Nuklearna energija u elektroenergetici

Kišić, Domagoj

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:827134

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište
Sjever

Završni rad br. 488/EL/2021

Nuklearna energija u elektroenergetici

Domagoj Kišić, 2020 / 336

Varaždin, srpanj 2021. godine

Sveučilište Sjever

Odjel Elektrotehnike / Automatizacije

Završni rad br. 488/EL/2021

Nuklearna energija u elektroenergetici

Student

Domagoj Kišić, 2020 / 336

Mentor

dr.sc. Dunja Srpak, dipl. ing. el.

Varaždin, srpanj 2021. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL: Odjel za elektrotehniku

STUDIJ: preddiplomski stručni studij Elektrotehnika

PRISTUPNIK: Domagoj Kišić | MATIČNI BROJ: 2020/336

DATUM: 05.07.2021 | KOLEGIJ: Uređaji energetske elektronike

NASLOV RADA: Nuklearna energija u elektroenergetici

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU: Nuclear energy in electrical power engineering

MENTOR: doc.dr.sc. Dunja Srpak dipl.ing.el. | ZVANJE: docent

ČLANOVI POVJERENSTVA:

1. mr.sc. Ivan Šumiga dipl.ing.el., viši predavač
2. doc.dr.sc. Dunja Srpak dipl.ing.el.
3. Josip Srpak dipl.ing.el., viši predavač
4. Miroslav Horvatić dipl.ing.el., predavač, rezervni član
5.

VZ KC

HMI

Zadatak završnog rada

BROJ: 488/EL/2021

OPIS:

U završnom radu je potrebno opisati način rada i vrste nuklearnih elektrana, a zatim opisati prednosti i nedostatke istih. Provesti analizu trenutnog stanja primjene nuklearne energije u elektroenergetici i prikazati rezultate.

U radu je potrebno:
- opisati način rada i vrste nuklearnih elektrana,
- opisati različita rješenja koja se koriste za osiguranje sigurnosti nuklearnih elektrana,
- provesti ekonomsku analizu isplativosti nuklearnih elektrana,
- prikazati rezultate analiziranja trenutnog stanja primjene nuklearne energije u elektroenergetici.

REPUBLIKA HRVATSKA

ZADATAK URUČEN: 09.07.2021.

POTPIS MENTORA

POVJERENSTVO

Sažetak

Putem raznih primjeraka i faktora plan je pokazati prednosti i mane nuklearne energije, gdje je ona nastala, kako se može koristiti. U prvom dijelu govori se općenito o nuklearnoj energiji, fosilnim gorivima i gdje su nastala. Kroz završni rad je izrađena usporedba između raznih proizvođača energije, što čistih što fosilnih. Također se stavlja fokus na ekonomsku stranu cijele priče o proizvodnji. Na primjeru će se prikazati dobit i gubitak izgradnje jedne takve elektrane, kako na nuklearnu energiju gledaju ostale države svijeta, neke velesile kao što i manje države. Po završetku rada bitno je napomenuti kamo i kako bi se trebala nuklearna proizvodnja električne energije kretati u budućnost. Jedan od takvih faktora jest torij na koji se također obraća pažnja. Također će se opisivati način rada i vrste nuklearnih elektrana, kako se stvara nuklearna energija, proces lančane reakcije, prikazati zašto su odeđeni tipovi nuklearnih elektrana bolji od drugih. Provodi se analiza najnovijih podataka i trenutno stanje primjene nuklearne energije u elektroenergetici prikazanim rezultatima. Budući da je sigurnost veliki faktor u cijeloj priči nuklearne energije prikazati će se razni načini ispitivanja sigurnosti tijekom i nakon izgradnje.

Summary

Through various examples and factors, the plan is to show the advantages and disadvantages of nuclear energy, where it originated, how it can be used. The first part discusses nuclear energy in general, fossil fuels and where they came from. Through the final work, a comparison was made between various energy producers, both pure and fossil. It also focuses on the economic side of the whole production story. The example will show the profit and loss of the construction of such a power plant, how nuclear energy is viewed by other countries in the world, some superpowers as well as smaller countries. Upon completion, it is important to note where and how nuclear power generation should move into the future. One such factor is thorium, which is also addressed. It will also describe the mode of operation and types of nuclear power plants, how nuclear energy is generated, the chain reaction process, show why certain types of nuclear power plants are better than others. The analysis of the latest data and the current state of application of nuclear energy in the power industry with the presented results is being carried out. Since safety is a big factor in the whole story of nuclear power, various ways of testing safety during and after construction will be shown.

Popis korištenih kratica

CP – I Chicago Pile – 1

NRC Nuklearna Regulatorna Komisija

kW Kilovat

kWh Kilovat sat

g/kWh gram po kilovat sat

PGE Pacific gas & Electric

U – 233 Uran – 233

U – 235 Uran – 235

U – 238 Uran – 238

LFTR Liquid Fluoride Thorium Reactor

NEA Agencije za nuklearnu energiju

LCOE nivelirani trošak proizvodnje električne energije

OECD Organizacija za ekonomsku suradnju i razvoj

EPC Europska strukovna iskaznica

Sadržaj

1. UVOD 1

2. RAD NUKLEARNIH ELEKTRANA 2

2.1. KAKO RADE NUKLEARNE ELEKTRANE 2
2.2. O FOSILNIM GORIVIMA 4
2.3. SIGURNOST NUKLEARNIH ELEKTRANA 5
2.4. CHERNOBYL I FUKUSHIMA 7
2.5. RAZVOJ I NAPREDOVANJE 8

3. FINANCIJSKI ASPEKT NUKLEARNE ENERGIJE 9

3.1. NUKLEARNA NASPRAM OSTALIH IZVORIMA ENERGIJE 9
3.2. EKONOMSKI ASPEKT IZGRADNJE ELEKTRANE 10
3.3. ISPLATIVOST NUKLEARNE ELEKTRANE 11
3.4. ZAVRŠETAK IZRADE ELEKTRANE I RAD NA DULJI VREMENSKI PERIOD 13

4. TORIJ KAO BUDUĆNOST NUKLEARNE ENERGIJE 15

4.1. TORIJ I NJEGOVA ENERGIJA 15
4.2. URAN – 235 17
4.3. TORIJ 19
4.4. TORIJ REAKTOR 21

5. GORIVO NNUKLEARNIH ELEKTRANA 22

5.1. PROCES NASTANKA NEUTRONA 22
5.2. PROMJENA ENERGIJE U NUKLEARNOJ ELEKTRANI 24

6. VRSTE I NAČIN RADA NUKLEARNIH ELEKTRANA 25

6.1. SASTAV NUKLEARNE ELEKTRANE 25
6.2. PWR NUKLEARNA ELEKTRANA 27
6.3. BWR NUKLEARNA ELEKTRANA 29
6.4. HTR NUKLEARNA ELEKTRANA 31
6.5. NAPREDNI REAKTOR S PLINSKIM HLAĐENJEM (AGR) 32
6.6. PHWR REAKTOR 34

7. EKONOMSKA ANALIZA ISPLATIVOSTI NUJLEARNIH ELEKTRANA 35

7.1. VRIJEDNOST NUKLEARNE ENERGIJ 35
7.2. PROCJENA TROŠKOVA NUKLEARNE ENERGIJE 36

8. RJEŠENJA OSIGURANJA SIGURNOSTI NUKLEARNIH ELEKTRANA 37

8.1. SIGURNOSNI SUSTAV NUKLEARNIH ELEKTRANA 37
8.2. KLASIFIKACIJA NUKLEARNIH INCIDENATA 39

9. TRENUTNO STANJE NUKLEARNE ENERGIJE U ELEKTROENERGETICI 40

9.1. TRENUTNO STANJE NUKLEARNIH ELEKTRANA 40
9.2. TRENUTNO STANJE PROIZVODNJE ENERGIJE 41

10. ZAKLJUČAK 43

11. LITERATURA 44

12. POPIS SLIKA 45

1. Uvod

Razvoj nuklearne energije započeo je u samo vrijeme drugog svjetskog rata. Prvi znanstvenici koji su pionirali nuklearnu energiju bili su Frédéric Joliot-Curie, francuski fizičar, Otto Hahn i Fritz Strassmann, njemački kemičari, također se tu spominje i Enrico Fermi, talijanski i američki fizičar koji je bio jedan od najvećih znanstvenika 20. stoljeća.

Da bi se postigla prva nuklearno kemijska reakcija, trebala se postići samoodržujuća lančana reakcija. Prva takva reakcija bila je postignuta 02. prosinca 1942. godine u reaktoru kod Sveučilišta u Chicagu. Projekt i grupu znanstvenika vodio je Enrico Fermi.

Prvi postojeći nuklearni reaktor pod imenom "Chicago pile I (CP – I)" bio je izgrađen od blokova granita s umetnutim šipkama prirodnog urana. Razlog njegove izgradnje bio je zbog takozvanog „Mannhattan Project“, čiji je krajnji cilj bio izgradnje prve atomske bombe. Ovdje se prvi put ostvarila pojava oslobađanja atomske jezgre i njene uporabe. Nažalost, ta energija bila je korištena u vojne i ratne svrhe.

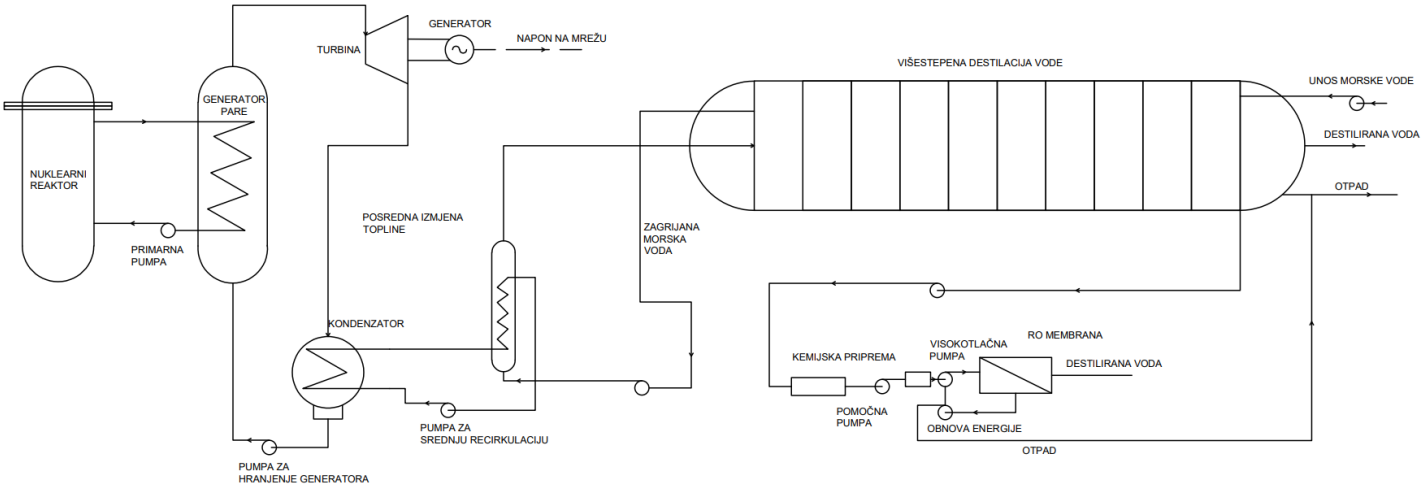
Iako se znalo o fenomenu fisije i lančane reakcije, vodio se ogromni oprez. Tim specijaliziran za izgradnju reaktora bio je spreman ugasiti sve tekućim kadmijem, u slučaju da bi nešto pošlo po krivu. Usvajanjem procesa fisije i lančane reakcije čovjek je ovladao proizvodnjom energije ogromne koncentracije s obzirom na bilo koju drugu kemijsku reakciju. Proizvedena energija je po jedinici mase kod takvih reakcija za milijun veća od klasičnih eksplozija.

2. Rad nuklearnih elektrana

Sve nuklearne elektrane koje su trenutno u upotrebi rade na principu fisije.

2.1 Kako rade nuklearne elektrane

Nuklearna energija okružuje mnoštvo čvrstih mišljenja, pa prije nego što se prikaže razlog zašto svijetu treba nuklearna energija, potrebno je objasniti kako nuklearna energija djeluje i radi. Tajna nuklearne energije je iskorištavanje onoga što radioaktivni materijal želi učiniti, raspadati se. Kada se radioaktivni materijal raspada tijekom svog života, nasumični komadići visoke energije lete u slučajnim smjerovima. Nuklearni inženjeri primjenjuju to znanje tako da uzmu energiju takvog nuklearnog materijala, obično kao metalne šipke i pažljivo ih raspoređuju tako da one čine neku sofisticiranu konstrukciju. Tako da kada te visokoenergetske čestice izlaze, udaraju u druge šipke potičući lančanu reakciju. Ako se takav postupak učini pažljivo, proizvode se ogromne količine topline iz radioaktivnog materijala. Ta toplina se koristi za stvaranje pare iz vode, a zatim ta para pokreće turbine za proizvodnju električne energije. Elektrane koje rade na bazi ugljena rade isto što i nuklearne elektrane, ali tamo gdje nuklearna dobiva prednost jest u količini proizvedene energije s obzirom na utrošenu količinu goriva. U nastavku slikovno je prikazan princip rada nuklearne elektrane [1].



Slika 1.1 Princip rada nuklearne elektrane [2]

Ugljen je nastao iz drevnih molekula stisnutih i zagrijavanih milijunima godina u dubinama planeta Zemlje. Ako se doda malo energije ovoj grumenici, oslobađa se sav kemijski potencijal koji je čekao milijunima godina da izađe i tim se oslobađanjem koristi kao gorivo za proizvodnju električne energije.

Fosilna goriva poput ovih vodila su industrijsku revoluciju jer su energetski gusta. Na primjer, za samo 1 kilogram ugljena možemo dobiti 25*10^6 J/kg kemijske energije. S druge strane, jedan kilogram urana-235 može osloboditi istu količinu energije kao što i 10^6 ugljena. Što znači da je potrebno puno više ugljena nego urana-235 da bi se oslobodila ista količina energije. Nuklearno gorivo je milijun puta gušće od fosilnog goriva, što znači da bi bilo potrebno relativno malo nuklearnih reaktora da u potpunosti zamijene fosilna goriva i da bi se očuvala eko sfera planeta potrebno ih je izgraditi čim više [2].

2.2 O fosilnim gorivima

Fosilna goriva potječu od drevnog ugljika. Ugljik je ono što čini organskim, ali ugljiku u tom obliku trebaju milijuni godina pod stalnim pritiskom da se stvori. Toliko vremena da je era dinosaura jednostavno premlada da bi se ugljik stvorio. Sva trenutna fosilna goriva dolaze od najranijih fosiliziranih bića koja su živjela u periodu kada je planet imao svoje prve oceane. Iz takozvanog „Carboniferous“ razdoblja od prije tristo milijuna godina[2].

Glavne skupine fosilnih goriva jesu ugljen, sirova nafta i prirodni plin. Crni ili smeđi komadi sedimentnih stijena koji se sastoje od mrvičastih do relativno tvrdih tvari čine ugljen.

Ugljen opskrbljuje jednu trećinu cjelokupne proizvodnje energije cijelog svijeta. Najveći potrošači ugljena, prema statistici iz 2018. godine bili su Kina, Indija i Sjedinjene Američke države. Pošto postoje razne vrste ugljena, on se može kvalificirati u četiri glavne skupine: antracit, bitumenski ugljen, sub-bitumenski ugljen i lignit. O grupaciji ovisi sam sadržaj ugljena.

Emisije ugljičnog dioksida izgaranjem ugljena čine čak četrdeset i četiri posto ukupne svjetske potrošnje, a to je najveći pojedinačni izvor porasta globalne temperature iznad predindustrijske razine. Diljem svijeta, zbog lagane nestašice ugljena pada potražnja za takvom vrstom goriva, dok je u Indiji očekivan porast potražnje do 2023. godine. Spoj ugljika i vodika čini glavne dijelove sirove nafte. Sirova nafta je često duboko crne boje, ali postoji i u raznim bojama i viskoznostima, ovisno o kemijskom sastavu. Velik dio nastao je tijekom mezozojskog razdoblja, između 252 i 66 milijuna godina prije nas. Sirova nafta se izvlači iz kopnenih i obalnih bušotina. Nakon izvlačenja, sirova nafta se rafinira u razne naftne derivate, kao što su benzin, dizel i lož ulje, glavni pokretači automobilskih vozila. Sirova nafta se uglavnom proizvodi u Sjedinjenim Američkim Državama, Saudijskoj Arabiji i Rusiji, koje čine četrdeset posto svjetske ponude. Prirodni plin je plin bez ikakvoga mirisa koji se sastoji uglavnom od metana. Takav plin se uglavnom nalazi u naslagama koje su poput nafte i ugljena, nastale prije mnogo milijuna godina od biljnih tvari i tvrdih organizama. Proizvodnja prirodnog plina i nafte porasla je uglavnom u Sjedinjenim Američkim Državama tijekom posljednja dva desetljeća zbog napredaka u tehnikama bušenja koje se naziva „Fracking“. Takozvani „Fracking“ ili hidrauličko lomljenje s vodoravnim bušenjem, kao što i druge inovacije, industrija fosilnih goriva uspjela je izvući resurse koji su prethodno bili preskupi, ili kompletno ne mogući za dosezanjem. Kao rezultat takvih napredaka u industriji, prirodni plin nadmašio je ugljen i postao glavno gorivo za proizvodnju energije diljem svijeta, što se tiče fosilnih goriva. Kao što i u ostalim fosilnim gorivima, najveća proizvodnja energije putem prirodnog plina vrši se u Sjedinjenim Američkim Državama, a slijede ih Rusija i Iran.

2.3 Sigurnost nuklearnih elektrana

Javna slika prema nuklearnoj energiji vrlo je negativna, ali gledano s tehničke strane puno pažnje se posvećuje sigurnosti nuklearne elektrane. Zamisli se neki nepostojeći grad. Takav određeni grad ima dvadeset i sedam tisuća kućanstava. U tim kućanstvima sveukupno boravi sto osamdeset sedam tisuća ljudi.

Nuklearni reaktor proizvodi 1TWh/god (1 bilijun W/h godišnje) energije. Kada se radi o sigurnosti nuklearne elektrane ili bilo kakve elektrane općenito, bitno je postaviti pitanje koliko bi se života moglo izgubiti zbog zagađenja i nesreća povezanih s različitim izvorima energije. Da ta količina energije dolazi iz ugljena, rezultati pokazuju da će 25 ljudi godišnje izgubiti život kao rezultat rudarskih nesreća, zagađenja. Ako je ovo grad koji primarno koristi prirodni plin, ovaj broj pada na tri osobe godišnje[2]. Ako bi ovo bio grad koji se napaja putem nuklearne energije, život bi izgubilo manje od jedne osobe (0,07/godišnje). Trebale bi godine i godine vremena da se vidi stvarna šteta za ljudski život kada bi se koristila nuklearna energija. Jedino što je sigurnije od nuklearne energije su vjetar i solarna energija.

Američka nuklearna industrija ponosi se time što imaju veoma velik pristup prema sigurnosti nuklearnih elektrana. Time pokazuju, kao velesila, da je najveći prioritet sigurnost i da se svaka odluka, korak i mjere opreza temelja na takvom pristupu. Bitno je napomenuti da je industrijska proizvodnja Sjedinjenih Američkih Država jedno od najsigurnijih industrijskih radnih okruženja u cijelom svijetu.

Pri posjetu nuklearnoj elektrani, prvo na što se nalazi i prvo što se ističe posjetiteljima je predanost industrije sigurnosti. Dio po dio suvišnih i raznolikih sigurnosnih sustava dio su pristupa sigurnosti koja se generalno naziva „Dubinskom obranom“.

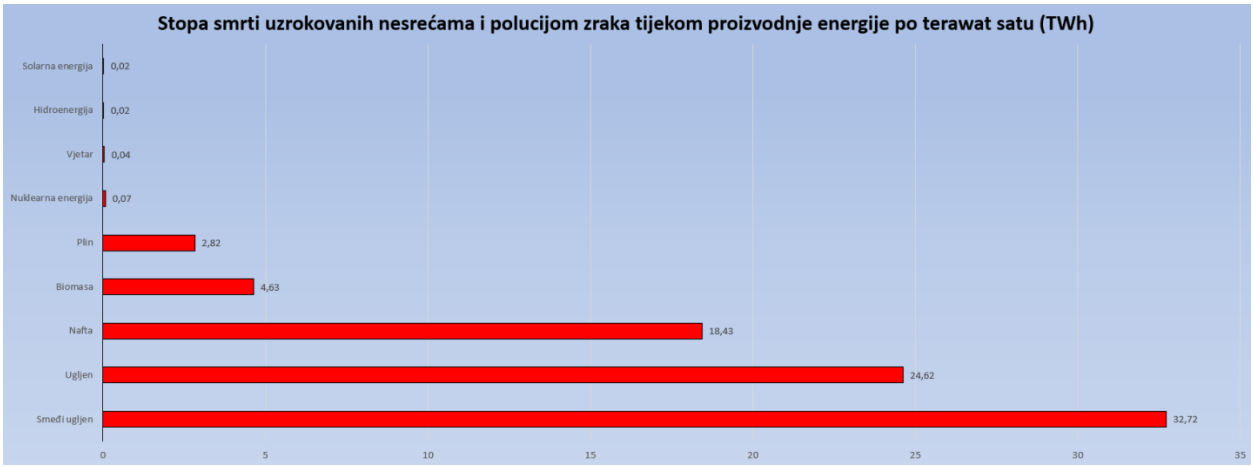
Kada se spomene dubinska obrana, to podrazumijeva da postoje višestruke, preklapajuče razine sigurnosti koje su osmišljene kako bi se spriječila bilo kakva slučajna nezgoda ili greška koja bi imala neopisivo velike posljedice na samu elektranu, kao što i velik dio okoline u kojem se takva nuklearna elektrana nalazi.

Jedan primjer takvih takozvanih „barijera“ uključuju šipke koje drže uranovo gorivo reaktora, masivne čelične posude i cjevovode koji sadrže šipke za gorivo kao što i rashladni sistemi i sustavi takvih elektrana te vrlo robusnu građevinu ili u većini slučajeva i zgradu u kojoj se nalazi i sam reaktor izrađen od ojačanog čelika i betona debljine čak i do nekoliko metara [1].

U većini slučajeva pristup izgradnji nuklearne elektrane je veoma detaljan i bitan. Zbog stvaranja takve razine sigurnosti pri planiranju, samoj izgradnji i montaži više se višestruke kontrole da se elektrana kreira na način gdje se svaka smetnja može ukloniti i nije štetna radu. Sigurnost se nadalje osigurava visoko sposobnim i dobro zaštićenim operaterima, licenciranim od

strane Nuklearne Regulatorne Komisije (NRC), kao i detaljnijim pisanim postupcima. Uz to svako postrojenje čuva i ažurira svoje planove reagiranja u slučaju nužde koju odobrava Nuklearna Regulatorna Komisija (NRC) kao što i Savezna agencija za upravljanje hitnim situacijama.

U globalu, dubinskom obranom se smatra svaki korak, svaka stavka, i svaki način i uputa pri radu, da se nuklearnoj elektrani, kao što i zajednicama osigura najveća moguća sigurnost u radu. Na sljedećem grafu jasno je vidljiva stopa smrtnosti uzrokovana nesrećama i polucijom zraka tijekom proizvodnje energije po TWh.



Slika 2.1 Stopa smrtnosti određenog načina proizvodnje energije [3]

2.4 Chernobyl i Fukushima

Katastrofalni prizori koji su se dogodili na nuklearnim reaktorima Chernobyl i Fukushima su prva stavka koje se ljudi prisjećaju. Ta dva određena incidenta su bila ogromnih razmjera i s još većim posljedicama. Prikaz što se može dogoditi kada nuklearna energija pođe po zlu. Takve pogreške koštaju ljudske živote. To su bili neki od najpoznatijih događaja u ljudskoj povijesti. Mišljenje ljudi pa tako i prijenos informacija medija reflektira se na javno mišljenje društva.

Grafikon prikazuje brojne smrtne slučajeve povezane sa zagađenjem, proizvodnjom, nesrećama različitih izvora energije po TWh baš kao i na primjeru prije, gdje su se prikazali podatci na bazi nekog grada. Kao i pretpostavka prije, nema puno zagađenja i nesreća te smrtnih slučajeva zbog vjetro i sunčevih načina proizvodnje energije [3].

Putem proizvodnje vjetrenom energijom, dogodi se 150 smrtnih slučajeva po TWH. Kod solarne energije se ta brojka kreće oko 440. Ti brojevi su sami po sebi vrlo niski. Kod proizvodnje energije ugljenom, ta brojka se kreće oko ogromnih 100.000 smrtnih slučajeva po TWh. Dok kod nuklearne energije, ta brojka se kreće oko 90 smrtnih slučajeva po TWh. Prema prikazanim podatcima, vidi da je nuklearna energija najsigurniji oblik proizvodnje. To uključuje sve što se dogodilo 1986. u Chernobylu i 2011. u Fukushimi. Uključujući katastrofe, zagađenje, nesreće. Nuklearna energija i dalje je najsigurniji oblik energije kojim ljudska rasa trenutno barata. U tabeli predočena je veza između određenih izvora energije, smrti po tisuću teravata sati proizvedeno kao što i postotka primarne opskrbe energijom po izvoru energije.

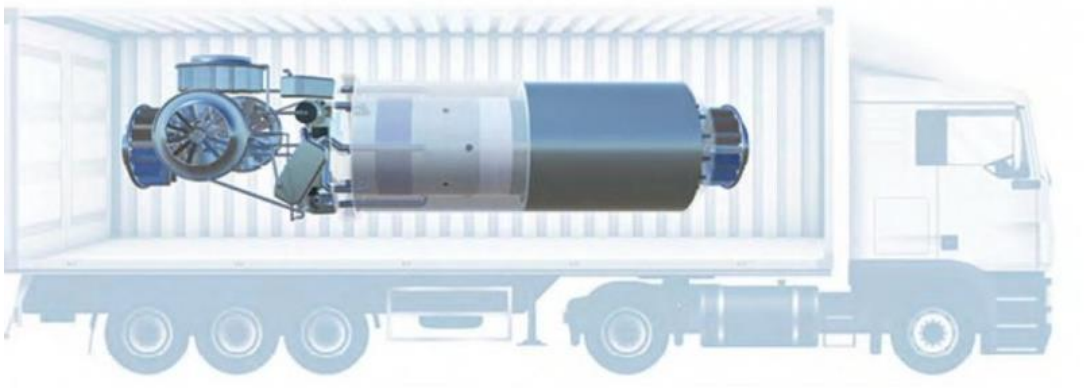
Izvor energije	Smrti po 1000 TWh	Postotak primarne obskrbe energijom (2015)
Ugljen	100000	28.1%
Nafta	36000	31.7%
Prirodni plin	4000	21.6%
Hidro energija	1400	2.5%
Solarna energija	440	<1%
Vjetar	150	<1%
Nuklearna energija	90	4.9%

Slika 2.2 Stopa smrtnosti po 1000TWh proizvedene energije [5]

2.5 Razvoj i napredovanje nuklearne energije

Trenutno se provode znatna istraživanja u kojima se radi na napredovanju nuklearne energije. Potrebno je društvo zainteresirati za takav tip energije. Primjerice, INL (Idaho National Laboratory), jedna od mnogih lokacija diljem svijeta gdje je primarni zadatak rad i razvoj u području nuklearne energetike, istražuje nove vrste takozvanih „plug and play“ modularnih nuklearnih reaktora koji se mogu serijski povezati kako bi se napajala bilo koja vrsta energije koja bi se u to vrijeme mogla zahtijevati. Idaho National Laboratory također istražuje takozvane mikro reaktore koji se mogu uklopiti u kamion ili neki drugi način transporta i mogu se prenijeti bilo gdje.

Takve vrste reaktora mogu isporučiti mnogo Megavata (MW) energije do udaljenih područja koja se danas oslanjaju na dizel generatore. Brojni su zahtjevi za čisto i sigurno napajanje. Takav razvijeni mikro reaktor mogao bi se brzo poslati i aktivirati na neko područje nakon prirodne katastrofe poput potresa ili uragana. Gdje takvi reaktori sjaje jest u tome, da bi ih se moglo dostaviti bez problema i brzo uspostaviti uporište s kojeg bi se prilično brzo moglo obnoviti mjesto koje je priroda opustošila. Takvi reaktori imaju vijek rada i do deset godina, bez ikakvih većih izmjena. Na dolje prikazanoj ilustraciji vidi se zamisao određenog mikro reaktora.



Slika 2.3 Prikaz mikro reaktora [4]

3. Financijski aspekt nuklearne energije

3.1 Nuklearna naspram ostalih izvorima energije

U potrazi za najefikasnijim izvorima energije, širom svijeta su se pojavile masivne elektrane pogonjene solarnom i svjetlosnom energijom. Investicije u te obnovljive izvore energije porasle su i do 273 milijarde dolara (1.722.793.800.000,00 hrvatskih kuna) u 2018. godini, uključujući i osam prethodnih godina, ta brojka doseže 2,36 bilijuna dolara (14.893.016.000.000,00 hrvatskih kuna). Takve vijesti su pozitivne za većinu, ali se također preispituje zašto se takve investicije ne pojavljuju i u području nuklearne energije. Nakon pregleda statistike nekoliko većih država prvog svijeta i kolika je njihova proizvodnja ugljičnog dioksida po proizvedenom kWh (kilovat sat) energije, postaje jasno da zemlje poput Francuske trenutno rade bolje od zemalja poput Njemačke. Pregledom njihovih podataka vidi se da Francuska s 61% proizvodnje nuklearne energije proizvodi samo 32g ugljičnog dioksida po svakom proizvedenom kWh (kilovat sat) energije. Tamo gdje Njemačka, zemlja koja je uložila milijarde u vjetar i postupno zatvara sve nuklearne elektrane, zamjenjujući ih pogonima na prirodni plin i energijom vjetra, proizvodi 318g ugljičnog dioksida po svakom kWh (kilovat sat). Dok Hrvatska, koja nema nijednu nuklearnu elektranu, proizvodi oko 196g ugljičnog dioksida, a udio proizvodnje energije putem obnovljivih izvora je 26%.

Jasno je zašto se mnogi zalažu za vjetroelektrane umjesto nuklearne. Vjetar sam oslobađa manje ugljičnog dioksida za svaki kWh (kilovat sat) energije koju proizvodi s otprilike 11g, neposredno ispod nuklearne, koja ima 12 g/kWh (grama po kilovat satu). Ali budući da je vjetar naizmjeničan, treba ga poduprijeti nekim oblikom proizvodnje električne energije, kada njega nema. Treba ga poduprijeti izvorom koji se može brzo aktivirati, a prirodni plin je savršeno rješenje za takve situacije ako u obzir uzmemo cijenu.

Dakle, u stvarnosti se vjetar ne natječe protiv nuklearne energije, barem ne izravno. Natječe se s većim baznim elektranama u kojima se i djelom koristi prirodni plin i da bi se vidjelo zašto nuklearne elektrane gube takvu vrstu bitke, potrebno je pogledati ekonomsku stranu nuklearne elektrane i shvatiti zašto se zemlje i investitori pokušavaju kloniti nuklearne energije.

3.2 Ekonomski aspekt izgradnje elektrane

Pri odabiru gdje će biti uložena veća količina novca za izgradnju neke elektrane, u obzir se uzima nekoliko čimbenika. Vrijeme uloženog u izgradnju elektrane, novac uložen u izgradnju i vrijeme potrebno da se ulaganja vrate su tri glavna čimbenika kada se generalno govori o izgradnji neke infrastrukturne proizvodnje, a pogotovo u proizvodnji električne energije. Potrebno je usporediti dvije elektrane, gdje je jedna elektrana nuklearna, dok je druga od prirodnog plina. U slučaju povrata investicije za te dvije elektrane, koje su svaka od 1000 kW, dobitak se temelji na predavanju profesora energije iz Illinoisa, David N. Ružić. Prilikom izrade takve vrste izračuna s malo varijabli, potrebno je uzeti u obzir troškove gradnje, cijenu goriva i vrijeme gradnje. Te tri čimbeničke varijable su glavne stavke koje se razlikuju između dva izvora energije, a isto tako i za izradu samog proračuna.

Prosječan trošak gradnje nuklearne elektrane teško je utvrditi. Broj varira od projekta do projekta. Koristeći se prijašnjim podacima, izrada nuklearne elektrane varira u rasponu od 5500$ (34.693,45 hrvatskih kuna) po kW (kilovat) do 8100$ (51.076,98 hrvatskih kuna) po kW (kilovat). Potrebno je uzeti nižu cijenu od 6000$ (37.834,80 hrvatskih kuna) po kW (kilovat). Pri cijeni od 6000$ (37.834,80 hrvatskih kuna) po kW dobiva se vrijednost od 6 milijardi dolara (37.822.200.000,00 hrvatskih kuna) za nuklearnu elektranu snage 1000 (tisuću) MW (megavat). Prirodni plin s druge strane je jedna od najjeftinijih elektrana za izgraditi s cijenom od 920$ (5.799,40 hrvatskih kuna) po kW (kilovat), pa će elektrana od 1000 (tisuća) MW (megavat) koštati 930 milijardi dolara (6.900.130.879.200,00 hrvatskih kuna). Ovaj broj zbog jednostavnosti izračuna potrebno je zaokružiti na jednu milijardu dolara. Ovdje je vidljivo da je prirodni plin jednostavno jeftinija opcija od nuklearne i da će nuklearnoj trebati više vremena da nadoknadi taj trošak od samog početka izgradnje takve vrste elektrane.

Problem izrade postaje još većim zbog vremena koje je potrebno za njihovu izgradnju. Prosječnoj nuklearnoj elektrani treba šest godina za izgradnju, gdje je prosječnoj elektrani koja radi na prirodni plin potrebno svega dvije godine. Takva situacija postaje posebno problematična kada dolazi do zaduživanja, posuđivanja novaca i kamate. Generalno s radi o kamati od 3% i otplati od dvadeset i pet godina za obje tvornice gdje se obje zadužuju za jednu milijardu dolara. Jedna milijarda dolara na dvadeset i petogodišnjoj otplati s kamatnom stopom od 3% iznosi pedeset i šest milijuna dolara godišnje. Takav niz se i dalje nastavlja kroz izgradnju. Što se više vrše ulaganja u proizvodnju nuklearne elektrane, to će trebati duže da se oni na kraju vrate. S druge strane, nuklearne elektrane su isplativije od elektrana na prirodni plin ako se na isplativost gleda dugoročno.

3.3 Isplativost nuklearne elektrane

Jedan od čimbenika na koji je potrebno obratiti detaljniju pažnju jest isplativost same nuklearne elektrane. Da bi se konkretno vidjela isplativost, u obzir se mora uzeti prihod. Uspoređujući s jedne strane nuklearnu elektranu, a s druge elektranu na prirodni plin može se zaključiti da obje imaju snagu oko 1000 (tisuća) MW (Megavat), što znači da ako obje rade sat vremena, obje će proizvesti 1000 (tisuću) MWh (Megavat sat) energije.

Izračunavanje prihoda određene elektrane je veoma kompliciran postupak. Kako je tržište proizvodnje energije veoma složeno, tvrtke koje žele izgraditi nuklearnu elektranu se jednim dijelom opterećuju za određenu cijenu u samom startu, jer je nuklearnu elektranu samu po sebi teško isključiti. Elektrana radi kontinuirano, a s obzirom da cijena električne energije pada noću uslijed pada potražnje, kompliciran je postupak odrediti konkretno način na koji će se sama elektrana regulirati. Cijene električne energije neprestano osciliraju što znači da je potrebno da se nuklearne elektrane i mrežni operateri dogovore o nekoj određenoj cijeni.

Tamo gdje postrojenje za proizvodnju energije putem prirodnog plina može raditi kao dodatno postrojenje nekom glavnom načinu proizvodnje energije, kao što u spoju sa vjetroelektranom, koja kada nema vjetra koristi elektranu na prirodni plin kao zamjensku, isključujući se po potrebi i raditi samo kada situacija to zahtjeva. Isto tako, ako se proizvodi premala količina energije putem vjetroelektrane, elektrana na prirodni plin se koristi kao dodatni izvor proizvodnje energije. Ovakav način rada omogućava mrežnom operateru da s obzirom na okolnosti koje su se stvorile oni postignu i nadalje bolju cijenu za svoju infrastrukturu. Na taj način gube manje novca koji je namijenjen za održavanje i rad određenog postrojenja i ostvaruju maksimalni profit za to određeno postrojenje.

Ako se također uračunaju gubitci koji se događaju na dalekovodima, poreze i prireze na proizvodnju energije, i sve ostale faktore koji bi mogli naštetiti radu elektrane, proračun isplativosti neke elektrane, a pogotovo nuklearne postaje još teži i kompliciraniji. Izračun postaje neprecizan i netočan.

U situaciji kada obje elektrane završe svoju izgradnju, nakon toga dolazi izračun prihoda. Dobiva se vrijednost od oko 525 milijuna dolara (3.300.307.500,00 hrvatskih kuna) nakon svih odbitaka koji se mogu dogoditi za vrijeme rada elektrane. Glavni faktor koji je bitan za elektranu u bilo kojoj situaciji jest gorivo. Ovdje nuklearna elektrana ima golemu prednost. Nuklearno gorivo je relativno jeftino. Samo zahvaljujući tome da nuklearna elektrana treba veoma malu količinu goriva da obavlja svoj rad naspram elektrane prirodnog plina. Jedna paleta urana, u kojoj je komad urana veličine jedne AA baterije (fi50x14mm), može osloboditi jednaku količinu energije kao jedna tona ugljena ili 0,5 tona prirodnog plina [6].

Da bi elektrane od 1000MW radila tijekom cijele godine, za nuklearnu elektranu potrebno je oko 64 milijuna dolara (402.323.200,00 hrvatskih kuna) goriva. Za proizvodnju električne energije prirodni plin treba gorivo u vrijednosti od 450 milijuna američkih dolara (2.828.835.000,00 hrvatskih kuna). Ove cijene će također oscilirati tijekom godine.

Dakle, ako se odabere nuklearna elektrana kao elektrana koja će biti izgrađena, na godišnjoj bazi doći će do više prihoda nego da je odluka pala na izgradnju elektrane koja radi na prirodni plin ili ugljen zbog razloga zašto se uopće elektrane proizvode. Da se jedan tip energije oslobodi i pretvori u drugi. Za taj proces potrebno je gorivo, a gorivo nuklearne elektrane, to jest uran, je značajno jeftinije.

3.4 Završetak izrade elektrane i rad na dulji vremenski period

Cijeli postupak izgradnje nuklearne elektrane trajao je oko sedam godina. Od tog trenutka, nakon sedam godina se po prvi put stvara prihod. Razmišljajući o ulaganjima, kako za prirodni plin tako i za nuklearnu elektranu iz danih brojeva vidljivo je da će nuklearna elektrana godišnje ostvarivati veći dobitak od elektrane, čak i ako se u obzir uzmu sva ulaganja koja su se pojavila tijekom procesa izgradnje.

To znači da elektrana na prirodan plin znači brži povrat novca, ali nuklearna elektrana je isplativija na duži period.

Dugoročno gledano, nuklearna elektrana je naspram elektrane na prirodan plin mnogo puta više profitabilna, ali gubitak brzine postizanja te dobiti je ogroman. Političari i investitori oklijevaju staviti novac na kocku kada se zna da se za tih prvih šest godina mora otplatiti dug koji iznosi više od milijardu i pola američkih dolara. S tim iznosom koji se mora otplatiti u tom vremenskom periodu, da se taj novac investirao drugačije mogla se izgraditi još jedna takva elektrana pogonjena na prirodan plin.

Dobivanje bilo kakvih financijskih sredstava od političara je također teško. Stavka koja šest godina neće početi proizvoditi električnu energiju, a šesnaest godina neće zarađivati, nije u njihovom interesu. Prije toga će ih trebati ponovno izglasati.

Bilo kakav ekonomski dio koji se tiče nuklearnih elektrana je enormno teško za izračunati pa isto tako i predvidjeti. Pri izgradnji se često događaju premašaji budžeta, zaostatci u izgradnji, što rezultira još većim negativnim stanjem prije nego što tok prihoda može krenuti. To je glavni razlog zašto se nuklearne elektrane naspram ostalih zanemaruju, prije nego što počnu govori o sigurnosti tih elektrana.

S obzirom na prikazane vrijednosti, male su vjerojatnosti da bi se nuklearna elektrana izgradila. Ipak, upravo se to događa na mnogim mjestima diljem svijeta. Elektrana “Diablo Canyon” u Kaliforniji. Ovom elektranom upravlja “Pacific Gas & Electric” (PGE), tvrtka s raznolikim portfolijem proizvodnje energije. Hidroelektrična proizvodnja, prirodni plin, obnovljivi izvori. Oni su u vlasništvu investitora i u javnoj prodaji. Povećavanje dobiti njihov je primarni cilj. Ipak, odlučili su kompletno zatvoriti navedenu elektranu do 2024. Godine. Razlozi su mnogi, ali glavni je bio taj, da se na navedenoj elektrani mora obaviti process modernizacije.

Da bi se obnovila dozvola koju svaka elektrana treba za proizvodnju energije, treba modernizirati cijelo postrojenje po cijeni koju tvrtka smatra prevelikom. Treba se provesti izmjena sustava za hlađenja. Trenutni sustav koji se nalazi u elektrani je zatvoreni ciklus. Morska voda se uzima i dijeli postrojenjem, kada dođe do kraja ona se vraća natrag u more.

Dok bi kod otvorenog ciklusa radio rashladni sustav koji kontinuirano koristi istu količinu vode i tako smanjiva vlastiti utjecaj na klimu.

Jedan posebno veliki trošak bio je trošak integriranja odgovarajućih potresnih zaštita, pogotovo nakon lekcija naučenih iz uništenja elektrane u Fukushimi, gdje je poplavna voda od tsunamija uništila vanredne generatore i izazvala tri odvojena otapanja i tri eksplozije vodika. Iz danih podataka može se zaključiti da je izgradnja nuklearne elektrane i sam rad nuklearne elektrane siguran, ali također i skup.

4. Torij kao budućnost nuklearne energije

Torij je glavna vrsta goriva koja se trenutno koristi u eksperimentalnim fazama napredovanja fuzijskih nuklearnih elektrana.

4.1 Torij i njegova energija

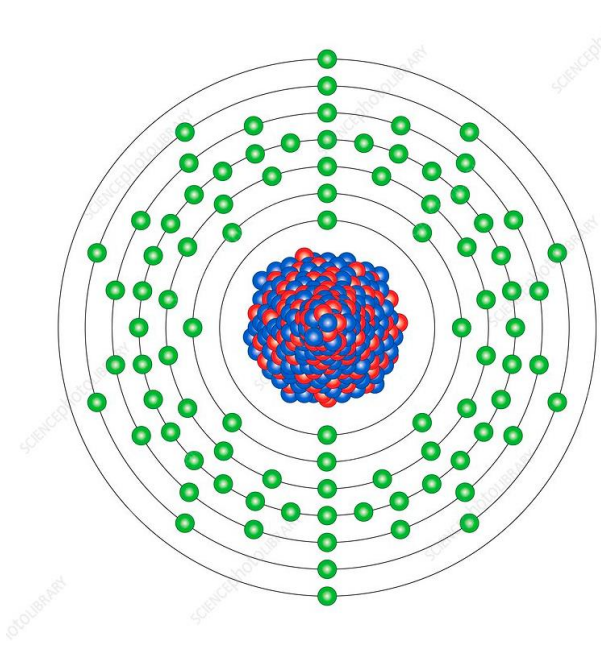
Energija toliko jeftina da se ne može ni usporediti s ostalim izvorima energije. To je bilo obećanje koje je 1950.tih godina dao predsjednik komisije za atomsku energiju Louis Strauss. Nažalost, to se obećanje još nije ostvarilo. Ali s određenim novim tehnologijama koje se nalaze u području gdje se iz dana u dan sve više istraživa, samo je pitanje vremena kada će se takve tehnologije ostvariti.

Energija se nalazi posvuda. Kao što je poznato, sva je masa energija. Ugljen se izgara i stvara se maleni dio energije smješten u njegovim kemijskim vezama. Takav način proizvodnje, kao navedeno prije je jednostavan i jeftin, ali energija koja se dobiva po kilogramu ugljena je mala. Dobitak energije po toni oslobođenog ugljičnog oksida je još manji. Na drugom kraju spektra nalazi se energija koja se oslobađa iz materije i antimaterije. Materija i antimaterija se međusobno uništavaju pri čemu oslobađaju sto posto sadržane energije. Zvuči sjajno, ali antimateriju je nevjerojatno teško stvoriti i pohraniti.

Između prekida kemijskih veza i uništavanja antimaterije se nalazi nuklearna energija. Snažna nuklearna sila koja drži nuklearne veze zajedno sadrži ogromnu količinu energije. Sunce se opskrbljuje energijom oslobađajući tek 0,4 posto mase hidronuklija kao osigurača za reakciju putem helija. Taj iznos se čini iznimno malen, ali tom količinom energije suncu je dovoljno da svijetli oko deset milijardi godina. Praktične fuzijske elektrane su savršen proizvođač energije, ali da one postanu potpuno funkcionalne i da bi ih se moglo kreirati, potrebno je još mnogo vremena. Do kad se takav sistem ne realizira, jedini održivi izvor nuklearne energije jest fisija, što znači razbijanje vrlo teških jezgara na stabilnije, ali i manje dijelove [4].

Da bi se masa pretvorila u energiju, fisija daje najviše za uloženo. Zapravo je radioaktivnost oko elektrana koje proizvode energiju putem ugljena također veća. Najuvjerljivija je tvrdnja da nuklearna energija izravno ne proizvodi emisije ugljika. Kao što je već rečeno, nuklearna energija je najsigurniji put ka smanjenju emisija ugljika i jedan od glavnih načina da se zaustave nagle klimatske promjene. Jedini način koji tom cilju vodi su također i obnovljivi izvori energije.

Postoje moderne ideje da proizvodnja putem nuklearne energije bude još više efikasnija, kao što su takozvani „Torij reaktori“. Takvi reaktori sugeriraju da energija proizvedena putem nuklearnih elektrana bude dovoljno sigurna. Putem torija moguće je gotovo potpuno izbrisati radioaktivni dio, jedini razlog zašto nuklearna energija nije primarni način proizvodnje energije. Na dolje ilustriranoj slici vidi se sastav atoma torija.



Slika 4.1 Atomska struktura torija [5]

4.2 Uran – 235

Uran – 235 ima devedeset i dvije čestice protona i sto četrdeset i tri neutrona. Čini manje od jedan posto urana koji se javlja u prirodi, a to je uglavnom uran – 238 s tri dodatna neutrona. Uran – 235 (dalje u tekstu U – 235) je koristan, ali vrlo djeljiv, što znači da ima veliku vjerojatnost presretanja zalutalog neutrona i cijepanja njime.

Rascjepljuje se u prisutnosti brzih neutrona stvorenih vlastitim cijepanjem, ali je puno više puta djeljivo ako se ti neutroni prvo uspore i poprime toplinsku energiju neutrona. S druge strane, Uran – 238 (dalje u tekstu U – 238) cijepa se samo na neutron koji se brzo kreće, a nikako na spor neutron. Zapravo je mnogo vjerojatnije da apsorbira sporo pokretne neutrone.

Najjeftiniji način komercijalne fisije je iskoristiti U – 235ovu visoku fisibilnost za te toplinske neutrone, i tako pridobiti maksimalnu iskoristivost. Da bi se održala toplinska fisija u uranu, uran se prvo mora obogatiti. Potrebno je povećati udio U – 235 u odnosu na U – 238, tako da se stvara više neutrona, a tim putem također i manje apsorbira.

Također, potrebno je da se ti neutroni uspore u poziciji gdje se ti neutroni cijepaju s U – 235. Da bi se takav proces postigao, termalni reaktori koriste neku vrstu određenog moderatora. Najčešći moderator je voda, jer su jezgre vodika u H2O približno iste mase kao i neutroni. Oni upijaju puno više zamaha u sudaru neutrona i povoljno jest to, da se ta ista voda može koristiti kao rashladna tekućina. Potrebna je toplina od uranovog goriva sprječavajući topljenje tamo gdje je potrebno, a to je pogon turbine izravno kroz sekundarnu petlju toka vode. Uobičajeno je da vodeno hlađenje zahtjeva aktivne napore za održavanje i tako je sklono velikoj količini poremećaja.

Jedan od načina rješavanja problema s rashladnom tekućinom je upotreba rastopljenih metala ili rastopljenih soli. Tu se podrazumijeva da su to tekućine koje podražaju vrlo veliki raspon temperatura smanjujući mogućnost slučajnog vrenja što omogućuje rad sustava na znatno višim temperaturama, čime se povećava učinkovitost i pod znatno nižim tlakom od vode.

Najveći nedostatak uobičajenih nuklearnih reaktora sam otpad. Takav reaktor koristi samo oko jedan posto urana izvađenog iz zemlje. Neki od U – 238 se pretvaraju u cjepljivi plutonij apsorbiranjem neutrona, ali većina je ili neiskoristiva ili pretvorena u teže, nemjerive elemente. Na donjim slikama su predočeni U – 235 i U – 238.



Slika 4.2 Uran – 235 (lijevo) i Uran – 238 (desno) [5]

4.3 Torij

Torij je jedan od nekoliko elemenata koji čine skupinu aktinida. Sam je po sebi dva prostora lakši na periodnom sustavu u usporedbi s uranom. Aktinidi su tipični metali. Svi su veoma mekani i imaju srebrnasti kolorit, ali na zraku se mrlje. Aktinidi su sami po sebi relativno velike gustoće i plastičnosti. Što je zanimljivo jest da se nekolicinu njih može prerezati nožem.

Njihova električna otpornost varira između petnaest i sto pedeset μOhm/cm. Tvrdoća torija slična je tvrdoći mekog čelika pa se zagrijani čisti torij može smotati u listove i uvlačiti u žicu. Torij je gotovo upola gust od urana i plutonija, ali je tvrđi od bilo kojeg od njih.

Svi aktinidi su radioaktivni, paramagnetski i osim aktinija, imaju nekoliko kristalnih faza. Torij se prirodno ne dijeli, ali je plodan apsorpcijom neutrona koji se raspada u protaktinij – 233. On sam po sebi ima veoma dobru cijepanost. U usporedbi s U – 235 i U – 238, takvo svojstvo je još bolje jer apsorbira manje neutrona, što znači da ima bolju neutronsku raspodijeljenost i što je još važnije u prosjeku Uran – 233 proizvodi nešto više od dva neutrona po cijepanju. Čak kada se i dijeli sporo pokretnim neutronom. To znači da je moguće uzgajati novi U – 233 iz torija u takvim termičkim reaktorima.

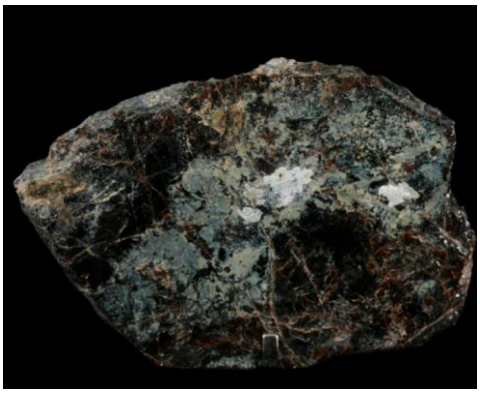
Prednost torija se također javlja pri iskopu. Kod U – 235 i U – 238, problem se javlja pri tome što kod iskopa, oni ispuštaju plin radona koji je kancerogeni. Zbog takve situacije, pri iskopu se moraju postaviti skupi sistemi ventilacije da bi se zaštitili radnici koji rade na tom iskopu. Kod torija takvi problemi ne postoje iz razloga što on ne ispušta plin. Torij također ima znatno veću koncentraciju u rudama naspram urana [4]. Manje truda se mora uložiti da bi se dobila ista količina materijala. Također, u zemljinoj kori nalazi se tri puta više torija nego urana.

Najveća razlika između urana i torija se javlja pri proizvodnji energije. Uran je fisioni, odnosno cjepljiv, dok je torij plodni materijal. To znači da za razliku od torija, uran može obavljati posao bez ikakvih dodanih materijala i elemenata. Torij s druge strane treba dodatni materijal, koji bi mu omogućio proizvodnju energije poput plutonija. Ta stavka se može uzeti u obzir kao nedostatak toriju, ali gledajući s druge strane torij je svakako sigurnija opcija. Ako se u tijeku procesa proizvodnje električne energije dogodi bilo kakva greška ili problem, uran neće stati. Uran se može hladiti, premjestiti, ali će i dalje pretvarati jedan oblik energije u drugi. Torij s druge strane ima dodatne elemente sigurnosti koji omogućuju odstranjivanje aktivnog procesa u sustav gdje takav proces staje.

Iako je proces proizvodnje energije putem torija znatno sigurniji, kao što je bilo vidljivo u prošlosti ljudima je bitan rezultat. Ali i ovo je područje u kojem je torij bolji u skoro svakom pogledu.

Određene procjene kažu da je energija koja se proizvede iz tone torija jednaka energiji koja se proizvede iz dvjesto tona urana. Zbog usporedbe, taj broj je također jednak količini energije koja se proizvede iz tri i pola milijuna tona ugljena.

Kada se radi o nusproizvodima, torij koji je čist u usporedbi čak i s obogaćenim uranom, producira sto puta manje nuklearnog otpada naspram urana. To svojstvo urana znatno smanjuje odlaganje nuklearnog materijala proizvedenog tim procesom. Također, veoma bitna stavka jest da je znatno teže proizvesti nuklearno oružje iz urana, iz razloga što njemu treba dodatni materijal da bi se proces pokrenuo. Na slici ispod je vidljiv torij u stvarnome svijetu.



Slika 4.3 Torij [5]

4.4 Torij reaktor

Postoje razni načini izgradnje reaktora koji bi radili putem torija, ali onaj koji je najperspektivniji reaktor torija je torij reaktor s tekućim fluoridom ili LFTR (Liquid Fluoride Thorium Reactor). U reaktoru takvog dizajna su povezani i torij i U – 233 s fluorom i otopljeni u rastopljenoj fluoridnoj soli berilija ili litijevog fluorida. Fisija u uranu proizvodi toplinu kao što i neutrone kako bi se održala sama fisija i tim putem razmnožavala veća količina energije iz torija. Uran i torij mogu se međusobno pomiješati ili odvojiti s pokrivačem koji je izrađen od samog torija, a koristi se tako da taj pokrivač okružuje kompletnu jezgru urana. U oba slučaja rastaljena sol koja sadrži uran također prenosi toplinu iz jezgre u sekundarne krugove koji u konačnici napajaju turbine.

Stvarna fuzija može se dogoditi samo u jezgri reaktora, jer tu moderator usporava neutrone kako bi fisija postala više puta vjerojatnija. Moderator je u većini slučajeva rešetka grafitnih kanala kroz koje teče tekućina. Grafit je posebno dobar izbor jer usporava neutrone, umjesto da bi ih apsorbirao, poput nekih drugih materijala.

Kad se tekućina udalji od grafita, neutroni se ubrzavaju, što znači da se fisija usporava. Budući da je u tekućem obliku, gorivo se u hitnim slučajevima može brzo ispustiti iz reaktora. U slučaju da bi došlo do nekog kvara ili pogreške u sistemu, čep napravljen od materijala niske temperature taljenja će se otopiti ako se jezgra previše zagrije ili ako se sustav hlađenje kojim slučajem isključi. Nakon toga se gorivo odvodi u spremnik gdje je proces fisije nemoguć.

Ako se takav proces izgradi na ispravan način, tekuće gorivo može postati manje cjepivo kako se temperatura povećava. Razlog tome jest što je pri visokim temperaturama torij sve bolji u apsorpciji neutrona. Čitava postavka sjajan je primjer pasivnog sistema sigurnosti ili sigurnosti pri radu, što znači da bi se u slučaju nužde, čak i kada bi svaki mehanički ili ljudski mehanizam otkazao, reaktor bi se jednostavno isključio.

Još jedna prednost reaktora na dizanje i rastaljenije soli općenito je što mogu biti mali i kompaktni jer im ne trebaju divovske strukture za rukovanje vodom pod visokim pritiskom. Za upotrebu u podmornicama i zrakoplovima prvi put su zamišljeni takvi načini rashladne putem takvog sredstva. Zbog takve kompaktnosti i modularnosti tih sistema omogućava lagano umetanje u postojeću električnu mrežu da bi se zamijenila postrojenja pogonjena ugljenom ili prirodnim plinom.

Trenutno ne postoji izgrađen reaktor koji radi putem torija pošto je torij elektrana još u početnim fazama.

5. Gorivo nuklearnih elektrana

5.1 Proces nastanka neutrona

Kao i sve ostale termoelektrane, nuklearni reaktori rade generirajući toplinu koja kuha vodu da se proizvede para za pogon turbogeneratora. U nuklearnom reaktoru, toplina je proizvod nuklearne fisije. Jezgre urana i plutonija u gorivu su bombardirana neutronima i podijeljena na dva dijela, oslobađajući energiju u obliku topline, kao što i dodatnu količinu neutrona [1]. Novi neutroni oslobođeni tim putem također prouzrokuju daljnju fisiju čime se pokreće lančana reakcija.

Neutroni oslobođeni tim putem su takozvani brzi neutroni, s velikom količinom energije. Takvi neutroni se moraju usporiti pomoću moderatora da bi se lančana reakcija dogodila.

Moderator nuklearnog reaktora je bilokakav element koji se može koristiti za usporavanje neutrona. U tradicionalnim nuklearnim reaktorima moderator je ista stvar kao i rashladna tekućina, odnosno voda. Kad brzi neutroni udaraju u atome H2O, znatno gube na brzini kretanja. Postoje i drugi moderatori koji su se pokazali iznimno korisnim kao što su grafit i berilij.

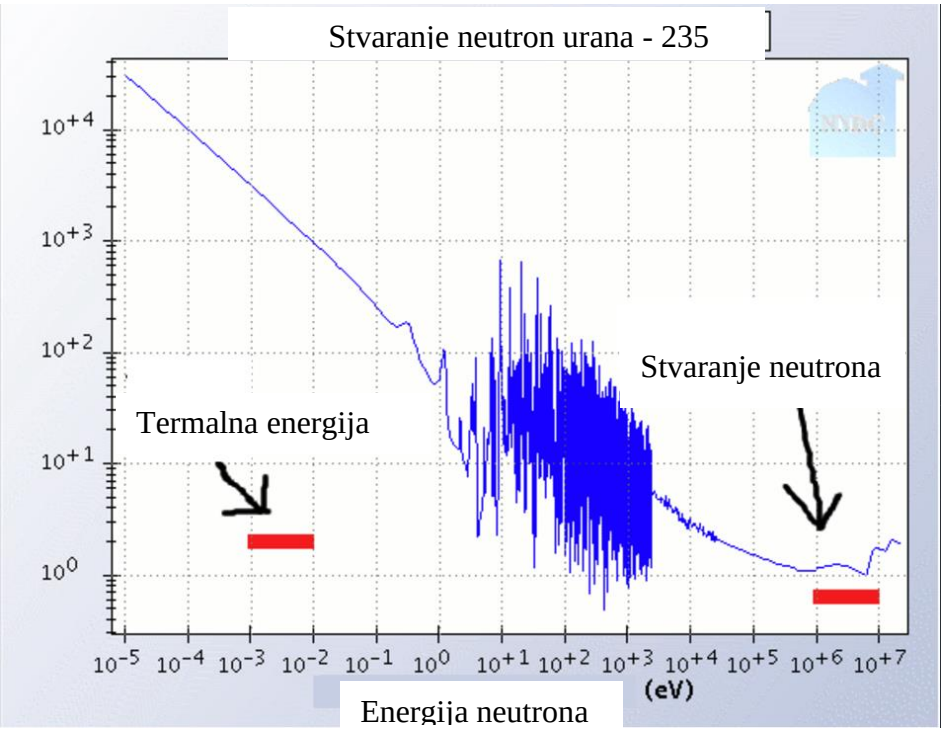
Kad dolazni neutron uzrokuje cijepanje jezgre atoma, drugi se neutroni oslobađaju brzinom jednakoj deset milijuna metara po sekundi, ili otprilike 3% brzine svijetlosti. Kritična masa urana približno je veličine deset centimetara. Vrijeme koje je potrebno da bi neutron prošao sferu jest:

$$T = 0.1m \div 1 * 10^{7} \text{ metar / sekunda}$$

$$T = 1 \times 10^{-8} \text{ sekundi}$$

Ako barem jedan od tih neutrona može uzrokovati razdvajanje drugog atoma goriva, moguća je lančana reakcija. Atomi goriva vjerojatnije će apsorbirati neutron koji se kreće sporo. Dakle, nuklearne elektrane koriste moderatore kako bi se lakše i bolje mogla postići lančana reakcija. Dolje je grafički je prikazano stvaranje neutrona u uranu – 235 [2].

.



5.1 Vjerojatnost cijepanja jezgre U - 235 u odnosu na energiju dolaznog neutrona [7]

5.2 Promjena energije u nuklearnoj elektrani

Tijekom nuklearnih promjena za vrijeme rada nuklearnog reaktora ili se neka masa pretvara u energiju ili se neka energija pretvara u masu. Točno što će se dogoditi ovisi o specifičnostima pojedinačne reakcije. Za takvu promjenu mase može se izračunati energetski ekvivalent pomoću Einsteinove jednadžbe, $E = mc^2$.

Da bi se pronašla vrijednost energetske promjene nuklearne reakcije, potrebno je znati mase svake vrste u jednadžbi reakcije. Za izračunavanje promjene energije nuklearne reakcije potrebno je prvo izračunati zbroj masa svih proizvoda i zbroj masa svih reaktanata, izračunati promjenu mase oduzimajući kombiniranu masu reaktanata od kombinirane mase proizvoda, pretvoriti promjenu mase u ekvivalentnu promjenu energije pomoću Einsteinove jednadžbe. Također je potrebno pretvoriti promjenu energije iz J / atom u kJ / mol atoma. Kao što na primjeru:
Mase za prikazane vrijednosti (amu označava atomsku jedinicu mase):
neutron = 1.00867 amu
elektron = 0.00055 amu
uran – 235 = 234.9934 amu
rubidij – 89 = 88.8913 amu
cerijum – 144 = 143.8817 amu

$$1\ neutron + {}^{235}U \rightarrow {}^{89}Rb + {}^{144}Ce + 3\ elektrona + 3\ neutrona$$

Izračunavanje kombinirane mase i proizvoda reaktanata:

$$Masa\ produkta = 88.8913\ amu + 143.8817\ amu + 3\ (0.00055\ amu) + 3\ (1.00867\ amu) = 235.8007\ amu$$

$$Masa\ reaktanata = 1.00867\ amu + 234.9934\ amu = 236.0021\ amu$$

Izračunavanje promjene mase za reakciju (masa produkta – masa reaktanata):

$$Dmasa = 235.8007\ amu - 236.0021\ amu = -\ 0.2014\ amu$$

Pretvorba promjene mase u energiju pomoću Einsteinove jednadžbe. Bitno je napomenuti da se masa mora promijeniti u kilograme.

$$DE = (-\ 0.2014\ amu)(1.6606 \times 10^{-27}\ kg/amu)(2.9979 \times 10^{8}\ m/s)^2 = -\ 3.006 \times 10^{-11}\ J$$

Pretvorba promjene energije po atomu U – 235 u kJ / mol U – 235 (predznak predstavlja da je nuklearna reakcija eksotermična) :

$$(-\ 3.006 \times 10^{-11}\ J/atom)(1\ kJ/1000\ J)(6.023 \times 10^{23}\ atom/mol) = -\ 1.811 \times 10^{10}\ kJ/mol\ U\text{-}235$$

6. VRSTE I NAČIN RADA NUKLEARNIH ELEKTRANA

6.1 Sastav nuklearne elektrane

U nuklearnom energetskom reaktoru oslobođena energija se koristi kao toplina za stvaranje pare za proizvodnju električne energije. Načela korištenja nuklearne energije za proizvodnju električne energije jednaka su za većinu vrsta reaktora. Energija oslobođena neprekidnim cijepanjem atoma odnosno lančanom reakcijom koristi se kao gorivo kojim se proizvodi para iz vode. Danas se primarno koriste takve nuklearne elektrane. Takve nuklearne elektrane su izvedeni prema konstrukcijama izvorno razvijenim za pogon podmornica i velikih pomorskih brodova, i koriste se za gotovo 85% proizvodnje električne energije putem nuklearnih elektrana na svijetu.

Glavna izvedba nuklearne elektrane koja se koristi je reaktor za vodu pod tlakom (eng. Pressurised Water Reactor (PWR)). Takav reaktor u svom primarnom krugu hlađenja, odnosno prijenosa topline ima vodu na temperaturi od preko 300 ° C , a u sekundarnom krugu stvara paru.

Reaktor koji se manje koristi jest reaktor s kipućom vodom (eng. Boiling Water Reactor (BWR)) . Reaktor s kipućom vodom stvara paru u primarnom krugu iznad jezgre reaktora, na sličnim temperaturama i tlaku.

Obje vrste koriste vodu kao rashladnu tekućinu i kao moderator za usporavanje neutrona. Budući da voda vrije na 100 ° C, oni imaju robusne čelične posude ili cijevi pod tlakom koje omogućuju višu radnu temperaturu.

Svaka nuklearna elektrana se sastoji od nekoliko komponenti. Prva komponenta važna za izgradnju nuklearne elektrane je gorivo. Uran je osnovno gorivo većine nuklearnih elektrana. Obično su kuglice uranovog oksida (UO2) poredane u cijevi kako bi se oblikovale gorive šipke. Te šipke su raspoređene u sklopove za gorivo u jezgri reaktora. U novom reaktoru s novim gorivom potreban je izvor neutrona da bi reakcija krenula. Obično je to berilij pomiješan s polonijem, radijem ili drugim alfa-emiterom. Alfa čestice iz raspada uzrokuju oslobađanje neutrona iz berilija dok se on pretvara u ugljik – 12. Ponovno pokretanje reaktora s nekim korištenim gorivom takav pokretač neće trebati, jer je dovoljno neutrona proizvedeno da se postigne kritičnost kada se uklone upravljačke šipke.

Rashladna tekućina je druga komponenta koja čini nuklearni reaktor. U reaktorima lagane vode također djeluju kao primarna rashladna tekućina. Osim u BWR-ima, postoji i sekundarni krug rashladne tekućine u kojem voda postaje para. PWR reaktor ima dvije od četiri primarne petlje rashladne tekućine s pumpama koje pokreće para ili električna energija. Kineski dizajn takvog reaktora, „Hualong One“ ima tri, od kojih svaka pokreće 6,6 MW elektromotor, sa svakom pumpnom garniturom težak 110 tona.

Tlačna posuda ili tlačne cijevi su treća komponenta nuklearne elektrane. Takva posuda je obično robusna čelična posuda koja sadrži jezgru reaktora i moderator odnosno rashladnu tekućinu, za takvu primjenu se također koriste nizovi cijevi koje drže gorivo i dovode rashladnu tekućinu kroz okolni moderator.

Generator pare je četvrta komponenta. Dio rashladnog sustava pod pritiskom gdje se visokotlačna primarna rashladna tekućina koja dovodi toplinu iz reaktora koristi za izradu pare za turbinu, u sekundarnom krugu. U osnovi izmjenjivač topline poput hladnjaka za motora vozila. Nuklearne elektrane imaju do šest takvih petlji, svaka s generatorom pare. Uglavnom su to veliki izmjenjivači topline za prijenos topline iz jedne tekućine u drugu. Svaka struktura teži do 800 tona i sadrži od 300 do 16 000 epruveta promjera oko 2cm za rashladnu tekućinu, koja je radioaktivna zbog dušika – 16 (N – 16), nastala neutronskim bombardiranjem kisika, s životnim trajanjem 7 sekundi. Sekundarna voda mora teći kroz potporne konstrukcijske cijevi. Cijeli sistem se projektira na način tako da cijevi ne vibriraju i ne rade međusobno uznemiravanje, upravljati tako da se naslage ne stvaraju da bi ometale protok i održavati kemijski čistima kako bi se izbjegla korozija. Kao sigurnosni sistem, propuštanja se otkrivaju nadgledanjem razine N – 16 u pari dok napušta generator pare.

Zadnja komponenta nuklearne elektrane jest . Struktura oko reaktora i pripadajućih generatora pare koja je dizajnirana da ga zaštiti od vanjskog prodora i da zaštiti one izvan od utjecaja zračenja u slučaju bilo kakvog ozbiljnog kvara. Uobičajeno je da je to betonska i čelična konstrukcija debljine najmanje jednog metra. Noviji reaktori instaliraju uređaje za lokalizaciju jezgre ispod posude pod tlakom kako bi uhvatili bilo koji otopljeni materijal jezgre u slučaju veće nesreće.

6.2 PWR Nuklearna elektrana

Vodeni reaktor pod tlakom (PWR) vrsta je nuklearnog reaktora na bazi vode. PWR-ovi čine veliku većinu svjetskih nuklearnih elektrana. U PWR, primarna rashladna tekućina (voda) pumpa se pod visokim pritiskom u jezgru reaktora, gdje se zagrijava energijom koja se oslobađa cijepanjem atoma. Zagrijana, visokotlačna voda zatim teče do generatora pare, gdje svoju toplinsku energiju prenosi na vodu nižeg tlaka sekundarnog sustava u kojem se stvara para. Para zatim pokreće turbine, koje vrte električni generator. Za razliku od reaktora s kipućom vodom (BWR), tlak u primarnoj petlji rashladne tekućine sprječava prokuhavanje vode u reaktoru.

Svi reaktori s laganom vodom koriste običnu vodu i kao rashladno sredstvo i kao moderator neutrona. Većina ih koristi od dva do četiri vertikalno postavljena generatora pare; VVER (PWR reaktor sovjetske tehnologije) reaktori koriste vodoravne generatore pare. PWR-ovi su izvorno projektirani da služe kao nuklearni pomorski pogon za nuklearne podmornice i korišteni su u izvornom dizajnu druge komercijalne elektrane u atomskoj elektrani „Shippingport“. PWR-ovi koji trenutno rade u Sjedinjenim Državama smatraju se reaktorima generacije II. Francuska, koja je jedna od velesila proizvodnje nuklearne energije, primarno koristi takvu vrstu nuklearnih reaktora.

PWR nuklearna elektrana radi na način da se nuklearno gorivo u tlačnoj posudi reaktora uključi u lančanu reakciju cijepanja, koja proizvodi toplinu, zagrijavajući vodu u primarnoj petlji rashladne tekućine toplinskim provođenjem kroz oblogu goriva. Vruća primarna rashladna tekućina pumpa se u izmjenjivač topline koji se naziva generator pare, gdje teče kroz stotine ili tisuće malih cijevi. Prijenos topline ostvaruje se bez miješanja dviju tekućina kako bi se spriječilo da sekundarna rashladna tekućina postane radioaktivna.

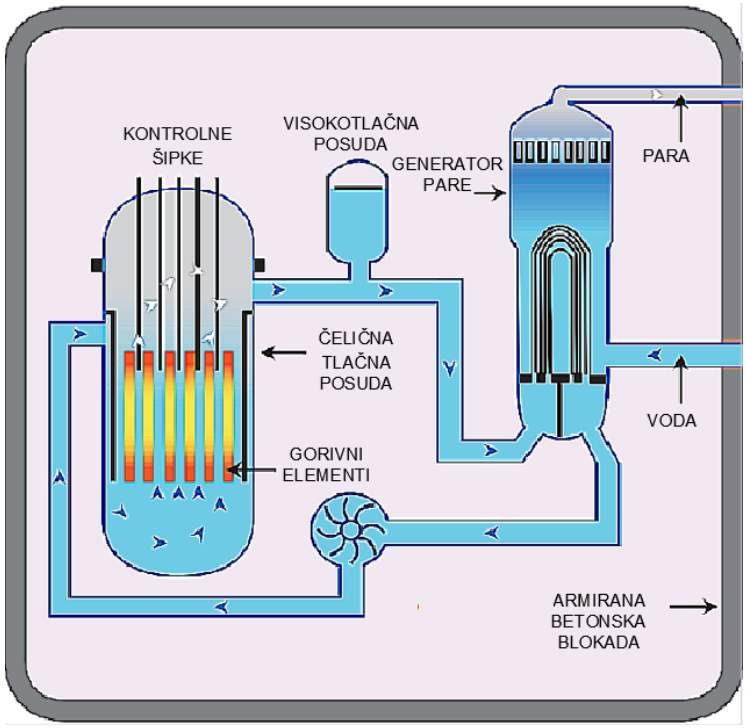
Neki uobičajeni uređaji generatora pare su u-cijevi ili jedno prolazni izmjenjivači topline. U nuklearnoj elektrani, para pod tlakom dovodi se kroz parnu turbinu koja pokreće električni generator povezan na električnu mrežu za prijenos. Nakon prolaska kroz turbinu, sekundarna rashladna tekućina (smjesa vode i pare) hladi se i kondenzira u kondenzatoru. Kondenzator pretvara paru u tekućinu kako bi se mogla ponovno pumpati u generator pare i održava vakuum na izlazu iz turbine tako da pad tlaka na turbini, a time i energija koja se izvlači iz pare, bude maksimaliziran. Prije ulaska u generator pare, kondenzirana para ponekad se prethodno zagrije kako bi se umanjio toplinski udar.

Dvije su karakteristike karakteristične za reaktor pod vodom pod pritiskom (PWR) u usporedbi s drugim vrstama reaktora: odvajanje petlje rashladne tekućine od parnog sustava i tlak unutar primarne petlje rashladne tekućine. U PWR-u postoje dvije odvojene petlje rashladne tekućine (primarne i sekundarne), koje su obje napunjene demineraliziranom vodom. Reaktor s kipućom vodom, za razliku od toga, ima samo jednu petlju rashladne tekućine. Tlak u primarnoj

petlji rashladne tekućine obično iznosi 15-16 mega paskala (150-160 bara), što je znatno više nego u drugim nuklearnim reaktorima, i gotovo dvostruko veći od reaktora s kipućom vodom (BWR). Kao posljedica toga, javlja se samo lokalizirano vrenje i para će se odmah obnoviti u tekućini.

Prednosti PWR reaktora je ta što su vrlo stabilni zbog svoje tendencije da proizvode manje energije kako temperature rastu; to svojstvo olakšava rad reaktora sa stajališta stabilnosti. Petlja PWR turbine odvojena je od primarne petlje, tako da voda u sekundarnoj petlji nije onečišćena radioaktivnim materijalima. PWR-ovi mogu pasivno strugati reaktor u slučaju da se izvan snage izgubi snaga kako bi se odmah zaustavila primarna nuklearna reakcija. Upravljačke šipke drže elektromagneti i padaju gravitacijom kad se izgubi struja; potpuno umetanje sigurno isključuje primarnu nuklearnu reakciju.

Nedostatci PWR reaktora su ti da zbog zahtjeva da se primarna petlja rashladne tekućine u reaktoru pod pritiskom napuni borom, nepoželjna proizvodnja radioaktivnog sekundarnog tricija u vodi je preko 25 puta veća nego u reaktorima s kipućom vodom slične snage, zbog posljednjeg odsustva elementa za moderiranje neutrona u svom petlja rashladne tekućine. Tritij nastaje apsorpcijom brzog neutrona u jezgri atoma bora-10 koji se potom dijeli na atom litija-7 i tricija. Reaktori s vodom pod pritiskom godišnje emitiraju u okoliš nekoliko stotina tricija kao dio normalnog rada. Zbog toga je potrebno obogatiti uranovo gorivo, što značajno povećava troškove proizvodnje goriva. Dolje je prikazan spoj komponenti PWR reaktora.



Slika 6.1 Prikaz komponenti PWR reaktora [9]

6.3 BWR Nuklearna elektrana

Reaktor s kipućom vodom ili BWR reaktor koristi demineraliziranu vodu kao rashladno sredstvo i neutronski moderator. Toplina nastaje nuklearnim cijepanjem u jezgri reaktora, što uzrokuje vrenje rashladne vode, stvarajući paru. Para se izravno koristi za pogon turbine, nakon čega se hladi u kondenzatoru i pretvara natrag u tekuću vodu. Ta se voda zatim vraća u jezgru reaktora, završavajući petlju. Voda za hlađenje održava se na oko 75 atm (standardna atmosfera) (7,6 MPa, 1000–1100 psi), tako da u srži vrije na oko 285 ° C (550 ° F). U usporedbi s tim, u vodenom reaktoru pod tlakom (PWR) nije dopušteno značajnije vrenje zbog visokog tlaka koji se održava u njegovoj primarnoj petlji - približno 158 atm (16 MPa, 2300 psi) [9].

Para koja se proizvodi u jezgri reaktora prolazi kroz prijenosnike pare i ploče za sušenje iznad jezgre, a zatim izravno u turbinu, koja je dio kruga reaktora. Budući da je voda oko jezgre reaktora zbog zauzimanja neutrona iz vode uvijek onečišćena tragovima radionuklida, turbina mora biti zaštićena tijekom normalnog rada, a tijekom održavanja mora se osigurati radiološka zaštita. Većina radioaktivnosti u vodi vrlo je kratkog vijeka (uglavnom N-16, s polu vijekom od 7 sekundi), pa se u turbinsku dvoranu može ući ubrzo nakon isključivanja reaktora.

Suvremeni sklop goriva BWR elektrane sastoji se od 74 do 100 šipki, a u jezgri reaktora nalazi se do približno 800 sklopova koji sadrže do približno 140 kratkih tona nisko obogaćenog urana. Broj sklopova goriva u određenom reaktoru temelji se na razmatranjima željene izlazne snage reaktora, veličine jezgre reaktora i gustoće snage reaktora.

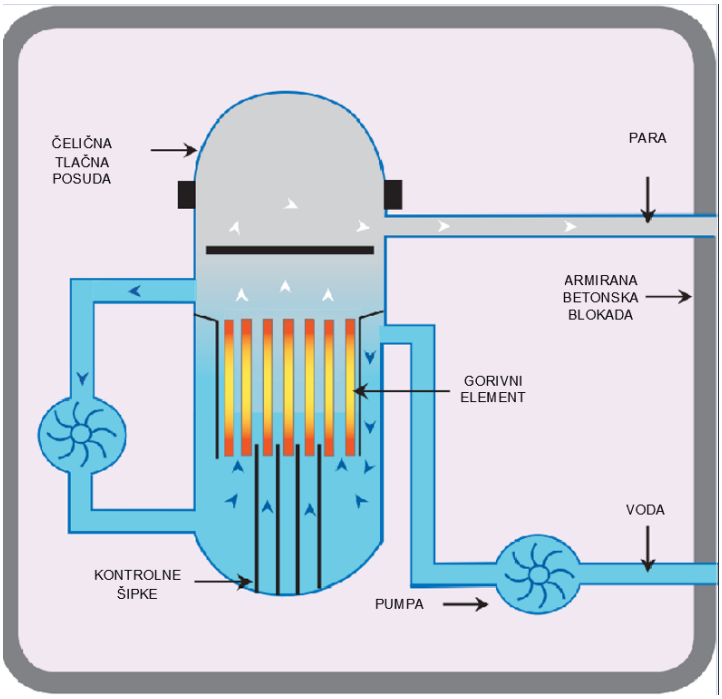
Šipke za gorivo reaktora povremeno se zamjenjuju premještanjem iz tlačne posude reaktora u bazen istrošenog goriva. Uobičajeni ciklus traje 18–24 mjeseca, a oko jedne trećine sklopova goriva zamjenjuje se tijekom prekida punjenja gorivom. Preostali sklopovi goriva preusmjeravaju se na nova mjesta jezgre kako bi se povećala učinkovitost i snaga proizvedena u sljedećem ciklusu goriva. Budući da su vrući i radioaktivno i toplinski, to se radi pomoću dizalica i pod vodom. Iz tog su razloga bazeni za skladištenje istrošenog goriva iznad reaktora u tipičnim instalacijama. Oni su zaštićeni vodom nekoliko puta većom od njihove visine i pohranjeni su u krute nizove u kojima se kontrolira njihova geometrija kako bi se izbjegla kritičnost.

U nuklearnoj katastrofi „Fukushima Daiichi“ postalo je problematično jer se voda izgubila iz jednog ili više bazena istrošenog goriva, a potres je mogao promijeniti geometriju. Činjenica da je obloga gorivih šipki legure cirkonija također bila problematična jer ovaj element može reagirati s parom na temperaturama iznad 1.500 K (1.230 ° C) dajući vodik, koji se može zapaliti kisikom u zraku.

Prednosti takvih reaktora su te da posuda reaktora i pripadajuće komponente rade na znatno nižem tlaku od oko 70-75 bara (1.020-1.090 psi) u usporedbi s oko 155 bara (2.250 psi) u PWR. Posuda pod tlakom izložena je znatno manjem zračenju u odnosu na PWR, pa s godinama ne postaje toliko krhka. Radi na nižoj temperaturi nuklearnog goriva, uglavnom zbog prijenosa topline latentnom toplinom isparavanja, za razliku od osjetne topline u PWR-ima. Manje velikih metalnih i ukupnih komponenata zbog nedostatka generatora pare i posude pod tlakom, kao i pripadajućih pumpi primarnog kruga. To također čini BWR-ima jednostavnijim za rad.

Iako se kaže da je manja vjerojatnost da će sadašnja flota BWR-a pretrpjeti oštećenja jezgre uslijed ograničenja kvara "1 na 100 000 reaktorskih godina" od sadašnje flote PWR-a, izražena je zabrinutost zbog sposobnost zadržavanja tlaka ugrađenog, neizmijenjenog sustava za zadržavanje oznake i - da takva može biti nedovoljna da zadrži pritiske generirane ograničavajućom greškom u kombinaciji s potpunim kvarom ECCS-a (eng. Emergency core cooling system) što rezultira izuzetno teškim oštećenjem jezgre. U ovom scenariju dvostrukog zatajenja, za koji se pretpostavlja da je krajnje nevjerojatan prije nuklearnih nesreća „Fukushima I“.

Kontrolne šipke umetnute su odozdo za trenutne BWR izvedbe. Dostupna su dva hidraulična izvora energije koji mogu upravljati šipkama u jezgru za BWR u hitnim uvjetima. Za svaku upravljačku šipku dostupan je namjenski visokotlačni hidraulički akumulator, kao i tlak unutar posude reaktora pod tlakom. Ili namjenski akumulator (jedan po šipki) ili pritisak reaktora mogu u potpunosti umetnuti svaku šipku. Većina ostalih vrsta reaktora koristi gornje ulazne upravljačke šipke koje se elektromagneti pridržavaju u povučenom položaju, uzrokujući da gravitacijom padnu u reaktor ako se izgubi snaga. Ova prednost djelomično se kompenzira činjenicom da hidrauličke sile pružaju mnogo veće sile umetanja štapa od gravitacije, a kao posljedica toga, mnogo je manja vjerojatnost da će se upravljačke šipke BWR zaglaviti u djelomično umetnutom položaju zbog oštećenja kanala upravljačke šipke u jezgri štetni događaj. Desno je predočen prikaz BWR reaktora.



Slika 6.2 Prikaz komponenti BWR reaktora [9]

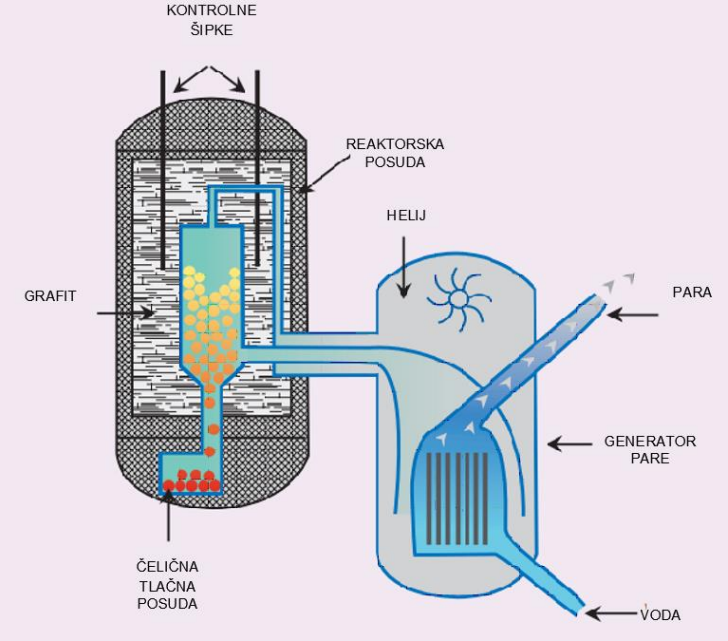
6.4 HTR Nuklearna elektrana

Reaktori s plinskim hlađenjem visoke temperature (HTR) – nisu još u komercijalnom pogonu - nude alternativu konvencionalnim dizajnom. Kao moderator koriste grafit i helij kao rashladnu tekućinu. Značajka HTR-a jest visok stupanj sigurnosti oslanjanjem na pasivno sigurnosne značajke. Gorivo je presvučeno keramikom pa je time sposobno proizvoditi energiju na temperaturama većim od 1600ºC a učinkovitost postižu radom na temperaturama od 700-950ºC. Helij može pokretati plinsku turbinu izravno ili se koristi za izradu pare.

Visoko temperaturni plinsko hlađeni reaktor (HTGR) koncept je nuklearnog reaktora IV generacije koji koristi grafitni moderator s prolaznim ciklusom uranovog goriva. HTGR je vrsta visoko temperaturnog reaktora (HTR) koji konceptualno može imati izlaznu temperaturu od 1000 ° C. Jezgra reaktora može biti ili "prizmatični blok" ili jezgra "šljunčanog sloja". Visoke temperature omogućuju primjene kao što su procesna toplina ili proizvodnja vodika putem termo kemijskog ciklusa sumpor-joda.

Postoje dvije vrste HTR dizajna, klasificirane prema tome kako se zbijaju čestice goriva u sklopovima za gorivo. U reaktorima sa šljunčanim slojem čestice, zajedno s moderatorom, su komprimirani u sferne kamenčiće promjera oko 6 cm. Šljunak je labavo složen u reaktorske posude i hladi se helijem. Alternativni dizajn sadrži čestice goriva ugrađene u zamjenjive grafičke blokove (obično šesterokutne prizme) različitih konfiguracija, s prolazima za helijsku rashladnu tekućinu.

Što je zanimljivo kod takvih reaktora jest da što se više povećava veličina pojedinih reaktora tako da generiraju znatno više od 1000MWe, sve je veći interes u malim jedinicama do oko 10MWe. HTR reaktori zbog svoje izvedbe takvu proizvodnju energije omogućuju. Desno je predočen prikaz HTR reaktora.



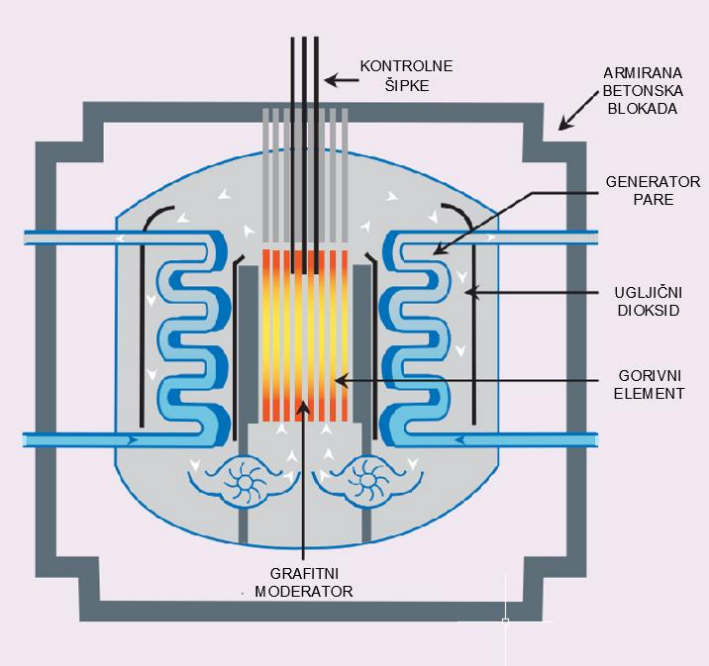
Slika 6.3 Prikaz HTR reaktora [9]

6.5 Napredni reaktor s plinskim hlađenjem (AGR)

AGR reaktori su druga generacija britanskih reaktora hlađenih plinom, koji koriste grafit kao neutronski moderator i ugljični dioksid kao rashladnu tekućinu. Oni su okosnica britanske flote za proizvodnju nuklearne energije od 1980-ih. AGR je razvijen iz reaktora „Magnox“, britanskog dizajna prve generacije. Prvi dizajn „Magnoxa“ optimiziran je za proizvodnju plutonija, i iz tog je razloga imao značajke koje nisu bile najekonomičnije za proizvodnju električne energije. Primarni među njima bio je zahtjev za radom na prirodnom uranu, koji je zahtijevao rashladnu tekućinu s malim poprečnim presjekom neutrona, u ovom slučaju ugljičnog dioksida, i učinkovit neutronski moderator, grafit. Dizajn „Magnox“ također je radio relativno hladne temperature plina u usporedbi s drugim dizajnom za proizvodnju električne energije, što je rezultiralo manje učinkovitim uvjetima pare [9].

Dizajn AGR reaktora zadržao je „Magnoxov“ moderator za grafit i rashladnu tekućinu s ugljikovim dioksidom, ali je povećao radnu temperaturu rashladnog plina kako bi poboljšao uvjete pare. Izrađene su identično onima u postrojenjima na ugljen, što omogućava korištenje istog dizajna turbina i proizvodne opreme. Tijekom početnih faza projektiranja utvrđeno je da je potrebno presvući oblogu goriva s berilija na nehrđajući čelik. Međutim, čelik ima veći poprečni presjek neutrona i ta je promjena zahtijevala upotrebu obogaćenog uranovog goriva za nadoknadu. Ova je promjena rezultirala većim sagorijevanjem od 18.000 MWt-dana po toni goriva, što je zahtijevalo rjeđe punjenje gorivom. Svi su konfigurirani s dva reaktora u jednoj zgradi, a svaki reaktor ima dizajniranu toplinsku snagu od 1.500 MWt za pogon turbina-alternatora od 660 MWe. Razne AGR stanice proizvode izlazne vrijednosti u rasponu od 555 MWe do 670 MWe, mada neke rade na nižim od projektnih snaga zbog operativnih ograničenja.

AGR reaktor je dizajniran tako da su konačni uvjeti pare na zaustavnom ventilu kotla bili identični onima kod konvencionalnih elektrana na ugljen, pa se mogao koristiti isti dizajn turbo generatorskog postrojenja. Srednja temperatura vruće rashladne tekućine koja napušta jezgru reaktora bila je projektirana na 648 ° C. Da bi se postigle ove visoke temperature, ali ipak osigurajte korisni vijek trajanja jezgre grafita (grafit lako oksidira u CO2 na visokoj temperaturi), za hlađenje grafita koristi se povratni protok rashladne tekućine na nižoj izlaznoj temperaturi kotla od 278 ° C. Izlazna temperatura i tlak bili su dizajnirani da iznose 2.485 psi (170 bara) i 543 ° C. Na slici ispod je prikazan takav reaktor.



Slika 6.4 Prikaz AGR reaktora [9]

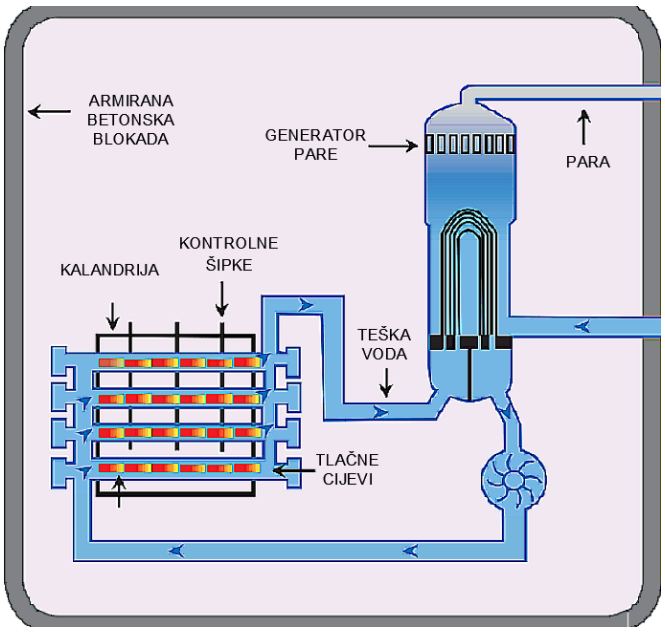
6.6 PHWR Reaktor

Reaktor s teškom vodom pod pritiskom ulazi u vrstu nuklearnog reaktora koji u svojem djelovanju koristi deuterij oksid (D2O) kao svoju rashladnu tekućinu i neutronski moderator. Prilikom svoje izvedbe u većini slučajeva koristi prirodni uran kao svoje gorivo, no nije strano kako osim čistog urana koristi se i pomalo obogaćeni uran. Razlozi zbog kojih se voda drži pod pritiskom jest što bi se u suprotnom izazvalo vrenje koje ne bi moglo omogućiti određenu visinu temperature bez stvaranja mjehurića pare. Prema provedenim istraživanjima početkom 2001. godine radilo se 31 PHWR od ukupnog kapaciteta od 16,5 GW (e) što će predstaviti otprilike 7,76% po broju i 4,7% po proizvodnom kapacitetu svih trenutnih pogonskih reaktora.

Prednost rada PHWR jest u mehaničkom rasporedu koji većinu moderatora postavlja na niže temperature te je iz tog razloga posebno učinkovit zato što su dobiveni toplinski neutroni "toplotniji" nego u tradicionalnim izvedbama u kojima je moderator puno vrući. Po tim značajkama vidljivo je da PHWR može koristiti prirodni uran kao i druga goriva, i to na učinkovitiji način od reaktora lagane vode (LWR).

Najvažniji nedostaci svedeni su na dva razloga zbog kojih se otežava rad PHWR. Jedan od nedostataka je smanjeni energetski sadržaj prirodnog urana što će u usporedbi s obogaćenim uranom zahtjeva češću zamjenu goriva.

U nastavku slikovno je prikazano kako izgleda reaktor s teškom vodom pod pritiskom te način na koji djeluje.



Slika 6.5 Prikaz PHWR reaktora [9]

7. Ekonomska analiza isplativosti nuklearnih elektrana

7.1 Vrijednost nuklearne energije

Na samom početku potrebno je spomenuti kako nuklearne elektrane svojom proizvodnjom građanima omogućuju povoljne cijena proizvedene električne energije. Unutar same cijene proizvedene energije ubrajaju se investicijski troškovi, operativni troškovi, troškovi goriva i troškovi održavanja [6]. Na samu cijenu unutar svake države utječu različiti faktori zbog kojih cijene nisu jednake unutar svake države. Konkretan primjer kretanja cijena prikazan je u dolje navedenoj tablici izrađen za Sjedinjene američke države.

SAD		
Tip elektrane	**Cijena (USD/MWh)**	**Udio cijene goriva (%)**
konvencionalni ugljen	99,6	29
ugljen sa CO2	140,7	26
plin (ovisno o tipu elektrane)	65,5-132	50-70
napredna nuklearna	112,7	10
biomasa	120,2	40
kopnena vjetroelektrana	96,8	/
vjetroelektrana na moru	330,6	/
solarna fotovoltaična	156,9	/
hidro	89,9	

Tablica 7.1 Cijene za tipove elektrane [7]

Izvještaj govori da na ekonomiju novih nuklearnih elektrana uvelike utječu njihovi kapitalni troškovi koji čine 60% njihovog niveliranog troška proizvodnje električne energije (LCOE-a). Naknade za kamate i razdoblje izgradnje važne su varijable za određivanje ukupnih troškova kapitala. Troškovi sustava minimalni su za izvore poput nuklearne, ali postaju čimbenik za obnovljive izvore čiji učinak ovisi o povremenim ulozima vjetra ili sunca. Ako se udio takvih obnovljivih izvora poveća iznad nominalnog udjela u ukupnom iznosu, tada troškovi sustava znatno eskaliraju i lako premašuju stvarne troškove proizvodnje iz tih izvora. Taj podatak modeliran je u studiju OECD-ove Agencije za nuklearnu energiju 2019. godine i vrlo je važno je razmatranje izvan LCOE-a u usporedbi izvora.

7.2 Procjena troškova energije proizvedene iz nuklearne

Troškovi financiranja ovisit će o razdoblju gradnje i primjenjivim kamatama na dug. Vrijeme izgradnje nuklearne elektrane obično se uzima kao trajanje između izlijevanja prvog "nuklearnog betona" i priključka na mrežu. Oko 80% troškova odnosi se na troškove Europske strukovne iskaznice (EPC), s tim da se oko 70% sastoje od izravnih troškova (fizička oprema postrojenja s radnom snagom i materijalima za njihovo sastavljanje) i 30% neizravnih troškova (nadzorni inženjering i potpora troškovima rada s nekim materijalima)[6]. Preostalih 20% troškova odnosi se na nepredviđene slučajeve i troškove vlasnika (u osnovi troškovi sustava testiranja i osoblja za obuku).

Izračun OECD-ove Agencije za nuklearnu energiju (NEA) troškova za nuklearnu elektranu izgrađenu u OECD-u porastao je s oko 1900 USD / kWe krajem 1990-ih na 3850 USD / kWe u 2009. U izvještaju za 2015. godinu Projektirani troškovi proizvodnje električne energije , troškovi su se kretali od 2021 USD / kWe u Južnoj Koreji do 6215 USD / kWe u Mađarskoj. Za Kinu su dvije usporedive brojke iznosile 1807 USD / kWe i 2615 USD / kWe. LCOE podaci o diskontnoj stopi od 3% kreću se od 29 USD / MWh u Koreji do 64 USD / MWh u Velikoj Britaniji, po diskontnoj stopi od 7% od 40 USD / MWh (Koreja) do 101 USD / MWh (Velika Britanija) i po stopi od 10% 51 USD / MWh (Koreja) do 136 USD / MWh (Velika Britanija).

8. Rješenja osiguranja sigurnosti nuklearnih elektrana

8.1 Sigurnosni sustavi nuklearnih elektrana

Od samog početka postoji snažna svijest o potencijalnoj opasnosti nuklearne energije i oslobađanja radioaktivnih materijala iz proizvodnje električne energije nuklearnom energijom. Kao i u drugim industrijama, dizajnom i radom nuklearnih elektrana cilj je smanjiti vjerojatnost nesreća i izbjeći velike ljudske posljedice kada se dogode. U povijesti civilne nuklearne energije dogodile su se dvije velike nesreće s reaktorima - Černobil i „Fukushima Daiichi“ [3]. Černobil je uključivao snažnu vatru bez osiguranja za zadržavanje, a „Fukushima Daiichi“ ozbiljno je testirao zadržavanje, dopuštajući neko oslobađanje radioaktivnosti. To su jedine veće nesreće koje su se dogodile u preko 18.500 kumulativnih reaktora u komercijalnom nuklearnom pogonu u 36 zemalja. Dokazi tijekom šest desetljeća pokazuju da je nuklearna energija sigurno sredstvo za proizvodnju električne energije. Rizik od nesreća u nuklearnim elektranama je nizak i opada. Posljedice nesreće ili terorističkog napada minimalne su u usporedbi s ostalim općeprihvaćenim rizicima.

Temeljno načelo rada nuklearne elektrane u svijetu je da je operator odgovoran za sigurnost. Nacionalni regulator odgovoran je za osiguravanje sigurnog rukovanja pogonima vlasnika licence i za odobrenje dizajna. Drugi važan koncept je da je misija regulatora zaštititi ljude i okoliš. Ovjera dizajna reaktora također je odgovornost nacionalnih regulatora. Među njima postoji međunarodna suradnja u različitom stupnju, a postoji niz skupova mehaničkih kodeksa i standarda koji se odnose na kvalitetu i sigurnost. S novim dizajnom reaktora uspostavljenim na međunarodnoj osnovi od 1990-ih i industrija i regulatori traže veću standardizaciju dizajna i također usklađivanje propisa. Uloga Radne skupine Svjetske nuklearne asocijacije u vrednovanju i licenciranju dizajna reaktora (CORDEL) i Multinacionalnog programa ocjenjivanja dizajna (MDEP) OECD-ove Agencije za nuklearnu energiju opisani su na informativnoj stranici o suradnji u nuklearnoj energiji. Izvještaj NEA iz 2010. godine naglasio je da se teoretski izračunata frekvencija za veliko oslobađanje radioaktivnosti od teške nesreće nuklearne elektrane smanjila za faktor 1600 između ranih reaktora I. generacije kako su izvorno izgrađeni i elektrana III. danas.

Da bi se postigla optimalna sigurnost, nuklearne elektrane u svijetu rade koristeći pristup "obrane u dubini", s više sigurnosnih sustava koji nadopunjuju prirodne značajke jezgre reaktora. Ključni aspekti pristupa su visokokvalitetni dizajn i konstrukcija, ugradnju opreme za sprečavanje operativnih smetnja ili ljudske pogreške, sveobuhvatan nadzor i redovita ispitivanja radi otkrivanja kvarova na opremi ili greškama operatera, raznoliki sustavi za kontrolu oštećenja i sprečavanje radioaktivnih ispuštanja i odredba koja ograničava učinke ozbiljne štete od nuklearnog goriva na

samo postrojenje. Mogu se sažeti kao: prevencija, nadzor i djelovanje (radi ublažavanja posljedica kvarova.)

Sigurnosne odredbe uključuju niz fizičkih prepreka između jezgre radioaktivnog reaktora i okoliša, pružanje više sigurnosnih sustava, svaki s sigurnosnom kopijom i dizajnom da udovolji ljudskim pogreškama. Kao i fizički aspekti sigurnosti, postoje i institucionalni aspekti koji nisu manje važni.

Prepreke u tipičnom postrojenju su te da je gorivo u obliku čvrstih keramičkih (UO2) peleta, a radioaktivni proizvodi cijepanja ostaju uglavnom vezani unutar tih peleta dok gorivo gori. Peleti su pakirani unutar zatvorenih cijevi od legure cirkonija i tvore šipke. Zatvoreni su u veliku čeličnu posudu pod tlakom sa stjenkama debljine do 30 cm - pripadajuće cijevi za primarno hlađenje vodom također su značajne. Sve je zatvoreno unutar robusne armiranobetonske konstrukcije sa zidovima debljine najmanje jedan metar, što znači tri značajne prepreke oko goriva, koje je samo po sebi stabilno do vrlo visokih temperatura.

Glavne sigurnosne značajke većine reaktora su svojstvene - negativni koeficijent temperature i negativni koeficijent praznine. Drugo znači da ako se u rashladnoj vodi stvorila para, dolazi do smanjenja umjerenog učinka, tako da manje neutrona može prouzročiti fisiju, a reakcija se automatski usporava.

8.2 Klasifikacija nuklearnih incidenata

Međunarodnu ljestvicu nuklearnih događaja (INES) razvili su IAEA i OECD 1990. godine kako bi komunicirali i standardizirali izvještavanje javnosti o nuklearnim incidentima ili nesrećama. Ljestvica se kreće od nule - događaji bez sigurnosnog značaja do 7 za "veliku nesreću" poput Černobila [3]. TMI je ocijenio ocjenom 5 kao "nesreću s rizicima izvan lokacije", iako nikome nije naštetila, a "nesreća uglavnom na instalaciji" razine 4 dogodila se u Francuskoj 1980. godine. Još jedna nesreća ocijenjena na razini 4 dogodila se u pogonu za preradu goriva u Japanu u rujnu 1999. Ostale nesreće dogodile su se u vojnim pogonima. Ispod se nalazi tablični prikaz razina sigurnosti.

Tablica 8.1 Prikaz klasifikacije razina sigurnosti [5]

Razina	Utjecaj na okolinu	Utjecaj na elektranu	Degradacija dubinske obrane	Primjer
7 - VELIKA NESREĆA	Veliki utjecaj na zdravlje I okoliš			Černobil, Ukrajina, 1986, Fukushima Daiichi 1 - 3, 2011.
6 - OZBILJNA NESREĆA	Potpuna provedba lokalnih hitnih planova			Mayak kod Ozerska, Rusija, 1957.
5 - NESREĆA S POSLJEDICAMA VAN LOKACIJE	Djelomična provedba lokalnih hitnih planova	Teška oštećenja jezgre reaktora ili radioloških barijera		Three Mile Island, Sjedinjene Američke Države, 1979.
4 - NESREĆA KOD INSTALACIJE, S LOKALNIM POSLJEDICAMA	Djelomična provedba lokalnih hitnih planova	Značajna oštećenja jezgre reaktora ili radioloških barijera; smrtni slučaj radnika		Saint - Laurent A1, Francuska, 1969.
3 - OZBILJAN INCIDENT	Minimalna provedba lokalnih hitnih planova	Glavna onečišćenja; Utjecaj na zdravlje radnika	U blizini nesreće: Odredbe o gubitku obrane u dubini - nisu preostali sigurnosni slojevi	Vandellos, Španjolska, 1989., Davis - Besse, Sjedinjene Američke Države, 2002., Paks, Mađarska, 2003.
2 - INCIDENT	/	Značajno širenje onečišćenja; Utjecaj na zdravlje radnika	Incidenti sa značajnim propustima u sigurnosnim odredbama	
1 - ANOMALIJA	/	/		Anomalija izvan odobrenog režima rada
0 - ODSTUPANJE	/	/	/	

9. Trenutno stanje nuklearne energije u elektroenergetici

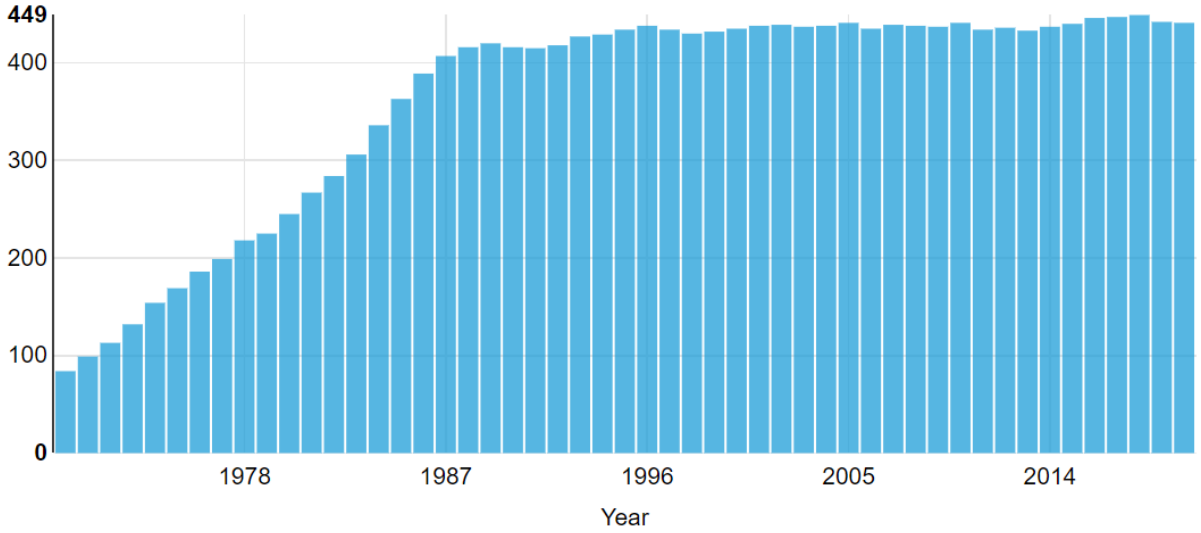
9.1 Trenutno stanje nuklearnih elektrana

Prve komercijalne nuklearne elektrane započele su s radom 1950-ih. Nuklearna energija sada osigurava oko 10% svjetske električne energije iz oko 445 reaktora. Nuklearna energija je drugi najveći svjetski izvor energije s niskim udjelom ugljika (29% od ukupnog broja u 2018.). Preko 50 zemalja koristi nuklearnu energiju u oko 220 istraživačkih reaktora. Uz istraživanja, ti se reaktori koriste za proizvodnju medicinskih i industrijskih izotopa, kao i za obuku.

Nuklearne elektrane s lipnjem 2021. Godine imaju sveukupno više od 18 000 godina reaktorskog iskustva, a nuklearne elektrane rade u 32 zemlje širom svijeta. Zapravo, putem regionalnih prijenosnih mreža, mnogo više zemalja djelomično ovisi o nuklearnoj energiji; Na primjer, Italija i Danska dobivaju gotovo 10% svoje električne energije iz nuklearne energije iz uvoza [11].

Primjene nuklearne tehnologije šire se i izvan pružanja energije s niskim udjelom ugljika. Pomaže u kontroli širenja bolesti, pomaže liječnicima u njihovoj dijagnozi i liječenju pacijenata te daje snage našim najambicioznijim misijama u istraživanju svemira. Različite upotrebe nuklearne tehnologije postavljaju u središte svjetskih napora za postizanje održivog razvoja.

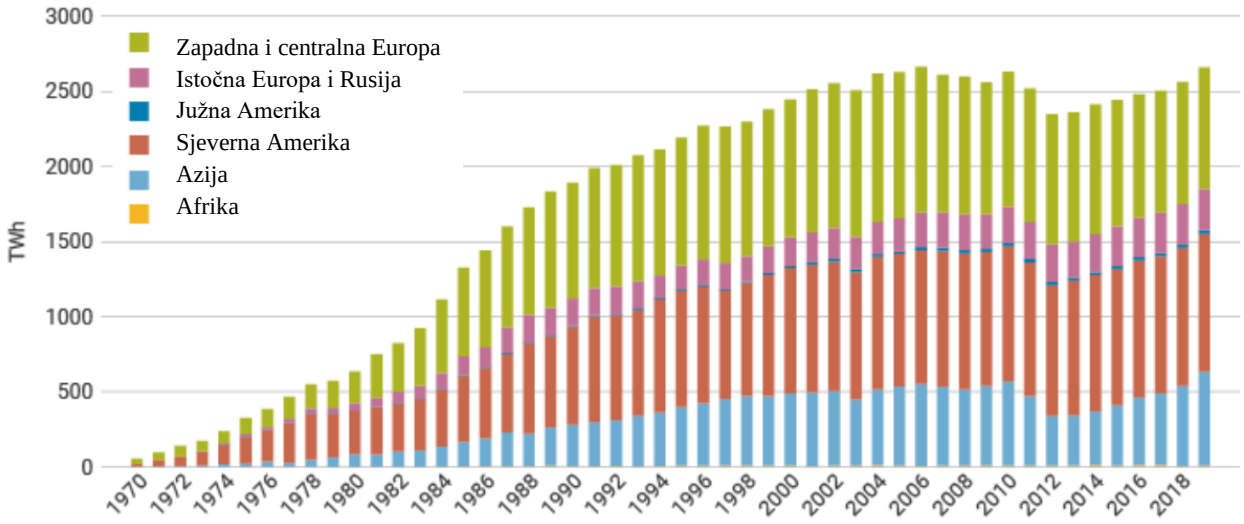
Kao što je vidljivo iz grafa dolje, broj operabilnih nuklearnih reaktora diljem svijeta raste iz godine u godinu. Otprilike 10% svjetske električne energije generira oko 445 nuklearnih reaktora. U izgradnji je još oko 50 reaktora, što odgovara približno 15% postojećih kapaciteta. 2020. godine nuklearke su isporučile 2553 TWh električne energije, u odnosu na 2657 TWh 2019. Prije 2020. proizvodnja električne energije iz nuklearne energije povećavala se sedam uzastopnih godina. Na grafu ispod je prikazan porast količine nuklearnih elektrana izgrađenih na svijetu



Slika 9.1 Grafički prikaz količine nuklearnih elektrana na svijetu [11]

9.2 Trenutno stanje proizvodnje energije

Trinaest je zemalja 2020. proizvelo najmanje četvrtinu električne energije iz nuklearne energije. Francuska otprilike tri četvrtine električne energije dobiva iz nuklearne energije, Slovačka i Ukrajina više od polovice dobivaju iz nuklearne energije, dok Mađarska, Belgija, Slovenija, Bugarska, Finska i Češka dobivaju jednu trećinu ili više. Južna Koreja obično više od 30% električne energije dobiva iz nuklearne energije, dok je u SAD-u, Velikoj Britaniji, Španjolskoj, Rumunjskoj i Rusiji otprilike petina električne energije iz nuklearne energije [11]. Japan se navikao oslanjati na nuklearnu energiju više od jedne četvrtine svoje električne energije i očekuje se da će se vratiti negdje blizu te razine. U grafu dolje detaljno je vidljivo u koljem dijelu svijeta se proizvodi određena količina energije.



Slika 9.2 Prikaz proizvodnje nuklearne energije po dijelu svijeta [11]

Uz komercijalne nuklearne elektrane, u oko 50 zemalja radi oko 220 istraživačkih reaktora, a još ih je u izgradnji. Osim što se koriste za istraživanje i osposobljavanje, mnogi od ovih reaktora proizvode medicinske i industrijske izotope. Korištenje reaktora za pomorski pogon uglavnom je ograničeno na glavne mornarice, gdje je igralo važnu ulogu pet desetljeća, pružajući snagu podmornicama i brodovima. velike površinske posude. Preko 160 brodova, uglavnom podmornica, pokreće oko 200 nuklearnih reaktora, a preko 13 000 reaktorskih godina steklo je iskustvo s morskim reaktorima. Rusija i SAD ukinule su mnoge svoje nuklearne podmornice iz doba hladnog rata. Rusija također upravlja flotom velikih ledolomaca na nuklearni pogon, a ima ih još u izgradnji. Također je povezala plutajuću nuklearku s dva reaktora snage 32 MWe na mrežu u udaljenom arktičkom području Pevek. Reaktori su prilagođeni onima koji napajaju ledolomce.

10. ZAKLJUČAK

U ovom radu obrađena je tema nuklearne energije i primjena takve vrste energije za proizvodnju električne energije. Sustav nuklearnih elektrana radi na principu sličnom termoelektranama. Nuklearne elektrane zagrijavaju vodu da bi se proizvela para. U nuklearnoj fisiji atomi se razdvajaju da bi stvorili manje atome, oslobađajući energiju. Cijepljenje se odvija unutar reaktora nuklearne elektrane. U središtu samog reaktora nalazi se jezgra koja sadrži uranovo gorivo. Uranovo gorivo formira se u keramičke kuglice. Svaka takva keramička kuglica proizvodi jednaku količinu energije kao sto pedeset litara nafte. Takvi energetski peleti složeni su od početka do kraja u metalne šipke goriva. Snop gorivih šipki, naziva se sklopom za gorivo. Jezgra reaktora sadrži mnoštvo takvih goriva.

Upoznavanjem načinom rada nuklearnih elektrana, sa kakvim vrstama goriva nuklearna energija konkurira, kakva se pažnja obraća na sigurnost nuklearne elektrane i što se može dogoditi ako se takva sigurnost ne provodi kako treba, središnji je dio ovog završnog rada. Zatim je razmatran ekonomski aspekt nuklearne energije, usporedba nuklearne i elektrane na prirodan plin za vrijeme njihovog planiranja, izgradnje i puštanja u pogon, također i rad elektrane gledano prema budućnosti. Putem analize troškova i prihoda, vanjskih čimbenika koji utječu na primjena nuklearne elektrane, bolja i stabilnija opcija za dugogodišnji radni vijek.

Razmatrajući razne tipove izvedbi nuklearnih elektrana, kako one rade i na koji način, dani su opisi i slike za sve konstrukcije. Prikazane su prednosti i mane svakog tipa nuklearnih elektrana, dizajn i način rada. Također je bilo prikazano i zašto se PWR nuklearna elektrana koristi najviše, i kakav je pogled u budućnost za unapređenje i poboljšanje navedenih tipova elektrana.

Cilj ovog rada je pokazati da je nuklearna energija pouzdan i dobar izvor proizvodnje električne energije. Uz daljnje napredovanje tehnologija, obnovu zastarjelih nuklearnih elektrana i provođenje aktualizacije, novim načinima integracije nuklearnih reaktora putem manjih, kompaktniji modela koji se mogu koristiti u izvanrednim situacijama, spajanja nuklearnih elektrana sa obnovljivim tipovima kao što su sunčeva energija ili energija vjetra, nuklearna energija i nuklearne elektrane ostaju važan faktor za proizvodnju čiste energije.

11. Literatura

[1] Dr. Vladimir Knapp: Novi izvori energije I. dio, Zagreb, 1993.

[2] Prof. dr. sc. Danilo Feretić: Uvod u nuklearnu energetiku, 2. dopunjeno izdanje, Zagreb, 2010.

[3] Jim T. Smith, Nicholas A. Beresford: Chernobyl – Catastrophe and Consequences, Engleska, 2005.

[4] K. Anantharaman, V. Shivakumar, D. Saha: Journal of nuclear materials: Utilisation of thorium in reactors, Sjedinjene Američke Države, 15.12.2008

[5] https://www.engineering.com/story/whats-the-death-toll-of-nuclear-vs-other-energy-source, dostupno 25. 02.2021.

[6] https://www.eia.gov/electricity/generatorcosts/, dostupno 10.08.2020

[7] http://css.umich.edu/sites/default/files/Nuclear%20Energy_CSS11-15_e2020.pdf, dostupno 09.2020.

[8] https://online.ucpress.edu/cse/article-abstract/3/1/1/108808/Closing-Diablo-Canyon-Nuclear-Power-Plant-2009?redirectedFrom=fulltext, dostupno 12.2019.

[9] https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx, dostupno 02.08.2020.

[10] https://www.electricitymap.org/zone/GB?solar=false&remote=true&wind=false, dostupno 12.11.2020.

[11] https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx, dostupno 26.07.2020.

12. Popis slika

Slika 1 Princip rada nuklearne elektrane ..... **Error! Bookmark not defined.**
Slika 2 Meganuera (lijevo) i Pulmonoscorpius (desno) ..... **Error! Bookmark not defined.**
Slika 3 Stopa smrtnosti određenog načina proizvodnje energije 2
Slika 4 Stopa smrtnosti po 1000TWh proizvedene energije 2
Slika 5 Prikaz mikro reaktora 2
Slika 6 Zarada pri proizvodnji jednog MWh po državama i po načinu proizvodnje . **Error! Bookmark not defined.**
Slika 7 Atomska struktura torija 2
Slika 8 Uran – 235 (lijevo) i Uran – 238 (desno) 2
Slika 9 Torij (Theodore W. Gray, 2005.) 2
Slika 10 Prikaz reaktora koji radi na sistem hlađenja putem tekuće soli ..... **Error! Bookmark not defined.**

Sveučilište
Sjever

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Domagoj Kisić (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Kibernetička energija u elektroenergetici (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Domagoj Kisić
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost i visokom obrazovanju sveučilišni/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Domagoj Kisić (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Kibernetička energija u elektroenergetici (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)
Domagoj Kisić
(vlastoručni potpis)