



5

VARAUTUMINEN HÄIRIÖIHIN JA ONNETTOMUUKSIIN YDINVOIMALAITOKSILLA

Lauri Pöllänen, Suvi Ristonmaa,
Jorma Sandberg, Olli Vilkkamo

SISÄLLYSLUETTELO

5.1	Turvallisuussuunnittelun lähtökohdat	170
5.2	Turvallisuusanalyysit	172
5.3	Kokeellinen tutkimus turvallisuusarvioinnin tukena	175
5.4	Analysoitavia kuvitteellisia onnettomuuksia	177
5.5	Muut polttoainekierron onnettomuusmahdollisuudet	190
5.6	Ydinvoimalaitosonnettomuuden päästöt	192
5.7	Valmiussuunnitelmat ja -järjestelyt	199

5.1 Turvallisuussuunnittelun lähtökohdat

Onnettomuudet ovat mahdollisia kaikessa teollisessa toiminnassa. Niiden esiintymistiheys ja seuraukset ovat erilaisia eri teollisuudenaloilla ja toiminnoissa. Esimerkiksi konepaja- ja rakennusteollisuudessa onnettomuudet koskevat yleensä yksittäisiä työntekijöitä, kun taas prosessi- ja kemianteollisuuden onnettomuuksilla voi olla laajoja ympäristövaikutuksia. Ydinvoimalaitokset kuuluvat jälkimmäiseen ryhmään. Jos huomattava osa reaktorin sisältämistä fissiotuotteista vapautuisi ympäristöön, seurauksena olisi laaja ympäristökatastrofi. Onnettomuuksien estäminen ja mahdollisten onnettomuuksien seurausten rajoittaminen ovat keskeisiä tavoitteita kaikessa ydinenergian käytössä.

Ydinvoimalaitos on monimutkainen teknillinen kokonaisuus, joka sisältää kymmeniä tuhansia laitteita. Sen käyttöön sekä kunnossapitoon osallistuu suuri joukko eri alojen asiantuntijoita. Korkeatasoisesta laadunvarmistuksesta huolimatta ydinvoimalaitoksillakin esiintyy laitevikoja ja käyttöhenkilökunnan virheitä. Tämä on otettu huomioon laitosten suunnittelussa, ja yksittäisten vikojen ja virheiden kehittyminen onnettomuuksiksi on estetty luotettavasti. Laitosten suunnittelussa ja käytössä on varauduttu myös onnettomuustilanteisiin, ja niiden varalta laitoksissa on erityisiä turvallisuusjärjestelmiä. Turvallisuussuunnittelun yleisiä periaatteita on esitetty kohdassa 3.4 ja todellisuudessa tapahtuneita onnettomuuksia ja häiriöitä luvussa 6.

Ydinvoimalaitosonnettomuuksista puhuttaessa ei välttämättä tarkoiteta tilannetta, jossa käyttäjät tai ympäristön asukkaat altistuvat merkittävälle määrälle säteilyä. Suunnittelun, turvallisuusanalyysin ja lupakäsittelyn yhteydessä puhutaan oletetuista onnettomuuksista tai suunnitteluperusteonnettomuuksista. Esimerkki oletetuista onnettomuuksista on reaktorin primaarijäähdytyspiirin putkikatko, johon laitoksen suunnittelussa on varauduttu ja jota käytetään yhtenä turvallisuusjärjestelmien suunnittelun lähtökohtana. Jos turvallisuusjärjestelmät toimivat suunnitellulla tavalla, kyseisten tapahtumien vaikutukset rajoittuvat jokseenkin kokonaan laitoksen sisälle.

Suunnittelua ja turvallisuusanalyysyjä varten ydinvoimalaitostapahtumat jaetaan normaalikäyttöön, odotettavissa oleviin käyttöhäiriöihin, oletettuihin onnettomuuksiin ja vakaviin reaktorionnettomuuksiin. Suunnitteluperusteonnettomuudet ovat onnettomuuksia, joihin on varauduttu laitoksen suunnittelussa. Aikaisemmin suunnitteluperusteonnettomuudella ja oletetulla onnettomuudella tarkoitettiin samaa asiaa, mutta viime aikoina

eräissä maissa, muun muassa Suomessa, myös vakavat onnettomuudet on sisällytetty suunnitteluperustaan.

Odotettavissa oleviksi käyttöhäiriöiksi sanotaan häiriöitä, jotka todennäköisesti esiintyvät vähintään kerran laitoksen käytön aikana eli esiintymistodennäköisyys on vähintään kerran sadassa vuodessa. Turvallisuusanalyysien pitää osoittaa, että laitos selviää ilman polttoaineaurioita kaikista odotettavissa olevista käyttöhäiriöistä. Esimerkkejä häiriöiden syistä ovat säätöjärjestelmien vikaantumiset, yksittäiset laiteviat, käyttöhenkilöstön tekemät virheet ja laitoksen ulkopuoliset tapahtumat kuten sähkönsiirtoverkon häiriöt ja poikkeukselliset sääilmiöt.

On syytä huomata, että myös normaalikäytön aikana polttoaineen toimissa tavanomaisissa olosuhteissa saattaa esiintyä yksittäisiä polttoainevuotoja. Tällöin polttoainesauvan suojakuori menettää tiiviytensä esimerkiksi satunnaisten valmistusvikojen tai reaktoriin joutuneiden vieraiden esineiden takia. Seurauksena on yleensä pieni radioaktiivisten fissiotuotekaasujen ja jodin vuoto polttoainesauvasta primaaripiiriin. Polttoainevuotoja on suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla esiintynyt keskimäärin noin yhdessä reaktorin 30 000–50 000 polttoainesauvasta vuoden aikana, ja niiden vaikutus radioaktiivisten aineiden päästöihin on erittäin vähäinen. Normaalikäytön aikaiset polttoainevuodot on otettu huomioon primaarijäähdytteen puhdistusjärjestelmän suunnittelussa. Polttoainevuotojen määrä pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, koska ne voivat vaikuttaa muun muassa laitostilojen säteilytasoihin ja työntekijöiden säteilyturvallisuuteen.

Laitoksen suunnittelussa varaudutaan myös oletettuihin onnettomuuksiin, jotka ovat niin harvinaisia, että niitä ei odoteta tapahtuvan kertaakaan laitoksen käytön aikana, mutta joita esimerkiksi laitoksen ominaispiirteiden perusteella pidetään periaatteessa mahdollisina (esiintymistodennäköisyys pienempi kuin kerran sadassa vuodessa). Oletettujen onnettomuuksien varalle suunniteltavien turvajärjestelmien pitää olla sellaisia, että niillä pystytään kattavasti hoitamaan myös samantyyppiset lievemmät onnettomuudet.

Tyypillinen oletettu onnettomuus on suurimman primaaripiirin putken katkosta johtuva jäähdytteenmenetys (large break LOCA, loss-of-coolant accident). Tämä onnettomuus oli lähtökohtana suunniteltaessa useimpien nykyisten ydinvoimalaitosten hätäjäähdytysjärjestelmiä ja suojarakennuksia. Muiden järjestelmien suunnittelun perusteena voidaan käyttää muita oletettuja onnettomuuksia. Suomalaisten vaatimusten mukaan oletettui-

hin onnettomuuksiin luetaan myös häiriöt, joiden yhteydessä reaktorin pikasulku ei onnistu (niin sanotut ATWS-tapahtumat). Alun perin niitä ei sisällytetty suunnitteluperustaan, eikä käytäntöä yleensä vieläkään noudateta muissa maissa. ATWS-tapahtumat toimivat pikasulkujärjestelmää varmentavan riippumattoman sammutusjärjestelmän (boorivesijärjestelmä) suunnittelun perusteena.

Laitokset tulee suunnitella ja niitä tulee käyttää niin, että ne selviävät myös oletetuista onnettomuuksista ilman huomattavia polttoainevaurioita. Vaurioiden tulee jäädä niin vähäisiksi, että polttoaineesta jäähdytyspiiriin vapautuvat radioaktiiviset aineet voidaan pidättää tehokkaasti tarkoitusta varten suunnitelluilla suodatus- ja puhdistusjärjestelmillä.

Syvyyssuuntaisen turvallisuusajattelun mukaisesti ydinvoimalaitoksissa pyritään varautumaan myös niihin tilanteisiin, joissa odotettavissa olevan käyttöhäiriön tai oletetun onnettomuuden hallinta ei jostain syystä onnistu suunnitellusti. Tällöin seurauksena saattaa olla vakava reaktori-onnettomuus, jossa huomattava osa reaktorin polttoaineesta vaurioituu. Tällaisessa tilanteessa pitää varmistaa sekä suojarakennuksen toiminta että vaurioituneen sydämen jäähdytys.

Alun perin varautuminen vakaviin onnettomuuksiin ei kuulunut nykyisten ydinvoimalaitosten suunnitteluvaatimuksiin. Monissa maissa, muun muassa Suomessa, käytössä oleville ydinvoimalaitoksille on myöhemmin esitetty vakavien onnettomuuksien hallintaa koskevia vaatimuksia. Sekä Loviisan että Olkiluodon ydinvoimalaitoksissa on tehty huomattavia muutoksia vakavien onnettomuuksien varalta.

Suoranaisesti ydinteknisistä järjestelmistä alkavien onnettomuuksien lisäksi ydinvoimalaitosten turvallisuusarvioissa tarkastellaan myös muita tapahtumia, esimerkiksi tulipaloja, joilla on vaikutusta laitoksen turvallisuuden hallinnassa tarvittaviin järjestelmiin (katso kohdat 3.4 ja 3.7).

5.2 | Turvallisuusanalyysit

Koska ydinvoimalaitosten häiriöistä on kokemusta vain rajoitetusti ja oletetuista onnettomuuksista tuskin lainkaan, on turvallisuusjärjestelmien toiminta perusteltava ja turvallisuusvaatimusten täyttyminen osoitettava laskennallisilla ja kokeellisilla menetelmillä.

Odotettavissa olevien käyttöhäiriöiden sekä oletettujen ja vakavien onnettomuuksien analysoinnissa käytetään teoreettisiin malleihin perustuvia laskentaohjelmistoja, joilla tapahtumia voidaan kuvata. Mallien luotettavuus ja ohjelmien laskentatarkkuus on tarkistettu vertaamalla ohjelmilla laskettuja tuloksia hallituissa olosuhteissa tehtyjen kokeiden tuloksiin. Joissakin tapauksissa vertailuja on voitu tehdä myös todellisista häiriöistä ja onnettomuuksista saatuihin kokemuksiin.

Turvallisuusanalyyseissä tarkasteltavat tilanteet ovat laskentamenetelmien kannalta vaativia. Monet käytettävistä tietokoneohjelmista ovat erittäin laajoja ja niitä on kehitetty ydinenergiamaiden kansallisissa laboratorioissa jopa kymmenien vuosien ajan.

Vesijäähdytteisten ydinvoimalaitosten turvallisuustarkastelujen tyyppillinen perustehtävä on primaaripiirin suuren jäähdytevuodon eli ison LOCAn analysointi. Laskentaohjelma sisältää mallit muun muassa seuraaville toisistaan riippuville ilmiöille: jäähdytteen virtaus, jäähdytteen höyrystyminen, polttoaineen jälkilämmön tuotto, lämmönsiirto polttoainetableteista suojakuoreen ja edelleen jäähdytteeseen, suojakuoren jännitykset ja muodonmuutokset sekä suojakuoren hapettuminen.

Turvallisuusanalyysillä selvitettäviä asioita primaaripiirin vuodon tapauksessa ovat muun muassa polttoaineen suojakuoren lämpötila ja vaurioituvien polttoainesauvojen lukumäärä. Säteilyturvakeskuksen suomalaisille laitoksille asettamien vaatimusten mukaan oletetuissa onnettomuuksissa, joiden arvioitu esiintymistajuus on kerran 100–1 000 vuodessa, polttoaineen suojakuoren maksimilämpötila ei saa ylittää 650 °C ja polttoainevaurioiden todennäköisyyden on oltava erittäin pieni. Tätä harvinaisemmille oletetuille onnettomuuksille on asetettu lievemät vaatimukset. Kaikissa oletetuissa onnettomuuksissa vaaditaan kuitenkin, että vaurioituvien polttoainesauvojen lukumäärä on enintään kymmenen prosenttia reaktorin polttoainesauvojen kokonaismäärästä. Polttoaineen muodonmuutokset tai muut oletetun onnettomuuden seuraukset eivät myöskään saa vaarantaa reaktorin sammutusta tai polttoaineen jäähdytettävyyttä.

Jäähdytteenmenetysonnettomuuden analyysin oleellisin osuus on jäähdytteen virtauksen, höyrystymisen ja lämmönsiirron eli termohydrauliikan laskenta. Onnettomuuksien laskentaan käytetyistä termohydrauliikkaohjelmista tunnetuimpia ovat yhdysvaltalaiset RELAP5 ja TRAC, ranskalainen CATHARE ja saksalainen ATHLETE. Yhdysvalloissa on vuonna 2000 aloitettu kehityshanke, jossa eri ohjelmien parhaat piir-

teet yhdistetään interaktiivisesti käytettävään ja matemaattisten ratkaisumenetelmien osalta kehittyneeseen yhteen ohjelmaan. Suomessa on VTT:llä kehitetty virtauslaskennan menetelmiä ja ohjelmia. Niistä voidaan mainita yleinen prosessisimulointiohjelma APROS, johon on liitetty ydinturvallisuussovellutuksissa tarvittavia termohydraulisia laskentamenetelmiä.

Vuototilanteita tutkittaessa lasketaan myös suojarakennuksen paineen ja lämpötilan käyttäytyminen. Tuloksia käytetään hyväksi suojarakennuksen mitoituksessa ja suojarakennusjärjestelmien suunnittelussa.

Vaativia turvallisuusanalyysseja ovat myös reaktiivisuusunnettomuuden ja ATWS:n (käyttöhäiriö ilman pikasulkua) tarkastelut. Näissä tapauksissa fissioketjureaktio ei välittömästi sammu ja analyyseihin tulee mukaan myös reaktorifysikaalinen neutronivuon ja fissiotehon laskenta. Vaativimmat tapaukset edellyttävät realistista kolmiulotteista neutronivuon ja virtauskentän laskentaa. Tunnetuin ohjelma on alun perin norjalaisten kehittämä RAMONA. Suomessa käytetään VTT:n kehittämiä ohjelmia TRAB 3D ja HEXTRAN, joista edellinen on tarkoitettu kiehumusvesireaktoreille sekä länsimaisille painevesireaktoreille ja jälkimmäinen Loviisan voimalaitoksen VVER-reaktoreille. Reaktiivisuusunnettomuutta koskevia tuloksia käytetään hyväksi pikasulkujärjestelmän suunnittelussa. ATWS-tapausten laskentatulokset vaikuttavat pikasulkujärjestelmää varmentavan boorisammutusjärjestelmän suunnitteluun.

Vakavien onnettomuuksien analyysi käsittää pitkän tapahtumaketjun alkutapahtumasta, esimerkiksi primaaripiirin vuodosta tai lämmönsiirron menetyksestä, polttoaineen sulamiseen ja mahdolliseen suojarakennuksen vaurioitumiseen. Tarkasteltaviin ilmiöihin kuuluvat virtaus ja lämmönsiirto reaktorisydämessä ja primaaripiirissä, polttoaineen kuumentuminen, sulaminen ja kemialliset reaktiot, fissiotuotteiden vapautuminen polttoaineesta sekä niiden fysikaalinen ja kemiallinen käyttäytyminen primaaripiirissä ja suojarakennuksessa, räjähdysriskin vetykaasun muodostuminen polttoaineen suojakuoren ja veden välisissä reaktioissa, vetypalot tai -räjähdykset suojarakennuksessa, reaktoripainesäiliön mahdollinen puhkisulamien ja muut sydänsulan ja rakennemateriaalien vuorovaikutukset sekä suojarakennuksen paineen ja lämpötilan nousu.

Vakavien onnettomuuksien analyyseissa pyritään selvittämään muun muassa sydänvaurioiden laajuus, suojarakennuksen kestävyys sekä mahdollisten vuotojen seurauksena ympäristöön vapautuvien fissiotuotteiden määrä ja laatu sekä päästöjen ajankohta. Tunnetuimpia vakavien onnetto-

muuksien laskentaan tarkoitettuja ohjelmia ovat yhdysvaltalaiset MAAP ja MELCOR sekä SCDAP/RELAP5.

Turvallisuusvaatimusten täyttymisen osoittamiseksi tehtävissä analyyseissä käytetään yleensä niin sanottua konservatiivista laskentatapaa eli lähtötiedot ja fysikaalisten mallien oletukset valitaan mahdollisen vaihteluvälin epäedullisesta päästä. Tällöin laskentatulokset yliarvioivat esimerkiksi todellisissa onnettomuustilanteissa esiintyviä lämpötiloja ja paineita. Todellisuudessa turvallisuusvaatimusten täyttymiseen on siis yleensä suuret marginaalit.

Konservatiivisten laskujen lisäksi on tarpeen tehdä myös mahdollisimman todenmukaisia eli ”best-estimate” -laskuja. Tämä on tarpeen, jos halutaan selvittää onnettomuuden todennäköisin kulku esimerkiksi suunnittelun tai ohjeistuksen perustaksi. Myös todennäköisyyspohjaisen turvallisuusanalyysin perustana pyritään käyttämään mahdollisimman realistisia onnettomuusanalyyssejä. Kaikissa monimutkaisissa tapahtumaketjuissa ei myöskään ole mahdollista arvioida etukäteen, mikä lähtötietojen yhdistelmä johtaa konservatiivisiin tuloksiin.

Varsinaisten turvallisuusanalyysien lisäksi ydinturvallisuuden varmistaminen edellyttää laitteiden ja rakenteiden luotettavaa mitoitusta onnettomuustilanteita varten. Tähän käytetään yleisiä teknistieteellisiä välineitä kuten lujuslaskentaohjelmia ja tietokoneavusteista suunnittelua.

5.3 | Kokeellinen tutkimus turvallisuusarvioinnin tukena

Ydinturvallisuusvaatimusten toteutumisen perustelemiseksi tarvitaan myös kokeellista tutkimusta. Tarvittavat koelaitteistot ovat yleensä suuri-koisia, ja kokeiden tekeminen on kallista. Koelaitteistoja on erityisesti suurissa ydinenergiamaisissa, ja koeohjelmia toteutetaan myös kansainvälisenä yhteistyönä esimerkiksi EU:n tai OECD:n puitteissa. Myös Suomessa tehdään onnettomuuksien virtaus- ja lämpöteknisten ilmiöiden tutkimusta Lappeenrannan teknillisen yliopiston PACTEL-koelaitteistolla.

Kokeellisella tutkimuksella edistetään ydinturvallisuuden kannalta tärkeiden ilmiöiden ymmärtämistä ja selvitetään laskentamalleissa tarvittavia lähtötietoja. Vertaamalla koetuloksia ja laskentaohjelmien tuloksia voidaan arvioida ohjelmien ja fysikaalisten mallien luotettavuutta ja kelpoistaa ohjelmia turvallisuusanalyysiin.

Tyypillisiä kokeellisen tutkimuksen aiheita ovat suuri jäähdytteenmenetysonnettomuus, reaktiivisuusonnettomuus, polttoaineen käyttäytyminen normaalikäytössä, häiriötilanteissa ja onnettomuuksissa sekä vakaviin onnettomuuksiin liittyvät ilmiöt.

Suurta jäähdytteenmenetysonnettomuutta koskevilla LOCA-kokeissa selvitettäviä asioita ovat jäähdytteen paine, lämpötila ja virtaus sekä polttoaineen ja suojakuoren lämpötila, fissiokaasujen vapautuminen polttoaineesta, suojakuoren hapettuminen sekä suojakuoren muodonmuutokset ja vauriot. Parhaillaan on eri maissa käynnissä ohjelmia, joiden tarkoituksena on selvittää korkeapalalaisen polttoaineen käyttäytymistä LOCA-olosuhteissa.

Polttoainetutkimuksissa selvitetään polttoaineen käyttäytymistä normaalikäytössä sekä onnettomuus- ja häiriötilanteissa. Tyypillisiä koetilanteissa mitattavia suureita ovat polttoaineen eri osien lämpötilat, kaasumaisten fissiotuotteiden vapautuminen ja suojakuoren sisäinen paine. Kokeiden aikana tehtävien mittausten lisäksi polttoaineelle tehdään kokeen jälkeen metallurgisia tutkimuksia, joissa mitataan muun muassa suojakuoren muodonmuutokset ja hapettuminen. Kokeellisella tutkimuksella selvitetään myös polttoaineen vaurioitumista reaktiivisuusonnettomuuksissa. Ranskassa Cadarachen tutkimuslaboratoriossa on meneillään CABRI-tutkimusohjelma, jonka tarkoituksena on selvittää korkean palaman vaikutusta polttoaineen vaurioitumiseen.

Vakavien onnettomuuksien kokeellisessa tutkimuksessa tarkasteltavia ilmiöitä ovat esimerkiksi polttoaineen vaurioituminen ja sulaminen, fissiotuotteiden vapautuminen polttoaineesta onnettomuuden eri vaiheissa, fissiotuotteiden fysikaalinen ja kemiallinen käyttäytyminen primääripiirissä ja suojarakennuksessa, sydänsulan ja rakennemateriaalien vuorovaikutukset, vedyn muodostuminen ja vetypalot tai -räjähdykset suojarakennuksessa.

Polttoaineen sulamiseen ja fissiokaasujen vapautumiseen liittyviä ilmiöitä tutkitaan muun muassa Ranskassa Cadarachen laboratoriossa meneillään olevassa PHEBUS-ohjelmassa. Sydänsulan ja veden vuorovaikutuksia, erityisesti niin sanottua höyryräjähdystä on tutkittu muun muassa EU:n yhteisen tutkimuskeskuksen Ispran laboratorion FARO-ohjelmassa Italiassa. Sulan sydänmateriaalin käyttäytymistä reaktoripainesäiliön pohjalta tutkitaan esimerkiksi kansainvälisenä yhteistyöhankkeena RASPLAV-ohjelmassa Venäjällä.

5.4 Analysoitavia kuvitteellisia onnettomuuksia

Seuraavassa on kuvattu ydinvoimalaitosonnettomuuksien etenemistä siten, kuin kokeelliset ja teoreettiset analyysit ennustavat. Kuvatut tapaukset ovat perinteisesti turvallisuusjärjestelmien mitoituksen perustana käytetyt jäähdytteen menetys ja reaktiivisuusonnettomuus sekä sydämensulamisonnettomuus, johon päädytään turvallisuusjärjestelmien toiminnan epäonnistuessa.

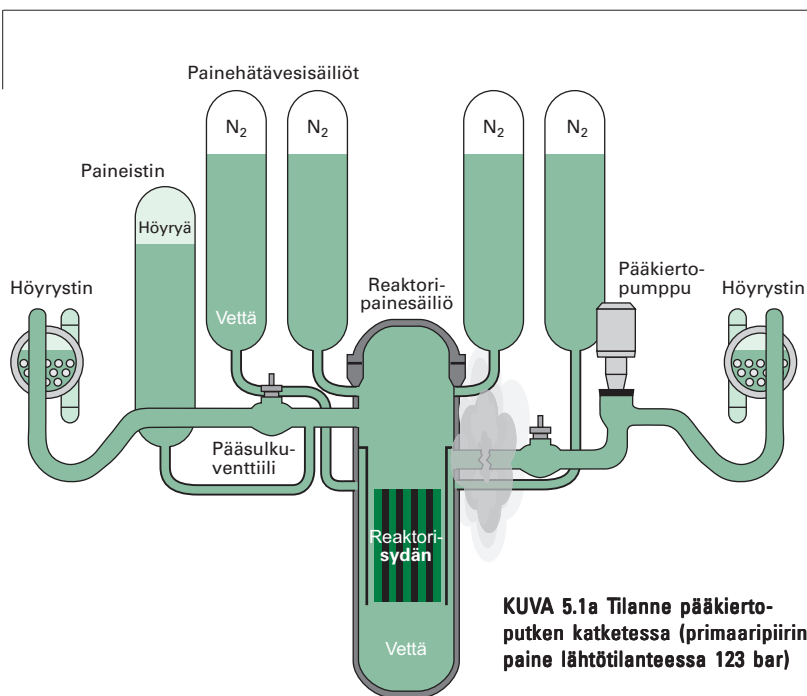
Jäähdytteenmenetysonnettomuus

Yksi pahimmista kuviteltavissa olevista onnettomuuksista vesijäähdytteisissä reaktoreissa on jäähdytteen suuri vuoto primaaripiiristä suojarakennukseen eli iso LOCA (loss-of-coolant accident). Seuraavassa tarkastellaan esimerkkinä Loviisa-tyyppisen painevesireaktorin pääkiertoputken katkeamisesta johtuvaa suurta jäähdytevuotoa. Kiehumisvesilaitoksessa vastaava onnettomuus olisi päähöyryputken katkeaminen. Primaaripiirin suuri vuoto on yksi nykyisin toiminnassa olevien länsimaisten ja uudempien venäläisperäisten kevytvesireaktoriin suunnittelun perusteena käytetyistä onnettomuuksista.

Lähtötilanteena oletetaan, että reaktori toimii tavanomaisella tehoajolla. Loviisan ydinvoimalaitoksessa primaaripiirin paine on tällöin 123 bar (ilmakehää) ja reaktorista lähtevän veden lämpötila 300 °C. Primaaripiirin suuren paineen takia vesi ei normaalitilanteessa höyrysty, sillä veden kiehumispiste riippuu paineesta. Onnettomuuden oletetaan alkavan pääkiertoputken täydellisenä päittäisenä katkeamisena niin, että jäähdyte pääsee virtaamaan esteettä ulos putken päästä katkon kummaltakin puolelta. Tapahtumasta käytetään myös nimitystä $2 \times 100\%$ -vuoto.

Vuoto johtaa sekunnin murto-osassa voimakkaaseen primaaripiirin paineen laskuun tasolle, jossa höyry-vesiseos saavuttaa hetkeksi uuden termodynaamisen tasapainon. Paineen lasku aiheuttaa reaktorin pikasulun ja pääkiertopumppujen pysähtymisen lähes välittömästi eli noin 0,1 sekunnin kuluttua putkikatkoa. Primaaripiirin lämpötila ei ehdi muuttua juuri lainkaan sekuntien aikajaksolla ja siksi nopea paineen lasku päättyy tasolle, jossa primaarijäähdyte on kiehumispisteessä (kylläistä lämpötilaa vastaava paine). Loviisan voimalaitoksella kyseinen paine on 87 bar. Tämän jälkeen paine laskee hitaammin, kun primaaripiiristä vuotaa jäähdytettä ja osa jäähdytysvedestä höyrystyy piirin sisällä.

Jäähdytteen höyrystymisen seurauksena reaktorin sydän paljastuu, vaikka vuoto kohta sijaitsi sydämen yläpuolella, kuva 5.1. Polttoainesauvat ovat veden sijasta höyryn ympäröimiä ja lämmönsiirto suojakuoresta jäähdytteeseen heikkenee. Tällöin suojakuoren lämpötila nousee, sillä radioaktiivisten fission tuotteiden hajoaminen tuottaa jälkilämpöä ja lisäksi polttoainetablettien kuumasta keskiosasta siirtyy varastoitunutta lämpöenergiaa suojakuoreen. Muutaman sekunnin kuluttua suojakuoren lämpötila saavuttaa huippuarvonsa, joka voi kuumimmissa sauvoissa olla noin 800 °C. Noin kahdenkymmenen sekunnin kuluttua murtumasta käynnistyy korkeapaineinen hätäjäähdytys. Muutamia sekunteja myöhemmin alkavat kaasulla korkeassa paineessa pidetyt painehätävesisäiliöt (”painevesiakut”) purkautua, kun primääripiirin paine on laskenut alle säiliöiden paineen 35 bar. Primääripiirin vesimäärä saavuttaa pienimmän arvonsa noin 34 sekunnin kohdalla. Tapahtumien kulkua tähän asti sanotaan primääripiirin suuren vuodon ulospuhallusvaiheeksi (blowdown).

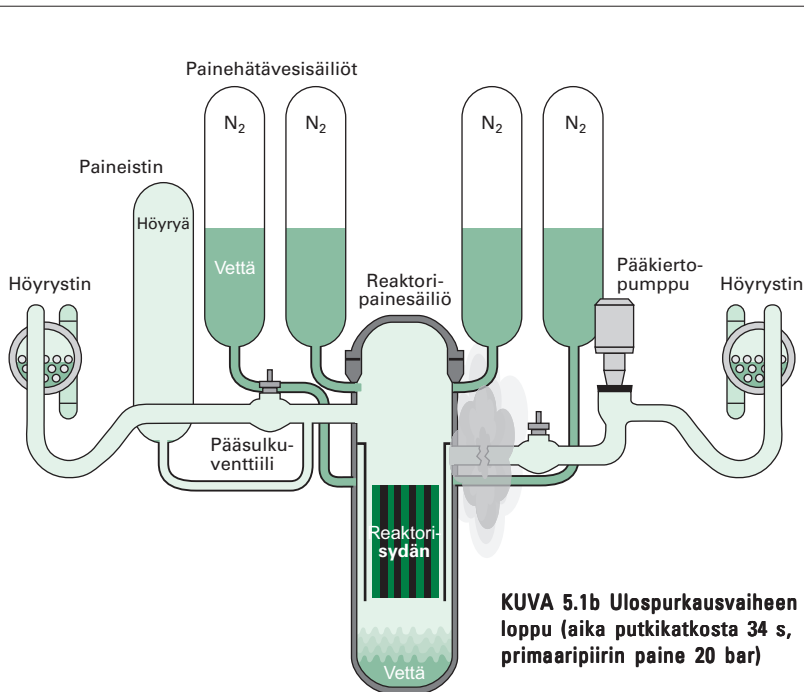


KUVAT 5.1a–5.1e Suuri primääripiirin vuoto Loviisan voimalaitoksessa (reaktoriin tulevan jäähdytysvesiputken täydellinen katko)

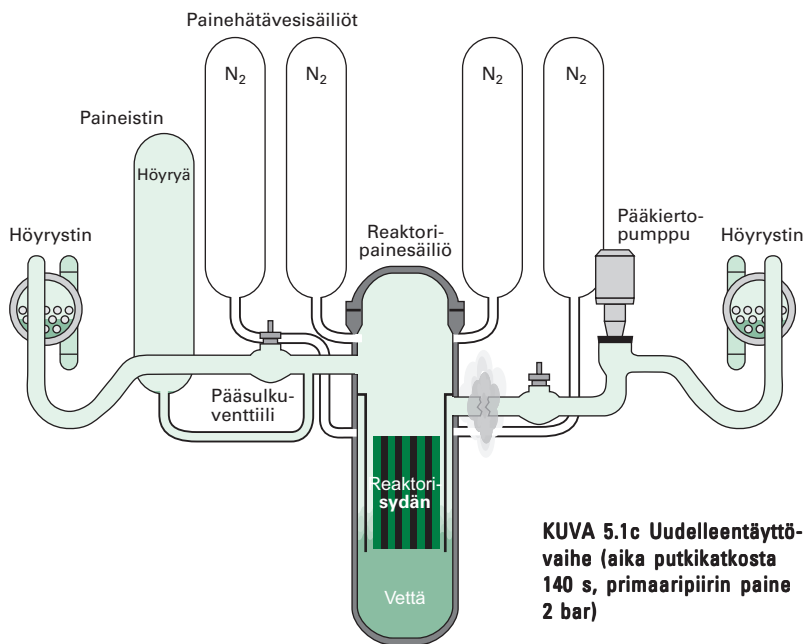
Putken murtuessa primääripiirin paine on 123 bar (kuva a). 19 sekunnin kuluttua murtumasta käynnistyvät korkeapaineiset hätäjäähdytyspumput (ei merkitty kuvaan). Paineen lasketua 25 sekunnin kuluttua 35 bariin alkavat painehätävesisäiliöt purkautua. Reaktoripaine-

Ulospuhallusvaiheen jälkeen alkaa uudelleentäyttövaihe, jonka aluksi vedenpinta nousee sydämen alareunan tasolle (refill-vaihe) ja tunkeutuu sitten sydänelueelle (reflood-vaihe). Matalapaineinen hätäjähdytysjärjestelmä käynnistyy 44 sekunnin kuluttua murtumasta. Aika-arviot on laskettu olettaen, että hätäjähdytysjärjestelmät toimivat vähimmäiskapasiteetillaan. Hätäjähdytysvesi otetaan aluksi boorivesisäiliöistä, mutta niiden tyhjennyttyä noin puolen tunnin kuluttua siirytään sisäiselle kierrolle (niin sanotulle sumppikierrolle). Tällöin primaaripiiristä vuotanut vesi kerätään suojarakennuksen lattiakaivoon eli sumppiin ja pumpataan takaisin primaaripiiriin. Kierrätettävää vettä jäähdytetään lämmönsiirtimissä jälkilämmön poistamiseksi suojarakennuksesta. Välipiirin kautta lämpö siirretään lopulta meriveteen.

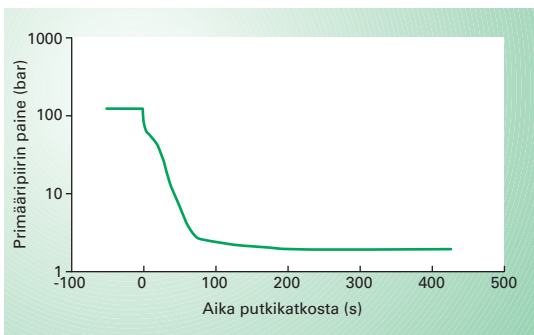
Painehätävesisäiliöt tyhjenevät runsaan 100 sekunnin kuluttua putkikatkosta. Uudelleentäyttövaiheen aikana jäähdytteen virtaus ja pinnankor-



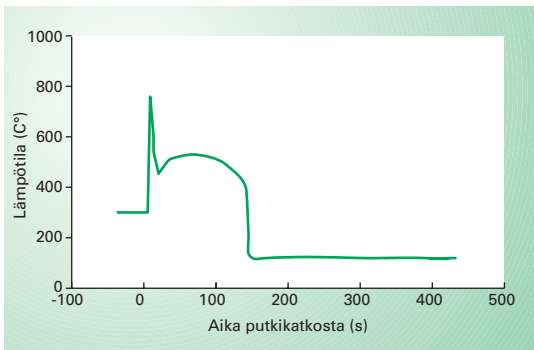
säiliön vesimäärä saavuttaa alimman arvonsa noin 34 sekunnin kuluttua murtumasta (kuva b). Tämän jälkeen vedenpinta reaktori-painesäiliössä alkaa jälleen nousta. Matalapaineiset hätäjähdytyspumput käynnistyvät noin 44 sekunnin kuluttua murtumasta, ja painehätävesisäiliöt tyhjenevät noin 100 sekunnin kuluttua murtumasta. Noin 140 sekunnin kuluttua murtumasta vedenpinta nousee reaktorisydämen alueelle, ja vesi-höryseos jäähdyttää polttoainesauvoja tehokkaasti (kuva c).



**KUVA 5.1c Uudelleentäyttö-
vaihe (aika putkikatkosta
140 s, primaaripiirin paine
2 bar)**



**KUVA 5.1d Primaaripiirin pai-
ne onnettomuuden aikana**



**KUVA 5.1e Kuumimman
polttoainesauvan suoja-
kuoren lämpötila onnetto-
muuden aikana**

keus sekä suojakuoren lämpötila voivat vaihdella, mutta muutaman minuutin kuluessa primaaripiirin vesimäärä sekä polttoainesauvojen suojakuorien lämpötilat vakiintuvat tasapainoarvoihin.

Polttoaineen suojakuoren ja polttoainetablettien välisessä kaasutilassa on normaalikäytön aikana jonkin verran polttoainetableteista vapautuneita käyttölämpötilassa kaasumaisia fissiotuotteita, lähinnä jalokaasuja ja jodia. Kun polttoaineen suojakuori kuumenee tyhjennysvaiheen aikana, on mahdollista että osa sauvoista menettää tiiviytensä ja kaasutilassa olevia fissiotuotteita vapautuu primaaripiiriin ja edelleen suojarakennukseen. Kaasutilassa olevat jalokaasut vapautuvat puhjenneista sauvoista tyhjennysvaiheessa muutaman sekunnin kuluessa primaaripiirin murtumisen jälkeen. Tässä vaiheessa voi vapautua myös jonkin verran muita fissiotuotteita kuten jodia ja cesiumia, mutta pääosin niiden vapautuminen tapahtuu vasta uudelleentäyttövaiheessa, kun ne ovat lienneet sauvojen sisään tunkeutuneeseen veteen. Tämä vapautumisvaihe alkaa muutamia minuutteja vuodon jälkeen ja voi kestää noin tunnin.

Primaaripiiristä purkautuva ja höyrystyvä jäähdyte virtaa suojarakennukseen ja nostaa sen painetta. Jäähdytteessä on jo normaalikäytön aikana pieniä määriä radioaktiivisia aineita, ja onnettomuuden aikana niitä voi tulla huomattavasti lisää polttoaineaurioiden seurauksena. Vuotanut höyry pyritään pitämään suojarakennuksen sisällä, jotta radioaktiivisten aineiden leviäminen ympäristöön estettäisiin. Onnettomuustilanteen ensimmäisten sekuntien aikana suojarakennus eristetään, eli kukin suojarakennuksen seinän läpi kulkeva putki ja ilmastointikanava suljetaan kahdella peräkkäisellä venttiilillä.

Eräissä suojarakennustyypeissä paineen nousua rajoitetaan lauhduttamalla höyryä (eli tiivistämällä höyryä vedeksi). Loviisan voimalaitoksessa käytetään jäälauhdutinta, jonka läpi suojarakennuksen alatilaa vuotava höyry kulkee suojarakennuksen ylätilaan (kuva 2.10). Kaikki kuumaa vettä tai höyryä sisältävät putket ja painesäiliöt sijaitsevat alatilassa. Lisäksi suojarakennuksessa on vesiruiskutusjärjestelmä, jolla voidaan paineen alentamiseksi jäähdyttää suojarakennuksen ala- ja ylätilaa. Ruiskutusjärjestelmä myös huuhtoo suojarakennukseen mahdollisesti joutuneita höyrystyneitä ja hiukkasmaisia radioaktiivisia aineita ilmatilasta veteen. Ruiskutusvesi kertyy suojarakennuksen lattiakaivoihin ja voidaan palauttaa jäähdyttimien kautta ruiskutuskiertoon. Suojarakennuksen sisemmän osan (teräskuvun) tiiviydelle on asetettu tiukat vaatimukset. Mahdolliset vähäiset vuodot tapahtuvat pääosin teräsku-

vun ja sitä ympäröivän betoniseinäisen ulomman suojarakennuksen väliseen tilaan. Välitilasta vuodot kerätään ja johdetaan suodattimien kautta ulkoilmaan.

Jäälauhdutinsuojarakennusta on käytetty myös muutamissa amerikkalaistyyppisissä painevesireaktorilaitoksissa. Useimmilla länsimailla painevesireaktoreilla on kuitenkin suuri kuiva suojarakenus, joka on suunniteltu kestäämään onnettomuudessa syntyvä paine ilman paineenalennustoimintoa. Painevesireaktorit vaativat tilavuudeltaan suuren suojarakennuksen, sillä primaaripiiriin kuuluvat höyrystimet pitää sijoittaa suojarakennuksen sisään. Kiehutusvesireaktoreiden suojarakennukset ovat tilavuudeltaan huomattavasti pienempiä. Niissä paineenalennus toteutetaan lauhduttamalla höyryä vesialtaaseen (kuva 2.11).

Jos hätäjähdytys ja suojarakenus toimivat suunnitellulla tavalla, suuressa jäähdytteenmenetysonnettomuudessa vapautuu ympäristöön vain vähän radioaktiivisia aineita. Esimerkiksi Loviisan voimalaitoksen tapauksessa ympäristön eniten säteilylle altistuvan asukkaan säteilyannos olisi vajaat 0,05 mSv, vaikka oletettaisiin, että reaktorissa olisi ennen onnettomuutta poikkeuksellisen suuri määrä vuotavia polttoainesauvoja. Arvioitu annos on vain noin sadasosa uusia ydinvoimalaitoksia koskevasta 5 mSv:n raja-arvosta.

Suuri primaaripiirin putkimurtuma on ollut keskeisessä asemassa ydinvoimalaitosten turvallisuusjärjestelmiä suunniteltaessa. Yhtään tämän tyyppistä onnettomuutta ei toistaiseksi ole tapahtunut millään ydinvoimalaitoksella. Ydinvoimalaitoksilla ei ole tapahtunut pienempiäkään putkimurtumia, jotka olisivat vaarantaneet reaktorin jäähdytyksen. Käytännössä hätäjähdytysjärjestelmiä on tarvittu venttiilien virheellisestä aukijäämisestä johtuneiden vuotojen kompensointiin sekä höyrystimen sisäisten primaaripiiristä sekundaaripiiriin tapahtuvien vuotojen hallintaan. Primaaripiirin suurten putkien murtumisen todennäköisyys on nykyisin arvioitu erittäin pieneksi kehittyneen laadunvalvonnan ja käytönaikeiden materiaalitarkastusten takia.

Reaktiivisuusonnettomuus

Turvallisuusanalyseissä tarkasteltaviin tapahtumiin kuuluvat myös reaktiivisuusonnettomuudet, joissa reaktorin teho kasvaa äkillisesti. Reaktiivisuusonnettomuus voisi olla useiden erilaisten tapahtumaketjujen

seurausta. Näihin tapahtumaketjuihin kuuluisi yleensä sekä käyttökannan virheitä että samanaikainen suojausjärjestelmän toimintahäiriö.

Kiehumusvesilaitoksessa pahimpana reaktiivisuusonnettomuutena voidaan pitää yksittäisen täysin sisällä olleen säätösauvan putoamista ulos reaktorista. Vaikutus olisi suurin käynnistysvaiheessa tilanteessa, jossa sisällä olleita säätösauvoja vedetään ulos reaktorista ja yksi sauva juuttuu ensin sisään ja putoaa myöhemmin alaspäin eli ulos reaktorista. Putoamisen syynä voisi olla reaktoriin alhaalta työnnettävän säätösauvan kiinnitysmekanismien pettäminen.

Säätösauvan putoaminen ulos reaktorista aiheuttaisi nopean paikallisen tehon nousun reaktorisydämessä. Teho nousee niin nopeasti, että lämpö ei ehdi siirtyä polttoainesauvasta jäähdytteeseen, vaan polttoaineeseen varastoitunut energia ja lämpötila nousevat äkillisesti ja saavuttavat huippunsa noin yhden sekunnin kuluessa. Ilmiö on niin nopea, että reaktorin pikasulku ei ehdi oleellisesti vaikuttaa sen kulkuun. Sen sijaan tehon nousua rajoittavat reaktiivisuuden luontaiset takaisinkytkennät (katso luku 2.1), kuten polttoaineen lämpötilan noususta johtuva ei-fissiileihin ytimiin tapahtuva neutronien resonanssiabsorption lisääntyminen (reaktorifysikaalinen Doppler-ilmiö) sekä jäähdytteen paikallisesta kiehumisesta johtuva neutronien hidastumisen huononeminen. Esimerkiksi Olkiluodon reaktorin tapauksessa on turvallisuusanalyysin osoitettu, että mahdolliseksi arvioidut reaktiivisuusonnettomuudet eivät johda polttoaineaurioihin.

Painevesilaitoksessa reaktiivisuuden säätöön käytetään säätösauvojen lisäksi jäähdytteeseen liuotettua booria. Säätösauvoihin liittyvien syiden lisäksi painevesilaitoksessa reaktiivisuusonnettomuus voi johtua myös jäähdytteen booripitoisuuden äkillisestä laimenemisestä. On ajateltavissa, että esimerkiksi käyttökannan virheiden takia reaktoriin pumpattaisiin booripitoisen veden sijasta booritonta vettä. Jos booriton vesi sekoittuu suhteellisen tasaisesti reaktoripainesäiliön vesimäärään, booripitoisuuden vaihtelut ovat suurimmallakin pumppausteholla pieniä eikä vaarallista reaktiivisuuden lisäystä tapahdu. Jos booriton vesi pääsisi kertymään sellaiseen jäähdytyspiiriin osaan, jossa vesi ei poikkeuksellisen käyttötilanteen vuoksi kierrä, ja sen jälkeen joutuisi reaktorin sydämeen sekoittumattomana ”tulppana”, seurauksena voisi olla reaktiivisuuden ja tehon äkillinen kasvu sekä polttoaineaurioita. Virheellinen boorittoman veden pumppaus reaktoriin on estetty luotettavasti teknisillä suojauksilla ja hallinnollisilla varmistuksilla.

Vakava onnettomuus

Vakavalla reaktorionnettomuudella tarkoitetaan tilannetta, jossa huomattava osa reaktorin polttoaineesta vaurioituu. Vakavaan onnettomuuteen voitaisiin päätyä, jos reaktorin turvallisuusjärjestelmät eivät onnettomuustilanteessa toimisi. Onnettomuus voi alkaa eri tavoin, mutta loppuvaiheessa sille on tunnusomaista jäähdytysveden menetys reaktorista, jälkilämmön aiheuttama polttoaineen ylikuumeneminen, polttoainesauvojen suojakuorien puhkeaminen ja lopulta polttoaineen sulaminen.

Edellä tarkasteltiin painevesireaktorin primaaripiirin suurta murtumaa. Hätjäähdätyksen toimiessa suunnitellusti seurauksena on enintään vähäisiä polttoaineen suojakuoren vaurioita. Jos taas hätjäähdätyks ei toimi, tilanne kehittyisi nopeasti vakavaksi reaktorionnettomuudeksi. Esimerkiksi Loviisan voimalaitoksessa reaktorisydän paljastuu muutaman sekunnin kuluttua putkikatkoksa ja kuumimpien polttoainesauvojen lämpötila kohoaa noin 800 °C:een. Painehäätävesisäiliöiden purkautuminen reaktoriin pitäisi lämpötilan hallinnassa hetken aikaa, mutta jos reaktoriin ei saataisi vettä muilla hätjäähdätyksjärjestelmillä, polttoainesauvojen lämpötila jatkaisi kohoamistaan. Yli 1 000 °C:n lämpötiloissa suojakuori alkaisi hapettua nopeasti reaktiossa vesihöyryn kanssa ja reaktiossa vapautuva lämpö kiihdyttäisi entisestään polttoaineen kuumenemista. Reaktiossa syntyisi myös vetyä, joka on herkästi palavaa kaasua ja on otettava huomioon vakavien onnettomuuksien hallinnassa.

Loviisan voimalaitoksessa reaktorisydämen sulaminen alkaisi aikaisintaan noin tunnin kuluttua suuresta primaaripiirin vuodosta, jos oletetaan, että mikään hätjäähdätyksjärjestelmä ei toimisi painehätävesisäiliöiden tyhjennyttä.

Vakavan reaktorionnettomuuden lähtötilanne olisi kuitenkin paljon todennäköisemmin jokin muu tapahtuma kuin suuri primaaripiirin vuoto. Vakava onnettomuus voisi alkaa esimerkiksi täydellisestä jäähdytysjärjestelmien sähkönsyöttöjen menetyksestä. Jos primaaripiirissä ei alun perin ole vuotoa, jälkilämmön tuotto johtaa piirin paineen nousuun ja jäähdytteen purkautumiseen varoventtiilien kautta. Tällaisessa tilanteessa reaktorin tyhjeneminen kestää kauemmin ja sydämen sulaminen alkaa paljon myöhemmin kuin suuren vuodon tapauksessa. Sähkönsyötön ja hätjäähdätyksen palautukseen on Loviisa-tyyppisellä voimalaitoksella aikaa vähintään noin neljä tuntia. Muillakin painevesilaitoksilla aikaa on vähintään noin tunti, ennen kuin reaktorisydän alkaa ylikuumentua.

Pienestä vuodosta tai sähkönmenetyksestä alkavat vakavat onnettomuudet ovat kuitenkin sikäli vaarallisia, että sydän voi sulaa primaaripiirin paineen ollessa korkea. Reaktoripainesäiliön säilyminen ehjänä on tällöin kyseenalaista. Jos painesäiliö puhkeaa korkeassa paineessa, suojarakennuksen alatiilojen nopea paineen nousu voisi johtaa suojarakennuksen vaurioitumiseen. Korkeapaineisen sydämen sulamisen estämiseksi Loviisan laitosyksikköjen primaaripiirit on 1990-luvun loppupuolella varustettu suurikokoisilla paineenalennusventtiileillä.

Vakavien onnettomuuksien kulkuun ja ympäristövaikutuksiin vaikuttavat useat fysikaaliset ja kemialliset ilmiöt, joista muutamia on seuraavassa kuvattu lyhyesti.

Sydämen sulaminen

Kun polttoaineen lämpötila saavuttaa noin 2 000 °C, reaktorisydän alkaa sulaa. Sydämen sulaminen tapahtuisi todennäköisesti vaiheittain, sillä materiaalit saattavat välillä jähmettyä ja sulaa uudestaan jälkilämmön vaikutuksesta. Myös korkeassa lämpötilassa tapahtuva polttoaineen suo-jakuoren ja vesihöyryn välinen reaktio kuumentaa sulavaa sydäntä. Aluksi sulavista polttoainesauvoista valuu alaspäin sulaa uraanidioksidia ja rakennemateriaaleja. Polttoaine- ja rakennemateriaalien väliset niin sanotut eutektiset reaktiot edistävät sydämen sulamista. Alaspäin valuvat materiaalit jähmettyvät sydämen alaosan kylmempien tukirakenteiden päälle. Ne muodostavat vaurioituneista sauvoista putoavien polttoainetablettien kanssa kasan, joka vähitellen sulaa sisältäpäin jälkilämmön vaikutuksesta. Tällöin reaktorin alaosaan muodostuu sydänsula-allas, jota pitää koossa jähmettyneestä sydänsulasta muodostunut kuori. Vähitellen kuori ja reaktorin alaosan rakenteet sulavat puhki ja sydänsula valuu painesäiliön pohjalle.

Loviisan reaktoripainesäiliön pohjalla on vakavan onnettomuuden tapauksessa suhteellisen runsaasti vettä, joten aluksi pohjalle purkautuva sydänsula jäähtyy ja jähmettyy, mutta sulaa myöhemmin uudestaan jälkilämmön vaikutuksesta. Painesäiliön pohjalla oleva sydänsula-allas kuumentaa painesäiliön pohjaa ja aiheuttaa sille suuria rasituksia. Loviisan tapauksessa painesäiliö on useimmissa vakavaan reaktorivaurioon johtavissa tilanteissa suurella varmuudella veden ympäröimä. Laskelmien mukaan vesi jäähdyttää reaktoripainesäiliötä ulkopuolelta niin, että se säilyttää eheydensä sydämensulamisonnettomuudessa. Laitoksella on 2000-luvun alussa toteutettu muutoksia ulkopuolisen jäähdytyksen varmistamiseksi.

Jos reaktoripainesäiliön ulkopuolinen jäähdytys ei onnistu, kuten käy Loviisan voimalaitosta lukuun ottamatta miltei kaikilla muilla laitoksilla, painesäiliö sulaa puhki ja sydänsula purkautuu suojarakennuksen pohjalle. Ellei suojarakennuksen pohjalla ole niin paljon vettä ja leviämistilaa sydänsulalle, että kuuma sydänsula jäähtyy ja jähmettyy, sula alkaa tunkeutua betoniin ja saattaa vaarantaa suojarakennuksen eheyden.

Suojarakennuksen paineen nousu

Vakavan onnettomuuden yhteydessä huomattava osa primaaripiirin vedestä höyrystyy jälkilämmön vaikutuksesta. Jos suojarakennuksesta tapahtuvaan jälkilämmön poistoon tarkoitetut järjestelmät eivät toimi, höyryn paine kasvaa hitaasti ja ylittää lopulta suojarakennuksen suunnitellupaineen. Tämän takia Loviisan voimalaitoksen suojarakennukset varustettiin 1990-luvun alussa jälkilämmön poistoon tarkoitetulla ulkopuolisella ruiskutusjärjestelmällä, joka on täysin riippumaton laitoksen kaikista muista järjestelmistä. Se kastelee suojarakennuksen ulkopintaa, jolloin teräs jäähtyy niin paljon, että suojarakennuksen sisällä oleva höyry lauhtuu sisäpinnalla.

Olkiluodon voimalaitoksen suojarakennukseen rakennettiin paineen nousun estämiseksi suodatettu ulospuhallusjärjestelmä. Erityyppisin suodatimin varustettuja ulospuhallusjärjestelmiä on rakennettu myös moniin muihin eurooppalaisiin ydinvoimalaitoksiin. Sen sijaan USA:n ja Japanin ydinvoimalaitosten suojarakennuksia ei ole varustettu vakavien onnettomuuksien varalta minkäänlaisilla ylipaineen rajoittamiseen tarkoitetuilla järjestelmillä. Näissä maissa on muutenkin otettu se kanta, että rakenteelliset laitosmuutokset vakavien onnettomuuksien varalle eivät ole perusteltuja.

Fissiotuotteiden vapautuminen ja pidättyminen

Kun reaktorin uraanidioksidipolttoaineen lämpötila nousee lähelle sulamispistettä, lähes kaikki siihen sitoutuneet kaasumaiset ja helposti höyrystyvät fissiotuotteet vapautuvat polttoainetableteista. Myös osa vaikeammin höyrystyvistä fissiotuotteista vapautuu. Sydämen sulamislämpötilakin riippuu olosuhteista, esimerkiksi uraanidioksidi sulaa 2 878 °C:ssa, mutta suojakuoren zirkoniumin ja polttoaineen mahdollisesti muodostama Zr-U-O-seos jo alle 2 000 °C:ssa.

Fissiotuotteiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet kuten sulamispiste sekä kiehumispiste sekä reaktiivisuus muiden fissiotuotteiden, uraanidiok-

sidin ja polttoaineen suojakuoren kanssa vaikuttavat ratkaisevasti niiden vapautumiseen polttoaineesta. Jalokaasut krypton ja ksenon ovat tavanomaisessa käyttölämpötilassa pääosin fysikaalisesti sitoutuneita uraani-dioksidipolttoaineen rakeisiin. Pieni osa jalokaasuista on kaasumaisena polttoainesauvan suojakuoren sisällä. Lämpötilan noustessa yhä suurempi osa jalokaasuista vapautuu polttoainerakeista kaasutilaan. Kun polttoaineen lämpötila on lähellä 2 000 °C, jokseenkin kaikki jalokaasut vapautuvat polttoainetableteista.

Jodi ja cesium ovat huoneenlämpötilassa kiinteitä, mutta reaktorin normaalikäytön ja onnettomuuksien aikana esiintyvissä korkeissa lämpötiloissa kaasumaisia¹. Ne vapautuvat polttoainetableteista suunnilleen samalla tavoin kuin jalokaasut. Myös muut helposti höyrystyvät fissiotuotteet vapautuvat polttoaineesta tyypillisten onnettomuusskenaarioiden mukaan jo ennen sydänsulan putoamista reaktoripainesäiliön pohjalle. Vaikeammin höyrystyviä aineita vapautuu lähinnä vasta sydänsula-altaasta ja niiden vapautumisosuudet ovat yleensä pieniä.

Suhteellisen helposti vapautuvia fissiotuotteita ovat esimerkiksi telluuri ja strontium. Vaikeasti vapautuvia aineita ovat muun muassa zirkonium ja yttrium sekä transuraanit (neptunium, plutonium, amerikium). Radioaktiivisten aineiden kemiallinen tila polttoaineessa voi vaikuttaa ratkaisevasti vapautumiseen. Esimerkiksi puhtaan ruteniumin kiehumispiste on 3 900 °C, mutta ruteniumoksidin RuO_4 kiehumispiste on vain 108 °C.

Jos reaktorin suojarakennus vaurioituu, radioaktiivisia fissiotuotteita voi päästä myös ympäristöön. Jalokaasuja voi päästä ympäristöön, vaikka suojarakennus ei vaurioituisikaan, jos suojarakennuksen painetta joudutaan vakavan onnettomuuden aikana alentamaan päästämällä kaasuja suodattimen kautta ulos. Jos suodattimet eivät toimi, myös kaasumaista jodia voi tällöin päästä ympäristöön. Kaikki polttoaineesta vapautuvat fissiotuotteet eivät kuitenkaan pääsisi kulkeutumaan ympäristöön, sillä erilaiset fysikaaliset ja kemialliset ilmiöt vaikuttavat päästöjä vähentävästi, varsinkin muiden kuin kaasumaisten aineiden kohdalla. Suuri osa fissiotuotteista pidäytyisi jo primaaripiiriin

¹ Jodin sulamispiste on 113 °C ja kiehumispiste 184 °C. Cesiumin sulamispiste on 28 °C ja kiehumispiste 678 °C.

sisäpinnalle, primaaripiiriin veteen tai suojarakennuksessa oleviin vesialtaisiin Kokeiden mukaan valtaosa primaaripiiristä suojarakennuksen ilmatilaan purkautuvista radioaktiivisista aineista laskeutuisi alle vuorokauden kuluessa suojarakennuksen sisäpinnoille.

Jodin ja cesiumin tärkeimmät yhdisteet CsOH ja CsI sekä muut höyrystyneet yhdisteet jalokaasuja ja kaasumaista jodia lukuun ottamatta tiivistyvät suojarakennuksessa aerosolihiukkasiksi eli pieniksi ilmassa leijuviksi pisaroiksi tai hiukkasiksi. Muodostuvien hiukkasten koko riippuu olosuhteista kuten massakonsentraatiosta (jos konsentraatio on suuri tulee hiukkasistakin isoja) ja siitä, kauanko ne ehtivät kasvaa keräämällä kosteutta ilmasta. Hiukkaset laskeutuvat painovoiman ansioista alaspäin sitä nopeammin mitä suurempia ne ovat. Pienet hiukkaset (läpimitta alle $1\ \mu\text{m}$) eivät mainittavasti laskeudu, mutta diffuusioliikkeensä seurauksena ne törmäilevät ja tarttuvat seiniin, lattioihin ja muihin pintoihin. Kun aerosolihiukkaset törmäilevät toisiinsa, voi muodostua suurempia ja nopeammin laskeutuvia hiukkasia (konglomeraatio). Jos suojarakennuksessa on vesihöyryä niin paljon, että se tulee ylikylläiseksi (mikä on varsin tyypillistä onnettomuusskenaarioissa), tiivistyy vesi hiukkasten pinnoille kasvattaen niitä nopeasti. Hygroskooppiset hiukkaset (esimerkiksi CsOH:sta koostuvat) imevät kosteutta ja kasvavat, vaikka suhteellinen kosteus olisi jonkin verran alle 100 prosenttia. Myös lämpötilaerot voivat aiheuttaa ylikuumenneesta sydäimestä tulevien hiukkasten kulkeutumista primaaripiiriin ja suojarakennuksen kylmiä pintoja kohti (termoforeesi). Aerosolihiukkasten fysiikkaa on kuvattu kirjan 2 ”Säteily ympäristössä” luvussa 3.

Radioaktiiviset aineet voivat osallistua kemiallisiin reaktioihin joko muiden radioaktiivisten aineiden tai rakennemateriaalien kanssa. Esimerkiksi cesium voi muodostaa jodin kanssa cesiumjodidia CsI tai veden kanssa cesiumhydroksidia CsOH. CsI pidättyy suojarakennuksen pinnoille ja suodattimiin paremmin kuin kaasumainen jodi. Jodi voi reagoidessaan esimerkiksi kaapelien eristemateriaalien kanssa muodostaa myös kaasumaisia orgaanisia jodideja, jotka taas pidättyvät huonosti.

Suojarakennuksen pettämisen yhteydessä tapahtuva paineenlasku ja kaasuvirtaus saattaisivat irrottaa osan primaaripiiriin ja suojarakennukseen pidättyneistä fissiotuotteista uudelleen, mutta yleisen käsityksen mukaan päästöt jäisivät sitä pienemmiksi mitä pitempään suojarakennus pysyisi tiiviinä ja ehjänä.

Vetypalot

Sydämen ylikuumenemisen yhteydessä polttoaineen suojakuorimateriaalien ja vesihöyryn välisessä reaktiossa voi muodostua runsaasti vetyä, joka virtaa suojarakennuksen yläosan ilmatilaan. Sopivassa suhteessa ilmaan sekoittuneena vety palaa tai räjähtää herkästi. Vetyräjähdys tai joissakin suojarakennustyypeissä myös vedyn laajamittaisen leviämisen jälkeen syttyvä rauhallisempi vetypalo voi vaarantaa suojarakennuksen kestävyys. Tämän takia esimerkiksi Loviisan laitos on varustettu sytytystulpilla vedyn hallitukseksi polttamiseksi. Kokeiluvaiheessa on myös katalyyttisiä rekombinaattoreita, joiden avulla vetyä voitaisiin poistaa jo pienissä pitoisuuksissa.

Olkiluodon voimalaitoksen suojarakennus on käytön aikana täytetty typpellä eli inertoitu, ja sen happipitoisuus on niin pieni, että vety ei syty palamaan. Typpi-inertointi on käytössä useimpien kiehutusvesireaktoreiden pienikokoisissa suojarakennuksissa, joissa ei ole tarpeen työskennellä käytön aikana.

Höyryräjähdys

Vakavaan reaktorionnettomuuteen liittyy myös niin sanotun höyryräjähdysten mahdollisuus. Sydämen sulaessa sydänmateriaalia voi purkautua äkillisesti esimerkiksi reaktoripainesäiliön pohjalla olevaan veteen. Tällöin sula sydänmateriaali saattaa hajota pisaroiksi, joiden ympärille muodostuu nopeasti eristävä höyrykalvo. Tilanne on epästabiili ja sopivissa olosuhteissa höyrystyminen voi edetä räjähdysnomaisesti eristävän kalvon hävitessä. Ilmiö tunnetaan esimerkiksi valimoteollisuuden kokemusten perusteella tapauksista, joissa suuri määrä sulaa metallia on joutunut veteen. Höyryräjähdys saattaa uhata reaktoripainesäiliön tai suojarakennuksen eheyttä.

Höyryräjähdysten aiheuttama riski on Loviisan ydinvoimalaitoksessa arvioitu pieneksi, sillä riittävän suuren sydänsulamäärän purkautuminen veteen höyryräjähdykseen johtavissa olosuhteissa on reaktoreiden rakenteen vuoksi epätodennäköistä.

Olkiluodon voimalaitoksella joudutaan varautumaan myös mahdollisuuteen, että reaktoripainesäiliö sulaa puhki ja suuri määrä sydänsulaa putoaa äkillisesti suojarakennuksen pohjalle onnettomuuden aikana muodostuneeseen vesialtaaseen. Kokeellisten tutkimusten perusteella on luultavaa, että sulan putoaminen vesialtaaseen ei aiheuta höyryräjähdystä,

mutta erityisesti metallisten rakennemateriaalien aiheuttamaa höyryräjähdyriskiä ei voida kokonaan sulkea pois. Höyryräjähdyks saattaisi vaarantaa suojarakennusten alaosassa olevan kulkuaukon eheyden. Tämän vuoksi Olkiluodon voimalaitoksella on vahvistettu kulkuaukon rakenteita.

Uudelleenkriittisyys

Vakavaan onnettomuuteen voidaan joutua myös reaktiivisuusonnettomuuden seurauksena. Länsimaisissa reaktoreissa laajoihin polttoainevaurioihin johtavaa reaktiivisuusonnettomuutta pidetään kuitenkin äärimmäisen epätodennäköisenä reaktiivisuuden luontaisten takaisinkytkentöjen takia. Muista syistä johtuvaan sydämen sulamiseen voi kuitenkin liittyä niin sanottu sydämen uudelleenkriittisyys.

Erityisesti kiehutusvesireaktorissa on materiaaliominaisuuksien takia mahdollista, että säätösaavat sulavat ja säätömateriaalia valuu pois sydämen alueelta, ennen kuin polttoaine on vaurioitunut vakavasti. Jos osittain vaurioitunut reaktori täyttyy uudelleen vedellä, se saattaa tulla uudelleen kriittiseksi. Uudelleenkriittisyyden seurauksena reaktorissa voi syntyä fissiotehoa, joka kuumentaa polttoainetta ja aiheuttaa fissiotuotteiden vapautumista. Aikaväli, jonka aikana uudelleenkriittisyys olisi mahdollista, on lyhyt. Kevytvesireaktorin polttoaine saavuttaa kriittisyyden vain sopivalla uraani-vesisuhteella, jonka saavuttaminen on epätodennäköistä kovin vakavasti vaurioituneessa sydämessä. Vaikka uudelleenkriittisyys on epätodennäköistä, mahdollisuus pitää ottaa huomioon onnettomuuden hallinnan suunnittelussa.

Painevesireaktorin vakavan onnettomuuden aikana reaktoripainesäiliöissä muodostuva höyry saattaisi lauhtua vedeksi höyrystymissä. Höyrystimiin voisi siten kertyä tislautunutta vettä, jossa säätöön käytettävän boorin pitoisuus olisi tavanomaista pienempi. Jos boorin suhteen laimentunutta vettä pumpattaisiin takaisin reaktoriin, myös vaurioitunut painevesireaktori saattaisi jossain tilanteessa tulla uudelleen kriittiseksi.

5.5 | Muut polttoainekierron onnettomuusmahdollisuudet

Ydinvoimalaitosten polttoainekiertoa on käsitelty kohdassa 2.5. Tuore uraani on vain lievästi radioaktiivista, joten uraanipolttoaineen valmistus tai tuoreen uraanipolttoaineen käsittely ei yleensä voi aiheuttaa suuria annoksia eikä niiden yhteydessä ei voi vapautua merkittäviä määriä ra-

dioaktiivisia aineita. Sekaoksidipolttoaine (MOX), joka sisältää jälleenkäsittelystä saatavaa plutoniumia, on voimakkaammin radioaktiivista. Sen valmistuksen ja käsittelyn yhteydessä säteilyonnettomuuksien ja radioaktiivisten aineiden vapautumisen mahdollisuus on suurempi.

Väkevöintivaiheesta alkaen polttoaineen valmistukseen ja valmiiden polttoainennippujen käsittelyyn liittyy kriittisyysonnettomuuden mahdollisuus. Tahaton kriittisyyden saavuttaminen on kuitenkin epätodennäköistä, sillä se vaatii fissioreaktion kannalta edullisia poikkeuksellisia olosuhteita. Kevytvesireaktorin polttoaineen kriittisyys edellyttää, että polttoaineen ympärillä on neutronihidastimena toimivaa materiaalia, käytännössä vettä. Kriittisyysonnettomuuden vaara on suurempi valmistettaessa tai käsiteltäessä sellaista tutkimusreaktorin tai nopean hyötöreaktorin polttoainetta, jossa on korkea ^{235}U - tai Pu-pitoisuus.

Esimerkki polttoaineen valmistukseen liittyvästä onnettomuudesta on 1.10.1999 Japanissa JCO-yhtiön Tokaimuran polttoainetehtaalla tapahtunut kriittisyysonnettomuus. Onnettomuus tapahtui konversiolaitoksella, jossa käsiteltiin pieniä määriä vaihtelevan väkevöintiasteen uraania erilaisten tutkimusreaktoripolttoaineiden valmistusta varten. Käsiteltäessä tavanomaista korkeammalle väkevöityä uraania (18,8 %) rikottiin turvallisuusmääräyksiä ja kaadettiin liian suuri erä nestemäistä uraaniyhdistettä kerralla säiliöön, jota ympäröi jäähdytyspiirin vesisäiliö. Uraaniyhdiste saavutti kriittisyyden, jolloin esiintyi aluksi voimakas neutroni-, gamma- ja beetasäteilyn välähdys, ja uraani pysyi sen jälkeen useita tunteja kriittisenä. Kaksi työntekijää sai erittäin suuren annoksen (16–20 Gy), ja he menehtyivät säteilyaltistuksen seurauksiin usean kuukauden kuluttua. Fissioreaktioon liittyvä suora säteily aiheutti myös erälle laitoksen ulkopuolisille säteilyannoksia, joiden arvioitiin olevan enimmillään noin 20 mSv. Kriittisyystapahtuman yhteydessä syntyi jonkin verran fissiotuotteita, jotka kuitenkin jäivät pääosin laitosalueelle. Arvioitu jalo-kaasupäästö oli $1,6 \cdot 10^{14}$ Bq ja jodipäästö $1,3 \cdot 10^{10}$ Bq. Päästön aiheuttamat säteilyannokset olivat pieniä.

Käytetty polttoaine sisältää runsaasti radioaktiivisia aineita. Niistä pääosa on kiinteässä olomuodossa ja sitoutuneena keraamisiin polttoainetabletteihin. Koska käytetyn polttoaineen ^{235}U -pitoisuus on pieni, kriittisyysonnettomuuden vaara on vähäinen. Käytetyn polttoaineen varastoissa ja kuljetuksissa polttoaineen lämpötila on yleensä matala reaktoriolosuhteisiin verrattuna eikä laajamittainen nopea fissiotuotteiden vapautuminen ole mahdollista ilman ulkoista energialähdettä, esimerkiksi suurta tulipaloa. Käytetyn ydinpolttoaineen vaarallisuutta vä-

hentää olennaisesti myös se, että lähes kaikki helpoimmin vapautuvat radioaktiiviset aineet, mukaan lukien radioaktiivinen jodi, ovat hajonneet noin kolmen kuukauden kuluessa sen jälkeen, kun polttoaine on poistettu reaktorista.

Jälleenkäsittelylaitosten kemiallisissa prosesseissa käytettyä polttoainetta ja fissiotuotteita käsitellään liuosten muodossa. Vuodot ja kemialliset räjähdykset ovat periaatteessa mahdollisia jälleenkäsittelylaitoksissa. Ydinjätehuoltoa koskevassa luvussa 7 on selvitetty ydinjätehuollon turvallisuutta ja kuvattu jälleenkäsittelyn yhteydessä tapahtuneita onnettomuuksia.

5.6 | Ydinvoimalaitosonnettomuuden päästöt

Maaailman ydinvoimalaitoksilla on tapahtunut niiden yhteensä lähes 10 000 käyttövuoden aikana (vuoden 2000 loppuun mennessä) muutamia onnettomuuksia, mutta vain yhden kerran onnettomuus on lisännyt ympäristön säteilytasoa enemmän kuin luonnon taustasäteilyn normaalin vaihtelun verran. Normaalilla vaihtelulla tarkoitetaan tällöin esimerkiksi säteilytasooeroja paikkakuntien välillä ja säteilytason vaihtelua tietyllä paikkakunnalla säteilyltä suojaavan lumipeitteen paksuudesta riippuen.

Vakavia päästöjä aiheuttanut Tshernobylin onnettomuus vuonna 1986 oli luonteeltaan ainutlaatuinen eikä edustanut ”tyypillistä ennustettua päästöä”. Tässä luvussa esitettävät arviot ydinvoimalaitoksen päästöistä perustuvat kokeellisten tutkimusten ja laskentamallien antamaan käsitykseen reaktoreista, jotka on varustettu suojarakennuksella.

Ydinvoimalaitoksen toiminnassa syntyy radioaktiivisia aineita usealla eri tavalla, mutta ympäristön kannalta onnettomuustilanteessa merkitystä on reaktorissa olevilla fissiotuotteilla. Merkittävä radioaktiivisten aineiden päästö edellyttää reaktorin polttoaineen ylikuumenemista ja vakavia vaurioita sekä reaktoria ympäröivän kaasutiiviin suojarakennuksen tai päästöä rajoittavien suodatusjärjestelmien pettämistä. Reaktorin radioaktiivisista aineista valtaosa on kiinteässä olomuodossa eikä pääse ympäristöön, vaikka reaktori ja polttoaine vaurioituisivat.

Ydinvoimalaitosonnettomuudessa radioaktiivisia aineita voi vapautua ilmakehään kaasumaisina ja hiukkasina (aerosolina) ja maaperään sekä pinta- ja pohjavesiin laitoksesta mahdollisesti vuotavan veden seassa.

Tässä luvussa keskitytään ilmakehään vapautuviin päästöihin, jotka turvallisuusanalyysien mukaan voivat olla ympäristön kannalta selvästi vakavampia kuin vesipäästöt.

Radioaktiivisten aineiden päästön koostumus

Kaasumaisessa muodossa olevat radioaktiiviset aineet ovat pääasiassa jalokaasuja (ksenon, krypton). Jalokaasut vapautuvat reaktori-vauriossa nopeasti, mutta niiden vaarallisuus on suhteellisesti pienempi kuin muiden päästöön sisältyvien radioaktiivisten aineiden, koska

- jalokaasut eivät aiheuta ympäristöä saastuttavaa laskeumaa, vaan levitessään ilmakehään laimentuvat tehokkaasti,
- ne eivät sitoudu elimistöön hengityksen tai ruuansulatuksen kautta, joten niiden aiheuttama annos on pääosin peräisin ulkoisesta säteilystä, ja
- niiden puoliintumisaika on melko lyhyt, joten niiden vaikutus jää suhteellisen lyhytaikaiseksi (tuntien–vuorokauden suuruusluokkaa).

Edellä mainituista syistä jalokaasujen aiheuttama säteilyaltistus ei aiheuta välitöntä vaaraa pahimmissakaan tapauksissa laitosalueen ulkopuolella. Toisaalta onnettomuustilanteessa suojarakennuksesta mahdollisesti vapautuvia jalokaasupäästöjä ei voida vähentää suodattimilla.

Melko helposti onnettomuustilanteessa vapautuu myös radioaktiivista jodia, joka höyrystyy matalassa lämpötilassa. Se aiheuttaa ulkoista säteilyä päästövanasta eli päästöpilvestä. Ympäristöön kulkeutuva jodi sitoutuu myös hengityksen kautta ihmiseen. Suuri jodipäästö olisi jo alkuvaiheessa merkittävä säteilyaltistumisen aiheuttaja. Lisäksi maahan laskeutunut jodi voi rikastua elintarvikkeisiin, erityisesti maitoon, ja voi siten sitoutua elimistöön myös ruuansulatuksen kautta. Suuri jodipäästö aiheuttaisi elintarvikkeiden käytön rajoituksia. Poistoilmajärjestelmään kerättävien suojarakennuksen vuotojen tai hallitun paineenalennuksen yhteydessä vapautuvaa jodipäästöä voidaan tehokkaasti rajoittaa onnettomuustilanteessa toimivilla suodattimilla.

Pitkällä aikavälillä merkittävin polttoaineesta vakavassa onnettomuustilanteessa vapautuva radioaktiivinen aine on cesium. Cesium esiintyy

suojarakennusolosuhteissa pieninä ilmassa leijuvina hiukkasina (aerosolina). Onnettomuudessa vapautuu ympäristöön suuria määriä cesiumia vain, jos suojarakennus menettää tiiveytensä pian polttoaineaurioiden jälkeen. Cesium pidättyy myös onnettomuuspäästön suodattimiin. Jos vuodot suojarakennuksesta saadaan kerättyä suodatusjärjestelmään, ei merkittävää päästöä synny. Maahan laskeutunut cesium aiheuttaa ulkoista säteilyä ja lisäksi sitä voi kulkeutua ravintoketjun kautta ihmiseen. Pahimmassa tapauksessa ympäristön merkittävä saastuminen voisi aiheuttaa ydinvoimalaitoksen lähialueella vuosia kestäviä maankäytön rajoituksia.

Muut fissiotuotteet paitsi jalokaasut, jodi ja cesium pidättyvät useimmissa onnettomuustilanteissa hyvin suurelta osin polttoaineeseen, primaaripiiriin ja suojarakennukseen. Sen vuoksi niiden aiheuttama säteilyaltistus laitoksen ympäristössä olisi huomattavasti pienempi kuin edellä mainittujen fissiotuotteiden aiheuttama altistus.

Viimeaikainen tutkimus fissiotuotteiden käyttäytymisestä kohdistuu sellaisiin kaasumaisiin yhdisteisiin, jotka eivät laskeudu primaaripiiriin tai suojarakennuksen pinnoille. Tällaisia yhdisteitä, joita voi suojarakennuksessa syntyä, ovat orgaaniset jodiyhdisteet ja ruteenin oksidit. Ne voisivat vapautua ympäristöön, jos suojarakennus alkaisi onnettomuuden myöhemmässä vaiheessa vuotaa tai jos suojarakennuksesta poistettaisiin kaasuja suodatetun ulospuhallusjärjestelmän kautta. Eräs rajoittava menetelmä on alkalisten kemikaalien ruiskuttaminen suojarakennukseen onnettomuuden aikana. Sitä varten tarvittavat järjestelmät on asennettu Olkiluodon voimalaitokselle vuoden 2000 aikana.

Tshernobylin ydinvoimalaitosonnettomuuden kokonaispäästöstä on esitetty arvio taulukossa 5.1. Jalokaasut vapautuivat vaurioituneesta polttoaineesta lähes kokonaan ja helposti höyrystyviä aineita, kuten jodia, cesiumia ja telluuria, vapautui enemmän kuin vaikeasti höyrystyviä aineita. Vaikeasti höyrystyviä aineita vapautui suunnilleen samassa suhteessa kuin niitä oli polttoaineessa ennen onnettomuutta. Sen on tulkittu johtuneen siitä, että polttoainetta hajosi aivan onnettomuuden alkuvaiheessa räjähdysmäisesti pieniksi hiukkasiksi, ja hiukkasia sinkoutui räjähdyksessä suoraan ympäristöön. Vaatimusten mukaan suunnitellussa reaktorissa räjähdys ei ole mahdollinen ja hiukkasmaisia päästöjä ei pahimmassakaan tapauksessa odotettaisi. Helpommin vapautuvia aineita saattaisi sen sijaan päästä ympäristöön saman verran kuin Tshernobylin onnettomuudessa.

Nuklidi	Puoliintumis- aika	Aktiivisuus reaktorissa Bq	Päästön osuus %	Päästö Bq
¹³³ Xe	5,25 d	$6,5 \cdot 10^{18}$	100	$6,5 \cdot 10^{18}$
¹³¹ I	8,02 d	$3,2 \cdot 10^{18}$	50–60	$\sim 1,8 \cdot 10^{18}$
¹³⁴ Cs	2,06 a	$1,8 \cdot 10^{17}$	20–40	$\sim 5,4 \cdot 10^{16}$
¹³⁷ Cs	30,2 a	$2,8 \cdot 10^{17}$	20–40	$\sim 8,5 \cdot 10^{16}$
¹³² Te	76,3 h	$2,7 \cdot 10^{18}$	25–60	$\sim 1,2 \cdot 10^{18}$
⁸⁹ Sr	50,5 d	$2,3 \cdot 10^{18}$	4–6	$\sim 1,2 \cdot 10^{17}$
⁹⁰ Sr	28,6 a	$2,0 \cdot 10^{17}$	4–6	$\sim 1,0 \cdot 10^{16}$
¹⁴⁰ Ba	12,8 d	$4,8 \cdot 10^{18}$	4–6	$\sim 2,4 \cdot 10^{17}$
⁹⁵ Zr	64,0 d	$5,6 \cdot 10^{18}$	3,5	$2,0 \cdot 10^{17}$
⁹⁹ Mo	66,0 h	$4,8 \cdot 10^{18}$	> 3,5	$> 1,7 \cdot 10^{17}$
¹⁰³ Ru	39,4 d	$4,8 \cdot 10^{18}$	> 3,5	$> 1,7 \cdot 10^{17}$
¹⁰⁶ Ru	374 d	$2,1 \cdot 10^{18}$	> 3,5	$> 7,3 \cdot 10^{16}$
¹⁴¹ Ce	32,5 d	$5,6 \cdot 10^{18}$	3,5	$2,0 \cdot 10^{17}$
¹⁴⁴ Ce	285 d	$3,3 \cdot 10^{18}$	3,5	$\sim 1,2 \cdot 10^{17}$
²³⁹ Np	2,34 d	$2,7 \cdot 10^{19}$	3,5	$\sim 9,5 \cdot 10^{16}$
²³⁸ Pu	87,8 d	$1,0 \cdot 10^{15}$	3,5	$3,5 \cdot 10^{13}$
²³⁹ Pu	24100 a	$8,5 \cdot 10^{14}$	3,5	$3,0 \cdot 10^{13}$
²⁴⁰ Pu	6570 a	$1,2 \cdot 10^{15}$	3,5	$4,2 \cdot 10^{13}$
²⁴¹ Pu	14,4 a	$1,7 \cdot 10^{17}$	3,5	$\sim 6,0 \cdot 10^{15}$
²⁴² Cm	163 d	$2,6 \cdot 10^{16}$	3,5	$\sim 9,0 \cdot 10^{14}$

TAULUKKO 5.1 Tshernobylin onnettomuusreaktorin aktiivisuus ja päästö

Arvio onnettomuusreaktorin aktiivisuudesta 26.4.1986 ja kokonaispäästöstä merkittävien radionuklidien osalta (OECD/NEA 1995). Päästö tapahtui kymmenen päivän aikana. Kattavammin nykyisiä arvioita on esitetty viitteessä (UNSCEAR 2000).

Päästön aikatekijät

Onnettomuuden aikatekijät riippuvat onnettomuuden alkutapahtumasta, järjestelmien toiminnasta ja laitoksen käyttäjien toimenpiteistä. Mahdollisten tapahtumaketjujen suuren lukumäärän vuoksi tyypillisiä radioaktiivisten aineiden päästön aikatekijöitä ei voida määritellä ennakolta. Sääolosuhteet vaikuttavat lisäksi olennaisesti siihen, miten päästö käyttäytyy voimaloituksen ulkopuolella.

Ydinvoimalaitosten suunnittelun perusteena olevissa onnettomuuksissa suojarakennus estää päästöt ympäristöön käytännössä lähes kokonaan, ellei suojarakennusjärjestelmien toiminnassa esiinny vakavia häiriöitä. Myös vakavammissa onnettomuuksissa suojarakennus estää merkittävät päästöt, niin kauan kuin se säilyy tiiviinä. Three Mile Island 2:n onnettomuudessa suojarakennus pysyi ehjänä ja esti päästöt ympäristöön lähes täysin, vaikka onnettomuus johti reaktorisydämen sulamiseen.

Jos reaktorisydämen vaurioon liittyisi samanaikainen suojarakennuksen vuodon aiheuttava vika, pahimmassa tapauksessa päästö saattaisi alkaa jo alle tunnin kuluttua alkutapahtumasta. Tyypillisempi aika alkutapahtumasta päästön alkamiseen olisi kuitenkin useita tunteja. Suojarakennuksen vuotaminen voitaisiin havaita esimerkiksi siitä, että eristysventtiilit eivät sulkeudu suunnitellusti tai suojarakennuksen ulkopuolella mitataan poikkeuksellisen korkeita lämpötiloja tai säteilytasoja.

Toisaalta on mahdollista, että päästö alkaisi vasta vuorokausien kuluttua, jos suojarakennus menettäisi tiiviytensä esimerkiksi vakavan onnettomuuden aiheuttamien rasitusten seuraksena. Päästön viivästyminen pienentäisi onnettomuuden aikaisia säteilyannoksia merkittävästi. Väestön suojelutoimenpiteiden käynnistäminen vakavassa onnettomuudessa jo ennen mahdollista päästöä harkittaisiin tilanteen mukaan (katso myös kohta 5.7).

Jos radioaktiivinen päästö alkaisi, sen keskeyttäminen saattaisi olla hankalaa. Päästö olisi useimmissa ajateltavissa olevissa onnettomuuksissa suurimmillaan päästön alussa muutaman tunnin aikana. Luontainen radioaktiivisten aineiden kiinnittyminen ydinvoimalaitoksen sisätiloihin pienentäisi päästön nopeutta huomattavasti jo ensimmäisen vuorokauden kuluessa, mutta päästöä voisi esiintyä senkin jälkeen useita päiviä.

Ilmakehään vapautuneen päästön leviäminen ympäristöön riippuisi tuulen nopeudesta ja ilmavirtausten pyörteisyydestä. Kovalla tuulella radioaktiiviset aineet ehtisivät etäälle nopeammin, mutta toisaalta tuuli tällöin hajottaisi ja laimentaisi päästöä tehokkaammin. Lisäksi radioaktiiviset aineet ohittaisivat lähiympäristön lyhyemmässä ajassa, jolloin henkilö ei ehtisi altistua säteilylle niin pitkää aikaa kuin niiden liikkuesssa hitaammin.

Säteilyannosten kertymistä ajatellen on huomattava, että annos ei kilometrien päässä onnettomuuspaikalta keräänny hetkellisesti. Säteilyannoksen kertyminen edellyttäisi tunteja kestävästä säteilyaltistuksesta. Lyhytaikaiset poistumiset säteilysuojasta tai nopea siirtyminen parempaan suojaan eivät siis lisäisi sanottavasti saatua kokonaisannosta.

Pelastussuunnittelussa käytetään taulukossa 5.2 esitettyjä aika-arvioita.

	Aika
Aika onnettomuuden alkuunpanevasta tapahtumasta laitoksen ulkopuolisen organisaation hälyttämiseen (tapahtuman tunnistamiseen ja sen vakavuuden arviointiin kuluva aika)	0,5 h
Aika onnettomuuden alkuunpanevasta tapahtumasta päästön alkuun - minimiaika - suojaustoimien suunnittelun perustaksi suositeltava aika	0,5 h 4 h
Päästön kesto (päästönopeus alkaa pienentyä nopeasti muutaman tunnin kuluttua)	tunteja – useita vuorokausia
Päästön leviäminen ympäristöön suurimmat annokset aiheuttavissa sääolosuhteissa (päästön alkamisesta)	5 km 15 min – 1 h 10 km 0,5 – 2 h 20 km 1 – 4 h
Suureen säteilyannokseen tarvittava altistumisaika	tunteja

TAULUKKO 5.2 Pelastussuunnittelun perustana olevat ydinvoimalaitosonnettomuuden aika-arviot

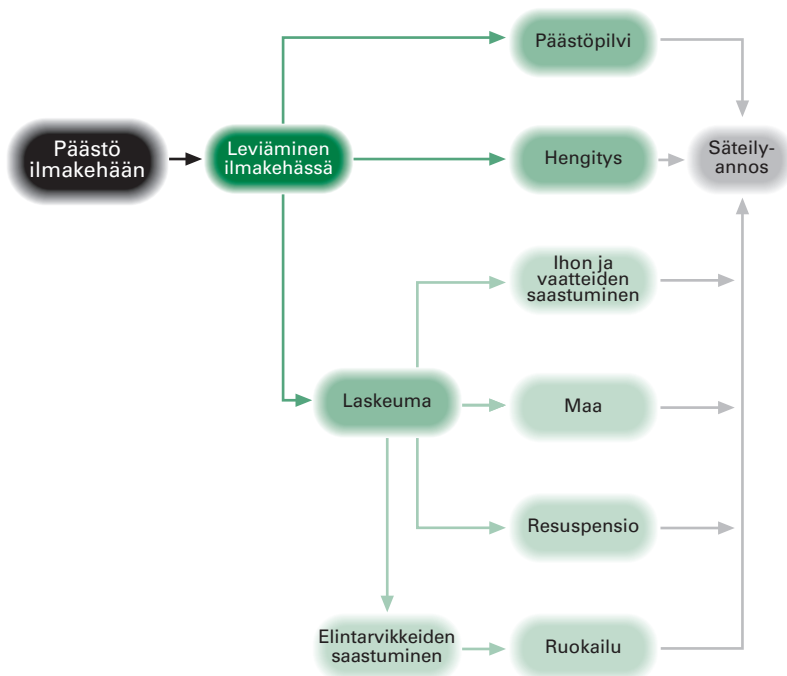
Säteilyaltistukset

Onnettomuudessa ilmaan päässeet radioaktiiviset aineet leviävät tuulen alapuolelle päästövanana (päästöpilvenä), joka voidaan havaita vain säteilymittauksin. Päästöstä aiheutuvat radioaktiivisten aineiden pitoisuudet ilmassa eri etäisyyksillä leviämissuunnassa riippuvat päästön määrästä, päästökorkeudesta, tuulen nopeudesta, ilmakähen stabiilisuudesta (eli ilmapvirtausten pyörteisyydestä), maastosta, radioaktiivisten aineiden laskeutumisesta maan pinnalle ja muista tekijöistä.

Päästön seurauksena väestölle voi aiheutua säteilyaltistusta eri tavoin. Altistumisreittejä on esitetty kuvassa 5.2.

Onnettomuuden ensimmäisessä vaiheessa aiheutuu ulkoista säteilyä päästövanan sisältämistä radioaktiivisista aineista ja sisäistä säteilyä kehoon hengitetyistä radioaktiivisista aineista. Päästövanasta maanpinnalle siirtyneistä aineista eli laskeumasta aiheutuu ulkoista säteilyä jonkin verran jo ensimmäisessä vaiheessa, mutta laskeuma on ennen kaikkea pitkän aikavälin altistuksen lähde. Pitemmän ajan altistumista voi aiheuttaa sekä laskeuman lähettämä suora ulkoinen säteily että kehoon joutuvista radioaktiivisista aineista tuleva sisäinen säteily. Vesi ja elintarvikkeet voivat saastua suoraan laskeumasta, maanpinnalle laskeutuneita aineita voi joutua uudestaan hengitettävään ilmaan ja laskeumaan sisältyviä aineita voi kulkeutua maitoon ja muihin elintarvikkeisiin.

Suoria terveyshaittoja aiheuttavia suuria henkilökohtaisia säteilyannoksia (yli 500 mSv) voisi aiheutua vain erittäin epätodennäköisten tapahtu-



KUVA 5.2 Väestön altistuminen säteilylle onnettomuustilanteessa ilmakehään vapautuneen päästön seurauksena – pääaltistusreitit (IAEA 1996)

makulkujen seurauksena, jolloin reaktori vaurioituisi pahoin ja radioaktiivisia aineita vapautuisi paljon suojarakennuksesta ilmakehään. Tshernobylin onnettomuuden seurauksena evakuoitujen ympäristön asukkaiden säteilyannosten on arvioitu olleen enimmäkseen alle 250 mSv ja joillakin harvoilla 300–400 mSv. Three Mile Island 2:n onnettomuuden suurimmaksi väestön yksilön annokseksi on arvioitu 0,85 mSv.

Ydinvoimalaitosten suunnittelussa huomioon otettaville oletetuille onnettomuuksille on Suomessa asetettu ympäristön asukkaan vuotuisen säteilyannoksen raja-arvoksi 5 mSv. Samoin vakavalle reaktorionnettomuudelle, jossa huomattava osa reaktorissa olevasta polttoaineesta vaurioituu, on asetettu päästöraja (katso kohta 3.3). Raja-arvon mukaisesta päästöstä ei aiheudu väestölle suoria terveyshaittoja eikä pitkäaikaisia rajoituksia laajojen maa- ja vesialueiden käytölle. Päästörajan ylittymisen mahdollisuuden on oltava erittäin pieni.

Suojelutoimenpiteiden avulla voitaisiin välttää tai rajoittaa väestölle aiheutuvia säteilyannoksia (katso kohta 5.7).

5.7 | Valmiussuunnitelmat ja -järjestelyt

Vakavan säteilyvaaratilanteen todennäköisyys Suomessa on pieni. Koska onnettomuuden riski on kuitenkin olemassa, on sekä laitosten käyttäjillä että viranomaisilla valmiussuunnitelmat onnettomuuden varalle. Valmiussuunnittelussa on otettu huomioon muun muassa onnettomuudet kotimaisissa ydinvoimalaitoksissa, lähialueiden ydinvoimalaitoksissa, radioaktiivisten aineiden kuljetuksissa sekä ydinkäyttöisissä aluksissa.

Kotimaisten ydinvoimalaitosten valmiusjärjestelyt

Ydinvoimalaitos huolehtii valmiusorganisaatiosta ja valmiusjärjestelyistä laitoksen alueella valmiussuunnitelmansa mukaan. Voimalaitosta käytetään normaalista poikkeavissa tilanteissa ennalta laadittujen häiriö- ja hätätilanneohjeiden mukaisesti. Onnettomuustilanteessa voimalaitoksen valmiusorganisaation tehtävänä on

- estää onnettomuuden eteneminen tai rajoittaa sitä ja saattaa laitos turvalliseen tilaan
- estää tai rajoittaa radioaktiivisten aineiden hallitsemattomasta vapautumisesta aiheutuvia säteilyvaikutuksia laitoksella, laitosalueella ja ympäristössä
- tehdä onnettomuusilmoitukset paikalliselle pelastusviranomaiselle ja STUKille
- osallistua pelastus- ja sammutustoimintaan voimalaitoksen alueella
- hälyttää väestö tarvittaessa voimalaitoksen lähialueella (0–5 km)
- osallistua säteilymittaukseen voimalaitosalueella ja sen lähiympäristössä
- antaa tietoja onnettomuuden kehittymisestä ja muuta asiantuntija-apua
- toimeenpanna tarvittaessa evakuointi voimalaitoksen alueella pelastusorganisaation tukemana.

Voimalaitoksen valmiusorganisaatiota johtaa valmiuspäällikkö. Aluksi hänen vastuullaan on myös pelastustoiminnan johtaminen, kunnes pelastusviranomainen ilmoittaa ottavansa vastuun. Voimalaitoksen valmiuspäällikölle kuuluu myös väestönsuojelua koskevien suositusten antaminen pelastusviranomaiselle, kunnes Säteilyturvakeskus ilmoittaa ottavansa vastuun suosituksista.

Viranomaisten valmiusjärjestelyt

Ilmoitusjärjestelyt

On tärkeää saada tieto uhkaavasta tilanteesta mahdollisimman nopeasti, jotta tarvittaviin suojelutoimiin voidaan varautua. STUKilla on ennalta sovitut ilmoitusmenettelyt maamme ydinvoimalaitosten kanssa. Voimalaitos ilmoittaa tapahtumista STUKin päivystäjälle sekä puhelimitse että faksilla. STUKin valmiushenkilöstö kokoontuu hälytyksen saatuaan valmiuskeskukseen, josta on suorat puhelin- ja tietoliikenneyhteydet kotimaisille ydinvoimalaitoksille. Tärkeimmät prosessi- ja säteilytiedot (käytössä olevat turvajärjestelmät ja niiden tila, reaktorin teho-taso sekä ympäristön ja laitoksen säteilytiedot) välittyvät voimalaitok-selta tiedonsiirtolinjoja pitkin automaattisesti STUKin tietokoneille.

Suomella on myös säteily- ja ydinonnettomuuksien ilmoittamista koske-via sopimuksia naapurimaiden ja kansainvälisten järjestöjen kanssa. Esi-merkiksi Venäjän lähivoimaloissa on onnettomuusilmoitusten tekemistä nopeuttavat hälytysjärjestelmät. Viestit välitetään satelliitin kautta, joten mahdolliset viat paikallisessa puhelinverkossa eivät estä onnettomuus-viestin lähettämistä. STUK saa poikkeustilanteessa myös näiden ydin-voimalaitosten ympäristön säteilyvalvonnan tiedot. Kansainvälisistä val-miusharjoituksista saatujen kokemusten perusteella organisaatioiden toi-mintatapoja ja tiedonsiirtoyhteyksiä kehitetään jatkuvasti.

Säteilyturvakeskus on kansallinen yhdyspiste, joka ottaa vastaan kaikki säteilyyn liittyvät hälytykset ja ilmoitukset. Viestin vastaanottaminen var-mistetaan ympärivuorokautisella päivystyksellä. Toiminta käynnistetään viiveettä. STUK hälyttää muun muassa keskeisten ministeriöiden päivys-täjät. Ministeriöt hälyttävät oman sekä tarvittaessa alue- ja paikallista-son organisaatiot. Tarvittaessa myös STUK lähettää hälytysviestin pelas-tustoiminnan alueellisiin hätäkeskuksiin. STUK tiedottaa tilanteesta ja käynnistämistään toimista myös tiedotusvälineille. Viranomaisten työn-jako säteilyvaaratilanteissa on esitetty taulukossa 5.3.

Onnettomuuden vaikutus- alue ja suojautuminen

Onnettomuuden vaikutukset voivat ulottua laajalle alueelle vain, jos radioaktiivisia kaasuja ja hiukkasia vapautuu runsaasti ilmaan. Näin voi tapahtua ydinräjäytyksessä tai vakavassa ydinvoimalaitosonnettomuudessa. Aineet kulkeutuvat ilmassa tuulen mukana. Tuulen nopeus määrää päästön kulkunopeuden. Tuulen suunta, ilmakehän stabiilisuus ja mahdolliset saateet määräävät saastuvan alueen (katso myös kohta 5.6).

Suomen säteilytilannetta valvotaan koko maan kattavalla mitausasemien verkolla, jossa on noin 300 automaattista säteilyvalvonta-asemaa (katso kirja 2, luku 8). Säätilan, laitostilanteen sekä säteilyvalvonnan perusteella voidaan arvioida, milloin, missä ja minkälainen suojautuminen on tarpeen. Mahdollisia suojelutoimia on esitetty kuvassa 5.3. Jos ulkoilmaan pääsee radioaktiivista jodia, oikea-aikaisesti nautittu joditabletti suojaa kilpirauhasta. Päästön ylikulun ajaksi suojaudutaan pääasiallisesti sisätiloihin. Tällöin välttyään radioaktiivisen ilman hengittämislta ja päästövanan sisältämien radioaktiivisten aineiden lähettämältä suoralla säteilyltä. Ulkoista annosnopeutta vastaavat suojelutoimenpiteet on esitetty taulukossa 5.4.

Sisäasiainministeriö

vastaa suojelutoimista laajoja alueita koskevista säteilyvaaratilanteista. Ministeriö perustaa johtokeskuksen, johon kutsutaan eri hallinnalojen edustajat. Se koordinoi toimintaa ja huolehtii siitä, että tieto kokonaistilanteesta välittyy eri toimialoille.

Säteilyturvakeskus

muodostaa tilannekuvan onnettomuudesta ja säteilytasoista, määrittää vaara-alueen ja arvioi tilanteen aiheuttamat haitalliset vaikutukset sekä antaa suositukset suojelutoimista. STUK välittää tietoa tilanteesta koti- ja ulkomaisille yhteistyötahoille ja tiedotusvälineille. Lisäksi STUK neuvoo teollisuutta, kauppaa sekä liikenne- ja tulliviranomaisia haittavaikutusten vähentämisessä ja selvittää tarpeen elintarvikkeiden käyttörajoituksille. STUK vastaa myös säteilyasiantuntemukseen liittyvästä kansainvälisestä avusta.

Ilmatieteen laitos

arvioi ja ennustaa radioaktiivisten aineiden kulkeutumisen ilmakehässä sekä ylläpitää säteilyvalvontaan liittyvää sääpalvelua. Se antaa STUKille meteorologista asiantuntijapua tilannekuvan muodostamisessa ja toimittaa pelastustoiminnassa tarvittavia säätietoja.

Maa- ja metsätalousministeriö

antaa maa- ja metsätaloutta koskevia määräyksiä ja ohjeita. Ministeriön hallinnon alainen Elintarvikevirasto vastaa elintarvikevalvonnan johtamisesta. Ydinonnettomuuden jälkeisessä tilanteessa EU säättää tarvittaessa asetuksella radioaktiivisten aineiden enimmäispitoisuudet kaupan oleville elintarvikkeille ja rehuille. Suomessa EU-yhteysviranomaisena on Elintarvikevirasto.

Kauppa- ja teollisuusministeriö

huolehtii poikkeusoloissa energiahuollosta, varmuusvarastoinnista ja ulkomaankaupasta.

Sosiaali- ja terveysministeriö

vastuulla on, että terveyden- ja sosiaalihuollon perustoiminnot jatkuvat myös säteilyvaaratilanteessa. Ministeriö antaa määräykset juomaveden laadusta ja sen valvonnasta.

Puolustusvoimat

osallistuu pelastustoimintaan antamalla käyttöön tarvittavaa kalustoa, henkilöstöä ja erityisasiantuntijapalveluja.

Liikenne- ja viestintäministeriö

vastaa kuljetusreittejä koskevista ohjeista rekka-, lento- ja junaliikenteelle sekä merenkululle. Lisäksi se vastaa viestiyhteyksien ylläpidosta ja etuoikeusjärjestelyistä.

Ulkoasiainministeriö

huolehtii tehostetusta tiedotuksesta ulkomailla oleville Suomen edustustoille ja Suomessa oleville ulkovaltojen edustustoille.

Lääninhallitukset

valvovat pelastustoimintaa ja ohjaavat alaistensa sekä valvomiensa viranomaisten toimintaa muiden aluehallinto- viranomaisten kanssa. Lisäksi lääninhallitukset välittävät ministeriöihin tietoa tilanteen etenemisestä alueellaan.

Vaara-alueen kunnat

toteuttavat pelastustoimen ja muiden hallintoalojen päätökset ja ohjeet. Kunnat huolehtivat osaltaan tiedottamisesta alueensa asukkaille. Pelastusviranomaiset johtavat pelastustoimintaa sekä huolehtivat eri viranomaisten ja yhteisöjen pelastustoimien yhteensovittamisesta alueellaan.

TAULUKKO 5.3 Viranomaisten työnjako säteilyvaaratilanteissa

Suojelutoimenpide	Operatiivinen toimenpidetaso ulkoisena annosnopeutena
Joditablettien nauttiminen	100 µSv/h aikuiset, 10 µSv/h lapset
Sisällesuojautuminen	100 µSv/h
Kulkurajoitukset	100 µSv/h
Evakuointi	1000 µSv/h (laskeuman aiheuttama)
Kotieläintuotannon suojaaminen	1 µSv/h

Taulukko 5.4 Ohjeelliset operatiiviset toimenpidetasot suojelutoimille säteilyvaaratilanteessa

Toimenpidetasot koskevat tilannetta, jossa säteilyä aiheuttavan radioaktiivisen saasteen koostumusta ei tunneta (ohje VAL 1.1). Konkreettisessa säteilytilanteessa toimenpidetasoja voi olla tarkoituksenmukaista muuttaa, kun tilanteen laadusta ja vakavuudesta on riittävästi tietoa.

Uhkakuvia ja suojelutoimenpiteitä on kuvattu tarkemmin kirjan 2 luvussa 9.

Radioaktiivinen jodi kulkeutuu hengityksen mukana keuhkoihin ja kertyy lopulta kilpirauhaseen. Kilpirauhasen saama säteilyannos voi aiheuttaa rauhasen kasvaimia tai vajaatoimintaa.

Radioaktiivisen jodin kertymistä kilpirauhaseen voi estää nauttimalla kaliumjodidia sisältävän joditabletin. Tabletin sisältämä ei-radioaktiivinen jodi kyllästää kilpirauhasen. Tällöin radioaktiivinen jodi ei imeydy rauhaseseen. Joditabletti nautitaan vain viranomaisen kehotuksesta oikean ajoituksen varmistamiseksi. Liian aikaisin tai myöhään nautittuna tabletin suojavaikutus heikkenee.

Mistä saa joditabletteja

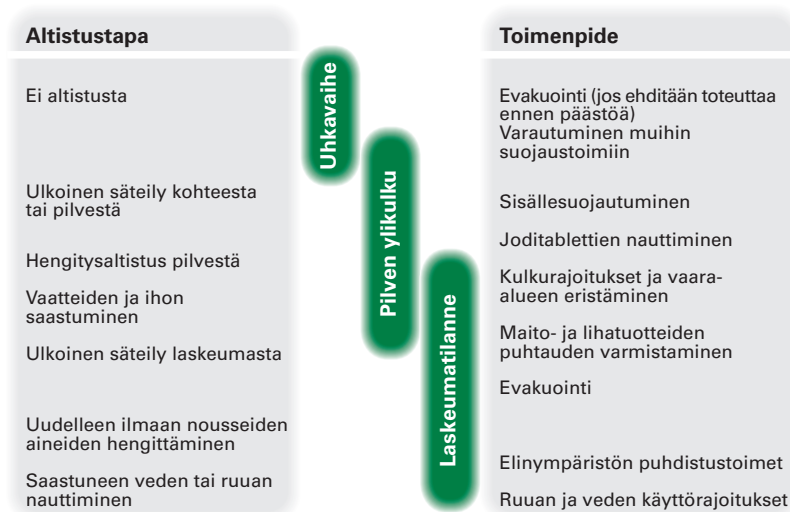
- Yrityksiä ja laitoksia sekä asuintaloja kehotetaan hankkimaan joditabletit työntekijöiden, asukkaiden ja laitoksessa olevien tarpeeseen.
- Terveyskeskuksia on kehotettu pitämään varalla joditabletteja, ja väestöä on kehotettu hankkimaan niitä kotiinsa ja loma-asuntoihinsa.
- Joditabletteja saa ostaa apteekeista.
- Voimayhtiöt huolehtivat joditablettien hankkimisesta ja ennakkojakelusta viiden kilometrin säteellä ydinvoimalaitoksesta.

Pelastustoimilain ja -asetuksen mukaan rakennusten omistajan ja haltijan, teollisuus- ja liiketoiminnan harjoittajan, viraston, laitoksen ja muun yhteisön on laadittava suunnitelma vaaratilanteiden varalle. Suunnitelmassa on selvitettävä vaaratilanteet ja niiden vaikutukset, suojautumismahdollisuudet ja tarvittava suojelumateriaali, kuten joditabletit.

Kun päästö on loppunut ja ohittanut alueen (tai suuntautuu muualle), ilmassa ei ole enää paljon radioaktiivisia aineita. Sen sijaan niitä on laskeutuneena maahan ja rakennusten pinnoille. Laskeumassa voi olla suuriakin paikallisia eroja. Esimerkiksi sade lisää maahan putoavien hiukkasten määrää. Myöhäisvaiheessa painopiste on elintarvikkeista ja elinympäristöstä saatavan altistuksen vähentämisessä. STUK ja asianomaiset ministeriöt antavat ohjeita ja suosituksia itse tuotettujen elintarvikkeiden ja luonnontuotteiden käyttäjille. Elintarviketuottajille ja -tuotantolaitoksille annetaan ohjeita tuotteiden puhtauden varmistamiseksi. Tietoa välittävät myös työvoima- ja elinkeinokeskukset, metsähallitus, metsäkeskukset, ympäristökeskukset, riistanhoitopiirit ja -yhdistykset ja kalastuspiirit.

Tiedottaminen väestölle

Säteilyvaaratilanteessa nopeasti aloitetulla, oikeita tietoja välittävällä ja yhdenmukaisella tiedottamisella voidaan ehkäistä huhujen ja virheellis-



KUVA 5.3 Mahdollisia suojelutoimia säteilyvaaratilanteessa. Uhkakuvia ja suojelutoimenpiteitä on kuvattu tarkemmin kirjan 2 luvussa 9.

ten tietojen leviämistä. Jos säteilyvaaratilanne vaatii nopeaa suojautumista, tiedotetaan siitä ihmisille ulkohälyttimillä annettavalla yleisellä vaaramerkillä. Tällöin on siirryttävä sisätiloihin ja kuunneltava televisiota ja radiota, joissa annetaan muut toimintaohjeet esimerkiksi joditablettien ottamisesta, elintarvikkeiden suojaamisesta sekä ulkona liikkumisesta. Kiireelliset tiedotteet tulevat kaikilta lähetykskanavilta ja ne katkaisevat muut ohjelmälähetykset.

Säteilyvaaratilanteessa saa tietoa

- Tiedotusvälineistä; viranomaiset antavat ohjeet väestölle ja tietoa tapahtumista radion ja TV:n välityksellä.
- YLEn teksti-TV:n säteilyturvasivulta 197
- Internetsivuilta osoitteista www.stuk.fi ja www.pelastustoimi.net

Yleiset toimintaohjeet säteilyvaaratilanteen varalle ovat puhelinluettelon alkusivuilla.

KIRJALLISUUTTA

Libman J. Elements of nuclear reactor safety, Les Ulis: Institut de Protection et de Sûreté Nucleaire, Les Editions de Physique, 1996.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 Report. New York: United Nations, 2000.

OECD Nuclear Energy Agency. Chernobyl: Ten years on radiological and health impact. An assessment by the NEA Committee on Radiation Protection and Public Health. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 1995.

International Atomic Energy Agency. Procedures for conducting probabilistic safety assessments of nuclear power plants (Level 2): Accident progression, containment analysis and estimation of accident source terms. IAEA Safety Series No. 50-P-8. Vienna, 1995.

International Atomic Energy Agency. Procedures for conducting probabilistic safety assessments of nuclear power plants (Level 3): Off-Site Consequences and Estimation of Risks to the Public. IAEA Safety Series No. 50-P-12. Vienna, 1996.

Säteilysuojelun toimenpiteet säteilyvaaratilanteessa, Ohje VAL 1.1. Helsinki: Säteilyturvakeskus, 2001.