

# **Menetelmän kehittäminen alfa- aktiivisuuden määrittämiseen poistoil- masuodattimista**

Petri Hovi

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2013  
Paperi-, tekstiili- ja kemian-  
tekniikan koulutusohjelma  
Kemiantekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Paperi-, tekstiili- ja kemiantekniikan koulutusohjelma  
Kemiantekniikka

PETRI HOVI:

Menetelmän kehittäminen alfa-aktiivisuuden määrittämiseen poistoilmasuodattimista

Opinnäytetyö 44 sivua, joista liitteitä 3 sivua  
Huhtikuu 2013

---

Opinnäytetyö tehtiin Teollisuuden Voima Oyj:n Käytön tuki -toimiston Kemian jaokselle Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 laitosten laboratoriossa. Työn tavoitteena oli löytää menetelmä, jolla saadaan alfa-aktiiviset aineet reaktorirakennuksen lasikuituisista poistoilmasuodattimista mitattavaan muotoon. Tavoitteellinen havaitsemisraja lasikuitusuodattimesta kokonaisalfa-aktiivisuudelle oli 0,1 Bq ja  $^{241}\text{Am}$ :lle 0,01 Bq tai sen alle. Menetelmä, joka valittiin sisältää päävaiheet: liuotus ja haihdutus vetyperoksidissa ja typpihapossa, suodatus ja lopuksi aktiivisen aineksen elektrosaostus metalliplansetille Opinnäytetyössä käsiteltiin myös lyhyesti Olkiluodon käyviä laitoksia, radioaktiivista hajoamista ja ionisoivaa säteilyä.

Tuloksissa 0,01 Bq:n aktiivisuustasolla päästiin  $^{241}\text{Am}$ :n suhteen hieman yli 45 %:n saantoon. Menetelmä testattiin myös 0,005 Bq:n aktiivisuuksilla, jotta voitiin tarkistaa menetelmän toimivuus havaitsemisrajan alapuolella. Työssä testattiin myös vuosihuoltorakennuksesta otettuja suodattimia, jotta voitiin nähdä menetelmän toimivuus pölyisellä suodattimella. Näistä suodattimista saatiin  $^{241}\text{Am}$ :lla noin 50 %:n saanto.

Työssä käytettyjen merkkiaineiden standardiliuosten aktiivisuuksia ei pystytty tarkistamaan luotettavasti. Siitä syystä myöskään tuloksissa olevat saannot eivät ole välttämättä täysin tarkkoja. Tästä huolimatta todettiin standardiliuosten olevan niin tyydyttäviä, että niitä voitiin käyttää menetelmänkehityksessä. Alfasäteilyn mittausta kehitetään jatkossa niin, että mitataan aktiivisuus suodattimesta verrannollisuuslaskurilla ennen näytteenkäsittelyä. Näin olisi tarkoitus saada kaksi keskenään vertailukelpoista tulosta.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree programme in Paper, Textile and Chemical Engineering  
Option of Chemical Engineering

PETRI HOVI:

Method Development for Determination of Alfa Activity in Exhaust Air Filters

Bachelor's thesis 44 pages, appendices 3 pages  
April 2013

---

This thesis was commissioned by Teollisuuden Voima Ltd at Olkiluoto 1 and Olkiluoto 2 laboratory. The purpose of the thesis was to develop a method for the determination of alpha activity in glass fiber exhaust air filters from the reactor building. The objective was to be able to measure 0,1 Bq gross alpha and 0.01 Bq  $^{241}\text{Am}$ . The method chosen was dilution and evaporation with nitric acid and hydrogen peroxide, filtering and electro precipitation of active material to metallic planchet. The thesis also briefly covers Olkiluoto 1 and Olkiluoto 2 nuclear power plants, radioactive decay and ionizing radiation.

A little bit over 45 % yield from 0,01 Bq  $^{241}\text{Am}$  activity level samples was achieved. The method was also tested with 0.005 Bq samples to ensure it works with lower than demanded activities. Also dusty filters from VHR-building were tested to make certain the method can work with real reactor building exhaust air filters. From these samples a 50 % yield was achieved.

The activity of the used standard solutions could not be measured exactly. Thus achieved yields are suggestive. Even so it was decided activities were close enough to be used in this thesis. The method is to be further developed so that filter is measured with proportional counter before sample preparation. This way both results can be compared.

---

Key words: glass fiber filter, alpha radiation

## SISÄLLYS

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | JOHDANTO .....   | 6  |
| 2 | TVO.....   | 7  |
|   | 2.1 Perustietoja Teollisuuden Voimasta.....                  | 7  |
|   | 2.2 Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2.....                          | 8  |
|   | 2.3 Olkiluoto 3 ja Olkiluoto 4.....                          | 12 |
|   | 2.4 OL1 ja OL2 laboratorio .....                             | 13 |
| 3 | RADIOAKTIIVISUUS .....                                       | 14 |
|   | 3.1 Radioaktiivinen hajoaminen .....                         | 14 |
|   | 3.1.1 $\alpha$ -hajoaminen .....                             | 14 |
|   | 3.1.2 $\beta^-$ -hajoaminen .....                            | 15 |
|   | 3.1.3 $\beta^+$ -hajoaminen.....                             | 15 |
|   | 3.1.4 Fissio .....   | 15 |
|   | 3.2 Ionisoiva säteily .....                                  | 17 |
|   | 3.2.1 $\alpha$ -säteily.....                                 | 18 |
|   | 3.2.2 $\beta$ -säteily.....                                  | 19 |
|   | 3.2.3 $\gamma$ -säteily .....                                | 20 |
|   | 3.3 Opinnäytetyöhön liittyvät säteilyn mittauslaitteet ..... | 21 |
|   | 3.3.1 Alfaspktrometri.....                                   | 21 |
|   | 3.3.2 Nestetuikelaskuri .....                                | 21 |
| 4 | Alfamenetelmä poistoilmasuodattimille.....                   | 23 |
|   | 4.1 Perusteita menetelmälle.....                             | 23 |
|   | 4.1.1 Näytteet 0–2 .....                                     | 26 |
|   | 4.1.2 Näytteet 3–22 .....                                    | 29 |
|   | 4.1.3 Näytteet 23–54.....                                    | 31 |
|   | 4.1.4 Näytteet 55–64.....                                    | 32 |
|   | 4.2 Tulokset.....  | 34 |
| 5 | POHDINTA .....   | 38 |
|   | LÄHTEET.....   | 41 |
|   | LIITTEET.....  | 42 |
|   | Liite 1. Mittaustulokset.....                                | 42 |

---

**LYHENTEET JA TERMIT**

|                      |   |
|----------------------|---|
| Bq                   | Becquerel, radioaktiivisen hajoamisen yksikkö, 1 Bq tarkoittaa yhtä hajoamista sekunnissa                                 |
| Elektrosaostus       | Aktiivinen aines saostetaan sähkövirran avulla metalliselle plansetille   |
| Kokonaisalfasäteily  | Kaiken alfaenergialla tulevan säteilyn summa, ei nuklidispesifinen  |
| Kokonaisbeetasäteily | Kaiken beetaenergialla tulevan säteilyn summa, ei nuklidispesifinen   |
| mTorr                | 1 mTorr on noin 0,133 Pa:n paine  |
| Nuklidi              | Sisältää atomilajin ytimelle ominaisen määrän protoneita ja neutroneita   |
| OL1                  | Olkiluoto 1   |
| OL2                  | Olkiluoto 2   |
| Plansetti            | Ohut metallinen levy, johon aktiivinen aines elektrosaostuksen avulla kiinnitetään  |
| Tunneli-ilmiö        | Kvanttimekaaninen ilmiö, jonka avulla alfahiukkanen voi läpäistä potentiaalivallin jota se muuten ei pystyisi läpäisemään |
| VHR                  | Vuosihuoltorakennus   |
| VLJ-luola            | Voimalaitosjäteluola  |
| Moderointikyky       | Väliaineen kyky hidastaa neutroneita  |
| Neutriino            | Varaukseton alkeishiukkanen   |
| Positroni            | Elektronin antishiukkanen, jonka sähkövaraus on +1 e  |
| annihilaatio         | Hiukkasen ja antishiukkasen kohtaaminen, jossa molemmat muuttuvat yleensä gammasäteilyksi                                 |
| Fotoni               | Sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen   |
| Ceriumsaostus        | Ceriumin avulla saostetaan aktiivinen aines suodattimen pinnalle  |

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoitus oli kehittää menetelmä alfa-aktiivisten aineiden erottamiseksi ja mittaamiseksi reaktorirakennuksen lasikuituisista poistoilmasuodattimista. Alfasäteilyä ei voida nuklidispesifisesti mitata suodattimista ilman näytteenkäsittelyä, vaan tätä varten piti kehittää menetelmä. Tällä hetkellä suodattimia ei mitata omassa laboratorioissa, vaan ne lähetetään muualle mitattavaksi. Tähän haluttiin muutos ja alfa-aktiivisuuksia on tarkoitus mitata tulevaisuudessa omassa laboratorioissa.

Tavoitteena oli kehittää menetelmä, jolla saataisiin toistettavasti erotettua alfa-aktiiviset aineet poistoilmasuodattimesta, ja elektroaostettua ne metalliselle plansetille. Aktiivisuus mitattiin alfaspektrometrillä. Säteilyturvakeskuksen Ydinvoimalaitosohje (YVL) 7.6 antaa ydinvoimalaitoksen kaasumaisille ja hiukkasmaisille päästöille saavutettavissa olevat havaitsemisrajat, joiden mukaan alimmat käytetyt aktiivisuustasot valittiin. Opinnäytetyö tehtiin Teollisuuden Voiman Oyj:n OL1 ja OL2 laitosten laboratorioissa Olkiluodossa.

Lisäksi opinnäytetyössä käytiin päällisin puolin läpi OL1 ja OL2 voimalaitosten prosessi. Radioaktiivisesta hajoamisesta käsiteltiin muutama yleinen hajoamistapa. Myös ionisoivasta säteilystä käsiteltiin perusteet. Opinnäytetyössä käytettiin pääasiassa kahta laitetta, alfaspektrometriä ja nestetuikelaskuria, joilla voidaan havaita alfasäteilyä. Näiden molempien laitteiden toimintaperiaatteet ja ominaisuudet käsiteltiin lyhyesti.

## 2 TVO

### 2.1 Perustietoja Teollisuuden Voimasta

Teollisuuden voima Oyj, lyhennetään TVO, perustettiin vuonna 1969 tuottamaan sähköä sen omistajayhtiöille omakustannushintaan ja rakentamaan uutta sähköntuotantokapasiteettia. Pohjolan voima Oy on TVO:n suurin omistaja, ja muita omistajia ovat EVP Energia Oy, Fortum Power and Heat Oy, Karhu Voima Oy, Kemira Oyj ja Oy Mankala Ab. TVO:lla on kaksi käyvää ydinvoimalaitosta OL1 ja OL2. Lisäksi rakenteilla on kolmas ydinvoimalaitos OL3 ja suunnitteilla OL4. (TVO).

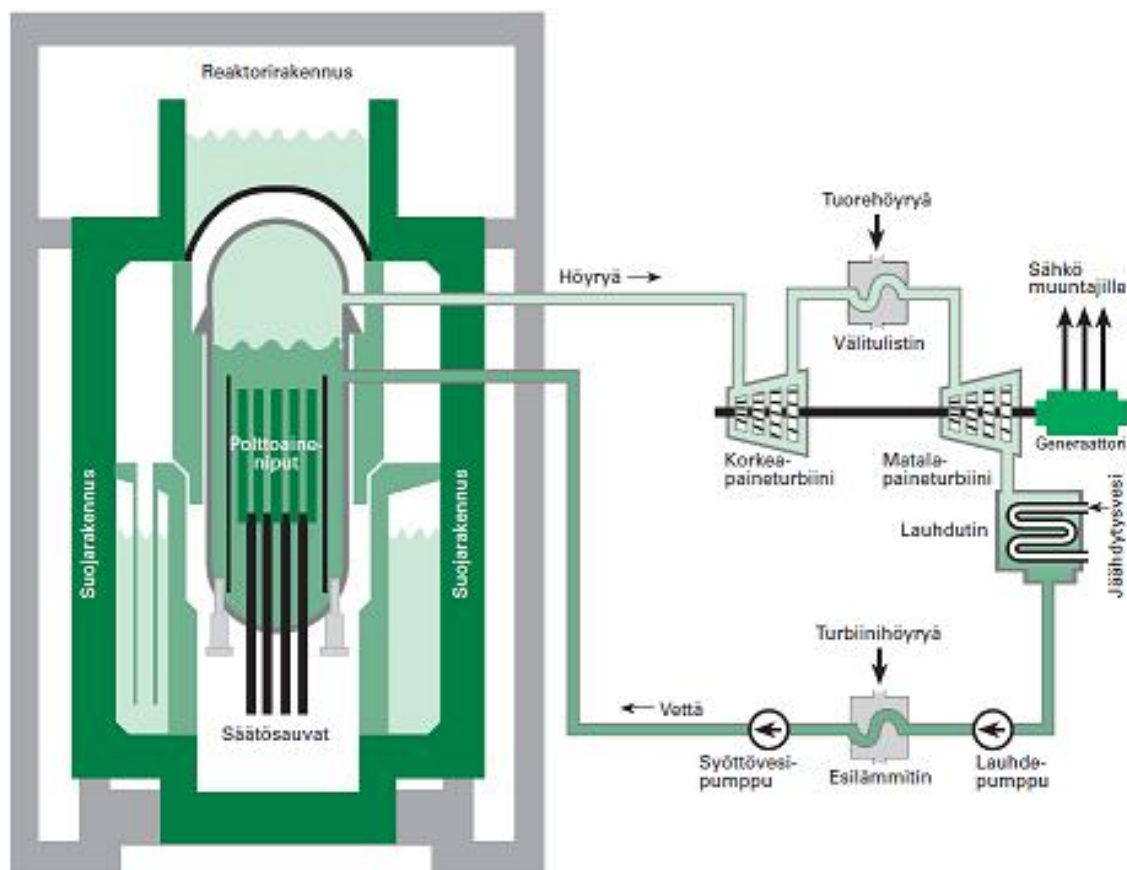
TVO omistaa myös Olkiluodon saarella olevan 1 MW:n tuulivoimalaitoksen ja 45 prosenttia Meri-Porin 565 MW:n hiilivoimalaitoksesta. Kuvassa 1 on Olkiluodon saari Eurajoella. Käyvät laitokset OL1 ja OL2 ovat kuvassa keskellä, rakenteilla oleva OL3 on oikealla. Vasemmanpuoleisin on suunnitteilla oleva OL4 voimalaitos. (TVO.)



KUVA 1. Olkiluodon voimalaitosalue (Kuva: [tvo.fi/voimalaitokset](http://tvo.fi/voimalaitokset))

## 2.2 Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2

Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 ovat samanlaisia AB Asea Atomin (nykyisin Westinghouse Atom AB) toimittamia yksiköitä. Molempien laitosten tämän hetkinen nettosähköteho on 880 MW. OL1 on kytketty valtakunnan sähköverkkoon syyskuussa 1978, ja OL2 helmikuussa 1980. Suurin osa maailmalla olevista laitoksista ovat, kuten Olkiluodonkin laitokset, painevesi- tai kiehutusvesireaktoreita, eli niin kutsuttuja kevytvesireaktoreita. Näissä, puhdistettu, ionivaihdettu ja suolavapaa vesi toimii hidastimena ja jäähdytteenä. 60 % maailman reaktoreista on painevesireaktoreita (PWR) ja noin 20 % kiehutusvesilaitoksia (BWR). Kuvassa 2 on esitelty OL1 ja OL2 laitosten toimintaperiaate. (Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 2007, 4.)



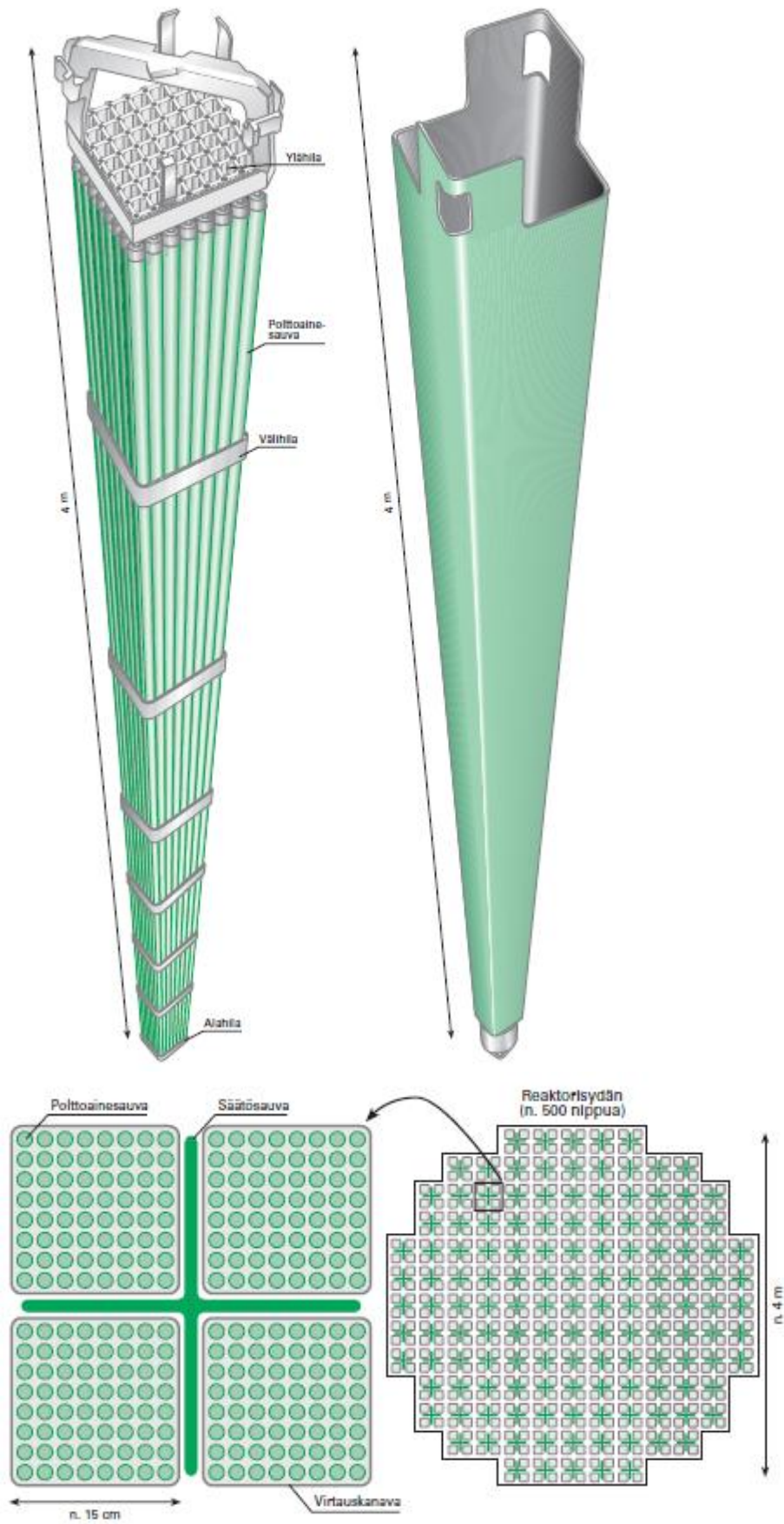
KUVA 2. Olkiluodon ydinvoimalaitoksen periaatekuva (Kuva: Eurasto ym. 2004, 48.)

Kiehutusvesireaktorissa ei ole erillistä höyrystintä tai sekundääripiiriä, vaan syntyvä höyry johdetaan suoraan turbiinille. Reaktorin reaktiivisuutta säädetään säätösauvojen ja pääkiertopumppujen avulla. OL1 ja OL2 laitoksilla säätösauvat tulevat reaktoriin alhaaltapäin. Veden kiehuessa höyry ei toimi yhtä hyvänä hidastimena kuin vesi, joten alhaal-



ta reaktoriin syötettävien säätösauvojen avulla reaktoritehoa pystytään rajoittamaan tehokkaammin ja nopeammin. (Eurasto, Hyvärinen, Järvinen, Sandberg & Sjöblom 2004, 48–51.)

Säätösauvat ovat ristinmuotoisia, ja niiden ulkokuori on ruostumatonta terästä. Sisustassa on absorbaattorina boorikarbidia,  $B_4C$ . Pääkiertopumpuilla tehoa säädetään siten, että pääkiertovirtauksen hidastuessa reaktorin höyrypitoisuus nousee ja neutronien moderoitukyky laskee laskien myös reaktiivisuutta. Tehoa kasvatetaan puolestaan virtausta kasvattamalla. Kuva 3 on polttoainepusta ja reaktorin ytimestä. (Eurasto ym. 2004, 48–51.)



KUVA 3. Polttoainenippu ja virtauskanava sekä reaktorin ydin. (Kuva: Eurasto ym. 2004, 50–51.)

Laitoksen reaktorissa vesi lämpiää 70 barin paineessa 286 °C lämpötilaan. Vettä kierrätetään kuuden pääkiertopumpun avulla. Ennen päähöyryputkiin saapumista höyry kulkee höyrynerottimen ja höyrynkuivaimen läpi. Tuorehöyry saapuu korkeapaineturbiinille 283 °C lämpötilassa ja 67 barin paineella. Tuorehöyryn virtaus on 1260 kg/s. Korkeapaineturbiinin jälkeen höyry johdetaan kahden peräkkäisen kosteudenerottimen läpi välitulistimille. Höyryn välitulistuksessa käytetään hyväksi tuorehöyryä ja korkeapaineturbiinilta otettua väliottohöyryä. (Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 2007, 12, 23-24.)

Välitulistettu höyry johdetaan neljälle matalapaineturbiinille. Turbiinien jälkeen höyry kulkeutuu lauhduttimeen. Lauhduttamiseen käytettävä merivesi virtaa 38 m<sup>3</sup>/s ja sen lämpötila nousee lauhduttimessa 13 °C. Lauhtunut vesi vietään lauhteenpuhdistukseen ja sieltä lauhteen esilämmitykseen. Syöttövesipumput pumppaavat veden syöttöveden esilämmitykseen ja sieltä takaisin reaktoriin. Syöttövesi lämmitetään viidessä esilämmitysvaiheessa 185 °C loppulämpötilaan. Lauhteen ja syöttöveden lämmityksessä käytetään matala- ja korkeapaineturbiineilta otettua väliottohöyryä. Höyry voidaan myös johdattaa suoraan turbiinien ohi lauhduttimelle. Tätä käytetään laitoksen ylös- ja alasajojen yhteydessä, ja jos generaattorin kuorma menetetään. Taulukossa 1 on OL1:n ja OL2:n tekniset tiedot. (Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 2007, 23–26.)

TAULUKKO 1. Tekniset tiedot Olkiluodon käyvistä laitoksista. (Taulukko: tvo.fi/page-515)

|                          |                                   |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Sähköteho, netto         | 880 MW                            |
| Reaktorin lämpöteho      | 2500 MW                           |
| Kokonaishyötysuhde       | runsaat 35 %                      |
| Reaktorin toimintapaine  | 70 bar                            |
| Polttoainien määrä       | 500 kpl                           |
| Polttoaine               | uraanidioksidi<br>UO <sub>2</sub> |
| Polttoaineen kulutus     | noin 20 t vuodessa                |
| Tuorehöyryn lämpötila    | 286 °C                            |
| Vuotuinen sähköntuotanto | noin 7 TWh                        |
| Säätösauvojen määrä      | 121 kpl                           |
| Merivesivirtaus          | 38 m <sup>3</sup> /s              |
| Turbiinin kierrosluku    | 3000 rpm                          |
| Turbiinien lukumäärä     | 1 KP + 4 MP                       |

### 2.3 Olkiluoto 3 ja Olkiluoto 4

OL 3 on rakenteilla oleva ydinvoimalaitos, se on EPR (European Pressurized Water reactor) -tyyppinen painevesilaitos, ja nettoteholtaan se on noin 1600 MW. Laitoksen rakentaminen aloitettiin keväällä 2005, ja sen olisi tarkoitus olla sähköntuotannossa vuonna 2016. AREVA NP GmbH, AREVA NP SAS ja Siemens AG vastaavat OL3 yksikön rakentamisesta "avaimet käteen" -tyyppisellä toimituksella. (TVO OL3.)

OL4 on kilpailu- ja suunnitteluvaiheessa oleva ydinvoimalaitosyksikkö. Laitoksessa tulee olemaan joko kiehutus- tai painevesireaktori. Vaihtoehtoja ovat kiehutusvesireaktoreista ABWR Toshiba 1650 MW laitos ja ESBWR GE Hitachin 1650 MW laitos, ja painevesireaktoreista APWR Mitsubishi 1650MW laitos, APR KHNP 1450 MW laitos ja EPR Areva 1650 MW laitos. OL4:n rakentamislupahakemus tulee jättää viimeistään 1.7.2015. (TVO OL4.)

## 2.4 OL1 ja OL2 laboratorio

Kemian jaoksen päätehtäviin kuuluvat seuraavat asiat: laitosten kontaminoitumisen ja säteilytason minimointi, jännityskorroosion ja muiden korroosioilmiöiden minimointi, aktiivisten jätteiden minimointi ja prosessin laadukas seuranta, joka on myös kunnossapidon ennakkohuoltoa. Kemian jaoksen tehtäviin kuuluu myös kemiallisten arvojen seuraaminen sekä päästöjen ja prosessivesien aktiivisuusmittaukset luotettavasti ja riittävän tiheästi. Kemiallisiin arvoihin sisältyy muun muassa anioneiden, korroosiometallien ja pH:n analysointia. Muita jaoksen tehtäviä ovat esimerkiksi analyysimenetelmien kehittäminen ja laboratorioiden välisiin vertais- ja pätevyyskokeisiin osallistuminen. (Paaso 2012, 5–7.)

Radiokemian laboratorio tekee seuranta-analyysejä esimerkiksi vesistä, poistoilmakaasuista ja erilaisista suodattimista. Gammaskpektrometrillä tehtävissä mittauksissa seurataan esimerkiksi seuraavia nuklideja:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{131}\text{I}$  ja  $^{133}\text{I}$ . Beetasäteilevistä nuklideista seurataan nestetuikelaskurilla kokonaisbeetasäteilyä, tritiumia ja  $^{14}\text{C}$ :sta. Lisäksi alfasäteilevistä nuklideista seurataan esimerkiksi seuraavia:  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  ja  $^{241}\text{Am}$ . Alfasäteileviä näytteitä mitataan alfaspektrometrillä, ja uusi verrannollisuuslaskuri kokonaisalfaa varten odottaa sisäänajoa. (Paaso 2012, 20–22.)

### 3 RADIOAKTIIVISUUS

#### 3.1 Radioaktiivinen hajoaminen

Radioaktiivisessa hajoamisessa epävakaan atomin ydin muuttuu toiseksi ytimeksi spontaanisti, ilman ulkopuolista energiaa. Jos syntynyt uusi ydin on epävakaana, seuraa uusia hajoamisia. Seuraavana on esitetty muutamia tapoja, joilla radioaktiiviset ytimet voivat hajota:  $\alpha$ -hajoaminen,  $\beta^+$ -hajoaminen,  $\beta^-$ -hajoaminen, elektronisieppaus ja spontaani fission. (Riess 2010, 3-6-3-7.) Yleinen kaava radioaktiiviselle hajoamiselle voidaan esittää kaavalla 1.



Kaikissa radioaktiivisessa hajoamisessa erilaiset säilymislaivat ovat voimassa, ja hajoaminen on riippumaton nuklidin kemiallisesta ja fyysisestä tilasta. (Riess 2010, 3-6-3-7.)

##### 3.1.1 $\alpha$ -hajoaminen

Alfahajoamisessa ydin hankkiutuu eroon ylimääräisestä massasta emittoimalla heliumytimen, jota kutsutaan alfapartikkeliksi. Tämän vuoksi massaluku pienenee neljällä yksiköllä ja atomiluku kahdella yksiköllä. Alfahajoamista tavataan yleensä paljon protooneita sisältävissä suuren atomiluvun nuklideissa. Tämä johtuu siitä, että sähköiset poistovoimat kasvavat raskaissa nuklideissa nopeammin kuin koossapitävä vahva vuorovaikutusvoima. Lisäksi emittoituvalla partikkelilla täytyy olla tarpeeksi energiaa ylittääkseen ytimen 25 MeV potentiaalivallin. Alfapartikkelit voivat myös paeta potentiaalivallin yli tunneli-ilmiöllä. Alfahajoaminen tapahtuu kaavan 2 mukaan. (Riess 2010, 3-7.)



### 3.1.2 $\beta^-$ -hajoaminen

$\beta^-$ -hajoamisessa emittoituu elektroneja  $e^-$ , ja ne syntyvät ytimessä yhtä aikaa antineutriinon  $\bar{\nu}$  kanssa neutronin muuttuessa protoniksi. Nuklidin massaluku säilyy vakiona, mutta atomiluku nousee yhdellä yksiköllä.  $\beta^-$ -hajoamisen kaava (3) on esitetty alla. (Riess 2010 s, 3-8–3-9.)



Beetasäteily eroaa alfasäteilystä siinä, että beetasäteilyllä on jatkuva energiaspektri nollan ja tietyn maksimiarvon välillä. Maksimiarvo on kullekin nuklidille ominainen. Beetapartikkelin energijakauman jatkuvuus tiettyyn maksimiin saakka kertoo siitä, että mukana on toinenkin partikkeli, neutriino. Maksimienergia vastaa äiti- ja tytärnuklidin välistä massakatoa energiansäilymislain mukaan. Beetapartikkelin mediaanienergia on noin kolmasosa maksimienergiasta. (Riess 2010 s, 3-8–3-9.)

### 3.1.3 $\beta^+$ -hajoaminen

$\beta^+$ -hajoamisessa ytimen protoni muuttuu positroniksi ja neutriinoksi. Nuklidin massaluku säilyy samana, mutta atomiluku laskee yhdellä. Kuten  $\beta^-$ -säteilyllä, niin myös  $\beta^+$ -säteilyn energijakauma on jatkuva nolasta tiettyyn maksimienergiaan. Mediaanienergia on noin 40 prosenttia maksimienergiasta.  $\beta^+$ -hajoamisen kaava (4) on esitetty alla. (Lehto & Hou 2011, 10.)

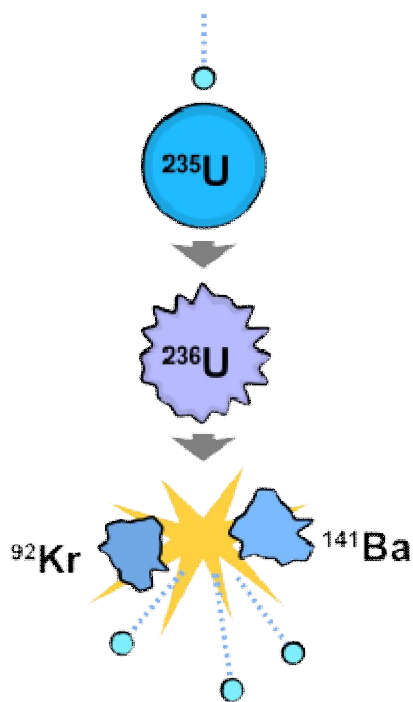


### 3.1.4 Fissio

Vain kaikkein raskaimmat alkuaineet voivat hajota spontaanilla fissiolla. Fissiotuotteet syntyvät fissiossa raskaan ytimen hajotessa kahdeksi kevyemmäksi ytimeksi. Luonnon isotoopeista vain  ${}^{238}\text{U}$  voi hajota spontaanilla fissiolla, ja sitäkin vain 0,005 % hajoo tällä tavalla ja loppu hajoo alfahajoamisella. Raskaimmissa keinotekoisissa alkuaineis-

sa spontaani fissio muuttuu vallitsevammaksi, ja esimerkiksi  $^{260}\text{No}$  voi hajota vain spontaanilla fissiolla. (Lehto & Hou 2011, 6.)

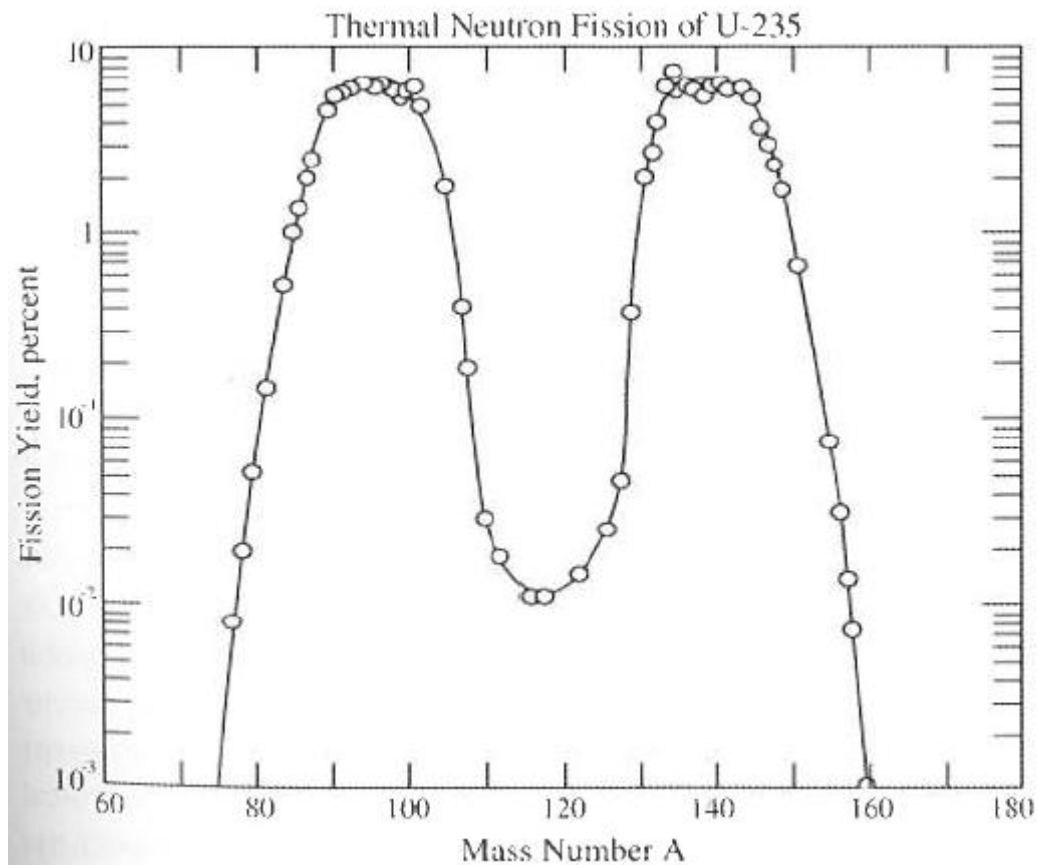
Ei-spontaani fissio on spontaania fissiota tärkeämpi prosessi ottaen huomioon fissiotuotteiden tuotannon ja määrän. Tässä ydin absorboi partikkelin, yleensä neutronin, joka johtaa atomiytimen virittyneeseen tilaan ja lopuksi fissioon.  $^{235}\text{U}$  ja  $^{239}\text{Pu}$  ovat tärkeimmät tällaiset nuklidit. Niille voidaan aikaansaada fissio termisten neutronien avulla, mikä mahdollistaa niiden käytön ydinvoimalaitosten polttoaineena. Kuvassa 4 on esitetty neutronin aikaansaama  $^{235}\text{U}$ :n fissio. (Lehto & Hou 2011, 6-8)



KUVA 4. Esimerkki  $^{235}\text{U}$ :n fissiosta (Kuva: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Fissio>).

Fissioissa syntyy suuri määrä erilaisia fissiotuotteita. Fissio ei ole symmetrinen prosessi, eli yhden fission fissiotuotteilla ei välttämättä ole samat massaluvut. Esimerkiksi  $^{235}\text{U}$ :n fissiossa uraani absorboi ensiksi yhden neutronin ja hajoaa sen jälkeen kahdeksi fissiotuotteeksi, joiden massaluvut ovat noin 90-100 ja 135-145. Näiden kahden lisäksi fissiossa vapautuu keskimäärin 2,5 neutronia. Kuviossa 1 on esitetty  $^{235}\text{U}$ :n fissiotuotteiden massalukujen jakauma. (Lehto & Hou 2011, 7-8.)





KUVIO 1.  $^{235}\text{U}$ :n fissiotuotteiden jakauma. (Kuvio: Lehto & Hou 2011, 7)

### 3.2 Ionisoiva säteily

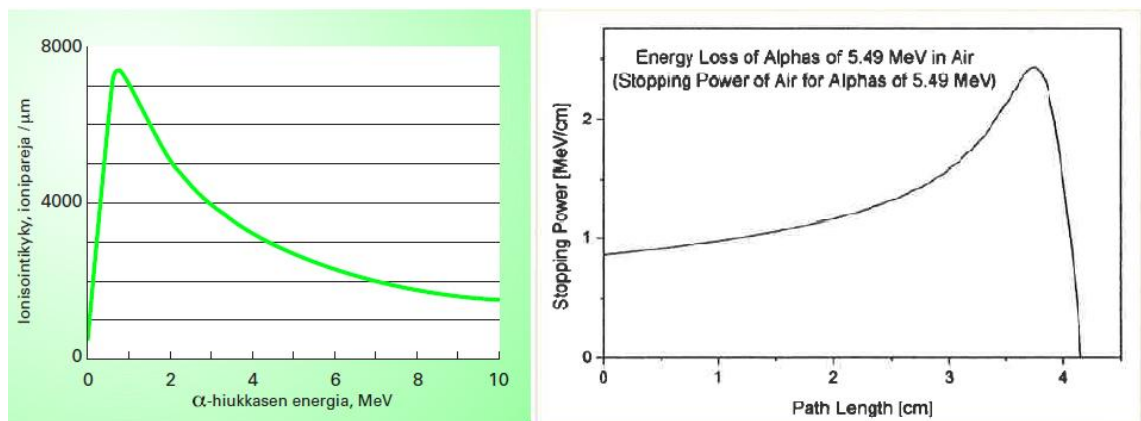
Radioaktiivisuuden liittyvä säteily on ionisoivaa säteilyä. Väliaineessa siirtyvä varattu hiukkanen on vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa, sen energiaa siirtyy jarruuntumisessa väliaineeseen. Tästä vuorovaikutuksesta johtuvat säteilyn haittavaikutukset ja siihen perustuu mahdollisuudet säteilyn havaitsemiseen. (Sandberg & Paltemaa 2002, 36–37.)

Vuorovaikutuksessa elektronin menettäneestä atomista tulee positiivinen ioni, ja sironneen elektronin siirtyessä neutraaliin atomiin muodostuu negatiivinen ioni. Molekyylien dissosioitumisessa syntyy yleensä myös ionipari. Kemiallisesti hyvin reaktiivinen vapaa radikaali syntyy, jos atomille jää pariutumaton valenssielektroni. Vapaa radikaali on merkittävä tekijä säteilyvaurion aiheuttajana elävässä kudoksessa. (Sandberg & Paltemaa 2002, 37.)

### 3.2.1 $\alpha$ -säteily

Alfahiukkanen vastaa massaltaan yli 7000 elektronia. Tästä johtuen se ei muuta törmäyksissä suuntaansa, vaan etenee suoraviivaisesti. Hiukkanen menettää energiaansa epäelastisissa törmäyksissä väliaineen elektronien kanssa. Törmäykset vaikuttavat hiukkaan vasta jarruuntumisen loppuvaiheessa, kun se on menettänyt suurimman osan nopeudestaan eikä ole enää ionisoitunut. (Sandberg & Paltemaa 2002, 39–40.)

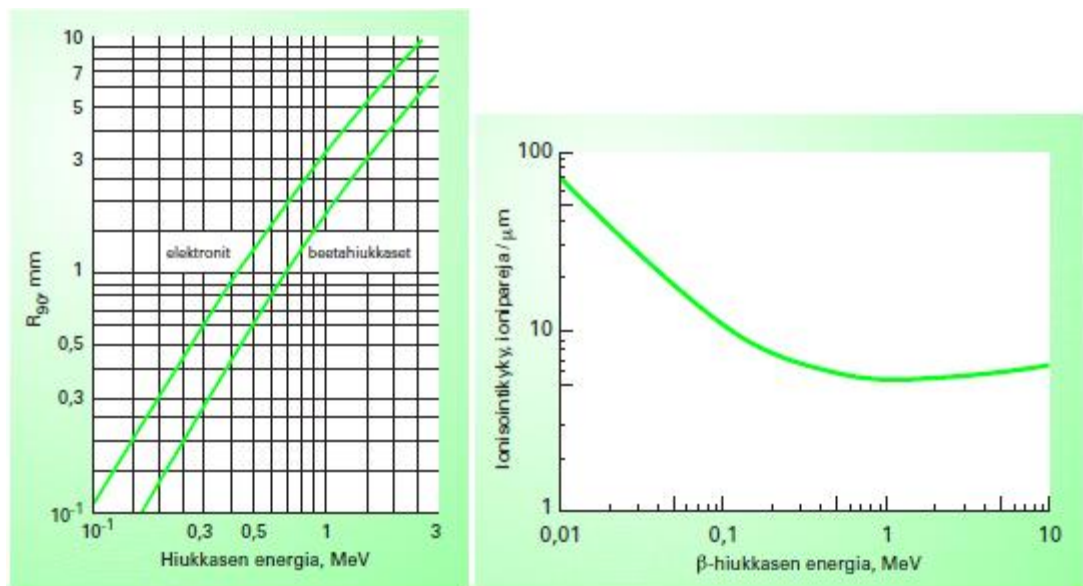
Väliaineen jarrutuskyky on alfahiukkasille suuri, sen massan ja kahdenarvoisen varauksen vuoksi, eli sen kantama on lyhyt. Alfahiukkasella on suuri ionisointikyky, vedessä tuhansia ionipareja mikrometriä kohti. 6 MeV:n alfahiukkasella on 56  $\mu\text{m}$  kantama kudoksessa. Orvaskesi on noin 50  $\mu\text{m}$  paksu, eli suurin osa partikkeleista absorboituu ennen kuin se pääsee elävään kudokseen. (Sandberg & Paltemaa 2002, 39–40.)  $^{241}\text{Am}$ :n 5,5 MeV:n alfahiukkasen läpäisy 0,89  $\text{g}/\text{cm}^3$  paperiin on 53  $\mu\text{m}$  ja veteen 45  $\mu\text{m}$  (Riess 2010, 5-4). Kuviossa 2 on 5,49 MeV:n alfahiukkasen Braggin käyrä, joka kuvaa hiukkasen jarruuntumista ja hiukkasen ionisointikykyä energian funktiona vedessä tai kudoksessa.



KUVIO 2. Hiukkasen ionisointikyky (Sandberg & Paltemaa 2002, 40) ja hiukkasen jarruuntuminen ilmassa (Riess 2010, 5-4).

### 3.2.2 $\beta$ -säteily

Beetasäteily koostuu nopeista elektroneista tai positroneista. Hiukkaset siroavat epäelastisesti aineen ytimistä ja elektroneista, ja menettävät näin pääosin energiansa. Beetahiukkasen massa on paljon pienempi tai yhtä suuri sirottavan hiukkasen kanssa, joten se kulkee eri tavalla kuin alfahiukkanen. Beetahiukkasen rata voi olla voimakkaasti mutkitteleva. Hiukkanen voi myös menettää kaiken energiansa yksittäisessä törmäyksessä. Beetahiukkasen ionisointikyky on huomattavasti pienempi kuin alfahiukkasen johtuen sen pienemmästä massasta ja varauksesta. Kuvassa 7 on esitetty beetahiukkasen ionisointikyky ja kantama, jolla 90 % säteilyenergiasta absorboituu. (Sandberg & Paltemaa 2002, 40–41.)

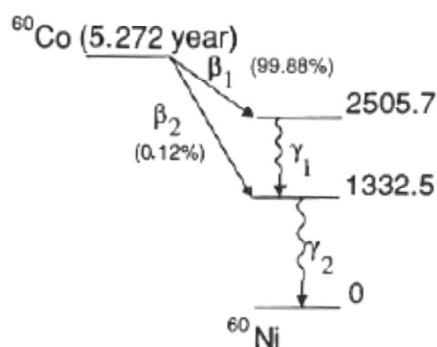


KUVIO 3. Beetasäteilylähteen vaimeneminen vedessä ja hiukkasen ionisointikyky. (Kuvio: Sandberg & Paltemaa 2002, 43, 41)

$\beta^+$ -hajoamisessa syntynyt positroni annihiloituu yhdistymällä hidastumisen loppuvaiheessa elektroniin. Molemmat hiukkaset häviävät ja syntyy kaksi vastakkaisiin suuntiin lähtevää fonia, joiden energia 511 keV vastaa beetahiukkasen lepoenergiaa. (Sandberg & Paltemaa 2002, 42–43.)

### 3.2.3 $\gamma$ -säteily

Gammaemissio ei ole hajoamismuoto, kuten  $\alpha$ - ja  $\beta$ -hajoaminen ovat, sillä atomi-, massa-, tai neutroniluvussa ei tapahdu mitään muutoksia.  $\gamma$ -emissio on virittyneen ytimen ylimääräisen energian purkautumista, jota nähdään yleensä alfa- ja beetahajoamisten sivutuotteina. Gammasäteily on sähkömagneettista säteilyä, kuten ovat esimerkiksi näkyvä valo ja radioaallotkin. Gammasäteily sijaitsee laajan sähkömagneettisen spektrin päässä, jossa säteilyn energia on korkea ja aallonpituus lyhyt. Kuviossa 4 on  $^{60}\text{Co}$  hajoamiskaavio.  $^{60}\text{Co}$  hajoaa  $\beta$ -hajoamisella, mutta jää aina virittyneeseen tilaan, joka purkautuu gammasäteilynä. Hajoaminen tapahtuu 99,88 %:sti 2505,7 keV:n ja 0,12 %:sti 1332,5 keV:n viritystilan kautta. Suurempi viritystila purkautuu aina alemman viritystilan kautta nollassolle, jolloin gammapiikeille saadaan seuraavat energiat 2505,7-1332,5=1173,2 keV ja 1332,5-0=1332,5 keV. (Gilmore & Hemingway 1995, 9.)



KUVIO 4.  $^{60}\text{Co}$  hajoamiskaavio (Kuva: Gilmore & Hemingway 2001)

Gammasäteily ei ole suoraan ionisoivaa säteilyä, kuten alfa- ja beetasäteily, vaan se ionisoi välillisesti. Säteily voi olla vuorovaikutuksessa sähkömagneettisen kentän kanssa, joka ympäröi ydintä tai elektroneja, tai ydinvoimien aiheuttaman kentän kanssa. Vuorovaikutus voi olla muodoltaan epäelastista tai elastista sirontaa tai absorptiota. (Sandberg & Paltmaa 2002, 44)

Varauksen ja lepomassan puute johtaa  $\gamma$ -säteillä pieneen vuorovaikutukseen absorboivien atomien kanssa sekä pitkään kantamaan.  $\gamma$ -säteiden ioniparien muodostuskyky tietyllä matkalla on vain 1-10 % samanenergisten  $\beta$ -partikkeleiden ioniparien muodostuskyvystä. (Choppin, Liljenzin & Rydberg 2001, 141)

### 3.3 Opinnäytetyöhön liittyvät säteilyn mittauslaitteet

#### 3.3.1 Alfaspektrometri

Alfaspektrometri sisältää puolijohdedetektorin, jota käytetään yleensä alfaemittovien radionuklidien mittaamiseen. Mittaus tapahtuu yleensä vakuuissa hyvän tarkkuuden saamiseksi ja absorptio estämiseksi. Lopputyön yhteydessä käytetty paine oli alle 100 mTorr. Puolijohdedetektoreita käytetään mittaamaan energioita 20 keV:n ja 10 MeV:n välillä. Detektorin resoluutio on 20 keV. Säteilyn ilmaisu perustuu p- ja n-tyyppin puolijohteista tehtyyn p-n-liitokseen, josta signaali saadaan kerätyistä elektroni-aukko-areista. Kaikki elektroaostetut plansetit mitattiin Ortecin Octete plus alfaspektrometrillä. Kuva 5 on laboratorion alfaspektrometrinä. (Riess 2010, 5-14–5-15)



KUVA 5. Alfaspektrometri ja sen mittaus-Pc. (Kuva: Petri Hovi 2013)

#### 3.3.2 Nestetuikelaskuri

Nestetuikelaskuria käytetään yleensä  $\beta$ -säteilyn mittaamiseen, mutta sillä voidaan mitata myös  $\alpha$ -säteilyä. Laitteen säteilyn havaitseminen perustuu säteilyenergian absorboitumiseen. Absorboitunut säteily virittää nestetuikeaineessa atomin energiatilalle, jonka purkautuminen näkyy ultraviolettifotoneina tai näkyvänä valona. Fotonit ohjataan valomonistinputkelle, jonka valoherkkä fotokatodi emittoi elektroneja valon osuessa siihen. Anodille saapuva elektronipulssi on verrannollinen fotonin energiaan. (Klemola 2002, 123–125). Nestetuikelaskennan huonona puolena alfasäteilyn mittauksessa on sen huo-

no resoluutio. Parhaimmissakin tapauksissa erotuskyky on noin 200 keV, jolloin nukliideja ei voida erottaa toisistaan. Nestetuikelaskuri sopiikin kokonaisalfasäteilyn laskentaan, jossa suurta resoluutiota ei tarvita. (Lehto & Hou 2011 s, 18–19.) Kuvassa 6 on laboratorion nestetuikelaskuri Wallac Guardian 1414 Liquid Scintillation Counter.



KUVA 6. Nestetuikelaskuri. (Kuva: Petri Hovi 2013)

## 4 Alfamenetelmä poistoilmasuodattimille

### 4.1 Perusteita menetelmälle

Säteilyturvakeskus antaa YVL-ohjeita koskien muun muassa ydinvoimalaitosten turvallisuutta ja ydinenergian käytön turva- ja valmiusjärjestelyitä. Annettuja sääntöjä tulee noudattaa, jos STUKille ei ole esitetty muuta hyväksyttävää menettelytapaa tai ratkaisua. (YVL-ohjeisto). Ohje YVL 7.6 ydinvoimalaitoksen radioaktiivisten aineiden päästöjen mittaus, 22.3.2006 antaa ohjeita mittausmenettelyistä ja esimerkkejä päästöissä olevista radionuklideista. Taulukko 2 on ydinvoimalaitoksen kaasumaisten ja hiukkasmaisten päästöjen mittauksista. (YVL-ohje 7.6)

TAULUKKO 2. Yhteenveto ydinvoimalaitoksen kaasu- ja hiukkaspäästöjen saavutettavissa olevista havaitsemisrajoista. (STUK YVL-ohje 7.6 taulukko 1)

| Päästölaji                       | Mittausmenettely                            | Kahdennus | Radionuklidi                          | Havaitsemisraja päästövirtauksessa            |
|----------------------------------|---|-----------|---------------------------------------|---|
| jalokaasut                       | jatkuva mittaus                             | kyllä     | $^{133}\text{Xe}$                     | 10 kBq/m <sup>3</sup> mittausaikana < 10 min  |
|                                  | laboratoriomääritys vähintään viikoittain   | kyllä     | $^{85}\text{Kr}$                      | 10 kBq/m <sup>3</sup>                         |
|                                  |   |           | $^{87}\text{Kr}$                      | 1 kBq/m <sup>3</sup>                          |
|                                  |   |           | $^{133}\text{Xe}$                     | 1 kBq/m <sup>3</sup>                          |
| jodit                            | jatkuva mittaus                             |           | $^{131}\text{I}$                      | 2 Bq/m <sup>3</sup> mittausaikana < 1 h       |
|                                  | laboratoriomääritys vähintään viikoittain   | kyllä     | $^{131}\text{I}$                      | 4 mBq/m <sup>3</sup>                          |
| aerosolit                        | jatkuva mittaus                             |           | kaikki                                | 4 Bq/m <sup>3</sup> mittausaikana < 1 h       |
|                                  | laboratoriomääritys vähintään viikoittain   | kyllä     | $^{60}\text{Co}$<br>$^{137}\text{Cs}$ | 1 mBq/m <sup>3</sup><br>1 mBq/m <sup>3</sup>  |
| alfa-aktiivisuus                 | laboratoriomääritys vähintään kuukausittain | kyllä     | kaikki                                | kokonaisaktiivisuus 1 mBq/m <sup>3</sup>      |
|                                  |   |           | $^{241}\text{Am}$                     | 0,1 mBq/m <sup>3</sup>                        |
| yksittäiset merkittävät nuklidit | laboratoriomääritys neljännesvuosittain     | kyllä     | $^{89}\text{Sr}$ ja $^{90}\text{Sr}$  | yhdistetty aktiivisuus 0,1 mBq/m <sup>3</sup> |
|                                  | laboratoriomääritys vähintään kuukausittain |           | $^3\text{H}$                          | 0,1 kBq/m <sup>3</sup>                        |
|                                  | laboratoriomääritys vähintään kuukausittain |           | $^{14}\text{C}$                       | 10 Bq/m <sup>3</sup>                          |

Taulukon 2 mukaan poistokaasupiipussa olevasta suodattimesta pitäisi pystyä mittaamaan alfa-aktiivisuus seuraavasti: kokonaisaktiivisuus  $1\text{mBq/m}^3$  ja  $^{241}\text{Am}$   $0,1\text{mBq/m}^3$ . OL1 ja OL2 reaktorirakennuksessa oleva lasikuitusuodatin, josta alfa mitataan, vaihdetaan tiheimmillään kahden vuorokauden välein. Virtaus näytteenottolinjassa on  $33\text{ l/min}$ . Tästä voidaan laskea (5), että suodattimesta pitäisi kyetä havaitsemaan kokonais-alfa-aktiivisuus noin  $0,1\text{ Bq}$  ja  $^{241}\text{Am}$ :a  $0,01\text{ Bq}$ .

$$60 \frac{\text{min}}{\text{h}} * 48\text{h} * 0,033 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} * 0,001 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} = 0,095\text{ Bq} \quad (5)$$

Kuvassa 7 on suodatin, jossa valkoiseen paperiosaan kerääntyvät aerosolit, ja josta alfa mitataan. Alempi oranssi osa on täynnä aktiivihiihtä, josta mitataan jodit. Ilman kulkusuunta suodattimessa on kuvassa ylhäältä alas.



KUVA 7. Suodatin johon esimerkiksi alfat kerätään. (Kuva: Petri Hovi 2013)

Tavoitteena oli kehittää menetelmä, jolla voidaan lasikuitusuodattimesta erottaa luotettavasti aktiivista ainetta, ja mitata se vähintään kohtalaisella saannolla. Mitattavaksi aktiivisuustasoksi, joka täytyi saada mitattua, asetettiin  $0,1\text{ Bq}$ , ja mielellään vähemmän. Aktiivisuuksien erottamista suodattimesta testattiin märkäpolttamalla, liuottamalla tai liottamalla hapossa. Taulukossa 3 on esitetty yhteenvetona, mitä menetelmää on käytetty missäkin näytteessä.



TAULUKKO 3. Taulukko käytetyistä aktiivisuuksista, menetelmistä ja näytteistä.

| Aktiivisuus | Menetelmä  | Näytteet            |
|-------------|--|---------------------|
| 1 Bq        | HF+HNO <sub>3</sub>                              | 0–2                 |
| 1 Bq        | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +HNO <sub>3</sub> | 7–12 ja 15–16       |
| 1 Bq        | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +HNO <sub>3</sub>  | 3–6, 13–14 ja 17–22 |
| 0,5 Bq      | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +HNO <sub>3</sub>  | 23–30               |
| 0,1 Bq      | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +HNO <sub>3</sub>  | 31–38               |
| 0,05 Bq     | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +HNO <sub>3</sub>  | 39–46               |
| 0,01 Bq     | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +HNO <sub>3</sub>  | 47–60               |
| 0,005 Bq    | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +HNO <sub>3</sub>  | 61–62               |
| Tausta      | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +HNO <sub>4</sub>  | 63–64               |

Erotettu aktiivisuus elektrostaostettiin metalliselle plansetille, ja mitattiin alfaspektrometrillä. Elektrostaostukseen käytettiin jo olemassa olevaa ohjetta. Elektrostaostuksen jälkeen plansetit asetettiin lämpökaappiin kuivamaan, ja sen jälkeen eksikaattoriin. Kuivatuksen jälkeen plansetteja mitattiin 1000 minuuttia Ortec:n alfaspektrometrillä, ja saadut tulokset kirjattiin taulukkoon. Kuvassa 8 on poistoilmapiipun näytteenottolinja. Kuvaan on merkitty nuolella missä kuvan 10 suodatin sijaitsee.



KUVA 8. Reaktorirakennuksen poistoilmapiipun näytteenottolinja, nuolella merkitty suodattimen paikka. (Kuva: Petri Hovi 2013)

#### 4.1.1 Näytteet 0–2

Ensimmäisenä testattiin Ortec:n sivuilla ollutta ohjetta Sample Preparation for Low-Level Alpha Spectrometry: Air Filters, Water and Soils. Menetelmässä suodatin liuotettiin fluorivetyhappoon ja typpihappoon. Liuotusta jatkettiin useista tunneista päiviin. Lasikuitusuodattimen pitäisi olla liukoinen fluorivetyhapon ja typpihapon yhdistelmään. Liuotuksen jälkeen liuos haihdutettiin kuiviin. Haihdutuksen jälkeen dekanterilasi huuhdeltiin typpihapolla ja liuos haihdutettiin. Tämä toistettiin muutama kertaan, jonka jälkeen näyte oli valmis elektrosaostusta varten.

Ohjeessa ei mainittu kuinka väkeviä happoja tai minkälaisia määriä tulisi käyttää, joten liuotusta lähdettiin testaamaan lisäämällä lasiseen dekanteriin 15 ml 40 % HF ja 15 ml 65 % HNO<sub>3</sub>. Suodatin liukeni silmämääräisesti heti liuokseen. Liuotusta jatkettiin muu-

tama tunti. Ongelmia kuitenkin ilmeni, kun liuosta alettiin haihduttaa kuiviin, sillä lähes kuiviin haihdutettuna lasin pohjalle ilmestyi sakkaa. Seuraavaksi liuotusta kokeiltiin hieman pidemmällä ajalla, ja suodattimen annettiin olla liuoksessa noin puolesta päivästä seuraavaan aamuun. Tämäkään ei auttanut, vaan sakkaa ilmaantui edelleen. Seuraavaksi yritettiin suodattaa kertaalleen kuiviin haihdutettu liuos, johon oli lisätty typpi-happoa. Sakka näytti liukenevan happoon.

Suodatuksessa käytettiin imusuodatuslaitteistoa ja 0,45 µm partikkelikoon suodatinta. Suodatuksen jälkeen suodattimessa näkyi sakkaa, mutta silti kuiviin haihdutettaessa lasin pohjalle jäi sakkaa. Suodatus tehtiin kuvan 9 mukaisella laitteella ja tarvittava alipaine saatiin aikaan vesisuihkupumpun avulla.



KUVA 9. Imusuodatuslaitteisto. (Kuva: Petri Hovi 2013)

Vaikka sakasta ei päästy kokonaan eroon, päätettiin silti testata saostusta, sillä sakka näytti aina liukenevan kun siihen lisättiin nestettä. Suodattimeen 0 lisättiin noin 1 Bq  $^{241}\text{Am}$  -merkkiainetta, ja suodatin liuotettiin happoihin. Haihdutuksen jälkeen lisättiin  $\text{HNO}_3$ :sta, joka haihdutettiin uudelleen. Sakka liuotettiin 10 % typpihappoon ja suodattettiin 0,45 µm suodattimella. Haihdutettaessa jäi sakkaa, mutta päätettiin silti testata,

millainen tulos saostuksesta tulisi. Saostus suoritettiin elektroaostuksen ohjeella. Ennen elektroaostuksen reagensseja lisättiin vielä  $^{244}\text{Cm}$  -merkkiaine, jotta nähtäisiin, miten hyvällä saannolla aktiivisuudet saostuvat plansetille.  $^{241}\text{Am}$ - ja  $^{244}\text{Cm}$  -saantojen avulla pystytään arvioimaan, miten hyvin aktiivisuudet saadaan suodattimesta pois.

Saostuksen jälkeen plansetin pinnalle oli muodostunut niin paksu kerros sakkaa, että näytteestä ei saatu mitattua aktiivisuutta. Uudet näytteet 1 ja 2, tehtiin samalla tavalla kuin ensimmäinen näyte, mutta liuokset suodatettiin lisäksi  $0,1\ \mu\text{m}$  suodattimen läpi. Haihdutettaessa muodostui edelleen sakkaa, mutta hieman vähemmän kuin aiemmin. Näyte 1 päätettiin saostaa, mutta kunnollista tulosta ei saatu sakan takia. Kuvassa 10 on elektroaostetut plansetit. Menetelmään ei perehdytty enempää, koska STUK:ssa tehdyissä mittauksissa, missä suodatin oli kokonaan hajotettu happoon, olivat taustan pulssit nousseet  $0,16\ \text{Bq}$ :iin näytettä kohden. Tämä johtui siitä, että käytettävä suodatinpaperi sisältää hieman uraania.

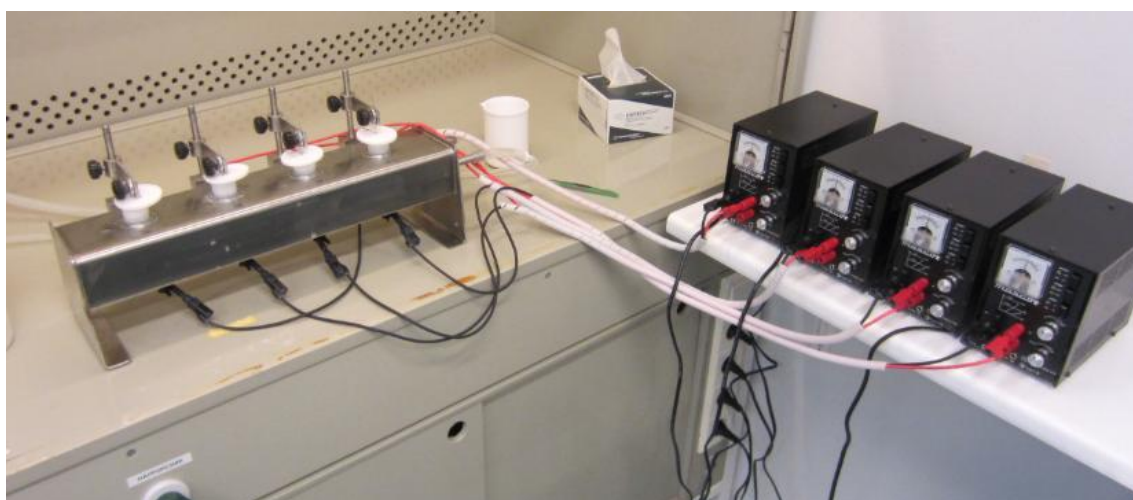


KUVA 10. Typpihappoon ja fluorivetyhappoon hajotettujen suodattimien plansetit. (Kuva: Petri Hovi 2013)

#### 4.1.2 Näytteet 3–22

Taustan nousemisen vuoksi paperia ei kannata liuottaa happoon, ja oli etsittävä uutta menetelmää, jossa suodatin ei liukenisi happoihin. Radiokemisti Hannele Hirvonen kertoi, että STUKista oli tullut ilmoitus taustan pulssien noususta, jos paperi hajotetaan fluorivetyhappoon. Samassa STUKista tulleessa viestissä kerrottiin, että keittämällä suodatinta typpihapon ja vetyperoksidin liuoksessa taustasta ei tulisi ongelmaa. Päätettiin testata seuraavaksi kyseistä liotusmenetelmää. Viestissä ei mainittu happojen väkevyyttä tai määrää eikä jatkotoimenpiteitä. Näytteet 3-6 tehtiin kahden erissä siten, että lasikuitusuodatin laitettiin lasidekantteriin, jonne lisättiin punnitsemalla  $^{241}\text{Am}$ -merkkiliuos. Tämän jälkeen dekantteriin lisättiin 15 ml 65 %  $\text{HNO}_3$  ja 15 ml 30 %  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

Liuokset haihdutettiin lähes kuiviin, ja suodatimet siirrettiin imusuodattukseen. Näytteet ja dekantterilasit huuhdeltiin ionivaihdetulla vedellä, paitsi näyte 6, jolle kaikki huuhtelet tehtiin 10 % typpihapolla. Kaikissa näytteissä käytettiin 0,45  $\mu\text{m}$  suodatinta. Suodatuksen jälkeen lisättiin  $^{244}\text{Cm}$ -merkkiaine, lukuun ottamatta näytteitä 5 ja 6. Vesi tai typpihappoliuos haihdutettiin kuiviin, jonka jälkeen jatkettiin elektroaostukseen tarvittavilla reagensseilla. Näytteestä 6 tuli parempi saanto kuin edellisistä näytteistä, joten näytteitä huuhdeltiin jatkossa aina 10 % typpihapolla. Kuvassa 11 on elektroaostukseen käytetty laitteisto.



KUVA 11. Elektroaostuslaitteisto. (Kuva: Petri Hovi 2013)

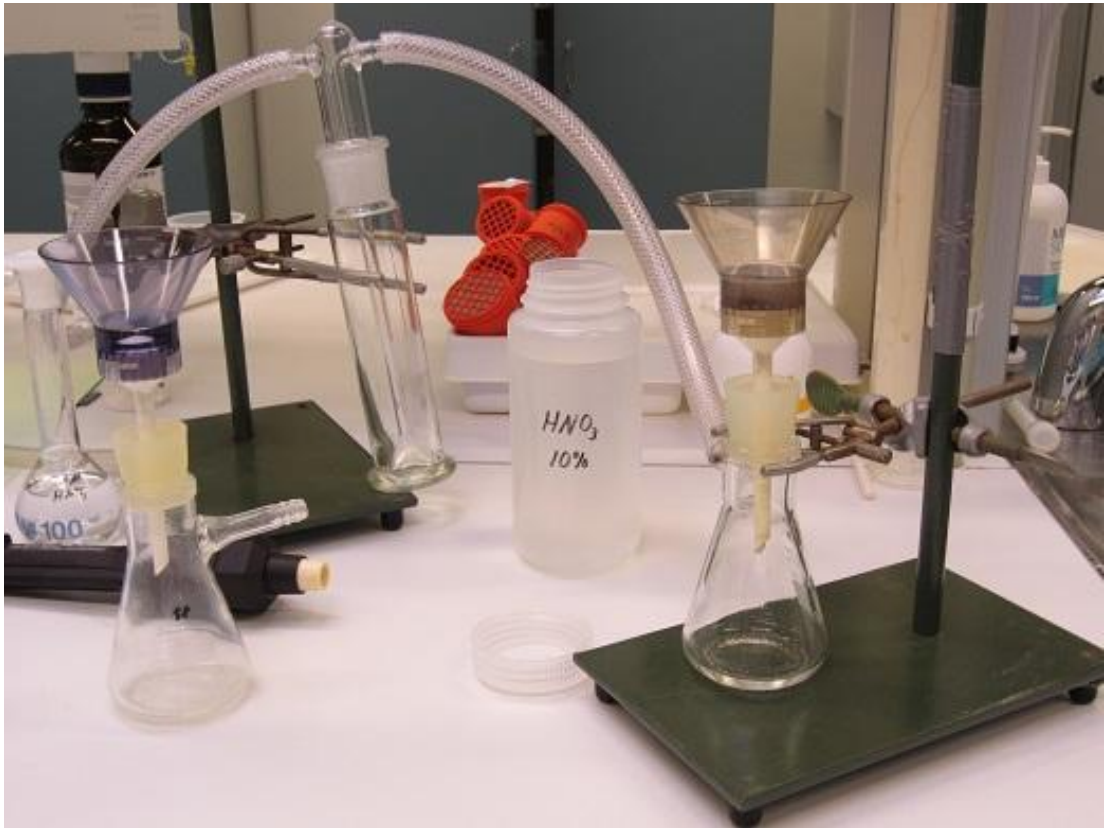
Näytteet 7, 8, 11, 12, 15 ja 16 tehtiin kahden erissä, ja niissä testattiin soveltuvien osien käytöstä poistettua ceriumsaostuksen ohjetta. Suodattimiin punnittiin aktiivisuudet ja ne siirrettiin märkäpolttolaitteen putkiin. Putkiin kaadettiin 10 ml 95-97 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ :ää, ja näytteitä haudutettiin tunti 250 °C lämpötilassa. Kun putket olivat hieman jäähtyneet, lisättiin niihin 10 ml 65 %  $\text{HNO}_3$  ja annettiin hautua puoli tuntia 180 °C lämpötilassa.

Tämän jälkeen liuos kaadettiin dekantterilasiin, ja putki ja suodatin huuhdeltiin 3 ml:lla 1 M HCl. Liuos ja näyte haihdutettiin lähes kuiviin. Näytteet 7, 8 ja 11 suodatettiin 0,45  $\mu\text{m}$  suodattimella, ja muut 0,1  $\mu\text{m}$  suodattimella. Suodatuksen jälkeen näytteisiin lisättiin  $^{244}\text{Cm}$ -merkkiaine (näyte 8 kaatui, joten sitä ei saatu saostukseen ja mittaukseen), jonka jälkeen näytteet elektroasaostettiin ja mitattiin. Näytteestä 7 saatiin tulos hyvällä saannolla, mutta muista neljästä saannot olivat huonoja. Koska toistettavuus oli jostain syystä huono, menetelmä päätettiin hylätä ja siirtyä tekemään liotuksia vain typpihapon ja vetyperoksidin kanssa.

Näytteet 9, 10, 13, 14 ja 17–22 tehtiin kaikki samalla tavalla aktiivisuuksien ja happojen lisäämiseen sekä haihduttamiseen saakka. Kaikkiin myös lisättiin  $^{244}\text{Cm}$ -merkkiaine ennen elektroasaostuksen ohjeen mukaista toiminnan aloitusta, paitsi näytteisiin 9 ja 10. Näytteet 9 ja 10 huuhdeltiin 10 % typpihapolla ja poistettiin, jonka jälkeen liuos kaadettiin sentrifugin putkiin. Liuoksia pidettiin puoli tuntia 3000 rpm sentrifugissa. Otettaessa sentrifugista putken pohjalla olevat haituvat lähtivät heti liikkeelle, joten liuokset suodatettiin seuraavasti, 9 0,45  $\mu\text{m}$  suodattimella ja 10 0,1  $\mu\text{m}$  suodattimella. Näytteestä 10 tuli 9 prosenttiyksikköä parempi saanto kuin näytteestä 9, joten jatkossa siirryttiin käyttämään 0,1  $\mu\text{m}$  suodattimia.

Näytteet 13, 14, 17 ja 18 tehtiin kuten näyte 10 sillä poikkeuksella, että imusuodatuksessa käytettävä vesisuihkupumppu vaihdettiin papereissa 17 ja 18 ilmenneiden käyttöongelmien vuoksi linjastoon, jossa oli käytössä tyhjiökompressori, ja johon imusuodatuslaitteisto vaihdettiin. Vesisuihkupumppua käytettäessä imusuodatuspullon pohjalle pääsi vettä imulinjaa pitkin. Saostuksessa plansettien päälle muodostui hyvin hienojakoinen sakka. Imulinjaston venttiili oli täysin auki, joten imu saattoi olla liian voimakas. Tällaista sakkaa ei ollut muodostunut aiemmin. Näytteet 19–22 valmistettiin samalla tavoin kuin aikaisemmat, mutta ne laitettiin sentrifugiin haihdutuksen jälkeen. Näytteet 19 ja 20 imusuodatettiin sentrifugoinnin jälkeen, mutta imusuodatuksessa ei käytetty yhtä voimakasta imua kuin näytteissä 17 ja 18. Kun imulinjaston venttiiliä avattiin vain

hieman, päästiin suurelta osin eroon plansetteihin muodostuvasta sakasta. Sentrifugoituista liuksista 21 ja 22 otettiin liuosta varovasti pipetillä, siten että haituvat eivät lähtisi liikkeelle. Kuvassa 12 on toinen imusuodatuslaitteisto, jonka käytössä ei ollut ongelmia.



KUVA 12. Toinen imusuodatuslaitteisto. (Kuva: Petri Hovi 2013)

#### 4.1.3 Näytteet 23–54

Kaikki näytteet tehtiin samalla tavalla suodatukseen asti, mutta tällä kerralla lisättiin kolme eri merkkiainetta:  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$  ja  $^{241}\text{Am}$ . Aktiivisuuslisäyksen jälkeen lisättiin hapot, ja näytteet haihdutettiin kuiviin. Eroavaisuudet näytteissä tulevat aktiivisuuksien määristä ja suodatustavasta. Näytteisiin 23–30 laitettiin 0,5 Bq kutakin aktiivisuutta ja paperit huuhdeltiin ja poistettiin ennen sentrifugointia. Liuos kaadettiin sentrifugiin. Sentrifugoinnin jälkeen liukset suodatettiin 0,1  $\mu\text{m}$  suodattimen läpi, ja suodatettuun liuokseen lisättiin  $^{244}\text{Cm}$  -merkkiaine. Liuos haihdutettiin ja käsiteltiin elektroosauksen ohjeen mukaan.

Näytteisiin 31–38 lisättiin merkkiaineita 0,1 Bq. Näytteet valmisteltiin muuten samalla tavalla, mutta sentrifugia ei käytetty, vaan näytteet imusuodatettiin suoraan haihdutuksen jälkeen. Näytteestä 35 eteenpäin lasiset dekantterilasit vaihdettiin PTFE:stä tehtyihin dekanttereihin. Vaihto tehtiin, koska aktiivisen aineksen tarttuminen PTFE:hen pitäisi olla vähäisempää kuin lasiin, ja saannon pitäisi ainakin teoriassa parantua. Saanto vaihtelee aina hieman, joten on vaikea sanoa tapahtuiko muutosta parempaan, mutta ainakaan se ei näyttänyt huonontuvan. Kuvassa 13 on happojen haihdutusta PTFE-dekanttereissa.



KUVA 13. Näytteet haihdutuksessa PTFE-dekanttereissa. (Kuva: Petri Hovi 2013)

Näytteisiin 39–46 lisättiin 0,05 Bq kutakin merkkiainetta, ja ne valmistettiin samalla tavalla kuin 35–38. Näytteistä 39–42 unohtui  $^{244}\text{Cm}$  -merkkiaine. Näytteet 47–54 valmistettiin myös samalla tavalla, mutta jokaisen merkkiaineen aktiivisuutta vähennettiin 0,01 Bq:iin.

#### 4.1.4 Näytteet 55–64

Seuraavat näytteet tehtiin vuosihuoltorakennuksen ja VLJ-luolan prosessissa olleista poistoilmasuodattimista. Näytteet 55, 56, 59 ja 60 tehtiin vuosihuoltorakennuksessa

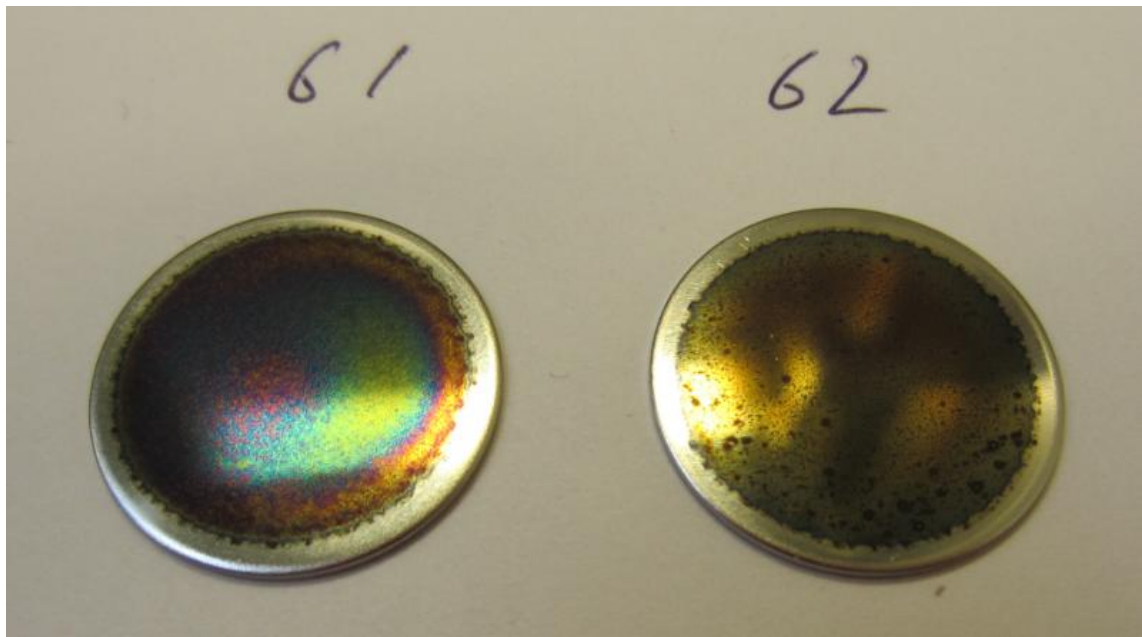


olleista suodattimista, joiden keräysaika on neljä viikkoa. Näytteet 57 ja 58 tehtiin VLJ-luolassa olleesta paperista, jonka keräysaika oli kolme kuukautta. Suodattimet halkaisi-  
tiin puoliksi, ja yhdestä puolikkaasta tehtiin yksi näyte, johon lisättiin aktiivisuudet.  
Näytteiden 55 ja 56 suodatintähteet haettiin 28.3.2013, 57 ja 58 5.3.2013 ja 59 ja 60 22.2.2013.  
Näihin näytteisiin laitettiin kaikkiin 0,01 Bq kutakin aktiivisuutta ( $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$  ja  $^{241}\text{Am}$ ).  
Kuvassa 14 on lasikuitusuodattimet, joista vasemmalla olevasta suodattimesta tehtiin  
näytteet 59 ja 60, ja oikealla olevasta näytteet 57 ja 58.



KUVA 14. Lasikuitusuodatin vuosihuoltorakennuksesta ja VLJ-luolasta. (Kuva: Petri Hovi 2013)

Näytteillä 61 ja 62 pyrittiin testaamaan, pääseekö menetelmällä  $^{241}\text{Am}$ :n suhteen alle YVL-ohjeen suositusten. Näytteisiin lisättiin 0,005 Bq  $^{241}\text{Am}$ -,  $^{242}\text{Pu}$ -,  $^{233}\text{U}$ - ja  $^{244}\text{Cm}$ -  
merkkiaineita. Näytteet 63 ja 64 tehtiin suodattimesta, joissa ei ole lainkaan aktiivisuut-  
ta. Näistä suodattimista nähdään millainen tausta tyhjästä suodattimesta tulee. Myös  
nämä näytteet tehtiin samalla tavalla kuin muut viimeisimmät näytteet. Kuvassa 15 on  
0,005 Bq aktiivisuuksilla testatut plansetit 61 ja 62.



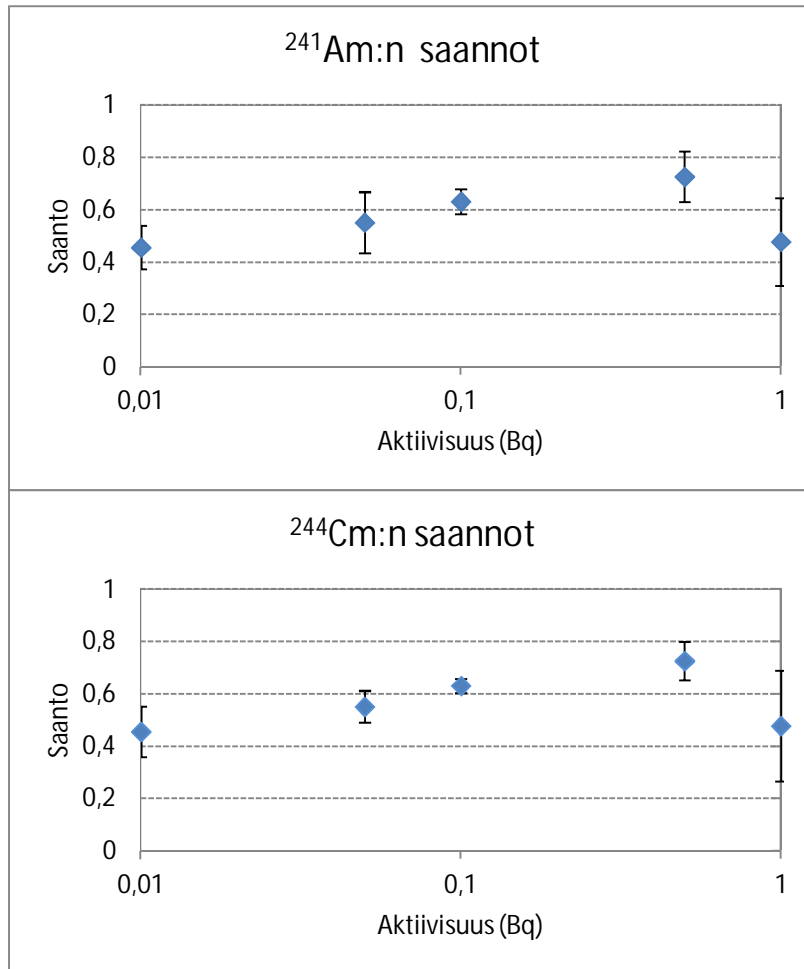
Kuva 15. Plansetit, joissa on 0,005 Bq jokaista merkkiainetta. (Kuva: Petri Hovi 2013)

## 4.2 Tulokset

Kaikki mittaustulokset kirjattiin Excel-taulukoon, joka löytyy liitteestä 1. Taulukkoon merkittiin jokaiselle nuklidille punnittu standardimäärä, laskettu aktiivisuus, mitattu aktiivisuus ja saanto. Jokaisesta aktiivisuustasosta tehtiin taulukko, johon kirjattiin kyseisen aktiivisuustason saanto. Aktiivisuuksista laskettiin keskiarvo ja keskihajonta. Rikkihappo- ja fluorivetyhappomenetelmillä tehtyjä näytteitä ei otettu laskuissa huomioon.

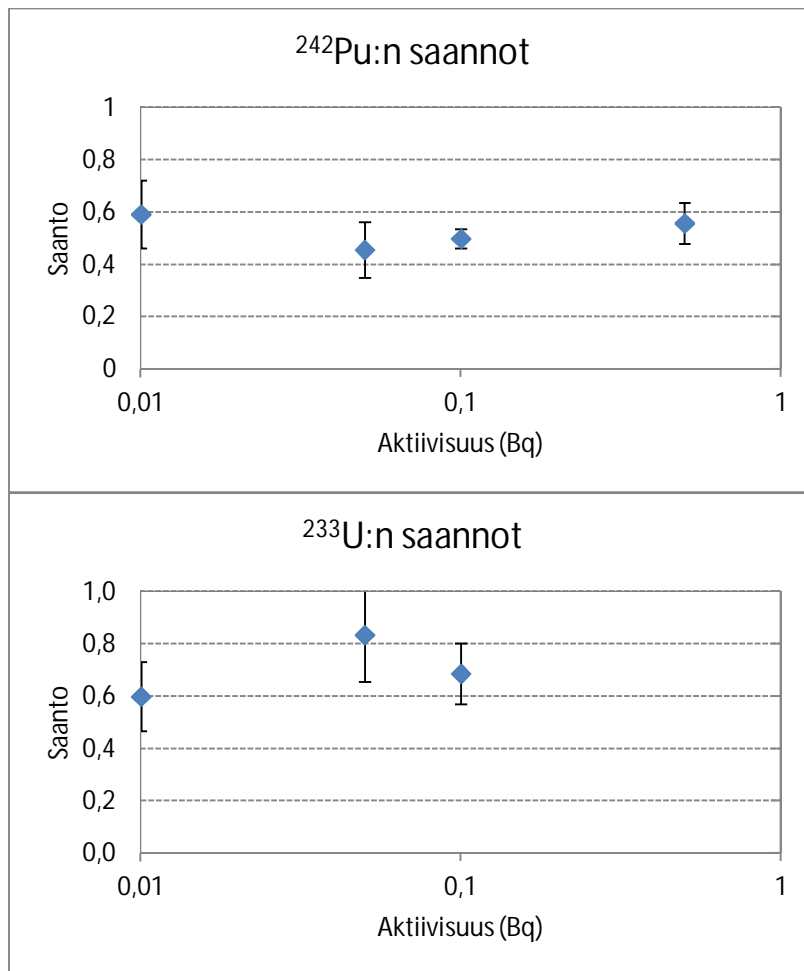
Pois laskuista jätettiin myös näytteet, jotka olivat selvästi epäonnistuneet. Epäonnistuneita olivat näyte 25, jonka pullo hajosi sentrifugissa ja näyte 32, josta ei saatu tulosta. Joissain näytteissä saattoi epäonnistua jonkin nuklidin mittaustulos. Näissä näytteissä otettiin huomioon kaikki muut nuklidit, paitsi epäonnistuneet. Kaikissa 0,5 Bq:n näytteissä ollut  $^{233}\text{U}$  -merkkiaine oli selvästi konsentroitunutta, joten tulos jätettiin huomioimatta. Samoin näytteissä 5-10 ollut  $^{244}\text{Cm}$  -merkkiaine oli konsentroitunut. Näytteisiin 39-42 ei lisätty  $^{244}\text{Cm}$  -merkkiainetta. Näytteissä 51 ja 52 jätettiin  $^{242}\text{Pu}$  -merkkiaine huomioimatta vaa'an epästabiiliuden takia. Näytteisiin 61 ja 62 punnittiin liian aktiivista  $^{233}\text{U}$  merkkiainetta ja sen tuloksia ei taulukoitu. Kuviossa 5 on  $^{241}\text{Am}$ :n ja  $^{244}\text{Cm}$ :n saannot eri aktiivisuuksilla, x-akseli on kuvaajassa logaritminen. Pisteet ovat saantojen

keskiarvoja jokaisella aktiivisuudella ja virhepalkit kuvaavat aktiivisuuksien keskihajontaa.



KUVIO 5. Merkkiaineiden saannot eri aktiivisuuksilla.

Kuviossa 6 on  $^{242}\text{Pu}$ :n ja  $^{233}\text{U}$ :n saannot eri aktiivisuuksilla. Pisteet ovat saantojen keskiarvoja jokaisella aktiivisuustasolla. Pisteiden virhepalkit ovat aktiivisuuksien keskihajonta, x-akseli on kuvaajassa logaritminen.



KUVIO 6. Merkkiaineiden saannot eri aktiivisuuksilla.

Taulukkoon 4 on laitettu merkkiaineiden saannot nuklideittain sekä tulosten keskihajonnat.

TAULUKKO 4. Nuklidien saannot ja keskihajonnat.

| Näytteiden saantojen keskiarvot ja keskihajonnat |              |        |        |        |       |
|--|--------------|--------|--------|--------|-------|
|  | nuklidi      | Am-241 | Cm-244 | Pu-242 | U-233 |
| 1 Bq<br>näytteet                                 | keskiarvo    | 0,478  | 0,578  |        |       |
|  | keskihajonta | 0,126  | 0,146  |        |       |
| 0,5 Bq<br>näytteet                               | keskiarvo    | 0,726  | 0,732  | 0,558  |       |
|  | keskihajonta | 0,071  | 0,049  | 0,059  |       |
| 0,1 Bq<br>näytteet                               | keskiarvo    | 0,631  | 0,658  | 0,499  | 0,687 |
|  | keskihajonta | 0,039  | 0,027  | 0,037  | 0,116 |
| 0,05 Bq<br>näytteet                              | keskiarvo    | 0,551  | 0,445  | 0,456  | 0,835 |
|  | keskihajonta | 0,092  | 0,043  | 0,089  | 0,149 |
| 0,01 Bq<br>näytteet                              | keskiarvo    | 0,456  | 0,461  | 0,592  | 0,599 |
|  | keskihajonta | 0,069  | 0,073  | 0,106  | 0,104 |

Taulukossa 5 on vuosihuoltorakennuksen ja VLJ-luolan suodattimien testitulokset. Lisäksi taulukossa on suodattimiin todellisuudessa kertyneen  $^{210}\text{Po}$ :n aktiivisuudet.

TAULUKKO 5. Näytteiden 55–62 saannot ja  $^{210}\text{Po}$  aktiivisuus becquereleina.

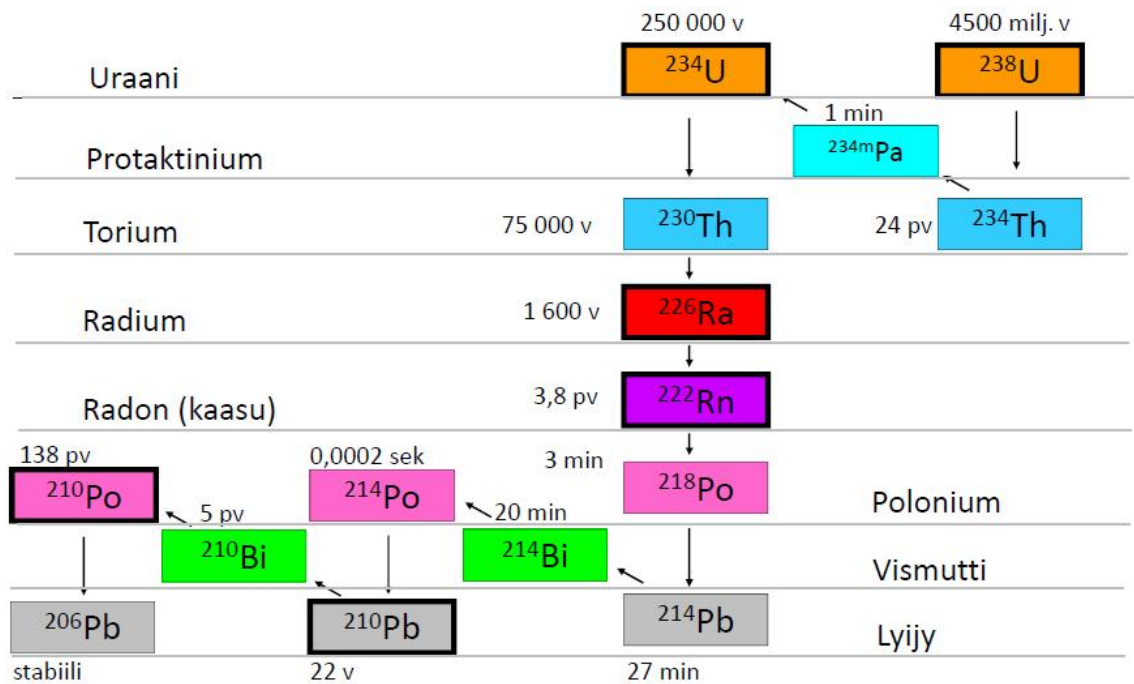
| Näytteiden 55-62 saannot ja Po-210 aktiivisuudet |        |        |        |       |                  |
|--|--------|--------|--------|-------|------------------|
| 0,01 Bq  | Am-241 | Cm-244 | Pu-242 | U-233 | Po-210 akt. (Bq) |
| 55   | 0,483  | 0,487  | 0,364  | 1,038 | 0,005            |
| 56   | 0,401  | 0,539  | 0,529  | 1,123 | 0,001            |
| 57   | 0,600  | 0,680  | 0,791  | 0,591 | 0,173            |
| 58   | 0,354  | 0,336  | 0,524  | 0,366 | 0,108            |
| 59   | 0,642  | 0,679  | 0,406  | 0,640 | 0,008            |
| 60   | 0,471  | 0,454  | 0,455  | 0,467 | 0,011            |
| 61 0,005 Bq                                      | 0,555  | 0,577  | 0,724  |       | 0,007            |
| 62 0,005 Bq                                      | 0,476  | 0,529  | 0,664  |       | 0,010            |
| keskiarvo  | 0,505  | 0,544  | 0,524  | 0,817 | 0,007            |
| keskihajonta                                     | 0,083  | 0,078  | 0,144  | 0,314 | 0,004            |

Pienimpien aktiivisuuksien näytteessä käytettiin 0,1 Bq/g  $^{241}\text{Am}$  -merkkiainetta.  $^{241}\text{Am}$  -merkkiaineesta noin 35,92 % hajoaa siten, että syntynyt ydin jää virittyneeseen tilaan ja emittoi  $\gamma$ -säteilyä 59,54 keV:n energialla. Lasikuitusuodattimelle punnittiin 1,1566 g 0,1 Bq/g  $^{241}\text{Am}$  -merkkiaineliuosta. Suodatimien mitattiin samalla alustalla, kuin poistoilmasuodattimet normaalistikin mitataan. Mittaus suoritettiin Ortecin HPGe-gammakiteellä (high purity germanium). Mittausajaksi asetettiin pienen aktiivisuuden takia 60 000 sekuntia. Tulokseksi saatiin 0,096811 Bq 44,5 %:n epävarmuudella.

## 5 POHDINTA

Työn tarkoituksena oli löytää menetelmä, jolla pystyttäisiin mittaamaan YVL-ohjeissa mainittu kokonaisaktiivisuus  $1 \text{ mBq/m}^3$  ja  $^{241}\text{Am}$   $0,1 \text{ mBq/m}^3$ . Tämän mukaan silloin tulee mitattavaksi aktiivisuudeksi suodattimessa kahden päivän keräysajalla  $0,1 \text{ Bq}$  kokonaisalfassa ja  $0,01 \text{ Bq}$   $^{241}\text{Am}$ :ssa. Kahden päivän keräysaikaa käytetään vain vuosihuoltojen aikaan. Normaalisissa käytössä suodatin vaihdetaan neljän viikon välein. Kokonaisalfan havaitsemisraja on huomattavasti korkeammalla normaalin käytön aikana. Pienin lisätty merkkiaineaktiivisuus oli  $0,005 \text{ Bq}$ , ja molemmista tehdyistä näytteistä saatiin noin 50 %:n saanto  $^{241}\text{Am}$ :n suhteen. Tämä oli tehty vuosihuoltorakennuksesta otettuun paperiin, joten voidaan olettaa että menetelmä toimisi myös reaktorirakennuksesta otetuissa suodattimissa.

Vuosihuoltorakennuksesta ja VLJ-luolasta otetuissa oikeissa näytteissä näkyy  $^{210}\text{Po}$  merkkiaineiden lisäksi.  $^{210}\text{Po}$  kuuluu luonnon  $^{238}\text{U}$  hajoamissarjaan ja on siten luonnosta peräisin oleva aktiivisuus, eikä voimalaitosperäinen päästö. Poloniumia tulee kallioperästä nousevasta radonista. Poloniumia muodostuu radonista erilaisten hajoamisten kautta. Kuviossa 7 on  $^{238}\text{U}$ :n hajoamissarja.



KUVIO 7.  $^{238}\text{U}$ :n hajoamissarja. (Kuva: [http://www.stuk.fi/sateilytietoa/sateily\\_ymparistossa/uraani/fi\\_FI/uraanin-tyttaret/files/88697801919767296/default/238U-hajoamissarja.pdf](http://www.stuk.fi/sateilytietoa/sateily_ymparistossa/uraani/fi_FI/uraanin-tyttaret/files/88697801919767296/default/238U-hajoamissarja.pdf))

Mitattujen saantojen tarkkuudesta ei voida olla aivan varmoja. Tämä johtuu siitä, että käytettyjen merkkiainestandardiliuosten aktiivisuuksia ei voitu tarkasti varmistaa. Käytetty  $^{233}\text{U}$  standardi oli todennäköisesti päässyt konsentroitumaan. Tämä tarkoittaa sitä, että standardipullosta on päässyt haihtumaan vettä, ja liuos on väkevöitynyt. Tehdyn liuoksen aktiivisuus tarkastettiin nestetuikelaskurin alfaohjelmalla. Laskurin alfaohjelma oli tehdasasetuksilla, ja siitä johtuen sen tulokset ovat suuntaa antavia, eikä niihin voi täysin luottaa.

0,1 Bq/g  $^{241}\text{Am}$ -merkkiaineen aktiivisuutta tarkistettiin gammamittauksen avulla. Saatu 0,0837 Bq/g tulos eroaa jonkun verran oletetusta aktiivisuudesta. Mittauksessa saatu ero voi johtua siitä, että lasikuitusuodatinmittausta ei ole kalibroitu noin pienille aktiivisuuksille. Mittaus osoittaa kuitenkin standardin olevan suunnilleen oikealla aktiivisuustasolla. Lisäksi kaikki muut merkkiaineet olivat saapuneet vuonna 2011, joten ne eivät luultavasti olleet juurikaan ehtineet konsentroitumaan. Konsentroitumisen lisäksi aktiivisuuksien säilyttämisessä on muitakin ongelmia. Aktiivisuudet tarttuvat helposti säilytyksessä käytettyjen pullojen pintoihin, ja pipetoitu aktiivisuuskonsentraatio saattaa siitä

syystä hieman pienentyä. Tarttumista pyritään estämään laimentamalla standardiliuokset happoon.

Koska standardien tarkkoja aktiivisuuksia ei voitu luotettavasti tarkistaa, mitatut aktiivisuudetkaan eivät välttämättä ole tarkkoja. Tämän vuoksi saannotkaan eivät siten ole välttämättä tarkkoja. Saantojen epätarkkuus ei tässä tapauksessa ole kovin suuri haitta, koska tarkoituksena oli etsiä menetelmä, jolla saadaan aktiivisuuksia suodattimesta, eikä pyrkä tässä vaiheessa hyvin suureen tarkkuuteen. Tavoitteessa onnistuttiin kaikilla aktiivisuustasoilla, ja aktiivisuuksia saatiin saostettua planseteille.

Kun laboratorion Berthold verrannollisuuslaskuri saadaan ajettua sisään, voidaan tuloksia vertailla paremmin. Verrannollisuuslaskurilla mitataan paperi suoraan ilman minäänlaista näytteenkäsittelyä. Tulokseksi saadaan kokonaisalfa, joka ei ole nuklidispesifinen. Alfasäteilyn voimakkaan vaimenemisen vuoksi täytyy tutkia miten paljon säteilyä vaimenee suodattimen pinnalle kertyvään pölyyn. Myös plansetille saostetulle alfa-aktiiviselle aineelle täytyy määrittää vaimenemiskerroin.

Kokonaisuudessaan työ onnistui hyvin, ja sen aikana saatiin tuloksia, joihin pyrittiinkin. Kun uusi  $^{233}\text{U}$ -standardi saapuu, saadaan saannot senkin suhteen kuntoon. Muiden standardien aktiivisuuksien pitäisi olla suhteellisen hyvin kohdallaan niiden tuoreuden vuoksi, mutta näidenkin kohdalla pitäisi käyttää vielä uudempia standardeja.



## LÄHTEET

Choppin, G., Liljenzin, J. & Rydberg, J. 2001. Radiochemistry and Nuclear Chemistry Third Edition. Yhdysvallat: Butterworth-Heinemann.

Eurasto, T., Hyvärinen, J., Järvinen, M-L., Sandberg, J., Sjöblom, K-L 2004. Ydinvoimalaitostekniikan perusteita. Teoksessa Sandberg, J. 2004. Ydinturvallisuus. Hämeenlinna: Karisto Oy

Hirvonen, H. Radiokemisti. 2013. 8.2.2013. Haastattelija Hovi, P. Olkiluoto.

Klemola, S. Säteilyn ilmaisimet 2002. Teoksessa Ikäheimonen, T. 2002. Säteily ja sen havaitseminen. Hämeenlinna: Karisto Oy

Lehto, J. & Hou, X. 2011. Chemistry and Analysis of Radionuclides. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA

Ortec. Sample Preparation for Low Level Alpha Spectrometry. Luettu 4.2.2013.  
<http://www.ortec-online.com/download/Sample-Preparation-for-Low-Level-Alpha-Spectrometry.pdf>

Paaso, N. 2012. TVO:n kemian jaoksen tehtävät: erilaiset analyysit ja mittaukset power point esitys.

Riess, R. 2010 Radioactivity in Nuclear Reactors ja Alpha Radiation Measurement. Teoksessa LCC6 Special Topic Report Radiochemistry in Nuclear Power Reactor (Light Water Reactors) Volume I 2010. Mölnlycke: A.N.T. International

Sandberg, J. & Paltemaa, R. 2002. Ydin- ja säteilyfysiikan perusteet. Teoksessa Ikäheimonen, T. 2002. Säteily ja sen havaitseminen. Hämeenlinna: Karisto Oy

TVO luettu 27.3.2013. <http://tvo.fi>

TVO OL3. Luettu 9.4.2013. <http://tvo.fi/OL3>

TVO OL4. luettu 9.4.2013. <http://tvo.fi/olkiluoto4>

Ydinvoimalaitokset Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 2007. Euraprint

YVL-ohje 7.6. Luettu 5.4.2013.  
<http://www.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVL7-6>

YVL-ohjeisto. Luettu 5.4.2013  
[http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/saannosto/fi\\_FI/yvl/](http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/saannosto/fi_FI/yvl/)

## LIITTEET

### Liite 1. Mittaustulokset

1 (3)

| Näyte | Laskettu<br><sup>241</sup> Am<br>akt. (Bq) | Laskettu<br><sup>244</sup> Cm<br>akt. (Bq) | Mitattu<br><sup>241</sup> Am<br>(Bq) | Mitattu<br><sup>244</sup> Cm<br>(Bq) | Saanto<br><sup>241</sup> Am | Saanto<br><sup>244</sup> Cm |
|-------|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0     | 1,0004                                     | 1,2806                                     |                                      |                                      |                             |                             |
| 1     | 0,9326                                     | 1,0360                                     |                                      |                                      |                             |                             |
| 2     | 1,0178                                     | 1,0370                                     |                                      |                                      |                             |                             |
| 3     | 0,9876                                     | 1,0375                                     | 0,3737                               | 0,6014                               | 0,3784                      | 0,5796                      |
| 4     | 1,0863                                     | 1,0380                                     | 0,2997                               | 0,3835                               | 0,2759                      | 0,3694                      |
| 5     | 1,0327                                     |  | 0,4803                               |                                      | 0,4651                      |                             |
| 6     | 1,0889                                     |  | 0,6033                               |                                      | 0,5540                      |                             |
| 7     | 1,0588                                     | 1,0610                                     | 0,7114                               | 0,7552                               | 0,6719                      | 0,7118                      |
| 8     | 1,1254                                     |  | 0,0000                               |                                      | 0,0000                      |                             |
| 9     | 1,0361                                     |  | 0,6011                               |                                      | 0,5801                      |                             |
| 10    | 1,1143                                     |  | 0,7513                               |                                      | 0,6743                      |                             |
| 11    | 1,0219                                     | 0,7757                                     | 0,0089                               | 0,0031                               | 0,0087                      | 0,0040                      |
| 12    | 1,0046                                     | 0,7809                                     | 0,0582                               | 0,0412                               | 0,0579                      | 0,0528                      |
| 13    | 1,0355                                     | 0,8235                                     | 0,4519                               | 0,5170                               | 0,4364                      | 0,6278                      |
| 14    | 1,0625                                     | 0,8168                                     | 0,0544                               | 0,0423                               | 0,0512                      | 0,0517                      |
| 15    | 1,0558                                     | 0,7847                                     | 0,0133                               | 0,0070                               | 0,0126                      | 0,0089                      |
| 16    | 1,0185                                     | 0,7697                                     | 0,0203                               | 0,0862                               | 0,0199                      | 0,1120                      |
| 17    | 1,0745                                     | 0,7996                                     | 0,6755                               | 0,5564                               | 0,6287                      | 0,6958                      |
| 18    | 1,0690                                     | 0,7936                                     | 0,3571                               | 0,4036                               | 0,3341                      | 0,5086                      |
| 19    | 1,0028                                     | 0,8011                                     | 0,6191                               | 0,6136                               | 0,6174                      | 0,7659                      |
| 20    | 1,0570                                     | 0,7944                                     | 0,6786                               | 0,6091                               | 0,6420                      | 0,7668                      |
| 21    | 1,0558                                     | 0,7854                                     | 0,4830                               | 0,5294                               | 0,4575                      | 0,6741                      |
| 22    | 1,0217                                     | 0,7884                                     | 0,6082                               | 0,5864                               | 0,5953                      | 0,7438                      |

| Näyte | Laskettu<br><sup>241</sup> Am<br>akt. (Bq) | Laskettu<br><sup>244</sup> Cm<br>akt. (Bq) | Laskettu<br><sup>242</sup> Pu<br>akt. (Bq) | Laskettu<br><sup>233</sup> U<br>akt. (Bq) | Mitattu<br><sup>241</sup> Am<br>(Bq) | Mitattu<br><sup>244</sup> Cm<br>(Bq) | Mitattu<br><sup>242</sup> Pu<br>(Bq) | Mitattu<br><sup>233</sup> U<br>(Bq) | Mitattu<br><sup>210</sup> Po<br>(Bq) | Saanto<br><sup>241</sup> Am | Saanto<br><sup>244</sup> Cm | Saanto<br><sup>242</sup> Pu | Saanto<br><sup>233</sup> U |
|-------|--|--|--|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 23    | 0,5205                                     | 0,5640                                     | 0,4536                                     |   | 0,4667                               | 0,4877                               | 0,2964                               |                                     |                                      | 0,8967                      | 0,8647                      | 0,6534                      |                            |
| 24    | 0,4892                                     | 0,8445                                     | 0,7884                                     |   | 0,3518                               | 0,6021                               | 0,4634                               |                                     |                                      | 0,7191                      | 0,7130                      | 0,5878                      |                            |
| 26    | 0,4659                                     | 0,6979                                     | 0,5076                                     |   | 0,3754                               | 0,5193                               | 0,2154                               |                                     |                                      | 0,8058                      | 0,7441                      | 0,4243                      |                            |
| 27    | 0,5572                                     | 0,4600                                     | 0,4806                                     |   | 0,3985                               | 0,3487                               | 0,2661                               |                                     |                                      | 0,7151                      | 0,7580                      | 0,5537                      |                            |
| 28    | 0,4870                                     | 0,4914                                     | 0,4914                                     |   | 0,2952                               | 0,3050                               | 0,3049                               |                                     |                                      | 0,6062                      | 0,6206                      | 0,6205                      |                            |
| 29    | 0,5296                                     | 0,4959                                     | 0,5022                                     |   | 0,3543                               | 0,3549                               | 0,2446                               |                                     |                                      | 0,6690                      | 0,7156                      | 0,4871                      |                            |
| 30    | 0,5201                                     | 0,4937                                     | 0,5076                                     |   | 0,3497                               | 0,3483                               | 0,2928                               |                                     |                                      | 0,6724                      | 0,7055                      | 0,5768                      |                            |
| 31    | 0,1121                                     | 0,0966                                     | 0,1138                                     | 0,1194                                    | 0,0790                               | 0,0553                               |                                      |                                     |                                      | 0,7054                      | 0,5726                      |                             |                            |
| 32    | 0,1177                                     | 0,1006                                     | 0,0999                                     | 0,0889                                    |                                      |                                      |                                      |                                     |                                      |                             |                             |                             |                            |
| 33    | 0,0895                                     | 0,0971                                     | 0,1022                                     | 0,1029                                    | 0,0527                               | 0,0634                               | 0,0545                               | 0,0630                              |                                      | 0,5883                      | 0,6525                      | 0,5334                      | 0,6121                     |
| 34    | 0,1029                                     | 0,1031                                     | 0,1022                                     | 0,1003                                    | 0,0624                               | 0,0675                               | 0,0570                               | 0,0742                              |                                      | 0,6065                      | 0,6552                      | 0,5583                      | 0,7396                     |
| 35    | 0,0916                                     | 0,0998                                     | 0,1083                                     | 0,1003                                    | 0,0636                               | 0,0664                               | 0,0437                               | 0,0984                              |                                      | 0,6949                      | 0,6657                      | 0,4035                      | 0,9802                     |
| 36    | 0,0909                                     | 0,0271                                     | 0,1017                                     | 0,1071                                    | 0,0554                               | 0,0198                               | 0,0523                               | 0,0649                              |                                      | 0,6096                      | 0,7298                      | 0,5144                      | 0,6060                     |
| 37    | 0,0916                                     | 0,0268                                     | 0,1009                                     | 0,1124                                    | 0,0552                               | 0,0176                               | 0,0502                               | 0,0687                              |                                      | 0,6026                      | 0,6568                      | 0,4972                      | 0,6107                     |
| 38    | 0,0916                                     | 0,0487                                     | 0,1008                                     | 0,1208                                    | 0,0561                               | 0,0328                               | 0,0490                               | 0,0690                              |                                      | 0,6123                      | 0,6730                      | 0,4862                      | 0,5709                     |
| 39    | 0,0545                                     |  | 0,0526                                     | 0,0494                                    | 0,0374                               |                                      | 0,0210                               | 0,0509                              |                                      | 0,6863                      |                             | 0,4001                      | 1,0304                     |
| 40    | 0,0497                                     |  | 0,0488                                     | 0,0494                                    | 0,0253                               |                                      | 0,0131                               | 0,0548                              |                                      | 0,5087                      |                             | 0,2684                      | 1,1094                     |
| 41    | 0,0491                                     |  | 0,0508                                     | 0,0482                                    | 0,0286                               |                                      | 0,0289                               | 0,0309                              |                                      | 0,5830                      |                             | 0,5682                      | 0,6414                     |
| 42    | 0,0498                                     |  | 0,0503                                     | 0,0499                                    | 0,0374                               |                                      | 0,0269                               | 0,0325                              |                                      | 0,7522                      |                             | 0,5347                      | 0,6513                     |
| 43    | 0,0464                                     | 0,0501                                     | 0,0512                                     | 0,0483                                    | 0,0205                               | 0,0212                               | 0,0262                               | 0,0370                              |                                      | 0,4418                      | 0,4232                      | 0,5109                      | 0,7668                     |

| Näyte | Laskettu<br><sup>241</sup> Am<br>akt. (Bq) | Laskettu<br><sup>244</sup> Cm<br>akt. (Bq) | Laskettu<br><sup>242</sup> Pu<br>akt. (Bq) | Laskettu<br><sup>233</sup> U<br>akt. (Bq) | Mitattu<br><sup>241</sup> Am<br>(Bq) | Mitattu<br><sup>244</sup> Cm<br>(Bq) | Mitattu<br><sup>242</sup> Pu<br>(Bq) | Mitattu<br><sup>233</sup> U<br>(Bq) | Mitattu<br><sup>210</sup> Po<br>(Bq) | Saanto<br><sup>241</sup> Am | Saanto<br><sup>244</sup> Cm | Saanto<br><sup>242</sup> Pu | Saanto<br><sup>233</sup> U |
|-------|--|--|--|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 44    | 0,0494                                     | 0,0496                                     | 0,0514                                     | 0,0493                                    | 0,0205                               | 0,0193                               | 0,0266                               | 0,0340                              |                                      | 0,4139                      | 0,3892                      | 0,5179                      | 0,6909                     |
| 45    | 0,0496                                     | 0,0497                                     | 0,0528                                     | 0,0497                                    | 0,0249                               | 0,0217                               | 0,0183                               | 0,0477                              |                                      | 0,5029                      | 0,4367                      | 0,3456                      | 0,9587                     |
| 46    | 0,0496                                     | 0,0508                                     | 0,0521                                     | 0,0494                                    | 0,0259                               | 0,0270                               | 0,0262                               | 0,0409                              |                                      | 0,5218                      | 0,5316                      | 0,5027                      | 0,8276                     |
| 47    | 0,0100                                     | 0,0105                                     | 0,0094                                     | 0,0098                                    | 0,0041                               | 0,0041                               | 0,0039                               | 0,0078                              |                                      | 0,4130                      | 0,3871                      | 0,4175                      | 0,7949                     |
| 48    | 0,0100                                     | 0,0104                                     | 0,0105                                     | 0,0101                                    | 0,0047                               | 0,0048                               | 0,0054                               | 0,0077                              |                                      | 0,4722                      | 0,4588                      | 0,5087                      | 0,7662                     |
| 49    | 0,0100                                     | 0,0103                                     | 0,0093                                     | 0,0099                                    | 0,0038                               | 0,0040                               | 0,0050                               | 0,0045                              |                                      | 0,3831                      | 0,3916                      | 0,5318                      | 0,4566                     |
| 50    | 0,0100                                     | 0,0102                                     | 0,0096                                     | 0,0100                                    | 0,0034                               | 0,0051                               | 0,0062                               | 0,0064                              |                                      | 0,3440                      | 0,4966                      | 0,6380                      | 0,6402                     |
| 51    | 0,0094                                     | 0,0101                                     | 0,0075                                     | 0,0103                                    | 0,0053                               | 0,0058                               | 0,0064                               | 0,0055                              |                                      | 0,5643                      | 0,5715                      |                             | 0,5378                     |
| 52    | 0,0099                                     | 0,0099                                     | 0,0043                                     | 0,0099                                    | 0,0040                               | 0,0032                               | 0,0081                               | 0,0043                              |                                      | 0,4057                      | 0,3196                      |                             | 0,4325                     |
| 53    | 0,0098                                     | 0,0102                                     | 0,0095                                     | 0,0095                                    | 0,0056                               | 0,0062                               | 0,0073                               | 0,0052                              |                                      | 0,5687                      | 0,6081                      | 0,7698                      | 0,5550                     |
| 54    | 0,0102                                     | 0,0105                                     | 0,0117                                     | 0,0100                                    | 0,0050                               | 0,0048                               | 0,0080                               | 0,0061                              |                                      | 0,4948                      | 0,4543                      | 0,6850                      | 0,6092                     |
| 55    | 0,0099                                     | 0,0105                                     | 0,0117                                     | 0,0107                                    | 0,0048                               | 0,0051                               | 0,0043                               | 0,0111                              | 0,0048                               | 0,4833                      | 0,4870                      | 0,3640                      | 1,0383                     |
| 56    | 0,0095                                     | 0,0102                                     | 0,0089                                     | 0,0072                                    | 0,0038                               | 0,0055                               | 0,0047                               | 0,0081                              | 0,0010                               | 0,4008                      | 0,5390                      | 0,5286                      | 1,1227                     |
| 57    | 0,0094                                     | 0,0102                                     | 0,0074                                     | 0,0095                                    | 0,0056                               | 0,0069                               | 0,0058                               | 0,0064                              | 0,1728                               | 0,5998                      | 0,6796                      | 0,7906                      | 0,5912                     |
| 58    | 0,0098                                     | 0,0104                                     | 0,0083                                     | 0,0095                                    | 0,0035                               | 0,0035                               | 0,0044                               | 0,0091                              | 0,1084                               | 0,3540                      | 0,3364                      | 0,5237                      | 0,3662                     |
| 59    | 0,0101                                     | 0,0103                                     | 0,0105                                     | 0,0101                                    | 0,0065                               | 0,0070                               | 0,0043                               | 0,0102                              | 0,0084                               | 0,6422                      | 0,6786                      | 0,4061                      | 0,6404                     |
| 60    | 0,0099                                     | 0,0102                                     | 0,0098                                     | 0,0100                                    | 0,0047                               | 0,0046                               | 0,0045                               | 0,0084                              | 0,0112                               | 0,4712                      | 0,4545                      | 0,4546                      | 0,4666                     |
| 61    | 0,0047                                     | 0,0044                                     | 0,0044                                     |   | 0,0026                               | 0,0025                               | 0,0032                               |                                     |                                      | 0,5550                      | 0,5773                      | 0,7238                      |                            |
| 62    | 0,0047                                     | 0,0043                                     | 0,0045                                     |   | 0,0022                               | 0,0023                               | 0,0030                               |                                     |                                      | 0,4760                      | 0,5292                      | 0,6642                      |                            |