

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Loviisan ydinvoimalaitoksen käytöstäpoiston aikaisen
primääripiirin dekontaminoinnin kannattavuus

Profitability of the primary circuit decontamination during
the decommissioning of Loviisa nuclear power plant

Työn tarkastaja: Heikki Suikkanen

Työn ohjaajat: Pasi Kelokaski (Fortum), Heikki Suikkanen

Lappeenranta 18.12.2019

Teemu Seitomaa

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Teemu Seitomaa

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaajat: Pasi Kelokaski (Fortum), Heikki Suikkanen

Kandidaatintyö 2019

38 sivua, 5 kuvaa, 6 taulukkoa, 1 liite

Hakusanat: Käytöstäpoisto, Loviisan voimalaitos, primääripiiri, dekontaminointi

Kandidaatintyö on tehty yhteistyössä Fortum Power and Heat Oy:n kanssa. Työssä on tarkasteltu Loviisan ydinvoimalaitoksen käytöstäpoiston aikana tehtävän primääripiirin dekontaminoinnin kannattavuutta. Työssä on määritetty arviot dekontaminoinnista saatavalle annossäästölle, sen kestolle ja syntyvälle jätemäärälle. Johtopäätökset dekontaminoinnin kannattavuudesta on tehty dekontaminoinnista aiheutuvien kustannusten ja siitä saatavien annossäästöjen perusteella.

Työssä esitetyt arviot perustuvat vahvasti Loviisa 2:lla vuonna 1994 tehtyyn käytön aikaiseen primääripiirin dekontaminointiin sekä muualla maailman ydinvoimalaitoksilla tehtyihin dekontaminointeihin. Näiden perusteella on pystytty määrittämään arviot dekontaminoinnin kannattavuuteen vaikuttaville tekijöille.

Otettaessa huomioon kustannukset, joita syntyy dekontaminoinnin suorittamisesta, syntyvän jätemäärän käsittelystä ja loppusijoittamisesta sekä henkilöstökustannuksista, päästään kokonaiskustannuksiin, jotka ovat n. 2 % koko Loviisan voimalaitoksen käytöstäpoiston kustannuksista. Tällä investoinnilla saadaan 18 manSv:n annossäästö, jolloin käytöstäpoistosta aiheutuva kollektiivinen säteilyannos pienenee n. kolmasosaan.

Työn johtopäätöksenä primääripiirin käytöstäpoiston aikaista dekontaminointia voidaan pitää hyvin kannattavana. On siis käytännössä varmaa, että dekontaminointi tullaan suorittamaan käytöstäpoiston valmisteluvaiheen aikana ennen kuin siirrytään varsinaisiin purkutoimiin.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Ydinvoimalaitoksen käytöstäpoisto	6
2.1 Loviisan laitoksen käytöstäpoisto	7
3 Dekontaminointimenetelmät ydinvoimalaitoksella	9
3.1 Mekaaniset dekontaminointimenetelmät.....	10
3.2 Sähkökemialliset dekontaminointimenetelmät.....	10
3.3 Kemialliset dekontaminointimenetelmät.....	11
3.3.1 HP/CORD UV -menetelmä.....	12
3.3.2 EPRI DFD -menetelmä	13
4 Primääripiirin dekontaminointi	14
4.1 Dekontaminoinnin hyödyt.....	14
4.2 Dekontaminoinnin haitat	15
5 Primääripiirin dekontaminointi Loviisa 2:lla vuonna 1994	16
5.1 Loviisan primääripiirin yleiskuvaus	16
5.2 Dekontaminoinnin suoritus	18
5.3 Dekontaminoinnin seuraukset	19
6 Loviisan käytöstäpoiston aikainen primääripiirin dekontaminointi	20
6.1 Dekontaminoinnin laajuus.....	20
6.2 Dekontaminoinnin aikataulu ja kesto	21
6.3 Dekontaminoinnista saatavat annossäästöt	22
6.4 Dekontaminoinnin vaikutus primääripiirin putkiston leikkausmenetelmän valintaan	25
6.5 Dekontaminoinnista syntyvät jätteet	30
6.6 Dekontaminoinnin kustannukset	31
7 Johtopäätökset	33
8 Yhteenveto	34
Lähdeluettelo	35
Liite 1. Yhteenvetotaulukko eri laitosten dekontaminointikokemuksista	39

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	Aktiivisuus	[Bq]
h	Annosmuuntokerroin	[Sv/Bq]
t	Aika	[s]
$T_{1/2}$	Puoliintumisaika	[s]

Lyhenteet

DAC	Derived Air Concentration, ilman johdettu konsentraaiooraja
DF	Dekontaminointikerroin
DRF	Annosnopeuden alenemiskerroin
EDTA	Etyleenidiamiinitetraetikkahappo, kompleksinmuodostaja
EPRI-DFD	Dekontaminointimenetelmä, jossa käytetään fluoriboorihappoa, kaliumpermanganaattia ja oksaalihappoa (Decontamination for Decommissioning)
EYT	Ei ydinteknisesti turvaluokiteltu
HP/CORD UV	Dekontaminointimenetelmä, jossa käytetään permangaanihappoa, oksaalihappoa ja UV-valoa (Permanganic Acid Chemical Oxidizing Reducing Decontamination Ultra-Violet light)
IAEA	Kansainvälinen atomienergiajärjestö
NTA	Nitriilotrietikkahappo, kompleksinmuodostaja
PWR	Painevesireaktori
VVER	Neuvostoliittolais-venäläisvalmisteinen painevesireaktori

1 JOHDANTO

Fortum Oyj:n omistama Loviisan ydinvoimalaitos koostuu kahdesta laitosesiköstä, joiden reaktorit ovat painevesireaktoreita tyypiltään VVER-440. Loviisa 1:n nettosähköteho on 507 MW ja Loviisan 2:n 502 MW. Loviisan laitoksen tämänhetkiset käyttöluvut ovat voimassa LO1:llä vuoteen 2027 ja LO2:lla vuoteen 2030 asti. Käyttölupien päätyttyä reaktorit sammutetaan, minkä jälkeen aloitetaan laitosesiköiden käytöstäpoisto. Loviisan voimalaitoksella käytöstäpoistostrategiaksi on valittu välitön käytöstäpoisto, eli käytöstäpoistotoimenpiteisiin käydään heti reaktorin sammuttamisen jälkeen. Yhdeksi käytöstäpoiston työvaiheeksi on suunniteltu primääripiirin dekontaminointi alentamaan käytöstäpoiston aikaisia annoskertymiä.

Dekontaminointiprosessin tarkoituksena on poistaa kappaleiden pinnoille kertyneet radioaktiiviset hiukkaset, eli kontaminaatio, sekä joissain tapauksissa myös komponenttien aktivoituneet rakenneosat (aktivoitumista tapahtuu erityisesti reaktorin läheisyydessä, vuotoneutroneiden vaikutusalueella). Primääripiirin putkiston sisäpinnoilla ilmenee näitä molempia. Dekontaminointimenetelmät voidaan yleisesti jakaa kemiallisiin, sähkökemiallisiin ja mekaanisiin menetelmiin. Tässä työssä käsitellään syvällisemmin kemiallisia dekontaminointimenetelmiä, sillä vain ne soveltuvat suljetun putkiston sisäpintojen laaja-alaiseen dekontaminointiin.

Tässä työssä päätavoitteena on selvittää, kannattaako Loviisan ydinvoimalaitoksen primääripiiri dekontaminoida laitoksen käytöstäpoiston yhteydessä. Dekontaminoinnin kannattavuus määritellään loppukädessä siitä saatavien annossäästöjen sekä aiheutuvien kustannusten suhteen. Työssä selvitetään käytöstäpoiston aikaisen dekontaminoinnin eri kustannustekijöitä sekä esitetään perusteltu annossäästöarvio. Työhön sisältyy myös kuvaus yleisimmin käytetyistä dekontaminointimenetelmistä, jotka soveltuvat käytettäväksi Loviisan voimalaitoksella.

Tämä työ on tehty yhteistyössä Fortum Oyj:n kanssa, minkä vuoksi osa käytetyistä kirjallisuuslähteistä on saatavilla vain Fortumin sisäisistä tietojärjestelmistä. Nämä lähteet ovat kuitenkin mahdollistaneet tarkempien lukuarvojen ja työn kannalta arvokkaan tiedon hyödyntämisen Loviisan primääripiirin käytöstäpoiston aikaisen dekontaminoinnin kannattavuuden arvioinnin osalta.

2 YDINVOIMALAITOKSEN KÄYTÖSTÄPOISTO

Ydinvoimalaitoksen tultua elinkaarensa päähän, täytyy se poistaa käytöstä asianmukaisesti. Tällöin laitoksen käyttöluvut ovat päättyneet ja reaktori sammutetaan. Käytöstäpoistoon kuuluu mm. laitoksen puhdistus ja dekontaminointi, laitoksen purkaminen, laitosalueen raivaus, radioaktiivisten jätteiden ja rakenteiden käsittely ja loppusijoittaminen sekä lopulta laitosalueen vapauttaminen lakisääteisestä valvonnasta. Lopullisena tavoitteena on saada poistettua laitosalueelta kaikki luonnosta poikkeava radioaktiivisuus, jonka jälkeen se voidaan vapauttaa uuteen (ei-radioaktiiviseen) käyttötarkoitukseen. (Rahman, 2008, s. 79)

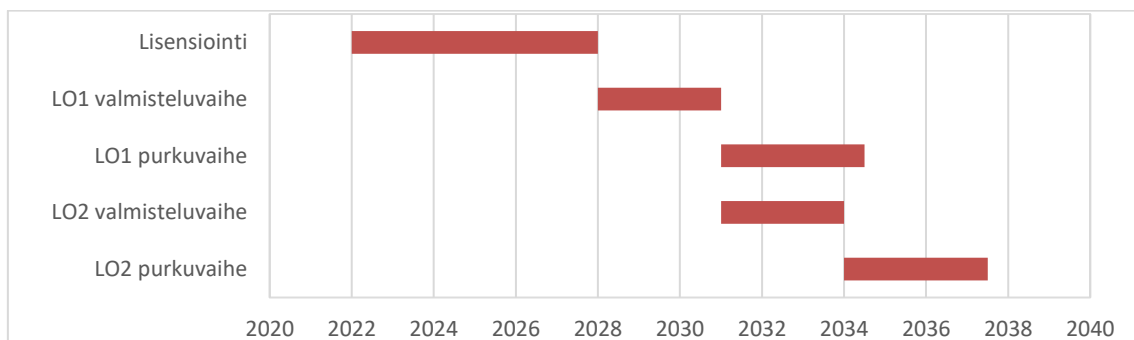
Laitoksen sammuttua seuraa tyypillisesti noin muutaman vuoden mittainen valmisteluvaihe, jonka aikana toimintamalli muutetaan laitoksen käytöstä laitoksen käytöstäpoistoon ja tehdään valmistavia toimenpiteitä laitoksen purkamisen mahdollistamiseksi. Näitä toimenpiteitä ovat mm. käytetyn polttoaineen poistaminen reaktorista ja siirtäminen jäähtymään, jätteiden käsittely (nestemäisten jätteiden haihdutus ja kiinteytys), prosessijärjestelmien tyhjentäminen ja huoltaminen käytöstäpoistoa varten sekä dekontaminointityöt. (IAEA, 2005, s. 3)

Käytöstäpoistostrategiaa suunniteltaessa lähtökohtana on yleisesti kaksi eri vaihtoehtoa, joko välitön tai viivästetty purkaminen. Välittömän purkamisen tapauksessa purkutoimiin käydään heti valmisteluvaiheen päätyttyä. Viivästetyllä purkamisella tarkoitetaan strategiaa, jossa laitos saatetaan valmisteluvaiheen jälkeen turvalliseen ja valvonnanalaiseen tilaan. (IAEA, 2005, s. 2) Laitosta pidetään tässä tilassa tyypillisesti useita vuosikymmeniä, joiden aikana aktiivisuustasot pienenevät radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Myös kolmas vaihtoehto on olemassa, nk. paikan päälle hautaaminen (engl. entombment), jossa koko laitos tai osa siitä suljetaan pitkäikäisen ja kestävän materiaalin sisään, kunnes aktiivisuustasot saavuttavat vapauttamisrajat. IAEA ei kuitenkaan pidä tätä menetelmää varsinaisena käytöstäpoistostrategiana, vaan esittää sen olevan harkittavissa vain erikoistapauksissa, kuten vakavassa onnettomuustilanteessa. (IAEA, 2014, s. 3)

2.1 Loviisan laitoksen käytöstäpoisto

Loviisan ydinvoimalaitoksen laitousyksiköiden käyttöluvut ovat tällä hetkellä voimassa Loviisa 1:llä vuoteen 2027 ja Loviisa 2:lla vuoteen 2030 asti. On mahdollista, että käyttöluvia pidennetään vielä kymmenellä lisävuodella. Tämänhetkinen käytöstäpoistosuunnitelma on kuitenkin tehty olettaen, että laitos tullaan sulkemaan edellä mainittuina vuosina. Tämä tarkoittaa sitä, että käytöstäpoiston valmisteluvaihe alkaa LO1:llä vuonna 2028 ja LO2:lla 2031. Valmisteluvaiheen on määritetty kestävän kolme vuotta kummankin laitousyksikön kohdalla. Valmisteluvaiheen aikaisiin tehtäviin kuuluu käytetyn polttoaineen siirtäminen käytetyn polttoaineen varastoon, prosessijärjestelmien tyhjennys, nestemäisten jätteiden käsittely, primääripiirin dekontaminointi, kuljetusjärjestelyt sekä tarvittavien hankintojen tekeminen. (Kaisanlahti et al., 2018)

Loviisan käytöstäpoistostrategiaksi on valittu välitön purkaminen. Strategia mahdollistaa ammattitaitoisen ja hyvän laitostuntemuksen omaavan henkilökunnan käyttämisen purkutöissä ja se on määritetty myös aiheutuvilta kustannuksiltaan matalimmaksi. Purkutyöt aloitetaan siis heti valmisteluvaiheen päätyttyä, LO1:llä vuonna 2031 ja LO2:lla 2034. Kestoltaan purkuvaiheet ovat n. 3,5 vuotta, joiden aikana keskitytään reaktorirakennuksessa sijaitsevan primääripiirin ja muiden kontaminoituneiden järjestelmien purkamiseen. (Kaisanlahti et al., 2018) Käytöstäpoiston aikataulua on vielä havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1: Loviisan ydinvoimalaitoksen käytöstäpoiston aikataulu valmistelu- ja purkuvaiheiden osalta. (Kaisanlahti et al., 2018, s. 27, muokattu)

Laitoskokonaisuudesta tullaan toiminnaltaan itsenäistämään käytetyn polttoaineen varasto, nestemäisten jätteiden varasto, jätteiden kiinteytyslaitos sekä loppusijoitustilat. Näiden toimintaa ylläpidetään aina 2060-luvulle saakka, kunnes varastojen ja

kiinteytyslaitoksen purkaminen aloitetaan vuonna 2066 ja loppusijoitustilat suljetaan lopullisesti vuonna 2068. Tämän jälkeen laitosalue voidaan aktiivisuusmittauksista riippuen vapauttaa uuteen käyttötarkoitukseen. (Kaisanlahti et al., 2018)

3 DEKONTAMINOINTIMENETELMÄT YDINVOIMALAITOKSELLE

Dekontaminointiprosessin tarkoituksena on poistaa kappaleiden pinnoille kertyneet radioaktiiviset hiukkaset, eli kontaminaatio, sekä joissain tapauksissa myös komponenttien aktivoituneet rakenneosat (aktivoitumista tapahtuu erityisesti reaktorin läheisyydessä, vuotoneutroneiden vaikutusalueella). Dekontaminoinnin avulla kappaleiden säteilyannosnopeudet pienenevät, jolloin niiden käsittely helpottuu ja henkilökunnalle aiheutuva annoskertymä minimoituu.

Dekontaminoinnin tehokkuutta ilmaistaan dekontaminointikertoimella (DF), joka on alkuaktiivisuuden suhde loppuaktiivisuuteen. Tämä on esitetty yhtälössä 1. Toinen tapa mitata dekontaminoinnin tehokkuutta on mitata aktiivisuuksien sijaan säteilyannosnopeudet alussa ja lopussa, joiden suhteesta voidaan laskea annosnopeuden alenemiskerroin (DRF).

$$DF = \frac{A_1}{A_2} \quad (1)$$

missä	DF	dekontaminointikerroin	[-]
	A_1	aktiivisuus alussa	[Bq]
	A_2	aktiivisuus lopussa	[Bq]

Ydinvoimalaitoksissa käytettävät dekontaminointimenetelmät voidaan yleisesti jakaa mekaanisiin, kemiallisiin ja sähkökemiallisiin menetelmiin. Jokaisella menetelmällä on omat rajoitteensa esimerkiksi dekontaminointikohteen luoksepäästävyuden, koon tai geometrian suhteen. Tämä työ keskittyy primääripiirin laaja-alaiseen dekontaminointiin, jolloin dekontaminoinnin pääkohteena on siis suljetun putkiston sisäpinta. Ainoa soveltuva menettelytapa suljetun putkiston dekontaminointiin on kemiallisten menetelmien käyttäminen. Tämän takia seuraavissa kappaleissa on esitelty mekaaniset ja sähkökemialliset dekontaminointimenetelmät hyvin lyhyesti, pääpainon ollessa kemiallisten menetelmien käsittelyssä.

3.1 Mekaaniset dekontaminointimenetelmät

Mekaanisissa dekontaminointimenetelmissä käytetään nimensä mukaisesti erilaisia mekaanisia ja fyysisiä prosesseja kontaminoituneen tai aktivoituneen rakenteen dekontaminoimiseen. Mekaanisia menetelmiä on lukuisia erilaisia, mutta ne voidaan kuitenkin jakaa kahteen pääkategoriaan, joko pintoja puhdistaviin tai pintoja poistaviin menetelmiin. Pintaa puhdistavia menetelmiä ovat esimerkiksi huuhtelu, pyyhintä tai imurointi. Pintaa poistavia menetelmiä ovat puolestaan esimerkiksi hionta, hiekkapuhallus, höyläys tai jyrshintä. (Feltcorn, 2006, s. 36)

Mekaanisten dekontaminointimenetelmien monipuolisuuden vuoksi niitä voidaan käyttää kaikille materiaaleille ja yleisesti myös dekontaminointitehokkuus on suuri. Verrattuna muihin menetelmiin, mekaaniset menetelmät soveltuvat erityisen hyvin huokoisten materiaalien, kuten betonirakenteiden, dekontaminointiin. Huokoisissa materiaaleissa kontaminaatio voi tunkeutua hyvin syvälle rakenteeseen ja mekaaniset menetelmät ovat tehokkaita runsaan materiaalmäärän poistamisessa. Muut menetelmät voivat pahentaa tilannetta päästämällä kontaminaation entistä syvemmälle rakenteeseen. Mekaanisten menetelmien käyttö rajoittuu kohteisiin, jotka ovat fyysisesti luokse päästäviä. Suljettujen järjestelmien mekaaninen dekontaminointi on hyvin hankalaa. (Feltcorn, 2006, s. 36-37)

3.2 Sähkökemialliset dekontaminointimenetelmät

Sähkökemialliset dekontaminointimenetelmät ovat toiminnaltaan kemiallisia menetelmiä, joissa dekontaminointia tehostetaan sähkövirtaa käyttäen. Tasavirta aikaansaa dekontaminoitavassa komponentissa anodisen liukenemisreaktion, jonka avulla saadaan poistettua oksidikerros sekä aktivoitunut pohjametallikerros. Tyypillisesti komponentti upotetaan säiliöön, joka sisältää elektrolyyttiliuosta, jota regeneroidaan jatkuvasti kierrättämällä. Yleisimmin käytetyt elektrolyytit ovat fosfori- ja rikkihappo. Sähkövirran suuruuden ylärajana on tyypillisesti 2700 A. (Kumar et al., 2010)

Sähkökemiallisilla menetelmillä saavutetaan usein todella korkeat dekontaminointikertoimet, mutta niiden käytölle on useita rajoittavia tekijöitä. Sähkökemiallisten menetelmien käyttöä rajoittavat erityisesti dekontaminoitavan kappaleen materiaali sekä koko. Sähkökemialliset menetelmät toimivat vain sähköä johtavilla pinnoilla. Pinnoilla esiintyvät rasvajäämät, ruoste ja maali heikentävät

dekontaminointitehokkuutta huomattavasti. Elektrolyyttikylpyyn upotettavat komponentit tulee siis puhdistaa huolellisesti. Dekontaminoitavan komponentin koko on riippuvainen elektrolyyttisäiliön koosta. Huomioitavaa on myös se, että sähkökemiallisten menetelmien käyttö edellyttää aina dekontaminoitavan komponentin irrottamista laitoskokonaisuudesta. (Kumar et al., 2010)

3.3 Kemialliset dekontaminointimenetelmät

Kemialliset dekontaminointimenetelmät perustuvat kemikaalien kierrättämiseen järjestelmässä (tai yksittäisten pienten tai pilkottujen komponenttien tapauksessa kemikaalikylpyyn upotukseen). Primääripiirin tapauksessa dekontaminointiprosessi toteutetaan ajamalla järjestelmän läpi useita peräkkäisiä kemikaalisyklejä erilaisilla kemikaaleilla, jotta kontaminoituneiden pintojen lujat kromipitoiset oksidikerrokset (paksuus tyypillisesti muutamia mikrometrejä) irtoaisivat kerros kerrokselta. Käsittelyä jatketaan, kunnes kontaminaatio- ja säteilytasoja on saatu alennettua tavoitteiden mukaisesti. (Kinnunen, 2008, s. 13)

Oikeilla kemikaaleilla kontaminoituneet pinnat saadaan puhdistettua lähes täysin dekontaminointikerrointen ollen jopa yli 10000, ts. kontaminaatiosta on mahdollista saada poistettua yli 99,99 %. (Feltcorn, 2006, s. 11) Käytännössä kertoimet jäävät kuitenkin todennäköisesti välille 10-1000, ellei komponentteja pureta ja käytetä sen jälkeen sähkökemiallisia menetelmiä. Koko primääripiirin dekontaminointioperaatioissa on päästy yleisesti kertoimiin 5-40. (Laraia, 2012, s.320)

Käytöstäpoistoa varten tehtävä dekontaminointi mahdollistaa tehokkaampien dekontaminointimenetelmien käytön kuin laitoksen käyttöajan aikana tehtävässä dekontaminoinnissa, sillä polttoaineen reaktorista poiston jälkeen primääripiiri luokitellaan turvallisuusluokkaan EYT (ei ydinteknisesti turvaluokiteltu), eikä sen käytönaikaiset eheysvaatimukset ole täten enää voimassa. Primääripiirin turvallisuusluokka voidaan alentaa EYT:hen, sillä piiriä käsitellään enää mahdollisena säteilyn tai kontaminaation lähteenä (tai rajana huomattavasti käytönaikaista pienemmälle kontaminaation leviämislle), jolloin sen ei tarvitse enää kestää käytönaikaisia paine- ja lämpötilatasoja. (Oinonen, 2017, s. 55) Tämän perusteella primääripiirin sisäpinnoilta voidaan poistaa aktiivisen oksidikerroksen lisäksi ohut

aktivoitunut pohjametallikerros, mikä mahdollistaa entistä korkeammat dekontaminointikertoimet.

Nykyään suositaan kemiallisia dekontaminointimenetelmiä, joissa ei käytetä kompleksinmuodostajia (kelatointiaineita). Kompleksinmuodostajien tehtävänä on sitoa liukenevat metalli-ionit kompleksimuotoon, jotta ne eivät enää karkaisi dekontaminointiliuoksesta. Niiden avulla päästään korkeampiin dekontaminointikertoimiin. Kompleksinmuodostajien käyttö on kuitenkin epäsuotuisaa, sillä syntyvät kompleksiyhdisteet ovat vesiliukoisia. (Pirkanniemi, 2007, s. 24) Tämä on ongelmallista pitkäaikaisturvallisuuden näkökulmasta, sillä vesi toimii pääasiallisena kuljettaja-aineena jätteiden loppusijoitustiloissa.

Seuraavaksi on esitelty kaksi yleisesti ydinvoimalaitoksien dekontaminoinneissa käytettävää kemiallisista dekontaminointimenetelmää, joissa kompleksinmuodostajia, kuten EDTA:ta (etyleenidiamiinitetraetikkahappo) tai NTA:ta (nitrilotrietikkahappo), ei esiinny lisäaineina.

3.3.1 HP/CORD UV -menetelmä

AREVA:n kehittämä CORD-menetelmä ja siitä patenttirajoitusten takia kehitellyt johdannaiset ovat tällä hetkellä lähes ainoat menetelmät, joita järjestelmien dekontaminoinnissa käytetään yleisesti ympäri maailmaa Yhdysvaltoja lukuun ottamatta. HP/CORD UV -menetelmän nimi tulee sanoista Permanganic acid (HP) Chemical Oxidizing Reducing Decontamination Ultra-Violet light. Menetelmän toiminta perustuu neljään päävaiheeseen:

1. Esihapetusvaiheessa oksidikerrosten sisältämä kromi hapetetaan ($\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{6+}$) permangaanihappoa (HMnO_4) käyttäen, jotta sisemmät lujat kromipitoiset oksidikerrokset irtoaisivat.
2. Permangaanihappo pelkistetään ($\text{Mn}^{7+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$) oksaalihappoa käyttäen.
3. Varsinainen dekontaminointi oksaalihapolla, joka liuottaa heikentyneet oksidikerrokset.
4. Dekontaminointikemikaali (ts. oksaalihappo) hajotetaan vedeksi ja CO_2 :ksi käyttämällä ultraviolettivaloa ja vetyperoksidia H_2O_2 .

CORD:sta on kehitelty erityisversio yksinomaan ydinvoimalaitosten käytöstäpoistoa varten, HP/CORD D UV. Siinä kontaminoituneen pinnan oksidikalvo poistetaan täysin, jonka jälkeen oksidikalvon alta paljastunutta pohjamateriaalia liuotetaan kemikaalikiertojen avulla niin kauan, että pohjamateriaaliinkin tunkeutunut aktiivisuus on saatu poistettua. Siirryttäessä oksidikalvon poistamisesta pohjametallin liuottamiseen, dekontaminointiliuoksesta poistetaan kaikki hapettavat aineet, kuten rauta-III ja happi. Tällöin hapettumis-/pelkistymisreaktiot eivät ole suojaamassa pohjametallin pintaa. Kun haluttu lopputulos on saavutettu, liuotusprosessi voidaan pysäyttää välittömästi syöttämällä liuokseen hapettavia reagensseja, kuten ilmaa tai vetyperoksidia. (Kinnunen, 2008, s. 19-20)

3.3.2 EPRI DFD -menetelmä

EPRI DFD- prosessi (Decontamination for Decommissioning) on kehitelty erityisesti ydinvoimalaitosten käytöstäpoiston yhteydessä tehtävälle dekontaminoinnille. Menetelmä on toiminnaltaan hyvin samankaltainen HP/CORD D UV -menetelmän kanssa, sillä tarkoituksena on EPRI DFD -menetelmässäkin poistaa rakenteiden pinnoilta aktiiviset oksidikerrokset sekä ohut kerros aktivoitunutta pohjametallia. EPRI DFD:ssä oksidikerrosten liuottamiseen käytetään fluoriboorihappoa ja lisäksi prosessin kemikaaleihin kuuluvat kaliumpermanganaatti ja oksaalihappo. (Kinnunen, 2008, s. 21)

Prosessista on kehitelty myös paranneltua versiota, EPRI DFDX:ää, jossa perusprosessiin on lisätty sähkökemiallinen ioninvaihtovaihe, jonka tavoitteena on jätteen syntymisen vähentäminen. Ioninvaihtohartsia pidetään sähkökemiallisen kennon katodi- ja anodipuoliskojen välissä, jolloin aktiiviset metalli-ionit kerääntyvät katodipuolelle muodostaen metallipölyä. Tämä pöly on helposti kerättävissä, jolloin aktiivista nestemäistä jätettä ei muodostuisi ollenkaan. Menetelmää on testattu laboratorio-olosuhteissa onnistuneesti, mutta suuremman mittakaavan, kuten koko primääripiirin dekontaminoinnin, näyttöä ei ole. (Bradbury et al., 2007) Mikäli EPRI DFDX -prosessia voidaan aikanaan hyödyntää primääripiirin dekontaminoinnissa, olisi se erittäin hyvä vaihtoehto syntyvän jätemäärän minimoimisen vuoksi.

4 PRIMÄÄRIPIIRIN DEKONTAMINOINTI

4.1 Dekontaminoinnin hyödyt

Primääripiirin dekontaminoinnista hyödyttäisiin usealla eri tavalla. Keskeisin hyöty ja samalla dekontaminoinnin päätavoite on alentaa primääripiirin säteilytasoja, jolloin primääripiiriin yhteydessä olevissa huonetiloissa tai itse primääripiirin kanssa työskentelevien henkilöiden saamat säteilyannokset pienenevät. Dekontaminoinnin avulla komponenttien pinnoilta saadaan poistettua aktiiviset materiaalikerrokset, jolloin niistä ei tarvitse huolehtia enää komponenttien purkuvaiheessa. Täten dekontaminointi vähentää myös kontaminaation leviämisen riskiä sekä alentaa todennäköisyyttä altistua sisäiselle kontaminaatiolle (hengittämällä tai muuten suun kautta) niiden henkilöiden osalta, jotka työskentelevät primääripiirin kanssa. (Laraia, 2012, s. 319)

Dekontaminointi helpottaa myöhempiä käytöstäpoiston työvaiheita. Dekontaminoidut pinnat mahdollistavat niiden helpommat käsittelyn sillä työt, jotka ilman dekontaminointia tarvitsisivat esimerkiksi robotiikkaa tai etätyöskentelytapoja, voidaankin suorittaa käsivoimin pienempien säteilyannosnopeuksien vuoksi. Työskentelyä nopeuttaa edelleen kevyempien säteilysuojien ja kevennetyn suojarustuksen käytön mahdollisuus. Tämä tekee työskentelystä tehokkaampaa vähentäen samalla työvoimakustannuksia ja säteilysuojeluorganisaation raskautta.

Aktiivisuutta voidaan saada alennettua sen verran, että dekontaminoidut komponentit voidaan pakata kevyempiin loppusijoituspakkauksiin. Käytöstäpoistojäte luokitellaan joko luokkaan I tai luokkaan II. Annosnopeuden ollessa yli 0,1 mSv/h jäte kuuluu luokkaan I ja pakataan betoniin loppusijoituspakkauksiin. Luokassa II annosnopeus on alle 0,1 mSv/h ja jäte voidaan pakata puulaatikoihin. (Kaisanlahti et al., 2018, s.30) Pelkällä kemiallisella dekontaminoinnilla komponentteja tuskin saadaan niin puhtaiksi, että ne voitaisiin vapauttaa valvonnasta. Dekontaminointi tarjoaa kuitenkin mahdollisuuden harkita kallioperään loppusijoittamisesta poikkeavia menettelytapoja, kuten esimerkiksi kehitteillä olevaa maaperäloppusijoitusta.

4.2 Dekontaminoinnin haitat

Keskeisimpänä haittana primääripiirin dekontaminoinnissa on siitä syntyvät nestemäiset jätteet. Dekontaminointiliuoksien käsittely tuottaa käytettyä ioninvaihtohartsia ja jäteveden haihdutuksesta syntyy haihdutusjätettä. Nämä jätteet joudutaan käsittelemään ja loppusijoittamaan. Jätteiden kiinteytyminen on hyvin kallista ja lisää dekontaminoinnin kokonaiskustannuksia huomattavasti. Dekontaminointimenetelmää valitessa tulee välttää menetelmiä, joissa käytetään kompleksinmuodostajia. Kompleksinmuodostajat heikentävät pitkäaikaisturvallisuutta ja hankaloittavat jätteiden kiinteytystä. (Cumo et al, 2004)

Dekontaminoinnin jälkeen putkistoihin voi jäädä vielä kemikaalijäämiä huolellisesta huuhtelusta huolimatta. Nämä jäämät aiheuttavat riskejä työturvallisuudelle komponenttien purkuvaiheessa, sillä kemikaaleille altistuminen voi aiheuttaa esimerkiksi syöpymiä, hengitystieoireita tai sekavuutta. Sama riski on olemassa myös itse dekontaminointivaiheen aikana, kun kemikaaleja joudutaan käsittelemään ja kierrättämään järjestelmissä. Käytöstäpoiston yhteydessä dekontaminoinnissa poistetaan yleensä oksidikerrosten lisäksi pieni kerros pohjametallia lopputuloksen tehostamiseksi. Tämän vuoksi tulee varmistua siitä, että kemikaalit eivät aiheuta liikaa korroosiota kierrätysjärjestelmissä, jotta laitteistojen hajoamiset ja haitalliset kemikaalivuodot vältetään.

Dekontaminoinnista aiheutuu myös kustannuksia mm. kemikaalien hankinnasta, mahdollisesta lisälaitteiston vuokraamisesta ja tietysti työtunneista. Dekontaminointiprojektin kustannuksia tulee verrata siitä saatuun hyötyyn alenevien säteilyannosten ja poistettavan aktiivisuuden kannalta.

5 PRIMÄÄRIPIIRIN DEKONTAMININTI LOVIISA 2:LLA VUONNA 1994

5.1 Loviisan primääripiirin yleiskuvaus

Loviisan voimalaitos käsittää kaksi laitousyksikköä, joiden primääripiirit ovat pääjärjestelmiltään samanlaiset. Yhden laitousyksikön primääripiiriin kuuluu reaktoripaineastia, kuusi kiertopiiriä ja niistä kahteen piiriin yhdistetty paineentasausjärjestelmä. Jokaiseen kiertopiiriin kuuluvat pääkomponentit ovat höyrystin, pääkiertopumppu, kaksi pääsulkuventtiiliä sekä primääripiirin putkisto. Loviisan laitousyksikön primääripiiri on esitetty kuvassa 2.

Reaktoripaineastia ympäröi ja suojaa reaktorisydäntä. Se toimii reaktorin sisäosien kiinnityksenä, pitää reaktorisydämen paikallaan sekä ohjaa ja johtaa sydämen jäähdytevirtausta turvaten riittävän jäähdytyksen kaikissa tilanteissa. Paineastia koostuu kuudesta hitsatusta sylinterirenkaasta sekä ellipsin muotoisesta pohjasta. Paineastiassa on 12 kpl 500 mm yhteitä kiertopiirien kylmille ja kuumille haaroille sekä 5 kpl 250 mm yhteitä, joista 4 on sydämen hätäjähdytysjärjestelmän putkille ja yksi reaktorista lähteille impulssiputkille. Paineastian rungon korkeus on 11,8 m ja halkaisija leveimmillään 4,35 m. Sen sisäpintaa suojaa päällehitsauksella tehty 9 mm austeniittinen ruostumaton teräskerros. (Fortum Power and Heat Oy, 2004)

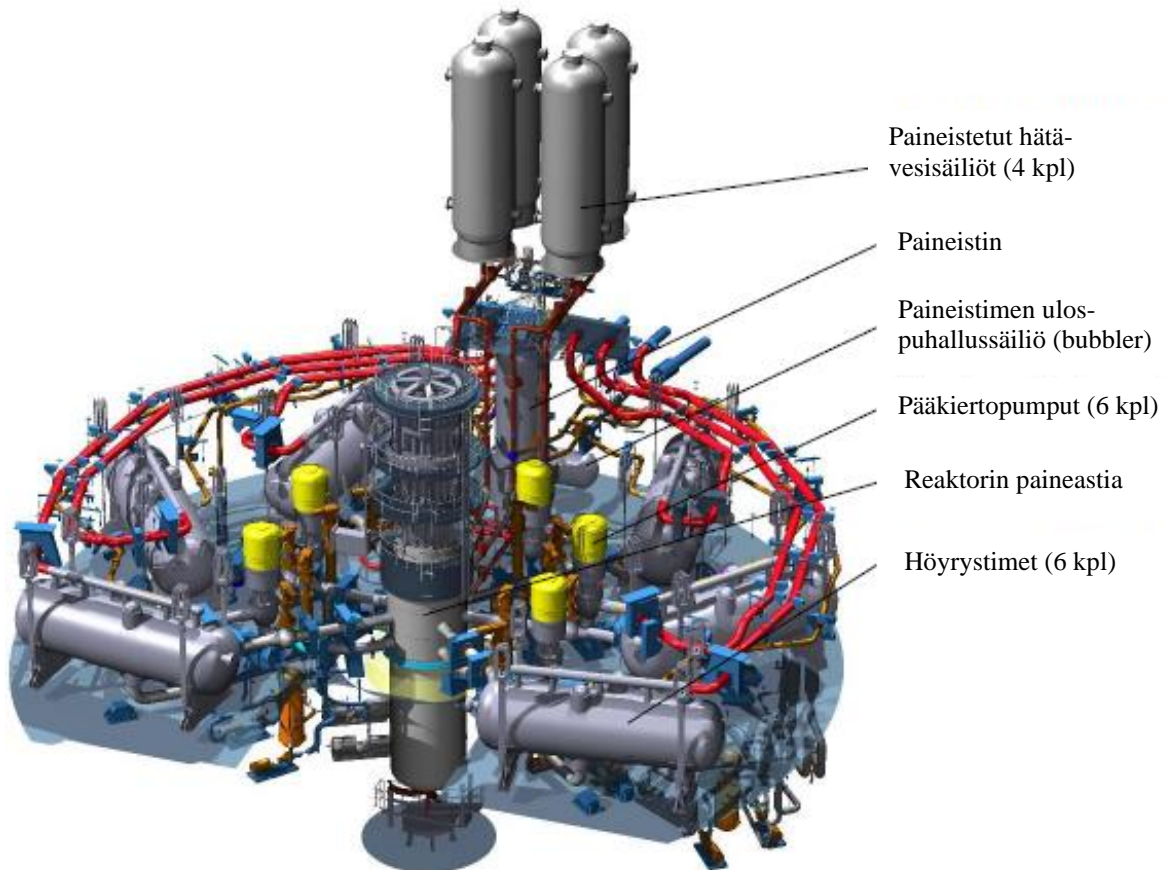
Primääripiirin putkiston päätehtävänä on jäähdytekierron muodostaminen höyrystinten ja reaktorin välille hyödyntäen pääkiertopumppujen kehittämää paine-eroa tai luonnonkiertoa. Jokainen kiertopiiri sisältää kuumen haaran reaktorista höyrystimeen ja vastaavasti kylmän haaran höyrystimestä takaisin reaktoriin. Kahden kiertopiirin kuumista haaroista on yhteydet paineistimen vesitilaan ja kylmistä haaroista syöttöyhteet paineistimen paineensäätöön tarkoitetulle ruiskutusvedelle. Höyrystimien alla on vesitysyhteet, joita käytetään seisokin aikaisiin tyhjennyksiin. Sekä kuumat, että kylmät haarat ovat ulkohalkaisijaltaan 560 mm ja seinämänpaksuudeltaan LO1:llä 32 mm ja LO2:lla 34 mm. Kuumen haaran tilavuus on 2,8 m³ ja kylmän haaran 3,2 m³. Putkiston materiaalina on käytetty austeniittista ruostumatonta terästä. (Fortum Power and Heat Oy, 2004)

Höyrystimet siirtävät primäärijäähdytteen sisältämän lämpöenergian sekundääripuolen syöttövedeen höyrystäen sen. Höyrystimet ovat sylinterinmuotoisia ja ne on asetettu vaakatasoon. Pituudeltaan ne ovat 11,8 m ja sisähalkaisijaltaan 3,21 m. Primääripuolen tilavuudeksi muodostuu 10,2 m³. Höyrystimet liittyvät primääripiirin kuumiin ja kylmiin haaroihin keskellä olevien primäärikollektorien välityksellä ja primäärikollektorit puolestaan ovat toisiinsa yhteydessä U:n muotoisilla lämmönsiirtoputkilla. Näitä lämmönsiirtoputkia (halkaisija 16 mm, seinäpaksuus 1,4 mm) on yhdessä höyrystimessä 5536 kpl. Putkiston kokonaispituus on 55500 m ja lämmönsiirtopinta-ala 2510 m². (Fortum Power and Heat Oy, 2004)

Pääkiertopumput kierrättävät primäärijäähdytettä reaktorista höyrystimeen ja takaisin. Lisäksi pumppujen tuottamaa paine-eroa hyödynnetään paineistimen ruiskutusveden syötössä ja primääriveden puhdistuskierrossa. Pääkiertopumppu on rakenteeltaan pystysuuntainen diagonaalipumppu. Pumpun moottori sijaitsee pumpun yläpuolella ja se on liitetty pumppuun moottorituolilla. Virtaus tulee vaakasuunnassa pumpun pesään, jossa se käännetään pystysuuntaiseksi ja ohjataan nelisiipiselle diagonaaliselle juoksupyörälle. Juoksupyörä muuttaa pyörimisenergian jäähdytteen paine-energiaksi muodostaen n. 1400 kg/s virtauksen. (Fortum Power and Heat Oy, 2004)

Paineentasausjärjestelmän päätehtävä on ylläpitää ja säätää primääripiirin painetta siten, että häiriötilanteista ja tehon muutoksista johtuvat ominaistilavuuden muutokset jäähdytteessä eivät laukaise laitossuojausjärjestelmää tai reaktorin pikasulkua. Ulospuhallus- ja varoventtiileillä estetään piirin ylipaineistuminen. Paineentasausjärjestelmän keskeisin komponentti, paineistin, on yhdistetty alapään vesitilasta kahden kiertopiirin kuumiin haaroihin ja yläosan höyrytilasta kylmiin haaroihin. Paineistin säätelee painetta lämpövastuksilla ja vesiruiskutuksella. Jos ruiskutuksella ei saada lauhdutettua höyryä tarpeeksi, johdetaan höyryä puhallussäiliöön (bubleriin), missä se lauhtuu vedeksi. (Fortum Power and Heat Oy, 2004)

Primääripiirin pääjärjestelmiksi lasketaan myös boorin syöttöjärjestelmä, primääriveden puhdistusjärjestelmä, primääripiirin uloslasku- ja poistovesien esipuhdistusjärjestelmä sekä normaali lisävesijärjestelmä. Lisäksi primääripiiriin kuuluu useita apujärjestelmiä, kuten esimerkiksi boorivesien käsittelyjärjestelmä, polttoainealtaiden jäähdytysjärjestelmä ja dekontaminointijärjestelmä.



Kuva 2: Havainnekuva Loviisan laitosesikön primääripiiristä. (Kaisanlahti et al., 2018)

5.2 Dekontaminoinnin suoritus

Loviisa 2:lla suoritettiin koko primääripiirin dekontaminointi vuoden 1994 vuosihuollon yhteydessä, jotta säteilytasoja saataisiin laskemaan vuosihuollon aikana tehtäviä suuria huoltotöitä varten. Loviisan yksiköllä suoritettu dekontaminointi oli siihen mennessä länsimaalaisissa PWR-reaktoreissa tehdyistä dekontaminoinneista laajin. Dekontaminointimenetelmänä käytettiin silloisen Siemens AG:n (nyk. AREVA:n) kehittämää CORD-menetelmää. Dekontaminointi suoritettiin Loviisan normaaleilla prosessijärjestelmillä, pois lukien UV-hajottajat, joista toinen vuokrattiin Siemensiltä ja toinen OKG:lta. (Lindén et al., 1994, s. 2)

Dekontaminointi käsitti seuraavat primääripiirin osat: primääriputkisto, reaktoripaineastia (polttoaine, suojaputkiyksikkö ja säätösauvat poistettuina), paineistin,

höyrystimet sekä suuri osa primääripiirin apujärjestelmiä. Dekontaminointisyklejä (hapetus-, pelkistys- ja puhdistuvaiheet) ajettiin neljä kappaletta. Samanaikaisesti ajettiin aina kahta pääkiertopumppua kerrallaan. Loppupuhdistuksen jälkeen suoritettiin vielä putkiston sisäpintojen passivointi, jossa pinnoille muodostettiin rekontaminaatiolta suojaava oksidikerros syöttämällä järjestelmään vetyperoksidia. Dekontaminointi saatiin suoritettua 10 vuorokauden aikana. Kemikaaleja kului seuraavasti: permangaanihappoa 20 m³, oksaalihappoa 5300 kg ja vetyperoksidia 1000 kg. Prosessin vaatima permangaanihappo valmistettiin Loviisan voimalaitoksella sitä varten täyssuolapoistolaitokselle rakennetun järjestelmän avulla, sillä permangaanihapon hinta olisi Siemensiltä tilattuna ollut erittäin korkea ja kuljetus Saksasta hankalaa. (Lindén et al. 1994)

5.3 Dekontaminoinnin seuraukset

Dekontaminoinnin avulla järjestelmistä saatiin poistettua yhteensä 290 kg metalleja ja 41,5 TBq aktiivisuutta. Ioninvaihtohartseissa aktiivisuutta oli 36,3 TBq ja haihdutusjätteissä loput 5,2 TBq. Dekontaminointikertoimet laskettiin 20 eri pisteestä. Saavutetut dekontaminointikertoimet olivat keskimääräisesti kuumissa haaroissa 18, kylmissä haaroissa 10 ja höyrystimissä 150. Kaikkien 20 pisteen dekontaminointikertoimien keskiarvo oli suoraan laskettuna 40, eli n. 98 % aktiivisista oksidikerroksista saatiin poistettua. Loviisassa kuitenkin sovittiin, että lopullinen kerroin määritettäisiin harmonisena keskiarvona. (Lindén et al., 1994) Tämä käytäntö vähentää suurten yksittäisten kertoimien (erityisesti höyrystimien) vaikutusta keskiarvoon. Kokonaiskertoimeksi määräytyi lopulta n. 10.

Dekontaminointitöistä aiheutui kokonaisuudessaan 15,3 manmSv kollektiivinen säteilyannos. Dekontaminoinnin ansiosta säästetty kollektiivinen annos vuosihuollon aikana oli merkittävä hyvin laajojen huolto- ja korjaustöiden tekemisen vuoksi. Ensimmäisen vuoden annossäästöiksi arvioitiin suurimpien töiden perusteella n. 8000 manmSv. Jätettä dekontaminoinnista syntyi käytettyinä ioninvaihtohartseina 32,5 m³ ja haihdutusjätteenä 50 m³. (Lindén et al., 1994) Liitteeseen 1 on kerätty teknisiä arvoja muidenkin laitosten dekontaminoinneista, joita voidaan hyödyntää suunnittelussa.

6 LOVIISAN KÄYTÖSTÄPOISTON AIKAINEN PRIMÄÄRIPIIRIN DEKONTAMINOINTI

6.1 Dekontaminoinnin laajuus

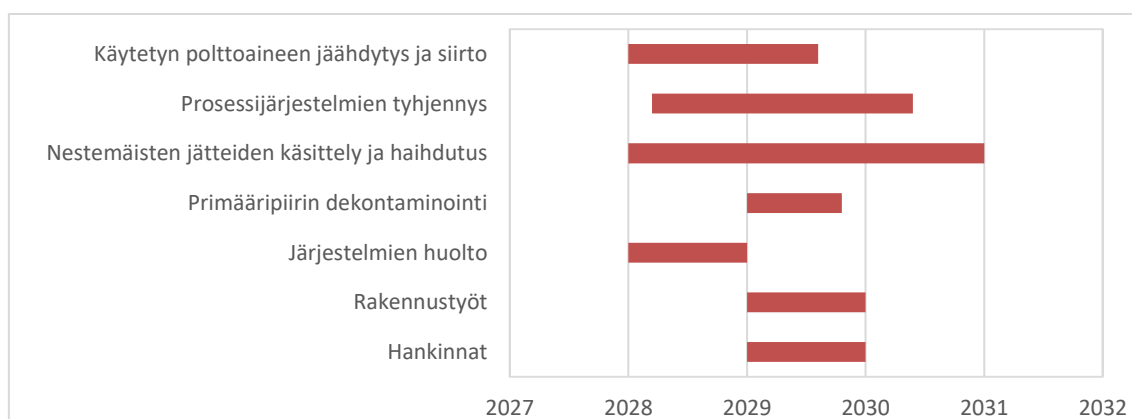
Dekontaminointi voi laajimmillaan käsittää koko primääripiirin apujärjestelmiseen tai suppeimmillaan vain pelkän primääriputkiston. Suuret komponentit, kuten reaktoripaineastia, höyrystimet ja paineastia voidaan tarvittaessa ohittaa tekemällä putkistoihin asianmukaiset ohitukset. Oletetaan kuitenkin, että dekontaminointi tehdään samassa laajuudessa käytöstäpoiston yhteydessä molemmilla laitossyksiköillä, kuin se tehtiin vuonna 1994 LO2:lla. Dekontaminointi käsittäisi siis kaikki 6 kiertopiiriä, höyrystimet, paineistimen ja osan primääripiirin apujärjestelmistä (mm. primääriveden puhdistus-, primääripiirin poistovesien esipuhdistus- ja normaalin lisävesijärjestelmän).

Paineistimen dekontaminoinnissa oli vuonna 1994 suuria ongelmia. Paineistin oli tarkoitus dekontaminoida nostamalla ja laskemalla pintaa vuorotellen paineistimessa, mutta se osoittautui kuitenkin liian hitaaksi. Paineistimessa ylläpidettiin lisäksi typpipatjaa, johon kului typpeä erittäin paljon. Pinnanvaihteluyrityksistä luovuttiinkin heti ensimmäisen dekontaminointisyklin jälkeen, minkä seurauksena paineistimeen jäi aktiivisia kiintoaineita nostoen dekontaminoinnin jälkeiset annosnopeudet paineistimessa korkeammiksi kuin ne olivat olleet ennen dekontaminointia. (Lindén et al.,1994, s. 9) Paineistimen dekontaminointiin joudutaan siis kehittämään vielä toimivampi ratkaisu sen sisältyessä käytöstäpoiston aikaiseen dekontaminointiin.

Höyrystimet muodostavat dekontaminoitavasta pinta-alasta jopa 90 %. Suuren lämmönsiirtopinta-alan takia ne sisältävät suuren määrän aktiivisia korroosiotuotteita, joiden poistamisesta aiheutuu runsaasti ioninvaihtohartsijätettä. Höyrystimien dekontaminointi vähentää kuitenkin höyrystintilassa tehtävistä töistä ja höyrystimien käsittelystä aiheutuvia säteilyannoksia. Höyrystimien dekontaminointiin sisällyttämisen kannattavuutta tulee vielä harkita käytöstäpoiston aikaisten aktiivisuustasojen ollessa selvillä.

6.2 Dekontaminoinnin aikataulu ja kesto

Primääripiirin dekontaminointi suoritetaan käytöstäpoiston valmisteluvaiheen aikana. Valmisteluvaihe alkaa heti laitossyöskön sammutuksen jälkeen ja kestää 3 vuotta. Loviisan 1:n suunniteltu valmisteluvaiheen aikataulu on esitetty kuvassa 3. Loviisan 2:n valmisteluvaiheen aikataulu vastaa hyvin pitkälti Loviisa 1:n aikataulua 3 vuoden aikasiirtymällä. Todennäköisesti kesto on hieman lyhyempi, sillä LO1:n valmisteluvaiheen aikana tehdään jo molempia laitossyösköitä koskevia hankintoja sekä rakennetaan yhteiset jätteenkäsittelytilat.



Kuva 3: Käytöstäpoiston valmisteluvaiheen tämän hetkinen suunniteltu aikataulu LO1:llä. (Kaisanlahti et al., 2018, s. 30, muokattu)

Valmisteluvaihe aloitetaan reaktorin avauksella, polttoaineen siirrolla latausaltaaseen ja reaktorin sisäosien poistolla. Polttoaineen reaktorista poiston jälkeen aloitetaan välittömästi järjestelmien tyhjentäminen. Polttoainetta jäädytetään vaihtolatausaltaassa 18 kuukauden ajan, jonka jälkeen se siirretään käytetyn polttoaineen varastolle. Dekontaminointi voidaan suorittaa aikaisintaan, kun siihen liittyvät järjestelmät on tyhjennetty. Mikäli dekontaminointi suoritetaan polttoaineen jäädytyksen aikana, tulee varmistua polttoainealtaiden jäädytysjärjestelmien häiriöttömästä toiminnasta.

Dekontaminointi voidaan suorittaa käytöstäpoiston aikana joko nopeasti, kuten LO2:lla käytön aikana vuonna 1994, tai pienempien tuotantopaineiden vuoksi myös hitaammin, kuten esimerkiksi Unterweserin laitoksella tehtiin vuonna 2012. Käytännössä dekontaminoinnin kestoa pidentämällä ja syklien määrää lisäämällä päästään parempiin dekontaminointikertoimiin. Tietyn pisteen jälkeen tämä ei kuitenkaan ole enää järkevää, sillä tulokset paranevat prosentuaalisesti hyvin vähän. Esimerkiksi kun DF on kymmenen,

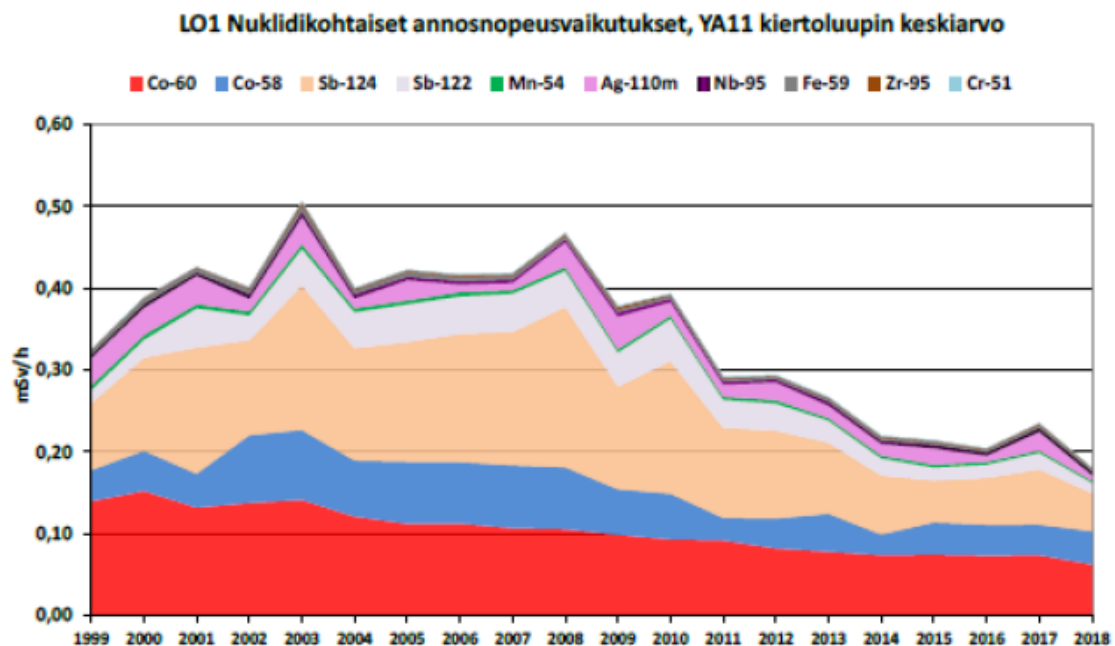
on 90 % aktiivisuudesta saatu poistettua ja jos DF olisi tuhat, 99,9 % aktiivisuudesta olisi poistettu. Toisin sanoen DF olisi kasvanut 100-kertaisesti, mutta poistetun aktiivisuuden ero on vain 9,9 prosenttiyksikköä.

LO2:n kokemuksien perusteella yksi dekontaminointisykli kestää 40-45 tuntia tai konservatiivisesti 2 vuorokautta. Loppupuhdistukseen ja huuhteluihin tulee varata myös n. 2 vuorokautta. Dekontaminointilaitteiston asennuksen kestolle ei ole saatavilla vertailukelpoisia arvioita, joten käytetään sille tämän hetkisessä käytöstäpoistosuunnitelmassa esitettyä arvoa 28 vrk. Käytöstäpoiston aikana passivointia ei tehdä. Käytöstäpoiston aikaisen primääripiirin dekontaminoinnin mukaillessa LO2:n dekontaminointia, voidaan sen kestoksi määrittää neljällä syklillä 38 vrk, jokaisen ylimääräisen syklin pidentäessä kestoja kahdella vuorokaudella.

Unterweserin laitoksella tehdyssä koko primääripiirin dekontaminoinnissa syklejä ajettiin viisi kappaletta, jokaisen syklin kestäen noin viikon. Keskimääräiseksi DF:ksi saatiin 94,5, joka on huomattavasti suurempi kuin LO2:lla. (Topf et al., 2013) Samaa ratkaisua voitaisiin käyttää myös Loviisan laitossyksiköillä tehostamaan dekontaminoinnin vaikutuksia. Yhden syklin kestäessä 7 vuorokautta ja viittä sykliä käyttäen, olettaen laitteiston asennuksen kestävän 28 vuorokautta ja loppupuhdistuksen 2 vuorokautta, dekontaminointi kestäisi siis 65 vuorokautta. Tämän ja edellisen kappaleen perusteella voidaan määrittää käytöstäpoiston aikaisen dekontaminoinnin kestoksi 38-65 vuorokautta, riippuen syklien lukumäärästä ja niiden kestosta.

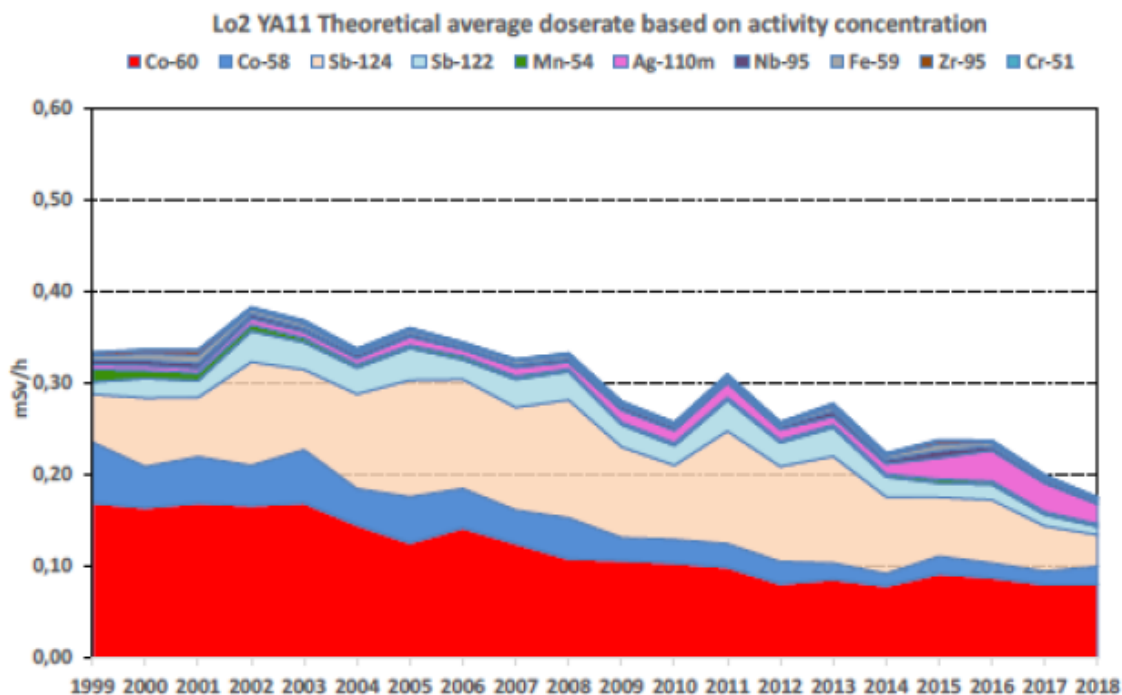
6.3 Dekontaminoinnista saatavat annossäästöt

Primääripiirin dekontaminoinnista saatavia annossäästöjä voidaan arvioida tarkemmin vasta lähempänä operaation suorittamista, kun käytöstäpoiston aikaiset aktiivisuus- ja säteilytasot ovat määritettävissä. Säästöihin vaikuttaa myös lopullinen päätös dekontaminointilajuudesta. Yhden kiertopiirin keskimääräiset annosnopeudet viimeisten 20 vuoden ajalta on esitetty LO1:n osalta kuvassa 4 ja LO2:n osalta kuvassa 5. Tulokset perustuvat vuosittain tehtävistä MARC-mittauksista saatuihin aktiivisuustasoihin.



Kuva 4: Kontaminaatiopitoisuuden perusteella lasketun annosnopeuden kehitys LO1:n kiertoalueella. (Kvarnström & Hirvelä, 2018)

Kuten kuvasta 4 nähdään, LO1:n annosnopeus on viimeisimpien mittausten perusteella keskimäärin 0,18 mSv/h ja laskenut huomattavasti edellisten kymmenen vuoden aikana. Nuklideista suurimmat vaikutukset ovat koboltilla (Co-60 ja Co-58) ja antimonilla (Sb-124 ja Sb-122), jotka muodostavat annosnopeudesta n. 90 %.



Kuva 5: Kontaminaatiopitoisuuden perusteella lasketun annosnopeuden kehitys LO2:n kiertopiirissä. (Kvarnström & Hirvelä, 2018)

LO2:n kiertopiirin annosnopeus oli vuonna 2018 täsmälleen sama kuin LO1:llä, 0,18 mSv/h. Myös LO2:n annosnopeuksissa on havaittavissa huomattava laskusuhdanne. LO2:lla huomattava vaikutus annosnopeuteen on koboltin ja antimoinin lisäksi hopealla (Ag-110m), jotka yhdessä muodostavat n. 90 % annosnopeudesta. Nuklideista koboltin, antimoinin ja hopean nuklidit ovat siis ensisijaiset, joita dekontaminoinnilla pyritään primääripiiristä poistamaan. Yleisesti annosnopeustasojen lasku heikentää ja nousu puolestaan lisää dekontaminoinnin kannattavuutta.

Primääripiirin dekontaminointi vähentäisi henkilökunnalle aiheutuvia säteilyannoksia erityisesti reaktorirakennuksen kontaminoituneen materiaalin purun yhteydessä. Kyseisistä töistä on arvioitu aiheutuvan kollektiiviseksi säteilyannokseksi LO1:llä 1,0 manSv ja LO2:lla 1,0 manSv. (Ketolainen, 2008, s. 19) Näissä arvioissa on oletettu, että primääripiirin dekontaminoinnissa saavutetaan DRF 10 (Eurajoki, 1998, s. 16.) Arvioitu DRF vastaa vuonna 1994 LO2:lla saavutettua kerrointa ja toimii hyvänä konservatiivisena arviona käytöstäpoiston aikaiselle DRF:lle, sillä silloin dekontaminointi voidaan suorittaa käytön aikaista tehokkaammin. Saavutettavaa lopputulosta voidaan arvioida myös muiden laitoksien dekontaminointikokemuksien

perusteella. Yleisestä kirjallisuudesta saatavilla olevat vertailukelpoisimmat DRF:t ovat Grafenrheinfeldin ja Obrigheimin laitoksien primääripiirin dekontaminoinnista, sillä ne ovat PWR-laitoksia ja käytettynä menetelmänä on HP/CORD UV neljällä syklillä. Grafenrheinfeldissä DRF:ksi saatiin 14 ja Obrigheimissa 10. (Topf et al., 2017; Topf 2007) Näiden kahden laitoksen ja LO2:n kertoimien keskiarvoksi muodostuu 11,3, joka sekin puoltaa DRF 10 valintaa hyväksi konservatiiviseksi arvioksi käytöstäpoiston aikaisen primääripiirin dekontaminoinnin lopputulokselle.

Annosnopeuden vähenemiskertoimen 10 käyttö on nyt perusteltu ja sen avulla voidaan päätellä, että ilman dekontaminointia aiheutuvat kollektiiviset säteilyannokset kontaminoituneen materiaalin purusta olisivat 10 manSv/laitosyksikkö. Primääripiirin dekontaminoinnilla saataisiin annossäästöjä siis 9 manSv/laitosyksikkö eli 18 manSv yhteensä molemmilla laitosyksiköillä. Annossäästö on hyvin merkittävä, sillä koko Loviisan laitoksen käytöstäpoistosta aiheutuva kollektiivinen säteilyannos on määritetty olevan 9,4 manSv (Oinonen, 2018, s. 80.)

6.4 Dekontaminoinnin vaikutus primääripiirin putkiston leikkauksen menetelmän valintaan

Primääripiirin putkisto tullaan pilkkomaan osiin ennen sen sijoitusta loppusijoitusastioihin. Primääripiirin dekontaminointi voi mahdollistaa nopeamman leikkauksen menetelmän käyttämisen ja säästää näin aikaa ja kustannuksia. Ilman dekontaminointia putkisto tullaan varmasti pilkkomaan mekaanista jyräystä käyttäen, mutta dekontaminoinnin jälkeen putkiston kontaminaatiotasot voivat olla niin matalia, että leikkauksessa voidaan käyttää plasmaleikkausta. Korkean kontaminaatiotason omaavia kappaleita ei plasmaleikata, sillä se saa kappaleen pinnalla olevan kontaminaation höyrystymään ja leviämään ympäröivään tilaan ilmakontaminaationa, joka nostaa riskiä henkilöiden altistumisessa sisäiselle kontaminaatiolle. Tässä luvussa määritetään dekontaminoinnin jälkeiset primääriputkiston kontaminaatiotasot, plasmaleikkauksen aiheuttama teoreettinen sisäisen annoksen suuruus sekä plasmaleikkauksella säästettävissä oleva aika.

Primääriputkisto on suunniteltu leikattavaksi siten, että jokaisen kuuden luopin kuuma ja kylmä haara leikataan poikki seitsemästä kohtaa. Tällöin leikkauksia suoritetaan yhteensä

siis 84 kappaletta. Loviisan Käytöstäpoiston työsuunnitelmassa primääriputkistossa käytettävän DN500-putken jyrshintänopeudeksi on arvioitu 52 min/leikkaus ja plasmaleikkauksen nopeudeksi 300 mm/min (Mayer, 2008). Primääriputkiston ulkohalkaisijan ollessa 5600 mm plasmaleikkauksen nopeus on n. 6 min/leikkaus eli yli kahdeksan kertaa nopeampaa kuin jyrshintä. Leikkauksien kokonaiskesto jyrshintällä olisi 73 h ja plasmaleikkaamalla 8h. Plasmaleikkaus säästäisi aikaa siis n. 65 tuntia.

Tiettyä rajaa plasmaleikkauksen käytön sallivalle kontaminaatiotasolle ei ole, vaan käytön mahdollisuus suunnitellaan aina tapauskohtaisesti. Plasmaleikatessa ilmaan höyrystyy primääriputkiston sisäpinnasta sekä gamma- että beetanuklideja. Beetanuklidit eivät juurikaan aiheuta ulkoista annosta, mutta sisään hengitettynä niistä voi saada runsaan sisäisen annoksen. Taulukossa 1 on esitetty primääripiirin luupin keskimääräinen kontaminaatiotaso eri nuklidien osalta vuonna 2018. Taulukossa gammanuklideja ovat Sb-122...Cr-51 ja beetanuklideja Ni-59...Fe-55. Beetanuklidien aktiivisuuspitoisuudet on määritetty vuoden 2030 nuklidivektorin perusteella Co-60:n suhteen. (Kupiainen et al., 2019, s. 68) Cs-isotoopit ovat vesiliukoisia, jolloin primääripiirin jatkuvan puhdistuskierron vuoksi niitä ei esiinny primääripiirin oksidikerroksessa (Ojovan & Lee, 2014, s. 106.)

Taulukko 1: LO1:n ja LO2:n primääriluupin kontaminaatiotasot vuonna 2018. (Kvarnström & Hirvelä, 2018; Kupiainen et al., 2019, s. 68)

Nuklidi	Aktiivisuus [kBq/cm ²]	
	LO1	LO2
Sb-122	23,143	18,548
Sb-124	13,857	11,290
Co-60	12,714	17,903
Co-58	27,714	15,000
Mn-54	2,143	2,581
Ag-110m	1,571	5,323
Cr-51	7,000	5,645
Ni-59	0,023	0,032
Ni-63	2,296	3,233
Sr-90	0,054	0,076
Nb-94	0,003	0,004
Ag-108m	0,007	0,010
Fe-55	254,286	358,065
Yht.	344,811	437,710

Tämän hetkisen suunnitelman mukaan laitoksen sammutuksen ja primääriputkiston paloittelun välissä on 4 vuotta aikaa. Tänä aikana aktiivisuudesta valtaosa häviää radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Radioaktiivinen hajoaminen lasketaan puoliintumisajan perusteella yhtälön 2 mukaisesti.

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t} \quad (2)$$

missä	A_0	Aktiivisuus alussa	[Bq/cm ²]
	$T_{1/2}$	Puoliintumisaika	[d]
	t	Aika	[d]

Primääripiirin dekontaminointi suoritetaan n. 18 kuukautta laitoksen sammutuksen jälkeen. Tällöin putkiston pilkkomisen aikainen aktiivisuustaso lasketaan siten, että aluksi aktiivisuus puoliintuu 18 kuukauden ajan, sen jälkeen aktiivisuutta saadaan dekontaminoinnilla poistettua nuklidikohtaisten dekontaminointikerrointen verran ja lopuksi aktiivisuus puoliintuu vielä 30 kuukauden ajan. Taulukossa 2 on esitetty vuoden 1994 LO2:n dekontaminoinnissa saavutetut keskimääräiset nuklidikohtaiset dekontaminointikertoimet.

Taulukko 2: LO2:lla saavutetut keskimääräiset nuklidikohtaiset dekontaminointikertoimet vuoden 1994 dekontaminoinnissa. (Lindén et al., 1994, s. 14)

Keskimääräiset nuklidikohtaiset DF:t		
Nuklidi	Kylmähaara DF	Kuumahaara DF
Sb-122	150	330
Sb-124	80	130
Mn-54	450	420
Co-58	60	280
Co-60	80	110
Ag-110m	80	20

Valitaan konservatiivisesti taulukosta 2 kylmän/kuuman haaran väliltä pienempi arvo käytettäväksi yleisesti primääripiirin haaroille. Valintaa voidaan pitää hyvin konservatiivisena, sillä käytöstäpoiston aikana tarkoituksena on poistaa koko oksidikerros. Cr-51:n osalta dekontaminointikerrointa ei ole saatavilla, mutta se jää merkityksettömäksi sillä Cr-51:n aktiivisuus puoliintuu kokonaan ennen putkiston purkamista, vaikka dekontaminointia ei tehtäisikään. Laitoksen sammussa aktiivisuustasoksi oletetaan sama kuin vuonna 2018 (taulukko 1). Taulukkoon 3 on

laskettu primääripiirin aktiivisuustasot eri vaiheissa. Mikäli dekontaminointia ei tehtäisikään, voidaan purkuvaiheen aikaiset aktiivisuustasot määrittää pelkästään yhtälöä 2 käyttämällä.

Taulukko 3: Primääripiirin aktiivisuustasot laskettuina eri vaiheissa.

Nuklidi	T 1/2 [d]	Aktiivisuus valmisteluvaiheen alussa [kBq/cm ²]		Aktiivisuus ennen dekontaminointia [kBq/cm ²]		Aktiivisuus dekontaminoinnin jälkeen [kBq/cm ²]		Aktiivisuus primääriputkiston purkamisen alkaessa [kBq/cm ²]	
		LO1	LO2	LO1	LO2	LO1	LO2	LO1	LO2
Sb-122	2,70	23,1	18,5	0	0	0	0	0	0
Sb-124	60,20	13,9	11,3	0,028	0,023	0	0	0	0
Co-60	1923,55	12,7	17,9	10,4	14,7	0,131	0,184	0,095	0,133
Co-58	70,80	27,7	15,0	0,140	0,076	0,002	0,001	0,000	0,000
Mn-54	312,00	2,14	2,58	0,646	0,778	0,002	0,002	0,000	0,000
Ag-110m	250,00	1,57	5,32	0,352	1,19	0,018	0,060	0,001	0,005
Cr-51	27,70	7,00	5,65	0,000	0,000	0	0	0	0
Ni-59	2,74E+07	0,023	0,032	0,023	0,032	0	0	0	0
Ni-63	36865	2,29	3,23	2,27	3,20	0,028	0,040	0,028	0,039
Sr-90	10512	0,054	0,076	0,052	0,074	0,001	0,001	0,001	0,001
Nb-94	5379500	0,003	0,004	0,003	0,004	0	0	0	0
Ag-108m	159870	0,007	0,010	0,007	0,010	0	0	0	0
Fe-55	999,01	254,3	358,1	174,8	246,2	2,18	3,08	1,17	1,65
Yht.	-	344,8	437,7	188,8	266,3	2,37	3,37	1,30	1,83

Reaktorin lähellä höyrystymistilassa on vuotoneutroneita, jotka aktivoivat rakenteita muualtakin kuin vain putkiston sisäpinnalta, mutta oletetaan sen osuuden olevan niin pieni, että se voidaan pitää merkityksettömänä jo valmiiksi konservatiivisissa arvioissa. Kontaminaatiota oletetaan siis höyrystyvän vain primääriputkiston sisäpinnalta putkistoa plasmaleikkauksessa. Primääriputkiston sisähalkaisija on LO1:llä 49,6 cm ja LO2:lla 49,2 cm. Jos plasmaleikkauksessa muodostuva leikkausura olisi putken sisäpinnalla 0,1 cm ja kaikki kontaminaatio tältä pinnalta höyrystyy niin pinta-alaa, jolta kontaminaatiota höyrystyy ilmaan, on LO1:llä n. 15,6 cm² ja LO2:lla n. 15,5 cm²/leikkaus.

Taulukkoon 4 on laskettu sisäisen kontaminaation aiheuttama säteilyannos 50 vuoden ajanjaksolla, jos henkilö hengittäisi kaiken höyrystyvän kontaminaation sisään. Taulukossa 3 esitetyt nuklidikohtaiset aktiivisuudet muunnetaan säteilyannoksiksi annosmuuntokertoimien, $h(g)$, avulla. Annosmuuntokertoimia on saatavilla sekä 1 µm, että 5 µm hiukkaskoolle. (STUK, 2014) Loviisassa menettelytapana on käyttää 1 µm:n

kertoimia. Huomioitavaa on, että taulukkoon 4 lasketut sisäiset annokset ovat käytännössä pahin mahdollinen skenaario. On erittäin epätodennäköistä, että henkilö altistuisi kaikelle putkesta höyrystyvälle kontaminaatiolle. Sisäiset annokset pyritään aina täysin välttämään suojavarusteita käyttäen. Lasketut sisäiset annokset toimivatkin vain eräänlaisena ”riskitarkasteluna”.

Taulukko 4: Yhdestä putken leikkauksesta aiheutuva sisäinen annos 50 vuoden ajalta henkilön hengittäessä koko höyrystyvä kontaminaatio sisäänsä.

Nuklidi	$h(g)_{1\mu m}$	Kok. annos LO1 [mSv]		Kok. annos LO2 [mSv]	
	[Sv/Bq]	Ei dek.	Dek.	Ei dek.	Dek.
Sb-122	1,00E-09	0,000	0,000	0,000	0,000
Sb-124	6,10E-09	0,000	0,000	0,000	0,000
Co-60	9,60E-09	1,124	0,014	1,570	0,020
Co-58	1,50E-09	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn-54	8,70E-10	0,001	0,000	0,001	0,000
Ag-110m	7,20E-09	0,003	0,000	0,010	0,001
Cr-51	3,10E-11	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni-59	1,80E-10	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni-63	4,4E-10	0,015	0,000	0,021	0,000
Sr-90	2,40E-08	0,018	0,000	0,026	0,000
Nb-94	1,00E-08	0,000	0,000	0,001	0,000
Ag-108m	6,10E-09	0,001	0,000	0,001	0,000
Fe-55	3,70E-10	0,532	0,007	0,744	0,009
Yht.	-	1,695	0,021	2,37	0,030

Kuten taulukosta 4 nähdään, niin dekontaminoinnin myötä sisäisten annosten suuruus alenee noin 80-kertaisesti kummallakin laitosyksiköllä.

Höyrystyessä kontaminaatio leviää ympäröivään tilaan ja tätä ilmakontaminaatiota mitataan DAC-arvolla. Plasmaleikatessa työkohteella tulee olla kohdepoistolaitteisto, joiden HEPA-suodattimien suodatusaste on tyypillisesti vähintään 99,5 %. Suodattimen läpi kaikista 84 leikkauksesta pääsisi ympäröivään tilaan leviämään aktiivisuutta yhteensä LO1:llä 8,48 kBq ja LO2:lla 11,86 kBq. Molemmilla laitosyksiköillä tästä valtaosa on Fe-55 (90 %) ja Co-60 (7,3 %). 1 DAC Fe-55 vastaa 22,52 kBq/m³ ja 1 DAC Co-60 0,287 kBq/m³. Aktiivisuuden levitessä esimerkiksi 20 m³:n tilaan olisi DAC-arvo täten LO1:llä 0,12 ja LO2:lla 0,17. Ympäröivän tilan ilmakontaminaatio pysyisi luokitukseltaan vihreänä (<0,3 DAC). Korkeat nuklidikohtaiset dekontaminointikertoimet saavutettaessa

voitaisiin plasmaleikkausta siis pitää oikeutettuna työtapana primääriputkiston pilkkomisessa ajansäästön ja täten kustannussäästöjen vuoksi.

6.5 Dekontaminoinnista syntyvät jätteet

Dekontaminoinnin seurauksena syntyy kahta erilaista jätettä, käytettyä ioninvaihtohartsia sekä haihdutusjätettä. Ioninvaihtohartsia käytetään dekontaminointiliuoksen puhdistukseen ja haihdutettavaa vettä muodostuu uloslaskuista ja ioninvaihtohartsien vaihdon sekä kuohkeutuksen seurauksena. Syntyvien jätteiden käsittely, kiinteytys ja loppusijoittaminen on hyvin kallista, joten taloudellisesta näkökulmasta syntyvän jätemäärän minimointi on hyvin tärkeää. Syntyvien jätteiden määrää voidaan arvioida parhaiten vuoden 1994 LO2:n primääripiirin dekontaminoinnin ja muilta laitoksilta saatujen uudempien dekontaminointikokemusten perusteella.

Ioninvaihtohartsit jaetaan kationi- ja anionihartseihin. HP/CORD UV -menetelmää käytettäessä kationihartsin kulutus on riippuvainen liukenevien metallien määrästä, edeltävän syklin oksalaattimäärästä sekä syötetyn permanganaanihapon määrästä. Anionihartsin kulutus riippuu ainoastaan syötetyn oksaalihapon määrästä. Vuonna 1994 LO2:lla permanganaanihappoa kului 20 m³ ja korroosiotuotteita poistettiin 290 kg, jolloin kationihartsin kulutus oli 9,9 m³. Oksaalihappoa käytettiin 5300 kg ja anionihartsia kului 22,6 m³. Yhteensä käytettyä ioninvaihtohartsia muodostui siis n. 32,5 m³. (Lindén et al. 1994, s. 15) Liitteestä 1 nähdään, että taulukoissa esitetyistä dekontaminoinneista LO2:n ioninvaihtohartsien määrä on suurin. Liitteen 1 arvojen perusteella konservatiiviseksi ioninvaihtohartsijätteen määrän väliksi voi arvioida 20-32,5 m³/laitosyksikkö. Käsiteltävää ioninvaihtohartsijätettä syntyisi molemmilta laitosyksiköiltä yhteensä 40-65 m³.

Anionihartsin kulutusta saadaan vähennettyä UV-hajottajia käyttämällä, jotka hajottavat käytetyn oksaalihapon vedeksi ja hiilidioksidiksi. LO2:n dekontaminoinnissa käytettiin kahta UV-hajottajaa, joiden avulla hajotettiin n. 800 kg oksaalihappoa ja siten säästettiin yli 9 m³ (n. 27 %) anionihartsia. UV-hajotus on kuitenkin prosessina hitaampi kuin anionivaihtimien käyttö, minkä takia käytön aikaisessa dekontaminoinnissa ei tuotantopaineiden vuoksi hyödynnetty UV-hajottimia optimaalisesti. Esimerkiksi LO2:n dekontaminoinnin neljännessä syklissä käytettiin ainoastaan anionivaihtimia

dekontaminointiliuoksen puhdistukseen, jonka seurauksena anionihartsin kulutus oli n. 10 m^3 eli noin 44 % koko dekontaminoinnin ioninvaihtohartsikulutuksesta. (Lindén et al., 1994) Käytöstäpoiston aikaisessa dekontaminoinnissa ei ole yhtä suuria aikataulupaineita, jolloin UV-hajottimia voitaisiin hyödyntää enemmän ja pienentää syntyvää jätemäärää. Esimerkiksi Unterweserin laitoksen primääripiirin dekontaminoinnissa korroosiotuotteita poistettiin 459 kg, permangaanihappoa kului 20 m^3 ja oksaalihappoa 4900 kg, mutta kulunut kokonaishartsimäärä oli vain 19 m^3 . (Topf et al., 2013) Yhtenä selityksenä tähän voi olla juurikin UV-hajottimien tehokkaampi hyödyntäminen, sillä Unterweserin laitoksella käytettiin dekontaminointiin aikaa 6 viikkoa kun taas LO2:lla vain 10 vuorokautta.

LO2:n primääripiirin dekontaminoinnista syntyi haihdutettavaa jätevettä yhteensä n. 2600 m^3 ja haihdutuksen jälkeen haihdutusjätettä jäi 50 m^3 . (Lindén et al. 1994) Haihdutusjätteen määrälle ei juurikaan ole vertailukelpoisia arvoja saatavilla muilta laitoksilta yleisestä kirjallisuudesta. Oletetaan, että käytöstäpoiston aikaisesta dekontaminoinnista aiheutuvat haihdutusjätteet olisivat samaa suuruusluokkaa, jolloin haihdutusjätettä olisi käsiteltävänä molempien laitostyöyksiköiden dekontaminointien jälkeen yhteensä n. 100 m^3 .

6.6 Dekontaminoinnin kustannukset

Suurimmat kustannukset primääripiirin dekontaminoinnissa aiheutuvat syntyvien jätteiden käsittelystä ja loppusijoittamisesta, kemikaalien hankkimisesta, laitosmuutoksien tekemisestä sekä henkilöstökustannuksista. Säästöjä puolestaan kertyy edullisempien loppusijoituspakkauksien käytön mahdollisuudesta ja mahdollisesti myös paremmin optimoitavissa olevasta purkuvaiheen aikataulusta. Nämä tekijät on esitetty taulukossa 5. Kustannusten ja säästöjen euromääräisiä arvoja ei esitetä tässä työssä niiden salassa pidettävyyden vuoksi, joten kustannusten ja säästöjen osuudet kokonaiskustannuksista on esitetty likimääräisinä prosenttiosuuksina. Taulukosta 5 nähdään, että syntyvän jätemäärän minimointi on hyvin tärkeää kustannusten alentamiseksi.

Taulukko 5: Käytöstäpoiston aikaisen primääripiirin dekontaminoinnin kustannukset ja säästöt sekä niiden prosenttiosuudet kokonaiskustannuksista.

Kustannustekijät	Osuus kokonaiskustannuksista
Dekontaminointi	50 %
Henkilöstökustannukset	10 %
Syntyvien jätteiden käsittely	40 %
Säästötekijät	
Kevyemmät loppusijoituspakkaukset	2 %
Säästö urakoitsijakuluissa	10 %

Ilman dekontaminointia primääriputkiston palat joudutaan varmasti loppusijoittamaan betonilaatikoissa. Primääriputkisto pilkotaan 84 osaan ja näitä osia mahtuu yhteen betonilaatikkoon 4 kappaletta (Mayer, 2008.) Tällöin betonilaatikoita tarvitaan 21 kappaletta primääriputkiston osien loppusijoittamista varten. Dekontaminoinnin jälkeen on mahdollista, että primääriputkisto voidaan luokitella luokkaan 2 ja sijoittaa tällöin betonilaatikoiden sijaan käytännössä ilmaisissa puulaatikoissa.

Primääripiirin dekontaminointi ei vaikuta purkuvaiheen kriittiseen polkuun, jolloin dekontaminoinnin avulla purkuvaiheen päättymisajankohtaa ei saada aikaistettua. Urakoitsijoiden työtunteja dekontaminoinnilla saadaan kuitenkin vähennettyä. Primääriputkiston plasmaleikkaus säästää aikaa ja lisäksi dekontaminointi vaikuttaa höyrystintilan yleisiin työolosuhteisiin (kevyempi suojarustus ja vähäisempi suojaletyksen tarve) ja helpottaa esimerkiksi höyrystimien käsittelyä.

Dekontaminointi antaa lisäksi mahdollisuuden purkuvaiheen aikataulun optimointiin, joka voi vaikuttaa dekontaminoinnista saataviin säästöihin huomattavasti. Tämän hetkessä työsuunnitelmassa esimerkiksi höyrystintilan lattian purkaminen on ajoitettu tapahtuvan samanaikaisesti loppusiivouksen ja valvonnasta vapautuksen kanssa (purkuvaiheen viimeiset työt) ja näiden aikana organisaatiovahvuus on täysimääräinen. Mikäli höyrystintilan katkaisutyöt voidaan tehdä nopeammin, voidaan myös höyrystintilan lattia purkaa aikaisemmin. Tällöin viimeisiksi työvaiheiksi jäisivät vain loppusiivous ja valvonnasta vapauttaminen, jotka voidaan tehdä huomattavasti pienemmällä organisaatiovahvuudella kuin nykyisessä suunnitelmassa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Otettaessa huomioon käytöstäpoiston aikaisesta primääripiirin dekontaminoinnista HP/CORD D UV -menetelmällä aiheutuvat suurimmat kustannustekijät ja saatavat säästöt, voidaan operaation kustannusten määrittää olevan n. 2 % koko Loviisan laitoksen käytöstäpoiston kustannuksista. Verrattaessa kustannuksia dekontaminoinnista saatavaan annossäästöön, 18 manSv, voidaan primääripiirin dekontaminointia pitää hyvin kannattavana toimenpiteenä. Sen seurauksena Loviisan laitoksen käytöstäpoistosta aiheutuvat säteilyannokset pienenevät n. kolmasosaan. Primääripiirin dekontaminointi helpottaa ja nopeuttaa myös eri työvaiheita ja aktiivisten komponenttien käsittelyä. Taulukossa 6 on esitetty tässä työssä määritetyt arviot Loviisan käytöstäpoiston aikaisen primääripiirin dekontaminoinnin seurauksille.

Taulukko 6: Loviisan käytöstäpoiston aikaisen primääripiirin dekontaminoinnin seurauksia.

Käytöstäpoiston aikainen primääripiirin dekontaminointi		
	LO1	LO2
Kesto [vrk]	40-65	40-65
Jättemäärä (ioninvaihtohartsit) [m ³]	20-32,5	20-32,5
Jättemäärä (haihdutusjäte) [m ³]	50	50
Annossäästö [manmSv]	9000	9000

Käytöstäpoiston aikaisen primääripiirin dekontaminoinnin kannattavuutta voidaan lisätä edelleen optimoimalla dekontaminointisykliä pituus ja määrä, sekä minimoimalla syntyvä jättemäärä. Syntyvää jättemäärää voidaan vähentää etenkin hyödyntämällä UV-hajottimia mahdollisimman tehokkaasti. Mikäli dekontaminoinnin avulla käytöstäpoiston purkuvaiheiden aikatauluja pystytään optimoimaan, voi dekontaminoinnin kustannukset mitätöityä kokonaan ja lopulliset kustannukset kääntyä jopa tuoton puolelle.

Työn sisältö pohjautuu vahvasti aiemmin tehtyihin ydinvoimalaitosten primääripiirien dekontaminointeihin. Dekontaminointisuunnitelmia voidaan tarkentaa lähempänä käytöstäpoiston alkamista, kun sen aikaiset aktiivisuus- ja säteilytasot ovat selvillä. Tällöin eri osa-alueita pystytään analysoimaan asiantuntijoiden toimesta paljon tarkemmin. Seuraavan kymmenen vuoden aikana myös dekontaminointimenetelmät voivat vielä kehittyä, jolloin uusia innovaatioita voidaan mahdollisuuksien mukaan hyödyntää myös Loviisan laitoksen dekontaminoinnissa.

8 YHTEENVETO

Työssä esiteltiin lyhyesti Loviisan ydinvoimalaitoksen käytöstäpoistosuunnitelma ja sen aikataulu. Tällä hetkellä laitousyksiköiden käyttöluvut ovat voimassa LO1:llä vuoteen 2027 ja LO2:lla vuoteen 2030 asti, joiden jälkeen laitousyksiköiden käytöstäpoistotoimenpiteet aloitetaan välittömästi käytöstäpoiston valmisteluvaiheilla. Yhtenä valmisteluvaiheen operaationa on primääripiirin dekontaminointi, jonka kannattavuuteen tässä työssä keskityttiin.

Työhön sisältyi lyhyt kuvaus mekaanisista, sähkökemiallisista ja kemiallisista dekontaminointimenetelmistä, joita ydinvoimalaitoksilla käytetään. Kemiallisia dekontaminointimenetelmiä käsiteltiin syvällisemmin, sillä ne ovat ainoita, joilla primääripiirin suljetut putkistojärjestelmät voidaan dekontaminoida. Dekontaminointimenetelmien päätavoitteena on alentaa kappaleiden kontaminaatio- ja säteilytasoja. Työssä valittiin Loviisan käytöstäpoiston aikaiseen primääripiirin dekontaminointiin käytettäväksi HP/CORD-UV -menetelmä, sillä siitä on maailmalla eniten kokemuksia ja sitä on käytetty LO2:lla aiemminkin primääripiirin dekontaminointiin. Menetelmän toiminta perustuu dekontaminointikemikaalien kierrättämiseen primääripiirissä ja lopuksi dekontaminointiliuoksen hajottamiseen UV-valoa käyttäen.

Primääripiirin dekontaminoinnin kesto ja siitä aiheutuva jätemäärä arvioitiin aiempien dekontaminointikokemusten perusteella. Dekontaminoinnista saatava säteilyannossäästö perustuu Loviisassa aiemmin tehtyihin arvioihin ja niissä käytetyn dekontaminointikertoimen reaalisuuden perusteluun. Suunnitelmat tulevat vielä tarkentumaan ennen käytöstäpoiston aloitusta, jolloin myös primääripiirin dekontaminoinnin kannattavuuden määritteleviä tekijöitä voidaan analysoida tarkemmin.

Työn tavoitteena oli määrittää käytöstäpoiston aikaisen primääripiirin dekontaminoinnin kannattavuus, joka pohjautuu loppujen lopuksi dekontaminoinnista aiheutuviin kustannuksiin ja siitä saataviin annossäästöihin. Työn johtopäätöksenä primääripiirin dekontaminointia voidaan pitää hyvin kannattavana operaationa vähentämään Loviisan käytöstäpoiston aikaisia säteilyannoksia.

LÄHDELUETTELO

Aker, R., 2005. Maine Yankee Decommissioning Experience Report – Detailed Experiences 1997-2004. [verkkojulkaisu]. [viitattu 30.10.2019]. Saatavissa: <http://www.maineyankee.com/public/pdfs/epri/my%20epri%20report-2005.pdf>

Basu, A., Lindvall, C., Åberg, T., Tingfors, T., Topf, C., Mattson, M. 2008. Full System Decontamination for Decommissioning: Experiences at NPP Barsebäck Units 1 and 2 Applying the AREVA NP GmbH HP CORD UV/AMDA Technology. [verkkojulkaisu]. [viitattu 30.10.2019]. Saatavissa: https://pdfs.semanticscholar.org/8cc1/71ddc65d7b7aeffd41dd695c8633bbdeb3f1.pdf?_ga=2.107929482.92181016.1562750747-1896666540.1561442263

Bradbury, D., Bushart, S.P., Elder, G., Wood, C.J., 2007. Decontamination and Recycling of Radioactive Material from Retired Components. *WM'07 Conference, February 25 – March 1, 2007, Tucson, AZ*. [verkkojulkaisu]. [viitattu 28.10.2019]. Saatavissa: <http://www.wmsym.org/archives/2007/pdfs/7427.pdf>

Cumo, M., Tripputi, I., Spezia, U. 2004. Nuclear Plant Decommissioning: Technology, Cost Evaluation, Management, Regulation, Safety, Health and Environment Protection. ISBN 88-900812-0-1.

Eurajoki Tapani, 1998. Käytöstäpoistosuunnitelma, Henkilökunnan säteilyannokset. Loviisan voimalaitos.

Feltcorn Edward, 2006. Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surfaces. U.S. Environmental Protection Agency, *EPA-402-R-06-003*. [verkkojulkaisu]. [viitattu 2.10.2019]. Saatavissa: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-06-003.pdf>

Fortum Power and Heat Oy, 2004. Loviisan Voimalaitoksen Yleiskuvaus. Koulutusmateriaali.

International Atomic Energy Agency, 2005. Selection of Decommissioning Strategies: Issues and Factors. ISBN 92-0-111705-1.

International Atomic Energy Agency, 2014. Decommissioning of Facilities, General Safety Requirements, Safety Standards Series No. GSR Part 6. [verkkojulkaisu]. [viitattu 16.10.2019]. Saatavissa:
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1652web-83896570.pdf>

Kaisanlahti, M., Kälviäinen, E., Nummi, O., Oinonen, V., 2018. Decommissioning Plan of Loviisa NPP Edition 2018. Loviisan Voimalaitos.

Ketolainen Antti, 2008. Käytöstäpoistosuunnitelma, Purkuhenkilöstön Säteilystä. Loviisan voimalaitos.

Kinnunen Petri, 2008. ANTIOXI – Decontamination Techniques for Activity Removal in Nuclear Environments. [verkkojulkaisu]. [viitattu 2.10.2019]. Saatavissa:
<https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT-R-00299-08.pdf>

Kumar V., Goel R., Chawla R., Silambarasan M., Sharma RK., 2010. Chemical, biological, radiological, and nuclear decontamination: Recent trends and future perspective. J Pharm Bioall Sci. 2:220-238. [verkkojulkaisu]. [viitattu 18.10.2019]. Saatavissa: <http://www.jpbonline.org/text.asp?2010/2/3/220/68505>

Kupiainen, P., Eurajoki, T., Nummi, O., 2019. Safety Case for Loviisa LILW Repository 2018. Loviisan Voimalaitos.

Laraia Michele, 2012. Nuclear Decommissioning: Planning, Execution and International Experience. Woodhead Publishing Series in Energy. ISBN 978-0-85709-115-4

Lindén, U., Halin, M., Kvarnström, R., Wahlström, B., 1994. Loviisa 2 Primääripiirin Dekontaminointi. Loviisan voimalaitos.

Mayer, E., 2008. Käytöstäpoiston Työsuunnitelma M2. Loviisan voimalaitos.

Oinonen Ville, 2018. Loviisan Voimalaitoksen Käytöstäpoiston Säteilyturvallisuuksuunnitelma. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta

Oinonen Ville, 2017. Käytöstäpoiston Turvallisuuksuunnitelma. Loviisan Voimalaitos.

Ojovan, M.I., Lee, W.E., 2014. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation (Second Edition). [verkkojulkaisu]. [viitattu 18.11.2019]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099392-8.00009-7>

Pirkanniemi Kari, 2007. Complexing Agents: A Study of Short-term Toxicity, Catalytic Oxidative Degradation and Concentrations in Industrial Waste Waters. Kuopion yliopisto. ISBN 978-951-27-0687-7.

Rahman A, 2008. Decommissioning and Radioactive Waste Management. Whittles Publishing. ISBN 978-1904445-45-6.

Stiepani C. & Schappert W., 2006. Full System Decontamination of the PWR Stade prior to Decommissioning. [verkkojulkaisu]. [viitattu 27.11.2019]. Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/caa7/bafc0cd0dc75a529e302bd89c4ef52739ce8.pdf>

STUK, 2014. Ohje ST 7.3, Sisäisestä Säteilystä Aiheutuvan Annoksen Laskeminen. ISBN 978-952-478-986-8 (pdf)

Topf Christian, 2007. Full System Decontamination (FSD) with the CORD Family Prior to Decommissioning, Experiences at the German NPP Obrigheim 2007. [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.10.2019]. Saatavissa: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/048/40048127.pdf

Topf, C., Schütz, S., Volkmann, C., 2017. Double Decontamination. Nuclear Engineering International. [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.10.2019]. Saatavissa: <https://www.framatome.com/businessnews/liblocal/docs/Presse/Fachaufsatze/FSD%20NEI%20final%20122017.pdf>

Topf, C., Sempere-Belda, L., Fischer, M., Tscheschlok, E., Volkmann, C., 2013. Full System Decontamination at German Power Plant Unterweser. *atw Vol. 58 (2013) Issue 4*. [verkkojulkaisu]. [viitattu 30.10.2019]. Saatavissa:

<http://www.framatome.com/businessnews/liblocal/docs/Presse/Fachaufsatze/TOPF%20aus%20atw%202013-04.pdf>

**LIITE 1. YHTEENVETOTAULUKKO ERI LAITOSTEN
DEKONTAMINOINTIKOKEMUKSISTA**

Taulukon lähteinä (Aker, 2005; Basu et al., 2008; Lindén et al., 1994; Stiepani, 2008; Topf, 2007; Topf et al., 2013; Topf et al., 2017).

Laitos	Grafenrheinfeld	Unterweser	Barsebäck 1	Barsebäck 2	Obrigheim	Stade	Connecticut Yankee	Loviisa 2
Sijainti	Saksa	Saksa	Ruotsi	Ruotsi	Saksa	Saksa	USA	Suomi
Tyyppi	PWR	PWR	BWR	BWR	PWR	PWR	PWR	PWR
Teho [MW _e]	1345	1410	600	600	357	672	560	502
Vuosi	2016	2012	2008	2007	2007	2005	1998	1994
Menetelmä	CORD	CORD	CORD	CORD	CORD	CORD	CORD	CORD
Dekontaminoitu tilavuus [m ³]	-	540	200	200	160	310	-	320
Dekontaminoitu pinta-ala [m ²]	-	22500	1800	1800	8100	17000	-	17000
Syklien lkm	4	5	3	3	4	4	2	4
Kesto	-	6 viikkoa	11 vrk	11 vrk	-	-	5 viikkoa	10 vrk
Poistettu aktiivisuus [TBq]	28	91	1,29	2,14	5,6	27	4,85	41
Poistetut korroosiotuotteet [kg]	190,2	459	118	64	224	609	83	290
Ioninvaihtohartsijäte [m ³]	7,8	19	5	4	6,7	15,4	13,2	32,4
Haihdotusjäte [m ³]	-	11,5	-	-	-	-	-	50
DF	139	94,5	298	93	625	58	-	40
DRF	14	-	25	26	10	-	5	10
Aiheutunut annos [manmSv]	-	70	53,8	84,5	-	150	300	15,3
Annossäästö [manmSv]	-	-	3300	3300	-	-	-	8000