

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Epäsuorien kontaminaatiomittausmenetelmien vertailu

Loviisan ydinvoimalaitoksella

Comparison of Indirect Contamination Measurement

Methods at Loviisa Nuclear Power Plant

Työn tarkastaja: Heikki Suikkanen

Työn ohjaaja: Jaakko Hyypiä, Heikki Suikkanen

Lappeenranta 9.12.2019

Atte Arola

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Atte Arola

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Jaakko Hyypiä, Heikki Suikkanen

Kandidaatintyö 2019

40 sivua, 13 kuvaa, 6 taulukkoa ja 2 liitettä

Hakusanat: kontaminaatio, Loviisan voimalaitos, pyyhkäisynäyte, säteilymittaus

Tämä kandidaatintyö tehtiin Loviisan ydinvoimalaitoksen säteilysuojeluorganisaatiolle. Loviisan voimalaitoksella käytettiin tämän työn tekohetkellä märkäpyyhkäisymenetelmää epäsuoriin kontaminaatiomittauksiin. Märkäpyyhkäisymenetelmä oli kuitenkin tarkoitus korvata kuivapyyhkäisymenetelmällä.

Tässä työssä toteutettiin mittauskampanja, jonka tarkoituksena oli selvittää, onko menetelmän vaihtamiselle havaittavissa esteitä ja dokumentoida kuiva- ja märkäpyyhkäisymenetelmien erot. Erojen tunnistaminen on tärkeää, jotta esimerkiksi vuosittain toistuvien mittausten tulosten vertailu mahdollistuisi, vaikka näytteenottomenetelmää vaihdettaisiinkin.

Mittauskampanjassa kerättiin 256 näytettä, joista 112:lle tehtiin myös laboratorion gammaspektrometrinen analyysi. Laboratoriotuloksia verrattiin pyyhkäisynäyteanalysointilaitoksen mittaustuloksiin. Menetelmiä verrattiin tässä työssä toisiinsa ennen kaikkea erilaisten suhdelukujen avulla. Tulosten perusteella havaittiin, että ihannetulokset saavutetaan tiettyjä mittaussparametrejä muuttamalla. Näille parametreille laskettiin tässä työssä uudet arvot. Loppujen lopuksi menetelmän vaihtamiselle ei tämän työn perusteella havaittu esteitä.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

| | |
|--|-----------|
| 1 Johdanto | 6 |
| 1.1 Tavoitteet ja rajaus | 7 |
| 1.1.1 Aiempi tutkimus ja lähtökohdat | 8 |
| 2 Ionisoiva säteily | 9 |
| 2.1 Hiukkassäteily | 10 |
| 2.1.1 Alfasäteily | 10 |
| 2.1.2 Beetasäteily | 10 |
| 2.2 Gammasäteily | 11 |
| 2.3 Kontaminaatio | 12 |
| 3 Säteily Loviisan ydinvoimalaitoksella | 13 |
| 4 Pintakontaminaation mittaus | 14 |
| 4.1 Säteilyn ilmaisimet | 14 |
| 4.1.1 Verrannollisuuslaskuri | 14 |
| 4.1.2 Puolijohdeilmaisimien | 16 |
| 4.2 Suora pintakontaminaation mittaus | 17 |
| 4.3 Epäsuora pintakontaminaation mittaus | 18 |
| 4.3.1 Kuivapyyhkäisynäyte | 19 |
| 4.3.2 Märkäpyyhkäisynäyte | 19 |
| 4.3.3 NT200-pyyhkäisynäyteanalysointilaitos | 20 |
| 4.3.4 Gammaspektrometrinen analyysi Loviisan voimalaitoksella | 24 |
| 5 Menetelmävertailu | 26 |
| 5.1 Näytteenotto ja näytteiden analysointi | 26 |
| 5.2 Epävarmuustekijät | 27 |
| 5.3 Tulokset ja tulosten käsittely | 28 |
| 5.3.1 Nutronic NT200- ja laboratorioanalyysitulokset | 28 |
| 5.3.2 Suhdelukujen laskenta | 32 |
| 5.3.3 Laboratorioanalyysissä havaitut nuklidit | 34 |
| 6 Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet | 37 |
| 7 Yhteenveto | 38 |
| Lähdeluettelo | 39 |
| Liite 1. Mittaustulokset taulukoituna | |
| Liite 2. Nuklidien suhteelliset osuudet näytteiden aktiivisuuksista | |

Symboli- ja lyhenneluettelo

Roomalaiset aakkoset

| | | |
|-------------|--------------------------------|-----------------------|
| A | aktiivisuus | [Bq] |
| A_A | aktiivisuuskate | [Bq/cm ²] |
| C | detektorin havaitsemat pulssit | [-] |
| E | säteilyn energia | [MeV] |
| I | säteilyn intensiteetti | [%] |
| K | korjauskerroin | [-] |
| p | paine | [mbar] |
| S | pinta-ala | [cm ²] |
| t | aika | [s] |
| $T_{1/2}$ | puoliintumisaika | [s, h, d, a] |
| ν | neutriino | [-] |
| $\bar{\nu}$ | antineutriino | [-] |
| x | suhdeluku | [-] |

Kreikkalaiset aakkoset

| | | |
|-----------------|---------------------------------------|-------|
| α | alfahajoaminen, -hiukkanen, -säteily | [-] |
| β | beetahajoaminen, -hiukkanen, -säteily | [-] |
| γ | gammasäteily, -säteilijä | [-] |
| ε | elektronikaappaus | [-] |
| ε_d | mittalaitteen havaitsemisherkkyys | [%] |
| ε_s | lähteen tehokkuus | [%] |
| ε_w | saanto | [%] |
| λ | hajoamisvakio | [1/s] |

Alaindeksit

| | |
|--------|--|
| 0 | alkutila |
| brutto | brutto- |
| kok | kokonais- |
| KP | kuivapyyhkäisy |
| lab | laboratorio |
| max | maksimi |
| md | mediaani |
| MP | märkäpyyhkäisy |
| NT200 | Nutronic NT200-pyyhkäisnäyteanalysointilaite |
| tausta | tausta- |

Lyhenteet

| | |
|-------|----------------------------------|
| ADC | analogia/digitaali-muunnin |
| ALARA | As Low As Reasonably Achievable |
| GM | Geiger-Müller-putki, geigerputki |
| IT | isomeerinen transito |
| KP | kuivapyyhkäisy |
| LO1 | Loviisa 1 |

| | |
|------|---|
| LO2 | Loviisa 2 |
| MARC | Measurement and Analysis of Reactor Circuit Contamination |
| MCA | monikanava-analysaattori |
| MP | märkäpyyhkäisy |
| STUK | Säteilyturvakeskus |
| TLTA | turvallisuusluokitellut tarveaineet |
| YVL | ydinturvallisuusohje |

1 JOHDANTO

Kontaminaatiomittauksilla on merkittävä rooli käytännön säteilysuojelussa. Mittausten perusteella tehdään muun muassa päätökset ydinvoimalaitoksella työskentelevien henkilöiden suojarustetarpeista sekä estetään radioaktiivisen kontaminaation leviäminen laitoksen ulkopuolelle. Tästä syystä onkin tärkeää, että käytetään sellaisia menetelmiä ja laitteita, joilla voidaan mitata säteilyä riittävän tarkasti. Tämä kandidaatintyö on tehty Fortum Power and Heat Oy:n säteilysuojeluorganisaatiolle Loviisan Hästholmenissa.

Ydinenergialainsäädännössä, Säteilyturvakeskuksen (STUK) määräyksissä sekä ydinturvallisuusohjeissa (YVL-ohjeet) määritetään määräykset ja ohjeet, joiden ympärille työntekijöiden säteilyturvallisuudesta ja –suojelusta huolehtiminen Suomessa rakentuu. Loviisan laitoksilla säteilysuojelusta ja –turvallisuudesta huolehtii säteilysuojeluorganisaatio. Seuraavaksi esitellään sellaisia määräyksiä ja ohjeita, jotka ohjaavat säteilysuojeluorganisaation toimintaa.

Säteilylaissa määritetään säteilyn käytön edellytykset seuraavasti:

- ”Säteilytoiminta ja suojelutoimet ovat oikeutettuja, jos saavutettava kokonaishyöty on suurempi kuin aiheutuvat haitat (*oikeutusperiaate*).” (Säteilylaki 5 §),
- ”Säteilysuojelun optimoimiseksi työperäinen altistus ja väestön altistus ionisoivalle säteilylle on pidettävä niin vähäisenä kuin se käytännöllisin toimenpitein on mahdollista sekä lääketieteellinen altistus on rajoitettava välttämättömään tarkoitettun tutkimus- tai hoitotuloksen saavuttamiseksi tai toimenpiteen suorittamiseksi (*optimointiperiaate*).” (Säteilylaki 6 §),
- ja ”Säteilytoiminnassa työntekijän ja väestön yksilön säteilyannos ei saa olla annosrajaa suurempi (*yksilönsuojaperiaate*).” (Säteilylaki 7 §).

Edellä mainittua optimointiperiaatetta kutsutaan yleisesti myös ALARA-periaatteeksi.

Ydinvoimalaitosalue on jaettu valvonta- ja tarkkailualueisiin sekä valvomattomaan alueeseen sen perusteella, kuinka suuri säteilyaltistus alueella työskentelystä voi aiheutua.

Säteilylain mukaan: ”Valvonta-alue on rajattava. Alueelle pääsy on rajoitettava tarvittavat ohjeet saaneisiin henkilöihin. Valvonta-alueelle pääsyä sekä siellä työskentelyä ja käyntiä on valvottava kirjallisten ohjeiden mukaisesti. Lisäksi ionisoivalta säteilyltä suojaamiseksi ja radioaktiivisen kontaminaation leviämisen estämiseksi on tehtävä erityiset järjestelyt.” (Säteilylaki 91 §)

Radioaktiivisen kontaminaation leviämistä valvotaan säteilymittauksilla. Esimerkiksi kaikkien valvonta-alueelta poistuvien tavaroiden radioaktiivisuus on mitattava ja mittaustuloksen on alitettava asetetut raja-arvot. (YVL C.2 2014. 11) Loviisan ydinvoimalaitoksella käytetyt ulosvientirajat on esitetty taulukossa 1.1. Rajat kuvaavat keskimääräistä aktiivisuutta 100 cm² alueella. ALARA-periaatteen mukaan irtoava kontaminaatio pyritään tosin poistamaan, vaikka taulukossa olevat rajat alittuisivatkin.

Taulukko 1.1: Loviisan voimalaitoksella käytettävät ulosvientirajat (Kontio 2016. 3).

| Säteilylaji | Ulosvientiraja [Bq/cm ²] |
|------------------|--------------------------------------|
| $\beta + \gamma$ | < 4,0 |
| α | < 0,4 |

1.1 Tavoitteet ja rajaus

Tällä hetkellä Loviisan ydinvoimalaitoksella käytetään pääsääntöisesti märkäpyyhkäisynäytemenetelmää (MP) irtoavan kontaminaation mittaamiseen. Tässä työssä toteutetaan mittauskampanja, jossa tutkitaan kahdella eri pyyhkäisynäytemenetelmällä saatujen tulosten keskeisiä eroja ja niiden syitä, sekä sitä, olisiko mahdollista siirtyä märkäpyyhkäisystä kuivapyyhkäisyyn (KP).

Mittauskampanjassa näytteiden keräyspisteet pyritään valitsemaan siten, että niiden sisältämät nuklidit kattavat mahdollisimman kokonaisvaltaisesti Loviisan laitoksilla esiintyvät nuklidijakaumat siltä osin kuin se on vuoden 2019 vuosihuolloissa mahdollista. Kaikki näytteet analysoidaan pyyhkäisynäyteanalysointilaitoksella ja osalle näytteistä suoritetaan myös gammaspektrometrinen laboratorioanalyysi. Kaikkia näytteitä ei toimiteta laboratorioon, koska kampanja toteutetaan pääasiassa kiireisenä vuosihuoltoaikana.

Työssä käydään läpi ionisoivan säteilyn teoriaa ainoastaan alfa-, beeta- ja gammasäteilyn osalta, koska ne ovat tämän työn kannalta merkittävimmät säteilylajit. Radioaktiivisen kontaminaation osalta keskitytään ainoastaan pintakontaminaatioon. Pintakontaminaation mittauslaitteiden toimintaperiaatteista esitellään tarkemmin vain ne, joita tässä työssä hyödynnetään.

Tässä työssä pyyhkäisynäyteanalyysointilaitteilla oletetaan havaittavan ainoastaan β -säteilyä ja laboratorioanalyysissä ainoastaan gammasäteilyä. Pyyhkäisynäyteanalyysointilaitteita käytettäessä mittausgeometrian erot kuiva- ja märkäpyyhkäisymenetelmien välillä oletetaan merkityksettömiksi. Näin ollen yhtä suuri osuus läpää lähtevästä säteilystä osuu detektoriin kummassakin menetelmässä. Pyyhkäisynäyteanalyysointilaitteen mittaustulosten virheen ajatellaan johtuvan vain kahdesta parametrin – saannosta ja lähteen tehokkuudesta. Näiden parametrin ajatellaan sisältävän myös muut mahdolliset virhetekijät. Tämä tehdään siksi, että ne ovat pyyhkäisynäyteanalyysointilaitteissa helposti säädettävissä. Kyseiset parametrin esitellään myöhemmin tässä työssä, kappaleessa 4.3.

1.1.1 Aiempi tutkimus ja lähtökohdat

Loviisan laitoksella on aiemmin suoritettu mittauskampanja eri pyyhkäisynäytemenetelmien vertailemiseksi. Kyseisen tutkimuksen mittapisteet painottuivat lähinnä reaktorikuiluun. Tässä työssä mittapisteet valitaan muualta.

Tarve tässä tehtävälle tutkimukselle syntyi, kun selvisi, ettei tällä hetkellä Loviisan voimalaitoksella käytössä oleville märkäpyyhkäisynäytelapuille voida enää myöntää turvallisuusluokitelluille tarveaineille (TLTA) annettavaa käyttölupaa. Lisäksi viranomaisen vaatimus alfasäteilyn mittausohjelmasta herättää kysymyksen pääasiallisen mittausmenetelmän vaihtamisesta, sillä kuivapyyhkäisymenetelmän ajatellaan soveltuvan paremmin alfasäteilymittauksiin märkäpyyhkäisyä pienemmän itseabsorption takia. Tässä työssä toteutettava mittauskampanja on tehty näytteenottomenetelmän vaihdosta johtuvien mittaustulosten eroavaisuuksien tunnistusta ja dokumentointia varten. Tutkimuksella pyritään säilyttämään hyvä vertailtavuus esimerkiksi vuosittain otettujen näytteiden välillä, vaikka ne olisikin otettu eri menetelmillä.

2 IONISOIVA SÄTEILY

Ionisaatiolla tarkoitetaan tapahtumaa, jossa atomi luovuttaa yhden elektroninsa saatuaan ensin sopivan määrän energiaa. Vaadittavaa energiamäärää kutsutaan ionisaatioenergiaksi. Elektronin irrottamiseen vaadittu energiamäärä riippuu siitä, missä kohtaa atomia se sijaitsee. Sisimmän elektronin irrottaminen vaatii eniten energiaa ja uloimman elektronin irrottaminen vähiten. Ionisaatioenergia voi tulla esimerkiksi ionisoivasta säteilystä, jolla tarkoitetaan siis säteilyä, joka pystyy irrottamaan kohtaamastaan atomista elektroneita. (Lamarsh et al 2014. 15)

Ionisoivaa säteilyä syntyy, kun radioaktiivinen ydin hajoaa. Radioaktiivisella hajoamisella tarkoitetaan prosessia, jossa epästabiili ydin hajoaa itsenäisesti toiseksi ytimeksi. Alkuperäistä ydintä kutsutaan emoytimeksi ja hajoamistuotetta tytärytimeksi. (Ikäheimonen 2002. 12, 19)

Radioaktiivinen hajoaminen on spontaani ilmiö, jonka vuoksi yksittäisen hajoamisen tapahtumahetkeä on mahdotonta ennustaa. Hajoamisen todennäköisyyttä aikayksikön kuluessa voidaan kuitenkin kuvata hajoamisvakiolla λ [1/s]. Puoliintumisaika $T_{1/2}$ [s] tarkoittaa sitä aikaa, jonka jälkeen lähteen aktiivisuus on laskenut puoleen alkuperäisestä. Hajoamisvakiolla ja puoliintumisajalla on yhteys (Ikäheimonen 2002. 19-20):

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1)$$

Aktiivisuus A [Bq] kuvaa hajoamisten lukumäärää aikayksikössä t [s]. Aktiivisuus ajanhetkellä t määritellään (Ikäheimonen 2002. 27):

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

jossa A_0 on aktiivisuus hetkellä $t = 0$ [Bq]
 t on kulunut aika siitä hetkestä, kun aktiivisuus oli A_0 [s]

Ydinvoimalaitoksilla radioaktiiviset aineet syntyvät reaktorissa. Reaktorin ollessa tehoajolla sen sisältämässä polttoaineessa tapahtuu fissioreaktioita, joissa syntyy radioaktiivisia fissiotuotteita. Lisäksi polttoaineessa tapahtuvissa neutronikaappauksissa syntyy alfasäteileviä transuraaneja eli uraania raskaampia nuklideja. (Sandberg 2004. 148, 150)

Stabiilin aineen muuttumista radioaktiiviseksi neutronireaktioiden vaikutuksesta kutsutaan aktivoitumiseksi. Käyvän reaktorin neutronivuossa aktivoituneita tuotteita on muun muassa jäähdytysveden kemikaaleissa ja niiden epäpuhtauksissa, itse jäähdytysvedessä sekä prosessin kiinteissä komponenteissa ja niistä irtoavissa ainesosissa (Kvarnström 2019a)

2.1 Hiukkassäteily

Tässä kappaleessa käsitellään alfa- ja beetahiukkassäteilyn ominaispiirteitä.

2.1.1 Alfasäteily

Tapahtumaa, jossa epästabiili atomydin emittoi hiukkasen, joka muodostuu kahdesta protonista ja kahdesta neutronista (^4He -ydin), kutsutaan alfahajoamiseksi (α -hajoaminen). Emittoitunutta hiukkasta kutsutaan yksinkertaisesti alfahiukkaseksi ja sen energia E_α [MeV] on tyypillisesti muutaman megaelektronivoltin luokkaa. Alfasäteilevän nuklidin energiaspektri on viivaspektri, jolloin alfasäteilevät nuklidit voidaan tunnistaa spektrin nuklidispesifisten piikkien avulla. Alfasäteily on yleistä etenkin raskaiden nuklidien kohdalla (Ikäheimonen 2002. 20). Esimerkiksi ydinpolttoaineessa olevan ^{238}U alfahajoamista isotoopiksi ^{234}Th voidaan kuvata reaktioyhtälöllä (Lamarsh et al 2014. 18):



Alfahiukkasen kantama on lyhyt, ilmassa vain muutamia senttimetrejä, ja se pysähtyy esimerkiksi ohueen paperiarkkiin. Tämä johtuu yksinkertaistetusti siitä, että sen massa ja varaus ovat suuria. Suuren massansa vuoksi se kulkee väliaineessa suoraviivaisesti. Näin ollen se menettää energiaa törmäyksissä väliaineen elektroneihin ja jarruuntuu voimakkaasti. (Ikäheimonen 2002. 39)

2.1.2 Beetasäteily

Beetasäteily on ionisoivaa hiukkassäteilyä, jota syntyy, kun atomi hajoaa β^- - tai β^+ -hajoamisella. β^- -hajoamisessa neutroni hajoaa protoniksi ja elektroniksi (β^- -hiukkanen). Protoni jää ytimeen, jolloin atomin järjestysluku kasvaa yhdellä. Elektroni puolestaan

poistuu β^- -säteilynä. Lisäksi β^- -hajoamisessa vapautuu varaukseton ja massaton antineutriino $\bar{\nu}$. Esimerkiksi ^{14}C β^- -hajoamista voidaan kuvata reaktioyhtälöllä



β^+ -hajoamisessa protoni hajoaa ytimessä muodostaen neutronin ja positronin (β^+ -hiukkanen). Protonin hajoaminen pienentää järjestyslukua yhdellä. Syntynyt neutroni jää ytimeen ja positroni poistuu ytimestä β^+ -säteilynä. Lisäksi hajoamisessa vapautuu varaukseton ja massaton neutriino ν . Esimerkiksi ^{11}C β^+ -hajoamista voidaan kuvata yhtälöllä



Beetahiukkasen kantama on huomattavasti pidempi kuin vastaavalla energialla olevalla alfahiukkasella. Toisin kuin alfahiukkanen, beetahiukkanen ei kulje väliaineessa suoraan, vaan sen rata mutkittelee. Tämä johtuu siitä, että sen massa on joko yhtä suuri tai pienempi kuin hiukkasen, johon se kulkiessaan törmää. Beetasäteilyn spektri on jatkuva, eli emittoituneen beetahiukkasen energia voi olla mitä tahansa nollan ja nuklidin maksimienergian $E_{\beta,\text{max}}$ [MeV] väliltä. (Ikäheimonen 2002. 21, 23, 40-41) Beetasäteilyltä voidaan suojautua kevyillä aineilla, kuten alumiinilla.

2.2 Gammasäteily

Gammasäteily on ionisoivan sähkömagneettisen säteilyn muoto, joka on välillisesti ionisoivaa. Tämä tarkoittaa sitä, että gammasäteily tuottaa ionisoivia sekundäärihiukkasia väliaineessa edetessään. (Ikäheimonen 2002. 44) Sitä syntyy, kun atomiydin jää virittyneeseen tilaan radioaktiivisen hajoamisen jälkeen ja tämä viritystila lopulta purkautuu. Viritystilan purkautuminen voi tapahtua kerralla tai osissa. Viritystilan purkautuessa ydin emittoi gammakvantin, jonka energia E_γ [MeV] vastaa suuruudeltaan ytimen energiatason muutosta. (Knoll 2010. 10-11) Viritystila purkaantuu yleensä käytännössä välittömästi. Joidenkin nuklidien kohdalla näin ei kuitenkaan tapahdu, vaan ydin jää virittyneeksi pitemmäksi aikaa. Tällöin ytimen sanotaan olevan isomeerisessä tilassa. Isomeerinen viritystila purkautuu usein isomeerisellä transitiolla (IT), joka havaitaan gammasäteilynä. Isomeerinen viritystila voi purkautua myös β^- -hajoamisen kautta. (Lamarsh et al 2014. 19)

Gammasäteilyä syntyy myös elektronikaappauksessa ϵ . Elektronikaappaus kuvaa ilmiötä, jossa ydin kaappaa elektronin sisimmältä elektronikuoreltaan. Ilmiön seurauksena ydin jää virittyneeseen tilaan ja viritystilasta purkautuu gammasäteilyä. Elektronikaappauksessa ei emittoitu hiukkassäteilyä, joten elektronikaappauksella hajoavat nuklidit havaitaan heikosti gammasäteilylle epäherkillä mittareilla. (Ikäheimonen 2002. 21)

Lisäksi gammasäteilyä syntyy säteilevässä kaappauksessa (engl. radiative capture). Siinä ydin absorboi neutronin, jonka seurauksena emittoituu vähintään yksi gammakvantti. (Lamarsh et al. 2014. 50)

Gammasäteilyn spektri on viivamainen ja jokaisella gamma-aktiivisella nuklidilla on sille ominainen energijakaumansa (Gilmore 2008. 9, 33). Gammasäteily on hyvin läpitunkevaa. Parhaiten sitä voidaan vaimentaa raskailla alkuaineilla, kuten lyijyllä. (Ikäheimonen 2002. 46)

2.3 Kontaminaatio

Kontaminaatiolla tarkoitetaan radioaktiivista likaa, jota pinnalla ollessaan kutsutaan pintakontaminaatioksi ja ilmassa ollessaan vastaavasti ilmakontaminaatioksi. Ydinvoimalaitoksilla kontaminaatio on lähtöisin fissiotuotteista, transuraaneista ja aktivoitumistuotteista ja se sisältää monesti useita eri nuklideja, jonka vuoksi se voi emittoida useampaa säteilylajia.

Reaktorissa fissiot tapahtuvat suljetun polttoainesauvan sisällä, jolloin syntyvät fissiotuotteet jäävät normaalitilanteessa sauvan sisään. Myös polttoaineessa muodostuvat transuraanit jäävät sauvan sisälle. Poikkeuksena on niin sanottu tramp-uraani, jolla tarkoitetaan polttoaine-elementtien ulkopinnoille valmistusvaiheessa jäänyttä uraania. Sen hajoaminen mahdollistaa fissiotuotteiden ja transuraanien vapautumisen jäähdytteeseen, vaikkei varsinaista polttoainevuotoa olisikaan. (Dong et al 2018. 231) Fissiotuotteita ja transuraaneita voi vapautua jäähdytteeseen polttoainevuodon yhteydessä, jolloin ne voivat järjestelmiä avattaessa levitä yhdessä aktivoitumistuotteiden kanssa myös prosessin ulkopuolelle.

3 SÄTEILY LOVIISAN YDINVOIMALAITOKSELLE

Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi, mistä Loviisan laitoksella esiintyvä kontaminaatio on peräisin ja mitä nuklideja siinä on. Nuklideista käsitellään pääasiassa vain ne, jotka havaitaan pääkiertoluuppien gammaspektrometrisistä mittauksista.

Loviisan voimalaitoksella ei ole viime vuosina ollut vakavia polttoainevuotoja, joten alfasäteilyn osuus kontaminaatiosta on pieni. Suurin osa Loviisan laitoksilla havaittavasta kontaminaatiosta on peräisin aktivoitumistuotteista, jotka ovat pääasiassa beeta- ja gammasäteilijöitä. (Hyypiä 2018. 8)

Loviisan laitosten höyrystintiloissa sijaitsevien pääkiertoluuppien kontaminaatiotasoa seurataan vuosittain tehtävissä gammaspektrometrisissä MARC-mittauksissa (Measurement and Analysis of Reactor Circuit Contamination). Mittauksia on suoritettu vuodesta 1993 alkaen, joten vuosittaisia tuloksia vertailemalla saadaan hyvä kuva laitosten säteilytasojen ja nuklidipitoisuuksien muutoksista. Esimerkiksi vuonna 2018 1. pääkiertoluupin mittauksissa aktiivisuuksiltaan dominoivimmat nuklidit olivat ^{58}Co , ^{60}Co , ^{122}Sb ja ^{124}Sb . (Kvarnström & Hirvelä 2018. 1-4)

On huomattava, että MARC-mittauksissa havaitaan vain gammasäteileviä nuklideja. Lisäksi, koska mittaukset suoritetaan vuosihuoltojen aikana reaktorin ollessa sammutettuna, lyhytikäisimmät nuklidit eivät näy mittauksissa. Tällainen nuklidi on esimerkiksi jäähytevedessä syntyvä ^{16}N , jolla on merkittävä annosnopeusvaikutus tehoajon aikana. (Sandberg 2004. 149) Sitä ei kuitenkaan esiinny kontaminaatiossa, eikä se aiheuta työntekijöille merkittävää annoskertymää, koska höyrystintila on käyttöjakson aikana lukittuna.

4 PINTAKONTAMINAATION MITTAUS

Pintakontaminaatiota voidaan mitata suoralla tai epäsuoralla menetelmällä ja mittausmenetelmiin on olemassa standardit. Tässä kappaleessa esitellään ensin yleisesti ilmaisimien toimintaperiaatteita, jonka jälkeen esitellään suora- ja epäsuora mittausmenetelmä ja käydään läpi standardien asettamia vaatimuksia mittauksille. Lopuksi esitellään Loviisan voimalaitoksella käytössä olevat epäsuoran kontaminaatiomittauksen näytteiden analysointimenetelmät.

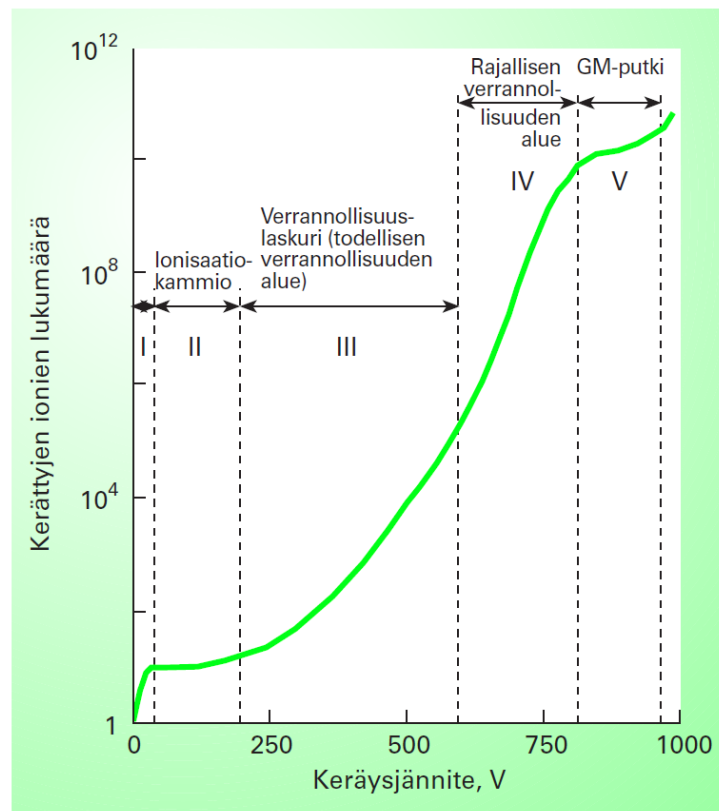
4.1 Säteilyn ilmaisimet

Tässä kappaleessa esitellään tämän työn kannalta merkittävimpien ilmaisintyyppien, verrannollisuuslaskurin ja puolijohdeilmaisimen, toimintaperiaatteet. Loviisan voimalaitoksella pyyhkäisynäytteiden analysointi perustuu näihin ilmaisintyyppeihin.

4.1.1 Verrannollisuuslaskuri

Verrannollisuuslaskuri kuuluu kaasutäytteisiin säteilyn ilmaisimiin eli detektoreihin. Kaasutäytteiset ilmaisimet ovat usein rakenteeltaan yksinkertaisia. Verrannollisuuslaskuri on tyypillisesti kaasutäyteinen sylinteri, jonka keskiakselilla on anodilanka. Sylinterin kuori toimii katodina. Säteily synnyttää kaasuun ioneja. Syntyneiden ionien kulkeutuminen detektorin elektrodeille havaitaan sähkövirtana tai jännitteenä. Käytettävän kaasun tulee olla sellaista, että elektronit eivät kiinnity sen atomeihin. Sopivia kaasuja ovat esimerkiksi helium sekä argon. (Ikäheimonen 2002. 116, 119, 121)

Kaasutäytteiset ilmaisimet on nimetty sen mukaan, millä jännitealueella ne toimivat. Kuvan 4.1 mukaisesti pienellä keräysjännitteellä toimivaa kaasutäytteistä ilmaisinta kutsutaan ionisaatiokammiksi. Kun jännitettä nostetaan, saavutetaan ensin verrannollisuuslaskurin ja sen jälkeen geigerputken (Geiger-Müller-putki, GM-putki) toiminta-alue. Kuvan 4.1 jännitealueella I kaasutäyteinen ilmaisim ei toimi lainkaan, koska ionit ehtivät neutraloitua ennen kuin ne ehtivät elektrodeille. (Ikäheimonen 2002. 116-118)



Kuva 4.1: Kerättyjen ionien lukumäärä keräysjännitteen funktiona (Ikäheimonen 2002. 118).

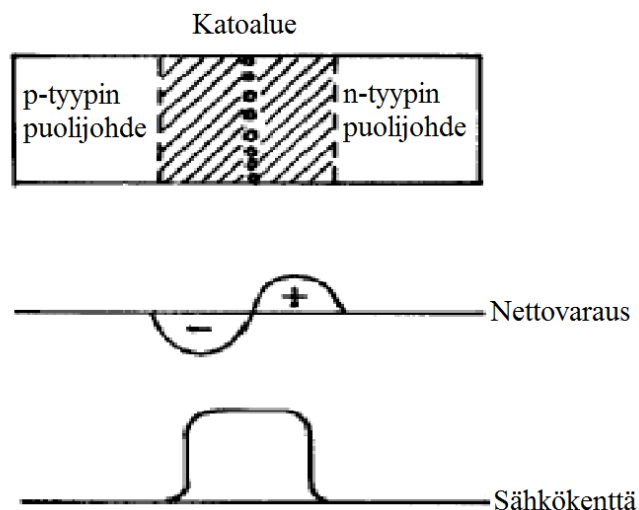
Kun elektrodien välistä jännitettä ja sähkökentän voimakkuutta nostetaan verrannollisuuslaskurin toiminta-alueelle (kuvassa 4.1 alue III), aletaan kaasussa havaitsemaan elektronivyöryjä. Tämä johtuu siitä, että ionisaatioissa vapautuneet elektronit saavat lisää liike-energiaa sähkökentässä, jolloin ne kykenevät aiheuttamaan sekundäärisiä ionisaatioita toisiin kaasumolekyyleihin törmätessään. Myös uusissa ionisaatioissa irronneet elektronit kiihtyvät ja aiheuttavat lisää ionisaatioita. Näin muodostuu elektronivyöry, joka jatkuu, kunnes kaikki vapaat elektronit ovat päässeet anodille. Tässä ilmiössä, kaasumonistuksessa, anodille saapuva varaus voi olla tuhansia kertoja suurempi kuin alkuperäisten ionisaatioiden aiheuttama varaus. Se on kuitenkin suoraan verrannollinen alkuperäisten ioniparien määrään. (Ikäheimonen 2002. 118)

Käytettävän anodilangan tulee olla hyvin ohut, jotta vaadittu sähkökentän voimakkuus saavutetaan järkevillä jännitteen arvoilla (L'Annunziata 2012. 200). Sähkökenttä voimistuu kaasumonistukselle riittäväksi vasta anodilangan lähellä. Säteilyn aiheuttamissa ionisaatioissa irtoavat elektronit kulkeutuvat anodin ympärillä olevaa voimakasta sähkökenttää kohti, jossa ne aiheuttavat sekundääri-ionisaatioita. Koska

sekundääriset ionisaatiot tapahtuvat hyvin lähellä anodilankaa, saavutetaan tällaisella rakenteella myös se, että sekundäärielektronit saavat yhtä suuren vahvistuksen. Tästä syystä verrannollisuuslaskurilla on hyvä energianerotuskyky. (Ikäheimonen 2002. 119)

4.1.2 Puolijohdeilmaisin

Puolijohdeilmaisimessa säteily aiheuttaa kiinteään puolijohdeaineeseen elektroni-aukko-pareja, jotka toimivat varauksenkuljettajina. Puolijohdeilmaisimilla on hyvä energianerotuskyky ja niitä käytetään yleisesti gammaspektrometrisissa mittauksissa (Ikäheimonen 2002. 126). Puolijohdeilmaisimen rakennetta ja toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 4.2.



Kuva 4.2: Puolijohdeilmaisimen periaatekuva (Mukaiillen: Hende & Ritenour 2002. 139).

Puolijohdeilmaisin koostuu p- ja n-tyyppin puolijohdeistä sekä niihin lisätyistä epäpuhtauksista. P-tyyppin materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi germaniumia, johon on lisätty elektronivajaukselliseksi komponentiksi, akseptoriksi, booria. Akseptorin elektronivajaus aiheuttaa p-tyyppin materiaaliin aukkoja, joilla on positiivinen varaus.

N-tyyppin materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi germaniumia, johon on lisätty elektroneita luovuttavaksi komponentiksi, donoriksi, litiumia. Kun p- ja n-tyyppin materiaalit yhdistetään, alkavat n-tyyppin materiaalin elektronit virtaamaan rajapinnan yli p-tyyppin materiaaliin ja aukot vastaavasti p-tyyppin puolelta n-tyyppin puolelle. Tämän seurauksena aukot ja elektronit rekombinoituvat kohdatessaan liitoskohdan kummallakin puolella. Näin muodostuu katoalue, jossa on kuvan 4.2 mukaisesti muodostunut

sähkökenttä ja vain vähän vapaita varauksenkuljettajia. Katoaluetta laajennetaan estosuuntaisella jännitteellä liitoksen yli kytkemällä jännitelähteen positiivinen napa puolijohteen n-puolelle. (Gilmore 2008. 43-44)

Yksittäisen atomin elektronit sijaitsevat tietyillä energiatasoilla. Kun atomit yhdistetään kiinteäksi aineeksi, voidaan tasoa, jolla elektronit voivat sijaita, ajatella energiavyönä. Energiavöiden välissä on energia-alueita, joilla elektronit eivät voi sijaita. Puolijohdeissa korkeaenergiset vyöt, jolle ei mahdu enempää elektroneita kutsutaan valenssivyöksi. Valenssivyöstä seuraavaa tasoa, jossa elektronit voivat liikkua, kutsutaan johtavuusvyöksi. Elektroni tarvitsee energiaa siirtyäkseen valenssivyöltä kielletyn alueen yli johtavuusvyölle. Tämä energia voi tulla esimerkiksi säteilystä. (Gilmore 2008. 40)

Säteily aiheuttaa katoalueelle kohdistuessaan elektronien nousun valenssivyöltä johtavuusvyölle, josta ne kulkeutuvat edelleen n-tyypin alueelle positiiviselle elektrodille. Tämän seurauksena valenssivyölle jää aukko, joka mahdollistaa elektronien liikkeen nyt myös valenssivyöllä. Koska elektronit pyrkivät positiivista n-tyyppiä kohti, siirtyy toinen elektroni valenssivyöllä p-puolen suunnalta paikkaamaan aukkoa. Myös tämän elektronin alkuperäiselle paikalle jää aukko. Edelleen seuraava elektroni siirtyy lähteneen jättämään aukkoon. Näin ollen aukko ikään kuin virtaa kohti negatiivista p-tyypin elektrodia. (Hendee & Ritenour 2002. 138-139)

Puolijohdeilmaisimissa syntyneet elektroni-aukko-parit kerätään katoalueelta jännitteen avulla pulssiksi, joka on suoraan verrannollinen säteilyn luovuttamaan energiaan (Ikäheimonen 2002. 127). Pulssin analysointi Loviisan laitoksen laitteistolla esitellään tässä työssä lyhyesti myöhemmin.

4.2 Suora pintakontaminaation mittaus

Suoralla pintakontaminaation mittauksella tarkoitetaan tapahtumaa, jossa radioaktiivisuutta mitataan liikuttamalla mittalaitteen detektoria sopivalla etäisyydellä mitattavasta pinnasta. Suoralla menetelmällä havaitaan sekä helposti irtoava että irtoamaton kontaminaatio. Sillä ei kuitenkaan voida erotella näitä toisistaan. Suora mittausmenetelmä soveltuu hyvin kontaminaatiovapauden varmistamiseen juuri siksi, että sillä voidaan molemmat edellä mainitut pintakontaminaation tyypit.

Suora mittaustapahtuma soveltuu huonosti pintakontaminaation määrittämiseen silloin, kun mitattava kohde sijaitsee paikassa, jossa taustasäteilyn määrä on selvästi normaalia suurempi tai jos se vaihtelee paljon. Suora mittaus ei myöskään sovellu ahtaisiin paikkoihin tai monimutkaisen muotoisille pinnoille. Tähän voidaan toki vaikuttaa detektorin valinnalla. Sopivan mittarin valinnassa tulee yleisesti ottaa huomioon ainakin käytettävyys, mitattavat nuklidit, detektorin havaitsemisherkkyyksivaatimukset, mitattava säteilylaji sekä vaadittu tarkkuus.

4.3 Epäsuora pintakontaminaation mittaus

Epäsuoralla pintakontaminaation mittauksella tarkoitetaan menetelmää, jossa mitattavalta pinnalta otetaan näyte esimerkiksi pyyhkäisynäytelapulla, joka sitten analysoidaan tarkoituksen mukaisella pyyhkäisynäyteanalyysointilaitteella tai vaihtoehtoisesti laboratorion spektroskopialaitteella. Pyyhkäisynäyteanalyysointilaitteella voidaan havaita pienetkin aktiivisuuspitoisuudet ja laboratoriossa voidaan tarvittaessa selvittää myös näytteen nuklidijakauma.

Standardin ISO 7503-2 mukaan epäsuora kontaminaation mittaus on sopiva menetelmä silloin, kun tarkasteltava pinta on geometrisesti hankalassa paikassa, taustasäteilyn vaikutus on haitallisen suuri tai silloin, kun kontaminaatiossa on sellaisia nuklideja, joita suoralla mittaustavalla ei voida luotettavasti mitata. Lisäksi mainitaan, että usein molempia menetelmiä käyttämällä saavutetaan luotettavin mittaustulos. (ISO 2016a. 5)

Epäsuoralla mittaustavalla voidaan siis selvittää ainoastaan irtoavan kontaminaation esiintymistä pyyhityllä alueella. Epäsuoraa menetelmää käytetään Loviisan ydinvoimalaitoksella ennen kaikkea suojarustetarpeen määrittämisen tukena sekä silloin, kun mitattavalla kohteella on korkeat säteilytasot. Lisäksi pyyhkäisymenetelmää käytetään Loviisan voimalaitoksella rutiininomaisiin kartoitusmittauksiin, joissa mitataan esimerkiksi valvonta-alueen lattioiden kontaminaatiotasoja tietyistä mittauspisteistä.

Pyyhkäisynäytteet voidaan jakaa märkä- ja kuivapyyhkäisynäytteisiin. Kummassakin menetelmässä standardi ISO 7503-2 suosittelee pyyhittäväksi 100 cm² aluetta tarkoituksen mukaisella näytelapulla. Näytelapun valmistusmateriaali tulee valita mittauksen tarkoituksen ja tarkasteltavan pinnan perusteella. Märkäpyyhkäisynäytelappu

on kostutettu liuottimella, joka tulee valita siten, että se irrottaa pinnan kontaminaation mahdollisimman hyvin, mutta ei kuitenkaan vahingoita pintaa. (ISO 2016a. 6-7)

4.3.1 Kuivapyyhkäisynäyte

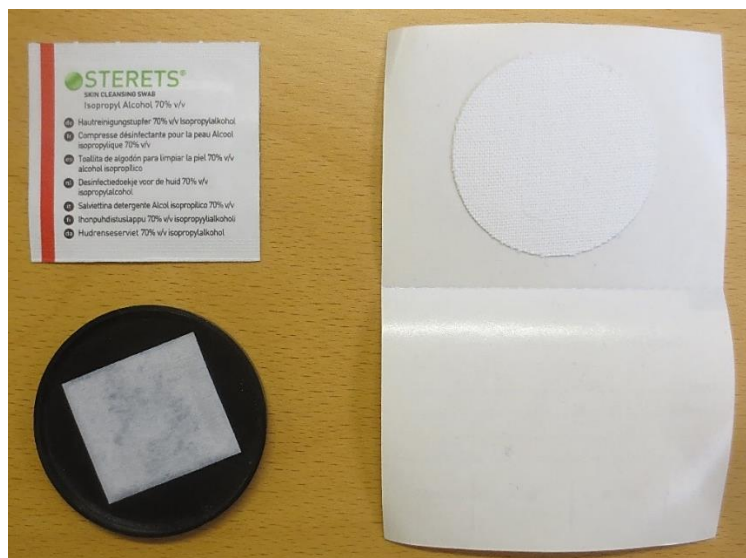
Tässä työssä käsiteltävät kuivapyyhkäisynäytelaput ovat halkaisijaltaan 44 mm olevia pyöreitä pyyhkeitä, joissa ei ole liuotinta. Kyseiset laput ovat tämän tutkimuksen tekohetkellä käytössä Loviisan voimalaitoksella pääasiassa vain silloin, kun tutkitaan alfakontaminaation esiintymistä laitoksella.

Kuivapyyhkäisy soveltuu yleisesti ottaen märkäpyyhkäisyä paremmin alfasäteilijöiden etsimiseen, sillä kuivapyyhkäisynäytelappua käytettäessä lähteen (näytelappu) tehokkuuden ε_s [%] ajatellaan olevan suurempi kuin kostutetulla lapulla. Lähteen tehokkuudella tarkoitetaan lähteestä haluttuun suuntaan poistuvien tietyn energisten hiukkasten tai fotonien suhdetta kaikkiin lähteessä syntyviin vastaaviin hiukkasiin tai fotoneihin (ISO 2016b. 2). Märkäpyyhkäisynäytelappujen liuotin kasvattaa lähteen vaimennuskykyä ja siten itseabsorptiota, jolloin alfahiukkaset voivat pienen kantamansa vuoksi pysähtyä jo ennen kuin ne pääsevät pois lapusta (ISO 2016a. 7).

Pinnan aktiivisuuskate A_A [Bq/cm²] määritetään pyyhkimällä pinnalta 100 cm² alue, jonka jälkeen näytelappu analysoidaan. Säteilysuojelun kannalta pyyhkäisynäyteanalysointia antama mittaustulos on usein riittävä, mutta laboratorioanalyysi tulee kyseeseen, kun halutaan selvittää nuklidijakauman avulla esimerkiksi se, mistä kontaminaatio on peräisin.

4.3.2 Märkäpyyhkäisynäyte

Loviisan ydinvoimalassa käytetään tämän tutkimuksen tekohetkellä pyyhkäisynäytteenottoon märkäpyyhkäisymenetelmää. Märkäpyyhkäisyyn käytetään 70 % isopropyylialkoholilla kostutettua Sterets®-näytelappua, jonka mitat ovat 28*31 mm. Muuten näytteenotto tehdään vastaavalla tavalla, kuin kuivapyyhkäisynäytteellä. Märkä- ja kuivapyyhkäisylaput on esitetty kuvassa 4.3.



Kuva 4.3: Vasemmalla ylhäällä märkäpyyhkäisynäytelappu pakkauksessaan, vasemmalla alhaalla märkäpyyhkäisynäytelappu näytealustalla analyysiä varten, oikealla kuivapyyhkäisylappu.

4.3.3 NT200-pyyhkäisynäyteanalysaattori

Loviisan voimalaitoksen säteilyvalvonnassa käytetään pyyhkäisynäytteiden analysointiin Nutronic AB:n valmistamaa NT200-pyyhkäisynäyteanalysaattoria. Laitteen pääkomponentit ovat pääyksikkö, lyijysuojallinen detektoriyksikkö sekä erillinen detektorien päälle tuleva lyijysuoja. NT200-pyyhkäisynäyteanalysaattori on esitetty kuvassa 4.4.



Kuva 4.4: Nutronic NT200-pyyhkäisynäyteanalysaattori.

NT200-analysaattori on toimintaperiaatteeltaan verrannollisuuslaskuri. Laitteessa on kaksi detektoria, joista toinen on itse näytteen mittaamista varten ja toinen taustasäteilyn kompensointia varten. Verrannollisuuslaskurilla kyetään erottelemaan alfa- ja beetasäteily toisistaan. Lisäksi detektori on epäherkkä gammasäteilylle. Tästä syystä se sopii erinomaisesti pyyhkäisynäytteiden analysointiin. (Nutronic. 8)

NT200-pyyhkäisynäyteanalysointilaitteen detektoreissa käytetään täytekaasuna argonin ja hiilidioksidin seosta, joka on paineessa $p = 850$ mbar. Kummankin detektorin efektiivinen mittauspinta-ala on $15,5 \text{ cm}^2$. (Nutronic. 70)

NT200-analysointilaitteessa on valittavissa kolme eri mittausohjelmaa:

1) β -mittaus

Laite suorittaa mittauksen ainoastaan beetasäteilymittauksen toimintajännitteellä.

2) $\alpha+\beta$ -mittaus

Laite suorittaa ensin mittauksen beetamittauksen toimintajännitteellä, jonka jälkeen se laskee jännitettä alfamittauksen toiminta-alueelle ja suorittaa sitten alfamittauksen.

3) Automaattinen α -mittaus

Laite suorittaa ensin beetamittauksen. Mikäli se kuitenkin havaitsee pulsseja, jotka vaikuttavat alfa-kontaminaatiolta, se laskee jännitettä ja suorittaa varsinaisen alfamittauksen. (Nutronic. 9-10)

Automaattinen alfamittaustoiminto on käytössä Loviisan voimalaitoksen märkäpyyhkäisynäytteille tarkoitetuissa pyyhkäisynäyteanalysointilaitteissa. Vastaavasti kuivapyyhkäisynäytteille käytetään tällä hetkellä $\alpha+\beta$ -mittausohjelmaa.

NT200 ottaa analyysissään huomioon taustasäteilyn ja näytteenottopinta-alan S [cm^2] lisäksi muun muassa lähteen tehokkuuden ε_s [%], detektorin havaitsemisherkkyuden ε_d [%] sekä näytelappuun tarttuneen osuuden irtoavasta kontaminaatiosta, eli saannon ε_w [%]. Näiden avulla se laskee havaitsemistaan pulsseista pinnan irtoavan kontaminaation aktiivisuuskatteen. (Nutronic. 40)

Kuiva- ja märkäpyyhkäisyjen analysointiin käytetään tässä työssä kahta Nutronic NT200-laitetta, koska menetelmille käytetään erilaisia mittaussparametrejä. Standardi ISO 7503-3 suosittelee lähteen tehokkuudeksi alfalähteille sekä energialtaan $\leq 0,400$ MeV oleville beetalähteille 25 % ja muille beetalähteille sekä gammasäteilylle 50 %. Standardissa saannon todetaan vaihtelevan välillä 12 %...60 %. Lisäksi standardi suosittelee saannon arvoksi konservatiivisesti 10 %, mikäli asiaa ei ole tarkemmin tutkittu. (ISO 2016b. 41, 61) Loviisan laitoksella oletetaan kuivapyyhkäisyyn saannoksi 10 % ja märkäpyyhkäisyyn saannoksi 50 %. Taulukkoon 4.1 on kerätty NT200-analyysaattoreissa käytettäviä parametrejä. Käytettävällä havaitsemisherkkyydellä käytetään kalibrointitarkastuksessa määritettyä, laitekohtaista havaitsemisherkkyyden arvoa.

Taulukko 4.1: NT200-laitteissa käytettävät parametrit beetamittauksille.

| NT200-pyyhkäisyinäyteanalyysaattori | KP (XR40R010) | MP (XR40R004) |
|---|----------------------|----------------------|
| Lähteen tehokkuus ε_s [%] | 50 | 50 |
| Saanto ε_w [%] | 10 | 50 |
| Käytettävä havaitsemisherkkyyys ε_d [%] | 40,4 | 32,0 |
| Minimimittausaika [s] | 15 | 4 |
| Aktiivisuuskatteen kynnysarvo [Bq/cm ²] | 4 | 10 |
| Maksimimittausaika [s] | 20 | 8 |
| Maksimipulssimäärä [-] | 99999 | 99999 |

Taulukossa aktiivisuuskatteen kynnysarvolla tarkoitetaan sitä lukuarvoa, jonka tulee alittua minimimittausajan kuluessa, jotta pidempää mittausaikaa ei käytetä. Lisäksi mittausaikaa rajoittaa maksimipulssimäärä, jonka ylittyessä mittaus loppuu. Mittausaika vaihtelee siis tilanteen mukaan.

Tilanteissa, joissa maksimipulssimäärä täyttyy, ilmoittaa Nutronic NT200 aktiivisuuskatteeksi ”>9999 Bq/cm²”. Muodostetaan yksinkertaistettu yhtälö, jolla pinnan aktiivisuuskate voidaan tällaisessa tilanteessa arvioida laskennallisesti.

$$A_A = \frac{C}{\varepsilon_d * \varepsilon_s * \varepsilon_w * S * t} \quad (6)$$

jossa C on havaitut pulssit [-]
 t on mittausaika [s]

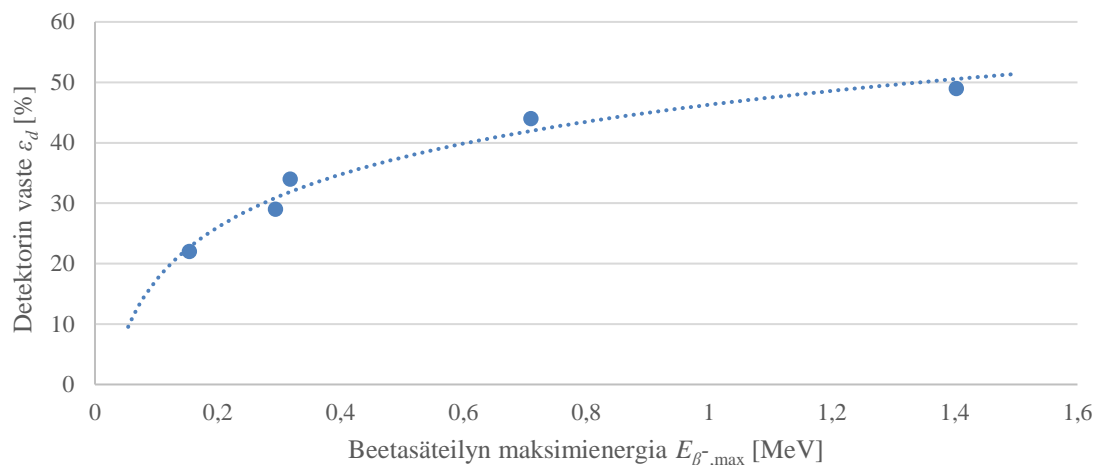
Yhtälössä 6 ei huomioida muun muassa taustasäteilyn vaikutusta, mutta sen merkitys on tällaisessa tilanteessa häviävän pieni.

Taulukkoon 4.2 on kirjattu laitevalmistajan ilmoittamat mittalaitteen tyypilliset havaitsemisherkkydet eräille nuklideille β^- -säteilyn maksimienergian $E_{\beta^-, \max}$ funktiona.

Taulukko 4.2: NT200 tyypilliset havaitsemisherkkydet beetasäteilijöille (Nutronic. 71).

| Nuklidi | $E_{\beta^-, \max}$ [MeV] | Mittalaitteen havaitsemisherkkyys ε_d [%] |
|--------------------------------|---------------------------|---|
| ^{14}C | 0,154 | 22 |
| ^{99}Tc | 0,294 | 29 |
| ^{60}Co | 0,318 | 34 |
| ^{36}Cl | 0,710 | 44 |
| $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ | 0,546/2,260 | 49 |

Taulukosta 4.2 huomataan, että strontium-90:lle ja yttrium-90:lle on esitetty yhteinen havaitsemisherkkyys. Strontium-90 muuttuu hajotessaan yttrium-90:ksi, joka hajoaa edelleen stabiiliksi zirkoniumin isotoopiksi ^{90}Zr . ^{90}Sr puoliintumisaika on 28,5 vuotta ja ^{90}Y puoliintumisaika on 64 tuntia. Kumpikin näistä nuklideista on käytännössä puhdas beetasäteilijä. ^{90}Sr ja ^{90}Y hajoamisketju saavuttaa ajan kuluessa tasapainotilan, jonka jälkeen kummankin nuklidin aktiivisuus on saman suuruinen. (Brun et al 2003. 4-5) Tällainen tasapaino on mahdollinen silloin, kun tytärnuklidin puoliintumisaika on huomattavan paljon lyhyempi, kuin emonuklidin vastaava. Koska tämä toteutuu $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ tapauksessa, voidaan laskennassa käyttää keskiarvoa kyseisten nuklidien taulukossa 4.2 esitetystä hajoamisenergioista (Gilmore 2008. 18-19). Näin ollen saadaan $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -lähteen laskennalliseksi beetaenergiaksi $E_{\beta^-, \max} = 1,403$ MeV. Piirretään havaitsemisherkkydet maksimienergian funktiona kuvaan 4.5 ja sovitetaan pisteisiin logaritminen trendikäyrä.



Kuva 4.5: NT200 beetasäteilyn havaitsemisherkkyys hajoamisenergian funktiona.

Huomataan, että detektorin vaste vaikuttaa parantuu kuvaajan energia-alueella beetasäteilyn energian kasvaessa. Tämä johtuu etenkin pienienergisillä nuklideilla siitä, että suurempi osa hiukkasista absorboituu detektorin tuloikkunaan (Kontio 2002. 39). Tässä työssä kuvan 4.5 käyrää käytetään kuvaamaan NT200-analysointilaitteen vastetta β^- -säteileville nuklideille.

4.3.4 Gammaskpektrometrinen analyysi Loviisan voimalaitoksella

Pyyhkäisynäyte voidaan analysoida myös Loviisan voimalaitoksen laboratoriossa gammaskpektroskopiaalaitteella. Näin toimitaan, kun halutaan tietää kontaminoituneen kappaleen nuklidisisältö tai jos aktiivisuuskate on tarpeen määrittää tarkemmin, kuin mihin pyyhkäisynäyteanalysointilaitteella pystytään.

Loviisan laitoksella tehtävissä gammaskpektrometrisissä mittauksissa näyte mitataan ensin germaniumista valmistetulla puolijohdeilmäsimellä, jolta mitattavat virtapulsit muunnetaan esivahvistimella jännitepulsseiksi. Jännitepulsseja vahvistetaan lineaarivahvistimella, jonka jälkeen ne muunnetaan digitaaliseen muotoon analogia/digitaali-muuntimella (ADC). ADC:lla analysoidaan myös pulssien korkeudet. ADC:n jälkeen digitaaliset pulssit viedään monikanava-analysointilaitteelle (MCA), jossa pulssit jaotellaan niiden koon mukaan, jolloin muodostuu spektri. Lopuksi tulokset analysoidaan ja tarkistetaan tietokoneella. Analyysissä näytteen sisältämät nuklidit tunnistetaan gammaskpekttrin piikkien energioiden avulla ja nuklidien pitoisuudet määritetään piikkien pinta-aloista. (Kangas 2018a. 4-5) Mittauslaitteistolle suoritetaan

havaitsemisherkkyysskalibrointi, jonka ansiosta laitteisto osaa ottaa huomioon havaitsemisherkkyydet mittaustulosten analysoinnissa (Kangas 2018b. 3).

LabSocs-mallinnusohjelmistolla tehdyn mittausgeometriamallinnuksen perusteella märkäpyyhkäisynäytteen havaitsemisherkkyys on noin 4 % suurempi kuin kuivapyyhkäisynäytteen käytännössä koko energia-alueella. Tästä syystä tässä työssä käytetään gamma-analyysituloksille korjauskerrointa K [-], jolla gamma-analyysin tulos kerrotaan. Kuivapyyhkäisynäytteen korjauskertoimen arvona käytetään $K_{KP} = 1$ ja märkäpyyhkäisynäytteen arvona vastaavasti $K_{MP} = 0,96$. (Kvarnström 2019b)

5 MENETELMÄVERTAILU

Tässä kappaleessa esitetään tutkimuksessa käytetyt menetelmät, näytteenottopisteet sekä tulokset. Lisäksi pohditaan mittausepävarmuuteen vaikuttavia tekijöitä.

5.1 Näytteenotto ja näytteiden analysointi

Näytteenottopisteet pyritään valitsemaan siten, että näytteiden nuklidijakaumat kattaisivat mahdollisimman hyvin Loviisan laitoksilla esiintyvän kontaminaation. Näytteet kerätään erilaisista prosessikomponenteista, kuten venttiileistä, pumpuista ja putkista sekä sekalaisilta laajoilta pinnoilta, kuten lattioista. Etenkin laajemmista kohteista otetaan useampia näytteitä, jotta saavutetaan luotettavampi mittaustulos. Näytteenottopisteistä 58 on Loviisa 1:llä (LO1) ja 70 on Loviisa 2:lla (LO2).

Näytteet nimetään neljän numeron järjestelmällä siten, että 1. numero kuvaa laitosta, jolta näyte on otettu (1 = Loviisa 1 ja 2 = Loviisa 2). 2. numero kuvaa puolestaan käytettyä menetelmää (1 = KP ja 2 = MP) ja 3. ja 4. numero muodostavat juoksevan näytenumeron. Esimerkiksi näyte 1214 on otettu Loviisa 1:ltä märkäpyyhkäisymenetelmällä, ja se on LO1:llä tehdyn kampanjan 14. näyte.

Jokaiselle näytenumerolle otetaan yksi kuiva- ja yksi märkäpyyhkäisynäyte, mahdollisimman läheltä toisiaan ja mahdollisimman saman tyyppisiltä pinnoilta. Näytteet otetaan 100 cm² alueelta, jos mahdollista. Mikäli tämä ei onnistu, arvioidaan pyyhitty pinta-ala ja merkitään se tuloksiin. Vertailukelpoisuuden vuoksi molemmat näytteet tulee kuitenkin kerätä saman kokoiselta alalta.

Näytteen analysointi NT200-pyyhkäisynäyteanalyysointilaitteella tapahtuu siten, että pyyhkäisynäyte asetetaan analyysointilaitteen kelkkaan, jonka jälkeen kelkka työnnetään laitteeseen siten, että näytelappu on detektorin kohdalla. Laite suorittaa analysoinnin, jonka jälkeen se ilmoittaa muun muassa mittausajan, näytteestä havaitut pulssit sekä tarkasteltavan pinnan aktiivisuuskatteen.

Ennen kutakin analyysiä suoritetaan taustamittaus puhtaalla pyyhkäisynäytelapulla, jotta saadaan selville taustasäteilyn sekä kelkan mahdollisen kontaminoitumisen vaikutus mittaustulokseen. Taustamittauksen tulos, $A_{A,tausta}$ [Bq/cm²], vähennetään varsinaisesta NT200 ilmoittamasta bruttomittaustuloksesta $A_{A,brutto}$ [Bq/cm²]. Lisäksi, koska NT200

olettaa näytteenottopinta-alaksi 100 cm², täytyy siitä poikkeavat näytteenottopinta-alat huomioida nettotuloksen $A_{A,NT200}$ [Bq/cm²] laskennassa.

$$A_{A,NT200} = \frac{(A_{A,brutto} - A_{A,tausta}) \cdot 100 \text{ cm}^2}{S} \quad (7)$$

NT200 mittauksen jälkeen laboratorioanalyysiin vietävät näytelaput suljetaan puhtaaseen muovipussiin kontaminaation leviämisen estämiseksi. Tämän jälkeen laput toimitetaan laboratorioon, jonka jälkeen ne analysoidaan puolijohdeilmallisella.

Gammaspektrometrisessä analyysissä mitattu aktiivisuus korjataan laboratorion toimesta laskennallisesti vastaamaan NT200 analyysin ajankohdan aktiivisuutta. Tämä tehdään tulosten vertailun helpottamiseksi. Gammamittaustuloksissa ilmoitetaan näytelapussa havaitun nuklidin i aktiivisuus $A_{lab,i}$ [Bq], sekä lapun kokonaisaktiivisuus $A_{lab,kok}$ [Bq]. Nuklidin i aktiivisuus lapussa muunnetaan pinnan aktiivisuuskatteeksi $A_{A,lab}$ [Bq/cm²] ottamalla huomioon oletettu saanto, korjauskerroin K sekä näytteenottopinta-ala.

$$A_{A,lab} = \sum \frac{A_{lab,i}}{\epsilon_w S} \cdot K \quad (8)$$

5.2 Epävarmuustekijät

Pyyhintänäytemittauksiin aiheutuu aina epävarmuutta ja epävarmuustekijät tulee ottaa huomioon tuloksia tarkasteltaessa. NT200-pyyhkäisynäyteanalysointin mittaustulokseen vaikuttaa muun muassa pinta-alan arviointi sekä näytteenottajan käyttämä voima. Tietty kohta voi esimerkiksi tulla pyyhityksi useamman kerran. Näytteenottopinta-alan arviointia vaikeuttaa esimerkiksi tarkasteltavan pinnan monimutkainen geometria. Kontaminaatio ei myöskään välttämättä ole tasaisesti jakautunut tarkasteltavalle pinnalle. Lisäksi mittaustulokseen vaikuttaa nuklidijakauma sekä pyyhittävän pinnan ominaisuudet, kuten kosteus, karheus ja likaisuus.

Koska osa käytettävistä mittaustuloksista on oletuksia, aiheutuu niistä eroja gamma-analyysin sekä pyyhkäisynäyteanalysointin mittaustulosten välille. Lisäksi tulosten välille aiheutuu eroa nuklidikohtaisten havaitsemisherkkyksien eroista johtuen. Lisäksi on huomattava, että vaikka laboratorion aktiivisuusmittaustulosta voisikin tämän työn tapauksessa ajatella absoluuttisesti oikeana arvona, ei samaa voi ajatella sen pohjalta

määritetystä aktiivisuuskatteesta. Tämä johtuu laskennasta käytetystä oletetusta saannosta, sekä silmämääräisesti arvioidusta pinta-alasta.

On myös huomioitava, että pelkkää gammasäteilyä emittoivat, esimerkiksi elektronikaappauksella hajoavat nuklidit näkyvät heikosti pyyhkäisynäyteanalyysointin mittaustuloksissa. Vastaavasti gammaspektrometriassa ei havaita puhtaita beeta- tai alfasäteilijöitä. Yksi merkittävimmistä nuklideista, joka havaitaan molemmilla tämän työn menetelmillä heikosti, on ^{63}Ni , joka on puhdas beetasäteilijä. Kyseinen nuklidi esiintyy Loviisan laitoksella ^{60}Co esiintymisen yhteydessä siten, että nikkelin aktiivisuus on 0,4...1,3-kertainen koboltin aktiivisuuteen nähden. ^{63}Ni keskimääräinen beetasäteilyn energia on noin 0,017 MeV. Näin ollen sen havaitsemisherkkyys pyyhkäisynäyteanalyysointilla on kuvan 4.5 mukaisesti pieni. (Kvarnström 2019a)

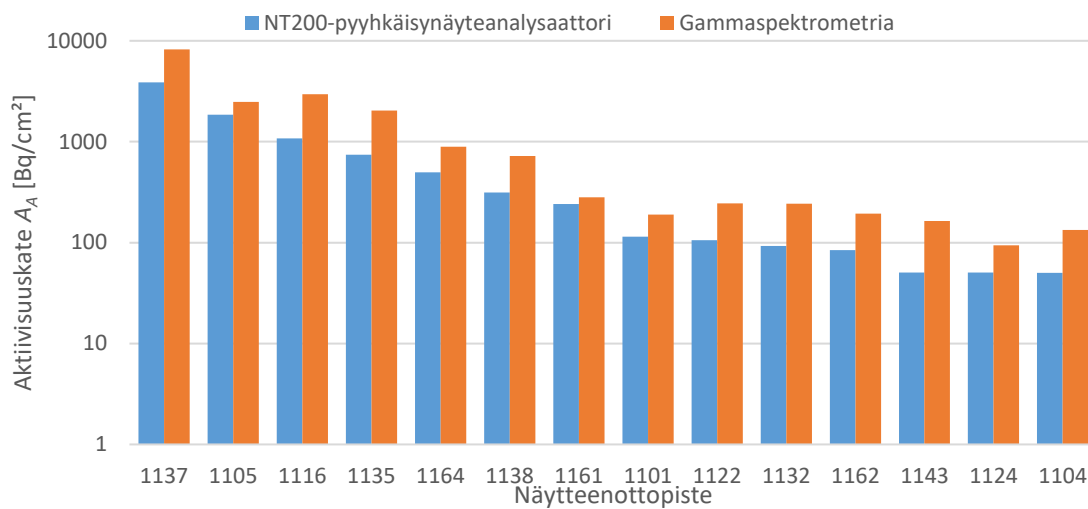
Myös mittausaika ja sen vaihtelu vaikuttavat mittaustulosten tarkkuuteen. Lisäksi, koska pyyhkäisynäyteanalyysointin käyttöhetken sekä laboratorioanalyysin välillä voi olla pitkäkin aika, voivat kaikkein lyhytikäisimmät nuklidit puoliintua pois ennen gammamittausta aiheuttaen siten virhettä tuloksiin.

5.3 Tulokset ja tulosten käsittely

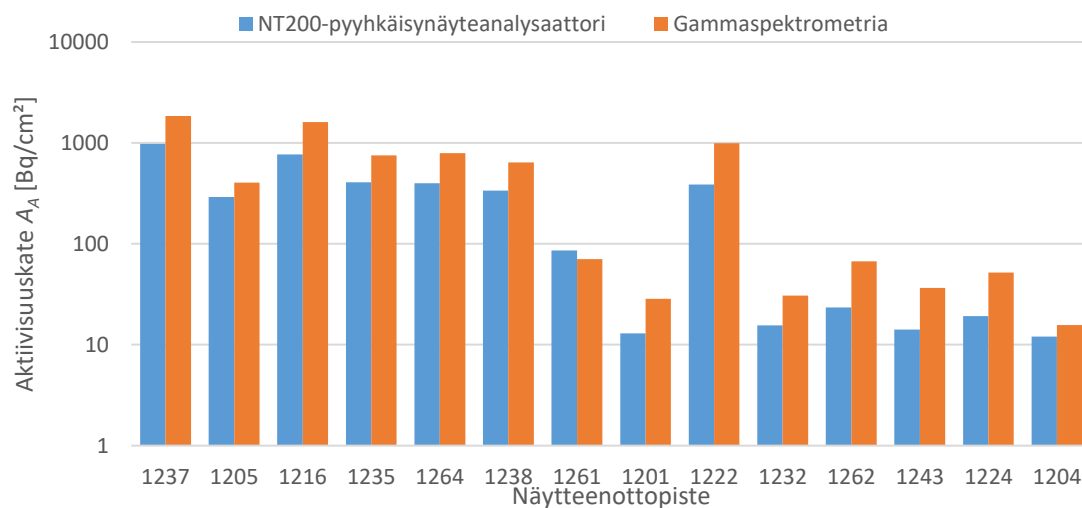
Tässä kappaleessa esitetään ensin laitoskohtaisesti mittaustulokset niiden näytteiden osalta, joille suoritettiin analyysi sekä pyyhkäisynäyteanalyysointilla että laboratorion puolijohdeilmalaitteilla. Kaikki tulokset on esitetty liitteessä 1. Tulosten esittämisen jälkeen lasketaan joitakin suhdelukuja, jotka havainnollistavat menetelmien keskinäisiä eroja. Lopuksi verrataan gamma-analyysissä havaittujen nuklidien säteilyenergioita Nutronic NT200-pyyhkäisynäyteanalyysointin havaitsemisherkkyyskuvaajaan.

5.3.1 Nutronic NT200- ja laboratorioanalyysitulokset

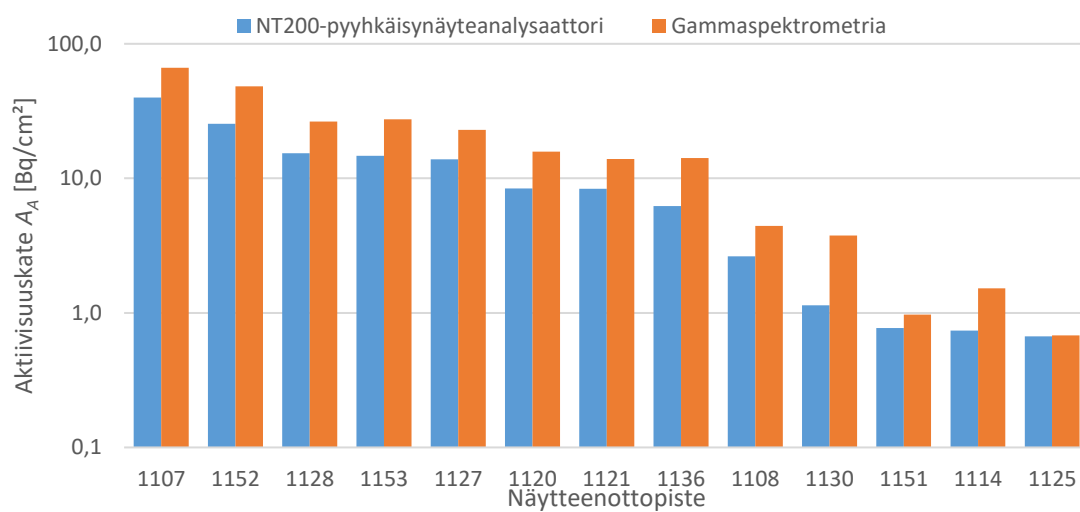
Kuviin 5.1 ja 5.3 on kerätty Loviisa 1 pyyhkäisynäyteanalyysointin sekä gammaspektrometrian analyysitulokset kuivapyyhkäisynäytteistä. Kuviin 5.2 ja 5.4 on kerätty vastaavat tulokset märkäpyyhkäisynäytteistä. Vastaavasti kuviin 5.5 ja 5.7 on merkitty tulokset Loviisa 2 kuivapyyhkäisynäytteistä ja kuviin 5.6 ja 5.8 märkäpyyhkäisynäytteistä. Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava logaritminen asteikko pystyakselilla.



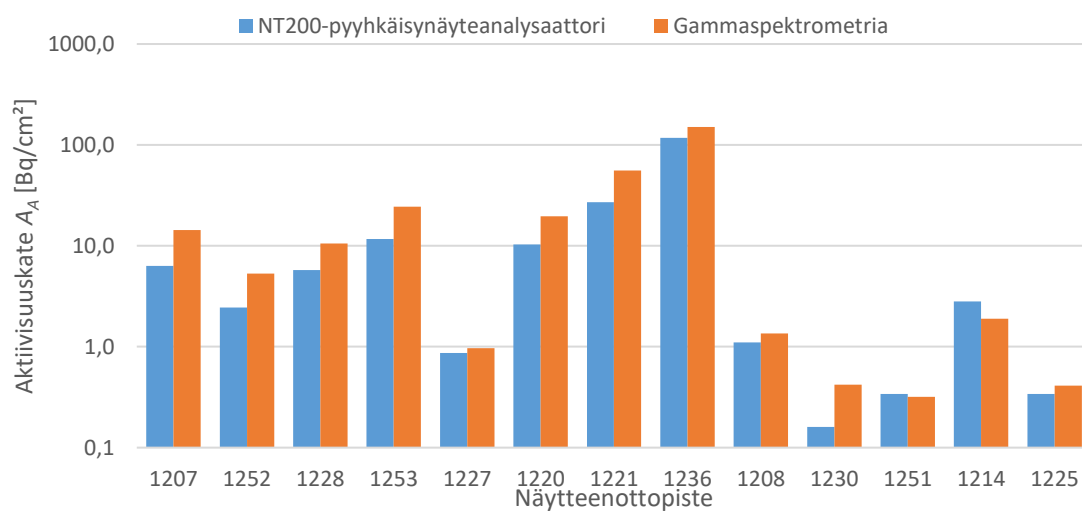
Kuva 5.1: Loviisa 1. Kuivapyyhkäisynäytteiden mittaustulokset NT200-analysaattorilla ja gammasepektrometrialla, osa 1/2.



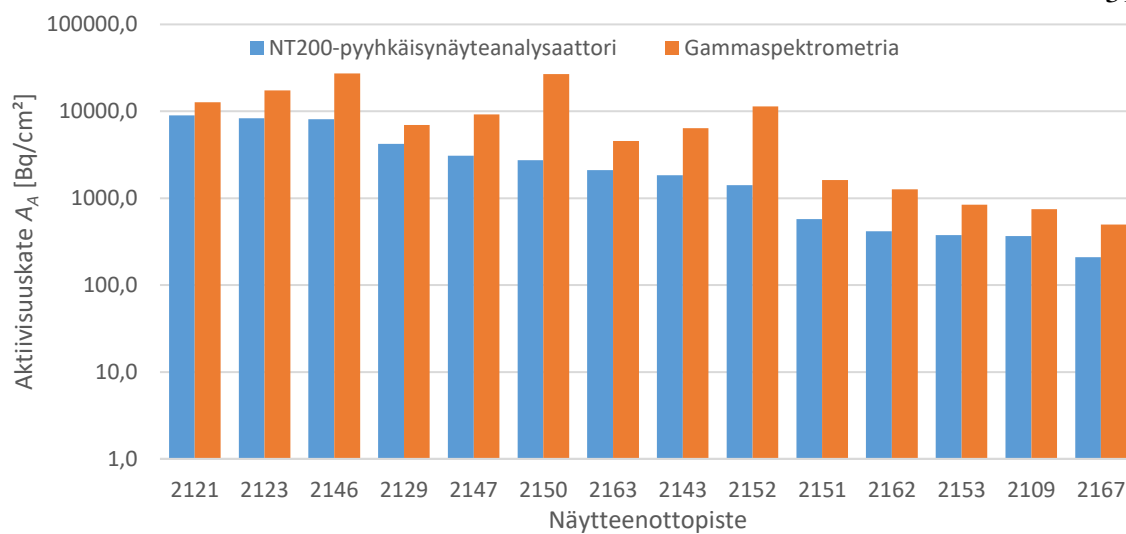
Kuva 5.2: Loviisa 1. Märkäpyyhkäisynäytteiden mittaustulokset NT200-analysaattorilla ja gammasepektrometrialla, osa 1/2.



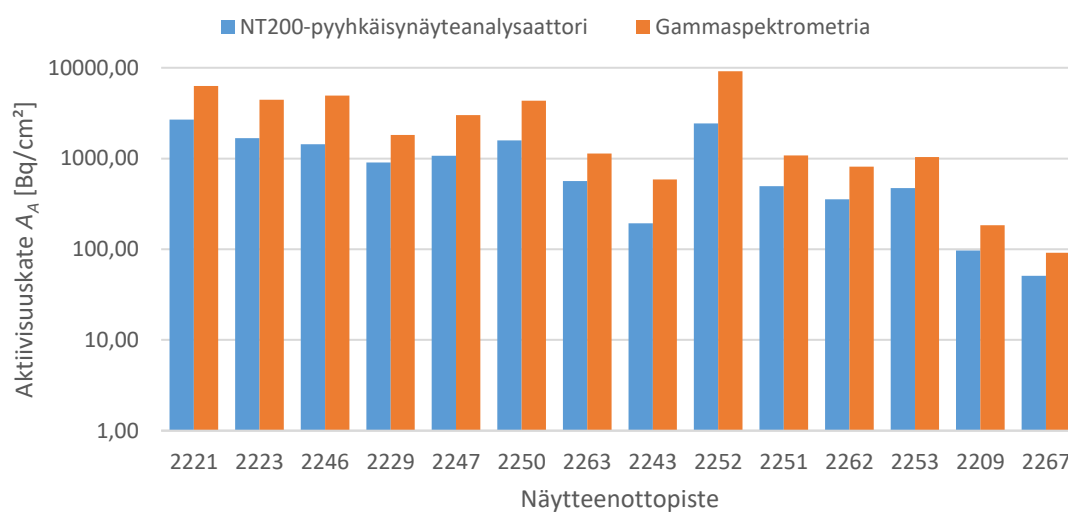
Kuva 5.3: Loviisa 1. Kuivapyyhkäisynäytteiden mittaustulokset NT200-analysaattorilla ja gammasepektrometrialla, osa 2/2.



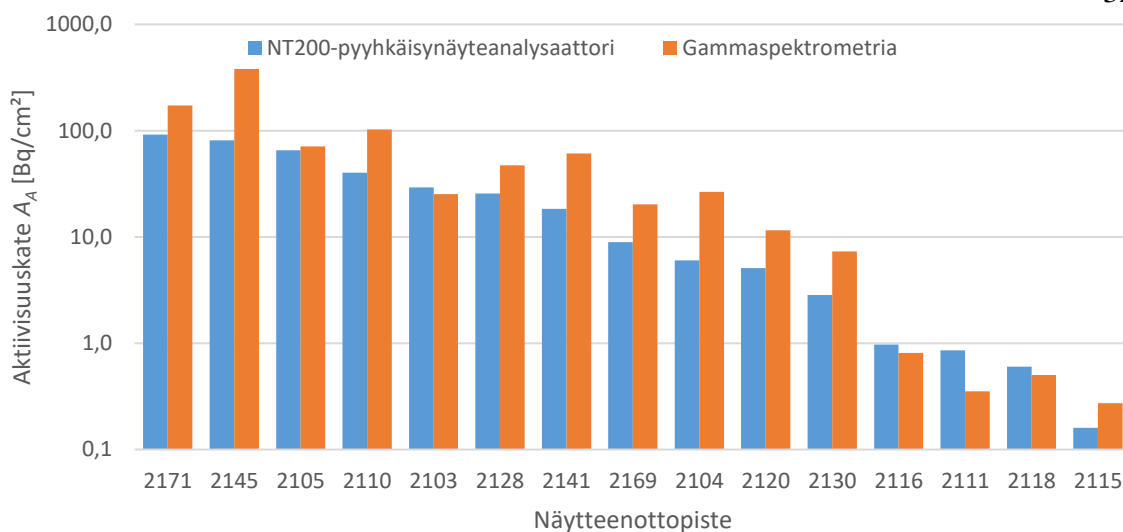
Kuva 5.4: Loviisa 1. Märkäpyyhkäisynäytteiden mittaustulokset NT200-analysaattorilla ja gammasepektrometrialla, osa 2/2.



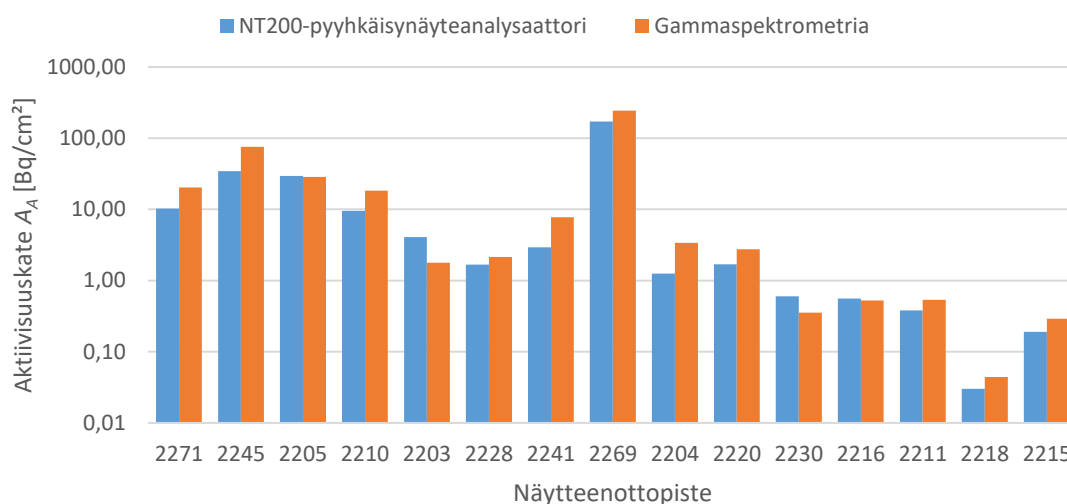
Kuva 5.5: Loviisa 2. Kuivapyyhkäisnäytteiden mittaustulokset NT200-analysaattorilla ja gammaspektrometrialla, osa 1/2.



Kuva 5.6: Loviisa 2. Märkäpyyhkäisnäytteiden mittaustulokset NT200-analysaattorilla ja gammaspektrometrialla, osa 1/2.



Kuva 5.7: Loviisa 2. Kuivapyyhkäisynäytteiden mittaustulokset NT200-analysaattorilla ja gammasppektrometrialla, osa 2/2.



Kuva 5.8: Loviisa 2. Märkäpyyhkäisynäytteiden mittaustulokset NT200-analysaattorilla ja gammasppektrometrialla, osa 2/2.

Kuvien perusteella vaikuttaa siltä, että pyyhkäisyanalysaattorin tulos on useimmiten gamma-analyysin tulosta pienempi. Näin ollen kenttäkäytössä saataisiin pyyhkäisynäyteanalysaattorilta epäkonservatiivisia tuloksia, joka ei ole suotavaa. Lisäksi vaikuttaisi, että kuivapyyhkäisymenetelmällä saavutetaan yleisesti ottaen korkeampia mittaustuloksia, kuin märkäpyyhkäisymenetelmällä.

5.3.2 Suhdelukujen laskenta

Tarkastellaan seuraavaksi mittausparametrejä. Jos parametrit olisivat täysin oikeat, olisi sekä kuiva- että märkäpyyhkäisynäytemenetelmillä saavutetut mittaustulokset

luonnollisesti identtisiä. Koska näin ei ole, lasketaan NT200-mittaustuloksista kunkin näytteenottopisteen märkä- ja kuivapyyhkäisy näytteiden aktiivisuuskatteiden suhde x_{NT200} [-], jonka ideaalinen arvo on 1. Suhdeluvun avulla voidaan arvioida menetelmien saantojen paikkansapitävyyttä toistensa suhteen. Lisäksi saantoa voidaan tarkastella suoraan laboratoriotulosten suhteesta x_{lab} [-]. Jotta tällä hetkellä käytössä olevat oletukset olisivat oikeat suhteessa toisiinsa, tulisi suhteen olla $x_{lab} = 5$, koska märkäpyyhkäisy saanto on viisinkertainen kuivapyyhkäisyyn nähden.

Lähteen tehokkuuden arvot ovat oletuksia ja kummassakin menetelmässä käytetään samaa arvoa. Näin ollen se ei sinällään vaikuta menetelmien keskinäisiin eroihin, mutta se vaikuttaa suoraan siihen, miten paljon pyyhkäisy näyteanalysointin tulos poikkeaa laboratoriotuloksesta. Tästä syystä lasketaan molemmille menetelmille suhdeluvut $x_{NT200/lab}$ [-], joka kuvaa pyyhkäisy näyteanalysointin aktiivisuuskatetuloksen sekä laboratorioanalyysin tuloksesta johdetun aktiivisuuskatteen suhdetta. Ideaalitilanteessa tämä suhdeluku olisi luonnollisesti luku 1. Taulukkoon 5.1 on taulukoitu molempien laitosten yhteiset keskiarvot ja mediaanit edellä mainituista suhdeluvuista. Lisäksi taulukkoon on merkitty kunkin suhdeluvun ihannearvo.

Taulukko 5.1: Loviisa 1 ja Loviisa 2 mittaustuloksista laskettujen laitoskohtaisten suhdelukujen keskiarvojen ja mediaanien keskiarvot sekä kunkin suhdeluvun ihannearvo.

| Suhdeluku | Ihannearvo | Keskiarvo | Mediaani |
|---|------------|-----------|----------|
| NT200-tulosten suhde x_{NT200} [-] | 1,00 | 1,03 | 0,27 |
| Kuivapyyhkäisy $x_{NT200/lab}$ [-] | 1,00 | 0,56 | 0,49 |
| Märkäpyyhkäisy $x_{NT200/lab}$ [-] | 1,00 | 0,63 | 0,51 |
| Laboratorioanalyysitulosten suhde x_{lab} [-] | 5,00 | 4,83 | 1,53 |

Taulukon tuloksista huomataan, että etenkin suhteiden x_{NT200} ja x_{lab} keskiarvot ovat varsin lähellä ihannearvoja. Kuitenkin, mediaani on tässä käytännöllisempi vertailuluku, sillä keskiarvoihin vaikuttaa ratkaisevasti yksittäiset, hyvin paljon keskiarvosta poikkeavat arvot. Näin ollen, mediaanien perusteella suhdeluvut vaikuttavat jäävän selvästi ihannearvojaan pienemmiksi. Laboratorioanalyysianalyysien suhde x_{lab} jää pieneksi, joten vaikuttaa siltä, että kuivapyyhkäisy saanto-oletus on liian pieni suhteessa märkäpyyhkäisyyn vastaavaan. Myös NT200-tulosten pieni suhde x_{NT200} tukee tätä teoriaa. Olettamalla märkäpyyhkäisy 50 %:n saanto-oletus oikeaksi, voidaan kuivapyyhkäisymenetelmälle laskea tämän työn mittaustulosten perusteella uusi arvo.

Lisäksi NT200- ja laboratoriotulosten aktiivisuuskatteiden suhteista $x_{NT200/lab}$ voidaan todeta pyyhkäisynäyteanalyysointitulosten jäävän pienemmiksi. Näin ollen on syytä todeta, että oletus 50%:n lähteen tehokkuudesta kummallekin pyyhkäisynäytetelapulla lienee väärä. Myös lähteen tehokkuudelle voidaan laskea sopiva arvo mittaustulosten perusteella. Lasketaan ensin kuitenkin uusi saanto ε_w suhdeluvun x_{NT200} mediaanin ihannearvon, $x_{NT200,md} = 1$, avulla.

$$x_{NT200,md,0} \cdot \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{w,0}} = 1 \leftrightarrow \varepsilon_w = \frac{\varepsilon_{w,0}}{x_{NT200,md,0}} \quad (9)$$

Lasketaan kuivapyyhkäisylle uusi saanto myös suhdeluvun x_{lab} mediaanin perusteella. Huomioidaan kyseisen suhdeluvun ihannearvo $x_{lab,md} = 5$.

$$x_{lab,md,0} \cdot \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{w,0}} = 5 \leftrightarrow \varepsilon_w = \frac{5}{x_{lab}} \cdot \varepsilon_{w,0} \quad (10)$$

Uusi lähteen tehokkuus ε_s lasketaan puolestaan huomioimalla suhdeluvun $x_{NT200/lab}$ mediaanin ihannearvo, $x_{NT200/lab,md} = 1$. Lähteen tehokkuus määritetään tässä työssä kuivapyyhkäisymenetelmän tuloksista.

$$x_{NT200/lab,md,0} \cdot \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,0}} = 1 \leftrightarrow \varepsilon_s = x_{NT200/lab,md,0} \cdot \varepsilon_{s,0} \quad (11)$$

Laskennan tulokset on esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2: Laskennan tulokset saannolle ja lähteen tehokkuudelle.

| Luku, jonka ihannearvosta laskettu | Lähteen tehokkuus ε_s [%] | Saanto ε_w [%] |
|--|---------------------------------------|----------------------------|
| NT200-tulosten suhde x_{NT200} [-], LO1 | - | 35 |
| NT200-tulosten suhde x_{NT200} [-], LO2 | - | 42 |
| Kuivapyyhkäisy $x_{NT200/lab}$ [-], LO1 | 27 | - |
| Kuivapyyhkäisy $x_{NT200/lab}$ [-], LO2 | 22 | - |
| Laboratorioanalyysitulosten suhde x_{lab} [-], LO1 | - | 28 |
| Laboratorioanalyysitulosten suhde x_{lab} [-], LO2 | - | 39 |
| Keskiarvo | 25 | 36 |

5.3.3 Laboratorioanalyyseissä havaitut nuklidit

Tarkastellaan seuraavaksi gamma-analyyseissä havaittuja nuklideja, jotka on esitetty taulukossa 5.3. Näytekohtaiset nuklidijakaumat on esitetty liitteessä 2. Taulukossa 5.3 on lisäksi kunkin nuklidin puoliintumisaika, hajoamistavat sekä säteilyenergiat ja niiden

intensiteetit. β -säteilyn maksimienergioista on esitetty vain intensiteetiltään suurin. Gammasäteilyenergioista on esitetty kaksi intensiteetiltään suurinta, kuitenkin siten, ettei intensiteetiltään $I_\gamma < 1\%$ olevia energioita ole esitetty.

Taulukko 5.3: Laboratorioanalyseissä havaitut nuklidit ja niiden ominaisuuksia (The Lund/LBNL Nuclear Data Search 1999).

| Nuklidi | $T_{1/2}$ | Hajoamis- tapa | $E_{\beta^-,max}$ [MeV] | $I_{\beta^-,max}$ [%] | $E_{\gamma,1}$ [MeV] | $I_{\gamma,1}$ [%] | $E_{\gamma,2}$ [MeV] | $I_{\gamma,2}$ [%] |
|--------------------|-----------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| ⁷ Be | 53,1 d | ϵ | | | 0,478 | 11 | | |
| ⁴⁶ Sc | 83,8 d | β^- | 0,357 | 100 | 1,121 | 100 | 0,889 | 100 |
| ⁵¹ Cr | 27,7 d | ϵ | | | 0,320 | 10 | | |
| ⁵⁴ Mn | 312 d | $\epsilon+\beta^+, \beta^-$ | | | 0,835 | 100 | | |
| ⁵⁷ Co | 272 d | ϵ | | | 0,122 | 86 | 0,136 | 11 |
| ⁵⁸ Co | 70,9 d | $\epsilon+\beta^+$ | | | 0,811 | 99 | | |
| ⁵⁹ Fe | 44,5 d | β^- | 0,466 | 53 | 1,099 | 57 | 1,292 | 43 |
| ⁶⁰ Co | 5,27 a | β^- | 0,318 | 100 | 1,333 | 100 | 1,173 | 100 |
| ⁷⁵ Se | 120 d | ϵ | | | 0,265 | 59 | 0,136 | 58 |
| ⁷⁶ As | 1,08 d | β^- | 2,962 | 51 | 0,559 | 45 | 0,657 | 6 |
| ⁸² Br | 35,3 h | β^- | 0,444 | 99 | 0,777 | 84 | 0,554 | 71 |
| ⁹⁴ Nb | 20300 a | β^- | 0,472 | 98 | 0,871 | 100 | 0,703 | 98 |
| ⁹⁵ Nb | 35,0 d | β^- | 0,160 | 100 | 0,766 | 100 | | |
| ⁹⁵ Zr | 64,0 d | β^- | 0,368 | 55 | 0,757 | 54 | 0,724 | 44 |
| ¹⁰³ Ru | 39,3 d | β^- | 0,227 | 92 | 0,497 | 91 | 0,610 | 6 |
| ^{108m} Ag | 418 a | $\epsilon+\beta^+, IT$ | | | 0,723 | 91 | 0,434 | 90 |
| ^{110m} Ag | 250 d | β^-, IT | 0,083 | 67 | 0,658 | 94 | 0,885 | 72 |
| ¹²² Sb | 2,72 d | $\epsilon+\beta^+, \beta^-$ | 1,418 | 67 | 0,564 | 71 | 0,693 | 4 |
| ^{123m} Te | 120 d | IT | | | 0,159 | 84 | | |
| ¹²⁴ Sb | 60,2 d | β^- | 0,611 | 52 | 0,603 | 98 | 1,691 | 48 |
| ¹²⁵ Sb | 2,76 a | β^- | 0,303 | 40 | 0,428 | 30 | 0,601 | 18 |
| ¹³² Te | 3,20 d | β^- | 0,215 | 100 | 0,228 | 88 | 0,050 | 15 |
| ¹³⁷ Cs | 30,1 a | β^- | 0,514 | 94 | 0,662 | 85 | | |
| ¹⁴⁴ Ce | 285 d | β^- | 0,319 | 77 | 0,134 | 11 | 0,080 | 1 |
| ¹⁸¹ Hf | 42,4 d | β^- | 0,412 | 93 | 0,482 | 81 | 0,133 | 43 |
| ¹⁹⁸ Au | 2,70 d | β^- | 0,961 | 99 | 0,412 | 96 | 0,676 | 1 |

Mainittakoon, että kaikki vuoden 2018 MARC-mittauksissa esiintyneet nuklidit esiintyvät myös tämän mittauskampanjan nuklidisisällössä. Kun verrataan taulukon arvoja kuvan 4.5 NT200-havaitsemisherkkyysskuvaajaan, huomataan, että suurin osa nuklideista osuu varsin hyvän havaitsemisherkkyyden (> 30 %) alueelle. Lähestulkoon

kaikissa laboratoriossa analysoiduissa näytteissä dominoiva nuklidi oli joko ^{60}Co tai $^{110\text{m}}\text{Ag}$. Nutronic NT200 havaitsemisherkkyys koboltti-60:lle on varsin hyvä, mutta hopea-110m kohdalla havaitsemisherkkyys jää varsin pieneksi. Koska NT200 kalibroinnin määräaikaistarkastukset tehdään beetasäteilymittauksen osalta ^{99}Tc -lähteillä, jonka beetasäteilyenergia ($E_{\beta^-, \text{max}} = 0,294 \text{ MeV}$) on lähellä ^{60}Co vastaavaa, voidaan sanoa $^{110\text{m}}\text{Ag}$ -nuklidia sisältävien näytteiden mittaustulosten olevan aliarvioituja (Hyypiä 2019. 6) (The Lund/LBNL Nuclear Data Search 1999).

Tämän työn rajausten perusteella on lisäksi huomioitava, että nuklideja ^7Be , ^{51}Cr , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{75}Se , $^{108\text{m}}\text{Ag}$ ja $^{123\text{m}}\text{Te}$ ei oleteta tässä työssä havaittavan pyyhkäisynäyteanalysointorilla lainkaan. Todellisuudessa detektorille aiheutunee kuitenkin pulsseja muistakin säteilylajeista, kuin vain β^- -säteilystä. Näiden merkitys jäänee kuitenkin pieneksi.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET

Märkä- ja kuivapyyhkäisy näytteiden laboratoriotuloksien suhteiden x_{lab} huomataan vaihtelevan paljon. Joskus kuivapyyhkäisy näytteeseen tarttuu enemmän aktiivisuutta, välillä toisinpäin. Suhdeluvun mediaani jää kuitenkin liian pieneksi. Myös menetelmien välisissä NT200-tuloksissa on havaittavissa suuria eroja. Tämä on käytännön säteilysuojelussa haitallista etenkin lievästi kontaminoituneita pintoja mitattaessa, jolloin virheellinen mittaustulos voi johtaa suojaruustevaatimusten alimitoitukseen. Tulosten perusteella kuivalla menetelmällä saavutetaan konservatiivisempia tuloksia. Tämä johtuu siitä, että tämän työn tekohetkellä käytössä oleva kuivapyyhkäisy saanto-oletus on liian pieni.

Mittauskampanja osoittaa, että pyyhkäisy näyteanalysointorilla saavutetut tulokset jäävät systemaattisesti laboratoriotuloksista johdettuja arvoja pienemmiksi. Näin ollen voidaan tulkita, että sekä lähteen tehokkuuden että saannon oletuksia olisi järkevää muuttaa. Uusiksi oletuksiksi kuivapyyhkäisy näytteille voitaisiin harkita esimerkiksi taulukossa 5.2 esitettyjä arvoja $\epsilon_w = 36\%$ ja $\epsilon_s = 25\%$. On kuitenkin suositeltavaa tehdä lisätutkimuksia, jotta saadaan lisää dataa ja sitä kautta enemmän varmuutta tuloksiin. Saannon määrittämiseen soveltuu parhaiten kokeellinen testausmenetelmä, josta lisätietoa on saatavilla esimerkiksi standardissa ISO 7503-2. Mittausparametreja määritettäessä on myös huomioitava tässä työssä tehdyt rajaukset ja oletukset sekä se, että todellisuudessa suhteisiin, joista uudet parametrit on määritetty, voi vaikuttaa myös muita tekijöitä.

Laboratoriotulosten perusteella näytteiden nuklidisisällössä on paljon yhtäläisyyksiä MARC-mittauksissa havaittujen nuklidien kanssa. Kuitenkin sillä erotuksella, että tässä työssä otettuja näytteitä dominoi ^{110m}Ag . Mielenkiintoista on, että ^{110m}Ag tartumisessa kuiva- ja märkäpyyhkäisy lappuihin ei havaittu tässä työssä merkittävää eroa, vaikka aiemmat kokemukset Loviisan laitoksella osoittavatkin, että hopea tarttuu paremmin märkäpyyhkäisyyn.

Kaiken kaikkiaan vaikuttaa siltä, ettei kuivapyyhkäisy menetelmään siirtymiseen ole mitään estettä. Mittausparametrien säätäminen ei sinällään estä uusien tulosten vertailua vanhoilla parametreilla saavutettuihin mittaustuloksiin. Vertailu toki edellyttää, että vanhat tulokset päivitetään vastaamaan uusilla parametreilla saatuja tuloksia. Tästä syystä onkin tärkeää, että tiedostetaan kulloinkin käytössä olleet parametrit.

7 YHTEENVETO

Tämä kandidaatintyö tehtiin Fortum Power and Heat Oy:n säteilysuojelujaoxelle Loviisan ydinvoimalaitoksella, jossa on tarkoitus siirtyä tämän työn hetkellä epäsuorissa kontaminaatiomittauksissa käytettävästä märkäpyyhkäisymenetelmästä kuivapyyhkäisymenetelmään.

Aluksi esiteltiin työn lähtökohdat ja tavoitteet, sekä tehdyt oletukset ja rajaukset. Tämän jälkeen käytiin läpi säteilyn teoriaa erityisesti alfa- ja beetahajoamisen sekä gammasäteilyn osalta. Seuraavaksi esiteltiin lyhyesti pintakontaminaation käsite, jonka jälkeen syvennyttiin tarkemmin Loviisan ydinvoimalaitoksen säteilyolosuhteisiin.

Työssä paneuduttiin pintakontaminaation mittaamiseen siten, että detektorityypeistä esiteltiin syvällisemmin tässä työssä käsiteltävät verrannollisuuslaskuri sekä puolijohdeilmaisin. Kontaminaatiomittaukset jaetaan suoraan ja epäsuoraan menetelmään, joista jälkimmäinen sisältää tässä työssä tutkitut kuiva- ja märkäpyyhkäisymenetelmät. Pyyhkäisynäytteiden analysointitavoista esiteltiin Loviisassa käytössä oleva NT200-pyyhkäisynäyteanalyysointilaitos sekä gammaspektrometrinen analyysi.

Tämän työn mittauskampanjassa kerättiin 256 näytettä. Näytteet kerättiin molemmilta laitoksilta mahdollisimman monipuolisesti eri järjestelmistä ja erilaisilta pinnoilta. Näytteet analysoitiin pyyhkäisynäyteanalyysointilaitoksella. Osa näytteistä vietiin myös laboratorioanalyysiin. Tuloksista laskettiin menetelmien eroja kuvaavia suhdelukuja sekä verrattiin laboratorioanalyysissä havaittuja nuklideja pyyhkäisynäyteanalyysointilaitoksen havaitsemisherkkyyskuvaajaan. Tuloksista huomattiin, että joitakin parametrejä olisi järkevää muuttaa. Näille parametreille laskettiin uudet arvot.

Kaiken kaikkiaan vaikuttaa siltä, ettei kuivapyyhkäisymenetelmään siirtymiselle ole esteitä. Menetelmien välillä on kuitenkin eroja. Tiettyjä mittausparametrejä säätämällä tulokset on mahdollista saada lähemmäs toisiaan ja lähemmäs laboratoriotulosta, jolloin saavutetaan parempi vertailtavuus sekä totuudenmukaisempia mittaustuloksia.

LÄHDELUETTELO

9.11.2018/859. Säteilylaki. 5 § Oikeutusperiaate.

9.11.2018/859. Säteilylaki. 6 § Optimointiperiaate.

9.11.2018/859. Säteilylaki. 7 § Yksilönsuojaperiaate.

9.11.2018/859. Säteilylaki. 91 § Valvonta-alueet ja tarkkailualueet.

Brun Stéphane, Kergadallan Yann, Boursier Bernadette, Fremy Jean-Marc, Janin Françoise. 2003. Methodology for Determination of Radiostrontium in Milk: A Review. [verkkojulkaisu]. [viitattu 4.7.2019]. Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/0fd9/f00bf14214c2589a55833d6e2c61f5e6484b.pdf>

Dong Bing, Li Leihao, Li Chenyue, Zhou Wentao, Yin Junlian, Wang Dezhong. 2018. Review on models to evaluate coolant activity under fuel defect condition in PWR. *Annals of Nuclear Energy*, 2019: 124. 223-233.

Gilmore Gordon. 2008. Practical Gamma-ray Spectrometry. 2. painos. Warrington, UK: John Wiley & Sons, Ltd. 387s. 978-0-470-86196-7.

Hendee William R, Ritenour Russel E. 2002. Medical Imaging Physics. 4. painos. New York: Wiley-Liss, Inc. 512s. 0-471-38226-4.

Hyypiä Jaakko. 2018. Selvitys laitoksen alfasäteilymittausten toteuttamisesta. 10s. [Doris-dokumentti]. [viitattu 5.7.2019]. Käyttö rajoitettu: Doris LO1-T343-00024.

Hyypiä Jaakko. 2019. Kannettavien säteilymittareiden määräaikaistarkastukset. 7s. [Doris-dokumentti]. [viitattu 26.9.2019]. Käyttö rajoitettu: Doris S-03-00014.

Ikäheimonen Tarja K (toim.). 2002. Säteily ja sen havaitseminen. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 197s. 951-712-496-1.

ISO 7503-2. 2016a. Measurement of radioactivity – Measurement and evaluation of surface contamination – Part 2: Test method using wipe-test samples. Sveitsi: ISO. 11s.

ISO 7503-3. 2016b. Measurement of radioactivity – Measurement and evaluation of surface contamination – Part 3: Test method using wipe-test samples. Sveitsi: ISO. 64s.

Kangas Satu. 2018a. Gamma-aktiivisuuden määrittäminen (Yleinen osa). 22s. [Doris-dokumentti]. [viitattu 4.7.2019]. Käyttö rajoitettu: Doris S-05-00013.

Kangas Satu. 2018b. Gammadetektorien kalibrointi APEX-ohjelmistossa. 14s. [Doris-dokumentti]. [viitattu 15.7.2019]. Käyttö rajoitettu: Doris S-05-00024.

Knoll Glenn F. 2010. Radiation Detection and Measurement. 4. Painos. USA: John Wiley & Sons, Inc. 830s. 978-0-470-13148-0.

Kontio Timo. 2002. Ydinvoimalaitoksen nuklidijakauman vaikutus kontaminaatiomittauksiin. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan osasto. Loviisa. 73s.

Kontio Timo. 2016. Pintakontaminaatiomittaukset. 9s. [Doris-dokumentti]. [viitattu 31.10.2019]. Käyttö rajoitettu: Doris S-05-00013.

Kvarnström Roger. 2019a. Erityisasiantuntija, radiokemia. Fortum Power and Heat Oy. Loviisa. Henkilökohtainen kirjallinen tiedonanto. 21.8.2019.

Kvarnström Roger. 2019b. Erityisasiantuntija, radiokemia. Fortum Power and Heat Oy. Loviisa. Henkilökohtainen suullinen tiedonanto. 21.8.2019.

Lamarsh John R, Baratta Anthony J. 2014. Introduction to Nuclear Engineering. 3. Painos. England: Pearson. 730s. 978-1-292-02581-0

L'Annunziata Michael F. 2012. Handbook of Radioactivity Analysis. 3. Painos. San Diego: Elsevier Science. 1303s. 978-0-123-84873-4.

Nutronic AB. NT200 User's Manual. 73s. Versio 2.42.

Sandberg Jorma (toim.). 2004. Ydinturvallisuus. Helsinki: Säteilyturvakeskus STUK. 418s. 951-712-500-3.

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

The Lund/LBNL Nuclear Data Search. 1999. WWW Table of Radioactive Isotopes [verkkoaineisto]. [viitattu 26.9.2019]. Saatavissa: <http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/>

LIITE 1. MITTAUSTULOKSET TAULUKOITUNA

Liitteen I taulukoihin on merkitty harmaalle pohjalle suhdeluvut, jotka on laskettu käyttäen taulukon 5.2 laitoskohtaisia arvoja.

Loviisa 1:

| KP # | MP # | NT200-ajankohta | Pinta-ala S [cm ²] | KP $A_{A,NT200}$ [Bq/cm ²] | MP $A_{A,NT200}$ [Bq/cm ²] | MP/KP x_{NT200} [-] | MP/KP x_{NT200} [-] uusi | KP $A_{A,lab}$ [Bq/cm ²] | MP $A_{A,lab}$ [Bq/cm ²] | KP $x_{NT200/lab}$ [-] | MP $x_{NT200/lab}$ [-] | KP $x_{NT200/lab}$ [-] uusi | MP $x_{NT200/lab}$ [-] uusi | MP/KP x_{lab} [-] |
|------|------|-----------------|--------------------------------|--|--|-----------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 1101 | 1201 | 19.7.2019 11:05 | 100 | 114,7 | 12,95 | 0,11 | 0,39 | 189,16 | 28,51 | 0,61 | 0,45 | 1,14 | 0,85 | 0,78 |
| 1102 | 1202 | 19.7.2019 11:05 | 100 | 102,4 | 18,48 | 0,18 | 0,63 | | | | | | | |
| 1103 | 1203 | 19.7.2019 10:50 | 100 | 2,1 | 2,21 | 1,03 | 3,58 | | | | | | | |
| 1104 | 1204 | 19.7.2019 10:55 | 100 | 50,3 | 12,06 | 0,24 | 0,83 | 133,49 | 15,71 | 0,38 | 0,77 | 0,71 | 1,44 | 0,61 |
| 1105 | 1205 | 19.7.2019 11:00 | 100 | 1853,8 | 290,94 | 0,16 | 0,54 | 2484,00 | 404,16 | 0,75 | 0,72 | 1,40 | 1,35 | 0,85 |
| 1106 | 1206 | 19.7.2019 10:35 | 100 | 4,2 | 1,43 | 0,34 | 1,18 | | | | | | | |
| 1107 | 1207 | 19.7.2019 10:30 | 100 | 40,0 | 6,32 | 0,16 | 0,55 | 66,44 | 14,30 | 0,60 | 0,44 | 1,13 | 0,83 | 1,12 |
| 1108 | 1208 | 29.7.2019 7:25 | 100 | 2,6 | 1,10 | 0,42 | 1,45 | 4,44 | 1,36 | 0,59 | 0,81 | 1,12 | 1,52 | 1,59 |
| 1109 | 1209 | 29.7.2019 7:35 | 100 | 1,5 | 0,15 | 0,10 | 0,34 | | | | | | | |
| 1110 | 1210 | 29.7.2019 7:40 | 100 | 34,7 | 4,00 | 0,12 | 0,40 | | | | | | | |
| 1111 | 1211 | 2.8.2019 9:10 | 100 | 3,0 | 0,34 | 0,11 | 0,40 | | | | | | | |
| 1112 | 1212 | 6.8.2019 10:45 | 100 | 0,3 | 0,22 | 0,67 | 2,31 | | | | | | | |
| 1113 | 1213 | 6.8.2019 10:40 | 100 | 0,2 | 0,12 | 0,75 | 2,60 | | | | | | | |
| 1114 | 1214 | 6.8.2019 9:50 | 50 | 0,7 | 2,80 | 3,78 | 13,13 | 1,52 | 1,89 | 0,49 | 1,48 | 0,91 | 2,78 | 6,48 |
| 1115 | 1215 | 9.8.2019 15:05 | 10 | 11,1 | 0,90 | 0,08 | 0,28 | | | | | | | |
| 1116 | 1216 | 12.9.2019 17:15 | 100 | 1076,5 | 768,63 | 0,71 | 2,48 | 2961,90 | 1604,73 | 0,36 | 0,48 | 0,68 | 0,90 | 2,82 |
| 1117 | 1217 | 12.9.2019 17:25 | 100 | 1698,6 | 353,63 | 0,21 | 0,72 | | | | | | | |
| 1118 | 1218 | 12.9.2019 17:30 | 100 | 1680,0 | 645,60 | 0,38 | 1,33 | | | | | | | |
| 1119 | 1219 | 12.9.2019 17:35 | 100 | 8546,4 | 685,69 | 0,08 | 0,28 | | | | | | | |
| 1120 | 1220 | 12.9.2019 16:30 | 100 | 8,4 | 10,29 | 1,22 | 4,25 | 15,81 | 19,66 | 0,53 | 0,52 | 1,00 | 0,98 | 6,52 |
| 1121 | 1221 | 12.9.2019 16:35 | 100 | 8,4 | 27,09 | 3,24 | 11,23 | 13,89 | 55,74 | 0,60 | 0,50 | 1,13 | 0,94 | 20,49 |
| 1122 | 1222 | 12.9.2019 18:55 | 100 | 106,1 | 386,47 | 3,64 | 12,64 | 245,62 | 989,38 | 0,43 | 0,39 | 0,81 | 0,73 | 20,98 |
| 1123 | 1223 | 12.9.2019 19:00 | 100 | 9519,2 | 1850,10 | 0,19 | 0,67 | | | | | | | |
| 1124 | 1224 | 12.9.2019 19:10 | 100 | 50,5 | 19,19 | 0,38 | 1,32 | 94,36 | 51,92 | 0,54 | 0,37 | 1,01 | 0,69 | 2,87 |
| 1125 | 1225 | 13.9.2019 17:10 | 100 | 0,7 | 0,34 | 0,51 | 1,76 | 0,68 | 0,41 | 0,98 | 0,83 | 1,85 | 1,56 | 3,14 |
| 1126 | 1226 | 13.9.2019 17:15 | 100 | 0,3 | 0,66 | 2,00 | 6,94 | | | | | | | |
| 1127 | 1227 | 13.9.2019 17:20 | 100 | 13,9 | 0,87 | 0,06 | 0,22 | 22,94 | 0,97 | 0,60 | 0,90 | 1,14 | 1,69 | 0,22 |
| 1128 | 1228 | 17.9.2019 20:15 | 100 | 15,4 | 5,75 | 0,37 | 1,30 | 26,44 | 10,55 | 0,58 | 0,54 | 1,09 | 1,02 | 2,08 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|-----------|-------|-----|--------|---------|-------------|-------------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| 1129 | 1229 | 17.9.2019 | 20:20 | 100 | 533,7 | 69,65 | 0,13 | 0,45 | | | | | | | | |
| 1130 | 1230 | 17.9.2019 | 20:25 | 100 | 1,1 | 0,16 | 0,14 | 0,49 | 3,76 | 0,42 | 0,30 | 0,38 | 0,57 | 0,71 | 0,58 | |
| 1131 | 1231 | 17.9.2019 | 20:30 | 100 | 1,0 | 0,16 | 0,16 | 0,55 | | | | | | | | |
| 1132 | 1232 | 17.9.2019 | 20:40 | 100 | 93,0 | 15,57 | 0,17 | 0,58 | 243,37 | 30,72 | 0,38 | 0,51 | 0,72 | 0,95 | 0,66 | |
| 1133 | 1233 | 17.9.2019 | 20:45 | 100 | 21,2 | 0,28 | 0,01 | 0,05 | | | | | | | | |
| 1134 | 1234 | 17.9.2019 | 20:50 | 100 | 80,4 | 13,32 | 0,17 | 0,58 | | | | | | | | |
| 1135 | 1235 | 12.9.2019 | 18:20 | 100 | 742,5 | 405,91 | 0,55 | 1,90 | 2037,50 | 754,64 | 0,36 | 0,54 | 0,68 | 1,01 | 1,93 | |
| 1136 | 1236 | 12.9.2019 | 18:25 | 100 | 6,2 | 117,22 | 18,88 | 65,52 | 14,18 | 150,13 | 0,44 | 0,78 | 0,82 | 1,47 | 55,14 | |
| 1137 | 1237 | 12.9.2019 | 18:35 | 100 | 3870,4 | 975,54 | 0,25 | 0,87 | 8232,92 | 1847,72 | 0,47 | 0,53 | 0,88 | 0,99 | 1,17 | |
| 1138 | 1238 | 12.9.2019 | 18:40 | 100 | 313,6 | 335,66 | 1,07 | 3,71 | 719,50 | 639,84 | 0,44 | 0,52 | 0,82 | 0,99 | 4,63 | |
| 1139 | 1239 | 12.9.2019 | 18:45 | 100 | 8684,9 | 2081,60 | 0,24 | 0,83 | | | | | | | | |
| 1140 | 1240 | 12.9.2019 | 16:45 | 100 | 1557,4 | 296,66 | 0,19 | 0,66 | | | | | | | | |
| 1141 | 1241 | 12.9.2019 | 17:40 | 100 | 7787,2 | 1627,35 | 0,21 | 0,73 | | | | | | | | |
| 1142 | 1242 | 12.9.2019 | 16:40 | 100 | 323,8 | 387,94 | 1,20 | 4,16 | | | | | | | | |
| 1143 | 1243 | 12.9.2019 | 16:55 | 100 | 50,6 | 14,13 | 0,28 | 0,97 | 164,10 | 36,56 | 0,31 | 0,39 | 0,58 | 0,73 | 1,16 | |
| 1144 | 1244 | 12.9.2019 | 17:00 | 100 | 54,9 | 5,12 | 0,09 | 0,32 | | | | | | | | |
| 1145 | 1245 | 12.9.2019 | 17:05 | 100 | 19,8 | 10,89 | 0,55 | 1,91 | | | | | | | | |
| 1149 | 1249 | 13.9.2019 | 17:50 | 100 | 0,1 | 0,40 | 6,67 | 23,14 | 0 | 0 | | | | | | |
| 1150 | 1250 | 13.9.2019 | 17:30 | 100 | 0,0 | 0,00 | | | | | | | | | | |
| 1151 | 1251 | 13.9.2019 | 17:25 | 100 | 0,8 | 0,34 | 0,44 | 1,53 | 0,97 | 0,32 | 0,79 | 1,07 | 1,49 | 2,01 | 1,71 | |
| 1152 | 1252 | 13.9.2019 | 18:05 | 100 | 25,5 | 2,44 | 0,10 | 0,33 | 48,39 | 5,29 | 0,53 | 0,46 | 0,99 | 0,87 | 0,57 | |
| 1153 | 1253 | 13.9.2019 | 18:10 | 100 | 14,7 | 11,68 | 0,79 | 2,75 | 27,55 | 24,46 | 0,54 | 0,48 | 1,01 | 0,90 | 4,63 | |
| 1154 | 1254 | 13.9.2019 | 18:20 | 100 | 11,8 | 3,51 | 0,30 | 1,03 | | | | | | | | |
| 1155 | 1255 | 13.9.2019 | 17:55 | 100 | 0,0 | 0,03 | | | | | | | | | | |
| 1156 | 1256 | 13.9.2019 | 18:00 | 100 | 0,0 | 0,07 | 2,33 | 8,10 | 0 | 0 | | | | | | |
| 1161 | 1261 | 12.9.2019 | 17:10 | 100 | 241,8 | 86,09 | 0,36 | 1,24 | 280,60 | 70,71 | 0,86 | 1,22 | 1,62 | 2,29 | 1,31 | |
| 1162 | 1262 | 18.9.2019 | 13:40 | 100 | 84,2 | 23,42 | 0,28 | 0,96 | 194,11 | 67,20 | 0,43 | 0,35 | 0,82 | 0,66 | 1,81 | |
| 1163 | 1263 | 18.9.2019 | 13:35 | 100 | 71,3 | 12,61 | 0,18 | 0,61 | | | | | | | | |
| 1164 | 1264 | 12.9.2019 | 16:15 | 100 | 497,6 | 397,76 | 0,80 | 2,77 | 894,22 | 793,00 | 0,55 | 0,50 | 1,05 | 0,94 | 4,62 | |
| 1165 | 1265 | 12.9.2019 | 16:20 | 100 | 857,6 | 950,44 | 1,11 | 3,85 | | | | | | | | |
| Keskiarvo | | | | | | | 1,05 | 3,65 | | | 0,54 | 0,63 | 1,01 | 1,18 | 5,57 | |
| Mediaani | | | | | | | 0,29 | 1,00 | | | 0,53 | 0,52 | 1,00 | 0,98 | 1,81 | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|-----------|------|-----|------|-------|-------------|-------------|--------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2171 | 2271 | 28.8.2019 | 1:40 | 100 | 92,2 | 10,29 | 0,11 | 0,47 | 172,86 | 20,35 | 0,53 | 0,51 | 1,21 | 1,15 | 0,61 |
| 2172 | 2272 | 28.8.2019 | 1:55 | 100 | 41,1 | 4,85 | 0,12 | 0,50 | | | | | | | |
| Keskiarvo | | | | | | | 1,01 | 4,26 | | | 0,57 | 0,63 | 1,28 | 1,43 | 4,09 |
| Mediaani | | | | | | | 0,24 | 1,00 | | | 0,44 | 0,50 | 1,00 | 1,13 | 1,28 |

LIITE 2. NUKLIDIEN SUHTEELLISET OSUDET NÄYTTEIDEN AKTIIVISUUKSISTA

