

MAAMME RIKKAUDET 2026
KEMI 18.-19. 2026

Radioaktiivisten aineiden vaikutus ihmiseen ja vesieliöihin

Eero Huhtalo

Esityksen sisältö

Mitä ionisoiva säteily on - alfa, beeta ja gammasäteily ja niiden ominaisuudet

Miten ionisoiva säteily syntyy

Säteilylajit

Tärkeimmät mittayksiköt
- Bq (Becquerel) aktiivisuuden yksikkö
- Sv (Sievert) säteilyannoksen yksikkö
- Sv/h (Sieverttiä tunnissa) annosnopeuden yksikkö

Hajoamissarjat - Alfasäteily merkittävässä osassa hajoamissarjoissa

Aktiivisuuspitoisuuksien tasapaino kiinteässä kiviaineessa

Luonnon taustasäteilyn arvoja

Ulkoinen ja sisäinen säteilyaltistuminen

Mitä alfasäteily tekee sumukammiossa

Alfasäteilyä säteilevä pölyhiukkanen apinan keuhkoissa

Koe-eläimillä käytetään plutoniumia uraanin ja toriumin sijaan.
Selitystä tälle.

Esimerkkitapaus: Säteilyannoksen arviointi kaivoksessa

Eläinkokeista

Esimerkkejä alfasäteilyn riskeistä

Suomen kallioperän säteilevät aineet
- Uraani U-238
- Torium Th-232
- K-40

Mitä ionisoiva säteily on

Ionisoiva säteily tarkoittaa suurienergistä säteilyä, jolla on riittävästi energiaa irrottamaan atomeista elektroneja tai rikkomaan molekyylejä.

<u>Keskeiset tiedot</u>

Miten se vaikuttaa: Säteily irrottaa kohteen atomilta elektronin, jolloin atomi muuttuu ioniksi ja sen kemiallinen reaktiivisuus muuttuu. Tämä voi rikkoa esimerkiksi solujen DNA-molekyylejä.

Lajit: Ionisoivaa säteilyä ovat alfahiukkas-, betahiukkas-, gamma- ja röntgensäteily.

Lähteet: Säteilyä syntyy luonnostaan radioaktiivisista aineista (kuten maaperän radonista) sekä ihmisen tekemistä laitteista, kuten röntgenlaitteista ja hiukkaskiihdyttimistä.

Ero ionisoimattomaan: Toisin kuin matalaenerginen ionisoimaton säteily (esimerkiksi matkapuhelimien radioaallot tai näkyvä valo), ionisoiva säteily pystyy yksittäisillä osumillaan vaurioittamaan elävää kudosta.

Miten säteily ionisoi?

Suuri energia: Säteily (kuten röntgensäteily, gammasäteily tai alfa- ja beetahiukkaset) kantaa mukanaan energiaa.

Törmäys: Kun tämä säteily osuu materiaaliin (esimerkiksi ilmaan, veteen tai ihmisen kudokseen), se törmää aineen atomeihin.

Elektronin irtoaminen: Säteilyn energia on niin voimakas, että se "potkaisee" atomin uloimmalta kuorelta irti yhden tai useamman elektronin.

Ioniparin synty: Tämän seurauksena alun perin sähköisesti neutraali atomi muuttuu positiivisesti varautuneeksi ioniksi, ja irronnut elektroni toimii negatiivisena varauksena.

Mitä ionisoiva säteily on - alfa, beeta ja gammasäteily ja niiden ominaisuudet

Alfasäteily:

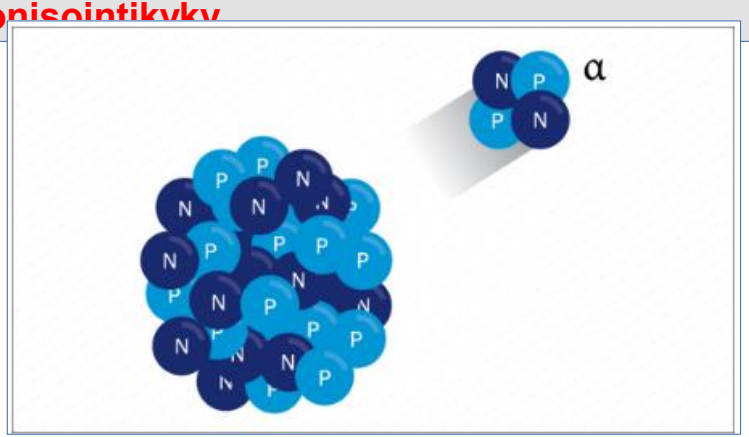
Alfasäteilyä syntyy silloin kun raskas paljon ydinhiukkasia sisältävä atomin ydin hajoaa ja ytimen sisältä lentää alfahiukkanen.

Alfahiukkasen rakenne: Alfahiukkanen on käytännössä heliumatomin ydin. Se koostuu kahdesta protonista ja kahdesta neutronista.

Muutos ytimessä: Kun ydin luovuttaa alfahiukkasen, sen järjestysluku (protonien määrä) pienenee kahdella ja massaluku (kaikkien ydinhiukkasten määrä) pienenee neljällä. Alkuaine siis muuttuu toiseksi alkuaineeksi.

Läpäisykyky: Alfasäteily on massiivisuutensa vuoksi heikosti läpäisevää. Se pysähtyy jo ilmassa muutaman senttimetrin matkalla tai esimerkiksi tavalliseen paperiarkkiin ja ihmisen kuolleeseen ihosolukkoon.

Vaarallisuus: Vaikka se pysähtyy helposti ulkoapäin, alfasäteily on erittäin vaarallista elimistön sisällä (esimerkiksi jos alfa-aktiivista ainetta, kuten radonia, hengitetään tai niellään), koska sillä on suuri ionisointikyky



https://www.iaea.org/emergency/radiation-and-health-effects/types-of-ionizing-radiation

Mitä ionisoiva säteily on - alfa, beeta ja gammasäteily ja niiden ominaisuudet

Beetasäteily:

Beetasäteily syntyy atomiytimen hajoamisessa, kun epävakaa ydin pyrkii muuttumaan stabiilimmaksi (tasapainoisemmaksi). Toisin kuin monet kuvittelevat, beetasäteilyn hiukkaset eivät ole peräisin ytimen ympärillä pyörivistä elektroniverhoista, vaan ne luodaan ytimen sisällä itse hajoamistapahtumassa.

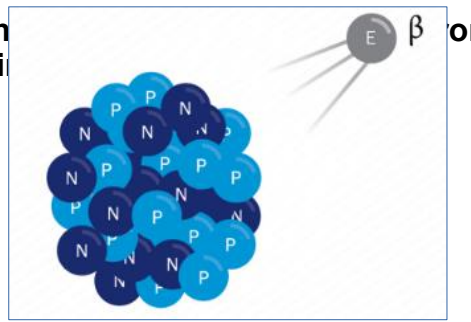
Beeta-miinus-hajoaminen (β^-)Tämä on yleisin beetasäteilyn muoto. Se tapahtuu ytimissä, joissa on liikaa neutroneja suhteessa protoneihin.

Mitä tapahtuu: Ytimessä oleva neutroni muuttuu protoniksi.

Mitä syntyy: Muuttumisen yhteydessä syntyy elektroni (beeta-miinus-hiukkanen) ja näkymätön antineutriino (elektronin antineutriino).

Lopputulos: Elektroni ja antineutriino sinkoutuvat ulos ytimestä suurella nopeudella. Koska ytimeen tuli yksi protoni lisää, alkuaine muuttuu jaksollisessa järjestelmässä yhden askeleen eteenpäin (esim. hiili-14 muuttuu typeksi).

β^--h oni. Se syntyy atomiytimessä, kun neutroni muuttuu protoniksi, elektroniksi ja anti



https://www.iaea.org/emergency/radiation-and-health-effects/types-of-ionizing-radiation

Mitä ionisoiva säteily on - alfa, beeta ja gammasäteily ja niiden ominaisuudet

Gammasäteily:

Gammasäteily syntyy atomiydinten purkaessa ylimääräistä energiaansa.

Viritystila: Atomiydin voi joutua virittyneeseen tilaan esimerkiksi alfa- tai beetahajoamisen tai ydinreaktioiden jälkeen.

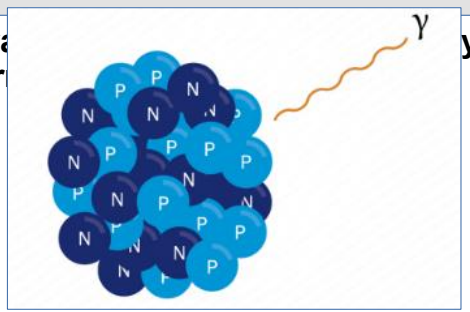
Energian vapautuminen: Ydin pyrkii palaamaan alemman energian tilaan. Se vapauttaa ylimääräisen energian sähkömagneettisena aaltoliikkeenä eli fotonina.

Suuri energia: Koska ytimen sisäiset energiat ovat suuria, vapautuvan fotonin energia ja taajuus ovat poikkeuksellisen korkeita. Tämä korkeaenerginen fotoni on gammasäteilyä.

Missä gammasäteilyä syntyy?

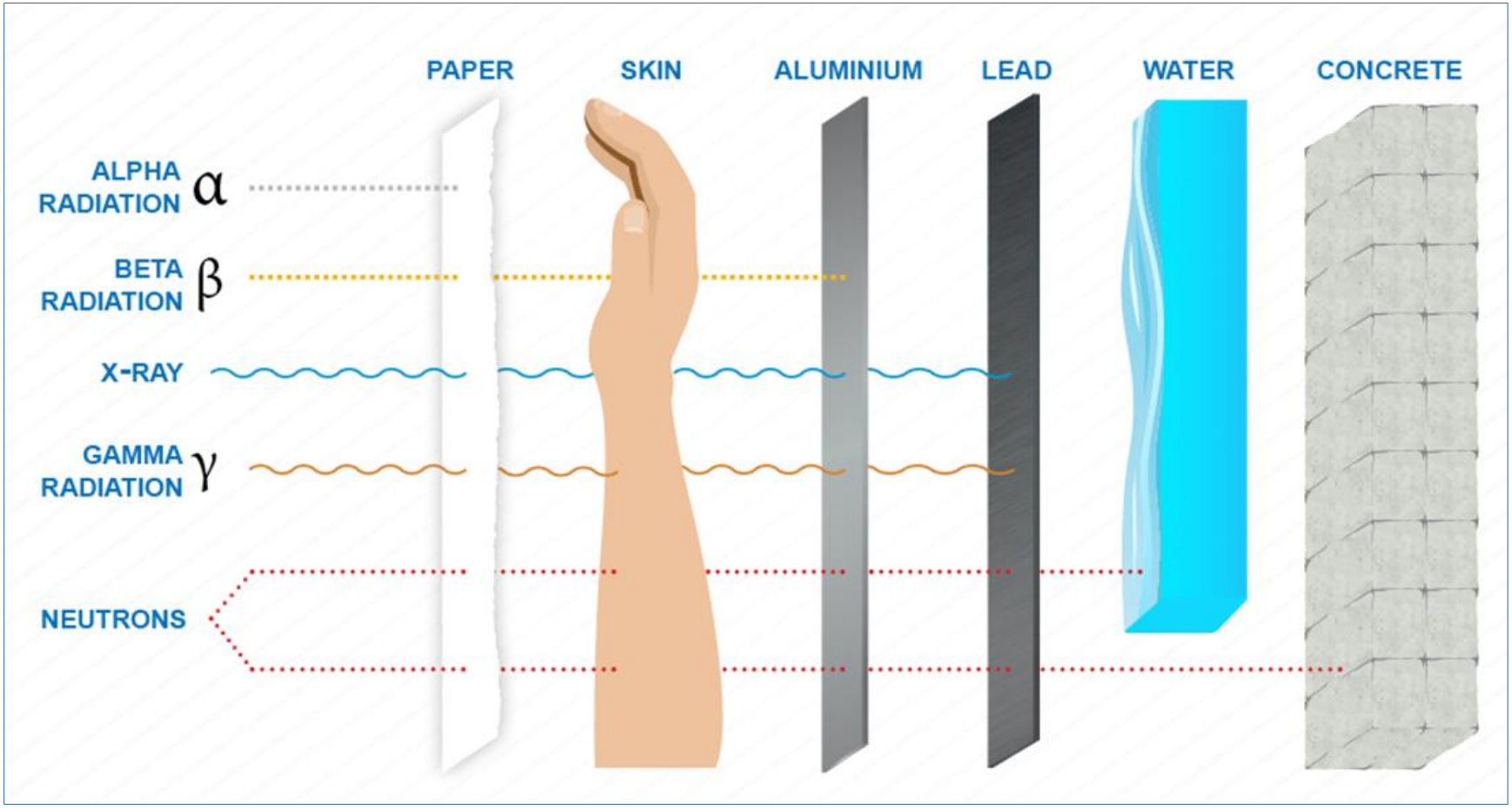
Radioaktiiviset aineet: Maapallolla sitä syntyy luonnostaan tai keinotekoisesti radioaktiivisten isotooppien hajoamisen yhteydessä.

Ava y rajuissa ilmiöissä, kuten supernovissa, mustissa aukoissa ja neutronitähtien tör



https://www.iaea.org/emergency/radiation-and-health-effects/types-of-ionizing-radiation

Mitä ionisoiva säteily on - alfa, beeta ja gammasäteily ja niiden ominaisuudet



https://www.iaea.org/emergency/radiation-and-health-effects/types-of-ionizing-radiation

Kaavio esittää eri säteilytyyppien läpäisykykyä ja sitä, millaiset materiaalit pystyvät pysäyttämään ne. Kuvassa vertaillaan alfasäteilyä, beetasäteilyä, röntgensäteilyä, gammasäteilyä ja neutronisäteilyä suhteessa eri esteisiin kuten paperiin, ihoon, alumiiniin, lyijyyn, veteen ja betoniin.

Eri säteilytyypit ja niiden pysäyttäjät kaavion mukaan:

Alfasäteily (\(\alpha \)): Pysähtyy jo paperiin.

Beetasäteily (\(\beta \)): Läpäisee paperin ja ihon, mutta pysähtyy alumiiniin.

Röntgensäteily (X-ray): Läpäisee paperin, ihon ja alumiinin, mutta pysähtyy lyijyyn.

Gammasäteily (\(\gamma \)): Erittäin läpäisevää. Se kulkee paperin, ihon, alumiinin ja lyijyn läpi, ja pysähtyy vasta paksuun betoniin.

Neutronisäteily: Kaikkein läpäisevintä. Se vaatii pysähtyäkseen runsaasti vetyä sisältäviä materiaaleja, kuten vettä tai paksua betonia.

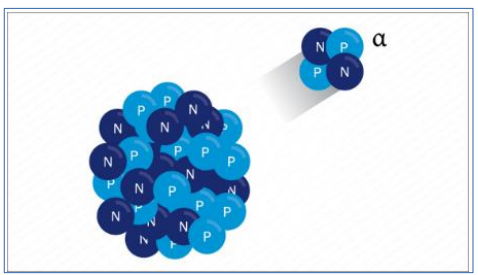
Kaavio antaa helposti harhaanjohtavan kuvan, sillä se kuvaa vain säteilyn läpäisykykyä kehon ulkopuolelta. Alfasäteily on erittäin vaarallista, jos sitä pääsee elimistön sisälle.
Vaikka alfasäteily pysähtyy helposti, sen biologinen vaikutus muuttuu täysin, kun säteilevä pölyhiukkanen päätyy kehoon:
- Ulkoisesti vaaratonta: Alfasäteily ei läpäise ihon kuollutta pintakerrosta.
- Sisäisesti tuhoisaa: Hengitettynä tai nieltynä alfahiukkaset osuvat suoraan eläviin soluihin.
- Voimakas ionisaatio: Alfasäteily vaurioittaa kudoksia ja DNA:ta paljon voimakkaammin kuin beeta- tai gammasäteily.
- Radonriski: Esimerkiksi huoneilman radonkaasu aiheuttaa keuhkoissa alfasäteilyä, mikä lisää keuhkosyövän riskiä.

Tärkeimmät mittayksiköt

- Bq (Becquerel) aktiivisuuden yksikkö

Aktiivisuuden yksikkö Becquerel [Bq]:

Becquerel (tunnus Bq) on SI-järjestelmän mukainen säteilyn aktiivisuuden mittayksikkö.
Määritelmä: 1 Bq tarkoittaa yhtä radioaktiivista hajoamista (ydinmuutosta) sekunnissa.
Käyttö: Yksikkö kertoo, kuinka monta atomia aineessa hajoaa keskimäärin sekunnissa.
Yksikön suuruus: Yksi becquerel on hyvin pieni määrä säteilyä, minkä vuoksi aktiivisuutta mitataan usein suurempina kerrannaisina (kuten kilobecquereina [kBq] tai megabecquereina [MBq]).
Pitoisuudet: Aktiivisuus voidaan ilmoittaa myös massaa tai tilavuutta kohdin, esimerkiksi muodossa Bq/kg (massayksikkö) tai Bq/m³ (tilavuusyksikkö).



Suomen maaperän graniittikivissä on tyypillisesti noin 50 Bq/kg (becquereliä kilogrammassa) uraani-238-isotoopin aktiivisuuspitoisuus, mikä on kansainvälisesti vertailtuna suhteellisen korkea taso. Lisäksi suomalaisessa graniitissa on tyypillisesti myös torium-232-isotooppia (noin 40–50 Bq/kg) sekä huomattavia määriä radioaktiivista kalium-40-isotooppia (usein yli 1000 Bq/kg).

Tärkeimmät mittayksiköt

- Sv (Sievert) säteilyannoksen yksikkö

Sv (Sievert) säteilyannoksen yksikkö

Sievert (tunnus Sv) on ionisoivan säteilyn aiheuttamaa terveydellistä haittaa kuvaava säteilyannoksen yksikkö.

Mitä sievert tarkoittaa?
- Sievert kertoo, kuinka paljon biologista vahinkoa säteily aiheuttaa elävälle kudokselle.
- Yksikkö ottaa huomioon sekä säteilyn määrän että sen, millaista säteily on ja miten herkkiä eri kehon osat ovat sille.

Pienemmät kerrannaisyksiköt
Sievert on mittayksikkönä niin suuri, että tavallisissa mittauksissa käytetään sen osia:
- Millisievert [mSv]: Yksi tuhannesosa sievertistä (0,001 Sv).
- Mikrosievert [µSv]: Yksi miljoonasosa sievertistä (0,000001 Sv).

Säteilyannoksesta vertailun vuoksi:
Syöpäriski: Kansainvälisen säteilysuojelukomission (ICRP) mukaan riski kuolla säteilyn aiheuttamaan syöpään on noin 5,5 % jokaista saatua sievertiä (1 Sv) kohden.
Laskutapa: Tämä tarkoittaa, että jos 100 ihmistä saa kerralla 1 Sv:n annoksen, tilastollisesti noin 5–6 heistä sairastuu myöhemmin elämässään kuolemaan johtavaan syöpään tämän säteilyn seurauksena.
Viive: Säteilyn aiheuttamat syövät eivät puhkea heti, vaan niiden kehittymisessä kestää yleensä vuosikymmeniä (usein 10–30 vuotta).
Katso tarkemmin LNT-malli (Linear No-Treshold model)

Tärkeimmät mittayksiköt

- Sv/h (Sieverttiä tunnissa) annosnopeuden yksikkö

Sv/h (Sieverttiä tunnissa) annosnopeuden yksikkö

Sv/h (sieverttiä tunnissa) on säteilyn annosnopeuden yksikkö.
Se kertoo, kuinka suuren ionisoivan säteilyn annoksen (eli energiamäärän) ihminen tai kohde vastaanottaa tietyssä ajassa.
Koska yksi sievertti on erittäin suuri määrä säteilyä, käytännön mittauksissa ja taustasäteilyä arvioitaessa käytetään yleensä paljon pienempiä kerrannaisyksiköitä:

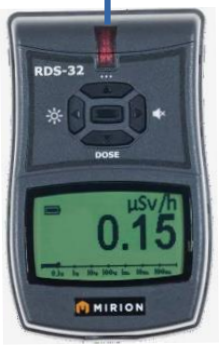
- **mSv/h (millisieverttiä tunnissa) = tuhannesosa sievertistä tunnissa.**
- **µSv/h (mikrosieverttiä tunnissa) = miljoonasosa sievertistä tunnissa.**

U-238:a ja Th-232:a sisältävä säteilevä kivi





Mittari mittaa vain gammasäteilyä. Alfasäteily ei läpäisen mittailmaisimen alumiinikuorta



Kuvassa säteilymittari mittaa hyvin pientä säteilyn annosnopeutta.

Mittari näyttää 0,15µSv/h.

Suomen normaali taustasäteilyn annosnopeus ulkoilmassa on noin 0,05–0,3 µSv/h

🟢 **Normaalitasot ja luonnon taustasäteily**

0,05–0,30 µSv/h: Normaali luonnon taustasäteily Suomessa. Taso vaihtelee hieman maaperän (kuten graniitin määrän) mukaan.

0,10 µSv/h: Tyypillinen maailmanlaajuinen keskiarvo maantasolla. Jatkuvana tämä tarkoittaa noin 1 millisievertin (mSv) vuosiannosta.

🟡 **Kohonnut säteily (Lentäminen ja lievät poikkeamat)**

0,20–0,40 µSv/h: Säteilyvalvontaverkon hälytysraja Suomessa. Jos Säteilyturvakeskuksen (STUK) automaattinen mittari ylittää tämän tason, päivystäjä saa hälytyksen tilanteen tarkistamiseksi.

~2,7–5,0 µSv/h: Annosnopeus matkustajakoneessa noin 10–12 kilometrin korkeudessa. Korkealla ilmakehä suojaa vähemmän avaruudesta tulevalta kosmiselta säteilyltä.

5,0 µSv/h: Korkein Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuuden aikana Suomessa mitattu annosnopeus (vuonna 1986). [1]

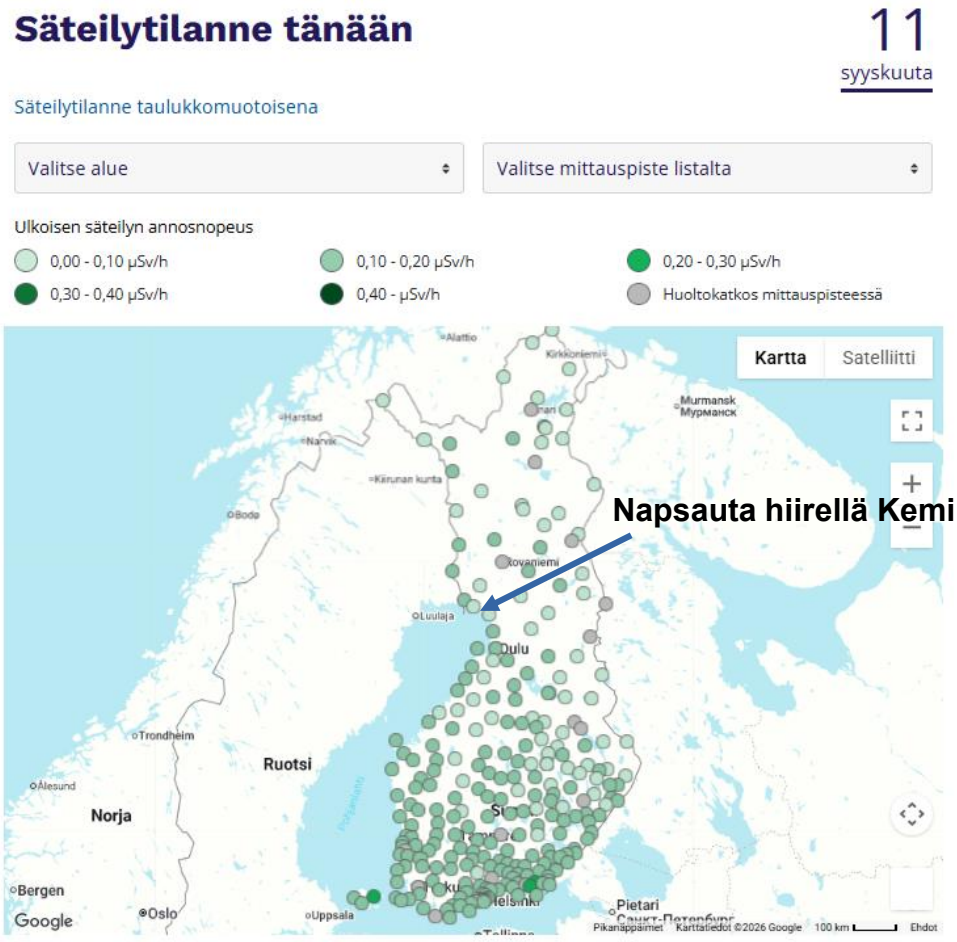
🔴 **Vaaratilanteet ja viranomaisten suojelutoimenpiteetSäteilyvaaratilanteessa viranomaiset käyttävät operatiivisia toimenpidetasoja väestön suojaamiseksi:**

Yli 100 µSv/h: Kulkurajoitukset. Alueella liikkumista ja ulkona oleskelua aletaan rajoittaa.

Yli 1 000 µSv/h (1 mSv/h): Evakuointi. Väestön siirtäminen pois alueelta aloitetaan, jos annosnopeus saavuttaa tai uhkaa saavuttaa tämän tason.

STUK Säteilytilanne tänään kertoo hetkellisen taustasäteilyn arvon

- https://stuk.fi/sateilytilanne-tanaan





11.9.2026 klo 15:30
Kemissä taustasäteilyn annosnopeuden arvo oli 0,086 µSv/h.

8.9.2026 klo aamupäivällä
Kemissä taustasäteilyn annosnopeuden arvo oli hetkellisesti 0,103 µSv/h.
Korkea piikki taustasäteilyn määrässä johtuu sateesta. Sadeveden mukana Bi-214 (vismutti) tulee maahan. Se aiheuttaa taustasäteilyn nousun ja myös voi aiheuttaa säteilyvalvontahälytyksen. Bi-214 puoliintumisaika on noin 20 minuuttia, joten siitä ei aiheudu vaaraa.

Säteilyn toteaminen aistimalla on käytännössä täysin mahdotonta, sillä ihmissilmät tai muut aistit eivät kykene havaitsemaan ionisoivaa säteilyä.

Säteilyä ei voi nähdä, kuulla, haistaa, maistaa eikä tuntea iholla. Tämän vuoksi säteilyn havaitsemiseen tarvitaan aina säteilymittalaitteita.

Miksi aistit eivät toimi?

Ei välitöntä aistimusta: Suuretkaan säteilyannokset eivät tunnu miltään hätätilanteen hetkellä.

Poikkeukset: Äärimmäisen korkeat säteilyannokset (esimerkiksi vakavissa ydinonnettomuuksissa) voivat aiheuttaa metallin makua suuhun tai ihon punoitusta, mutta nämä ovat jo merkkejä alkavasta säteilysairaudesta tai kudosvaurioista, eivät suoraa säteilyn aistimista.

~~Ionisoivaa säteilyä voidaan havaita ainoastaan säteilymittareitten avulla.~~

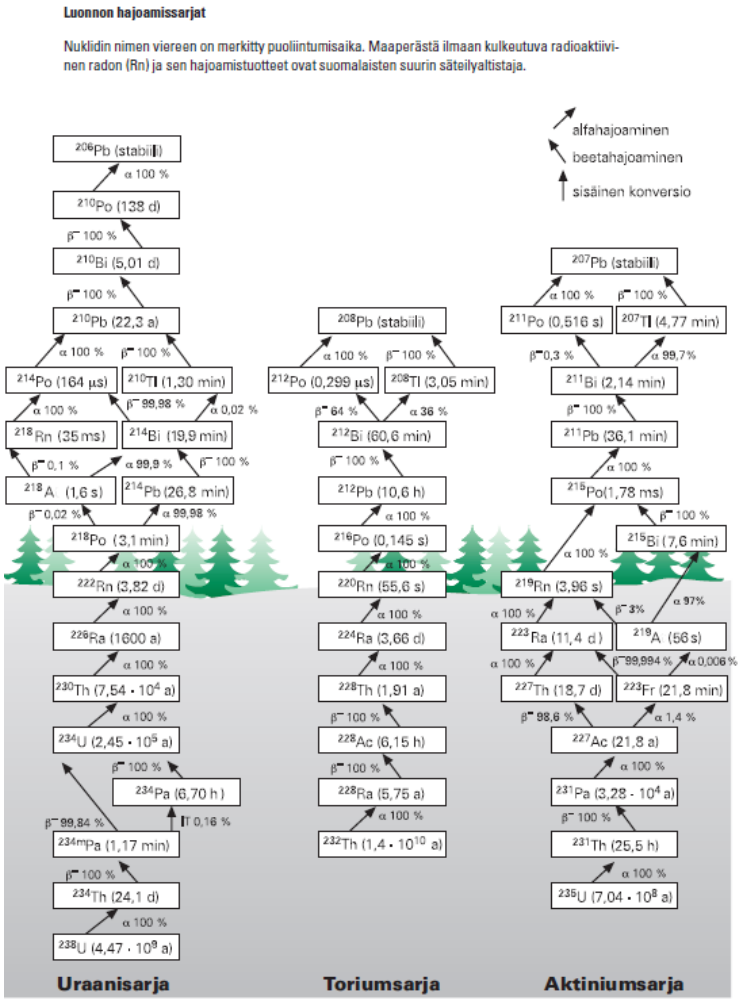




Kuvissa on 2 kappaletta ns. väestönsuojelumittareita. Ne mittaavat vain gammasäteilyä. Alfasäteily ne eivät mittaa ollenkaan.
Kaivoksissa gammasäteilyä mittavia mittareita ei voi käyttää, sillä mittarit mittaavat vain uraanin ja toriumin tytärnuklidien tuottamaa gamma. Kaikkein vaarallisin alfasäteily jää kokonaan mittaamatta.

<u>Tee kyselyitä Google AI:lle:</u>
Onko perusteltua mittailla RDS-100-mittarilla kaivoksessa, missä on paljon radonia ja thoronia sekä U-238 ja Th-232 pölyä?
Näyttääkö mittari edes suurin piirtein että säteilyä on, emonuklidien tyttärien tuottaman gamman vuoksi?

Uraanin ja toriumin hajoamissarjat



Viereisessä kuvassa on kolme hajoamissarjaa:
- Uraanisarja
- Toriumsarja
- Aktiniumsarja
Koska aktiniumsarja U-235 hajoamissarja on harvinaisempi luonnossa, niin jatkossa käsitellään vain U-238 eli uraanisarjaa ja Th-238 eli toriumsarjaa.

Uraani- ja toriumsarjoissa tytärnuklidien ja emonuklidien aktiivisuus on yleensä sama, eli tyttäret ovat tasapainossa emon kanssa.
Esimerkiksi kaivoksesta louhitussa kiviaineksessa tyttäret ovat tasapainossa.
Tasapaino voi muuttua jos kaasumaiset radon ja toron pääsevät karkaamaan kivestä.

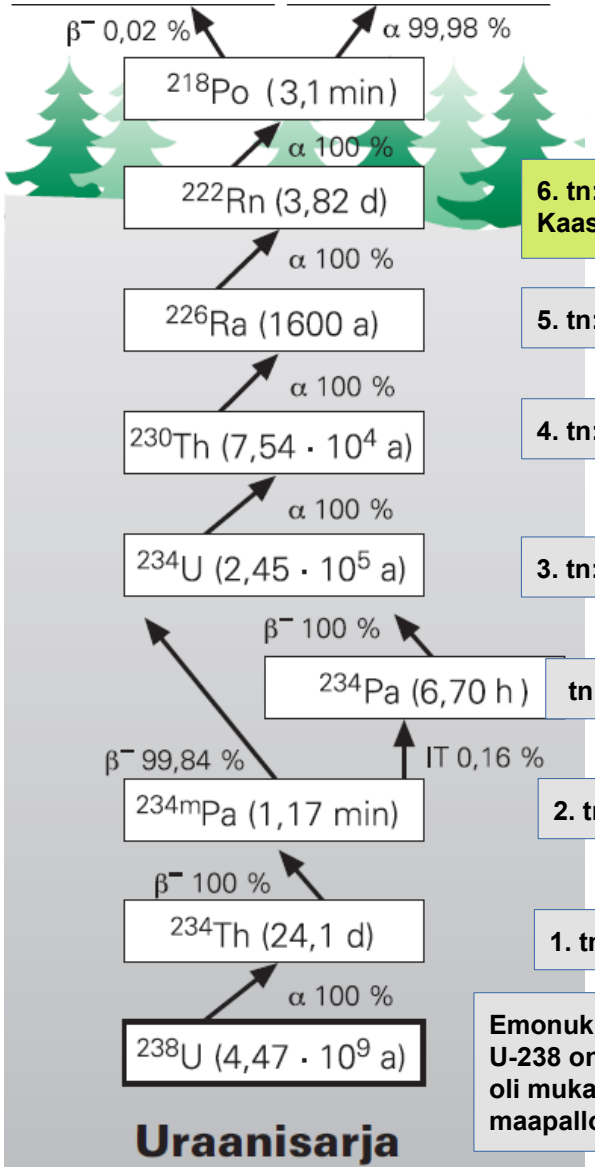
Kuvan lähde:

STUK nettisivustolla olevasta ilmaisesta kirjasarjasta :
Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja
https://stuk.fi/sateily-ja-ydinturvallisuus-kirjasarja

Kirja: Säteily ympäristössä
Liitteet: Liite 2 (sivu 377)
Kirjat ovat PDF-muodossa ja ne voi ladata omalle tietokoneelle ilmaiseksi.

https://stuk.fi/documents/150192312/162661266/kirja2-sateily-ymparistossa-liitteet.pdf/68ab6c5f-aca4-c03e-92a1-452ebb1ae16a?t=1684851447467

Uraanin hajoamissarja, alkuosa



6. tn: radon-222 (Rn-222)
Kaasu

5. tn: radium-226 (Ra-226)

4. tn: torium-230 (Th-230)

3. tn: uraani-234 (U-234)

tn: protaktinium-234 (Pa-234)

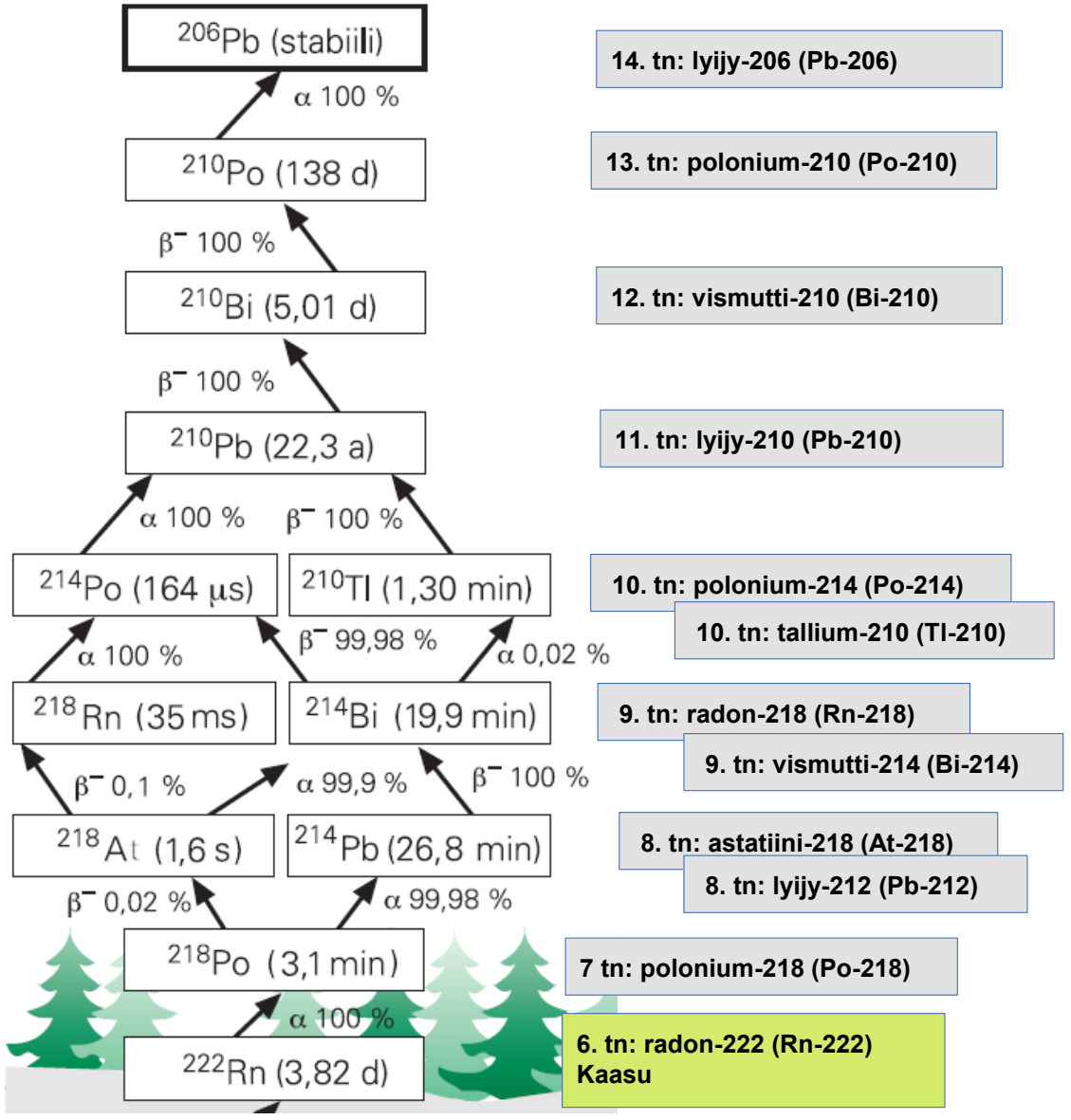
2. tn: protaktinium-234 (Pa-234)

1. tn (tytärnuklidi): torium-234 (Th-234)

Emonuklidi: uraani-238 (U-238)
U-238 on syntynyt maailmankaikkeudessa, aurinkokunnan muodostumisen aikana: Uraania oli mukana niissä kaasu- ja pölypilvissä, jotka tiivistyivät nykyiseksi aurinkokunnaksi ja maapalloksi noin 4,6 miljardia vuotta sitten.

Muutamia kysymyksiä tekoälylle:
- Miten U-238 syntyy
- Miten Pa-234m hajoaa

Uraanin hajoamissarja, loppuosa



14. tn: lyijy-206 (Pb-206)

13. tn: polonium-210 (Po-210)

12. tn: vismutti-210 (Bi-210)

11. tn: lyijy-210 (Pb-210)

10. tn: polonium-214 (Po-214)

10. tn: tallium-210 (Tl-210)

9. tn: radon-218 (Rn-218)

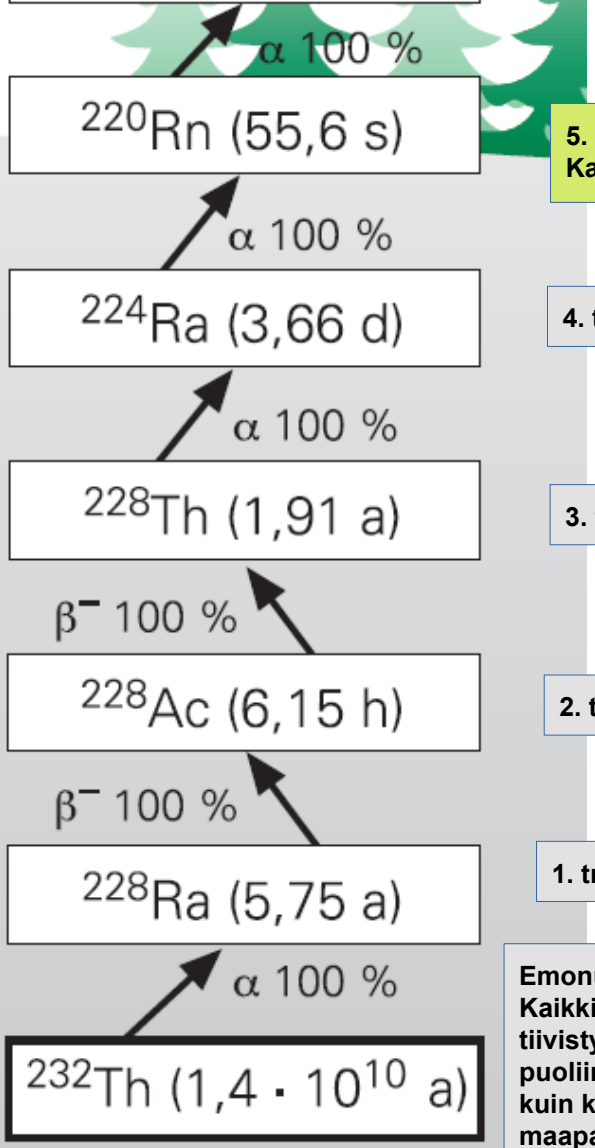
9. tn: vismutti-214 (Bi-214)

8. tn: astatiini-218 (At-218)

8. tn: lyijy-212 (Pb-212)

7 tn: polonium-218 (Po-218)

6. tn: radon-222 (Rn-222)
Kaasu



5. tn: radon-220 (Rn-220)
Kaasu

4. tn: radium-224 (Ra-224)

3. tn: torium-228 (Th-228)

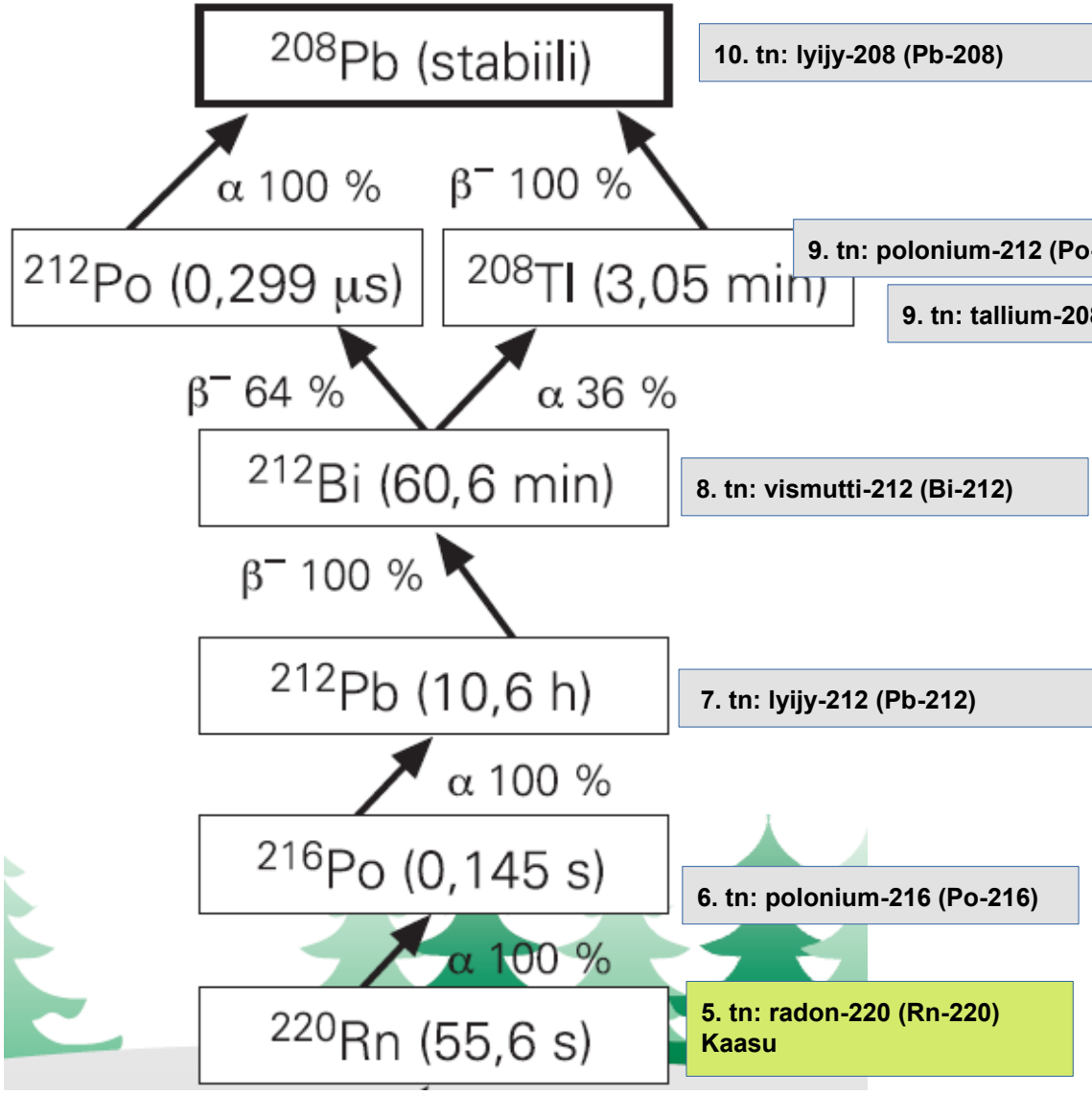
2. tn: aktinium-228 (Ac-228)

1. tn: radium-228 (Ra-228)

Toriumin Th-232 hajoamissarja, alkuosa

Emonuklidi: torium-232 (Th-232)
Kaikki maapallon torium on peräisin tästä samasta kosmisesta pölystä, josta aurinkokuntamme tiivistyi noin 4,6 miljardia vuotta sitten. Torium-232 on säilynyt nykypäivään asti, koska sen puoliintumisaika on poikkeuksellisen pitkä: noin 14,05 miljardia vuotta (mikä on hieman enemmän kuin koko universumin nykyinen ikä). Se hajoaa niin hitaasti, että alkuperäisestä toriumista on maapallolla jäljellä vielä noin 80 %.

Toriumin hajoamissarja, loppuosa



10. tn: lyijy-208 (Pb-208)

9. tn: polonium-212 (Po-212)

9. tn: tallium-208 (Tl-208)

8. tn: vismutti-212 (Bi-212)

7. tn: lyijy-212 (Pb-212)

6. tn: polonium-216 (Po-216)

5. tn: radon-220 (Rn-220)
Kaasu

Ulkoinen ja sisäinen säteily

Ulkoisessa säteilyssä olet säteilyn kohteena, sisäisessä säteilyssä kannat säteilyn lähdettä mukanasi. Sisäistä säteilyä pidetään yleisesti salakavalampana ja vaarallisempana hallita, vaikka loppujen lopuksi säteilyn vaarallisuus riippuu aina säteilyannoksen suuruudesta ja säteilyn tyypistä.

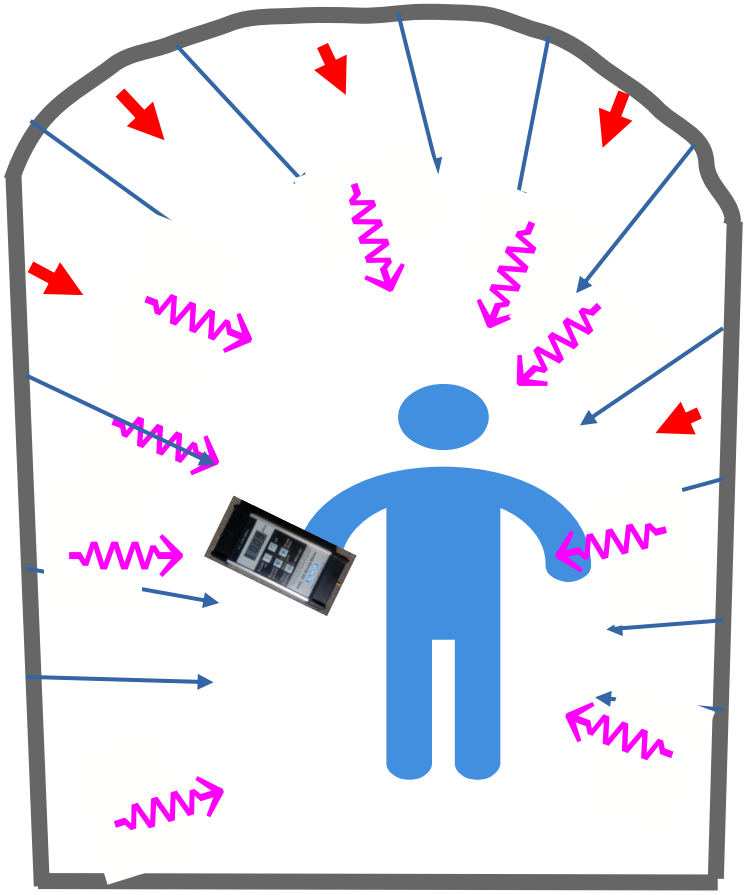
Kun kaivoksissa, tai sellaisissa paikoissa, missä säteilevät aineet pölyävät on aina riskinä että saa sisäisen säteilyaltistuman.

Altistumalta voi välttyä käyttämällä hyvälaatuista hengityssuojainta.

Vaikka tavallinen väestönsuojeluun tarkoitettu säteilymittari näyttää lähes tavallista taustasäteilyn arvoa, niin ilman pöly voi sisältää pitkäikäisiä alfasäteileviä pölyhiukkasia mitä mittari ei havaitse ollenkaan.
Sisäinen alfasäteily aiheuttaa helposti vakavan säteilyaltistuman.

Kysymyksiä tekoälylle:
1. Mitä on ulkoinen ja sisäinen säteily
2. Vertaa ulkoista ja sisäistä säteilyä
3. Kumpaa pidetään vaarallisempana

Ulkoinen säteily



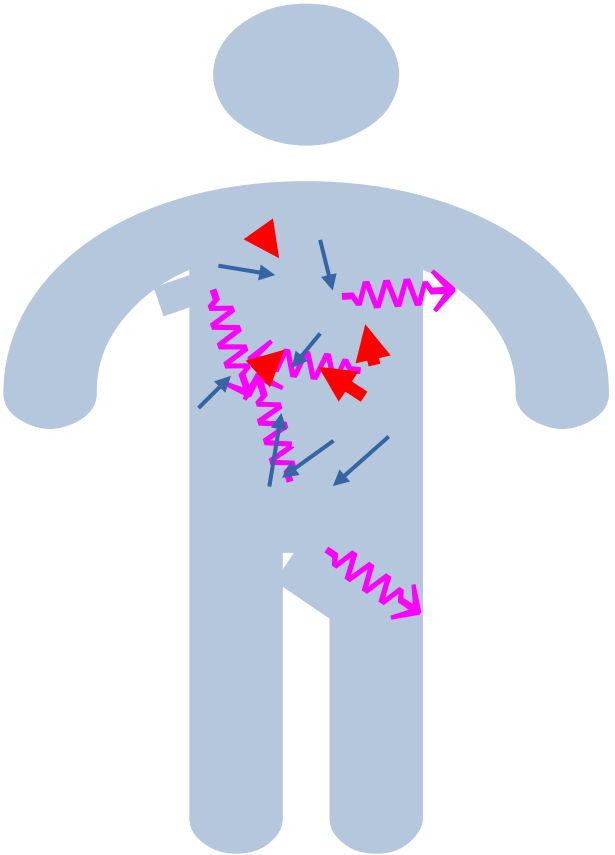
Kuvassa henkilöön kohdistuu ulkoinen säteily. Kaivoksen sisällä tavallinen väestön suojeluun tarkoitettu säteilymittari näyttää yleensä vain pientä säteilyn annosnopeutta, yleensä vain 1 – 10µSv/h.

Punainen nuoli kuvaa alfasädettä

Sininen nuoli kuvaa beetasädettä

Violetti nuoli kuvaa gammasädettä

Ulkoinen säteily



Kuvassa henkilöön kohdistuu sisäinen säteily.
Hengitysilman mukana kehon sisälle on kertynyt säteileviä pölyhiukkasia.
Säteilyturvallisuuden kannalta kehon sisälle joutuneet pitkäikäiset alfasäteilyä säteilevät hiukkaset ovat kaikkein vaarallisimpia.

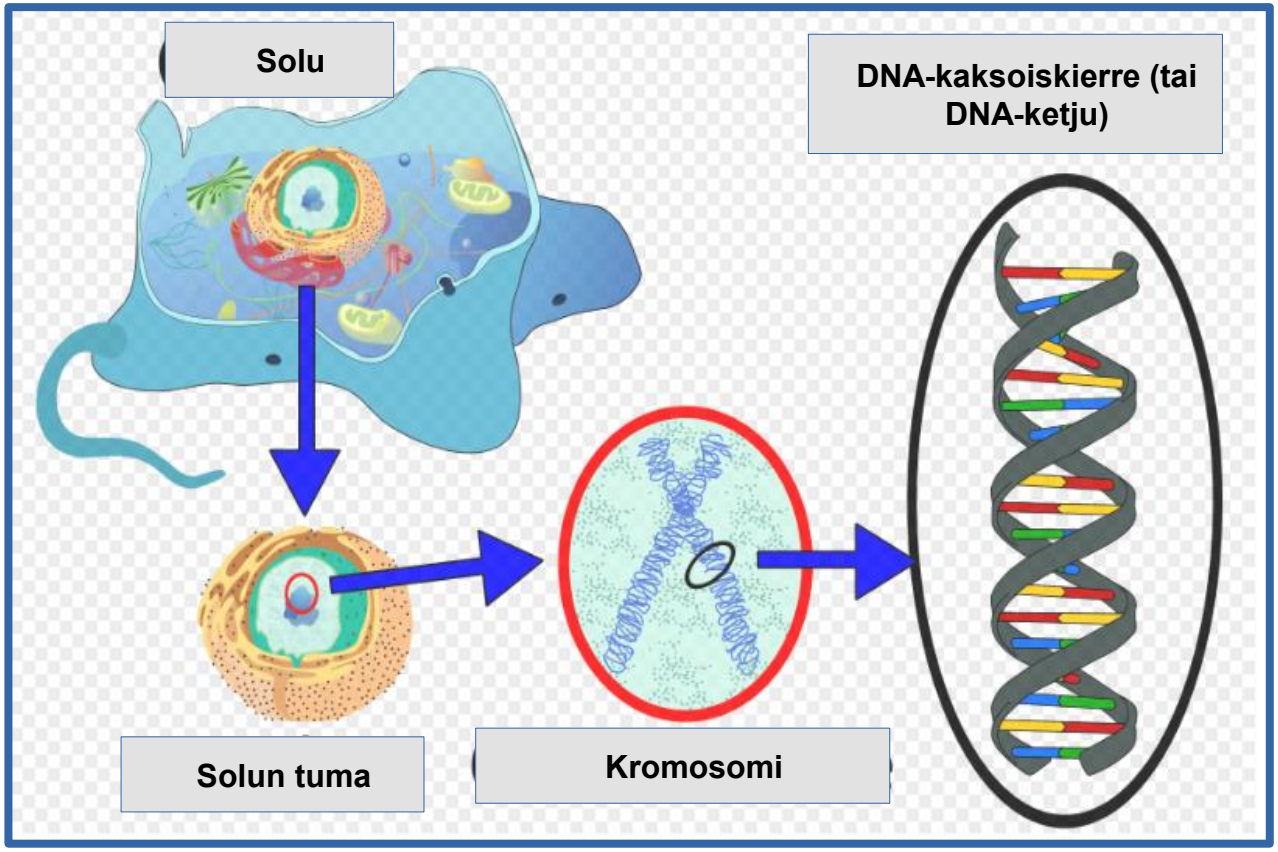
Punainen nuoli kuvaa alfasädettä

Sininen nuoli kuvaa beetasädettä

Violetti nuoli kuvaa gammasädettä

Säteilyn terveysvaikutukset

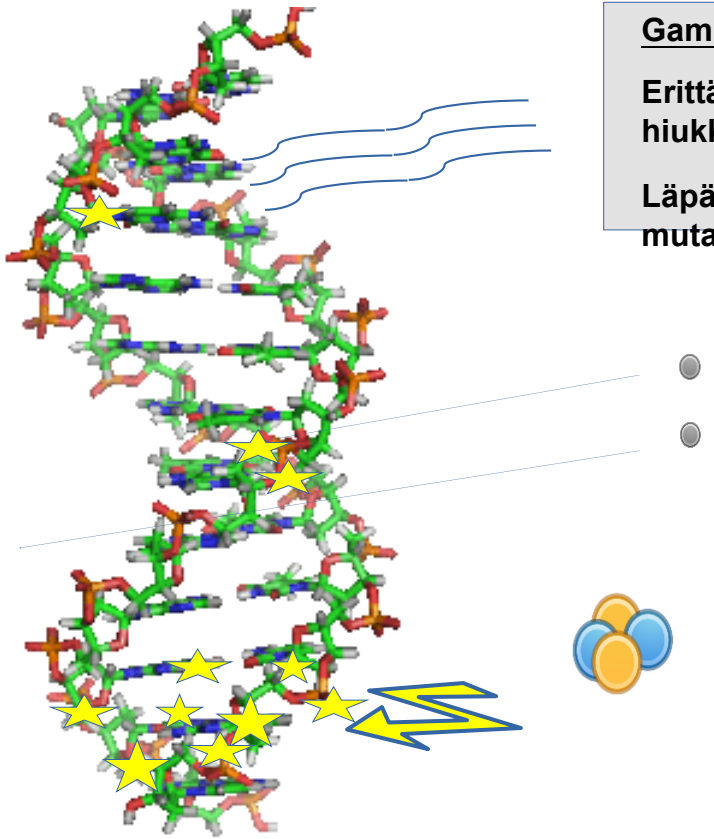
Alakuvassa on kaaviokuva solusta ja sen rakenneosista



Säteilyn terveysvaikutukset kaivoksissa työskenteleville

Alakuvassa on kaavio DNA-kaksoiskierteestä

Säteilyn aiheuttaa kaksoiskierteeseen vaurioita.



Gammasäteet:

Erittäin voimakasta, näkymätöntä valonkaltaista aallonliikettä (energiaa ilman hiukkasia).

Läpäisee helposti lähes kaikki materiaalit ja kehon kudokset. Voi aiheuttaa vaurioita ja mutaatioita DNA-ketjuun kulkiessaan sen läpi.

Beetasäteily

Pienten ja keveiden hiukkasten (elektronien) virta.

Läpäisykyky on rajallinen (pysähtyy esimerkiksi vaatteisiin tai ikkunalasiin). Voi vaurioittaa DNA-ketjua osuessaan siihen suoraan lähietäisyydeltä.

Alfasäteily

Suuria ja raskaita hiukkasia (heliumytimiä).

Ei läpäise edes paperia tai ihon pintaa, joten se on ulkoisesti vaaratonta. On kuitenkin erittäin tuhoisaa DNA-ketjuille, jos säteilyn lähde päätyy kehon sisälle esimerkiksi hengitysilman (kuten radonin), hengitysilman pölyn tai ruuan mukana.

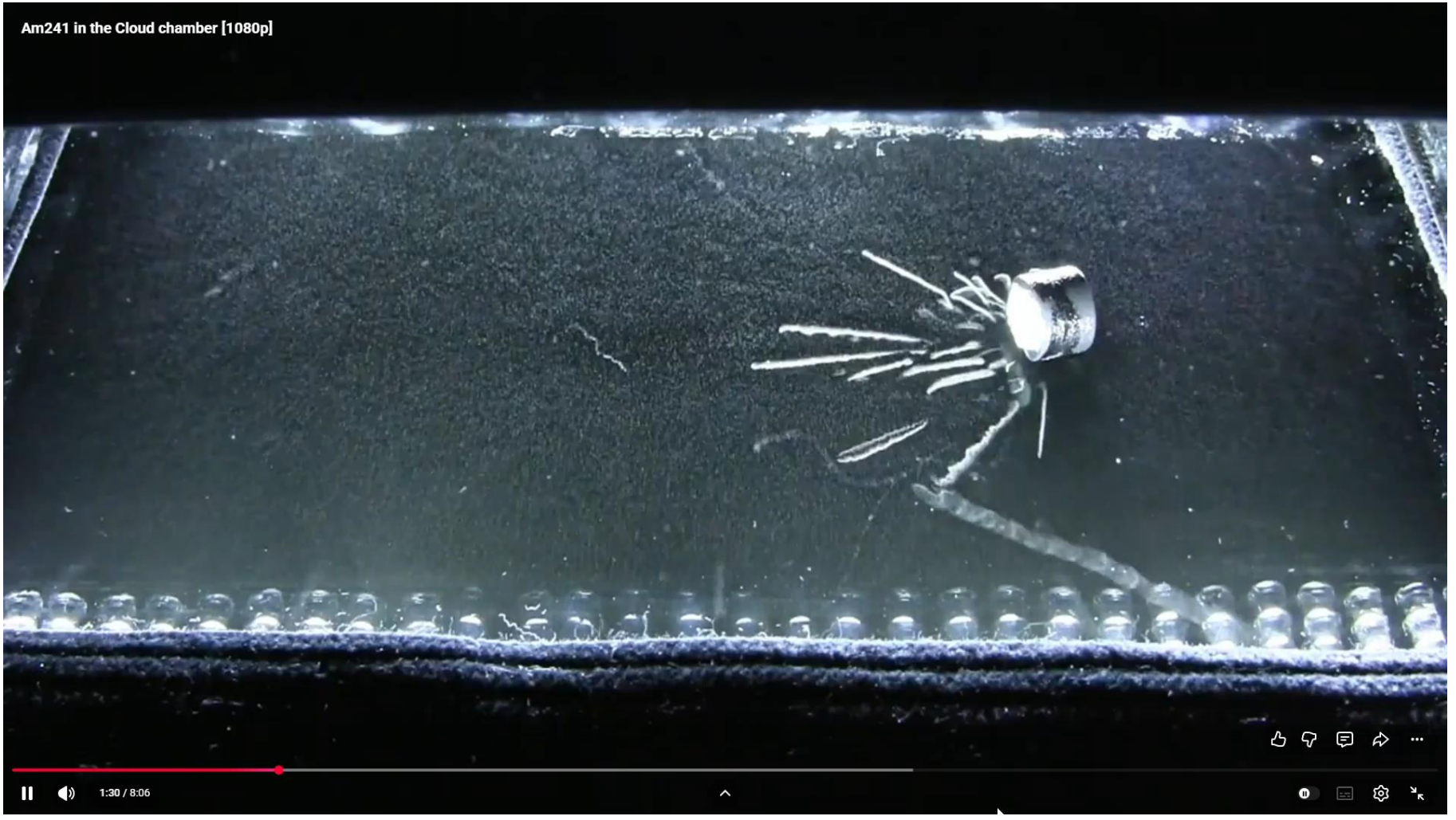
Mitä alfasäteily tekee sumukammiossa (cloud chamber)



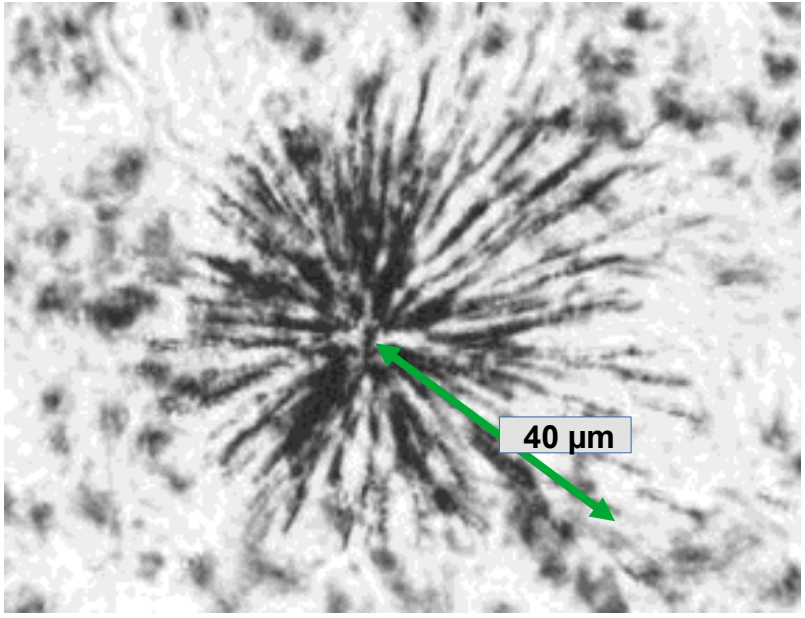
https://www.youtube.com/watch?v=Lp2b-OQEQ7c
Kuvan selosteessa kerrotaan että säteilevä aine olisi neptunium-237 (Np-237). Todellisuudessa kysymyksessä on kuitenkin Am-241 säteilylähde. Am-241 emonuklidina hajoaa Np-237:ksi ja se on voinut aiheuttaa sekaannusta.

$$^{241}_{95}\mathrm{Am} \rightarrow {}^{237}_{93}\mathrm{Np} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}^{2+}(\alpha)$$

Mikä on sumukammio
Sumukammio on pienehkön akvaarion näköinen laatikko, jossa alfasäteet ja muu hiukkassäteily tulevat näkyviksi ylikylläisessä alkoholihöyryssä.
Viereisessä kuvassa amerikium-241 (Am-241) palovaroittimen säteilylähde tuottaa alfasäteilyä, joka näkyy alkoholihöyryssä säteinä. Säteiden pituus on vain muutama senttimetri, koska alfasäteilyn kantama ilmassa on lyhyt.
Sumukammio on yksinkertainen laite ja sen voi rakentaa myös itse. Netistä löytyy paljon ohjeita miten kammion voi rakentaa.
On kuitenkin suositeltavampaa että käyttää säteilylähteenä punaista toriumseostettua tig-hitsauskoneen elektrodin pätkää palovaroittimen säteilylähteen sijaan. Punainen elektrodi säteilee myös alfasäteilyä, sillä se sisältää torium-232 (Th-232).
Am-241 on hyvin vaarallinen jos sitä joutuu käsille tai jopa kehon sisälle. Palovaroittimessa Am-241 säteilylähde on vain noin 1 x 1mm metallilastusta, ja se voi irrota kun säteilylähdettä purkaa. 1X1 mm metallilastua on vaikea löytää ilman hyvin herkkää säteilymittaria, jos lastu sattuu katoamaan.
Kysymyksiä tekoälylle:
Mikä on sumukammio jossa hiukkassäteily tulee näkyväsi ylikylläisessä alkoholihöyryssä?
Mitä tapahtuu kun hiukkassäde kulkee alkoholihöyryssä?


Am241 in the Cloud chamber [1080p]
1:30 / 8:06

Alfasäteilyä säteilevä pölyhiukkanen apinan keuhkoissa.



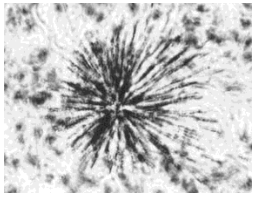
Alfatähden tuhoisa voima
Musta tähti esittää jälkiä, jotka ovat muodostuneet 48 tunnin aikana alfasäteistä, joita on lähettänyt apinan keuhkokudokseen pesiytynyt radioaktiivinen plutoniumhiukkanen (itse hiukkanen on näkymätön). Elävässä keuhkokudoksessa yksikin hiukkasen viereinen solu, joka vaurioituu tietyllä tavalla, voi myöhemmin muuttua syöpäsoluksi. Se leviää nopeasti keuhkoihin ja johtaa lähes varmaan kuolemaan.

Kuva visualisoi sen, miksi sisäänhengitetty plutonium on niin vaarallista. Vaikka alfasäteily ei läpäise edes paperia tai ihmisen ihoa ulkopuolelta, kehon sisälle joutuessaan se on tappavaa. Kuvan osoittama "tähti" pommittaa samoja ympäröiviä keuhkosoluja miljoonia kertoja päivästä toiseen. Tämä jatkuva solutuho ja DNA-vaurio johtaa erittäin suurella todennäköisyydellä keuhkosyöpään.

Kuvan lähde:
Canadian Coalition for Nuclear Responsibility
https://www.ccnr.org/index.html#dir

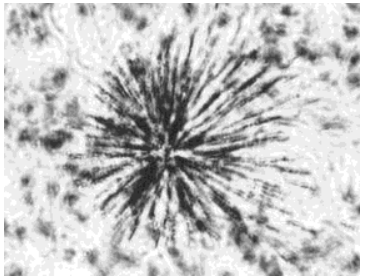
Anna hakukenttään hakusana APE (apina) -->
What does alpha radiation look like?
Alpha Rays from a Radioactive Particle in Lung Tissue
https://ccnr.org/alpha_in_lung.html

Kuvassa alfahiukkasen kantama on noin 40 µm
(40 mikrometri = 0,040 mm)



Mitä tuossa kuvassa oikein tapahtuu
Kuvassa näkyy yksittäisen plutoniumhiukkasen aiheuttama mikroskooppinen tuho elävässä kudoksessa.
Kyseessä on autoradiografia eli menetelmä, jossa kudoksessa oleva näkymätön säteily saadaan näkyväksi valokuvausfilmin (emulsion) avulla.
Tässä on yksinkertaistettu selitys siitä, mitä kuvassa tarkalleen ottaen tapahtuu:
1. Hiukkanen on jumissa keuhkoissa
Keskellä oleva piste (josta viivat alkavat) on plutonium-239-pölyhiukkanen. Se on pieni, mikroskooppinen ja silmälle näkymätön. Kun apina on hengittänyt tätä radioaktiivista pölyä, hiukkanen on jäänyt pysyvästi kiinni keuhkorakkuloiden kudokseen.
2. Jatkuva alfapommitus
Plutonium on epävakaa alkuaine, joka pyrkii muuttumaan stabiiliksi lähettämällä alfasäteilyä.
Kuvassa näkyvät mustat, suorat piikit ovat alfahiukkasia, jotka sinkoutuvat plutoniumhiukkasesta suoraan ulospäin joka suuntaan.
Koska kyseessä on alfasäteily (joka koostuu raskaista heliumytimistä), hiukkaset ovat erittäin massiivisia ja tuhoisia, mutta ne eivät pääse kovin pitkälle. Ne etenevät kudoksessa vain muutaman solun paksuisen matkan ja pysähtyvät sitten.

3. Miksi jäljet näkyvät "tähtenä"?
Tutkijat ottivat ohuen siivun apinan keuhkoa ja peittivät sen valoherkällä emulsiolla (kuin kameran filmillä).
Kuvaa valotettiin 48 tuntia.
Tänä aikana hiukkasesta ehti sinkoutua tuhansia alfahiukkasia.
Jokainen alfahiukkanen toimi kuin mikroskooppinen luoti, joka poltti filmille mustan viivan.
Koska säteilyä lähtee tasaisesti kaikkiin suuntiin, lopputuloksena on kuvaan piirtynyt "alfa-tähti".



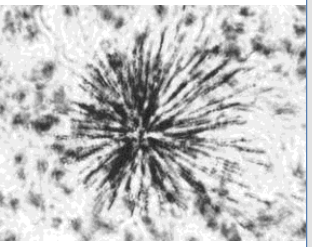
Arvio kuvan pölyhiukkasen alfa-aktiivisuudesta.

Kuvassa näkyvän plutoniumhiukkasen alfa-aktiivisuus on äärimmäisen pieni – arviolta vain noin 0,0012 becquereliä (Bq).
Tämä tarkoittaa, että hiukkanen lähettää keskimäärin vain yhden alfahiukkasen jokaista 10 - 15 minuuttia kohden.

Perustelu ja laskelma tälle arviolle rakentuvat seuraavasti:
1. Jälkien määrän laskeminen
Kun kuvasta lasketaan keskipisteestä ulospäin suuntautuvat mustat viivat (alfahiukkasten jäljet), niitä voidaan erottaa noin 100 kappaletta.

2. Altistusajan huomioiminen
CCNR:n artikkelin tietojen mukaan kuvan valotusaika oli 48 tuntia.
48 tuntia on sekunteina 48 × 3600 = 172 800 sekuntia.
Jos filmille tallentui noin 100 jälkeä tämän ajan kuluessa, hiukkasesta irtosi filmille keskimäärin 0,00579 alfahiukkasta sekunnissa.

3. Kolmiulotteisuuden korjaus (Geometria)
Valokuvausfilmi (emulsio) on asetettu kudosnäytteen päälle tasomaisesti. Koska plutoniumhiukkanen säteilee alfahiukkasia pallomaisesti kaikkiin kolmeen ulottuvuuteen (3D), filmi pystyy tallentamaan vain ne hiukkaset, jotka lensivät ylöspäin kohti filmiä. Noin puolet hiukkasista lensi alaspäin syvemmälle kudokseen.
Kun rekisteröityjen jälkien määrä kerrotaan kahdella, saadaan hiukkasen todellinen kokonaispurkausmäärä.
0,00579 x 2 = 0,0012 Bq (eli 1,2 millibecquereliä)



Mitä 1,2 mBq aktiivisuus käytännössä tarkoittaa?

Käytännössä 1,2 millibecquerelin (mBq) aktiivisuus tarkoittaa sitä, että kyseinen plutoniumhiukkanen on erittäin "hiljainen" ja lähettää säteilyä äärimmäisen harvoin, mutta se tekee sitä pistemäisesti ja taukoamatta vuosikymmenien ajan. Tässä on avattu viiteen helposti ymmärrettävään kohtaan, mitä tämä luku tarkoittaa käytännössä:

1. Säteilypurkausten harvuus

Becquerel (Bq) tarkoittaa yhtä radioaktiivista hajoamista sekunnissa. Kun aktiivisuus on 1,2 mBq, hiukkasessa tapahtuu vain noin yksi hajoaminen jokaista 10 - 15 minuuttia kohden (eli noin 100 hajoamista vuorokaudessa). Suurimman osan ajasta hiukkanen on täysin hiljaa, kunnes siitä yhtäkkiä sinkoutuu yksi alfahiukkanen.

2. Äärimmäisen pieni massa

Tämä aktiivisuus paljastaa, että kyseessä on käsittämättömän pieni hiukkanen. Plutonium-239:n kohdalla 1,2 mBq aktiivisuus vastaa vain noin 0,00000000049 milligrammaa (eli 0,49 pikogrammaa) plutoniumia. Se on niin pieni pölyhiukkanen, että sitä ei voi nähdä edes tavallisella laboratoriomikroskoopilla ilman sen jättämiä säteilyjälkiä.

3. Kyseessä on "paikallinen mikroskooppinen tykistö"

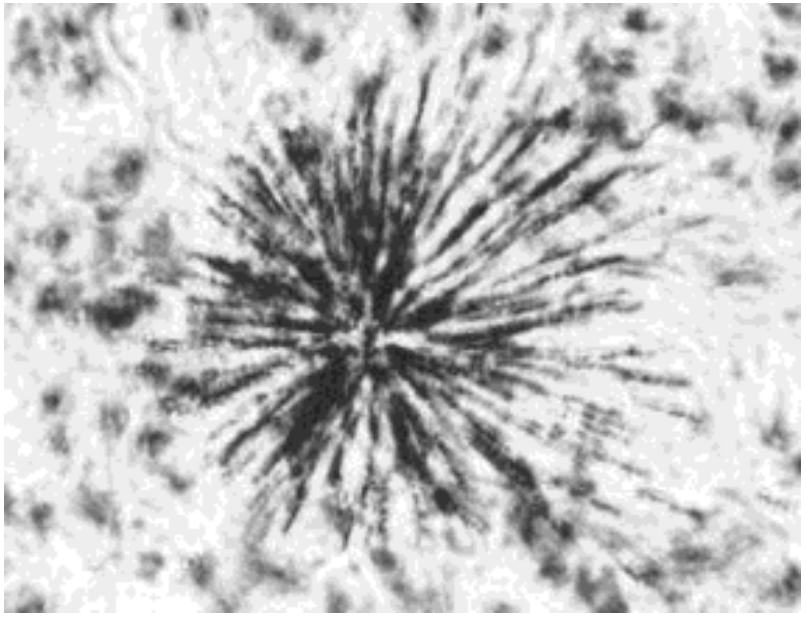
Vaikka säteilyä lähtee harvoin, sen tuhoisuus perustuu siihen, mihin se osuu. Jos tämä sama säteilyenergia jaettaisiin tasaisesti koko kehoosi, se olisi täysin vaaratonta. Koska hiukkanen on jumissa keuhkorakkulan seinämässä, se ei liiku minnekään. Kaikki 200 alfahiukkasta, jotka siitä vuorokaudessa sinkoutuvat, iskeytyvät täsmälleen samoihin muutamaan kymmeneen viereiseen soluun vuodesta toiseen.

4. Solutason "Lekavasara"

Alfahiukkanen on atomitason mittakaavassa valtavan raskas ja energinen (kuin raskas kuorma-auto verrattuna beeta-säteilyn "polkupyörään"). Kun se 10 -15 minuutin välein iskeytyy viereiseen soluun, se repii sen DNA-ketjut peruuttamattomasti rikki. Solu ei ehdi korjata itseään kunnolla ennen seuraavaa iskua.

5. Elinikäinen riski

Koska plutonium-239:n puoliintumisaika on 24 110 vuotta, hiukkasen aktiivisuus ei heikkene ihmisen eliniän aikana lainkaan. Se jatkaa täsmälleen samalla 1,2 mBq teholla keuhkojen pommittamista 10, 30 tai 50 vuotta – eli niin kauan kuin henkilö elää. Tämä jatkuva solujen vaurioituminen ja virheellinen korjaantuminen johtaa lopulta siihen, että jokin soluista muuttuu syöpäsoluksi.



Miksi näin pieni aktiivisuus on vaarallinen?

Vaikka 0,0012 Bq kuulostaa mitättömältä verrattuna esimerkiksi banaanin luonnolliseen kalium-aktiivisuuteen (noin 15 Bq), ero piilee energian keskittymisessä:
Banaanin säteily jakautuu tasaisesti ympäri kehoa ja poistuu nopeasti.
Tämä plutoniumhiukkanen on pysyvästi paikallaan yhdessä kohdassa. Se pommittaa samoja muutamia kymmeniä soluja sekunnista, tunnista ja vuodesta toiseen plutonium-239:n pitkän (24 110 vuoden) puoliintumisajan vuoksi. Solut saavat tästä pistemäisestä lähteestä valtavan, jatkuvan säteilyannoksen, mikä vaurioittaa niiden DNA-rakennetta.

1											
2		Pu-239, U-238 ja Th-232 vertailu									
3											
4		Isotooppi	Alfasäteilyn energia (keskiarvo)	Kantama keuhkokudoksessa	Puoliintumisaika		Annosmuunto-kerroin Tyyppi S (Hidas liukeneminen)	Alfasäteiden määrä / Bq ilman tytärnuklidej a		Annosmuunto-kerroin Kivipöly jonka tyttäret tasapainossa	Alfasäteiden määrä / Bq Tytärnuklidit mukaan-luettuna
5			[MeV]	[µm]	[Vuotta]		[µSv/Bq]	[kpl/Bq]		[µSv/Bq]	[kpl/Bq]
6											
7		Pu-239	5,15–5,24	Noin 40	24110		16	1		16	1
8		U-238	4,20–4,27	Noin 30	4,5 miljardia		12	1		41	8
9		Th-232	3,95–4,01	Noin 28	14 miljardia		54	1		88	6

Miksi koetilanteissa käytetään plutoniumia eikä uraania tai toriumia?

Taulukosta voi nähdä että plutoniumin puoliintumisaika (24110 vuotta) on selvästi lyhyempi kuin uraanin ja toriumin. Sen vuoksi plutoniumin ominaisaktiivisuus on paljon suurempi kuin uraanin ja toriumin.
Painossa plutoniumia tarvitaan siis huomattavasti vähemmän kuin uraania ja toriumia.
Jos koe-eläimen suonee ruiskutetaan esimerkiksi 1 MBq (1 000 000 Bq) aktiivisuus plutoniumia, niin sen paino on noin 1,5 g.
Jos vastaava aktiivisuus olisi ollut U-238 niin sen paino olisi 80 g ja vastaavasti Th-232 246 g.

Vertailutaulukko

Pu-239 = plutonium-239
U-238 = uraani-238
Th-232 = torium-232

Kaikilla samaa suuruusluokka olevat säteilyn energiat. Tämän vuoksi kantamatkin ovat suurin piirtein samat.

Pu-239 puoliintumisajassa on merkittävä ero. Tämän vuoksi plutoniumin ominaisaktiivisuus on huomattavasti suurempi kuin muilla. Tämä ei kuitenkaan muuta tilannetta kun aktiivisuus on kaikilla sama esim. 1Bq. Silloin vain massan määrässä Pu-239:a olisi huomattavasti vähemmän kuin muita.

Annosmuuntokerroin [µSv/Bq] ilman tytärnuklideja 16, 12 ja 54 ovat samaa suuruusluokkaa. Muuntokertoimet on saatu ICRP:n uusimmista OIR 137 ja 141 malleista. ICRP on muuttanut Th-232 arvoa korkeammaksi viimeisimmissä päivityksissä.

Kun tytärnuklideja ei huomioida, niin säteilevien alfahiukkasten määrä on sama kaikilla kun aktiivisuus on sama 1Bq.

Kun kysymyksessä on annosmuuntokerroin kivipölystä, missä U-238 ja Th-232 tyttäret ovat tasapainossa, niin yhteenlaskettu muuntokerroin kasvaa. Kasvu johtuu siitä, että tyttäret säteilevät myös. Esimerkiksi U-238 alfojen määrä kasvaa 1 > 8 kpl/Bq. Taulukossa kivipölysarakkeessa annosmuuntokerroin tarkoittaa emonuklidin ja sen tyttärien yhteenlaskettua annosmuuntokerrointa.

Annosmuuntokertoimien määrittelyssä on käytetty valintoja:
- Mallit ICRP OIR 137 ja 141
- Aikuinen ihminen
- Työntekijä
- Hiukkaskoko 5µm
- Hengityksen kautta saatu altistuminen, eli kun on hengitetty esimerkiksi säteilevää kivipölyä

Esimerkkitapaus: Säteilyannoksen arviointi kaivoksessa 1/2

Kaivoksessa malmikiven U-238 aktiivisuuspitoisuus on 1000 Bq/kg ja Th-232 aktiivisuuspitoisuus on 5000 Bq/kg. Henkilö työskentelee kaivoksessa yhden vuoden ajan (työaika vuodessa 1000 h). Ilman pölypitoisuus on 1 mg/m³ ja hengitetyn ilman määrä 1 m³/h.

1. Altistuminen ilman hengityssuojainta

U-238 aktiivisuuspitoisuus: 1000 Bq/kg = 1 Bq/g

Th-232 aktiivisuuspitoisuus: 5000 Bq/kg = 5 Bq/g

Vuoden työskentelyn aikana työntekijän keuhkoihin päätyvän kivipölyn kokonaismassa on:

1000 h × 1 m³/h × 1 mg/m³ = 1000 mg = 1 g pölyä. Tässä pölygrammassa olevat emonuklidien aktiivisuudet ovat:

U-238: 1 Bq/g × 1 g = 1 Bq

Th-232: 5 Bq/g × 1 g = 5 Bq

Kivipölyssä oletetaan emonuklidien ja tytärnuklidien olevan täydellisessä sekulaarisessa tasapainossa. Sen vuoksi käytetään ICRP OIR 137 -mallin mukaisia kokonaisketjun annosmuuntokertoimia (aikuinen työntekijä, hengitys, hiukkaskoko 5 µm, tyyppi S):

U-238-ketju: 41 µSv/Bq

Th-232-ketju: 88 µSv/Bq

Työntekijän saama sitoutunut efektiivinen säteilyannos vuodessa:

U-238-ketju: 1 Bq × 41 µSv/Bq = 41 µSv

Th-232-ketju: 5 Bq × 88 µSv/Bq = 440 µSv

Yhteenlaskettu säteilyannos: 41 µSv + 440 µSv = 481 µSv

Jos kaivoksessa työskentelevää henkilöä ei ole luokiteltu säteilytyöntekijäksi, hänen vuoden aikana saamansa työstä aiheutuva säteilyannos ei saa ylittää väestörajaa 1000 µSv/vuosi. Arvo alittaa rajan kirkkaasti.

Vertailun vuoksi: jokainen suomalainen saa sisäilman radonin, muun luonnon taustasäteilyn ja lääketieteellisen käytön vuoksi keskimäärin 5 900 µSv säteilyannoksen vuodessa [STUK]. Ilman suojainta saatu annos työstä (481 µSv) on noin 8 % (noin 1/12-osa) suomalaisten keskimääräisestä vuotuisesta kokonaisannoksesta.

Esimerkkitapaus: Säteilyannoksen arviointi kaivoksessa 2/2

Kaivoksessa malmikiven U-238 aktiivisuuspitoisuus on 1000 Bq/kg ja Th-232 aktiivisuuspitoisuus on 5000 Bq/kg. Henkilö työskentelee kaivoksessa yhden vuoden ajan (työaika vuodessa 1000 h). Ilman pölypitoisuus on 1 mg/m³ ja hengitetyn ilman määrä 1 m³/h.

2. Hengityssuojauksen vaikutus

Käytännön työssä työntekijän todellista altistumista vähennetään merkittävästi hengityksensuojaimilla. Kivipölyä vastaan kaivoksissa käytetään tyypillisesti P3-luokan hiukkassuodattimia (esim. FFP3-maskia).
P3-suodatin pidättää vähintään 99 % ilmassa olevista hiukkasista, jolloin keuhkoihin asti pääsee 1 gramman sijaan vain 0,01 g pölyä vuodessa.
Koska suojain leikkaa hengitetyn pölymassan sadasosaan, saatu vuotuinen säteilyannos putoaa samassa suhteessa:
481µSv / 100 = 4,81µSv
Säännöllisellä suojaimen käytöllä työstä aiheutuva vuotuinen säteilyannos putoaa alle 5 µSv:iin, mikä on enää noin 1/12-osa suomalaisen keskimääräisestä tausta-annoksesta [STUK]. Suojauksen ansiosta työntekijän riski jää häviävän pieneksi.

Tätä laskentaesimerkkiä voidaan käyttää joustavana dynaamisena pohjana säteilyannoksen arviointiin aina, kun kaivoksen ilman pölymäärät tai malmin aktiivisuuspitoisuudet muuttuvat.

Säteilyaltistuksen pitkäaikaiset vaikutukset ja syöpäriski

Sisäänhengitetyn kivipölyn sisältämän uraanin ja toriumin kokonaisaktiivisuudet ovat vuodessa suhteellisen pieniä. Koska kyseessä on hitaasti liukenematon kivipöly (liukoisuusluokka Tyyppi S), hiukkaset eivät leviä verenkierron mukana ympäri kehoa. Ne jäävät pysyvästi paikallisesti keuhkokudokseen ja sen imusolmukkeisiin, missä ne altistavat ympäröiviä soluja jatkuvalle säteilylle.

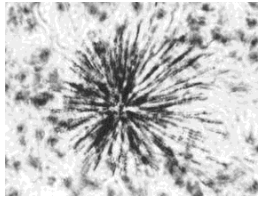
Uraanin ja toriumin erittäin pitkien puoliintumisaikojen vuoksi yksittäisessä mikroskooppisessa pölyhiukkasessa tapahtuu alfahajoamisia verrattain harvoin. Kudokseen kohdistuva rasitus on kuitenkin pitkäkestoista:

- Annoksen jatkuva kertyminen: Keuhkoihin sitoutunut pöly ei poistu, vaan se pommittaa ympäröiviä soluja alfahiukkasilla passiivisesti vuosikymmenten ajan – myös sen jälkeen, kun työskentely kaivoksessa on jo lopetettu.

- Solutason vauriot: Alfasäteily on erittäin tiheästi ionisoivaa. Yksikin alfahiukkasen osuma voi vaurioittaa solun DNA-ketjua korjauskelvottomasti.

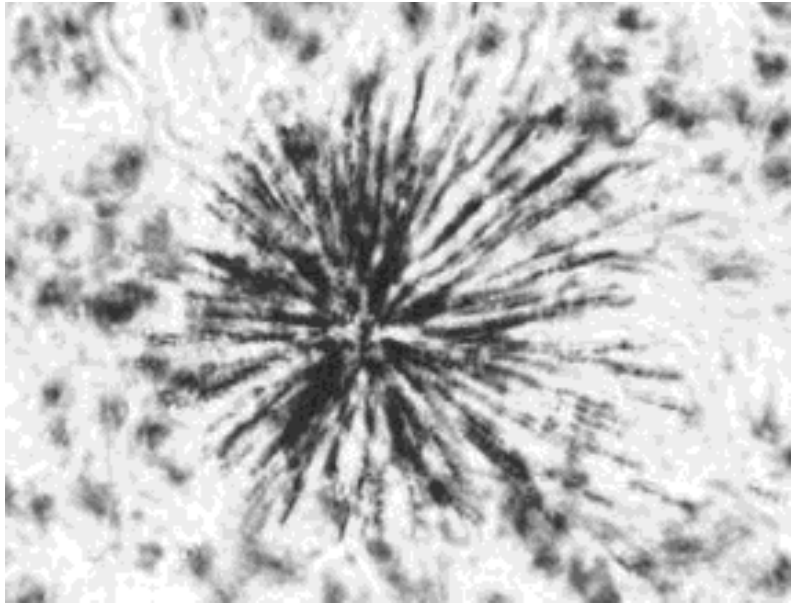
- Monivuotinen biologinen prosessi: Syövän kehittyminen vaurioituneesta solusta kliinisesti havaittavaksi kasvaimeksi vaatii useita peräkkäisiä mutaasia ja vie biologisena prosessina vuosia.

Tämä mekanismi selittää sen, miksi uraanikaivoksissa työskennelleet henkilöt pysyvät usein täysin terveinä koko työuransa ajan. Säteilyn aiheuttama keuhkosyöpä kehittyy tyypillisesti vasta 10 – 30 vuoden latenssiajan eli viiveen kuluttua ensialtistuksesta. Historiallisesti tämä pitkä viive johti siihen, että varhaisilla uraanikaivoksilla pölyn vaarallisuutta ei aluksi ymmärretty. Kun sairastumiset tulivat esiin vasta vuosikymmeniä myöhemmin työntekijöiden eläkeiässä, keuhkosyöpien syynä pidettiin usein pelkkää tupakanpolttoa. Koska tupakointi oli tuohon aikaan erittäin yleistä, kaivospölyn ja sen sisältämän säteilyn todellinen osuus syöpien aiheuttajana peittyi vuosiksi. Myöhempi tutkimus on kuitenkin osoittanut, että kiven radioaktiiviset aineet ja tupakointi voimistavat toisensa vaikutusta (synergistinen efekti), mikä moninkertaistaa tupakoivan kaivosmiehen syöpäriskin.



Käytännössä tämä tarkoittaa, että kuvassa näkyvään alfatähteen (piikkipalloon), missä piikit ovat alfasäteilyn jättämiä jälkiä, uusia piikkejä syntyy hyvin harvakseltaan.
Uusia alfajälkiä voi syntyä vain muutamia kappaleita kuukauden tai jopa vuoden aikana.

Visuaalinen esimerkki: "Alfatähti" kudoksessa
Ilmiötä voidaan havainnollistaa mikroskooppikuvilla keuhkokudoksesta, johon on jäänyt radioaktiivinen hiukkanen. Kuvassa näkyvä "piikkipallo" eli alfatähti syntyy, kun yksittäisestä mikroskooppisesta pölyhiukkasesta sinkoutuu alfahiukkasia eri suuntiin jättäen jälkeensä suoria säteilyvauriojälkiä.
Käytännössä uraanin ja toriumin hitaan hajoamisen vuoksi tähän piikkipalloon syntyy uusia piikkejä hyvin harvakseltaan – kenties vain muutamia kappaleita kuukaudessa tai vuodessa. Yksittäinen solu tai sen lähellä olevat naapurisolut eivät siis saa jatkuvaa "keskitystä tulitusta", vaan vauriot tapahtuvat pitkin väliajoin. Koska altistus kuitenkin jatkuu vuosikymmenestä toiseen ilman taukoja, piikkien (ja siten soluvaurioiden) kokonaismäärä kasvaa salakavalasti, mikä lopulta laukaisee syövän syntymisen.



Eläinkokeet Yhdysvalloissa

Kylmän sodan aikana Yhdysvalloissa tehtiin laajoja eläinkokeita kun haluttiin selvittää säteilevien aineitten vaikutuksia ihmisiin. Eläinkokeissa käytettiin lähinnä hiiriä ja rottia, mutta laajoja kokeita tehtiin myös beaglekoirilla.

Beaglekoirille tehdyistä kokeiden yhteenvedosta on kirjoitettu kirja :
ROY C. THOMPSON
Life-span effects of ionizing radiation in the beagle dog

PDF-muotoisena tiedostona sen voi ladata netistä osoitteesta:
U.S. Department of Energy
Office of Scientific and Technical Information
https://www.osti.gov/biblio/6073442





Eläinkokeet beagle-koirilla

Yhteensä kokeessa oli koiria 136 kpl. 135 niistä kuoli kokeitten aikana, mutta vain 51 kuoli suoraan kokeitten aiheuttamaan sairauteen.

	Altistus Bq / 1 kg	Altistus 12 kg painavalle koiralle	Altistetut eläimet	Kuolleet eläimet	Elinkaari altistuksen jälkeen (mediaani)	Luukas-vaimet	Luukas-vaimet	Keuhkokas-vaimet	Keuhkokas-vaimet	Säteilypneu-moniitti-kuolemat	Säteilypneu-moniitti-kuolemat
	[Bq / kg]	[Bq]	[kpl]	[kpl]	[VUOTTA]	[kpl]	[%-osuus kaikista]	[kpl]	[%-osuus kaikista]	[kpl]	[%-osuus kaikista]
1	0	0	20	20	12,7	0	0	4	20	0	0
2	11	133	24	24	12,8	1	4	1	4	0	0
3	74	888	21	21	13,2	1	5	4	19	0	0
4	259	3 108	20	19	12,9	0	0	10	53	0	0
5	962	11 544	22	22	10,1	0	0	16	73	0	0
6	3 330	39 960	21	21	6,3	0	0	20	95	2	10
7	22 200	266 400	8	8	1,5	0	0	1	13	7	88
			136	135							

1970 ^{239}Pu (Pu-239)
Yksittäinen plutoniumoksidiaerosolin sisäänhengitys, keskimääräinen hiukkaskoko, keskimääräinen GSD 1,9;
14–22 kuukauden ikäisiä uros- ja naaraskoiria, jotka otettiin mukaan kokeeseen vuosina 1970–1972.
Tulokset 30. 9.87 tilanteen mukaan (Asiakirja PNL-6500 Pt 1).

Kirjassa kohta : 8.4.3



Eläinkokeet beagle-koirilla

Yhteensä kokeessa oli koiria 75 kpl. Koirista kuoli 49 kpl kokeitten aikana ja ennenaikaisesti niistä kuoli ainakin 24 kpl säteilyn aiheuttamiin sairauksiin.

	Annettu aktiivisuus annostus suhteessa painoon	Kokonaisaktiivisuus 12 kg painavalle koiralle	Koirien määrä	Kuolleitten koirien määrä	Elinaika injektion jälkeen	Luukasvaimet		Maksakasvaimet	
	[Bq/kg]	[Bq]	[kpl]	[kpl]	[vuota, mediaani]	[kpl]	[%-osuus kaikista koirista]	[kpl]	[%-osuus kaikista koirista]
1	0	0	8	7	12,6	0	0	0	0
2	185	2 220	11	4	> 11,5	0	0	0	0
3	592	7 104	10	5	> 10,5	0	0	0	0
4	1 850	22 200	11	4	> 10,9	1	25	1	25
5	3 700	44 400	11	5	> 10,1	1	33	1	33
6	11 100	133 200	12	12	7,1	8	67	2	17
7	111 000	1 332 000	12	12	3,5	12	100	0	0
			75	49					

1972 ^{239}Pu (Pu-239)
Yksittäinen suonensisäinen (intravenoosinen) injektio plutoniumsitraattiliuosta; 2,9–3,5 kuukauden ikäisiä uros- ja naaraskoiria, jotka otettiin mukaan kokeeseen vuosina 1972–1978.
Tulokset syyskuun 1987 tilanteen mukaan (Asiakirja COO-119-263).

Kirjan kohta: 8.1.9

Eläinkokeista johdettu radiobiologinen riskinarviointi ihmiselle

Eläinkokeista johdettu radiobiologinen riskinarviointi ihmiselle

Vertailemalla Roy C. Thompsonin teoksen Life-Span Effects of Ionizing Radiation in the Beagle Dog (1989) taulukoita voidaan havaita, että 0,05 µCi/kg (1,85 kBq/kg) on havaittava kynnystaso sille, että beagle-koirille alkaa kehittyä säteilyn aiheuttamia kasvaimia.

Ihmisen elinikä on kuitenkin huomattavasti pidempi kuin beaglen keskimääräinen 12 vuoden elinaika. Koska pitkäikäiset alfa-säteilijät, kuten uraani (U-238), torium (Th-232) ja plutonium (Pu-239), eivät poistu helposti elimistöstä, ne jatkavat kudosten säteilyttämistä ihmisessä paljon pidempään kuin koirassa.

Esimerkkilaskelma altistumisajasta ja annoskertymästä:

Lähtökohta: Oletetaan havaittavaksi kynnystasoksi sekä ihmiselle että koiralle sama elimistöpitoisuus: 1,85 kBq/kg (Pu-239).

Aikatekijä: Ihminen elää altistumisen alkamisen jälkeen noin 50 vuotta, kun taas beagle-koira elää kokeessa altistumisen jälkeen keskimäärin 10 vuotta.

Kumulatiivinen annos: Mikäli säteilevä aine ei poistu kehosta biologisen puoliintumisen kautta, ihminen ehtii pitkän elinaikansa vuoksi kerätä kudoksiinsa viisi kertaa suuremman kumulatiivisen säteilyannoksen (Gy/Sv) kuin koira samasta pitoisuudesta.

Tämän vuoksi ihmisen elinikä ja altistumisaika on välttämätöntä huomioida, kun ihmiselle asetetaan sisäisen aktiivisuuden kynnys- tai turvarajoja (Bq/kg). Edellä mainitussa lineaarisessa esimerkkiskenaariossa ihmisen kynnystason tulisi olla vähintään viisi kertaa pienempi kuin koiran vastaava arvo, jotta elinaikana kertyvä kokonaisannos kompensoitaisiin.

Johtopäätökset ja turvakertoimet

Ihmisen ja koiran välillä on lisäksi fysiologisia ja metabolisia eroja (kuten solujen jakautumisnopeus ja elinkaari), joiden vuoksi ihmisen kynnystason on oltava vieläkin matalampi. Jotta kasvaimien syntymiseltä vältyttäisiin varmuudella, arvioon on sisällytettävä merkittävä viranomaiskohtainen varmuusvara.

Kuinka monta milligrammaa luonnonuraania tai toriumia tarvitaan kehossa tuottamaan tämä 20–200 Bq/kg aktiivisuus?

Luonnonmateriaalien radioaktiivisuus on erittäin matala niiden pitkän puoliintumisajan vuoksi, joten tarvittavat määrät mitataan milligrammoissa. Laskelmissa käytetään luonnonuraanin ominaissäteilyä (noin 25 Bq/mg) ja luonnontoriumin/Th-232:n ominaissäteilyä (noin 4,1 Bq/mg).

1. Määrä yhtä painokiloa kohden (mg/kg)

Jos halutaan saavuttaa kudokseen pitoisuus 20–200 Bq/kg, vaadittavat ainemäärät ovat:

Luonnonuraani: 0,8 – 8,0 mg jokaista kehon kilogrammaa kohden.

Torium (Th-232): 4,9 – 49,1 mg jokaista kehon kilogrammaa kohden.

2. Kokonaismäärä 70-kiloisen ihmisen kehossa

Kun pitoisuus suhteutetaan standardikokoiseen 70 kg painoiseen työntekijään, kehon kokonaisaktiivisuuden täytyy olla 1 400 – 14 000 Bq. Tämä tarkoittaa seuraavia kokonaismääriä milligrammoina:

Alkuaine	Määrä kehossa (20 Bq/kg tasolla)	Määrä kehossa (200 Bq/kg tasolla)
Luonnonuraani	56 mg	560 mg
Torium (Th-232)	344 mg	**3 440 mg** (n. 3,4 grammaa)

Tässä laskelmassa ei ole otettu huomioon tytärnuklideja

Kun kysymyksessä on kaivospöly ja luonnon uraani jonka aktiivisuuspitoisuus on U-238 1000Bq/kg, ja sen tyttäret tasapainossa, ja alfoja saisi olla 20 - 200 Bq/kg, niin miten paljon pölyä silloin voi hengittää enimmillään?

Uraani-238-hajoamisketjussa on yhteensä 8 alfa-säteilijää (U-238, U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, Po-218, Po-214 ja Po-210). Tasapainotilassa jokainen näistä hajoaa samalla nopeudella. Siten kiviaineksessa on 8 Bq alfa-aktiivisuutta jokaista 1 Bq emäuraania (U-238) kohden.

Laskelma:

1. Pölyn alfa-aktiivisuus

Malmin kokonaispitoisuudeksi 1 000 Bq/kg.

Kun 1 000 Bq/kg tarkoittaa emäuraanin (U-238) pitoisuutta, on malmin todellinen alfa-aktiivisuus 8 000 Bq/kg (8 x1000).

2. Enimmäismäärä keuhkoissa (70 kg ihminen)

Aiemmin johdetun ihmisen kynnystason (20 – 200 Bq/kg alfa-aktiivisuutta) mukaan 70-kiloisen ihmisen kehoon (keuhkokudokseen) saa kertyä eliniän aikana enimmillään:

Alarajalla (20 Bq/kg): 70 kg x 20Bq/kg = 1 400 Bq alfa-aktiivisuutta.

Ylärajalla (200 Bq/kg): 70 kg x 200 Bq/kg = 14 000 Bq alfa-aktiivisuutta.

Koska 1 gramma malmipölyä sisältää täsmälleen 1 Bq alfa-aktiivisuutta 1 000 Bq / 1 000 g = 1 Bq/g, keuhkoihin jäävän pölyn maksimimäärät grammoina ovat:

Matalampi kynnysraja (20 Bq/kg): Enintään 1,4 grammaa malmipölyä.

Korkeampi kynnysraja (200 Bq/kg): Enintään 14 grammaa malmipölyä.

3. Paljonko pölyä voi hengittää sisään? (Biologinen suodatus)

Keuhkot suodattavat tehokkaasti mekaanista pölyä: vain noin 15 % hienojakoisesta alveolijakeesta (alle 5 µm kokoisesta pölystä) jää pysyvästi keuhkorakkuloihin. Loput 85 % poistuvat yskimisen, liman ja ruoansulatuksen kautta.

Jotta keuhkoihin jää pysyvästi tuo 1,4 – 14 grammaa, suojaamaton työntekijä saa kaikkiaan hengittää sisäänsä:

Alarajalla (20 Bq/kg): 1,4 g / 0,15 = 9,3 grammaa pölyä koko työuran aikana.

Ylärajalla (200 Bq/kg): 14 g / 0,15 = 93,3 grammaa pölyä koko työuran aikana.

Yhteenveto

Kun tytärnuklidit ovat tasapainossa, alfa-pommitus on niin voimakasta, että ihmisen 50 vuoden elinkaaren aikana keuhkoihin ei saisi kertyä muutamaa grammaa enempää (9-93 g) kyseistä malmipölyä.

Jos suojaamaton työntekijä hengittää kaivosilmaa, jossa pölytaso on tyypillinen 2 mg/m³, hän hengittää sisäänsä noin 6,4 grammaa pölyä vuodessa. Tällä tahdilla alaraja (9,3 g hengitettyä pölyä) täyttyisi jo 1,5 vuodessa, ja ylärajakin (93,3 g) saavutettaisiin noin 15 vuodessa. Tämä osoittaa aukottomasti, miksi pelkkä "köyhäkin" 1 000 Bq/kg -tasapainossa oleva malmi vaatii maanalaisessa työssä ehdottoman tehokkaan kohdepoistoilmanvaihdon ja P3-luokan

Suomessa kiviaineksen aktiivisuuspitoisuudet:
U-238 30 -130 Bq/kg
Th-232 20–100 Bq/kg .

<u>Soklin aktiivisuuspitoisuudet</u>
Fosforimalmeissa:
Uraanipitoisuus keskimäärin (U-238) 310 Bq/kg(25 ppm) ja vaihteluväli 100–1000 Bq/kg.
Toriumpitoisuus keskimäärin (Th-232) 533 Bq/kg(130 ppm) ja vaihteluväli 200–1700 Bq/kg.

Niobimalmeissa:
Uraanipitoisuus keskimääräinen 1000 Bq/kg
Toriumpitoisuus keskimääräinen 4000 Bq/kg.

Lähde:
Soklin radiologinen perustilaselvitys
Loppuraportti
31.5.2010

ICRP-Dose-ohjelma

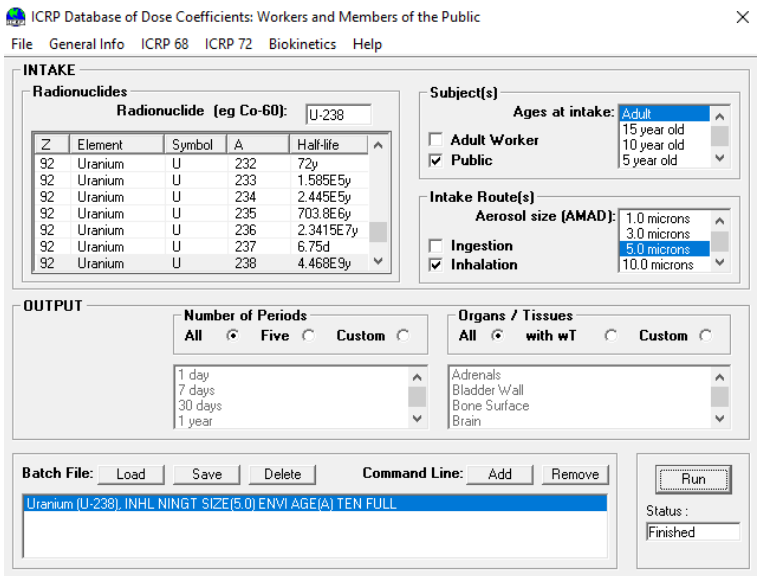
ICRP-DOSE-ohjelman avulla sisäisen säteilyn annosmuuntokertoimet saadaan nopeasti käyttöön.

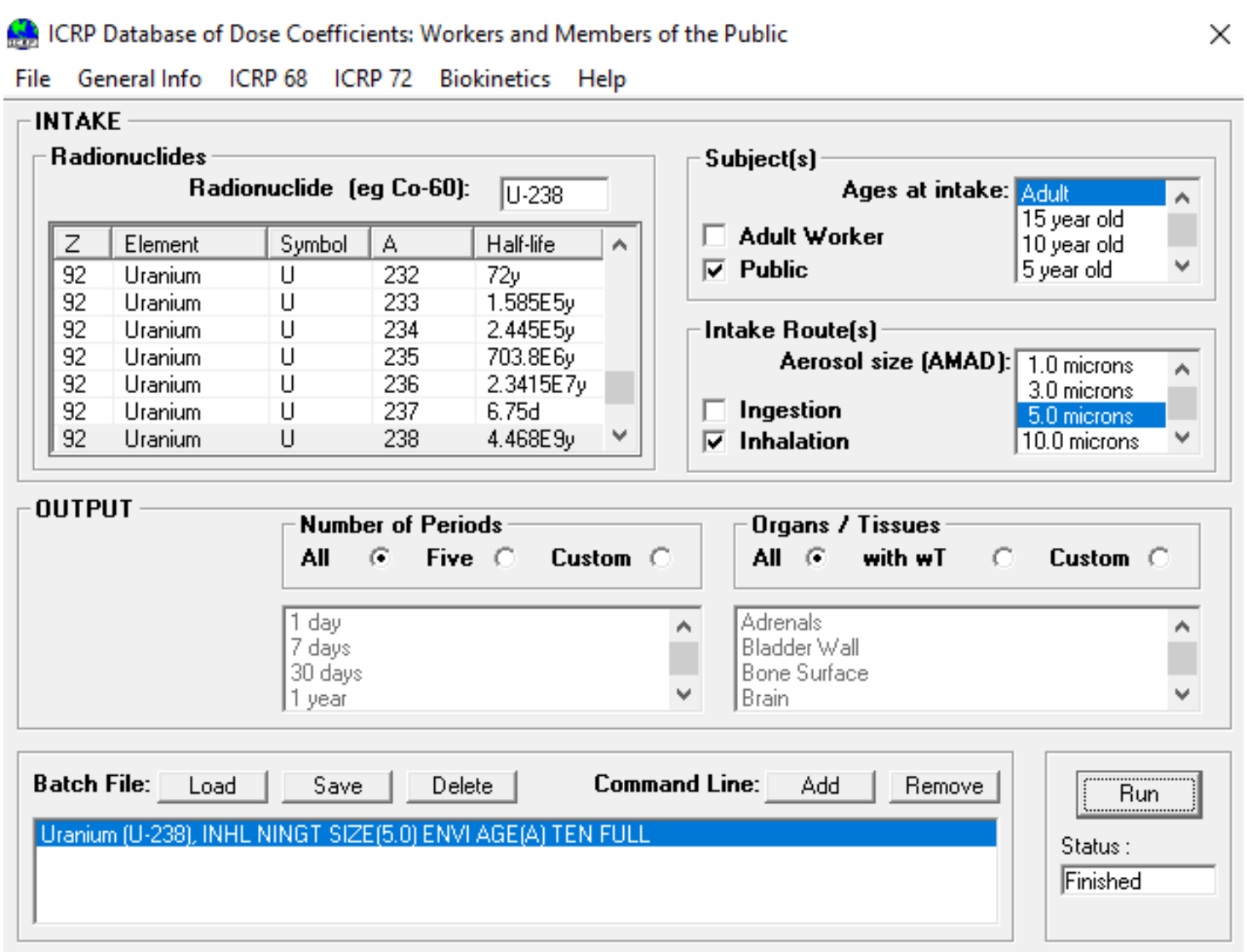
Annosmuuntokertoimet kertovat kuinka suuren säteilyannoksen joku yksittäinen elin saa kun kehon sisälle joutuu 1 Bq jotakin säteilevää ainetta.

ICRP-Dose-ohjelman saa ladattua omalle tietokoneelle ICRP:n nettisivuilta osoitteesta:

https://www.icrp.org/page.asp?id=402

Lataa ja asenna ICRPDOSE_setup.exe





Kun ohjelman avaa, niin ensimmäisenä avautuu valintaruutu.

Tee siihen haluamasi valinnat.

Kuvassa on esimerkki U-238 valinnoista.

Kun valinnat on tehty, paina valintaa ADD.

Sen jälkeen paina valintaa RUN.

Nyt ohjelma avaa uuden ikkunan, jossa varsinaiset arvot ovat.

Dose Coefficients (Sv/Bq) - Viewer

File Help

U-238, adult worker

Inhalation of particulate aerosol: AMAD = 5.000 micron, absorption Type S, f1 = 0.002

Highest committed equivalent dose coefficient: ET Airways, 6.5E-05 Sv/Bq

Remainder formulation: split

Time after intake	1 day	7 days	30 days	1 year	5 years	10 years	20 years	30 years	45 years	50 years
Adrenals	3.2E-12	1.3E-11	4.1E-11	2.1E-10	8.1E-10	1.6E-09	3.2E-09	4.8E-09	7.2E-09	8.0E-09
Bladder Wall	6.3E-12	1.7E-11	4.4E-11	1.8E-10	7.1E-10	1.4E-09	3.0E-09	4.7E-09	7.0E-09	7.8E-09
Bone Surface	2.9E-10	2.0E-09	4.5E-09	1.8E-08	6.3E-08	1.1E-07	1.6E-07	2.0E-07	2.4E-07	2.5E-07
Brain	3.1E-12	1.2E-11	3.8E-11	1.7E-10	6.9E-10	1.4E-09	3.0E-09	4.6E-09	7.0E-09	7.8E-09
Breast	3.2E-12	1.3E-11	4.1E-11	2.1E-10	8.2E-10	1.6E-09	3.2E-09	4.8E-09	7.2E-09	8.0E-09
GI-Tract										
Oesophagus	3.3E-12	1.3E-11	4.2E-11	2.2E-10	8.4E-10	1.6E-09	3.2E-09	4.9E-09	7.3E-09	8.0E-09
St Wall	4.1E-10	4.3E-10	4.7E-10	6.6E-10	1.3E-09	2.0E-09	3.6E-09	5.3E-09	7.6E-09	8.4E-09
SI Wall	1.0E-09	1.1E-09	1.1E-09	1.3E-09	2.0E-09	2.7E-09	4.3E-09	5.9E-09	8.3E-09	9.1E-09
ULI Wall	4.6E-09	6.4E-09	6.6E-09	7.4E-09	8.4E-09	9.2E-09	1.1E-08	1.2E-08	1.5E-08	1.6E-08
LLI Wall	5.1E-09	1.9E-08	2.0E-08	2.2E-08	2.4E-08	2.5E-08	2.7E-08	2.8E-08	3.1E-08	3.1E-08
Colon	4.8E-09	1.2E-08	1.2E-08	1.4E-08	1.5E-08	1.6E-08	1.8E-08	1.9E-08	2.2E-08	2.2E-08
Kidneys	3.6E-10	2.7E-09	6.3E-09	1.5E-08	3.9E-08	5.6E-08	7.5E-08	8.3E-08	9.0E-08	9.1E-08
Liver	8.9E-12	6.1E-11	1.6E-10	9.0E-10	5.4E-09	1.1E-08	2.1E-08	2.7E-08	3.2E-08	3.3E-08
Muscle	3.4E-12	1.3E-11	4.0E-11	1.9E-10	7.5E-10	1.5E-09	3.1E-09	4.7E-09	7.1E-09	7.9E-09
Ovaries	4.7E-12	1.6E-11	4.3E-11	1.8E-10	7.1E-10	1.5E-09	3.0E-09	4.7E-09	7.1E-09	7.8E-09
Pancreas	3.3E-12	1.3E-11	4.1E-11	2.0E-10	7.8E-10	1.5E-09	3.1E-09	4.8E-09	7.2E-09	7.9E-09
Red Marrow	2.9E-11	1.9E-10	4.5E-10	2.1E-09	7.6E-09	1.3E-08	1.8E-08	2.2E-08	2.5E-08	2.6E-08
Respiratory Tract										
ET Airways	7.1E-08	5.0E-07	2.1E-06	2.1E-05	5.6E-05	6.4E-05	6.5E-05	6.5E-05	6.5E-05	6.5E-05
Lungs	5.4E-07	2.7E-06	8.2E-06	1.8E-05	2.6E-05	2.9E-05	3.2E-05	3.3E-05	3.4E-05	3.4E-05
Skin	3.1E-12	1.2E-11	3.9E-11	1.7E-10	7.1E-10	1.5E-09	3.0E-09	4.7E-09	7.0E-09	7.8E-09
Spleen	3.2E-12	1.3E-11	4.1E-11	2.0E-10	7.8E-10	1.5E-09	3.1E-09	4.8E-09	7.2E-09	7.9E-09
Testes	3.1E-12	1.2E-11	3.9E-11	1.7E-10	7.0E-10	1.4E-09	3.0E-09	4.7E-09	7.0E-09	7.8E-09
Thymus	3.3E-12	1.3E-11	4.2E-11	2.2E-10	8.4E-10	1.6E-09	3.2E-09	4.9E-09	7.3E-09	8.0E-09
Thyroid	3.2E-12	1.2E-11	3.9E-11	1.8E-10	7.3E-10	1.5E-09	3.1E-09	4.7E-09	7.1E-09	7.8E-09
Uterus	3.7E-12	1.4E-11	4.0E-11	1.7E-10	6.9E-10	1.4E-09	3.0E-09	4.6E-09	7.0E-09	7.8E-09
Remainder	3.6E-08	2.5E-07	1.1E-06	1.1E-05	2.8E-05	3.2E-05	3.2E-05	3.2E-05	3.2E-05	3.2E-05
Effective dose				2.7E-06	4.5E-06	5.1E-06	5.5E-06	5.6E-06	5.7E-06	5.7E-06

Vaihda taulukko sivulle 3/3.

<< < > >> Print Save Close

U-238, adult worker

Inhalation of particulate aerosol: AMAD = 5.000 micron, absorption Type S, f1 = 0.002

Highest committed equivalent dose coefficient: ET Airways, 6.5E-05 Sv/Bq

Remainder formulation: split

Taulukon otsikosta näkee että ET Airways saa suurimman säteilyannoksen 50 vuoden aikana altistumisesta. ET Airways tarkoittaa nenää, suuta nielua ja kurkun päätä (ylähengitystiet).

Kumulatiivinen säteilyannos on 6,5 E-5 Sv/Bq = 65 µSv/Bq.

Taulukosta voi huomata, että ET Airways -alueen säteilyannos nousee hyvin nopeasti huippuunsa ja tasaantuu lähes kokonaan jo 30 päivän – 1 vuoden kohdalla?

Time after intake	1 day	7 days	30 days	1 year	5 years	10 years	20 years	30 years	45 years	50 years
ET Airways	7.1E-08	5.0E-07	2.1E-06	2.1E-05	5.6E-05	6.4E-05	6.5E-05	6.5E-05	6.5E-05	6.5E-05

Bone Surface - luun pinta.

ICRP:n biologisissa malleissa sillä tarkoitetaan luun sisä- ja ulkopintoja peittävää ohutta kudoskerrosta, johon uraanin kaltaiset "luuhakuiset" aineet ensimmäisenä sitoutuvat verenkierrosta.

Time after intake	1 day	7 days	30 days	1 year	5 years	10 years	20 years	30 years	45 years	50 years
Bone Surface	2.9E-10	2.0E-09	4.5E-09	1.8E-08	6.3E-08	1.1E-07	1.6E-07	2.0E-07	2.4E-07	2.5E-07

Luun pinnalla annoskertymä kasvaa tasaisesti ja voimakkaasti koko 50 vuoden ajan.

Mikä selittää tätä luonnon tilan seurannan kannalta tärkeää ilmiötä?

Uraanin kemiallinen luonne:

Se on "luuhakuinen" aine. Uraani käyttäytyy elimistössä hyvin samalla tavalla kuin kalsium. Kun uraania pääsee verenkiertoon (esimerkiksi keuhkoista imeytyen), luusto imee sen itseensä kuin sieni.

Luukudoksessa uraanin biologinen puoliintumisaika on erittäin pitkä (jopa vuosikausia). Tämä tarkoittaa, että kerran luuhun päätynyt uraani pysyy siellä ja säteilee hyvin, hyvin pitkään.

Time after intake	1 day	7 days	30 days	1 year	5 years	10 years	20 years	30 years	45 years	50 years
Bone Surface	2.9E-10	2.0E-09	4.5E-09	1.8E-08	6.3E-08	1.1E-07	1.6E-07	2.0E-07	2.4E-07	2.5E-07

Jos haluat perehtyä tähän ohjelmaan tarkemmin, niin voit kysellä kaikista ohjelmaan liittyvistä asetuksista tekoälyltä.

Huomaa kuitenkin, että ohjelma alkaa olla jo vanha, eikä sen taustalla olevia taulukoita ole päivitetty pitkään aikaan.
Ohjelma voi kuitenkin olla perustana kun selvitellään sisäisen säteilyaltistuman suuruutta.

Koska ohjelman taulukoita ei ole päivitetty, niin uusimpien ICRP OIR 137 ja 141 taulujen arvot saa helpoiten kun kysyy tekoälyltä.
Kysymykseen pitää kuitenkin sisällyttää että vastauksessa pitää käyttää viimeisimpiä ICRP-taulukoita.

Esimerkiksi :
Google AI-kysely:
Anna U-238 efektiivinen annosmuuntokerroin kun altistunut henkilö on aikuinen työntekijä, hiukkaskoko on 5µm, altistuminen on tapahtunut hengityksen kautta. Anna tulokset viimeisimpien ICRP-taulukoitten perusteella.

Google AI antaa tulokset ICRP- 137 taulukon perusteella 1,2 x E-5 Sv/Bq (= 12 µSv/Bq)
ICRPDOSE-ohjelma antoi ICRP- 68 taulukon perusteella 5,7E-6 Sv/Bq (= 5,7 µSv/Bq).
Uudemman taulukon mukaa U-238:sta onkin tullut noin kaksi kertaa vaarallisempaa aikaisempaan verrattuna.



Uraanin ja toriumin kertyminen vesieliöihin, simpukoihin

"Kuva: Joel Berglund / Wikimedia Commons / Public Domain

Kun ICRPDOSE-ohjelman avulla vertailee uraani-238:n (U-238) ja torium-232:n (Th-232) tuottamia säteilyannoksia, huomataan, että elintoimintoihin päässyt säteilyannos kasvaa vielä 50 vuotta altistumisen jälkeen.

Tämä ilmiö johtuu siitä, että uraani ja torium ovat niin sanottuja luuhakuisia elementtejä, jotka sitoutuvat luustoon pitkäksi aikaa. Luukudoksessa nämä raskaat metallit jäljittelevät kalsiumia ja sitoutuvat luun hydroksiapatiittikristallien fosfaattiryhmiin sekä korvaavat kalsiumioneja.

Tämän seurauksena ne hautautuvat luun sisään erittäin pitkäksi aikaa, ja niiden biologinen puoliintumisaika kehossa voi olla vuosikymmeniä.

Säteilyn kertymistä luustoon voidaan havainnollistaa vertauskuvalla: aivan kuten raudoitustanko jää pysyvästi valun sisään betonin kovettuessa, myös uraani ja torium lukittuvat tiukasti osaksi luun sisäistä rakennetta uuden luukudoksen kasvaessa niiden päälle.

Sama kemiallinen mekanismi toimii myös vesistöissä. Simpukoiden ja kotiloiden kuoret koostuvat kalsiumkarbonaatista, ja ne muodostavat kasvaessaan vuosirenkaita puiden tapaan.

Koska veteen joutunut uraani ja torium käyttäytyvät kalsiumin tavoin, ne sitoutuvat kullakin hetkellä kasvavaan kuorikerrokseen. Tämän ansiosta simpukan kuoren vuosirenkaat toimivat kuin historian arkisto: analysoimalla renkaiden uraani- ja toriumpitoisuuksia tutkijat voivat selvittää tarkasti, minä vuonna ja kuinka paljon kyseisessä vesistössä on ollut radioaktiivisia



Uraanin ja toriumin kertyminen vesieliöihin, simpukoihin

Simpukoiden kuorikerrostumien ja niiden kemiallisen koostumuksen tutkimusta (sklerokronologiaa ja sklerokemiaa) käytetään laajasti todellisessa tiedemaailmassa. Menetelmää hyödynnetään erityisesti historiallisten ympäristömuutosten ja ihmistoiminnan aiheuttamien radioaktiivisten päästöjen kartoittamisessa.

1. Ydinasekokeiden aikakauden todentaminen ("Pommi-hiili" ja ydinlaskeumat)

2. Kaivostoiminnan ja uraanirikastamojen päästöseuranta

3. Ydinlaitosten ja teollisuuden monitorointi (Mussel Watch -ohjelmat)

2. Kaivostoiminnan ja uraanirikastamojen päästöseuranta

Uraanikaivosten ja muiden metallikaivosten lähivesistöissä simpukankuoria käytetään selvittämään, milloin ja kuinka paljon ympäristöön on valunut haitallisia aineita.

Miten tutkittiin:

Järvistä ja joista otettiin makeanveden helmisimpukoita (kuten jokihelmisimpukoita eli raakkuja). Kuorikerroksia ammuttiin laserilla (LA-ICP-MS-menetelmä), joka höyrystää mikroskooppisen pienen osan kuoren vuosirenkaasta ja analysoi sen metallipitoisuuden.

LA-ICP-MS on lyhenne sanoista Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ja sen suomenkielinen nimi on laserablaatio-induktiivisesti kytketty plasma-massaspektrometria.

Mitä selvisi:

Menetelmällä pystyttiin osoittamaan tehtaiden tai kaivosten jätevesipäästöjen alkamisajankohta viikkojen ja kuukausien tarkkuudella. Vaikka kaivoksen pitäjät olisivat väittäneet päästöjen alkaneen vasta hiljattain, simpukan kuoren vuosirenkaat paljastivat totuuden vuosien takaa.



Uraanin ja toriumin kertyminen vesieliöihin, simpukoihin

Miten LA-ICP-MS käytännössä toimii, kun mitataan simpukoitten vuosirenkaitten sisältämiä aineita:

1. Laserleikkaus (LA):
Tarkka laser ampuu kuoren vuosirenkaiden poikki lasersäteen ja höyrystää pinnasta mikroskooppisen pientä pölyä.

2. Poltto plasmassa (ICP):
Pöly puhalletaan kuumaan plasmaan. Tämä plasma on jopa 6 000–10 000-asteista tulikuumaa kaasua, joka hajottaa kuoriaineksen sähköisesti varautuneiksi hiukkasiksi (ioneiksi).

3. Tunnistus magneettivaa'alla (MS):
Hiukkaset kiihdytetään kovaan vauhtiin ja ohjataan kulkemaan voimakkaan magneettikentän läpi, joka toimii erottavana vaakana:
Kevyet hiukkaset (kuten magnesium) kaareutuvat magneetin voimasta jyrkästi.
Raskaat hiukkaset (kuten lyijy) kääntyvät painonsa vuoksi vain vähän ja lentävät suorempaan.
Putken päässä oleva sensori tunnistaa hiukkaset sen mukaan, kuinka jyrkästi ne kaareutuivat, ja laskee niiden tarkan määrän.

Lopputulos:
Tutkijat saavat tarkan kemiallisen aikajanan. Siitä voidaan lukea suoraan menneiden vuosien veden lämpötilat ja saastemuutokset jopa viikon tarkkuudella sen mukaan, mitä aineita vaaka milläkin kuoren kohdalla havaitsee.



Simpukoitten kuorissa on vuosikasvaimet samalla tavalla kuin puissa on vuosirenkaat.

LA-ICP-MS-mittausten avulla simpukan vuosirenkaista pystytään rakentamaan kymmenien vuosien pituinen katkeamaton profiili, joka toimi itsenäisenä historian biologisena arkistona.



Uraanin ja toriumin kertyminen vesieliöihin, simpukoihin

Suomessa LA-ICP-MS-mittausmenetelmää käytetään suhteellisen vähä, verrattaessa esim. Ruotsiin.

Kaivosten vaikutusalueen vesistöjen tilaa pitäisi kuitenkin kartoittaa nykyistä tarkemmin, ennen uusien kaivosten avaamista.
LA-ICP-MS-mittauksella, joko kuolleitten raakkujen, tai joki- ja järvisimpukoitten kuorista saisi luotua tarkan historian siitä millaisessa tilassa joki oli ennen kaivosta. Sitten kun kaivos on avattu, niin on helpompaa selvitellä miten vesistön tilanne on muuttunut.

Mittaukset ovat suhteellisen kalliita, ja sen vuoksi joukkorahoitus saattaisi olla eräs mahdollisuus mittausten järjestämiselle.



Uraanin ja toriumin kertyminen vesisammaliin

"Kuva: Common water moss in a pool at Myrstigen trail" / Ann-Sophie Qvarnström (W.carter) / Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0



Näkinsammal (erityisesti Suomen yleisin laji isonäkinsammal, Fontinalis antipyretica) on täysin veden alla
elävä kookas lehtisammal, jota kutsutaan yleiskielessä usein nimellä vesisammal. Se on yksi Suomen tutuimmista ja laajimmalle levinneistä vesikasveista, ja sitä tavataan koko maassa aina
sisävesistä murtovetisiin rannikoihin.

Näkinsammalen keskeiset ominaisuudet voi jakaa seuraaviin piirteisiin:

Ulkonäkö ja rakenne
Koko ja versot: Se on sammaleksi huomattavan suurikokoinen ja rento. Sen velttomaiset versot kasvavat tyypillisesti 20–50 senttimetrin pituisiksi, mutta voivat suotuisissa olosuhteissa
venyä jopa metrin mittaisiksi.

Väri: Kasvin varsi on usein lähes musta, ja sen lehdet ovat tumman- tai ruskeanvihreitä.

Lehdet: Lehdet ovat suuria, suonettomia ja kourumaisia (venhomaisen teräväselkäisiä).
Ne kasvavat varrella selkeästi kolmessa rivissä.

Juurettomuus: Muiden sammalten tapaan näkinsammalella ei ole oikeita juuria. Se kiinnittyy alustaansa,
kuten kiviin tai upospuuhun, tyvellään olevien tarttumakarvojen (rihmojen) avulla.



Uraanin ja toriumin kertyminen vesisammaliin

Näkinsammal (erityisesti Suomen yleisin laji isonäkinsammal, Fontinalis antipyretica) on täysin veden alla elävä kookas lehtisammal, jota kutsutaan yleiskielessä usein nimellä vesisammal.
Se on yksi Suomen tutuimmista ja laajimmalle levinneistä vesikasveista, ja sitä tavataan koko maassa aina sisävesistä murtovetisiin rannikoihin.

Näkinsammalen keskeiset ominaisuudet voi jakaa seuraaviin piirteisiin:

Ulkonäkö ja rakenne
Koko ja versot: Se on sammaleksi huomattavan suurikokoinen ja rento.
Sen velttomaiset versot kasvavat tyypillisesti 20–50 senttimetrin pituisiksi, mutta voivat suotuisissa olosuhteissa venyä jopa metrin mittaisiksi.

Väri: Kasvin varsi on usein lähes musta, ja sen lehdet ovat tumman- tai ruskeanvihreitä.

Lehdet: Lehdet ovat suuria, suonettomia ja kourumaisia (venhomaisen teräväselkäisiä).
Ne kasvavat varrella selkeästi kolmessa rivissä.

Juurettomuus: Muiden sammalten tapaan näkinsammalella ei ole oikeita juuria. Se kiinnittyy alustaansa, kuten kiviin tai upospuuhun, tyvellään olevien tarttumakarvojen (rihmojen) avulla.

Julkisissa asiakirjoissa kuten:
SÄTEILYTURVAKESKUS Soklin radiologinen perustilaselvitys / sivu 35
Näkin sammaleen on havaittu imevän hanakasti U-238:a. Mittauksissa Soklissa ja Enon Paukkajanvaarassa U-238 tytärnuklidien Pb-210 ja Po-210 pitoisuuksien arvot ovat :

Sokli		**Pb-210**	**47 – 660 Bq/kg**	**Po-210 147 – 1 190 Bq/kg (Sokli)**
Paukkujanvaara	**Pb-210**	**790 – 15 000 Bq/kg**	**Po-210 840 – 13 000 Bq/kg (Sokli)**	

Korkeat aktiivisuuspitoisuudet kertovat siitä että näkinsammal kerää tehokkaasti ainakin uraania ja se tytärnuklideita. Tämä mahdollistaa sen käyttämisen ympäristövalvonnassa.

Maamme rikkaus – Sokli

Soklin malmiossa niobium on merkittävä mineraali. Niobium seostettujen teräste lujuus kasvaa huomattavasti.
Kysy tekoälyltä:
- Miten niobium vaikuttaa teräksen lujuuteen
- Missä niobiumia käytetään
- Mikä on niobiumin kilohinta
- Missä niobiumia tuotetaan
- Miten uraani ja torium vaikeuttavat malmin louhimista ja jatkokäsittelyä

Katso tarkemmin Soklin kaivoshankkeesta nettisivustolta 3D-animaatiot malmion muodosta ja koosta:

https://www.sokli.fi/esiintyma.html

Etsi kohta:
Tutustu Sokliin interaktiivisesti, ja klikkaa sitä.

Tai klikkaa vain linkkiä:
https://vrify.com/decks/12674

Odota hetki …. sivut avautuvat hitaasti.

Valitse avautuvan sivuston vasemmalta puolelta Soklin karbonaatti jatkuu ainakin 7 kilometriin ...

Kuva on 3D kaavio Soklin malmiosta.

Kun kuvaa kääntää, ja suurentaa niin siinä tulee näkyville niobiummalmion louhintasuunnitelmat.
Niobium on kaaviossa merkitty harmaalla värillä.