



Euroopa Liit
Euroopa Sotsiaalfond



Eesti tuleviku heaks

KIIRGUSKAITSE

Merle Lust & Kadri Isakar

2009

Tartu Ülikool

Sisukord

I Aatomid, kiirgus ja aine	2
Üldine: aatom, nukliid, isotoop	2
Radioaktiivsus: radionukliid, alfa-, beeta- ja gammakiirgus	5
Radioaktiivse lagunemise seadus ja aktiivsus	8
II Looduslikud ja tehiskivid ioniseeriva kiirguse allikad	17
Radionukliidide read	23
Radoon	27
Kiirgus organismis	30
Kiirgusallikate kasutamine	31
Kiirguse kasutamine meditsiinis	32
Ioniseeriv kiirgus tööstuses	40
Tuumarelvade katsetused	45
Avariid	48
III Ioniseeriva kiirguse bioloogilised efektid	52
Bioloogilised efektid	52
Kiirguse ja raku vastasmõju neli etappi	53
DNA, kiirguse otsene ja kaudne toime	54
Deterministlikud ja stohhastilised efektid	57
Vähi tekkimine	61
Pärilikud haigused	63
Akuutse kiirituse sündroom	64
Kiirguse mõju uurimise iseärasustest	65
IV Tuumaenergeetika	66
Tuumaenergeetika	66
Surveveereaktor, PWR	73
Keevveereaktor	74
III põlvkonna tuumareaktorid	75
Tuumakütuse tsükkel ja jäätmed	76
V Radioaktiivsed jäätmed	83
Radioaktiivsed jäätmed	83
Radioaktiivsete jäätmete käitlemisest seadusandluses	86
Keskkonda vabastamine	88
Vedelad, tahked ja gaasilised radioaktiivsed jäätmed	89
Tuumakütusesükli radioaktiivsed jäätmed	91
Kasutatud tuumkütus	97
Dekomisjoneerimine	100
VI Kiirguskaitse süsteem	101
Ajalugu ning organisatsioonid	101
Üldised põhimõtted	104
Tegevuse õigustamine	105
Kaitse optimeerimine	107
Doosi piirmäärad	108
Riiklik kiirguskaitse	109

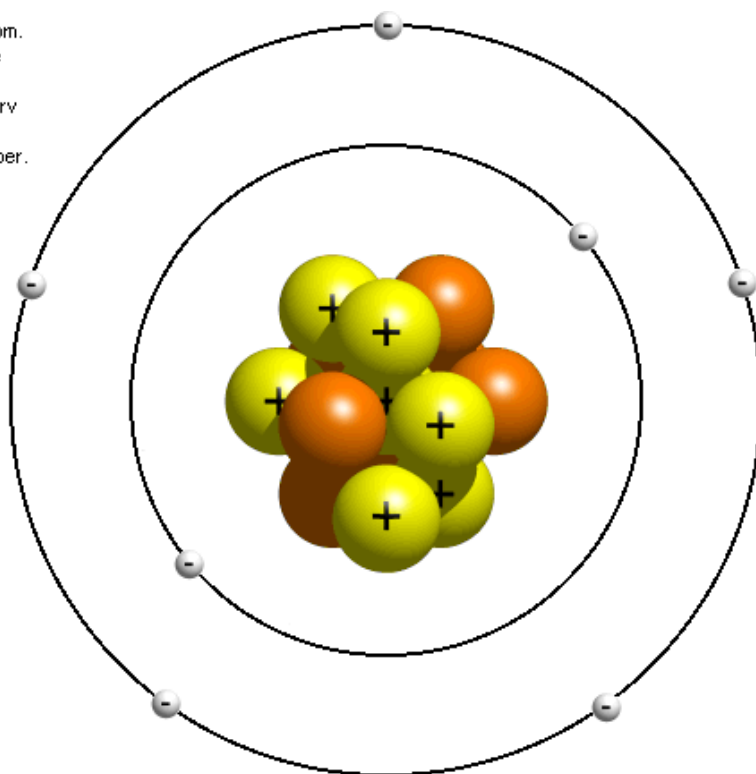
I Aatomid, kiirgus ja aine

Üldine: aatom, nukliid, isotoop

Kõik ained, mis esinevad meid ümbritsevas maailmas, koosnevad **aatomitest**. Teadlased Rutherford ja Bohr tegid möödunud sajandi algul kindlaks, et aatom koosneb omakorda positiivselt laetud tuumast, mida ümbritsevad negatiivse laenguga **elektronid**.

Elektronid kannavad negatiivset laengut ja moodustavad tuuma ümber liikuva muutuvate piiridega pilve, mida kutsutakse ka kihiks. Tavaliselt on tuum 10 000 korda väiksem kui elektronpilv ja elektronid ise veel väiksemad. See tähendab, et aatom on suuremas osas tühi ja teda on raske kujutada teisiti kui ainult visandlikult.

Lämmastiku (N) aatom.
Näha on 7 positiivse laenguga prootonit tuumas ning sama arv negatiivselt laetud elektrone tuuma ümber.

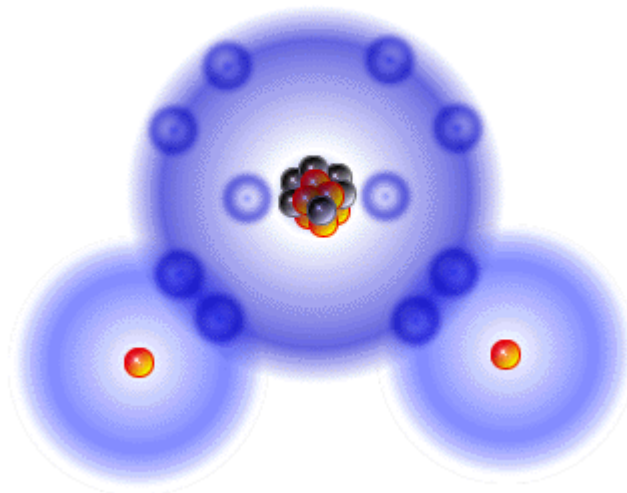


Aatomituum sisaldab **protoneid**, mis kannavad **elektroni** negatiivse laenguga võrdset positiivset laengut, ja **neutroneid**, millel pole üldse laengut. **Protonitel** ja **neutronitel** on omakorda sisemine struktuur, mis aitab mõista aatomituumade koospüsümise mehhanisme, kuid selle kirjeldamine jääb antud loengukursuse raamidest väljapoole.

Iga aatom sisaldab tavaliselt võrdse arvu **elektrone** ja **protoneid** ning on seetõttu elektriliselt neutraalne. Sama või erinevate elementide aatomid võivad ühineda ja moodustada suuremaid laenguta kogumeid, mida kutsutakse **molekulideks**.

Näiteks kaks hapniku aatomit moodustavad ühe hapniku molekuli ja kaks vesiniku aatomit moodustavad koos ühe hapniku aatomiga ühe vee molekuli.

VEE MOLEKUL



	Prooton	Neutron	Elektron
Elektrilaeng	Positiivne (+)	Neutraalne (0)	Negatiivne (-)
Mass	$1,6726 \times 10^{-24}$ g ehk $1,007276470$ amü*	$1,6749 \times 10^{-24}$ g ehk $1,007276470$ amü	$9,1094 \times 10^{-28}$ ehk $0,00054858016$ amü
Tähtis	Prootonite arv tuumas määrab keemilise elemendi.	Neutronite arv tuumas määrab elemendi isotoobi .** Neutronite arvust ei sõltu elemendi keemilised omadused.	Tavaliselt on elektronide arv aatomis võrdne prootonite arvuga ning aatom on elektriliselt neutraalne. Keemilist käitumist mõjutab elektronide arv kõige välimisel orbiidil.

***aatommassiühik**

****Isotoobid** on aatomid, mis sisaldavad sama arvu **prootoneid**, st on samast keemilisest elemendist, aga erineva arvu **neutroneid**.

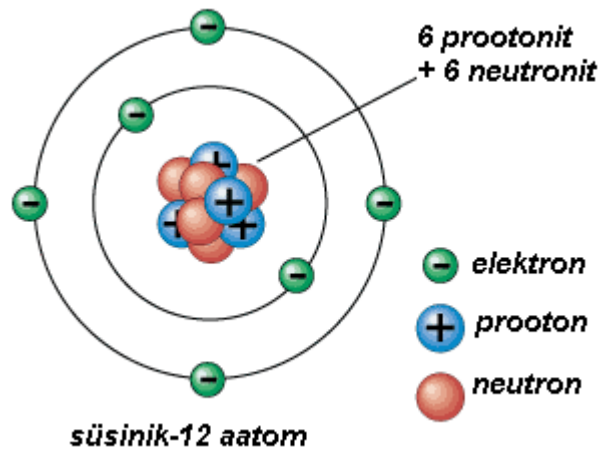
Elektronide arv aatomis – ja vastavalt **prootonite** arv tuumas, mida nimetatakse **aatomnumber** – annab elemendile tema unikaalsed omadused. Kõigil ühe elemendi aatomitel on sama **aatomarv**. Näiteks süsiniku **aatomnumber** on 6, samas kui plii **aatomnumber** on 82. Põhjusel, et **prootonitel** ja **neutronitel** on peaaegu võrdne mass ja nad on palju raskemad kui elektronid, koondub enamus aatomi massist tuuma. **Prootonite** ning **neutronite** koguarvu nimetatakse **massiarvuks**.

Näiteks harilikus vesiniku aatomituumas on 1 **prooton** ning **neutronid** puuduvad, seega tema **massiarv** on 1.

Kui aga uraani **isotoop** sisaldab 146 **neutronit**, siis tema **massiarv** on 238 (92 **protonit** + 146 **neutronit**).

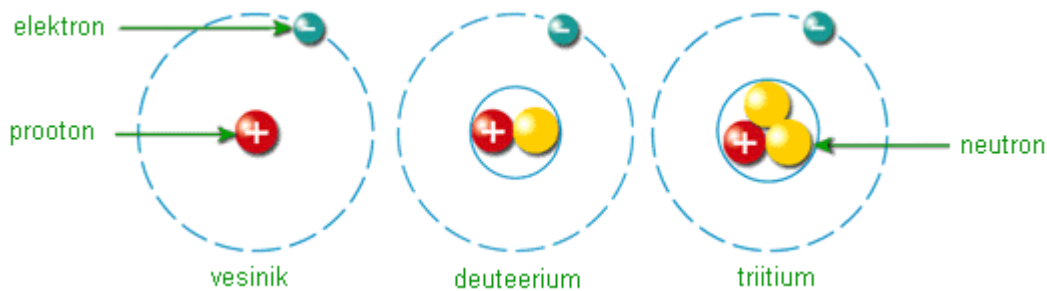
Et aga **prootonite** arv on igale elemendile ainuomane, võime lihtsalt kasutada elemendi nime koos **massiarvuga**, et määrata iga aatomi tüüpi ehk **nukliidi**.

Näiteks on süsinik-12 kuue **protoni** ja kuue **neutroniga** nukliid. Võrdluseks plii-208 on 82 **protoni** ja 126 **neutroniga** nukliid (82+126=208).



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:

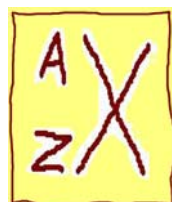
- vesinik-1 (tavaline vesinik, mille tuumas on ainult üks prooton),
- vesinik-2, mida kutsutakse deuteeriumiks (üks prooton ja üks neutron) ja
- vesinik-3, mida kutsutakse triitiumiks (üks prooton ja kaks neutronit).



Raual on kümme isotoopi vahemikus raud- 52 kuni raud-61, igaühe tuumas on 26 prootonit, mis on iseloomulikud elemendile, kuid vastavalt 26 kuni 35 neutronit. Massiarvu võib kasutada koos elemendi nimega täpsustamaks elemendi isotoopi.

Näiteks viidates uraani isotoobile massiarvuga 238 võib selle kirjutada uraan-238 või veelgi lühemalt $U-238$.

Teatud prootonite ja neutronite kombinatsiooni tähistamiseks on kasutusel omad reeglid. Selleks kasutatakse standardset keemilist sümbolit, mille vasemale alla kirjutatakse aatomarv ning vasemale üles massiarv.



kus X on elemendi sümbol,

Z aatomarv (prootonite arv) ja

A on massiarv (prootonite ja neutronite arvu summa $A=N+Z$)

Näiteks uraan-238 tähistus oleks seega ${}^{238}_{92}U$.

Radioaktiivsus: radionukliid, alfa-, beeta- ja gammakiirgus

Ehkki paljud nukliidid on stabiilsed, siis enamik seda ei ole. Stabiilsus määratakse peamiselt nukliidis sisalduvate neutronite ja prootonite arvu vahelise tasakaalu järgi. Väiksemates stabiilsetes tuumades on see arv tavaliselt võrdne, suuremates stabiilsetes tuumades on neutroneid veidi rohkem kui prootoneid.

Neutronite suure ülekaaluga tuumad püüavad saavutada stabiilsemat struktuuri, muundades neutroneid prootoniteks. 1896. aastal avastas Becquerel uue nähtuse, mida abielupaar Curie'de ettepanekul hakati nimetama radioaktiivsuseks - tuuma iseeneslik muundumine, mille käigus tekkiv üleliigne energia vabaneb ioniseeriva kiirgusena. Muundumise akti kutsutakse lõhustumiseks ja muutuvat ning kiirgust eraldavat nukliidi nimetatakse radionukliidiks. Lõhustumise tulemusena vabaneb energia ja üldjuhul tekivad uued tuumad. Peale radioaktiivsuse avastamist tehtud uuringud on näidanud, et:

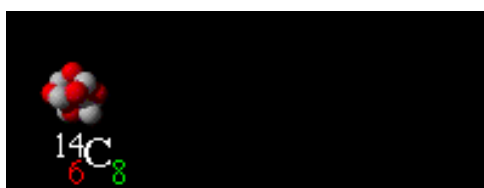
- ioniseerv kiirgus on võimeline esile kutsuma bioloogilist ja keemilist mõju,
- ioniseerival kiirgusel on ainet suur läbitungimisvõime.

Üksikasjalisem uurimine on näidanud, et põhiliselt on olemas kolme liiki kiirgust:

1. 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.



2. β -kiirgus. Beetakiirguse moodustavad elektronid, mis eralduvad ebastabiilsest tuumast. Beetaosakesed on alfaosakestest tunduvalt väiksemad ja võivad tungida sügavamale materjalidesse või kudedesse. Beetakiirgus neeldub täielikult plastikust, klaasist või metallikihis. Tavaliselt ei tungi see naha pealispinnast sügavamale. Siiski võib ulatuslikum kokkupuude suure energiaga beetakiirgajatega põhjustada nahal põletusi. Sellised kiirgajad võivad ohtlikuks osutada ka sissehingamise või neelamise käigus kehasse sattudes.



3. 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.



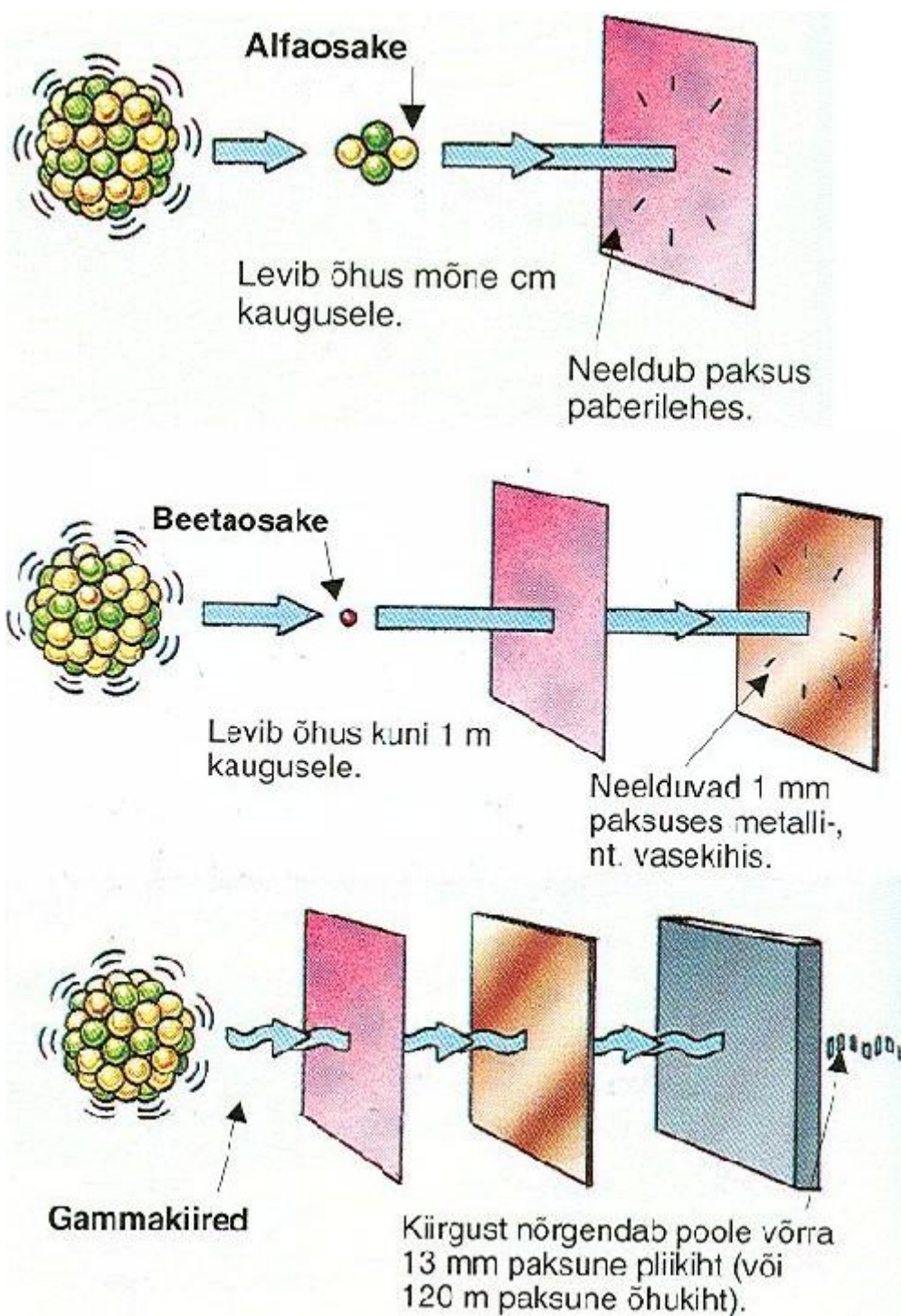
Lisaks eelnevatele tulevad kiirguskaitstes mängu ka järgmised kiirgused:

- **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.

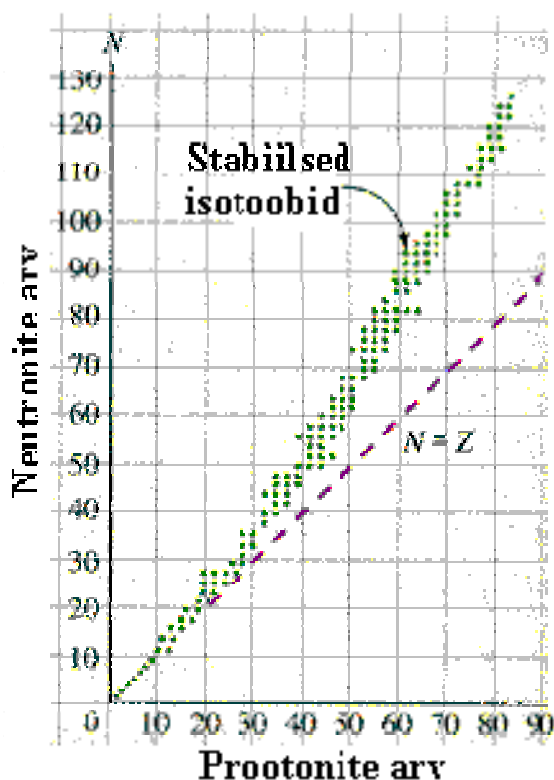
- **Neutronkiirguse** moodustavad neutronid, mis eralduvad ebastabiilsetest tuumadest, eriti aatomi lagunemise ja tuumade liitumise ajal. Ehkki neutroneid esineb kosmilistes kiirtes, kutsutakse neid tavaliselt esile tehnikult. Neutronid on elektriliselt neutraalsed ja seetõttu väga suure läbimisvõimega. Kokkupuutes aine või kudede kaudu kutsuvad nad esile beeta- ja gammakiirgust. Neutronkiirguse mõju vähendamiseks on vajalik väga tugev varjestus.

- **Kosmilise kiirguse** tuleb avakosmosest. See on segu mitmetest erinevatest kiirguse liikidest, sealhulgas prootonid, alfaosakesed, elektronid ja mitmed teised suure energiaga osakesed. Kõik need osakesed on tugevas vastastikmõjus atmosfääriosakestega, mille tulemusena koosneb kosmilise kiirguse maapinnale jõudev osa peamiselt müüonitest, neutronitest, elektronidest, positronidest ja footonitest. Valdav osa maapinnal saadavast doosist tuleb müüonidest ja elektronidest.

Kiirguse liik	Elektri line laeng	Oht	Peatab
Alfaosakesed	+2	sisemine	paber
Beetaosakesed	-1	sisemine, nahk, silmad, välimine	plastik, klaas, alumiinium
Neutronid	0	väline	vesi, plastik
Gammakiirgus	0	väline	tina, betoon
Röntgenkiirgus	0	väline, nahk	Madalate energiatega korral kõik, kõrgemate energiatega korral



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. Kui aga materjal on radioaktiivseks muudetud, siis ei ole võimalik seda enam lihtsalt 'välja lülitada' või hävitada. Materjali **aktiivsus** väheneb ise aega mööda ning selleks kuluv ajaperiood sõltub materjalist.



Radioaktiivse lagunemise seadus ja aktiivsus

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*.

Seejuures λ on erinevatel **nukliididel** erinev ja võrdub tuuma lagunemise tõenäosusega ajaühikus. Radioaktiivse tuuma *keskmine eluiga* võrdub *radioaktiivse lagunemise konstandi* pöördväärtusega:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

Radioaktiivse lagunemise konstandi ja radioaktiivse tuuma keskmise eluea asemel leiab praktikas sageli kasutamist *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.

Näiteks jood-131 puhul on see 8 päeva, tseesium-137 korral 30 aastat, süsinik-14 poolestusaeg on 5730 aastat, plutoonium-239 oma 24 000 aastat ja uraan-238 poolestusaeg on 4470 miljonit aastat.

Järjestikusel poolestumisel kahaneb radionukliidi aktiivsus $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ -ni jne oma algsest väärtusest. See tähendab, et on võimalik prognoosida järelejäänud aktiivsust. Kui radionukliidi kogus väheneb, väheneb proportsionaalselt ka eralduv kiirgus. Kasutades eelnevaid seoseid on võimalik tuletada, et poolestusaeg T avaldub järgmiselt:

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

Poolestusaega iseloomustab visuaalselt järgnev pilt.

Poolestusaeg:

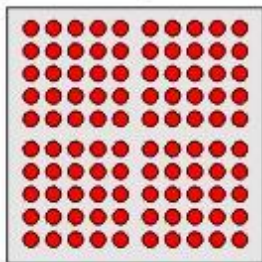
dwu-Unterrichtsmaterialien.de
pap111f

© 2001



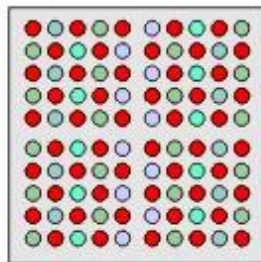
Poolestusajaks nimetatakse aega, mille jooksul antud isotoobi kogus radioaktiivse lagunemise tõttu väheneb kaks korda. Poolestusaeg võib ulatuda sekundi murdosast miljardite aastateni. Tulemusena tekkiv uus isotoop võib omakorda radioaktiivne olla ja oma poolestusajaga.

Näiteks: **aktiinium-227** poolestusajaga umbes 22 aastat



täna

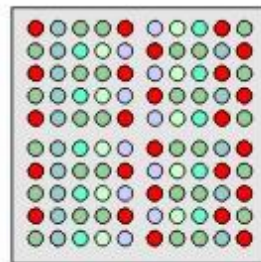
100% ●



22 aasta pärast

1 poolestusaeg

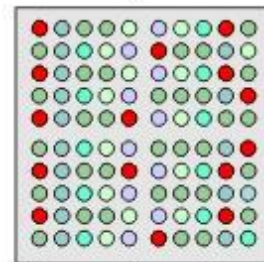
50% ●



44 aasta pärast

2 poolestusaega

25% ●

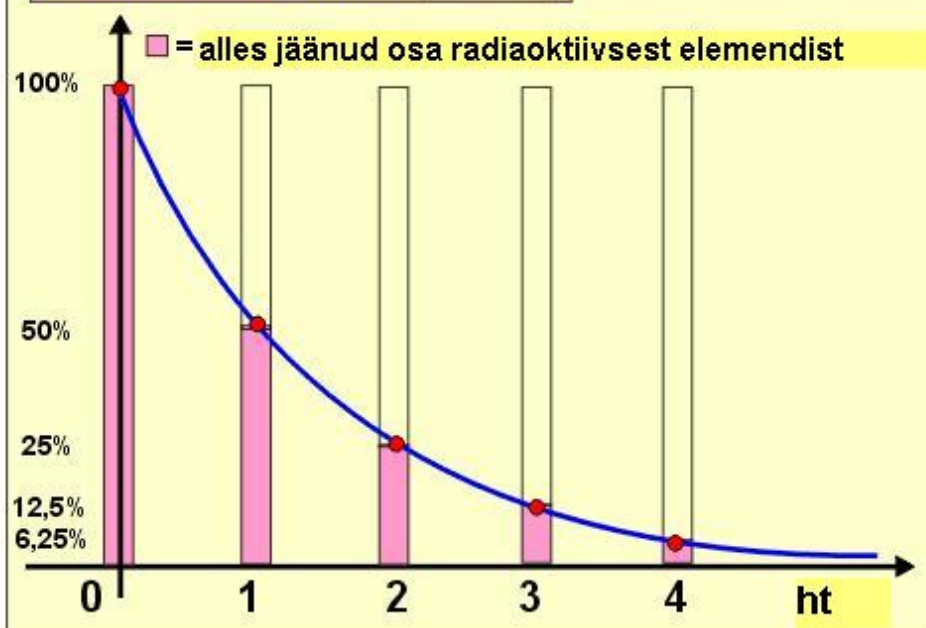


66 aasta pärast

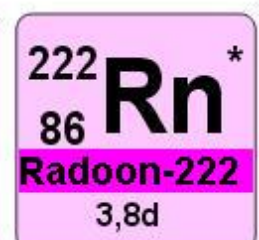
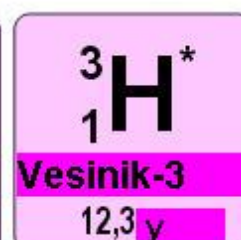
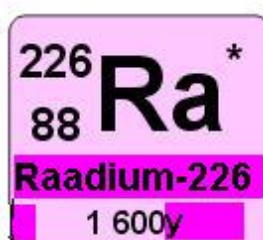
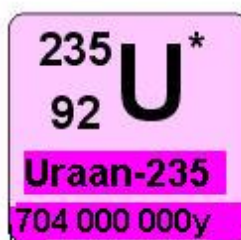
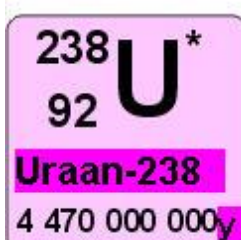
3 poolestusaega

12,5% ●

Poolestusaeg (ht):



Mõnede keemiliste elementide poolestusajad:



Iseeneslike muundumiste toimumise määra antud hulgas radioaktiivses materjalis nimetatakse **aktiivsuseks**. Aktiivsust väljendatakse ühikutes, mida nimetatakse **bekerelli**ks (sümbol Bq). Üks Bq võrdub ühe muundumisega sekundis. **Bekerell** on saanud oma nime prantsuse füüsiku Henri Becquereli järgi. Ühik on väga väike ja seetõttu kasutatakse **bekerelli** tihti kordsetena, näiteks megabekerell ehk MBq, mis on 1 miljon **bekerelli**.

Näiteks ühe grammi raadium-226 **aktiivsus** on ligikaudu 37 000 MBq:

– See tähendab, et ta eraldab umbes 37 000 miljonit **alfaosakest** igas sekundis (Varem kasutatud **aktiivsuse** ühikut **küri** – mis sai nime poola päritolu prantsuse teadlase Marie Curie järgi, defl neeriti kui ühe grammi raadiumi **aktiivsust**).



Raadiumi kasutati varem laialdaselt kelladele helendavate numbrite maalimiseks. Sellised kellad on veel praegugi suhteliselt radioaktiivsed ja jäävad niisuguseks veel kauaks, kuna raadium-226 **poolustusae**g on umbes 1600 aastat.

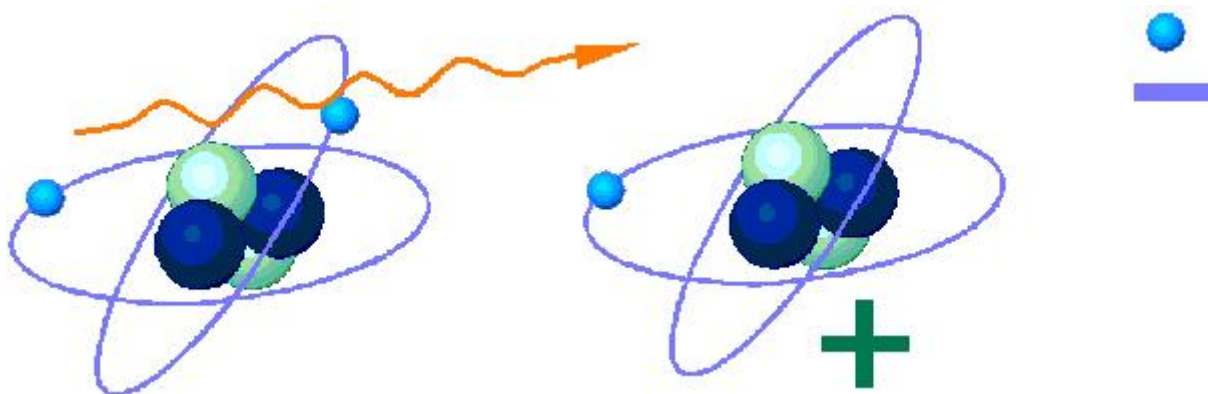
Aine **aktiivsust** massi-, ruumala- või pindalaühiku kohta nimetatakse **eriaktiivsuseks**. **SI** järgi on **eriaktiivsuse** ühikud vastavalt Bq/kg, Bq/m³ ja Bq/m².

Näiteid **aktiivsustest**:

Täiskasvanud inimene	7000 Bq
1 kg kohvi	1000 Bq
100 m² korteri õhk	30 000 Bq
Kodune suitsudetektor	30 000 Bq
Meditiinilises diagnoosis kasutatav radionukliid	70 miljon Bq
Meditiinilises teraapias kasutatav radionukliid	100 000 000 miljon Bq
1 kg kivisütt	2000 Bq
1 kg uraani	25 miljon Bq

Ionisatsioon, neeldunud doos, ekvivalentdoos, efektiivdoos Elektrilaenguga alfa- ja beetaosakesed annavad energia ära vastastikusel *elektrilises* toimes aines sisalduvate elektronidega. Gamma- ja röntgenkiired kaotavad energiat erineval viisil, kuid mõlema puhul on tegemist (orbitaal)elektronide vabastamisega aatomist, mis siis annavad energiat üle vastastikusel toimes teiste elektronidega. Ka neutronid kaotavad energiat erinevatel viisidel, millest olulisemaks on kokkupõrked prootoneid sisaldavate tuumadega. Prootonid pannakse selle tagajärjel liikuma ning oma laengu tõttu annavad nad saadud energia edasi vastastikuse elektrilise mõju kaudu. Seega kiirgus põhjustab igal juhul aines vastastikuseid elektrilisi mõjutusi.

Mõnel juhul võib elektron aines saada piisavalt energiat, et lahkuda aatomist ning jätta maha positiivse laenguga aatom või molekul. Protsessi, mille käigus neutraalne aatom või molekul omandab laengu, nimetatakse *ionisatsiooniks* ja selle tulemusel tekkiwat üksust *iooniks*. Aatomi juurest eraldunud elektron võib omakorda ioniseerida teisi aatomeid või molekule. Ükskõik millist *ionisatsiooni* esile kutsuvat kiirgust – kas vahetut nagu alfa- ja beetaosakeste puhul või kaudset nagu gamma- ja röntgenkiirte ning neutronite korral – tuntakse kui *ioniseerivat kiirgust*. Aatomeid läbivad laetud osakesed võivad samuti anda energiat aatomi elektronidele ilma, et viimased aatomist lahkuksid. Sellist protsessi nimetatakse *ergastamiseks*.



Ionisatsioon:

Ioniseeriv kiirgus (oranž nool) kohtub aatomiga ning annab ära osa oma energiast lüües elektronihilt välja **elektroni**. Järele jäävad negatiivselt laetud **elektron** ning positiivselt laetud aatom ehk **ioon** – sellest ka väljend „**ioniseeriv kiirgus**“.

Me ei suuda **ioniseerivat kiirgust** meeltega tajuda, kuid võime seda avastada ja mõõta kasutades erinevaid meetodeid ning vahendeid. Mõõtmistulemusi võime väljendada energiaühikutes, mida kiirgus annaks üle inimkehale või kehaosale. Kui otsene mõõtmine pole võimalik – näiteks **radionukliid** asub organismis, siis saame vastavas elundis **neeldunud doosi** arvutada, kui teame elundisse jäänud **aktiivsuse** suurust.

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 ($1\text{Gy}=1\text{ J kg}^{-1}$). Sageli kasutatakse *grei* alamjaotusi nagu milligrei (mGy), mis on üks tuhandik *greid*. *Greid* sai nimetuse inglise füüsiku Harold Gray järgi

Neeldunud doos:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} ,$$

kus $d\varepsilon$ on keskmine üle antud energia, mille *ioniseeriv kiirgus* annab ainele ruumielemendis massiga dm .

Seda energiat võib keskmistada üle igasuguse määratletud ruumala, kusjuures keskmine *doos* võrdub kogu sellele ruumalale üleantud energiaga, mis on jagatud selles ruumalas oleva aine massiga.

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 *ekvivalentdoos*, mille ühik on *siivert* (sümbol Sv). Sageli kasutatakse *siiverti* kordseid nagu millisiivert ehk mSv, mis on üks tuhandik *siivertit*. *Siivert* on saanud nimetuse rootsi füüsiku Rolf Sieverti järgi.

Ekvivalentdoosi leidmiseks korrutatakse *neeldunud doos* faktoriga, mis võtab arvesse viisi, kuidas kiirgus koele energiat üle annab, nii et saame arvutada selle *suhtelist võimet põhjustada bioloogilisi kahjustusi*. *Gamma-* ja *röntgenkiirguse* ning *beetaosakeste* jaoks on selleks *kiirguse kaalu faktoriks* võetud 1 ning *neeldunud doos* ja *ekvivalentdoos* on arvuliselt võrdsed. *Alfaosakeste* puhul on faktor 20, nii et *ekvivalentdoos* on 20 korda suurem kui *neeldunud doos*. Erineva energiaga *neutronite* kaalufaktorite väärtused jäävad vahemikku 5-20.

$$\begin{aligned} & \text{Ekvivalentdoos } H_{T,R}, \\ H_{T,R} &= W_R \cdot D_{T,R} . \end{aligned}$$

Kui kiirgusväli koosneb erineva kaalufaktori W_R väärtustega kiirgustest, siis arvutatakse *ekvivalentdoos* järgmise summana:

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} .$$

Kiirgusfaktorid sõltuvad kiirguse poolt põhjustatavast ionisatsioonitihedusest ehk sellest, kui palju kahjustusi tekitab vastavat liiki kiirgus mingisuguses läbitud ruumalas.

Kiirguse liik	W_R
Elektronid, röntgen- ja gammakiirgus	1
Prootonid	5
Aeglased ehk termilised neutronid	5
Kiired neutronid	5-20
Alfaosakesed, lõhustumistuumad	20

Sellisel defineerides kirjeldab **ekvivalentdoos** tõenäolist ohtlikkuse määra konkreetsele koele või elundile sõltuvalt kokkupuutest kiirgusega, olenemata kiirguse liigist.

Näiteks põhjustab 1 Sv **alfakiirgust** kopsule samasuguse eluohtliku kopsuvähi tekkeriski kui 1 Sv **beetakiirgust**.

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 kasvajakud või tõsise päriliku kahjustuse oht, mida põhjustab munandite või munasarjade kokkupuude kiirgusega. Need mõjud erinevad nii tüübilt kui 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 E on vastavate **koefaktoritega** korrutatud kudede **ekvivalentdooside** summa:

$$E = \sum_T W_T H_T ,$$

kus H_T on keskmine **ekvivalentdoos** koes või elundis T ja W_T on koe T jaoks määratletud **koefaktor**. Ka **efektiivdoosi** ühikuks on **siivert** (Sv).

Organid, koed	W_T
Nahk	0.01
Maks	0.05
Magu	0.12
Kopsud	0.12
Luuüdi	0.12
Suguelundid	0.20

Vahel on vajalik mõõta kiirguse kogudoosi inimeste rühmadele või kogu elanikkonnale. Summaarset kogust kirjeldav doos on **kollektiivne efektiivdoos**. Selle leidmiseks liidetakse kiirgusallikaga kokku puutunud rühma või elanikkonna kõikide üksikisikute **efektiivdoosid**. Näiteks kõikidest kiirgusallikatest saadav **efektiivdoos** on keskmiselt 2,8 mSv aastas. Et maailmas on umbes 6 miljardit inimest, siis kogu elanikkonna kollektiivne **efektiivdoos** aastas on nende kahe arvu korrutis – umbes 17 miljonit **inimsiivertit** (sümbol inimSv).

Efektiivdoosi näiteid:

1 tund lennukis 10 km kõrgusel	5 mikroSv
keskmine ööpäevane looduskiirgusest põhjustatud doos	6,5 mikroSv
keskmine aastane looduskiirgusest ja meditsiinist saadav doos	3 mSv
lühikese aja jooksul kogu keha poolt saadud kiirgusdoosi puhul ajutine verepildi muutus; suurenenud oht kasvaja tekkimiseks	1 Sv
lühikese aja jooksul kogu keha poolt saadud kiirgusdoosi puhul äge kiiritustõbi; juuste väljalangemine	2,5 Sv
lühikese aja jooksul kogu keha poolt saadud kiirgusdoosi puhul suure tõenäosusega surmav	6 Sv

Elanikkonna *kollektiivne efektiivdoos*:

$$S = \sum_i E_i N_i ,$$

kus E_i on elanikkonna alarühma i keskmine *efektiivdoos* ja N_i on isikute arv selles alarühmas.

Tavaliselt kasutatakse *efektiivdoosi* asemel väljendit *doos* ja *kollektiivse efektiivdoosi* asemel *kollektiivdoos*. Sama loogikat jälgitakse ka õppematerjalides.

Kokkuvõttes:

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 efektiivdoosid.

Enim kasutatavad kümneastmed:

Kümne aste	Lahti kirjutatuna	Nimetus	Lühend
10^{-9}	0,000 000 001	nano	n
10^{-6}	0,000 001	mikro	μ
10^{-3}	0,001	milli	m
10^{-2}	0,01	senti	c
10^2	100	hekto	h
10^3	1 000	kilo	k
10^6	1 000 000	mega	M
10^9	1 000 000 000	giga	G
10^{12}	1 000 000 000 000	tera	T

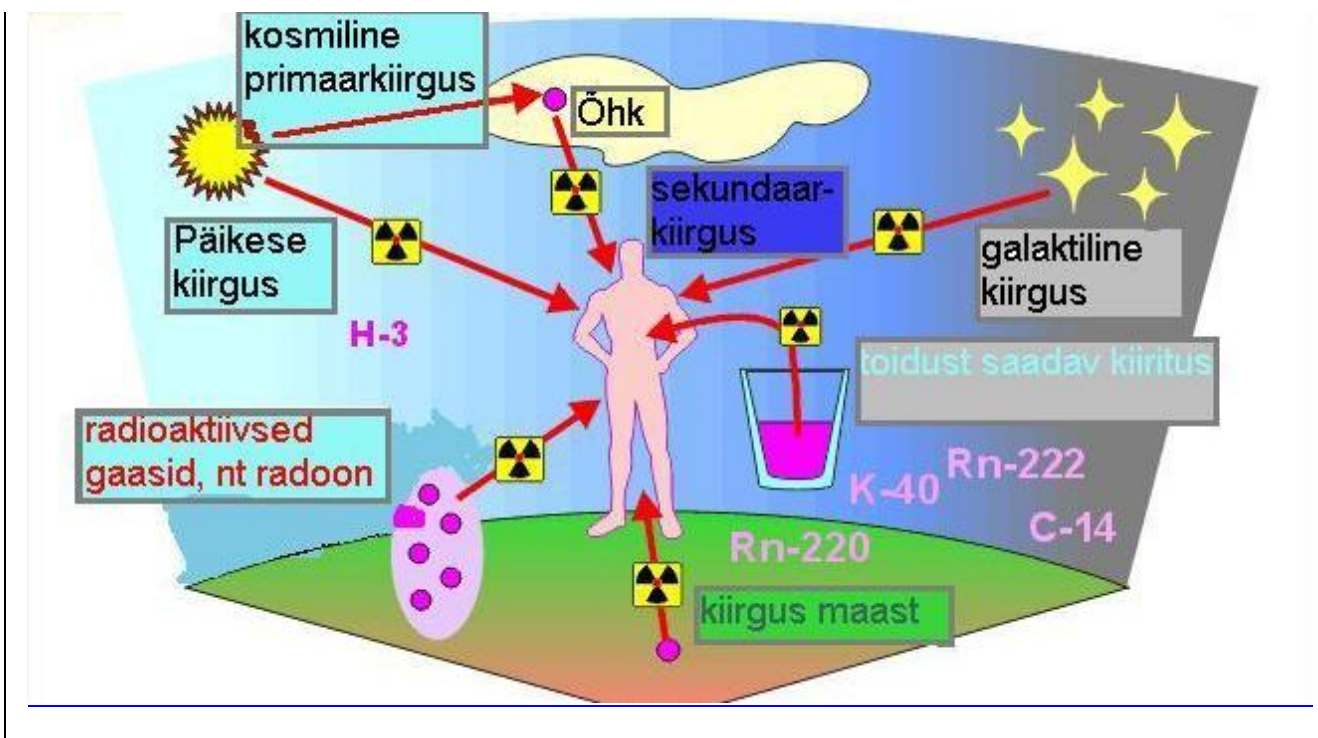
Näiteks 3,2 mikroSv = 0,0032 mSv = 0,0000032 Sv ehk $3,2 \times 10^{-6}$ Sv
5,3 GBq = 5 300 000 000 Bq ehk $5,3 \times 10^9$ Bq

II Looduslikud ja tehislikud ioniseeriva kiirguse allikad

Ioniseeriv kiirgus keskkonnas

Ioniseeriva kiirgusega puutume kokku erineval viisil. See tekib looduslikes protsessides nagu uraani lagunemisel maapinnas ning inimtegevuse tagajärjel nagu röntgenkiirguse kasutamisel meditsiinis. Seega võime vastavalt tekkimisele liigitada kiirguse *looduslikuks* või *tehislikuks*.

Looduslikud kiirgusallikad on *kosmiline kiirgus*, *gammakiirgus maapinnast*, *radooni lagunemisproduktid õhus* ja erinevad *radionukliidid*, mis esinevad looduslikult toidus ja joogis.



Tehisallikateks on meditsiiniline *röntgenkiirgus*, radioaktiivne saaste, mis tekib *tuumarelvade katsetamisel* atmosfääris, *tuumatööstuse radioaktiivsete heitmete* vabanemine keskkonda, *tööstuslik gammakiirgus* ja muud tekitajad nagu näiteks *tarbekaubad*.

Looduslik ioniseeriv kiirgus levib kõikjal keskkonnas. Kosmilised kiired jõuavad Maale avakosmosest. Maa on ise ka radioaktiivne. Looduslik radioaktiivsus on omane nii toidule, joogile kui õhule. Me kõik puutume loodusliku kiirgusega suuremal või vähemal määral kokku ja enamiku inimeste jaoks on see peamiseks kokkupuuteks

ioniseeriva kiirgusega. Veelgi enam, inimeste, loomade ja taimede evolutsioon on kulgenud loodusliku ioniseeriva kiirguse taustal ning üldiselt ollakse seisukohal, et see ei kujuta tervisele märkimisväärset ohtu. Siiski leidub erandeid.

Kosmiline kiirgus

Kosmiline kiirgus avastati kui püüeldi taustakiirguse vähendamise poole. Eeldati, et foon on täielikult põhjustatud pinnases ja õhus leiduvatest radionukliididest, seega peaks maapinnast eemaldudes kiirgusfoon vähenema. Katsel viia detektorid maapinnast eemale fikseeriti kiirguse olemasolu ka kõrgustel, kus oletati ümbritsevate allikate puudumist. Eelduste kohaselt oleks pidanud maapinnast kõrgemale viies mõõtetulemused vähenema, kuid efekt oli vastupidine. Need ja ka teised uuringud näitasid, et tegemist on *Universumist tuleva kiirgusega*.

Kosmilised kiired on peamiselt teadmata kosmilise päritoluga ja väga kõrge energiaga prootonid, mis jõuavad meie atmosfääri üsna muutumatus koguses. On siiski teada, et mõned madalama energiaga prootonid saavad päikeselt ja eralduvad pursetena päikese loidete käigus.

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*. Atmosfääri tungides algatavad kosmilised kiired keerulisi reaktsioone ja neelduvad järk-järgult, nii et *doosikiirus kahaneb kõrguse vähenedes*.

Kosmilised kiired on *segu paljudest erinevat tüüpi kiirgustest*, sisaldades prootoneid, alfaosakesi, elektrone ja teisi erinevaid haruldasi (kõrge energiaga) osakesi. Maapinnal koosneb kosmiline kiirgus eelkõige müüonidest, neutronitest, elektronidest, positronidest ja footonitest. Valdava osa doosist tekitavad müüonid ja elektronid.

Hinnanguliselt on keskmine kosmilistest kiirgusest põhjustatud aasta efektiivdoos maapinnal umbes 0,3 mSv, mis varieerub sõltuvalt kõrgusest ja laiuskraadist. Enamik inimesi elab suhteliselt madalatel kõrgustel ning kosmilise kiirguse mõju neile on seega väiksem (kuigi arvesse tuleb võtta ka laiuskraadist tulenevat varieerumist). Siiski leidub ka suurtel kõrgustel rahvarohkeid asustusi (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. Vähesel määral võivad kosmilise kiirguse doosi mõjutada ka elamute tüübid.

Näiteks kiirgusdoosid erinevatel kõrgustel asuvates asustatud paikades.

<i>Asukoht</i>	<i>Rahvastiku arv (miljon)</i>	<i>Kõrgus (m)</i>	<i>Aastane doos (mikroSv)</i>
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
Mere pinnal			270
Maailma keskmine			380

Kosmiline kiirgus on *lennukõrgustel palju intensiivsem kui maapinnal*. Mandritevahelistes lennukoridorides võivad doosid olla isegi kuni 100 korda kõrgemad kui maapinnal. Tavalised lennureisid põhjustavad täiendava keskmise aastadoosi 0,01 mSv (tihti lendavate üksikreisijate doosid on sellest keskmisest palju kõrgemad), kuid see ei mõjuta maailma keskmist aastadoosi, mis on 0,4 mSv.

Näiteks lennureisidel saadavad efektiivdoosid.

<i>Linnad</i>	<i>Efektiivdoos (µSv)</i>
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
Paris ➤ San Francisco	84.9

Eestis on kosmilise kiirguse doosikiiruseks hinnatud ~0.034 mikroSv/h. *Globaalselt* on kosmisest kiirgusest põhjustatav kollektiivdoos on 2×10^6 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 kosmisest kiirgusest põhjustatud doosikomponent imeväike, kuid seda tuleb arvestada lennunduses töötavate inimeste puhul.

Gammakiirgus

Kõik ained maakooses sisaldavad radionukliide. Kahtlemata on sügaval Maa sisemuses toimivate looduslike protsesside energial maakoore kujunemisel ja sisetemperatuuri säilitamisel oma osa. See energia tuleb peamiselt *uraani, tooriumi ja kaaliumi* radioaktiivsete isotoopide lagunemisest.

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 *torooniks*.

Maapinnal asuvad radionukliidid eraldavad suure läbistuvõimega *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. Doose, mida nad saavad, mõjutavad nii selle piirkonna geoloogilised omadused kui ka elamute ehitamise tavad, kuid looduslikest gammakiirtest saadud *keskmise doosi aastaks 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 ebataavaliselt kõrge aktiivsusega piirkondades või selliseid materjale kasutades.

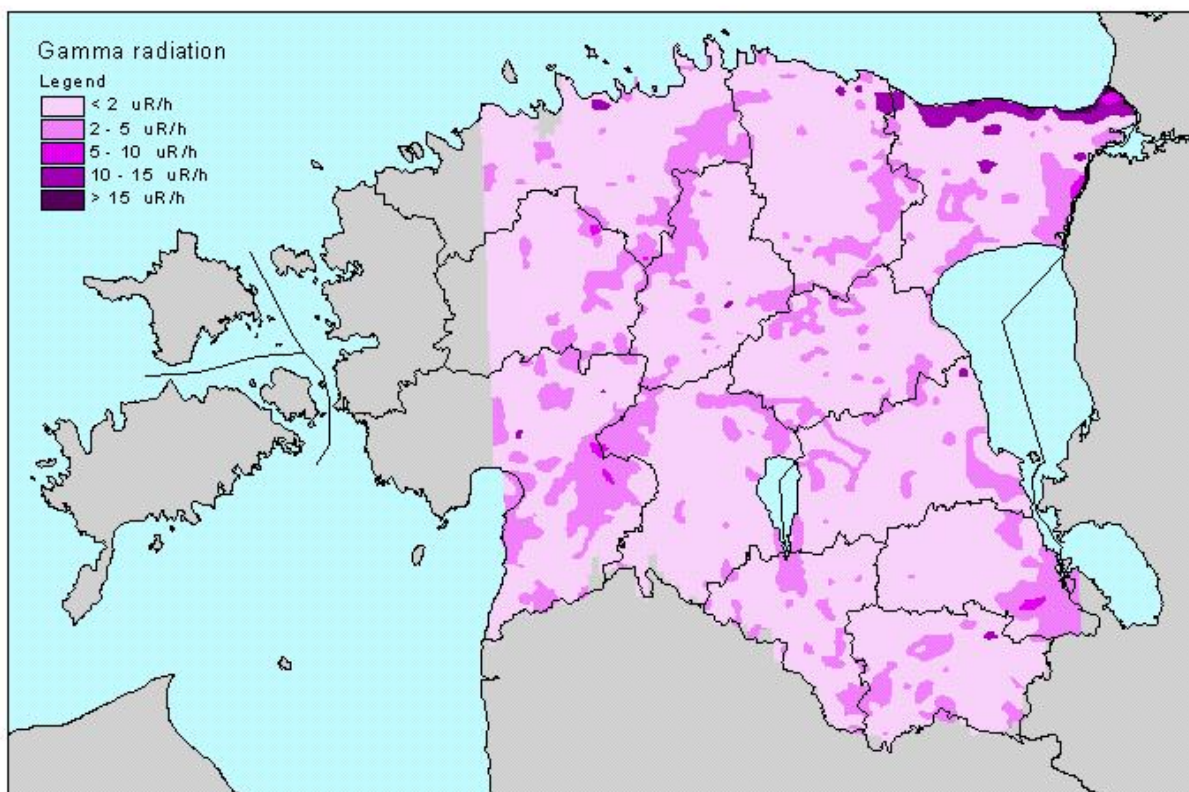
Näiteks Eestis mõõdetud gammakiirguse doosikiirused.

Abiks ühikute mõistmisel:

1 Sv = 100 R

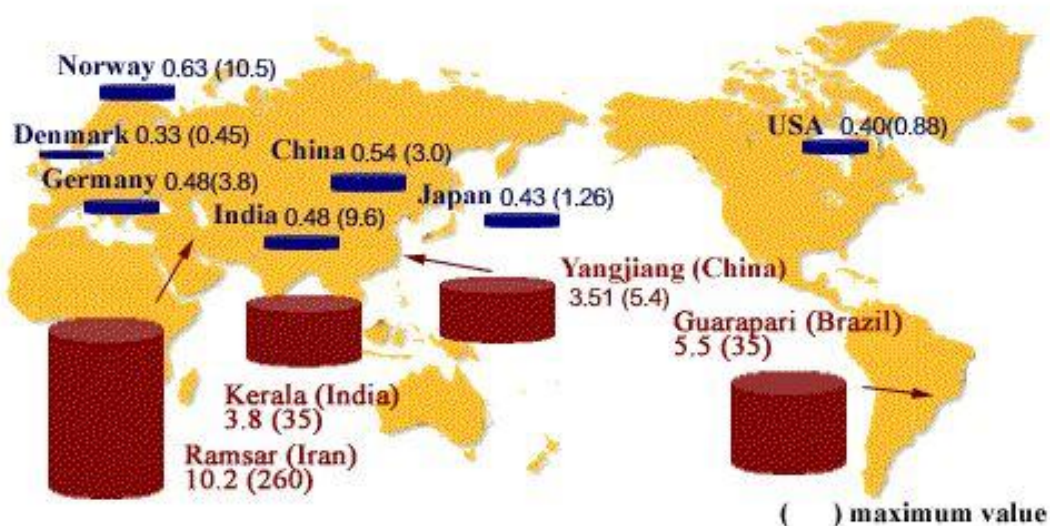
1 mikroSv = 100 mikroR

0.15 mikroSv/tunnis = 15 mikroR/tunnis



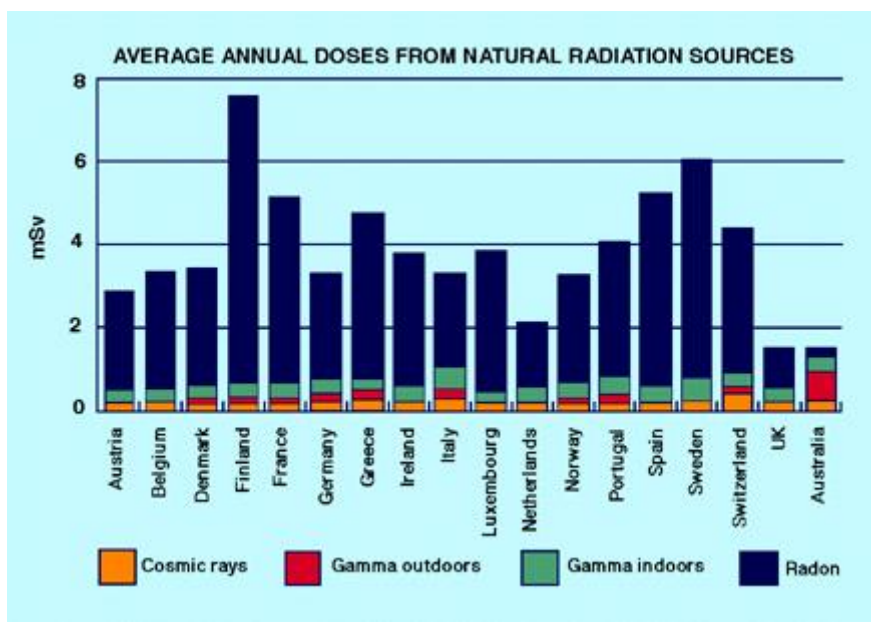
Kõrgenenud loodusliku kiirgustasemega piirkonnad Iraanis, Indias, Brasiilias, Hiinas.

Eesti: 0,1 (0,25). mikroGy/h. Sulgudes on maksimaalne mõõdetud väärtus.



Loodusliku kiirguse summaarne keskmine aastane efektiivdoos on umbes 2,4 mSv, kuid doosid võivad oluliselt varieeruda. Mõnede riikide keskmised doosid ületavad 10 mSv aastas ja mõnedes piirkondades võivad individuaalsed doosid olla isegi kõrgemad kui 100 mSv aastas. Viimast põhjustab tavaliselt radooni ja selle

lagunemissaaduste eriti kõrge tase elamutes.



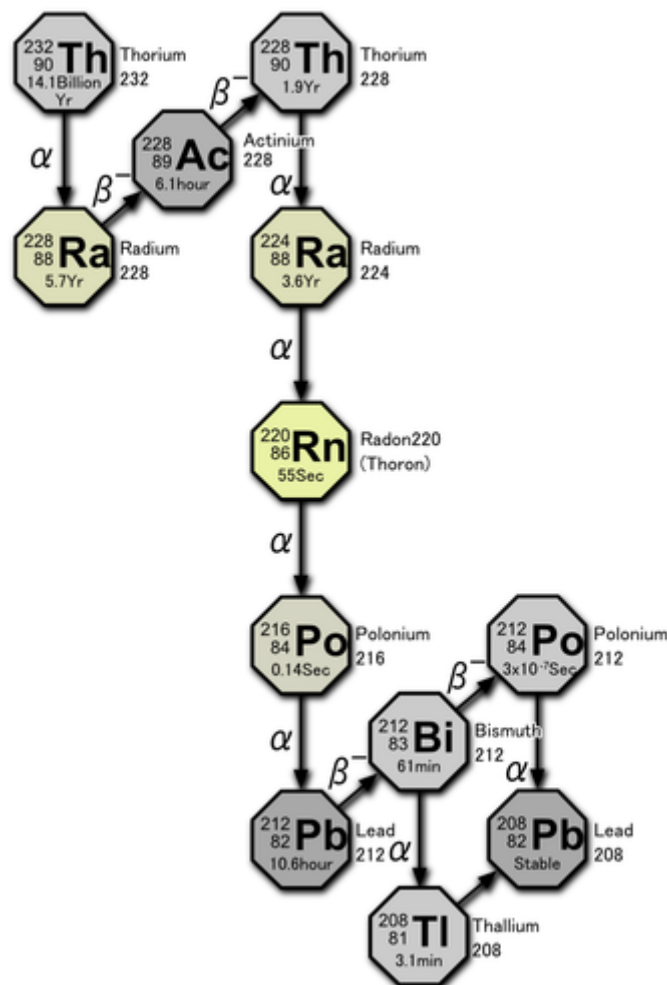
Radionukliidide read

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

$$A = 4n + q,$$

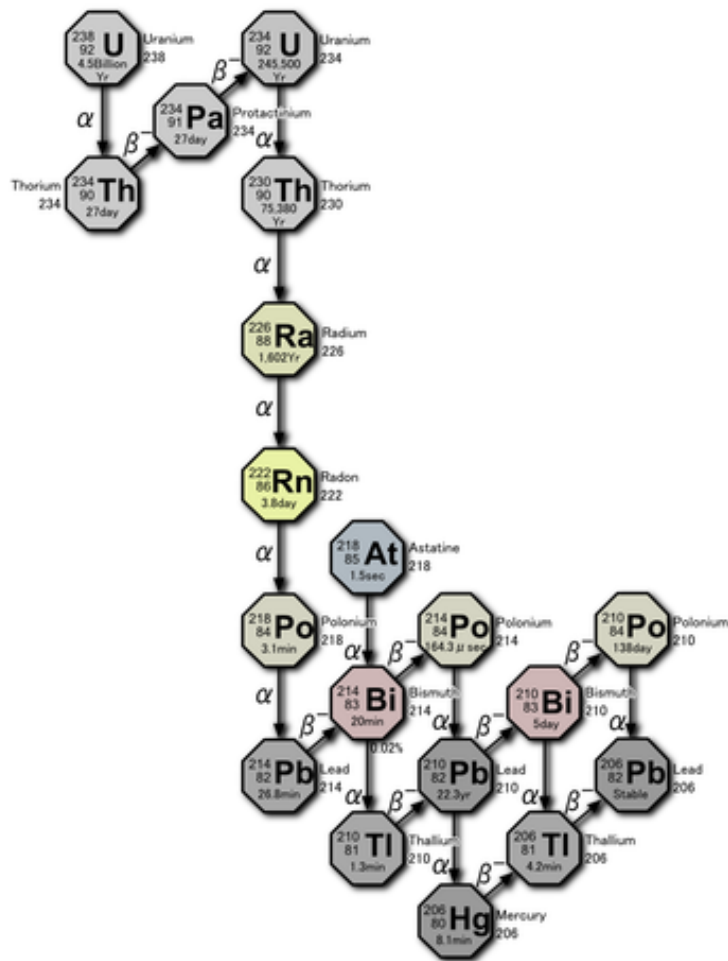
kus n on naturaalarv. Kuna q võib omada ainult 4 väärtust, siis eksisteerib ainult 4 radioaktiivset rida. Analüüsid on näidanud, et looduslikes tingimustes esineb ainult 3 neist. Need on:

tooriumi rida, mille liikmete massiarv on $A = 4n$. Selle rea esimene liige on ^{232}Th ja viimane liige ^{208}Pb (stabiilne).

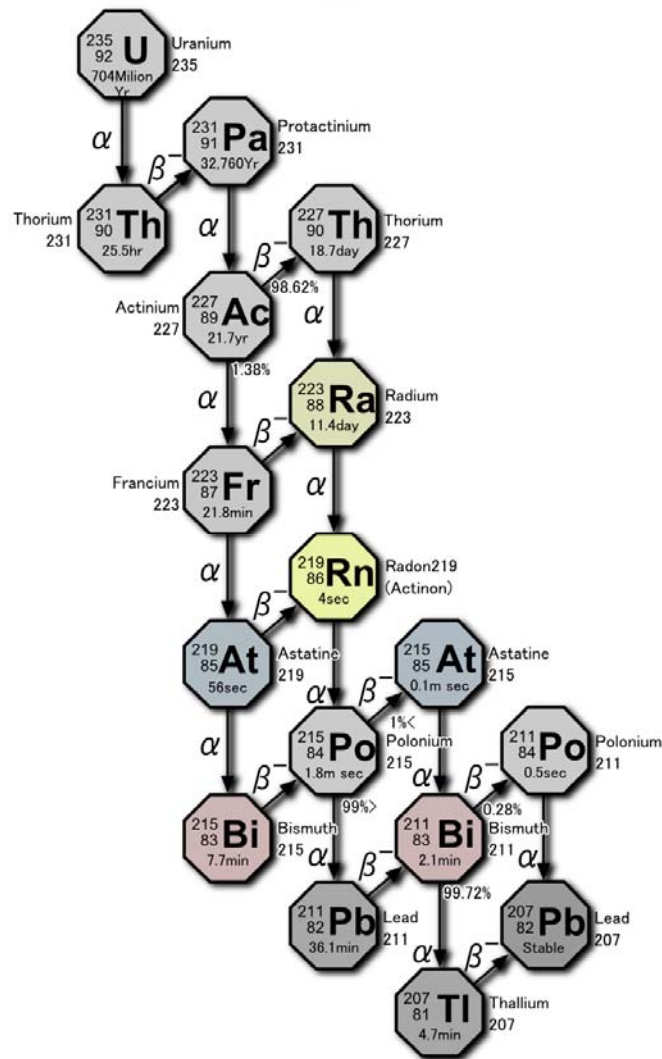


uraani rida, mille liikmete massiarv on $A = 4n + 2$. Selle rea esimene liige

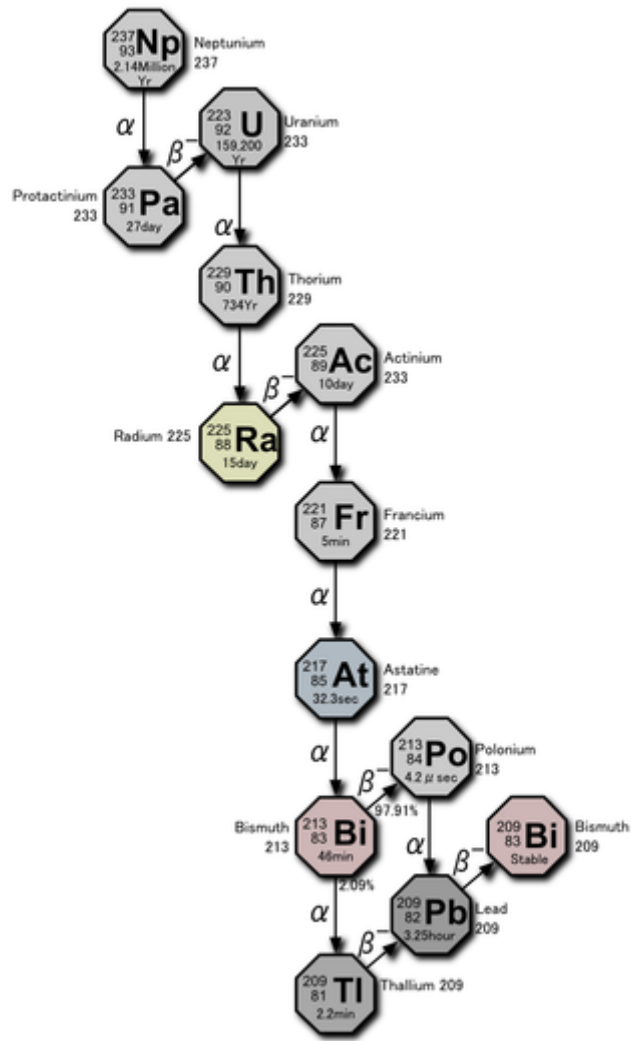
on ^{238}U ja viimane ^{206}Pb .



aktiiniumi rida, millel $A = 4n + 3$. Rea esimene liige on ^{235}U ja viimane ^{207}Pb .



Neljas rida ehk **neptuuniumi rida** looduslikult ei esine kuna kõikide tema liikmete poolestusajad on väiksemad ehk – see rida on juba ära lagunened. Samas on teda võimalik tehislikult tekitada.



Radoon

Radoon on eriti oluline loodusliku kiirguse allikas. Seda põhjustab asjaolu, et *radoon-222* vahetud lagunemissaadused on lühikese poolestusajaga radionukliidid, mis seovad ennast väikeste õhusakestega. Need hingatakse sisse ja nad kiiritavad kopsukudesid alfaosakestega ning suurendavad kopsuvähki haigestumise riski. Sama kehtib *radoon-220 (toroon)* kohta, kuid kopsule põhjustatav doos on palju väiksem.

Maapinnalt atmosfääri sattudes hajub radoongaas õhus, seetõttu on tema kontsentratsioon välisõhus madal. Kui gaas satub hoonesse – enamasti pinnasest läbi põranda – *tõuseb aktiivsuskontsentratsioon suletud ruumis*. Kui hooneid õhutatakse, ei ole radoonil võimalust koguneda. Küll aga projekteeritakse paljudes – üldiselt külmema kliimaga – piirkondades hooned eelistatult nii, et need peaksid sooja ja ei laseks tuult läbi. Seetõttu on nende hoonete ventilatsioon sageli puudulik ja radooni kontsentratsioon siseruumides võib olla mitu korda suurem kui väljas.

Radooni kontsentratsioonid hoonetes sõltuvad oluliselt ka kohalikest geoloogilistest tingimustest ja võivad riigi erinevates osades, aga isegi sama piirkonna erinevates hoonetes tugevalt varieeruda.

Radooni kontsentratsioon sõltub:

Ventilatsioonist – akende-uste avatus ja ruumide tuulutamine vähendavad kontsentratsiooni;

Tuulest – samuti ventileerib;

Temperatuurierinevustest – erinevus toas ja õues toob kaasa rõhumuutused, mis omakorda muudab ventilatsiooni;

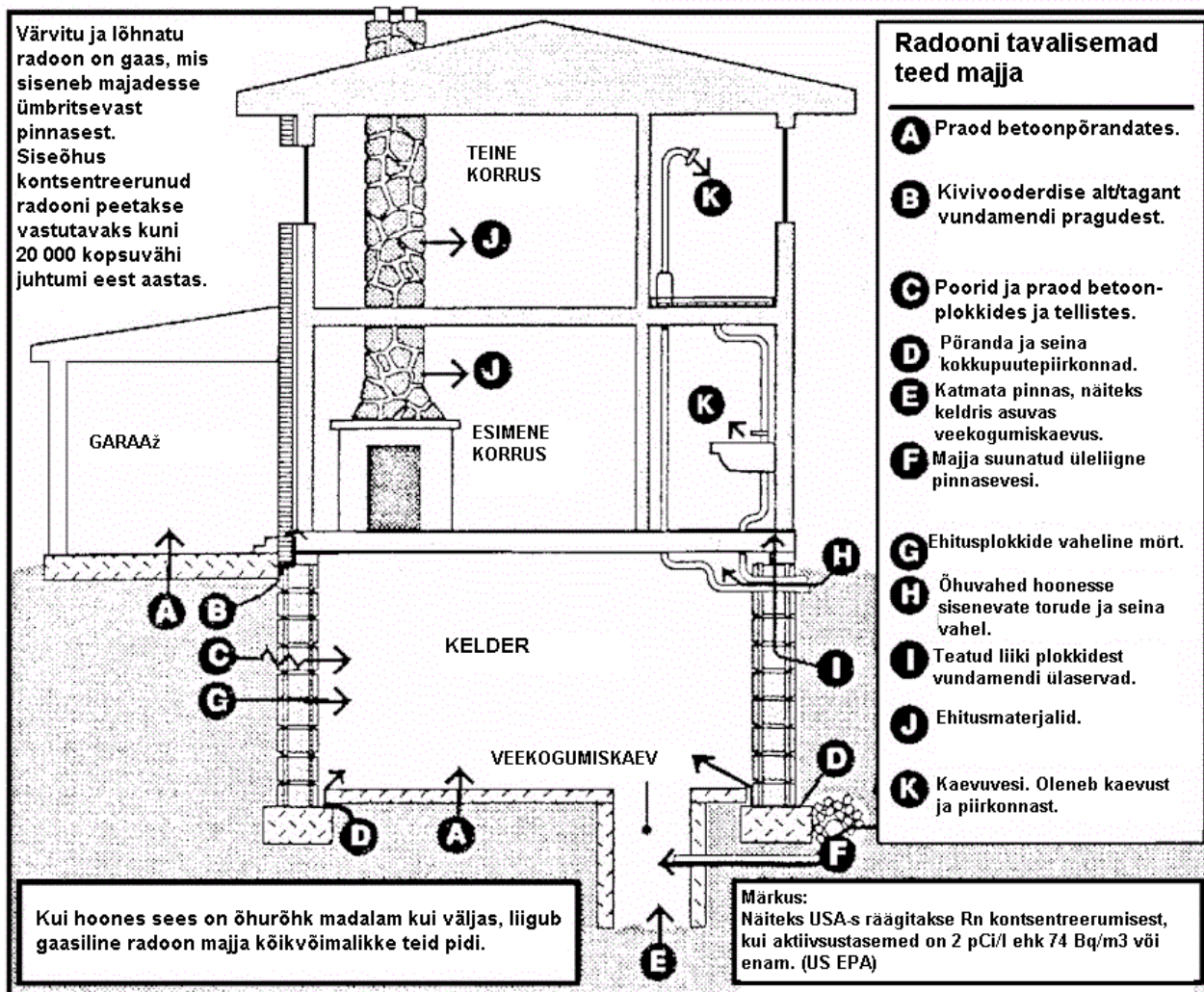
Välise õhurõhu muutumisest tulenevad muutused radooni liikumisel maapinnas;

Vihmast – muudab radooni taset pinnaseõhus;

Radooni lagunemissaadustest tekitatud üle maailma keskmistatud aastast efektiivdoosi hinnatakse umbes 1,2 millisiivertile. See väärtus aga varieerub märkimisväärselt. Mõnes riigis (näiteks Soomes) on riigi keskmine mitu korda kõrgem ja paljude maade elamutes saavad elanikud mitusada korda suuremaid efektiivdoose aastas. Seda arvestades on ICRP (Rahvusvaheline Kiirguskaitse Komisjon) ja IAEA (Rahvusvaheline Aatomienergia Agentuur) soovitanud kasutada tegutsemistasemeid (väljendatakse Bq/m³), millest kõrgemate väärtuste registreerimisel soovitatakse elamu valdajatel radooni taset elamutes vähendada. Tüüpiliselt peaksid *tegutsemistasemed* jääma vahemikku *200-600 Bq/m³*, mis on umbes kümme korda kõrgem kui keskmine radooni kontsentratsioon elamute siseõhus.

Inimesed, kes avastavad, et radooni tase nende elamutes on kõrge, võivad selle alandamiseks takistada õhu sattumist maapinnast elamusse. Kõige tõhusam viis selleks on alandada väikese ventilaatori abil õhurõhku hoone all (keldris).

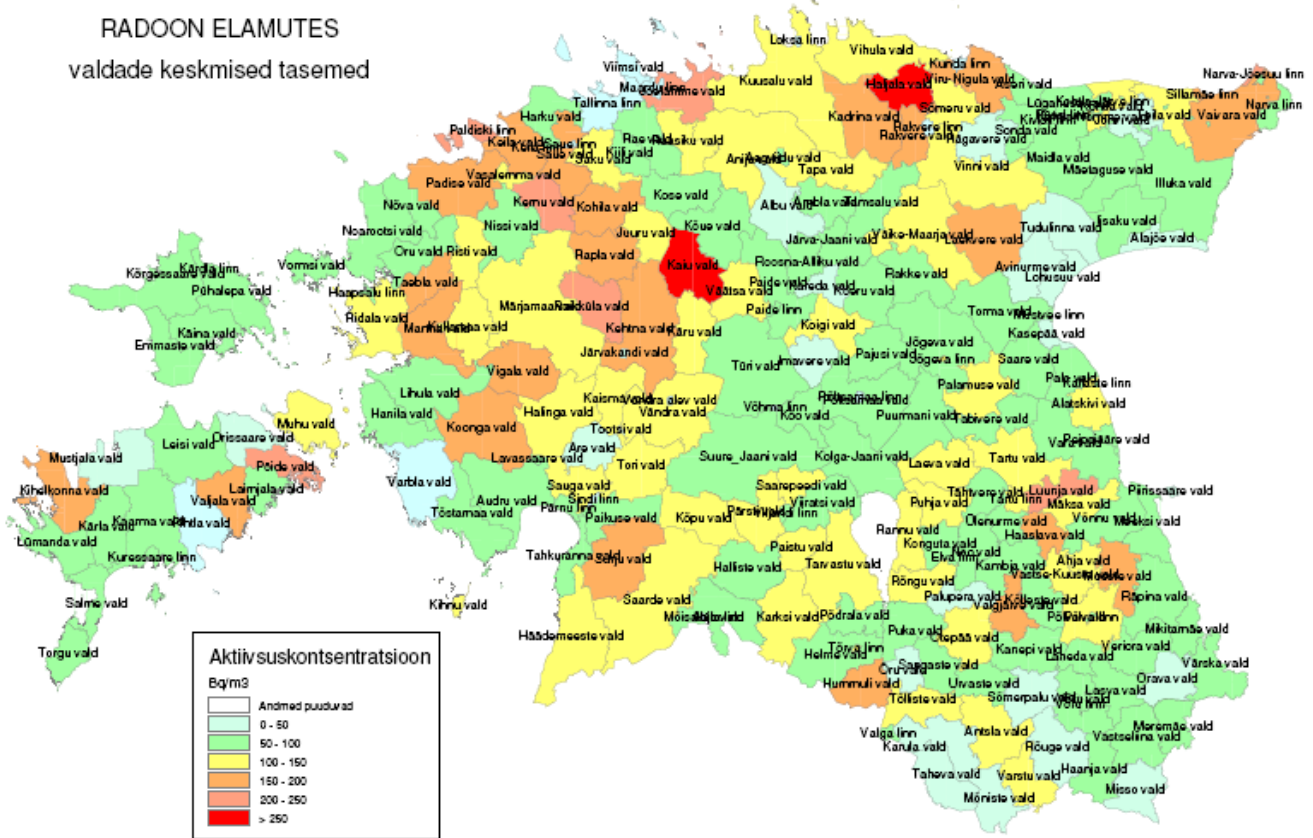
RADOONI TEEKOND MAJJA



Radooni möötmise kohta saab lugeda näiteks <http://www.envir.ee/kiirus/index.php?leht=153>

Näiteks radoonikontsentratsioonid Eesti hoonetes valdade kaupa.

RADOON ELAMUTES
valdade keskmised tasemed



Kiirgus organismis

Uraani ja tooriumi rea mitmed radionukliidid (lisaks radoonile ja toroonile), eriti plii-210 ja poloonium-210 esinevad õhus, toidus ja vees ning kiiritavad keha seestpoolt. Kaalium-40 satub samuti kehasse tavalise toiduga. Radooni lagunemissaaduste kõrval on see sisekiirituse peamine allikas. Lisaks tekitab kosmiliste kiirte ja atmosfääri vastastikune toime rea radionukliide nagu süsinik-14, mis samuti suurendab sisekiiritust. *Sisekiirituse* keskmist aastast efektiivdoosi nendest allikatest hinnatakse 0,3 mSv suuruseks, millest umbes pool langeb kaalium-40 arvele. Teave selle kohta, kuidas kogusumma üksikisikute löikes varieerub, on piiratud, ehkki teatakse, et kaaliumi sisaldust inimese kehas kontrollitakse bioloogiliste protsesside kaudu. Kaaliumi ja järelkult ka kaalium-40 hulk varieerub sõltuvalt keha lihassmassist ja on noortel meestel umbes kaks korda kõrgem kui vanematel naistel. Teiste radionukliidide tekitatud sisekiiritust on praktiliselt võimatu mõjutada, välja arvatud kõrge radioaktiivsusega toidu ja vee kasutamise vältimine.

Kiirgusallikate kasutamine

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.

Tehiskiirguse tuntuim vorm on *röntgenkiirgus*. Röntgenkiirgust rakendatakse meditsiinis ja aine ehituse ning füüsikaliste omaduste uurimisel. Ühtlasi annab see inimese tekitatud kunstlikust kiirgusest kõige suurema panuse elanikkonna doosi, mis on aga sellegipoolest mitmeid kordi väiksem looduslikust kiirgusest. Kuna näiteks röntgenkiirgus liigub otse, ei peegeldu ja hajub vähe, siis saab teda kasutada läbivate kiirte abil piltide tegemiseks.

Erinevalt radioaktiivsetest ainetest, mis kiirgamise ajal võivad asuda nii väljaspool meid kui meie sees, on röntgenikiirguse allikas inimese jaoks alati väline. Selle toime lõpeb alati, kui kiirgusallikas *välja lülitatakse*.

Tehislike kiirgusallikate kasutusvaldkonnad ja tegevused:

Tööstusasutused – tööstuslik radiograafia, tehnilise protsessi jälgimine, suurenenud looduskiiritusega seotud tegevus

Meditsiinasutused – röntgendiagnostika, tuumameditsiin, radioteraapia (kiiritusravi)

Uurimise- ja teadusasutused – röntgenanalüüs, märgitud aatomite meetod

Teenindusasutused – kiirgusallikate transport; kiirgusallikate paigaldamine, hooldus ja remont; radioaktiivsete jäätmete käitlemine

Kiirguse kasutamine meditsiinis

Esimeseks tehnilikuks allikaks olid *röntgenkiired*, mille avastas aastal 1895. Wilhelm Conrad Röntgen. Kiirelt muutusid nad populaarseks diagnoosimisvahendiks meditsiinis. Tänapäeval on *meditsiinis kasutatav kiirgus* endiselt juhtival kohal ning meditsiiniga seotud doosid varieeruvad väga suurtes piirides.

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*.

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.

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.

Enamik inimesi on oma elu jooksul kokku puutunud röntgenuuriga, 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.

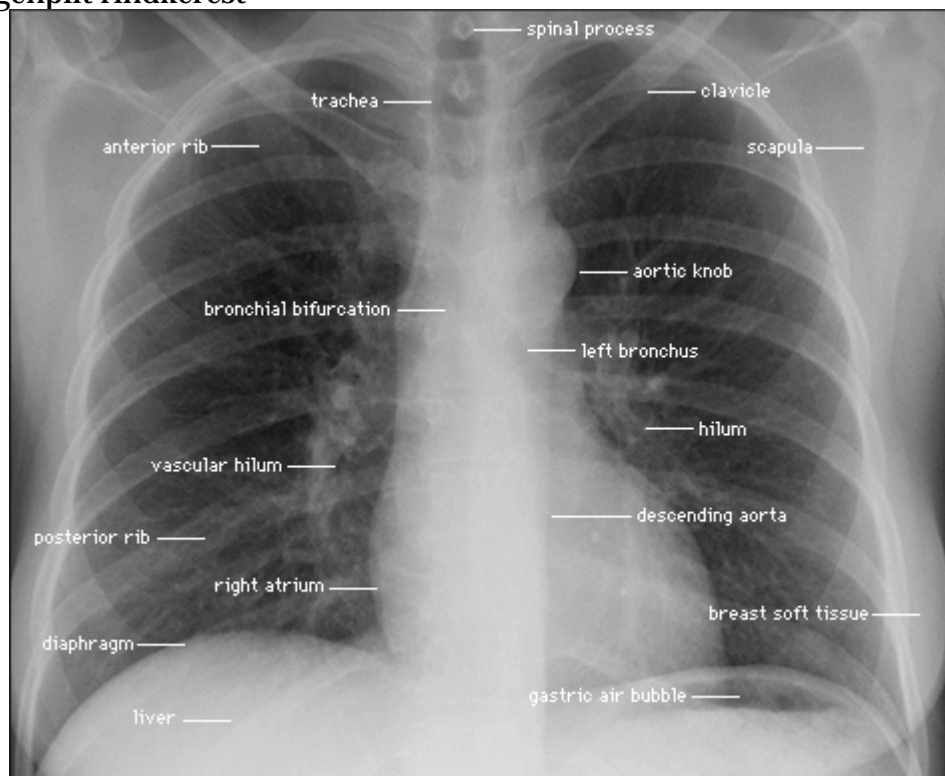
Kiirgusdoosid on tavaliselt väikesed, ehkki teatud protseduurides võivad need olla üsna suured. Palju suuremaid doose on vaja kasutada eluohtlike haiguste või elundite talitushäirete raviks, vahel kombineeritakse kiiritamist teiste ravivõtetega. Haiget kehaosa võib mõjutada radioaktiivse kiirega või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

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

Röntgendiagnostika

Tavalises röntgenuurinus läbib seadmest tulev kiirgus patsiendi keha. Röntgenkiired läbivad lihaseid ja luid erinevalt ning tekitavad keha sisehituse kujutise fotofilmile. Sageli on võimalik kujutist jäädvustada ja töödelda ka elektrooniliselt. Nende kujutiste abil saadava info väärtus selgitab, miks arenenud maades teevad arstid aastas inimese kohta vähemalt ühe röntgendiagnostika.

Röntgenpilt rindkerest



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. Muude 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 protsenti.

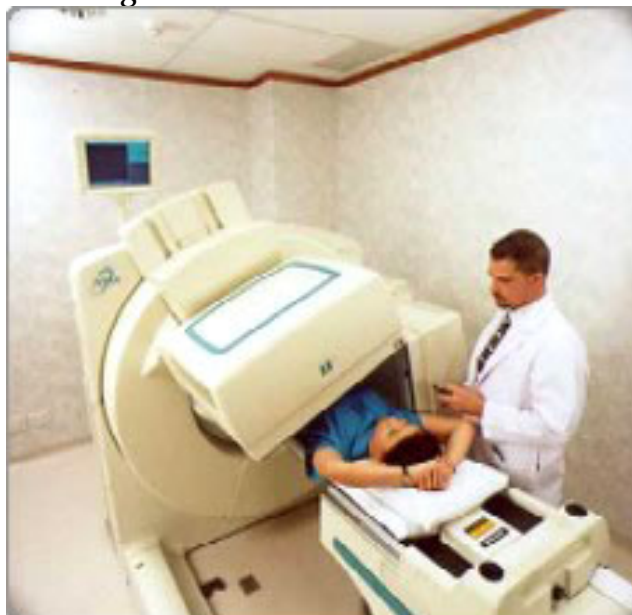
Kompuutertomograafia (KT) kasutamine on viimastel aastatel oluliselt sagenenud ja jõudnud tasemele, kus arenenud riikides moodustavad KT skaneeringud umbes 5 protsenti kõikidest kiirgusdiagnostika protseduuridest.

Selle meetodi puhul pöörleb lehvikukujuline röntgenkiirte kimp ümber patsiendi ja registreeritakse vastasküljel asuva andurite rea poolt. Arvuti koostab patsiendist lõigu- või sektorikujulise läbiva kujutise, mis võimaldab saada kõrgetasemelist diagnostilist informatsiooni. Siiski tuleb arvestada, et KT puhul võivad doosid olla suurusjärgu võrra või veelgi suuremad kui tavalises röntgendiagnostikas.

Kompuutertomograaf.

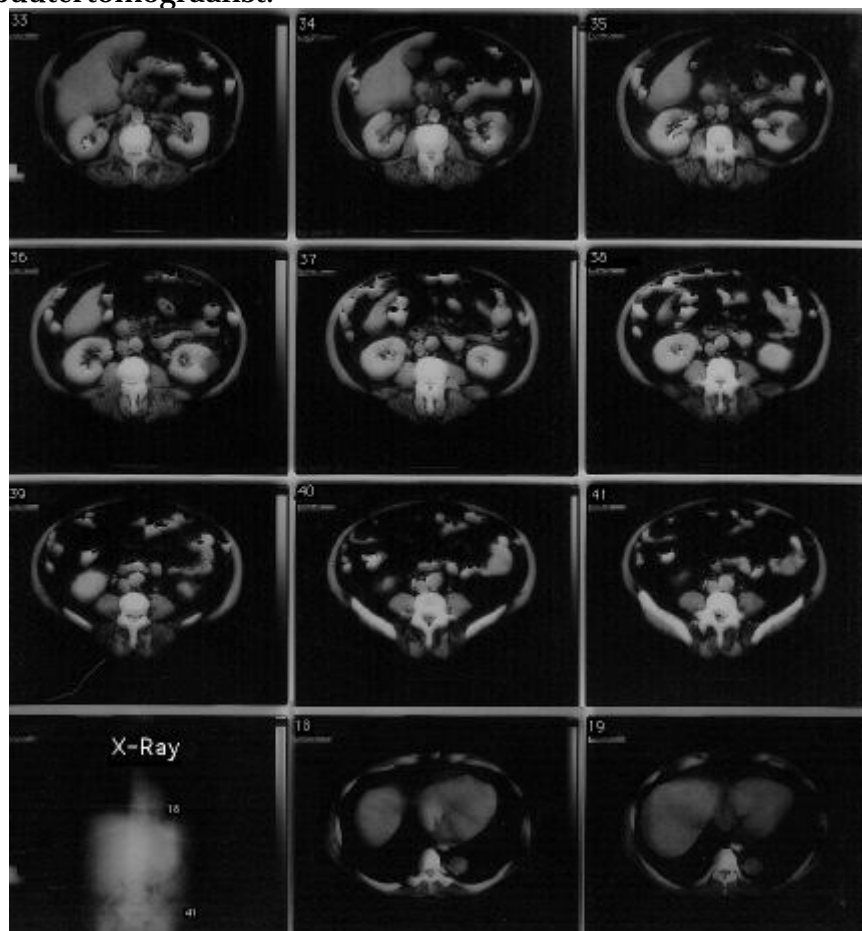


Patsient kompuutertomograafis.



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.

Pildid kompuutertomograafist.



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.

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 radiologe, 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).



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*.

Enamasti kasutatakse diagnostilistes protseduurides radionukliidi *tehneetsium-99m*, mille poolestusaeg on 6 tundi ja eraldatavate gammakiirte energia 0,14 MeV. Seda radionukliidi on haiglas lihtne valmistada ning ta seondub keemiliselt kergesti mitmesuguste kandeainetega. Selleks, et uurida, kuidas elundid ja koed käituvad ja kui kiiresti radionukliid liigub, on vaja eriandurit.

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 – hüpertüroosi 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.

Radiofarmatseutikumid



Radiofarmatseutikumi manustamine



Kiiritusravi

Kiiritusravi kasutatakse vähi raviks või vähemalt kõige piinavamate sümptomite leevendamiseks, tappes kiirgusega vähirakke. *Kõrge energiaga röntgenkiirte kimp, gammakiired või elektronid*, suunatakse haigele koele, põhjustades suure doosi ning samal ajal säästes ümbritsevat tervet kude. Kui kasvaja asub sügaval kehas, suunatakse kiirtekimp sellele mitmest suunast, et vältida ümbritseva koe juhuslikku kahjustust. Teine ravivõte, mida mõne vähi puhul kasutatakse, on *brahhüteraapia*. Kuna kiiritusravi doosid on kõrged, kasutatakse seda vaid juhul, kui paranemiseväljavaade on hea ja teised meetodid ei annaks nii tõhusat tulemust.

Ehkki kiiritusravi võib esialgse vähi välja ravida, võib see ka tekitada vähki teistes kudedes või kahjulikke pärilikke mõjusid järgmistes põlvkondades. Siiski on enamik kiirgusravi saavatest inimestest laste soetamise eest väljas ja liiga vanad, et hiljem avalduvad vähid saaksid tekkida. *Niisiis on kiiritusravi eesmärk maksimeerida ravi tõhusust ja samal ajal minimeerida kahjulikke kõrvalmõjusid.*

Kasvajate puhul on vajalik kasutada kümnete greide suurusi doose, et tulemuslikult vähirakke tappa. Kudedele määratud doosid on tavaliselt vahemikus 20– 60 Gy. Ravi tuleb väga hoolikalt ja täpselt planeerida – liiga suurte või väikeste dooside tagajärjeks võib olla puudulik ravi või soovimatud kõrvalmõjud.

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.

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.

Ioniseeriv kiirgus tööstuses

Tööstuses kasutatakse sageli kiirgusallikaid *erinevate protsesside jälgimiseks*. Miks kasutatakse radioisotoope:

- kiirgust on lihtne detekteerida
- kiirgus neeldub materjalides
- kiirgus peegeldub

Näiteks röntgenkiirgust kasutatakse pagasiläbivalgustamise seadmetes.

Näiteks mõned enim kasutatavad radioisotoobid:

Tseesium-137 : kõrgust ja täituvust kontrollivad seadmed, trasserid;
Koobalt-60 : sterilisaatorid, tööstuslik gammaradiograafia, kõrgust ja täituvust kontrollivad seadmed;

Iriidium-192 : gammaradiograafia;

Ameriitsium-241, plutoonium-240: suitsudetektorid.

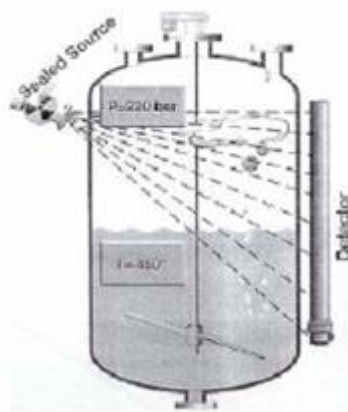
Näiteks metalli homogeensuse kontrolliks ja ka keevituste kvaliteedi kontrolliks kasutatakse radiograafiat. Kiirgusallikaks võib olla kas röntgenaparaat või siis radionukliid (iriidium-192 või koobalt-60).

Tööstuslik radiograaf



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 siis niiskuse mõõtmiseks ning sel juhul on töös peamiselt mobiilseid kiirgusallikaid.

Nivooanduri tööpõhimõte



Näited nivooanduritest

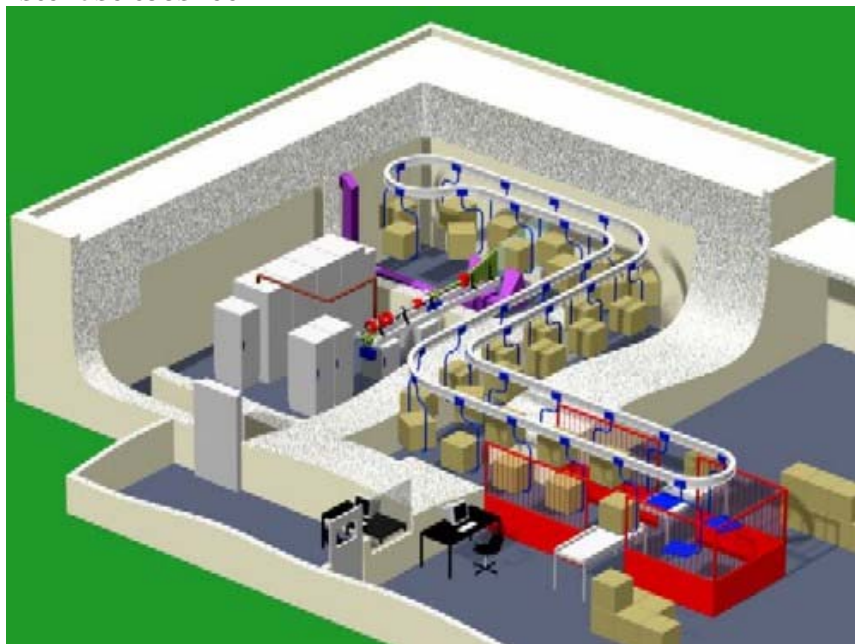




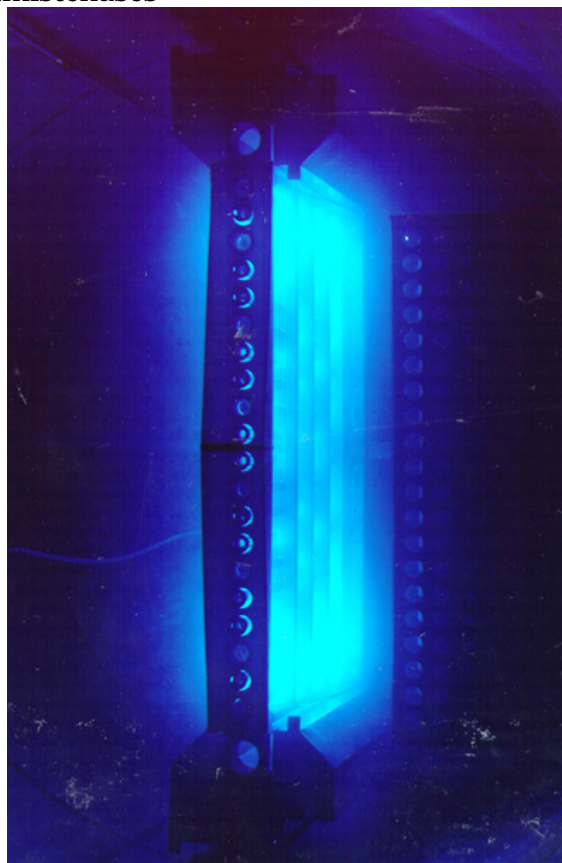
Purkide täituvuse kontroll



Steriliseerimistehase tööskeem



Koobalt-60 steriliseerimistehases



Veel kiirgusallikate kasutusalasid:
Soojuse tootmine, eriti põhjapiirkondades
Mageda vee tootmine (Jaapan ja Kasahstan),

Tööstuslike protsesside soojusega varustamine (Kanada, Saksamaa)
Tsiivilaevade jõuseadmete käitamine (Saksamaa, Jaapan, Venemaa, USA)
Kosmoseuuringud – USA ja NL

Tuumarelvade katsetused

Antropogeensete radionukliidide põhiliseks allikaks on olnud tuumakatsetused atmosfääris. Peamised katsetajad olid 1950-ndate lõpus ja 1960-ndate alguses USA ja NSVL. 1962. sõlmisid Suurbritannia, USA ja NSVL moratooriumi ning hiljem on katsetusi korraldanud Prantsusmaa ja Hiina. 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.*

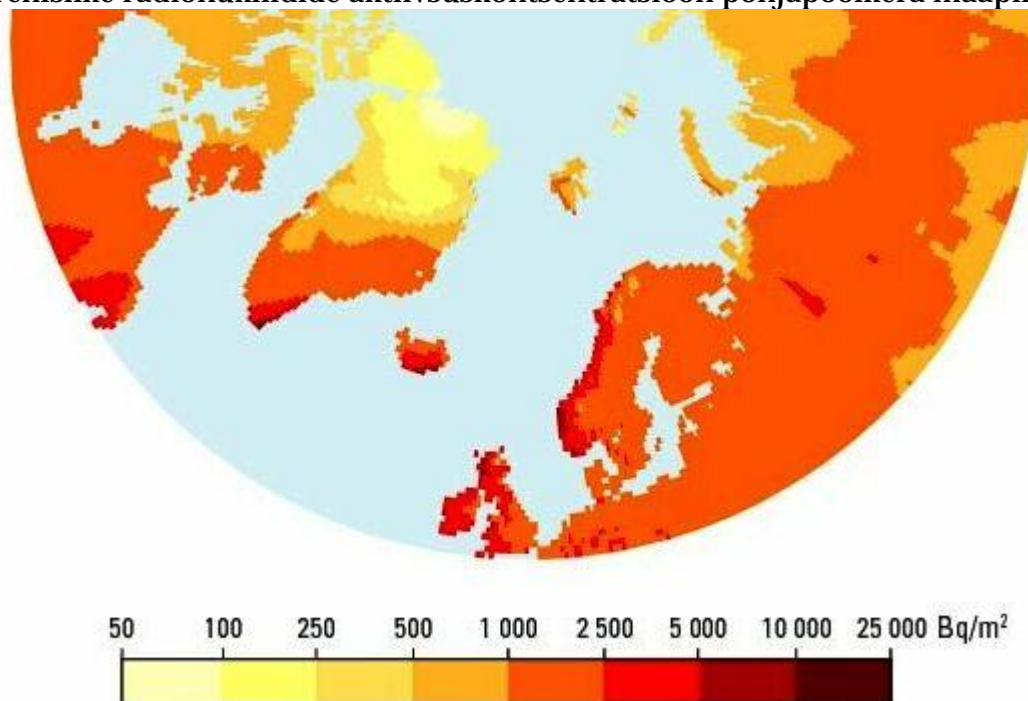
Kui tuumarelvi katsetatakse maapinna kohal, *paisatakse atmosfääri ülakihtidesse erinevaid radionukliide* alates vesinik-3 (tritium) kuni plutoonium-241. Sealt liiguvad radionukliidid aeglaselt atmosfääri alakihtidesse ja edasi maapinnale. Pea 2/3 katsetuste tulemusena tekkinud saagisest langes *põhjapoolkerale*. Viimane on tingitud sellest, et enamik katsetusi viidi läbi ekvaatorist põhja pool ning kahe poolkera vaheline atmosfäärivahetus on väike.

Praegu on radionukliidide kontsentratsioon õhus, viimas ja inimtoidus palju madalam kui 1960. aastatel. Tänapäevani aga korraldatakse *maa-aluseid katsetusi*.

Plahvatusega kaasnev soojus põhjustab pommi ümbruses olevate ainete *aurustumise*. 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. Kui see tulepall aga jahtub, algab kondensatsioon ning selle tagajärjel moodustub seenekujuline pilv, mis sisaldab väikeseid tahkeid osakesi ja ka veepiisku.

Pommi võimusus ja meteoroloogilised tingimused määravad selle kui kõrgele pilve tõuseb. 1 megatonnise võimsusega pomm võib põhjustada tõusu kuni 40 km kõrgusele.

Tehislike radionukliidide aktiivsuskontsentratsioon põhjapoolkera maapinnal.



AMAP

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 kohalikku 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.

Tuumakatsetuste tulemusena on tekkinud enam kui 200 erinevat *lõhestumisprodukti*, millede poolestusaeg varieerub sekunditest kuni miljonite aastateni.

Kohaliku sadenemise puhul on esindatud enamuse 200 radionukliidist. Selle mõju inimkonnale on võimalik vähendada sobilikke katsetuspaiku ning ilmastikutingimusi valides.

Suuremat rolli elanikkonnale tekitatud doosis mängib *ülemaailmne sadestumine*. Kuna sadestumine hilineb, siis jõuavad osad lõhestumisproduktid vahepeal laguneda ja mõned uued ka juurde tekkida.

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.

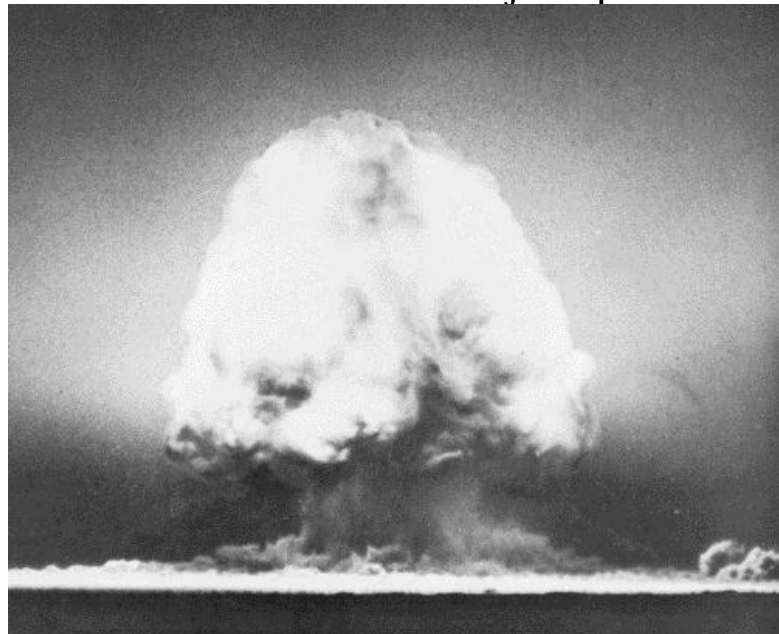
Näiteks avastati 1960. aastatel, et Põhja-Euroopa ja Kanada põhjapõdrakarjused saavad oluliselt kõrgemaid doose kui ülejäänud inimesed, sest nad söövad samblikust – mis on väga tõhus õhust tseesium-137 koguja – toituvate loomade liha.

Eeldades, et maailma elanikkond on 6 miljardit inimest, siis hinnatakse tuumarelvakatsetustes tekkinud radioaktiivsest tolmust saadud globaalne kollektiivdoos on umbes 30 000 inimsiivertit aastas.

Tähis märgistamaks esimese tuumapommi, Trinity lõhkamist 16. juulil 1945 aastal USA-s.



Trinity lõhkamise tulemusena tekkinud seenekujuline pilv



Avariid

Kostõmi avarii

29.septembril 1957 toimus keemiline plahvatus radioaktiivsete jääkide kontainerites. Vabanemised produktid kandusid Tšeljabinski, Sverdlovski ja Tjumeni oblasti regioonidesse. Arvatakse, et ligikaudu 1150 inimest sai üle 0.5 Sv doosi.

Windscale avarii

1957 aasta oktoobri alguses tekkis tulekahju plutooniumi tootmiseks kasutatud reaktoris. Tulekahju tulemusena vabanesid lagunemisproduktid keskkonda ning enamus saastest jagunes Suurbritannias.

SNAP-9

21. Aprillil 1964 sisenes USA navigatsioonisatelliit India ookeani kohal atmosfääri. 2/3 saastest kandus lõunapoolkerale.

Palomares ja Thule

Mõlemal juhul purunes pommikandja. 1966 jaanuaris Hispaania Vahemere rannikul Palomares küla lähedal ja 1968. Jaanuaris Bylot Soundis Gröönimaa loodeosas. Keskkonda vabanes plutooniumi.

Kosmos 954

Nõukogude aatomreaktoriga satelliit sisenes Kanada loodeosa kohal atmosfääri 1978. aasta jaanuaris. 75% originaalmaterjalist jäi ülemisse atmosfääri ja seega jaotus globaalselt.

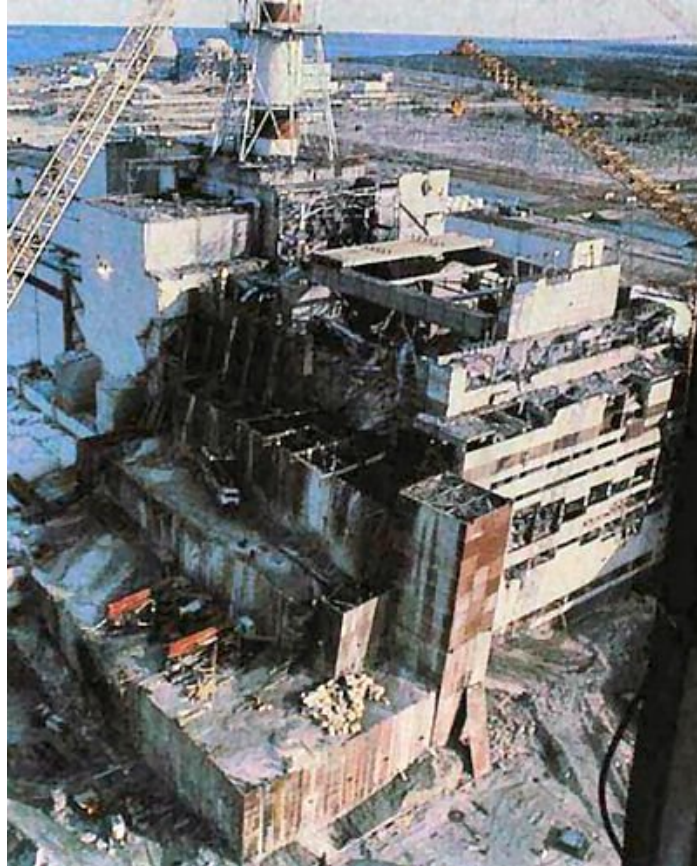
Tšernobõli avarii

26. aprillil 1986 toimus turbiini generaatori testimise tagajärjel avarii tuumajaama 4. Reaktoris. Testimise käigus rikuti põhilisi ohutusnõudeid ja reaktor töötas ohtlikus režiimis. Avarii tagajärjel süttis reaktor ja tulekahju kestis 10 päeva.

Tšernobõli avariid

Tuumareaktori plahvatus Tšernobõli aatomielektijaamas 26. aprillil 1986 põhjustas radionukliidide pihkumise keskkonda suurtes kogustes kümne päeva jooksul. Õhu kaudu levis õnnetuspaigalt Ukrainas radioaktiivne materjal kogu Euroopasse. Saastepilv liikus Euroopasse ja kaugemalegi, kuid sadenemise määrasid valdavalt kohalikud ilmastikutingimused. Vihm põhjustas mõnes piirkonnas suurema radionukliidide sadenemise kui teistes.

Tšernobõli tuumaelektijaama reaktori number 4 hoone peale plahvatust:



Kohalikul tasandil oli õnnetus katastroofi mõõtmetega ja päästetöötajate kokkupuude tugeva kiirgusega lõppes 31 inimese, sealhulgas 28 tuletõrjuja surmaga. Tuletõrjujad said sadestunud radionukliididest suuri välisdoose – vahemikus 3-16 Sv. Naha saastumine peamiselt beetakiirgust eraldavate radionukliididega põhjustas raskekujulist erüteemi. 209 inimest paigutati haiglasse, neist 106 diagnoositi äge kiiritushaigus. Õnneks nad paranesid ja võisid mõne nädala või kuu pärast haiglast lahkuda.

Peamised radionukliidid, mis põhjustasid doose nii lähikonnas kui ka kaugemal asuvatele inimestele, olid jood-131, tseesium-134 ja tseesium-137. Peamise osa doosist moodustas pinnases asuvate radionukliidide väliskiiritus, jood-131 sissehingamisest (sadestus kilpnäärmesse) ja toiduainetes sisalduvatest radionukliididest põhjustatud sisekiiritus.

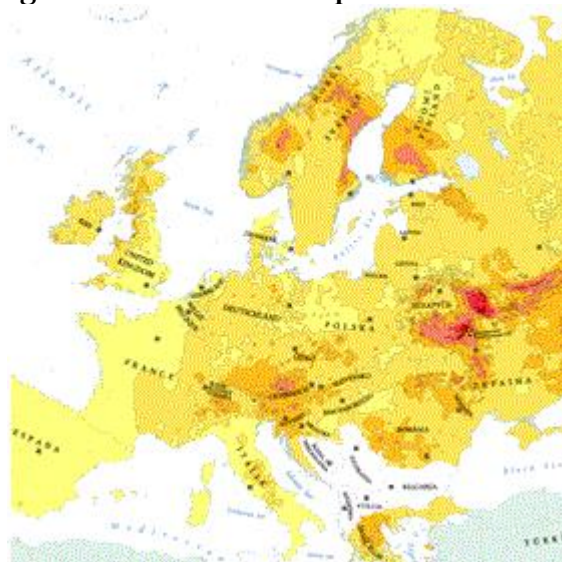
Pärast avariid evakueeriti oma kodudest praeguses Valgevenes, Ukrainas ja Vene Föderatsioonis rohkem kui 100 000 inimest ning pinnasesse sattunud radioaktiivsete materjalide tõttu kuulutati mitmed alad „kinnisteks“. Tšernobõli reaktori juures algatati ulatuslik puhastusoperatsioon, kuhu kaasati 750 000 inimest. Saaste puhastamisega tegelevaid inimesi hakati kutsuma likvideerijateks ja mõned

neist said doose, mis olid üle 50 mSv. Avaldatud andmete kohaselt jäid esimesel aastal pärast õnnetust keskmised doosid alla 165 mSv. Järgmistel aastatel viidi need järkjärguliselt alla 50 mSv.

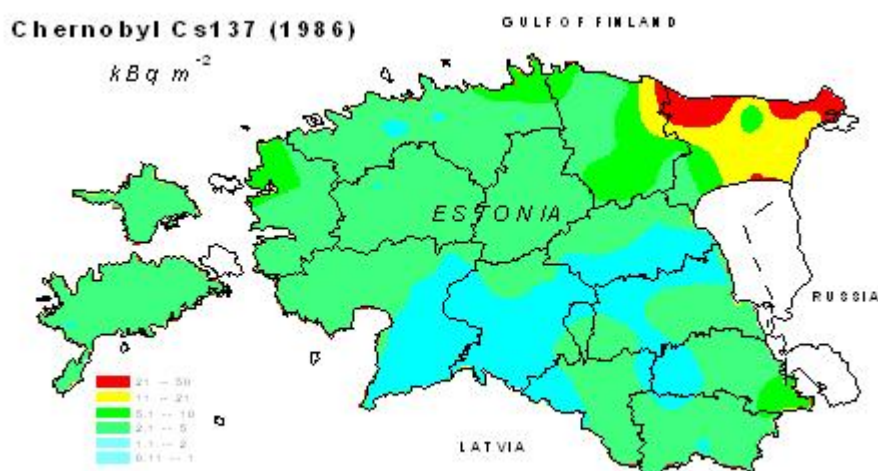
Tšernobõli ümbruse elanike seas ja ka muudes piirkondades viidi läbi põhjalikud uuringud, et avastada võimalikke mõjusid tervisele. Seni on suurima mõjuna tuvastatud kilpnäärme vähi juhtumid Valgevene ja Ukraina lastel. Jood-131 sattus nende organismi eelkõige joodiga reostatud piima juues. Jood-131 on lühiealine radionukliid (poolestusaeg 8 päeva), mis kontsentreerub kilpnäärmes. Erinevaid andmeid kasutades on olnud võimalik hinnata selle tervisemõjuri riskifaktoreid lastel.

2000. aastal avaldas UNSCEAR ülevaate Tšernobõli avari tagajärgedest. Selles toodud teaduslike hinnangute alusel võib väita, et õnnetuse ajal kiiritust saanud laste seas oli umbes 1800 kilpnäärme vähi juhtumit. Ehkki tegemist on raske haigusega, ei ole selle tagajärjeks tavaliselt siiski surm. (UNSCEARi raportit saab lugeda võrguaadressil: <http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>)

Tšernobõli õnnetuse järgne saastumine Euroopas.



Tšernobõli õnnetuse järgne tseesium-137 saastumine Eestis.



Tšernobõli tuumaelektrijaama endine reaktor number 4 sarkofaagiga kaetult.



III Ioniseeriva kiirguse bioloogilised efektid

Bioloogilised efektid

Kehasse sattudes astub ioniseeriv kiirgus vastastikmõju miljonite rakkudega. Sama suurest ja veelgi suuremast rakkude hulgast võib aga kiirgus mööduda vastastikmõju astumata ja seega ilma mingit kahju tekitamata.

Juhul kui rakk jääb *otsest ioniseeriva kiirguse teele*, siis võib ta selle tulemusena surra, tõenäolisem on siiski, et ta saab ainult kahjustada.

Kui rakk sureb, siis harilikult pole see organismi jaoks suureks õnnetuseks (loomulikult juhul kus surnud rakke pole just väga suurel hulgal), sest surnud rakk eemaldatakse vereringe abil ja harilikult produtseeritakse tema asemele uus ja terve rakk.

Ohtlikum on aga olukord kui rakk on saanud *kahjustada*, sest sellisel juhul võib ta osutada edasiste vähirakkude arengu põhjustajaks. Vähi arenguks ja esimeste haigusnähtude ilmnemiseks võib kuluda mitmeid aastaid või isegi aastakümneid.

Ionisatsioon kudedes

Laetud osake kaotab energiat iga kord, kui ta ioniseerib või ergastab aatomit, kuni tal lõpuks pole enam piisavalt energiat aatomi mõjutamiseks. Selliste energiakadude lõplik tulemus on tühine temperatuuri tõus aines, mille koostisesse aatom kuulub. Sel viisil hajub kogu ioniseeriva kiirguse mõjul kudedele üle antud energia soojusena, mida tekitab aatomite ja molekulaarstruktuuride suurenenud vibratsioon.

Kahjulikke bioloogilisi mõjusid põhjustavad *esmane ionisatsioon* ja sellele järgnevad *keemilised muudatused*. Bioloogiliste kudede ehitusühik on rakk, mille talitlust kontrollib tuum. *Rakutuum* on väga keeruline struktuur, mida ei tohi segi ajada aatomituumaga. Umbes 80 protsenti raku koostisest moodustab vesi, ülejäänud 20 protsenti aga keerulised bioloogilised ühendid. Kui ioniseeriv kiirgus läbib rakulist kude, tekitab ta *laetud vee molekule*. Need lagunevad ühenditeks, mida nimetatakse *vabadeks radikaalideks* nagu näiteks vaba hüdroksüülradikaal (OH), mis koosneb hapniku ja vesiniku aatomist.

Vabad radikaalid on keemiliselt väga aktiivsed ja võivad muuta raku elutähtsaid molekule.

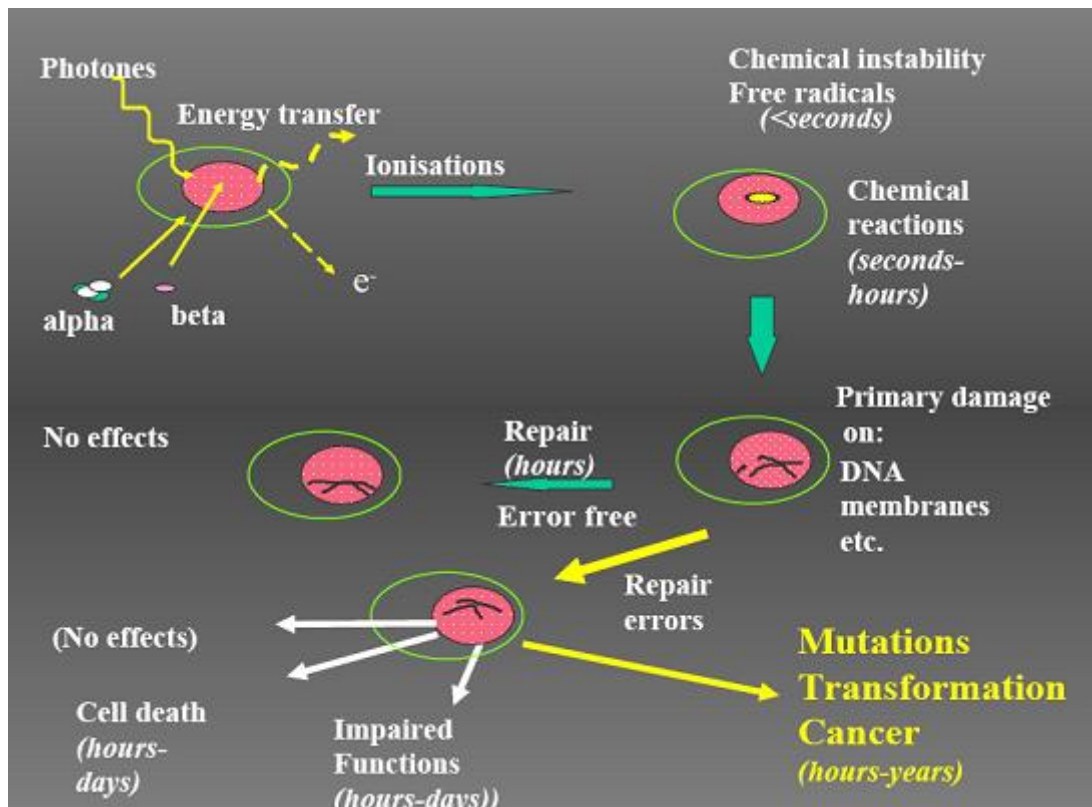
Kiirguse ja raku vastasmõju neli etappi

esmane füüsikaline etapp, mis kestab väga lühikest aega ($\sim 10^{-16}$ sekundit). Selle aja jooksul põhjustab raku neeldunud energia ionisatsiooni. Vee puhul väljendab seda protsessi järgmine võrrand: $H_2O \xrightarrow{\text{kiirgus}} H_2O^+ + e^-$

füsiokeemiline etapp, mis kestab umbes 10^{-6} sekundit. Selle aja jooksul toimub vastastikmõju ioonide ja teiste veemolukulide vahel, mille tulemusena tekib mitmeid uusi ühendeid. Näiteks võib positiivneioon dissotsieeruda või siis elektron ühineda neutraalse molekuliga. Nende protsesside tulemusteks on H^+ , OH^- , H ja OH . Viimaseid kahte nimetatakse **vabadeks radikaalideks**, sest neil on väliskihil paardumata elektron ja seega on nad keemiliselt väga reageerimisvõimelised.

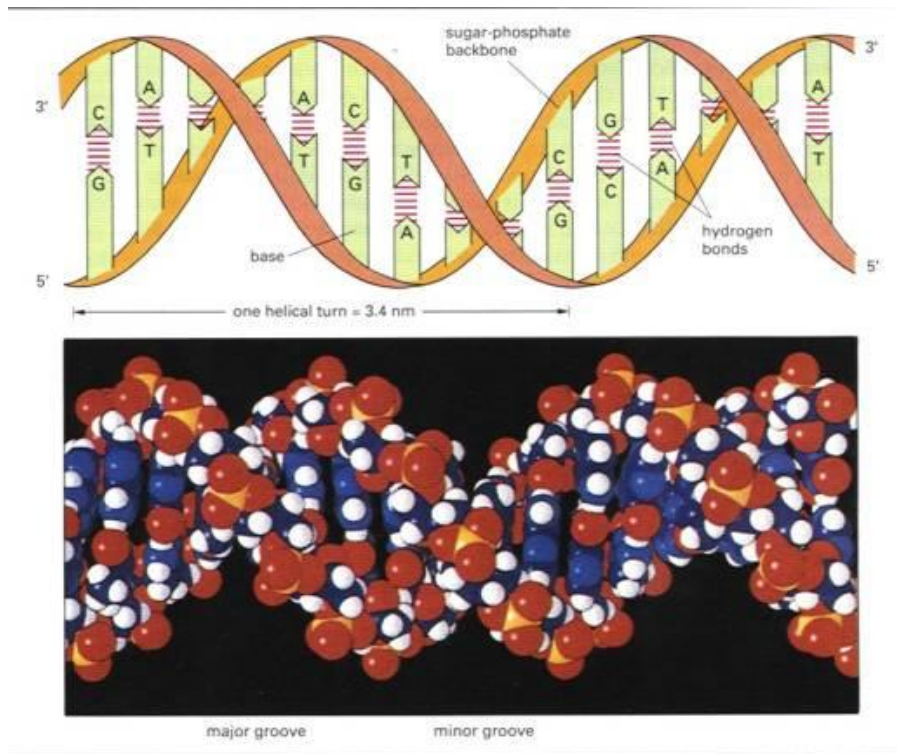
keemiline etapp, mis kestab paar sekundit. Selle aja jooksul on reaktsiooniproduktid vastastikmõjus raku orgaaniliste molekulidega. Vabad radikaalid võivad rünnata kromosoomi moodustavaid kompleksühendeid.

bioloogiline etapp. Selle perioodi kestus võib varieeruda kümnetest minutitest kuni kümnete aastateni, sõltuvalt konkreetsetest sümptomitest. Eelpoolnimetatud keemilised muutused võivad üksikut rakku mõjutada mitmel erineval viisil – tulemuseks võib olla raku surm, pooldumise takistus või siis alaline muutus raku, mis kandub edasi ka tütarrakkudesse.



DNA, kiirguse otsene ja kaudne toime

Üks eriti tähtsaid molekule on *desoksüribonukleiinhape, DNA*,



mida leidub peamiselt rakutuumas. DNA kontrollib raku ehitust ja elutegevust ja toodab iseenda koopiaid. DNA molekulid on suured ning struktuure, mille koostisesse nad kuuluvad ja mida nimetatakse *kromosomideks*, võib näha mikroskoobiga.

Kromosoomid:

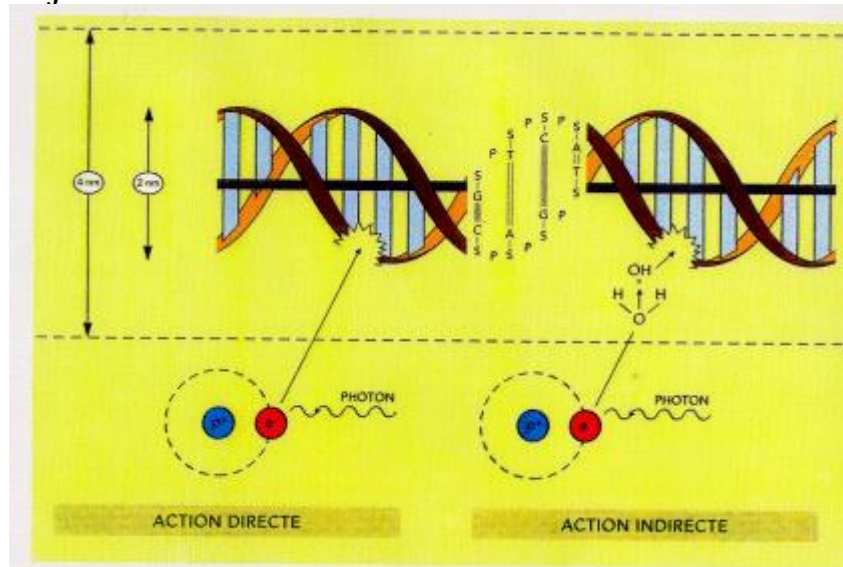


Me ei mõista praegugi praegugi täielikult, kuidas kiirgus rakke kahjustab, kuid suurel

määral on see seotud *DNA muutustega*. See võib toimuda kahel viisil.

Kiirgus võib ioniseerida DNA molekuli, mille tagajärjeks on *otsene keemiline muudatus*, või muudetakse DNA *kaudselt vastastikuses toimes vaba hüdroksüülradikaaliga*, mis on kiirguse tagajärjel tekkinud vee molekulist.

Joonise vasakpoolne osa iseloomustab DNA otsest kahjustamist ning parempoolne ose kaudset kahjustamist.



Mõlemal juhul võib keemiline muutus põhjustada kahjulikku bioloogilist mõju, mille tagajärjeks võib olla *vähi teke või pärilike geneetiliste defektide ilmnemine*.

Erinevat liiki ioniseeriva kiirguse kõige tähtsam omadus on *võime ainet läbida*. Teatud tüüpi kiirguse läbitungimisvõime suureneb tema energia kasvuga, kuid varieerub erinevate kiirgustüüpide puhul sama energiahulga juures.

Laetud osakeste puhul nagu alfa- ja beetaosakesed sõltub läbitungimisvõime ka osakese massist ja laengust. Võrdse energia korral tungib beetaosake märgatavalt sügavamale kui alfaosake. Alfaosake peaaegu ei suuda tungida läbi inimese naha pealmise, surnud kihi, ning nad pole ohtlikud seni, kuni nad ei satu kehasse hingamise või söömise käigus või läbi lahtise nahahaava. Beetaosakesed tungivad koes umbes sentimeetri sügavusele, seega on neid eraldavad radionukliidid ohtlikud pealiskudedele, siseorganitele muutuvad nad ohtlikuks alles siis kui nad kehasse satuvad.

Kaudselt ioniseeriva kiirguse puhul nagu gammakiired ja neutronid oleneb läbitungimisvõime vastastikusest toimest koega. Gammakiirgus suudab läbida keha, seega seda eraldavad radionukliidid on ohtlikud nii kehaväliselt kui -siseselt. Ka röntgenkiired ja neutronid on võimelised keha läbima.

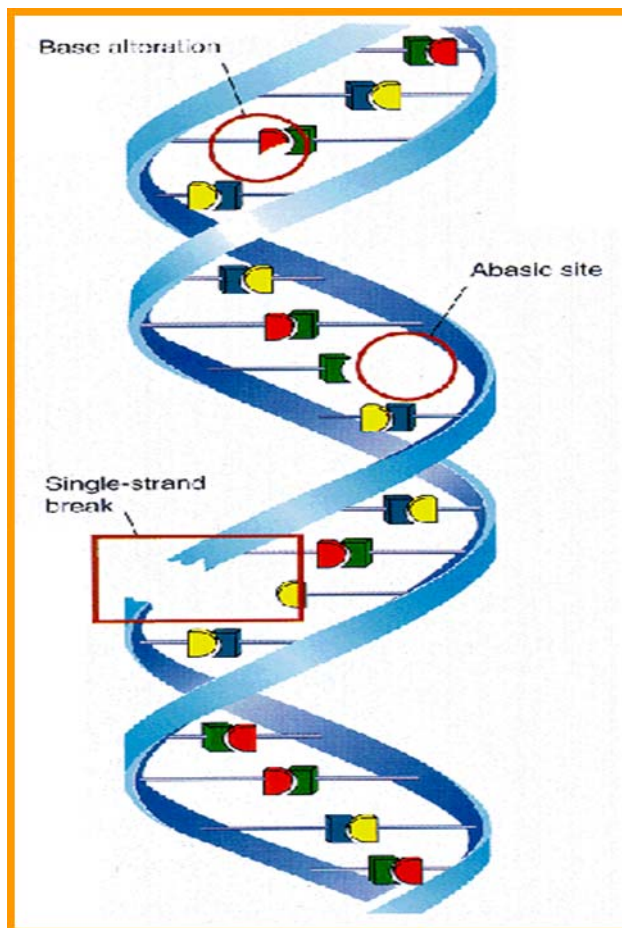
Väga suur doos *kogu organismile* võib põhjustada surma mõne nädalaga. Näiteks 4 grei suurune või suurem neeldunud doos, mis on saadud väga lühikese aja jooksul, põhjustab arvatavasti surma, kui ei ole võimalik anda ravi, sest kahjustatakse luuüdi ja seedekulglat. Samas on sellel juhul otseselt mõjutatud ainult 1 aatom 10 miljoni kohta.

Kuna 1 Gy vastab energia neeldumisele 1 J/kg ehk $6,25 \times 10^{18}$ eV/kg ning üheks ionisatsiooniprotsessiks vajalik energia on 34 eV, siis

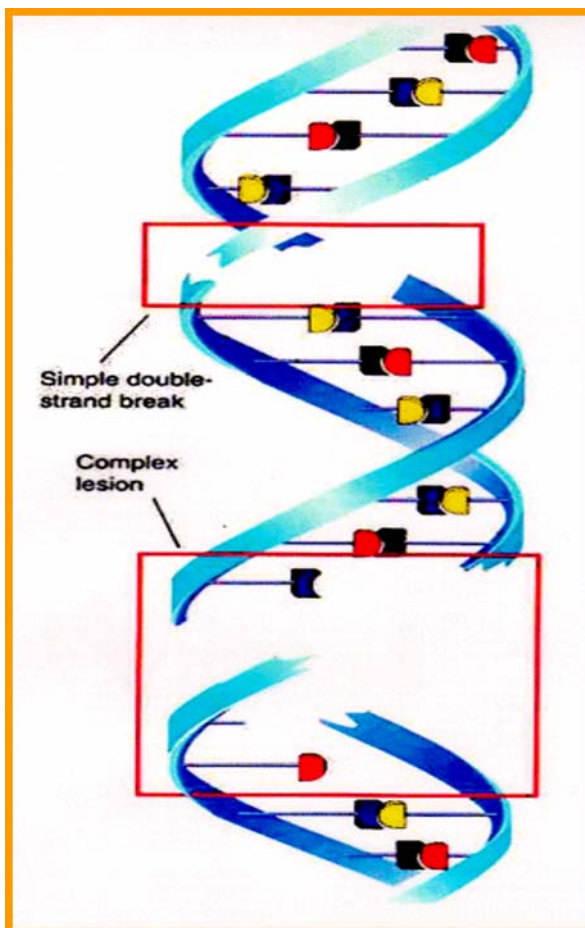
letaalne doos 4 Gy põhjustab $8,2 \times 10^{17}$ ioniseeritud aatomit ühe koe kilogrammi kohta.

Üks ioniseeritud aatom ergastab aga umbes 9 aatomit ja seega on letaalse doosi korral otseselt mõjutatavad $7,35 \times 10^{18}$ aatomit ühes kilogrammis koes.

Pehmes koes on umbes 9.5×10^{25} aatomit/kg, seega otseselt on mõjutatud ainult 1 aatom 10 miljonist.



Ühe DNA molekuli haru kahjustus. Sellisel juhul suudetakse DNA molekuli puuduv osa enamasti teise poole järgi taastada.



Mõlema DNA haru kahjustus. Sellisel juhul on DNA korrektne taastamine raskendatud.

Deterministlikud ja stohhastilised efektid

Kiirguse poolt põhjustatud efektid saavad kõik alguse üksikutest rakkudest, kuid ometi saab kahjustusi jaotada kahte põhimõtteliselt erinevasse gruppi: *deterministlikud ja stohhastilised efektid*.

Deterministlikud efektid

Deterministlikud efektid esinevad, kui rakud hakkavad kiirituskahjustuste toimel surema või viivitub rakkude poolestumine. Suurte dooside ja laiaulatusliku kahjustuse puhul takistab selline nähtus kiiritatud koe normaalset funktsioneerimist. Allpool teatud piirmäära on kahjustatud rakkude arv nii väike, et see ei mõjuta organi või koe funktsioone ning seega ei järgne ka mingeid efekte. Efektid ilmnevad inimesel alati juhtudel, kui kiirgusdoos ületab teatud efektile omast *läviväärtust*. Selliseid efekte nimetatakse *deterministlikeks*.

Suure kiirgusdoosi saanud inimestel ilmnevad juba suhteliselt kiiresti pärast kiiritamist sellised nähud, nagu iiveldus, naha punetus. Raskematel juhtudel aga esinevad nn. *akuutsed nähud*, milledest tuleb juttu edaspidi. Täpset piiri pole olnud võimalik paika panna, kuid 8 Gy suuruse doosi puhul on ellujäämise tõenäosus väga väike. Kasutusel on *letaalse doosi* mõiste LD 50/30, mis tähendab, et 30 päeva jooksul peale kiirituse saamist sureb pool katsealustest. Inimeste puhul arvatakse letaalne doos olevat gammakiirguse puhul 4 Gy.



Stohhastilised efektid

Kiiritus võib aga esile kutsuda ka kasvaja, mis avalduvad alles *pika peiteaja möödumisel* ja mille seos kiiritusega on leitav ainult suurte inimrühmade epidemioloogilise uuringu tulemusena. Kaasaja teadmiste tasemel arvatakse, et seda liiki efektid *avalduvad kõikide kiirgusdooside puhul* ja et neil puudub deterministlikele efektidele iseloomulik doosilävi. Loomkatsete statistilise töötlemise tulemusena on tuvastatud ka kiirgusest põhjustatud pärilikkuseefektid ja eeldatakse, et samasugused on need ka inimestel.

Oma juhusliku loomuse tõttu nimetatakse neid epidemioloogiliselt avastatavaid efekte - *kasvajate teket ja mõju pärilikkusele* - *stohhastilisteks*

kiirgusefektideks.

Pikaajalise viivituse järel võib kiirguse poolt modifitseeritud rakk saada *vähi* arengu initsiaatoriks. Organismi rehabilitatsiooni- ja kaitsemehhanismide tõttu on selline areng väikestel doosidel ülimalt väikese tõenäosusega, kuid siiani pole leitud mitte mingeid kinnitusi doosiläve olemasolust vähi tekkeks. *Stohhastilisi efekte iseloomustab nende kujunemise tõenäosuse suurenemine võrdeliselt doosi suurenemisega ja asjaolu, et tagajärgede raskus ei sõltu üldse neid tekitanud doosi suurusest.* Tõepoolest, tõenäosus vähi haigestuda on suurem suuremaid doose saanud indiviididel, kuid vähi kulg ja selle tagajärjed pole otseselt seotud teda esilekutsunud doosi suurusega. Sama kehtib ka pärilikkusefektide kohta. Kui järglastele geneetilist informatsiooni ülekandev reproduktiivrakk on kiirguse mõjul modifitseerunud, siis võivad kiiritatud indiviidi järeltulijatel avalduda mitmesugused pärilikud haigused.

Deterministlikud efektid

kiiritus põhjustab kahjustuste toimel rakkude suremist või viivitatud poolestumist;

häired koe normaalses funktsioneerimises;

efektid ilmnevad inimesel alati juhtudel, kui kiirgusdoos ületab teatud efektile omast läviväärtust;

dooside ja terviseefektide vahelised seosed on hästi kirjeldatud ja teada;

lihtne kasutada seadusandluses;

piirmäärad tagavad selle, et deterministlikke efekte ei esineks;

Stohhastilised efektid

kasvajad, mis avalduvad alles pika peiteaja möödumisel ja mõju pärilikkusele;

seos kiiritusega on leitav ainult suurte inimrühmade epidemioloogilise uuringu tulemusena;

puudub deterministlikele efektidele iseloomulik doosilävi;

efektide kujunemise tõenäosuse suurenemine võrdeliselt doosi suurenemisega;

tagajärgede raskus ei sõltu neid tekitanud doosi suurusest;

vähijuhtumite kasv kiiritatud elanikkonna hulgas;

pole võimalik ennustada, kellel kiiritatutest võib areneda vähk-kasvaja;

tekkinud vähk-kasvajate korral pole võimalik eristada neid kasvaja, mis on põhjustatud kiirituse poolt;

Õige ravi võib päästa inimese, kes on saanud 5 Gy suuruse doosi, kuid kogu keha

ulatuses saadud doos 50 greid on surmav isegi ravi korral. Väga kõrged doosid keha teatud osadele ei tarvitse olla eluohtlikud, kuid võivad siiski omada nähtavaid tagajärgi.

Näiteks silmapilgu jooksul neeldunud 5 grei suurune doos nahale põhjustab arvatavasti erüteemi – valulise naha punetuse – nädala jooksul, sama suur doos suguorganitele aga võib põhjustada steriilsust. See on deterministliku efekti tulemus – ilmneb ainult siis, kui doos või doosikiirus on kõrgemad kui teatud läviväärtus ning kui doos ja doosikiirus suurenevad, avaldub mõju varem ning tugevamalt.

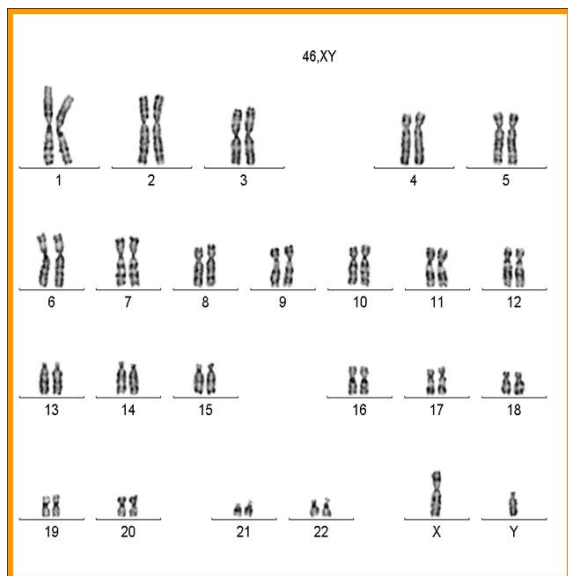
Deterministlikud mõjud indiviidile on kliiniliselt tuvastatavad kui kiirgusega kokkupuute tagajärjed, ehkki harvadel juhtudel, kus nende esilekutsujaks on õnnetused, ei ole alati suudetud tegelikku põhjust määrata.

Üks tüüp deterministlike tagajärgi ilmneb pikema aja möödumisel kiirituse saamisest. Tavaliselt pole need eluohtlikud, kuid võivad olla puudeks või takistuseks, sest teatud kehaosade funktsioneerimine on häiritud või tekivad mittepahaloomulised muutused. Kõige tuntumaks näiteks on *kae* (silmaläätse läbipaistmatuks muutumine). Sellise seisundi kutsuvad tavaliselt esile suured – mitme grei suurused neeldunud doosid.

Organ or tissue	Dose in less than 2 days, Gy	Deterministic effects	
		Type of effect	Time of occurrence
Whole body (bone marrow)	1	Death	1 – 2 months
Skin	3	Erythema	1 – 3 weeks
Thyroid	5	Hypothyroidism	1st – several years
Lens of the eye	2	Cataract	6 months - several years
Gonads	3	Permanent sterility	weeks
Foetus	0.1	Teratogenesis	-

Kui doos on väiksem või see saadakse pikema ajavahemiku jooksul, on keharakkudel suurem võimalus paraneda ja varaseid kahjustuse tundemärke ei ilmne. Ometi võivad koed olla kahjustatud selliselt, et tagajärjed ilmnevad alles hilisemas elus – võib-olla mitmekümne aasta pärast või isegi kiirgust saanud inimese järglastel. See on *stohhastilise efekti* näide – ei ole kindel, et nad ilmnevad, kuid nende ilmnemise tõenäosus suureneb, kui doos suureneb, samal ajal kui mõju ajastus ja raskus ei sõltu doosist.

Kiirgus ei ole nende tagajärgede ainus põhjustaja ja seepärast pole tavaliselt võimalik kliiniliselt tuvastada, kas üksikjuhtum tekkis kiirituse tagajärjel või mitte.



Tavapärased kromosoomid



Kromosomid pärast kiiritamist

Vähi tekkimine

Kõige olulisem stohhastiline tagajärg on *vähk*, mis on alati tõsine haigus ja sageli surmav. Ehkki enamikul juhtudel jääb vähi täpne tekkepõhjus selgusetuks või on vähe mõistetav, mängib kokkupuude selliste mõjuritega nagu tubakasuits, asbest ja ultraviolettkiirgus, samuti ioniseeriv kiirgus, kindlasti olulist osa teatud tüüpi vähkide esilekutsumises.

Vähi areng on keeruline mitmeastmeline protsess, mis tavaliselt kestab aastaid. Kiirgus avaldab olulist mõju algstaadiumis, tekitades kudede normaalsete rakkude DNAs teatud mutatsioone. Need mutatsioonid võimaldavad rakul hakata vohama, mis mõnikord lõpeb pahaloomulise kasvaja tekkega.

Kuidas saame hinnata kiirguse põhjustatud vähitekkeriski, arvestades, et me ei suuda eristada kiirguse tagajärjel ja muudel põhjustel tekkinud vähijuhtumeid?

Praktikas kasutatakse *epidemioloogilisi andmeid* – statistilisi erihaiguste juhtumiuuringuid (juhtumite arv ja nende levik) spetsiifilistes rahvastikurühmades. Oletame, et kiirgust saanud rühma indiviidide arv ja saadud doosid on teada. Uurides vähi esinemist rühmas ja võrreldes seda eeldatavate doosidega ja vähijuhtumitega muidu sarnases, kuid kiirgust mitte saanud rühmas, võime hinnata vähitekkeriski doosiühiku kohta. Tavaliselt nimetatakse seda *riskifaktoriks*. Väga oluline on kasutada sellistes kalkulatsioonides suurte inimrühmade andmeid, et viia statistiline määramatus miinimumini ja võtta arvesse vähi spontaanset arengut mõjutavad faktorid nagu vanus ja sugu.

Kõik vähijuhtumid ei lõpe surmaga. Keskmise suremus kiirgusest põhjustatud kilpnäärmevähi on umbes 10 protsenti (ehkki see on Tšernobõli katastroofi tagajärjel lastel ja teismelistel esineva kilpnäärmevähi korral palju madalam – alla 1 protsendi), rinnavähki umbes 50 protsenti ja nahavähki umbes 1 protsent. Üldiselt on ühtlaselt kogu organismile mõjuva kiirguse poolt vähi põhjustamise kogurisk umbes pool surmaga lõppeva vähi esilekutsumise riskist.

Kiirguskaitstes on surmaga lõppeva vähi tekkerisk tema erilise tähenduse tõttu suurimaks probleemiks. Eluohtliku vähi tekkerisk muudab võrdlused teiste elus ette tulevate eluohtlike riskidega lihtsamaks. Vastupidiselt sellele on väga raske võrrelda riske, mis ei ole eluohtlikud.

Riskihinnangud

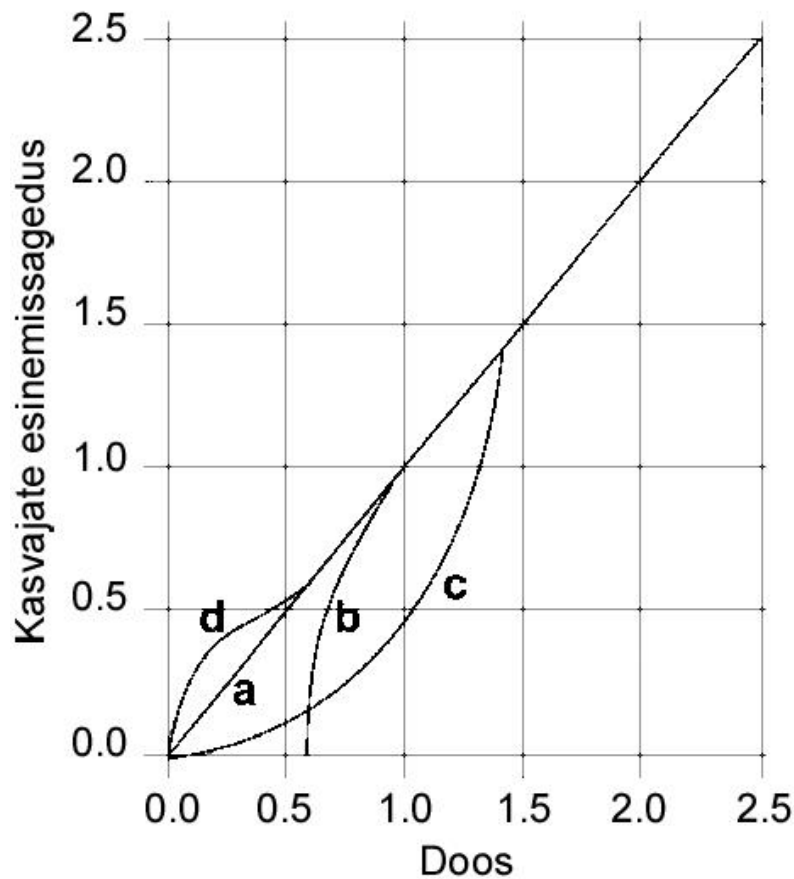
Peamiseks infoallikaks vähi tekke lisariski kohta, mille põhjustab kogu keha kokkupuude gammakiirgusega, on 1945. aastal *Hiroshima ja Nagasaki* aatompommide plahvatustes ellujääjatega läbi viidud uuringud. Endiselt on elus üsna suur arv pommitamised üle elanud inimesi ja seetõttu on oluline prognoosida, kui palju vähijuhtumeid kiirgust saanud elanikkonnal veel võib tekkida. Selleks kasutatakse erinevaid matemaatilisi meetodeid, mis omakorda on veel üks riskihinnangu määramatuse allikas.

Määramatuse allikaks on ka asjaolu, et ellujääjate dooside suurust on võimalik hinnata vaid suvalise kättesaadava informatsiooni alusel ja erinevad kalkulatsioonid on andnud mõnevõrra erinevaid tulemusi.

Riskihinnangute tegemiseks kasutatakse ka tavapärasest erinevat *väliskiirgust saanud inimeste andmeid* – juhul kui erinevaid kudesid ja elundeid on kiiritatud röntgen- ja gammakiirtega healoomuliste ja pahaloolumuliste kasvajate ravi ja diagnostika käigus ning samuti Marshalli saarte elanike andmeid – nemad puutusid kokku atmosfääri tuumarelvakatsetuste tagajärjel tekkinud ulatusliku radioaktiivse saastega.

Teavet *alfakiirguse* allikaks olevate radionukliidide mõjude kohta saadakse radooni ja selle lagunemisproduktide mõjualas tegutsevatelt kaevuritelt, töolistelt, kes puutuvad kokku raadium-226 ja luminestseeruva värviga, patsientidelt, kelle luuhaigusi ravitakse raadium-224-ga ja patsientidelt, kellele antakse röntgenkiirguse kontrastainet, mis sisaldab tooriumoksiidi.

Kasvajate esinemissageduse ja doosi vaheliste seoste kohta väikestel doosidel ei ole senimaani üksmeelt saavutatud. Joonisel on näha neli erinevat versiooni väikeste dooside mõjust kasvajate tekkele.



Pärilikud haigused

Teine peamine ajaliselt hiljem avalduv kiirguse mõju vähi kõrval on *pärilikud haigused*. Täpselt nagu vähi puhul, sõltub pärilike haiguste ilmnemise tõenäosus – kuid mitte raskus – doosist.

Geneetiline kahjustus tekib *munandite ja munasarjade kiiritamisel*, mis meestel toodavad vastavalt spermarakke ja naistel munarakke. Ioniseeriv kiirgus võib tekitada nendes rakkudes või nendest moodustuvates tüvirakkudes mutatsioone, mille kahjulikud tagajärjed väljenduvad tulevastel sugupõlvedel.

Mutatsioonid tekivad üksikute sugurakkude DNAs struktuuri muutusena, mille tulemusena kandub DNAs sisalduv pärilikkusinformatsioon tulevastele sugupõlvedele edasi. Võimalike pärilike haiguste raskusaste varieerub varajasesst surmast ja rasketest vaimsetest hälvetest suhteliselt ohutute luustiku arenguhälveteni ja kergete ainevahetushäireteni.

Ehkki näib, et mutatsioonid tekivad inimese genoomis ilma selge põhjuseta, võivad *looduslik kiirgus ja teised keskkonnamõjurid* samuti esile kutsuda valdava osa pärilike haiguste ilmnemist või siis suurendada selle tõenäosust. Siiski pole leitud kindlaid tõendeid nende pärilike defektide esinemise kohta inimese järgmistes põlvkondades, mida saaks seostada loodusliku või tehiskiirgusega.

Tuleb märkida, et aatompommiplahvatuste ohvrite järglaste ulatuslikud uuringud ei ole näidanud pärilike defektide statistiliselt olulist suurenemist. Selle asemel aitavad negatiivsed tulemused leida neile riskifaktori hinnangulist ülempiiri.

Pärilike kahjustuste kohta, mida ioniseeriv kiirgus kutsus esile loomadel, peamiselt hiirtel, on läbi viidud ulatuslikud eksperimentaaluuringud. Need hõlmavad laia dooside ja doosikiiruste vahemikku ja näitavad selgesti, et ioniseeriv kiirgus põhjustab mutatsioone. Tulemused annavad ettekujutuse ka sagedusest, millega teatud doosid põhjustavad pärilikke defekte.

Aatompommiplahvatuse üleelanute andmetega kõrvutades võimaldab see informatsioon hinnata pärilikkuse riski inimesele. Nende tulemuste põhjal on ICRP hinnanud rasketesse pärilikesse haigustesse haigestumise riski väikeseid doose ja doosikiirusi saaval elanikkonnal.

Akuutse kiirituse sündroom

Kui on tegemist *kogu keha kiiritusega*, siis on mõjutatud kõik koed ja organid. Kuna aga kõik organid ei ole sama kiirgustundlikkusega, siis keha reageering doosile sõltub ikkagi eelkõige doosi suurusest. Lihtsustamiseks jaotatakse akuutse kiirituse sündroomid kolme gruppi:

**vereloome (alates 2 Gy),
siseelundite (10-20 Gy) ja
kesknärvisüsteemi (~20 Gy) sündroomid.**

Kõikidele gruppidel on omased: pööritus, oksendamine, nõrkus, väsimus, kehatemperatuuri tõus ja muutused vere koostises.

Vereloome sündroomide korral algab pööritus ja oksendamine mõne tunni möödudes kiiritamisest. Enesetunne halveneb ning inimene tunneb nõrkust. Samas aga pole kindlat seost enesetunde ja saadud doosi suuruse vahel. Teisel, kolmandal nädalal peale kiiritamist algab juuste väljalangemine. Kui meditsiiniline abi ei ole efektiivne, siis võib surm saabuda 1-2 kuu möödudes. Peamiselt on seotud see sündroom muutustega *luuüdis ja veres*.

4-6 Gy doosi korral luuüdi hävineb peaaegu täielikult. Luuüdi on küll võimeline ise taastuma, kuid seda eeldusel, et inimene elab luuüdi hävingu üle. Üle 7 Gy dooside korral on luuüdi häving taastumatu.

Sisseelundite sündroomide korral korduvad kõik eelnimetatud nähtused, kuid pööritus ja oksendamine hakkab kohe peale kiirituse saamist. Vaatamata meditsiinilistele pingutustele saabub surm mõne nädala jooksul.

Üle 20 Gy doosid mõjuvad *kesknärvisüsteemile*, samuti kui teistele kehaorganitele. Mõni minut peal kiiritust saabub teadvusetus ning paari järgneva tunni jooksul inimene sureb.

Akuutsete üledooside korral on inimese immuunsussüsteem häiritud ja seega tuleb kiiritust saanutule *manustada antibiootikume ning hoida neid võimalikult eraldatutena steriilsetes tingimustes*. Harilikult kasutatakse vereülekandeid ning luuüdi siirdamisi, et vähendada kiirituse poolt tekitatud efekte. Samas on aga luuüdi siirdamisega seotud palju lahtiseid küsimusi.

Üledooside korral on harilik, et tegemist oli välise kiiritusega ja seega on kiiritus avaldanud mõju ka nahale. Inimese nahk punetab, tekivad villid, nahk koorub, pidev higistamine ja karvade hävimine. Keha nahapinnaga seotud nähtused on otseses seoses saadud doosiga.

Jäsemete kiirituse korral on võimalik, et kahjustused arenevad edasi gangreeniks ning võib tekkida amputeerimise vajadus. Meditsiiniline abi on efektiivne ainult vereloome sündroomide korral, suuremate dooside korral pole võimalik surma vältida.

Kiirguse mõju uurimise iseärasustest

Kiirguse poolt põhjustatud tervisekahjustustega kaasneb probleem, et enamus andmeid pärineb kõrgete dooside piirkonnast. Igapäevases elus puutume kokku aga madalate doosidega ja pole veel kindlaks tehtud, et madalate dooside piirkonnas kehtivad doosi suuruste ja tervisekahjustuste vahel analoogilised seosed.

Peamiseks infoallikateks on olnud Hiroshima ja Nagasaki elanikkonnad. Samas aga kaasneb sellega veel ka see probleem, et pole võimalik igal juhul täpselt määrata inimese poolt saadud doosi suurust. Järelikult ei ole nende andmete põhjal tehtud hinnangud väga objektiivsed ning põhjustavad kõrgeid riskifaktoreid.

Tehtud katsed ja uuringud on tõestanud, et tegelikkuses on riskifaktorid madalamad. Igasuguse riski vältimiseks aga kasutatakse tihtipeale siiski kõrgemaid faktoreid, et kindlalt välistada võimalike oht. Jaapani tuumapommirünnaku ohvrite põhjal tehtud hinnangute kohaselt arvati, et 0,01 Sv doos põhjustab tulevikus miljoni inimesega populatsioonis lisaks loomulike surmade arvule veel 300 kuni 500 surmajuhtumit. Samas sureb analoogses populatsioonis muudest faktoritest põhjustatud vähki ligikaudu 200000 inimest. Tegelikkus on aga näidanud, et Hiroshima ja Nagasaki pommitamise tagajärjel vähki surnud inimeste arv on olnud eeldatust väiksem.

Seoste leidmist raskendab ka asjaolu, et inimkonda ümbritsevad lisaks mitmed teised vähitekitajad. Vähi puhul pole aga võimalik põhjustajat määrata pealegi ilmneb haigus mitmeid aastaid hiljem.

Lisaks on andmete puhul olnud tegemist lühiajalise suure doosiga. Igapäevases elus saame aga pidevalt väikeseid doose. Näiteks 2 mSv doos gammakiirgust kogu kehale poole tunni jooksul võib põhjustada mõnede patsientidel halva enesetunde ja oksendamise, võibolla 1% patsientidest sureb järgmise kuu või kahe jooksul akuutse kiirgussündroomi tagajärjel. Sama doos aga kuu või veel pikema aja perioodi jooksul ei põhjusta aga mingeid märgatavaid sümptomeid.

Doos ühe ööpäeva jooksul (mSv)	Põhjustatavad efektid
250	Detekteeritavad efektid puuduvad
500	Ajutine verekoosluse muutus
1000	Oksendamine
2000 – 2500	Surm ilma meditsiinilise abita
5000	Surm

IV Tuumaenergeetika

Tuumaenergeetika

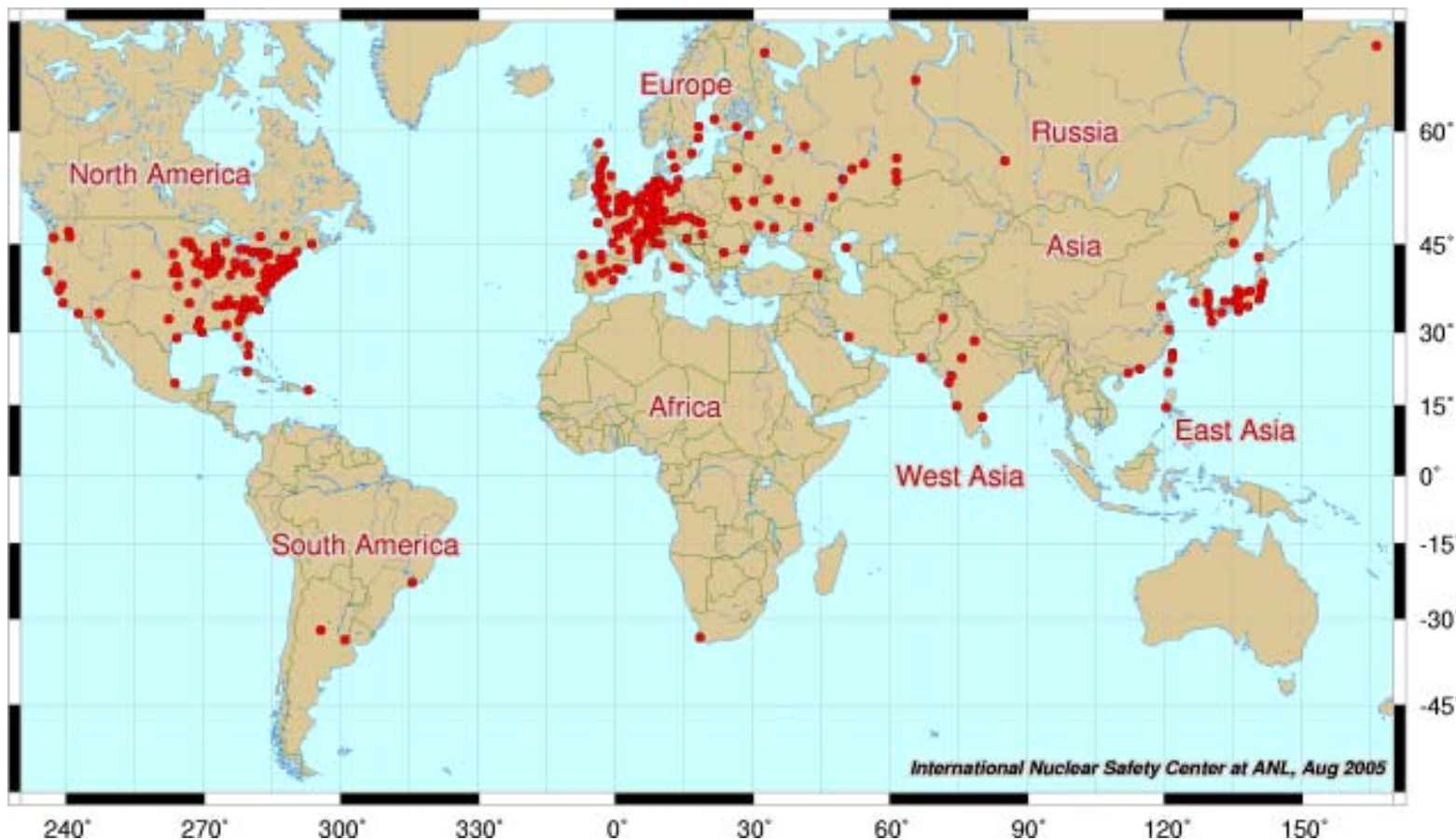
Tuumade lõhustumise protsessi avastamine 1938 aastal lõi uue energiaallika ning esimene reaktor hakkas tööle 1942. aastal Chicagos. Tuumareaktoreid on kasutatud energia tootmiseks alates 1950. aastatest, eriti kiire areng toimus 60- ja 70-ndatel aastatel. Tänapäeval on 30 riigis elektritootmisel käigus 439 tuumareaktorit koguvõimsusega 372 GWe. Tuumalõhustumise energia abil toodetakse 16 % kogu maailma elektrist ja selline osakaal on püsinud juba paar aastakümnet.

Näiteks 2006. aastal toodeti üle 2600 miljardi kWh. Sama suur kogus elektrienergiat toodeti tuumaenergeetika sünni ajal 1960. aastal kõikidest muudest allikatest kokku ning see ületab enam kui kolmekordselt suurriikide Saksamaa või Prantsusmaa kogu elektritoodangu.

Ehitusjärgus on praegu üle 30 uue reaktori koguvõimsusega üle 26 GWe. Lisaks on kindlalt otsustatud või juba tellitud 94 reaktori ehitamine koguvõimsusega rohkem kui 100 GWe, mis moodustab veerandi praegu olemasolevast.

Riigiti erineb nii tuumareaktorite arv kui nende toodetud tuumaelektri osa laiades piirides. Kõige rohkem reaktoreid töötab Ameerika Ühendriikides – 104, järgnevad Prantsusmaa 59 ja Jaapan 55 reaktoriga.

Samas toodab tuumaenergia suurima osana kogu oma elektrist - 78% - Prantsusmaa; järgnevad Leedu ja Slovakkia vastavalt 69% ja 57% (kuni viimase ajani juhtis seda edetabelit Leedu, kuid kaotas esikoha ühe reaktori sulgemise järel). Üle kolmandiku moodustab tuumaelekter veel Belgias, Bulgaarias, Ungaris, Lõuna-Koreas, Rootsis, Šveitsis, Sloveenias ja Ukrainas, üle veerandi Jaapanis, Saksamaal ja Soomes ning umbes viiendiku USA-s.



2. detsembril 1942 käivitas rühm teadlasi Itaalia füüsiku Enrico Fermi juhtimisel maailma esimese tuumareaktori. Chicago Ülikooli staadioni tribüüni alla ehitatud katseseadmes teostati äärmise salastatuse õhkkonnas esimest korda inimese juhitud tuumalõhustumise ahelreaktsioon. Kolmkümmend aastat hiljem (1972) selgus, et inimene polnud siiski esimene tuumareaktori looja Maal. Juba 1,8 miljardit aastat tagasi käivitus looduses Oklo uraanirikastes settekivimites Aafrikas Gabonis vähemalt 17 tuumareaktorit.

Tuumaenergia sihipärasest arendamisest ühiskonnale olulise baasenergia allikana soojuse ja elektri tootmiseks saab hakata rääkima alles pärast Teise Maailmasõja lõppu, 1950-ndatel aastatel. Tuumarelv oli demonstreerinud oma võimsust katsetusega Alamogordos ja sõjas Jaapaniga 1945. a. ning kätte oli jõudnud aeg selle energialiigi rahumeelseteks rakendusteks. Külma sõja tingimustes jätkus tegevus paralleelselt tuumarelvastuse suurendamisega eraldi kahel pool „raudset eesriiet“. Seepärast pole ime, et suurriikide paljud energiareaktorid olid pikka aega kaksikkasutusega ja teenisid elektritarbijate kõrval ka teist isandat – sõjatööstust.

Esimese tuumaelektri tootmine on dokumenteeritud 20. detsembril 1951, kui Idahos, USA, pani eksperimentaalne reaktor EBR-1 helendama neli 200 W lampi. Esimene riigi elektrivõrku ühendatud 5 MWe võimsusega Obninski tuumaelektrijaam APS-1 avati 1954. aastal NLiidus.

1970-1980-ndatel aastatel hakkas peamiselt USA-s ja Euroopa maades tuumaenergia areng uute jaamade ehitamise osas pidurduma ja see tendents jätkus kuni käesoleva

sajandi alguseni. Oma osa oli kasvaval rahutusel *radioaktiivsete tuumajäätmete pikaajalise ohutuse ja tuumarelvamaterjali võimaliku leviku suhtes, fossiilkütuste hinnatrendidel ning tuumajaamade avariidel*, mis tekitasid ühiskonnas ja investeerijates vastuseisu tuumaenergia arendamisele. Sellel perioodil toimusid suurimad vähestest tuumaenergeetikaga seotud avariidest: nullilähedase keskkonnamõju, kuid suure majanduskahjuga avarii Three Mile Islandi tuumajaamas USA-s 1979. aastal ja eriti RBMK-reaktori avarii Tšernobõli tuumajaamas Ukrainas 1986.a.

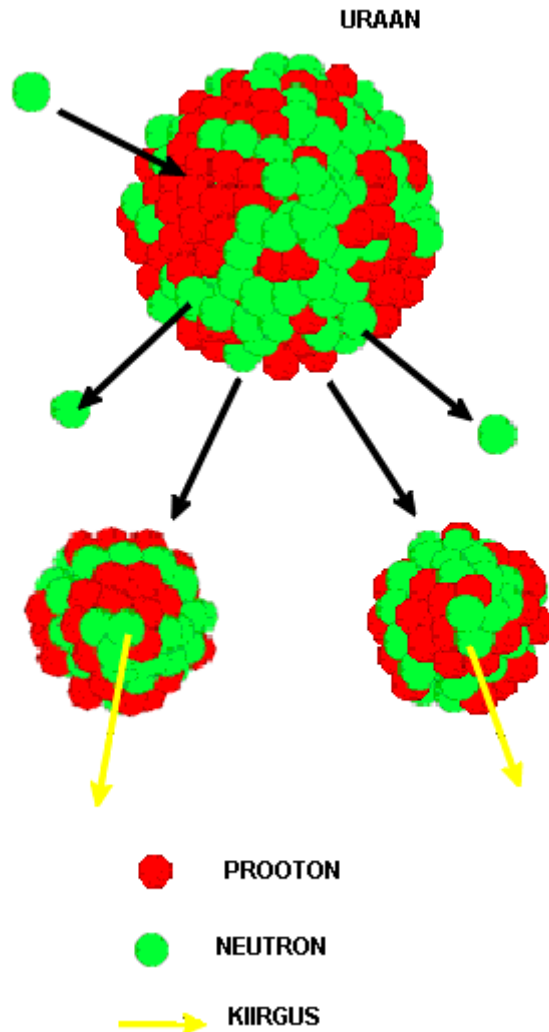
Järgnevatel aastatel *karmistunud turvanõuete* tõttu suurenesid hüppeliselt tuumajaamade ehituskulud, samas langes uraani hind ja konsolideerus selle turg. Uusi reaktoreid ehitati sel perioodil peamiselt ainult Aasia riikides.

Ajavahemikul 1990-2006 suurenes maailma tuumaelektri tootmisvõimsus 13,5%, millest ainult kolmandik tuli uute reaktorite evitamisest, ülejäänud saadi töötavate reaktorite täiustamisest ja eriti koormusteguri suurendamisest. Nii on viidud kolmandiku reaktorite koormustegurid paremaks kui 90 % ja kahel kolmandikul suuremaks kui 75 %, kusjuures parimaid tulemusi on saavutanud USA ja Jaapani kõrval Soome. Arvestades, et reaktorid PWR ja BWR vajavad peatamist kütuseuuenduseks ja rutiinholduseks iga 1,5-2 aasta järel, siis on saavutatud koormustegurid peaaegu maksimaalsed.

Lõhustumisprotsess

Tuumareaktori töö aluseks on *lõhustumisprotsess*, mille käigus laguneb tuum kaheks peaaegu võrdseks tükiks, mida nimetatakse *kildtuumadeks või lõhustumissaaduseks*. 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 - *seega tuumakütuse temperatuur tõuseb*.

Üks tuntumaid isotoope, mis lõhustub energia lisamisel (ehk neutronitega pommitamisel) on *looduslik uraan*, mis koosneb 0,7% ^{235}U ja 99,3% ^{238}U . Lõhustumise juures on oluline fakt, et *kildtuumad ei ole stabiilsed* ning emiteerivad protsessi käigus 2 kuni 4 neutronit, mis on võimelised põhjustama uut lõhestumist.

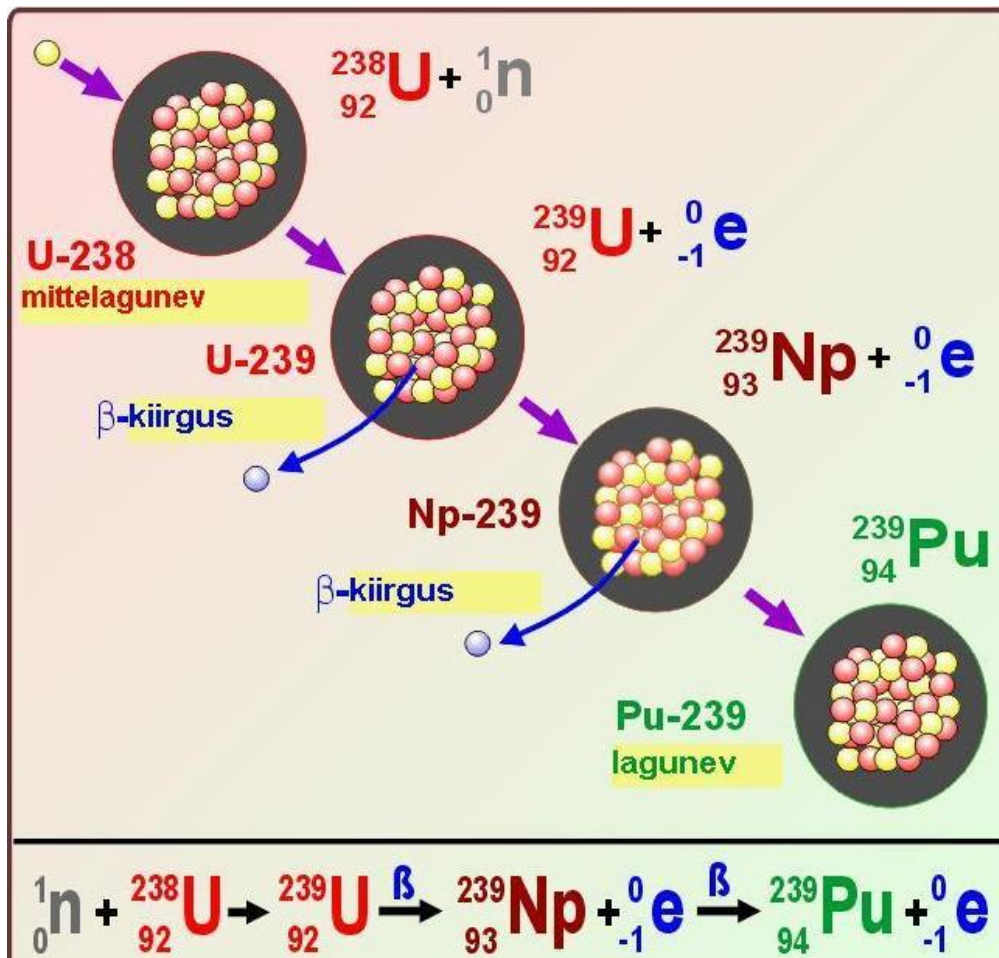


Enamus vabanevatest neutronitest kiiratakse vahetult lõhustumise käigus, osad aga emiteeritakse hilinevalt, mõni sekund kuni paar minutit hiljem. Viimaseid nimetatakse *hilinevad neutroniteks*. Neutronite vabanemine muudab võimalikuks *ahelreaktsiooni* tekkimise, tänu hilinevad neutronite olemasolule 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.

Juhul kui uraan-238 tuum neelab hoopis *kiire neutroni*, muutub ta uraan-239, mille lõplik lagunemissaadus on *plutoonium-239*. Ka plutoonium lõhestub või seob neutroneid, moodustades täiendavalt aktiniidide isotoope nagu ameriitsium või kүүrium.



Plutoonium on uraanist raskem element ja looduslikult seda ei esine, siiski on teda loodusesse sattunud tuumakatsetuste tulemusena. Lisaks radioaktiivsusele on Pu ohtlik oma mürgisuse tõttu.

Mõnedes reaktorites üritatakse kasutada kütusena *oksiidkütusesegu*, mis sisaldab *rikastatud uraani*, kuhu on segatud kasutatud kütuse töötlemisel saadud plutoonium. Seda käsitatakse *kütuse taaskasutusena* ja tuumarelvade valmistamiseks sobiva plutooniumi varude kontrolli all hoidmisena.

Reaktori südamik koosneb

tuumakütusest

Enamikus reaktorites on kütuseks tsirkooniumisulamist torudesse paigutatud keraamilise uraanoksiidi UO_2 tabletid. Olenevalt reaktoritüübist kasutatakse kas rikastatud (tavaliselt 3,5-5% U-235) või looduslikku (ainult 0,7% U-235) uraani. Mitmest sellisest 3,5 kuni 4 m pikkusest kütusevardast koostatakse reaktori südamikku asetamiseks kütusekomplektid. Mitmetes riikides kasutatakse tuumkütusena ka uraani ja plutooniumioksiidide segu – nn MOX-kütust.

aeglustist

Aine, mis aeglustab kütusetuumade lõhustumises tekkivaid kiireid neutroneid ja muudab nad sellega efektiivsemateks ahelreaktsiooni tekitajateks. Kõige rohkem kasutatakse tavalist vett, kuid ka rasket vett (D_2O) ja grafiiti. Tavaline vesi, mis lisaks

aeglustamisele ka neelab neutroneid, ei ole aeglustina nii efektiivne kui eeltoodud.

jahutusvedelikust (või -gaasist)

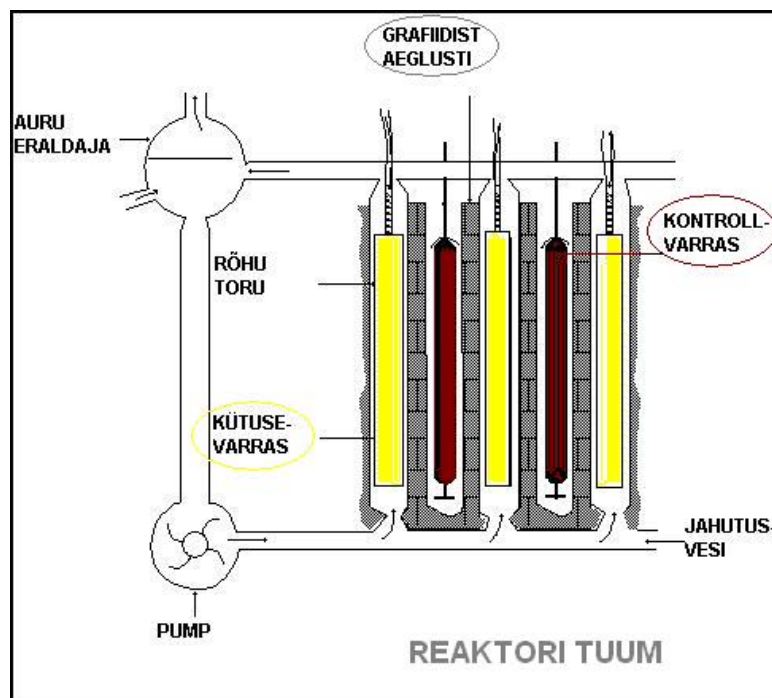
...soojuse ärajuhtimiseks - vesi ja raske vesi täidavad tihti ka aeglusti rolli. Veel on variantideks vedel naatrium, heelium jm.

juhtvarrastest

Neutroneid neelavat ainet sisaldavad vardad, mille väljatõmbamisega reaktorisüdamikust või sellesse sisselükkamisega saab ahelreaktsiooni kiirust muuta või lõhustumisprotsessi üldse seisata. Neelavateks aineteks on tavaliselt boor, hafnium või kaadmium. Peaaegu kõikides reaktorites on ahelreaktsiooni kiireks summutamiseks ka lisasüsteem, mis vajaduse korral juhib reaktorisse neutroneid neelavat vedelikku või gaasi.

avariivarrastest

...kriitilisuse kiireks minimaliseerimiseks avariide puhul.



Lisaks südamikule on olulised veel soojuskandja, aurugeneraator ja kaitsekest. Lõhestumise käigus vabaneb suurel hulgal soojust, mis põhjustab kütuse ja südamiku temperatuuri tõusu. Soojust eemale juhtivat *soojusekandjat*, milleks on vedelik või gaas, mis reaktorisüdamikust läbi voolates kannab sellest soojust välja ja toodab turbogeneraatori käivitamiseks vajalikku *auru*. *Keevveereaktorist BWR* väljunud aur käivitab otse turbiini, muudes reaktoritüüpides on soojusvahetid ja sekundaarsed aurugeneraatorid.

Aurugeneraator on jahutussüsteemi osa, milles soojuskandja annab reaktorisüdamikust väljakantud soojust sekundaarsüsteemis olevale veele ja tekitab auru turbogeneraatori käitamiseks. Kütus on suletud metallkonteineritesse ja reaktori südamik paikneb surveanumas (mõne tehnilise lahenduse puhul on kütuseelemendid paigutatud eraldi surveanumatesse).

Kaitsekest on tavaliselt 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. Suuremale osale reaktoritest on ehitatud täiendav kaitsekest (sarkofaag), mis ümbritseb reaktoreid ja tavaliselt ka soojusvahetajaid.

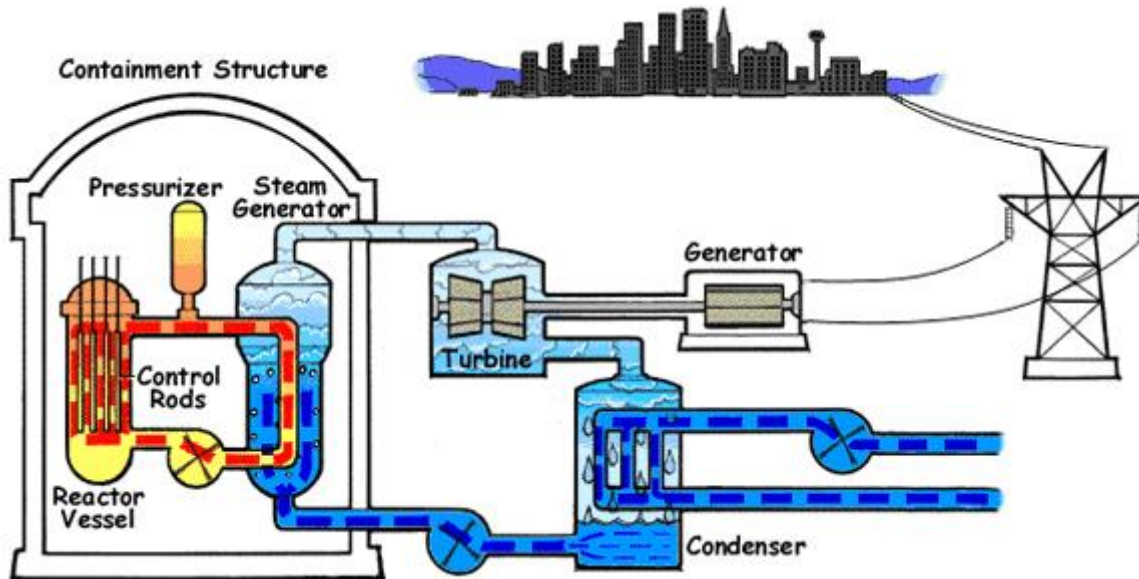
Enamik praegu energeetikas kasutatavaid tuumareaktoreid loetakse *II põlvkonda kuuluvaks*:

surveveereaktor PWR ja WWER,
keevveereaktor BWR,
surveraskeveereaktor PHWR või CANDU,
täiustatud gaasjahutusega reaktor AGR,
kergevee grafiitaeglustiga reaktor RBMK,
kiire reaktor FBR.

Energeetiline tuumareaktor toodab tuumkütuse tuumade kontrollitaval lõhustumisel vabanevat soojusenergiat, mida kasutatakse auruturbiiniga ühendatud generaatoris elektri saamiseks. Tüüpiline soojusefektiivsus enamikul praegustel tuumajaamadel on 33-36 %. Vaatamata reaktoritüüpide erinevusele, on tuumajaama üldskeem ja rida komponente nende ehituses ühised.

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 %.

Surveereaktor, PWR

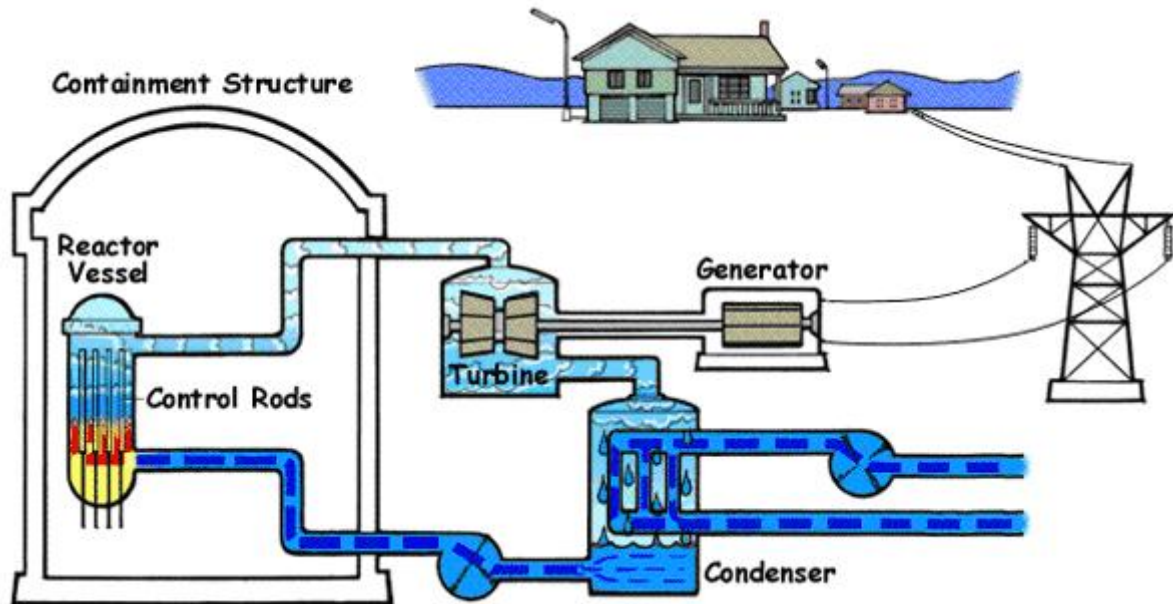


Rohkem kui 260 reaktoriga on PWR enimkasutatav reaktoritüüp maailma energeetikas, peamiselt USA-s, Prantsusmaal, Jaapanis ja Venemaal (nimetatakse WWER). Elektriline võimsus varieerub piirides 300-1500 MWe.

Suure võimsusega PWR reaktori südamikus võib olla 150-250 vertikaalselt asetatud kütusekomplekti, millest igaüks on 200-300 kütusevarrast. Kokku on reaktoris seega 80-100 tonni 3,5-5% ^{235}U suhtes rikastatud tuumkütust. Veerand kuni kolmandik kütust uuendatakse 1,5-2 aasta järel.

Vertikaalsed juhtvardad juhitakse südamikku reaktorianuma pealt. Tavaline vesi reaktorianumas ja *esmasest 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.

Keevveereaktor



Maailmas töötab üle 90 keevveereaktori võimsustega kuni 1300 MWe ja see on levikult teine reaktoritüüp USA-s, Jaapanis, Rootsis.

Erinevalt PWR-st on selles reaktoris *ainult üks jahutuskontuur*. BWR kasutegur väiksem kui PWR reaktoril. Reaktorianuma ülaosas tekkinud aur läbib auruseparaatorid ja juhitakse sealt otse turbiini. Turbiinist jõuab aur kondensaatorisse, kus muundub veeks, jahtub ja vesi pumbatakse tagasi reaktorianumasse.

Tuumkütusena kasutatakse ^{235}U suhtes rikastatud uraanoksiidi olenevalt reaktori võimsusest kuni 750 vertikaalses kütusekomplektis (igäühes 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.

III põlvkonna tuumareaktorid

III põlvkonna tuumareaktorid on loodud II põlvkonna reaktorite baasil, viies neisse arendusi, täiustusi ja uuendusi. Mõned enam kui tosinast arendatavast reaktoritüübist juba töötavad Jaapanis ja veel rohkem on ehitusjärgus. Eelkõige on püütud uue põlvkonna reaktorite puhul tagada pikemat tööiga ning rohkem on rakendatud erinevaid passiivseid ohutusmeetmeid.

Mõned näited III põlvkonna reaktoritest on:

täiustatud keevveereaktor ABWR;

Euroopa surveveereaktor EPR (European Pressurized Reactor), millest esimest ehitatakse praegu Soomes Olkiluoto tuumajaamas;

Venemaa ujvutuumajaam võimsusega 70 - 600 MWe väikeste elektrivõrkude toiteks väheasustatud aladel Kaug-Idas ja –Põhjas – koosneb kahest reaktorist praamil. Ehitamist alustati 2007. a.

Vahel eristatakse reaktorikonstruktsioone, millesse viidud uuendusi loetakse revolutsioonilisteks, kuid mitte veel IV põlvkonna reaktoritele omasteks. Selliseid reaktoreid peetakse *III+ põlvkonda* kuuluvateks.

EPR-i ehitus Flamanville'i tuumaelektrijaamas Prantsusmaal.



Tuumakütuse tsükkel ja jäätmed

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 märkimisväärset 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 maakoos - 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.

Uraani leidub maakoos 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.

Kaevandatav looduslik uranimaak koosneb kahest isotoobist: **U-235 ja U-238** ja uraani radioaktiivsetest tütardest. Viimased on radionukliidid, mis moodustuvad uraani radioaktiivsel lagunemisel. Kaevandatav uranimaak sisaldab keskmiselt 99,3% U-238 ja 0,7% U-235. Lisaks on seal veel tühisel hulgal U-234, mis on U-238 lagunemisprodukt.

Maak purustatakse, peenestatakse lobriks ja sellest eraldatakse uraan tugevas happes või leelises lahustamise teel. Lahusest sadestatakse uraanoksiidi U_3O_8 kontsentraat, mis kuivatatakse, kuumutatakse ja pakendatakse. Nõrgalt radioaktiivset ~85% uraani sisaldavat **uraanoksiidi** U_3O_8 nimetatakse oma khaki-värvusest hoolimata „**kollakoogiks**“, millisel kujul uraan ka kaubastatakse.

Kollakook



Põhiosa maagi radioaktiivsusest ja ka raskemetallid jäävad kaevandus- ja eraldusjääkidesse, mis tuleb ohutult ladustada, et takistada nende pääsu keskkonda.

Tänapäeval kasutatakse järjest rohkem maa-aluse leostamise tehnoloogiat. Siin lastakse nõrgalt leeliseliseks või happeliseks muudetud hapnikurikkal põhjaveel tsirkuleerida läbi poorse maagikihi selles sisalduva uraani lahustamiseks. Maapinnale tuuakse juba uraanilahus, mida eelkirjeldatud viisil keemiliselt töödeldakse.

Suurimad uraanitootjad on Kanada, Austraalia ja Kasahstan.

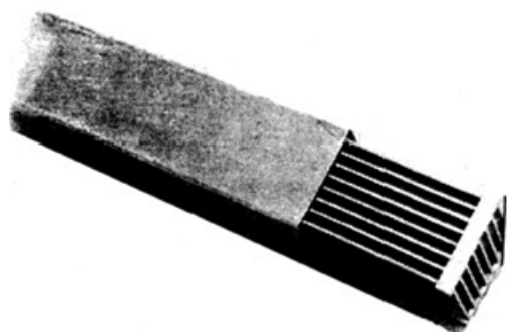
Pärast maagi kaevandamist toodetakse temast *uraani kontsentraat*. Üldiselt on töötlemistehased kaevanduste vahetus läheduses. Kontsentraat sisaldab üle 60% uraani, samas kui looduslikus uraanimaagis on seda 0,1 kuni 1 %. Kuna kütusena kasutatakse peamiselt U-235, siis tuleb maaki rikastada ja sellega tõuseb tema osakaal 0,7%-lt 3,5%-ni. Keskmiselt saadakse 8 tonnist uraanimaagist 1 tonn kütust. Kasutamata 7 tonni eraldatakse **rikastamise** protsessi ajal.

Tsentrifuugid rikastamistehases



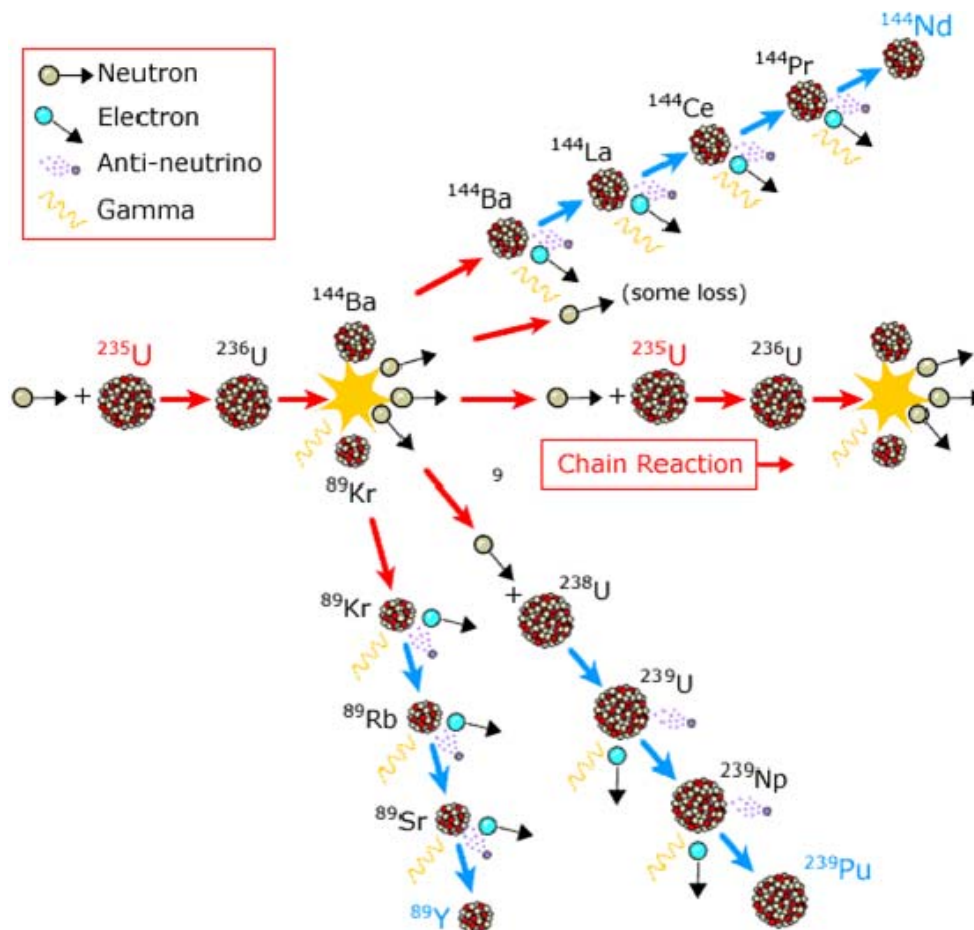
Enamus kasutatavast tuumkütusest valmistatakse uraandioksiidist pressitud ja kõrgel temperatuuril (üle 1400 kraadi) kuumutatud **keraamiliste tablettide** kujul. Tablettide mõõtmed sõltuvad eelkõige edasisest kasutusest ja reaktoritüübist. Tabletid pakitakse hermeetiliselt tsirkooniumisulamist torudesse **kütusevarrasteks**. Viimastest koostatakse reaktorisse paigutamiseks **kütusekomplektid**.

Kütusekomplektid:



*Tuumareaktori tööprotsessis toimub uraani isotoobi U-235 **lõhustamine**. Moodustuvad ka uued radionukliidid, millest enamuse poolestusaeg on väga lühike. Samas aga tekib märkimisväärsel hulgal ka pika poolestusajaga radionukliide, mis muudavad **kasutatud tuumakütuse** käsitlemise probleemikaks.*

U-235 ahelreaktsioon ja lõhustumisproduktid.



Keskmiselt toodetakse ühest tonnist looduslikust uraanist rohkem kui 40 miljonit kWh elektrit. Sama tulemuse annavad ka 16000 tonni söe ja 80000 barreli nafta põletamine.

Erinevad jäätmed tekivad tuumakütuse tsükli erinevate etappide käigus:

mitteradioaktiivsed jäätmed tekivad kaevandamise käigus

madala aktiivsusega jäätmed tekivad pea igas etapis

keskmise aktiivsusega jäätmed tekivad reaktori töötamisel, samuti kütuse ümbertöötlemisel

kõrge aktiivsusega jäätmed on kasutatud tuumakütus ja lõhustumisprodukte sisaldavad jäätmed

Kaevandamisel tekkivad jäätmed sisaldavad pikaajalisi radionukliide, samas on nende kontsentratsioon aga väga väike.

Rikastumise protsessi käigus tekib aga ka uraan, milles U-235 kontsentratsioon on väiksem kui looduslikus uraanis (seega vähem kui 0.7%). Sellist uraani nimetatakse *vaesustatud uraaniks*, mida sageli kasutatakse varjestusena suure tiheduse tõttu.

Kasutatud tuumakütus moodustab umbes 99% tuumakütuse tsükli käigus tekkivate

radioaktiivse jäätmete aktiivsusest, samas koguse osas on olukord vastupidine.

Kasutatud tuumakütuses leidub kahte tüüpi radionukliide: *lõhestumis- ja aktivatsiooni produktid* ning *aktiniidid*. Lõhestumisproduktid on uued radionukliidid, mis moodustuvad raskete tuumade (uraan, plutoonium) lõhestumisel - näiteks jood, tseesium ja strontsium.

Aktivatsiooniproduktid tekivad kui elektriliselt neutraalsed osakesed, neutronid, neelduvad erinevates materjalides ning viimased muutuvad seeläbi radioaktiivseteks. Sellisel moel on võimalik aktiveerida koobaltit ja niklit.

Aktiniidid koosnevad kütuses leiduvast uraanist ja elementidest, mis moodustuvad kui uraan neelab ühe või enam neutronit ning sellele ei järgne lõhestumist. Elemente, mis on uraanist raskemad, nimetatakse *transuraanideks* ja tähtsaim neist on plutoonium. Nii uraan kui ka plutoonium on mõlemad radioaktiivsed ja lagunevad läbi radioaktiivsete ridade.

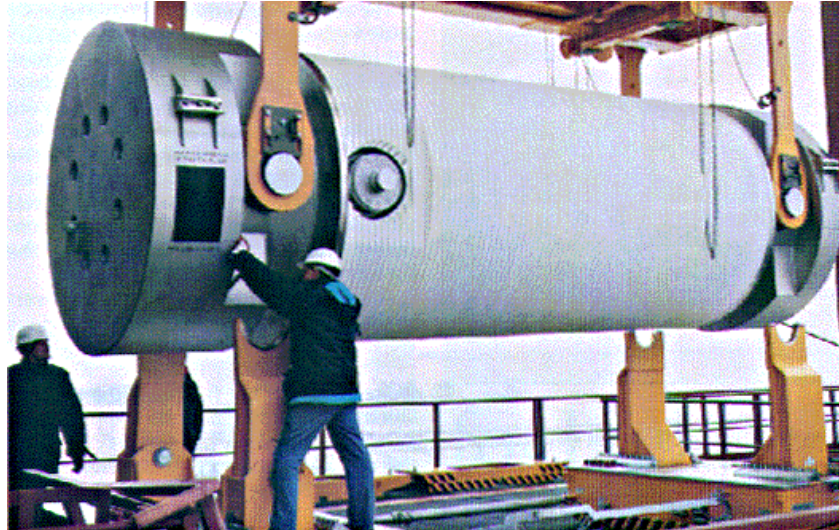
Esimese saja aasta jookusul peale kasutamist moodustab suurema osa tuumakütuse aktiivsusest aktivatsiooniproduktid. Aktiniidid ja nende tütreid hakkavad rolli mängima alles pärast 500 aasta möödumist.

Reaktori töö käigus suureneb tuumkütuses kildtuumade, plutooniumi ja teiste raskete nn väikeaktiniidide osakaal. Paljud neist on ahned neutronineelajad, nn „reaktorimürgid“, ja kütuse edasine kasutamine pole teatud aja möödudes enam mõttekas. Kasutatud tuumkütus, mis on tootnud 36 miljonit kWh elektrienergiat 1 tonni loodusliku uraani kohta, eemaldatakse tavaliselt aasta või kahe pärast reaktorist. Võrdluseks, sama koguse elektri saamiseks oleks vaja põletada 20000 t kivisütt või 8,5 miljonit kuupmeetrit gaasi.

Kasutatud tuumkütusekomplektid on reaktorist väljavõtmise järel ülimalt radioaktiivsed - intensiivse ioniseeriva kiirguse ja soojuse allikad. Et peamiselt lühiealised kildtuumad radioaktiivselt laguneksid, paigutatakse kasutatud kütus aastateks või aastakümneteks tuumajaama lähedusse ehitatud veebasseini või õhkjahutusega hoidlasse. Viimased peavad tagama kiirgusvarjestuse ja soojuse ärajuhtimise kõrval ka radioaktiivse materjali turvalisuse. Kasutatud tuumakütus, mis koosneb peamiselt U-238 (95%), kuid sisaldab lisaks ka lõhustamata U-235, plutooniumi ja lõhustumisprodukte, läheb kas ümbertöötlemisele või siis lõppladestamisele. Ümbertöötlemise käigus eraldatakse kasutatud tuumakütusest uraan ja plutoonium ning järele jääb jääde, mis koosneb lõhustusproduktidest. Teisel juhul transporditakse kasutatud kütus pärast jahutusbasseini ladestuspaika.

Kasutatud kütus paigutatakse transportimiseks spetsiaalsetesse konteineritesse, eelkõige selleks, et kaitsta käitlemisega tegelevaid töötajaid. Konteinerid on projekteeritud nii, et nad peaksid vastu ka avariidel ning muude õnnetusjuhtumite korral. Näiteks ei suuda 800 kraadine põleng 30 minuti jooksul ja langemine 9 meetri kõrguselt betoonpinnale tekitada muutusi konteineri konstruktsioonis.

B-tüüpi konteiner kasutatud tuumakütuse transportimiseks.



Ümbertöötlemistehases eraldatakse kasutatud kütuses sisalduv uraan, plutoonium ja väikeaktiiniidid lõhustusproduktidest (kildtuumadest). Lõppladustamist vajavateks radioaktiivseteks jäätmeteks lähevad ainult viimased, so umbes 3 % kogu kasutatud kütuse asemel. Uraan, milles on lõhustuvat ^{235}U rohkem kui looduslikus, suunatakse tagasi kütusetsükklisse: konversioon, rikastamine jne.

Ehkki peamised teaduslik-tehnilised lahendused on läbi töötatud, ükski kasutatud tuumkütuse lõppladustusrajatis tänapäeval veel ei tööta. Ehitamisel on sellised rajatised Soomes, USA-s, planeerimisjärgus veel paljudes maades, kuid esimest lõppladustamist pole oodata enne 2010. a. Soovitavaks peetakse sügaval maa all asuva nn geoloogilise lõpprajatise varianti stabiilses graniidis, savis, soolalademetes, jm. Võimalust kasutatud kütust vajadusel välja võtta arvestatakse nii kasutatud kütuse pakendamisel kui ka hoidla konstruktsioonis. Kasutatud tuumkütusekomplektid pakendatakse lõppladustamiseks hermeetiliselt korrosioonikindlatesse konteineritesse - roostevabateras või vask on eelistatavad materjalid.

Senini on kasutusel *maapealsed või maapinna-lähedased vahehoiud.*

Põhjendusi tuuakse mitmeid:

- 1)** kasutatud kütuse kogused on suhteliselt väikesed, õigustamaks suuri kulutusi lõpphoidlale;
- 2)** pikem vahehoiustamine ja seega pikem aeg radioaktiivseks lagunemiseks soodustab hiljem lihtsamat ja ohutumalt käitlemist;
- 3)** soovimatus loobuda tuumkütuse taaskasutatavast osast, pidades silmas tulevast ümbertöötlemist, otsest kasutamist CANDU-tüüpi reaktoris või tuleviku kiire reaktori kütusena.

Allpool on esitatud *1000 MWe võimsusega kergeveereaktori keskmised näitajad aastas.* Eeldatakse 4 % ^{235}U suhtes rikastatud kütust, mille kogus reaktoris on 72 t uraani, aastas vahetatakse üks kolmandik kütusest, reaktor töötab täisvõimsusega 80 % aastast.

Kaevandamine

20000 tonni 1% uraanisisaldusega maaki

Eraldamine uraani	230 tonni uraanoksiidi kontsentraati, milles on 195 t uraani
Konversioon	288 tonni uraanheksafluoriidi UF ₆ , so 195 t uraani
Rikastamine uraani	35 tonni UF ₆ (24 t rikastatud uraani) ja 170 t vaesestatud uraani
Kütuse valmistamine	27 tonni uraandioksiidi UO ₂ (24 t rikastatud uraani)
Tuumareaktor	7 miljardit kWh elektrienergiat
Kasutatud kütus	27 tonni, millest 0,8 % ²³⁵ U rikastusastmega uraani on 23 t, lõhustusprodukte 720 kg ja plutooniumi koos väikeaktiniididega 240 kg

21. sajandi alguses võib täheldada selgeid märke *tuumaenergeetika taassünnist*, mida tõukavad tagant elanikkonna arvukuse kasv, vajadus energia järele, fossiilkütuste varude kahanemine, nende kasvavad hinnad ja tarnijamaade poliitiline ebastabiilsus, mure globaalse soojenemise pärast.

Eeldused taassünniks on kaalukad ja põhjendatud, sest tuumaenergia on CO₂-vaba keskkonda mittesaastav ohutu kontsentreeritud baasenergiaallikas ja juba praegu üks peamisi energiaressursse (annab näiteks 31% Euroopa Liidu elektrist).

Tuumakütust on ka looduses küllaldaselt ja puudub konkurents selle kasutamiseks muul otstarbel. Tähtsusetud pole ka asjaolud, et kütusevarud asuvad poliitiliselt stabiilsetes riikides ning et tuumaelektri hind on teiste energialiikide suhtes konkurentsivõimeline.

Juba on algatatud ambitsioonikad tuumaelektrijaamade arendamise programmid USA-s, Prantsusmaal, Hiinas, Indias, Jaapanis, Venemaal jm. See leiab kinnitust ehitatavate ja kavandatavate reaktorite suures arvus – Maailma Tuumaassotsiatsiooni WNA 2007.a. andmetel 222 reaktorit.

V Radioaktiivsed jäätmed

Radioaktiivsed jäätmed

Enne tuumaenergia kasutusele võttu ei räägitud palju *radioaktiivsetest jäätmetest*, sest nende hulk oli väga väike. On tehtud arvestusi, et enne 1938. aastat teaduses ja meditsiinis kasutatud allikate radioaktiivsus kokku on väiksem kui 30 TBq. See aktiivsus on samas suurusjärgus ühe kilogrammi loodusliku raadiumiga. Tänapäeval kasutatavates tuumareaktorites sisaldub näiteks üle 10^8 Bq aktiivsusega kildtuumi ja maailmas on kasutusel üle 400 tuumareaktori. Lisaks tuumakütusetsükli erinevatele etappidele – kaevandamisest ja uraani töötlemisest vanade tuumarajatiste dekomisjoneerimiseni – tekib radioaktiivseid jäätmeid ka radioaktiivsete materjalide kasutamisel meditsiinis, tööstuses ja teaduses.

Radioaktiivsete jäätmete *käitlemise ja lõppladustamise* eesmärgiks on kaitsta inimesi ja keskkonda. Samas on see kahtlemata tuumaenergeetika enim vastakaid arvamusi tekitav valdkond, vaatamata asjaolule, et kütusetsükli kõigi etappide jaoks on olemas usaldatavad ja kontrollitud tehnoloogiad. Samuti ei ole probleeme finantsilise poolega, sest käitlemisega seotud kulutuste maksumus sisaldub tuumaelektri hinnas. Radioaktiivsed jäätmed võivad olla tõesti ohtlikud, kuid senine praktika on tõestanud ohutu käitlemise võimalikkust täielikult. Suur osa riikidest tunnustab ja jälgib rahvusvahelisi radioaktiivsete jäätmete käitlemise põhimõtteid, konventsioone. Rahvusvaheliste alusdokumentide baasil on välja töötatud siseriiklik seadusandlus, tagamaks inimese, keskkonna, järeltulevate põlvkondade kaitset.

Rahvusvaheliselt tunnustatud määratluse järgi loetakse radioaktiivseteks jäätmeteks **igasugused ained, mis sisaldavad või on saastunud kehtestatud vabastamistasemeid ületava radioaktiivsusega ja mida ei kavatseta enam kasutada.**

Kõige erinevama isotoopkoostise, poolestusaja ja aktiivsusetasemega radioaktiivseid jäätmeid tekib tuumakütusetsükli kõikidel etappidel, eriti aga tuumakütuse kasutamisel reaktoris ja kütuse ümbertöötlemisel.

Kõik tekkivad jäätmed isoleeritakse keskkonnast, käideldakse ja ladustatakse vastavalt nende omadustele ja potentsiaalsele ohtlikkusele. Tuumaeenergeetikat omavates riikides moodustab radioaktiivsete jäätmete kogus alla 1% kõikide toksiliste jäätmete kogusest, nt, OECD riikides on need arvud vastavalt 80000 ja 300 miljonit m^3 aastas.

Tehisliku päritoluga radionukliidid satuvad keskkonda tuumaenergeetikatööstusest, militaarrajatistest, uurimisasutustest ning ka haiglatest ja tööstusest.

Vähegi olulisemate heitmete üle tuleks rakendada seadusega ette nähtud kontrolli, see tähendab, et nende vabastamine peaks toimuma vaid loa alusel ja järelevalve all.

Eesti seadusandluses on radioaktiivsete jäätmete liigid defineeritud järgnevalt:

Liik	Radioaktiivsete jäätmete kirjeldus	Ladustamispaiga liik
1. Vabastatud jäätmed	Kiirgustegevuse käigus tekkivad jäätmed, mille aktiivsus, eriaktiivsus või pinderiaktiivsus on väiksem kui «Kiirgusseaduse» § 17 lõike 7 alusel kehtestatud vabastamistasemed	Ei piirata pärast vabastamist. Käideldakse vastavalt «Jäätmeseadusele» (RT I 2004, 9, 52; 30, 208)
2. NORM (Naturally Occuring Radioactive Material – looduslikke radionukliide sisaldavad ained)- jäätmed	Looduslikke radionukliide (Th-232 ja U-238 ning nende lagunemiseritta kuuluvad radionukliidid) sisaldava toorme töötlemise tulemusena tekkivad radioaktiivsed jäätmed, mille eriaktiivsus on suurem kui «Kiirgusseaduse» § 17 lõike 7 alusel kehtestatud vabastamistasemed	NORM-jäätmete ladustuspaik
3. Lühiealised radioaktiivsed jäätmed	Radioaktiivsed jäätmed, mis sisaldavad alla 100-päevase poolestusajaga radionukliide ja mis lagunevad allapoole «Kiirgusseaduse» § 17 lõike 7 alusel kehtestatud vabastamistasemeid kuni 5 aasta jooksul	Radioaktiivsete jäätmete hoiuruum või vaheladustuspaik
4. Madal- ja keskaktiivsed lühiealised radioaktiivsed jäätmed	Radioaktiivsed jäätmed, mis sisaldavad alla kolmekümneaastase poolestusajaga beeta- ja gammakiirgajaid ning piiratud koguses pikaealisi alfakiirgajaid (mitte rohkem kui 4000 Bq/g ühes jäätmepakendis ja mitte rohkem kui keskmiselt 400 Bq/g kogu jäätmete hulga kohta)	Vahe- või lõppladustuspaik
5. Madal- ja keskaktiivsed pikaealised radioaktiivsed jäätmed	Radioaktiivsed jäätmed, mis sisaldavad pikema kui 30-aastase poolestusajaga radionukliide ja mille eriaktiivsus on suurem kui madal- ja keskaktiivsetel lühiealistel radioaktiivsetel jäätmetel ning mille radioaktiivsel lagunemisel tekkinud soojuse hulk on väiksem kui 2 kW/m ³	Vahe- või lõppladustuspaik
6. Kõrgaktiivsed radioaktiivsed jäätmed	Radioaktiivsed jäätmed, milles radioaktiivse lagunemise käigus tekkinud soojuse hulk on suurem kui 2 kW/m ³	Lõppladustuspaik

Radioaktiivsete jäätmete käitlemisel kasutatakse nii tavajäätmete käitlemise praktikast tuntud (kaks esimest) kui ka neile ainuomaseid protseduure:

kontsentreerimine ja isoleerimine
lahjendamine ja hajutamine
viivitamine ja radioaktiivne lagunemine.

Jäätmekäitluse eesmärgiks on töödelda jäätmeid selliselt, et nad sobiksid hoidmiseks ja ladustamiseks ning hoida või ladustada neid nii, et ei tekiks lubamatuid riske praegustele ja tulevastele põlvkondadele.

Paljudes riikides paigutatakse lühiealised jäätmed maapinna lähedastesse ladustuspaikadesse, mis tegelikult on mõne meetri sügavused muld- või betoonkanalid. Hoidlasse paigutatud jäätmed kaetakse mõne meetri paksuse mullakihi ja sageli vee eemale hoidmiseks saviga. Sarnast meetodit kasutatakse mõnes riigis suurte koguste NORM jäätmete puhul, nagu kaevandamisel ja uraani peenestamisel tekkiva aheraine ladustamisel.

Näiteks Rootsi kasutab Läänemere põhja all Forsmarkis asuvat hoidlat peamiselt lühiealiste madala ja keskmise aktiivsusega radioaktiivsete jäätmete jaoks.

Madala ja keskmise aktiivsusega jäätmed ei teki kohe ladustamiseks sobivas vormis, neid on vaja segada inertsete materjalidega nagu betoon, bituumen või kumm. Minevikus uputasid mõned riigid sellised jäätmed ookeani, kuid see praktika keelati Londoni konventsiooniga. Alates keelustamisest hoitakse radioaktiivseid jäätmed kuni ladustamismeetodi valimiseni. Kõige sobivamaks peetakse soodsates geoloogilistes tingimustes asuvaid sügavaid maa-alused hoidlaid.

Kui kasutatud tuumakütust kavatakse kohe ladustada ning mitte ümber töödelda, *hoiustatakse kasutatud tuumakütus lühiajaliselt kas tuumaelektrijaama territooriumil või spetsiaalsetes rajatistes*. See võimaldab kütusel jahtuda, kuid loomulikult tuleb hoida kasutatud tuumakütust seal seni kuni lõpladustuspaik on olemas.

Ümbertöötlemisprotsessides tekkivaid kõrgaktiivseid vedeljäätmeid hoitakse tavaliselt spetsiaalsetes jahutatud mahutites, kuid kasutatakse ka seadmeid vedeljäätmete tahkestamiseks klaasjate materjalide abil (vitreerimine). Klaasplokkidel lastakse jahtuda mitukümmend aastat, enne kui nad lõplikult ladustatakse, eeldatavalt sügaval maa all.

Radioaktiivsete jäätmete käitlemisest seadusandluses

Kiirgusseaduses on ära toodud radioaktiivsete jäätmete käitlemise põhimõtted:

- (1) Kiirgustegevusloa omaja tagab kiirgustegevuse käigus tekkivate radioaktiivsete jäätmete ja heitmete ohutu käitlemise ning kindlustab, et:
 1. radioaktiivseid jäätmeid käideldakse viisil, mille prognoositav kahjulik mõju tulevastele põlvvedele ei oleks suurem kui käesoleva seadusega või selle alusel antud õigusaktidega lubatud;
 2. tekkivate radioaktiivsete jäätmete ja heitmete aktiivsus ja kogused oleksid võimalikult väikesed;
 3. oleks arvesse võetud bioloogilisi, keemilisi ja muid ohte ning radioaktiivsete jäätmete tekkimise erinevate etappide ja nende käitlemise vastastikust mõju;
 4. radioaktiivsete jäätmete üleandmine radioaktiivsete jäätmete käitluskohta ei toimuks hiljem kui viie aasta jooksul pärast nende tekkimist.
- (2) Radioaktiivsete jäätmete käitlemiseks antud kiirgustegevusloa omaja tagab, et radioaktiivsete jäätmete käitluskoha ohutus oleks tagatud kogu selle kasutamise jooksul.
- (3) Radioaktiivsete jäätmete tekitaja katab kõik radioaktiivsete jäätmete käitlemisega seotud kulutused.

Rahvusvahelise Aatomienergiaagentuuri poolt sätestatud radioaktiivsete jäätmete käitlemise printsiibid:

- Inimese tervise kaitse. Radioaktiivseid jäätmeid käideldakse viisil, mis tagab inimese tervise kaitse vastuvõetaval tasemel.
- Keskkonna kaitse. Radioaktiivseid jäätmeid käideldakse viisil, mis kannab hoolt keskkonna kaitse eest vastuvõetaval tasemel.
- Piiriülene kaitse. Radioaktiivseid jäätmeid käideldakse viisil, mis tagab võimalike piiriüleste mõjude arvessevõtmise ka naaberriikide inimeste tervisele ja keskkonnale.
- Tulevaste põlvkondade kaitse. Radioaktiivseid jäätmeid käideldakse viisil, et ennustatavad mõjud tulevaste põlvkondade tervisele ei oleks suuremad kui tänapäevased vastuvõetavad tasemed.
- Koormus tulevastele põlvkondadele. Radioaktiivseid jäätmeid käideldakse viisil, mis ei põhjusta üleliigset koormust tulevastele põlvkondadele.
- Riigi seadusandlus. Radioaktiivseid jäätmeid käideldakse vastavalt seadusandlusega sätestatule. Seadusandlus peab muuhulgas tagama ka selge vastutusalade jaotuse ja sõltumatute regulatiivsete ametikohustuste nõuded.
- Kontroll radioaktiivsete jäätmete tekitamise üle. Radioaktiivsete jäätmete tekitamist hoitakse nii väiksena kui see on teostatav.
- Radioaktiivsete jäätmete tekitamise ja käitlemise vastastikkune sõltuvus. Arvestada tuleb kõiki vastastikkuseid sõltuvusi radioaktiivsete jäätmete tekitamise ja käitlemise kõikide etappide vahel.
- Rajatiste ohutus. Radioaktiivsete jäätmete käitlemisrajatiste ohutus tagatakse

kogu nende kasutusaja kestel.

Mõned radioaktiivsete jäätmete käitlemise põhimõtted Eesti seadusandlusest:

- 1)** eri liikidesse kuuluvad ja erinevate füüsikalise-keemiliste omadustega radioaktiivsed jäätmed tuleb koguda ja ladustada eraldi;
- 2)** töötlemata radioaktiivsed jäätmed tuleb koguda ja ladustada konditsioneeritud jäätmetest eraldi;
- 3)** radioaktiivsed jäätmed tuleb koguda ja ladustada sööbivatest, plahvatusohtlikest ja kergestisüttivatest ainetest eraldi;
- 4)** bioloogilised radioaktiivsed jäätmed tuleb koguda ja ladustada külmutatult, paigutatuna sobivasse lahusesse või töödelduna mõnel muul sobival viisil;
- 5)** kasutatud kinnised kiirgusallikad tuleb koguda ja ladustada kas nende enda või muus sobivas kiirgusvarjestuskestas;
- 6)** teravad radioaktiivsed jäätmed tuleb koguda ja ladustada eraldi, soovitatavalt metallkonteineris, mis on märgistatud sildiga «teravad radioaktiivsed esemed»;
- 7)** konditsioneerimata märjad tahked radioaktiivsed jäätmed tuleb koguda ja ladustada vähemalt kahekordses hoiukonteineris, et oleks välistatud radioaktiivselt saastunud vedeliku leke;
- 8)** konditsioneerimata vedelad radioaktiivsed jäätmed tuleb koguda ja ladustada konteineris, mis on ümbritsetud absorbeeriva materjaliga koguses, mis tagab konteineris olevast vedelikust kaks korda suurema vedelikuhulga sidumise. Konteineri võib asetada ka teise konteineri sisse või kindlustada mõnel muul sobival viisil.

Keskkonda vabastamine

Keskkonda vabastamise korral on kasutusel meetodid selleks, et jäätmed oleks ikkagi keskkonnast kasvõi ajutiselt isoleeritud.

Vaheladestus on kasulik kui tegemist on lühikese poolestusajaga radionukliididega (kuni paar kuud). Paari-aastase ladestusperioodi vähendab jäätmete aktiivsus nii palju, et jäätmeid on võimalik vabastada keskkonda.

Pika poolestusaja ning suure aktiivsusega radioaktiivsete jäätmete korral on kasutusel **sügavladestus**.

Radionukliide vabastamise korral peavad operaatorid rakendama *seireprogramme*, samuti nagu teevad ka mõned pädevad asutused. Heitmed kütusetöötlusseadmetest tekitavad kõige suuremat kiiritust inimestele, kes söövad kohalikke mereande. Nende aastadoosiks kujuneb kuni 0,14 mSv, põhjustajaks peamiselt aktiniidid. Strontsium-90 ja teiste radionukliidide vabastamine õhku põhjustab isikudoose – kohaliku piima ja köögivilja kasutamisest – alla 0,05 mSv aastas. Gaasiliste heitmete poolt põhjustatud kollektiivdoos, mis tuleneb peamiselt süsinik-14 sisaldusest toiduainetes, on umbes 500 inimsiivertit aastas.

Vedelad, tahked ja gaasilised radioaktiivsed jäätmed

Vedelad radioaktiivsed jäätmed

Madala aktiivsusega vedelad radioaktiivsed jäätmed lastakse tihtipeale jõgedesse, järvedesse, rannikumerre või siis kanalisatsiooni. Euroopas eelistatakse jõgesid mitte kasutada, sest paljude jõgede vesi on kasutusel joogiveena või siis põllumajanduses. Suhteliselt suuri vedelate radioaktiivsete heitmete koguseid võib aga vabastada merre.

Vabastamise piirmäärad sõltuvad eelkõige toiduahelast. Rannikupiirkondades võib aastas vabastada veekogusse sadu TBq radioaktiivseid heitmeid, ilma et see põhjustaks kriitilisele grupile märkimisväärseid doose. Samas tuleb vabastamise protsessis alati jälgida, et doosid kriitilisele grupile oleksid *nii väikesed kui on võimalik saavutada*.

Vaheladustuse periood on kasulik lühikese poolestusajaga radionukliide sisaldavate radioaktiivsete jäätmete korral. Näiteks võib kasutada spetsiaalseid konteinereid, milles saab jäätmeid hoida kuni nende aktiivsus on väiksem lubatud normidest. Enne keskkonda vabastamist tuleb läbi viia konteineris olevate jäätmete täiendavad analüüsid, et veenduda nende vabastamise võimalikkuses.

Kõrgaktiivsusega jäätmete korral kasutatakse keemilisi töötlusviise või ionisatsiooni, mille tulemusena on võimalik kontsentreerida aktiivsus väiksema mahuga 'mudasse'. Viimast on omakorda võimalik tahkestada ning käidelda siis edasi tahke jäätmena ja *näiteks sügavladustada*.

Gaasilised radioaktiivsed jäätmed

Radioaktiivsete jäätmete *atmosfääri paiskamine* on palju otsesemaks ohuks kui teised saate vabastamise viisid. Seetõttu on atmosfääri lubatud jäätmete paiskamise piirmäärad väga madalad (välja arvatud vääriskaasid).

Üldine põhimõte on *vähendada atmosfääri paisatavat radioaktiivsust nii palju kui võimalik* ning selleks on kasutusel näiteks:

filtrereimine ehk siis tahkete osakeste eraldamist, adsorbeerimine gaasi aktiivsuse vähendamiseks õhku paiskamine korstnast.

Filtreerimine on kõige tavalisem ja levinum meetod. Üldiselt on meetodi kasutegur suur, kuid sõltub eelkõige osakeste mõõtmetest. Filtreerimise puhul ei tohi unustada, et protsessi tulemusena võivad filtrid ise muutuda radioaktiivseks ja neid tuleb siis käidelda radioaktiivse jäätmena.

Adsorbeerimise kasutamine on üldiselt väga kulukas ning seetõttu kasutusel peamiselt ainult tuumajaamades. Õhku paiskamise korral tuleb olla ettevaatlik ning arvestada ilmastikutingimustega.

Suuremate koguste puhul on soovitatav kasutada *korstent*, mis tähendab üldiselt

lisakulutusi. Kui korsten on 2-3 korda kõrgem ümbritsevatest ehitistest, siis tagab see saaste parema jaotuse. Isegi kõrgete korstende korral põhjustavad difusioon ja laiali hajumine seda, et teatud kaugusel allatuult on aktiivsuse kasv maapinnal. Maksimalne kontsentratsioon on umbes 10-20 korstnakõrguse kaugusel allatuult, sõltudes tuulest ja ilmast.

Tahked radioaktiivsed jäätmed

Tahke radioaktiivne jääde tekib erineval kujul nii tuumarajatistes ning radioaktiivsuse meditsiiniliste ning tööstuslike kasutuste puhul. Üldiselt jaotatakse jäätmed *kolme klassi*:

madal,
keskmine ja
kõrgaktiivsed.

Madala aktiivsusega jäätmed

koosnevad enamasti radioaktiivselt saastatud ruumide üldisest prahist, samuti ka kergelt saastunud või aktiveeritud esemetest/aparaatidest tuumaelektrijaamas.

Keskmise aktiivsusega jäätmete

hulka kuuluvad tahked protsesside jäägid ja märkimisväärselt aktiveeritud esemed. Definitsioonide piirmäärad (eriaktiivsused) varieeruvad riikide kaupa.

Kõrgaktiivsed radioaktiivsed jäätmed

on peamiselt tuumaelektrijaama kasutatud kütus. Eriaktiivsus on nii kõrge, et saastest eraldub märkimisväärsel hulgal soojust. Seega tuleb jäätmete käsitlusel kasutada jahutust.

Üldiselt võib tahkeid jäätmeid jagada *kokkusurutavateks ning mitte kokkusurutavateks* või siis *orgaanikarikasteks ning -vaesteks*.

Näiteks on laboratooriumi prahi hulka kuuluvad kummikindad nii kokkusurutavad kui ka orgaanikarikkad. Samas aga ehitustöödel suurte tuumajaamade ümbruses tekkiv kiviprügi on nii kokkusurumatu kui ka orgaanikavaene.

Jäätmete sulgemiseks on peamiselt kasutusel betoonmaterjalid. Kokkupakitavate materjalide korral surutakse nad kokku (võimalik on mahu vähendamine 5:1) ning siis paigutatakse spetsiaalsetesse konteineritesse. Pikaajaliseks hoiustamiseks on kasutusel maa-alused hoidlad.

Tuumkütusetsükli radioaktiivsed jäätmed

Uraani kaevandamise ja eraldamise käigus tekkivaid jäätmed ei loeta reeglina radioaktiivseteks jäätmeteks, sest nad sisaldavad vähem radioaktiivsust kui uraanimaak ise. Jääkide ladustamisel jälgitakse sellegipoolest mitmeid meetmeid, mis tõkestavad radooni ja muude looduslike radioaktiivsete ainete leviku keskkonda. Vähe radioaktiivsed on tavaliselt ka ***konversioonil, rikastamisel ja tuumkütuse valmistamisel*** tekkivad jäätmed.

Madalaktiivsed jäätmed, LLW

Koguseliselt kõige enam tekkib üldtunnustatud radioaktiivsete jäätmete klassifikatsiooni järgi **madalaktiivseid jäätmeid LLW** (i.k. *Low-Level Waste*), mis moodustavad 90% radioaktiivsete jäätmete ruumalast, kuid sisaldavad ainult 1% radioaktiivsusest.

Pakitud madala aktiivsusega jäätmed



Need on peamiselt mitmesugused õrnalt saastunud tööriided, kindad, puhastusvahendid, tööriistad jm, mille käitlemine eraldi kiirgusvarjestust ei vaja. Pärast toksiliste komponentide eraldamist vähendatakse nende jäätmete mahtu kokkupressimise, tuhastamise vm meetodil ning siis ladustatakse nad erihoidlasse.

Ülimadala aktiivsusega jäätmete ladustamine Prantsusmaal.



Ülimadala ja madala aktiivsusega jäätmed pakitakse ning paigutatakse 6m sügavustesse kraavidesse.



Pärast jäätmete paigutamist ajutine katus eemaldatakse ning jäätmed kaetakse spetsiaalse ilmastikukindla kattega, mille viimaseks kihiks tuleb muru.



Keskaktiivsed jäätmed, ILW

Keskaktiivsed jäätmed ILW (i.k. *Intermediate-Level Waste*) moodustavad mahult umbes 7% ja nende aktiivsus 4% kõikidest radioaktiivsetest jäätmetest. Peamiselt kuuluvad sellesse gruppi mitmesugused vaigud, keemilised setted, reaktori vahetatavad komponendid ja materjalid, mille käitlemine nõuab mingisuguse kiirguskaitse kasutamist nende suurema radioaktiivsuse tõttu.

Enamik selle kategooria jäätmetest sorteeritakse radioisotoopide poolestusaja järgi ja jäätmed ladustatakse paigutatuna betooni. Lühiealised ILW-jäätmepakendid ladustatakse maapinna-lähedasse hoidlasse, pikaealised – analoogiliselt kõrgaktiivsete jäätmetega - sügavale maa alla ehitatud lõppladustuspaika. Tänapäevased võimalused ehitusel tagavad ohutuse ja konstruktsioonide vastupidavuse, mille tulemusena välditakse ohtlike ainete lekkimine keskkonda mõne sajandi jooksul.

Kõrgaktiivsed jäätmed, HLW

Kõrgaktiivsed jäätmed HLW (i.k. *High-Level Waste*), milleks on avatud kütusetsükli kogu kasutatud tuumkütus või suletud tsükli selle peamised ümbertöötlemisjäätmed, sisaldavad 95% kõikide jäätmete radioaktiivsusest, seejuures moodustab nende ruumala ainult 3%. See jäätmeliik nõuab tugeva ioniseeriva kiirguse ja soojuse tekitajana erikäitlemist ja erivahendeid.

Tasub rõhutada, et mitmetes **suletud tuumkütusetsükli** poliitika valinud maades, nagu Prantsusmaa, Ühendkuningriik, Saksamaa, Šveits, Jaapan jt, ei peeta kasutatud tuumkütust radioaktiivseks jäätmeks, vaid ressursiks energiatootmises. Nendes maades töödeldakse kasutatud kütus ümber uueks tuumkütuseks. Kõrgaktiivsed radioaktiivsed jäätmed moodustavad sellisel juhul ainult 3,5% kogu kasutatud tuumkütuse massist: tuumalõhestusproduktid ja pika poolestusajaga väikeaktiividid. Need materjalid, millele tulevikus mingit kasutusvõimalust ei suudeta hetkel ette näha, kuivatatakse, klaasistatakse boorsilikaatklaasis ja paigutatakse konteineritesse.

Kanadas, Rootsis, Soomes ja USA-s on aktsepteeritud **avatud kütusetsükkel**, mis tähendab, et jäätmeteks loetakse kogu kasutatud tuumkütus, mis valmistatakse ette

lõppladustamiseks. Viimastel aastatel võib siiski täheldada tendentsi, et lahenduste otsimisel arvestatakse võimalusega neid jäätmeid tulevikus ressursina kasutada.

Kõrgradioaktiivsete jäätmete ladustamiseks disainitud konteinerid.





Jäätmesilindreid lükkava roboti prototüüp



Olenevalt kasutatavast kütusesüklist on erinev HLW-*jäätmete kogus*, mida lisaks 200-300 m³ madal- ja keskaktiivsetele jäätmetele üks keskmine 1000 MWe võimsusega kergetuumareaktor aastas toodab.

Kui ümbertöötlemist ei korraldata, siis läheb aastas kõrgaktiivsete jäätmetena lõppladustamiseks kogu 20 m³ (27 t) kasutatud kütust. Kütuse ümbertöötlemisel tekib aga ainult 3 m³ klaasistatud kõrgaktiivseid jäätmeid. Need kogused tunduvad eriti väikestena võrdluses sama võimsusega sütt põletava elektriijaama tuhajäätmete hulgaga – 400000 tonni aastas.

Kasutatud tuumkütuse ja radioaktiivsete jäätmete käitlemisse, sh lõppladustamisse, suhtutakse tõsiselt ning selle eest kantakse hoolt. Käitlemise maksumus sisaldub

enamikus maades elektri hinnas, nt USA-s 0,1 US-senti/kWh ja Prantsusmaal 0,14 euro senti/kWh.

Tavaliselt hoitakse ülimalt radioaktiivset kasutatud kütust eribasseinis paksu veekihi all või massiivsete betoonseintega kuivhoidlas ja lastakse tal umbes 5 aastat radioaktiivselt laguneda enne kui kütus ümbertöötlemisele saadetakse.

Kogu maailma kasutatud tuumkütusest paiknebki ca 90% (270000 t) tänapäeval turvaliselt reaktori-lähedastes või riikide tsentraalsetes vaheladustuspaikades. Kuna kogu maailmas lisandub aastas keskmiselt 12000 tonni, millest 3000 tonni töödeldakse ümber, siis otsest pakilist vajadust lõppladustamise järele veel ei ole. Siiski maa-aluseid lõppladustuspaikasid ehitatakse juba Soomes, Rootsis, USA-s ning planeeritakse paljudes teisteski riikides.

Kasutatud tuumkütus

Kasutatud tuumkütus koosneb kolmest põhikomponendist: **uraan**, **lõhustusproduktid ja aktiniidid**.

Üle 95% kasutatud tuumkütusest moodustab **väheradioaktiivne uraan**, mille käitlemine on praktiliselt ohutu. Kuna ^{235}U sisaldus kasutatud tuumkütuses on kõrgem kui looduslikus uraanis, on seda otstarbekas kasutada **uue rikastatud tuumkütuse tootmiseks**. Kui otsustatakse seda mitte teha, näiteks põhjusel, et see pole majanduslikult kasulik, siis radioaktiivsete jäätmete matmine (nt, kaevandustesse) ei põhjusta mingeid erilisi keskkonnanariske.

Järgmise koostisosa (~4%) moodustavad **lõhustusproduktid**, mille massist enamus on stabiilsed isotoobid, kuid umbes kümnendiku moodustavad radioaktiivsed tugevat beetakiirguse kiirgavad isotoobid. Selle algperioodil olulisel määral soojust tekitava kütuseosa ohutut käitlemist peetakse nii teaduslikust kui tehnilisest aspektist lahendatuks. Enamiku lõhustusproduktide poolestusaeg on suhteliselt lühike – ohutuks muutmiseks piisab ladustamisest paariks-kolmeks sajandiks. Selle aja vältel väheneb radioaktiivsus tuhandeid kordi ja saavutab alge uraanimaagi taseme. Konteineritesse ja teatud sideainetesse paigutatud (konditsioneeritud) lõhustusprodukte võib ladustada LLW/ILW-jäätmetena maapinnalähedastes suhteliselt lihtsa ehitusega ladustuspaikades.

Kasutatud kütuse suurimaks ohuallikaks osutub hoopis massilt kõige väiksem komponent – umbes 1%, see on 10 kg iga kasutatud kütuse tonni kohta. Selle moodustavad pika poolestusajaga intensiivset alfakiirgust kiirgavad **plutoonium ja nn väikeaktiniidid**: ameriitsium, neptuunium, kuurium jt. Kiirgusohutuse tagamiseks tuleb neil lasta radioaktiivselt laguneda biosfäärist isoleerituna sadade tuhandete aastate jooksul. See väike kogus annab ka suurima osa kasutatud tuumkütuse radioaktiivsel lagunemisel tekitatud soojusest enam kui 1500 aasta jooksul.

Lõppladustamisel muutub just eralduv soojus lõpphoidla mahtu määravaks teguriks. Asjaolu, kui kõrgeid temperatuure võib maapõue kivimites lubada, määrab ka selle kui tihedalt kasutatud kütust võib ladustada. Viimasest tuleneb aga lõpphoidla ruumala - ja mida suurem ruumala, seda kallimaks muutub hind.

Reaktoris töötanud tuumkütus vahetatakse teatavasti perioodiliselt uue vastu välja ja pannakse hoidebasseini aastakümneteks "jahtuma", et see hiljem lõppladustada. **Avatud tuumkütusetsükli** puhul erinevaid komponente ei eraldata ja ei taaskasutata, tähendab kogu kasutatud tuumkütuse ladustamine suuri maa-aluste nn geoloogiliste lõpphoidlate mahte. Nobeli laureaat Burton Richter hindab (2007), et praeguse tuumaelektri osakaalu juures ja avatud kütusetsükli jätkudes peaks ainult USA ehitama käesoleva sajandi lõpuni veel üheksa sama suurt lõpphoidlat nagu Yucca Mountain. Samas pole viimastki veel suudetud kasutusele võtta!

Kogu maailmas laienevat tuumaenergeetikat arvestades, on enamik eksperte praeguseks üksmeelil, et mitmeks sajandiks avatud tuumkütuse tsüklil kindlasti jätkusuutlik ei ole. Riskid peituvad lõppladustamata järjest lisanduva tugevalt

radioaktiivse kasutatud kütuse pikaajalises ohutus hoidmises.

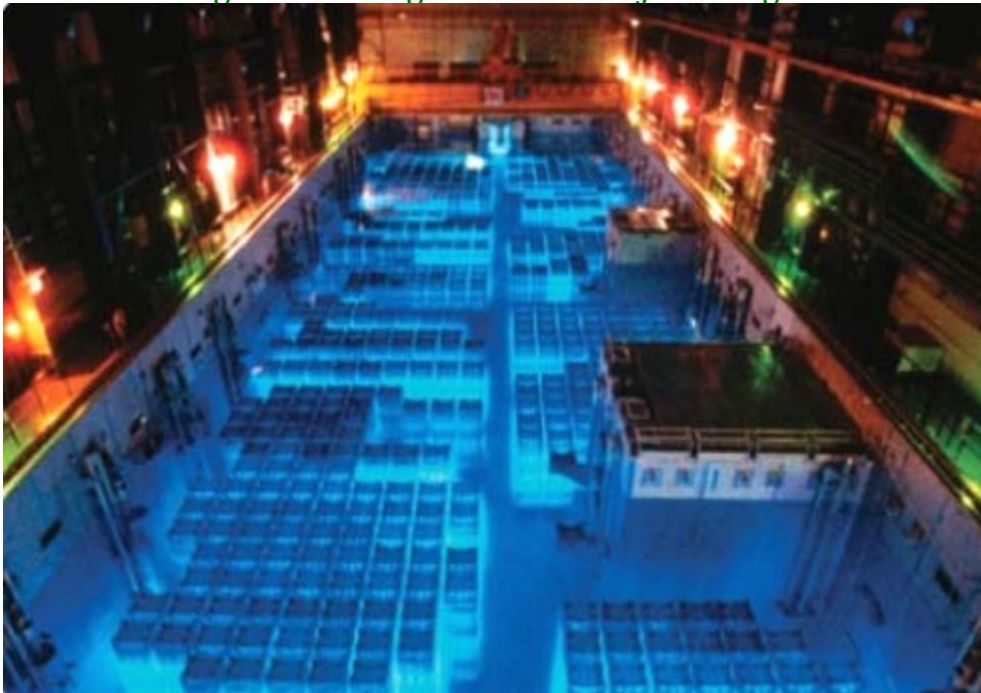
Lahendus on põhimõtteliselt lihtne ja küllalt hästi teada - **suletud nn sümbiootilise tuumkütusetsükli** rakendamine. Sel juhul töödeldakse aeglase neutronite reaktorite kasutatud tuumkütus ümber, eraldatakse tema põhikomponendid, millest igäht käideldakse erinevalt.

Uraani, plutooniumi ja väikeaktiivide kasutatakse uue tuumkütuse valmistamiseks kiirete neutronite reaktori jaoks. Viimastes väikeaktiivideid "põletatakse" muudeks lühema eluajaks radioaktiivseteks isotoopideks. Kiiretes reaktorites uraanist briteerprotsessiga toodetud plutoonium, kasutatud kütuse väikeaktiivideid ning järelejäänud uraan töödeldakse omakorda ümber uueks tuumkütuseks. Tulemusena klaasistatakse ainult lõhustusproduktid ja paigutatakse maapinna lähedasse hoidlasse mõneks sajandiks ohutuks lagunema. Maa-alust lõppladustamist vajavate jäätmete kogus väheneb sel juhul kümneid kordi ja samast tuumkütusest saadakse lisaks 50 kuni 60 korda rohkem kasulikku energiat.

Kasutatud tuumakütus basseinis. (La Hague'i ümbertöötlemistehases Prantsusmaal)

Vesi võimaldab kütusel jahtuda ning täidab ühtlasi varjestuse rolli.

Tekkiv sinine valgus kannab Tserenkovi kiirguse nime ning näitab ilmekalt, et tegemist on kõrgradioaktiivsete jäätmetega.



Möödunud sajandi lõpukümnendite madalad fossiilkütuste ja uraani hinnad ning teatav pidurdumine tuumaenergeetika arengus ei soodustanud kütuse uute ümbertöötlemisrajatiste ehitamist ja kiirete tuumareaktorite kasutuselevõtmist. Sellest hoolimata on valdav osa teaduslike ja tehnoloogilisi lahendusi suletud kütusetsükli tarvis juba olemas. Praegu toimub paljudes maades, sh rahvusvahelises koostöös, väga aktiivne tegevus lahendamaks veel lahendamata probleeme, sh kiirete reaktorite arendamist. Teada on, et Prantsusmaa, USA jt kavandavad sümbiootilise tuumkütusetsükli rakendamist oma maa tuumaenergeetikas. Prantsusmaal jpt on kütuse ümbertöötlemise rajatised ja U/Pu-segukütuse MOX kasutamise pikaajalised kogemused.

Kasutatud tuumakütuse ümbertöötlemise tehas La Hague'is Prantsusmaal.



Dekomisjoneerimine

Dekomisjoneerimise protsess saab alguse tuumarajatise (või rajatise osa) tööea lõpust ning selle tulemusena saavutatakse pikaajaline ohutu lahendus. Dekomisjoneerimine võib hõlmata aparatuuri või hoonete puhastamist radioaktiivsest saastest, rajatiste või struktuuride demonteerimist ja järelejäänud radioaktiivsete materjalide teisaldamist või viimist radioaktiivsete jäätmete käitluskohta.

Paljudel juhtudel on lõppeesmärgiks puhastada tegevuskoht kõikidest olulistest radioaktiivsetest jäätmetest ja saastest, kuid see pole alati võimalik või vajalik. Praeguseks on vaid üksikud kommertstuumarajatised lõplikult dekomisjoneeritud. Siiski on suure hulga erinevate seadmete, sealhulgas mõne tuumaelektrijaama, mitmete prototüüpide ja uurimisreaktorite ning arvukate laboratooriumide ja töökodade dekomisjoneerimisest saadud palju kogemusi.

Asjaolu, et paljudel maailma tuumareaktoritel on lähenemas kasutusaja lõpp, on koondanud tähelepanu dekomisjoneerimisega seotud küsimustele. Dekomisjoneerimine vajab ranget kontrolli tegevuste üle, et optimeerida töötajate ja elanikkonna kaitsmine. Rajatiste kõige radioaktiivsemate osade, eriti reaktori südamekäsitlemiseks on välja töötatud kaugkasutustehnoloogiad.

Suurte rajatiste demonteerimine tekitab suurtes kogustes „jätmeid”. Nende hulgas on ka madala ja keskmise aktiivsega radioaktiivsed jätmed. Üle jääb ka suurel hulgal ehitusmaterjale nagu teras ja betoon, mis pole märkimisväärselt radioaktiivsed. Vahel on vaja erimenetlust, et määratleda neid vabastatud jätmetena, mis tähendab, et neid ei pea käitlema nagu radioaktiivseid jätmeid.

VI Kiirguskaitse süsteem

Ajalugu ning organisatsioonid

1895 avastas Professor Wilhelm Conrad Röntgen *X-kiired*, mida hiljem hakati avastaja auks nimetama röntgenkiirteks.

Röntgenkiired võeti kiiresti kasutusele ja kuna ei osatud kahtlustada röntgenkiirte kahjulikke omadusi, siis kasutati neid üsnagi piiramatult. Röntgeniaparatuuride töövõime mõõtmiseks kasutati enda kiiritamist – *hinnates kui kiiresti nahk muutus ärrituse tulemusena punaseks*.

Hinnatakse, et selle tulemusena suri enam kui 300 inimest, umbes 250 nahavähki ja üle 50 verehaigustesse, põhiliselt aneemiasse ja leukeemiasse. Kahjuks ei võetud alguses neid juhtumeid veel piisavalt tõsiselt.

Samuti oli ühe röntgenpildi tegemisel saadud doos tollel ajal palju suurem kui tänapäevaseid röntgenaparatuuride kasutades. See põhjustas täiendavat riski radioloogidele. Eriti aktuaalne oli see esimese maailmasõja päevil, kus radioloogide suurele tööhulgale ja saadud kiiritusele lisandus veel ka psühholoogiline pinge. *Ilmnenud kõrvalnähtude tõttu muututi röntgenkiirguse kasutamise eettevaatlikumaks*.

Ettevaatusabinõuna kasutati **varjestust** - mingi materjali asetamist inimese ja kiirguseallika vahele. Üldiselt ei taganud see radioloogi täielikku varjestust, kuid kindlasti vähendas kiirguse kasutamisest tulenevat terviseriski.

Järgmise näitena võib tuua Radium Luminous Materials Company New Jersey's (USA). **1915 aasta paiku** kasutati kelladele numbrite kirjutamiseks värvisegu, mis sisaldas *raadiumi ja tsinksulfiidi*. Sajad tüdrukud niisutasid oma suus pintslite otsi numbrite maalimisel kellade numbrilaudadele ja kohalikud hambaarstid diagnoosisid peagi kummalise haiguse, mida hakati nimetama "**raadiumilõuad**". 1926.a. lõpuks olid neli tüdrukut, kellel diagnoositi luuvähk või plastiline aneemia, surnud.

Arusaam, et isegi *looduslikud kiirgusallikad* võivad põhjustada kõrgeid doose, oli raske tulema. Näiteks kasutati aastakümneid *uraaniühendeid keraamika- ja klaasitööstuses erinevate värvitoonide saamiseks*.

Samuti jõuti järeldusele, et *uraanikaevuritel* sageli esinev kopsuvähk on tingitud *radooni ja tema tütarproduktide* sissehingamisest.

Fiesta Ware (ca 1930), näide uraaniühendeid sisaldavate värvida kasutamisest keraamikas.



Uraani sisaldavad kollakat tooni klaasnõud, 1930-ndatest



Kiirgusdooside reguleerimiseks hakati erinevaid ekspertkomisjone moodustama juba 1920ndatel. Radioloogide esimene kongress toimus Londonis 1925 ning otsustati luua rahvusvahelised lepingud kiirguskaitse valdkonnas. Esimese probleemina tulid lahendada kasutatavate ühikutega seotud küsimused.

1928.a. toimus teine rahvusvaheline radioloogia konverents, kus loodi valitsusväline teadusorganisatsioon - *Rahvusvaheline Radioloogilise Kaitse Komisjon* (ICRP <http://www.icrp.org/>), mida algusaastatel tunti pigem küll Rahvusvahelise Röntgenkiirte ja Raadiumi Kaitse Komiteena. ICRP avaldab regulaarselt *soovitusi*, kuidas korraldada kaitset ioniseeriva kiirguse eest.

Organisatsiooni reputatsioon tuleneb tema liikmete teaduslikust mainest ja soovituste asjakohasusest. Komisjoni prognoosid surmaga lõppevasse vähki haigestumise tõenäosuse kohta põhinevad Jaapani tuumaplahvatused üleelanute uurimisel ja nende hindamisel. ICRP süsteem on laialdaselt üle võetud kogu maailma riikide seadusandlusesse.

ÜRO aatomkiirguse mõjude teaduslik komitee (UNSCEAR <http://www.unscear.org/>) uurib regulaarselt keskkonnas esinevaid looduslikke ja tehisklikke kiirgusallikaid, millega inimesed kokku puutuvad, neist allikatest lähtuvat

kiirgust ja sellega seotud riske. Komitee annab oma töö tulemustest jooksvalt aru ÜRO peaassambleele.

1956. aastal tööd alustanud *Rahvusvaheline Aatomienergiaagentuur (IAEA <http://www.iaea.org/>)* osaleb ka *ohutusstandardite* väljatöötamisel, tehes vajadusel koostööd teiste asjaomaste rahvusvaheliste organisatsioonidega. IAEA toetub oma tegevuses eelkõige UNSCEAR ja ICRP tööle. Kui riik esitab vastava soovi, siis aitab IAEA kaasa ka ohutusstandardite rakendamisele riigis, kasutades selleks erinevaid vahendeid, sealhulgas teenuste osutamine ja väljaõppe korraldamine.

Üldised põhimõtted

Kiirguskaitse põhieesmärgiks on **deterministlike efektide vältimine ja stohhastiliste efektide tõenäosuse piiramine**. Kõikide kiiritust suurendavate inimtegevuste puhul soovitab ICRP kolmel kesksel nõudel põhinevat kiirguskaitse süsteemi. Kõik nõuded võtavad arvesse ka sotsiaalse mõõtme, kaks esimest otseselt ja kolmas kaudselt, seega on õigete otsuste langetamine väga oluline.

Tegevuse õigustamine

Ükskõik milline tegevus, mis toob kaasa kokkupuute kiirgusega, on lubatud ainult juhul, kui sellest saadav kasu on vähemalt piisav, et kompenseerida kiiritust saavatele üksikisikutele või isikute rühmadele kiirguse poolt põhjustatud kahjustused.

Kaitse optimeerimine

Ükskõik millises tegevuses kasutatavast konkreetsest kiirgusallikast saadud doos üksikisikule peab jääma madalamaks kui ette nähtud doosipiirmäär ja kasutusele tuleb võtta kõik mõistlikud meetmed kaitse korraldamiseks jälgides, et kiirguse põhjustatav doos oleks „nii madal kui on võimalik mõistlikult saavutada” (mõiste ALARA-akronüüm ingliskeelsest fraasist *As Low As Reasonably Achievable*), arvestades majanduslikke ja sotsiaalseid tegureid.

Individaalsete doosipiirmäärade rakendamine

Piirmäär tuleb määrata kiirgustegevuste käigus üksikisiku poolt saadavatele doosidele, välja arvatud meditsiinilise diagnostika või ravi käigus saadavad doosid.

Tegevuse õigustamine

Tegevus tähendab inimtegevust, millega kaasneb *kiirguse tahtlik kasutamine*. Sellised kasutusala on selgelt määratletud ja neid on võimalik reguleerida.

Teiselt poolt ei saa me eriti midagi teha, et vähendada *looduslikust kiirgusest* saadud doosi, ehkki otstarbekas on sekkuda, kui inimesed puutuvad kokku kõrge radooni tasemega kodus või tööl.

Maakide ja teiste materjalidega töötamisel, nagu nafta- ja gaasipuurtoornides, kus looduslikult esinevate radionukliidide tasemed on kõrgemad, on vaja tagada töötajatele teatud kontroll kiirgusega kokkupuute üle.

Kiirguse kasutamine meditsiinis on peamiselt kliinilise põhjendatuse küsimus, sest selline tegevus teenib eelduste kohaselt patsiendi huve. Patsientide puhul ei ole dooside piirmäära kehtestamine mõistlik – see võib vähendada eeldatavat kasu. Siiski tuleks õigustamise ja optimeerimise põhimõtteid, mida käsitletakse järgmisena, rakendada täies ulatuses, eriti kui arvestada, et individuaalsete dooside alandamine toimub teatud vahemikus ja meditsiiniliste protseduuride käigus saadud kollektiivdoos on kõrge.

Tegevuse õigustamise nõue kiirguskaitse süsteemis rõhutab ilmset vajadust võrrelda kahjulikke kulusid kasudega. *Kiirguse mõjud on enamasti vaid osa võimalikest kahjulikest tagajärgedest, mis võetakse arvesse sotsiaalsete ja majanduslike üldkulude arvutamisel*. Juhul, kui leidub teisi võimalusi sama tulemuse saavutamiseks, kas kiirgusega või ilma, on oluline analüüsida alternatiivsete võimaluste kulusid ja tulusid enne lõpliku otsuse langetamist ühe või teise valiku kasuks.

Küsimused, mis õigustamise käigus tõusetuvad, ulatuvad kaugele *väljapoole kiirguskaitse temaatikat* ja neile on sobivaks *illustratsiooniks tuumaenergeetika programmi argumendid*.

Programmi *radioloogiliste tagajärgede hulka kuuluvad* ka radioaktiivsete ainete vabastamine keskkonda ja doosid, mida töötajad saavad tuumaenergeetikatööstuses.

Lisaks peaks täielik analüüs hõlmama ka *õnnetusi*, mis võivaid juhtuda tuumareaktoriga, samuti *radioaktiivsete jäätmete käitlemist*. Arvesse tuleks võtta ka *uraanikaevurite* (kes sageli ei asu maades, kus uraani kasutatakse) *doosid* ja nendega juhtuda võivad õnnetused.

Hinnata tuleks, *millised tagajärjed on tuumaenergiast loobumisel või energia tootmiseks alternatiivsete allikate – näiteks söe – kasutamisel*. Elektrienergia tootmine söest tekitab suuri jäätmekoguseid ja vabastab gaase, mis põhjustavad kasvuhooneefekti. Söel töötavad elektrijaamad vabastavad keskkonda ka toksilisi aineid ja radioaktiivseid materjale. Söekaevurid kannatavad kutsehaiguste all ja alati on olemas potentsiaalne kaevandusõnnetuste oht.

Täielik analüüs peaks seega arvestama *paljusid strateegilisi ja majanduslikke faktoreid*: erisusi, turvalisust, kättesaadavust ja erinevate kütuste varusid, erinevat tüüpi elektrijaamade ehitus- ja käitluskulusid, eeldatavat nõudlust elektrienergia järele ja inimeste valmisolekut teatud tööstusharus töötada.

Nõuetekohane õigustus on vajalik ka *kiirguse kasutamiseks meditsiinilises*

diagnostikas. Vähesed meist seaksid tegevuse kahtluse alla – kasu on vaieldamatu, isegi kui individuaaldoosid on mõnedes uuringutes – ja kollektiivdoosid üldiselt – kõrged.

Sellele vaatamata on *iga protseduuri vaja põhjendada konkreetsete eeliste alusel*. Massiline röntgenläbivaatus vähiennetuses, mis võib esile kutsuda rohkem vähijuhtumeid kui selle abil tõenäoliselt avastatakse, on selgelt vastuvõetamatu. Sellel põhjusel ei ole töötajate rutiinsele läbivaatusele kliinilist õigustust, välja arvatud erijuhtumid nagu tuberkuloosi vältimine.

Meditsiiniline kiiritus *raseduse ajal* nõuab eriti kaalukaid põhjendusi ja hoolikaid meetodeid.

Radioloogiline läbivaatus õiguslikest või kindlustuse eesmärkidest lähtuvalt ei ole tavaliselt õigustatud, välja arvatud juhul, kui see tuleb kasuks kiiritust saava isiku tervisele.

Aeg-ajalt soovitakse algetada tegevusi, mis *ei ole piisavalt õigustatud*. Nende hulgas on radioaktiivset materjali sisaldavate mänguasjade ja ehete ning teiste esemete, näiteks turvasildid, valmistamine, mille tootmiseks on olemas täiesti sobivad mitteradioaktiivsed alternatiivsed võimalused.

Möödunud sajandil toodetud ehted, mille värvid sisaldavad uraanoksiidi.

Selline radioaktiivse materjali kasutamine ei ole õigustatud.



Kaitse optimeerimine

Kuna ükski kiirgusdoos ei ole täiesti riskivaba, on oluline **pöörata tähelepanu kõikidele doosidele ja neid vähendada** alati, kui see on *mõistlikult* saavutatav.

Järkjärgult jõutakse punktini, kus dooside edasine alandamine muutub ebamõistlikuks, sest sotsiaalsed ja majanduslikud kulud osutuvad alandamise väärtusest suuremaks.

Teisest küljest ei ole konkreetse tegevusalaga seotud kasud ja riskid sageli ühiskonnas ühtlaselt jaotatud, seega teine nõue – ICRP soovitatud kaitse optimeerimine – sisaldab endas ka protseduuri piiranguid doosi- või riskipiirangute vormis, et vältida õigustamatut kokkupuudet kiirgusega.

Piiranguid seatakse tegevusaladel, kus kiirguse kasutamist alles planeeritakse. Töötajate jaoks peaks doosipiirangu väärtuse valima nii, et see kajastaks doosi väärtust aastas, see võib olla ka väike osa doosi piirmäärast, mida suudetakse mõistlikult saavutada teatud tööstusharus või protseduuri puhul. Üldsuse jaoks saab tüüppiirangut – 0,3 mSv aastas – kasutada plaanilise väärtusena uue kiirgusallika kasutuselevõtmisel näiteks tehases, kus kavatakse radioaktiivset materjali keskkonda vabastada.

Kaitse optimeerimist on hakatud viimase kahekümne aasta jooksul kogu maailmas üha olulisemaks pidama ja **enamikus riikides jääb kiirgustöötajate keskmine aastadoos märgatavalt (10 või enam korda) alla ICRP soovitatud 20 mSv aastas.**

Mõned töötajate rühmad saavad doose, mis ületavad keskmist mitu korda ja mõned töötajad saavad rohkem kui 20 mSv aastas, kuid sellised juhtumid moodustavad koguarvust väga väikese protsendi. UNSCEARi analüüs näitab, et keskmine aastadoos tehislisest allikatest on 0,6 mSv, samal ajal töötajate keskmine doos kohtades, kus on kõrgendatud looduslike radionukliidide sisaldus (näiteks kaevandused) on kõrgem: 1,8 mSv.

Enamuses riikides on *üksikisikute aastadoosid* tegevustest, mille käigus saadakse kiirgust, suudetud viia alla 0,3 mSv aastas, mis on ka esmane ICRP soovitatud doosipiirmäär elanikkonnale. Isegi inimrühmad, kes puutuvad kõige rohkem kokku tuumaseadmetest vabanenud radioaktiivsete materjalidega, sest nad elavad seadme lähedal või neil on spetsiifilised toitumisharjumused, saavad tavaliselt aastadoosid, mis moodustavad vaid murdosa sellest piirmäärast.

Doosipiirmäärad või juhendtasemed on kohaldatavad ka *patsientide meditsiinilise kiirituse korral*, kui eesmärgiks on dooside mõistlik minimeerimine. Mõne rutiinse meditsiiniprotseduuri käigus saadakse märkimisväärsed doosid (s.o. mitu mSv) ja, mis on väga oluline, need võivad haiglate löikes tugevasti erineda. Juhendtasemete kasutamine võib osutada praktiliseks võimaluseks patsientide dooside alandamisel, ilma et arstid kaotaksid diagnoosi määramiseks vajalikku informatsiooni.

Doosi piirmäärad

Kolmas nõue kiirgustegevusele on kohustus mitte allutada üksikisikuid ja nende järglasi lubamatult suurele riskile. Seda täidetakse rangete doosi piirmäärade seadmise ja kaitse optimeerimise põhimõtte rakendamisega. BSS (*Basic Safety Standard, IAEA*) määrab töötajate doosipiirmääraks 20 mSv aastas (viie aasta keskmisena, kuid mitte üle 50 mSv aastas) ja elanikkonna jaoks 1 mSv aastas.

Esmased piirmäärad, mida väljendatakse efektiivdoosina, peavad aitama vältida ohtlike tagajärgede ilmumist nagu vähk ja pärilikud kahjustused, võttes arvesse nende tekkimise tõenäosust.

Teine piirmäärade kogum, mida väljendatakse ekvivalentdoosina, peab kaitsma silmi, nahka ja jäsemeid muude kahjustusvormide eest.

Doosi piirmääradega seoses esineb kaht liiki **väärarusaamu**.

Esimese puhul arvatakse, et piirmäärad tähistavad järsku muudatust bioloogilises riskis, eraldusjoont turvalise ja mitteturvalise vahel. Arutelust doosi ja riski üle selgub, et see ei ole nii. See peaks järelduma ka faktist, et töötajate ja elanikkonna jaoks kehtivad erinevad doosi piirmäärad. Need piirmäärad erinevad, sest töötajatele, kes saavad töandjatelt soodustusi, on kõrgemad riskid vastuvõetavamad kui elanikkonnale, kelle risk ei ole vabatahtlik.

Teine väärarusaam seisneb selles, et dooside hoidmine alla piirmäära on kiirguskaitse ainus oluline nõue. Vastupidi, ülim nõue on hoida doosid nii madalad kui mõistlikult võimalik. See kajastub ka suureneval rõhuasetusel uurimistasemetele, mis on loomulikult seatud doosi piirmäärast madalamale.

ICRP poolt 1991. aastal esitatud soovitustes olid antud järgmised piirmäärad ning need on kehtestatud ka Kiirgusseaduse alusel:

	Doosi piirmäär	
	Kiirgustöötaja	Elanikkond
Efektiivdoos	20 mSv/a*	1 mSv/a*
Aastane ekvivalentdoos		
silmalääts	150 mSv	15 mSv
naha ja jäsemed	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.

Aastate jooksul on lubatud dooside piirmäärasid vähendatud. Näiteks olid 1934 lubatud doosid 12 korda suuremad kui 1990 aastal. See ei ole tingitud asjaolust, et eelnevad piirmäärad oleks olnud tervist kahjustavad, pigem on muutunud ettevaatlikumaks. Kuna ilmsiks on tulnud stohhastiliste efektide kaduvväike tõenäosus isegi üliväikeste dooside puhul, siis peavad ohutusstandardid hõlmama kogu dooside piirkonda, et piirata kõikvõimalike kiirguskahjustusi.

Riiklik kiirguskaitse

Kiirgustegevusega või sekkumistegevusega hõivatud inimeste või asutuste suhtes peab riik kehtestama teatud *üldised nõuded*, mis tulenevad kiirgusohutuse spetsiifikast. Riik peab neid nõudeid rakendama ja tavaliselt tehakse seda *nn. Pädeva Asutuse* kaudu. Eestis on kiirgusohutusega seotud nõuded sätestatud kiirgusseaduses. Riikliku kiirguskaitse infrastruktuuri olulised osad on *seadused ja määrused, samuti ka Pädev Asutus*, kellele on antud õigus kontrollida õigusaktide täitmise korda, ning lõpuks ka *küllaldased ressursid ning vajalike oskustega inimesed*.

Riik peab leidma teid ja vahendeid, selleks et reageerida ühiskonna erinevatele kiirguskaitse alastele probleemidele, mis ulatuvad kiirgusega tegelevate inimeste seaduslikest kohustustest kaugemale. Näiteks peab riigivõim kindlustama *radioaktiivste ainete võimaliku kuhjumise avastamise keskkonnas*, aga samuti *sekkumise ettevalmistamise, kui seda nõuab inimeste kiiritusohu sattumine avariiolukordades*. Riigivõim peab suutma kontrollida ka selliseid *kiirgusallikaid, mille eest ükski teine organisatsioon ei vastuta*. Heaks *näiteks* on siin looduslikud allikad ja varasema kiirgustegevuse radioaktiivsed jäätmed.

Riiklik infrastruktuuri oluliseks ülesandeks on ka tegelemine *kiirguskaitse ja kiirgusohutuse alaste asjatundjate koolitamisega*. Sellega tegevusega on tihedalt seotud ka *elanikkonna informeerimine* kiirguskaitsest kõikvõimalike meediakanalite kaudu. Tihe infovahetus hõlbustab riiklike prioriteetide paikapanemise keerulist poliitilist protsessi ja võimaldab eraldada riiklikke vahendeid kiirguskaitseks. Erinevaid kiirguskaitset käsitlevaid teabematerjale leiab Keskkonnaameti kiirgusosakonna kodulehelt: <http://www.kiirguskeskus.ee/index.php?leht=10>

Riiklik infrastruktuur peab pakkuma selliseid kiirguskaitsealaseid teenuseid, mida ei suuda teha isikud, kes on lubatud kiirgusega tegelema. Sellised teenused on näiteks *isikudosimeetria, keskkonnaseire ja kiirgusmõõteriistade kalibreerimine* ning nende omavaheline võrdlemine, samuti *kutsekiirituse registri pidamine ja kasutatava aparatuuri usaldusväarsuse hindamine*.

Eesti Vabariigi Kiirgusseaduse kohaselt on pädevaks valitsusasutuseks *Keskkonnaamet* (<http://www.keskkonnaamet.ee>), mis kuulub Keskkonnaministeriumi haldusalasse ja kiirgustegevus tohib toimuda ainult Keskkonnaameti poolt väljastatava kiirgustegevusloa alusel. Keskkonnaameti kiirgusosakonna ülesanneteks on:

- osaleda vastavate poliitikate, arengukavade ning programmide koostamisel ja elluviimisel;
- viia läbi haldusmenetlust talle antud volituste piires;
- koostada kiirgusohutushinnanguid kavandatavatele ja olemasolevatele kiirgustegevustele;
- pidada kiirgusalaseid andmekogusid;

korraldada kiirgustegevuslubade järelevalvet koostöös Keskkonnainspeksiooniga;
korraldada keskkonna radioaktiivsuse seiret ja tulemuste analüüsi;
teostada kiirgusalast laboratoorset analüüsi;
teostada looduskiirituse uuringuid;
hinnata elanikukiiritust;
tagada kiirgusohu eest varajane hoiatamine.

Kiirgusseadus sätestab põhilised ohutusnõuded inimese ja keskkonna kaitsmiseks ioniseeriva kiirguse kahjustava mõju eest ning isikute õigused, kohustused ja vastutuse ioniseeriva kiirguse kasutamisel. Samuti reguleerib kiirgusseadus kiirgustegevust ja toiminguid, mille korral looduslikud kiirgusallikad võivad põhjustada töötajate ja elanike kiirituse olulist suurenemist, sekkumistegevust kiirgushädaolukorra ning kiirgushädaolukorra või lõpetatud kiirgustegevuse tagajärjel tekkinud püsikiirituse korral. Kiirgusohutusosalase seadusandluse leiab Keskkonnaameti kiirgusosakonna kodulehelt: <http://www.kiirguskeskus.ee/index.php?leht=139>

Kiirgusohumärgis (must kolmikleht kollasel taustal)



kinnitatakse:

- 1) kinnist kiirgusallikat sisaldavale seadmele,
- 2) statsionaarse kiirgusallika vahetusse lähedusse,
- 3) ruumi uksele, kus asub ioniseeriva kiirguse allikas või ioniseerivat kiirgust tekitav elektriline seade,
- 4) laboratooriumi uksele, kus radioaktiivset ainet kasutatakse lahtise kiirgusallikana,
- 5) radioaktiivse aine ja radioaktiivsete jäätmete hoiukoha ustele ning radioaktiivsete jäätmete kogumise anumatele.

Kontrollitavates ruumides, kus viiakse läbi kiirgustegevust, viibimisel peab personal järgima alltoodud nõudeid:

1. Ei tohi süüa, juua või suitsetada.
2. Kõik haavad tuleb enne ruumi sisenemist katta veekindlalt. Lahtised haavad kujutavad endast otsest teed vereringe saastamiseks.
3. Ruumis saadud haavadest tuleb kohe teatada vastutavale isikule.
4. Harilike taskurätikute asemel tuleb kasutada ühekordseid.