

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Ydinonnettomuuksien historia ja niiden syyt

History and Causes of Nuclear Accidents

Työn tarkastaja: Vesa Tanskanen

Työn ohjaaja: Vesa Tanskanen

Lappeenranta 22.1.2019

Santeri Vento

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Santeri Vento

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Vesa Tanskanen

Kandidaatintyö 2018

54 sivua, 1 kuva, 2 taulukkoa, 1 yhtälö

Hakusanat: kandidaatintyö, ydinonnettomuudet, ydinturvallisuus

Tässä kandidaatintyössä käsitellään historian saatossa tapahtuneita ydinonnettomuuksia. Työ on kirjallisuusselvitys, jossa lähdeaineistona on käytetty asiantuntijakirjallisuuden lisäksi eri maiden valvovien viranomaisten virallisia raportteja, sekä myös riippumattomien kansainvälisten tutkintaryhmien raportteja onnettomuuksista.

Työn tavoitteena on luoda selkeä ja kattava kokonaiskuva tiedossa olevista ydinonnettomuuksista ja niiden keskeisimmistä syistä ja vaikutuksista ydinturvallisuuden kehitykseen. Työssä käydään vakavien ydinvoimalaitosonnettomuuksien lisäksi läpi myös muita lievempiä tapahtumia, joiden on voitu katsovan vaikuttaneen ydinturvallisuuden kehitykseen.

Työssä onnettomuuksiin johtaneita syitä pyritään tarkastelemaan mahdollisimman monipuolisesti. Onnettomuuksia käsitellessä otetaan huomioon tapahtuman aikainen tietämys, reaktorisuunnittelu, mahdollinen sähköntuotantovaatimusten tai sotilaallisen käytön luoma poliittinen painostus, sekä inhimilliset virheet ja niiden vaikutukset onnettomuuksien syntyyn. Työn lopussa pohditaan yleisesti ydinturvallisuuden ja turvallisuuskulttuurin kehitystä ajan saatossa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Ensimmäiset säteilytapaturmat	8
3 Sotilaskäytössä olleiden ydinlaitosten onnettomuuksia	11
3.1 Windscalen onnettomuus 1957	11
3.2 SL-1 tutkimusreaktorin onnettomuus 1961	13
3.3 Kyshtymin onnettomuus 1957.....	14
4 Three Mile Islandin ydinvoimalaonnettomuus 1979	16
4.1 Tapahtumien kulku.....	16
4.2 Onnettomuuden syyt ja inhimilliset virheet	19
4.3 Onnettomuuden vaikutus nykytilanteeseen.....	21
5 Tsernobylin ydinvoimalaonnettomuus 1986	23
5.1 Tapahtumien kulku.....	23
5.2 Laitoksen suunnitteluvirheet	26
5.3 Henkilöstön tekemät virheet.....	27
5.4 Tehdyt parannukset ja vaikutus nykytilanteeseen	28
6 Fukushima Daiichin ydinvoimalaonnettomuus 2011	30
6.1 Tapahtumien kulku.....	30
6.2 Onnettomuuden syyt.....	32
6.3 Onnettomuuden vaikutus nykytilanteeseen.....	34
7 Muita ydinturvallisuuden kehitykseen vaikuttaneita tapahtumia	36
7.1 Tulva Ågestan ydinvoimalaitoksella 1969	36
7.2 Browns Ferryn tulipalo 1975.....	37
7.3 Barsebäckin vaaratilanne 1992.....	38
7.4 9/11 -iskujen vaikutus ydinvoimalaitosten turvallisuuteen	39
7.5 Suomessa tapahtuneita ydintapahtumia.....	40
8 Kirjallisuusselvityksen perusteella tehtyjä päätelmiä	42
9 Yhteenveto	48
Lähdeluettelo	50

LYHENNELUETTELO

AEC	United States Atomic Energy Commission
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
BWR	Boiling Water Reactor
EIA	United States Energy Information Administration
IAEA	International Atomic Energy Association
INES	International Nuclear Event Scale
INSAG	International Nuclear Safety Advisory Group
LB-LOCA	Large-Break Loss-of-Coolant Accident
LOCA	Loss-of-Coolant Accident
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry
NISA	Nuclear and Industrial Safety Agency
NRA	Nuclear Regulatory Authority
NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
OTSG	Once-Through Steam Generator
PORV	Power Operated Relief Valve, kauko-ohjattu varoventtiili
PRIS	Power Reactor Information System
PWR	Pressurized Water Reactor, painevesireaktori
RBMK	Grafiittihidasteinen kanavatyyppinen reaktori
SAM	Serious Accident Management
STUK	Säteilyturvakeskus
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
TMI	Three Mile Island
WNA	World Nuclear Association
YVL	Ydinturvallisuusohjeet

1 JOHDANTO

Ydinvoima energiantuotantomuotona herättää sen hyvistä puolista huolimatta ihmisissä paljon ristiriitaisia mielipiteitä. Tavallisten ihmisten mielikuvissa ydinvoima ei ole kovin yksinkertainen tapa tuottaa energiaa, epätietoisuus ydinvoimalaitosten toiminnasta voi luoda epäluottamusta ydinvoimaa kohtaan. Erittäin merkittävänä tekijänä kielteiseen suhtautumiseen ydinvoimaa kohtaan voidaan pitää menneisyydessä tapahtuneita vakavia ydinonnettomuuksia, sekä pelkoa niiden toistumisista.

Tässä kandidaatintyössä esitellään ydintapahtumia ja -onnettomuuksia eri ajanjaksoilta radioaktiivisuuden ja säteilyn löytämisestä 1800-luvun lopulta asti aina nykyhetkeen saakka. Työssä käsitellään myös sotilasreaktorien onnettomuuksia ja niiden merkitystä ydinturvallisuuden kehitykselle. Erytishuomiota työssä kiinnitetään kolmeen tunnetuimpaan ydinvoimalaitosonnettomuuteen; Three Mile Islandin, Tsernobylin ja Fukushima Daiichin onnettomuuksiin. Työssä pohditaan myös lievempiä ydintapahtumia, ja niiden vaikutuksia ydinturvallisuuden kehitykseen.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on luoda kattava ja selkeä kokonaisuus historian merkittävimmistä ydintapahtumista sekä niihin johtaneista syistä. Keskeisenä tavoitteena on myös selvittää, mitä parannuksia on tapahtunut ydinturvallisuudessa suunnittelun, teknologian, lainsäädännön ja henkilöstön turvallisuuskulttuurin osalta. Ydintapahtumia on sattunut historiassa siinä määrin, ettei jokaista tapahtumaa ole käsitelty tässä kandidaatintyössä. Työssä on esitelty pääasiassa ne tapahtumat, joiden on katsottu kehittäneen merkittävästi ydinturvallisuutta. Lähteinä työssä on käytetty asiantuntijakirjallisuuden lisäksi virallisia raportteja.

Ennen historiallisten tapahtumien käsittelyä on syytä selventää muutama käsite ydintapahtumiin liittyen. Ydinlaitostapahtumien vakavuutta on mitattu 1990-luvulta alkaen seitsemänportaisella INES-asteikolla (International Nuclear Event Scale), jossa luokitus 1 on lievin tapahtuma ja luokitus 7 erittäin vakava onnettomuus (Sandberg 2004, s. 208). Asteikko on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Kansainvälinen ydintapahtumien vakavuusasteikko INES (Sandberg 2004, s. 208).

INES-luokitus	Tapahtumakategoria
7 – Erittäin vakava onnettomuus	Luokkien 4-7 ydintapahtumat luokitellaan onnettomuuksiksi
6 – Vakava onnettomuus	
5 – Ympäristölle vaaraa aiheuttava onnettomuus	
4 – Laitosonnettomuus	
3 – Vakava turvallisuuden vaikuttava tapahtuma	Luokkien 1-3 ydintapahtumat luokitellaan turvallisuutta heikentäneiksi tapahtumiksi
2 – Merkittävä turvallisuuden vaikuttava tapahtuma	
1 – Poikkeuksellinen turvallisuuden vaikuttava tapahtuma	
0 – Ei merkitystä ydin- eikä säteilyturvallisuuden kannalta	Luokan 0 ydintapahtumat luokitellaan poikkeuksellisiksi tapahtumiksi

Taulukosta 1 nähdään selkeästi, että luokkien 4-7 tapahtumissa puhutaan ydinonnettomuuksista ja näitä lievempään luokitukseen kuuluvia tapahtumia ydintapahtumiksi. Huomionarvoista on myös se, että INES-asteikon käyttö ei rajoitu pelkästään ydinvoimalaitoksien tapahtumiin vaan se kattaa myös radioaktiivisten aineiden kuljetuksissa, lääketieteellisessä käytössä, teollisuuden radiografiassa ja radioaktiivisten jätteiden käsittelyssä sattuneet tapahtumat (IAEA 2013, 1).

Tässä kandidaatintyössä erittäin tärkeä käsite on ydinturvallisuus. Ydinturvallisuudella tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla ehkäistään ydintapahtumien syntymistä. Tätä voidaan

toteuttaa niin teknisen suunnittelun kuin ajan tasalla olevan henkilökunnan ohjeistuksen avulla. Ydinvoimalaitosten suunnittelussa onnettomuuksien estäminen on ensisijainen tavoite, mutta myös onnettomuuksiin tulee varautua ja niiden haittavaikutuksia täytyy pyrkiä lieventämään. Ydinturvallisuuteen kuuluu myös se, että ydinjätteiden huolto on asianmukaista. Ydinenergian käyttö ei saa myöskään edistää ydinaseiden leviämistä. (Sandberg 2004, 90-91)

Työssä tärkeä käsite on myös turvallisuuskulttuuri, joka on ollut keskeisessä osassa monissa tapahtuneissa ydinonnettomuuksissa ja ydinturvallisuuden kehityksessä. Kansainvälisen atomienergiajärjestö IAEA:n (International Atomic Energy Agency) alaisuudessa toimineen INSAG:in (International Nuclear Safety Advisory Group) mukaan turvallisuuskulttuuri on organisaatioiden ja yksilöiden asenteiden ja käyttäytymisen tulos, jolla osoitetaan ydinvoimalaitoksen turvallisuuteen liittyvien kysymyksien saavan ensisijaisen tärkeyden niiden merkityksen takia (INSAG 1991, 1). Turvallisuuskulttuuriin kuuluu keskeisesti riskien tunnistus ja huomioiminen suunnittelussa ja käytössä, sekä organisaatioiden vastuualueiden selkeys (Sandberg 2004, 92).

2 ENSIMMÄISET SÄTEILYTAPATURMAT

Radioaktiivisuutta ja säteilyä on ollut olemassa koko maapallon historian ajan, mutta ilmiöinä ne löydettiin vasta 1890-luvulla. Vuonna 1895 Wilhelm Röntgen Münchenin yliopistosta julkaisi ensimmäisen kirjoituksen uudesta ilmiöstä, joka tunnettiin myöhemmin nimellä röntgensäteily. Nykyisen Kroatian alueelta Yhdysvaltoihin muuttanut Nikola Tesla oli työskennellyt samoihin aikoihin myös saman ilmiön parissa. Vuoden 1896 aikana hän teki useita kokeita altistamalla itsensä säteille. Kokeista aiheutui hänelle voimakasta ihon ärsytystä, tulehduksia ja rakkuloita. Vuonna 1896 Tesla julkaisi *Electrical Review* -julkaisussa yhteensä kolme artikkelia kokemistaan oireista. Nämä artikkelit olivat ensimmäiset julkaistut kirjoitukset liiallisen säteilyaltistuksen vaaroista. (Mahaffey 2014, 4-7)

Ensimmäinen erittäin vakava säteilytapaturma tapahtui Yhdysvalloissa Thomas Edisonin laboratoriossa röntgensäteilyn tutkimuksen yhteydessä. Vuodesta 1890 asti Edisonin assistentti Clarence Dally oli auttanut Edisonia testaamaan erityyppisiä fluoresoivia maaleja. Kokeiden aikana Dally laittoi kätensä röntgenputken ja fluoroskoopin väliin, jolloin fluoroskoopin maalipinnoitteisessa lasilevyssä näkyi hänen kätensä luiden varjo. Testejä oli paljon ja kumulatiiviseksi altistusajaksi on arveltu satoja tunteja. Fyysisiin oireisiin hän reagoi vaihtamalla altistuvaa kättä. Lopulta pahenevat oireet johtivat Dallyn molempien käsien amputoimiseen. Tästä huolimatta hän menehtyi syöpään vuoden 1904 lokakuussa. Edison keskeytti tapahtuman seurauksena tutkimuksensa. (Mahaffey 2014, 8-9)

Alfasäteilevää radiumia alettiin 1900-luvun alkupuolella käyttää syöpien hoitoon, sillä se pystyi tappamaan syöpäsoluja, mutta alfasäteilyn lyhyen kantaman vuoksi vahingot rajoittuivat vain halutuille alueille (Mahaffey 2014, 11). Radium sai osin tästä johtuen ihmeaineen maineen. Radium myös hohtaa pimeässä, joka oli erittäin houkutteleva ominaisuus käyttää esteettisiin tarkoituksiin. Yritykset alkoivat valmistaa erilaisia radiumia sisältäviä tuotteita, josta aiheutui ikäviä seurauksia ajan kuluessa. (Mahaffey 2014, 26-27)

Radiumin aiheuttamista säteilytapaturmista ehkä tunnetuin on niin kutsuttujen radiumtyttöjen tapaus. Nimityksellä tarkoitetaan kellotehtaan työntekijöitä, jotka maalasivat kellotauluja pimeässä hohtavalla radiumia sisältävällä maalilla. Kellotaulua maalatessaan he suoristivat harjaksen huulillaan. 1920-luvun alussa yhdeksän maalaajaa oli menehtynyt ja useilla oli vakavia oireita etenkin leuan seudulla. (Mahaffey 2014, 27-28) Toinen tunnettu tapaturma oli sosiaaliselta asemaltaan yläluokkaisen Eben Byersin kuolema vuonna 1932. Hän oli ennen kuolemaan johtanutta sairauttaan nauttinut neljän vuoden aikana noin 1400 pullollista radiumia sisältävää Radithor-terveysvettä, johon hänellä oli lääkärin resepti. (Mahaffey 2014, 21-24)

Ydinvoiman historian alkuaikojen tapaturmat johtuivat melko suoraan säteilyn ja radioaktiivisuuden uutuudesta ilmiönä, sekä tästä johtuvasta tiedon puutteesta. Radioaktiivisuus ja säteily ovat myös ongelmallisia ilmiötä, sillä niitä ei voi aistein nähdä, korkeintaan tuntee äärimmäisessä altistuksessa. Säteilyaltistus voi aiheuttaa jopa vasta kymmenien vuosien päästä ilmeneviä satunnaisia eli stokastisia haittavaikutuksia, johon kuuluvat esimerkiksi syövät ja perinnölliset haitat. Ilmenneitä haittavaikutuksia ei voida yhdistää suoraan säteilyaltistukseen, vaan esimerkiksi syöpätapausten määrä perustuu tilastotieteeseen. (Paile 2002, 44-45) 1900-luvun alkupuolella laadukasta tilastotietoa haittavaikutuksista ei ollut saatavilla ja näiden tietojen kerääminen olisi kestänyt joka tapauksessa kymmeniä vuosia. Tämä on varmasti vaikuttanut suuresti säteily- ja ydinturvallisuuden melko hitaaseen kehitykseen ydinvoiman historian alkupuolella.

Kehityksestä huolimatta vakavia onnettomuuksia säteilylähteiden kanssa on tapahtunut myöhemminkin. Esimerkiksi vuonna 1987 Brasilian Goianiassa kaksi jätteiden keräilijää löysi kaksi vuotta aiemmin pois muuttaneen syöpäklinikan tiloista hylätyn Cs-137 säteilylähteen. Erottaessaan lähteestä metalliosia he rikkoivat lähdetä ympäröineen kapselin, ja sisällä ollut cesiumsuolapulveri pääsi leviämään ympäristöön ja ruoan mukana ihmisten elimistöihin. Tämän seurauksena neljä ihmistä kuoli, 54 joutui sairaalaan ja yli sadalle tuhannelle ihmiselle tehtiin kontaminaatiomittaus. (Pukkila 2004, 339) Goianian tapaus on hyvä esimerkki säteilylähteiden huolellisen säilytyksen ja käsittelyn tärkeydestä.

1900-luvun alun tapahtumilla ja ihmisten altistumisella säteilylle ja radioaktiivisille aineille on ollut kuitenkin kauaskantoisia vaikutuksia säteilyturvallisuuden kehitykseen. Säteilyn ja radioaktiivisten aineiden vaarallisuus tunnistettiin yleisesti, ja niiden käyttöä alettiin valvoa tarkemmin. Konkreettisina esimerkkeinä sääntelystä voidaan pitää esimerkiksi kansallisia valvovia viranomaisia ja heidän vaatimiaan lupamenettelyjä säteilylähteitä käyttäville toimijoille. Keskeiseksi periaatteeksi säteilyn käytölle muodostui ajan niin kutsuttu ALARA-periaate (As Low As Reasonably Achievable), jonka mukaan säteilyn käytöstä on oltava enemmän hyötyä kuin haittaa (Sandberg 2004, 91).

3 SOTILASKÄYTÖSSÄ OLLEIDEN YDINLAITOSTEN ONNETTOMUUKSIA

Toisen maailmansodan kynnyksellä 1930-luvun lopulla löydettiin uusi fysikaalinen ilmiö, fissio. Hyvin pian ymmärrettiin ilmiön potentiaali tuottaa täysin uudella tavalla energiaa joko väestön tarpeisiin tai sotilaallisiin tarkoituksiin. Vuonna 1942 Chicagossa saatiin aikaiseksi ensimmäinen hallittu ketjureaktio ydinreaktorissa (Sandberg 2004, 41). Suurelle yleisölle raskaiden ytimien halkeamisesta syntyvä voima tuli selväksi toisen maailmansodan lopussa, kun Yhdysvallat pudotti vuonna 1945 Japaniin kaksi atomipommia.

Ydinvoimalaitostekniikan kehityksen alkuvaiheessa tutkimuksissa oltiin enemmän kiinnostuneita ydinasetuotannon, kuin sähköntuotannon mahdollisuuksista. Ydinasetuotannosta muodostui monien maiden teknologinen kärkihanke, ja kansallisten tavoitteiden saavuttamiseksi turvallisuus oli tällöin toissijaista. Seuraavissa osiossa esitellään onnettomuuksia, joita tapahtui sotilastarkoitukseen käytetyissä ydinlaitoksissa.

3.1 Windscalen onnettomuus 1957

Vuonna 1957 Englannin pohjoisosassa sijaitsevassa Windscalessa tapahtui länsimaiden ensimmäinen laajoja ympäristövaikutuksia aiheuttanut ydinvoimalaitosonnettomuus. Laitoksen kaksi reaktoria olivat molemmat grafiittihidasteisia ja ilmajäädysteisiä, ja ne oli valjastettu plutoniumin tuotantoon sotilaskäyttöä varten. Hidasteena käytetty grafiitti voi varastoida neutronien liike-energiaa muodostaen niin sanottua Wigner-energiaa. Tämän varastoituneen energian purku täytyy tapahtua hallitusti, sillä se voi johtaa grafiitin lämpötilan voimakkaaseen nousuun. Ilmiötä ei tunnettu laitoksen rakentamisen aikaan, mutta onnettomuusvuonna 1957 ilmiö oli jo tiedossa. Laitoksen instrumentointia ei kuitenkaan kehitetty, eikä grafiitin lämpötilaa kyetty valvomaan täysin luotettavasti joka kohdassa. (Sandberg 2004, 217-218)

Windscalen laitosyksikkö 1:llä oli käynnistynyt 7.10.1957 varastoituneen Wigner-energian purkamisen, joka on useita päiviä kestävä toimenpide (Mahaffey 2014, 173). Operaatioissa grafiittia lämmitetään tasaisin välein, jotta energian purkautuminen tapahtuu hallitusti. Ohjaajat olivat kasvattaneet grafiitin lämpötilaa myöhemmin puutteelliseksi todettujen lämpötilamittausten perusteella liian suureksi, jolloin varastoituneen energian purkautuminen muuttui hallitsemattomaksi. Seurauksena grafiitti syttyi palamaan, joka johti myös polttoaineen syttymiseen. (Sandberg 2004, 217-218) Tulipalo havaittiin 10.10.1957, ja se saatiin hallintaan vasta seuraavana päivänä pumppaamalla vettä reaktoriin. Tämä ei ollut riskitön toimenpide, sillä palamisessa grafiitti ottaa vedestä hapen pois ja jättää jäljelle vetyä, joka suurina konsentraatioina ilmassa räjähdysaltista. Räjähdystä ei kuitenkaan tapahtunut. (Mahaffey 2014, 168-177)

Windscalen reaktorissa ei ollut suojarakennusta, mikä johti huomattavan suuriin radioaktiivisiin päästöihin ympäristöön. Operaattorien koulutus ja ohjeistus todettiin myös puutteelliseksi. Windscalen onnettomuus luokiteltiin jälkikäteen INES-asteikolla luokkaan 5. (Sandberg 2004, 218)

Jälkeenpäin on todettu, että onnettomuuden syntyyn vaikutti toisen maailmansodan jälkeinen valtion painostus plutoniumin tuottamiseen ydinasekehitystä varten. Tämä nähtiin ensimmäisenä prioriteettina, ja tässä hengessä riskien otto oli sallittavaa. Vallalla oli myös kulttuuri, jossa yksittäiset voimalaitokset huolehtivat omista asioistaan, mikä vaikeutti yhtenäisen turvallisuuskulttuurin luomista ja valvovan viranomaisen toimintaa. Lisäksi Windscalen laitokset olivat onnettomuuden aikoihin lyhyen käyttöikänsä loppupäässä, eikä niiden turvallisuuteen enää kiinnitetty suurta huomiota katseiden ollessa jo edistyneemmissä projekteissa. (Simpson 1992, 297)

Windscalen onnettomuutta voidaan pitää monin tavoin merkittävänä tapahtumana ydinvoiman historiassa, vaikka kyseessä ei ollutkaan fissiotehon karkaamisesta johtunut onnettomuus, vaan tulipalo. Onnettomuus paljasti muun muassa huolellisen reaktori-instrumentoinnin, tehon hallinnan ja suojarakennuksen tarpeellisuuden. Myös valtiovallan suunnalta tulevan painostuksen ja yhtenäisen valvonnan puutteen vaikutus

ydinturvallisuuteen nousi esiin. Windscalen kaltaisia avoinpiirisiä ja ilmajäähdytteisiä reaktoreja ei enää valmistettu onnettomuuden jälkeen (Mahaffey 2014, 179).

3.2 SL-1 tutkimusreaktorin onnettomuus 1961

Yhdysvalloissa Idahon osavaltiossa sijaitsi pieni, 3 MW tehoinen armeijan hallussa oleva tutkimusreaktori SL-1 (Sandberg 2004, 216). Vuonna 1961 reaktorin ollessa huollossa yksi huoltomiehistä veti manuaalisesti yhden reaktorin kolmesta säätösauvasta 20 tuumaa ylöspäin, vaikka kyseistä huoltotehtävää varten sauvaa täytyi nostaa vain 2 tuumaa. Täysin selkeää syytä tälle toiminnalle ei löydetty onnettomuuden tutkinnassa. (AEC 1962, 246) Säätösauvan nosto johti reaktorin muuttumiseen nopeasti ylikriittiseksi, ja tehon nousun seurauksena höyryn muodostus ja paineen nousu karkasivat käsistä. Tapahtui höyryräjähdys, jonka seurauksena reaktorin sisäosat hajosivat, reaktori irtosi ulkopuolisista järjestelmistä ja kaikki tapahtumapaikalla olleet kolme henkilöä kuolivat. (Sandberg 2004, 216) Säätösauvan asettumisesta 20 tuuman korkeudelle kului aikaa tuhoisan tehopiikin huippuun arviolta vain joitakin millisekunteja (AEC 1962, 238).

Onnettomuuden seuraukset jäivät suhteellisen pieniksi reaktorirakennuksen estäessä radioaktiivisten aineiden leviämisen ympäristöön, varsinaista suojarakennusta rakennuksessa ei kuitenkaan ollut (AEC 1962, 271). Onnettomuus olisi voinut olla ympäristövaikutuksiltaan paljon vakavampi, mikäli reaktori oli ollut teholtaan suurempi kuin 3 MW, ja se ei olisi ollut onnettomuuden aikaan huoltoseisokissa (Sandberg 2004, 216). SL-1 reaktorin onnettomuutta voidaan kuitenkin pitää erittäin merkittävänä tapahtumana ydinvoiman historiassa. Se on historian vakavin tutkimuskäytössä olleen reaktorin onnettomuus ja samalla ensimmäinen ydinreaktioperäinen reaktorin täydellinen tuhoutuminen. Se paljasti myös säätösauvojen vähyyden erittäin suuren vaaran, koska yksittäisen sauvan nostaminen vaikuttaa silloin tehoon liian suuresti.

3.3 Kyshtymin onnettomuus 1957

Vuoden 1957 syyskuussa tapahtui entisessä Neuvostoliitossa Tseljabinskin alueella historian kolmanneksi tuhoisin ydinonnettomuus. Onnettomuuden takana oli Kyshtymin kaupungin lähellä sijaitsevan Majakin jälleenkäsittelylaitoksen jätesäiliön räjähdys. Näihin maanalaisiin säiliöihin sijoitettiin plutoniumtuotannon erotusvaiheen nestemäiset jätteet, joita alun perin kaadettiin suoraan Ob-jokeen. Säiliöissä oli jäähdytysvesiputkisto radioaktiivisten hajoamisten tuottaman jälkilämmön poistamiseksi. Yhdessä säiliössä saattoi olla jätettä kymmeniä tonneja. (Mahaffey 2014, 282-283)

Yhden säiliön jäähdytysjärjestelmä rikkoontui vuonna 1956, mutta ilmeisesti korjauksen työläyden takia jäähdytysjärjestelmä päätettiin jättää korjaamatta. Säiliö oli ilman jäähdytystä noin vuoden, ja radioaktiivisten aineiden hajoamisen seurauksena lämpötila säiliössä kasvoi noin 350 °C:seen. Vesi kiehui säiliöstä pois, ja säiliössä olleet nitraatit saivat aikaan räjähdysen, joka levitti radioaktiivisia aineita laajalle ympäristöön. (Mahaffey 2014, 283)

Kyshtymin onnettomuudesta ei tiedetty tapahtuman aikoihin Neuvostoliiton ulkopuolella juuri mitään, ja ensimmäinen artikkeli tapahtuneesta julkaistiin neuvostoliittolaisten toimesta vasta vuoden 1976 marraskuussa, 19 vuotta tapahtuneen jälkeen (Mahaffey 2014, 279). On arvioitu, että säteilylle altistui satoja tuhansia ihmisiä, mutta tarkkoja tietoja kuolonuhreista tai säteilylääkitystapausten määristä ei ole saatavilla (Mahaffey 2014, 284-285). Yhtenä syynä vaikenemiseen voi olla onnettomuuden syrjäinen tapahtumapaikka Uralin eteläosassa, jolloin vaikutukset eivät olleet yhtä selkeästi havaittavissa naapurimaissa kuin Tsernobylin onnettomuudessa vuonna 1986. Kyshtymin onnettomuudessa osoitettiin erittäin vakavaa välinpitämättömyyttä turvallisuutta kohtaan ja tapahtuman opetukset jäivät melko vähäiseksi näitä myöhempiä tapahtumia silmällä pitäen.

Sotilaskäytössä olleiden ydinlaitosten onnettomuudet paljastivat monia ydinvoiman käytössä piileviä vaaroja. Onnettomuudet tarjosivat paljon arvokasta tietoa niin

reaktorisuunnittelun kuin turvallisuuskäytäntöjen osalta. Näitä onnettomuuksia voidaan siten pitää merkittävinä tapahtumina ydinturvallisuuden kehityksen kannalta. Historiallisesti kaikkein merkittävimpiä tapahtumia ydinturvallisuuden kannalta olivat kuitenkin kolme tunnetuinta ja vakavinta ydinvoimalaitosonnettomuutta, jotka olivat Three Mile Island vuonna 1979, Tsernobyli vuonna 1986 ja Fukushima Daiichi vuonna 2011. Kandidaatintyön kolmessa seuraavassa kappaleessa käydään läpi nämä suurimmat onnettomuudet tapahtumien kulun, onnettomuuksien johtaneiden syiden ja onnettomuuksien jälkeisten ydinturvallisuuden kehitysaskelien osalta.

4 THREE MILE ISLANDIN YDINVOIMALAONNETTOMUUS 1979

Three Mile Islandin ydinvoimalaitos sijaitsi Yhdysvalloissa Pennsylvanian osavaltiossa, noin 15 kilometrin päässä Harrisburgin kaupungista. Ydinvoimalaitosta rakennettiin nimensä mukaisesti Susquehanna-joen varrella sijaitsevalle pitkälle Three Mile Island -saarelle. (Filburn & Bullard 2016, 29)

Saarelle rakennettiin kaksi laitousyksikköä, joissa oli molemmissa käytössä painevesireaktori (PWR, Pressurized Water Reactor). Ensimmäinen yksikkö TMI-1 (Three Mile Island), nimellisteholtaan 819 MW, aloitti kaupallisen tuotantonsa vuoden 1974 syyskuussa. Onnettomuuteen joutunut toinen yksikkö TMI-2, nimellisteholtaan 880 MW, aloitti puolestaan kaupallisen tuotantonsa vuoden 1978 joulukuussa. (IAEA 2019)

4.1 Tapahtumien kulku

Onnettomuus tapahtui aamulla maaliskuun 28. päivä vuonna 1979. TMI-2 oli tehoajolla, ja se oli ollut käytössä kaupallisessa tuotannossa vain muutaman kuukauden. Työntekijät yrittivät poistaa sekundääripiirin korroosiota estäviin suodattimiin muodostunutta tukosta. Kello 04:00 aikaan syöttövesipumput pysähtyivät tukoksesta aiheutuneen alentuneen virtauksen takia, ja veden tulo höyrystimeen lakkasi. Tämä johti höyryn paineen ja virtauksen alenemiseen, jonka seurauksena höyryturbiinin pikasulku käynnistyi. (Filburn & Bullard 2016, 34-35) Syöttövesivirtauksen lakkautuminen johti höyrystimien vedenpintojen laskuun, jonka seurauksena lämmönsiirto primääripiiristä lämpönieluna toimivaan sekundääripiiriin heikentyi. Tämän seurauksena primääripiiri alkoi kuumentumaan ja sen paine kasvamaan. (Sandberg 2004, 221)

Primääripiirin paineen kasvettua liian suureksi paineistimen kauko-ohjatut PORV-varoventtiilit (Power Operated Relief Valve) aukesivat alentaakseen painetta. Kymmenen sekuntia varoventtiilien aukeamisesta ne suljettiin. Henkilöstön tietämättä yksi

varoventtiileistä ei sulkeutunutkaan kunnolla, mistä syntyi pieni vuoto, josta jäähdytysvettä alkoi valua pois reaktorin jäähdytysjärjestelmästä. Valvomönäytön mukaan venttiili oli kiinni, vaikka se oli vain saanut sulkeutumiskäskyn, eikä näytöllä näkynyt näin venttiilin todellista asentoa. (Filburn & Bullard 2016, 60) Reaktorin pikasulku oli käynnistynyt automaattisesti kohonneen primääripiirin paineen takia noin neljä minuuttia kello 04:00 tapahtuneen turbiinin pikasulun jälkeen (Sandberg 2004, 222).

Reaktorin sulkemisen jälkeen reaktorissa muodostuu jälkilämpöä radioaktiivisten hajoamisten seurauksena. Tyypillisellä painevesilaitoksella muodostuu jälkilämpöä reaktorin sulkemishetkellä noin 6,5 % reaktorin normaalikäytön termisestä tehosta. Mikäli jälkilämmön jäähdytys epäonnistuu, voi se johtaa reaktorin ylikuumentumiseen ja polttoaine-elementtien sulamiseen. (Mahaffey 2014, 331-332)

Paineen laskiessa korkeapaineinen hätäjäähdytysjärjestelmä käynnistyi automaattisesti. Paineen laskeminen pysähtyi, kun primääripiiriin tuli vettä sitä mukaa, mitä vuodon kautta poistui. Operaattorit huomasivat, että toimenpiteen seurauksena paineistimen vedenpinta alkoi nousemaan ylärajoilleensa, mikä voi johtaa vaikeuksiin paineen hallinnassa. Operaattorit reagoivat tilanteeseen vähentämällä primääripiiriin pumpatun veden määrää, jolloin vuodon seurauksena veden määrä alkoi vähentyä ja paine laskea. Operaattorit eivät kuitenkaan edelleenkään tienneet vuodosta. (Sandberg 2004, 222-223)

Painevesireaktorin primääripiirissä on yleensä paineistimen yläosaa lukuun ottamatta pelkkää paineistettua vettä, mutta paineen laskemisen seurauksena se alkoi kiehua. Veden määrää primääripiirissä seurattiin paineistimen veden pintaa seuraamalla. Koska vesi oli alkanut kiehua reaktorissa, veden sijaan primääripiirissä alkoi kiertää ominaistilavuudeltaan suurempaa veden ja höyryn seosta. Paineistimen veden pinnan korkeus ei tällöin enää kertonut primääripiiriin todellista tilaa veden määrän osalta. (Sandberg 2004, 223)

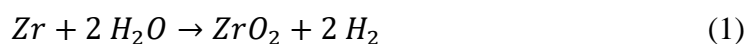
Hieman yli tunnin kuluttua turbiinin pikasulusta primääripiiriin pääkiertopumput alkoivat värähdellä voimakkaasti. Tämä johtui siitä, että vedenpinnan taso reaktorissa oli laskenut niin alas, että höyry alkoi kiertää jäähdytysputkistoissa. Pumput olivat suunniteltu vain

nestemäisen veden kierrättämiseen. Operaattorit joutuivat kytkemään kaikki pääkiertopumput pois päältä alle tunnin kuluttua värähtelyn alkamisesta. (Filburn & Bullard 2016, 37)

Veden kiehuminen reaktorissa jatkui, ja veden pinta laski paljastaen reaktorisydämen. Tämän seurauksena sydän alkoi vähitellen sulaa. Pääkiertopumppujen sammuttaminen laski paineistimen veden pintaa saaden tilanteen vaikuttamaan paremmalta, mutta tieto polttoaineaurioista tuli valvomoon vasta säteilytasojen noustessa yli hälytysrajojen reaktorirakennuksessa. Aikaa oli kulunut tässä vaiheessa noin kaksi ja puoli tuntia turbiinin pikasulusta. Samoihin aikoihin paineistimen vuoto huomattiin ja se saatiin pysäytettyä. (Sandberg 2004, 225)

Noin kello 07:20 toinen pääkiertopumpuista käynnistettiin, mutta pumpattava vesi-höyry-seos aiheutti pumpun kavitoimisen. Tämän seurauksena reaktoriin ei saatu tilanteen hallitsemiseen vaatimia määriä vettä, vaan noin tunti tulvituksen jälkeen sula oli vajonnut paineastian pohjalle. Sula kuitenkin jäähdyi ennen kuin se puhkaisi paineastian pohjan. (Sandberg 2004, 222-226) Monien vaikeuksien jälkeen iltapäivällä reaktoriin saatiin syötettyä vettä korkeapainehätäjäähdytysjärjestelmän kautta, näin sydän saatiin veden peittoon ja tilanne alkoi olla hallinnassa (Filburn & Bullard 2016, 40).

Veden pumppaamisessa reaktoriin oli kuitenkin olemassa merkittävä vaaratekijä, sillä kuumissa olosuhteissa polttoainesauvojen zirkonium ja höyry muodostavat reaktiotuotteena vetyä reaktioyhtälön mukaisesti. (Filburn & Bullard 2016, 111-112)



Hapettumisreaktiossa vapautuu paljon energiaa, mikä voi pahentaa mahdollista onnettomuustilannetta. Syntynyttä vetykaasua on vaikea käsitellä ja se on myös hyvin räjähdysaltista. Mikäli vedyn osuus ilmassa kasvaa liian suureksi, tapahtuu vetyräjähdys. Tämä olisi iso uhkatekijä suojarakennukselle ja radioaktiivisten aineiden hallinnalle. (Filburn & Bullard 2016, 112) Suojarakennuksessa tapahtui pieni vetyräjähdys noin 13:50 aikaan, noin kymmenen tuntia turbiinin pikasulun jälkeen. Räjähdys ei ollut

kuitenkaan tarpeeksi voimakas rikkomaan suojarakennusta. Muutamia päiviä myöhemmin kyettiin toteamaan, että uusia räjähdyksiä ei enää voi tapahtua. (Filburn & Bullard 2016, 39-40)

4.2 Onnettomuuden syyt ja inhimilliset virheet

Reaktorin toimittanut Babcock & Wilcox luotti suunnittelussaan normaalin u-putkihöyrystinnmallin sijaan OTSG-malliin (Once-Through Steam Generator), jossa vesi meni suoraan höyrystimen läpi. Tällä tavalla saatiin aikaan sekundääripuolella turbiiniprosessille edullisempaa tulistettua höyryä kylläisen höyryn sijasta. U-putkihöyrystimet pitävät kuitenkin sisällään suuremman osan syöttövedestä. Tämän takia u-putkihöyrystinnmallia käyttävästä primääripiiristä voitiin poistaa reaktorin tuottamaa lämpöä huomattavasti kauemmin kuin OTSG-mallia käyttävästä vastaavasta primääripiiristä. Tämän luontaisen turvallisuusominaisuuden puute OTSG-mallissa rajoitti merkittävästi operaattorien aikaa diagnosoida ongelma onnettomuushetkellä. (Filburn & Bullard 2016, 31-32)

Suurin osa Three Mile Islandin laitosten turvajärjestelmistä ja operaattorien koulutuksesta keskittyi valmistautumiseen pahimman varalle, kuten esimerkiksi suureen repeytymään primääripiirissä (LB-LOCA, Large-Break Loss-of-Coolant Accident). Nyt kyseessä oli kuitenkin huomattavasti erilainen tilanne, aukinaisesta PORV-varoventtiilistä johtuva pieni vuoto primääripiirissä. Onnettomuudelle keskeistä oli, että pieni ongelma johti isompiin ongelmiin. (Filburn & Bullard 2016, 35)

Valvomossa oli suunnitteluvirheitä, jotka vaikeuttivat operaattorien työtä ongelman diagnosoinnissa. PORV-varoventtiilien todellinen asento ei näkynyt valvomonäytössä, sen sijaan näytöllä näkyi vain niille annettu kauko-ohjattu käsky joko avautua tai sulkeutua. Tämä suunnittelumalli ei ottanut jumiutumisen mahdollisuutta huomioon, ja ongelman syytä ei saatu ajoissa selville. Lisäksi valvomossa hälytti jo muutamien minuuttien jälkeen ongelman alkamisesta yli 100 erilaista hälytintä. Operaattoreita

pommitettiin näin suurella määrällä varoitustietoja, mikä teki ongelmaa ratkaisevien tietojen löytämisestä äärimmäisen hankalaa. (Filburn & Bullard 2016, 35)

Tapahtumien kulussa oli kuitenkin monta tapahtumaa, josta ongelman lähteen olisi voinut pystyä päättämään. Kun operaattorit keskittyivät paineistimen pinnan korkeuden seurantaan, jäi heiltä huomaamatta hyvin selkeä merkki vuodosta. Auki jumiutuneesta venttiilistä höyry meni suojarakennuksessa olevaa säiliöön, jossa se lauhtui vedeksi. Vuodon pitkittyessä vesi alkoi lämmitä ja lopulta kiehua säiliössä. Lopulta säiliö antoi periksi ja primääripiirin vesi purkautui suoraan suojarakennukseen. Tämän seurauksena suojarakennuksen lattialta vettä poistavat pumput käynnistyivät automaattisesti ja säiliön paineen nousu huomattiin valvomossa. Vuotoa ei osattu epäillä, vaikka myös suojarakennuksen lämpötila oli noussut jo 83 °C:seen, sillä PORV-varoventtiilin uskottiin olevan valvomonäytön mukaisesti kiinni. (Sandberg 2004, 223-224)

Reaktorille suoritettiin onnettomuuden aikana hätäbooraus ketjureaktion pysäyttämiseksi, kun primääripiiristä otettujen vesinäytteiden booripitoisuus oli alkanut laskea. Tilanne vaikutti siltä, että reaktori oli tulossa uudelleen kriittiseksi säätösauvojen laskemisesta huolimatta. Tämä primääripiirin booripitoisuuden laimeneminen johtui siitä, että boorattu vesi kiehui reaktorissa ja jäljelle jäänyt puhdas vesihöyry lauhtui eri puolilla primääripiiriä. Näin reaktorissa veden booripitoisuus todellisuudessa kasvoi, mutta hätäbooraus päätettiin suorittaa primääripiirin muista osista otettujen laimenneiden vesinäytteiden perusteella. Operaattorit eivät näin olleet tunnistaneet booripitoisuuden laimenemisen syytä. Veden booripitoisuuden epätasainen jakautuminen primääripiirin eri osissa aiheutti erittäin suuren vaaran, kun operaattorit päättivät käynnistää pääkiertopumpun veden saamiseksi reaktoriin. Mikäli operaattorit olisivat käynnistäneet pääkiertopumpun siinä osassa piiriä, jonne oli kertynyt tonneittain puhdasta vettä, olisi seurannut booripitoisuuden laskeminen reaktorissa voinut johtaa reaktorin uudelleen kriittisyyteen. (Sandberg 2004, 224-227)

4.3 Onnettomuuden vaikutus nykytilanteeseen

Three Mile Islandin onnettomuus on erinomainen esimerkki siitä, miten ydinvoimalaitoksilla myös pienet ongelmat voivat kehittyä vakaviksi onnettomuuksiksi, mikäli niitä ei hallita oikein. Erilaisia riskitekijöitä ymmärrettiin olevan ydinvoimalaitoksilla luultua enemmän, mikä lisäsi huolellisen suunnittelun merkitystä. Onnettomuus oli suuri alkutekijä kattavien todennäköisyyspohjaisten turvallisuusanalyysien kehitykselle. Myös operaattorien koulutukseen, inhimillisiin virheisiin, valvomon suunnitteluun ja operaattorien tukijärjestelmiin ruvettiin kiinnittämään enemmän huomiota. (Sandberg 2004, 228-229)

Laitoksen suunnitteluvirheistä ainakin reaktorin vedenpinnan mittauksen puute oli erittäin vakava turvallisuusuhka, ja Yhdysvaltojen valvova viranomainen NRC (Nuclear Regulatory Commission) teki näistä instrumentoinneista pakollisia onnettomuuden jälkeen (Mahaffey 2014, 342). Painevesilaitosten suunnittelussa otettiin jatkossa luontainen turvallisuus ja riittävät jäähdytysmassat tarkemmin huomioon. Laitoksen toimittaja Babcock & Wilcox ei saanut onnettomuuden jälkeen enää yhtäkään tilausta täysikokoiselle ydinvoimalamallilleen, joka käytti pienillä jäähdytemassoilla toimivia OTSG-höyrytimiä (Mahaffey 2014, 356).

Suomessa vakavien onnettomuuksien hallinta on ollut keskeisenä osana Suomen viranomaisvalvontaa Three Mile Islandin onnettomuuden jälkeen. Suomen ydinvoimalaitokselle luotiin SAM-strategiat (Severe Accident Management), jonka edellyttämät muutokset toteutettiin 1980- ja 1990-luvuilla olemassa olleilla laitoksilla. (Routamo 2016, 3) Esimerkiksi Loviisan ydinvoimalaitoksen SAM-strategiaan kuuluu muun muassa paineastian ulkoinen jäähdytys, suojarakennukseen vuotavan höyryn aiheuttaman paineen nousun hallinta jäälauhduttimella, sekä syntyvän vedyn hallinta erittäin vakavassa onnettomuudessa. Laitoksella on myös erillinen SAM-valvomo näiden tilanteiden varalle. (STUK 2016, 95-97)

Three Mile Islandin onnettomuudella oli isoja seurauksia Yhdysvaltojen ydinvoimateollisuudelle, sillä onnettomuuden jälkeen seuraava uusi ydinvoimalahanke aloitettiin vasta vuonna 2012. Onnettomuuden vaikutuksesta ydinturvallisuuden kehitykseen kertoo puolestaan se, että vielä vuonna 1985 Yhdysvaltojen ydinvoimalaitoksilla tapahtui 2,38 merkittävää turvallisuuteen vaikuttavaa tapahtumaa yhtä laitosvuotta kohden, mutta vuoteen 2000 mennessä vastaava lukema oli enää 0,1 tapahtumaa laitosvuotta kohden. (Cummings & Matzie 2018, 21)

5 TSERNOBYLIN YDINVOIMALAONNETTOMUUS 1986

Tsernobylin ydinvoimalaitos sijaitsi Neuvostoliiton entisessä neuvostotasavallassa Ukrainassa, noin 150 kilometrin päässä raskaan teollisuuden keskuksesta, noin kahden miljoonan asukkaan Kiovasta. Laitosyksiköitä alettiin rakentaa paikalle vuonna 1970 osana suurta, maanlaajuista ydinohjelmaa. (Filburn & Bullard 2016, 55) Onnettomuuteen joutunut laitosyksikkö 4 kytkettiin verkkoon joulukuussa 1983 (INSAG 1992, 107).

Laitoksen neljässä yksikössä reaktorit olivat RBMK-1000 -tyyppisiä (Реактор Большой Мощности Канальный) grafiittihidasteisia kanavatyyppejä, yhden reaktorin ollessa termiseltä teholtaan 3200 MW (IAEA 2019). RBMK-reaktorissa kiehuva jäähdytysvesi kulkeutuu reaktorisydämessä pystysuorasti menevien metalliputkien läpi. RBMK-reaktori käyttää polttoaineena kevytvesireaktoreihin verrattuna vähemmän rikastettua uraania ja sitä voidaan ladata myös käytön aikana. Polttoaineen alempi rikastusaste ja polttoaineen vaihdon ajoitusmahdollisuus mahdollistaa tehokkaan plutoniumintuotannon, kuitenkin tinkimättä sähköntuotannosta. (Mahaffey 2014, 357-358)

5.1 Tapahtumien kulku

Onnettomuus tapahtui aamuyöllä 26.4.1986 laitosyksikkö 4:n huoltoa varten tehtävän alasajon aikana suoritettuna turvallisuuskokeen yhteydessä. Kokeessa testattiin pysäytetyn, mutta yhä pyörivän turbiinin kykyä tuottaa generaattorilla sähköä laitoksen omaan tarpeeseen hätätilanteessa. Tällä sähköllä pidettäisiin yllä pääkiertopumppuja ja syöttövesipumppuja onnettomuustilanteessa, kunnes varajärjestelmät saataisiin käyntiin. Testin aikana reaktorin täytyi käydä normaalia alemmalla 700-1000 MW:n teholla. Koe oli haastava, sillä RBMK-reaktori ei ole kovin stabiili alemmalla tehotasolla. (Filburn & Bullard 2016, 59-60)

Koetta varten hätäjäähdytysjärjestelmä täytyi kytkeä pois päältä, mikä tehtiin 25.4.1986 kello 14:00 aikaan (INSAG 1992, 10). Kiovasta tuli kuitenkin määräys, että sähköntuotantoa on vielä jatkettava kello 23:10 asti, joten kokeen aloitusta päätettiin

lykätä (Smith & Beresford 2005, 2). Sähköntuotantoa jatkettiin puolella teholla vielä 11 tunnin ajan, vaikka hätäjähdytysjärjestelmä ei ollut kytkettynä (INSAG 1992, 10).

Keskiyön aikaan laitos kävi noin 720 MW:n teholla (INSAG 1992, 53). Kello 00:28 aikaan henkilöstö epäonnistui ohjausjärjestelmän vaihdossa, ja reaktorin teho laski 30 MW:n tasolle, vain noin yhteen prosenttiin nimellistehosta. Tehon laskuun johtaneita toimenpiteitä ei ole jälkikäteen pystytty täysin yksiselitteisesti selvittämään puutteellisten tietojen takia. (INSAG 1992, 73)

Uraanin U-235 fission yhteydessä reaktorissa syntyy yhtenä reaktiotuotteena ksenonkaasua (Xe-135). Ilmiö on erityisen yleinen alasajon yhteydessä, kun reaktoria on ajettu korkealla teholla ennen alasajoa. (Filburn & Bullard 2016, 60) Xe-135 absorboi neutroneita erittäin voimakkaasti, ja estää näin uusien fissioiden syntymisen. Xe-135 on näin ollen reaktorimyrkky. Xe-135:n puoliintumisaika 9,1 tuntia, joten ennen kuin myrkyttyneen reaktorin tehoa aletaan nostaa uudelleen, tulisi odottaa ainakin noin 20 tunnin ajan ksenonin hajoamista. (Filburn & Bullard 2016, 48) Reaktorin nopea tehon lasku oli johtanut tilanteeseen, jossa reaktori oli ksenonkaasun kyllästämä. Kokeen suorittamiselle oli kovat paineet, ja odottamisen sijaan ohjaajahenkilöstö vastasi tehon laskuun vetämällä suurimman osan neutroneita kaappaavista säätösauvoista pois reaktorista. Näin reaktorin teho alkoi taas vähitellen nousta. (Filburn & Bullard 2016, 60)

Kello 01:00 aikaan reaktorin teho oli saatu pysymään 200 MW:n tasolla, joka oli kuitenkin paljon kokeen vaatimaa tehotasoa alempi. Myös säätösauvoja oli reaktorissa alle puolet laitosmääräysten vaatimasta minimistä. Koe päätettiin kuitenkin suorittaa kaikesta huolimatta. (Smith & Beresford 2005, 2)

Laitosyksikössä oli 8 pääkiertopumppua, jotka syöttivät jäähdytysvettä reaktorisydämeen. Täydellä teholla kaikkien kahdeksan pumpun tuli olla käynnissä, mutta nyt tehotaso oli vain noin 1/16 täydestä tehosta, eikä täysimittaista jäähdytystä tarvittaisi. Ennen koetta käynnissä oli 6 pumppua, mutta koetta varten käynnistettiin vielä kaksi viimeistäkin pumppua. Kokeen suunnitelman mukainen ylenmääräinen syöttövesivirta johti tilanteeseen, jossa jäähdytysvesi vain lämpeni höyrystymisen sijaan.

Höyryntuotanto väheni huomattavasti ja paine alkoi laskea. Veden keskimääräisen lämpötilan nousu reaktorisydämessä teki siitä alttiimpaa höyrystymiselle tehon noustessa tai syöttövesivirran pienentyessä. Höyrystymätön vesi toisaalta myös absorboi neutroneita höyryä enemmän, jonka takia tehon ylläpitämiseksi ylimääräisiä säätösauvoja täytyisi vetää ylös reaktorista. (Filburn & Bullard 2016, 61)

Koetta varten neljä pääkiertopumppua kahdeksasta valjastettiin pumppaamaan vettä pysäytyskäskyn saaneen turbiinin pyörinnästä tuotetulla sähköllä. Ohjaajahenkilöstö kytki irti vielä viimeiset varajärjestelmät, yksi näistä järjestelmistä pysäyttää reaktorin, jos höyrynpaine laskee liian alas tai veden pinta laskee höyrynerottimessa liian alas. (Filburn & Bullard 2016, 61-62)

Koe aloitettiin kello 01:23 aikaan, höyry ohjattiin pysäytettävän turbiinin ohi, joka tuotti sähköä neljälle pääkiertopumpulle. Reaktorisydämessä höyrynpaine alkoi kasvaa, kun höyryä ei enää ohjattu turbiinille. Pysäytettävä turbiini ei luonnollisesti enää tuottanut yhtä paljoa sähköä, mikä johti jäähdytysveden virran pienenemiseen. Reaktorin lämpötila lähti nousemaan, ja jo valmiiksi lämmennyt jäähdytysvesi alkoi kiehua, kasvattaen höyryntuotantoa. Höyry ei absorboi neutroneita yhtä tehokkaasti kuin nestemäinen vesi, joten höyryn osuuden kasvaessa fissioreaktiot alkoivat kiihtyä, nostaen edelleenkin tehoa. (Filburn & Bullard 2016, 62)

Ohjaajahenkilöstö päätti käynnistää pikasulun ajanhetkellä 01:23:40, vain alle minuutti kokeen aloituksesta, ja säätösauvat alkoivat laskeutua hitaasti reaktoriin (INSAG 1992, 55). Toimenpiteen tarkoitus oli pysäyttää tehon nousu lopettamalla fissioreaktiot. RBMK-reaktorin säätösauvojen kärjet oli tehty kuitenkin grafiitista, joka ei absorboi neutroneja, vaan hidastaa niitä. Hidastetut neutronit halkaisevat uraanin todennäköisemmin, joten fissioreaktiota alkoikin tulla enemmän. Kun sauvat laskettiin reaktoriin, se johti tehon hallitsemattomaan nousuun. On esitetty arvioita, että teho nousi yli sata kertaa laitoksen nimellistehoa suuremmaksi. (Filburn & Bullard 2016, 62-63)

Toisin kuin monesti väitetään, Tsernobylistä ei tapahtunut ydinräjähdystä, vaan höyryräjähdys. Ydinräjähdys tapahtuu korkeasti rikastetun uraanin ketjureaktiosta,

ydinvoimalaitosten käyttämä polttoaine ei ole lähellekään tarpeeksi rikastettua aiheuttaakseen ydinräjähdysten. Tsernobyliässä tehon nousu johti jo valmiiksi lämmentyneen veden hallitsemattomaan höyrystymiseen ja paineen kasvuun. Tämän seurauksena paineputket rikkoutuivat ja höyry vapautui tuhoten laitoksen rakenteita. Höyry reagoi myös ylikuumentuneen polttoaineen zirkoniumiin reaktioyhtälön (1) mukaisesti muodostaen räjähdysaltista vetykaasua. (Filburn & Bullard 2016, 63)

5.2 Laitoksen suunnitteluvirheet

RBMK-1000:ssa on erittäin suurikokoinen reaktorisydän, halkaisijaltaan 11,8 m ja korkeudeltaan 7,0 m. Tällöin reaktorin yhdessä osassa tapahtuva ketjureaktio ei ole kovin tiivistä yhteydessä toisissa osissa tapahtuviin reaktioihin. Sydämessä teho voi jakautua hyvinkin epätasaisesti eri alueiden välillä. Samoin myös ksenonia voi muodostua epätasaisesti eri puolille sydäntä. On arvioitu, että ennen onnettomuutta reaktorin ylä- ja alaosat olivat käyneet lähes toisistaan riippumattomina. (INSAG 1992, 6) Reaktorin suuri koko johtuu sen polttoaineena käytetyn uraanin erittäin alhaisesta rikastusasteesta (2 %), yhdistettynä monimutkaiseen paineputki- ja grafiittihidasterakenteeseen (Filburn & Bullard 2016, 58).

RBMK-reaktorissa on sydämen yläpuolella sijaitsevien säätösauvojen lisäksi myös sen alapuolella olevia säätösauvoja (INSAG 1992, 4). Tämä suunnitteluratkaisu johtuu erittäin todennäköisesti reaktorin suuresta koosta. Se tekee reaktorin tehon hallinnasta melko monimutkaista, etenkin kun suurin osa säätösauvoista oli manuaalisesti ohjattavia.

RBMK-reaktorin säätösauvoissa oli noin 4,5 m pitkä grafiittikärki, joka syrjäyttää vettä. Neuroneita absorboivan veden syrjäyttäminen neutroneita hidastavalla grafiitilla oli olennainen osa onnettomuuden syntyyn, sillä pikasulun laukaiseminen kiihdytti näin fissioreaktioita. Reaktorin pikasulku oli erittäin hidas, säätösauvojen laskeminen reaktoriin kesti noin 18 sekuntia (INSAG 1992, 4).

Reaktoria jäähdytettäessä vedellä sen sydämeen syntyy kiehunnan seurauksena höyrykuplia. Höyrykuplia kutsutaan aukoiksi ja niiden osuutta suhteessa jäähdytteen

tilavuuteen aukko-osuudeksi. Aukko-osuuden muutos vaikuttaa suoraan reaktiivisuuteen, ja se voi muuttua esimerkiksi reaktorin tehoa säädettyessä. Reaktiivisuuden muutosta suhteessa aukko-osuuden muutokseen kutsutaan aukko-reaktiivisuuskertoimeksi, ja se voi olla joko positiivinen tai negatiivinen. (INSAG 1992, 3)

RBMK-reaktorissa aukko-reaktiivisuuskertoimen on tietyissä olosuhteissa positiivinen, aukkojen lisääntyessä reaktiivisuus kasvaa, sillä vesi toimii jäähdyttimen lisäksi myös absorboijana. Etenkin matalalla teholla ajettaessa satunnainen tehon nousu voi aiheuttaa sydämessä olevan jäähdytysveden höyrypitoisuuden kasvun. Höyry ei absorboi neutroneja läheskään yhtä tehokkaasti kuin nestemäinen vesi, mistä seuraa reaktiivisuuden kasvu. RBMK-reaktorissa keskeisin suunnitteluheikkous länsimaisiin reaktoreihin verrattuna on juurikin se, että länsimaisissa reaktoreissa kertoimen täytyi olla negatiivinen joka tilanteessa, eli tehon muutosten tulee hillitä itseään. RBMK-reaktorilla matalalla teholla ajettaessa tehon nousu vain kiihdyttää reaktioita, mikä tekee siitä hyvin epästabiilin. (Filburn & Bullard 2016 59-60)

Toisin kuin kaikissa länsimaalaisissa ydinvoimaloissa, RBMK-reaktoreita varten ei rakennettu niille tarkoitettuja suojarakennuksia, mikä vaikutti erittäin suuresti onnettomuuden laajuuteen. Suojarakennuksen tarkoitus on selvittää vakavasta onnettomuudesta ja estää radioaktiivisten materiaalien leviäminen ympäristöön. Three Mile Islandilla suojarakennus esti lähes kaiken radioaktiivisen materiaalin leviämisen ja myös Fukushimaa siitä oli erittäin paljon hyötyä. RBMK-reaktoreille suojarakennus saatettiin jättää kustannussyistä rakentamatta, sillä suurikokoiselle reaktorille sen rakentaminen olisi ollut huomattava menoerä. (Filburn & Bullard 2016, 58-59)

5.3 Henkilöstön tekemät virheet

Tsernobylin ydinvoimalaitosonnettomuudessa henkilöstön tekemien virheiden vaikutus onnettomuuden syntyyn oli huomattavan suuri. Testiä valmistellessa tehtiin useita vakavia käyttövirheitä. Hätjäähdytysjärjestelmän kytkeminen pois päältä oli edellytys testin suorittamiseksi, ja siihen oli saatu lupa pääinsinööritä. Kokeen viivästytyä sähköntuotannon jatkaminen 11 tunnin ajan puolella teholla ilman että

hätäjäähdytysjärjestelmä on kytkettynä, kertoo kuitenkin vakavasta turvallisuuskulttuurin puutteesta. (INSAG 1992, 18)

Laitoksen turvallisuusohjeissa on määritelty, että puolella teholla reaktorissa tulee olla koko ajan vähintään 30 manuaalisesti säädettävää säätösauvaa (INSAG 1992, 80). Testin aikana reaktorissa ei ollut kuin 6-8 säätösauvaa. Henkilöstö ei ollut täysin tietoinen RBMK-reaktorin vaarallisista piirteistä, ja he eivät ymmärtäneet tekemiensä käyttövirheiden seurauksia. Neuvostoliitossa ei ollut myöskään valvovaa viranomaista ydinvoiman käytölle, joten kellään ei ollut suoraa vastuuta laitoksen turvallisesta käytöstä, vaan kaikki vastasivat vain omista teoistaan. (INSAG 1992, 87)

5.4 Tehdyt parannukset ja vaikutus nykytilanteeseen

Reaktorin aukkoreaktiivisuuskerrointa pienennettiin lisäämällä lisääabsorboijia reaktoriin. Määräyksiä muutettiin myös siten, että manuaalisesti ohjattavia säätösauvoja tuli olla reaktorissa vähintään 43-48 aiemman 26-30 sijaan. Myös polttoaineena käytetyn uraanin rikastusastetta nostettiin 2,4 %:iin aiemmasta 2 %:sta. Reaktorin pikasulkua nopeutettiin 18 sekunnista 12 sekuntiin. (INSAG 1992, 125)

Venäjällä oli vuonna 2018 käytössä vielä 11 kevytvesijäähdytteistä ja grafiittihidasteista reaktoria, joista neljä sijaitsee Suomen lähetyvillä Pietarin Sosnovyi Borin voimalaitoksessa. Näistä laitoksikkö Leningrad-1 suljettiin 22.12.2018. (IAEA 2019) Vuoden 2019 alussa saatujen tietojen mukaan lähes kaikki näistä reaktoreista on tarkoitus sulkea vuosien 2021-31 aikana. Toisaalta vuonna 1990 toimintansa aloittanut Smolenskin laitoksikkö 3 on tarkoitus sulkea vasta vuonna 2050. (WNA 2019) On huomioitava, että todennäköisesti jossain länsimaassa tapahtunut Tsernobylin kaltainen onnettomuus olisi johtanut kyseistä reaktoryyppiä käyttävien ydinvoimalaitosten välittömään lakkauttamiseen. Toiminnan jatkaminen tapahtumista huolimatta kertoo rajoja koettelevasta turvallisuuskulttuurista.

Johtuen Tsernobylin onnettomuuden peittelystä ja huonosta tiedottamisesta, otettiin tapahtumien jälkeen käyttöön kansainvälinen INES-asteikko. Asteikko on tarkoitettu

riipeään ja johdonmukaiseen yhteiskunnalliseen tiedottamiseen tapahtumista ja onnettomuuksista, joiden takana on säteilylähteitä. INES-asteikolla pyritään antamaan onnettomuuksille selkeät mittasuhteet, jotka helpottavat asiantuntijayhteisön, median ja tavallisten kansalaisten välistä yhteisymmärrystä tapahtumien vakavuudesta. Tsernobylin onnettomuus sijoittuu vakavimpaan INES-7 -luokkaan, ja se on tähän päivään mennessä historian vakavin ydinonnettomuus. (IAEA 2013, 1-2) Asteikko helpottaa kansainvälistä ydintapahtumista tiedottamista, ja se on käytössä noin 70 maassa (STUK 2015).

6 FUKUSHIMA DAIICHI YDINVOIMALAONNETTOMUUS 2011

Fukushiman ydinvoimalaitos sijaitsee Japanin itärannikolla 230 kilometrin päässä pääkaupunki Tokiosta. Fukushiman ensimmäistä voimalaitosta, kuuden reaktorin Fukushima Daiichia, alettiin rakentaa vuonna 1967 ja viimeinen laitosyksikkö 6 kytkettiin verkkoon vuonna 1979. Toinen voimalaitos, neljän laitosyksikön Fukushima Daini, rakennettiin vuosien 1976-87 aikana. (Filburn & Bullard 2016, 77-78) Onnettomuuteen joutuneen Fukushima Daiichi -voimalaitoksen reaktorit olivat tyypiltään kiehutusvesireaktoreita (BWR, Boiling Water Reactor). Laitosyksikkö 1:n sähköntuottoteho oli 460 MW, laitosyksiköiden 2-5 784 MW ja laitosyksikkö 6:n 1100 MW. (IAEA 2019)

6.1 Tapahtumien kulku

Maaliskuun 11. päivä vuonna 2011 tapahtui Tyynellämerellä lähellä Japanin itärannikkoa voimakkuudeltaan 9,0 momenttimagnitudin maanjäristys. Meren alla tapahtunut järistys aiheutti tsunamiaallon. Fukushima Daiichin ydinvoimalaitos sijaitsi vain alle 200 kilometrin päässä järistyksen keskuksesta. Maanjäristysvyöhykkeellä sijaitsevan Japanin suuret rakennukset, mukaan lukien ydinvoimalaitokset oli suunniteltu kestämään näin voimakkaat järistykset. Järistys katkaisi kuitenkin kaikki korkeajännitevaihtovirtajohdot, joista laitosalue sai sähkönsä. (Filburn & Bullard 2016, 91)

Laitosyksiköt olivat onnettomuuden aikaan eri tiloissa. Yksiköt 4-6 olivat kylmäseisokissa polttoaineenvaihtoa ja huoltoa varten. Yksiköt 1-3 puolestaan kävivät täydellä teholla. Laitoksella oli sensorit, jotka tunnistivat maanjäristyksen. Tämä laukaisi automaattisesti pikasulut yksiköillä 1-3. On kuitenkin tärkeä ymmärtää, että vaikka reaktori sammutetaan, se luo vielä erittäin runsaasti hajoamisreaktioiden tuottamaa jälkilämpöä, jota täytyy jäähdyttää. Maanjäristyksen jälkeen laitoksen menetettyä ulkoisen sähköverkon, jäähdytysjärjestelmät olivat varavoimadieselgeneraattorien varassa, jotka toimivat suunnitellusti. (IAEA 2015, 24) Yksikkö 4 oli sammutettu vasta

äskettäin, ja sen käytetty polttoaine oli siirretty käytetyn polttoaineen altaaseen. Käytetyssä polttoaineessa oli vielä huomattavia määriä jälkilämpöä jäljellä. (Filburn & Bullard 2016, 93-94)

Noin tunnin kuluttua järjestyksestä alkoivat varsinaiset ongelmat, kun tsunami iskeytyi rannikolle. Laitoksen ympärille rakennettu aallonmurtaja oli 5,7 metriä korkea, mutta tsunami oli alueelle iskeytyessään jopa 13 metrin korkuinen. Suurin osa laitoksen varavoimageneraattoreista oli sijoitettu kellaritiloihin, jotka jäivät tulvan alle. Kaikki jäähdytyslinjat ja pumput, jotka yhdistivät kaikki kuusi reaktoria niiden lopulliseen lämpönielunaan, Tynneenmereen, tuhoutuivat. Kun jäähdytys oli menetetty, kiehui painesäiliössä oleva vesi kuiviin. Tämän jälkeen yksikköjen 1-3 reaktorisydämet ylikuumentuivat ja polttoainesauvat alkoivat sulaa. Arvioiden mukaan yksiköllä 1 polttoaineen sulaminen alkoi noin kuusi tuntia varajäähdytysjärjestelmien menetyksestä. (Filburn & Bullard 2016, 91-97)

Erittäin haastavaksi onnettomuuden hallinnan teki se, että laitosityksiköt menettivät sähkön erittäin pitkäksi aikaa. Monet kriittiset sähkötoimiset turvallisuusjärjestelmät menetettiin useiden päivien ajaksi. Yksiköillä 1 ja 2 sähköt saatiin takaisin väliaikaisilla voimakapeleilla maaliskuun 20. päivä, yhdeksän päivää tsunamin iskeytymisestä. Yksiköt 3 ja 4 saivat sähköt takaisin vasta maaliskuun 26. päivä, yli kaksi viikkoa tsunamin iskeytymisestä. Sähköjen ollessa poissa henkilökunnalla oli joko hyvin vähän tai ei lainkaan tietoa reaktorin tilasta tai tehtyjen hätätoimenpiteiden onnistuvuudesta. (IAEA 2015, 44-47)

Kuten Three Mile Islandin onnettomuutta käsitelleessä kappaleessa todettiin, polttoainesauvojen zirkonium ja höyry muodostavat kuumissa olosuhteissa reaktiotuotteena vetyä reaktioyhtälön (1) mukaisesti. Yksiköllä 1 kuuma polttoaine sulii paineastian pohjasta läpi. Suojarakennuksen vetypitoisuuden kasvettua liian suureksi, laitoksella 1 tapahtui vetyräjähdys maaliskuun 12. päivänä, järjitystä seuraavana päivänä. Yksiköllä 3 tapahtui vetyräjähdys puolestaan maaliskuun 14. päivänä. Myös järjityksen aikaan kylmäseisokilla olleella yksiköllä 4:llä tapahtui vetyräjähdys maaliskuun 15.

päivänä, koska sillä oli yksikkö 3:n kanssa yhteinen ilmanvaihtojärjestelmä. Yksiköllä 2 polttoainetta pääsi sulamaan, mutta vetyräjähdystä ei tapahtunut. Yksiköt 5 ja 6 selvisivät vähillä vaurioilla, sillä ne sijaitsivat muihin yksiköihin verrattuna hieman korkeammalla merenpintaan nähden ja yksi varageneraattoreista oli jäänyt ehjäksi. (Filburn & Bullard 2016, 97-101)

Fukushima Daiichin eteläpuolella sijaitseva Fukushima Daiini -sisarlaitos selvisi melko pienillä vaurioilla. Järistyksen aikaan kaikki neljä 1100 MW:n laitosyksikköä kävivät täydellä teholla. Fukushima Daiinin laitokset oli sijoitettu noin 12 metriä merenpinnan yläpuolelle, joten ne kärsivät pienempiä vaurioita. Laitos menetti kuitenkin kaikki varavoimadieselgeneraattorit merivesijäähdytyspumppujen rikkouduttua, vaikka itse generaattorit eivät yhtä lukuun ottamatta jääneetkään tulvan alle. Laitoksen onneksi yksi ulkopuolinen korkeajännitejohto oli säilynyt ehjänä. Tämän virran avulla pystyttiin yhä valvomaan reaktorisydänten ja polttoaineiden tilaa ja tilanne saatiin ennen pitkää hallintaan. Ainekset toisellekin onnettomuudelle olivat kuitenkin olemassa. (Filburn & Bullard 2016, 95)

6.2 Onnettomuuden syyt

Kansainvälisen atomienergiajärjestö IAEA:n vuonna 2015 valmistuneen raportin mukaan keskeinen syy onnettomuuteen oli Japanissa vallinnut usko siihen, että ydinvoimalaitokset ovat tarpeeksi turvallisia ja lujatekoisia kestämään myös epätodennäköiset ja tuhoisat ulkoiset tapahtumat. Ennen onnettomuutta tällaisten tapahtumien mahdollisuutta ei otettu tarpeeksi vakavasti. (IAEA 2015, 67) Japani sijaitsee niin kutsutulla Tyynenmeren tulirenkaalla, jonka alueella on tapahtunut yli 9,0 momenttimagnitudin maanjäristyksiä Chilessä ja Alaskassa 1960-luvulla, ennen kuin Fukushima Daiichin yksikkö 1:n rakennuslupaa oli myönnetty. Historiallista dataa Fukushiman alueelle iskeneistä tsunamista tai niiden nostamista tulvatasoista ei kuitenkaan ollut, eikä myöskään näin voimakkaista maanjäristyksistä. (IAEA 2015, 50)

Laitos rakennettiin liian matalalle merenpintaan nähden, ja tärkeimmät turvallisuusjärjestelmät olivat näin alttiita tulvimiselle. Vuonna 2009 laitoksen omistaja TEPCO (Tokyo Electric Power Company) oli arvioinut tsunamin maksimikorkeudeksi 6,1 m, jonka seurauksena jälkilämpöä poistavia pumppuja päätettiin sijoittaa korkeammalle. Varavoimadieselgeneraattoritulojen tulvimisen estämiseksi ei ruvettu kuitenkaan toimenpiteisiin. Lähihistoriasta löytyi kuitenkin varottavia esimerkkejä tulvimisen vaaroista ydinvoimalaitoksilla; vuonna 1999 Ranskassa myrskyn aiheuttamana, vuonna 2004 Intiassa tapaninpäivän tsunamin yhteydessä ja vuonna 2007 Japanissa maanjäristyksen yhteydessä. (IAEA 2015, 51-52)

Operaattoreita ei koulutettu valmistautumaan tsunamin aiheuttamaan useamman yksikön samanaikaiseen sähkön ja jäähdytyksen menetykseen. TEPCO oli laatinut ohjeet vakavien onnettomuuksien varalle, mutta ne eivät kattaneet näin epätodennäköistä tapahtumien yhdistelmää. Henkilöstö selvisi vaikeisiin olosuhteisiin nähden kelvollisesti, mutta kykenemättömyys saada elintärkeitä tietoja laitoksen tilasta pakotti henkilöstön useisiin improvisoituihin ratkaisuihin. (IAEA 2015, 59-63)

Ydinvoiman sääntelyä Japanissa onnettomuuden aikoihin hoiti useat eri organisaatiot, joilla oli erilaisia rooleja, vastuualueita ja monimutkaisia keskinäisiä suhteita. Ei ollut siis selkeyttä, millä organisaatiolla oli valtaa antaa sitovia korjausmääräyksiä havaittuihin turvallisuusongelmiin. Japanin näennäinen valvova viranomaisena oli elinkeinoministeriö METI:n (Ministry of Economy, Trade and Industry) alaisuudessa toimiva NISA (Nuclear and Industrial Safety Agency), eikä sillä ollut riittävää auktoriteettia haastamaan vallalla olleita käsityksiä ydinturvallisuudesta. IAEA:n vuonna 2007 tekemän valvonnan aikana huomattiin, etteivät NISA:n tarkastajat saaneet esteetöntä pääsyä luvanhaltijoiden laitoksille tarkastuksia varten, ja tarkastuksia sai suorittaa vain tiettyinä aikoina. (IAEA 2015, 63-68)

Japanin parlamentin riippumattoman tutkintakomitean puheenjohtaja Kiyoshi Kurokawa ilmaisi vuonna 2012 julkaistussa raportissa Fukushima onnettomuuden olleen lukuisien virheiden ja tahallisen välinpitämättömyyden aiheuttama. Luonnonvaroiltaan

vähävaraisen Japanin energiaomavaraisuus oli pitkälti ydinvoiman varassa, joten myös poliittinen paine oli osaltaan vaikuttamassa kollektiivisen, pohjaltaan epäterveen turvallisuusasetteen syntymiseen. (Kurokawa 2012, 9)

6.3 Onnettomuuden vaikutus nykytilanteeseen

Fukushima Daaichin onnettomuudella on ollut suuria kansainvälisiä vaikutuksia ydinvoimateollisuuteen. Esimerkiksi Euroopan Unionin kaikissa ydinvoimalaitoksissa aloitettiin kesäkuussa 2011 stressitestit, joilla tarkoitetaan riski- ja turvallisuusanalyysien tekemistä. Analyysien kohteena olivat erityisesti ulkoiset uhkatekijät, kuten meren tulviminen, maanjäristykset ja äärimmäiset sääolosuhteet. Testeillä mitattiin myös laitoksen vaihtovirran ja lämpönielun menetyksien kestävyys, sekä vakavien onnettomuuksien hallintaa. Valmius hallita useamman laitosesikön samanaikaista onnettomuutta nousi myös tarkastelun kohteeksi. (Routamo 2016, 3-5)

Konkreettinen esimerkki Fukushiman onnettomuuden jälkeisestä turvallisuusparannuksesta Suomessa on Loviisan voimalaitoksen päätös vuonna 2012 rakentaa molemmille laitosyksiköille jäähdytystornit. Mikäli merivesi menetetään lopullisena lämpönieluna järjestelmän vioittumisen tai jäätyksen vuoksi, tornit siirtävät lämpöä vaihtoehtoiseen lämpönieluun, ilmakehään. Toisella jäähdytystornilla poistetaan jälkilämpöä reaktorista, toisella poistetaan käytetyn polttoaineen altaan jälkilämpöä sekä jäähdytetään kriittisiä järjestelmiä. Tornit otettiin käyttöön vuonna 2015. (Teräsvirta 2016, 2-12)

Fukushiman onnettomuudesta seurasi yleistä ydinvoimavastaisuutta, sekä myös poliittisia päätöksiä ydinvoiman suhteen. Esimerkiksi Saksa päätti luopua kokonaan ydinvoimasta vuoteen 2022 mennessä (WNA 2018). Japanissa onnettomuus johti maan kaikkien ydinvoimalaitosten väliaikaiseen alasajoon perusteellisia turvallisuustarkastuksia varten. Onnettomuuden jälkeen kaksi ensimmäistä reaktoria Japanissa käynnistettiin syksyllä 2015, jonka jälkeen vielä seitsemän laitosyksikköä on käynnistetty vuoden 2018 loppuun mennessä. Marraskuun lopussa 2018

uudelleenkäynnistämislupa oli myönnetty Japanin valvovan viranomaisen NRA:n (Nuclear Regulation Authority) toimesta kuudelle laitosesikölle. Uudelleenkäynnistämisluvan myöntämistä odotti samalla hetkellä 12 laitosesikköä. (EIA 2018)

7 MUITA YDINTURVALLISUUDEN KEHITYKSEEN VAIKUTTANEITA TAPAHTUMIA

Ydinonnettomuuksista puhuttaessa suurin huomio kiinnittyy luonnollisesti suurimpiin ja vakavimpiin ydinonnettomuuksiin. On kuitenkin erittäin tärkeää tiedostaa, että ydinturvallisuuden kehitykseen ovat vaikuttaneet myös läheltä-piti -tilanteet. Ydinturvallisuuden kehitykseen vaikuttaneita tapahtumia on sattunut ydinvoiman historian aikana siinä määrin, ettei niitä kaikkia voida tässä kandidaatintyössä käsitellä. Tähän kappaleeseen on valittu neljä erityyppistä ydinturvallisuuden kehitykseen vaikuttanutta tapahtumaa ja kerrottu myös Suomessa tapahtuneista ydintapahtumista.

7.1 Tulva Ågestan ydinvoimalaitoksella 1969

Ågestan ydinvoimalaitos sijaitsi Ruotsissa Tukholman lähetyvillä, ja se oli tyypiltään raskasvesihidasteinen painevesireaktori. Toimintansa se aloitti vuonna 1963 ja se tuotti sähköä 10 MW:n ja kaukolämpöä 55 MW:n edestä. Toukokuussa 1969 laitoksella tapahtui vakava vaaratilanne, kun turbiinipuolella rutiininomaisen kaukolämmön jäähdytyspumpun vaihdon yhteydessä eräs suljettu venttiili repeytyi. Tämän seurauksena kaukolämmön jäähdytysaltaan sisältämät 400 kuutiota vettä pääsi purkautumaan ulos. Suurimmaksi osaksi kallion sisään rakennetun laitoksen turbiinipuoli sijaitsi suhteellisen korkealla maan pinnan tasolla suojarakennukseen verrattuna, ja vesi pääsi näin alemmille tasoille. (Dahlgren 1996, 1-22)

Tulva aiheutti useita oikosulkuja laitoksella. Reaktori pysäytettiin hallitusti, mutta sähköhäiriöiden takia voimakkaasti kontaminoitunut hätäjähdytysjärjestelmä käynnistyi tarpeettomasti. Ohjaajat yrittivät sammuttaa järjestelmän, mutta inhimillisen virheen johdosta raskasta vettä alkoi virrata kevytvettä käyttävään hätäjähdytysjärjestämään. Järjestelmä päätyi primääripiirin paineeseen 34 bar, kun järjestelmä oli suunniteltu kestäväksi 20 bar suuruista painetta. Osa laitoksen hätäjähdytysjärjestelmästä sijaitsi

suojarakennuksen ulkopuolella, joten mahdollinen putkirikko tällaisessa paikassa olisi voinut johtaa radioaktiivisten aineiden leviämiseen ympäristöön. (Dahlgren 1996, 22-25)

Ågestan tulvimisesta johtunut vaaratilanne oli hyvä osoitus rinnakkaisten turvajärjestelmien tarpeellisuudesta. Mikäli laitoksella olisi tapahtunut jäähdytteen menetyssonnettomuus LOCA (Loss-of-Coolant Accident), ainoa primääripiirin vettä syöttävä järjestelmä olisi ollut pois pelistä Dahlgren 1996, 23-24). Myös turvajärjestelmien fyysisen erottelun merkitys tunnistettiin ydinturvallisuuden kannalta laajemmin. Erottelulla estetään ulkoisesta syystä, tässä tapauksessa tulvasta johtuva järjestelmien samanaikainen vikaantuminen sijoittamalla osa samasta järjestelmästä fyysisesti toiseen tilaan. Tällöin yhdessä paikassa tapahtuva vahinko ei kaada koko järjestelmää. (Sandberg 2004, 103)

7.2 Browns Ferryn tulipalo 1975

Browns Ferryn kiehutusvesilaitoksella Yhdysvaltojen Alabamassa tapahtui vuonna 1975 tulipalosta aiheutunut vaaratilanne. Laitoksella oli tapana todeta alipaineisen reaktorirakennuksen läpivientien epätiiveyttä pienetkin ilmavirtaukset paljastavan kynttilän avulla. Yhtä tällaista vuotoa laitoksyksiköllä 1 yritettiin paikata paloherkällä polyuretaanilla, ja kynttilällä tehtävän tiiveyskokeen aikana liekki imeytyikin läpivientiin sytyttäen polyuretaanitiivisteiden palamaan. Tulipalo pääsi leviämään reaktorirakennukseen, jossa ei ollut samanlaista CO₂-sammutusjärjestelmää kuin palon alkulähteellä kaapelitilassa. Sammutusveden käyttöä pyrittiin välttämään sähkövikojen pelossa, eikä sitä käytetty ennen kuin reaktorin jäähdytys oli varmistettu seitsemän tuntia palon alkamisen jälkeen. (Sandberg 2004, 250)

Palon seurauksena vaurioitui 1600 kaapelia, joista yli 600 oli turvallisuuden kannalta merkittäviä. Kaapeleiden vaurioituminen aiheutti useiden turvallisuusjärjestelmien, kuten syöttövesi- ja apusyöttövesipumppujen menetyksen. Primääripiirin ulospuhallus lauhdutusaltaaseen turvasi lopulta riittävän jälkilämmön poiston, mutta mahdollisuus polttoaineen paljastumiselle oli päässyt syntymään. (Sandberg 2004, 250-251)

Browns Ferryn vaaratilanne pääsi syntymään jälkikäteen ajateltuna melko typerästä syystä, avotulen käsittelystä rakennuksen sisällä. Tapaus on malliesimerkki siitä, että ydinvoimalalaitoksessa pienestäkin häiriöstä voi syntyä erittäin vakava tilanne. Alun perin pienestä tulipalosta aiheutui useiden keskeisten järjestelmien menetys ja reaktorin jäähdytyksen vaarantuminen.

Browns Ferryn tapaus on toiminut yhtenä merkittävänä ajurina ydinvoimaloiden paloturvallisuuden kehitykselle. Esimerkiksi Suomen valvovan viranomaisen STUK:n (Säteilyturvakeskus) YVL-ohjeet (Ydinturvallisuusohjeet) vaativat luvanhaltijalta paljon valmiuksia palotorjunnan eteen. Lupaa haettaessa suunnitteluvaiheessa on esitettävä valvovalle viranomaiselle kattavat palotorjuntasuunnitelmat muun muassa laitoksen rakenteellisen suunnittelun, palojen havaitsemisen, kriittisten järjestelmien fyysisen erottamisen, palokuorman hallinnan ja sammutusjärjestelmien osalta. YVL-ohjeet vaativat myös operatiivisen palontorjuntavalmiuden, joka toteutetaan laitospalokunnan ja lähialueiden palokunnan avulla. (STUK 2013b, 6-16)

7.3 Barsebäckin vaaratilanne 1992

Ruotsin eteläpäässä sijaitsevalla Barsebäckin kiehutusvesilaitoksella tapahtui vuonna 1992 seisokin jälkeisen käynnistyksen yhteydessä päähöyrylinjan varoventtiilin tahaton aukeaminen. Piiri oli sillä hetkellä 30 bar paineessa, jolloin höyry purkautui voimalla repien satoja kiloja putkilinjojen eristeitä. Osa näistä villaeristeistä päätyi märkätilaan, josta hätäjäähdytysjärjestelmät ottavat vetensä. Eristeet tukkivat kaksi viidestä reaktorisydämen ruiskutuslinjan siivilöistä. Varoventtiilin aukeaminen oli johtanut reaktorin pikasulkuun. Mikäli kaikki ruiskutuslinjat olisivat tukkeutuneet, olisi jälkilämmön poisto voinut vaarantua. Jäähdytys oli riittävää, mutta puutteita laitoksen suunnittelussa oli tullut ilmi. (Sandberg 2004, 254-255)

Tapahtuma johti hätäjäähdytysjärjestelmien uusimiseen Ruotsin ja myös Suomen ydinvoimalaitoksissa. Ruotsissa viisi ydinvoimalaitosta oli pysähdyksissä noin puolen vuoden ajan, kunnes imusiivilöille ja eristyksille oli tehty tarvittavat muutokset.

Suomessa Loviisassa suojarakennuksen lattiakaivot uudistettiin kokonaan vuonna 1993, niiden imupinta-alaa kasvatettiin ja ne varustettiin puhdistusjärjestelmällä. (Sandberg 2004, 255-256)

Barsebäckin tapaus on monella tapaa hyvä esimerkki ydinturvallisuuden kehittymisestä. Ydinturvallisuudessa isoja turvallisuustekijöitä löydetään usein alueilta, jotka ovat hyvinkin arkisia kuten esimerkiksi sähkö ja eristys. Irtoavien eristeiden käyttäytyminen onnettomuustilanteissa oli tyypillinen turvallisuuskysymys, joka ei kuulunut monesti kenenkään vastuualueelle. Myös näihin arkisempiin asioihin alettiin kiinnittää aiempaa enemmän huomiota turvallisuussuunnittelussa. Barsebäckin tapausta seurannut kansainvälinen yhteistyö voidaan nähdä ydinturvallisuudelle positiivisena asiana.

7.4 9/11 -iskujen vaikutus ydinvoimalaitosten turvallisuuteen

Ydinvoimalaitoksia on aina valvottu tarkasti niiden herkän ja vaaroja sisältävän prosessin, siellä syntyvien vaarallisten aineiden vuoksi. Ydinvoimalaitokset ovat lähes poikkeuksetta elintärkeitä kohteita kansalliselle energiantuotannolle. Ydinvoiman kehitys oli myös olennainen osa suurvaltapolitiikkaa, eivätkä laitosten yksityiskohtaiset suunnittelutiedot olleet julkista tietoa. Myös ulkoisiin uhkatekijöihin oli varauduttu.

Syyskuun 11. päivän terrori-iskut Yhdysvalloissa vuonna 2001 muuttivat kuitenkin maailmaa peruuttamattomasti turvajärjestelyjen osalta. Lentokenttien lisäksi myös ydinvoimaloiden turvatoimia kiristettiin. Terrori-iskut vaikuttivat oleellisesti etenkin uusien ydinvoimalaitosten suunnitteluvaatimuksien kovenemiseen. Yhdysvaltojen valvova viranomaisen NRC päätti helmikuussa 2002 määrätä maan kaikkien käytössä olevien ydinvoimalaitosten luvanhaltijat kehittämään strategian mistä tahansa syystä syntyneiden suurten tulipalojen ja räjähdysten varalta, myös lentokoneiden törmäysten varalta (NRC 2008, 2). Joulukuussa 2008 NRC vahvisti asetuksen, jonka nojalla jokainen uudelle ydinvoimalaitokselle lupaa hakeva taho joutuu tekemään selvityksen suuren matkustajalentokoneen törmäykseen varautumisesta ja vaikutusten torjunnasta (NRC 2008, 13)

Suomessa STUK:n 15.11.2013 julkaisemassa YVL-ohjeessa A.11 esitetään vaatimuksia ydinvoimalaitoksen ja käytetyn polttoaineen varaston kestävyydelle lentokoneen törmäystä vastaan. Näiden mukaan suunnittelussa tulee ottaa huomioon laitoksen rakenteellisen lujuuden lisäksi myös muun muassa sähkö- ja turvajärjestelmien toimiminen, mahdolliset tulipalot ja radioaktiiviset päästöt. Rakennuslupaa ei myönnetä ilman kattavia selvityksiä näistä. (STUK 2013a, 28-30) Syyskuun 11. päivän iskut ovat hyvä esimerkki siitä, että suurilla onnettomuuksilla voi olla vaikutuksia myös ydinturvallisuuden kehitykselle, vaikka ne eivät edes olisi ydinonnettomuuksia.

7.5 Suomessa tapahtuneita ydintapahtumia

Suomessa ei ole tapahtunut INES-2 -luokkaa vakavampia tapahtumia (Sandberg 2004, 259-265). Tapahtuma luokitellaan INES-2 -luokkaan, mikäli turvallisuudessa on tapahtunut merkittäviä vaarantumisia, mutta mitään seurauksia ei kuitenkaan päässyt tapahtumaan ja turvallisuus on pystytty varmistamaan (IAEA 2013, 3).

Olkiluoto 2 menetti vuonna 1991 yhteyden ulkoiseen sähköverkkoon 7,5 tunniksi kytkinlaitosrakennuksessa tapahtuneen tulipalon seurauksena. Laitos toimi tämän ajan hätädieselgeneraattorien tuottamalla sähköllä. Tapahtuma paljasti puutteita sähköjärjestelmien suunnittelussa. (Sandberg 2004, 264) Olkiluodon molemmissa laitoksissa havaittiin ulospuhallusjärjestelmässä ohjausventtiilivikoja vuonna 1985. Olkiluoto 1:llä vuonna 1989 havaittiin pikasulkujärjestelmän vajaatoimintaa. Viidentoista säätösauvan ulosvedossa oli ongelmia, sillä säätösauvakoneistoon oli päässyt metallijauhetta. Jauhetta kerättiin puhdistustöiden aikana noin kolme litraa ja laitos oli näiden töiden aikana puolitoista kuukautta alhaalla. (Sandberg 2004, 261-264)

Loviisassa molempien laitossyöksikköjen sekundääripiirin syöttövesiputket ovat katkenneet, Loviisa 1:llä vuonna 1991 ja Loviisa 2:lla vuonna 1993. Molemmat tapaukset johtuivat eroosiokorroosion aiheuttamasta putken syöpymisestä. Loviisa 2:n tapaus nostettiin INES-2 -luokkaan tapahtuman toistumisen vuoksi. (STUK 2015) Loviisa 2:lla on myös tapahtunut hätäjähdytyksen käynnistyminen vuonna 1981, sekä pää- ja

hätäsyöttöveden menetys vuonna 1987. Loviisa 1:llä on tapahtunut työntekijöiden virheellisestä toiminnasta johtunut hätäjähdytysvesisäiliön booripitoisuuden laimeneminen alle sallitun rajan vuonna 1988. (Sandberg 2004, 260-263)

Suomessa tapahtuneet ydintapahtumat ovat tässä kandidaatintyössä esiteltyihin muissa maissa tapahtuneisiin ydintapahtumiin verrattuna hyvin lieviä. Niiden vaikutukset ovat rajoittuneet laitoksen sisäpuolelle ja turvallisuus on pystytty varmistamaan mahdollisesta lisäviasta huolimatta. Vaikka Suomessa onkin tapahtunut ydintapahtumia historian saatossa, turvallisuuskulttuurin voidaan nähdä Suomessa olevan erinomaisella tasolla. Tapahtumista on otettu myös opiksi, esimerkiksi Olkiluoto 2:n vuoden 1991 tulipalon jälkeen sähköjärjestelmän erottelua parannettiin, kun yhden osajärjestelmän vikaantuminen tulipalossa oli aiheuttanut lopulta koko ulkoisen sähköverkon menetyksen (Sandberg 2004, 264-265).

8 KIRJALLISUUSSELVITYKSEN PERUSTEELLA TEHTYJÄ PÄÄTELMIÄ

Tämä kandidaatintyö osoittautui melko haasteelliseksi, sillä aihe oli erittäin laaja ja tietoa on tarjolla erittäin paljon. Yksittäistä ydinonnettomuutta käsittelevä raportti saattoi olla pituudeltaan useita satoja sivuja, ja samaa onnettomuutta käsittelevien raporttien ja kirjallisten lähteiden välillä saattoi olla eroavaisuuksia. Ydinonnettomuuksia voidaan myös lähestyä erittäin monesta eri näkökulmasta, eikä selkeän kokonaiskuvan luominen ydinonnettomuuksista ei ole näin kovin helppoa. Tässä kappaleessa on esitetty muutamia tärkeimpiä kirjallisuusselvityksen perusteella tehtyjä havaintoja ydinonnettomuuksien historiasta ja ydinturvallisuuden kehityksestä.

Historian saatossa tapahtuneet ydinvoimalaitosonnettomuudet ovat usein syntyneet monien eri tekijöiden yhteisvaikutuksesta, eikä niille voi nimetä yhtä ainoaa tekijää. Yhden turvallisuuden osa-alueen pettäminen johtaa yleensä toisenkin osa-alueen pettämiseen. Esimerkiksi suunnitteluvirhe instrumentoinnissa johtaa helposti väärään tulkintaan ihmisen toimesta, joka puolestaan voi johtaa virheellisiin toimenpiteisiin. Vastaavasti ihmisen tekemä odottamaton virhe, jota ei ole otettu huomioon suunnittelussa, voi johtaa onnettomuuteen.

Ydinvoimalaitosonnettomuuksissa on kirjallisuusselvityksen perusteella lähes aina kyse joko reaktorin jälkilämmön jäähdytyksen epäonnistumisesta tai reaktorin tehon käsistä karkaamisesta. Tehon käsistä karkaaminen on huomattavasti harvinaisempi tapaus ja se vaatii usein huomattavia puutteita reaktorisuunnittelussa, esimerkiksi positiivisen takaisinkytkennän muodossa. Lisäksi tämän tyyppistä onnettomuutta edeltää usein vakava käyttövirhe, kuten reaktorissa olevien säätösauvojen liian vähäinen määrä tai kiertävän veden booripitoisuuden liiallinen laimeneminen. Reaktorin jälkilämmön poiston epäonnistuminen on puolestaan huomattavasti yleisempi syy ydinvoimalaitosonnettomuuksien syntyyn, sillä tilanne voi syntyä hyvin monella eri

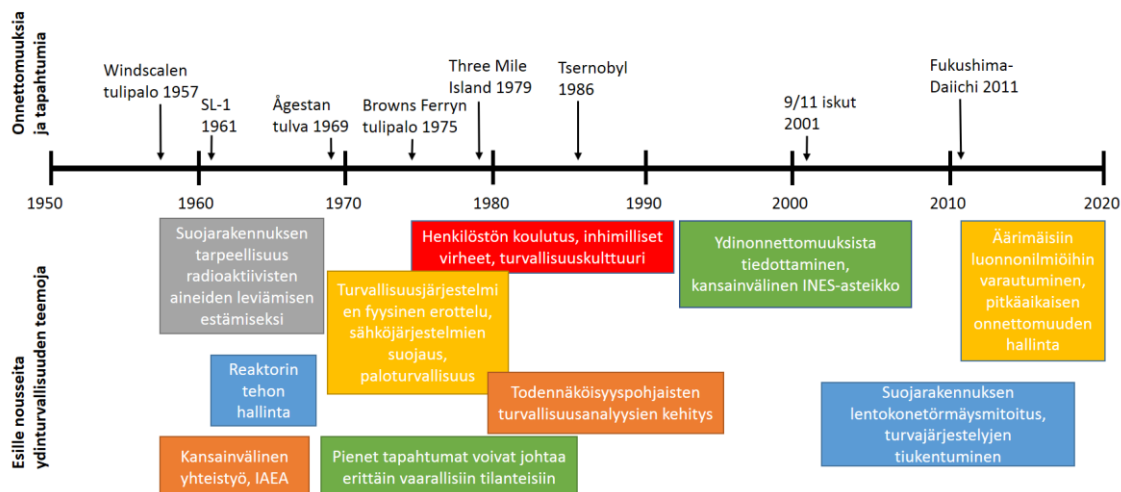
tavalla. Useimmiten tämäntyyppisten onnettomuuksien takana on vaikeasti ennustettava tapahtuma, kuten ulkoisesta syystä johtuva sähköhäiriö tai reaktorin kiertopiirin vaurioitumisesta johtuva jäähdytteen menetys.

Yleinen turvallisuuden kehittyminen ydinvoimateollisuudessa on ollut pitkäaikainen prosessi. Turvallisuuskehityksen ytimessä on jatkuva kehittymisen halu. Usein kehityksen esteenä voi olla hämääntyminen siitä, että tällä hetkellä käytössä oleva tapa on paras tapa. Nykyhetkellä käytössä oleva tapa voi tuntua hyvältä, mutta niin ei tehdä välttämättä siksi, että se olisi paras tapa, vaan koska samalla tavalla on tehty asioita jo pitkään ja toimintaa tukeva ympäristö on olemassa. On helppo käsittää, minkä takia ydinturvallisuuden ja turvallisuuskulttuurin suurimmat kehitysaskeleet ovatkin tapahtuneet ydinonnettomuuksien ja muiden turvallisuuteen vaikuttaneiden tapahtumien yhteydessä, sen sijaan että näiden tapahtumien mahdollisuus olisi otettu huomioon jo suunnitteluvaiheessa.

Ydinonnettomuudet ovat vaikuttaneet keskeisesti turvallisuusjärjestelmien suunnitteluun. Suunnittelun keskeiseksi periaatteeksi on muodostunut se, että yhden turvallisuusjärjestelmän vikaantuessa täytyy varalla olla korvaava järjestelmä. Luotettavuuden varmistamiseen on useita tapoja. Rinnakkaisperiaatteen eli redundanssin mukaisesti turvallisuustoimintoa voidaan hoitaa usealla samanlaisella osajärjestelmällä, jotta yhden osajärjestelmän vikaantuminen ei estä turvallisuustoimintoa. Erilaisuusperiaatteen eli diversiteetin mukaisesti turvallisuustoimintoa voidaan hoitaa rinnakkaisilla ja eri periaatteella toimivilla järjestelmillä, millä pienennetään samasta syystä johtuvan samanaikaisen vikaantumisen riskiä. Kolmantena periaatteena on jo työssä mainittu erotteluperiaate, jossa järjestelmien fyysisellä sijoittamisella estetään ulkoisesta syystä, kuten tulipalosta johtuvia järjestelmien samanaikaista vikaantumista. (Sandberg 2004, 102-103)

Alla olevassa kuvassa 1 on aikajanalla esitetty tämän kandidaatintyön kirjallisuusselvityksen perusteella ydinturvallisuuden kehitystä. Aikajanaan on sijoitettu työssä läpikäytyjä ydinonnettomuuksia ja muita tapahtumia, joiden on voitu katsovan

vaikuttaneen ydinturvallisuuden kehitykseen. Aikajanan samalle hetkelle sijoittuvat ydinturvallisuusteemat ja onnettomuudet eivät välttämättä liity suoraan toisiinsa, mutta yhteyksiä on mahdollista löytää niiden väliltä.



Kuva 1: Kirjallisuusselvityksen pohjalta laadittu ydinturvallisuuden kehitystä kuvaava aikajana.

Alla olevassa taulukossa 2 on esitetty tiedossa olevia vakavaksi luokiteltuja polttoainevaurioihin johtaneita ydinvoimalaitosonnettomuuksia. Listassa on huomattava määrä tapahtumia, joita ei tässä kandidaatintyössä ole käsitelty, mikä antaa paremman käsityksen erittäin vakavien ydinvoimalaitostapahtumien yleisyydestä.

Taulukko 2: Polttoainevaurioita aiheuttaneita ydinvoimalaitostapahtumia (IAEA 2019) (Sandberg 2004, 239). Toiminnan alkaminen on määritetty ensimmäisestä kriittisyydestä, ja teho on ilmoitettu joko sähköteho (e) tai termisenä teho (th).

Reaktori	Teho [MW]	Tyyppi (jäähdyte/hidastin)	Toiminta			INES
			Vuosi alkoi	Maa		
Chalk River NRX	10 (th)	Raskasvesi / raskasvesi	1952	1947	Kanada	5
Windscale 1	n. 2 (th)	Kevytvesi / grafiitti	1957	1950	Iso-Britannia	5
SL-1	3 (th)	Kevytvesi / kevytvesi	1961	1958	USA	4
Enrico Fermi 1	200 (th)	Natrium / boorikarbidi	1966	1963	USA	4
Chapelcross 2	400 (e)	Kaasu / grafiitti	1967	1959	Iso-Britannia	
Saint-Laurent 1	500 (e)	Kaasu / grafiitti	1969	1969	Ranska	4
Sosnovyi Bor 1	1000 (e)	Kevytvesi / grafiitti	1975	1973	Neuvostoliitto	
Bohunice A-1	143 (e)	Kaasu / raskasvesi	1977	1972	Tsekkoslovakia	4
Beloyarsk 2	160 (e)	Kevytvesi / grafiitti	1977	1967	Neuvostoliitto	
TMI-2	959 (e)	Kevytvesi / kevytvesi	1979	1978	USA	5
Saint-Laurent 2	530 (e)	Kaasu / grafiitti	1980	1971	Ranska	4
Tsernobyľ 1	800 (e)	Kevytvesi / grafiitti	1982	1977	Neuvostoliitto	
Tsernobyľ 4	1000 (e)	Kevytvesi / grafiitti	1986	1983	Neuvostoliitto	7
Sosnovyi Bor 3	1000 (e)	Kevytvesi / grafiitti	1992	1979	Venäjä	2
Paks 2	500 (e)	Kevytvesi / kevytvesi	2002	1984	Unkari	3
Fukushima						
Daiichi 1	460 (e)	Kevytvesi / kevytvesi	2011	1970	Japani	7
Fukushima						
Daiichi 2	784 (e)	Kevytvesi / kevytvesi	2011	1973	Japani	7
Fukushima						
Daiichi 3	784 (e)	Kevytvesi / kevytvesi	2011	1974	Japani	7

Taulukosta 2 voidaan huomata, että grafiittihidastetta käyttäville reaktoreille on käynyt huomattavan paljon polttoaineaurioihin johtaneita onnettomuuksia. Tämä voidaan nähdä keskeisenä syynä sille, että uusia grafiittihidastetta ja vesijäähdytettä käyttäviä ydinvoimalaitostyyppisiä ei enää rakenneta (IAEA 2018, 64). Grafiittihidasteen käytöstä ei ole kuitenkaan kokonaan luovuttu, vaan se on hyvä ratkaisu esimerkiksi kaasujäähdytteisen kuulapetireaktorin polttoainekuulan pinnassa (Woo 2012, 62).

Taulukosta 2 esille nousee myös esille se, että huomattavan moni vakava onnettomuus on tapahtunut hyvin lyhyen ajan sisällä laitoksen käyttöönotosta, tässä tapauksessa ensimmäisestä reaktorin kriittisyydestä. Oikeastaan vasta Fukushima tapauksessa vuonna 2011 jo iäkkäämmät yli 35 vuotta vanhat laitosyksiköt kärsivät polttoaineaurioita. Tämä kertoo osin siitä, että uudentyyppisen teknologian käyttöönotossa on ollut piileviä riskejä, eikä kaikkia mahdollisia tilanteita ole pystytty ottamaan huomioon.

Yksi tärkeimmistä havainnoista kuvasta 1 ja taulukosta 2 on se, että vakavat ydinvoimalaitosonnettomuudet ovat huomattavasti vähentyneet nykypäivää kohti tullessa. Maailmanlaajuisen mediahuomion saaneet Three Mile Islandin ja Tsernobylin onnettomuudet voidaan nähdä lopullisena käännekohtana, jonka jälkeen turvallisuuteen on alettu kiinnittämään vakavammin huomiota.

On vaikea nähdä, että Fukushima onnettomuuden jälkeen voisi vielä tapahtua vastaavan kokoluokan suuronnettomuuksia ydinvoimalaitoksilla. Reaktori- ja laitossuunnittelun osalta viranomaisvaatimukset ovat muuttuneet jatkuvasti tiukemmiksi. Suunnitteluratkaisuissa on siirrytty varautumaan pahimpiin kuviteltavissa oleviin tilanteisiin, vaikka ne olisivat erittäin epätodennäköisiä. Myös kansainvälistä yhteistyötä eri maiden välillä tehdään enemmän kuin koskaan ennen.

Vuoden 2018 lopussa maailmassa on 31 valtiota, joilla on ydinvoimakapasiteettia käytössä, ja kuudessatoista maassa rakennetaan parhaillaan uutta kapasiteettia. Näiden maiden joukossa on monia länsimaihin verrattuna vähemmän kehittyneitä valtioita, kuten Intia, Pakistan, Iran ja Bangladesh. (IAEA 2019) On helppo nähdä seuraavan suuren

ydinvoimalaitosonnettomuuden todennäköisyyden olevan korkeampi näissä köyhemmissä maissa, mutta samalla saatetaan unohtaa, että länsimainenkin turvallisuuskulttuuri voi rapautua tyytyväisyyden turmellessa kehityksen. Tietämys ydinvoiman riskeistä on kuitenkin nykypäivänä suurempi kuin koskaan aikaisemmin, ja aikaisempien onnettomuuksien tuomat opit vähentävät uusien onnettomuuksien riskiä olennaisesti kaikkialla maailmassa.

9 YHTEENVETO

Ydinvoiman historian alkuvaiheessa 1900-luvun alussa onnettomuudet johtuivat pääasiassa radioaktiivisuuden ja säteilyn uutuudesta ilmiöinä, jolloin niiden vaaroja ei tunnistettu. Suurimman huomion saivat tapaturmat, joissa ilmeni suurista kertannoksista seuranneita suoria eli deterministisiä vaikutuksia. Sen sijaan yleisempiä ja pidemmällä aikavälillä ilmeneviä stokastisia haittavaikutuksia, kuten esimerkiksi syöpiä ei pystytty havaitsemaan laadukkaan tilastotieteen avulla vielä kymmeneen vuosiin. Näin pienempien säteilyannosten kerryttämän kumulatiivisen annoksen terveysvaikutuksiin ei osattu suhtautua asianmukaisella vakavuudella. Säteilyn ja radioaktiivisten aineiden käsittelyn turvallisuus kehittyi kuitenkin myöhemmin tietämyksen lisääntyessä, ja säteilylähteiden kanssa työskentelevien henkilöiden saamia säteilyannoksia seurataan aktiivisesti.

Ydinvoimalaitoksilla on merkittävä energiapoliittinen asema yhteiskunnissa, ja ydinvoimaa on käytetty sen keksimisestä asti osana suurvaltapoliitiikkaa etenkin ydinasetuotannon muodossa. Ydinaseisiin tarvittavan plutoniumin tuotanto oli monien valtioiden tärkeimpiä hankkeita ja tavoitteiden saavutuksen rinnalla turvallisuus oli toissijaista. Valtion suunnalta tuleva painostus on ollut monissa ydinonnettomuuksissa merkittävänä tekijänä, mukaan lukien historian pahimmassa ydinonnettomuudessa Tsernobylässä vuonna 1986. Myös Fukushima Daiichin onnettomuudessa vuonna 2011 poliittinen ja ennen kaikkea yhteiskunnallinen turvallisuusasenne oli keskeisenä syynä onnettomuudelle.

Historian saatossa tapahtuneet ydinvoimalaitosonnettomuudet ovat pääasiallisesti aiheutuneet joko reaktorin tehon karkaamisesta käsistä, tai reaktorin jälkilämmön jäähtymisen epäonnistumisesta. Tehon karkaamisesta tai jäähtymisen epäonnistumisesta seuraa useimmiten polttoaine-elementtien sulaminen, josta aiheutuu radioaktiivisten aineiden leviämisen ja suurien säteilytasojen lisäksi usein myös

vetyräjähdys vaara. Erittäin keskeinen piirre ydinvoimalaitosonnettomuuksille on se, että hyvin pienistäkin tapahtumista voi kehittyä erittäin vakavia onnettomuuksia. Tästä ilmiöstä ehkä tunnetuin esimerkki on Three Mile Islandin onnettomuus vuonna 1979.

Pienemmillä ydintapahtumilla on ollut myös suuri vaikutus ydinturvallisuuden kehitykseen. Muun muassa tulvista ja tulipaloista aiheutuneet sähköhäiriöt ovat aiheuttaneet useita läheltä-piti -tilanteita ydinvoimalaitoksilla, jotka ovat aiheuttaneet reaktorin muodostaman jälkilämmön poiston vaarantumisen. Nämä tilanteet ovat johtaneet useisiin turvallisuusparannuksiin niin teknisen suunnittelun kuin henkilöstön koulutuksen ja ohjeistuksen osalta. Myös ydinvoimalaitosten ulkopuolella tapahtuneet säteilylähteiden kanssa tapahtuneet ydintapahtumat ovat kehittäneet ydinturvallisuutta.

Ydinturvallisuudessa on tapahtuneiden ydinonnettomuuksien myötä otettu erittäin suuria askelia eteenpäin. Reaktorisuunnittelussa otetaan tarkemmin huomioon luontainen turvallisuus niin hitauden, takaisinkytkentöjen ja turvajärjestelmien muodossa. Ydinvoimalaitosten suunnittelussa on tänä päivänä siirrytty varautumaan pahimpiin kuviteltavissa oleviin onnettomuuksiin. Etenkin ulkoisiin uhkiin, kuten maanjäristyksiin ja tulipaloihin varaudutaan huolellisemmin. Turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa otetaan laajemmin huomioon myös erotteluperiaate, laitteiden redundanttisuus ja erilaisuusperiaate. Myös inhimillisiin virheisiin varaudutaan paremmin muun muassa ohjaajien huolellisemman koulutuksen muodossa.

LÄHDELUETTELO

Cummings, W.E. & Matzie, R. 2018. Design evolution of PWRs: Shippingport to generation III+. [viitattu 4.12.2018]. Progress in Nuclear Energy: January 2018, vol. 102. S. 21. Saatavilla:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197017302123?via%3Dihub>

Dahlgren, C. 1996. SKI Report 96:51, The Flooding Incident at the Ågesta Pressurized Heavy Water Nuclear Power Plant. [viitattu 7.11.2018]. Division of Nuclear Power Safety, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. S. 1-25. Saatavilla: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/028/28028518.pdf

Filburn, T. & Bullard, S. 2016. Three Mile Island, Chernobyl and Fukushima: Curse of the Nuclear Genie. [viitattu 11.6.2018]. Sveitsi: Springer International Publishing. S. 29-112. ISBN: 978-3-319-34055-5.

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2019. Power Reactor Information System (PRIS). [viitattu 22.1.2019]. Päivitetty 1/2019. Saatavilla: <https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2018. Nuclear Power Reactors in the World. [viitattu 12.11.2018]. Itävalta, Wien: International Atomic Energy Agency (IAEA). S. 64. ISBN: 978-92-0-101418-4. Saatavilla: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-38_web.pdf

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2015. The Fukushima Daiichi Accident: Report by the Director General. [viitattu 5.7.2018]. Itävalta, Wien: International Atomic Energy Agency (IAEA). S. 24-68. ISBN: 978-92-0-107015-9. Saatavilla: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf>

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2013. INES User's Manual 2008 Edition. [viitattu 4.7.2018]. Itävalta, Wien: International Atomic Energy Agency (IAEA). S. 1-3. Saatavilla: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/INES2013web.pdf>

International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG). 1992. The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1: INSAG-7. [viitattu 11.6.2018]. Itävalta, Wien: International Atomic Energy Agency (IAEA). S. 3-125. ISBN: 92-0-104692-8. Saatavilla: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub913e_web.pdf

International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG). 1991. Safety culture: A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group. [viitattu 8.1.2019]. Itävalta, Wien: International Atomic Energy Agency (IAEA). S. 1. ISBN: 92-0-123091-5. Saatavilla: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub882_web.pdf

Kurokawa, K. 2012. The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission: Executive Summary. [viitattu 6.1.2019]. Japani: The National Diet of Japan. S. 9. Saatavilla: <https://reliefweb.int/report/japan/official-report-fukushima-nuclear-accident-independent-investigation-commission>

Mahaffey, J. 2014. Atomic accidents: A History of Nuclear Meltdowns and Disasters: from Ozark Mountains to Fukushima. [viitattu 10.11.2018]. USA, New York: Pegasus Books LLC. S. 4-358. ISBN: 978-1-60598-492-6.

Paile, W. 2002. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja: Osa 4: Säteilyn terveysvaikutukset. [viitattu 9.1.2019]. Helsinki: Säteilyturvakeskus (STUK). S 44-45. ISBN: 951-712-506-2. Saatavilla: <https://www.stuk.fi/julkaisut/sateily-ja-ydinturvallisuus-kirjasarja/sateilyn-terveysvaikutukset>

Pukkila, O. 2004. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja: Osa 3: Säteilyn käyttö. [viitattu 4.12.2018]. Helsinki: Säteilyturvakeskus (STUK). S. 339. ISBN: 951-712-505-4. Saatavilla: <https://www.stuk.fi/julkaisut/sateily-ja-ydinturvallisuus-kirjasarja/sateilyn-kaytto>

Routamo, T. 2016. Nordic Reactor Safety Related Progress. [PowerPoint esitys 13.1.2016]. [viitattu 3.12.2016]. Säteilyturvakeskus (STUK). S. 3-5. Saatavilla: http://www.nks.org/download/NKSseminar2016pdf/12_nks_nordic_reactor_safety_related_progress.pdf

Sandberg, J. 2004. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja: Osa 5: Ydinturvallisuus. [viitattu 12.7.2018]. Helsinki: Säteilyturvakeskus (STUK). S. 41-265. ISBN: 951-712-507-0. Saatavilla: <http://www.stuk.fi/julkaisut/sateily-ja-ydinturvallisuus-kirjasarja/ydinturvallisuus>

Simpson, J. 1992. Britain's Chernobyl? – Windscale 1957: Anatomy of a Nuclear Accident by Lorna Arnold. [viitattu 6.11.2018]. Nature, 356(6367). S. 297. Saatavilla: <https://search.proquest.com/docview/204420567/fulltextPDF/C2B6287259D7433BPQ/1?accountid=27292>

Smith, J. & Beresford, N.A. 2005. Chernobyl – Catastrophe and Consequences. [viitattu 13.6.2018]. Iso-Britannia, Chichester: Praxis Publishing Ltd. Sivu 2. ISBN 3-540-23866.

Säteilyturvakeskus (STUK). 2016. Finnish report on nuclear safety: Finnish 7th national report as referred to in Article 5 of the Convention on Nuclear Safety. [viitattu 3.12.2018]. S. 95-97. ISBN: 978-952-309-330-0. Saatavilla: https://www-ns.iaea.org/downloads/ni/safety_convention/7th-review-meeting/finland-7th-national-report.pdf

Säteilyturvakeskus (STUK). 2015. Ydinlaitos- ja säteilytapahtumien kansainvälinen vakavuusasteikko INES. [viitattu 4.7.2018]. Päivitetty 11/2015. Saatavilla: <https://www.stuk.fi/aiheet/sateilyvaara/ydinlaitos-ja-sateilytapahtumien-kansainvalinen-vakavuusasteikko-ines>

Säteilyturvakeskus (STUK). 2013a. Ohje YVL A.11 / 15.11.2013: Ydinlaitoksen turvajärjestelyt. [viitattu 7.11.2018]. S. 28-30. ISBN: 978-952-478-935-6. Saatavilla: http://www.finlex.fi/data/normit/41427/YVL_A.11.pdf

Säteilyturvakeskus (STUK). 2013b. Ohje YVL B.8 / 15.11.2013: Ydinlaitoksen palontorjunta. [viitattu 7.11.2018] S. 6-16. ISBN: 978-952-478-875-5. Saatavilla: https://www.finlex.fi/data/normit/41407/YVL_B.8.pdf

Teräsvirta, A. 2016. Design and Implementation of Forced Draft Cooling Towers for Loviisa NPP [PowerPoint esitys 3.11.2016]. [viitattu 3.12.2018]. Fortum Power and Heat Oyj. S. 2-12. Saatavilla: https://www.ats-fns.fi/images/files/2016/syp2016/presentations/TSG2_ATerasvirta_ForcedCoolingTowersForLoviisa.pdf

United States Atomic Energy Commission (AEC). 1962. IDO-19311 Final Report of SL-1 Recovery Operation, Idaho Test Station, General Electric Corporation, July 27, 1962. [viitattu 7.11.2018]. S. 238-271. Saatavilla: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1029163/m2/1/high_res_d/4763434.pdf

United States Energy Information Administration (EIA). 2018. Japan has restarted five nuclear reactors in 2018. [21.1.2019]. Päivitetty 11/2018. Saatavilla: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=37633>

United States Nuclear Regulatory Commission (NRC). 2008. FINAL RULE - CONSIDERATION OF AIRCRAFT IMPACTS FOR NEW NUCLEAR POWER REACTORS (RIN 3150-AI19). [viitattu 7.11.2018]. S. 2-13. Saatavilla: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/secys/2008/secy2008-0152/2008-0152scy.pdf>

Woo, T. 2012. Atomic Information Technology: Safety and Economy of Nuclear Power Plants. [viitattu 8.1.2019]. Iso-Britannia, Lontoo: Springer-Verlag. S. 62. ISBN: 978-1-4471-4030-6.

World Nuclear Association (WNA). 2019. Nuclear Power in Russia. [viitattu 22.1.2019]. Päivitetty 12/2018. Saatavilla: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx>

World Nuclear Association (WNA). 2018. Nuclear Power in Germany. [viitattu 12.7.2018]. Päivitetty 1/2019. Saatavilla: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>