

Nuklearna tehnologija i njezina primjena

Miletić, Rea

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Chemistry / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za kemiju**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:182:835476>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Department of Chemistry, Osijek](#)



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Odjel za kemiju

Preddiplomski studij kemije

Rea Miletić

Nuklearna tehnologija i njezina primjena

Završni rad

Mentor: Doc. dr. sc. Brunislav Matasović

Osijek, 2020.

SAŽETAK

Cilj ovog stručnog rada je obrada temeljnih procesa i njihove primjene u nuklearnoj tehnologiji. Prikazan je povijesni razvoj, od otkrića radioaktivnosti i radioaktivnih elemenata, do formacije strukture atoma kakvu danas poznajemo, te postavljanja temeljnih pretpostavki o fizijskim procesima. Kroz daljnja poglavlja detaljno su opisana dva industrijski najznačajnija nuklearna procesa, radioaktivni raspad i binarne nuklearne reakcije, te najčešće korišteni sustavi u kojima se provode ti procesi, nuklearni reaktori i čestični akceleratori. Radionuklidi nastaju kao produkti nuklearnih procesa i imaju potencijal oslobađanja određene količine energije, koja se koristi u industriji u svrhu praćenja procesa, proizvodnje električne energije i baterija, te u medicini kao način liječenja malignih nakupina.

Ključne riječi: nuklearna tehnologija, radioaktivnost, fisija

ABSTRACT

The purpose of this research paper is the explanation of fundamental processes and their application in nuclear technology. Historical development will be shown, from the discovery of radioactivity and radioactive elements to the formation of the atomic structure that we know today, also setting up the basis for fission processes. Furthermore, it will be described in detail two of the most industry significant nuclear processes, radioactive decay and binary nuclear reaction, and most widely used systems in which these processes occur: nuclear reactors and particle accelerators. Radionuclides are formed as products of nuclear processes and have the potential to release a certain amount of energy, which is used in industry to track processes, produce electricity and batteries, and in medicine as a way to cure malignant cellular formations.

Key words: nuclear technology, radioactivity, fission

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POVIJESNI RAZVOJ NUKLEARNE TEHNOLOGIJE	2
3. NUKLEARNI PROCESI	3
3.1. RADIOAKTIVNI RASPAD	4
3.2. BINARNE NUKLEARNE REAKCIJE	6
4. IZVORI NUKLEARNOG ZRAČENJA	8
4.1. NUKLEARNI REAKTORI	9
4.2. ČESTIČNI AKCELERATORI	14
5. ULOGA RADIONUKLIDA U INDUSTRIJI	17
6. ULOGA RADIONUKLIDA U MEDICINI	20
7. ZAKLJUČAK	22
LITERATURA	23

1. UVOD

Nuklearna tehnologija obuhvaća sva znanstvena znanja i metode primjene nuklearnih procesa. Temelj nuklearnih procesa čine jezgre atoma sastavljene od protona i neutrona. Radioaktivnost je svojstvo svake jezgre u kojoj se javlja nejednakost između elektromagnetne i nuklearne sile, te takva jezgra ima veliku sposobnost otpuštanja suviška energije. Energija se oslobađa različitim raspadnim putovima ili interakcijom s drugim radionuklidima. Produkti takvih reakcija mogu biti visokoenergetske čestice i atomi promijenjenog atomskog i masenog broja. Industrijski važna reakcija u kojoj se teške jezgre radioaktivnih elemenata cijepaju na lakše naziva se fisija. Nuklearni reaktori koriste fisijsku energiju za proizvodnju električne energije i radionuklida. Čestični akceleratori također se koriste u proizvodnji radionuklida, ali njihova upotreba usmjerena je k istraživanju. Industrija koristi radioaktivnost kao izvor energije za proizvodnju baterija, način praćenja određenih kemijskim mehanizama, tokova fluida i procesa unutar tijela čovjeka, te određivanja geološke starosti. Medicinska primjena uključuje detektiranje i korištenje energije radioaktivnog raspada u svrhu mapiranja i suzbijanja malignih stanica.

2. POVIJESNI RAZVOJ NUKLEARNE TEHNOLOGIJE

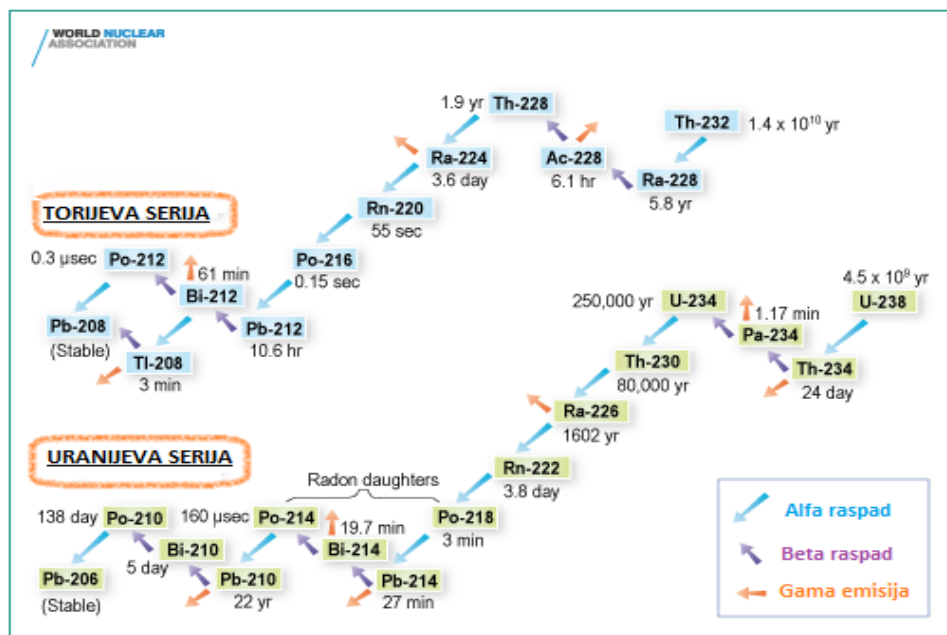
Radioaktivnost je otkrio Henri Becquerel 1896. godine, u eksperimentu s uranijevim solima [1]. Otkriće spontanog zračenja uranijevih soli, bez vanjskih utjecaja, dovelo je do pronalaska drugih elemenata koji emitiraju zračenje na sličan način. Gerhard Schmidt otkrio je zračenje torija [2], dok su za otkriće polonija [3] i radija [63] odgovorni Pierre i Marie Curie.

Temelj nuklearnih reakcija, pa tako i nuklearne tehnologije, je sama jezgra atoma. Sve do 1911. postojanje jezgre bila je nepoznanica. Ernest Rutherford i njegovi studenti Hans Geiger i Ernest Marsden promatrali su interakciju α -čestica, tj. jezgara helija, sa tankim listićem zlata. Zaključili su da je masa atoma koncentrirana u maloj pozitivnoj jezgri [4]. Walther Bothe i Herbert Becker, također koristeći α -čestice, 1930. uočavaju da one uzrokuju radijaciju velike snage, koja nastaje kao rezultat bombardiranja berilijevih, litijevih, fluorovih i borovih atoma tim česticama. Pretpostavili su da se takvo zračenje može postići emisijom γ -zraka, koje su tada bile poznate zbog velike prodirajuće snage. [5] Nekoliko godina kasnije, Irène Curie, dolazi do zaključka kako je snaga zračenja nekoliko puta veća, od one koju su predvidjeli Bothe i Becker. Zračenje je prodiralo kroz olovo, čak tri puta deblje od onog kroz koje mogu proći γ -zrake najveće snage [6]. Chadwick u svom radu iz 1932. objašnjava kako se takva vrsta zračenja može opisati jedino ako oslobođena čestica ima masu 1 i naboj 0, te na taj način dolazi do otkrića neutrona [7]. Irène Curie i Frédéric Joliot bili su uspješni u sintezi umjetnih radioaktivnih elemenata. Koristili su α -čestice, dobivene iz izvora polonija, te njima zračili lakše elemente kao što su bor i magnezij. Novonastali materijal zračio je pozitrone, i ostao radioaktivan neko vrijeme, dovoljno za analizu i odjeljivanje nove supstance. Predložili su pretvorbu aluminijskog u silicij u dva koraka. Međuprodukt je bio izotop ^{30}P , koji zatim uz otpuštanje neutrina i pozitrona prelazi u silicij [8]. Daljnja istraživanja, koja je proveo Enrico Fermi koristeći neutrone, dovela su do otkrića jednog od najvažnijih procesa nuklearne industrije – fisije. Fermi je otkrio da sporiji neutroni bolje prodiru i stupaju u reakciju sa jezgrama atoma, nego oni većih kinetičkih energija [9]. Bombardiranjem uranija i torija neutronima nastaju fragmenti nižih atomskih brojeva, koje je Enrico Fermi smatrao transuranijevim elementima [10].

Otkrićem barija, kao jednog od produkata fragmentacije torija [11], potvrdila je sumnju o cijepanju jezgara teških elemenata na elemente manjih atomskih masa, te na taj način uvela pravu definiciju fisije. Razvoj kvantne kemije i Schrödingerove valne funkcije, de Broglieove hipoteze o dualnoj prirodi svih čestica, te Heisenbergovog načela neodređenosti, doprinijelo je formaciji modela atoma i položaju elektrona i protona unutar atoma. Elektroni se nalaze unutar atomskih orbitala i njihov položaj je opisan valnim funkcijama, koje pokazuju vjerojatnost pronalaska, a ne točno određen položaj i brzinu, kako je postulirao Niels Bohr. Masa atoma koncentrirana je u jezgri, koju čine protoni i neutroni. Einsteinova jednačina o istovjetnosti mase i energije omogućila je daljnje objašnjenje nuklearnih reakcija, te istraživanje Frédérica Joliot i njegovih kolega o lančanim reakcijama, koje uzrokuju neutroni, dovelo je do napretka u shvaćanju i konstrukciji prvih nuklearnih reaktora [12].

3. NUKLEARNI PROCESI

Radioaktivni elementi su izvori prirodnog zračenja, koje nas svakodnevno okružuje. U prirodi ih nalazimo u obliku ruda, te kao produkte atmosferskih plinova s kozmičkim zrakama. Dvije prirodne lančane serije raspada, koje najviše utječu na koncentracije radioaktivnih vrsta su torijeva i uranijeva serija (Slika 1.).

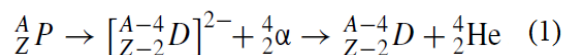


Slika 1. Shematski prikaz torijeve i uranijeve lančane serije radioaktivnog raspada. [13]

Jedan od produkata tih dvaju serija je radon, te je prema istraživanju iz 2019. godine odgovoran za pola godišnjeg izvora zračenja, te znanstveno dokazano uzrokuje rak pluća [14]. ^{40}K , je sedmi najobilniji element u zemljinoj kori. Ovaj radioaktivni izotop ima vrijeme polu-života 1,25 milijardi godina i može se pronaći u hrani bogatoj kalijem kao što su banane. Industrijskim djelovanjem mogu se promijeniti koncentracije radioaktivnih vrsta. ^{210}Pb i ^{210}Po su česti otpadni produkti izgaranja fosilnih goriva i uljne industrije. Tantal i niobij se nalaze uz mineralne rude uranija i torija [13]. Poznavanje nuklearnih procesa koji uključuju spontane radioaktivne raspade i nuklearne reakcije, od kojih su najznačajnije one koje se odvijaju između dva nuklida, tj. binarne, temelj su nuklearne tehnologije.

3.1. RADIOAKTIVNI RASPAD

Elementi s atomskim brojem Z većim od 83 smatraju se radioaktivnima. Vrijeme njihova polu-života može biti veliko, što ih čini relativno stabilnima, dok teži elementi podliježu spontanim nuklearnim transformacijama nestabilne roditeljske radioaktivne jezgre u stabilniju jezgru. Takvi raspadi moraju poštovati temeljne fizikalne zakone očuvanja naboja i broja nukleona, tj. nepromjenjivost masenog broja A (može se dogoditi transmutacija protona u neutron i obrnuto, ali njihov broj mora biti očuvan). Ukupna energija, linearni i zakretni moment unutar sustava u kojem se čestice gibaju također moraju biti očuvani [15]. Proces kojima se jezgra spontano raspada ovise o broju protona i neutrona, i prvi koji će biti opisan je α -raspad. Roditeljska jezgra P emitira α -česticu i nastaje jezgra kći D sa dva protona i neutrona manje. Nastala jezgra D ubrzo gubi oba elektrona čineći je električki neutralnom. Oba elektrona vezati će se na α -česticu dajući atom helija prema kemijskoj jednadžbi (1).



Ovom raspadu podliježu teške jezgre, budući da čestica koja napušta jezgru mora imati energiju dostatnu za prijelaz barijere potencijalne energije. Prvi koji je riješio problem emitiranja čestice pomoću kvantnog prijelaza bio je George Gamow [16].

Provedeni su izračuni kvantnog prijelaza α -čestica u istraživanju iz 2013., tzv. paradoks α -raspada, u kojem se pretpostavlja da se u bilo kojem trenu čestica može nalaziti izvan energetske barijere, iako za to nema dovoljnu energiju [17].

Druga vrsta raspada je β^- -raspad, koji se događa transformacijom neutrona u proton. Slijedi emisija antineutrina i β^- -čestice, tj. visokoenergetskog elektrona. Sljedeća dva raspada najčešće slijede nakon α i β raspada, nakon kojih nastaju jezgre u višem energetske stanju. Emisijom γ -fotona, jezgra gubi energiju i vraća se u stabilnije energetske stanje, što se naziva γ -raspadom. Novonastala jezgra može se nalaziti u metastabilnom stanju, te nakon nekog vremena prelazi izometričnim prijelazom u stabilno stanje. Takav prijelaz događa se kod jezgara koje mogu biti u međustanju dulje od jedne nanosekunde, unutar koje se može odviti γ -raspad. Unutrašnja konverzija jezgre u višem energetske stanju odvija se uz emisiju elektrona i X-zrake, uslijed prijelaza elektrona u niže energetske stanje. Izbacivanjem orbitalnog elektrona atom gubi dio energije procesom unutarnjeg fotoelektričnog efekta, a izbačeni elektroni nižih energija nazivaju se Auger elektroni [18]. Emisija pozitrona ili β^+ -raspad moguć je kod jezgara manjeg broja protona i neutrona. Intranuklearnom konverzijom protona u neutron, te emisijom pozitrona i neutrina jezgra postaje stabilnija. Pozitron elektrostatski privlače elektroni u atomskim orbitalama, te se uništavaju emitirajući dva γ -fotona. Elektronsko zarobljivanje (*electron capture*) odvija se procesom zarobljivanja energetski nižih elektrona, koji zatim u reakciji s protonom prelaze u neutron i oslobađa se neutrino. Emisija X-zrake događa se uslijed popunjavanja elektronske praznine vanjskim elektronima [12]. Drugi oblici radioaktivnog raspada spontanim procesima uključuju spontanu fisiju, na kojoj se temelji proces nuklearnih reaktora, te protonski raspad. Oba procesa odvijaju se kod masivnijih jezgri, kod kojih se povećanjem radijusa jezgre smanjuje utjecaj nuklearnih sila kratkog dosega.

3.2. BINARNE NUKLEARNE REAKCIJE

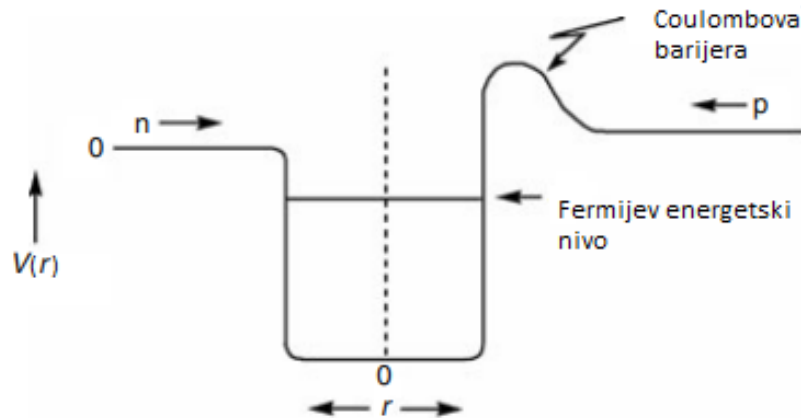
Reakcija između dvaju jezgara, gdje nastaju jedan ili više produkata, jedne su od najvažnijih u nuklearnoj kemiji. Proces sjedinjavanja lakih jezgri u teže temeljni je način oslobađanja energije zvijezda, pa tako i našeg Sunca. Produkti reakcije ponajprije ovise o kinetičkim energijama reaktanata. Prema de Broglievoj teoriji o valnom svojstvu svih tvari, čestice koje imaju velike kinetičke energije posjeduju mjerljiva valna svojstva [19]. Lakše jezgre, koje posjeduju dostatnu energiju, imaju usporedivu de Broglievu valnu duljinu s onom nukleona jezgre s kojom stupaju u reakciju. Reakcije tog tipa događaju se najčešće na površini, te samo djelomično djeluju na okolne nukleone, te se nazivaju periferalni procesi. Jezgre manjih energija, time i većih de Broglievih valnih duljina od nukleona koji se nalaze u jezgrama materijala, imaju veću vjerojatnost reakcije s jezgrom u cijelosti. Produkt takve reakcije je kratkoživuća smjesa jezgre u višem energetske stanju, koja daljnjim procesima prelazi u stabilnije stanje [15]. Uspješnost reakcije ovisi o energetskim barijerama, tj. minimumu energije potrebne kako bi dvije čestice prešle u produkte. Temeljna vrijednost nuklearne reakcije je razlika stacionarne mase-energije između jezgri reaktanata i produkata, prema Einsteinovoj formuli $E=mc^2$. Prema zakonu očuvanja mase-energije može se izračunati Q-vrijednost reakcije kao razlika sume svih stacionarnih masa m_0 reaktanata i produkata prema jednadžbi (2). Višak mase Δ , predstavlja razliku stvarne mase nuklida m_0 i aproksimacije prema masenom broju A , izraženom pomoću unificirane atomske jedinice mase u prema jednadžbi (3). Višak mase označava nuklearnu veznu energiju, tj. energiju potrebnu za vezanje nukleona u jezgru. Kombiniranjem jednadžbi (2) i (3) dobiva se izraz prema kojem se računa Q-vrijednost reakcije jezgre projektila koja se kreće prema jezgri meti prema (4). [20]

$$Q = [\sum m_0 (\text{reaktanti}) - \sum m_0 (\text{produkti})] \cdot c^2 \quad (2)$$

$$\Delta = (m_0 - A \cdot u) \cdot c^2 \quad (3)$$

$$Q = [\Delta (\text{projektil}) + \Delta (\text{jezgra meta})] - \sum \Delta (\text{produkti}) \quad (4)$$

Coulombova energetska barijera proizlazi iz smanjena utjecaja jake nuklearne sile, koja stvara približno jednolično polje unutar jezgre [20]. Povećanjem broja nukleona u jezgri elektrostatsko odbijanje protona počinje nadvladavati privlačne sile, te smanjenje nuklearne potencijalne energije u ovisnosti o udaljenosti r od centra jezgre. Na neutrone ne djeluje Coulombovo odbijanje, zbog čega oni ne posjeduju energetska barijeru. (Slika 2.)



Slika 2. Shematski prikaz promjene nuklearne potencijalne energije V kao funkcije udaljenosti od centra jezgre r . Prikazana je Coulombova energetska barijera, koja se javlja kod protona budući da su električki nabijene čestice, za razliku od neutrona. [20-str.153]

Mogući su elastični sudari, ako čestice sadrže energiju ispod Coulombove barijere, dok je za uspješnu reakciju potrebna veća energija, iako su zbog utjecaja kvantnih efekata moguće reakcije i s energijama ispod barijere [21]. Ukoliko su reaktanti nenabijene čestice, kao što su neutroni i fotoni, Coulombova barijera ne postoji. Kinetička energetska barijera najvažniji je faktor za vjerojatnost odvijanja takvih reakcija. Reakcije s neutroni od posebnog su interesa u nuklearnoj industriji. Neutronska raspršivanje može biti elastično i neelastično.

Elastično raspršivanje može se dogoditi ukoliko jezgra ostaje u osnovnom stanju i Q -vrijednost je nula, a neelastično kad jezgra prelazi u više energetska stanje. Kinetička energija neutrona je manja je od početne, te nakon nekog vremena dolaze do termalne ravnoteže s atomima u okruženju. Neutroni energija od otprilike 0.025 eV, koja je najvjerojatnija pri određenoj temperaturi prema Maxwell-

Boltzmannovoj energetskej raspodijeli, nazivaju se termalni neutroni, te imaju posebnu primjenu zbog izrazite moći prodiranja u materijale [22].

Apsorpcija neutrona unutar jezgre drugi je oblik reakcije neutrona s jezgrama materijala. Radionuklidi nastaju na temelju zarobljavanja neutrona, te čine željeni nuklid radioaktivnim. Primjer takve reakcije je ona sa ^{10}B , koji iznimno dobro apsorbira termalne neutrone [23]. Visoko energetske neutroni mogu reagirati s teškim jezgrama, kao što je ^{235}U , u reakciji fisije. Nastaje vrlo nestabilna jezgra, koja oscilira i deformira se. Deformacija jezgre može uzrokovati raspad jezgre pod utjecajem elektrostatskog odbijanja i djelovanja nuklearne sile, koja na malim udaljenostima pokušava jezgru držati na okupu. Nastali fragmenti odvajaju se uz veliko oslobođenje energije, što uzrokuje odvajanje neutrona. Oslobađa se i γ -zračenje, te novonastale jezgre prelaze u niže energetske stanje. Okolni elektroni okružuju te jezgre i kako one polako usporavaju, postaju neutralni atomi. Dobiveni fisijski produkti i dalje su radioaktivni, te najčešće β -raspadom dolaze u završno stabilno stanje. Polu-život takvih atoma može biti vrlo velik [24].

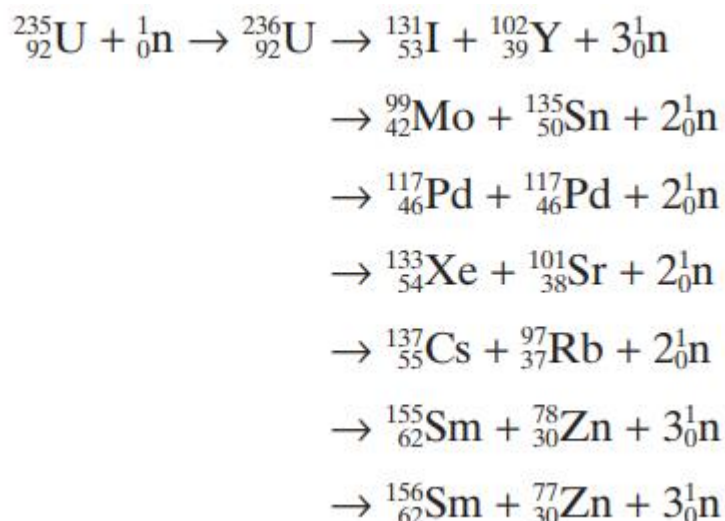
4. IZVORI NUKLEARNOG ZRAČENJA

Nuklearna tehnologija koristi energiju nastalu nuklearnim procesima. Takvi procesi odvijaju se u jezgrama teških kemijskih elemenata, čiji je atomski broj veći od 83. Između protona i neutrona svih atoma djeluje jaka nuklearna sila, koja ih drži na okupu, te elektromagnetna sila, koja odbojno djeluje među istoimenim nabojima, tj. protonima. Povećanjem atomskog broja elektromagnetna sila prevlada nuklearnu, te destabilizira jezgru, dajući joj mogućnost oslobađanja viška energije u obliku nuklearnog zračenja. Atomi takvih elemenata mogu, različitim radioaktivnim raspadnim putovima, osloboditi različite količine energije. [25] Stabilnost izotopa očitava se iz Segrè tablice, koja predstavlja grafički prikaz ovisnosti atomskog i masenog broja [26]. Potreba za stvaranjem umjetnih radioizotopa proizlazi iz njihove raznolike primjenjivosti u medicini i drugim

granama industrije. Dva su glavna načina generiranja radionuklida : zračenjem u nuklearnom reaktoru i korištenjem čestičnih akceleratora [15].

4.1. NUKLEARNI REAKTORI

Zaključno s veljačom 2020. godine u funkciji se nalazi 220 reaktora, koji se koriste u istraživačke svrhe, te za proizvodnju radioizotopa [27]. Prema izvješću iz rujna 2020. godine, ukupno je 440 aktivnih reaktora, te još 50 u izgradnji. Dobivena energija najčešće se koristi za proizvodnju električne energije [28]. Unutar jezgre reaktora kao gorivo se koristi ^{235}U ili ^{239}Pu , koji procesom fisije ili cijepanja na lakše atome oslobađaju visokoenergetske neutrone energije od otprilike 1,5 MeV. Oslobođeni neutroni sudaraju se s atomima goriva, koji se nalaze u obliku šipki, te nizom lančanih reakcija mogu prouzrokovati nekontrolirano oslobađanje energije velikih razmjera, tj. razaranje nuklearne jezgre. Kako bi se spriječile takve reakcije koriste se kontrolne šipke, najčešće napravljene od kadmija, koje apsorbiraju višak neutrona. Između šipki, u kojima se nalazi fisijsko gorivo, nalaze se moderatori, tj. tvari koje usporavaju neutrone velike kinetičke energije. Moderatori su najčešće grafit ili teška voda (D_2O). Potrebno je postići nižu termalnu energiju intenziteta (protoka) od 10^{11} do 10^{14} neutrona/ cm^2 s. Time se omogućava uspješna interakcija neutrona s željenom materijom, koja je iznimno važna u proizvodnji radionuklida. Reakcijom visokoenergetskih neutrona s materijalima, koji sadrže elemente atomskog broja većeg od 92, poput ^{235}U , ^{233}U , ^{232}Th , ^{239}Pu ili ^{237}Np , mogu nastati elementi atomskog broja od 28 do 65. Takva reakcija naziva se proces fisije. Najčešći reaktant u fisiji je ^{235}U , čijim bombardiranjem neutronima može nastati niz tehnološki korisnih radionuklida (Slika 3.)



Slika 3. Prikaz mogućih radioaktivnih produkata reakcije ${}^{235}\text{U}$ s neutronom. [29-str.47]

Dobiveni radonuklidi bogati su neutronima i najčešće podliježu β^- -raspadu. [29] Druga moguća reakcija je hvatanje neutrona i emisija γ -zračenja. Ova reakcija događa se u određenoj mjeri pri svakoj interakciji materije i neutrona, te nastaje izotop istog elementa. Specifična aktivnost takvih radionuklida relativno je niska, za razliku od onih dobivenih procesom fisije.

Specifična aktivnost radioaktivne tvari opisuje brzinu raspada po jedinici mase. Brzina raspada označava se s A i funkcija je vremena. Brzina raspada računa se prema diferencijalnoj jednadžbi (5) kao negativna promjena broja radioaktivne tvari N u iznimno malom vremenskom intervalu dt . [15]

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} \quad (5)$$

Integriranje (5) aktivnost se može iskazati eksponencijalnom jednadžbom (6) koja ovisi o početnoj koncentraciji tvari A_0 i konstanti raspada λ .

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

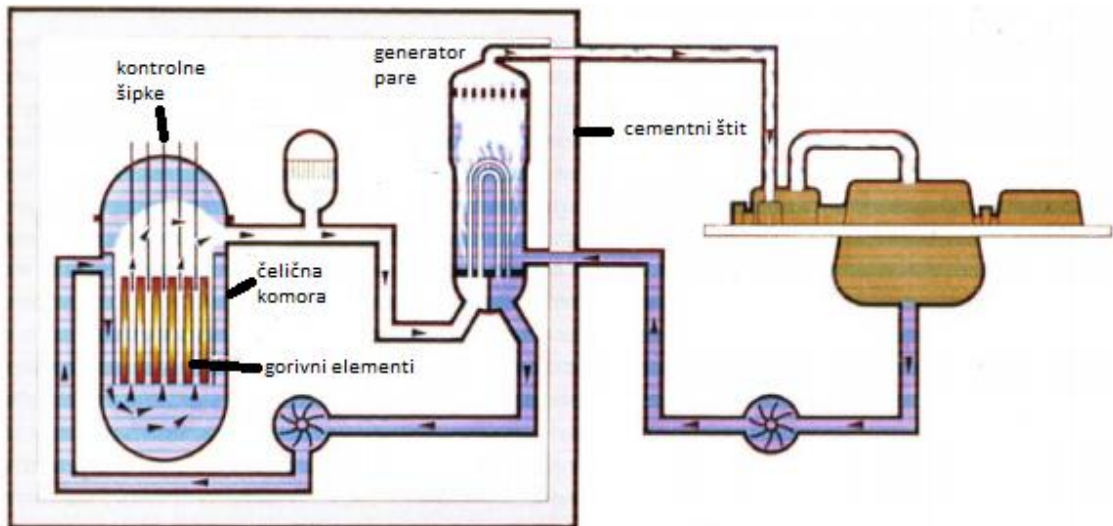
Reaktori za proizvodnju radioizotopa dijele se na tip bazena (*pool-type*) i spremnika (*tank-type*) [31]. *Pool-type* reaktori imaju jezgru potopljenu u vodi, koja se nalazi pod atmosferskim tlakom. Voda ima ulogu moderatora, hladila i radijacijskog štita. Gorivo je uranijev oksid koji se dobiva iz prirodnih ruda ${}^{235}\text{U}$. Proces pretvorbe uključuje preradu, pročišćavanje i koncentriranje željenog

izotopa, kako bi se dobili peleti. Dobiveni peleti nalaze se unutar gorivnih stupova, te na taj način čine jezgru reaktora [30]. Željeni materijal može se lako spustiti na određeno mjesto u reaktoru, budući da je reaktor otvorenog tipa, te je jezgra lako dostupna i vidljiva. *Tank-type* reaktori imaju aluminijski spremnik u kojem se nalaze gorivni stupovi. Tlak unutar spremnika nešto je viši od atmosferskog i jezgru hladi obična voda, dok se u manjem spremniku nalazi teška voda D₂O, koja ima svrhu moderatora. Posebno namijenjene kapsule koriste se za ozračivanje uzoraka. [31].

Nuklearni reaktori mogu se koristiti u svrhu dobivanja električne energije. Kontroliranim procesom fisije oslobađa se termalna energija u fluid koji može biti voda ili plin, na taj način pokreće parna turbina, koja generira električnu struju.

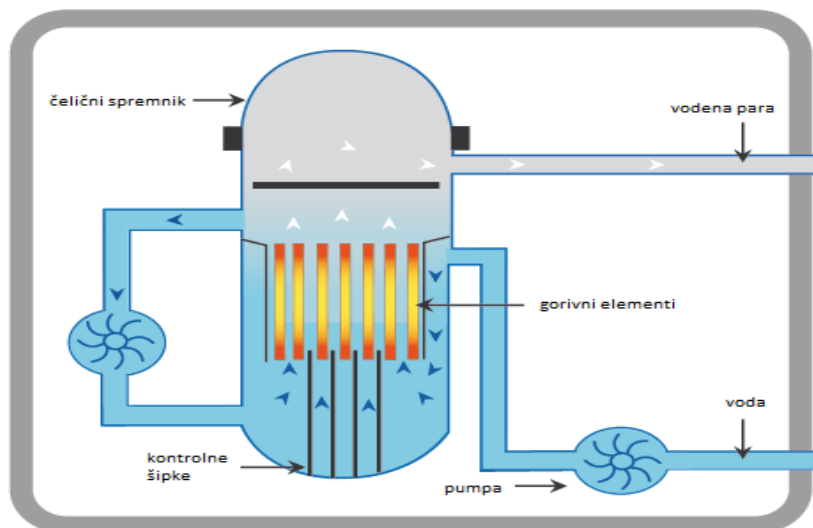
Najčešći tipovi reaktora, koji se koriste u tu svrhu, su vodeni reaktor pod visokim tlakom (*pressurised water reactor - PWR*), reaktor s vrijućom vodom (*boiling water reactor - BWR*) i reaktor s teškom vodom pod visokim tlakom (*pressurised heavy water reactor - PHWR*). [32]

Najčešći tip je *PWR*, koji spada u lakovodne reaktore (Slika 4.). Obična voda H₂O koristi se kao hladilo i moderator. Kontrolne šipke od hafnija ili kadmija spuštaju se i podižu unutar spremnika od cirkonijeve slitine u kojemu se nalaze obogaćeno gorivo ²³⁵U, te na taj način apsorbiraju višak neutrona nastalih fisijom. Voda se primarnim sustavom pumpi pod visokim tlakom odvodi od jezgre reaktora, gdje apsorbira termalnu energiju nastalu u reakciji, do sekundarnog sustava pumpi koji pod normalnim tlakom odvodi vodenu paru do turbina za proizvodnju električne energije. Visoki tlak omogućava hlađenje, i sprječava isparavanje vode. [33]



Slika 4. Shematski prikaz konstrukcije *PWR* reaktora. [34]

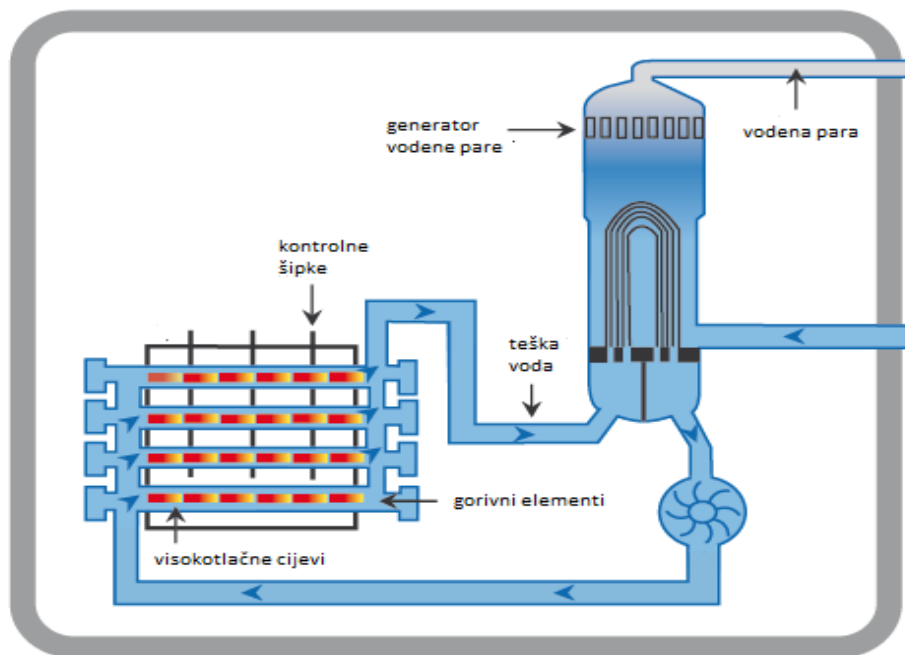
Drugi najčešće korišteni tip reaktora, koji također spada u lakovodni, je *BWR* (Slika 5.). Ovaj reaktor funkcionira na isti način kao *PWR*, jedina razlika je postojanje samo jednom cirkulirajućeg sustava. Voda ključa unutar jezgre reaktora, para se uzdiže i odvaja parnim separatorima.



Slika 5. Shematski prikaz *BWR* reaktora. [35]

Vodena para često može sadržavati tragove radioaktivnih elemenata zbog čega se mora osigurati zaštita turbina, kao bi se mogle održavati. [36]

Najrjeđe korišteni su *PHWR* reaktori (Slika 6.). Teška voda D_2O koristi se kao moderatori i hladilo. Koristi se prirodno gorivo od 0.7 % ^{235}U zato što D_2O usporava manje elektrona od obične vode, te je na taj način moguće veće iskorištenje nastalih neutrona, a time i goriva. [37] Nekoliko stotina horizontalnih cijevi s gorivom prolazi kroz spremnik s teškom vodom pod visokim tlakom, što čini primarni cirkulirajući sustav hlađenja koji stvara paru, koja se odvodi sekundarnim sustavom do turbine.



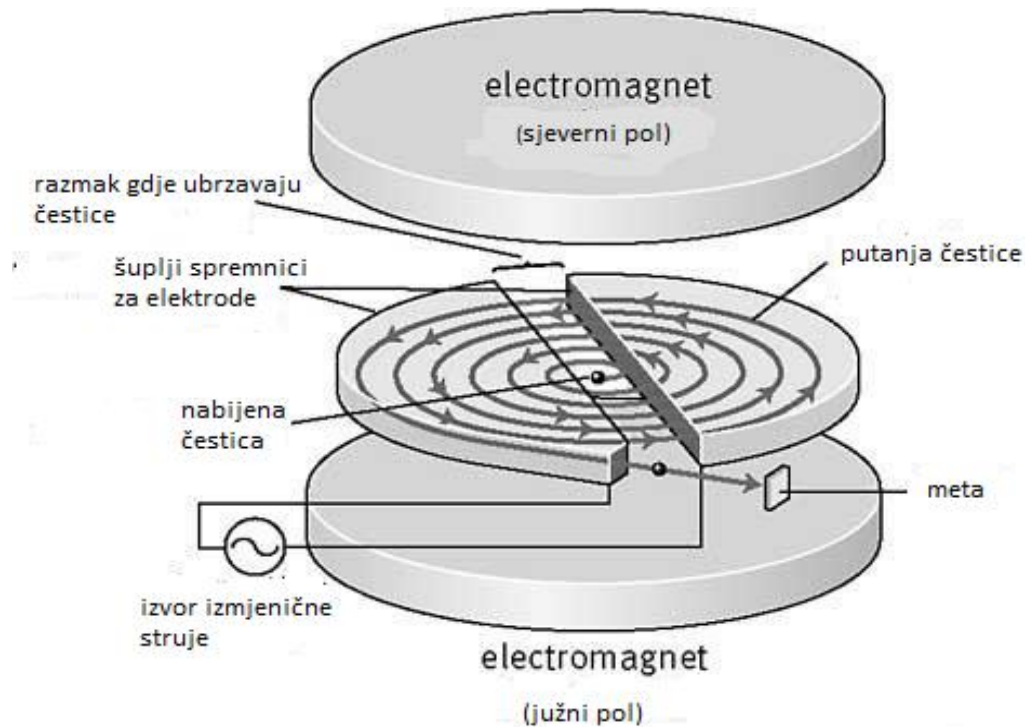
Slika 6. Shematski prikaz *PHWR* reaktora.[38]

PHWR ima potencijal osiguravanja jeftinijeg i sigurnijeg način proizvodnje električne energije. [39]

4.2. ČESTIČNI AKCELERATORI

Nuklearne reakcije mogu se odviti akceleracijom i sudarom nabijenih čestica, kao što su protoni, s željenim atomima neke materije. Produkti takvog sudara postaju bogatiji protonima, za razliku od neutronske bogatijih produkata fisionuklearne reakcije. Izvor nabijenih čestica mogu biti elektronski i ionski. Elektroni se mogu dobiti termionskom emisijom sa površine određenog metala i fotokatodama primjenom elektromagnetnog zračenja. Ionske zrake dobivaju se generiranjem plazme, te su dva moguća načina pomoću Penning ili Philips ionizacijskog mjerača i elektron ciklotronskog rezonancijskog izvora iona. [40] Čestični akceleratori koriste se u istraživačke svrhe i za proizvodnju radionuklida, koji se najčešće koriste u medicini, te je osnovna podjela na linearne i cikličke (ciklotrone).

Ciklotroni su vrsta čestičnih akceleratora, koji se koriste za proizvodnju radionuklida (Slika 7.). Spiralna konstrukcija omogućava prevladavanje velikih udaljenosti, koje su potrebne za postizanje velikih energija čestica. Željena jezgra bombardira se akceleracijom protona (${}^1\text{H}$), deuterija (${}^2\text{H}$), tricija (${}^3\text{H}$) ili α -čestica. Unutar vakuumske komore nalaze se polukružne metalne elektrode, između kojih se nalazi mali razmak. Elektrode stvaraju električno polje, u kojem se nabijene čestice kreću od višeg prema nižem potencijalu. Elektrode se nalaze između dva elektromagneta, koja stvaraju magnetno polje, te Lorentzovu silu koja zakreće česticu u cirkularnu putanju.



Slika 7. Shematski prikaz ciklotrona. [41]

Izvor nabijenih čestica nalazi se u centru, na njih se primjenjuje oscilirajuća izmjenična struja (*radio frequency - RF*). Nakon prolaska kroz prvi polukružni dio naboji na elektrodama se mijenjaju, kako bi čestica nastavila teći prema području nižeg potencijala. [42] Ciklotronska jednačba (7) prikazuje kutnu frekvenciju ω čestice naboja q i mase m , unutar magnetnog polja B .

$$\omega = \frac{qB}{m} \quad (7)$$

Moguće je postići samo određene energije budući da se pri brzinama sve bližim brzini svjetlosti moraju uračunati relativistički efekti povećanja mase. [20]

Linearni akceleratori ubrzavaju ione pravocrtno primjenom elektrostatskog ili mikrovalnog polja. Elektrostatski akceleratori koriste odjeljke s procjepima određenog otpora, koji na taj način visoki napon razdjeljuju na manje korake. Unutar svakog odjeljka, kako se nabijena čestica kreće, u točno određenom trenutku se mijenjaju naboji na elektrodama, kako čestica ne bi usporavala. Princip rada linearnog elektrostatskog akceleratora primjenjuje se u komori s katodnim zrakama ubrzavanjem elektrona i Van de Graaffovom akceleratoru. [43]

Mikrovalni linijski akceleratori koriste koaksijalne metalne tube. Između susjednih tuba nalazi se određeni razmak u kojem se generira RF polje. Ioni se kreću unutar tuba konstantnom primjenom takvog polja visokog napona. Udaljenost između centra svake tube mora odgovarati vremenu prolaska iona od jednog do drugog razmaka, budući da su unutar tuba zaštićeni od utjecaja RF polja. Točno pri izlasku iz tube polje mora djelovati akcelerirajuće zbog čega duljina tuba mora odgovarati punom periodu osciliranja polja. [43]

5. ULOGA RADIONUKLIDA U INDUSTRIJI

Radionuklidi imaju karakteristična mjerljiva svojstva koja se mogu pratiti. Primjenom unutar sustava, u kojem je potrebno pratiti neke promjene, često se koriste kao označivači. Vrijeme polu-života i količina zračenja važni su faktori u odabiru primjerenog radionuklida. Moguća je detekcija puknuća unutar sustava cijevi bez fizičke procjene, te je na taj način korišten ^{99}Tc , koji ima vrijeme polu-života od 6,0058 sati. [44] Kretanje radionuklida unutar fluida pridonosi razumijevanju kompleksnih tokova ili načinu na koji se materijal prenosi unutar promatranog sustava. Elementi kao što su ^{137}Cs i ^{210}Pb mogu se koristiti za praćenje gibanja zračne mase unutar niže troposfere, te dati uvid u kretanje zagađivača [45]. Radioaktivni elementi imaju značajnu primjenu u proučavanju mehanizama kemijskih reakcija i daju uvid u prostornu strukturu molekula. Označavanjem jednog ili više elemenata radioaktivnim izotopom istog elementa moguće je pratiti gibanje takvih vrsta tijekom nekog određenog procesa.

Mjerenjem promjene omjera koncentracije dvaju izotopa istog elementa u uzorku, te poznavajući vrijeme poluraspada, moguće je odrediti starost uzorka. Radiometrijsko datiranje omogućilo je određivanje starosti Zemlje. Primjeri tehnika radiodatiranja su raspad ^{40}K u ^{40}Ar , praćenje nestabilnog C-14 i raspad uranija u olovo. [46] K-Ar tehnika uzima u obzir prisutnost Ar iz drugih izvora, tj. atmosfere, mjerenjem omjera prirodnih izotopa Ar, te se koncentracija mjeri spektrofotometrijski. [47] C-14 raspada se β -raspadom na ^{14}N , vrijeme poluraspada iznosi oko 5730 godina. Mjerenjem omjera tih dvaju elemenata moguće je odrediti starost organskih uzoraka, koji su konzumiranjem fotosintetskih biljaka, unijeli C-14 u svoj organizam. On nastaje reakcijom dušika s kozmičkim zrakama u atmosferi, te se veže s kisikom u CO_2 i na taj način veže u fotosintetske biljke. [48] Određivanje starosti može biti zahtjevan proces, te uzrokovati određene pogreške. Potrebno je pravilnom pripremom uzoraka i uvažavanjem svih parametar koji mogu utjecati na promjenu koncentracije izotopa, postići što točnije rezultate. [49]

Električna energija se može proizvoditi pomoću nuklearnih reaktora. Drugi način proizvodnje, na manjoj razini, su nuklearne baterije. Energija za proizvodnju može proizlaziti iz energije raspada radioaktivnog elementa i direktne pretvorbe emitiranog zračenja u električnu energiju. U prvom slučaju se koristi termalni ciklus radionuklidnih izvora topline, koji dinamičkom, termionskom i termoelektričnom metodom pretvaraju energiju.

Dinamička metoda koristi energiju radioaktivnog izvora za isparavanje cirkulirajućeg fluida koji pokreće generator. Termionska metoda koristi izvor koji generira elektrone termoelektričnom emisijom. Termoelektrična metoda bazira se na stvaranju termalnog gradijenta, unutar strujnog kruga, između dva vodiča, što rezultira termo-elektromotivnom silom. [12] Drugi slučaj koristi direktne metode pretvorbe, te je moguće postići veće napone.

Direct charge baterije koriste nabijene čestice koje stvara izvor kako bi se nabili električni vodiči, koji stvaraju električno polje unutar kojeg je moguće kretanje naboja, tj. stvaranje električne struje. *Direct conversion* baterije temelje se na stvaranju razlike potencijala uslijed nuklearnog raspada, čime nastaju nabijene α i β čestice. *Betavoltaic* baterije su vrsta baterija koje direktno dovode do prijevoda u električnu energiju, te funkcioniraju na sličnom principu kao solarne ćelije, koristeći p-n poluvodiče ili diode. Poluvodički materijal se bombardira visokoenergetskim β -česticama, te na taj način proizvodi nekoliko elektron-praznina parova, koji mogu generirati električnu struju. [50] Budući da se koriste radioaktivni izvori potrebno je umanjiti mogućnost prebrzog raspada poluvodiča, time i iznimno kratko vrijeme uporabe. Istraživanje iz 2019. ukazalo je na 4H-SiC kao potencijalni poluvodič za ^3H i ^{63}Ni izvore, te dijamant koji bi mogao u budućnosti povećati efikasnost za otprilike 34%. [51] Zadnji oblik, koji će biti opisan, su *indirect conversion* baterije, koje α i β čestice prvo prevode u fotone, koji se zatim prevode u električnu struju. Nastanak fotona omogućen je apsorpcijom α i β čestica unutar luminescentnog materijala, te zatim fotoni putuju prema fotonaponskim ćelijama. [52]

Saznanja o temeljnim silama, koje djeluju među subatomske česticama, te potvrde o postojanja takvih čestica proizašle su iz nuklearnih reakcija unutar čestičnih akceleratora. Jaka nuklearna sila odgovorna je za vezanje protona i neutrona u jezgri atoma, a ona proizlazi iz interakcije sa subnukleonskim česticama – gluonima. Gluoni su otkriveni 1979. godine, te njihova izmjena između nukleona rezultira jakom nuklearnom silom, koja nije elektromagnetne prirode kako se prije smatralo. Temeljna razlika fotona i gluona je ta da gluoni mogu apsorbirati i emitirati druge vrste gluona. [53] Jedno od najznačajnijih otkrića dogodilo se 2012. godine, detektiranjem Higgsovog bosona, koji je prema teoriji sastavnica Higgsovog polja, koje je u interakciji s česticama, odgovorno za njihovu masu. [54]

6. ULOGA RADIONUKLIDA U MEDICINI

Primjena nuklearne tehnologije u medicinske svrhe uvelike je promijenila način na koji je moguće promatrati i liječiti ljudsko tijelo. Wilhelm Röntgen 1895., otkrićem X-zraka, daje novi način uvida u naizgled nevidljivo. Saul Hertz 1941. primjenjuje radioaktivni izotop joda u liječenju bolesti štitne žlijezde. Detekcija i mjerenje, uz pravilnu primjenu, nužni su u korištenju nuklearnih procesa u svrhu liječenja.

Mapiranje fizioloških procesa unutar organskih sustava može se dobiti korištenjem gama mapiranja, najčešće s ^{99}Tc . ^{99}Tc emitira γ -zračenje energije od 140 keV, koje se lako detektira, te je smanjena mogućnost prevelike izloženosti zračenju zbog vremena poluraspada unutar biološkog sustava od šest sati. Dobiva se kao fisijski produkt neutronskog bombardiranja ^{98}Mo . [55] Svaki organ ima smanjuje aktivnost za određeni koeficijent, te je potrebno s iznimnom preciznošću odrediti faktor smanjenja emitiranih fotona kako bi se dobili što točniji rezultati mapiranja. [56]

Druga važna metoda mapiranja je topografija pozitronskom emisijom (*positron emission topography* - *PET*). Koriste se spojevi označeni s ^{18}F kao što su ^{18}F (FDG), fluoro-deoksi-glukoza. Radionuklidni spoj raspada se pozitronskim β^+ -raspadom, te se tako detektira. Pozitron se sudara s okolnom materijom i gubi kinetičku energiju, zatim se zaustavlja u tkivu. Reakcijom pozitrona i elektrona oslobađa se energija u obliku γ -zraka, koje se mogu izmjeriti interakcijom s mjernim uređajima. Kristali koji se koriste u detektoru, npr. bizmut-germinat (BG), pretvaraju zračenje u svjetlosnu energiju, koja se zatim pretvara u električni signal na računalu. Kombinacijom s drugim tehnikama kao što su magnetno rezonancijsko mapiranje (MRI) može se dobiti informacija o načinu na koji se odvija proces u tkivu, te kakva je struktura. [57]

Radioterapija koristi radionuklidne izvore koji prodiru u tkivo, te se koristi u svrhu suzbijanja malignih stanica. Zračenje može biti primijenjeno iz vanjskih izvora i unutar zahvaćenog područja. Brahiterapija je primjer smještanja izvora radijacije što bliže mjestu tumora. U tu svrhu koriste se ^{137}Cs , ^{192}Ir i ^{60}Co , koji se

uklanjaju nakon određenog vremena. ^{198}Au , ^{125}I , ^{103}Pd i ^{131}Cs trajno se ugrađuju u tkivo. Karakteristika ovih radionuklida je njihovo djelovanje na malim udaljenostima, koje lokalizirano zrači tumor. Primjernom brahiterapije smanjuje se vrijeme oporavka i hospitalizacije pacijenta, te potreba za kompliciranijim zahvatima. [58] ^{125}I može prouzrokovati potencijalne nuspojave, koje se ne pojavljuju korištenjem ^{103}Pd prema istraživanju na štakorima. [59] Gama nož je uređaj koji koristi vanjski izvor zračenja kao ^{60}Co i s velikom preciznošću djeluje na stanice tumora u mozgu. Djelovanje zračenja ovisi o vrsti stanice koja je izložena. Smanjenje doze zračenja ne utječe značajno na uništavanje tumorskih stanica, ali može utjecati na nekrozu okolnog tkiva. [60]

Imunoterapija koristi radionuklide, koji se prenose putem krvotoka, pričvršćene na antitijela. Antitijela dolaze do mjesta tumora i emitiraju produkte radioaktivnog raspada, koji uništavaju tumor. Kombiniraju se izotopi ^{90}Y , ^{131}I , ^{153}Sm i ^{213}Bi s peptidima i antitijelima. [12] Terapija ionskom zrakom koristi protone ili ^{12}C čestice, koje usmjereno djeluju na željeno područje. Vrsta zraka ovisi o tipu i veličini tumora. Godine 2007. Izgrađen je prvi centar za korištenje ionskih zraka (*Heavy Ion Centre – HIT*), koji koristi linearne i cirkularne čestične akceleratorne direktno povezane s prostorijama u kojima se liječe pacijenti. [61]

Bor neutron snimanje (*Boron neutron capture therapy - BNCT*) je tehnika lokaliziranog tretiranja tumora, koja zahtjeva intravenozno unošenje ^{10}B u tijelo. ^{10}B se veže na tumorske stanice i ozračuje neutronima energije od nekoliko keV. Neutroni gube energiju i raspršuju se u okolnom tkivu, dok termalne energetske niže hvata ^{10}B . Raspada se na Li i He jezgre, koje potencijalno uništavaju tumorske stanice. Prednost ovakve tehnike liječenja je u što preciznijem smještanju ^{10}B na maligne nakupine, zbog čega nije potrebno usmjeravanje zračenja. [62]

7. ZAKLJUČAK

Razvitak nuklearne tehnologije počeo je 1896. otkrićem radioaktivnosti. Radioaktivnost je svojstvo određenih elemenata, koji posjeduju teške jezgre velikog broja nukleona. Znanstvenici 20. stoljeća provode eksperimente na području atomske strukture i položaja subatomske čestice iz čega proizlazi novi model atoma, koji opisuje ponašanje svih čestica kroz njihovu dualnu valno-čestičnu prirodu. Elektroni se definiraju pomoću valnih jednadžbi vjerojatnosti, te se otkrivaju subnuklearne čestice odgovorne za jaku nuklearnu silu koja veže protone i neutrone. Nuklearne reakcije klasificiraju se prema načinu na koji radioaktivne jezgre otpuštaju višak energije. Jedan od načina uključuje emisiju neutrona, koji su od velike važnosti u principu rada nuklearnih reaktora. Nuklearni reaktori se najviše koriste za proizvodnju električne energije i radionuklida procesom fisije uz utrošak radioaktivnog goriva. Fisija koristi termalne neutrone, koji imaju karakteristična svojstva prodiranja u materijale, te su zaslužni za inicijaciju i propagaciju lančanih reakcija. Čestični akceleratori najviše se koriste u istraživačke svrhe, iako imaju široku primjenu u medicini. Radioaktivni elementi koriste se za praćenje tokova fluida, kemijskih reakcija i raznolikih procesa u ljudskom tijelu. Potencijalnu primjenu imaju unutar baterija, zbog mogućnosti duljeg korištenja. Značajna primjena nuklearne tehnologije je u medicini, gdje se koristi za mapiranje i liječenje malignih nakupina tkiva.

LITERATURA

- [1] A. Allisy, Henri Becquerel: The Discovery of Radioactivity, *Radiation Protection Dosimetry*, **68** (1996), 3–10.
- [2] G. C. Schmidt, Über die von den Thorverbindungen und einigen anderen Substanzen ausgehende Strahlung (On the radiation emitted by thorium compounds and some other substances), *Annalen der Physik und Chemie*, **65** (1898), 141–151.
- [3] P. Curie, M. Curie, Sur une substance nouvelle radio-active, contenue dans la pechblende (On a new radioactive substance contained in pitchblende), *C. R. hebd. Séanc. Acad. Sci. Paris*, **127** (1898), 175–178.
- [x] P. Curie, M. Curie, G. Bémon, Sur une nouvelle substance fortement radio-active contenue dans la pechblende (On a new, strongly radioactive substance contained in pitchblende), *C. R. hebd. Séanc. Acad. Sci. Paris*, **127** (1898), 1215–12.
- [4] E. Rutherford, The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom, *Philosophical Magazine*, **6** (1911), 669–688.
- [5] W. Bothe, H. Becker, Künstliche Erregung von Kern- γ -Strahlen (Artificial excitation of nuclear γ rays, *Z. Phys.*, **66** (1930), 289.
- [6] I. Curie, Sur le rayonnement γ nucléaire excité dans le glucinium et dans le lithium par les rayons α du polonium (On the nuclear γ radiation excited in glucinium and lithium by the α rays of polonium), *C. r. hebd. séances Acad. sci. Paris*, **193** (1930)
- [7] J. Chadwick, Possible Existence of a Neutron, *Nature*, **129** (1932), 312–312.
- [8] F. Joliot, I. Curie, Artificial production of a new kind of radio-element, *Nature*, **133** (1934), 201.
- [9] E. Fermi, Sul moto dei neutroni nelle sostanze idrogenate (On the motion of neutrons in hydrogenated substances), *Ric. Sci.*, **7** (2) (1936), 13.
- [10] E. Fermi, Possible production of elements of atomic number higher than 92, *Nature* **134**, (1933), 898.
- [11] O. Hahn, F. Straßmann, Über den Nachweis und das Verhalten bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle, *Naturwissenschaften*, **27** (1939)
- [12] J. Magill, J. Galy, *Radioactivity Radionuclides Radiation*, Springer, Njemačka, 2004.
- [13] <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx> (13.09.2020.)

- [14] J-K. Kang, S. Seo, Y. W. Jin, Health Effects of Radon Exposure, *Yonsei medical journal*, **60** (2019)
- [15] J. K. Shultis, R. E. Faw, *Fundamentals of nuclear science and engineering*, Marcel Dekker, New York, 2002.
- [16] E. P. Wang, Quantum Mechanics of Alpha Decay, *MIT department of physics* - <http://web.mit.edu/wangfire/pub8.14/apaper.pdf> (13.09.2020.)
- [17] F. R. Xu, S. M. Wang, Z. J. Lin, J. C. Pei, Alpha-decay quantum-tunnelling calculations based on a folded Woods-Saxon potential, *Journal of Physics: Conference Series*, **436** (2013)
- [18] A. I., Kassis, The Amazing World of Auger Electrons, *International Journal of Radiation Biology*, **80** (2004), 789–803.
- [19] P. Weinberger, Revisiting Louis de Broglie's famous 1924 paper in the *Philosophical Magazine*, *Philosophical Magazine Letters*, **86** (2006), 405-410,
- [20] A. Vértés, S. Nagy, Z. Klencsar, R.G. Lovas, F. Rösch, *Handbook of Nuclear Chemistry*, Springer, Njemačka, 2011.
- [21] G. Scamps, D. Lacroix, Effect of pairing on one- and two-nucleon transfer below the Coulomb barrier: A time-dependent microscopic description, *Physical Review*, **87** (2013)
- [22] N. J. Carron, *An Introduction to the Passage of Energetic Particles through Matter*, Taylor & Francis, New York, 2007.
- [23] S. A. R. Wynchank, A. E. Cox, C. H. Collie, The thermal neutron capture cross section of a natural boron, *Nuclear Physics*, **62** (1965), 491-496.
- [24] E. Song, Fission Fragment Tracking and Identification in the Neutron-Induced Fission Fragment Tracking Experiment's Time Projection Chamber, 2015. <https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1123&context=physsp> (14.09.2020.)
- [25] J. R. Lamarsh, A. J. Baratta, *Introduction to Nuclear Engineering Third Edition*, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [26] <http://atom.kaeri.re.kr/nuchart/?zlv=2> (13.09.2020.)
- [27] <https://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/research-reactors.aspx> (13.09.2020.)
- [28] <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx> (13.09.2020.)

- [29] G. B. Saha,. Production of Radionuclides, *Physics and Radiobiology of Nuclear Medicine*, (2006), 44–55.
- [30] <https://www.world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-is-uranium-made-into-nuclear-fuel.aspx> (14.09.2020)
- [31] A. Mushtaq, Producing radioisotopes in power reactors, *J Radioanal Nucl Chem*, (2012), 793-802.
- [32] https://www.clpgroup.com/NuclearEnergy/Eng/power/power4_1_1.aspx#:~:text=The%20commonly%20used%20reactor%20types,in%20nuclear%20power%20stations%20worldwide (14.09.2020)
- [33] B. Zarubin, Introduction to Light Water Reactors, 2016. <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph241/zarubin1/> (14.09.2020.)
- [34] Nuclear Reactor Types An Environment & Energy Fact File provided by the IEE http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/kallman1/docs/nuclear_reactors.pdf (14.09.2020.)
- [35] <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx> (14.09.2020)
- [36] J. Ortiz-Villafuerte, R. Castillo-Durán, H. Hernández-López, E. Araiza-Martínez, *Fundamentals of Boiling Water Reactor Safety Design and Operation*, Springer, Berlin, 2007.
- [37] J. A. Ayres, C. A. Trilling, Heavy Water and Organic Fluids as Neutron Moderator and Reflector Materials, *Nuclear Engineering and Design*, **14** (1971), 363-389.
- [38] <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx> (13.09.2020.)
- [39] A. K. Nayak, S. Banerjee, Pressurised Heavy Water Reactor (PHWR) Technology: Its Relevance Today, *ASME J of Nuclear Rad Sci.*, **3** (2017)
- [40] R. Scrivens, Electron and Ion Sources for Particle Accelerators <https://cds.cern.ch/record/941321/files/p495.pdf> (14.09.2020.)
- [41] A.A.M. El-Saftawy, Regulating The Performance Parameters Of Accelerated Particles, (2013) http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:46135147 (13.09.2020.)
- [42] G. M. Currie, J. M. Wheat, .R Davidson, H. Kiat, Radionuclide production, *The Radiographer*, **58** (2011), 46-52.

- [43] H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics Fourth Edition*, Springer, New York, 2015.
- [44] M. F. A. Rahman, J. Abdullah, H. Hassan, M. R. Shari, A. M. Affandi, M. A. K. Adnan, Application of Radiotracer Technology on Solving the Unsolved Leak in Lift Pit, 2018. <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/48/050/48050369.pdf> (14.09.2020.)
- [45] <https://www.iaea.org/topics/air> (14.09.2020.)
- [46] T. Camacho, Geological Radiodating, 2017. <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/camacho1/> (14.09.2020.)
- [47] S. Kelley, K-Ar and Ar-Ar Dating, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **47** (2002), 785-818
- [48] L. A. Currie, The Remarkable Metrological History of Radiocarbon Dating [II], *J Res Natl Inst Stand Technol.* **109**(2) (2004), 185-217.
- [49] R. B. Hayes, Some Mathematical and Geophysical Considerations in Radioisotope Dating Applications, *Nuclear Technology*, **197**(2) (2017), 209-218
- [50] S. Harrison, Betavoltaic Devices, 2013. <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/harrison2/> (14.09.2020.)
- [51] S. I. Maximenko, J. E. Moore, C. A. Affouda. i dr., Optimal Semiconductors for ^3H and ^{63}Ni Betavoltaics, *Sci Rep* **9**, 10892 (2019)
- [52] N. Mane, V. Patil, Atomic Batteries A Compact And Long Life Power Source, 2016.
- [53] S. Lan Woo, Discovery of the gluon, *AIP Conference Proceedings* **300**, **598** (1994)
- [54] S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A. M. Sirunyan, A. Tumasyan, W. Adam, E. Aguilo, C. Fabjan, Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, *Physics Letters B*, **716** (1) (2012), 30–61.
- [55] E. M. Smit, Properties, Uses, Radiochemical Purity and Calibration of Tc^{99} , *Journal of Nuclear Medicine*, **5** (1964), 871-882.
- [56] M. N. Hossain, K. Quadir, M. N. Islam, T. Biman, F. Begum, Measurement of Linear Attenuation Coefficient of Tc-99m using Planar Gamma Camera Image, *Bangladesh Journal of Nuclear Medicine*, **17** (1) (2015), 61-66.
- [57] P. M. Robson, D. Dey, D. E. Newby, D. Berman, D. Li, Z. A. Fayad, M. R. Dweck, MR/PET Imaging of the Cardiovascular System, *JACC Cardiovasc Imaging*, **10** (2017), 1165-1179.
- [58] J. Skowronek, Current status of brachytherapy in cancer treatment - short overview, *J Contemp Brachytherapy*, **9**(6) (2017), 581-589.

- [59] A. G. Wernicke, M. Shamis, W. Yan, S. Trichter, A. M. Sabbas, Y. Goltser, J. P. Christos, J. S. Brennan, B. Parashar, D. Nori, Role of Isotope Selection in Long-term Outcomes in Patients With Intermediate-risk Prostate Cancer Treated With a Combination of External Beam Radiotherapy and Low-dose-rate Interstitial Brachytherapy, *Urology*, **79** (5) (2012), 1098-1104.
- [60] A. Niranjana, G. Gobbel, J. Novotny Jr, J. Bhatnagar, W. Fellows, L. D. Lunsford, Impact of decaying dose rate in gamma knife radiosurgery: in vitro study on 9L rat gliosarcoma cells, *J Radiosurg SBRT*, **1**(4) (2012), 257-264.
- [61] A. D. Jensen, M. W. Mütter, J. Debus, Review of clinical experience with ion beam radiotherapy, *Br J Radiol. Spec No 1* **84** (2011), 35-47.
- [62] K. Nedunchezian, N. Aswath, M. Thiruppathy, S. Thirugnanamurthy, Boron Neutron Capture Therapy - A Literature Review, *J Clin Diagn Res.*, **10** (12) (2016)
- [63] P. Curie, M. Curie, G. Bémont, Sur une nouvelle substance fortement radio-active contenue dans la pitchblende (On a new, strongly radioactive substance contained in pitchblende), *C. R. hebd. Séanc. Acad. Sci. Paris*, **127** (1898) , 1215–12.