

Torijski nuklearni reaktori

Busić, Nenad

Master's thesis / Diplomski 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:190:180814>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike

Diplomski rad

TORIJSKI NUKLEARNI REAKTORI

Rijeka, rujan 2023.

Nenad Busić
0069083580

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike

Diplomski rad

TORIJSKI NUKLEARNI REAKTORI

Mentor: prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, rujan 2023.

Nenad Busić
0069083580

Rijeka, 14. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Elektrane**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Nenad Busić (0069083580)**
Studij: **Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike**
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Torijski nuklearni reaktori / Thorium nuclear reactors**

Opis zadatka:

Torijski nuklearni reaktori, iako predstavljaju privlačnu alternativu postojećim rješenjima u nuklearnoj energetici, do sada nisu doživjeli komercijalizaciju. U radu je potrebno prikazati teorijske osnove rada torijskog reaktora kao i eksperimentalna tehnološka rješenja razvijana tijekom prošlog stoljeća. Prikazati prednosti i nedostatke torijskih reaktora u odnosu na postojeća komercijalna rješenja te napraviti bazičnu usporedbu energetske, ekonomske i ekološke primjene torijskih reaktora u odnosu na, danas najzastupljenije, tlakovodne reaktore.

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

Boed

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

Prof. dr. sc. Dubravko Franković

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

Prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA

Sukladno članku 7. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku sveučilišnih diplomskih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci od ožujka 2023., izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad prema zadatku preuzetom dana 20. ožujka 2023.

Rijeka, 12. rujna 2023.



Nenad Busić

Veliko hvala mentoru prof. dr. sc. Dubravku Frankoviću na prenesenom znanju, pomoći i strpljenju pri pisanju diplomskog rada. Također, veliku zahvalnost dugujem mr. sc. Marijani Živić Đurović, v. pred. te izv. prof. dr. sc. Ivanu Dražiću koji su mi bili velika podrška i motivacija. Svojom neiscrpnom energijom, znanjem i stalnom prisutnošću uvelike su mi olakšali studiranje.

Hvala mojoj obitelji na ogromnoj podršci kroz svih pet godina studiranja. Zahvalnost dugujem i svim prijateljima koji su bili uz mene na ovome putu.

Sadržaj

| | |
|--|-----------|
| 1. Uvod | 3 |
| 2. Nuklearna energija | 5 |
| 2.1. Usporedba nuklearne elektrane s klasičnom termoelektranom | 6 |
| 2.2. Trend proizvodnje električne energije iz nuklearne energije kroz povijest | 6 |
| 2.3. Radioaktivnost | 7 |
| 3. Proizvodnja električne energije | 9 |
| 3.1. Toplinski stroj | 9 |
| 3.2. Rankineov proces | 9 |
| 3.3. Trenutna zastupljenost reaktora u svijetu | 10 |
| 3.3.1. LWR reaktor | 12 |
| 4. Torij kao element u nuklearnoj energetici | 13 |
| 4.1. Općenito o Toriju | 13 |
| 4.2. Usporedba goriva | 14 |
| 4.3. Reaktori koji mogu koristiti toriji kao gorivo | 15 |
| 5. Reaktor hlađen rastaljenom soli - Molten salt reactor | 18 |
| 5.1. Povijesni razvoj MSR-a | 18 |
| 5.2. Osnovne fizikalno-kemijske osobine rastaljenih soli | 19 |
| 5.3. Način rada | 20 |
| 5.4. Prednost dizajna MSR-a u usporedbi s klasičnim reaktorom | 21 |
| 5.5. Tekuće gorivo i njegova ekonomska isplativost | 22 |
| 5.6. Proizvodnja tricija i problemi s materijalima | 22 |
| 5.7. Analiza fleksibilnosti i sigurnosnih značajki | 22 |
| 5.7.1. Model PWR-a | 23 |
| 5.7.2. Model MSR-a | 24 |
| 5.7.3. Gubitak primarnog protoka | 26 |
| 5.7.4. Gubitak sekundarnog protoka | 28 |
| 5.8. Ekonomičnost MSR-a | 30 |
| 5.8.1. Indikatori ekonomske i financijske uspješnosti elektrane | 30 |
| 5.8.2. Ekonomija razmjera | 31 |

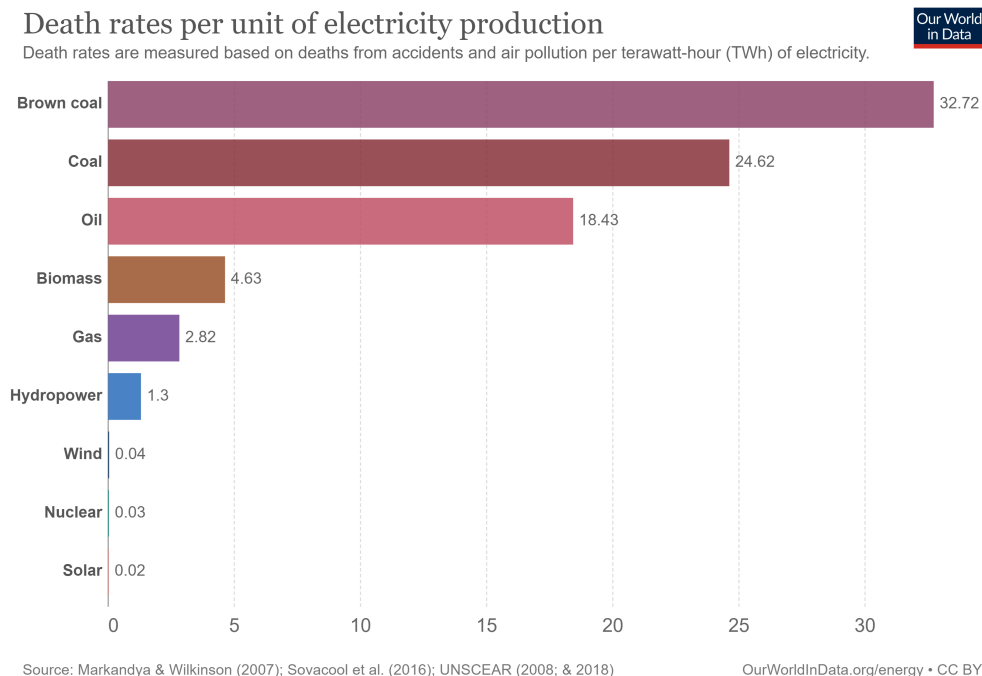
| | |
|--|-----------|
| 5.8.3. Ekonomija višestruke izgradnje | 31 |
| 5.9. Analiza LCOE-a MSR-a i PWR-a | 32 |
| 5.9.1. Dva dizajna MSR-a i njihova financijska struktura | 32 |
| 6. Reaktor s tekućim fluoridom torija | 34 |
| 6.1. Uvodno o reaktoru s tekućim fluoridom torija | 34 |
| 6.2. Način rada | 34 |
| 6.2.1. Primarna petlja i međupetlja procesa | 35 |
| 6.2.2. Kontrola reaktivnosti | 36 |
| 6.3. Efikasnost goriva | 37 |
| 6.4. Nuklearni otpad | 37 |
| 6.5. Nemogućnost naoružavanja | 38 |
| 6.6. Problem s materijalima i kontinuiranim čišćenjem mješavine tekućeg fluorida | 39 |
| 6.7. Usporedba radiotoksičnosti uranija i torija | 40 |
| 7. Procjena troškova iskorištavanja goriva na bazi torija | 41 |
| 7.1. Uvod | 41 |
| 7.2. Analiza troškova | 42 |
| 7.2.1. Ulazni podaci | 42 |
| 7.2.2. Rezultati | 45 |
| 8. Dvofluidni reaktor (DFR) | 47 |
| 8.1. Tehnologija dvofluidnog reaktora | 47 |
| 8.2. Proizvodnja električne energije | 48 |
| 9. Dugoročni potencijal torijske nuklearne energije | 49 |
| 9.1. Komercijalna upotreba torijskih nuklearnih elektrana | 49 |
| 9.2. Utjecaj vodeće nuklearne industrije | 50 |
| 10. Zaključak | 51 |
| Bibliografija | 52 |
| Sažetak i ključne riječi | 55 |
| Summary and key words | 56 |

1. Uvod

U današnje vrijeme postoji sve veća i opravdana zabrinutost zbog globalnog zatopljenja. Europska unija jasno je angažirana u cilju smanjenja emisije stakleničkih plinova putem europskog sustava trgovanja emisijama stakleničkih plinova. Fokusirajući se na strože propise, EU teži tome da Europa postane prvi klimatski neutralan kontinent do 2050. godine. Kao dio ovog procesa, Europska burza CO_2 svake godine smanjuje dostupnu količinu CO_2 koja se može trgovati. Time se potiču energetske potrošači da pređu na niskoemisijske alternative.

Tranzicijska faza u energetske sektoru ponovno je potaknula interes za proizvodnju električne energije iz nuklearne energije, što donosi izazove u vezi s dugotrajnim radioaktivnim otpadom, sigurnošću i zabrinutošću vezanom za nuklearno oružje. Zbog tih razloga, nuklearna energija još uvijek nije popularna opcija u očima javnosti.

Važno je naglasiti da nuklearna energija može biti smatrana najsigurnijim načinom proizvodnje električne energije. Na slici 1.1 prikazana je stopa smrtnosti po jedinici proizvodnje električne energije. Iz prikazanih podataka vidljivo je da nuklearna energija nije značajno opasnija od energije vjetra ili solarne energije.



Slika 1.1. Stope smrtnosti po jedinici proizvodnje električne energije. [5]

Postoji potreba da se razmotri perspektiva izvan tradicionalnih reaktora hlađenih vodom (LWR) kako bi se riješili ranije spomenuti problemi. U ovome radu posebna pozornost će se posvetiti toriju kao mogućem zamjenskom elementu za uranij, uz to bit će objašnjen princip rada reaktora koji koristi rastaljenu sol kao radni mediji. Zamjena radnog medija u ovom tipu reaktora ima za cilj eliminirati mogućnost eksplozije vodika, što je bila jedna od posljedica nesreće u Fukušimi¹.

Prednosti korištenja torija kao goriva u nuklearnim reaktorima bit će detaljno istražene, kao i princip rada reaktora koji koristi rastaljenu sol kao radni mediji. Na taj način žele se razmotriti sigurnosni, ekonomski i ekološki aspekti ove alternativne tehnologije koja bi mogla doprinijeti održivijoj primjeni nuklearne energije.

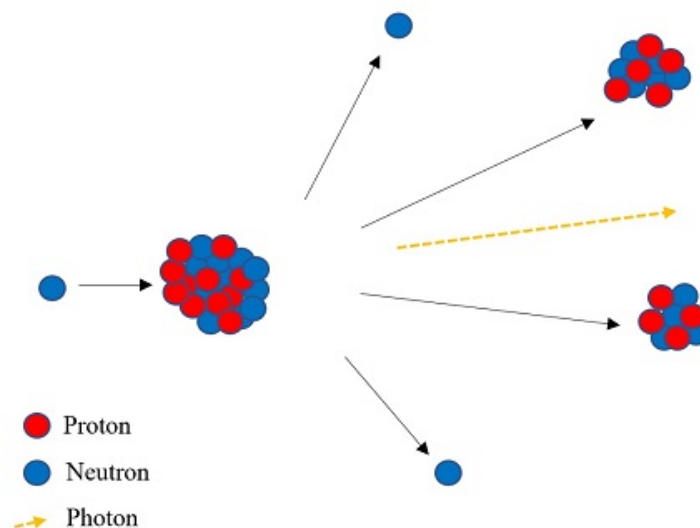
¹*Nakon velikog potresa, 15-metarski tsunami onesposobio je napajanje i hlađenje tri reaktora u Fukušimi Daiichi, uzrokujući nuklearnu nesreću koja je započela 11. ožujka 2011.*

2. Nuklearna energija

Nuklearna energija predstavlja proces oslobađanja energije iz atomskih jezgri putem nuklearnih reakcija. Dvije glavne nuklearne reakcije koje se koriste za oslobađanje nuklearne energije su fisija i fuzija.

U nuklearnoj fisiji, teške jezgre atoma, poput U-235, podvrgavaju se razgradnji u manje dijelove (nukleide) kada ih pogodi neutron. Ovaj proces oslobađa veliku količinu toplinske energije i dodatne neutrone koji mogu potaknuti nove fisije u susjednim jezgrama, stvarajući tako lančanu reakciju.

U nuklearnim reaktorima, kontrolirana lančana reakcija održava se moderatorom i kontrolnim šipkama kako bi se osiguralo stabilno i kontrolirano oslobađanje energije.



Slika 2.1. Reakcija fisije. [9]

Nuklearna fuzija je proces u kojem se dvije lagane jezgre atoma, poput izotopa vodika (deuterij i tricij), spajaju kako bi stvorile težu jezgru, oslobađajući pri tom veliku količinu energije.

Fuzija je proces koji se odvija u suncu, gdje su visoki tlak i temperatura omogućili spajanje atomskih jezgri vodika u helij, oslobađajući ogromne količine energije u obliku svjetla i topline. No, za postizanje kontrolirane nuklearne fuzije na Zemlji, moraju se stvoriti ekstremni uvjeti visokog tlaka i temperature, što predstavlja tehnički izazov.

U današnje vrijeme, nuklearna energija koja se široko koristi za proizvodnju električne energije temelji se na nuklearnoj fisiji. U nuklearnim reaktorima, goriva se obogaćuju teškim izotopima koji su skloni fisiji, kao što je uranij ili drugi teški elementi. Kada neutroni interagiraju s ovim gorivom, fisija se odvija, što oslobađa toplinsku energiju. Oslobođena energija potom se koristi za zagrijavanje vode i pretvaranje vode u paru koja pokreće turbine te se proizvodi električna energija.

S druge strane, nuklearna fuzija predstavlja potencijalno revolucionarni izvor čiste i obnovljive energije, ali zahtijeva daljnja istraživanja i razvoj tehnologije kako bi postala komercijalno održiva.

2.1. Usporedba nuklearne elektrane s klasičnom termoelektranom

Bitna razlika između nuklearne elektrane i klasične termoelektrane leži u vrsti goriva koju koriste (nuklearno ili fosilno) te u procesu pretvorbe tog goriva (reaktor ili ložište). Ostali koraci u procesu su identični. I nuklearne elektrane i klasične termoelektrane generiraju električnu energiju na osnovu proizvodnje toplinske energije, koja se potom transformira u mehaničku energiju, te na kraju u električnu energiju putem generatora. Oba procesa uključuju primjenu radnog medija koji prenosi toplinsku energiju do turbine.

U nuklearnoj elektrani, toplinska energija proizvodi se putem nuklearne fisije, gdje se teške jezgre atoma razgrađuju na manje dijelove oslobađajući toplinsku energiju. U klasičnoj termoelektrani, toplinska energija proizvodi se putem izgaranja fosilnih goriva u ložištu, pri čemu se oslobađa toplinska energija.

Oba tipa elektrana koriste paru generiranu toplinskom energijom kako bi pokrenuli turbine i proizveli mehaničku energiju koja se dalje pretvara u električnu energiju.

2.2. Trend proizvodnje električne energije iz nuklearne energije kroz povijest

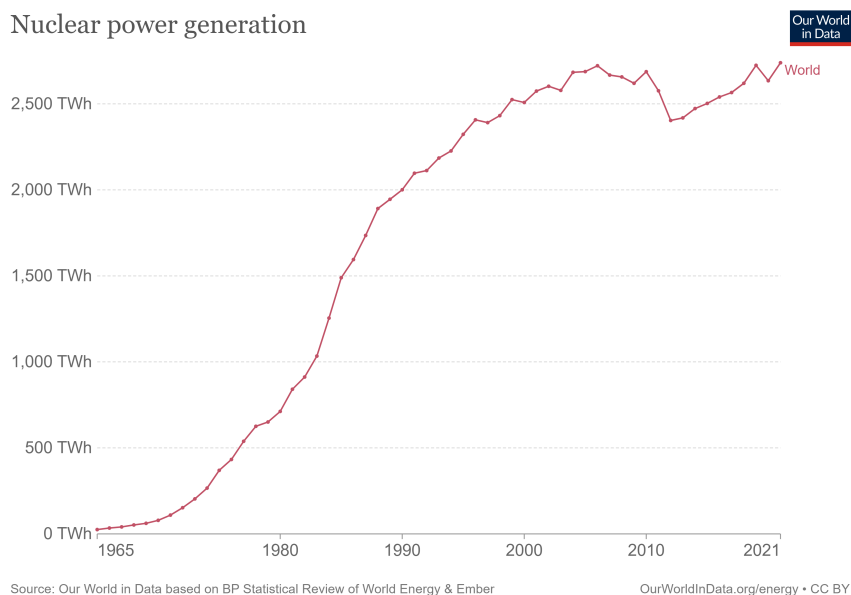
Na grafikonu, slika 2.2, prikazan je trend globalne proizvodnje električne energije iz nuklearne energije tijekom posljednjih pet desetljeća.

Nuklearna energetika postojala je od 1960-ih, ali je doživjela znatan rast na globalnoj sceni tijekom 1970-ih, 80-ih i 90-ih godina. Tijekom tog razdoblja, mnoge zemlje diljem svijeta ulagale su u izgradnju novih nuklearnih elektrana, te je nuklearna energija postala značajan dio globalnog energetskeg portfelja.

Nakon intenzivnog rasta tijekom tog razdoblja, globalni rast proizvodnje električne energije iz nuklearne značajno je usporio. Posebno značajan događaj koji je utjecao na nuklearnu industriju bila je nuklearna nesreća u Fukushimi u Japanu koja se dogodila u ožujku 2011. godine nakon snažnog tsunamija uzrokovanog potresom. Katastrofa je potaknula mnoge zemlje da preispitaju svoje nuklearne programe i izazvala zabrinutost oko sigurnosti nuklearnih elektrana.

Nakon nuklearne nesreće u Fukushimi, došlo je do značajnog pada u proizvodnji električne energije iz nuklearne energije na globalnoj razini. Međutim, u posljednjim godinama vidljivo je ponovno povećanje proizvodnje, iako uz neke oscilacije. Povećanje proizvodnje može biti rezultat daljnjih poboljšanja sigurnosnih standarda, jačanja postojećih nuklearnih kapaciteta ili izgradnje novih elektrana u zemljama koje nastoje proširiti svoj energetskeg portfelj.

Također, važno je napomenuti da proizvodnja električne energije iz nuklearne može biti osjet-



Slika 2.2. Globalna proizvodnja nuklearne energije. [10]

ljiva na promjene u cijenama energenata i na ekonomske uvjete. Novonastala energetska kriza također može utjecati na budući smjer i dinamiku rasta proizvodnje.

2.3. Radioaktivnost

Radioaktivnost¹ je prirodni fenomen koji se odnosi na nestabilnost atomskih jezgri, što rezultira spontanom raspadom i transformacijom u druge atome. Ovaj proces praćen je oslobađanjem zračenja ili čestica materije iz radioaktivnih jezgri. Tvari koje sadrže nestabilne atomske jezgre nazivaju se radioaktivni elementi ili radionuklidi.

Raspad radioaktivnih jezgri može se dogoditi na različite načine, ali tri osnovne vrste zračenja koja se emitiraju u ovom procesu su alfa, beta i gama zračenje.

Alfa zračenje nastaje kada jezgra atoma postane nestabilna (omjer neutrona i protona je preni-zak) i emitiraju se alfa čestice kako bi se obnovila ravnoteža. Alfa raspad javlja se u elementima s visokim atomskim brojevima, poput uranija, radija i torija. Jezgre spomenutih elemenata su bogate neutronima, što omogućava emisiju alfa čestica. Alfa čestice su relativno teške i spore, pa imaju nisku probojnu moć i mogu se zaustaviti listom papira.

Beta zračenje potječe od onoga što se klasificira kao relativno lagane čestice, zapravo elektrona ili pozitrona², koji su manji i dublje prodirući od alfa čestica te mogu putovati nekoliko metara kroz zrak. Tipični beta emiteri uključuju stroncij-90, tehnezij-99, cezij-137, ugljik-14, sumpor-35 i tricij.

¹ Otkrivena od strane Henria Becquerela 1. ožujka 1896. godine.

² Subatomska čestica iste mase i iste veličine kao elektron, ali s pozitivnim nabojem.

Beta zračenje ima veću probojnu moć od alfa zračenja, ali i dalje bi imalo poteškoća probijajući se kroz odjeću. Međutim, ima dovoljno energije da prodre kroz kožu, ali ne dovoljno da prođe kroz nju. Za razliku od alfa čestica, beta čestice mogu proći kroz list papira, ali ih lako zaustavlja tanki sloj aluminija.

Gama zračenje je elektromagnetsko zračenje visoke energije, slično rendgenskim zrakama. Gama fotoni nemaju masu ni naboje, što im daje iznimno visoku sposobnost prodora u materiju. Oni se zaustavljaju samo debljim slojevima materijala, poput olova, betona ili drugih materijala visoke gustoće.

Stupanj radioaktivnosti ovisi o udjelu nestabilnih jezgri i koliko se često te jezgre raspadaju.

3. Proizvodnja električne energije

3.1. Toplinski stroj

Učinkovitost toplinskog stroja koji toplinsku energiju pretvara u električnu uvijek je manja od Carnotove učinkovitosti¹:

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (3.1)$$

gdje su T_h i T_c temperature radnog medija koji ulazi i izlazi iz procesa, u Kelvinima.

Kad je riječ o toplinskim strojevima, na prvom mjestu obično se nalaze elektrane koje koriste fosilna goriva. Takve elektrane mogu biti relativno fleksibilne u prilagodbi izlazne snage kako bi odgovorile na promjenjivu potražnju.

Primjerice, kada solarne elektrane generiraju veliku količinu energije tijekom sunčanih razdoblja, dolazi do povećanja proizvodnje i snage u mreži. U takvim trenucima, elektrane koje koriste fosilna goriva mogu smanjiti svoju izlaznu snagu kako bi se ukupna snaga održavala u ravnoteži s potražnjom.

Zbog svoje brzine pokretanja i zaustavljanja procesa, obično su elektrane na plin te koje su odgovorne za pokrivanje vršne potražnje, no također bi se mogli koristiti i reaktori rastaljene soli (MSR²). Dio toplinske energije koja je pohranjena u rastaljenoj soli može se koristiti za brzo povećanje snage putem toplinskog stroja, čime bi MSR mogao imati važnu ulogu u osiguravanju stabilnosti mreže. [15]

3.2. Rankineov proces

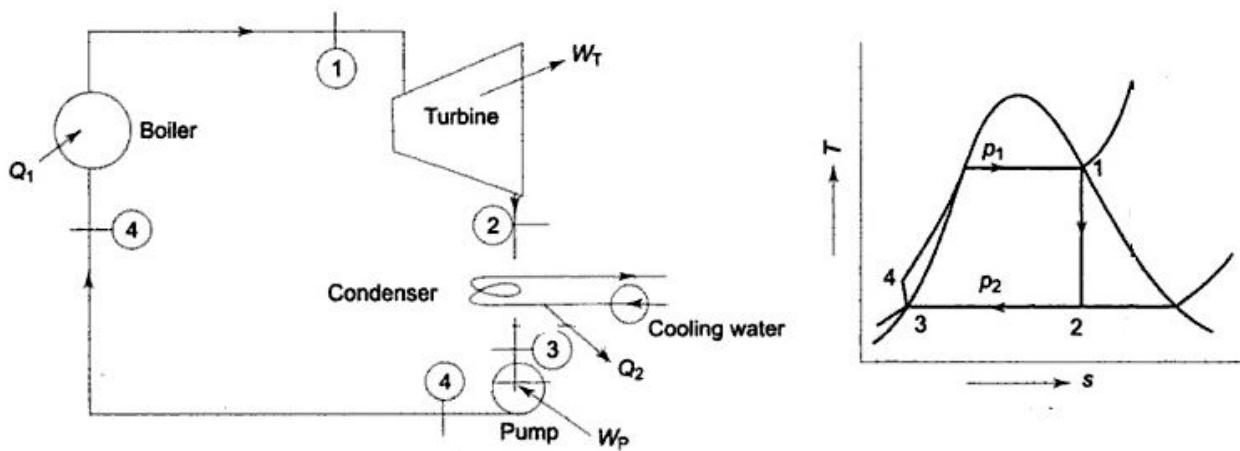
Rankineov kružni proces je osnova termodinamičkog rada svih velikih termoelektrana. U elektranama na ugljen, visokotemperaturna para pod visokim tlakom se proizvodi pretvaranjem kemijske energije pohranjene u ugljenu u toplinsku energiju. Toplinska energija se potom prenosi na radni medij, koji prolazi kroz kotao i proizvodi paru.

Para se iz kotla zatim širi u nizu visokotlačnih i niskotlačnih stupnjeva parne turbine, koje pretvaraju energiju u mehanički rad na vratilu za pogon električnog generatora i proizvodnju električne energije. Nakon posljednjeg stupnja turbine, para se usmjerava u kondenzator, a kondenzat se zatim pumpa natrag u kotao i ciklus se ponavlja. [13]

¹Predstavlja maksimalnu toplinsku učinkovitost koju toplinski stroj može postići prema drugom zakonu termodinamike. Zakon je 1824. godine izveden od strane Sadija Carnota.

²Molten salt reactor.

Opisani proces prikazan je na slici 1.4.

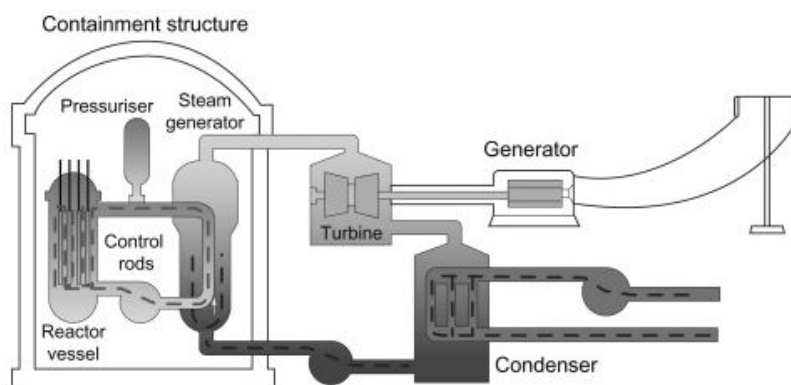


Slika 3.1. Rankineov proces [14]

3.3. Trenutna zastupljenost reaktora u svijetu

Dominantni tip reaktora, čineći otprilike 71% svjetskog energetskeg portfelja, su PWR, odnosno tlakovodni reaktori, koji spadaju u kategoriju lakovodnih reaktora (LWR). U ovom tipu reaktora, primarni i sekundarni krugovi su odvojeni, odnosno toplina se iz primarnog sustava za hlađenje putem radnog medija dovodi u izmjenjivač topline te se prenosi na vodu u sekundarnom sustavu.

Jezgra PWR-a je napunjena vodom, pod tlakom približno 150 puta većim od atmosferskog tlaka. Visoki tlak sprječava vodu da vrije na njezinoj normalnoj točki vrenja, što omogućuje dostizanje temperature iznad uobičajene točka vrenja vode na standardnom atmosferskom tlaku, odnosno iznad 100°C . Korištenje sekundarnog rashladnog ciklusa dovodi do gubitaka energije koji PWR čine manje učinkovitim u procesu pretvaranja energije iz nuklearne u električnu energiju. [16]

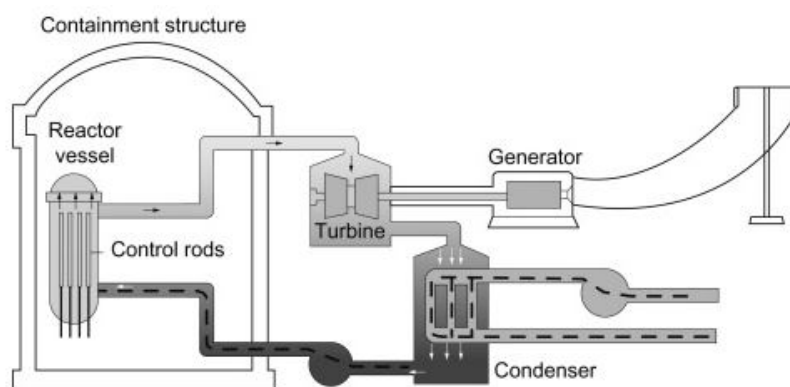


Slika 3.2. PWR [16]

PWR koristi obogaćeno uranijevo gorivo do 5%. Gorivo se unosi u jezgru u obliku gorivnih elemenata, odnosno šipki uranijeva dioksida. Tipični PWR sadržavat će 100 tona uranija. U PWR-u kontrolne šipke su umetnute odozgo, dopuštajući gravitaciji da djeluje kao zaštita od kvara u slučaju nesreće. Tipični PWR ima proizvodni kapacitet od 1000 MW. Učinkovitost je oko 33%.

Sa zastupljenošću od 18%, reaktori s kipućom vodom (BWR) čine drugi tip lakovodnih reaktora (LWR). BWR koristi običnu vodu (laku vodu) i kao radni mediji i kao moderator. U BWR-u je dopušteno da voda u jezgri reaktora vrije pod tlakom od 75 puta većim od atmosferskog, podižući vrelište na 285°C, a stvorena para koristi se izravno za pogon parne turbine [16]. Para se zatim kondenzira i reciklira natrag u jezgru reaktora.

Budući da je para izložena jezgri, postoji određena radioaktivna kontaminacija turbine. Najveća nuklearna elektrana (8 GW) je ovoga tipa, radi se o nuklearnoj elektrani Kashiwazaki-Kariva smještenoj u Japanu.



Slika 3.3. BWR [16]

Sa 6% udjela, čine reaktori s teškom vodom pod tlakom (PHWR). Oni koriste tešku vodu (deuterijev oksid) kao moderator i neobogaćeni prirodni uranij kao gorivo. U suprotnosti s LWR-om, ovi reaktori imaju odvojene krugove za rashladno sredstvo i moderator. Teška voda za hlađenje održava se pod tlakom, što omogućuje zagrijavanje na više temperature bez vrenja, slično kao u tipičnom reaktoru s vodom pod tlakom. Teška voda omogućuje reaktoru da radi bez postrojenja za obogaćivanje goriva.

Navedeni reaktori spadaju u reaktore koji su hlađeni i moderirani s vodom. Ostali tipovi reaktora (5%) su plinom hlađeni reaktori (GCR) i napredni plinom hlađeni reaktori (AGR) gdje se ugljikov dioksid koristi kao radni medij, a grafit kao moderator te lakovodni grafitni reaktor (LWGR) s vodom kao radnim medijem te grafitom kao moderatorom. [4]

3.3.1. LWR reaktor

Struktura lakovodnih reaktora (LWR) obuhvaća jezgru s gorivnim šipkama od U-235, okruženu vodom. U samoj jezgri, uranij je podvrgnut procesu fisije, stvarajući slobodne neutrone koji podržavaju nuklearni lančani proces uz oslobađanje značajne topline. Voda djeluje kao radni medij te prenosi toplinu stvorenu u jezgri do generatora pare. Para pokreće parnu turbinu te se proizvodi električna energija. Za kontrolu brzine ili zaustavljanje nuklearne reakcije u jezgri, koriste se kontrolne šipke koje su napravljene od materijala poput kadmija, hafnija ili bora. Kontrolne šipke apsorbiraju neutrone i omogućuju preciznu regulaciju reakcije kada je to potrebno.

Svaki dizajn LWR-a ima svoje prednosti i nedostatke. Usporedno sa BWR-om, koji iako ima manje mehaničkih komponenti u odnosu na PWR proces, ipak zahtijeva dodatne komponente za podršku sustavu hlađenja jezgre reaktora u hitnim slučajevima. Nadalje, unutarnji sustav BWR-a je složeniji, budući da uključuje unutarnje recirkulacijske pumpe i složenu opremu za odvajanje pare koja se ne nalazi u PWR konstrukciji [17]. Proces izravnog ciklusa BWR-a smanjuje gubitak topline između jezgre i parne turbine, ali zato radi na nižim tlakovima i temperaturama od PWR-a, što rezultira manjom termodinamičkom učinkovitošću.

4. Torij kao element u nuklearnoj energetici

4.1. Općenito o Toriju

Torij je radioaktivni kemijski element s relativnom atomskom masom 232,0381 i atomskim brojem 90, otkriven 1828. godine od strane švedskog kemičara Jonsa Jakoba Berzeliusa. Element je nazvan po Thoru, nordijskom bogu groma. U prirodi se pojavljuje u malim količinama u stijenama, gdje njegova prisutnost iznosi otprilike tri puta više nego uranija. Analize ukazuju na prisutnost torija u masi zemljine kore u rasponu od 0,00081% do 0,0013%, što ga stavlja na 36. mjesto po zastupljenosti među elementima u zemljinoj kori.

Važno je napomenuti da treba pažljivo razmotriti prethodno spomenuti podatak o omjeru torija i uranija u prirodi. Iako se taj omjer odnosi na zemljinu koru, često se zanemaruje činjenica da se značajna količina uranija nalazi u morskim sedimentima. Ekonomski razlozi trenutno sprječavaju iskorištavanje tog uranija, zbog čega se često ne uzima u obzir prilikom rasprava o omjeru uranija i torija.

Torij se prirodno javlja u obliku jednog izotopa, Th-232, koji ima vrlo sporu razgradnju. Sam po sebi, Th-232 nije fisibilan, dakle neće se raspasti nakon udara neutrona, kao što je slučaj s U-235. Ponašanje izotopa Th-232 usporedivo je s ponašanjem izotopa uranija U-238, koji će apsorbirati neutron i pretrpjeti transformaciju u drugi element. Jednom kada izotop Th-232 apsorbira neutron, prelazi u protaktinij (Pa-233), a potom, putem emisije beta zračenja, prelazi u U-233, koji je fisibilni element. Zbog toga čisti torij nije direktno korišten kao konvencionalno gorivo u nuklearnom ciklusu. Umjesto toga, koristi se u proizvodnji fisibilnog elementa, U-233.

Najčešći izvor torija potječe iz minerala monazita, koji sadrži otprilike do 12% torijevog fosfata. Monazit se nalazi u različitim tipovima stijena, uključujući magmatske stijene. [33] Ukupne svjetske rezerve monazita procjenjuju se na otprilike 16 milijuna tona, pri čemu se 12 milijuna tona nalazi u naslagama teškog mineralnog pijeska duž istočne i južne obale Indije. U Tablici 4.1 su prikazane države s najznačajnijim zalihama i izvorima elementa torija.

Tablica 4.1. Svjetski izvori torija, Izvor: [33]

| Zemlja | Tona |
|------------|---------|
| Indija | 846.000 |
| Brazil | 632.000 |
| Australija | 595.000 |
| SAD | 595.000 |
| Egipat | 380.000 |
| Turska | 374.000 |
| Venezuela | 300.000 |

Tablica 4.1. (Nastavak) Svjetski izvori torija

| Zemlja | Tona |
|--------------|-----------|
| Kanada | 172.000 |
| Rusija | 155.000 |
| Južna Afrika | 148.000 |
| Kina | 100.000 |
| Norveška | 87.000 |
| Grenland | 86.000 |
| Finska | 60.000 |
| Švedska | 50.000 |
| Kazahstan | 50.000 |
| Druge zemlje | 1.725.000 |
| Ukupno | 6.355.000 |

4.2. Usporedba goriva

Broj neutrona po fisiji

Broja neutrona po fisiji povoljan je u termalnom spektru, odnosno dolazi do veće proizvodnje broja neutrona po sudaru, u odnosu na konvencionalno gorivo [18]. Navedeno rezultira generiranjem veće količine energije i manjom potrošnjom goriva.

Radiotoksičnost

S obzirom da toriji ima atomsku masu 232, gorivni ciklus zahtijeva više zahvata neutrona kako bi stvorio transuranijske elemente¹ poput neptunija, plutonija, americija i kirija. Nakon što se fisijski produkti raspadnu (nakon otprilike 500 godina), radiotoksičnost gorivna ciklusa U -> Pu dominira transuranijskim elementima, dok gorivni ciklus Th-232 -> U-233 ima znatno nižu radiotoksičnost.

Međutim, u vrlo dugom razdoblju, sustavi s Th-232 -> U-233 ciklusom uvijek imaju višu radiotoksičnost od ekvivalentnih sustava s U -> Pu zbog nakupljanja nuklida potomaka iz lanca raspada U-233. Radiotoksičnost torijeva gorivna ciklusa dakle ovisi o vremenskom okviru i nije uvijek povoljna.

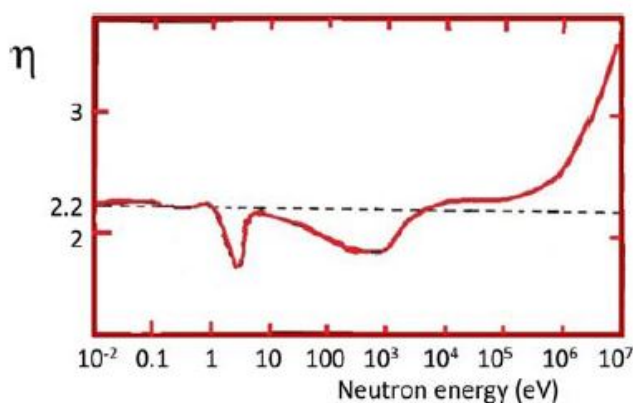
¹Elementi kojima je atomski broj veći od 92, odnosno veći od atomskoga broja uranija.

Ekonomičnost

Gorivni ciklus s torijem zahtijeva dodatan razvoj i implementaciju nove infrastrukture koja bi konkurirala postojećoj infrastrukturi za gorivni ciklus s U \rightarrow Pu [18]. Trenutno, nedostaje dovoljno razumijevanje detalja kako bi se moglo procijeniti bi li gorivni ciklus s torijem bio ekonomičniji u praksi, stoga treba uzeti s dozom opreza sveprisutni podatak da je gorivni ciklus s torijem ekonomičniji od onog na bazu U \rightarrow Pu.

Faktor regeneracije

S torijem kao nuklearnim gorivom, fisijaska reakcija ostvariva je s termičkim odnosno sporim neutronima te s brzim neutronima. Nakon apsorpcije neutrona, dolazi do emisije fisijaskih neutrona [15]. Spomenuta pojava definira se kao faktor regeneracije η , dakle η predstavlja omjer broja emisija fisijaskih neutrona i broja apsorpcija neutrona u gorivu.



Slika 4.1. Promjena faktora regeneracije η s energijom neutrona za U-233 [15]

Da bi se ostvarila efikasna proizvodnja nuklearnog goriva, potrebna je vrijednost $\eta \geq 2.2$. Za Th-233 vrijednost faktora regeneracije za termičke neutrone iznosi $\eta = 2.24$ dok je za brze neutrone vrijednost $\eta = 2.3$. Dakle proizvodnja goriva ostvariva je sa brzim i usporenim neutronima.

Za plutoniji-239 (Pu-239), iznos faktora regeneracije za termičke neutrone iznosi $\eta = 2.01$, dok za brze neutrone iznosi $\eta = 2.45$. Vrijednost $\eta = 2.01$ nije dovoljna za efikasnu proizvodnju goriva.

4.3. Reaktori koji mogu koristiti toriji kao gorivo

Reaktori s kipućom vodom

U BWR-u sastavni dio nuklearnog procesa su gorivni sklopovi, koji sadrže gorivne šipke koje omogućuju nuklearnu reakciju fisije. Standardno, glavni element goriva u BWR-u je uranij, najčešće u obliku uranij-dioksida (UO_2). No moguće je, kako bi se povećala efikasnost reaktora,

varirati sastav goriva. [19] Konkretnije, spomenuti gorivni sklopovi mogu biti dizajnirani s različitim omjerima sastava materijala koji sudjeluju u procesu fisije, uključujući fisibilne elemente poput U-235, Pu ili U-233 i nenuklearnih materijala poput moderatora ili kontrolnih šipki.

BWR gorivni sklopovi mogu biti fleksibilno dizajnirani u smislu šipki s različitim sastavima (sadržaj fisijskih elemenata) s različitim strukturnim značajkama. [19] Tako je moguće, na primjer, dizajnirati torij-plutonij BWR goriva koja su prilagođena za *spaljivanje* viška plutonija.

Tlakovodni reaktori

Održiva torijeva goriva mogu se dizajnirati za PWR, iako s manjom fleksibilnošću nego za BWR. Gorivo treba biti u heterogenom rasporedu kako bi se postigao zadovoljavajuć odgor. Heterogeni rasporedi omogućuju da se nuklearne reakcije i procesi, poput stvaranja i konzumacije U-233, ravnomjerno raspodijele unutar reaktora.

Nije moguće dizajnirati održiva PWR goriva na bazi torija koja pretvaraju značajne količine U-233. Konstrukcija i karakteristike PWR reaktora više su prilagođene korištenju U-235 kao glavnog izotopa goriva [19]. Iako PWR-i nisu savršeni reaktori za korištenje torija, zbog svoje učestalosti i dobrog razumijevanja takvog tipa nuklearnih reaktora, oni čine pouzdanu platformu za razmatranje ranijeg uvođenja torijevih goriva u industriji nuklearne energije.

Reaktori s brzim neutronima (FNR)

Torij može poslužiti kao komponenta goriva za reaktore koji rade sa spektrom brzih neutrona. Međutim, nema relativne prednosti u korištenju torija umjesto osiromašenog uranija. Reaktori s brzim neutronima favoriziraju brzu fisiju U-238 i omogućuju fisijski doprinos zaostalog U-235 u gorivu [19]. Osiromašeni uranij, koji je bogat izotopom U-238, može efikasno podržavati brzu fisiju u ovim reaktorima.

Također, postoji značajna zaliha osiromašenog uranija dostupnog za korištenje, tako da torij ima malu ili nikakvu komparativnu prednost u odnosu na ove sustave.

Teškovodni reaktori (PHWR)

Teškovodni reaktori imaju nisku parazitsku apsorpciju neutrona², što znači da torij može apsorbirati više neutrona za proizvodnju korisnog U-233. Nadalje, teškovodni reaktori koriste neutronske zračenje s malo brzim neutronima (0.1–1 MeV) što pogoduje pretvorbi torija u U-233. Brži neutroni imaju veću vjerojatnost za poticanje fisije u torijevom gorivu. [19]

²Parazitska apsorpcija neutrona predstavlja apsorpciju neutrona od strane nuklida koja ne rezultira niti fisijom niti korisnim umjetnim elementom.

Određeni modeli teškovodnih reaktora, poput CANDU reaktora³, imaju fleksibilnost obrade goriva, odnosno gorivo je moguće zamjeniti tijekom rada reaktora.

Teškovodni reaktori (osobito CANDU) dobro su uspostavljena i široko rasprostranjena komercijalna tehnologija. Reaktor Enhanced Candu 6 (EC6) koristi gorivo od 5% plutonija i torija. U zatvorenom ciklusu goriva, pogonsko gorivo potrebno za pokretanje postupno se zamjenjuje recikliranim U-233, dobivenim iz torija.

Reaktori s rastaljenom soli (MSR)

Osim klasičnih gorivnih šipki, gorivo u reaktoru može biti i u tekućem stanju. Tekuće gorivo može sadržavati fluoride torija i uranija (U-233 i/ili U-235) kao dio mješavine soli koja se tali u rasponu od 400-700 °C, ova tekućina služi kao tekućina za prijenos topline i kao matrica za gorivo potrebno za fisiju. Tekućina cirkulira kroz područje jezgre, a zatim kroz krug kemijske obrade koji uklanja razne fisijske produkte i/ili dragocjeni U-233 [19]. Određeni modeli MSR-a bit će dizajnirani posebno za torijeva goriva za proizvodnju korisnih količina U-233. O samome MSR-u i načinu rada bit će više riječi u sljedećem poglavlju.

U sljedeća dva poglavlja bit će opisane tehnologije nuklearnih reaktora na bazi torija koje su poprimile najveću znanstvenu, tehnološku i financijsku pozornost od strane struke. Oba na istome principu - s tehnologijom rastaljenih soli.

³Kratica CANDU označava CANada Deuterium Uranium, ističući značaj deuterija ili teške vode koja djeluje kao moderator neutrona unutar reaktora. Ova karakteristika predstavlja jedinstvenu odliku CANDU reaktora.

5. Reaktor hlađen rastaljenom soli - Molten salt reactor

MSR, odnosno reaktor s rastaljenom soli opći je naziv za klasu fizijskih reaktora koji se oslanjaju na tekuću smjesu rastaljene soli kao gorivo i djeluju pod niskim tlakom. Postoje različiti dizajni unutar ove klase, pri čemu neki koriste uranij ili transuranijske elemente, torij ili njihove kombinacije kao gorivo. MSR predstavlja jednu od klasa reaktora u okviru koncepta 4. generacije nuklearnih reaktora, kojih sada ima šest, a uskoro će ih biti sedam.

Prvi nuklearni reaktori namijenjeni komercijalnoj uporabi, izgrađeni tijekom kasnih 1950-ih i 1960-ih, spadaju u 1. generaciju. Reaktori 2. generacije obuhvaćaju komercijalne reaktore koji su konstruirani u razdoblju od 1970. do 1990. 3. generacija označava komercijalne dizajne reaktora s poboljšanjima u odnosu na 2. generaciju. 4. generacija koristi se za opisivanje naprednih dizajna reaktora u razvoju, koji koriste rashladna sredstva različita od vode.

Stoga, reaktori sa rastaljenom soli spadaju u kategoriju nuklearnih fizijskih reaktora, a njihova ključna karakteristika je upotreba rastaljene soli kao primarnog rashladnog sredstva. Za razliku od lakovodnih reaktora (LWR) koji rade na nižim temperaturama, reaktori sa rastaljenom soli rade na znatno višim temperaturama iznosa do 700°C-750°C i koriste nizak tlak, gotovo atmosferski tlak.

Reaktori hlađeni rastaljenom solju s tekućim gorivom često su povezani s gorivnim ciklusom Th-232 -> U-233. MSR-ovi mogu koristiti različite fisibilne materijale. Korištenje torija smatra se pogodnijim od gorivnog ciklusa U -> Pu kako bi se smanjila proizvodnja visoko radiotoksičnih transuranskih elemenata poput neptunija, plutonija, americija i kirija. Ovo je djelomice zbog sposobnosti fluoridnih soli, koje se koriste u MSR-ovima, da učinkovito hvataju produkte fisije.

Važno je napomenuti da torij ne sadrži fisijske izotope poput U-235, stoga je za njegovo korištenje kao goriva potrebno dodatno fisibilno gorivo iz uranijeva ciklusa za početno pokretanje nuklearne reakcije.

5.1. Povijesni razvoj MSR-a

Tijekom projekta Manhattan¹, izgrađeni su prvi reaktori s tekućim gorivom. Ovi reaktori bili su vodeni homogeni reaktori (AHR). Koristili su otopine uranija ili plutonija, a njihova glavna svrha bila je proučavanje plutonija.

Koncept otopljenog solnog goriva prvi put je razmatran 1940-ih, kada se počelo razmišljati o zrakoplovima pogonjenim nuklearnom energijom. Zahtijevan je nuklearni reaktor sposoban za postizanje iznimno visokih temperatura kako bi se generirao potrební potisak. Većina ranih istraživanja o rastaljenim solima provedena je tijekom ovog programa.

¹Tajni program s ciljem izrade prve atomske bombe tijekom Drugog svjetskog rata.

Prvi eksperiment s reaktorom s rastaljenim solnim gorivom izveden je 1954. godine u Oak Ridge National Laboratory (ORNL²), koristeći sol Na-Zr-U. Reaktor je proizveo 96 MWh energije.

1956. godine formiran je tim u ORNL-u s ciljem izgradnje komercijalne nuklearne elektrane. Kako je bilo potrebno gorivo koje bi apsorbiralo malo neutrona, otapalo velike količine uranija i torija, bilo termički stabilno te kemijski kompatibilno sa strukturnim materijalima, razvijena je sol poznata kao *Flibe*, koja se sastojala od mješavine litijevog fluorida i berilijevog fluorida. Godine 1962. započela je izgradnja eksperimentalnog reaktora pod nazivom *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE), koristeći upravo ovu sol. MSRE je počeo s radom 1966. godine.

5.2. Osnovne fizikalno-kemijske osobine rastaljenih soli

Rastaljena sol je kemijski proizvod dobiven reakcijom kiselina i lužina, pri čemu se stvaraju voda i sol kao rezultat. Fizička svojstva takvih soli uključuju prozirnost, nizak tlak, nisku gustoću blisku gustoći vode te tekuće stanje. Rastaljene soli s obzirom na visoku temperaturu taljenja, imaju sposobnost otapanja različitih nuklearnih materijala koji su potrebni u jezgri reaktora.

Također, rastaljene soli pružaju iznimno povoljne karakteristike kao radni medij. Njihove visoke točke vrelišta i visoki volumetrijski toplinski kapacitet³ omogućuju učinkovit prijenos topline. U usporedbi s jednakim volumenom vode, rastaljene soli prenose više topline. Također, ove soli su otporne na zračenje, ne reagiraju burno s vodom ili zrakom te su izuzetno prikladne za upotrebu kao radni medij u nuklearnim reaktorima.

Obrada svježeg tekućeg goriva za MSR

U tipičnom MSR-u, gorivo se sastoji od rastaljene fluoridne soli. Ova nosiva sol obično je eutektička smjesa⁴ $7\text{LiF}-\text{BeF}_2$. U njoj su otopljeni uranijev tetrafluorid (UF_4) i torijev tetrafluorid (ThF_4), čime se omogućuje fisijska lančana reakcija i prirodna proizvodnja novog fisibilnog materijala (U-233 ili U-235) iz torija (Th-232).

Proces obrade uranijeva tetrafluorida (UF_4) i torijevog tetrafluorida (ThF_4) dobro su poznati u nuklearnoj industriji. Proizvodnja UF_4 već se koristi u postupku obogaćivanja uranija, gdje je uranijev tetrafluorid posredni proizvod u proizvodnji uranijeva heksafluorida (UF_6). [15] Ova tehnologija temelji se na reakciji hidrofluorinacije, koja pretvara uranijev dioksid (UO_2) u UF_4 uz pomoć anhidridnog fluorovodičnog plina (HF). Reakcija je egzotermna i obično se provodi na temperaturama od oko 500 do 600°C.

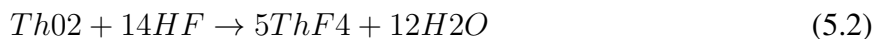


²Američki znanstveni i tehnološki nacionalni laboratorij.

³Svojstvo materijala koje opisuje koliko topline može materijal pohraniti po jediničnom volumenu.

⁴Eutektička mješavina je čvrsta otopina sastavljena od dvije ili više tvari, pri čemu je njezino talište niže od tališta svake pojedinačne čiste komponente ili njihovih bilo kakvih kombinacija.

Slično tome, za pripremu torijevog tetrafluorida (ThF_4) koristi se hidrofluorinacija torijevog dioksida (ThO_2) s anhidridnim fluorovodičnim plinom (HF). Reakcija je također egzotermna i provodi se na temperaturama između 500 i 600°C.



Nakon dobivanja UF_4 i ThF_4 , ove dvije soli otopljene u nosivoj soli kombiniraju se kako bi se stvorilo svježije tekuće gorivo za MSR. Važno je napomenuti da se litijev fluorid (LiF) koji se koristi u MSR-u mora pripremiti od čistog izotopa Li-7 kako bi se smanjila generacija tricija iz Li-6. Kada se sve ove komponente obrade i kombiniraju, dobiva se svježije tekuće gorivo koje se može koristiti u MSR-u za proizvodnju električne energije. [15]

5.3. Način rada

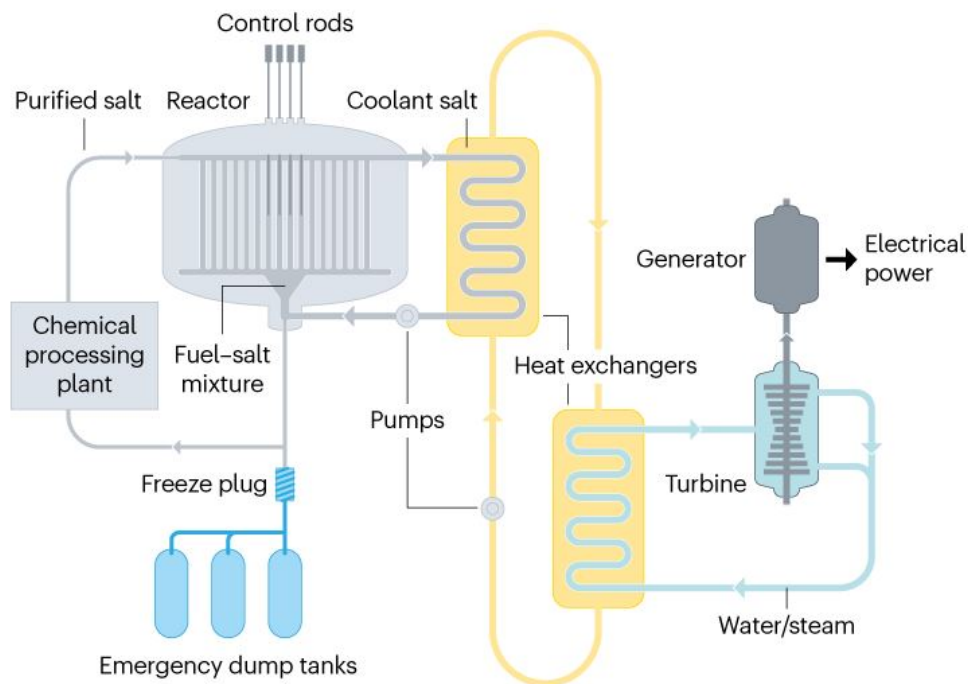
Poput svakog drugog nuklearnog reaktora, tako je i svrha reaktora hlađenog rastaljenom soli proizvodnja toplinske energije putem nuklearne lančane reakcije. No ključna razlika između MSR-a i klasičnih reaktora leži u samom gorivu, njegovom sastavu i agregatnom stanju. Dok se klasični reaktori oslanjaju na kruta goriva, pri čemu je uranij dominantno gorivo, MSR koristi mješavinu rastaljene soli s fisibilnim materijalom kao gorivo.

Unatoč razlikama u gorivu, osnovni dijelovi i procesi energetskog postrojenja, uključujući izmjenjivače topline, turbine, električne generatore i ostale pomoćne sustave, u osnovi ostaju isti. No, važno je napomenuti da ti dijelovi kod MSR reaktora moraju biti konstruirani da podnesu više temperature, budući da MSR reaktori rade na znatno višim temperaturama u usporedbi s klasičnim reaktorima.

Na slici 5.6 prikazan je kružni proces MSR-a. Gorivo je u obliku rastaljene soli koja sadrži fisibilni materijal, poput U-233 (dobiven pomoću torija). Gorivo prolazi kroz metalne cijevi i ulazi u reaktorsku posudu. Unutar reaktorske posude postoje strukture od grafita koje usporavaju, odnosno moderiraju neutrone koji prolaze kroz gorivo.

Moderirani neutroni povećavaju vjerojatnost da će izazvati fisijske reakcije u fisibilnom materijalu. Kada se fisijske reakcije dogode, dolazi do povećanja temperature goriva koje potom izlazi iz reaktorske posude i prolazi kroz sustav cijevi.

Izvan reaktora gorivo prenosi toplinu na rashladnu, također rastaljenu sol. Rashladna sol izlazi iz regije reaktorske zaštite i prolazi kroz sustav izmjenjivača topline. Toplina se prenosi radnom mediju koji ulazi u turbinu te se generira mehanički rad na vratilu.



Slika 5.1. Kružni proces MSR-a. [2]

Prednost reaktora s tekućim gorivom leži u njihovoj sposobnosti obrađivanja goriva tijekom rada reaktora. Kada se atomi podvrgnu fisiji, oni se raspadnu u atome manjeg atomskog, odnosno masenog broja. Takve atome moguće je brzo ukloniti iz jezgre što sprječava daljnju apsorpciju neutrona čime se onemogućuje lančana nuklearna reakcija. Kao rezultat, gorivo u reaktorima s tekućim gorivom, poput MSR-ova, postiže visoku učinkovitost.

5.4. Prednost dizajna MSR-a u usporedbi s klasičnim reaktorom

Glavna prednost MSR dizajna jest rad na visokoj temperaturi. Zbog prirode soli, čija je temperatura vrenja 1400°C , radni tlak je blizak atmosferskom što smanjuje rizik od eksplozije sustava. S druge strane, tradicionalni nuklearni reaktori prvenstveno su tlakovodni reaktori. Takvi reaktori rade na 140 puta višem tlaku od atmosferskog. [22]

MSR reaktori imaju negativan koeficijent reaktivnosti. Kako se temperatura u reaktoru povećava, brzina odvijanja fisijske reakcije opada, što ima za posljedicu samoregulaciju temperature u gorivu i sprječava da reaktor postane kritičan, odnosno da dođe do moguće eksplozije.

Ukoliko bi MSR postrojenje ostalo bez napajanja, reaktor bi se sam ugasio bez potrebe za ljudskom intervencijom. Reaktor je opremljen odvodnim kanalom koji zamrznuti ventil čini zatvorenim. Ventil ostaje zamrznut zahvaljujući aktivnom protoku rashladnog sredstva preko vanjske strane odvodnog kanala. U slučaju potpunog gubitka električne energije, ventil se odmrzne, a gorivo u reaktoru otječe kroz kanal u poseban spremnik koji se naziva odvodni spremnik. [18]

Zamrznuti ventil zahtijeva aktivno hlađenje. U slučaju potpunog gubitka električne energije,

hlađenje će biti prekinuto i ventil će se odmrznuti, što će posljedično dovesti do istjecanja goriva i potpunog zaustavljanja reaktora. Dakle, sigurnosni ventil jedinstven reaktorima s tekućim gorivom omogućuje iznimno visoku razinu sigurnosti što je jedan od glavnih argumenata za uvođenje reaktora takvog tipa.

5.5. Tekuće gorivo i njegova ekonomska isplativost

Klasične krute gorivne šipke podložne su oštećenjima koja proizlaze zbog visoke temperature i zračenja tijekom nuklearnog procesa. Zamjena tih šipki zahtijeva privremeno gašenje postrojenja, što predstavlja određeni financijski teret. Proces zamjene šipki provodi se svakih 18 mjeseci, pri čemu se svaki puta mijenja samo trećina šipki. Dodatno, potrošeno gorivo je izrazito radioaktivno i zahtijeva specifičan postupak rukovanja.

S druge strane, tekuće gorivo na bazi torija nije podložno istim naprezanjima kao krute gorivne šipke. Struktura ionskih veza u tekućim gorivima može izdržati visoke razine radijacijskog oštećenja. Tekuća goriva smanjuju troškove održavanja i zamjene, čime doprinose ekonomskoj isplativosti reaktora.

5.6. Proizvodnja tricija i problemi s materijalima

Postojanje litija u solima dovodi do nastanka radioaktivnog i izuzetno pokretnog tricija. Oak Ridge National Laboratory (ORNL) implementirao je poseban međusloj natrijevog fluoroborata kako bi zadržao veći dio tricija, međutim značajna se količina ipak emitira u okoliš. Unatoč sigurnosnim mjerama postoji realna opasnost od prodiranja produkata radioaktivne fisije u okoliš, što predstavlja jednu od najvećih opasnosti kod uvođenja MSR-a.

U dizajnu reaktora poput ovog, radionuklidi koji su otopljeni u gorivu dolaze u kontakt s ključnom opremom poput pumpi i izmjenjivača topline. Kako MSR koristi legure na bazi nikla, a takve su legure podložne krtosti⁵ kada su izložene intenzivnom protoku neutrona, potrebno je uložiti dodatne financije za rješavanje ovog problema.

5.7. Analiza fleksibilnosti i sigurnosnih značajki

U ovom će poglavlju biti prikazan dinamički odgovor MSR-a u dva sigurnosna scenarija kako bi se procijenile pasivne sigurnosne funkcije MSR sustava. [22]

Sigurnosni scenariji uključuju gubitak primarnog protoka i gubitak sekundarnog protoka.

Prijelazni odziv MSR sustava zatim se uspoređuje s prijelaznim odzivom jezgre tradicionalnog PWR-a, koji nema dodatne sigurnosne značajke.

⁵Svojstvo materijala da se lomi bez uočljive plastične deformacije.

Jedna od glavnih prednosti MSR-a u odnosu na tradicionalni PWR je mogućnost regulacije opterećenja, što je ostvarivo zbog samostabilnih i samoregulirajućih svojstava MSR-a. Količina topline koja se razvija u MSR jezgri može se regulirati bez umetanja kontrolnih šipki, za razliku od tradicionalnog nuklearnog reaktora. Kontrola topline kod MSR-a postiže se regulacijom protoka rashladne soli. Kada se brzina protoka rashladne soli promijeni, temperatura goriva mijenja se sukladno tome, što posljedično utječe na toplinsku snagu jezgre. [22]

Ova analiza ispituje dinamiku MSR-a nakon promjene opterećenja, koristeći stvarne podatke o potražnji električne energije koje je dostavio *New York Independent System Operator* (NYISO). Rezultati se uspoređuju s tradicionalnim PWR-om tijekom pogona nakon promjene opterećenja. [22] Svrha analize rezultata je utvrđivanje načina na koji MSR povećava pouzdanost i otpornost električne mreže.

5.7.1. Model PWR-a

Model nuklearne elektrane uključuje jezgru reaktora, generator pare i Rankineov ciklus.

Teorijski model za jezgru tradicionalnog PWR-a razvijen je temeljem prvog zakona termodinamike, bilanci mase i energije. Dinamički model za nuklearni reaktor preuzet je iz radova [23] i [24]. Ulazni podatak modela pozicija je upravljačkih šipki, izražena u metrima. Izlaz modela uključuje toplinsku snagu nuklearnog reaktora te temperature moderatora i goriva. [22]

Model neutronske dinamike preuzet je iz rada [24]:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \lambda C(t) \quad (5.3)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n(t) - \lambda C(t), \quad (5.4)$$

gdje je $n(t)$ gustoća neutrona, $\rho(t)$ je reaktivnost jezgre PWR reaktora, β je efektivni udio zaostalih neutrona⁶, Λ je vrijeme stvaranja slobodnih neutrona, λ je konstanta raspada za jednu prosječnu grupu zaostalih neutrona i $C(t)$ je koncentracija jedne prosječne grupe zaostalih neutrona.

Reaktivnost reaktora zbroj je reaktivnosti goriva i moderatora te reaktivnosti zbog položaja upravljačkih šipki [24]:

$$\rho_{fb}(t) = \alpha_f(T_f - T_{f0}) + \alpha_m(T_m - T_{m0}) + p_2 z^2 + p_1 z + p_0, \quad (5.5)$$

gdje je T_f temperatura goriva, T_m temperatura moderatora, T_{f0} i T_{m0} su referentne temperature goriva i moderatora, α_f je koeficijent povratne veze temperature goriva, α_m je koeficijent povratne

⁶Neutron emitiran nakon nuklearne fisije, od strane jednog od produkata fisije, u vremenskom periodu od nekoliko milisekundi do nekoliko minuta nakon fisije.

veze temperature moderatora, z je položaj upravljačkih šipki, izmjeren u metrima. $p_2 z^2 + p_1 z + p_0$ opisuje reaktivnost kao funkciju položaja upravljačkih šipki. [22]

Energetska bilanca gorivnih šipki je sljedeća:

$$\frac{dT_f}{dt} = -\frac{h_{conv} A_s}{\rho_f V_f C_{pf}} (T_f - T_m) + \frac{P}{\rho_f V_f C_{pf}}, \quad (5.6)$$

gdje je ρ_f gustoća goriva, V_f je volumen goriva, C_{pf} je toplinski kapacitet goriva, h_{conv} je konvekcijski koeficijent prijenosa topline od goriva do rashladnog sredstva, A_s je površina između goriva i rashladnog sredstva.

Energetska bilanca rashladnog sredstva jest:

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{h A_s}{\rho_m V_m C_{pm}} (T_f - T_m) - \frac{W_m}{\rho_m V_m} (T_m - T_{m,in}), \quad (5.7)$$

gdje je ρ_m gustoća rashladne tekućine, V_m volumen rashladne tekućine, C_{pm} toplinski kapacitet rashladne tekućine, a $T_{m,in}$ ulazna temperatura rashladnog sredstva. [22]

Prema izvoru [25], toplinska snaga reaktora povezana je s gustoćom neutrona na sljedeći način:

$$P = n(t) \cdot \sigma_f^{235} \cdot E_f \cdot N_{235} \cdot V_{jezgra}, \quad (5.8)$$

gdje je E_f prosječna iskoristiva energija po fisiji, σ_f^{235} je mikroskopski presjek U-235, N_{235} je atomska gustoća broja U-235 u gorivu, a V_{jezgra} je ukupni volumen jezgre.

5.7.2. Model MSR-a

Cjelokupni model MSR postrojenja sastoji se od MSR jezgre, dva izmjenjivača topline, generatora pare, visokotlačne turbine, srednje i niskotlačne turbine, generatora, kondenzatora i dva grijača napojne vode.

Kod modeliranja jezgre reaktora s rastaljenom soli, jedna od ključnih razlika u odnosu na tradicionalni PWR je proces otapanja fisibilnog materijala u rastaljenoj soli. Produkti fisije neprestano cirkuliraju kroz primarni krug, što može rezultirati izlaskom zaostalih neutrona izvan jezgre [22]. Posljedično dolazi do smanjenja broja zaostalih neutrona unutar same jezgre.

Dinamički model reaktora s rastaljenom soli uzima u obzir ove učinke modificiranim modelom točkaste kinetike. Modificirani model točkaste kinetike preuzet je iz [26]:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{(\rho(t) - \beta)n(t)}{\Lambda} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S(t) \quad (5.9)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i n(t)}{\Lambda} - \lambda_i C_i(t) - \frac{C_i(t)}{\tau_c} + \frac{C_i(t - \tau_L) e^{-\lambda_i \tau_L}}{\tau_c}, \quad (5.10)$$

gdje $n(t)$ predstavlja gustoću neutrona, $C_i(t)$ predstavlja koncentraciju i -te skupine zaostalih neutrona, gdje je $i = 1, 2, \dots, 6$. β_i je udio zaostalih neutrona i -te skupine, β je ukupni udio zaostalih neutrona. τ_c je vrijeme prijenosa goriva u jezgri reaktora, a τ_L je vrijeme prijenosa goriva u vanjskoj petlji.

Jednadžba 5.10 eksplicitno uzima u obzir gubitke zaostalih neutrona u vanjskoj petlji, tako da uključuje članove za brzinu izlaska iz jezgre:

$$\frac{C_i(t)}{\tau_c} \quad (5.11)$$

i brzinu ponovnog ulaska ovih zaostalih neutrona:

$$\frac{C_i(t - \tau_L) e^{-\lambda_i \tau_L}}{\tau_c}. \quad (5.12)$$

Dinamika temperature goriva može se modelirati na sljedeći način [27] :

$$\frac{dT_{f1}}{dt} = \frac{W_f}{m_{f1}} (T_{f,in} - T_{f1}) + \frac{K_1 P_0 \left(\frac{n}{n_0}\right)}{m_{f1} C_{pf}} + \frac{K_{g1}}{K_{f1}} \frac{h A_{fg}}{m_{f1} C_{pf}} (T_g - T_{f1}), \quad (5.13)$$

gdje je T_{f1} temperatura goriva, W_f je protok goriva u jezgri MSR-a, m_{f1} je masa rastaljene soli u gorivu, K_1 je ukupna proizvedena snaga, K_{g1} je udio ukupne snage proizvedene u grafitu, a $h A_{fg}$ je umnožak koeficijenta prijenosa topline i površine između goriva i grafita. P_0 je nazivna snaga na vratilu, koja nakon množenja s $\frac{n}{n_0}$ daje trenutnu snagu u trenutku t . [22]

Dinamika temperature grafita modelirana je kao:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{(K_{g1}) P_0 \left(\frac{n}{n_0}\right)}{m_g C_{pg}} + \frac{h A_{fg}}{m_g C_{pg}} (T_f - T_g), \quad (5.14)$$

gdje m_g predstavlja masu grafita, a C_{pg} je specifični toplinski kapacitet grafita.

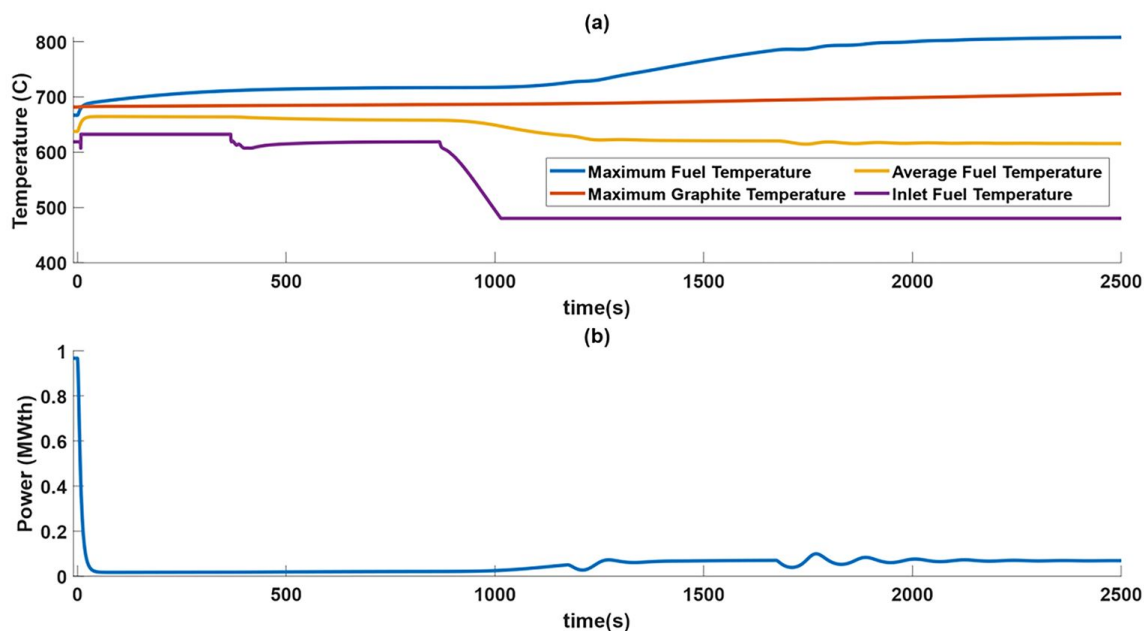
5.7.3. Gubitak primarnog protoka

MSR

Gubitak primarnog protoka rashladnog medija predstavlja nesreću često uzrokovanu prestankom rada primarne crpke zbog nestanka električne energije. Zaustavljanjem primarne crpke, brzina cirkulacije rashladnog sredstva ne pada trenutačno na nulu, već se eksponencijalno smanjuje tijekom razdoblja usporavanja koje traje nekoliko sekundi [22]. Zbog prirodnog konvekcijskog efekta koji proizlazi iz razlike između ulazne i izlazne temperature u primarnom krugu, protok rashladnog sredstva na kraju ne opada na nulu. Za modeliranje ovog protoka, odabran je efektivni protok od 1% nominalnog protoka [28].

Promjena u primarnom protoku dovodi do smanjenja brzine prijenosa zaostalih neutrona i smanjenja odvođenja topline iz jezgre. Trenutak $t = 0$ predstavlja trenutak kada se protok primarnog rashladnog sredstva smanjuje. Zbog usporavanja protoka smanjuje se prijenos topline iz jezgre i odvod topline iz izmjenjivača topline. Spomenuto rezultira skokom temperature goriva, pri čemu se prosječna temperatura goriva povećava s 645°C na 665°C u roku od 20 sekundi.

Povećanje temperature rezultira snažnom negativnom temperaturnom povratnom spregom koja uzrokuje brzo smanjenje snage. Unutar 60 sekundi nakon isključivanja crpke, snaga se smanjuje na 2% nazivne snage i ostaje na toj razini do 1000 sekundi nakon incidenta [22].



Slika 5.2. Gubitak primarnog protoka u MSR-u. [22]

Nakon što se dosegne maksimalni iznos temperature, prosječna temperatura goriva postupno opada zbog smanjenja količine raspada atoma u jezgri.

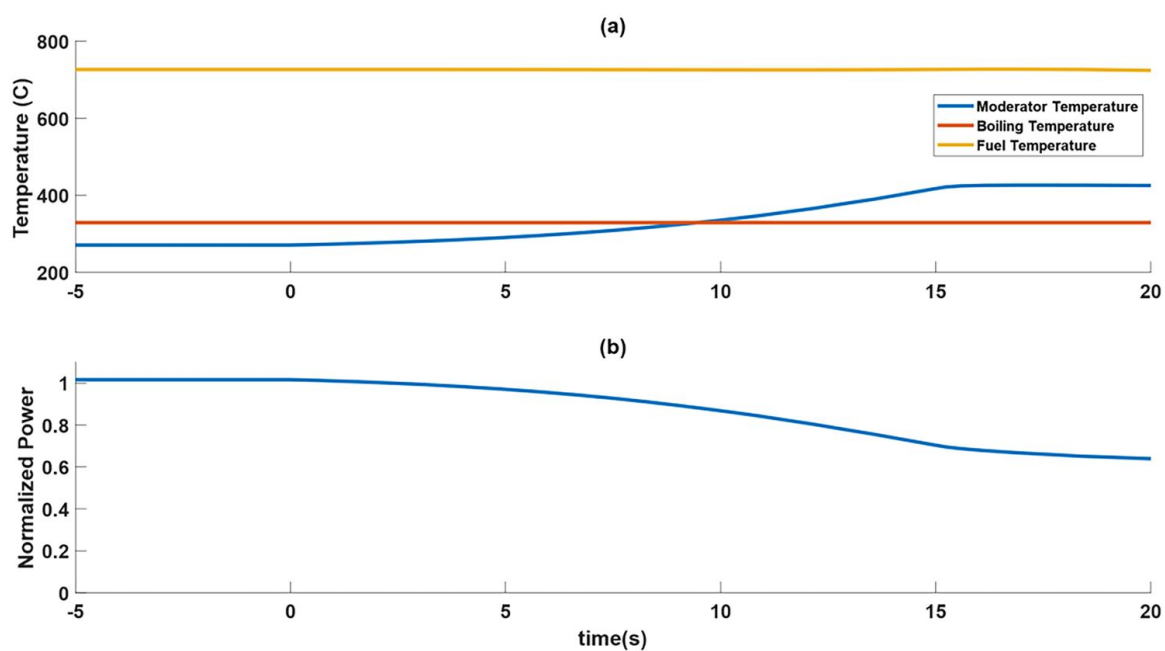
Tijekom vremena, prosječna temperatura goriva pada ispod početne temperature stabilnog stanja, što dovodi do pozitivnog unosa reaktivnosti u jezgri. Ovaj učinak, zajedno s udjelom zaostalih neutrona u jezgri, ponovno pokreće fisijsku reakciju nakon 1000 sekundi.

Fisija potom povećava temperaturu goriva, što smanjuje proizvedenu snagu. Ovaj ciklus rezultira prigušenom fluktuacijom u snazi, nakon čega se uspostavlja stabilno stanje.

Nakon 2500 sekundi, jezgra postiže stabilno stanje, sa snagom koja se uspostavlja na oko 7% nazivnog kapaciteta. Prosječna temperatura goriva iznosi 615°C što je niže od najviše dozvoljene temperature grafitu i goriva od 705°C odnosno 805°C .

PWR

Dinamika u PWR-u je brza. Unutar 10 sekundi od gubitka primarnog protoka, temperatura rashladne tekućine (vode) raste do razine koja prelazi temperaturu vrenja pri radnom tlaku. [22] Time se povećava tlak u jezgri reaktora, čime se povećava mogućnost eksplozije.



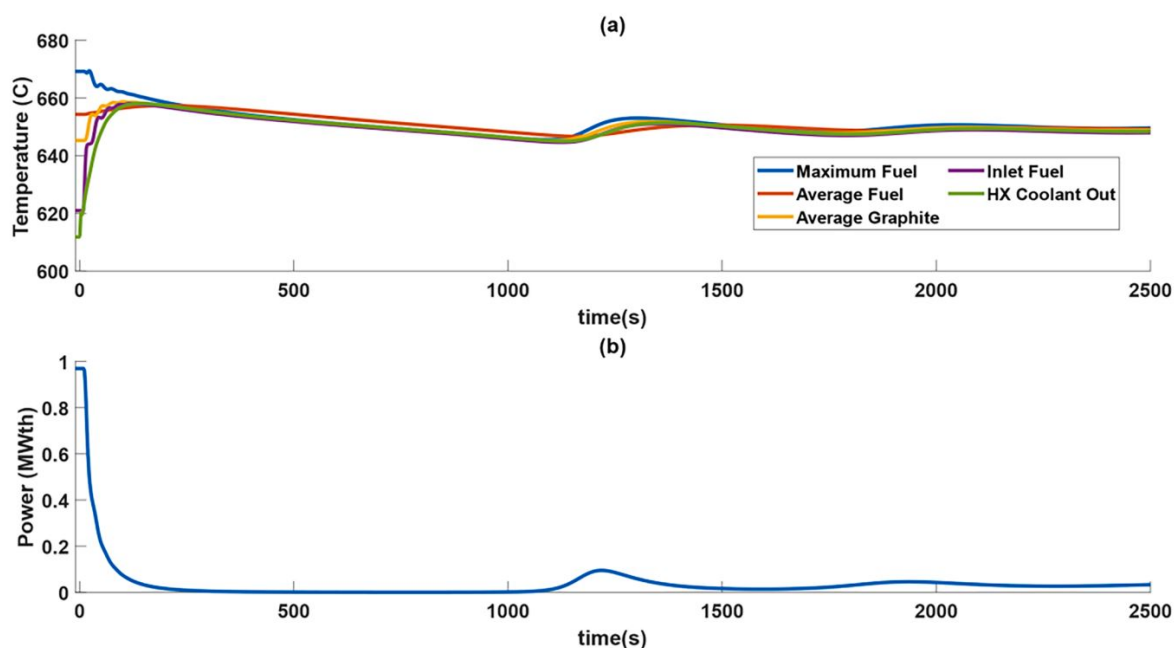
Slika 5.3. Gubitak primarnog protoka u PWR-u. [22]

Treba napomenuti da tradicionalni PWR reaktori imaju dodatne složene sigurnosne značajke koje osiguravaju siguran rad postrojenja kod takvih nesreća.

5.7.4. Gubitak sekundarnog protoka

MSR

U trenutku $t = 0$, smanjuje se protok rashladnog sredstva unutar sekundarne petlje. Smanjeni protok rezultira brzim porastom temperature rashladne soli. Smanjeni protok posljedično smanjuje prijenos topline iz goriva prema rashladnoj soli unutar izmjenjivača topline. [22]



Slika 5.4. Gubitak sekundarnog protoka u MSR-u. [22]

Pad pri prijenosu topline uzrokuje brzi porast temperature goriva koji ulazi u jezgru reaktora. Porast temperature goriva rezultira smanjenjem snage jezgre. Prosječna temperatura goriva se polako povećava, da bi se zatim postupno smanjivala kako snaga opada.

Nakon 1200 sekundi, temperatura goriva padne dovoljno da poništi negativnu povratnu spregu reaktivnosti i uzrokuje povećanje snage. Ovaj skok na snazi, međutim, podiže temperaturu goriva, uzrokujući ponovno smanjenje snage.

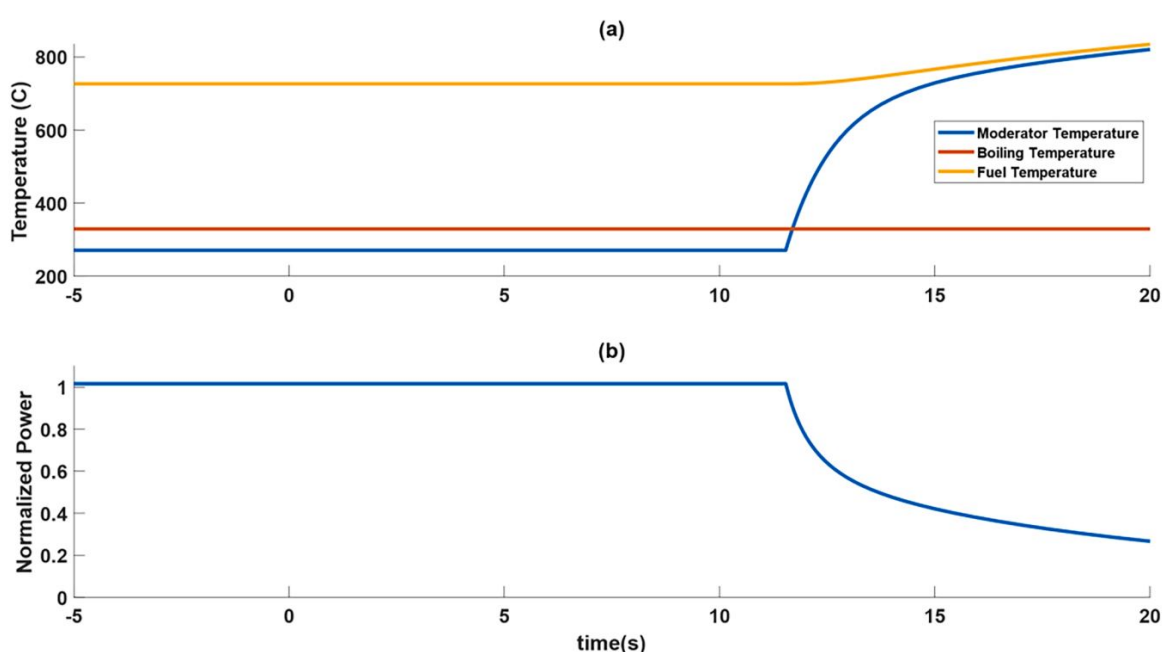
Nakon 2500 sekundi, sustav doseže stabilno stanje. Maksimalna temperatura goriva polako opada sve dok se ne izjednači s prosječnom temperaturom.

PWR

Posljedice otkaza pumpe rashladnog medija unutar sekundarne petlje u tradicionalnom PWR-u značajno su veće. Kada pumpa unutar sekundarne petlje prestane raditi, protok⁷ u sekundarnoj petlji počinje opadati.

Kako protok sekundarne petlje opada, temperatura medija i jezgre počinje rasti. U trenutku $t = 11$ sekundi, temperatura medija koji se vraća u jezgru bitno se ne razlikuje od temperature medija koji je izašao iz jezgre.

Porast ulazne temperature, zajedno s gubitkom prijenosa topline iz jezgre, rezultira eksponencijalnim porastom temperature moderatora.



Slika 5.5. Gubitak sekundarnog protoka u PWR-u. [22]

U roku od 12 sekundi nakon što pumpa zakaže, temperatura moderatora se povećava iznad zasićene temperature pri projektiranom radnom tlaku [22]. Ovaj scenarij može dovesti do ozbiljne nesreće u tradicionalnim reaktorima bez dodatnih sigurnosnih komponenti.

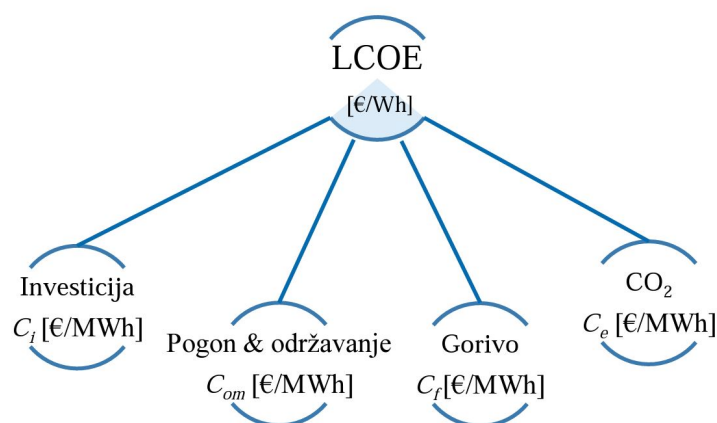
⁷Protok sekundarne petlje u PWR-u također je modeliran kao u slučaju MSR-a: eksponencijalni pad s periodom smirivanja od 2 sekunde, nakon čega se stabilizira na 1% nominalnog protoka.

5.8. Ekonomičnost MSR-a

5.8.1. Indikatori ekonomske i financijske uspješnosti elektrane

LCOE i LACE

Jedan od najvažnijih pokazatelja ekonomske isplativosti elektrane je nivelirana cijena električne energije proizvedene u elektrani (LCOE). Iako se ponekad naziva niveliranim troškom električne energije, LCOE je robusna mjera za procjenu troška električne energije proizvedene tijekom životnog vijeka proizvodnog postrojenja. Omogućuje usporedbu različitih tehnologija nejednakog životnog vijeka (npr. vjetar, solarna energija, prirodni plin), veličine projekta, različitih kapitalnih troškova, troškova goriva, troškova rada i održavanja, povrata i kapaciteta te se izražava u energetskej valuti, obično kao [\$/kWh] ili [€/kWh].



Slika 5.6. LCOE [20]

$$LCOE = C_{investicije} + C_{O\&M} + C_{gorivo} + C_{emisije} \quad (5.15)$$

U nuklearnom sektoru, glavna komponenta LCOE su kapitalni troškovi (50-75%), a slijede troškovi rada i održavanja te potom troškovi goriva. Elektrana se smatra ekonomski isplativom ako je njezin projicirani LCOE niži od projiciranih izravnatih izbjegnutih troškova električne energije (LACE). [21]

LACE je vrijednost elektrane na mreži. Drugim riječima, LACE predstavlja troškove koji bi nastali u slučaju osiguravanja iste opskrbe sustava drugom tehnologijom. LACE se obično izražava kao [\$/kWh] ili [€/kWh].

LCOE i LACE iznimno su važni za donošenje odluka te evaluaciju dizajna u ranoj fazi.

5.8.2. Ekonomija razmjera

Povijesno gledano, snaga nuklearnih elektrana povećavala se od nekoliko stotina MW pa sve do 1500 MW i više. Razlog za povećanje snage nuklearnih elektrana leži u načelu ekonomije razmjera, tj. *veće je jeftinije*. Prema načelu ekonomije razmjera, kapitalni trošak [valuta/kW] i LCOE [valuta/MWh] nuklearne elektrane smanjuju se s povećanjem njezine snage. [21]

Smanjenje kapitalnih troškova rezultat je nekoliko čimbenika, poput smanjenja razine jedinstvenih troškova priključenja na mrežu (trošak priključenja elektrane na mrežu); veći kapacitet opreme (npr. generator pare) i učinkovitije korištenje sirovina.

Provedba načela ekonomije razmjera može imati i nedostatke. Uz ostale nepromijenjene parametre, što je veća veličina reaktora, veća su početna ulaganja i problemi komunalnih usluga. Može se desiti da će mrežni priključak teško pouzdano prenijeti veću snagu.

5.8.3. Ekonomija višestruke izgradnje

Troškovi životnog ciklusa nuklearne elektrane ovise o tome koliko je identičnih (ili barem vrlo sličnih) jedinica izgrađeno. [21] Kada se identično postrojenje isporučuje više puta, ostvaruje se ekonomska prednost kroz koncept ekonomije višestruke izgradnje. Koncept omogućuje smanjenje ukupnih investicijskih troškova.

Ekonomija višestruke izgradnje nuklearnih elektrana povezana je s idejom *masovne proizvodnje* koja je najprije utemeljena u automobilskoj industriji, a kasnije i u drugim područjima (npr. u zrakoplovnoj industriji, proizvodnji računala).

5.9. Analiza LCOE-a MSR-a i PWR-a

Prema izvoru [29], procjenjuje se LCOE (nivelirani trošak električne energije) za MSR te se uspoređuje s tlakovodnim reaktorom i klasičnom termoelektranom na ugljen, temeljem evaluacija provedenih u ORNL-u 1978. godine. [21]

U analizi ORNL-a detaljno su prikazani troškovi za MSR snage 1000 MW, tlakovodni reaktor jednake snage i za termoelektranu na ugljen. Dolazi se do sljedeća dva glavna rezultata: LCOE za MSR snage 1000 MW (sa 20% obogaćenim gorivom) iznosi 36.5 \$/MWh, odnosno LCOE za MSR snage 1000 MW je 7% manji od jednakog tlakovodnog reaktora iste snage te 9% manji od termoelektrane na ugljen iste snage. [21]

Analiza ne uzima u obzir troškove licenciranja, sigurnosti i ekoloških standarda. [30]

Tablica 5.1 sažima usporedbu iznosa LCOE-a za sljedeće tipove reaktora: MSR snage 1000 MW (20% obogaćen), MSR snage 1000 MW (100% obogaćen), PWR snage 1000 MW te za termoelektranu na ugljen snage 1000 MW. Obogaćivanje mora biti manje od 20% za U-235 odnosno manje od 12% za U-233 (dobiven iz torija).

Tablica 5.1. LCOE [\$/MWh] za MSR, PWR i Termoelektranu ugljen

| Komponenta | MSR (20% obogaćen) | MSR (100% obogaćen) | PWR | Termoelektrana |
|------------|--------------------|---------------------|------|----------------|
| Kapital | 20.1 | 20.1 | 20.7 | 15.8 |
| O&M | 5.8 | 78 | 11.3 | 8 |
| Gorivo | 11.1 | 4 | 7.4 | 17.2 |
| Otpad | 1 | 1 | 1 | 0.9 |
| Razgradnja | 0.4 | 0.4 | 0.7 | - |
| Ukupno | 38.4 | 31.3 | 41.1 | 41.9 |

5.9.1. Dva dizajna MSR-a i njihova financijska struktura

MSR-FUJI

FUJI reaktor japanski je dizajn reaktora s rastaljenim solima (MSR) koji je razvijala japanska tvrtka *International Thorium Energy & Molten-Salt Technology (IThEMS)* od 1980-ih godina, koristeći rezultate ORNL-a.

MSR-FUJI postiže snage od 100 MW do 1000 MW. Tipičan dizajn, poznat kao FUJI-U3, ima snagu od 200 MW i može se kategorizirati kao reaktor male veličine s modularnim dizajnom (SMR). Toplinska snaga FUJI-U3 iznosi 450 MWt, što omogućava postizanje toplinske učinkovitosti od 44%.

MSR-FUJI sadrži sigurnosni sustav koji omogućuje ispuštanje goriva u podkritični odvodni spremnik kroz ventil za zamrzavanje. S obzirom da se plinoviti fisibilni produkti kontinuirano uklanjaju iz goriva, rizik od nesreća je minimiziran.

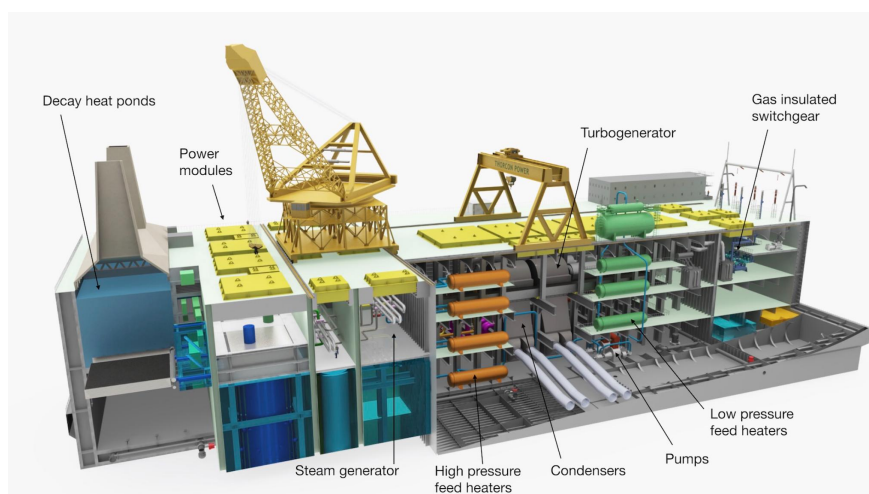
MSR-FUJI radi na vrlo niskom tlaku (0,5 MPa), što eliminira potrebu za debelom reaktorskom posudom. Unutar reaktorske posude nema gorivnih sklopova niti složenih unutarnjih struktura jezgre, pri čemu je jedina komponenta grafitni moderador.

Procijenjeni trošak izgradnje 1000 MW MSR-FUJI-a manji je od 2000 \$/kW, a ukupni trošak proizvodnje električne energije je otprilike 30 \$/MWh.

ThorCon MSR

ThorCon nuklearni je reaktor s rastaljenim solima i tekućim gorivom koje je također moguće pasivno ispuštati u slučaju incidenta. ThorCon koristi automatiziranu konstrukciju od čeličnih ploča u brodskom stilu uz radni tlak reaktora od 3 bara. [33]

Ovi nuklearni reaktori dizajnirani su kao dio plutajuće elektrane. Elektrana od 500 MW zatvorena je u trup, izgrađena u brodogradilištu, dotečljena u plitku vodu te pričvršćena balastom na morsko dno. Cijeli nuklearni dio postrojenja smješten je pod zemljom kako je prikazano na slici 5.7.



Slika 5.7. ThorCon [32]

Podzemni nuklearni dio postrojenja smješten je ispod žutih pravokutnih poklopaca, a dostupan je putem mostnih dizalica. Dizalice omogućuju periodičnu zamjenu svih ključnih komponenti te obradu goriva.

Izvor [31] izvješćuje o procjeni kapitalnih troškova od 800–1000 \$/kW i trošku proizvodnje električne energije od 30 \$/MWh za 500 MW ThorCon nuklearni reaktor.

6. Reaktor s tekućim fluoridom torija

6.1. Uvodno o reaktoru s tekućim fluoridom torija

Dizajn reaktora s tekućim fluoridom torija (eng. Liquid fluoride thorium reactor - LFTR) koristi zatvoreni ciklus goriva temeljen na toriju. Reaktor se sastoji od dvije cjeline. Prvu cjelinu čini centralni aktivni dio jezgre, dok drugu čini vanjski spremnik sa Th-232. Obje cjeline ispunjene su fluoridnim solima. Th-232 u području vanjskog spremnika pretvara se u U-233 putem zahvata neutrona i beta raspada. [34]

Reaktori s tekućim fluoridom torija zahtijevaju niže početne kapitalne troškove u usporedbi s konvencionalnim reaktorima zbog odsutnosti masivne tlačne posude i smanjenih potreba za hlađenjem. LFTR može neprekidno biti u pogonu tijekom mnogo godina, čak i desetljećima. Zbog svoje lagane konstrukcije i kompaktne jezgre, LFTR ima veću izlaznu snagu po jedinici od konvencionalnih tipova reaktora.

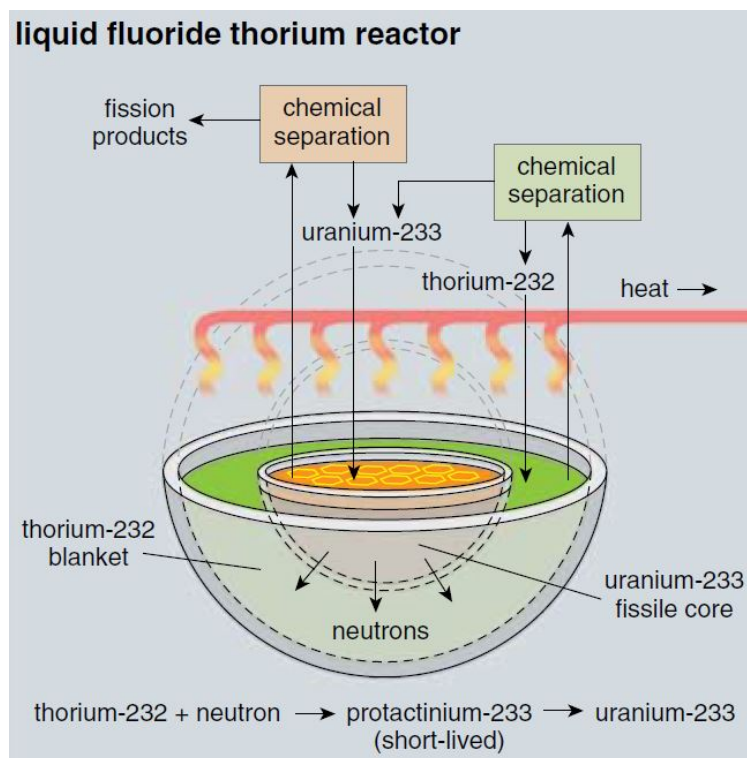
Eliminirana potreba za čestom zamjenom goriva u kombinaciji s malim dimenzijama reaktora čine LFTR izvrsnom opcijom za napajanje mornaričkih brodova i svemirskih letjelica.

6.2. Način rada

Reaktor s tekućim fluoridom torija predstavlja specifičnu varijantu reaktora hlađenih rastaljenom soli. Jezgra reaktora okružena je spremnikom tekućeg fluorida torija (Th-232 blanket, slika 6.1) koja ne samo da apsorbira zračenje, već i generira novo gorivo koje se postupno uvodi u jezgru reaktora. Struktura reaktora s tekućim fluoridom torija uključuje kritičnu jezgru koja sadrži fisibilni U-233 otopljen u fluoridnoj soli. Jezgra je okružena spremnikom koji sadrži Th-232.

Višak neutrona koji nastaje kao rezultat fisije u jezgri apsorbira Th-232 prisutan u spremniku, što uzrokuje transmutaciju u U-233. Novogenerirani U-233 usmjerava se natrag u jezgru, gdje održava lančanu reakciju. Cijeli proces vizualno je prikazan na slici 6.1.

Reaktor s tekućim fluoridom torija pripada kategoriji oplodnih reaktora, što implicira njegovu sposobnost za proizvodnju većih količina fisibilnog goriva nego što je potrebno za vlastiti rad. Kako je ranije opisano, unosi se druga struja tekuće rastaljene soli za proizvodnju fisibilnih izotopa. Prva struja sadrži fisibilno gorivo koje djeluje kao inicijator nuklearne reakcije, dok druga struja goriva sadrži gorivo koje apsorbira neutrone i postupno se transformira u fisibilno gorivo. Ovaj proces rezultira stvaranjem više fisibilnog goriva nego što je potrebno za sam proces, što objašnjava termin *oplodni*.



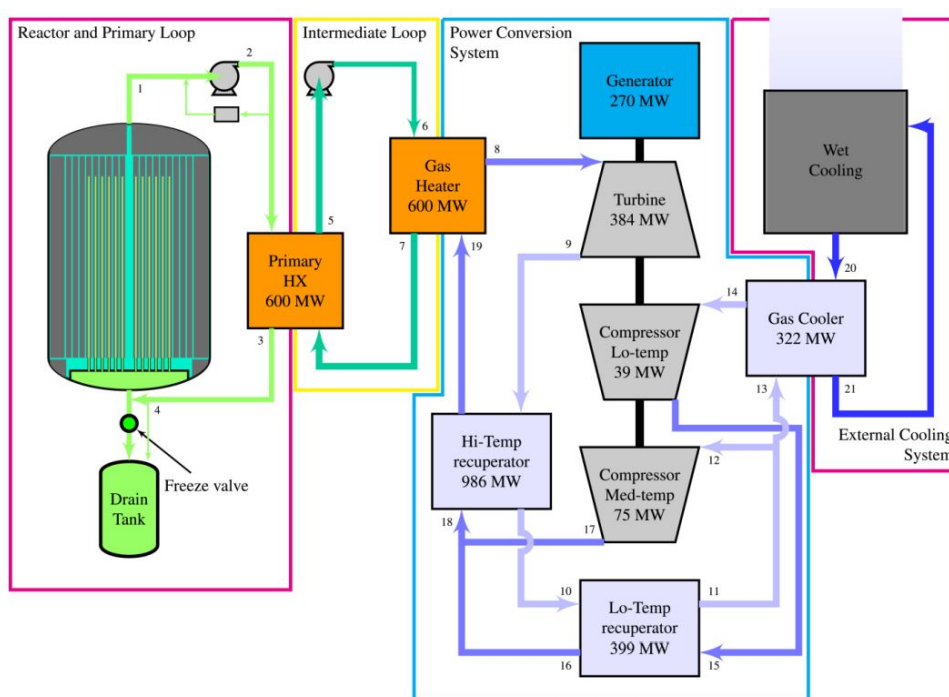
Slika 6.1. LFTR. [1]

6.2.1. Primarna petlja i međupetlja procesa

Primarna petlja ima zadaću vođenja rastaljenog goriva kroz primarni izmjenjivač topline (PHX) tijekom normalnog rada, pri čemu gorivo predaje toplinu rashladnoj soli. Prisilnu cirkulaciju osigurava primarna pumpa [34]. Sustav primarne petlje započinje i završava kod reaktorskog spremnika te uključuje primarnu pumpu, izmjenjivač topline, spremnik za pražnjenje goriva i pripadajući vanjski uređaj za hlađenje. Cijeli opisani proces prikazan je na slici 6.2.

Međupetlja prenosi toplinu iz primarne petlje u petlju za pretvorbu energije (eng. Power conversion system - PCS), uključujući izmjenjivač topline, pumpu za hlađenje rashladne soli, te spremnike za odvod rashladne soli.

Međupetlja također ima ulogu izoliranja primarne petlje od visokih tlakova unutar petlje za pretvorbu energije (PCS-a), koristeći sigurnosne ventile. Ova izolacija predstavlja bitnu sigurnosnu karakteristiku. U slučaju kvara unutar PCS-a, međupetlja onemogućava povratak visokog tlaka kroz rashladnu tekućinu, čime se sprječava prelazak visokih tlakova u primarnu petlju.



Slika 6.2. Primarna petlja, međupetlja, sustav pretvorbe energije te vanjski sustava hlađenja. [34]

Obzirom da primarna petlja nije projektirana za visoke tlakove, izostanak ove izolacije može rezultirati oštećenjem komponenta te potencijalnim širenjem radioaktivnosti unutar objekta.

6.2.2. Kontrola reaktivnosti

U reaktorskoj posudi implementirani su sustavi pasivnih i aktivnih upravljačkih šipki koje imaju ključnu sigurnosnu ulogu. Spremnik mješavine fluoridnih soli i Th-232 koji okružuje jezgru u reaktorskoj posudi (Th-232 blanket) snažan je apsorber neutrona, stoga bi eventualno *curenje* soli iz spremnika moglo dovesti do smanjenja apsorpcije neutrona, što bi povećalo reaktivnost.

Kako bi se kompenziralo ovo potencijalno povećanje pozitivne reaktivnosti, mogao bi se koristiti niz kontrolnih šipki koje *plutaju* u spremniku i stoga se nalaze izvan jezgre.

U slučaju nepoželjnog *curenja* fluoridne soli iz spremnika, uzgona bi nestalo, što bi omogućilo kontrolnim šipkama da *skliznu* u jezgru. Ovaj proces bi dodao negativnu reaktivnost kao kompenzaciju za gubitak negativne reaktivnosti zbog gubitka apsorpcijske soli u spremniku. Konstrukcija ovih šipki je takva da bi se one pasivno smjestile u jezgru ako dođe do gubitka fluoridnih soli, bez potrebe za intervencijom operatera. [34]

Pretpostavlja se da postoji i aktivni pogonski sustav koji bi namjerno mogao gurnuti kontrolne šipke u jezgru za zaustavljanje reaktora. Reaktor se ne bi mogao pokrenuti ako ove šipke nisu potpuno izvučene iz jezgre, zbog njihove snažne negativne reaktivnosti. Također, potreban je i sustav aktivnih kontrolnih šipki konvencionalnijeg dizajna sa sigurnosnom funkcijom, koja omogućuje operaterima da upravljaju razinom reaktivnosti reaktora.

6.3. Efikasnost goriva

Efikasnost goriva predstavlja oblik toplinske efikasnosti. Efikasnost procesa uključuje pretvaranje kemijske potencijalne energije sadržane u gorivu u kinetičku energiju ili rad. Efikasnost se povećava što je veća temperaturna razlika procesa, s granicom iznad apsolutne nule u kelvinima (°K). Viša temperatura rastaljenih soli u usporedbi s temperaturom vode pod tlakom doprinosi visokoj električnoj/toplinskoj efikasnosti LFTR-a.

LFTR sigurno djeluje pri visokim temperaturama, pri čemu sol ostaje u tekućem stanju ispod 1400°C. LFTR s rastaljenim solima radi na temperaturi od 700°C, za razliku od LWR-a koji radi na 315°C, omogućujući novu, efikasniju tehnologiju pretvorbe električne/toplinske energije.

Tradicionalni reaktori napajani uranijem nisu vrlo učinkoviti, zato što se samo 3% uranija koji se unese u reaktor potroši prije nego što se gorivna šipka zamijeni. Jedan od razloga je da toplina i zračenje oslobođeni u jezgri reaktora oštećuju čvrste šipke s uranijevim gorivom.

LFTR je puno učinkovitiji u proizvodnji energije od LWR-a jer se svo gorivo iskoristi, sa stopom pretvorbe toplinske u električnu energiju od 45 - 50%, umjesto 30 - 35%. Također, oštećenja zračenjem nisu značajna zbog svojih snažnih ionskih veza, a gorivo se ne mora uklanjati prije nego što se potpuno iskoristi [33]. Osim toga, svi nusprodukti fisije koji se formiraju mogu ostati u gorivu sve dok i oni ne podlegnu fisiji.

U LFTR sustavu, reaktoru neće trebati kontinuirani unos goriva kako bi održao svoju proizvodnju neutrona. S druge strane, LWR-ovi se moraju neprestano opskrbljivati novim obogaćenim fisibilnim šipkama s uranijem, jer ne mogu sami stvoriti gorivo kao što to čini LFTR. LWR će iskoristiti samo vrlo malu frakciju (3% - 5%) prirodnog fisibilnog U-235 iz svojih gorivnih šipki. [33]

U LFTR-u, 6 kg torija proizvede istu količinu energije kao što bi se dobilo iz 300 kg obogaćenog uranija u LWR-u.

6.4. Nuklearni otpad

LFTR-i imaju potencijal za značajno smanjenje nuklearnog otpada u usporedbi s konvencionalnim reaktorima (LWR). Kroz cijeli gorivni ciklus i procesni lanac, od vađenja rude do skladištenja nuklearnog otpada, LFTR-i imaju sposobnost proizvesti daleko manje otpada.

Konkretno, LFTR bi generirao oko 4000 puta manje otpada nastalog tijekom rudarenja, dok bi proizvodio između 1000 do 10000 puta manje nuklearnog otpada u usporedbi s LWR-ima. Prebacivanje na tekuće fluoridne torijske reaktore značajno bi doprinijelo rješavanju problema skladištenja nuklearnog otpada.

Većina otpadnih produkata (83%) brzo bi se stabilizirala unutar deset godina, dok bi preostali

otpadni materijali (17%) trebali biti pohranjeni u geološku izolaciju tijekom otprilike 300 godina. Ovo je značajno kraći vremenski okvir u usporedbi s više od 10000 godina potrebnih za skladištenje otpada iz LWR-a. [3]

6.5. Nemogućnost naoružavanja

Rasprave o nuklearnoj energiji oduvijek su uključivale naglašavanje problema proliferacije¹ nuklearnog oružja. U svrhu sprječavanja neovlaštenog korištenja nuklearnih materijala i tehnologije u vojne svrhe, svijet je osmislio međunarodni okvir za kontrolu širenja nuklearnog oružja.

U usporedbi s uranijem, torij je nepogodniji za proizvodnju nuklearnog oružja. Tijekom fisijske reakcije, U-233 apsorbira neutron i oslobađa nešto više od dva slobodna neutrona. Jednog od ta dva neutrona potom Th-232 apsorbira u spremniku, stvarajući novi U-233 u jezgri. Proces dakle stvara dovoljno neutrona za održavanje nuklearne reakcije, ali ne i više od toga. [33] Stoga, gorivni ciklus Th/U nije pogodan za proizvodnju i razvoj nuklearnog oružja.

Važno je napomenuti da, unatoč postojećih približno 70000 nuklearnih oružja diljem svijeta, nijedno od njih ne koristi ciklus goriva Th/U. Sva nuklearna oružja temelje se na drugim fisibilnim materijalima, poput izotopa uranija (U-235) te izotopa plutonija (Pu-239).

¹Izraz nuklearna proliferacija odnosi se na nabavu nuklearnog oružja od strane država ili terorističkih organizacija.

6.6. Problem s materijalima i kontinuiranim čišćenjem mješavine tekućeg fluorida

Materijali

Vruća smjesa fluorida iznimno je otrovna, korozivna i radioaktivna, što zahtijeva upotrebu metala sposobnih izdržati takve ekstremne uvjete tijekom dužeg razdoblja. U eksperimentu s reaktorom rastaljenih soli u Oak Ridgeu korištena je izdržljiva legura poznata kao *Hastelloy-N*. Iako su bile potrebne neke manje prilagodbe kako bi se poboljšala otpornost na zračenje, ova legura je pokazala zadovoljavajuću trajnost. [8]

Suvremeni zahtjevi za povećanom sigurnošću nužno će zahtijevati temeljito istraživanje novih materijala kako bi se osigurala njihova sposobnost da izdrže izazove rada u takvim uvjetima. Iako je vjerojatno da će biti pronađen odgovarajući metal, važno je napomenuti da to može dovesti do potencijalno znatno većih troškova investicije.

Kontinuirano čišćenje mješavine tekućeg fluorida

Razvoj procesa za odvajanje neželjenih produkata fisije unutar LFTR-a još uvijek je u tijeku, predstavljajući izazov koji treba prevladati. Za olakšavanje čišćenja i manipulacije tekućim fluoridom, LFTR zahtijeva istovremenu instalaciju kemijske obrade koja je povezana s nuklearnim reaktorom. Iako je čišćenje goriva također bilo dio eksperimenata s reaktorima rastaljenih soli provedenih u Oak Ridgeu tijekom 1960-ih, tada se to postiglo u odvojenoj instalaciji i nije se provodilo kontinuirano, što je nužno za postupak LFTR-a.

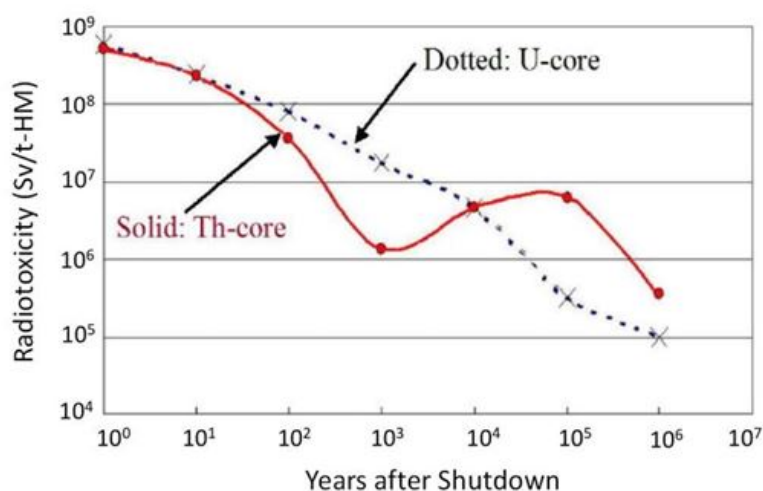
Jedan od istraživanih načina za uklanjanje neželjenih nusproizvoda fisije naziva se *helium bubbling* (proces stvaranja mjehurića helija) [15]. Tehnika uključuje prolazak plinovitog helija kroz smjesu soli, čime se izbacuju čvrste čestice nusproizvoda fisije iz rastaljene soli.

Daljnje istraživanje je neophodno kako bi se razvila cjelovita metoda kemijske prerade koja je prilagođena za LFTR i koja bi bila sposobna za neprekidnu proizvodnju energije. Ovo je ključni izazov u razvoju tehnologije LFTR-a. Mnoge tehničke, kemijske i sigurnosne procedure i postupci potrebni za ovu svrhu tek trebaju biti razvijeni i detaljno ispitani.

6.7. Usporedba radiotoksičnosti uranija i torija

Radiotoksičnost je važan parametar pri razmatranju nuklearnog gorivnog ciklusa, bez obzira na to gdje se skladišti istrošeno gorivo. Radiotoksičnost proizlazi iz raspada aktinoida² i produkata fisije, stoga ovisi o vrsti goriva, u ovome slučaju, o toriju.

Usporedba radiotoksičnosti između jezgre koja koristi uranij kao gorivo i jezgre koja koristi ciklus torijeva goriva u PWR-u, prikazana je na slici 6.3. Radiotoksičnost Th-jezgre je 10% do 90% niža od radiotoksičnosti U-jezgre do 1000 godina, ali nakon 10 000 godina postaje viša [39].



Slika 6.3. Radiotoksičnost za U-jezgru i Th-jezgru. [39].

Za U-jezgru, glavni uzrok dugotrajne radiotoksičnosti (10 000 - 100 000 godina) je Pu-239, čiji je doprinos gotovo polovina ukupne radiotoksičnosti. U-jezgra oslobađa puno plutonija, dok Th-jezgra tome nije sklona. Glavni uzrok dugotrajne radiotoksičnosti (10 000 - 100 000 godina) za Th-jezgru je Th-229 koji čini gotovo polovinu ukupne radiotoksičnosti. [15]

²Aktinoidi čine seriju od 15 kemijskih elemenata u periodnom sustavu, počevši od aktinija pa sve do lorensija (atomske brojevi 89-103). Elementi su značajni uglavnom zbog svoje radioaktivnosti.

7. Procjena troškova iskorištavanja goriva na bazi torija

7.1. Uvod

Postoji niz istraživanja posvećenih ekonomičnosti nuklearnog gorivnog ciklusa, uključujući ona koja proučavaju gorivne cikluse temeljene na toriju. Ovaj pregled djelomice se temelji na izvješću *Međunarodne agencije za atomsku energiju* iz 2012. pod nazivom *Uloga torija u dopuni gorivnih ciklusa budućih nuklearnih energetske sustava*, koje je procjenjivalo, između ostalog, ekonomske aspekte korištenja torija u konvencionalnim LWR, HWR i brzim reaktorima. Takvi reaktori mogu koristiti gorivni ciklus U-233/Th-232. [35]

Izvješće IAEA koristi INPRO (*Međunarodni projekt o inovativnim nuklearnim reaktorima i gorivnim ciklusima*) metodologiju za usporedbu cijene energetske jedinice različitih reaktora s različitim gorivnim ciklusima. Ova metodologija zahtijeva izračun niza ekonomskih parametara za nuklearni energetski sustav: LUEC - izražen u ekvivalentu sadašnje vrijednosti, ukupne investicije te ekonomske pokazatelje poput internih stopa povrata i povrata ulaganja. [35]

Potrebno je spomenuti da kapitalni troškovi nuklearnih postrojenja koji su ključni čimbenik za nuklearnu energetske industriju ne ovise samo o tehnologiji, već su također specifični za svaku zemlju. Na primjer, noćni troškovi¹ mogu varirati od 1.556 USD/kW u Južnoj Koreji do 5.863 USD/kW u Švicarskoj u isto vrijeme.

Gorivni ciklus uranij-plutonijski formirao se kao dio vojnog nuklearnog programa, a infrastruktura koja se koristi često ima dvostruku svrhu. Investicija iz prošlosti za vojne namjene stvorila je određenu ekonomsku prepreku za uvođenje drugih vrsta goriva. Gorivni ciklus na bazi torija mora značajno zamijeniti gorivni ciklus na bazi uranija i gotovo istodobno obuhvatiti sve faze ciklusa - od proizvodnje rude i izrade gorivnih šipki do redizajniranja reaktora, sigurnosnih sustava, upravljanja otpadom itd. [35]

Gorivni ciklus na bazi torija zahtijeva skupu infrastrukturu za proizvodnju U-233 i njegovo daljnje recikliranje iz iskorištenog goriva. Iako trenutno nema značajnih tehnoloških prepreka za korištenje goriva na bazi torija, ekonomske i druge prednosti gorivnog ciklusa na bazi torija moraju biti dovoljno velike da omoguće takvu tranziciju.

¹Izraz "noćni trošak" odnosi se na troškove izgradnje projekta bez uključivanja bilo kakvih kamata koje bi nastale tijekom procesa izgradnje, suštinski pretpostavljajući da je projekt završen odmah ili "preko noći".

7.2. Analiza troškova

U publikaciji Međunarodnog foruma za 4. generaciju, pretpostavlja se da su vrijeme izgradnje reaktora, vrijeme dobivanja dozvola te noćni trošak za reaktor koji radi s torijevim gorivnim ciklusom otprilike isti kao i za konvencionalni LWR. Osim toga, pretpostavlja se da su neki parametri troškova goriva, kao što su trošak izrade svježeg goriva, vrijeme hlađenja, skladištenja iskorištenog goriva, trošak zbrinjavanja te troškovi prijevoza, isti kao odgovarajući troškovi za LWR.

U IAEA-inoj kalkulaciji, razdoblje izgradnje pretpostavljeno je da traje pet godina za svaku vrstu reaktora, a investicije tijekom izgradnje svakog reaktora ravnomjerno su raspodijeljene. Stvarna diskontna stopa² pretpostavljena je da iznosi 0,04, što je prilično niska vrijednost koja povećava važnost troškova goriva u usporedbi s kapitalnim troškovima. Pretpostavljena vrijednost prikriva neke nedostatke reaktora s visokim kapitalnim troškovima, poput brzih reaktora koji imaju relativno niske troškove goriva.

U usporedbi s trenutačnim stanjem sustava nuklearnih gorivnih ciklusa, glavne vrijednosti ulaznih podataka svjesno su pristrane u korist inovativnih reaktora. To je postignuto odabirom povoljnijih vrijednosti parametara (diskontna stopa, razdoblje izgradnje). [35]

Cilj ekonomske analize korištenja torija jest usporediti različite gorivne cikluse. Ne uzimaju se u obzir troškovi povezani s dugotrajnim skladištenjem osiromašenog uranija, skladištenjem recikliranog uranija te skladištenjem fisibilnih materijala odvojenih tijekom reprocesiranja. Pretpostavlja se da su potencijalni gubici nuklearnog materijala u ciklusu goriva (npr. tijekom konverzije, reprocesiranja) jednaki nuli. [35]

7.2.1. Ulazni podaci

Opseg ovog izvještaja obuhvaća skupinu reaktora koji koriste torij. Skupina se sastoji od reaktora uobičajenih tipova kao što su LWR, HWR i FR (brzi reaktori) koji mogu koristiti gorivni ciklus U-233/Th-232.

Troškovi prednjeg i stražnjeg dijela gorivnog ciklusa uključeni su u trošak električne energije putem troška goriva, koji uključuje troškove materijala i usluga na svakom koraku proizvodnje nuklearnog goriva, skladištenja, reprocesiranja (ako postoji) i odlaganja otpada.

Glavni ekonomski parametri tradicionalnih reaktora na gorivnim ciklusima UO_2 i MOX prikazani su u tablici 7.1.

²Kamatna stopa po kojoj središnja banka odobrava kredite poslovnim bankama.

Tablica 7.1. Kapitalni troškovi i troškovi održavanja [38]

| Udio | Jedinica | Tip reaktora | Raspon | Referentna vrijednost |
|------------------------|----------|--------------|-----------|-----------------------|
| Kapitalni trošak | \$/kW | LWR | 1200-4000 | 2000 |
| | | LWR/MOX | 1200-2300 | 2000 |
| | | HWR | 1200-2800 | 2200 |
| | | FR/MOX | - | 2500 |
| Fiksni O/M trošak | \$/kW | LWR, LWR/MOX | 49-63 | 55 |
| | | HWR | 55-63 | 60 |
| | | FR, MOX | 80 | 60 |
| Varijabilni O/M trošak | \$/MWh | LWR, LWR/MOX | 0.47-0.9 | 0.5 |
| | | HWR | 0.47-0.9 | 0.5 |
| | | FR/MOX | - | 0.5 |

Trošak gorivnog ciklusa, uz određene iznimke, obično ima prilično umjeren utjecaj na cijenu električne energije, dok vrijednosti troškova rudarenja i mljevenja, troškova konverzije, obogaćivanja i troškova izrade goriva UO_2 (uranijeva-dioksida) imaju vrlo malen utjecaj.

Troškovi stražnjeg dijela ciklusa goriva, uključujući preradu, izradu *MOX* goriva (*Mixed oxide fuel* - nuklearno gorivo izrađeno od reprociranog plutonija i uranija) te upravljanje otpadom, znatno su manje pouzdani.

U području neozračenog goriva, troškovi torijeva ciklusa i konvencionalnih ciklusa uranija su slični. Troškovi izrade UO_2 goriva iznose 250\$/kgHM, dok je za ciklus goriva $ThO_2 - UO_2$ iznos 300\$/kgHM, gdje je HM oznaka za *Heavy Metal*. Iznosi se razlikuju za otprilike 20%. [38]

Iako troškovi izrade goriva u ciklusu s torijem nisu jeftiniji od ciklusa s uranijem, ciklus s torijem pokazuje povoljniju ekonomiju na temelju visoke iskoristivosti goriva i dugog vremena boravka goriva u jezgri.

Trošak zbrinjavanja iskorištenog nuklearnog goriva i visokoradioaktivnog otpada ima umjeren utjecaj na ukupni energetska trošak i procjenjuje se putem linearne ekstrapolacije. Trošak izravnog zbrinjavanja iskorištenog goriva za LWR-ove preuzet je iz [36], a isti parametri za druge vrste reaktora, uključujući HWR, procijenjeni su kao:

$$C_{SNFDD}[\$/kgHM] = 10 \cdot B[MWd/kgHM], \quad (7.1)$$

gdje su C_{SNFDD} trošak izravnog odlaganja, B je prosječna potrošnja nuklearnog goriva, a d je oznaka za dan. [37]

Trošak plutonija dobivenog iz potrošenog goriva reaktora procijenjen je kao:

$$C(Pu^{ukupno}) = C_{repr} + C_{FPdisp} - C_{SFdisp}, \quad (7.2)$$

gdje je $C(Pu^{ukupno})$ trošak jedinične količine plutonija, C_{repr} trošak reprocesiranja iskorištenog goriva potrebnog za proizvodnju jedinične količine plutonija, C_{FPdisp} trošak direktnog odlaganja iste količine iskorištenog nuklearnog goriva i C_{SFdisp} trošak odlaganja fisibilnih produkata koji su odvojeni tijekom reprocesiranja. [35]

Trošak U-233 povezan je s troškom plutonija na sljedeći način:

$$C(U^{233}) = \frac{m(Pu^{ukupno})}{m(Pu^{239} + Pu^{241})} \cdot C(Pu^{ukupno}) \quad (7.3)$$

Jednadžba za prosječni trošak energije po jedinici (LUEC) je sljedeća:

$$LUEC = \frac{ONC + IDC + \frac{FE_{firstcore}}{\eta \cdot \delta_{th}}}{8760 \cdot L_f} \cdot \left(\frac{1 - (\frac{1}{1+r})}{1 - (\frac{1}{1+r})^t} \right) + \frac{(1 - \frac{1}{t}) \cdot FE_{reload} + BE}{Q \cdot \eta} + LBF + LD + LOM, \quad (7.4)$$

gdje su:

LUEC - ekvivalent prosječne stvarne cijene koju bi potrošači morali platiti kako bi točno nadoknadili kapitalne troškove, troškove pogona i održavanja te troškove goriva uz odgovarajuću diskontnu stopu tijekom cijelog životnog vijeka postrojenja

ONC - ukupni inicijalni trošak (po instaliranoj jedinici kapaciteta)

IDC - kamate plaćene tijekom izgradnje po instaliranoj jedinici električnog kapaciteta

FE - prosječni nivelirani trošak goriva po kilogramu teškog metala

BE - trošak kraja životnog ciklusa goriva za razmatranu vrstu reaktora izražen u američkim dolarima po kilogramu teškog metala potrošenog goriva

L_f - prosječni faktor iskorištenja kapaciteta

Q - prosječna potrošnja neiskorištenog goriva

r - stvarna diskontna stopa

t - životni vijek postrojenja

η - neto toplinska učinkovitost postrojenja

δ_{th} - prosječna gustoća snage u jezgri reaktora pri punoj snazi

LBF - nivelirani trošak prilagodbe na produljeni vijek trajanja

LD - nivelirani trošak dekomisije po jedinici proizvedene energije

LOM - nivelirani trošak životnog ciklusa pogona i održavanja po jedinici uključujući troškove obnove

7.2.2. Rezultati

Niske vrijednosti troška, posebno kod brzih reaktora (FRTh, FR1 i FR2), uzrokovane su prilično optimističnim ekonomskim pretpostavkama, kao što su kapitalni troškovi brzih reaktora (samo 25% viši od LWR reaktora) i umjerena diskontna stopa (4%).

Rezultati izračuna prikazani su u tablici 7.2.

Tablica 7.2. LUEC ($\$/MWh$) ovisno o trošku prirodnog uranija [38]

| $\$/kgU$ | HWR | LWR | ALWR | FRTh | FR1 | FR2 | AHWR |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| 50 | 30.1 | 29.7 | 27.3 | 32.0 | 29.8 | 34.2 | 27.6 |
| 150 | 32.1 | 32.7 | 29.7 | - | - | - | 32.6 |
| 300 | 35.3 | 37.2 | 33.2 | - | - | - | 40.0 |
| 1000 | 49.8 | 58.3 | 49.9 | - | - | - | 74.7 |

Brzi reaktor koji koristi gorivo od osiromašenog ili reprocesiranog uranija (FR1) ima najniži trošak proizvodnje električne energije od svih razmatranih brzih reaktora, iznosa $29.8 \$/MWh$. Upotreba spremnika na bazi torija (Th-232 blanket) u brzom reaktoru neznatno povećava trošak proizvodnje električne energije na $32.0 \$/MWh$, budući da dio potrebnog plutonija mora biti reprocesiran iz potrošenog goriva ALWR reaktora.

Trošak električne energije od $34.2 \text{ \$/MWh}$ proizvedene brzim reaktorom (FR2) koji troši plutonij recikliran iz potrošenog goriva ALWR reaktora, 15% je viši nego u slučaju potrošnje vlastitog plutonija ($32.0 \text{ \$/MWh}$). Spomenuto je uzrokovano znatno većim naporom za reprocesiranje potrebnog goriva. Očekuje se da će na početnom stadiju programa brzih reaktora, svi novi reaktori proći kroz fazu prilično skupog goriva. [38]

Isti učinak višeg troška plutonija uzrokujući viši trošak električne energije događa se na početnom stadiju komercijalnog razvoja brzih reaktora s spremnikom na bazi torija (FRTh).

AHWR (*Advanced heavy-water reactor*) koji koristi torij, proizvodi najjeftiniju električnu energiju pri niskom trošku uranija i pokazuje se konkurentnim naspram ALWR-a (*Advanced light-water reactor*) pri cijeni uranija ispod $50\text{\$/kg}$ i naspram konvencionalnih reaktora (LWR, HWR) do troška od $150\text{\$/kg}$ prirodnog uranija.

Jeftina električna energija uvjetovana je kombinacijom dugog vijeka trajanja reaktora (100 godina) i niske diskontne stope (0.04), a ne izravno zbog vrste goriva koja se koristi.

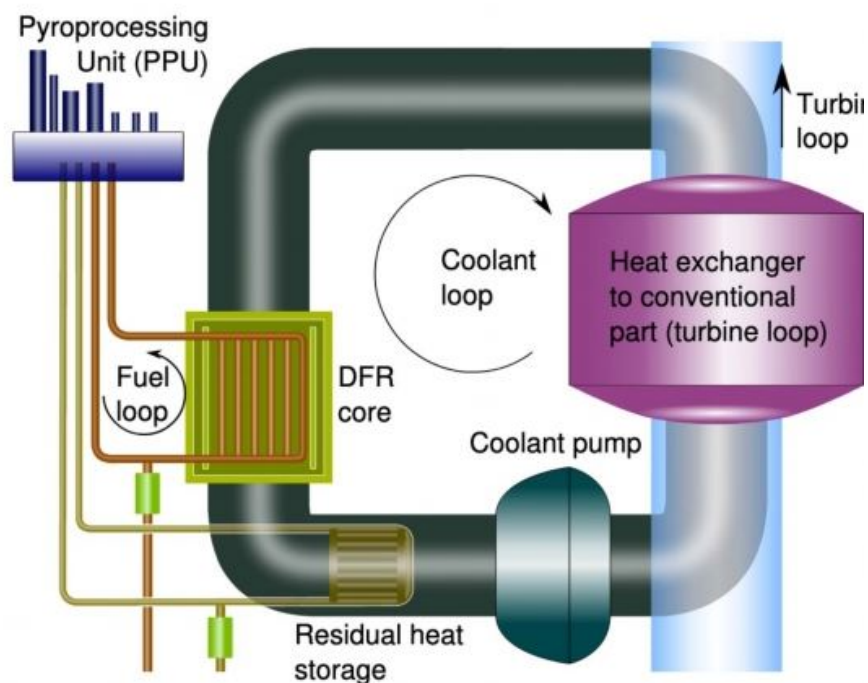
Međutim, AHWR ima jedan od najbržih rasta troškova energije pri povećanju cijene uranija. [38]

8. Dvofluidni reaktor (DFR)

8.1. Tehnologija dvofluidnog reaktora

Osnovna ideja dvofluidnog principa je reaktor s tekućim gorivom i brzim reakcijama s odvajanjem rashladnog sredstva iz gorivnog kruga kako je prikazano na slici 8.1. Lančana nuklearna reakcija odvija se u nizu cijevi kroz koje prolazi tekuće gorivo i koje se postavlja unutar struje čistog rastaljenog olova (radnog medija).

Tehnologija ide dalje od koncepta MSR-a u kojem oba funkcionalna aspekta, hlađenje i opskrba gorivom, moraju biti osigurani istim medijem. [15]



Slika 8.1. Tehnologija dvofluidnog reaktora. [40].

Kombiniraju se pozitivna svojstva brzih reaktora hlađenih olovom (LFR) koji imaju visoku sposobnost prijenosa topline, s prednostima tekućeg goriva (kao što je u MSR-u) u kojima je moguća obrada goriva pri radu reaktora i sigurnost postrojenja putem zamrznutog ventila.

Poboljšanje učinkovitosti dodatno se održava unutarnjim ciklusom tekućeg goriva s razdvajanjem i transmutacijom, čime se eliminiraju nusprodukti fisije.

Trenutno se razvijaju dvije varijante DFR-a:

1. DFR s rastaljenim gorivom već ima niz prednosti u odnosu na *uobičajene* koncepte MSR-a. Zahvaljujući principu dvostrukog toka, toplina se može ukloniti iz jezgre mnogo učinkovitiše.
2. DFR s rastaljenim metalnim gorivom i solima dodatno povećava proizvedenu snagu. Mnogo veća toplinska vodljivost takvog reaktora znatno poboljšava njegovu učinkovitost.

8.2. Proizvodnja električne energije

Za proizvodnju električne energije, toplinska energija mora biti prenesena iz tekućeg metala, medija s vrlo visokom sposobnošću prijenosa topline, na radni medij sa znatno nižom sposobnošću prijenosa topline pogodnom za turbine. Bez daljnjeg istraživanja i razvoja, najekonomičnija tehnologija koja je trenutno dostupna je superkritični ciklus s vodom (scH_2O).

Još jedna mogućnost u bliskoj budućnosti su turbine sa superkritičnim ugljičnim dioksidom ($scCO_2$), što rezultira kompaktnijim komponentama stroja s nešto većom termičkom učinkovitošću i značajno smanjenim stopama korozije. Tlakovi su otprilike jednaki tlakovima kod scH_2O turbina. [15]

9. Dugoročni potencijal torijske nuklearne energije

Kako bi se zadovoljila rastuća potreba za energijom i postigao globalni cilj smanjenja emisija stakleničkih plinova uslijed sve učestalijih klimatskih promjena, svjetska zajednica sve više istražuje alternativne, održive i pouzdane energetske tehnologije, uključujući nuklearne reaktore temeljene na toriju.

Govoreći o razvoju tehnologije vezane za torij, važno je napomenuti da je u kolovozu 2021. godine Kina objavila završetak svog prvog eksperimentalnog nuklearnog reaktora¹ baziranog na toriju. Izgrađen usred pustinje Gobi na sjeveru zemlje, reaktor će tokom narednih nekoliko godina biti podvrgnut testiranju [41]. Ako eksperiment pokaže uspjeh, planira se izgraditi još jedan reaktor koji potencijalno može proizvoditi električnu energiju za više od 100 000 domova.

Kina nije jedina zemlja koja ima namjeru iskoristiti jedinstvene karakteristike torija. Japan, Indija, Ujedinjeno Kraljevstvo, Sjedinjene Američke Države i druge zemlje također pokazuju entuzijazam za istraživanje potencijalne primjene torija u nuklearnoj energiji.

9.1. Komercijalna upotreba torijskih nuklearnih elektrana

Može se pretpostaviti da glavni razlog zbog kojeg nuklearne elektrane temeljene na toriju još uvijek nisu postigle značajnu komercijalnu primjenu leži u tome što je, unatoč svojoj obilnosti, torij trenutačno skup za ekstrakciju.

Mineral monazit, glavni izvor rijetkih zemnih elemenata, isto tako predstavlja primarni izvor torija. Bez trenutne potražnje za rijetkim zemnim elementima, monazit se ne bi eksploatirao isključivo zbog prisutnosti torija. Torij je sporedan proizvod, a njegovo izdvajanje zahtijeva metode koje su skuplje u usporedbi s onima za uranij. Dakle, količina torija koja se može iskopati na ekonomičan način nije jednako velika kao kod uranija. Međutim, to bi se moglo promijeniti ako bi postojala veća potražnja za torijem i njegovom primjenom u nuklearnoj energiji. [41]

Ekonomija nuklearne energije temelji se na kapitalnim troškovima postrojenja, a izgradnja elektrane s torijevim reaktorom nije značajno jeftinija od izgradnje elektrane s uranijevim reaktorom. Nadalje, korištenje torija u postojećim reaktorima tehnički je moguće, ali ne bi rezultiralo jasnim komercijalnim prednostima i zahtijevalo bi stvaranje nove infrastrukture.

Osim toga, tehnički gledano, ne postoji takvo što kao "torijev reaktor". Kako je već objašnjeno kroz rad, torij se ne može direktno koristiti kao gorivo, umjesto toga, djeluje kao plodna jezgra koja se može pretvoriti u uranij unutar reaktora. Tek nakon što se pretvori u uranij, torij postaje

¹Smješten u pustinji Gobi, u gradu Wuwei u provinciji Gansu, Institut za primijenjenu fiziku Shanghai Kineske akademije znanosti upravlja reaktorom MSR koji koristi toriji snage 2 MW.

koristan kao nuklearno gorivo. U suštini, čak i za reaktor koji bi uključivao torij u svoj gorivni ciklus, većina proizvedene energije zapravo bi potekla iz fisije uranija.

Također financijske prepreke leže u razvoju i testiranju nuklearnih postrojenja pogonjenih torijem zbog nedostatka značajnog iskustva s torijem i povijesne premoćnosti uranija u nuklearnoj energiji.

9.2. Utjecaj vodeće nuklearne industrije

Nuklearnu industriju danas čine tvrtke poput Westinghousea, General Electrica, Toshiba, AREVA-e, Rosatoma, Babcocka i Wilcoxa koje slijede dizajne vodom hlađenih reaktora pogonjenih uranijevim gorivnim elementima. Spomenuti su izrazili vrlo malo, ako ikakvo, zanimanje za torij kao nuklearno gorivo iz jednostavnog razloga što nije dobar tehnološki spoj s njihovim vodom hlađenim, reaktorima na kruto gorivo.

Da bi prihvatili torij u visokotemperaturnom reaktoru na tekuće gorivo kao što je LFTR, bilo bi potrebno potpuno restrukturiranje njihove dosadašnje nuklearne poslovne strategije, koja uvelike ovisi o prihodima od prodaje proizvedenog krutog nuklearnog goriva [42]. Malo je vjerojatno da će ikada imati ekonomski poticaj za usvajanje torija u obliku tekućeg goriva, a većina ih potencijalne dobrobiti torija u obliku čvrstog goriva smatra neuvjerljivima.

10. Zaključak

U kontekstu sve veće zabrinutosti zbog klimatskih promjena i utjecaja proizvodnje električne energije na okoliš, ovaj rad uvodi koncept korištenja torija kao potencijalnog zamjenskog elementa za uranij u nuklearnim procesima. Prikazane su razne prednosti i nedostaci upotrebe torija, uz izvršene financijske analize i usporedbe goriva i nuklearnih procesa.

Iako torij predstavlja privlačnu alternativu i potencijalni sljedeći korak u nuklearnoj energetici, nije zaživio u praksi iz nekoliko razloga. Mogući razlozi uključuju inerciju industrije - postojeća nuklearna industrija temeljena na uraniju ima duboko ukorijenjenu infrastrukturu, znanje i iskustvo, što može usporiti prihvaćanje promjena u obliku torijskih tehnologija. Utjecaj energetske faktora - odluke o energetske politici i investicijama često su podložne političkim, ekonomskim i tržišnim čimbenicima. Torijevim tehnologijama možda nedostaje potrebna politička podrška ili financijski poticaji. Prisutan je i problem financijske neisplativosti rudarenja i procesa proizvodnje, s obzirom na to da proces nije značajno jeftiniji od klasičnih industrijskih procesa koji se temelje na uraniju.

Bitno je napomenuti da torij nije pogodan za vojne svrhe. Kako je ranije spomenuto, nuklearni proces na bazi torija stvara dovoljno neutrona za održavanje reakcije, ali ne i više od toga, s time dakle nedostaje vojni poticaj koji uvodi nove moderne tehnologije.

Unatoč izazovima i preprekama koje su navedene u vezi s torijem i njegovom integracijom u nuklearnu industriju, postoji optimizam da će ovaj element ipak naći svoje mjesto na nuklearnoj sceni u budućnosti. Razvoj i implementacija novih tehnologija u energetske sektoru često zahtijeva strpljenje i vremenski period koji se proteže kroz desetljeća. Vrijeme će pokazati kakvu će ulogu torij zaista odigrati u budućnosti nuklearne energetike.

Bibliografija

- [1] Hargraves, R.; Moir R.: "Liquid Fluoride Thorium Reactors: An old idea in nuclear power gets reexamined", www.americanscientist.org, 2010.
- [2] "China prepares to test thorium-fuelled nuclear reactor", s Interneta, <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02459-w>, 2021.
- [3] "LFTR Technology", s Interneta, <https://flibe-energy.com/lftr/>
- [4] Emblemsv?g, J: "Safe, clean, proliferation resistant and costeffective Thorium-based Molten Salt Reactors for sustainable development", *International Journal of Sustainable Energy*, 2022.
- [5] "<https://ourworldindata.org/grapher/death-rates-from-energy-production-per-twh>", s Interneta
- [6] Christopher J. Rhodes: "Current Commentary: Thorium-based nuclear power"
- [7] ResearchGate: "https://www.researchgate.net/figure/Brief-overview-of-developments-of-MSRs-globally-by-2020-Source-IAEA-2020_tb11_352182172", s Interneta
- [8] Pool, M.L.: "Advantages & disadvantages of thorium fuelled nuclear power when generated in the Liquid Fluoride Thorium Reactor compared to uranium fuelled nuclear power & stakeholders in the decision making process."
- [9] "<https://study.com/learn/lesson/nuclear-fission-process-example.html>", s Interneta
- [10] Nuclear Energy, Our World in Data: "<https://ourworldindata.org/nuclear-energy>", s Interneta
- [11] International Atomic Energy Agency: "Thorium fuel cycle — Potential benefits and challenges"
- [12] U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum: "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", prosinac 2002.
- [13] Rankine Cycle, "<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/rankine-cycle>", s Interneta
- [14] ACTUAL RANKINE CYCLE VERSUS IDEAL RANKINE CYCLE; <https://www.hkdivedi.com/2016/10/actual-rankine-cycle-versus-ideal.html>, s Interneta
- [15] Woodhead Publishing Series in Energy: "Molten Salt Reactors and Thorium Energy", Edited by Thomas J. Dolan

- [16] Science Direct: Pressurized Water Reactor, "<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pressurized-water-reactor>", s Interneta
- [17] Britannica: Types of reactors; "<https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor/Types-of-reactorsref155185>", s Interneta
- [18] Revol, J.P.; Bourquin M.; Kadi, Y.; Lillestol, E.; de Mestral, J.C.; Samec, K; Thorium Energy for the World: Proceedings of the ThEC13 Conference, CERN, Globe of Science and Innovation, Geneva, Switzerland, October 27–31, 2013
- [19] World nuclear association: Thorium; <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>, s Interneta
- [20] Tržište električne energije: "Cijena proizvodnje"; Materijali s predavanja; Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci
- [21] Benito Mignacca, Giorgio Locatelli: "Economics and finance of Molten Salt Reactors"; University of Leeds, School of Civil Engineering, Leeds, United Kingdom
- [22] An Hoa, Matthew Memmottb, John Hedengrenb, Kody M. Powella: "Exploring the benefits of molten salt reactors: An analysis of flexibility and safety features using dynamic simulation"; Digital Chemical Engineering 7(2023)
- [23] Gabor, A., Fazeska, C., Hangos, K.M., 2009. Modeling and Identification of a Nuclear Reactor with Temperature Effects and Xenon poisoning. IEEE Xplore.
- [24] Johnson, M., Lucas, S., Tsvetkov, P., 2010. Modeling of Reactor Kinetics and Dynamics. INL, Idaho Falls.
- [25] Hetrick, D.L., 1993. Dynamics of Nuclear Reactors, USA. American Nuclear Society.
- [26] Singh, V., Wheeler, A., Lish, M., Chv´ala, O., Upadhyaya, B., 2018. Nonlinear dynamic model of Molten-Salt Reactor Experiment – Validation and operational analysis. Annals of Nuclear Energy 113, 177–193.
- [27] Kerlin, T.W., Ball, S.J., Steffy, R.C., Buckner, M.R., 1971. Experiences with dynamic testing methods at the molten-salt reactor experiment. Nucl. Technol 10, 103–117.
- [28] Singh, V., Wheeler, A., Lish, M., Chv´ala, O., Upadhyaya, B., 2018. Nonlinear dynamic model of Molten-Salt Reactor Experiment – Validation and operational analysis. Annals of Nuclear Energy 113, 177–193.
- [29] Moir, R.W., 2002. Cost of electricity from molten salt reactors. Nucl. Technol. 138, 93–95. <https://doi.org/10.13182/NT02-A3281>.

- [30] Moir, R.W., 2008. Recommendations for a restart of molten salt reactor development. *Energy Convers. Manag.* 49, 1849–1858. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.07.047>.
- [31] ThorCon, 2019. Economics – ThorCon. "<http://thorconpower.com/economics/>", s Interneta
- [32] Forbes: "ThorCon Advanced Nuclear Reactor – More Than Worth Its Weight In Salt", <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2019/05/31/thorcon-advanced-nuclear-reactor-more-than-worth-its-weight-in-salt/>, s Interneta
- [33] Advantages of liquid fluoride thorium reactor in comparison with light water reactor Che Nor Aniza Che Zainul Bahri, Amran Ab. Majid, and Wadeeah M. Al-Areqi
- [34] Status Report – LFTR - IAEA ARIS database <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://aris.iaea.org/PDF/LFTR.pdf>, s Interneta
- [35] Leonid Andreev; Bellona report 2013: Certain issues of economic prospects of thorium-based nuclear energy systems
- [36] Posiva Oy (2010): Posiva Oy, Total Costs and Funding for Final Disposal, official website, 2010, www.posiva.fi/en/final_disposal/total_costs_and_funding_for_final_disposal.
- [37] Bunn et al. (2003): Bunn, M., S.Fetter, J.Holdren, and B.van der Zwaan, The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel, Managing the Atom Project, Belfer Centre for Science /International Affairs, Harvard University, USA, 2003, belfercenter.ksg.harvard.edu/files/repro-report.pdf
- [38] IAEA (2012): International Atomic Energy Agency, Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems, IAEA Nuclear Energy Series NF-T-2.4, 2012, www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1540_web.pdf.
- [39] Yoshioka, R., Kinoshita, M., Takaki, N., Yoshida, T., 2015. Radiotoxicity evaluation for spent thorium fuel in PWR (in Japanese). Transaction of AESJ-2015 meeting, Hitachi, Japan.
- [40] Negative reactivity coefficient of a two-fluid reactor <https://www.ncbj.gov.pl/en/aktualnosci/negative-reactivity-coefficient-two-fluid-reactor>, s Interneta.
- [41] IAEA: Thorium's Long-Term Potential in Nuclear Energy: New IAEA Analysis: <https://www.iaea.org/newscenter/news/thorium-s-long-term-potential-in-nuclear-energy-new-iaea-analysis>, s Interneta
- [42] Thorium, <https://energyfromthorium.com/myths-vs-facts/>, s Interneta
- [43] ThorCon, <https://thorconpower.com/>, s Interneta

Sažetak i ključne riječi

U ovom radu tematizirani su nuklearni reaktori temeljeni na toriju. Spomenut je MSR koji predstavlja jednu od sedam klasa reaktora nove generacije, poznatih kao 4. generacija. Istaknute su brojne prednosti ovog tipa reaktora u usporedbi s LWR reaktorom. Posebno se ističe visoka razina sigurnosti zahvaljujući negativnom koeficijentu reaktivnosti te činjenici da reaktor djeluje pri niskom tlaku, što gotovo eliminira mogućnost katastrofalnih događaja. Prikazane su prednosti tekućeg goriva te je izvršena analiza fleksibilnosti i sigurnosnih značajki MSR-a i PWR-a. Uspoređena je ekonomska struktura tih reaktora.

U četvrtom poglavlju objašnjen je model reaktora s tekućim fluoridom torija, opisan je način rada takvog reaktora te je obrađena tema efikasnosti goriva i tema naoružavanja. Izvršena je procjena troškova iskorištavanja goriva na bazi torija te je uspoređena radiotoksičnost.

Spomenuta je tehnologija dvofluidnog reaktora te je objašnjen dugoročni potencijal torijske nuklearne energije.

Ključne riječi: Nuklearna energija, torij, reaktor hlađen rastaljenom soli, reaktor s tekućim fluoridom torija, potencijal torijske nuklearne energije

Summary and key words

This paper addresses thorium-based nuclear reactors. The Molten Salt Reactor (MSR) is mentioned as one of the seven classes of next-generation reactors known as "Generation IV". Numerous advantages of this reactor type compared to Light Water Reactors (LWR) are highlighted. The emphasis is particularly on the high level of safety due to the negative reactivity coefficient and the fact that the reactor operates at low pressure, nearly eliminating the possibility of catastrophic events. The benefits of liquid fuel are presented, and an analysis of the flexibility and safety features of both MSR and Pressurized Water Reactors (PWR) is conducted. The economic structure of these reactors is also compared.

In the fourth chapter, the model of a thorium-based reactor with liquid fluoride is explained, detailing its operation and addressing fuel efficiency and the issue of weaponization. An assessment of the costs of thorium-based fuel utilization is conducted, and radiotoxicity is compared.

Furthermore, the dual-fluid reactor technology is mentioned, and the long-term potential of thorium nuclear energy is explained.

Keywords: Nuclear Energy, Thorium, Molten Salt Reactor, Thorium Liquid Fluoride Reactor, Potential of Thorium Nuclear Energy