

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Elektronisten dosimetrien uusinta Loviisan ydinvoimalaitoksella

Renewal of electronic dosimeters at Loviisa Nuclear Power Plant

Työn tarkastaja: Apulaisprofessori (tenure track) Heikki Suikkanen

Työn ohjaajat: Apulaisprofessori (tenure track) Heikki Suikkanen

Säteilysuojeluinsinööri Miska Hirvelä

Lappeenranta 28.08.2018

Waltteri Skogberg

TIIVISTELMÄ

Walteri Skogberg

Elektronisten dosimetrien uusinta Loviisan ydinvoimalaitoksella

Kandidaatintyö 2018

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Tarkastaja: Apulaisprofessori (tenure track) Heikki Suikkanen

32 sivua, 7 kuvaa ja 7 taulukkoa

Hakusanat: dosimetrit, elektroniset dosimetrit, DMC 3000, säteily, gammasäteily, säteilysuojelu, Loviisan ydinvoimalaitos

Loviisan ydinvoimalaitoksen elektroniset dosimetrit päivitetään uuteen malliin lähitulevaisuudessa. Viranomaisen vaatii säteilymittareiden uusimisen yhteydessä selvitystyötä uusien laitteiden kelpoisuudesta suunniteltuun käyttöpaikkaan. Tässä kandidaatintyössä tutkitaan erilaisia dosimetrityyppisiä ja niiden toiminnallisia eroavaisuuksia. Lisäksi selvitetään perusteet dosimetrien tarpeellisuudelle tutkimalla erilaisia säteilylajeja, niiden osuutta voimalaitostyöntekijöiden säteilyannoksissa sekä säteilyn terveysvaikutuksia. Työssä tutustutaan myös säteilymittalaitteiden viranomaisvaatimukseen, Loviisan voimalaitoksen käyttöpaikkakohtaisiin vaatimukseen ja nykyiseen työntekijöiden ulkoisen säteilyannoksen seurantajärjestelmään. Loviisan säteilysuojelujao oli käytännön syistä päättänyt jo etukäteen hankkia Mirionin DMC 3000 -mallin elektronisia dosimetreja, jos ne todetaan soveltuviksi. Tämän vuoksi tässä työssä ei vertailla DMC 3000:ta kilpailevien tuotteiden kanssa. Työn lopussa todetaan mittarin olevan ominaisuuksiltaan parempi kuin nykyinen DMC 2000S ja täyttävän viranomaisvaatimukset. Lisäksi sen yhteensopivuus nykyisen mittausjärjestelmän kanssa vahvistetaan.

SISÄLLYSLUETTELO

Symboli- ja lyhenneluettelo	5
1 Johdanto	6
2 Säteily	7
2.1 Ionisoimaton säteily	7
2.2 Ionisoiva säteily.....	7
2.2.1 Alfasäteily	8
2.2.2 Beetasäteily	9
2.2.3 Neutronisäteily	10
2.3 Sähkömagneettinen säteily	10
2.3.1 Röntgensäteily.....	12
2.3.2 Gammasäteily.....	12
2.4 Säteilyannos.....	12
2.4.1 Ulkoinen säteilyannos	15
2.4.2 Sisäinen säteilyannos	15
2.5 Säteilyn terveysvaikutukset	16
3 Dosimetri	17
3.1 TL-dosimetri.....	17
3.2 Filmidosimetri	18
3.3 DIS-dosimetri	19
3.4 OSL-dosimetri	19
3.5 Elektroninen dosimetri	20
4 Ulkoisen säteilyaltistuksen seuranta	22
4.1 Seurannan toteutus Loviisan voimalaitoksella	22
5 Dosimetrien kelpoistus	23
6 Reaaliaikaisen dosimetrijärjestelmän vaatimusmäärittely	24
6.1 Viranomaisvaatimukset	24

6.2	Käyttöpaikkakohtaiset ja toiminnalliset vaatimukset.....	26
6.3	DMC 2000S.....	27
6.4	DMC 3000.....	28
7	Johtopäätökset	30
8	Yhteenvedo	32
	Lähdeluettelo	33

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

<i>D</i>	absorboitunut säteilyannos	[Gy, Jkg ⁻¹]
<i>E</i>	efektiivinen annos	[Sv]
<i>H</i>	ekvivalenttiannos	[Sv]
<i>I</i>	intensiteetti	[Wm ⁻²]
<i>w</i>	painotuskerroin	[-]
<i>x</i>	materiaalin paksuus	[m]

Kreikkalaiset aakkoset

μ	vaimenemiskerroin	[m ⁻¹]
-------	-------------------	--------------------

Alaindeksit

<i>T</i>	kudos tai elin
<i>R</i>	säteilyn laatu

Lyhenteet

DIS	Direct Ion Storage
OSL	Optically Stimulated Luminescence
ST	Säteilyturvallisuus
TLD	Termoluminesenssidosimetri
VAL	Valmius
YVL	Ydinturvallisuus

1 JOHDANTO

Ionisoiva säteily aiheuttaa kudokseen absorboituessaan solumuutoksia ja siten terveyshaittoja ihmiselle. Näitä haittoja minimoidakseen säteilytyötä tekevien henkilöiden tulee pitää saamansa säteilyannokset mahdollisimman alhaisina. Säteilyasetuksessa on myös annettu ylärajat henkilöiden työperäisille vuotuisille säteilyannoksille. Näiden tavoitteiden täyttämiseksi ja annostarkkailun toteuttamisen vuoksi ydinvoimalaitoksilla käytetään henkilökohtaisia säteilymittareita, joita kutsutaan dosimetreiksi.

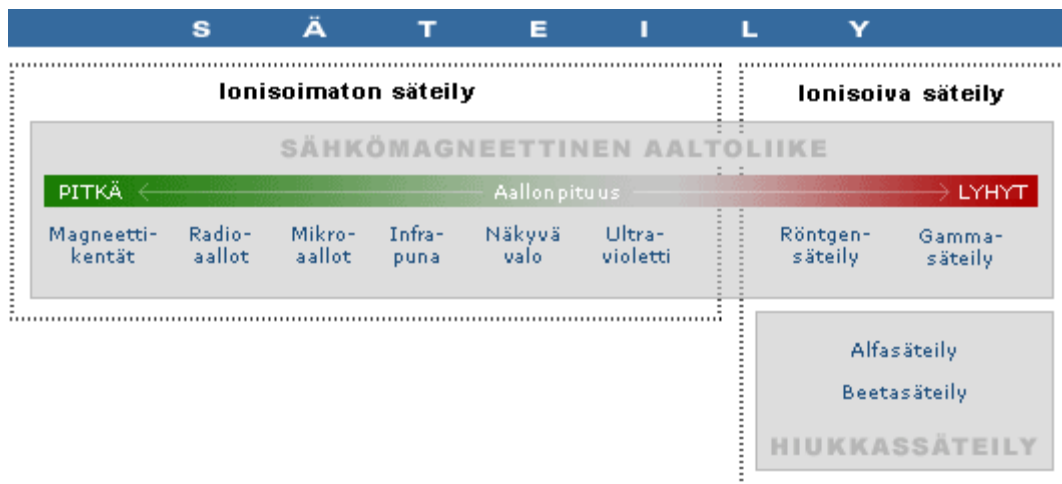
Loviisan ydinvoimalaitoksella nykyisin käytössä olevat elektroniset dosimetrit alkavat olla teknisen käyttöikänsä päässä. Lisäksi valmistaja on lopettamassa mittalaitteiden valmistamisen sekä huoltopalvelut lähivuosina. Näistä syistä johtuen laitoksen elektroniset dosimetrit on päätetty vaihtaa uusiin.

Elektroninen dosimetrijärjestelmä koostuu dosimetriä lisäksi muistakin laitteista ja ohjelmistoista. Taloudellisista ja käytännöllisistä syistä johtuen uusien dosimetriä tulee olla mahdollisimman yhteensopivia nykyisen järjestelmän muiden komponenttien kanssa. Tämän takia selvitystyössä keskitytään ainoastaan saman laitevalmistajan uudemman laitesukupolven elektroniseen dosimetriin.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan uusien laitteiden soveltumista Loviisan voimalaitokselle. Teoriaosassa käsitellään eri säteilylajien ominaisuuksia, säteilyannoksen määrittämistä, säteilyn terveysvaikutuksia sekä dosimetriä toimintaperiaatteita. Tämän jälkeen työssä käsitellään säteilymittarien viranomaisvaatimuksia, Loviisan voimalaitoksen käyttöolosuhteita sekä nykyisten ja selvityksen alla olevien mittarien ominaisuuksia. Lisäksi arvioidaan uusien mittareiden soveltuvuutta suunniteltuun käyttötarkoitukseen.

2 SÄTEILY

Säteilyä on sekä ionisoimatonta että ionisoivaa. Jaottelu tehdään sen perusteella, pystyykö säteily irrottamaan elektroneja atomin elektronikuorilta tai hajottamaan molekyylien rakenteen. Kuvassa 1 on esitetty yleisimmät säteilytyypit.



Kuva 1. Säteilyn luokittelu (Säteilyturvakeskus)

2.1 Ionisoimaton säteily

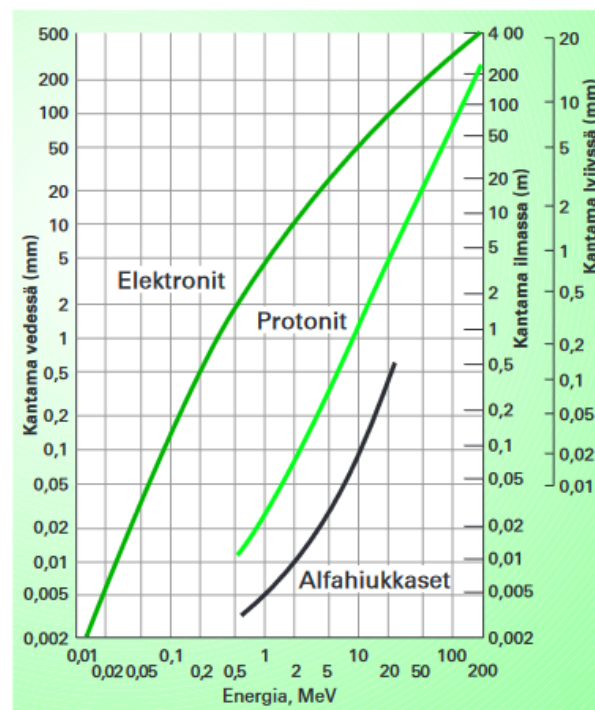
Sähkömagneettinen säteily muodostuu fotoneista, joiden energia riippuu säteilyn aallonpituudesta. Säteilyä, jonka energia ei riitä atomin elektronien irrottamiseksi eli ionisoimaan atomia, kutsutaan ionisoimattomaksi säteilyksi. Tämän energian on määriteltävä olevan 12 eV. Tähän luokkaan kuuluvat ultraviolettisäteily ja sitä pienempienergiset säteilytyypit kuten valo ja mikroaaltosäteily. Vaikka ionisoimaton säteily ei kykene ionisoimaan ainetta, voi riittävän voimakas säteily aiheuttaa valokemiallisia reaktioita, vaurioittaa silmää tai lämmittää kudosta. (Nyberg 2006, s. 16-20)

2.2 Ionisoiva säteily

Ionisoiva säteily koostuu sähkömagneettisesta säteilystä sekä hiukkassäteilystä. Ionisoivalla sähkömagneettisella säteilyllä on riittävän pieni aallonpituus ja siten tarpeeksi korkea energia tuottamaan ionisoivia sekundaarihiukkasia vuorovaikuttaessaan aineen kanssa (Ikäheimonen 2002, s. 44). Säteilyn aallonpituuden ja fotonin alkuperän perusteella ionisoiva

sähkömagneettinen säteily luokitellaan joko röntgen- tai gammasäteilyksi. Hiukkassäteilyssä ionisaation aiheuttaa suurella nopeudella kulkeva alfa- tai beetahiukkanen tai neutroni, jonka jarrutusenergia siirtyy väliaineeseen. (Ikäheimonen 2002, s. 12)

Eri säteilylajeilla on keskenään erilaiset ominaisuudet läpäistä väliainetta. Hiukkassäteilyn läpäisykyky eli kantama on suurimmillaan nopeilla, pienimassaisilla ja pienivarauksisilla hiukkasilla. Kuvassa 2 on esitetty eräiden hiukkassäteilytyyppien kantamia erilaisissa väliaineissa. (Ikäheimonen 2002, s. 39)



Kuva 2. Elektronien, protonien ja alfahiukkasten läpäisevyys eri väliaineissa energian funktiona (Ikäheimonen 2002, s. 39)

Sähkömagneettisella säteilyllä ei ole kantamaa väliaineessa, vaan säteilyn intensiteetti puolittuu tietyn paksuisessa väliaineessa. Puoliintumispaksuus riippuu kvantin energiasta sekä väliaineesta. (Reilly 1991, s.27-28)

2.2.1 Alfasäteily

Alfasäteily on hiukkassäteilyä, jossa suurienergiset kahdesta protonista ja kahdesta neutronista koostuvat alfahiukkaset ionisoivat kohtaamaansa materiaa. Alfahiukkanen syntyy

radioaktiivisen aineen alfahajoamisessa, jolloin atomiydin hajoaa tytärtimeksi ja alfahiukkaseksi. Hajoaminen perustuu atomiytimessä syntyvän alfahiukkasen muodostumisessa vapautuvaan sidosenergiaan, joka muuttuu hiukkasten liike-energiaksi ja poistaa alfahiukkasen ytimeistä. Samanlaisella nuklidilla alfahiukkasen saama energia on aina vakio tai jakautunut muutamaankin vakioenergiiseen ryhmään. Alfahajoaminen on tyypillisesti raskaiden ytimien hajoamista ja pienin tunnettu alfahajoava nuklidi on Ce-142. (Ikäheimonen 2002, s. 20)

Alfahiukkasten massa ja varaus on suuri verrattuna muihin hiukkassäteilytyyppeihin. Tästä johtuen niiden ionisointikyky eli vuorovaikutuskyky väliaineen elektronien kanssa on suuri. Alfahiukkasen aiheuttama vahinko kudoksessa on merkittävä, jos alfahajoavaa ainetta päätyy kehon sisään. Toisaalta alfahiukkasen hidastuminen väliaineessa on nopeaa ja niiden ilmassa kulkema etäisyys on lyhyt. Kehon ulkopuolinen alfasäteily ei aiheuta terveysuhkaa, sillä alfahiukkanen ei kykene läpäisemään ihon ulointa kuolleiden solujen muodostamaa kerrosta. Toisaalta alfahajoamisessa syntyvä tytärtimeksi saattaa jäädä virittyneeseen tilaan, joka purkautuu ihon läpäisevänä gammasäteilyä. (Ikäheimonen 2002, s. 20, 39-40)

2.2.2 Beetasäteily

Toinen hiukkassäteilyn tyyppi on beetasäteily, jossa beetahiukkaset ionisoivat kohtaamiaan atomeja. Beetasäteilyä syntyy kahdella eri tavalla. Beeta-miinus-hajoamisessa yksi atomiytimen neutroni hajoaa protoniksi, elektroniksi sekä antineutriinoksi. Beeta-plus-hajoamisessa yksi ytimen protoneista hajoaa neutroniksi, positroniksi sekä neutriinoksi. Syntyneitä elektroneja tai positroneja kutsutaan beetahiukkasiksi. Niillä on sähkövaraus sekä liike-energiaa ionisoimaan kohtaamiaan atomeja. Hajoamisessa syntyvät nukleonit jäävät atomin ytimeen. Neutriinot sekä antineutriinot puolestaan ovat massattomia ja varauksettomia hiukkasia, joten ne eivät juurikaan vaikuta ympäristön kanssa. Hajoamisessa vapautuvan energian jakautuminen ytimelle, beetahiukkaselle sekä neutriinolle tai antineutriinolle aiheuttaa beetahiukkaselle nuklidikohtaisen jakautuvan energiaspektrin alfahajoamisen vakioenergioiden sijaan. (Ikäheimonen 2002, s. 21-24)

Beetahiukkasen massa on huomattavasti pienempi kuin alfahiukkasella, joten niiden ilmassa tai muussa väliaineessa kulkema matka on suurempi ja ionisointikyky pienempi. Beetahiukkaset

menettävät energiaa pääasiassa siroamalla väliaineen ytimistä sekä elektroneista. Hidastumisen nopeus on riippuvainen väliaineen järjestysluvusta. Suurempaan nuklidiin törmätessään beetahiukkanen voi luovuttaa energiaa nopeammin, mikä aiheuttaa jarrutus säteilyksi kutsuttua sähkömagneettista säteilyä. Beeta-plus-säteily aiheuttaa myös aina sähkömagneettista säteilyä positronin annihiloituessa elektronin kanssa. (Ikäheimonen 2002, s. 40-43)

2.2.3 Neutronisäteily

Neutronisäteily on kolmas terveyshaitoiltaan merkittävä hiukkassäteilyn tyyppi. Neutronit vapautuvat pääasiassa radioaktiivisten ytimien fissionissa. Fissionissa yksi raskas ydin hajoaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi vapauttaen samalla muutamia neutroneja. Toisin kuin alfa- ja beetahiukkasilla, neutroneilla ei ole sähköistä varausta, minkä vuoksi ne eivät ionisoi atomeja. Sen sijaan ne voivat absorboitua kohtaamaansa atomiytimeen ja tehdä siitä epävakaa, jolloin ydin voi esimerkiksi fissionia tai emittoida gamma-, protoni-, alfa- tai neutronisäteilyä. Ytimeä emittoituvat varatut hiukkaset, gammakvantit ja ytimen hajoamisessa saama liike-energia kykenevät ionisoimaan atomeja. Neutronisäteily kykenee siis ionisoimaan atomeja ainoastaan välillisesti. Sähköisen varauksen puuttumisen vuoksi neutronisäteily kykenee läpäisemään väliainetta syvemmälle kuin alfa- tai beetasäteily. (Ikäheimonen 2002, s. 49-50)

2.3 Sähkömagneettinen säteily

Kuten neutronisäteily, on sähkömagneettinenkin säteily välillisesti ionisoivaa. Fotonin sironta ja absorptio atomin elektronin tai ytimen kanssa tai ytimen voimakentässä voi tuottaa sekundaarihiukkasia, jotka kykenevät ionisoimaan atomeja. Vaikka fotoni kykenee suoraan ionisoimaan hiukkasen, aiheuttaa sekundaarielektroni useampia ionisaatioita kuin sen irrottanut fotoni, minkä vuoksi fotonisäteily on määritelty välillisesti ionisoivaksi (Nuclear Power). Merkittävimpiä vuorovaikutuksia aineen kanssa ovat klassinen sironta, Comptonin ilmiö, fotosähköilmiö, parinmuodostus ja fotodynaaminen reaktio. (Ikäheimonen 2002, s. 44)

Fotoni voi reagoida atomiin sitoutuneen elektronin kanssa kolmella tavalla. Klassisessa sironnassa fotoni vuorovaikuttaa atomin elektronin kanssa ja luovuttaa osan energiastaan kyseiselle atomille. Tuloksena fotonin energia pienenee. Fotosähköilmiössä elektroni vastaanottaa kaiken fotonin energian, mikä johtaa elektronin irtoamiseen elektroniverhosta.

Irronneen elektronin liike-energia on alkuperäisen fotonin energia vähennettynä elektronin sidosenergialla. Ionisoivan elektronin lisäksi fotosähköilmiössä vapautuu röntgensäteilyä, kun ylemmän elektronikuoren elektroni siirtyy alemmas täyttämään syntynyttä aukkoa. Comptonin ilmiössä fotonin energia pienenee ja ytimeistä poistuu elektroni, joka kykenee ionisoimaan atomeja. (Ikäheimonen 2002, s. 44-47)

Jos fotonin energia ylittää elektronin lepomassan vähintään kaksinkertaisesti, saattaa atomiytimen sähkömagneettisessa kentässä oleva fotonin aiheuttaa parinmuodostuksen. Siinä fotonin häviää synnyttäen elektronin sekä positronin. Syntyneiden hiukkasten liike-energiaksi jää alkuperäisen fotonin energian ja lepomassojen erotus. Kun positroni on luovuttanut liike-energiansa siroamisessa väliaineen kanssa, se yhdistyy elektroniin ja annihiloituu, mistä syntyy kaksi fotonia, joiden energia on elektronin lepomassan suuruinen. (Ikäheimonen 2002, s. 47)

Suurienerginen fotonin saattaa myös absorboitua atomiytimeen ja irrottaa neutronin tai protonin. Nukleonin irrottaminen vaatii useilla aineilla yli kymmenen MeV:n energian ja kynnysenergiat protonin irrottamiseksi ovat aina huomattavasti suuremmat kuin neutronin irrottamiseen. (Ikäheimonen 2002, s. 48)

Sähkömagneettisella säteilyllä ei ole olemassa samanlaista yksiselitteistä läpäisyarvoa kuten alfa- ja beetasäteilyllä, vaan säteily vaimenee heikkensylain mukaisesti. Sen mukaan säteilyn intensiteetti heikkenee samalla ainepaksuudella aina yhtä paljon, kun materiaali ja säteilyn aallonpituus pysyvät samana. Fotonisäteily läpäisee väliainetta sitä paremmin mitä suurempienergiisiä fotonit ovat. Aineen vaimennuskerroin, eli kyky vaimentaa sähkömagneettista säteilyä, on tyypillisesti parempi tiheillä aineilla verrattuna kevyisiin. Vaimentunut intensiteetti lasketaan yhtälöllä (Reilly 1991, s.27-29)

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

missä

I	intensiteetti	$[\text{Wm}^{-2}]$
μ	vaimennuskerroin	$[\text{m}^{-1}]$
x	materiaalin paksuus	$[\text{m}]$

2.3.1 Röntgensäteily

Röntgensäteily on sähkömagneettista säteilyä, jossa fotonit emittoituvat atomin elektronikuorelta. Röntgensäteilyn fotonin energia on tyypillisesti yli 0,1 keV ja aallonpituus on lyhyt. Röntgensäteily on jaettu karakteristiseen röntgensäteilyyn ja jarrutussäteilyyn fotonin alkuperän perusteella. Karakteristinen röntgensäteily syntyy, kun elektroni siirtyy atomin sisemmälle elektronikuorelle vapauttaen atomin sisäenergiaa. Jarrutussäteilyä syntyy, kun elektronin tai muun varauksellisen hiukkasen liike-energiasta osa vaihtaa muotoa esimerkiksi hiukkasen hidastuessa. Molempia säteilytyyppejä syntyy keinotekoisesti esimerkiksi röntgenputkessa. (Ikäheimonen 2002, s. 15)

2.3.2 Gammasäteily

Gammasäteily on röntgensäteilyn tavoin sähkömagneettista säteilyä. Mutta toisin kuin röntgensäteilyssä, gammakvantit emittoituvat virittyneen atomin ytimeistä. Myös annihilaatiosäteily eli hiukkasen ja sen vastahiukkasen yhtyminen ja niiden lepomassojen muuttuminen gammakvanteiksi lasketaan yleensä gammasäteilyksi. (Ikäheimonen 2002, s. 21). Ytimen viritystilojen purkautumista kutsutaan transitioksi. Gammatransitiot tapahtuvat yleensä välittömästi hajoamisen jälkeen. Joidenkin hajoamisten jälkeiset atomiytimet jäävät kuitenkin virittyneeseen tilaan pidemmäksi aikaa. Näitä tiloja kutsutaan isomeerisiksi tai metastabiileiksi tiloiksi ja niiden laukeamista kutsutaan isomeeriseksi transitioksi. Isomeerisessa tilassa olevien nuklidien tunnukseseen lisätään kirjain m. Esimerkiksi indiumin isotooppi In-113m jää isomeeriseen tilaan. (Ikäheimonen 2002, s. 24) Gammasäteily on pääasiallinen säteilyannoksen aiheuttaja ydinvoimalaitoksilla (Toivonen et al. 1988, s. 291).

2.4 Säteilyannos

Säteilyn mukana aineeseen siirtynyttä energiaa kuvaa absorboitunut annos D . Absorboitunut annos kertoo, paljonko energiaa on siirtynyt kohdeaineeseen massayksikköä kohden. Annoksen yksikön erityisnimi on gray [Gy], joka vastaa SI-yksikköä [Jkg^{-1}]. (Ikäheimonen 2002, s. 73-74)

Säteilysuojelun kannalta on olennaista tietää, miten säteily vaikuttaa kehoon. Tätä tarkoitusta varten on luotu käsitteet ekvivalenttiannos sekä efektiivinen annos, joiden määrittämiseen on käytetty fysikaalisten suureiden lisäksi tilastollisia menetelmiä. (Ikäheimonen 2002, s. 69)

Ekvivalenttiannos H_T ottaa huomioon eri säteilylajien erilaiset ionisointivaikutukset kudokseen. Ekvivalenttiannos saadaan kertomalla keskimääräinen kudokseen absorboitunut annos säteilylajin painotuskertoimella w_R . Ekvivalenttiannoksen yksikön erityisnimi on sievert [Sv], joka vastaa myös SI-yksikköä [Jkg^{-1}]. Painotuskertoimet on esitetty taulukossa 1. Jos absorboitunut säteilyannos on aiheutunut useasta eri säteilylajista, on ekvivalenttiannos eri säteilylajien aiheuttamien annosten summa. Ekvivalenttiannos lasketaan yhtälöllä (Ikäheimonen 2002, s. 82)

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}, \quad (2)$$

missä

H_T	ekvivalenttiannos	[Sv]
w_R	säteilyn laadun painotuskerroin	[-]
$D_{T,R}$	keskimääräinen absorboitunut annos	[Gy, Jkg^{-1}]

Alaindeksi T viittaa kudokseen tai elimeen, johon säteily on absorboitunut. Alaindeksi R puolestaan tarkoittaa säteilylajia, johon absorboitunut säteily kuuluu. (Ikäheimonen 2002, s. 80)

Efektiivinen annos E ottaa huomioon säteilyn vaikutuksen eri kudoksiin ja elimiin. Efektiivinen annos lasketaan kertomalla ekvivalenttiannos kudoksen tai elimen painotuskertoimella w_T . Efektiivisen annoksen yksikkö on [Jkg^{-1}] ja myös sen erityisnimi on sievert [Sv]. Painotuskertoimet on esitetty taulukossa 2. Jos useampi osa kehoa on säteilyaltistuksen kohteena, tulee painotetut ekvivalenttiannokset summata yhteen. Efektiivinen annos määräytyy yhtälöllä (Ikäheimonen 2002, s. 82)

$$E = \sum_T w_T H_T, \quad (3)$$

missä

E	efektiivinen annos	[Sv]
w_T	kudoksen tai elimen painotuskerroin	[-]
H_T	ekvivalenttiannos	[Sv]

Taulukko 1. Painotuskertoimet eri säteilylajeille (Ikäheimonen 2002, s. 80)

Säteilyn laatu	Painotuskerroin w_R
Fotonit, kaikki energiat	1
Elektronit, kaikki energiat	1
Neutronit, joiden energia on	
-alle 10 keV	5
-yli 10 keV ja enintään 100 keV	10
-yli 100 keV ja enintään 2 MeV	20
-yli 2 MeV ja enintään 20 MeV	10
-yli 20 MeV	5
Protonit, joiden energia yli 2 MeV	5
Alfahiukkaset, fissionfragmentit ja raskaat ytimet	20

Taulukko 2. Painotuskertoimet eri kudoksille ja elimille (Ikäheimonen 2002, s. 81)

Kudos tai elin	Painotuskerroin w_T
Sukurauhaset	0,20
Punainen luuydin	0,12
Paksusuoli	0,12
Keuhkot	0,12
Mahalaukku	0,12
Virtsarakko	0,05
Rintarauhaset	0,05
Maksa	0,05
Ruokatorvi	0,05
Kilpirauhanen	0,05
Iho	0,01
Luun pinta	0,01
Muut kudokset ja elimet yhteensä	0,05

Säteilytyötä tekevien henkilöiden työstä saaman efektiivisen annoksen viiden vuoden keskiarvo ei saa olla suurempi kuin 20 mSv vuodessa. Lisäksi saatu annos ei saa ylittää yhtenäkkään vuotena arvoa 50 mSv. (Säteilyasetus §3)

2.4.1 Ulkoinen säteilyannos

Ulkoisella säteilyllä tarkoitetaan säteilyä, joka kohdistuu kehoon sen ulkopuolisesta lähteestä. Ulkoisen säteilyannoksen aiheuttaja voi olla joko beeta-, ftoni- tai neutronisäteilylähde. (Toivonen et al. 1988, s. 291)

Suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla työntekijöiden saamasta säteilyannoksesta valtaosa aiheutuu ulkoisesta gammasäteilystä. Säteily on peräisin radioaktiivisista materiaaleista, joita on kertynyt erityisesti primääripiiriin, reaktoriin, ioninvaihtohartseihin sekä erilaisiin suodattimiin. (Toivonen et al. 1988, s. 559-560)

Beetasäteily ei aiheuta paljoa ulkoista annosta, sillä beetahiukkaset eivät läpäise komponentteja, joiden sisälle radioaktiivinen materiaali on kertynyt. Neutronisäteily puolestaan ei aiheuta merkittävää henkilöannosta, sillä sitä esiintyy enimmäkseen reaktorin ympäristössä käytön aikana, jolloin työntekijöiden kulkua alueelle on rajoitettu. Lisäksi reaktorin sydäntä ympäröivä vesi- ja betonimassa toimii säteilysuojana (McAlister 2016, s. 7). Jonkin verran neutronisäteilyannosta aiheutuu myös käytetyn polttoaineen käsittelystä ja tiettyjen mittalaitteiden käyttämisestä säteilylähteistä (Hirvelä 2018).

2.4.2 Sisäinen säteilyannos

Sisäisen säteilyannoksen aiheuttaa kehon sisälle joutunut radioaktiivinen aine. Sisäisen säteilyannoksen tarkka määrittäminen on haastavaa, sillä säteilylähde ja siten absorboitunut energia on yleensä jakautunut epätasaisesti kehoon. Lisäksi yksilölliset vaihtelut aineenvaihdunnan nopeudessa vaikuttavat säteilyannoksen suuruuteen. (Toivonen et al. 1988, s. 321)

Sisäisen säteilyannoksen määrä suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla on vähäistä verrattuna ulkoiseen. Radioaktiiviset materiaalit pääsevät komponenteista ulos lähinnä huoltojen aikana, kun laitteita avataan ja korjataan. (Toivonen et al. 1988, s. 560)

2.5 Säteilyn terveysvaikutukset

Ionisoivan säteilyn aineesta irrottamat elektronit voivat vaurioittaa solujen DNA-ketjua ja jopa katkaista sen. Tämä vaikuttaa solujen jakautumiseen ja uusiutumiseen, tai pahimmillaan saattaa tuhota solun kokonaan. Säteilyn terveysvaikutukset jaetaan deterministisiin ja stokastisiin. (Paile 2002, s. 44)

Deterministisillä vaikutuksilla tarkoitetaan suurista kerta-annoksista johtuvia terveysvaikutuksia, jotka johtuvat runsaasta solukuolemasta kudoksessa. Deterministisiä vaikutuksia ovat esimerkiksi säteilytauti, palovamma tai sikiövaurio. Näitä vaikutuksia ei esiinny ollenkaan, mikäli henkilön säteilyannos ei ylitä vaikutuksen vaatimaa kynnysarvoa. Säteilysuojelun kannalta on olennaista, ettei yksilön saama säteilyannos nouse liian suureksi ja ylitä tätä arvoa. (Paile 2002, s. 44-46)

Stokastisilla terveysvaikutuksilla tarkoitetaan esimerkiksi tilastollisia vaikutuksia väestön syöpäkuolemiin. Säteily saattaa muuttaa solun perimää siten, että solusta syntyy kasvain tulevaisuudessa. Stokastisten vaikutusten esiintyminen on satunnaista ja niiden esiintymistodennäköisyys kasvaa lineaarisesti väestön kokonaissäteilyannoksen kasvaessa. Tästä syystä ihmisten kollektiivinen säteilyannos pidetään mahdollisimman matalana. (Paile 2002, s. 44-46)

3 DOSIMETRI

Henkilöiden työstä saamia säteilyannoksia tulee tarkkailla, jotta voidaan varmistaa säteilyasetuksessa määritettyjen rajojen puitteissa pysyminen. Ulkoisia säteilyannoksia mittaavia laitteita kutsutaan dosimetreiksi. Tyypillisesti niillä mitataan henkilön niin sanottua kokokehoannosta. On myös olemassa mittareita, jotka on suunniteltu esimerkiksi silmän mykiön tai käsien efektiivisten annosten määrittämiseksi, mutta ydinvoimalaitoksilla niitä on käytössä vain poikkeustapauksissa (Trousil 1999, s. 153).

Dosimetrin toivottuja ominaisuuksia ovat pieni koko ja kestävä rakenne, jotka ovat olennaisia mittarin käytännöllisyyden kannalta. Lisäksi mittarin tulisi kestää lämpöä, kosteutta ja valoa. Mittaustuloksen tulee olla mahdollisimman riippumaton mittauskulmasta ja säteilyn energiasta, voimakkuudesta sekä lajista. Mitatun säteilyannoksen tulisi säilyä muuttumattomana luentajakson yli. Luentajakson pituus on yleensä kuukausi. Muita dosimetrin toivottuja ominaisuuksia ovat tuloksen helppo ja nopea luettavuus, uudelleenluettavuus, hyvä mittaustarkkuus sekä halpa hinta. Mittausalueen tulisi kattaa vähintään annosväli 10^{-4} – 10 Sv. Säteilyannos 10^{-4} Sv on nykyinen kuukauden kirjausraja ulkoiselle säteilyannokselle Suomessa (YVL C.2). 10 Sv puolestaan on suurin nopeasti saatu säteilyannos, josta ihminen voi selvitä hengissä. (Gollnick 1989, s. 238-239)

3.1 TL-dosimetri

TL- eli termoluminesenssidosimetrejä käytetään virallisina ulkoisen henkilösäteilyannoksen mittareina suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla. (Kalinainen 2014, s. 4) TL-dosimetri on esitetty kuvassa 3. Niiden toiminta perustuu termoluminesenssimateriaalin kiderakenteeseen. Ionisoiva säteily saa kiteessä aikaan viritystiloja, jotka voidaan purkaa kidettä lämmittämällä. Viritystilan purkautuminen emittoi fotoneita, jotka mitataan valomonistinputkella. Emittoituneen valon määrästä voidaan laskea henkilön saama säteilyannos. Kiteet voivat dosimetrin rakenteen ja kidemateriaalin perusteella olla tarkoitettuja eri säteilylajien mittaamiseen. Suomessa käytetään litiumboraatti- sekä litiumfluoridikiteitä, joilla voidaan mitata beeta-, fotoni- sekä neutronisäteilyannoksia (Kalinainen 2014, s. 5). (Knoll 2000, s. 731-734)



Kuva 3. TL-dosimetrin kuoret ja sen sisällä olevat kiteet (Slovak Legal Metrology)

TL-dosimetrit ovat yleisessä käytössä muun muassa koska monet termoluminesenssimateriaalit pysyvät kiinteinä käyttölämpötiloissa. Lisäksi monien materiaalien ionisoituminen on riippumaton säteilykentän suunnasta. TL-dosimetrien yksi ongelma on kiteiden viritystilojen ei-haluttu purkautuminen erityisesti ympäristön lämpötilasta johtuen ajan kuluessa (Mahesh 1985, s. 167). Osalla materiaaleista tämä on kuitenkin merkityksettömän pientä huoneenlämpötilassa. TL-dosimetrien säteilyannoksen mittausalue vaihtelee kidemateriaalin perusteella. Litiumboraatilla se on noin $10^{-4} - 3$ Sv ja litiumfluoridilla $5 \cdot 10^{-5} - 10^2$ Sv (Mahesh 1985, s. 175). Annosnopeuden mittausalue on käytännössä lineaarinen arvoon 10^9 Sv/s asti. (Mahesh 1985, s. 202)

3.2 Filmidosimetri

Filmidosimetrit olivat aikaisemmin standardimenetelmä henkilöannosten määrittämiseksi. Dosimetri toimii kuten filmiin perustuvat valo- tai röntgenkuvaukset: Säteilyaltistus näkyy filmissä mustumisena, kun se kehitetään. Kehitettyä filmiä verrataan toiseen kehitettyyn filmiin, jonka saama säteilyaltistus on tiedossa. Näin saadaan selville henkilön saama säteilyannos. Filmin vaste on suurimmillaan matalaenergiselle fotonisäteilylle, minkä vuoksi filmidosimetreissä käytetään yleensä tina- ja lyijysuotimia tasoittamaan säteilyn energiavastetta. (Knoll 2000, s. 730-731)

Filmidosimetrien mittausalue gammasäteilylle on noin $2 \cdot 10^{-4} - 10$ Sv. (Mahesh 1985, 314) Filmidosimetrin energiavaste gammasäteilylle voi olla noin $\pm 20\%$ energia-alueella 10 keV – 1,3 MeV. (Mahesh 1985, 310) Säteilykentän ja dosimetrin välisen kulman vaikutus mittaustulokseen ei ole merkittävä, jos dosimetrissä ei ole energiavastetta tasoittavaa

metallisuodatinta. Toisaalta suodattimellisen dosimetrin mitatun annoksen alttius kulmalle voi olla merkittävä joissain tapauksissa. Toinen ongelma filmidosimetricien käytössä on filmin tummuminen ja haaleneminen ajan myötä. Tähän vaikuttaa muun muassa mitattu säteilyannos, fotonien energia sekä ympäristön lämpötila ja kosteus. Erityisesti suurella suhteellisella ympäristön kosteudella filmin haalistuminen on merkittävän nopeaa. (Mahesh 1985, s. 312-313)

3.3 DIS-dosimetri

DIS-dosimetrin (Direct Ion Storage) toiminta perustuu ionisaatiokammioon, jossa syntyy varauksia ionisoivan säteilyn vaikutuksesta. Sähkövaraus tallentuu ionisaatiokammiossa olevaan puolijohdemuistiin, josta se voidaan myöhemmin lukea sähkövarausten erotuksena. DIS-dosimetrin etu verrattuna TLD- ja filmidosimetreihin on, että säteilyaltistuksen lukeminen ei tyhjennä dosimetriä. (Knoll 2000, 751-752)

DIS-dosimetrin mitta-alue on suuri noin $1 \cdot 10^{-6} - 40$ Sv (Dung et al. 2001, s. 1). Niiden mittaustulos ei juurikaan muutu pitkänkään luentajakson aikana (Dung et al. 2001, s. 4). Energiavaste on $\pm 20\%$ fotonien energia-alueelle 50 keV – 3 MeV. (Thompson 1999, s. 175)

3.4 OSL-dosimetri

OSL-dosimetri (Optically Stimulated Luminescence) on toimintaperiaatteeltaan samankaltainen kuin TL-dosimetri. Säteilyaltistus aiheuttaa kidemateriaaliin viritystilan, joka voidaan purkaa altistamalla materiaali laservalolle. Viritystilan purkautumisessa vapautuva valo on aallonpituudeltaan erilaista kuin käytettävä laservalo, joten laitteen itse tuottama valo (jota ei haluta valomonistinputkelle luettavaksi) voidaan erottaa optisella suodattimella. Mittaustyyppi on termoluminesenssimenetelmää uudempi. Etuna OSL-dosimetrillä on, että sillä voidaan mitata pienempiä säteilyaltistuksia kuin TL-dosimetrillä. Lisäksi dosimetrin materiaalien ei tarvitse kestää yhtä korkeita lämpötiloja kuin TL-dosimetrissa. (Knoll 2000, s. 735)

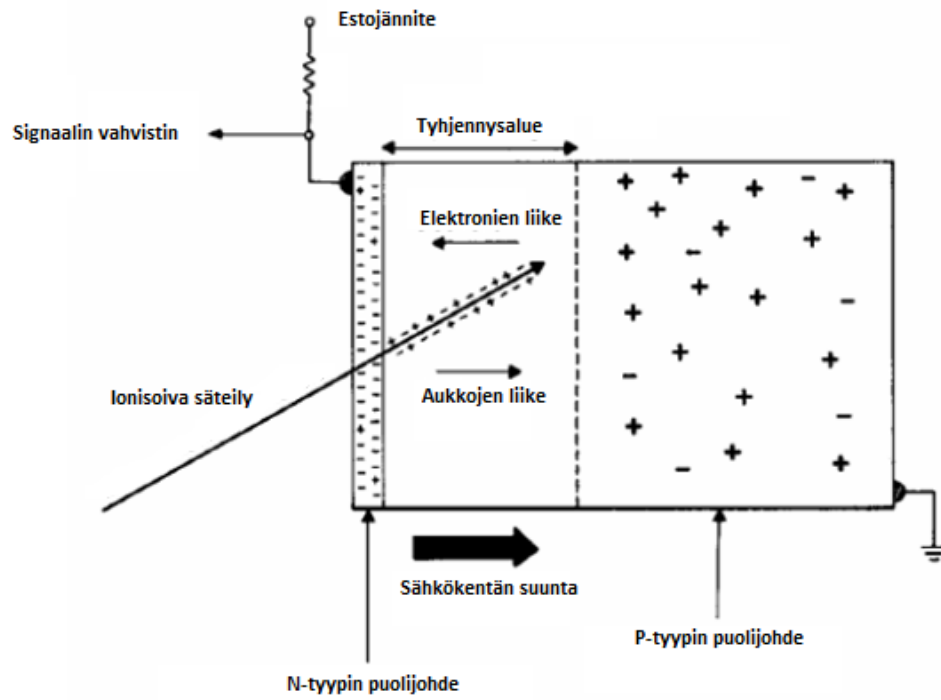
OSL-dosimetrin säteilyannoksen mittausalue on $5 \cdot 10^{-5} - 10$ Sv. Mittauksen energia-alueen minimiraja-arvo on 15 keV sähkömagneettiselle säteilylle. OSL-dosimetrien kiteiden viritystilojen purkautuminen ajan mittaan ei ole merkittävän suurta. (Slovak Legal Metrology)

3.5 Elektroninen dosimetri

Elektronisten dosimetrien toiminta perustuu nykyään tyypillisesti puolijohdeilmaisimeen. Dosimetrien puolijohdeilmaisimena käytetään yleensä PIN-diodia, johon on kytketty jännite estosuuntaisesti. Jännite synnyttää p- ja n-tyyppien välille varauksenkuljettajista vapaan tyhjennysalueen. Kun ionisoiva säde reagoi tyhjennysalueen materiaalin kanssa, se ionisoi puolijohdemateriaalia. Ionisaatio synnyttää vapaita varauksenkuljettajia eli positiivisesti varautuneita aukkoja sekä negatiivisesti varautuneita elektroneja. Puolijohdemateriaaliin kytketyn jännitteen vuoksi aukot ja elektronit kulkevat vastakkaisiin suuntiin puolijohdeissa. Varauksenkuljettajien liikkeen synnyttämä virta mitataan, mistä voidaan laskea diodin saama säteilyannos. PIN-diodin toiminta säteilymittarina on esitetty kuvassa 4. Ennen puolijohdeilmaisimia elektronisissa dosimetreissa käytettiin Geiger-Muller -putkia. Puolijohdeilmaisimeen perustuvat mittarit ovat nykyään yleisemmin käytössä, sillä ne ovat pienempiä sekä kestävämpiä. (Knoll 2000, s. 399-400)

Elektronisen dosimetrin etuna kaikkiin edellä mainittuihin dosimetreihin on sen mittaaman säteilyaltistuksen reaaliaikainen luentamahdollisuus (Knoll 2000, 399). Muut dosimetrit täytyy lukea ja usein nollata erilaisilla luentalaitteilla, mutta elektronisissa dosimetreissa on näyttö, josta mittarin kantaja näkee saadun säteilyannoksen välittömästi. Jatkuva luenta mahdollistaa lisäksi myös erilaisten hälytysten asentamisen mittariin varoittamaan henkilöitä odotettua suuremmista säteilyannoksista tai -annosnopeuksista (Thompson 1999, s. 173).

Elektronisen dosimetrin heikkouksia verrattuna moniin muihin dosimetreihin ovat niiden korkeampi hinta, suurempi koko ja toiminnan riippuvuus virtalähteestä. Mittausvaste gammaenergialle on yleensä alle $\pm 20\%$ tai $\pm 30\%$ energiavälillä 20 keV – 4 MeV riippuen muun muassa PIN-diodien lukumäärästä dosimetrissä. (Thompson 1999, s. 173-175)



Kuva 4. PIN-diodi säteilymittarina (kuva muokattu lähteestä Sanderud, s. 18)

4 ULKOISEN SÄTEILYALTISTUKSEN SEURANTA

Ydinvoimalaitostyöntekijöiden saama säteilyannos johtuu pääasiassa ulkoisesta gammasäteilystä. Tämä johtuu siitä, että pääosa radioaktiivisesta aineesta reaktorin ulkopuolella on primääripiirin putkissa, venttiileissä ja muissa komponenteissa. Nämä säteilevät materiaalit ovat pääasiassa reaktorissa aktivoituneita korroosiotuotteita, jotka ovat beeta- tai gamma-aktiivisia. Beetasäteily ei läpäise komponenttien pintamateriaaleja, joten käytännössä kaikki tavallisen käyttötilanteen säteilyaltistus ydinvoimalaitoksella johtuu ulkoisesta gammasäteilystä. (Sandberg 2004, s. 147)

Säteilytyöluokkaan A kuuluville henkilöille on järjestettävä virallinen annostarkkailu (ST 7.1 2014, s. 3). Loviisan voimalaitoksella kaikki valvonta-alueen työntekijät kuuluvat tähän luokkaan. Virallinen annostarkkailu toteutetaan yleensä passiivisilla dosimetreillä. Virallisen annostarkkailun lisäksi ydinvoimalaitostyöntekijöille on järjestettävä epävirallinen reaaliaikainen annostarkkailu, jota käyttäen säteilysuojelutyöntekijät voivat operoida säteilysuojelutoimia (YVL C.2).

4.1 Seurannan toteutus Loviisan voimalaitoksella

Loviisan voimalaitoksella käytetään virallisen säteilyannoksen mittaamiseen termoluminesenssidosimetrejä. TL-dosimetreissä käytetään litiumboraatti sekä litiumfluoridikiteitä, joiden avulla mitataan beetasäteilyn aiheuttama pinta-annos sekä gamma- ja neutronisäteilyn aiheuttama syväannos. (Kalinainen 2014, s. 4-5)

Reaaliaikainen dosimetrijärjestelmä koostuu pääasiassa elektronisista dosimetreistä, niiden lukijalaitteista sekä järjestelmään kuuluvista ohjelmistoista. Järjestelmällä tarkkaillaan jatkuvasti työntekijöiden saamaa gamma-annosta sekä -annosnopeuksia työkohteissa. Tähän järjestelmään kuuluvat elektroniset dosimetrit on tarkoitus uudistaa siten, että järjestelmän muut laitteet ja ohjelmistot voitaisiin säilyttää niin ennallaan kuin on käytännöllisesti mahdollista.

5 DOSIMETRIEN KELPOISTUS

Ydinvoimalaitoksien järjestelmät, rakenteet ja laitteet jaetaan neljään eri luokkaan niiden turvallisuusvaikutuksen perusteella. Nämä luokat ovat 1, 2, 3 sekä EYT (ei ydinteknisesti luokiteltu). Turvallisuusluokituksen perusteella määräytyy laitteiden kelpoistukseen eli viranomaisille toimitettavan laitteen soveltuvuuden arviointiin tarvittavan dokumentoinnin laajuus. (YVL B.2)

Turvallisuusluokkaan 1 kuuluvat ydinpolttoaine, reaktori sekä primääripiirin laitteet, joiden vaurioituminen vaarantaa reaktorin eheyden. Turvallisuusluokkaan 2 kuuluvat järjestelmät, joilla on tarkoitus ajaa laitos hallittuun tilaan mahdollisen onnettomuuden sattuessa. Tämän luokan laitteita ja rakenteita ovat esimerkiksi reaktorin hätäjähdytysjärjestelmän tärkeimmät laitteet sekä paineastia. Turvallisuusluokkaan 3 kuuluu esimerkiksi laitteita, joilla käsitellään polttoainetta, säädetään reaktorin tehoa tai jäähdytetään käytettyä polttoainetta. (YVL B.2)

EYT-luokiteltuja järjestelmiä ovat ne, jotka eivät merkittävästi vaikuta laitoksen turvallisuuteen eivätkä kuulu turvallisuusluokkiin 1, 2 tai 3. Luokkaan EYT sijoitetuista järjestelmistä luokitellaan luokkaan EYT/STUK ne järjestelmät, joiden vikaantuminen saattaa olla alkutekijä laitoskohtaiselle riskille. Lisäksi laitteet, joilla mitataan ympäristössä, laitoksella tai työntekijöissä esiintyvää säteilyä, luokitellaan tähän luokkaan, jos ne eivät ole luokassa 3. Luokkaan EYT/STUK kuuluvat esimerkiksi palontorjuntajärjestelmät sekä erilaiset säteilymittarit. Uudet elektroniset dosimetrit tulee siis kelpoistaa tähän turvallisuusluokkaan. (YVL B.2)

EYT/STUK-luokan laitteiden kelpoistuksessa tulee perustellusti esittää laitteiden soveltuvuus käyttöpaikkaansa vaatimusmäärittelyn mukaisesti. (YVL C.6; YVL E.7)

6 REAALIAIKAISEN DOSIMETRIJÄRJESTELMÄN VAATIMUSMÄÄRITTELY

Loviisan voimalaitoksella käytössä oleva reaaliaikainen dosimetrijärjestelmä koostuu henkilökohtaisista elektronisista dosimetreistä, niiden käsittelyohjelmistosta, lukijalaitteista, säilytystauluista sekä järjestelmän käyttö- ja konfigurointiohjelmistosta. Lisäksi dosimetrejä käytetään valvonta-alueen rajoilla sijaitsevien monitorien ja sakaraporttien käyttämiseen.

Järjestelmään kuuluvat dosimetrit täytyy vaihtaa uudempiin laitteiden ikääntymisen vuoksi. Lisäksi valmistaja aikoo tulevaisuudessa lopettaa DMC 2000S -mittarien valmistuksen ja huoltopalveluiden tuottamisen. Tämän vuoksi mittauslaitteet täytyy vaihtaa uuteen malliin.

Uusien laitteiden tulee pystyä täyttämään YVL- ja ST-ohjeiden mittauksille asettamat vaatimukset. Mittareiden tulee säilyttää toimintakykynsä valvonta-alueella esiintyvissä normaalikäytön aikaisissa ympäristöolosuhteissa (YVL E.7). Lisäksi uusien laitteiden tulee olla käyttöpaikkakohtaisilta ja toiminnallisilta ominaisuuksiltaan vähintään yhtä kelvollisia kuin nykyisin käytössä olevat DMC 2000S -laitteet. Dosimetrien tulisi olla mahdollisimman hyvin yhteensopivia nykyisen mittausjärjestelmän muiden laitteiden kanssa käytännön syistä sekä kustannusten pitämiseksi mahdollisimman matalana.

6.1 Viranomaisvaatimukset

Viranomaisvaatimuksena on, että työntekijöillä tulee olla virallisen henkilökohtaisen säteilyannosmittausjärjestelmän lisäksi erillinen järjestelmä, jolla voidaan reaaliaikaisesti valvoa työntekijöiden säteilyannosta. Tällä järjestelmällä tulee voida mitata ulkoisesta säteilylähteestä aiheutuvaa säteilyannosta työntekijälle. Reaaliaikaisessa annosmittarissa tulee olla näyttö, josta mittarin käyttäjä näkee saamansa säteilyannoksen. Lisäksi mittariin täytyy voida asentaa hälytys saatua annosta sekä korkeaa työkohteen annosnopeutta varten. (YVL C.2)

Reaaliaikaisella annosmittarijärjestelmällä saatua tietoa tulee olla mahdollista käyttää varmentamaan virallisen annosmittausjärjestelmän toimintaa. Lisäksi sitä tulee käyttää korvaavana järjestelmänä arvioitaessa virallista säteilyannosta varsinaisen mittausjärjestelmän

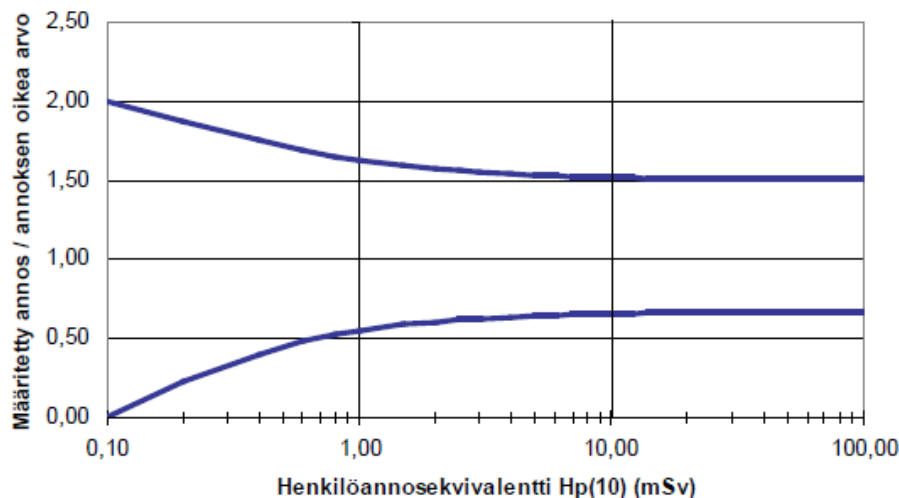
pettäessä. Edellä mainittu tilanne voi olla esimerkiksi varsinaisen mittarin katoaminen tai rikkoutuminen. Järjestelmällä toteutetulla säteilyannoksen seurannalla saatuja tietoja on käytettävä työn suunnitteluun säteilysuojelutoimien optimoimiseksi sekä säteilysuojelutoimenpiteiden riittävyyden varmistamiseen. (YVL C.2)

Työntekijöiden reaaliaikaisen säteilyannosmittauslaitteen tulee syväannoksen energiavasteen sekä mittaustarkkuuden suhteen täyttää suunnittelussa niiden standardien vaatimukset, jotka koskevat ulkoisen gammasäteilyn mittauslaitteita. (YVL C.6)

Ulkoisen gammasäteilyn mittalaitteen tulee täyttää standardien asettamat vaatimukset säteilyn energian funktiona sekä kalibrointisäteilyllä. Vaatimusten tulee täytyä vähintään säteilyn energiavälillä 80 keV – 1,5 MeV. (YVL C.6)

Säteilymittausjärjestelmän tulee olla suunniteltu kattamaan olennaiset voimassa olevat säteilymittausstandardit (YVL E.7). Aktiivisen annosnopeus-annosmittarin eli elektronisen dosimetrin ominaisuuksien tulee noudattaa standardissa IEC 61526 esitettyjä (VAL 4, s. 8). Sama standardi on mainittu myös säteilyturvallisuusohjeissa (ST 1.9).

Työntekijöiden annostarkkailuun käytettävien annosmittausjärjestelmien mittaustulos ei saa poiketa oikeasta arvosta enempää kuin 50 % ylöspäin tai 33 % alaspäin 95 % luotettavuudella. Tämä koskee sähkömagneettisesta säteilystä aiheutuvaa henkilöannosta, kun mittaustulokset ovat lähellä työntekijän vuotuista annosrajaa (ST 1.9, s. 4). Kuvassa 5 on esitetty rajat, joiden sisässä mittaustuloksen vasteen eli suhteellisen poikkeaman tulee pysyä säteilyannoksen funktiona. Elektroninen dosimetrijärjestelmä on vain varajärjestelmä työntekijöiden viralliselle annostarkkailulle, mutta myös sen olisi hyvä kyetä samaan mittaustarkkuuteen.



Kuva 5. Mittaustuloksen vasteen raja-arvot säteilyannoksen funktiona (ST 1.9, s. 5)

6.2 Käyttöpaikkakohtaiset ja toiminnalliset vaatimukset

Sen lisäksi, että reaaliaikainen henkilöannosmittari täyttää viranomaisvaatimuksissa vaaditut rajat, on reaaliaikaisen säteilyannosmittarin säilytettävä toimintakykynsä valvonta-alueella esiintyvissä normaalikäytön aikaisissa ympäristöolosuhteissa. Tämän lisäksi mittausten tarkkuuden on säilyttävä vaaditulla tasolla edellä mainitussa käyttöympäristössä.

Merkittävä ero viranomaisvaatimusten ja käyttöympäristön edellyttämien vaatimusten välille tulee vaatimuksesta mittauksen energia-alueesta. Viranomaisen vaatima standardien edellyttämä taso mittaukselle tulee saavuttaa ainakin välillä 80 keV - 1,5 MeV (YVL C.6). Käytännössä mitta-alueen tulisi toimia kaikilla laitoksella merkittävää säteilyannosta aiheuttavien nuklidien energioilla. Ydinvoimalaitoksilla suurimman säteilyaltistuksen työntekijöille aiheuttavat normaalissa käytössä reaktorissa neutronisäteilyn vaikutuksesta aktivoituneet materiaalit (Sandberg 2004, s. 146). Pääosa säteilysuojelullisesti merkittävistä aktivoitumistuotteista on korroosiotuotteita reaktorista tai muualta primääripiiristä (Kontio 2002, s. 26). Nämä materiaalit ja niiden määrä primääripiirissä vaihtelee laitoksittain. Loviisan voimalaitoksella valtaosa henkilösäteilyannoksista aiheutuu nuklideista Sb-124, Sb-122, Co-60 sekä Ag-110m (Hyypiä 2018). Suurin osa näiden nuklidien gammaenergioista on viranomaisvaatimuksen määrittämällä energiavälillä 80 keV – 1,5 MeV. Nuklidin Sb-124 emittoima gammaenergia kuitenkin on 1,691 MeV ja tulisi myös olla luotettavasti mitattavissa

dosimetrillä (Firestone 1998). Taulukossa 3 on esitetty merkittävimpien Loviisan voimalaitoksella esiintyvien radionuklidien todennäköisimmät emittoimat gammaenergiat.

Taulukko 3. Loviisan voimalaitoksella esiintyvien tärkeimpien radionuklidien γ -energioita (Hyypiä 2018; Firestone 1998; GSI 2010, s. 16)

Nuklidi	Gammaenergia [MeV]
Co-60	1,173; 1,332
Ag-110m	0,658; 0,885
Sb-122	0,564
Sb-124	0,603; 1,691

Uusien dosimetricien tulisi mittausolosuhteiden lisäksi olla mahdollisimman yhteensopiva nykyisen mittausjärjestelmän muiden laitteiden ja ohjelmistojen kanssa. Tämä vähentää mittalaitteiden uudistuksesta aiheutuvia toimenpiteitä. Nykyiseen järjestelmään kuuluu dosimetricien lisäksi LDM 2000 -lukijalaitteet, konfigurointiohjelmisto DosiServ sekä käsittelyohjelmisto DosiMass.

6.3 DMC 2000S

Loviisan voimalaitoksella käytöstä poistuva elektroninen dosimetri DMC 2000S on esitetty kuvassa 6. Laissa sanotaan, että turvallisuus ydinenergian käytössä on pidettävä niin korkealla kuin on käytännössä mahdollista ja turvallisuutta on kehitettävä edelleen, jos sitä voidaan tekniikan kehittymisen myötä pitää perusteltuna (Ydinenergi laki 7 a §). Sen lisäksi, että uusi mittari täyttää viranomaisvaatimukset ja on toimintakuntoinen voimalaitoksen valvonta-alueen ympäristöolosuhteissa, tulee sen olla turvallisuuden kannalta ominaisuuksiltaan yhtä hyvä tai parempi kuin käytöstä poistuva mittari. DMC 2000S -mittalaitteen toiminnalliset ominaisuudet on esitetty taulukossa 4 ja rajat käyttöpaikan ympäristöolosuhteille taulukossa 5.

Taulukko 4. DMC 2000S -mittalaitteen käyttöpaikkakohtaiset laitespesifikaatiot (Mirion. DMC-2000)

Ominaisuus	DMC 2000S -laitespesifikaatio
Käyttölämpötila	-10 – +50 °C
Suhteellisen kosteuden kesto	< 90 %
Laitteen kestävyys	Iskun, värähtelyn ja putoamisen kestävä
Laitteen kotelointi	IP67

Taulukko 5. DMC 2000S -mittalaitteen toiminnalliset laitespesifikaatiot (Mirion. DMC-2000)

Ominaisuus	DMC 2000S -laitespesifikaatio
Mittauksen energia-alue	20 keV – 6 MeV
Energiavaste mittausalueella	$\leq \pm 30 \%$
Tarkkuus $H_{p(10)}$ kalibrointienergialla (^{137}Cs)	$\pm 5 \%$
Mittausalue (säteilyannos)	1 μSv – 10 Sv
Mittausalue (annosnopeus)	0,1 $\mu\text{Sv/h}$ – 10 Sv/h
Hälytys	Äänihälytys Hälytysvalo Hälytyksen voi asettaa sekä annokselle että annosnopeudelle.
Annosnäyttö	LCD-näyttö

**Kuva 6.** DMC 2000S (Radico)

6.4 DMC 3000

Vanhojen dosimetricien korvaavaksi laitteeksi suunniteltu DMC 3000 on esitetty kuvassa 7. Taulukoissa 6 ja 7 on dosimetrin toiminnalliset ominaisuudet sekä rajat käyttöpaikan ympäristöolosuhteille.

Taulukko 6. DMC 3000 -mittalaitteen käyttöpaikkakohtaiset laitespesifikaatiot (Mirion. DMC 3000)

Ominaisuus	Laitespesifikaatio
Lämpötila	-10 – +50 °C
Suhteellinen kosteus	< 90 %
Kestävyys	Iskun, värähtelyn ja putoamisen kestävä (1,5 m pudotus betonille)
Kotelointi	IP67

Taulukko 7. DMC 3000 -mittalaitteen toiminnalliset laitespesifikaatiot (Mirion. DMC 3000)

Ominaisuus	Laitespesifikaatio
Mittauksen energia-alue	15 keV – 7 MeV
Energiavaste mittausalueella	$\leq \pm 20 \%$ (tyypillisesti $\leq \pm 10 \%$)
Tarkkuus $H_{p(10)}$ kalibrointienergialla (^{137}Cs)	$\leq \pm 5 \%$
Mittausalue (säteilyannos)	1 μSv ... 10 Sv
Mittausalue (annosnopeus)	0,1 $\mu\text{Sv/h}$... 20 Sv/h
Hälytys	Äänihälytys Värinähälytys Hälytysvalo Hälytyksen voi asettaa sekä annokselle että annosnopeudelle.
Annosnäyttö	LCD-näyttö

**Kuva 7.** DMC 3000 (Arrow-Tech)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vertailemalla taulukoiden 5 ja 7 sisältöä keskenään voidaan todeta, että DMC 3000 on kaikilta ominaisuuksiltaan joko parempi tai vähintään yhtä kelvoinen kuin DMC 2000S. Säteilymittauksien tarkkuuden kannalta olennaiset laitespesifikaatiot, mittauksen energia-alue sekä energiavaste mittausalueella, ovat selkeästi paremmat uudella mittarilla. Taulukoita 4 ja 6 keskenään vertailemalla voidaan todeta, että DMC 3000 soveltuu samanlaiseen käyttöpaikkaan kuin DMC 2000S. Lisäksi DMC 3000:ssa on hälytysvalon ja -äänen lisäksi värinäähälytys, joka DMC 2000S:sta puuttuu.

Taulukosta 7 nähdään, että DMC 3000 täyttää YVL-ohjeissa vaaditut ominaisuudet. Mittauksen energia-alue on 15 keV – 7 MeV, mikä ylittää reilusti vaaditun 80 keV – 1,5 MeV alueen. Energia-alue on riittävä myös Loviisan voimalaitoksella esiintyvän Sb-124 mittaamiseksi. Lisäksi mittarissa on viranomaisen vaatima annosnäyttö ja mittariin voidaan asettaa hälytys sekä saadulle säteilyannokselle että hetkelliselle annosnopeudelle.

Viranomaisvaatimuksissa mainittiin myös, että mittarin tulee olla suunniteltu täyttämään ulkoisen gammasäteilyn mittareille asetettuja vaatimuksia, jotka on määritelty standardeissa. DMC 3000:n toiminnallisten ominaisuuksien suunnitteluun on käytetty pääasiassa standardia IEC 61526 (Mirion). Kyseinen standardi on riittävä tähän tarkoitukseen. Lisäksi mittavasteen tuli poiketa korkeintaan 50 % ylöspäin tai 33 % alaspäin. DMC 3000:n mittavaste on alle ± 20 % koko mittausalueella (Mirion. DMC 3000). (ST 1.9)

DMC 3000 on yhteensopiva voimalaitoksella nykyisin käytettävien LDM 2000 -lukijalaitteiden kanssa, eli niitä ei tarvitse korvata uusilla laitteilla. Lisäksi DMC 3000:a voidaan konfiguroida samalla DosiServ-ohjelmistolla, joka on käytössä nykyisin. DosiMass-ohjelmiston kanssa uudet mittarit eivät ole yhteensopivia. Tämän vuoksi voimalaitokselle täytyy hankkia uusi dosimetrien käsittelyohjelmisto DMCUser, joka on suunniteltu DMC 3000:n käsittelyä varten. Uuden ohjelmiston käyttöönotto ei vaadi ylimääräisten laitteiden asentamista. Lisäksi käsittelyohjelmistoa käyttävät yleensä vain dosimetriasta vastaavat säteilyvalvojat. Ohjelmiston asentaminen käyttäjien tietokoneille ei siis aiheuta merkittävää ylimääräistä työtä. (Laurus Systems)

Kappaleessa 6 käsittelyn vaatimusmäärittelyn sekä tässä kappaleessa käsiteltyjen vertailujen perusteella DMC 3000 soveltuu korvaavaksi laitteeksi nykyisin käytössä olevalle DMC 2000S -dosimetrille.

8 YHTEENVETO

Ionisoivalla säteilyllä on negatiivisia terveysvaikutuksia, jotka jaetaan populaation stokastisiin ja yksilön deterministisiin vaikutuksiin. Näiden vuoksi yksilöiden sekä ihmisryhmien saamat säteilyannokset pyritään pitämään mahdollisimman alhaisina ja lainsäädännössä on asetettu ylärajat ihmisen työstä saamalle säteilyannokselle. Merkittäviä ihmisen toiminnasta aiheutuvia säteilyannoksen lähteitä ovat ydinvoimalaitokset, joissa suurimman osan työntekijöiden säteilyannoksesta aiheutuu kehon ulkopuolisesta gammasäteilystä.

Työntekijöiden saamien säteilyannoksien kontrollointi edellyttää saatujen säteilyannoksien jatkuvaa mittaamista. Tähän tarkoitukseen suunniteltuja mittalaitteita kutsutaan dosimetreiksi. Dosimetrien toimintaperiaatteet vaihtelevat suuresti, mutta tässä työssä keskityttiin elektronisiin dosimetreihin, jotka mittaavat ulkoista gammasäteilyä puolijohdeilmaisimilla ja ovat reaaliaikaisesti luettavissa.

Loviisan ydinvoimalaitoksella käytössä olevat elektroniset dosimetrit täytyy vaihtaa uusiin lähitulevaisuudessa. Koska ydinvoimateollisuus on tiukasti säädeltyä, uudet mittalaitteet vaativat selvityksen viranomaisvaatimusten täyttämistä. Tässä työssä vertailtiin uusia dosimetreja nykyisin käytössä oleviin dosimetreihin. Lisäksi selvitettiin, että ne ovat soveltuvia Loviisan ydinvoimalaitoksella vallitseviin olosuhteisiin sekä täyttävät YVL-ohjeissa annetut viranomaisvaatimukset.

LÄHDELUETTELO

Arrow-Tech. DMC 3000 Electronic Personal Dosimeter, X-ray & Gamma. [verkkajulkaisu]. [viitattu 7.2.2018]. Saatavissa: <http://www.dosimeter.com/electronic-dosimeters-readers/dmc-3000-electronic-personal-dosimeter-x-ray-gamma/>

Dung, N. et al. 2001. Basic Characteristics Examination of DIS (Direct Ion Storage) Dosimeter. Tutkimusraportti. Japan Atomic Energy Research Institute. Saatavissa: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/020/33020720.pdf

Firestone, R. 1998. Table of Isotopes. 8. ed. Berkeley: University of California: Wiley.

Gollnick, D. 1989. Basic Radiation Protection Technology. 2. ed. Altadena, CA: Pacific Radiation.

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. 2010. γ -Spektroskopie mit NaI- und Ge-Detektoren. [verkkodokumentti]. [viitattu 7.2.2018]. Saatavissa: https://web-docs.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/ANLEITUNG/Anleitung_5.pdf

Hirvelä, M. 2018. Sähköpostikeskustelu 3.8.2018.

Hyypiä, J. 2018. Fortum Loviisa. Ydintekniikan opiskelijaseminaari, 2.2.2018, Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Ikäheimonen, T. (toim.) 2002. Säteily ja sen havaitseminen. Helsinki: Säteilyturvakeskus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja osa 1.

Kalinainen, T. 2014. Suomalaisilla ydinvoimaloilla saadut säteilyannokset ja niihin vaikuttavat tekijät. Diplomityö. Espoo: Aalto-yliopisto.

Knoll, G. 2000. Radiation Detection and Measurement. 3. ed. Michigan: Wiley.

Kontio, T. 2002. Ydinvoimalaitoksen nuklidijakauman vaikutus kontaminaatiomittauksiin. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikan osasto.

Laurus Systems. DMC 3000 User's Guide. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.3.2018]. Saatavissa: http://www.laurussystems.com/Service/DMC_3000_Manual_LAURUS_012014.pdf

Mahesh, K. et al. 1985. Techniques of radiation dosimetry. New Delhi: Wiley cop.

McAlister, D. 2016. Neutron Shielding Materials. Revision. 2.1. Lisle: Illinois: PG Research Foundation, Inc. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.4.2018]. Saatavissa: <https://www.eichrom.com/wp-content/uploads/2018/02/neutron-attenuation-white-paper-by-d-m-rev-2-1.pdf>

Mirion. DMC-2000 Electronic Radiation Dosimeter. [verkkodokumentti]. [viitattu 7.2.2018]. Saatavissa: <https://mirion.app.box.com/s/zuixw66581h0px861yq1>

Mirion. DMC 3000 Personal Electronic Dosimeter. [verkkodokumentti]. [viitattu 7.2.2018]. Saatavissa: <https://mirion.app.box.com/s/4zz8p1chhd716qd2cvck>

Nuclear Power. Forms of Ionizing Radiation. [verkkojulkaisu]. [viitattu 5.8.2018]. Saatavissa: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radiation/forms-ionizing-radiation/>

Nyberg, H. et al. (toim.) 2006. Ionisoimaton säteily – Sähkömagneettiset kentät. Helsinki: Säteilyturvakeskus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja osa 6.

Reilly, D. et al. (toim.) 1991. Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory.

Paile, W. (toim.) 2002. Säteilyn terveysvaikutukset. Helsinki: Säteilyturvakeskus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja osa 4.

Radico. Personal Electronic Dosimeter DMC 2000S. [verkkajulkaisu]. [viitattu 7.2.2018]. Saatavissa: <http://radico.ru/index.php?id=274&L=3>

Sandberg, J. (toim.) 2004. Ydinturvallisuus. Helsinki: Säteilyturvakeskus. Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarja osa 5.

Sanderud, A. Principles of dosimetry – The ionization chamber. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.2.2018]. Saatavilla http://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS-KJM4710/v06/undervisningsmateriale/The_ionization_chamber.pdf

Slovak Legal Metrology. Types of dosimeters. [verkkajulkaisu]. [viitattu 5.2.2018]. Saatavilla: <http://www.dozimeter.sk/en/osobna-dozimetrica/typy-dozimetrov.html>

Säteilyasetus (20.12.1991/1512).

Säteilyturvakeskus. 2008. Valmiusohje 4 (VAL 4) Kannettavien säteilymittarien laatu- ja tarkastusvaatimukset. Helsinki.

Säteilyturvakeskus. 2013. Ydinturvallisuusohje B.2 (YVL B.2) Ydinlaitosten järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelu. 2013. Helsinki.

Säteilyturvakeskus. 2013. Ydinturvallisuusohje C.6 (YVL C.6) Ydinlaitoksen säteilymittaukset. Helsinki.

Säteilyturvakeskus. 2013. Ydinturvallisuusohje E.7 (YVL E.7) Ydinlaitoksen sähkö- ja automaatiolaitteet. Helsinki.

Säteilyturvakeskus. 2014. Ydinturvallisuusohje C.2 (YVL C.2) Ydinlaitoksen työntekijöiden säteilysuojelu ja säteilyaltistuksen seuranta. Helsinki.

Säteilyturvakeskus. 2014. Säteilyturvallisuusohje 7.1 (ST 7.1) Säteilyaltistuksen seuranta. Helsinki.

Säteilyturvakeskus. 2016. Säteilyturvallisuusohje 1.9 (ST 1.9) Säteilytoiminta ja säteilymittaukset. Helsinki.

Säteilyturvakeskus. Mitä säteily on. [verkkajulkaisu]. [viitattu 5.2.2018]. Saatavilla: <http://www.stuk.fi/aiheet/mita-sateily-on>

Thompson, I. 1999. Electronic dosimeter characteristics and new developments. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA). Intercomparison for individual monitoring of external exposure from photon radiation.

Toivonen, H. et al. 1988. Säteily ja turvallisuus. Helsinki: Säteilyturvakeskus.

Trousil, J. et al. 1999. Passive dosimeter characteristics and new developments. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA). Intercomparison for individual monitoring of external exposure from photon radiation.

Ydinenergi laki (11.12.1987/990).