



DISKREETIT RADIOAKTIIVISET PARTIKKELIT JA NIIHIN LIITTYVIEN KEHITYSTOIMIEN SELVITYS LOVIISAN YDINVOIMALAITOKSELLA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

Pyry-Pekka Koistinen

Tarkastajat: TkT Elina Hujala

DI Liisa Salminen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Pyry-Pekka Koistinen

Diskreetit radioaktiiviset partikkelit ja niihin liittyvien kehitystoimien selvitys Loviisan ydinvoimalaitoksella

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

34 sivua, 3 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: TKT Elina Hujala ja DI Liisa Salminen

Avainsanat: Diskreetti partikkeli, säteilysuojelu, säteilyturvallisuus, säteilyannos, radioaktiivinen kontaminaatio

Tässä Loviisan ydinvoimalaitoksen säteilysuojeluorganisaatiolle tehdyssä kandidaatintyössä tarkastellaan diskreettejä partikkeleja säteilyturvallisuuden näkökulmasta.

Diskreetit partikkelit ovat mikroskooppisen pieniä, korkean ominaisaktiivisuuden omaavia radioaktiivisia hiukkasia. Ne aiheuttavat riskin korkeisiin pistemäisiin säteilyannoksiin joutuessaan iholle tai kehon sisälle. Diskreetit partikkelit ovat myös vaikeasti havaittavissa pienen kokonsa takia, tehden niiden hallinnasta haasteellista ydinvoimalaitoksen säteilysuojelun kannalta.

Tutkimuksen perusteella Loviisan ydinvoimalaitokselle suositellaan säteilysuojelun ohjeiden, suunnitelmien, sekä näihin perustuvien menetelmien päivittämistä. Uusien menetelmien tulisi parantaa laitoksen säteilyturvallisuutta otteen huomioon diskreetit partikkelit ja niiden hallintaan sopivat keinot. Nämä muutokset voidaan toteuttaa käyttäen tässä työssä tutkittuja hyväksi havaittuja käytäntöjä ja menetelmiä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Pyry-Pekka Koistinen

Discrete radioactive particles and improvement measures related to them at the Loviisa nuclear power plant

Bachelor's thesis

2023

34 pages, 3 figures, 3 tables and 1 appendix

Examiners: D.Sc Elina Hujala and M.Sc Liisa Salminen

Keywords: Discrete particle, radiation protection, radiation safety, radiation dose, radioactive contamination

This bachelor's thesis made for the radiation protection department at the Loviisa nuclear power plant considers discrete particles from the perspective of radiation safety.

Discrete particles are microscopically small radioactive particles with a high specific activity. They cause a risk for high concentrated skin- and internal radiation doses. Discrete particles are also difficult to detect due to their small size. This causes multiple problems considering their control to the radiation protection personnel.

This thesis recommends the Loviisa nuclear power plant to update its radiation protection guides and plans, and then methods based on them. The new methods should improve the plant's radiation safety by taking discrete particles and suitable methods for their control into consideration. These changes can be implemented using proven to be good practices and methods researched in this thesis.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	aktiivisuus	[Bq]
D	absorboitunut annos	[Gy]
d	halkaisija	[m]
E	efektiivinen annos	[Sv]
E_x	säteilyn energia	[MeV]
H	ekvivalenttiannos	[Sv]
P	teho	[W]
w	painokerroin	[-]

Kreikkalaiset

ρ	tiheys	[kg/m ³]
μ	vaimennuskerroin	[-]

Alaindeksit

β	beetasäteily
R	säteilylaji
T	kudos

Lyhenteet

DPK	Dose point kernel
EPRI	Electric power research institute

IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRU	International comission on radiation units and measurements
INPO	Institute of nuclear power operations
NISP	Nuclear industry standard process
NRC	Nuclear regulatory comission
STUK	Säteilyturvakeskus

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Työn tavoitteet	6
1.2	Loviisan voimalaitos	6
1.3	Diskreetin partikkelin määrittelmä.....	7
2	SÄTEILY JA SÄTEILYANNOS.....	8
2.1	Ionisoiva säteily	8
2.1.1	Säteilyn haittavaikutukset	8
2.2	Säteilyannos	9
2.2.1	Annosekvivalentti, ekvivalenttiannos ja efektiivinen annos.....	9
2.2.2	Syväannos ja pinta-annos.....	11
2.3	Säädäntö säteilyannoksista.....	12
3	DISKREETIT PARTIKKELIT	13
3.1	Kontaminaation synty ydinvoimalaitoksella.....	13
3.2	Diskreetit radioaktiiviset partikkelit.....	14
3.3	Diskreettien partikkelien vaarallisuus	16
3.4	Diskreettien partikkelien aiheuttamat haasteet säteilysuojelulle.....	17
3.5	Diskreetit partikkelit henkilökontaminaatiotapauksissa	18
3.5.1	Sisäinen kontaminaatio hengitysteiden kautta	19
3.5.2	Sisäinen kontaminaatio nieltynä	19
3.6	Ihoannoksen määrittäminen	20
3.6.1	Beetasäteilyn ihoannos	20
3.6.2	Gammasäteilyn ihoannos	21
4	DISKREETTIEN PARTIKKELIEN HALLINTA MAAILMALLA	23
4.1	Painevesilaitosten riskit diskreettien partikkelien suhteen.....	23
4.2	Keinoja diskreettien partikkelien hallintaan.....	24
4.2.1	Hot particle control zone.....	24
4.3	Kontaminaatioraportit	25

4.4	Pyyhkäisnäytteiden käyttö diskreettien partikkelien hallintaan.....	26
5	KORKEA-AKTIIVISTEN PARTIKKELIEN HALLINTA LOVIISAN YDINVOIMALAITOKSELLA.....	27
5.1	Loviisan voimalaitoksen kontaminaatioseuranta	27
5.2	Henkilömonitorointi ja henkilökontaminaatioraportointi	29
5.3	Säteilytyölupa valvonta-alueelle	30
5.4	Suosituksset toimiksi Loviisan ydinvoimalaitokselle.....	31
6	Johtopäätökset	32
	Lähteet	33

Liitteet

Liite 1. INPO:n Henkilökontaminaatiokyselelylomake

1 JOHDANTO

Tämä tutkimus on tehty selvityksenä Fortum Power and Heat Oy:n Loviisan ydinvoimalaitoksen säteilysuojeluorganisaatiolle diskreettien radioaktiivisten partikkelien hallinnasta säteilysuojelun näkökulmasta.

1.1 Työn tavoitteet

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää mikä on diskreetti radioaktiivinen partikkeli, millaisia riskejä ne aiheuttavat säteilysuojelun kannalta sekä mitä säteilysuojelutoimenpiteitä on tunnistettu tehtäväksi niiden kannalta. Selvitys pohjautuu säteilyturvakeskuksen (STUK) ja kansainvälisen atomienergiajärjestö IAEA:n ohjeisiin, sekä ydinvoimalaitosten käyttöä määritteleviin säteily- ja ydinenergialakiin. Tarkasteltavana on myös Loviisan – ja muiden ydinvoimalaitoksen ja niiden säteilysuojeluorganisaatioiden toiminta aikaisemmissa diskreettejä aktiivisia partikkeleita koskevissa tapauksissa.

1.2 Loviisan voimalaitos

Loviisan ydinvoimalaitoksella on kaksi neuvostovalmisteista VVER-reaktoriyksikköä. Ensimmäinen yksikkö otettiin käyttöön vuonna 1977 ja toinen vuonna 1980. Laitosten alkuperäinen sähköteho oli 440 MW, joka on lukuisten modernisointien jälkeen nostettu 507 MW:iin. (Fortum 2022)

Ydinvoimalaitoksen normaalista toiminnasta syntyy ionisoivaa säteilyä. Laitoksen työntekijöiden säteilyturvallisuudesta vastaa säteilysuojeluorganisaatio. Ionisoivan säteilyn hallinta kiteytyy säteilyannosten ja radioaktiivisen kontaminaation hallintaan. Loviisan voimalaitoksen säteilysuojeluorganisaation tekemissä mittauksissa on toisinaan löydetty yksittäisiä, tavallista korkea-aktiivisempia radioaktiivisia partikkeleita muun muassa laitoksen prosessikomponenttien pinnoilta, sekä valvonta-alueelta poistuvien henkilöiden suojarusteista.

1.3 Diskreetin partikkelin määritelmä

Diskreetin aktiivisen partikkelin määritelmä ei ole yksiselitteinen, sillä säteily- ja ydinturvallisuutta käsittelevät järjestöt eivät ole määritelleet sitä tarkasti tai yhdenmukaisesti. Suomessa tällaista termiä ei ole määritelty esimerkiksi säteilylainsäädännössä, eikä säteilyturvakeskuksen YVL-ohjeissa.

Yhdysvaltalaisen tutkimusjärjestö EPRI:n raportissa *Industry Experience With Discrete Radioactive Particles* (Robinson et al., 1994) diskreetti partikkeli on määritelty mikroskooppiseksi veteen liukenemattomaksi partikkeliksi, jolla on korkea ominaisaktiivisuus. Sana ”diskreetti” tarkoittaa yksittäistä ja erottuvaa. Diskreetti partikkeli eroaakin siis ydinvoimalaitoksilla esiintyvistä kontaminaatioista, sillä se on yksittäisesti korkea-aktiivinen hiukkanen. Tavallinen ydinvoimalaitoksella esiintyvä kontaminaatio voidaan määritellä tyypillisesti tasaisesti jakaantuneeksi ei-toivotuksi radioaktiiviseksi aineeksi.

Kirjallisuudessa käytettyjä suomenkielisiä nimiä diskreeteille partikkeleille ovat mm. korkea-aktiivinen partikkeli, kuuma partikkeli ja hippu. Englanninkielisessä kirjallisuudessa käytettyjä termejä ovat muun muassa *discrete particle* ja *hot particle*. Selkeyden vuoksi tässä työssä käytetään nimeä diskreetti partikkeli.

2 SÄTEILY JA SÄTEILYANNOS

Säteily on tavallinen luonnonilmiö, joka voi tietyissä muodoissa olla ihmiselle vaaraksi. Elämälle haitallisen ionisoivan säteilyn vaikutuksia voidaan arvioida saadun säteilyannoksen avulla. Ionisoivan säteilyn määrä, laatu ja kohdistuminen vaikuttavat kuitenkin merkittävästi säteilyn haittavaikutuksiin. (Ikäheimonen, 2002)

2.1 Ionisoiva säteily

Säteily voidaan luokitella ionisoivaan ja ionisoimattomaan säteilyyn. Ionisoiva säteily kykenee irrottamaan atomien elektronikuoresta elektroneja, eli aiheuttamaan ionisaatioita. Ionisaatiot johtavat vaurioihin elävässä kudoksessa. Ionisoivaa säteilyä on röntgen- ja gammasäteily, jotka ovat sähkömagneettista säteilyä, sekä alfa-, beeta- ja neutronisäteily, jotka ovat hiukkassäteilyä. (Ikäheimonen, 2002)

2.1.1 Säteilyn haittavaikutukset

Ionisoivan säteilyn haittavaikutukset voidaan jakaa deterministisiin ja stokastisiin haittavaikutuksiin, deterministiset vaikutukset ovat suoria ja stokastiset satunnaisia, tilastollisesti havaittavia vaikutuksia. (Paile, 2002)

Deterministiset vaikutukset aiheutuvat suuresta lyhyessä ajassa saadusta säteilyannoksesta, joka johtaa laajoihin solukuolemiin. Nämä ionisoivan säteilyn niin sanotut ”näkyvät oireet”, eli säteily sairaus aiheutuu noin 0.5–1 Sv kerta-annoksesta. Säteily sairauden oireita ovat muun muassa pahoinvointi, säteily palovammat ja luuydin vauriot. (Paile, 2002)

Stokastiset haittavaikutukset syntyvät ionisoivan säteilyn aiheuttamista perimämuutoksista solun dna:ssa. Nämä vauriot voivat johtaa solun mutatoitumisen syöpäsoluksi, jolloin säteilyn haitat saattavat näkyä vasta useiden vuosien jälkeen saadusta annoksesta. Stokastisille

vaikutuksille ei ole olemassa tiettyä esiintymiskynnysarvoa, vaan kaikki elinikästä saatu säteilyannos kasvattaa kokonaisriskiä stokastisten haittojen esiintymiseen. (Paile, 2002)

2.2 Säteilyannos

Säteilyn biologisia vaikutuksia voidaan arvioida säteilyannoksen avulla. Tarkan säteilyannoksen määrittämiseksi on lähdettävä liikkeelle absorboituneesta annoksesta:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1)$$

Jossa $d\bar{\epsilon}$ on keskimääräinen ionisoivan säteilyn absorboitunut energia ja dm sen alkion massa, johon säteily kohdistuu. Absorboituneen annoksen yksikkö (J/kg) on gray (Gy). Absorboitunut annos kuvaa hyvin säteilyn aiheuttamien determinististen vaikutusten määrää. Säteilysairauden esiintymisen kynnyksarvona voidaan pitää yhtä grayta ja tappavan annoksen rajana 6–7 grayta. (Paile, 2002)

2.2.1 Annosekvivalentti, ekvivalenttiannos ja efektiivinen annos

Säteilyannosta arvioitaessa absorboitunut annos on suhteellisen yksinkertainen suure, se ei ota huomioon säteilyn lajia, energiaa, eikä absorboivan kudoksen vaikutusta säteilyannokseen. Todellista säteilyannosta arvioidessa on käytettävä erilaisia normituskertoimia. Pistemäiselle massa-alkiolle voidaan määrittää annosekvivalentti:

$$H = Q \cdot D \quad (2)$$

Jossa D on edellä määritetty absorboitunut annos (Gy) ja Q on dimensioton säteilyn paikallinen laatutekijä. Paikallinen laatutekijä määräytyy absorboituneen säteilyn energiansiirtokyvyn L ($keV/\mu m$) kautta, ja se voidaan määrittää tarkasti, jos tiedetään absorboituneen säteilyn spektri. Kansainvälinen säteilysuojelukomissio ICRP määrittää laatutekijälle likiarvon:

$$Q(L) = \begin{cases} 1 & L < 10 \text{ keV}/\mu m \\ 0.32L - 2.2 & 10 \leq L \leq 100 \text{ keV}/\mu m \\ 300/\sqrt{L} & L > 100 \text{ keV}/\mu m \end{cases} \quad (3)$$

Annosekvivalentin yksikkö on sievert (Sv). Annosekvivalenttia käytetään säteilyn vaikutusten arviointiin kudoksen eri syvyyksissä, kuten pinta- ja syväannoksessa. (Petoussi-Henss et al., 2010)

Annosekvivalentista erillinen suure on ekvivalenttiannos, joka määritellään absorboituneen annoksen avulla äärellisen kokoisessa kudoksessa:

$$H_T = \sum w_R \cdot D_{TR} \quad (4)$$

Kudoksen ekvivalenttiannos on siihen absorboituneen säteilyn (D_{TR}) ja säteilylajin painokertoimen (w_R) painotettu summa. Ekvivalenttiannoksen yksikkö on sievert. Efektiivisen annoksen painokertoimia on esitetty taulukossa 1. (Marttila, 2002)

Taulukko 1. Säteilyn laadun painokertoimia (muokattu Valtioneuvoston asetuksesta ionivoivasta säteilystä 2018/1034)

Säteilyn laatu	Painokerroin w_R
Fotonit	1
Elektronit	1
Neutronit, joiden energia E_n	
< 1 MeV	$2.5 + 18.2 e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$
$1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$	$5 + 17 e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$
> 50 MeV	$2.5 + 3.25 e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}$
Protonit ja varatut pionit	2
Alfahiukkaset, fissionfragmentit, raskaat ytimet	20

Ekvivalenttiannoksesta johdettu efektiivinen annos ottaa huomioon myös säteilylle altistuneen kudoksen vaikutuksen säteilyannokseen:

$$E = \sum w_T \cdot H_T \quad (5)$$

Jossa w_T on kudoksen painokerroin ja H_T kudoksen ekvivalenttiannos. Myös efektiivisen annoksen yksikkö on sievert (Sv). Kudoksen painokertoimet määräytyvät todennäköisyyksistä säteilyn absorboitumisesta johtuviin haittavaikutuksiin. Ekvivalenttiannoksen painokertoimia on esitetty taulukossa 2. (Marttila, 2002)

Taulukko 2. Kudosten painokertoimia (muokattu Valtioneuvoston asetuksesta ionivoivasta säteilystä 2018/1034)

Kudos/elin	Painokerroin w_T
Keuhkot	0,12
Mahalaukku	0,12
Paksusuoli	0,12
Punainen luuydin	0,12
Rintarauhaset	0,12
Sukurauhaset	0,08
Kilpirauhanen	0,04
Maksa	0,04
Ruokatorvi	0,04
Virtsarakko	0,04
Aivot	0,01
Iho	0,01
Luun pinta	0,01
Sylkirauhaset	0,01
Muut kudokset	0,12
Koko keho	1

Säteilyolosuhteita arvioidessa tärkeä suure on säteilyannosnopeus:

$$DR = \frac{dE}{dt} \quad (6)$$

Jossa dE on säteilyannoksen muutos ja dt tämän muutoksen aikaväli. Annosnopeuden yksikkö on sievertiä tunnissa (Sv/h) ja se esitetään usein kerrannaisyksiköillä kuten mSv/h tai μ Sv/h. (Marttila, 2002)

2.2.2 Syväannos ja pinta-annos

Ekvivalentti- ja efektiivistä annosta ei voida mitata suoraan, ne ovat niin sanottuja laskennallisia suureita. Henkilön säteilyannosta määritettäessä on selvítettävä, onko altistuttu ulkoiselle vai sisäiselle säteilylle. Ulkoisella säteilyllä tarkoitetaan sellaista säteilyä, jonka lähde sijaitsee kehon ulkopuolella. Sisäisen säteilyn lähde taas on joutunut kehon kudoksen tai elimen sisälle.

Ulkoisten säteilyn aiheuttama säteilyannos määritetään käyttämällä mitattavia suureita, syväannos ja pinta-annos. Sisäisen säteilyn aiheuttama säteilyannos määritetään käyttämällä laskennallisia suureita perustuen aineen aktiivisuuteen ja säteilyn painokertoimiin. (STUK, 2014)

Määritettäessä mittausolosuhteita ulkoisen säteilyn aiheuttamalle annokselle on suunniteltava ihmiskeholle ja elimistölle sopiva vastine. Tämän vastineen tulisi vastata ihmiskehoa mahdollisimman hyvin. Yleinen keino on käyttää ns. ICRU-palloa, jonka halkaisija on 300 mm ja jonka tiheys on 1000 kg/m^3 . Kehon eri syvyyksissä olevat osat saavat luonnollisesti eri määrän säteilyä säteilyenergian vaimenemisen takia. Pinta-osat saavat suurimmat annokset ja syvemmälle siirryttäessä annos laskee. (Marttila, 2002)

Henkilöannosekvivalentti kehon pintaa lähellä oleville elimille määritetään 0.07 millimetrin syvyydessä ihmiskehoa kuvaavassa vastineessa. Tätä nimitetään usein ”pinta-annokseksi” ja sen merkintä on $H_p(0.07)$. Pinta-annosta voidaan pitää ihon ekvivalenttiannoksen likiarvona. Pinta-annoksesta käytetään myös termiä ihoannos, jota käytetään tässä työssä tästä eteenpäin.

Syvemmälle kehoon kohdistuvan säteilyannoksen määrittämisessä käytetään henkilöannosekvivalenttia 10 millimetrin syvyydessä. Tätä nimitetään usein ”syväannokseksi” ja sen merkintä on $H_p(10)$. Pinta- ja syväannoksesta erillisesti on määritelty silmän mykiön annosekvivalentti, tämä on määritelty 3 millimetrin syvyydessä ja sen merkintä on $H_p(3)$. (Marttila, 2002; STUK, 2014)

2.3 Sääntö säteilyannoksista

Valtioneuvoston asetuksessa ionisoivasta säteilystä on asetettu säteilytyöntekijöiden annosrajat. Säteilytyöntekijän efektiivinen annos ei saa olla suurempi kuin 20 mSv vuodessa. Tämän lisäksi on määritelty tarkemmat ekvivalenttiannosrajat yksittäisille kehonosille.

Käsien, käsivarsien, jalkaterien ja nilkkojen ekvivalenttiannos ei saa olla suurempi kuin 500 mSv vuodessa. Samoin ihon ekvivalenttiannos ei saa olla suurempi kuin 500 mSv vuodessa eniten altistuneella neliösenttimetrillä. Silmän mykiön ekvivalenttiannos ei saa olla viiden vuoden aikana suurempi kuin 100 mSv, muttei kuitenkaan yhden vuoden aika suurempi kuin 50 mSv. (STUK, 2019)

3 DISKREETIT PARTIKKELIT

Ydinvoimalaitoksella esiintyvä radioaktiivinen kontaminaatio voi esiintyä tasaisesti jakautuneen aktiivisuuden lisäksi yksittäisinä aktiivisina partikkeleina, näitä kutsutaan puhekielessä ”kuumiksi hiukkasiksi” tai ”hipuiksi.” Diskreetit partikkelit ovat säteilysuojelun kannalta kiinnostavia, sillä ne voivat aiheuttaa suhteellisen suuria pinta-annoksia, tai kehon sisälle joutuessaan suuria sisäisiä annoksia. (Sandberg, 2004)

3.1 Kontaminaation synty ydinvoimalaitoksella

Ydinvoimalaitoksella esiintyvä ionisoiva säteily voidaan jakaa karkeasti fissiotuotteiden ja aktivoitumistuotteiden säteilyyn. Fissiotuotteiden säteily johtuu fissioreaktiossa syntyneiden keskiraskaiden ydinten hajoamisesta. Normaaliolosuhteissa fissiotuotteet pysyvät polttoainesauvojen sisällä, osa kiinteinä fissiotuotteina ja osa kaasuna polttoainesauvojen suojakuoren sisällä. Valtaosa ydinvoimalaitoksen radioaktiivista aineista sijaitsee reaktorissa ja siitä poistetussa käytetyssä polttoaineessa. Laitosten työntekijöiden säteilyannoksesta suurin osa kuitenkin aiheutuu aktivoitumistuotteiden säteilystä. (Sandberg, 2004)

Aktivoitumistuotteet syntyvät reaktorisydämen läheisyydessä suuren neutronivuon vaikutuksesta. Neutronivuo aktivoi muun muassa reaktoripaineastian rakenteita, säätösauvoja, polttoainesauvoja sekä jäähdytysainetta. Reaktorissa virtaava jäähdytysaine kuljettaa mukanaan epäpuhtauksia ja erilaisia korroosiotuotteita, jotka aktivoituvat neutronivuossa. Nämä epäpuhtaudet leviävät ja kiinnittyvät reaktorin jäähdytysjärjestelmiin radioaktiivisena likana eli niin sanottuna ”crudina”. (Sandberg, 2004)

Yleistermi ydinvoimalaitoksella esiintyvälle ei-toivotulle radioaktiiviselle aineelle on kontaminaatio. Kontaminaatio on yleensä reaktorissa jäähdytysveden mukana aktivoitunutta ainetta, mutta myös fissiotuotteiden leviäminen jäähdytysveden mukana on mahdollista vakavan polttoainevuodon yhteydessä. Kontaminaatiota esiintyy ydinvoimalaitoksella mm. jäähdytysvedessä partikkeleina, tai siihen liuenneena, pinnoille kertyneenä likana (pintakontaminaatio), sekä ilmassa kaasuna tai aerosoleina (ilmakontaminaatio).

Kontaminaatiota esiintyy ydinvoimalaitoksilla erilaisissa muodoissa. Ydinvoimalaitoksen kontaminoituneista prosessikomponenteista päässeet radionuklidit voivat tarttua laitoksen pintoihin ja erillään olevaan ”likaan” leviten sen mukana. Tällainen, yleisesti tasaisesti jakautunut lika on yleisin kontaminaation esiintymismuoto.

Ydinvoimalaitokset ovat varustettu havaitsemaan mahdolliset kontaminoituneiden järjestelmien vuodot erilaisilla mittauksilla, kuten ilma-aktiivisuuden ja annosnopeuden monitoroinnilla. (Sandberg, 2004)

3.2 Diskreetit radioaktiiviset partikkelit

Diskreetti radioaktiivinen partikkeli tarkoittaa yksittäistä, mikroskooppisen pientä, sekä aktiivisuudeltaan korkeaa partikkelia. Suomen säteilylainsäädäntö ei kuitenkaan tunne termiä diskreetti partikkeli, eikä sille ole virallisesti määritelty tarkkoja rajoja esimerkiksi koon tai ominaisaktiivisuuden suhteen. Säteilylainsäädännössä on määritelty termit korkea-aktiivinen jäte, sekä korkea-aktiivinen umpilähde. Diskreetti partikkeli ei luonnollisesti kuulu kummankaan termin piiriin. Lain näkökulmasta diskreetit partikkelit eivät siis eroa tavanomaisesta kontaminaatiosta.

Kuten kontaminaatio yleisesti, myös diskreetit partikkelit voidaan jakaa fissiotuote- ja aktivoitumistuoteperäisiin partikkeleihin. Ydinvoimalaitoksilla esiintyvistä diskreeteistä partikkeleista valtaosa sisältää aktivoitumistuoteperäisiä radionuklideja. Näistä yleisin on korrosiotuote koboltti-60, joka syntyy neutronisieppauksen mukana luonnon koboltti-59:stä, jota esiintyy muun muassa teräsrakenteissa. Diskreetti partikkeli voi olla myös niin sanottu polttoainepartikkeli, joka voi koostua useista fissiotuotenuklideista. (Bell, 1991)

Säteilyturvakeskuksen teoksessa Ydinturvallisuus (Sandberg, 2004) diskreetti partikkeli (kirjassa kuuma hiukkanen) on määritelty pieneksi kiinteäksi hiukkaseksi, jonka aktiivisuus on tyypillisesti 0.3–2000 kBq. Säteilyturvakeskus mainitsee diskreettien partikkelien olevan tyypillisesti tavallista pölyä raskaampia, sekä mahdollisesti sähkömagneettisesti varautuneita hiukkasia. Yhdysvaltalaisen tutkimusjärjestö EPRI:n raportissa Industry Experience With Discrete Radioactive Particles (Robinson et al., 1994) diskreetti partikkeli on määritelty mikroskooppiseksi veteen liukenemattomaksi partikkeliksi, jolla on korkea ominaisaktiivisuus.

Kokonaiskuvana diskreetti partikkeli on mikroskooppisen pieni, korkean ominaisaktiivisuuden omaava yksittäinen partikkeli, joka on veteen liukenematon, sekä mahdollisesti sähköisesti varautunut. Diskreetit partikkelit ovat ydinvoimalaitoksilla tyypillisesti korroosiotuotepölyä sisältäviä pistemäisiä kontaminaatioita.

Diskreettien partikkelien talteen kerääminen havaitsemisen jälkeen tapahtuu ydinvoimalaitoksella tyypillisesti käyttäen teippiä tai muuta tarrautuvaa materiaalia. Diskreettien partikkelien leviämistä estävät myös esimerkiksi voimalaitoksen kulkureiteillä sijaitsevat tarramatot. Kuvassa 1 on esitetty Loviisan voimalaitoksella teipinpalaan kiinni saatu diskreetti partikkeli mitattuna Automess AD6 - annosnopeusmittarilla.



Kuva 1. Loviisan voimalaitoksella havaittu diskreetti partikkeli teipinpalassa.

Kuvassa 1 mitatun partikkelin kontaktiannosnopeus (n. 2 mSv/h) on tyypillistä suurempi, sillä myös sen koko on mikroskooppista partikkeliä suurempi. Käytännön säteilysuojelun kannalta myös näin kookas, juuri silmin havaittavissa oleva partikkeli luokitellaan ja käsitellään diskreettinä partikkelina.

3.3 Diskreettien partikkelien vaarallisuus

Ydinvoimalaitoksen tavallisen kontaminaation tavoin diskreetit partikkelit emittoivat yleensä beeta- ja gammasäteilyä. Yksittäinen partikkeli voi gammasäteilyn kautta nostaa koko kehon säteilyannosta, mutta näin aiheutuva annos on suhteellisesti hyvin vähäinen. Diskreettien partikkelien vaara muodostuukin pääosin beetasäteilystä, jonka aiheuttama annos on voimakkaasti riippuvainen etäisyydestä säteilylähteeseen. Korkea-aktiivinen beetasäteilijä voi aiheuttaa ihon pinnalla suuren säteilyannoksen lyhyessä ajassa. Suuret ihoannokset johtuvat korkeasta kontaktiannosnopeudesta, tavallisellakin diskreetillä partikkelilla kontaktiannosnopeus voi olla useita millisievertejä tunnissa. (James, 1988)

Diskreetit partikkelit ovat kuitenkin hyvin pieniä, joten myös säteilyannosta saava pinta-ala on usein pieni. Tämän takia diskreetit partikkelit aiheuttavat harvoin vakavaa laajaa vahinkoa iholle. Ihoon kohdistuva säteily on vaarallisinta kantasoluja sisältävässä tyvisolukerroksessa, jossa tapahtuu solujakautumista. Tyvisolukerroksen yläpuolella olevissa osissa ei ole jakautuvia soluja, joten säteily ei vaikuta niihin yhtä vakavasti. Tyvisolukerroksen paksuus on noin 40–80 μm . Tästä johtuen ihon säteilyannos (pinta-annos) määritetään 70 μm syvyydessä. (James, 1988)

Diskreetit partikkelit voivat aiheuttaa myös deterministisiä vaikutuksia, jos altistus aika on pitkä ja jos partikkeli on tavallista aktiivisempi. Paikallisten säteilyvammojen oireita voi olla punoitus, arpeumat, haavaumat tai pahimmassa tapauksessa nekroosi. Tällaiset vaikutukset ilmaantuvat tyypillisesti vasta noin 1 grayn annoksen jälkeen ja ovat käytännössä erittäin harvinaisia. (Baum et al., 1996)

On myös esitetty väitteitä, joiden mukaan diskreettien partikkelien aiheuttama säteilyannos nostaisi syöpäriskiä enemmän kuin laajalle pinta-alalle kohdistunut annos. Kristiina Servomaan ja Tapio Rytömaan artikkelissa ”Malignant transformation and activation of onogenes by uranium aerosols released from chernobyl” (1989) kerrotaan, että Chernobylin ydinvoimalaonnettomuudessa vapautuneet diskreetit partikkelit voisivat mahdollisesti aiheuttaa vakavia terveysvaikutuksia, poiketen ulospäin näkyvistä akuutin säteily sairauden oireista. Tutkimuksessa oli tehty koeputkikokeita plutoniumpartikkelien vaikutuksesta eläviin soluihin. Tutkimuksessa havaittiin syöpämuodostumia, joiden pääteltiin johtuvan pistemäisestä annoslähteistä.

Monty Charlesin artikkelissa *Carcinogenic risk of hot particle exposures* (2003) todetaan, ettei laajoissa, eliöissä tehdyissä kokeissa ole havaittu diskreettien partikkelien nostamaa syöpäriskiä verrattuna laaja-alaisen annoksen aiheuttamaan riskiin. Tällainen vaikutus on havaittu vain koeputkikokeissa, joiden vastaavuutta todellisiin ihmisen kudosaikutuksiin on artikkelissa epäilty.

Diskreetteihin partikkeleihin liittyviä syöpäkuolematapauksia on hyvin vähän, eikä niistä pystytä tulkitsemaan suoraa syy-seuraussuhdetta. Charlesin mukaan pistemäisen annoksen karsinogeenisiä riskejä suurempana ongelmana voidaan pitää deterministisiä riskejä. Mm. ICRP:n ohjeissa säteilyannoksista iholle ja elimille ohjaavana tekijänä on yksittäisten partikkelien mahdolliset deterministiset vaikutukset stokastisten vaikutusten sijaan. Pienelle alalle kohdistunut annos aiheuttaa kudokseen suuren keskittyneen annoksen, joka tarpeeksi suurena johtaa solukuolemiin. (Charles et al., 2003)

ICRP määrittelee diskreettien partikkelien aiheuttamien ihoannosten rajaksi sellaisen annoksen, joka aiheuttaa näkyviä haavaumia. Tällaisien vaikutusten ehkäisemiseksi ihoannos olisi pidettävä yhden neliösenttimetrin alueella muutaman tunnin aikana alle yhden sievertin, tai beeta-annokselle alle viiden sievertin. (International Commission on Radiological Protection, Sutton (United Kingdom), 1992)

3.4 Diskreettien partikkelien aiheuttamat haasteet säteilysuojelulle

EPRI:n raportissa *Problem assessment of discrete radioactive particles* (1988) on koottu kyselytietoja yhdysvaltalaisilta paine- ja kiehutusvesilaitoksilta diskreetteistä partikkeleista. Raportissa todetaan diskreettien partikkelien esiintyvän erityisesti reaktorin jäähdytysjärjestelmien yhteydessä. Reaktorin jäähdytysjärjestelmät ovat raskaasti kontaminoituneita ja ne emittoivat läheisyyteensä myös suuria määriä suoraa säteilyä. Tällaisia järjestelmiä, tai niiden komponentteja avattaessa on riski diskreettien partikkelien vapautumiselle tavallisen kontaminaation ohella. Raportissa todetaan diskreettien partikkelien kannalta riskialttiiksi tiloiksi muun muassa käytetyn polttoaineen altaat ja höyrystintila(t). Näissä tiloissa esiintyy tyypillisesti myös korkeita annosnopeuksia, jolloin näiden läheisyydessä suorat kontaminaatiomittaukset eivät ole mahdollisia.

Koska diskreetit partikkelit poikkeavat merkittävästi tasaisesti jakautuneesta ydinvoimalaitoksen kontaminaatiosta, myös keinot niiden paikantamiseen ja hallitsemiseen poikkeavat tavallisista menettelyistä.

Tasaisesti jakautunut kontaminaatio on helppo löytää, sekä puhdistaa pinnoilta. Laajalle pinta-alalle jakautunut kontaminaatio voidaan havaita mittaamalla helposti, mutta pistemäisen kontaminaation havaitseminen on hankalampaa. Diskreettien partikkelien ongelma on niiden paikannus, sillä pistemäisen partikkelin havaitseminen laajalta pinta-alalta on haastavaa. Tavalliselta kontaminaatiolta voidaan suojautua ja se voidaan puhdistaa, jos sen olemassaolo tiedetään, mutta diskreettien partikkelien tapauksessa niiden sijaintia taikka määrää on hyvin hankala selvittää.

Kontaminaation havaitseminen on haasteellista, jos mitattavalla alueella, tai mitattavalla komponentilla on suuri annosnopeus. Tämä johtuu tavallisten pintakontaminaatiomittareiden herkkyydestä, sillä suuri annosnopeus aiheutuu erittäin suuresta aktiivisuudesta, jota pintakontaminaatiomittarit mittaavat. Tämän myötä diskreettien partikkelien havaitseminen on erityisen haasteellista suoralla kontaminaatiomittauksella korkean annosnopeuden alueella.

Raportissa todetaan myös diskreettien partikkelien liikkuvuuden kasvavan kontaminoituneen komponentin kuivuessa. Tämä johtuu diskreettien partikkelien mahdollisesti omaavasta sähkövarauksesta. Tällä tavalla sähköisesti varautuneen partikkelin havaitseminen ja kiinni saaminen voi olla hyvin haasteellista, sillä sähköisesti varautunut partikkeli voi heti havaitsemisen jälkeen karata arvaamattomaan paikkaan.

Merkittävimmät haasteet diskreetteihin partikkeleihin liittyen ovat niiden havaitseminen ja esiintymisen ennustaminen. Diskreetit partikkelit aiheuttavat myös riskin henkilökontaminaatiotapauksille, joista voi seurata korkeita paikallisia säteilyannoksia.

3.5 Diskreetit partikkelit henkilökontaminaatiotapauksissa

Charles & Harrisonin artikkelissa ”Hot particle dosimetry and radiobiology – past and present” (2007) on tutkittu diskreettien partikkelien aiheuttamia säteilyannoksia iholle ja sisäisenä kontaminaationa sisäelimille.

Tutkimuksessa on havaittu diskreettien partikkelien aiheuttamat henkilökontaminaatiotapauksien olevan yleensä ihokontaminaatiotapauksia, jolloin niiden potentiaalinen vaarallisuus ja annosrajojen ylitysmahdollisuus jäävät suhteellisen pieneksi. Diskreetit partikkelit voivat myös kulkeutua kehon sisälle hengitettynä tai nieltynä. Tällaisissa sisäisen kontaminaation tapauksissa on mahdollisuus saada suhteellisen suuria säteilyannoksia sisäelimiin ja kudoksiin. Sisäisessä kontaminaatiossa partikkelin koolla on suuri merkitys niiden aiheuttamiin vaikutuksiin. (Charles & Harrison, 2007)

3.5.1 Sisäinen kontaminaatio hengitysteiden kautta

Päästäkseen hengitysteiden kautta kehon sisälle yksittäisen partikkelin on oltava riittävän pieni. Yli 3 mm kokoisilla partikkeleilla on hyvin pieni todennäköisyys kulkeutua kehon sisälle hengitysilman kautta normaaliolosuhteissa, mutta tähän on kuitenkin mahdollisuus kovissa ilmavirtauksissa ja erityisen pölyävissä töissä. (Charles & Harrison, 2007)

Hengitysteiden kautta kulkeutuvat partikkelit ovat kooltaan ja usein myös aktiivisuudeltaan suhteellisen pieniä. Hyvin pienen partikkelikoon ($d < 10 \mu\text{m}$) hiukkasilla on mahdollisuus päästä hengitysilman kautta keuhkoihin, mutta näin pienillä partikkeleilla on hyvin harvoin riittävästi aktiivisuutta aiheuttaakseen merkittävää säteilyannosta. Hengitettynä suuremman partikkelikoon hiukkaset jäävät keuhkoja todennäköisimmin nenäonteloon tai poistuvat kehosta uloshengityksen mukana kokonaan. (Charles & Harrison, 2007)

Annosarviona nenäonteloon päätyneelle aktiivisuudeltaan 10^5 Bq Cs-137-partikelille on 300 mGy. Tämä on keskimääräinen annos koko nenäontelokudokselle, jossa oletuksena on yhden päivän puhdistuma. Keskimääräistä annosta vaarallisempi tekijä sisäisen kontaminaation tapauksissa voi olla korkea paikallinen annos, joka voi aiheutua, mikäli partikkeli jää pitkäksi aikaa paikalleen. (Charles & Harrison, 2007)

3.5.2 Sisäinen kontaminaatio nieltynä

Diskreetti partikkeli voi päätyä kehon sisälle myös nieltynä, jolloin säteilyannos kohdistuu ruoansulatuskanavan reitille. Tällaisissa sisäisen kontaminaation tapauksissa aiheuttaa suurin säteilyannos aiheutuu paksusuoleen.

Annosarvio paksusuolelle hyvin korkea-aktiivisesta Cs-137 partikkelista (10^8 Bq) on tyyppisarvoltaan 0.3–0.4 Gy ja maksimiarvoltaan 1–2 Gy. Sisäisen kontaminaation aiheuttaman maksimiannoksen arviointi paksusuolella on haastavaa, sillä partikkelien liike suolen läpi ei ole tasaista. Yksittäinen partikkeli voi olla paikallaan hyvinkin pitkiä aikoja ja aiheuttaa näin suuren paikallisen annoksen. (Charles & Harrison, 2007)

Diskreettien partikkelien aiheuttamat sisäisen kontaminaation tapaukset ovat harvinaisia ja sellaisen sattuessa on edelleen epätodennäköistä, että vaarallisen annoksen raja ylittyisi.

3.6 Ihoannoksen määrittäminen

Säteilyturvakeskus määrittelee YVL C2 – ohjeessa, että ydinlaitosten käytössä on oltava las kentamenetelmä, jolla voidaan määrittää kontaminaation aiheuttama ekvivalenttiannos iholle tai silmän mykiölle. (STUK, 2019) Loviisan voimalaitoksella hyväksytty menetelmä on Yhdysvaltojen Nuclear Regulatory Commissionin kehittämä annoslaskennan ohjelmisto.

Loviisan voimalaitoksella radioaktiivisten hiukkasten korkeiden henkilökontaminaatioiden aiheuttamat ihoannokset lasketaan kyseisellä ohjelmistolla. Ihoannos on määritettävä, jos työntekijän ihoannoksen kirjausraja (1 mSv) on mahdollisesti ylittynyt. Ohjelmistoon annetaan alkuarvoiksi säteilylähteen oletettu geometria (pistelähde, äärettömän ohut pinta, lieriö, pallo tai harkko), aktiivisuus (Bq), lähteessä olevat nuklidit, ihon altistuspinta-ala, sekä altistusaika. Lisäksi voidaan määrittää tiedot suojarusteiden mitoista ja mahdollisesta ilma- raosta. (Mattila, 2015)

3.6.1 Beetasäteilyn ihoannos

Ohjelmisto laskee ihon ekvivalenttiannoksen beetasäteilylle käyttäen dose point kernel (DPK) -menetelmää. Tässä menetelmässä annos lasketaan tietyssä pisteessä säteilylähteestä, olettaen että säteily vaimenee jonkin väliaineen kautta. Yleisesti kudosta vastaavana väliaineena pidetään vettä. Ekvivalenttiannos lasketaan säteilylähteen oletetun muodon ja ihon altistusta saaneen pinta-alan perusteella numeerisen integroinnin menetelmin. (NRC, 2021)

DPK elektroneille säteilylähteen ja annospisteen etäisyyden r funktiona:

$$D_{\beta}(r) \left[\frac{Gy}{s} \right] = \frac{1.6 \cdot 10^{-10} \left[\frac{Jg}{MeVkg} \right] \cdot A \left[\frac{1}{s} \right] \cdot Y \left[\frac{\beta}{1} \right] \cdot E_{\beta} \left[\frac{MeV}{\beta} \right] \cdot F_{\beta}(\xi)}{4\pi r^2 \cdot \rho \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot X_{90}[cm]} \quad (7)$$

Missä A on säteilylähteen aktiivisuus, Y on beetasäteilyn osuus hajoamisista, E_{β} on elektronien energia, F_{β} on skaalattu absorboituneen annoksen jakauma, ρ on väliaineen tiheys ja X_{90} on etäisyys, jossa 90 % elektronien kineettisestä energiasta on absorboitunut.

Skaalatun absorboituneen annoksen jakauman muuttuja ξ kuvaa tiheyden mukaan määritettyä etäisyyttä säteilylähteestä annospisteeseen. Tähän sisältyy lähteen, vaatteiden ja ilman tiheyden vaikutus annokseen. Ohjelmiston 5. versio laskee F_{β} :n monte carlo -menetelmällä, kun taas vanhemmat versiot käyttävät momenttipohjaisia energiahäviöiden jakaumia. Monte carlo -menetelmä on parempi arvioimaan kudoksen syvempiä annoksia, tehden annosarvioista tarkemman. (NRC, 2021)

3.6.2 Gammasäteilyn ihoannos

Gammasäteilyn ihoannos määritetään käyttäen samoja parametreja kuin beetasäteilyn ihoannoksen laskennassa. Ihoannos määritetään yksinkertaisesti:

$$D(E) = \frac{S}{4\pi d^2} \cdot E \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right) \quad (8)$$

Jossa S on fotoniemissioiden määrä hajoamisia kohti, d on etäisyys säteilylähteestä annospisteeseen, E on fotonien energia, μ_{en} on säteilyn vaimennuskerroin kudokselle ja ρ on ihon tiheys. Tästä voidaan muodostaa beetasäteilyn tavoin DPK-menetelmän mukainen yhtälö radionuklidien emittoimien fotonien i summan avulla:

$$D \left[\frac{Gy}{nt} \right] = \frac{1.602 \cdot 10^{-10} \left[\frac{J \cdot g}{MeV \cdot kg} \right]}{4\pi d^2 [cm^2]} * \sum_i \left[y_i \left[\frac{1}{nt} \right] \cdot E_i \left[\frac{MeV}{1} \right] \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right) \left[\frac{cm^2}{g} \right] \right] \quad (9)$$

Suhde $\frac{\mu_{en}}{\rho}$ on kudoksen energian absorptiokerroin, jonka numeerinen arvo on sama kuin säteilyn vaimenemiskertoimen arvo, jos ihon tiheytenä pidetään yksikkötiheyttä $1 \frac{1}{cm^2}$. Ohjelmisto suorittaa säteilyn vaimenemiskertoimen määrittämisen analyttisesti ICRU:n ”taulukodataan” perustuvilla yhtälöillä. (NRC, 2021)

Ihoannoksen määrittämiseen kyseisellä ohjelmistolla on kuitenkin joitain rajoituksia. Ohjelmisto ei esimerkiksi laske hajoamistuotteiden aiheuttamia annoksia, joten erityisesti moninuklidisten hiukkasten kohdalla tämä tulisi laskea erikseen. Ohjelmisto on tarkoitettu erityisesti ihoannosten laskentaan, joten se ei myöskään sovellu tilanteisiin, jossa ilmarako säteilylähteen ja kudoksen välillä on yli 5 cm. (Mattila, 2015)

4 DISKREETTIEN PARTIKKELIEN HALLINTA MAAIL- MALLA

M.W Charlesin ja P.J Darleyn artikkelissa ”Radioactive Hot Particles: Are They Still a Problem?” (Charles & Darley, 1996) diskreettien partikkelien haittojen arviointia kutsutaan ”hot particle” -ongelmaksi. Suurimpia haasteita ovat diskreettien partikkelien aiheuttamien tarkkojen henkilöannosten määrittäminen ja annosten aiheuttamien vaikutusten arviointi.

4.1 Painevesilaitosten riskit diskreettien partikkelien suhteen

EPRI:n raportissa Industry Experience With Discrete Radioactive Particles todetaan, että diskreettejä partikkeleja havaitaan yhdysvaltalaisilla painevesilaitoksilla noin viisi kertaa useammin vuosihuoltojen aikana kuin tuotannon aikana. Tällöin suurin osa havaituista partikkeleista on löytynyt reaktorin suojarakennuksen sisältä laitoksen primääripiiriin liittyvien töiden yhteydessä. Diskreettien partikkelien esiintymistä tietyssä työkohteessa ei kuitenkaan voida ennustaa yhtä hyvin kuin tavallisen kontaminaation esiintymistä. (Robinson et al., 1994)

On kuitenkin mahdollista tunnistaa työt, joissa on suuri todennäköisyys diskreettien partikkelien esiintymiselle. Tällöin voidaan arvioida mahdollisuutta polttoainepartikkelien tai aktivoitumistuotepartikkelien esiintymiselle erilaisissa työvaiheissa- ja kohteissa. (Robinson et al., 1994)

Polttoainepartikkeleita esiintyy havaittavissa olevien polttoainevuotojen yhteydessä. Polttoainevuotojen tapauksessa todennäköisyys diskreettien partikkelien löytymiselle kasvaa primääripiirin yhteydessä tehtävissä töissä. Yhdysvaltalaisilla laitoksilla tällaisiksi korkean partikkeliriskin töiksi on tunnistettu muun muassa höyrystimen pyörrevirtakokeet, polttoaineen siirrot, sekä reaktorikuilussa tehtävät työt. (Robinson et al., 1994)

Aktivoitumistuotepartikkelit ovat kuitenkin yleisempiä, eikä esimerkiksi koboltti-60 partikkelien esiintymistä voida yhdistää tarkasti yksittäisiin töihin. Tunnistettuja töitä

partikkeliriskien kannalta on polttoainepartikkelien tavoin primääripiirin aukaisu, höyrystintyöt sekä reaktorikuilutyöt. (Robinson et al., 1994)

4.2 Keinoja diskreettien partikkelien hallintaan

Diskreettien partikkelien hallinta ydinvoimalaitoksilla perustuu niihin liittyvien töiden ja työkohteiden havaitsemiseen. Ydinvoimalaitoksilla on erilaisia ohjelmia diskreettien partikkelien hallintaa varten riippuen laitosten säteilysuojelullisista olosuhteista. Tässä osiossa tarkastellaan Yhdysvaltojen ydinturvallisuusjärjestö INPO:n ohjetta ”Hot Particle Controls Program”, jossa on määritelty keinoja diskreettien partikkelien hallintaan.

4.2.1 Hot particle control zone

Eräs keino diskreettien partikkelien hallintaan on ns. ”hot particle control zone”, eli kuumien partikkelien hallinta-alue. Tämä alue muistuttaa tavallista valvonta-alueen kenkäräjaa, joka perustetaan sellaiselle työkohteelle, jossa on havaittu korkea diskreettien partikkelien esiintymisriski. Tavalliseen kenkärajaan verrattuna tällainen raja tulisi rakentaa ns. kaksinkertaiseksi, jolloin työkohteen ja puhtaan alueen välissä olisi rajattu riisumisalue, johon mahdolliset suojarusteissa olevat partikkelit jäisivät talteen. Tavallisen kenkärajan tavoin kaikki materiaali kuumien partikkelien rajalta tulisi mitata tarkasti kontaminaation suhteen. (INPO, 1989)

Tavallisesta kenkärajasta poiketen kuumien partikkelien raja tulisi olla suojarustemääräyksiltään oletusarvoisesti korkea mahdollisten ihokontaminaatiotapausten välttämiseksi. Rajan valvontaan diskreettien partikkelien suhteen tulisi käyttää myös tavallista enemmän resursseja partikkelien löytämisen ja yleisen kontaminaation kartoittamisen suhteen. (INPO, 1989)

Kuumien partikkelien kenkäraja tulisi myös luokitella aiempien partikkelihavaintojen perusteella eri kategorioihin. INPO:n ohjeessa on käytetty neljää kategoriaa perustuen diskreettien partikkelien mahdollisiin annosnopeuksiin.

Taulukko 3. Hot particle control zone- kategoriat (INPO, 1989)

Kategoria	Annosnopeus [mSv/h]	Tarkastusväli [min]
I	≥ 5	Tapauskohtainen
II	≥ 2.5 ja < 5	15
III	≥ 1 ja < 2.5	30
IV	< 1	120

Taulukossa 3 esitetty tarkastusväli tarkoittaa alueella työskentelevien työntekijöiden kontaminaatiomittausta. Tarkastusväli on korkean riskin alueilla lyhyempi, sillä näin mahdolliset diskreeteistä partikkeleista aiheutuvat ihoannokset pidetään mahdollisimman alhaisina. Työntekijöiden tarkastus suositellaan tekemään lähellä olevalla henkilökontaminaatiomonitorilla. Käytännössä tämä tarkoittaisi vain lyhyitä työjaksoja kuumien partikkelien kenkärajan sisällä, jos lähellä ei olisi säteilyvalvojaa suorittamassa suojavarusteiden mittausta. (INPO, 1989)

Kuumien partikkelien kenkärajoilta tuleva jäte tulisi merkitä selkeästi, jotta mahdolliset kuumia partikkeleja sisältävät jätteet eivät pääsisi sekoittumaan tavallisten jätteiden kanssa. Myös kaikki kuumien partikkelien rajoilta lähtevä materiaali tulisi suojata ja merkitä selkeästi, jos niitä ei pystytä mittaamaan puhtaiksi rajojen sisäpuolella. (INPO, 1989)

INPO suosittelee kuumien partikkelien rajan käytön harkitsemista muun muassa reaktorin paineastian, höyrystimien primääripuolen, käytetyn polttoaineen altaan ja säätösauvojen yhteydessä tehtäviin töihin. (INPO, 1989)

4.3 Kontaminaatioraportit

INPO:n ohjeessa suositellaan pitämään kirjaa kaikista voimalaitoksella löytyneistä diskreeteistä partikkeleista ja niiden aiheuttamista henkilökontaminaatiotapauksista. Näin saadaan riittävästi tietoa sellaisista töistä, joissa diskreeteillä partikkeleilla olisi mahdollisuus esiintyä. (INPO, 1989)

Liitteessä 1 on esitetty INPO:n diskreeteille partikkeleille tarkoitettu henkilökontaminaatio-raportti. Tämä muistuttaa ulkonäöltään mm. Loviisan henkilökontaminaatioraporttia ja sen peruseriaatteet ovat samat. Diskreetille partikkelille tarkoitettussa raportissa on varattu kohdat partikkelien kirjanpitoa varten, mahdollisen hot particle control zone -alueen luokitus, sekä alustava arvio ihoannoksesta sekä partikkelin aktiivisuudesta.

4.4 Pyyhkäisynäytteiden käyttö diskreettien partikkelien hallintaan

Sillä diskreettien partikkelien havaitseminen suoraa kontaminaatiomittauksta käyttäen ei ole aina mahdollista, niiden löytämiseen voidaan käyttää epäsuoria mittausmenetelmiä, kuten pyyhkäisynäytteenottoa.

Yhdysvaltalainen Nuclear Industry Standard Process (NISP) on määrittänyt ohjeessaan ”Radiation and contamination surveys” (2018) hyväksi koetun menetelmän diskreettien partikkelien paikantamiselle pyyhkäisynäytteitä käyttäen. Tässä ohjeessa suositellaan käyttämään näytteenottoon kangasrättiä tai jotakin tarrautuvaa materiaalia. Tutkittava alue, kuten korkean kontaminaatoriskin työalue tulisi pyyhkiä mahdollisimman laaja-alaisesti. Tämän jälkeen näyte tulisi analysoida suoraa mittausmenetelmää käyttäen, kuten pintakontaminaatiomittarilla.

Näytteestä mahdollisesti löytyneet diskreetit partikkelit tulisi saada erotettua, mikäli tarkempi laboratorioanalysointi on tarpeen. Ohjeessa on määritetty myös yksinkertainen menetelmä partikkelin alkuperän selvittämistä varten. Määrittämällä partikkelin open window (OW) ja closed window (CW) -mittausarvojen suhde voidaan arvioida, onko partikkeli polttoaine- vai korroosiotuotepäinen. Closed window -mittauksessa detektorin ja näytteen välissä on beeta- ja alfasäteilyä vaimentavaa materiaalia, kun taas open window -mittauksessa näytettä mitataan suoraan. Alhainen OW/CW -arvo viittaa partikkelin olevan voimakas gammasäteilijä. Tällöin voidaan epäillä partikkelin olevan polttoaineperäinen. Korkea arvo taas viittaa partikkelin olevan tavanomainen korroosiotuotepartikkeli. (NISP, 2018)

5 KORKEA-AKTIIVISTEN PARTIKKELIEN HALLINTA LOVIISAN YDINVOIMALAITOKSELLA

Korkea-aktiivisten partikkelien hallinta ydinvoimalaitoksilla on automaattisesti osa voimalaitoksen tavallista kontaminaation hallintaa. Kuumien partikkelien erityispiirteet on kuitenkin huomioitava erityisesti tarkasteltaessa henkilökontaminaatiotapauksia ja niiden aiheuttamia säteilyannoksia.

5.1 Loviisan voimalaitoksen kontaminaatioseuranta

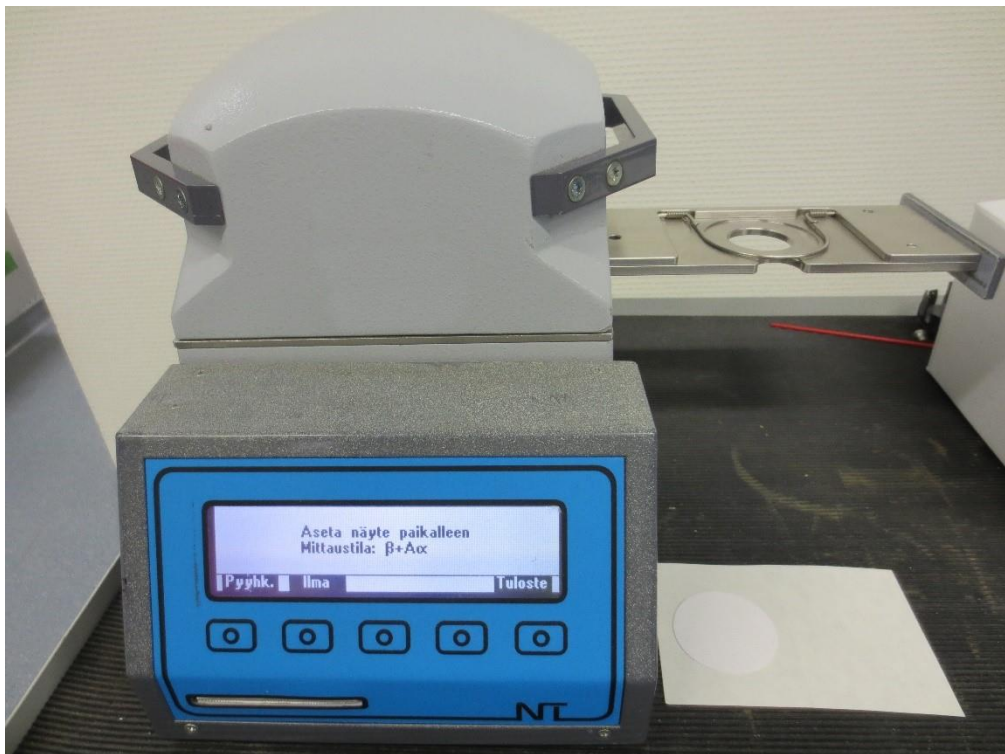
Loviisan voimalaitoksen säteilysuojeluorganisaatio vastaa säännöllisestä säteilyvalvonta-alueen kontaminaatioseurannasta. Tämän tarkoituksena on varmistaa, että laitoksella mahdollisesti leviävä kontaminaatio pystytään havaitsemaan ja torjumaan. Laitoksen kontaminaatioseuranta suoritetaan rutiinotoimintana tehtävillä pyyhkäisyinäytekierroksilla, sekä jatkuvasti työntekijöiden henkilömittauksia seuraamalla. Kontaminaation leviäminen laitoksen ulkopuolelle on varmistettu siten, että kaikki valvonta-alueelta lähtevä materiaali on mitattava kontaminaation suhteen puhtaiksi. (Salminen, 2021)



Kuva 2. RadEye-pintakontaminaatiomittari

Pintakontaminaatiomittaukset voidaan jakaa suoriin ja epäsuoriin mittaamenetelmiin. Suoralla kontaminaatiomittauksella tarkoitetaan kontaminaatiotason mittaamista kappaleesta pintakontaminaatiomittarilla, jolloin kappaleen aktiivisuus voidaan havaita suoraan. Pintakontaminaatiomittari esittää aktiivisuuden yksikössä cps, eli havaittua hajoamista sekun-
nissa. (Salminen, 2021) Kuvassa 2 on esitetty Loviisan voimalaitoksella käytössä oleva RadEye-pintakontaminaatiomittari.

Epäsuorassa kontaminaatiomittauksessa määritetään irtoavan kontaminaation määrä esimerkiksi pyyhkäisy näytteiden avulla. Epäsuoran kontaminaatiomittauksen tarkoitus on usein yksinkertaisesti selvittää, että onko kyseinen kappale kontaminoitunut vai ei.



Kuva 3. Nutronic NT200-näyteanalysaattori ja pyyhkäisy näytelappu

Pyyhkäisy näyte analysoidaan analysaattorilla, joka esittää aktiivisuuden yleensä aktiivisuuskatteena Bq/cm^2 . Laaja-alaisen pyyhkäisy näytteen voi analysoida myös pintakontaminaatiomittarilla, mikäli analysaattorin käyttö ei ole mahdollista. (Salminen, 2021)

Etsittäessä diskreettejä partikkeleja tulisi käyttää laaja-alaisia pyyhkäisy näytteitä, sillä näin yksittäisen partikkelin todennäköisyys tulla havaituksi on suurempi. Diskreetin partikkelin

mahdollisesti löytyessä laaja-alaisesta näytteestä, tulisi alue tutkia uudelleen tarkemmin mahdollisesti toisten alueella olevien partikkelien varalta.

Diskreettien partikkelien mahdollinen sähkövaraus aiheuttaa ongelmia myös epäsuoran mittauksen yhteydessä. Tavalliselle pyyhkäisynäytteelle on määritetty kokeellisesti 35 % saanto, eli kontaminaation määrä, jota pinnoilta otettavasta näytteestä keskimääräisesti saadaan kerättyä. (Salminen, 2021) Saanto on määritetty tavalliselle, tasaisesti jakautuneelle kontaminaatiolle, ja näyteanalyysoija huomioi tämän laskennassa. Diskreettien partikkelien tapauksessa tällainen kompensointi ei ole toimiva, sillä niiden aktiivisuus ei ole tasaisesti jakautunutta pinnoille.

5.2 Henkilömonitorointi ja henkilökontaminaatoraportointi

Kuumien partikkelien havaitsemiseen tehokas keino on henkilömonitorointi. Valvonta-alueelta poistuessaan laitoksen työntekijöiden on käytävä pre- ja exit-henkilömonitoreissa. Pre-monitorit havaitsevat pintakontaminaation, kun taas exit-monitorien tarkoitus on sisäisen kontaminaation havaitseminen. Exit-monitorit ovat tarkkoja erityisesti gammasäteilyn havaitsemisessa. Yksittäiset kuumat partikkelit paljastuvat henkilömonitoreissa selkeästi ja niiden määristä ja suuruuksista saadaan automaattisesti kerättyä dataa. Korkean kontaminaatoriskin töiden jälkeen yleinen ohjeistus on käydä molemmissa monitoreissa välittömästi töiden päättymisen jälkeen.

Loviisan voimalaitoksella henkilömonitorien kontaminaatiohälytykset on jaettu tavallisiin, korkeisiin ja erittäin korkeisiin hälytyksiin. Näistä kahden jälkimmäisen tapauksessa on oltava yhteydessä säteilysuojeluun, sekä täytettävä henkilökontaminaation taustakysely. Taustakyselyn tarkoituksena on tunnistaa mistä kontaminaatio on peräisin. Taustakyselyn lisäksi on tehtävä laajempi luottamuksellinen henkilökontaminaatoraportti, mikäli kontaminaatiota havaitaan iholla, käsillä tai kasvoissa erittäin korkean hälytysrajan ylittävää määrää. Raportti on tehtävä myös, jos exit-mittauksessa havaitaan gamma-aktiivisuutta hälytysrajan ylittävää määrää. (Viljanmaa, 2021)

5.3 Säteilytyölupa valvonta-alueelle

YVL C2 -ohjeessa on määrätty, että ydinvoimalaitoksen valvonta-alueella tehtäviä töitä varten on tehtävä säteilytyölupa tai -ohje, mikäli se on säteilyturvallisuuden vuoksi perusteltua. Loviisan voimalaitoksella säteilytyöluvut ovat luokiteltu työn säteilyriskin mukaan. Eniten huomiota on kiinnitettävä töihin, joissa on riski suuriin henkilöannoksiin, suuriin kollektiivisiin annoksiin, vakaviin henkilökontaminaatiotapauksiin, sekä merkittävään kontaminaation leviämiseen. Diskreetit partikkelit voivat aiheuttaa vakavia henkilöannoksia, joten niiden huomioiminen olisi riskitasojen tunnistamisen kannalta tärkeää. (Mattila, 2015)

Loviisan voimalaitoksella säteilytöiden riskitasot ovat matala, normaali ja korkea. Matalan riskin töihin ei käytännössä liity kontaminaatoriskiä, sillä niissä ei työskennellä lisäkenkärajan sisäpuolella, eikä työ kohdistu prosessilaitteeseen. Normaalin riskitason säteilytöissä ei ole merkittävää henkilökontaminaatoriskiä. Normaalin riskin töissä tavallisen työkohteen luoksepäästävän kontaminaation taso on $< 800 \text{ Bq/cm}^2$. Korkean säteilyriskin töissä on riski suuriin kollektiivisiin tai henkilöannoksiin, tai merkittävä kontaminaatoriski. Korkean säteilyriskin töitä varten on tehtävä myös säteilysuojelusuunnitelma. Säteilysuojelusuunnitelman tarkoitus on helpottaa korkean säteilyriskin töihin valmistautumista, sekä käyttää edellisiä vastaavista töistä saatuja oppeja parempien käytäntöjen löytämiseen. (Mattila, 2015)

YVL C2 -ohjeessa määrätään, että jos ydinvoimalaitoksella tehtävästä työstä aiheutuva kollektiivinen annos on yli 50 mSv, tai työssä on merkittävä henkilökontaminaation, tai kontaminaation leviämisen riski, on työlle tehtävä yksityiskohtainen työ- ja säteilysuojelusuunnitelma, jotka on toimitettava STUK:lle ennen työn aloittamista. (STUK, 2019)

Säteilytöiden riskiluokittelun määrittelyssä mainittu henkilökontaminaation riski voi johtua diskreeteistä partikkeleista, mutta niiden havaitsemisen vaikeus aiheuttaa haasteita myös tämän kannalta. INPO suosittelee ohjeessaan ”Hot Particle Controls Program” (1989) käyttämään edellisiä partikkelihavaintoja sekä henkilökontaminaatoraportteja perustana toimintaan diskreettejä partikkeleja vatsaan. Tämä vastaa yhtä Loviisan säteilysuojelusuunnitelman tarkoitusta, joka on saada ja käyttää oppeja säteilysuojelullisesti vaativista töistä. Diskreettejä partikkeleja ei kuitenkaan mainita Loviisan säteilysuojeluohjeessa erikseen.

Diskreetit partikkelit liittyvät myös materiaalin kuljetukseen valvonta-alueen ulkopuolelle. Tällaiset materiaalit ja komponentit ovat voineet olla suoraan yhteydessä diskreettien

partikkelien lähteisiin (polttoaineen siirtosäiliöt), tai olleet diskreettien partikkelien kannalta riskialttiilla alueilla. Tämä riski on huomioitava säteilytyöluvan valmistelussa, vaikka kontaminaatoriski valvonta-alueen ulkopuolelle on harvinaisempi tapaus.

5.4 Suositukset toimiksi Loviisan ydinvoimalaitokselle

Tässä työssä esitettyjen diskreettien partikkelien riskien seurauksesta voidaan todeta, että niihin liittyviin säteilysuojellisiin toimiin on kiinnitettävä huomiota. Yleisiä ohjeita diskreettien partikkelien hallintaan on esitetty useissa standardeissa ja ohjekokoelmissa, kuten ydinvoimalaitosten säteilysuojeluohjeissa.

Tärkeimmäksi keinoksi diskreettien partikkelien aiheuttamaa riskiä vastaan on suunnittelu ja ennaltaehkäisy. Tämän vuoksi Loviisan ydinvoimalaitoksen säteilysuojelusuunnitelmiin ja ohjeisiin tulisi sisällyttää diskreettien partikkelien riskien tunnistus. Kokemukset töistä, joissa on ilmennyt kohonnut riski diskreettien partikkelien esiintymiselle, tulisi dokumentoida myöhempää käyttöä ja työsuunnittelua varten.

Sellaisissa töissä, joissa diskreettien partikkelien esiintymisriski on suuri, voidaan soveltaa tässä työssä esitettyjä rajaus- ja hallintakeinoja, jotka on todettu hyväksi käytössä toisilla ydinvoimalaitoksilla.

6 Johtopäätökset

Diskreetit radioaktiiviset partikkelit aiheuttavat pienestä koostaan, sekä mahdollisesta sähkövarauksestaan ja korkeasta annosnopeudestaan haasteita ydinvoimalaitosten säteilysojeiluorganisaatioille. Suositukset diskreettien partikkelien hallintaan perustuvat usein jo olemassa oleviin ydinvoimalaitoksen kontaminaation hallinnan keinoihin, mutta uniikin luonteensa takia ne vaativat tavallisesta poikkeavia toimenpiteitä.

Diskreettien partikkelien hallinnan tärkein tavoite on estää partikkelien aiheuttamat sisäiset ja ulkoiset henkilökontaminaatiotapaukset. Diskreetit partikkelit luovat tyypillisesti korkean annosnopeutensa seurauksesta riskin suuriin paikallisiin ihoannoksiin, tai sisäisiin annoksiin. Vakavimmat sisäisen kontaminaation tapaukset ovat kuitenkin harvinaisia, eivätkä näistä raportoidut säteilyannokset ole olleet tyypillisesti kovin suuria.

Loviisan ydinvoimalaitoksella havaitut tärkeimmät kehityskohteet diskreettien partikkelien hallinnan kannalta ovat työsuunnitteluun ja säteilytyöohjeisiin liittyvät parannukset. Useassa aiheetta käsittelevässä ohjeessa tärkeimmiksi hallintakeinoiksi mainitaan riskien tunnistus ja ennaltaehkäisevä työ. Erityisesti ohjeet korkean säteilyriskin töistä sekä näihin liittyvät säteilysojelusuunnitelmat tulisi päivittää, jotta ne ottaisivat töissä mahdollisesti esiintyvät diskreetit partikkelit huomioon.

Tässä kandidaatintyössä tehdyn tutkimuksen perusteella suositellaan Loviisan ydinvoimalaitoksen säteilysojelusuunnitelmien ja -ohjeiden päivittämistä niin, että ne sisältävät tarpeenmukaiset keinot ja toimintatavat diskreettien partikkelien hallintaan.

Lähteet

Baum, J. W., et al. 1996. Acute skin lesions due to localized "hot particle" radiation exposures.

Bell, J. M. 1991. Recommendations, requirements, and radioactive particles.

Charles, M. W., & Harrison, J. D. 2007. Hot particle dosimetry and radiobiology-past and present. *Journal of Radiological Protection*, 27(3), A97-A109. 101088/0952-4746/27/3A/S11

Charles, M. W., et al. 2003. Carcinogenic risk of hot-particle exposures. *Journal of Radiological Protection*, 23(1), 5-28.

Charles, M. W., & Darley, P. J. 1996. Radioactive 'hot particles': Are they still a problem?. IAEA.

Fortum Power And Heat Oy 2022. Loviisan ydinvoimalaitos [Verkkoaineisto, Saatavissa: [Fortum](#)] [Viitattu 25.7.2022]

Ikäheimonen, T. K. 2002. Säteily ja sen havaitseminen. Säteilyturvakeskus.

International Commission on Radiological Protection, Sutton. 1992. The biological basis for dose limitation in the skin.

INPO. 1989. Hot Particle Controls Program [Sisäinen aineisto INPO 89-006] Käyttö rajoitettu

James, D. W. 1988. Problem assessment of discrete radioactive particles: Final report.

Mattila Einari. 2015. Ihoannoksen määrittäminen Varskin-ohjelmalla. [Doris-dokumentti LO1-T314-00035]. Käyttö rajoitettu

Mattila Einari. 2020. Säteilysuojelusuunnittelu ja työmääräimen säteilyturvallisuuskäsittely [Doris-dokumentti S-03-00006]. Käyttö rajoitettu

- NISP, 2018. Radiation and Contamination Surveys. NISP-RP-002 [Verkkoaineisto, Saatavissa: [NISP](#)] [Viitattu 21.11.2022]
- NRC. 2021. A Computer Code for Skin Contamination and Dosimetry Assessments [Verkkoaineisto, Saatavissa: [NRC](#)] [Viitattu 28.8.2022]
- Paile, W. 2002. Säteilyn terveysvaikutukset. Säteilyturvakeskus.
- Petoussi-Henss, et al. 2010. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. Annals of the ICRP.
- Robinson, P., Kelly, J. J., & Gustafson, S. 1994. Industry experience with discrete radioactive particles Final report.
- Salminen Liisa. 2021. Pintakontaminaatiomittaukset. [Doris-dokumentti S-03-00039]. Käyttö rajoitettu
- Sandberg, J. 2004. Ydinturvallisuus. Säteilyturvakeskus.
- Servomaa, K, Rytömaa, T. 1989. Malignant transformation and activation of oncogenes by uranium aerosols released from Chernobyl.
- STUK. 2014. ST7.2 Säteilyaltistuksen enimmäisarvojen soveltaminen ja säteilyannoksen laskemisperusteet.
- Viljanmaa Julia. 2021. Työskentely valvonta-alueella. [Doris-dokumentti S-03-00005]. Käyttö rajoitettu
- YVL C.2 Ydinlaitoksen työntekijöiden säteilysuojelu ja säteilyaltistuksen seuranta. 2019.

Liite 1. INPO:n Henkilökontaminaatiokyselelylomake

HOT PARTICLE EXPOSURE INVESTIGATION DATA SHEET

Date _____ Hot Particle Log Number _____

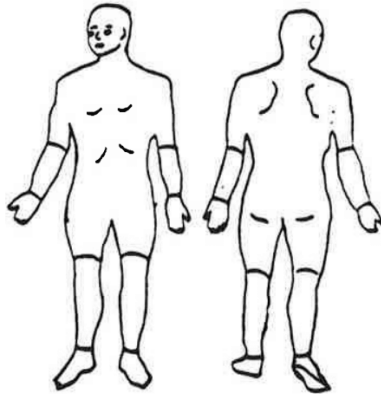
Worker Name _____ TLD # _____
Data Department _____ Supervisor _____

Red Zone Red Zone Location _____
Data Red Zone Category I II III IV Other _____

Work RWP # _____ RWP Title _____
Desc. Work Being Performed _____

Survey Survey Instrument _____ Serial # _____
Data Hot Part. Reading: Open Window _____ Closed Window _____
Max. Time Contaminated _____ (Attach copy of Hot Part. Survey log)

Hot Particle Location:



Add'l Additional Protective Clothing Being Worn _____
Info. _____
Comments (i.e., PCs loose fittings, stretching, etc.) _____

Describe the circumstances and the cause of the contamination: _____

Dose Skin dose received _____
Assigned Whole body dose received _____

Attach isotopic, if available.
Initiator Signature _____
Radiological Protection Supervision _____