



GOSPODARENJE RADIOAKTIVNIM OTPADOM

U REPUBLICI HRVATSKOJ



Zbrinjavanje radioaktivnog otpada
www.radioaktivniotpad.org




Fond za financiranje
razgradnje NEK





SADRŽAJ

Uvod	05
Radioaktivnost, opći pojmovi	06
Nuklearna energija i primjena	14
Radioaktivni otpad i zbrinjavanje	24





UVOD

Radioaktivnost je svojstvo nekih vrsta atomskih jezgri da se spontano mijenjaju (raspadaju) i pritom emitiraju brze čestice (alfa, beta, neutrone ...) i prodorne elektromagnetske valove (gama zrake). Takve atomske jezgre nazivaju se radionuklidima, a emitirane čestice i gama zrake radioaktivnim zračenjem.

Na Zemlji ima oko 85 vrsta prirodnih radionuklida, od čega samo manji broj u znatnijim količinama (torij-232, uranij-238, kalij-40 ...). Osim toga, blizu 3.000 vrsta radionuklida proizvedeno je umjetno, u nuklearnim reakcijama, najviše u nuklearnim reaktorima. Iako su uglavnom sadržani u vrlo visokim koncentracijama u istrošenom reaktorskom gorivu, njihova ukupna radioaktivnost daleko je manja od prirodne radioaktivnosti Zemljine kore, a ozračenje koje prosječan čovjek od njih dobiva tisućama je puta manje od ozračenja iz prirodnog okoliša. Rizik od posljedica primljenog ozračenja za čovjekovo zdravlje izražava se veličinom koja se naziva efektivnom dozom.

U nuklearnim reaktorima odvija se kontrolirana lančana fisija, u kojoj se oslobađa milijunima puta veća energija po kilogramu iskorištenog materijala nego u kemijskim reakcijama sagorijevanja, što se u nuklearnim elektranama koristi za proizvodnju električne energije. U reaktorima se spontana fisija, koja je oblik radioaktivnog raspada u kojemu se jezgra cijepa na dva podjednaka dijela, pretvara u lančanu reakciju tako što neutroni oslobođeni prilikom fisije pogađaju okolne atomske jezgre i u njima izazivaju (induciraju) daljnje fisije. Brzina lančane reakcije kontrolira se djelovanjem na tok fisijskih neutrona. Istrošeno nuklearno gorivo iz reaktora, ili barem jedan njegov dio nakon eventualne prerade, predstavlja visokoradioaktivni otpad. Usto, radom i razgradnjom nuklearnih elektrana nastaju i znatno veće količine otpada koji je puno manje radioaktivan. Osim toga, radioaktivni otpad nastaje i u drugim primjenama radionuklida (medicina, industrija, istraživanja...).

Postupanje sa svim vrstama radioaktivnog otpada (njegovo zbrinjavanje) strogo je uređeno nacionalnim i europskim propisima i međunarodnim konvencijama. Ključni zahtjev je ograničavanje rizika za ljudsko zdravlje, prema kojemu efektivna doza koju pojedinac iz opće populacije smije primiti od svih umjetnih izvora (osim u medicinske svrhe) mora biti otprilike upola manja od prosječne prirodne doze iz okoliša.

U tu svrhu, zbrinjavanje radioaktivnog otpada mora osigurati odgovarajuću izolaciju otpada od okoliša. To se postiže primjerenom obradom i pakiranjem otpada koji se, u pravilu, najprije pod stalnim nadzorom čuva u skladištima, a potom trajno smješta u odlagališta. U odlagalištu će izgrađene barijere (npr. armirano-betonski zidovi) i prirodne barijere prikladne lokacije (geološka i druga svojstva) spriječiti migraciju radioaktivnih tvari u okoliš sve dok se njihova radioaktivnost (zahvaljujući procesu raspada) ne umanjí na razinu prirodne radioaktivnosti okolnog tla.

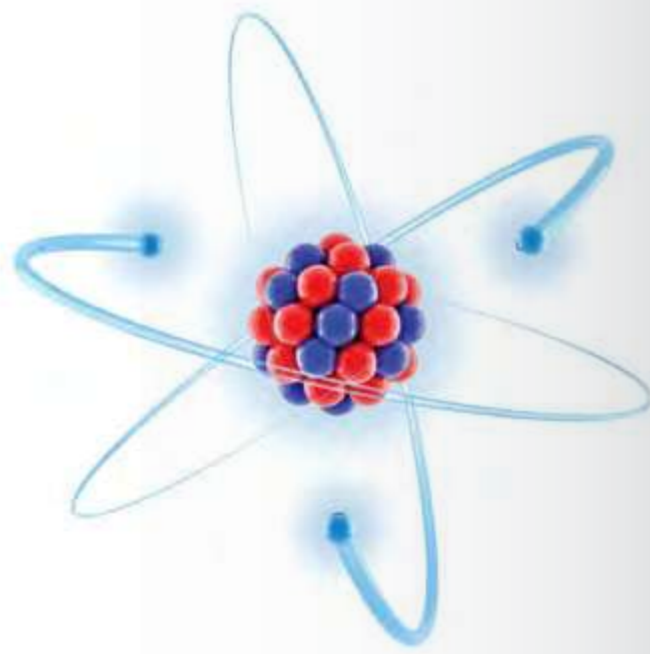
RADIOAKTIVNOST, OPĆI POJMOVI

Radioaktivnost ili zračenje tj. radijacija je prirodan fenomen sveprisutan u našoj okolini od njenog postanka. Sve tvari na makroskopskoj ili mikroskopskoj razini imaju tendenciju da poprime stabilan i neutralan oblik. Spontana pretvorba nestabilne atomske jezgre tj. radionuklida pri čemu odbacuje tj. emitira čestice ili energiju koju možemo detektirati i mjeriti nazivamo radioaktivnost.

Prije nego krenemo u kategorizaciju vrsta zračenja, pa tako i radioaktivnosti, moramo krenuti od atomske jezgre. Broj protona u atomskoj jezgri određuje o kojemu se kemijskom elementu radi: to je tzv. redni broj elementa ili atomski broj (oznaka Z). Broj Z se često ne navodi jer ga u cijelosti zamjenjuje naziv odnosno simbol kemijskog elementa: npr. kratka oznaka C, ili opširnija oznaka ${}_6\text{C}$, znače istu stvar, kemijski element ugljik kojemu atomske jezgre imaju 6 protona ($Z=6$).

Jezgre istoga elementa, koje imaju različiti broj neutrona, pripadaju različitim izotopima toga elementa. Uobičajeno ih je označavati masenim brojem (oznaka A) koji je jednak zbroju protona i neutrona u jezgri (protoni i neutroni zajedno se nazivaju nukleonima). Najpoznatiji izotopi ugljika su: dominantni stabilni izotop koji se označava kao ^{12}C ili C-12 (6 protona + 6 neutrona = 12 nukleona), te radioizotop ^{14}C (ili C-14) koji ima 2 neutrona više, a koristi se za radioaktivno datiranje. Navedene oznake sadrže samo maseni broj A jer je Z izostavljen kao suvišan.

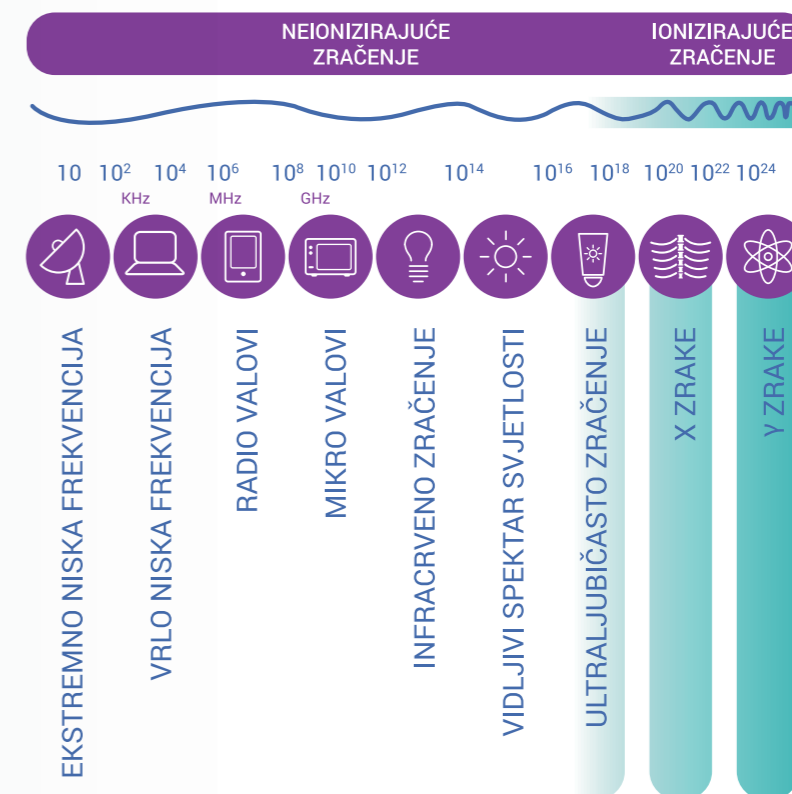
Broj protona u atomskoj jezgri određuje o kojemu se kemijskom elementu radi.



SLIKA 1: ATOM S JEZGROM I OMOTAČEM

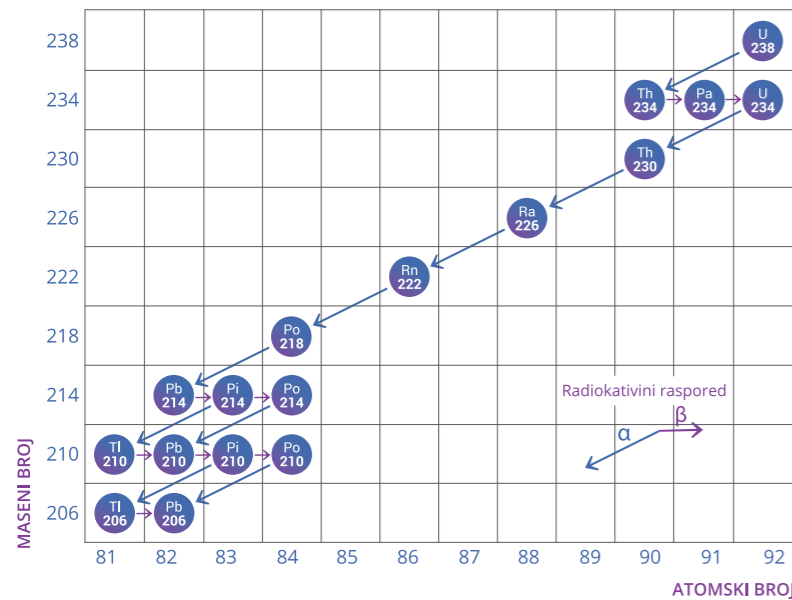
Nuklid je naziv za atomsku jezgru (ili vrstu jezgri) opisanu brojem protona, brojem neutrona (ili masenim brojem) i energijskim stanjem. Ako nas stanja povišene energije nekog izotopa ne zanimaju (kod većine vrsta ona gotovo trenutno prelaze u osnovno stanje izotopa), nema prave potrebe razlikovati termine „nuklid“ i „izotop“. U takvim slučajevima, korištenje termina „nuklid“ obično sugerira da nas zanimaju samo nuklearna svojstva (svojstva atomske jezgre), dok „izotop“ može naglašavati pripadnost nekom kemijskom elementu.

Radionuklidi su nuklidi koji imaju viška nuklearne energije koju spontano izbacuju u vidu čestica iz jezgre (alfa i beta raspad) ili u vidu energije tj. gama zraka. Emitiranje čestica nazivamo čestičnim zračenjem, a emitiranje gama zraka elektromagnetskim zračenjem (elektromagnetskim valovima). Uz gama zrake, koje imaju najvišu frekvenciju, spektar elektromagnetskog zračenja čine i rendgenske (X) zrake, UV zrake, vidljivi spektar, infracrveni spektar, mikrovalovi te radiovalovi. U čestično zračenje spada dodatno i neutronska zračenje.



SLIKA 2: VALNI SPEKTRI

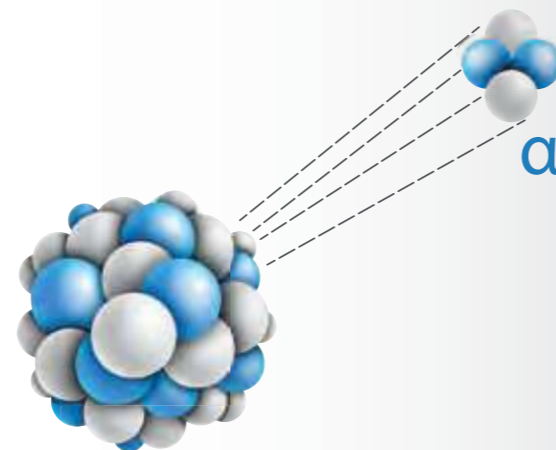
Zračenje ima još jednu, nama puno bitniju podjelu, po energiji emitiranih čestica. Energija čestica čini zračenje ionizirajućim ili neionizirajućim. Radioaktivnost je ionizirajuće zračenje. Čestice imaju dovoljnu energiju da ioniziraju atome i molekule te da poremete kemijske veze. U ionizirajuće zračenje spada alfa zračenje, beta zračenje, gama zračenje, neutronska zračenje, X zrake te UV zrake. Neutroni mogu ionizirati iako imaju vrlo male energije, jer djeluju na atomsku jezgru. Objasnimo detaljnije prva četiri tipa zračenja.



Od sve 4 vrste čestica, alfa čestice su najveće i time mogu biološka oštećenja.

SLIKA 3: RASPAD URANA

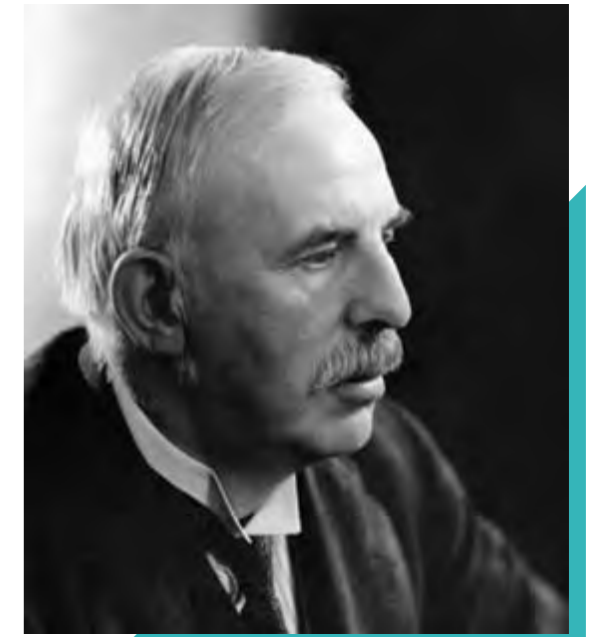
Alfa zračenje nastaje alfa raspadom pri čemu nestabilni nuklid izbacuje tj. emitira alfa česticu – jezgru helija ^4He pri čemu radionuklid gubi 4 masena broja odnosno 2 atomska broja i postaje drugi element. Od sve 4 vrste čestica, alfa čestice su najveće i time mogu biološka oštećenja najlakše uzrokovati, ali također imaju najmanju prodornu moć tako da alfa čestice zaustavlja već gornji sloj kože ili list papira. Najveća opasnost od ove vrste zračenja je kad se radionuklid koji emitira alfa čestice unese u organizam te tako izravno oštećuje nezaštićene organe.



SLIKA 4: ALFA ZRAČENJE

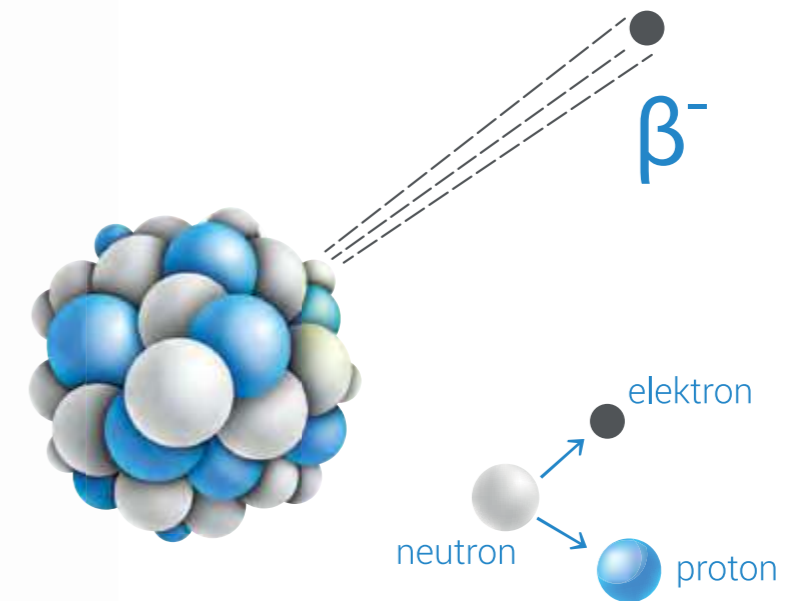
Alfa čestice su prisutne i u kozmičkom zračenju gdje postoje i alfa čestice s većom energijom koje su prodornije, ali njih zaustavlja Zemljina atmosfera. Neki od najopasnijih izvora alfa čestica su svi izotopi radija, radona i polonija. Alfa čestice je otkrio 1899. godine Ernest Rutherford.

Sljedeće čestično zračenje je beta zračenje koje čine beta čestice – elektroni ili pozitroni. Tendencijom da postigne stabilniju konfiguraciju, nuklid može pretvoriti neutron u proton pri čemu se izbacuje visoko energetski elektron odnosno pozitron ukoliko se proton pretvara u neutron. Beta čestice imaju srednju prodornost i srednju ionizirajuću moć (u usporedbi s alfa i gama zračenjem). Beta zračenje zaustavlja primjerice tanka aluminijska ploča. Otkrio ih je Ernest Rutherford uz alfa čestice. Primjer radionuklida koji emitira beta čestice je ^{40}K .



SLIKA 5: ERNEST RUTHERFORD

Neki od najopasnijih izvora alfa čestica su svi izotopi radija, radona i polonija.



SLIKA 6: BETA ZRAČENJE

Posebno čestično zračenje koje je vezano isključivo za nuklearnu fuziju i fisiju je neutronska zračenje gdje se emitiraju slobodni neutroni. Ono je neizravno ionizirajuće zračenje (nema vlastiti naboj) jer u kontaktu s drugim nuklidima stvara nestabilne nuklide koji postaju alfa, beta i gama emiteri. Primarni izvor ovog tipa zračenja je nuklearna fisija tj. proces u nuklearnim reaktorima gdje neutroni sudjeluju u lančanim reakcijama gdje sudaranjem cijepaju jezgre urana pri čemu nastaju novi neutroni koji proces nastavljaju. O procesu fisije će biti više riječi kasnije.

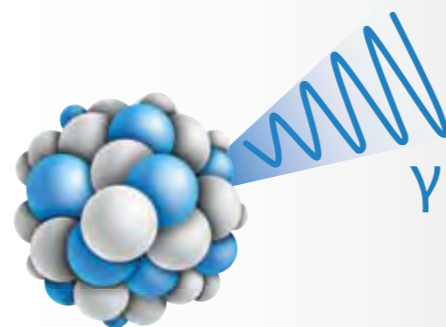
Neutronska zračenje predstavlja ozbiljan zdravstveni hazard jer je, zbog toga što je neutralna čestica, puno više prodorna od alfa i beta čestica te su oko 10 puta štetnije tkivu od beta i gama čestica. Drugi problem s neutronske zračenjem je što polako degradira materijale, primjerice dijelove nuklearnog reaktora zbog čega postaju sami radioaktivni te se periodički moraju mijenjati i razlog je zbog čega nuklearni reaktori u elektranama imaju „vijek trajanja“. Neutronska zračenje je, ponavljam, vezano isključivo za fisionu i fuzionu procese tj. nuklearne reaktore te nuklearno oružje. Ovaj tip zračenja se zaustavlja debelim slojem betona ili vodom koja je odličan apsorber neutrona što je i razlog zbog čega se istrošeno nuklearno gorivo čuva u bazenima s vodom.



SLIKA 7:
MOKRO SKLADIŠTENJE, CHERENKOVA SVJETLOST

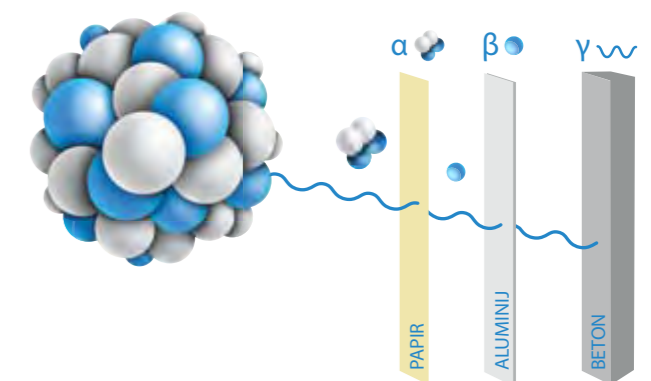
Gama zračenje je elektromagnetsko zračenje vrlo visoke frekvencije. Pri višim frekvencijama, elektromagnetsko zračenje (valovi) obično djeluje na tvar tako da joj predaje energiju u paketima koji se nazivaju fotonima. Energija fotona izražava se u elektronvoltima (eV), a ionizaciju obično izazivaju fotoni od desetak i više eV.

Gama zračenje se sastoji od visoko energetskih fotona (gama fotoni), koji nastaju kada nuklid pređe iz višeg energetskog stanja u niže energetsko stanje, te imaju energije oko milijun eV (MeV). Drugi izvor gama zraka je



SLIKA 8: GAMA ZRAČENJE

kozmičko zračenje kojemu smo izloženi ukoliko živimo na višim katovima zgrada ili prilikom leta avionom. Gama zračenju smo najizloženi jer je vrlo prodorno te predstavlja zdravstveni hazard u svim okolnostima.

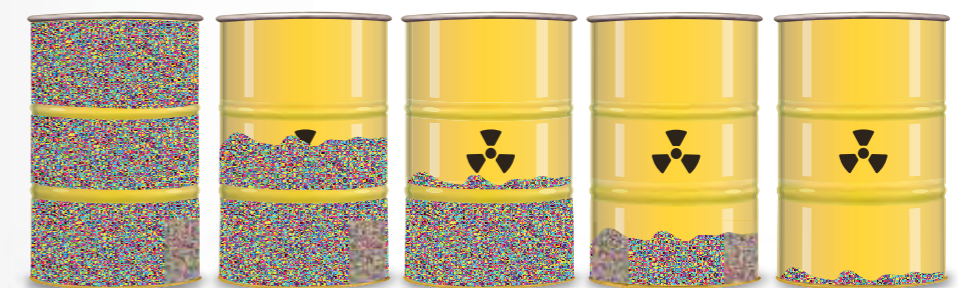


SLIKA 9: ŠTO ZAUSTAVLJA ZRAČENJA

Neutronska zračenje je vezano isključivo za fisionu i fuzionu procese tj. nuklearne reaktore te nuklearno oružje.

Sve opisane vrste zračenja su rezultat raspada pri čemu su određene čestice izbačene iz jezgri te se pritom događa nuklearna transmutacija tj. pretvaranje jednog nuklida u drugi, bio to drugi izotop istog elementa ili novi element. Ovo ponašanje je nasumično u pravom smislu te riječi te ne možemo znati kad će se koji nuklid raspasti, ali za određene nuklide znamo koliko im je vrijeme poluraspada.

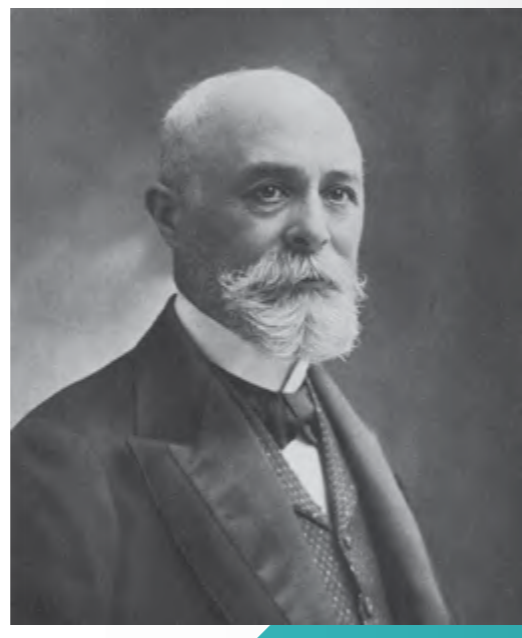
Vrijeme poluraspada označava vremenski period u kojem postoji 50% šanse da će se određeni nuklid raspasti, posljedično, u tom istom periodu očekujemo da će od skupine tih nuklida ostati samo polovica prvotnog broja. Jedan od najpoznatijih primjera je ^{14}C koji ima vrijeme poluraspada od 5.730 godina i čini osnovu karbonske metode datiranja starosti.



SLIKA 10: POLUŽIVOT, OPISNA SLIKA S TOČKAMA

Prije nego počnemo pričati o zdravstvenim posljedicama izlaganja ionizirajućem zračenju moramo proći i shvatiti značenje najčešće spominjanih mjernih jedinica u vezi radioaktivnosti.

Počnimo od jedinice bekerel (Bq) što je SI mjerna jedinica za aktivnost radioaktivnog materijala. 1Bq označava jedan raspad jezgre atoma u jednoj sekundi. 1Bq je suviše mala jedinica da bi se praktično koristila stoga se najčešće koriste prefiksi poput TBq (terabekerel, 10^{12} Bq). Primjerice oko 0,0169 grama ^{40}K u prosječnom ljudskom tijelu stvara otprilike 4.400 raspada u sekundi tj. 4,4 kBq aktivnosti, atomska bomba bačena na Hirošimu proizvela je, procijenjeno, 8×10^{24} Bq. Stara jedinica aktivnosti je curie (Ci) koja označava aktivnost 1 grama ^{226}Ra te je $1\text{Ci} = 37\text{GBq}$. Ime je dobila po Henriju Becquerelu koji je dijelio Nobelovu nagradu za otkriće radioaktivnosti uz Marie i Pierre-a Curie 1903. godine.

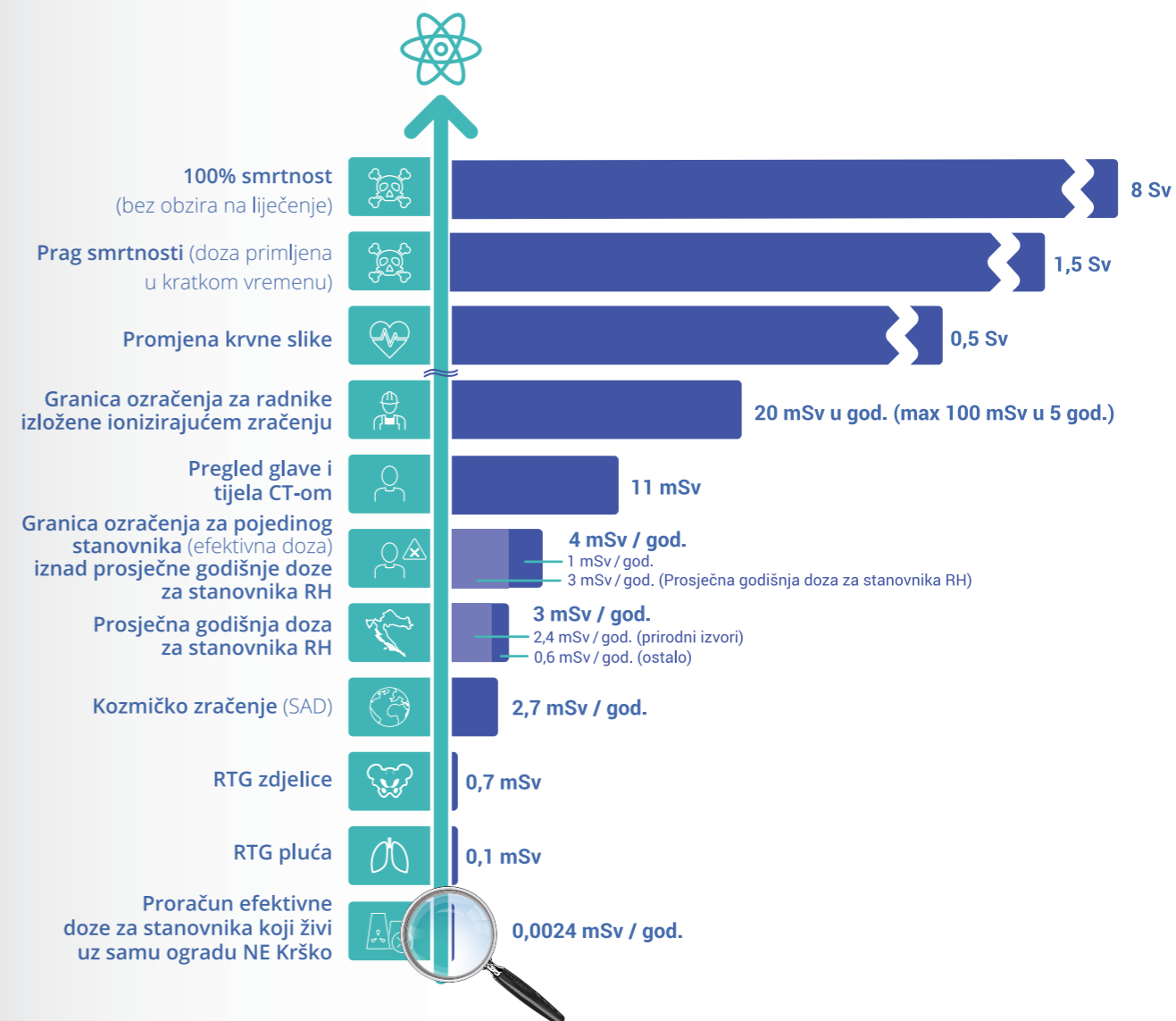


SLIKA 11: HENRI BECQUEREL

Atomska bomba bačena na Hirošimu proizvela je, procijenjeno, 8×10^{24} Bq.

Apsorbirana doza zračenja neke materije ili tkiva izražava se u jedinici gray, Gy. 1Gy je 1 džul energije predan 1 kilogramu materije ili tkiva tj. 1 J/kg. Služi za mjerenje apsorbirane doze zračenja prilikom procesa izlaganja određenih materijala zračenju, medicinskih tretmana ili za akutno izlaganje radioaktivnosti prilikom nesreća gdje tijelo u vrlo kratkom roku primi određenu količinu zračenja. Tu leži i najčešća konfuzija između mjerne jedinice gray i mjerne jedinice sivert jer biološki učinci ne ovise samo o apsorbiranoj dozi nego i o vrsti zračenja i vrsti ozračenog tkiva tj. organa.

Ekvivalentna doza, koja se mjeri u sivertima, uzima u obzir o kojoj se vrsti zračenja radi. Prosječna apsorbirana doza u nekom tkivu se množi s težinskim faktorom koji ovisi o tipu zračenja. Težinski faktori beta i gama zračenja su 1, alfa zračenja 20, a težinski faktor neutronske zračenja ovisi o brzini neutrona.



SLIKA 12: USPOREDNA SLIKA DOZA ZRAČENJA U SIVERTIMA OD NAJMANJIH IZVORA

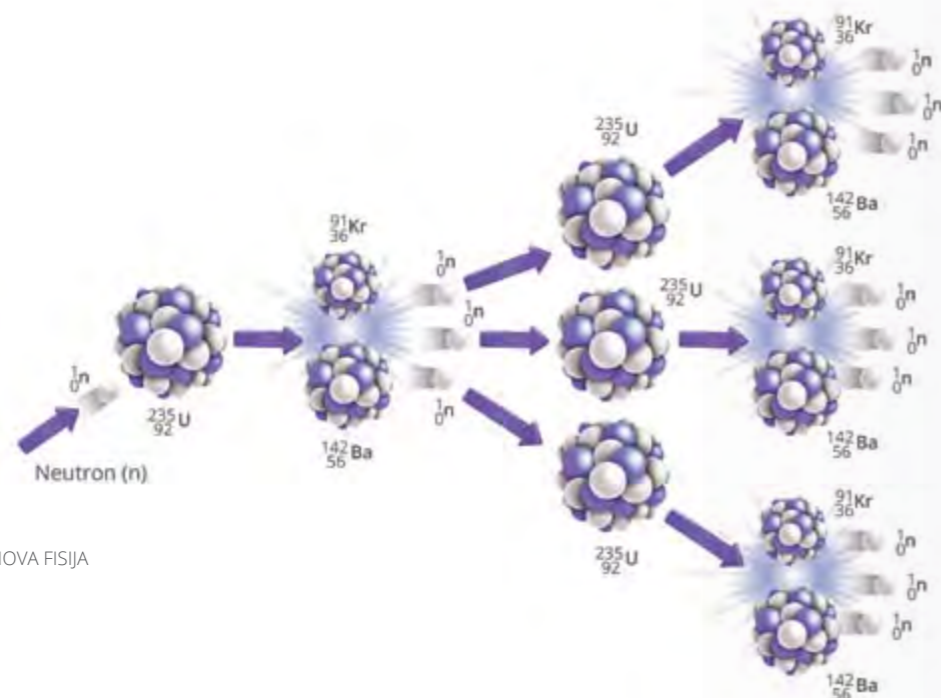
Efektivna doza, koja se također mjeri u sivertima, uzima u obzir i vrstu tkiva i računa se za cijelo tijelo i to tako da se ekvivalentne doze za sva tkiva pomnože s težinskim faktorom tkiva ili organa i zbroje. Tako je težinski faktor koštane srži 0,12, a kože 0,01. Upravo se efektivnom dozom približno opisuje rizik za zdravlje čovjeka prilikom izloženosti ionizirajućem zračenju. Primjerice, jednokratno ozračenje od 5 Sv izaziva smrt u 50% slučajeva u roku od 30 dana. Doza od 1 Sv može izazvati prolazne simptome radijacijske bolesti, a kasnije se razvije u rak u 5% slučajeva. Primjer gornje dozvoljene granice od 1Sv izlaganja imaju astronauti NASA-e tokom svoje karijere, 10 – 30 mSv je CT sken tijela, 5 – 10 μSv je zubni rentgen, 0,098 μSv daje jedna banana itd.

NUKLEARNA ENERGIJA I PRIMJENA

Primjena nuklearne energije u društveno korisne svrhe, poput proizvodnje električne energije, se veže uz izrazito burnu povijest prve polovice dvadesetog stoljeća. Povijest primjene ovog izvora energije i početak „atomske doba“ seže u 1919. godinu kad je Ernest Rutherford pomoću alfa zraka ostvario prve nuklearne pretvorbe. Tridesetih godina prošlog stoljeća Rutherford je otkrio da se cijepanjem atoma litija pomoću protona iz protonskog akceleratora oslobađa velika količina energije. Iste godine, 1932., otkrivena je čestica neutron koja lako prodire u atomsku jezgru jer nema naboj, tj. neutralna je.

Daljnji eksperimenti gdje su se koristili neutroni kao čestice s kojima se bombardiraju materijali pokazali su svojstvo inducirane radioaktivnosti (objašnjeno pod „neutronska zračenje“). Tim eksperimentima su znanstvenici 1938. godine došli do neočekivanog otkrića: kad neutron pogodi jezgru urana ona se može podijeliti na dvije manje

atomske jezgre, otprilike podjednake. To otkriće, nazvano nuklearnom fisijom, je bilo revolucionarno i zato što se dotad smatralo da su sve nuklearne promjene jezgre atoma tj. raspadi bili postepen proces. Leo Szilard i mnogi drugi znanstvenici su posljedično teoretizirali da nakon cijepanja prve jezgre urana zaostaju slobodni neutroni



SLIKA 13: URANOVA FISIJA

koji mogu bombardirati ostale jezgre i tako stvoriti lančanu reakciju kojom bi se stvorila velika količina energije. Objavom ovog saznanja 1939. godine, na pragu Drugog svjetskog rata, počela je, iza kulisa, utrka za nuklearnim naoružanjem.

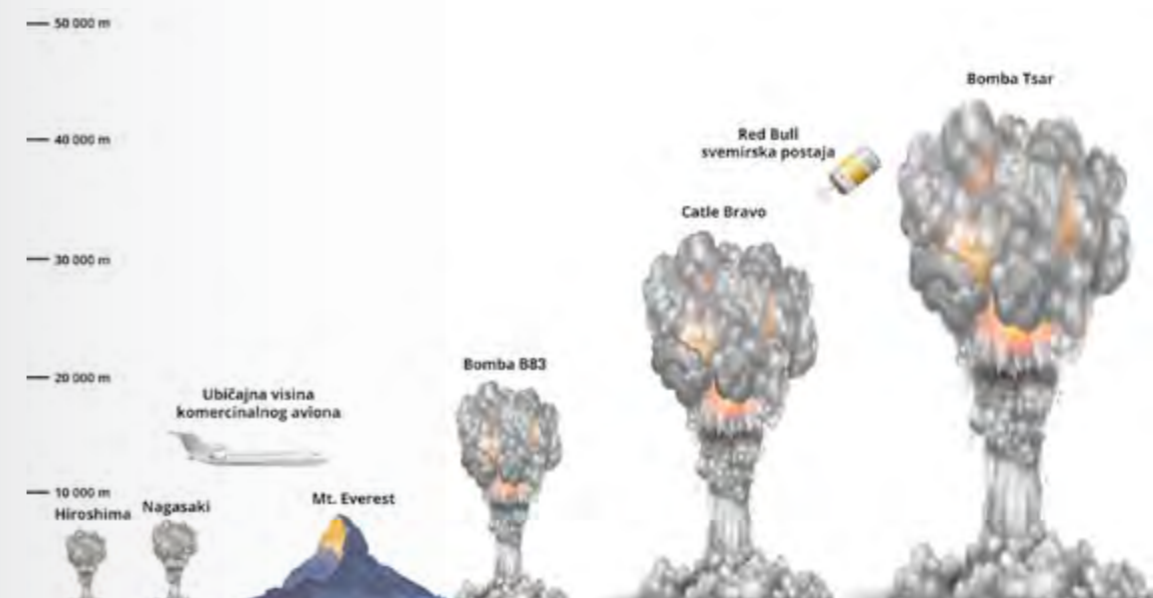
Prvi nuklearni reaktor u kojem je postignuta kritičnost je izgrađen u Chicagu 1942. godine u sklopu tajnog projekta „Manhattan“ čiji je cilj bio stvaranje obogaćenog urana i plutonija za stvaranje atomske bombe. Reaktor, nazvan Chicago Pile 1, bio je utjelovljenje znanstvene vizije znanstvenika imigranata Enrica Fermija i spomenutog Lea Szilarda. U nuklearnom reaktoru kritičnost označava stanje u kojemu se ravnomjerno odvija održiva lančana reakcija fisije. Broj slobodnih neutrona koji se stvara u materijalu za lančanu reakciju jednak je broju neutrona koji biva apsorbiran ili izlazi iz materijala. Prvu etapu utrke nuklearnog naoružanja osvajaju Sjedinjene Američke Države i uporabom atomskih bombi na Hirošimu i Nagasaki okončavaju Drugi svjetski rat. Tim događajem započinje nova utrka u nuklearnom naoružanju, ona između Sjedinjenih Američkih Država i njenih najbližih saveznika, Velike Britanije i Francuske te Sovjetskog Saveza.



SLIKA 14: CHICAGO PILE, izvor: Argonne National Laboratory



SLIKA 15: HIROSHIMA I NAGASAKI, TRINITY TEST, TZAR BOMBA



U godinama nakon Drugog svjetskog rata tajne nuklearne fisije su bile obznanjene i počelo je razvijanje tehnologije u kojoj će se nuklearna energija primjenjivati za opće dobro tj. za proizvodnju električne energije.

Prvi reaktor koji je proizveo električnu energiju je EBR-1 u saveznoj državi Idaho 20.12.1951., dok je prva nuklearna elektrana koja je priključena na električnu mrežu bila u gradu Obninsk, SSSR 27.06.1954. godine. Prva komercijalna nuklearna elektrana je Calder Hill u Engleskoj, otvorena 17.10. 1956. Godinu kasnije, 1957., osniva se Europska zajednica za atomsku energiju EURATOM te Međunarodna agencija za atomsku energiju IAEA.

Nuklearni reaktori stvaraju električnu energiju indirektno.

Energija oslobođena prilikom fisije zagrijava fluid koji služi za hlađenje materijala u kojemu se odvija lančana reakcija (nuklearnog goriva). Zagrijani fluid, primjerice voda ili plin, može se koristiti za zagrijavanje vode odnosno pare u parogeneratorima, čime se razdvaja tzv. primarni krug reaktorskog hladila od sekundarnog kruga u kojemu vodena para pokreće turbine za proizvodnju električne energije. Alternativno, može se hladilo iz primarnog kruga izravno koristiti za pokretanje turbina.

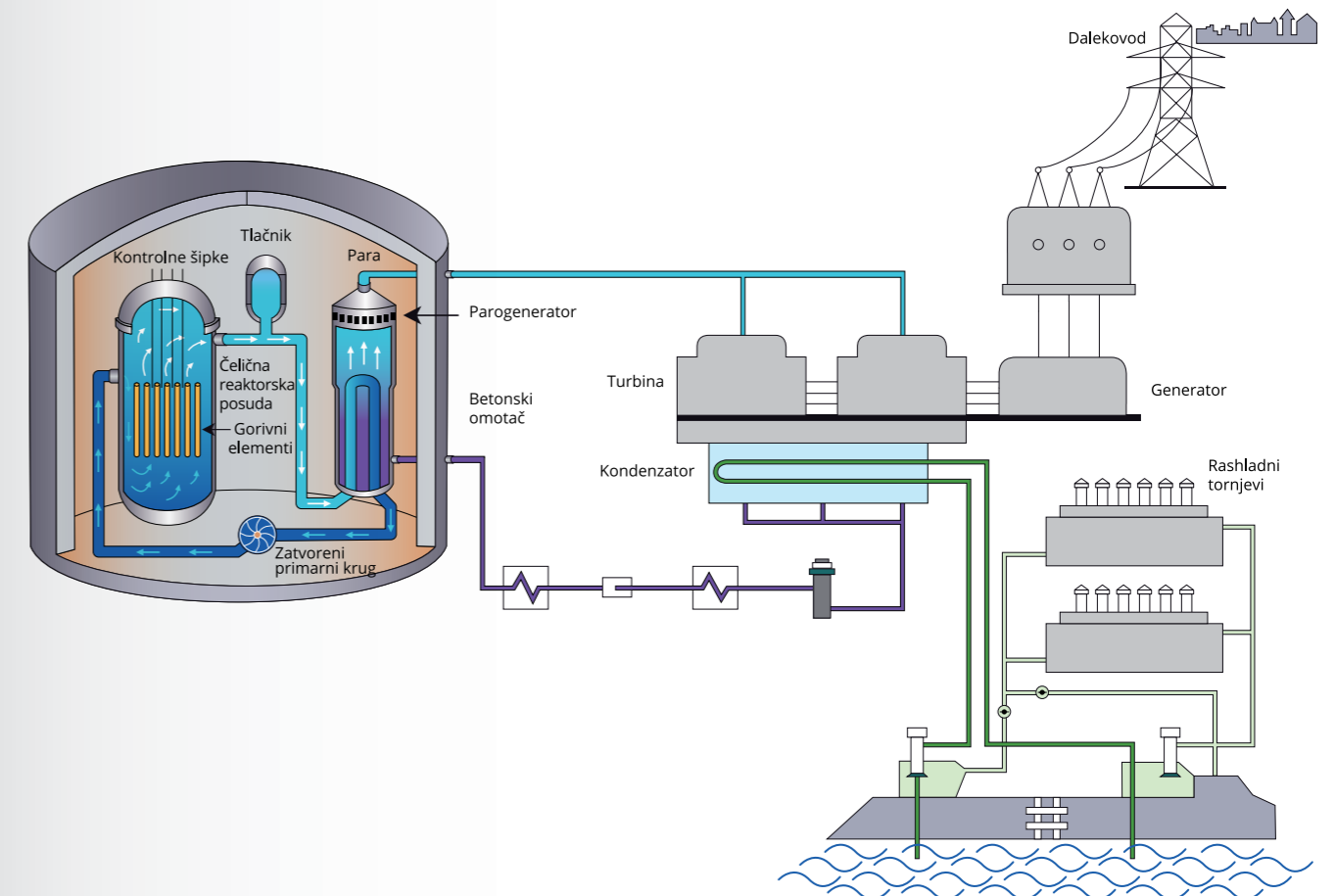


SLIKA 16: NUKLEARNI REAKTOR, GORIVNI ELEMENTI



Tlačni reaktor (PWR – Pressurized water reactor) radi na maloprije opisanom principu pri čemu je u primarnom krugu voda pod tlakom zbog čega ona ne prelazi u kipuće stanje. Voda u ovom tipu reaktora služi kao rashladno sredstvo za reaktor te je prvi put razvijen za potrebe pogona nuklearnih podmornica. Danas je najrašireniji tip reaktora u svijetu i tom tipu pripada i reaktor NE Krško i detaljnije ćemo ga opisati kasnije.

Nuklearni reaktori stvaraju električnu energiju indirektno. Energija oslobođena prilikom fisije zagrijava fluid koji služi za hlađenje materijala u kojemu se odvija lančana reakcija.



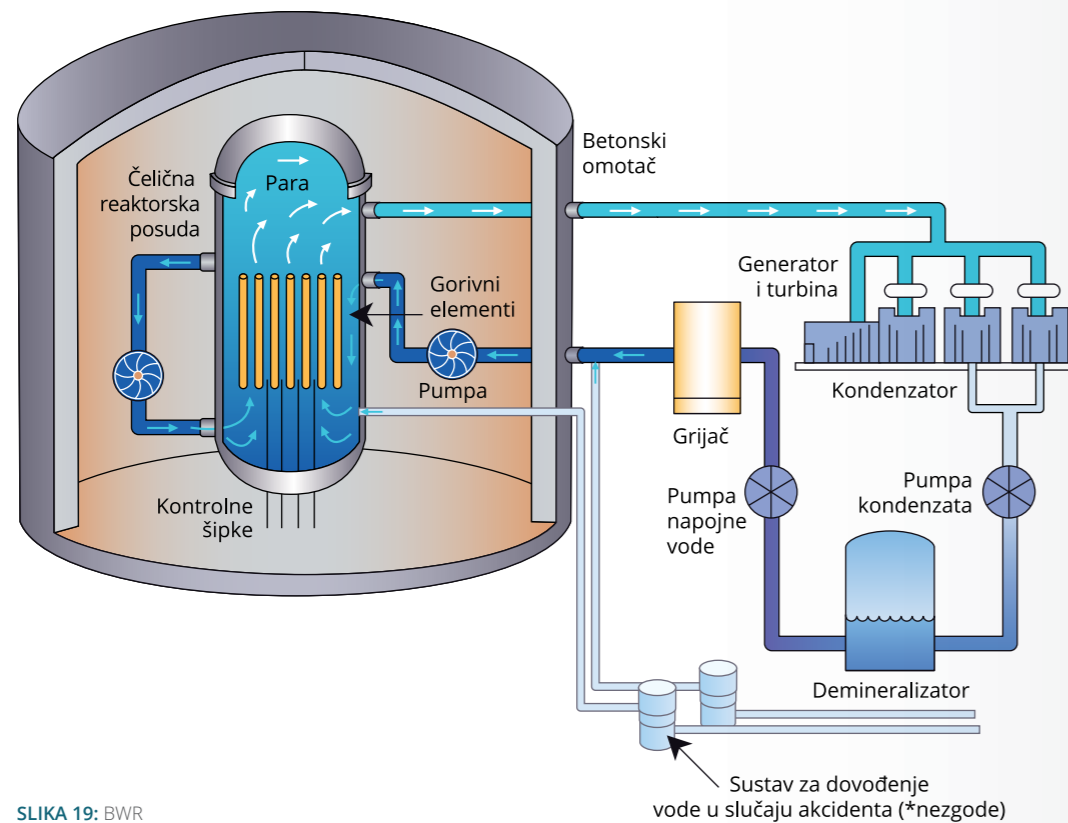
SLIKA 17: PWR, izvor: NEK

Drugi tip reaktora koji koristi običnu vodu je reaktor s kipucom vodom (BWR – boiling water reactor). Kod ovog tipa reaktora voda koja hladi reaktor je pod manjim tlakom što omogućuje isparavanje vode direktno u parnu turbinu. Razvijeni su isključivo za proizvodnju električne energije te trenutno čine petinu svih svjetskih reaktora ove namjene. Jednostavniji dizajn tj. izostanak generatora pare i podjele na primarnu i sekundarnu cirkulaciju vode čine ovaj tip reaktora jednostavnijim, a time i sigurnijim rješenjem.

BWR trenutno čini petinu svih svjetskih reaktora ove namjene.



SLIKA 18: FUKUSHIMA



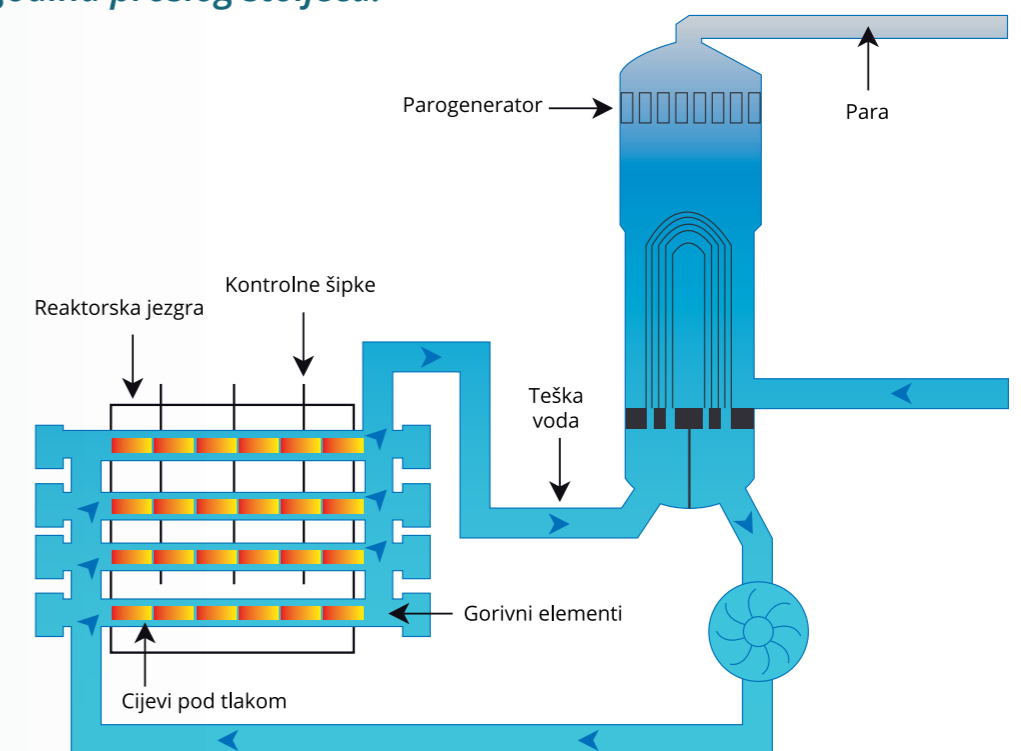
SLIKA 19: BWR

Tlačni reaktor steškom vodom (PHWR) radi neobogaćenim uranom te koristi tešku vodu D_2O kao hladilo i moderator neutrona. Slično kao kod PWR reaktora, primarno hladilo reaktora se nalazi pod tlakom da se spriječi isparavanje. Iako je teška voda skuplja od obične za pripremu goriva nije potrebno imati pogon za obogaćivanje urana. Najpoznatija izvedba ovog tipa reaktora je CANDU reaktor tj. Canada Deuterium Uranium, tehnologija razvijena kasnih 50-tih i 60-tih godina prošlog stoljeća. Svi reaktori izgrađeni u Kanadi su ovog tipa te nuklearna elektrana Bruce sa svojih 8 reaktora je najveća nuklearna elektrana u svijetu po broju operativnih reaktora. Smještena je na obali jezera Huron.



SLIKA 21: NE BRUCE U KANADI

CANDU reaktor tj. Canada Deuterium Uranium, tehnologija razvijena kasnih 50-tih i 60-tih godina prošlog stoljeća.



SLIKA 20: PHWR

Neizostavno je spomenuti i RBMK tip reaktora koji je poznat po Černobilskoj katastrofi. Taj najstariji tip komercijalnog reaktora koji, iako zastarjelog dizajna po današnjim standardima, i dalje se koristi u Ruskoj Federaciji, ali se postepeno zamjenjuje ruskom verzijom PWR reaktora kratice VVER. RBMK je, po principu rada, sličan BWR reaktoru te sadrži cirkulaciju kipuće vode uz moderaciju grafitnim šipkama. Elektrane koje još imaju operativne RBMK reaktore su Kursk, Leningrad i Smolensk.



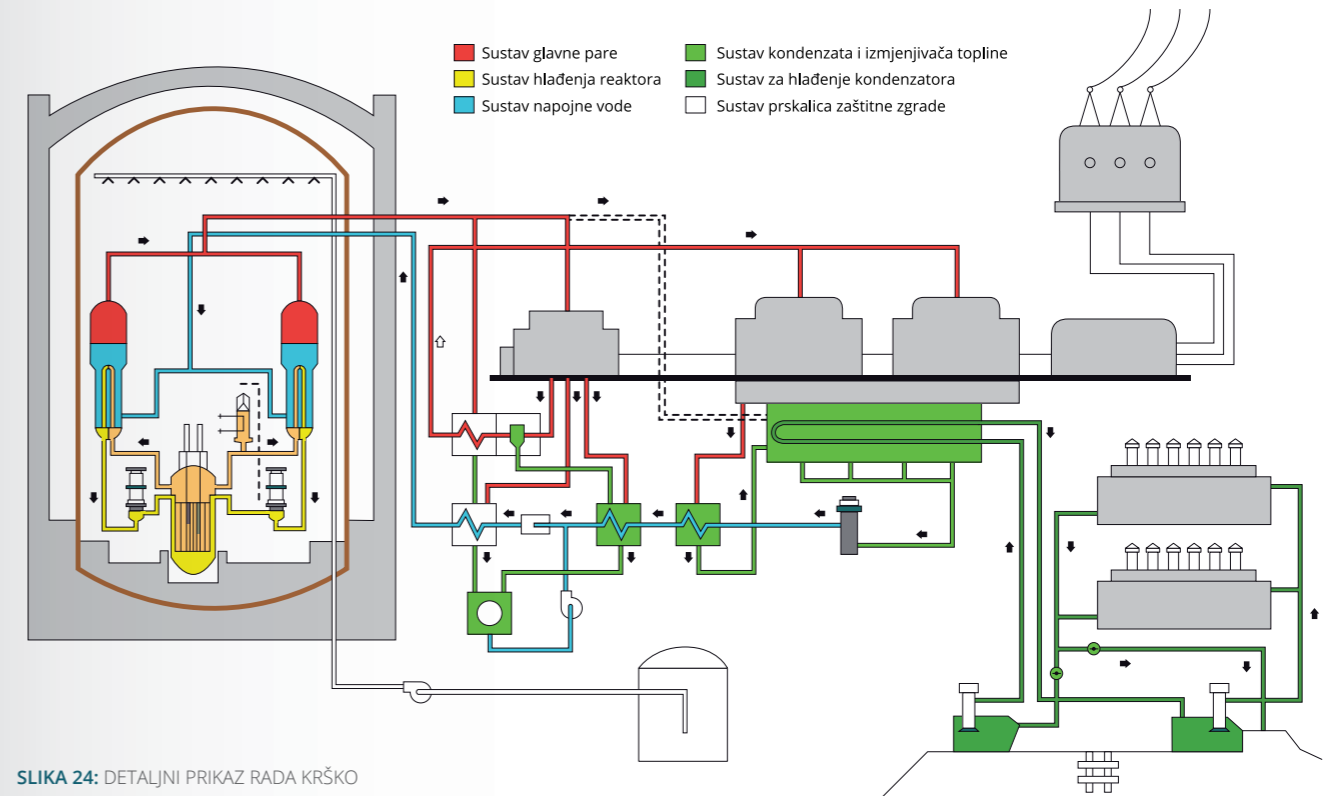
SLIKA 22: ČERNOBIL

Nama najzanimljivija elektrana je NE Krško koja se nalazi u općini Krško u republici Sloveniji. Planovi o izgradnji zajedničke elektrane su sklopljeni 1970. godine zbog potreba tadašnjih SR Hrvatske i SR Slovenije za dodatnim izvorima električne energije. Natječaj za nabavu samog reaktora osvojila je američka tvrtka Westinghouse Electric Corporation (u konkurenciji je bio i Siemens) i time tadašnja Jugoslavija postaje prva socijalistička zemlja koja ima nuklearnu elektranu sa zapadnim tipom reaktora. Reaktor NE Krško je, dakle, Westinghouseov PWR tlačni reaktor s dvije cirkulacije vode. Jezgru čini 121 gorivni element od

kjih je svaki sastavljen od 235 gorivnih šipki raspoređenih u 16 x 16 matrici. Prosječno obogaćenje nuklearnog goriva je do 5% ²³⁵U. Jezgra se nalazi u reaktorskoj posudi koja je ispunjena rashladnim sredstvom što je u slučaju PWR reaktora voda. Kontrolne šipke koje služe za inhibiciju lančane reakcije jezgre reaktora se spuštaju s gornjeg kraja reaktorske posude. Prilikom rada određeni broj neutrona i gama zraka pogađa stjenku reaktorske posude što izaziva oštećenja koja posljedično i određuju vijek trajanja elektrane, koji se, u slučaju da je struktura stjenke posude zadovoljavajuća, može produljiti.



SLIKA 23: NEK, izvor: NEK



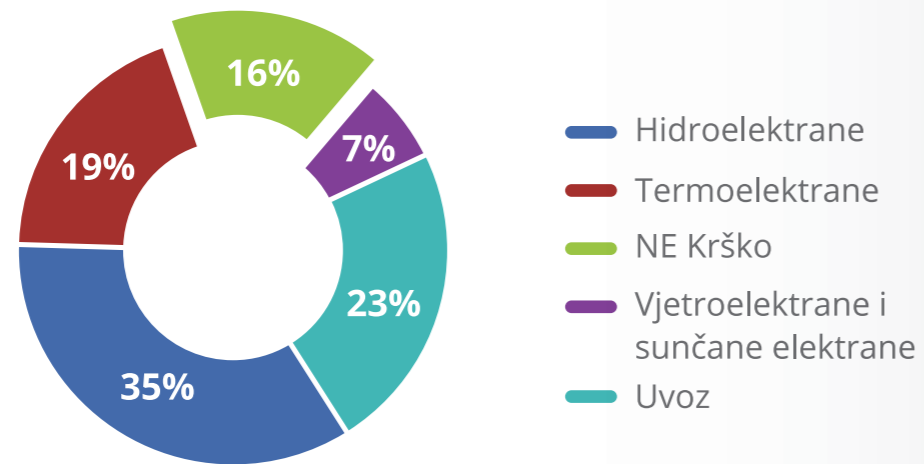
SLIKA 24: DETALJNI PRIKAZ RADA KRŠKO

Rashladno sredstvo u reaktorskoj posudi je pod tlakom od 15,5 MPa što onemogućuje isparavanje vode pri radnoj temperaturi od otprilike 315 °C. Tako zagrijana voda ulazi u 2 izmjenjivača topline tj. parogeneratora. Parogeneratori se sastoje od snopova 5.428 tankih cijevi, što daje površinu od 7.177 m² za razmjenu topline u drugi cirkulacijski krug. Voda u drugom cirkulacijskom krugu se zagrijava te isparava jer je pod normalnim tlakom. Ta para odlazi kroz sustav separatora vlage te dolazi na parne turbine pri tlaku od 6,5 MPa koje pokreću generator i stvaraju električnu energiju.

Para dolazi u doticaj s izoliranim sustavom hlađenja gdje

se hladi pomoću rashladnog tornja ili po potrebi vodom rijeke Save te kondenzira i pumpa natrag u parogenerator. Mora se naglasiti kako je svaki cirkulacijski sustav potpuno izoliran jedan od drugog tj. voda iz primarnog kruga ne može dospjeti u drugi ili treći krug pa time niti u okoliš. Zaštitna zgrada tzv. kontejnment je čelični plašt projektiran da izdrži tlak od 0,357 MPa tj. da s lakoćom izdrži tlak koji bi se stvorio da sva voda u primarnom krugu (koja je radioaktivna) u trenutku ispari tj. možemo reći da se ne može dogoditi „bojler eksplozija“ kakva se dogodila u Černobilskom incidentu. Zaštitna zgrada i sve ostale zgrade u NE Krško su projektirane da izdrže potrese od 9 stupnjeva MCS ljestvice bez oštećenja.

NE Krško proizvodi 696 MW električne energije te je četvrta nuklearna elektrana u svijetu po pokazateljima pogonske efikasnosti. Republika Hrvatska kao 50% suvlasnik dobiva polovicu proizvedene električne energije. NE Krško ima 18-mjesečni nuklearni gorivni ciklus, što znači da se remont obavlja svakih 18 mjeseci što uključuje razne tipove održavanja, testiranja i zamjenu istrošenih elemenata nuklearnog goriva novim elementima. Istrošeno nuklearno gorivo se odlaže u posebni bazen za istrošeno nuklearno gorivo gdje se čeka da se ohladi i da aktivnost padne na određenu vrijednost prije nego se prenosi u lokaciju za suho skladištenje u sklopu same elektrane o čemu će biti više riječi kasnije.



SLIKA 25: POSTOCI PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE U RH IZ NEK-A I DRUGIH IZVORA

Iako se proces i eksploatacija nuklearne fisije te tehnologija izgradnje nuklearnog reaktora veže za tehnološki napredak 20. stoljeća, moramo biti svjesni činjenice da je teoretski moguće da reaktor nastane i prirodnim procesima. Kao što je prvi put predvidio Paul Kazuo Kuroda 1956. godine, pronađena je serija prirodnih reaktora unutar sloja uranove rude u rudniku Oklo u Gabonu, Afrika. Iako postoje čvrsti dokazi da su davno u zemljinoj prošlosti, prije 1,8 milijardi godina, ti reaktori bili aktivni oni se danas više ne mogu spontano stvoriti zbog manje koncentracije potrebnog

izotopa urana ^{235}U . Znatno manja količina izotopa urana ^{235}U nego što se normalno nalazi, uz pronađene fisijske produkte poput izotopa neodimija ^{143}Nd te rutenija ^{99}Ru upućuju na isti proces uranove fisije kakvog imamo u suvremenim reaktorima. Aktivacija prirodnog reaktora je bila moguća prodorom vode u sloj uranove rude s dovoljnom koncentracijom ^{235}U pri čemu bi došlo do usporavanja neutrona i stvaranja uvjeta za lančanu reakciju. Voda bi zbog povećanja temperature isparila što bi zaustavilo reakciju te se nakon hlađenja ponovno vratila ponavljajući ciklus svaka

otprilike tri sata sve dok se koncentracija fisibilnog materijala nije spustila ispod koncentracije za održivu lančanu reakciju. Tehnologija naprednih nuklearnih reaktora i reaktora četvrte generacije, koje za svrhu imaju povećanje efikasnosti, smanjenje cijene proizvodnje te povećanja sigurnosti, je u razvoju. Svi napredni koncepti se uglavnom temelje na postojećim izvedbama PWR, BWR i PHBR reaktora dok postoje i neke izvedbe koje bi kao sredstvo hlađenja koristilo tekuće olovo ili natrij ili plin helij.

U drugom smjeru razvija se tehnologija kontrolirane nuklearne fuzije koja bi energiju trebala stvarati iz reakcije spajanja vodikovih izotopa deuterija i tricija pri čemu bi se stvorio helij. Izazov pri dizajniranju ovakvog tipa reaktora su ogromne temperature koje bi se razvile (Sunce je fuzijski reaktor) i na koji način izvesti eksploataciju. Trenutno sve izazvane fuzijske reakcije koriste više energije za održavanje nego za eksploataciju. Eksperimentalni reaktor u kojem bi se istraživala i dokazala mogućnost da održavana fuzijska reakcija proizvodi više energije nego što je treba trošiti je ITER čija je izgradnja počela 2013. godine na jugu Francuske. To je projekt vrijedan više od 10 mlrd. dolara sufinanciran sa strane 7 članica projekta – Europske Unije, Kine, Indije, Japana, Koreje, Rusije i Sjedinjenih Američkih Država. Bazira se na „tokamak“ tehnologiji u kojoj bi se vruća plazma zadržavala unutar cilindričnog koluta pomoću moćnih magnetskih sila. Tokamak je ruska kratica za „toroidalnu komoru s magnetnim zavojnicama“ te je ta tehnologija osmišljena 1956. godine u moskovskom Kurchatov institutu. Neke prednosti tehnologije za stvaranje električne energije procesima fuzije nad fisijom su te da je gorivo vodik, radioaktivni nusprodukti su kratkog životnog vijeka te puno veća stvorena energija.

Nuklearna energija je relativno čista energija koja, za razliku od termoelektrana na fosilna goriva, ne stvara ugljični dioksid te ne pridonosi efektu staklenika. Otpad koji stvara jedna prosječna termoelektrana na ugljen godišnje (oko 300.000 tona) je neusporedivo u volumenu veći, toksičniji i radioaktivniji od 20tak tona radioaktivnog otpada koje stvara rad nuklearne elektrane. Što se efikasnosti dobivanja energije tiče, kompletnim izgorijevanjem kilograma ugljena se dobiva 8 kWh, a fisijom kilograma ^{235}U 18.000.000 kWh.



SLIKA 26: UREDAJ TOKAMAK



SLIKA 27: VIZUALNA USPOREDBA KOLIČINA POTREBNH ZA DOBIVANJE ENERGIJE

Nuklearna energija je relativno čista energija koja, za razliku od termoelektrana na fosilna goriva, ne stvara ugljični dioksid te ne pridonosi efektu staklenika.

RADIOAKTIVNI OTPAD I ZBRINJAVANJE

Kao i svaka druga industrija ili aktivnost, primjena nuklearne energije i izvora ionizirajućeg zračenja za sobom povlači i stvaranje neiskoristivog nusprodukta - otpada. Bilo da se radi o reaktorima nuklearnih elektrana, istraživačkim reaktorima, medicinskim uređajima za dijagnostiku i liječenje, sve te tehnologije stvaraju radioaktivni otpad kojeg klasificiramo u nekoliko kategorija.

Kategorizacijom se radioaktivni otpad (RAO) dijeli na: vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO), nisko radioaktivni otpad (NRAO), srednje radioaktivni otpad (SRAO) te visokoradioaktivni otpad (VRAO). Istrošeno nuklearno gorivo (ING) se može reprocesirati ili se može deklarirati kao otpad – u kojem slučaju spada u kategoriju visoko radioaktivnog otpada što se načina skladištenja i odlaganja tiče. Kategorizacija se vrši na temelju koncentracije i vrste radionuklida tj. specifične aktivnosti i vremena poluraspada.

VNRAO ima zanemarivu aktivnost te se može zbrinjavati slično kao standardni komunalni otpad i kao takav ne predstavlja opasnost za zdravlje.

NRAO sadrži većinom radionuklide s kratkim vremenom poluraspada i male specifične aktivnosti te se kao takav zbrinjava uglavnom u površinskim odlagalištima.

SRAO često sadrži veći udio dugoživićih radionuklida te je specifična aktivnost veća nego u nisko radioaktivnom otpadu. Zbrinjava se u podzemnim odnosno dubokim odlagalištima, ovisno o vremenu poluraspada.

U svijetu, pa i kod nas, niski i srednje radioaktivni otpad se, budući da granice nisu jasno određene, često klasificira zajedno kao nisko i srednje radioaktivni otpad – NSRAO te se zajedno i odlaže. No, za zbrinjavanje u površinskom odlagalištu postavljaju se ograničenja na sadržaj dugovječnih radionuklida, osobito alfa emitera, pa se takav otpad obično naziva „kratkoživić NSRAO“.

VRAO sadrži veliki udio radionuklida u obliku fisijskih produkata i transuranskih dugoživićih elemenata stvorenih u jezgri reaktora. Njegova je specifična aktivnost mnogo tisuća puta veća od prosječnog NSRAO. Zbrinjava se u podzemnim odlagalištima na velikoj dubini (tipično oko 500m) u geološkim slojevima s osobito dobrim izolacijskim svojstvima, za koja se obično koristi naziv „duboka geološka odlagališta“.



SLIKA 28: VIZUALNI PRIKAZ VRSTA OTPADA I POSTOTKA AKTIVNOSTI / VOLUMENA

Podrijetlo **NSRAO** je raznoliko, to su uglavnom potrošni materijali poput odjeće, papira, materijala i instrumenata iz okoline u kojima se radilo s radioaktivnim izvorima tokom rada u nuklearnoj elektrani, medicinskim ustanovama i istraživačkim laboratorijima. Nešto više specifične aktivnosti imaju primjerice talozi od pročišćivača, smole iz ionoizmjenjivačkih filtara, kemijski talog, metalni otpad pobuđene radioaktivnosti, izvori zračenja iz medicinske dijagnostike, radioaktivni gromobrani, detektori dima, dekomisijski otpad itd. Važno je napomenuti kako je ovog tipa radioaktivnog otpada najviše, oko 95% po volumnom udjelu, dok mu je udio radioaktivnosti jako mali, 1% naspram visoko radioaktivnog otpada.



SLIKA 29: PRIKAZ NSRAO U SPREMNICIMA

NSRAO dolazi u raznim agregatnim stanjima – čvrstom, tekućem i plinovitom te se, budući da je volumen ovog otpada dosta velik, primjenjuju brojne metode obrade i kondicioniranja otpada u svrhu prevođenja u stabilnu krutu formu te smanjenja volumena. To uključuje spaljivanje, sabijanje, rezanje te kompakciju spremnika s krutim otpadom pomoću hidrauličkih preša što može smanjiti volumen i do 40 puta. Tekući i plinoviti otpad se dugoročno

ne skladišti niti odlaže bez da se prethodno procesima ne pretvori u kruti otpad. Spremnici u koje je pakiran kondicionirani otpad su uglavnom cilindričnog oblika poput bačvi i izgrađeni od vrlo otpornih i robusnih materijala poput nehrđajućeg čelika, plastike i fibreglassa i to u više slojeva što predstavlja sekundarnu zaštitu. Također, važno je navesti i da se sadržaj spremnika dodatno izolira i imobilizira cementom ili sličnom ispunom.

Takvim se postupcima postiže fizička i kemijska stabilnost paketa s otpadom, te ograničava zračenje koje emitiraju, što je potrebno za rukovanje, transport, skladištenje i odlaganje.

Svaki spremnik mora imati deklaraciju koja sadržava informacije potrebne za daljnje zbrinjavanje: identifikacijski broj, prisutne radionuklide i njihovu aktivnost, prijašnju namjenu sadržaja, vrstu ispune, masu i volumen, dozu zračenja na 1 metar od stjenke s datumom mjerenja itd.



SLIKA 30: KONDICIONIRANJE NSRAO, izvor: JAVYS

Skladištenje NSRAO

Direktiva Europske Unije predlaže da svaka zemlja članica na odgovarajući način riješi skladištenje RAO na državnom nivou. Uz postojeću polovicu pogonskog NSRAO koji se trenutno još nalazi u NEK-u, najveći dio hrvatskog radioaktivnog otpada tj. institucionalnog otpada je trenutno smješten u Institutu Ruđer Bošković (IRB) i u Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI).



SLIKA 31: SKLADIŠTE IRB



Praksa kojom se pristupa u funkcionalnom dizajnu skladišta NSRAO je takva da objekt mora biti jednostavan, ali robusan i otporan. Izvedba može biti površinska ili pripovršinska, ovisno o lokalnim parametrima i očekivanom inventaru skladišta. Pripovršinska skladišta su prekrivena slojem zemlje i geoinženjerskim barijerama kako bi se dodatno zaštitila i izolirala od vanjskog utjecaja.



SLIKA 32: SKLADIŠTE NSRAO BRINJE



U oba slučaja struktura se gradi od visokokvalitetnog betona. Prostor se pomno dizajnira da može primiti što veći volumen otpada s tim da mora postojati prostor za prijenos i pristup svakoj pojedinoj čestici inventara te sekundarni manipulativni kapacitet za inspekciju i rukovanje inventarom prije smještaja. Pristup je bitan jer skladištenje pretpostavlja kontinuiran nadzor pojedinih spremnika.

Inventarom se može manipulirati ručno – u slučaju spremnika koji neznatno zrače te viljuškarima i dizalicama koje mogu biti ručno ili kompjuterski upravljane. Unutar skladišta se često ugrađuju čelične police na koje se spremnici postavljaju vodoravno ili okomito. Bačve s otpadom se mogu, također, slagati jedna na drugu ili samo polagati na podlogu jedna do druge, sve ovisi o količini, težini i tipu otpada u skladištima odnosno spremnicima.



SLIKA 33a: IMPLEMENTACIJA RADIOLOŠKOG MONITORINGA, izvor: JAVYS

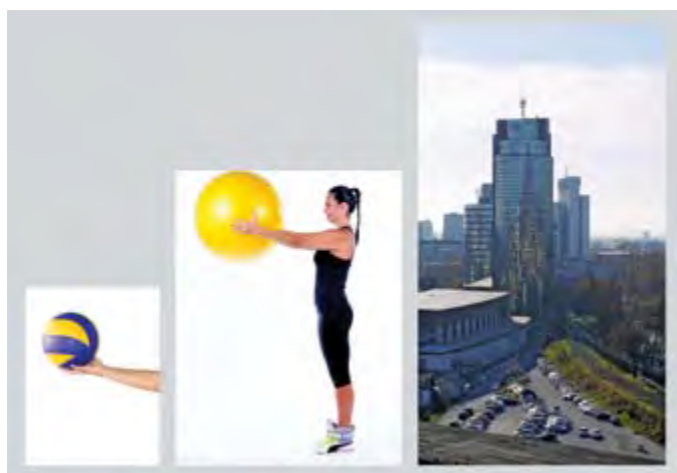


SLIKA 33b: IMPLEMENTACIJA RADIOLOŠKOG MONITORINGA



izvor: JAVYS

Samo skladište mora imati implementiran sustav praćenja radioaktivnog zračenja po svim sekcijama skladišta kao i u vanjskom okolišu. Praksa je da se kontinuirano mjeri doza zračenja na jedan metar udaljenosti od spremnika s radioaktivnim otpadom i bilježi svako stanje i promjena koja bi mogla upućivati na ikakve probleme. Oko samog skladišta se postavljaju mjerne točke za nadzor koje u realnom vremenu prate stanje radioaktivnosti okoliša. Granica dopuštenog mogućeg ozračenja pojedinca iz stanovništva je 1 mSv (milisievert) godišnje iz svih takvih tehničkih izvora zajedno. Za usporedbu, svjetski prosjek izloženosti pojedinca je 3,01 mSv godišnje; od kojih se 2,4 mSv odnosi na prirodne izvore.



SLIKA 34: USPOREDBA DOZA ZRAČENJA: prosječna godišnja doza u Hrvatskoj je oko 4 mSv (veličina odbojkaške lopte), dopuštena doza za zaposlenike elektrane je do 20 mSv (veličina pilates lopte), smrtonosna doza je 3 Sv (visina ciboninog tornja).

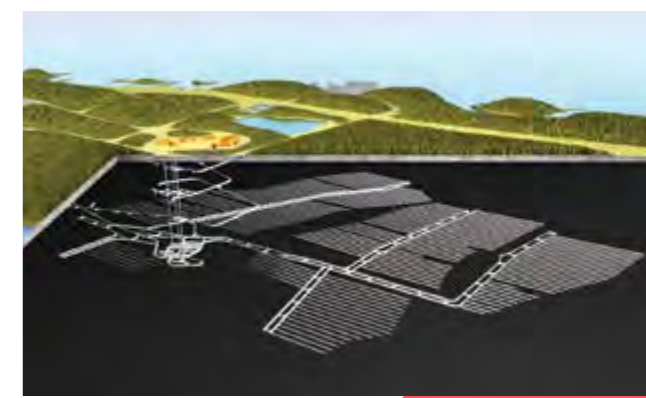
Odlagalište RAO te razlike između skladišta i odlagališta

Ukoliko se ne radi o kratkoživućem nisko radioaktivnom otpadu koji se nakon nekog vremena može tretirati kao običan otpad, nakon privremenog skladištenja otpad se trajno zbrinjava u odlagalištima RAO. Prije tog koraka spremnici s otpadom se provjeravaju te po potrebi dodatno kondicioniraju i repakiraju.

U svijetu postoje ili se planiraju različite izvedbe odlagališta RAO. Odabir izvedbe ovisi o inventaru kojeg treba zbrinuti, ali i o raspoloživim lokacijama i njihovim prirodnim svojstvima. Površinska ili plitko ukopana odlagališta koriste se za kratkoživući NSRAO ili za NRAO. Za zbrinjavanje visokoaktivnog otpada planiraju se duboka geološka odlagališta u koja se, naravno, mogu odlagati i sve druge vrste RAO. Na manjim dubinama i uz blaže zahtjeve na geološko okruženje izgrađena su ili se planiraju različita podzemna odlagališta (ukopani tuneli, adaptirani rudnici...) za odlaganje svih vrsta RAO osim visokoaktivnoga. Svrha odlaganja je trajno izolirati otpad od okoliša i ljudi na dugi niz godina koristeći umjetne barijere (spremnike, građevine, punila) i prirodne barijere (stijenu, tlo, itd.)

U široj javnosti, često se termini „skladište RAO“ i „odlagalište RAO“ smatraju istovjetnima, što nije točno. Razlika je u tome što se u skladištu otpad čuva pod stalnim nadzorom na određeno vrijeme (desetak pa i do 100 godina), nakon čega se uklanja iz skladišta, a skladište se razgradi. Tijekom skladištenja može se jednom dijelu RAO aktivnost umanjiti toliko da postane obični otpad, a ostali RAO se premješta u odlagalište RAO. U odlagalištu se RAO zbrinjava na neodređeno vrijeme, bez namjere da ga se ikada vadi.

Zbrinjavanje na neodređeno vrijeme tj. odlaganje pretpostavlja odgovarajuću izolaciju RAO od okoliša izvan odlagališta. Kad predviđeni kapacitet odlagališta bude popunjen spremnicima s radioaktivnim otpadom, preostali prostor se ispunjava punilima radi dodatne izolacije (mort,



SLIKA 35: POTPOVRŠINSKO, DUBOKO GEOLOŠKO ODLAGALIŠTE, izvor: Posiva Oy

beton, bentonit...). Na površinska odlagališta postavlja se armirano-betonska ploča, te preko nje izolacijski slojevi (folija, šljunak, glina...), a iznad njih sloj tla i vegetacije. U podzemnim odlagalištima zapunjavaju se pristupna okna i tuneli. Ti se postupci nazivaju zatvaranjem odlagališta. Nakon zatvaranja, odlagališta će neko vrijeme biti u režimu tzv. institucionalne kontrole, osobito površinska i plitko ukopana odlagališta. Kontrola uključuje početni period aktivnog nadzora, primjerice u vidu mjernih točaka za mjerenje zračenja u neposrednom okolišu. U kasnijem periodu pasivne kontrole može se samo sprečavati pristup odlagalištu, npr. održavanjem ograde, kako se ljudskim aktivnostima ne bi ugrozio integritet odlagališta. Takva je kontrola osobito smisljena za pripovršinska odlagališta

Svrha odlaganja je trajno izolirati otpad od okoliša i ljudi na dugi niz godina koristeći umjetne barijere.

kratkoživućeg NSRAO, kojemu će aktivnost pasti na razinu prirodnog okoliša za približno 300 godina.

Skladište RAO je u cijelom periodu svojega postojanja aktivno, prihvaća novi otpad, spremnici otpada su pod stalnim aktivnim nadzorom, moguće su intervencije dodatne obrade i pakiranja. Stoga operativni troškovi skladišta mogu biti znatni, mada cijena same gradnje skladišta nije značajna u ukupnom kontekstu zbrinjavanja

RAO. U kontrastu, cijena izgradnje odlagališta je daleko veća, ali trajanje pogona odlagališta (prihvat otpada) i pripadajući operativni troškovi se mogu ograničiti racionalnim planiranjem, npr. produženim skladištenjem. Takvo skladištenje također otvara mogućnosti budućim generacijama da na bolji i efikasniji način prerade i zbrinu otpad, ali proizvođači otpada imaju obvezu da im za to osiguraju financijska sredstva.

Zbrinjavanje istrošenog nuklearnog goriva – ING

Istrošeno nuklearno gorivo se, u većini reaktora, sastoji primarno od urana, ali uz dovoljan postotak produkata fisije te plutonija je izuzetno radioaktivno. ING se prije skladištenja, transporta ili eventualnog odlaganja mora prvo držati u bazenu s vodom minimalno 12 mjeseci da bi se ohladilo i da bi se radioaktivnost smanjila. Takvi bazeni su izgrađeni u krugu same nuklearne elektrane te se u njima gorivni elementi mogu skladištiti i više godina tj. koliko kapacitet bazena dozvoljava. Bazeni za takvo, mokro skladištenje su duboki oko 12 metara jer 6 metara dubok sloj vode iznad ING štiti osoblje od zračenja.

Kad je kapacitet tih bazena popunjen (ili se daljnje mokro skladištenje ne smatra optimalnim rješenjem) gorivni elementi se mogu suho skladištiti. Suho skladištenje se može izvoditi u posebno konstruiranim cilindrima koji sami jamče sigurnost i integritet sadržaja (a često mogu biti i višenamjenski, npr. i za transport), ili u betonskim građevinama u kojima se gorivni elementi u manje zahtjevnim spremnicima ulažu u odgovarajuće niše. Takva suha skladišta se često grade u sklopu same elektrane, ali ima i vanjskih skladišta.



SLIKA 36: SPREMNIK ING I TRANSPORT, izvor: Posiva Oy



Nakon skladištenja, ovisno o nacionalnoj strategiji pojedine zemlje, ING se može odlagati kao VRAO ili reprocessirati što znatno smanjuje količinu VRAO. Finska je zemlja koja će prva početi s odlaganjem istrošenog nuklearnog goriva u odlagalištu Onkalo nedaleko nuklearne elektrane Olkiluoto. Francuska agencija za radioaktivni otpad – ANDRA obavlja istražne radove u podzemnom laboratoriju na 500 metara dubine na lokalitetu Bure. Istražuju se svojstva i kapacitet geološke formacije muljnjaka koji bi, ukoliko istraživanja to

potvrde, bila pogodna za odlaganje VRAO i dugoživućeg NSRAO. Sjedinjene Američke Države izgradile su na lokaciji Yucca Mountain u saveznoj državi Nevada duboko geološko odlagalište, ali je još posve neizvjesno hoće li u njemu biti dopušteno odlaganje visokoaktivnog otpada. Razlog zbog čega je odlagalište VRAO odnosno ING tako komplicirana tematika je što se ta odlagališta moraju projektirati tako da njihov sadržaj bude izoliran na vrlo duge vremenske periode, primjerice 100.000 ili više godina.



SLIKA 37: MOKRO SKLADIŠTENJE U NEK-u, izvor: NEK



SLIKA 38: YUCCA MOUNTAIN, SAD



SLIKA 39: ONKALO, FINSKA, izvor: Posiva Oy





www.fond-nek.hr
www.radioaktivniotpad.org