

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Loviisan voimalaitoksen reaktorikuilun pohjan
dekontaminointimenetelmien vertailu

Comparison of decontamination methods of Loviisa Power Plant's
reactor cavity surfaces

Työntarkastaja: Jani Laine

Työn ohjaaja: Jani Laine

Loviisa 7.12.2011

Henrik Tarkkio Ente

TIIVISTELMÄ

Henrik Tarkkio

Loviisan voimalaitoksen reaktorikuilun pohjan dekontaminointimenetelmien vertailu

Comparison of decontamination methods of Loviisa Power Plant's reactor cavity surfaces

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2011

47 sivua, 19 kuvaa, 13 taulukkoa, 1 liite

Hakusanat: kontaminaatio, radioaktiivisuus, ydinvoimalaitos

Tässä kandidaatintyössä on tutkittu kontaminaation irtoamista Loviisan voimalaitoksen reaktorikuilun pohjalta. Lisäksi tutkittiin eri nuklidien suhteen muuttumista kontaminaatiotason laskiessa.

Tutkimusta varten kerättiin voimalaitoksen kakkosyksikön reaktorikuilun pohjan puhdistuksen yhteydessä näytteitä, jotka analysoitiin kontaminaatiotasojen osalta sekä gammaspektrometreillä selvitettiin näytteiden nuklidijakauma radiokemian laboratoriossa.

Työssä on lisäksi esitelty yleisesti kontaminaatioon ja radioaktiivisuuteen liittyviä määritelmiä sekä käytettyjä mittalaitteita ja kuvattu näytteenottomenetelmät.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenne­luettelo	4
1 Johdanto	6
1.1 Loviisan voimalaitos	6
1.2 Työn taustat.....	7
1.3 Työn tavoitteet	8
2 Määritelmiä	9
2.1 Atomin koostumus	9
2.2 Radioaktiivinen hajoaminen	9
2.2.1 Hajoamislaki	10
2.2.2 Alfahajoaminen	11
2.2.3 Beetahajoaminen	11
3 Mittalaitteet	13
3.1 ELECTRA	13
3.2 Nutronic NT200	15
3.3 Epäsuora pintakontaminaatiomittaus	16
3.4 Gammasektrometri	17
4 Näytteenotto	19
5 Tulokset	22
6 Tulosten tarkastelu	35
6.1 Harso- ja froteepyyhinnän erot	35
6.2 Näytteiden nuklidijakauma pinnalta A.....	36
6.3 Näytteiden nuklidijakauma pinnalta B	39
6.4 Näytesarja PC pinnalta C.....	41
6.5 Pyyhinnässä käytettyjen harsojen ja froteepyyhkeiden nuklidijakaumat	42
7 Johtopäätökset	45

LÄHTEET

LIITTEET

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	ytimen massaluku	[-]
A_S	aktiivisuuskate	[Bq/cm^2]
F	kontaminaation irtoamissuhde	[-]
N	ytimen neutroniluku	[-]
n	pulssitaajuus	[-]
S	pyyhitty pinta-ala	[m^2]
$T_{1/2}$	puoliintumisaika	[s]
W	ilmaisimen pinta-ala	[m^2]
Z	ytimen protoniluku	[-]

Kreikkalaiset aakkoset

ε	emissiviteetti	[-]
λ	hajoamisvakio	[1/s]

Alaindeksit

B	tausta
e	sähkö
i	ilmaisim
s	lähde

Lyhenteet

Ag	hopea
Co	koboltti
Cr	kromi
Fe	rauta
He	helium
Mn	mangaani
Nb	niobium
Sb	antimoni
Te	telluuri
Zr	zirkonium
VVER	Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor

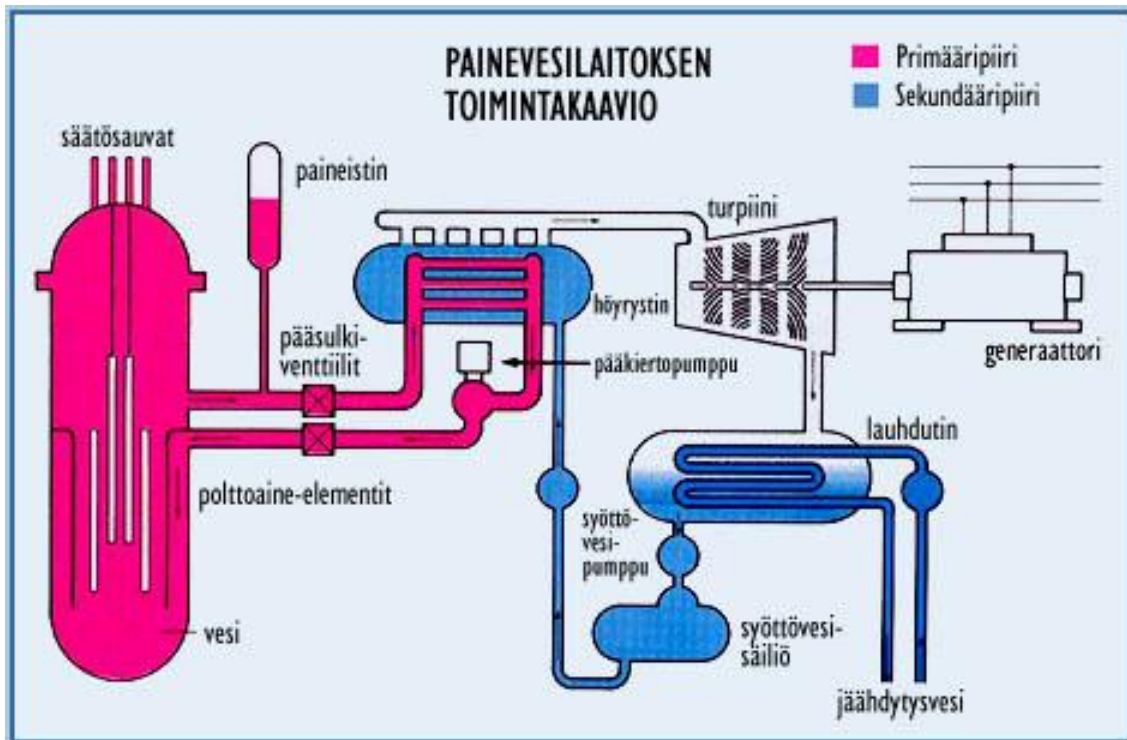
1 JOHDANTO

1.1 Loviisan voimalaitos

Fortum Power and Heat Oy omistaa Loviisassa Hästholmenin saarella sijaitsevat kaksi ydinvoimalaitosyksikköä. Voimalaitosyksiköt otettiin käyttöön vuosina 1977 ja 1981. Loviisan voimalaitos on tyypiltään painevesireaktorilaitos. Laitoksen tuottama nettosähköteho on 980 MWe. Laitosyksiköt ovat tyypiltään VVER-440-konseptiin pohjautuvia painevesilaitoksia.

Sopimus voimalaitoksen rakentamisesta solmittiin neuvostoliittolaisen V/O Atomenergoexportin (AEE) kanssa vuonna 1969. Esikuvana käytettiin Novo Voroneshissa sijaitsevaa VVER-tyyppistä painevesilaitosta. Suomen viranomaiset kuitenkin vaativat huomattavia parannuksia laitostyyppin turvallisuusvaatimuksiin. Laitos tuli varustaa kaasutiiviillä suojarakennuksella sekä hätäjähdytysjärjestelmällä. (STUK 2009)

Painevesireaktorilaitoksessa jäähdytysvesi ei kiehu reaktorissa. Korkeapaineinen vesi johdetaan erillisiin höyrystimiin, jossa primääripiirin lämpö siirtyy sekundääripiirin veteen, joka höyrystymisen jälkeen johdetaan turbiineille. Kuvassa 1.1 on esitelty painevesilaitoksen toimintakaavio. (STUK 2009)



Kuva 1.1 Painevesilaitoksen toimintakaavio

1.2 Työn taustat

Painevesilaitoksen rakenteesta johtuen käytännössä kaikki aktiivisuus esiintyy laitoksen primääripiirissä. Kontaminaation eli radioaktiivisen lian esiintyminen primääripiirin ulkopuolella johtuu tyypillisesti huoltotöistä.

Vuosihuolloissa yksikköjen polttoaineesta vaihdetaan noin yksi kolmasosa. Polttoaineen siirrot tehdään veden alla, jolloin primääripiirin veden pinta nostetaan niin ylös kuin mahdollista, aina reaktorihallin +22-tasolle asti. Tällöin reaktorikuilu täytetään aktiivisella primääripiirin vedellä useiksi päiviksi. Polttoainesierrojen valmistuttua vedenpinta lasketaan takaisin normaalille tasolle.

Polttoainesierrojen aikana reaktorikuilun seinät ja pohja kontaminoituvat voimakkaasti. Ennen muiden huoltotöiden jatkumista kuilun seinät ja pohja on puhdistettava kontaminaatiosta. Kuilun seinät puhdistetaan nykyään koneellisesti ja tässä onkin viime vuosina onnistuttu varsin hyvin.

Kuilun pohja puhdistetaan käsin. Tämä on raskas ja vaativa työvaihe, jonka kesto on vuosittain vaihdellut paljon. Pohjan puhdistukseen osallistuu kerralla 4 henkilöä muiden ollessa tauolla. Yhteensä kuilunpesuryhmän vahvuus on ollut noin 12–15 henkilöä. Käytännössä erikoispuhdistushenkilöstö pesee pohjalta ensin näkyvän lian painepesureilla, jonka jälkeen pohja kuivataan kumilastoilla ja siirrytään käsin puhdistamaan jäljellä jäänyttä kontaminaatiota. Säteilyvalvonta suorittaa puhdistuksen edetessä näytteenottoja ja tavoitteena olisi päästä mahdollisimman lähelle vihreää tasoa (4 Bq/cm^2) kontaminaation osalta.

Tämän työvaiheen kestoksi on suunniteltu 12 tuntia. Usein tässä aikataulussa ei kuitenkaan pysytä ja esimerkiksi vuonna 2011 Lo1:llä kuilun pohjan pesu venyi yli 30 tuntiin. Pohjan pesun venyminen lisää jonkin verran kollektiivista säteilyannosta, mutta kun painepesun jälkeen enimmäkseen kontaminaatiot on saatu siivottua putoavat säteilytasot kuilunpohjalla noin $30 \mu\text{Sv/h}$. Koska useimmissa vuosihuolloissa reaktorikuilun pohjan pesu on kriittisen polun työ, on sen kesto suoraan verrannollinen vuosihuollon kesto. Tämän vuoksi työn pysyminen aikataulussa on tärkeää.

1.3 Työn tavoitteet

Työssä on tarkoitus selvittää, kuinka tehokas kuilun pohjan käsipuhdistusvaihe on nykyisillä menetelmillä. Tämän lisäksi selvitetään kuinka eri nuklidien suhde kontaminaatiossa muuttuu puhdistuksen edetessä. Näytteitä otetaan eri pinnoilta ja puhdistuksessa kokeillaan muutamaa eri menetelmää.

Näytteet analysoidaan kontaminaatitasojen osalta kontaminaatiomittareilla. Kontaminaatiomittauksien jälkeen näytteille tehdään tarkempi gammaspektrometrinen tutkimus voimalaitoksen radiokemian laboratoriossa nuklidijakauman selvittämiseksi.

2 MÄÄRITELMIÄ

2.1 Atomin koostumus

Atomi koostuu positiivisesti varautuneesta ytimeistä ja sitä ympäröivästä negatiivisista elektroneista. Ydin itsessään koostuu nukleoneista, joita ovat sähköisesti positiivisesti varautunut protoni ja sähköisesti varaukseton neutroni. Järjestys-, varaus- tai protoniluvuksi kutsutaan ytimen protonien lukumäärää Z . Järjestysluku määrittelee atomin kemialliset ominaisuudet. Saman alkuaineen atomeilla on sama järjestysluku.

Neutroniluvuksi N kutsutaan ytimen neutroniluvuksi ja nukleonin kokonaismäärää $A = Z + N$ nukleoni- eli massaluvuksi. Nuklidi on atomityyppi, jolla on tietty järjestys- ja massaluku. Saman alkuaineen atomeja, joilla on eri massaluku, kutsutaan isotoopeiksi. Nuklidit merkitään siten, että alkuaineen kemiallisen symbolin vasempaan yläkulmaan kirjoitetaan massaluku. Esimerkiksi uraanin isotoopin 238 merkinä on ^{238}U . Saman alkuaineen eri isotoopit käyttäytyvät kemiallisesti samalla tavalla, kun taas alkuaineen eri isotooppien ydinfysikaaliset ominaisuudet voivat olla aivan erilaiset. (Ikäheimonen 2002, 12.)

Nuklideja tunnetaan lähes 2000 ja niistä noin 270 on stabiileja. Muut ovat epästabiileja, toisin sanoen ne muuttuvat spontaanisti, ilman ulkoisten tekijöiden vaikutusta, toisiksi nuklideiksi. Koska ytimet lähettävät hajoessaan säteilyä, sanotaan ilmiötä radioaktiiviseksi hajoamiseksi ja epästabiileita nuklideja radioaktiivisiksi nuklideiksi. (Ikäheimonen 2002, 16.)

2.2 Radioaktiivinen hajoaminen

Ytimet muuttuvat toisiksi ytimiksi radioaktiivisessa hajoamisessa tai ydinreaktiossa. Radioaktiivinen hajoaminen on spontaani prosessi, jossa epästabiili ydin muuttuu toiseksi ytimeksi ilman ulkoisten tekijöiden vaikutusta. Samalla ydin lähettää fotoneja tai hiukkasia.

Radioaktiivisen kappaleen aktiivisuus on kappaleessa tapahtuvien hajoamisien lukumäärä aikayksikössä. Aktiivisuuden SI-yksikkö on becquerel (Bq). Mikäli kappaleen aktiivisuus on 1 Bq, siinä tapahtuu keskimäärin yksi hajoaminen sekunnissa. Aktiivisuus ilmaistaan usein aineen massaa, tilavuutta tai pinta-alaa kohti. Massaaktiivisuus on tiettyyn ainemäärään sisältyvä aktiivisuus jaettuna sen massalla. Sen yksikkö on Bq/kg. Aktiivisuuspitoisuus on tiettyssä tilassa oleva aktiivisuus jaettuna tilavuudella, käytettävä yksikkö on Bq/m³. Aktiivisuuskate on tietyllä pinnalla oleva aktiivisuus jaettuna pinta-alalla, yksikkönä käytetään Bq/m². Tässä työssä keskitytään aktiivisuuskatteen käsittelyyn ja käytettävänä yksikkönä on Bq/cm².

Radioaktiivinen hajoaminen on satunnaisilmiö, eikä tietyn radioaktiivisen ytimen hajoamisen ajankohtaa ole mahdollista määrittää etukäteen. Radioaktiivisen aineen hajoamisen nopeutta kuvaa hajoamisvakio λ , joka on todennäköisyys, että tietty ydin hajoaa aikayksikön kuluessa. Hajoamisvakion SI-yksikkö on 1/s. Puoliintumisaika $T_{1/2}$ tarkoittaa sitä aikaa, jonka kuluessa tietystä radionuklidista koostuvan radioaktiivisen lähteen aktiivisuus laskee puoleen.

Ydinreaktiot ovat prosesseja, jotka tapahtuvat ytimen ja alkeishiukkasen välisissä törmäyksissä tai kahden ytimen törmäyksessä. Radioaktiivisella hajoamisella ja ydinreaktiolla on paljon yhteisiä piirteitä, sillä ne perustuvat samoihin fysikaalisiin perusmekanismeihin, ja niissä myös syntyy samoja säteilylajeja ja reaktiotuotteita. (Ikäheimonen 2002, 19–20.)

2.2.1 Hajoamislaki

Radioaktiivinen hajoaminen on satunnaista ja spontaania. Yksittäinen ydin voi hajota koska tahansa riippumatta ulkoisista tekijöistä. Radioaktiiviset lähteet koostuvat kuitenkin erittäin suuresta määrästä epästabiileita ytimiä, jolloin lähteen aktiivisuus voidaan laskea tarkasti kaavojen avulla, huolimatta hajoamisten satunnaisuudesta.

Radioaktiivisen ytimen hajoamisvakio on λ . Lyhyellä aikavälillä tapahtuvan hajoamisen todennäköisyys on siis λdt . Ytimien lukumäärän $N(t)$ muutoksella $dN(t)$ saadaan lauseke

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

Kun ytimien määrä hetkellä $t = 0$, saadaan ytimien määräksi hetkellä t

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Ainemäärän aktiivisuus $A(t)$ eli hajoamisten lukumäärä aikayksikköä kohti on ytimen hajoamistodennäköisyys aikayksikköä kohti kerrottuna ytimien lukumäärällä

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Sijoittamalla kaavaan (3) ajaksi puoliintumisaika $t = T_{1/2}$ ja aktiivisuudeksi $A(t) = 0,5$ saadaan hajoamisvakion λ ja puoliintumisajan välille yhteys

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad (4)$$

(Ikäheimonen 2002, 27–28.)

2.2.2 Alfahajoaminen

Alfahajoamisessa ytimestä lähtee kahden protonin ja kahden neutronin muodostama α -hiukkanen. α -hiukkanen on käytännössä ${}^4\text{He}$ -atomin ydin. Alfahajoaminen on yleistä raskailla nuklideilla. Hajoamisen seurauksena syntyvä tytärudin saattaa olla virittynyt, ja virityksen lauetessa syntyy sähkömagneettista säteilyä.

2.2.3 Beetahajoaminen

Beetahajoamisessa ydin siirtyy alempaan energiatilaan siten, että ytimen varaus muuttuu, mutta massaluku ei muutu. Tämä voi spontaanisti tapahtua kolmella tavalla. β^- -hajoamisessa yksi ytimen neutroni hajoaa protoniksi ja elektroniksi, joita

radioaktiivisten hajoamisen yhteydessä sanotaan β -hiukkasiksi. Muodostunut protoni jää ytimeen, kun taas elektroni sinkoutuu ulos β -säteilynä. β^+ -hajoamisessa yksi ytimen protoneista hajoaa neutroniksi ja β^+ -hiukkaseksi, positroniksi. β^+ -hajoamisen yhteydessä esiintyy myös sähkömagneettista annihilaatiosäteilyä.

β^+ -hajoamisen kanssa vaihtoehtoinen prosessi on elektronikaappaus, jossa ytimen protoniluku pienenee, kun ydin sieppaa atomin elektroniverhosta yhden elektronin. Kun siepatun elektronin tilalle siirtyy ylemmän kuoren elektroni, elektroniverhosta lähtee karakteristista röntgensäteilyä.

α - ja β -hajoamisien yhteydessä syntyy myös gammasäteilyä. Gammasäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota syntyy kun virittyneessä tilassa oleva atomiydin siirtyy alemmalle energiatasolle. (Ikäheimonen 2002, 20–24.)

3 MITTALAITTEET

3.1 ELECTRA

ELECTRA on kannettava säteilymittari, jota Loviisan voimalaitoksella käytetään kontaminaation mittaamiseen. ELECTRAa voidaan käyttää myös annosnopeuden mittaamiseen, riippuen käytössä olevasta ilmaisim-osasta. Loviisan voimalaitoksella mittari on varustettu tuikeilmaisimella. Tuikeilmaisimen toiminta perustuu tuikeaineessa säteilypulssien aiheuttamiin valovälähdyksiin, jotka voimistetaan valomonistinputkella. Valomonistinputkessa on valoherkkä fotokatodi, josta irtoaa elektroneja valon osuessa siihen. Tämän jälkeen elektronit kiihdytetään dynodeilla. Tuikeilmaisimen lähettämät heikot virtapulssit ohjataan esivahvistimelle, joka muuntaa sen jännitepulssiksi. Detektorina tässä mittarityypissä on käytössä mallimerkinnältään BP7/4-anturi. Tämä ilmaisim tyyppi on herkkä beetasäteilylle, epäherkkä gammasäteilylle ja alfasäteilyä se ei havaitse lainkaan. Anturin ikkunan pinta-ala on 49 cm². Kuvassa 3.1 on esitelty ELECTRA detektoreineen.



Kuva 3.1 ELECTRA-kontaminaatiomittari detektoreineen

ELECTRAn antama mittaustulos on pulssia per sekunti eli cps. Suoran kontaminaatiomittauksen tulos saadaan muunnettua pulssitaajuudesta aktiivisuuskatteeksi kaavalla

$$A_S = \frac{n - n_B}{\varepsilon_i \cdot \varepsilon_s \cdot W} \quad (5)$$

missä A_S on aktiivisuuskate, n on suoraan pinnalta mitattu pulssitaajuus, n_B on taustasäteilyn aiheuttama pulssitaajuus, ε_i on ilmaisimen efektiivisyys, ε_s on lähteen efektiivisyys ja W on ilmaisimen pinta-ala. Lähteen efektiivisyys on 0,5.

Epäsuoraa kontaminaatiomittausta sovellettaessa pyyhintänäytteen pulssitaajuus muutetaan aktiivisuuskatteeksi kaavalla

$$A_S = \frac{n - n_B}{\varepsilon_i \cdot \varepsilon_s \cdot F \cdot S} \quad (6)$$

jossa S on pyyhitty pinta-ala ja F on kontaminaation irtoamissuhde. Märkäpyyhkäisyä analysoitaessa oletetaan irtoamissuhteen olevan 0,5.

Pintakontaminaatiomittauksissa aktiivisuuskatteen ja pulssitaajuuden vastaavuus perustuu edellä mainittuihin laskentakaavoihin. Loviisan voimalaitoksella esiintyvän kontaminaation nuklidijakaumalla anturin tehokkuus ε_i on noin 33 %.

$$A_S = \frac{n - n_B}{\varepsilon_i \cdot \varepsilon_s \cdot W} = \frac{33 \text{ cps}}{0,33 \cdot 0,5 \cdot 49 \text{ cm}^2} \approx 4 \frac{1}{\text{s}} / \text{cm}^2 = 4 \text{ Bq} / \text{cm}^2$$

Kuten edellisestä kaavasta käy ilmi, vastaa ELECTRAlla mitattu 33cps noin $4 \text{ Bq} / \text{cm}^2$.

Mikä on YVL-ohjeiden määrittelemä puhtausraja pintakontaminaatiolle. Loviisan voimalaitoksella ELECTRAlla suoritettun kontaminaatiomittauksen raja-arvoksi on asetettu 25cps. Laskennallisesti 33cps riittäisi, mutta pieni varmuusmarginaali on syytä pitää. (Loviisan voimalaitos, 2009.)

3.2 Nutronic NT200

NT200 on Nutronic AB:n valmistama pyyhintänäyteenanalysaattori. Analysaattorissa on detektorina pysyvästi Ar-Co₂:lla täytetty verrannollisuuslaskuri. Laskuri mahdollistaa alfa- ja beetasäteilyn erottelun. Ilmaisin on hyvin epäherkkä gammasäteilylle. Detektorin päällä on 50 mm paksu lyijysuoja, jonka tehtävä on vähentää taustasäteilyn vaikutusta mittaustuloksiin. Laitteeseen on asennettu kaksi identtistä ilmaisinta, joista toinen mittaa näytteen aktiivisuutta ja toinen taustasäteilyä. Kuvassa 3.2 on esitelty Nutronic NT200.



Kuva 3.2 Nutronic NT200 -pyyhintänäyteenanalysaattori

Loviisan voimalaitoksella NT200 on ohjelmoitu oletamaan, että näytteenottopinta-ala on 100 cm². Kuten kaavassa 6 todettiin, on irtoamissuhde märkäpyyhintälappuun kontaminaation osalta F 0,5. Tulokseksi NT200 antaa pinnalla olevan kokonaisaktiivisuuskatteen, ei näytelapun aktiivisuutta. (Loviisan voimalaitos, 2009.)

3.3 Epäsuora pintakontaminaatiomittaus

Suoralla pintakontaminaatiomittauksella tarkoitetaan pintakontaminaation aktiivisuuskatteen määrittämistä suoraan pintaa vastaan kohdistetulla ilmaisimella. Epäsuoralla menetelmällä aktiivisuuskate määritetään pyyhintänäytteellä. Suora menetelmä kohdistuu sekä pinnalta irtoavaan että siihen kiinnittyneeseen kontaminaatioon, kun taas epäsuoramittaus perustuu vain irtoavaan kontaminaatioon.

Mittausmenetelmän valintaan vaikuttavat kontaminaation laatu, aktiivisen aineen kiinnittyminen pintaan, pinnan muoto sekä sijainti ja tärkeimpänä mittauspaikalla vallitseva säteilyn yleistaso. Luotettavin tulos saadaan käyttämättä sekä suoraa että epäsuoraa mittausta.

Loviisan voimalaitoksella irtoavan kontaminaation määrittäminen tapahtuu märkäpyyhintänäytteen avulla. Liuotinaineella kostutetulla huokoisesta materiaalista valmistetulla näytelapulla otetaan kontaminoituneesta pinnasta pyyhintänäyte. Tarkan aktiivisuuskatteen määrittämiseksi pyyhintälapulla pyyhitään $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Pyyhintänäytelappuun arvioidaan tarttuvan 50 % pinnalla olevasta kontaminaatiosta. Märkäpyyhintänäytelappu analysoidaan Nutronic NT200-laitteella. Pyyhintänäyte otetaan kuvan 3.3 mukaisesti.



Kuva 3.3 Pyyhintänäytteen ottaminen

Pyyhintänäytteen tarkkuuteen vaikuttavat monet tekijät, jotka niiden merkitys näkyy näytteenottolappuun tarttuvan kontaminaation määrässä. Muun muassa pintamateriaalin laatu, kontaminaation laatu ja hankausvoimakkuus vaikuttavat tulokseen. Laajan alueen, esimerkiksi ison huonetilan kontaminaatiotason määrittämiseksi on otettava useita näytteitä, koska kontaminaatio ei välttämättä ole levittäytynyt tasaisesti. Erot paikallisesti voivat olla hyvinkin suuria. (Loviisan voimalaitos, 2009.)

3.4 Gammaspektrometri

Gammaspektrometrillä voidaan selvittää näytteen sisältämän radioaktiivisuuden koostumus ja aktiivisuus. Jokaisella radionuklidilla on juuri sille ominainen gammasäteilyn energiajakauma. Tämä energiajakaumaa analysoimalla voidaan näytteen radioaktiiviset nuklidit tunnistaa. Loviisan voimalaitoksella käytettävät

gammaspesktrometrit ovat nestetyyppijäähdytteisiä Canberran valmistamia karakterisoituja HPGe (High Purity Germanium) detektoreja, joista kaksi on tarkoitettu aktiivisten näytteiden analysointiin (herkkyys 25 %) ja kaksi päästönäytteiden analysointiin (60–65%). Spektrien analysointiin käytetään Canberran APEX Lab Productivity Suite ohjelmaa.

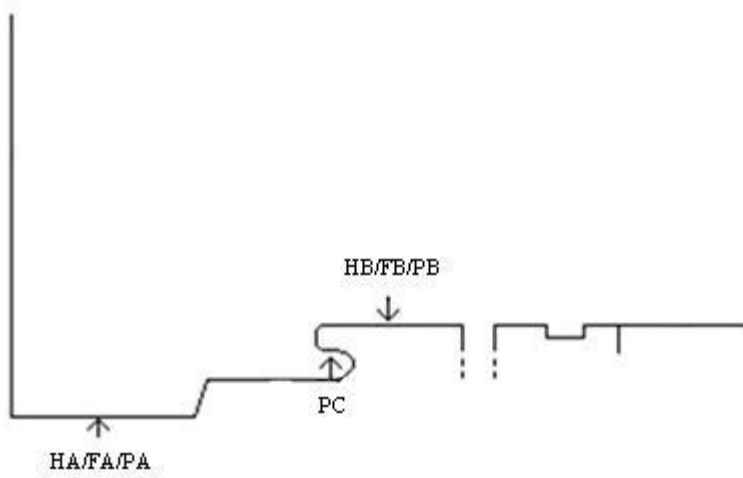
Germaniumilmaisoin perustuu elektori-aukko -parien syntyyn säteilyn ja aineen vuorovaikutuksen seurauksena. Nämä varaukset kerätään sähkökentän avulla virtapulssiksi, jonka suuruus on suoraan verrannollinen absorboituneeseen energiaan. (Ikäheimonen, 2002, 139–142.)

4 NÄYTTEENOTTO

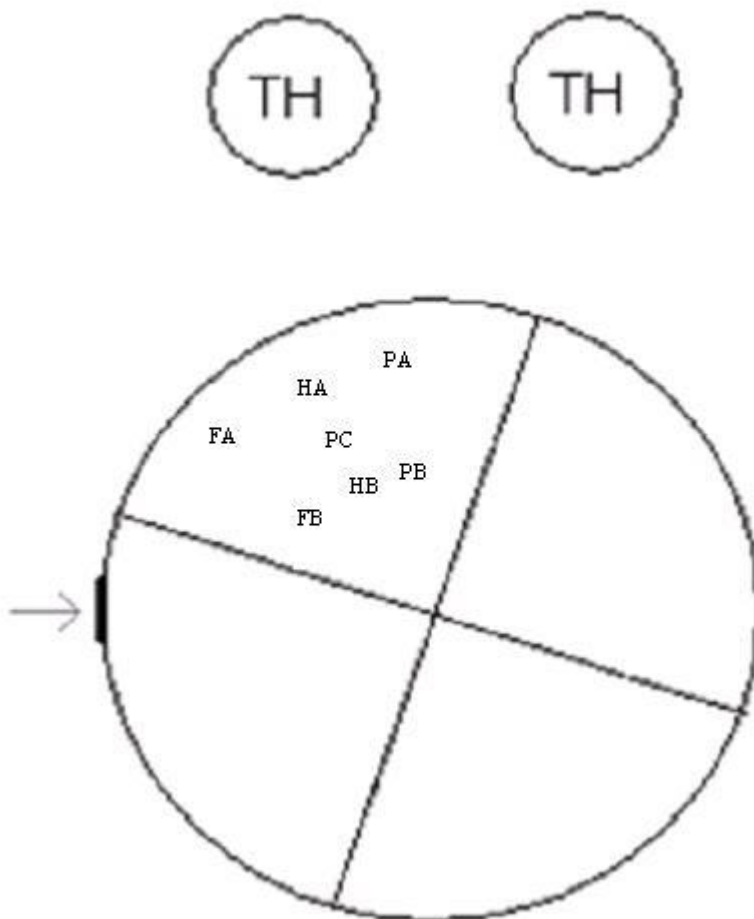
Näytteiden kerääminen tapahtui ennen varsinaisen kuilun pohjan pesun aloittamista. Ennen näytteenottoa pohja oli pesty painepesurilla ja kuivattu näkyvästä liasta. Nykyisen käytännön mukaan kuilun pohjan pesu on jaettu sektoreihin. Yksi sektori on kerrallaan käsittelyssä muiden ollessa muovitettuna. Sektorien määrä on vaihdellut vuosittain, esimerkiksi syksyllä 2011 kuilun pohja oli jaettu neljään sektoriin. Näin estetään kontaminaation leviäminen likaisilta alueilta jo puhdistetuille alueille. Tässä vaiheessa kontaminaatiotasot vaihtelevat noin välillä $20 - 500 \text{ Bq/cm}^2$, pinnasta ja näytteenotto-kohdasta riippuen. Kuten aikaisemmin on todettu, kontaminaatiotasot saattavat vaihdella paljon pienelläkin alueella.

Märkäpyyhkäisyinäytteitä kerättiin yhteensä 56 kappaletta. Lisäksi otettiin talteen puhdistuksessa käytetyt harsorätit sekä froteepyyhkeet.

Näytteiden ottoa varten yhden vielä puhdistamattoman sektorin muovitukseen leikattiin 7 kappaletta $20 \times 20 \text{ cm}^2$ kokoisia aukkoja, jotka muovitettiin reunoistaan kiinni kuilunpohjaan. Näin pysyttiin rajaamaan puhdistettava alue ja estämään kontaminaation leviäminen likaisilta alueilta näytteenottokohtaan. Kuvissa 4.1 ja 4.2 on esitelty kuilun pohjaa ja näytteenottokohtia. Lisäksi liitteessä 1 on valokuva näytteenotosta reaktorikuilunpohjalta.



Kuva 4.1 Kuilunpohjan näytteenottokohdat sivusta päin katsottuna



Kuva 4.2 Kuilunpohjan näytteenottokohdat ylhäältä päin katsottuna

Näytteitä kerättiin kolmella eri metodilla:

1. Harsorätti kostutettuna industolilla. Näytteitä otettiin järjestyksessä; pyyhkäisynäyte, puhdistus industolharsolla, pyyhkäisynäyte, puhdistus industolharsolla jne. Kunnnes pyyhkäisynäytteitä oli 8 kappaletta ja harsoja 7 kappaletta.
2. Froteepyyhe kostutettuna industolilla. Näytteitä otettiin järjestyksessä; pyyhkäisynäyte, puhdistus froteepyyhkeellä, pyyhkäisynäyte, puhdistus froteepyyhkeellä jne. Kunnnes pyyhkäisynäytteitä oli 8 kappaletta ja froteepyyhkeitä 7 kappaletta.
3. Näytteenottokohdasta otettiin 8 kappaletta pyyhkäisynäytteitä ilman välipuhdistuksia.

Näytteitä kerättiin myös kahdelta eri pinnalta:

1. Näytteet kohdista HA, FA ja PA otettiin ns. kulkureitiltä, joka on kirkasta terästä.
2. Näytteet kohdista HB, FB, PB ja PC otettiin ns. laippatasolta, joka on mustaa rautaa ja huokoisempana materiaalina imee itseensä kontaminaatiota kirkasta terästä enemmän.

Kohdissa HA ja HB puhdistuksessa käytettiin industolilla kostutettuja harsoja. Kohdissa FA ja FB puhdistuksessa käytettiin industolilla kostutettuja froteepyyhkeitä ja kohdissa PA, PB ja PC ei tehty välipuhdistuksia.

Näytteenotossa kiinnitettiin erityistä huomiota näytteiden luotettavuuteen esimerkiksi vaihtamalla suojahanskoja riittävän usein. Jokainen pyyhkäisynäyte, harsorätti ja froteepyyhe laitettiin erikseen muovipusseihin.

5 TULOKSET

Näytteenoton jälkeen märkäpyyhintänäytteet analysoitiin Nutronic NT200 -pyyhintänäyteenalysoitsalla ja froteepyyhkeet sekä harsot mitattiin ELECTRALLA kontaminaatiotasojen selvittämiseksi.

Tämän lisäksi kaikki pyyhkäisynäytteet, harsot sekä froteepyyhkeet analysoitiin radiokemianlaboratoriossa gammaspektrometrillä nuklidijakauman selvittämiseksi. Taulukossa 5.1 on esitelty Nutronic NT200 -pyyhintänäyteenalysoitsan antamat tulokset märkäpyyhintänäytteistä. Tulokset ovat yksikköä Bq/cm^2 .

Taulukko 5.1 Kontaminaatiotasot näytteenoton edetessä

Näytesarja	Märkäpyyhintänäytteen järjestysnumero							
	1	2	3	4	5	6	7	8
HA	31	6,5	2,5	2	1,4	1,4	0,7	0,5
FA	28	22,4	4,5	4	3,2	0,6	1,3	1,5
PA	18,8	11,5	10	7,5	4,9	3,2	2,7	1,8
HB	234	27	8	7	5	5	3	2
FB	123	39	23	12,5	11	7	6	5,5
PB	165	128	60	46	35	32	26	20,5
PC	340	190	130	65	80	25	37	19

Taulukossa 5.2 on esitelty gammaspektrometrin antama märkäpyyhkäisynäytteiden kokonaisaktiivisuus. Tulokset ovat yksikköä Bq/cm^2 .

Taulukko 5.2 Märkäpyyhintänäytteiden kokonaisaktiivisuus

Näytteenotto kohta	Märkäpyyhintänäytteen järjestysnumero							
	1	2	3	4	5	6	7	8
HA	38,64	8,90	3,88	2,93	1,94	1,81	1,04	1,08
FA	31,05	33,49	5,82	5,53	3,97	1,39	1,78	1,74
PA	30,05	15,61	13,42	11,78	7,81	4,95	4,32	3,43
HB	233,66	26,19	8,19	6,77	5,09	5,89	3,45	2,92
FB	147,21	44,00	25,88	13,75	11,16	7,65	5,77	6,50
PB	224,15	160,43	82,28	49,23	45,97	31,32	27,26	24,40
PC	604,62	230,54	168,45	86,31	86,67	78,89	41,83	19,96

Taulukossa 5.3 on esitetty pyyhkäisynäytesarjan HA nuklidijakauma. Tulokset ovat yksikköä Bq/cm^2 . Suluissa prosenttiosuudet.

Taulukko 5.3 Pyyhkäisynäytesarjan HA nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7	8
Cr-51	4,14 (10,72)	0,67 (7,51)	0,25 (6,45)	0,24 (8,21)	0 (0)	0,11 (6,06)	0 (0)	0 (0)
Mn-54	1,12 (2,90)	0,05 (0,67)	0,05 (1,29)	0 (0)	0 (0)	0,01 (0,5)	0,01 (0,97)	0 (0)
Co-58	1,65 (4,27)	0,12 (1,34)	0,06 (1,55)	0,04 (1,37)	0,02 (1,03)	0,03 (1,65)	0,02 (1,93)	0,02 (1,85)

Fe-59	0,60 (1,55)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Co-60	0,72 (1,86)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Nb-95	1,47 (3,80)	0,21 (2,35)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Zr-95	1,06 (2,74)	0,08 (0,90)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Ag-110m	21,30 (55,13)	7,18 (80,47)	3,27 (84,40)	2,46 (84,16)	1,79 (92,08)	1,53 (84,26)	0,92 (88,91)	0,97 (89,86)
Sb-122	1,19 (3,08)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Te-123m	0,48 (1,25)	0,07 (0,79)	0,03 (0,73)	0,03 (1,13)	0,03 (1,44)	0,02 (1,04)	0,01 (0,86)	0,01 (1,36)
Sb-124	4,90 (12,68)	0,53 (5,96)	0,22 (5,58)	0,15 (5,13)	0,11 (5,45)	0,12 (6,44)	0,08 (7,33)	0,07 (6,93)

Taulukossa x on esitetty pyyhkäisynäytesarjan FA nuklidijakauma. Tulokset ovat yksikköä Bq/cm^2 . Suluissa prosenttiosuudet.

Taulukko 5.4 Pyyhkäisynäytesarjan FA nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7	8
Cr-51	2,32 (7,47)	1,36 (4,06)	0,25 (4,30)	0,17 (3,07)	0,15 (3,83)	0,08 (5,70)	0 (0)	0,07 (4,05)
Mn-54	0,83 (2,69)	0,09 (0,27)	0 (0)	0,03 (0,47)	0,03 (0,73)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Co-58	1,05 (3,38)	0,25 (0,74)	0,07 (1,22)	0,07 (1,20)	0,02 (0,55)	0,01 (0,88)	0,01 (0,72)	0 (0)

Fe-59	0,50 (1,60)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Co-60	0,38 (1,23)	0,16 (0,49)	0 (0)	0 (0)	0,04 (1,03)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Nb-95	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,10 (1,88)	0,07 (1,64)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Zr-95	0,45 (1,46)	0,11 (0,32)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Ag-110m	22,30 (71,82)	30,00 (89,59)	5,17 (88,86)	4,94 (89,27)	3,50 (88,20)	1,24 (89,20)	1,68 (94,38)	1,57 (90,34)
Sb-122	0,61 (1,98)	0,31 (0,92)	0,07 (1,17)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Te-123m	0,24 (0,78)	0,17 (0,50)	0,04 (0,66)	0,02 (0,44)	0,02 (0,58)	0,01 (0,47)	0,01 (0,70)	0,02 (0,92)
Sb-124	2,36 (7,60)	1,04 (3,11)	0,22 (3,80)	0,20 (3,67)	0,14 (3,43)	0,05 (3,74)	0,07 (4,20)	0,08 (4,70)

Taulukossa 5.5 on esitetty pyyhkäisynäytesarjan PA nuklidijakauma. Tulokset ovat yksikköä Bq/cm^2 . Suluissa prosenttiosuudet.

Taulukko 5.5 Pyyhkäisynäytesarjan PA nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7	8
Cr-51	3,68 (12,25)	1,48 (9,48)	1,51 (11,26)	0,97 (8,21)	0,82 (10,47)	0,42 (8,48)	0,35 (8,20)	0,25 (7,20)
Mn-54	0,36 (1,19)	0,15 (0,95)	0,10 (0,72)	0,07 (0,62)	0,04 (0,55)	0 (0)	0,02 (0,52)	0,02 (0,51)
Co-58	0,62 (2,07)	0,27 (1,74)	0,17 (1,30)	0,13 (1,11)	0,07 (0,92)	0,06 (1,19)	0,03 (0,78)	0,03 (0,84)

Fe-59	0,28 (0,94)	0,12 (0,76)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Co-60	0,27 (0,89)	0,11 (0,68)	0,09 (0,64)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Nb-95	1,16 (3,86)	0 (0)	0,17 (1,30)	0,28 (2,38)	0,20 (2,56)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Zr-95	0,84 (2,79)	0,20 (1,26)	0,15 (1,10)	0 (0)	0,07 (0,94)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Ag-110m	20,10 (66,89)	12,30 (78,81)	10,50 (78,26)	9,63 (81,77)	6,28 (80,37)	4,21 (85,04)	3,72 (86,15)	3,00 (87,44)
Sb-122	0,57 (1,90)	0 (0)	0 (0)	0,13 (1,10)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Te-123m	0,24 (0,81)	0,14 (0,90)	0,11 (0,81)	0,08 (0,68)	0,05 (0,64)	0,04 (0,85)	0,03 (0,71)	0,02 (0,61)
Sb-124	1,93 (6,42)	0,85 (5,42)	0,62 (4,62)	0,49 (4,13)	0,28 (3,56)	0,22 (4,44)	0,16 (3,64)	0,12 (3,41)

Taulukossa 5.6 on esitetty pyyhkäisynäytesarjan HB nuklidijakauma. Tulokset ovat yksikköä Bq/cm^2 . Suluissa prosenttiosuudet.

Taulukko 5.6 Pyyhkäisynäytesarjan HB nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7	8
Cr-51	9,80 (4,19)	0,98 (3,75)	0,34 (4,13)	0,30 (4,46)	0,15 (2,91)	0,20 (3,36)	0,18 (5,22)	0,10 (3,39)
Mn-54	7,36 (3,15)	0,26 (0,98)	0,07 (0,84)	0,08 (1,21)	0,05 (1,00)	0,05 (0,92)	0,03 (0,74)	0,03 (1,15)
Co-58	8,32 (3,56)	1,31 (5,00)	0,62 (7,62)	0,61 (8,95)	0,62 (12,22)	0,69 (11,74)	0,38 (10,91)	0,40 (13,72)

Fe-59	4,64 (1,99)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Co-60	2,97 (1,27)	0,21 (0,78)	0,07 (0,84)	0,06 (0,91)	0 (0)	0,08 (1,42)	0,03 (0,92)	0 (0)
Nb-95	2,40 (1,03)	0,08 (0,32)	0,10 (1,23)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Zr-95	1,38 (0,59)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Ag-110m	175,00 (74,90)	21,10 (80,56)	6,21 (75,83)	5,05 (74,58)	3,57 (70,14)	4,05 (68,71)	2,45 (71,07)	1,90 (64,99)
Sb-122	4,74 (2,03)	0,43 (1,64)	0,11 (1,34)	0,12 (1,83)	0,19 (3,69)	0,14 (2,39)	0 (0)	0,10 (3,29)
Te-123m	0,85 (0,36)	0,13 (0,51)	0,03 (0,41)	0,03 (0,39)	0,02 (0,46)	0,03 (0,59)	0,02 (0,59)	0,02 (0,67)
Sb-124	16,20 (6,93)	1,69 (6,45)	0,64 (7,75)	0,52 (7,68)	0,49 (9,59)	0,64 (10,87)	0,36 (10,56)	0,37 (12,79)

Taulukossa 5.7 on esitetty pyyhkäisynäytesarjan FB nuklidijakauma. Tulokset ovat yksikköä Bq/cm^2 . Suluissa prosenttiosuudet.

Taulukko 5.7 Pyyhkäisynäytesarjan FB nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7	8
Cr-51	8,02 (5,45)	2,51 (5,70)	1,40 (5,41)	0,65 (4,70)	0,52 (4,67)	0,40 (5,22)	0,21 (3,59)	0,25 (3,88)
Mn-54	2,46 (1,67)	0,24 (0,55)	0,12 (0,45)	0,07 (0,50)	0,06 (0,53)	0,05 (0,61)	0,05 (0,81)	0,04 (0,64)
Co-58	4,11 (2,79)	1,13 (2,57)	0,76 (2,92)	0,61 (4,41)	0,61 (5,45)	0,51 (6,65)	0,55 (9,51)	0,60 (9,17)

Fe-59	1,07 (0,73)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Co-60	1,41 (0,96)	0 (0)	0,13 (0,50)	0,09 (0,65)	0,07 (0,63)	0 (0)	0 (0)	0,06 (0,88)
Nb-95	1,89 (1,28)	0 (0)	0 (0)	0,17 (1,20)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Zr-95	1,07 (0,73)	0,12 (0,27)	0,04 (0,15)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Ag-110m	112,00 (76,08)	36,90 (83,86)	20,90 (80,76)	10,70 (77,80)	8,47 (75,91)	5,70 (74,50)	4,26 (73,81)	4,84 (74,46)
Sb-122	3,72 (2,53)	0,38 (0,86)	0,61 (2,35)	0,31 (2,26)	0,40 (3,58)	0,26 (3,33)	0 (0)	0,15 (2,29)
Te-123m	0,86 (0,59)	0,25 (0,58)	0,16 (0,62)	0,07 (0,47)	0,06 (0,54)	0,05 (0,61)	0,02 (0,41)	0,03 (0,39)
Sb-124	10,60 (7,20)	2,47 (5,61)	1,77 (6,84)	1,10 (8,00)	0,97 (8,69)	0,70 (9,08)	0,69 (11,87)	0,54 (8,29)

Taulukossa 5.8 on esitetty pyyhkäisynäytesarjan PB nuklidijakauma. Tulokset ovat yksikköä Bq/cm^2 . Suluissa prosenttiosuudet.

Taulukko 5.8 Pyyhkäisynäytesarjan PB nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7	8
Cr-51	18,10 (8,07)	5,08 (3,17)	3,45 (4,19)	2,00 (4,06)	2,83 (6,16)	1,44 (4,60)	1,03 (3,78)	1,27 (5,21)
Mn-54	7,53 (3,36)	2,68 (1,67)	2,05 (2,49)	0,85 (1,72)	0,67 (1,47)	0,53 (1,70)	0,30 (1,10)	0,41 (1,70)
Co-58	10,30 (4,60)	5,34 (3,33)	3,12 (3,79)	2,14 (4,35)	2,93 (6,37)	1,20 (3,83)	0,98 (3,59)	1,10 (4,51)

Fe-59	3,12 (1,39)	1,27 (0,79)	0,94 (1,14)	0,40 (0,80)	0,17 (0,37)	0 (0)	0 (0)	0,16 (0,65)
Co-60	1,37 (1,37)	1,49 (0,93)	0,85 (1,03)	0,52 (1,06)	0,58 (1,26)	0,40 (1,29)	0 (0)	0,27 (1,09)
Nb-95	3,53 (1,57)	6,07 (3,78)	0 (0)	0,96 (1,94)	0,47 (1,02)	0,25 (0,80)	0 (0)	0,47 (1,92)
Zr-95	2,76 (1,23)	2,72 (1,70)	0,64 (0,77)	0,35 (0,70)	0,23 (0,51)	0,20 (0,64)	0,19 (0,69)	0,15 (0,61)
Ag-110m	160,00 (71,38)	125,00 (77,92)	66,40 (80,70)	38,50 (78,21)	35,50 (77,22)	25,50 (81,41)	23,10 (84,74)	19,20 (78,70)
Sb-122	2,26 (1,19)	2,48 (1,55)	0,58 (0,71)	0,74 (1,50)	0,46 (1,00)	0,29 (0,91)	0,30 (1,09)	0,26 (1,07)
Te-123m	0,68 (0,30)	0,38 (0,23)	0,23 (0,28)	0,16 (0,32)	0,16 (0,35)	0,12 (0,38)	0,09 (0,32)	0,08 (0,33)
Sb-124	12,40 (5,53)	7,92 (4,94)	4,03 (4,90)	2,62 (5,32)	1,97 (4,29)	1,39 (4,44)	1,28 (4,70)	1,03 (4,22)

Taulukossa 5.9 on esitetty pyyhkäisynäytestarjan PC nuklidijakauma. Tulokset ovat yksikköä Bq/cm^2 . Suluissa prosenttiosuudet.

Taulukko 5.9 Pyyhkäisynäytestarjan PC nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7	8
Cr-51	103,00 (17,04)	14,20 (6,16)	9,23 (5,48)	4,95 (5,73)	4,69 (5,41)	2,70 (3,42)	3,19 (7,63)	1,80 (9,02)
Mn-54	22,90 (3,79)	4,19 (1,82)	3,93 (2,33)	1,38 (1,60)	1,30 (1,50)	1,07 (1,36)	3,16 (7,56)	0,81 (4,06)
Co-58	139,00 (22,99)	4,86 (2,11)	3,46 (2,05)	1,40 (1,65)	1,59 (1,83)	1,08 (1,37)	3,32 (7,94)	0,89 (4,47)

Fe-59	10,00 (1,65)	1,38 (0,60)	0 (0)	0 (0)	0,38 (0,44)	0,36 (0,46)	1,59 (3,80)	0,27 (1,37)
Co-60	9,92 (1,64)	1,72 (0,75)	2,74 (1,63)	1,27 (1,47)	0,75 (0,87)	0,45 (0,56)	1,16 (2,77)	0,33 (1,67)
Nb-95	37,10 (6,14)	4,31 (1,87)	1,87 (1,11)	2,02 (2,34)	2,90 (3,35)	26,80 (33,97)	0,53 (1,27)	0,21 (1,07)
Zr-95	24,20 (4,00)	0,72 (0,31)	1,09 (0,65)	0,31 (0,36)	1,34 (1,55)	21,70 (27,51)	0,31 (0,74)	0,13 (0,63)
Ag-110m	247,00 (40,85)	193,00 (83,72)	141,00 (83,70)	73,30 (84,92)	71,80 (82,83)	24,00 (30,42)	26,80 (64,08)	15,00 (75,14)
Sb-122	0 (0)	0,80 (0,35)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,22 (0,52)	0 (0)
Te-123m	0 (0)	0,23 (0,10)	0,33 (0,20)	0,10 (0,12)	0,08 (0,09)	0,05 (0,07)	0,08 (0,18)	0,04 (0,19)
Sb-124	11,50 (1,90)	5,14 (2,23)	4,80 (2,85)	1,58 (1,83)	1,85 (2,13)	0,68 (0,86)	1,47 (3,51)	1,48 (2,38)

Taulukossa 5.10 on esitetty näytesarjan HA harsorättien nuklidijakauma. Tulokset ovat prosenttiosuuksia kokonaisaktiivisuudesta.

Taulukko 5.10 Näytesarjan HA harsorättien nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7
Cr-51	5,85	4,96	4,30	4,11	32,38	3,43	1,69
Mn-54	1,25	0,57	0,62	1,33	1,19	3,37	0,00
Co-58	2,00	0,92	0,80	1,40	0,89	3,19	1,97

Fe-59	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,89	0,00
Co-60	1,07	0,77	1,07	1,31	1,11	1,86	1,24
Nb-95	4,22	0,85	0,00	8,28	0,91	0,00	0,74
Zr-95	1,32	0,97	0,34	6,89	0,00	1,08	0,69
Ag-110m	74,21	85,16	87,65	72,28	60,00	79,34	87,66
Te-123m	0,84	0,69	0,75	0,63	0,45	0,72	0,67
Sb-124	8,68	5,09	4,46	3,78	3,06	6,13	5,33

Taulukossa 5.11 on esitetty näytesarjan FA froteepyyhkeiden nuklidijakauma. Tulokset ovat prosenttiosuuksia kokonaisaktiivisuudesta.

Taulukko 5.11 Näytesarjan FA froteepyyhkeiden nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7
Cr-51	3,71	4,13	4,93	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn-54	1,35	0,56	1,34	12,62	4,01	0,52	8,28
Co-58	1,81	0,98	2,45	3,85	4,22	1,07	4,70
Fe-59	0,51	0,00	0,00	1,60	1,17	0,00	4,92

Co-60	0,79	0,56	0,82	4,17	1,65	0,51	2,74
Nb-95	4,05	3,39	3,00	2,98	3,69	0,00	0,00
Zr-95	1,01	0,46	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00
Ag-110m	81,38	85,88	83,55	71,68	81,99	94,14	76,08
Te-123m	0,54	0,39	0,42	0,41	0,48	0,21	0,69
Sb-124	4,83	3,66	3,06	2,67	2,79	3,55	2,60

Taulukossa 5.12 on esitetty näytesarjan HB harsorättien nuklidijakauma. Tulokset ovat prosenttiosuuksia kokonaisaktiivisuudesta.

Taulukko 5.12 Näytesarjan HB harsorättien nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7
Cr-51	3,03	3,23	0,00	5,58	2,22	3,12	2,69
Mn-54	2,56	0,60	0,77	1,02	1,86	1,00	0,84
Co-58	3,67	4,30	6,17	7,35	8,47	7,95	6,72
Fe-59	0,95	0,00	0,23	0,00	0,67	0,00	0,00
Co-60	0,89	0,65	0,63	0,67	0,94	0,71	0,50

Nb-95	3,02	0,10	0,00	0,00	2,91	2,67	2,66
Zr-95	0,47	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ag-110m	80,97	84,93	84,43	76,61	74,09	76,27	77,79
Te-123m	0,32	0,40	0,52	0,45	0,43	0,44	0,39
Sb-124	4,12	5,61	7,26	8,32	8,42	7,84	8,40

Taulukossa 5.13 on esitetty näytesarjan FB froteepyyhkeiden nuklidijakauma. Tulokset ovat prosenttiosuuksia kokonaisaktiivisuudesta.

Taulukko 5.13 Näytesarjan FB froteepyyhkeiden nuklidijakauma

	1	2	3	4	5	6	7
Cr-51	3,57	3,92	6,88	4,83	0,00	0,00	4,12
Mn-54	1,51	0,59	0,81	0,59	1,02	0,77	0,72
Co-58	2,80	2,58	3,28	4,19	6,01	5,96	5,40
Fe-59	0,73	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00
Co-60	0,79	0,32	0,48	0,34	0,81	0,55	0,38
Nb-95	3,72	0,45	3,00	0,00	0,00	0,73	0,00

Zr-95	0,45	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ag-110m	80,95	85,84	79,33	82,18	83,72	83,60	79,66
Te-123m	0,37	0,31	0,31	0,40	0,41	0,41	0,42
Sb-124	5,12	5,72	5,92	7,47	7,66	7,97	9,30

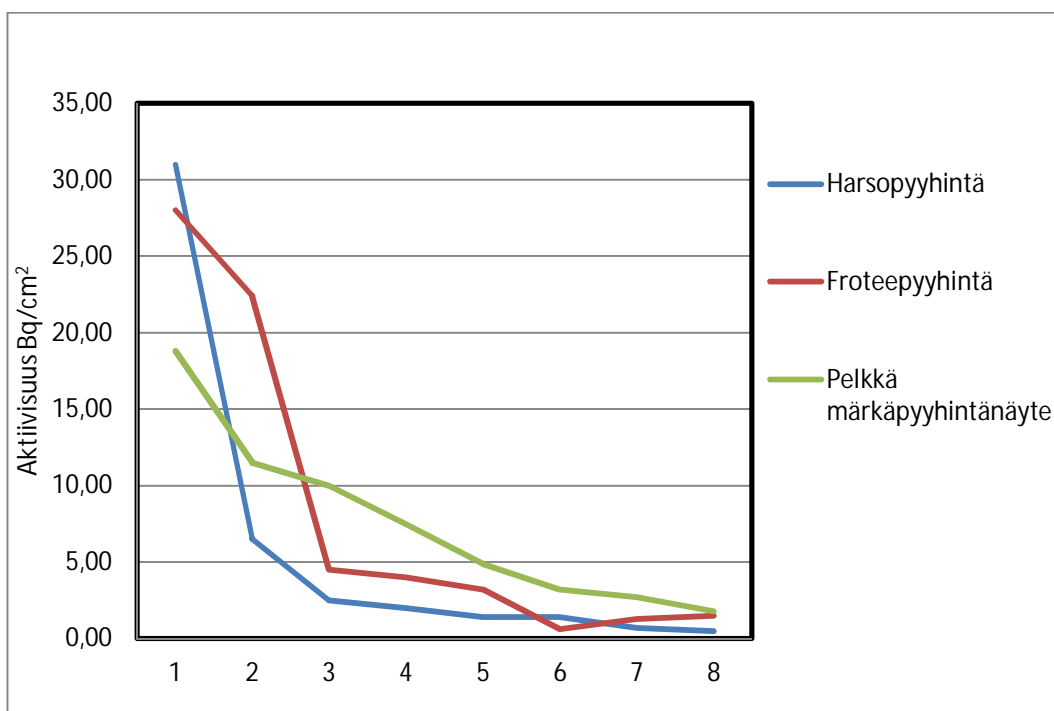
6 TULOSTEN TARKASTELU

Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon muutamia näytteenottoon sekä säteilyyn liittyviä seikkoja.

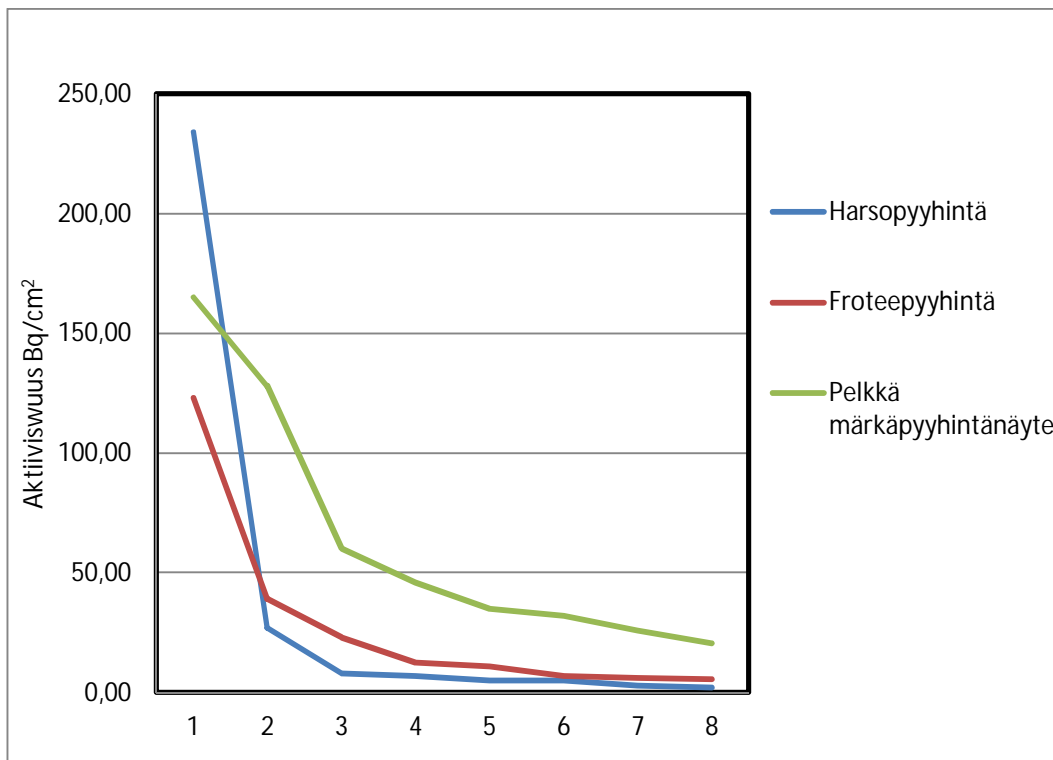
Säteily on luonteeltaan statistista. Radioaktiivinen hajoaminen on luonteeltaan satunnaisia. Tämän vuoksi aktiivisuus ei ole koskaan täysin tarkka-arvoista. Suuremmilla pitoisuuksilla tämä virhe tasoittuu. Märkäpyyhintänäytteenotossa huolimaton näytteenotto aiheuttaa suuria virheitä lopputuloksiin. Tähän vaikuttavat mm. pintamateriaalin laatu, kontaminaation laatu, hankausvoimakkuus ja näytteenottoalan laajuus. Näytteenotossa kiinnitettiin erityistä huomiota näiden tekijöiden minimoimiseksi.

6.1 Harso- ja froteepyyhinnän erot

Kuvissa 6.1 ja 6.2 on esitelty mittaustuloksia pinnoilta A ja B graafisessa muodossa.



Kuva 6.1 Nutronic NT antamat tulokset kontaminaatiotasosta pinnalla A

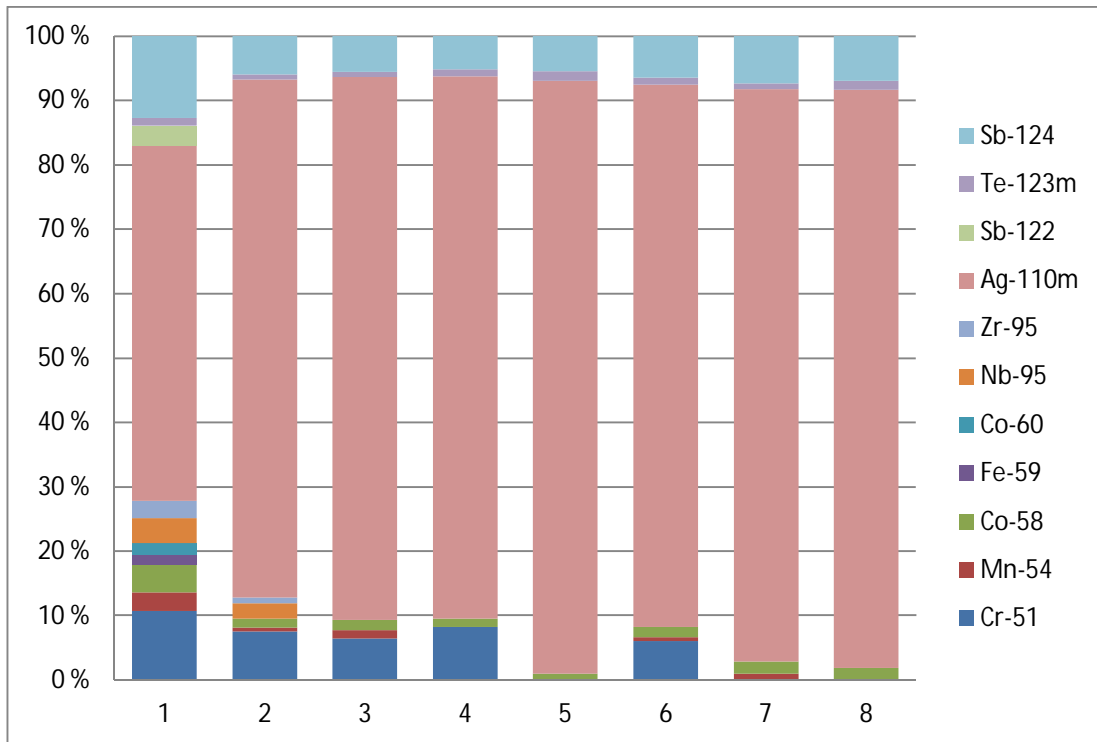


Kuva 6.2 Nutronic NT antamat tulokset kontaminaatiotasosta pinnalla B

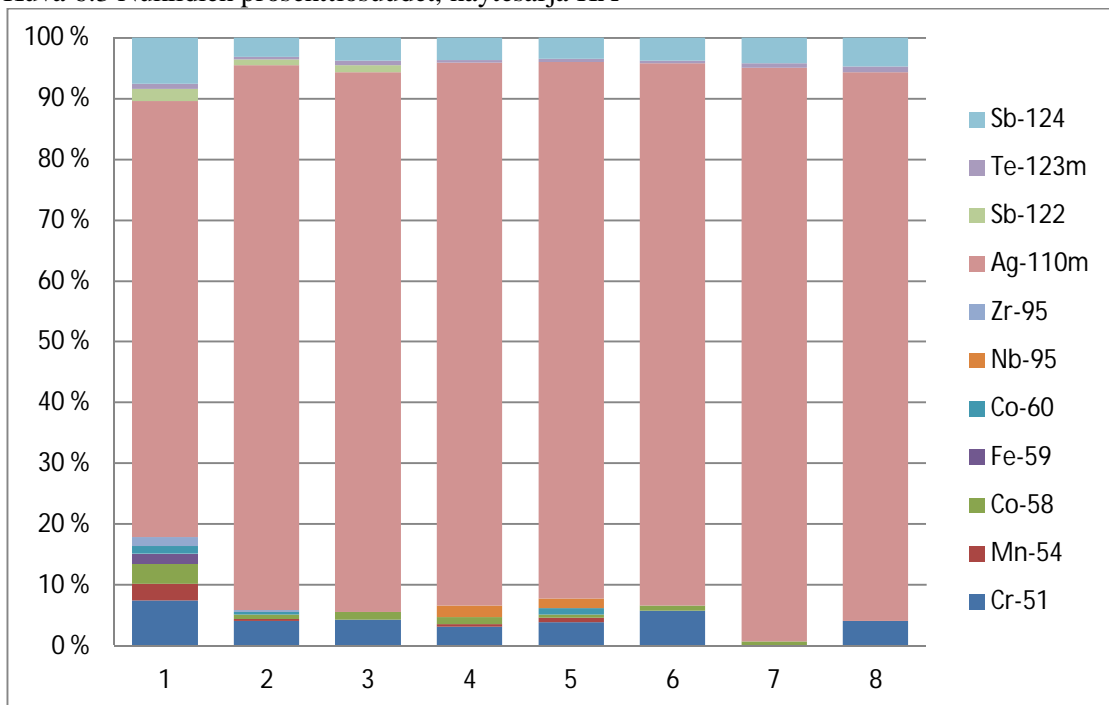
Huomataan, että molemmilla pinnoilla aktiivisuus saadaan nopeammin laskemaan käytettäessä harsopyyhintää froteepyyhinnän sijasta. Useamman pyyhintäkerran jälkeen erot tasaantuvat. Kuitenkin on huomattava, että ero pelkkään märkäpyyhintänäytteenottoon on huomattava. Kuten aikaisemmin on todettu, saattavat kontaminaatiotasot paikallisesti vaihdella suurestikin. Tämä ei kuitenkaan estä havaitsemasta sitä tosi asiaa, että harsopyyhintä on $> 10 \text{ Bq/cm}^2$ tasoilla käytetyistä menetelmistä tehokkain. Kontaminaatiotasojen laskiessa noin 5 Bq/cm^2 paikkeille on huomattavissa puhdistustehokkuuden selkeä notkahdus.

6.2 Näytteiden nuklidijakauma pinnalta A

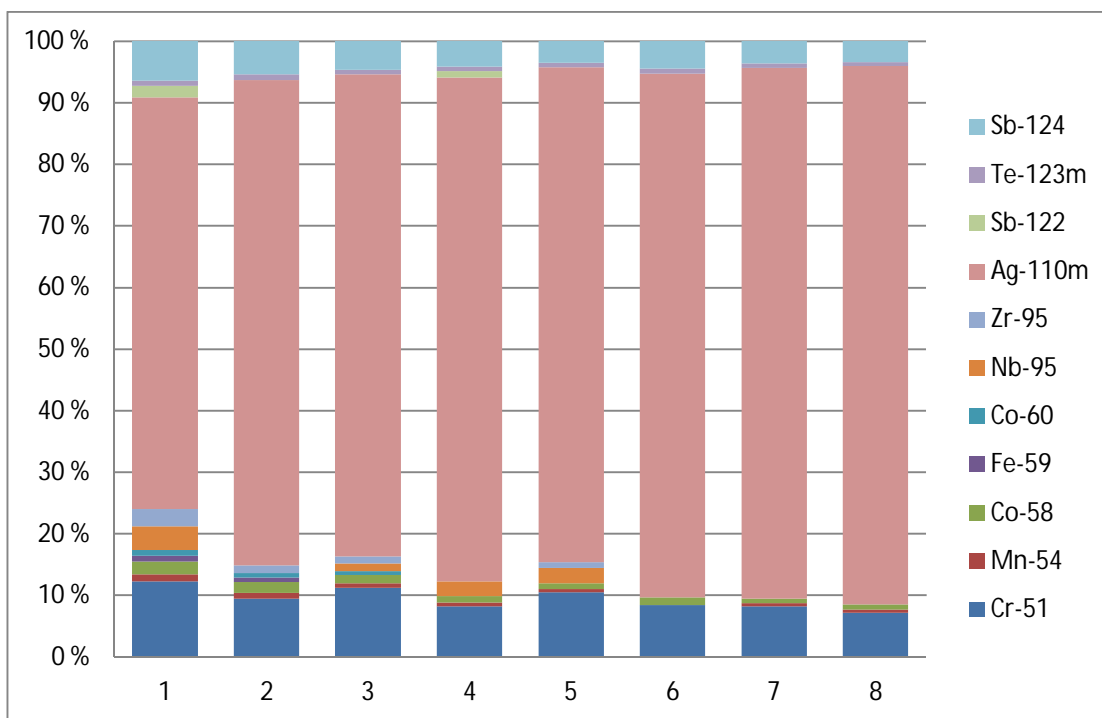
Kuvissa 6.3, 6.4 ja 6.5 on esitelty pinnalta A otettujen näytesarjojen HA, FA ja PA nuklidijakaumat.



Kuva 6.3 Nuklidien prosenttiosuudet, näytesarja HA



Kuva 6.4 Nuklidien prosenttiosuudet, näytesarja FA



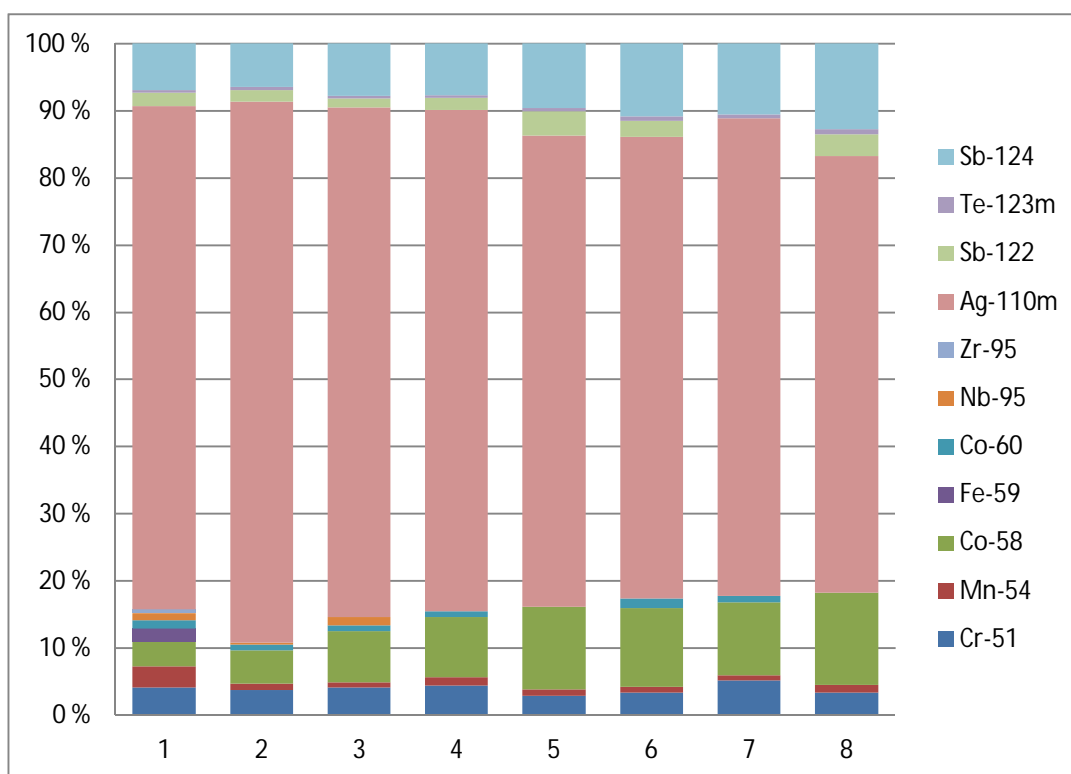
Kuva 6.5 Nuklidien prosenttiosuudet, näytesarja PA

Havaitaan, että parin ensimmäisen puhdistuskerran jälkeen Mn-54, Fe-59, Co-60, Sb-122 ovat kadonneet lähes kokonaan. Cr-51 irtoaa selkeästi harsopyyhinnällä paremmin tältä pinnalta, kuin muilla vertailtavilla metodeilla. Co-58 osuus pysyy suurin piirtein samana läpi kaikkien sarjojen. Nb-95 ja Zr-95 esiintyvät yleensä yhdessä ja näkyvät näytteissä satunnaisina pieninä piikkeinä. Te-123m, vaikkakin osuudeltaan pieni, näkyy selkeästi kaikissa sarjoissa ja säilyttää prosenttiosuutensa muuttumattomana.

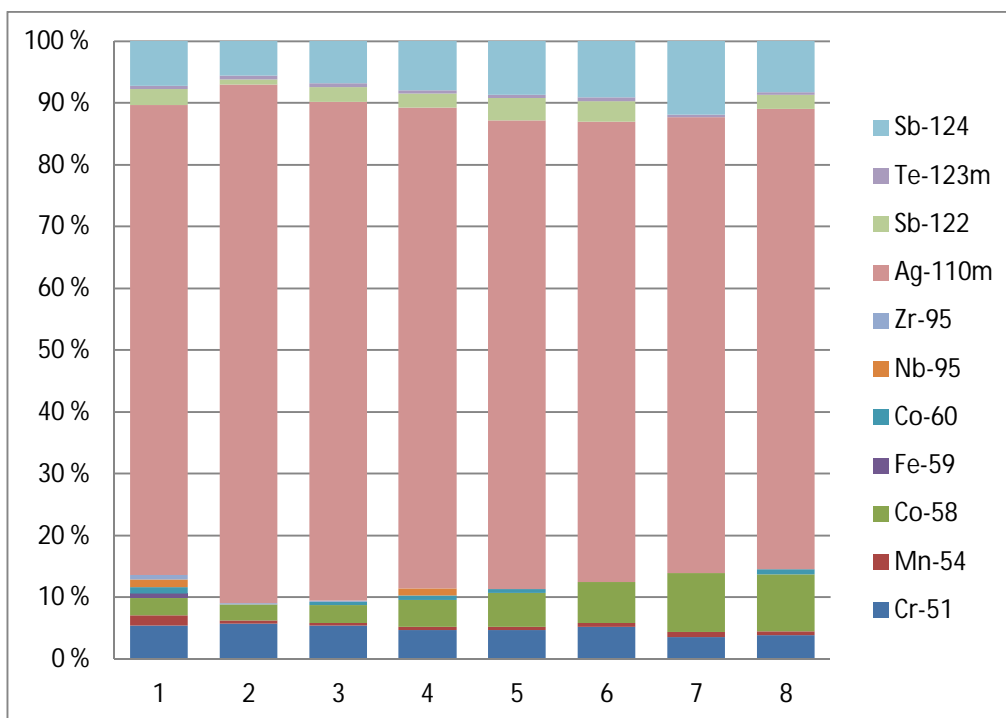
Puhdistuksen edetessä Ag-110m kasvattaa prosenttiosuuttaan tasaisesti ja onkin loppujen lopuksi kontaminaatiotasojen kannalta ainoa merkityksellinen nuklidi. Sb-124 osuus hieman pienenee, mutta on prosenttiosuudeltaan toiseksi suurin nuklidi. Huomion arvoista pinnan A näytesarjoissa on harsopuhdistuksen tehokkuuden ero Cr-51 osalta verrattuna muihin menetelmiin.

6.3 Näytteiden nuklidijakauma pinnalta B

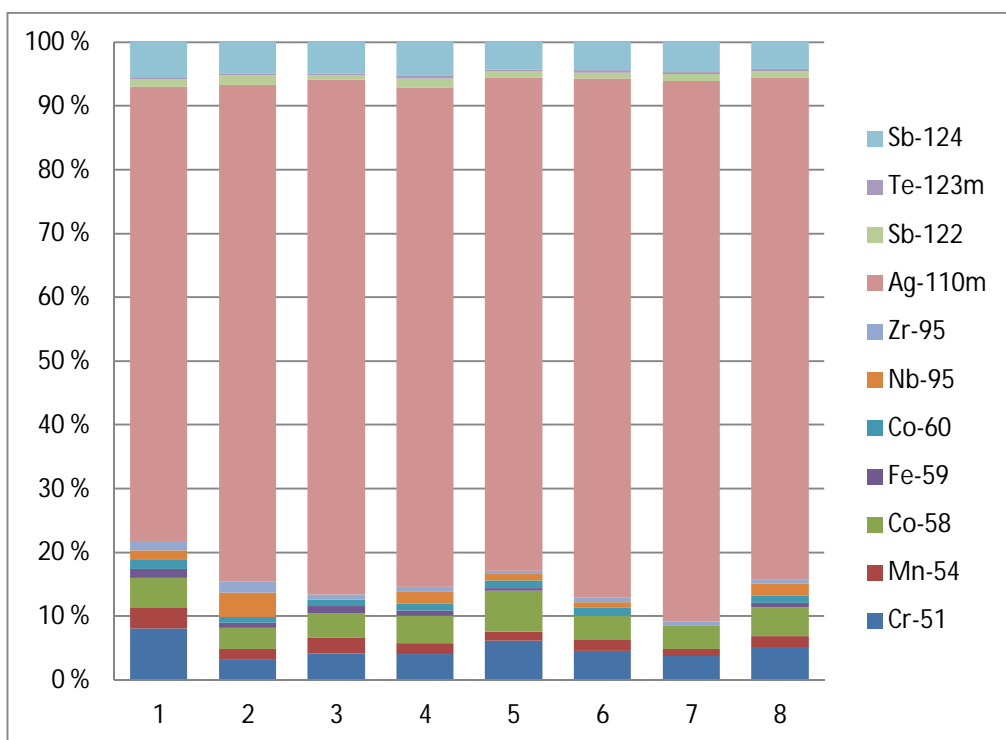
Kuvissa 6.6, 6.7 ja 6.8 on esitelty pinnalta B otettujen näytesarjojen HB, FB ja PB nuklidijakaumat.



Kuva 6.6 Nuklidien prosenttiosuudet, näytesarja HB



Kuva 6.7 Nuklidien prosenttiosuudet, näytesarja FB

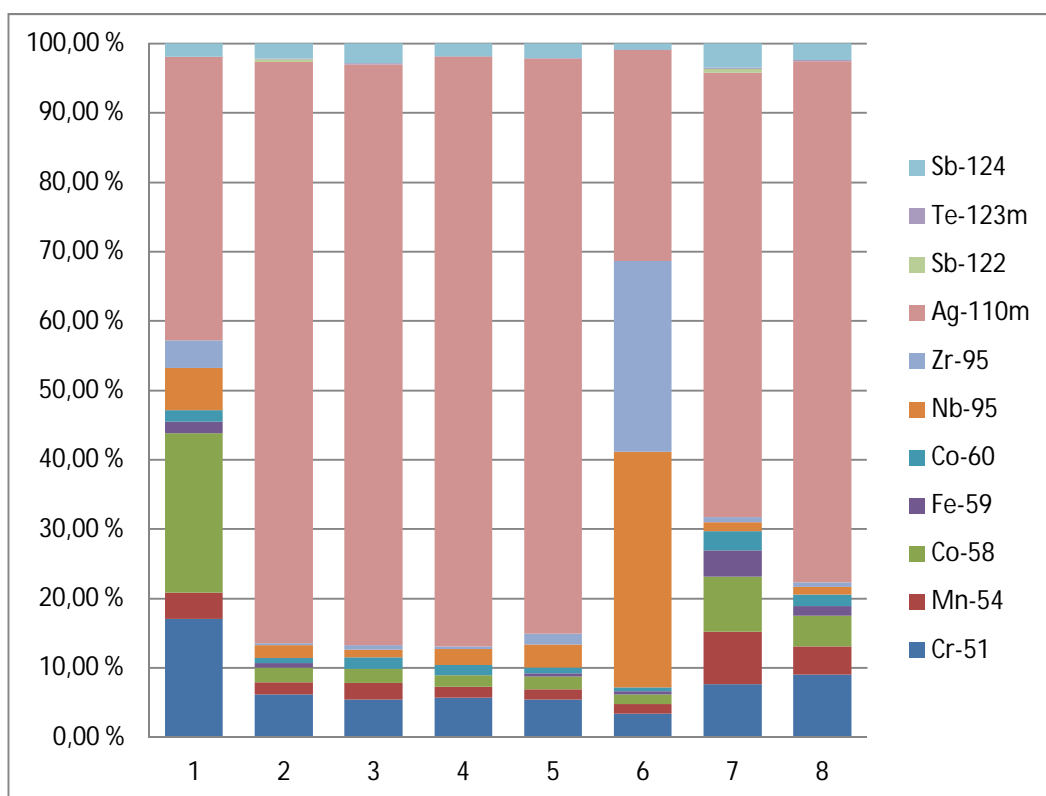


Kuva 6.8 Nuklidien prosenttiosuudet, näytesarja PB

Havaitaan, että jälleen muutaman puhdistuskerran jälkeen nuklidit Mn-54, Fe-59 Co-60 häviävät lähes kokonaan. Sitä vastoin Sb-122 ja Cr-51 säilyttävät osuutensa lähes kokonaan ja ovatkin huomattavissa sarjojen viimeisistäkin näytteistä. Nb-95 ja Zr-95 käyttäytyvät lähes identtisesti pinnan A sarjoihin nähden. Te-123m niin ikään säilyttää pienen osuutensa läpi näytesarjojen. Ag-110m säilyy ylivoimaisesti merkityksellisimpänä nuklidina vaikka sarjojen loppua kohti hieman menettää osuuttaan. Sb-124 nostaa hieman osuuttaan ja aiheuttaa noin 10 prosenttia kokonaiskontaminaatiosta. Suurimpana erona sarjoihin HA, FA ja PA on huomattava Co-58 osuuden huomattava kasvu puhdistuksen edetessä.

6.4 Näytesarja PC pinnalta C

Kuvassa 6.9 on esitelty pinnalta C otettu näytesarja PC nuklidijakauma.

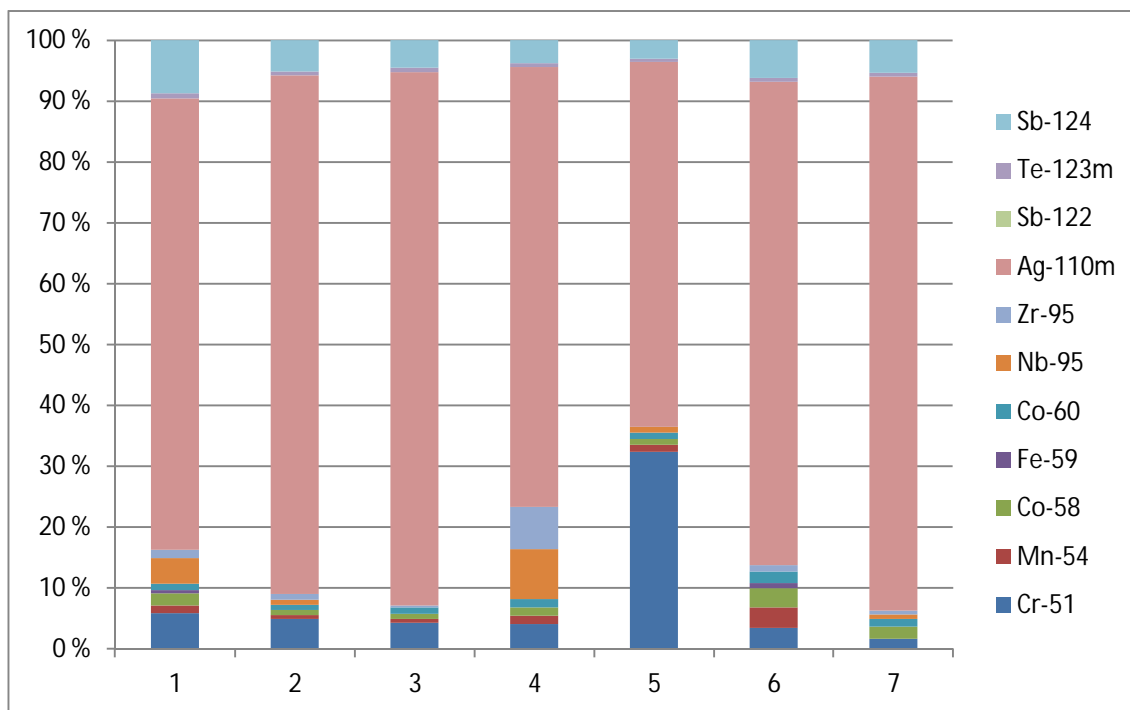


Kuva 6.9 Nuklidien prosenttiosuudet, näytesarja PC

Näytesarja PC otettiin muihin näytesarjoihin verrattuna heikosti rajatulta alueelta. Tämä aiheuttaa verrattain suuren hajonnan tuloksissa. Nuklidikohtaisia tuloksia tulee tarkastella tietyllä varauksella. Ag-110m osuus tuloksissa on edelleen selvästi suurin. Sb-122 ei esiinny tuloksissa ollenkaan, mikä on hieman yllättävää. Tämän voisi selittää Sb-122 kohtalaisen lyhyt puoliintumisaika (2.7 vrk). Joka puolestaan tarkoittaisi sitä, että pinnalta löytynyt kontaminaatio ei olisi peräisin tältä käyttöjaksolta. Sarjan näytteessä numero 6 näkyy selkeä piikki Nb-95 ja Zr-95 osuuksissa. Tämä selittyy yksittäisenä hippusena, joka on osunut näytelappuun. Vastaavia yksittäisiä korkeita Nb-95 ja Zr-95 lukemia on havaittu radiokemian laboratorion mukaan ennenkin.

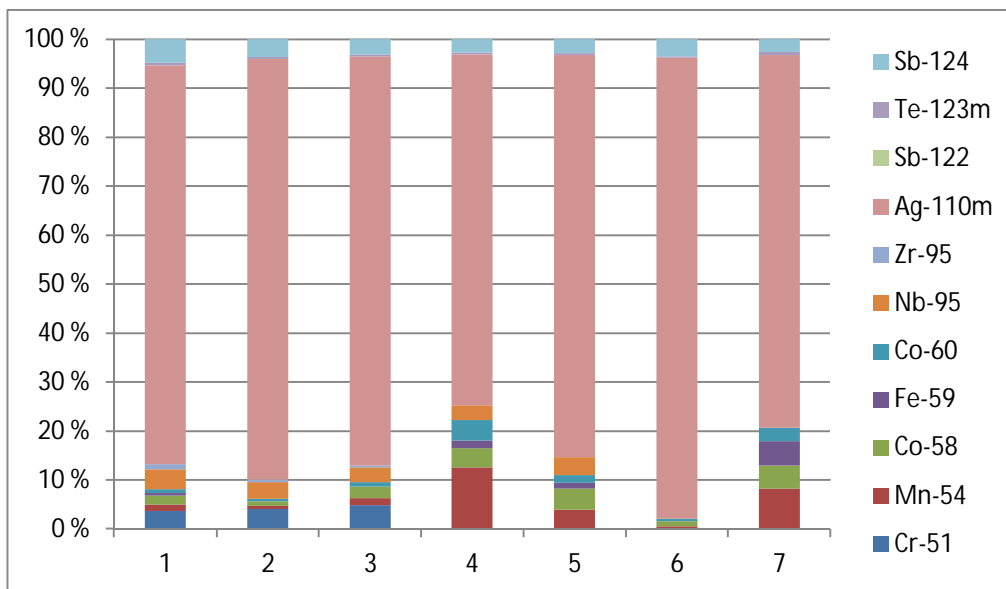
6.5 Pyyhinnässä käytettyjen harsojen ja froteepyyhkeiden nuklidijakaumat

Kuvassa 6.10 on esitetty sarjan HA harsojen nuklidijakauma.



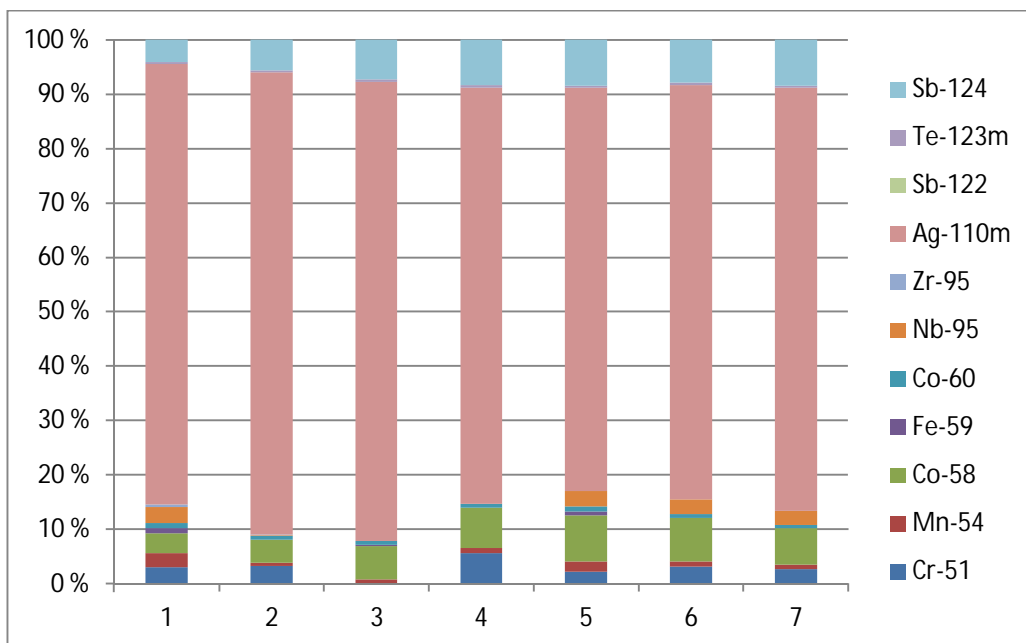
Kuva 6.10 Nuklidien prosenttiosuudet, Harsot näytesarja HA

Kuvassa 6.11 on esitetty sarjan FA froteepyyhkeiden nuklidijakauma.



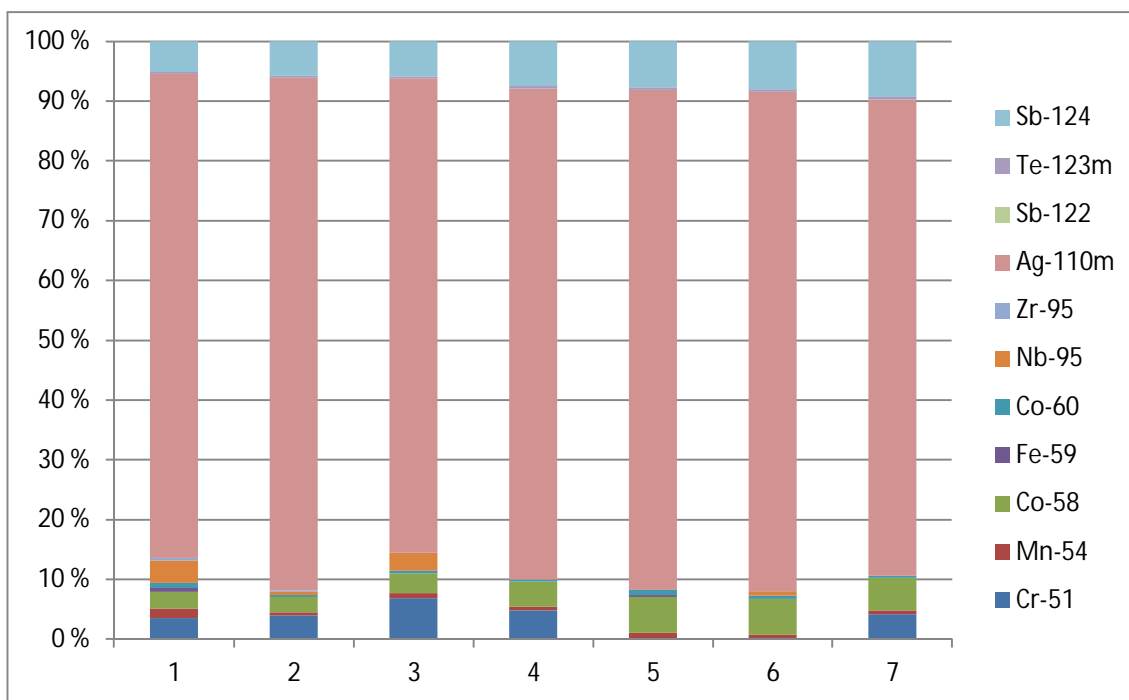
Kuva 6.11 Nuklidien prosenttiosuudet, näytesarja FA froteepyyhkeet

Kuvassa 6.12 on esitetty sarjan HB harsojen nuklidijakauma.



Kuva 6.12 Nuklidien prosenttiosuudet, Harsot näytesarja HB

Kuvassa 6.13 on esitetty sarjan FB harsojen nuklidijakauma.



Kuva 6.13 Nuklidien prosenttiosuudet, näytesarja FB froteepyyhkeet

Hopean osuus on suuri kaikissa näytteissä, mikä oli odotettavaa. Ennen näytteiden analysointia Sb-122 oli jo ehtinyt puoliintua pois. Sb-124 näkyy samassa suhteessa kuin aikaisemminkin. Sarjojen HB ja FB harsoissa ja pyyhkeissä näkyy selkeästi Co-58, mikä sopii yhteen märkäpyyhkäisynäytteiden kanssa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn pääasiallinen tavoite oli selvittää, onnistuuko kuilun pohjan puhdistus nykyisillä käsipyhintämenetelmillä. Vertailtavat metodit olivat harso- ja froteepyyhemyshintä. Tuloksista on selkeästi havaittavissa, että harsopyyhintä on froteepyyhintää huomattavasti tehokkaampi puhdistuskeino.

Tuloksista nähdään, että kuilunpesun ongelma ei ole kontaminaation irtoaminen. Kuilunpesun jokavuotisen venymisen selityksiä on useita; järjestelmällisyyden puute, väärä pyyhintäteknikka ja työn raskas luonne.

Järjestelmällisyyden puute juontuu siitä ongelmasta, ettei kontaminaatio ole aina näkyvää liikaa, jolloin jo puhdistetut alueet eivät erotu puhdistamattomista. Tähän ratkaisuksi käytetään jo nyt alueiden rajaamista muovituksilla. Ratkaisevaa on kuitenkin yksittäisen puhdistajan järjestelmällisyys siivouksen edetessä.

Kuilun pohjan puhdistus käsin ei eroa juurikaan lattian pesemisestä. Kontaminaatio on nuklideista ja pinnasta riippuen kuitenkin vain enemmän tai vähemmän pinttynyttä likaa. Runsas liuottimien käyttö ja riittävä voimankäyttö pyyhittäessä irrottavat pinttyneemminkin kontaminaation. Lisäksi on huolehdittava suojahanskojen ja puhdistusrätin riittävän useasta vaihtamisesta.

Työn raskaasta luonteesta aiheutuvaa haittaa voidaan pienentää lähinnä parantamalla työnsuorittajien jaksamista, lisäksi reaktorikuilun pohjan puhdistajien tulisi olla kunnoltaan hyvällä tasolla. Jaksamista edesauttavat nopeampi siirtyminen kevyempiin suojavarustuksiin, riittävä tauotus sekä työkykyä ylläpitävä ruoka- ja juomahuolto.

Koska harsopyyhinnän teho heikkenee selkeästi päästäessä muutamaan Bq/cm^2 , olisi ehkä hyvä miettiä löytyykö puhdistuksen viimeistelyyn parempiakin ratkaisuita. Yksi vaihtoehto voisi olla mikrokuituliinojen käyttö.

Kuten Loviisan voimalaitoksen säteilysojelupäällikkö DI Timo Kontio ennen työn aloitusta epäili, on kuilun pohjan pesun edetessä kontaminaation kannalta ainoa merkityksellinen nuklidi Ag-110m. Kuilunpohjan puhdistuksen nopeuttamiseksi tulisi tutkia, onko olemassa metodeita joilla saataisiin helpotettua hopean irrottamista kuilunpohjasta. Kuitenkin nykyiselläkin käsipuhdistuksella päästään riittävään lopputulokseen nopeasti, kunhan puhdistus suoritetaan järjestelmällisesti ja riittävällä ammattitaidolla.

LÄHTEET

STUK. Loviisan voimalaitos. [STUK:n www-sivuilla]. Päivitetty huhtikuu 27, 2009. [Viitattu 18.11.2011].

Saatavissa: http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/loviisa/fi_FI/loviisa/

STUK. Painevesilaitoksen toimintakaavio. [STUK:n www-sivuilla]. Päivitetty huhtikuu 27, 2009. [Viitattu 18.11.2011].

Saatavissa:

http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/ydinvoimalaitoksen_toiminta/sa_hkontuotanto/fi_FI/painevesireaktori/

Tarja K. Ikäheimonen, Säteily ja sen havaitseminen, 2002, [Viitattu 2.11.2011]

Säteilysuojelun metodikansio, Loviisan voimalaitos, Fortum Power and Heat Oy, 2009, [Viitattu 4.11.2011]

Liite 1. Kuva näytteenotosta reaktorikuilun pohjalta.

