

# Razvoj nuklearnih reaktora 4. generacije s posebnim osvrtom na superkritične vodom hladene reaktore

---

Šepić, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:832954>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**RAZVOJ NUKLEARNIH REAKTORA 4. GENERACIJE S  
POSEBNIM OSVRTOM NA SUPERKRITIČNE VODOM  
HLAĐENE REAKTORE**

Rijeka, srpanj 2023.

Mateo Šepić

0069090566

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**RAZVOJ NUKLEARNIH REAKTORA 4. GENERACIJE S  
POSEBNIM OSVRTOM NA SUPERKRITIČNE VODOM  
HLAĐENE REAKTORE**

Mentor: prof. dr. sc. Igor Bonefačić

Rijeka, srpanj 2023.

Mateo Šepić

0069090566

Rijeka, 6. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**  
Predmet: **Izvori energije**  
Grana: **2.11.02 procesno energetska strojarstvo**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Mateo Šepić (0069090566)**  
Studij: **Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva**

Zadatak: **Razvoj nuklearnih reaktora 4. generacije s posebnim osvrtom na superkritične vodom hladene reaktore/Development of 4th generation nuclear reactors with special reference to supercritical water-cooled reactors**

### Opis zadatka:

U okviru zadatka potrebno je dati pregled razvitka nuklearne energetike u svijetu. Opisati nuklearni gorivni ciklus i tipove nuklearnih reaktora 4. generacije s posebnim osvrtom na superkritične vodom hladene reaktore (SCWR). Ocijeniti prednosti i nedostatke superkritičnih vodom hlađenih reaktora u odnosu na konvencionalne tlakovodne reaktore. Analizirati utjecaj nuklearnih elektrana na okoliš te metode zbrinjavanja, reprocesuiranja i transmutacije istrošenog goriva iz reaktora.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

Sukladno uputama iz Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkoga fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad u razdoblju od 17. srpnja 2023 do 8. rujna 2023. Rad sam izradio iz kolegija Izvori energije prema zadatku Povjerenstva za završne ispite, pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Igora Bonefačića.

Potpis:

---

Zahvaljujem se svojim roditeljima i bratu na ukazanoj pomoći i podršci koju su mi pružali u dosadašnjem tijeku studija.

Također se zahvaljujem profesor Igoru Bonefačiću na strpljenju i savjetima kojima mi je olakšao pisanje ovoga rada.

## Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. NUKLEARNA ENERGETIKA U SVIJETU</b> .....	2
<b>2.1. Nuklearna fizika</b> .....	2
<b>2.2. Razvoj nuklearne energije kroz povijest</b> .....	3
<b>2.3. Nuklearna energetika danas</b> .....	8
<b>2.4. Osnovni princip rada nuklearnih elektrana</b> .....	10
2.4.1. Tlakovodni reaktor .....	11
2.4.2. Kipući reaktor .....	13
<b>3. NUKLEARNI GORIVNI CIKLUS</b> .....	15
<b>3.1. Uran</b> .....	15
<b>3.2. Rudarenje</b> .....	15
<b>3.3. Mljevenje i obrada rude</b> .....	17
<b>3.4. Konverzija</b> .....	18
<b>3.5. Obogaćenje</b> .....	18
3.5.1. Metoda plinske difuzije .....	18
3.5.2. Metoda plinske centrifuge .....	19
3.5.3. Laserska metoda .....	19
3.5.4. Elektromagnetska metoda .....	20
3.5.5. Aerodinamički proces .....	20
<b>3.6. Proizvodnja goriva</b> .....	20
<b>3.7. Proizvodnja električne energije</b> .....	22
<b>3.8. Privremeno skladištenje istrošenog goriva</b> .....	22
<b>3.9. Reprocesuiranje</b> .....	23
<b>3.10. Odlaganje radioaktivnog otpada</b> .....	24
<b>3.11. Transmutacija istrošenog goriva</b> .....	26
<b>4. UTJECAJ NA OKOLIŠ</b> .....	28
<b>4.1. Staklenički plinovi</b> .....	28
<b>4.2. Vodeni resursi</b> .....	29
<b>4.3. Iskorištavanje tla</b> .....	30
<b>4.4 Utjecaj radioaktivnog otpada</b> .....	30
<b>4.5. Nuklearne katastrofe</b> .....	30
4.5.1. Černobil .....	30
4.5.2. Fukushima .....	33
<b>5. REAKTORI IV. GENERACIJE</b> .....	36

<b>5.1. Olovni brzi reaktor</b> .....	38
<b>5.2. Natrijev brzi reaktor</b> .....	39
<b>5.3. Plinski brzi reaktor</b> .....	40
<b>5.4. Reaktor vrlo visoke temperature</b> .....	41
<b>5.5. Reaktor s rastaljenim solima</b> .....	42
<b>6. SUPERKRITIČNI VODOM HLAĐENI REAKTOR</b> .....	45
<b>6.1. Općenite značajke SCWR-a</b> .....	45
<b>6.2. Krična točka vode</b> .....	46
<b>6.3. Iskustva u termoelektranama</b> .....	48
<b>6.4. Izvedbe SCWR-a</b> .....	49
6.4.1 Kina .....	49
6.4.2. Kanada.....	52
6.4.3. Euratom .....	53
6.4.4. Japan.....	53
<b>6.5. Prednosti</b> .....	55
<b>6.6. Nedostatci</b> .....	56
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	57
<b>POPIS LITERATURE</b> .....	58
<b>POPIS SLIKA</b> .....	62
<b>SAŽETAK</b> .....	63
<b>ABSTRACT</b> .....	63



## 1. UVOD

Nuklearna energija već desetljećima ima važnu ulogu u energetske sektoru, pružajući čistu i pouzdanu električnu energiju. Međutim ograničena energetska iskoristivost i upravljanje radioaktivnim otpadom neki su od izazova s kojima se susrećemo kod tradicionalnih nuklearnih elektrana.

Osim toga, nesreće koje su se dešavale u prošlosti dovele su do toga da neke zemlje u potpunosti isključuju nuklearne elektrane iz svoje mreže za proizvodnju električne energije. Međutim, važno je napomenuti kako su nesreće koje su se dešavale u prošlosti bile posljedica neadekvatnih dizajna reaktora, ljudske nepažnje, neadekvatnih sigurnosnih mjera ili kombinacije navedenih razloga.

Nuklearni reaktori IV generacije trebali bi pružiti značajan napredak u radu nuklearnih elektrana. Navedeni reaktori trenutno su u fazi razvoja, a proučava se i razvija šest tipova reaktora. Njihovom implementacijom poboljšati će se iskorištavanje goriva, postizati će se više energetske iskoristivosti te će se smanjiti mogućnosti za pojavu incidentnih situacija koje su se dešavale u prošlosti.

Superkritični vodom hlađen reaktor (SCWR) jedan je od koncepata koji se razvija. Ovaj reaktor kao i većina današnjih reaktora koji su u funkciji koristi vodu kao rashladno sredstvo te kao moderator. Međutim tlakovi i temperature koji bi se trebali postizati značajno su viši nego li kod konvencionalnih reaktora, a fluid na ulazu u turbinu više ne bi bila pregrijana vodena para, već superkritična voda.

U prilog korištenju SCWR-a ide i dugogodišnje iskustvo u radu termoelektrana na fosilna goriva koje koriste superkritičnu vodu. Korištenjem spoznaja iz tih postrojenja u kombinaciji sa tehnologijama koje se koriste u većini današnjih nuklearnih elektrana, olakšan je razvoj SCWR-a. Glavna prednost ovih reaktora biti će povećana energetska iskoristivost te smanjenje kapitalnih i operativnih troškova.

## 2. NUKLEARNA ENERGETIKA U SVIJETU

### 2.1. Nuklearna fizika

Grana fizike koja se bavi proučavanjem građe jezgre atoma te procesa poput fisije, fuzije, nuklearnih reakcija, transmutacije, radioaktivnosti i dr. naziva se nuklearna fizika. Akcelerator čestica je glavni alat koji omogućava istraživanja u području nuklearne fizike. Njime se električki nabijene čestice (elektroni, protoni, ioni) ubrzavaju do iznimno velikih brzina nakon čega se usmjeravaju na odabrane mete te se promatraju i analiziraju rezultati sudara. Spoznaje koje se mogu dobiti takvim postupcima korisne su za razna područja kao što su nuklearna astrofizika, energetika, medicina, vojna industrija i dr. [1].

Atom je najmanji sastavni dio najjednostavnijih tvari, kemijskih elemenata, koji zadržava svojstva elementa. Sastoji se od jezgre koja se nalazi u središtu i elektronskog omotača. Jezgra čini većinu njegove mase, oko 99,9 %, no s druge strane čini tek mali dio ukupnog volumena. U jezgri se nalaze pozitivno nabijene čestice protoni i neutralne neutroni. Različiti kemijski elementi imaju različit broj protona i neutrona u jezgri, a na temelju njih određuju se redni i maseni broj pojedinog elementa. Međutim, isti elementi u svojoj jezgri mogu sadržavati jednak broj protona, a različit broj neutrona. U tom slučaju riječ je o izotopima određenog elementa. Fizikalna i kemijska svojstva različitih izotopa istog elementa gotovo se ne razlikuju. Uran se primjerice u prirodi pojavljuje u tri glavna izotopa, a to su: uran-238, uran-235 i uran-234.

Energija vezanja predstavlja energiju potrebnu da bi se jezgra atoma mogla rastaviti na protone i neutrone. Ovisno o kojem se elementu radi jezgra može biti više ili manje stabilna. Oni elementi koji imaju stabilniju jezgru imati će i veću energiju vezanja. Nuklearna energija se može oslobađati na dva načina. Prvi način je da se manje jezgre spoje u veću što je moguće kod jezgri lakših od željeza te tada govorimo o fuziji. Kod jezgri težih od željeza moguće je izazvati cijepanje jezgri pri čemu se jezgre težih elemenata cijepaju u jezgre s manjom atomskom masom. U tom slučaju radi se o fisiji. U oba slučaja (fisija i fuzija) ukupna masa se smanjuje po završetku nuklearne reakcija. Razlika u masi pretvara se u energiju prema Einsteinovoj jednadžbi (2.1):

$$E = \Delta m \cdot c^2 \quad (2.1)$$

Pritom  $E$  predstavlja oslobođenu energiju,  $\Delta m$  promjenu u masi tijekom reakcije, a  $c$  brzinu svjetlosti ( $3 \cdot 10^8$  m/s).

Ukoliko imamo određenu količinu nekog radioaktivnog elementa, tijekom vremena on se raspada, odnosno njegova se količina smanjuje. Zakon radioaktivnog raspada (2.2) opisuje koliko će se radioaktivnih jezgri raspasti u određenom vremenskom intervalu. Bez obzira o kojoj vrsti nestabilnih jezgri je riječ za sve radioaktivne elemente vrijedi isti zakon raspadanja. Aktivnost predstavlja brzinu promjene broja radioaktivnih jezgri u promatranom vremenskom intervalu, odnosno vrijedi da je:

$$R = \frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \quad (2.2)$$

Pri čemu  $R$  predstavlja aktivnost,  $dN$  promjenu broja neraspadnutih radioaktivnih jezgri u vremenskom intervalu  $dt$ ,  $N$  broj istovrsnih nestabilnih jezgri te  $\lambda$  konstantu raspada. Konstanta raspada karakteristična je veličina koja se razlikuje za različite radioaktivne elemente te o njoj ovisi brzina raspadanja radioaktivne jezgre.

Slijedeća važna veličina za opisivanje radioaktivnog raspada je vrijeme poluraspada. Ova veličina opisuje koliko je potrebno vrijeme da se broj radioaktivnih jezgri prepola, a formula za njeno izračunavanje glasi (2.3):

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.3)$$

Do radioaktivnog raspada općenito dolazi zbog nestabilnosti jezgri pojedinih radioaktivnih elemenata. Radioaktivnim raspadom jezgre prelaze u stabilniji oblik te se pritom emitiraju različite čestice. Jedna od vrsta čestica koje mogu nastati su neutroni koji su od iznimnog značaja za odvijanje nuklearnih reakcija u nuklearnim elektranama [2].

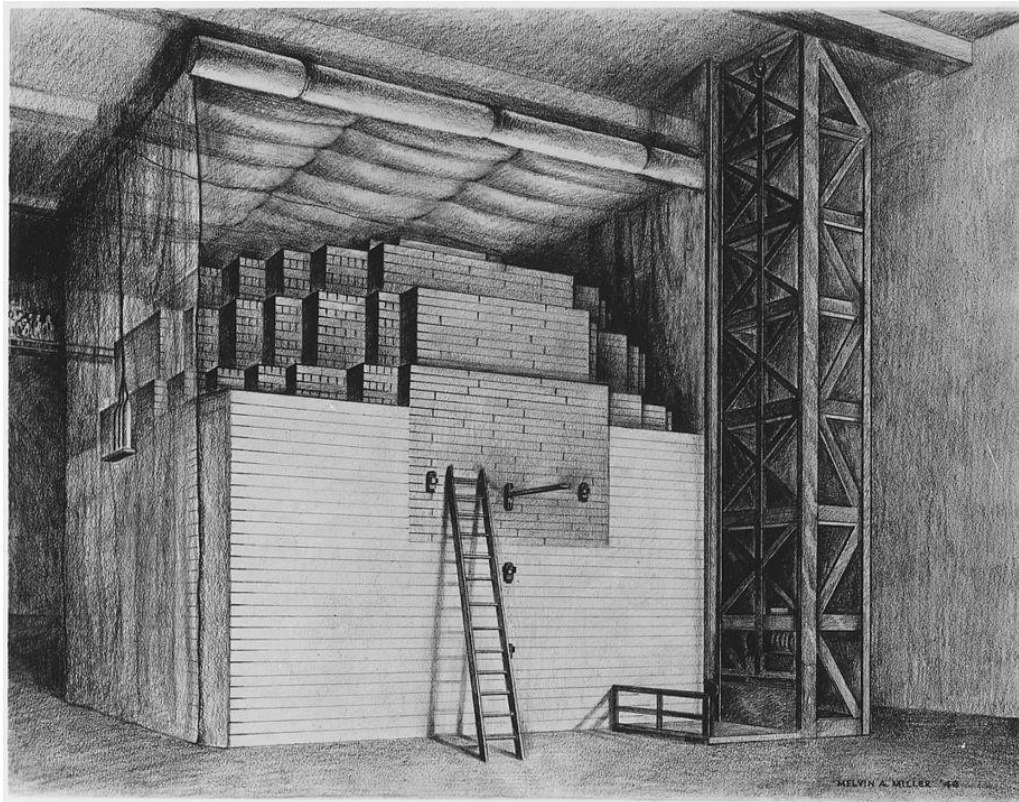
## 2.2. Razvoj nuklearne energije kroz povijest

Mnogi znanstvenici krajem 19. te tijekom prve polovice 20. stoljeća istraživali su pojave vezane uz radioaktivnost te su svojim otkrićima doprinijeli praktičnom iskorištavanju nuklearne energije. Antoine Henri Becquerel otkrio je radioaktivnost, tako što je utvrdio da iz kovine urana izlaze zrake koje djeluju na fotografski papir, ioniziraju zrak i izazivaju fluorescenciju. Njegovo otkriće zaintrigiralo je i druge znanstvenike koji su također došli do novih spoznaja u ovome području poput M. Curie, E. Rutherford, O. Hahn, F. Strassmann, L. Szilard, E. Fermi i dr. Velik napredak u istraživanju nuklearne energije postigli su O. Hahn i F. Strassmann koji su 1938. godine otkrili dotad nepoznat način razbijanja atoma. Naime, bombardirajući izotop urana  ${}_{92}\text{U}^{235}$  sporim neutronima, kao produkt te nuklearne reakcije dobili su rascjep uranove jezgre na dva približno jednaka dijela te uz to još nekoliko neutrona. Ovakvo cijepanje jezgre

nazvano je fisija. Ovo otkriće imalo je izrazito velik značaj iz razloga što je utvrđeno kako se fisijom oslobađa mnogo veća količina energije nego bilo kojom dotad poznatom nuklearnom reakcijom (oko 200 MeV). Količina oslobođene energije fisijom daleko je veća i u odnosu na energiju dobivenu kemijskim reakcijama.

Važna karakteristika, ukoliko se radi o fisiji urana  ${}_{92}\text{U}^{235}$  jest ta da fisiju mogu izazvati samo spori neutroni. Neutron je električki neutralan te iz tog razloga lako prodire u jezgru urana i ne odbija se uslijed velikog pozitivnog naboja jezgre urana. Razlog zašto neutron mora biti spor leži u tome da je poželjno da se neutron što duže zadrži u jezgri kako bi u njoj izazvao željene promjene. Kako je već rečeno, osim izrazito velikih količina energije koje se oslobađaju fisijom produkt takve reakcije redovito su i novi neutroni kojima je moguće postići daljnje fisije na preostalim jezgrama. Takva pojava kod koje neutroni nastali fisijom izazivaju drugu fisiju naziva se lančana reakcija. Međutim, prilikom lančane reakcije javlja se i jedna poteškoća. Fisijom nastali neutroni su brzi, a kako fisiju mogu izazvati isključivo spori neutroni, nastali neutroni moraju se na neki način usporiti. Neutrone je moguće usporiti ukoliko ih se propusti kroz tvari sagrađenih iz atoma s malom atomskom masom, koji uz to nemaju sposobnost apsorpiranja neutrona. Eksperimentalno je utvrđeno kako su najpovoljniji usporivači neutrona teška voda ( $\text{D}_2\text{O}$ ) te čisti grafit (C). Ti usporivači neutrona nazivaju se moderatori [2].

Uređaji kojima se nuklearna energija dobiva reguliranom fisijom zovu se reaktori, a prvi takav uređaj konstruirao je Enrico Fermi 1942. godine na sveučilištu u Chicagu. Reaktor je bio izgrađen od 45 000 blokova čistog grafita koji se koristio kao moderator, a kao gorivo se koristio uranov oksid i prirodni uran. Također su korištene kontrolne šipke izrađene od kadmija kojima se regulirala lančana reakcija. Kadmij ima svojstvo da jako apsorbira neutrone, te na taj način preostaje manje neutrona koji bi izazvali fisiju urana. Izvlačenjem kontrolnih šipki više neutrona pogađalo je jezgre urana čime se ubrzalo odvijanje lančane reakcije. Konstrukcija je bila visoka nešto više od 6 metara te je dobila naziv Chicago Pile-1 (CP-1). Navedena konstrukcija bila je izgrađena u sklopu Projekta Manhattan, a cilj njenog razvoja nije bio dobivanje električne energije, već stvaranje atomske bombe [3].



*Slika 2.1. Reaktor Chicago Pile-1*

Iako su u početku nuklearni reaktori bili razvijani u vojne svrhe, nakon što je završio 2. Svjetski rat, u SAD-u je 1946. godine oformljena organizacija pod nazivom Atomic Energy Commission (AEC) koja je imala cilj promovirati korištenje nuklearne energije u miroljubive svrhe. AEC je odobrio projekt kojim je započela gradnja eksperimentalnog oplodnog reaktora u saveznoj državi Idaho. 1951. godine reaktor je pušten u rad te je to bio prvi reaktor kojim se proizvodila električna energija, a u početku je služio za napajanje četiri žarulje. Tijekom 1950-ih reaktori su bili građeni u eksperimentalne svrhe te je cilj bio dokazati da se nuklearna energija može koristiti za dobivanje električne energije i njeno korištenje u komercijalne svrhe [4]. U godinama nakon završetka 2. Svjetskog rata gradnja grafitnih reaktora (sličnih CP-1) dijelom je iz SAD-a prenesena u Europu, U Englesku i Francusku. U tim zemljama reaktori su građeni prvenstveno za potrebe vojne industrije, odnosno za proizvodnju plutonija. Iako se toplinska energija proizvedena u prvim grafitnim reaktorima u principu smatrala beskorisnim nusproizvodom, s vremenom su znanstvenici shvatili kako bi se otpadna toplina iz reaktora mogla koristiti u energetici. Reaktori razvijeni na toj ideji građeni su tijekom 1950-ih i 1960-ih u Francuskoj i Engleskoj. Kao gorivo su se koristile šipke metalnog urana, u oblozi od legure magnezija po čemu su ti reaktori dobili ime Magnox reaktori. Ti reaktori bili su hladjeni

ugljkovim dioksidom, a prva izgrađena nuklearna elektrana tog tipa bila je NE Calder Hall, snage 240 MW [5].

1954. godine izgrađena je prva nuklearna podmornica, imena Nautilus. Podmornica je bila dugačka 91,4 m i široka 8,5 m dok joj je masa iznosila 3180 t. Nuklearni reaktor služio je za pokretanje dvije turbine koje su imale ukupnu snagu od 11 MW, a brzina koju je podmornica mogla ostvariti pod vodom iznosila je 20 čv. Nautilus je 1958. godine prešao put od Point Barrow-a (Aljaska) do Grenlandskog more čime je postala prva podmornica koja je u potpunosti prošla ispod Sjevernog pola [6].

U Sovjetskom Savezu također se mnogo ulagalo u istraživanja vezana uz nuklearnu energiju i usavršavanje postojećih dizajna reaktora tijekom 20. stoljeća. Tako je 1954. godine u mjestu Obninsk, sa radom započeo prvi generator električne energije na nuklearni pogon. Reaktor pod nazivom Atom Mirny, bio je hlađen vodom, a kao moderator korišten je ugljik. Kapacitet za proizvodnju električne energije iznosio je 5 MW<sub>e</sub> [7]. Prva nuklearna elektrana koja je proizvodila električnu energiju za komercijalnu upotrebu na području SAD-a bila je izgrađena u Shippingportu (Pennsylvania), a s radom je započela 1957. godine [4]. Prvi komercijalni tlakovodni reaktor izgrađen je od strane američke tvrtke Westinghouse 1960. godine, a njegova snaga iznosila je 250 MW<sub>e</sub>. Istovremeno, druga američka tvrtka General Electrics razvila je drugi tip reaktora, reaktor s kipućom vodom. Reaktor pod nazivom Dresden-1 započeo je sa radom također 1960. te mu je snaga iznosila 250 MW<sub>e</sub>.

Tijekom 60-ih i 70-ih godina prošlog stoljeća nastavilo se sa razvojem nuklearnih reaktora i to pretežito tlakovodnih te reaktora sa kipućom vodom. Unatoč tome, 1962. godine razvijen je tzv. CANDU reaktor. Ovaj tip reaktora pogodan je iz razloga što može kao gorivo koristiti prirodni uran. S druge strane, kako bi se mogao koristiti prirodni uran, kao moderator te kao rashladno sredstvo koristila se teška voda (D<sub>2</sub>O). Iako su se na ovaj način postigle uštede u potrošnji goriva nedostatak je bio taj što je proizvodnja teške vode bila relativno skupa. Prvi reaktor ovog tipa razvijen je u Kanadi, a kasnije su i druge zemlje poput Kine, Južne Koreje i Argentine razvijale i gradile CANDU reaktore. U Kazahstanu je 1972. godine pušten u pogon prvi reaktor koji je mogao koristiti brze neutrone, što mu je omogućilo rad bez upotrebe moderatora. Navedeni reaktor imao je snagu od 135 MW<sub>e</sub>, a služio je za dobivanje električne energije i topline potrebnih za desalinizaciju vode iz Kaspijskog jezera. U nadolazećem razdoblju došlo je do određene stagnacije i smanjenja u razvoju nuklearne energije. Tijekom 1980-ih mali broj reaktora bio je u izgradnji, a neki od postojećih prestajali su sa radom. Unatoč tome, udio proizvedene električne energije u svijetu iz nuklearne energije u to vrijeme iznosio je između

16 i 17 %. 1990-ih godina došlo je do ponovnog skoka u razvoju novih tipova nuklearnih reaktora. Novi tipovi reaktora imali su naprednije sustave sigurnosti te se radilo na tome da se dodatno smanje emisije radioaktivnog zračenja koje se otpuštaju u okoliš [7].

Općenito, nuklearne reaktore je moguće grupirati u četiri osnovne skupine, odnosno četiri generacije. Pojedine generacije reaktora razlikuju se s obzirom na vrijeme kada su pušteni u rad ili kada se očekuje početak njihovog rada, a razlikujemo:

Reaktori I generacije – razvijeni u razdoblju između 1950-ih i 1960-ih godina

- Većina reaktora iz ovog razdoblja više nisu u funkciji

Reaktori II generacije – reaktori izgrađeni do 1990-ih godina

- Reaktori tipa: PWR, BWR, CANDU, AGR, RBMK, VVER

- Većina reaktora koji su danas u funkciji

- Originalni predviđeni životni vijek im je između 30 i 40 godina, mogućnost rada i do 60 godina

Reaktori III generacije – povećane sigurnosne mjere i iskorištenje goriva te veća toplinska iskoristivost u odnosu na rektore II generacije, standardiziran dizajn

- Reaktori koji su u funkciji ili fazi izgradnje

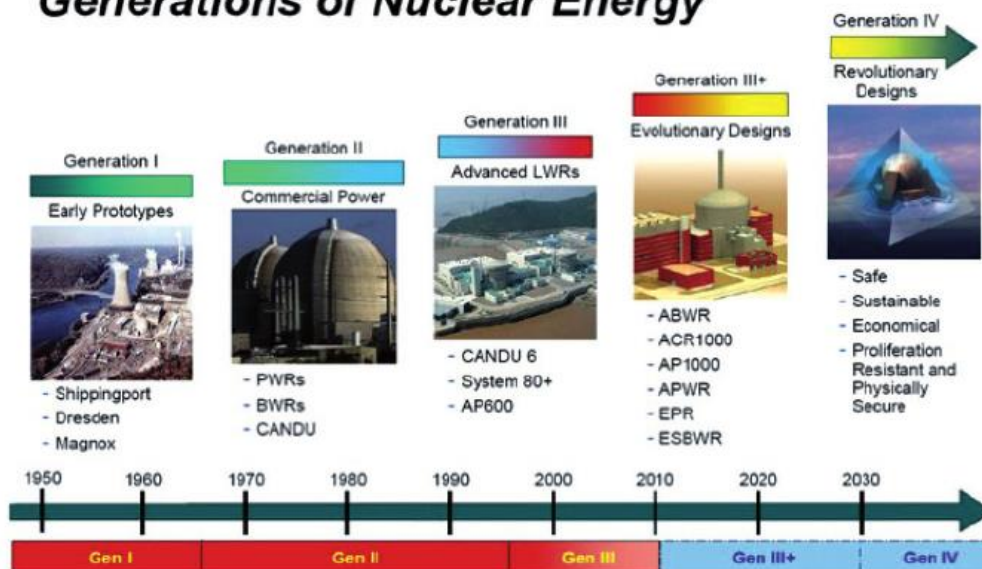
Reaktori IV generacije – reaktori koji su još u fazi razvoja

- Tipovi reaktora: GFR, LFR, MSR, SCWR, SFR, VHTR

- Izgradnja prototipova predviđena za 2020. godinu

- Komercijalna upotreba od 2030. godine

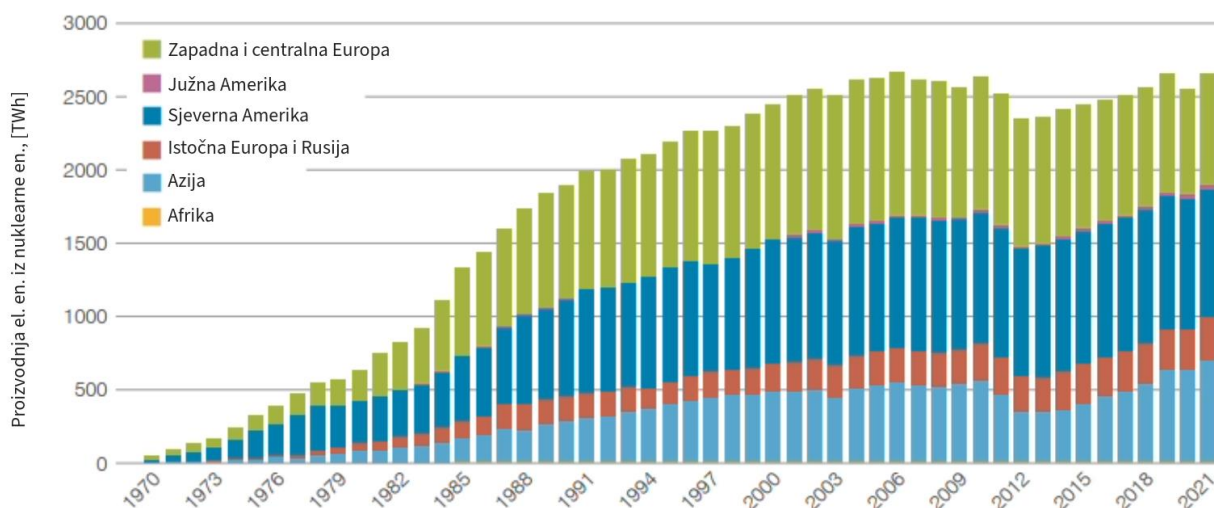
## Generations of Nuclear Energy



Slika 2.2. Pregled različitih generacija nuklearnih reaktora [8]

### 2.3. Nuklearna energetika danas

Nuklearna energija predstavlja važan dio u današnjem energetskom sektoru. Svakim danom potrebe za energijom u svijetu sve su veće. U takvim uvjetima mnoge vlade uvidjele su značaj nuklearne energije, kojom se energetska mreža čini sigurnijom i stabilnijom. Uz to, u prilog korištenju nuklearne energije ide i činjenica da su nuklearne elektrane gotovo CO<sub>2</sub> neutralne. Proizvodnja električne energije u nuklearnim elektranama nakon 2012. godine gotovo je u stalnom porastu uz izuzetak u 2020. godini. 2021. godine količina proizvedene električne energije u svijetu iz nuklearne energije dosegla je treću po redu najvišu vrijednost u povijesti, u iznosu od 2653 TWh [9]. Navedeni trend vidljiv je i sa slike 2.3.



Slika 2.3. Proizvodnja električne energije iz nuklearne energije u različitim dijelovima svijeta [9]



U 2021. godini područja u kojima se povećala proizvodnja električne energije iz nuklearne energije bila su Azija, Afrika, Južna Amerika, istočna Europa i Rusija. S druge strane na području zapadne Europe i Sjeverne Amerike obustavlja se rad mnogih reaktora te u tim područjima vlada padajući trend. Ukupan broj reaktora koji su bili u funkciji 2021. godine iznosio je 436, ukupne snage 370 GW<sub>e</sub> [9]. Većina današnjih reaktora su tlakovodni reaktori, koji čine oko 70 % od ukupnog broja reaktora u funkciji. Drugi po redu po brojnosti su kipući reaktori dok je broj ostalih izvedba znatno manji. Udio pojedinih izvedbi u ukupnom broju reaktora vidljiv je iz tablice 2.1.

*Tablica 2.1. Broj različitih tipova reaktora u svijetu [9]*

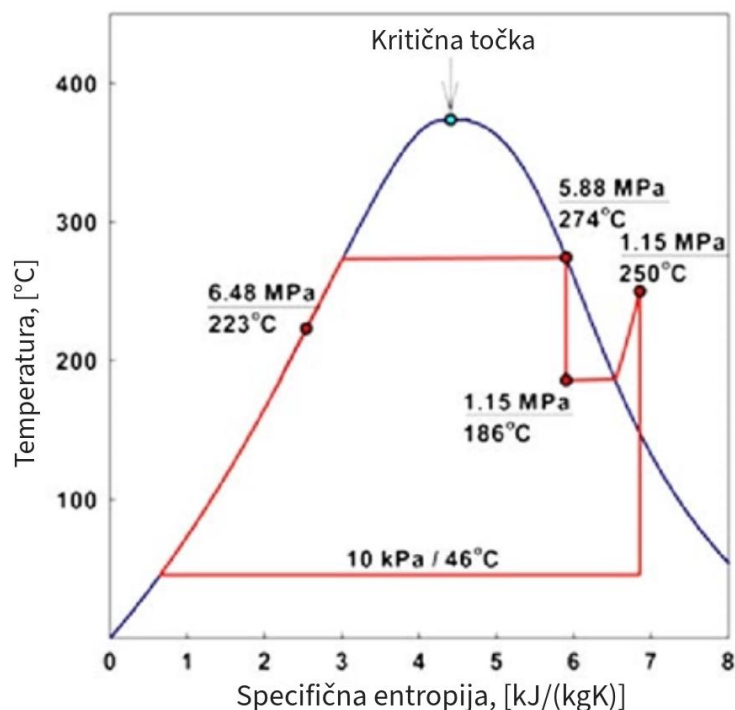
	Afrika	Azija	Istočna Europa i Rusija	Sjeverna Amerika	Južna Amerika	Zapadna i centralna Europa	Ukupno
BWR		20		33		8	61
FNR			2				2
GCR						11	11
HTGR		1					1
LWGR			11				11
PHWR		24		19	3	2	48
PWR		99	40	61	2	98	302
Ukupno	2	144	53	113	5	119	436

Japan je jedna od država u kojoj se očekuje daljnji porast u korištenju nuklearne energije, no nakon nesreće u Fukushima 2011. godine mnogi reaktori čekaju na odobrenje za ponovnim početkom rada. Ukupan broj reaktora koji su 2021. bili u izgradnji u svijetu, iznosio je 53. Većina reaktora koji su u fazi izgradnje nalaze se u Kini i Indiji, a većina ih je tipa PWR. Iste godine u svijetu je obustavljen rad sve ukupno 10 reaktora od čega su se 3 nalazila u Njemačkoj. Time je Njemačka u potpunosti uklonila nuklearnu energiju iz svoje mreže za proizvodnju električne energije [9]. S druge strane 2023. godine u Finskoj je u rad pušten trenutno najveći reaktor u Europi te treći po veličini u svijetu. Riječ je o nuklearnoj elektrani izgrađenoj na otoku Olkiluoto u kojoj se nalaze dvije jedinice s BWR tipom reaktora svaki snage 890 MW te treća

jedinica s EPR tipom reaktora snage 1600 MW [10]. Većina reaktora koji su danas u izgradnji započeli su sa konstrukcijom u proteklih 10 godina. Potrebno vrijeme za izgradnju reaktora, danas u prosjeku iznosi 88 tjedana, odnosno nešto više od 7 godina. Međutim neki od reaktora koji su nedavno pušteni u rad izgrađeni su i znatno brže. Tako je primjerice reaktor Tianwan 6 u Kini započeo sa radom 56 tjedana nakon početka gradnje, a reaktor Karachi 2 u Pakistanu nakon 67 tjedana [9].

## 2.4. Osnovni princip rada nuklearnih elektrana

Nuklearne elektrane su postrojenja u kojima se energija oslobođena fisijom nuklearnog goriva transformira u električnu energiju posredstvom toplinske energije proizvedene u nuklearnom reaktoru. Toplinska energija iskorištava se na gotovo identičan način kao i u termoelektranama na fosilna goriva. Toplinska energija se pomoću vodene pare Clausius-Rankine-ovim kružnim procesom pretvara u mehaničku energiju u turbini.



Slika 2.4. T-s dijagram parnog procesa za nuklearnu elektranu s VVER tipom reaktora [11]

Turbina služi za pokretanje električnog generatora u kojemu se mehanička energija pretvara u električnu. Osnovna razlika između nuklearnih i klasičnih termoelektrana jest u samome gorivu. Klasične elektrane kao gorivo koriste fosilna goriva (ugljen, prirodni plin itd.), dok nuklearne elektrane koriste nuklearno gorivo (najčešće uran). Sljedeća razlika je u mjestu gdje se energija goriva pretvara u toplinsku energiju. Kod klasičnih termoelektrana ta promjena događa se u ložištu, a u nuklearnim elektranama u nuklearnom reaktoru. Prema drugom zakonu

termodinamike poznato je da je stupanj iskoristivosti toplinskog procesa tim veći što je veća temperatura toplog spremnika. U slučaju nuklearnih elektrana temperatura toplog spremnika zapravo je prosječna temperatura rashladnog sredstva. Ta temperatura ograničena je mehaničkom čvrstoćom materijala iz kojih je izrađena zaštitna obloga gorivnih elemenata i maksimalnim dozvoljenim temperaturama goriva. Gubitak mehaničkih svojstava materijala nuklearnog goriva može dovesti do ispuštanja fisijskih produkata u rashladno sredstvo te posredno u okolinu. Iz te činjenice proizlazi i glavni ograničavajući faktor za temperaturu nuklearnog goriva i rashladnog sredstva u reaktoru, a to je sigurnost nuklearnog postrojenja i okoline. Temperatura toplog spremnika varira ovisno o vrsti nuklearne elektrane, odnosno o korištenom rashladnom sredstvu te o samom dizajnu nuklearne elektrane. Za većinu nuklearnih elektrane te temperature iznose između 280 i 330 °C. U klasičnim termoelektranama se te temperature uobičajeno kreću između 500 i 600 °C iz čega se može zaključiti kako nuklearne elektrane imaju manju toplinsku iskoristivost u odnosu na klasične termoelektrane [5]. U nastavku će detaljnije biti opisane dvije najzastupljenije izvedbe reaktora (tlakovodni i kipući) i princip njihovog rada.

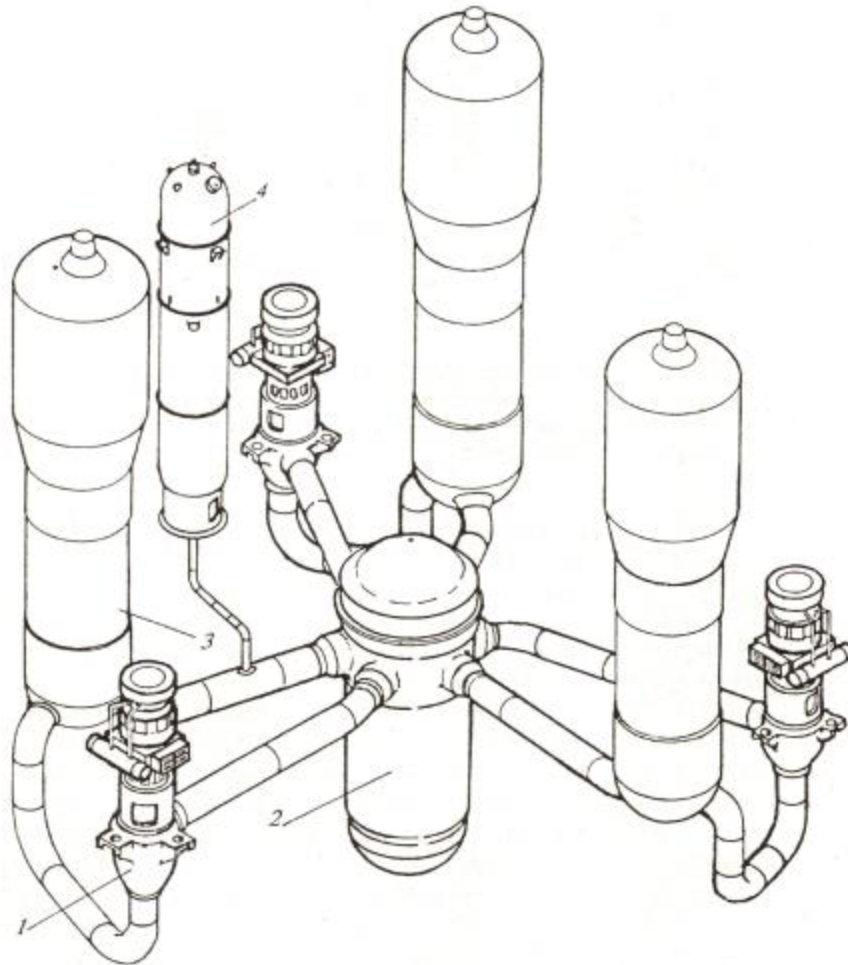
#### 2.4.1. Tlakovodni reaktor

Tlakovodni reaktori upotrebljavaju običnu vodu za usporavanje neutrona te kao rashladno sredstvo. Izvedba nuklearne elektrane s tlakovodnim reaktorom zasniva se na principu dvaju odvojenih rashladnih krugova: rashladnog kruga reaktora koji se naziva primarni krug te rashladnog kruga parogeneratora poznatog kao sekundarni krug. Nuklearne elektrane se u osnovi razlikuju po izvedbi reaktorskog postrojenja, dakle po izvedbi primarnog rashladnog kruga. Sekundarni rashladni krug, iako i on može imati neke specifičnosti s obzirom na klasične termoelektrane, u biti se od njih ne razlikuje. Zbog toga se sekundarni krug često označava kao klasični ili konvencionalni dio nuklearne elektrane.

Izvor toplinske energije u primarnom krugu elektrane je nuklearni reaktor. Reaktor zagrijava rashladnu vodu koja cirkulira u zatvorenoj petlji sastavljenoj od parogeneratora, primarne pumpe, tlačnika i primarnih cjevovoda. Pravilno funkcioniranje postrojenja, uvjetovano je pothlađenjem rashladne vode reaktora, tj. da ona ne kipi.

Veličina jezgre reaktora i broj gorivnih elemenata u njoj ovise o snazi. Radi što višeg stupnja standardizacije komponenata opreme primarnog rashladnog kruga, nuklearne elektrane tog tipa izvode se samo u određenim područjima snaga u zapadnim zemljama to su snage u području između 600 i 1500 MW. Na taj je način moguće da se reaktori hlade s više rashladnih krugova

od kojih svaki odgovara polovici, trećini ili četvrtini snage reaktora. Komponente opreme (parogeneratori, pumpe) u svakom rashladnom krugu su iste. Budući da su rashladni krugovi hidraulički povezani, potreban je samo jedan regulator tlaka (tlačnik) za sve rashladne krugove.



*Slika 2.5. Prostorni raspored osnovnih komponenti reaktorskog postrojenja s tlakovodnim reaktorom (PWR) i tri rashladna kruga: 1 - cirkulacijska pumpa, 2 - nuklearni reaktor, 3 - parogenerator, 4 – tlačnik [5]*

Komponente primarnog kruga smještaju se u veliku zaštitnu posudu koja se naziva kontejnment. Zaštitna posuda je projektirana za tlak koji bi u njoj nastao pri većem lomu komponente primarnoga kruga (redovito se pretpostavlja lom jednog od primarnih cjevovoda). U takvu bi naime slučaju naglo pao tlak u primarnom krugu i voda bi isparila. Para bi, zajedno s dijelom radioaktivnih nuklida koji su sadržani u primarnom krugu, ispunila zaštitnu posudu i povisila u njoj tlak na 0,3 do 0,4 MPa. To je upravo tlak za koji je posuda projektirana. Zaštita okoline i u takvom bi slučaju bila osigurana. Potrebno je spomenuti da se opisani kvar tretira kao najveći projektom predviđeni kvar (u literaturi označen kao Design Basic Accident, DBA).

Sekundarni krug nuklearne elektrane u osnovi sliči postrojenju klasične termoelektrane, kod koje parogenerator ima funkciju parnog kotla. Postoje međutim i neke specifičnosti. Kada je riječ o tlakovodnom reaktoru, one se ponajprije ogledaju u radu turbinskog ciklusa za zasićenom parom relativno niskog tlaka (6 do 7 MPa). Parametri pare uvjetovani su temperaturom primarnoga kruga i težnjom da se uz takvu temperaturu postigne što bolji stupanj djelovanja turbinskog ciklusa. Zasićena para tijekom ekspanzije u turbini doseže vlažnost koja bi mogla znatno erodirati lopatice izlaznog dijela turbine. Zbog toga se nakon djelomične ekspanzije pare u visokotlačnom dijelu turbine ona odvodi u separatore i pregrijače pare, a tek nakon toga vraća u niskotlačni dio turbine [5].

#### 2.4.2. Kipući reaktor

Kipući reaktor je tlakovodni reaktor u kojemu, za razliku od tlakovodnog reaktora, rashladna voda u jezgri (koja je ujedno i moderator) kipi. Kipljenje vode u jezgri reaktora uvjetuje primjenu niza tehničkih rješenja u reaktorskom postrojenju koje se znatno razlikuju od rješenja kod tlakovodnih reaktora.

Najbitnija razlika prema tlakovodnim reaktorima je proizvodnja vodene pare u samoj jezgri reaktora, što čini suvišnim parogeneratore jer sam reaktor preuzima njihovu ulogu. Para iz reaktora može se izravno slati u turbinu. Međutim izravan ulaz pare iz reaktora u turbinu sa sobom nosi i određene probleme. Navedeni princip onemogućuje upotrebu tekućeg apsorbera za kontrolu reaktivnosti u normalnome radu, već tu funkciju preuzimaju regulacijske šipke. Izravni ulaz pare iz reaktora u turbinu nije povoljan i zato što u pari postoji uvijek određena radioaktivnost (aerosoli i plinovi) koja potječe iz fisijskih proizvoda zbog oštećenih gorivnih elemenata (statistički uvijek treba računati s 0,1 % oštećenih gorivnih šipki). Aerosoli i druge krute čestice talože se u turbini i povećavaju njenu radioaktivnost (posebno u visokotlačnom dijelu), pa kod tekućeg održavanja i remonta treba turbinu kipućeg reaktora tretirati kao djelomično radioaktivnu komponentu.

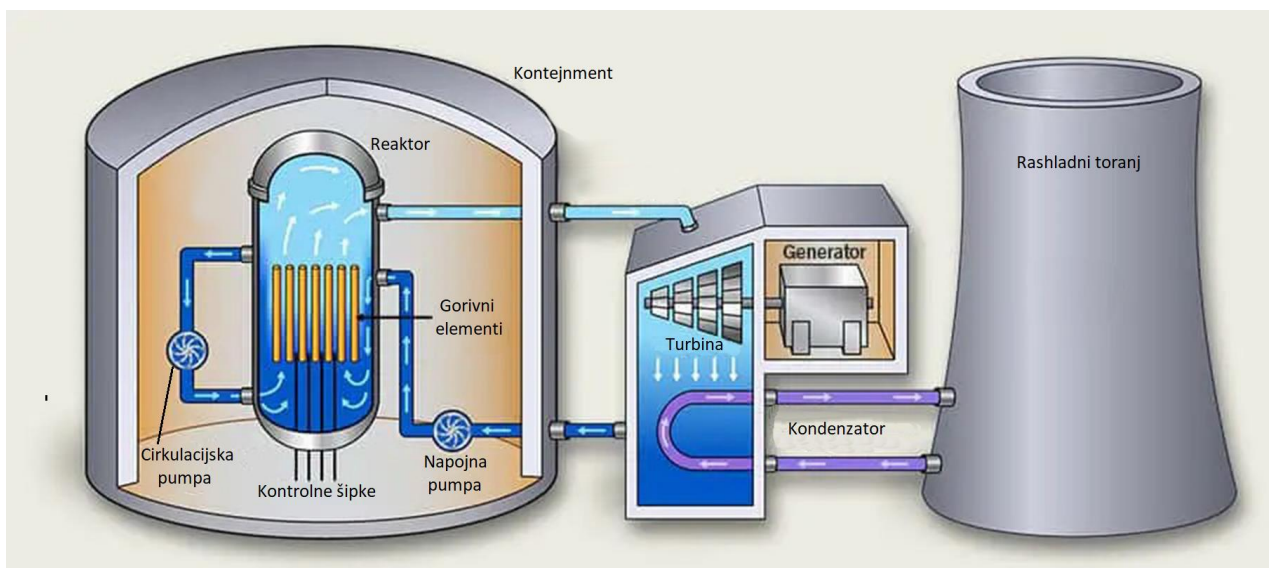
Reaktorsko postrojenje kipućeg reaktora je kompaktno jer funkciju cijeloga primarnoga kruga u postrojenju tlakovodnog reaktora preuzima reaktorska posuda i u nju ugrađeni uređaji. Reaktorska posuda kipućeg reaktora sadrži uređaje za separiranje vlage i sušenje pare i sustav za internu recirkulaciju rashladnog sredstva (mješavina vode i pare). Zbog toga mora biti mnogo većih dimenzija nego kod tlakovodnog reaktora. Nadalje, i jezgra reaktora je za danu snagu veća jer je gustoća snage u njoj manja. Apsorpcijski štapovi (kod tlakovodnog reaktora djelotvorni se dijelovi regulacijskog sustava sastoje od snopova apsorpcijskih šipki, kod

kipućeg reaktora tu funkciju obavljaju masivni štapovi križnog presjeka) ulaze u posudu odozdo (jer je gornji dio reaktorske posude zauzet separatorima vlage i sušionicima pare). Takav smještaj onemogućuje korištenje gravitacije za sigurnosno gašenje reaktora, već se u tu svrhu mora upotrijebiti drugi pasivni način za njihov pogon (plin pod tlakom).

Tlak u reaktorskoj posudi odgovara tlaku pare i mnogo je niži nego u tlakovodnom reaktoru (tlak pare pred turbinom u oba postrojenja se bitno ne razlikuje). Tlak pare u kipućem reaktoru je 6 do 7 MPa, a temperatura napojne vode oko 490 K. Povoljna je okolnost kipućeg reaktora što, u usporedbi s tlakovodnim reaktorom, osim mnogo manjeg tlaka rashladnog fluida ima veću razliku entalpije između ulaznog i izlaznog fluida iz jezgre. Veća razlika entalpije rashladnog fluida dopušta utrošak manje snage pumpanja fluida uz istu snagu reaktora.

Kod svih postojećih kipućih reaktora fluid cirkulira u jezgri prisilnom cirkulacijom. Time se znatno intenzivira odvođenje toplinske energije iz jezgre reaktora. Cirkulacija fluida kroz jezgru može se održavati korištenjem vodenih sisaljki napajanih vanjskim recirkulacijskim krugom. Tvrtke koje su gradile kipuće reaktore na području Europe usvojile su drugačiji sustav koji je usvojen kod naprednih izvedbi. Umjesto sisaljki korištene su interne cirkulacijske pumpe, čime su eliminirani vanjski recirkulacijski krugovi. Vanjski recirkulacijski krugovi su nepovoljni jer povećavaju vjerojatnost kvarova zbog lomova u cjevovodu u zaštitnoj posudi [5].

Schema postrojenja s kipućim reaktorom prikazana je na slici 2.6.



Slika 2.6. Pojednostavljena shema postrojenja sa kipućim reaktorom [12]

### 3. NUKLEARNI GORIVNI CIKLUS

Pod nuklearnim gorivnim ciklusom podrazumijevaju se sve aktivnosti koje se provode od iskapanja rude urana iz zemlje sve do vađenja istrošenog goriva iz reaktora i njegovog odlaganja.

#### 3.1. Uran

Uran je radioaktivni kemijski element srebrnkaste boje, a na zemlji ga pronalazimo u obliku minerala povezanog s dugim kemijskim elementima u zemlji, stijenama i vodama. Najvažniji uranov mineral je uraninit ( $UO_2$ ), a nalazi se i u mineralima kao što su karnotit, torijanit i torit. Od svih kemijskih elemenata koje je moguće pronaći na Zemlji, upravo je uran element koji ima najveću atomsku masu. Pojavljuje se u obliku tri izotopa, a to su uran-238 koji ima izotopsku učestalost od 99,27 %, slijedi uran-235 s učestalošću od 0,71 % i uran-234 čija je učestalost najmanja. S obzirom na zastupljenost u Zemljinoj kori uran se smatra obilnim elementom. Primjerice ima ga više nego srebra, joda ili žive, no konkretne količine u rudi variraju s obzirom na geografski položaj nalazišta. Neke od država sa najvećim zalihama urana su Australija, Južnoafrička Republika, Kazahstan, Kanada, Rusija i Namibija [13].

#### 3.2. Rudarenje

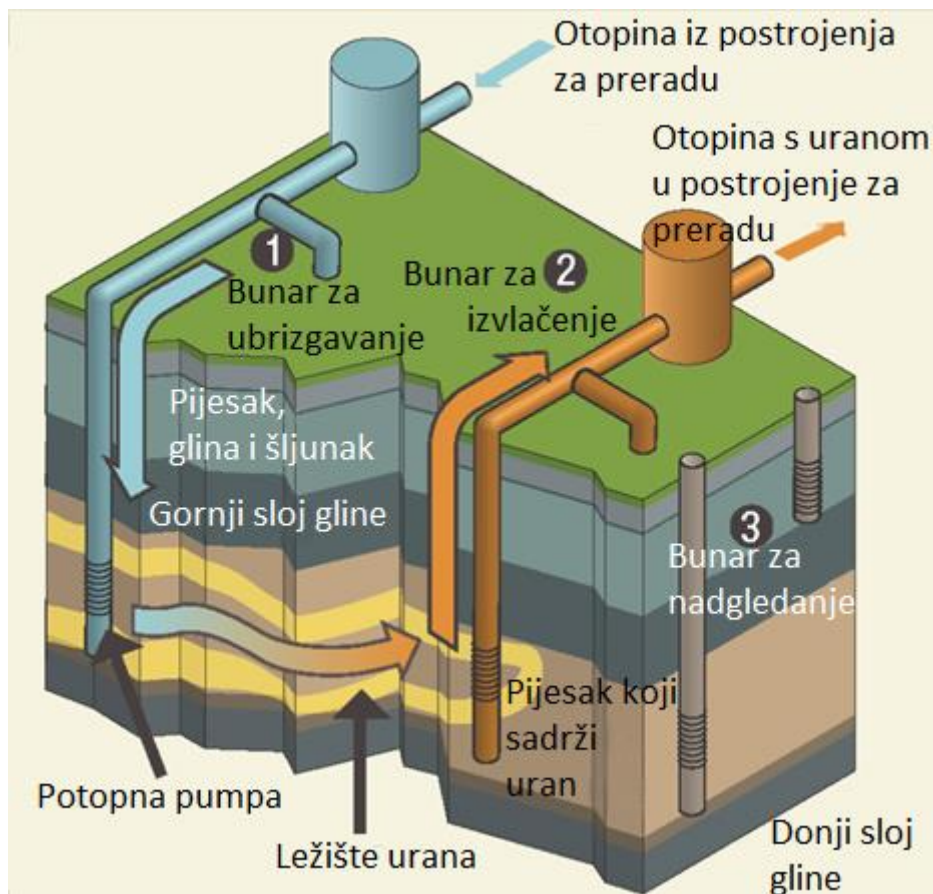
Postoje tri metode kojima je moguće vaditi rudu urana, a to su površinski iskop, dubinski iskop te in-situ ispiranje. Odluka o tome koja metoda će se koristiti ovisi o prirodi nalazišta te sigurnosnim i ekonomskim razlozima. Većina nalazišta iz kojih se dobiva rudača urana, imaju sadržaj urana u rudi od oko 0,1 % premda postoje i nalazišta sa daleko većim udjelima.

Površinski (otvoreni) iskopi karakteristični su za područja u kojima se nalazišta nalaze bliže površini. Količina materijala koju je potrebno ukloniti korištenjem ove metode može biti iznimno velika. Kod površinskog iskopa treba voditi računa o nagibu „zidova“ koji se stvaraju kako ne bi došlo do urušavanja. Utjecaj ovakvog načina dobivanja urana na okoliš je značajan, no s obzirom da je jeftiniji u odnosu na druge metode i dalje se često koristi.

Dubinski ili podzemni iskopi druga su metoda za dobivanje rude urana. Karakteristika je ove metode da je potrebno ukloniti manje materijala kako bi se došlo do rude. Međutim prilikom korištenja ove metode potrebno je provesti opsežnije pripreme nego u slučaju površinskog iskopa kako bi se zadovoljile sigurnosne mjere. Prije svega potrebno je osigurati odgovarajući sustav ventilacije. Također potrebno je izgraditi pristupna okna i tunele. Dubinski iskopi

karakteristični su za dubine veće od 120 m, a na nekim mjestima ruda se vadi sa dubina i do 600 m.

Još jedna od metoda koje se danas sve češće koriste pri rudarenju je in-situ ispiranje. Ovu metodu moguće je koristiti kod nalazišta koja sadrže uran među poroznim materijalom kao što su pijesak ili šljunak. Ovom metodom uran se otapa te se pumpama izvlači na površinu. Kao otapalo se najčešće koristi sumporna kiselina. Ukoliko nalazište sadrži veću koncentraciju materijala koji bi apsorbirao kiselinu kao što je vapnenac tada je potrebno koristiti lužinu kao otapalo. In-situ ispiranje danas je najčešće korištena metoda rudarenja, a njena prednost je u tome što ima najmanji utjecaj na okoliš od svih metoda. Primjenjuje se u većini nalazišta u Kazahstanu, Uzbekistanu i SAD-u. Ovu metodu svakako ne treba koristiti na mjestima gdje bi se mogla ugroziti opskrba pitkom vodom. Ovisno o korištenim otopinama uran na površinu najčešće izlazi u obliku uranil sulfata ( $UO_2(SO_4)_3$ ) ili u obliku uranil karbonata ( $UO_2(CO_3)_3$ ).



Slika 3.1. In-situ ispiranje

S obzirom na trenutno identificirana nalazišta i poznate dostupne količine urana, procijenjena cijena do koje se isplati iskorištavati određeno nalazište iznosi 130 \$/kg izvađenog urana. Trenutna potrebe za uranom u svijetu iznose oko 67 000 t godišnje, a najveći dio koristi se za



potrebe dobivanja električne energije. Ukupne rezerve urana u svijetu iznose oko 6 Mt iz čega proizlazi da bi ta količina urana na temelju trenutne potrošnje trebala biti dostatna za otprilike 90 godine. Međutim, uz efikasnije iskorištavanje goriva i daljnja istraživanja izgledno je da će se uran kao nuklearno gorivo koristiti i duže od toga. Pozitivna stavka za vađenje urana je i činjenica da je relativno lako utvrditi gdje se nalazišta urana nalaze. Nalazište urana moguće je locirati sa površine Zemlje na temelju zračenja kojeg imaju produkti nastali prirodnim raspadom urana [13].

### 3.3. Mljevenje i obrada rude

Sljedeći postupak kojeg je potrebno provesti za dobivanje nuklearnog goriva je mljevenje rudače u mlinovima. Ova postrojenja najčešće su smještena nedaleko od samih nalazišta. Iskapanu rudu drobi se i melje u mlinovima te ju se zatim odvodi u spremnike sa sumpornom kiselinom kako bi se u njoj otopili uranovi oksidi. Postupak mljevenja provodi se u slučaju otvorenog i dubinskog iskopa, a nakon što se usitnjena ruda pomiješa sa sumpornom kiselinom daljnji postupak obrade isti je i u slučaju in-situ ispiranja. Iz otopine se filtrira nekorisno kamenje, a preostala otopina prolazi daljnju kemijsku obradu i suši se. Proizvod koji se dobije je uranijev oksid ( $U_3O_8$ ) u krutom stanju. Navedeni produkt najčešće je žute boje na temelju čega je i dobio ime žuti kolač (engl. yellowcake). Slijedi pakiranje u čelične posude u kojima se  $U_3O_8$  transportira na daljnju obradu [14].



*Slika 3.2. Žuti kolač [15]*

### 3.4. Konverzija

Ukoliko se kao nuklearno gorivo koristi obogaćeni uran, žuti kolač potrebno je pripremiti za proces obogaćenja. Kako bi se mogao izvršiti postupak obogaćenja urana koncentrat urana potrebno je pretvoriti u plinoviti spoj, a taj postupak naziva se konverzija. Provodi se na način da se pročišćeni koncentrat urana dovede u kemijsku reakciju s fluorovodičnom kiselinom (HF) čime se dobije spoj  $UF_4$ . Daljnjim tretiranjem tog spoja fluorom dobiva se plinoviti uranov heksafluorid  $UF_6$ . Eventualne nečistoće koje se mogu pojaviti u ovom spoju moguće je ukloniti postupkom frakcijske destilacije [5].

### 3.5. Obogaćenje

Obogaćenje urana je postupak u kojemu se povećava sadržaj uranovog izotopa  $^{235}U$  u prirodnom uranu. Prirodni uran sadrži 0,71% izotopa  $^{235}U$ , a većina reaktora koji su danas u upotrebi koriste obogaćeni uran u kojem je sadržaj izotopa  $^{235}U$  između 3 i 5 %. S obzirom na to da izotopi  $^{235}U$  i  $^{238}U$  imaju identična kemijska svojstva, za obogaćenje se koriste uglavnom fizikalni postupci. Razlika u fizikalnim svojstvima ogleda se u razlici masa dvaju izotopa. Razlika u masi postoji iz razloga što izotop  $^{238}U$  sadrži 3 neutrona manje u jezgri nego li  $^{235}U$  što čini razliku u masama od 1,27%. s obzirom da se u postupcima obogaćenja koristi uranov heksafluorid razlika u masi je još i manja, oko 0,85%.

Postupci koji se mogu koristiti su: metoda plinske difuzije, metoda plinske centrifuge, laserska metoda, elektromagnetska metoda, aerodinamički procesi [17].

#### 3.5.1. Metoda plinske difuzije

Osnova za odvijanje procesa jest razlika u masi molekula. Metoda se odvija na način da se plinoviti  $UF_6$  provodi pod pritiskom kroz niz poroznih membrana. Obzirom da su molekule  $^{235}U$  lakše od molekula  $^{238}U$ , kreću se većom brzinom te imaju veće izgleda da prođu kroz membranu. Uranov heksafluorid koji prođe kroz membranu blago je obogaćen dok se u plinu koji nije prošao kroz membranu koncentracija  $^{235}U$  smanjuje. Takav proces ponavlja se u više difuzijskih stupnjeva odnosno kaskada. Svaka kaskada sastoji se od kompresora, difuzora i izmjenjivača topline koji se koristi za odvođenje topline nastale kompresijom. Kako bi se dobio plin koji sadrži 3 do 4 % obogaćenog  $^{235}U$  potrebno je plin provesti kroz otprilike 1400 kaskada. Iako je obogaćenje po jednom stupnju veoma malo, prednost ove metode je da se mogu obraditi velike količine plina. Rad utrošen za separaciju urana naziva se rad separacije, pri čemu se taj rad prvenstveno odnosi na rad utrošen za cirkulaciju plinske smjese. Rad separacije izražava se

po jedinici mase obogaćenog urana kao jedinica separacijskog rada (SWU) koji ovisi o konačnom obogaćenju urana, količini utrošenog prirodnog urana i sadržaju  $^{235}\text{U}$  u osiromašenom uranu. Separacijski rad je proporcionalan cijeni obogaćenja urana. Prema tome cijena obogaćenja određuje se temeljem cijene separacijskog rada te broja utrošenih jedinica separacijskog rada. Kako bi se provela ova metoda potrebne su velike količine energije zbog čega se u novije vrijeme ova metoda sve rjeđe koristi.

### 3.5.2. Metoda plinske centrifuge

Ova metoda razvijena je 60-ih godina prošlog stoljeća, a u odnosu na metodu plinske difuzije mnogo je efikasnija obzirom da zahtijeva mnogo manje utrošenog rada. U radu se koristi plinoviti  $\text{UF}_6$ , a postupak se provodi na temelju razlike u masama izotopa urana. Struja plina injektira se u cijevi iz kojih je prethodno izvučen zrak. Cijevi su visoke oko 12 metara, a unutar njih nalazi se rotor visine 3 do 5 metara i promjera 40 do 50 cm koji se okreću brzinama vrtnje i do 70 000 okr./min. Time se postižu brzine na vanjskom obodu rotirajućih cilindara od 400 do 500 m/s koje su nužne za učinkovitu separaciju. Prilikom rotacije teže molekule izotopa  $^{238}\text{U}$  bivaju odvučene prema obodu pod djelovanjem centrifugalne sile. Molekule koje sadrže  $^{235}\text{U}$  ostaju bliže središtu odakle se odvođe u daljnje stupnjeve gdje se postupak ponavlja, a postotak  $^{235}\text{U}$  se postepeno povećava. Plin u kojemu je postotak  $^{235}\text{U}$  smanjen odvođi se u prethodni stupanj. U usporedbi s metodom plinske difuzije u plinskim centrifugama moguće je obraditi manju količinu plina po jednom stupnju, međutim sama učinkovitost separacije znatno je viša. Sustav se sastoji od velikog broja paralelno postavljenih centrifuga odnosno stupnjeva centrifuga koji se dalje organiziraju u kaskade, slično kao kod plinske difuzije. U usporedbi sa plinskom difuzijom potreban broj stupnjeva umjesto 1000 stupnjeva ili više, može iznositi tek 10 do 20. Jednom kada su centrifuge pokrenute nije ih moguće usporavati ili zaustavljati, a predviđeni vijek rada iznosi oko 25 godina. Većina postrojenja za obogaćenje urana koji su danas u funkciji koriste upravo metodu plinske centrifuge.

### 3.5.3. Laserska metoda

Laserska metoda još uvijek je u fazi razvoja, no u budućnosti bi ta metoda mogla prevladati i postati glavnim načinom za obogaćenje urana. Postoje dvije varijante ove metode, atomska i molekularna. Rad atomskog procesa zasniva se na principu foto-ionizacije. Za tu svrhu koriste laseri koji služe za ioniziranje atoma u plinu koji sadrži uran. Općenito, moguće je postići da se izbije elektron iz nekog atoma ukoliko se na njega usmjeri svjetlost određene frekvencije. Tako se laseri koji se koriste za ovu namjenu podese na frekvencije kojima se ionizira izotop  $^{235}\text{U}$ ,

ali ne i  $^{238}\text{U}$ . Pošto je izgubio jedan elektron  $^{235}\text{U}$  sada ima pozitivan naboj te ga je moguće odvojiti na ploči koja ima negativan naboj. Molekularni proces temelji se na postupku foto-disocijacije. Kada laseri pogode molekulu uranovog heksafluorida koja sadrži izotop  $^{235}\text{U}$  dolazi do njenog razdvajanja na krutinu  $\text{UF}_5$  i na  $\text{F}$  u plinovitom stanju. Ovime se omogućuje odvajanje ioniziranog  $\text{UF}_5$  od molekula  $\text{UF}_6$  koje sadrže izotop  $^{238}\text{U}$  na koje laser nije imao utjecaja. Molekularni proces bolje se uklapa u konvencionalni nuklearni ciklus. SILEX laser koristi se za potrebe ove metoda, a predviđeno obogaćenje koje bi se ostvarivalo iznosi do 8 %.

#### 3.5.4. Elektromagnetska metoda

Ioni urana-238 i urana-235 odvajaju se na temelju principa masene spektrometrije. Nakon što su molekule u kojima se uran nalazi ionizirane provode se kroz električno polje u kojemu se ubrzavaju. Zbog razlika u masi molekule će imati različite putanje unutar magnetskog polja zbog čega će biti moguće odvojiti željene molekule koje sadrže  $^{235}\text{U}$ . Za provođenje ovog procesa potrebne su iznimno velike količine energije.

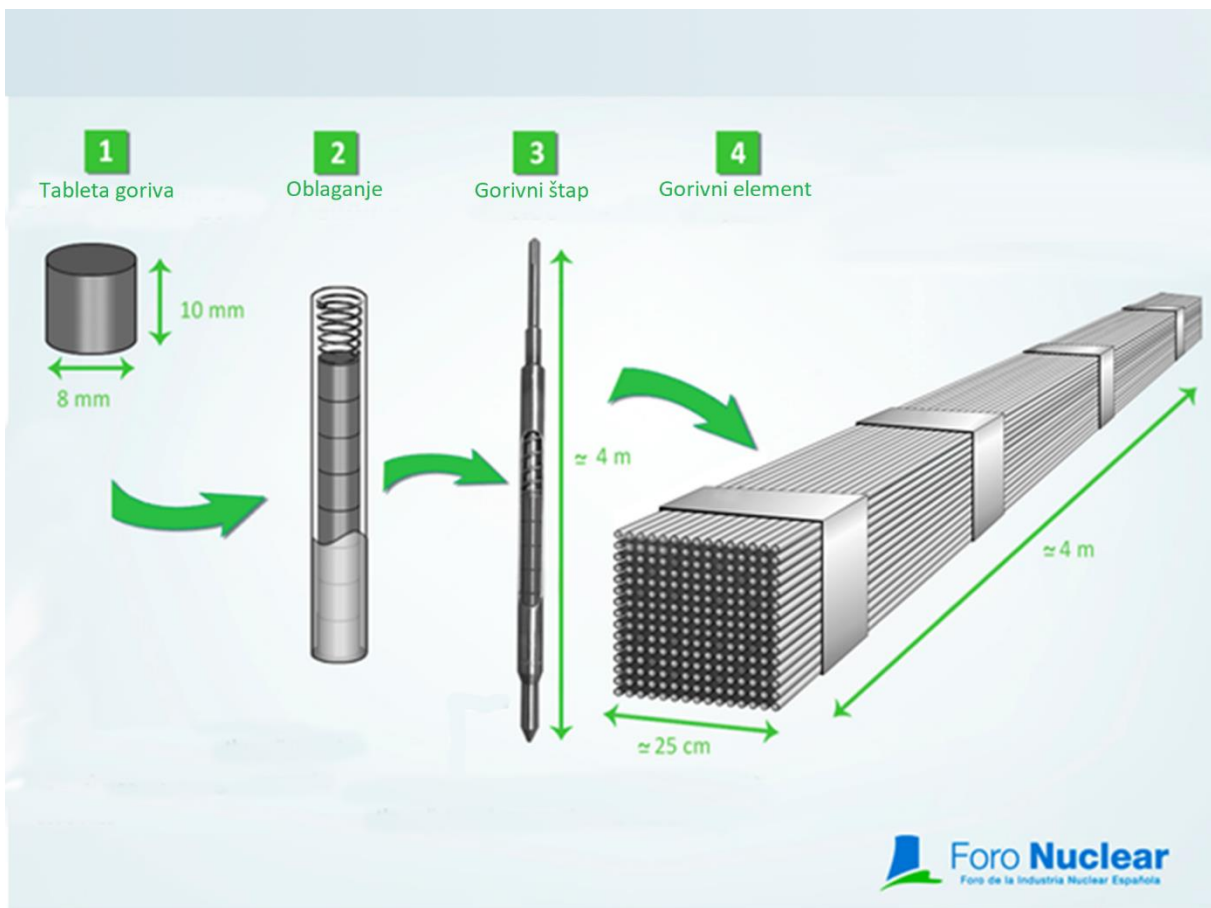
#### 3.5.5. Aerodinamički proces

Načelo temeljem kojega se odvajaju teže molekule  $\text{UF}_6$  od lakših slično je onome kod metode plinske difuzije. Struja plina  $\text{UF}_6$  provodi se velikom brzinom kroz mlaznicu malog promjera te se stvara razlika u tlaku. Lakše molekule mogu se izdvojiti bliže središtu dok će se one teže nalaziti uz rub mlaznice. Metoda zahtijeva velike količine energije te još ne postoji postrojenje koje koristi ovu metodu .

### 3.6. Proizvodnja goriva

Nakon obogaćenje plinoviti se  $\text{UF}_6$  prevodi u uranov dioksid  $\text{UO}_2$  u obliku praha. Za tu pretvorbu moguće je koristiti dva procesa, mokri i suhi. U suhom procesu  $\text{UF}_6$  se zagrijava i odvodi u dvostupanjski spremnik. Najprije se miješa sa parom prilikom čega nastaje krutina  $\text{UO}_2\text{F}_2$ , a nakon toga se dovodi u kemijsku reakciju sa vodikom koji na sebe veže fluor čime se dobiva čisti  $\text{UO}_2$ . Kod mokre metode  $\text{UF}_6$  se ubacuje u vodu. Naknadno se dodaje amonijak ili amonijev karbonat te se tako dobivena mješavina filtrira, suši i zagrijava. Produkt takvog postupka također je  $\text{UO}_2$ . Različiti aditivi mogu se dodavati praškastome  $\text{UO}_2$  kako bi se osigurala njegova željena svojstva. Također potrebno je osigurati da čestice praha budu jednake veličine. Ukoliko su ispunjeni prethodni zahtjevi  $\text{UO}_2$  se puni u kalupe te se pomoću preša oblikuje u tablete cilindričnog oblika. Tablete se zatim u pećima zagrijavaju na temperaturu od oko  $1750\text{ }^\circ\text{C}$  u reduciranoj atmosferi. Tablete se nakon toga obrađuju na potrebne dimenzije.

Za većinu reaktora koriste se tablete koje su nešto manje od 1 cm u promjeru, a dužina im iznosi oko 1 cm. Tableta takvih dimenzija ima otprilike jednak sadržaj energije kao i tona ugljena. Tablete se zatim oblažu zaštitnom košuljicom, koja se najčešće izrađuje iz cirkonija. Uloga zaštitne košuljice je sprječavanje erozijskog djelovanja rashladnog sredstva na gorivo, a njenom upotrebom također se smanjuje radioaktivnost u rashladnom sredstvu. Pored navedenog važno je da materijal zaštitne košuljice apsorbira što manje neutrona koji će reagirati sa nuklearnim gorivom. Tablete se slažu u gorivne štapove koji se dalje slažu u gorivne elemente. Štapovi sa  $UO_2$  gorivom pune se helijem pod tlakom nakon čega se zatvaraju zavarivanjem. Dodatan prostor ostavlja se s gornje strane gorivnih štapova čime se omogućava termička ekspanzija gorivnih elemenata. U taj prostor dodaje se opruga koja sprječava kretanje tableta goriva. Precizno raspoređivanje gorivnih štapova od velikog je značaja za ispravno djelovanje komponenti poput moderatora i regulacijskih šipki. Postupak izrade gorivnih elemenata praćen je pažljivim ispitivanjima i mjerenjima [5,18].



Slika 3.3. Sastavni dijelovi gorivnog elementa [19]

### 3.7. Proizvodnja električne energije

U jezgri reaktora, u kojoj se nalazi 100 i više gorivnih elemenata, oslobađaju se velike količine topline nastale kontinuiranom fisijom  $^{235}\text{U}$ . Dio  $^{238}\text{U}$  u reaktoru pretvara se u plutonij koji je također pogodan za odvijanje fisije te je zaslužan za dio oslobođene topline. U prosjeku oko dvije trećine oslobođene energije dolazi od fisije  $^{235}\text{U}$ , a jedna trećina od fisije  $^{239}\text{Pu}$ . Toplinska energija služi za dobivanje vodene pare kojom se pokreće parna turbina. Parna turbina, osovinom je povezana sa generatorom električne energije koji služi za proizvodnju električne energije. Odvijanje lančane reakcije uvelike ovisi o moderatoru, a najčešće korištena sredstva su voda, teška voda i grafit. Prosječan reaktor snage 1000 MW sadrži oko 75 tona nisko obogaćenog urana, a kako bi se zadržala efikasnost rada, trećina goriva vadi se iz reaktora svakih 12 do 18 mjeseci te se zamjenjuje svježim gorivom. Prilikom izmjene goriva obustavlja se rad reaktora.

Količina električne energije koju je moguće proizvesti iz 1 tone prirodnog urana, uobičajeno iznosi oko 44 GWh. Veličina koja služi za određivanje karakteristika oksidnih goriva naziva se potrošnja goriva (engl. fuel burn-up), a izražava se u giga-vat danu po toni goriva (GWd/t) i proporcionalna je obogaćenju urana. Razvojem opreme i gorivnih elemenata danas je moguće postići oko 55 GWd/t u slučaju da se koristi 5 % obogaćeno nuklearno gorivo. Daljnjim razvojem procjenjuje se da će se moći postići i 70 GWd/t. Za toliko iskorištenje obogaćenje bi trebalo iznositi 6%. Većim sagorijevanjem goriva produžio bi se radni ciklus goriva do otprilike 24 mjeseca. Također broj gorivnih elemenata koje bi trebalo mijenjati smanjio bi se za jednu trećinu. Ukoliko se kao nuklearno gorivo koristi prirodni uran sagorijevanje goriva iznosi oko 7,5 GWd/t. Obzirom da je takvo gorivo jeftinije, ekvivalent tolike potrošnje obogaćenog goriva iznosio bi 50 GWd/t.

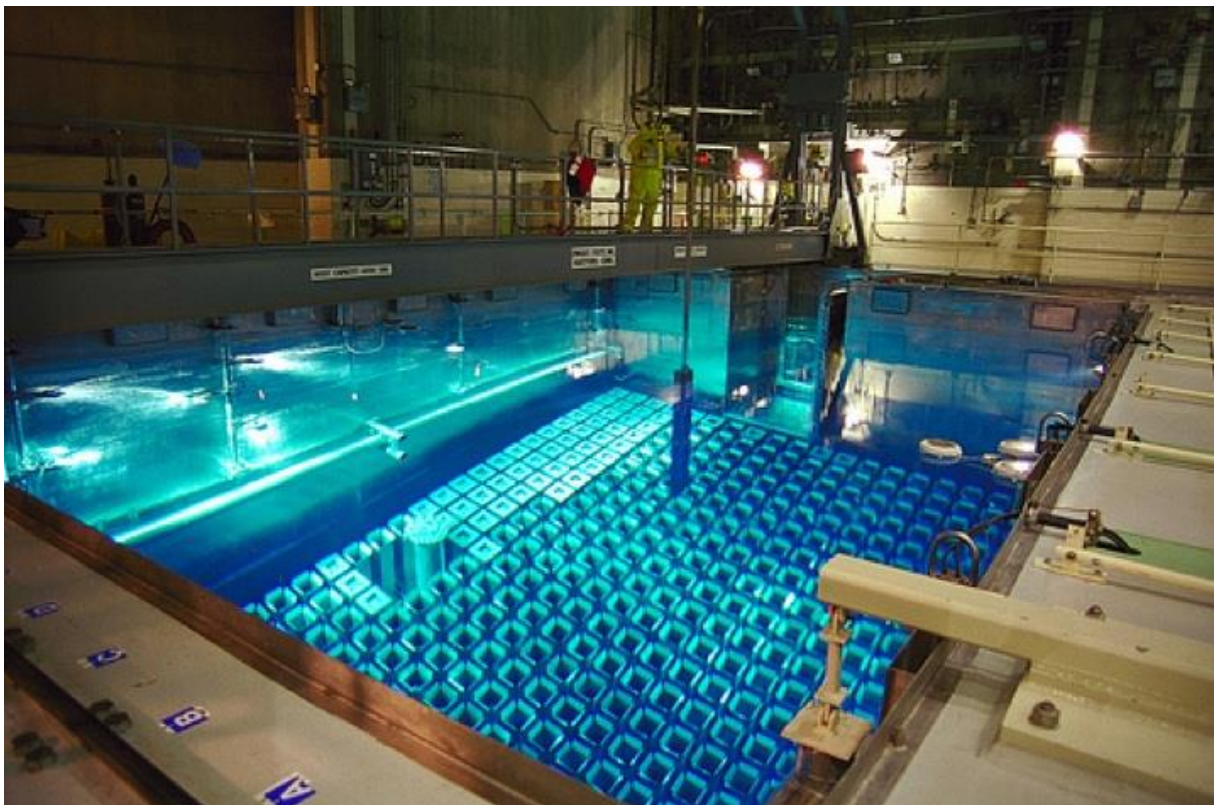
Nuklearne elektrane često se grade u blizini mora i velikih rijeka obzirom da je potrebno odvoditi velike količine topline u okolinu. Osim vode iz mora i rijeka koje prolaze kroz kondenzator, za hlađenje vode koja cirkulira u kružnom procesu koriste se i rashladni tornjevi [14].

### 3.8. Privremeno skladištenje istrošenog goriva

S vremenom se količina fisijskih produkata i teških metala u nuklearnome gorivu povećava te takvo gorivo više nije pogodno za korištenje. Stoga se gorivo koje je u reaktoru provelo između 18 i 36 mjeseci vadi iz reaktora. Iskorišteno gorivo u pravilu sadrži oko 95 %  $^{238}\text{U}$ , 1 %  $^{235}\text{U}$ , 0,6 % plutonija pogodnog za fisiju, a ostatak uglavnom čine fisijski produkti i teški metali.



Iskorišteno nuklearno gorivo smješta se zatim u bazene koji se nalaze u sklopu nuklearnih elektrana. Gorivo se pohranjuje u bazene prvenstveno s namjerom da se ohladi obzirom da se toplina iz goriva i dalje oslobađa. Osim topline, nastali fizijski produkti čine gorivo radioaktivnim o čemu također treba voditi računa. Bazeni su ispunjeni vodom kojoj se dodaje bor koji ima svojstvo da snažno apsorbira neutrone. Time se osigurava potkritičnost te se omogućuje hlađenje goriva i sprječava se zračenje prema okolini. Gorivni elementi se slažu u stalke od nehrđajućeg čelika kojima se može dodavati bor čime se omogućuje gušće slaganje gorivnih elemenata. Vrijeme koje istrošeno gorivo mora provesti u bazenima iznosi minimalno 6 mjeseci. U tom periodu radioaktivnost se smanji do razine pri kojoj je dozvoljeno suho skladištenje i daljnji transport iskorištenog goriva. Iskorišteno gorivo kod većine današnjih nuklearnih elektrana provede u bazenima mnogo duži period, čak desetak godina pa i duže od toga [5,14].



*Slika 3.4. Bazen za istrošeno gorivo [20]*

### **3.9. Reprocesuiranje**

Nuklearna energija specifična je po tome što se iskorišteno gorivo može obraditi i ponovno koristiti. Nakon što istrošeno nuklearno gorivo odleži u bazenu za istrošeno gorivo, moguće ga je preraditi u posebnim postrojenjima. Cilj takve prerade je izdvajanje plutonija i urana

sadržanih u gorivu, čime je moguće postići 25 do 30 % bolje iskorištenje goriva. Reprocesuiranjem se također smanjuje količina visoko radioaktivnog otpada, ali i sam intenzitet radioaktivnosti. Većina postupaka koji se danas koriste temelje se na izdvajanju fisilnog plutonija iz istrošenog goriva koji se naknadno može koristiti kao nuklearno gorivo. Većina izdvojenog plutonija koristi se kao tzv. mixed oxide fuel (MOX). To je gorivo dobiveno miješanjem plutonija iz istrošenog goriva i osiromašenog urana izdvojenog u procesu obogaćenje. Danas već postoji značajan broj nuklearnih elektrana koje mogu koristiti takvu vrstu goriva, a većina ih se nalazi u Europi (Francuska, Belgija, Švicarska) i Japanu. MOX gorivo može se koristiti kao samostalno gorivo ili u kombinaciji s osiromašenim UO<sub>2</sub>, a nakon iskorištavanja moguće je i njegovo daljnje reprocesuiranje. Također, moguće je koristiti i uran iz istrošenog goriva, međutim za to ga je potrebno ponovno obogatiti s obzirom da obogaćeni <sup>235</sup>U čini tek oko 0,5% istrošenog goriva.

Najkorišteniji postupak koji se koristi pri reprocesuiranju istrošenog goriva danas je PUREX (plutonium uranium extraction) postupak. Postupak uglavnom sadrži sljedeće aktivnosti: rezanje gorivnih šipki, odvajanje materijala obloge od tableta goriva, otapanje goriva dušičnom kiselinom te izdvajanje urana i plutonija ekstrakcijom iz kiseline. Nakon izdvajanja plutonija i urana, preostala kiselina predstavlja visoko radioaktivni otpad obzirom da se u njoj nalaze fisijski produkti i manja količina aktinida. Za konačno odlaganje visokoradioaktivnog otpada potrebno je njegovo prevođenje u kruti oblik kako bi se spriječilo potencijalno izlučivanje radioaktivnih tvari u tlo i podzemne vode. U tu svrhu provodi se miješanje radioaktivnog otpada sa rastaljenom staklenom masom (vitifikacija) [5].

Trenutni kapaciteti za reprocesuiranje istrošenog goriva iznose oko 2000 t godišnje, a razvojem reaktora 4. generacije koji će koristiti brze neutrone iskorištenje goriva značajno će se povećati. Navedeni reaktori moći će koristiti istrošeno gorivo iz reaktora koji su danas u funkciji, ali i značajne zalihe osiromašenog urana nastalog kao nusprodukt u postrojenjima za obogaćivanje urana. Oko 400 000 t iskorištenog goriva do sada je uklonjeno iz reaktora koji su trenutno u funkciji, a otprilike 30 % je reprocesuirano [21].

### **3.10. Odlaganje radioaktivnog otpada**

Radioaktivnim otpadom smatraju se svi prirodno radioaktivni materijali ili materijali kontaminirani radioaktivnošću koji više nisu pogodni za korištenje. Nastaje u normalnom pogonu nuklearne elektrane, uključujući vrijeme remonta te u postupku dekomisije. Kako bi se radioaktivni otpad sigurno mogao odlagati potrebno je da koncentracije različitih radionuklida



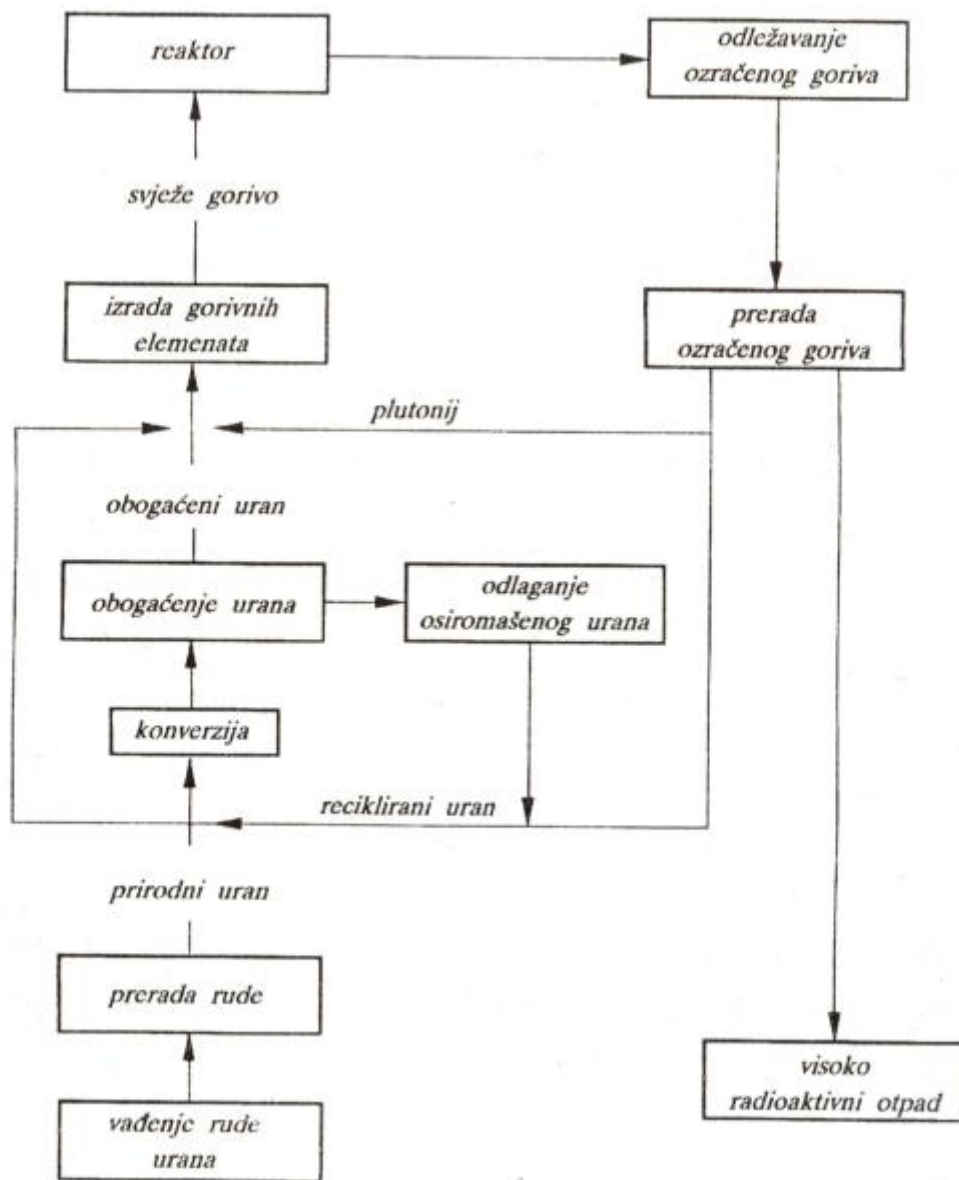
padnu na razine koje neće biti opasne po okoliš. Koncentracija različitih radionuklida u otpadu smanjuje se tijekom vremena, čime se smanjuje radioaktivnost otpada. Mjerna jedinica za iskazivanje radioaktivnosti je Becquerel (Bq). S obzirom na to koliko je otpad radioaktivan moguće ga je svrstati u različite kategorije. Niskoaktivni otpad je vrsta otpada koju karakterizira emitiranje alfa-zraka do 4 GBq te beta i gama-zraka do 12 GBq po toni otpada. Otpad iz ove kategorije predstavlja većinu radioaktivnog otpada gledajući sam volumen, no čini tek oko 1 % ukupne radioaktivnosti. Prilikom rukovanja niskoaktivnim otpadom ne treba provoditi posebne zaštitne mjere te ga se može odlagati na površini u čeličnim bačvama, u blizini nuklearnih elektrana. Srednjoaktivni otpad radioaktivniji je u odnosu na niskoaktivni zbog čega su potrebne određene zaštitne mjere pri rukovanju. Može se odlagati na površini ili u podzemlju. U slučaju odlaganja pod zemljom otpad se najprije smješta u čelične bačve koje se zalije betonom. Bačve se potom smještaju u betonske kontejnere koji se postavljaju u tunele ispunjene vodonepropusnim materijalom. Srednjoaktivni otpad čini oko 7 % od ukupnog volumena radioaktivnog otpada te je zaslužan za 4 % radioaktivnosti. Visokoaktivni otpad predstavlja iskorišteno gorivo označeno kao otpad, ali i otpad izdvojen iz postupka reprocesuiranja istrošenog goriva. Takvo gorivo sadrži veće količine fisijskih produkata i aktinida. Iako čini tek 3 % od ukupnog volumena, predstavlja čak 95 % radioaktivnosti od ukupne količine radioaktivnog otpada. Prilikom rukovanja zahtijevaju se posebne mjere opreza kao i hlađenja obzirom da se njegovim raspadom oslobađaju značajne količine topline [22]. Različite opcije razmatrane su kao potencijalna mjesta za odlaganje visokoaktivnog otpada. Utvrđeno je kako bi u bližoj budućnosti jedino prihvatljivo mjesto bile stabilne geološke formacije s malom propusnošću za podzemne vode. Jedno takvo odlagalište izgrađeno je u SAD-u, u državi Nevada, no ono još uvijek nije u funkciji [23]. Prvo odlagalište u koje će se moći odlagati i visokoaktivni otpad u fazi je gradnje, a nalazi se u Finskoj na otoku Olkiluoto u blizini tamošnje nuklearne elektrane [24].

Otpad se proizvodi i u početnim fazama nuklearnog gorivog ciklusa, već od samog rudarenja te u daljnjim postupcima prerade i izrade goriva. Međutim količine otpada koje nastaju u ranijim fazama gotovo su beznačajne u usporedbi s količinama otpada nastalog nakon iskorištavanja goriva ukoliko se promatra sama radioaktivnost otpada i moguće posljedice za okoliš. U prvoj fazi odlaganja otpada za najveći dio radioaktivnosti zaslužni su fisijski produkti poput  $^{90}\text{Sr}$  te  $^{137}\text{Cs}$ . U dužem razdoblju raste utjecaj aktinida. 100 godina nakon korištenja aktinidi pridonose ukupnoj radioaktivnosti goriva sa 17 %, da bi u tisućitoj godini taj doprinos

narastao na gotovo 100 %. Najveći doprinos u periodu kada je doprinos radioaktivnosti od aktinida dominantan daju izotopi plutonija  $^{239}\text{Pu}$  i  $^{240}\text{Pu}$  te izotop americija  $^{241}\text{Am}$  [5].

### **3.11. Transmutacija istrošenog goriva**

Jedno od svojstava radioaktivnih elemenata je da se njihove jezgre same od sebe raspadaju pri čemu nastaju nove jezgre odnosno novi kemijski elementi s bitno izmijenjenim svojstvima. Pokretači takvih reakcija su neutroni koji omogućavaju odvijanje nuklearnih reakcija. Ta činjenica može biti korisna i u pogledu tretiranja istrošenog goriva, posebice u tretiranju elemenata koji imaju vremena poluraspada od nekoliko tisuća ili milijuna godina. Stoga, ukoliko se istrošeno gorivo izloži dodatnom toku neutrona, produkti fisije dugačkog vremena poluraspada mogli bi se pretvoriti u fisijske produkte s puno kraćim vremenom poluraspada. Na taj način značajno se olakšava skladištenje radioaktivnog otpada, posebno onog visokoaktivnog [21]. Neutroni potrebni za odvijanje reakcije mogu se dobiti u brzim oplodnim reaktorima ili bombardiranjem protona pomoću akceleratora. U SAD-u je 2003. osmišljen program unutar kojeg se provode istraživanja za korištenje naprednijih oblika goriva koje bi trebali koristiti nuklearni reaktori IV. Generacije kao i tehnologije za reprocessuiranje i transmutaciju istrošenog goriva. Cilj programa je razviti metode kojima bi se radioaktivnost visokoaktivnog otpada smanjila na razine manje od one koju emitira ruda urana iz koje je nuklearno gorivo proizvedeno, u periodu ne dužem od 10 000 godina od odlaganja [25].



Slika 3.5. Shematski prikaz osnovnih faza nuklearnog gorivnog ciklusa [5]

## 4. UTJECAJ NA OKOLIŠ

Svi energetske objekti stvaraju određene promjene u okolišu pa tako i nuklearne elektrane. U današnje vrijeme potiče se proizvodnja električne energije iz onih izvora kojima se najmanje utječe na okoliš, ponajviše u pogledu emisija CO<sub>2</sub>. U tom pogledu nuklearne elektrane svakako pružaju održivu opciju s obzirom da su količine CO<sub>2</sub> koje se ispuštaju u atmosferu prilikom rada zanemarive. Međutim, kako bi se utvrdio ukupan utjecaj nuklearnih elektrana na okoliš potrebno je utvrditi i kako utječu na iskorištavanje vodenih resursa i zemljišta na kojima se grade te koliki utjecaj ima radioaktivni otpad.

### 4.1. Staklenički plinovi

Prilikom proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama u atmosferu se ne ispuštaju staklenički plinovi, obzirom da se toplinska energija dobiva fisijom nuklearnog goriva, a ne sagorijevanjem fosilnog goriva kao u slučaju konvencionalnih termoelektrana. No ukoliko se sagleda šira slika, u većini ostalih procesa vezanih pretežno uz izradu goriva nastaju određene količine CO<sub>2</sub> i drugih štetnih spojeva kao što su dušikovi i sumporovi oksidi. Staklenički plinovi se dakle ispuštaju u atmosferu prilikom niza procesa poput rudarenja, mljevenja i obrade rude, konverzije, procesa obogaćenja, konstrukciji reaktora, odlaganju radioaktivnog otpada itd. Tijekom ovih procesa staklenički plinovi nastaju direktno s obzirom da se koriste različiti strojevi koji koriste fosilna goriva za svoj rad. Također valja u obzir uzeti i emisije koje nastaju indirektno, korištenjem materijala kao što su čelik i cement u čijoj proizvodnji nastaju značajne količine stakleničkih plinova. Stoga se ne može reći da su nuklearne elektrane neutralne u pogledu emisije stakleničkih plinova, no nuklearna energija svakako predstavlja jedan od čistijih izvora energije iz čega proizlazi njena važnost za budućnost. U usporedbi s drugim izvorima energije emisije CO<sub>2</sub> u svim procesima u nuklearnim elektranama otprilike su jednake onima u vjetroelektranama. U oba navedena postrojenja količine ispuštenog CO<sub>2</sub> po kWh proizvedene električne energije iznose 12 grama [26]. Za usporedbu, recimo kako termoelektrane koje koriste ugljen kao gorivo za istu količinu proizvedene električne energije u atmosferu ispuste 900 grama CO<sub>2</sub> [27]. Negativne posljedice ispuštanja CO<sub>2</sub> ogledaju se u pojačanom efektu staklenika odnosno u povećanju temperatura na površini Zemlje. Dušikovi i sumporovi oksidi u atmosferi se spajaju sa vodenom parom te se vraćaju na Zemlju u obliku kiselih kiša koje imaju negativan utjecaj na oceane i na kvalitetu tla.

## 4.2. Vodeni resursi

Nuklearne elektrane zahtijevaju velike količine vode za hlađenje u svom radu s obzirom na velike količine ostatne topline koja se u njima proizvodi. Većina današnjih nuklearnih elektrana ima toplinske iskoristivosti oko 30 % što znači da se preostalih 70 % generirane topline vraća u okoliš [27]. Prema tome povoljne lokacije za smještanje nuklearnih elektrana su u blizini velikih rijeka, jezera ili mora. Nakon što vodena para prođe kroz turbinu potrebno ju je prevesti u tekućinu i ohladiti kako bi se ponovno mogla koristiti u procesu. Najčešće korišten tip rashladnog sustava je direktni protočni rashladni sustav. Voda se izdvaja iz korita rijeke ili iz mora, te se provodi kroz kondenzator u kojemu preuzima dio topline pare iz procesa. Uobičajeno je da se kod takvih sustava hlađenja definira dozvoljeno povišenje temperature vodotoka kao i njegova maksimalna dozvoljena temperatura. Uobičajena maksimalna vrijednost pri kojoj se voda smije vraćati u vodotok iznosi 30 °C [28]. Povišenje temperature rashladne vode konstantno se mjeri kako bi se izbjegle nepovoljne posljedice na floru i faunu u okolini nuklearne elektrane. Količine vode koje se izdvajaju u slučaju direktnog protočnog hlađenja u elektrani snage 1600 MW iznose 90 m<sup>3</sup>/s [2]. Potrošnja vode u rashladnom krugu relativno je malena obzirom da se većina vode (oko 97%) vraća u izvor iz kojeg je početno izdvojena. Hlađenje morskom vodom obično je efikasnije nego u slučaju hlađenja slatkom vodom, no to zahtijeva korištenje materijala boljih svojstava kako bi se spriječilo stvaranje korozije. Kako je količina vode u koritima rijeka promjenjiva te ovisi o količini padalina, protoci ponekad nisu dostatni za efikasno direktno hlađenje. U tom slučaju često se grade rashladni tornjevi u kojima se toplina odvodi u atmosferu. Zagrijana voda iz kondenzatora dovodi se u rashladne tornjeve koji mogu funkcionirati na principu prirodne ili prisilne cirkulacije zraka. Hlađenje se u oba slučaja ostvaruje prijenosom topline s vode na zrak, dijelom direktno te dijelom prilikom isparavanja dijela vode. Potrebna količina vode u rashladnim tornjevima mnogo je manja nego u slučaju direktnog hlađenja te obično iznosi oko 2 m<sup>3</sup>/s [27]. Uz navedene načine toplina se može odvoditi i u umjetno stvorenim jezerima.

Obzirom da su voda u rashladnom krugu i voda koja se koristi u samom procesu odvojene ne postoji opasnost od kontaminacije. Međutim postoje drugi problemi posebice kada je riječ o direktnom sustavu hlađenja. Naime, zagrijavanje vode dovodi do manje koncentracije otopljenog kisika u vodi i povećanja njene pH vrijednosti. Također, organska tvar brže se razgrađuje pri višim temperaturama. Posljedica navedenih promjena je pojačano cvjetanje algi, što negativno utječe na biljke koje se nalaze pod vodom, s obzirom da alge blokiraju prolaz svjetlosti. Veća količina algi često dovodi i do povećane koncentracije aerobnih bakterija u vodi

čime se voda dodatno osiromašuje kisikom i postaje nepovoljna za život mnogih organizama. Stoga životinje poput riba napuštaju svoja prirodna staništa, a osjetljivije vrste ugibaju [28].

### **4.3. Iskorištavanje tla**

Kao i druga postrojenja za proizvodnju električne energije potrebna je određena površina terena na kojoj će se izgraditi nuklearna elektrana i postrojenja koja su bitna za njeno funkcioniranje. Nuklearne elektrane zahtijevaju otprilike jednaku površinu kao i klasične termoelektrane na ugljen, no ne zahtijevaju sustave tračnica ili cjevovoda za transport goriva kao ni postrojenja za skladištenje goriva. U usporedbi sa vjetroelektranama ili postrojenjima koja koriste sunčevu energiju, nuklearne elektrane zahtijevaju mnogo manje površine za proizvodnju istih količina električne energije [27]. Negativni utjecaji na tlo mogu nastati prilikom rudarenja urana ukoliko se primjenjuje otvoreno iskapanje. U tom slučaju znatno se narušava reljef terena. U budućnosti se očekuje daljnji porast u broju stanovnika, čime će vrijednost površina na kopnu dodatno rasti. Dodaju li se tome i potrebe za očuvanjem bioraznolikosti, nuklearna energija nudi pogodnu opciju u vidu iskorištavanja tla u usporedbi s drugim izvorima energije.

### **4.4 Utjecaj radioaktivnog otpada**

Bez obzira koji izvor energije se koristi, proizvodnja električne energije uvijek je praćena i stvaranjem određene količine otpada. Međutim količine otpada, rizik koji proizvedeni otpad stvara te metode njegovog zbrinjavanja razlikuju se među pojedinim izvorima. Kada je riječ o nuklearnoj energiji količine otpada relativno su malene s obzirom na veliku gustoću energije goriva. Osim toga upravljanje otpadom kod nuklearnih elektrana strogo je regulirano čime se smanjuju moguće štetne posljedice po okoliš i zdravlje ljudi. Veličina kojom se opisuje energija zračenja je biološka doza, a izražava mjernom jedinicom Sievert. Propisana dozvoljena količina radijacije kojoj smiju biti izloženi radnici u nuklearnoj industriji iznosi 20 mSv/godišnje. U periodu od 50 godina intenzivnijeg praćenja zdravlja radnika u industriji te uzroka koji su doveli do njihove smrti, utvrđeno je kako radnici nisu oboljevali od raka više nego što je to slučaj kod ostatka populacije premda su bili izloženiji i do 10 puta većoj količini zračenja [26].

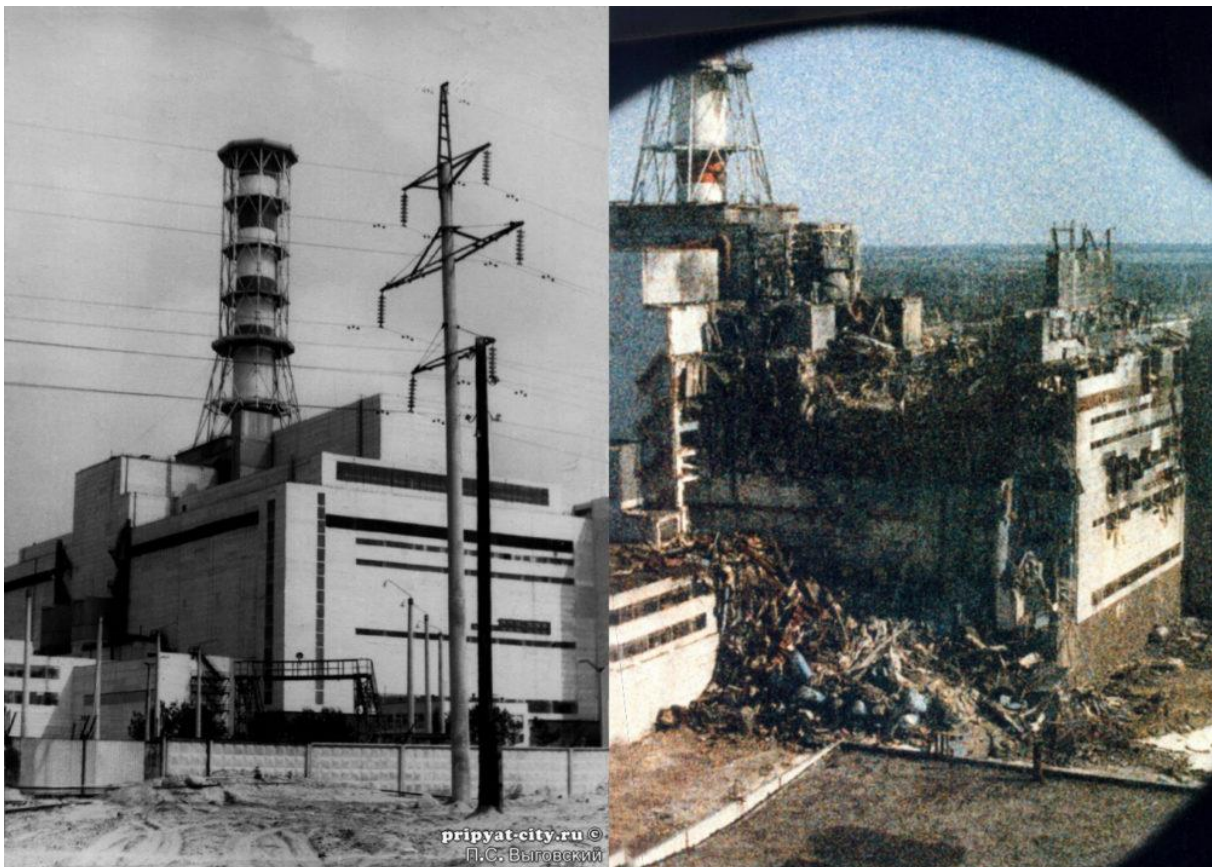
### **4.5. Nuklearne katastrofe**

Nuklearne katastrofe su događaji koji dovode do značajnih posljedica za ljude, okoliš i objekte. Iako su takvi događaji rijetki, tijekom povijesti bilo je slučajeva u kojemu su nuklearne elektrane imale izrazito negativan utjecaj na zdravlje ljudi i okoliš.

#### **4.5.1. Černobil**

Nuklearna katastrofa koja je imala najveće posljedice u povijesti dogodila se 26. travnja 1986. u Nuklearnoj elektrani Černobil, na području današnje Ukrajine. Do katastrofe je došlo zbog neadekvatnog dizajna reaktora te zbog ne pridržavanja sigurnosnih mjera od strane dijela radnika. U vrijeme nesreće 4 reaktora tipa RBMK bila su u funkciji, a još dva bila su u fazi izgradnje. Valja napomenuti kako se ovaj tip reaktora bitno razlikuje po svojim karakteristikama u odnosu na većinu reaktora koji su danas u funkciji. RBMK kipući je tip reaktora moderiran grafitom i hlađen vodom koji se razvijao isključivo na prostorima bivšeg SSSR-a. Iako su nedostaci reaktora u vidu sigurnosti bili poznati (nestabilnost u radu kada reaktor radi na manje od 20 % nazivne snage), zanemarivanje sigurnosnih procedura i nedovoljna stručnost radnika rezultirali su kobnim posljedicama. Radnici su provodili ispitivanje kojim se trebalo utvrditi koliko dugo će rotirati turbine koje bi trebale opskrbljivati cirkulacijske pumpe električnom energijom, nakon gubitka glavnog napajanja električnom energijom. Prilikom provođenja ispitivanja ugašen je sustav za hlađenje jezgre reaktora u slučaju nužde. Kada je snaga reaktora spuštena na oko 50 % donesena je odluka da se reaktor zadrži u funkciji još neko vrijeme obzirom da je električna energija bila potrebna u mreži. Fisijski produkti i dalje su se stvarali, a među njima nastajao je i  $^{135}\text{Xe}$  koji ima svojstvo snažnog apsorpiranja neutrona. Za provođenje ispitivanja bilo je predviđeno da se snaga sa početnih 3200 MW<sub>t</sub> smanji na 1000 MW<sub>t</sub> i zadrži na toj razini prije potpunog gašenja reaktora. Međutim uslijed snažne apsorpcije neutrona snaga reaktora smanjila se na svega 30 MW<sub>t</sub> te su operateri pokušali povišati snagu tako što su izvukli gotovo sve kontrolne šipke iz reaktora [30]. Sigurnosni propisi zahtijevali su da minimalno 30 šipki bude unutar reaktora u bilo kojem trenutku, a kada su operateri pokušali povećati snagu svega 8 šipki ostalo je u reaktoru. Uslijed povećanja protoka rashladnog sredstva došlo je do pada tlaka pare. Automatski sistemi koji su trebali prepoznati prenizak tlak pare i ugaziti reaktor bili su isključeni te su operateri u namjeri da održe snagu reaktora izvukli gotovo sve preostale kontrolne šipke. Međutim na taj način reaktor je doveden u veoma nestabilno stanje. Kako bi se održao tlak pare smanjen je protok napojne vode, a istovremeno su pumpe dostavljale manje rashladne vode u reaktor. Najvažnija karakteristika RBMK reaktora je da ima pozitivan koeficijent praznine (void coefficient) što je uskoro postalo vidljivo. Ova karakteristika podrazumijeva povećanu proizvodnju pare u kanalima za gorivo uslijed smanjenja protoka vode kroz reaktor ili uslijed naglog porasta snage. Iako u normalnom radu reaktora pozitivan koeficijent praznine ne predstavlja problem, pri snagama nižim od 20 % nazivne snage taj efekt postaje dominantan te se reaktor dovodi u nestabilno stanje karakterizirano naglim porastom snage reaktora. Procijenjeno je da se na ovaj način snaga povećala na 100 puta veću od nazivne. Uslijed prekomjerne proizvodnje pare

(samim time i topline) došlo je do puknuća dijela goriva koji je reagirao sa preostalom vodom i uzrokovao parnu eksploziju koja je uništila jezgru reaktora. Nekoliko sekundi kasnije uslijedila je i druga eksplozija, a njen uzrok povezuje se s proizvodnjom vodika iz reakcije pare i cirkonija. Dvije eksplozije dovele su do izbacivanja goriva, dijelova jezgre i konstrukcijskih elemenata te su proizvele kišu visoko radioaktivnih čestica koje su ispuštene u zrak. Dim, radioaktivni fisijski produkti i čestice iz jezgre uzdignule su se do visine od 1000 m.



*Slika 4.1. Zgrada 4. reaktora u Černobilu prije i nakon eksplozija*

Teže radioaktivne čestice taložile su se bliže mjestu nesreće dok su lakši elementi (dio fisijskih produkata i zaliha plemenitih plinova) vjetrom odneseni u područje u okolici nuklearne elektrane. U preostalom dijelu zgrade u kojoj se nalazio reaktor, obližnjim skladištima dizelskog goriva i skladištima u kojima su se nalazili zapaljivi materijali, buknu li su požari. Razvoj požara potaknule su i velike količine grafita koji se koristio kao moderator, a uslijed eksplozije oko dvije trećine odnosno 1200 tona raspršeno je u okruhu reaktora [31]. Požar grafita predstavljao je poseban problem obzirom da u to vrijeme nisu postojale razrađene



strategije za gašenje požara takvog tipa. Također postojala je i zabrinutost o daljnjem širenju radionuklida ili ostvarivanja kritičnosti preostalog goriva.

Tijekom 10 dana velike količine radioaktivnih tvari ispuštane su u zrak. Većina zračenja koja je činila opasnost za ljude u okolici dolazila je od dva radionuklida,  $^{131}\text{I}$  te  $^{137}\text{Cs}$ . Najvećoj količini zračenja bili su izloženi vatrogasci, radnici nuklearne elektrane te pripadnici ostalih hitnih službi koji su na dan nesreće bile u okolici postrojenja. Dvoje ljudi poginulo je neposredno od posljedica eksplozije, a još 28 ljudi umrlo je od posljedica zračenja do kraja srpnja. U razdoblju od 1991. do 2015. dijagnosticirano je između 18 000 i 20 000 slučajeva raka štitnjače kod ljudi koji su u vrijeme nesreće imali manje od 18 godina (obzirom da je bolest češća kod mlađe populacije). Procijenjeno je kako je oko 5000 slučajeva povezano s velikim dozama zračenja. Rak štitnjače u pravilu nije smrtonosan ukoliko se otkrije na vrijeme i prikladno tretira, no za 15 ljudi bolest je bila kobna. Tijekom 1986. i 1987. godine velik broj ljudi s područja SSSR-a bio je angažiran kako bi se zgrada 4. reaktora sanirala te kako bi preostala 3 reaktora mogla nastaviti s radom. Oko 200 000 ljudi bilo je uključeno u projekt te su u prosjeku primili dozu zračenja od 100 mSv. Kasnije se broj ljudi koji su sudjelovali u sanaciji povećao do čak 600 000, no kasnije su i emisije zračenja bile slabije. U nešto više od 2 tjedna 116 000 ljudi evakuirano je s područja koje se nalazilo u radijusu 30 kilometara oko nuklearne elektrane, a u daljnjim godinama područje je prošireno te je još 220 000 ljudi moralo napustiti svoje domove [31]. Katastrofa u Černobilu potaknula je razvoj reaktora u vidu njihove sigurnosti, pogotovo kod preostalih reaktora tipa RBMK koji su još uvijek bili u funkciji. Isto tako poboljšana je međunarodna suradnja među državama u vidu međusobnog obavješćavanja, a isto tako mnoge države unaprijedile su sustave za hitne slučajeve kojim bi se smanjile posljedice eventualnih sličnih nesreća. Katastrofa u Černobilu rezultat je niza sigurnosnih propusta i nedovoljne stručnosti dijela osoblja te ukoliko se poštuju zaštitne mjere koje su danas propisane, nesreće takvih razmjera ne mogu se dogoditi.

#### 4.5.2. Fukushima

Nuklearna katastrofa u Fukushimi, u Japanu, dogodila se 11. ožujka 2011. godine. Glavni uzrok nesreće bio je snažan potres, jačine 9.0 po Rihteru. Epicentar potresa bio je u gradu Sendai udaljenom 180 kilometara od Nuklearne elektrane Fukushima Daichi. Potres je stvorio tsunami koji je uzrokovao mnogo veće posljedice. Tsunami je poplavio područje od 560 km<sup>2</sup> te je uzrokovao ogromnu štetu u okolnim gradovima i lukama. Više od milijun zgrada je bilo srušeno ili oštećeno, a gotovo 20 000 ljudi izgubilo je život. U regiji u kojoj se dogodio potres, 11 reaktora bilo je u funkciji u vrijeme nesreće u 4 različite nuklearne elektrane. Iako se pokazalo

da je izvedba reaktora i pomoćnih sustava u nuklearnim elektranama dobro prilagođena potresima, ono na što u Fukushimi nisu bili spremni jest 15 metara visok tsunami. Nuklearna elektrana Fukushima Daichi bila je smještena oko 11 km od obale, a sigurnosne mjere iz 1960. na temelju kojih je nuklearna elektrana bila sagrađena nisu predviđale tsunami ovolike visine. Iako su se tijekom prošlog stoljeća na području Fukushime dogodili nešto slabiji potresi nego što je bio ovaj 2011. (jačine od 7.7 do 8.4 po Rihteru) koji su uzrokovali tsunamije visine i do 31 metra nikakve promjene u Nuklearnoj elektrani nisu bile poduzete. Nuklearna elektrana bila je sagrađena 10 metara iznad razine mora dok su se pumpe koje su služile za odvođenje ostatne topline iz reaktora nalazile 4 metra iznad razine mora. Dizajn elektrane bio je prilagođen za visine tsunamija do 3.1 metara te iako su novija istraživanja ukazivala kako takve mjere nisu dovoljne u slučaju većih nesreća, nikakve promjene nisu bile napravljene. Iako je većina reaktora u regiji uspjela postići hladno gašenje u razdoblju od oko 4 dana od nesreće uspješno odvođeci ostatnu toplinu, 3 reaktora u Fukushimi Daichi nisu bili te sreće. Premda su se 3 reaktora koja su bila u radu automatski isključila nakon potresa, izvori vanjskog napajanja oštećeni su te su prestali raditi nakon čega su u pogon pušteni rezervni dizel-agregati. Nadolazeći tsunami potopio je pumpe morske vode koje su služile za hlađenje kondenzatora i sporednih rashladnih krugova posebice sustava za hlađenje i odvođenje ostatne topline. Dizel-agregati, električne sklopke i baterije za napajanje također su bili potopljeni, a prilazne ceste Nuklearnoj elektrani bile su oštećene što je dodatno otežalo situaciju.

U postrojenju se ukupno nalazilo 6 reaktora tipa BWR, a u vrijeme nesreće 3 su bila u radu. S obzirom na to da je odvođenje topline bilo onemogućeno unutar samog reaktora stvarale su se povećane količine vodene pare. Iako je para bila odvođena u komoru koja se nalazila ispod reaktora, temperatura i tlak svejedno su se brzo povećavali. Počelo je ubrizgavanje vode u reaktor pomoću različitih sigurnosnih rashladnih sustava, međutim tijekom prva tri dana od nesreće ti sustavi su se pokvarili. Razina vode pala je ispod dna goriva, što je dovelo do zagrijavanja goriva do temperature od 2800 °C. Gorivo se počelo taliti i padati u preostalu vodu na dnu reaktorske posude. Odvođenje pare u ovakvim situacijama bilo je predviđeno kroz vanjski dimnjak, no uslijed nestanka struje većina se vratila na vrh reaktorske zgrade. Uz vodenu paru ispuštani su i različiti plemeniti plinovi, aerosoli i vodik koji je nastao u reakciji pare sa cirkonijem iz kojega je bila izrađena obloga goriva. Količine vodika koje su se stvorile bile su značajne, između 800 i 1000 kg u svakom od reaktora što je rezultiralo eksplozijama koje su oštetile zgrade reaktore. Vlasti su sveukupno evakuirale više od 100 000 ljudi s područja do 30 kilometara udaljenog od elektrane, a nesreća je okarakterizirana najvišim 7. stupnjem na

INES (International Nuclear Events Scale) ljestvici. Najveći udio ispuštenog radioaktivnog zračenja dolazio je od  $^{131}\text{I}$  čije je vrijeme poluraspada 8 dana te od  $^{137}\text{Cs}$  vremena poluraspada 30 godina. S obzirom na različita vremena poluraspada zajednički utjecaj zračenja izražava se ekvivalentom zračenja  $^{131}\text{I}$ . Ekvivalentno ispuštanje radioaktivnog izotopa  $^{131}\text{I}$  procijenjeno je na 570 PBq (nakon havarije u Černobilu ovo ispuštanje iznosilo je 5200 PBq) [32].

## 5. REAKTORI IV. GENERACIJE

S ciljem unaprjeđenja nuklearne energije i zadovoljavanja budućih energetske potrebe stvorena je međunarodna suradnja trinaest zemalja (Argentina, Brazil, Kanada, Francuska, Japan, Južna Koreja, Južnoafrička Republika, Švicarska, Ujedinjeno Kraljevstvo, SAD, Kina, Rusija, Australija) i Europske Unije (u sklopu organizacije Euratom) u istraživanju buduće IV. generacije nuklearnih reaktora. Plan je da reaktori IV. generacije budu spremni za implementaciju na međunarodnoj razini oko 2030. godine. Kako bi to bilo moguće reaktori će morati zadovoljavati određene uvjete u pogledu održivosti, ekonomičnosti, sigurnosti, pouzdanosti, te otpornosti na širenje upotrebe nuklearnog oružja.

Ciljevi za reaktore IV. generacije:

- Održivost–1: Nuklearni energetske sustavi četvrte generacije osigurat će održivu proizvodnju energije koja zadovoljava ciljeve čistog zraka i promiče dugoročnu dostupnost sustava te učinkovitu uporabu goriva za svjetsku proizvodnju električne energije.
- Održivost–2: Nuklearni energetske sustavi četvrte generacije minimizirat će i upravljati svojim nuklearnim otpadom i primjetno smanjiti teret dugoročnog upravljanja, čime će poboljšati zaštitu za javno zdravlje i okoliš.
- Ekonomija–1: Nuklearni energetske sustavi četvrte generacije imat će jasnu prednost u troškovima životnog ciklusa u usporedbi s drugim izvorima energije.
- Ekonomija–2: Nuklearni energetske sustavi četvrte generacije imat će razinu financijskog rizika usporedivu s drugim energetske projektima.
- Sigurnost i pouzdanost–1: Operacije nuklearnih energetske sustava četvrte generacije istaknut će se u sigurnosti i pouzdanosti.
- Sigurnost i pouzdanost–2: Nuklearni energetske sustavi četvrte generacije imat će vrlo nisku vjerojatnost i stupanj oštećenja jezgre reaktora.
- Sigurnost i pouzdanost–3: Nuklearni energetske sustavi četvrte generacije eliminirat će potrebu za izvanrednim intervencijama izvan postrojenja u slučaju nužde.
- Otpornost na proliferaciju i fizička zaštita–1: Nuklearni energetske sustavi četvrte generacije povećat će uvjerenje da su vrlo neprivlačan i najmanje poželjan put za preusmjeravanje ili krađu materijala pogodnih za izradu oružja te pružiti povećanu fizičku zaštitu protiv terorističkih akcija [33].

Održivost podrazumijeva sposobnost zadovoljavanja potreba današnjih generacija istovremeno unaprjeđujući, a ne ugrožavajući sposobnost budućih generacija da neograničeno zadovolje potrebe društva u budućnosti. Načelo održivosti danas je jedan od najvažnijih kriterija u području proizvodnje električne energije. Održiv rad nuklearnih elektrana podrazumijeva štednju resursa, učinkovitu uporabu goriva, unaprjeđenje u upravljanju otpadom, minimalne utjecaje na okoliš te širenje upotrebe nuklearnih elektrana izvan proizvodnje električne energije.

Ekonomska konkurentnost jedan je od ključnih kriterija za sustave četvrte generacije. Danas većina nuklearnih elektrana funkcioniraju kao bazne jedinice u javnom i privatnom vlasništvu. U budućnosti se može očekivati sve veći broj neovisnih proizvođača električne energije kao i različitih oblika vlasništva nad nuklearnim elektranama. Stoga će se sustavi četvrte generacije morati prilagoditi različitim opcijama vlasništva nad postrojenjem te također predvidjeti različite uloge nuklearnih elektrana poput proizvodnje vodika, generiranje topline za centralna grijanja i potrebe industrije te zadovoljavanja potreba za pitkom vodom. Važno je da budući energetske sustavi budu ekonomski privlačni, a da pritom ispunjavaju promjenjive energetske potrebe.

Sigurnost i pouzdanost ključni su prioriteti sustava četvrte generacije. Nuklearni energetske sustavi moraju biti projektirani na takav način da tijekom normalnog rada postoje adekvatne sigurnosne mjere, a ukoliko dođe do izvanrednih situacija one ne smiju prijeći u ozbiljne nesreće. Tijekom godina sigurnost i pouzdanost nuklearnih elektrana konstantno se unaprjeđuje, sve je manja učestalost i intenzitet ispuštanja radioaktivnih tvari u okoliš te su mogućnosti od oštećenja postrojenja minimalne. Sustavi četvrte generacije suočit će se s novim izazovima obzirom na više radne temperature i tlakove. Biti će potrebni pojednostavljeni dizajni reaktora koji ujedno minimiziraju mogućnost nesreća ili njihovih eventualnih posljedica. Osim tehničkih poboljšanja važnu ulogu ima i odgovorna i stručna ljudska izvedba bez koje nije moguće postići navedene ciljeve.

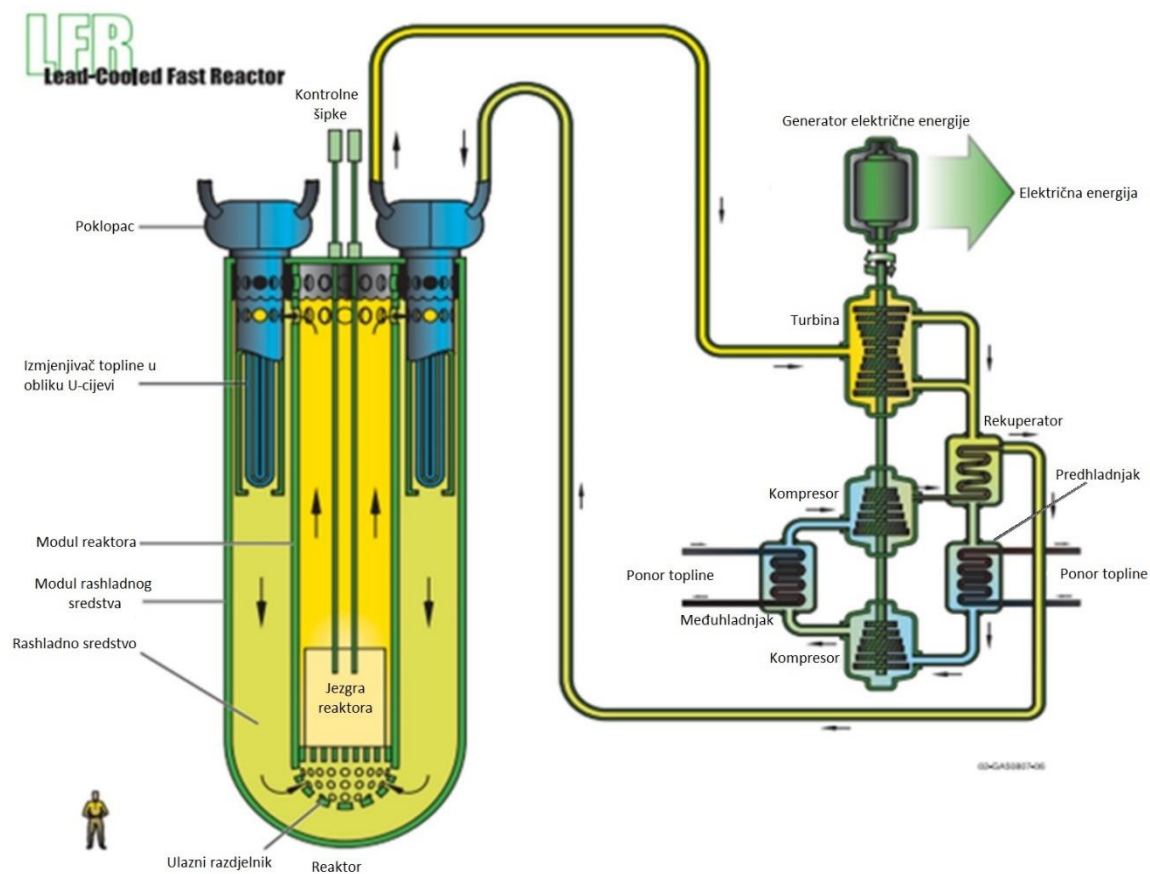
Konačno važno je osigurati da svi nuklearni materijali koji se koriste i nastaju u nuklearnim elektranama budu zaštićeni od eventualnog pokušaja za korištenjem u svrhu izrade nuklearnog oružja [34].

Generation IV International Forum (GIF) sudjeluje u istraživanju i razvoju različitih opcija za nuklearne reaktore 4. generacije, ali neće se baviti njihovom izradom. GIF je izabrao šest tipova reaktora koji će biti razvijani kako bi zadovoljili odgovarajuće ciljeve u području nuklearne energije, a to su:

- Olovni brzi reaktor / Lead fast reactor (LFR)
- Natrijev brzi reaktor / Sodium fast reactor (SFR)
- Plinski brzi reaktor / Gas fast reactor (GFR)
- Reaktor vrlo visoke temperature / Very-high temperature reactor (VHTR)
- Reaktor s otopljenim solima / Molten salt reactor (MSR)
- Superkritični vodom hlađeni reaktor / Supercritical water-cooled reactor (SCWR)

### 5.1. Olovni brzi reaktor

Kao što mu i samo ime kaže, olovni brzi reaktor jedan je od reaktora četvrte generacije koji koristi brze neutrone za odvijanje reakcija fisije što znači da nema potrebe za moderatorom, odnosno za usporavanjem neutrona. Dvije opcije koje se razvijaju kao izvedba rashladnog sredstva za ovaj tip reaktora su tekuće olovo ili eutektik olova i bizmuta. Obje opcije pogodne su za rad pri niskim tlakovima, imaju dobra termodinamička svojstva, a u dodiru s vodom ili zrakom ne dolazi do burnih reakcija. Pogodni su sa stajališta održivosti obzirom da je predviđen zatvoreni ciklus goriva što znači da mogu koristiti reprocesuirano istrošeno gorivo. Različite opcije moguće su pri izboru goriva. Primjerice olovni brzi reaktori mogli bi koristiti metal urana i/ili plutonija, uran-plutonij nitrid ili pak kombinaciju torija i urana kao gorivo. U razvoju su različite izvedbe reaktora s obzirom na nazivnu snagu. Prva opcija je reaktor snage 50 do 150 MW<sub>e</sub> s dugačkim periodom korištenja goriva (izmjena goriva nakon 15 do 20 godina). Razvija se i reaktor veličine između 300 i 400 MW<sub>e</sub> kao i opcija od 1200 MW<sub>e</sub>. Izlazna temperatura rashladnog sredstva bila bi oko 550 °C, a u slučaju korištenja goriva u obliku nitrida te uz razvoj odgovarajućih materijala mogle bi se postići temperature i do 800 °C. Temperatura vrelišta olova iznosi 1749 °C prema tome ne postoji opasnost od isparavanja rashladnog sredstva pri normalnim uvjetima rada. Pogodna je i činjenica da će ovi reaktori raditi pri atmosferskom tlaku, čime se eliminira mogućnost gubitka rashladnog sredstva uz uporabu odgovarajućeg zaštitnog spremnika. Osim što predstavlja prednost u vidu sigurnosti time se mogu postići i pojednostavljenja u dizajnu. Olovo zadržava fisijske produkte i druge materijale koji se mogu osloboditi iz goriva te ne podržava kemijske reakcije kojima bi se oslobodila energija što ga čini povoljnim izborom za rashladno sredstvo u slučaju eventualnih nesreća. LFR bi prvenstveno trebali služiti u proizvodnji električne energije, no naprednije izvedbe mogle bi se koristiti i za proizvodnju vodika [35].

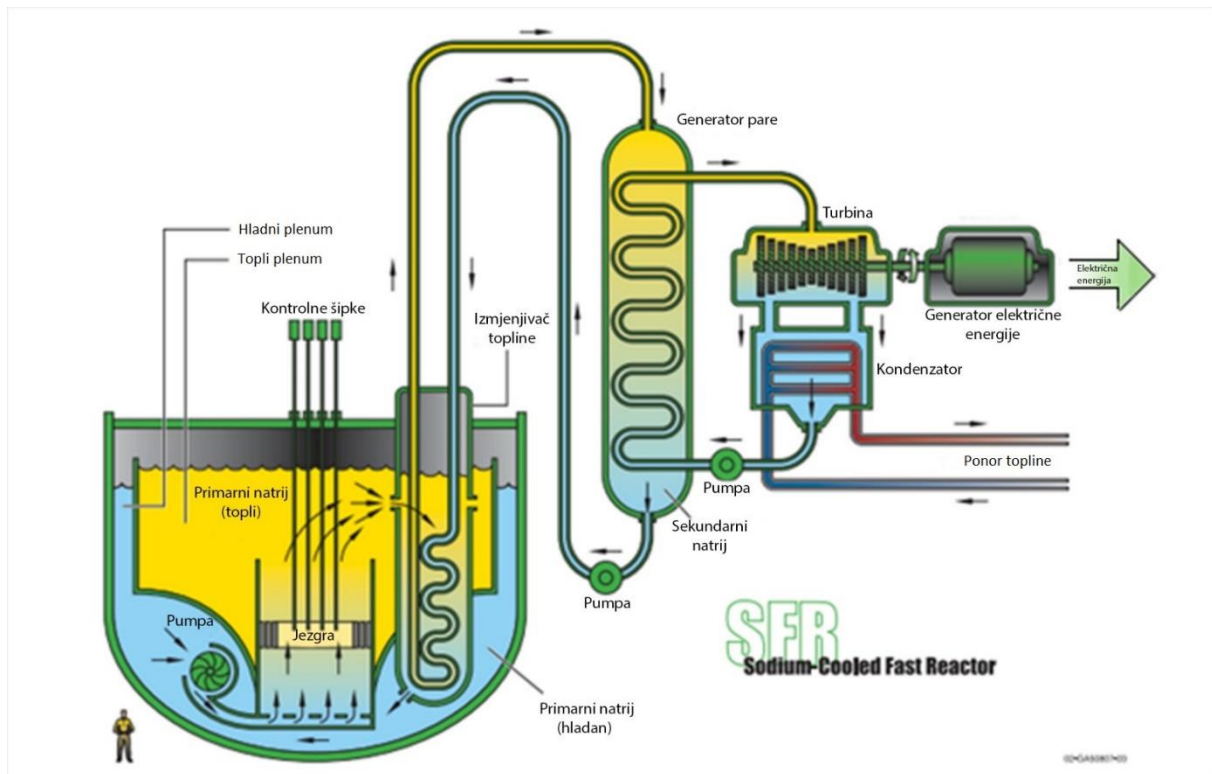


Slika 5.1. Shema postrojenja s LFR reaktora

## 5.2. Natrijev brzi reaktor

SFR koristi tekući natrij kao rashladno sredstvo čime je omogućena velika gustoća snage s malim volumenom rashladnog sredstva te rad pri niskom tlaku. Obzirom da natrij reagira sa vodom i zrakom važno je razviti dizajn kojim bi se smanjile mogućnosti takve reakcije i njenih posljedica. SFR jedan je od reaktora koji koristi spektar brzih neutrona te ima zatvoren ciklus goriva. Zatvoreni ciklus goriva nužan je kako bi se iskoristile prednosti koje nudi SFR, a to su oporavak i recikliranje aktinida te efikasnije iskorištenje goriva. Razvijaju se varijante različitih snaga, manje modularne izvedbe snage 50 do 300 MW<sub>e</sub>, ali i izvedbe snage 1500 MW<sub>e</sub>. Uz korištenje provjerenih, trenutno dostupnih materijala SFR bi trebali raditi pri temperaturama rashladnog sredstva od 500 do 550 °C. Postoje dvije potencijalne opcije za gorivo koje bi se koristilo kod SFR, a to su MOX gorivo ili legura urana, plutonija i cirkonija (metal). Korištenje MOX-a je izglednije obzirom na veće dosadašnje iskustvo uporabe. Većina osnovne tehnologije za SFR razvijena je u prethodnim programima s brzim reaktorima. Najnoviji projekti u kojima se koristi natrij kao rashladno sredstvo su Kineski eksperimentalni brzi reaktor

(CEFR) snage 20 MW<sub>e</sub> iz 2011. godine te prototip brzog oplodnog reaktora u Indiji koji je pušten u pogon 2013 [35, 36].



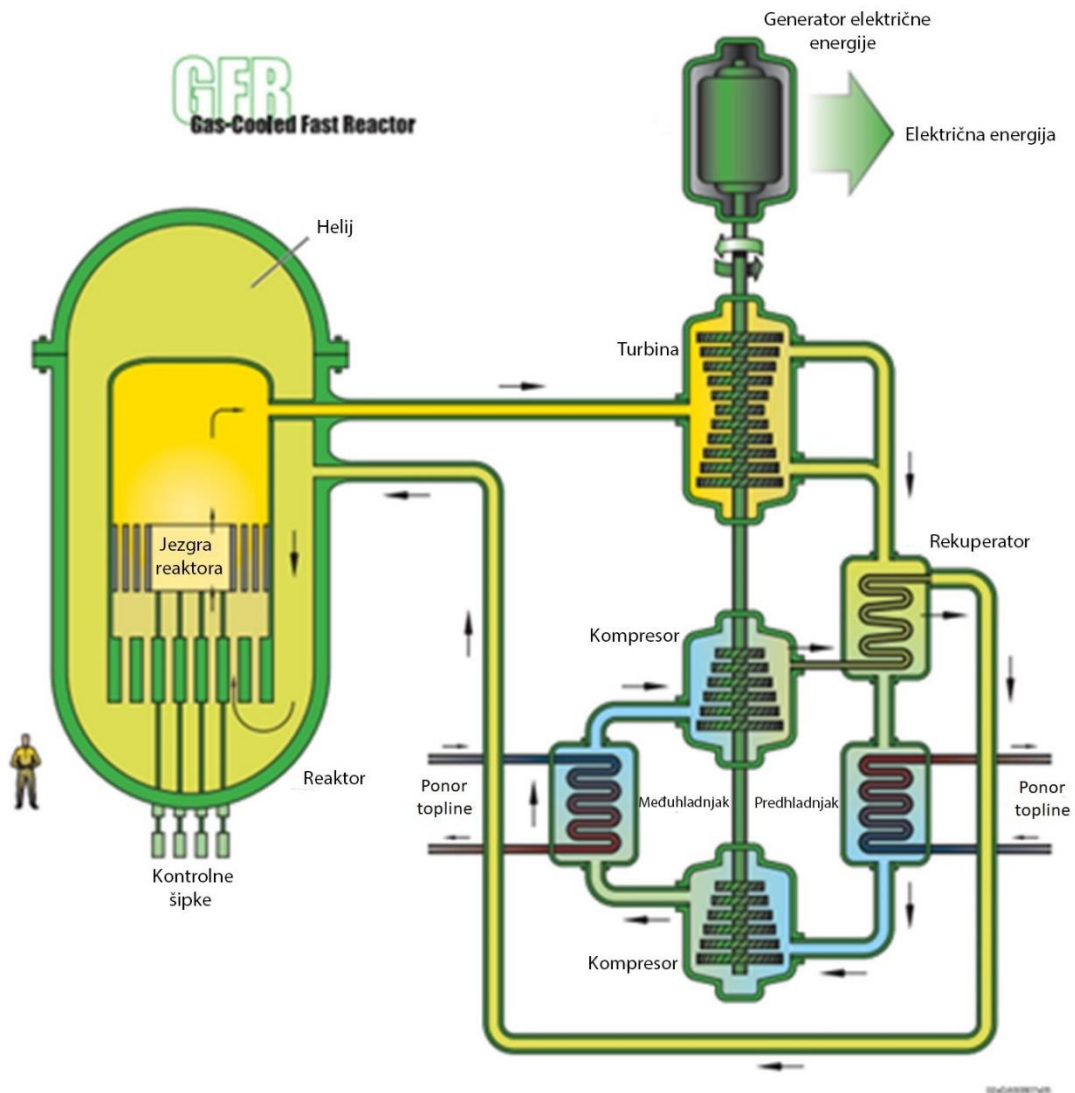
Slika 5.2. Shema postrojenja sa SFR reaktorom

### 5.3. Plinski brzi reaktor

GFR sustav ima reaktor koji koristi spektar brzih neutrona, koristi helij kao rashladno sredstvo te ima zatvoren ciklus goriva. U prošlosti su već razvijani reaktori koji su se hladili helijem poput PBMR i GT-MHR međutim te izvedbe koristile su termalne neutrone. Izlazna temperatura helija iznosila bi 850 °C čime bi se osigurala učinkovita proizvodnja električne energije, a isto tako GFR bi mogao služiti za proizvodnju vodika ili generiranje procesne topline. U slučaju proizvodnje električne energije topli helij direktno prolazi kroz plinsku turbinu. Električna energija dobiva se kroz Braytonov proces za razliku od većine današnjih reaktora koji koriste Clausius-Rankine-ov proces. Kombinacijom brzog neutronskeg spektra i potpunog recikliranja aktinida GFR minimiziraju proizvodnju dugoživućih radioaktivnih izotopa. Korištenjem brzih neutrona također je omogućena efikasnija upotreba raspoloživih fisilnih materijala (uključujući osiromašeni uran iz postrojenja za obogaćivanje urana) nego s plinskim reaktorom koji koristi termalne neutrone. Nazivna snaga reaktora iznosi 1200 MW<sub>e</sub>.



Najizglednija opcija pri odabiru goriva jest uran-plutonium karbid, a moguća je i opcija uran-plutonium nitrid. Glavni izazovi u razvoju GFR-a su strukturni materijali za unutrašnjost reaktorske posude koji će moći izdržati oštećenja od brzih neutrona te izrazito visoke temperature (čak do 1600 °C u slučaju nesreće) [35].

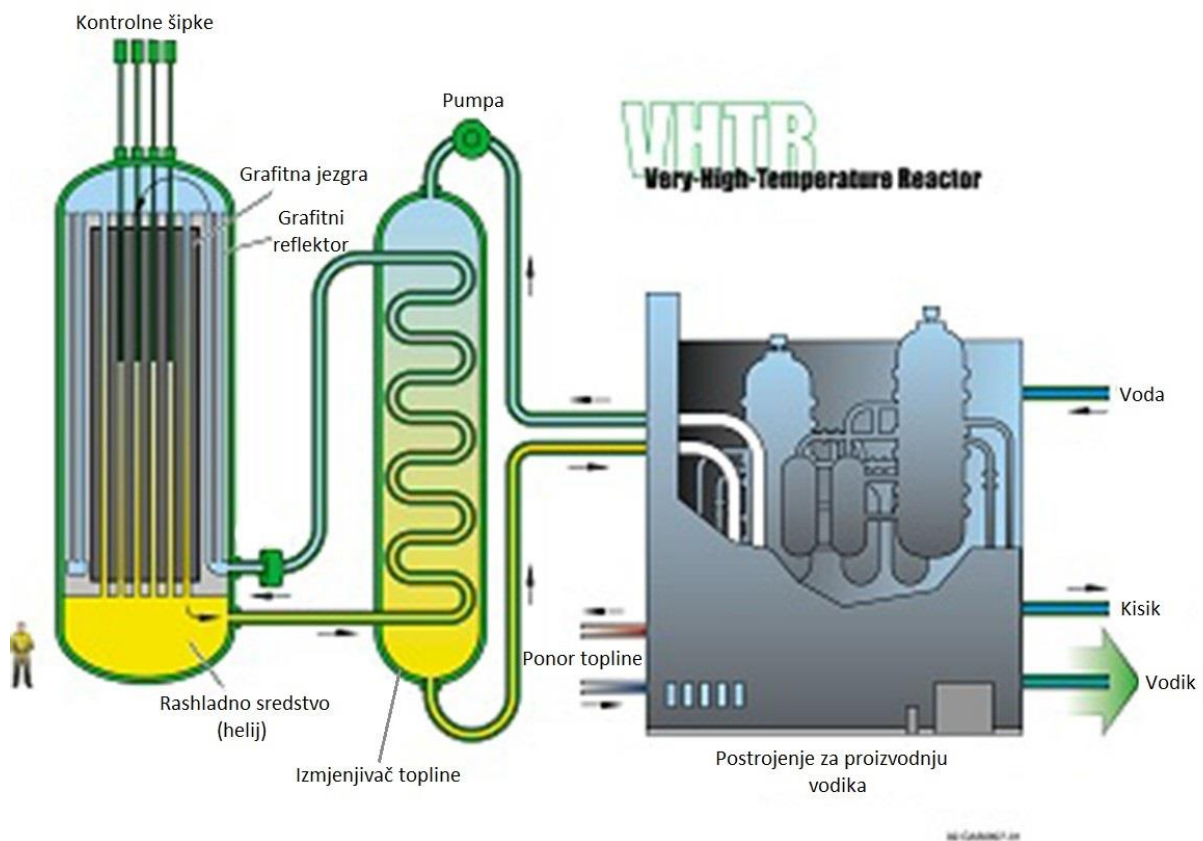


Slika 4.3. Shema postrojenja s GFR reaktorom

#### 5.4. Reaktor vrlo visoke temperature

VHTR je grafitom moderiran, helijem hlađen reaktor koji koristi termalne neutrone u svom radu. Izlazne temperature koje se postižu u jezgri reaktora iznose između 700 i 950 °C, a razvojem materijala boljih svojstava biti će moguće postići i temperature iznad 1000 °C [37]. Primarna svrha bila bi proizvodnja vodika, ali mogao bi se koristiti i za proizvodnju električne energije s visokom učinkovitošću (preko 50%). Izvedba reaktora snage 600 MW<sub>t</sub> koja je u

razvoju proizvodila bi  $2 \cdot 10^6 \text{ m}_n^3$  vodika dnevno [35]. Termalna snaga reaktora ograničena je uvjetom da u uvjetima nesreće VHTR u potpunosti samostalno otkloni ostatnu toplinu. VHTR bi se također mogao koristiti i za dobivanje procesne topline primjerice u rafinerijama ili petrokemijskoj industriji. Gorivo za VHTR bile bi čestice TRISO goriva, koje bi podržavalo rad pri vrlo visokim temperaturama. TRISO čestice sastavljene su od uranovog dioksida koji se nalazi u središtu te od 3 zaštitna sloja na bazi ugljika i keramičkih materijala koji sprječavaju ispuštanje radioaktivnih fizijskih produkata. Čestice se mogu oblikovati u cilindrične pelete ili u kugle veličine biljarske lopte [38]. Osim TRISO goriva VHTR bi mogli koristiti uran-plutonij, plutonij, MOX ili uran-torij gorivo [37]. Na slici 5.4. prikazan je VHTR koji bi služio za proizvodnju vodika.

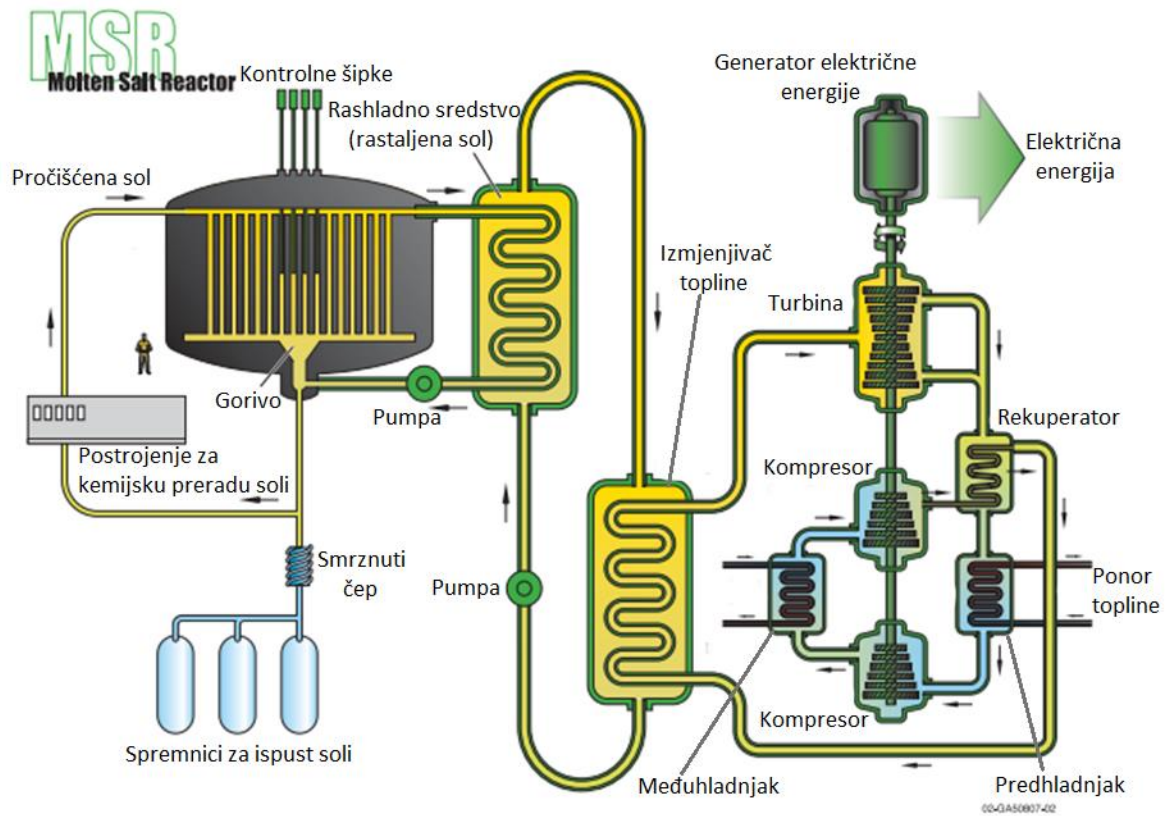


Slika 5.4. Shema postrojenja s VHTR reaktorom

## 5.5. Reaktor s rastaljenim solima

Prva istraživanja nuklearnih reaktora s rastaljenim solima započela su već 1940-ih godina u sklopu američkog programa za razvoj nuklearnog pogona za zrakoplove. Rastaljene fluoridne soli činile su se pogodnima s obzirom na svojstva koja posjeduju poput dobre topljivosti urana, dobra svojstva prijenosa topline, ne oštećuju se radijacijom, u dodiru s vodom i zrakom ne

dolazi do burnih reakcija te općenito spadaju među stabilnije kemijske spojeve. Tako je 1954. godine u Oak Ridgeu s radom započeo eksperimentalni reaktor snage 2,5 MW<sub>t</sub> koji je kao gorivo koristio smjesu NaF, ZrF<sub>4</sub> i UF<sub>4</sub> dok se kao moderator koristio BeO. Reaktor je bio stabilan te je bez pojave mehaničkih ili kemijskih problema radio 9 dana, a izlazne temperature iznosile su 860 °C [39]. U sklopu istraživanja reaktora četvrte generacije razmatraju se dvije vrste reaktora s rastaljenim solima. Prvi, brzi reaktor u kojemu bi fisilni materijal bio otopljen u soli te drugi tip u kojemu bi gorivo bilo u obliku TRISO čestica, a rastaljene soli koristile bi se samo kao rashladno sredstvo. U slučaju brzih reaktora moguće su različite vrste goriva u kojima bi fisilni materijal bio otopljen u solima fluora. Kao fisilni materijal mogao bi se koristiti uran (<sup>233</sup>U, <sup>235</sup>U), plutonij (<sup>239</sup>Pu) ili torij (<sup>233</sup>Th). Najnovija istraživanja baziraju se na razvoju brzog reaktora koji bi koristio litij-berilij fluorid (FLiBe) kao rashladno sredstvo s otopljenim torijem i <sup>233</sup>U. Radne temperature reaktora bile bi oko 700 °C, a tlakovi oko atmosferskih vrijednosti. Snaga reaktora iznosila bi 1000 MW<sub>e</sub> te bi se mogao koristiti u proizvodnji električne energije i u proizvodnji vodika [35]. MSR su pogodni u pogledu sigurnosti iz razloga što pregrijavanje jezgre reaktora nije moguće zahvaljujući svojstvima koje rastaljena sol posjeduje, a to su negativni temperaturni koeficijent i negativni koeficijent praznina. U slučaju povećanog zagrijavanja rastaljena sol ekspandirati će uslijed čega će se gustoća smanjiti. Smanjenje gustoće rezultirati će manjom reaktivnošću procesa, odnosno proces fisije odvijati će se sporije i reaktor će se ohladiti [40]. Problem kod MSR je korozija koja se javlja pri kontaktu otopljenih soli s materijalima iz kojih je reaktor izgrađen. Prema tome, potrebna su dodatna istraživanja u tom području prije nego MSR budu korišteni u komercijalne svrhe. Kina se posebno se ističe u razvoju nuklearne energetike pa tako i u razvoju reaktora s rastaljenim solima. Tako je 2022. godine eksperimentalni Thorium Molten Salt Reactor – Liquid Fuel 1 (TMSR-LF1) u Kini dobio dozvolu za puštanjem u rad. Reaktor snage 2 MW<sub>t</sub> koristi gorivnu sol LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>[+ThF<sub>4</sub>] u kojoj obogaćenje urana iznosi nešto manje od 20 %, a količina torija iznosi 50 kg uz omjer pretvorbe 0,1. Sekundarna sol je LiF-BeF<sub>2</sub>. U slučaju da se TMSR-LF1 pokaže uspješnim Kina planira do 2030. izgraditi reaktor snage 373 MW<sub>t</sub> [41, 42]. Na slici 5.5. prikazan je reaktor koji koristi gorivo u obliku rastaljene soli i rastaljenu sol kao rashladno sredstvo u sekundarnom krugu.

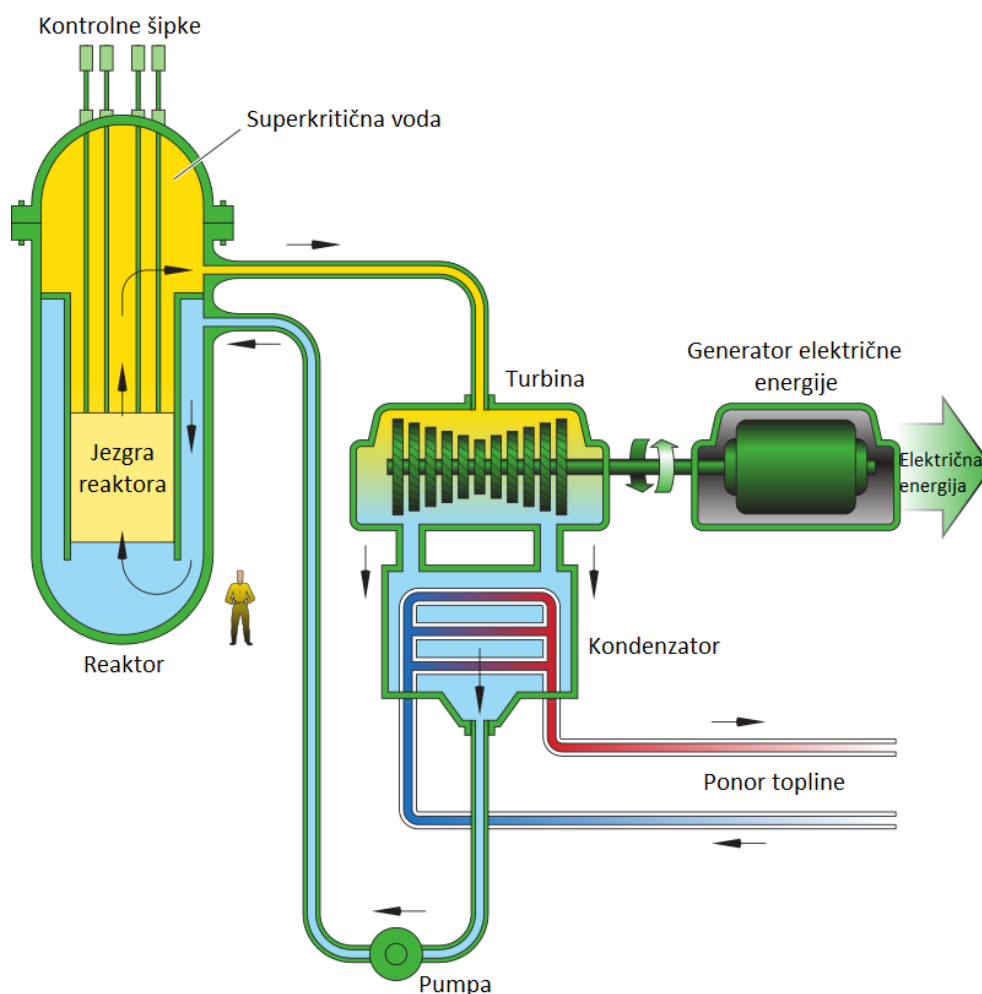


Slika 5.5. Shema postrojenja s MSR reaktorom

## 6. SUPERKRITIČNI VODOM HLAĐENI REAKTOR

### 6.1. Općenite značajke SCWR-a

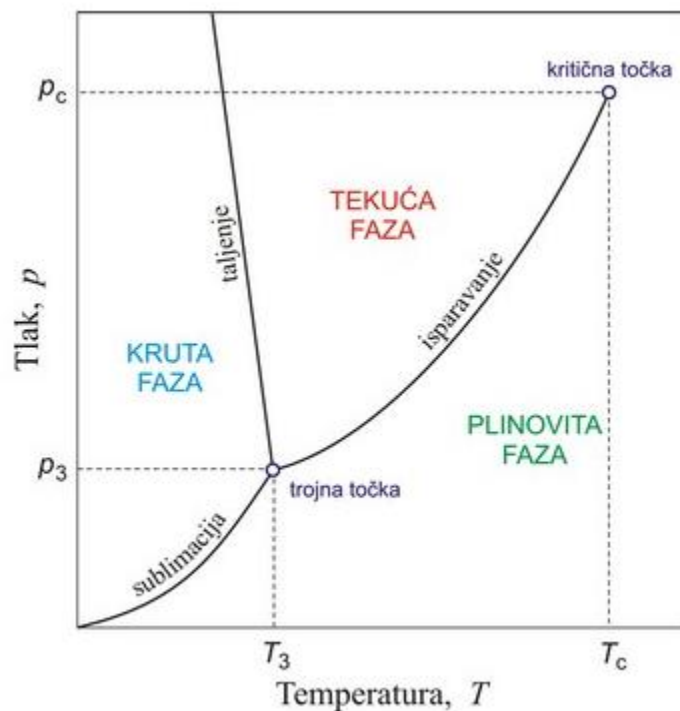
SCWR je reaktor koji radi pri veoma visokim tlakovima te koristi vodu ili tešku vodu kao rashladno sredstvo. Voda koja bi se koristila imala bi temperature veće od  $374\text{ }^{\circ}\text{C}$  i tlakove iznad  $22,1\text{ MPa}$ , odnosno vrijednosti temperature i tlaka iznad termodinamičke kritične točke vode. Navedeni radni uvjeti omogućili bi postizanje većih efikasnosti nego li kod konvencionalnih reaktora hlađenih vodom. SCWR jedini je vodom hlađen reaktor četvrte generacije te stoga predstavlja prirodnu evoluciju trenutnih tehnologija naprednih reaktora hlađenih vodom. SCWR mogao bi raditi sa spektrom termalnih neutrona, ali i sa brzim neutronima. Gorivo koje bi se koristilo bio bi  $\text{UO}_2$  kao i kod većine konvencionalnih reaktora ili kombinacija plutonija i torija u slučaju reaktora koji bi koristili termalne neutrone. Izvedbe koje bi koristile brze neutrone mogle bi koristiti MOX gorivo. Razmatraju se dvije moguće izvedbe. Prva koja bi koristila tlačnu posudu te druga s tlačnim cijevima. Zemlje koje su pokazale najveći interes za razvojem SCWR te su razvile koncepte kako bi SCWR trebali izgledati su Kina, Kanada, Europska Unija (kroz organizaciju Euratom), Japan i Rusija. SCWR koristili bi se u proizvodnji električne energije. Osim veće efikasnosti SCWR su također pogodni jer je moguće pojednostavljeno cijelog postrojenja čime bi se smanjili kapitalni troškovi, obzirom da se pojedine komponente mogu izostaviti pošto se koristi superkritična voda [43]. Superkritična voda proizvedena u reaktoru direktno bi se provodila kroz turbinu, a na slici 6.1. prikazano je postrojenje koje bi koristilo SCWR.



Slika 6.1. Shema postrojenja sa SCWR reaktorom

## 6.2. Kritična točka vode

Ovisno o tome koliki su tlak i temperatura određenog kemijskog spoja on će imati različita fizikalna i kemijska svojstva. Dijagram u kojemu se na osi apscise nalaze temperature, a na osi ordinate tlakovi te prikazuje područja pojavljivanja različitih faza (krutina, tekućina, plin) određenog kemijskog spoja naziva se fazni dijagram. Dvije točke u dijagramu karakteristične su za svaki kemijski spoj, a to su trojna točka i kritična točka. Trojna točka odgovara vrijednosti tlaka i temperature pri kojoj sve tri faze određenog kemijskog spoja mogu postojati u ravnoteži. Vrijednosti tlaka i temperature pri kojima više nije moguće razlikovati tekuću od plinovite faze odgovaraju kritičnoj točki. Za vodu kritična točka u faznom dijagramu nalazi se pri vrijednosti tlaka od 22,09 MPa te pri temperaturi od 374,14 °C [44]. Fazni dijagram za vodu prikazan je na slici 6.2.



Slika 6.2.. Fazni dijagram vode [46]

Neki od parametara vode u kritičnoj točki su:

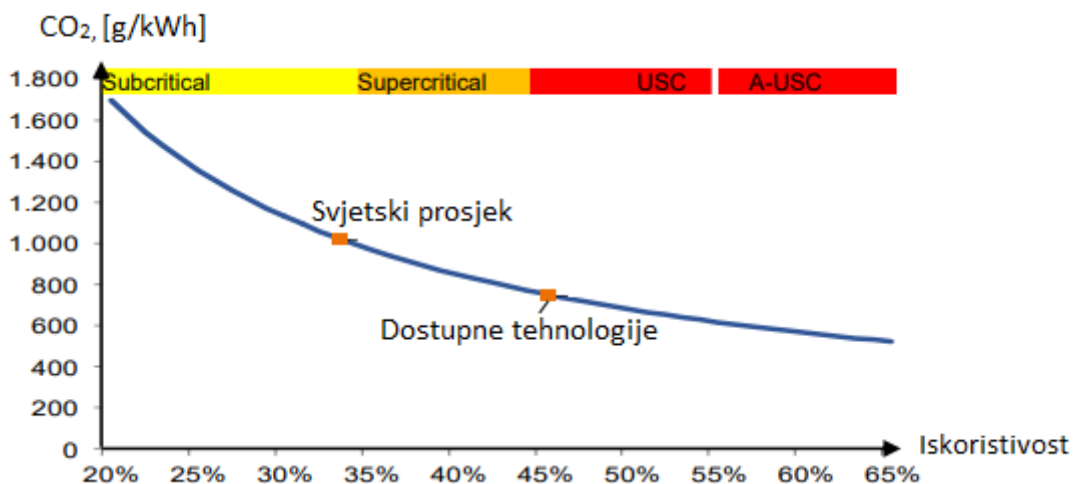
- Specifični volumen,  $v_c = 0,003155 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
- Specifična entalpija,  $h_c = 2084 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- Specifična entropija,  $s_c = 4,406 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

Iz termodinamičkih tablica može se vidjeti kako se približavamo kritičnoj točki, razlike u svojstvima poput gustoće i entalpije između tekuće i plinovite faze postaju sve manje. Primjerice, ispod kritične točke na tlaku od 218 bar i pri temperaturi od 373 °C specifična entalpija vrele kapljevine iznosi  $1965 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ , specifična entalpija suhozasićene pare iznosi  $2233 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  dok specifična toplina isparavanja iznosi  $268 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ . U kritičnoj točki nestaju razlike između svojstava tekuće i plinovite faze pa tako i specifična toplina isparavanja postaje 0. Iznad kritične točke nalazi se superkritični fluid, odnosno superkritična voda.

### 6.3. Iskustva u termoelektranama

Iako danas još ne postoje nuklearne elektrane u kojima se koristi superkrična voda, neke termoelektrane na fosilna goriva već koriste takvu tehnologiju za proizvodnju električne energije. Temperature superkrične vode koje se danas mogu postići pri tlaku od 330 bar, iznose čak 650 °C. Ovisno o temperaturi i tlaku kojeg superkrična voda ima na ulazu u parnu turbinu razlikuju se sustavi koji rade s nadkričnom, ultra-nadkričnom (USC) te naprednom ultra-nadkričnom (AUSC) tehnologijom. Iako nuklearne elektrane ne stvaraju ugljični dioksid tijekom svog rada, valja napomenuti kako termoelektrane na fosilna goriva pored povećane iskoristivosti koju ostvaruju postizanjem viših temperatura također značajno smanjuju emisije CO<sub>2</sub>. Sustavi koji rade u nadkričnom području postižu temperature oko 565 °C pri tlaku od 250 bara. Termoelektrane koje koriste nadkričnu tehnologiju čine oko 22 % od ukupnog broja termoelektrana na ugljen u svijetu. Iako su početna ulaganja veća nego za termoelektrane koje rade u podkričnom području, mogu se postići značajne uštede u gorivu uz ostvarivanje većih učinkovitosti. Veća početna ulaganja posljedica su primjene materijali boljih mehaničkih svojstava te postupaka zavarivanja potrebnih za rad pri povišenim tlakovima i temperaturama. Sustavi koji koriste ultra-nadkričnu tehnologiju postižu čak i više tlakove i temperature, oko 275 bar i 620 °C. Takva postrojenja postižu iskoristivosti i do 45 %. U usporedbi sa termoelektranama koje rade u podkričnom području smanjuju se emisije CO<sub>2</sub> za 1/3 uz istu količinu korištenog ugljena. Udio ultra nadkričnih postrojenja u ukupnom broju termoelektrana na ugljen u svijetu iznosi 3 %. AUSC predstavljaju daljnje poboljšanje u odnosu na USC sustave. Postizanjem još većih tlakova i temperatura biti će potrebno koristiti materijale koji imaju višu temperaturu tališta. Primjer takvog materijala je legirani čelik s velikim udjelom nikla. Iako još ne postoje postrojenja koja koriste AUSC tehnologiju, države poput Kine, SAD-a, Japana i Indije razvijaju eksperimentalna postrojenja koja bi u budućnosti mogla postizati iskoristivosti i do 50 %. Povećanjem toplinske iskoristivosti za 1 % termoelektrane na ugljen mogu smanjiti emisije CO<sub>2</sub> za 2 do 3 %. Prosječna iskoristivost u današnjim termoelektranama iznosi 33 %, a kada bi se iskoristivost povećala na 40 % emisije CO<sub>2</sub> na godišnjoj bazi mogle bi se smanjiti za 2 Gt [27]. Ovisnost emisija CO<sub>2</sub> po kWh proizvedene električne energije o iskoristivosti u termoelektranama vidljiva je sa slike 6.3.





Slika 6.3. Ovisnost emisija ugljičnog dioksida o iskoristivosti termoelektrana na fosilna goriva [27]

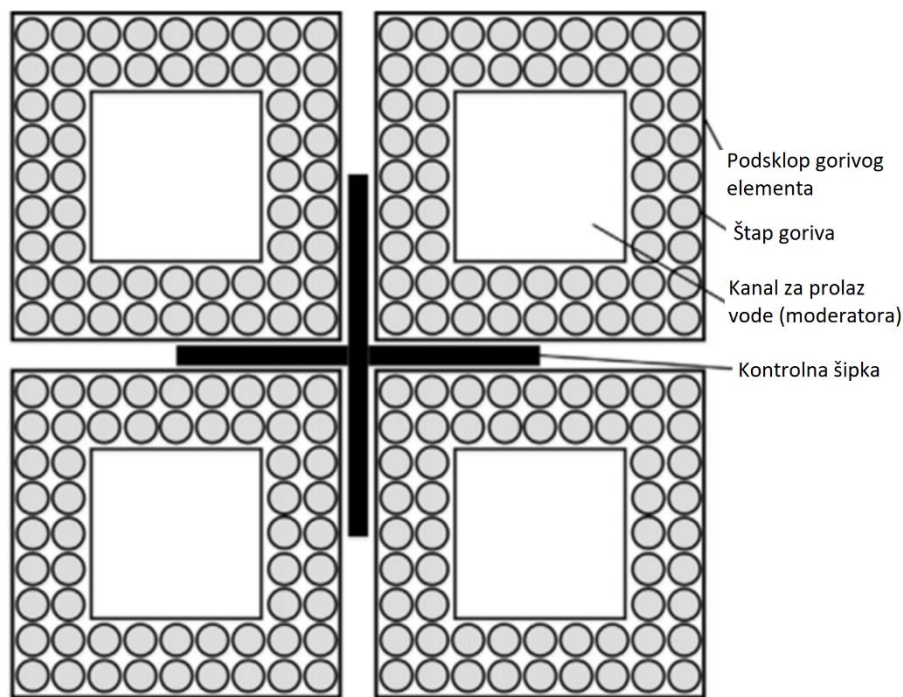
TE Avedøre kombinirano je postrojenje za proizvodnju električne energije i procesne topline u Danskoj. Postrojenje se sastoji od dvije jedinice ukupnog kapaciteta 793 MW za proizvodnju električne energije i 918 MW topline koja se koristi za grijanje okolnih područja. Jedinica 1 primarno je bila ložena ugljenom, no od 2015. godine koriste se drveni peleti čime su emisije CO<sub>2</sub> smanjene za oko 1,2 milijuna tona godišnje. Jedinica 2 u funkciji je od 2001. godine te može sagorijevati širok spektar goriva poput prirodnog plina, loživih ulja ili drvenih peleta. Jedinica 2 postiže iskoristivost od 49 % u slučaju da se proizvodi isključivo električna energija. U slučaju paralelne proizvodnje električne energije i korištenja otpadne topline za grijanje postižu se ukupne iskoristivosti između 94 i 96 % što ovo postrojenje čini jednim od najučinkovitijih kombiniranih postrojenja u svijetu. Tretiranjem dimnih plinova u TE Avedøre također se proizvodi gips. Tlak i temperatura superkritične vode na ulazu u turbinu iznose 300 bar i 600 °C [46]. TE Karlsruhe u Njemačkoj, TE Safi u Maroku te TE Fuyang u Kini još su neki od primjera koji koriste ultra nadkritičnu tehnologiju čime postižu veće iskoristivosti u odnosu na konvencionalne termoelektrane.

## 6.4. Izvedbe SCWR-a

### 6.4.1 Kina

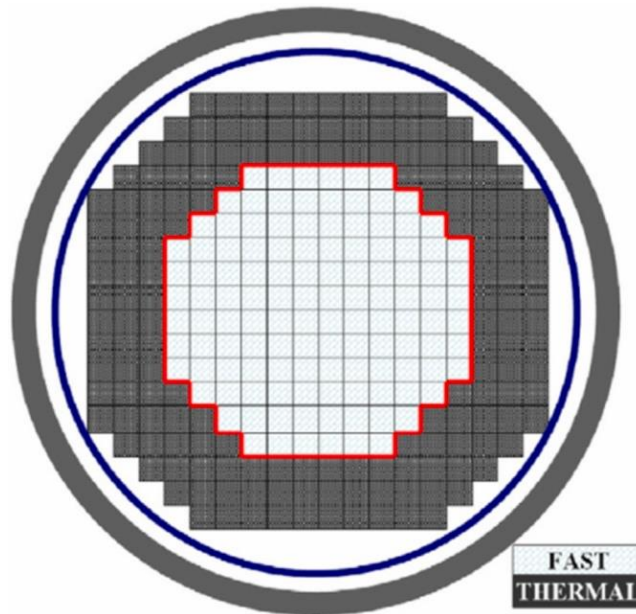
Postoje dva glavna tipa kineskih koncepata nuklearnih reaktora koji bi koristili superkritičnu vodu, CSR1000 te SCWR-M. CSR1000 je tip reaktora sa spremnikom pod tlakom koji koristi termalni spektar neutrona te superkritičnu vodu kao rashladno sredstvo i kao moderator. U donjem dijelu jezgre. Temperatura vode na ulazu iznosila bi 280 °C dok bi temperatura na

izlazu iz jezgre bila 500 °C što bi rezultiralo toplinskom iskoristivošću od 45 %. Snaga reaktora iznosila bi 1000 MW<sub>e</sub>. Kako bi postigli ravnomjerniju raspodjelu aksijalne snage, CSR1000 primjenjuju dizajn jezgre s dva prolaza rashladnog sredstva. Jezgra reaktora sadrži 177 gorivnih elemenata. U prvome prolazu voda prolazi kroz 57, a u drugome prolazu kroz 120 gorivnih elemenata. Svaki gorivni element sastoji se iz 4 podsklopa gorivog elementa i 4 kanala za provođenje vode što je prikazano na slici 6.4. Voda prolazi kroz kanale u središtu podsklopova i kroz prostor između šipki sa gorivom te tako djeluje kao moderator i kao rashladno sredstvo. Kako bi se postigla bolja kontrola nad reaktivnošću reaktora koriste se kontrolne šipke križnog poprečnog presjeka [47].



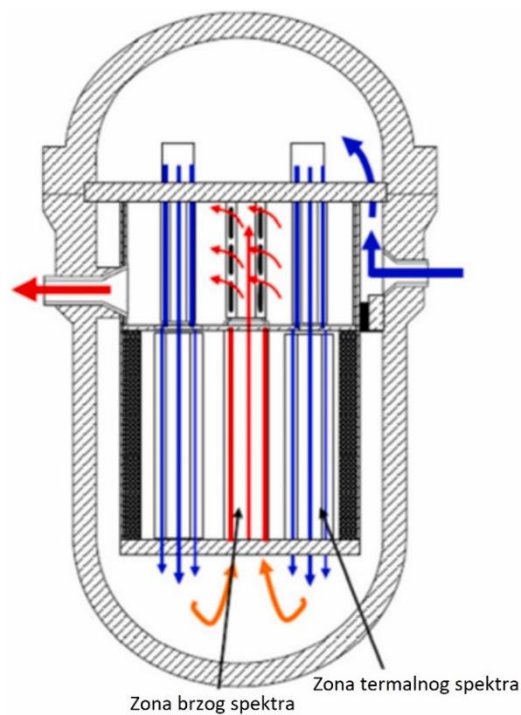
Slika 6.4. Gorivni element kineskog CSR1000 reaktora [47]

SCWR-M je tip reaktora s mješovitom jezgrom, odnosno sastoji se od dijela s termalnim i dijela koji koristi spektar brzih neutrona. Jezgra SCWR-M sastoji se od 284 goriva elementa, od čega 164 elementa nalaze u vanjskoj zoni koja reagira s termalnim neutronima i 120 elemenata u unutarnjoj zoni koji reagiraju s brzim neutronima. Raspored gorivnih elemenata u jezgri reaktora prikazan je na slici 6.5.



Slika 6.5. Raspored gorivnih elemenata u SCWR-M [47]

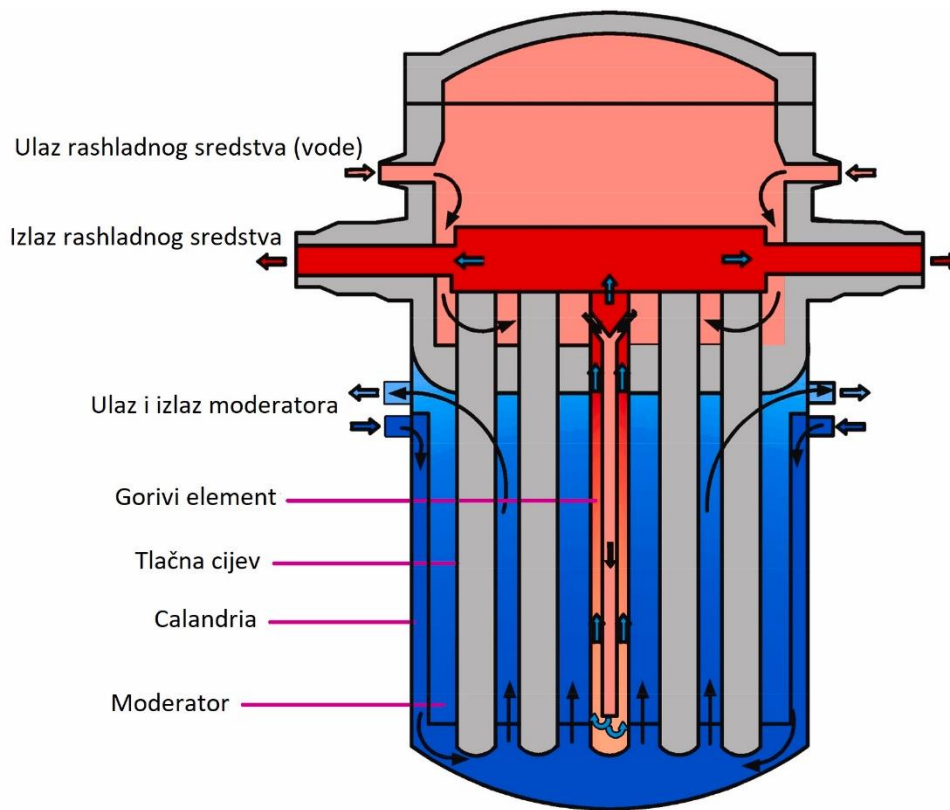
U zoni sa termalnim spektrom gorivni elementi podijeljeni su u tri sloja po visini koji sadrže gorivo različitog postotka obogaćenja. Voda ulazi u gornju komoru reaktora nakon čega dio ulazi u kanale moderatora, a dio u kanale rashladnog sredstva. Rashladno sredstvo zatim izlazi iz zone s termalnim spektrom te s donje strane ulazi u zonu s brzim neutronima. Protok rashladnog sredstva kod SCWR-M prikazan je na slici 6.6.



Slika 6.6. Protok rashladnog sredstva unutar SCWR-M [47]

#### 6.4.2. Kanada

Kanadska izvedba SCWR-a jedini je koncept koji koristi tlačne cijevi te predstavlja nadograđenu verziju CANDU reaktora. Glavne značajke CANDU reaktora su zadržane, kao što su konfiguracija modularnih kanala goriva te odabir teške vode kao moderatora. Predložen je koncept bez taljenja jezgre. Izmjenom topline zračenjem između gorivnih šipki unutar tlačne cijevi i hladnije teške vode koja se koristi kao moderator može se odvesti ostatna toplina u slučaju ekstremnih radnih uvjeta. Na taj način značajno se smanjuje vjerojatnost taljenja jezgre u reaktoru. Jezgra kanadskog SCWR-a sadrži 336 kanala goriva, a prosječna snaga po kanalu iznosi 7,5 MW<sub>t</sub>. Shematski prikaz kanadskog SCWR-a prikazan je na slici 6.7.



Slika 6.7. Shematski prikaz kanadskog koncepta SCWR-a [47]

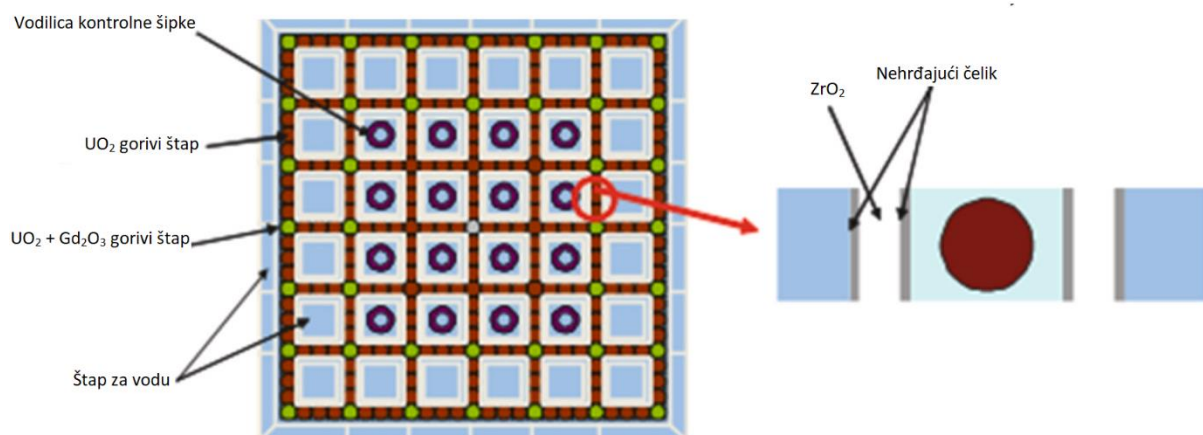
Radni tlak bio bi 25 MPa dok bi ulazna i izlazna temperatura rashladnog sredstva iznosile 350 i 625 °C. Uz takve radne parametre postizala bi se toplinska iskoristivost od 48 %, dok bi snaga reaktora iznosila 1200 MW<sub>e</sub> [47].

### 6.4.3. Euratom

Europska unija također razvija koncept SCWR reaktora u obliku tlačne posude pod nazivom HPLWR. Karakteristična značajka ovog dizajna je primjena toka rashladnog sredstva s 3 staze pa je tako i proces zagrijavanja rashladne vode podijeljen u 3 faze. Jezgra reaktora također je podijeljena u 3 dijela. Svaki gorivni element sastoji se od 9 podsklopova gorivnog elementa. U svakom podsklopu nalazi se 40 štapova s gorivom, dok se u središtu nalazi dodatan prostor za moderator. Radni tlak iznosio bi 25 MPa dok bi izlazna temperatura iz jezgre bila 500 °C [47].

### 6.4.4. Japan

Japan istovremeno provodi istraživanja koncepata SCWR-a s termalnim (Super LWR) i brzim (Super FR) spektrom. Voda se u konceptu s termalnim spektrom koristi kao moderator te djeluje u obliku vodenih šipki. Vodene šipke predstavljaju prostor u jezgri reaktora ispunjen vodom kojim se osigurava negativan koeficijent praznine i mogućnost dodatnog hlađenja jezgre u slučaju nesreća. Obje izvedbe primjenjivale bi protok rashladnog sredstva u dva prolaza. Nakon ulaza vode u reaktor dio se odvodi u gornju komoru odakle se provodi kroz gorive elemente smještene uz vanjski dio jezgre. Drugi dio vode odvodi se u donju komoru gdje se miješa sa zagrijanom vodom koja je prošla kroz gorive elemente uz vanjski dio jezgre nakon čega rashladno sredstvo struji odozdo prema gore kroz gorive elemente smještene u središnjem dijelu jezgre. Jezgra reaktora sastoji se od 372 goriva elementa podijeljenih u 3 skupine [47]. Dizajn gorivnih elemenata jednak je kao kod konvencionalnih reaktora koji koriste vodu kao moderator i rashladno sredstvo. Gorivo je u obliku  $\text{UO}_2$  peleta s oblogom iz legure nehrđajućeg čelika i nikla. Dizajn gorivnog elementa za Super LWR prikazan je na slici 6.8.



Slika 6.5. Dizajn gorivnog elementa japanskog Super LWR [47]

Super FR imati će mnogo veću gustoću snage u odnosu na Super LWR obzirom da ne zahtijeva korištenje moderatora. Koristilo bi se MOX gorivo, a osim toga većina karakteristika bila bi jednaka kao i kod Super LWR izvedbe.

Tablica 6.1. Pregled koncepata SCWR-a s glavnim značajka [47]

Zemlja	Kina		Japan		Kanada	EU	Rusija
Naziv	CSR1000	SCWR-M	Super LWR	Super FR	Canadian SCWR	HPLWR	VVER-SCP
Tip	TP	TP	TP	TP	TC	TP	TP
Tlak, [MPa]	25	25	25	25	25	25	24,5
Ulazna temp., [°C]	280	280	290	280	350	280	290
Izlazna temp., [°C]	500	510	560	501	625	500	540
Toplinska snaga, [MW]	2300	3800	3794	1602	2540	2300	3830
Iskoristivost, [%]	43	44	46	44	48	43,5	45
Aktivna visina jezgre, [m]	3	4,5	4,2	2,4	5	4,2	4,07
Gorivo	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> /MOX	UO <sub>2</sub>	MOX	Pu-Th (UO <sub>2</sub> )	UO <sub>2</sub>	MOX
Moderator	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O/-	H <sub>2</sub> O	-/ZrH	D <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	/
Broj prolaza protoka rashl. sreds.	2	2	2	2	1	3	1

Većina koncepata ima približno jednake radne parametre. Glavne razlike među pojedinim izvedbama su u broju prolaza rashladnog sredstva kroz jezgru reaktora te u dizajnu i broju gorivnih elemenata i njihovog rasporeda unutar jezgre.

## 6.5. Prednosti

Implementacijom SCWR-a postići će se brojne prednosti u usporedbi s konvencionalnim reaktorima koji koriste vodu kao rashladno sredstvo. Korištenjem superkritične vode omogućeno je postizanje viših temperatura na ulazu u turbinu čime se direktno povećava toplinska iskoristivost samog procesa. U usporedbi sa konvencionalnim reaktorima koji postižu iskoristivosti između 34 i 36 %, SCWR će imati znatno veću iskoristivost, oko 44 %. Više temperature također podrazumijevaju i veće entalpijske vrijednosti čime se omogućava manji protok rashladnog sredstva po jedinici termalne snage. Na taj način smanjuje se veličina pumpi rashladnog sredstva, cjevovoda i pripadajuće armature kao i sama potrošnja energije za pumpanje. Koristiti će se manje količine vode u usporedbi s PWR reaktorima obzirom da superkritična voda po izlazu iz jezgre reaktora direktno prolazi kroz turbinu. Rashladno sredstvo također će imati manju gustoću što će u kombinaciji s manjim količinama omogućiti gradnju manjih kontejnerskih posuda. Korištenje superkritične vode također nudi mogućnost pojednostavljenja cjelokupnog postrojenja obzirom da brojne komponente poput uređaja za sušenje pare, separatora pare, generatora pare i drugih uređaja nisu potrebne [43]. Prozirnost vode omogućuje jednostavan optički nadzor, u otvorenom reaktoru, prilikom rukovanja gorivom bilo da se radi o svježem ili istrošenom gorivu. Gorivni elementi ili čak svaki gorivni štapi mogu biti označeni i tako identificirani bez potrebe za uklanjanjem iz rashladnog sredstva ili jezgre. Nadalje, voda je inertna u kontejnerskoj posudi pa tako i eventualno curenje rashladnog sredstva ne predstavlja nikakvu sekundarnu štetu, već se sigurnosnim sistemima jednostavno nadomjesti nedostatak rashladnog sredstva [48]. Razvojem SCWR-a koji bi koristio brze neutrone dodatno bi se pojednostavila izvedba obzirom da u tom slučaju moderator ne bi bio potreban. Termoelektrane na fosilna goriva koje koriste superkritičnu vodu uspješno funkcioniraju već više od 40 godina. Znanja i iskustva iz tih postrojenja, kao i iz nuklearnih elektrana koje koriste vodu kao rashladno sredstvo, značajno će olakšati razvoj SCWR-a. Glavna značajka koja će se preuzeti iz termoelektrana biti će korištenje turbine koja će moći koristiti superkritičnu vodu te će se moći uključiti u direktni termodinamički proces. Navedene tehničke prednosti dovesti će do značajnog smanjenja kapitalnih troškova. Procjenjuje se da bi kapitalni troškovi za nuklearnu elektranu snage 1700 MW<sub>e</sub> koja bi koristila SCWR trebali iznositi 900 \$/kW<sub>e</sub>, što je oko 50 % manje u usporedbi s ALWR (Advanced Light-Water Reactor). Operativni troškovi trebali bi se također smanjiti, za otprilike 35 % u usporedbi trenutnim LWR [35].

## 6.6. Nedostatci

Iako SCWR nudi brojne prednosti, postoje određeni zahtjevi koji se još moraju ispuniti prije nego SCWR budu spremni za komercijalnu upotrebu. Jedan od zahtjeva je razvoj odgovarajućeg materijala za izradu obloge goriva kao i za dijelove reaktora. Materijali moraju biti stabilni pod djelovanjem zračenja te visokih tlakova i temperatura te moraju biti otporni na pojavu korozije, pucanja od korozije pod naprezanjem (SCC), puzanja i krhkog loma. Generiranje helija transmutacijom nikla također je pojava koja zahtjeva pomno razmatranje obzirom da pri visokim temperaturama može dovesti do tečenja ili loma materijala. Neki od kandidata za materijal koji bi ispunjavao navedene zahtjeve su austenitni ili feritno-martenzitni nehrđajući čelik, legure na bazi nikla te legure ojačane dispergiranim oksidnim česticama [35]. Izvedbe koje bi koristile termalni spektar neutrona kao i većina današnjih reaktora koristila bi gorivo u obliku peleta  $UO_2$ . Takve izvedbe ne bi se mogle koristiti za obradu istrošenog goriva za razliku od većine ostalih reaktora 4. generacije, no ipak količine otpada koje bi se proizvodile bile bi nešto manje nego kod konvencionalnih reaktora hlađenih vodom. Kako je za SCWR predviđen direktan prolaz superkritične vode kroz turbinu to znači da postoje i mogućnosti njene kontaminacije. Još jedan od zahtjeva koje će SCWR morati ispuniti je i jasno definiranje prijelaznih modela prijenosa topline. Obzirom da prijelazom iz superkritičnih u podkritične uvjete dolazi do pada tlaka i promjena u svojstvima vode, promjene koje će se zbivati moraju biti predviđene kako bi se osigurao stabilan rad reaktora [43]. Isto tako, pažljivo moraju biti proučeni svi poznati scenariji mogućih nesreća. To uključuje kraće i duže gubitke rashladnoga sredstva, gubitak protoka, događaje prekomjernog hlađenja i dr. Stvaranje mjehurića pare oko gorivnih štapova jedna je od pojava koje se mogu dogoditi uslijed naglog pada tlaka. Iako su značajna istraživanja ove pojave provedena za gorive šipke obložene legurom cinka, ponašanje gorivnih šipki obloženih austenitnim ili feritno martenzitnim nehrđajućim čelikom predstavlja određenu nepoznanicu koja će morati biti dodatno istražena. Mnogi od glavnih sustava koje bi SCWR potencijalno koristili razvijeni su za trenutne BWR-ove i PWR-ove te SCW postrojenja koja koriste fosilna goriva. Unatoč tome, potrebna je optimizacija određenih komponenti poput gorivnih elemenata, pogonskih sustava kontrolnih šipki, sustava za pročišćavanje rashladnog sredstva, senzora u jezgri, kontejnmentske zgrade i dr. kako bi se osigurala ekonomska konkurentnost bez žrtvovanja sigurnosti ili pouzdanosti [35].



## 7. ZAKLJUČAK

Razvoj nuklearnih reaktora 4. generacije predstavlja iznimno važan korak prema stvaranju održive i učinkovite nuklearne energetike u budućnosti. SCWR je svakako jedan od koncepata koji bi tome mogao pridonijeti. Kombinacijom visokih tlakova i temperatura te korištenjem superkritične vode, SCWR nudi razna poboljšanja u odnosu na sustave koji su danas u upotrebi i koriste običnu vodu u radu. Veća učinkovitost u proizvodnji električne energije svakako je jedno od poboljšanja. Pored toga, mogućnost pojednostavljenja cjelokupnog postrojenja čime se značajno mogu smanjiti kapitalni troškovi također je iznimno važan aspekt s ekonomskog stajališta. Troškovi izgradnje nuklearnih elektrana sa SCWR reaktorom, ali i drugim reaktorima 4. generacije, trebali bi biti konkurentni sa gradnjom postrojenja koji koriste druge izvore energije. Na taj način će se i interes za ulaganjem u nuklearne elektrane povećati.

Stav javnosti prema nuklearnim elektranama izrazito je podijeljen. Razlog tome su nesreće koje su se dešavale u prošlosti, prije svega one u Černobilu i Fukushimi. Razvojem reaktora 4. generacije mogućnost za pojavom incidentnih situacija svesti će se na minimalne vrijednosti. Ukoliko do njih i dođe pasivni sigurnosni sistemi ili pak sama svojstva rashladnoga sredstva osigurati će da takvi događaji ne prijeđu u ozbiljnije nesreće te ne dovedu u opasnost ljude i okoliš.

Potrebe za energijom u svijetu iz dana u dan sve su veće, a isto tako postoji i sve veća potreba za proizvodnjom čiste i održive energije kako bi se smanjile emisije stakleničkih plinova koje nepovoljno djeluju na okoliš i zdravlje ljudi. Nuklearna energija i reaktori 4. generacije značajno mogu ublažiti navedene probleme.

U ovom radu opisan je princip rada i različiti sustavi koji se koriste u nuklearnim elektranama s naglaskom na reaktore 4. generacije i to posebno na superkritične vodom hlađene reaktore. Iako bi navedeni sustavi trebali pružiti niz poboljšanja u usporedbi s reaktorima koji su trenutno u funkciji, potrebno je provesti dodatna istraživanja i ispitivanja kako bi se prevladali tehnički izazovi koji postoje te kako bi se osigurala sigurnost u radu. Stoga je važno nastaviti ulagati u razvoj nuklearnih reaktora 4. generacije kako bismo osigurali čistu, sigurnu i održivu energetska budućnost za generacije koje dolaze.

## POPIS LITERATURE

- [1] S interneta, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=44376>
- [2] Marković, B.: „Fizika IV“, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [3] S interneta, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=44376>, 18. srpnja 2023.
- [4] S interneta, [https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy_0.pdf), 22. srpnja 2023.
- [5] Feretić, D.; Čavlina, N.; Debrecin, N.: „Nuklearne elektrane“, Školska knjiga, Zagreb, 1995.
- [6] Augustyn, A.: „Nautilus“, s interneta, <https://www.britannica.com/topic/Nautilus-submarine>, 22. srpnja 2023.
- [7] S interneta, <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>, 22. srpnja 2023.
- [8] Ricotti, M. E.: „Nuclear energy: Basics, present, future“, s interneta, [https://www.researchgate.net/figure/Nuclear-reactor-generations-from-the-pioneering-age-to-the-next-decades\\_fig7\\_260833632](https://www.researchgate.net/figure/Nuclear-reactor-generations-from-the-pioneering-age-to-the-next-decades_fig7_260833632), 22. srpnja 2023.
- [9] Bilbao y Leon, S.: „World nuclear performance“, s interneta, <https://www.world-nuclear.org/getmedia/9dafaf70-20c2-4c3f-ab80-f5024883d9da/World-Nuclear-Performance-Report-2022.pdf.aspx>, 24. srpnja 2023.
- [10] S interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Olkiluoto\\_Nuclear\\_Power\\_Plant](https://en.wikipedia.org/wiki/Olkiluoto_Nuclear_Power_Plant), 24. srpnja 2023.
- [11] Pioro, I.: „Power cycles of generation III and III+ nuclear power plants“, s interneta, [http://www.researchgate.net/figure/Simplified-T-s-diagram-of-VVER-1000-PWR-NPP\\_fig1\\_277566348](http://www.researchgate.net/figure/Simplified-T-s-diagram-of-VVER-1000-PWR-NPP_fig1_277566348), 24. srpnja 2023.
- [12] S interneta, [https://www.cameco.com/uranium\\_101/electricity-generation/how-reactors-work/](https://www.cameco.com/uranium_101/electricity-generation/how-reactors-work/), 7. rujna 2023.
- [13] S interneta, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/uranium-mining-overview.aspx>, 24. srpnja 2023.
- [14] S interneta, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>, srpanj 2023.

- [15] S interneta, <https://www.engineeringnews.co.za/article/finland-gives-green-light-to-uranium-mining-2020-02-06>, 7. rujna 2023.
- [16] S interneta, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/conversion-and-deconversion.aspx>, 25. srpnja 2023.
- [17] S interneta, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx>, 25. srpnja 2023.
- [18] S interneta, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx>, 25. srpnja 2023.
- [19] S interneta, <https://www.fornuclear.org/en/resources/infographics/nuclear-fuel/>, 27. srpnja 2023.
- [20] Adams, R.: „Spent fuel pool fire risks goes to zero a few months after reactor shutdown“, s interneta, <https://www.ans.org/news/article-1579/spent-fuel-pool-fire-risk-goes-to-zero-a-few-months-after-reactor-shutdown/>, 27. srpnja 2023.
- [21] S interneta, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx>, srpanj 2023.
- [22] S interneta, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>, 30. srpanj 2023.
- [23] S interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Yucca\\_Mountain\\_nuclear\\_waste\\_repository](https://en.wikipedia.org/wiki/Yucca_Mountain_nuclear_waste_repository), 30. srpanj 2023.
- [24] Gil, L.: „Finland’s Spent Fuel Repository a „Game Changer“ for the Nuclear Industry, Director General Grossi Says“, s interneta, <https://www.iaea.org/newscenter/news/finlands-spent-fuel-repository-a-game-changer-for-the-nuclear-industry-director-general-grossi-says>, 30. srpanj 2023.
- [25] Mtingwa, S. K.: „Feasibility of Transmutation of radioactive elements“, s interneta, <https://nap.nationalacademies.org/read/11320/chapter/6>, 30. srpanj 2023.
- [26] S interneta, <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/nuclear-energy-and-sustainable-development.aspx>, 1. kolovoza 2023.
- [27] Schiffer, H. W.: „World Energy Resources 2016“, s interneta, <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>, kolovoz 2023.
- [28] Clark, B.: „Thermal Water Pollution from Nuclear Power Plants“, s interneta, <http://large.stanford.edu/courses/2019/ph241/clark1/>, 1. kolovoza 2023.
- [29] S interneta, <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx>, 1. kolovoza 2023.

- [30] S interneta, [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_28271/chernobyl-chapter-i-the-site-and-accident-sequence](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_28271/chernobyl-chapter-i-the-site-and-accident-sequence), kolovoz 2023.
- [31] S interneta, <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx>, kolovoz 2023.
- [32] S interneta, <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident.aspx>, 7. kolovoza 2023.
- [33] S interneta, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9502/generation-iv-goals](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9502/generation-iv-goals),
- [34] Caponiti, A.: „Annual report 2021“, s interneta, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_177525/gif-2021-annual-report](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_177525/gif-2021-annual-report), kolovoz 2023.
- [35] S interneta, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_40481/technology-roadmap](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40481/technology-roadmap), kolovoz 2023.
- [36] S interneta, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9361/sfr](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9361/sfr), 11. kolovoza 2023.
- [37] S interneta, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9362/vhtr](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9362/vhtr), 12. kolovoza 2023.
- [38] S interneta, <https://www.energy.gov/ne/articles/triso-particles-most-robust-nuclear-fuel-earth>, 12. kolovoza 2023.
- [39] S interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft\\_Reactor\\_Experiment](https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_Reactor_Experiment), 12. kolovoza 2023.
- [40] S interneta, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_42150/molten-salt-reactor-msr](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42150/molten-salt-reactor-msr), 13. kolovoza 2023.
- [41] S interneta, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Operating-permit-issued-for-Chinese-molten-salt-re>, 13. kolovoza 2023.
- [42] McFadden, C.: „Green light given for the first thorium molten salt nuclear reactor in China“, s interneta, <https://interestingengineering.com/innovation/thorium-molten-salt-nuclear-reactor-china>, 13. kolovoza 2023.
- [43] S interneta, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9360/scwr](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9360/scwr), kolovoz i rujan 2023.
- [44] S interneta, <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/materials-nuclear-engineering/properties-of-water/critical-point-of-water/>, 13. kolovoza 2023.
- [45] S interneta, <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=kriti%C4%8Dna+to%C4%8Dka>, 13. kolovoza 2023.
- [46] S interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Aved%C3%B8re\\_Power\\_Station](https://en.wikipedia.org/wiki/Aved%C3%B8re_Power_Station), 29. kolovoza 2023.
- [47] Wu, P. i dr.: „A review of existing SuperCritical Water reactor concepts, safety analysis codes and safety characteristics“, Progress in Nuclear Energy. Vol. 153, pp. 2-8, 2022, s intereta, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197022002839#sec1>, kolovoz i rujan 2023.
- [48] Edwards, G.; Leung, L.: „GIF Supercritical Water-Cooled Reactor, Proliferation Resistance and Physical Protection White Paper“, s interneta,

[https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2022-04/scwr\\_prpp\\_white\\_paper\\_april\\_2022\\_2022-04-25\\_14-26-21\\_623.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2022-04/scwr_prpp_white_paper_april_2022_2022-04-25_14-26-21_623.pdf), 4. rujna 2023.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Reaktor Chicago Pile-1 .....	5
Slika 2.2. Pregled različitih generacija nuklearnih reaktora [8] .....	8
Slika 2.3. Proizvodnja električne energije iz nuklearne energije u različitim dijelovima svijeta [9] .....	8
Slika 2.4. T-s dijagram parnog procesa za nuklearnu elektranu s VVER tipom reaktora [11] .....	10
Slika 2.5. Prostorni raspored osnovnih komponenti reaktorskog postrojenja s tlakovodnim reaktorom (PWR) i tri rashladna kruga: 1 - cirkulacijska pumpa, 2 - nuklearni reaktor, 3 - parogenerator, 4 – tlačnik [5] .....	12
Slika 2.6. Pojednostavljena shema postrojenja sa kipućim reaktorom [12] .....	14
Slika 3.1. In-situ ispiranje .....	16
Slika 3.2. Žuti kolač [15] .....	17
Slika 3.3. Sastavni dijelovi gorivnog elementa [19] .....	21
Slika 3.4. Bazeni za istrošeno gorivo [20] .....	23
Slika 3.5. Shematski prikaz osnovnih faza nuklearnog gorivnog ciklusa [5] .....	27
Slika 4.1. Zgrada 4. reaktora u Černobilu prije i nakon eksplozija .....	32
Slika 5.1. Shema postrojenja s LFR reaktora .....	39
Slika 5.2. Shema postrojenja sa SFR reaktorom .....	40
Slika 5.3. Shema postrojenja s GFR reaktorom .....	41
Slika 5.4. Shema postrojenja s VHTR reaktorom .....	42
Slika 5.5. Shema postrojenja s MSR reaktorom .....	44
Slika 6.1. Shema postrojenja sa SCWR reaktorom .....	46
Slika 6.2. Fazni dijagram vode [46] .....	47
Slika 6.3. Ovisnost emisija ugljičnog dioksida o iskoristivosti termoelektrana na fosilna goriva [27] .....	49
Slika 6.4. Gorivni element kineskog CSR1000 reaktora [47] .....	50
Slika 6.5. Raspored gorivnih elemenata u SCWR-M [47] .....	51
Slika 6.6. Protok rashladnog sredstva unutar SCWR-M [47] .....	51
Slika 6.7. Shematski prikaz kanadskog koncepta SCWR-a [47] .....	52
Slika 6.8. Dizajn gorivnog elementa japanskog Super LWR [47] .....	53

## **SAŽETAK**

U početnome dijelu ovoga rada opisane su neke od veličina važnih u razmatranju nuklearne energije, kao i osnovni princip na temelju kojeg se proizvodi električna energija u nuklearnim elektranama te je dan pregled razvoja nuklearne energetike. Opisan je nuklearni gorivni ciklus i utjecaj nuklearnih elektrana na okoliš. Detaljnije su opisani nuklearni reaktori 4. generacije, posebno superkritični vodom hlađen reaktor. Dan je pregled izvedbi superkritičnih vodom hlađenih reaktora koji se razvijaju te njegove prednosti i nedostaci.

Ključne riječi: superkritični vodom hlađeni reaktor, generacije nuklearnih reaktora, nuklearna energija, uran, nuklearna fisija, nuklearni gorivni ciklus, utjecaj na okoliš.

## **ABSTRACT**

In the initial part of this paper some of the important parameters in the consideration of nuclear energy were described, as well as the basic principle on which electric energy is produced in nuclear power plants and an overview of the development of nuclear energy was provided. The nuclear fuel cycle and the impact of nuclear power plants on the environment were also described. Nuclear reactors of the 4th generation, especially the supercritical water-cooled reactors, were described in more detail. An overview of the performance of supercritical water-cooled reactors under development as well as their advantages and disadvantages was given.

Keywords: supercritical water-cooled reactor, generations of nuclear reactors, nuclear energy, uranium, nuclear fission, nuclear fuel cycle, environmental impact.