupno se smanjivala brzina turbine i pripadajućeg turbogeneratora, a time i protok cirkulacijskih pumpi. Smanjenje protoka vode dovelo je do nastanka mjehurića vodene pare u rashladnom mediju u reaktoru. Nastanak mjehurića vodene pare nepovoljan je i kritičan fenomen u radu reaktora RBMK, jer dovodi do daljnjeg povećanja fluksa neutrona, s obzirom na to da se vodena para ponaša kao slab moderator neutrona, čime posljedično i raste snaga reaktora. Sprega niza postupaka operatera te manjkavosti izvedbe RBMK-a dovele su reaktor u izrazito nestabilnu konfiguraciju. Operateri su potom pokrenuli automatsko isključivanje reaktora. Nažalost, ne znajući da su vrhovi kontrolnih šipki bili izrađeni od grafita te da je suvišak ^{135}Xe gotovo iscrpljen, simultanim spuštanjem kontrolnih šipki u reaktor došlo je do drastično povećane reaktivnosti usporavanjem iznimno velikog broja netermalnih neutrona. Ti sinergistički efekti rezultirali su dramatičnim, izrazito brzim i nekontroliranim cijepanjem uranija u gorivu. Naime, smatra se da je snaga reaktora trenutno porasla na barem deseterostruko veću vrijednost od one za koju je reaktor konstruiran.⁵



Slika 3 – Hodogram toplinske snage reaktora br. 4 černobilske nuklearne elektrane neposredno prije havarije⁵

Uslijed dramatičnog porasta topline oslobođene fisijom došlo je ne samo do sublimacije rashladne vode već i do nastanka vodika reakcijom vode s cirkonijom pregrijanim gorivnim šipkama. Procjenjuje se da je temperatura obloga gorivnih šipki dosegla gotovo 2600 °C.⁶ Najprije je poklopac reaktora popustio pod strahovitim pritiskom pregrijane pare, nakon čega je uslijedila detonacija vodika koja je u konačnosti razorila objekt. Dio gorivnih šipki fragmentirao se tijekom eksplozije, čime je dodatno porasla reaktivnost i povećao se učinak katastrofe.³ Eksplozija je bila toliko silovita da je lansirala tzv. "biološki štit" (engl. *upper biological shield*) težine oko 2000 t nekoliko desetaka metara u zrak te u potpunosti razorila zaštitnu zgradu. Gorivne šipke koje nisu izbačene iz jezgre reaktora rastalile su se u potpunosti, čijim hlađenjem je nastala kruta masa $\text{ZrO}_2\text{-UO}_2$ s primjesama fisijskih nusprodukata.



Slika 4 – Ruševine černobilskog reaktora fotografirane neposredno nakon havarije, na sredini fotografije vidljiva je struktura tzv. biološkog štita izbačenog iz reaktora⁷

Dijelovi rastaljenog reaktora probili su kroz dno reaktorske posude te rastalili ne samo slojeve pijeska i serpentinita ispod reaktora, koji su rabljeni kao zaštita od zračenja te toplinska izolacija, već i beton samog objekta tvoreći pri tome svojevrsnu lavu. Nastala lava danima je prodirala kroz donje katove objekta. Hlađenjem te lave nastali su cirkonijem i uranijem bogati silikati, općenite formule $(\text{Zr}_{1-x}\text{U}_x)\text{SiO}_4$ s inkluzijama čelika, uranijeva oksida i krute otopine $\text{ZrO}_2\text{-UO}_2$.



Slika 5 – Fotografije ohlađene $(Zr_{1-x}U_x)SiO_4$ lave u prostorijama ispod uništenog černobilskog reaktora⁹

Procjenjuje se da je u prostorije podno reaktora dospjelo oko 85 t goriva.⁶ Maseni udio obogaćenog uranija u ohlađenim lavama kreće se od 4 do 10 %, pri čemu su znatni emiteri radioaktivnosti Pu i Am (α -emiteri) te ^{137}Cs (β i γ -emiteri). Prvobitni "sarkofag", odnosno zaštitna građevina oko ruševina reaktora, nije spriječila prodor padalina u ruševine, čime je došlo do kontinuiranog onečišćenja podzemlja ispranim radionuklidima. Znatna intrinzična radioaktivnost može dovesti do degradacije silikatne matrice uslijed nastanka defekata u materijalu, a ujedno dovođi i do zagrijavanja u samom materijalu. Ti se efekti negativno odražavaju na mehaničku stabilnost ohlađenih lava te olakšavaju oslobađanje radioaktivnih izotopa. Naime, degradacijom ohlađenih lava nastaju minijature čestice koje lako tvore aerosole. Osobito podložne mehaničkoj degradaciji i formiranju aerosola su tvorevine slične plovućima, odnosno vrlo porozni radioaktivni materijali nastali interakcijom s kapljevitom vodom, pri čemu je vodena para stvorila mjehuriće u materijalu. Voda nepovoljno djeluje i na stabilnost ohlađenih, formiranih lava. Naime, istraživanje provedeno nad realnim uzorcima lave iz Černobila ukazalo je na znatno oslobađanje radionuklida te kemijsku degradaciju na površini kao posljedicu izlaganja deioniziranoj vodi.⁶ Stoga je ispiranje radionuklida oborinskim vodama koje su prodirale u nekadašnji sarkofag pridonijelo radiološkom onečišćenju podzemnih voda. Ipak, oborinske vode koje su prodrle kroz ruševine omogućile su hlađenje tih masa, koje ne bi bilo moguće ohladiti drugim načinima. Postavljanjem novog, vodonepropusnog zaštitnog objekta nad sarkofagom reaktora 2016. godine smanjenja je opasnost od oslobađanja radioaktivnih aerosola u atmosferu i daljnje onečišćenje podzemnih voda, no ujedno je i prekinut dotok oborinskih voda koje su hladile te mase. Nakon postavljanja novog objekta razina neutronske zračenja u neslavnoj prostoriji 305/2, u kojoj se zadržala glavina rastaljenog goriva iz reaktora, gotovo se udvostručila u razdoblju od četiri godine. Nažalost, pristup toj prostoriji iznimno je otežan ne samo uslijed zabrinjavajuće razine zračenja već i zato što je gotovo u cijelosti ispunjena ohlađenom lavom. Zbog nesigurnosti u svezi sa situacijom u prostoriji 305/2 nije moguće isključiti opasnost svojevrsnog razbuktanja fisije ostataka goriva. Tim više je opasnost veća ukoliko radioaktivnom i toplinskom degradacijom dođe do fragmentacije i izdvajanja uranijem bogatih faza. Stoga se predlaže slanje specijaliziranog robota koji bi u ohlađenu lavu ugradio šipke bora, vrlo učinkovitog apsorbera neutrona.¹ Međutim, iz černobilske elektrane stigao je svojevrzni demanti, odnosno objava na službenoj mrežnoj stranici da je povećanje radioaktivnosti u skladu s predviđanjima te da su intenziteti zračenja unutar prihvatljivih granica.¹⁰

Tek predstoji vidjeti hoće li doći do neočekivanih razvoja u ruševinama Černobila, no sigurno je da černobilska katastrofa kontinuirano zadaje nove izazove ukrajinskim i međunarodnim nuklearnim stručnjacima. Ipak, iskustva i znanja stečena u njezinom upravljanju i zbrinjavanju svakako će povećati sigurnost nuklearnih elektrana današnjice i sutrašnjice.

Literatura

1. URL: <https://www.sciencemag.org/news/2021/05/nuclear-reactions-reawaken-chernobyl-reactor> (22. 6. 2021.)
2. INSAG-7 The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1, A Report by the International Safety Advisory Group, International Atomic Energy Agency, Beč, 1992., str. 7–8.
3. A. N. Kiselev, A. I. Surin, K. P. Checherov, Post-accident survey of the unit 4 reactor of the Chernobyl nuclear plant, *At. Energy* **80** (1996) 225–231, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02419299>.
4. A. Kaliatka, E. Uspuras, M. Vaisnoras, G. Krivoshein, Analysis of decay heat removal from RBMK-1500 reactor in decommissioning phase by natural circulation of water and air, *Nucl. Eng. Des.* **240** (2010) 1242–1250, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.01.011>.
5. E. O. Adamov, Yu. M. Cherkashov, L. N. Podlazov, Chernobyl accident causes: Overview of the studies over the decade, International forum "One decade after Chernobyl: nuclear safety aspects", International Atomic Energy Agency, Beč, 1996., str. 46–63.
6. B. Zubekhina, B. Burakov, E. Silanteva, Y. Petrov, V. Yapaskurt, D. Danilovich, Long-term aging of Chernobyl fuel debris: Corium and "Lava", *Sustainability* **2021** (2021) 1073, doi: <https://doi.org/10.3390/su13031073>.
7. URL: https://www.upi.com/Top_News/World-News/2019/08/09/Workers-to-dismantle-crumbing-sarcophagus-at-Chernobyl-by-2023/2221565309600/ (22. 6. 2021.).
8. A. A. Shiryayev, I. E. Vlasova, B. E. Burakov, B. I. Ogorodnikov, V. O. Yapaskurt, A. A. Averin, A. V. Paknevich, Y. V. Zubavichus, Physico-chemical properties of Chernobyl lava and their destruction products, *Prog. Nucl. Energy* **92** (2016) 104–118, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.07.001>.
9. URL: <https://www.forbes.com/sites/davidbressan/2019/06/14/how-the-chernobyl-nuclear-plant-meltdown-formed-worlds-most-dangerous-lava-flow/?sh=5cd4a0a1691e> (22. 6. 2021.).
10. URL: <https://chnpp.gov.ua/en/infocenter/news/5817-refutation-of-the-information-about-potential-risks> (22. 6. 2021.).