

Gospodarenje radioaktivnim otpadom

Đuran, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:149825>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Luka Đuran

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidat **Luka Đuran**

Predao je izrađen završni rad dana: 5. rujna 2023.

Povjerenstvo u sastavu:

prof. dr. sc. Marija Vuković Domanovac, Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

prof. dr. sc. Zvezdana Findrik Blažević, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Miroslav Jerković, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije

dr. sc. Monika Šabić Runjavec, znanstvena suradnica, Sveučilište u
Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 8. rujna 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ

Luka Đuran

GOSPODARENJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Marija Vuković Domanovac

Članovi ispitnog povjerenstva:

Prof. dr. sc. Marija Vuković Domanovac

Prof. dr. sc. Zvezdana Findrik Blažević

Doc. dr. sc. Miroslav Jerković

Zagreb, rujan 2023.

Prije svega, posebnu zahvalu bih izrazio mentorici prof. dr. sc. Marija Vuković Domanovac na ogromnoj pomoći, strpljenju, razumijevanju i savjetima tijekom pisanja završnog rada.

Hvala svim kolegama FKIT-a na suradnji i savjetima tokom pripreme i polaganja ispita.

Veliko hvala mojim prijateljima koji su me u najtežim trenucima nasmijavali i bili podrška kada je bilo najpotrebnije.

Najposebnije hvala mojim roditeljima, bratu i ostatku obitelji. Njihova vječna i najvrjednija podrška i razumijevanje su odigrali ključnu ulogu tijekom mog studiranja.

Sažetak

Radioaktivni otpad primarno nastaje radom i razgradnjom nuklearnih elektrana i reaktora, proizvodnjom nuklearnog oružja i primjenom u medicini, industriji i istraživanju. Ovaj otpad obuhvaća različite oblike i materijale, od kojih svaki ima različita svojstva, razine radioaktivnosti i vremena poluraspada. Osnovna podjela radioaktivnog otpada s obzirom na radioaktivnost je na nisko, srednje i visoko radioaktivni otpad. Najveći izazov predstavljaju visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo zbog svoje visoke razine radioaktivnosti. Odgovorno gospodarenje radioaktivnim otpadom uključuje pažljivo rukovanje, skladištenje i odlaganje radioaktivnog materijala kako bi se zaštitilo ljudsko zdravlje i okoliš kako sada tako i u budućnosti.

Ključne riječi: radioaktivni otpad, nuklearne elektrane, istrošeno nuklearno gorivo, gospodarenje radioaktivnim otpadom

Summary

Radioactive waste is generated primarily during the operation and decommissioning of nuclear power plants and reactors, the manufacture of nuclear weapons, and other uses of radioactive materials in medicine, industry, and research. This waste includes various forms and materials, each with different properties, levels of radioactivity, and half-lives. The basic classification of radioactive waste is by radioactivity: low, medium, and high. The main challenge in managing high-level radioactive waste and spent fuel is its high radioactivity. Responsible handling of radioactive waste requires careful handling, storage and disposal of radioactive materials to protect human health and the environment now and in the future.

Keywords: radioactive waste, nuclear power plants, spent fuel, radioactive waste management

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. OPĆI DIO	2
2.1. Nuklearna energija.....	2
2.1.1. Otkriće fisije	2
2.1.2. Nuklearna energija u Drugom svjetskom ratu.....	3
2.1.3. Komercijalna upotreba nuklearne energije	4
2.2. Nuklearne elektrane	5
2.2.1. Osnove nuklearnih reakcija.....	6
2.2.2. Uloga neutrona u nuklearnoj fisiji	7
2.2.3. Uloga aktinoida u nuklearnoj fisiji	9
2.3. Nuklearni reaktori.....	11
2.3.1. Podjela i karakteristike nuklearnih reaktora.....	11
2.3.2. Pregled II. Generacije nuklearnih reaktora	14
2.3.3. Budućnost nuklearnih reaktora.....	23
2.4. Proizvodnja nuklearnog goriva	24
2.5. Radioaktivni otpad.....	25
2.5.1. Podjela i klasifikacija radioaktivnog otpada	26
2.5.2. Otpad nastao procesima gorivnog ciklusa.....	27
3. PREGLEDNI DIO.....	31
3.1. Gospodarenje radioaktivnim otpadom.....	31
3.1.1. Visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo	33
3.1.1.1. Obrada	33
3.1.1.2. Inovativni ciklusi nuklearnog goriva	38
3.1.1.3. Transport i skladištenje	39
3.1.1.4. Odlaganje	41
3.1.2. Srednje radioaktivni otpad	45
3.1.2.1. Obrada, skladištenje i odlaganje	45
3.1.3. Nisko radioaktivni otpad.....	47
3.1.3.1. Obrada, skladištenje i odlaganje	48

3.1.4. Vrlo nisko radioaktivni otpad.....	49
3.1.4.1. Obrada, skladištenje i odlaganje	50
3.1.5. Otpad nastao rudarenjem i mljevenjem uranija.....	50
3.2. Dekomisija NE	51
3.3. Dekontaminacija.....	53
3.4. Nuklearni otpad u Hrvatskoj	54
3.4.1. Otpad iz NE Krško.....	55
4 .ZAKLJUČAK	57
5. POPIS SIMBOLA I SKRAĆENICA	58
6. LITERATURA.....	60

1. UVOD

U današnjem svijetu, gdje je sve izglednija nestašica fosilnih goriva, nuklearna energija se pokazuje kao obećavajuće rješenje za većinu problema koje donosi energetska kriza i globalno zatopljenje. Generalni stav javnosti oko nuklearne energije je veoma negativan. Česte asocijacije koje se mogu čuti su: zračenje, radioaktivnost, nesigurnost, nuklearni otpad, nuklearne katastrofe poput Černobila i Fukushime itd. Trenutna politička zbivanja pokazuju koliko veliku važnost imaju energetske resursi te koliko utječu na prosječnu kvalitetu života. Procjenjuje se da dvije milijarde ljudi tj. 30 % svjetske populacije nema pristup električnoj energiji. [1] Nuklearna elektrana (NE) proizvodi električnu energiju na pouzdan, ekološki siguran i pristupačan način. Zabrinutost oko dostupnosti energetske resursa, klimatskih promjena, kvalitete zraka i energetske sigurnosti ukazuje na važnu ulogu nuklearne energije u budućoj opskrbi energijom. Trenutno je u pogonu 437 nuklearna reaktora u 32 zemlje diljem svijeta, koji proizvode oko 13 % svjetske električne energije. [2,3]. Hrvatska elektroprivreda (HEP) je, uz Sloveniju, suvlasnica 50 % NE Krško te je odgovoran za zbrinjavanje polovine otpada koji generira elektrana, kao i otpada koji će nastati razgradnjom elektrane kada ona prestane s radom 2043. godine. Najizgledniji odgovor na ovo pitanje je lokacija na Trgovskoj gori, no konačna odluka još nije donesena.[4] Radom i razgradnjom nuklearnih objekata te aktivnostima koje koriste radioizotope u znanosti, industriji i medicini nastaje radioaktivni otpad.[5] Ukupna količina krutog radioaktivnog otpada na kraju 2016. godine iznosila je oko 38 milijuna m³, uz prosječno povećanje od 1 milijun m³ godišnje. Većina tog radioaktivnog otpada je vrlo nisko ili nisko radioaktivni otpad (93 %) te je 30 milijuna m³ već zbrinuto.[6] Kako bi se osiguralo da ne predstavlja opasnost za ljude ili okoliš sada i u budućnosti, potrebno je upravljati radioaktivnim otpadom na siguran način. Znanstvenici i stručnjaci stalno traže nova rješenja za probleme. Trenutno su u pogonu nuklearni reaktori generacije II., ali se radi na inovativnim reaktorima. Primarni ciljevi inovativnih reaktora su povećanje nuklearne sigurnosti, smanjenje otpada i njegove štetnosti te smanjiti troškove izgradnje i vođenja takvih postrojenja. [2] Postoji mnogo načina upravljanja i obrade radioaktivnog otpada od kojih će najbitniji biti obrađeni u ovome radu

2. OPĆI DIO

2.1. Nuklearna energija

2.1.1. Otkriće fisije

Kraj 19. i početak 20. stoljeća obilježeni su značajnim prodorima u fizici i kemiji. Otkrića mnogih znanstvenika su pridonijela razumijevanju atomske energije. Znanstvenici su radili na istraživanjima atoma kako bi bolje razumjeli strukturu i odnose među česticama. Otkrića poput katodnih zraka (Wilhelm Röntgen 1895.), α i β -zračenja (Henri Becquerel, 1899.), γ -zraka (Paul Villard, 1900.), polonija i radija uz istraživanje radioaktivnosti (Pierre i Marie Curie, 1898.) samo su neka od važnijih ostvarenja. Ernest Rutherford, Niels Bohr, James Chadwick i mnogi drugi su također utjecali na tadašnje shvaćanje strukture atoma i zakonitostima koje vladaju između čestica. [7,8]

Enrico Fermi je 1935. godine otkrio da korištenje neutrona umjesto protona, prilikom bombardiranja jezgara različitih atoma, rezultira širim rasponom umjetnih radionuklida. Fermi je nastavio s eksperimentima, uglavnom dobivajući teže elemente iz ozračenih uzoraka, ali također, s uranom, neke mnogo lakše. Početkom 1939. Otto Hahn i Fritz Strassmann u Berlinu potvrdili su atomsku fisiju pokazujući da su novi proizvedeni elementi barij i drugi elementi približno polovice mase urana.[8] Lise Meitner i Otto Frisch, radeći pod vodstvom Nielsa Bohra, objasnili su ovaj fenomen kao rezultat neutrona koji je zarobljen od strane jezgre, uzrokujući jake vibracije i cijepajući jezgru na dva nejednaka dijela. Njihovi izračuni procijenili su oslobađanje energije od oko 200 milijuna elektronvolta (eV), vrijednost koju je Otto Frisch eksperimentalno potvrdio u siječnju 1939. To je bila prva eksperimentalna potvrda Einsteinove ekvivalentnosti mase i energije koju je objavio 1905. godine. Događaji iz 1939. potaknuli su val aktivnosti u brojnim istraživačkim ustanovama. Hahn i Strassmann pokazali su da fisija ne samo da oslobađa značajnu energiju, već i emitira dodatne neutrone koji mogu izazvati fisiju u drugim jezgrama urana, potencijalno dovodeći do samoodržive lančane reakcije i ogromnog oslobađanja energije. Ovu su ideju brzo potvrdili eksperimentima Joliot i njegovi kolege u Parizu, kao i Leo Szilard koji je surađivao s Fermijem u New Yorku.

Bohr je zatim pretpostavio da je fisija vjerojatnija u izotopu urana-235 nego u U-238, te da bi bila učinkovitija sa sporim nego s brzim neutronima. Szilard i Fermi podržali su ovu ideju i predložili upotrebu 'moderatora' za usporavanje emitiranih neutrona. Bohr i Wheeler proširili su te koncepte, stvarajući temelj za klasičnu analizu procesa fisije. Njihov temeljni rad objavljen je samo dva dana prije izbijanja Drugog svjetskog rata 1939. godine. [7,8]

Posljednji dio koncepta atomske bombe pojavio se 1939. od Francisa Perrina, koji je predstavio koncept kritične mase urana potrebnog za samoodrživo oslobađanje energije. Rudolf Peierls sa Sveučilišta u Birminghamu proširio je Perrinove teorije, što je dovelo do ključnih proračuna koji su uvelike utjecali na razvoj atomske bombe. U Parizu je Perrinov tim prikazao održivost održavanja lančane reakcije u mješavini urana i vode, korištenjem vanjskog ubrizgavanja neutrona i uvođenjem tvari koje apsorbiraju neutrone za upravljanje umnažanjem neutrona, čineći osnovu za rad nuklearne elektrane. [7]

Werner Heisenberg, koji je od travnja 1939. nadgledao njemački projekt nuklearne energije pod Njemačkim uredom za naoružanje, isprva je bio usmjeren na vojne primjene. Krajem 1939. spekulirao je o potencijalu za lančane reakcije nuklearne fisije u 'uranovom stroju' ili reaktoru, koji se može kontrolirati za proizvodnju energije ili nekontrolirati za vrlo snažnu nuklearnu eksploziju. Iako je Heisenberg razmatrao korištenje čistog urana-235 kao eksploziva, vjerovao je da bi potrebna kritična masa bila nepraktična. U ljeto 1940. Heisenbergov kolega Carl Friedrich von Weizsäcker primijetio je da stroj za uran koji održava lančanu reakciju može transformirati uran-238 u 'element 94', kasnije prepoznat kao plutonij, još jedan nevjerojatno snažan eksploziv. Godine 1941. von Weizsäcker je čak podnio patentnu prijavu za korištenje stroja za uran za sintezu ovog novog radioaktivnog elementa. Zbog straha da bi Njemačka mogla prva napraviti atomsku bombu, u utrku naoružanja uključuju se SAD i Velika Britanija. [7,8]

2.1.2. Nuklearna energija u Drugom svjetskom ratu

Tijekom Drugog svjetskog rata, britanski znanstvenici, uključujući fizičare izbjeglice Peierlsa i Frischa, odigrali su ključnu ulogu u unapređenju koncepta atomske bombe. Njihov Frisch-Peierlsov memorandum sugerirao je upotrebu 5 kg čistog U-235 za

izgradnju moćne bombe te predložio metode za detonaciju, proizvodnju, i analizu učinaka. Kao rezultat memoranduma osnovan je Odbor MAUD (engl. *Military Application of Uranium Detonation*), sastavljen od uglednih znanstvenika, koji je usmjerio istraživanje na više britanskih sveučilišta. Eksperimentalni dokazi za održavanje lančane reakcije sa sporim neutronima i demonstracija veće vjerojatnosti fisije U-235 u odnosu na U-238 provedeni su prema radovima na Cambridgeu. Do ožujka 1941. potvrđena je jedna kritična informacija, nuklearni udarni presjek U-235, pokazujući da su spori neutroni učinkovitiji. Peierls je izjavio da je shema bombe izvediva ako se može dobiti visoko obogaćeni U-235. Dva sažeta izvješća Odbora MAUD u srpnju 1941. procijenila su izvedivost atomske bombe i njezin energetska potencijal. Izvješće o bombi sugeriralo je suradnju sa SAD-om, dok se u energetskom izvješću raspravljalo o kontroliranoj fisiji za proizvodnju energije i izotope. Tek nakon japanskog napada na Pearl Harbor u prosincu 1941. godine, SAD ulaže značajna sredstva razvoju atomske bombe. Uz suradnju britanskih, kanadskih i francuskih znanstvenika, SAD je pokrenuo projekt Manhattan s ciljem razvoja atomske bombe. Fermijeva eksperimentalna nuklearna lančana reakcija dogodila se u prosincu 1942. godine na Sveučilištu u Chicagu, a taj prvi eksperimentalni nuklearni reaktor nazvan je Chicago Pile-1. Reaktori za proizvodnju plutonija izgrađeni su u Argonneu, Oak Ridgeu i Hanfordu, uz postrojenja za ponovnu obradu. Istraživački laboratorij u Los Alamosu, predvođen Oppenheimerom, dizajnirao je i U-235 i Pu-239 bombe. Prvi uspješan atomski test, kodnog naziva „Trinity“ dogodio se 16. srpnja 1945 u Novom Meksiku. Atomske bombe koje su sadržavale U-235 („Little Boy“) i Pu-239 („Fat Man“) bačene su na Hirošimu i Nagasaki u kolovozu 1945., pridonijevši kapitulaciji Japana. [7,8]

2.1.3. Komercijalna upotreba nuklearne energije

Po završetku Drugog svjetskog rata, vizija postavljena u Frisch-Peierls Memorandumu, počela se u određenoj mjeri ostvarivati. S razornim potencijalom nuklearne energije koji se pokazao kroz tragične događaje, svjetska se pozornost usmjerila prema iskorištavanju atomske energije u miroljubive svrhe, posebice u proizvodnji električne energije. Prepoznajući ovaj potencijal, države su usmjerile svoje

napore prema iskorištavanju atomske energije za proizvodnju pare i električne energije. Značaj ovog izvora energije nije samo u njegovoj sposobnosti generiranja energije, već i u njegovoj sposobnosti stvaranja kompaktnih, trajnih izvora energije prikladnih za različite primjene, uključujući mornarička plovila poput podmornica. Početkom 1950-ih, eksperimentalni rasplodni reaktor (EBR-1) u SAD-u uspio je u proizvodnji male količine električne energije, označavajući početak praktične proizvodnje nuklearne energije. Program "Atomi za mir" predsjednika Eisenhowera uveden je 1953. i dodatno je usmjerio istraživanja prema proizvodnji električne energije, postavljajući temelje za razvoj nuklearne energije u SAD-u. U međuvremenu je SSSR (Savez Sovjetskih Socijalističkih Republika) osnovao Institut za fiziku i energetiku u Obninsku, koji je postao središte napretka tehnologije nuklearne energije. Reaktor AM-1, izgrađen 1954. godine, bio je prvi svjetski generator električne energije na nuklearni pogon, koristeći vodu kao rashladno sredstvo, a grafit kao moderator. Ovaj reaktor ne samo da je opskrbljivao električnom energijom, već je također služio kao prototip za kasnije dizajne reaktora npr. RBMK (rus. *Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalny*). Dok su SAD imale uporište u obogaćivanju urana, Ujedinjeno Kraljevstvo je slijedilo drugačiji put, koristeći prirodni metalni uran kao gorivo za reaktore hlađene plinom, moderirane grafitom. Značajan među njima bio je reaktor Calder Hall 1, koji je radio od 1956. do 2003. Britanski nuklearni razvojni put na kraju je doveo do usvajanja naprednog reaktora hlađenog plinom i, kasnije, tlakovodnog reaktora. [7,8]

Kraj Drugog svjetskog rata rezultirao je ostvarenju aspekata navedenih u Memorandumu Frisch-Peierls, utirući put mirnom korištenju nuklearne energije za proizvodnju električne energije. [7]

2.2. Nuklearne elektrane

Nuklearne elektrane (NE) su energetska postrojenja koja toplinsku energiju nastalu u nuklearnom reaktoru pretvaraju u električnu energiju. Toplinska energija nastaje u nuklearnom gorivu kao posljedica samoodržavajuće i kontrolirane fisije atoma uranija ili plutonija. Kao i u običnim termoelektranama, toplina generirana u reaktoru se

iskorištava za generiranje pare. Para potom pokreće parnu turbinu koja je povezana s generatorom, odgovornim za stvaranje električne energije. [9,10]

Prema podacima Međunarodna agencija za atomsku energiju IAEA (engl. *International Atomic Energy Agency*) iz 2022. godine, u funkciji su 437 nuklearna reaktora za proizvodnju električne energije, ukupne snage oko 390 000 MWe u 32 zemlje svijeta, s dodatnih 59 nuklearnih reaktora koji su trenutno u izgradnji. [3]

2.2.1. Osnove nuklearnih reakcija

Nuklearna energija je energija sadržana u jezgri (nukleusu) atoma. Većina jezgri atoma koje nalazimo u prirodi je stabilna, ali mali postotak atoma ima nestabilnu jezgru. Ti radioaktivni atomi teže da se putem unutarnjih transformacija (npr. putem beta-raspada emisijom elektrona iz atoma) i/ili putem emisija, radioaktivno raspadaju na stabilnije atome ili izotope. Ta pojava se naziva radioaktivnost i tokom nje čestica emitira α , β ili γ -zračenje. Uobičajeno, jezgre s parnim brojem protona i neutrona su stabilnije od nuklida kod kojih je jedan od ta broja neparan, a osobito kod nuklida gdje su oba broja neparna. [10] Prijelaz mase (m) u energiju (E) opisao je Einstein 1905. godine: [11]

$$E=m \times c^2 \tag{1}$$

gdje je c brzina svjetlosti, 2.9979×10^8 m/s. Uvrštavanjem jedinične mase u izraz (1), slijedi da je kilogram mase koji potpuno prijeđe u energiju ekvivalentan energiji izgaranja 3 milijuna tone ugljena.

Vrijeme poluraspada ($t_{1,2}$) je vrijeme potrebno da se raspadne polovina početno prisutnih radioaktivnih jezgara nekog uzorka.[10] Svaki radioaktivni nuklid (radionuklid, radioizotop) ima svoje karakteristično vrijeme raspada i ne ovisi o masi. Fizikalna veličina koja opisuje brzinu raspada radioaktivne tvari naziva se aktivnost, a izražava se u bekerelima ($Bq=s^{-1}$). [10]

Nuklearna energija se može osloboditi nuklearnim reakcijama, tj. reakcijama nuklearne fuzije i nuklearne fisije. Nuklearna fuzija je proces spajanja dva lakša atoma (npr. vodika) u težu jezgru (npr helij). Fuzija oslobađa ogromne količine energije.

Štoviše, Sunce i druge zvijezde proizvode energiju fuzijom. Mnogi znanstvenici smatraju da je nuklearna fuzija rješenje za energetske krize jer njome ne nastaje dugoživeći nuklearni otpad te se može dobiti čista energija bez emisije CO₂ i drugih stakleničkih plinova. Nuklearna fisija je proces u kojem se neutronima bombardira atomska jezgra nekog teškog elementa (npr. uranij ili plutonij), jezgra apsorbira neutron, postaje nestabilna i raspada se na jezgre lakših atoma (poput barija i kriptona), uz oslobađanje ogromne toplinske energije i neutrona. Ta toplina se koristi za pokretanje turbine koja zatim proizvodi električnu energiju. To je princip na kojem funkcionira većina nuklearnih elektrana danas u pogonu. [10,11]

2.2.2. Uloga neutrona u nuklearnoj fisiji

Nuklearna energija kakvu poznajemo danas dolazi od nuklearnih reakcija. To su reakcije fisije gdje teška jezgra atoma, npr. ²³⁵U, apsorbira neutron te se cijepa na dvije jezgre lakših atoma koji se nazivaju fisijskim fragmentima ili fisijskim produktima (FP). Omjer masa fisijskih produkata približno iznosi 2:3 početne teške jezgre te se tijekom fisije razvija ogromna količina toplinske energije i 2-3 dodatna neutrona. [10]

Pojednostavljeni prikaz fisije atoma uranija (²³⁵U-fisiilni izotop uranija) gdje se cijepa na atome lantana (La) i broma (Br) uz oslobađanje 2 neutrona i energije 200 MeV (3.2×10^{-11} J):[12]



Neutroni mogu biti slobodni, spori i brzi. Za nuklearne reaktore u današnjoj upotrebi važni su brzi i spori (termički) neutroni. Brzi neutroni se koriste u "brzim" reaktorima, a termički neutroni u "termičkim" reaktorima. Neutroni koji nastaju u gornjoj jednadžbi su brzi neutroni. Njihova brzina iznosi otprilike 20000 km/s, sadrže prosječnu toplinu od 2 MeV te nisu pogodni za fisiju ²³⁵U. Brze neutrone je potrebno usporiti na otprilike 2 km/s kako bi postali termički neutroni koji sadrže prosječnu energiju od 0,625eV te je fisija ²³⁵U vjerojatnija. [10,11]

Termički neutron je spori neutron čija je kinetička energija približno jednaka čestici u normalnim uvjetima. Kako se brzi neutron sudara s teškim jezgrom, gubi malo energije te je potrebno i do 2000 sudara s jezgrom uranija kako bi se pretvorio u termički neutron. S druge strane, ako se brzi neutron sudari s jezgrom lakšeg atoma predat će mu više energije i prije će postati termički neutron; u tom slučaju je potrebno samo 20 sudara s vodikom. Moderiranje je mehanizam kojim se radioaktivnom elementu dodaju lakši element (moderator) kako bi se pospješilo usporavanje brzih neutrona u termičke neutrone. Neki od danas korištenih moderatora su vodik (u obliku lake vode), deuterij (u obliku teške vode–najbolji moderator, mala apsorpcija neutrona) i ugljen (u obliku grafita). U nuklearnom reaktoru je potrebna kontinuirana fisija kako bi se osigurala stalna proizvodnja energije. Kako bi se to postiglo, jedan od fisijskih neutrona mora pokrenuti novu reakciju fisije (lančana reakcija), dok su ostali fisijski neutroni apsorbirani ili ispušteni iz sustava. Kada se fisijska lančana reakcija odvija konstantnom brzinom i proizvedena snaga je konstantna, kaže se da je jezgra reaktora u "kritičnom" stanju. [10,11]

Neutronske prinos (k) koristi se za određivanje kritičnosti sustava, on predstavlja omjer fisija (ili fisijskih neutrona) u jednoj generaciji neutrona u odnosu na prethodnu generaciju. Trajanje fisijske generacije, τ je prosječno vrijeme između dvije reakcije fisije. Kritičnost se postiže kada je $k=1$. Reaktivnost (ρ), definirana kao $(k-1)/k$, označava relativno odstupanje reaktora od kritičnosti. Pozitivno ili negativno odstupanje reaktivnosti od nule dovodi do povećanja ili smanjenja brzine reakcija fisije i, posljedično, snage reaktora. [12]

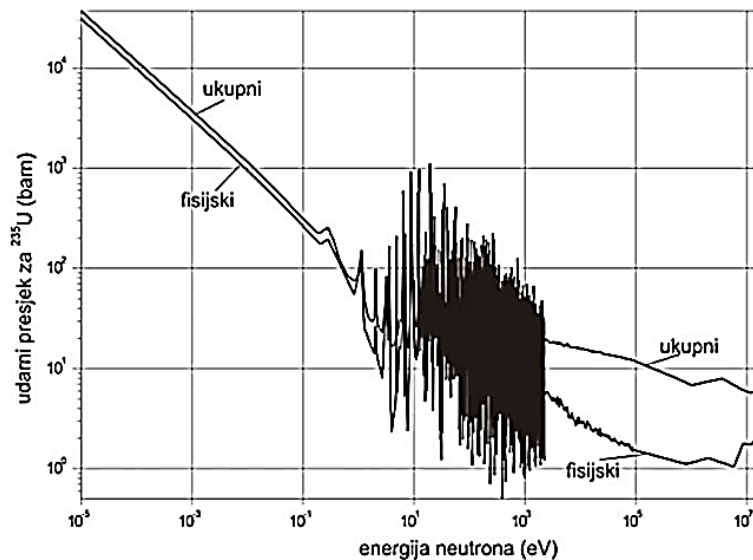
Promjene reaktivnosti mogu biti planirane i neplanirane. Planirane promjene se provode kroz male prilagodbe umetanja kontrolnih šipki u jezgru reaktora, koje su izrađene od materijala koji apsorbiraju neutrone. Ove se prilagodbe koriste za postizanje željenih varijacija snage ili za kompenzaciju izgaranja goriva. U slučaju nenormalnih uvjeta ili potencijalnih opasnosti, trenutno gašenje snage reaktora može se postići brzim umetanjem svih upravljačkih šipki, što rezultira brzim prekidom lančane reakcije uklaňanjem fisijskih neutrona iz sustava. [12]

2.2.3. Uloga aktinoida u nuklearnoj fisiji

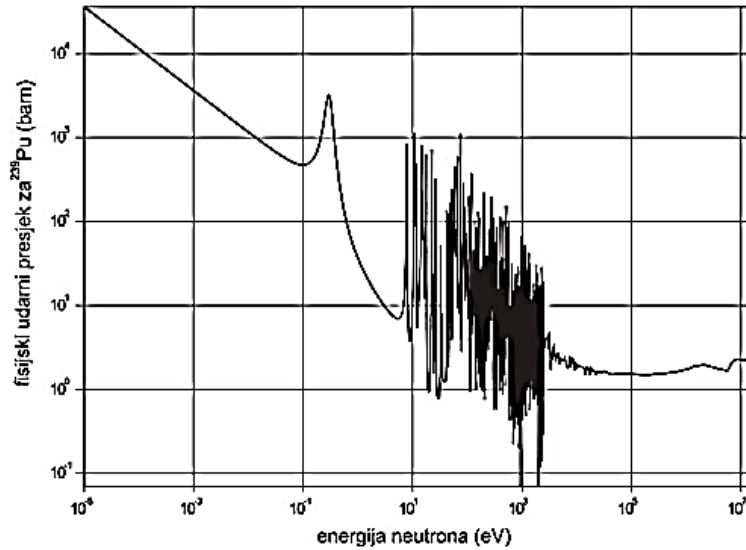
Aktinoidi su skupina 15 elemenata F-bloka s atomskim brojevima između 89-103 u periodnom sustavu elemenata (Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr) Svi su radioaktivni. U nuklearnim elektranama najviše se koriste uranij, torij (možemo ih naći u prirodi) i plutonij (sintetički dobiven). Vjerojatnost sudara neutrona određene brzine i izotopa nekog radioaktivnog elementa definira nuklearni udarni presjek. To je parametar koji kvantificira učestalost pojave nuklearne fisije.[10]

Uranij u prirodnom obliku se sastoji od 2 izotopa: ^{235}U (0,72 %) i ^{238}U (99,27 %), a manje od 1 % čini ^{234}U . [10] Kako bi se povećala koncentracija uranija potrebna za održavanje fisije tj stabilne lančane reakcije, prirodni uranij se obogaćuje. Koncentracija obogaćenog uranija varira od 3–5 % za tlakovodne i kipuće reaktore do 7–20 % za posebnu vrstu reaktora. [10,12]

Na slikama 2.1. i 2.2. [10] prikazani su nuklearni udarni presjeci za izotope ^{235}U i ^{239}Pu . Može se primijetiti kako je za fisiju oba izotopa optimalna energija neutrona između 10-1000 eV kada nastupa rezonantno područje.

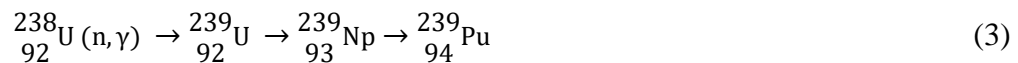


Slika 2.1. Ukupni udarni presjek i udarni presjek za fisiju ^{235}U

Slika 2.2. Udarni presjek za fisiju ^{239}Pu

Izotopi poput ^{235}U (prirodni fisilni materijal) koji imaju veću vjerojatnost fisije pri manjim energijama se nazivaju fisilnim izotopima. Osim ^{235}U , fisilni izotopi koji se koriste u nuklearnoj industriji su: ^{233}U , ^{239}Pu i ^{241}Pu (umjetni fisilni materijali). Fisilne atomske jezgre su sposobne za cijepanje na različite načine, što znači da će se formirati između 60 i 80 različitih fragmenata fisije. U slučaju fisije ^{235}U , dominantni fisijski fragmenti imaju masene brojeve oko 95 i oko 140. [10,11]

Izotopi poput ^{238}U koji se mogu pobuditi na raspad nuklearnom fisijom pomoću neutrona niskih ili visokih energija nazivaju se fisibilnim ili materijalima. ^{238}U sadrži svojstvo apsorpiranja neutrona malih brzina (termički neutroni) što rezultira lančanim reakcijama gdje se na kraju dobije fisilni izotop ^{239}Pu kao što je prikazano jednadžbom (3).[12]



gdje strelica simbolizira β -raspad. Proces stvaranja fisilnog izotopa (^{239}Pu) iz plodnog izotopa (^{238}U) naziva se konverzijom ili oplodivanjem (eng. *breeding*) ako je stvorena masa fisilnog izotopa veća od potrošene mase fisilnog izotopa. Zbog tog svojstva izotop

^{238}U se naziva oplodnim materijalom (izotopom) i predstavlja osnovu današnjih nuklearnih elektrana koje koriste gorivo na bazi uranija i plutonija. [12]

2.3. Nuklearni reaktori

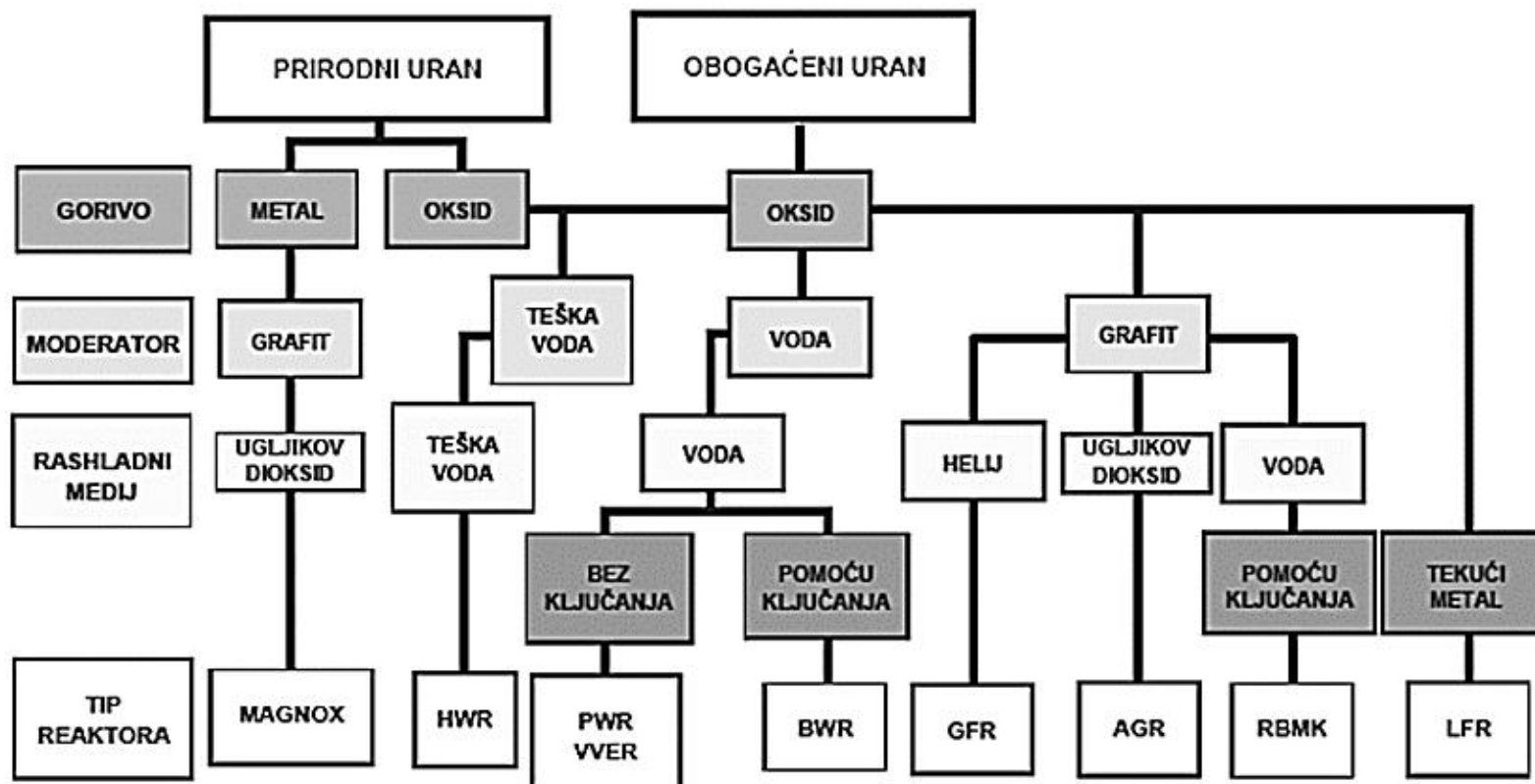
Nuklearna elektrana je postrojenje koje toplinsku energiju nastalu u nuklearnom reaktoru pretvara u električnu energiju. Nuklearni reaktor je dio nuklearne elektrane gdje se u kontroliranim uvjetima odvija lančana reakcije fisije. Sastoji se od: reaktorske posude u kojoj se nalazi reaktorska jezgra s nuklearnim gorivom, moderatora, reflektora, rashladnog sredstva i kontrolnih šipki. [9]

2.3.1. Podjela i karakteristike nuklearnih reaktora

Nuklearne reaktore moguće je podijeliti na temelju više karakteristika: energiji neutrona koja izaziva fisiju (termički i brzi reaktori), materijalu moderatora, materijalu rashladnog sredstva, razvojnim kategorijama, vrsti nuklearnog goriva i prema primjeni. Osnovna podjela nuklearnih reaktora s obzirom na primjenu je na [9]:

- eksperimentalne reaktore za istraživanje prirode i djelovanja zračenja u fizikalne, kemijske, biološke i tehnološke svrhe;
- produkcijske reaktore za proizvodnju novih umjetnih goriva i izotopa;
- energetske reaktore za proizvodnju elektroenergije, pogon plovila i vozila te za grijanje.

Nuklearni reaktori mogu biti homogeni i heterogeni. Gotovo svi današnji reaktori su heterogenog tipa, što znači da su gorivo, moderator i rashladna tekućina međusobno fizički odvojeni. Kod heterogenih reaktora je gorivo pomiješano s moderatorom i rashladnom tekućinom. Prema materijalu moderatora, dijele se na: grafitom moderirane reaktore, vodom moderirane reaktore, teškom vodom moderirane reaktore, lakim elementima moderirane reaktore i organskim materijalima moderirane reaktore. Pregled najbitnijih nuklearnih energetskih reaktora u odnosu na vrstu goriva, moderator i rashladnog sredstva dan je slikom 2.3. [9]



Slika 2.3. Shematski prikaz reaktora u odnosu na vrstu goriva, moderatora i rashladnog medija. [9]

Prema korištenom rashladnom sredstvu razlikujemo [9]:

- reaktore hlađene plinom GCR (engl. *Gas Cooled Reactor*)
- brze reaktore hlađene plinom GFR (engl. *Gas-cooled Fast Reactor*)
- napredne reaktore hlađene plinom AGR (engl. *Advanced Gas Reactor*)
- reaktore hlađene običnom vodom LWR (engl. *Light Water Reactor*)
- reaktore s tlakovodnim hlađenjem PWR (engl. *Pressurized Water Reactor*) (npr. NE Krško) i VVER (rus. *Vodo-Vodnoj Energetičeskij Reaktor*)
- reaktore s ključajućom vodom BWR (engl. *Boiling Water Reactor*)
- reaktore hlađene i moderirane teškom vodom HWR (engl. *Heavy Water Reactor*)
- reaktore hlađene vodom i moderirane grafitom LWGR (engl. *Light Water Cooled Graphite-moderated Reactor*) i RBMK (npr. NE Černobil) (rus. Reaktor Boljšoi Močnosti Kipjaščij)
- visokotemperaturne reaktore HTGR (engl. *High Temperature Gas Reactor*)
- brze reaktore hlađene natrijem SFR (engl. *Sodium-cooled Fast Reactor*)
- brze reaktore hlađene olovom LFR (engl. *Lead-cooled Fast Reactor*)
- brze reaktore hlađene s rastaljenim solima MSR (engl. *Molten Salt Reactor*)

Nuklearni reaktori se prema razvojnim kategorijama mogu podijeliti u nekoliko generacija [13]:

Generacija I - Prva generacija reaktora razvila se 50 i 60-ih godina 20.st. Prva proizvodnja električne energije iz eksperimentalnog reaktora EBR-1 dogodila se 1951 godine i proizvela je električnu energiju za samo 4 žarulje. Prva nuklearna elektrana, koja je imala sposobnost opskrbe stanovništva električnom energijom, puštena je u pogon 27.lipnja 1954. godine u Obninsku (Rusija) sa snagom od otprilike 5 MWe. Zadnji nuklearni reaktor ove generacije ugašen je 2015. godine u Walesu.

Generacija II - Ova generacija reaktora razvila se iz 1. generacije te su se gradili u razdoblju od 1960-ih do 1990-ih godina. Poboľšanja ovih reaktora su u pogledu ekonomičnosti, pouzdanosti i dužeg radnog vijeka, otprilike 40 godina. Tipični predstavnici ove generacije su: LWR (BWR i PWR), AGR, CANDU, RBMK i VVER.

Generacija III/III+ - Treća generacija reaktora stavlja naglasak na siguran rad i učinkovito ublažavanje nesreća. Evolucijski dizajn je vidljiv u sustavima upravljanja,

boljoj izradi i iskoristivosti goriva, manjom količinom nuklearnog otpada, manjim troškovima te kraćim vremenom izgradnje. Prva elektrana ove generacije izgrađena je 1996. godine u Japanu. Neki od značajnih predstavnika ove generacije su: EPR (europski tlakovodni reaktor, engl. *European Pressurized Reactor*), AP1000, ABWR (napredni ključajući reaktor, engl. *Advanced Boiling Water Reactor*) i System 80+ (koristi plutonij kao gorivo, a snaga mu iznosi 1300 MW). [12,13]

Generacija IV - Ovu generaciju obilježavaju inovativni nuklearni reaktori koji su trenutno u fazi istraživanja. Na inicijativu američke vlade 2006. godine osnovan je međunarodni forum (GIF engl. *Generation IV International Forum*). Forum okuplja 13 zemalja i svrha mu je istraživanje novih tehnologija nuklearnih elektrana i reaktora. Glavni ciljevi GIF-a su: održivi razvoj, minimalni utjecaj na okoliš i ljude, količina otpada mora biti svedena na minimum te izvrsnost u sigurnosti i pouzdanosti. Izgradnja prvih reaktora četvrte generacije predviđa se za 2030. godine.

Slika 2.4 prikazuje razvojni put nuklearnih reaktora, najbitnije tipove svake generacije i elektranu u kojima se određeni tip reaktora koristi, a za četvrtu generaciju su navedena načela dizajna i reaktori u fazi istraživanja. Predviđa se da će četvrta generacija reaktora krenuti s proizvodnjom električne energije najranije 2030. godine.

2.3.2. Pregled II. Generacije nuklearnih reaktora

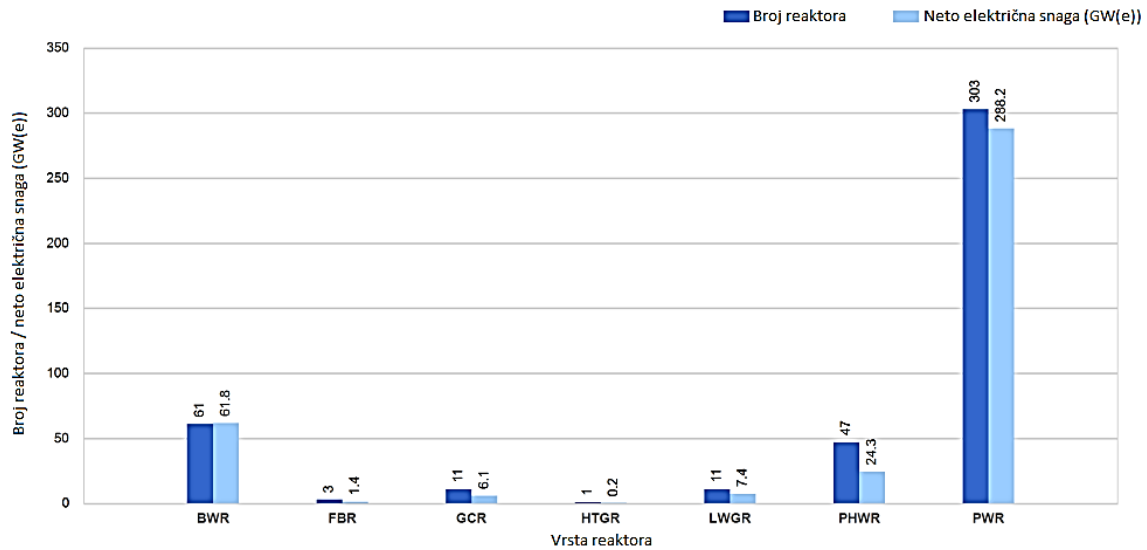
Ova generacija reaktora razvila se iz I. generacije reaktora. Promjene u dizajnu su bile značajne, ali ne revolucionarne. Reaktori II. generacije (Gen II reaktori) usvojili su aktivne sigurnosne sustave, što znači da im je potrebno vanjsko napajanje (bilo iz električne mreže, ili opskrbljivačima strujom za hitne slučajeve kao što su dizelski generatori ili električne baterije) kako bi funkcionirali. [12] Postoji više tipova Gen II. reaktora, u ovom poglavlju obradit će se oni najbitniji u praksi:

- Tlačni (tlakovodni) reaktor PWR (engl. *Pressurized Water Reactor*),
- Reaktor s ključajućom vodom BWR (engl. *Boiling water reactor*),
- Tlačni teškovodni reaktor PHWR (engl. *Pressurized heavy water reactor*),
- Napredni reaktori hlađeni plinom AGR (engl. *Advanced Gas Reactor*),
- Brzi oplodni reaktor FBR (engl. *Fast Breeder Reactors*)



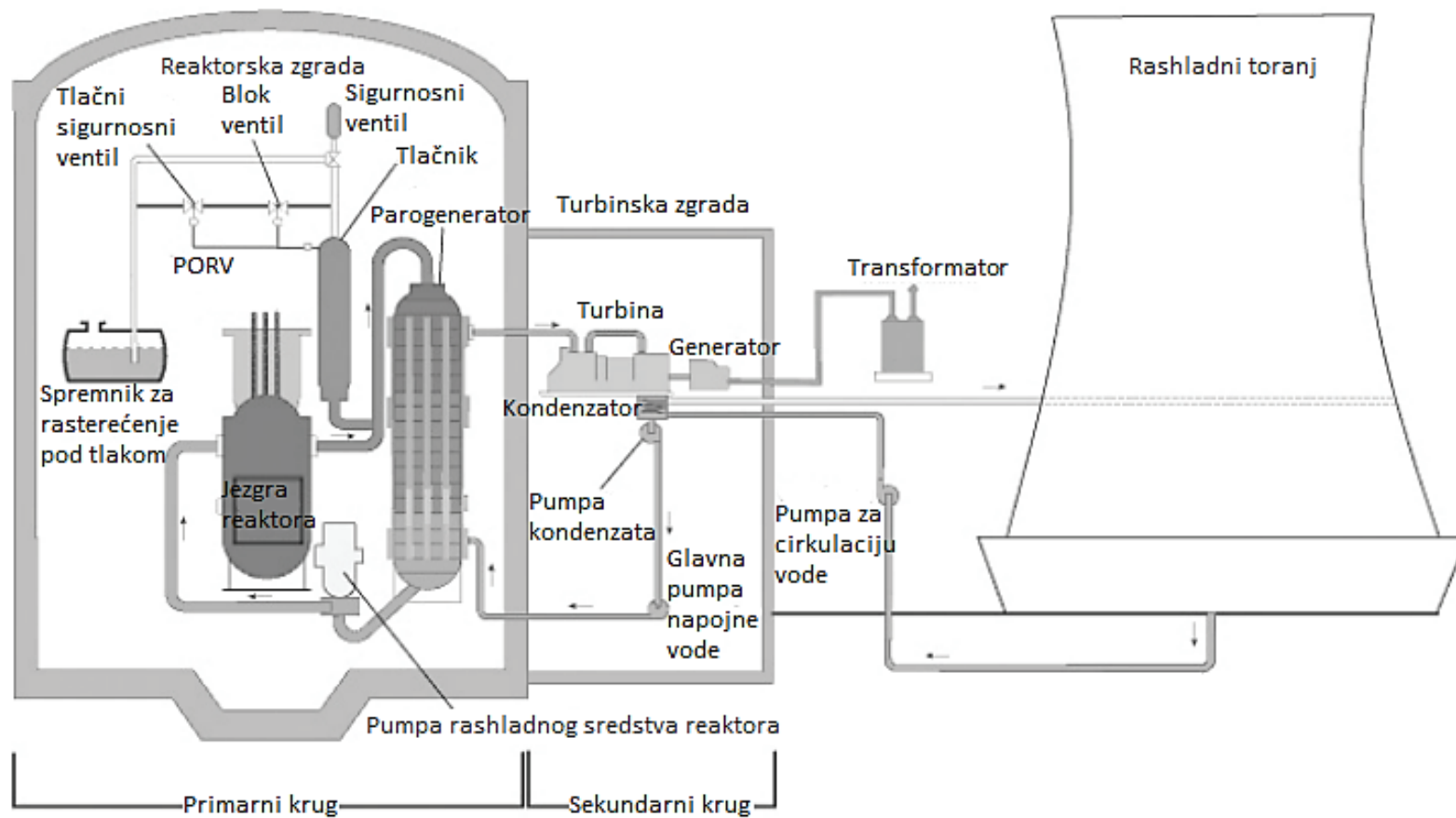
Slika 2.4. Razvojni put nuklearnih reaktora. [2]

Tlakovodni reaktor, PWR, primarno je dizajniran za pogon nuklearnih podmornica i najzastupljenija je vrsta reaktora u današnjim nuklearnim elektranama kao što je vidljivo iz slike 2.5. Nuklearna elektrana Krško (NEK) također je ovog tipa.



Slika 2.5. Broj pogonskih reaktora prema vrsti i neto električnoj snazi (na dan 31.12.2021). [3]

Slika 2.6 prikazuje shemu tipičnog PWR reaktora Westinghouse dizajna. [9,12] “Nuklearni“ dio postrojenja nalazi se s lijeve strane i zatvoren je unutar zaštitne zgrade. U ovom se dijelu nalazi reaktorska zgrada, koja ograničava jezgru reaktora u kojoj se odvija reakcija lančane fisije, zajedno sa drugim komponentama primarne petlje kao što su tlačnik, parogenerator i pumpe rashladnog sredstva. Preostali dio je "konvencionalan", a sastoji se od komponenti koje se nalaze u elektranama na fosilna goriva. Turbinska zgrada sadrži turbogeneratorski sustav koji čini sekundarnu petlju, dok tercijarna (ili pomoćna) petlja uključuje rashladni toranj neophodan za odvođenje viška topline u okolinu. Alternativna metoda uključuje raspršivanje preostale topline pomoću rashladnog tijela kao što je rijeka, jezero ili more. [12]

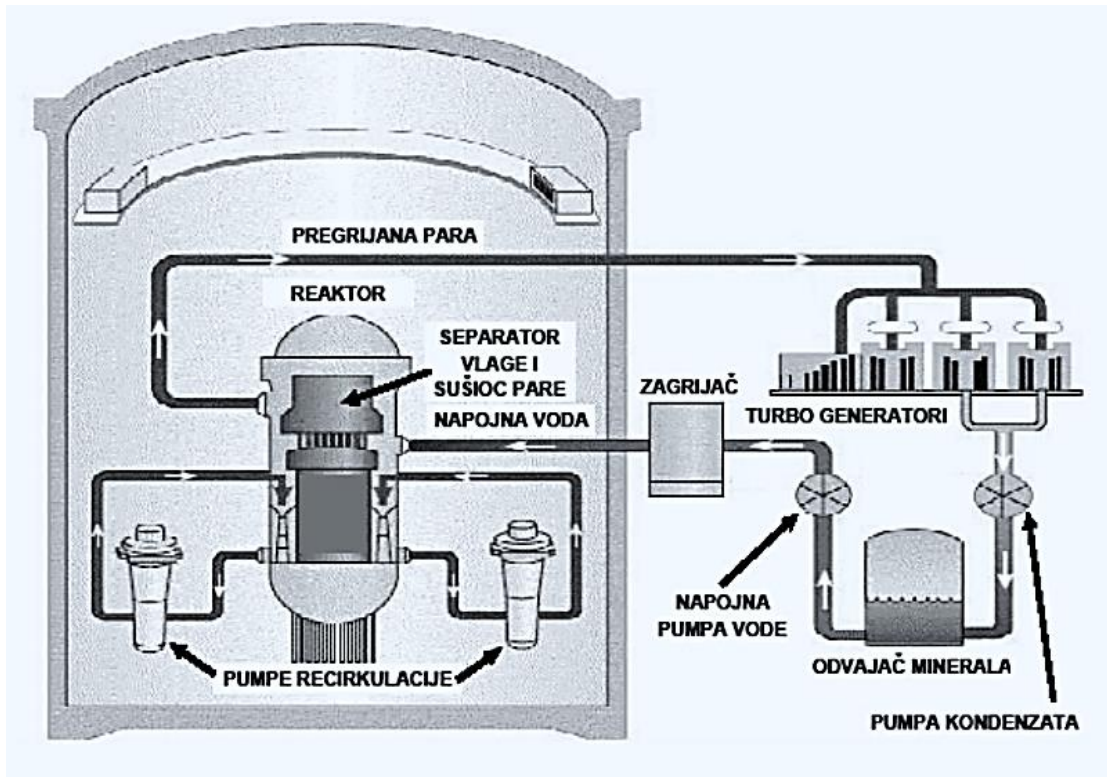


Slika 2.6. Shema nuklearne elektrane PWR tipa (Westinghouse PWR koncept). [12]

U jezgri reaktora nalazi se gorivna tableta, mali cilindar od praha uranovog dioksida (UO_x) promjera približno 0,78 cm i duljine nekoliko cm. Ove tablete su naslagane unutar gorivnih štapova izrađenih od cirkaloja (legure cirkonija i kositra), svaka dugačka 365 cm. Cirkaloj se koristi zbog svojstva niske apsorpcije neutrona i povoljnih svojstava prijenosa topline. Tablete su tretirane da zadrže produkte fisije i izdrže učinke vode visoke temperature u slučaju pucanja obloge. Postavljene u kvadratni niz od 17 x 17, gorivni štapovi strukturalno su povezani kako bi stvorili gorivni element. Veliki broj gorivih elemenata (193) se zatim sastavlja unutar pregrade jezgre kako bi se formirala jezgra reaktora. Sustav regulacije snage reaktora, koja je proporcionalna protoku neutrona unutar jezgre, uključuje skupinu kontrolnih šipki u gorivnim elementima, apsorber neutrona (borna kiselina) otopljen u rashladnom sredstvu reaktora i uzimanje u obzir fizičkih pojava koje utječu na neutronske ravnoteže jezgre. Toplina stvorena u jezgri reaktora, koja potječe od usporavanja produkata fisije (FP) unutar goriva, uklanja se protokom vode pod tlakom, pothlađenom u primarnoj petlji. Zaštitna zgrada reaktora izgrađena je od kontinuirane armiranobetonske konstrukcije s čeličnom oblogom koja prekriva njezinu unutarnju površinu kako bi se osigurala vodonepropusnost. Njegova primarna funkcija je zadržavanje mase i energije rashladnog sredstva reaktora u slučaju puknuća cjevovoda. Dizajn zgrade reaktora uzima u obzir normalna opterećenja, preopterećenja i naprezanja uzrokovana teškim uvjetima, uključujući seizmičke događaje. Radioaktivni materijal je izoliran zahvaljujući generatoru pare koji odvaja primarnu petlju od sekundarne petlje. Moderni PWR-ovi imaju sustave za hlađenje jezgre u hitnim slučajevima (ECCS, engl. *Emergency Core Cooling Systems*). Osim hlađenja jezgre nakon nesreće s gubitkom rashladnog sredstva (LOCA, engl. *loss-of-coolant accident*), ECCS isporučuje dodatne neutronske otrove kako bi osigurao da reaktor ostane ugašen nakon hlađenja povezanog s puknućem glavnog parovoda. [12]

Ključajući reaktor, BWR - Tlakovodni reaktor i ključajući reaktor vrste su termičkih lakovodnih reaktora koji koriste obogaćeni uran kao gorivo i vodu kao rashladno sredstvo i moderator neutrona. Glavna razlika između ova dva tipa reaktora je u njihovim radnim karakteristikama. U PWR, primarni krug radi pod visokim tlakom, a para se stvara u generatoru pare sekundarnog kruga. Nasuprot tome, u BWR-u voda ključa dok prolazi kroz jezgru reaktora, proizvodeći paru na izlaznom vodu reaktorske

posude. Dok izravna proizvodnja pare pojednostavljuje cjelokupnu shemu postrojenja zbog nedostatka sekundarnog kruga, ona uvodi dodatni problem radioaktivnosti turbine zbog aktivirane pare. Parni separatori, koji odvajaju vodu od pare prije slanja pare u turbinu, nalaze se u gornjem dijelu plašta reaktora. Zbog toga se upravljačke šipke obično umeću s donje strane kao što je prikazano na slici 2.7.

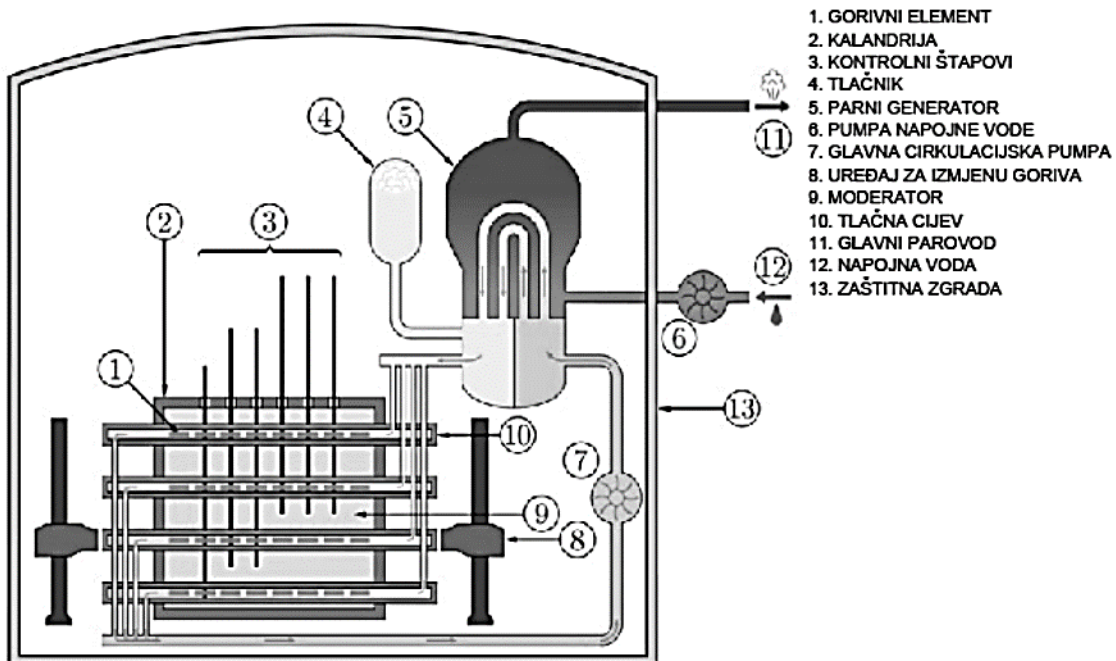


Slika 2.7. Shema ključajućeg nuklearnog reaktora BWR. [9]

Nepostojanje posebnog generatora pare daje BWR-u veću ukupnu toplinsku učinkovitost u usporedbi s PWR-om. Međutim, dizajn reaktorske posude za BWR je složeniji zbog prisutnosti značajne količine pare unutar nje. Dizajn zaštitne zgrade za BWR također mora uzeti u obzir potencijalni scenarij koji oslobađa znatnu količinu pare visoke temperature unutar nje. To zahtijeva rezervoar vode koji može apsorbirati oslobođenu energiju i spriječiti prekomjerno povećanje tlaka unutar primarnog spremnika. S obzirom na promjenjivo stanje rashladne tekućine, nije moguće uvesti tvari koje apsorbiraju neutrone u primarnu petlju. Kao rezultat toga, snagom reaktora u BWR-u upravlja se kontrolnim šipkama i mijenjanjem protoka vode kroz jezgru. Povećanje

protoka vode i stvaranja pare dovodi do veće izlazne snage. Primjer nuklearne elektrane koja koristi reaktor BWR tipa je NE Fukushima Daiichi. [12]

Tlačni teškovodni reaktor, PHWR, koristi tešku vodu kao moderator, a u nekim slučajevima i kao primarno rashladno sredstvo. Zbog znatno nižeg presjeka hvatanja neutrona teške vode u usporedbi s običnom lakom vodom, jezgra PHWR-a može se dizajnirati za postizanje kritičnosti korištenjem prirodnog urana UOX. To je velika prednost za zemlje koje nemaju vlastita postrojenja za obogaćivanje. Alternativno, plutonij proizveden tijekom ozračivanja može se reciklirati, kao što je to učinjeno u LWR-ovima, ponovnom preradom (oporabom) istrošenog goriva bez potrebe za bilo kakvim postrojenjem za obogaćivanje i izgradnjom gorivih elemenata kao MOX. Povoljna ekonomičnost neutrona PHWR-a dovodi do prosječnih faktora konverzije od približno 0,7–0,8, nadmašujući raspon od 0,5–0,6 LWR-a. Različiti tipovi PHWR konstruirani su diljem svijeta od 1960-ih. Međutim, industrijski najzreliji dizajn je reaktor s moderiranjem i hlađenjem teškom vodom, također poznat kao CANDU (Canada Deuterium Uranium) reaktor. [12]



Slika 2.8. Shema nuklearnog reaktora CANDU. [9]

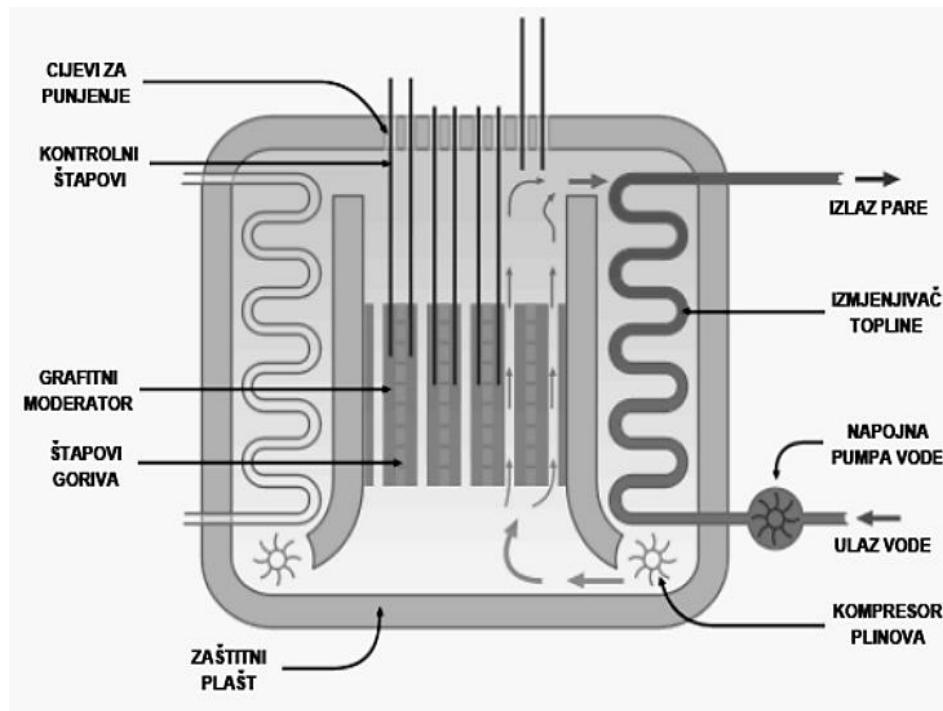
Pojednostavljeni prikaz reaktora CANDU (slika 2.8.) prikazuje petlju primarnog hlađenja s D₂O pod tlakom (oko 100 bara), povezanu sa sekundarnom petljom s parogeneratorom i turbinom, slično kao kod PWR-a. Temperature teške vode na ulazu i izlazu reaktora obično se kreću između 250–300 °C, što ograničava termodinamičku učinkovitost na približno 30%. Moderator u ovom reaktoru je D₂O pri atmosferskom tlaku i niskoj temperaturi. Jedinstveni aspekt dizajna CANDU je zamjena konvencionalne tlačne posude tlačnim cijevima koje sadrže gorivne elemente. Spremnik moderatora (calandria) nije pod tlakom i može biti montažni. Teška voda ima vrlo visoku jediničnu cijenu i zbog toga su troškovi postrojenja za HWR obično veći od troškova postrojenja za LWR. Zbog velikog radnog iskustva HWR-a, ovaj tip reaktora samo se usavršava, budući da su njegova učinkovitost i pouzdanost već dovoljno dokazani. [12]

Reaktori hlađeni plinom su komercijalni reaktori koji se trenutno koriste samo u Ujedinjenom Kraljevstvu, UK. Globalni interes za unaprjeđenje visokotemperaturnih reaktora hlađenih plinom raste zbog njihovog potencijala za isporuku učinkovite, isplative električne energije i visokotemperaturne procesne topline pogodne za različite industrijske primjene. Plinom hlađeni reaktori trenutno predstavljaju oko tri posto ukupnog broja reaktora u komercijalnom radu u svijetu (slika 2.5). Sve su to napredni reaktori hlađeni ugljikovim dioksidom u UK koji će se postupno ukinuti. Brojne su zemlje aktivno uključene u razvoj naprednih visokotemperaturnih reaktora hlađenih plinom HTGR (engl. *High-Temperature Gas Reactor*), koji koriste helij kao rashladno sredstvo. Ovi reaktori posjeduju sposobnost postizanja izuzetnog stupnja iskorištenja goriva i rada na povišenim temperaturama. Također daju procesnu toplinu koja je korisna za proizvodnju vodika i primjene na nižim temperaturama kao što su desalinizacija morske vode i daljinsko grijanje. Neke države trenutno istražuju kompaktne modularne HTGR dizajne. Namjera je uskoro predstaviti ove reaktore za pojednostavljenu proizvodnju električne energije te kombinirane primjene topline i električne energije (kogeneracija). U tijeku su brojne HTGR istraživačke i razvojne inicijative u raznim zemljama, uključujući Kinu, Indoneziju, Japan, Kazahstan, Republiku Koreju, Rusiju, Južnu Afriku, Sjedinjene Američke Države i EU. [12]

Visokotemperaturni plinom hlađeni reaktor, HTGR, spada u kategoriju termičkih reaktora koji su dosegli vrlo obećavajuću fazu razvoja i pokazujući značajan potencijal za

buduće primjene. Odlikuju se jezgama od keramičkog materijala (kao što je grafit koji je jedini strukturni element) i plinovitim helijem kao rashladnim sredstvom. HTGR karakterizira izvrsna kemijska kompatibilnost sa strukturnim materijalima i izvrsna toplinska vodljivost koju nudi helij. Ova konfiguracija omogućuje formiranje samo primarne petlje, što dovodi do pojednostavljenog cjelokupnog dizajna postrojenja. S nedostatkom parazitskih apsorbera poput čelika u jezgri, korištenje različitih kombinacija fisijskih izotopa (^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu) i oplodnih izotopa (^{232}Th , ^{238}U) postaje izvedivo, u obliku oksida ili karbida. Eksperimentalni reaktori su pokazali sposobnost postizanja temperatura helija u rasponu od 850 do 1000°C, što je rezultiralo odgovarajućom visokom učinkovitošću ciklusa koja prelazi 40%. [12]

Napredni reaktori hlađeni plinom, AGR - Napredni plinski reaktori su značajno različiti u odnosu na prve plinske reaktore i proizašli su iz evolucije Magnox reaktora (slika 2.9). Obloge gorivih štapova se izrađuju od nehrđajućeg čelika, a gorivo je oksid obogaćenog uranija. Trenutno je u funkciji sedam naprednih plinskih reaktora snage između 555 MW i 625 MW. Svi ovi reaktori se nalaze u Velikoj Britaniji. [9]



Slika 2.9. Shema poboljšanog plinskog nuklearnog reaktora AGR. [9]

2.3.3. Budućnost nuklearnih reaktora

Do kraja 2021. godine u izgradnji je bilo 56 reaktora u 19 zemalja, ukupnog kapaciteta od 58,1 GW(e). Najviše reaktora se gradi u Kini (16), Indiji (8) te Rusiji i Republici Koreji (4). Dodatno, više od 70 energetskih reaktora radi više od 40 godina, a preko 250 energetskih reaktora u uporabi je više od 30 godina. Očekuje se da će se veliki broj nuklearnih reaktora staviti izvan pogona u sljedeća dva desetljeća. [6]

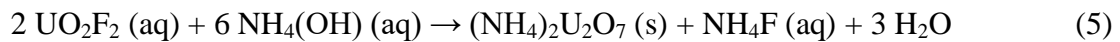
Brojne međunarodne inicijative i projekti suradnje, kao što su GIF (engl. *Generation IV International Forum*), INPRO (engl. *International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles*), Tehnološka platforma za održivu nuklearnu energiju Europske unije (SNETP) i razne nacionalne organizacije, istražuju inovativne dizajne reaktora. Očekuje se da će inovativni energetski reaktori i gorivni ciklusi biti komercijalno isplativi za izgradnju nakon 2030. godine. Ključni ciljevi ovih inovativnih reaktora i ciklusa goriva su povećati nuklearnu sigurnost, poboljšati otpornost na proliferaciju, minimizirati otpad i potrošnju prirodnih resursa te smanjiti troškove izgradnje i rada. Sustavi pokretani akceleratorima (ADS) dizajnirani su za konačno odlaganje plutonija i manjih aktinoida nakon rada termičkog i brzog reaktora. Inovativni termički reaktori imaju specifične značajke koje poboljšavaju iskorištavanje nuklearne energije, poput visoke toplinske učinkovitosti i izlaza na vrlo visokim temperaturama. Neki od tih reaktora također mogu koristiti torij kao gorivo. Iako inovativni toplinski reaktori možda neće značajno smanjiti otpad kada rade otvorenim ili djelomično zatvorenim nuklearnom gorivnim ciklusom, smanjenje otpada moglo bi biti značajno ako se koriste zajedno sa sustavima brzih reaktora. [2]

Inovativni nuklearni reaktori u fazi istraživanja i projektiranja uključuju: brzi reaktor hlađen natrijem SFR(engl. *Sodium-Cooled Fast Reactor*), brzi reaktor hlađen olovom LFR(engl. *Lead-Cooled Fast Reactor*), brzi reaktor hlađen plinom GCFR (engl. *Gas-Cooled Fast Reactor*), reaktor vrlo visoke temperature VHTR (engl. *Very-High-Temperature Reactor*), superkritični reaktor hlađen vodom SCWR (engl. *Supercritical water reactor*), napredni reaktor na tešku vodu AHWR (engl. *Advanced heavy-water reactor*), reaktor s rastaljenom soli MSR (engl. *molten salt reactor*) i subkritični reaktor pokretan akceleratorom ADSR (engl. *Accelerator-driven subcritical reactor*). [2]

2.4. Proizvodnja nuklearnog goriva

Dobivanje uranija postiže se ispiranjem izvađene rude sumpornom kiselinom, dušičnom kiselinom ili natrijevim karbonatom nakon drobljenja i mljevenja rude. Uobičajene mineralne faze su oksidi, karbonati, fosfati, silikati i vanadati. Za pročišćavanje uranija iz bazičnih minerala koristi se taloženje $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$. Nakon procesa ispiranja kiselinom, ekstrakcijom organofosforim ili trialkilaminskim ekstrakcijskim agensima selektivno se izolira U(VI) iz matrice. Oporabljeni uranij se zatim uklanja kiselim, neutralnim ili baznim otopinama (ovisno o primijenjenom procesu ekstrakcije) kako bi se omogućilo daljnje pročišćavanje/obrada i recikliranje otopine ekstrakta. Uranij se također može dobiti iz fosfatnih minerala pomoću nešto složenijeg procesa ekstrakcije otapalom.[14]

Prethodno obrađeni uranij se podvrgava daljnjoj obradi kako bi se pretvorio u U_3O_8 . Taj uranij se oksidira i pretvara u fluorid pomoću F_2 , stvarajući UF_6 , što omogućuje obogaćenje izotopa. Obogaćeni uranij zatim se šalje za izradu goriva, dok se preostali UF_6 koji sadrži izotopski osiromašeni uranij ($> 99,7\%$ ^{238}U) pohranjuje za kasniju obradu i odlaganje. Značajne količine takvih osiromašenih uranskih rezervi nalaze se pohranjene na različitim lokacijama. [14] Za pripremu goriva, obogaćeni UF_6 se hidrolizira (4) te se precipitira amonijakom (5):



Proizvod amonijeva diuranata potom se reducira s H_2 i pretvara u UO_2 . "Zeleni" UO_2 se preša i sinterira na $1700\text{ }^\circ\text{C}$ u suhoj atmosferi H_2 , rezultirajući materijalom s malim viškom kisika (UO_{2+x} , tj. UOX gorivo). Keramički materijal UO_{2+x} oblikuje se u odgovarajuću veličinu i oblik, a zatim se smješta u zirkonijev (ili aluminijski) omotač za gorivo kako bi se stvorio sastavljeni gorivni štap. Obogaćeno gorivo zatim se koristi u reaktoru kako bi se generirala snaga putem kontroliranih lančanih reakcija fisije.[14]

2.5. Radioaktivni otpad

Pojam radioaktivnog ili nuklearnog otpada obuhvaća otpad nastao radom nuklearnih reaktora, postrojenja za preradu nuklearnog goriva, bolnica ili istraživačkih ustanova. Cjelokupni proces proizvodnje nuklearne energije, koji uključuje rudarenje, mljevenje, konverziju, obogaćivanje ili proizvodnja goriva, kao i rad i dekomisiju NE, stvara otpad kojim se mora na odgovarajući gospodariti u skladu s tehničkim zahtjevima i međunarodno prihvaćenim načelima i zakonima. Tablica 2.1. [15] prikazuje relativne volumene, aktivnosti i radiotoksičnosti radioaktivnog otpada koji nastaje tijekom raznih faza gorivnog ciklusa. Vidljivo je kako najviše otpada nastaje prilikom rudarenja i mljevenja uranija, ali je takav otpad niske aktivnosti i radiotoksičnosti. Najopasniji otpad nastaje upravljanjem iskorištenim nuklearnim gorivom iako je volumen takvog otpada manji od otpada nastao rudarenjem i mljevenjem. [5,15]

Tablica 2.1. Prikaz relativnog volumena, aktivnosti i radiotoksičnosti otpada nastao raznim fazama gorivnog ciklusa. [15]

Proces stvaranja otpada	Relativni volumen	Relativna aktivnost	Relativna radiotoksičnost
Rudarstvo i mljevenje	Vrlo veliki	Niska	Niska
Rafiniranje	Niski	Niska	Niska
Konverzija i obogaćivanje	Niski	Niska	Niska
Proizvodnja goriva, svježe	Niski	Niska	Niska
Proizvodnja goriva, reciklirano	Niski	Niska/srednja	Srednja
Rad nuklearne elektrane	Veliki	Srednja	Niska
Upravljanje istrošenim nuklearnim gorivom – uporaba	Niski/srednji	Velika/vrlo velika	Velika
Upravljanje istrošenim nuklearnim gorivom – izravno odlaganje	Srednji	Velika	Velika
Dekomisija	Vrlo veliki	Niska	Vrlo niska

Glavni cilj gospodarenja nuklearnim otpadom je postupanje s njim na način koji štiti ljudsko zdravlje i okoliš, kako sada tako i u budućnosti, uz izbjegavanje nepotrebnog opterećivanja budućih generacija. Da bi se postigao cilj upravljanja radioaktivnim otpadom, važno je razmotriti količine (volumene), aktivnost, radiotoksičnost te fizička i kemijska svojstva otpada tijekom postupaka obrade, kondicioniranja i odlaganja.[15]

Praktična inženjerska načela za postizanje sigurnog skladištenja radioaktivnog otpada su: [5]

- Radioaktivnost treba biti imobilizirana
- Oblik otpada i spremnik moraju biti fizički i kemijski stabilni
- Potrebno je ukloniti energiju iz otpada
- Mora se usvojiti pristup s više barijera kako bi se osiguralo zadržavanje
- Oblik otpada i njegov spremnik moraju biti otporni na degradaciju
- Okruženje skladištenja treba optimizirati kako bi se produžio životni vijek pakiranja otpada
- Potrebe za aktivnim sigurnosnim sustavima, nadzorom i održavanjem te ljudskim intervencijama za osiguranje sigurnosti moraju biti minimizirane
- Paketi otpada moraju biti takvi da se mogu pregledati
- Skladišna zgrada mora biti otporna na potencijalne opasnosti
- Nužno je osigurati pristup u slučaju incidenta
- Životni vijek skladišne zgrade trebao bi odgovarati razdoblju skladištenja prije eventualnog odlaganja
- Skladište treba omogućiti preuzimanje otpada za konačno zbrinjavanje ili uporabu
- Paketi otpada trebaju biti prihvatljivi za konačno odlaganje

2.5.1. Podjela i klasifikacija radioaktivnog otpada

Međunarodna agencija za atomsku energiju, IAEA (engl. *International Atomic Energy Agency*) klasificira radioaktivni otpad na sljedeći način: [2]

- otpušteni radioaktivni otpad, ORAO (engl. *Exempt Waste*, EW);
- vrlo kratkoživi radioaktivni otpad, VKRAO (engl. *Very Short Lived Waste*, VSLW);

- vrlo nisko radioaktivni otpad, VNRAO (engl. *Very Low Level Waste*, VLLW);
- nisko radioaktivni otpad, NRAO (engl. *Low Level Waste*, LLW);
- srednje radioaktivni otpad, SRAO (engl. *Intermediate Level Waste*, ILW) i
- visoko radioaktivni otpad, VRAO (engl. *High Level Waste*, HLW).

Iako je klasificiranje otpada (tablica 2.2.) na temelju radioaktivnosti i vremenu poluraspada logična metoda, treba ga nadopuniti drugim relevantnim informacijama o svojstvima otpada, kao što su mjesto nastanka, fizičko stanje (plinovito, tekuće, kruto), metoda obrade, svojstva i opcije procesa. Kategorizacija otpada osigurava dosljedan pristup obradi, skladištenju i zbrinjavanju radioaktivnog otpada. [2] Mogući izvori tj. podrijetlo radioaktivnog otpada može se svesti na: otpad nastao ciklusima nuklearnog goriva što uključuje rafiniranje i pretvorbu koncentrata urana (žuti kolač), obogaćivanje, proizvodnju goriva i ponovnu preradu goriva, otpad nastao radom nuklearnih reaktora i otpad dobiven od prirodno nastalih radioaktivnih materijal, uključujući mljevenje i rudarenje urana. Kategorizacija toka otpada prema mjestu nastanka nudi vrijedne informacije o očekivanim svojstvima otpada, što kasnije može olakšati probleme povezane s analizama karakterizacije, procesima, klasifikacijom i odlaganjem.[5]

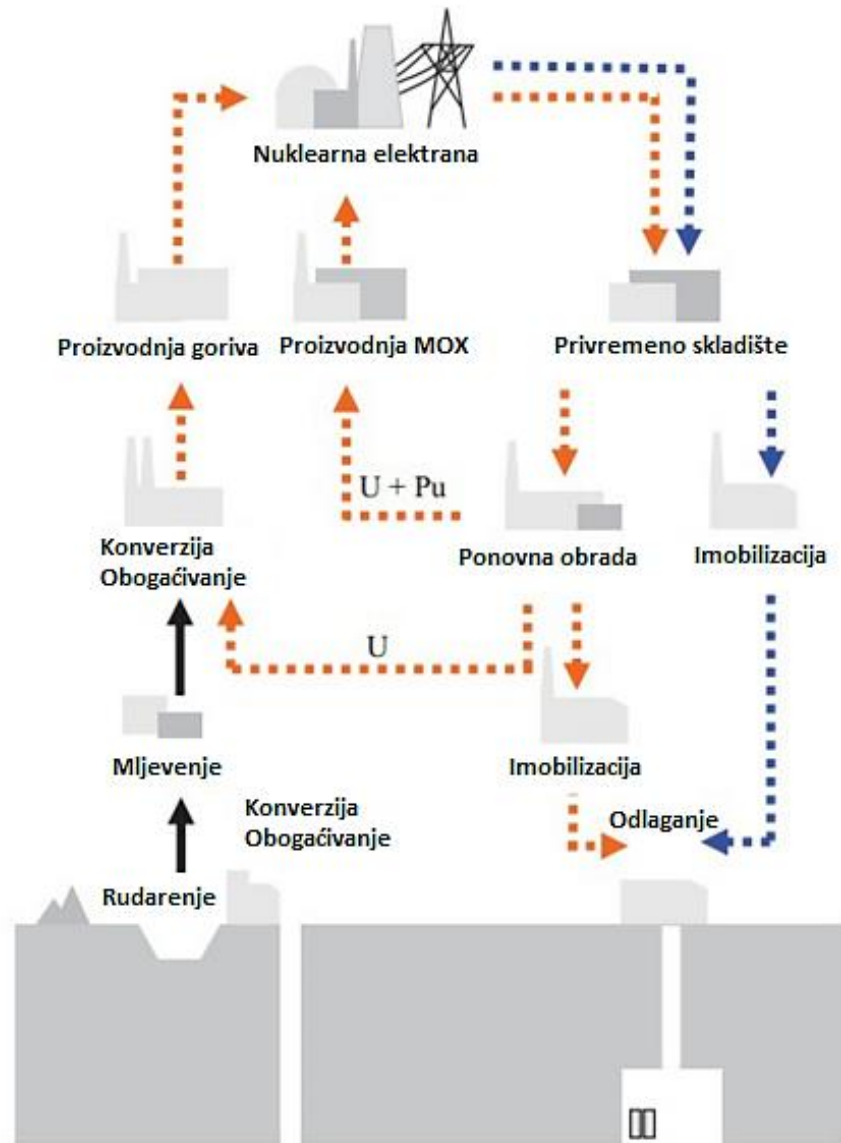
2.5.2. Otpad nastao procesima gorivnog ciklusa

Faze nuklearnog gorivnog ciklusa uključuju uz istraživanje nalazišta urana, rudarenje i obradu rude, konverziju, obogaćivanje, proizvodnju goriva, sagorijevanje goriva u reaktoru, privremeno skladištenje u elektrani, reprocesiranje (izdvajanje urana i plutonija iz istrošenog goriva te konačno odlaganje radioaktivnog goriva). Trenutno postoje dva primarna pristupa ciklusu nuklearnog goriva i to otvoreni (ili jednokratni) ciklus i zatvoreni (ili djelomično zatvoreni) ciklus. Obje se opcije koriste u postojećim nuklearnim reaktorima, ali inovativni nuklearni sustavi (INS) mogu zahtijevati nove ili prilagođene cikluse goriva.[2]

Tablica 2.2. Podjela i klasifikacija radioaktivnog otpada u Hrvatskoj [16]

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 kratkoživi radioaktivni otpad (VKRAO)	Sadrži radionuklide s vremenom poluraspada kraćim od 100 dana.	Skladištenje 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 ovoga Pravilnika.
Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO)	Radioaktivni otpad s većim koncentracijama aktivnosti od VKRAO. Koncentracije dugoživućih radionuklida u ovoj kategoriji otpada su zanemarive.	Skladištenje 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 pakovanju, odnosno 400 Bq/g za kompletnu masu radioaktivnog otpada).	Skladištenje 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. Ovisno o koncentraciji dugoživućih radionuklida može se podijeliti na – kratkoživi (na koji se primjenjuju prethodno propisana ograničenja dugoživućih radionuklida) – dugoživi (koji sadrži dugoživuće radionuklide iznad prethodno navedenih koncentracija). Proizvodnja topline u ovom otpadu niža je od 2 kW/m ³ .	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu na dubini od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara ispod površine. Prihvatljivost odlaganja manjih količina kratkoživućeg SRAO u pripovršinskom odlagalištu treba dokazati procjenom sigurnosti.
Visoko radioaktivni otpad (VRAO)	Radioaktivni otpad u kojemu je proizvodnja topline iznad 2 kW/m ³ .	Skladištenje u građevini odgovarajućih karakteristika i potom odlaganje u podzemnom odlagalištu smještenom u stabilnoj geološkoj formaciji na dubini od nekoliko stotina metara ispod površine.

U postojećim *otvorenim gorivnim ciklusima*, nuklearno gorivo izgrađeno je od urana (ili torija), ozračuje se u reaktoru, skladišti nekoliko desetljeća kako bi se omogućilo smanjenje proizvodnje topline, a zatim se izravno odlaže. Shema otvorenog ciklusa na bazi obogaćenog uranija prikazana je na slici 2.10. plavom bojom.[2]



Slika 2.10. Nuklearni gorivni ciklusi (plava boja – otvoreni ciklus; narančasta boja – zatvoreni ciklus).[17]

U *zatvorenim* ili *djelomično zatvorenim ciklusima goriva* (slika 2.12. narančasta boja), fisilni materijal (uranij i plutonij) se obnavlja iz ING-a (iskorištenog nuklearnog goriva) u postrojenju za ponovnu preradu i pretvara u novo gorivo. To se gorivo ponovno koristi, obično do tri puta u termičkim reaktorima, za dobivanje dodatne energije. Nakon upotrebe, dobiveni ING se ili odlaže kao otpad ili se pohranjuje za potencijalne buduće primjene u inovativnim reaktorima. [2]

Istrošeno nuklearno gorivo (ING), nakon vađenja iz jezgre reaktora, sadrži približno 96 % uranija, 1 % plutonija i 3 % fisijskih produkata i transuranskih teških metala. To predstavlja izvor neutronske i gama zračenja, kao i izvor topline. Zbog toga se obično prenosi u mokro skladište u bazenu goriva, gdje ostaje nekoliko godina. Nakon tog razdoblja, poznatog kao razdoblje hlađenja, istrošeno gorivo može se sigurno premjestiti u skladišta, mokra ili suha, ili poslati u pogone za ponovnu obradu. Trajanje vremena koje istrošeno gorivo provede u različitim metodama skladištenja varira ovisno o njegovim specifičnim svojstvima i planiranom tijeku djelovanja. Na primjer, istrošeno gorivo predviđeno za ponovnu obradu može doživjeti relativno kratka razdoblja skladištenja (nekoliko godina), dok istrošeno gorivo namijenjeno izravnom odlaganju može provesti više desetljeća u skladištu. [6]

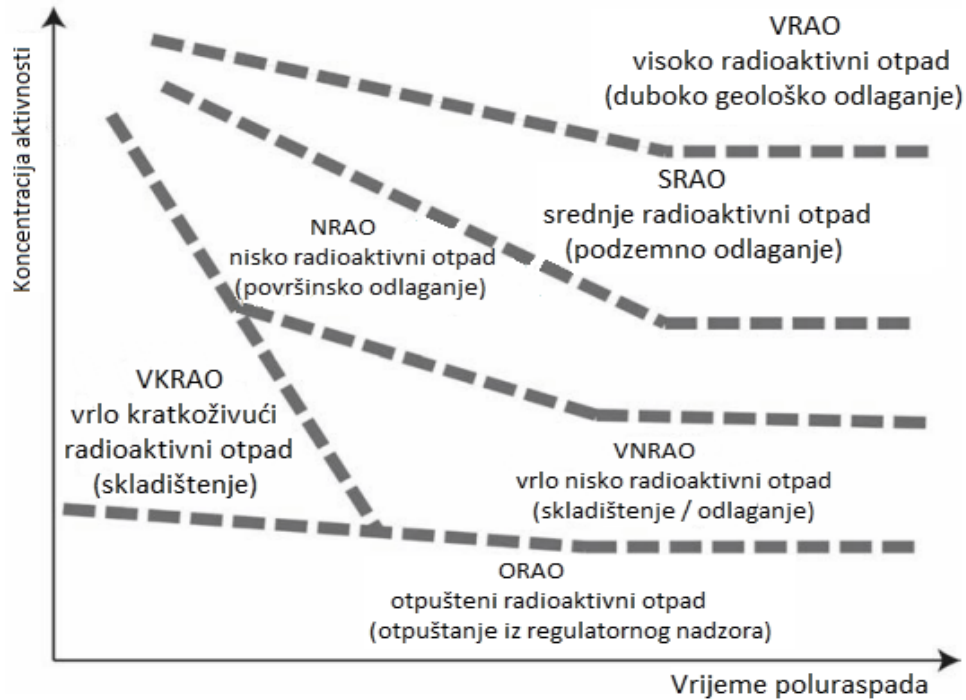
Točan sastav istrošenog goriva ovisi o nekoliko čimbenika, uključujući početnu vrstu goriva (uran, torij, miješani oksid (MOX)), njegovo obogaćivanje (postotak fisilnog sadržaja) i vrstu reaktora i uvjete rada. Kako bi se iskoristio preostali fisilni sadržaj u istrošenom gorivu, neke su zemlje usvojile zatvoreni ili djelomično zatvoreni ciklus goriva. [6]

3. Pregledni dio

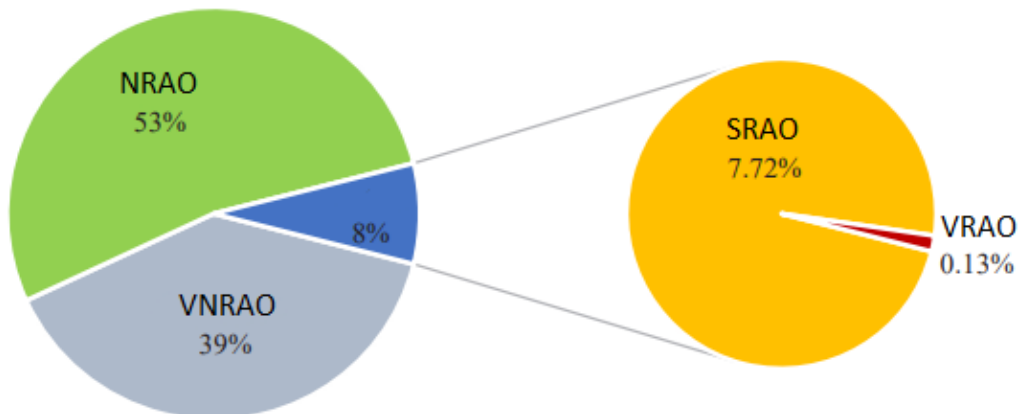
3.1. Gospodarenje radioaktivnim otpadom

Radioaktivni materijal se koristi za liječenje raka, nadzor kvalitete industrijskih proizvoda i proizvodnju električne energije, između ostalih korisnih namjena. Kao i svaki drugi proces, ove primjene rezultiraju proizvodnjom otpada. Ovaj otpad dolazi u različitim oblicima i materijalima, od kojih svaki ima različite razine radioaktivnosti i vremena poluraspada. Pravilno upravljanje i konačno sigurno odlaganje ključni su za gospodarenje radioaktivnim otpadom. Izbor metoda odlaganja ovisi o razinama radioaktivnosti, utvrđenim preferencijama i praksi u različitim zemljama. U nekim slučajevima, otpad s niskom radioaktivnošću može se osloboditi propisane kontrole i tretirati kao da nije radioaktivni otpad. Međutim, otpad koji predstavlja dugoročnu opasnost za ljude i okoliš zahtijeva smještaj u dobro projektirano postrojenje s više barijera. Istrošeno gorivo i radioaktivni otpad nastaju kao nusproizvodi nuklearnih reaktora, aktivnosti ciklusa goriva i drugih primjena radioaktivnog materijala u istraživanju, medicini i industriji. Trenutno se koriste dvije strategije za upravljanje istrošenim gorivom iz energetske reaktora kao što je postupanje s njim kao otpadom ili kao sredstvom. U slučaju kada se koristi kao sredstvo potrebna je dodatna obrada za dobivanje dragocjenog urana i plutonija, pri čemu se kao nusprodukt stvara visokoradioaktivni otpad. Istrošeno nuklearno gorivo nastaje kao rezultat rada svih vrsta nuklearnih reaktora, uključujući energetske reaktore, istraživačke reaktore, reaktore za proizvodnju izotopa i pogonske reaktore. Status istrošenog goriva, bilo kao resursa za ponovnu upotrebu ili kao otpada, ovisi o politikama i strategijama svake države članice. Krajem 2021.godine, 46 nuklearnih reaktora bilo je operativno u 32 države, doprinoseći oko 11 % globalne električne energije. Većina postojećeg radioaktivnog otpada, oko 95 %, spada u kategoriju vrlo niske ili niske radioaktivnosti. Srednje radioaktivni otpad čini otprilike 4 %, dok visokoradioaktivni otpad čini manje od 1 % (slike 3.1. i 3.2.) Od početka nuklearne proizvodnje električne energije 1954. do kraja 2016. godine proizvedeno je oko 390.000 tona istrošenog goriva. Otprilike dvije trećine te količine je uskladišteno, a preostala trećina je podvrgnuta ponovnoj obradi. Iako visokoradioaktivni

otpad čini manje od 1 % ukupne količine radioaktivnog otpada u svijetu, on sadrži oko 95 % kumulativne radioaktivnosti (slika 3.1.). [6]



Slika 3.1. Konceptualni prikaz sheme razvrstavanja otpada. [6]



Slika 3.2. Udio različitih klasa radioaktivnog otpada u ukupnim količinama u skladištu i odlagalištu iz 2016. godine. [6]

Najpoželjniji pristup za smanjenje otpada je reducirati ga na izvoru. Međutim, smanjenje na samom izvoru ograničeno je potrebom da se djeluje učinkovito, ekonomično i održivo. Otpad koji nastane može se obraditi kako bi se smanjio volumen koji zahtijeva odlaganje. Mnoga postrojenja već postižu ovo smanjenje koristeći postojeće tehnologije, uključujući kompaktiranje, super kompaktiranje, spaljivanje, sinteriranje i taljenje (za čvrsti otpad); kemijsko taloženje, isparavanje, ionska izmjena i membransko odvajanje (za tekući otpad) te toplinsko skrućivanje tekućih koncentrata procesima bituminizacije, vitrifikacije i sušenja. U fazi istraživanja su i nove tehnologije smanjenja volumena otpada poput taljenja plazmom, parni reforming, ultraljubičasta fotooksidacija i superkrična oksidacija vodom. [2]

3.1.1. Visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo

Od početka proizvodnje električne energije temeljene na nuklearnoj energiji od 1954. do kraja 2016. godine iz svih nuklearnih elektrana u svijetu ispušteno je ukupno oko 390000 metričkih tona teških metala (t HM) istrošenog goriva. Oko jedne trećine ukupnog istrošenog goriva ispuštenog iz NE (127000 t HM) je prerađeno dok se preostale dvije trećine trenutno skladište, čekajući preradu ili konačno zbrinjavanje. Većina istrošenog goriva trenutno se nalazi u nuklearnim elektranama, gdje prolazi kroz vlažno skladištenje unutar bazena reaktora. Nakon početnog razdoblja hlađenja od najmanje nekoliko godina u bazenu reaktora, dio istrošenog goriva je premješten u suha skladišta ili centralizirana mokra skladišta. Zaključno s 2016. ukupna količina istrošenog goriva u skladištu iznosila je približno 263000 t HM. [6]

3.1.1.1. Obrada

Ponovna obrada istrošenog nuklearnog goriva metodama vodene separacije daje tekući otpad visoke radioaktivnosti koji se obično obrađuje kako bi se dobio čvrsti oblik otpada putem vitrifikacije. Ovaj proces kondicioniranja uključuje proizvodnju kemijski izdržljivog materijala otpornog na toplinu i zračenje. Za obradu i kondicioniranje VRAO koriste se različite vrste stakla (poput borosilikatnog i fosfatnog) i određene keramike.

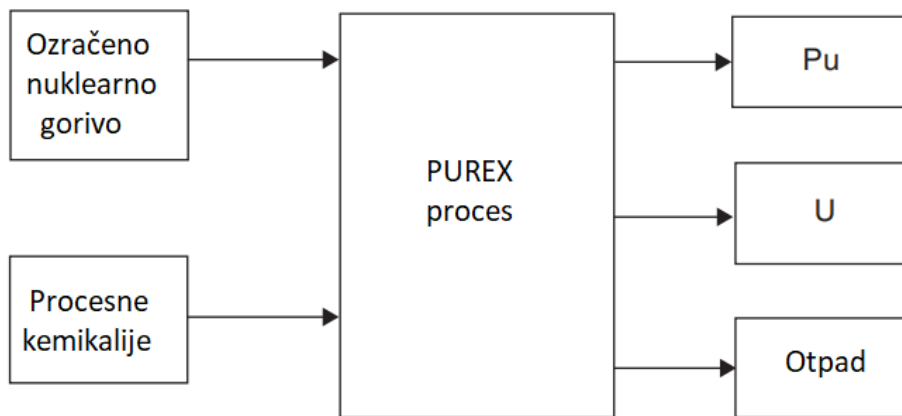
Otpadno staklo se stavlja u spremnike koji mogu poslužiti i kao skladišne jedinice. Nakon toga, VRAO se skladišti nekoliko desetljeća kako bi se smanjila razina proizvodnje topline, slično pristupu za istrošeno nuklearno gorivo. Nakon faze skladištenja, VRAO, poput istrošenog goriva koje je kategorizirano kao otpad, namijenjen je odlaganju u duboko geološko odlagalište. Trenutačno, zemlje s operativnim velikim postrojenjima za ponovnu obradu uključuju Francusku, Indiju i Rusku Federaciju. Odvojeni uran može se reciklirati kao gorivo u današnjim reaktorima nakon pretvorbe (konverzije) i, ako je potrebno, ponovnog obogaćivanja. Izolirani plutonij može se ponovno integrirati u miješano oksidno gorivo (MOX), koje kombinira osiromašeni uran i plutonijeve okside. MOX gorivo se koristi u lakovodnim reaktorima diljem svijeta, te u nekoliko Gen IV reaktora. Ovi reaktori omogućuju učinkovitije iskorištavanje energetskog potencijala urana i plutonija. [6]

U tijeku su inicijative za korištenje osiromašenog urana kao goriva ili za recikliranje svih obnovljenih dugoživićih aktinoida zajedno (uključujući plutonij) u brzim reaktorima. Ovaj strateški potez mogao bi značajno povećati iskorištenje uranija u nuklearnom gorivu s ispod 1% na više od 90%, što bi dovelo do otpada koji se pretežno sastoji od kratkotrajnih fizijskih produkata. Ovakav ishod značajno bi smanjio teret zbrinjavanja otpada. Također se razvijaju nove tehnologije ponovne obrade, namijenjene za implementaciju uz brze neutronske reaktore koji mogu spaliti sve dugovječne aktinoide, uključujući i uran i plutonij, bez njihovog međusobnog odvajanja. [6]

Visokoradioaktivni otpad je onaj otpad u kojemu temperatura može značajno porasti kao rezultat njegove radioaktivnosti, tako da se ovaj faktor mora uzeti u obzir pri projektiranju oblika otpada i objekata za skladištenje ili odlaganje. Takav otpad nastaje iz procesa sagorijevanja nuklearnog goriva unutar reaktora, obično stvarajući manje aktinoide koji stvaraju toplinu i produkte fisije kao što su radionuklidi ^{137}Cs i ^{90}Sr . Ova kategorija također može uključivati istrošeno ili iskorišteno gorivo ako je označeno kao otpad, kao i visokoradioaktivni otpad koji nastaje odvajanjem istrošenog goriva tijekom postupaka oporabe. Vodeni rafinat koji nastaje iz ciklusa ekstrakcije otapalom tijekom takve ponovne obrade općenito zadržava približno 97-99% aktivnosti produkta fisije pronađene u ozračenom korištenom gorivu. Istrošeno gorivo i dalje sadrži nizak postotak fisibilnih radionuklida koji se, ako je ekonomski isplativo, mogu ekstrahirati i ponovno

upotrijebiti u novoprodučenim gorivim elementima. Postupci ponovne obrade služe za odvajanje korisnih fisijskih materijala (^{235}U , ^{239}Pu i ^{241}Pu) od relativno kratkotrajnih fisijskih produkata. Izvučeni $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ mogao bi se pomiješati s obogaćenim uranom za proizvodnju novog goriva. Plutonijs se može prenamijeniti kao gorivo od miješanih oksida (MOX) ili sačuvati za potencijalnu buduću upotrebu. Neželjenim fisijskim produktima upravlja se kao visoko ili srednje radioaktivnim otpadom, ovisno o njihovim karakteristikama.[5]

Tijekom nuklearne fisije u reaktoru, koncentracija fisibilnih izotopa u nuklearnom gorivu se smanjuje, a povećava se koncentracija fisijskih produkata. Nuklearno gorivo se zatim treba zamijeniti novim, a istrošeno se nuklearno gorivo u postrojenjima ponovno prerađuje. [2]



Slika 3.3. Pojednostavljena shema PUREX procesa. [14]

Proces PUREX (engl. *Plutonium, Uranium, Reduction, Extraction*) prvobitno je dokumentiran 1949. godine, a zatim je implementiran u velikoj mjeri u procesu oporabe ozračenog nuklearnog goriva 1954. godine. Razvijen je u SAD-u kao sredstvo za izolaciju čistog plutonija u vojne svrhe. U suštini, cjelokupna uporaba ING provodi se PUREX procesom. Proces se temelji na ekstrakciji tekućina-tekućina koristeći tri-n-butil fosfat (TBP), razrijeđen na približno 20-30% volumena s normalnim parafinskim ugljikovodikom (NPH). Bitno je napomenuti da je razrjeđivač neophodan za održavanje fizičkih karakteristika organske faze, uglavnom viskoznosti i gustoće. Slika 3.3 prikazuje kako su primarni ulazi PUREX-a ozračeno nuklearno gorivo i brojne procesne

kemikalije, pretežno dušična kiselina (HNO_3). Proces daje tri glavna izlazna toka: 1) relativno čistu otopinu plutonijevog nitrata, 2) relativno čistu otopinu uranovog nitrata i 3) procesni otpad. Ovi produkti U i Pu nitrata mogu se dodatno pročistiti kroz dodatne cikluse PUREX obrade, a na kraju se pretvaraju u čvrste oblike, npr. metalne okside. Otpad je kategoriziran u tri razine (visoko, srednje i nisko) na temelju relativnog sadržaja radioaktivnosti.[2]

Temeljni ciljevi PUREX-a su proizvodnja uranija i plutonija visoke čistoće uz smanjenje gubitaka i volumena nastalog otpada. Temeljna važnost PUREX-a leži u njegovoj sposobnosti da učinkovito odvoji glavne aktinoide, posebno uran, plutonij i neptunij (zajedno s dugotrajnim i ekološki relevantnim fisijskim produktom tehnecijem). Prilagodbe PUREX-a, uključujući Advanced PUREX, COEX™ ili UREX, sve koriste otapalo TBP/kerozin za ekstrakciju aktinoida iz medija dušične kiseline. Unatoč svom uspjehu, PUREX nije bez izazova. Elementi kao što su Np, Tc, Zr, Nb i Ru predstavljaju probleme procesu, zahtijevajući više stupnjeva i implementaciju dekontaminacije. S vremenom su napravljena poboljšanja i modifikacije PUREX-a, uključujući ugradnju naprednije opreme za poboljšano rukovanje i povećanu propusnost.[2,14] Na temelju opsežnog francuskog iskustva s PUREX-om, Areva i Komisija za alternativne energije i atomsku energiju CEA (fran. *Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives*) razvili su tri procesa: [2]

1. COEX (engl. *Co-extraction of actinides*) proces fokusiran je na koekstrakciju i kotaloženje urana i plutonija (obično zajedno s neptunijem), uz struju čistog urana. Ovim pristupom eliminira se odvajanje plutonija. COEX proces je na rubu industrijske primjene i obećava poboljšane MOX performanse i za lakovodne i za brze reaktore. Proizvedeni otpad uključuje produkte fisije i manje aktinoide, namijenjene za ostakljivanje tj. vitrifikaciju.

2. DIAMEX-SANEX (engl. *Diamide extraction-Selective actinide extraction*) procesi temelje se na selektivnom odvajanju dugoživićih radionuklida (s posebnim fokusom na odvajanje Am i Cm) od kratkotrajnih produkata fisije. Ovaj se proces može integrirati s COEX-om, nakon odvajanja U, Pu, Np. Uranij, plutonij i manji aktinoidi se neovisno recikliraju u Gen. IV brzim oplodnim reaktorima.

3. Proces grupirane ekstrakcije aktinoida GANEX (engl. *Group actinide extraction*) uključuje taloženje urana s plutonijem (slično COEX-u) i zatim odvajanje manjih aktinoida i određenih lantanoida od kratkotrajnih fizijskih produkata. U ovom procesu, uran, plutonij i manji aktinoidi koriste se kao gorivo u reaktorima brzih neutrona IV. generacije, dok lantanoidi postaju otpad zajedno s drugim fizijskim produktima.

Prilagođena verzija procesa PUREX, koja ne podrazumijeva izolaciju struje plutonija, je serija postupaka ekstrakcije urana UREX (engl.). Ove se metode mogu proširiti na obnavljanje produkata fisije poput joda isparavanjem i tehnecija elektrolizom.[14]

UREX proces jedinstveno je razvijen za dobivanje uranija i tehnecija. Otapalo koje se koristi u UREX procesu je konvencionalno PUREX otapalo koje se sastoji od tributil fosfata (TBP) otopljenog u n-dodekanu. Unutar UREX procesa iz otopljene gorivne smjese ekstrahiraju se uran i tehnecij. Međutim, koekstrakcija plutonija i neptunija učinkovito je spriječena uvođenjem složenog redukcijskog spoja. Nakon što se izdvoji iz otapala, uran se izolira od tehnecija kroz proces anionske izmjene. Zbog svoje mobilnosti u okolišu, izuzetno je važno izdvojiti Tc iz reciklirane smjese. Putem UREX-a, tehnecij se može uspješno obnoviti uz visok prinos od preko 95%. UREX+ je nadogradnja UREX procesa gdje se uvodi dodatni korak odvajanja i obnavljanja dugoživićih Np i Am zbog njihove radiotoksičnosti. [2]

Za razliku od konvencionalnih tekućih metoda, piroliza ne uključuje otapanje istrošenog goriva pomoću otopine. U početku se uklanjaju strukturni materijali iz sklopova goriva, poput obloga, a gorivo se reže ili drobi u male komadiće. Ti se segmenti goriva zatim stavljaju u metalnu košaru i uvode u ćeliju za elektropročišćavanje koja sadrži sol elektrolita, kao što je eutektička smjesa LiCl-KCl. Ova ćelija općenito radi na povišenim temperaturama, obično oko 700-800 K. Većina komponenti istrošenog goriva, uključujući uran, TRU (transuranske elemente) i produkte fisije, otapa se u soli. Uran se elektrokemijskim putem prenosi do čvrste katode, gdje se taloži u pročišćenom stanju. Plutonij, manji aktinoidi (MA) i reaktivni produkti fisije nakupljaju se unutar soli. Nakon izdvajanja urana, čvrsta katoda zamjenjuje se tekućom kadmijevom katodom. Plutonij, drugi manji aktinoidi, preostali uran i male količine produkata fisije lantanida skupljaju se u ovoj tekućoj katodi. Nereaktivni produkti fisije općenito se nakupljaju kao metalne

krutine unutar anodnog koša (anodni mulj). S nakupljanjem produkata fisije, toplina koja nastaje uslijed njihovog radioaktivnog raspada raste sve dok se ne uklone elementi koji stvaraju toplinu. Naslage s katoda ćelije za elektro-pročišćavanje zagrijavaju se kako bi isparile sve kontaminirajuće soli i stvorile ingot teškog metala. Tehnike koje uključuju redukciju koriste se za izdvajanje Pu i MA iz kadmija. Odvojeni materijal može biti podvrgnut oksidaciji ili nitrifikaciji, ovisno o vrsti goriva, prije transporta u postrojenje za proizvodnju goriva. Posebni tretmani se primjenjuju na sol kako bi se oporavili preostali TRU elementi i uklonile dovoljne količine produkata fisije, što omogućuje recikliranje. Alternativno rješenje uključuje korištenje komponenti fluora umjesto klora. Pirokemijski proces stvara specifične oblike otpada, uključujući otopine za hvatanje otpadnih plinova, nezarobljene plinove, kontaminirane soli i metale koji se koriste za ekstrakciju. Gospodarenje ovim oblicima otpada zahtijeva značajan rad na razvoju, budući da se moraju identificirati prikladni procesi obrade i stabilnog kondicioniranja. [15]

3.1.1.2. Inovativni ciklusi nuklearnog goriva

Cilj inovativnih nuklearnih sustava (INS) je pozicionirati nuklearnu energiju kao značajan doprinos globalnoj opskrbi energije u 21. st. Ovi sustavi obuhvaćaju evolucijske i inovativne dizajne. Evolucijski dizajn predstavlja napredni pristup koji poboljšava postojeće dizajne kroz umjerene izmjene, zadržavajući dokazane koncepte kako bi se smanjili tehnološki rizici. S druge strane, inovativni dizajn uključuje radikalne promjene u pristupima dizajnu ili konfiguracijama sustava u usporedbi s trenutnom praksom. [2]

U pristupu potpunog recikliranja fisijskih materijala u gorivnom ciklusu, istrošeno nuklearno gorivo ponovno se prerađuje kako bi se oporavio i reciklirao uran (U), plutonij (Pu) i/ili uran-233 (^{233}U). Ovaj proces recikliranja uključuje višekratnu obradu i recikliranje ING-a u brzim reaktorima kako bi se u potpunosti iskoristio fisijski materijal, dok se manji aktinoidi i fisijski produkti usmjeravaju u tok otpada. Ova strategija gorivnog ciklusa ima za cilj očuvanje resursa fisijskih materijala, iako se trenutno ne provodi u velikom opsegu. Međutim, to bi se moglo provesti u praksi s postavljanjem brzih reaktora.[2]

Drugi pristup ciklusu goriva uključuje recikliranje aktinoida i dugovječnih fisijjskih proizvoda. U ovoj metodi, sav ING se obrađuje, a aktinoidi se recikliraju više puta kako bi se u potpunosti potrošio fisijjski materijal i transmutilali manji aktinoidi. Osim toga, jedan ili više produkata fisije, kao što su ^{99}Tc i ^{129}I , također se mogu reciklirati. Ovaj ciklus goriva mogao bi se temeljiti na termičkim reaktorima poput teškovodnih reaktora pod tlakom (PHWR) ili lakovodnih reaktora (LWR), u kombinaciji s brzim reaktorima. I termički i brzi reaktori bi proizvodili energiju, ali brzi reaktori bi mogli sagorjeti višak fisibilnog goriva proizvedenog od plodnog ^{238}U i manjih aktinoida, koji bi inače bili poslani u odlagališta. Razvijaju se koncepti za ovaj ciklus goriva koji će se dugoročno koristiti u inovativnim nuklearnim sustavima (INS). Ovaj pristup podupire očuvanje resursa, smanjuje radiotoksičnost u konačnom otpadu i optimizira prostor odlagališta, što su sve važni kriteriji za inovativne cikluse goriva. Jedna značajna prednost INS-ova leži u njihovom potencijalu za gospodarenje otpadom. Očekuje se da će generirati manje otpada po jedinici proizvedene energije (otpad/kWh(e)), što će rezultirati smanjenom radioaktivnosti, manjim brojem dugoživućih aktinoida i manjim otiskom za geološko odlaganje. Ovaj napredak u gospodarenju otpadom omogućit će širu primjenu nuklearne energije uz manji utjecaj na stanovništvo i okoliš. [2]

3.1.1.3. Transport i skladištenje

Gospodarenje istrošenim gorivom i VRAO uključuje brojne korake transporta između nuklearnih elektrana, skladišnih objekata, postrojenja za kapsuliranje/pakiranje i/ili postrojenja za ponovnu obradu, kao i do odlagališta. Većina prijevoza obavlja se unutar jedne zemlje, ali neka putovanja prelaze državne granice. Za zemlje koje prerađuju svoje istrošeno gorivo, ali nemaju vlastita postrojenja za preradu, takva su prekogranična kretanja neophodna. Prijevoz obično koristi posebno dizajnirane transportne kontejnere koji osiguravaju sigurnost, štite radnike i javnost te ispunjavaju zahtjeve nuklearne sigurnosti kao što je upravljanje raspadnom toplinom, osiguranje subkritičnosti i zaštita od neutrona. U slučaju prekograničnog kretanja, svaka uključena država mora poduzeti odgovarajuće mjere kako bi se osiguralo da se prijevoz odvija na odgovarajući način i uz odobrenje zemalja porijekla, odredišta i tranzita. [6]



Slika 3.4. Mokro skladište istrošenog nuklearnog goriva u Švedskoj. [6]

Nakon što se istrošeno gorivo ispusti iz reaktora, ono se obično stavlja u bazen ispunjen vodom posebno dizajniran za skladištenje istrošenog goriva. Ovo skladište služi za hlađenje goriva i kao zaštita od njegove radioaktivnosti. Trajanje ove faze skladištenja može varirati od nekoliko godina do više desetljeća, ovisno o odabranom pristupu gospodarenju istrošenim gorivom. Kada je istrošeno gorivo namijenjeno za recikliranje, razdoblje skladištenja je relativno kratko, oko desetljeća ili čak i manje. Međutim, u zemljama koje su se ili odlučile za izravno zbrinjavanje ili još uvijek razmatraju kako postupiti s ING, trajanje skladištenja može se značajno produžiti. Metode skladištenja obuhvaćaju mokro skladištenje unutar skladišnih bazena(slika 3.4.) i suho skladištenje unutar namjenski izgrađenih skladišnih bačvi, kanistara ili trezora(slika 3.5.). Svi nuklearni reaktori opremljeni su bazenima za skladištenje istrošenog goriva kao dijelom svog izvornog dizajna, koji imaju svrhu prvog koraka skladištenja topline koja se oslobađa pri hlađenju nakon izdvajanja iz reaktora. Dodatni skladišni kapacitet, bilo mokri ili suhi, može se konstruirati kako bi se zadovoljile veće potrebe za skladištenjem. Ova nova skladišta smještena su izvan zaštitne zgrade i mogu postojati unutar ili izvan granica nuklearne elektrane. [6]



Slika 3.5. Suho skladište u Švicarskoj. [6]

3.1.1.4. Odlaganje

Postoji općeprihvaćeno mišljenje među tehničkim stručnjacima da je najpoželjnija metoda osiguravanja dugoročne sigurnosti za istrošeno gorivo i VRAO izolacija u dubokim geološkim odlagalištima. Postrojenja za geološko odlaganje otpada dizajnirana su tako da osiguraju pasivnu izolaciju s više barijera za radioaktivne materijale. To podrazumijeva njihovo postavljanje unutar pažljivo projektiranih struktura koje su zakopane duboko unutar odgovarajućih geoloških formacija, čime se osigurava trajna stabilnost karakteristična za geološki stabilnu okolinu. U zemljama u kojima ING i VRAO zahtijevaju odlaganje, uobičajeni pristup često uključuje korištenje jednog dubokog geološkog odlagališta za obje vrste otpada. Za opciju otvorenog ciklusa, prije prijevoza u odlagalište, ING mora biti zatvoreno u spremnik koji je otporan na koroziju i mehanički robustan. Ovaj će spremnik služiti kao izolacija tijekom odgovarajućeg vremena, često u rasponu od tisuću godina ili više. Osim toga, stakleni oblik VRAO, zatvoren u posudu od nehrđajućeg čelika, posebno je dizajniran da pokaže dugotrajnu izdržljivost u svrhu skladištenja i odlaganja. Specifikacije za dugovječnost i cjelovitost spremnika ovise o konkretnom konceptu geološkog odlagališta i odabranom geološkom

mediju. [6] Za spremnike namijenjene skladištenju istrošenog goriva dostupni su različiti dizajni. Obično je svaki spremnik dizajniran za smještaj višestrukih reaktorskih elemenata i ima težinu od nekoliko desetaka tona kada je potpuno napunjen (slika 3.6.). Ovi spremnici mogu biti izrađeni od materijala kao što su bakar, lijevano željezo ili lijevani čelik, s debljinom stijenke većom od 50 mm. Završno brtvljenje spremnika može se postići zavarenim ili vijčanim poklopcima.



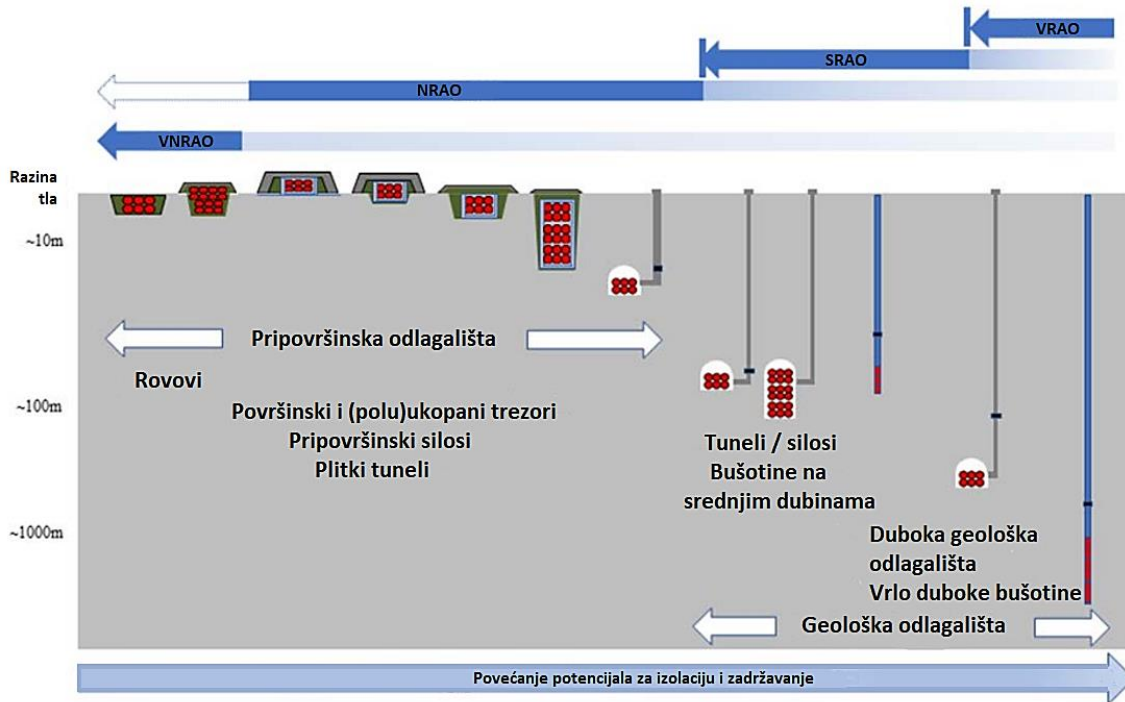
Slika 3.6. Spremnici za odlaganje istrošenog goriva. [6]

Proces vitrifikacije uključuje sušenje i kemijsku pretvorbu (kalcinaciju) visoko aktivnog tekućeg koncentrata u fini suhi prah poznat kao "kalcin". Ovaj kalcin se kombinira sa smrvljenim staklom u omjeru od približno 25 % otpada prema 75 % stakla, a zatim se zagrijava do 1150 °C u indukcijskoj peći. To rezultira taljenjem stakla i otapanjem kalcina, stvarajući rastaljenu mješavinu stakla i produkata fisije. Rezultirajući vitrificirani stakleni proizvod izliva se u spremnike od nehrđajućeg čelika od 150 litara, skrućuje se hlađenjem i zatvara postavljanjem prikladno zavarenog poklopca. Ovi postakljeni spremnici za otpad od proizvoda pohranjuju se u prirodno ventiliranim objektima koji se hlade zrakom dok ne budu spremni za odlaganje ili, u slučaju komercijalnih operacija, za vraćanje kupcima koji snose odgovornost za gospodarenje svojim otpadom. [5,14]

Korištenje spremnika za skladištenje visoko aktivne tekućine (HAL, engl. *High active liquor*) pokazalo se učinkovitim u kratkom do srednjem roku (preko 50 godina). Međutim, pojavljuju se nesigurnosti u pogledu dugoročnog (preko 100 godina) integriteta spremnika zbog čimbenika poput korozije i taloženja čestica koje stvaraju toplinu u spremnicima koji se ne miješaju. Prije vitrifikacije, HAL-ovi moraju biti ujednačeni i podvrgnuti se temeljitom testu kako bi se odredile njihove karakteristike i svojstva. To obično uključuje metode kao što su spektroskopija induktivno spregnute plazme (ICP), spektroskopija atomske emisije (AES) i spektroskopija mase (MS). Dodatni parametri uključuju temperaturu sirovine, gustoću, sadržaj litija (koji može utjecati na stvaranje stakla i otpornost na ispiranje), pH i različita fizikalna i kemijska svojstva otpada, uključujući sve povezane opasnosti poput korozivnosti, zapaljivosti, toksičnosti i prisutnosti organskih spojevi. Ostala razmatranja obuhvaćaju inventar radionuklida, volumen otpada i kompatibilnost toka otpada s predviđenom matricom za kapsuliranje.

Alternativa preradi je izravno odlaganje istrošenog goriva. Kako bi se olakšalo rasipanje topline i iskoristilo prirodno radioaktivno raspadanje, smatra se da je potrebno razdoblje skladištenja od oko 50 godina, što pojednostavljuje buduće odlaganje. Međutim, ako se izravno odlaganje istrošenog nuklearnog goriva odabere kao strategija upravljanja, trenutačno u svijetu ne postoji dostupno postrojenje za odlaganje VRAO-a za smještaj tog materijala. [5]

Dugoživi radioaktivni otpad, kao što je istrošeno nuklearno gorivo (ako se deklarira kao otpad) i visokoradioaktivni otpad nastao preradom goriva mora se sigurno držati i izolirati od ljudskog kontakta i okoliša u rasponu od nekoliko tisuća godina. Izolacija znači držanje otpada podalje od biosfere sredstvima koja se ne oslanjaju na aktivne mjere u budućnosti i otežavaju namjerni ljudski upad u otpad. Uzimajući u obzir da se apsolutno zadržavanje ne može jamčiti tijekom cijelog razdoblja kada otpad predstavlja potencijalnu opasnost, svako potencijalno ispuštanje iz sustava odlagališta trebalo bi predstavljati prihvatljivu razinu rizika. Trajna sigurnost odlagališta podržana je zaštitnim karakteristikama geološkog okruženja, projektiranim barijerama koje okružuju otpad i stabilnošću strukturnog oblika otpada. Široko prihvaćen pristup dugoročnom gospodarenju radioaktivnim otpadom uključuje odlaganje dugoživućeg otpada u duboke i stabilne geološke formacije (slika 3.7.). [6,15]



Slika 3.7. Prikaz odlaganja različitih klasa radioaktivnog otpada. [6]

Odlagališta su obično smještena unutar stabilnih geoloških okruženja koja nude povoljne uvjete, osiguravajući zaštitu otpada i projektiranih barijera tijekom značajnih vremenskih okvira. To znači da je malo vjerojatno da će se ključne karakteristike koje osiguravaju sigurnost, poput mehaničke stabilnosti, niskog toka podzemne vode i povoljnih geokemijskih uvjeta, značajno promijeniti tijekom relevantnih vremenskih okvira. Koncept sustava s više barijera jača otpornost repozitorija. Barijere bi trebale djelovati sinergistički, s različitim fizičkim i kemijskim komponentama i procesima koji zajednički doprinose sigurnosti, omogućujući kompenzacije za nesigurnosti u izvedbi jedne ili više komponenti ili procesa kroz učinkovitost drugih. Što se tiče visokoradioaktivnog otpada, razmatraju se dvije glavne konfiguracije odlaganja: odlaganje otpada unutar galerija, gdje se otpad postavlja duž središnje osi galerije, i odlaganje otpada u bušotine, okomite ili vodoravne, koje se buše iz galerije [15]

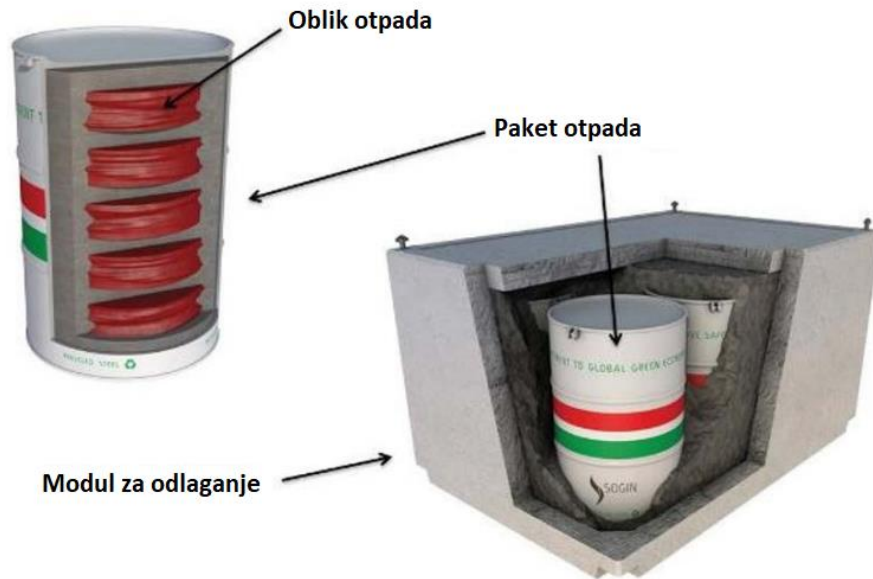
3.1.2. Srednje radioaktivni otpad

Srednje radioaktivni otpad općenito sadrži značajne količine dugoživićih radionuklida i stoga zahtijeva odlaganje na dubinama koje osiguravaju dugoročnu izolaciju od biosfere. SRAO nastaje iz raznih izvora, uključujući ostatke proizvodnje goriva kao što su ostaci uranija, proces obogaćivanja i kao nusprodukt ponovne obrade. U vojnom kontekstu operativni otpad potječe iz proizvodnje oružja, uključujući materijale poput plutonija, tvari kontaminiranih plutonijem, tricij (^3H), filtere, tekući otpad, kao i istrošene jezgre reaktora iz nuklearnih pogonskih postrojenja i njihov radni otpad. Medicinski, industrijski i sektori manjih korisnika doprinose nizu otpada, kao što su zatvoreni izvori, izvori ^{60}Co , ^3H i ^{14}C , koji se ili vraćaju proizvođačima ili usmjeravaju nacionalnim službama za zbrinjavanje. Radni otpad reaktora obuhvaća mješavinu aktiviranih komponenti, fragmenata gorivnih elemenata, filtera, smola za ionsku izmjenu, taloga, koncentrata isparivača i materijala jezgre poput grafita. Otpad od razgradnje uključuje materijale poput kontaminiranih i aktiviranih strukturnih komponenti kao što su beton, armaturne čelične šipke, kao i elemente jezgre reaktora kao što su grafit i kontrolne šipke.[5,6]

3.1.2.1. Obrada, skladištenje i odlaganje

Obrada srednje radioaktivnog otpada može se odvijati ili na mjestu njegovog nastanka ili unutar namjenskog postrojenja. Proces obrade obuhvaća različite faze, kao što su prikupljanje, sortiranje, dekontaminacija, smanjenje veličine ili volumena te stabilizacija prije pakiranja. Uobičajene tehnike za obradu i kondicioniranje SRAO-a uključuju sušenje, isparavanje, kompaktiranje pod visokim tlakom, taljenje i cementiranje. Ovisno o namjeravanom odredištu za skladištenje ili odlaganje, SRAO se često obrađuje i kondicionira ugradnjom u matricu, poput cementa, unutar odgovarajućeg spremnika kako bi se osigurala potrebna zaštita od zračenja. U nekim slučajevima, gdje dodatne matrice nisu potrebne radi sigurnosti, kondicioniranje uključuje samo pakiranje. Materijali za pakiranje koji se obično koriste za SRAO uključuju betonske spremnike s čeličnom armaturom, čelične bačve i čelične kutije (slika 3.8.). Njihove dimenzije odabrane su tako da zadovolje sigurnosne zahtjeve i budu kompatibilne s transportnim

bačvama i trezorima za odlaganje. SRAO kontejneri mogu biti samozaštićeni ili se oslanjati na vanjsku zaštitu od zračenja, a oba koncepta dizajna su široko primijenjena.



Slika 3.8. Način pakiranja i zbrinjavanja RAO. [6]

Tekući otpad može biti podvrgnut smanjenju volumena kroz procese kao što su kolone za ionsku izmjenu, kemijsko odvajanje ili filtracija, što dovodi do manje aktivnih ili neaktivnih tekućina koje se mogu ispustiti. Preostale koncentrirane aktivne komponente su imobilizirane unutar matrice pomoću materijala poput cementne žbuke, što ne povećava njihovu topljivost. Čvrsti SRAO uključuje predmete kao što su materijali kontaminirani plutonijem, strukturno kontaminirani ili aktivirani čelici od razgradnje, građevinski otpad, kao i visoko aktivni radni otpad i kućišta goriva. Metode obrade uključuju smanjenje pokretljivosti otpada uz smanjenje njegovog volumena. Plinoviti otpad, osim ako nije izravno odobren za ispuštanje, obično se nalazi unutar kontroliranih sustava i hvataju ga apsorberi ili filtri ventilacijskog sustava, nakon čega se podvrgava obradi sličnoj krutom SRAO-u. Mješavine za injektiranje koje se koriste za stvaranje blokova krutog otpada mogu sadržavati visoki pH (alkalni) kako bi se osiguralo okruženje u kojem su dugotrajni radionuklidi manje topivi, smanjujući mogućnosti za njihovo ponovno pojavljivanje na površini iz dubokog geološkog odlagališta. [5,6]

Nakon prerade, često je potrebno skladištenje proizvoda ako prikladna postrojenja za odlaganje nisu dostupna. Skladištenje na razdoblje do 100 godina ili dulje može se razmotriti kao opcija pod uvjetom da će spremnici za otpad ostati netaknuti i ne podliježu degradaciji. Potrebno je obratiti pozornost na osiguranje odgovarajućeg zadržavanja i zaštite. U nekim slučajevima također može biti potrebno uklanjanje topline, iako ne u istoj mjeri kao sa VRAO. [6]

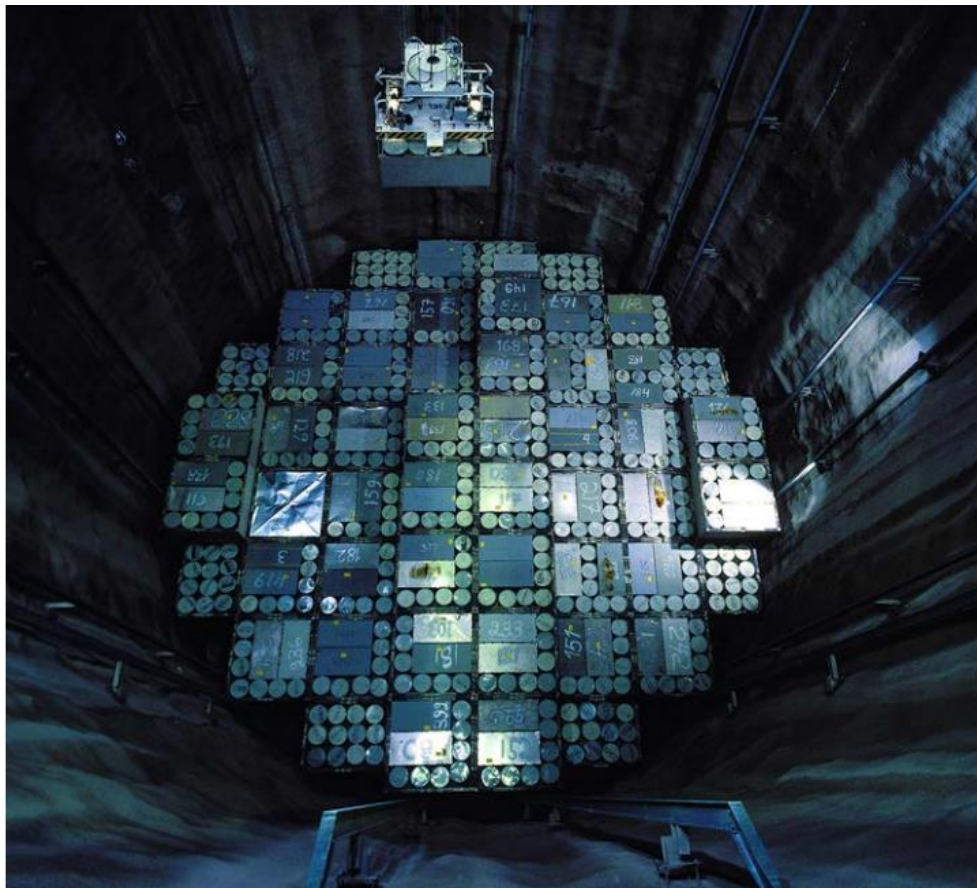
Odlaganje SRAO uključuje različite metode i pristupe kako bi se osigurala sigurnost i minimalni utjecaj na okoliš. Neki od tih pristupa uključuju površinsko ili pripovršinsko odlaganje u posebno izgrađenim odlagalištima, plitko ukopane ili tunelske strukture. Također, postoji mogućnost dubokog geološkog odlaganja. Ova kombinacija prirodnih i inženjerskih barijera ima za cilj ograničiti širenje radioaktivnosti i potencijalne utjecaje na okoliš. [5,6]

3.1.3. Nisko radioaktivni otpad

Kombinirani vrlo nisko radioaktivni otpad i nisko radioaktivni otpad čine više od 95 % ukupne količine radioaktivnog otpada, ali doprinose manje od 2 % ukupne radioaktivnosti. NRAO obično ne zahtijeva značajnu zaštitu tijekom faza rukovanja i privremenog skladištenja. Ova vrsta otpada prikladna je za odlaganje unutar prizemnih odlagališta. Niskoradioaktivni otpad obuhvaća razne radionuklide, uključujući one prirodne poput urana, torija i produkata njihovog raspada, kao i radionuklide koje je stvorio čovjek. Mnogi umjetni radionuklidi potječu od fisije urana u nuklearnim reaktorima, bilo kao proizvodi fisije ili aktivacijski proizvodi koji nastaju apsorpcijom neutrona od strane atomskih jezgri. NRAO obuhvaća zaštitnu odjeću, filtere koji su bili u interakciji s ovim radionuklidima i koji su postali kontaminirani do razina koje ispunjavaju uvjete za klasifikaciju NRAO. Među značajnim radionuklidima u NRAO ističu se aktinoidi. Ova skupina uključuje teške elemente poput torija i urana (oba prirodna) i umjetno stvorene elemente poput plutonija, americija i neptunija. Aktinoidi uglavnom emitiraju alfa zračenje i dugovječni su, što doprinosi njihovoj klasifikaciji unutar kategorije NRAO. Unatoč varijacijama u poluživotima, proizvodi aktivacije i fisije emitiraju beta i gama zračenje, dok aktinoidi oslobađaju prvenstveno alfa zračenje. [5]

3.1.3.1. Obrada, skladištenje i odlaganje

Slično srednje radioaktivnom otpadu, obrada i priprema NRAO odvija se ili na mjestu gdje nastaje ili u namjenskom postrojenju. Otpad se podvrgava odvajanju, obradi, kondicioniranju, pakiranju, praćenju i prikladnom skladištenju prije transporta na odlagalište. Tehnike kondicioniranja NRAO uključuju sušenje, spaljivanje, isparavanje, zbijanje pod visokim tlakom, taljenje i cementiranje. Uobičajeni materijali za pakiranje uključuju betonske spremnike, čelične bačve i čelične kutije. Dimenzije ovih spremnika odabrane su u skladu sa sigurnosnim kriterijima i raspoloživim prostorom za odlaganje i transport paketa. [6]



Slika 3.9. Silos odlagališta NRAO-a (Finska). [6]

Mogućnosti skladištenja NRAO-a (slika 3.9.) uglavnom su slične onima za SRAO. Skladištenje na razdoblje do 100 godina ili dulje može se razmotriti kao opcija

pod uvjetom da spremnici za otpad ostanu netaknuti i da se ne razgrađuju. Takvo dugoročno privremeno skladištenje provodi se u Nizozemskoj. [6]

Kao i sa SRAO, nisko radioaktivnim otpadom, koji većinom ima poluživot kraći od 30 godina, obično se upravlja odlaganjem u odlagalištima blizu površine u brojnim zemljama. Ta odlagališta mogu biti u obliku rovova ili betonskih trezora, služeći kao spremnici za otpad u kontejnerima (slika 3.9.). Kako bi se spriječila infiltracija vode, površinska erozija i neovlašteni pristup, preko otpada se postavlja projektirani sustav pokrivanja. Ta postrojenja ostaju pod nadzorom sve dok se opasnost povezana s otpadom ne smanji na prihvatljive razine, često u rasponu od nekoliko stotina godina. Iako je odlaganje NRAO-a u odlagalištima blizu površine uobičajeni pristup, zemlje poput Kanade, Finske, Njemačke, Mađarske, Nizozemske, Republike Koreje, Švedske i Švicarske istražuju ili su se odlučile za alternativu odlaganja NRAO u odlagalištima koja se nalaze na dubinama od 50 m do 1000 m. Ova spremišta eliminiraju potrebu za produljenim nadzorom. Kratkoživeći nisko i srednje radioaktivni otpad (NiSRAO) može se skladištiti u odlagalištima blizu površine ili u rudarskim odlagalištima smještenim na dubinama od nekoliko desetaka metara. Alternativno, za zajedničko odlaganje s visoko radioaktivnim i/ili dugoživućim otpadom, kratkoživeći NiSRAO može se smjestiti u duboka geološka odlagališta. Ove strategije se koriste u raznim zemljama kao što su Francuska, Španjolska, Švedska, Finska, Ujedinjeno Kraljevstvo, Sjedinjene Države i Japan. S druge strane, dugoživeći NRAO zahtijeva zatvaranje unutar dubokih geoloških odlagališta. Među njima samo su dva postrojenja uspostavljena: Morsleben u Njemačkoj (prestao primati otpad u rujnu 1998.) i WIPP (engl. *Waste Isolation Pilot Plant*) u Sjedinjenim Državama. Treći pogon, Konrad u Njemačkoj, dobio je licencu, ali tek treba započeti s radom.[6,15]

3.1.4. Vrlo nisko radioaktivni otpad

VNRAO, koji se često nalazi u značajnim količinama, prvenstveno se pojavljuje tijekom razgradnje nuklearnih postrojenja ili sanacije kontaminiranih lokacija. Primjeri VNRAO-a obuhvaćaju beton, tlo i građevinski otpad. Trenutno samo ograničeni broj zemalja, poput Francuske, Japana, Litve, Španjolske i Švedske, službeno identificira ovu

kategoriju kao posebnu klasifikaciju. U većini drugih nacionalnih klasifikacijskih okvira VNRAO je grupiran unutar šire kategorije nisko radioaktivnog otpada [6]

3.1.4.1. Obrada, skladištenje i odlaganje

Općenito, VNRAO prolazi minimalnu obradu, prvenstveno ograničenu na pakiranje, zbog svojih značajnih količina i niskog sadržaja radionuklida. U državama u kojima se primjenjuje načelo čišćenja, obujam potencijalnog VNRAO-a može se smanjiti preciznom karakterizacijom, dopuštajući odvajanje komponenti koje ispunjavaju uvjete za oslobađanje od regulatornog nadzora kao otpušteni radioaktivni otpad. Općenito, VNRAO se skladišti na mjestu njegove proizvodnje ili u centraliziranom skladištu dok se ne može transportirati do odgovarajućeg odlagališta. Tijekom ove faze, jednostavno sklonište ili privremeni pokrov mogu biti dovoljni za zaštitu od vjetra, kiše itd. [6]

U Francuskoj, Slovačkoj i Španjolskoj, VNRAO-om se upravlja kroz namjenska odlagališta koja se nalaze u plitkim rovovima koji imaju projektirane pokrove. Ti su objekti često smješteni blizu mjesta nastanka kako bi se minimizirala potreba za transportom znatnih količina materijala. Švedska i Litva primijenile su nadzemni pristup, koristeći betonske ploče za zadržavanje. U drugim zemljama, VNRAO se može odlagati zajedno s drugim kategorijama otpada kao što je NRAO, ili u slučajevima poput Ujedinjenog Kraljevstva, može se kombinirati s nenuklearnim opasnim otpadom. [6]

3.1.5. Otpad nastao rudarenjem i mljevenjem uranija

Rudarenje i mljevenje uranove rude stvara velike količine otpada s različitim karakteristikama. Ovaj otpad zahtijeva odgovarajuće gospodarenje iako se samo dio smatra radioaktivnim. Glavni oblik otpada ove faze nuklearnog ciklusa je uranova jalovina. Ona je rijetko inertna i sadrži ostatke procesnih kemikalija i određeni stupanj radioaktivnosti. Moguća je prerada otpadne rude u svrhu ekstrahiranja vrijednih minerala ili prenamjena u građevinski materijal. [15]

Otpadnim kamenjem i jalovinom iz rudarenja urana obično se upravlja i odlaže u neposrednoj blizini rudnika ili mlina urana. Umjesto da se pakiraju, ti se otpadni materijali drže na obližnjim lokacijama pomoću odgovarajućih barijera, poput stabilnih

humaka s učinkovitim sustavima pokrivanja. Ovaj pristup se koristi kako bi se smanjio njihov radiološki i neradiološki utjecaj na okoliš. U nekim zemljama otpad nastao iz jalovine tvornice uranija i ispiranja in situ nije kategoriziran kao radioaktivni otpad. Posljedično, te zemlje ne uključuju takav otpad u svoja izvješća o radioaktivnom otpadu. Međutim, druge zemlje taj otpad klasificiraju kao radioaktivan, što rezultira različitim praksama izvješćivanja. Jalovina tvornice uranija može se klasificirati ili kao dugotrajni VNRAO ili, u posebnim slučajevima, kao NRAO. Metoda ispiranja in situ za ekstrakciju urana općenito stvara manje količine radioaktivnog otpada, koji se mogu razlikovati s obzirom na oblike otpada. [6] Kao i kod rudarenja i mljevenja, primarni rizici povezani s konverzijom su kemijski i radiološki. Jake kiseline i lužine koriste se u procesu konverzije, koji uključuje pretvaranje praha žutog kolača u vrlo topive oblike, što dovodi do mogućeg udisanja urana. Osim toga, konverzija proizvodi iznimno korozivne kemikalije koje mogu uzrokovati požar i potencijalne opasnosti od eksplozije. Konverzijom se stvaraju relativno male količine radioaktivnog otpada, kao što su filtri za zrak, odjeća i tekućine za čišćenje. [15]

3.2. Dekomisija NE

Pojam "dekomisija", kako se koristi u nuklearnoj industriji, odnosi se na sveobuhvatne radnje koje se poduzimaju kada nuklearna elektrana dođe do kraja svog radnog vijeka. Svrha ovih radnji je osigurati sigurno upravljanje objektom, zaštitu radnika, javnosti i okoliša. Ovaj proces obuhvaća niz aktivnosti, od jednostavnog zatvaranja postrojenja uz minimalno uklanjanje radioaktivnih materijala, do potpunog rastavljanja postrojenja i ponovnog uspostavljanja lokacije za neograničenu uporabu. Koncept dekomisije međunarodno je priznat te uključuje tri različite faze, koje je prvobitno zacrtala IAEA. *Faza 1* uključuje potpuno pražnjenje goriva iz reaktora i transport goriva dalje od reaktora. Uklanjaju se sve tekućine za prijenos topline i lako uklonjivi kontaminirani materijali. Za nereaktorska postrojenja uklanjaju se radioaktivni izvori i lako uklonjiva oprema. Struktura zatvorenog prostora ostaje netaknuta, a atmosfera unutar zgrade i zatvorenih prostora je kontrolirana. Periodična mjerenja i vizualni pregledi provode se kako bi se osiguralo pravilno funkcioniranje sustava

kontrole kontaminacije. U *fazi 2*, kontaminirana područja se dekontaminiraju prema potrebi. Područja s preostalim neprihvatljivim razinama radioaktivnosti, kao što su strukture jezgre reaktora, zapečaćena su kako bi se spriječio neovlašteni pristup. Kontaminirani dijelovi koji se lako rastavljaju uklanjaju se i odvoze izvan mjesta ili stavljaju u zatvorena područja postrojenja. Sustavi ventilacije i aktivna sigurnosna oprema više nisu potrebni. Određeni dijelovi postrojenja mogu se prenamijeniti ili pustiti za korištenje uz određena ograničenja koja ne uključuju druge radioaktivne izvore. I dalje je potreban nadzor oko zabranjenih područja, iako manje opsežan nego u *fazi 1*. *Faza 3* podrazumijeva uklanjanje svih materijala, opreme i struktura s razinama radioaktivnosti iznad propisanih granica u odobreno skladište ili odlagalište. Lokacija, zajedno sa preostalom opremom i materijalima, može se prenamijeniti u druge svrhe bez ograničenja i radiološke zaštite. Nije potreban daljnji nadzor, inspekcija ili testiranje. [5]

Ove faze mogu biti isprekidane produljenim razdobljima nadzora i održavanja, tijekom kojih su na snazi sigurnosne mjere i radiološki nadzor, ili mogu slijediti jedna drugu uzastopno na kontinuiran, sustavan i progresivan način. Strategija dekomisije može se razviti na temelju postojeće politike u državi članici (npr. brza ili odgođena dekomisija). Važno je napomenuti da dok je ove faze razgradnje prvobitno definirala IAEA i naširoko se koristila na međunarodnoj razini, IAEA sada preporučuje "faze" u životnom ciklusu postrojenja. Ove faze uključuju radnu fazu, tranziciju do isključivanja (pražnjenje goriva i post-operativno čišćenje), pripremu za sigurno ograđivanje, razdoblje sigurnog ograđivanja i konačno rastavljanje.

Prijelazna faza između operativnih aktivnosti i razgradnje počinje kada se postrojenje proglasi nepotrebnim i traje dok se plan razgradnje čvrsto ne uspostavi i ne provede. Uspješno stavljanje izvan pogona zahtijeva pažljivo planiranje prije nego što postrojenje prestane s radom kako bi se osigurao nesmetan prijelaz s rada na stavljanje izvan pogona. Integracija robotike smanjuje izloženost operatera zračenju i riziku. Roboti postižu veću produktivnost od ručnog rada s odijelima pod tlakom, što smanjuje radne sate i troškove razgradnje. Također, pravilno korišteni roboti doprinose smanjenju stvaranja otpada, osobito sekundarnog otpada. Početak razgradnje kontaminiranog postrojenja zahtijeva prethodno prikupljanje opsežnih podataka o inventaru radioaktivnosti. To uključuje niz kontaminirajućih radionuklida i njihove količine

prisutne u postrojenju. Osim toga, ključno je razumijevanje fizičkog i kemijskog stanja kontaminanata i njihove distribucije po različitim područjima (podovi, zidovi, stropovi). Tijekom procesa razgradnje može se susresti niz alfa-emitirajućih radionuklida, uključujući ^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{226}Th , ^{232}Th , ^{234}U , ^{238}U , ^{237}Np , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{242}Cm , ^{244}Cm i ^{252}Cf . [2,5]

Postupci rastavljanja obično obuhvaćaju smanjenje veličine postrojenja i opreme kako bi se olakšalo njihovo rukovanje i pakiranje. Demontaža može uključivati rastavljanje uklanjanjem vijaka, iako se ovaj pristup često smatra nepraktičnim zbog dužine trajanja. Umjesto toga, češće se koriste različite mehaničke, toplinske ili alternativne metode za rezanje predmeta. Na primjer, konvencionalne tehnike rušenja mogu se primijeniti za razbijanje betona i zidanih materijala. [5]

3.3. Dekontaminacija

Dekontaminacija je proces čiji je cilj uklanjanje radioaktivnog onečišćenja s površina, uključujući i one porozne ili ispucale. Razborito korištenje tehnika dekontaminacije ima potencijal za smanjenje razine zračenja i smanjenje količine radioaktivnog otpada koji nastaje tijekom rastavljanja postrojenja. Dostupne su različite metode dekontaminacije, uključujući tehnike poput struganja ili pranja pod pritiskom. Odabir odgovarajuće tehnike ovisi o specifičnim okolnostima. Primjena dekontaminacije može dovesti do smanjenja razine radioaktivnosti na kontaminiranoj površini, omogućujući da se predmet kategorizira na nižu razinu zračenja (npr. prijelaz sa srednjeg na nisko radioaktivni otpad). U nekim slučajevima, dekontaminacija može čak dovesti predmet do razine gdje više nije potreban nadzor. Važno je napomenuti da proces dekontaminacije neizbježno stvara sekundarni otpad. Odgovarajuće rute za odlaganje ovog sekundarnog otpada moraju postojati, a njihov volumen treba biti razuman da opravda operaciju. Korištenje kemijskih metoda može dovesti do otpadnih voda koje sadrže tvari poput kelirajućih agenasa, što bi moglo ometati nizvodne procese ili biti neprikladno za ispuštanje u okoliš (npr. teški metali poput olova). Nadalje, treba biti oprezan kako bi se osiguralo da operacije dekontaminacije ne pogoršaju kontaminaciju, bilo širenjem unutar objekta ili pretvaranjem u oblik kojim je teže upravljati. Na primjer,

mehaničke tehnike poput struganja mogu proizvesti prašinu koja se, ako se ne obuzda, može proširiti po objektu i pogoršati ukupnu kontaminaciju. Slično tome, pranje betonske površine pod tlakom moglo bi rezultirati dubljim onečišćenjem u betonu, poništavajući željeni učinak. Nadalje, prilikom uklanjanja kontaminiranog materijala kao dijela dekontaminacije građevinskog materijala, mora se paziti da se ne ugrozi strukturni integritet zgrade. [2,5]

Tehnike dekontaminacije mogu se kategorizirati [5] na nedestruktivne kao što su brisanje, metenje i usisavanje, koje ne mijenjaju značajno površinu podloge te kemijske (i elektrokemijske) za uklanjanje sloja površine supstrata i ugrađene radioaktivnosti. Dubina tretmana ovisi o stupnju prodiranja radioaktivnosti. Fizička abrazija se koristi za uklanjanje površinskog sloja, poput struganja betona.

Većina tehnika može se primijeniti ili na licu mjesta ili na materijale i komponente odnesene u namjensko postrojenje za dekontaminaciju. Tijekom razgradnje reaktora mogu se koristiti agresivniji kemijski agensi za uklanjanje viših razina aktivnosti i postizanje većeg smanjenja razine zračenja u usporedbi s onim što se može postići tijekom operativnih razdoblja. Međutim, činjenica je da sekundarna proizvodnja radioaktivnog otpada neizbježan ishod procesa dekontaminacije. Gospodarenje sekundarnim otpadom općenito ovisi o tome je li u krutom ili tekućem obliku. Kruti otpad, poput onog od struganja, mljevenja ili skupljenog u usisavaču, može se riješiti standardnim načinima odlaganja krutog otpada. U određenim slučajevima može biti potrebna prethodna obrada. Tekući otpad, s druge strane, zahtijeva obradu kako bi se skrutio ili smanjio nivo radioaktivnosti radi odlaganja na konvencionalniji način. [2]

3.4. Nuklearni otpad u Hrvatskoj

U Hrvatskoj se nalazi otprilike 11,5 m³ niskog i srednje radioaktivnog otpada većinom smještena u dva skladišta koja su predviđena za pohranu institucionalnog RAO. Oba skladišta se nalaze u Zagrebu. Jedno skladište se nalazi unutar Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) (skladišteno 1,5 m³ RAO), a drugo je skladište Instituta Ruđer Bošković (IRB) (skladišteno 10 m³ RAO). U navedenim skladištima se nalazi RAO poput: radioaktivnih gromobrana, radioaktivnih detektora

požara, medicinski izvori i drugi RAO iz medicine, izvori iz istraživačkih ustanova, fluorescentna boja i sl. Otpad u njima je obrađen i pohranjen u spremnike namijenjene za skladištenje ili odlaganje. Bitan problem predstavlja činjenica da su oba skladišta zatvorena tj. nijedno od ova dva skladišta više nije u mogućnosti primiti novi institucionalni otpad. Također, procjenjuje se da će se ukupni volumen institucionalnog RAO-a povećati na 100 m^3 nakon sanacije skladišta IRB. [4,18]

Osim RAO koji nastaje svakodnevno kao rezultat medicine, raznih istraživačkih ustanova i industrije, Hrvatska mora sanirati i tri lokacije s prirodno radioaktivnim materijalima. To uključuje odlagalište pepela i šljake termoelektrane (TE) Plomin (s ukupnom količinom od $1.110.000 \text{ m}^3$ materijala koji su rezultat rada dviju elektrana. Od toga, 900.000 m^3 potječe od rada TE Plomin 1, koja je koristila istarski ugljen s visokim koncentracijama urana i radija), odlagalište pepela i šljake u Kaštel Sućurcu (oko 280.000 m^3 materijala nastalih izgaranjem ugljena u tvorničkoj termoelektrani) te odlagalište fosfogipsa kod Kutine koje pokriva $1,6 \text{ km}^2$, a ukupni volumen fosfogipsa iznosi otprilike $7 \times 10^6 \text{ m}^3$. [4,18]

3.4.1. Otpad iz NE Krško

Potreba za novim skladištem radioaktivnog otpada u Hrvatskoj nije samo zbog postojećih zatvorenih skladišta i kontinuiranog stvaranja novog otpada. Također proizlazi iz činjenice da Hrvatska (HEP), zajedno sa Slovenijom (GEN Energija), ima suvlasništvo nad nuklearnom elektranom Krško (NEK) s udjelom od 50%. Ovaj suvlasnički aranžman ne uključuje samo kupovinu električne energije, već i zbrinjavanje 50% otpada, kao što je propisano direktivom 2011/70/Euratom i ugovorom između dviju država. [4]

Hrvatski program upravljanja radioaktivnim otpadom započeo je 1979. godine tijekom izgradnje NE Krško. Originalna ideja o odlagalištu se mijenjala, a Hrvatska i Slovenija su preuzele brigu o radioaktivnom otpadu. 1984. godine je započet novi zajednički program, a Hrvatska je 1988. pokrenula vlastiti program za izbor lokacije niskog i srednjeg radioaktivnog otpada. Program je zaustavljen 1997. nakon odabira 4 preferirane lokacije te je ponovno obnovljen 2014. godine. Trenutno najizglednija

lokacija odlagališta je Trgovska gora, preciznije Čerkezovac čije je zemljište u vlasništvu hrvatske vojske. Izbor lokacije je temeljen na tehničkim i društvenim faktorima kao jedna od potencijalnih opcija, što implicira da ispunjava zahtjeve i u geološkom, hidrogeološkom, hidrološkom, seizmičkom i drugim relevantnim aspektima. Prema Nacionalnom programu provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva iz 2018. godine odlagalište za nisko i srednje radioaktivni otpad u Republici Hrvatskoj neće biti potrebno prije 2060. godine. Također, prema programu, aktivnosti vezane uz odabir i potvrdu lokacije za odlagalište nisu planirane do 2025. godine. [3]

Tablica 3.1. Moguća rješenja za odlaganje i skladištenje hrvatskog NiSRAO. [4]

Rješenje	Argumenti za	Argumenti protiv
Trgovska gora	Lokacija zadovoljava kriterije kako za skladištenje tako i za odlaganje RAO-a u tehničkom smislu. Nalazi se u Programu prostornog uređenja Republike Hrvatske.	Neslaganje lokalnog stanovništva s odabranom lokacijom. Neslaganje stanovništva iz pogranične zone Bosne i Hercegovine s odabranom lokacijom.
Vrbina u Sloveniji	Izbjegle bi se nesuglasice sa stanovništvom s područja Trgovske gore kao i iz pogranične zone Bosne i Hercegovine.	Ukupna negativna financijska razlika za hrvatsko gospodarstvo je preko pola milijarde eura. Lokacija odlagališta je unutar zagrebačkog vodonosnika. Tehničko rješenje je neprovjereno (nema svjetskih iskustava). Slovenija ne bi prihvatila sav otpad (ne vojni i institucionalni) te bi se lokacija za njegovo odlaganje morala svejedno ponovo tražiti.
Restart programa	Odabrala bi se lokacija prema principu općina dragovoljaca i izbjegle nesuglasice s lokalnim stanovništvom.	Program bi se vratio više godina unazad. Hrvatska bi se našla u prekršaju međunarodnih/europskih sporazuma poradi produžetka rokova. Cijena odlaganja bi znatno porasla.

Nakon predviđene razgradnje NEK-a 2043. godine, Hrvatska mora zbrinuti polovicu pogonskog nisko i srednje radioaktivnog otpada (3500 m³) i polovicu otpada nastalog razgradnjom elektrane (5400 m³). Do završetka rada elektrane 2043. godine, bit će skupljeno 2283 gorivna elementa, a Hrvatska je odgovorna za polovicu njihovog zbrinjavanja. Moguća rješenja ovog problema prikazana su tablicom 3.1. s argumentima za i protiv svakog rješenja. [4,18]

4 .ZAKLJUČAK

Na temelju saznanja o gospodarenju radioaktivnim otpadom može se zaključiti sljedeće:

1. Radioaktivni otpad nastaje radom i razgradnjom nuklearnih elektrana, proizvodnjom nuklearnog oružja, upotrebom radionuklida u medicini, industriji i istraživanjima. RAO obuhvaća različite oblike i materijale s različitim fizičkim i kemijskim svojstvima te vremenima poluraspada.
2. Podjela radioaktivnog otpada s obzirom na radioaktivnost je sljedeća: otpušteni, vrlo kratkoživi, vrlo nisko, nisko, srednje i visoko radioaktivni otpad.
3. Odgovorno gospodarenje radioaktivnim otpadom uključuje pažljivo rukovanje, skladištenje i odlaganje radioaktivnog materijala. Svaka vrsta radioaktivnog otpada se mora obraditi kako bi se, što je više moguće, smanjio utjecaj na zdravlje ljudi i okoliš
4. Najveću opasnost za zdravlje ljudi i okoliš predstavljaju visoko radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo. Istrošeno nuklearno gorivo se skladišti u bazenima za istrošeno nuklearno gorivo kako bi se smanjila količina topline koju emitira. Visoko radioaktivni otpad i istrošeno gorivo se odlažu u duboka geološka odlagališta te se za odvajanje od okoliša koristi metoda višestrukih barijera.
5. Istrošeno nuklearno gorivo se može oporabiti kako bi se izdvojili korisni izotopi koji se mogu ponovno upotrijebiti pri proizvodnji novog goriva. Najvažnije metode uporabe su PUREX i UREX procesi te piroliza.
6. Vrlo nisko, nisko i srednje radioaktivni otpadi se skladište 100 godina ili dulje, a zatim se odlažu u površinska ili pripovršinska odlagališta. Moguće je odlaganje i u duboka geološka odlagališta zajedno sa visoko radioaktivnim otpadom.
7. Razvojem novih inovativnih reaktora četvrte generacije i gorivnih ciklusa bit će potrebne nove ideje i istraživanja u području gospodarenja nuklearnim otpadom.

5. POPIS SIMBOLA I SKRAĆENICA

ABWR napredni ključajući reaktor (engl.

Advanced Boiling Water Reactor)

ADS Sustavi pokretani akceleratorom

(engl. *Accelerator Driven Systems*)

ADSR subkritični reaktor pokretan

akceleratorom (engl. *Accelerator-driven subcritical reactor*).

AGR napredni reaktori hlađeni plinom

(engl. *Advanced Gas Reactor*)

AHWR napredni reaktor na tešku vodu

(engl. *Advanced heavy-water reactor*),

BWR reaktori s ključajućom vodom (engl.

Boiling Water Reactor)

CEA Komisija za alternativne energije i

atomske energije (fran. *Commissariat à*

l'énergie atomique et aux énergies

alternatives)

COEX (engl. *Co-extraction of actinides*)

DIAMEX -SANEX (engl. *Diamide*

extraction - Selective actinide extraction)

ECCS Sustavi za hlađenje jezgre u hitnim

slučajevima (engl. *Emergency Core*

Cooling Systems)

EPR europski tlakovodni reaktor (engl.

European Pressurized Reactor)

GANEX grupirane ekstrakcije aktinoida

(engl. *Group actinide extraction*)

GCFR brzi reaktor hlađen plinom (engl.

Gas-Cooled Fast Reactor)

GCR reaktori hlađeni plinom (engl. *Gas*

Cooled Reactor)

GFR brzi reaktori hlađeni plinom (engl.

Gas-cooled Fast Reactor)

GIF Međunarodni forum generacije IV

(engl. *Generation IV International Forum*)

HEP Hrvatska Elektroprivreda

HTGR visokotemperaturni reaktori (engl.

High Temperature Gas Reactor)

HWR reaktori hlađeni i moderirani teškom

vodom (engl. *Heavy Water Reactor*)

IAEA Međunarodna agencija za atomsku

energiju (engl. *International Atomic Energy*

Agency)

IMI Instituta za medicinska istraživanja i

medicinu rada

IRB Instituta Ruđer Bošković

ING istrošeno nuklearno gorivo

INPRO (engl. *International Project on*

Innovative Nuclear Reactors and Fuel

Cycles)

INS inovativni nuklearni sustavi

LFR brzi reaktor hlađen olovom (engl.

Lead-Cooled Fast Reactor)

LFR brzi reaktori hlađeni olovom (engl.

Lead-cooled Fast Reactor)

LOCA nesreća s gubitkom rashladnog

sredstva (engl. *Loss-Of-Coolant Accident*)

LWGR reaktori hlađeni vodom i moderirani

grafitom (engl. *Light Water Cooled*

Graphite-moderated Reactor)

LWR reaktori hlađeni običnom vodom

(engl. *Light Water Reactor*)

MA manji aktinoidi

NiSRAO nisko i srednje radioaktivni otpad	VHTR reaktor vrlo visoke temperature (engl. <i>Very-High-Temperature Reactor</i>)
MOX miješano oksidno gorivo	VKRAO vrlo kratkoživući radioaktivni otpad
MSR brzi reaktori hlađeni s rastaljenim solima (engl. <i>Molten Salt Reactor</i>)	VNRAO vrlo nisko radioaktivni otpad
EBR-1 eksperimentalni rasplodni reaktor (engl. <i>Experimental Breeder Reactor 1</i>)	VRAO visoko radioaktivni otpad
MSR reaktor s rastaljenom soli (engl. <i>molten salt reactor</i>)	VVER (rus. <i>Vodo-Vodnoj Energetičeskij Reaktor</i>)
NE Nuklearna elektrana	$t_{1,2}$ – vrijeme poluraspada, s/h/g
NEK Nuklearna elektrana Krško	m – masa, kg
NRAO nisko radioaktivni otpad	E – energija, J
ORAO otpušteni radioaktivni otpad	k – neutronske prinos
PUREX (engl. <i>Plutonium, Uranium, Reduction, Extraction</i>)	τ – trajanje fisijske generacije
PWR reaktori s tlakovodnim hlađenjem (engl. <i>Pressurized Water Reactor</i>)	ρ – reaktivnost
RBMK (rus. Reaktor Boljšoi Močnosti Kipjaščij)	Na ₂ U ₂ O ₇ natrijev diurinat
SCWR superkritični reaktor hlađen vodom (engl. <i>Supercritical water reactor</i>),	U ₃ O ₈ triuranijev oktoksid
SFR brzi reaktor hlađen natrijem (engl. <i>Sodium-Cooled Fast Reactor</i>)	F ₂ fluor
SFR brzi reaktori hlađeni natrijem (engl. <i>Sodium-cooled Fast Reactor</i>)	UF ₆ uranij heksafluorid
SNETP Tehnološka platforma za održivu nuklearnu energiju (engl. <i>Sustainable Nuclear Energy Technology Platform</i>)	UO ₂ F ₂ uranil fluorid
SRAO srednje radioaktivni otpad	HF flourovodik
TE termoelektrana	UO ₂ uranijev dioksid
TRU transuranijski elementi	TBP tri-n-butil fosfat
UNEX ekstrakcija urana (engl. Uranium extraction)	NPH normalni parafinski ugljikovodik
UOX uranijev oksid	LiCl litijev klorid
	KCl kalijev klorid

6. LITERATURA

- [1] Rhodes, R., Beller, D., The need for nuclear power, *Foreign affairs*, 79 (2000) , 30–44
- [2] International Atomic Energy Agency, Waste from innovative types of reactors and fuel cycles, No. NW-T-1.7, IAEA Nuclear energy series, IAEA, Vienna, 2019, str. 1-2, 4-15, 67-69
- [3] International Atomic Energy Agency, Nuclear power reactors in the world, IAEA Reference data series No. 2, Vienna, 2022, str. 84, 85, 88
- [4] Veinović, Ž., Zbrinjavanje radioaktivnog otpada – svjetska praksa i hrvatski izazovi u: Vojvodić, V., *Kem. Ind.* 65 (2016), 420–423
- [5] Bayliss, C.R. , Langley, K.F., Nuclear decommissioning, waste management, and environmental site remediation, Butterworth-Heinemann, Burlington, 2003, str. 41-44, 53-55, 89-95, 99-100, 161-166, 193-198, 201-211, 221-227, 229-239
- [6] International Atomic Energy Agency , Status and trends in spent fuel and radioactive waste management , IAEA Nuclear energy series No. NW-T- 1.14, Vienna , 2022 str. 1-4, 9-18, 26-43 , 54-73
- [7] Hore-Lacy, I., History of nuclear energy, u: Hore-Lacy, I., Nuclear energy in the 21st century, Elsevier, London, 2007, str. 139-151
- [8] Murray, R.L., Nuclear energy, An introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes 5th edition, Butterworth-Heinemann, Raleigh, 2000, 3-10, 14-23, 27-34, 37-52, 67-73, 128-142, 197-206, 333-357, 419-435
- [9] Martinić, F. Ukorak s vremenom 44 (2013) , 51-70
- [10] Feretić, D. Uvod u nuklearnu energetiku 2nd ed., Zagreb, 2007 str. 20-59 , 75-86 , 131-150
- [11] Hewitt, G.F., Collier, J.G., Introduction to nuclear power, 2nd ed. Taylor & Francis, New York, 2000, str. 3-20, 50-54
- [12] Badescu, V., Lazarioiu, G.C., Barelli, L., Power engineering advances and challenges part A: thermal, hydro and nuclear power, Taylor & Francis, Boca Raton , str. 72-109
- [13] Goldberg, S.M., Rosner R., Nuclear reactors: generation to generation, American academy of arts and sciences, Cambridge, 2011, str. 3-11, 15-17
- [14] Nash, K.L., Lumetta, G.L. Advanced separation techniques for nuclear fuel reprocessing and radioactive waste treatment, Woodhead publishing limited, Cambridge , 2011, str 3-20 , 58-86 , 139-172 , 176-198, 269-298
- [15] Nuclear Energy Agency, Advanced nuclear fuel cycles and radioactive waste management, OECD, 2006 ,str. 17, 21-27, 43-69, 73-79, 81-109
- [16] Pravilnik o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora, NN 88/2022 , članak 4.
- [17] Corkhill, C., Hyatt, N., Nuclear waste management, IOP publishing, Sheffield, 2018
- [18] Nacionalni program provedbe Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva (Program za razdoblje do 2025. godine s pogledom do 2060. godine), Zagreb, 2018., str. 8-14

ŽIVOTOPIS

Luka Đuran je pohađao Osnovnu školu Ksaver Šandor Gjalski i X. gimnaziju Ivan Supek u Zagrebu. Preddiplomski studij Kemijsko inženjerstvo upisuje na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije. U slobodno vrijeme bavi se glazbom i raznim aktivnostima poput biljara, nogometa, sportskog penjanja, planinarenja, tajlandskog boksa. Tijekom studija obavlja široki spektar studentskih poslova te volontira u udruzi "Kreni, sad i odmah" i sudjeluje u projektu "Živjeti s Parkinsonom – biciklirajući".