

Energetski i ekološki aspekti korišćenja nuklearne energije

Todor Seničanin



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Energetski i ekološki aspekti korišćenja nuklearne energije | Todor Seničanin | | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0006335>

Univerzitet u Beogradu
Rudarsko-geološki fakultet



Završni rad

Osnovne akademske studije

Energetski i ekološki aspekti korišćenja nuklearne energije

Kandidat

Seničanin Todor

R89/14

Mentor

prof. dr Dejan Ivezić

Beograd, septembar 2022.

Komisija:

1. Prof. dr Dejan Ivezić, mentor

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

2. Prof. dr Marija Živković, član

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

3. Prof. dr. Miloš Tanasijević, član

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Datum odbrane: _____

REZIME

Rad se bavi problemima energetske tranzicije i razmatra korišćenje nuklearne energije kao moguće rešenje. Dat je pregled nuklearnih mineralnih sirovina, njihovih rezervi i proizvodnja. Prikazan je statistički pregled korišćenja nuklearne energije u energetici sveta. Obradeni su tehničko-tehnološki aspekti korišćenja nuklearne energije – princip nuklearne fisije i najvažnije karakteristike komercijalnih reaktora. Razmotrene su ekonomske karakteristike izgradnje i korišćenja nuklearnih postrojenja kao i ekološki problemi korišćenja nuklearne energije i problemi odlaganja nuklearnog goriva. Prikazani su najznačajniji nuklearni incidenti, razlozi koji su do njih doveli i posledice koje su ostavili. U računskom delu rada obradeni su energetske i ekološki efekti izgradnje nuklearne elektrane snage 1.000 MW u Republici Srbiji. Napravljen je energetski bilans u slučaju izgradnje takvog postrojenja, i prikazani su ekološki efekti uvođenja nuklearne energije (dekarbonizacija i smanjenje emisije zagađivača iz termoenergetskih postrojenja).

Ključne reči: energetska tranzicija, nuklearna energija, energetski bilans, dekarbonizacija

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	NUKLEARNA ENERGIJA U ENERGETICI SVETA	2
3.	NUKLEARNE MINERALNE SIROVINE	6
4.	NUKLEARNA FISIJA – NUKLEARNI REAKTORI.....	10
4.1.	Nuklearni reaktor sa vodom pod pritiskom.....	16
4.2.	Nuklearni reaktor sa ključajućom vodom	21
4.3.	Nuklearni reaktor sa teškom vodom pod pritiskom	23
4.4.	Nuklearni reaktor hlađen gasom.....	25
4.5.	Lakovodni reaktor moderiran grafitom	27
4.6.	Brzi oplodni reaktori hlađeni tečnim metalom.....	29
4.7.	Nuklearne elektrane.....	33
4.8.	Ekonomski aspekti izgradnje i korišćenja nuklearnih postrojenja	36
5.	EKOLOŠKI PROBLEMI KORIŠĆENJA NUKLEARNE ENERGIJE	39
5.1.	Problem iskorišćenja nuklearnog goriva	39
5.2.	Regeneracija	41
5.3.	Odlaganje nuklearnog otpada.....	43

5.4.	Nuklearni incidenti	44
5.4.1.	Ostvoro Tri milje.....	46
5.4.2.	Černobilj.....	48
5.4.3.	Fukušima Daiči	50
6.	ENERGETSKI I EKOLOŠKI EFEKTI IZGRADNJE NUKLEARNE ELEKTRANE SNAGE 1.000 MW U SRBIJI	53
7.	ZAKLJUČAK	64
	LITERATURA.....	65

1. UVOD

Od druge polovine dvadesetog veka termoelektrane predstavljaju osnovu elektroenergetskog sistema Srbije, pa se danas više od 2/3 električne energije u Srbiji proizvodi sagorevanjem uglja u termoelektranama. Jedna od glavnih prednosti termoelektrana je što one predstavljaju bazni izvor električne energije, odnosno proizvodnja u njima se može planirati i prilagoditi potrebama potrošača. Usled iscrpljivanja raspoloživih rezervi lignita, pada kvaliteta iskopanog uglja, emisije štetnih gasova i čestica iz termoelektrana, uz težnje ka smanjenju zagađenja, neophodna je zamena termoenergetskih postrojenja na ugalj nekim od obnovljivih izvora energije, elektranama na gas ili nuklearnim elektranama.

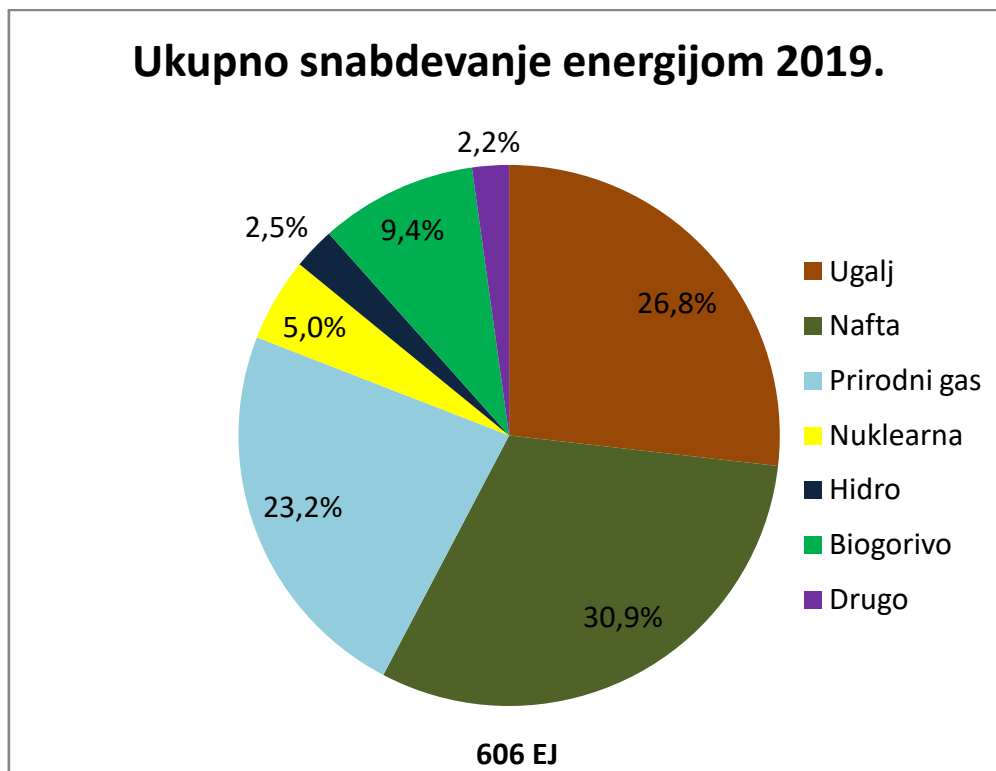
Varijabilni izvori, kao što su solarne elektrane i vetroelektrane elektrane, osim što zavise od vremenskih uslova, podrazumevaju izgradnju kapaciteta za skladištenje da bi se obezbedilo stabilno snabdevanje. Usled nestabilne političke klime u Evropi dugoročno snabdevanje gasom iz Rusije je upitno.

Nakon Černobiljske katastrofe u Socijalističkoj Federativnoj Republici Jugoslaviji donet je Zakon o zabrani izgradnje nuklearnih elektrana, koji je na snazi i danas u Republici Srbiji. Međutim, Narodna skupština 2015. godine usvaja Strategiju razvoja energetike kojom se zaključuje da je za postizanje odgovarajućih ekoloških standarda neophodno uvođenje nuklearne energije u energetiku Srbije do 2050. godine.

Stoga rad nastoji da prikaže da se težnje ka smanjenju korišćenja fosilnih goriva i dekarbonizaciji mogu zadovoljiti korišćenjem nuklearne energije kao primenljivog primarnog izvora energije, odnosno da tehnologija nuklearne elektrane predstavlja validan bazni izvor koji bi mogao da zameni termoelektrane. S obzirom da se najveće količine električne energije u energetici Srbije proizvode u termoelektranama, čija tehnologija proizvodnje najviše doprinosi zagađenju životne sredine u odnosu na sve druge komercijalne proizvođače, u radu se razmatraju efekti gašenja termoenergetskih postrojenjana na emisiju zagađivača životne sredine.

2. NUKLEARNA ENERGIJA U ENERGETICI SVETA

Po statističkim podacima Međunarodne agencije za energiju iz septembra 2021. godine, globalno ukupno snabdevanje energijom 2019. godine iznosilo je 606 EJ (grafikon 2.1), a udeo nuklearne energije iznosio je 5%.

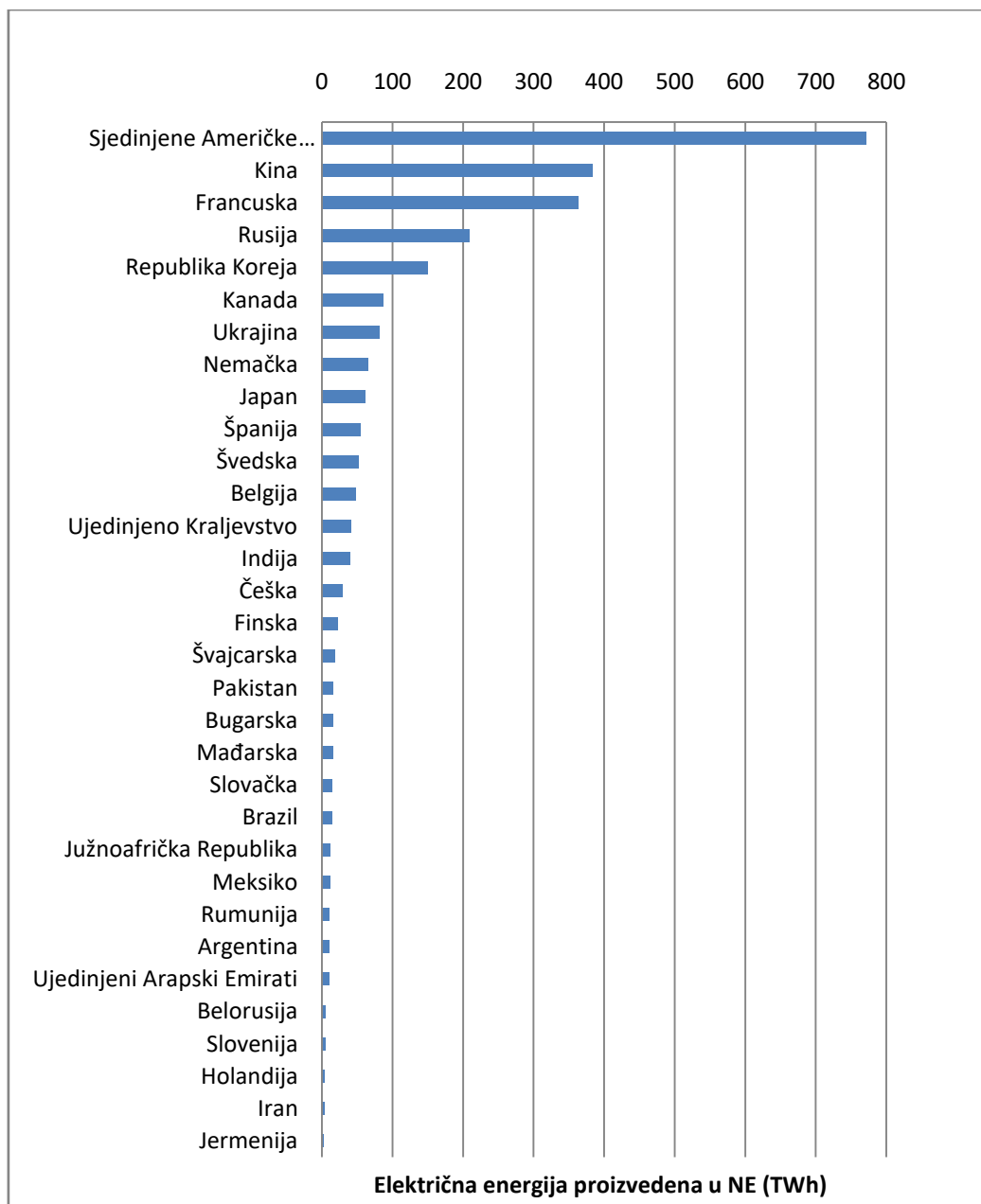


Grafikon 2.1 - Snabdevanje energijom po izvorima 2019. godine (IEA, 2021,p. 18)

Proizvodnja električne energije iz nuklearnih elektrana 2020. godine globalno opala je 4% u odnosu na 2019, što je bilo najveće smanjenje od 2011. godine i incidenta u Fukušimi. Najviše je pogođena nuklearna energetika Sjedinjenih Američkih Država, sa padom od 11%, i Japana, sa padom od čak 33%, gde su pojedini reaktori privremeno ugašeni kako bi zadovoljili sigurnosne standarde u pogledu antiterorizma. Globalna proizvodnja električne energije iz nuklearnih elektrana se 2021. godine povećala za 2% u odnosu na 2020, što je ipak manje od proizvodnje iz 2019. godine (IEA, 2021, p. 29). Nuklearne elektrane su 2021. godine proizvele 2653,1 TWh električne energije, što je udeo od oko 10% u

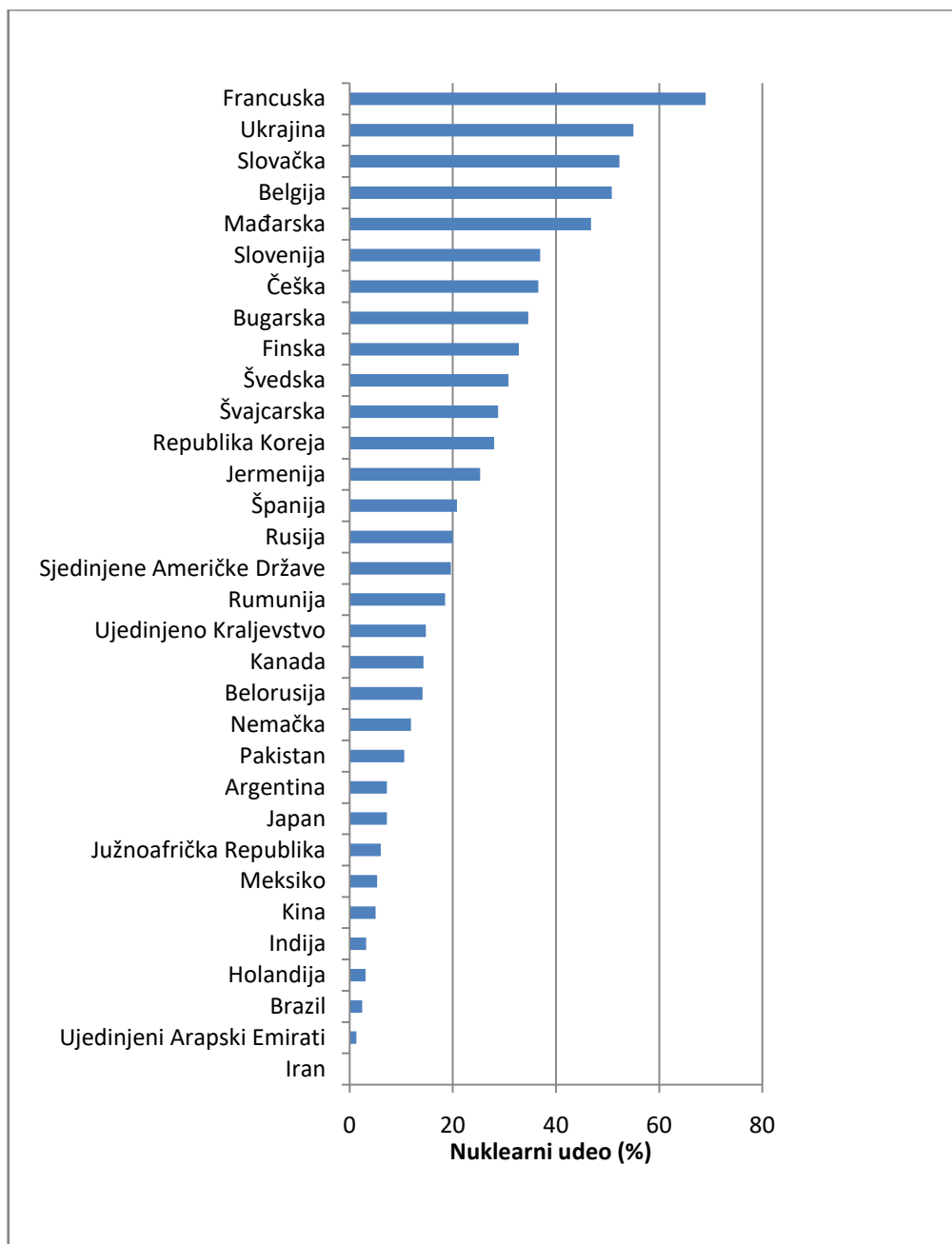
globalnoj proizvodnji električne energije, a 25% ukoliko se u obzir uzme samo energija dobijena niskougljeničnim tehnologijama (IAEA, 2021.).

Na kraju 2021. u svetu je operativno 437 reaktora u 32 države ukupne snage 389,5 GW. Zaključno sa 31. decembrom 2021. u izgradnji je 56 reaktora ukupne snage 58,1 GW. Izgradnja novih kapaciteta tokom godina je stabilna, osim neprekidnog rasta u Aziji, gde je od 2005. na mrežu prikačeno 70 reaktora snage 63,6 GW, što je Kinu drugu godinu za redom učinilo drugim najvećim proizvođačem električne energije iz nuklearnih elektrana iza Sjedinjenih Američkih Država, što je prikazano grafikonom 2.1. (IAEA, 2021.).



Grafikon 2.1 - Proizvodnja električne energije u nuklearnim elektranama 2021. (PRIS, 2021)

Kina kao drugi najveći proizvođač samo oko 5% svojih potreba za električnom energijom zadovoljava iz nuklearnih elektrana, dok Francuska kao treći najveći proizvođač gotovo 70% električne energije proizvodi u nuklearnim elektranama (grafikon 2.2).



Grafikon 2.2 - Udeo nuklearne energije u proizvodnji električne energije po državama (PRIS, 2021)

Tokom 2021. 7801,2 TJ toplote generisane u nuklearnim elektranama iskorišćeno je u svrhe grejanja, desalinizacije vode i industrijskim procesima, od čega 89% u 54 reaktora u Evropi, a 11% u 7 reaktora u Aziji (IAEA, 2021).

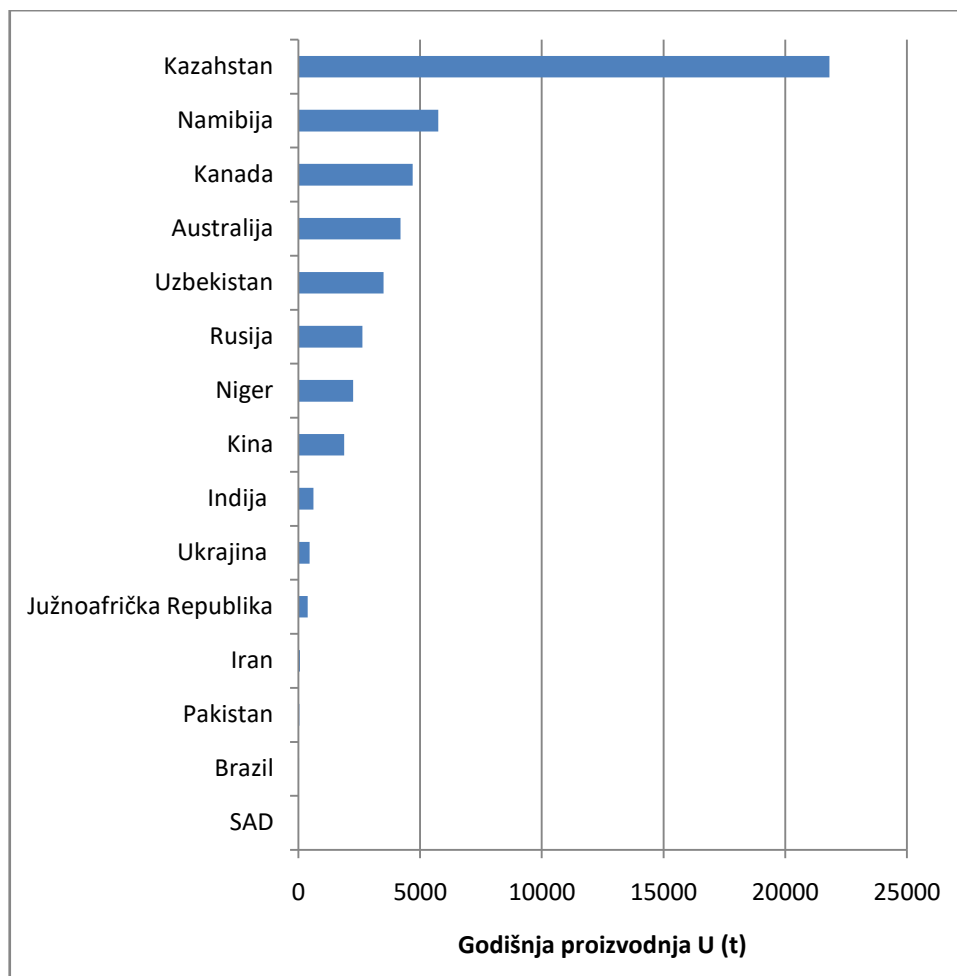
3. NUKLEARNE MINERALNE SIROVINE

Uranijum je otkriven u 18. veku, a radioaktivnost kao njegova definišuća karakteristika krajem 19. veka, međutim sve do otkrića nuklearne fisije 1938-1939. godine uranijum ima malu primenu. Od tada mu značaj rapidno raste u meri da je to element koji je obeležio poslednjih osamdeset godina, te da kao sirovina predstavlja osnovu nuklearne energetike. Uranijum je slabo radioaktivan srebrno siv metal. Najteži je element koji se može naći u prirodi, pa se u periodnom sistemu nalazi na 92. mestu. U prirodi se nalazi u vidu dva izotopa: ^{238}U , koji predstavlja 99,3% celokupnog uranijuma na Zemlji, i ^{235}U , čija je koncentracija oko 0,7%. Gorivo većine reaktora je uranijum obogaćen izotopom ^{235}U . Zemljina kora sadrži 1,3 ppm uranijuma, što znači da ga ima više od žive, antimona, srebra i kadmijuma, te da mu je koncentracija približna molibednu i arsenu. Međutim, uranijum je rasejan element, što znači da su bogata ležišta retka. Sadržaj uranijuma u njegovim rudama je do 1%, a smatra se da je sadržaj od preko 0,1% isplativ za eksploataciju (Miljanić, 2008, str. 245).

Po podacima iz 2019. godine sigurne svetske rezerve uranijuma koji se eksploatiše po ceni do 130 \$/kg iznose 6.147.800 t (grafikon 3.1) (NEA/IAEA, 2020, p. 10). Godišnja proizvodnja uranijuma 2021. iznosila je 48.332 t (grafikon 3.1). Kako nuklearni reaktori na globalnom nivou koriste oko 67.500 t uranijuma godišnje, korišćenje ovih rezervi u konvencionalnim reaktorima dovoljno je za oko 90 godina snabdevanja energijom. Ukoliko se u obzir uzmu i rezerve koje se mogu eksploatisati po ceni do 260 \$/kg izdašnost je 135 godina. Ukoliko bi se eksploatisao celokupan uranijum iz konvencionalnih resursa izdašnost bi bila preko 250 godina (World Nuclear Association, 2022).

Tabela 3.1 - Sigurne svetske rezerve uranijuma 2019. godine(NEA/IAEA, 2020)

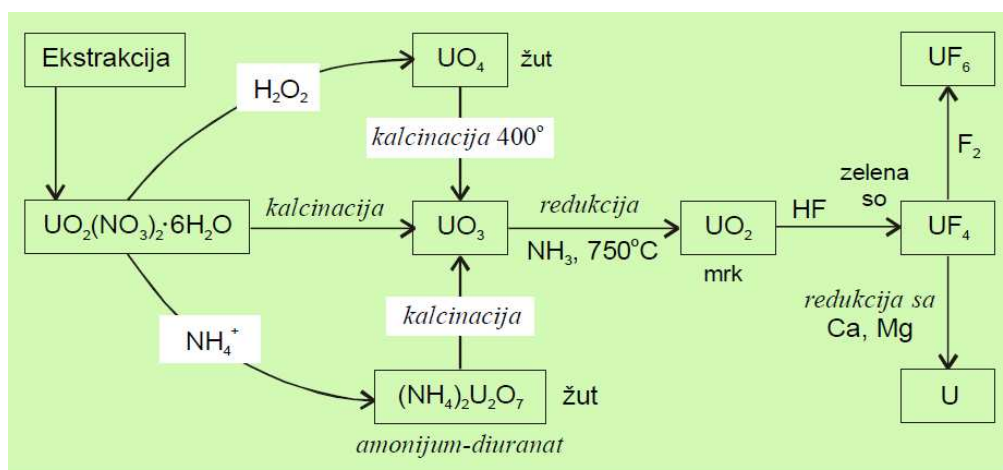
	Rezerve uranijuma (t)	Svetski udeo (%)
Australija	1.692.700	28%
Kazahstan	906.800	15%
Kanada	564.900	9%
Rusija	486.000	8%
Namibija	448.300	7%
Južnoafrička Republika	320.900	5%
Brazil	276.800	5%
Niger	276.400	4%
Kina	248.900	4%
Mongolija	143.500	2%
Uzbekistan	132.300	2%
Ukrajina	108.700	2%
Bocvana	87.200	1%
Tanzanija	58.200	1%
Jordan	52.500	1%
SAD	47.900	1%
Ostali	295.800	5%
Ukupno u svetu	6.147.800	



Grafikon 3.1 - Godišnja proizvodnja uranijuma 2021. godine po državama (World Nuclear Association, 2022)

Nakon eksploatacije ruda uranijuma mora proći kroz proces prečišćavanja pre upotrebe u nuklearnim reaktorima. Na slici 3.1. prikazana je šema procesa prerade. Finalni proizvod takvog procesa mora biti pogodan za izotopsko obogaćivanje ili direktnu primenu u reaktorima koji koriste uranijum prirodnog izotopskog sastava. Zadovoljavanje ovakvih uslova čistoće postiže se ekstrakcijom iz uranil-nitrata $UO_2(NO_3)_2$ u amonijum-diuranat $(NH)_4U_2O_7$. Osušeni talog diuranata naziva se žuti kolač. Njegovim kalcinisanjem dobija se uranijum-trioksid UO_3 , koji se redukcijom prevodi u uranijum-dioksid UO_2 . Ovaj mrko-crni teško topljivi oksid predstavlja osnovu za pravljenje nuklearnog goriva za reaktore. Izlaganjem uranijum-dioksida fluorovodoniku dobija se uranijum-tetrafluorid UF_4 , takozvana zelena so. Ukoliko se gorivo koristi u reaktorima na prirodni uranijum,

neophodno je koristiti uranijum u formi metala, pa se zelena so podvrgava žarenju u prisustvu metalnog magnezijuma ili kalcijuma. Ukoliko se gorivo koristi u reaktorima na obogaćenim uranijum, neophodno ga je obogatiti putem gasne difuzije ili gasnog centrifugiranja. Obe tehnologije zahtevaju gasovito jedinjenje uranijuma, uranijum-heksafluorid UF_6 , koji se dobija iz tetrafluorida obradom elementarnim fluorom (Miljanić, 2008, str. 247-248).



Slika 3.1 – Šematski prikaz procesa prerade uranijuma (Miljanić, 2008, str. 247)

Torijum je slaboradioaktivni metal svetlo sive boje. U prirodi se isključivo nalazi u vidu izotopa ^{232}Th . Ovaj izotop torijuma je ujedno i najstabilniji i ima izuzetno dug period poluraspada (poluživot mu je tri puta duži od starosti Zemlje). Koncentracija torijuma u Zemljinoj kori iznosi oko 6 ppm (oko četiri puta više od uranijuma). U periodnom sistemu se nalazi dva mesta ispred uranijuma.

Torijum nije fisilan, pa se ne može direktno primenjivati u termalnim nuklearnim reaktorima. Značaj torijuma je u primeni u oplodnim reaktorima kao fertilno gorivo za oplodnju i konverziju.

Torijum se ne eksploatiše direktno, već se dobija iz monacita, minerala koji se eksploatiše prvenstveno radi ekstrakcije lantanoida. Kako je primena torijuma trenutno mala, rezerve torijuma se procenjuju indirektno u odnosu na rezerve monacita i uranijuma, a ne na osnovu geoloških ispitivanja. Trenutno procenjene rezerve torijuma su 6.355.000 t, od čega najviše u Indiji (846.000 t), Brazilu

(632.000 t), Sjedinjenim Državama (595.000 t), Australiji (595.000 t), a značajnije rezerve (iznad 100.000 t) imaju još Egipat, Turska, Venecuela, Kanada, Južna Afrika i Kina (NEA/IAEA, 2016, p. 40).

U budućnosti se očekuje značajnija primena torijuma, naročito ukoliko dođe do komercijalne upotrebe reaktora IV generacije na topljene soli, koji su još uvek u konceptualnoj fazi.

4. NUKLEARNA FISIJA – NUKLEARNI REAKTORI

Fisija je nuklearna reakcija cepanja teških jezgara atoma, obično pod uticajem neutrona, na dva fragmenta sličnih masa, uz emisiju neutrona i oslobađanje velike količine energije. Fisija se može odigrati na najmanje 90 različitih načina, pri čemu daje različite fragmente i različit broj neutrona. Energija oslobođena po jednoj fisiji iznosi oko 200 MeV, što je osnovom za komercijalnu proizvodnju energije.

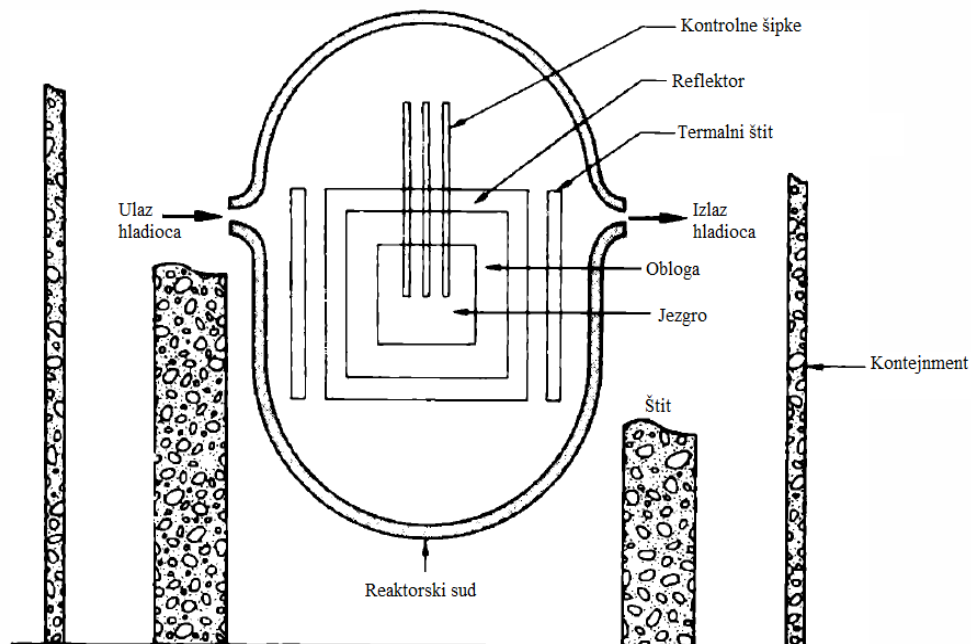
Nuklearna energija generiše se putem nuklearne lančane reakcije. U ovom procesu, neutroni emitovani iz jezgra u procesu fisije indukuju fisiju drugih fisibilnih (izotopi kod kojih je moguće izazvati fisiju) ili fisilnih (fisija moguća termalnim neutronima) izotopa, zatim neutroni iz ovih fisija indukuju fisiju u drugim izotopima, i tako dalje. Ovakva lančana reakcija može se definisati faktorom multiplikacije k , koji je definisan neutronske prinos:

$$k = \frac{\text{broj fisija u jednoj generaciji}}{\text{broj fisija u prethodnoj generaciji}} \quad (1)$$

Ukoliko je k veće od 1, broj fisija se povećava iz generacije u generaciju. U tom slučaju, energija oslobođena lančanom reakcijom se povećava u toku vremena, a reakcija je natkritična. Ukoliko je k manje od 1, broj fisija se smanjuje s vremenom i takva reakcija je potkritična. U posebnim slučajevima, kada je k jednako 1, lančana reakcija se nastavlja konstantnim tempom i takav sistem je kritičan.

Uređaji konstruisani u svrhu kontrolisanja lančane reakcije nazivaju se nuklearni reaktori. U reaktoru, ova kontrola se sprovodi promenom faktora k koji kontroliše operator. Kako bi se povećala snaga koju generiše reaktor, k se povećava do natkritične vrednosti. Kada se dostigne željena snaga, reaktor se vraća u kritično stanje promenom faktora k na 1, i tada reaktor održava zadatu snagu. Ukoliko je neophodno smanjenje snage ili potpuno gašenje reaktora, k se smanjuje do potkritične vrednosti.

Kako bi se reaktor našao u kritičnom stanju, ili kako bi se promenio faktor k , neophodno je izbalansirati stopu produkcije neutrona unutar reaktora sa brzinom njihovog nestanka. Nestanak neutrona se može odigrati na dva načina, kao rezultat absorpcije u sklopu nuklearne reakcije, ili njihovim bekstvom sa površine reaktora. Kada je suma absorpcije i curenja neutrona jednaka stopi produkcije reaktor je u kritičnom stanju. Ako je stopa produkcije veća od sume absorpcije i bekstva neutrona, reaktor je superkritičan, i obrnuto, ako je manja, reaktor je subkritičan. Ovi odnosi određuju dimenzije reaktora i osobine materijala neophodne kako bi se u reaktoru postiglo kritično stanje (Lamarsh, Baratta, 2001, pp. 117-119).



Slika 4.1 - Prosta šema nuklearnog reaktora (Lamarsh, Baratta, 2001, p. 134)

Centralni deo reaktora zove se jezgro. Kod termalnih reaktora unutar jezgra se nalazi gorivo, moderator i hladilac. Oplodni reaktori ne sadrže moderator, isključivo gorivo i hladilac. Gorivo podrazumeva fisilni izotop koji omogućava kritičnost reaktora i oslobađanje energije fisije. Gorivo takođe može sadržati oplodni materijal. Većina modernih komercijalnih reaktora (koji su termalni) se pogoni uranijumom ^{235}U obogaćenim do najmanje 3%.

Neutroni koji imaju termalne energije su termalni elektroni. Termalne energije su energije koje neutroni imaju u stanju termodinamičke ravnoteže na datoj temperaturi okoline. Termalni elektroni imaju velike efikasne preseke na fisiju. Efikasni presek je mera verovatnoće da se nuklearna reakcija desi, ima dimenzije površine, najčešće se obeležava σ i izražava u barnima ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$). U stanje ravnoteže (0,025 eV) brzi neutroni nastali fisijama (od 0 do 10 MeV, najčešće 2 MeV) dospevaju usporavanjem u sudarima. Funkcija moderatora je da uspori neutrone i tako ih prebaci iz fisionog u termalno stanje. Jezgra niskog atomskog masenog broja su najpogodnija za ovu svrhu, te je moderator uvek materijal sačinjen od takvih elemenata. Voda (gde je 2/3 atoma vodonik), teška voda i grafit (tipična forma vodonika) su najčešće korišćeni moderatori. Ređe korišćeni su i berilijum i berilijum oksid (BeO) usled izuzetno visoke cene (Miljanić, 2020).

Neophodne karakteristike moderatora su: visoka moderatorska efikasnost (usporavanje neutrona u najmanjem mogućem broju kolizija), niska neutronska apsorpcija, otpornost na iradijaciju i koroziju, niska cena sirovine, proizvodnje i instalacije (Garland (Ed.), 2020, ch. 4, p. 49).

Idealan moderator bio bi vodonik ^1H , u čijem jezgru se nalaze samo jedan proton i jedan elektron, iz razloga što su masa i veličina protona gotovo podjednake neutronske (masa i veličina elektrona su zanemarljivo male). Kako u jezgru vodonika nema neutrona, vodonik ima tendenciju da neutrone apsorbuje. Zato je izotop vodonika deuterijum ^2H , dvostruke atomske mase u odnosu na vodonik, u čijem jezgru se već nalazi proton pa mu je tendencija ka apsorpciji značajno manja, daleko bolji moderator od vodonika (Garland, 2020, ch. 4, p. 49). Deuterijum se kao moderator koristi u jedinjenju sa kiseonikom (D_2O) koje nazivamo teška voda.

Teška voda se dobija elektrolizom, hemijskom izmenom ili destilacijom iz vode i u sebi sadrži oko 0,015% deuterijuma (Miljanić, 2020).

Grafit je široko rasprostranjen moderator. Atom ugljenika je relativno male atomske mase, grafit je relativno jeftin, i vodonik je relativno slab apsorber neutrona. Kako je grafit lošiji moderator od vode i teške vode, potrebna je veća zapremina kako bi reaktor funkcionisao što znači i veća kapitalna ulaganja (Garland (Ed.), 2020, ch. 4, p. 49).

Hladilac ima funkciju odvođenja toplote generisane u gorivu reaktora direktno u turbine (reaktor direktnog ciklusa) ili u izmenjivače toplote (reaktor indirektnog ciklusa). Hladilac mora posedovati sledeće karakteristike: veliki toplotni kapacitet, dobar prenos toplote, malu apsorpciju neutrona, malu aktivaciju neutrona, nizak pritisak pri visokoj temperaturi, ne sme izazivati koroziju gorivih elemenata i sistema hladioca i nisku cenu.

Voda, teška voda, različiti gasovi, istopljene soli i tečni metali koriste se kao hladilac u trenutno operativnim reaktorima.

Voda je daleko najčešće korišćen hladilac. Ima izvrsna svojstva u pogledu prenosa toplote, jeftina je i adekvatno ne doprinosi koroziji legura cirkonijuma košuljica goriva i feričnog ili austenitnog čelika elemenata rashladnog sistema. Manjkavosti su joj prosečna ekonomija neutrona (količina pobeglih ili apsorbovanih neutrona) i relativno visok pritisak pare pri reaktorskim temperaturama. Nedostatak je i to što voda prenosi produkte korozije sistema, te tako omogućava da oni budu aktivirani u jezgru, da bi zatim stvorili polje zračenja u rashladnom sistemu. Aktivira se neutronima u jezgru, ali je takva aktivacija kratkog daha. Voda se koristi kao tečnost u indirektnom ciklusu pare, ili se ključanjem prevodi u parno stanje u direktnom ciklusu.

Teška voda ima značajno bolju ekonomiju neutrona od obične. Glavni nedostatak joj je visoka cena i nešto veća tendencija da se aktivirau tricijum ^3H .

U oplodnim reaktorima voda i teška voda se ne mogu koristiti kao hladilac, makar ne u tečnom stanju, jer bi usporile neutronske fisije, koje se u ovom tipu reaktora moraju odvijati što energičnije moguće. Iz tog razloga ovi reaktori se hlade

tečnim natrijumom ili eutektikom natrijuma i kalijuma NaK. Brzi neutroni gube energiju u najvećoj meri preko elastičnih rasejanja (energija koju neutron izgubi jednaka je kinetičkoj energiji uzmaca jezgra). Sa atomskom masom 23 natrijum je neefektivan u usporavanju neutrona elastičnim rasejanjem. Prednosti tečnih metala su što odlično provode toplotu i imaju niske pritiske pare pri visokim temperaturama. Nedostaci su nekompatibilnost sa vodom koja pokreće turbinu (pri kontaktu se stvara natrijum hidroksid NaOH i gasoviti hidrogen), velika apsorpcija neutrona, relativno visoka tačka topljenja (sistem hladioca se mora dogrevati) i visoka neutronska aktivacija neprekidnim radijacionim poljem nakon gašenja reaktora (stvora se radioaktivni ^{24}Na , neophodna radioaktivna zaštita rashladnog sistema).

Reaktori se takođe mogu hladiti gasovima kao što su ugljen-dioksid i helijum. Prednosti ugljen-dioksida su cena, mala aktivacija neutrona (minimizira stvaranje zračnog polja od strane rashladnog sistema), visoke radne temperature, dobra ekonomija neutrona i relativno dobar prenos toplote za gas pri umerenom pritisku hladioca. Na visokim temperaturama CO_2 će izazvati koroziju košuljica goriva i grafitnog moderatora koji se najčešće koristi u gasom hlađenim reaktorima. Glavni nedostatak u pogledu ekonomičnosti mu je mali prenos toplote u odnosu na tečnosti. Iz tog razloga potrebna je veća snaga za pokretanje kompresora gasnog hladioca i jezgro većih dimenzija, jer mali koeficijent toplotne provodljivosti zahteva veću površinu za prenos (Garland (Ed.), 2020, ch. 4, pp. 46-48).

Jezgro oplodnih reaktora okružuje obloga koja sadrži oplodni materijal. Obloga je specijalno dizajnirana kako bi podržavala oplodnju. Neutroni koji napuste jezgro se intercepiraju u oblozi i ulaze u konverzione reakcije. U oblozi se može generisati značajna količina energije kao rezultat fisije indukovane brzim neutronima. Iz tog razloga neophodno je hladiti zajedno sa jezgrom.

Oko jezgra, ili obloge ukoliko ona postoji, se nalazi neutronska reflektor. Reflektor neutrona je sloj moderatorskog materijala. Ukoliko bi jezgro bilo otkriveno, svi neutroni koji bi pobjegli sa površine jezgra bi bili izgubljeni. Postavljanjem ovakvog moderatorskog materijala neki od ovih neutrona se

difuzijom vraćaju u jezgro nakon kolizija (termalizovanja) u istom. Ti neutroni ponovo učestvuju u lančanoj reakciji u jezgri, te se tako značajno smanjuje količina goriva koja je potrebna kako bi se reaktor našao u kritičnom stanju. Kod oplodnih reaktora reflektor je načinjen od oplodnog materijala.

Kontrolne šipke su pokretni elementi izgrađeni od materijala koji apsorbuje neutrone. Koriste se za kontrolu reaktora putem kontrole faktora multiplikacije sistema. Izvlačenjem kontrolnih šipki povećava se faktor multiplikacije, dok se umetanjem isti smanjuje. Pokretanje i gašenje reaktora, kao i izlazna snaga, kontrolišu se adekvatnim kretanjem šipki. Šipke moraju biti optimizovane da održavaju reaktor kritičnim i operativnim u trenutku kada se u toku vremena gorivo troši, a različiti produkti fisije koji apsorbuju neutrone akumuliraju u reaktoru. Za izradu šipki se koriste različiti materijali sa velikim efikasnim presekom za apsorpciju neutrona: borom legiran čelik, kadmijum, srebro i njihove legure. Šipke mogu biti cilindričnog oblika, ali mogu biti i krstaste ili u obliku lopatica.

Navedene komponente se nalaze u reaktorskom sudu. Kako bi se smanjio termalni stres nastao apsorpcijom γ -zraka emitovanih iz jezgra, neki reaktori imaju termalni štit, debeo sloj apsorpcionog materijala (obično gvožđa ili čelika) između reflektora i unutrašnjeg zida suda. Kako termalni štit apsorbuje značajnu količinu energije mora se hladiti zajedno sa jezgrom i oblogom.

Reaktorski sud zajedno sa komponentama sistema nuklearne pare koje sadrže izvore radijacije moraju se izolovati radijacionom zaštitom, kako bi se obezbedila zaštita osoblja postrojenja prilikom normalnog rada reaktora. Obim zaštitnog sistema zavisi od dizajna reaktora. Kako bi se šira populacija zaštitila u slučaju nuklearnog incidenta cela reaktorska instalacija je izolovanazaštitnim sudom ili kontejnmentom. U nekim elektranama ovo podrazumeva masivnu građevinu koja izoluje celokupni sistem nuklearne pare, dok je u drugim kontejnment podeljen na reaktorski (primarni) i kontejnment reaktorske zgrade (sekundarni) (Lamarsh, Baratta, 2001, pp. 134-136).

Od konstrukcije prvog reaktora u Čikagu decembra 1942. godine razvijeno je više različitih tipova reaktora koji se koriste u različite svrhe: za konverziju ^{238}U u

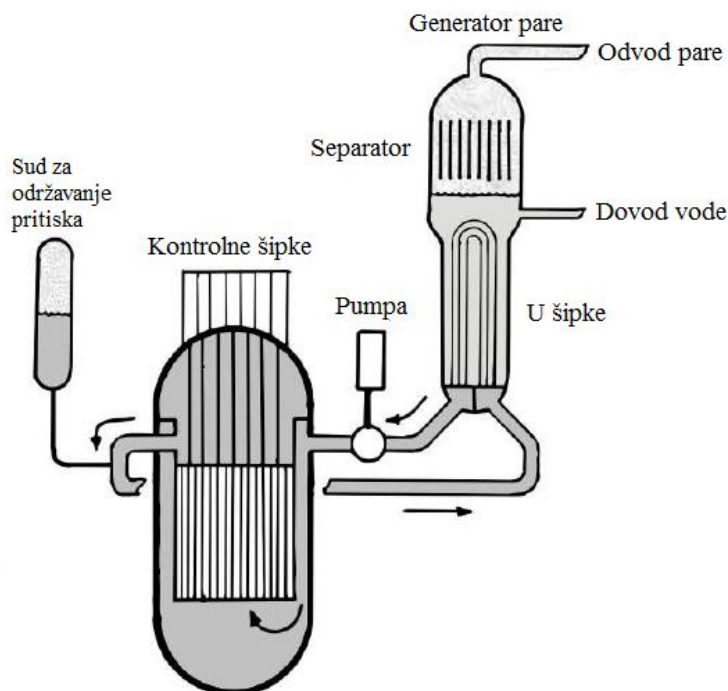
^{239}Pu , za pogon plovila, letelica, raketa i satelita, medicinsku radijaciju, naučno istraživanje i proizvodnju električne energije u okviru nuklearnih elektrana. Kako se tehnologija nuklearnih reaktora razvijala u pogledu goriva, moderatora i sredstva za hlađenje, različite vrste reaktora su modelovane i konstruisane ne bi li se komercijalno koristili. Komercijalna upotreba nuklearnih reaktora počinje sredinom 1950.-ih, sa reaktorima prve generacije, sredinom naredne dekade u upotrebu ulaze reaktori druge generacije (od kojih su mnogi i danas u upotrebi), da bi se njihove unapređene verzije, reaktori treće generacije, našli u upotrebi od sredine 1990.-ih. U pogledu otvaranja novih nuklearnih elektrana, aktuelni su reaktori 3+ generacije (reaktori treće generacije sa unapređenim ekonomskim i sigurnosnim parametrima), dok su reaktori četvrte generacije u eksperimentalnoj fazi, ali postoji težnja da se ekonomski koriste do kraja ove decenije (Mesarović, 2020).

Na kraju 2021. godine 89,9% operativnih nuklearnih reaktora kao hladilac i moderator koriste laku vodu, 6,2% kao moderator i hladilac koriste tešku vodu, 1,9% kao hladilac koriste laku vodu, grafit kao moderator; 1,6% su gasom hlađeni reaktori, a 0,4% reaktora su brzi brider reaktori hlađeni teškim metalom. Tokom 2021. godine u Kini je pušten u rad i prvi reaktor četvrte generacije. Nuklearna elektrana Šidao proizvodi električnu energiju visokotemperaturnim gasnim reaktorom hlađenim helijumom (IAEA, 2021).

U nastavku su ukratko prikazane specifičnosti svih tipova reaktora koji se danas komercijalno koriste.

4.1. Nuklearni reaktor sa vodom pod pritiskom

Najeveći broj trenutno operativnih nuklearnih elektrana električnu energiju proizvodi pomoću reaktora sa vodom pod pritiskom. Zajednička karakteristika svih PWR (engl. *Pressurized water reactor*) reaktora je da koriste laku vodu kao moderator i hladilac i obogaćeni uranijum kao gorivo.



Slika 4.1.1 - Šema PWR reaktora (Garland, 2020, ch. 1, p. 9)

Hladilac podrazumeva primarni, sekundarni i tercijarni vod. U primarnom vodu, hladilac prima toplotu generisanu u jezgru i napušta reaktor na temperaturi dovoljnoj da generiše paru u generatoru. Hladilac se zatim vraća u reaktor korišćenjem pumpi. Reaktor, u zavisnosti od snage, može imati više ovakvih primarnih vodova, svaki sa posebnom pumpom i generatorom (najčešće 2-4). U sekundarnom vodu, para generisana u parogeneratoru ekspandira u parnoj turbini generišući mehaničku energiju. U tercijarnom vodu istrošena para iz turbine se kondenzuje u kondenzatoru pri čemu predaje toplotu toplotnom ponoru.

Reaktor sa vodom pod pritiskom rešava problem radioaktivnosti ciklusa pare uvođenjem izmenjivača toplote kojim se reaktorsko – rashladni ciklus odvaja od turbinsko – parnog ciklusa. Para se generiše u generatoru i odvodi u turbinu kao zasićena. Reaktorsko – rashladni ciklus se nalazi u uslovima visokog pritiska (oko 15 MPa) kako bi se sprečilo ključanje unutar reaktora. Voda u reaktor ulazi na temperaturi od oko 290°C, a temperatura na izlazu je oko 325°C. Generator pare

radi na temperaturi od oko 293°C i pritisku od 5 MPa. Rezultujuća termodinamička efikasnost PWR ciklusa je između 32% i 33% (Lamarsh, Baratta, 2001, p. 140).

Dimenzije reaktorskog suda zavise od proizvedene količine toplote, najčešće 12-14 m visine i prečnika 5-7 metara. Sud je izrađen od kovanog ugljeničnog čelika, debljine zida 20-25 cm, sa oblogom unutrašnjeg zida od 3 mm od nerđajućeg čelika koja štiti od erozije i korozije.

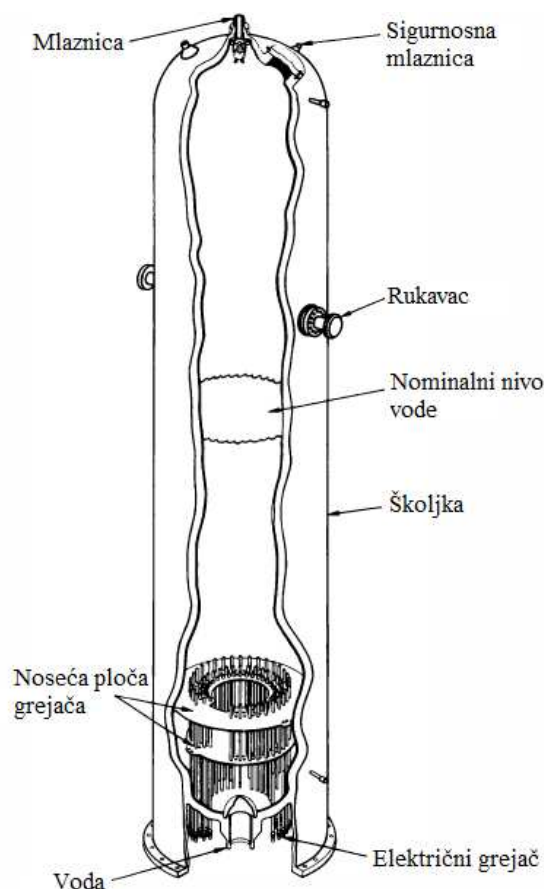
Reaktorsko jezgro se nalazi u donjem delu reaktorskog suda u cilindričnom unutrašnjem sudu koji se naziva bure (engl. *barrel*). Unutar bureta košuljice goriva su okružene plaštom koji obezbeđuje radijalno strujanje fluida. U donji deo bureta su ugrađene klizne navrtke kako bi se omogućila termalna ekspanzija i sprečila rotacija. Oko spoljašnjeg zida bureta izrađen je metalni plašt koji apsorbuje radijalnu radijaciju neutrona i tako štiti sud. Plašt je obično 1/3 veličine jezgra i postavlja se u centralnom delu.

Jezgro je sa gornje i donje strane podržano gornjom i donjom nosećom pločom koje održavaju košuljice goriva u adekvatnom položaju. Kontrolni elementi i elementi za gašenje reaktora ulaze u reaktor kroz gornju ploču, a instrumentacija sa donje strane.

Hladilac cevima ulazi u reaktor, krećući se pored bureta ka dnu suda. Odatle utiče u samo jezgro sa donje strane, kroz donju noseću ploču. Hladilac se kreće naviše kroz jezgro i izlazi iz jezgra sa gornje strane. Ovakav model kretanja omogućava kretanje hladioca i u slučaju kvara pumpe, usled tendencije fluida da se kreće naviše kako pri zagrevanju gubi na gustini. Dakle, reaktor kao izvor toplote je uvek najniža tačka sistema, a generator pare kao toplotni ponor najviša.

Kako je voda praktično nestišljiva, male promene u zapremini mogu dovesti do velike promene pritiska, što može dovesti do pogubnih efekata na sistem. Ako se iz bilo kog razloga zapremina hladioca smanji, sledstveni pad pritiska može dovesti do isparavanja dela reaktorske vode i sagorevanja elemenata goriva. Kako bi se ovo predupredilo vod hladioca je opremljen specijalnom posudom za održavanje pritiska (engl. *pressurizer*, slikav4.1.2). Ovakva posuda se sastoji iz rezervoara koji je ispunjen vodom i parom (para kao lakša ispunjava gornji deo posude), sa

mlaznicama na vrhu i grejačima na dnu. Ukoliko dođe do povećanja temperature hladioca, pa samim tim i povećanja zapremine, dolazi do rasta nivoa vode u posudi. Sa povećanjem nivoa vode u posudi raste pritisak pare u gornjem delu posude. U tom slučaju prelivni ventil mlaznice se otvara i omogućava utok vode niže temperature, pa dolazi do kondenzacije dela pare, što dovodi do momentalnog pada i ograničavanja daljeg rasta pritiska. Pri padu pritiska hladioca, nivo vode u posudi opada, pa samim tim i pritisak pare u posudi. Grejači se automatski aktiviraju tako da se deo vode prevodi u paru što dovodi do povećanja pritiska (Lamarsh, Barrata, 2001, p. 140).



Slika 4.1.2 - Posuda za održavanje pritiska (Lamarsh, Barrata, 2001, p. 141)

Gorivni elementreaktora su šipke izrađene od legura cirkonijuma (košuljice), unutar kojih se naleze peleti odobogaćenog uranijuma dioksida UO_2 , raspoređene u šestougao ili kvadratni snop. Snopovi su dalje raspoređeni u gustu triangularnu ili kvadratnu rešetku. Reaktori američke proizvodnje tipično imaju kvadratne snopove

u kvadratnoj rešetci, dok su u reaktorima ruske proizvodnje gorivni elementi šestougani snopovi u triangularnoj mreži. Rešetkasta struktura omogućava radijalno kretanje hladioca kroz gorivo. Kako se nikakvo ključanje ne odigrava u samom reaktorskom jezgri, ono se izrađuje kompaktno (ne sadrži kanale). U zavisnosti od snage reaktora jezgro tipično ima 120-170 ovakvih gorivih elemenata dužine 3,6-4,2 m.

Ciklus punjenja gorivom je 18-24 meseca, a sama operacija traje 4-5 dana. Međutim, operacija može potrajati i do mesec dana kada se u obzir uzme priprema, hlađenje, održavanje i vraćanje na pun kapacitet snage. Reaktor se pri punjenju goriva gasi, pri čemu se mora osigurati normalizacija pritiska i hlađenje primarnog voda. Nekoliko dana nakon gašenja reaktora temperatura primarnog voda opadne dovoljno da omogući dekompresiju. Nakon hlađenja i dekompresije reaktor se puni vodom najmanje 10 m iznad poklopca kako bi se omogućila adekvatna radioaktivna zaštita osoblju koje izvodi punjenje. Tako se stiču uslovi za otvaranje poklopca i manipulaciju gorivnih elemenata. Deo gorivnih elemenata se repositionira u jezgri po kompjuterskim programom predefinisanoj sekvenci, a deo se vadi i umesto njih se insertuju novi gorivni elementi. Isluženo gorivo se pod vodom transportuje do bazena u kojima se hladi godinama.

Deo pozicija gorivnog elementa se ne puni gorivom već cevima za navođenje. Cevi za navođenje se izrađuju za svaki gorivni element posebno. Svrha im je da omoguće inserciju klastera sa određenim brojem kontrolnih šipki. Iako svi gorivni elementi nemaju insertovane kontrolne šipke, imaju u sebi izrađenje cevi za navođenje kako bi se mogli montirati na bilo koju poziciju u jezgri nezavisno od toga da li imaju kontrolne šipke ili ne. Gorivni element koji nemaju klaster se zaptivaju sa gornje strane specijalnim zaptivačemu vidu zaptivne cevi. Zaptivač sprečava neželjeno isticanje hladioca kroz neispunjene cevi za navođenje.

Kontrola reaktivnosti se obavlja kontrolnim šipkama, bornim šipkama ili hemijski, bornom kiselinom.

Kontrolne šipke su izrađene od materijala koji apsorbuje neutrone celom dužinom kojom ulaze u jezgro, najčešće je to mešavina 80% sreba Ag, 15% indijuma In i 5% kadmijuma Cd. Kadmijum je element sa najvećom sposobnošću za apsorbciju neutrona koji se koristi u modernim reaktorima. Elementi za pogon kontrolnih šipki su locirani izvan reaktorskog suda, a samo vratilo kontrolnih šipki se nalazi u cevima za navođenje koje se prostiru kroz poklopac reaktora. Kako se cevi za navođenje prostiru i izvan reaktora, gde je pritisak atmosferski, posebna pažnja se mora posvetiti zaptivanju usled razlika u pritisku koji u reaktoru iznosi 15 Mpa (Garland (Ed.), 2020, ch. 6, pp. 252-263).

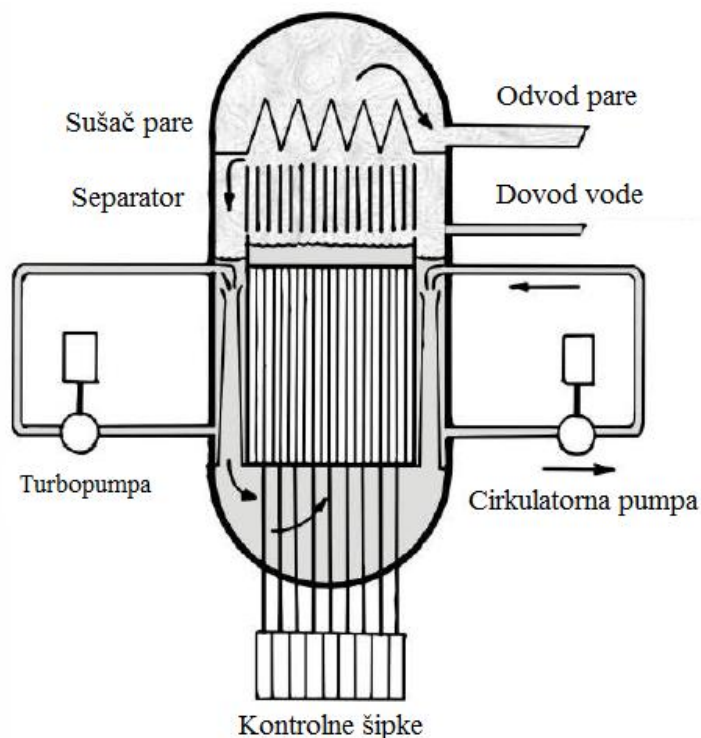
Promena reaktivnosti u toku ciklusa goriva borom može se obavljati i pomoću sagorevanja specijalnih sagorljivih bornih šipki. Bor se ugrađuju u gorivo i smanjuju reaktivnost koja je na početku ciklusa najveća. Sagorevanjem šipki u toku ciklusa dolazi do povećanja reaktivnosti čime se kompenzuje smanjenje reaktivnosti usled trošenja goriva. Bor se u ovu svrhu koristi u vidu borom legiranih šipki od nerđajućeg čelika ili u vidu peleta od borosilikatnog stakla u cevima od nerđajućeg čelika.

Zbog svojstva izotopa bora ^{10}B da dobro apsorbuje neutronei niske cene, borna kiselina $\text{B}(\text{OH})_3$ se koristi kako bi se kontrolisala promena reaktivnosti sa trošenjem goriva. Neposredno nakon punjenja gorivom u hladilac se rastvara borna kiselina tako da reaktor bude jedva kritičan. Kako se gorivo troši, koncentracija borne kiseline se smanjuje kako bi kritičnost u jezgru ostala konstantna. Mana ovakvog sistema kontrole jezgra je u tome da borna kiselina korozivno deluje na sistem prenosa toplote i komponente reaktora (Garland (Ed.), 2020, ch. 6, pp. 51-52).

4.2. Nuklearni reaktor sa ključajućom vodom

Reaktori BWR (engl. *Boiling water reactor*) tipa su konstruisani tako da omogućavaju ključanje hladioca u reaktorskom sudu, te zbog toga ne zahtevaju poseban izmenjivač toplote (generator pare) za proizvodnju pare. U pogledu ekonomičnosti reaktori sa ključajućom vodom rade pri nižem pritisku (7 MPa)

primarnog voda od PWR reaktora pa omogućavaju manju debljinu reaktorskog suda. Takođe, kako dolazi do ključanja unutar suda, veća količina toplote se može apsorbovati kao latentna, pa je potrebna manja količina vode za istu snagu na izlazu nego kod PWR sistema. Međutim, kako je jedinica snage po jedinici zapremine manja kod ovog tipa reaktora nego kod reaktora sa vodom pod pritiskom, reaktorski sud mora biti većih dimenzija. Stepenn korisnosti BWR ciklusa je 33% do 34%



Slika 2.2.1 - Šema BWR reaktora (Garland (Ed.), 2020, ch. 1, p. 8)

Elektreane pogonjene BWR reaktorom se mogu konstruisati na dva načina: u direktnom ili dvostepenom ciklusu. U direktnom ciklusu, koji se najčešće koristi, para proizvedena u reaktoru se sprovodi u turbine kao suva para. U elektrani sa dvostepenim ciklusom, osim pare generisane u reaktoru, para se proizvodi i u sekundarnom generatoru pare kome se voda dovodi iz separatora vlage. Elektreane direktnog ciklusa zato zahtevaju manja kapitalna ulaganja.

Reaktor sa ključajućom vodom sastoji se iz suda pod pritiskom u kom su štapovi goriva vertikalno potopljeni u vodu, u specijalno konstruisane kanale za tu namenu. Jezgro je obično visine 3,5-4 m, sa 500-800 gorivnih elemenata, svaki sa određenim brojem gorivnih šipki slično PWR reaktorima. Gorivni elementi BWR reaktora su tipično raspoređeni u kvadrat, ali su šipke postavljene u kanale koji ne dozvoljavaju radijalan protok. Kako u samom jezgru dolazi do ključanja vode, nema potrebe za radijalnim mešanjem kako bi se povećala turbulencija kao kod PWR reaktora.

Gorivni elementi su praktično isti kao kod PWR sistema, peleti obogaćenog UO_2 zaptiveni u gorivnim šipkama. Kontrolne šipke su postavljene sa donje strane, jer je, zbog isparavanja rashladne vode pri prolasku kroz jezgro (oko 15%), generisanje toplote veće u donjem delu jezgra, pa kretanje šipki kroz gornji deo jezgra neće imati potreban efekat na vrednost k .

Uz pomoć pumpi voda, koja služi kao moderator i rashladni fluid, cirkuliše kroz kanale, gde se generiše vodena para. Kvalitet pare na izlazu je oko 13%, a para se odvaja iz vode u ciklonima postavljenim iznad reaktorskog jezgra. Zasićena para se direktno šalje u parne turbine. Nedostatak ovog prostog, direktnog ciklusa je mogućnost kontaminacije parogeneratora fisionim proizvodima u slučaju prskanja košuljice gorivnih elemenata, čime para iz reaktora koja prolazi kroz turbine, kao i kondenzat koji ide u dogrevač postaju radioaktivni.

Sistem cirkulacije hladioca sastoji se od recirkulacionih pumpi postavljenih sa strane reaktorskog suda. U prostor između reaktorskog suda i jezgra postavljene su turbopumpe u parovima. Voda se u reaktorski sud dovodi eksternim pumpama i ulazi sa gornje strane, tako da gravitaciono pada ka dnu reaktora do usisnog rezervoara turbopumpe (Lamarsh, Baratta, 2001, pp. 143-147).

4.3. Nuklearni reaktor sa teškom vodom pod pritiskom

S obzirom da je teška voda daleko lošiji moderator od obične, neutroni pri sudarima gube manje energije i zahtevaju više sudara. Iz tog razloga dimenzije jezgra reaktora sa teškom vodom moraju biti veće od lakovodnih jezgara. Analogno,

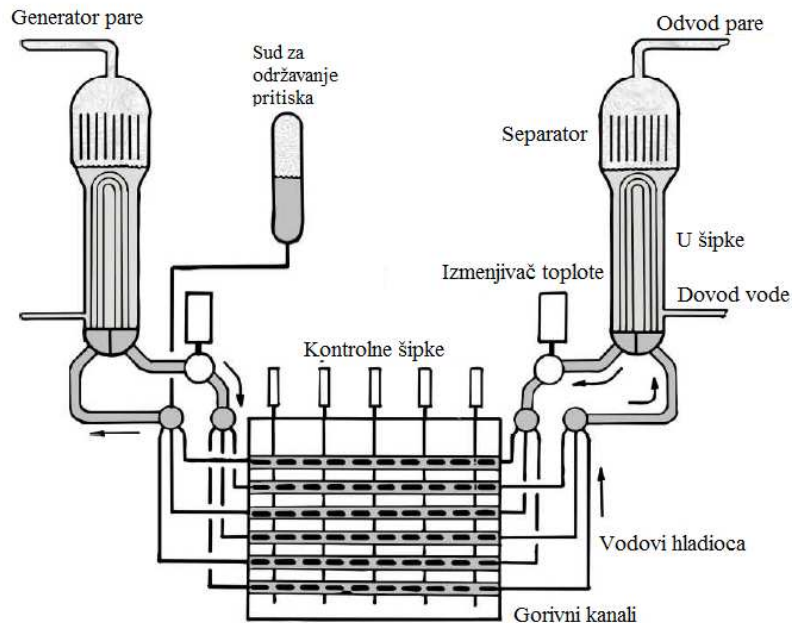
ukoliko bi se reaktor dizajnirao po uzoru na reaktor sa lakom vodom sa gorivom potopljenim u sud pod pritiskom ispunjen teškom vodom, sud bi morao biti velikih dimenzija. Kako bi se izbeglo korišćenje velikog suda pod pritiskom, ovi reaktori imaju kanale pod pritiskom. Reaktor se sastoji iz horizontalnog suda (tzv. kalandrija), koji je ispunjen moderatorom, teškom vodom, niske temperature i pritiska. Sud je konstruisan sa nekoliko stotina horizontalnih kanala koje sadrže gorivo. Hladilac, teška voda, protiče kroz ove kanale na pritisku od oko 10 MPa. Ovakvim modelom stavljanja hladioca pod pritisak umesto celog reaktora izbegava se korišćenje velikog reaktorskog suda.

Primarni vod hladioca se sastoji iz dva generatora pare. Teška voda ulazi u jezgro na temperaturi od oko 260°C gde se zagreva do oko 310°C. Hladilac toplotu odvodi u generator pare kojom se pokreću turbine. Zatim se hladilac centrifugalnom pumpom vraća u reaktor gde se ponovo zagreva pre odvođenja u drugi generator pare. Hladilac u susednim kanalima teče u suprotnom smeru. Hlađenje goriva u slučaju prekida snabdevanja električnom energijom se održava obrtnim momentom pumpe i konvekcijom nakon što se pumpe zaustave. Pritisak hladioca se održava sudom kao kod PWR reaktora.

Teška voda u jezgru ne postiže temperature kao kod reaktora koji koriste laku vodu. Zbog toga je stepen korisnosti PHWR ciklusa između 28% i 30%. S obzirom da je temperatura hladioca niža, para koja pokreće turbine sadrži veći procenat vlage u sebi, pa se koriste turbine sa specijalnim lopaticama koje ovakva zasićena para neće oštetiti.

Gorivni element se sastoji od 37 šipki od cirkonijuma ispunjenih peletima prirodnog uranijuma u obliku UO_2 . Svaki kanal goriva sadrži 12 ovakvih gorivnih elemenata. Osobitost ovih reaktora je da se dopuna goriva može vršiti dok je reaktor u pogonu i vrši se specijalnim mašinama postavljenim na suprotne strane kalandrije. Nov gorivni element se predaje mašini koja ga insertuje u kanal. Time se isluženi gorivni element odvodi iz kanala u mašinu na drugoj strani. Ovakav način punjenja gorivom doprinosi velikoj dostupnosti (oko 90%) (Lamarsh, Baratta, 2001, pp 163-164).

Glavna prednosti ovog sistema je što se usled korišćenja teške vodene zahteva korišćenje obogaćenog uranijuma. Time se izbegava konstrukcija skupih postrojenja za obogaćivanje uranijuma ili zavisnost od pojedinih država koje imaju monopol na obogaćivanje. Zbog velikih rezervi prirodnog uranijuma Kanada je svoju nuklearnu energetiku bazirala na razvoju PHWR tehnologije, pa je ovaj tip reaktora poznat i kao CANDU (Canada, Deuterium, Uranium) reaktor.



Slika 4.3.1 - Šema PHWR reaktora (Garland (Ed.), 2020, ch. 1, p. 10)

4.4. Nuklearni reaktor hlađen gasom

Sa ekspanzijom nuklearne energetike nakon Drugog svetskog rata, Velika Britanija, koja nije imala mogućnost obogaćanja uranijuma neophodnog za postrojenja hlađena lakom vodom, razvila je tehnologiju reaktora hlađenih gasom. Tehnologija je razvijena na bazi ugljen-dioksida CO_2 kao hladioca. Ugljen-dioksid nije jak apsorber termalnih neutrona i ne postaje preterano radioaktivan, a istovremeno je hemijski stabilan na temperaturama ispod 540°C i ne reaguje u kontaktu sa moderatorom ili gorivom.

Prva generacija ovakvih reaktora bazirana je na prirodnom oksidu uranijuma UO_2 u košuljicama od legure magnezijuma, po kojima nosi ime Magnox.

Temperature hladioca su limitirane prirodnim uranijumom i Magnox košuljicom pa im je efikasnost oko 30%.

Iz Magnox tehnologije razvijena je tehnologija naprednih reaktora hlađenih gasom. Reaktorsko jezgro AGR (engl. *advanced gas-cooled reactor*) reaktora predstavlja grafitni segment koji u sebi ima izrađene vertikalne kanale za gorivo raspoređene u kvadrat. Gorivo je slabo obogaćeni $UO_2(1,4-2,6\%)$ u vidu peleta kojisu spakovani u šipke od nerđajućeg čelika. Šipke su spakovane u grafitnu košuljicu i formiraju jedinstven gorivni element. Ovakav dizajn omogućava uslove bliske elektranama na konvencionalno fosilno gorivo (16,5 MPa, 550°C).

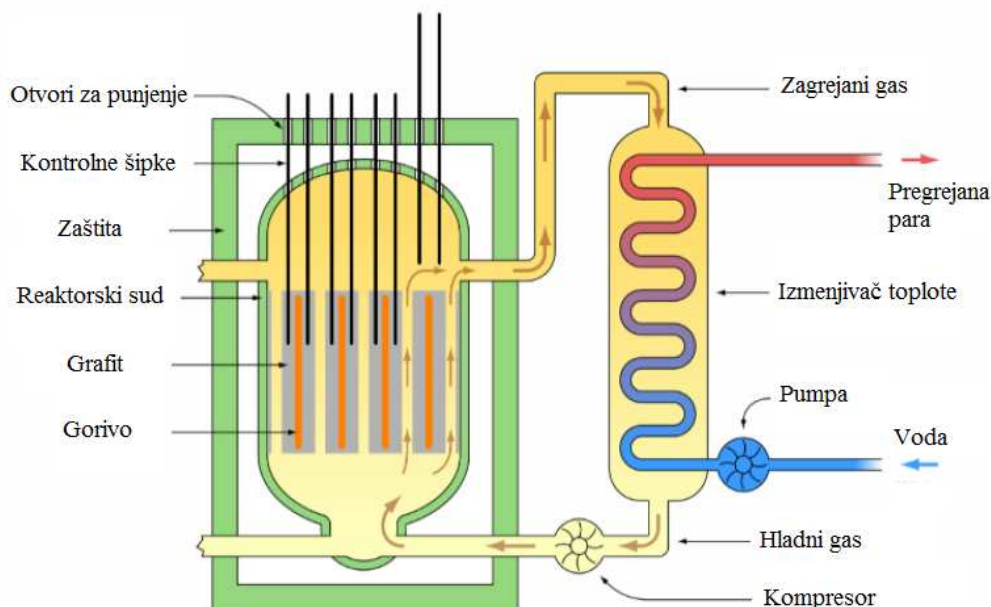
Gas se u jezgro dovodi sa donje strane, a zatim odlazi u generator pare. Iz generatora pare CO_2 se odvodi nazad u jezgro, pri čemu prolazi kroz ventilator koji omogućavaju neophodnu cirkulaciju gasa.

U Sjedinjenim Državama je na bazi ovih britanskih tehnologija razvijen reaktor hlađen gasom koji umesto CO_2 koristi helijum kao hladilac – HTGR (engl. *high temperature gas-cooled reactor*) reaktor. Korišćenje helijuma omogućava više temperature hladioca bez indukovanja hemijske reakcije sa grafitnim moderatorom. Takođe, helijum je inertan i ne apsorbuje neutrone, pa samim tim ne postaje radioaktivan. Međutim, male količine radioaktivnih gasova koje napuste gorivo se mešaju sa helijumom, te je hladilac AGR reaktora radioaktivan u izvesnoj meri.

Na početku ciklusa, gorivo AGR reaktora je visoko obogaćeni (93%) ^{235}U pomešan sa torijumom. Torijum apsorbuje neutrone i nakon nekog vremena se sukcesivnim radioaktivnim raspadom konvertuje u fisilni ^{233}U . Posledično, reaktivnost goriva ostaje visoka i nakon dugog perioda upotrebe, jer ^{233}U zamenjuje ^{235}U koji se troši. Korišćenjem ovakvog goriva dimenzije reaktora se značajno smanjuju u odnosu na standardan gasom hlađeni reaktor.

Velika prednost gasom hlađenih reaktora je njihov visok stepen korisnosti, oko 40% (temperatura pare u generatoru je približno 540°C, a pritisak 16 MPa). Jedinstvena karakteristika HTGR reaktora je izuzetno visoka temperatura helijuma (815-870°) koja se postiže u ciklusu. Ovakav helijum se može koristiti direktno u gasnoj turbini, jednostavnije konstrukcije od parne, za pokretanje generatora uz

stepen korisnosti oko 50%. Potencijal HTGR ciklusa je i u iskorišćenju toplote koja se predaje toplotnom ponoru za gasifikaciju uglja, desalinizaciju morske vode i drugo (Lamarsh, Baratta, pp. 160-163).



Slika 4.4.1 - Šema AGR reaktora (Garland (Ed.), 2020, ch. 6, p. 268)

4.5. Lakovodni reaktor moderiran grafitom

Sovjetska tehnologija kanalnog reaktora bazira se na korišćenju lake vode kao hladioca, grafita kao moderatora i obogaćenog uranijuma kao goriva. U Rusiji i postsovjetskim republikama ovaj tip reaktora poznat je i kao RBMK reaktor (rus. реактор большой мощности канальный). Nakon černobiljskog akcidenta mnogi reaktori ovog tipa su ugašeni, a preostalima u radu su implementirane promene u dizajnu kako bi se obezbedila veća sigurnost.

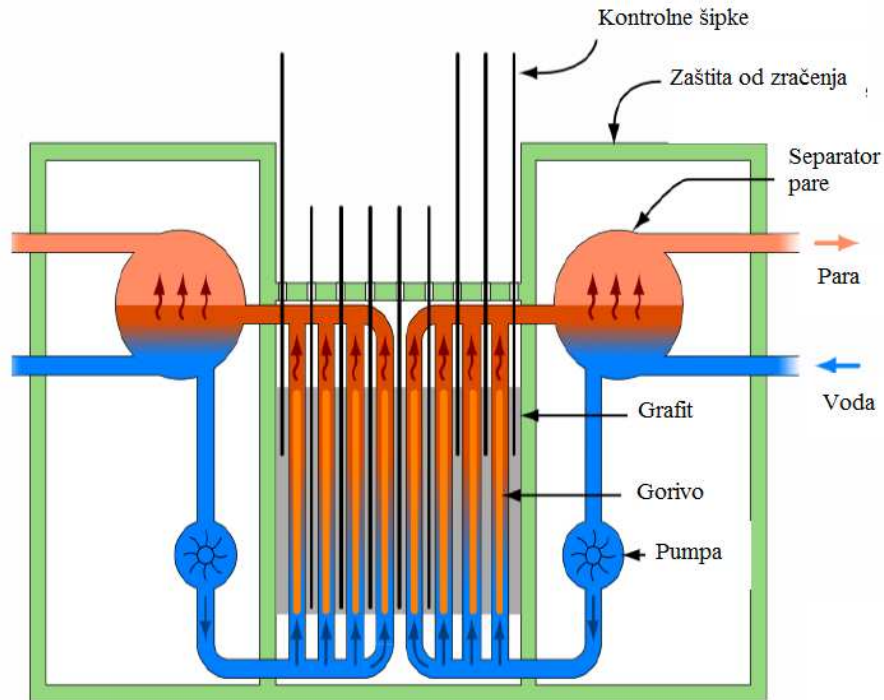
Ovaj reaktor nema reaktorski sud, već se sastoji od grafitnog bloka sa većim brojem autonomnih reaktorskih kanala. Grafitni blok je hermetički izolovan i potopljen u smešu helijuma i azota koja omogućava inertnost i sprečava oksidaciju grafita. Reaktorsko jezgro je velikih dimenzija (21 x 21 x 25 m) Kao gorivo se

koristi UO_2 , a gorivni element je sličan onom kod LWR reaktora, sa 2-4% obogaćenim ^{235}U . Punjenje goriva se izvodi bez prekida u radu reaktora, kako bi se optimizovao neutronske fluks i produkcija ^{239}Pu .

Reaktor je dizajniran sa dva nezavisna kola hladioca, svako sa četiri primarne cirkulacione pumpe i jednom na stend-baju. Voda se dovodi u reaktor sa donje strane posebnim kanalima, a svaki napaja 38-41 posebnih kanala goriva. Mešavina vode i pare se sa gornje strane odvodi u separatore, odakle se para kvaliteta 15% sprovodi u turbinu. Nominalni protok kroz jezgro je $46000-48000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, nominalna temperatura vode na ulazu u jezgro 270°C , dok je na izlazu 284°C uz pritisak 6,9 MPa.

Kanali goriva su ispunjeni cirkonijumskim šipkama, ukupno 1661, lociranim u centru grafitnog bloka. Osim kanala goriva u grafitnom bloku izrađeno je i 211 kanala za kontrolu reaktivnosti. Zazor između grafitnog bloka i goriva je malih dimenzija. Deformacija elemenata goriva usled povećanja pritiska može proizvesti naprezanje i oštećenje grafitnog bloka, pri čemu se ono može preneti i na susedne kanale.

Laka voda je korišćena kao hladilac, a grafit kao moderator. Ovakva kombinacija materijala u jezgru omogućavala je akcident krtičnosti u slučaju gubitka hladioca što je i izazvalo akcident u Černobiljskoj nuklearnoj elektrani. Nakon akcidenta u Černobilju sovjetski energetski sektor se okreću razvijanju VVER reaktora koji se bazira na PWR tehnologiji (Garland (Ed.), 2020, ch. 6. pp. 270-272).



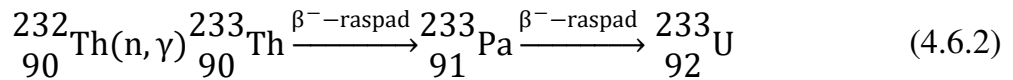
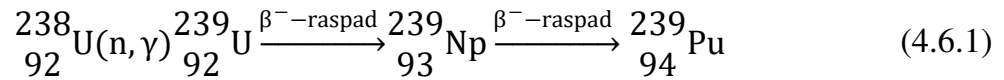
Slika 4.5.1 - Šema RBMK reaktora (Mesarović, 2020, str. 4)

4.6. Brzi oplodni reaktori hlađeni tečnim metalom

Termalni reaktori za indukovanje fisije koriste termalne neutrone. Moguće je održati lančanu reakciju i brzim neutronima visokih energija, uz uslov da je gorivo obogaćeno fisilnim uranijumomom ^{235}U ili plutonijumom ^{239}Pu . Za proces oplodnje neophodno je ispuniti uslov da faktor umnožavanja neutrona u fisilnom gorivu bude veći od 2. U proseku se pri fisiji generiše više od dva neutrona, jedan se koristi za indukovanje sledeće fisije, dok se drugi stvoreni neutron (ili neutroni) apsorbuje u oplodnom materijalu kao što je ^{238}U koji dalje stvara pomenuta fisilna jezgra. Tako je u ovom reaktoru uz dobru neutronske ekonomiju moguće stvoriti više fisilnog materijala nego što se troši.

Svetske rezerve ^{235}U su ograničene, pa samim tim i primena tehnologije reaktora koji primarno koriste izotop kao gorivni element. Kako je u prirodnom uranijumu sadržaj ovog izotopa manji od 1%, konvertovanjem određenog dela od preostalih 99% u plutonijum ^{239}Pu rezerve uranijuma se značajno duže mogu

koristiti. Tehnologija oplodnih reaktora problem rešava zamenom ^{235}U izotopom ^{238}U ili torijumom ^{232}Th , čije su rezerve značajno veće, koji se zatim koriste za dobijanje ^{239}Pu i ^{233}U kojih nema u prirodi:



Takođe, celokupan osiromašeni uranijum ^{238}U koji se dobija u procesu obogaćivanja uranijuma, kao i isluženo gorivo izvađeno iz termalnih reaktora mogu se koristiti kao gorivo. Stoga ovakva tehnologija nuklearnog reaktora može da zadovolji svetske potrebe za energijom u budućnosti u dugoročnom periodu (Miljanić, 2020).

Kod ovih reaktora rashladni fluid je tečni metal, najčešće natrijum, koji protiče direktno preko vertikalno postavljenih štapova goriva. Natrijum ne usporava elektrone u značajnoj meri i odlično prenosi toplotu, što omogućava da jezgro reaktora bude malih dimenzija. Tačka ključanja natrijuma na atmosferskom pritisku iznosi 882°C što omogućava rad reaktora bez upotrebe suda za regulaciju pritiska. Hladilac će prema tome biti visoke temperature, a kao posledicu će proizvesti paru visoke temperature ($\sim 500^\circ\text{C}$) i pritiska (16-18 MPa) što rezultira visokim stepenom korisnosti sistema ($\sim 40\%$). Natrijum poseduje i neke nepoželjne karakteristike. Tačka topljenja iznosi 98°C , pa se celokupan sistem hladioca mora dogrevati kako bi se sprečio prelazak u čvrsto stanje. Natrijum pri visokim temperaturama burno reaguje sa vodom, a pri kontaktu sa vazduhom dolazi do paljenja pri čemu se stvara gust beli dim natrijum-peroksida. Poslednja karakteristika predstavlja prednost pri korišćenju natrijuma iz razloga što se bilo kakav gubitak iz cevi odmah može detektovati prisustvom belog dima.

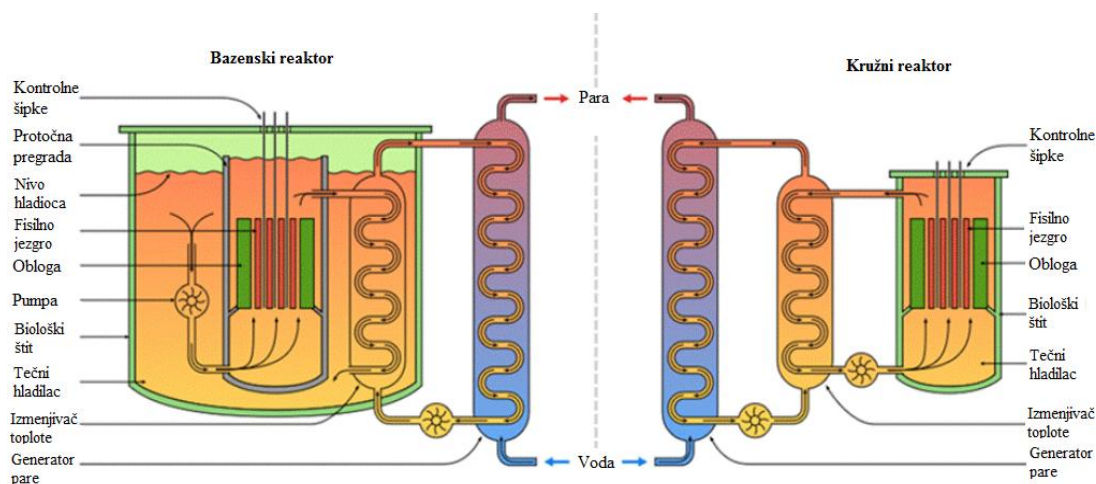
Natrijum apsorbuje neutrone u izvesnoj meri pri čemu se formira radioaktivni izotop ^{24}Na , što znači da je natrijum koji prolazi kroz jezgro reaktora

radioaktivan. Usled radioaktivnosti natrijuma i svojstva da burno reaguje sa vodom hladilac se ne može direktno sprovesti iz reaktora u generator pare, već se toplota primarnog vodaprenosi u sekundarni natrijumskivod putem izmenjivača. Sekundarnivod zatim prenosi toplotu pari u parnom generatoru. Svaki reaktor uobičajeno ima 3-4 primarna voda, svaki sa odgovarajućim sekundarnim natrijumskim vodom i sistemom voda-para.

Moderator koji smanjuje energiju neutrona se ne koristi, zbog čega se ovakvi reaktori nazivaju brzim, a višak elektrona se koristi za konverziju nefisionih materijala u fisiono gorivo, zbog čega se ovi reaktori nazivaju i oplodni reaktori.

Kod uranijumsko-plutonijumskog reaktora šipke se sastoje iz peleta izrađenih od oksida uranijuma UO_2 ili plutonijuma PuO_2 obloženih metalnom pokrivicom otpornom na visoke temperature. Jezgro je u ovom slučaju sa svih strana obloženo oplodnim pokrivačem izrađenim od ^{238}U , takođe u vidu šipki. Kod torijumsko-uranijumskog reaktora gorivne šipke sadrže ^{233}U umesto plutonijuma, a oplodni pokrivač se izrađuje od torijuma. Kontrolne šipke su cevi od nerđajućeg čelika ispunjene karbidom bora.

U odnosu na to kako su povezani primarni i sekundarni natrijumski vod brider reaktori se dele na bazenske i reaktore sa kružnim sistemom.



Slika 4.6.1 - Šema dva tipa reaktora hlađenih tečnim metalom (Garland, 2020, ch. 6, p. 273)

Kod kružnog sistema izmenjivač toplote i ostali elementi sistema za prenos toplote nalaze se van reaktorskog suda. Oko reaktorskog suda izgrađen je biološki štit koji sprečava dalje kretanje radioaktivnog natrijuma ukoliko dođe do izlivanja iz suda. Kako je natrijum primarnog voda radioaktivan svi elementi primarnog voda (pumpe, cevi, izmenjivači toplote) moraju imati odgovarajući radioaktivni štit i nalaziti se u atmosferi azota. Azot ne reaguje sa natrijumom, što smanjuje mogućnost paljenja radioaktivnog natrijuma ukoliko dođe do curenja. Iz istog razloga se prostor iznad primarne pumpe za natrijum i reaktorskog suda nalazi u inertnoj atmosferi argona. Sekundarni natrijumski vod, voda i para nisu radioaktivni, pa nema potrebe za izgradnjom radioaktivnog štita oko ovih elemenata.

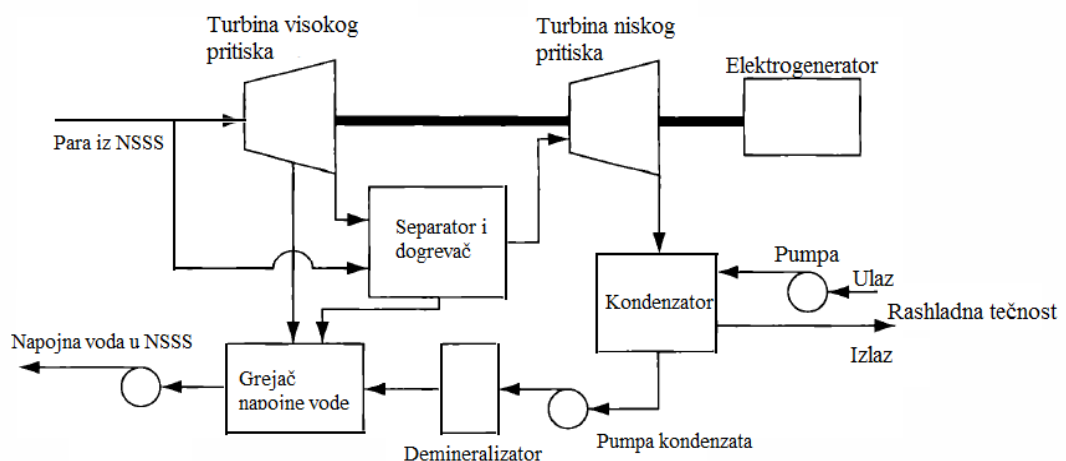
Kod bazenskog tipa reaktora svi elementi primarnog voda se zajedno sa jezgrom nalaze u reaktorskom sudu u atmosferi tečnog natrijuma. Natrijum pomoću pumpe cirkuliše kroz jezgro i izmenjivač toplote. Natrijum sekundarnog voda se zatim dovodi u reaktorsku posudu, prenosi mu se toplota u izmenjivaču, a zatim se odvodi u generator pare. Kako bi se obezbedilo da natrijum koji napušta reaktorski sud ne bude radioaktivan posebna pažnja se pridaje zaštiti izmenjivača toplote od reaktorskih neutrona (Lamarsh, Baratta, 2001, pp. 169-174).

Dva reaktora ovakvog tipa trenutno su u pogonu u Rusiji, snage 600 i 800 MW. U Indiji se u oktobru 2022. planira puštanje u rad reaktora snage 500 MW. Istorijski najznačajniji komercijalni reaktori ovog tipa su japanski Mondžu kružnog tipa i francuski Superfeniks bazenskog tipa. Mondžu, snage 280 MW, bio je u pogonu od avgusta do decembra 1995. godine. Usled požara izazvanog curenjem natrijuma suspendovan je na 15 godina, da bi 2010. godine bio ponovo stavljen u pogon u periodu od maja do avgusta, da bi bio u potpunosti ugašen usled akcidenta koji je nastao upadanjem uređaja za punjenje i transfer goriva u reaktorski sud. Usled deformacije uređaja pri padu iz reaktorskog suda izvađen je tek nakon godinu dana, 2011. godine. Japanska vlada od tada radi na planu dekomisije elektrane, a sam početak dekomisije planiran je za 2023. godinu. Superfeniks je bio do sada najveći komercijalni reaktor ovog tipa, snage 1200 MW. Reaktor je proizvodio električnu energiju od 1985. do 1996. godine, međutim tokom 11 godina postrojenje

je imalo 53 meseca rada (uglavnom pri maloj snazi), 25 meseci prekida rada usled tehničkih problema, dok se 66 meseci nalazilo van pogona usled političkih i administrativnih problema (Mesarović, 2020).

4.7. Nuklearne elektrane

U svim nuklearnim elektranama energija fisije u reaktoru koristi se za produkciju pare, bilo direktno u reaktoru ili u pomoćnim izmenjivačima toplote – generatorima pare. Reaktor ili kombinacija reaktor – generator pare naziva se sistem snabdevanja nuklearnom parom (engl. NSSS - *nuclear steam supply system*). Ovaj sistem ima funkciju kotla kod elektrana koje kao energent koriste fosilna goriva.



Slika 4.7.1 - Uprošćeni dijagram proizvodnje električne energije u nuklearnoj elektrani (Lamarsh, Baratta, 2001, str. 130)

Slika 4.7.1 prikazuje parni proces nuklearne elektrane od tačke kada para napušta reaktor ili generator do tačke kada se u tečnom stanju vraća kao napojna voda kako bi se ceo ciklus dobijanja pare ponovio. Para pokreće parne turbine čijim pokretanjem generator proizvodi električnu energiju. Vodena para koja ulazi u sistem turbina sadrži što je moguće manje tečne faze, a kako bi se to naglasilo naziva se još i suva para. Kako suva para prolazi kroz sukcesivne turbinske etape, temperatura i pritisak opadaju te se deo pare kondenzuje u tečnu fazu. Ta utečnjena

para u vidu kapljica vode nepovoljno deluje na turbinu i dovodi do erodiranja lopatica što višestruko skraćuje radni vek turbine. Ovaj problem se rešava pregrevanjem pare pre ulaska u samu turbinu, što znatno smanjuje količinu vode generisanu u turbini, a može se izvesti na različite načine: u posebnoj jedinici predviđenoj za tu operaciju, u delu generatora pare ili u samom reaktoru. Problem se može rešiti i uvođenjem separatora vlage u sistem. Kada sadržaj vlage u vodenoj pari dostigne nivo na kom se para smatra vlažnom, para se odvodi iz turbine u separator gde se vlaga odvaja, a para se dogreva i šalje u jednu ili više turbina nižeg pritiska. Separacija vlage i ponovno grejanje vode se obično obavlja u okviru istog postrojenja (po jedan sistem za svaku turbinu niskog pritiska).

Iz turbine niskog pritiska iskorišćena para se uvodi u kondenzator gde se hladi i kondenzuje u vodu. Kondenzovana voda se pumpom sprovodi kroz demineralizator u deo sistema za proizvodnju pare. Efikasnost sistema se povećava ukoliko se voda pre odvođenja u NSSS zagreje parom iz turbine uz pomoć izmenjivača toplote, što se naziva regeneracija. Vraćanjem ovako zagrejane vode u reaktor ciklus generisanja električne energije je završen.

Koeficijent korisnog dejstva nuklearne elektrane može se definisati kao odnos:

$$\eta = \frac{W}{Q_r} \quad (4.7.1)$$

gde je W količina proizvedene električne energije u megavatima (MWe), a Q_r količina toplotne energije odate iz reaktora (MWt). Vrednost W manja od Q_r za vrednost jednaku sumi gubitka toplote iz svih delova sistema (izmenjivačima toplote, turbinama, pumpama, cevovodu, generatoru) i količini toplote Q_c , odatoj rashladnoj tečnosti u kondenzatoru. U praksi se gotovo celokupna energija fisije predaje pari koja ulazi u turbinu, a zanemarljiv deo se gubi u turbini, cevovodu, ili se koristi za pogon pumpi, te generator radi visoko efikasno, te iz toga sledi:

$$W \simeq Q_r - Q_c \quad (4.7.2)$$

iz čega stepen korisnosti možemo napisati kao:

$$\eta \approx 1 - \frac{Q_c}{Q_r} \quad (4.7.3)$$

Iz ove jednačine zaključujemo da što je manja vrednost Q_c , stepen korisnog dejstva elektrane je veći, što dalje znači da što je veći stepen korisnog dejstva elektrane to je količina toplote Q_c odata rashladnom fluidu manja.

U praksi, efikasnost parnog ciklusa zavisi i od drugih parametra, između ostalog temperature pare koja ulazi u turbinu T_t i temperature rashladne tečnosti koja se koristi u kondenzatoru T_c . Efikasnost se povećava pri povećanju temperature T_t i smanjenju T_c . U praksi vrednost T_c je određena uslovima okoline, lokalne temperature vazduha ili temperature rashladne vode kondenzatora, i samo je T_t pod kontrolom inženjera. Dakle, za postizanje visoke efikasnosti, potrebno je turbine pokretati parom najviše moguće temperature.

Koeficijent korisnog dejstva je ključan parametar kako kod elektrana na fosilno gorivo, tako i kod nuklearnih elektrana, ali iz nešto drugačijih razloga. Kod elektrana koje kao energent koriste fosilno gorivo cena proizvodnje električne energije determinisana je cenom goriva koje se koristi za dobijanje toplote Q_r . Sa porastom koeficijenta korisnog dejstva manje goriva je potrebno za proizvodnju iste količine električne energije. Stoga, potrebno je sve napore uložiti ne bi li se dobila para što više temperature, a turbine u ovakvim elektranama rade na temperaturama bliskim maksimalnim temperaturama dopuštenim metalurškim osobinama materijala od kojih su turbine izrađene. S druge strane, kod nuklearnih elektrana, efikasnost postrojenja je prvenstveno određena kapitalnim ulaganjima u izgradnju samog postrojenja, a ne cenom goriva. Dakle, električna energija se može proizvoditi ekonomično iako je koeficijent korisnog dejstva nizak, a potrošnja goriva visoka, jer cena proizvedene električne energije na prvom mestu i ne zavisi od cene goriva. Ovo je povoljna okolnost iz razloga što je temperatura goriva u

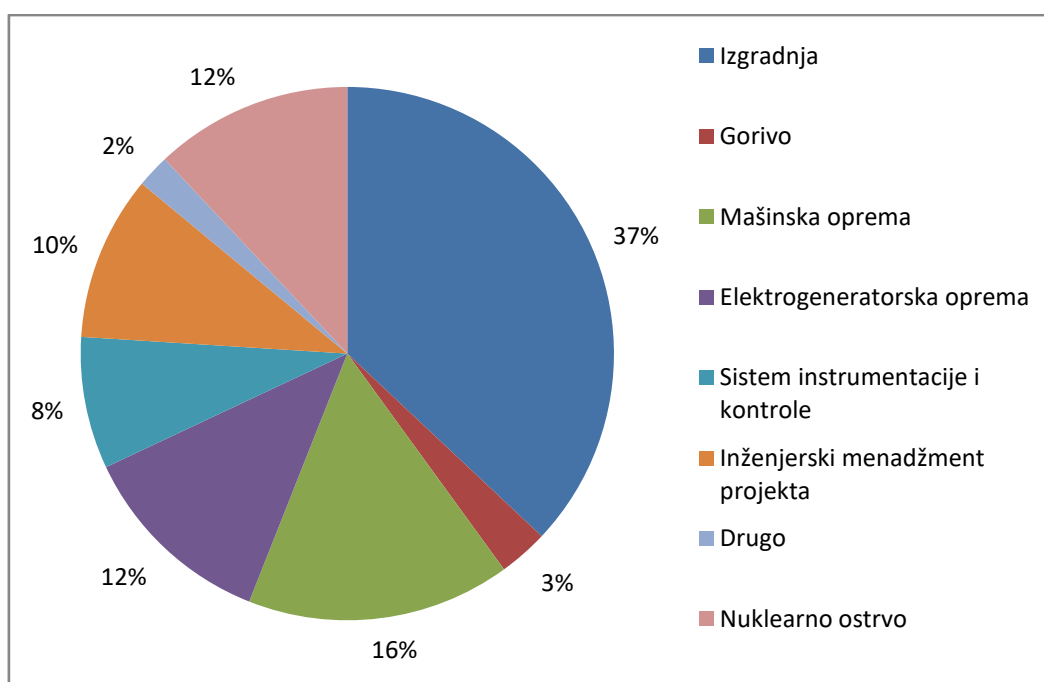
reaktoru ograničena, pa je samim tim temperatura vodene pare koja pokreće turbine znatno niža. Temperature u reaktoru su niže od temperature komore za sagorevanje konvencionalnog kotla kako bi se obezbedio integritet goriva i kontrolisali produkti fisije. Međutim, ozbiljna posledica nižeg koeficijenta korisnog dejstva nuklearne elektrane je odavanje znatno veće količine toplote u atmosferu od komparabilnih termoelektrana. Nuklearna elektrana koja radi sa koeficijentom korisnog dejstva od 33% odaje 25% više toplote okolini od termoelektrane koja radi sa stepenom korisnosti od 38%. Ako se ova toplota nepravilno otpusti u toplotni ponor može doći do termalnog zagađenja i narušavanja biološke ravnoteže ekosistema, što je jedan od izazova pri izboru lokacije i dizajna svih elektrana, ali naročito nuklearnih. Kako bi se redukovalo termalno zagađenje, mnoge nuklearne elektrane koriste toranj za hlađenje. To su visoke građevine, često visine iznad 150 metara, u kojima se vrši razmenjivanje toplote između kondenzatora i atmosfere. Izgradnja tornja je neophodna gde god nije moguće garantovano snabdevanje hladioca tokom cele godine.

Uz stepen korisnog dejstva, drugi parametri kojim se opisuju performanse nuklearnih elektrana su faktor raspoloživosti i faktor kapaciteta. Raspoloživost je definisana kao procenat vremena, unutar nekog definisanog vremenskog intervala, u kom je elektrana operativna. Faktor kapaciteta je procenat ukupne količine električne energije koja bi se teoretski proizvela ako bi elektrana radila sa 100% kapaciteta bez prestanka. Faktor kapaciteta je manji od faktora raspoloživosti jer elektrana ne može biti u pogonu ukoliko nije dostupna, niti radi sa 100% kapaciteta sve vreme. Faktor raspoloživosti nuklearnih elektrana je oko 90%, dok je faktor kapaciteta od 80 – 85% (Lamarsh, Baratta, 2001, pp. 129-133).

4.8. Ekonomski aspekti izgradnje i korišćenja nuklearnih postrojenja

U energetici se svedeni troškovi (engl. LCOE – *levelized cost of electricity*) uobičajeno koriste za poređenje različitih energetske tehnologije. Svedeni troškovi

predstavljaju odnos celokupnih troškova elektrane (kapitalnih i operativnih) u toku očekivanog radnog veka i ukupne količine proizvedene električne energije u toku istog. Svedeni troškovi prikazuju cenu energije po proizvedenom MWh (Lloyd, 2020, p. 2). Kod nuklearnih elektrana kapitalni troškovi doprinose u toj meri da čine oko 70% svedenih troškova kod standardnih PWR reaktora, dok ostalih 30% podrazumeva troškove u toku radnog veka elektrane (operativni troškovi, troškovi održavanja, troškovi goriva, troškovi dekomisije) (BEIS, 2016). Pregled troškova i njihov udeo prikazan je na grafikonu 4.8.1.



Grafikon 4.8.1 – Udeo pojedinačnih troškova u ukupnim troškovima nuklearne elektrane (NEA, 2015, pp. 145-146)

Iako je LCOE uobičajen način komparacije različitih energetske tehnologije, razlikuje se u odnosu na geografsku lokaciju elektrane, prognoze cena goriva na svetskim berzama, diskontne takse, karbonske takse, itd. Tabela 4.8.1 prikazuje ovu varijabilnost. Vrednosti svedenih troškova u tabeli su normalizovane u odnosu na vrednost jednog lakovodnog reaktora, tako da ukoliko je vrednost manja od 1 nuklearna energija je ekonomičnija u odnosu na ugalj i gas, a ukoliko je vrednost

veća od 1 drugi izvori energije su ekonomičniji. Pretpostavljena diskontna stopa je 7%, a faktor kapaciteta 85%. Pretpostavljena karbonska taksa je 30 \$/t CO₂.

Tabela 4.8.1 – Normalizovani svedeni troškovi prirodnog gasa, uglja i nuklearne energije u pojedinim državama (MIT, 2018, p. 37)

	Prirodni gas		Ugalj		Nuklearna energija
	LCOE	LCOE sa karbonskom taksom	LCOE	LCOE sa karbonskom taksom	1
SAD	0,67	0,85	0,88	1,21	1
Južna Koreja	1,54	1,78	1,40	1,99	1
Japan	0,92	1,05	0,94	1,23	1
Kina	0,74	0,97	1,03	1,63	1
Francuska	0,58	0,71	-	-	1

Iz tabele 4.8.1 se može zaključiti da cena nuklearne energije nije kompetitivna sa cenom prirodnog gasa u Evropi i Sjedinjenim Državama, dok u Aziji jeste kada se u obzir uzme karbonska taksa. U slučaju uglja, uključivanje karbonske takse u cenu energije nuklearnu energiju čini izuzetno komercijalnom, dok je i bez iste kompetitivna u Kini i Japanu.

Očekivani svedeni troškovi pri izgradnji nove nuklearne elektrane u razvijenim zemljama Zapadne Evrope i SAD su prosečno 110 \$/MWh pri diskontnoj stopi od 9%. Optimizacijom procesa izgradnje ovi troškovi bi se mogli smanjiti na 80 \$/MWh, što bi značilo da bi se specifični kapitalni troškovi smanjili sa 6000 \$/kWe na 4385 \$/kWe, nešto niže od današnje referentne tačke od 4400 \$/kWe (Roulstone, 2019, navedeno u Lloyd, 2020, p. 4).

Važno je primetiti i da visoki troškovi nisu svojstveni nuklearnoj tehnologiji kao takvoj. U svakoj državi prva elektrana prosečno je za 30% skuplja od svih narednih elektrana koje rade na istom principu. Ovi troškovi učenja mogu biti i veći ukoliko preduzeće ili energetska sistem nisu učestvovali u izgradnji novih elektrana u dužem vremenskom periodu. Sa te strane se izgradnja elektrana sa novim reaktorskim tehnologijama, jednim reaktorom ili malim brojem reaktora susreće sa problemima u lancu nabavke i ispravkom grešaka nastalih u toku izgradnje, što

dovodi do odlaganja i većih troškova. Najisplativiji projekti su oni izgrađeni sa više reaktora po postrojenju (do 6), standardizovanog dizajna, sa istim podizvođačima i radnom snagom angažovanim na projektu u kontinuitetu. Ovim se izbegavaju dodatni troškovi ponovne mobilizacije, a maksimizira se učenje u smislu unapređenja projekta. Tako su se troškovi radne snage u NE Barak u Ujedinjenim Arapskim Emiratima tokom vremena smanjeni za 40%, između izgradnje reaktora 1 i reaktora 4. Naravno, tome dosta doprinosi i sama cena rada, pa je u azijskim državama moguće angažovati više osoblja za istu količinu novca u odnosu na Zapadnu Evropu i Sjedinjene Države, što omogućava mlađim radnicima svih profila da steknu relevantno iskustvo za buduće projekte. Takođe, skorašnji projekti izgradnje postrojenja u Evropi i Sjedinjenim Državama odlikuju se nezadovoljavajućom praksom menadžmenta izgradnje privatnih izvođača. U Aziji se to minimizira jakim uticajem državnog aparata, pa su vlade azijskih država u mnogome zaslužne za uspeh njihovih nuklearnih industrija u nastajanju (MIT, 2018, pp. 36-38).

5. EKOLOŠKI PROBLEMI KORIŠĆENJA NUKLEARNE ENERGIJE

5.1. Problem iskorišćenja nuklearnog goriva

Glavni problem iskorišćenja nuklearnog goriva predstavlja nuklearni otpad. Nuklearni otpad podrazumeva zaostalu radioaktivnost iz procesa prerade ili korišćenja nuklearnih materijala u energetske, medicinske i druge svrhe. Nuklearni otpad iz nuklearnih elektrana po masi i radioaktivnosti višestruko nadmašuje sve druge izvore otpada, pa je pitanje nuklearnog otpada jedan od najvećih izazova sa kojim se nuklearna energetika suočava.

Radioaktivni otpad se klasifikuje na više načina: po agregatnom stanju na tečni, čvrsti i gasoviti; po vremenu poluraspada se deli na kratkoživići ($t_{1/2} < 90$ dana) i dugoživići ($t_{1/2} > 90$ dana); po radioaktivnosti na niskoradioaktivni, srednjeradioaktivni i visokoradioaktivni. Niskoradioaktivni otpad podrazumeva

90% zapremine i 1% radioaktivnosti ukupnog otpada i ne zahteva radioaktivnu zaštitu tokom upravljanja i transporta. Srednjeradioaktivni otpad ima viši nivo radijacije od niskoradioaktivnog pa je radioaktivna zaštita neophodna, ali toplota koju generiše nije dovoljna ($< 2 \frac{kW}{m^3}$) da zahteva specijalne postupke pogledu hlađenja i skladištenja. Podrazumeva 7% zapremine i 4% radioaktivnosti ukupnog otpada. Visokoradioaktivni otpad sadži dovoljnu količinu toplote ($> 2 \frac{kW}{m^3}$) da značajno povisi temperaturu okolini pa zahteva i hlađenje i zaštitu. Visokoradioaktivni otpad predstavlja svega 3% zapremine, ali 95% ukupne radioaktivnosti svog otpada.

Nakon 18-36 meseci korišćenja nuklearnog goriva koncentracija fisijonih i teških fragmenata raste u meri da se gorivo ne može adekvatno koristiti u reaktoru, zbog čega se isluženo gorivo vadi iz reaktora, a reaktor se puni novim gorivnim elementima.

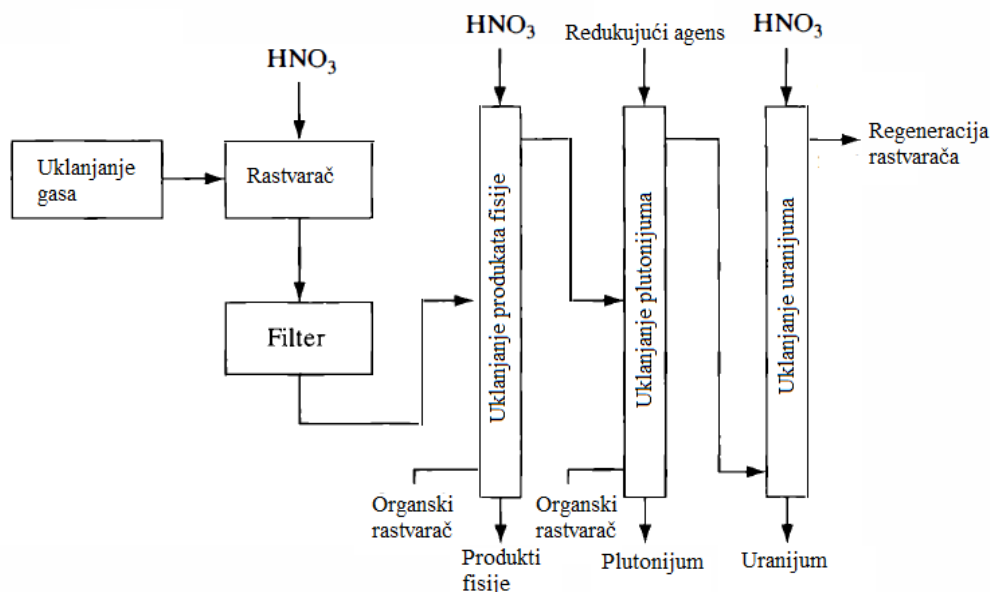
Nakon vađenja iz reaktora gorivo će odavati radijaciju i toplotu, usled čega se odlaže neposrednoj blizini reaktora, u bazen dubine 7-12 m, kako bi se obezbedilo da se gorivo nalazi nekoliko metara ispod površine vode. Voda se u ovom slučaju koristi kao štit i omogućava sigurno opadanje nivoa radijacije u gorivu tokom vremena. Istovremeno se toplota goriva predaje vodi u bazenu. Odvođenje toplote se postiže cirkulacijom vode kroz spoljne izmenjivače toplote. Isluženo gorivo se u ovakvom bazenu može nalaziti u period od nekoliko meseci do nekoliko godina, nakon čega se može premestiti u suvo skladište unutar samog postrojenja. Pravilo je da se gorivo skladišti u trajanju od najmanje 10 perioda poluraspada, tako da aktivnost bude 0,001% od početne.

Nakon skladištenja (privremeni postupak) isluženo gorivo se mora ili trajno odložiti kako bi se omogućio raspad dugoživićih radioizotopa, ili preraditi u hemijskom procesu, nakon čega se otpad dobijen u takvom procesu takođe mora skladištiti i odložiti. Odlaganje se mora izvesti tako da se spreči prodiranje radioaktivnosti u biosferu u periodu 100.000 – 1.000.000 godina (Miljanić, 2008, str. 255-257).

5.2. Regeneracija

Isluženo gorivo sadrži oko 96% prvobitnog uranijuma, gde je udeo fisibilnog ^{235}U manji od 1%. Oko 3% sadržine isluženog goriva predstavlja nuklearni otpad, a 1% je plutonijum generisan u reaktoru.

Hemijskim procesom se uranijum i plutonijum mogu izdvojiti iz isluženog goriva i osposobiti za ponovnu upotrebu u gorivnim elementima. U tu svrhu razvijane su različite metode, ali gotovo sva postrojenja sagrađena u poslednjih 70 godina koriste PUREX proces (engl. plutonium uranium reduction extraction), tečno-tečnu ekstrakciju organskim rastvaračima. Proces se bazira na činjenici da plutonijum i uranijum imaju različita oksidaciona stanja. Usled razlike u oksidacionom i redukcionom potencijalu moguće je oksidovati ili redukovati jedan bez uticaja na drugi element. Takođe, jedinjenja uranijuma i plutonijuma u različitom stanju imaju različite rastvorljivost u organskim rastvaračima. Pri oksidacionom stanju 4^+ i 6^+ nitrati oba elementa su rastvorljivi u određenim rastvaračima, dok se u 3^+ stanju jedinjenja ne mogu rastvoriti u istim rastvaračima. Prema tome proces regeneracije se može podeliti na tri različite faze: odvajanje uranijuma i plutonijuma od produkata fisije rastvaranjem u pogodnom rastvaraču, smanjenje oksidacionog broja plutonijuma na 3^+ i ekstrakcija plutonijuma u vodeni rastvor.



Slika 5.2.1 - Uprošćena šema PUREX postrojenja (Lamarsh, Baratta, 2001, p. 218)

Pre samog procesa regeneracije neophodno je skratiti gorivne šipke na dužinu 3-5 cm. Tako pripremljeno gorivo se zatim zagreva kako bi se otklonili radioaktivni gasovi, u najvećoj meri tricijum i izotop kriptona ^{85}Kr . Zatim se gorivo rastvara u koncentrovanom rastvoru azotne kiseline HNO_3 . Ovakav vodeni rastvor uranijuma i plutonijuma zatim prolazi kroz filter kako bi se otklonile zaostale nerastvorene čestice i odvodi u prvu ekstrakcionu kolonu. U kolonu se organski rastvarač tributil-fosfat, rastvoren u dodekanu (ugljovodonik sličan kerozinu), dovodi sa gornje strane i odvaja uranijum i plutonijum iz vodenog rastvora. Istovremeno se sa gornje strane dovodi azotna kiselina kako bi primila zaostale produkte fisije iz rastvarača koji puni kolonu. Rastvarač pri napuštanju kolone na vrhuu najvećoj meri sadrži uranijum i plutonijum, ostale produkte fisije samo u tragovima. Sa druge strane, vodeni rastvor koji napušta kolonu pri dnu, sadrži produkte fisije (uranijum i plutonijum u tragovima). Organski rastvor se zatim dovodi u drugu kolonu, gde sa druge strane struji redukujući agens koji redukuje plutonijum u 3^+ stanje. Plutonijum postaje nerastvorljiv u tributil-fosfatu i napušta kolonu u vidu vodenog rastvora. Uranijum se iz organskog rastvora izdvaja u trećoj

koloni tako što prolazi kroz struju azotne kiseline. Rastvarač, iz koga su izdvojeni praktično svi produkti fisije, cevovodom se sa vrha kolone odvodi u regenerativno postrojenje za prečišćavanje i ponovnu upotrebu. Uranijum se sa dna kolone odvodi u vidu vodenog rastvora. Rastvori uranijuma i plutonijuma se mogu iskoristiti za pravljenje novog goriva. Vodeni rastvor aktinoida i produkata fisije se dalje prečišćava kako bi se odvojili korisni (americijum, kirijum, neptunijum, izotopi joda, cezijuma i stroncijuma), a ostatak je nuklearni otpad (Lamarsh, Baratta, 2001, pp. 217- 218).

Tako dobijeni visokoradioaktivni nuklearni otpad je u tečnom stanju i mora se prevesti u čvrsto stanje. Rastvor se u postupku vitrifikacije utiskuje u borosilikatno staklo koje se zatim izliva u sudove visine 1,3 m od nerđajućeg čelika. Odlivci se čuvaju u posebnim skladištima u periodu od 25 godina, u prvo vreme uz hlađenje, jer svaki sud sadrži oko 45 kW toplote. Nakon toga u njima ostaju samo fisioni proizvodi visokeradiotoksičnosti s vremenima poluraspada od oko 30 godina (^{90}Sr , ^{137}Cs). Međutim, radioaktivni raspad je eksponencijalni proces, te je za potpuni raspad neophodno beskonačno vreme. Smatra se da su uslovi za odlaganje zadovoljeni kada nivo radioaktivnosti opadne na nivo uranijumove rude za šta je potrebno minimalno 1000 godina (Miljanić, 2008, str. 256-257).

5.3. Odlaganje nuklearnog otpada

Način odlaganja nuklearnog otpada zavisi od tipa radioaktivnosti samog goriva. Niskoradioaktivni otpad i sredneradioaktivni otpad sa kratkim vremenom poluraspada se odlažu u nadzemna postrojenja konstruisana u tu namenu ili postrojenja u plitkim geološkim formacijama. U nadzemnim postrojenjima kontejneri nuklearnog otpada skladište se u plitkim iskopinama sa debelim betonskim zidovima, koje se zatim prekrivaju nepropusnom membranom i nekoliko metara zemlje. Ovakva postrojenja koriste Ujedinjeno Kraljevstvo, Španija, Francuska, Japan i Sjedinjene Američke Države, gde postoji čak pet ovakvih postrojenja. Švedska i Finska radioaktivni otpad ovog tipa odlažu u postrojenjima u plitkim geološkim formacijama. Švedsko postrojenje Forsmark nalazi se 50 m ispod

niova Baltičkog mora, dok su u Finskoj izgrađena dva ovakva postrojenja na dubini od oko 100 m. Po podacima koje je 2022. objavila Međunarodna agencija za energiju 80% ovakvog otpada je uspešno odloženo.

Visokoradioaktivni otpad i srednjeradioaktivni otpad sa dugim vremenom poluraspada odlaže se u dubokim iskopima ili bušotinama u stabilnim geološkim formacijama. Pogodnosti ovakvog načina odlaganja su dobra izolacija otpada, te nepostojanje potrebe za održavanjem posebno konstruisanog postrojenja, a mana nemogućnost praćenja stanja ukoliko dođe do migracije otpada iz kontejnera. Odlagalište ovog tipa izgrađeno je u Sjedinjenim Američkim Državama, ali ono nema potrebnu licencu za odlaganje srednje i visokoradioaktivnog otpada. Švedska i Finska su započele izgradnju odlagališta ovog tipa. Po proceni Međunarodne agencije za energiju 5% srednjeradioaktivnog otpada i 0% visokoradioaktivnog otpada je uspešno odloženo (World Nuclear Association, 2021).

5.4. Nuklearni incidenti

Incidenti se u opštem smislu mogu klasifikovati kao fizički, hemijski, biološki ili radiološki.

Nuklearne elektrane ne predstavljaju opasnost za incident fizičkog tipa, s obzirom da rizik od nuklearne eksplozije ne postoji. Eksplozija u Černobilju se dogodila kao rezultat toplote, dok je eksplozija u Fukušimi vodonična, pri čemu se generiše značajno manja količina energije nego pri nuklearnoj eksploziji. Princip rada nuklearnog naoružanja je takav da je cilj održanje fisilne materije u superkritičnom stanju dovoljno dugo ne bi li se stvorila enormna količina energije. Nuklearni reaktori uspore neutrone na brzine termalnih neutrona, a takvi termalni neutroni imaju značajno kraći poluživot od zahtevanog.

Hemijski incidenti mogu nastati s obzirom da je za rad nuklearne elektrane, kao i svih drugih tipova termalnih elektrana, neophodna znatna količina vode za hlađenje i odvođenje toplote. Oko dve trećine termalne energije koju nuklearna elektrana proizvede je neiskoristiva usled drugog zakona termodinamike. Višak energije se ispušta u reke, jezera, mora ili atmosferu. U većini elektrana koje se

nalaze u blizini značajnog vodnog tela, voda se koristi u samo jednom ciklusu u glavnom kondenzatoru, i obično joj se dodaje hlor kako bi se izbeglo stvaranje biološkog materijala u opremi. Zbog toga elektrane imaju izgrađene rezervoare sa hlorom. Takvi rezervoari predstavljaju rizik po okolinu ukoliko dožive fizički defekt.

Biološki rizici ne postoje s obzirom da nuklearne elektrane ne sadrže bakterije i viruse.

Efekti radiološkog incidenta mogu biti somatski ili genetski. Somatski utiču na individuu u toku njenog životnog veka, dok su genetski oni koji se odražavaju na potomstvo. Somatski efekti se mogu pojaviti neposredno nakon incidenta (akutni ili nestohastički) ili kasniji (latentni ili stohastički). Stohastički efekti su nasumični, što znači da ako se individue izlože dovoljno velikoj dozi radijacije, moguće je proceniti broj individua koje će oboleti i raka, ali ne i precizirati koje će to individue biti. Genetski efekti su u praksi primećeni kod životinja ali ne i ljudi (Garland (Ed.), 2020, ch. 13, pp. 10-11).

Kada se govori o radiološkim incidentima treba napraviti razliku između apsorbovane i ekvivalentne doze radijacije. Apsorbovana doza se definiše kao energija apsorbovana po jedinici mase bilo koje vrste zračenja u bilo kom materijalu. Tradicionalna jedinica za apsorbovanu dozu je rad i definisan je kao $100 \frac{\text{erg}}{\text{g}}$. Jedinica SI sistema je grej (Gy) i definiše se kao $1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

$$1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{\text{kg}} = \frac{10^7 \text{ erg}}{10^3 \text{ g}} = 100 \text{ rad} \quad (5.4.1)$$

Apsorbovana doza potrebna za radiološko oštećenje je različita za razne vrste zračenja. Za svrhe zaštite od zračenja stoga je definisana ekvivalentna doza, kao proizvod apsorbovane doze D i bezdimenzionog faktora Q koji zavisi od gubitka energije zračenja po jedinici puta.

$$H = QD \quad (5.4.2)$$

Pri korišćenju tradicionalne jedinice apsorbovane doze rad, jedinica za ekvivalentnu dozu je rem (rentgen equivalent man). Jedinica SI sistema za ekvivalentnu dozu je sivert (Sv), iz čega sledi da je $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$. U svrhu monitoringa dozvoljenog izlaganja zračenju ekvivalentna doza je veličina koja mora biti propisana (Miljanić, 2008, str. 107).

Prvi incidenti u nuklearnim reaktorima su bili incidenti vezani za kritičnost unutar samog reaktora. S obzirom da se radilo o reaktorima malih dimenzija, odvođenje toplote radioaktivnog raspada nije predstavljalo problem, jer se pri gašenju reaktora ona mogla otkloniti vodom i kontejnment strukturama oko jezgra. Najveći bezbednosni problem je predstavljalo izbegavanje neželjene kritičnosti i blagovremeno zaustavljanje rada reaktora ukoliko do iste dođe. Značajan broj incidenata se dogodio pri prekidu rada reaktora, pri naizgled potpuno bezazlenim situacijama. Pri prekidu rada, reaktor se ne nalazi pod aktivnom kontrolom, detektori su neosetljivi, indikatori kritičnosti nisu očigledni i reaktor se može naći u stanju bliskom kritičnom. U nekim slučajevima, razlog prekida rada mogu biti remontni radovi kontrolnog ili sistema za gašenje, pri čemu oni nisu u funkciji. Tada se bezbednost postiže na jedan od sledećih načina: dodavanjem apsorberskih štapova, uklanjanjem dela goriva, dodavanjem tečnog apsorbera moderatoru ili tečnosti za hlađenje, i uklanjanjem neutronske reflektora koji se nalazi oko jezgra.

U nastavku su ukratko prikazani najpoznatiji nuklearni incidenti u komercijalnim reaktorima.

5.4.1. Ostvro Tri milje

Incident na ostrvu Tri milje u Pensilvaniji 1979. jedan je od najtežih koji se dogodio u komercijalnoj nuklearnoj elektrani. Reaktor 2, sa vodom pod pritiskom (PWR), snage 900 MWe, radio je u skoro punom kapacitetu prilikom incidenta.

Tokom operacije održavanja protok napojne vode u generator pare je prekinut. Usled naglog prekida odvođenja toplote, pritisak u primarnom sistemu je počeo da raste. Porast pritiska je prekinut umetanjem kontrolnih šipki, ali pre nego

što je to u potpunosti urađeno, prelivni ventil suda za održavanje pritiska se otvorio, što je očekivan sled događaja pri gubitku napojne vode. Sa opadanjem pritiska prelivni ventil se trebao zatvoriti, a kako se to nije desilo, došlo je do kontinuiranog gubitka hladioca kroz otvoreni ventil, što nije dijagnostikovano satima. Kao rezultat gubitka inventara jezgro je otkriveno, što je dovelo do delimičnog topljenja jezgra, generisanja vodonika kao produkta oksidacije goriva na visokoj temperaturi, paljenje vodonika unutar kontejnmenta, i delimičnog topljenja dna suda za održavanje pritiska. Zaglava ventila u otvorenom položaju je neuobičajena, ali ne i retka. Transformacija ove operativne poteškoće u akcident se delimično dogodila pošto operatori nisu ustanovili da je ventil otvoren jer je indikator ventila u kontrolnoj sobi izveden iz signala za pokretanje ventila a ne samog položaja ventila, a delimično jer je nivo u posudi za održavanje pritiska porastao usled gubitka hladioca sa gornje strane, što je u suprotnosti sa očekivanim ponašanjem pri gubitku hladioca u drugim delovima sistema. Operatori su došli do pogrešnog zaključka da je u sistemu previše vode usled korišćenja nivoa vode u posudi za održavanje pritiska kao indikatora. Ako se voda doda pothlađenom sistemu pritisak će rapidno porasti jer će se parni deo posude za održavanje pritiska napuniti, pa su operatori ovo želeli da izbegnu.

Čak i pri ovako delimičnom topljenju jezgra, kontejnmentski model je uspeo da odavanje radijacije u atmosferu dovede na zanemarljiv nivo. Cezijum i jod pri oslobađanju iz pregrejanog goriva formiraju aerosol cezijum jodid CsI. Pri kontaktu cezijum jodida sa vodom dolazi do disocijacije:



pa ga je praktično nemoguće izdvojiti iz vode. Za razliku od Černobilja gde je došlo do paljenja moderatora, ovakav „mocar“ incident se pokazao kao znatno povoljniji, kako po pitanju uticaja na životnu sredinu, tako i po okolnu populaciju, jer su efekti na zdravlje suštinski izbegnuti (Garland (Ed.), 2020, ch. 13, pp. 45-47).

5.4.2. Černobilj

Incident u nuklearnoj elektrani Černobilj se odigrao 26. aprila 1986. godine, pri planiranom gašenju elektrane. U trenutku incidenta pogon elektrane su činila četiri reaktora. Reaktor 4 Nuklearne elektrane Černobilj, gde se incident dogodio, bio je u tom trenutku najnoviji iz serije kanalnih reaktora sa ključajućom vodom RBMK tipa snage 1000 MW. Kao moderator se koristio grafit, hladilac je bila voda, a gorivo obogaćeni 2% izotop uranijuma U^{235} . Električna energija se proizvodila u direktnom ciklusu iz dvostrukih turbina. Postojala su dva odvojena kola rashladne tečnosti, svako sa 830 kanala goriva, dva separatora pare i četiri pumpe (sa jednom na stendbaju). Gorivo se punilo sa gornje strane jezgra. Kontrola i gašenje su se vršili uz pomoć pokretnih kontrolnih šipki. Pri procesu gašenja, planiran je test kako bi se demonstrirale određene sigurnosne karakteristike elektrane. Manjkavost samog testa, kao i nekoliko nepredviđenih događaja i neplaniranih akcija operatora doveli su do ekstremno nestabilnih radnih uslova koji su doveli do brzog, superkritičnog pobegasnage u reaktor i pogubnog kvara reaktora (Garland (Ed.), 2020, ch. 13, p. 40).

Reaktor RBMK tipa ima osobit model reaktivnosti zbog upotrebe grafita kao moderatora i vode kao hladioca. Rashladna voda radi istovremeno kao moderator i apsorber neutrona. Moderatorski efekat vode je zanemarljiv spram grafita, ali apsorpcija neutrona znatno utiče na efekat reaktivnosti reaktora. Redukcija gustine ili gubitak hladioca dovodi do znatnog smanjenja apsorpcije neutrona u samom jezgru, dok povećanje pritiska rezultuje povećanjem reaktivnosti. Reaktor RBMK tipa ima pozitivan koeficijent reaktivnosti što znači da sa smanjenjem apsorpcije neutrona dolazi do ubrzavanja lančane reakcije. Kontrolne šipke, njih 163, su umetnute u reaktor sa gornje strane. Šipke su izrađene iz apsorberskog dela dužine 6 metara i centralnog grafitnog dela dužine 4,5 metara. Kada se kontrolne šipke maksimalno izvuku, grafitni deo se nalazi u centru reaktorskog jezgra, dok se iznad i ispod kanal kontrolne šipke napuni vodom. Kada se kontrolne šipke iz ovog položaja spuste nazad u jezgro, centralni grafitni deo, koji služi kao moderator

neutrona, zameni deo napunjen vodom, koji služi za apsorpciju neutrona. Dakle, dobija se kontraefekat od željenog, snaga reaktora se ne smanjuje umetanjem kontrolnih šipki, već se inicijalno povećava usled smanjene apsorpcije i povećane moderacije.

Neposredno pre pokretanja testa, uslovi rada elektrane su bili ekstremno nestabilni, sa nepovoljnim uslovima opterećenja, niskim nivoom snage (test je planiran sa nivoom snage od 700 MW, a iniciran pri snazi 200 MW), visokim nivoom protoka hladioca kroz jezgro, smanjenim protokom napojne vode i povećanjem temperature hladioca. Umesto obustavljanja testa, pokušano je sa povećanjem nivoa snage na željeni, pa su kontrolne šipke izvađene iz jezgra.

Pri pokretanju testa, kako je i planirano, četiri glavne pumpe hladioca su usporene, što je dovelo do smanjenja protoka hladioca. Smanjenje protoka hladioca zajedno sa već nestabilnim uslovima u kojima se elektrana nalazila dovelo je do povećanja snage od 15% što je, nakon nekoliko sekundi, dovelo do nekontrolisanog pobega snage. Pobeg snage je doveo do ubrzanog povećanja odavanja energije goriva i uništenja reaktorskog jezgra. Toplota goriva se prenela na okolnu rashladnu vodu koja je praktično isparila, što je dovelo do daljeg povećanja snage usled pozitivnog koeficijenta reaktivnosti. Proisteklo povećanje pritiska je dovelo do eksplozije reaktora.

Eksplozija je uništila veći deo objekta Reaktora 4, kao i okolnih objekata, zidovi su delimično uništeni, a krov u potpunosti. Oslobađanje energije je bilo dovoljno da zapali grafitne blokove, što je dovelo do požara. Vatra je prenela gorivo i produkte fisije kroz objekat i okolinu. Stanovništvo naseljeno u okolnom gradu (elektrana se nalazi na obali reke Pripjat, neposredno pored istoimenog grada) izloženo je velikoj dozi radijacije prenosom radioizotopa kroz vazduh. Usled stepena nastale štete i ekstremnog nivoa radijacije oko reaktorske jedinice izgrađen je privremeni pokrivač, sarkofag, kako bi se izolovalo dalje odavanje radijacije u okolinu u periodu od 30 godina. Izgradnja pokrivača koji bi rešio problem na duži vremenski period trenutno je u toku.

Procenjeno je da je 3,5% goriva ispušteno iz reaktora, radioaktivni plemeniti gasovi u celosti, kao i znatne količine radioizotopa, približno 33% cezijuma¹³⁷Cs i 50% joda ¹³¹I. Ovi radioizotopi su glavni zagađivači okoline. Dok radioizotop joda ima kratak period poluraspada (8 dana), radioizotop cezijuma ima značajno dug period poluraspada (30 godina). Jaki lokalni vetrovi su ove čestice preneli širom severne Evrope i Skandinavije.

Operatori postrojenja, vatrogasci i vojska su u zajedničkom naporu zaustavili požar i pokrili izloženo reaktorsko jezgro. Kako bi se osigurala subkritičnost, bor je helikopterima ispušten u otvoreno jezgro. Vatra je ugašena kombinacijom ispuštanja peska sa gornje strane i upumpavanja tečnog azota sa donje strane. Oko 300 ljudi je zahtevalo bolničku negu, od kojih 134 sa visokom apsorbovanom dozom radijacije i simptomima akutnog radijacijskog sindroma. Od njih 134, 28 je preminulo usled posledica, a doze apsorbovane radijacije su dostizale i 13 Gy. Sa dozom od 4 Gy šansa za preživljavanje je 50%.

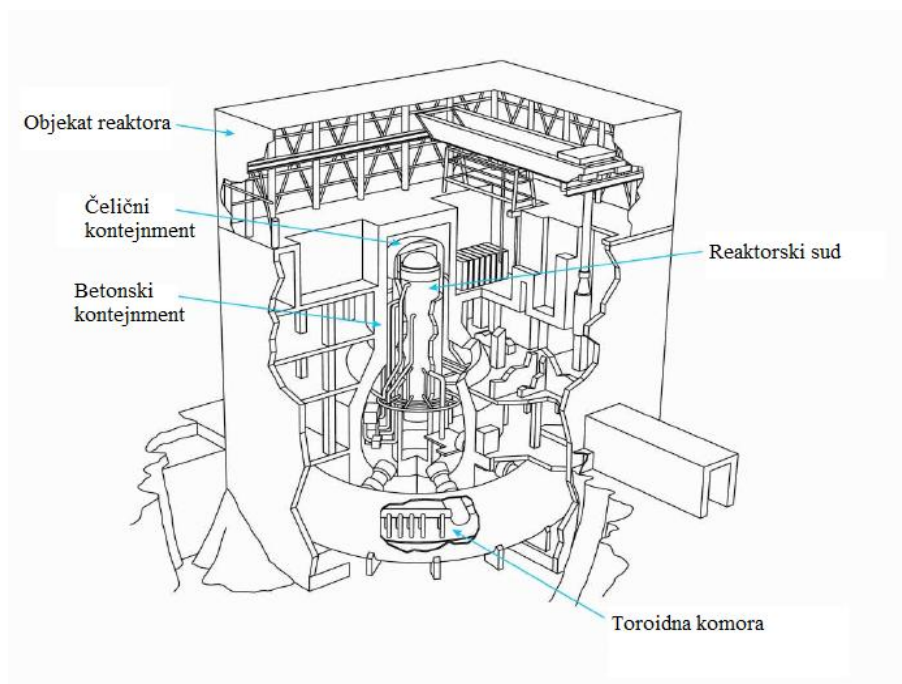
Neposredno nakon incidenta, sovjetske vlasti su propisale hitne zaštitne mere. Obliznji grad Pripjat je evakuisan u potpunosti, kao najteže pogođeno područje, a usledile su i evakuacije pri daljem pronalaženju novih pogođenih područja korišćenjem sistema za monitoring.

Radiološke posledice incidentom pogođenih područja su značajne. U regiji je u periodu od 1981. godine do 1986. godine zabeleženo 39 slučajeva kancera štitne žlezde, da bi u periodu od 1986. godine do 1994. godine došlo do povećanja od 1000%, odnosno 565 slučajeva (Lamarsh, Baratta, 2001, pp. 688-693).

5.4.3. Fukušima Daiči

U nuklearnom postrojenju Fukušima I (Daiči) postoji šest nuklearnih reaktora BWR tipa. U obližnjem postrojenju Fukušima II (Daini) postoji još 4 ovakva reaktora. Ovi reaktori imaju kontejnment u obliku sijalice koji je povezan sa toroidnim bazenom ili komorom za prigušivanje (slika 5.4.3.1). Svrha ovog bazena ili komore je da kondenzuje paru dospelu u kontejnment u slučaju incidenta (kao što je gubljenje rashladnog fluida) i da posluži kao privremeni primalac toplote u

slučaju da je glavni mehanizam nedostupan. Ako se ova komora koristi kao primalac toplote, mora se hladiti spoljnom vezom kao što je izolacioni kondenzator. Ovakav kondenzator je dizajniran da radi na gravitacionom kretanju hladioca iz posude za održavanje pritiska kroz izmenjivač toplote postavljen u rezervoar za vodu velike zapremine koji je izdignut u odnosu na jezgro. U konkretnom slučaju izolacioni kondenzator je dizajniran da prima toplotu u periodu od oko osam časova. U samom objektu se nalazi i izdignuti bazen za skladištenje isluženog goriva.



Slika 5.4.3.1 - Šema jednog bloka NE Fukušima I (Garland (Ed.), 2020, ch. 13, p. 50)

U martu 2011. godine jak zemljotres magnitude 9 dogodio se u blizini istočne obale Japana. Zemljotres je rezultirao cunamijem čiji je talas procenjen na oko 15 m visine kada je nakon četrdeset minuta pogodio Fukušimu. Iako je zemljotres izazvao značajnu štetu i gubitak struje u oba postrojenja, svi operativni blokovi su automatski ugašeni i dizel generatori predviđeni za hitne slučajeve su pokrenuti. Fukušima 1 je tako dizajnirana da može podneti udar cunami talasa u visini od 5,7 metara. Dizel generatori, koji su hladjeni morskom vodom, su

onesposobljeni poplavom, a kako je veza sa eksternom električnom mrežom već prekinuta, nestalo je struje u reaktorima 1-5. Sve motorne pumpe su prestale sa radom, nestalo je svetla u glavnoj kontrolnoj stanici. Sistem morske vode koji se koristio za odavanje toplote tako je postao neoperativan. Operativni blok 6 je u pogonu imao jedan operativan dizel generator hlađen vazduhom. Ovaj generator je uspešno povezan sa blokom 5 usled čega su ova dva bloka ugašena bez oštećenja goriva. Kako je baterije za hitne slučajeve bilo nemoguće puniti kontrola i instrumentacija u blokovima 1-4 je izgubljena, čime je izgubljen nadzor nad jezgrima.

U reaktoru 1 (sekvenca događaja u ostalim reaktorima je slična, ali prolongirana) izolacioni kondenzator je inicijalno korišćen za otklanjanje toplote raspada koja nastaje kao rezidualni produkt fisije. Kondenzator je ubrzo postao neoperativan. Kako je jezgro izgubilo mogućnost odavanja toplote, usledilo je isparavanje vode iz jezgra i kondenzacija u bazenu za prigušivanje. Nivo vode u jezgru je opao toliko da je gorivo izloženo. Kako se gorivo pregrijalo u atmosferi pare, dolazi do oksidacije cirkonijumskih košuljica u koje je gorivo spakovano uz vodonik kao produkt oksidacije. Ciljevi operatora od tog trenutka postaju: uranjanje goriva u vodu, sprečavanje uništenja kontejnmenta usled visokog pritiska, kontrola i oslobađanje vodonika. Petnaest sati nakon zemljotresa operatori su uspeli da injektuju slatku vodu protivpožarnim pumpama, da bi nakon 13 sati od tada uspostavili ponovno injektiranje morske vode. Kontejnemt je morao biti provetravan kako bi se kontrolisao pritisak, što je dovelo do migracije vodonika iz kontejnmenta u reaktorsku zgradu. Tako akumulirani vodonik je eksplodirao nakon sedam sati, pri čemu je uništen značajan deo same zgrade. Analizama je zaključeno da se gorivo blokova 1, 2 i 3 topilo nekoliko časova nakon što je otkriveno, te je zbog toga probilo sud reaktora i kontejnment, međutim integritet i stanje jezgra, suda i kontejnmenta nije mogao biti utvrđen sa sigurnošću.

Dalji problem je predstavljalo stanje goriva u bazenima sa isluženim gorivom. Toplota raspada u ovim bazenima se odvodila aktivnim sistemima koji su bili neoperativni usled gubitka struje. Zagrevanje ovog isluženog goriva je manje od

zagrevanja jezgra, međutim, ukoliko se ne reaguje, može doći do otkrivanja i oštećenja. Ovi bazeni su postavljeni u gornjem delu zgrade, a takav položaj je doprineo poteškoćama u hlađenju bazena. Zbog toga se voda u bazene dodavala prvo helikopterima, a zatim kranom, sve dok sistemi za stabilno hlađenje nisu vraćeni u operativno stanje.

Fukušima II je pretrpela znatno manja oštećenja usled poplave, te su svi blokovi odmah uspešno ugašeni.

Glavni sigurnosni cilj je bio hladno gašenje reaktora (sa temperaturama manjim od 100°) što je postignuto u decembru 2011. godine, a očekivani period potpune dekomisije je 40 godina.

Injektovanje slane vode, iako je zaustavilo dalje topljenje jezgra, dovelo je do akumulacije znatne količine visoko radioaktivne vode u podrumima postrojenja jer je rashladni sistem bio otvoren. Određena količina ove zagađene vode se emitovala u more i zemljište. Kasnije je ovakav otvoren sistem zamenjen zatvorenim sistemom sa implementiranim sistemom za dekontaminaciju uz pomoć filtracije.

Naposletku, značajnu količinu visoko zagađene vode iz postrojenja potrebno je tretirati i sigurno odložiti (Garland (Ed.), 2020, ch. 13, pp. 50-52).

6. ENERGETSKI I EKOLOŠKI EFEKTI IZGRADNJE NUKLEARNE ELEKTRANE SNAGE 1.000 MW USRBIJI

Energetski bilansom utvrđuju se godišnji iznosi energije i energenata potrebni za pouzdano, sigurno i kvalitetno snabdevanje krajnjih kupaca energije i energenata za 2022. godinu, a izrađuje se u skladu sa metodologijom Međunarodne agencije za energiju i Evrostata.

Veličine se iskazuju u fizičkim jedinicama, čvrsta i tečna goriva u hiljadama tona, gasovita goriva u milionima standardnih metara kubnih (temperature 15°C, pritiska 1,01325 bar i donje toplotne moći $33.338 \frac{kJ}{m^3}$), električna energija u gigavat satima, toplotna energija u teradžulima, a zbirni energetski bilans iskazan je u

milionima tona ekvivalentne nafte. Po metodologiji Međunarodne agencije za energiju ukupna toplotna energija generisana u nuklearnom sistemu prikazuje se kao sopstveni energetske resurs u sistemu primarne energije.

Tabela 6.1. prikazuje Planirani energetske bilans Republike Srbije za 2022. godinu u pogledu proizvodnje primarne energije i transformacija primarne energije:

Tabela 6.1 - Planirani energetske bilans Republike Srbije za 2022. godinu.
(Ministarstvo rudarstva i energetike, 2022, str 14-15)

REPUBLIKA SRBIJA	fizičke jedinice	Plan 2022	
		Fizičke jedinice	Mil ten
PROIZVODNJA PRIMARNE ENERGIJE		-	10,775
Ugalj	1000 t	38984	6,950
Nafta (sa poluproizvodima)	1000 t	821	0,868
Gas	Mil m ³	319	0,254
Hidropotencijal (bez RHE)	GWh	10277	0,884
Geotermalna energija	TJ	212	0,005
Biomasa	TJ	67642	1,616
Biogas	TJ	2164	0,052
Solarna energija	GWh	19	0,002
Energija vetra	Gwh	1,088	0,094
Energija iz otpada	TJ	2,180	0,052
UTROSAK ZA PROIZVODNJU ENERGIJE TRANSFORMACIJOM	Mtoe		14,748
Hidroelektrane	Mtoe		0,884
Vetroelektrane	Mtoe		0,094
Solarnе elektrane	Mtoe		0,002
Pumpanje-reverzibilne hidroelektrane	Mtoe		0,068
Termoelektrane	Mtoe		6,537
Termoelektrane-toplane (TE-TO)	Mtoe		0,398
Energane	Mtoe		0,378
Toplane	Mtoe		0,621
Ekstrakcija nafte i gasa	Mtoe		0
Rafinerije i Petrohemija	Mtoe		4,715
Razmenjeni proizvodi	Mtoe		0,058
Vraćeni iz petrohemiје	Mtoe		0,124
Visoke Peći	Mtoe		0,588
Rudnici uglja	Mtoe		0
Prerada Uglja	Mtoe		0,206
Cumurane i retorte	Mtoe		0,031
Proizvođači drvnih peleta	Mtoe		1,222
Proizvođači briketa	Mtoe		0,004
Ostali	Mtoe		0,018
PROIZVODNJA ENERGIJE TRANSFORMACIJOM	Mtoe		9,923
BRUTO PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE	GWh	39801	3,422
TERMŌELEKTRANA	GWh	25959	2,232
TERMŌELEKTRANA – TOPLANA	GWh	1414	0,122
HIDROELEKTRANA	GWh	10472	0,9
OD TOGA MALE HIDRO	GWh	410	0,035
RHE	GWh	519	0,045
ELEKTRANE NA SUNČANU ENERGIJU	GWh	19	0,002
ELEKTRANE NA VETAR	GWh	1088	0,094
OSTALO	GWh	849	0,073

U nastavku se razmatraju efekti izgradnje nuklearne elektrane snage 1000 MW na energetske bilans Republike Srbije za 2022. godine na proizvodnju primarne energije, količine energije i energenata u postrojenjima za odvijanje procesa transformacije primarne energije i količine energije proizvedene iz procesa transformacije. Takođe se razmatraju i ekološki efekti gašenja termoelektrana na ugljaj koje trenutno proizvode ekivalentnu količinu električne energije, odnosno smanjenje materija iz termoenergetskih postrojenja koje utiču na kvalitet vazduha (CO₂, praškastih materija, NO_x, SO_x) na osnovu manjeg sagorevanja uglja u blokovima koji bi bili ugašeni.

Nuklearna elektrana snage 1000 MW, godišnje raspoloživosti 90% u toku godine proizvodi električnu energiju:

$$W = P * 365 \text{ dana} * 24 \text{ č} * 0,9 = 7884 \text{ MWh} = 0,678 \text{ Mtoe} \quad (6.1)$$

gde je W količina električne energije proizvedene u generatoru u jedinicama energije, P snaga reaktora u GW. Ta količina energije se prikazuje u delu energetskog bilansa „PROIZVODNJA ENERGIJE TRANSFORMACIJOM“.

Efikasnost transformacije pretpostavljene nuklearne elektrane iznosi 33% i računa se po obrascu:

$$\eta = \frac{W}{Q_r} \quad (6.2)$$

iz čega sledi da se količina toplotne energije odate iz reaktora računa:

$$Q_r = \frac{W}{\eta} = \frac{7884}{0,33} = 86007 \text{ TJ} = 2,054 \text{ Mtoe} \quad (6.3)$$

U planiranom energetskom bilansu za 2022. godinu ta količina energije prikazana je u delu „PROIZVODNJA PRIMARNE ENERGIJE“.

U slučaju izgradnje pretpostavljene nuklearne elektrane proizvodnja električne energije u termoelektranama smanjila bi se sa 25.959 GWh na 18.075 GWh.

Snaga blokova termoelektrana koji bi mogli biti ugašeni (pretpostavlja se da termoelektrane proizvode električnu energiju uz godišnju raspoloživost 90% i godišnju efikasnost 30%), a da se pritom bruto proizvodnja električne energije ne promeni iznosi:

$$P = \frac{W}{24 * 365 * 0,8} = \frac{7884}{24 * 365 * 0,8} = 1,125 \text{ GW} \quad (6.4)$$

Toplotna energija genrisana u tim blokovima iznosi:

$$Q_r = \frac{7884}{0,3} = 94608 \text{ TJ} = 2,260 \text{ Mtoe} \quad (6.5)$$

čime bi se utrošak energije za transformaciju u termoelektranama smanjio sa 6,537 Mtoe na 4,278 Mtoe. Posledično bi se proizvodnja primarne energije iz uglja smanjila sa 6,950 Mtoe na 4,690 Mtoe, što znači da bi se proizvedene količine uglja potrebne za snabdevanje smanjilena 26,292 miliona tona uglja, odnosno za 32,6% u odnosu na trenutno planiranih 38,984 miliona tona uglja.

U tabeli 6.2. prikazane su promene u Planiranom energetskom bilansu za 2022. koje bi nastale izgradnjom nuklearne elektrane snage 1000 MW.

Tabela 6.2 - Planirani energetski bilans Republike Srbije za 2022. uz izgradnju NE snage 1000 MW

REPUBLIKA SRBIJA	fizičke jedinice	Plan 2022	
		Fizičke jedinice	Mil ten
PROIZVODNJA PRIMARNE ENERGIJE		-7	10,57
Ugalj	1000 t	26292	4,690
Nafta (sa poluproizvodima)	1000 t	821	0,868
Gas	Mil m ³	319	0,254
Nuklearna energija	TJ	86007	2,054
Hidropotencijal (bez RHE)	GWh	10277	0,884
Geotermalna energija	TJ	212	0,005
Biomasa	TJ	67642	1,616
Biogas	TJ	2164	0,052
Solarna energija	GWh	19	0,002
Energija vetra	Gwh	1,088	0,094
Energija iz otpada	TJ	2,180	0,052
UTROŠAK ZA PROIZVODNJU ENERGIJE TRANSFORMACIJOM	Mtoe		14,643
Hidroelektrane	Mtoe		0,884
Vetroelektrane	Mtoe		0,094
Solarne elektrane	Mtoe		0,002
Pumpanje–reverzibilne hidroelektrane	Mtoe		0,068
Termoelektrane	Mtoe		4,278
Termoelektrane-toplane (TE-TO)	Mtoe		0,398
Nuklearna elektrana	Mtoe		2,054
Energane	Mtoe		0,378
Toplane	Mtoe		0,621
Ekstrakcija nafte i gasa	Mtoe		0
Rafinerije i Petrohemija	Mtoe		4,715
Razmenjeni proizvodi	Mtoe		0,058
Vraćeni iz petrohemije	Mtoe		0,124
Visoke Peći	Mtoe		0,588
Rudnici uglja	Mtoe		0
Prerada Uglja	Mtoe		0,206
Cumurane i retorte	Mtoe		0,031
Proizvođači drvnih peleta	Mtoe		1,222
Proizvođači briketa	Mtoe		0,004
Ostali	Mtoe		0,018
PROIZVODNJA ENERGIJE TRANSFORMACIJOM	Mtoe		9,923
BRUTO PROIZVODNJA ELEKTRICNE ENERGIJE	GWh	40730	3,503
TERMoeLEKTRANA	GWh	18075	1,554
TERMoeLEKTRANA – TOPLANA	GWh	1414	0,122
NUKLEARNA ELEKTRANA	GWh	7884	0,678
HIDROELEKTRANA	GWh	10472	0,9
OD TOGA MALE HIDRO	GWh	410	0,035
RHE	GWh	519	0,045
ELEKTRANE NA SUNČANU ENERGIJU	GWh	19	0,002
ELEKTRANE NA VETAR	GWh	1088	0,094
OSTALO	GWh	849	0,073

Tabela 6.3. prikazuje termoelektrane u sistemu Elektroprivrede Srbije:

Tabela 6.3 - Pregled TE kapaciteta Elektroprivrede Srbije, (EPS, 2022)

	Broj blokova	Ukupna snaga (MW)	Godina puštanja u rad
TE Nikola Tesla A	6	1766	1970.
TE Nikola Tesla B	2	1300	1983.
TE Kolubara	5	239	1956.
TE Morava	1	125	1969.
TE Kostolac A	2	310	1967.
TE Kostolac B	2	697	1987.

Ukoliko bi se pristupilo gašenju blokova do ukupne snage od 1125 MW, u pogledu energetske isplativosti i kvaliteta životne sredine adekvatno bi bilo ugasiti najmanje i najstarije kapacitete: TE „Moravu“, TE „Kolubaru“, TE „Kostolac A“ i dva najstarija bloka TE „Nikola Tesla A“ (blok A1 snage 210 MW i blok A2 snage 210 MW). Ukupna snaga ovih kapaciteta iznosi 1094 MW.

Tabela 6.4. prikazuje količine uglja potrošene u pojedinačnim kapacitetima, i efekte gašenja na potrošnju:

Tabela 6.4 - Potrošnja uglja o ograncima Elektroprivrede Srbije 2020, uz prikaz smanjenja potrošnje u pojedinim ograncima u slučaju izgradnje NE, (EPS, 2021, str. 12)

Potrošnja goriva u 2020. Godini		
Organizacioni deo	Blok/kotao	Ugalj
		T
OGRANAK TE NIKOLA TESLA		
TE NIKOLA TESLA A	A1	1.391.850
	A2	1.811.135
	A3	2.954.507
	A4	3.178.885
	A5	3.073.984
	A6	3.261.663
TE NIKOLA TESLA B	B1	6.064.787
	B2	6.723.519
TE KOLUBARA A	K1	88.952
	K2	-
	K3	44.320
	K4	150.158
	K5	109.984
	K6	639.681
TE MORAVA	A1	637.329
UKUPNO		30.130.754
NAKON GAŠENJA BLOKOVA		25.257.345
OGRANAK TE-KO KOSTOLAC		
TE KOSTOLAC A	A1	879.894
	A2	1.552.884
TE KOSTOLAC B	B1	2.742.700
	B2	2.810.524
UKUPNO		7.986.002
NAKON GAŠENJA BLOKOVA		5.553.224

Tabela 6.5 prikazuje potrošnju goriva u termoenergetskim postrojenjima Elektroprivrede Srbije čiji bi blokovi bili ugašeni, kao i efekte tog smanjenja na potrošnju. Nakon gašenja blokova A1 i A2 TE „Nikola Tesla A“, TE „Kolubara“ i TE „Morava“, potrošnja u Ogranku „TE Nikola Tesla“ bi se smanjila sa 30.130.754 na 25.257.345 t uglja, odnosno 16,17%. U Ogranku „TE-KO Kostolac“, gašenjem

blokova TE „Kostolac A“, potrošnja bi se smanjila sa 7.986.002 na 5.553.224 t uglja, odnosno 30,46%.

Podaci o ukupnoj emisiji štetnih materija koje utiču na kvalitet vazduha iz termoenergetskih postrojenja 2020. godine prikazani su u tabeli 6.5:

Tabela 6.5 - Ukupna emisija materija iz termoenergetskih postrojenja koje utiču na kvalitet vazduha 2020. godine (EPS, 2021, str. 13)

KOLIČINE EMITOVANIH MATERIJA IZ TERMOENERGETSKIH POTROJENJA KOJE UTIČU NA KVALITET VAZDUHA U 2020. GODINI				
Organizacioni deo	t / godina			
	Praškaste materije	SO₂	NO_x(NO₂)	CO₂
Ogranak TE Nikola tesla	7.870,68	217.597,21	30.712,23	21.199.901,00
Ogranak TE-KO Kostolac	1.617,93	137.515,20	8.876,77	7.040.213,97
Ogranak Panonske TE-TO	1,77	0,29	290,87	140.500,38
Ogranak RB Kolubara – OC Prerada	44,41	421,78	190,21	25.621,40
Ukupno	9.534,79	355.534,48	40.070,08	28.406.236,75

Korelacijom smanjenja potrošnje uglja u Ogranku „TE Nikola Tesla“ od 16,17%, te smanjenja potrošnje uglja od 30,46% u Ogranku TE Kostolac sa količinama emitovanih materija iz istih dobijaju se umanjene vrednosti prikazane u tabeli 6.6.

Tabela 6.6 - Ukupna emesija materija iz termoenergetskih postrojenja koje utiču na kvalitet vazduha 2020. godine nakon gašenja pojedinih blokova

KOLIČINE EMITOVANIH MATERIJA IZ TERMOENERGETSKIH POTROJENJA KOJE UTIČU NA KVALITET VAZDUHA U 2020. GODINI				
Organizacioni deo	t / godina			
	Praškaste materije	SO₂	NO_x(NO₂)	CO₂
Ogranak TE Nikola tesla	6.597,66	182.402,60	25.744,77	17.77.0986,20
Ogranak TE-KO Kostolac	1.125,06	95.623,91	6.172,64	4.895.551,64
Ogranak Panonske TE-TO	1,77	0,29	290,87	140.500,38
Ogranak RB Kolubara – OC Prerada	44,41	421,78	190,21	25.621,40
Ukupno	7.768,90	278.448,57	32.398,49	22.832.659,62
Ukupno smanjenje (%)	18,52	21,68	19,14	19,62

Tabela 6.7 prikazuje da bi se gašenjem navedenih blokova Ogranaka „TE Nikola Tesla“ i Ogranaka „TE-KO Kostolac“ 2020. godine postigle sledeće redukcije emisija: praškastih materija za 18,52%, sumpor-dioksida za 21,68%, azotnih oksida za 19,14% i ugljen-dioksida za 19,62%.

Za proizvodnju 10 GWh električne energije u nuklearnoj elektrani neophodno je iskopati oko 2,5 miliona t rude 0,1% U odakle bi se dobilo 2000 t uranijuma. Ukoliko reaktor koristi obogaćeno gorivo, dobilo bi se 314 t 3% obogaćenog uranijuma. Nakon korišćenja u reaktoru i prolaska kroz proces regeneracije dobija se oko 11 t fisionih proizvoda i 120 m³ rastvora, čija bi se

zapremina smanjila na 5-30 m³ borosilikatnog stakla nakon vitrifikacije (Miljanić, 2020, str 259).

Na osnovu tabela 6.5 i 6.6 blokovi koji bi bili ugašeni u periodu od 10 godina emituju 56 miliona tona ugljen-dioksida, 76 hiljada tona azotnih oksida i 770 hiljada tona sumpor-dioksida, sve to pri sagorevanju 73 miliona tona uglja (tabela 6.4). U ovim postrojenjima 2020. godine generisano je ukupno 1.284.914 t pepela, šljake i prašina iz kotla i to 388.411t u TE „Nikola Tesla A“ (ukupno 3.107.288,030, procenjena vrednost 1/8, u skladu sa potrošnjom uglja u blokovima A1 i A2 u odnosu na ukupnu), 238.773,670 t u TE „Kolubara“, 146.847,000t u TE „Morava“ i 510.883 u TE „Kostolac A“ (EPS, 2021, str. 91,118).

7. ZAKLJUČAK

Kao što je pokazano u poglavlju 6, Nuklearna energija značajno doprinosi dekarbonizaciji energetskeg sistema. Kako se trenutno ne može takmičiti sa prirodnim gasom i ugljem kao najjeftinijim tehnologijama, trebalo bi je porediti sa obnovljivim izvorima energije. Ugalj i prirodni gas dugoročno nisu prihvatljivi energenti usled želje za smanjenjem efekta staklene bašte, pa njihova niska cena predstavlja nerealan referentnu tačku kojoj se teži. Nuklearni kapaciteti koji se implementiraju u sistem su najčešće većih kapaciteta od obnovljivih, nisu periodično uslovljeni, pa predstavljaju strateški adut čiju je vrednost pogrešno razmatrati samo iz aspekta troškova izgradnje. Iako je 2019. godine 2/3 ukupnih investicija uloženo u elektrane koje koriste obnovljive izvore energije, čini se da su u bliskoj budućnosti, usled izrazito nestabilne političke klime u Evropi, ulaganja u nove i postojeće nuklearne kapacitete neizbežna. Neupitno je da se tehnologija nuklearnih reaktora razvija, te da će nove generacije reaktora posedovati bolje sigurnosne i pogonske karakteristike od postojećih, što svakako predstavlja olakšavajuću okolnost za zemlje koje u budućnosti budu pristupile izgradnji nuklearne elektrane. Međutim, kapitalni troškovi će i tada predstavljati glavnu prepreku, pa se sistemi neiskusni u upravljanju zahtevanim lancem snabdevanja, i sa neiskusnim stručnim kadrom, mogu susresti sa značajnim problemima i odlaganjima, što bi izuzetno nepovoljno uticalo na ekonomiju elektrane. Iz tog razloga ne može se tvrditi da će napredak reaktorskih tehnologija u budućnosti osigurati uspeh takvog projekta u odnosu na projekat na bazi dobro poznatih tehnologija kao što su PWR ili CANDU uz učešće zainteresovanih strana sa neophodnim logističkim iskustvom koji bi počeo odmah.

9.9.2022. u Beogradu

LITERATURA

1. IEA 2021. Key World Energy Statistics 2021, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>
2. Elektroprivreda Srbije, 2021. *Izveštaj o stanju životne sredine u JP „Elektroprivreda Srbije“ za 2020. godinu.*
<https://www.eps.rs/lat/Stranice/Sredina-izvestaji.aspx>
3. Elektroprivreda Srbije, *Ogranci.* <https://www.eps.rs/cir/Pages/Ogranci.aspx>
(31.08.2022)
4. IAEA, Amid Global Crises, Nuclear Power Provides Energy Security with Increased Electricity Generation in 2021.
<https://www.iaea.org/newscenter/news/amid-global-crises-nuclear-power-provides-energy-security-with-increased-electricity-generation-in-2021>,
(12.07.2022)
5. IEA, 2021. Global Energy Review 2021, IEA, Paris.
<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>
6. Lamarsh, John R., Baratta, Anthony J. (2001). Introduction to Nuclear Engineering, Third Edition, Prentice Hall, New Jersey
7. Lloyd, C. A., 2020. Modular Manufacture and Construction of Small Nuclear Power Generation Systems (Doctoral thesis).
<https://doi.org/10.17863/CAM.46941>
8. Mesarović M., 2020. Termoelektrane na nuklearna goriva, *Naučni skup Uloga nuklearne energetike u energetskej tranziciji*, SANU, Beograd.
9. Miljanić Š. S., 2008. Udžbenik nuklearne hemije, Fakultet za fizičku hemiju, Beograd.
10. Miljanić Š. S., 2020. Nuklearna energija, *Naučni skup Uloga nuklearne energetike u energetskej tranziciji*, SANU, Beograd.
11. Ministarstvo rudarstva i energetike, 2020. Energetski bilans Republike Srbije za 2020. godinu. <https://www.mre.gov.rs/dokumenta/strateska-dokumenta/energetski-bilans-republike-srbije-za-2022-godinu>

12. MIT, 2018. The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
<https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>
13. NEA/IAEA, 2016. Uranium 2016: Resources, Production and Demand, OECD Publishing, Paris.<https://doi.org/10.1787/uranium-2016-en>.
14. NEA/IAEA, 2021. Uranium 2020: Resources, Production and Demand, OECD Publishing, Paris.<https://doi.org/10.1787/d82388ab-en>.
15. NEA/OECD, 2015. Nuclear New Build: Insights into Financing and Project Management, Nuclear Development, OECD Publishing, Paris.<https://doi.org/10.1787/9789264241749-en>
16. Power Reactor Information System, *Nuclear Share of Electricity Generation in 2021*.<https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/NuclearShareofElectricityGeneration.aspx> (15.07.2022)
17. Roulston T., 2019. Nuclear at the Cross-Roads, *Nuclear Future*, vol 15, no. 3, May/June 2019.
18. The Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2016. Electricity Generation Costs, BEIS, London, Uk.
<https://www.gov.uk/government/publications/beis-electricity-generation-costs-november-2016>
19. University Network of Excellence in Nuclear Engineering (UNENE), The Essential CANDU, A Textbook on the CANDU Nuclear Power Plant Technology, Editor-in-Chief Wm. J. Garland, , ISBN 0-9730040.<https://www.unene.ca/education/candu-textbook>(28.07.2020)
20. World Nuclear Association, *Storage and Disposal of Radioactive Waste*,<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste.aspx> (10.08.2022)

21. World Nuclear Association, *World Uranium Mining Production*,
<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>, (10.07.2022)

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента Тодор Сеничанин

Број индекса Р89/14

Изјављујем

да је завршни рад под насловом

Енергетски и еколошки аспекти коришћења
нуклеарне енергије

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 9.9.2022.

Потпис студента

ИЗЈАВА
О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента Тодор (Владимир) Сеничанић

Број индекса РБГ/14

Студијски програм инженерство нафте и гаса

Наслов рада Енергетски и еколошки аспекти коришћења
нуклеарне енергије

Ментор проф. др Астаси Ивезић

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, 9.9.2022.

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

Енергетски и еколошки аспекта коришћења
нуклеарне енергије

који је моје ауторско дело.

Завршни рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је (заокружити једну од две опције):

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)

У Београду, 9.9.2022.

Потпис ментора

Потпис студента
