E-kursuse

"Kosmilisest kiirgusest tuumajaamani"

materjalid

Aine maht 3 EAP

Merle Lust (Tartu Ülikool), 2011

1. Ioniseeriv kiirgus. Kosmiline kiirgus. Radionukliidid pinnases

Selle teema käigus saad vastused järgmistele küsimustele:

- Mis on kiirgus?
- Mis on ioniseeriv kiirgus?
- Kuidas me ioniseeriva kiirgusega kokku puutume?
- Kuidas hinnatakse kiirguse mõju organismile?
- Mis on kosmiline kiirgus?
- Milliseid radionukliide leidub keskkonnas?
- Kas looduslik foon on kõikjal ühesugune?

Sissejuhatus

Tänapäeval räägitakse meedias kiirgusest palju ning tavaliselt eelkõige negatiivses mõttes. Paljude inimeste jaoks tekitab sõna „kiirgus“ hirme ning sageli seostatakse sellega tuumapilve või siis võikaid pilte tuumakatastroofidest. Loomulikult on kiirguse näol tegemist nähtusega, mis võib tekitada suuri kahjustusi nii keskkonnale kui ka inimese tervisele. Samas tasub meeles pidada, et meie igapäevases elus on enamus asju või tegevusi ohtlikud. Kas oskate nimetada mõnda tegevust, mis oleks riskivaba?

Meid kõiki on õpetatud juba lapsepõlves, et tulega ei mängita. Aastasadade jooksul on tuli tekitanud väga palju kahju – maha on põlenud linnad, suured metsad jne. Tulekahju käigus hävib peaaegu kõik, kuid samas on tuli meie elu igapäevane osa ja me oleme teadlikud sellega kaasnevatest ohtudest. Viimane võimaldab meil tagada tule ohutu kasutamise. Sarnane olukord on ka arstirohtudega. Kui jääme haigeks, siis tarbime me vajadusel arsti poolt ette kirjutatud ravimeid. Kõikide ravimite puhul on lisatud karbile, et kui palju ja mitu korda päevas neid võtta tuleb. Juhul kui manustaksime korraga kõik meile antud tabletid, siis selle tulemusena ei parane meie tervis kiiremini, pigem on tulemuseks tervise halvenemine. Seega kontrollitud kogus ravimeid aitab meil haigusest jagu saada, samas liigne kogus tekitab organismile täiendava kahju.

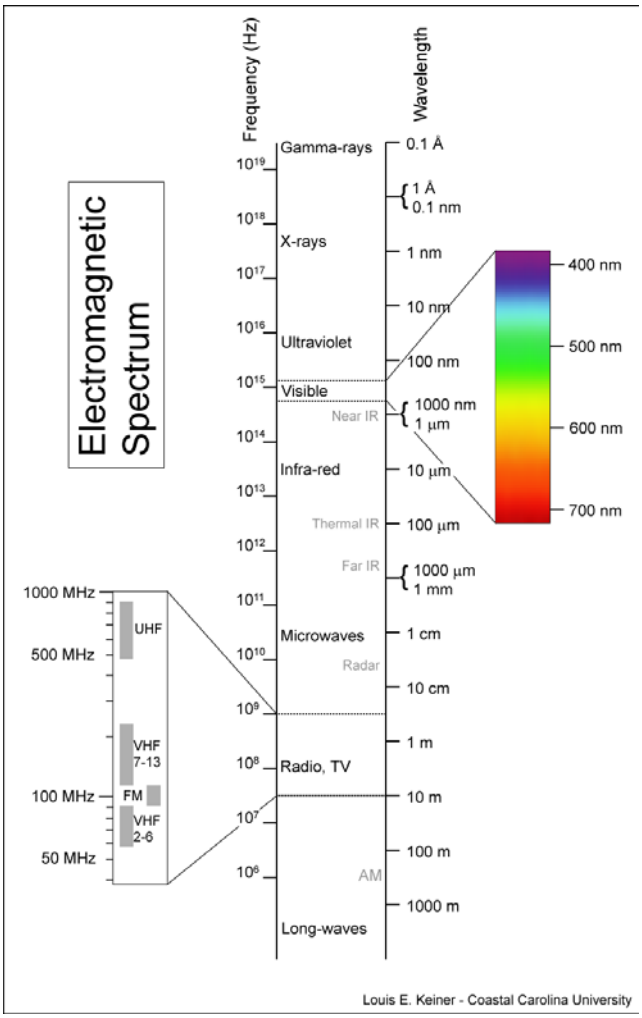
Kiirgus on osa meid ümbritsevast keskkonnast ning on seda olnud aegade algusest peale. Sisuliselt ei ole võimalik leida kohta maakeral, kus kiirgus puuduks. Kiirgus ümbritseb meid kogu aeg ja on võimeline tekitama nii kasu kui kahju – seega kiirgus ei ole oma olemuselt halb ega hea. Kõik oleneb sellest, kuidas seda kasutada. Loodetavasti aitab see kursus saada aimu meid igapäevaelus ümbritsevatest ioniseerivatest kiirgustest ja nende allikatest. Marie Curie, kes mängis olulist rolli radioaktiivsuse avastamisel ja kes aastakümneid tegeles radioaktiivsuse uurimisega (ning selle tulemusena sai suured kiiritusdoosid), on kunagi öelnud:

„Karta ei tohi midagi. Oluline on aru saada.“

Mis on kiirgus?

Kiirgus on energia levimine kiirte, lainete või osakeste voona, mis viitab sellele et tegemist on väga laia mõistega. Me räägime sageli erinevatest kiirguse liikidest - päikesekiirgusest, ultraviolettkiirgusest, soojuskiirgusest jne. Eri lainepikkusega elektromagnetkiirgustel on palju erinevusi, kuid kõik nad on ühesuguse olemusega. Kõigi nendega ilmnevad lainetele omased omadused ja samas ka kvantomadused. Kõigil elektromagnetkiirguse liikidel on ühine tekkemehhanism: igasuguse pikkusega elektromagnetlained tekivad laengute kiirendusega liikumise tulemusena.

Elektromagnetilise kiirguse spektri puhul on lainepikkused pöördvõrdelised sagedustega. Ehk mida suurem sagedus, seda väiksem lainepikkus ja vastupidi – mida suurem lainepikkus, seda väiksem sagedus. Madala sagedusega kiirgus on hästi tuntud raadiolained, sellele järgnevad mikrolained (mikrolaineahi!) jne. Sellel skaalal olevad kiirgused kuni ultraviolettkiirgus kaasa arvatud ei ole võimelised tekitama keemilisi muutusi. Skaala paremapoolses osas olevad kiirgused on aga võimelised tekitama muutusi aine ehituses – näiteks on need võimelised aatomitest elektrone välja lööma.



Joonis 1.1. Elektromagnetiline skaala (Louis E. Keiner)

Kui tekitada vaakumtorus elektrone kiirgava hõõgkatoodi ja anoodi vahel mõnekümne tuhande voldine pinge, siis algul elektronid kiirenevad elektriväljas ning seejärel pidurduvad vastu anoodi põrkumisel. Kiirete elektronide pidurdumisel tekib aines ultraviolettkiirgusest lühema lainepikkusega elektromagnetkiirgus. Selle kiirguse avastas 1895 saksa füüsik Wilhelm Röntgen. Röntgenkiirgus ei kutsu esile nägemisaistingut ning on võimeline läbima pakse ainekihte ilma olulise neeldumiseta. Röntgenkiirgus kutsub esile mõnede kristallide helendumise ja avaldab mõju fotoplaadile.

Kiirguste liigitamisel kasutatakse erinevaid jaotuseid, võttes aluseks nende sagedusi või energiaid. Samuti saab kiirguseid liigitada vastavalt võimele põhjustada ionisatsiooni:

- mitte-ioniseeriv kiirgus ei ole võimeline tekitama ionisatsiooniprotsessi, sest sellel pole piisavalt energiat, et vabastada näiteks elektron aatomist.
- ioniseeriv kiirgus on võimeline otseselt või kaudselt tekitama ioone keskkonnas, mida ta läbib. See tähendab, et kiirgus annab energiat aatomitele, millest ta möödub ning võib põhjustada näiteks elektroni lahkumise aatomist. Selle tulemusena ei ole aatom enam elektriliselt neutraalne – tekib positiivne ioon, milleks on aatom ühe puuduva elektroniga ning vabanenud elektron moodustab negatiivse iooni. Kiirgus tavaliselt moodustub footonitest või aineosakestest. Ioniseerivaks kiirgusteks on skaalal need kiirgused röntgenkiirgusest kosmilise kiirguseni. Edaspidi käsitlemegi selle kursuse raames ioniseerivat kiirgust.

Üksikasjalisem uurimine on näidanud, et põhiliselt puutume me kokku järgmiste inoniseerivate kiirgustega:

- α-kiirgus. Alfakiirguse moodustavad positiivse laenguga heeliumi tuumad (kaks prootonit ja kaks neutronit), mis eralduvad suuremast ebastabiilsest tuumast. Alfa-osake on suhteliselt massiivne osake, kuid tema levikaugus õhus on väike (1-2 cm) ning selle neelamiseks piisab paberist või naha pealmistest (eluta) kihtidest. Alfakiirgus võib siiski olla ohtlik, kui ta satub sissehingamise või neelamise käigus kehasse, sest puutudes lähedalt kokku näiteks kopsu või kõhu sisekudedega võib ta põhjustada suure kiirgusdoosi.
- β-kiirgus. Beetakiirguse moodustavad elektronid, mis eralduvad ebastabiilsest tuumast. Beetaosakesed on alfaosakestest tunduvalt väiksemad ja võivad tungida sügavamale materjalidesse või kudedesse. Beetakiirgus neeldub täielikult plastikus, klaasis või metallikihis. Tavaliselt ei tungi see naha pealispinnast sügavamale. Siiski võib ulatuslikum kokkupuude suure energiaga beetakiirgajatega põhjustada nahal põletusi. Sellised kiirgajad võivad ohtlikuks osutuda ka sissehingamise või neelamise käigus kehasse sattudes.
- γ-kiirgus. Gammakiirguse moodustavad väga kõrge energiaga footonid (teatud elektromagnetiline kiirgus nagu valgus), mis eralduvad ebastabiilsest tuumast, mis samal ajal võib kiirata ka alfa- või

beetaosakesi. Gammakiirgus põhjustab ainet läbides ning elektronidega kokkupuutumisel aatomite ionisatsiooni. Sellist liiki kiirgus on suure läbimisvõimega ja ainult väga paks tiheda aine kiht nagu teras või plii võib olla heaks varjestuseks. Gammakiirgus võib siseelundeid tugevalt mõjutada ka ilma et seda sisse hingataks või neelataks.

Lisaks eelpool mainitud röntgenkiirgusele on oluline ka veel kiirgusohutuse seisukohalt neutronkiirgus:

- Röntgenkiirguse moodustavad kõrge energiaga footonid (sarnased gammakiirgusele), mida kutsutakse esile kunstlikult elektronkiire järsu pidurdamisega. Röntgenkiirgus on samamoodi suure läbimisvõimega ja ilma tiheda materjali kaitsekihita võib see põhjustada siseelunditele suuri kiirgusdoose. Gammakiirgus on oma olemuse ja füüsikaliste omaduste poolest identne röntgenkiirgusega, erinevuseks on ainult tekkemehanism, sest gammakvandid tekivad elementaarosakeste vahelise vastasmõju tulemusena.
- Neutronkiirguse moodustavad neutronid, mis eralduvad ebastabiilsetest tuumadest, eriti aatomi lagunemise ja tuumade liitumise ajal. Ehkki neutroneid esineb kosmilistes kiirtes, kutsutakse neid tavaliselt esile tehislikult. Neutronid on elektriliselt neutraalsed ja seetõttu väga suure läbimisvõimega. Kokkupuutes aine või kudedega kutsuvad nad esile beeta- ja gammakiirgust. Neutronkiirguse mõju vähendamiseks on vajalik väga tugev varjestus.

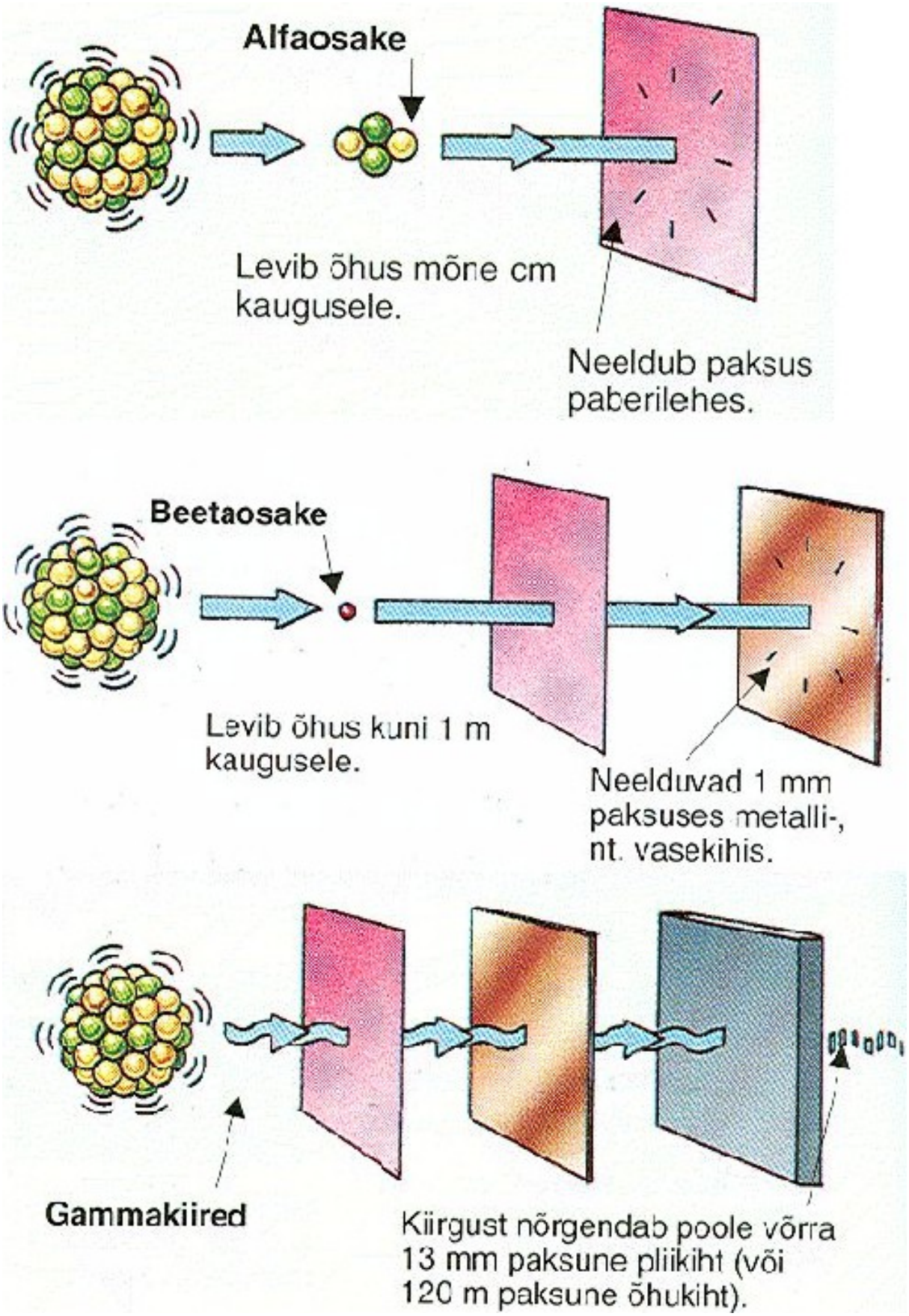
Aktiivsus ja doos

Tavatingimustes on aatom ning selle tuum stabiilsed. Samas esinevad ka aatomid, mis ei ole stabiilsed ning millel on kalduvus laguneda. Selle käigus eraldub suure energiaga kiirgust ning lagunemise tulemusena tekivad uued aatomituumad. Teatud aatomeid on võimalik muuta ebastabiilseks kui neile energiat juurde anda. Selle tulemusena võib aatomist vabaneda mõni elektron või isegi mõni tuuma osake (positron või neutron). Radioaktiivsus on aine omadus, mida iseloomustab tuuma muundumise kiirus. Aktiivsuse ühikuks on bekerell, mis tähendab ühte radioaktiivset lagunemist sekundis. Kuna tegemist on lagunemisega, siis viitab see omakorda ka sellele, et aja jooksul aktiivsus väheneb.

Radioaktiivsete nukliidide puhul kehtib radioaktiivse lagunemise seadus:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

kus N_0 on aatomtuumade arv aja alghetkel, N(t) nende arv ajahetkel t ja λ on positiivne konstant, mida nimetatakse radioaktiivse lagunemise konstandiks ning on erinevatel radionukliididel erinev.

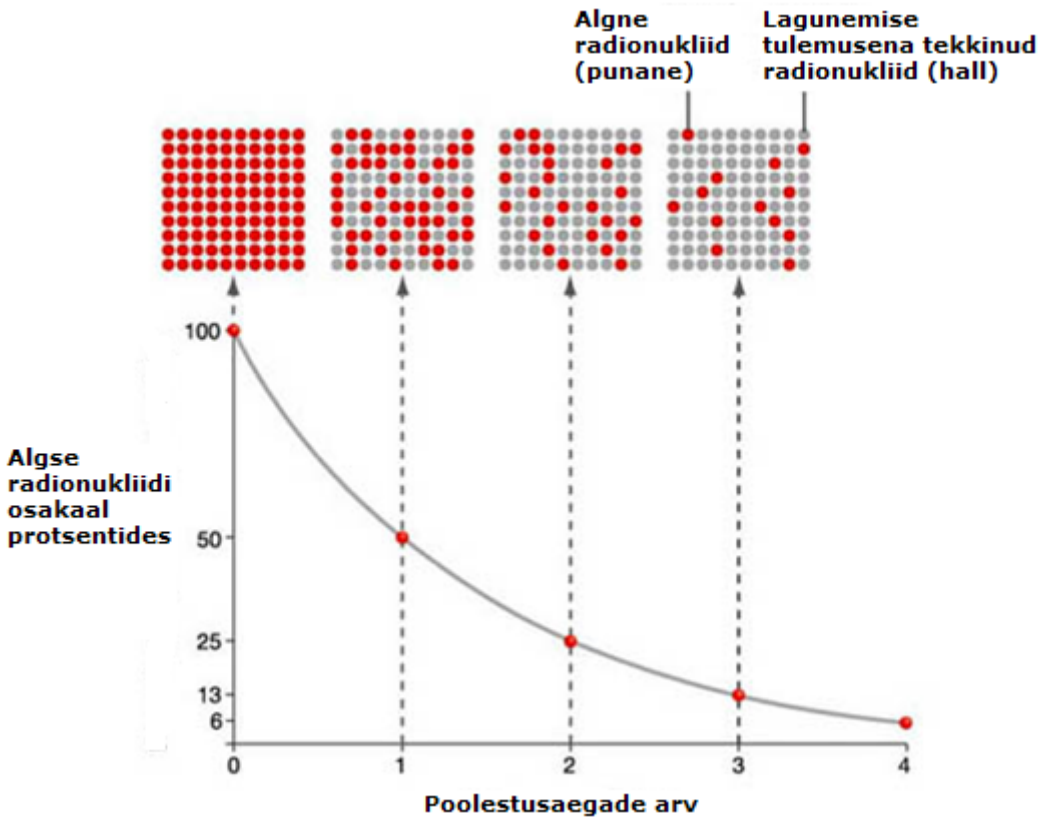


Joonis 1.2. Erinevate kiirguste läbitungimisvõime (Usborne'i illustreeritud füüsikaleksikon, 1997)

Sageli kasutatakse radioaktiivse lagunemise konstandi asemel hoopis mõistet poolestusaeg, mis on defineeritud kui ajavahemik, mille jooksul pooled vaadeldava radioaktiivse nukliidi tuumadest lagunevad. Ehk siis aeg, mis kulub radionukliidil poole kaotamiseks oma algväärtusest. Igal radionukliidil on ainuomane poolestusaeg, mis võib ulatuda sekundi murdosast miljardite aastateni. Jood-131 puhul on see 8 päeva, tseesium-137 30 aastat, süsinik-14 5730 aastat, plutoonium-239 24 000 aastat ja uraan-238 4470 miljonit aastat. Järjestikusel poolestumisel kahaneb radionukliidi aktiivsus ½, ¼, ⅛ -ni jne oma algsest väärtusest.

See tähendab, et on võimalik prognoosida järelejäänud aktiivsust. Kui radionukliidi kogus väheneb, väheneb proportsionaalselt ka eralduv kiirgus. Poolestusaeg T ja radioaktiivse lagunemise konstant λ on omavahel seotud järgmiselt:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$



Joonis 1.3. Radioaktiivne lagunemine ja poolestusajad (East Rutherford High School)

Kiirguse mõju iseloomustamiseks kasutatakse mõistet doos. Energia hulka, mille ioniseeriv kiirgus annab üle aine (näiteks inimkoe) massiühikule, kutsutakse neeldunud doosiks. Seda väljendatakse ühikuga grei (sümbol Gy), kus üks grei

võrdub ühe džauliga kilogrammi kohta (1Gy=1 J kg-1). Ioniseeriva kiirguse liigid erinevad orgaanilistele ainetele avaldatava toime poolest, nii et võrdsed neeldunud doosid, mille all mõeldakse võrdset hulka üleantud energiat, ei tarvitse avaldada samasugust bioloogilist mõju. Näiteks alfakiirguse 1 Gy mõju koele on kahjulikum kui beetakiirguse 1 Gy mõju, sest aeglasem ja suurema laenguga alfaosake kaotab liikudes rohkem energiat, kuna tal on raskem kudet läbida. Niisiis on erinevat tüüpi ioniseeriva kiirguse võimaliku kahjulikkuse võrdlemiseks vaja muud mõõtu. Selleks sobib kiirgusfaktoriga läbi korrutatud neeldunud doos ehk siis ekvivalentdoos, mille ühik on siivert (sümbol Sv).

Erinevate kehaosade risk varieerub sõltuvalt elundist. Näiteks pahaloomulise kasvaja tekkimise risk ekvivalentdoosi ühiku kohta on kilpnäärme puhul madalam kui kopsu puhul. Veel enam, on olemas olulised kahjustuste tüübid nagu healoomulised kasvajad või tõsise päriliku kahjustuse oht, mida põhjustab munandite või munasarjade kokkupuude kiirgusega. Need mõjud erinevad nii tüübilt kui ka ulatuselt ja me peame nendega arvestama, kui hindame inimese üldist kiirguse tagajärjel tekkinud tervisekahjustust. Nende komplikatsioonidega saame hakkama, kui võtame ekvivalentdoosi peamistes keha kudedes ja organites ning korrutame selle kaalufaktoriga, mis on seotud sellele konkreetsele koele või organile iseloomuliku riskiga. Nende kaalutud ekvivalentdooside summa on suurus, mida nimetatakse efektiivdoosiks. Efektiivdoos võimaldab meil kirjeldada erinevaid doosi ekvivalente kehas konkreetse arvuna. Efektiivdoos võtab arvesse ka kiirguse energiat ja liiki ning sellest tulenevalt annab ulatusliku viite tervisekahjustuse kohta. Veel enam, see kehtib võrdselt nii välis- kui sisekiirgusega kokkupuute ning ühtlase ja ebaühtlase kiirguse korral. Efektiivdoos võtab arvesse erinevate kiirguste mõju erinevatele kudedele ja organitele, seega väljendab ta kiirguse kahjulikkust tervisele. Efektiivdoosi mõõtmiseks kasutatakse rahvusvaheliselt ühikut Sievert (Sv). Kuna tavaliselt on inimese poolt saadavad doosid palju väiksemad, siis palju enam kasutatakse ühikuid millisievert (1 mSv = 0,001 Sv) või mikrosievert (1 Sv = 0,000001 Sv).

Tabel 1.1. Efektiivdoosi näiteid

Efektiivdoos	Sellele vastav tegevus või tervisekahjustus
5 mikroSv	1 tund lennukis 10 km kõrgusel
6,5 mikroSv	Keskmine ööpäevane doos, mille põhjustab looduskiirgus
3 milliSv	Keskmine aastane doos elanikule (looduskiirgus+meditsiin)
1 Sv	Lühikese aja jooksul saadud kiirgusdoos põhjustab ajutise verepildi muutuse. Suureneb oht kasvaja tekkimiseks.
2,5 Sv	Lühikese aja jooksul saadud kiirgusdoos põhjustab ägeda kiiritustõve, juuste väljalangemine
6 Sv	Lühikese aja jooksul saadud kiirgusdoos on suure tõenäosusega surmav

1 Sv = 1000 mSv (milliSv) = 1000 000 µSv(mikroSv)

Tabel 1.2. Lühikokkuvõte kasutatavatest mõistetest ja nende ühikutest

Suurus	Ühik	Ühiku sümbol	Selgitus
Aktiivsus	bekerell	Bq	Näitab radioaktiivse aine hulka.
Neeldumisdoos	grei	Gy	Näitab kiirguse poolt mingisse materjali jäetud energiat.
Ekvivalentdoos	siivert	Sv	Võtab arvesse kiirguse liigi.
Efektiivdoos	siivert	Sv	Võtab arvesse kiirguse liigi ja organismi koe tüübi.
Kollektiivne efektiivdoos	inimsiivert	inimSv	Liidetakse kokku uuritava inimrühma kõigi liikmete efetiivdoosid.

Selgitamaks, kui ohtlik on viibida mingis kohas teatud kiirguse mõju all, kasutatakse doosikiiruse mõistet. Doosikiirus väljendab, kui suure kiiritusdoosi saab inimene teatud ajaühikus ning selle ühikuks on siivertit/tunnis (Sv/h, mSv/h, µSv/h jne).

Rahvusvaheline Radioloogilise Kaitse Komisjon tegeleb soovituste väljatöötamisega kiirgusohutuse valdkonnas. Nende soovitustel põhineb ka rahvusvaheline seadusandlus ning samuti on nendest lähtutud Eesti Vabariigis kehtiva kiirgusseaduse väljatöötamisel.

Tabel 1.3. Doosipiirmäärad kehtivas kiirgusseaduses

	Doosi piirmäär kiirgustöötajale	Doosi piirmäär elanikule
Efektiivdoos	20 mSv/a*	1 mSv/a
Aastane ekvivalentdoos silmaläätsele	150 mSv	15 mSv
Aastane ekvivalentdoos nahale ja jäsemetele	500 mSv	50 mSv

* seaduses on täiendus, et viie järjestikuse aasta jooksul saadud efektiivdoosi piirmäär on 100 millisiivertit tingimusel, et ühe aasta jooksul saadud efektiivdoos ei ole suurem kui 50 millisiivertit.

Kokkupuude ioniseeriva kiirgusega

Ioniseeriv kiirgus ning selle allikad on lahutamatu osa meie elus. Igapäevaselt elame koos kosmilise kiirgusega ja pinnases leiduvate radioaktiivsete elementidega. Samuti kasutatakse nii hoonete kui ka teede ehitamiseks materjale, mis sisaldavad looduslike radioaktiivseid elemente. Radioaktiivseid elemente leidub ka meie toidus, joogivees jne. Seega oma igapäevase elamise käigus jõuavad meie organismi hingamisel või söömisel erinevad radionukliide ja ioniseeriva kiirguse allikad.

Kokkupuude kiirgusega võib toimuda järgmistel viisidel:

- Pinnases olevate radionukliidide sattumine inimorganismi;
- Sissehingamine või sissesöömine (sisekiiritus);

- Meid ümbritsevas keskkonnas leiduvate radionukliidide või kosmilise kiirguse poolt tekitatud kiiritus (väliskiiritus).

Sõltuvalt päritolust võib jagada ioniseeriva kiirguse allikaid kaheks: looduslik või tehislik. Üle 80% elanikkonna aastasest efektiivdoosist põhjustab ioniseeriv kiirgus, mis pärineb looduslikest kiirgusallikatest. Looduslikest kiirgusallikate poolt põhjustatav doos sõltub suuresti geograafilisest asukohast ning doosi suurused varieeruvad suures ulatuses.

Looduslike kiirgusallikate poolt põhjustatud efektiivdoosi iseloomustab asjaolu, et tegemist on suhteliselt konstantse suurusega, mis aja jooksul eriti ei muutu. Keskmine aastane efektiivdoos elanikule on umbes 2.8 mSv. Aastane efektiivdoos looduslikest kiirgusallikatest on umbes 2.4 mSv, moodustades ligikaudu 85% aastasest elaniku efektiivdoosist. Pea poole looduslike kiirguallikate poolt põhjustatud doosist põhjustab radoon. Sellest võib järeldada, et tehislike kiirgusallikate poolt põhjustatav efektiivdoos moodustab kõigest 15% aastasest efektiivdoosist.

Juba eelmise sajandi algusaastatest on teadus tegelenud ka tehislike ioniseeriva kiirguse allikate arendamisega. Inimkond on õppinud neid allikaid tootma ning samuti ka ohutult kasutama. Ioniseeriva kiirguse allikad on tänapäeval laialdaselt kasutusel tööstuses, meditsiinis ja teadusuuringutes. Ioniseerivat kiirgust kasutatakse meditsiinis, tööstuses ja teaduses. Tehiskiirguse allikateks on meditsiiniseadmed, radioaktiivseid aineid sisaldavad tarbeesemed, tuumakütus ja tuumajäätmed, tuumajaama avariidest ja tuumarelvakatsetustest tingitud saaste jm.

Kosmiline kiirgus

Kosmiline kiirgus avastati siis, kui püüeldi taustakiirguse vähendamise poole. Eeldati, et kiirgusfoon on täielikult põhjustatud pinnases ja õhus leiduvatest radionukliididest, seega peaks maapinnast eemaldudes kiirgusfoon vähenema. Briti füüsik Charles Wilson uuris 19. sajandi lõpus kiirgust atmosfääris ning kasutas selleks kuldlehtedega kaetud elektroskoopi. Aastate jooksul viis ta läbi mitmeid mõõtmisi mere kohal, kasutades õhupalle mõõtevahendite üles viimiseks. Ta eeldas, et maapinnast kaugemal kiirgustase väheneb. Samas näitasid tulemused vastupidist - tulemused näitasid, et maapinnast kõrgemale liikudes kiirgushulk hoopis kasvab. Tulemuste alusel jõudis ta aastal 1900 järeldusele, et atmosfääri jõudev kiirgus peab pärinema kosmosest.

Kosmilised kiirgus on segu paljudest erinevat tüüpi kiirgustest, peamiselt moodustavad kosmilise kiirguse meile teadmata kosmilise päritoluga ja väga kõrge energiaga prootonid. Maapinnal koosneb kosmiline kiirgus eelkõige müüonidest, neutronitest, elektronidest, positronidest ja footonitest. Valdava osa doosist tekitavad müüonid ja elektronid. Osakeste voog on suhteliselt stabiilne, kuid siiski on teada, et mõned madalama energiaga prootonid saabuvad päikeselt ja eralduvad pursetena päikese loidete käigus. Kosmilise kiirguse moodustavad

osakesed, mis liiguvad pea sama kiirgusega kui valgus ning osakesed jaotatakse põhinevalt nende päritolule kas galaktilisteks või Päikeselt pärinevateks.

Galaktilise päritoluga kosmiline kiirgus on pidev ning koosneb erineva energiaga osaketest, mis tekivad erinevate supernoovade (ehk siis oma „eluea“ lõppu jõudnud suurte tähtede) plahvatuste tulemusel. Osakese on erinevate elementide tuumad, peamiselt vesiniku ja heeliumi tuumad. Samas võib galaktilise päritoluga kosmilise kiirguse osakestena leida ka raskemaid tuumi, näiteks raua ja nikli tuumasid.

Kosmilise kiirguse pideva osa jaotus:

- Vesiniku tuumad – 85%
- Heeliumi tuumad – 12.5%
- Rasked tuumad – 1%
- Elektronid – 1.5%

Galaktilise päritoluga kosmiline kiirgus on isotroopne, mis tähendab, et tema omadused ei sõltu suunast ning näiteks on kiirguse intensiivsus sõltumatu sellest, millisest suunast seda mõõdetakse.

Kui galaktilise päritoluga kosmiline kiirgus on pidev, siis Päikeselt pärit kosmiline kiirgus on muutuv. Vastavalt päikese 11-aastasele tsüklile lisanduvad galaktilise päritoluga kosmilise kiirguse osakestele ka Päikeselt pärit kosmilise kiirguse osakesed. Tavaliselt on tegemist madala energiaga osakestega, eriti võrreldes galaktikast pärinevate kosmilise kiirguse osakestega, ja seega jõuab Päikeselt Maa atmosfääri kosmilise kiirguse osakesi harva. Peamiselt jõuavad nad maa atmosfääri siis kui nad pärinevad Päikesel toimunud pursetest. Vahel toimuvad Päikesel paari tunni pikkused pursked, mille käigus vabanevad osakesed on suurema energiaga kui tavaliselt. Tänu suuremale energiale on nad ka võimelised paremini Maa atmosfääri läbima ja seega jõuab neid enam maapinnale. Sellised pursked on piisavalt võimsad, et mõõtevahenditega nii maapinnal kui ka erinevate õhusõidukitel oleks võimalik seda tuvastada. Sellised pursked on seotud eelkõige Päikese aktiivsuse maksimumidega, mis aga ei tähenda, et purest ei või toimuda mõnel muul ajahetkel.

Galaktilise päritoluga	**Päikselise päritoluga**
Pidev	Muutuv
Suure energiaga osakesed	Keskmise energiaga osakesed
Isotroopne	Ei ole isotroopne

Enne maapinnale või lennukite lennukõrgustele jõudmist peab kosmiline kiirgus läbima Maad kaitsvad kihid: Maa magnetvälja ja atmosfääri. Viimased kihid moodustavad topeltkaitse, mis võimaldas Maal elu kujunemist. Maapinnale jõudnud osakesed moodustavad seega väga väikese osa nendest, mis algselt Universumist maa atmosfäärini jõudsid. Maapinnast kõrgemale liikudes kosmilise kiirguse osakeste hulk kasvab. Atmosfääri tungides algatavad kosmilised kiired

keerulisi reaktsioone ja neelduvad järk-järgult, nii et doosikiirus kahaneb kõrguse vähenedes. Maa atmosfääri jõudes asuvad kosmilise kiirguse osakesed vastastikmõjju atmosfääri osakestega ning selle tulemusena tekivad uued osakesed. Tegemist on sekundaarse kosmilise kiirgusega, mille moodustavad laetud osakesed ja neutronid. Kui nende energiad on piisavalt suured, siis jõuavad need osakesed maapinnale. Ilma geomagneetilise kaitseta jõuaks maapinnani pidev laetud osakeste voog. Geomagneetiliselt aktiivsematel perioodidel võime näha kauneid virmalisi, mille põhjustavad Päikeselt pärinevad kosmilise kiirguse osakesed.

Kuna magnetväli on võimeline mõjutama elektriliselt laetud osakesi, siis mõjutab Maa magnetväli ka kosmilise kiirguse osakesi. Maa magnetväli on võimeline mõjutama osakeste liikumise suunda sarnaselt näiteks kompassinõela suuna muutmisega. Maa magnetväljas saavad jõujooned alguse lõunapooluselt ning lõpevad põhjapoolusel. Kui kosmiliste osakeste energiad on teatud piirmäärast suuremad, siis suudavad need osakesed ületada magnetosfääri ning jõuda atmosfääri ülemistesse kihtidesse. Samas kui energia ei ole piisav, jäävad need osakesed magnetvälja jõuvälja. See on põhjus, miks poolustel on kosmilise kiirguse intensiivsus suurem kui ekvaatori lähistel. Ehk siis kosmilist kiirgust mõjutab ka laiuskraad. Näiteks inimesed, kes elavad poolustele lähemal, saavad suuremaid kosmilise kiirguse poolt põhjustatavaid doose kui ekvaatori lähedal elavad inimesed. Prootonid on laetud osakesed, seetõttu mõjutab neid atmosfääri sisenedes Maa magnetväli. Pooluste piirkonda satub neid rohkem kui ekvaatori alale, nii et doosikiirus suureneb laiuskraadi suurenedes

Kosmilist kiirgust mõjutab päikesetuul, mis on päikesest lähtuv laetud osakeste voog. Päikesetuule magnetilised omadused on ajas muutuvad, sõltudes päikese aktiivsusest. Tugevate päikesetuulte korral jõuab maapinnale vähem kosmilist kiirgust. Kuna on teada Päikese aktiivsuse tsükkel, milleks on 11 aastat, siis on võimalik hinnata ka galaktilise kosmilise kiirguse intensiivust.

Kosmiline kiirgus moodustab umbes 11% keskmisest aastasest elaniku efektiivdoosist, mis on umbes 0,3 mSv. Doos varieerub sõltuvalt kõrgusest ja laiuskraadist. Kosmilise kiiruse poolt põhjustatav doos suureneb kõrgusega maapinnast, sest kõrgemal on meid kaitsva amtosfääri paksus väiksem. Põhinedes rahvusvahelistele hinnangutele, siis iga tuhande meetri kohta suureneb kosmilise kiirguse poolt põhjustatav aastane doos umbes 0,03 mSv. Enamik inimesi elab suhteliselt merepinnale lähedastel kõrgustel, kuid leidub ka rahvarohkeid asustusi suurtel kõrgustel (näiteks Quito ja La Paz Andides, Denver Kaljumägedes, Lhasa Himaalaja mägedes), kus elanikud võivad saada aastadoose, mis on mitu korda kõrgemad merepinna tasemel elavate inimeste aastadoosidest. La Pazi aastaväärtus näiteks on maailma keskmisest viis korda suurem.

Tabel 1.4. Kosmilisest kiirgusest põhjustatav aastane doos erinevates linnades

Asukoht	Rahvastiku arv (miljonit)	Kõrgus (m)	Aastane doos (mikroSv)
La Paz (Bolivia)	1,0	3900	2020
Quito (Ecuador)	11,0	2840	1130
Mexico City (Mehhiko)	17,3	2240	820
Nairobi (Keenia)	1,2	1660	580
Teheran (Iraan)	7,5	1180	440
Merepinnal			270
Maailma keskmine			380

Kosmiline kiirgus lennukõrgustel on palju intensiivsem kui maapinnal. Mandritevahelistes lennukoridorides võivad doosid olla isegi kuni 100 korda kõrgemad kui maapinnal. Näiteks Euroopa ja Põhja-Ameerika vahelisel õhulennul saavad nii reisijad kui ka meeskonnaliikmed hinnanguliselt doosi suurusega 0,1 mSv.

Tabel 1.5. Efektiivdoos erinevatel lennutrajektooridel

Lennutrajektoor	Efektiivdoos (µSv)
Vancouver ✈ Honolulu	14.2
Frankfurt ✈ Dakar	16.0
Madrid ✈ Johannesburg	17.7
Madrid ✈ Santiago de Chile	27.5
Kopenhaagen ✈ Bangkok	30.2
Montreal ✈ London	47.8
Helsingi ✈ New York	49.7
Frankfurt ✈ Fairbanks, Alaska	50.8
London ✈ Tokio	67.0
Pariis ✈ San Francisco	84.9

Tavalised lennureisid põhjustavad täiendava keskmise aastadoosi 0,01 mSv (tihti lendavate üksikreisijate doosid on sellest keskmisest palju kõrgemad).

Eestis on kosmilise kiirguse doosikiiruseks hinnatud ~0.034 mikroSv/h. Globaalselt on kosmilisest kiirgusest põhjustatav kollektiivdoos on 2 x 10^6 inimSv. Umbes poole sellest saab 2/3 elanikkonnast, kes elab allpool 0,5 km. Seevastu ~2% elanikkonnast, kes elab kõrgemal kui 3 km saab ~10% kollektiivdoosist. Võrreldes muude doositekitajatega on kosmilisest kiirgusest

põhjustatud doosikomponent imeväike, kuid seda tuleb arvestada lennunduses töötavate inimeste puhul.

Ioniseeriva kiirguse allikad pinnases

Kõik ained maakoores sisaldavad radionukliide. Kahtlemata on sügaval Maa sisemuses toimuvate looduslike protsesside energial maakoore kujunemisel ja sisetemperatuuri säilitamisel oma osa. Pinnases leiduvate radionukliidide poolt põhjustatavad doosid sõltuvad eelkõige pinnase geoloogilistest omadustest ja seega varieeruvad need suurtes piirides. Teatud kivimid sisaldavad rohkem radionukliide kui teised. Näiteks suurimaid doose pinnases leiduvatest radionukliididest saavad elanikud Soomes, sest graniidis on tavaliselt radionukliidide kontsentratsioonid kõrgemad. Samas madalamaid doose saavad Austraalia elanikud.

Looduses esinevad sagedasti nn. radioaktiivsed read, mille iga liige tekib eelnevast liikmest kas alfa- või beeta- lagunemise tulemusena. Kuna nihkereegli järgi alfa-lagunemisel väheneb tuuma massiarv 4 võrra ja beeta-lagunemisel jääb ta muutumatuks, siis on konkreetses radioaktiivses reas massiarvu A jagamisel arvuga tekkinud jääk q alati sama.Viimane ongi rea iseloomustaja:

$$A = 4n + q ,$$

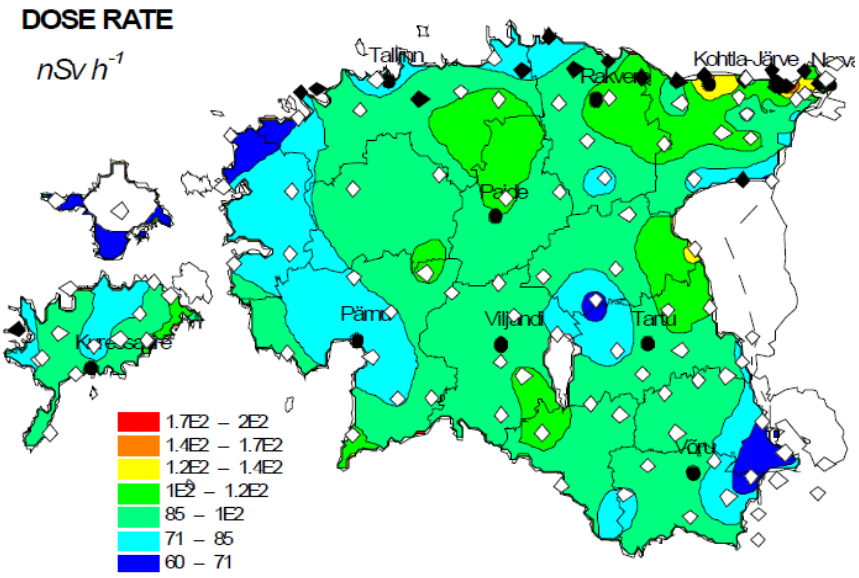
kus n on naturaalarv. Kuna Q võib omada ainult 4 väärtust, siis eksisteerib ainult 4 radioaktiivset rida. Analüüs näitas samas, et looduslikes tingimustes esineb ainult 3 neist. Need on:
1) tooriumi rida, mille liikmete massiarv on A=4n. Selle rea esimene liige on ^{232}Th ja viimane liige ^{208}Pb (stabiilne).
2) uraani rida, mille liikmete massiarv on A=4n+2. Selle rea esimene liige on ^{238}U ja viimane ^{206}Pb.
3) aktiiniumi rida, A=4n+3. Rea esimene liige on ^{235}U ja viimane ^{207}Pb.
4) neptuuniumi rida looduslikult ei esine kuna kõikide tema liikmete poolestusajad on väiksemad Universumi vanusest. Samas on teda võimalik tehislikult tekitada.

Uraan on hajutatud kivimites ja pinnases madalates kontsentratsioonides mõni osake miljoni kohta (o/m). Kui kontsentratsioon maagis ületab 1000 o/m, on majanduslikult otstarbekas seda kaevandada ja kasutada tuumareaktorites. Uraan-238 on mitmetest elementidest koosneva radionukliidide pika rea lähteaine, mis jõuab lagunemiste tulemusena stabiilse nukliidini plii-206. Ahela lagunemissaaduste hulgas on ka radioaktiivse gaasi radooni isotoop radoon-222, mis võib sattuda atmosfääri jätkates seal radioaktiivset lagunemist. Toorium on samamoodi maapinnas hajutatud. Toorium-232 on lähteaineks teisele radioaktiivsele reale, mille käigus tekib radooni teine isotoop, radoon-220, mida

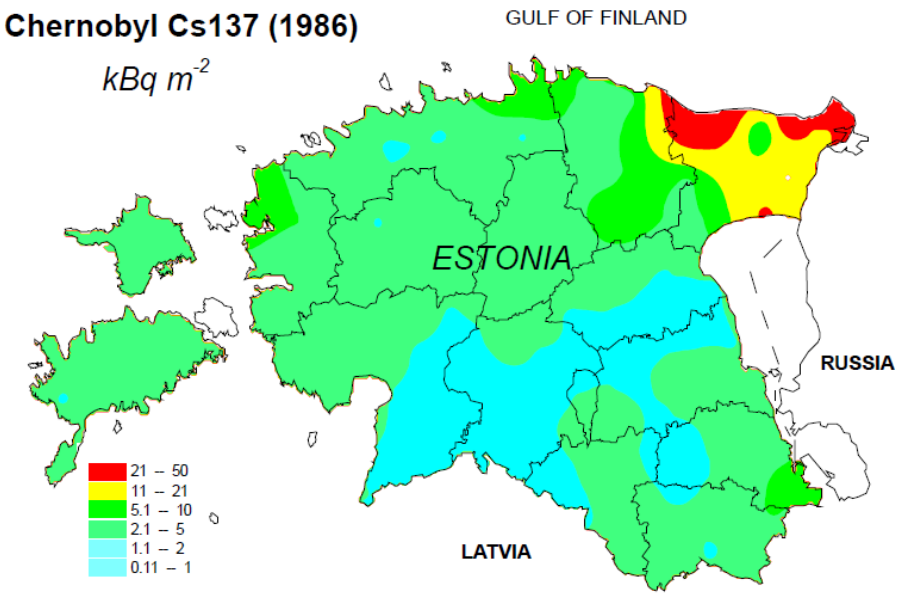
kutsutakse ka toroonіks. Näiteks on suhteliselt uraanirikas diktüoneemakilt, mida on võimalik Põhja-Eesti pankrannikul ka näha.

Joonis 1.4. Põhja-Eesti pankrannik Pakri poolsaarel (autori foto)

Maapinnal asuvad radionukliidid eraldavad suure läbistusvõimega gammakiiri, mis kiiritavad meid pidevalt ning enam-vähem ühtlaselt üle kogu organismi. Et enamik ehitusmaterjalide toorainest kaevandatakse maapõuest, siis on needki kergelt radioaktiivsed ja seetõttu saavad inimesed kiirgust nii siseruumides kui ka väljas. Olulist rolli doosikiirustes mängib ka Tsernobõli avarii tagajärjel keskkonda paiskunud radionukliidid ning nende sadenemine. Peamiseks radionukliidiks oli tseesium-137.

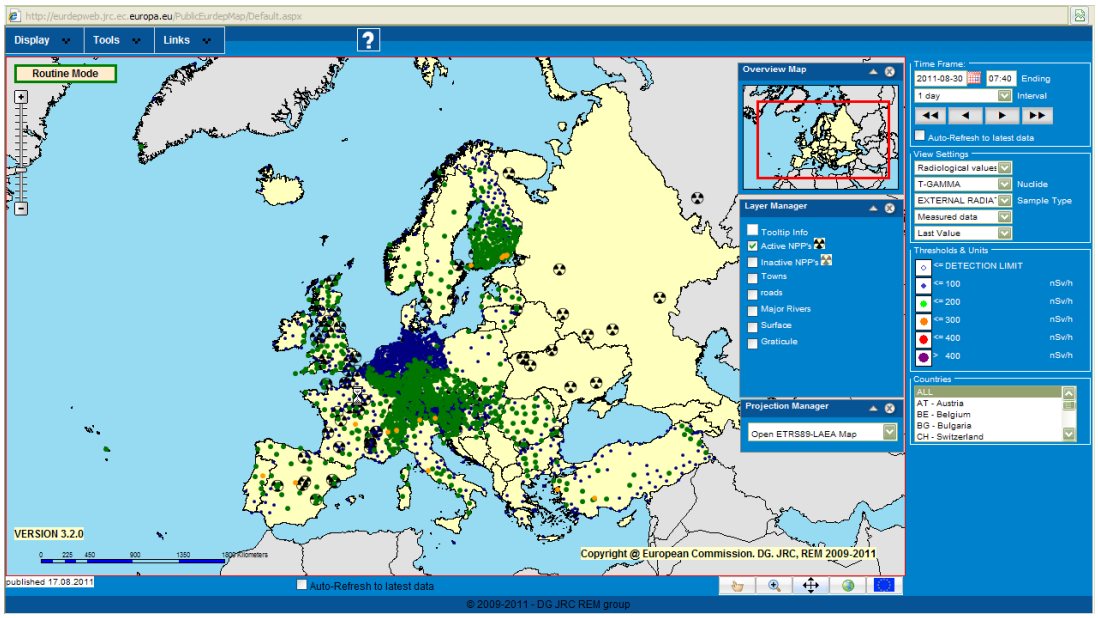


Joonis 1.5. Läbiviidud mõõtmiste alusel koostatud doosikiiruste kaart (Tartu Ülikool, Füüsika Instituut)



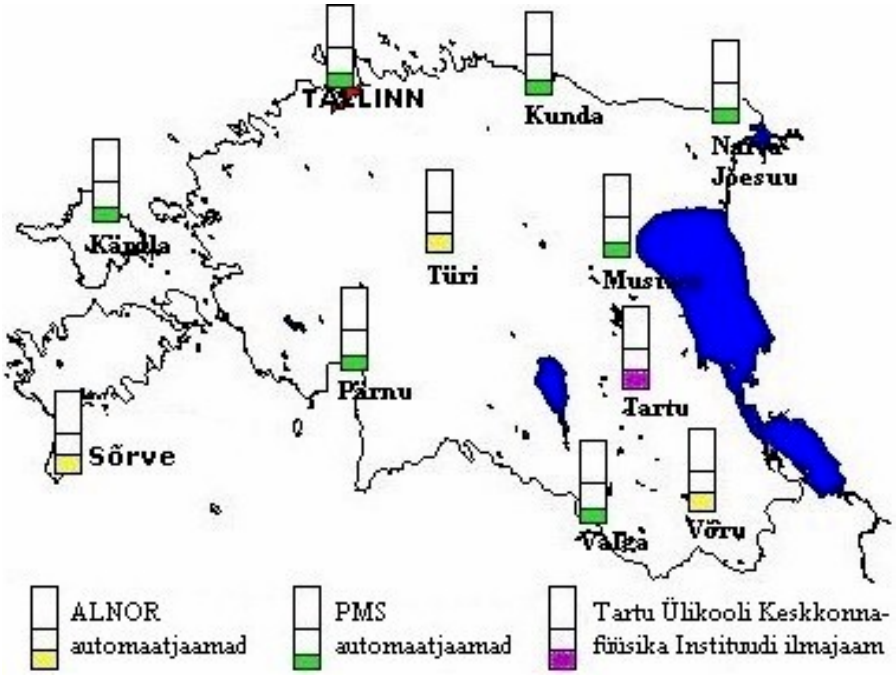
Joonis 1.6. Läbiviidud mõõtmiste alusel koostatud Tsernobõli avarii tulemusena keskkonda vabanenud Cs-137 sadenemiste kaart (Tartu Ülikooli Füüsika Instituut)

Keskkonnaameti kiirgusosakond jälgib ööpäevaringselt atmosfääri radioaktiivsuse taset üle kogu Eesti. Seda eelkõige tagamaks kodanike ohutus ning võimalus avastada kiiresti kiirgusavariisid. Samas tagab pidev seire ka hea ülevaate keskkonna kiirgusest. Eesti ja teiste Euroopa riikide atmosfääri kiirgusseire andmeid on kõigil võimalik jälgida EURDEP (EUropean Radiological Data Exchange Platform ehk Euroopa kiirgusandmete vahetamise programm) kodulehe vahendusel: [eurdep koduleht]



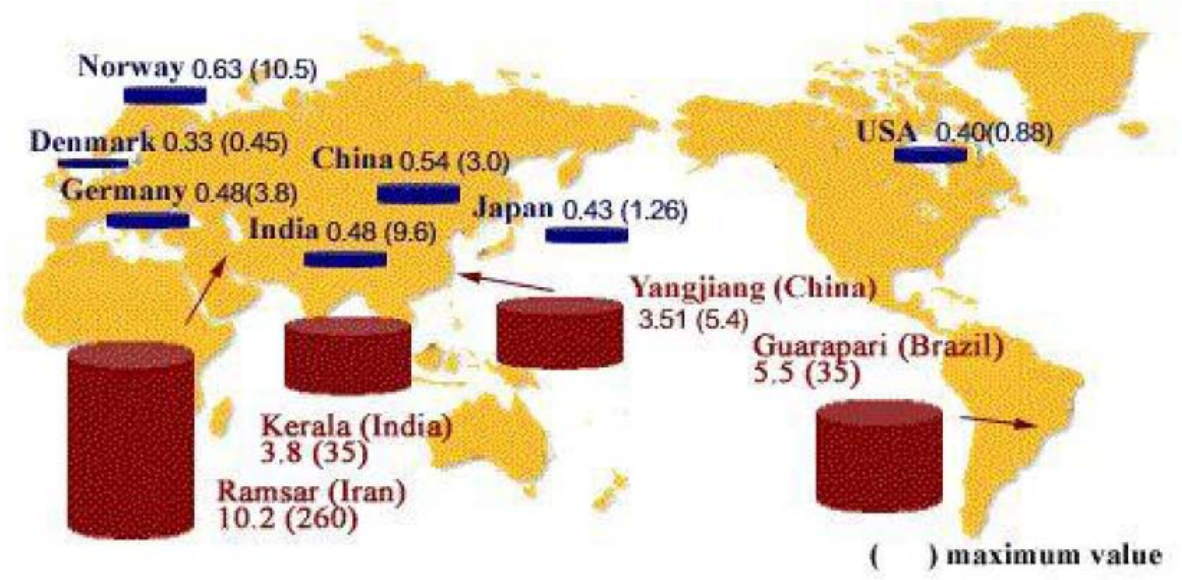
Joonis 1.7. Vaade EURDEP kodulehel avaldatavale kiirgusseire infole (EURDEPi kodulehekülg)

Eestis teostatakse kiirgusseiret teostatakse alates 1994. aastast. Kaasaegsete seadmetega mõõdetud atmosfääri seire andmed pärinevad Eesti erinevates piirkondades asuvatest vaatlusjaamadest, kus mõõdetakse gammakiirguse taset ning erinevate õhuosakeste radioaktiivsust. Gammakiirguse doosikiirust jälgitakse ööpäevaringselt automaatjaamade abil 10 vaatlusjaamas, mille asukohtadeks on Kärdla, Kunda, Mustvee, Valga, Türi, Narva-Jõesuu, Pärnu, Sõrve, Tallinn ja Võru. Automaatjaamadega jälgitakse avatud maastikul atmosfääri gammakiirguse doosikiirust reaalajas.



Joonis 1.8. Kiirgusseire jaamad Eestis (Keskkonnaamet)

Doose, mida elanikud saavad, mõjutavad nii selle piirkonna geoloogilised omadused kui ka elamute ehitamise tavad, kuid looduslikest gammakiirtest saadud keskmine doos aastas jääb suurusjärku 0,5 mSv. Tegelikud väärtused varieeruvad märgatavalt. Osa inimesi võib saada keskmisest mõned korrad suuremaid või väiksemaid doose. Vähestes kohtades, kus radionukliidide kontsentratsioon maapinnas on looduslikult suhteliselt kõrge, nagu Kerala Indias ning Prantsusmaa ja Brasiilia teatud piirkonnad, võib põhjustatav doos olla kuni 20 korda maailma keskmisest suurem. Ehkki reeglina pole sellise doosi mõjutamiseks ega vältimiseks peaaegu midagi võimalik ette võtta, oleks mõistlik võimaluse korral vältida ehitamist ebatavaliselt kõrge aktiivsusega piirkondades või selliseid materjale kasutades.



Joonis 1.9. Aastased hinnangulised doosid (mGy) (Rahvusvaheline Aatomienergiaagentuuri infomaterjalid)

Iraanis asuvat Ramsari peetakse üheks kõrgeima loodusliku kiirguse fooniga kohaks. Linn asub Iraani põhjaosas, Kaspia mere kaldal. Peamiselt on kõrged doosid seotud looduslike kuumaveeallikatega. Hinnanguliselt võivad aastased doosid elanikule olla kuni 260 mGy. Allikatest tulevas kuumas vees on lahustunud Ra-226, lisaks temale on veel väiksemates kogustes uraani ja tooriumi. Piirkonnas on üle 9 teadaoleva kuumaveeallika ning neid on alati kasutatud raviomaduste tõttu. Piirkonda ja selle elanikke on põhjalikult uuritud, kuid pole tõestatud, et doosid oleksid põhjustanud elanikele tervisekahjustusi. Pigem näivad need uuringud tõestavat, et selle piirkonna elanike eluiga on pikem ning inimesed on ka tavapärasemast tervemad.

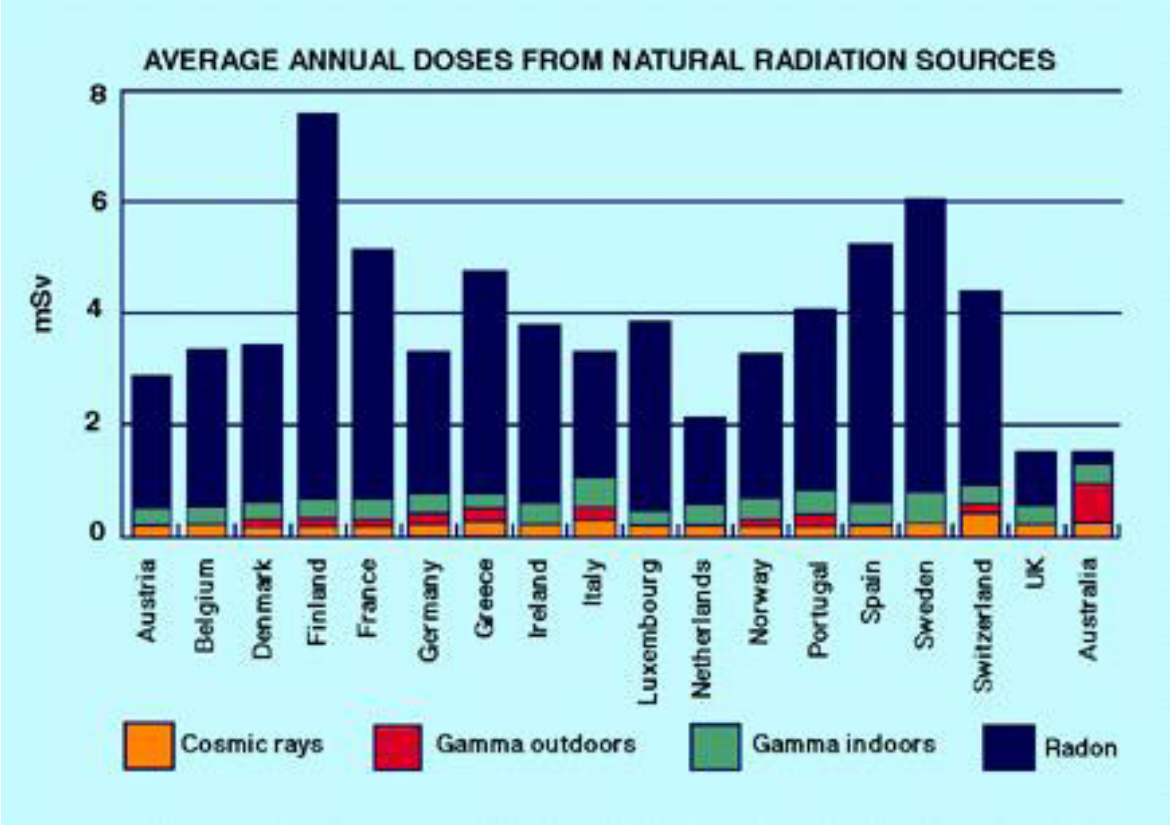
2.Radoon

Selle teema käigus saad vastused järgmistele küsimustele:

- Mis on radoon?
- Kuidas radoon liigub?
- Kuidas radooni mõõta?
- Millised on radooni poolt põhjustatavad terviseprobleemid?
- Milliseid meetmeid saab kasutada radooni kontsentratsiooni vähendamiseks?
- Millest sõltub radooni kontsentratsioon siseõhus?

Sissejuhatus

Ioniseeriv kiirgus on keskkonna loomulik osa. Radionukliide võib leida nii pinnasest, kivimitest, toiudust, veest, õhust ... Ühe sõnaga – igal pool. Samas tasub meeles pidada, et loodusliku kiirguse poolt tekitatavad doosid elanikele varieeruvad geograafiliselt, seega sõltuvad nad suurel määral konkreetsest asukohast. Näiteks on loodusliku kiirguse poolt tekitatud keskmine doos elanikule Soomes pea 10 korda suurem kui Austraalia elanikul. Peamiselt on see põhjustatud sellest, et radoon moodustab suure osa elaniku doosist Põhjamaades. Alljärgneval joonisel on toodud hinnangud looduliku kiirguse poolt põhjustatavatele elanikudoosidele. Sinisega on märgitud see osa doosist, mille põhjustab radoon.



Joonis 2.1. Elaniku aastadooside jagunemine erinevates riikides (Rahvusvahelise Aatomienergiagentuuri infomaterjalid).

Lihtne on järeldada, et loodusliku kiirguse komponentide hulgas on olulisim radoon. Talle järgneb peamiselt ehitusmaterjalides sisalduvate radionukliidide poolt põhjustatud doos.

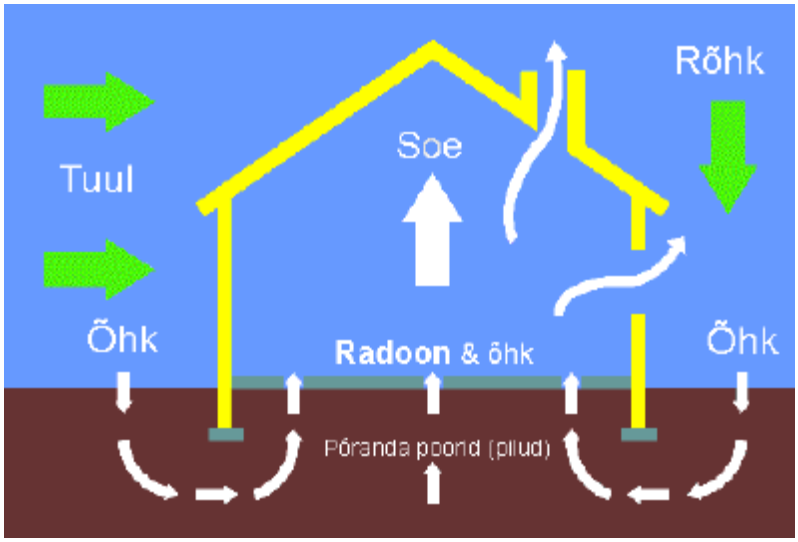
Mis on radoon?

Marie ja Pierre Curie uurisid looduslikku radioaktiivsust ning uuringute käigus avastasid nad raadiumi aastal 1899. Lähemal uurimisel selgus, et raadiumist eralduv gaas on samuti radioaktiivne. 1900 aastal tuvastas Friedrich Earns Dorn,

et tegemist on väärisgaasiga ja alates aastast 1923 kannab see väärisgaas ametlikult nimetust radoon.

Nagu eespool mainitud, siis suurima osatähtsusega looduslike kiirgusallikate ja nende poolt põhjustatavate dooside osas on radoon. Paljudes riikides on radoon ning eelkõige tema poolt põhjustatud elanikudoos suuremal või vähemal määral probleemiks. Suurimaid probleeme põhjustab radoon Rootsis ja teistes Põhjamaades, Saksamaal ja USA-s.

Radoon on keskkonnas esinev loodusliku päritoluga radioaktiivne gaas, mis tekib uraani radioaktiivse lagunemise tulemusena. Uraani ning tema isotoope leidub erinevates pinnastes ning kivimites. Radoon on värvitu, lõhnatu, maitsetu ja keemiliselt inertne. Oma gaasilise oleku tõttu on radoon võimeline liikuma oma tekkekohast maapinnas näiteks atmosfääri või siis hoonete siseõhku. Siseruumidesse jõuab maapinnast pärinev radoon peamiselt põrandas/vundamendis olevate pragude ning avade kaudu (nt avad torustiku või juhtmete jaoks). Kuna tavaliselt on rõhk hoonetes madalam kui väljas ja radoon liigub eelkõige koos õhuvooludega, siis soodustab see radooni liikumist hoonetesse. Osa radoonist atmosfääri ei jõua ja jääb pinnasesse, samas võib see lahustuda ka põhjavette.



Joonis 2.2. Radooni liikumine hoonetesse (Radoonitõrjekeskuse ettekanne)

Radooni poolestusaeg on umbes neli päeva (täpsemalt 3.8 päeva). See tähendab, et pool radoonist laguneb nelja päeva jooksul. Radooni radioaktiivse lagunemise käigus eraldub alfaosake. Alfaosakeste läbitungivõime on väga väike, ehk siis nende teekond on tavaliselt väga lühike, nende peatamiseks piisab paberilehest või inimese nahast. Radooni radioaktiivsel lagunemisel tekivad ka tütarnukliidid, millest osa on samuti radioaktiivsed. Erinevalt radoonist ei ole tema tütarnukliidid gaasilises olekus, seega võivad need haakuda õhus olevate tolmu või muude osakeste külge. Inimene hingab koos õhuga neid osakesi sisse ja seega jõuavad need inimese organismi. Tütarnukliidide lagunemine toimub seni, kuni jõutakse stabiilse tuumani. Samas nii kaua kui meil pole tegemist

stabiilse tuumaga, võib iga radioaktiivse lagunemise käigus vabaneda kas energiat või mõni kiirgusosake.

Kuidas radoon liigub keskkonnas?

- Pinnases ja kivimites tekkiv gaasiline radoon võib liikuda koos õhuvoolude või põhjaveega maapinnale.
- Radooni poolestusaeg on umbes 4 päeva, mis tähendab, et 4 päeva jooksul muutuvad pooled radoonituumadest ehk siis lagunevad radioaktiivselt tütranukliidideks.
- Radooni tütarnukliidid on tahked ning võivad õhus olles „kleepuda“ kas tolmu või muude osakeste külge ning siis edasi liikuda koos õhuvooludega.

Joonis 2.3. Ehitustööde käigus on maja soklikorruse ümbert on pinnast ära viidud ning tänu sellele on hästi näha erinevad praod seintes, mille kaudu saab radoon pinnasest hoonesse liikuda (autori foto).

Kus võib radooni leida?

- Madalad radoonitasemed on tavaliselt välisõhus ning veekogude (jõgede, järvede) vetes.
- Kõrgemaid radoonitasemeid võib leida hoonete siseõhus ja kaevuvees. Hoone vundamendis olevad lõhed või avavused soodustavad radooni kogunemist hoonesse ning seetõttu on selliste hoonete siseruumides radoonitasemed tavaliselt kõrgemad.
- Kõrgemaid radooni ja tema lagunemisproduktide kontsentratsioone võib üldiselt leida piirkondades, kus pinnases ja kivimites on kõrge uraani ja tooriumi kontsentratsioon.

Teatud määral sisaldavad looduslike radionukliide ka ehitusmaterjalid, mille valmistamiseks on kasutatud looduslikke tooraineid. Ka ehitusmaterjalid võivad olla radooni tekkeallikateks. Tavaliselt on aga doos, mida põhjustab ehitusmaterjalidest pärinev radoon väike võrreldes doosiga, mida võib põhjustada maapinnast pärinev radoon. Eestis põhjustavad kõrget radoonisisaldust peamiselt fosforiit ning diktüoneemakilt, millest ehitusmaterjale ei valmistata. Kui ehitusmaterjal (näiteks kergkruusast plokk) valmistatakse savist, milles on kõrge radionukliidide sisaldus, võib see põhjustada kõrgemat radoonitaset hoones. Eestis on läbi viidud vastavad uuringud ning jõutud järeldusele, et valdavalt põhjustab inimestele doosi radoon, mis jõuab siseruumide õhku hoonet ümbritsevast maapinnast ja seega ei peeta Eestis ehitusmaterjale radooniohtlikeks.

Millist tervisekahjustust võib põhjustada kokkupuude radooniga?

Aastasadu on usutud, et radoon on tervisele kasulik. Umbes sajand tagasi olid erinevaid radoonivanne pakuvad sanatooriumid väga populaarsed ja ka tänapäeval võib leida terviseasutusi, kus pakutakse radoonivanni võimalust. Allpool on toodud üks postkaart, millel reklaamitakse radoonivanne.

Joonis 2.4. Raadiumi vanne reklaamiv postkaart (Theodore W. Gray)

Saksa arst ja loodusuurija Parcelsus juhtis juba 16. sajandil tähelepanu hõbedakaevurite kopsuhaigustele Schneebergis Saksamaal. Järgmistel sajanditel kopsuhaiguste sagedus hõbedakaevandustes töötavatel kaevuritel suurenes veelgi ja 18. sajandil hakati haiguse vältimiseks eelistama lahtiste hõbeda-,

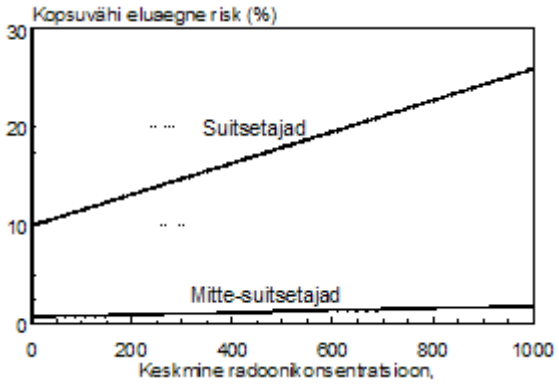
vase- ja koobaltikaevanduste kasutamist. 19. sajandi lõpuks tunti seda haigust kopsuvähina. 1902 aastal Schneebergis läbi viidud radoonimõõtmised andsid kõrged tulemused.

Alates sellest ajast seostatakse omavahel radooni kontsentratsiooni õhus ja kopsuvähki haigestumist. 1920-ndail aastail korraldati laialdased uurimused lisaks Schneebergile ka teistes kaevandustes ning väide, et radooni kontsentratsioon ja kopsuvähki haigestumine on omavahel seotud, sai kinnitust. Need uurimistulemused ei olnud siiski piisavad, sest osa teadlasi seostas kopsuvähi teket teiste teguritega. 1951. aasta katsed loomadega näitasid, et radooni mõju neile oli kantserogeene ning epidemioloogilised uurimused kaevurite seas 1960-ndatel aastatel kinnitasid sama ka inimeste jaoks.

Kuni 1970-ndateni vaadeldi radooni ja tema tütarnukleiide kui kiirgusohtu tervisele, mis esineb üksnes kaevandamisel ja uraanimaagi töötlemisel. Nüüdseks on see arusaam märgatavalt muutunud. Seoses energiakriisiga 1970ndatel aastatel, energia säästmiseks mõõduka ja külma kliimaga riikides kasutusele võetud meetmed õhuvahetuse vähendamiseks hoonetes tõid kaasa järsu siseõhu radoonitaseme tõusu.

Seega radooni mõju tervisele on uuritud kaua. Teadlased on suhteliselt ühisel meelel, et tavatasemete puhul ei põhjusta radoon meile ohtu, kuid rohkem on vaja teavitustööd. Viimastel aastatel on üha enam asutud radooniga seotud küsimusi reguleerima seadusandluse abiga, ikka eesmärgiga kaitsta elanikkonda radoonist põhjustatud kiirgusohu eest.

Maailma Tervishoiuorganisatsiooni andmetel on radoon on olulisuselt teine kopsuvähi põhjustaja. Kopsuvähi tekitajate hulgas edestab radooni ainult suitsetamine. Samas on oluline ka suitsetamise ja radooni koosmõju. Näiteks on suitsetajatel tõenäosus radoonist põhjustatud kopsuvähki haigestuda üle 25 korra suurem.



Joonis 2.5. Kopsuvähi riski sõltuvus keskmisest radoonikontsentratsioonist ja suitsetamisest (Radooni infovoldik, Kiirguskeskus)

Ruumis suitsetamisel tekib õhus palju osakesi, mis on efektiivseteks radooni tütarisotoopide kandjateks. Suitsuse õhu sissehingamisel satub seega kopsu

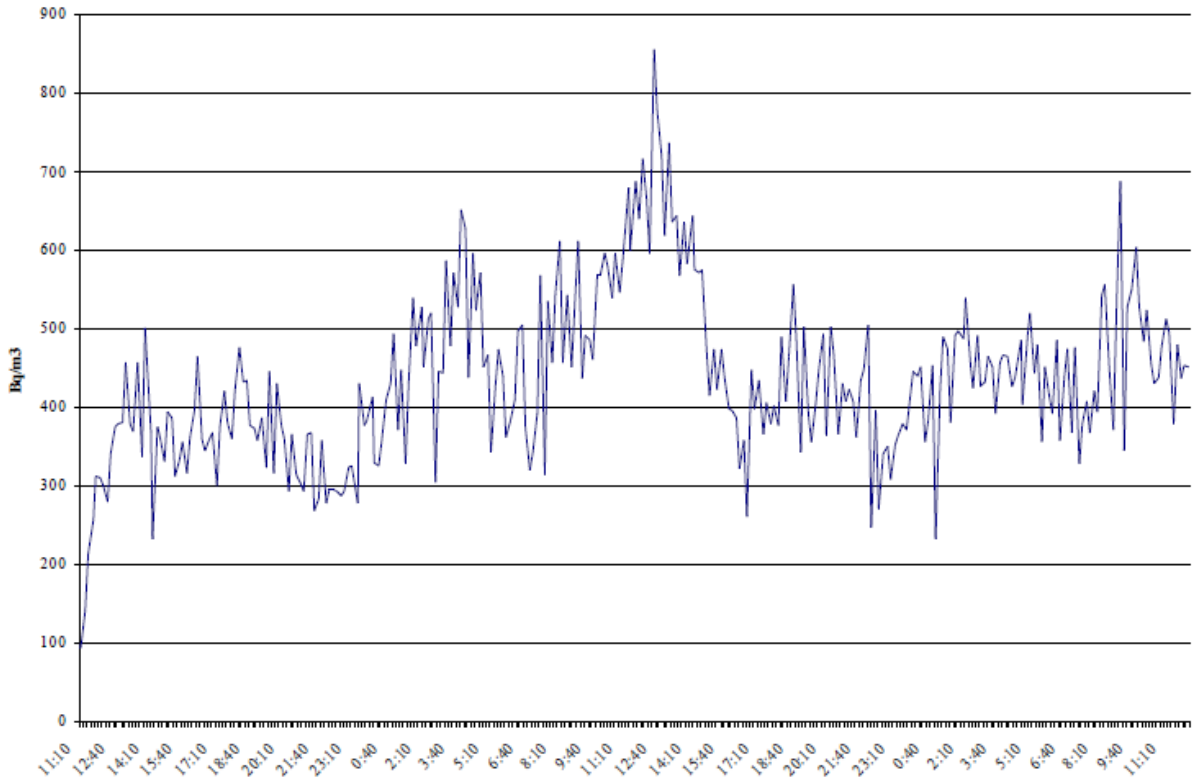
rohkem tütarisotoope, põhjustades täiendava kiirgusdoosi limaskestadele. Radooni lagunemise tulemusel tekkivad tahked radionukliidid, mis võivad jääda kopsudesse. Radooni radioaktiivse lagunemise käigus vabanevad suure energiaga alfa-oskesed, mis on peamiseks meie tervist ohustavaks faktoriks. Sellised osakesed oma lagunemise käigus eraldavad kiirgusosakesi või energiat, viimased omakorda võivad ionisatsiooniprotsesside tulemusena põhjustada kopsuvähki. Tõve avaldumiseni võib kuluda aastaid ning otseseid kiireid sümptome nagu hingeldus, köha, peavalu või palavik, radoon ei tekita. Radoonist põhjustatud kopsuvähi esinemine on tõenäosuslik, seega kaugeltki mitte igaühel, kes on sisse hinganud suure radoonisisaldusega õhku, ei arene kopsuvähk. Samas, mida rohkem on kokkupuudet radooniga, seda suurem on tõenäosus kopsuvähki haigestumiseks. Ehk siis pikaajaline elamine suure radoonikontsentratsiooniga hoones põhjustab kopsuvähki haigestumise tõenäosuse kasvu. Riski suurusjärk sõltub radooni kontsentratsioonist ning sellest, kui pika aja jooksul selles hoones viibiti ning sellest, kas inimene suitsetab või mitte. Tänaseni pole suudetud teaduslikult tõestada, et radoon põhjustaks lisaks kopsuvähile teisi tervisekahjustusi. Samas ei ole erinevad uuringud tõestanud ka, et radoon oleks lastele suuremaks ohuks kui täiskasvanutele.

Radoonisisaldus õhus

Kuna radoon põhjustab looduslikest kiirgusallikatest suurima doosi ning on ka teine oluline kopsuvähki tekitav faktor, siis erinevad kiirgusohutusega tegelevad pädevad asutused soovitavad mõõta radoonisisaldust siseruumide õhus. Radoonisisaldust siseõhus ei ole võimalik hinnata, selle määramise ainukeseks võimaluseks on mõõtmiste läbiviimine. Ainus võimalus radoonisisalduse määramiseks on läbiviidavad mõõtmised.

Radoon siseruumides pärineb eelkõige hoone all ja ümber olevast pinnasest ja kivimitest. Radoon ja teised gaasid liiguvad pinnases rõhkude erinevuste tõttu. Kuna hoones on üldiselt temperatuurid kõrgemad kui pinnases, mis jällegi põhjustab selle, et rõhk hoones on madalam kui pinnases, seega rõhu erinevuste tõttu liiguvad gaasid pinnasest hoonesse, kasutades selleks eelkõige erinevaid pragusid või avasid. Hoonesse jõudesi jääb radoon sisuliselt „lõksu“. Samas, võttes arvesse radooni poolestusaega, ei jõua see tavaliselt enne lagunemist liikuda pinnasest kaugemale kui hoone keldri- või esimene korrus. Seega on radoonisisaldust hoone siseõhus eelkõige vajalik läbi viia nendel korrustel.

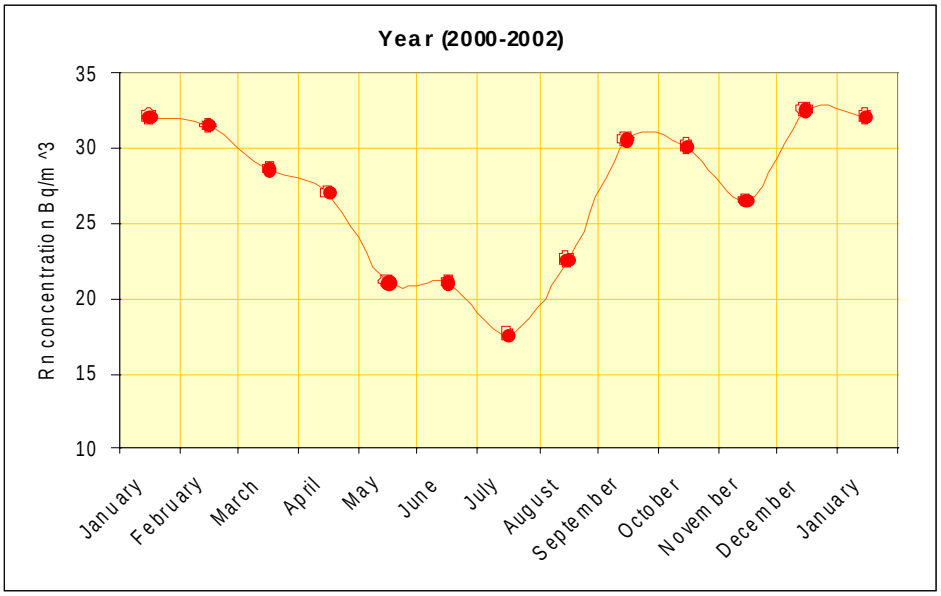
Radoon on gaas ja selle eraldumine maapinnast on seotud ilmastikutingimustega seepärast on enamikul juhtudel vajalik küllalt pikk mõõtmisperiood. Kuna radooni kontsentratsioon varieerub ajas, siis täpsema tulemuse saavutamiseks on soovitav kasutada pikka mõõteperioodi – 2-3 kuud. Usaldusväärsete tulemuste saamiseks ei piisa paarist päevast või nädalast.



Joonis 2.6. Radoonikontsentratsiooni muutus ruumis ööpäeva jooksul, mõõtmine on läbi viidud lühiajalise meetodiga (Keskkonnaamet)

Radoonitaset mõjutavad väga paljud faktorid. Eelkõige on see seotud õhuvahetusega. Ehk mida rohkem õhuvahetust toimub, seda rohkem liigub gaasiline radoon ka ruumist välja. Radoonitaseme muutusi põhjustavad ka ventilatsiooni muutused, vundamendi liikumise käigus tekkivad praod jne. Näiteks põhjustab radoonitaseme muutuse ruumis selle ruumi kasutamisharjumused – kui ruumi kasutatakse tihedalt, siis on tavaliselt radoonitasemed madalamad kui juhul, kui ruumi kasutatakse harva. Talvisel kütteperioodil on uksed ja aknad suletud ning ruumi ventileerimisel tõmmatakse ruumidesse suhteliselt rohkem maa-alust õhku, mis on kontaktis pinnasega. Lisaks takistab talvekuudel külmunud maapind hoone ümber radooni väljapääsu atmosfääri. Maja all pinnas ei külmu ning sinna satub ka osa radooni sisaldavast pinnaseõhust hoone ümbrusest. Seetõttu on radooni sisaldus hoones suurim talvisel ajal. Suvel hoitakse aknaid rohkem lahti ja tubadesse tulev välisõhk vähendab ruumides radooni taset.

Radoonisisalduse määramiseks saab kasutada erinevaid mõõtemeetodeid. Radoonisisaldust õhus mõõdetakse: bekerell kuupmeetri kohta, Bq/m^3. Bekerell on aktiivsuse ühik, mis vastab ühele spontaansele tuumasiirdele sekundis. Aktiivsuskontsentratsioonil 1 Bq/m^3 laguneb ühe sekundi jooksul õhu igas kuupmeetris üks radooniaatom. Mida rohkem lagunemisi sekundi jooksul toimub, seda rohkem aine kiirgab.

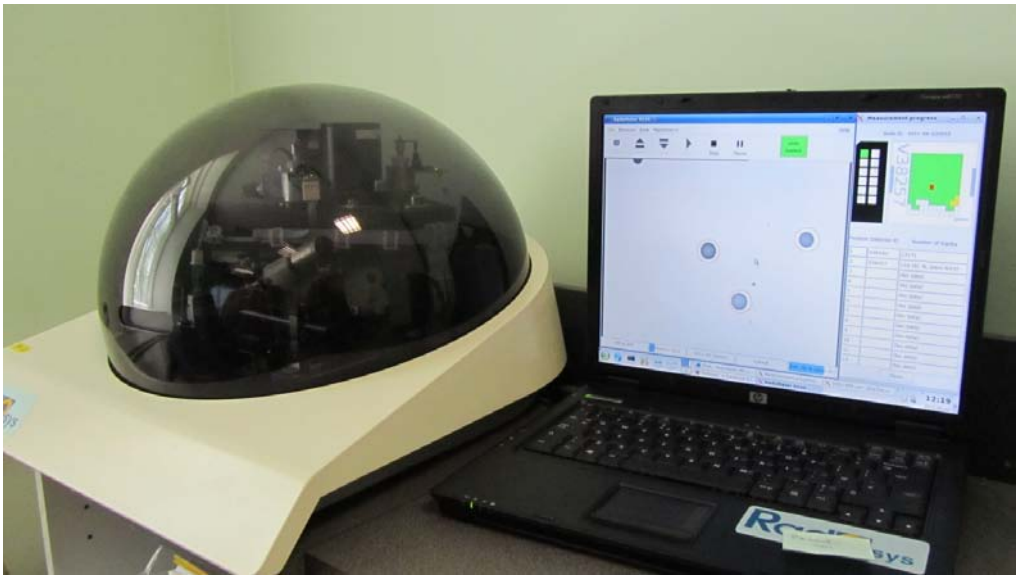


Joonis 2.7. Radoonikontsentratsiooni keskmised väärtused kuude kaupa (mõõtmised läbi viidud Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi labori ruumis jaanuar 2001 – jaanuar 2002).

Enamasti mõõdetakse radooni taset kahe väikese detektoriga, mis paigutatakse elamusse – soovitavalt üks magamistuppa ja teine elutuppa. Detektorid on ohutust materjalist ning ei ole radioaktiivsed. Samuti ei vaja need elektrivoolu ega tekita mingit müra.

Joonis 2.8. Radooni pikaajaliseks mõõtmiseks kasutatavad detektorid (Keskkonnaamet)

Radooni tütarnukliidid tekitavad plastikusse jäljed. Pärast eksponeerimist töödeldakse plastik keemiliselt ning siis on söövitatud jälgi plastikult võimalik lugeda mikroskoobi abil. Loomulikult on protsessi kiirendamiseks olemas ka vastavad programmid, mis teevad selle töö peaaegu automaatselt ära.



Joonis 2.9. Pikaajalise meetodil kasutatavate plastikute loendamiseks kasutatav mõõtesüsteem Keskkonnaametis.

Mõõtmise ajal ei ole vajadust oma tavapärast eluviisi muuta - inimesed võivad elada oma igapäevast elu ning kasutada ruume harjumuspäraselt. Kasulik ongi mõõtmisi viia läbi tavatingimustes, kuna elanike harjumused avaldavad suurt mõju radooni kontsentratsioonile (näiteks kui majas elatakse, siis avatakse uksi, aknaid jne, mis omakorda mõjutab radooni taset).

Kiiremaid mõõtmisi saab läbi viia erinevate elektrooniliste otsenäitavate mõõteriistade abil.

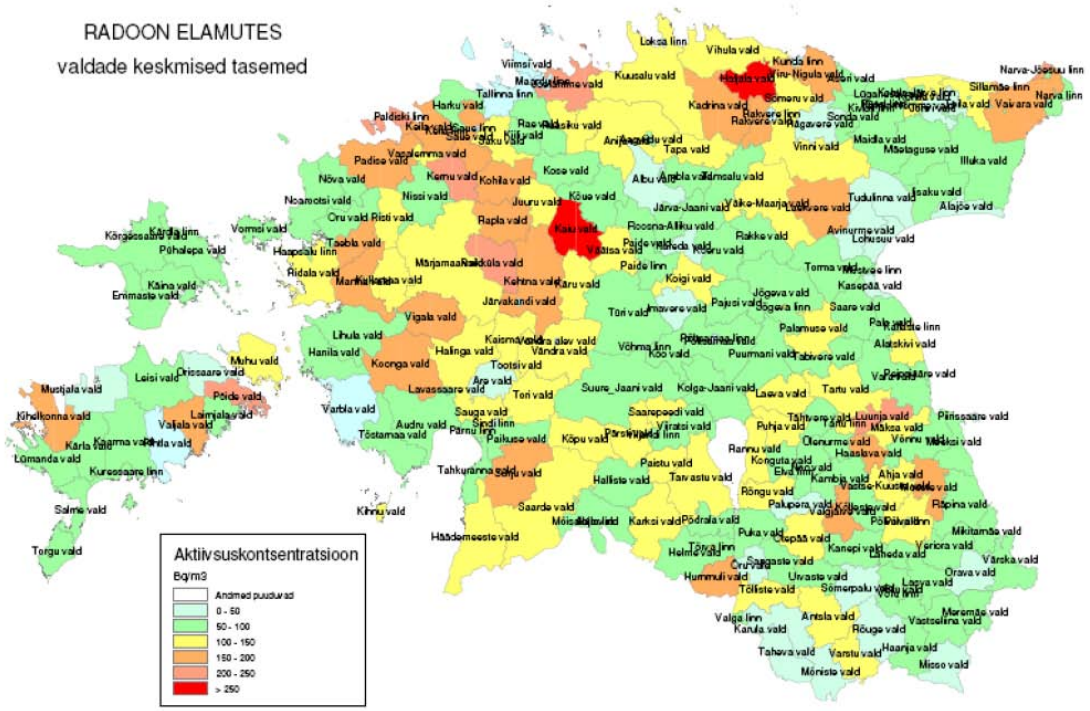
Radoonikaart

Radooni kontsentratsioonid ruumide siseõhus varieeruvad suurtes piirides, sõltudes maja asukohast, tüübist ja elanike harjumustest. Erinevad mõõtmistulemused saadakse ka kui mõõtmised viiakse läbi erinevatel aastaaegadel või ilmastikutingimustel. Seda eelkõige just seetõttu, et radooni sisaldus siseõhu sõltub väga paljudest faktoritest. Eelkõige registreeritakse kõrgemaid tasemeid külmematel aastaaegadel. Samuti tõuseb radoonisisaldus öistel tundidel ning langeb tuuliste ning vihmaste ilmadega. Eestis läbi viidud uuringud on näidanud, et Eesti elumajade siseõhu radooni sisaldus varieerub valdavalt 20-1000 Bq/m^3 piirides ja ulatub üksikjuhtudel Põhja-Eesti klindivööndis üle 9000 Bq/m^3. Majade siseõhu keskmine radooni sisaldus on nende uuringute põhjal 103 Bq/m^3. Ühepereealmutes on enamasti radooni tase kõrgem kui kortermajades. Kui hoone on hästi ioleeritud ning sellel on kelder, siis on olemas eeldused kõrgemateks radoonisisaldusteks. Korterelamute puhul on radoon äärmisel juhul esimese korruse elanike mure. Sama kehtib ka äripindade kohta, mis üldjuhul asuvad esimesel korrusel. Samas tuleb äripindade puhul eelkõige lähtuda töötajate ohutusest.

Üldiselt võib leida kõrenenud radoonisisaldust õhus teatud geograafilistes piirkondades, kus pinnases on mõndade radionukliidide kontsentratsioonid

suuremad. Kõrge radooni tase pinnases on seotud uraanirikka diktüoneemakilda ja uraani sisaldava glaukoniitliivakivi esinemisega Põhja-Eestis ja graniidirikka moreeni levialadega Lõuna-Eestis. Mõõduka ohuga alasid esineb ka Kesk-Eestis. Radooniohtlikud alad Eestis on ära määratud ning välja on antud Radooniriski kaart.

Samas kuna radoonisisaldus siseruumi õhus sõltub väga palju muudest faktoritest, siis geoloogiliste tingimuste alusel ei ole võimalik otseselt hinnata radoonisisaldust siseõhus. Samade geoloogiliste tingimustega kohtadele rajatud hoonetes võib radoonisisaldus erineda kümneid kordi, näiteks on parema ventilatsiooniga majas radoonisisalduse tase kindlasti madalam kui teises hoones. Aastate jooksul läbi viidud siseruumide õhu radooni kontsentratsiooni mõõtmiste tulemuste alusel on välja antud siseõhu radoonikaart.



Joonis 2.10. Radooni hinnangulised tasemed siseruumides erinevates valdades. Kaardi koostamisel on kasutatud juhusliku valikut (Keskkonnaamet).

Kuna radooni sisaldus õhus varieerub erinevates piirkondades, siis on keeruline defineerida keskmist väärtust. Maailma keskmiseks välisõhu radooni tasemeks on hinnatud 10 Bq/m³. Eestis on mõõtmistulemused jäänud vahemikku 3–5 Bq/m³.

Radooniohu vähendamine

Euroopa Komisjon soovitab uute eluruumide puhul jälgida, et radooni sisaldus siseõhus oleks alla 200 Bq/m3 ning juba kasutusel olevate eluruumide puhul alla 400 Bq/m3. Ühendkuningriigis näiteks soovitatakse kasutusele võta meetmeid

kui radooni keskmine kontsentratsioon ruumide siseõhus ületab 200 Bq/m3. Eesti Vabariigis sätestab standard, et hoonete elu-, puhke- ja tööruumides peab aasta keskmine radoonisisaldus ruumiõhus olema väiksem kui 200 Bq/m3. Vanemates majades on aktsepteeritavaks tasemeks kontsentratsioon mis jääb alla 400 Bq/m3.

Kuna reaalselt on mõõtmisi ebaotstarbekas läbi viia aasta vältel, peab ruumide radoonisisaldus olema väiksem kui 200 Bq/m3 mõõtmisperioodil, mis on vähemalt kaks kuud eeldusel, et mõõtmised viiakse läbi kütteperioodil. Kui olemasolevates hoonetes on radooni kontsentratsioon vahemikus 400 Bq/m3 kuni 600 Bq/m3 , siis on soovitatav rakendada kergemaid ja vähem kulukaid radoonitõkestusmeetodeid. Elukohtades on radoonitõkestusmeetodid õigustatud kui radooni kontsentratsioon ületab 600 Bq/m3. Töökohtades on radoonitõkestusmeetodid õigustatud kui radooni kontsentratsioon ületab 1000 Bq/m3 .

Kui mõõtmistulemuste põhjal selgub, et on vajadus rakendada meetmeid radooniohu vähendamiseks, siis tuleb lähtuda eelkõige mõõtetulemustest.

Meetmed, mida saab kiirelt rakendada, on järgmised:

- Tuulutage ruume võimalikult tihti. Nii vahetub radoonirikas õhk kiiremini ning selle mõju on väiksem. Tuulutage ka ruume, kus tihti ei viibita (näiteks kelder), et radoon sinna kontsentreeruda ei saaks.
- Hoidke ruumid tolmust ning suitsu- ja tahmaosakestest vabad, sest radooni tütarproduktid kleepuvad nende külge ning liiguvad õhu abil inimeste hingamisteedesse.
- Ärge suitsetage, sest nii väldite radooni ja suitsetamise sünergilist koosmõju tervisele.

Radooni taset siseruumide õhus saab vähendada, kui tihendada pragusid ja avasid, mille kaudu radoon võib hoonesse siseneda. Radooni kontsentratsiooni vähendamiseks hoonete siseõhus on väga mitmeid võimalusi – nii lihtsamaid kui ka keerulisemaid. Kallimate hulka kuulub näiteks ventilatsioonisüsteemi paigaldamine nii, et maja-alune õhk suunataks majast eemale. Samas, kui tegemist on ikkagi väga kõrgete radoonikontsentratsioonidega siseõhus, siis tuleb kasutusele võtta kardinaalsemad lahendused ning ventileerimisest ainuüksi ei piisa. Näiteks tuleb siis hoolikalt sulgeda radooni sissepääsu teed või parandada õhuvahetust keldrikorrustel. Ventilatsiooni suurendamine, eelkõige keldrikorrusel ning esimesel korrusel võib vähendada radooni kontsentratsiooni. Kui algne radooni kontsentratsioon oli väga suur, ei pruugi vähenemine olla piisav. Tuleb arvestada, et liiga tugev tõmme võib intensiivistada radooni imbumist hoone alt, ning põhjustada ruumides soovitule vastupidise efekti. Pärast meetmete rakendamist on oluline läbi viia kordusmõõtmine, et olla kindel meetmete efektiivsuses.

Kokkuvõtte

Inimesi on alati ümbritsenud kiirgus looduses leiduvatest kiirgusallikatest. Maapinnas leiduvate kiirgusallikate hulgas on uraan, mida võib leida pea kõikjal, mõnedes kohtades on kontsentratsioon suurem, teistes väiksem.

Samas tuleb radooni puhul alati meeles pidada, et radoonist põhjustatavat doosi saab inimene ka vähendada. Seda soodustab ka omavalitsuste aktiivne osalus elanike teavitamisel ning ehitajate ja arhitektide koostöö, mille tulemusena planeeritakse ja ehitatakse uued majad radooniohututena.

3. Tuumakatsetused

Selle teema käigus saad vastused järgmistele küsimustele:

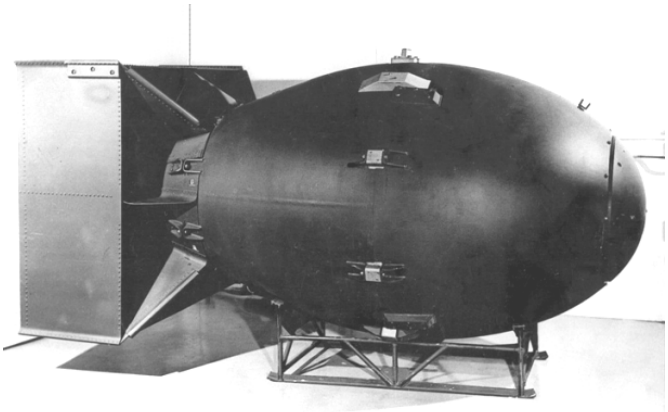
- Kuidas tuumapomm töötab?
- Milliseid tuumakatsetusi on läbi viidud?
- Mis järgneb tuumapommi plahvatusele?
- Millised riigid ja kus on tuumakatsetusi läbi viinud?
- Mis on tuumakatsetuste keelustamise moratoorium?
- Kuidas mõjutavad tuumakatsetused meid?

Sissejuhatus

Tuumarelva hakati looma Teise maailmasõja ajal USA-s, kuhu oli emigreerunud suur osa maailma tippfüüsikuid. Peamiseks põhjuseks oli kartus, et hitlerlik Saksamaa oli jõudnud tuumarelva saladuseni ning arvati, et nad on valmistanud tuumapommi. Vahetult enne sõda avastati võimalus tekitada tuumade lõhustumisel plahvatuslik ahelreaktsioon ning seega olid eeldused tuumapommi tegemiseks olemas. Kui teine maailmasõda algas, siis aktiveerus ka USA tuumaprogramm.

Tuumapomm

Tuumapomm ehk aatomipomm (ka: aatompomm) on suure plahvatusjõuga lõhkekeha, kus energia vabaneb raskete aatomituumade lõhustumisel. Lisaks tavalisetele tuumapommidele on olemas termotuumapommid (ehk vesinikupommid), neutronpommid ja kombineeritud tuumarelvad. Termotuumapommis kasutatakse tuumalõhustumisel tekkivat energiat termotuumareaktsiooni süütamiseks. Neutronpommi puhul on tegemist väikese lõhkejõuga kombineeritud tuumapommiga, mille puhul ei kasutata neutronpeeglit, vaid pommi eesmärk ongi võimalikult suure hulga neutronite vabastamine, et tekiks surmav neutronkiirgus. Kombineeritud tuumarelvade puhul võimendatakse termotuumareaktsiooni energiat tuumalõhustumisega, mille käivitamiseks kasutatakse termotuumareaktsioonil tekkinud kiireid neutroneid (kiirete neutronitega on võimalik lõhustada ahelreaktsiooni mittetekitavaid tuumakütuseid).



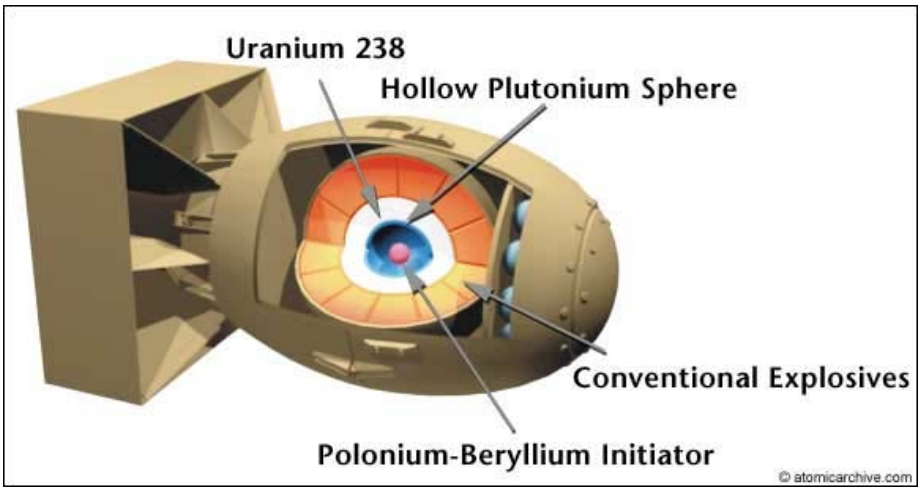
Joonis 3.1. Tuumapomm koodinimega „Fat Man“, mis visati Jaapani linnale Nagasaki, 9. august 1945 (Wikipedia).

Ahelreaktsiooniks sobivaid aatomituumi pole just palju. Tuumapommi materjalinaon kasutusel tavaliselt uraan-235 või plutoonium-239, seda eelkõige suure tiheduse tõttu, mis võimaldab olulist purustusjõudu massi kohta.

Tuumapommis olevat tuumkütust peab olema rohkem kui vastav kriitiline mass, et saaks tekkida ahelreaktsioon. Kriitiline mass ei ole tegelikult seotud tuumapommi tuumkütuse massiga, vaid määrab ära kütuse koguse, mis oleks piisav, et tuumalõhustumisel tekkivad neutronid algataks uue tuuma-lõhustumise reaktsiooni. Kui mass on kriitilisest massist väiksem, siis ei ole võimalik ahelreaktsiooni tekitada, sest paljud neutronid lahkuvad materjalist ilma järgmist lõhustusmist tekitamata. Tuumkütuse kriitilist massi on võimalik alandada näiteks tuumkütusest välja kiiratud neutronite tagasipeegeldamisega või siis tuumkütuse tihendamisega. Mõlemad suurendavad tõesnäosust, et lõhustusmise tulemusena vabanenud neutronid tabavad mõnda tuumkütuse tuuma ja põhjustavad järgmise lõhustumise.

Tuumapommi valmistamine tundub lihtne, sest ahelreaktsiooni käivitamiseks tuleb kokku saada teatav minimaalne kogus ehk kriitiline mass ainet. Omades seda vajalikul hulgal, tuleb tuumapommi osad hoida teineteisest lahus, kusjuures kummagi tüki mass peab olema kriitilisest väiksem. Kui need siis vajalikul hetkel kokku viia, tekibki plahvatuslik ahelreaktsioon.

Näiteks uraan-235 sisaldavates tuumapommides kasutatakse ahelreaktsiooni algatamiseks tavalõhkeainega tekitatud plahvatust, mis põhjustaks kahe uraanist poolkera liikumise kokku. Mõlema poolkera mass on kriitilisest massist väikem, nende kahe poolkera mass kokku on aga üle kriitilise massi. Plutooniumi korral ei saa aga sama moodust rakendada, sest seal käivitub reaktsioon juba teise plutooniumitüki liikumise käigus, mistõttu osa plutooniumist saastub, enne kui õige ahelreaktsioon jõuab käivituda. Seepärast mõeldi plutooniumi jaoks välja teine ja hoopis tõhusam võimalus – sissepoole suunatud plahvatus. See on kasulik ka tuumaaine kokkuhoiu mõttes, sest tuumaaine kokkusurumisel selle tihedus suureneb, mistõttu plahvatuseks vajalik kriitiline mass väheneb. Tänapäeval kasutatakse tuumade lõhustumisel töötavates pommides peaaegu eranditult viimast meetodit.



Joonis 3.2. „Fat Man“-tüüpi tuumapommi ehitus (Atomicarchive)

Uraani isotoopi U-235 on looduslikus uraanis ülimalt vähe – keskmiselt ainult üks aatom 140 uraani isotoobi U-238 kohta. Kergema isotoobi eraldamine on aga ülimalt kallis ja keeruline. Esimese uraanipommi tegemiseks vajaliku, umbes 25 kilogrammi uraani eraldamine võttis aega ligi kolm aastat. Kui tuumareaktori saab põhimõtteliselt tööle panna ka looduslikul uraanil, kus lõhustuvat isotoopi on ainult 0,7 protsenti, siis pommiuraanis peab U-235 osa olema üle 90 protsendi. Teine oluline tuumamaterjal on plutooniumi isotoop Pu-239, mida aga looduses ei leidu ja mida saab toota ainult tuumareaktoris. Nii pandi ka USA-s tuumarelva väljatöötamise ehk nn Manhattani projekti raames 1942. aastal tööle salajane tuumareaktor, mis hakkas valmistama pommiplutooniumi.

Uraanituumade lõhustumine nende pommitamisel neutronitega avastati 1939. aastal. Ühe uraanituuma lõhustumisel vabaneb umbes 200 MeV energiat. Teades ühe uraanituuma lõhustumisel eraldunud energiat, võime välja arvutada, et 1 kg uraani kõigi tuumade lõhustumisel eraldub 80000 miljardit džauli energiat. Ahelreaktsiooni võimalikkust ennustati juba 1934. aastal. Uraanituuma lõhustumisel kildudeks lendab tuumast välja 2-3 neutronit. Soodsatel tingimustel võivad need neutronid neelduda teistes tuumades ning kutsuda esile nende lõhustumise. Kolme uraanituuma lõhustumisel vabaneb 6-9 uut neutronit, mis neelduvad uutes uraanituumades jne. Praktiliselt ei ole ahelreaktsiooni esile kutsumine siiski nii lihtne. Uraanituuma lõhustumisel vabanenud neutronid võivad esile kutsuda ainult uraani isotoobi U-235 tuumade lõhustumise. Isotoobi U-238 tuumade lõhustamiseks on nende energia liiga väike. Looduslikus uraanis on aga 99,3% U-238 isotoopi ja kõigest 0,7% U-235 isotoopi. Seega on ahelreaktsiooni esilekutsumise esimeseks võimaluseks uraani isotoopide eraldamine üksteisest ja suurtes kogustes puhta isotoobi U-235 saamine.

Ahelreaktsioon võib tekkida ainult küllalt suures uraanikoguses, sest väikeste mõõtmetega uraanitükist lendavad neutronid enasmasti välja, ilma et nad kohtuksid oma teel ühegi tuumaga. Väikseimat massi, mille korral võib tekkida ahelreaktsioon nimetatakse kriitiliseks massiks. Isotoobi U-235 kriitiline mass on mõnikümmend kilogrammi. Lihtsaim viis U-235 ahelreaktsiooni tekitamiseks on järgmine. Valmistatakse kaks metallilisest uraanist keha, kumbki massiga veidi alla kriitilise. Kui need kehad on eraldi, siis ahelreaktsiooni neis ei toimu. Kehade kiirel kokkuviimisel tekib neis aga ahelreaktsioon ja vabaneb hiigelsuur energiahulk. Tuumaplahvatuse energiat on väga raske kasutada rahuotstarbel, sest energia eraldumist on võimatu kontrollida ja reguleerida.

Chicago reaktori kõrval loetakse teiseks tuumaajastu algustähiseks esimest tuumarelva katsetust koodnimetusega Trinity. 16. juulil 1945 pandi USA tuumapommi projekti käigus J. R. Oppenheimeri juhtimisel Alamogordo polügoonil, New Mexico osariigis USA-s 20 m terastorni otsas plahvatama esimene plutooniumi tuumalõhestumisel põhinev pomm. Katse õnnestus ja tekkinud plahvatuse võimsus oli võrdne 20 kilotonni trinitrotolueeni (TNT) omaga, jättes maha kraatri kergelt radioaktiivse sulanud liivaga (trinitiit). Kuna

teadlased olid suhteliselt kindlad, et uraanil põhinev pommisüsteem töötab, siis seda enne kasutamist ei katsetatud. Plutooniumil põhineva süsteemi osas nii suurt kindlust ei olnud ning seepärast viidigi läbi katsetus.

Tuumakatsetused maailmas

Tuumapommi plahvatusel vabaneb palju energiat; mitu suurusjärku rohkem kui tavalise lõhkeaine plahvatusel. Näiteks tänapäeva termotuumapomm, mis kaalub umbes üks tonn, vabastab lõhkedes energia, mis on võrdne umbes miljoni tonni tavalõhkeaine plahvatusega. Tuumakatsetusi määratletakse nende läbi viimise eesmärkide alusel – kas tuumakatsetus viidi läbi sõjalistel või siis rahumeelsetel eesmärkidel.

Tuumapommid olid eelkõige seotud „külma sõjaga“. Nõukogude Liit jõudis tuumapommini aastaid varem kui oodati. Seda eelkõige tänu sellele, et üks ameerika füüsikutest edastas salaja andmeid. Selline juhtum soodustas edasist võidurelvastumist. Näiteks vesinikupommi katsetamiseni jõudis Nõukogude Liit varem kui Ameerika Ühendriigid. Tolle ajastu tüüpilist mõtteviisi iseloomustab Ameerika Ühendriikides valminud propagandafilm.

Maa-all läbi viidud tuumakatsetused moodustavad pea 75% tuumakatsetuste koguarvust. Keskkonnale avaldasid eelkõige mõju atmosfääris läbi viidud tuumakatsetused. Atmosfääris viidi läbi umbes 500 tuumakatsetust – umbes pooled viis läbi Ameerika Ühendriigid ning teise sama palju Nõukogude Liit. Samas atmosfääris tuumakatestusena tekkinud radionukliidid levisid palju laiematele aladele ning avaldavad mõju tänase päevani. Atmosfääris leiduvate antropogeensete radionukliidide põhiliseks allikaks ongi olnud tuumakatsetused atmosfääris. Enne katsetuste piiramise keelustamise lepingu vastu võtmist 1963. aastal pandi atmosfääris toime umbes 500 plahvatust ja pärast seda 1980. aastani veel mõned. Viimane atmosfääris toimunud tuumakatsetuse korraldas Hiina 1980. aasta oktoobris.

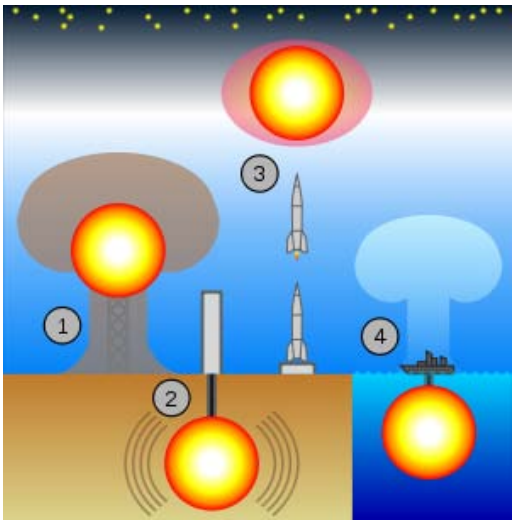
1960ndatel kui 1980ndate teise pooleni viisid nii Nõukogude Liit kui ka Ameerika Ühendriigid läbi ka tuumakatestusi rahumeelsetel eesmärkidel: ligi 2050-st tuumakatsetustest aastatel 1945 kuni 1996 oli neid umbes 150 (ehk siis ligikaudu 7%). Kuigi katsetused olid rahumeelsetel eesmärkidel, olid kasutatavad tuumarelvad samad ning mõjud keskkonnale ning inimkonnale samad, nagu teiste tuumapommide katsetamisel.

Endises Nõukogude Liidus viidi läbi kõige ambitsioonikam tuumakatsetuste programm rahvamajanduse arendamiseks. Aastatel 1965 kuni 1998 viidi selle programmi raames läbi üle 120 katsetuse. Programmi eesmärkideks oli näiteks seismilisete uuringute läbiviimine, kanalite ja maaaluste hoiualade loomine, gaasi- ja naftatööstusega seotud uuringud jne. 1961 aastast kuni 1973 aastani viisid Ameerika Ühendriigid läbi 27 tuumakatsetust. Üks esimesi soove oli kasutada vesinikupomme uue sadama loomiseks Alaskal. See jäi küll ellu

viimata, eelkõige seetõttu, et sellise võimaluse kasutamisega seotud riskid ja hind ei olnud piisavalt õigustatud võrreldes saadava tulemusega.

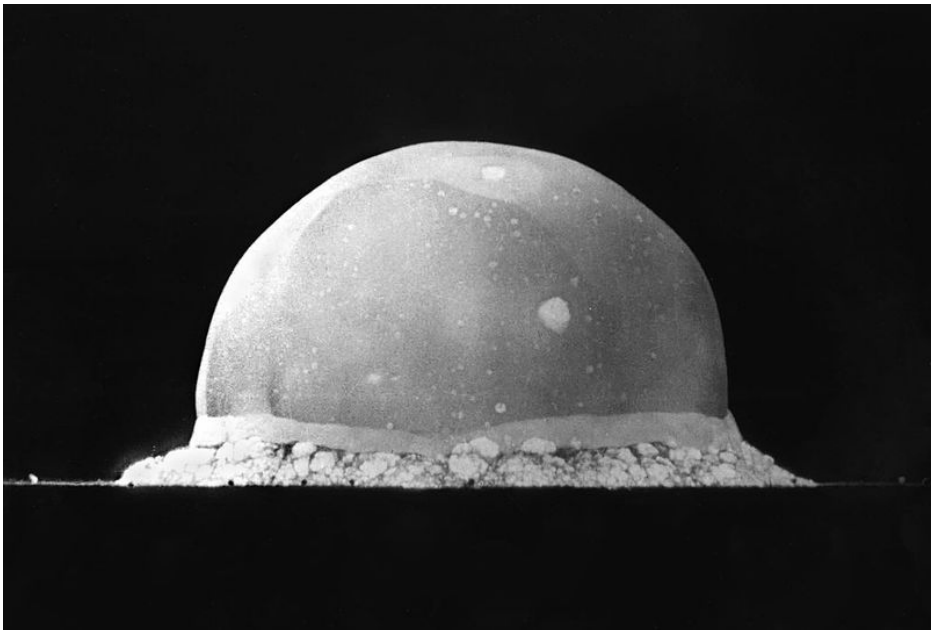
Tuumakatsetused

Tuumapommide katsetusi on viidud läbi erinevates keskkondades – veealuseid, maa-aluseid, atmosfääris ja avakosmoses. Kui tuumarelvi katsetatakse maapinna kohal, paisatakse atmosfääri ülakihtidesse erinevaid radionukliide alates vesinik-3st kuni plutoonium-241ni. Sealt liiguvad radionukliidid aeglaselt atmosfääri alakihtidesse ja edasi maapinnale. Pea 2/3 katsetuste tulemusena tekkinud saagisest langes põhjapoolkerale. Viimane on tingitud sellest, et enamik katsetusi viidi läbi ekvaatorist põhja pool ning kahe poolkera vaheline atmosfäärivahetus on väike.



Joonis 3.3. Tuumakatsetused erinevates keskkondades: (1) atmosfääris, (2) maa-alune, (3) avakosmoses ja (4) vee-alune (CTBTO kodulehekülg)

Kui tuumapommi plahvatus viiakse läbi umbes 600 meetri kõrgusel maapinnast, siis vabaneb suurel hulgal energiat ning sekundi murdosa jooksul aurustub plahvatusega kaasneva soojuse tõttu pea kõik, mis leidub ümbruskonnas. Aurustuda võivad nii lõhustumisproduktid, kasutamata jäänud kütus kui ka muud pommi osad, lühidalt - kõik, mis juhtub läheduses asuma. Kõik tõmmatakse tulepalli, mis suureneb ja tõuseb kiiresti. Tulekera raadius on umbes 300 meetrit. Kui see tulepall aga jahtub, algab kondensatsioon ning selle tagajärjel moodustub seenekujuline pilv, mis sisaldav väikeseid tahkeid osakesi ja ka veepiisku. Pommi võimusus ja meteoroloogilised tingimused määravad ära selle, kui kõrgele pilve tõuseb. 1 megatonnise võimsusega pomm võib põhjustada pilve tõusu kuni 40 km kõrgusele. 0,016 sekundit pärast esimese tuumapommi Trinity plahvatust nägi tulepall välja järgmine (ees oleval äärel on näha puude kujutused).



Joonis 3.4. Tulepall 0,016 sekundit pärast esimese tuumapommi Trinity plahvatust. Ees oleval äärel on näha puude kujutused (Wikipedia)

Tuumakatsetustega kaasnev lööklaine on väga suure hävitusjõuga. See lööklaine liigub 10 sekundi jooksul enam kui 3 kilomeetrit edasi ning hävitab pea kõik teele jääva. Sageli on tuumakatsetusega kaasneva lööklaine ja kõrgete temperatuuridega seotud kahjustused palju tõsisemad, kui otseselt ioniseeriva kiirguse poolt põhjustatavad kahjustused. Jaapanis hinnati Hiroshima ja Nagasaki puhul, et umbes 5-15% ohvritest põhjustas ioniseeriv kiirgus. Ülejäänud ohvrid olid tingitud eelkõige tule- ja lööklainest.

Tuumakatsetustest põhjustatud sadenemist võib iseloomustada kui kohalikku või ülemaailmset. Viimase määratleb peamiselt see, kui kõrgel maapinnast pomm lõhkes ja kas pilv ulatus maapinnale või mitte. Kui tulepall puutub maapinda, siis haarab ta endaga kaasa suurel hulgal pinnast ja tekitatud vaakumi tõttu ka muid asju. See aga põhjustab suurte osakeste tekkimise, mis sadenevad kiiresti lähimas ümbruses. Sadenemise puhul mängib suurt rolli ka tuule suund, kuid kohaliku sadenemise korral jõuavad saasteosakesed maapinnale 24 tunni jooksul peale plahvatust.

Kui tulepall aga ei puuduta maapinda, siis jäävad osakesed atmosfääri ja sadestuvad maapinnale suure hilinemisega, sellisel juhul on tegemist ülemaailmse sadenemisega. Suurema võimsusega pommide korral võib osa tuumakatsetuste ajal moodustunud radionukliididest kanduda stratosfääri (10-20 km kõrgusele) ning saaste võib tiirelda mitmeid kordi ümber maakera, maapinnale tagasi sadenemine võib alata isegi alles 5 aastat hiljem.

Militaarsetel tuumakatsetustel on mitmeid eesmärke. Näiteks annavad need katsetused aimu, et kuidas täpselt tuumarelvad töötavad, millised on mõjud erinevates tingimustes ning kuidas erinevad lähedalolevad struktuurid

reageerivad plahvatuse korral. Lisaks tehnilistele on tuumakatsetuste puhul alati oluline ka poliitiline aspekt.

Kahjuks leidis tuumapomm ka sõjalist rakendust, olgugi et selleks praktilist vajadust enam ei olnud. 6. augustil 1945 visati Hiroshimale uraanipomm Little Boy (väike poiss) ja kolm päeva hiljem Nagasakile plutooniumipomm Fat Man (paks mees). Mõlema võimsus oli ligikaudu 20 kilotonni.

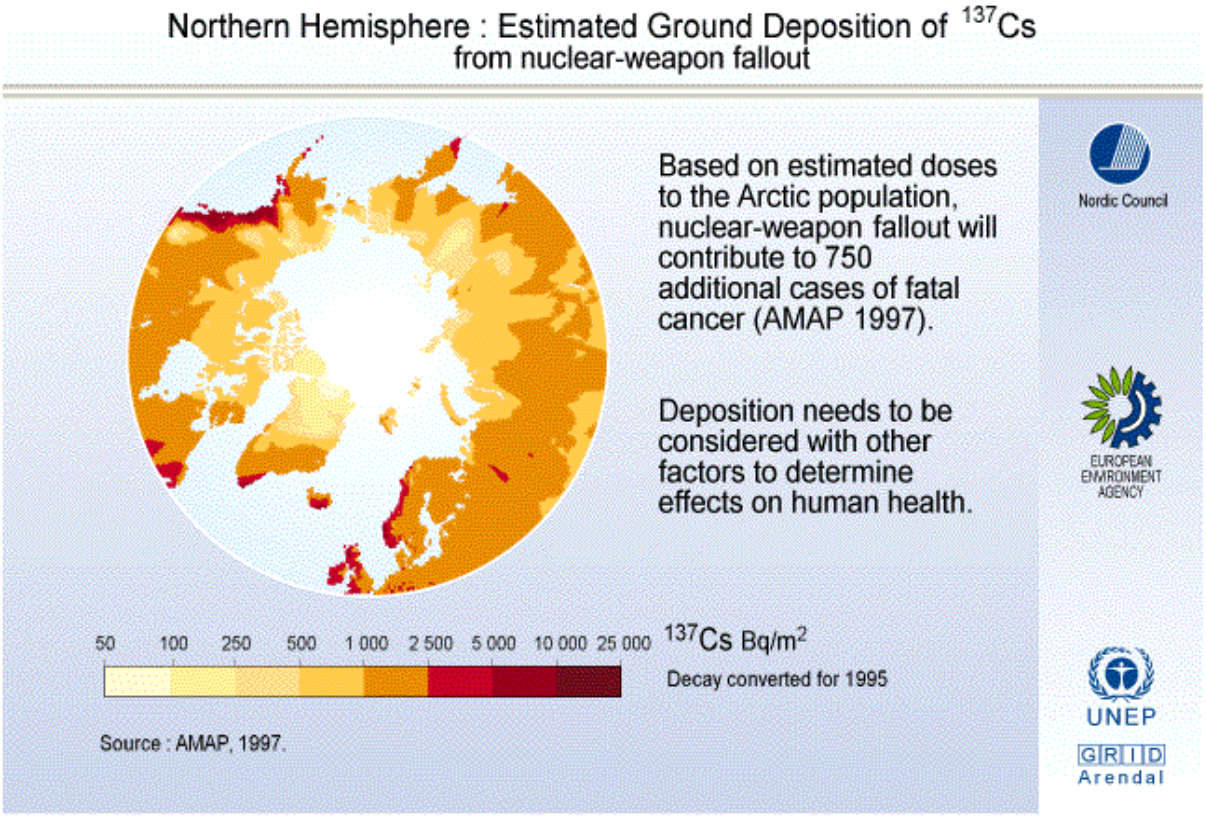
Sadestumine

Suuremat rolli elanikkonnale tekitatud doosis mängib ülemaailmne sadestumine. Kuna sadestumine hilineb, siis jõuavad osad lõhustumisproduktid vahepeal laguneda ja mõned uued ka juurde tekkida. Tuumakatsetuste tulemusena on tekkinud enam kui 200 erinevat lõhestumisprodukti, millede poolestusaeg varieerub sekunditest kuni miljonite aastateni. Kohaliku sadenemise puhul on esindatud enamus 200 radionukliidist. Selle mõju inimkonnale on võimalik vähendada sobilikke katsetuspaiku ning ilmastikutingimusi valides. Praegu on radionukliidide kontsentratsioon õhus, vihmas ja inimtoidus palju madalam kui 1960. aastatel.

Maailmas on praegu inimesele olulise kiirituse seisukohalt tähtsaimad katsetuste käigus tekkinud radionukliidid süsinik-14, strontsium-90 ja tseesium-137. Nende väikesed kogused satuvad kehasse toidu ja joogiga. Kuna neid radionukliide on sadenenud ka pinnasele, kust osaliselt on nad liikunud pinnasesse, siis nende radionukliidide jääkaktiivsus põhjustab samuti inimesele mõningat kiirgust.

Sise- ja väliskiirgus tõstavad võrdselt maailma keskmist efektiivdoosi 0,005 mSv võrra aastas. Seda tuleks võrrelda järsu tõusuga kuni 0,1 mSv 1963. aastal. Määratletud on mõned inimrühmad, kes saavad globaalsest radioaktiivsest tolmust märgatavalt kõrgemaid doose. Näiteks avastati 1960. aastatel, et Põhja-Euroopa ja Kanada põhjapõdrakarjused saavad oluliselt kõrgemaid doose kui ülejäänud inimesed, sest nad söövad samblikust toituvate loomade liha – samblik on väga tõhus õhust tseesium-137 koguja. Eeldades, et maailma elanikkond on 6 miljardit inimest, siis hinnatakse tuumarelvakatsetustes tekkinud radioaktiivsest tolmust saadud globaalne kollektiivdoos on umbes 30 000 inimsiivertit aastas.

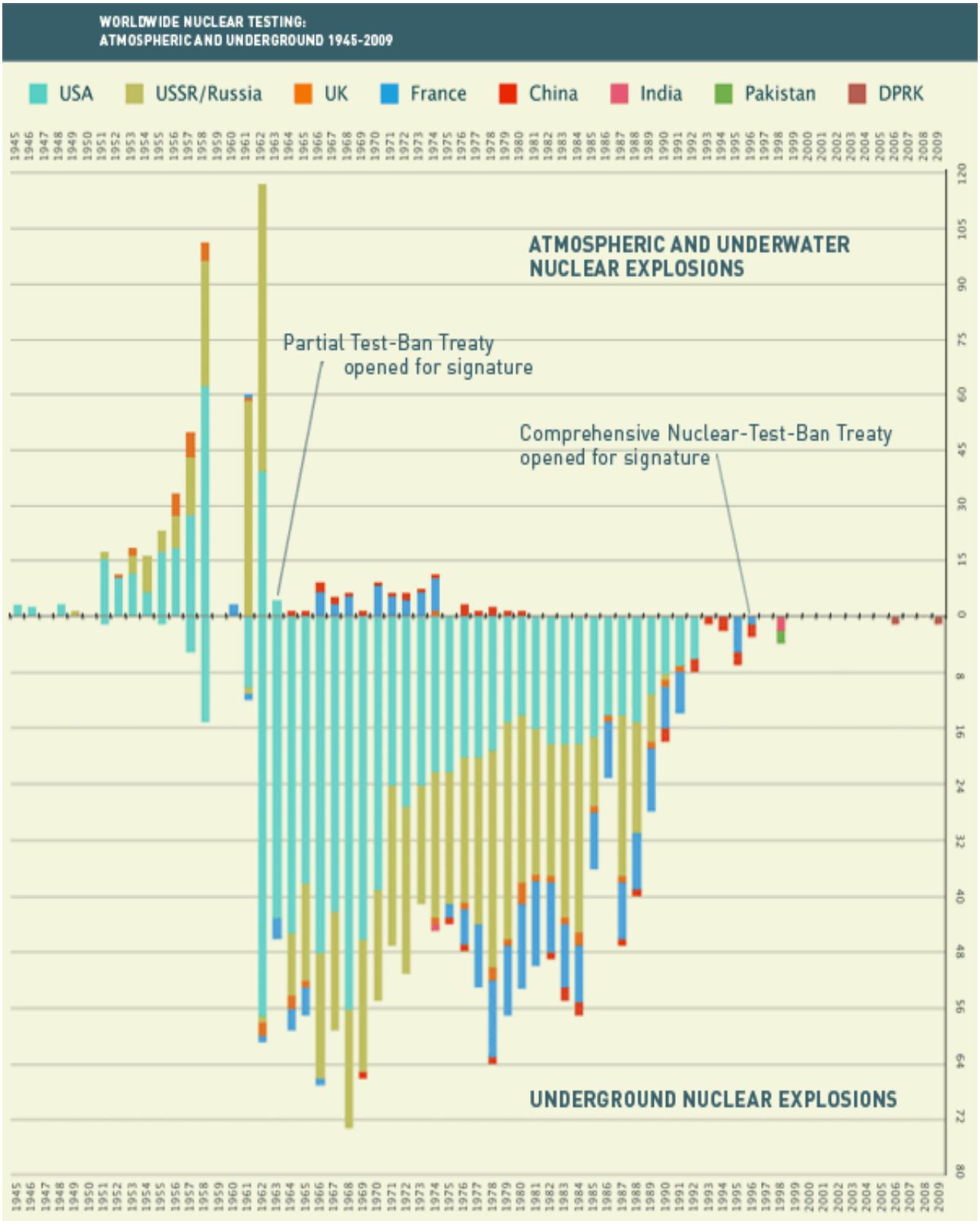
Kuna kahe erineva Maa poolkera vahel on atmosfäärivahetus väike, siis sadestub valdav osa radionukliide samal poolkeral, kus ta tekib. Võttes arvesse, et enamus tuumakatsetustest atmosfääris viidi läbi põhjapoolkeral, siis on olnud sadenemine seal ka suurem kui lõunapoolkeral.



Joonis 3.5. Atmosfääris läbiviidud tuumakatsetustest põhjustatud Cs-137 sadenemine põhjapoolkeral (Artic Monitoring and Assessment Programme)

Tuumakatsetuste moratoorium

1950ndate keskpaigaks olid nii Nõukogude Liit kui ka Ameerika Ühendriigid alustanud tuumakatsetustega atmosfääris. Nende katsetuste tulemustena tekkinud radionukliidide sadenemine põhjustas ülemaailmse kriitikalaine ning selle tulemusena jõuti esmase osalise tuumakatsetuste keelustamise leppeni. Pärast Stalini surma sai Nõukogude Liidus võimule Hruštšov, kes tegi ettepaneku piirata tuumakatsetusi. Erinevad läbirääkimised viisid selleni, et aastal 1963 kirjutati alla leping, mis keelustas tuumakatestused kosmoses, atmosfääris ja vee all. Lepinguga ei ühinenud Prantsusmaa ja Hiina, kes viisid oma viimased tuumakatsetused atmosfääris läbi vastavalt aastatel 1974 ja 1980. Katsetusi oli lubatud läbi viia maa all. Eelkõige oli selle keelu eesmärgiks välistada radionukliidide sadenemist keskkonda. Kuigi lepingu tulemusena sadenemine keskkonda tõepoolest vähenes, siis tegelikult tuumakatsetuste arv mitte.



Joonis 3.6. Tuumakatsetused aastate ja riikide lõikes (CTBTO andmetel)

Alates 90-ndatest, kui lõpule jõudis ka „külma sõja“ periood, paranesid suhted Ameerika Ühendriikide ja Nõukogude Liidu/Vene Föderatsiooni vahel ning lõppes võidurelvastumine. Selles ajast hakkas märkimisväärselt vähenema nii tuumakatsetuse arv kui ka tuumarelvade arv.

Tabel 3.1. Tuumarelvade arsenali hinnang

Riik	Tuumarelvade arv
Hiina	410
Prantsusmaa	464
India	Üle 60
Iisrael	Üle 200
Pakistan	15-25
Venemaa	Umbes 10 000
Suurbritannia	185
Ameerika Ühendriigid	Umbes 10 500

1990 tegi Nõukogude Liit ettepaneku kehtestada tuumakatsetuste moratoorium. Sellega ühinesid Ameerika Ühendriigid ja Ühendkuningriik. Nõukogude Liit viis viimase tuumakatsetuse läbi 24. Oktoobril 1990, Ühendkuningriik 26. Novembril 1991 ja Ameerika Ühendriigid 23. Septembril 1992. Hiina ja Prantsusmaa viisid oma viimased tuumakatestused läbi aastal 1996. Pärast erinevaid läbirääkimisi avas ÜRO tuumakatsetuste keelustamise lepingu allkirjastamiseks 24. septembril 1996. Tuumakatsetuste keelustamise leping keelab kõik tuumaplahvatused erinevates keskkondades. Samal päeval kirjutasid lepingule alla tuumarelva omavatest riikidest Ameerika Ühendriigid, Vene Föderatsioon, Hiina, Prantsusmaa ja Ühendkuningriik. Lisaks neile allkirjastasid lepingu veel 66 riiki. Alates 1996 aastast on tehtud palju tööd, et leping saaks juriidiliselt kohustuslikuks, kuid kahjuks pole erinevatel põhjustel leping tänaseni täies ulatuses jõustunud.

Aastatel 1998 kuni 2009 viidi läbi mitu tuumakatsetust. India ja Pakistan viisid aastal 1998 mõlemad läbi kaks tuumakatestust. Põhja-Korea Rahvavabariik viis aastal 2006 läbi kaks ning aastal 2009 veel ühe tuumakatsetuse. India ja Pakistan teatasid aga mõlemad pärast 1998 aasta katsetusi, et rohkem nad neid läbi ei vii.

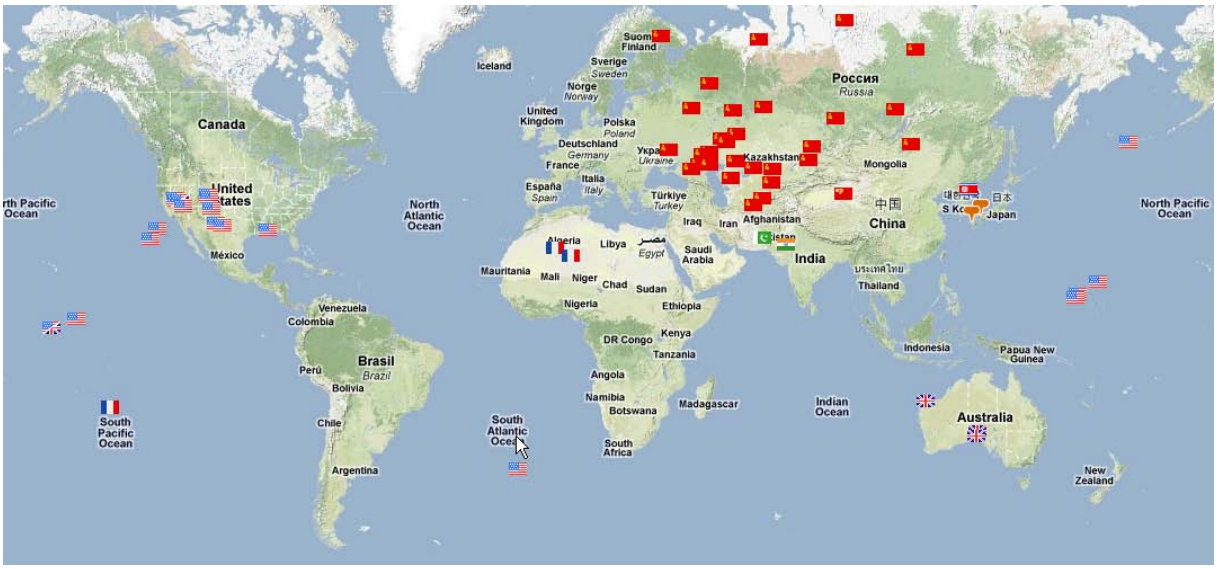
Tuumakatsetused

- Ameerika Ühendriigid – 1032 tuumakatsetust aastatel 1945 kuni 1992
- Nõukogude Liit – 715 tuumakatsetust aastatel 1949 kuni 1990
- Ühendkuningriik – 45 tuumakatsetust aastatel 1952 kuni 1991
- Prantsusmaa – 210 tuumakatsetust aastatel 1960 kuni 1996
- Hiina – 45 tuumakatsetust aastatel 1964 kuni 1996
- India – 2 tuumakatsetust aastal 1998
- Pakistan – 2 tuumakatsetust aastal 1998
- Põhja-Korea – 2 tuumakatsetust aastatel 2006 kuni 2009

Tuumakatsetuste asukohad

Läbi on viidud üle 2050 tuumakatsetuse erinevates paikades. Ameerika Ühendriigid, Nõukogude Liit ja Hiina viisid katsetused läbi enda territooriumil. Samas Prantsusmaa viis tuumakatsetusi läbi näiteks ka Sahaara kõrbes ja Prantsuse Polüneesias Vaikses ookeanis. Ühendkuningriigid viisid valdava osa oma tuumakatsetustest läbi koostöös Ameerika Ühendriikide või siis Austraaliaga. Valdav osa tuumakatsetustest viidi läbi hõredalt asustatud piirkondades.

- Nevada (USA) – üle 900 tuumakatsetuse
- Semipalatinsk (Kasastan, endine Nõukogude Liit) – üle 450 tuumakatsetuse
- Vaikne ookean (Prantsuse Polüneesia) – üle 190 tuumakatsetuse
- Novaya Zemlya (Venemaa, endine Nõukogude Liit) – 130 tuumakatsetust
- Lop Nur (Hiina) – 45 tuumakatsetust



Joonis 3.7. Tuumakatsetuste asukohtade kaart (CTBTO kodulehekülg)

Jaapani kunstniku Isao Hasimoto poolt koostatud ülevaade ajaperioodil 1945-1998 toimunud tuumakatsetustest.

Kuigi valdav osa riikidest on tänaseks tuumakatsetuste keelustamise moratooriumiga ühinenud, siis on ikkagi riike, kes soovivad omada ja katsetada tuumarelva. Selleks, et oleks võimalik salaja korraldatavaid tuumakatsetusi avastada, on loodud rahvusvaheline mõõtejaamade võrgustik. Selles võrgustikus olevate mõõtejaamade asukohti võid näha sellel kaardil. Tuumapomme loetakse massihävitusrelvadeks ning nende kasutamise tõkestamine on tänapäeva rahvusvahelise poliitika üks peaeesmärke.

4. Kiirgusallikad tööstuses

Selle teema käigus saad vastused järgmistele küsimustele:

- Miks kasutatakse kiirgusallikaid tööstuses?
- Kus kasutatakse kiirgusallikaid tööstuses?
- Kuidas toimub tootmisprotsessi kontoll kiirgusallika abil?
- Mis on radiograafia?
- Kuidas steriliseeritakse kiirgusallikate abil?
- Milleks veel kiirgusallikaid kasutatakse?

Sissejuhatus

Tavaliselt me isegi ei mõtle selle peale, et meie igapäevases elus on päris palju tooteid, mille valmistamisel või mille tootmises/arendamises on kasutatud kiirgusallikaid. Seega tavaliselt ei suuda me tähtsustada kiirgusallikate olulisust meie elus. Võtame näiteks kontaktläätsed, mida kasutatakse palju. Selleks et müügil olevad kontaktläätsed ei oleks saastunud erinevate bakteritega sterileeritakse toodetud kontaktläätsed enne müügile saatmist. Väga sageli kasutatakse steriliseerimiseks kiirgusallikaid. Kui kontaktläätsede asemel vaadelda prille, siis sageli kasutatakse prilliklaaside valmistamisel niiskuse kontrollimisel kiirgusallikaid. Kiirgust kasutatakse väga paljudes valdkondades ning tänu kiirguse kasutamisele on paljud tooted palju kättesaadavamad. Kiirgusallikate kasutamine tööstuses sai alguse 1950ndatel aastatel, samaaegselt tuumaenergeetika arenguga.

Ioniseeriva kiirguse ja radioaktiivsete ainete omadused võimaldavad neid kasutada erinevates tööstusvaldkondades. Olulisemad nende erinevate omaduste hulgas on läbitungimisvõime ning mõõtmiste lihtsus. Ioniseeriva kiirguse allikate ja radioaktiivsete ainete kasutamine põhineb ioniseeriva kiirguse vastastikmõjul. Tänapäevane tööstus on orienteeritud eelkõige suurte koguste tootmisele, sest see võimaldab hoida tootmise (seega ka toote) hinda madalal. See aga omakorda nõuab vahendeid, mis oleks vastupidavad ning suudaks tagada kiire töötempo. Olulise osa moodustab ka kvaliteedi kontoll, seda enam, et väga paljudes valdkondades on toodetele või nende erinevatele osadele mitmeid pakkujaid. Kuna ioniseeriv kiirgus on võimeline materjale läbima, siis saab teda väga edukalt kasutada erinevate mõõtmiste käigus ning nende kasutamisel ei ole vajalik otsene kontakt materjaliga. See võimaldab näiteks mõõta ka siis, kui mõõdetavad objektid ise on liikumises.

Tootmisprotsessi kontroll

Tehnilise protsessi järgimiseks kasutatakse nii statsionaarseid kui ka mobiilseid kiirgusallikaid. Statsionaarsed on näiteks nivoomõõturid, mis on kasutusel paljudes katlamajades, et jälgida põletuskatelde täituvust. Kiirgusallikaid kasutatakse ka atmosfääris tolmu või niiskuse mõõtmiseks ning sel juhul on töös peamiselt mobiilsed kiirgusallikad.

Kaasaegse tootmise väga oluliseks osaks on kvaliteedikontroll. Seda eelkõige siis, kui tootmine toimub erinevates kohtades ning valmistamisel kasutatav toore või osad tarnitakse erinevatest firmadest/riikidest ning oluline on tagada lõpptoote kvaliteet. Ioniseeriva kiirguse kasutamisega on võimalik hõlbustada järelvalvet toodete kvaliteedi üle.

Tootmisprotsessides kasutatakse kiirgusallikaid järgmistel eesmärkidel:

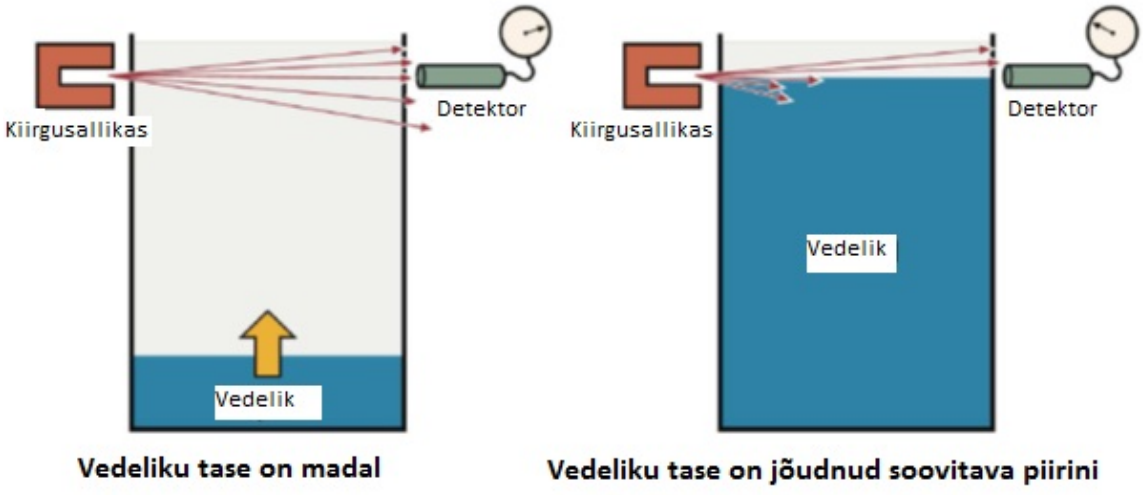
- Tiheduse määramine;
- Nivoo tuvastamine;
- Paksuse kontroll;
- Niiskuse määramine;
- Niiskuse kontroll jne.

Mitmete tootmisprotsesside puhul on oluline mõõta näiteks vedeliku taset anumates, küttematerjali hulka katlas, kasutatavate materjalide tihedust jne. Ioniseeriva kiirguse abil on võimalik läbi viia mõõtmisi, mis ei vaja füüsilist kontakti, see aga võimaldab läbi viia mõõtmisi reaalajas, kusjuures mõõdetavas asjad võivad liikuda. Näiteks erinevate anumate täitmisel vedelikuga on sellised tingimused vajalikud, sest villimise või konserveerimise protsessi puhul on oluline selle toimumise kiirus. Karastusjookide toomisel on tegemist suurte mahtudega, kuid enne pudelite pakendamist tuleb tagada, et karastusjookide pudelid on täidetud. Karastusjookide villimisel kasutatakse sageli kiirgusallikaid pudelite kontrollimisel – et kas karastusjoogi hulk pudelis vastab normidele. Vaevalt, et kellelegi meeldiks leida poest limonaadipudel, mis on ainult pooles ulatuses limonaadiga täidetud.

Joonis 4.1. Karastusjookide tootmisliin A Le Coqi tehases (autori foto)

Kuidas see protsess toimub? Nivooandurite töö põhimõtteks on kiirguse neeldumine materjalides. Tootmisliinist ühel pool asub kiirgusallikas ning teisel pool andur. Kiirgusallikas ja andur paigutatakse tasemele, mis vastab konteineri täituvusele. Tootmisliinil liikuvad konteinerid liiguvad kiirgusallika ja anduri vahelt läbi. Kui konteineri täitematerjali (kas siis vedelik või tahke aine) hulk on piisav, et ületada tase, kus asuvad detektor ja kiirgusallikas, siis neeldub osa kiirgusest selles materjalis ning detektorisse jõudev signaal väheneb oluliselt. Sellega saadetakse elektriline signaal kontrollkeskusesse märkimaks, et konteiner on täidetud. Kui täitematerjali on vähem, siis kiirgusallikast lähtuv

kiirgus jõuab pea neeldumiseta andurini. Sellisel juhul edastatakse kontrollkeskusesse signaal, et tegemist on ebapiisavalt täidetud konteineriga ning see kõrvaldatakse tootmisliinilt.



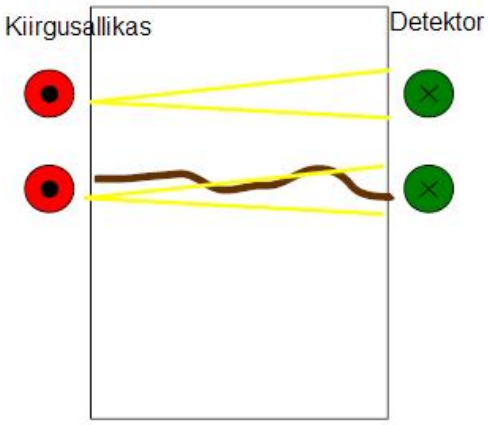
Joonis 4.2. Nivooanduri tööpõhimõte (Alan Walter)

Joonis 4.3. Nivooandur Saku Õlletehases (Keskkonnaamet)

Sarnast protsessi kasutatakse laialdaselt erinevates soojuselektrijaamades, mille kateldes põletatakse erinevaid materjale (näiteks puitu või põlevkivi).

Joonis 4.4. Nivooandur katlamajas (Keskkonnaamet)

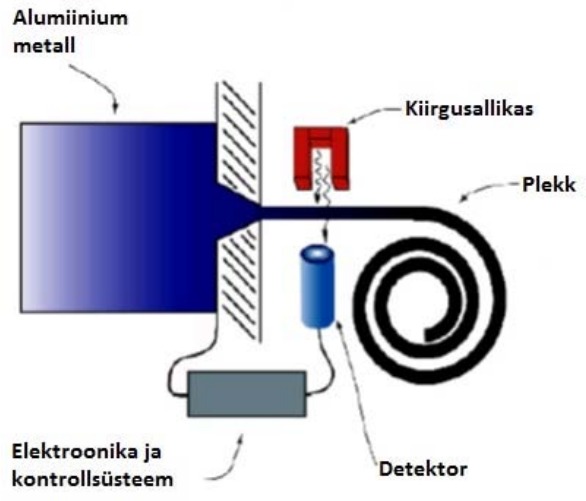
Katelde puhul on oluline tagada, et neis oleks piisavalt materjali põlemisprotsessiks ning samas ei tohi neid liialt materjaliga täita. Selle tagamiseks kasutatakse katelde puhul sageli kahte nivooandurit. Alumine tagab selle, et oleks tagatud minimaalne täituvus ning ülemine kontrollib seda, et katel ei saaks liialt täidetud. Nivooandurite kasutamine võimaldab katelde automaatset kasutamist. Anduritest minevate signaalide abil toimub küttematerjali lisamine või siis lisamise protsessi peatamine.



Joonis 4.5. Kahe nivooanduri kasutamine (Rahvusvahelise Aatomienergia-agentuuri juhendmaterjalid)

Kiirgusallikaid kasutatakse ka erinevate materjalide tootmisel. Sarnaselt nivooanduritega kasutatakse kiirguse neeldumise omadust paksusandurite puhul. Paksusandureid kasutatakse erinevate materjalide (paber, metall, tekstiil jne) tootmisel ühesuguse paksuse tagamiseks. Paksusandur koosneb samuti kiirgusallikast ning andurist. Nende vahelt liigub läbi toodetud materjal. Tänu kiirguse neeldumise mõõtmise võimalusele on lihtne kontrollida materjali paksust. Kui materjali paksus erineb ettenähtust, siis edastatakse automaatne signaal kontrollkeskusesse. Näiteks kasutatakse liivapaberi tootmisel paksusandurit kolm korda. Esmalt aluspaberi tootmisel kontrollitakse selle

kvaliteeti piisava vastupidavuse tagamiseks. Siis järgmise sammuna kasutatakse paksusandurit aluspaberile lisatava liimikihi paksuse kontrollimiseks ning viimase etapina kasutatakse paksusandurit lisatavate „kareduse“ kvaliteedi tagamiseks. Ehituspoodides on võimalik leida erineva karedusega liivapabereid. Paberit toodetakse erineva paksusega ning kvaliteedi kontrollimiseks kasutatakse kiirgusallikat sisaldavat paksusandurit. Tootmisprotsesside kiiruse tagamine oleks pea võimatu ilma kiirgusallikaid kasutamata.



Joonis 4.6. Paksusanduri kasutamine plektitootmisel (Alan Walter)

Kiirgusallikad on tegelikult väga väikeste mõõtmetega, alljärgneval pildil on ühes nivooanduris sisalduv kiirgusallikas.

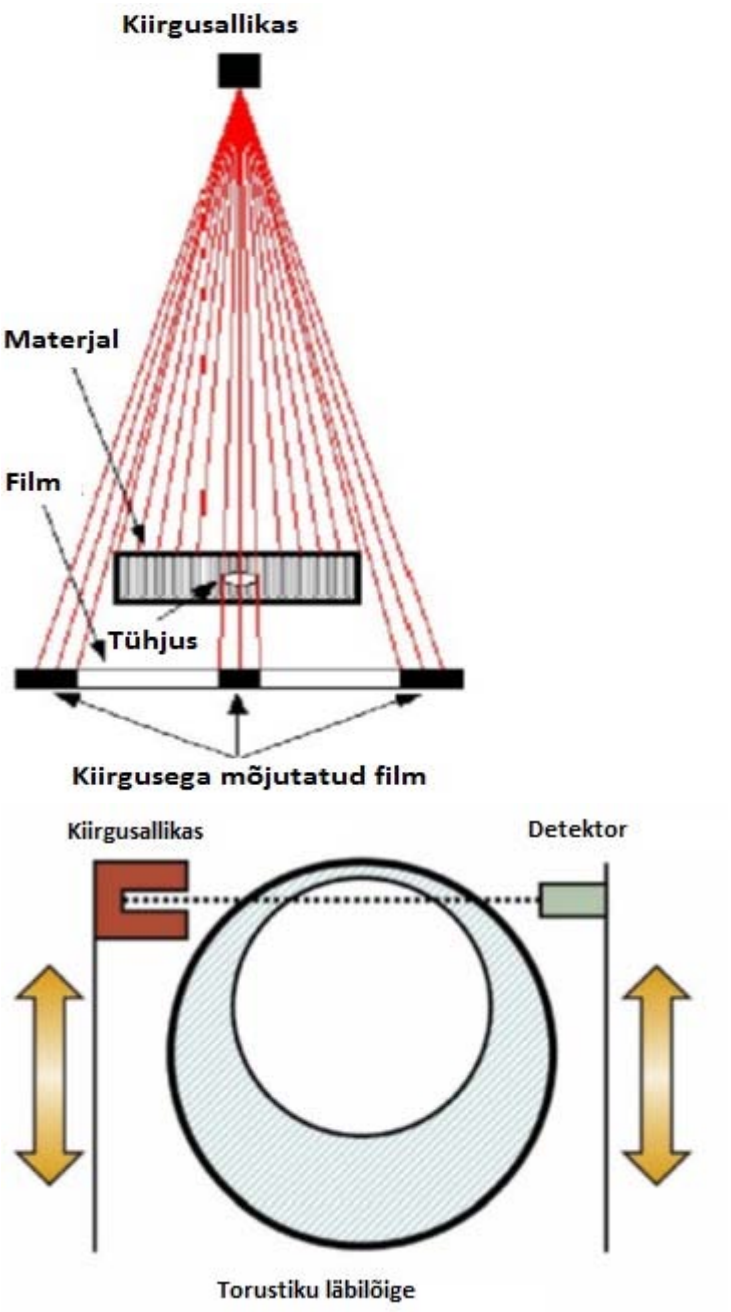
Joonis 4.7. Nivooanduris kasutatav kiirgusallikas (Rahvusvahelise Aatomienergia-agentuuri juhendmaterjalid)

Radiograafia

Kuna kiirgusallikate puhul on võimalik erinevate materjalide kvaliteedi kontroll ilma otsese kokkupuuteta, siis kasutatakse kiirgusallikaid ka kasutatavate masinate, torustike jne kvaliteedi kontrolliks. Kiirgusallikaid kasutatakse ka lennukite kvaliteedi tagamiseks. Me kõik tahame, et lennureis oleks ohutu ning lennuki valmistamisel ning ka pärastisel kasutamisel viiakse läbi erinevaid kvaliteedikontrolle. Näiteks lennukitiibade valmistamisel tuleb tagada, et

materjali tihedus ei oleks väga suur. Juhul kui see on liialt suur, on nende mass ka suur ja see võib edaspidi takistada lennuki õhutõusmist. Selleks kasutatakse tihedusandureid. Samuti kasutatakse lennukite puhul keevisliideste kvaliteedi kontrolliks radiograafiat.

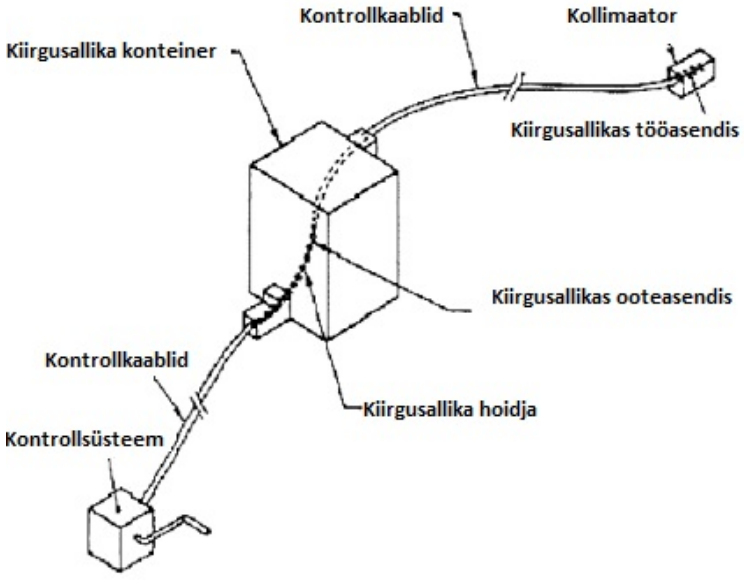
Radiograafia on sisuliselt erinevate asjade „pildistamine“ röntgenkiirguse või gammakiirgusega. Oluline on regulaarselt kontrollida kasutatavaid masinaid ning tuvastada erinevad rikked. Valmivatelt „fotodelt“ on näha materjalide kvaliteet. Samuti kasutatakse kiirgusallikaid keevisliidete kontrolliks. Sisuliselt on radiograafia analoog meditsiinis kasutatavatele röntgenpiltidele – lihtsalt inimese asemel on siis mingi seade või materjal.



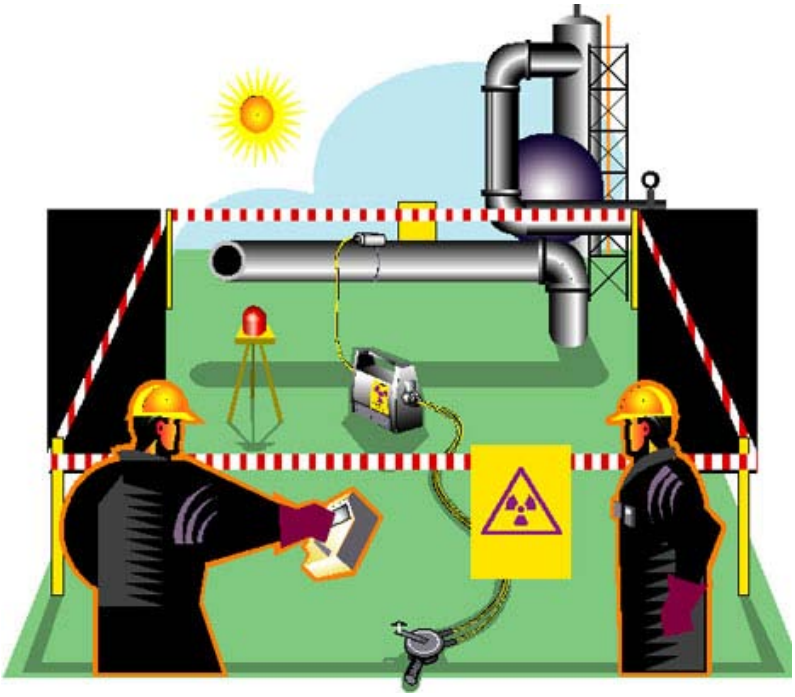
Joonis 4.8. Tööstusliku radiograafia kasutmine materjalide kontrolliks (Rahvusvahelise Aatomienergiaagentuuri juhendmaterjalid)

Joonis 4.9. Tööstuslikus radiograafias kasutatavate kiirgusallikate mõõtmed (Rahvusvahelise Aatomienergiaagentuuri juhendmaterjalid)

Eelneval pildil on näha erinevaid kiirgusallikate tüüpe radiograafias. Olenevalt eesmärgist, milleks radiograafiat kasutatakse, valitakse ka kiirgusallikad. Paksemate metallide kvaliteedi uurimiseks on vaja suurema aktiivsusega kiirgusallikaid. Gamma radiograafias on peamiselt kasutusel isotoop Ir-192. Transpordi ja hoiustamise ajal on kiirgusallikas varjestuskonteineris. Kasutusele võtmisel liigutatakse kiirgusallikas tööpositsiooni ning töö lõpetamisel liigutatakse jälle konteinerisse tagasi. Kiirgusohutuse tagamiseks toimub liigutamine kaugjuhtimise teel. Tavaliselt tehakse radiograafiat välistingimustes.



Joonis 4.10. Radiograafia seadme tööpõhimõte (Rahvusvahelise Aatomienergia-agentuuri juhendmaterjalid)



Joonis 4.11. Radiograafia kasutamine (NRPA koduleheküg)

Näide mobiilsest radiograafia seadmest. Seadme kaal on alla 50 kg ning see võimaldab suhteliselt lihtsat transportimist. Tavaliselt on kasutusel Ir-192 aktiivsusega kuni 3.7 TBq. On ka suuremate mõõtmetega mobiiliseid seadmeid ja nende puhul kasutatakse peamisel ratastega aluseid, et oleks lihtsam seadet liigutada.

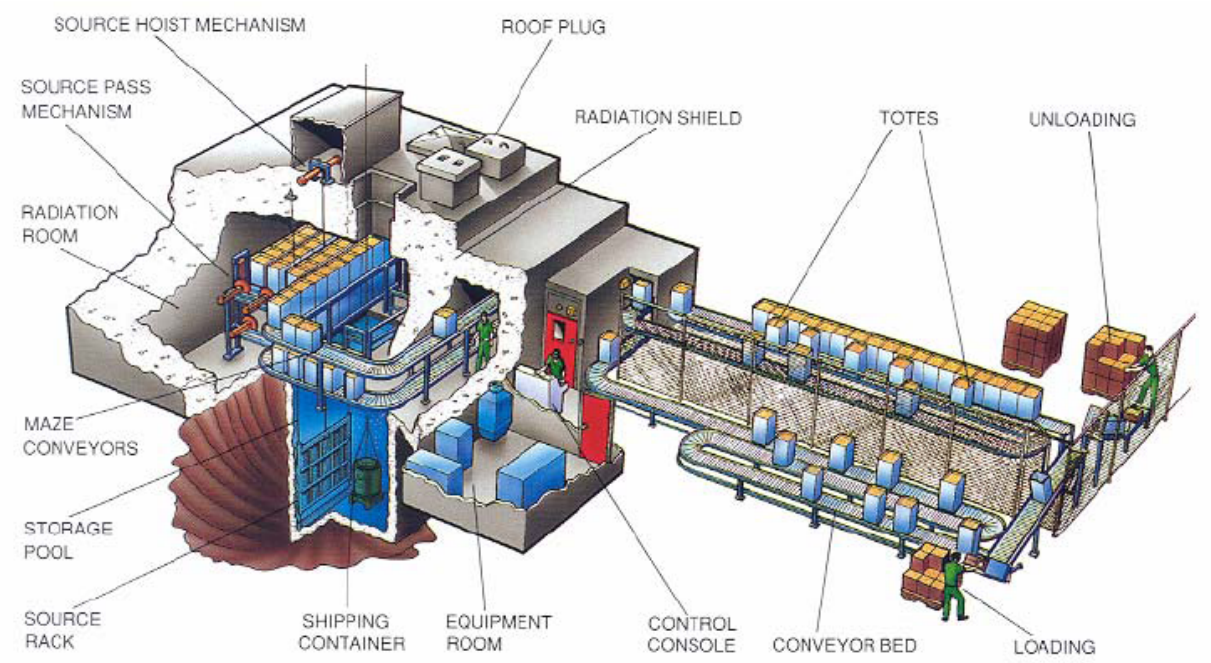
Joonis 4.12. Kaasaskantav radiograafia seade (Rahvusvahelise Aatomienergia-agentuuri juhendmaterjalid)

Joonis 4.13. Eestis kasutusel olev radiograafiaseade (Keskkonnaamet)

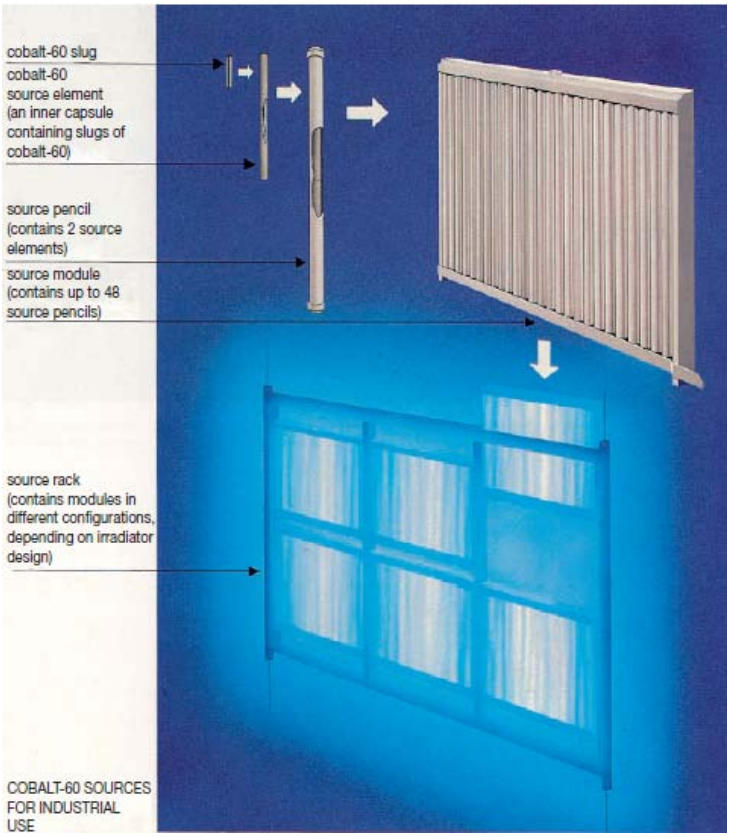
Steriliseerimine

Steriliseerimise abil on võimalik vähendada bioloogilist saastatust meditsiini- või toiduainepakenditel, töödelda maitseaineid (muude toidukaupade töötlemine bioloogilise saastuse vähendamiseks ja säilivusaja pikendamiseks on Euroopa Liidus keelatud, kuid mujal maailmas laialt levinud). Steriliseerimise tulemusena ei tohi ühe miljoni eseme kohta olla üle ühe elava mikroorganismi. Steriliseerimiseks on võimalik kasutada erinevaid meetodeid: kuumutamine, aurutamine, ioniseeriv kiirgus jne. Plastikesemete steriliseerimiseks on kiirgus kõige sobivam.

Eestis kasutatakse steriliseerimiseks Co-60 kiirgusallikat ning tegevus toimub ligi 170 cm paksuste seintega betoonist punkris (kiirguskambris) gammakiirgusega, mille eesmärgiks on bioloogilise saastatuse vähendamine (steriliseerimine). Eelkõige töödeldakse mitmesuguseid ühekordselt kasutatavaid meditsiinitarbeid, nt süstlad, sondid, verealused, plaastrid, haavapuhastusvahendid jne.



Joonis 4.14. Steriliseerimistehase skeem (Rahvusvahelise Aatomienergiaagentuuri juhendmaterjalid)



Joonis 4.15. Sterilisatsioonitehases kasutatavad kiirgusallikad (Rahvusvahelise Aatomienergiaagentuuri juhendmaterjalid)

Meditsiiniasutustes igapäevaselt kasutatavad riided, kirurgilised kindad, süstlad jne steriliseeritakse, et tappa mikroorganismid. Kuna kiirgusega sterilisatsioon ei

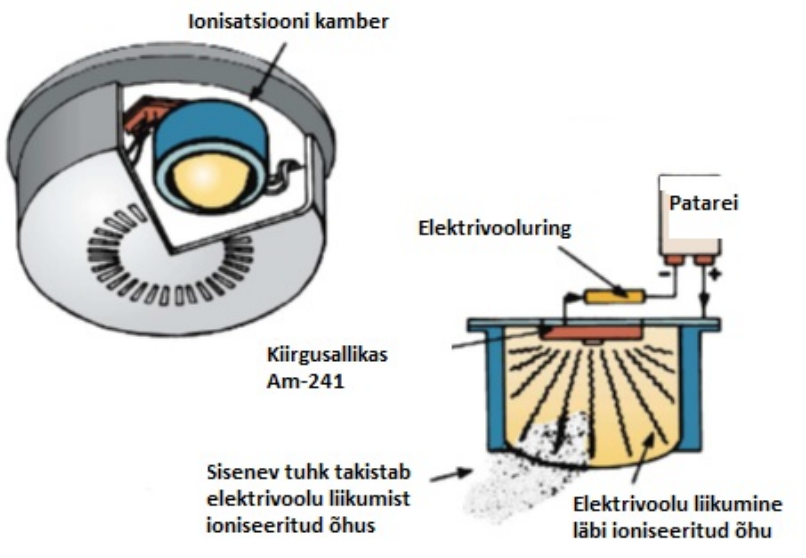
põhjusta toodete temperatuuri tõusu, siis on kasutusvaldkond lai. Oluline eelis kiirgusega steriliseerimiseks on ka see, et steriliseerida saab pärast pakendamist ning koos pakenditega. Seega on protsessi hind odavam.

Ehitus ja tarbeesemed

Erinevate ehitusprojektide (olgu siis selleks suured maanteed, sillad, pilvelõhkujad) puhul on oluline tagada korralik vundament. Alustoestuse kvaliteedi tagamiseks kasutatakse sageli niiskus- ja tihedusandureid, mis sisaldavad kiirgusallikat. Tavaliselt on kasutusel kas siis Cs-137 või Co-60 sisaldav kiirgusallikaid. Pinnasesse tehakse väikese läbimõõduga puurauk ning seda mööda liigutatakse kiirgusallikat. Andur on tavaliselt maapinnal ning selleni jõudva kiirguse hulk sõltub pinnase tihedusest. Kui tihedusandurit kasutatakse õhukeste kihtide mõõtmisel (näiteks asfaldi tiheduse kontrolliks), siis asetatakse kiirgusallikas selle materjalikihi peale ning anduriga registreeritakse tagasipeegeldunud kiirgus, mille kaudu omakorda on võimalik hinnata materjali tihedust. Niiskusandurite puhul kasutatakse eelkõige neutronallikaid. Kiirgusallikast väljunud neutronid aeglustuvad, kui nad kohtuvad vesiniku aatomitega (mis omakorda on veemolekuli osa). Mõõtes siis anduriga aeglaste neutronite arvu, on võimalik hinnata pinnase niiskust.

Võib tunduda üllatavana, kuid kiirgusallikaid kasutatakse ka kosmeetikatööstuses kvaliteedi tagamiseks. Samuti kiiritatakse enamus kosmeetikatoodetest eesmärgiga hävitada parasiidid, enne kui nad müüki jõuavad. Ka on gamma-kiirgusega võimalik töödelda erinevaid materjale (nt plastikuid) nende füüsikaliste omaduste muutmiseks (nt plastiku tugevdamiseks või tefloni pulbriks muutmiseks jne). Kuna kiirguse abil on võimalik muuta ka mõnede materjalide struktuuri molekulide tasandil. Seda võimalust kasutatakse näiteks osade materjalide imavuse suurendamiseks. Näiteks beebimähkmete puhul on oluline, et nad oleksid võimelised imama suurel määral vedelikku.

Kiirgusallikaga puutume kokku ka iga kord, kui lennukiga lendama läheme. Röntgenkiirgust kasutatakse väga paljudes pagasikontrolliaparaatides. Neid võib lisaks lennujaamadele leida ka veel ametiasutustes, postkontorites jne. Samuti on väga palju kasutusel ka suituandureid, mis sisaldavad kiirgusallikat.



Joonis 4.16. Suitsuanduri ehitus ja tööpõhimõte (Alan Walter)

Kokkuvõtte

Kiirgusallikaid kasutatakse tööstuses laialdaselt ning erinevates valdkondades. Raske on leida tooteid, mille tootmisel pole kasutatud ühtegi kiirgusallikat. Kiirgusallikaid kasutatakse eelkõige seetõttu, et nad võimaldavad tagada tootmisportsesside kiiruse ning samuti ei ole vajalik otsene kontakt materjaliga. Olulisemad on tootmisportsesside kvaliteedi tagamine (näiteks nivooandurid või paksusandurid), samuti tööstuslik radiograafia ning sterilisatsioon. Tänu kiirgusallikate kasutamisele on lihtsam avastada erinevaid lekkeid, uurida materjalide omadusi ja struktruure. Samaaegselt kasutamisega toimub uute meetodite ning rakenduste arendamine.

5. Kiirgusallikad meditsiinis

Selle teema käigus käsitletakse kiirgusallikate kasutamist meditsiinis ning siin saad vastused järgmistele küsimustele:

- Millistel eesmärkidel kiirgusallikaid meditsiinis kasutatakse?
- Milline oli esimene kiirgusallikate kasutusala meditsiinis?
- Millised on erinevad võimalused röntgendiagnostikaks?
- Mida tähendab tuumameditsiin?
- Kuidas viiakse läbi kiiritusravi?
- Mis vahe on sisemisel ja välimisel kiiritusravil?
- Kuidas ennast kiirguse eest kaitsta?

Sissejuhatus

Esimeseks tehislikuks allikaks olid röntgenkiired, mille avastas aastal 1895Wilhelm Conrad Röntgen. Kiirelt muutusid nad populaarseks diagnoosimisvahendiks meditsiinis. Tänapäeval on meditsiinis kasutatav kiirgus endiselt juhtival kohal ning meditsiiniga seotud doosid varieeruvad väga suurtes piirides. Enamik inimesi on oma elu jooksul röntgenkiirtega kokku puutunud. Röntgenuuringuga, mis aitab arstil diagnoosida haigust või tuvastada trauma iseloomu. Palju harvem kasutatakse diagnostikas radionukliidide manustamist patsiendile, et väljaspool keha asuvate andurite abil kindlaks teha, kuidas elundid töötavad. Kui muul viisil pole võimalik diagnoosi määrata kasutavad arstid mõlemat tüüpi protseduure.

Ioniseerival kiirgusel on meditsiinis kaks väga erinevat kasutusala – diagnostika ja ravi. Mõlemal juhul tuleb lähtuda patsiendi huvidest ja alati tuleb järgida kiirguskaitse printsiipi – saadav kasu peab ületama võimaliku riski. Radioisotoopide kasutamine meditsiinis annab võimaluse spetsiifiliste kemikaalide liikumisteede ja asukoha jälgimiseks inimkehas. Kõik põhineb asjaolul, et radioaktiivsed isotoobid on keemiliselt identsed stabiilsete isotoopidega ning järgivad nende käitumist kehas. Aktiivse isotoobi asukohta on aga võimalik mõõtevahendeid kasutades määrata. Näiteks on kasutusel on tehneetsium-99m ja indium-113m.

Kiirgusdoosid on tavaliselt väikesed, ehkki teatud protseduurides võivad need olla üsna suured. Palju suuremaid doose on vaja kasutada eluohtlike haiguste või elundite talitushäirete raviks, vahel kombineeritakse kiiritamist teiste ravivõtetega. Haiget kehaosa võib mõjutada radioaktiivse kiirega või patsiendile manustada üsna kõrge aktiivsusega radionukliide.

Röntgenkiirte kasutamist patsientide uurimiseks nimetatakse röntgen-diagnostikaks ja diagnoosiks või teraapiaks ette nähtud radiofarmatseutikumide kasutamist nimetatakse tuumameditsiiniks. Protseduure, kus patsientide raviks kasutatakse kiiritamist, nimetatakse kiiritusraviks.

Röntgendiagnostika

8 novembril 1895 täheldas Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) ekraanil toimunud floresentsi. Erinevate katsetuste käigus jõudis ta järeldusele, et kui kiirgusallika ja ekraani vahele asetada objekte, siis tekib ekraanile niiöelda objekti vari. Kattes hiljem ekraani fotopaberiga tegi ta esimese röntgenülesvõtte. Alltoodud on 22 detsembril 1895 pildistatud Wilhelm Conrad Röntgeni abikaasa käsi.

Joonis 5.1. Wilhelm Röntgeni poolt tehtud esimene „meditsiiniline“ röntgenülesvõte tema abikaasa käest, 22. Detsember 1895 (Wikipedia).

Röntgenkiirgus on mänginud väga olulist rolli kiirguskaitse arengus. 1895 aastal avastatud röntgenkiired võeti kiiresti laialdaselt kasutusele. Näiteks olid esimese maailmasõja ajal mobiilsed röntgenaparaadid kasutusel ning Marie Curie ise koolitas arste neid kasutama. Tänu röntgeni kasutamise võimalusele oli võimalik aidata paljusid, sest haiguste/vigastuste diagnoosimine oli lihtsam.

Kiirguse puhul tuleb aga tegeleda ka kaitsega. Kuna keegi ei osanud alguses kahtlustada röntgenkiirte kahjulikke omadusi, siis kasutati neid ünagi piiramatult. Röntgeniaparaatide torude töövõime mõõtmiseks kiiritasid valmistajad ennast ja jälgisid, kui kiiresti nende nahk ärrituse sai ja punaseks tõmbus. Lisaks eelnevale oli ühe röntgenpildi tegemisel saadud doos tollel ajal palju suurem kui tänapäeval. Sellest tingituna suri rohkem kui 300 inimest - umbes 250 nahavähki ja üle 50 verehaigustesse, põhiliselt aneemiasse ja leukeemiasse. Samas aga kujutas see suuremat ohtu mitte patsientidele, vaid hoopis radioloogidele. Eriti oli see aktuaalne esimese maailmasõja päevil, kus suurele tööhulgale ja kiiritusele lisandus veel ka psüholoogiline pinge. Nii mõnegi arsti jaoks olid selle kurvad tagajärjed.

Ilmnenud kõrvalnähtude tõttu muututi röntgenkiirguse kasutamisega ettevaatlikumaks. Enamusel juhtudel kasutati ettevaatusabinõuna mingi

materjali asetamist inimese ja radioaktiivse kiirguse allika vahele, peamiselt oli kasutusel plii. See küll ei varjestanud teadlast/meedikut kiirguse eest täielikult, kuid kindlasti vähendas ohtu. Tänapäeval viiakse röntgenuuringuid läbi eraldi ruumides ning ülesvõtte ajal on patsient üksinda. Tänu sellele on meedikud kiirguse eest kaitstud. Täpsem tehnika võimaldab tänapäeval ülesvõtte ajal suunata kiirguse ainult patsiendi sellesse piirkonda, millest ülesvõte on vajalik. Allpool on foto tüüpilisest röntgendiagnostika kabinetist. Selleks, et radioloogil oleks ülevaade ülesvõte ajal toimunust on tavaliselt eraldusseinas ka spetsiaalse klaasiga aken.

Joonis 5.2. Röntgenülesvõtte ruum Tartu Kliinikumis, taamal on näha, et töötajad asuvad eraldi ruumis ja saavad patsienti jälgida läbi akna (autori foto).

Tavalises röntgenuuringus läbib seadmest tulev kiirgus patsiendi keha. Röntgenkiired läbivad lihaseid ja luid erinevalt ning tekitavad keha siseehituse kujutise fotofilmile. Sageli on võimalik kujutist jäädvustada ja töödelda ka elektrooniliselt. Röntgenpilt iseloomustab röntgenkiirguse neeldumist inimese oranismis. Keha eri osad neelavad röntgenikiiri erineval määral. Tihedad luud neelavad suure osa kiirgusest, kuid pehmed koed nagu lihased, rasv ja siseelundid lasevad röntgenikiiri rohkem endast läbi. Näiteks rindkere röntgenülesvõtte korral on tumedamad need osad, mis sisaldavad rohkem õhku ja seega neeldub röntgenkiirgust nendes osades vähem. Näiteks on selliseks

organiks kopsud. Luudes neeldub röntgenkiirgust olulisel määral ja seetõttu on nende jäljend röntgenpildil heledam. Selle tulemusena näitab röntgenipilt luusid valgena, pehmeid kudesid mitmes toonis hallina ning õhku mustana.

Joonis 5.3. Röntgenülesvõte kannast (autori foto).

Kehaosad, mida kõige sagedamini uuritakse, on rindkere, jäsemed ja hambad, millest igaüks eraldi võetuna moodustab uuringute kogusummast 25 protsenti. Doosid on üsna väikesed – näiteks umbes 0,1 mSv rindkere uuringu korral. Luude uuringute – nagu selgroo alaosa – efektiivdoosid on suuremad, sest kiirguse suhtes tundlikumad elundid ja koed saavad seda rohkem. Soolestiku alaosa uurimisel, kus kasutatakse baariumklistiiri, on efektiivdoos märkimisväärselt suur, umbes 6 mSv, kuid sellised uuringud moodustavad kogusummast ainult ligikaudu ühe protsendi.

Levinud on ka mammograafia, mille eesmärgiks on naiste rinnahaiguste avastamine ja diagnoosimine. Selleks, et võimalused vähiraviks oleks suuremad, on oluline vähktõved avastada varajases staadiumis. Rindade kontrolliks ja uurimiseks kasutatakse röntgenikiirgust, kuid mammograafia käigus saadav kiirgusdoos on väga väike ega mõju naise tervisele kahjulikult. Eestis on kasutusel ka mammograafiauuringuteks kohandatud sõiduk.

Joonis 5.4. OÜ Mammograafi poolt kasutatav mobiilne labor väljast- ja seestpoolt (OÜ Mammograaf).

Mammograafia käigus tehakse rinnast röntgenipilt, mida nimetatakse mammogrammiks. Uuringu tegemiseks kasutatakse spetsiaalset röntgeniaparaati, mille nimi on mammograaf.

Kompuutertomograafia (KT) kasutamine on viimastel aastatel oluliselt sagenenud ja jõudnud tasemele, kus arenenud riikides moodustavad KT skaneeringud umbes 5 protsenti kõikidest kiirgusdiagnostika protseduuridest. Kompuutertomograaf on toodud alljärgneval fotol.

Joonis 5.5. Kompuutertomograaf Põhja-Eesti Regionaalhaiglas (autori foto).

Selle meetodi puhul pöörleb patsiendi ümber lehvikukujuline röntgenkiirte kimp, mis registreeritakse vastasküljel asuva andurite rea poolt. Arvuti koostab patsiendist lõigu- või sektorikujulise läbiva kujutise, mis võimaldab saada kõrgetasemelist diagnostilist informatsiooni. Selle informatsiooni abil on võimalik avastada kõrvalekaldeid patsiendi organismis. Kompuutertomograafia abil on võimalik uurida paljusid kliinilisi probleeme nii rinna, kõhu ja selja piirkonnas. Samuti on see sobilik peavigastuste diagnoosimiseks.

Siiski tuleb arvestada, et KT puhul võivad doosid olla suurusjärgu võrra või veelgi suuremad kui tavalises röntgendiagnostikas. KT uuringud suurendavad oluliselt meditsiinilise diagnostika käigus saadud kollektiivdoosi ja mõnes riigis ulatub see kuni 40 protsendini kogudoosist. Soolestiku alaosa uurimine annab 10 protsenti kogu kollektiivdoosist ja rindkere uurimine umbes ühe protsendi. Need arvud näitavad selgelt, et mõned suhteliselt harva kasutatavad protseduurid võivad anda elanikkonnale kaugelt suurema doosi kui tavalisemad uuringud. Seepärast KT ei kasutata, kui tavalisest röntgenuuringust piisab diagnoosi määramiseks.

Diagnostilised protseduurid, mille käigus saadakse kõige suuremaid doose, on siiski sekkuva radioloogia protseduurid. See tähendab, et arst viib protseduuri läbi patsiendi kehas, rakendades röntgenkiiritamist seeriaviisiliselt, et „vaadata patsiendi sisse“ reaalajas. See võimaldab siseelundite puhul viia protseduuri läbi ilma kirurgilise operatsioonita, mis oleks muidu ainus võimalus elundi juurde pääsemiseks. Peab aga märkima, et selliste protseduuride käigus võivad patsiendid saada doose vahemikus 10-100 mSv ja kui ei rakendata hoolikat abivahendeid või kontrolli, võivad sama suuri doose saada ka kirurgid. Mõnel taolisel juhul on protseduuride doosid olnud piisavalt kõrged, et kutsuda nii patsientidel kui kirurgidel esile deterministlikke tagajärgi. Üheks tüüpiliseks ning Eestis kasutusel olevaks on angiograafia. Angiograafia on veresoonte röntgenuuring. Protseduuri käigus lisatakse verele kontrastainet ning see võimaldab veresooni näha röntgenkiirguse abil. Angiograafia uuringuga saab täpsustada veresoonte seisundit ja organite verevarustust ning võimaldab teatud veresoontehaiguste ravi. Angiograafia uuringutega samal ajal viiakse läbi ka veresoonte operatsioone.

Kaitse röntgenkiirguse eest: erinevalt radionukliididest, mis emiteerivad kiirgust pidevalt, on röntgenaparaadil see hea omadus, et teda on võimalik sisse ja välja lülitada. Oma väga lühikesest lainepikkusest tulenevalt on röntgenkiired võimelised tungima läbi mitmetest materjalidest, nt. vesi, puit, raud ning kõige lihtsam on neid peatada raskete materjalidega, näiteks kasutades pliid.

Röntgenaparaadi töötamise ajal on põhjustatav doosikiirus tavaliselt palju suurem kui radioaktiivsete allikate puhul. Töötajate kaitseks peab aparaat peab töötama nii, et otsese kiirgusvoo alla satub ainult uuritav patsient, mitte aga radioloog. Selle tagamiseks koolitatakse radiolooge, et nad oskaksid kasutada

aparaati optimaalselt ning on ka teadlikud varitsevatest ohtudest. Ohu vähendamiseks tuleb määrata vajaliku kiirekimbu mõõtmed ja kasutada tuleb ka varjestusi (nt pliipõlled). Näiteks radioloogi tööpõlled (sinised) ning patsiendi põll (parempoolsel pildil; mittekiiritatava ala kaitseks).

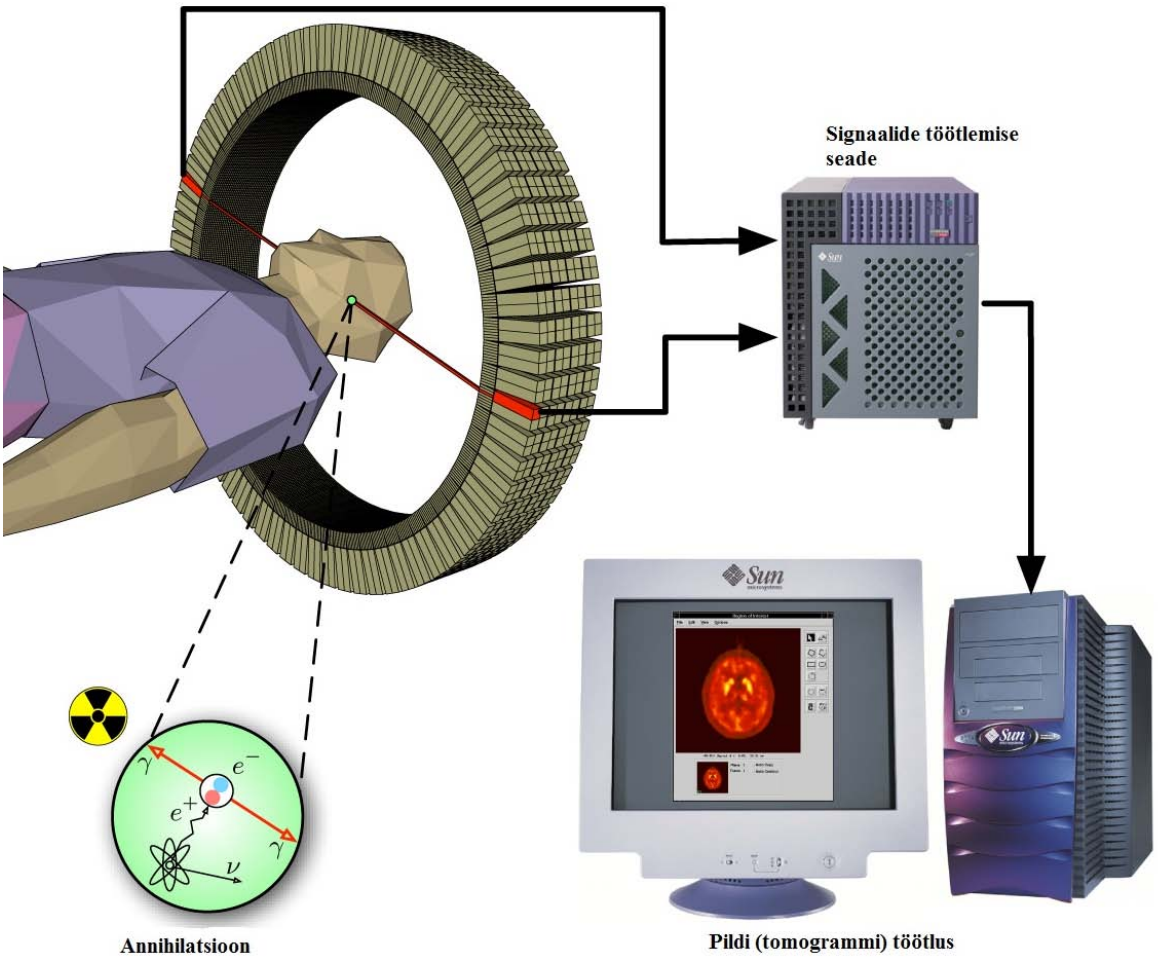
Joonis 5.6. Erinevad kaitsepõlled töötajatele (Rahvusvahelise Aatomienergia-agentuuri juhendmaterjalid).

Tuumameditsiin

Tuumameditsiini diagnostilise protseduuri korral antakse patsiendile radionukliide sisaldavat ainet ehk radiofarmatseutikumi, mida uuritav kude või organ omandab eelisjärjekorras. Medikamenti manustatakse süstimise, allaneelamise või sissehingamise teel. Manustatav radionukliid eraldab gammakiiri. Kui patsiendi ümber paigutada detektrorid, siis on võimalik lihtsalt kindlaks teha radionukliidi asukoht patsiendi organismis. Selline meetod annab teavet ainevahetuse, ainete jaotumise ja eritumise kohta organismis. Hinnanguliselt viiakse USA-s pea 80% uute ravimite testidest läbi koos lisatud radionukliididega, et oleks lihtsam jälgida ravimite käitumist organismis. Seetõttu ei ole üllatav, et kiirgusallikad on mänginud olulist rolli ka ravimite arengus.

PET-tehnoloogia abil on võimalik visualiseerida ja kvantitatiivselt uurida elusorganismi funktsiooni ja metabolismi ilma opereerimata. Metoodika on ülitundlik ning seetõttu on võimalik erinevaid onkoloogilisi, neuroloogilini jne muutusi lokaliseerida varajases staadiumis. Uuringus kasutatakse radioaktiivsedi isotoope, mille lagunemisel tekivad positronid (elektroni antiosake). Kudedes ümbritseb teda hulgaliselt elektrone, millega kohtumisel toimub annihilatsioon. Selle tulemusena kiiratakse annihilatsioonipaigast vastassuundades kaks 511 keV energiaga footonit. PET-kaamera ringikujuline detektorite süsteem on paigalolev

ning selles neeldunud footonid tekitavad sähvatuse, mis registreeritakse. Kogutud signaalid töödeldakse arvutis ja genereeritakse/konstrueeritakse kujutis – tomogramm.



Joonis 5.7. PET-uuring ja sellega seotud andmekogumine (Wikipedia)

PET-uuringul kasutatavad isotoobid on lühikese poolestusajaga, mis eeldab nende tootmiseks vajaliku kiirendi, tsüklotroni olemasolu PET-kaamera lähikonnas. Rahvusvahelise Aatomienergiaagentuuri hinnangul on kasutusel pea 300 erinevat radiofarmatseutikumi. Enamasti kasutatakse diagnostilistes protseduurides radionukliidi tehneetsium-99m, mille poolestusaeg on 6 tundi ja eraldatavate gammakiirte energia 0,14 MeV. Seda radionukliidi on suhteliselt lihtne toota ning ta seondub keemiliselt kergesti mitmesuguste kandeainetega. Eestis radiofaramatseutikume ei toodeta. Tuumameditsiinis kasutatavad vahendid tuuakse sisse väljaspoolt Eestit, peamiselt Soomest. Lühikese poolestusajaga radiofarmatseutikumide transportimiseks kasutatakse lennutransporti. Kõige laialdasemalt on kasutusel (^{18}F)-FDG, mis sisaldab molekule, mis on glükoosi analoogiks. Samas peaaju uuringutel on eelkõige kasutusel tehneetsium-99m.

Joonis 5.8. Tuumameditsiini protseduurid (Rahvusvahelise Aatomienergia-agentuuri juhendmaterjalid)

Tehneetsiumi uuringutel saadud individuaaldoosid on võrreldavad kiirgusdiagnostika doosidega. Tuumameditsiini kollektiivdoos on siiski rohkem kui suurusjärgu võrra madalam, sest protseduuride arv on palju väiksem. Kui radionukliide kasutatakse pigem raviks kui diagnoosimiseks, puutub patsient kokku palju suurema aktiivsusega ja sihtkoed või elundid saavad palju kõrgemaid doose.

Kilpnäärme ületalitluse – hüpertüroismi ravi on arvatavasti kõige levinum raviprotseduur, milles kasutatakse radionukliidi jood-131. Ehkki selistes protseduurides kasutatavatel radionukliididel on lühike poolestusaeg, peavad meedikud arvestama sellega, et aktiivsus jääb radionukliide saanud patsiendi kehasse ka mõneks ajaks pärast protseduuri lõppu. Eriti peab seda arvestama pärast raviprotseduuri, kui on vaja otsustada, kas patsiendi võib haiglast välja lubada. Mõnikord on vajalik teavitada ka patsiendi perekonda ja sõpru, et nad võtaksid kasutusele kaitseabinõud jääkaktiivsusest tingitud juhusliku kiirguse vältimiseks.

Kiiritusravi

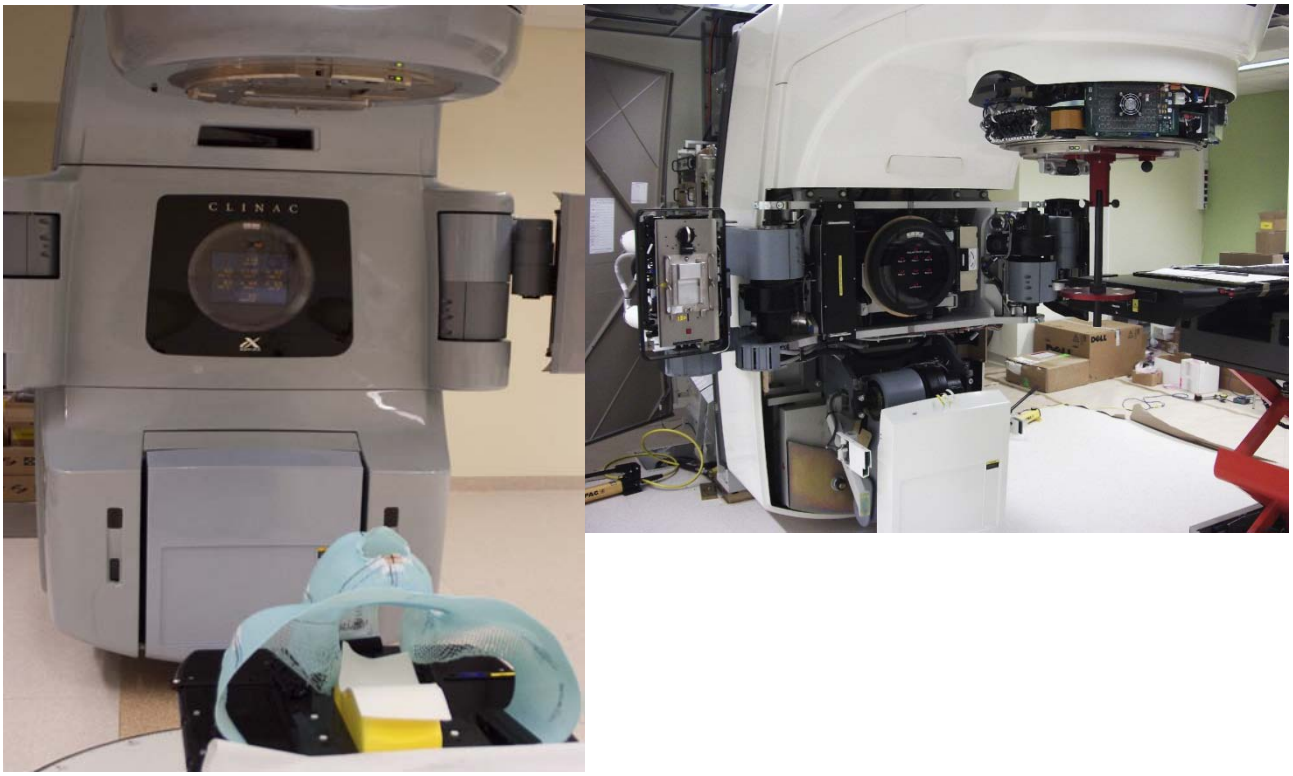
Kiiritusravi on röntgenkiirte, gammakiirte, elektronide ja teiste ioniseeriva kiirguse liikide kasutamine haiguste, peamiselt pahaloomuliste kasvajate ravis. Kiiritusravi võib kasutada kahel viisil: väliselt või sisemiselt. Paljud haiged saavad mõlemaid kiiritusravi viise, kuid sagedamini kasutatakse välist kiiritusravi. Välise kiiritusravi puhul suunatakse ioniseeriv kiirgus kasvajani aparaadist, mis on kehapinnast eemal. Sisemise kiiritusravi korral viiakse kiirgusallikas vahetusse kontakti kasvajaga kas kehaõõnes või koesiseselt. Suured kiirgusdoosid võivad rakke hävitada või neid kahjustada, pidurdades rakkude kasvu ja paljunemist. Vähirakud on tundlikumad kiirguse kahjustavale toimele, sest nad kasvavad ja paljunevad kiiremini, kui neid ümbritsevate tervete kudede rakud. Normaalsed rakud paranevad kiirguse kahjustavast toimest kiiremini ja täielikumalt kui vähirakud.

Enne kiiritusravi viiakse läbi simulatsioon, mille käigus määratletakse patsiendi keha täpne piirkond, mis allutatakse kiiritusravile. Simulatsioonile järgneb kiiritusdoosi ning režiimi arvestus koos füüsiku ja dosimetristiga. Kuna kiiritusravi puhul on oluline, et kiiritatakse kogu aeg sama kohta, siis selle jaoks kasutatakse erinevaid abivahendeid.

Joonis 5.9. Patsientide individuaalsed maskid pea piirkonna kiiritamisel fikseerimiseks Põhja-Eesti Regionaalhaiglas (autori foto).

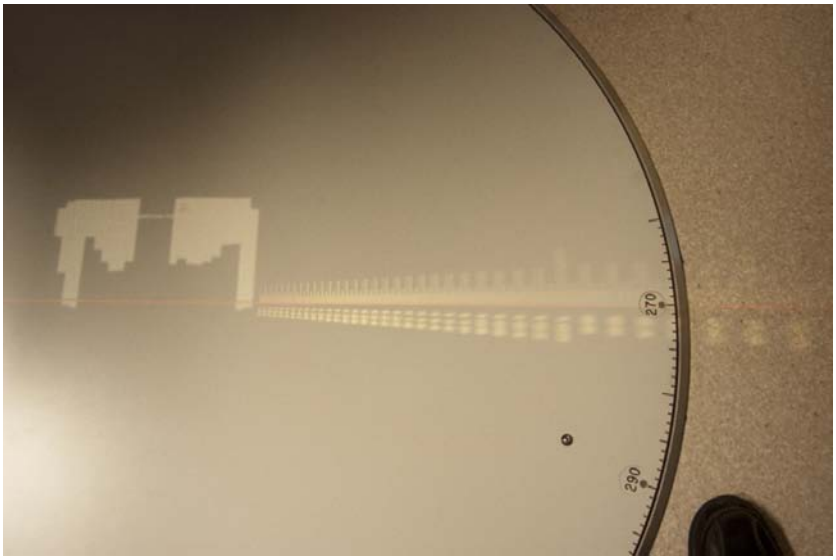
Ravi ettevalmistamise raames määratakse kindlaks ka ravikuuri pikkus, mis on igal haigel erinev. Enamasti toimub 5 kiiritusseanssi nädalas ning keskmine ravikuuri pikkus on 4 - 6 nädalat.

Välise kiiritusravi jaoks kasutatakse Eestis kiirendeid. Varasematel aastatel on kasutatud ka gamma-kiirgusallikaid, kuid tänaseks on need seadmed kõik kasutuselt kõrvaldatud. Kiirendis luuakse väga kõrge võimsusega röntgen- või elektronkiirgus. Kiirgus suunatakse aparaadist täpselt doseerituna kiiritatavasse piirkonda. Raviseanss kestab tavaliselt vaid mõne (1-10) minuti. Allpool on toodud kaks fotot kiirenditest. Üks kiirenditest on juba kasutuses ning teine on alles paigaldamise faasis.



Joonis 5.10. Põhja-Eesti Regionaalhaiglas kasutatavad kiirendid, üks kiirenditest on kasutuses, teine oli suvel 2011 paigaldamise faasis (autori fotod).

Tänapäevaste kiirenditega on võimalik kiiritusravis tagada see, et kiiritatakse ravi vajavat piirkonda. Kollimaatorite kasutamine võimaldab tekitada erinevaid kujutisi ning uuemad kiirendid võimaldavad ka kolmemõõtmelist ravi planeerimist.



Joonis 5.11. Kiirendist lähtuva kiirtekimbu kujutisest, Põhja-Eesti Regionaalhaigla (autori foto).

Mõne kasvajaliigi puhul rakendatakse sisemist kiiritusravi. Sel juhul viiakse radioaktiivne preparaat vahetusse kontakti kasvajaga. Sisemise kiiritusravi eeliseks on suurema kiiritusdoosi saamine lühema ajaga, kusjuures ümbritsevad terved koed saavad tunduvalt väiksema kiiritusdoosi kui välise kiiritusravi puhul. Sisemise kiiritusravi jaoks kasutatav seade on toodud alljärgneval fotol.

Joonis 5.12. Sisemise kiiritusravi seade Põhja-Eesti Regionaalhaiglas (autori foto)

Sisemist kiiritusravi kasutataks pea ja kaela piirkonna, söögitoru, pärakukanali, emakakaela ja emakavähi korral, samuti kilpnäärme, eesnäärme ja rinnanäärme vähi ravis. Kohaliku tuimastuse all viiakse kehaõõnde esmalt aplikaator ehk preparaadi hoidja ja fikseeritakse see. Seejärel ühendatakse aplikaator elastsete torude abil aparaadiga, kus asuvad radioaktiivsed preparaadid. Protseduur kestab 30-60 min. ja toimub meditsiinipersonali pideva kontrolli all.

Seadmete ülespanekul ja kasutamisel on vaja rangelt jälgida nõuetekohase kvaliteedi tagamist. Kui seda ei tehta, võivad tagajärjed olla tõsised:

- 1996. aastal Costa Ricas sai valesti kalibreeritud kiirgusteraapia tagajärjel üle 100 patsiendi kõrgemaid doose kui vaja, mis lõppes paljudel juhtudel surma või raske vigastusega.
- 2001. aastal avastati Panamas, et häired andmete sisestamisel ravi planeerimissüsteemi viisid 28 patsiendi ülekiiritamiseni, põhjustades mitme inimese surma.

Kokkuvõtte

Kiirgusallikate kasutamine on olulist rolli mänginud viimase poolsajandi jooksul eelkõige meditsiinis. Tänu kiirgusallikate kasutusele võtmisega on arenenud märkimisväärselt nii elukvaliteet kui ka inimeste eluiga.

Peamisteks kiirgusdoosi allikateks on:

• Diagnostilise radioloogia põhjustatud doosist moodustab umbes 90% röntgendiagnostika. Inimkeha kõige kriitilisemad piirkonnad on luuüdi, suguorganid ja loode. Luuüdi on piirkond, kus moodustuvad vererakud ja selle piirkonna kiiritamine võib põhjustada leukeemia. Suguelundite kiiritamine võib põhjustada geneetilisi kahjustusi.
• Terapeutilise radioloogiaga võivad olla seotud suured doosid, kuid vaatluse all on palju väiksem elanikegrupp.

Kuna läbiviidavate röntgendiagnostika protseduuride arv on suur, eriti arenenud maades, on selle tagajärjel saadav kollektiivdoos üsnagi suur. UNSCEARi hinnangul on kõikidest diagnostikaprotseduuridest saadud kollektiivne doos 2500 miljonit inimsiivertit. Noored inimesed ei vaja kiirgusprotseduure sagedasti ja uuringu vajaduse tõenäosus kasvab üldiselt vanuse suurenemisega. See viitab üldiselt ka sellele, et kiirituse tagajärjel vähi tekkimise tõenäosus on madal.

6. Tuumaenergeetika ja tuumkütuse tsükkel

Selle teema käigus käsitletakse tuumaenergeetikat ning tuumkütuse tsüklit. Vastused saad järgmistele küsimustele:

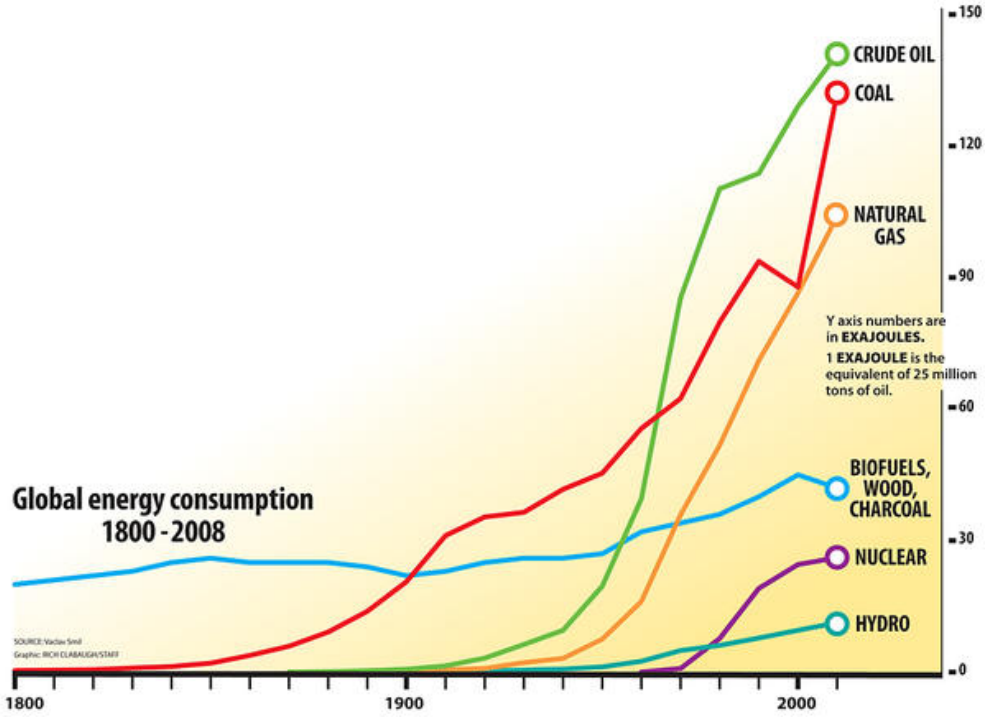
- Miks vabaneb tuumade lõhustumisel energia?
- Mis on isotoop?
- Mis on ahelreaktsioon?
- Millised on tuumajaama peamised osad?
- Kuidas töötab tuumajaam?
- Millised jäätmed tekivad?
- Kuidas tagada tuumaohutust?
- Mis on termotuumasüntees ja ITER?

Sissejuhatus

Oma kodudes kasutame igapäevaselt elektrienergiat, elektrit on vaja näiteks toidu valmistamiseks, pesumasina kasutamiseks, arvutiga töötamiseks, televiisori vaatamiseks jne. Oleme elektrist niivõrd sõltuvad, et igasugune kasvõi lühiajaline probleem elektrivarustusega põhjustab häired meie igapäevases elus.

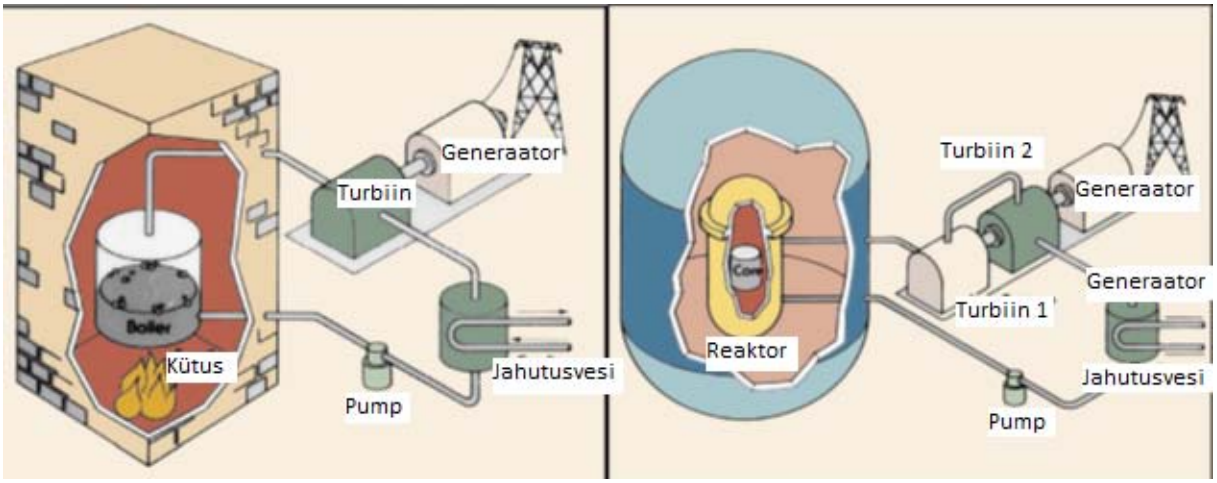
Elektrit toodetakse elektrijaamades ning toorainena kasutatakse erinevaid materjale – kivisüsi, nafta, gaas jne. Aastakümnete jooksul energiavajadus maailmas ainult suurenendud ja sellega koos on suurenenud vajadus ka energiatoomiseks vajaliku tooraine järele. Veel 100 aastat tagasi elas Maal ligi 4 korda vähem inimesi kui tänasel päeval. Samuti soovivad inimesed parandada oma heaolu ning olenemata sellest kuitahes palju energiasäästust ja selle vajalikkusest räägitud, siis praeguseni areng teistsugune – eriti arenguriikides. Tänapäeva tehnoloogilises ühiskonnas tarbib iga inimene keskmiselt 120 korda rohkem energiat kui ammustel aegadel elanud inimesed. Tuleb arvestada ka sellega, et enamus arengumaid on seadnud endale ühe peamise eesmärgina liikumise tehnoloogilise heaoluühiskonna suunas. Viimane viitab sellele, et energiavajadus kasvab ka edaspidi.

Alljärgneval joonisel on toodud inimkonna energiavajadus alates aastast 1800. Näeme, et oluline energiavajaduse kasv algas 1950ndatel aastatel. Seejuures umbes 36% energiavajadusest moodustab tehnoloogilises ühiskonnas elektrienergia. Aastasadade jooksul on biomassi osa olnud suhteliselt stabiilne. Kasutatakse ka tänapäeval suhteliselt palju puitu sooja tootmiseks.



Joonis 6.1. Globaalne energiavajadus aastatel 1800-2008 (Rich Clabaugh)

Hetkel maailmas kasutusel olevate energialiikide hulka kuuluvad: kivisüsi, tuumaenergia, hüdroenergia, gaas, tuul, päikeseenergia, biomass, jne. Mitmetes riikides on täiendavalt kasutusele võetud ka tuumade lõhustusmise käigus vabanev energia, ehk siis energiatootmiseks kasutatakse ka tuumajaamasid. Sisuliselt on kõik elektrijaamad sarnased – nii tuumade lõhustusmise kui ka erinevate ainete põletamisel tekkinud energiat kasutatakse auru tootmiseks. Tekkinud aur suunatakse turbiinidele, mille abil toodetakse elektrienergia. Allpool on toodud kaks lihtsustatud skeemi – esimesel on tuumajaam, teisel on tavalisel kütuse põletamisel põhineva elektrijaam. Erinevusi on vähe, sest auru abil energia genereerimine on sisuliselt sama.



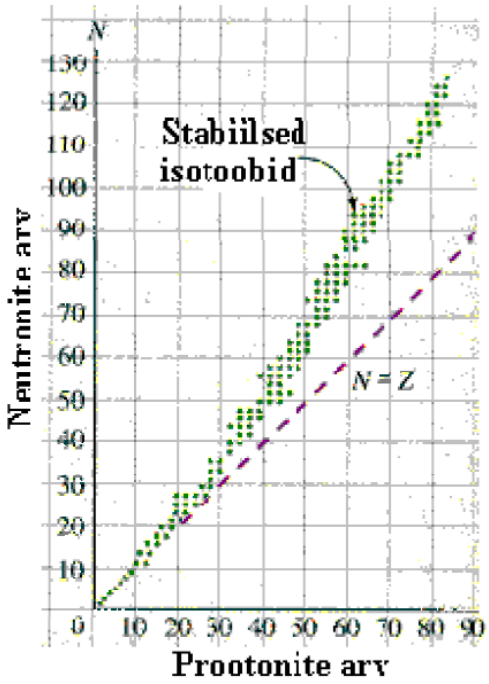
Joonis 6.2. Fosiil- ja tuumkütust kasutavad elektrijaamad (World Nuclear Association)

Tuuma lõhustumise energia

Meid ümbritsev koosneb aatomitest. Aatomid moodustavad erinevate materjalide vundamendid. Kreeklased uskusid, et aatom oli väikseim aine osake. Nüüd teame, et nii see ei ole ja aatomit võib jagada väiksemateks osadeks Aatomid koosnevad aatomi tuumast ning selle ümber tiirlevatest elektronidest. Aatomi tuumad omakorda koosnevad prootonitest ja neutronitest. Elektronid on elektriliselt negatiivselt laetud osakesed ning neid on suhteliselt lihtne aatomist „vabastada“. Aatom oma tavalises olekus on neutraalne, ehk see siis tähendab, et elektronide negatiivse laengu tasakaalustab aatomi tuuma positiivse laengu. Kuna aatomi tuum koosneb prootonitest ja neutronitest. Neutronitele elektriline laeng puudub, seega aatomi neutraalsuse tagamiseks peab iga aatomi prootoni kohta olema üks elektron. Prootonite ja neutronite mass on umbes 2000 korda raskem kui elektronide mass, seega sellest on lihtne järeldada, et valdav osa aatomi massist asub tuumas. Prootonite arvu puhul kasutatakse ka mõistet aatomarv. Aatomi koguarvuks on prootonite ja neutronite summaarne arv.

Näiteks hapniku aatomi tuumas on kaheksa prootonit ja kaheksa neutronit. See tähendab, et hapniku aatominumber on kaheksa. Kaheksa prootoni positiivset lanegut tasakaalustavad tuuma ümber tiirlevad kaheksa elektroni. Need elektronid paiknevad kahel kihil. Sisemisel kihil on kaks elektroni ning välimisel kihil on kuus elektroni. Ionisatsiooni seisukohalt on olulised eelkõige elektronide arv välisel kihil, sest neid on võimalik eemaldada ionisatsiooni käigus ning nendest sõltuvad ka mitmed elemendi keemilised omadused.

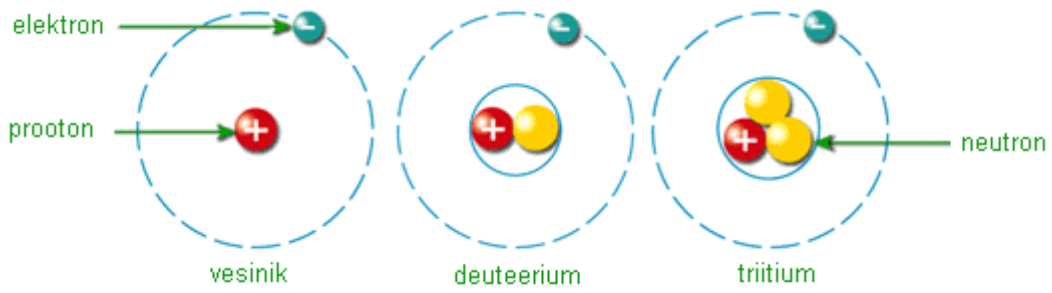
Tagasi tulles aatomi tuuma juurde. Kuidas on võimalik tuuma stabiilsus? Teada on, et vastandlaengutega osakesed omavahel tõmbuvad. Samas on aatomi tuumas elektriliselt positiivselt laetud prootonid ja neutraalsed neutronid, seega miks need koos püsivad? Võiks ju eeldada, et sarnaste laengutega osakesed omavahel tõukuvad. Vastus on selles, et tuumaosakesi hoiavad koos tuumajõud. Tuuma stabiilsus või ebastabiilsus on seotud tuuma struktuuriga. Tuleb meeles pidada, et paljud aatomid ei ole stabiilsed, esineb ka mitmeid ebastabiilseid aatomeid. Erinevate uuringute tulemusena on jõutud järeldusele, et tuum on üldiselt seda stabiilsem kui tuumas on neutronite ja prootonite arvu tasakaal. Kui see suhe on liiga kõrge või liiga mada, siis kipub tuum olema ebastabiilsem.



Joonis 6.3. Stabiilsed isotoobid (Enn Realo)

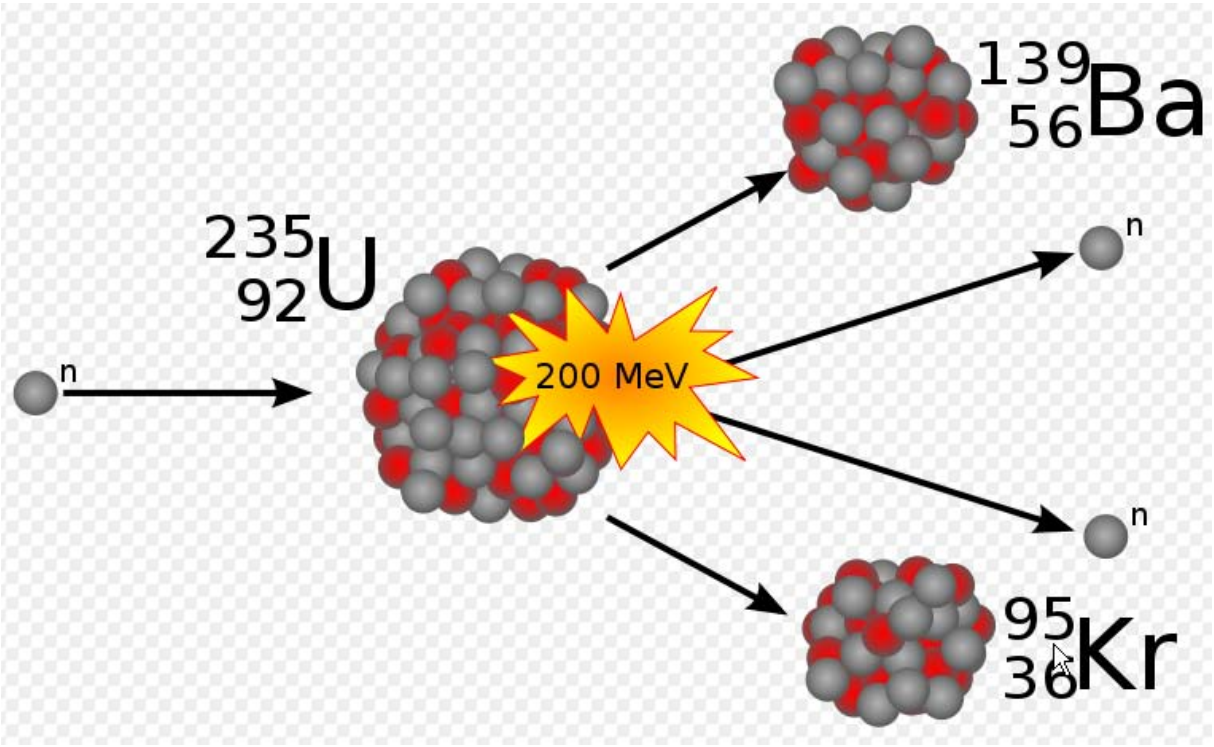
Iga elemendi puhul on teada neutroniarvude vahemik, mille puhul on tuumad stabiilsed. Teatud nukliidid esinevad looduses mittestabiilsetena ja neid käsitletakse kui looduslikult radioaktiivseid aineid. Samas on aga ka hulk nukliide, mida on võimalik muuta inimtegevuse abil radioaktiivseteks.
Isotoobid on nukliidid, mille aatomites on sama arv prootoneid, kuid neutronite arv on erinev. Seega kõik nukliidid, millede aatomarvud on samad, kuid aatommassid on erinevad, on isotoobid. Näiteks vesinikul on kolm isotoopi:

- vesinik-1 (tavaline vesinik, mille tuumas on ainult üks prooton),
- vesinik-2, mida kutsutakse deuteeriumiks (üks prooton ja üks neutron) ja
- vesinik-3, mida kutsutakse triitiumiks (üks prooton ja kaks neutronit).



Joonis 6.4. Vesiniku isotoobid (Kiirguskaitse)
Näiteks triitiumi puhul on neutronite ja prootonite arvu suhe suur (1 prooton ja 2 neutronit), siis see tuum kipub lagunema ja ning selle protsessi käibus vabanevad neutronid.

Nagu nimigi viitab, siis toimub tuumade lõhustumine aatomi tuumas. See reaktsioon tekib kui raske tuum jaguneb kaheks või enamaks tuumaks, millele lisanduvad veel mõned kõrvalosakesed. Tuumaelektrijaamades kasutatakse kontrollitud tuumalõhustumisahelat. Võrreldes erinevate keemiliste reaktsioonidega vabaneb tuumalõhustusmiste käigus suurel hulgal energiat. Mõned rasked tuumad on võimelised spontaanselt lõhustuma, teiste puhul on selleks vaja lisaenergiat Lõhustumise käigus vabaneb energiat, peamiselt kildtuumade kineetilise energiana, mis muundatakse kiiresti termiliseks. Üks tuntumaid isotoope, mis lõhustub energia lisamisel (ehk neutronitega pommitamisel) on looduslik uraan, mis koosneb 0,7% 235U ja 99,3% 238U.

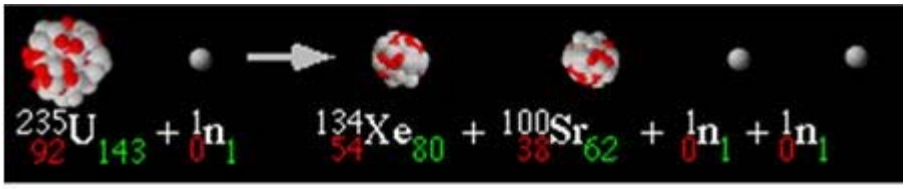


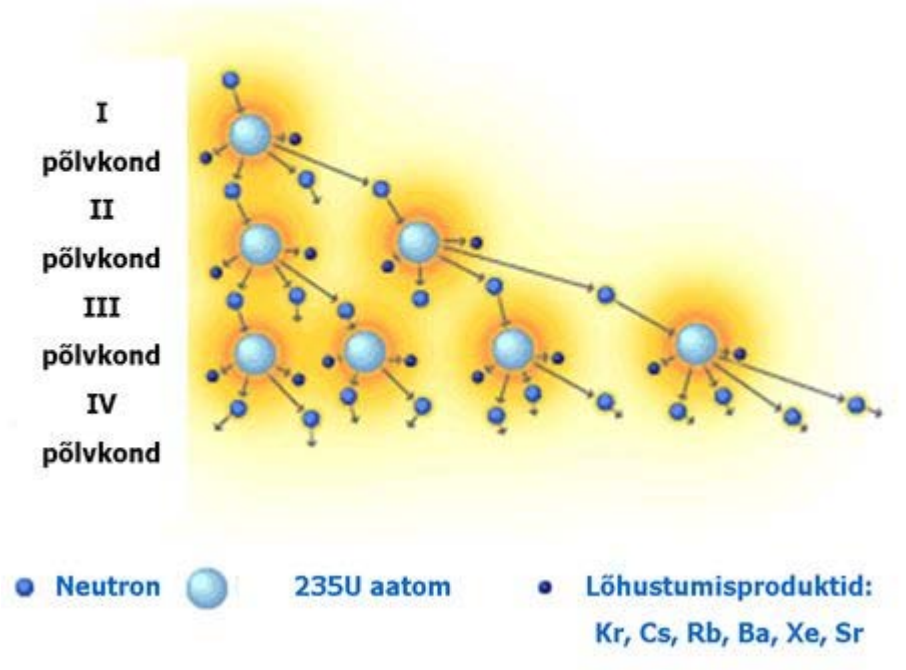
Joonis 6.5. Uraani tuuma lõhustumiprotsess (Wikipedia)

Lõhustumise juures on oluline fakt, et kildtuumad ei ole stabiilsed ning emiteerivad protsessi käigus 2 kuni 4 neutronit, mis on võimelised põhjustama uut lõhestumist. Enamus vabanevatest neutronitest kiiratakse vahetult lõhustumise käigus, osad aga emiteeritakse hilinenult, mõni sekund kuni paar minutit hiljem. Viimaseid nimetatakse hilinenud neutroniteks. Neutronite vabanemine muudab võimalikuks ahelreaktsiooni tekkimise, tänu hilinenud neutronite olemasolule on võimalik aga reaktoris toimuvat kontrollida.

Keskmiselt vabaneb tuumareaktoris lõhustumise käigus 2,3 neutronit, samas aga haaravad neid reaktori aeglustid ning ka kütus. Kadude hulka kuulub ka hajumine või difusioon väljapoole süsteemi. Reaktorites püütakse luua olukord, kus neutronite kadu oleks minimaalne. Kriitilisus saabub, kui lõhestumisel kiirgunud mitmest neutronist vähemalt üks

tekitab järgmise tuuma lõhestumise.





Joonis 6.6. Ahelreaktsioon (tuumaenergia.ee)

Tuumaelektrijaama tegevus

Tuumajaama töötamise põhimõtte on väga lihtne. Elektrienergia tootmine ei erine meetoditest, mida kasutatakse erinevates soojuselektrijaamades. Tekkitavat soojust kasutatakse auru tootmiseks. Aur omakorda suunatakse turbiinidesse, mis on ühendatud elektrit tootvate generaatoritega. Seega toimub soojusenerga muutmine elektriks. Lihtsalt tehnoloogia alused põhinevad füüsikalistel nähtustel ja võivad seetõttu tunduda keerulisemana kui erinevate fossiilkütuste põletamised.

Tuumaelektijaamades kasutatakse peamiselt kütusena rikastatud uraani isotoopi U-235. Lisaks on kasutusel veel toorium, looduslik uraan või siis plutoonium. Kütuse puhul on oluline, et neutroniga vastastikmõju tulemusena tekiks tuuma lõhustumine, mille käigus omakorda peab vabanema neutron, mis on võimeline põhjustama järgmise lõhustumise. Rikastatud uraani kasutatakse kütuses tavaliselt keraamiliste graanulitene, mis asetatakse metallvardasse ja mis omakorda koos teiste lisaseadmetega moodustab siis kütusevarda. Sageli on need kütusevardad paigutatud reaktorisüdamikku ning nad on ümbritsetud veega või mõne teise soojuskandjaga. Vesi või siis muu soojuskandja on vajalik soojuse transportimiseks. Reaktorisüdamikus on oluline ka moderaator, ehk siis aine, mis aeglustaks lõhustumise tulemusel tekkivaid neutroneid ning mis võimaldaks juhtida ahelreaktsiooni. Kontrollvardad koosnevad neutroneid neelavatest materjalidest, ehk siis kontrollvarraste sisestamisel tuumareaktori südamikku on võimalik ahelreaktsioon täiesti peatada.

Auruturbiinidesse suunatavat auru toodetakse sageli reaktorisüdamikus (keevveereaktorid) või siis vahetis (survveereaktorid). Aur, mis suunati aurugeneraatoritesse kondenseerub pärast jahutuse tulemusena ning vesi suunatakse jälle reaktorisüdamikku.

Tuumareaktori võtmekomponendid

Tuumareaktori võtmekomponendid on:

• tuumkütus, mis koosneb lõhustuvast materjalist, tavaliselt on kasutusel uraaniühendid. Looduslik uraan sisaldab kolme tüüpi isotoope: 99,284% moodustab uraan-238, 0,711% uraan-235 ja 0,0085% on uraan-234. Uraan-235 ei ole stabiilne ja seega on tegemist radioaktiivse isotoobiga. Lagunemise käigus eralduvad alfaosaksed. 1939 aastal jõuti erinevate uuringute tulemusena järeldusele, et lagunemise käigus eraldub ka neutron ning seega muutub tuum lagunemise käigus. Tegemist on protsessiga, millele on ülesehitatud tuumapommi põhimõte. Teame, et uraan -235 tuuma lagunemise tulemusena tekib kaks enam-vähem sarnase massiga kildtuuma. Selle reaktsiooni käigus vabaneb suurel hulgal energiat ning 2-3 neutronit. Kui üks nendest vabanenud neutronitest kohtub mõne teise U-235 tuumaga, siis võib selle vastastikmõju tulemusena tekkida uus tuuma lagunemine ning alguse saab ahelreaktsioon, mis on tuumareaktori töö aluseks. Tuumkütuse varrastes kasutatakse uraani keraamiliste graanulite kujul.

• aeglusti: tuumalõhustumise reaktsiooni käigus vabanevatel neutronitel on suur energia ning tänu sellele on nad võimelised läbima pikki vahemaid ning liikuma reaktori südamikust (ja seega ka tuumkütusest) väljapoole. Aeglustiks on aga aine, mis aeglustab vabanenud neutroneid ning selle tulemusena on neutronite kiirgus väiksem ja nende tõesnäosus vastastikmõjuks erinevate uraanituumadega suureneb ning seega suureneb ahelreaktsiooni tekkimise tõenäosus. Aeglustitena kasutatavad materjalid on näiteks vesi, raske vesi, grafiit jne.

• jahuti: kas siis vedelik või gaas soojuse ärajuhtimiseks. Kasutatakse näiteks vett, rasket vett, vedelat naatriumi, heeliumit jm. Vesi ja raske vesi võivad samaaegselt täita ka aeglusti rolli.

• juhtvardad: ahelreaktsiooni jätkumiseks, tema kiirendamiseks või peatamiseks on vajalik reguleerida neutronite arvu reaktoris ning selleks kasutatakse juhtvardaid. Juhtvardad on tavaliselt valmistatud materjalist, milles neutronid neelduvad (boor, hafnium või kaadmium) ning see võimaldab reguleerida neutronite arvu. Näiteks mida rohkem on juhtvardaid, seda rohkem neeldub neutrone ning seda vähem on „vabu“ neutroneid, mis võivad põhjustada järgmise lõhustumise.

Tuumareaktorit ümbritseb tavaliselt kaitsekest, mis on 1 kuni 1,5 m paksusest raudbetoonist ehitis reaktorianuma ja muude komponentide ümber. Kaitsekest on projekteeritud ja ehitatud kaitsmaks reaktorit väliste mõjutuste (orkaan, maavärin, terroriakt, lennukitabamus jm) eest ja keskkonda radioaktiivsuse või ioniseeriva kiirguse levi eest reaktoriavarii puhul.

Tuumareaktorite tüübid

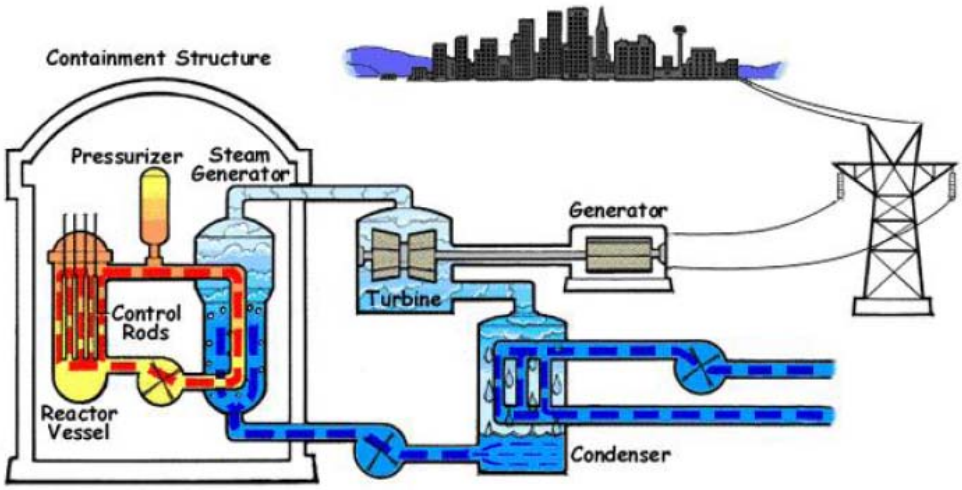
Tuumade lõhustumise protsessi avastamine 1938 aastal lõi uue energiaallika ning esimene reaktor hakkas Enrico Fermi juhendamisel tööle 1942. aastal Chicagos. Tuumareaktoreid on kasutatud energia tootmiseks alates 1950. aastatest, eriti kiire areng toimus 60- ja 70-ndatel aastatel.

1942 aastal tööd alustanud tuumareaktor oli esimese tehniliselt valminud reaktoriga, sest looduslikud tuumareaktorid töötasid umbes 1700 miljonit aastat tagasi Aafrikas Oklos, mis asub nüüdse Gaboni riigi territooriumil. Sealsed geoloogilised tingimused lõid soodsad tingimused selleks, et tekkis spontaanselt lõhustumise ahelreaktsioon.

Kuigi kasutusel on mitmeid reaktoritüüpe, siis lähemalt käsitleme kahte: survveereaktor (PWR) ja keevveereaktor (BWR). Valdav enamik tuumajaamadest sarnaselt muudele soojusjõujaamadele kasutab jahutuseks vett. See on põhjuseks, miks neid ehitatakse suure veekogu - mere, järve või jõe äärde. Rakendatakse nii veekogu vee ühekordse läbivoolu kui ka korduvkasutuse süsteeme. Esimesel juhul juhitakse vesi kondensaatorisse ja sealt veidi kõrgema temperatuuriga vesi veekogusse tagasi. Teisel juhul kasutatakse kondensaatorist väljuva vee jahutamiseks jahutustorne, kus aurustamine jahutab vett piisavalt selle taas kondensaatorisse juhtimiseks. Kummalgi juhul peale soojuse muud saastet veekeskkonda ei kanta. Jahutustornide puuduseks on, et nad vähendavad jaama kasutegurit 3 – 5 %.

Survveereaktorid (PWR)

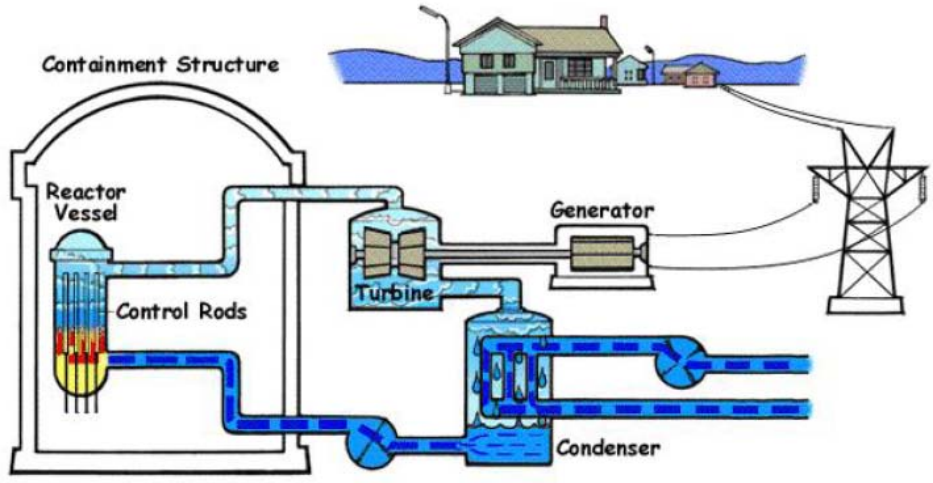
Rohkem kui 260 reaktoriga on PWR enimkasutatav reaktoritüüp maailma energeetikas, peamiselt USA-s, Prantsusmaal, Jaapanis ja Venemaal (nimetatakse WWER). Elektriline võimsus varieerub piirides 300-1500 MWe. Suure võimsusega PWR reaktori südamikus võib olla 150-250 vertikaalselt asetatud kütusekomplekti, millest igaühes on 200-300 kütusevarrast. Kokku on reaktoris seega 80-100 tonni 3,5-5% 235U suhtes rikastatud tuumkütust. Veerand kuni kolmandik kütust uuendatakse 1,5-2 aasta järel.



Joonis 6.7. Survveereaktori skeem (United States Nuclear Regulatory Commission).

Vertikaalsed juhtvardad juhitakse südamikku reaktorianuma pealt. Tavaline vesi reaktorianumas ja esmases jahutussüsteemis (kaitsekesta sees) toimib nii soojuskandja kui ka aeglustina. Aurugeneraator asub tavaliselt samuti kaitsekestas. Kaitsekestast väljas koosneb teisene jahutuskontuur aurutraktist, turbogeneraatorist, kondensaatorist ja veepumbast. Kondensaatorit, kus aur muundub tagasi aurugeneraatorisse juhitavaks veeks, jahutatakse jõe-, järve- või mereveega või jahutustornide abil.

Keevveereaktrid



Joonis 6.8. Keevveereaktori skeem (United States Nuclear Regulatory Commission).

Sisuliselt on väga sarnane survveereaktrorile. Suurimaks erinevuseks on teise kontuuri puudumine, sest vett niiöelda „keedetakse“ reaktorianumas ning selle protsessi käigus tekitatud aru suunatakse ka turbiinidesse, mis omakorda on ühendatud generaatoritega. Sama vesi toimib ka tuumareaktsiooni moderaatorina. Pärast turbiinides kasutamist suunatakse aur kondensaatoritesse ning kui seal aurust tekkinud vee temperatuur vastab nõuetele, siis suunatakse ta uuesti reaktori südamikku.

Maailmas töötab üle 90 keevveereaktori võimsustega kuni 1300 MWe ja see on levikult teine reaktoritüüp USA-s, Jaapanis, Rootsis. BWR kasutegur väiksem kui PWR reaktoril. Tuumkütusena kasutatakse 235U suhtes rikastatud uraanoksiidi olenevalt reaktori võimsusest kuni 750 vertikaalses kütusekomplektis (igaühes 90-100 varrast). Korraga on reaktoris kuni 140 tonni tuumkütust. Juhtvardad viiakse südamikku reaktorianuma alt. Lisaks kasutatakse juhtimiseks südamikku läbiva veevoo muutmist, reguleerides auru osakaalu südamiku ülaosas ja sellega neutronite aeglustamise efektiivsust.

Tänapäeval on üle 30 riigis elektritootmisel käigus ligikaudu 440 tuumareaktorit koguvõimsusega üle 370 GWe. Tuumalõhustumise energia abil toodetakse 16 % kogu maailma elektrist ja selline osakaal on püsinud juba paar aastakümmet. Sel

aastal Jaapani tsunami tagajärjel tekkinud probleemid tuumajaamas on tekitanud olukorra, kus osad riigid on otsustanud kaaluda tuumaenergeetika kasutamise otstarbekust.

Joonis 6.9. Olkiluoto (Soome) tuumajaam aastal 2004, enne kolmanda reaktri ehituse algust ja aastal 2012, pärast kolmanda reaktori valmimist (TVO koduleheküIg).

Lühiülevaade inglise keeles Soomes Olkiluotos ehitatavast kolmandast reaktorist.

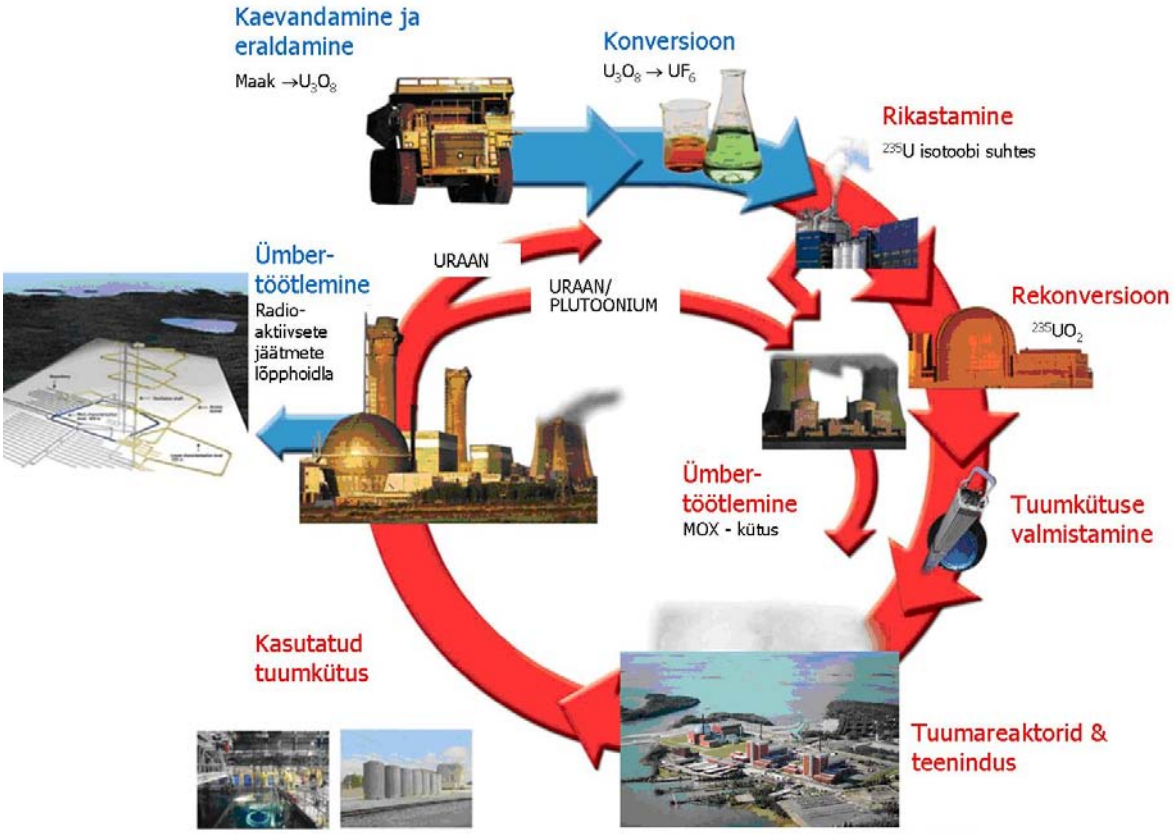
Lisaks elektrienergia tootmisele on tuumareaktorid kasutusel ka muul otstarbel. Näiteks kasutatakse neid erinevate laevade (sealhulgas allveelaevade ja jäälõhkujate) energiaallikana, sest sellisel juhul on vajamineva kütuse hulk väiksem.

Tuumkütuse tsükkel

Värske kütuse aktiivsus on väga madal ja seda võib käidelda ilma varjestuseta. Kui aga kütus jõuab reaktorisse, siis kasutamise käigus tema aktiivsus tõuseb.

Selle põhjuseks on eelkõige kütuses tekkivad lõhustumissaadused. Sellest tulenevalt võib reaktoriga toimuva avarii korral keskkonda vabaneda märkimisväärsel hulgal radioaktiivset materjali. Pärast reaktorist eemaldamist on kasutatud kütus kõrge temperatuuriga ning sulamise vältimiseks on vaja teda jahutada ja varjestada, et vähendada kokkupuudet kiirgusega.

Tuumakütuse tsükliks nimetatakse tuumaenergia tootmisega seotud tegevusi. Tsükkel saab alguse uraani kaevandamisega ja lõpeb radioaktiivse saaste hoiustamisega. Uraan on kergelt radioaktiivne metall, mida leidub kõikjal maakoores - peaaegu kõigis kivimites ja pinnastes, samuti ka jõgedes ning merevees. Näiteks graniidis, mis moodustab 60 % maakoorest, on leitud 4 uraaniosakest miljoni pinnaseosakese kohta. Maailmas on mitmeid piirkondi, kus uraani kontsentratsioon maapinnas on veelgi kõrgem.



Joonis 6.10. Tuumkütuse tsükkel (tuumaenergia.ee)

Uraani leidub maakoores kõikjal, kivimites, mullas ja samuti merevees. Siiani on teda majanduslikel kaalutlustel toodetud peamiselt mineraalsetest maakidest, kus sisaldus ületab 0,1%. Uraanimaak kaevandatakse kas avatud karjääridest või allmaakaevandustest ja saadetakse tavaliselt lähedal asuvasse tehasesse.

Keskmiselt toodetakse ühest tonnist looduslikust uraanist rohkem kui 40 miljonit kWh elektrit. Sama suure hulga elektrienergia tootmiseks on vaja põletada kas siis 16 000 tonni sütt või 80 000 barrelit naftat.

Rahvusvaheliselt tunnustatud määratluse kohaselt loetakse radioaktiivseteks jäätmeteks igasugused ained, mis sisaldavad või on saastunud kehtestatud

vabastamistasemeid ületava radioaktiivsusega ja mida ei kavatseta enam kasutada. Radioaktiivseid jäätmeid liigitatakse lähtudes jäätmetes sisalduvate radionukliidide:

- aktiivsusest ja eriaktiivsusest;
- poolestusajast;
- kiirguse liigist;
- radioaktiivsel lagunemisel tekkivast soojuse hulgast.

Radioaktiivseid jäätmeid tekib erinevate tegevuste tulemusena, eeldusel, et nende tegevuste käigus kasutatakse radioaktiivseid materjale, näiteks tekib radioaktiivseid jäätmeid ka erinevate kiirgusallikate kasutamise tulemusena nii meditsiinis kui ka tööstuses. Umbes 90% radioaktiivsetest jäätmetest tekib aga energiatootmisega seotud valdkondades, seega eelkõige tuumaelektrijaamades.

Rahvusvahelise Aatomienergiaagentuuri poolt sätestatud radioaktiivsete jäätmete käitlemise põhiprintsiibid on järgmised:

- radioaktiivseid jäätmeid käideldakse viisil, mis tagab inimese tervise ja keskkonna kaitse vastuvõetaval tasemel;
- radioaktiivseid jäätmeid käideldakse viisil, mis tagab võimalike piiriüleste mõjude arvessevõtmise ka naaberriikide inimeste tervisele ja keskkonnale;
- radioaktiivseid jäätmeid käideldakse viisil, mis ei põhjusta üleliigset koormust tulevastele põlvkondadele ja millega seonduvad ennustatavad mõjud inimeste tervisele ei oleks suuremad kui tänapäeval vastuvõetavad tasemed;
- radioaktiivseid jäätmeid käideldakse vastavalt seadusandluses sätestatule. Seadusandlus peab muuhulgas tagama sõltumatu regulatiivorgani olemasolu ja vastutusalade selge jaotuse;
- radioaktiivsete jäätmete tekitamise mahtusid hoitakse nii madalal tasemel kui võimalik;
- radioaktiivsete jäätmete tekitamise ja käitlemise juures tuleb võtta arvesse kõiki vastastikuseid sõltuvusi radioaktiivsete jäätmete tekitamise ja nende käitlemise etappide vahel;
- radioaktiivsete jäätmete käitlemisrajatiste ohutus tagatakse kogu nende kasutusaja kestel.

Radioaktiivsete jäätmete puhul kasutatakse sageli järgmist klassifikatsiooni:

- madalaktiivsed radioaktiivsed jäätmed
- keskmise aktiivsusega radioaktiivsed jäätmed
- kõrgaktiivsed radioaktiivsed jäätmed (seal hulgas ka kasutatud tuumkütus)

Lühema poolestusajaga jäätmete puhul on sageli kasutusel niiöelda vaheladustus, kus oodatakse kuni radioaktiivsete jäätmete aktiivsus on langenud teatud tasemeteni ning neid jäätmeid võib edasi käidelda nagu tavajäätmeid. Ehk sellised jäätmed ei põhjusta enam kiirgusohtu. Sõltuvalt käideldatavate radioaktiivsete jäätmete aktiivsusest kasutatakse käitlemiseks ka erinevaid käitluskohti. Näiteks on osad radioaktiivsete jäätmete käitluskohad maapinnalähedased (peamiselt kasutusel madal ja keskmise aktiivsusega jäätmete puhul), samas kui kasutusel on ka sügavad geoloogilised käitluskohad (peamiselt kõrgaktiivsete radioaktiivsete jäätmete ladustamiseks).

Eestis tegeleb radioaktiivsete jäätmete käitlemisega AS A.L.A.R.A. ning Paldiskis asub radioaktiivsete jäätmete vaheladustuspaik. Kõrgaktiivseid jäätmeid Eestis ei

ole, kuid on madala ja keskmise aktiivsusega radioaktiivsed jäätmed. Valdav osa neist pärineb Paldiski endise tuumaobjekti puhastamisest.

Joonis 6.11. Kesmise aktiivsusega ja madala aktiivsusega radioaktiivsete jäätmete vaheladustamine Paldiski objektil (autori fotod).

Joonis 6.12. Keskmise aktiivsusega radioaktiivsete jäätmete vaheladustamiseks kasutatakse betoonist valmistatud konteinereid (AS A.L.A.R.A.).

Võrreldes teiste jäätmeliikidega on aastased radioaktiivsete jäätmete kogused Euroopa Liidus väikesed:
• 1000 miljonit m3 tööstusjäätmed;
• 10 miljonit m3 ohtlikke jäätmeid;
• 150 m3 madala ja keskmise aktiivsusega radioaktiivseid jäätmeid ja
• 80 m3 kõrge aktiivsusega radioaktiivseid jäätmeid.

Tuumaohutus

Ohutuse tagamise suhtes on tuumaenergia arengu kestel väga palju tehtud ja saavutatud. Euroopa Liidu kui maailma suurima tuumaelektri tootja seadmetes ei ole kogu ajaloo jooksul toimunud ühtki tõsisemat avariid. Enamik praegustest töötavatest tuumareaktoritest on ohutuse suurendamiseks ja käidu lihtsustamiseks täiustatud. Eriti kehtib see uue põlvkonna kergevee reaktorite kohta, mille ehitusse on projekteeritud lihtsustatud hooldussüsteemid ja passiivsed, see on operaatorist sõltumatult toimivad, ohutussüsteemid.

Tuumaenergeetikas võivad ohutuse rikkumise tagajärjed ulatuda kaugele väljapoole tuumajaama ennast. Selgeks näiteks oli puuduliku konstruktsiooniga reaktori ja ohutusreeglite jõhkra rikkumise tulemusena arenenud Tšernobõli avarii 1986. a. Seepärast ei saa tuumaohutusega seotud tegevust ainult tuumajaama operaatori kontrolli alla jätta. Igal juhul on õigustatud tõhus asjakohasele seadusandlikule ja täidesaatvale baasile tuginev riigipoolne ja rahvusvaheline järelevalve. Nii irooniline kui see ka ei näi, soodustas just eelnimetatud avarii tuumaohutuse tohutut parandamist kogu maailmas. Võib täie kindlusega väita, et kaasaegsed arendused reaktoriehituses koos praeguste ohutusstandardite, käidupraktika, tugeva järelevalve- ja inspektsioonisüsteemiga on võimelised tagama tuumaenergia ohutuse. Samas suurenevad riskid vältimatult, kui ükski neist süsteemidest ei täida oma ülesandeid korralikult.

Tuumajaama käitamisel peavad olema rakendatud asjakohased tuumaohutuse meetmed, mille eesmärgiks on hädaolukordade tekkimise vältimine, elanikkonna ja töötajate ning ümbritseva keskkonna kaitsmine tuumajaama käitamisest põhjustatud ioniseeriva kiirguse mõjude eest. Peamiselt rakendatakse tuumajaama ohutuse tagamiseks sügavuti mineva kaitse põhimõtteid, mis koosnevad viiest tasandist:

- Esimese tasandi eesmärgiks on ära hoida kõrvalekalded tuumajaama tavapärasest toimimisest;
- Teise tasandi eesmärgiks on tuumajaama tavapärase toimimise järelevalve ja võimalike kõrvalekallete avastamine.
- Kolmanda tasandi eesmärgiks on tuumajaama tehniliste lahenduste põhiste tuumaintsidentide ärahoidmine.
- Neljanda tasandi eesmärgiks on tuumajaama tavapärase toimimise kõrvalekalletest tingitud tuumaintsidentide progresseerumise ärahoidmine või nende võimalike tagajärgede leevendamine.
- Viienda tasandi eesmärgiks on keskkonda paiskunud radioaktiivsete ainete poolt põhjustatud kahjustuste leevendamine.

Termotuumasüntees

Lisaks tuumade lõhustumisele loodakse tulevikus kasutada energiatootmises ka termotuumasünteesi reaktsioone. Termotuumasünteesi kasutamist energiatootmiseks on alles väljatöötamisel. Termotuumasünteesi näol on tegemist reaktsiooniga, milles kaks väga kerget tuumad ühinevad, et moodustada stabiilne tuum ning selle käigus vabaneb suur kogus energiat. Termotuumasünteesi toimumiseks peavad positiivse laenguga tuumad ületama elektrostaatiliste jõudude poolt tekitatavad tõukejõud. Kõige keerulisem termotuumareaktsiooni puhul on leida selline energiaallikas, mis oleks piisav reaktsiooni algatamiseks ning selle käigus hoidmiseks. Käesoleval ajal ehitatakse rahvusvahelist katsetermotuumareaktorit ITER. ITERi näol on tegemist suureulatusliku teadusliku eksperimendiga, mille eesmärgiks on tõestada, et termotuumareaktsioone on võimalik kasutada energiatootmiseks.