



7

SISÄINEN SÄTEILY

Matti Suomela, Tua Rahola, Maarit Muikku

SISÄLLYSLUETTELO

7.1	Kehon radioaktiivisten aineiden käyttäytymismallit	246
7.2	Annoslaskujen perusyhtälöt	250
7.3	Radionuklidien biokineetiikan mallintaminen	255
7.4	Ruoansulatuselimistön biokineettinen malli	256
7.5	Hengityselinten biokineettinen malli	261
7.6	Imeytyminen hengityselimistöä kehon nesteisiin	266
7.7	Käyttäytyminen elimistössä imeytymisen jälkeen	269
7.8	Annosmääritykset	273
7.9	Suorat mittausmenetelmät annosmäärityksissä	277
7.10	Epäsuorat mittausmenetelmät annosmäärityksissä	281
7.11	Suomalaisten altistus sisäiselle säteilylle	287
7.12	Radioaktiivinen jodi ja kilpirauhanen	290
7.13	Työperäinen säteilyaltistus	292

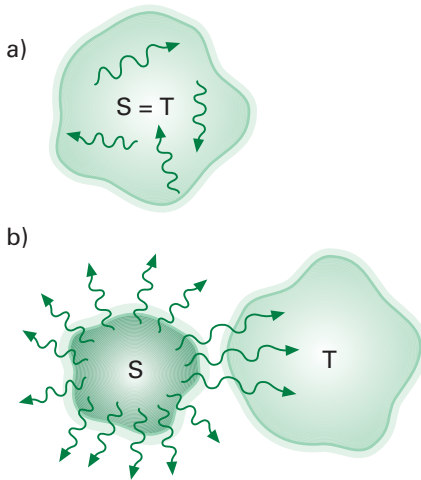
Sisäisellä säteilyllä tarkoitetaan kehossa olevien radioaktiivisten aineiden lähettämää säteilyä. Radioaktiiviset aineet voivat joutua ihmiskehoon ruoan, juoman tai hengitysilman mukana. Iholle joutuneet radioaktiiviset aineet voivat imeytyä ihon tai haavojen kautta elimistöön. Säteilylajista riippuen säteilyn energiasta osa tai kaikki absorboituu elimistöön.

Luonnon hajoamissarjoihin (liite 1) kuuluvat radionuklidit voivat kehoon joutuessaan aiheuttaa säteilyaltistuksen, jolla on käytännön merkitystä. Sisäisen säteilyn altistuksen kannalta merkittävä nuklidi on myös ^{40}K . Luonnosta peräisin olevat radioaktiiviset aineet aiheuttavatkin suurimman osan vuotuisesta keskimääräisestä sisäisen säteilyn annoksesta. Siihen verrattuna ydinasekokeista ja Tshernobylin onnettomuudesta Suomeen kulkeutuneiden keinotekoisien radioaktiivisten aineiden aiheuttama sisäisen säteilyn annos on vähäinen. Säteilytyössä saadut suuret sisäisen säteilyn annokset ovat Suomessa erittäin harvinaisia.

7.1 | Kehon radioaktiivisten aineiden käyttäytymismallit

Sisäisestä säteilystä aiheutuva annos johtuu kehon radioaktiivisten aineiden lähettämän säteilyn energian absorboitumisesta elimiin ja kudoksiin. Elintä, jossa radioaktiivinen aine on, kutsutaan lähde-elimeksi tai -kudokseksi. Alfa- ja beetasäteilyn kantama kudoksessa on lyhyt ja siksi säteily absorboituu kokonaisuudessaan lähde-elimeen tai -kudokseen (kuva 7.1a). Myös pienenerginen alle 10 keV gamma- ja röntgensäteily (fotonisäteily) absorboituu lähde-elimeen. Näitä säteilylajeja kutsutaankin läpäisemättömäksi säteilyksi. Fotonisäteilyn energian kasvaessa yhä pienempi osa siitä absorboituu lähde-elimeen tai -kudokseen. Tästä syystä suurienergistä gammasäteilyä sanotaan läpäiseväksi säteilyksi.

Läpäisevää gammasäteilyä lähettävät radioaktiiviset aineet aiheuttavat säteilyannoksen lähde-elimien tai -kudoksen lisäksi myös ympäröiville elimille ja -kudoksille, joita kutsutaan kohde-elimiksi ja -kudoksiksi (kuva 7.1b). Yksinkertaisuuden vuoksi jatkossa käytetään vain nimityksiä lähde-elin tai kohde-elin, vaikka kysymyksessä olisikin kudos. Jos myös kohde-elimessä on läpäisevää säteilyä lähettäviä radionuklideja, aiheutuu näistä puolestaan säteilyannos lähde-elimelle. Säteilyannoksen kertyminen jatkuu, kunnes radioaktiiviset aineet ovat erittyneet pois kehosta tai hävinneet radioaktiivisen hajoamisen seurauksena.



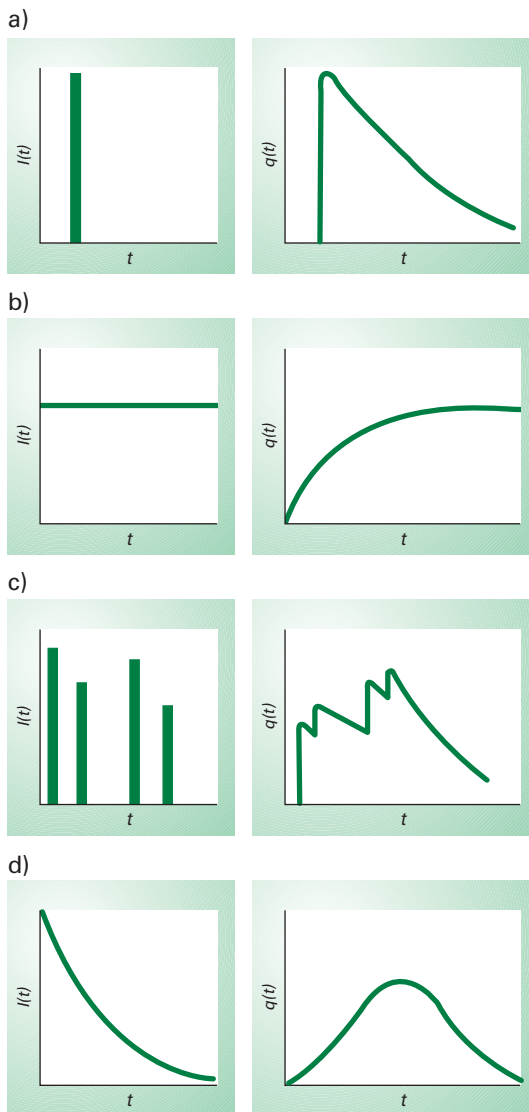
KUVA 7.1 Kaavio säteilyaltistuksen kohdistumisesta elimistössä; S on lähde-elin ja T kohde-elin.

- a) Lähde-elimessä olevan radioaktiivisen aineen lähettämä läpäisemätön säteily absorboituu lähde-elimeseen, joka on tässä tapauksessa myös kohde-elin.
- b) Läpäisevä gammasäteily aiheuttaa säteilyannoksen kohde-elimelle. Osa gammasäteilyn energiasta absorboituu kuitenkin lähde-elimeseen, joten myös sille aiheutuu annosta. Mikäli myös kohde-elin sisältää läpäisevää gammasäteilyä lähettävää ainetta, se aiheuttaa puolestaan annoksen lähde-elimelle.

Radioaktiivisen aineen määrä tietyssä lähde-elimessä riippuu kehoon tulevasta ja kehosta poistuvasta määrästä, nuklidin kulkeutumisesta elimistössä sekä siitä, millä tavalla nuklidin saanti ajallisesti tapahtuu. Kun tunnetaan lähde-elimessä olevan radionuklidin aktiivisuus ajan funktiona, voidaan laskea nuklidin hajoamisten lukumäärä lähde-elimessä tarkastellulla aikavälillä. Sen avulla määritetään kohde-elimeseen tiettyä aikana absorboituva energia ja siten myös saatu säteilyannos.

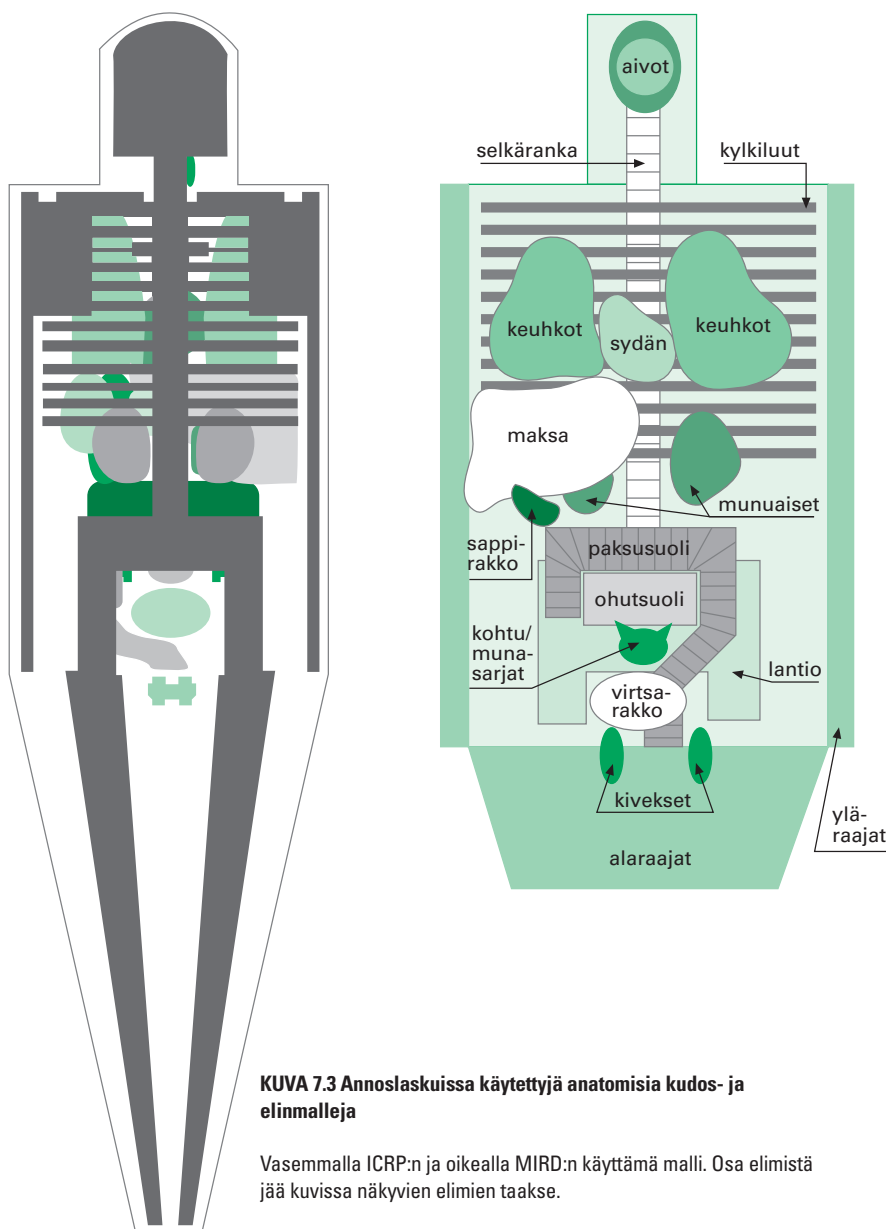
Jotta kohde-elimeseen absorboituneen säteilyenergian määrä saadaan selville, on tiedettävä lähde- ja kohde-elimien muoto ja massa sekä niiden välinen etäisyys. Lisäksi on tunnettava niiden väliin jäävien elinten vastaavat tiedot sekä niihin absorboituneen säteilyn määrä. Kehossa tai elimissä tapahtuvien hajoamisten lukumäärää tarkastellulla aikavälillä – niin sanottua aktiivisuuden aikaintegraalia – kuvaa pinta-ala, joka jää radionuklidinmäärän muuttumista kehossa esittävän käyrän ja aika-akselin väliin (kuva 7.2).

Ihmisen elimistö on anatomisesti ja fysiologisesti monimutkainen. Jotta annoslaskut olisivat mahdollisia, on elimistön rakennetta jouduttu malleissa yksinkertaistamaan (kuva 7.3). Ihmisen anatomiaa ja aineenvaihduntaa kuvaavia malleja on laadittu niin sanotun vertailuihmisen (kirja 1, Säteily ja sen havaitseminen, luku 2.4) lisäksi myös eri-ikäisille ihmisille ja eri etnisille ryhmille.



KUVA 7.2 Radioaktiivisten aineiden saantitavan vaikutus kehossa olevaan radionuklidimäärään $q(t)$, kun radionuklidien saanti $I(t)$ a) tapahtuu yhdellä kertaa, b) on tasaista ja jatkuvaa, c) tapahtuu useina kertasaanteina ja d) on jatkuvaa, mutta vähenee ajan kuluessa.

Kansainvälinen säteilysuojelutoimikunta ICRP (kirja 4, Säteilyn terveys-
haitat, luku 11) on käyttänyt kuvan 7.3 mukaista anatomista mallia sätei-
lysuojelussa tarvittaviin annoslaskuihin. MIRD:n (Medical Internal Ra-
dion Dose Committee) anatomista mallia kehitettäessä on pidetty silmällä
erityisesti lääketieteellisissä sovelluksissa tarvittavia annoslaskuja.



KUVA 7.3 Annoslaskuissa käytettyjä anatomisia kudosis- ja elinmalleja

Vasemmalla ICRP:n ja oikealla MIRD:n käyttämä malli. Osa elimistä jää kuvissa näkyvien elimien taakse.

ICRP:n ja MIRD:n annoslaskumenetelmät ovat periaatteessa samanlaisia, vaikka annoslaskennan suureet ja symbolit ilmaistaankin eri tavalla. Seuraavassa käsitellään vain ICRP:n annoslaskumallia. Annoslaskuja varten tulee tuntea kysymyksessä olevan aineen aineenvaihduntaominaisuudet eli metabolia. ICRP:n mallissa radioaktiivisten aineiden imeytymistä ja kulkeutumista sekä niiden erittymistä elimistöstä kuvataan ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälöillä. Niitä hyväksi käyttäen las-

ketaan eri elimissä olevien radionuklidien määrä ajan funktiona ja tästä edelleen ensin kudoksiin tai elimiin absorboituneet annokset ja niiden perusteella ekvivalenttiannokset ja efektiivinen annos. Mallissa elinten ja kudosten ekvivalenttiannokset saadaan kertomalla absorboituneet annokset säteilylajista riippuvalla painotuskertoimella. Näin otetaan huomioon eri säteilylajien erilainen kyky aiheuttaa ionisaatiota kudoksessa. Eri elinten ja kudosten säteilyherkkyys sekä elimen tai kudoksen merkitys ihmisen terveyden kannalta otetaan huomioon kertomalla elinten ja kudosten ekvivalenttiannokset elinkohtaisilla kudospainotuskertoimilla. Kun kudospainotetut ekvivalenttiannokset lasketaan yhteen, saadaan efektiivinen annos. Efektiivinen annos kuvaa sitä säteilyn aiheuttamaa terveydellistä kokonaishaittaa, joka ihmiselle aiheutuisi, jos efektiivisen annoksen suuruinen säteilyannos olisi jakautunut tasaisesti koko kehon alueelle.

7.2 | Annoslaskujen perusyhtälöt

Spesifinen efektiivinen energia

Säteilyannoksen määrittämiseksi on tiedettävä, kuinka suuri osa lähde-elimessä olevien radionuklidien lähettämästä säteilystä absorboituu kyseiseen elimeen ja kuinka paljon siitä osuu ja absorboituu kohde-elimeen. Kudoksiin ja elimiin absorboituneen säteilyenergian määrää ei elävästä ihmisestä pystytä mittaamaan, vaikka absorboitunut energia onkin fysikaalinen suure ja siten periaatteessa mitattavissa. Absorboituneen energian määrittämisessä käytetään hyväksi kudosekvivalenteja fantomeja (katso kirja 1, luku 5.6) ja Monte Carlo -menetelmää.

Määritettäessä elimeen tai kudokseen absorboitunutta annosta lasketaan ensin lähde-elimessä S olevan radionuklidin lähettämästä säteilylajista R kohde-elimeen T absorboituva spesifinen efektiivinen energia $SEE(T \leftarrow S; k)$ yhtä radioaktiivista hajoamista kohti. Spesifinen absorboitunut energia (yksikkö MeV/g) kohde-elimen massayksikköä kohti on

$$SEE(T \leftarrow S; k) = \sum_R w_R Y_R E_R AF(T \leftarrow S; k)_R / M_T(k), \quad (7.1)$$

missä k on tarkasteltavan henkilön ikä (a), w_R on säteilylajin R painotuskerroin (kirja 1 taulukko 2.1), Y_R on lähde-elimessä olevan radionuklidin lähettämän säteilylajin R tuotto yhtä hajoamista kohti, E_R on säteilylajin R energia (MeV), $AF(T \leftarrow S; k)_R$ on lähde-elimessä S olevan radionukli-

din lähettämän säteilylajin R energiasta E_R kohde-elimeen T absorboituva osuus ja $M_T(k)$ on kohde-elimen massa (g).

Koska kohde-elimen massa $M_T(k)$, etäisyys lähde-elimestä ja sen myötä säteilystä R kohde-elimeen absorboituneen säteilyenergian osuus $AF(T \leftarrow S; k)_R$ muuttuu iän mukana, on spesifinen efektiivinen energia $SEE(T \leftarrow S; k)$ myös iän k funktio. Vaikka absorboituneen energian osuus vaihtelee kohde-elimen eri osissa, käytetään käytännön säteilysuojelulaskuissa koko kohde-elimelle laskettua keskimääräistä arvoa. Siten myös kohde-elimelle laskettu spesifisen efektiivisen energian arvo on keskimääräinen. Spesifinen efektiivinen energia ottaa säteilyn painotuskertoimen w_R avulla huomioon eri säteilylajien ionisaatiokyvyssä ja siten säteilyn biologisessa tehokkuudessa olevat erot. Se on itse asiassa lähde-elimessä olevan radionuklidin yhdestä hajoamisesta kohde-elimelle aiheutunut ekvivalenttiannos, vaikka sen yksikkö ei olekaan ekvivalenttiannoksen määritelmän mukainen J/kg vaan MeV/g.

ICRP on taulukoinut nuklidikohtaisesti spesifisen efektiivisen energian arvot lähde- ja kohde-elinpareille. Taulukoissa on $SEE(T \leftarrow S; k)$:n arvot annettu 3 kuukauden sekä 1, 5, 10, 15 ja 20 vuoden ikäisille henkilöille. Yli 17-vuotiaille käytetään aikuisille eli 20-vuotiaille laskettuja arvoja. Mikäli halutaan laskea spesifiset efektiiviset energiat alle 17 vuoden ikäisille henkilöille, joiden iät poikkeavat taulukoiduista, voidaan tarvittaessa käyttää lineaarista interpolaatiota.

Jos radionuklidin lähettämän säteilyn R energia absorboituu jo lähde-elimeen, on $AF(S \leftarrow S) = 1$ ja yhtälö 7.1 yksinkertaistuu muotoon

$$SEE(S \leftarrow S; k) = \sum_R w_R Y_R E_R / M_S(k), \quad (7.2)$$

missä $M_S(k)$ on nyt lähde-elimen massa. Lähde-elimessä olevien radionuklidien lähettämästä läpäisevästä gammasäteilystä vain osa absorboituu lähde-elimeen, jolloin $AF(S \leftarrow S) < 1$. Lähde-elimeen absorboituneen säteilyenergian osuus voi olla hyvinkin pieni, jos elin on kooltaan pieni ja gammasäteilyn energia suuri.

Jos suurin osa kehoon joutuneesta radionuklidista kertyy yhteen elimeen, on lähde-elimä käytännössä yksi. Kilpirauhanen ja siihen kertynyt radioaktiivinen jodi tarjoavat tästä hyvän esimerkin. Yleensä kehoon joutuneita radionuklideja on myös kohde-elimessä. Jos radionuklidit lähettävät läpäisevää gammasäteilyä, täytyy kohde-elimen lähettämästä säteilystä lähde-elimeen absorboituva osuus lisätä lähde-elimen spesifiseen efektiiviseen

energiaan. Mikäli lähde- ja kohde-elimä on useita, annoslaskusta muodostuu varsin monimutkainen. Käytännössä tilannetta voidaan yksinkertaistaa jättämällä huomiotta sellaiset elimet, joissa radioaktiivisten aineiden määrä on niin pieni, ettei sillä ole kokonaisuuden kannalta merkitystä.

Yhtälöissä 7.1 ja 7.2 käytettyjä säteilyn painotuskertoimia w_R määritettäessä on otettu huomioon säteilyn biologinen vaikuttavuus eli eri säteilylajien erilainen kyky aiheuttaa ionisaatiota kohde-elimessä tai -kudoksessa. Painotuskertoimet ovat laaduttomia, ionisaatiokyvyn suhteen normitettuja lukuja. Säteilyn energiasta riippumatta on gamma-, röntgen- ja beetasäteilyn painotuskertoimelle annettu arvo $w_R = 1$ ja alfasäteilyn painotuskertoimelle arvo $w_R = 20$. Neutronien painotuskerroin riippuu energiasta (kirja 1 taulukko 2.1). Lisäksi neutronisäteilyn osalta on otettava huomioon neutronien kyky aktivoida elimistön nuklideja.

Aktiivisuuden aikaintegraali

Elimessä tai kudoksessa olevat radionuklidit säteilyttävät elimistöä siihen asti, kun ne ovat poistuneet elimistöstä joko biologisen erittymisen tai radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Tällöin kohde-elimien tietyn aikavälin kuluessa absorboituvan säteilyenergian määrä riippuu lähde-elimessä olevan radionuklidin kyseisenä aikavälinä tapahtuvien hajoamisten lukumäärästä U_S (Bq s).

Kuten jo aikaisemmin todettiin, lähde-elimessä olevan radioaktiivisen aineen poistumista kyseisestä elimestä biologisten prosessien seurauksena voidaan kuvata ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälöllä. Hajoamisen lukumäärää laskettaessa oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi, että lähde-elimä on yksi ja että elimessä on vain yhtä radionuklidia. Samoin oletetaan, että kohde-elimä on vain yksi ja ettei kohde-elimessä ole kyseistä nuklidia. Tällöin lähde-elimessä olevan radionuklidin biologisista syistä tapahtuva määrän vähenemistä kuvaa yhtälö $q(t) = q(0) \cdot e^{-\lambda_B \cdot t}$. Vastaavasti lähde-elimessä olevan radionuklidin määrän muutosta radioaktiivisen hajoamisen seurauksena kuvaa yhtälö $q(t) = q(0) \cdot e^{-\lambda_F \cdot t}$. Yhtälöissä $q(0)$ (Bq) on radionuklidin aktiivisuus hetkellä $t = 0$. Vakiot λ_B ja λ_F (1/s) kuvaavat radionuklidin määrän biologista ja fysikaalista vähenemisnopeutta. Lähde-elimessä S olevan radionuklidin aktiivisuuden aikaintegraali eli hajoamisen lukumäärä U_S (Bq s) aikavälillä $0 \dots \tau$ voidaan nyt laskea kaavasta

$$U_S(\tau) = \int_0^\tau q(t) dt = \int_0^\tau q(0) \cdot e^{-(\lambda_B \cdot t + \lambda_F \cdot t)} dt. \quad (7.3)$$

Kaava 7.3 on yksinkertaistus, koska siinä radioaktiivisen aineen koko määrän oletetaan olevan alussa lähde-elimessä eikä ainetta tule elimeen tarkastelujakson aikana.

Absorboitunut annos ja ekvivalenttiannos

Absorboitunut annos D (kirja 1 taulukko 2.3) on fysikaalinen suure eikä ota huomioon eri säteilylajien erilaista ionisaatiokykyä. Absorboitunut annos saadaan laskettua kertomalla lähde-elimessä tapahtuneiden hajoamisten lukumäärä U_S kohde-elimeen absorboituneella energialla. Absorboitunut energia lasketaan spesifisestä efektiivisestä energiasta $SEE(T \leftarrow S; k)$ jakamalla kukin säteilyenergia E_R sitä vastaavalla säteilyn painotuskertoimella w_R . Koska absorboituneen energian yksikkö on tällöin MeV/g, on se muunnettava vastaamaan absorboituneen annoksen yksikköä Gy. Koska 1 MeV on $1,6 \cdot 10^{-13}$ J, seuraa siitä, että $1 \text{ MeV/g} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ Gy}$. Kohde-elimeen absorboitunut annos D_T aikavälillä $0 \dots \tau$ on siten

$$D_T(\tau) = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot U_S(\tau) \sum_R (SEE(T \leftarrow S)_R / w_R). \quad (7.4)$$

Jos kohde-elimeen kohdistuu säteilyä useasta lähde-elimestä, jotka sisältävät useita eri radionuklideja j , on niistä kohde-elimelle aiheutuneet yksittäiset absorboituneet annokset laskettava yhteen. Tällöin kohde-elimeen absorboitunut annos on

$$D_T(\tau) = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \sum_S \sum_j (U_S(\tau) \sum_R (SEE(T \leftarrow S)_R / w_R))_j. \quad (7.5)$$

Ekvivalenttiannoksen määritelmän mukaan yksittäisen säteilylajin R kohde-elimelle aiheuttama ekvivalenttiannos (S_v) on

$$H_T(\tau) = w_R D_{T,R}(\tau). \quad (7.6)$$

Kaavoista 7.4 ja 7.6 seuraa, että lähde-elimien S sisältämän radionuklidin lähettämästä säteilystä kohde-elimelle T aiheutuva ekvivalenttiannos $H_T(\tau)$ on siten

$$H_T(\tau) = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot U_S(\tau) \sum_R SEE(T \leftarrow S)_R. \quad (7.7)$$

Mikäli lähde-elimä on useita ja ne sisältävät useita radionuklideja j , saadaan kohde-elimien annos laskemalla yhteen kaikkien lähde-elinten aiheuttamat annokset

$$H_T(\tau) = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \sum_S \sum_j (U_S(\tau) \sum_R SEE(T \leftarrow S)_R)_j. \quad (7.8)$$

Jos radionuklidilla on radioaktiivisia tytärnuklideja, on niiden aiheuttama annos laskettava erikseen. Tytärnuklidin kemiallisista ja fysiologisista ominaisuuksista ja fysikaalisesta puoliintumisajasta riippuu, käyttäytyykö se elimistössä samoin kuin emonuklidi. Useimmiten näin voidaan olettaa ilman, että siitä aiheutuu olennaista virhettä annoslaskuissa. Näin on varsinkin silloin, kun tytärnuklidin fysikaalinen puoliintumisaika on lyhyt emonuklidin puoliintumisaikaan ja biologisen erittymisen nopeuteen verrattuna.

Kudosten painotuskertoimet ja efektiivinen annos

Kuten aikaisemmin todettiin ekvivalenttiannoksen laskemisessa otetaan huomioon eri säteilylajien toisistaan poikkeava kyky aiheuttaa ionisaatiota kudoksessa eli säteilyn biologinen vaikuttavuus. Todennäköisyys, jolla tietty ekvivalenttiannos aiheuttaa terveydellisen haitan (syövän tai perinnöllisen haitan), riippuu myös kohde-elimen tai -kudoksen säteilyherkkyydestä. Tämän huomioon ottamiseksi ICRP on määritellyt kudospainotuskertoimet, joiden avulla eri elimien ja kudosten saamat ekvivalenttiannokset voidaan yhdistää efektiiviseksi annokseksi. Kertomalla kudoksen tai elimen ekvivalenttiannos kyseisen kudoksen painotuskertoimella w_T (taulukko 7.1, katso myös kirjan 1 lukua 2.4 ja kirjan 4 lukua 11) saadaan kyseistä annosta vastaava efektiivinen annos E . Tästä annoksesta aiheutuva säteilyvaikutus vastaa tilannetta, jossa koko kehoon on tasaisesti kohdistunut efektiivisen annoksen suuruinen säteilyannos. Kudosten painotuskertoimet kuvaavat sitä suhteellista osuutta, jolla yksittäisiin elimiin kohdistunut säteily vaikuttaa koko kehoon kohdistuvaan säteilyhaittaan. Jotta koko kehon tasaisesti saama ekvivalenttiannos antaisi numeerisesti yhtä suuren efektiivisen annoksen, on painotuskertoimet normitettu siten, että niiden summa on yksi.

Elin tai kudos	Kudosten painotuskerroin w_T
Sukurauhaset	0,20
Luuydin, paksusuoli, keuhkot, mahalaukku	0,12
Virtsarakko, rinnat, maksa, ruokatorvi, kilpirauhanen, muut nimeltä mainitsemattomat elimet ja kudokset yhteensä	0,05
Iho, luun pinta	0,01
Yhteensä	1,0

TAULUKKO 7.1 Kudosten painotuskertoimet

Kudosten painotuskertoimet on määritetty suuresta verrokkiväestöryhmästä, jossa on yhtä paljon naisia ja miehiä ja jonka ikäjakauma on laaja. Näin kertoimia voidaan käyttää sekä säteilytyöntekijöiden että väestön saamien annosten laskemiseen ihmisten sukupuolesta riippumatta. Ryhmään ”muut elimet ja kudokset” kuuluvat lisämunuaiset, aivot, nenän alue, ohutsuoli, munuaiset, lihakset, haima, perna, kateenkorva ja kohtu. Näille kudoksille ja elimille annettavien painokertoimien $w_{T, \text{muut}}$ summa on 0,05. Jos jokin näistä elimistä saa huomattavasti muita suuremman annoksen, sille annetaan painotuskertoimen 0,025 eli puolet koko ryhmän painotuskertoimesta. Loput ryhmän elimistä saavat jäljellä olevasta painotuskertoimesta kyseisen elimen massalla painotetun osuuden. Ryhmään ”muut elimet” kuuluvien kudosten ja elinten saama säteilyannos on merkittävä vain poikkeustapauksessa.

Ajanjakson τ kuluessa saatu efektiivinen annos lasketaan kudosten painotuskertoimia w_T käyttäen kaavasta

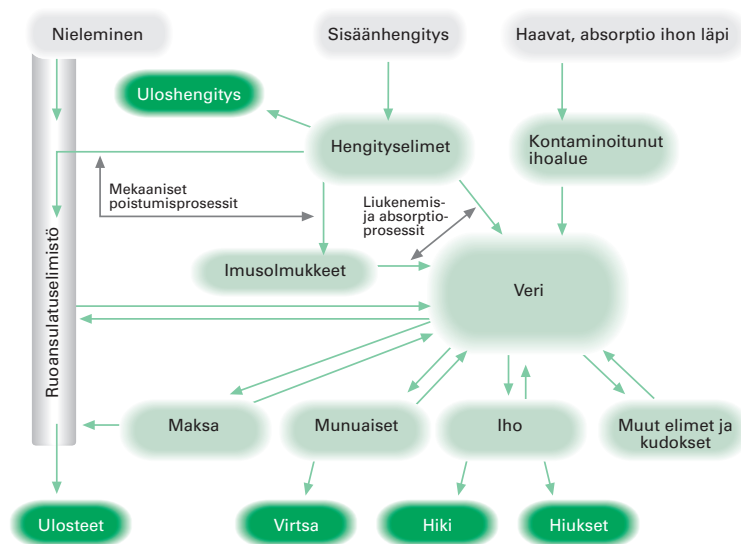
$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau). \quad (7.9)$$

Ekvivalenttiannoksen kertymällä ja efektiivisen annoksen kertymällä tarkoitetaan lasten (ikä alle 17 vuotta) tapauksessa 70 vuoden ikään mennessä kertynyttä annosta ja aikuisilla (sekä säteilytyöntekijät että väestö) 50 vuoden aikana kertynyttä annosta. Jos kyseisinä ajanjaksoina saadaan radioaktiivisia aineita useita kertoja, tulee niistä kaikista aiheutuvat annoskertymät ottaa huomioon. Jos säteilyn vaikutukset kohdistuvat pääasiassa vain yhteen elimeen, kuten on tilanne radioaktiivisen jodin jouduttua kilpirauhaseen, on tarkoituksenmukaista tarkastella efektiivisen annoksen sijasta elimen saamaa ekvivalenttiannosta tai absorboitunutta annosta.

7.3 Radionuklidien biokinetiikan mallintaminen

Säteilyannosten määrittämiseksi on olennaista tietää tarkastelun kohteena olevien elimien sisältämien radioaktiivisten aineiden määrät ja viipymääjat kyseisissä elimissä tai kudoksissa. ICRP on kuvannut radionuklidin kulkeutumista ja erittymistä elimistössä niin sanotulla lokeromallilla, jossa jokaista säteilyannoksen kannalta merkittävää kudosta tai elintä vastaa oma lokero (kuva 7.4). Sen jälkeen kun radionukklidi on imeytynyt kehon nesteisiin, ei saantitavalla ole enää merkitystä, vaan nuklidin käytäytymisen elimistössä määrää sen metabolia.

Radionuklidit ja niiden kemialliset yhdisteet kulkeutuvat elimistössä kuten niiden samassa kemiallisessa muodossa olevat stabiilit isotoopit tai saman alkuainejakson sukulaisaineet. Mallissa radionuklidien siirtymistä kuvaavat parametrit on valittu siten, että ne vastaavat keskiarvoitumisen biokineettisiä parametreja, joista yksilölliset arvot voivat ääritapauksissa poiketa jopa tekijällä 2–3. Biokineettiset parametrit kuvaavat usein miesten aineenvaihduntaa, koska naisia ja lapsia koskevia tutkimuksia ei ole tehty. Lapsille sovelletaan aikuisten biokineettisiä malleja ja parametreja, ellei ole perusteltua syytä poiketa niistä. Sama koskee aikuisia naisia. Tiettyä radioaktiivista ainetta koskevan mallin ja sen parametrien määrittämisessä on käytetty hyväksi kyseisen radioaktiivisen aineen tai sen sukulaisaineiden ja myös sen stabiilien isotooppien käyttäytymistä ihmiselimistössä selvittäneiden tutkimusten tuloksia. Eräiden radionuklidien osalta ihmistutkimuksia ei ole voitu tehdä. Tällöin on jouduttu turvautumaan eläinkokeista saatuihin tuloksiin, jotka on muunnettu vastaamaan ihmisen anatomiaa ja fysiologiaa. Tästä syystä biokineettiset mallien antamat tulokset voivat joissakin tapauksissa sisältää suuriakin epävarmuustekijöitä.



KUVA 7.4 Kaavio radioaktiivisten aineiden saanti- ja erittymisreiteistä sekä aineiden kulkeutumisesta elimistössä ja kudoksissa

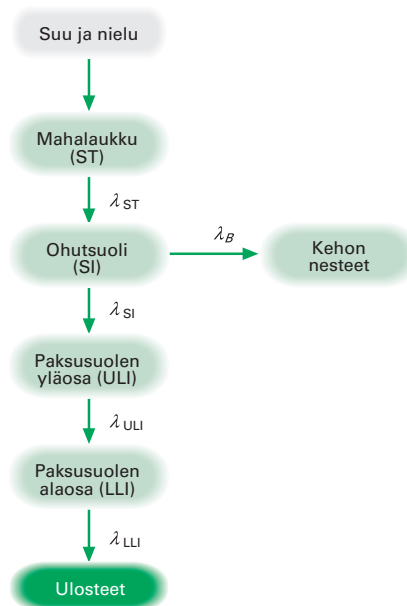
7.4 | Ruoansulatuselimistön biokineettinen malli

Ruoansulatuselimistö on ICRP:n biokineettisessä mallissa jaettu neljään osaan (kuva 7.5): mahalaukku (ST), ohutsuoli (SI) sekä paksusuolen ylä-

(ULI) ja alaosa (LLI). Tavallisimmin radioaktiivisia aineita saadaan ruoan ja juoman mukana, mutta niitä voi kulkeutua ruoansulatuselimistöön myös hengityselimistöstä. Hengitysilmaasta nenä-nielun limakalvoihin tarttuneet hiukkaset ja värekarvojen liikkeen liman mukana keuhkoista poistamat radioaktiiviset aineet kulkeutuvat nieluun ja edelleen mahalaukuun, jonka jälkeen niitä voidaan laskuissa käsitellä kuin suun kautta saatuja aineita. Mahalaukusta radioaktiiviset aineet siirtyvät ruoansulatusprosessin määräämällä nopeudella ohutsuoleen, josta ne muiden aineiden tavoin voivat imeytyä kehon nesteisiin, lähinnä vereen. Imeytyvä osuus riippuu aineen liukoisuusominaisuuksista. Kehon nesteitä tarkastellaankin mallissa siirtolokerona, johon radionuklidien oletetaan siirtyvän vakion $\lambda_B = 0,25$ 1/d määräämällä nopeudella. Kehon nesteet kuljetavat imeytyneen radioaktiivisen aineen kaikkialle elimistöön, jossa sen jakautuminen eri elimiin ja kudoksiin riippuu aineen tai yhdisteen kemiallisista ominaisuuksista.

KUVA 7.5 ICRP:n käyttämä lokeromalli, jolla kuvataan radionuklidin biokinetiikkaa ruoansulatuselimistössä.

Parametrit λ_{ST} , λ_{SI} , λ_{ULI} , λ_{LLI} ja λ_B ovat radionuklidien siirtymisnopeutta lokerosta seuraavaan lokeroon kuvaavia siirtymisnopeusvakioita (yhtälöt 7.10–13).



Esimerkiksi ^{131}I – kuten myös stabiili jodi – imeytyy vereen lähes täydellisesti. Noin 30 prosenttia imeytyneestä jodista kertyy kilpirauhaseen, mikäli kilpirauhasta ei ole kyllästetty ylimääräisellä jodilla. ^{137}Cs imeytyy helppoliukoisena aineena täysin ruoansulatuselimistöön vereen ja kulkeutuu suurimmaksi osaksi lihaksistoon kuten sen kemiallinen sukulainen kalium. Vastaavasti ^{90}Sr käyttäytyy kuten saman alkuainejakson aine kalsium. Vereen imeytyvän strontiumin määrä riippuu luuston kasvun ja

aineenvaihdunnan vaatimasta kalsiumin määrästä. Myös muiden kemiallisten sukulaisaineiden saanti vaikuttaa imeytyvän strontiumin määrään. Strontiumin imeytymisen on todettu lisääntyvän, mikäli elimistö saa ruokavaliosta liian vähän kalsiumia, magnesiumia ja fosforia. Lisäksi D-vitamiinin on todettu lisäävän strontiumin imeytymistä maidosta vereen. Aikuisilla noin kolmasosa ravinnon sisältämästä strontiumista päätyy vereen, mutta vuoden ikäisillä ja sitä nuoremmilla lapsilla imeytyvä määrä on yli 40 prosenttia. Lapsilla veren strontiumista luustoon kulkeutuu 40–60 prosenttia. Sen sijaan aikuisilla luustoon kulkeutuvan strontiumin määrä on vain 15 prosenttia loppuosan jakautuessa pehmeisiin kudoksiin.

Pääosa imeytyneistä eli systeemisistä radioaktiivisista aineista erittyy virtsan mukana. Pieni osa aineista voi kuitenkin kulkeutua verestä takaisin paksusuolen yläosaan ja poistua ulosteen mukana. Tämä osuus on otettu huomioon paksusuolen annosmuuntokertoimissa. Imeytymättömät radioaktiiviset aineet poistuvat ulosteen mukana. Paksusuolen alaosasta takaisin imeytyviä nesteitä ei ole sisällytetty malliin.

Tietyn radionuklidin siirtymistä ruoansulatuselimistön osasta toiseen ja imeytymistä kehon nesteisiin kuvataan mallissa ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälöillä

$$dq_{ST}(t)/dt = \dot{I}(t) - \lambda_{ST}q_{ST}(t) - \lambda_F q_{ST}(t) \quad (7.10)$$

$$dq_{SI}(t)/dt = \lambda_{ST}q_{ST}(t) - \lambda_{SI}q_{SI}(t) - \lambda_F q_{SI}(t) - \lambda_B q_{SI}(t) \quad (7.11)$$

$$dq_{ULI}(t)/dt = \lambda_{SI}q_{SI}(t) - \lambda_{ULI}q_{ULI}(t) - \lambda_F q_{ULI}(t) \quad (7.12)$$

$$dq_{LLI}(t)/dt = \lambda_{ULI}q_{ULI}(t) - \lambda_{LLI}q_{LLI}(t) - \lambda_F q_{LLI}(t) \quad (7.13)$$

missä $\dot{I}(t)$ on niellyn eli mahalaukkuun tulevan radionuklidin saantinopeus (Bq/d) ajan t funktiona, $q_{ST}(t)$ on mahalaukussa (ST) hetkellä t olevan radionuklidin määrä ja $q_{SI}(t)$, $q_{ULI}(t)$ ja $q_{LLI}(t)$ vastaavasti ohutsuolessa (SI), paksusuolen yläosassa (ULI) ja alaosassa (LLI) olevat radionuklidin määrät (Bq) hetkellä t . λ_F (1/d) on fysikaalinen hajoamisvakio ja λ_{ST} , λ_{SI} , λ_{ULI} ja λ_{LLI} (1/d) ovat vakioita, jotka kuvaavat radionuklidin siirtymisnopeutta lokeroista seuraavaan.

Yhtälöiden vasemmanpuoleiset termit kuvaavat radionuklidin määrän muuttumisnopeutta kussakin ruoansulatuselimistön osassa ajan t funktiona. Yhtälöiden 7.11–13 oikealla puolella ensimmäiset termit kuvaavat

nopeutta, jolla radionuklidia siirtyy edellisestä lokerosta tarkasteltavaan lokeroon. Yhtälöiden toiset termit ilmoittavat nopeuden, jolla radionuklidia siirtyy tarkasteltavasta lokerosta seuraavaan lokeroon. Kolmas hajoamisvakion λ_F sisältävä termi kuvaa lokerossa olevan radionuklidin määrän vähenemistä radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Yhtälössä 7.11 termi $\lambda_B q_{SI}(t)$ kuvaa nopeutta, jolla radionuklidi imeytyy ohutsuolesta kehon nesteisiin. Tämän melko yksinkertaisen lokeromallin tapauksessa yhtälöryhmä voidaan ratkaista suljetussa muodossa. Ratkaisu yksinkertaistuu, mikäli annoskertymät lasketaan pitkälle ajalle (50 tai 70 vuotta) ja oletetaan, että ajanhetkellä $t = 0$ koko nieltä radionuklidimäärä on mahalaaukussa. Näin voidaan arvioida radioaktiivisten hajoamisten lukumäärä kussakin elimessä (taulukko 7.2).

Elin	Hajoamisten lukumäärä
Mahalaauku	$1/(\lambda_{ST} + \lambda_F)$
Ohutsuoli	$\lambda_{ST}/[(\lambda_{ST} + \lambda_F) \cdot (\lambda_{SI} + \lambda_B + \lambda_F)]$
Paksusuolen yläosa	$\lambda_{ST} \lambda_{SI}/[(\lambda_{ST} + \lambda_F) \cdot (\lambda_{SI} + \lambda_B + \lambda_F) \cdot (\lambda_{ULI} + \lambda_F)]$
Paksusuolen alaosa	$\lambda_{ST} \lambda_{SI} \lambda_{ULI}/[(\lambda_{ST} + \lambda_F) \cdot (\lambda_{SI} + \lambda_B + \lambda_F) \cdot (\lambda_{ULI} + \lambda_F) \cdot (\lambda_{LLI} + \lambda_F)]$
Verenkiertoon siirtyvä osuus	$\lambda_{ST} \lambda_B/[(\lambda_{ST} + \lambda_F) \cdot (\lambda_{SI} + \lambda_B + \lambda_F)]$

TAULUKKO 7.2 Radioaktiivisten hajoamisten lukumäärä ruoansulatuselimistön eri osissa, kun tiettyä radioaktiivista ainetta on nieltä 1 Bq

Ruoansulatuselimistöön tulleesta radioaktiivisesta aineesta imeytyvä osuus riippuu aineen liukoisuudesta. Tätä osuutta kuvaa absorptio- eli imeytymiskerroin f_1

$$f_1 = \frac{\lambda_B}{(\lambda_{SI} + \lambda_B)}. \quad (7.14)$$

Jos aine imeytyy kokonaan kehon nesteisiin, on absorptiokerroin $f_1 = 1$. Tällöin kaiken ruoansulatuselimistöön tulleen aineen oletetaan siirtyvän siirtolokeroon eli kehon nesteisiin. Jos $f_1 = 0$, aine ei liukene ruoansulatusnesteisiin lainkaan, vaan se siirtyy kokonaisuudessaan ohutsuolesta paksusuoleen ja poistuu aikanaan ulosteen mukana. Absorptiokertoimen arvo voi muuttua iän mukana. Suurimmat absorptiokertoimen arvot ovat vastasyntyneillä, mutta pienevät nopeasti siten, että ne ovat lähes aikuisten arvojen suuruisia jo imetysvaiheen päättyessä. Niinpä aikuisille käytettäviä arvoja voidaan soveltaa yhden vuoden iästä lähtien. Työpaikoilla esiintyvien radionuklidien kemiallinen muoto

on yleensä tiedossa ja usein erilainen kuin muualla ympäristössä ja elintarvikkeissa. Viimeksi mainittujen kohdalla kemiallista muotoa ei välttämättä tiedetä. Tämän vuoksi joidenkin nuklidien kohdalla käytetään erilaisia kertoimien arvoja työpaikalla ja muualla elinympäristössä tapahtuvalle saannille.

Ruoansulatuselimistössä olevat radioaktiiviset aineet aiheuttavat säteilyannoksen mahalaukun ja suolten seinämille. Mikäli ruoan tai juoman mukana tullut radioaktiivinen aine lähettää alfa-, beeta- tai erittäin pienenergistä gamma- tai röntgensäteilyä, osa säteilystä absorboituu mahalaukun ja suoliston sisältöön (katso taulukko 7.3). Siten ruoansulatuskanavan sisäpinnoille aiheutuu vatsan ja suoliston ollessa täynnä pienempi annos kuin niiden ollessa tyhjinä.

Jos radionuklidi lähettää läpäisevää säteilyä, ruoansulatuselinten seinämiin kokonaisuudessaan absorboitunutta annosta pidetään myös seinämien limakalvojen saaman annoksen mittana. Beetasäteilyn tapauksessa ruoansulatuselimistön seinämiin absorboituva energia on noin puolet ja alfasäteilyn tapauksessa noin sadasosa sen sisältöön absorboituvasta spesifisestä efektiivisestä energiasta. Taulukossa 7.1 on annettu kudospainotuskerroin vain koko paksusuolelle. Laskettaessa efektiivistä annosta paksusuolen yläosan ja alaosan saamat ekvivalenttiannokset summataan ottaen huomioon elinten seinämien massat eli $H(\text{paksusuoli}) = 0,57 H_{\text{ULI}} + 0,43 H_{\text{LLI}}$. Kaavaa voidaan käyttää kaikenikäisille ihmisille, koska paksusuolen ylä- ja alaosan seinämien massojen suhde ei muutu iän mukana.

Ruoansulatus- elimistön osa	Keskimää- räinen viipymä- aika (h)	Siirtymä- nopeusvakio (1/d)	Seinämien massa (g)	Sisällön massa (g)
Mahalaukku (ST)	1	$\lambda_{\text{ST}}=24$	150	250
Ohutsuoli (SI)	4	$\lambda_{\text{SI}}=6$	640	400
Paksusuolen yläosa (ULI)	13	$\lambda_{\text{ULI}}=1,8$	210	220
Paksusuolen alaosa (LLI)	24	$\lambda_{\text{LLI}}=1$	160	135

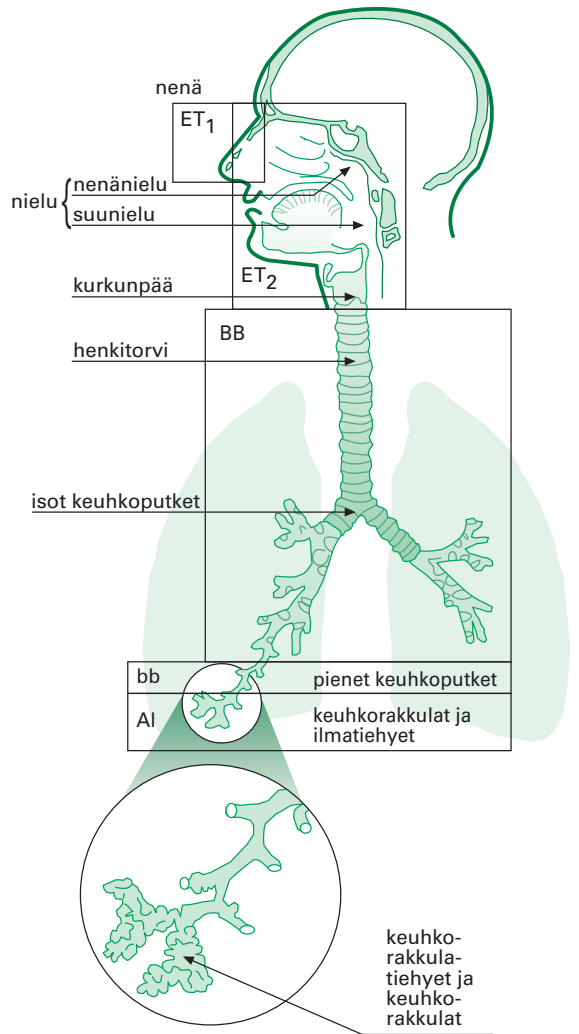
TAULUKKO 7.3 Radionuklidien kulkeutumista ruoansulatuselimistössä kuvaavaan kineettiseen malliin liittyviä parametrejä

7.5

Hengityselinten lokeromalli ja säteilylle herkät kudokset

Ilman mukana sisäänhengitettyjen aineiden biokinetiikan mallintamista ja annoslaskuja varten ICRP on muodostanut lokeromallin, jossa hengityselinmistö on jaettu viiteen osaan (kuva 7.6). Mallissa on otettu huomioon fysiologisten parametrien ja elinten koon muuttuminen iän mukana.

Lisäksi mallissa on keskitetty keuhkojen saaman keskimääräisen säteilyannoksen sijasta tarkastelemaan säteilylle herkkien keuhkoputkiston sisäpinnan kudosten ja keuhkorakkuloiden saamia annoksia. Annokset aiheutuvat pääosin kudosten pinnalle tarttuneiden tai pintakudoksiin liuenneiden radioaktiivisten aineiden lähettämästä säteilystä. Keuhkoputkiston ja -rakkuloiden säteilylle herkät solukerrokset ulottuvat vain muutaman kymmenen mikrometrin syvyyteen. Tästä syystä läpäisevästä gammasäteilystä aiheutuva säteilyannos jää erittäin pieneksi. Alfa-, beeta- tai pienenergistä gammasäteilyä lähettävät radionuklidit ovatkin hengityselimistön säteilyannosten kannalta merkittävimpiä. Keuhkojen ulkopuoliseen osaan (ET) kohdistuvaa säteilyannosta ei oteta huomioon tarkasteltaessa hengityselimistön saamaa säteilyannosta.



KUVA 7.6. Kaavio hengityselimistöstä ja sen jaosta eri osiin biokineettistä lokeromallia varten

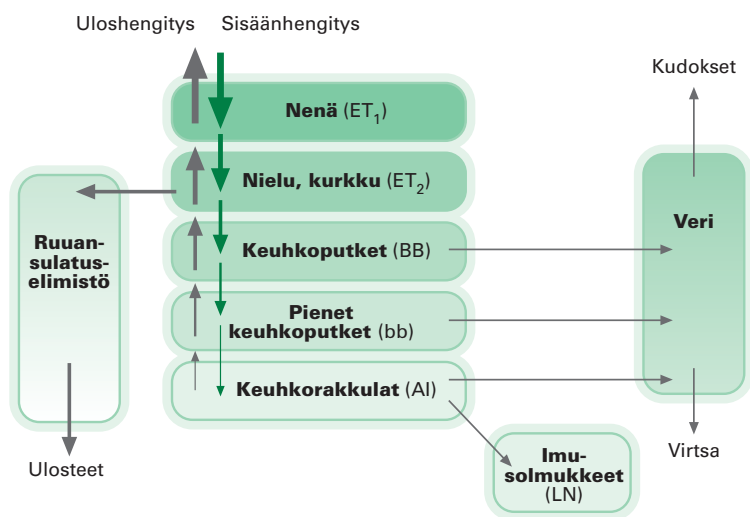
Kuuhkojen ulkopuoliset osat ET: ET₁ = nenän etuosa ja ET₂ = nenän takaosa, suu ja nielu henkitorven päähän asti.

Kuuhkot: BB = henkitorvi ja isot keuhkoputket, bb = pienet keuhkoputket ja AI = keuhkorakku-
lat ja niihin liittyvät ilmatiehyet.

Radioaktiiviset hiukkaset tarttuvat hengityselimistön eri osiin

Hengityselimistön saaman säteilyannoksen suuruuteen vaikuttaa sisäänhengitetyn ilman määrä sekä siinä olevien radionuklidien aktiivisuuspitoisuus ja fysikaalis-kemiallinen olomuoto. Hiukkaskoko on tärkein hiukkasmaisten radioaktiivisten aineiden kulkeutumiseen hengityselimistössä vaikuttava tekijä. Tehokkuus, jolla hiukkaset tarttuvat hengityselimien pintaan, riippuu hiukkasten ominaisuuksien lisäksi ilman virtausnopeudesta hengityselimistön eri osissa ja elinten mittasuhteista, ja siten henkilön iästä ja sukupuolesta. Hiukkasten tarttumista keuhkojen eri osiin kuvaavien parametrien määrittäminen perustuu sekä teoreettisiin laskelmiin että mittaustuloksiin.

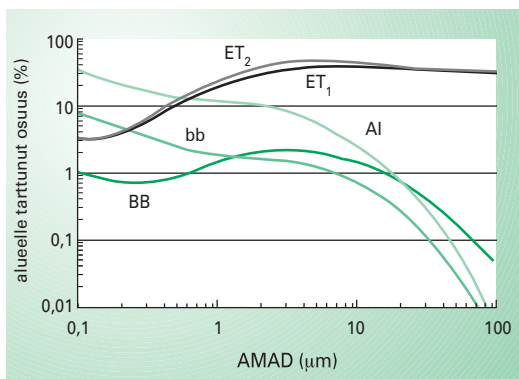
Alueiden ET, BB, bb ja AI (kuva 7.7) oletetaan muodostavan sarjan peräkkäisiä suodattimia, jotka toimivat sekä sisään- että uloshengitettäessä. Ilman kulkuväylät sekä pienenevät että rakenteellisesti monimutkaistuvat mentäessä syvälle hengityselimistöön, jolloin myös ilman virtausnopeus pienenee. Tällöin suodattimien tehokkuus poistaa hiukkasia ilmapirrasta kasvaa. Hiukkasten tarttumiseen hengityselimien sisäpinnan kudoksiin vaikuttavat painovoima, hiukkasten inertia ja Brownin liikkeestä aiheutuva diffuusio. Koska hiukkaskoko vaikuttaa oleellisesti hiukkasten kulkeutumiseen hengityselimistössä, on erikokoiset ja -muotoiset hiukkaset normitettu käsittelyn ja vertailun helpottamiseksi. Hiukkasten koot määritellään niin sanotun AMAD-halkaisijan avulla (luku 3.2).



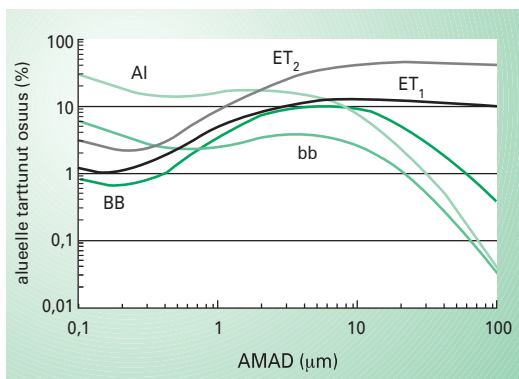
KUVA 7.7 Kaavio radionuklideja sisältävien hiukkasten kulkeutumisesta hengityselimistön eri osiin ja poistumisesta ruoansulatuselimistöön ja imusolmukkeisiin sekä hiukkasista liukenevien radionuklidien imeytymisestä verenkiertoon.

Sisäisen säteilyn aiheuttaman annoksen kannalta merkityksellisten hiukkasten koot vaihtelevat yksittäisten atomien suuruusluokasta (halkaisija noin $0,0005\ \mu\text{m}$) jopa yli $100\ \mu\text{m}$ hiukkasiin. Suuret hiukkaset tarttuvat tehokkaasti nenän ja nenä-nielun alueelle (kuva 7.8). Keuhkorakkuloihin pidätyvät tehokkaimmin noin $0,01\ \mu\text{m}$ hiukkaset. Kun hengitetään nenän kautta, ET_1 :n ja ET_2 :n alueelle tarttuvien hiukkasten määrä on hiukkaskoosta riippumatta likimain yhtä suuri, mutta suun kautta hengitettäessä suun ja nielun alueelle ET_2 jää selkeästi enemmän hiukkasia kuin nenän alueelle ET_1 . Muilla alueilla erot eivät ole yhtä suuria, mutta suun kautta hengitettäessä pääsee syvälle keuhkoihin suurempi osa hiukkasis-
ta kuin hengitettäessä nenän kautta.

a)



b)



KUVA 7.8 Hiukkasten tarttuminen hengityselimistön osiin AMAD-halkaisijan funktiona

Kuva esittää tilannetta, jossa kevyttä työtä tekevä aikuinen mies hengittää a) nenän kautta ja b) suun kautta (60 prosenttia hengitysilmaasta kulkee suun kautta). Hiukkaskoon oletetaan olevan lognormaalisesti jakautunut.

ICRP:n mallissa oletetaan, että työpaikoilla esiintyvien radionuklideja sisältävien hiukkasten AMAD-halkaisija on $5\ \mu\text{m}$. Kotiympäristön huoneilman hiukkasten samoin kuin ydinlaitosonnettomuuden tai ydinasekoekaiden seurauksena ympäristöön pääsevien radioaktiivisten hiukkasten hal-

kaisijaksi oletetaan 1 μm . Arvioitaessa hengityselimistön eri osiin tarttuvien hiukkasten määrää (taulukko 7.4) työympäristössä oletetaan, että työntekijän työajasta kaksi kolmasosaa on kevyttä työtä ja kolmasosa istumista. Työhön kuluvan ja elintoimintojen ylläpitämiseen tarvittavan energian tuottamiseksi työntekijä tarvitsee hengitysilmaa 1,2 m³/h. Kotiympäristössä on oletettu, että 55 prosenttia ajasta kuluu nukkumiseen, 15 prosenttia istumiseen ja 30 prosenttia kevyeen työhön. Tällöin keskimääräisen sisäänhengitysilman tarve on 0,78 m³/h. Kotiympäristössä noin puolet ja työympäristössä noin 18 prosenttia sisäänhengitetyistä hiukkasista poistuu suoraan uloshengitysilman mukana. Ero johtuu hiukkasten erilaisesta koosta. Samasta syystä hengityselimien ulkoisiin osiin ET₁ ja ET₂ tarttuvien hiukkasten osuus on työympäristössä selkeästi suurempi kuin kotiympäristössä. Tästä seuraa, että kotiympäristössä keuhkorakkuloihin AI kulkeutunut hiukkasmäärä on suurempi kuin työympäristössä.

Hengityselimistön osa	Osuus sisäänhengitetyistä hiukkasista, joka tarttuu tarkasteltavaan hengityselimistön osaan (%)	
	Työympäristö (kevyt työ, sisäänhengitys 1,2 m ³ /h)	Kotiympäristö (aikuinen mies, sisäänhengitys 0,78 m ³ /h)
ET ₁	33,9	14,2
ET ₂	39,9	17,9
BB	1,8	1,1
bb	1,1	2,1
AI	5,3	11,9
Yhteensä	82,0	47,3

TAULUKKO 7.4 Hengityselimien pintakudoksiin tarttuvien hiukkasten prosentuaalinen jakauma työympäristössä (kevyt työ, AMAD 5 μm , $\sigma_g = 2,5$) ja kotiympäristössä (AMAD 1 μm , $\sigma_g = 2,47$)

Kummassakin tapauksessa oletetaan hengityksen tapahtuvan nenän kautta (ICRP 66).

Hiukkasten poistuminen hengityselimistöstä

Hiukkasten poistumista keuhkoista säätelee imeytyminen vereen (kuva 7.7), värekarvaliike ja siihen liittyvä liman kulkeutuminen sekä makrofagien suorittama kuljetus (kuva 7.9). Liukenevia aineita sisältävien hiukkasten osalta tärkein prosessi on imeytyminen vereen. Värekarvaliike kuljettaa liukenemattomia hiukkasia keuhkoista nieluun ja sitä kautta ruoansulatuselimistöön. Makrofagit siirtävät vaikealiukoisia aineita hitaasti imusolmukkeisiin. ICRP:n mallissa värekarvaliikkeen ja makrofagien kuljetusprosessien nopeuksien ei oleteta riippuvan kyseessä olevas-

ta aineesta, henkilön iästä eikä sukupuolesta. Siirtymänopeuksia määritettäessä perustana ovat ihmistutkimuksista saadut tulokset.

Kun ei oteta huomioon radioaktiivisen hajoamisen vaikutusta eikä muilta hengityselimistön alueilta tarkasteltavalle alueelle siirtyvän aineen määrää, hengityselimistön alueella i olevan ainemäärän muuttumisnopeus voidaan esittää yhtälöllä

$$dq_i(t)/dt = -\lambda_i(t)q_i(t), \quad (7.15)$$

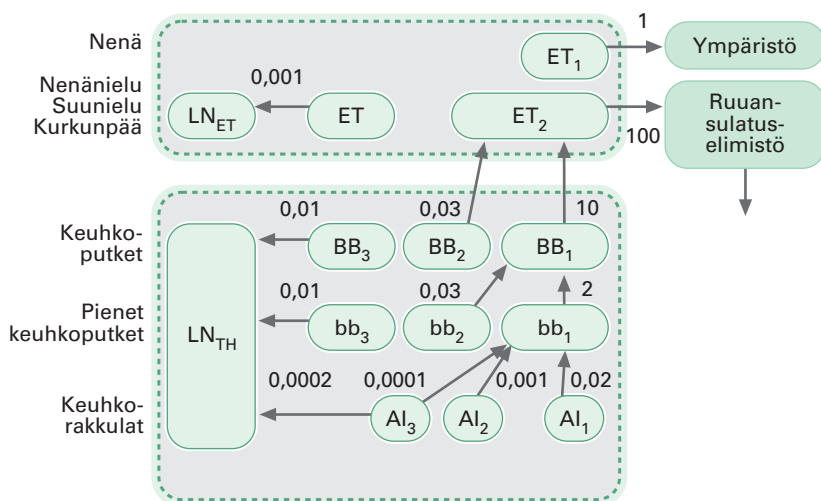
missä $q_i(t)$ on hengityselimistön alueelle i (ET₂, BB, bb tai AI) ajan t kulluttua saannista pidäytyneen aineen määrä (Bq) ja $\lambda_i(t)$ alueelta i poistuvan materiaalin hetkellinen poistumisnopeusvakio (1/d).

Radionuklidin siirtymisen elimistön alueelta toiselle ja imeytymisen kehon nesteisiin oletetaan olevan toisistaan riippumattomia, jolloin $\lambda_i(t)$ voidaan esittää muodossa

$$\lambda_i(t) = m_i(t) + s_i(t) = g_i(t) + l_i(t) + s_i(t), \quad (7.16)$$

missä $m_i(t)$ on hiukkasten poistumisnopeusvakio alueelta i kuljetusprosessien ja $s_i(t)$ vastaavasti imeytymisen vaikutuksesta. Yhtälössä 7.16 on $m_i(t)$ on jaettu vielä kahteen osaan, joista $g_i(t)$ kuvaa hiukkasten kulkeutumista ruoansulatuselimistöön ja $l_i(t)$ hiukkasten siirtymistä makrofagien kuljettamina imusolmukkeisiin. Kun tarkasteltavat hiukkaset ovat täysin liukene-mattomia eli imeytymistä vereen ei tapahdu lainkaan, on $s_i(t) = 0$.

Siirtymänopeudet eivät kuitenkaan ole vakioita, vaan muuttuvat ajan mukana. Tämän huomioon ottamiseksi keuhkojen kineettisessä mallissa oletetaan, että lokeroihin AI₁, AI₂ ja AI₃ kulkeutuneiden liukenemattomien hiukkasten määrät jakautuvat suhteessa 0,3:0,6:0,1 ja että siirtymisnopeutta pienten keuhkoputkien alueelle lokeroon bb₁ kuvaavat siirtymisnopeusvakiot ovat vastaavassa järjestyksessä 0,02, 0,001 ja 0,0001 1/d (kuva 7.9). Tällöin siirtymistä voidaan kuvata kolmen eksponenttifunktion summalla: $0,3 \cdot e^{-0,02 \cdot t} + 0,6 \cdot e^{-0,001 \cdot t} + 0,1 \cdot e^{-0,0001 \cdot t}$. Jos $T(1/2)$ on poistumisnopeutta vastaava puoliintumisaika, niin $g_i(t) = \ln 2/T(1/2)$ ja siirtymisnopeusvakioita vastaavat puoliintumisaikat ovat silloin 35, 700 ja 7 000 d. Makrofagien imusolmukkeisiin erittäin hitaasti kuljettama hiukkasosuus sisältyy lokeron A₃ osuuteen. Mallin mukaan keuhkorakkuloista olevista hiukkasista 30 prosenttia poistuu 35 päivän ja 60 prosenttia 700 päivän puoliintumisajan määräämällä nopeudella ja loput varsin hitaasti. Vastaavaa mallia sovelletaan myös muihin keuhkojen osiin.



KUVA 7.9 Hengityselimistön biokineettinen lokerokaavio, joka kuvaa liukenemattomien hiukkasten poistumista keuhkojen eri osista.

Kuvassa nuolien vieressä olevat luvut ovat siirtymänopeusvakioita yksikkönä 1/d. Merkintä LN_{ET} tarkoittaa keuhkojen ulkopuolisia imusolmukkeita ja LN_{TH} varsinaisia keuhkojen imusolmukkeita.

Suurin osa alueille BB ja bb tarttuneista hiukkasista kulkeutuu värekarvaliikkeen ansiosta nieluun ja sieltä ruoansulatuselimistöön. Lokeroissa BB₁, bb₁ ja BB₂, bb₂ olevat hiukkasmäärät riippuvat hiukkasten fysikaalisesta halkaisijasta. Halkaisijaltaan alle 2,5 µm hiukkasista on lokeroissa BB₁ ja bb₁ noin puolet, mutta osuus alkaa pienentyä halkaisija kasvaessa. Makrofagien merkitys hiukkasten poistumisessa on pieni. Ne kuljettavat 0,7 prosenttia keuhkoputkiston hiukkasista (lokerot BB₃ ja bb₃) imusolmukkeisiin. Alueelle ET₂ tarttuneista hiukkasista vain 0,05 prosenttia poistuu makrofagien siirtäminä pääosan kulkeutuessa nopeasti liman mukana ruoansulatuselimistöön. Alueelle ET₁ tarttuneet hiukkaset eivät kulkeudu muualle elimistöön ja poistuvat esimerkiksi niistettäessä.

7.6 | Imeytyminen hengityselimistöstä kehon nesteisiin

Kiinteässä olomuodossa olevat radionuklidit

Radioaktiivisten aineiden imeytyminen hengityselimistöstä kehon nesteisiin eli käytännössä vereen riippuu niiden fysikaalisesta olomuodosta ja kemiallisista ominaisuuksista. Imeytymisen oletetaan tapahtuvan kullekin aineelle ominaisella nopeudella, joka on sama koko hengityselimistön alu-

eella lukuunottamatta nenän aluetta ET_1 . Liukenevat aineet imeytyvät hengityselimistön seinämistä ja keuhkorakkuloista vereen (kuva 7.7).

Hengityselimiin joutuneet radioaktiiviset aineet jaotellaan imeytymisnopeuden perusteella neljään keuhkoabsorptioluokkaan:

V-luokka: Erittäin nopea imeytyminen. V-luokan radioaktiiviset aineet siirtyvät keuhkoista täydellisesti ja välittömästi kehon nesteisiin kemiallista muotoaan muuttamatta.

F-luokka: Nopea imeytyminen. Kaikki F-luokan radionuklidit imeytyvät hengityselimistä kehon nesteisiin nopeudella, jota vastaava puoliintumisaika on 10 minuuttia. Lähes kaikki alueisiin BB, bb ja AI ja puolet alueelle ET_2 tarttuneista radionuklideista imeytyy kehon nesteisiin. Loput alueelle ET_2 tarttuneesta materiaalista kulkeutuu ruoansulatuselimistöön.

M-luokka: Kohtalaisen nopea imeytyminen. M-luokan radionuklideista kymmenesosa imeytyy kehon nesteisiin puoliintumisajan ollessa 10 minuuttia ja 90 prosenttia puoliintumisajan ollessa 140 päivää. Kymmenesosa alueille BB ja bb ja viisi prosenttia alueelle ET_2 tarttuneesta materiaalista imeytyy nopeasti. Noin 70 prosenttia alueelle AI tarttuneesta radionuklidimäärästä päätyy lopulta kehon nesteisiin.

S-luokka: Hidas imeytyminen. S-typin radionuklideista vain tuhannesosa imeytyy nopeasti puoliintumisajan ollessa 10 minuuttia ja loput 99,9 prosenttia varsin hitaasti puoliintumisajan ollessa 7 000 päivää. Imeytyminen alueilta ET , BB tai bb on vähäistä ja vain kymmenesosa alueelle AI tarttuneesta aineesta imeytyy lopulta kehon nesteisiin.

Jos radionuklidi on kiinnittyneenä tai sitoutuneena muista materiaaleista koostuneeseen hiukkaseen, se voi vapautua ja liueta vasta hiukkasen hajoittua. Tällöin radionuklidin absorptioluokka on M tai S, vaikka radionuklidi muuten kuuluisikin liukoisuusominaisuuksiensa takia luokkaan F. Esimerkiksi maaperän mineraaleihin tai vaikkapa ydinpolttoainehiukkasiin sitoutuneiden radionuklidien absorptioluokka voi vaihdella. Tshernobylin onnettomuudessa ympäristöön vapautuneiden ydinpolttoainehiukkasten sisältämä ^{90}Sr liukenee polttoainehiukkasen hajoamisen määrämällä nopeudella. Huonon liukoisuutensa vuoksi esimerkiksi plutonium kuuluu luokkaan S. Kaikki cesiumin ja jodin yhdisteet kuuluvat

helppoliukoisuutensa takia luokkaan F. Sen sijaan uraani voi yhdisteestä riippuen kuulua luokkaan F, M tai S.

Kaasumaiset tai höyrymäiset radionuklidit

Kaasu- tai höyrymuodossa olevat radionuklidit pääsevät hengitysilman mukana kaikkialle keuhkoihin. Sisään- ja uloshengitettäessä melkein kaikki näiden aineiden molekyylit joutuvat kosketuksiin hengityselimien pintakudosten kanssa. Osa aineista tarttuu pinnan limakalvoihin ja liukee tai reagoi pinnan limakalvojen kanssa. Loppuosa poistuu hengityselimistöstä uloshengitysilman mukana. Keuhkojen eri alueille jäävän materiaalin määrään vaikuttaakin vain kaasujen ja höyryjen liukoisuus ja reaktiivisuus. Näiden ominaisuuksien perusteella kaasut ja höyryt on ryhmitelty kolmeen SR-luokkaan (S = Solubility, R = Reactivity):

Luokka SR-0: Liukenemattomat ja ei-reaktiiviset kaasut ja höyryt. Aineiden tarttuminen hengityselimistön eri osiin on erittäin vähäistä. Säteilyannosta saadaan vain sinä aikana, kun radioaktiivinen aine viipyy hengityselimistössä.

Luokka SR-1: Liukoiset tai reaktiiviset kaasut ja höyryt. Aineet voivat tarttua kaikkialle hengityselimistöön, jolloin ne aiheuttavat säteilyannoksen hengityselimistölle. Suurin osa saadusta annoksesta aiheutuu kuitenkin kehon nesteisiin imeytyneistä radioaktiivisista aineista. Jos radionuklidin jakautumista hengityselimistön eri osiin ei tunneta, oletetaan, että jakauma on: 10 % ET₁, 20 % ET₂, 10 % BB, 20 % bb ja 40 % AI.

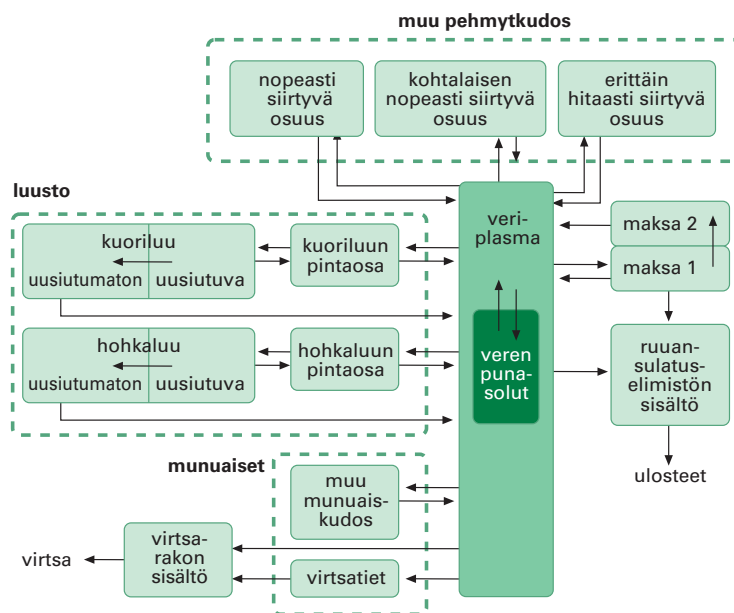
Luokka SR-2: Erittäin helppoliukoiset ja voimakkaasti reaktiiviset kaasut ja höyryt. Imeytyminen kehon nesteisiin on täydellistä ja tapahtuu välittömästi, kun radionuklidit joutuvat kosketuksiin keuhkojen ulkopuolisen hengityselimistön osan ET₂ kanssa. Säteilyannos aiheutuu käytännössä kehon nesteisiin imeytyneistä radionuklideista. Hengityselimien saama annos on pieni.

Jalokaasut kuuluvat tyypillisesti luokkaan SR-0. Kuitenkin esimerkiksi radonilla tehdyt imeytymistutkimukset osoittavat, että pieni osa hengitysilman radonista liukenee ja imeytyy elimistöön keuhkorakkuloista. Radonin tytäraineet ovat kiinteitä ja keuhkoabsorptioluokka riippuu niitä kantavien

hiukkasten fysikaalis-kemiallisista ominaisuuksista. Höyrymäinen jodi kuuluu reaktiivisena aineena luokkaan SR-1. Kymmenesosa sisäänhengitetystä jodista jää alueelle ET_1 , 40 prosenttia alueelle ET_2 ja 50 prosenttia alueelle BB. Myös metyyljodidi kuuluu luokkaan SR-1. Luokkaan SR-2 kuuluvat aineet jäävät lähes kokonaan alueen ET_2 limakalvoihin, josta ne imeytyvät nopeasti kehon nesteisiin. Höyrymäinen tritioitu vesi kuuluu luokkaan SR-2. Se imeytyy myös suoraan ihon läpi, mikä voi aiheuttaa jopa noin puolet tritiumista aiheutuvasta efektiivisestä annoksesta.

7.7 Käyttäytyminen elimistössä imeytymisen jälkeen

Ruoansulatus- tai hengityselimistöistä vereen imeytyneet radioaktiiviset aineet poistuvat verenkierrosta ja siirtyvät aineenvaihduntaominaisuuksiensa mukaisesti elimistön eri osiin. Radionuklidien kulkeutumista elimistön osasta toiseen eli lokerosta toiseen kuvataan ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälöillä vastaavalla tavalla kuin kuvattiin aineiden siirtymistä ja imeytymistä ruoansulatuselimistössä. Vaikka monet kuvan 7.4 elimistä osallistuvat vähäisessä määrin radionuklidin aineenvaihduntaan, otetaan malliin omina lokeroinaan mukaan vain ne kudokset ja elimet, jotka ovat olennaisia kyseisen radionuklidin aineenvaihdunnan kuvaamiseksi. Siitä huolimatta malli voi olla varsin monimutkainen (kuva 7.10).



KUVA 7.10 Esimerkki ICRP:n käyttämästä strontiumin, radiumin ja uraanin kinetiikan matemaattiseen mallintamiseen soveltuvasta lokerokaaviosta

Koska samaan alkuaineryhmään kuuluvat radionuklidit käyttäytyvät elimistössä lähes samalla tavalla, kuvataan niiden kulkeutumista myös samalla kyseiselle aineryhmälle sopivalla mallilla. Esimerkiksi uraani, strontium ja radium kertyvät luustoon ja niiden jakauma luustossa on samanlainen. Muutaman kuukauden kuluttua saannista ne ovat sitoutuneet lähes kokonaan mineraaliluuhun. Pehmeisiin kudoksiin siirtynyt osuus palaa uudestaan verenkiertoon ja aloittaa uudelleen saman aineenvaihduntakierroksen osan poistuessa elimistöstä eritteiden mukana. Luustoa on mallissa tarkennettu jakamalla se useaan eri osaan, jotta luuston eri osien välinen aineenvaihdunta voidaan ottaa huomioon.

Jos radionuklidi hajoaa kehossa radioaktiiviseksi tytäraineeksi, oletetaan tytäraineen käyttäytyvän kuten sen emonuklidi ellei tyttären käyttäytymisestä ole käytettävissä muuta tietoa. Näin on aina kun tytäraineen fysikaalinen puoliintumisaika on niin lyhyt, että se ehtii hajota ennen poistumistaan biologisilla prosesseilla kyseisestä elimestä tai kudoksesta.

Kun radionuklidi on imeytynyt vereen ja siirtynyt kemiallisten ominaisuuksiensa määräämällä tavalla elimiin tai kudoksiin, sen määrä niissä alkaa vähetä radioaktiivisen hajoamisen lisäksi biologisen erittymisen vaikutuksesta. Kehossa olevan radionuklidin määrän $q(t)$ muuttuminen määräytyy kaikkien aineenvaihduntaan osallistuvien elimien ja kudosten yhteisvaikutuksesta. Määrä voidaan kuvata kahden tai useamman eksponenttifunktion summana. Jos tarkastellaan radionuklidin määrän muuttumista biologisen erittymisen seurauksena ottamatta huomioon radioaktiivisen hajoamisen vaikutusta, niin

$$q(t) = q(0) \left(a_1 e^{-\lambda_{1,B} \cdot t} + a_2 e^{-\lambda_{2,B} \cdot t} + \dots + a_n e^{-\lambda_{n,B} \cdot t} \right), \quad (7.17)$$

missä $q(0)$ on kehossa hetkellä $t = 0$ ollut radionuklidin määrä (Bq) ja a_i on osuus $q(0)$:sta, joka poistuu kehosta biologisen poistumisnopeusvaktion $\lambda_{i,B}$ määräämällä nopeudella.

Jos yhtälö 7.17 jaetaan $q(0)$:lla, puhutaan retentio- eli pidättymisfunktioista $R(t)$

$$R(t) = a_1 e^{-\lambda_{1,B} \cdot t} + a_2 e^{-\lambda_{2,B} \cdot t} + \dots + a_n e^{-\lambda_{n,B} \cdot t}. \quad (7.18)$$

Retentiofunktio kuvaa kehon nesteisiin imeytynyttä osuutta, joka hetkellä $t = 0$ tapahtuneesta 1 Bq:n suuruudesta kertasaannista on elimistössä jäljellä ajan t kuluttua. Retentiofunktio saadaan seuraamalla kehossa olevan radionuklidin määrän vähenemistä ajan funktiona ja sovittamalla mittauspisteisiin yhden tai useamman eksponenttifunktion summa. Re-

tentiofunktion yksittäisten komponenttien kuvaamaa radionuklidin määrän vähenemisnopeutta biologisen erittymisen seurauksena kuvaa poistumisnopeusvakio $\lambda_{i,B}$, jonka merkitystä voidaan havainnollistaa biologisella puoliintumisaajalla $T_{1/2,i}(biol)$. Yhtälössä 7.18 kukin poistumisnopeusvakio on muotoa $\lambda_{i,B} = \ln 2 / T_{1/2,i}(biol)$. Biologinen puoliintumisaika tarkoittaa aikaa, jonka kuluessa a_i :n suuruinen osuus kehossa olevan radionuklidin aktiivisuudesta vähenee biologisen erittymisen takia puoleen. Vaikka kuhunkin komponenttiin liittyy biologinen puoliintumisaika, niin säteilyannoksen kannalta yleensä tärkein on komponentti, johon liittyvä puoliintumisaika on pisin. Esimerkkinä voidaan tarkastella radionuklidia ^{137}Cs , jonka retentiofunktio voidaan esittää kahden eksponenttifunktion summana. Aikuisilla ^{137}Cs :n retentiofunktio on

$$R(t) = 0,1 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/2} + 0,9 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/110}. \quad (7.19)$$

Yhtälön oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa kehosta nopeasti poistuvan ^{137}Cs :n määrää. Saantihetkellä eli hetkellä $t = 0$ kymmenesosa kehossa olleesta cesiumista poistuu biologisen puoliintumisaajan ollessa kaksi päivää. Tämä komponentti edustaa sitä ^{137}Cs -määrää, joka kertyy munuaisiin muutaman tunnin kuluessa saannista. Munuaisista ^{137}Cs erittyy virtsaan. Retentiofunktion toinen komponentti kuvaa suhteellisen hidasta erittymistä ($T_{1/2}(biol) = 110$ d). Kehoon imeytyneestä määrästä 90 prosenttia siirtyy verestä lihaksistoon ja muihin kudoksiin. Koska tämä komponentti määrää käytännössä, kuinka nopeasti ^{137}Cs poistuu elimistöstä biologisen erittymisen välityksellä, sanotaan ^{137}Cs :n biologisen puoliintumisaajan olevan 110 d. Lapsilla cesiumin erittyminen on nopeampaa kuin aikuisilla. Alle viiden vuoden ikäisillä lapsilla cesiumin pidättymisfunktioilla on vain yksi komponentti (taulukko 7.5).

Ikä	a_1	$T_{1/2,1}(biol)$ (d)	a_2	$T_{1/2,2}(biol)$ (d)
3 kuukautta	-	-	1,0	16
1 vuosi	-	-	1,0	13
5 vuotta	0,45	9,1	0,55	30
10 vuotta	0,30	5,8	0,7	50
15 vuotta	0,13	2,2	0,87	93
Aikuiset	0,10	2	0,90	110

TAULUKKO 7.5 ^{137}Cs :n retentiofunktion nopeaa ja hidasta biologista erittymistä kuvaavien parametrien muuttuminen iän mukana

Fysiologisista eroista johtuen ^{137}Cs :n biologinen puoliintumisaika voi olla 60–140 vuorokautta. Suomessa suhteellisen pientä joukkoa koskevien tutkimusten tulokset näyttäisivät viittaavan siihen, että aikuisilla cesiumin biologinen puoliintumisaika on Suomessa keskimäärin lyhyempi kuin ICRP:n käyttämä arvo. Naisilla puoliintumisajat vaihtelivat välillä 60–80 d ja miehillä välillä 80–140 d.

Koboltin aineenvaihdunta on cesiumia monimutkaisempaa. Koboltin pidättymistä ja erittymistä kuvaava retentiofunktio on neljän eksponenttifunktion summa

$$R(t) = 0,5e^{-\ln 2 \cdot t/0,5} + 0,3 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/6} + 0,1 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/60} + 0,1 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/800}. \quad (7.20)$$

Ensimmäinen termi kuvaa verenkierrosta munuaisten kautta virtsaan 0,5 päivän biologisella puoliintumisajalla erittyvää osuutta, joka on puolet vereen imeytyneestä koboltista. Loppu vereen imeytyneestä koboltista siirtyy maksaan ja muihin elimiin ja kudoksiin, joihin sen oletetaan jakautuvan tasaisesti. Retentiofunktion kolme viimeistä komponenttia kuvaavat maksaan ja muualle elimistöön pidättyneen koboltimäärän vähenemisnopeutta. Efektiivisen annoksen kertymisen kannalta tärkein on viimeinen eli 800 vuorokauden biologisen puoliintumisajan komponentti. Pitkällä aikavälillä sen määrittelemä osuus aktiivisuuden aikaintegraalista on suurin, vaikka lyhyellä aikavälillä kolme ensimmäistä komponenttia ovatkin merkittävämät. Lapsille käytetään samaa retentiofunktioita kuin aikuisille. Ruoansulatuselimistöön vereen imeytynyt osuus kuitenkin pienenee iän myötä ollen kolmen kuukauden ikäisille 0,6 ja aikuisille 0,1.

Kun sekä biologinen erittyminen että radioaktiivinen hajoaminen otetaan huomioon ja tarkastellaan vain kaksi komponenttia sisältävää retentiofunktioita, niin

$$\begin{aligned} R(t) &= (a_1 e^{-\lambda_{1,B} \cdot t} + a_2 e^{-\lambda_{2,B} \cdot t}) \cdot e^{-\lambda_F \cdot t} \\ &\Leftrightarrow \\ R(t) &= a_1 e^{-\lambda_{1,ef} \cdot t} + a_2 e^{-\lambda_{2,ef} \cdot t}, \end{aligned} \quad (7.21)$$

missä $\lambda_{1,ef} = \lambda_{1,B} + \lambda_F$ ja $\lambda_{2,ef} = \lambda_{2,B} + \lambda_F$.

Ottamalla huomioon, että $\lambda_{1,B} = \ln 2 / T_{1/2,i}(\text{biol})$ ja että $\lambda_F = \ln 2 / T_{1/2,i}(\text{fys})$ saadaan efektiiviseksi puoliintumisajaksi $T_{1/2}(ef)$

$$T_{1/2}(ef) = \frac{T_{1/2}(\text{biol}) \cdot T_{1/2}(\text{fys})}{T_{1/2}(\text{biol}) + T_{1/2}(\text{fys})}. \quad (7.22)$$

$T_{1/2}(ef)$ kuvaa sitä puoliintumisaikaa, jolla radionuklidin aktiivisuus tosi-asiassa vähenee kehossa ja se on aina pienempi kuin fysikaalinen ja biologinen puoliintumisaika. Koska pisimmän biologisen puoliintumisajan komponentti on säteilyannoksen kertymisen kannalta yleensä merkittävin, radionuklidin efektiivisestä puoliintumisajasta puhuttaessa tarkoitetaan usein juuri tätä komponenttia. Annoslaskuissa tulee käyttää efektiivisiä puoliintumisaikoja. Mikäli biologinen ja fysikaalinen puoliintumisaika poikkeavat toisistaan yli kymmenkertaisesti, voidaan efektiivinen puoliintumisaika korvata puoliintumisajoista lyhyemmällä.

Koska ^{137}Cs :n fysikaalinen puoliintumisaika on 30 vuotta, efektiivinen puoliintumisaika on käytännössä sama kuin biologinen puoliintumisaika eli 110 d. Sen sijaan ^{134}Cs :n ($T_{1/2}(fys)=2,04$ a) efektiivinen puoliintumisaika 96 d poikkeaa jo selvästi biologisesta puoliintumisajasta. ^{131}I :n fysikaalinen puoliintumisaika on 8 d ja biologinen puoliintumisaika aikuisilla on noin 80 d, jolloin efektiiviseksi puoliintumisajaksi saadaan 7,3 d. Osa strontiumista kulkeutuu luustoon ja jää sinne käytännössä pysyvästi, joten tässäkin tapauksessa nuklidin fysikaalinen puoliintumisaika määrittää aktiivisuuden vähenemisen.

7.8 | Annosmääritykset

Radionuklidin saannin ja kehon aktiivisuuden välinen yhteys

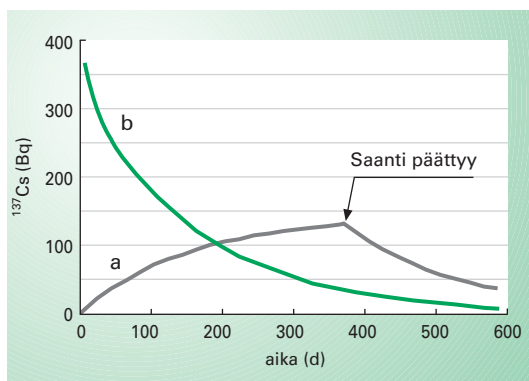
Kun radioaktiivista ainetta niellään tai hengitetään lyhyen ajan kuluessa, on kysymyksessä kertasaanti. Sen jälkeen kehon nesteisiin imeytyneen ja sieltä elimiin ja kudoksiin kulkeutuneen radionuklidin määrä kehossa vähenee retentiofunktion mukaisesti (kuva 7.2 a). Jos päivittäin saatu radionuklidin määrä on pitkän aikaa vakio (kuva 7.2 b), kehossa olevan radionuklidin määrä kasvaa, kunnes saavutetaan tasapainotila. Silloin radionuklidin saanti ja poistuminen ovat yhtä suuria. Näin käy viiden–kuuden puoliintumisajan kuluttua, jonka jälkeen kehon radionuklidimäärän lisääntyminen on enää hyvin vähäistä. Tasapainotilaa ei koskaan saavuteta, jos radionuklidia kertyy enemmän kuin sitä poistuu. Näin on esimerkiksi radioaktiivisen ^{90}Sr :n tapauksessa. Osa vereen imeytyneestä ^{90}Sr :stä kertyy luustoon ja jää sinne käytännössä pysyvästi. Tällöin luuston ^{90}Sr -määrä kasvaa niin kauan kuin saanti jatkuu.

^{137}Cs :n tapauksessa biologinen puoliintumisaika on niin lyhyt fysikaaliseen puoliintumisaikaan verrattuna, että radioaktiivinen hajoaminen voi-

daan jättää ottamatta huomioon. Oletetaan, että cesium saadaan ruoan mukana ja että kaikki saatu cesium absorboituu eli $f_1 = 1$ (kaava 7.14). Jos henkilö saa ravinnosta ^{137}Cs :ää joka päivä 1 Bq vuoden ajan, kehon ^{137}Cs -määrä vuoden lopussa saadaan laskettua integroimalla päivittäisellä saantinopeudella kerrottu retentiofunktio välillä 0–365 d

$$\begin{aligned} q(t) &= \int_0^{365} (1 \text{ Bq/d}) \cdot R(t) dt \\ &= \int_0^{365} (1 \text{ Bq/d}) \cdot (0,1 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/2} + 0,9 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/110}) dt = 129 \text{ Bq}. \end{aligned} \quad (7.23)$$

Vuoden aikana ^{137}Cs :ää on saatu yhteensä 365 Bq, mutta koska cesiumia on koko ajan myös poistunut kehosta, on sitä vuoden lopussa jäljellä vain 129 Bq (kuva 7.11). Jos saanti jatkuisi samanlaisena myös tulevaisuudessa, olisi kehossa lopulta maksimissaan 143 Bq ^{137}Cs :ää. Jos saanti lakkaa vuoden kuluttua, alkaa siihen mennessä kertynyt cesium erittyä pois biologisen puoliintumisajan (110 d) määräämällä nopeudella eli retentiofunktio on nyt $R(t) = e^{-\ln 2 \cdot t/110}$. Retentiofunktion ensimmäistä termiä (kaava 7.19) ei nyt tarvitse ottaa huomioon, koska uutta cesiumia ei tule ja termin arvo pienenee merkityksettömäksi muutamassa päivässä.



KUVA 7.11 ^{137}Cs :n aktiivisuuden muuttuminen kehossa, kun ihminen saa a) tasaisesti 1 Bq joka päivä vuoden ajan, minkä jälkeen saanti lakkaa, b) kertasaantina 365 Bq hetkellä $t = 0$.

Jos vuoden aikana saatu 365 Bq:n määrä olisi saatu yhdellä kertaa heti vuoden alussa, niin kehossa olevan cesiumin määrä kullakin hetkellä saadaan laskettua yhtälöstä

$$q(t) = 365 \text{ Bq} \cdot R(t) = 365 \text{ Bq} \cdot (0,1 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/2} + 0,9 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/110}). \quad (7.24)$$

Säteilyannos on suoraan verrannollinen aktiivisuuskäyrän ja aika-akselin väliseen pinta-alaan, joka saadaan integroimalla jatkuvan saannin tapauksessa $q(t)$:n yhtälö (7.23) ja kertasaannin tapauksessa yhtälö (7.24) ajan suhteen. Tulokseksi saadaan aktiivisuuden aikaintegraali, joka kertoo integrointiaikana kehossa tapahtuneiden hajoamisten lukumäärän U_S yksiköissä Bq \cdot d (vertaa kaava 7.3). Koska cesium jakautuu pääasiassa lihaksistoon ja siten melko tasaisesti koko kehon alueelle, keho kokonaisuudessaan on sekä lähde- että kohde-elin. ^{137}Cs lähettää sekä beeta- että gammasäteilyä, joista beetasäteily absorboituu kokonaan kehon kudoksiin. Sen sijaan osa gammasäteilystä ei absorboitu elimistöön, vaan karkaa pois kehosta.

Kertasaannin tapauksessa säteilyannosta kertyy niin kauan kuin radioaktiivista aihetta on kehossa. Jatkuvan saannin tapauksessa annosta kertyy jo saannin aikana, mutta osa säteilyannoksesta saadaan vasta saannin päätyttyä (kuvat 7.2 ja 7.11). Tässä suhteessa kehossa olevien radionuklidien aiheuttaman annoksen kertymistapa poikkeaa ulkoisen säteilyn annoksen kertymisestä (luku 8). Ulkoisen säteilyn annos kertyy vain sinä aikana, jona oleskellaan kehoon ulkopuolelta kohdistuvan säteilyn kentässä.

Annosmuuntokertoimet

Helpottaakseen sisäisen annoksen määrittämistä ICRP on laskenut valmiiksi kappaleessa 7.2 esitettyihin annoslaskujen perusyhtälöihin ja kappaleissa 7.4 ja 7.5 esitettyihin kineettisiin malleihin perustuvat annoskertoimet, joista esimerkkejä on poimittu liitteisiin 4–6. Kertoimien avulla voidaan laskea efektiivisen annoksen ja elinkohtaisen ekvivalenttiannoksen kertymä, kun tarkasteltavan radionuklidin saanto tiedetään. Annoskertoimet on taulukoitu erikseen suun kautta ja hengityksen kautta tapahtuvalle saannille. Tällöin on huomattava, että radionuklidin saanto tarkoittaa niellyn tai sisäänhengitetyn radioaktiivisen aineen määrää ennen kuin ainetta on ehtinyt poistua kehosta, tai sen määrä on vähentynyt radioaktiivisen hajoamisen seurauksena.

Annoskertoimet on laskettu erikseen väestölle ja säteilytyöntekijöille. Väestölle annoskertoimet on laskettu 3 kuukauden ikäisille ja 1, 5, 10, 15 vuoden ikäisille lapsille sekä aikuisille. Kertoimien avulla lasketaan 70 vuoden ikään mennessä kertyvä annos. Työntekijöille kertoimet on annettu vain 18 vuotta täyttäneille henkilöille ja tällöin annoskertymä lasketaan 50 vuoden ajalta. Iältään 16–18 vuotiaisiin opiskelijoihin ja harjoittelijoihin sovelletaan väestölle annettuja kertoimia. Väestöön

kuuluville aikuisille annoskertoimet suun kautta saaduille radionuklideille ovat samat kuin työntekijöillä, mutta hengitysteitse saaduille radioaktiivisille aineille lasketut annoskertoimet poikkeavat toisistaan. Tähän on syynä työpaikoilla ja muualla elinympäristössä olevien hiukasten kokoero.

Liitteessä 4 on esitetty esimerkkinä ICRP:n julkaisemat annoskertoimet, joiden avulla voidaan laskea suun kautta saadun ^{131}I :n eri elimille aiheuttama ekvivalenttiannoksen sekä efektiivisen annoksen kertymä, kun kerta-annos on 1 Bq. Ruoansulatuselimistöstä jodi imeytyy täysin vereen ($f_1 = 1$). Yli 3 kuukauden ikäisillä kolmasosa imeytyneestä jodista kertyy kilpirauhaseen. Kilpirauhanen on radiojodin säteilyn vahingollisten vaikutusten kannalta herkin elin. Jodin biologinen puoliintumisaika pidentyy iän mukana. Kolmen kuukauden ikäisillä jodin biologinen puoliintumisaika on 11 d ja aikuisilla 80 d. Efektiiviset puoliintumisaikat ovat vastaavasti 4,6 ja 7,3 d. Lyhyemmästä efektiivisestä puoliintumisaikasta huolimatta suurin annos yksikköaktiivisuutta kohti aiheutuu alle vuoden ikäisen lapsen kilpirauhaselle, koska tämän ikäisen lapsen kilpirauhasen massa on pieni on aikuisen kilpirauhasen massa verrattuna. Alle 1-vuotiaan lapsen kilpirauhaselle ekvivalenttiannoksen samoin kuin efektiivisen annoksen kerroin onkin yli kahdeksankertainen aikuisen vastaaviin annoskertoimiin verrattuna. Kilpirauhasen massan kasvaessa iän myötä annoskertoimien ero pienenee.

Toisaalta on huomattava, että esimerkiksi hengitettäessä jodipitoista ilmaa lasten saama jodimäärä on pienempi kuin aikuisten saama. Tämän takia lasten ja aikuisten saamien annosten ero on pienempi kuin annoskertoimien perusteella voisi olettaa. Hengityksen kautta tapahtuvan altistuksen osalta ero on vain 2–3 kertainen. Jos maito sisältää radioaktiivista jodia, lasten kilpirauhasen saama säteilyannos voi kuitenkin olla huomattavasti suurempi kuin aikuisilla ja siten suurempi kuin pelkästään annoskertoimia tarkastelemalla voisi olettaa. Tässä tapauksessa ero johtuu siitä, että lapset juovat maitoa painoonsa nähden suhteellisesti enemmän kuin aikuiset, jolloin lasten saama radioaktiivisen jodin määrä on suhteellisesti suurempi kuin aikuisten. Tshernobylin onnettomuudessa vapautunut radioaktiivinen jodi aiheutti lähiympäristön lasten kilpirauhasille suuria, jopa muutaman sievertin suuruisia ekvivalenttiannoksia. Vaikka ekvivalenttiannokset jäivät suurimmalle osalle lapsista huomattavasti pienemmiksi, on lasten kilpirauhassyöpätapausten määrän todettu kasvaneen voimalliseksi ympäristössä. Radioaktiivisen jodin osalta säteilysuojelussa kiinnitetäänkin erityistä huomiota lasten kilpirauhasen saaman säteilyannoksen minimoimiseen.

Laskettaessa ikäryhmään g kuuluvan henkilön efektiivisen annoksen kertymää otetaan huomioon sekä niellyt että hengitetyt radioaktiiviset aineet eli

$$E(\tau) = \sum_j h(g)_{j,s} \cdot I_{j,s} + \sum_j h(g)_{j,h} \cdot I_{j,h}, \quad (7.25)$$

missä $h(g)_{j,s}$ ja $h(g)_{j,h}$ ovat annoskertoimet (Sv/Bq) suun s ja hengityksen h kautta kehoon joutuneelle radionuklidille j ikäryhmään g kuuluvan henkilön tapauksessa ja $I_{j,s}$ ja $I_{j,h}$ ovat vastaavasti radionuklidin suun ja hengityksen kautta tapahtuneet saannot (Bq).

7.9 Suorat mittausmenetelmät annosmäärittämisessä

Sekä luonnollisten että keinotekoisien radioaktiivisten aineiden aiheuttama sisäisen säteilyn annos voidaan määrittää ja sitä voidaan valvoa usealla eri tavalla suorien ja epäsuorien menetelmien avulla. Suorat mittaukset perustuvat fotonien (kirja 1, luvut 1.5 ja 5.2) havaitsemiseen ihmisen ulkopuolella sijaitsevien säteilyn ilmaisimien avulla. Gamma- tai röntgensäteilyn energian on oltava niin suuri, ettei säteily absorboitu kokonaan elimistöön, vaan osa pystyy tunkeutumaan kudosten läpi kehon ulkopuolella olevaan ilmaimeen. Suoralla mittauksella voi havainnoida koko kehon (niin sanottu kokokehomittaus, kirja 1 luku 5.6) tai yksittäisen elimen – kuten esimerkiksi kilpirauhasen – sisältämien radioaktiivisten aineiden lähettämää säteilyä.

Suorat mittaukset ovat tärkeitä seurattaessa esimerkiksi ydinvoimalaonnettomuuksien jälkeen väestölle aiheutuvaa säteilyannosta. Valmiustarkoituksia varten on kehitetty yksinkertaisia mittauslaitteistoja, joilla lyhyessä ajassa voidaan määrittää ihmisessä olevien radionuklidien kokonaismäärä ja todeta, ylittävätkö ne toimenpiteitä vaativan tason.

Yksinkertaisin tapa laskea säteilyannos on käyttää hyväksi edellä esiteltyjä ICRP:n annoskerrointaulukkoja. Vaikeutena on, että tällöin on tiedettävä radionuklidin saanto. Kokokehomittauksella pystytään havaitsemaan kehossa mittaushetkellä olevat gamma- tai röntgensäteilyä lähettävät radionuklidit ja selvittämään niiden määrät. Radionuklidien saanti on kuitenkin voinut tapahtua päiviä, kuukausia tai jopa vuosia ennen mittausta. Näin ollen mittaustulos ei edusta saantoa, vaan sitä radionuklidin määrää, joka on biologisen erittymisen ja radioaktiivisen hajoamisen seurauksena jäljellä elimistössä. Jos radioaktiivinen aine on saatu nielemällä yhdellä kertaa ja mittausta suoritetaan välittömästi ennen kuin erittymistä

ja radioaktiivista hajoamista on ehtinyt tapahtua, mitattu aktiivisuus on sama kuin saanto. Kun hengitetään radioaktiivisia aineita sisältävää ilmaa ja mittaus suoritetaan välittömästi lyhytaikaisen saannin päätyttyä, ei mittaustulos vastaa saantoa, koska osa radioaktiivisista aineista on poistunut uloshengitysilman mukana.

Saannon arvioimiseksi tarvitaan siis mittaustuloksen lisäksi tieto siitä, milloin tai millä aikavälillä saanto on tapahtunut. Lisäksi tulisi tietää, missä fysikaalis-kemiallisessa muodossa radionuklidi on saantihetkellä ollut. Aineen olomuoto vaikuttaa siihen osuuteen, joka niellystä tai hengitetystä ainemäärästä siirtyy ruoansulatuselimistöä ja keuhkoista vereen ja muihin kehon nesteisiin. Jos kyseessä on suun kautta tapahtunut kerta-saanti, voidaan saanto laskea retentiofunktion avulla seuraavasti

$$I_j(0) = \frac{q_j(t_m)}{f_1 \cdot R_j(t_m)}, \quad (7.26)$$

missä t_m on radionuklidin j saannon ja mittauksen välinen aika, $I_j(0)$ on radionuklin j saanto (Bq), $q_j(t_m)$ on kehossa hetkellä t_m mitattu nuklidin j määrä (Bq), $R_j(t_m)$ on radionuklidin j retentiofunktion arvo hetkellä t_m ja f_1 on niellystä radioaktiivisesta aineesta ruoansulatuselimistöä kehon nesteisiin imeytyvä osuus.

Mikäli radionuklidi on hiukkasina hengitysilmassa, voidaan kaavaa soveltaa myös keuhkoabsorptioluokkiin F ja V kuuluville aineille, jotka imeytyvät välittömästi saannin jälkeen kehon nesteisiin. Tällöin niiden poistumista kehosta säätelee sama retentiofunktio kuin suun kautta saadun radioaktiivisen aineen tapauksessa. Yhtälössä 7.26 on f_1 korvattava osuudella, joka ilmoittaa, kuinka paljon kyseisestä aineesta on poistunut uloshengityksen mukana. Kaavaa voidaan soveltaa myös SR-2 luokan kaasuille ja höyryille, mutta luokkiin SR-1 ja SR-0 kuuluvien aineiden osalta on ensin arvioitava keuhkoihin tarttunut osuus.

Mikäli kysymyksessä on jatkuva tasaisella nopeudella suun kautta tapahtuva saanti, joka on alkanut hetkellä $t = 0$ ja jatkunut aina mittaushetkeen t_m asti, voidaan saanto laskea periaatteessa yhtälön 7.26 mukaisesti korvaamalla retentiofunktio $R_j(t_m)$ päivittäiseen saantiin suhteutetulla retentiofunktion jaksolle $0 \dots t_m$ lasketulla integraalilla ja ottaamalla huomioon saantipäivien lukumäärä. Lasketaan ensin, mikä on kehoon kertyneen radionuklidin määrä $q(t_m)'$, jos päivittäinen saanti on 1 Bq/d ja $f_1 = 1$

$$q(t_m)' = \int_0^{t_m} (1 \text{ Bq/d}) \cdot R(t) dt. \quad (7.27)$$

Kehoon kertynyttä radionuklidin määrää $q_j(t_m)$ vastaava päivittäinen saanti on silloin laskettavissa yhtälöstä

$$\frac{I_j(\text{päivittäinen})}{q_j(t_m)} = \frac{1 \text{ Bq/d}}{q(t_m)'} \quad (7.28)$$

Jakson $0 \dots t_m$ aikana tapahtunut saanto on $I_j = t_m \cdot I_j(\text{päivittäinen}) / f_1$, missä f_1 on kyseessä olevan aineen absorptiokerroin. Jos kehossa olevan nuklidin aktiivisuuden määrittäminen tapahtuu esimerkiksi Δt päivän kuluttua jatkuvan saannin päättymisestä, on mittaustulos korjattava ensin saannin päättymishetkeen jakamalla se retentiofunktion $R(\Delta t)$ arvolla ja laske-
malla saanto edellä esitetyllä tavalla.

Yllä esitettyjä menetelmiä voidaan soveltaa myös yksittäisen elimen ekvivalenttiansiannon laskemisessa. Tällöin pitää ottaa huomioon se osuus, joka kehoon joutuneesta radioaktiivisesta aineesta imeytyy kyseiseen elimeen. Jos esimerkiksi niellystä radionuklidista kehon nesteisiin imeytyvä osuus on puolet eli $f_1 = 0,5$ ja imeytyneestä ainemäärästä kulkeutuu tarkasteltavaan elimeen 60 prosenttia, on saannosta elimeen kulkeva osuus silloin $0,5 \cdot 0,6 = 0,3$. Ekvivalenttiansiannon kertymää laskettaessa pitää käyttää retentiofunktiota, joka kuvaa radionuklidin pidättymistä kyseiseen elimeen ja ICRP:n taulukoimia yksittäisten elimien annoskertoimia yksittäisille elimille.

Parhaiten saanto voidaan arvioida, jos kehossa olevien radioaktiivisten aineiden määrän muuttumista voidaan seurata sopivin aikavälein toistettavien mittauksin. Tällöin kertasaannin tapauksessa voidaan mittaustuloksiin sovittaa retentiofunktio ja laskea saanto sen perusteella. Jos mittauspisteitä on sovituksen kannalta liian vähän, voidaan saantona käyttää yksittäisistä mittaustuloksista laskettujen saantojen keskiarvoa. Jos radionuklidin saanti on tapahtunut lyhyellä aikavälillä ja se on ollut jatkuvaa tai tapahtunut pienissä erissä, voidaan radionuklidi olettaa saaduksi kerralla jakson puolivälissä.

Jos esimerkiksi ihmisten cesiummääriä seurataan pitkiä aikoja tietyin väliajoin tehtävin mittauksin, on kätevää muuntaa ICRP:n efektiivisen annoksen kertymän annoskerroin siten, että se antaa efektiivisen annoksen laskettuna ihmisen painolla jaetun aktiivisuuden aikaintegraalin avulla eli yksiköissä Sv/(Bq a/kg). Esimerkiksi UNSCEAR on käyttänyt tätä menetelmää laskiessaan ^{137}Cs :n ja ^{134}Cs :n aiheuttamia sisäisen säteilyn annoksia kokokehomittausten tulosten perusteella. Tarkastellaan esimerkkinä annoskertoimen määrittäystä ^{137}Cs :lle. Oletetaan, että ^{137}Cs :n saanti on 1 Bq vuorokaudessa ja lasketaan sitä vastaava aktiivisuuden

aikaintegraali N_1 välillä $0 - t_m$ (vertaa kaava 7.23)

$$N_1 = \int_0^{t_m} q(t)dt = \int_0^{t_m} \int_0^{t_m} (1 \text{ Bq/d}) \cdot (0,1 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/2} + 0,9 \cdot e^{-\ln 2 \cdot t/110}) dt dt.$$

Kun saanti on jatkunut vuoden ajan, on $t_m = 365$ d ja integrointi tuottaa tulokseksi $N_1 = 31\,840$ Bq d eli 87 Bq a, joka on siis 365 Bq:n saannosta aiheutunut hajoamisten lukumäärä kehossa kyseisenä aikana. Vuoden lopussa on kehon sisältämä ^{137}Cs -määrä 129 Bq (kaava 7.24). Saannin loputtua ^{137}Cs poistuu elimistöstä puoliintumisajan ollessa 110 d ja tästä saannon jälkeisestä osasta aiheutuva aktiivisuuden aikaintegraali on

$$N_2 = 129 \int_0^{\infty} e^{-\ln 2 \cdot t/110} dt = 20440 \text{ Bq d} = 56 \text{ Bq a.} \quad (7.30)$$

Kehon sisältämän ^{137}Cs :n aikaintegraali on siis tässä tapauksessa $N_1 + N_2 = 143$ Bq a. Jos oletetaan, että kysymyksessä on 70 kg painava vertailuihminen (kirja 1 luku 2.4), saadaan painokiloa kohden 2,04 Bq a/kg. ICRP:n mukaan suun kautta saadun efektiivisen annoksen annosmuuntokerroin ^{137}Cs :lle on $1,3 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq. Vuoden saannosta (365 Bq) aiheutunut efektiivinen annos on siten $365 \text{ Bq} \cdot 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq} = 4,7 \text{ } \mu\text{Sv}$. Nyt siis annos 4,7 μSv vastaa aikaintegraalin arvoa 2,04 Bq a/kg. Silloin ^{137}Cs :n annoskerroin on $4,7 \text{ } \mu\text{Sv}/2,04 \text{ Bq a/kg} = 2,3 \text{ } \mu\text{Sv}/(\text{Bq a/kg})$. Saatua arvo on hieman pienempi kuin UNSCEARin ilmoittama kerroin, koska nyt laskuissa on käytetty ICRP:n määrittelemää, uudempiin malleihin perustuvaa efektiivisen annoksen annosmuuntokerrointa. Laskemalla perättäisten mittausten avulla esimerkiksi vuoden aikana kehossa tapahtuneiden hajoamisten määrä yksiköissä Bq a/kg ja kertomalla se edellä lasketulla kertoimella, saadaan efektiivinen annos laskettua.

Kehossa tapahtuvien ^{137}Cs :n hajoamisten lukumäärä U_s voidaan laskea N_1 :n ja N_2 :n arvoista ja säteilyannos kaavoja 7.4–7.7 käyttäen. ICRP on kuitenkin laskenut valmiiksi edellä mainittujen kaavojen avulla annoskertoimet, joten menetelmää ei yleensä kannata käyttää kuin erikoistapauksissa. Menetelmää voidaan kuitenkin käyttää, kun halutaan tietää tietyn lähde-elimien tietylle kohde-elimelle aiheuttama säteilyannos. Elin-kohtaisen annoksen laskemiseksi tulee tuntea kyseisen aineen kulkeutuminen elimistössä ja pystyä mittaamaan aineen määrä lähde-elimessä samoin kuin radionuklidin biologinen puoliintumisaika kyseisessä elimessä. Vasta tämän jälkeen voidaan laskea elimessä tapahtuvien hajoamisten lukumäärä. Muut tarvittavat parametrit löytyvät kirjallisuudesta.

Elin-kohtaisia aktiivisuus- ja annosmäärittäyksiä tehdään lähinnä kilpirauhaseleille ja keuhkoille – harvemmin muille elimille. Koko-kehomittauslait-

teistojen lisäksi yksittäisten elinten aktiivisuuden mittaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi kilpirauhasmonitoria tai gammakameraa (kirja 3, Säteilyn käyttö, luku 3.7).

7.10 | Epäsuorat mittausmenetelmät annosmäärittelyssä

Jos kehoon joutuneet radionuklidit lähettävät vain beeta- tai alfasäteilyä tai erittäin pienenergistä röntgen tai gammasäteilyä, niitä ei voida suoraan havaita kehon ulkopuolisin mittauksin. Silloin nuklidien määrä on mitattava kehon nesteistä tai eritteistä.

Eritenäytteiden aktiivisuuspitoisuuteen perustuvat annosmäärittelyt

Nenän limakalvoihin tarttuneista radionuklideista saadaan näyte niistä-mällä. Näytteestä voidaan tunnistaa radionuklidit, mutta menetelmä ei sovellu annosmäärittelyyn. Liukenemattomat kehoon joutuneet radionuklidit poistuvat ulosteiden mukana, kun taas suurin osa liukenevista radionuklideista erittyy virtsaan. Saanto pyritään arvioimaan mittaamalla radionuklidien aktiivisuuspitoisuus virtsasta, sillä ulosteen erityisnopeus vaihtelee ja näytteen ottoon liittyy muitakin käytännön ongelmia. Virtsa-näytteiden ongelmana puolestaan on, että virtsan määrä ja myös virtsaan erittyneen radioaktiivisen aineen määrä vaihtelee päivittäin. Näytteet pitäisikin ottaa koko vuorokauden aikana erittyneestä virtsasta ja aineiden erittymistä pitäisi seurata mahdollisimman pitkään. Jos otetaan osavuorokautisia näytteitä, on mitattu aktiivisuus korjattava esimerkiksi virtsan kreatiniini- tai ^{40}K -pitoisuuden avulla vastaamaan vuorokautista näytettä.

Jos tiedetään, että radioaktiivinen aine j on saatu kerralla t_n päivää ennen eritenäytteen ottoa, saanto on silloin ollut

$$I_{aj}(0) = \frac{q_j(t_n)}{e_{aj}(t_n)}, \quad (7.31)$$

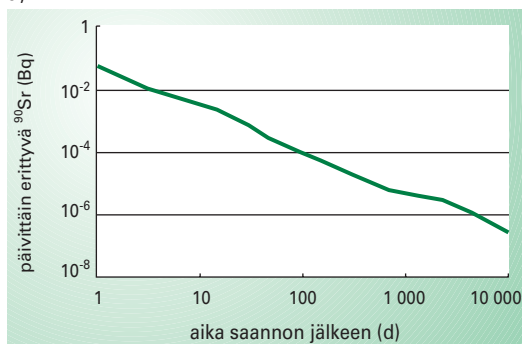
missä $I_{aj}(0)$ on saanto eli radionuklidin j aktiivisuus kehossa hetkellä $t = 0$ ja $q_j(t_n)$ on ajan t_n kuluttua mitattu 24 tunnin virtsa- tai ulostenäytteen aktiivisuus, $e_{aj}(t_n)$ on osuus, joka radionuklidin j saannosta $I_{aj}(0)$ on 24 tunnin virtsa- tai ulostenäytteessä ajan t_n kuluttua. Mikäli näytteenoton ja aktiivisuuspitoisuuden välillä on pitkä aika, on tällöin otettava huomioon radioaktiivisen hajoamisen vaikutus. Aktiivisuuspitoisuuden vaihteluun vaikuttavien tekijöiden – esimerkiksi ravinnon ja juotujen nesteiden määrän vaihtelun – eliminoimiseksi tulee saannon määrittästä varten ottaa

näytteitä mahdollisimman monena päivänä ja käyttää annoslaskuissa niiden aktiivisuuspitoisuuksista laskettua saantojen keskiarvoa. Toinen mahdollisuus on sovittaa mittauspisteisiin funktio, jonka avulla saanto lasketaan.

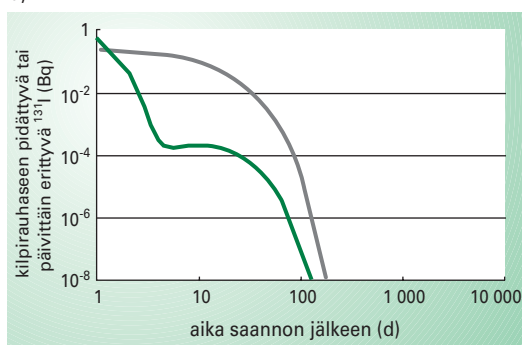
Jatkuvan saannon tapauksessa saanto voidaan laskea myös kaavalla 7.31. Osuus $e_{aj}(t_n)$ korvataan tällöin tekijällä $e_{ej}(t_n)$, joka on jatkuvasta 1 Bq/d saannosta t_n päivän kuluttua 24 tunnin virtsa- tai ulostenäytteessä oleva osuus. I_{ej} :n arvo on tällöin keskimääräinen päivittäinen saanti, joka pitää kertoa saantijakson päivien lukumäärällä saannon määrittämiseksi.

ICRP on laskenut virtsaan tai ulosteisiin päivittäin erittyvän radioaktiivisen aineen määrän sekä kertasaannin että jatkuvan saannin tapauksessa. Tulokset on esitetty nuklidikohtaisina taulukoina ja käyrinä ja niissä on otettu huomioon imeytyneen osuuden f_1 suuruus sekä aineen olomuoto ja keuhkoabsorptioluokka (kuva 7.12). Käyrät koskevat säteilytyöntekijöitä, mutta suun kautta saatujen radioaktiivisten aineiden osalta niitä voidaan käyttää hyväksi myös arvioitaessa muun aikuisväestön saamia säteilyannoksia.

a)



b)

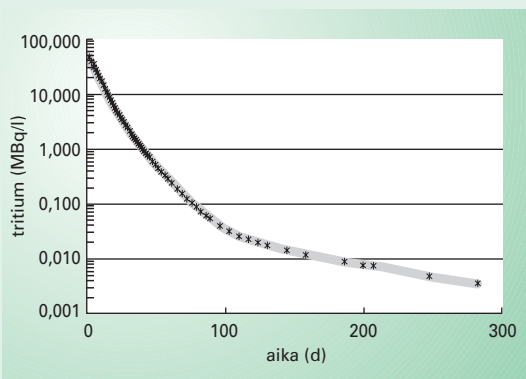


KUVA 7.12

a) ^{90}Sr :n erittyminen virtsaan suun kautta tapahtuneen kertasaannon jälkeen ($f_1 = 0,3$)
b) ^{131}I :n määrä kilpirauhasessa ja erittyminen virtsaan hengityksen kautta tapahtuneen kertasaannon jälkeen (F-luokka)
Saanto on ollut kummassakin tapauksessa 1 Bq.

ESIMERKKI 7.1

Säteilytyöntekijä oli sulkemassa kuumentamalla tritiumia sisältävää ampullia, kun lasiampulli rikkoutui ja tritiumia vapautui ympäristöön siitä huolimatta, että työ tehtiin vetokaapissa. Työntekijä sai hengityksen kautta tritiumia elimistöönsä. Virtsan tritiumpitoisuus määritettiin noin 300 päivän aikana, aluksi joka päivä myöhemmin harvemmin (kuva 7.13). Tritium esiintyi työtiloissa useassa kemiallisessa muodossa, mutta annoksen kannalta vain tritioitu vesi oli merkittävä. Miespuolisen 31-vuotiaan työntekijän paino oli 73 kg. Mikä on tritiumin saanto ja siitä aiheutunut efektiivisen annoksen kertymä?



KUVA 7.13 Tritiumin aktiivisuuspitoisuus säteilytyöntekijän virtsassa aikavälillä 0–300 d

Sovittamalla mitattuun pistejoukkoon eksponenttifunktioita sisältävä erittymisfunktio osoittautuu, että tässä tapauksessa tritiumin erittymistä kuvaa parhaiten seuraava funktio

$$r(t_n) = 74,6 \cdot e^{-\ln 2 t / 4,7} + 14,2 \cdot e^{-\ln 2 t / 10,2} + 0,045 \cdot e^{-\ln 2 t / 67,7},$$

missä $r(t_n)$ on tritiumin aktiivisuuspitoisuus virtsassa (MBq/l) ajan t_n kuluttua saannista. Oletetaan tritiumpitoisuuden kehon nesteissä olevan saman kuin virtsassa ja tritiumin jakautuneen tasaisesti kehoon. ICRP:n määrittelemän vertailuihmisen kehossa on vettä 0,6 l painokiloa kohti, joten 73 kg painavassa henkilössä on vettä 43,8 l. Sijoittamalla yllä olevaan yhtälöön hetki $t = 0$ saadaan arvioitua tritiumin aktiivisuuspitoisuus virtsassa saantihetkellä eli $r(0) = 88,8$ MBq/l. Kertomalla näin saatu tulos kehon kokonaisvesimäärällä saadaan saannoksi $I_{aj}(0) = 3,89$ GBq.

Hengityksen kautta kehoon joutuneen tritoidun veden aiheuttaman efektiivisen annoksen kertymän annoskerroin säteilytyötä tekeväälle henkilölle on $1,8 \cdot 10^{-11}$ Sv/Bq (Liite 6). Siten efektiivisen annoksen kertymäksi (kaava 7.25) saadaan 70 mSv.

Hengitysilman radionuklidien aktiivisuuspitoisuuteen perustuvat annosmääritykset

Hengitysilman sisältämien radioaktiivisten aineiden aiheuttama säteily-annos voidaan arvioida epäsuorasti ilman radionuklidikoostumuksen ja aktiivisuuspitoisuuden avulla. Tällaiseen tilanteeseen voidaan joutua, kun suoraan ihmisen kehossa olevien radionuklidien määrittämismenetelmiä ei ole käytettävissä.

Kun tiedetään hengitysnopeus, radionuklidin aktiivisuuspitoisuus ilmassa sekä kuinka kauan kyseistä radionuklidia sisältävää ilmaa on hengitetty, voidaan arvioida kunkin radionuklidin saanto ja siitä edelleen efektiivinen annos ja elinkohtaiset ekvivalenttiannokset käyttäen hyväksi annoskerrointaulukkoja. Jotta tilanteeseen sopivat annoskertoimet voitaisiin valita, tulee kunkin radionuklidin keuhkoabsorptioluokka pystyä määrittämään. Sitä varten tulisi tietää radionuklideja sisältävien hiukkasten kokojakauma ja liukoisuus. Radioaktiivisten kaasujen ja höyryjen osalta tulisi tietää niiden reaktiivisuus ja liukoisuus. Radionuklidista j aiheutunut efektiivisen annoksen kertymä E on tällöin

$$E = F \cdot C_j \cdot T \cdot h(g)_j, \quad (7.32)$$

missä F on hengitysnopeus m^3/d , C_j nuklidin j aktiivisuuspitoisuus ilmassa (Bq/m^3), T altistus aika (d) ja $h(g)_j$ annosmuuntokerroin Sv/Bq. Usein radionuklidin aktiivisuuspitoisuus vaihtelee ajan funktiona, mikä on otettava huomioon saantoa laskettaessa. Tällöin $C_j \cdot T$ on korvattava aktiivisuuspitoisuuden aikaintegraalilla.

Ilmassa olevien radionuklidien aktiivisuuspitoisuuteen perustuvat annosarviot ovat kuitenkin epätarkkoja. Aktiivisuuspitoisuus vaihtelee paikallisesti ja muuttuu ajan kuluessa, joten todellista sisäänhengitettyä radioaktiivisten aineiden määrää on vaikea mitata. Lisäksi hiukkasten koko voi vaihdella ja yksittäisen ihmisen hengitysnopeus poikkeaa usein keskimääräisestä. Jos ennalta tiedetään, että työssä on hengitysilman välityksellä tapahtuvan sisäisen kontaminoitumisen mahdollisuus, voidaan si-

säänhengitetyn radioaktiivisen aineen määrää arvioida sijoittamalla henkilön suun lähelle hiukkaskerääjä. Menetelmään liittyy kuitenkin monia tuloksen tarkkuutta heikentäviä tekijöitä. Työpaikkojen ilman aktiivisuuspitoisuuden mittaus palvelee pikemminkin työolosuhteiden tarkkailua kuin annosarvioita.

Radioaktiiviset jalokaasut eivät kemiallisesti reagoimattomina imeydy hengityselimistöstä tai imeytyvät vain hyvin vähäisessä määrin. Jos kaasun sisältämä radionuklidi hajoaa suoraan stabiiliksi nuklidiksi, sisäänhengitetystä radioaktiivisesta jalokaasusta aiheutuva annos jää yleensä pieneksi ulkoisen säteilyn annokseen verrattuna. Erityistapauksen muodostavat radon (^{222}Rn) ja toron (^{220}Rn), joiden radioaktiivisen hajoamisen kautta syntyy sarja radioaktiivisia kiinteässä olomuodossa olevia tytärnuklideja. Suurin osa hajoamistuotteista kiinnittyy ilman hiukkasiin. Pääasiallisen säteilyannoksen aiheuttaakin hengityselimistön pintakudoksiin tarttuneiden hajoamistuotteiden lähettämä alfasäteily, joka aiheuttaa annosta seinämien limakalvoille ja niiden alaisille solukerroksille. Radonin ja toronin aiheuttamia annoksia voidaan arvioida monella tavalla. Eräs tapa on käyttää mittana hengitysilman potentiaalista alfaenergiapitoisuutta. Silloin radonin ja toronin aiheuttama efektiivisen annoksen kertymä E voidaan laskea kaavasta

$$E = h \cdot W, \quad (7.33)$$

missä h on hajoamistuotteiden annosmuuntokerroin ($\text{Sv/h}/(\text{J/m}^3)$) ja W on potentiaalinen alfaenergia-altistus (J h/m^3).

Radonin ja toronin hajoamisketjussa syntyvä potentiaalinen alfaenergia (yksikkö J) tarkoittaa kokonaisalfaenergiaa, joka emittoituu radonin hajoatessa ^{210}Pb :een asti ja toronin hajoatessa stabiiliin ^{208}Pb :aan asti (luku 4). Alfaenergiapitoisuus on potentiaalinen alfaenergia tilavuusyksikköä kohden (J/m^3). Alfaenergia-altistus lasketaan altistusajan (h) ja alfaenergiapitoisuuden tulona.

Hajoamistuotteiden annosmuuntokertoimille käytetään arvoja:

- ^{222}Rn asunnoissa $h = 1,1 \text{ Sv}/(\text{J h/m}^3)$
- ^{222}Rn työpaikalla $h = 1,4 \text{ Sv}/(\text{J h/m}^3)$
- ^{220}Rn työpaikalla $h = 0,5 \text{ Sv}/(\text{J h/m}^3)$

Jos halutaan arvioida säteilyannos radonpitoisuuden perusteella, voidaan alfaenergiapitoisuus ja alfaenergia-altistus laskea olettamalla tietty tasapainosuhte radonin ja sen hajoamistuotteiden pitoisuuden välillä (luku 4.1).

Elintarvikkeiden aktiivisuuspitoisuuteen ja kulutukseen perustuvat annosmääritykset

Radioaktiivisten aineiden laskeuma aiheuttaa elintarvikkeiden ja juomaveden kontaminoitumista. Radionuklidit tarttuvat kasvien pinnoille tai kulkeutuvat juurioton välityksellä itse kasveihin sekä ravintoketjussa edelleen lihaan ja maitoon. Ihmisen kehoon joutuneiden radionuklidien määrä voidaan laskea nautittujen elintarvikkeiden ja juomaveden määrästä ja aktiivisuuspitoisuuksista ja siten määrittää epäsuorasti ihmisen saama säteilyannos (luku 6.7). Efektiivisen annoksen kertymä saadaan kertomalla nuklidikohtaiset saannot vastaavan ikäryhmän henkilölle määritellyillä annoskertoimilla ja laskemalla näin saadut annokset yhteen

$$E(g) = \sum_j \left(h(g)_{j,s} \sum_f \left(\int_0^T C_{f,j}(t) \cdot M_{f,g}(t) dt \right) \right), \quad (7.34)$$

missä $E(g)$ on efektiivisen annoksen kertymä (Sv) ikäryhmään g kuuluvalle henkilölle, T on elintarvikkeen f nauttimisaika (d), $C_{f,j}(t)$ on radionuklidin j keskimääräinen aktiivisuuspitoisuus (Bq/kg) hetkellä t elintarvikkeessa f , $M_{f,g}(t)$ on elintarvikkeen f keskimääräinen kulutus ikäryhmässä g (kg/d) hetkellä t ja $h(g)_{j,s}$ on suun kautta kehoon joutuneelle radionuklidille j efektiivisen annoksen annosmuuntokerroin (Sv/Bq) ikäryhmälle g (katso liite 5).

Kaavassa oletetaan, että integrointiajanjakso $0 - T$ on paljon lyhyempi kuin ikäryhmän g ja sitä seuraavan ryhmän välinen ikäero. Jos integrointiaika on ikäeroa pidempi, käytetään vanhemmalle ikäryhmälle annettuja annosmuuntokertoimia.

Jos elintarvikkeiden kulutus ja niiden sisältämien radionuklidien aktiivisuuspitoisuus ovat likimain vakioita aikavälillä $0 - T$, voidaan yhtälö 7.34 kirjoittaa muotoon

$$E(g) = \sum_j \left(h(g)_{j,s} \sum_f (C_{f,j} \cdot M_{f,g} \cdot T) \right). \quad (7.35)$$

Elintarvikkeiden avulla suoritettu sisäisen annoksen arviointi soveltuu suurten väkijoukkojen säteilyannosten määrittämiseen. Tällöin voidaan käyttää joko tiettyä aluetta tai koko maata koskevia elintarvikkeiden kulutusarvioita ja aktiivisuuspitoisuuksia. Tiettyä aluetta koskevien annosarvioiden tekoa helpottaa, jos radioaktiivisten aineiden laskeuma on tasainen koko tuotantoalueella ja jos säteilyannosten kannalta merkittävimmät elintarvikkeet tuotetaan ja kulutetaan alueen sisällä. Muussa tapauk-

nessa täytyy ottaa huomioon myös muualta tuotettujen elintarvikkeiden aktiivisuuspitoisuus ja kulutus.

7.11 | Suomalaisten altistus sisäiselle säteilylle

Suomessa on 1960-luvulta lähtien seurattu suorien mittauksien avulla väestön altistumista sisäiselle säteilylle. Toiminnan aloitti tutkimustarkeutuksessa Helsingin Yliopiston Radiokemian laitos, mutta jo vuonna 1965 valmistui silloiselle Säteilyfysiikan laitokselle – nykyinen Säteilyturvakeskus – oma laitteisto. Siitä lähtien on laitteistolla vuosittain mitattu keskuksen työntekijöistä muodostettua vertailuryhmää. Vuonna 1968 tehtiin ensimmäinen väestöön kohdistuva otantatutkimus, jonka tulosten perusteella arvioitiin väestön vuotuista säteilyaltistusta. Mittausten avulla on voitu seurata sekä ydinasekokeista että Tshernobylin onnettomuudesta peräisin olevien radioaktiivisten aineiden hidasta poistumista ihmiskehasta.

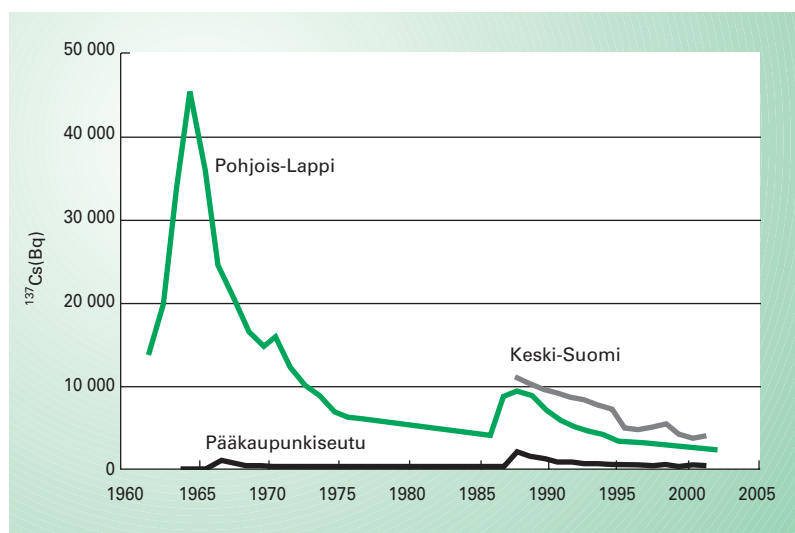
Tshernobylin onnettomuus

Vuonna 1986 huhtikuun lopussa tapahtuneen Tshernobylin onnettomuuden seurauksena radioaktiivisia aineita kulkeutui kaikkialle Eurooppaan. Parissa päivässä niitä kulkeutui tuulen mukana myös Suomeen, joten radioaktiivisia aineita sisältävässä pilvessä oli myös lyhytikäisiä nuklideja. Ilmassa oli muun muassa jodin (^{131}I , ^{132}I , ^{133}I), telluurin ($^{129\text{m}}\text{Te}$, ^{132}Te), cesiumin (^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs) ja ruteniumin (^{103}Ru , ^{106}Ru) isotooppeja. Koska radioaktiivinen pilvi oli Suomen yllä vain lyhyen ajan, ihmiset saivat hengitysilmaasta kehoonsa hyvin pieniä määriä radionuklideja. Siten myös hengitysilmassa olleista radionuklideista aiheutunut säteilyannos jäi pieneksi. Ilmavirtausten mukana Suomeen tuli myös ydinpoltto-ainehiukkasia, jotka sisälsivät muun muassa nuklideja ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce ja ^{144}Ce . Kokehomittauksissa näitä hiukkasia ei kuitenkaan havaittu. Kiovassa oli huhtikuussa 1986 suomalaisia työntekijöitä ja opiskelijoita sekä heidän perheenjäseniään. Suurin osa palasi Suomeen niin sanotulla evakuoitilennolla toukokuun ensimmäisenä päivänä. Osa saapuneista mitattiin välittömästi Säteilyturvakeskuksen kokehomittauslaitteistolla, osa hieman myöhemmin. Kiovasta saapuneissa ihmisissä havaittiin useita edellä mainituista radionuklideista.

Onnettomuuden jälkeen radioaktiivisen jodin pitoisuus maidossa nousi heti toukokuun alussa ja alkoi sen jälkeen nopeasti laskea. Ihmisissä ha-

vaittiinkin vain vähäisiä määriä ^{131}I :ä. Pitkäikäiset radioaktiiviset aineet kuten esimerkiksi ^{134}Cs , ^{137}Cs ja ^{90}Sr kerääntyvät kehoon lähinnä elintarvikkeista. Tshernobylin laskeumassa oli kuitenkin erittäin vähän ^{90}Sr :ää, joten sen aiheuttama sisäinen kontaminaatio jäi erittäin pieneksi. Cesiumin aktiivisuuspitoisuus maidossa ja lihassa nousi voimakkaasti kesäkuun alussa, kun karja päästettiin ulos laitumelle.

Kokokehomittauksissa ensimmäiset varsinaiset havainnot Tshernobylin onnettomuudesta tehtiin vasta kesäkuussa, jolloin suomalaisissa havaittiin ^{137}Cs :n lisäksi myös ^{134}Cs :ää. Seurantamittaukset osoittivat, että suomalaisten cesiummäärät olivat korkeimmillaan kesällä 1987. Helsingin vertailuryhmän ja Pohjois-Lapin poronhoitajien lisäksi on Tshernobylin onnettomuuden jälkeen seurattu myös Keski-Suomessa asuvien paljon luonnontuotteita (sisävesikalaa, riistaa, metsämarjoja ja sieniä) syövien ihmisten cesiumpitoisuutta (kuva 7.14).

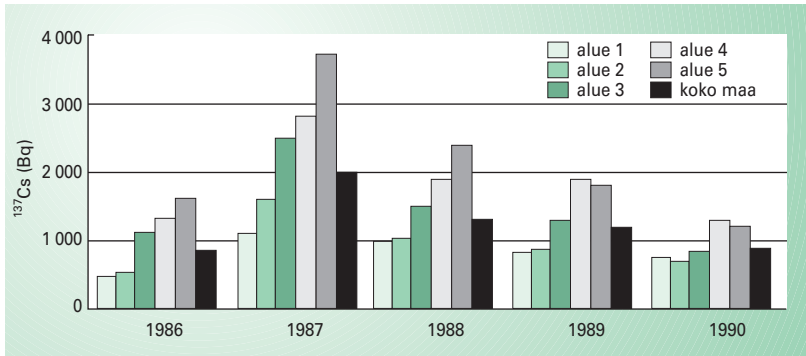


KUVA 7.14 ^{137}Cs :n määrä henkilöä kohden Helsingin väestöä edustavassa vertailuryhmässä, Pohjois-Lapin poronhoitajissa sekä paljon luonnontuotteita syövässä keski-suomalaisissa.

Ennen vuotta 1986 olevat cesiummäärät ovat peräisin ilmakehässä tehdyistä ydinräjäytyksistä. Pohjois-Lapin poronhoitajien muita suuremmat ^{137}Cs -määrät johtuvat poronlihaan ravintoketjussa jäkälä-poro-ihminen rikastuvasta ^{137}Cs :tä ja poronlihan suuresta osuudesta poronhoitajien ruokavaliassa.

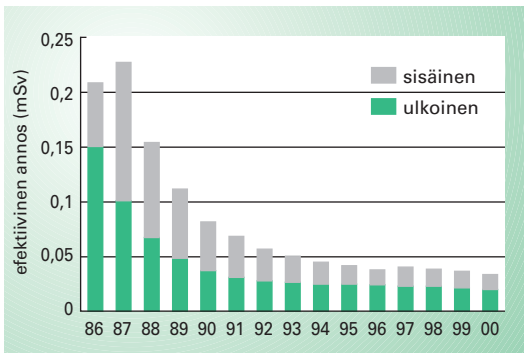
Tshernobylin onnettomuuden aiheuttama radioaktiivisten aineiden laskeuma jakautui alueellisesti epätasaisesti. Niinpä myös eri alueilla asuvan väestön altistuminen sisäiselle säteilylle vaihteli. Elintarvikkeiden

kuljettaminen alueelta toiselle tasoittaa eroja. Ihmisten ^{137}Cs -määrissä on kuitenkin suuria yksilöllisiä eroja samallakin laskeuma-alueella (kuva 7.15). Tämä johtuu ^{137}Cs :ia sisältävien sisävesikalojen, riistan, metsäsiemien ja -marjojen aktiivisuuspitoisuuden vaihtelusta ja ihmisten erilaisesta ruokavaliosta. ^{134}Cs :n ja ^{137}Cs :n aiheuttama sisäisen säteilyn annos vuoden 2000 loppuun mennessä jäi alle 1 mSv (kuva 7.16).



KUVU 7.15 Suomalaisen keskimääräinen ^{137}Cs -määrä (Bq) vuosina 1986–1990 vuoden lopun tilanteen mukaisesti

Alue 1 edustaa lievimmän ^{137}Cs -laskeuman aluetta ja alue 5 suurimman laskeuman aluetta. Merkintä "koko maa" tarkoittaa alueilla 1–5 asuvien henkilöiden lukumäärällä painotettua ^{137}Cs -määrän keskiarvoa koko Suomessa.



KUVU 7.16 Suomalaisen vuosittain saamat ulkoisen ja sisäisen säteilyn annokset Tshernobylin onnettomuuden laskeuman sisältämästä ^{134}Cs :sta ja ^{137}Cs :sta.

Kahtena ensimmäisenä vuotena ulkoisen säteilyn annos sisältää myös laskeumassa olleiden lyhytikäisten radionuklidien aiheuttaman annoksen.

Tshernobylin onnettomuudesta peräisin olevien radioaktiivisten aineiden aiheuttaman keskimääräisen efektiivisen annoksen kertymän on arvioitu olevan suomalaisille 2,5 mSv. Ydinasekokeiden on arvioitu aiheuttavan 0,3 mSv efektiivisen annoksen kertymän.

7.12 | Radioaktiivinen jodi ja kilpirauhanen

Uraani- ja plutoniumytimien fissiona syntyy yli kymmenen jodin isotooppia joko suoraan tai peräkkäisten beetahajoamisten kautta. Näistä kymmenestä nuklidista suurin osa on kuitenkin lyhytikäisiä (katso liite 3) eivätkä ne siten ole säteilyturvallisuuden kannalta niin merkittäviä kuin isotooppi ^{131}I ($T_{1/2}(\text{fys}) = 8 \text{ d}$). ^{132}I tosin ei häviä ympäristöstä kovin nopeasti, sillä sitä syntyy jatkuvasti lisää emoytimen ^{132}Te hajotessa ($T_{1/2}(\text{fys}) = 3,3 \text{ d}$). Radioaktiivisen jodin aiheuttama ekvivalenttiansa voidaan määrittää parhaiten kilpirauhasen aktiivisuusmittauksista. Radioaktiivisen jodin kertymistä kilpirauhaseen voidaan merkittävästi vähentää antamalla stabiilia jodia sisältävää kaliumjodidia (KI). Joditabletin suojauskerroin saadaan vertaamalla radioaktiivisen jodin hajoamisten lukumäärää kilpirauhasessa, kun on annettu stabiilia jodia (U_{KI}), tapaukseen, jossa stabiilia jodia ei ole annettu (U_I). Hajoamisten lukumäärään kilpirauhasessa vaikuttaa oleellisesti se aika, jonka radioaktiivinen jodi on kilpirauhasessa eli niin sanottu viipymäaika. Suojauskertoimeksi J_s saadaan

$$J_s = \frac{U_{KI}}{U_I} = \frac{t_{KI}}{t_I} \quad (7.36)$$

missä t_{KI} on viipymäaika tapauksessa, jossa stabiilia jodia on annettu ja t_I jossa sitä ei ole annettu.

Esimerkiksi 50 mg kaliumjodidia annettuna puoli tuntia radiojodiantistuksen jälkeen pienentää kilpirauhasen saaman annoksen kuuteen prosenttiin verrattuna tapaukseen, jossa stabiilia jodia ei ole annettu (taulukko 7.6). Mahdollisessa laskeumatilanteessa joditabletti tulisi ottaa 1–6 tuntia ennen altistumista radioaktiiviselle jodille. Stabiilin jodin suoja-

Elin	Viipymäaika (h)	
	a)	b)
kilpirauhanen	63,7	3,9
veri, epäorgaaninen	9,1	11,8
veri, orgaaninen	2,4	0,1
virtsarakko	1,9	2,5
keuhkot	0,2	0,2
koko keho	77,2	18,5

TAULUKKO 7.6 Joditabletin kilpirauhasta suojaava vaikutus

a) Hengityksen kautta saadun ^{131}I :n viipymäaika, kun suojaavaa stabiilia jodia ei ole annettu.
b) Tilanne, kun puoli tuntia altistuksen jälkeen on annettu 50 mg kaliumjodidia.

vaikutus heikkenee, jos tabletti otetaan liian aikaisin tai liian myöhään. Kun radioaktiivisen jodin saannista on kulunut yli puoli vuorokautta, ei joditablettien nauttiminen enää vähennä kilpirauhasen saamaa säteilyannosta. Vaikka kilpirauhasen säteilyaltistusta voidaankin vähentää tehokkaasti stabiilin jodin avulla, niin ^{131}I :n viipymäaika koko kehossa pienee tällöin vain neljännekseen. Jodin lyhytikäisten isotooppien kohdalla tämä tilanne korostuu edelleen: kilpirauhasta voidaan suojata tehokkaasti, mutta radioaktiivisten hajoamisten määrä koko kehossa ei ratkaisevasti vähene, vaan muiden elinten saama annos voi joditabletin vaikutuksesta jopa kasvaa. Joditabletti ei ole mikään ihmelääke, jolla voitaisiin kokonaan estää radioaktiivisen jodin haitalliset vaikutukset terveyteen.

ESIMERKKI 7.2

Kuinka suuri on kilpirauhasen ekvivalenttiannoksen kertymä eri ikäisillä (ikä < 1, 1, 5, 10, 15 ja yli 17 vuotta) ihmisillä, kun

- henkilöt juovat 10 päivän ajan päivittäin 0,4 litraa maitoa, jonka ^{131}I -pitoisuus on 30 Bq/l
- samat henkilöt hengittävät tunnin ajan ilmaa, jossa ^{131}I on hiukkasmuodossa ja jonka ^{131}I -pitoisuus on 1 000 Bq/m³ (keuhkoabsorptio-luokka F ja hiukkaskoko AMAD = 1 µm)?

Kilpirauhasen ekvivalenttiannoksen kertymän annoskertoimet on annettu alla olevassa taulukossa ja hengitysnopeudet kohdassa b) olevassa taulukossa.

Ikä vuosina	< 1	1	5	10	15	Aikuiset
Muunnoskerroin nielty jodi (Sv/Bq)	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$
Muunnoskerroin hengitetty jodi (F-luokka) (Sv/Bq)	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$7,3 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$

- Koska kaikki juovat saman määrän maitoa, on kaikkien saanto sama eli $10 \text{ d} \cdot 0,4 \text{ l/d} \cdot 30 \text{ Bq/l} = 120 \text{ Bq}$ (vertaa kaava 7.35). Käyttämällä yllä olevia muunnoskertoimia (katso myös liite 4) saadaan kilpirauhasen ekvivalenttiannoksen kertymäksi

Ikä vuosina	< 1	1	5	10	15	Aikuiset
Kilpirauhasen ekvivalenttiannoksen kertymä (mSv)	0,44	0,43	0,25	0,12	0,08	0,05

Jodi imeytyy täydellisesti vereen ja saannosta 30 prosenttia eli 36 Bq siirtyy kilpirauhaseen, josta se erittyy aikuisilla pois 80 d biologisella puoliintumisajalla. Koska ^{131}I lähettää vain beeta- ja gamma-säteilyä, on säteilyn painotuskerroin 1. Siitä seuraa, että myös absorboituneen annoksen kertymä, jonka yksikkö on Gy, on tässä tapauksessa lukuarvoltaan ekvivalenttiannoksen suuruinen. Efektiivisen annoksen kertymät ovat vain 5 prosenttia ekvivalenttiannosten kertymistä, koska kudosten painotuskerroin kilpirauhaselle on 0,05.

Todellisuudessa lapset juovat paljon enemmän maitoa kuin aikuiset, mikä nostaa lasten saamia annoksia. Tshernobylin lähialueilla lasten kilpirauhaseen absorboituneet annokset olivat jopa useita graytä ja ekvivalenttiannokset siis useita sievertejä.

- b) Saanto $I = \text{hengitysnopeus m}^3/\text{d} \cdot 1\,000\text{ Bq/m}^3 \cdot 1/24\text{ d}$. Kilpirauhasen ekvivalenttiannoksen kertymä saadaan kertomalla saanto kilpirauhasen ekvivalenttiannoksen annoskertoimella (vertaa kaava 7.32).

Ikä vuosina	< 1	1	5	10	15	Aikuiset
Hengitysnopeus (m ³ /d)	2,86	5,20	8,76	15,28	20,1	22,18
Saanto (Bq)	119	217	365	637	838	924
Kilpirauhasen ekvivalenttiannoksen kertymä (mSv)	0,17	0,30	0,27	0,24	0,18	0,14

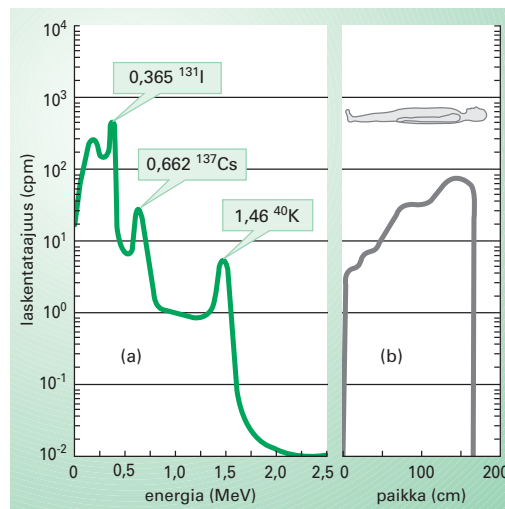
Kuten taulukosta huomataan, yhden vuoden ikäisen lapsen kilpirauhasen ekvivalenttiannos on vain kaksinkertainen aikuisten annokseen verrattuna, vaikka annoskertoimien ero on yli kahdeksankertainen.

7.13 Työperäinen säteilyaltistus

Säteilyturvakeskus valvoo säteilytyöntekijöiden altistusta sisäiselle säteilylle. Ydinvoimalaitosten työntekijöitä valvotaan STUKin autolaboratoriossa tehtävillä kokokehmittauksilla (kirja 1 luku 5.6), joita tehdään kahdesti vuodessa. Toinen mittaus tehdään ydinvoimalaitoksen normaali-käytön ja toinen vuosihuoltoseisokin aikana. Vuosittain mitataan yhteen-sä noin 250 ydinvoimalaitosten työntekijää. Osasta työntekijöitä on ha-vaittu pieniä määriä aktivoituneita korroosiotuotteita kuten esimerkiksi ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co sekä joskus fissiotuotteita. Muut säteilytyöntekijät

mitataan kiinteästi asennetulla laitteistolla Säteilyturvakeskuksen laboratoriossa Helsingissä. Tähän ryhmään kuuluu vuosittain alle viisikymmentä henkilöä. Sisäisen säteilyn mittauksia tehdään myös silloin, kun työntekijän epäillään kontaminoituneen. Kiinteästi asennetulla laitteistolla tai erillisilmaisimilla mitataan myös kaikki, joiden saaman säteilyannoksen arvioimiseksi on selvítettävä radioaktiivisten aineiden jakautuminen kehossa. Esimerkiksi NaI(Tl) ilmaisimia ja liikkuvaa mittausalustaa käyttäen samasta mittauksesta saadaan sekä gammaspektri että kuva radioaktiivisten aineiden jakautumisesta mitattavassa henkilössä (kuva 7.17). Gammaspektrissä näkyvistä radionuklideista ^{131}I on peräisin työpaikalta. Sen sijaan ^{137}Cs on saatu ravinnon kautta ja ^{40}K on luonnon radionuklidi. Tässä tapauksessa suurin osa (92 prosenttia) ^{131}I -kontaminaatiosta oli kilpirauhasessa ja loput keuhkojen ja käsien alueella.

KUVA 7.17 Kontaminoituneesta (^{131}I) säteilytyöntekijästä mitattu gammaspektri ja radioaktiivisten aineiden jakautuminen mitattavan henkilön kehossa



Suomessa säteilytyössä sisäisen säteilyn aiheuttama annos on hyvin harvoin merkittävä verrattuna ulkoisen säteilyn aiheuttamaan annokseen. Joskus työssä kuitenkin tapahtuu vahinkoja. Esimerkiksi erään radioisotooppeja valmistavan tutkimuslaitoksen laboratoriossa polttouunin termostaatti rikkoutui ja yksi työntekijöistä sai tavallista suuremman säteilyannoksen radionuklidista ^{192}Os ja muutama muu työntekijä kontaminoitui lievemmin. Kokokehólaskennalla seurattiin osmiumin häviämistä useiden kuukausien ajan ja työntekijöiden saama efektiivinen annos voitiin siten määrittää melko tarkasti.

Sisäisen annoksen mittaukset antavat erinomaista tietoa työpaikan säteilyhygienisistä olosuhteista. Huolelliseen työskentelyyn ja suojavarusteiden

siin kiinnitetään enemmän huomiota, kun saadaan tarkempaa tietoa omaan kehoon joutuneista radioaktiivisista aineista. Kontaminaatiota-pausten lukumäärä onkin vuosien kuluessa pienentynyt. Mittausten yh-teydessä on myös mahdollista antaa työntekijöille tietoa säteilyn käyttöön liittyvistä riskeistä ja säteilysuojelusta.

ESIMERKKI 7.3

Kevyttä säteilytyötä tekevälle työntekijälle suoritetaan kokokehomit-taus ja hänessä havaitaan olevan 400 Bq nuklidia ^{60}Co . Mikä on saanto ja efektiivinen annos, kun a) mittausta tehdään tunnin kuluttua kontami-noitumisesta ja kyseessä on hengittämällä saatu kertasaanti, b) konta-minaatio on tapahtunut suun kautta pieninä erinä mittausta edeltävän 30 päivän aikana?

Koboltin kemiallisesta muodosta eikä hiukkaskoosta ei ole käytettäväs-sä mittaustietoa. ICRP:n suosituksen mukaan laskuissa tulee käyttää hengitysilman osalta hiukkaskokoa $\text{AMAD} = 5 \mu\text{m}$ ja keuhkoabsorp-tioluokkaa M sekä absorptiokerrointa $f_1 = 0,1$. Vereen imeytyneen ja sieltä edelleen elimistöön jakautuneen koboltin eli systeemisen kobol-tin retentiofunktio on esitetty kaavassa 7.20.

a) Koska kokokehomitauks suoritetaan tunnin kuluttua altistumisesta, voidaan olettaa, että sisäänhengitetystä koboltista hengityselimis-töön pidähtynyt osuus on vielä kehossa. Taulukon 7.4 mukaan kevyt-tä työtä tekevän henkilön hengityselimistöön jäävien hiukkasten osuus sisäänhengitetystä määrästä on 82 prosenttia. Siten saanto $I_f(0) = 400 \text{ Bq} / 0,82 = 490 \text{ Bq}$.

Liitteessä 6 on taulukoituna annoskertoimet työntekijän efektiivisen annoksen kertymän määrittämiseksi ja ^{60}Co :lle on tässä tapauksessa $h(g)_j = 7,1 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$ ja efektiivisen annoksen kertymäksi (kaava 7.25) saadaan siten

$$E = h(g)_j \cdot I_f(0) = 7,1 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq} \cdot 490 \text{ Bq} = 3,5 \mu\text{Sv}.$$

Jos työympäristö on ollut esimerkiksi pölyinen, nenän alueelle ET_1 tarttunut koboltimäärä (33,9 prosenttia, taulukko 7.4) on voinut poistua niistettäessä jo ennen mittausta. Tällöin on kehossa jäljellä enää vain 48,1 prosenttia saannosta, jolloin saanto on ollut 830 Bq ja $E = 5,9 \mu\text{Sv}$.

Nenä-nielun alueelle ET_2 tarttuu lähes 40 prosenttia saannosta. Tämä osa kulkeutuu 17 minuutin puoliintumisajalla mahalaukuun, josta kymmenesosa (4 prosenttia saannosta) imeytyy kehon nesteisiin ja poistuu retentiofunktion 7.20 määräämällä nopeudella. Loppuosa ET_2 :n alueelle tarttuneesta määrästä (36 prosenttia saannosta) poistuu parissa vuorokaudessa (taulukko 7.3) ulosteiden mukana. Keuhkoputkiston ja -rakkuloiden alueelle tarttuu noin 8 prosenttia saannosta, josta keuhkoabsorptioluokkaan M kuuluvan aineen tapauksessa kymmenesosa imeytyy nopeasti ($T(1/2) = 10$ minuuttia) kehon nesteisiin. Loppuosa imeytyy hitaasti ($T(1/2) = 140$ d) tai poistuu muiden prosessien vaikutuksesta keuhkojen alueelta (katso kuva 7.9). Mittaustulos riippuu siten merkittävästi kontaminaation ja mittauksen välisen ajan pituudesta kontaminaatiota seuraavan muutaman päivän aikana.

- b) Tässä tapauksessa voidaan imeytynyt osuus arvioida kahdella tavalla: 1) oletetaan että päivittäinen saanti on vakio koko jakson ajan tai 2) oletetaan, että koko saanti on tapahtunut yhdellä kertaa jakson puolivälissä.
- 1) Lasketaan ensiksi, mikä on kehossa oleva ^{60}Co -määrä 30 päivän kuluttua olettaen kehon nesteisiin imeytyneen kobolttimäärän olevan 1 Bq/d. Koko jakson aikana imeytynyt määrä on tällöin 30 Bq ja siitä on jakson lopussa jäljellä

$$\int_0^{30} 1 \text{ Bq/d} \cdot R(t) dt =$$

$$1 \text{ Bq/d} \cdot \int_0^{30} (0,5 \cdot e^{(-\ln 2 \cdot t/0,5)} + 0,3 \cdot e^{(-\ln 2 \cdot t/6)} +$$

$$0,1 \cdot e^{(-\ln 2 \cdot t/60)} + 0,1 \cdot e^{(-\ln 2 \cdot t/300)}) dt = 8,37 \text{ Bq}.$$

Koska altistusjakso on lyhyt verrattuna ^{60}Co :n fysikaaliseen puoliintumisaikaan ($T_{1/2}(\text{fys}) = 5,27 \text{ a}$), ei radioaktiivista hajoamista tarvitse tässä tapauksessa ottaa huomioon. Mitatun 400 Bq:n aktiivisuuden aiheuttanut päivittäin imeytynyt kobolttimäärä saadaan suoraan suhteesta $x/400 \text{ Bq} = 1 \text{ Bq/d}/8,37 \text{ Bq}$ (kaava 7.28), josta $x = 47,8 \text{ Bq/d}$. Kertomalla jakson pituudella 30 d saadaan koko jakson aikana imeytyneeksi määräksi 1 430 Bq. Tätä vastaava saanto $I_j(0) = 1 \text{ 430 Bq} / 0,1 = 14 \text{ 300 Bq}$. Efektiivisen annoksen kertymän annoskerroin suun kautta saadulle ^{60}Co :lle on $h(g)_j = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$ (liite 6), joten efektiivisen annoksen kertymäksi saadaan $E = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq} \cdot 14 \text{ 300 Bq} = 0,049 \text{ mSv}$.

2) Kertasaannin tapauksessa lasketaan ensin retentiofunktion arvo puolivälissä jaksoa

$$R(14 \text{ d}) = 0,5 \cdot e^{(-\ln 2 \cdot 14 / 0,5)} + 0,3 \cdot e^{(-\ln 2 \cdot 14 / 6)} + 0,1 \cdot e^{(-\ln 2 \cdot 14 / 60)} \\ + 0,1 \cdot e^{(-\ln 2 \cdot 14 / 800)} \approx 0,2434.$$

Sijoittamalla saatu arvo kaavaan 7.26 saadaan saannoksi

$$I_j(0) = \frac{Q_j(14 \text{ d})}{f_1 \cdot R_j(14 \text{ d})} = \frac{400 \text{ Bq}}{0,1 \cdot 0,2434} = 16\,434 \text{ Bq}$$

ja efektiivisen annoksen kertymäksi $E = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq} \cdot 16\,400 \text{ Bq} = 0,056 \text{ mSv}$.

Sekä menetelmä 1 että menetelmä 2 antavat siis varsin lähellä toisiaan olevan tuloksen. Menetelmää 2 voidaan käyttää ellei tarkkaa tietoa kontaminoitumisajankohdasta ole käytettävissä.

KIRJALLISUUTTA

International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series 115, Vienna, 1996.

International Atomic Energy Agency. Assessment of Doses to the Public from Ingested Radionuclides. Safety Report Series no. 14, Vienna, 1999.

International Commission on Radiological Protection. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Annals of the ICRP, Publication 30, Oxford: Pergamon Press, 1979.

International Commission on Radiological Protection. Radionuclide Transformations: Energy and Intensity of Emissions, Annals of the ICRP, Publication 38, Oxford: Pergamon Press, 1983.

International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part 1. Annals of the ICRP, Publication 56, Oxford: Pergamon Press, 1990.

International Commission on Radiological Protection. Protection Against Radon-222 at Home and Work. Annals of the ICRP, Publication 65, Oxford: Pergamon Press, 1994.

International Commission on Radiological Protection. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. Annals of the ICRP, Publication 66, Oxford: Pergamon Press, 1994.

International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part 2, Ingestion Dose Coefficients. Annals of the ICRP, Publication 67, Oxford: Pergamon Press, 1994.

International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part 3. Annals of the ICRP, Publication 69, Oxford: Pergamon Press, 1995.

International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part 5. Compilation of Dose Coefficients from Parts 1 – 4. Annals of the ICRP, Publication 56, Oxford: Pergamon Press, 1995/96.

International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part 4. Inhalation Dose Coefficients. Annals of the ICRP, Publication 71, Oxford: Pergamon Press, 1996.

International Commission on Radiological Protection. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers. Replacement of ICRP Publication 54. Annals of the ICRP, Publication 78, Oxford: Pergamon Press, 1998.

International Commission on Radiation Units and Measurements, Phantoms and Computational Models in Therapy, Diagnosis and Protection. ICRU Report 48. Bethesda MD, 1992.

International Commission on Radiological Protection. Basic Anatomical and Physiological Data for use in Radiological Protection: Reference Values. Annals of the ICRP, Publication 89, Oxford: Pergamon Press, 2002.

Mustonen R, Aaltonen H, Laaksonen J, Lahtinen J, Rantavaara A, Reponen H, Rytömaa T, Suomela M, Toivonen H, Varjoranta T: Ydinuhkat ja varautuminen. STUK-A123, Helsinki, 1995

Sisäisestä säteilystä aiheutuvan annoksen laskeminen. ST-ohje 7.3, Säteilyturvakeskus, Oy Edita Ab, Helsinki, 1999.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 1988 report to the general assembly, with scientific annexes. New York: United Nations, 1988.

