

Herkko Metsämäki

YDINJÄTTEEN JALOSTAMINEN ENERGIAKSI

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Henrik Tolvanen
Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Herkko Metsämäki: Ydinjätteen jalostaminen energiaksi
Refining nuclear waste into energy
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Huhtikuu 2021

Nykyisten konventionaalisten ydinreaktoreiden keskeisenä ongelmana on tehoton polttoainetalous sekä muodostuva radioaktiivinen ydinjäte. Hyödyntämättömän energiapotentiaalin lisäksi ydinjätteen ongelmana ovat valtavat käsittely- ja loppusijoituskustannukset.

Tämä kirjallisuusselvityksenä tehty kandidaatintyö käsittelee ydinvoimalaitoksissa muodostuvan ydinjätteen energiahyödyntämisen mahdollisuuksia. Pääasiallisena tavoitteena oli muodostaa kattava kokonaiskuva ydinjätteen ongelmista, sen käsittely- ja hyödyntämismenetelmistä. Lisäksi tutkittiin hyödyntämiseen tarvittavan teknologian haasteita ja tulevaisuuden potentiaalia.

Nykyisellä uraanin ja plutoniumin kierrätyksellä pystytään ydinjätteestä kierrättämään viidesosa. Tulevaisuudessa kehittyneiden ydinjätteen käsittelymenetelmien ja nopean energiaspektrin reaktoreiden, kuten hyötöreaktoreiden ja kiihdytinpohjaisten reaktoreiden, ansiosta polttoaineesta voidaan hyödyntää jopa yli 80 prosenttia nykyisen alle prosentin sijaan. Useat ydinvoimamaat, kuten Yhdysvallat ja Iso-Britannia, pystyisivät kattamaan koko maan sähköntarpeen sadoiksi vuosiksi hyödyntämällä ydinjätevarantonsa nopeiden reaktoreiden avulla. Loppusijoitettavan jätteen sijoitusaika on vain satoja vuosia, kun konventionaaliselle ydinjätteelle loppusijoitusaika on satoja tuhansia vuosia.

Ydinjätteen käsittelyssä merkittävimmät vaihtoehdot ovat veteen perustuva PUREX sekä pyrometallurginen menetelmä. Vuosikymmeniä käytössä ollut PUREX, tulee pysymään pitkään merkittävimpänä menetelmänä, mutta haasteena on sen alhainen tehokkuus ja muodostuvat nestemäiset jätteet. Kehitystyön alla olevan pyrometallurgian etuna on tehokkaampi nuklidien erotteilykyky sekä prosessin hyvin korkea säteilynsietokyky. Ydinjätettä hyödyntävästä nopeasta reaktoritekniikasta potentiaalisena pidetään metallijäähdytteisiä reaktoreita, niiden hyvän transmutaatioimiskyvyn ansiosta. Sulasuolareaktorin etuna on sen kustannussäästöjä tuova yhteensopivuus purometallurgisen käsittelyprosessin kanssa. Kaasujäähdytteisen reaktorin vahvuutena taas pidetään sen säteilyturvallisuutta.

Suurimpana esteenä ydinpolttoainevarojen tehokkaalle hyödyntämiselle on uraanin runsas esiintyvyys ja edullinen hinta. Tarvittava teknologia on niin kallista ja monimutkaista, että tois-taiseksi kannattavampaa on ollut avoin polttoainekierto, jossa käytön jälkeen radioaktiivinen ydinpolttoaine loppusijoitetaan. Monet käsittely- ja reaktoritekniikat ovat vasta kehitysasteella ja suurin haaste onkin tutkimus- ja kehitystyössä. Neljännen sukupolven reaktorit tulevat todennäköisesti yleistymään hitaasti vasta 2030-luvun jälkeen. Nykyisellä kustannustasolla hyödynnettävät uraanivarat tulevat riittämään alle sata vuotta, minkä takia ydinpolttoaineresurssien tehokkaampi hyödyntäminen tulee olemaan elintärkeää jo tulevina vuosikymmeninä.

Avainsanat: Ydinvoima, ydinjäte, käytetty polttoaine, käsittely, kierrätys, neljännen sukupolven reaktorit

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Pohtiessani aihetta kandidaatintyölleni vuoden 2021 tammikuun alussa, sain tietää pääseväni töihin Eurajoen Olkiluotoon, Teollisuuden Voima Oyj:n omistamaan ydinvoimalaitokseen. Olen ollut pitkään hyvin kiinnostunut ydinvoimasta ja tämän tiedon innostamana halusin, että työni käsittelisi ydinvoimaa. Olen useasti miettinyt syytä, miksi ydinvoimalan polttoaineen energiasta suurin osa jätetään hyödyntämättä ja miten tehokkaampi hyödyntäminen olisi käytännössä mahdollista. Kandidaatintyö tarjosi erinomaisen tilaisuuden syventyä ydinjätteen jalostamismahdollisuuksiin ja tulevaisuuden kehityssuuntaan alalla.

Tampereella, 26.04.2021

Herkko Metsämäki

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|----|
| 1. JOHDANTO | 1 |
| 2. YDINVOIMA JA YDINJÄTE..... | 3 |
| 2.1 Ydinvoima | 3 |
| 2.1.1 Ydinpolttoaine | 4 |
| 2.1.2 Ydinvoimalan toiminta | 5 |
| 2.1.3 Ydinreaktio..... | 6 |
| 2.1.4 Yleisimmät reaktorityypit | 8 |
| 2.2 Ydinjätteen ominaisuudet | 10 |
| 2.3 Ydinjätehuolto | 11 |
| 3. YDINJÄTTEEN HYÖDYNTÄMINEN NYKYÄÄN..... | 14 |
| 3.1 Ydinjätteen käsittely | 14 |
| 3.1.1 Ydinjätteen käsittelymenetelmät yleisesti | 14 |
| 3.1.2 Veteen perustuva erotus | 15 |
| 3.1.3 Pyrometallurginen erotus | 17 |
| 3.1.4 Transuraanien käsittely | 19 |
| 3.2 Neljännen sukupolven reaktorit | 20 |
| 3.3 Haasteet | 24 |
| 4. YDINJÄTTEEN ENERGIAHYÖDYNTÄMISEN POTENTIAALI | 26 |
| 4.1 Nykyisten ydinjätevarastojen potentiaali..... | 26 |
| 4.2 Ydinjätteen käsittelyn potentiaali | 27 |
| 4.3 Uuden reaktoriteknikan potentiaali | 28 |
| 5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET | 30 |
| LÄHTEET | 31 |

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|--------|---|
| ADS | engl. Accelerator-Driven Subcritical System |
| ASTRID | engl. Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration |
| BR | engl. Breeder Reactor, hyötöreaktori (kts. FR) |
| BWR | engl. Boiling Water Reactor, kiehutusvesireaktori |
| CANDU | engl. Canadian Deuterium Uranium Reactor |
| COEX | engl. Co-extraction of uranium and plutonium |
| DUPIC | engl. Direct Use of spent PWR fuel in CANDU |
| FR | engl. Fast Reactor, nopea reaktori |
| GANEX | engl. Group Actinide Extraction |
| GCR | engl. Gas-cooled Reactor, kaasujäähdytteinen reaktori |
| GFR | engl. Gas-cooled Fast Reactor, kaasulla jäähdytetty nopea reaktori |
| GIF | engl. Generation IV International Forum |
| HWR | engl. Heavy-water reactor, raskasvesireaktori |
| IAEA | engl. International Atomic Energy Agency, kansainvälinen atomienergiäjärjestö |
| IFR | engl. Internal Fast Reactor |
| LFR | engl. Lead-cooled Fast Reactor, lyijyllä jäähdytetty nopea reaktori |
| LWGR | engl. Light-water-cooled graphite-moderated reactor, grafiittijäähdytteinen kevytvesireaktori |
| LWR | engl. Light-water Reactor, kevytvesireaktori |
| MA | engl. Minor Actinides |
| MOX | engl. Mixed Oxide, sekaoksidi |
| MSR | engl. Molten Salt Reactor, sulasuolareaktori |
| NEA | engl. Nuclear Energy Agency |
| OTC | engl. Once-through cycle |
| PFBR | engl. Prototype Fast Breeder Reactor |
| PHWR | engl. Pressurized Heavy-water Reactor, |
| PRIS | engl. Power Reactor Information System |
| PUREX | engl. Plutonium Uranium Extraction |
| PWR | engl. Pressurised Water Reactor, painevesireaktori |
| SANEX | engl. Selective Actinide Extraction |
| SCWR | engl. Supercritical Water Reactor, ylikriittisessä paineessa toimiva kevytvesireaktori |
| SFR | engl. Sodium-cooled Fast Reactor, natriumilla jäähdytetty nopea reaktori |
| STUK | Säteilyturvakeskus |
| TBP | engl. Tributyl phosphate, tributyylifosfaatti |
| TTC | engl. Twice-through cycle |
| UREX | engl. Uranium Extraction |
| VHTR | engl. Very High Temperature Reactor, erittäin korkean lämpötilan reaktori |
| VYR | Valtion ydinjätehuoltorahasto |
| WNA | engl. World Nuclear Association, maailman ydinenergiäjärjestö |
| Bq | becquerel |
| eV | elektronivoltti |
| GWe | gigawatti, e-alaindeksi tarkoittaa tuotettu sähkötehoa |
| tU | tonnia (1000 kg) uraania |

1. JOHDANTO

Ydinvoiman rooli sähköntuotannossa on kasvanut merkittäväksi sen käyttöönotosta eli 1950-luvulta lähtien ja noin kymmenesosa maailman sähköstä tuotetaan ydinreaktoreilla (Energiateollisuus 2006, s. 4; Statistical Review of World Energy 2020, s. 61). Ongelmana on kuitenkin fissioon perustuvan ydinreaktorin tehoton energiatalous. Alle prosentti polttoaineen sisältämästä energiasta pystytään hyödyntämään ja loppu päätyy ydinjätteeksi. (Energiateollisuus 2008, s. 14) Tämänhetkisellä kulutuksella ja teknologialla uraanin on arvioitu riittävän nykyisillä kustannuksilla hieman alle sata vuotta (Energiateollisuus 2020, s. 17; Fox 2014, s. 80). Tulevaisuudessa neitseellisen uraanin ja jätteessä olevan energiapotentiaalin tehokkaampi hyödyntäminen tulee siis olemaan ensiarvoisen tärkeää.

Ydinjätteen käsittelemiseen ja kierrättämiseen liittyy useita haasteita, jotka ovat olleet esteenä käytetyn ydinpolttoaineen uusiokäytölle. Käsitteleminen vaatii monimutkaisen kemiallisen prosessin, jonka haasteina ovat muun muassa taloudellinen kannattavuus sekä säteilyturvallisuus. Lisäksi käsittelyprosessissa muodostuu merkittäviä määriä nestemäistä jätettä. (Touran 2009) Ydinjätteen käsittelytekniikoiden suurimpana haasteena tulee olemaan kehitys- ja käyttöönotto, sillä monet potentiaaliset menetelmät ovat vielä tutkimusasteella (Taylor 2015, s. xxv).

Tässä työssä käytetty aineisto on koottu käyttäen lähteinä ydinvoima-alan kirjallisuutta, kansainvälisiä tutkimusartikkeleita ja kansainvälisten järjestöjen tutkimuskoosteita. Tuorein tutkimustyö ajoittuu 2010-luvun ensimmäiselle puoliskolle, minkä jälkeen aiheesta on tehty hyvin vähän uusia tutkimuksia. Merkittäviä tässä työssä hyödynnettyjä julkaisuja ydinjätteen energiahyödyntämiseen liittyen ovat alan asiantuntijoiden kirjoittamat kirjat, kuten *Reprocessing and Recycling of Spent Nuclear Fuel* (Taylor 2015) sekä kansainvälisten ydinvoima-alan järjestöjen, kuten International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear Energy Agency (NEA) sekä World Nuclear Association (WNA), tekemät julkaisut.

Työn tarkoituksena on saada lukija havahtumaan ydinpolttoaineen tehottomaan hyödyntämiseen ja maan uumeniin sijoitettavan ydinjätteen suureen hukkaan heitettyyn energiapotentiaaliin. Kirjallisuusselvityksenä tehty kandidaatintyö luo katsauksen ydinjätteen haasteisiin, hyödyntämismenetelmiin ja hyödyntämisen potentiaaliin tulevaisuudessa.

Työssä esitellään vaihtoehtoiset tavat energiahödyntämiselle ja hyödyntämiskelvottoman ydinjätteen muuttamiselle vähemmän haitalliseksi. Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Minkälaista ydinjätettä ydinvoimalaitoksista muodostuu ja kuinka paljon?
2. Mitä eri tapoja on käsitellä ydinjätettä?
3. Minkälainen potentiaali ydinjätteen energiahödyntämisellä on?

Työtä taustoitetaan luvussa 2 *Ydinvoima ja ydinjäte*, jossa esitellään ydinjätettä synnyttävän ydinvoimateollisuuden toiminta ja vaiheet. Lisäksi esitellään muodostuva ydinjäte ja siihen liittyvät ongelmat ja näin ollen vastataan ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Työn rakenne kartoittaa ydinpolttoainehuollon sekä ydinjätehuollon vaiheita laaja-alaisesti, jotta lukijalle muodostuisi kattava kuva ydinvoimateollisuudesta. Luvussa 3 *Ydinjätteen hyödyntäminen nykyään*, pureudutaan itse ongelmaan eli ydinjätteeseen, sen jalostamisen menetelmiin ja teknologioihin sekä niihin liittyviin haasteisiin. Samalla vastataan toiseen tutkimuskysymykseen. Neljännessä luvussa *Ydinjätteen energiahödyntämisen potentiaali*, käsitellään ydinjätteen mahdollisuuksia energiahödyntämisen ja polttoainetalouden näkökulmista. Tämä luku antaa vastauksen kolmanteen tutkimuskysymykseen. Viimeisessä luvussa 5 *Yhteenveto ja johtopäätökset*, palataan työn keskeisen ongelman – ydinjätteen – hyödyntämisen potentiaaliin, haasteisiin sekä menetelmiin ja pohditaan ydinvoima-alan polttoainekierron ja reaktoritekniikan tulevaisuuden näkymiä.

2. YDINVOIMA JA YDINJÄTE

2.1 Ydinvoima

Ydinvoiman osuus maailman energian primäärituotannosta vuonna 2019 oli 4,3 % ja sähköntuotannosta 10,1 % (Statistical Review of world Energy 2020, s. 4, 61). Toiminnassa olevien voimalaitosten määrä samana vuonna oli 442 ja niiden tuottama yhteis-sähköteho oli 392 GWe (WNA 2020, s. 3). Maailman suurimmat ydinvoiman tuottajamaat ovat Yhdysvallat, Ranska ja Kiina. Yhdessä ne tuottavat yli puolet maailman ydinenergiasta. (IAEA PRIS 2019)

Ydinvoiman kehittyminen alkoi suurin harppauksin toisen maailmansodan aikana, kun Yhdysvallat halusi valjastaa ydintekniikan sotilaskäyttöön. Maailman ensimmäinen reaktori käynnistyi vuonna 1942 Yhdysvalloissa ja se valmisti plutoniumia aseellisuudelle ydinaseiden valmistamiseksi. (Crossland 2012, s. 4) Hieman toisen maailmansodan jälkeen ydinvoima valjastettiin energiantuotannon käyttöön ja ydinsähköä tuotettiin maailmassa ensimmäisen kerran Yhdysvalloissa vuonna 1951. Suurvaltakilpailu Yhdysvaltojen ja Neuvostoliiton välillä näkyi myös kilpailussa ydinteknologian kehittämisessä ja ensimmäinen kaupallinen ydinreaktori sähköntuotantoon valmistui Neuvostoliitossa vuonna 1954. (Energiateollisuus 2006, s. 4)

Yhtenä tärkeimpänä ydinvoiman etuna voidaan pitää tuotannoltaan hiilidioksidipäästö-
töntä ja säästä riippumatonta vakaata sähköntuotantoa sekä voimalaitosten pitkäikäi-
syyttä. (Nakhobov et al. 2020, s. 63; Fox 2014, s. 104–107) Ydinvoiman polttoaine- ja
jätehuoltokustannukset ovat sähköntuotannon kustannuksista alle neljänneksen, kun ne
muuta polttoaineita käytävillä voimalaitoksilla ovat vastaavasti yli puolet. Syynä on tarvit-
tavan polttoaineen määrän vähäisyys, sillä keskikokoisen ydinvoimalaitoksen tarvitsema
ydinpolttainemäärä on vuodessa 20–30 tonnia eli yhden rekkalastillisen verran. Saman
teholuokan hiilivoimalaitoksen vuotuinen polttainemäärä on 100 000-kertainen. (Ener-
giateollisuus 2006, s. 5) Ydinreaktorit käyttävätkin tiheintä hyödynnettävissä olevaa
energiamuotoa; ytimen halkeamisessa vapautuvaa sidosenergiaa (Fox 2014, s. 106).

Ydinvoiman ongelmana on syntyvä radioaktiivinen ydinjäte, jonka säteily on elolliselle
luonnolle vaarallista ja on eristettävä siitä vuosituhansiksi. Tämä on herättänyt vastare-
aktioita ydinvoimaa kohtaan sen alkua ajoilta lähtien, ja ydinvoiman poliittinen kiistanalai-
suus on ollut yhtenä esteenä ydinvoiman laajemmalle käytölle. Ydinvoiman käyttöönoton

haasteena on myös laitosten korkeat rakentamiskustannukset ja pitkä rakentamisaika. (Fox 2014, s. 107, 114, 185–186)

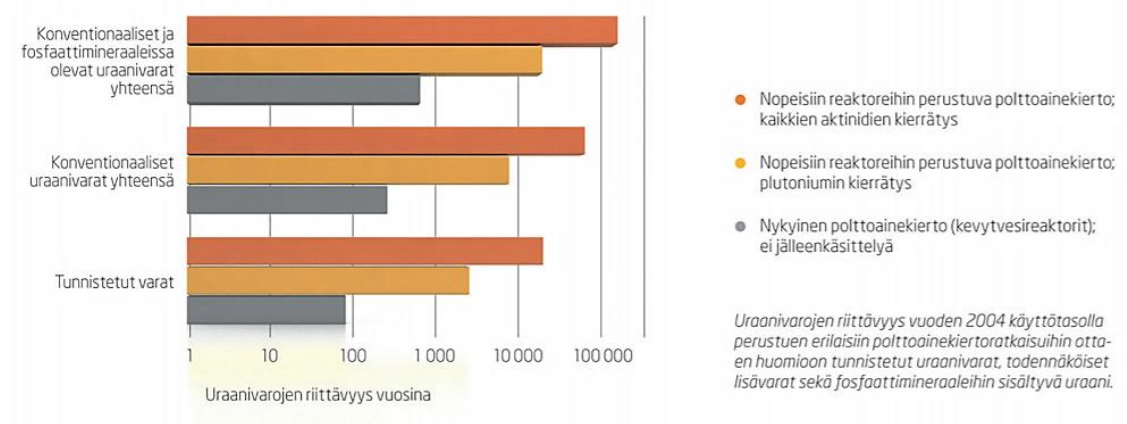
2.1.1 Ydinpolttoaine

Yleisin ydinvoimalan polttoaineena käytetty aine on uraani: metalli, joka on luonnosta löytyvistä alkuaineista raskain ja ainoa, joka hajoaa. Sitä on käytetty ydinvoimalaitosten polttoaineena ydinvoiman käyttöönoton alusta lähtien ja se on edelleen uraanin pääasiallinen käyttötarkoitus. Ydinpolttoainetta voidaan valmistaa keinotekoisesti myös uraanin U-238-isotoopista sekä luonnossa runsaana esiintyvistä toriumista Th-232, mutta toiseksi suurin osa perustuu nimenomaan uraanin isotoopin U-235:n hyödyntämiseen. (Energiateollisuus 2006, s. 3) Maassa esiintyvässä luonnonuraanissa 99,3 prosenttia on uraanin U-238 isotooppia ja vain 0,7 % isotooppia U-235, jota nykyiset voimalaitokset pystyvät hyödyntämään. Voimalaitoksissa käytettävässä polttoaineessa U-235:n osuus on saatu väkevöimällä noin 3–4 prosenttiin (Fox 2014, s. 251).

Uraanin tie ydinvoimalaitoksen polttoaineeksi sisältää useita mekaanisia ja kemiallisia prosesseja. Konversioprosessissa uraani erotetaan kemiallisesti malmista ja sen sisältämistä muista raskasmetalleista. Uraanin rikastaminen eli väkevöinti tapahtuu sentrifugissa isotooppien massaeroon perustuen, sillä kemiallinen käyttäytyminen on täsmälleen sama. Polttoaineen valmistuksessa uraaniheksafluoridi (UF_6) muutetaan uraanioksidijauheeksi ja puristetaan kovassa paineessa pieniksi tableteiksi. Sintrauksessa tabletit tiivistyvät kovassa kuumuudessa nesteitä hylkiväksi, minkä jälkeen polttoainetabletit pakataan tiiviisiin metalliputkiin eli polttoainesauvoihin. Sauvat ladotaan vielä suuremmiksi elementeiksi ydinvoimalan reaktorin käytettäväksi. (Fox 2014, s. 244–253)

Suurimmat tällä hetkellä tunnetut uraaniensijaintumat sijaitsevat Australiassa, Kazakstanissa, Venäjällä, Kanadassa, USA:ssa, Etelä-Afrikassa ja Namibiassa. Näiden maiden uraanivarannot kattavat 80 prosenttia tunnetuista varoista. Keskimäärin uraania on maankuorella 4 g malmitonnia kohden ja sen louhimista pidetään kannattavana, kun pitoisuus on kymmeniä kiloja tonnissa. Uraania voidaan saada myös muiden malmien louhinnan sivutuotteena. Uraania sekä sekaoksidipolttoaineessa (MOX, Mixed Oxide Fuel) käytettävää plutoniumia saadaan myös käytetyn ydinpolttoaineen jälleenkäsittelystä sekä puretuista ydinasevarastoista. Keskikokoisen laitoksen tarvitseman 20–30 ydinpolttoainetonnin tuottamiseen tarvitaan noin 150 tonnia raakaurania ja tämän raakauraanin saamiseksi on louhittava noin satakertainen määrä malmia. (Energiateollisuus 2006, s. 4–5)

Karkeasti jaoteltuna uraanivarat voidaan lukea kuuluvaksi kahteen ryhmään: tunnetut ja identifioidut varat sekä arvioidut lisävarat. Tunnettujen ja identifioitujen varojen sijainti on tiedossa ja niiden määrästä on vähintään karkeisiin mittauksiin perustuva arvio. Arvioidut lisävarojen olemassaolo on päätelty yleiseen geologiseen tietämykseen perustuen. Tunnettuja varoja on tällä hetkellä noin 4,5 miljoonaa tonnia ja nykyisellä tekniikalla ja kulutuksella uraani tulee riittämään useita kymmeniä vuosia. Vaikeammin hyödynnettäviä varoja, joiden olemassaolo on spekulatiivista, arvioidaan olevan todennettujen varojen lisäksi vielä noin 11 miljoonaa tonnia. (Energiateollisuus 2020, s. 16) Kuva 1 havainnollistaa vuosina uraanivarojen riittävyyttä polttoainekierrosta ja esiintymistyypeistä riippuen.



Kuva 1. Uraanivarojen riittävyys (Energiateollisuus 2020, s.17).

Maailman ydinvoimalaitokset kuluttavat reilun 68 000 tonnia uraania vuodessa (Energiateollisuus 2020, s. 16; Fox 2014, s. 257). Yhdestä uraanikilosta nykyiset kevytvesireaktorit tuottavat noin 40 000 kWh sähköenergiaa. Uraanin riittävyyttä voidaan lisätä ottamalla käyttöön uraania tehokkaammin hyödyntäviä reaktorityyppejä ja kierrättämällä käytettyä polttoainetta uuden polttoaineen raaka-aineeksi. Polttoaineen kierrätyksellä on nykyään mahdollista lisätä uraanista saatavaa energiaa jopa 30 prosenttia. (Energiateollisuus 2020, s. 16)

2.1.2 Ydinvoimalan toiminta

Toimintaperiaatteeltaan ydinvoimalaitos on lämpövoimalaitos, jossa ydinreaktion lämmön höyrystämä vesihöyry pyörittää laajentuessaan turbiinia. Turbiiniin kanssa samalle akselille kytketty sähkögeneraattori muuttaa liike-energian sähköksi. Turbiinin jälkeen vesihöyry kulkeutuu lauhduttimeen, jossa höyry tiivistyy nesteeksi, kun sitä jäähdytetään meriveden tai jäähdytystornin avulla. Lauhduttimelta vesi pumpataan syöttövesipumpun avulla takaisin höyrypiiriin kierron alkuun eli vastaanottamaan reaktorin lämpöenergiaa.

(Eurasto et al. 2004, s. 26, 28, 46) Alaluvussa 2.1.4 Yleisimmät reaktorityypit, esitellään tarkemmin erilaisten ydinreaktoreiden toimintaa. Periaatekuva ydinvoimalan toiminnasta on esitetty kuvassa 2. Ydinreaktio on atomiytimien halkeamis- eli fissioreaktio, joka tapahtuu hallitusti ydinreaktorin sydämessä, joka on suljettu reaktoripainesäiliöön. Sydämen muodostaa metalliputkiin suljettu ydinpolttoaine ja näitä putkia eli polttoainesauvoja ympäröivä hidastinaine. Hidastinaineen eli moderaattorin tarkoituksena on hidastaa neutroneita ja useissa reaktorityypeissä toimia myös reaktorin jäähdytinaineena. Moderaattorina käytetään useimmiten vettä (H_2O), raskasta vettä (D_2O) tai grafiittia (C). Moderaattorin toivottuihin ominaisuuksiin kuuluu, että se hidastaa neutroneita tehokkaasti mutta absorboi niitä vähän itseensä. Reaktorin jäähdyttimenä voidaan käyttää veden lisäksi kaasua tai sulaa metallia, kuten natriumia tai lyijyä. Reaktorin säätö tapahtuu säätösauvojen avulla, jotka on valmistettu neutroneja voimakkaasti absorboivasta aineesta, kuten boorista. Kun säätösauvoja työnnetään reaktorin polttoainesauvojen väleihin, reaktion teho laskee, kun sauvojen absorboimat neutronit eivät pääse aiheuttamaan uusia fissioita. (Eurasto et al. 2004, s. 26–28, 43, 47)

Polttoainekierron sanotaan olevan avoin, kun ydinpolttoaine käytetään kertaalleen, väli-varastoidaan ja loppusijoitetaan sellaisenaan. Kysymyksessä on suljettu polttoainekierto, kun käytetystä polttoaineesta erotetaan hyödynnettävät uraani ja plutonium ja ne käytetään uuden polttoaineen valmistukseen. (Eurasto et al. 2004, s. 78)

2.1.3 Ydinreaktio

Kaikki maailman energiantuotantokäytössä olevat ydinreaktorit perustuvat fissioreaktioon, jossa neutronilla pommitettu raskas atomiydin halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimestä (fissiotuotteiksi). Ohessa syntyy kaksi tai kolme neutronia sekä gamma- ja neutriinosäteilyä. Valtaosa reaktion energiasta muuttuu lähes välittömäksi lämpöenergiaksi. Neutronit ovat sähkövarauksettomia alkeishiukkasia, jotka protonien ohella ovat atomin ytimen rakenneosia. Fissiossa syntyviä neutroneita hidastetaan, jotta niiden liike-energia on termisellä energia-alueella ja todennäköisyys uuden fission tapahtumiseen on mahdollisimman suuri. Neutronien terminen energia tarkoittaa, että niiden liike-energia on keskimäärin yhtä suuri kuin väliaineen atomien lämpöliikkeen energia. Syntyvän neutronin energia on keskimäärin 2 MeV ja energia pienenee hidastuksen vaikutuksesta termiseksi energiaksi, joka on suuruudeltaan esimerkiksi 0,025 eV. Kyseisellä periaatteella toimivia kaupallisia reaktoreita kutsutaan termisiksi reaktoreiksi. (Eurasto et al. 2004, s. 26–28)

Ydinreaktiossa muodostuvat neutronit ylläpitävät reaktiota, kun fissiossa vapautuva neutroni aiheuttaa uuden fission. Kun muodostuvien neutronien määrä fissioreaktiota kohti on yksi, reaktoria kutsutaan kriittiseksi. Luvun ollessa alle yksi, reaktori on alikriittinen ja reaktorin teho laskee. Vastaavasti, kun neutronien lukumäärä perättäisissä sukupolvissa on yli yksi, reaktorin teho kasvaa ja reaktori on tällöin ylikriittisessä tilassa. (Eurasto et al. 2004, s. 30–31)

Halkeamis- eli fissiokelpoisiksi sanotaan ytimiä (nuklideja), joissa fissioreaktio on mahdollinen. Nuklideja, joissa fissioreaktion aiheuttaa terminen neutroni, sanotaan fissiotuviksi tai fissiileiksi. Erilaisten ydinreaktoreiden käyttöön soveltuvia fissiilejä nuklideja ovat luonnossa esiintyvä uraanin isotooppi U-235 sekä keinotekoiset U-233 ja plutonium Pu-239. Fertiileiksi eli hyötökelpoisiksi kutsutaan ytimiä, joista saadaan fissiilejä neutronikaappauksen avulla. Neutronikaappauksessa ydin absorboi neutronin ja muuttuu toiseksi alkuaineeksi. Tärkeimpiä fertiilejä ytimiä ovat uraanin yleisin isotooppi U-238 ja toriumin isotooppi Th-232. Näistä ytimistä muodostuu neutronikaappauksen seurauksena plutoniumia Pu-239 ja uraania U-233. Plutoniumia muodostuu ydinreaktorissa fissioketjureaktion sivutuotteena. Osa hajoaa fission aikana tuottaen energiaa ja loput plutoniumista jää polttoaineeseen hyödyntämättömänä, päätyen lopulta ydinjätteeksi. (Eurasto et al. 2004, s. 27)

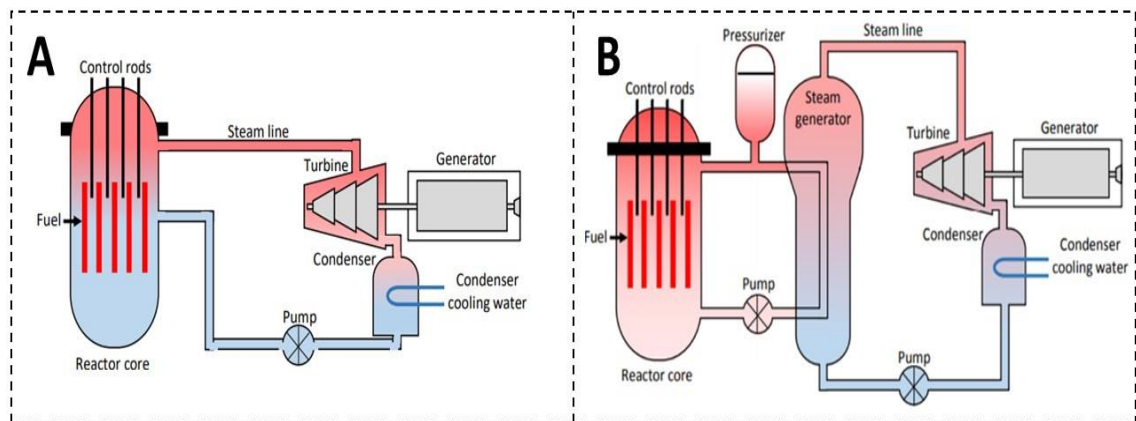
Halkeavilla ytimillä on aina pariton määrä neutroneita ytimessään ja fissio voi tapahtua millä tahansa neutronin energialla. Halkeamiskelpoisilla ytimillä on sen sijaan parillinen määrä neutroneita ja fission tapahtuminen vaatii absorboituneelta neutronilta ns. kynysenergian ylittymisen, joka on noin 1 MeV. (Energiateollisuus 2008, s. 16) Hitaan neutronin törmätessä uraanin isotooppiin U-238, tapahtuu neutronikaappaus, sillä hitaan neutronin energia ei riitä aiheuttamaan fissiota. Beetahajoamisen kautta muodostuu hyvin nopeasti neptuniumia Np-239, joka edelleen beetahajoamisen seurauksena hajoaa fissiiliksi plutoniumiksi Pu-239, jota voidaan käyttää polttoaineena reaktorissa. Nopean neutronin törmätessä U-238-atomiin tapahtuu fissio, mutta syntyvien neutronien energia pienenee hyvin nopeasti, jolloin niiden energia ei riitä ylläpitämään ketjureaktiota. (Fox 2014, s. 140)

Ydinjäte sisältää reaktorin käynnin aikana polttoaineeseen muodostuvia radioaktiivisia uraania kevyempiä fissiotuotteita ja pieniä määriä uraania raskaampia aktinoideja, jotka syntyvät neutronin absorption seurauksena (Energiateollisuus 2008, s. 26). Valtaosa muodostuvista fissiotuotteista on radioaktiivisia ja ne hajoavat pienemmiksi ytimiksi β -hajoamisen seurauksena. Osa hajoavista fissiotuotteista lähettää neutroneita, jotka aiheuttavat polttoaineen voimakasta kuumenemistä myös pysäyttämisen jälkeen. Tämän

ilmion aiheuttamaa lämpöä kutsutaan jälkilämmöksi ja siksi polttoaine vaatii jäähtytystä vielä käytönkin jälkeen. Jälkilämmön huomioon ottaminen suunnittelussa ja polttoainekierron seuraavissa vaiheissa on ensiarvoisen tärkeää. (Eurasto et al. 2004, s.28) Fission tuotteiden ohella muodostuvat uraania raskaammat aktinoidit ovat hyvin radioaktiivisia ja juuri niiden pitkän puoliintumisaikan takia käytetty ydinpolttoaine pysyy vaarallisen radioaktiivisena kymmeniä tuhansia vuosia. Merkittävimpiä näistä ovat plutoniumin lisäksi amerikum ja curium. Nopeilla reaktoreilla kyetään hajottamaan raskaita aktinoideja kevyemmiksi ytimiksi ja niin ikään vähentämään ydinjätteen radioaktiivisuutta ja haitallisuutta. (Energiateollisuus 2008, s. 16, 20, 26)

2.1.4 Yleisimmät reaktorityypit

Reaktorit jaotellaan neutroneiden liike-energian mukaan termisiin ja nopeisiin reaktoreihin. Termisten eli konventionaalisten reaktoreiden jaottelun perusteena on käytettävä polttoaine, jäähdytin ja hidastin. Yleisin ydinvoimalaitostyyppi on (terminen) kevytvesireaktori (LWR, Light-water Reactor), jossa reaktorin jäähdytinaineena ja neutronien hidastinaineena toimii tavallinen vesi. Kevytvesireaktoreita on kahdentyyppisiä: painevesireaktoreita (PWR, Pressurised Water Reactor) ja kiehutusvesireaktoreita (BWR, Boiling Water Reactor). (Eurasto et al. 2004, s. 42–43) Molempien reaktoreiden toiminta on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Kuvassa A kiehutusvesireaktori ja kuvassa B painevesireaktori (muokattu lähteestä Nakhabov et al. 2020, s. 48).

Kaikista toiminnassa olevista reaktoreista 66 prosenttia on kevytvesireaktoreita ja 16 prosenttia on painevesireaktoreita (Nakhabov et al. 2020, s. 3). Kevytvesireaktorissa on vain yksi höyrypiiri eli sama vesi, joka jäähdyttää ydintä, pyörittää myös turbiinia. Painevesireaktorissa prosessi on jaettu kahteen piiriin, jossa ensimmäisessä korkeassa paineessa oleva vesi jäähdyttää ydintä ja toisessa höyrystyvä vesi pyörittää turbiinia. Piirien välillä lämpö siirtyy lämmönvaihtimen ansiosta. (Nakhabov et al. 2020, s. 46)

Reaktorin jäähdytinaineena voi tavallisen veden lisäksi toimia myös niin sanottu raskas vesi (D_2O), jossa veden vetyatomien paikalla on vedyn raskaampi isotooppi deuterium. Tällaista reaktoria kutsutaan raskasvesireaktoriksi (HWR, Heavy Water Reactor), jollainen on esimerkiksi kanadalainen CANDU- (Canadian Deuterium Uranium Reactor) tai PHWR-reaktori (Pressurized Heavy-water Reactor). (Nakhabov et al. 2020, s. 46-48) Raskas vesi absorboi vähemmän neutroneita ja paremman neutronitalouden ansiosta reaktori pystyy käyttämään erilaisia polttoaineita laajalla skaalalla. Polttoaineeksi käy esimerkiksi rikastamaton luonnonuraani, kierrätetty polttoaine ja torium. HWR-reaktorin etuna on muun muassa pienemmät polttoainekustannukset, polttoaineen korkeampi hyödyntäminen, ydinjätteen pienempi vaarallisuus ja se että polttoainetta voidaan vaihtaa käynnin aikana. (Crossland 2012, s. 278–279)

Neutronien hidastimena eli moderaattorina voidaan käyttää myös hiilen erästä ilmene- mistä muotoa, grafiittia ja tällaisia reaktoreita ovat esimerkiksi vesijäähdytteinen grafiittihi- dasteinen reaktori (LWGR, Light-water-cooled Graphite-moderated Reactor) sekä kaa- sujäähdytteiset reaktorit (GCR, Gas-cooled Reactor). (Nakhabov et al. 2020, s. 48-49) Grafiittia pidetään hyvänä moderaattorin materiaalina, koska se pysyy hyvin stabiilina hyvin korkeissakin lämpötiloissa. Reaktorin jäähdytinaineena käytettäessä kaasun, ku- ten hiilidioksidin (CO_2) tai heliumin (He), etuna on korkea käyttölämpötila, korkea termi- nen hyötysuhde ja reagoimattoman kaasun räjähtämättömyys. (Crossland 2012, s. 301– 309)

Nopeissa reaktoreissa (FR, Fast-neutron Reactor) fissiossa syntyviä neutroneita ei hi- dasteta moderaattorilla ja reaktori toimii neutronien nopealla spektrillä. Reaktori vaatii käynnistyäkseen fissiileillä ytimillä rikastettua polttoainetta, mutta käydessään se muut- taa polttoaineen fertiiliä materiaalia fissiiliksi. (Nakhabov et al. 2020, s. 50) Reaktori siis tuottaa enemmän fissiiliä polttoainetta kuin kuluttaa, mitä kutsutaan hyötämiseksi ja siksi nopeita reaktoreita kutsutaan myös hyötöreaktoreiksi (BR, Breeder Reactor). Nopean reaktoriteknikan merkittävänä etuna on sen kyky hyödyntää hajoamiskelpoisia materi- aaleja ja käytettyä polttoainetta. Muun muassa hyötöreaktoreissa yhtenä vaihtoehtona jäähdyttimelle on sula metalli, kuten natrium tai lyijy. Natriumin haittana on kuitenkin sen räjähdysmäinen reaktio ilman ja veden kanssa. (Crossland 2012, s. 333, 368–369) Hyö- töreaktoreita käsitellään tarkemmin luvussa 3 *Ydinjätteen hyödyntäminen nykyään*.

Taulukossa 1 esitellään kaupallisessa sähköntuotannossa olevien reaktorityyppien tär- keimmät ominaisuudet. Reaktorityypit jaotellaan seuraavien ominaisuuksien perusteella: käytettävä polttoaine, jäähdytin ja moderaattori. Lisäksi ilmenee reaktorien lukumäärä ja

yleisimmät teholuokat. (Nakhobov et al. 2020, s. 3) Taulukon avulla on mahdollista hahmottaa nopeasti, minkä tyyppisistä reaktoreista maailman toiminnassa olevat laitokset koostuvat.

Taulukko 1. *Toiminnassa olevien reaktoreiden päätyypit taulukoituna (muokattu lähteestä Nakhobov et al. 2020, s. 3).*

| Ydinreaktorin tyyppi | Sähköteho (MW) | Polttoaine | Jäähdytin | Moderaattori | Reaktoreiden lukumäärä |
|--|----------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------|------------------------|
| Painevesireaktori (PWR, VVER) | 325–1750 | Rikastettu uraanioksidi | Vesi | Vesi | 298 |
| Kiehumusvesireaktori (BWR) | 390–1500 | Rikastettu uraanioksidi | Vesi | Vesi | 73 |
| Paineistettu raskasvesireaktori (PHWR, CANDU) | 100–934 | Luonnollinen uraanioksidi | Vesi | Raskas vesi | 49 |
| Kaasujäähdytteinen grafiittihidasteinen reaktori (GCR) | 615–682 | Luonnollinen/rikastettu uraanioksidi | Hiilidioksidi (CO ₂) | Grafiitti | 14 |
| Vesijäähdytteinen grafiittihidasteinen reaktori (LWGR, RBMK) | 1000 | Rikastettu uraanioksidi | Vesi | Vesi | 14 |
| Nopea reaktori (FR) | 600–885 | Rikastettu uraanioksidi/MOX | Natrium | - | 3 |

Ydinreaktorit jaetaan aikakautensa ja tekniikkansa perusteella viiteen sukupolveen: I, II, III, III+, IV. Tällä hetkellä eletään sukupolvessa III+ ja sukupolven IV reaktorit ovat kehitystyön alla. (Nakhobov et al. 2020, s. 46) Suurin osa vanhemmista reaktoreista on edelleen toiminnassa ja osa on poistettu käytöstä kannattamattomuutensa tai loppuun tulleen käyttöikänsä takia (Energiateollisuus 2020, s. 21).

2.2 Ydinjätteen ominaisuudet

Tyypillistä radioaktiivisille jätteille on, että niitä ei voida hävittää vaan ne on eristettävä luotettavasti elinympäristöstä. Radioaktiivisten jätteiden aiheuttama säteilyaltistus voi aiheuttaa ihmisessä ja elollisessa luonnossa ei-toivottuja solumuunnoksia, jotka voivat aiheuttaa muun muassa syöpää (Ikäheimonen et al. 2002). Radioaktiivisten aineiden hajoessa vapautuu paljon energiaa, mikä aiheuttaa ympäröivän väliaineen kuumenemista. Jätteiden aktiivisuus häviää itsestään radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Jätteelle

asetettavat eristämiskaavituksen riippuvatkin jätteen aktiivisuudesta ja radionuklidien puoliintumisajoista. Ydinjätteen radionuklidien puoliintumisajat vaihtelevat hyvin paljon, kuukausista jopa miljooniin vuosiin. Ydinreaktiossa muodostuvat fissiotuotteet, transuraanit ja hajoamaton U-235 sekä reagoimaton U-238 päätyvät ydinjätteeseen. Fissiotuotteita ovat esimerkiksi jodi (I-129) ja cesium (Cs-135), jotka ovat molemmat hyvin radioaktiivisia ja niiden puoliintumisajat ovat miljoonia vuosia. Esimerkiksi taas strontiumin (Sr-90) ja antimonin (Sb-125) puoliintumisajat ovat vain joitakin vuosia. (Eloranta et al. 2004, s. 271, 274–275)

Radioaktiiviset jätteet jaotellaan niiden fysikaalisesti mitattavan aktiivisuuden mukaan matala-, keski- ja korkea-aktiivisiksi jätteiksi. Fissioreaktoreissa muodostuva ydinjäte luokitellaan korkea-aktiiviseksi ydinjätteeksi, joka vaatii hyvin tehokkaita säteilysuojelujärjestelyitä ja yleensä myös jäähdytystä. Korkea-aktiivisten ydinjätteiden aktiivisuus on yli 10 GBq/kg. Keskiaktiiviset jätteet edellyttävät tehokkaita säteilysuojelujärjestelyitä ja tällaisiin jätteisiin lukeutuu muun muassa ydinvoimalaitoksen primääripiiriin puhdistukseen käytettävät ioninvaihtohartsit. Keskiaktiivisten jätteiden aktiivisuus on välillä 1 MBq/kg ja 10 GBq/kg. Matala-aktiivisiin jätteisiin lukeutuu esimerkiksi ydinvoimalaitosten huoltoseisokkien aikana muodostuva huoltojäte, joka sisältää esimerkiksi työkaluja, henkilökohtaisia suojavarusteita ja työvaatteita. Erityisiä säteilysuojelujärjestelyjä ei vaadita, sillä aktiivisuus on alle 1 MBq/kg. (Eloranta et al. 2004, s. 274–275)

Loppusijoituksen kannalta olennaista on jätteen radioaktiivisuuden kesto. Jätteet jaotellaan pitkä- ja lyhytikäisiin sen mukaan, onko jätteessä vallitsevien radionuklidien puoliintumisaika yli vai alle 30 vuotta. Ydinvoimalaitoksella muodostuvat matala- ja keskiaktiiviset jätteet ovat yleensä lyhytikäisiä. Reaktorista poistettu käytetty polttoaine luokitellaan pitkäikäisiin jätteisiin, koska se sisältää huomattavia määriä radioaktiivisia aineita, joiden puoliintumisaika on yli 30 vuotta. (Eloranta et al. 2004, s. 274–275)

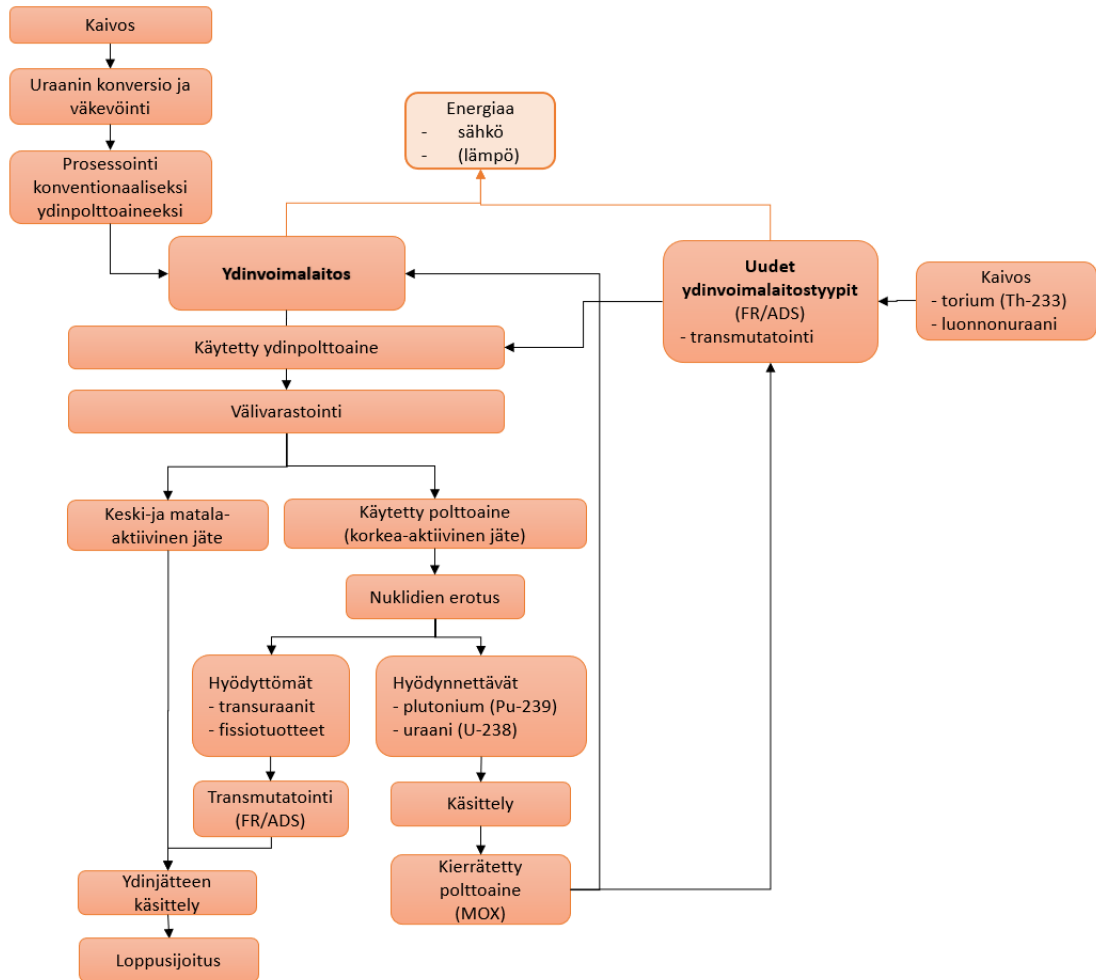
NEA:n teettämän vertailuselvityksen mukaan avoimen ja suljetun polttoainekierron aiheuttaman säteilyaltistuksen välinen ero ei ole merkittävä. Avoimessa kierrossa suurimman säteilyaltistuksen aiheuttaa laajamittaisempi kaivoistoiminta uraanin louhinnassa. Suljetussa kierrossa säteilyaltistuksen taas aiheuttaa monivaiheisempi polttoaineen käsittely. (Eloranta et al. 2004, s. 286)

2.3 Ydinjätehuolto

Ydinteollisuudessa ydinjätehuollolla tarkoitetaan voimalaitostoiminnassa syntyneestä radioaktiivisesta ydinjätteestä huolehtimista. Se käsittää ydinjätteen käsittelyn, varastoinnin ja loppusijoituksen tai vaihtoehtoisesti käytetyn polttoaineen jälleenkäsittelyn uudeksi

polttoaineeksi. Myös ydinvoimalan käytöstä poistamisen toimenpiteet luetaan ydinjätehuoltoon. (Energiateollisuus 2020, s. 18–19)

Kuvassa 3 on esitettyä esimerkinomainen prosessikaavio suljetusta polttoainekierrosta, jossa kierrätetään reaktorissa syntynyt ydinjäte uusiokäyttöön.



Kuva 3. Prosessikaavio suljetusta polttoainekierrosta.

Väliarastoinnin tarkoituksena on säilöä korkea-aktiivista ydinjätettä muutama vuosikymmen, jotta jätteen lämmöntuotto on alentunut riittävästi turvallisen käsittelyn varmistamiseksi. Tällä hetkellä yleisin käytettävä väliarastoinnin muoto on vesiallasvarastointi, jossa käytetty polttoainenippu upotetaan suureen vesialtaaseen. Muita väliarastointimenetelmiä ovat ilmajäähdytteinen holvivarasto ja säiliövarasto. Vesiallasvarastointi on käytössä Suomen molemmissa ydinvoimaloissa. Paksulla vesipatjalla on kaksi käyttöä: säteilysuojana toimiminen sekä lämpöä kehittävän ydinjätteen jäähdyttäminen. Nykytiedon mukaan ydinjätettä voidaan säilyttää asianmukaisessa vesiallasvarastossa ainakin 50 vuotta. (Eloranta et al. 2004, s. 287–288, 295)

Keski- ja matala-aktiivisia jätteitä on loppusijoitettu 1950-luvulta lähtien, mutta korkea-aktiivisen jätteen käsittelyprosessit eivät maailman ydinvoimalaitoksissa ole edenneet vielä loppusijoitusvaiheeseen, sillä niitä pidetään välivarastoissaan. Nykyisin loppusijoitusvaihtoehtoina on käytössä lähinnä kahdentyypisiä ratkaisuita: maan pintakerrokseen rakennettu betonibunkkeri tai kallioperään louhittu luolasto. Suomessa ydinjätteen loppusijoituslaitokset sijaitsevat nykyisten ydinvoimalaitosten – Eurajoen Olkiluodon ja Loviisan Hästholmenin alueilla – kallioperään louhituissa luolastoissa Ydinvoimaloiden tullessa käyttökänsä päähän, myös purettujen voimaloiden purkujäte tullaan sijoittamaan alueidensa kallioluolastojen matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituslaitoksiin. (Elo-ranta et al. 2004, s. 281–284, 290)

Ennen luolastoon sulkemista geologisessa loppusijoituksessa jäte suljetaan tiiviisiin kapselisiin, jotka estävät radioaktiivisten aineiden pääsyn ympäristöön. Kapselit sijoitetaan kallioon satojen metrien syvyyteen louhittuihin tunneleihin. Jätekapselit eristetään kallioista joustavalla ja vettä huonosti läpäisevällä täyteaineella, esimerkiksi bentoniitilla, joka turpoaa tiiviiksi suojakerrokseksi kapselin ympärille, mikäli luolastoon pääsee jostain syystä pohjavettä (Energiateollisuus 2020, s. 19). Kun loppusijoitusvaihe päättyy, maan-ala-tilat suljetaan kullekin kohteelle sopivalla täyteaineella ja sulkurakenteilla. (Elo-ranta et al. 2004, s. 295–306) Näin suojataan jätekapselia ympäristössä mahdollisesti tapahtuvilta muutoksilta, mutta myös ympäristöä kapselivuodon sattuessa vapautuvalta radioaktiivisuudelta.

Suomessa ydinjätehuollon kustannukset rahoitetaan ydinjätehuoltomaksuilla, jotka ydinjätehuoltovelvolliset voimalaitokset maksavat vuosittain valtion ydinjätehuoltorahastoon (VYR). Rahoitusjärjestelmä on suunniteltu siten, että yhteiskunnalle ei aiheudu kustannuksia jätteen käsittelystä missään toiminnan vaiheessa tai tilanteessa – ei edes voimalaitosyhtiön ajautuessa konkurssiin, sillä jätehuoltovarojen on katettava kaikki aiheutuvat kustannukset. Rahaston varojen on katettava kustannukset sekä ydinjätteen käsittelystä ja loppusijoituksesta että ydinvoimalaitoksen purkamisesta ja purkujätteen loppusijoittamisesta. (Energiateollisuus 2020, s. 18–19)

3. YDINJÄTTEEN HYÖDYNTÄMINEN NYKYÄÄN

3.1 Ydinjätteen käsittely

Ydinjätteen hyödyntämisen perustana on suljettu polttoainekierto. Tarkoituksena on hyödyntää käytettyyn polttoaineeseen jääneet halkeamiskelpoiset aineet (uraani ja plutonium) jalostamalla polttoainetta uudelleenkäytettäväksi. Tällöin polttoaineesta suurempi osuus pystytään hyödyntämään ja ydinjätteen määrä vähenee. (Eloranta et al. 2004, s. 285) Kevytvesireaktorin käytetty polttoaine sisältää noin 95 prosenttia uraania, noin prosentin plutoniumia ja loput polttoaineesta on fissiotuotteita sekä transuraaneja. Suljetun polttoainekierron toimivuuden ja ydinturvallisuuden kannalta on elintärkeää, että erittäin haitalliset ja radioaktiiviset transuraanit sekä fissiotuotteet pystytään erottamaan polttoaineesta. Nykyään nämä aineet käsitellään jätteenä ja loppusijoitetaan kiinteänä lasissa tai keraamisessa muodossa, mutta tulevaisuudessa ne voidaan jälleenkäsitellä tehokkaasti esimerkiksi neljännen sukupolven reaktoreissa. (Taylor 2015, s. 10, 31; Energiategollisuus 2008, s.15).

Käytetty ydinpolttoaine vaatii aina loppusijoittamista, vaikka kyse olisi täysin suljetusta polttoainekierrosta, sillä kierrätysprosessista jää jäljelle korkea-aktiivisia jätteitä. Suljettu kierto vähentää kuitenkin merkittävästi loppusijoituksen aiheuttamaa ympäristövaikutusta ja lyhentää ydinjätteen radiotoksista elinaikaa. (Taylor 2015, s. xxii) Transuraanien transmutaation avulla pitkän hajoamisajan ytimet (esimerkiksi Pu-239:lla 250 000 vuotta) hajoavat fissiotuotteiksi (esimerkiksi Sr-90 ja Cs-137), joiden hajoamisaika on vain 300–400 vuotta. (Taylor 2015, s. 9) Tarvittava loppusijoitusaika olisi tällöin vain noin tuhat vuotta. Nykyisen loppusijoituksen haasteena on useiden satojen tuhansien vuosien vaadittava loppusijoitusaika. Tähän mennessä vanhimpia säilyneitä ihmisen tekemiä rakenteita ovat jokusia tuhansia vuosia vanhat Egyptin pyramidit. (Taylor 2015, s. 10)

3.1.1 Ydinjätteen käsittelymenetelmät yleisesti

Käsiteltäessä ydinjätettä jatkokäyttöä varten, on jätteestä ensin erotettava hyödynnettävät komponentit ja jäljelle jäävä hyödyntämätön aine päätyy lopulta loppusijoitettavaksi. Ydinjätteestä nuklidit voidaan erottaa veteen perustuvalla (PUREX) tai pyrokemiallisella prosessilla. Muita tutkimusasteella olevia prosesseja ovat esimerkiksi ioninvaihto, uuttokromatografia tai fluoridien selektiivinen höyrystäminen. (Taylor 2015, s. 12, 17, 20). Todennäköisesti veteen perustuva prosessi tulee pysymään pääasiallisena erotusmenetel-

mänä, mutta menetelmiä tullaan käyttämään tulevaisuudessa rinnakkain, sillä erityyppisiä menetelmiä tarvitaan kattamaan jokainen polttoainekierron vaihe. (Taylor 2015, s. xxi–xxiv).

Yksikään maa ei ole vielä pystynyt toteuttamaan täysin suljettua kiertoa, sillä se vaatii nopeaa reaktoritekniikkaa, joka pystyy hyödyntämään uraanin, plutoniumin sekä muiden transuraanien koko energiapotentiaalin. Muutamissa maissa, kuten Ranskassa, käytetään osittain suljettua kiertoa, missä ydinjätteestä erotettua plutoniumia ja uraania käytetään sekaoksidipolttoaineen raaka-aineena termisten reaktoreiden polttoaineelle. (Taylor 2015, s. xxi–xxiv) Vielä nykyisin kaikki merkittävän kokoluokan käsittelylaitokset perustuvat PUREX-menetelmään. Suurin osa maailman tähän mennessä kierrätetystä ydinjätteestä on käsitelty Ranskassa (La Hague, Marcoule) ja Isossa-Britanniassa (Sellafield). Näiden jälkeen merkittävimmät ydinjätettä käsittelevät maat ovat Venäjä (Mayak) ja Japani (Rokkasho, Tokai). Muita ydinjätettä käsitteleviä maita ovat esimerkiksi Intia (Kalpakkam, Tarapur), Korea ja Kiina. (Taylor 2015, s. 14, 57–59; Eloranta et al. 2004, s. 287)

Ydinjätteen kierrättämisessä hyvin oleellisia osaprosesseja ovat käytetyn polttoaineen uudelleenkäsittely sekä transuraanien erottaminen ydinjätteestä, jotta ne voidaan transmutoitua nopean energiaspektrin reaktoreissa. Vuonna 2015, ydinjätteen käsittelyn kokonaiskapasiteetti oli 5630 tonnia vuodessa. Ydinjätteen määrä voi muuttua tulevaisuudessa ongelmalliseksi, sillä nykyarvion mukaan vuonna 2100 maailman välivarastoissa on yli miljoona tonnia ydinjätettä, mikäli jätteen määrää ei pystytä vähentämään. Suuruusluokan hahmottamiseksi, loppusijoituslaitokseen mahtuu vain joitakin kymmeniä tuhansia tonneja ja tyypillinen kaupallinen jätteen kierrätyslaitos kykenee käsittelemään vuodessa vain tuhat tonnia ydinjätettä. (Taylor 2015, s. xxi, xxiv, 58)

3.1.2 Veteen perustuva erotus

Nykyisin ydinjätteen kaupallisen mittakaavan käsittely perustuu PUREX-prosessiin (Plutonium Uranium Reduction EXtraction), jossa plutonium ja uraani erotetaan oksidimuodossa hydrometallurgisella menetelmällä. Prosessi perustuu uuttamiseen, jossa on sekä veden että orgaanisen aineen faasit. (Taylor 2015, s. xxii) Erotettu plutonium hyödynnetään sekaoksidipolttoaineen (MOX) raaka-aineena sekoittamalla sitä luonnonuraanin kanssa, jolloin louhittavan uraanin määrä vähenee noin viidenneskellä avoimeen kiertoon verrattuna (Eloranta et al. 2004, s. 285). MOX-polttoainetta voidaan hyödyntää osassa perinteisiä kevytvesireaktoreita ja näin ollen voidaan parantaa louhitun uraanin

hyödyntämistä. Erotusprosessissa saatu uraani säilötään toistaiseksi välivarastoon tulevaisuuden käyttöä varten nopeissa reaktoreissa. (Taylor 2015, s. 11)

Muita vastaavantyyppisiä, mutta vähäiseen rooliin jääneitä hydrometallurgisia erotusmenetelmiä ovat COEX (Ranska), Advanced PUREX (Iso-Britannia) ja UREX (Yhdysvallat), joka ei ole enää käytössä teollisen mittakaavan prosessina. Kaikissa menetelmissä plutonium on sitoutuneena johonkin toiseen aineeseen, mikä tekee sitä vaikeammin hyödynnettävän ydinasetarkoitukseen. Lisäksi COEX-menetelmän etuna on uraanin pysyminen prosessin plutoniumvirrassa, jolloin molemmat aineet voidaan suoraan hyödyntää sekaoksidipolttoaineen valmistukseen. Vaihtoehtoisten veteen perustuvien menetelmien haasteena on neptuniumin erottaminen plutoniumvirrasta, sillä erotusprosessi on monimutkainen. (Taylor 2015, s. 15–16)

PUREX-prosessissa käytetyt polttoaineniput puretaan osiin mekaanisesti ja pätkityt polttoainesauvat liuotetaan typpihappoon. Liukenemattomat aineet, kuten sauvojen suoja-kuoret otetaan talteen kiinteänä jätteenä. (Eloranta et al. 2004, s. 289–290) Happoon liukenevat uraanin lisäksi plutonium, transuraanit sekä fissiotuotteet. Tätä seuraa usea liuotus-uuttoprosessi, joissa erotetaan toisistaan ydinjätteen sisältämät erilaiset aineet vaihe vaiheelta. Liukenemattomat kiintoaineet erotetaan joko suodattamalla tai sentrifugilla. Uraani ja plutonium erotetaan typpihaposta uuttamalla orgaanisen tributyylifosfaatin (tributyl phosphate, TBP) avulla ja fissiotuotteet sekä transuraanit jäävät liuokseen. Plutonium ja uraani erotetaan toisistaan epäorgaanisen hydroksyyliamiinin avulla (NH_2OH), minkä jälkeen tuotteet käyvät läpi konversioprosessin, jonka tuotteena saadaan oksidimuotoista puhdasta uraania ja plutoniumia. PUREX-prosessissa muodostuva jäte on enimmäkseen nestemäistä korkea- ja matala-aktiivista jätettä. Matala-aktiivinen jäte tiivistetään haihduttamalla korkea-aktiiviseksi, minkä jälkeen se muutetaan kiinteäksi sintrauksen avulla. Lopulta jäte suljetaan ruostumattomiin terässäiliöihin ja lopuksi sijoitetaan. (Taylor 2015, s. 10, 15, 17–18)

PUREX-menetelmää pidetään merkittävänä saavutuksena, koska sen keksimisen myötä pystytään suorittamaan monimutkainen ja vaarallinen erotusprosessi. Menetelmä kehitettiin ydinaseteollisuuden tarkoituksiin jo 1950-luvulla, mutta se ei ole muuttunut juuri-kaan sen alkuperäisestä toteutuksesta. Todennäköisesti PUREX ei ole enää nykyisellä toteutuksellaan hyväksyttävä menetelmä 2050-luvulla, kun vaatimukset jätteen käsittelyyn, ydinaseturvallisuuden, ympäristönsuojelun sekä taloudellisuuden suhteen ovat nykyistä paljon suurempia. (Taylor 2015, s. xxii)

Suljetun polttoainekierron lopussa syntyy korkea-aktiivisen jätteen lisäksi jälleenkäsittelyssä erotettua uraania sekä käytettyä MOX-polttoainetta tai erotettuja transuraaneja,

jotka eivät reaktorifysikaalisten syiden takia sovi kiertoon. (Eloranta et al. 2004, s. 285) Perinteisessä ydinvoimalassa polttoaine kulkee kierron läpi kerran, minkä jälkeen käytetty uraanioksidipolttoaine loppusijoitetaan. Englanniksi tätä kuvaillaan termillä *once-through cycle* (OTC). Nykyisestä osittain suljetusta kierrosta puhuttaessa käytetään nimitystä *twice-through cycle* (TTC). Siinä käytetty polttoaine kierrätetään MOX-polttoaineena uusiokäyttöön, minkä jälkeen polttoainetta ei enää kierrätetä. Käytetty MOX-polttoaine päätyy loppusijoitukseen tai välivarastoon, käytettäväksi myöhemmin nopeissa reaktoreissa tekniikan tullessa laajempaan käyttöön. (Taylor 2015, s. 31)

3.1.3 Pyrometallurginen erotus

Ydinjätteen kuiville käsittelymenetelmille on yhteistä, että olosuhteissa ei saa olla läsnä vettä tai ulkopuolista happea sillä, ne voivat reagoida voimakkaasti käytettyjen kemikaalien kanssa. Kuivaprosesseissa voidaan käyttää sulaa suolaa tai sulatettua metallia ja siksi prosessin on toimittava aineen sulamispistettä korkeammassa lämpötilassa. Pyroprosessoinnin etuna on kemikaalien korkea säteilynkesto, jolloin ei ole tarvetta odottaa pitkää aikaa, jotta radioaktiivinen ydinjäte olisi hajonnut matalammalle aktiivisuustasolle. Tämän ansiosta pyroprosessi sopii hyvin korkean palaman ja lyhyen jäähdytysajan käytetyille polttoaineille, kuten nopeiden reaktoreiden käytetyn polttoaineen käsittelyyn. Pyroprosessoinnin etuna PUREX:iin nähden on parempi resistiivisyys ydinasekäytölle. Pyroprosessoinnissa saatavaan plutoniumiin on sekoittuneena transuraaneja, mikä tekee plutoniumista vaikeammin hyödynnettävän ydinasekäytössä. Väliaineena sulaa fluoriidisuolaa käyttävän elektrolyyttisen puhdistusmenetelmän mahdollisena etuna on myös sen yhteensopivuus sulasuolareaktorin kanssa (MSR, Molten Salt Reactor). (Taylor 2015, s. 11, 18, 55)

Eräs pyroprosessin tyyppi on elektrolyyttinen puhdistus sulasuolassa. Prosessin ensimmäinen vaihe on polttoainesauvojen pätkiminen pieniksi osiksi, mitä seuraa osien laskeminen korissa elektrolyysiyksikköön, jossa anodina on kadmiumkloriittia (CdCl_2). Elektrolyytinä toimii kahden sulasuolan, kaliumkloridin (KCl) ja litiumkloridin (LiCl) eutektinen seos korkeassa lämpötilassa. Elektrolyysiyksikössä on kaksi katodia: esimerkiksi hiiliteräksinen kiinteä katodi ja nestemäinen katodi, joka on esimerkiksi kadmiumia. Prosessi käynnistyy, kun elektrolyysipiiriin asetetaan sähköinen potentiaali. Käytetyn polttoainesauvan runko ja suojakuori jää prosessissa koriin, koska ne vaatisivat korkeamman sähköpotentiaalın reagoidakseen liuoksessa. Alemman potentiaalın aineet, kuten uraani, plutonium ja muut transuraanit sekä useimmat fissiotuotteet liukenevat elektrolyyttiin. Uraani pelkistyy kiinteälle katodille ja osa uraanista, plutonium ja transuraanit pelkistyvät

sulalle kadmiumkatodille. Transuraanit voidaan erottaa prosessista metallisessa muodossa harkkoina. Fissiotuotteet pysyvät sulasuolassa ja suola voidaan puhdistaa uusiokäyttöön esimerkiksi suodattamalla siitä fissiotuotteet pois huokoisen mineraalin, zeoliitin avulla. Jätteeksi päätyvä radioaktiivinen suola prosessoidaan keraamiseen muotoon ja muu radioaktiivinen jäte on metallisessa muodossa. (Taylor 2015, s. 11)

Vaikka tämänkaltaisia prosesseja on tutkittu yhtä kauan kuin veteen perustuvaa ydinjätteenkäsittelyprosessia, ei ainuttakaan elektroklyysiin perustuvaa ydinjätteenkäsittelylaitosta ole rakennettu verrattavissa olevassa mittakaavassa. Pyrometallurginen prosessi on mahdollisesti toteutettavissa keskittyviä käsittelylaitoksia huomattavasti pienemässä mittakaavassa, jolloin jätteenkäsittely olisi mahdollista ydinvoimalan omalla alueella. Erottelumenetelmä on ollut käytössä vasta pienen mittakaavan tutkimustyössä ja tutkimustyötä tehdään esimerkiksi Japanissa (CRIEPI) ja Koreassa (KAERI). Kiina on suunnitellut rakentavansa pyroprosessointiin perustuvan ydinjätteenkäsittelylaitoksen vuoteen 2030 mennessä. Suurin haaste kaupallisen mittakaavan tuotannolle on prosessin saaminen jatkuvatoimiseksi, sillä nykyisellään prosessi toimii vain erävalmisteisesti. Muita haasteita ovat korkean lämpötilan ja suolan aiheuttama korrosio ja vaatimukset laitteiston kestossa sekä prosessin ohjauksessa. Korkea lämpötila ja säteilytaso aiheuttavat haasteita turvallisuudessa sekä ohjaukseen tarvittavien sensoreiden suunnittelussa. (Taylor 2015, s. 10–12, 18, 59, 417)

Eräs toinen menetelmä on fluoridin selektiivinen höyrystäminen, joka perustuu uraanin ja plutoniumin heksafluoridien (UF_6 , PuF_6) eroihin haihtuvuudessa ja kemiassa. Menetelmän etuna on UF_6 :n talteenotto ja sen puhtaus, mutta ongelmana on PuF_6 :n talteen saaminen ja sen epävakaus. (Taylor 2015, s. 12) Muita menetelmiä ovat esimerkiksi ioninvaihto ja uutokromatografia. Näiden menetelmien etuina ovat tuotteiden todella korkea puhtaus ja syntyvien orgaanisten jätteiden pieni määrä. Haasteena on kuitenkin muodostuvien liuosten korkea metalli-ionipitoisuus, hidas erävalmisteinen prosessi ja jätteenkäsittelyn monimutkaisuus. (Taylor 2015, s. 20)

DUPIC (Direct use of spent PWR fuel in CANDU reactor) on esimerkki käytetyn polttoaineen hyödyntämismenetelmästä, jossa ei ole metallurgista erotusmenetelmää. DUPIC-menetelmässä PWR-reaktorin käytetty polttoaine hyödynnetään lähes suoraan CANDU-reaktorissa. Kanadassa kehitettyä menetelmää käytetään ja kehitetään paljon myös Koreassa ja Kiinassa, sillä siellä on paljon kumpaakin reaktoryyppiä. (NEA 2015, s. 35) Painevesireaktorin käytetyn polttoaineen käsittely tapahtuu korkeassa lämpötilassa mekaanisen käsittelyn sekä hapetus-pelkistysreaktioiden avulla. DUPIC:in haasteena on

korkean säteily- ja lämpötason aiheuttama lisätarve niiltä suojautumiselle, mikä aiheuttaa merkittäviä lisäkustannuksia CANDU-reaktoreiden laitosalueella. Toisaalta säästöjä syntyy vähäisen jätteenkäsittelyn tarpeen ansiosta. Menetelmää pidetään parhaimpana ydinaseiden leviämisen torjumisessa, koska kyseiseen tarkoituksen tarvittavia tuotteita ei synny. (Taylor 2015, s. 416–417)

3.1.4 Transuraanien käsittely

Kevytvesireaktorin käytetyssä polttoaineessa olevat uraania raskaammat alkuaineet neptunium, plutonium, amerikium ja curium kuuluvat transuraanien ryhmään (Minor Actinides, MA). Niiden osuus käytetystä polttoaineesta on vain noin 0,1 %, mutta niiden haittavaikutus on suuri voimakkaan radiotoksisuuden ja lämmönkehityksen sekä pitkäikäisyyden takia. (Taylor 2015, s. 290) Hyvin radioaktiivisia aineita ovat myös esimerkiksi ydinjätteessä olevat fissiotuotteet jodi ja teknetium (IAEA 2015, s. 2).

Transuraaneja erotetaan ydinjätteestä veteen perustuvalla menetelmällä tai pyrokemiallisella menetelmällä, kuten luvuissa 3.1.2 ja 3.1.3 esitellään. Menetelmän valitseminen riippuu rajaehdoista, kuten käsiteltävästä ydinjätteestä, vaadittavasta jäähdytysajasta ja mahdollisuudesta tehdä jätteen säteilytys ja käsittelyprosessi samassa laitoksessa. Transuraanien erottaminen ydinjätteestä voidaan jakaa kahteen eri luokkaan erotettavien fraktioiden mukaan: heterogeeniseen ja homogeeniseen. Heterogeenisessä tavassa erotetaan amerikium ja curium, mutta niiden erottaminen on hankalaa niiden kemiallisen samankaltaisuuden takia. Erottamiseen käytettäviä metodeja ovat esimerkiksi erilaiset kromatografiat ja perinteinen kemiallinen liuotus. Homogeenisessä tavassa kaikki transuraanit pyritään erottamaan prosessista yhtenä virtana. Menetelmää kutsutaan nimellä GANEX (Group Actinide Extraction). Transuraanien erotusmenetelmien johtava maa on Ranska, mutta menetelmiä kehitetään myös muun muassa Tšekissä, Koreassa ja Japanissa. (Taylor 2015, s. 50–53, 58)

Transuraanien erottaminen lantanoideihin kuuluvista fissiotuotteista on polttoineen laadun kannalta ensiarvoisen tärkeää, sillä lantanoidit aiheuttavat reaktorissa neutronimyrkytystä eli absorboivat neutroneita voimakkaasti. Erottamisesta erityisen vaikeaa tekee transuraanien kemiallinen samankaltaisuus lantanoidien kanssa. GANEX-prosessin vaihtoehtona on muun muassa SANEX-prosessi (Selective Actinide Extraction), jossa käytettävä liuotin erottaa tehokkaasti eri transuraanit toisistaan. Transuraanien erottamisen ja käsittelemisen prosessit vaativat vielä paljon tutkimustyötä, mutta kehitys vaikuttaa lupaavalta polttoainekierron sulkemiseksi. Transuraanien kierrätyksessä muodostu-

van polttoaineen laadun ja tarvittavan korkean palaman takia hydrometallurginen erotteluprosessi ei ole välttämättä paras metodi transuraanien erottamiselle. Syynä on muun muassa riittämätön erotuskyky ja käytettävien aineiden huono säteilykestävyys. (Taylor 2015, s. xxiv, 53–54, 439)

Pitkäikäisen jätteen hyödyntäminen on mahdollista niin sanotun P&T-tekniologian avulla (Partitioning and Transmutation). Transmutaatio voidaan toteuttaa joko kiihdytinpohjaisella reaktorilla (ADS, Accelerator Driven System) tai nopealla reaktorilla (FR). (IAEA 2015, s. 2) Hajoamattomat ytimet altistetaan transmutaatioissa nopean energiaspektrin neutronisuihkulle, joka saa aikaan fertiilien ytimien fission (Crossland 2012, s. 504). Plutoniumin ja muiden transuraanien sekä fissiotuotteiden transmutaation jälkeen jäljelle jäävä ydinjäte on vähentynyt merkittävästi. Lisäksi konventionaaliseen ydinjätteeseen verrattuna lämmöntuotto ja säteily ovat merkittävästi pienempää ja ytimet ovat lyhytikäisempiä. Näiden syiden ansiosta samaan tilavuuteen voidaan pakata huomattavasti suurempi määrä jätettä mikä parantaa loppusijoituslaitosten tehokkuutta ja säästää resursseja. Transuraanien hyödyntämisen ansiosta polttoainekierto tehostuu ja suurin osa uraanin energiapotentiaalista tulee hyödynnetyksi. Ydinjätteen transmutaation nähdään yleisesti keinona parantaa ydinvoiman hyväksyttävyyttä. (Kooyman 2021, s. 1–2) Myös loppusijoittamisen aiheuttama ympäristöriski pienenee, parantaen ydinteollisuuden vastuullisuutta (Taylor 2015, s. 438).

3.2 Neljännen sukupolven reaktorit

Neljäntoista ydinvoimamaan edustama järjestö Generation IV International Forum (GIF) on esittänyt kuusi reaktorityyppiä, jotka se arvelee edustavan tulevaisuuden ydintekniikkaa. Näihin reaktoreihin kuuluu: kaasujäähdytteinen nopea reaktori (Gas-cooled Fast Reactor, GFR), lyijyjäähdytteinen nopea reaktori (Lead-cooled Fast Reactor, LFR), natriumjäähdytteinen nopea reaktori (Sodium-cooled Fast Reactor, SFR), sulasuolareaktori (Molten Salt Reactor, MSR), ylikriittinen vesijäähdytteinen reaktori (Supercritical Water-cooled Reactor, SCWR), erittäin korkean lämpötilan reaktori (Very High Temperature Reactor, VHTR). Reaktorien merkittävänä etuina on ekologinen kestävyys, taloudellisuus, turvallisuus, luotettavuus ja resistenttiys ydinasekäytölle. (World Energy Council 2019, s. 42) Mainituista reaktoreista neljää ensimmäistä voidaan käyttää ydinjätteen energiahyödyntämiseen ja jätteen muokkaamiseen vähemmän haitalliseksi. Nopeina reaktoreina ne pystyvät hajottamaan fertiilejä ytimiä, joita on termisten reaktoreiden ydinjätteessä. (IAEA 2019, s. 4)

Kaasujäähdytteisessä nopeassa reaktorissa muodostuva käytetty polttoaine käsitellään laitosalueella. Lisäksi transuraanien kierrätyksen ansiosta pitkäikäisten radioaktiivisten ydinten päätyminen loppusijoitettavaksi minimoituu (World Energy Council 2019, s. 42). Korkean lämmöntuoton ansiosta tekniikkaa voidaan hyödyntää sähköntuotannon lisäksi prosessilämmön ja vedyn tuottamiseen (IAEA 2019, s. 6). Kaasun, kuten heliumin ja hiilidioksidin etuna on inerttiys ja kaasun aktivoitumattomuus, mitkä tekevät kaasun käytöstä turvallisempaa. Haittana on huono jäähdytysteho ja tarve operoida korkeassa paineessa. (GIF 2018, s. 21)

Lyijyjäähdytteinen (lyijy tai lyijyn ja vismutin eutektinen seos) reaktori voi hyödyntää köyhdytettyä uraania tai toriumia polttoaineenaan ja lisäksi se hyödyntää transuraaneja, joita erotetaan erillisellä käsittelylaitoksella kevytvesireaktoreiden käytetystä polttoaineesta. Tämäntyyppinen reaktori toimii hyvin matalassa, lähes ympäristön paineessa ja sen etuna on jäähdytysaineen inerttiyden lisäämä turvallisuus. Nykyinen toimintalämpötila on 550 °C, mutta materiaalien kehittyessä voidaan esimerkiksi haasteena olevaa lyijyn korroosiota estää ja toimintalämpötila nousisi tällöin 800 °C:een. (World Energy Council 2019, s. 42; IAEA 2019, s. 6)

Natriumjäähdytteisessä reaktorissa jäähdytinaineen erinomaisen lämmönjohtokyvyn ansiosta tarvittavan jäähdytinaineen tilavuus on pieni ja saavutetaan korkea energiatiheys matalassa paineessa (NEA 2002, s. 123). Reaktori toimii noin 500 °C:een käyttölämpötilassa ja käyttää polttoaineenaan esimerkiksi köyhdytettyä uraania. Natriumjäähdytteinen reaktori sopii myös transuraanien polttoon, jolloin laitos kannattaa olla ydinjätettä käsittelevän pyroprosessointilaitoksen yhteydessä. Myös MOX-polttoainetta voidaan käyttää polttoaineena ja tällöin laitoksen polttoaine saadaan PUREX-prosessiin perustuvalla keskitetyltä jätteenkäsittelylaitokselta. Tekniikka on GIF'in arvion mukaan neljännen sukupolven tekniikassa kiinnostuksen pääkohteena. Haasteena on jäähdytysprosessin vaatima laitteiston tiivistys. (World Energy Council 2019, s. 43) Joutuessaan kosketuksiin ilman hapen kanssa, natriumin palaa kiivaasti, mutta kun kyseessä on vesi, reaktio on räjähdysmäinen. Ongelmana on myös natriumin aktivoituminen reaktorissa. Nykyteknologian avulla turvallisuutta on kuitenkin onnistuttu parantamaan merkittävästi. (NEA 2002, s. 123)

Nopeassa sulasuolareaktorissa polttoaine on sekoittuneena jäähdytinaineena kiertävään sulasuolaan. Kiinteää polttoainetta käyttäviin reaktoreihin verrattuna sulasuolareaktorin kilpailuetuna on transuraanien polttaminen ja tehokas polttoaineresurssin hyödyntäminen. Kiinteää polttoainetta tai ydinjätettä ei tarvitse käsitellä ja säteilyn aiheuttama rasite on paljon pienempi. (World Energy Council 2019, s. 43)

Neljänteen sukupolveen kuuluvat termiset reaktorit (VHTR, SCWR) eivät neutronispekt-rinsä takia pysty hyödyntämään ydinjätettä. Poikkeuksena on ylikriittisellä vedellä toimiva nopea reaktori, jossa konventionaalisen jätteen transuraanit pystytään hyödyntämään. Aiempaan sukupolveen verrattuna neljännen sukupolven termisten reaktoreiden parem-muus näkyy korkeampana termisenä hyötysuhteena, parempina turvallisuusominaisuuksina, polttoaineen parempana hyödyntämisenä ja korkean lämpötilan tuottamisena. Niitä voidaan käyttää vedyn valmistukseen tai korkean lämpötilan ja prosessihöyryn tuot-tamiseen teollisuuden tarpeisiin. (World Energy Council 2019, s. 43; NEA 2015, s. 30) Neljännen sukupolven termisessä reaktorissa voidaan käyttää jäähdyttimenä myös su-lasuolaa ja hidastimena toimii tällöin grafiitti (GIF 2018, 22).

Viime vuosina maailmalla on ollut käynnissä useampia hankkeita nopeiden reaktorilai-tosten rakentamiseksi. Melko tuoreita nopeita natriumjäähdytteisiä reaktorilaitoksia on aloittanut toimintansa Venäjällä vuonna 2014 (BN-800, Beloyarsk) ja Intiassa vuonna 2018 (PFBR, Kalpakkam) (World Energy Council 2019, s. 43). Venäjällä on kokemusta natriumjäähdytteisistä nopeista reaktoreista aiempien SFR-tekniikan reaktoreiden ansi-osta: BN-350 (1973-1999) ja BN-600 (1980) (NEA 2002, s. 118). Entistä suurempi lai-toshanke, BN-1200 on valmistumassa vuonna 2030. GIF-järjestöön kuulumaton Intia on suunnitellut SFR-reaktoritekniikkaa jo usean vuosikymmenen ajan ja valmisteilla on 500 MW:n prototyyppilaitos, jota ei vielä ole saatu valmiiksi viivästysten takia. Eräs viivästys-ten takia kesken jäänyt nopean reaktorin laitoshanke on ranskalainen ASTRID. (NEA 2015, s. 31) ASTRID-reaktorin oli tarkoitus olla seuraaja kolmelle aiemmin toiminnassa olleelle ranskalaiselle SFR-reaktorille – Rapsodie, Phénix ja Superphénix, jotka olivat vuorollaan toiminnassa vuosien 1966-1996 välisenä aikana (GIF 2018, s. 54; NEA 2002, s. 119). Vuonna 2011 aloitti toimintansa ensimmäinen kiinalainen nopea reaktori, joka on teholtaan 20 MW:n SFR-tekniikkaan perustuva koelaitos. Kiina suunnittelee rakenta-vansa 1000 MW:n prototyyppilaitosta. (NEA 2015, s. 31) USA:ssa on suunnitteilla 1980-luvulla suunnitellun ja myöhemmin keskeytetyn IFR-hankkeen (Internal Fast Reactor) jatkaminen. GE Hitachi -nimisen yrityksen natriumjäähdytteisen nopean reaktorin hanke on nimeltään PRISM (Power Reactor Innovative Small Module), ja sen avulla voitaisiin kierrättää käytetyn polttoaineen uraania raskaammat ytimet. (NEA 2015, s. 31; Fox 2014, s. 258–259)

Neljännen sukupolven nopeista reaktoreista potentiaalisimpia ovat natrium- ja lyijyjääh-dytteiset reaktorit (NEA 2015, s. 30). Kevyen molekyyllirakenteensa ansiosta kaasumai-sella jäähdytinaineella on kuitenkin pienin moderoiva vaikutus neutroneihin, minkä takia kaasu on tehokkain jäähdytinaine transuraanien hävittämisessä. Moderoiva vaikutus on

raskailla lyijyllä ja natriumilla likimain sama ja kaasua suurempi. (NEA 2002, s. 333) Jätteen moninkertaisen kierrätyksen ja tehokkaamman käsittelyn ansiosta nopea reaktori voi tuottaa 60 kertaa enemmän energiaa samasta uraanimäärästä kuin kolmannen sukupolven kevytvesireaktori. GenIV-reaktoritekniikan leviäminen ei todennäköisesti tule alkamaan ennen vuotta 2030 ja pitkään sen jälkeen levittäytyminen tapahtuu GenIII-tekniikan rinnalla, mutta paljon pienemmässä mittakaavassa. Tämän kehityssuunnan toteutumiseksi aikavälillä 2020–2030 on panostettava erityisesti prototyyppilaitosten rakentamiseen ja operoimiseen. Uuden reaktorisukupolven kaupallistamiseksi on tehtävä vielä valtavasti tutkimus- ja kehitystyötä polttoaineiden sekä korroosiota, suurta neutronivuota ja korkeita lämpötiloja kestävien materiaalien osalta. (NEA 2015, s. 30)

Kiihdytinpohjainen reaktori (ADS) on suunniteltu toimimaan polttoainekierrossa termisen ja nopean reaktorin jälkeisenä komponenttina, sillä se hyödyntää jäljelle jääneen plutoniumin ja muut transuraanit sekä pitkäikäiset fissiotuotteet transmutaation avulla, minimoiden lopullisen jätteen määrän. ADS perustuu hyvin suureen nopeuteen kiihdytettyihin protonihiukkasiin, jotka törmäytetään raskasmetalliin. Tämä hiukkaspommitus aiheuttaa kohteessa spallaatio-reaktion, jolloin kohteesta irtoaa suurinopeuksinen neutronisuihku. Neutronit ohjataan alikriittiseen reaktorikuoreen, jossa neutronisuihkujen määrä moninkertaistuu, jotta voidaan maksimoida syntyvien fissioreaktioiden määrä. (IAEA 2019, s. 4, 7) Kiihdytintyyppinä on kahdenlaisia: lineaarinen kiihdytin ja syklotroni (IAEA 2015, s. 6).

Alikriittisen ADS-reaktorin etuna on turvallisuus, sillä ydinreaktiot pysähtyvät, kun kiihdyttimen sammutetaan. Teollisen mittakaavan transmutaation mahdollistamisen lisäksi ADS-reaktorilla voidaan tuottaa tulevaisuudessa sähköä ja prosessilämpöä. Kiihdyttimen haittapuolena on suuri energiankulutus, sillä noin 20 prosenttia tuotetusta sähköstä kuluu kiihdyttimen käyttämiseen. Muita haasteita on laitoksen lopullisen toteuttamisen kompleksisuus sekä hiukkassäteiden rakenteille aiheuttama rasitus. (IAEA 2015, s. 5–6)

Ajatus hiukkaskiihdyttimen käyttämisestä LWR-reaktorin ongelmallisen ydinjätteen hävittämiseksi heräsi jo 1990-luvun alussa. Käynnissä olevia projekteja tutkimuslaitoksiin liittyen on esimerkiksi Belgiassa, Yhdysvalloissa, Japanissa, Koreassa sekä hiukkasfyysikan tutkimuskeskuksessa CERN:issä Sveitsin ja Ranskan rajalla. (IAEA 2015, s. 6–7, 22) Kiihdytinpohjaisten reaktoreiden voimakkaana puolestapuhujana tunnetaan esimerkiksi Nobel-palkittu fyysikko Carlo Rubbia (Eurasto et al. 2004, s. 77). ADS-reaktorien avulla tapahtuva transmutaatio on mahdollinen osaratkaisu ydinjäteongelmaan, ja tulevaisuudessa nämä reaktorit ovat osana kestäväää ydinteollisuutta. Viimeisen viidentoista

vuoden aikana tapahtunut kehitystyö on ollut merkittävää, mutta toteutus on edelleen suunnitteluasteella. (IAEA 2015, s. 354)

3.3 Haasteet

Jälleenkäsittely ja MOX-kierto ovat toistaiseksi taloudellisesti kannattamatonta maalle, jolla ei ole jo olemassa olevaa jätteenkäsittelylaitosta. Säteilyturvakeskuksen (STUK) vuonna 2004 julkaiseman Ydinturvallisuus-kirjan mukaan ydinpolttoaineen jälleenkäsittelyn kustannukset uraanikiloa kohden olivat noin 1000 dollaria (USD) vuonna 2004. (Eloranta et al. 2004, s. 286–287) Neitseellisen uraanin hinta on nykyään ollut alle sata dollaria (USD) kiloa kohden (NEA 2002, s. 212). MOX-kierrosta uudelleenkäyttöön saatava kierrätetty ydinpolttoaine vähentää polttoaineen hankintakustannuksia niin vähäisesti, että se ei kata polttoaineen kierrätyksestä aiheutuvia kuluja. MOX-kierron lopputuotteena syntyvä lasitettu korkea-aktiivinen jälleenkäsittelyjäte on tilavuudeltaan merkittävästi pienempi verrattuna avoimen polttoainekierron tuottamaan pakattuun käytettyyn polttoaineeseen. Kuitenkin jätteen viemän tilavuuden sijaan, loppusijoitustilojen mittojen määräävänä tekijänä on ydinjätteen lämmönkehitys seuraavan sadan vuoden aikana, mikä on likimain sama molemmilla polttoainekierto-tyypeillä. Näin ollen suljettu polttoainekierto ei eroa avoimesta merkittävästi loppusijoituskustannusten osalta. (Eloranta et al. 2004, s. 286–287)

Monet ydinjätteen käsittelyn vastustamisen argumentit liittyvät huoleen turvallisuudesta ja käsittelylaitosten ympäristövaikutuksista. Lisäksi prosessissa erotettu plutonium kasvattaa ydinaseriskiä ja nopean reaktoritekniikan lisääntyessä ydinasevalvonta vaikeutuu. Lisäksi vastareaktiota aiheuttaa monimutkaisen laitosisnfrastruktuurin aiheuttamat kustannukset ja pitkä valmistumisaika. Suunnitteluun, rakentamiseen ja toiminnan käynnistämiseen kuluu lisäksi ainakin 10–20 vuotta sen jälkeen, kun käytetyn ydinpolttoaineen käsittelyn ja kierrätyksen tutkimus- ja kehitystyö on valmis. Näin ollen tutkimus- ja kehitystyö pysyy suurimpana epävarmuustekijänä 2050-lukuun mennessä. Tekniikan takana oleva tiede on kehityksessä perustavanlaatuinen tekijä, mutta käytännön toteutuksen kannalta insinööri- ja suunnittelutyö ovat yhtä merkityksellisiä. (Taylor 2015, s. xxii–xxiii, xxv)

Syynä hyötöreaktoreiden huonolle kaupalliselle menestykselle on ollut muun muassa teknisistä vaikeuksista johtuvat korkeat kehitys- ja käyttökustannukset. Lisäksi maankuoren ydinpolttoaineresurssit ovat osoittautuneet ennakoitua paljon paremmiksi, mikä on pitänyt uraanin hinnan alhaisena eikä hyötöreaktoritekniikalle ole näin ollen ollut kysyntää. Monet maat ovat suhtautuneet kriittisesti polttoaineen jälleenkäsittelyyn, kuten esim.

Yhdysvallat jo 1970-luvulta lähtien, sillä prosessissa erottuvan plutoniumin pelätään ajautuvan väärin käsiin ydinaseiden raaka-aineeksi. (Eurasto et al. 2004, s. 77, 79)

Transuraanien syöttämisellä nopeiden reaktorien polttoaineeksi on havaittu olevan negatiivisia vaikutuksia reaktorin hyötämistehokkuudelle ja ytimen vakaudelle. Laitteiston materiaalirajoitusten takia jätteen moninkertainen kierrättäminen ei ole transmutaationissa mahdollista. Transuraanien korkean aktiivisuuden takia niiden jätteenkäsittely on huomattavasti monimutkaisempaa ja vaarallisempaa kuin konventionaalisen ydinjätteen. Välittömän käsittelyn sijaan suuren lämmön- ja neutronituoton omaavan transuraanijätteen annetaan mieluummin jäähtyä useita vuosia. Monimutkaisen prosessin ja sijoitusten rajallisen takaisinmaksun takia transmutaatioimista ei ole pidetty välttämättömänä menetelmänä ydinteollisuuden kestäväen toiminnan kannalta. (Kooyman 2021, s. 2–3)

Ydinvoimalat ovat kalliita sekä hitaita rakentaa ja muun muassa tämän takia niiden käyttöikä pyritään pitämään mahdollisimman korkeana – jopa kuudessakymmenessä vuodessa (Fox 2014, s. 106). Ydinjätteen käsittelyyn ja energiahyödyntämiseen tarvittavien laitosten rakentaminen maksaisi arviolta 50–100 miljardia dollaria ja kasvattaisi sähkön tuotannon kustannuksia 2–7 prosenttia. (Fox 2014, s. 206) Muun muassa näiden seikkojen vuoksi muutokset ydinvoima-alalla tapahtuvat hyvin hitaasti. Reaktorityypin muuttaminen mitätöisi suuren osan ydinvoimalan nykyisistä investoinneista ja suunnitelmista, minkä lisäksi osaamista uudentyyppiselle ratkaisulle ei olisi olemassa.

4. YDINJÄTTEEN ENERGIAHYÖDYNTÄMISEN POTENTIAALI

4.1 Nykyisten ydinjätevarastojen potentiaali

Korkea-aktiivista käytettyä ydinpolttoainetta on kertynyt 50-luvulta lähtien eli seitsemän vuosikymmenen ajan ja toistaiseksi käytettyä ydinpolttoainetta ei ole vielä loppusijoitettu missään päin maailmaa. Vuoteen 2004 mennessä, ydinasetuotannon seurauksena on jäänyt miljoona kuutiometriä ydinjätettä, jonka yhteenlaskettu aktiivisuus on 150 000 PBq. Nämä ydinaseteollisuuden aiheuttamat ydinjätteet ovat nestemäisessä muodossa maan pintakerrokseen haudatuissa säiliöissä. (Eloranta et al. 2004, s. 290–291) Maapallolla on kokonaisuudessaan ydinjätettä 200 000–300 000 tonnia ja vuoteen 2030 mennessä määrä on arviolta 400 000 tonnia. Muodostuneesta ydinjätteestä 90 000 tonnia eli noin 30 prosenttia on uusiokäytetty. (Taylor 2015, s. 35–36, 49) Kaksi kolmasosaa ydinjätteestä on varastoituna polttoainenuippuina ja yksi kolmasosaa nestemäisenä tai lasiin kiinteytettynä jälleenkäsittelyjätteinä. Nykyisen ydinjätteen kokonaisaktiivisuus on 1 000 000 PBq. (Eloranta et al. 2004, s. 291)

Käynnissä olevat kaupalliset reaktorit tuottavat vuosittain korkea- ja matala-aktiivista jätettä 34 000 kuutiometriä (Vidal 2019). Jotta uraanivaroja voitaisiin hyödyntää paremmin, on parannettava merkittävästi reaktoreiden kykyä hyödyntää polttoainetta ja siten hyödynnettävä maksimaalisesti polttoaineen energiapotentiaali. (Taylor 2015, s. 35) Maailmassa olevan ydinjätteen kokonaismäärän arvioimisesta tekee hankalaa se, että jätteen aktiivisuuden luokittelussa on eroja ja kaikkien maiden todellinen jätemäärä ei ole tiedossa (Vidal 2019).

Ydinpolttoaineresurssien kokonaisvaltaisen hyödyntämisen saavuttamiseksi on saavutettava tavoitteet lyhyelle ja pitkälle aikavälille. Lyhytaikainen tavoite on ydinpolttoaineen kertakierrätys nykyisissä termisissä reaktoreissa, joihin tuotetaan MOX-polttoainetta PUREX-menetelmällä. Nykyään tämä tekniikka on hyvin tunnettu, tehokas, puhdas, turvallinen ja taloudellisesti toteutettavissa. Sen avulla pystytään säästämään noin 17 prosenttia uraanivaroja verrattuna perinteiseen avoimeen polttoainekiertoon. Pidemmän aikavälin tavoite on kierrättää uraania, plutoniumia ja muita transuraaneja jatkuvatoimisesti nopeiden reaktoreiden avulla. Tällöin yli 80 prosenttia uraania pystytään hyödyntämään avoimen kierron 0,7 prosentin sijaan. Nopeissa reaktoreissa voidaan hyödyntää myös köyhdytettyä uraania, jota esimerkiksi Ranskassa on varastoituna 250 000 tonnia.

(Taylor 2015, s. 35–38) Esimerkiksi hyödyntämällä Iso-Britannian ydinjätevarastoja nopean reaktoritekniikan avulla, maa voisi tuottaa tarvitsemansa sähkön viideksisadaksi vuodeksi (Duncan 2012). Vastaavalla tekniikalla, Yhdysvallat voisi tuottaa ydinjätevarastoillaan tarvitsemansa sähkön sadaksi vuodeksi (Touran 2009). Uraanin hyödyntäminen energiantuotannossa pystyttäisiin tehostamaan nykyisestä satakertaiseksi, mikäli käytettäisiin nopeita reaktoreita konventionaalisten sijaan (GIF 2018, s. 12; Eurasto et al. 2004, s. 27).

4.2 Ydinjätteen käsittelyn potentiaali

Ydinjätteen käsittelyssä pyroprosessi on osoittautunut lupaavaksi menetelmäksi korkean säteilynkestonsa vuoksi. Kuitenkin veteen perustuva erottelumenetelmä tulee pysymään lähitulevaisuudessa tärkeimpänä sen erottelutehokkuuden ja teknologisen kypsyytensä ansiosta. Transuraanien erottelulla ja hävittämisellä transmutatoimalla on ensiarvoisen tärkeä rooli ydinjätteen määrän ja vaarallisuuden sekä pitkäaikaisen riskin vähentämisessä. (IAEA 2019, s. 74) Suurena haasteena on ydinjätteen käsittelyyn ja kierrätykseen liittyvä tutkimus- ja kehitystyö, mutta tekniikan tuomien etujen ansiosta työtä voidaan pitää vaivan arvoisena. Sekä veteen että pyrokemiaan perustuvissa erottelumenetelmissä tapahtuu merkittävää kehittymistä ja molemmilla tekniikoilla on oma käyttökohteensa polttoainekierrosta ja maasta riippuen. (Taylor 2015, s. xxv)

Suurin osa ydinvoiman haitallisista ympäristövaikutuksista muodostuu kierron etupäässä: louhimisesta, jauhamisesta ja rikastamisesta. Hyödynnettäessä ydinjätteen kierrätystä, ympäristövaikutukset pienenevät merkittävästi pienemmän louhimistarpeen ansiosta. Merkittävä ydinjätteen määrään ja louhimistarpeen vähentämiseen vaikuttava tekijä on transuraanien hyödyntäminen sähkön tuottamiseksi. Uuden reaktorisukupolven kestävä toiminnan toteutumiseksi ydinjäte pyritään hyödyntämään tehokkaimmalla mahdollisella tavalla, jolloin kierrätysprosessista saatavien tuotteiden puhtaus laskee aiempaan teknologiaan nähden, mutta syntyvä jäte on vähemmän haitallista ja polttoainetalous on tehokkaampi. Ydinjätteen kierrätys ei suoraan paranna ydinenergian tuotannon turvallisuutta, mutta voi pienentää ydinaseiden riskiä ja kohentaa turvallisuutta polttoainekierron alku- ja loppupäässä pienemmän louhimis- ja käsittelytarpeen ansiosta. (Taylor 2015, s. 33, 50, 87)

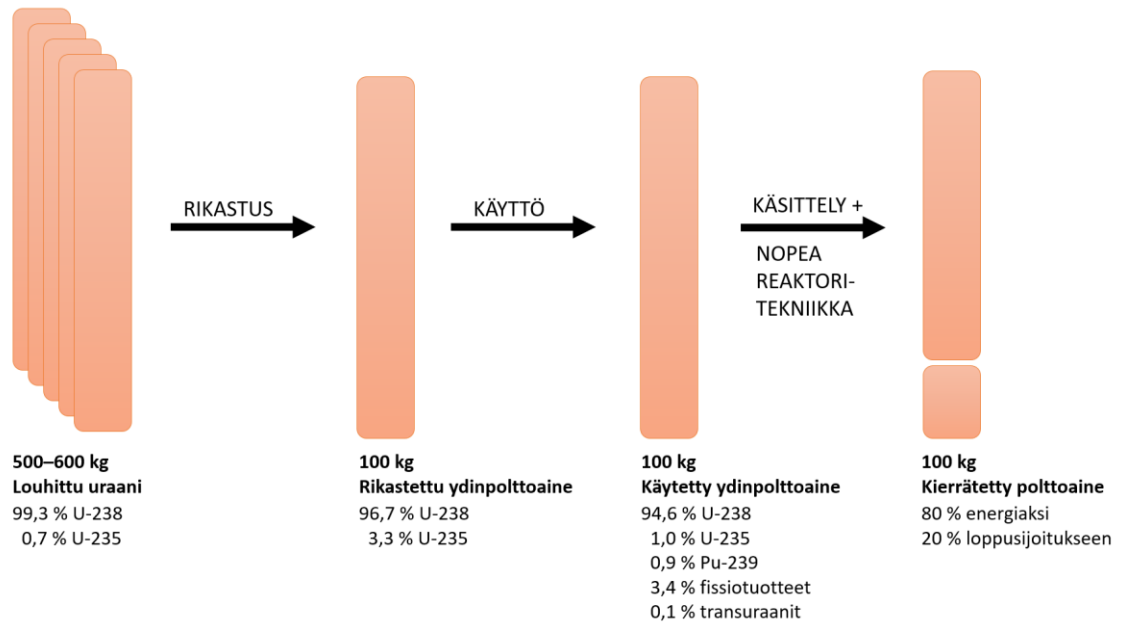
Ydinjätteen kierrätyksen kustannukset voidaan ajatella osittain kompensoituvan säästöillä, joita saavutetaan ydinpolttoainekierron alku- ja loppupäässä. Kierrätyksen ansiosta kierron alkupäässä tarve neitseellisen uraanin louhimiselle sekä uraanin rikastami-

selle pienenee. Säästöjä syntyy myös loppusijoittamisen kustannusten osalta, sillä loppusijoitettavan ydinjätteen tilavuus pienenee viidesosaan nykyisestä. (Taylor 2015, s. 10) Ranska kierrättää vuosittain noin 20 000 tonnia käytettyä polttoainetta ja nykyinen jätteenkäsittelyprosessi vähentääkin loppusijoittamisen vaatimaa kapasiteettia 50 % avoimeen kiertoon nähden. (NEA 2015, s. 35) Ranskalaisen ydinvoimayhtiön AREVA:n arvion mukaan Ranskan nykyinen tapa kierrättää ydinpolttoainetta lisää kokonaiskustannuksia vain noin 2 % perinteiseen avoimeen kiertoon nähden (Fox 2014, s. 206).

4.3 Uuden reaktoritekniikan potentiaali

Tehokkaamman energiahyödyntämisen seurauksena loppusijoitettavan ydinjätteen määrä sekä aktiivisuus pienenevät oleellisesti, sillä uudelleen hyödynnetty ydinjäte hajoaa fissiotuotteiksi, jotka pysyvät radioaktiivisena nykyistä ydinjätettä huomattavasti lyhyemmän ajan. (Upton 2013) Ydinjätteen satojen tuhansien vuosien puoliintumisajan sijaan, jätteen puoliintumisaika on vain satoja vuosia. (Taylor 2015, s. 9) Nopean reaktoritekniikan ansiosta uraanivarannot riittävät tuhansiksi vuosiksi eteenpäin (Fox 2014, s. 261). Ydinjätteen transmutoiminen tuo säästöjä jätteenkäsittelyyn osaprosessin yksinkertaistumisen vuoksi. Transuraanien transmutoiminen vähemmän haitalliseksi ja lyhytikäisemmiksi ytimiksi parantaa loppusijoittamisen turvallisuutta, mikä haasteellisuudestaan huolimatta tulisi huomioida kokonaiskustannuksia analysoidessa. Ydinjätteen hyödyntämisellä tuotettu energia parantaa hiilidioksidipäästötöntä tuotantoa ja vähentää fossiilisilla tuotetun energian tarvetta. (Taylor 2015, s. 10, 291)

Nopeiden hyötöreaktoreiden avulla voidaan tuottaa sellaisenaan ydinpolttoaineeksi kelpaamattomasta U-238:sta hajoamiskelpoista Pu-239:ää ja näin ollen käyttää tehokkaammin olemassa olevia uraanivaroja. Teoriassa nopeita ja kiihdytinpohjaisia reaktoreita voitaisiin käyttää myös radioaktiivisen ydinjätteen käsittelyyn, hävittämiseen ja energiantuotantoon. Kuitenkin kyseisen menettelyn tarpeelle, teknisille mahdollisuuksille ja yhteiskunnalliselle hyväksyttävyydelle ei ole täyttä varmuutta. (Eurasto et al. 2004, s. 77–78) Tulevaisuuden käsittely- ja reaktoritekniikan mahdollistamaa tehokasta ydinjätteen hyödyntämistä havainnollistetaan kuvassa 4 yksinkertaisen massataseen avulla.



Kuva 4. Ydinjätteen hyödyntämisen yksinkertaistettu massatase (muokattu lähteistä Storvick & Supples 2006, s. 285 sekä Taylor 2015, s. 37).

Potentiaalisena kahden prosessin yhteenliittymänä pidetään ydinjätteen käsittelyä pyroprosessilla ja transmutaatiolla nopeassa sulasuolareaktorissa, sillä molemmissa käytettävää suolaa käsitellään pyrokemiallisesti. Sulasuolareaktorin käyttö, jossa ydinjäte sekoitetaan suoraan sulasuolaan, vähentäisi tarvetta ydinjätteen käsittelylle ja poistaisi tarpeen polttoaineen valmistamiselle, millä saavutettaisiin kustannussäästöjä. Suurin osa tulevaisuuden transmutaatioon kykenevän reaktoritekniikan tutkimuksista kohdistuu kehittyneisiin metalli- ja kaasujähdytteisiin nopeisiin reaktoreihin. Lisäksi vaihtoehtona on kiihdytinpohjaisen reaktoritekniikan käyttö, jonka kehittäminen alkoi jo 1990-luvulla. ADS-tekniikan etuna on sen alikriittisen ytimen takaama turvallisuus sekä transuraanien lähes täysi hyödyntäminen ilman uusien transuraanien muodostumista. (Kooyman 2021, s. 2–3, 6)

Uudentyyppisissä reaktoreissa voidaan hyödyntää myös luonnossa esiintyvää toriumia, joka fertiilinä aineena on hyödynnettävissä nopeissa reaktoreissa. Toriumin käyttö laajentaisi polttoaineresurssia merkittävästi ja takaisi luonnonvarojen riittävyyden pitkälle tulevaisuuteen. (IAEA 2019, s. 79) Toriumia ei kuitenkaan käsitelty tässä työssä, koska neitseellisenä raaka-aineena se rajautuu työn aiheen ulkopuolelle.

5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tehdä kattava selvitys ydinjätteestä sekä sen hyödyntämismenetelmistä. Lisäksi esiteltiin, mikä on hyödyntämisen potentiaali tulevaisuudessa ja mitä haasteita hyödyntämiseen liittyy.

Ydinjätteen ongelmana on radioaktiivinen säteily, minkä takia ydinjäte on eristettävä elollisesta luonnosta vuosituhansiksi loppusijoittamalla. Ydinjätteen käsittely aiheuttaa valtavasti kustannuksia ja ydinpolttoaineen potentiaalista hyödynnetään vain alle prosentti. Maapallolla ydinjätettä on varastoituna kokonaisuudessaan noin 300 000 tonnia. Nopean reaktoritekniikan ansiosta ydinpolttoaineesta voidaan hyödyntää noin 80 prosenttia, mikä on noin sata kertaa konventionaalisia reaktoreita tehokkaammin. Hyödyntämällä ydinjätettä täysin suljetun polttoainekierron avulla, ydinvoimamaat voisivat tuottaa tarvitsemansa sähkön sadoiksi vuosiksi.

Teknologisen kypsyytensä takia jätteenkäsittelyssä käytetään vielä vuosia veteen perustuvaa PUREX-tekniikkaa, joka vähentää louhimistarvetta viidenneksellä. Kehitystyön edetessä haastajana on pyrometallurginen menetelmä. Sen etuna on nuklidien tehokas erotuskyky sekä prosessin korkea radioaktiivisuuden sieto, jolloin tuoretta ydinjätettä voidaan käsitellä ilman vuosien jäähtymisaikoja. Tekniikka on kuitenkin vielä kehitysasteella.

Suljettuun polttoainekiertoon siirtyminen ei toistaiseksi ole ollut taloudellisesti kannattavaa, sillä jätteenkäsittelyn kustannukset uraanikiloa kohden ovat noin 1000 dollaria ja neitseellisen uraanin kilohinta on pysynyt alle sadassa dollarissa. Nykyisillä kustannuksilla hyödynnettävät varannot riittävät hieman alle sata vuotta. Uraanin olisi kallistuttava ja varantojen ehdyttävä merkittävästi, jotta uudet hyödyntämisteknologiat yleistyisivät. Näin ollen kierrätykseen tarvittavat teknologiat tarjoavat ratkaisua ongelmaan, jota ei ole näköpiirissä lähitulevaisuudessa.

Yhteensopivuutensa takia potentiaalisena kombinaationa pidetään ydinjätteen käsittelyä pyroprosessilla ja transmutaatioimisella nopeassa sulasuolareaktorissa. Suuri osa reaktoritekniikan tutkimuksista kohdistuu kehittyneisiin metalli- ja kaasujäähdytteisiin nopeisiin reaktoreihin. Lisäksi vaihtoehtona on kiihdytinpohjaisen reaktoritekniikan käyttö, jonka etuna on sen alikriittisen ytimen takaama turvallisuus sekä transuraanien lähes täysi hyödyntäminen. Suurimpana haasteena on käsittely- ja reaktoritekniikan kehitystyö sekä tekniikan kalleus, mutta teknologian kypsyessä laitokset alkavat yleistyä hitaasti 2030-luvun jälkeen.

LÄHTEET

Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles (2002), Nuclear Energy Agency

Crossland, I. (2012). Nuclear Fuel Cycle Science and Engineering, Elsevier

Duncan, C. (2012). New generation of nuclear reactors could consume radioactive waste as fuel, The Guardian 2.2.2012. Saatavissa (viitattu 17.4.2021):

<https://www.theguardian.com/environment/2012/feb/02/nuclear-reactors-consume-radioactive-waste>

Eloranta, E., Hutri, K-L., Ruokola, E., Tikkinen, J. (2004). Radioaktiiviset jätteet, Ydinturvallisuus, Säteilyturvallisuuskeskus

Eurasto, T., Hyvärinen, J., Järvinen M., Sandberg, J., Sjöblom, K. (2004). Ydinvoimalaitostekniikan perusteita, Ydinturvallisuus, Säteilyturvakeskus

Fox, M.H. (2014). Why We Need Nuclear Power: The Environmental Case, Oxford University Press

GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems: 2018, Generation IV International Forum.

Hyvä tietää ydinvoimasta (2020), Energiateollisuus ry

Hyvä tietää uraanista (2006), Energiateollisuus ry

Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles. (2019). International Atomic Energy Agency

Ikäheimonen, T., Karvinen, H., Lehtinen, J., Marttila, O., Nyberg, H., Paile, W., Pukkila, O., Pöllänen, R., Salomaa, S., Sandberg, J., Weltner, A. (2002). Säteilyn terveysvaikutukset, Säteily ja sen havaitseminen, Säteilyturvakeskus

Power Reactor Information System (PRIS), Nuclear Power Status 2019. International Atomic Energy Agency. Saatavissa (viitattu 11.3.2021): <https://pris.iaea.org/pris/>

Kooyman, T. (2021). Current state of partitioning and transmutation studies for advanced nuclear fuel cycles, Annals of Nuclear Energy, Vol. 157, Elsevier

Nakhobov, A., Ud-Din Khan, S. (2020). Nuclear Reactor Technology Development and Utilization, Elsevier

- Statistical Review of world Energy 2020, 69th edition, British Petroleum
- Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development (2015), International Atomic Energy Agency
- Storvick, T., Supples, G.J. (2006). Sustainable Nuclear Power, Elsevier
- Taylor, R. (2015). Reprocessing and Recycling of Spent Nuclear Fuel, Elsevier
- Technology Roadmap: Nuclear Energy - 2015 Edition, Nuclear Energy Agency
- Touran, N. (2009). Recycling Nuclear Waste and Breeder Reactors. Saatavissa (viitattu 30.1.2021): <https://whatisnuclear.com/recycling.html>
- Upton, J. (21.11.2013). Our Nuclear Waste Is a Goldmine, Nautilus. Issue 7. Saatavilla (viitattu 29.1.2021): <http://nautil.us/issue/7/waste/our-nuclear-waste-is-a-gold-mine>
- Vidal, J. (2019). What should we do with a radioactive nuclear waste?, The Guardian 1.8.2019. Saatavissa (viitattu 17.4.2021): <https://www.theguardian.com/environment/2019/aug/01/what-should-we-do-with-radioactive-nuclear-waste>
- World Energy Scenarios 2019. The future of nuclear: diverse harmonies in the energy transition, World Energy Council
- World Nuclear Performance Report 2020, World Nuclear Association
- Ydinvoima ja innovaatiot (2008), Energiateollisuus ry