

UTJECAJ NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO NA OKOLIŠ

Vešligaj, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:624183>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-02**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu

Odjel sigurnosti i zaštite

Stručni prijediplomski studij sigurnosti i zaštite

Luka Vešligaj

UTJECAJ NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO NA OKOLIŠ

Završni rad

Karlovac, 2024.

Karlovac University of Applied Sciences

Safety and Protection Department

Professional undergraduate study of Safety and Protection

Luka Vešligaj

ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE KRSKO NUCLEAR POWER PLANT

Final paper

Karlovac, 2024.

Veleučilište u Karlovcu

Odjel sigurnosti i zaštite

Stručni prijediplomski studij sigurnosti i zaštite

Luka Vešligaj

UTJECAJ NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO NA OKOLIŠ

Završni rad

Mentor: dr.sc. Jasna Halambek, v.pred.

Karovac, 2024.



**VELEUČILIŠTE
U KARLOVCU**
Karlovac University
of Applied Sciences

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Trg J.J.Strossmayera 9
HR-47000, Karlovac, Croatia
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni/specijalistički studij: Stručni prijediplomski studij sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, 2024.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: LUKA VEŠLIGAJ

Matični broj:

Naslov: **UTJECAJ NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO NA OKOLIŠ**

Opis zadatka:

Nuklearna elektrana Krško je elektrana koja koristi uranijevu rudu kao gorivu u svrhu proizvodnje električne energije. Uranijeva ruda je vrlo štetna za okoliš i pučanstvo i kao takva treba se adekvatno zbrinuti nakon svoje uporabe. Glavni cilj ovog završnog rada je proučiti rad nuklearne elektrane Krško, te definirati pojam zaštite i sigurnosti nuklearnih elektrana. U radu će se također dati posebni osvrt na radioaktivni otpad koji pri tome nastaje i mogućnosti njegovog skladištenja.

Zadatak zadan:

10/2023.

Rok predaje rada:

06/2024.

Predviđeni datum obrane:

07/2024.

Mentor:

dr.sc. Jasna Halambek, v.pred.

Predsjednik Ispitnog povjerenstva

Lidija Jakšić, mag.ing.cheming., pred

Predgovor

Završni rad „Utjecaj nuklearne elektrane Krško na okoliš“ sam izradio uz pomoć internetskih izvora, stručnih knjiga i radova, te znanjem koje sam stekao na Veleučilištu u Karlovcu. Htio bih se zahvaliti mentorici dr.sc Jasni Halambek na dostupnosti pri izradu rada, te stručnim savjetima i pomoći kako bi se ovaj rad izradio kvalitetno. Zahvala ide i svim profesorima i djelatnicima Veleučilišta u Karlovcu, koji su pridnjeli tome da završim svoje školovanje.

Luka Vešligaj

Sažetak

Nuklearna elektrana Krško je elektrana koja koristi uranijevu rudu kao gorivu u svrhu proizvodnje električne energije. Uranijeva ruda je vrlo štetna za okoliš i pučanstvo i kao takva treba se adekvatno zbrinuti nakon svoje uporabe. Osim uranijeve rude i ostatka iste nakon uporabe, u procesu proizvodne električne energije nastaje i ostali nepovoljni produkti, koji su radioaktivni, odnosno nastaje radioaktivni otpad. Radioaktivni otpad je vrlo opasan i štetan za cijelu planetu Zemlju kao takav se mora vrlo temeljito i adekvatno zbrinuti. Zato su izgrađena odlagališta otpada, gdje se svi radioaktivni materijali koji se ne koriste u svrhu proizvodnje električne energije pohranjuju. Važno je da se odlagališta radioaktivnog otpada dovoljno udaljena od bilo kakvog naseljenog mjesta, i dovoljno kvalitetno izgrađena kako ne bi došlo do ispuštanja negativnih elemenata u biosferu.

Ključne riječi: Nuklearna elektrana Krško, nuklearna elektrana, radioaktivni otpad.

Summary

The Krško nuclear power plant is a power plant that uses uranium ore as fuel for the purpose of producing electricity. Uranium ore is very harmful to the environment and the population and as such should be properly disposed of after use. In addition to uranium ore and the rest of it after use, in the process of producing electricity, other unfavorable products are also created, which are radioactive, that is, radioactive waste is created. Radioactive waste is very dangerous and harmful to the entire planet Earth, as such it must be disposed of very thoroughly and adequately. That is why waste disposal sites were built, where all radioactive materials that are not used for the purpose of electricity production are stored. It is important that radioactive waste disposal sites are located far enough from any inhabited place, and built with sufficient quality, so that there is no release of negative elements into the biosphere.

Keywords: Krško nuclear power plant, nuclear power plant, radioactive waste.

Sadržaj

Zadatak završnog rada	I
Predgovor	II
Sažetak.....	III
Summary.....	III
1.Uvod	1
1.1 Predmet i cilj rada.....	1
2.Nuklearna energija.....	2
2.1 Povijest nuklearne energije.....	2
2.2 Nuklearne elektrane	3
2.3 Dijelovi nuklearne elektrane.....	4
2.4 Tipovi nuklearnih elektrana.....	5
3.Povijest nuklearne elektrane Krško	7
3.1 Način rada nuklearne elektrane Krško.....	13
3.2 Primarni krug	14
3.3 Sekundarni krug.....	15
3.4 Tercijarni krug	16
4.Sigurnost nuklearne elektrane Krško	17
4.1 Sigurnost nuklearnih elektrana	19
4.1.1 Osnovne mjere sigurnosti	19
4.2 Sigurnost nuklearnih elektrana kao industrije proizvodnje električne energije	22
5. Radioaktivnost	24
5.1 Kako radioaktivnost utječe na ljudski organizam.....	24
5.1.1 Vrste zračenja	24
5.1.2 Doza zračenja	25
5.1.3 Izloženost ionizirajućem zračenju	26

5.2 Radioaktivni otpad.....	27
5.2.1 Podjela i klasifikacija radioaktivnog otpada.....	27
5.2.2 Radioaktivni otpad NE Krško	29
5.2.3 Skladištenje NSRAO-a NE Krško.....	29
5.2.4 Upravljanje radioaktivnim otpadom u RH	30
5.2.5 Utjecaj odlagališta radioaktivnog otpada na okoliš.....	31
5.3 Projekt gradnje odlagališta RAO.....	32
5.3.1 Odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada.....	32
5.3.2 Odlagalište visokoaktivnog otpada.....	34
6.Zaključak	35
7. Popis literature.....	36
8. Popis simbola i kratica.....	39
9. Prilozi	40
9.1 Popis slika.....	40
9.2 Popis tablica.....	40

1.Uvod

Nuklearna elektrana Krško (NEK) nalazi se u Sloveniji (slika 1.). Smještena je 3.5 km od grada Krško po kojoj nosi ime, te oko 60 km od Zagreba. NEK je elektrana s lakovodnm tlačnim reaktorom, te godišnje proizvede oko 1 800 000 MWh električne energije. Njezina izgradnja je trajala 8 godina i to je prva nuklearna elektrana zapadnog tipa koja se izgradila u socijalističkoj državi. Početak gradnje je počeo u veljači 1975. godine, a završetak i puštanje u komercijalni pogon je bio u siječnju 1983. godine. Republika Hrvatska i Republika Slovenija suvlasnice su nuklearne elektrane, svaka s udjelom od 50% te svaka dobiva 50% proizvedene električne energije [1].



Slika 1 Nuklearna elektrana krško [2].

1.1 Predmet i cilj rada

Glavni cilj ovog završnog rada je proučiti rad nuklearne elektrane Krško, te definirati pojam zaštite i sigurnosti nuklearnih elektrana. U radu će se također dati posebni osvrt na radioaktivni otpad koji pri tome nastaje i mogućnosti njegovog skladištenja.

2. Nuklearna energija

Nuklearna energija je energija čestica pohranjena u jezgri atoma. Nuklearnim reakcijama dolazi do promjene stanja atomske jezgre, što znači da se broj ili vrsta čestica u jezgri mijenja. Ovisno o vrsti nuklearne reakcije, može doći do oslobađanja nuklearne energije, koja se može iskoristiti za proizvodnju električne energije u nuklearnim elektranama. Nuklearna energija je proces nuklearne fisije, tj. to je proces gdje se jezgra atoma cijepa ili razdvaja na dijelove, te se pri tom razdvajanju stvara velika energija kao i toplina. Cijeli taj proces se događa u reaktoru koji je ispunjen vodom. Kada dođe do procesa fisije dolazi do zagrijavanja vode, voda počinje ključati zbog visoke temperature i isparava, ta para pokreće lopatice na turbini i počinje se proizvoditi električna energija. Nuklearna energija je jedna od najčišćijih i isplativijih izvora za proizvodnju električne energije.[3]

2.1 Povijest nuklearne energije

Razvoj nuklearne energije možemo podijeliti na četiri razdoblja (generacije):

- Period od 1895. godine do 1938. godine obilježen je nizom znanstvenih otkrića vezanih uz radioaktivno zračenje, atomsku strukturu i promjene atomske strukture te nuklearne reakcije,
- Period od 1939. godine do 1945. godine, koji je obilježen intenzivnim istraživanjima vezanima uz razvoj atomske bombe,
- U periodu od 1945. godine do 1956. godine istraživanja vezana uz nuklearnu energiju prvenstveno su usmjerena k iskorištenju nuklearne energije iz kontrolirane fisijske reakcije za pogon plovila i proizvodnju električne energije,
- Od 1956. godine primarni je cilj nuklearnih istraživanja tehnološki razvoj pouzdanih nuklearnih reaktora.[4]

2.2 Nuklearne elektrane

Nuklearna elektrana je industrijsko postrojenje koje proizvodi električnu energiju iz nuklearne energije, koja se oslobađa u obliku toplinske energije kroz reakciju lanca nuklearne fisije unutar posude nuklearnog reaktora.

Glavna komponenta nuklearne elektrane je nuklearni reaktor koji sadrži nuklearno gorivo (obično uran) i ima sustave koji omogućuju pokretanje, održavanje i zaustavljanje nuklearne reakcije na kontroliran način.

Način rada nuklearne elektrane sličan je konvencionalnoj termoelektrani, gdje se toplinska energija dobiva izgaranjem fosilnih goriva. Međutim, u nuklearnom reaktoru ta se energija dobiva reakcijama nuklearnog fisijskog lanca atoma urana iz nuklearnog goriva.

Oslobodena toplinska energija koristi se za grijanje vode pod visokim tlakom i visokom temperaturom dok ne postane para. Ova para okreće turbinu spojenu na generator koja pretvara mehaničku energiju turbine vrtnjom u električnu energiju.[5]

2.3 Dijelovi nuklearne elektrane

- a) Nuklearni reaktor - Reaktor je ključna komponenta elektrane jer sadrži gorivo i njegovu reakciju na nuklearni lanac, zajedno sa svim proizvodima nuklearnog otpada. Reaktor je izvor topline za elektranu, baš kao što je i kotao za elektranu na ugljen. Uran je dominantno nuklearno gorivo koje se koristi u nuklearnim reaktorima, a njegove fisijske reakcije su ono što proizvodi toplinu unutar reaktora. Ta se toplina zatim prenosi u rashladno sredstvo reaktora, koje osigurava toplinu drugim dijelovima nuklearne elektrane.[6]
- b) Moderator - Materijal u jezgri koji usporava neutrone koji se oslobađaju iz fisije tako da uzrokuju više fisije. Obično je to voda, ali može biti teška voda ili grafit.
- c) Kontrolne šipke - Izrađuju se od materijala koji apsorbira neutrone, kao što su kadmij, hafnij ili bor, te se umeću ili povlače iz jezgre kako bi se kontrolirala brzina reakcije ili kako bi se ona zaustavila.
- d) Rashladna sredstva - Tekućina koja kruži kroz jezgru kako bi prenijela toplinu iz nje. U reaktorima lakih voda moderator vode djeluje i kao primarno rashladno sredstvo.
- e) Tlačne posude - Obično robustan čelični spremnik koji sadrži jezgru reaktora i moderator/rashladno sredstvo, ali to može biti niz cijevi koje drže gorivo i prenose rashladno sredstvo kroz okolni moderator.
- f) Generator pare - Dio rashladnog sustava tlačnih vodenih reaktora (PWR & PHWR) gdje se visokotlačno primarno rashladno sredstvo koje donosi toplinu iz reaktora koristi za proizvodnju pare za turbinu, u sekundarnom krugu. [7]
- g) Rashladni toranj - Uređaj koji omogućuje postizanje atmosfere, koja djeluje kao hladni pogon, dio je preostale topline proizvedene tijekom proizvodnje električne energije. Koristi se za hlađenje vode koja cirkulira unutar kondenzora i dio je pomoćnog rashladnog kruga stanice.
- h) Kondenzator- Toplinski prekidač koji se sastoji od skupa cijevi u kojima cirkulira rashladna voda. Vodena para koja ulazi u kondenzator iz turbine se ukapljuje. Ova konverzija stvara prazninu koja poboljšava performanse turbine.[8]

2.4 Tipovi nuklearnih elektrana

Specifičnost nuklearnih elektrana s obzirom na klasične termoelektrane je u iskorištavanju reaktora kao izvora toplinske energije. Zbog toga kod nuklearnih elektrana razlikujemo primarno postrojenje, koje se odnosi na reaktor, elemente primarnog kruga i na pomoćne sustave reaktora, te sekundarno postrojenje, kojemu pripada turbinsko i električno postrojenje elektrane.

Osnovni materijali po kojima se nuklearni reaktori razlikuju jesu:

- Nuklearno gorivo
- Moderator
- Rashladni fluid.

Što se tiče nuklearnog goriva to je najčešće prirodni ili obogaćeni uran, metalni uran ili oksid urana, kod moderatora bi bila obična voda, teška voda ili grafit, a kod rashladnog fluida se koristi medij poput: obične vode, teške vode, ugljik-dioksida, helija ili tekućeg metala.

Tipovi nuklearnih elektrana se razlikuju najčešće zbog različitih izvedbi nuklearnih reaktora i njihovim sustavom hlađenja, pogona ili čak goriva koje se koristi u njihovoj primjeni za rad nuklearne elektrane. [9]

Vrste nuklearnih reaktora;

- Reaktor hlađen i moderiran teškom vodom (HWR)
- Tlakovodni reaktor (PWR)
- Reaktor u kojemu voda vrije (BWR)
- Reaktor moderiran grafitom i hlađen ugljikovim dioksidom, plinom hlađen reaktor (GCR)
- Druga generacija grafitnih reaktora (AGR)
- Reaktor moderiran grafitom i hlađen kipućom vodom (RBMK)
- Visokotemperaturni reaktor (HTGR)
- Brzi oplodni reaktor (FBR)[9].

Rasprostranjenost pojedinih vrsta nuklearnih reaktora u svijetu 2024. godine prikazana je u Tablici 1.

Tablica 1 Rasprostranjenost nuklearnih reaktora u svijetu u 2024. godini [10].

Tip reaktora	Reaktori u pogonu	Reaktori u gradnji
BWR	41	2
FBR	2	4
GCR	8	-
HTGR	1	-
LWGR	11	-
PHWR	47	2
PWR	305	49

3. Povijest nuklearne elektrane Krško

1964. godine - Početak istraživanja na Krškom polju, kada je to područje postalo moguća lokacija za nuklearnu elektranu (Slika 2.).



Slika 2 Krško polje[11]

1974. godine u prosincu postavljen kamen temeljac za prvu nuklearnu elektranu u tadašnjoj Jugoslaviji (slika 3).



Slika 3 Postavljanje kamena temeljca[11]

1975. godine u veljači-Početak iskopa i građevinskih radova na gradilištu (slika 4).



Slika 4 Početak građevinskih radova[11]

1976. godine u lipnju- U riječku luku stiže prva oprema za nuklearni dio elektrane (slika 5).



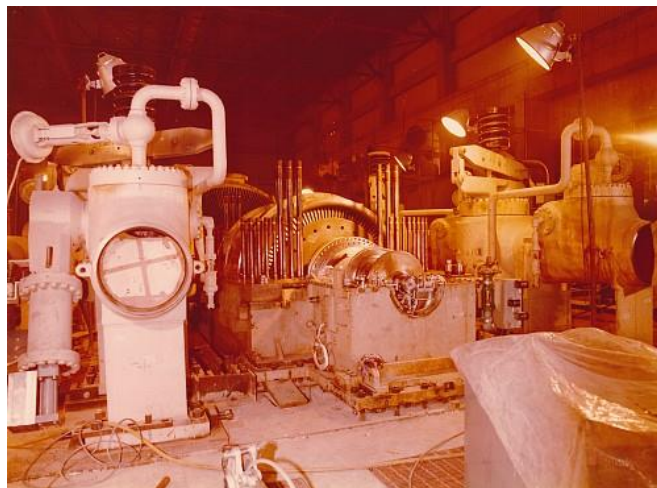
Slika 5 Oprema za nuklearni dio elektrane[11]

1976.god u listopadu je Završena montaža reaktorskog dijela (slika 6).



Slika 6 Montaža reaktorskog dijela[11]

1977. godine u listopadu- Početak montaže turboagregata (slika 7).



Slika 7 Montaža turboagregata[11]

1978. godine u travnju-Ugrađena oba parogeneratora i reaktorska posuda (slika 8).



Slika 8 Ugradnja oba parogeneratora[11]

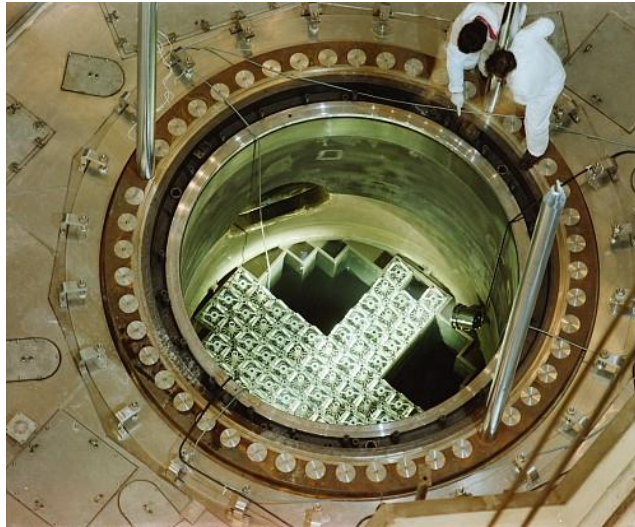
1979. godine u studenom- Završen najvažniji dio tlačnih ispitivanja

1980. godine u listopadu- Dobavljeno je gorivo (slika 9).



Slika 9 Dobava goriva[11]

1981. godine u svibnju -Početak prve faze pokusnog pogona - gorivo je uloženo u reaktorsku posudu i time elektrana postaje nuklearni objekt (slika 10).



Slika 10 Ubacivanje goriva u reaktorsku posudu[11]

1981. godine u rujnu -U reaktoru postignuta prva samoodržavajuća lančana reakcija.

1981. godine u listopadu -Generator sinkroniziran s mrežom, NEK daje prve kilovatsate električne energije u elektroenergetski sustav (slika 11).



Slika 11 Sinkroniziranje generatora s mrežom[11]

1982. godine -Početak vađenja uranijeve rude u rudniku Žirovski vrh za djelomično pokrivanje potreba NEK-a (slika 12).



Slika 12 Vađenje uranijeve rude[11]

1982. godine u veljači-Prvi put postignuto 100% snage elektrane.

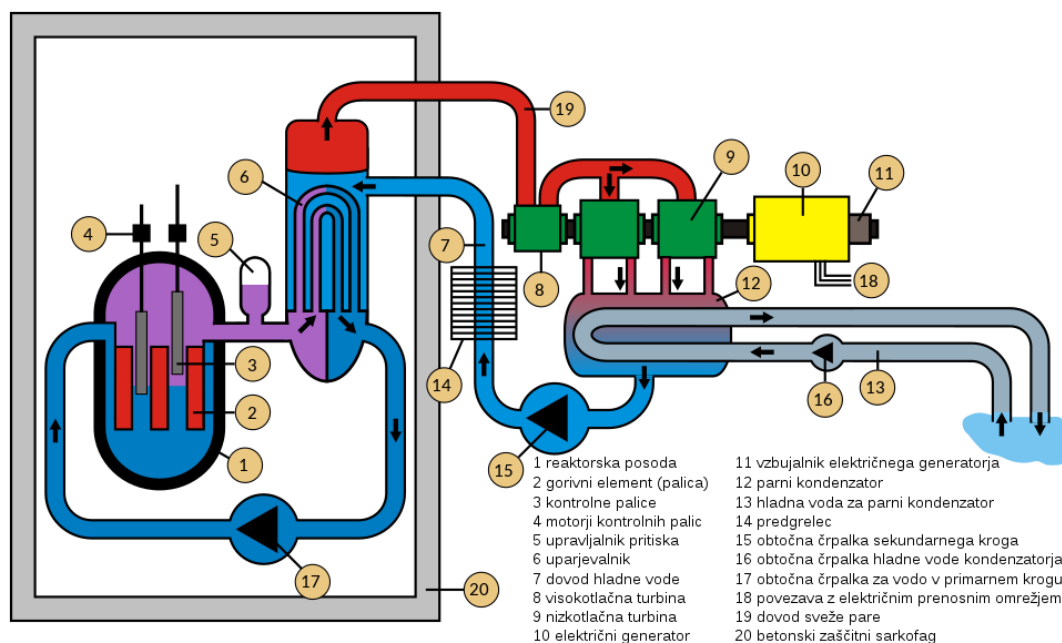
1982. godine u srpnju-Završena modifikacija sustava napajanja parogeneratora.

1982.godine u kolovozu-Početak pogona na punoj snazi.

1983. godine u siječnju- Početak komercijalnog pogona.

3.1 Način rada nuklearne elektrane Krško

Nuklearna elektrana Krško ima princip rada kao i klasična termoelektrana, njen izvor topline nisu fosilna goriva, već se toplina dobiva cijepanjem jezgre uranija u reaktoru. U zgradi reaktora nalazi se reaktorska posuda s gorivnim elementima, koji čine jezgru. Kroz reaktor struji pročišćena obična voda pod tlakom koja ima cilj odvesti toplinu u parogeneratore. U parogeneratorima nastaje para, koja dolazi do turbine i pogoni turbinu, turbina pogoni električni generator (slika 13.). Oprema reaktora nalazi se u reaktorskoj zgradi, koja se još naziva i zaštitnom zgradom. Za proces zamjene goriva potrebno je zaustaviti elektranu. Ciklus između dvije zamjene goriva nazivamo gorivnim ciklusom, koji u NEK-u traje 18 mjeseci. Nakon svakog ciklusa potrošeni materijal se zamjeni svježim materijalom. [11]



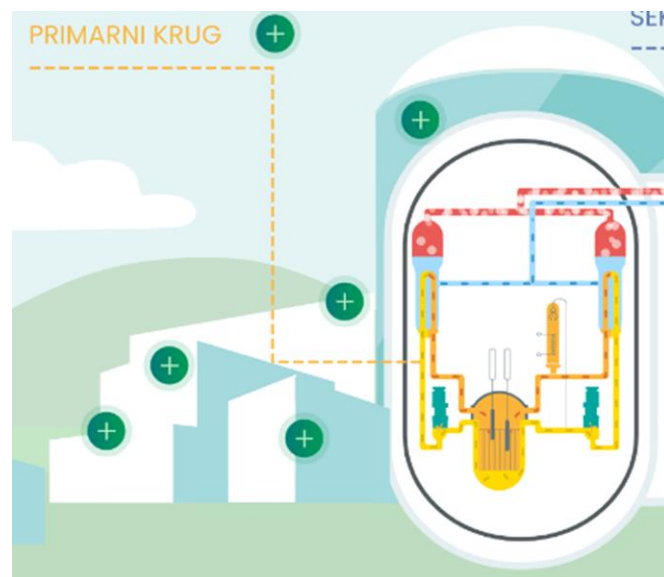
Slika 13 Shema NEK-a [12].

3.2 Primarni krug

Osnovna zadaća primarnog sustava NEK-a bi bila proizvodnja i prijenos topline iz reaktora u parogeneratore gdje se proizvodi para. Prosječna temperatura rashladne vode na punoj snazi reaktora iznosi 305°C, dok tlak iznosi 15,4 MPa.

Dijelovi primarnog sustava (slika 14.)

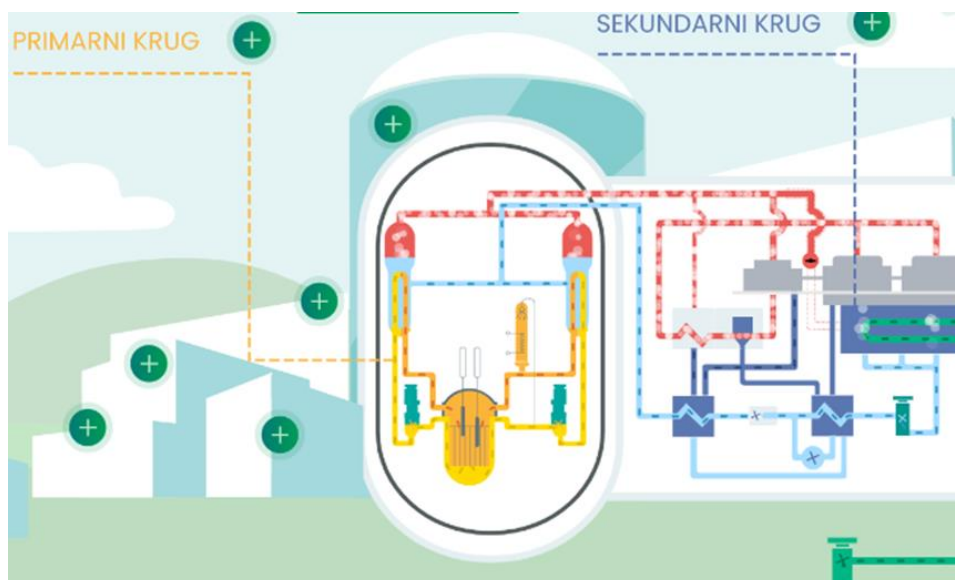
- Reaktor-tlačna posuda u kojoj se nalazi jezgra, te kroz nju teče rashladna voda, koja preuzima toplinu nastalu nuklearnom reakcijom u gorivu.
- Parogeneratori- toplinski izmjenjivači, gdje se toplina prenosi iz primarnog sustava u sekundarni sustav. Ta prenesena toplina stvara paru koja pogoni turbinu. Osim toga njihova dodatna zadaća je fizička granica koja sprječava prijenos radioaktivnih tvari na sekundarni sustav.
- Crpke rashladne vode- dodatno pritiskuju rashladnu vodu kroz reaktorsku jezgru, parogeneratore i cjevovode, dodatno osiguravaju stalan prijenos topline.
- Tlačnik hladnim tuševima- regulira tlak u primarnom sustavu. [11]



Slika 14 Shema primarnog kruga NEK[11]

3.3 Sekundarni krug

Parogeneratorske cijevi u sekundarnom sustavu su pokrivene vodom, zbog niskog tlaka vode, ta voda isparava. Zbog stalnog dovođenja napojne vode i odvođenjem pare tu se odvodi toplina iz rashladne vode tj. reaktora. Proizvedena para se vodi kroz cjevovod do visokotlačne i niskotlačne turbine, gdje se para širi i događa se mehanički rad odnosno pogoni se turbina. Nakon što je para obavila pogon u turbini dolazi do kondenzatora, u kojem se ta para vraća u tekuće stanje, te se zatim crpkom vraća kroz pregrijače u parogenerator (slika 15.) [11].

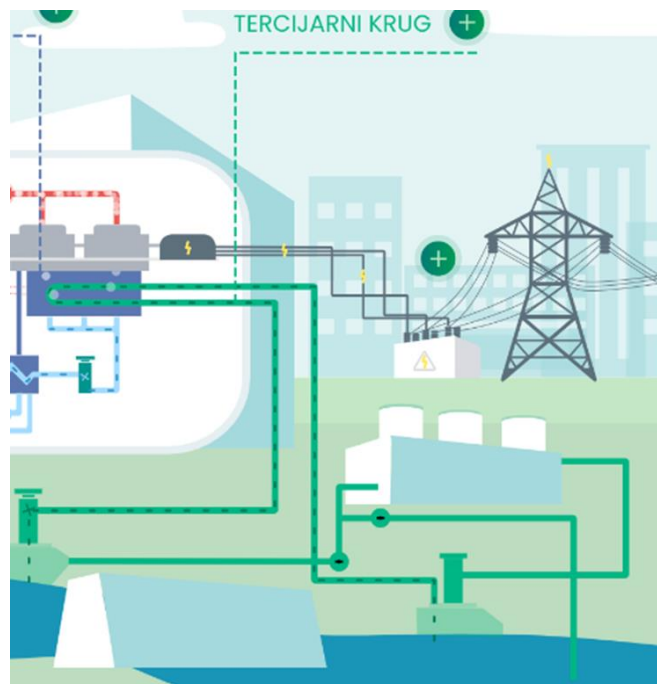


Slika 15 Shema sekundarnog kruga NEK[11]

3.4 Tercijarni krug

Komponente tercijarnog sustava čine: kondenzator, rashladne crpke, rashladni tornjevi i cjevovodi (slika16.)

Voda iz rijeke Save kada prolazi kroz kondenzator se zagrijava jer prima toplinu isparavanja vode. Ako bi došlo do zagrijavanja Save više od 3 stupnja celzijeva tada bi se uključili rashladni tornjevi s prisilnim hlađenjem. Kondenzator Nuklearne elektrane Krško ima hlađenje ograničeno s maksimalim porastom temperature rijeke Save od 3°C koja se ne smije prelaziti u 24-satnom prosjeku. [11]



Slika 16 Shema tercijarnog kruga[11]

4. Sigurnost nuklearne elektrane Krško

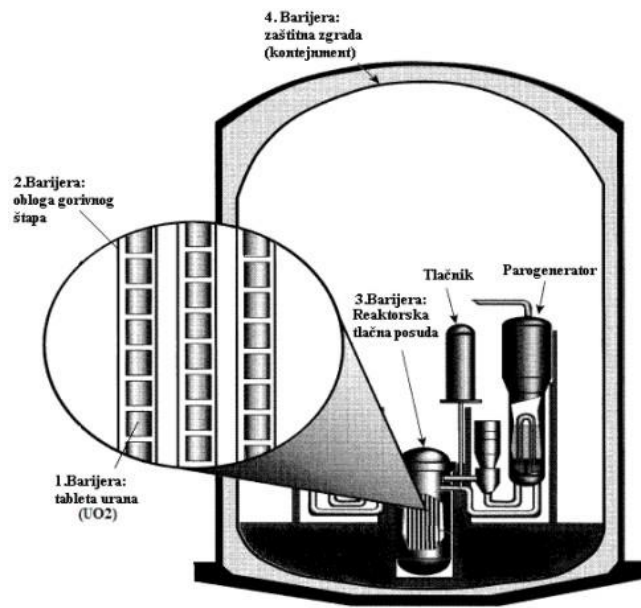
Pri izgradnji nuklearnih elektrana najvažniji je visoki standard projektiranja, izgradnje i pogon objekta, kako bi se držalo do nuklearne sigurnosti. Najvažnije je da su kvalitetno projektirani sigurnosni sustavi, koji u svim pogonskim stanjima kao i u slučaju kada dolazi do otkazivanja određene opreme, i dalje obavljaju svoju zadaću. Kod sigurnosnih sustava je najvažnija učinkovitost, a to se postiže podvajanjem i paralelnim djelovanjem. NEK je opremljena sa tlakovodnim reaktorom, koji ima fizikalne zakonitosti da se reaktor sam stabilizira ili zaustavi ako se neočekivano poveća temperatura ili snaga.

Sigurnost je važna za NEK, a samim time i stabilnost, zato su projektirane četiri sigurnosne pregrade (slika 17.). Glavni cilj pregradi je da se spriječi ispuštanje bilo kakve radioaktivne tvari u okoliš.

Dijelovi sigurnosnih pregradi:

- Prva pregrada- nuklearno gorivo, koje zadržava radioaktivne tvari u sebi.
- Druga pregrada- košuljica koja obavlja gorivne tablete i sprječava izlazak radioaktivnih plinova iz goriva.
- Treća pregrada- granica primarnog sustava, zadržava radioaktivnu vodu za hlađenje reaktora.
- Četvrta pregrada- zaštitna zgrada koja hermetički odvaja primarni sustav od okoline.

Glavna zadaća prve tri pregrade je da spriječe prelazak radioaktivnih tvari do sljedeće pregrade, a četvrta pregrada sprječava izlazak radioaktivnih tvari u okolinu. [11]



Slika 17 Koncept zaštite[13]

4.1 Sigurnost nuklearnih elektrana

Svakoj državi koja ima u vlasništvu nuklearnu elektranu glavna obveza je sigurnost vlastitih nuklearnih elektrana. Zbog toga je Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) osnovala skupinu stručnjaka da se bave problemom sigurnosti nuklearnih elektrana (INSAG). 1988. godine skupina INSAG izrađuje dokument Osnovna sigurnosna načela za nuklearne elektrane, kojeg se moraju pridržavati sve članice koje imaju u vlasništvu nuklearne elektrane, kako bi došlo do visokog sigurnosnog standarda. [13]

4.1.1 Osnovne mjere sigurnosti

Sigurnost je od najveće važnosti u nuklearnoj elektrani. Sadašnji propisi o nuklearnoj industriji poštuju se tijekom desetljeća zahvaljujući znanstvenim dostignućima i poukama iz manjih i većih incidenata. Kao rezultat tih propisa i stalnih poboljšanja, nuklearni incidenti sada su rijetki. [14]

Poznavanje i pridržavanje propisa ključno je za kontinuiranu sigurnost nuklearne energije. Ovdje je 10 područja regulacije na koja bi se nuklearne elektrane trebale usredotočiti:

- a) Stres test- Elektrane moraju proći niz „ispitivanja otpornosti na stres” ili procjene nuklearnog rizika i sigurnosti kako bi procijenile i ponovno procijenile sigurnost energetskih reaktora u slučaju prirodnih događaja (kao što su potresi, tsunamiji i poplave), upravljanja nesrećama (kao što su nesreće zrakoplova) ili gubitka sigurnosnih funkcija. Ti su testovi posljednji put bili prioriteta u EU-u nakon nuklearne nesreće u Fukushimi. Iako je posljednji krug velikih testiranja otpornosti na stres pokazao da su elektrane općenito bile u stanju izdržati ekstremne događaje. Kao i Nuklearna elektrana Krško koja je izdržala i prošla stres test.
- b) Kontinuirano poboljšanje – iako je općenito dobra praksa, stalno poboljšanje ključno je za održavanje visokih standarda nuklearne sigurnosti. Pravni zahtjevi u pogledu smanjenja rizika „u mjeri u kojoj je to razumno praktično” znače da je potrebno stalno poboljšavati standarde. Primjena naučenih lekcija iz iskustva, novih znanstvenih informacija te lokalnih i međunarodnih nuklearnih događanja ključna je za sigurnost u nuklearnoj industriji.[14]
- c) Mjerenje izloženosti zračenju - zaštita zdravlja radnika i stanovništva u središtu je mnogih državnih propisa oko elektrana. Naime, ublažavanjem ionizirajućeg zračenja u zraku i mjerenjem razina zračenja kojima su izloženi radnici, javnost i okolno okruženje.

Zajednica Euratoma u EU-u je utvrdila osnovne sigurnosne standarde za zaštitu radnika i građana od opasnosti ionizirajućeg zračenja.

- d) Sustavni sigurnosni pregledi - primarni cilj regulacije nuklearnih elektrana je da se ne pojave kvarovi, ali se moraju razmotriti sve mogućnosti. Ako se pojave kvarovi, moraju se uspješno kontrolirati. Ako ta zaštita ne uspije, moraju postojati sustavi za ograničavanje mogućih posljedica. Periodični pregledi sigurnosti na svim razinama znače ne samo da su uočeni potencijalni nedostaci prije nego što mogu postati problemi, već su i učinkovit način da se dobije cjelovit uvid u stvarnu sigurnost pogona i podrži operativno donošenje odluka. [14]
- e) Krizni planovi - sve nuklearne elektrane moraju moći dokazati da su definirale koje se hitne situacije mogu dogoditi i kakve mehanizme imaju za njihovo rješavanje. Ti planovi hitnih mjera trebali bi biti specifični za lokaciju i uključivati sva područja postrojenja. Posebno je važno da su zahtjevi za ocjenjivanje te donošenje i provedbu odluka apsolutno jasni. Ured za nuklearnu regulativu utvrđuje posebne odgovornosti kojih se nuklearna industrija mora pridržavati te obuhvaća aranžmane za postupke na licu mjesta i izvan njega.
- f) Vježbe za slučaj nužde – također je ključno da radnici u pogonu budu obučeni za planove za slučaj nužde. Inspektorat nuklearnih postrojenja zahtijeva da svi zaposlenici koji bi mogli biti uključeni u izvanredni događaj budu osposobljeni za upravljanje tim situacijama i da sudjeluju u redovitim vježbama. Nacionalni institut također posjećuje lokacije kako bi svjedočio demonstracijama tih vježbi i potvrdio njihovu zadovoljavajuću razinu.
- g) Vanjski stručni pregled – Osim sveobuhvatnog i sustavnog postupka procjene sigurnosti, vanjski stručni pregledi korisni su i ponekad potrebni. Neovisne organizacije poput Svjetske udruge nuklearnih operatera i Međunarodne agencije za atomsku energiju nude sveobuhvatne preglede sigurnosnih propisa i praksi.
- h) Sigurnost nuklearnih elektrana – osim protokola upravljanja nesrećama, potrebni su učinkoviti sigurnosni mehanizmi kako bi se spriječila krađa ili sabotaza te zaštitili osjetljivi podaci. Svaka tvornica mora imati odobreni plan zaštite. Ured za civilnu nuklearnu sigurnost dužan je osigurati da je svaka tvornica u skladu sa sigurnosnim propisima, uključujući za same lokacije i za prijevoz radioaktivnih materijala.[14]
- i) Stare elektrane-novoprojektirane elektrane moraju imati specifikacije za ublažavanje i upravljanje degradacijom i starenjem elektrane. Važnost toga sve je važnija zbog problema povezanih s produljenjem uporabe starijih elektrana. Mnogi su izvorno

stvorenim imajući u vidu 30-40 godina rada. Iako je u nekim slučajevima riječ o jednostavnoj modernizaciji (kao što je zamjena analognog digitalnim), sigurnosne funkcije moraju se analizirati, ispitati i po potrebi zamijeniti.

- j) Opće (nuklearno) zdravlje i sigurnost – kao i na svakom radnom mjestu, moraju se poštovati i opći zdravstveni i sigurnosni propisi. Neki rizici koje predstavlja Ured za nuklearnu regulativu uključuju azbest, građevinske radove, rad u zatvorenim prostorima, sigurnost strojeva, opasne tvari te izloženost buci i vibracijama. U tim slučajevima Izvršni odbor za zdravlje i sigurnost zadržava regulatornu odgovornost za rješavanje tih problema. [14]

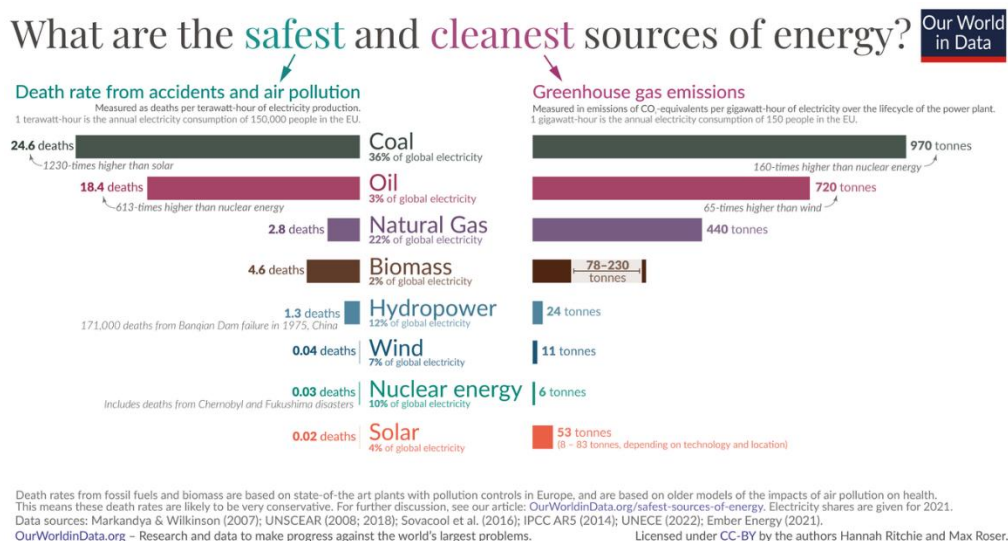
4.2 Sigurnost nuklearnih elektrana kao industrije proizvodnje električne energije

Svi izvori energije imaju negativne učinke, ali se jako razlikuju po veličini: fosilna goriva su zagađena i najopasnija, dok su nuklearni i moderni obnovljivi izvori energije znatno sigurniji i čišći. Iz perspektive ljudskog zdravlja i klimatskih promjena, manje je važno prelazimo li na nuklearnu energiju ili obnovljivu energiju i više što se prestanemo oslanjati na fosilna goriva.

Energija je bila ključna za ljudski napredak u posljednjih nekoliko stoljeća. Ali iako nam energija donosi ogromne koristi, nije bez njenih negativnih strana. Proizvodnja energije može na tri načina negativno utjecati na ljudsko zdravlje i okoliš:

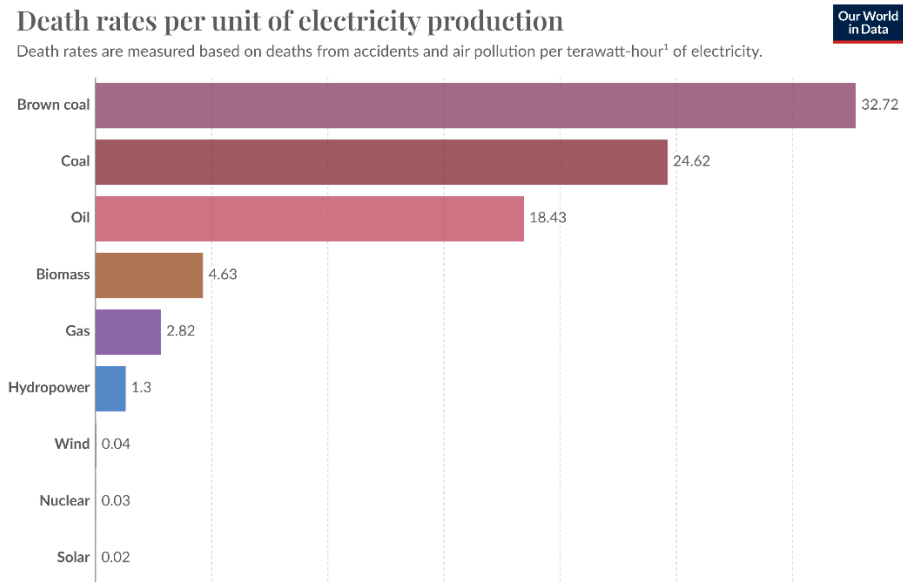
- Prvi je onečišćenje zraka: milijuni ljudi prerano svake godine umiru zbog onečišćenja zraka. Za većinu tih smrtnih slučajeva odgovorna su fosilna goriva i spaljivanje biomase – drva, otpada i drvenog ugljena.
- Druga su nesreće. To uključuje nesreće u rudarstvu i vađenju goriva – ugljena, urana, rijetkih metala, nafte i plina. Također uključuje nesreće u transportu sirovina i infrastrukture, izgradnju elektrane ili njezino održavanje.
- Treće su emisije stakleničkih plinova: fosilna goriva glavni su izvor stakleničkih plinova, glavni pokretač klimatskih promjena. U 2020. godini 91% globalnih emisija CO₂ dolazi iz fosilnih goriva i industrije.[15]

Fosilna goriva ujedno su najzagađenija i najopasnija te emitiraju najviše stakleničkih plinova po jedinici energije (slika 18.).



Slika 18 Najsigurniji i najčišći izvori energije[15]

Osim stakleničkih plinova na slici 19. se može vidjeti da je stopa smrtnosti kod nuklearne industrijske proizvodnje električne energija jako niska. Navedeno je moguće zbog jako strogih kontrola i sustava koji su napravljeni tako da se što manje zagađuje okoliš, ali i ukloni utjecaj na stanovništvo koje stanuje u neposrednoj blizini nuklearnih elektrana.



Slika 19 Stopa smrtnosti u industriji proizvodnje električne energije [15]

5. Radioaktivnost

Radioaktivnost je ispuštanje energije iz raspada jezgri određenih vrsta atoma i izotopa. Atomske jezgre sastoje se od protona i neutrona povezanih zajedno u malim snopovima u središtu atoma. Radioaktivne jezgre su jezgre koje su nestabilne i raspadaju se emitirajući energetske čestice kao što su fotoni, elektroni, neutrinosi, protoni, neutroni ili alpso (dva protona i dva povezana neutrona). Neke od tih čestica poznate su kao ionizirajuće čestice. To su čestice s dovoljno energije za uklanjanje elektrona iz atoma ili molekula. Stupanj radioaktivnosti ovisi o frakciji nestabilnih jezgri i učestalosti raspada tih jezgri.

Učinak radioaktivnosti također ovisi o vrsti i energiji čestica proizvedenih tijekom nuklearnog raspada. Na primjer, neutrinosi stalno prolaze kroz zemlju, dok alfa čestice blokira list papira. Radioaktivnost može uzrokovati oštećenje materijala te biljnog, životinjskog i ljudskog tkiva. Znanstvenici i inženjeri koriste radioaktivnost kao izvor topline za satelite, za medicinsko snimanje, za ciljano liječenje raka, za radiometrijska mjerenja i za istraživanje zakona prirode i podrijetla tvari. [16]

5.1 Kako radioaktivnost utječe na ljudski organizam

Ionizirajuće zračenje ima dovoljno energije da utječe na atome u živim stanicama i time ošteti njihov genetski materijal (DNK). Srećom, stanice u našim tijelima iznimno su učinkovite u popravljanju ove štete. Međutim, ako oštećenje nije pravilno popravljeno, stanica može umrijeti ili naposljetku postati kancerogena.[17]

Nekoliko faktora utječe na način na koji ljudsko tijelo reagira na ionizirajuće zračenje. To uključuje: dozu (količina primljenog zračenja), vrijeme tijekom kojeg se doza prima, zahvaćene stanice, zahvaćeni dio tijela, vrsta zračenja, dob i opće zdravstveno stanje osobe. [18]

5.1.1 Vrste zračenja

Postoje različite vrste zračenja, od kojih svako ima različite karakteristike. Uobičajena ionizirajuća zračenja su:

- Alfa zračenje- sastoji se od teških, pozitivno nabijenih čestica koje emitiraju atomi elemenata kao što su uran i radij. Alfa zračenje može se u potpunosti zaustaviti papirom ili tankim površinskim slojem naše kože. Međutim, ako se alfa-emitirajući materijali unesu u tijelo disanjem, hranom ili pićem, oni mogu izravno izložiti unutarnja tkiva i stoga mogu uzrokovati biološka oštećenja.

- Beta zračenje- sastoji se od elektrona. Prodiru više od alfa čestica i mogu proći kroz 1-2 centimetra vode. Općenito, aluminijski lim debljine nekoliko milimetara zaustavit će beta zračenje.
- Gama zrake- su elektromagnetsko zračenje slično rendgenskim zrakama, svjetlu i radijskim valovima. Gama zrake, ovisno o energiji, mogu prolaziti kroz ljudsko tijelo, ali se mogu zaustaviti debelim zidovima betona ili olova.
- Neutroni- nenabijene čestice i ne uzrokuju izravno ionizaciju. Ali, njihova interakcija s atomima materije može dovesti do alfa, beta, gama ili rendgenskih zraka koji zatim proizvode ionizaciju. Neutroni prodiru i mogu se zaustaviti samo debelim masama betona, vode ili parafina. [19]

5.1.2 Doza zračenja

Sunčeva svjetlost je topla jer naše tijelo upija infracrvene zrake koje sadrži. Međutim, infracrvene zrake ne proizvode ionizaciju u tjelesnom tkivu. Nasuprot tome, ionizirajuće zračenje može narušiti normalno funkcioniranje stanica ili ih čak ubiti. Količina energije potrebna za izazivanje značajnih bioloških učinaka ionizacijom toliko je mala da naša tijela ne mogu osjetiti tu energiju kao kod infracrvenih zraka koje proizvode toplinu.

Biološki učinci ionizirajućeg zračenja variraju ovisno o vrsti i energiji. Mjera rizika od biološke štete je doza zračenja koju tkiva primaju. Uobičajene doze zračenja izražavaju se u milisivertu (mSv) ili mikrosivertu (μSv). Na primjer, jedna rendgenska snimka prsnog koša dat će oko 0,2 mSv doze zračenja.

Prosječno, naša izloženost zračenju zbog svih prirodnih izvora iznosi oko 2,4 mSv godišnje, iako se ta brojka može razlikovati, ovisno o geografskom položaju. U domovima i zgradama postoje radioaktivni elementi u zraku. Ti radioaktivni elementi su radon (radon 222), toron (radon 220) i proizvodi nastali raspadom radija (radij 226) i torija prisutni u mnogim vrstama stijena, drugim građevinskim materijalima i u tlu. Daleko najveći izvor izloženosti prirodnom zračenju dolazi iz različitih količina urana i torija u tlu diljem svijeta.

Izloženost zračenju zbog kozmičkih zraka vrlo je ovisna o nadmorskoj visini, a malo o geografskoj širini: ljudi koji često putuju zračnim putem, time povećavaju svoju izloženost zračenju. [19]

5.1.3 Izloženost ionizirajućem zračenju

Ljudi mogu biti izloženi ionizirajućem zračenju u različitim okolnostima, kod kuće ili na javnim mjestima (javna izloženost), na svojim radnim mjestima (profesionalna izloženost) ili u medicinskom okruženju (medicinska izloženost).

Izloženost zračenju može se pojaviti unutarnjim ili vanjskim putovima.

Unutarnje izlaganje ionizirajućem zračenju događa se kada se radionuklid inhalira, proguta ili na drugi način ulazi u krvotok (na primjer, injekcijom ili kroz rane). Unutarnja izloženost prestaje kada se radionuklid eliminira iz tijela, bilo spontano (primjerice putem izlučevina) ili kao rezultat liječenja.

Vanjska izloženost može nastupiti kada se radioaktivni materijal u zraku (poput prašine, tekućine ili aerosola) odlaže na kožu ili odjeću. Ova vrsta radioaktivnog materijala često se može ukloniti iz tijela pranjem. Izloženost ionizirajućem zračenju može također biti posljedica zračenja iz vanjskog izvora, kao što je izloženost medicinskom zračenju iz rendgenskih zraka. Vanjsko ozračivanje zaustavlja se kada je izvor zračenja zaštićen ili kada se osoba kreće izvan područja zračenja.

Izloženost ionizirajućem zračenju može se u svrhu zaštite od zračenja svrstati u tri izložene situacije, tj. planirane, postojeće i izvanredne situacije. Planirane izloženosti nastaju namjernim uvođenjem i djelovanjem izvora zračenja s posebnim namjenama, kao što je slučaj s medicinskom uporabom zračenja za dijagnozu ili liječenje pacijenata, ili uporabom zračenja u industriji ili istraživanju. Postojeća izloženost nastaje ako zračenje već postoji i mora se donijeti odluka o kontroli – na primjer, izloženost radonu u domovima ili na radnim mjestima ili izloženost prirodnom pozadinskom zračenju iz okoliša. Izvanredne situacije izloženosti uzrokovane su neočekivanim događajima koji zahtijevaju brz odgovor, kao što su nuklearne nesreće ili zlonamjerni postupci.

Medicinska primjena zračenja čini 98% doprinosa populacijske doze iz svih ljudskih izvora i predstavlja 20% ukupne izloženosti populacije. Svake godine diljem svijeta provodi se više od 4200 milijuna dijagnostičkih radioloških pregleda, provodi se 40 milijuna postupaka nuklearne medicine i daje 8,5 milijuna radioterapijskih tretmana. [20]

5.2 Radioaktivni otpad

Radioaktivni otpad je materijal koji sadrži u sebi ili je kontaminiran sa radioaktivnim tvarima koje su opasne po okoliš i populaciju, te se ne može preraditi ili reciklirati za ponovnu upotrebu. Jedan od primjera koje nije nužno radioaktivni otpad je nuklearno gorivo koje je već istrošeno, i kao takvo se ne smatra radioaktivnim otpadom jer se može iskoristiti nakon prerade opet u pogonu kao gorivo. [21]

Neke od djelatnosti poput energetike, industrije, medicine, znanosti i poljoprivrede, proizvode radioaktivni otpad uz korištenje radioaktivnog zračenja. Najviše radioaktivnog otpada nastaje u nuklearnim elektranama, i u svim fazama procesa gorivnog ciklusa, od samog kopanja uranske rude do dekomisije nuklearnih postrojenja. [22]

5.2.1 Podjela i klasifikacija radioaktivnog otpada

Radioaktivni otpad dijeli se na (slika 20.):

1. Vrlo niski radioaktivni otpad (VNRAO)- u sebi ima jako malu specifičnu aktivnost, pa opasnost za okoliš i ljude nije jaka tako da se može zbrinuti kao i standardni otpad .
2. Nisko radioaktivni otpad (NRAO)- sadrži radionuklide koji su opasni za ljude i okoliš, ali ima kratko vrijeme poluraspada, dok tijekom dužeg vremena sadrži vrlo male specifične aktivnosti i jako sitni udio radioklida, njegovo zbrinjavanje se vrši u površinskim odlagalištima.
3. Srednje radioaktivni otpad (SRAO)- to je otpad koji sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada te kao takav se sprema u površinska odlagališta, također sadrži i radionuklide s dužim vremenom poluraspada pa se takvi zbrinjavaju u podzemnim spremnicima odnosno odlagalištima.
4. Visoko radioaktivni otpad- u sebi ima vrlo visok postotak radionuklida koji imaju jako dugi vremenski period poluraspada, takav otpad se zbrinjava u dubokim podzemnim odlagalištima. [23]



Slika 20 Klasifikacija radioaktivnog otpada [23].

Radioaktivni otpad se s obzirom na njegova tipična svojstva te predviđeni način zbrinjavanja razvrstava u klase koje su prikazane na slici 21.

Klasa	Tipična svojstva	Načini zbrinjavanja
Otpušteni radioaktivni otpad (ORAO)	Radioaktivni otpad koji udovoljava uvjetima za otpuštanje iz regulatornog nadzora.	Otpuštanje iz regulatornog nadzora. Jednom otpušten iz nadzora ovaj se materijal više ne smatra radioaktivnim otpadom.
Vrlo kratkoživući radioaktivni otpad (VKRAO)	Sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 100 dana.	Skладиštenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom otpuštanje iz regulatornog nadzora. Ovom radioaktivnom otpadu će se skladištenjem kroz nekoliko godina koncentracija aktivnosti smanjiti na ili ispod vrijednosti propisanih u Prilogu 1 ovog Pravilnika.
Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO)	Radioaktivni otpad s većim koncentracijama aktivnosti od VKRAO. Koncentracije dugoživućih radionuklida u ovoj kategoriji otpada su zanemarive.	Skладиštenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom otpuštanje iz regulatornog nadzora. Ovom radioaktivnom otpadu će se skladištenjem kroz nekoliko desetaka godina granične koncentracije aktivnosti smanjiti na ili ispod vrijednost propisanih u Prilogu 1 ovog Pravilnika.
Nisko radioaktivni otpad (NRAO)	Radioaktivni otpad koji sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 30 godina i ograničene koncentracije aktivnosti dugoživućih radionuklida (4.000 Bq/g u pojedinom pakiranju, odnosno 400 Bq/g za kompletnu masu radioaktivnog otpada). Proizvodnja topline u ovom otpadu niža je od 2 kW/m ³ .	Skладиštenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u površinskom ili podzemnom odlagalištu.
Srednje radioaktivni otpad (SRAO)	Radioaktivni otpad koji sadrži veće koncentracije aktivnosti od NRAO.	Skладиštenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu na dubini od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara ispod površine.
Visoko radioaktivni otpad (VRAO)	Radioaktivni otpad u kojemu je proizvodnja topline iznad 2 kW/m ³ .	Skладиštenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu smještenom u stabilnoj geološkoj formaciji na dubini od nekoliko stotina metara ispod površine.

Slika 21. Hrvatska klasifikacija radioaktivnog otpada[24]

5.2.2 Radioaktivni otpad NE Krško

Nuklearna elektrana Krško proizvodi električnu energiju, no uz električnu energiju dolazi i do stvaranja niskog i srednjeradioaktivnog otpada (NSRAO). Najčešće pod NSRAO spada: upotrebljena zaštitna odjela, prerađeni tekući otpad (filtri i smole) i dio materijala koji nastaju pri održavanju opreme u radiološkom kontroliranom području. [25]

5.2.3 Skladištenje NSRAO-a NE Krško

Niski i srednjeradioaktivni otpad koji je nastao od početka pogona 1981. godine i traje do danas pohranjuje se u privremenom skladištu u elektrani Krško, po svim najvišim međunarodnim standardima. Volumen NSRAO-a koji se pohranjuje iznosi 2488 m³. Taj volumen se može smanjiti pravilnim sortiranjem, koncentriranjem, taljenjem i spaljivanjem. U zadnjih deset godina nastaje više od 30 m³ NSRAO godišnje. [25]

5.2.4 Upravljanje radioaktivnim otpadom u RH

Republika Hrvatska ima obvezu zbrinuti radioaktivni otpad koji potiče iz nekoliko djelatnosti, gdje se svakodnevno koriste radioaktivni materijali i izvori, npr; industrija, medicina, znanost istraživanja i ostale djelatnosti. Takav otpad se naziva institucionalni otpad, osim institucionalnog otpada, tu dolazi otpad od NEK, gdje Republika Hrvatska ima 50% vlasništva i samim time ima obvezu zbrinuti otpad koji nastaje u NEK-u. Općenito Hrvatska ima mali obujam otpada koji se proizvodi, ali ga treba skladištiti po najvišim međunarodnim standardima. Samo zbrinjavanje RAO-a podrazumijeva sve operativne i administrativne postupke kako bi se radioaktivni otpad izolirao iz ljudske i prirodne okoline. Vrsta RAO-a će ovisiti o tome kako će se RAO skladištiti kao i količina i specifična aktivnost RAO-a. [26]

Republika Hrvatska stvara mali dio radioaktivnog otpada upoređujući sa većim zemljama poput Francuske, SAD i Rusije, ali opet treba ga adekvatno skladištiti. Volumen otpada koja stvara RH je 7,5 m³. Taj otpad se skladišti u jedine dvije institucije, a to su :

- Skladište u sklopu Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada
- Skladište Instituta Ruđer Bošković

Oba instituta se nalaze u Zagrebu, no glavni problem je taj što su oba zatvorena i nemogu više zaprimati otpad za skladištenje. Vrste otpada koji se nalaze u tim skladištima su: radioaktivni gromobrani, radioaktivni dojavljivači požara, medicinski izvori, industrijski izvori, izvori iz istraživačkih ustanova, svjetleća boja i djelovi optičkih uređaja. Programom iz 1997. godine izabrane su četiri lokacije za izgradnju odlagališta: Trgovska gora, Moslavačka gora, Papuk i Pšunj. Sve do 2014. godine je mirovalo i 2014. godine je izdvojena potencijalna lokacija za odlagalište, a to je Čerkezovac na Trgovskoj gori koja je u vlasništvu Hrvatske vojske. Do danas Hrvatska nema točno definiranu lokaciju skladišta ili odlagališta radioaktivnog otpada. Istrošeno nuklearno gorivo koji će se iskoristiti do kraja životnog vijeka NEK-a skladištiti će se u nuklearnoj elektrani Krško koje je predviđeno do kraja stoljeća. Nakon toga RH će morati preuzeti brigu za polovinu gorivnih elemenata.. [27]

5.2.5 Utjecaj odlagališta radioaktivnog otpada na okoliš

Glavna zadaća odlagališta radioaktivnog otpada je ta da se radioaktivni materijal i otpad izolira od okolišta, odnosno da se sve radioaktivne čestice ne ispuste u okoliš. Takav scenarij se može spriječiti kondicioniranjem otpada, postavljanjem višestrukih barijera između radioaktivnog otpada i okolnog geološkog medija, također dolazi u obzir i prikladna geološka struktura gdje će otpad biti zbrinut. Još jedna stavka je bitna kod odlagališta, to je da mora biti projektirano prema najvišim standardima koji su dovedeni da bi zaštitili okoliš i populaciju. Takav standard ima zahtijev da doza koju može primiti najizloženiji pojedinac mora biti uveliko manje od današnjih graničnih doza koju pojedinac smije primiti.

Najsigurnije odlaganje radioaktivnog otpada je u čvrstom tlu, taj zaključak je došao nakon dugogodišnjih temeljnih istraživanja, razmatranja i praktičnih znanja. Analize prirodnih procesa depozita urana u Gabonu i nalazišta uranijeve rude u Cigar Lakeu došlo je do zaključka da je najsigurnija vrsta skladištenja radioaktivnog otpada podzemno skladištenje. Dokazalo se da takvo skladištenje neće propustiti radioaktivne elemente u biosferu niti za milijune godina.

Zbog razvitka znanosti i tehnologije danas je omogućeno pronalaženje pogodnih geoloških lokacija i dopreme radioaktivnih materijala do njih. Skladišta u čvrstom tlu su prikladna ali i daje mogućnost da se kvalitetno nadgleda i predvidi smjer kretanja radioaktivnog materijala ako dođe do neplaniranog ispuštanja. Uzeći u obzir neplanirano ispuštanje mora se poduzeti mjere dodatne zaštite poput iženjerske barijere, koje osiguravaju bolju izolaciju u slučaju da slojevi okolnog tla nije toliko pouzdano za istu namjenu. Jača konzerviranost se može postići tako da se planira odlagališta ispod kojega nema vodenih tokova, gdje ne postoji dodatna opasnost za okoliš i populaciju. Zato je vrlo važno izabrati kvalitetnu i pravu lokaciju za trajno odlagalište radioaktivnog otpada.

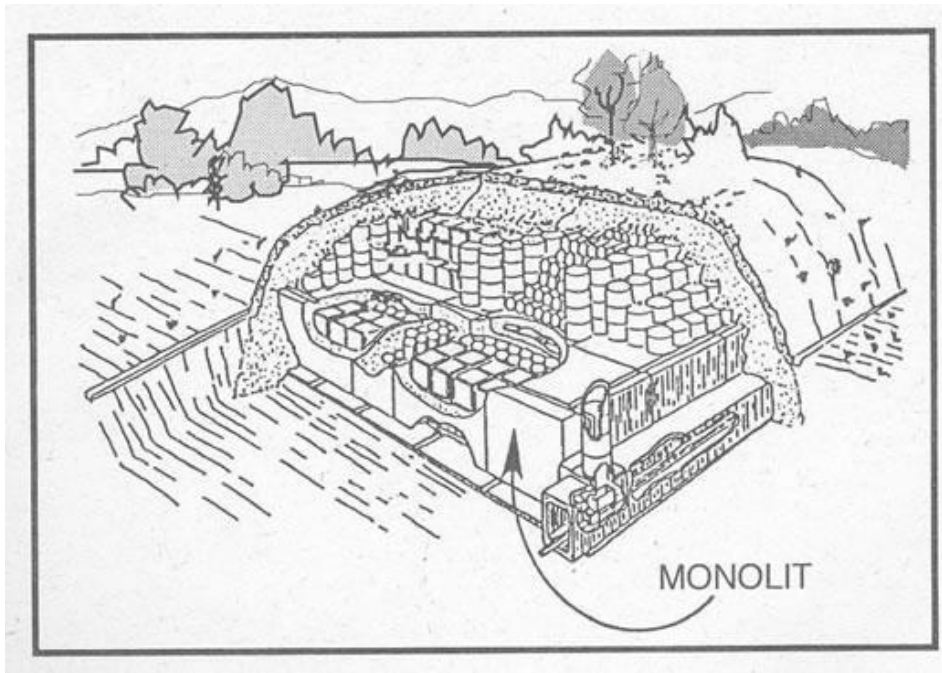
Radioaktivni otpad dokle god ima štetnih i radioaktivnih čestica u sebi mora biti zbrinut u izabranom i izgrađenom odlagalištu gdje će barijere spriječiti bilo kakve neplanirana ispuštanja radioaktivnih čestica u okoliš. Najbolje bi bilo da sav radioaktivni otpad koji sadrži i najmanju dozu štetnog radioaktivnog elementa koji može ugroziti sigurnost ljudi i okoliša da se skladišti u dubokim i stabilnim odlagalištima otpada. Glavni problem Republike Hrvatske je da još nije donešena odluka o trajnom odlagalištu, a radioaktivni otpad je i dalje prisutan. Istraživanja su pokazala da je preskupo graditi i održavati duboka odlagališta otpada velikih veličina gdje bi se smjestio sav radioaktivni otpad [28].

5.3 Projekt gradnje odlagališta RAO

Gradnja odlagališta je vrlo specifičan i temeljni proces. U obzir se mora uzeti sva geološka ispitivanja koja su potrebna, treba se izbjeći pojava potresa ili blizina podzemnih voda. Također važno uvidjeti i klimatske uvjete, te hidrološko i geološko okruženje poput: učestalosti kiša, blizina rijeka i vodopropusno tlo. Važno je uzeti u obzir karakteristike tla, da ne dolazi do korozije materijala od kojih se izrađuju spremnici za radioaktivni otpad. Istraživanja u današnjem vremenu pokazala su da su tla poput: granitne stijene, glinene i slane naslage i škriljevci pogodni za odlaganje radioaktivnog otpada. Koncept prirodnih višestrukih barijera se koristi u današnjem svijetu odlaganja otpada kako bi se što više spriječilo ispuštanje radioaktivnosti u okoliš. Glavna zadaća projekta gradnje odlagališta otpada je ta da odlagališta otpada moraju zadržati svoje strukturne karakteristike kroz jako dugi vremenski period, sve dok traje radioaktivni raspad nestabilnih nuklida [28].

5.3.1 Odlagalište nisko i srednje radioaktivnog otpada

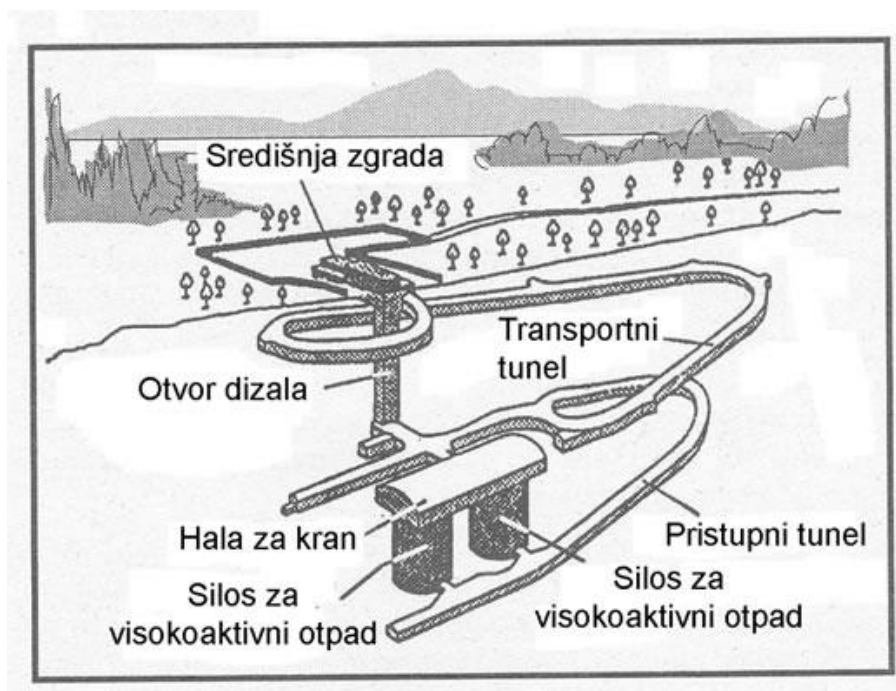
Najbitnija stavka kod odlagališta radioaktivnog otpada je dugotrajna izolacija radioaktivnih čestica, sprečavanje njihovog ispuštanja u okoliš sve do toga dok njihova aktivnost ne padnu na vrlo niske razine, odnosno dok ne padne ispod razine pozadinskog zračenja. Postoje dvije tehnološke varijante odlaganja radioaktivnog otpada. To su: površinsko odlaganje i odlaganje u duboke geološke formacije. Nisko i srednjeaktivni otpad najčešće bude zbrinut u površinski tip odlagališta. Izvedba površinskog tipa odlagališta je takva da se metalne posude sa radioaktivnim materijalom polažu u armiranu betonsku podlogu i dodatno zatrpavaju sa šljunkom, pijeskom u glinom (slika 22.) ovakva izvedba je jednostavnija i privremenog karaktera. Standardna izvedba je malo drugačija, metalne posude s radioaktivnim materijalima se smještaju u armirano-betonske kontejnere po određenom rasporedu na armirano betonsku podlogu s drenažnim sustavom. Takav sustav se još zove i betonski monolit. Kada dođe do popunjenja betonski kotejneri se ograđuju betonskim zidom kako bi se dobila monolitna struktura, koja se dodatno prekriva s nekoliko slojeva prirodnih i umjetnih materijala. Zbog toga se odlagalište vizualno bolje uklapa u prirodno okruženje [28].



Slika 22 Odlagalište površinskog tipa[28]

5.3.2 Odlagalište visokoaktivnog otpada

Zajednička osobina svih strategija za gospodarnjem i odlaganjem radioaktivnim otpadom je trajno odlaganje otpada u duboke geološke formacije. Kako bi trajno odlaganje uspelo, odlagalište mora biti sigurno 10000 godina. U tako dugom vremenskom intervalu dolazi do degradacije samih izolacijskih materijala, zato je vrlo važno izabrati pravilnu geološku lokaciju za trajno odlagalište otpada, gdje postoje materijali koji mogu izdržati izloženost radioaktivnosti, poput; granita, bazalita, tufa i gline koji su stabilni i milijunima godina. Zbog njihove stabilnosti su idealni za odlaganje istrošenog nuklearnog goriva i visokoaktivnog otpada. Koncept odlaganja predviđa kapsuliranje visokoaktivnog otpada u kovinske posude, a njihovo pohranjivanje u odlagališta izrađena u dubokim geološkim formacijama, dok se slobodni prostor popunjuje sa izolacijskim materijalom (slika 23.). [28]



Slika 23 Koncept podzemnog odlagališta za visokoaktivni otpad [28]

6.Zaključak

Nuklearne elektrane su vrlo važni izvor produkcije električne energije u svijetu već preko 50 godina. Način rada nuklearne elektrane sličan je konvencionalnoj termoelektrani, gdje se toplinska energija dobiva izgaranjem fosilnih goriva, no u nuklearnom reaktoru ta se energija dobiva kontroliranom fisijom atoma uranija ili plutonija iz nuklearnog goriva.

Nuklearna elektrane su danas jedne od najsigurnijih industrija, ali i ekološki prihvatljivih jer proizvode električnu energiju bez ispuštanja stakleničkih plinova u atmosferu čime se utječe na smanjenje globalnog zagrijavanja.

Loša strana proizvodnje električne energije u nukleaarnim elektranama je da u procesu lančane reakcije u nuklearnom reaktoru nastaju produkti fisije koji su radioaktivni i štetni za zdravlje. Također, trajno deponiranje radioaktivnog otpada proizvedenoga radom elektrane nije još u potpunosti riješeno.

Nuklearne elektrane u 2024. godini su dosegle vrlo visok standard sigurnosti i zaštite po okoliš i čovječanstvo.

7. Popis literature

1. Anonymus: Nuklearna elektrana krškoNEK, Nuklearna energija- mistika i stvarnost; <https://www.nemis.hr/index.php/energetske-svrhe/nuklearna-elektrana-krsko-nek.html> (pristupljeno 06.05.2024.)
2. Bergant, R.: NEK v 2019 presegla načrtovano letno proizvodnjo, eSvet, <https://esvet.si/novice/nek-v-2019-presegla-nacrtovano-letno-proizvodnjo> (pristupljeno 08.05.2024.)
3. Anonymus: Što je nuklearna energija i koje su 4 prednosti za okoliš?, Zaštita-prirode.hr, https://zastita-prirode.hr/clanci/nuklearna-energija/#Sto_je_nuklearna_energija, (pristupljeno 06.05.2024.)
4. Anonymus: Povijest nuklearne energije, Nuklearna energija – mistika i stvarnost <http://www.nemis.hr/index.php/struktura-tvari/povijest-nuklearne-energije.html>, Nemis, 2012. (pristupljeno 07.05.2024.)
5. Anonymus: How does a nuclear power plant work?, Foro Nuclear, <https://www.foronuclear.org/en/nuclear-power/how-does-a-nuclear-power-plant-work/>, (pristupljeno 07.05.2024.)
6. Anonymus: Nuclear power plant;Energy education https://energyeducation.ca/encyclopedia/Nuclear_power_plant, (pristupljeno 07.05.2024.)
7. Anonymus: Components of a nuclear power plant, Insights: <https://www.insightsonindia.com/science-technology/nuclear-technology/components-of-a-nuclear-power-plant/>, (pristupljeno 06.05.2024.)
8. Anonymus: What are the different components of a nuclear power plant?, Foro nuclear <https://www.foronuclear.org/en/updates/in-depth/what-are-the-different-components-of-a-nuclear-power-plant/>, (pristupljeno 07.05.2024.)
9. Feretić. D, Čavlina. N, Debrecin. N, Nuklearne elektrane, Školska knjiga, (1995.), ISBN 953-0-31651-8.
10. Anonymus: In Operation & Suspended Operation Reactors,IAEA PRIS <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>, (pristupljeno 05.05.2024.)
11. Anonymus: Nuklearna elektrana Krško, <https://www.nek.si/hr/>, , (pristupljeno 07.05.2024.)

12. Anonymus, Wikipedia, tlačnovodni reaktor,
https://sl.wikipedia.org/wiki/Tlačnovodni_reaktor (pristupljeno 08.05.2024.)
13. Anonymus: Sigurnost nuklearnih elektrana, Nuklearna energija- mistika i stvarnost
<http://www.nemis.hr/index.php/sigurnost/sigurnost-nuklearnih-elektrana.html>,
(pristupljeno 08.05.2024.)
14. Dhaliwal, A: Top 10 safety regulations for nuclear power plants, Likedin;
<https://www.linkedin.com/pulse/top-10-safety-regulations-nuclear-power-plants-aaron-dhaliwal/>, (pristupljeno 08.05.2024.)
15. Ritchie, H.: What are the safest and cleanest sources of energy?, Our World in data;
<https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>, (pristupljeno 08.05.2024.)
16. Anonymus: DOE Explains...Radioactivity; Department of Energy
<https://www.energy.gov/science/doe-explainsradioactivity> (pristupljeno 05.05.2024.)
17. Anonymus: Radiation Health Effects; Enviromental Protection Agency,
<https://www.epa.gov/radiation/radiation-health-effects>, (pristupljeno 15.04.2024.)
18. Anonymus: Radiation Effects on the Body; Let's Talk Science
<https://letstalkscience.ca/educational-resources/backgrounders/radiation-effects-on-body>, (pristupljeno 25.04.2024.)
19. Anonymus: Radiation in Everyday Life; International Atomic Energy Agency,
<https://www.iaea.org/Publications/Factsheets/English/radlife>, (pristupljeno 20.04.2024.)
20. Anonymus: Ionizing radiation and health effects, World Health Organization,
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-and-health-effects>, (pristupljeno 19.04.2024.)
21. Anonymus: Radioaktivni otpad, Zbrinjavanje radioaktivnog otpada
https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/rao_6/, (pristupljeno 19.04.2024.)
22. Anonymus: Nastajanje radioaktivnog otpada, Nuklearna energija-mistika i stvarnost,
<https://www.nemis.hr/index.php/radioaktivni-otpad/nastajanje-radioaktivnog-otpada.html> (pristupljeno 24.04.2024.)
23. Anonymus: Klasifikacija radioaktivnog otpada; Zbrinjavanje radioaktivnog otpada
https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/rao_6/ (pristupljeno 19.04.2024.)
24. Pravilnik o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora, NN 12/2018,
https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_02_12_271.html
25. Anonymus, Okoliš, Nuklearna elektrana Krško;
<https://www.nek.si/hr/pogon/okolis#zbrinjavanje-otpada>, (pristupljeno 30.04.2024.)

26. Anonymus: Zbrinjavanje RAO-a; Zbrinjavanje radioaktivnog otpada
https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/zbrinjavanje-rao-a_14/, (pristupljeno 20.04.2024.)
27. Besednik, M.: Nastanak i zbrinjavanje radioaktivnog otpada, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, 2018. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:300173> (pristupljeno 04.05.2024.)
28. Anonymus: Utjecaj odlagališta radioaktivnog otpada na okoliš; Nuklearna energija-mistika i stvarnost, <http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivni-otpad/utjecaj-odlagalista-radioaktivnog-otpada-na-okolis.html> (pristupljeno 02.05.2024.)

8. Popis simbola i kratica

NEK- Nuklearna elektrana Krško

HWR - Heavy water reactor

PWR – Pressurized water reactor

LWGR- Light-Water Cooled, Graphite Moderated Reactor

PHWR-Pressurized Heavy-Water Moderated and Cooled Reactor

BWR – Boiling water reactor

GCR - Gas-cooled reactor

AGR – Advanced gas reactor

RBMK – Reaktor boljšoi močnosti kipjaščij

HTGR -High temperature as reactor

FBR - Fast breeder reactor

VNRAO – vrlo niski radioaktivni otpad

NRAO – nisko radioaktivni otpad

SRAO – srednje radioaktivni otpad

VRAO- Visoko radioaktivni otpad

VKRAO- Vrlo kratkoživući radioaktivni otpad

ORAO- Otpušteni radioaktivni otpad

NSRAO- Nisko i srednjoradioaktivni otpad

RAO- Radioaktivni otpad

9. Prilozi

9.1 Popis slika

Slika 1. Nuklearna elektrana krško	1
Slika 2. Krško polje	7
Slika 3. Postavljanje kamena temeljca	7
Slika 4. Početak građevinskih radova	8
Slika 5. Oprema za nuklearni dio elektrane	8
Slika 6. Montaža reaktorskog dijela	9
Slika 7. Montaža turboagregata	9
Slika 8. Ugradnja oba parogeneratorsa	10
Slika 9. Dobava goriva	10
Slika 10. Ubacivanje goriva u reaktorsku posudu	11
Slika 11. Sinkroniziranje generatora s mrežom	11
Slika 12. Vađenje uranijeve rude	12
Slika 13. Shema NEK-a	13
Slika 14. Shema primarnog kruga NEK	14
Slika 15. Shema sekundarnog kruga NEK	15
Slika 16. Shema tercijarnog kruga	16
Slika 17. Koncept zaštite	18
Slika 18. Najsigurniji i najčišći izvori energije	22
Slika 19. Stopa smrtnosti u industriji proizvodnje električne energije	23
Slika 20. Klasifikacija radioaktivnog otpada	28
Slika 21. Hrvatska klasifikacija radioaktivnog otpada	28
Slika 22. Odlagalište površinskog tipa	33
Slika 23. Koncept podzemnog odlagališta za visokoaktivni otpad	34

9.2 Popis tablica

Tablica 1 Rasprostranjenost nuklearnih reaktora u svijetu u 2024. godini	5
--	---