



4

YDINENERGIAN NORMAALIKÄYTÖN SÄTEILYVAIKUTUKSET

Kirsi Alm-Lytz, Veli Riihiluoma, Olli Vilkamo

SISÄLLYSLUETTELO

4.1	Säteilyn lähteet ydinvoimalaitoksilla	146
4.2	Säteilysojelu ydinvoimalaitoksilla	150
4.3	Ydinvoimalaitosten ympäristön säteilyturvallisuus	158

4.1 | Säteilyn lähteet ydinvoimalaitoksilla

Ennen käyttöä uraanipolttoaine on vain hyvin lievästi radioaktiivista. Ydinreaktorin käytön aikana polttoaineessa tapahtuu uraani- ja plutoniumytimien halkeamisia eli fissioita, joissa syntyy fissiotuotteita sekä neutroni- ja gammasäteilyä. Reaktori on ympäröity massiivisilla säteilysuojilla, jotka vaimentavat tehokkaasti reaktorista tulevan säteilyn. Käytön aikana ei ole tarvetta työskennellä lähellä reaktoria eikä henkilöstö altistu fissioista peräisin olevalle säteilylle. Fissiotuotteet ovat uraanin ja plutoniumin halkeamisreaktioissa syntyviä keskiraskaita nuklideja, joista useimmat ovat radioaktiivisia. Fissiotuotteiden ohella reaktorissa syntyy aktinideja ja muita aktivoitumistuotteita. Aktinidit ovat ryhmä kemiallisesti samantapaisia radioaktiivisia alkuaineita, joiden järjestysluku on 89–103. Säteilysuojelun kannalta tärkeimmät reaktorin aktinidit ovat uraania raskaampia aineita, transuraaneja, jotka syntyvät neutronikaappausten ja niitä mahdollisesti seuraavien radioaktiivisten hajoamisten tuloksena (esimerkiksi ^{239}Pu , ^{241}Am). Myös uraani, torium ja niiden lähimmät hajoamistuotteet ovat aktinideja. Muita aktivoitumistuotteita syntyy reaktorin rakennemateriaaleissa (esimerkiksi ^{60}Co) ja jäädytteessä (esimerkiksi ^{16}N) neutronien aiheuttamien ydinreaktioiden seurauksena.

Valtaosa ydinvoimalaitoksen sisältämisistä radioaktiivisista aineista on fissiotuotteita ja aktinideja, jotka syntyvät ydinpolttoaineessa ja pysyvät normaalitilanteessa polttoainesauvojen suojakuoren sisällä. Polttoaineeseen kertyvien radioaktiivisten aineiden määrä on reaktori-tyyppistä riippumatta suunnilleen sama suhteessa reaktorin tehoon ja polttoaineen palamaan. Palama tarkoittaa ydinpolttoaineen tuottamaa energiaa massayksikköä, esimerkiksi uraanikiloa kohden. Reaktori on voimakas säteilylähte myös pysäytettynä ja säteilyltä suojautuminen vaatii noin kolmen metrin paksuisen vesikerroksen siellä, missä kiinteät reaktorin ympärillä olevat rakenteet eivät tarjoa vastaavaa säteilysuojaa.

Reaktorin ja siitä poistetun käytetyn polttoaineen ulkopuolella on vain pieni osa ydinvoimalaitoksen sisältämisistä radioaktiivisista aineista, mutta henkilökunnan säteilyaltistuksen ja päästöjen rajoittamisessa ne ovat normaaleissa käyttötilanteissa tärkein huomion kohde. Nämä aineet ovat enimmäkseen jäädytysvedessä neutronisäteilyn seurauksena syntyneitä aktivoitumistuotteita. Satunnaisten polttoaineen suojakuorivaurioiden seurauksena joukossa voi olla myös jonkin verran kaasumaisia tai veteen liukenevia fissiotuotteita. Suuremman polttoaineen

suojakuorivaurion jälkeen voivat myös aktinidit päästä polttoaineesta jäähdytysveden sekaan. Reaktorin lähellä kiinteissä rakenteissa on lisäksi neutronisäteilyn synnyttämiä aktivoitumistuotteita. Niiden huomioon ottaminen tulee tärkeäksi erityisesti ydinvoimalaitoksen käytöstä poiston yhteydessä, koska kyseessä olevat rakenteet ovat pitkäaikaisen käytön jälkeen voimakkaita säteilylähteitä.

Ydinvoimalaitoksella radioaktiivisia aineita esiintyy eri olomuodoissa. Kiinteät komponentit reaktorisydämen läheisyydessä ovat radioaktiivisia. Reaktorin jäähdytysvedessä radionuklidit voivat olla liuenneena tai hiukkasina. Ilmassa radionuklidit voivat olla kaasumaisia tai aerosolina eli ilmassa leijuvina pieninä hiukkasina tai pisaroina (ilmakontaminaatio). Radioaktiivista kiinteää tai irtonaista likaa voi kertyä myös erilaisille pinnoille (pintakontaminaatio).

Reaktorin jäähdytysvedessä syntyvät lyhytikäiset aktivoitumistuotteet muodostavat käytön aikana voimakkaan säteilylähteen. Tästä syystä reaktorin jäähdytyspiiri (primaariipiiri) vaatii ympärilleen vahvat säteilyltä suojaavat rakenteet. Reaktorin sulkemisen jälkeen lyhytikäiset aktivoitumistuotteet häviävät puoliintumisen vaikutuksesta lähes välittömästi, ja jäähdytyspiiristä tuleva säteily vähenee murtoosaan. Työntekijöiden säteilysuojelun kannalta merkittävimmäksi säteilylähteeksi jäävät jäähdytysveden seassa olleet ja reaktorissa aktivoituneet korroosiotuotteet sekä mahdollisista polttoainevuodoista peräisin olevat fissiotuotteet. Suomessa yli 90 prosenttia ydinvoimalaitoksella työskentelevien kokonaisannoksesta kertyy polttoaineen vaihdon ja huoltotöiden vuoksi pidettävän vuosihuoltoseisokin aikana.

Ydinvoimalaitoksen työntekijöiden säteilyannos voi aiheutua ulkoisesta säteilystä tai elimistöön hengityksen tai ruoansulatuskanavan kautta kulkeutuvien radioaktiivisten aineiden aiheuttamasta kehon sisäisestä säteilystä. Ulkoinen säteily on etupäässä läpätunkevaa gammasäteilyä, joka tulee laitteista tai radioaktiivista vettä sisältävistä putkista ja säiliöistä. Työntekijät voivat altistua myös käytetyn polttoaineen käsittelyn yhteydessä gamma- ja neutronisäteilylle. Sisäisen annoksen kannalta huomattavia ovat gammasäteilijöiden ohella myös eräät beetasäteilevät aineet, joita voi vapautua esimerkiksi avattaessa laitteita huoltotöiden yhteydessä. Ydinvoimalaitoksella tehtävien säteilysuojelutoimien ansiosta työntekijöiden sisäinen annos on yleensä vähämerkityksinen suoran säteilyn aiheuttamaan ulkoiseen säteilyannokseen verrattuna.

Fissiotuotteet

Ydinreaktorin fissiona syntyvät halkeamistuotteet hajoavat lähettäen sekä beeta- että gammasäteilyä. Reaktorin käydessä fissiotuotteita syntyy vakionopeudella ja hajoaa verrannollisesti niiden kulloiseenkin määrään. Jo muutaman kuukauden kuluttua reaktorin käynnistämisestä halkeamistuotteiden kokonaismäärät lähestyvät tasapainotilannetta. Taulukossa 4.1 on esitetty Loviisan reaktorisydämen laskennallinen radioaktiivisten aineiden aktiivisuus tasapainotilassa. Reaktorin pysäyttämisen jälkeen fissiotuotteiden aktiivisuus vähenee lyhytikäisten ytimien hajoamisen vaikutuksesta alussa suhteellisen nopeasti, mikä kuitenkin hidastuu vähitellen. Noin neljän kuukauden kuluttua polttoaineen koko-

naisaktiivisuus on noin prosentti täyden tehon tasapainotilanteen aktiivisuudesta.

Osa fissiotuotteista on kaasumaisia ja ne kerääntyvät polttoainesauvojen sisällä polttoainetablettien ja suojakuoren väliin. Reaktorin käyttölämpötilassa kaasumaisia tai höyrystyneitä ovat jalokaasut (muun muassa ^{133}Xe , ^{135}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ja ^{87}Kr) sekä jodin eri isotoopit (muun muassa ^{131}I , ^{132}I ja ^{133}I). Osa muistakin fissiotuotteista liukenee melko helposti jäähdyteveteen (muun muassa ^{137}Cs).

Fissiotuotteita voi päästä jäähdytteeseen polttoaineen suojakuoren vaurioituessa. Pieni vuoto polttoaineen suojakuorena vapauttaa lähinnä jalokaasuja ja jodin isotooppeja. Jos vaurio on suurempi, voi myös kiinteää polttoainetta päästä jäähdytysveden mukana reaktorisydämeen ja laitosjärjestelmiin. Suomessa reaktori-

Nuklidi	Aktiivisuus [Bq]	Puoliintumisaika $T_{1/2}$	Kaasu-raossa [%]
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	4,2E+17	4,5 h	0,7
^{86}Kr	1,1E+16	11 a	3,3
^{87}Kr	8,1E+17	1,3 h	0,4
^{88}Kr	1,1E+18	2,8 h	0,5
^{88}Rb	1,2E+18	18 min	3,3
^{89}Sr	1,6E+18	51 d	1,3
^{90}Sr	8,2E+16	29 a	1,3
^{91}Y	2,0E+18	59 d	1,3
^{95}Zr	2,6E+18	64 d	1,3
^{95}Nb	2,6E+18	35 d	1,3
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	2,4E+18	6,0 h	0,5
^{103}Ru	2,2E+18	39 d	2,7
^{131}I	1,5E+18	8 d	2,2
^{132}Te	2,1E+18	3 d	1,8
^{133}I	3,0E+18	21 h	1,4
$^{133\text{m}}\text{Xe}$	9,4E+16	5 d	-
^{133}Xe	3,0E+18	2 d	3,5
^{134}Te	2,6E+18	42 min	-
^{134}Cs	1,3E+17	2 a	3,3
$^{135\text{m}}\text{Xe}$	5,8E+17	9 h	0,9
^{135}Xe	6,3E+17	16 min	0,9
^{137}Cs	1,1E+17	30 a	3,3
^{140}Ba	2,7E+18	13 d	1,3
^{141}Ce	2,5E+18	33 d	2,7
^{239}Pu	3,7E+14	24 000 a	-
^{241}P	1,3E+17	14 a	-
^{241}Am	9,7E+13	430 a	-
^{244}Cm	1,2E+15	18 a	-

TAULUKKO 4.1 Radioaktiiviset aineet ydinvoimalaitoksen reaktorissa

torin polttoaineen vauriot ovat kansainvälisesti verraten vähäisiä; yhden käyttövuoden aikana on tyypillisesti yhdessä reaktorin 40 000–50 000 polttoainesauvasta ollut pieni vaurio.

Aktivoitumistuotteet

Aktivoitumistuotteita syntyy reaktorissa tai sen läheisyydessä olevien aineiden aktivoituessa reaktorisydämen aiheuttamassa voimakkaassa neutronivuossa. Aktivoitumista tapahtuu muun muassa polttoaineen suoja-kuoressa, paineastian sisäpuolisissa rakenteissa ja laitteissa (tukirakenteet ja säätösauvat), paineastiamateriaalissa sekä jäähdytteessä ja sen sisältämissä epäpuhtauksissa.

Reaktorin käytön aikana merkittävin säteilylähde on ^{16}N (gammaenergia yli 6 MeV), jota syntyy jäähdytteen virratessa sydämen läpi veden hapestaa nopeiden neutronien aiheuttamassa reaktiossa $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$. ^{16}N :n vaikutuksesta reaktorin primaaripiirin vesi säteilee voimakkaasti käytön aikana. Koska ^{16}N :n puoliintumisaika on lyhyt (7 s), vähenee isotoopin merkitys säteilylähteenä, kun jäähdyte kulkee kauemmas reaktorista eli isotoopin syntymisestä kuluneen ajan kasvaessa. Siten esimerkiksi kiehutusreaktorin turbiinille menevän höyryn typpiaktiivisuudesta aiheutuva säteilyannosnopeus on paljon pienempi (noin 5 mSv/h) kuin painevesireaktorin jäähdytekierrossa olevasta typestä aiheutuva säteilyannosnopeus (noin 500 mSv/h) putkistojen läheisyydessä. Kummankin reaktorin suunnittelussa kiinnitetään tarpeellista huomiota riittävän säteilysuojauksen toteuttamiseen.

Muita vedessä aktivoitumisen seurauksena syntyviä säteilylähteitä ovat ^{19}O (puoliintumisaika 27 s) ja ^3H (puoliintumisaika 12 a). Nuklidilla ^{19}O on lyhyen puoliintumisajan takia säteilysuojelullista merkitystä vain reaktorin käytön aikana. Tritiumia (^3H), joka on puhdas beetasäteilijä, muodostuu kevytvesireaktorin jäähdytteessä ja säätösauvoissa, pääasiassa boorin neutronireaktioissa. Sen merkitys on kuitenkin suhteellisen vähäinen suhteessa muihin nuklideihin laitoksen työntekijöiden saaman säteilyannoksen kannalta. Eräissä raskasvesijäähdytettä (D_2O) käyttävissä reaktoreissa sitä syntyy runsaasti deuteriumin (^2H eli D) neutronikaappauksessa ja se on merkittävä nuklidi huoltotöiden aikaisen säteilysuojelun kannalta.

Hiilen radioaktiivista isotooppia ^{14}C syntyy hapen ja typen neutronireaktioista. Beetasäteilevänä ja pitkäikäisenä nuklidina sillä on merkitystä ydinvoimalaitoksen radioaktiivisten päästöjen ja ydinjätteiden aiheuttaman säteilyaltistuksen kannalta.

Jäähdytteen mukana kulkeutuu myös liuenneena ja hiukkasina vähäisiä määriä korroosiotuotteita, jotka aktivoituvat reaktorisydämen neutronivuossa. Korroosiotuotteissa on rautaa, kromia, nikkeliä ja kobolttia. Aktivoituneet hiukkaset kiinnittyvät jäähdytysjärjestelmän pintoihin primääripiirissä. Tätä kiinteää radioaktiivista likaa kutsutaan ”crudiksi”, ja se aiheuttaa säteilysuojelutoimenpiteitä niin käytön kuin seisokin aikana. Säteilysuojelun kannalta tärkeimpiä aktivoituneita korroosiotuotteita ovat ^{60}Co ($T_{1/2} = 5,3 \text{ a}$), ^{54}Mn ($T_{1/2} = 312 \text{ d}$), ^{51}Cr ($T_{1/2} = 28 \text{ d}$) ja ^{59}Fe ($T_{1/2} = 45 \text{ d}$). Aktivoitumistuotteiden syntymistä jäähdytteessä voidaan vähentää sopivin primääripiirin materiaalivalinnoin ja piirissä ylläpidettävällä vesikemialla (pH, liukoisuus ja oksidoitumisreaktiot). Lisäksi puhdistusjärjestelmissä olevien suodattimien ioninvaihtimilla poistetaan aktivoitumistuotteita jäähdytteestä.

Transuraanit syntyvät polttoaineessa muun muassa ^{238}U :n neutronikaappauksessa. Yleisimpiä transuraaneja ovat ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{239}Np ja ^{242}Cm . Transuraanit vapautuvat fissiotuotteiden tapaan jäähdytteeseen ainoastaan, kun polttoaineen suojakuori on vaurioitunut. Alfasäteilijöinä ne eivät vaikuta yleiseen säteilytasoon lyhyen kantamansa takia, mutta ne voivat lisätä työntekijöiden sisäisen kontaminaation riskiä järjestelmiä avattaessa.

4.2 | Säteilysuojelu ydinvoimalaitoksilla

Ydinvoimalaitoksen työntekijöiden säteilyannosten pitäminen pienenä perustuu toiminnan hyvään suunnitteluun, tarkoituksenmukaisiin työtapoihin, ajanmukaisiin säteilysuojelumenetelmiin, laitteisiin ja suojava-rusteisiin, aikaisemman kokemuksen hyväksikäyttöön sekä hyvään yhteistyöhön eri organisaatioyksiköiden välillä.

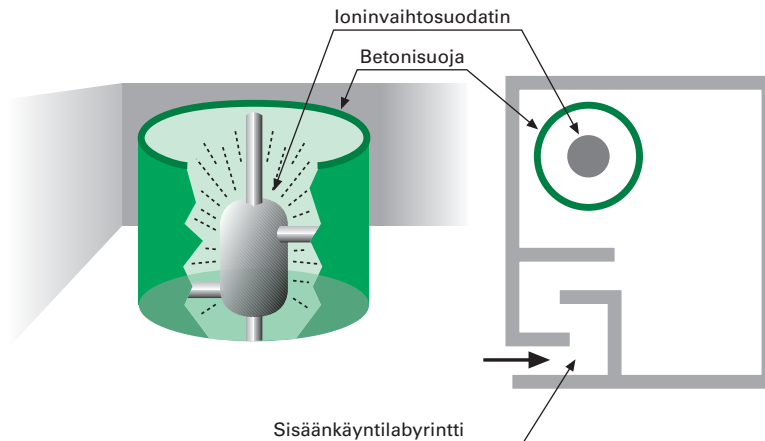
Säteilysuojelun kolme keskeistä kulmakiveä ovat optimointi-, yksilönsuoja- ja oikeutusperiaate. Säteilysuojelun optimointia kutsutaan myös ALARA-periaatteeksi (as low as reasonably achievable). Sen mukaan säteilyaltistus tulee rajoittaa niin pieneksi kuin käytännöllisin toimin on mahdollista. Säteilyannoksiin vaikuttavia tekijöitä ovat myös laitoksen prosessien ohjaus, primäärijäähdytteen kanssa kosketukseen joutuvien laitteiden materiaalit, vesikemia ja polttoaineen eheys. Nämä vaikuttavat merkittävästi siihen, miten radioaktiiviset aineet syntyvät ja kulkeutuvat ydinvoimalaitoksella. Jotta säteilysuojelussa pystyttäisiin saavuttamaan mahdollisimman hyvä tulos, kootaan annoksia alentavat toimenpiteet erilliseksi menettelyohjelmaksi, jota kutsutaan yleisesti ALARA-ohjelmaksi.

Suojautuminen ulkoista säteilyä vastaan

Ydinvoimalaitoksen rakenteista ja laitteista tuleva ulkoinen säteily muodostuu pääasiallisesti gammasäteilystä. Laitosrakennuksen tiloja, laitteistojen sijoittamista ja säteilysuojia suunniteltaessa pyritään mahdollisimman hyvään säteilysuojaukseen. Mahdollisimman suuren osan laitoksesta tulee kuitenkin olla luoksepäästävä myös käytön aikana. Säteilyn annosnopeuksia näissä tiloissa on rajoitettava riippuen tilojen käyttötarkoituksesta sekä käyntimääristä ja oleskeluajoista.

Suuret radioaktiiviset komponentit (suodattimet, paineastiat, pumput) on sijoitettu erillisiin tiloihin tai erotettu toisistaan säteilysuojilla huoltotöiden aiheuttamien säteilyannosten pienentämiseksi. Sokkeloita käytetään vähentämään suoraa säteilyä ovien läpi. Kaapeleiden ja putkien läpiviennit on sijoitettu siten, ettei suoraa säteilyä pääse lähtiloihin. Venttiilit ja laitteet, jotka sijaitsevat korkean säteilytason huonetiloissa, on varustettu kauko-ohjauksella. Radioaktiivista vettä sisältävien putkien linjat on johdettu niin, että vältetään radioaktiivisten likakertymien ("crudin") synty. Kuvassa 4.1 on esimerkki säteilevän komponentin suojauksesta.

Reaktoripaineastiaa ympäröivä betonisuoja vaimentaa reaktorin sisäosista ja sitä ympäröivistä rakenteista peräisin olevaa neutroni- ja gammasäteilyä. Käytön aikana suurimman säteilylähteen reaktorisydämen ulkopuolella muodostaa jäähdytysjärjestelmässä muodostuva ^{16}N . Voimakkaan ja läpituokevan gammasäteilyn vuoksi sitä käytetään putkilinjojen ja kiehutusreaktorilla myös turbiinin säteilysuojien mitoitusperustana. Lovii-



KUVA 4.1 Aktiivisen komponentin säteilysuojaus ydinvoimalaitoksella

san voimalaitoksella reaktorin ja primaaripiirin säteily suojaus on toteutettu niin, että tehokäytön aikana annosnopeus reaktorin yläpuolella suojarakennuksessa on alle 25 $\mu\text{Sv/h}$.

Reaktorin ollessa pysäytettynä sydämen ulkopuolisten järjestelmien ja huonetilojen säteilytasot määräytyvät aktivoituneiden korroosiotuotteiden radioaktiivisuuden mukaan. Reaktorin jäähdytyspiirin ympäristössä säteilytasot ovat tällöin alle tuhannesosa käytön aikaisesta säteilyannosnopeudesta. Korroosionuklideista ^{60}Co :n annosnopeuden merkitys on suurin sen lähettämän suurienergisemmän gammasäteilyn vuoksi. Säteilytasojen alentamiseen tähtäävässä työssä onkin merkittävää vaikutusta ^{60}Co :n aktiivisuuden vähentämiseen.

Polttoainevuototilanteessa fissiotuotteet voivat olla merkittävä säteilylähde jäähdytyspiirissä. Tällöin niissä suodattimissa, jonne radionuklidit kerääntyvät, on korkea säteilytaso. Siksi suodattimien säteily suojaukseen on kiinnitetty erityistä huomiota. Mitoituksessa oletetaan yleensä, että yksi prosentti polttoainesauvoista vaurioituu. Todellisuudessa polttoainevaurioita tapahtuu selvästi harvemmin. Normaalkäytön aikana reaktorissa voi tyypillisesti olla enintään yksi tai kaksi satunnaisesti vaurioitunutta, vuotavaa sauvaa.

Suojautuminen pinta- ja ilmakontaminaatiolta

Radioaktiivisten aineiden kertymistä laitteisiin tai tiloihin kutsutaan radioaktiiviseksi kontaminaatioksi. Ydinvoimalaitoksella kontaminoituneita ja säteileviä järjestelmiä ovat reaktorin primaaripiirin ohella reaktorin apujärjestelmät, jätteenkäsittelyyn liittyvät järjestelmät sekä käytetyn polttoaineen säilyttämiseen liittyvät järjestelmät. Järjestelmien vuodoissa voi laitostiloihin syntyä ilma- ja pintakontaminaatiota. Sen havaitsemiseksi ja mittaamiseksi laitos on varustettu tarkoilla mittausjärjestelmillä ja -laitteilla.

Polttoainevuodon sattuessa joudutaan ottamaan huomioon myös suojauminen radioaktiivisen jodin (muun muassa ^{131}I) varalta. Jodi voi sitoutua kiinteisiin aineisiin tai olla kaasumaisena ilmassa. Jodin merkitys säteilyriskin lisääjänä perustuu sen biologiseen ominaisuuteen kerääntyä ihmisen kilpirauhaseen. Polttoainevuodon takia vuosihuollon alkaessa joudutaan usein odottamaan jodin aktiivisuuspitoisuuden laskua reaktorivedessä, ennen kuin reaktoripaineastian kansi avataan.

Ilmakontaminaatiolta suojautumiseen käytetään ensisijaisesti laitoksen ilmastointijärjestelmiä. Ilmavirtaukset suunnataan pienemmän ilma-aktiivisuuden omaavista huoneista korkeamman aktiivisuustason omaaviin huoneisiin ennen tarkistusmittausta ja laitokselta ulospäästöä. Ellei näin pystytä järjestämään sopivia työolosuhteita, käytetään suoja-asuja ja hengityssuojaimia. Pintakontaminaatiolta suojaudutaan kuhunkin tilanteeseen sopivia asusteita ja suojavarusteita käyttämällä.

Kontaminaatiossa voi olla pieniä hiukkasia, jotka ovat tavallista aktiivisempia. Tällaisia, usein silmin näkymättömiä, kiinteitä hiukkasia kutsutaan kuumiksi hiukkasiksi. Kuuma hiukkanen voi olla pidemmän aikaa neutronisäteilyssä aktivoitunut metallihiukkanen tai polttoaineesta peräisin oleva fissiotuote- tai aktinidihiukkanen. Aktivoituneiden hiukkasten materiaali on pääosin polttoainekanavasta irronnutta zirkoniumoksidia. Hiukkasten aktiivisuus vaihtelee tyypillisesti 0,3 kBq:stä noin 2 000 kBq:iin. Koska hiukkaset ovat tavallista pölyä raskaampia, on todennäköisempää, että henkilö sisäänhengityksen sijasta saa hipun suojavaatteisiin tai iholle. Hiukkasilla voi olla myös sähkövaraus, joten ne voivat kulkeutua kauemmas, mikä vaikeuttaa työkohteen puhdistamista ja hiukkasten keräämistä. Pienten aktiivisten hiukkasten havaitsemiseksi mitataan tällaiselle kontaminaatiolle alttiita reaktorin läheisyydessä olevia alueita ja käytetään niiden keräämiseksi kulkureitillä olevia erityisiä tarramattoja.

Säteilysuojausten suunnittelu

Säteilysuojien suunnittelu ja säteilyolosuhteiden määrittely on tärkeä osa ydinvoimalaitosten suunnittelua. Koska ydinvoimalaitoksella esiintyvät säteilylähteet ja säteilysuojat ovat yleensä laskennallisesti monimutkaisia, käytetään laskennassa tarvittaessa annoslaskentaohjelmia. Ohjelmat perustuvat ominaisuuksiltaan esimerkiksi lähdealueen point kernel -integrointiin tai säteilyn kulkeutumista kuvaavaan simulointimenetelmään (Monte Carlo). Säteilysuojauslaskennassa käytettävien mallien ja lähtötietojen valinta tehdään tavallisesti konservatiivisesti eli niin, että saadaan yleisesti hieman suurempia tuloksia todelliseen säteilyn annosnopeuteen verrattuna.

Point kernel -laskentamenetelmässä säteilylähde jaetaan pieniin osiin, joita voidaan kutakin erikseen käsitellä pistelähteenä. Annosnopeus määrityissä paikassa saadaan laskemalla annospisteeseen sijoitetun ilmaisen vaste, jossa otetaan huomioon gammasäteilyn vaimeneminen ja siroinnasta väliaineesta aiheutuva lisäyskerroin. Säteilylähde voi olla pis-

te-, viiva-, taso- tai tilavuuslähde. Säteilysuojat voivat olla tasomaisia tai säteilylähteen ympäröiviä suojia. Tyypillisiä säteilysuojamateriaaleja ovat vesi, betoni, teräs ja lyijy.

Monte Carlo -simuloinnissa seurataan yksitellen suurta joukkoa fotoneita tai neutroneita, ja määrittellään näiden perusteella keskimääräisen hiukkasen käyttäytyminen. Menetelmä perustuu erilaisten vuorovaikutuksien ja sirontakulmien todennäköisyysjakautumiin. Kaikkia hiukkasia ei tarvitse seurata elinkaarensa loppuun asti, vaan laskennassa voidaan seuranta lopettaa merkityksettömänä esimerkiksi hiukkasen ajaututtua kauas annoslaskennan kohdealueesta. Monte Carlo -menetelmässä pystytään käyttämään rakenteita kuvattaessa point kernel -menetelmää monimutkaisempia laskentageometrioita (esimerkiksi erilaiset läpiviennit), mutta laskenta on hitaampaa simuloitavien hiukkasten suuren lukumäärän takia.

Säteilysuojeluorganisaatio ja -koulutus

Ydinvoimalaitoksen vastuullisen johtajan tehtävänä on huolehtia siitä, että laitoksella työskentelevien säteilysuojelussa noudatetaan säteilylain määräyksiä. Vastuullisen johtajan tulee turvata riittävät resurssit ja valtuudet säteilysuojelua toteuttavalle henkilöstölle.

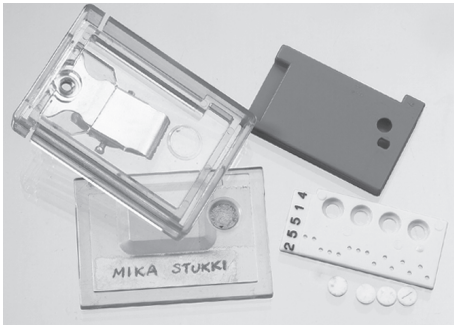
Laitoksen käyttöorganisaatiossa on yksikkö, jonka tehtävänä on huolehtia käytännön säteilysuojelutyöstä ja jonka esimiehenä toimii laitoksen säteilysuojelupäällikkö. Säteilysuojeluhenkilöstöllä tulee olla riittävät valtuudet toteuttaa säteilyannosten pienenä pitämiseen tähtääviä toimenpiteitä ja erityisesti valtuudet keskeyttää työnteko säteilysuojellisin perustein, jos tilanne sitä edellyttää.

Ydinvoimalaitosten valvonta-alueella työtä tekeville vakinaisille ja tilapäisille säteilytyöntekijöille annetaan työ- ja säteilysuojeluun liittyvää peruskoulutusta. Tämän lisäksi työhön liittyvää erityistä säteilysuojelukoulutusta annetaan niille henkilöille, joiden työhön liittyy merkittävä säteilyriski.

Työskentely ydinvoimalaitoksella

Ydinvoimalaitoksella tehdään järjestelmällisesti annosnopeusmittauksia ja ilmakontaminaation ja pintakontaminaation (aktiivisuuskate) määrittelyk-

siä. Mittaustulosten perusteella rajataan valvonta-alueet ja tarkkailualueet. Jos alueella efektiivinen annos voi ylittää 1 mSv yhden työskentelyvuoden aikana, alue luokitellaan vähintään tarkkailualueeksi. Valvonta-alueeksi luokitellaan ne ydinvoimalaitoksen tilat, joissa ulkoinen annosnopeus saattaa ylittää arvon $3 \mu\text{Sv/h}$ tai joissa 40 tunnin viikottaisesta oleskelusta voi aiheutua yli 1 mSv sisäinen säteilyannos vuodessa.



KUVA 4.2 Säteilyannosmittauksessa käytettävä TL-dosimetri avattuna

Termoluminesenssikiteet näkyvät kuvan oikeassa alareunassa.

Valvonta-alueen tilat jaetaan vyöhykkeisiin ulkoisen annosnopeuden, pintakontaminaation ja ilmakontaminaation perusteella. Vyöhykkeitä on vähintään kolme. Alimpaan vyöhykkeeseen kuuluvat tilat, joissa säteilyolosuhteet eivät yleensä edellytä työaika rajoituksia. Ylimpään vyöhykkeeseen kuuluvat tilat, joissa sallitaan ainoastaan lyhytaikaisia, huolellisesti edeltäkin suunniteltuja käyntejä. Ydinlaitosten tarkkailu- ja valvonta- aluetta koskevia määräyksiä ja ohjeita on esitetty STUKin ohjeessa YVL 7.9.

Työskenneltäessä ydinvoimalaitoksen valvonta-alueella käytetään suoja- välineitä. Vähin suojavarustus on suojahaalarit, suojakäsineet ja kengän- suojat. Mikäli työkohteen ilmassa esiintyy radioaktiivisia aineita, käytetään lisäksi erilaisia hengityssuojaimia. Poistuttaessa valvotulta alueelta kaikki työntekijät ja käytetyt työkalut mitataan, jottei radioaktiivisia aineita pääse leviämään laitoksen ulkopuolelle.

Kaikki ydinvoimalaitoksella tehtävä työ suunnitellaan ja tarpeen mukaan myös harjoitellaan etukäteen. Mikäli työskentely aiheuttaa säteilyannosta, tehdään töistä myös erilliset säteilytyöluvat, joissa annetaan työntekijöiden suojautumista ja työtä koskevat määräykset ja ohjeet. Jotta säteilysojeluotoimenpiteet pystyttäisiin toteuttamaan johdonmukaisesti, on ydinvoimalaitoksilla jatkuvasti ajan tasalla pidettävät säteilysojeluohjeet. Ydinvoimalaitoksella ylläpidettävät tiedostot huonetilojen vyöhykejaosta, järjestelmien annosnopeuksista ja säteilyolosuhteista helpottavat merkittävästi töiden säteilysojeluun suunnittelua.

Työntekijöiden altistusta säteilylle voidaan vähentää hyödyntämällä hankalissa työolosuhteissa monipuolista tekniikkaa kuten kauko-ohjattuja järjestelmiä, automatiikkaa ja kuvankäsittelyä.

Kansainväliseen yhteistyöhön liittyvällä käyttökokemusten vaihdolla eri ydinvoimalaitosten välillä voidaan parantaa vaativien töiden suunnittelua ja alentaa annoksia merkittävästi.

Säteilymittaus ja annosvalvonta

Säteilylähteiden mittaamiseen ydinvoimalaitoksilla käytetään erilaisia säteilymittalaitteita. Niillä mitataan ulkoista säteilyä, pinta- ja ilmakontaminaatiota. Osa mittalaitteista on kiinteitä ja ne valvovat jatkuvasti esimerkiksi laitoksen prosesseja, huonetiloja tai päästöjä. Niiden mittaustiedot ja mahdolliset hälytykset kootaan keskitetysti esimerkiksi ydinvoimalaitoksen valvomoon. Suuri osa käytännön säteilysuojelun mittalaitteista on kuitenkin siirrettäviä.

Valvonta-alueella työskentelevillä henkilöillä on aina oltava käytössään yksilön annosta mittaava annosmittari eli dosimetri. Suomessa ydinvoimaloissa on käytössä kahdenlaisia annosmittareita: reaaliaikaisia elektronisia dosimetrejä sekä passiivisia TL-dosimetrejä. Virallinen annosmittaus perustuu Suomessa termoluminisenssimateriaalia sisältävien mittakiteiden käyttöön (TL-dosimetri), kuva 4.2. Säteily aiheuttaa kiteissä, esimerkiksi LiF, viritystiloja. Kidettä lämmitettäessä viritystilat purkau-



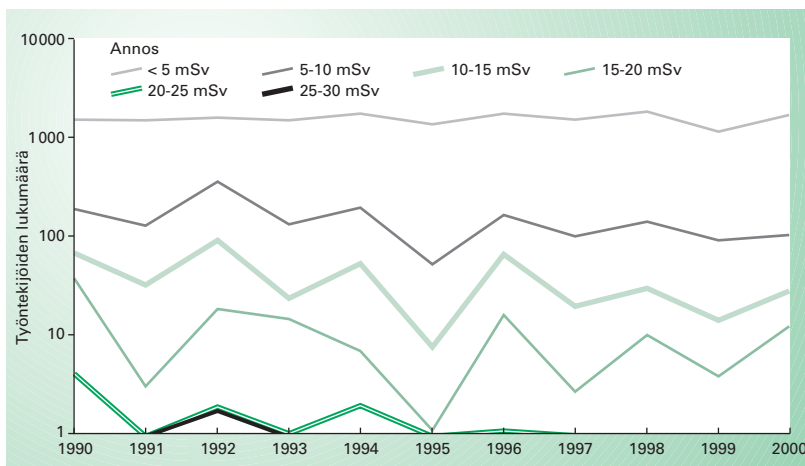
KUVA 4.3 Säteilyannosnopeuden mittaus ydinvoimalaitoksella

tuvat ja kide lähettää valoa, jonka voimakkuuden perusteella voidaan määrittää kiteen saama säteilyannos. Termoluminesensidosimetrisissa on yleensä muutamia mittakiteitä. Jos kiteet on valmistettu eri materiaaleista tai ne on päällystetty eri materiaaleilla, voidaan dosimetrilla saada tietoa esimerkiksi gamma-säteilyn aiheuttamasta pinta- ja syväannoksesta tai neutronisäteilyn annoksesta. Nämä dosimetrit luetaan määräajoin, esimerkiksi kerran kuukaudessa tai huoltotöiden päättyessä. Lisäksi käytetään elektronisia säteilymittareita, jotka mittaavat ja näyttävät reaaliajassa työannoksen kertymistä (kuva 4.4). Tällaisiin työdosimetreihin pystytään asettamaan säteilyannosnopeuden tai annoksen hälytysrajat, jolloin saadaan tarvittaessa varoitus. Saadut työannokset luetaan tietokonejärjestelmään, jolloin on mahdollista tarkkailla yksittäisten annosten lisäksi eri töissä työntekijäryhmille kertyviä annoksia.



KUVA 4.4 Säteilyannoksen kertymistä osoittavia elektronisia dosimetrejä

Työntekijöiden mahdollisen sisäisen säteilyannoksen valvontaa varten ydinvoimalaitoksella on aktiivisuuden mittauslaitteisto, joka pystyy havaitsemaan pieniä määriä radioaktiivisia aineita kehon sisällä. Tarvitta-



KUVA 4.5 Suomen ydinvoimalaitoksilla kertyneiden henkilökohtaisten säteilyannosten jakauma vuosina 1990–2000

essa mittaamiseen käytetään kokokehomittauslaitteistoa, jolla pystytään myös erottelemaan eri radionuklidit sekä niiden sijainti kehon eri osissa.

Suomessa ydinvoimalaitoksilla saadut annokset kirjataan ydinvoimalaitoksessa ja siirretään kuukausittain Säteilyturvakeskuksen annosrekisteriin. Kuvassa 4.5 on esitetty Suomen ydinvoimalaitosten henkilökunnalle kertyneiden säteilyannosten jakauma vuosina 1990–2000.

Osa ydinvoimalaitosten huoltohenkilöstöstä voi työskennellä myös muissa maissa. Ruotsin ja Suomen välillä on tehty sopimus työntekijöiden annostietojen siirtämisestä oman maan annosrekisteriin. Muissa maissa työskennellessä tulee käyttää EU-määräysten mukaista annospassia, johon merkitään työssä saadut säteilyannokset. Annospassi tulee Suomeen palattaessa toimittaa Säteilyturvakeskuksen annosrekisteriin.

4.3 | Ydinvoimalaitosten ympäristön säteilyturvallisuus

Normaalin käytön aikana pieni osa reaktorissa syntyneistä radioaktiivisista aineista joutuu reaktorin jäähdytysjärjestelmään ja siihen liittyviin puhdistus- ja jätejärjestelmiin. Nestemäisen jätteen käsittelyjärjestelmien sekä poistokaasujärjestelmien ja ilmastoinnin kautta pääsee radioaktiivisia aineita hyvin rajoitetusti ympäristön vesistöön tai ilmaan. Laitokselta ulos pääsevät radioaktiiviset kaasut ja nesteet puhdistetaan ja niitä viivästetään siten, että ympäristöön leviävä radioaktiivisten aineiden määrä on erittäin pieni ympäristön luonnollisten radioaktiivisten aineiden määrään ja niiden säteilyvaikutukseen verrattuna.

Päästö ilmaan tapahtuu tavallisesti laitoksen noin sata metriä korkeasta poistokaasupiipusta, jonka kautta laitoksen huoneiden ja tilojen ilmastoinnin koottu virtaus johdetaan ulkoilmaan. Lähinnä huoltotöiden aikana siinä voi olla havaittavia määriä radioaktiivisia aineita. Lisäksi piippuun johdetaan nestejärjestelmistä kerätyt, käsitellyt kaasut, joissa saattaa olla vähäisiä määriä radioaktiivisia aineita.

Ydinvoimalaitosten jäähdytteenä käytettävää vettä puhdistetaan jäähdytyskierron aikana ja sitä käytetään uudelleen laitoksessa. Turbiiniipiirissä olevan höyrylauhduttimen jäähdytys tapahtuu erillisen merivesipiirin avulla. Käytettävä lauhdutusvesi otetaan merestä ja palautetaan mereen, mutta merivesipiiri on eristetty voimalaitoksen suljetuista kiertopiireistä. Mikäli turbiinin lauhdutin vuotaa, painesuhteet aiheuttavat meriveden vuo-

tamisen laitoksen prosesseihin. Lauhdutinvuoto ei siis aiheuta laitoksen sisällä olevan veden pääsyä ympäristöön. Ydinvoimalaitoksessa on myös erilaisten laitteiden jäähtytykseen tarkoitettuja pieniä suljettuja kierto-piirejä, joista lämpö poistetaan lopulta erilliseen merivesipiiriin. Siten pääosa laitoksen vesijärjestelmistä perustuu suljettuun kiertoon eivätkä ne periaatteessa aiheuta radioaktiivisten aineiden päästöjä vesiympäristöön. Käytännössä ydinvoimalaitoksen suljetuista piireistä tapahtuu aina pieniä hallittuja vuotoja esimerkiksi pumppujen ja venttiilien tiivisteistä. Vuodot kerätään laitoksen sisällä vesien ja jätteiden käsittelyyn. Samoin kerätään erilaisia vähäaktiivisia pesuvesiä. Osa näistä vesistä lasketaan puhdistuksen, säilytyksen ja radioaktiivisuuden tarkistuksen jälkeen merivesikanavaan ja meriympäristöön.

Kansainvälisesti turvallisuusvaatimukset ovat periaatteiltaan melko samanlaisia, mutta radioaktiivisten aineiden päästöjen määrä voi olla erilainen eri maissa ja laitoksilla. Päästöjen radioaktiivisten aineiden määrää valvotaan kaikkialla tarkoin säteilymittauksin. Ympäristön säteilyvalvonnalla varmennetaan riippumattomasti, että laitoksen käytöstä ja päästöistä saadut tiedot ovat oikeita ja ettei ympäristössä löydy luonnon tai ihmisen kannalta haitallisia määriä laitoksesta peräisin olevia radioaktiivisia aineita.

Ydinvoimalaitosten päästöt

Kaikissa reaktoreissa käytetään erityisiä laitostyypille ja -sukupolvelle ominaisia puhdistus- ja jätteenkäsittelyjärjestelmiä. Ydinvoimalaitosten päästöt vaihtelevat jaksoittainkin reaktorin käyttötilasta ja -tavasta riippuen.

Oleennaista reaktorista normaalin käytön aikana vapautuvien radioaktiivisten aineiden suhteen on sen sisältämän ydinpolttoaineen eheys. Kun polttoaineen suojakuori pysyy kaasutiiviinä, fissiotuotteita ei vapaudu polttoaineesta jäähtytyspiiriin. Koska polttoainesauvoja on kymmeniätuhansia, yksittäisiin polttoainesauvoihin saattaa normaali-käytön aikana syntyä satunnaisia vuotoja, ja vähäinen osa polttoaineen sisältämistä kaasumaisista tai liukenevista fissiotuotteista voi siirtyä laitoksen käytön tai huollon aikana jäähtytteen mukana puhdistusjärjestelmiin.

Jäähtytteen kemiallisilla olosuhteilla ja puhtaudella sekä sen kanssa vuorovaikutuksessa olevilla rakennemateriaaleilla on suuri käytännön mer-

kitys jäähdytteen sisältämien aktivoituvien aineiden määrän ja ydinvoimalaitoksen päästöjen rajoittamisen kannalta. Seuraavassa käsitellään lähinnä suomalaisten ydinvoimalaitosten tai vastaavaa perustyyppiä olevien laitosten eli painevesireaktoreiden (PWR) ja kiehumisvesireaktoreiden (BWR) päästöjä.

Ydinvoimalaitosten radioaktiivisten aineiden päästöjä valvotaan säteilymittauksin. Mittausherkkyyden pitää olla suurella varmuudella sellainen, että päästöt, jotka saattaisivat aiheuttaa ympäristön asukkaalle vuodessa 0,1 mSv:n suuruisen säteilyaltistuksen, ovat varmuudella mitattavissa. Tämä olisi alle kymmenesosa luonnosta muutoin saatavasta säteilyaltistuksesta. Päästöt ovat todellisuudessa paljon tätä pienempiä, ja valvonnassa käytetään mittausrakenteita, joiden havaitsemisrajat ovat monta kertaluokkaa edellä mainitun mittausherkkyyden alapuolella.

Päästöistä tehtävien säteilymittausten, laitospaikan säätietojen ja merympäristöä koskevien tietojen perusteella arvioidaan laitokselta vapautuvien radioaktiivisten aineiden kulkeutumista ympäristössä. Leviämisarvioiden tuloksista lasketaan päästöistä aiheutuvat teoreettiset säteilyannokset ydinvoimalaitoksen ympäristössä ja ne varmennetaan kattavalla ympäristön säteilyvalvonnalla.

Päästöt ilmaan ja niiden valvonta

Normaalin käytön aikana ydinvoimalaitokselta vapautuu ilmaan suhteellisen lyhytikäisiä jalokaasujen (krypton, ksenon) isotooppeja, eräitä hiukkasmaisia aktivoituneita korroosiotuotteita (koboltti, mangaani, kromi) sekä vedyn ja hiilen radioaktiivisia isotooppeja (tritium ja hiili-14). Radioaktiivisen jodin havaittavat päästöt ilmaan ovat harvinaisia johtuen polttoaineen eheydestä ja laitosten tehokkaasta päästöjen puhdistuksesta.

Ydinvoimalaitoksen poistokaasupiipusta on suuren ilmavirtauksen takia järjestetty näytteenkeräys erilliseen näytteenotto- ja säteilymittausjärjestelmään. Tämä järjestelmä on varmistettu sen kaikkien aktiivisten toimintojen osalta. Näytteenotto tehdään hidastamatta ilman virtausta näytteenkeräjässä, jotta aerosolihiukkaset saataisiin edustavasti näytteenvirtaukseen ja säteilymittaukseen.

Radioaktiivisten jalokaasujen pitoisuuksia päästössä valvotaan jatkuvaltoimisella kokonaisaktiivisuutta mittaavalla säteilymittarilla. Lisäksi otetaan säännöllisesti erillisiä kaasunäytteitä laboratoriomäärityksiä varten.

Laboratoriossa merkittävät jalokaasunuklidit määritetään spektrometrisesti. Tällöin olennaisista radionuklideista, kuten ^{87}Kr :stä ja ^{133}Xe :sta, tulee havaita vähintään 10 kBq/m^3 (10 Bq litraa kohden) suuruinen aktiivisuuskonsentraatio.

Päästöistä kerätään näyte hyvän erotuskyvyn omaaviin, jodia ja jodiyhdisteitä pidättäviin suodattimiin. Suodattimille tehtävän laboratorioanalyysin määrittäminen on vähintään sellainen, että päästövirtauksessa pystytään havaitsemaan 10 mBq/m^3 ($0,00001 \text{ Bq}$ litraa kohden) ^{131}I :n aktiivisuuskonsentraatio.

Hiukkassuodattimien laboratorioanalyysin määrittäminen on oltava vähintään sellainen, että päästövirtauksessa havaitaan 10 mBq/m^3 ($0,00001 \text{ Bq}$ litraa kohden) aktiivisuuspitoisuus ^{60}Co :tä.

^{89}Sr ja ^{90}Sr analysoidaan määrääjain. Myös tritium (^3H) ja hiili-14 (^{14}C) määritetään päästökaasunäytteistä.

Edellä mainituilla laboratoriomittauksilla havaitaan hyvin pienet poistokaasujen sisältämät radioaktiivisten aineiden määrät, jotka edelleen laimenevat ilmassa laitoksen ulkopuolella. Jatkuva poistokaasupiipussa tehtävä mittaus ei yleensä osoita normaalista säteilytasosta poikkeavaa lukemaa erittäin pienten päästöjen tapauksessa. Käytännössä mittausten herkkyys on parempi, kuin edellä mainitut vaatimukset edellyttäisivät.

Päästöt vesiympäristöön ja niiden valvonta

Päästöt vesiympäristöön tapahtuvat jäähdytysveden purkukanavan kautta merialueelle. Vesipäästöissä esiintyy pääsääntöisesti samoja nuklideja kuin ilmaan tapahtuvissa päästöissä. Käytännössä pidempi-ikäisistä nuklideista ympäristön kannalta merkittäviä voivat olla esimerkiksi ^{60}Co ja ^{137}Cs . Siksi molemmilla suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla päästöjen rajoittamiseksi on kehitetty ja otettu käyttöön uusia puhdistusjärjestelmiä, joilla näiden nuklidien päästöjä voidaan edelleen rajoittaa.

Päästöt vesiympäristöön eivät ole jatkuvia, vaan tietty säiliö tyhjenetään tarvittaessa. Ennen päästöä vedestä otetaan edustava näyte, joka analysoidaan laboratoriossa. Lisäksi päästöä seurataan jatkuvatoimisilla säteilymittausjärjestelmillä koko päästön ajan. Yhdistetystä kokonaispäästöä edustavasta näytteestä määritetään myös tritium- ja kokonaisalfa-aktiivisuus.

Määrittelyherkkyyksien on oltava vähintään sellaiset, että näytteessä pystytään havaitsemaan gammasäteilevien radionuklidien aktiivisuuskonsentraatiot 10 kBq/m^3 (10 Bq/litra), tritiumin aktiivisuuskonsentraatio 100 kBq/m^3 (100 Bq/litra) ja kokonaisalfa-aktiivisuuspitoisuus 1 kBq/m^3 (1 Bq/litra).

Vesipäästöjen jatkuvatoimiset valvontamittaukset ovat sellaisia, että jo hyvin pienet radioaktiivisten aineiden määrät havaitaan ja päästö keskeytyy automaattisesti asetetun rajan ylittyessä. Päästöt laimenevat jäähdytysveden purkukanavassa ja ympäristössä suureen määrään merivettä.

Meteorologiset mittaukset

Ydinvoimalaitoksen alueella tehdään jatkuvasti meteorologisia mittauksia, joiden perusteella arvioidaan ilmaan tapahtuvien radioaktiivisten aineiden päästöjen leviämistä laitosten ympäristössä. Normaalit käyttö- ja säätilanteet keskiarvoistetaan tietyille, esimerkiksi kuukauden tai vuoden mittaiselle jaksolle. Meteorologiset perusmittaukset aloitetaan jo ennen ydinvoimalaitoksen käyttöönottoa. Mittauksia tehdään jatkuvasti laitoksen käytön aikana ja niiden perusteella saadaan lisää tietoa laitospaikan ilmastosta. Käytännössä näiden mittausten suurin merkitys on kuitenkin siinä, että näin ylläpidetään valmiutta poikkeuksellisen päästön leviämisen arviointia varten.

Paikallisten meteorologisten mittausten avulla saadaan tietoa tuulen suunnasta ja nopeudesta, ilmakehän sekoituskerroksen rakenteesta sekä sateesta. Mittaustulokset ovat reaaliaikaisesti ydinvoimalaitoksen käyttäjien sekä Säteilyturvakeskuksen ja Ilmatieteen laitoksen käytettävissä. Leviämisen arvioinnissa käytetään tarvittaessa hyväksi voimalaitosten läheisyydessä sekä myös kauempana sijaitsevien Ilmatieteen laitoksen havaintoasemien tietoja.

Meteorologiset mittaukset toteutetaan jatkuvasti toimivilla yli 100 metriä korkeaan säämastoon sijoitettavilla mittauslaitteilla. Eräillä laitospaikoilla esimerkiksi Ruotsissa ja Venäjällä on kokeiltu myös Doppler Sodar-tutkajärjestelmää, jolla on mahdollista saada havaintoja huomattavasti mastomittauksia korkeammalta, mutta järjestelmän yhteydessä tarvitaan täydentäviä mittaustuloksia säämastoista.

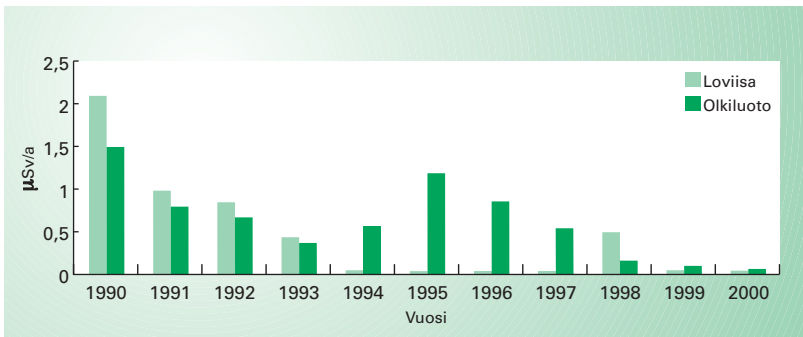
Säämittausjärjestelmät sijoitetaan siten, ettei ydinvoimalaitoksen rakennuksilla, maston rakenteilla eikä ympäröivällä maastolla ole häiritsevää

vaikutusta mittaustuloksiin. Maston korkeus on riittävä edustavien tuuliarvojen saamiseksi ja ilmakehän pyörteisyyden määrittämiseksi. Leviämislaskelmissa tarvittavat hajontaparametrit määritetään suoraan turbulenssimittauksin tai välillisesti lämpötilan ja tuulen nopeuden mittauksien sekä tuulen suunnan hajonnan avulla.

Päästöjen leviämisen ja ympäristön säteilyannosten laskenta

Päästöjen leviämistä kuvaavia laskentamalleja on olemassa sekä vesieittä ilmaympäristöön. Vaativampi kohde leviämislaskennalle on ilmakehä sen ajallisesti nopeiden ja jokseenkin satunnaisten vaihteluiden takia. Ilmakehään tapahtuva poikkeuksellinen päästö voisi aiheuttaa nopeimmin ympäristöön ja ihmiseen kohdistuvan säteilyhaitan. Ilmassa tapahtuvaa leviämistä tarkastellaan joko laitoksen lähialueella muutamasta kilometristä kymmeneen kilometriin tai kaukokulkeumana, joka ulottuu satoihin kilometreihin. Tarkastelun aika voi olla hetkellinen, alkaen tunneista, tai toisaalta voidaan tarkastella pitkien aikojen, kuten kuukausien leviämistilannetta. Jälkimmäinen tarkastelu tulee kysymykseen ydinvoimalaitoksen normaalin käytön aikaisten päästöjen leviämistä arvioitaessa.

Laskentamalleihin sisältyy hyvin monentyyppisiä yksityiskohtaisia kuvauksia päästön ajallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista sekä käyttäytymisestä (radioaktiivinen hajoaminen, aerosolien muodostuminen, kuiva ja märkä laskeuma, uudelleen liikkeelle lähtö laskeumasta). Päästöpilveen sisältyvän liike- ja lämpöenergian mahdollista vaikutusta sekä ilmakehän pyörteisyyttä ja sekoittumista kuvataan mahdollisimman luonnollisella ja realistisella tavalla.



KUVA 4.6 Ydinvoimalaitosten päästöjen perusteella lasketut säteilyannokset ympäristön altistuneimmalle asukkaalle.

Valtioneuvoston päätöksessä on annokselle asetettu raja-arvioksi 100 µSv/vuosi (0,1 mSv/vuosi).

Kun leviämismallilla saadaan laskettua päästöjen leviäminen ajan suhteen, erillisillä säteilyannosten laskentaan tarkoitetuilla laskentamalleilla arvioidaan väestön säteilyaltistusta. Vesipäästöjen kautta saatavien annosten laskentaan käytetään muutamaan perustilanteeseen sovellettuja lähtötietoja ja mallin kuvaukset vesiympäristöstä vaihtelevat ollen yksikertaisimmillaan vain muutamia lokeroita eli kompartmentteja, joiden vesitilavuus ja veden vaihtuvuus tunnetaan.

Säteilyturvakeskus julkaisee päästöjä koskevat tiedot vuosittain tai tarvittaessa neljännesvuosiraportissaan. Kuvassa 4.6 on esitetty suomalaisten ydinvoimalaitosten ympäristön väestön yksilön enimmäisannoksia.

Ydinvoimalaitosten ympäristön säteilyvalvonta

Ydinvoimalaitoksen ympäristön säteilyvalvonta käsittää ne laitosalueen ja sen ympäristön säteilyn mittaukset sekä radioaktiivisten aineiden määritykset, jotka tehdään ympäristössä esiintyvien radioaktiivisten aineiden ja väestön säteilyaltistuksen selvittämiseksi. Ympäristön säteilyvalvonnan peruslähtökohta on ympäristö- ja ihmiskeskeinen. Sen tarkoituksena on varmistaa, että ydinvoimalaitoksesta aiheutuva väestön säteilyaltistus pidetään erittäin pienenä ja että määrättyjä radioaktiivisten päästöjen raja-arvoja ei ylitetä. Valvonnalla varmennetaan myös ydinvoimalaitoksen radioaktiivisten päästöjen mittaustulokset sekä päästöjen kulkeutumisen arvioinnissa käytetyt laskentamallit.

Ydinvoimalaitosten ympäristön säteilyvalvonta on monipuolista ja kattavaa. Suomessa kummankin laitospaikan ympäristöstä kerätään ja analysoidaan vuosittain noin 500 näytettä. Ympäristön säteilyvalvontaohjelmassa määritellään toteuttajat, näytteenotot ja mittaukset sekä niiden suoritusajuuksu. Ohjelma sisältää ulkoisen säteilyn tarkkuusmittauksia ympäristössä sekä hengitysilman ja ihmiseen johtavien ravintoketjujen eri vaiheita edustavien näytteiden sekä ympäristössä asuvasta ryhmästä valittujen ihmisten radioaktiivisuuden mittauksia. Ohjelma sisältää myös indikaattorinäytteitä eli eliöitä ja muita näytekohteita, jotka voivat kerätä ja rikastaa päästöjen sisältämiä radionuklideja ympäristössä.

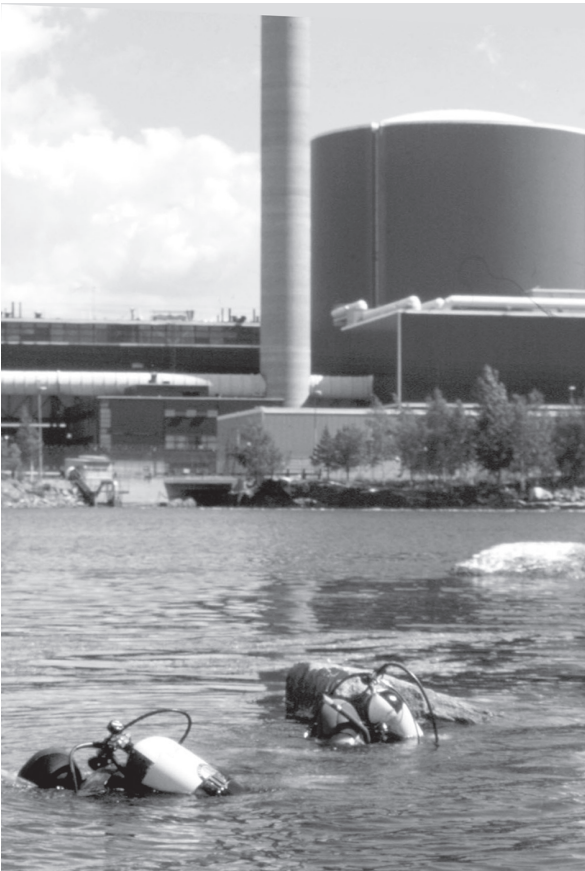
Säteilyvalvontaa tehdään usean kilometrin etäisyydelle laitoksesta. Lisäksi mitataan elintarvikenäytteitä lähimmiltä tuotanto- ja jalostuslaitoksilta. Ravintoketjuihin liittyvät mittaukset kohdistuvat maaympäristössä ensisijaisesti ilman, laskeuman, maaperän, talousveden, viljan, puutarhatuotteiden, luonnontuotteiden sekä kasvien, lihan, ruohon ja maidon

radioaktiivisten aineiden määrittelyksiin. Vesiympäristön mittaukset kohdistuvat meriveden, pohjaan laskeutuvan aineksen, vesikasvien ja pohjaeläimien sekä kalojen radioaktiivisten aineiden määrittelyksiin.

Säteilyvalvonnan näytteiden radioaktiivisuuden mittaukset perustuvat säteilyn energiaspektrin mittauksiin ja tarvittaessa niitä edeltävään näytteen esikäsitteilyyn, radionuklidin kemialliseen erotteluun ja rikastamiseen.

Säteilyvalvontaohjelmalla saadaan tietoa ympäristöön myös muualta kuin kyseessä olevasta ydinvoimalaitoksesta kulkeutuneista radioaktiivisista aineista.

Suomen ydinvoimalaitosten ympäristöstä otetuissa elintarvikenäytteissä havaitaan äärimmäisen harvoin merkkejä voimalaitoksesta peräisin olevista radioaktiivisista aineista. Sama koskee muitakin maaympäristöstä



KUVA 4.7 Ympäristönäytteiden keräys merestä Loviisan ydinvoimalaitoksen edustalla

otettuja näytteitä. Voimalaitosten lähistöltä kerätyistä ilma- ja laskeumanäytteissä ja voimalaitosten lähiympäristöstä kerätyissä meriympäristön indikaattorinäytteissä voidaan havaita pieniä määriä esimerkiksi koboltti-60:tä ja mangaani-54:ää, jotka ovat peräisin paikallisesta voimalaitoksesta. Lähiympäristöstä otetuissa merivesinäytteissä havaitaan voimalaitoksista peräisin olevaa tritiumia.

Eräät mittaukset osoittavat säännöllisesti Itämeressä olevia jo 1960-luvulla ilmakehässä tehtyjen ydinasekokeiden ja 1986 tapahtuneen Tshernobylin ydinvoimaonnettomuuden aiheuttamasta laskeumasta peräisin olevia tritium-, strontium- ja cesiumnuklideja. Tshernobylin laskeuman vaikutukset näkyvät edelleen myös useissa maaympäristön näytteissä. Ydinvoimalaitosten ympäristön valvontaa koskevat yksityiskohtaiset tulokset julkaistaan Säteilyturvakeskuksen A-sarjassa ja päätulokset lisäksi neljännesvuosittain STUKin WWW-sivuilla.

Ulkoisen säteilyn mittaamiseksi laitosten ympäristössä on noin yhden ja viiden kilometrin etäisyydellä jatkuvatoimisia annosnopeuden mittausasemia, joiden mittaustiedot siirretään reaaliaikaisesti ydinvoimalaitokselle ja Säteilyturvakeskuksen ylläpitämään säteilyvalvonnan tietojärjestelmään.

KIRJALLISUUTTA

YVL 7.6 Ydinvoimalaitosten radioaktiivisten aineiden päästöjen mittaus. Helsinki: Säteilyturvakeskus, 1992.

YVL 7.7 Ydinvoimalaitoksen ympäristön säteilyvalvonta. Helsinki: Säteilyturvakeskus, 1995.

YVL 7.9 Ydinvoimalaitosten työntekijöiden säteilysuojelu. Helsinki: Säteilyturvakeskus, 2002.

Rossi J. Evaluation of the dose assessment models for routine radioactive releases to the environment. STUK-YTO-TR 144. Helsinki: Säteilyturvakeskus, 1998.

Ilus E, Ikäheimonen TK, Klemola S. Monitoring of radionuclides in the vicinities of Finnish nuclear power plants in 1995 and 1996. STUK-A192. Helsinki: Säteilyturvakeskus, 2002.

Cember H. Introduction to health physics. New York: McGraw Hill, 1996.

International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources: a safety standard. Safety Series No. 115. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1996.

Jaeger et al. Engineering compendium on radiation shielding, Vol. 1–3, Springer-Verlag, 1968.

Occupational radiation protection safety guide. Safety Standards Series No. RS-G-1.1. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1999.

Regulatory control of radioactive discharges to the environment safety guide. Safety Standards Series No. WS-G-2.3. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000.