

Seppo Vuori & Kari Rasilainen

## Katsaus ydinjätehuollon tilanteeseen Suomessa ja muissa maissa



# **Katsaus ydinjätehuollon tilanteeseen Suomessa ja muissa maissa**

Seppo Vuori & Kari Rasilainen



ISBN 978-951-38-7544-2 (nid.)  
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7545-9 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2009

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

Toimitus Maini Manninen  
Kannen kuva-aineiston lähde Posiva Oy

Edita Prima Oy, Helsinki 2009

Seppo Vuori ja Kari Rasilainen. Katsaus ydinjätehuollon tilanteeseen Suomessa ja muissa maissa [Review of status of plans and implementation of nuclear waste management in Finland and other countries]. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2515. 59 s.

**Avainsanat** nuclear waste, spent nuclear fuel, nuclear waste management, final disposal, safety, costs

## Tiivistelmä

Valtioneuvoston käsiteltävänä on kaikkiaan viisi ydinlaitoksen rakentamista koskevaa periaatepäätöshakemusta. Kolme niistä koskee uusien ydinvoimalaitosyksiköiden rakentamista. Niitä koskevat hakemukset ovat jättäneet Fennovoima Oy, Fortum Oyj ja Fortum Power and Heat Oy sekä Teollisuuden Voima Oyj. Lisäksi Posiva Oy on jättänyt kaksi periaatepäätöshakemusta. Ne liittyvät Olkiluodon käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen laajentamiseen kattamaan myös Posivan omistajien mahdollisista uusista ydinvoimalaitosyksiköistä kertyvän käytetyn ydinpolttoaineen.

Ydinenergia-asetus edellyttää, että periaatepäätöksen ratkaisemista varten työ- ja elinkeinoministeriön on toimitettava valtioneuvostolle erityinen katsaus käytössä oleviin ja suunniteltuihin ydinjätehuollon menetelmiin, niiden turvallisuuteen, ympäristövaikutuksiin, taloudellisuuteen ja soveltuvuuteen Suomen oloihin. Tähän raporttiin sisältyvä katsaus on laadittu erityisesti tätä tarkoitusta varten, mutta katsauksella katsotaan olevan myös laajempaa käyttöä kuvaamaan ydinjätehuollon ajankohtaista tilannetta Suomessa ja muissa maissa.

Suomessa on ydinjätehuollon yleiset tavoitteet ja tavoiteaikataulu vahvistettu jo vuonna 1983 valtioneuvoston periaatepäätöksellä. Matala- ja keskiaktiivisen eli ns. voimalaitosjätteen loppusijoituslaitokset ovat olleet käytössä Olkiluodossa vuodesta 1992 ja Loviisassa vuodesta 1998 lähtien. Uusien suunniteltujen reaktoriyksiköiden voimalaitosjätteiden käsittely, varastointi ja loppusijoitus on suunniteltu toteutettavaksi samankaltaisiin menetelmiin perustuen. Sekä Teollisuuden Voima Oyj että Fortum Power and Heat Oy ovat lisäksi laatineet varsin perusteelliset suunnitelmat nykyisin käytössä olevien ydinvoimalaitosyksiköiden käytöstä poistamisesta sekä purkujätteiden loppusijoittamisesta.

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitosta koskien valtioneuvosto teki vuonna 2000 ydinenergiain mukaisen periaatepäätöksen laitoksen sijoittamisesta Eurajoen Olkiluotoon, ja eduskunta vahvisti päätöksen toukokuussa 2001. Myöhemmin, toukokuussa 2002, eduskunta hyväksyi toisen periaatepäätöksen, jonka mukaisesti myös viidennen ydinvoimalaitosyksikön käytetty polttoaine voidaan loppusijoittaa Olkiluotoon. Suunnitelmien mukaan loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemus jätetään valtioneuvoston käsiteltäväksi vuonna 2012. Laitoksen käyttö on tarkoitus aloittaa vuonna 2020.

Voimalaitosten käytöstä aiheutuvien keski- ja matala-aktiivisten voimalaitosjätteiden loppusijoitukseen on ollut jo pitkään käytössä loppusijoituslaitoksia useissa eri maissa. Sen sijaan korkea-aktiivisen jätteen tai käytetyn polttoaineen loppusijoitukseen ei ole vielä käytössä loppusijoituslaitoksia missään maassa. Tällä hetkellä konkreettisimmat suunnitelmat näiden jätteiden loppusijoituksen aloittamiselle jo 2020-luvun alkupuoliskolla ovat Suomessa, Ruotsissa ja Ranskassa. Myös Saksassa käytetyn polttoaineen loppusijoitushanke on etenemässä, kun hallituksen suunnitelmien mukaan tarkentavia tutkimuksia tullaan jatkamaan Gorlebenissä. Yhdysvalloissa on ollut käytössä vuodesta 1999 syvälle suolamuodostelmaan rakennettu maailman ensimmäinen pitkäikäisille matala- ja keskiaktiivisille transuraanipitoisille ydinjätteille tarkoitettu loppusijoituslaitos.

Seppo Vuori ja & Kari Rasilainen. Katsaus ydinjätehuollon tilanteeseen Suomessa ja muissa maissa [Review of status of plans and implementation of nuclear waste management in Finland and other countries]. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2515. 59 p.

**Keywords** nuclear waste, spent nuclear fuel, nuclear waste management, final disposal, safety, costs

## Abstract

The Finnish Government is presently handling five applications for Decision in Principle (DiP) for building nuclear facilities. Three of the applications are dealing with proposals to build new nuclear power plant units. These applications have been submitted by three nuclear power utilities Fennovoima Oy, Fortum Oyj and Fortum Power and Heat Oy as well as Teollisuuden Voima Oyj (TVO). In addition, Posiva Oy has submitted two applications concerning the expansion of the capacity of the encapsulation and final disposal facility for spent nuclear fuel at Olkiluoto to cover also the spent fuel quantities arising from the proposed new reactor units of the owners of Posiva, i.e. TVO and Fortum.

The Nuclear Energy Decree requires that for the DiP, the Ministry of Employment and the Economy shall submit to the Government a special review of the methods of nuclear waste management that are currently applied and planned, their safety, environmental effects, costs and applicability to Finnish conditions. The review contained in this report has been prepared especially for this purpose, but it is anticipated that this review can provide useful background information also to a broader audience regarding the status of nuclear waste management in Finland and other countries.

In Finland the general objectives and the overall schedule of the national nuclear waste management programme have been defined already in 1983 as the policy decision of the Government. The repositories for disposal of low- and medium-level operational wastes have been in operation in Olkiluoto since 1992 and in Loviisa since 1998. The treatment, storage and disposal of the operational wastes from the possible new reactor unit(s) are proposed to be performed employing similar methods. The operators of the existing reactors have prepared rather detailed plans for the decommissioning and dismantling of the reactor units including plans for final disposal of the decommissioning wastes.

The previous DiP on the construction of the repository for final disposal of spent nuclear fuel was made by the Government in 2000 and ratified by the Parliament in 2001. The Parliament approved in 2002 a further DiP to expand the capacity of the facility to cover also the spent fuel arising from the fifth reactor unit in Finland. According to the presents plans the application for construction licence for this facility will be submitted to the Government in 2012. It is expected that the disposal facility can start operation in 2020.

Repositories for operational wastes have been operated for a long time in several countries, but no repositories are so far in operation for disposing of high-level waste or spent fuel in any country. The most concrete plans to start operation of repositories for these type of wastes already in early 2020's are in Finland, Sweden (2023) and France (2025). The plans are also progressing in Germany after the decision to restart detailed studies at Gorleben. The deep geological disposal facility Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in New Mexico in USA for intermediate level transuranic wastes has been operating successfully since 1999.

## Alkusanat

Valtioneuvoston käsiteltävänä on vuosina 2008–2010 kaikkiaan viisi ydinlaitoksen rakentamista koskevaa periaatepäätöshakemusta. Kolme niistä koskee uusien ydinvoimalaitosyksiköiden rakentamista. Lisäksi käsiteltävänä on kaksi periaatepäätöshakemusta liittyen Olkiluodon käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen laajentamiseen kattamaan Olkiluotoon ja Loviisaan mahdollisesti rakennettavista uusista reaktoriyksiköistä kertyvän käytetyn ydinpolttoaineen kapseloinnista ja loppusijoituksesta aiheutuvan kapasiteetin laajentamistarpeen.

Ydinenergia-asetuksen 26 §:n mukaisesti työ- ja elinkeinoministeriön on toimitettava periaatepäätöksen ratkaisemista varten valtioneuvostolle erityinen katsaus käytössä oleviin ja suunniteltuihin ydinjätehuollon menetelmiin, niiden turvallisuuteen, ympäristövaikutuksiin, taloudellisuuteen ja soveltuvuuteen Suomen oloihin.

Työ- ja elinkeinoministeriö on tilannut VTT:ltä tämän katsauksen laadinnan. Raportissa kuvataan ydinjätehuollon ajankohtaista tilannetta sekä Suomessa että muissa maissa. Tämän raportin laadintaan ovat VTT:ltä osallistuneet johtava tutkija Seppo Vuori ja erikoistutkija Kari Rasilainen. Työ- ja elinkeinoministeriön yhteyshenkilönä tässä hankkeessa on toiminut neuvotteleva virkamies Jaana Avolahti ja hänen lisäkseen katsauksen luonnosversioihin on antanut hyödyllisiä kommentteja ja palautetta teollisuusneuvos Riku Huttunen. Tekijät kiittävät heitä arvokkaasta tuesta katsauksen viimeistelyssä.

Espoossa 26.11.2009

Tekijät

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	3
Abstract .....	4
Alkusanat .....	5
1 Johdanto .....	9
2 Käytetyn ydinpolttoaineen huolto .....	11
2.1 Perusvaihtoehdot käytetyn ydinpolttoaineen huollossa .....	13
2.1.1 Suora loppusijoitus .....	14
2.1.2 Jälleenkäsittely .....	15
Jälleenkäsittelyprosessi .....	16
Jälleenkäsittelyvaihtoehto ydinjätehuollon osana .....	17
2.1.3 Tehostettu jälleenkäsittely ja transmutaatio .....	18
2.1.4 Valvottu pitkäaikaisvarastointi .....	19
Pitkäaikainen välivarastointi vesialtaissa .....	19
Pitkäaikainen kuivavarastointi .....	19
2.1.5 Loppusijoituksen palautettavuus .....	20
2.1.6 Käytetyn ydinpolttoaineen huollon vaihtoehtoisten ratkaisujen vertailu .....	21
2.2 Käytetyn ydinpolttoaineen huollon vaiheiden ympäristövaikutukset .....	22
2.2.1 Yleistä .....	22
2.2.2 Säteilyvaikutukset .....	22
Välivarastointi .....	23
Jälleenkäsittely .....	23
Käytetyn polttoaineen kapselointi .....	23
Radioaktiivisten aineiden kuljetukset .....	24
Loppusijoitus kallioperään .....	24
Kokonaissäteilyvaikutukset ydinjätehuollon eri vaihtoehdoissa .....	25
2.3 Yleiskatsaus käytetyn ydinpolttoaineen huollon tilanteeseen eri maissa .....	27
2.4 Yhteenveto tärkeimpien ydinvoimaa käyttävien valtioiden käytetyn ydinpolttoaineen huollon tilanteesta .....	30
2.4.1 Belgia .....	30
2.4.2 Bulgaria .....	31
2.4.3 Espanja .....	31



2.4.4	Iso-Britannia.....	32
2.4.5	Japani .....	33
2.4.6	Kanada .....	34
2.4.7	Kiina.....	35
2.4.8	Ranska.....	35
2.4.9	Ruotsi.....	37
2.4.10	Saksa.....	38
2.4.11	Sveitsi .....	40
2.4.12	Venäjä.....	41
2.4.13	Yhdysvallat .....	42
3	Voimalaitosjätteiden huolto.....	44
3.1	Suomen ydinvoimalaitoksilla käytössä olevat voimalaitosjätteiden huollon järjestelmät.....	44
3.1.1	Voimalaitosjätteiden käsittely .....	44
3.1.2	Voimalaitosjätteiden loppusijoitus .....	45
3.2	Yleiskatsaus voimalaitosjätteiden loppusijoituksen tilanteeseen eri maissa .....	46
4	Ydinvoimalaitosten käytöstä poisto ja purkujätteiden huolto .....	48
5	Ydinjätehuollon kustannuksiin varautuminen.....	49
6	Ydinjätehuollon kansainvälinen yhteistyö .....	51
6.1	Kansainvälinen atomienergiajärjestö (IAEA).....	51
6.2	OECD:n ydinenergiajärjestö (NEA) .....	52
6.3	EU:n tutkimusyhteistyö .....	53
7	Yhteenveto.....	54
	Lähdeluettelo.....	56



# 1 Johdanto

Valtioneuvoston käsiteltävänä on vuonna 2009 kaikkiaan viisi ydinlaitoksen rakentamista koskevaa periaatepäätöshakemusta. Kolme niistä koskee uusien ydinvoimalaitosyksiköiden rakentamista. Hakemuksia ovat jättäneet seuraavat yhtiöt: (1) Teollisuuden Voima Oyj Olkiluoto 4 -laitosyksikön rakentamiseksi, (2) Fortum Oyj ja Fortum Power and Heat Oy Loviisa 3 -laitosyksikön rakentamiseksi sekä (3) Fennovoima Oy yhden tai kahden reaktoriyksikön rakentamiseksi jollekin kolmesta vaihtoehdoisesta sijoituspaikasta. Lisäksi Posiva Oy on jättänyt kaksi aiemman periaatepäätöksen laajentamista koskevaa hakemusta. Ne liittyvät Olkiluodon käytetyn ydinpolttoaineen kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen laajentamiseen kattamaan myös Posivan omistajien mahdollisista uusista ydinvoimalaitosyksiköistä (Olkiluoto 4 ja Loviisa 3) kertyvän käytetyn ydinpolttoaineen kapseloinnista ja loppusijoituksesta aiheutuvan kapasiteetin laajentamistarpeen.

Matala- ja keskiaktiivisen eli ns. voimalaitosjätteen loppusijoituslaitokset ovat olleet käytössä Olkiluodossa vuodesta 1992 ja Loviisassa vuodesta 1998 lähtien. Fennovoiman periaatteellisessa ydinjätehuoltosuunnitelmassa voimalaitosjätteiden käsittely, varastointi ja loppusijoitus on suunniteltu toteutettavaksi samankaltaisiin menetelmiin perustuen. Sekä Teollisuuden Voima Oyj että Fortum Power and Heat Oy ovat lisäksi laatineet varsin perusteelliset suunnitelmat nykyisin käytössä olevien ydinvoimalaitosyksiköiden käytöstä poistamisesta sekä purkujätteiden loppusijoittamisesta. Näitä suunnitelmia on tarkennettu viiden vuoden välein ja viimeisimmät päivitykset toimitettiin työ- ja elinkeinoministeriölle joulukuussa 2008. Purkujätteiden loppusijoitusta varten nykyisin käytössä olevia voimalaitosjätteiden loppusijoituslaitoksia Olkiluodossa ja Loviisassa on suunniteltu laajennettavaksi.

Ydinenergian käytön seurauksena syntyvän ydinjätteen huollosta ja sen kustannuksista vastaavat kokonaisuudessaan ”ydinjätteen tuottajat”. Kustannuksiin sisältyy myös laitosten käytöstä poisto ja purkujätteiden loppusijoitus. Ydinvoimalla tuotetun sähkön hintaan sisältyy siten myös ydinjätehuollon kustannukset. Aiheuttamisperiaatteen toteutumisen varmistamiseksi työ- ja elinkeinoministeriön alaisuudessa toimii Valtion ydinjätehuoltorahasto. Sinne kerätään ydinjätteen tuottajilta vuosittain varoja niin, että ydinjätehuoltoon tulevaisuudessa tarvittavat toimenpiteet voidaan varmuudella hoitaa kaikissa olosuhteissa.

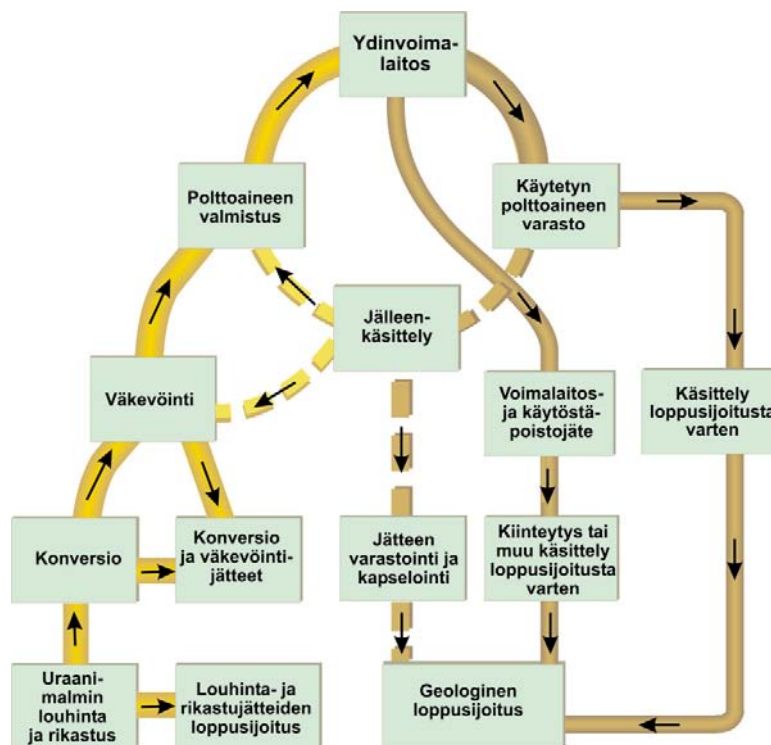
Ydinenergia-asetuksen 26 §:n mukaisesti työ- ja elinkeinoministeriön on toimitettava periaatepäätöksen ratkaisemista varten valtioneuvostolle erityinen katsaus käytössä oleviin ja suunniteltuihin ydinjätehuollon menetelmiin, niiden turvallisuuteen, ympäristövaikutuksiin, taloudellisuuteen ja soveltuvuuteen Suomen oloihin.

## 1. Johdanto

Tässä yleisluontoisessa ydinjätehuoltokatsauksessa tarkastellaan sekä käytetyn ydinpolttoaineen että voimalaitosten käytöstä aiheutuvien matala- ja keskiaktiivisten jätteiden huollon ratkaisumalleja Suomessa ja eräissä muissa maissa kiinnittäen huomiota edellä mainittuihin arviointitekijöihin. Katsauksessa tarkastellaan suppeasti myös koko polttoainekiertoa. Tarkastelu sisältää uranikaivos- ja malminrikastusjätteiden huollon aiheuttamien säteilyvaikutusten arvioinnin.

## 2 Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

Ydinpolttoainekierto (OECD 2000) voi perustua suoraan loppusijoitukseen (kallioperästä kallioperään) tai jälleenkäsittelyvaihtoehtoon, jolloin polttoaineen reaktorissa käytön jälkeen siitä erotellaan vielä ydinteknisesti hyödynnettävissä oleva materiaali uudelleenkäyttöä varten (Kuva 1). Suomessa toteutettavaksi suunniteltu polttoainekiertoratkaisu perustuu ydinenergialain mukaisesti käytetyn polttoaineen suoraan loppusijoitukseen.



Kuva 1. Ydinpolttoainekierron vaihtoehdot. Suomessa valittu ratkaisu perustuu käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitukseen ilman jälleenkäsittelyä. Muutamissa maissa käytetään vaihtoehtoisia ratkaisuja, jossa polttoaine jälleenkäsitetään ja erotettu uraani ja plutonium palautetaan kiertoon [Vuori ym. 2002].

Suora loppusijoitus on ns. avoimen ydinpolttoainekierron viimeisin vaihe, jota edeltävät uraanin louhinta ja malminrikastus, uraanin väkevöinti U-235-isotoopin suhteen sekä polttoaineen valmistus ja sen lataaminen reaktoriin kolmeksi–viideksi vuodeksi. Reaktorista poiston jälkeen käytettyä ydinpol-

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

toainetta varastoidaan useita vuosikymmeniä, minkä jälkeen se toimitetaan kapseloitavaksi loppusijoitusta varten. Avoimen kierron vaihtoehto on suljettu polttoainekierto. Siinä käytetty polttoaine jälleenkäsitellään muutaman vuoden varastoinnin jälkeen. Tällöin uraani ja plutonium erotetaan erilleen käytettäväksi uudelleen ydinreaktoreiden energianlähteenä välittömästi tai myöhemmin sopivaksi katsottuna ajankohtana. Uraani toimitetaan tarvittaessa uudelleen väkevöitäväksi tai siitä valmistetaan sellaisenaan plutoniumiin sekoitettuna polttoainetta tavallisissa kevytvesireaktoreissa käytettäväksi. Kuitenkaan pelkästään kevytvesireaktoreissa kaikkea jälleenkäsittelyssä erotettua uraania ei voida kokonaan hyödyntää. Tällöin on otettava huomioon, että uraanin ja plutoniumin seoksesta polttoainetta valmistettaessa voidaan periaatteessa käyttää hyväksi myös uraanin isotooppiväkevöinnissä kertyvää köyhtynyttä uraania. Vaihtoehtoisesti jälleenkäsittelyssä erotettua uraania ja plutoniumia voitaisiin kierrättää käytettäväksi nopean hyötöreaktorin polttoaineena, jolloin alun perin louhittu uraani tulisi lopulta vielä huomattavasti tehokkaammin käytetyksi verrattuna käyttöön tavallisissa reaktoreissa. Tällä hetkellä nopeilla reaktoreilla ei kuitenkaan ole käytännössä kaupallista merkitystä. Vasta kauempana tulevaisuudessa plutoniumin ja uraanin kierrätykselle hyötöreaktoreissa voi syntyä merkittävämpää tarvetta.

Suljetussa kierrossa ydinjätteeksi jää uraanista ja plutoniumista neutronisäteilytyksen seurauksena syntyvät muut raskaat alkuaineet, ns. sivuaktinidit, aktinidien radioaktiivisissa hajoamisissa syntyvät tytärnuklidit sekä fissio- eli halkeamistuotteet, jotka ovat sekoittuneina jälleenkäsittelyprosessissa käytettäviin kemiallisiin yhdisteisiin, yleensä liuoksiin. Tämä jäte pitää loppusijoittamista varten kiinteyttää ja sitoa sopivaan, hyvin stabiiliin materiaaliin. Lopputuloksena syntyvä korkea-aktiivinen massa suunnitellaan kapseloitavaksi ja loppusijoitettavaksi syvälle geologisiin muodostelmiin. Lisäksi käsittelyprosessissa syntyy matala- ja keskiaktiivisia jätteitä, jotka on myös loppusijoitettava asianmukaisella tavalla.

Suljettu polttoainekierto on edelleen useissa maissa valittu strategia, vaikka sen suosio on vähentynyt viime vuosina. Itse asiassa ensimmäiset kaupalliset jälleenkäsittelylaitokset valmistuivat länsimaissa vasta 1990-luvun alussa. Myös Loviisan ydinvoimalaitoksen käytetty polttoaine lähetettiin aina vuoteen 1996 saakka Neuvostoliittoon/Venäjälle jälleenkäsiteltäväksi.

Ydinvoimalaitoksessa energiantuotanto perustuu reaktoriin ladatun ydinpolttoaineen sisältämän uraanin halkeamisessa vapautuvaan energiaan. Suomessa nykyisin käytössä olevissa kevytvesireaktoreissa hyödynnetään halkeamisreaktioissa pelkästään isotooppia U-235. Uraanin toisesta luonnossa esiintyvistä isotoopista U-238 muodostuu reaktorissa plutoniumia. Kun polttoaine muutaman vuoden käytön jälkeen poistetaan reaktorista, se on erittäin radioaktiivista ja sen lämmöntuotto on korkea. Käytetyn polttoaineen sisältämiä radioaktiivisia aineita ei voida nykyisin tuhota tavanomaisin keinoin, joten käytetyn ydinpolttoaineen huolto perustuu sen luotettavaan, pitkäaikaiseen eristämiseen elollisesta ympäristöstä. Radioaktiiviset aineet hajoavat itsestään erilaisten luonnollisten ydinfysikaalisten hajoamisreaktioiden kautta. Osa käytetyn polttoaineen sisältämisistä radioaktiivisista aineista on kuitenkin niin pitkäikäisiä, että eristäminen tulee suunnitella kestämään hyvin pitkiä ajanjaksoja. Periaatteessa radioaktiivisia aineita voidaan myös tuhota ydinreaktioissa, mutta laajamittainen ja täydellinen hävittäminen ei ole mahdollista nykyisin käytössä olevalla tekniikalla.

Voimalaitosten käytäntö on, että reaktorista käytetty ydinpolttoaine siirretään aluksi laitoksella oleviin jäähdytysaltaisiin. Altaiden vesi toimii sekä jäähdytteenä että säteilysuojauksena. Altaissa polttoainepipit viipyvät yhdestä kymmeneen vuotta, jona aikana niiden sisältämien radioaktiivisten aineiden määrä ja lämmöntuotto alenevat luonnollisen radioaktiivisen hajoamisen seurauksena merkittävästi ja nippujen jatkokäsittely helpottuu tältä osin.

Seuraava huoltovaihe on yleensä välivarastointi, jonka aikana aktiivisuus edelleen alenee. Esim. Olkiluodossa ja Loviisassa käytetty ydinpolttoaine pidetään välivarastoissa nykyisten suunnitelmien mukaisesti 15–40 vuotta. Kyseiset varastot ovat ns. märkävarastoja, joissa polttoaine edelleen säilytetään vesialtaissa. Myös näistä poikkeavia, ns. kuivavarastoja on kehitetty ja käytössä ulkomaisilla ydinvoimalaitoksilla.

Käytetty ydinpolttoaine voidaan periaatteessa nähdä joko sellaisenaan jätteenä tai osittain kierrätyskelpoisena materiaalina, koska se edelleen sisältää ydinenergian tuotannossa käyttökelpoista uraania (U-238) ja reaktorissa syntyneitä plutoniumia ja muita uraania raskaampia aineita (aktinideja). Käytettyä ydinpolttoainetta kierrätettäessä se joudutaan ensin jälleenkäsittämään. Tällöin erotetaan vielä käyttökelpoiset aineet (uraani ja plutonium) jatkokäyttöä varten ja valtaosa polttoaineen sisältämistä radioaktiivisista halkeamistuotteista jää syntyvään korkea-aktiiviseen jälleenkäsittelyjätteeseen, joka on hyvin radioaktiivista ja siitä on huolehdittava sen mukaisesti. Jälleenkäsittelyn yhteydessä syntyy myös muita loppusijoitusta edellyttäviä keski- ja matala-aktiivisia jätevirtoja. Korkea-aktiivisesta jätteestä voidaan edelleen erottaa muita hyödyntämiskelpoisia aineita, mutta kaikesta huolimatta kaikkia aineita ei voida ydinreaktioilla kokonaan hävittää. Jälleenkäsittelyvaihtoehto ja siitä edelleen kehitetyt uudet ratkaisut eivät näin ollen poista loppusijoitustarvetta.

### 2.1 Perusvaihtoehdot käytetyn ydinpolttoaineen huollossa

Käytetyn ydinpolttoaineen huollon alkuvaiheen osalta voidaan valita kolmen vaihtoehdoisen strategian välillä:

1. Avoin polttoainekierto, jossa käytetty ydinpolttoaine sijoitetaan asianmukaisesti kapseloituna syväälle kallioperään lyhyehkön muutaman kymmenen vuotta kestävä välivarastoinnin jälkeen. Tätä kutsutaan myös suoraksi loppusijoittamiseksi. Useiden maiden turvallisuusvaatimuksissa edellytetään käytettäväksi sellaista menetelmää, jossa ydinpolttoaine voidaan haluttaessa palauttaa maan pinnalle jatkokäsiteltäväksi.
2. Suljettu polttoainekierto, jossa käytetty ydinpolttoaine jälleenkäsittellään muutaman vuoden välivarastoinnin jälkeen esimerkiksi erottamalla polttoaineeksi kelpaavat uraani ja plutonium muista aineista. Uraania ja plutoniumia voidaan käyttää polttoaineen valmistukseen. Uraanin halkeamisreaktioissa syntyneet voimakkaasti radioaktiiviset halkeamistuotteet ja muut aktinidit kuin uraani ja plutonium voidaan joko loppusijoittaa kiinteytettynä jälleenkäsittelyjätteenä tai myöhemmin muuttaa jatkokäsittelemällä (transmutoimalla) vähemmän vaaralliseen muotoon, mikäli tähän soveltuva tekniikka on tuolloin käytettävissä.
3. Hyvin pitkäaikainen välivarastointi, jossa käytettyä ydinpolttoainetta varastoidaan sellaisenaan määräämättömän pitkän ajan joko maan pinnalle tai matalalle maankamaran sisään rakennettavissa välivarastoissa. Kyseessä on tällöin kuitenkin vain väliaikaisratkaisu ja täten päätös jatkokäsittelystä tai suorasta loppusijoituksesta on välttämätöntä tehdä joskus tulevaisuudessa.

Suoralle loppusijoittamiselle on nähtävissä mm. eettisiä perusteita: ydinvoimasta hyötyvät sukupolvet huolehtivat lopullisesti myös syntyneistä jätteistä eivätkä siirrä vastuun taakkaa tulevaisuuteen. Lisäksi maan päällä sijaitsevissa laitoksissa pitkäaikaisesti varastoidun käytetyn ydinpolttoaineen voidaan olettaa olevan riski esim. yhteiskunnallisesti epävakaisissa oloissa ja myös altis tahallisesti aiheutetuille onnettomuuksille.

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

Jälleenkäsittelyllä voidaan vähentää polttoaineeksi louhittavan uraanin määrää jonkin verran (luokkaa 10 %) sekä myös loppusijoitettavan korkea-aktiivisen jätteen määrää. Jälleenkäsittely yhdistettynä vielä kehittyasteella olevaan pitkäikäisten radioaktiivisten aineiden transmutointiin voisi lyhentää aikaa, jonka kuluessa jätteet olisivat eliökunnalle ja ihmisille vaarallisia, mikäli kyseiset aineet joutuisivat niiden elinympäristöön.

Edellä mainittujen merkittävien haittojen vastapainona välivarastoinnin pitkittämisen etuna on pidetty sitä, että tällöin jäisi aikaa seurata, tuottaako ydinvoimatekniikan kehittyminen sellaisia keinoja, joilla voidaan vähentää loppusijoitettavien aineiden määriä ja niiden vaarallisuutta, esimerkiksi transmutaatio. Lisäksi siinä tapauksessa, että loppusijoitus toteutettaisiin myöhemmin, saataisiin lisäaikaa loppusijoitustekniikkaan sisältyvien epävarmuuksien vähentämiseen. Välivarastoinnin pitkäaikainen jatkaminen myös alentaa polttoaineen aktiivisuutta ja lämmöntuottoa, mikä jossain määrin voisi pienentää loppusijoitustilan tarvitsemaa kalliutilavuutta.

Teoreettisina vaihtoehtoina korkea-aktiivisten jätteiden tai käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitukselle esitettiin ydinvoimatekniikan kehityksen alkuvaiheessa ja myöhemminkin monia tapoja, esim. avaruuteen lähettämistä, napajäätiköihin tai valtameren pohjasedimentteihin hautaamista. Näitä vaihtoehtoja on myös tutkittu ja selvitetty, mutta niiden soveltamiseen käytännössä liittyy huomattavia teknisiä ja/tai oikeudellisia ongelmia [CoRWM 2006].

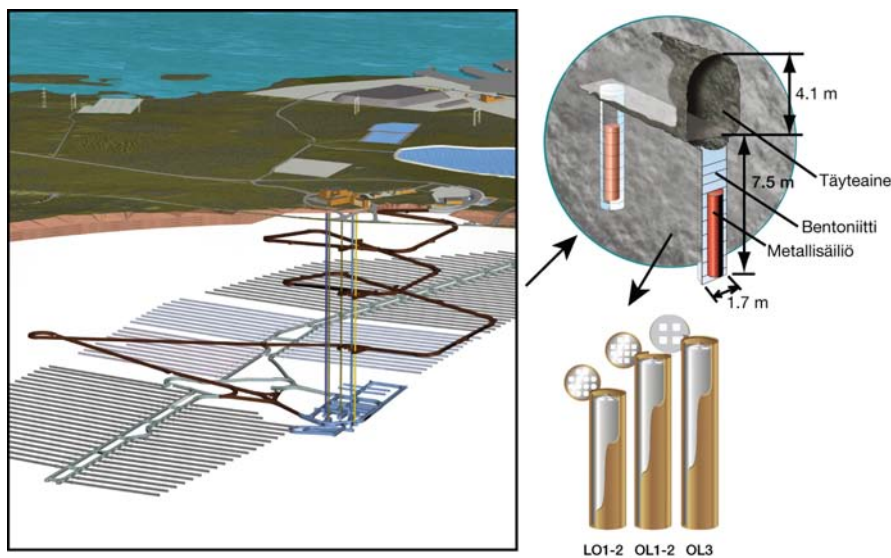
### 2.1.1 Suora loppusijoitus

Avoimessa polttoainekierrossa käytetty ydinpolttoaine loppusijoitetaan syvälle kallioperään, kuten kiteiseen kallioperään tai savikivi- tai suolakivimuodostumiin. Loppusijoituksen turvallisuus perustuu ehdotetuissa teknisissä ratkaisuisa moninkertaisten vapautumisesteiden käyttämiseen, joiden avulla varmistetaan, että ydinjätettä ei pääse haitallisessa määrin elolliseen luontoon tai ihmisten ulottuville. Tällä hetkellä vallitsee yleinen käsitys [OECD 2008, OECD 1999], että tutkituista loppusijoitusvaihtoehdoista syvälle kallioperään tapahtuva loppusijoitus eli geologinen loppusijoitus tarjoaa teknisesti parhaat ja realistisimmat mahdollisuudet eristää korkea-aktiiviset ydinjätteet riittävän pitkäaikaisesti elinympäristöstä.

Suomessa ja Ruotsissa esitetyssä loppusijoituksen perusmallissa (Kuva 2) käytetty ydinpolttoaine pakataan kapselointilaitoksessa loppusijoituskapseleihin, joiden sisäosa on pallografiittirautaa ja ulko-kuori kuparia. Valurautainen sisus tekee kapselin riittävän vahvaksi kestämään kallioperässä vallitsevat mekaaniset rasitukset. Hyvin korroosiota kestävä kupari suojaa säiliötä pohjaveden syövyttävältä vaikutukselta. Kupari-valurautakapselit on tarkoitus sijoittaa noin 400 metrin syvyydessä Olkiluodon kallioperässä sijaitseviin loppusijoitustiloihin. Jokaiseen kapseliin sijoitettaisiin 12 polttoaineenippua Suomessa nykyisin käytössä olevien reaktorien (Lo 1& 2 ja OL 1&2) käytettyä ydinpolttoainetta tai neljä kappaletta Olkiluoto 3:n EPR-polttoaineenippuja. Kapselit ympäröidään bentoniittisavella, jonka tehtävänä on muun muassa vähentää virtaavan pohjaveden pääsyä kosketuksiin kapseleiden kanssa. Lisäksi bentoniitti suojaa kapselia kallion mahdollisilta liikkahduksilta. Kallioperä tarjoaa kapselille ja bentoniitille olosuhteet, jossa muutokset ovat hitaita ja ennustettavia. Viimeisten kapselien tultua loppusijoitetuksi kaikki tunnelit täytetään savilohkoilla ja -pelleteillä ja alas johtavat kuilut suljetaan. Näin estetään tunnelien ja kuilujen muuttuminen keskeisiksi pohjaveden virtausreiteiksi sekä säilytetään tunnelien mekaaninen vakaus. Sulkemisen jälkeen alue ei vaadi erillistä valvontaa. Kun laitos on suljettu ja maanpäälliset rakennelmat purettu aluetta voidaan käyttää muihin tarkoituksiin.



Geologisessa loppusijoituksessa polttoainekapseleita ympäröi kalliomassa, joka vaimentaa täydellisesti kaiken suoran säteilyn maan pinnalle. Useiden satojen metrien loppusijoitussyvyys myös suojaa käytettyä ydinpolttoainetta jääkausien kallioperää kuluttavalta vaikutukselta. Kallioperän raossa ja halkeamissa virtaava pohjavesi tarjoaa ainoan kulkuväylän käytetyn ydinpolttoaineen sisältämille radioaktiivisille aineille päästä kosketuksiin ihmisten ja muun elävän luonnon kanssa. Loppusijoitukseen suunnitellussa moniestejärjestelmässä (mm. polttoaineen kapselointi ja loppusijoitustilojen bentoniittitäyte) on teknisten vapautumisesteiden päämääränä rajoittaa pohjaveden pääsyä kosketuksiin käytetyn ydinpolttoaineen kanssa. Moniestejärjestelmän peräkkäiset vapautumisesteet toimivat eri fysikaalis-kemiallisilla periaatteilla. Loppusijoitustilan moniestejärjestelmän suunnittelussa tavoitteena on, että minkään yksittäisen vapautumisesteen pettäminen ei olennaisesti alentaisi koko järjestelmän toimintakykyä.



Kuva 2. Kaaviokuva käytetyn polttoaineen loppusijoitustunnelista ja teknisistä vapautumisesteistä. Loppusijoitustilat sijaitsevat noin 400 metrin syvyydessä maanpinnasta. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituskapseli on kaksikerroksinen kupari-valurautakonstruktio. Kapselin ulkohalkaisija on noin yksi metri. Loviisan kapselin pituus on 3,6 metriä. Olkiluodon nykyisille polttoaine-elementeille suunnitellun kapselin pituus on 4,6 metriä. Uuden reaktoriyksikön, Olkiluoto 3:n, kapselin pituus on 5,2 metriä [VTT 2009].

Edellä kuvatun perusmallin rinnalla on Ruotsissa ja Suomessa selvitetty pitkiin vaakasuoriin reikiin tapahtuvaa geologista loppusijoitusta. Teknisen toteutettavuuden kannalta tätä vaihtoehtoista menetelmää ei ole selvitetty yhtä perusteellisesti kuin perusmallia. Aiemmassa suunnitteluvaiheessa on esitetty myös syviin pystyreikiin perustuvaa loppusijoitusratkaisua. Loppusijoitustilaan sijoitettujen jätteiden mahdollinen palautettavuus eli niiden poistaminen sijoitustiloista mahdollista jatkokäsittelyä varten on vaakavaihtoehdossa hankalampi toteuttaa.

### 2.1.2 Jälleenkäsittely

Suljetussa polttoainekierrossa käytetty polttoaine jälleenkäsittellään ja polttoaineeksi kelpaavat uraani ja plutonium hyödynnetään edelleen. Käsittelyprosessista jää jäljelle voimakkaasti radioaktiivista jälleenkäsittelyjätettä, joka on loppusijoitettava. Kuitenkin vain osa jälleenkäsittelyssä erotetusta plu-

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

toniumista ja uraanista voidaan käytännössä hyödyntää polttoaineen valmistukseen käytettäväksi nykyisen tyyppisissä kevytvesireaktoreissa.

### Jälleenkäsittelyprosessi

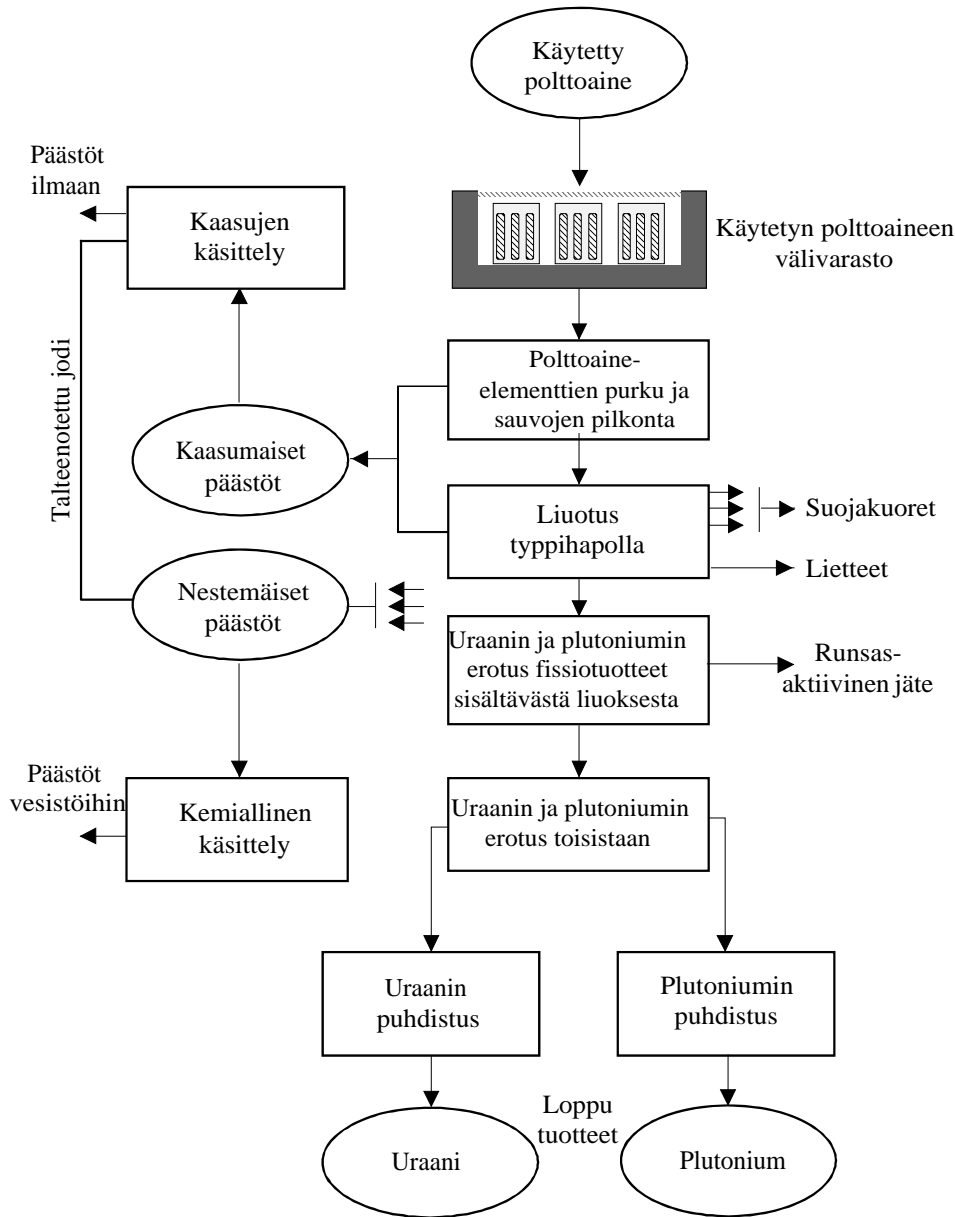
Maailmassa on yli 30 maalla energiantuotantoon käytettäviä reaktoreita. Näistä maista yli puolella on tai on ollut suoria tai epäsuoria kytkentöjä käytetyn ydinpolttoaineen kaupalliseen jälleenkäsittelyyn. Ei-sotilaalliseen käyttöön suunniteltuja jälleenkäsittelylaitoksia on Ranskalla, Isolla-Britannialla, Venäjällä, Japanilla ja Intialla. Myös Kiina on rakentamassa jälleenkäsittelylaitosta. Lisäksi esimerkiksi Saksalla on kokemusta jälleenkäsittelyn koelaitoksesta ja sen oli alun perin tarkoitus rakentaa oma jälleenkäsittelylaitos, sillä aiemmin Saksassa ydinjätehuollon perusratkaisu pohjautui jälleenkäsittelyyn.

Ensimmäiset eurooppalaiset jälleenkäsittelylaitokset oli tarkoitettu käsittelemään kaasujäähdytysten luonnonuraanireaktorien (Magnarox) uranimetallista valmistettua polttoainetta. Myöhemmin on rakennettu ja otettu käyttöön oksidipolttoainetta jälleenkäsitteleviä laitoksia sekä Ranskassa (la Hague) että Isossa-Britanniassa (Sellafield).

Jälleenkäsittelyn yhteydessä käytetystä ydinpolttoaineesta erotetaan ensimmäisessä vaiheessa käytökelpoinen uraani ja plutonium jatkokäyttöä varten. Ensimmäisen erotusvaiheen jälkeen ne erotetaan edelleen toisistaan erillisiin liuoksiin puhdistettaviksi ja jatkokäsiteltäviksi sen mukaan, millaisessa valmistusprosessissa niitä on tarkoitus käyttää uuden ydinpolttoaineen valmistuksessa.

Kuvassa 3 esitetään yksinkertaistettu kaavio jälleenkäsittelyyn liittyvistä osavaiheista. Kaikki tällä hetkellä käytössä olevat tai suunnitellut laitokset käyttävät niin sanottua PUREX-prosessia. Se perustuu mekaanisesti pilkottujen polttoainesauvojen liuottamiseen typpihappoon ja edelleen tuloksena syntyvän liuoksen kemialliseen jatkokäsittelyyn. Prosessin alkupäähän kuuluu käytetyn polttoaineen välivarasto ja mekaanisen alkukäsittelyn toteutus, jolloin polttoaine-elementeistä poistetaan kotelot ja muut tukirakenteet sekä polttoainesauvat pilkotaan palasiksi. Typpihappoliuotuksessa erotetaan suoja-kuoret muusta materiaalista ja seuraavassa vaiheessa plutonium ja uraani erotetaan yhdessä liuokseen jäävistä muista aktinideista ja halkeamistuotteista. Jäljelle jäävä liuos muodostaa jälleenkäsittelylaitoksen tärkeimmän erotetun jätetuotteen eli korkea-aktiivisen nestemäisen jätteen. Samanaikaisesti liuoksesta poistettu uraani ja plutonium erotetaan edelleen toisistaan erillisiin liuoksiin puhdistettavaksi ja muunneltavaksi ensin uraani- ja plutoniumnitraateiksi ja lopuksi uraani- ja plutoniumdioksideiksi. Varsinaisen erotusprosessin jälkeen korkea-aktiivisen nestemäisen jätteen alkuperäistä tilavuutta pienennetään höyrystämällä. Tiivistettyä liuosta varastoidaan erityisissä säiliöissä odottamassa kiinteytystä lasimatriisiin. Liuoksen korkea aktiivisuus aiheuttaa huomattavaa lämmöntuottoa. Tämän vuoksi varastosäiliöt on varustettu moninkertaisesti varmistetuilla ja eri periaatteilla toimivilla jäähdytysjärjestelmillä, jotta keskeytyksetön jäähdytys voidaan taata koko ajan.

Nesteenä varastointiin liittyvien turvallisuusriskien vuoksi korkea-aktiivinen nestemäinen jäte saatetaan turvallisempaan olomuotoon lasittamalla eli kuivaamalla ja sekoittamalla jäte sulaan lasimassaan, joka puolestaan valetaan terässäiliöihin. Tunnetuin kiinteytysprosessi on ranskalainen alun perin Marcoulessa kehitetty AVM-prosessi, joka on ollut teollisessa käytössä La Haguessa vuodesta 1989 lähtien ja Isossa-Britanniassa vuodesta 1990 lähtien. Japanissa on kehitetty oma muunnelma lasitusprosessista ja se on ollut teollisessa käytössä Tokain jälleenkäsittelylaitoksella.



Kuva 3. Käytetyn ydinpolttoaineen jälleenkäsittelyprosessin päävaiheet [Vuori 1996].

### Jälleenkäsittelyvaihtoehto ydinjätehuollon osana

Jälleenkäsittelyn lopputuloksena syntyy korkea-aktiivista lasitettua jätettä sekä erilaisia matala- ja keskiaktiivisia jätteitä. Lasitetun jätteen loppusijoitustarve ja loppusijoituksen turvallisuustekninen vaativuus ovat periaatteessa samat kuin avoimessa polttoainekierrossa syntyvän käytetyn ydinpolttoaineen. Myös syntyneiden matala- ja keskiaktiivisten jätteiden loppusijoituksesta on luonnollisesti huolehdittava asianmukaisesti.

Jälleenkäsittelyn myönteisinä puolina voidaan nähdä mm. uraanivarojen tehokkaampi hyödyntäminen ja loppusijoitettavan korkea-aktiivisen jätteen pienempi tilavuus. Tämä johtuu lähinnä siitä, että

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

jätteessä ei ole käytetyn polttoaineen uraania ja plutoniumia. Uraanilla ja plutoniumilla on heikko liikkuvuus syväällä kallioperässä vallitsevissa olosuhteissa, mikä tasoittaa jälleenkäsittelyvaihtoehdon etua päästöjen ja säteilyvaikutuksien osalta suoraan loppusijoitukseen verrattuna.

Toisaalta jälleenkäsittely merkitsee käytetyn ydinpolttoaineen käsittelyvaiheiden ja kuljetusten huomattavaa lisääntymistä sekä näistä aiheutuvien normaalikäytön päästöjen ja häiriö- ja onnettomuustilanteiden mahdollisuuksien lisääntymistä. Erääksi jälleenkäsittelyn ongelmaksi on nähty ydinräjähteiden valmistukseen soveltuvan plutoniumin leviämiskasvaminen.

Jälleenkäsittelyn tarkoituksenmukaisuutta voidaan tarkastella paitsi turvallisuustekniseltä myös mm. taloudelliselta kannalta. Suoraan loppusijoitukseen on päädytty etenkin sellaisissa maissa, joissa jouduttaisiin käyttämään ulkomaisia jälleenkäsittelypalveluita ja joissa ydinvoimakapasiteetti on pieni. Jälleenkäsittelypalveluita on saatavissa vain muutamista maista ja oman jälleenkäsittelyn toteuttaminen esimerkiksi vain Suomen tarpeita varten rakennetussa laitoksessa ei ole teknistaloudellisesti mielekäästä. Toisaalta Suomen ydinenergialaki kieltää kokonaan ydinvoimalaitosten käytetyn ydinpolttoaineen viennin ulkomaille, mikä nykytilanteessa estää Suomessa syntyneen käytetyn ydinpolttoaineen jälleenkäsittelyn ulkomailla.

### 2.1.3 Tehostettu jälleenkäsittely ja transmutaatio

Käytetyn ydinpolttoaineen käsittelyyn on pyritty kehittämään tekniikkaa, jolla vaarallisimmat radioaktiiviset aineet voitaisiin ydinfysikaalisesti muuntaa vähemmän vaaralliseen muotoon. Tämän ns. transmutoinnin tavoitteena on lyhentää sitä aikaväliä, jonka kuluessa kyseiset aineet voivat aiheuttaa vaaraa. Menetelmä sisältäisi useimpien esitettyjen suunnitelmien mukaan ensimmäisenä vaiheena nykyisin käytettävään jälleenkäsittelyprosessiin verrattuna tehostetun erottelun, jossa käytetystä polttoaineesta ensin erotettaisiin uraanin ja plutoniumin ohella erilleen myös eräitä pitkäikäisiä fissiotuotteita ja myös muut aktinidit. Sen jälkeen erotetut aineet muunnettaisiin ydinreaktioissa eli transmutoitaisiin toiseksi aineiksi joko tavanomaisissa reaktoreissa tai erityisissä transmutaatiolaitoksissa.

Tehokkaimmillakaan kaavailluilla tavoilla kaikkia radioaktiivisia aineita ei voida kokonaan tuhota tai siihen tarvittava ajanjakso olisi teknisesti kohtuuttoman pitkä ja näin joka tapauksessa tietty osa jätteistä tulee aikanaan loppusijoitettavaksi.

Transmutaatiohankkeet ovat vielä verrattain varhaisella kehitysasteella ja menetelmän todelliset tekniset mahdollisuudet ovat vielä osoittamatta. Periaatteellisenä vaihtoehtona transmutaatio ei kuitenkaan ole uusi ajatus, vaan sen fysikaaliset perusteet on esitetty jo kymmeniä vuosia sitten. Transmutaation ja siihen tarvittavan, nykyistä jälleenkäsittelyä tehokkaamman erotustekniikan on arvioitu tulevan selvästi kalliimmaksi kuin suora loppusijoitus.

Transmutaatio voidaan tällä hetkellä nähdä lähinnä pitkän aikavälin tutkimuskohteena, joka liittyy yleiseen ydinenergian kehittämiseen tai laajentuvaan käyttöön. Transmutaation mahdollinen teollinen soveltaminen on nykynäkemyksen mukaan vähintään vuosikymmenien päässä. Transmutaation kustannuksia ei ole voitu sen varhaisen kehitysasteen vuoksi arvioida kovinkaan tarkasti.

#### 2.1.4 Valvottu pitkäaikaisvarastointi

Väliaikaisena ratkaisuna käytetyn ydinpolttoaineen huollolle on esitetty hyvin pitkäaikaista välivarastointia. Käytetyn ydinpolttoaineen välivarastointitekniikka ei periaatteessa ole riippuvainen siitä, onko varastointi suunniteltu lyhyt- vai pitkäaikaiseksi. Jälkivalvonnan ja turvallisten toimintaolosuhteiden säilyttämisen merkitys korostuu sitä enemmän, mitä pitkäaikaisemmaksi välivarastointi on tarkoitettu. Seuraavassa on lyhyesti kuvattu nykyisiä vaihtoehtoisia välivarastointimenetelmiä.

##### Pitkäaikainen välivarastointi vesialtaissa

Käytettyä polttoainetta säilytetään nykyisin useimmiten vesiallasvarastoissa. Näin tapahtuu mm. Suomen ydinvoimalaitoksilla. Tästä niin sanotusta märkävarastoinnista on käytettävissä kokemuksia jo usealta vuosikymmeneltä. Käyttökokemukset ovat osoittaneet, että kaikki kuviteltavissa olevat, polttoainetta mahdollisesti vaurioittavat mekanismit, kuten hapettuminen, vedyttyminen, eri korroosionmuodot, galvaaniset ilmiöt tai reaktiot polttoaineen suoja-kuoren ja fissiotuotteiden välillä voidaan estää, jos varastoaltauissa ylläpidetään oikeat olosuhteet.

Vesiallasvarastojen käyttökokemusten mukaan on ennustettavissa, että varastoitavat polttoaine-elementit säilyvät vaurioitumatta yli 50 vuotta, ja ruotsalaisen maanalaisen CLAB-keskusvälivaraston käyttökokemusten perusteella tehtyjen arvioiden perusteella jopa yli 100 vuotta. Polttoaine-elementtien säilyminen vaurioitumatta edellyttää kuitenkin, että säilytysaltaan veden kemialliset ominaisuudet ylläpidetään koko varastointijakson ajan oikeina. Tarkasti valvotuissa olosuhteissa hyvin pitkäaikaisestakaan välivarastoinnista ei aiheudu säteilyhaittoja ympäristön väestölle eikä käyttöhenkilökunnalle.

##### Pitkäaikainen kuivavarastointi

Kuivavarastointikin on mahdollista toteuttaa joko maanalaisena tai maanpäällisenä. Ennen varastoon siirtämistä polttoaine-elementtejä on pidettävä muutaman vuoden ajan reaktoreiden yhteydessä olevis-  
sa vesialtaissa tai vesiallasvälivarastoissa. Tämän vesijäähdytysvaiheen jälkeen käytetyssä polttoai-  
neessa syntyvän jälkilämmön poistamiseen riittää kuivavarastoinnissa ilman luonnolliseen kiertoon  
perustuva jäähdytys. Märkävarastointiin verrattuna kuivavarastointi asettaa pienempiä vaatimuksia  
seurannalle ja valvontatoimille. Toisaalta kuivavarastossa käytännön mahdollisuudet polttoaineniipu-  
jen kunnan valvontaan ovat huonommat kuin vesiallasvarastossa. Menetelmänä kuivavarastointi sopisi  
periaatteessa käytettäväksi myös Suomessa.

Käytetyn polttoaineen välivarastointiin on alettu käyttää yhä enemmän myös kuljetukseen soveltuvia il-  
majäähdytteisiä metallisia säiliöitä. Tällaisia kuivavarastoja on käytössä mm. Belgiassa, Saksassa, Sveitsis-  
sä, Unkarissa ja Yhdysvalloissa. Muun muassa monet niistä Itä-Euroopan maista, jotka aiemmin palauttivat  
käytetyn polttoaineen entiseen Neuvostoliittoon, ovat päätyneet kuivavarastointiin käyttäen säiliöitä, jotka  
soveltuvat sekä kuljetukseen että varastointiin. Kuivavarastoinnista kertyneet käyttökokemukset ovat olleet  
hyviä ja mahdollisuuksia jatkaa välivarastointia aina 50–150 vuoteen pidetään hyvinä.

Nykyisin käytössä olevat kuivavarastot on kuitenkin tarkoitettu vastaavaan välivarastointiin kuin  
Suomessakin käytettävät vesiallasvarastot. Eräissä maissa, mm. Ranskassa, on esitetty suunnitelmia  
selvästi pidempiaikaiseen, jopa satojen vuosien välivarastointiin tarkoitetuista kuivavarastoista.

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

### 2.1.5 Loppusijoituksen palautettavuus

Useissa maissa käytetyn ydinpolttoaineen tai korkea-aktiivisen jätteen loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuudesta varmistautumiseen on liitetty suunnitteluvaatimus, että käytetty ydinpolttoaine tai korkea-aktiivinen jäte on voitava tarvittaessa palauttaa varastosta tai loppusijoitustilasta takaisin maan pinnalle.

Palauttamista voidaan tulevaisuudessa pitää tarpeellisena esimerkiksi siinä tapauksessa, että transmutointiteknologiassa tehdään merkittävä harppaus eteenpäin. Oleellisesti loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuteen vaikuttavien puutteellisuuksien tai vapautumisesteiden vaurioiden havaitseminen polttoaineen loppusijoituksen kuluessa tai jonkin verran sen jälkeen voivat myös edellyttää palauttavuutta. Lisäksi teknologian kehittymisen myötä ydinpolttoaineen jatkohyödyntäminen energian tuotannossa saattaisi luoda tarpeen palauttamiseen.

Loppusijoituksen tarkoituksena on käsitellä käytetty ydinpolttoaine niin, että siitä ei tulevaisuudessa aiheudu haittaa eikä huolehtimisvelvollisuutta. Viime kädessä tämä tarkoittaisi, ettei jälkipolvien tarvitsisi välttämättä tietää loppusijoitustilojen olemassaolosta ja sijainnista. Syvälle kallioperään sijoittamisen etuna ja vaatimuksenakin on pidetty sitä, että väärinkäytön estämiseksi kapseleita ei helposti saada palautetuksi ja että loppusijoitustilaan ei tulevaisuudessa vahingossa tunkeuduta. Toisaalta palautettavuuden vaatimus edellyttää tiedon säilyttämistä jälkipolville siitä, missä ja miten kapselit ovat varastoituina. Samalla kuitenkin kasvaa myös todennäköisyys tahalliseen tai rikolliseen tiloihin tunkeutumiseen.

Aiemmin kuvattuja, pitkäaikaiseen väliavarastointiin tarkoitettuja menetelmiä käytettäessä ja varsinkin varaston sijaitessa maan päällä tai maan pinnan tuntumassa, on palautettavuus paitsi mahdollista myös suhteellisen yksinkertaista ja halvempaa. Palautettavuuskysymyksistä on pääasiassa keskusteltu geologisen loppusijoituksen yhteydessä. Suomessa ja Ruotsissa ei turvallisuusvaatimusten mukaan vaadita loppusijoitustilojen jälkivalvontaa pitkäaikaisturvallisuuden varmistamiseen. Esitetyn tekniikan mukaisesti toteutettuna loppusijoitus on kuitenkin peruutettavissa ja ydinpolttoaine palautettavissa maan pinnalle kaikissa loppusijoituksen vaiheissa, myös tilojen ja tunnelien sulkemisen jälkeen [Siltanen 2003].

Syvällä kallioperässä sijaitsevan loppusijoitustilan avaaminen ja kapselien palauttaminen tapahtuisi periaatteessa samoin menetelmin kuin tilan rakentaminen ja kapselien vienti tilaan. Toteutus, sen vaikeusaste ja kustannukset riippuvat ennen muuta siitä, missä vaiheessa loppusijoitusta palauttaminen tehtäisiin. Loppusijoitustilan käyttöjakson aikana pystykyilut loppusijoitustilaan ja keskustunneli säilytetään avoimina, jolloin ratkaisun peruuttaminen edellyttää ainoastaan sijoitustunnelin avaamista ja sijoitusreikien bentoniittitäytteen poistamista. Kapselit on suunniteltu hyvin kestäviksi korroosiota ja mekaanisia rasituksia vastaan eikä ehjien kapselien poistamisessa tarvita sen tehokkaampia säteilysuojajärjestelyjä eikä monimutkaisempia kuljetusvälineitä kuin alkuperäisessä sijoittamisessakaan. Ajan myötä muuttuva ja palauttamisjärjestelyihin mahdollisesti vaikuttava tekijä on esim. kapselien ympäristössä vallitseva lämpötila, joka vajaassa sadassa vuodessa nousee ylimmilleen, n. 65 asteeseen. Kapselien pintalämpötila on korkeimmillaan, n. 95 astetta, parinkymmenen vuoden kuluttua loppusijoituksen jälkeen.

Ruotsin Äspön laboratoriossa on tehty palauttamistekniikkaan liittyviä käytännön kokeita. Vuonna 2006 tehdyssä täyden mittakaavan kokeessa osoitettiin, että metallikanisteri voitiin onnistuneesti poistaa samalla nostotekniikalla kuin se oli sijoitusreikään asennettu. Ennen kapselin poistoa paisunut täyteaine oli erityiskäsittelymenetelmällä poistettu. Suomen ja Ruotsin kiteinen, luja kallioperä on erityisesti pitkällä aikavälillä edullisempi palautettavuutta ajatellen kuin savi- ja suolamuodostumat, joita eräissä muissa maissa kaavillaan vaihtoehtoina loppusijoitustilan sijaintipaikaksi.

### 2.1.6 Käytetyn ydinpolttoaineen huollon vaihtoehtojen ratkaisujen vertailu

Edellä kuvattujen, käytetyn ydinpolttoaineen huollon vaihtoehtojen ratkaisujen keskeisiä etuja ja haittoja on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Yhteenveto käytetyn ydinpolttoaineen huollon ja loppusijoituksen vaihtoehtojen ratkaisujen eduista ja haitoista sekä sovellettavuudesta Suomen olosuhteissa [Anttila ym. 1999].

Vaihtoehto	Edut	Haitat	Soveltamismahdollisuudet Suomessa
Suora loppusijoitus	<ul style="list-style-type: none"> <li>Käsittelyvaiheita vähän ja käyttöhenkilökunnan säteilyaltistus pieni</li> <li>Perusteknologia olemassa</li> <li>Suuria kertavaikutuksia aiheuttavat tapahtumat erittäin epätodennäköisiä</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kaikki pitkäikäiset radioaktiiviset aineet mukana jätteessä, joten potentiaalinen vaarallisuus kestää pitkään</li> <li>Uraanivarojen käyttötehokkuus huono</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perusratkaisumalli Suomessa</li> <li>Täyttää ydinenergialain vaatimukset käsittelystä ja pysyvistä sijoittamisesta Suomeen; myös palauttaminen mahdollista</li> </ul>
Valvottu pitkäaikainen välivarastointi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Valvonta mahdollista</li> <li>Mahdollistaa vaihtoehtojen uudelleen harkinnan: palautettavuus suhteellisen yksinkertaista</li> <li>Teknologia olemassa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Siirtää vastuuta tuleville polville</li> <li>Turvallisuus ja ympäristövaikutusten hallinta vaativat aktiivista valvontaa</li> <li>Vaatii jatkuvaa ydinmateriaalivalvontaa</li> <li>Lisää kustannuksia</li> <li>Ei voi olla lopullinen ratkaisu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nykyisten välivarastojen käyttöä voidaan jatkaa jopa 100 vuotta</li> <li>Mahdollisen uudentyyppisen välivaraston rakentamispäätös tarvitaan vasta vuosikymmenien päästä</li> </ul>
Jälleenkäsittely ja loppusijoitus	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uraanivaroja voidaan käyttää tehokkaammin ja uraanin väkevöintitarve pienempi</li> <li>Uraanin ja plutoniumin määrä jätteessä pienempi ja mahdollinen vaarallisuus pitkällä aikavälillä alhaisempi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Useita käsittelyvaiheita, mikä lisää käyttöhenkilökunnan säteilyannoksia; häiriötilanteissa voi aiheutua päästöjä ympäristöön</li> <li>Kustannukset kasvavat</li> <li>Useita loppusijoitettavia jätetyyppejä; kokonaistilavuus ei olennaisesti pienene</li> <li>Ydinasemateriaalien leviämisen riski suurempi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kustannus- ja muista syistä johtuen olisi epätarkoituksenmukaista rakentaa pelkästään Suomen tarpeisiin jälleenkäsittelylaitosta</li> <li>Nykyisessä muodossaan ydinenergialaki ei salli ulkomaisten palvelujen käyttöä</li> </ul>
Jälleenkäsittely, lisäerottelu, transmutaatio, loppusijoitus	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pitkäikäisten radioaktiivisten aineiden määrä jätteessä vähenee</li> <li>Potentiaalisen vaarallisuuden ajanjakso lyhenee</li> <li>Osana kehittyntä ydinenergiajärjestelmää voisi olla edullinen ratkaisu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tarvittava jälleenkäsittelyteknologia monimutkaista ja kasvattaa edelleen kustannuksia</li> <li>Ydinasemateriaalin valmistusteknologian leviämisen riski voi lisääntyä</li> <li>Teknologia ei ole käytettävissä vielä, vaan vaatii huomattavaa lisäkehitystä</li> <li>Toteutettavuus epävarmaa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suomen ydinvoimaohjelma on liian suppea itsenäiseen soveltamiseen</li> <li>Ottaen huomioon jo perusvaihtoehtoon sisältyvän välivarastoinnin ja loppusijoituksen palautettavuuden tarvittaessa tulevaisuudessa voidaan periaatteessa hyödyntää mahdollisesti kehittyviä kansainvälisiä palveluita</li> </ul>
Avaruuteen lähettäminen tms.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jätteistä päästään lopullisesti eroon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Luotettavuusongelmia ⇒ riski laaja-alaiseen ydinsaastamiseen</li> <li>Kustannukset vaikeita arvioida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mahdollista ainoastaan kansainvälisenä yhteistyönä ja yhteisin sopimuksin</li> </ul>

## 2.2 Käytetyn ydinpolttoaineen huollon vaiheiden ympäristövaikutukset

### 2.2.1 Yleistä

Ydinjätehuollon ja loppusijoituksen ympäristövaikutukset voidaan jakaa säteilyyn liittyviin ja muihin vaikutuksiin. Muilla vaikutuksilla tarkoitetaan lähinnä ns. sosiaalisia, psykososiaalisia ja taloudellisia vaikutuksia. Näille on käytetty myös yhteisenä yleisnimityksenä ”yhteiskunnallisia” vaikutuksia kuvaamaan niiden erilaista luonnetta verrattuna säteilyn ihmiseen ja luontoympäristöön aiheuttamiin fysiologisiin ja luonnontieteellisiin vaikutuksiin. Toisaalta säteilyvaikutusten jyrkkä erottelu muista vaikutuksista on vaikeaa, sillä mahdollisilla säteilyvaikutuksilla on esimerkiksi fysiologisten terveysvaikutusten tai niiden uhan kautta luonnollisesti yhteys myös psykososiaalisiin ja taloudellisiin vaikutuksiin.

Yhteiskunnallisia vaikutuksia voidaan tarkastella suoraan laitoksesta aiheutuvina tai välillisesti esimerkiksi yhdyskuntarakenteen muutosten tai ns. imago-vaikutusten kautta. Nämä vaikutukset ovat luonnollisesti merkittävimmät loppusijoituslaitoksen ympäristössä. Kuljetusten osalta vaikutukset voivat koskettaa laitoksen sijainnista ja kuljetustavasta riippuen suurempaa väestömäärää.

Lakisääteisessä ympäristövaikutuksen arviointimenettelyssä (YVA) sovelletaan luonnontieteellisten ja teknisten arviointimenetelmien lisäksi myös yhteiskuntatieteellisen tutkimuksen menetelmiä. Siinä otetaan huomioon sekä suorat että epäsuorat vaikutukset. Edellä kuvattujen yhteiskunnallisten ja säteilyvaikutusten lisäksi loppusijoituslaitoksen tai muiden ydinjätehuollon osina toimivien ydinlaitosten rakentamisesta aiheutuu luonnollisesti ympäristöön normaalin teollisuusrakentamisen vaikutuksia (esim. pöly, melu, tärinä, maisemamuutokset ja tarvittavat maankäytön ratkaisut).

Seuraavassa keskitytään tarkastelemaan käytetyn polttoaineen huollosta ympäristölle mahdollisesti aiheutuvia säteilyvaikutuksia.

### 2.2.2 Säteilyvaikutukset

Käytetyn ydinpolttoaineen huollon terveysvaikutuksia arvioidaan normaalitoiminnasta aiheutuvien todellisten sekä mahdollisten onnettomuustilanteiden aiheuttamien päästöjen perusteella laskemalla kuvitteelliselle ihmiselle joko elimistöön joutuneen radioaktiivisen aineen tai suoran ulkoisen säteilyn aiheuttama säteilyannos. Laskettua säteilyannosta verrataan asetettuihin turvallisuuskriteereihin. Säteilyannoksien suuruutta tarkastellaan erityisesti säteilylle eniten altistetun ryhmän yksilöannosten kannalta. Laajemman alueen väestölle pidemmällä aikavälillä yhteensä aiheutuvia säteilyvaikutuksia voidaan arvioida ns. väestöannoksen avulla. Ydinlaitosten välittömässä läheisyydessä asukkaille aiheutuvien yksilöannoksien tulee viranomaismääräysten mukaan pysyä selvästi luonnollisen taustasäteilyn tasoa pienempänä. Suomessa viranomaisten asettama enimmäisyksilöannos on 0,1 mSv (millisievert) vuodessa. Tämä on alle 3 % suomalaisten keskimääräisestä, pääosin luonnollisesta taustasäteilystä ja huoneilman radonista aiheutuvasta säteilyannoksesta (noin 3,7 mSv/vuosi).

Huolimatta radioaktiivisten aineiden hajoamisesta eräät pitkäikäisimmät aineet eivät ehdi kokonaan hävitä esimerkiksi kallioperässä kulkeutumisen kuluessa ja voivat näin ollen vapautua biosfääriin ja säilyä siellä kauan ja aiheuttaa pitkäaikaista säteilyaltistusta. Valtioneuvoston esittämien yleisten turvallisuusvaatimusten mukaisesti säteilystä aiheutuvia haittoja on tarkasteltava myös pitkien aikavälien



kuluessa. Koko ydinpolttoainekierron kattavissa kansainvälisissä selvityksissä on arvioitu eri vaiheiden osuutta kokonaisväestöannokseen. Tällöin lasketaan yhteen koko tarkasteluajanjaksona ja kulloinkin tarkasteltavalla kohdealueella kertyvät säteilyannokset käyttäen mittayksikkönä mansievertiä (manSv). Tällöin tarkastelujakson pituus ja alueen suuruus vaikuttavat pitkäikäisten radioaktiivisten aineiden osalta merkittävästi kokonaisväestöannoksen suuruuteen.

### Välivarastointi

Ydinvoimalaitosten normaalikäytöstä ympäristöön aiheutuvat säteilyvaikutukset ovat tehtyjen arvioiden mukaan erittäin alhaiset luonnon taustasäteilyyn verrattuna. Käytetyn ydinpolttoaineen välivarastoinnista joko voimalaitoksella tai erillisessä välivarastossa aiheutuvat päästöt normaalikäytössä ovat edelleen olennaisesti pienemmät kuin päästöt itse ydinvoimalaitoksilta eli luonnon taustasäteilyn aiheuttamiin annoksiin verrattuina merkityksettä.

Käytännön kokemukset ovat osoittaneet märkä- ja kuivavarastoissa tapahtuvan käytetyn ydinpolttoaineen välivarastoinnin olevan koeteltua ja turvallista tekniikkaa. Vesiallasvarastoinnin keskeinen turvallisuuskysymys on jäädytyksen keskeytymättömyyden takaaminen. Varistolaitokset suunnitellaankin kestämaan suuria mekaanisia rasituksia ja muita häiriöitä kuten esimerkiksi sähkön saannin katkoksia.

### Jälleenkäsittely

Jälleenkäsittelylaitoksen normaalikäytössä vapautuvista pitkäikäisistä radioaktiivisista aineista aiheutuvat väestöannokset ovat tehtyjen arvioiden mukaan suuremmat kuin ydinvoimalaitoksen vastaavasti aiheuttama väestöannos [OECD 2000].

Onnettomuustilanteiden vaarallisuus riippuu olennaisesti laitoksilla käsiteltävien materiaalien laadusta ja niiden sisältämien radioaktiivisten aineiden määrästä. Merkittävä ero esimerkiksi jälleenkäsittelylaitoksen ja ydinvoimalaitoksen välillä on se, että samanaikaisesti käsiteltävä radioaktiivisten aineiden määrä on jälleenkäsittelylaitoksella olennaisesti pienempi. Toisaalta aineet ovat siellä helposti leviävässä muodossa (liuoksina, jauheina, kaasuina) ja niissä tapahtuu voimakkaita fysikaalisia ja kemiallisia reaktioita. Korkea-aktiivisten nestemäisten jätteiden kiinteytysprosessissa, lasittamisessa, ei ole kokemusten perusteella todettu merkittäviä turvallisuusongelmia.

### Käytetyn polttoaineen kapselointi

Käytetyn polttoaineen kapseloinnissa loppusijoituslaitokselta normaalitilanteessa tapahtuvat radioaktiivisten aineiden päästöt ovat tehtyjen arvioiden mukaan pienempiä kuin ydinvoimalaitoksen vastaavat päästöt ja luonnon taustasäteilyyn verrattuna merkityksettömät. Kapselointilaitoksen työntekijöille aiheutuvat säteilyannokset ovat arvioiden mukaan [Rossi ym. 1999 & 2009] niin ikään pienempiä kuin ydinvoimalaitosten henkilökunnalleen aiheuttamat.

Myös kapselointilaitoksella kerrallaan käsiteltävät radioaktiivisten aineiden määrät ovat pieniä verrattuna ydinvoimaloiden vastaaviin materiaalimääriin. Kapselointi tapahtuu eristetyissä kammioissa kauko-ohjatusti lämpötilan ja paineen ollessa alhaiset, mitkä pienentävät mahdollisten käsittelyhäiriöiden todennäköisyyttä sekä alentavat niistä aiheutuvien päästöjen määriä. Kapselointi ei edellytä radioaktiivisen materiaalin prosessointia, ja siksi siihen liittyvät turvallisuusriskit ovat selvästi pienemmät

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

kuin jälleenkäsittelylaitoksen riskit. Radioaktiivisten aineiden päästöjä voi tapahtua ainoastaan polttoaine-elementtien vaurioituessa esimerkiksi putoamisen seurauksena. Kapselointilaitoksista ei toistaiseksi ole todellisia käyttökokemuksia, mutta kapselointiprosessin voidaan perustellusti olettaa olevan säteilyturvallisuuden kannalta vaikeuksista toteutettavissa. Samaan suuntaan viittaavat välivarastointilaitoksien ja jälleenkäsittelylaitoksien polttoaineen siirto- ja käsittelytekniikasta saadut kokemukset.

### Radioaktiivisten aineiden kuljetukset

Käytetyn ydinpolttoaineen ja muiden radioaktiivisten materiaalien kuljetuksista on paljon kokemuksia ja niitä varten on luotu toimivat järjestelmät ja kattavat kansainväliset turvallisuusmääräykset. Kuljetussäiliöratkaisut on testattu monipuolisesti erilaisia häiriötilanteita (mm. rajut törmäykset, tulipalot ja veteen uppoamiset) silmällä pitäen.

Kuljetusten aiheuttamia riskejä arvioitaessa turvallisuusanalyysissä on tarkasteltu normaaleja kuljetuksia sekä erilaisia häiriö- ja onnettomuustilanteita. Tutkimustulosten perusteella [Suolanen ym. 1999 & 2004] kuljetusten aiheuttamat säteilyannokset ovat vähäisiä verrattuna luonnon taustasäteilyyn. Vakavissakin kuljetussäiliön vaurioitumistilanteissa radioaktiivisten aineiden päästön aiheuttama väestöannos jäisi alle kymmenesosaan luonnon taustasäteilystä saatavaan annokseen.

### Loppusijoitus kallioperään

Kapselointivaiheen jälkeen käytetyn ydinpolttoaineen syvälle kallioperään tapahtuvassa loppusijoituksessa ei ole nähtävissä suuria kertapäästöjä aiheuttavia onnettomuuksia, jotka aiheuttaisivat nopeasti ilmeneviä säteilyvaikutuksia väestössä. Loppusijoituksen mahdolliset säteilyvaikutukset kohdistuvat laitoksen lähiseudun asukkaisiin ja ne todennäköisesti ajoittuvat kauas tulevaisuuteen [Rasilainen ym. 2000 & 2001, Rasilainen & Vuori 1999].

Kallioperään sijoitetun ydinpolttoaineen sisältämät radioaktiiviset aineet voivat teknisten vapautumisesteiden mahdollisesti vaurioituttua vapautua ensin kallioperään liukenemalla pohjaveteen ja kulkeutua edelleen pohjavesivirtausten kuljettamana kallioperästä biosfääriin sekä aiheuttaa sen jälkeen eri altistusreittien kautta säteilyannoksia. Nykyisten laskelmien mukaan luonnolliset radionuklidien vapautumisesteen (lähinnä kallio) ja tekniset esteet (kapselointi, bentoniitti) varmistavat suunnitellusti toimiessaan, että ympäristössä asuville henkilöille aiheutuva vuosittainen säteilyaltistuksen lisäys olisi luokkaa 0,001 mSv. Suuremmille väestöryhmille keskimäärin aiheutuvat annokset jäisivät hyvin paljon edellä mainittua arvoa pienemmiksi. Näin myös väestöannos jäisi pieneen murto-osaan taustasäteilyn aiheuttamaan väestöannokseen verrattuna.

Merkittävin haitta loppusijoitustilan moniestejärjestelmälle voisi aiheutua jääkauden jälkeisistä maankuoren lohkoliikunnoista. Tällaisten tapausten vaikutuksia on arvioitu olettaen erittäin pessimistisesti, että jo 1000 vuoden kuluttua<sup>1</sup> voimakas loppusijoitustilaa leikkaava siirros rikkoisi kymmeniä kapsleita samanaikaisesti. Tulosten mukaan ympäristön väestölle aiheutuva säteilyannoksen lisäys

---

<sup>1</sup> Näin pian oletettava kalliosiirros yliarvioi merkittävästi säteilyvaikutuksia, koska tällöin jätteen aktiivisuuden vähenemistä ajan kuluessa ehtii tapahtua vain vähäisessä määrin. Nykyisen käsityksen mukaan jääkausi tulee Suomeen vasta kymmenien tuhansien vuosien päästä.

jäisi luonnolliseen taustasäteilyyn verrattuna vähäiseksi ja annoksen odotusarvo turvallisuusvaatimusten mukaisen annosrajan alapuolelle. Loppusijoitustilat sijoitetaan kuitenkin turvallisuussyistä mahdollisimman ejiin kalliolohkoihin, sillä liikunnot todennäköisimmin tapahtuvat ensisijaisesti jo olemassa olevia liikuntasauvoja (mm. rako- ja ruhjevyyöhykkeet) pitkin. Lisäksi täyteaineena käytettävä bentoniitti suojaa kapsleita loppusijoitustilassa tapahtuvilta pienehköiltä kallioperän liikunnoilta.

Geologisen loppusijoituksen säteilyvaikutuksia arvioitaessa tarkastellaan ketjua, jonka muodostavat kupari-rautakapselin korroosiotarkastelu tai vaurioituminen mekaanisesti, pohjaveden virtaustarkastelut, radionuklidien leviämistarkastelu pohjaveden virtauskentässä, sekä radionuklidien leviämistarkastelu biosfäärissä ja ihmisen altistus säteilylle eliniirissään. Perustapaukseksi oletetaan tilanne, jossa kallioperässä nyt vallitsevat olosuhteet jatkuvat myös tulevaisuudessa. Herkkyystarkasteluissa taas selvitetään perustapauksesta poikkeavien kehityskulkujen seurauksia, jolloin laskelmissa vaihdellaan mm. pohjaveden kemiallisia ominaisuuksia sekä pohjaveden virtaamaa ja ajanhetkeä, jolloin radionuklidit alkavat vapautua pohjaveteen. Lisäksi herkkyystarkasteluissa on selvitetty myös ihmisen tahatonta tunkeutumista loppusijoitustilaan. Taulukkoon 2 on koottu suppea yhteenveto [Rasilainen & Vuori 1999] suomalaisissa turvallisuusanalyseissa [Vieno & Nordman 1999] tarkastelluista tapauksista. Lasketut säteilyannokset jäivät kaikissa yhdistelmissä viranomaisten esittämiä annosrajoituksia alhaisemmiksi ja myös epätodennäköisten onnettomuuksien tapauksessa luonnon taustasäteilyn aiheuttamia annoksia pienemmiksi.

### Kokonaissäteilyvaikutukset ydinjätehuollon eri vaihtoehdoissa

Ydinjätehuollon vaihtoehtoratkaisujen ympäristölle aiheuttamia kokonaissäteilyvaikutuksia verrattaessa on otettava huomioon koko ydinpolttoaineen kierto alkaen uraanimalmin louhinnasta, koska eri vaihtoehdoissa materiaalivirrat merkittävästi poikkeavat toisistaan [OECD 2000, Vuori 1996]. Tällöin tulee tarkastella myös mm. mahdollisen jälleenkäsittelyn vaikutusta väestöannoksiin ja säteilyriskeihin. Laskennallisiin väestöannoksiin vaihtoehtoisissa prosesseissa ja jälleenkäsittelyn eri vaiheissa vaikuttavat hyvin monet tekijät, eikä suoran loppusijoituksen strategiaa ja jälleenkäsittelyn sisältävää ydinjätehuollon strategiaa voida yksiselitteisesti asettaa paremmuusjärjestykseen.

Polttoainekierron alkupäässä eli uraanin louhinnasta ja malminrikastuksesta aiheutuvat jätteet sisältävät luonnon radioaktiivisia aineita, jotka sisältyvät uraanin luonnossa esiintyvistä isotoopeista (U-238 ja U-235) alkaviin pitkiin hajoamisketjuihin. Malmia käsiteltäessä näihin hajoamisketjuihin sisältyvät urania lyhytikäisemmät aineet, kuten radium ja siitä hajoamistuotteena syntyvä radon aiheuttavat pitkään jatkuvan altistusmahdollisuuden radioaktiivisille aineille. Tämän vuoksi uraanimalmin louhinnasta ja malminrikastuksesta aiheutuvat jätteet on eristettävä luotettavasti elävästä luonnosta. Nykyisin toimivilla kaivoksilla on kiinnitetty huomattavasti aiempaa enemmän huomiota malminlouhinnan ja malminrikastuksen tuottamien jätekasojen jälkihoitoon eristämällä ne suojaavilla savikeroksilla, jolloin niiden läpi tihkuu vain vähän radioaktiivista radonkaasua, jonka puoliintumisaika on alle 4 vuorokautta. Uraanikaivos- ja malminrikastusjätteistä vapautuvan radonin aiheuttamaa väestön altistumista koskevia laskelmia on viime aikoina tarkennettu käyttäen parempia leviämismalleja sekä todellisten kaivosalueiden ympäristön väestöjakautumia. Uusimmat arviot ovat aiempia alhaisempia ja tuotettua sähköenergiayksikköä kohden väestölle aiheutuvan yhteenlasketun säteilyannoksen arvioidaan olevan noin 1 manSv/GWa, mikä on samaa luokkaa kuin ydinvoimalaitosten normaalikäytöstä aiheutuva väestöannos.

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

Taulukko 2. Suomalaisissa käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuusanalyseissa tarkasteltuja tapauksia. [Rasilainen & Vuori 1999].

Tapaus	Perustelu
<b>Pohjavesikemian muutokset</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pelkistävä (perustapaus)</li> <li>• hapettava</li> <li>• suolainen</li> </ul>	<p>Peruskalliosta tavattu kemiallisesti erilaisia pohjavesiä; kemia olennaisesti mukana kupari-rautakapselin korroosiossa, radionuklidien liukenemisessä pohjaveden ja radionuklidien vuorovaikutuksessa kivi-vesisysteemissä</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• loppusijoitusvyöhykellä nykyisin vallitseva tilanne</li> <li>• lähempänä maanpintaa vallitseva tilanne; vaikuttaa merkittävästi kapselin korroosioon, radionuklidien liukoisuuteen ja leviämiseen; jääkaudet voivat syöttää hapettavaa sulamisvettä kallioruhjeisiin</li> <li>• rannikoilla tavattu syviä lähes liikkumattomia suolaisia pohjavesiä; vaikuttaa radionuklidien liukoisuuteen ja leviämiseen; jääkaudet voivat siirtää makean ja suolaisen veden rajapintaa</li> </ul>
<b>Pohjaveden virtaama</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• uusia ruhjeita</li> <li>• häiriintynyt vyöhyke</li> </ul>	<p>Radionuklidien leviäminen tapahtuu pohjaveden välityksellä; mikäli pohjavesikemia ei muutu, pohjaveden kuljetuskyky on suoraan riippuvainen virtaamasta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• jääkausien yhteydessä voi kallion jännitystila laueta uusien vettä hyvin johtavien ruhjeiden syntymisen kautta</li> <li>• tunnelien louhiminen häiritsee kallion jännitystilaa ja voi aikaansaada tunnelien ympärille vettä paremmin johtavan vyöhykkeen</li> </ul>
<b>Kapselin elinikä</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• odotettu elinikä vähintään 100 000 vuotta (perustapaus)</li> <li>• alun pitäen viallisia kapseleita, esim. reikiä, viallinen hitsisauma</li> <li>• hapettava pohjavesi</li> <li>• kallioliikunnot vaurioittavat kapselia</li> </ul>	<p>Kuparin korroosionopeuden arviointi riippuu monista tekijöistä</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• kuparin korroosio on hidasta vallitsevissa kemiallisissa olosuhteissa</li> <li>• kapselin valmistuksen laadunvarmistus vastaavan teollisen toiminnan tasoa</li> <li>• hapettava pohjavesi korrodoi kuparia</li> <li>• kallioliikuntoja tiedetään tapahtuneen Suomessakin</li> </ul>
<b>Jääkausien vaikutukset</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• maan nousu rannikolla</li> <li>• vaikutus pohjavesikemiaan</li> <li>• kallioliikunnot</li> </ul>	<p>Jääkausia tiedetään olleen Suomen leveysasteilla ja voidaan olettaa olevan myös tulevaisuudessa; jääkausien kaikkia yksityiskohtia ei tunneta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• nykyiset maannousunopeudet tunnetaan</li> <li>• sulamisvesien tunkeutumiseen kalliooperään liittyy epävarmuuksia</li> <li>• jääkauden aikana kallion jännitystila vaihtelee, jännitysten laukaisemat maanjäristykset voivat aiheuttaa kallioliikuntoja ja uusia ruhjeita, vaikkakin jännitykset useimmiten purkautuvatkin olemassa olevia ruhjeita pitkin</li> </ul>
<b>Tunkeutuminen loppusijoitustilaan</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• koeporaus</li> <li>• syvä porakaivo</li> </ul>	<p>Ihmisen voidaan kuvitella tunkeutuvan tahattomasti loppusijoitustilaan<sup>2</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• kairausnäytteen käsittely voi altistaa työntekijät säteilylle</li> <li>• loppusijoitustilan lähelle voidaan tehdä porakaivo, jos sijoitustilasta ei tiedetä</li> </ul>

<sup>2</sup> Turvallisuusanalyseissa ei ole tarkasteltu ihmisen tahallista tunkeutumista loppusijoitustilaan.

Väestöannoksena laskettuna säteilyvaikutukset tuotettua energiayksikköä ja käytettyä luonnonuraanimäärää kohden ovat selvitysten mukaan suoran loppusijoituksen ja jälleenkäsittelyn vaihtoehdoissa olennaisesti samantasoiset, kun otetaan huomioon myös jälleenkäsittelylaitokselta ilmaan vapautuviksi oletetut pitkäikäisten radioaktiivisten aineiden päästöt. Siinä tapauksessa taas, että jälleenkäsittelyssä erotettu uraani ja plutonium jäisivät kokonaan hyödyntämättä reaktorien polttoaineena tai uudelleenkäytön osuutta ei huomioida laskelmassa, suoran loppusijoituksen voidaan katsoa aiheuttavan pienemmän väestöannoksen käytettyä uraanimäärää kohti kuin jälleenkäsittelyvaihtoehto. Joka tapauksessa sekä käytetyn ydinpolttoaineen että lasitetun korkea-aktiivisen jälleenkäsittelyjätteen loppusijoitusta koskevat tutkimustulokset vahvistavat käsitystä, että loppusijoitus voidaan toteuttaa turvallisesti ja että väestön yksilöiden vuotuiset enimmäissäteilyannokset jäävät selvästi viranomaisten asettamien rajojen alapuolelle.

### 2.3 Yleiskatsaus käytetyn ydinpolttoaineen huollon tilanteeseen eri maissa

Alun perin ydinvoimalaitosten polttoainekierron suunnittelun lähtökohtana pidettiin yleisesti periaatetta, jossa halkeamiskelpoisten aineiden mahdollisimman tehokkaan hyväksikäytön takaamiseksi uraanin lisäksi myös reaktoreissa syntyvä plutonium kierrätetään käytettäväksi polttoaineena joko tavallisissa reaktoreissa tai niin sanotuissa hyötöreaktoreissa. Sähköenergian tarpeen kasvaessa ennustettua hitaammin ja ydinenergian osuuden jäädessä kaavailtua pienemmäksi raakauraanin hinta on pysynyt edullisena ja tarjonta runsaana. Näin ollen on muodostunut tilanne, jossa monissa maissa on katsottu kierrätysvaihtoehdon jäävän taloudellisesti epäedullisemmaksi, etenkin tapauksissa, joissa joudutaan käyttämään ulkomaisia jälleenkäsittelypalveluita ja ydinvoimakapasiteetti on melko pieni. Eräissä maissa on perusteluksi jälleenkäsittelystä ja erotettavien ydinaineiden kierrätyksestä luopumiselle esitetty myös ydinaseiden leviämismahdollisuuksien pienentämiseen liittyvät näkökohdat.

Ydinvoiman käyttäjänä edelleenkin merkittävin maa Yhdysvallat teki 1970-luvun lopulla periaatteellisen päätöksen hylätä jälleenkäsittelyyn perustuva strategia. Tuossa vaiheessa Yhdysvaltojen aloitteesta tehty kansainvälinen ydinpolttoainekierto selvitys ei kuitenkaan saanut muita merkittävimpiä ydinvoimaa käyttäviä maita muuttamaan periaatteellisia näkemyksiään. Viime aikoina myös Yhdysvallat on esittänyt näkemyksiä, jotka puoltaisivat tukeutumista jälleenkäsittelyyn. Yhtenä tärkeänä näkökohtana on tällöin tuotu esille mahdollisuus pienentää jätteiden lämmönkehitystä ja tämän kautta pienentää loppusijoitettavan korkea-aktiivisen ydinjätteen tilantarvetta loppusijoitustilassa.

Taulukossa 3 esitetään yhteenveto ydinenergiaa käyttävien maiden valitsemista käytetyn polttoaineen huoltostrategioista ja ydinjätehuollon toteutusvaiheesta. Yhteenvetoa laadittaessa on käytetty hyväksi useita lähteitä, muun muassa Käytetyn polttoaineen ja radioaktiivisen jätteen huollon turvallisuutta koskevaan yleissopimukseen [IAEA 2009a] liittyviä kansallisia selontekoja sekä Ydinturvallisuutta koskevan yleissopimuksen (SopS 74/1996) vastaavia selontekoja. Erityisesti geologisen loppusijoituksen maailman laajuista tilannetta käsittelee laajasti katsaus [Witherspoon & Bodvarsson 2006]. Käytetyn polttoaineen huollon tilannetta merkittävimmissä ydinenergiamaissa käsittelee myös Rogers 2009. Tiivistettyjä ajantasaisia tilannekatsauksia sisältyy julkaisuihin [OECD 2009b, WNA 2009a, NWMO 2009c].

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

Jälleenkäsittelyyn voimakkaimmin sitoutuneita OECD-maita ovat Ranska ja Japani sekä aiemmin myös Iso-Britannia. Lisäksi useissa muissa maissa, kuten Saksassa ja Belgiassa, jälleenkäsittely on aiemmin ollut päävaihtoehtona, mutta suora loppusijoitus on sittemmin vaihtunut perusratkaisuksi. Venäjä on pitkällä aikavälillä vahvasti jälleenkäsittelyvaihtoehtoon suuntautuva. Entisen Itä-Euroopan maat ovat osittain vielä horjuvalla kannalla. Useimmissa tapauksissa käytetyn polttoaineen vienti Venäjälle on tullut joko muiden tai oman maan lainsäädännöllisten muutosten takia tai taloudellisista syistä suljetuksi pois vaihtoehtona. Tässä tilanteessa näissä maissa varaudutaan ainakin toistaiseksi pitkään väliavarastointiin. Käytetyn polttoaineen suoraan loppusijoitukseen ovat tällä hetkellä tiukimmin suuntautuneet Yhdysvallat, Kanada, Ruotsi, Espanja ja Suomi. Lisäksi maissa, joissa on vain pieni ydinvoimaohjelma (esimerkiksi alle neljä reaktoria) suoraa loppusijoitusta pidetään nykyisissä olosuhteissa ilmeisimpänä vaihtoehtona. Tätä vaihtoehtoa katsotaan erityisesti pienten, ulkopuolisista jälleenkäsittelypalveluista riippuvien maiden tapauksessa puoltavan myös taloudelliset tekijät.

Taulukko 3. Eri maissa valitut käytetyn ydinpolttoaineen huollon perusratkaisut ja geologisessa loppusijoituksessa tutkitut kalliomuodostelmat sekä aikataulu.

Maa	Perusratkaisu		Loppusijoituspaikka, kivilaji(t)	Lisätietoja
	Jälleenkäsittely	Suora loppusijoitus		
Argentiina	Valinta avoin			Kuiva väliavarastointi 50–100 vuotta
Belgia	(X)	X	Savi (Boom Clay) Kalliolaboratorio HADES; Mol (SCK-CEN) Sijoituspaikan valinta v. 2013 valmistuvan turv. analyysin perusteella.	Perusratkaisu avoin; jälleenkäsittely keskeytetty. Suunnitelma hallituksen periaatepäätöstä varten 2010. Luvitusprosessin käynnistys v. 2025.
Brasilia	X			
Bulgaria	X		Korkea-aktiivisen jätteen loppusijoitus Bulgariassa; konseptista päätös 2012.	Keskitetty väliavarasto käytetyille polttoaineelle; myös kuljetuksia Venäjälle jälleenkäsiteltäväksi jatkettu.
Espanja		X	Sijoituspaikan valintaselvitykset on toistaiseksi keskeytetty.	Ohjelma keskeytyksissä ainakin v. 2010 asti; loppusijoitus ehkä 2050 →.
Etelä-Korea		X	Ei vielä paikkakohtaisia loppusijoitus selvityksiä.	Keskitetyn väliaikaisvaraston paikanvalinta keskeytetty ja loppusijoitus avoin.
Hollanti		X		Keskitetty väliavarastointi ≥ 100 vuotta ennen lopullista päätöstä.
Intia	X		Sijoituspaikan valinnassa keskitytään maan luoteisosaan	Aikataulutavoitteista ei tietoa.
Iso-Britannia	X	X	Sijoituspaikan valinta kansallisen suunnitelman (2008) mukaisesti.	Loppusijoitustilan käyttöönotolle ei aikataulutavoitetta. Mahdollisten uusien reaktorien osalta ei jälleenkäsittelyä.
Japani	X		Kaksi kalliolaboratoriota (kiteinen kallio ja savi)	Oma jälleenkäsittelylaitos valmistumassa; loppusijoituslaitoksen käyttöönotto tavoite v. 2035.
Kanada		X	Kiteinen kallioperä, vaihteittainen etenevä, sopeutettavissa oleva sijoituspaikan valinta.	Loppusijoitustilan käyttöönotto 2030-luvun jälkipuoliskolla.
Kiina	X		Kiteinen kallio; sijoituspaikkatutkimuksia Beishan alueella (Gobin autiomaa).	Keskitetty väliavarasto suunnitteilla. Loppusijoituksen aloituksen aikataulutavoite 2050.
Liettua		X		Vähintään 50 vuoden väliavarastointi ennen loppusijoitusta.

Taulukko 3. (jatkuu)

Maa	Perusratkaisu		Loppusijoituspaikka, kivilaji(t)	Lisätietoja
	Jälleenkäsittely	Suora loppusijoitus		
Meksiko		X		
Pakistan		X		
Ranska	X		Tutkittu Buren aluetta, jossa kalliolaboratorio (savi).	Sijoituspaikan valinta 2015. Loppusijoituksen aloitus 2025.
Romania		X		Kesk. välivarastosta toteutettu 3 moduulia; loppusij. laitoksen käyttö 2055 →.
Ruotsi		X	Östhammar valittu 2009; graniittityyppinen.	Keskitetty käyt. polttoaineen välivarasto. Loppusijoituksen aloitus 2023
Saksa		X	Paikkatutkimuksia aiotaan jatkaa Gorlebenissä.	Jälleenkäsittely keskeytetty 2005; loppusijoitustila käyttöön 2035.
Slovakia		X		Paikkatutkimukset keskeytyksissä välivarastointia 40–50 vuotta.
Slovenia/ Kroatia		X		Loppusijoituksen aloitus 2065.
Suomi		X	Olkiluoto; graniittityyppinen.	Rakentamislupahakemus 2012. Loppusijoituksen aloitus 2020.
Sveitsi	X	X	Savi; kolme aluetta valittu sijoituspaikkatutkimuksiin.	Keskusvälivarasto käytössä; ls-paikan valintaprosessi kolmivaiheinen, loppusijoituslaitoksen rakentaminen 2040 → ja käyttöönotto v. 2050 (loppusijoitus valvottu, palautettavissa).
Taiwan	Valinta avoin			
Tšekki	(X)	X	6 potentiaalista sijoituspaikkavaihtoehtoa valittu.	Paikanvalinta 2025, kalliolaboratorio 2030; loppusij. aloitus ennen 2065.
Ukraina	X	X		
Unkari	(x)	X	Kalliolaboratorio 2012; savimuodostelma (Boda).	Loppusijoituksen aloitus ennen 2050.
Venäjä	X		Sijoituspaikkatutkimuksia mm. Tseljabinskin ja Krasnoyarskin alueilla.	Tavoiteaikataulu loppusijoituslaitoksen käyttöönotolle 2025–2030.
Yhdysvallat		X	Tuhkakivi /Yucca Mountain hankkeen jatko epäselvässä tilanteessa.	Ennen v. 2009 alun uusia linjauksia ls-laitoksen arvioitu käyttöönotto oli n. 2020. Myös palaamista jälleenkäsittelyvaihtoehtoon on harkittu.

Suurimmissa ydinenergiamaissa voidaan jälleenkäsittelyvaiheesta aiheutuvia lisäkustannuksia kompensoida polttoainemateriaalien kierrätyksestä ja raakaenergiavarojen tehokkaammasta käytöstä saatavalla hyödyllä. Muun muassa Japanissa, Ranskassa ja Yhdysvalloissa tutkitaan laajasti myös edistyneitä polttoainekierrätysratkaisuja, joissa jälleenkäsittelyssä eroteltuja pitkäikäisiä radioaktiivisia aineita voitaisiin erityisrakenteisissa reaktoreissa tai hiukkaskiihdyttimiä käyttäen muuntaa eli transmutoida lyhytikäisemmiksi aineiksi. Tässäkään tapauksessa ei voida välttyä korkea-aktiivisten jätteiden loppusijoitustarpeelta, mutta loppusijoituksen teknisten vapautumisesteiden pitkäaikaiskestävyydelle ja sijoituspaikoille asetettavia vaatimuksia voitaisiin lievittää. Siitä huolimatta voitaisiin saavuttaa yhtä korkea turvallisuustaso kuin nykyisin esitetyn loppusijoitusratkaisuin voidaan saavuttaa sekä jälleenkäsittelyjätteiden että käytetyn polttoaineen suorassa loppusijoituksessa.

## 2.4 Yhteenveto tärkeimpien ydinvoimaa käyttävien valtioiden käytetyn ydinpolttoaineen huollon tilanteesta

Maittain esitettävissä suppeissa katsauksissa kuvaillaan sekä jätehuollon ja loppusijoitushankkeiden teknistä toteutumista että sijoituspaikan valintaan liittyviä pääosin yhteiskunnallisia kysymyksiä. Merkittävimpien ydinenergiaa käyttävien maiden tekniset suunnitelmat on viety jo varsin yksityiskohtaiselle tasolle, vaikkakin kehityshaasteita on vielä jäljellä. Merkittävimmät erot eri maiden kesken liittyvät erityisesti loppusijoituslaitosten sijoituspaikkojen valintaan ja niistä aiheutuviin ympäristö- ja yhteiskunnallisiin vaikutuksiin. Suomessa ja Ruotsissa on pitkäjänteisen ja selkeästi välivaiheisiin jaetun prosessin myötä pystytty saavuttamaan myös laitosten sijoituspaikkakuntien paikallisen väestön hyväksyntä. Monissa maissa on sijoituspaikan valintamenettelyssä viime aikoina valittu ratkaisumalleja, joissa korostetaan vaiheittaista etenemistä ja kokonaissuunnitelman joustavaa mukauttamismahdollisuutta sekä kaikissa merkittävässä kehitysvaiheissa menettelyyn sisältyvää laajaa kuulemismenettelyä.

### 2.4.1 Belgia

- Käytössä olevien reaktorien määrä<sup>3</sup> ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 7 kpl; 5 700 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 53,8 %

Belgian hallitus teki vuonna 2003 päätöksen, että maa luopuu ydinvoiman käytöstä noin vuoteen 2015 mennessä. Nykyisen hallituksen nimeämän asiantuntijaryhmän suosituksen perusteella hallitus on syksyllä 2009 päättänyt, että vanhimpien reaktorien (Doel 1 & 2 ja Tihange 1) käyttöikää jatketaan ensivaiheessa 10 vuodella. Myöhemmin käyttöön otettujen reaktorien osalta asiantuntijaryhmä on suosittanut käyttöiän jatkoa 20 vuodella. Hallitus ei tässä vaiheessa kuitenkaan tehnyt päätöstä muusta kuin vanhimpien reaktorien käyttöiän jatkamisesta 10 vuodella. Aiemmin 1990-luvun puoliväliin asti pääperiaatteena oli käytetyn ydinpolttoaineen jälleenkäsittely. Kaikkiaan 670 tonnia polttoainetta on jälleenkäsittely Ranskassa ja näin syntynyt uraani ja plutonium on käytetty uudelleen sekaoksidipolttoaineen (MOX) valmistukseen.

Hallituksen päätöksellä käytetyn polttoaineen jälleenkäsittely on keskeytetty. Jatkossa ollaan kallistumassa kansallisen, suoraan loppusijoitukseen perustuvan ratkaisun kehittämiseen, mutta lopullista ratkaisua perusvaihtoehdon valinnan osalta ei ole tehty. Viimeisin erä käytettyä polttoainetta on toimitettu jälleenkäsiteltäväksi vuonna 2001. Jälleenkäsittelystä peräisin olevat jätteet palautetaan takaisin Belgiaan. Ennen loppusijoitusta lasitettua jätettä sisältäviä sylintereitä välivarastoidaan Desselissä Belgoprocessin maanpäällisessä varastossa. Käytetyn polttoaineen välivarastoinnissa sovelletaan kahta menettelytapaa. Doelin laitospaikalla on kuivavarastointiin perustuva välivarasto ja Tihangen laitoksella allastyypinen välivarasto.

---

<sup>3</sup> Tilastotiedot käytössä ja rakenteilla olevien reaktorien lukumääristä ja tuotantokapasiteeteista perustuvat viitteeseen [WNA 2009b]. Myös IAEA ylläpitää vastaavat tiedot sisältävää tietokantaa [IAEA 2009b]. Näiden lähteiden tiedot poikkeavat hieman toisistaan, mutta arvio rakenteilla olevista reaktoreista on kummankin lähteen mukaan hieman yli 50.



Belgiassa ydinjätehuollosta ja toiminnan suunnittelusta vastaa valtionyhtiö ONDRAF/NIRAS. Korkea-aktiivisen jätteen osalta on jo 1970-luvulta lähtien tutkittu Mol-Desselin alueella sijaitsevan savi-muodostelman (Boom Clay) soveltuvuutta loppusijoituspaikaksi. Tehdyissä asiantuntijaselvityksissä, joista on pyydetty myös OECD:n ydinenergiajärjestön riippumaton lausunto, ei ole nähty esteitä loppusijoituslaitoksen toteuttamiselle. Vuonna 2010 ydinjäteyhtiön on tarkoitus toimittaa jätehuollon yleisselvitys hallituksen periaatepäätöstä varten.

### 2.4.2 Bulgaria

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 2 kpl; 1 900 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 32,9 %

Alun perin käytetyn polttoaineen huollon perusratkaisuna oli toimitus jälleenkäsiteltäväksi Venäjälle (aiemmin Neuvostoliittoon). Sekä avointa että suljettua polttoainekiertoa harkitaan edelleen. Polttoaineen pitkäaikaiseen välivarastointiin on käytössä erillinen allastyypinen varasto Kozloduyn laitospaikalla. Käytetyn polttoaineen kuljetuksia Venäjälle on jatkettu ainakin vuoteen 2008 asti ja myös vuodelle 2009 on suunniteltu kuljetuksia. Jälleenkäsittelystä aiheutuvat jätteet on tarkoitus palauttaa takaisin ja sen vuoksi myös Bulgaria suunnittelee geologista loppusijoitusta.

### 2.4.3 Espanja

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 8 kpl; 7 400 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 18,3 %

Kesällä 1999 julkaistussa Espanjan viidennessä radioaktiivisten jätteiden huoltoa koskevassa suunnitelmassa esitetään, että käytetyn ydinpolttoaineen suora loppusijoitus on perusvaihtoehto, mutta että myös jälleenkäsittely on edelleen mahdollinen vaihtoehto. Radioaktiivisten jätteiden huollosta vastaa valtionyhtiö ENRESA. Tähän mennessä pieni osa syntyneestä käytetystä polttoaineesta on jälleenkäsitelty. Vuonna 2006 julkaistussa kuudennessa radioaktiivisten jätteiden huoltoa koskevassa suunnitelmassa ei ole esitetty periaatteellisia muutoksia ydinjätehuollon ohjelmaan [ENRESA 2006].

Espanjassa jatketaan edelleen myös tutkimuksia uusista teknologioista, kuten transmutaatio, jotka voisivat tuoda keinoja vähentää sekä loppusijoitettavan jätteen määrää että sen vaarallisuutta. Samalla jätehuoltostrategiassa todetaan, että geologista loppusijoitusta tarvitaan joka tapauksessa. Jotta päätöksen siirtäminen olisi mahdollista, on käytetyn polttoaineen välivarastojen kapasiteettia päätetty aluksi lisätä sijoittamalla polttoaine-elementtejä nykyisiin vesivarastoihin aiempaa tiiviimmin. Jatkossa on rakennettava myös uutta varastointitilaa esimerkiksi laitosten yhteyteen. Korkea-aktiiviselle ja lasitetulle jälleenkäsittelyjätteelle, joka palautuu Ranskasta ja Englannista, rakennetaan välivarasto. Varaston tulisi valmistua vuoteen 2010 mennessä. Välivarastointia voidaan jatkaa ainakin 60 vuotta.

Ydinjätehuollon ohjelma on keskeytyksissä ja sen myötä myös mahdollisen loppusijoituspaikan etsintä on lopetettu toistaiseksi. Panostusta loppusijoitustutkimukseen ja -kehitykseen ei ole lopetettu aivan kokonaan, vaan pyritään säilyttämään tarvittava taitotieto kansainvälisiin hankkeisiin osallistamalla. Samalla panostusta jälleenkäsittelyn ja transmutaation kehittämiseen esimerkiksi EU:n tutki-

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

mushankkeiden kautta jatketaan. Yleisenä aikataulutavoitteena on voida aloittaa korkea-aktiivisen jätteen ja käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus suunnilleen vuonna 2050.

### 2.4.4 Iso-Britannia

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 19 kpl; 11 000 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 13,5 %

Isossa-Britanniassa ydinjätteiden tuottajat ovat vastuussa jätehuollon suunnittelusta ja toteutuksesta. Sellafielldissa sijaitsee kaksi jälleenkäsittelylaitosta ja alkuperäisenä strategiana on ollut, että kaikki syntyvä käytetty ydinpolttoaine jälleenkäsiteltäisiin näissä laitoksissa. Jälleenkäsittelyjäte on välivarastoituna laitoksen yhteyteen. Ensimmäisessä vaiheessa otettiin 1960-luvun puolivälissä käyttöön Magnox-reaktorien polttoaineen jälleenkäsittelyyn tarkoitettu laitos. Se lopettaa toimintansa viimeistään vuonna 2013, kun viimeisimmänkin suljetun Magnox-reaktorin polttoaine on jälleenkäsitelty. Vuonna 1994 otettiin käyttöön oksidipolttoaineen jälleenkäsittelyyn tarkoitettu laitos (THORP, THERmal Oxide Reprocessing). Laitoksen toiminta on kuitenkin useiden käyttöhäiriöiden vuoksi ollut katkonaista ja kaikkiaan laitoksella on käsitelty noin 600 tonnia käytettyä polttoainetta. Jatkon osalta Iso-Britannia ei ole sitoutunut suljettuun eikä avoimeen polttoainekierto; käytettyä polttoainetta ei kuitenkaan katsota jätteeksi vaan tulevaisuudessa mahdollisesti käyttökelpoiseksi polttoainemateriaaliksi. Esimerkiksi Ison-Britannian ainoan kevytvesireaktorin, Sizewell B:n, polttoainetta välivarastoidaan toistaiseksi. Muista maista toimitettua polttoainetta jälleenkäsitellään edelleen THORP-laitoksella. Nykyisten sopimusten mukainen polttoainemäärä saadaan jälleenkäsittelyksi suunnilleen ensi vuosikymmenen puoleen väliin mennessä. Tämänhetkisen näkemyksen mukaan Isoon-Britanniaan mahdollisesti rakennettavien uusien ydinvoimalaitosten osalta perusolettamuksena on, että polttoainetta ei jälleenkäsiteltäisi.

Vuonna 2001 hallitus käynnisti radioaktiivisten jätteiden huollon kokonaisvaltaisen ohjelman laadinnan. Ohjelman laadinnan tueksi hallitus asetti marraskuussa 2003 ydinjätehuoltokomitean (CoRWM, Committee on Radioactive Waste Management). Lokakuussa 2006 hallitus hyväksyi CoRWM:n geologista loppusijoitusta koskevat suositukset. Hallitus myös tuki komitean suositusta, että loppusijoituspaikan valinnassa tulee edetä kuntien vapaaehtoisesti ilmaisemaan halukkuuteen perustuen. Kesäkuussa 2008 parlamentille esitettiin yleissuunnitelma (White Paper) liittyen geologiseen loppusijoitukseen [Defra 2008]. Samalla esitettiin kunnille kutsu tarjoutua ilmaisemaan kiinnostuksensa jatkokeskusteluihin ilman sitoumusta lopullisesta hyväksymisestä. Ydinjätekomitean (CoRWM) tilanneraportissa [CoRWM 2009] hallitukselle heinäkuussa 2009 esitetään lisäsuosituksia sijaintipaikan valintaprosessin edistämiseksi ja todetaan, että Copedalen ja Allerdale Boroughin alueneuvostot (valtuustot) ovat ilmaisseet alustavan kiinnostuksensa ja Cumbriassa ollaan aloittamassa keskusteluita. Komitea on kuitenkin ilmaissut olevan toivottavaa, että useammat kunnat ilmaisevat halukkuutensa.

Isossa-Britanniassa toteuttajaorganisaationa toimii keskitetysti kaikesta ydinlaitosten käytöstä poistosta ja ydinjätehuollosta huolehtiva, vuonna 2005 perustettu, julkishallinnon laitos (NDA, Nuclear Decommissioning Authority), jonka tehtävät on määritelty energiahuoltoa koskevassa laissa (Energy Act 2004). Aiemmin jätehuollon vastuorganisaationa toiminut Nirex on liitetty NDA:han ja

Nirexin tehtäviä hoitaa nyt NDA. Viranomaisvalvonnasta vastaavat yhdessä Health and Safety Executive ja Environment Agency.

### 2.4.5 Japani

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 46 kpl; 46 200 MW
- Rakenteilla olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 2 kpl; 2 300 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 24,9 %.

Japanissa käytetyn polttoaineen huollossa nojaututaan jälleenkäsittelyyn ja tällöin keskeisenä perusteluna on ydinpolttoainevarojen mahdollisimman tehokas hyödyntäminen. Käytettyä polttoainetta on lähetetty jälleenkäsiteltäväksi sekä Isoon-Britanniaan että Ranskaan. Osa polttoaineesta on käsitelty Tokaissa sijaitsevassa laitoksessa, jonka kapasiteetti oli 70 tonnia vuodessa. Laitos oli käytössä vuodesta 1977 vuoteen 2006 ja kaikkiaan siellä on käsitelty polttoainetta alle 1100 tonnia. Suuremman jälleenkäsittelylaitoksen (noin 800 tonnia vuodessa) rakentaminen Rokkashoon aloitettiin vuonna 1994. Laitoksen valmistuminen on useaan otteeseen lykkäytynyt. Laitos oli viimeksi tarkoitus ottaa käyttöön elokuussa 2009, mutta viimeisimpien tietojen mukaan laitosta ei saada valmiiksi ennen syksyä 2010. Vuonna 2011 on arvioitu voitavan jälleenkäsittellä noin 80 tonnia käytettyä polttoainetta. Valmistuttuaan laitoksen kapasiteetti riittää noin 40 reaktorin (keskimäärin 1000 MW) käytetyn ydinpolttoaineen jälleenkäsittelyyn, mikä vastaa noin 80 % käytetyn polttoaineen vuotuisesta kertymästä Japanissa.

Japanissa on aloitettu jo 1980-luvun lopulla uudelleen jälleenkäsittelyä seuraavan erotus- ja transmutaatiotekniikan tutkimus. Alkuvaiheessa erityiskohteena oli alikriittinen kiihdytinavusteinen transmutaatiotekniikka, mutta viime vuosina on korostettu enemmän neljännen sukupolven nopeiden reaktorien käyttöä ja tavoitteena on tehostaa polttoainevarojen käyttöä ja vähentää geologista loppusijoitusta vaativien jätteiden määrää.

Geologisen loppusijoituksen kehitystyöhön liittyen Japanissa on tavoitteena saattaa loppuun kahden kalliolaboratorion rakentaminen vuonna 2010. Miunamissa sijaitseva laboratorio on kiteisen kallioperän alueella kun taas Horonoben laboratoriossa tutkittava kalliomuodostelma on sedimenttikiveä. Loppusijoituspaikan valintaprosessi perustuu menettelyyn, jossa kuntia pyydetään esittämään halukkuutensa tarjota aluettaan alustavien sijoituspaikkatutkimusten kohteeksi. Syksyllä 2006 Toyon kaupunki Kochin prefektuurissa esitti olevansa valmis hyväksymään tarjouksen, mutta kaupunki perui sittemmin keväällä 2007 tarjouksensa. Japanissa on tavoitteena saada korkea-aktiivisen jätteen loppusijoitustila käyttöön vuoteen 2035 mennessä.

Japanissa korkea-aktiivisen jätteen loppusijoitushankkeesta vastaava organisaatio on NUMO (Nuclear Waste Management Organization). Valvova viranomais on energia-, kaupp- ja teollisuusministeriön (METI) alaisuudessa oleva riippumaton ydin- ja teollisuusturvallisuuden keskus (NISA, Nuclear and Industrial Safety Agency). Turvallisuusviranomaisen tukiorganisaationa toimii JNES (Japan Nuclear Energy Safety Organization).

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

### 2.4.6 Kanada

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 18 kpl; 12 600 MW
- Rakenteilla olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 2 kpl; 1 500 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 14,8 %.

Kanadassa käytetyn ydinpolttoaineen huolto perustuu avoimeen polttoainekiertoon eli käytetyn polttoaineen suoraan loppusijoitukseen ilman jälleenkäsittelyä. Käytetyn polttoaineen loppusijoitusta kiteiseen kallioperään on tutkittu jo pitkään Kanadassa yleisellä tasolla, mutta sijoituspaikan valintaan tähtääviä tutkimuksia ei käytetyn polttoaineen loppusijoituksen osalta ole tehty. Graniittityyppisen kallioperän soveltuvuutta käytetyn polttoaineen loppusijoitukseen on tutkittu Manitobassa sijaitsevassa kalliolaboratoriossa, jossa tehtävistä vastaa AECL (Atomic Energy of Canada Ltd). AECL toteutti laajan ympäristövaikutusten arviointimenettelyn, jota koskeva raporttiaineisto toimitettiin viranomaisten arvioitavaksi vuonna 1994. Ympäristövaikutusten arviointipaneelin lausunnossa vuonna 1998 todettiin tutkitun loppusijoitusratkaisun olevan teknisesti hyväksyttävä, mutta yhteiskunnallisen hyväksyttävyyden suhteen nähtiin olevan vielä puutteellisuuksia. Lausunnossa esitetyt jatkotoimenpidesuositukset johtivat erityisen käytettyä ydinpolttoainejätettä koskevan lain (Nuclear Fuel Waste Act (NFWA), 2002) säätämiseen.

Lain säädösten mukaisesti perustettiin käytetyn polttoaineen huollon toteutuksesta vastaava yhtiö NWMO (Nuclear Waste Management Organisation). Vuoteen 2005 asti NWMO selvitti vaihtoehtoisia ratkaisumalleja ja päätyi suosittamaan vaiheittain etenevää lähestymistapaa (APM, Adaptive Phased Management), jonka yksityiskohtia voidaan joustavasti harkita uudelleen hankkeen edetessä. Kanadan hallitus myönsi kesäkuussa 2007 NWMO:lle toimivallan APM-lähestymistapaan perustuvan ratkaisun toteuttamiseen. NWMO esitti tammikuussa 2009 viisivuotissuunnitelman APM-lähestymistavan soveltamiseksi vuoteen 2013 asti [NWMO 2009 a, b]. Varsinainen sijoituspaikan valintaan tähtäävä toiminta aloitettaneen vuonna 2010. Seuraavassa vaiheessa vapaaehtois pohjalta ehdotetuilla sijoituspaikoilla suoritetaan alustavia soveltuvuus selvityksiä, minkä jälkeen edetään yksityiskohtaisemmin tutkimuksin valittavilla potentiaalisilla sijoituspaikoilla. Tätä seuraavassa vaiheessa valitaan suositeltavin paikkavaihtoehto, jolle toteutetaan ympäristövaikutusten arviointimenettely sekä varsinainen luvitusprosessi. Aikaisimmaksi mahdolliseksi ajankohdaksi geologiseen loppusijoitukseen perustuvan laitoksen käynnistymiselle on arvioitu vuosi 2025, mutta kustannusarvioiden pohjana vuotta 2035 käytetään varovaisempana oletettuna käyttöön oton ajankohtana. Ennen loppusijoituslaitoksen käyttöön ottoa jatketaan käytetyn polttoaineen välivarastointia ydinvoimalaitoksilla ja tutkimuslaitoksilla. Alkuvaiheessa varastointi toteutetaan märkävarastointina ja asteittain polttoainetta siirretään kuivavarastointiin perustuviin laitoksiin, joita on aloitettu rakentaa ydinvoimalaitospaikoille 1990-luvun puolivälistä lähtien.

Laitospaikoilla tapahtuvasta välivarastoinnista vastaavat voimalaitosten käyttöorganisaatiot. Käytetyn polttoaineen pitkän aikavälin huolto-ohjelman ja erityisesti geologisen loppusijoituksen suunnittelusta ja toteutuksesta vastaa NWMO. Liittovaltion osalta ydinjätehuollosta vastaava ja toimintaa valvova organisaatio on NRCan (Natural Resources Canada). Ydinturvallisuudesta vastaava valvontaviranomainen on CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission).

### 2.4.7 Kiina

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 11 kpl; 8 600 MW
- Rakenteilla olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 17 kpl; 17 500 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 2,2 %.

Käytetyn polttoaineen huollon strategiana on jälleenkäsittely ja korkea-aktiivisten jätteiden geologinen loppusijoitus. Jätehuollosta vastaava organisaatio on CNNC (China National Nuclear Corporation). Ympäristöviranomainen (China Environmental Protection Agency) vastaa vaatimusten kehittämisestä ja on valvova viranomainen ympäristövaikutusten arvioinnissa. Ydinturvallisuusviranomainen (China National Nuclear Safety Administration) puolestaan vastaa korkea-aktiivisen jätteen loppusijoituksen turvallisuusvalvonnasta.

Loppusijoituspaikan valintaprosessi on käynnistetty jo 1985 ja geologisen loppusijoituslaitoksen toteuttaminen sisältää neljä vaihetta. Kiteinen kallioperä (graniitti) on valittu tutkittavaksi kallioperämuodostelmaksi ja alustavissa aluevalinnoissa (2001–2005) tutkittavaksi alueeksi valittiin Beishan alue Luoteis-Kiinassa Gansun provinssissa, jossa sijaitsee Gobin autiomaa. Yksityiskohtaisempia paikkatutkimuksia on sen jälkeen jatkettu ja vuoden 2010 jälkeen on tarkoitus käynnistää maanalaisen kalliolaboratorion suunnittelu ja rakentaminen sekä suorittaa siellä kallioperän soveltuvuutta selvittäviä kokeita. Vuoteen 2025 mennessä on tavoitteena saada viranomaisten hyväksyntä valitulle paikalle ja käynnistää loppusijoituslaitoksen suunnittelu. Rakentaminen on suunniteltu toteutettavaksi aikavälillä 2030–2050 ja näin loppusijoituslaitoksen käyttö voitaisiin aloittaa vuonna 2050.

### 2.4.8 Ranska

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 59 kpl; 63 500 MW
- Rakenteilla olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 1 kpl; 1 600 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 76,2 %

Ydinjätehuollon toteuttamisesta vastaa valtion omistama ydinjäteyhtiö ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs). Käytännön tutkimus- ja kehitystyöstä vastaa ANDRA yhdessä ydinenergiakomissio CEA:n kanssa. Ranskassa kaasujäähdytteisten reaktorien polttoaineen jälleenkäsittelylaitos (UP1, Usine de Plutonium) oli käytössä Marcoulessa vuoteen 1997 asti. La Hagueen on rakennettu suuri kevytvesireaktorien polttoaineen jälleenkäsittelylaitos, jossa on nykyisin käytössä kaksi yksikköä. UP2:ssa, jonka kapasiteetti nykyisin on 1 000 tonnia käytettyä polttoainetta vuodessa, käsitellään kaikki Ranskassa syntyvä käytetty ydinpolttoaine. UP3-laitoksella käsitellään ulkomaisten ydinvoimayhtiöiden Ranskaan toimittamaa käytettyä polttoainetta ja myös sen nimellinen kapasiteetti on luokkaa 1 000 tonnia vuodessa. Ulkomainen kysyntä on kuitenkin huomattavasti vähentymässä johtuen toisaalta oman jälleenkäsittelykapasiteetin rakentamisesta (Japani) tai monien maiden siirtymisestä käytetyn polttoaineen suoraan loppusijoitukseen ilman jälleenkäsittelyä.

Ranskan korkea-aktiivisen ydinjätteen huollon (ml. käytetyn polttoaineen loppusijoitus) tutkimusta ja kehitystä varten säädettiin vuonna 1991 erityinen laki. Siinä määrättiin selvitettäväksi ja tutkittavaksi yhtä suurella panostuksella (1) geologista loppusijoitusta, (2) isotooppierottelua ja transmutaatiota

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

sekä (3) pitkäaikaisväliavarastointia. Lain edellyttämät tutkimukset raportoitiin vuonna 2006 ja tutkimustuloksien pohjalta hallitus valmisteli uuden lain, joka hyväksyttiin vuonna 2006. Laissa määritellään käytetyn polttoaineen käsittelyyn ja korkea-aktiivisen jätteen geologiseen loppusijoitukseen liittyvän tutkimuksen ja toteutuksen tavoitteet ja aikataulut. Entiseen tapaan käytetystä polttoaineesta pääosa jälleenkäsitellään ja UP2- ja UP3-laitosten kapasiteetti riittää kaikkiaan noin 1 700 tonnin polttoainemäärän jälleenkäsittelyyn vuodessa. Aiemmassa laissa määritellyille pääselvityskohteille on kullekin määritelty uudet tavoitteet.

Isotooppierottelun ja transmutaation tutkimuksen ja kehityksen vastuuorganisaationa on edelleen CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique). Transmutaation toteuttamisvaihtoehtoina selvitetään edelleen uuden sukupolven nopeita reaktoreita että kiihdytinpohjaisia alikriittisiä järjestelmiä ja tavoitteena on vuonna 2012 tehdä valinta näiden vaihtoehtoisten ratkaisujen kesken perustuen arvioihin teollisesta toteuttamiskelpoisuudesta. Valintaa vastaavan prototyypilaitoksen käyttöön oton aikataulutavoite on vuosi 2020. Alustavien näkemysten perusteella on todennäköisintä, että aikanaan päädytään nopean natrium-jäähdytteisen reaktorin valintaan prototyypilaitokseksi. On huomattava, että kaikkia radioaktiivisia aineita ei voida täydellisesti transmutoida, vaan myös transmutaatiota sovellettaessa jää lopuksi jäljelle korkea-aktiivisia jätteitä, jotka edellyttävät geologista loppusijoitusta. Lisäksi transmutointia ei voida soveltaa jo aiemmin syntyneisiin korkea-aktiivisiin jätteisiin, jotka on kiinteystetty lasittamalla.

Geologisen loppusijoituksen osalta aiempi laki edellytti valitsemaan vähintään kaksi paikkaa, joihin rakennetaan maanalainen laboratorio. Laki edellytti, että laboratorioista ainakin yhden tulisi sijaita graniittikalliossa ja toisen savikivessä. Savikivilaboratorion paikaksi on hallituksen päätöksellä vuonna 1998 valittu Buren alue. Sen sijaan graniittilaboratorion sijoituspaikan valinnasta jouduttiin kokonaan luopumaan, koska millään vaihtoehtoisilla sijoituspaikoilla ei saatu riittävän laajaa poliittista ja kansalaisten hyväksyntää. Vuoden 2006 lain mukaan loppusijoituspaikan kallioperän tulee olla tyypiltään samaa kuin on tutkittu kalliolaboratoriossa eli Buressa tutkittu savimuodostelma. Yksityiskohtaiset sijoituspaikkatutkimukset loppusijoitusalueen valitsemiseksi käynnistettiin vuonna 2007. Tavoitteena on jättää vuonna 2015 viranomaisten käsiteltäväksi esitys alueen valinnasta geologisen loppusijoituslaitoksen sijoituspaikaksi. Laissa on määritelty, että loppusijoituslaitos on toteutettava ylläpitäen vaiheittaisessa toteutuksessa kaikissa vaiheissa mahdollisuus kunkin vaiheen peruuttamiseen. Peruutettavuusvaatimus koskee vähintään 100 vuoden jaksoa. Vaatimuksen noudattamisen vahvistaminen edellyttää parlamentin hyväksyntää ennen kuin aikanaan päätetään loppusijoituslaitoksen käyttöönotosta. On suunniteltu, että parlamentin käsittely toteutetaan laajan kansalaiskeskustelun pohjalta vuonna 2012. Parlamentin hyväksyntä edellytetään myös loppusijoituslaitoksen lopullisen sulkemisen yhteydessä. Syvän geologisen loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemus on suunniteltu jätettäväksi viranomaisten käsiteltäväksi vuonna 2015 ja laitoksen käyttöönoton on suunniteltu tapahtuvan vuonna 2025.

Pitkäaikaisväliavarastoinnin tutkimuksessa ja kehityksessä selvitettiin vuoteen 2006 mennessä erilaisia teknisiä mahdollisuuksia toteuttaa maanpinnalla tai maanalaisesti lähellä maanpintaa tapahtuva erilaisten jätetuotteiden (mm. lasitettu korkea-aktiivinen jäte ja polttoaine-elementtien metalliset rakenneosat) ja sekaoksidipolttaine-elementtien (MOX) väliavarastointi. Vaikkakin sekä vuoden 1991 että vuoden 2006 laeissa pitkä-aikaisvarastointi tuodaan esille itsenäisenä tutkimuslinjana ei sitä voida pitää kestävästä kehityksen mukaisena lopullisena ratkaisuna. Toisaalta pitkäaikainen väliavarastointi on jo nykyisin sovellettava, geologista loppusijoitusta edeltävä välivaihe. Lisäksi väliavarastointivaihe luo joustavuutta isotooppierottelun ja transmutaation toteutukseen ennen geologista loppusijoitusta. Esi-

merkiksi sekaoksidipolttoainetta ei tällöin ole tarvis loppusijoittaa käsittelemättömänä, vaan jälleenkäsittely on mahdollista toteuttaa myös tälle polttoainetyypille pitkähkön jäähtymisajan (60–80 vuotta) jälkeen ja tällöin voidaan hyödyntää myös sekaoksidipolttoaineessa käytön jälkeen vielä olevat käytökelpoiset polttoainevarat (uraani, aktinidit ja sivuaktinidit). Vuoden 2006 lain vaatimusten mukaan pitkäaikaisvarastointia koskevalla tutkimuksella on luotava edellytykset toteuttaa uusi pitkäaikainen välivarastointiratkaisu tai modifioida olemassa olevia pitkäaikaisvarastoja siten, että ne täyttävät lisäkapasiteetin tarpeen.

### 2.4.9 Ruotsi

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 10 kpl; 9 400 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 42,0 %

Ydinjätehuollon turvallisuutta valvoo ympäristöministeriön alaisuudessa toimiva säteilyturvallisuusviranomaisena SSM (Strålsäkerhetsmyndigheten). Oman ja kansallisen osaamisensa turvaamiseksi SSM rahoittaa tutkimusta sekä Ruotsissa että muissa maissa. Osa tutkimuksista liittyy riippumattomien arviointien suorittamiseen. Hallituksen antaman tehtävän mukaisesti SSM on laatinut ja julkaissut kesäkuussa 2009 kaikki radioaktiiviset jätteet kattavan kansallisen jätehuoltosuunnitelman [SSM 2009], joka lähinnä määrittelee viranomaistehtävät eri jätetyyppien osalta, joista merkittävin on ydinenergian tuotannosta peräisin olevat ydinjätteet. Lisäksi yhtenä neuvoo-antavana elimenä toimii ydinjäteneuvottelukunta KASAM (Statens råd för kärnavfallsfrågor), joka riippumattomana muista toimijoista arvioi kolmen vuoden välein julkaisemissaan raporteissa Ruotsin ydinjätehuollon tieteellistä tasoa ja osaamista. Ydinvoimateollisuuden omistama SKB-yhtiö (Svensk Kärnbränslehantering Ab) on vastuussa ydinjätehuollon toteutuksesta ja sen edellyttämästä tutkimustoiminnasta.

Käytetty ydinpolttoaine välivarastoidaan tällä hetkellä Oskarshamnissa ydinvoimalaitoksen yhteydessä olevassa keskusvarastossa (CLAB), johon kauempana sijaitsevista laitoksista tulevat käytetyn ydinpolttoaineen kuljetukset saapuvat meritse. Keskusvaraston yhteyteen on suunniteltu rakennettavaksi myös laitos käytetyn ydinpolttoaineen kapseloimiseksi loppusijoitusta varten. Kapselointilaitoksen rakentamiseen tarvitaan kaksi erillistä lupaa. SKB jätti ydinenergiain (kärntechniklagen) mukaisen hakemuksen kapselointilaitoksen rakentamisesta jo marraskuussa 2006 ja tätä hakemusta käsittelee SSM. Toinen hanketta koskeva hakemus ympäristöviranomaiselle (Miljöbalken) on tarkoitus jättää vuonna 2010. Kapselointilaitoksen rakentaminen on tarkoitus aloittaa noin vuonna 2015. Kapselointilaitoksen rakentamisen keskusvaraston yhteyteen on nähty tarjoavan useita etuja. Kapselointilaitos on tarkoitus ottaa käyttöön samana vuonna kuin otetaan käyttöön käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitos eli noin vuonna 2023.

SKB on toteuttanut useassa vaiheessa tutkimuksia käytetyn polttoaineen loppusijoituslaitoksen sijoituspaikan valintaan liittyen. Viimeisimmässä vaiheessa vertailevia tutkimuksia suoritettiin Oskarshamnin ja Forsmarkin ydinvoimalaitosten läheisyydessä, niiden sijainti- tai lähikunnissa eli Simpevarp ja Laxemar sekä Östhammar. Kesäkuussa 2009 SKB tiedotti valinneensa sijoituspaikaksi Östhammarin kunnan, jonka alueella sijaitsee Forsmarkin ydinvoimalaitos, jossa on käytössä kolme reaktoriyksikköä. Östhammarin valintaa puolsivat useat, erityisesti pitkäaikaisturvallisuuteen vaikuttavat tekijät, kuten alueen kallioperän eheys ja alhainen vedenjohtavuus sekä kallion parempi lämmönjohtavuus

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

verrattuna vaihtoehtona olleeseen Laxemarin alueeseen. Jälkimmäinen tekijä vaikuttaa myös loppusijoitustilan mitoitukseen ja saman jätemäärän loppusijoittaminen Östhammarissa vaatii pienemmän kalliutilavuuden kuin Laxemarissa. SKB:lla on aikomus jättää rakentamislupahakemuksensa säteilyturvallisuusviranomaiselle (SSM) ja ympäristöviranomaiselle vuoden 2010 lopulla. SKB arvioi saavansa hallitukselta luvan loppusijoituslaitoksen rakentamiseen aikaisintaan vuonna 2013, jolloin rakentaminen voitaisiin aloittaa vuonna 2014 ja käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus voitaisiin aloittaa vuonna 2023.

Pieni osa Ruotsissa syntynyttä käytettyä ydinpolttoainetta on jälleenkäsitelty Isossa-Britanniassa. Suunnitelmien mukaan tultaisiin pieniä määriä MOX-polttainetta valmistamaan ja käyttämään Oskarshamnin ydinvoimalaitoksella. Ruotsin hallitus teki päätöksen asiasta joulukuussa 2002. Silloin voimayhtiö esitti aikovansa ladata reaktoriin kyseistä polttoainetta vuoden 2005 jälkeen. Lisäksi on sovittu Saksan ja Ruotsin kesken, että Ruotsista aikanaan La Hagueen jälleenkäsiteltäväksi toimitetusta polttoaine-erästä (55 tonnia) muodostuneen lasitetun korkea-aktiivisen jätteen Ruotsiin palautuksen sijasta saksalaista MOX-polttainetta palautetaan 24 tonnia Ruotsiin ja sitä varastoidaan CLAB-keskusvarastossa. Perusteluna tälle vaihdolle on se, että tällöin Ruotsin käytetyn polttoaineen loppusijoituslaitoksella ei tarvitse erikseen suunnitelmissa varautua myös lasitetun jätteen loppusijoittamiseen.

Käytetty ydinpolttoaine on tarkoitus loppusijoittaa noin 500 metrin syvyyteen kallioperään. Loppusijoitusmenetelmä vastaa Suomessakin käytettäväksi suunniteltua KBS-3-menetelmää. Sen mukaan ydinpolttoaineput kapseloidaan kupari-rauta-kapseleihin, jotka loppusijoitustilassa lisäksi eristetään bentoniitilla ympäröivästä kalliosta. Sulkemisen jälkeen loppusijoitustila ei edellytä valvontaa. Loppusijoituksen palautettavuudelle tai peruutettavuudelle ei ole viranomaisvaatimuksia, mutta käytännössä valittu loppusijoituskonsepti tarjoaa eri vaiheissa mahdollisuuksia tällaisiin ratkaisuihin.

Monipuolisia käytännön loppusijoitustutkimuksia sekä ruotsalaisten omina että kansainvälisinä projekteina tehdään SKB:n Äspössä sijaitsevassa maanalaisessa kalliolaboratoriossa, jossa tutkimukset voidaan tehdä todellisessa loppusijoitussyvyudessa. Äspön kalliolaboratorioon on myös rakennettu prototyyppiloppusijoitustila eli täysimittaisen loppusijoitustilan osa, johon on sijoitettu kuusi sähköisesti lämmitettyä loppusijoituskapselia. Mittauksin seurataan sijoitusreiän kallion, kapselin, täyteaineen ja tunnelitäytteen käyttäytymistä pitkäaikaiskokeen kuluessa.

### 2.4.10 Saksa

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 19 kpl; 21 200 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 28,3 %

Saksan alkuperäinen atomienergielaki edellytti kaiken käytetyn ydinpolttoaineen jälleenkäsittämistä ja valtion rakentamaa loppusijoituslaitosta kaikille ydinjätteille. Vuonna 1979 aloitettiin valtiovallan toimesta suolakivimuodostumaan sijoitettavan loppusijoituslaitoksen kehittäminen Gorlebeniin. Saksassa ei kuitenkaan ole omaa jälleenkäsittelylaitosta, vaikka pilottityyppinen laitos oli käytössä Karlsruheessa ja Wackersdorfiin suunniteltiin rakennettavaksi teollisesti toimiva laitos, mutta sen rakentamisesta luovuttiin myöhemmin. Tämän vuoksi ydinvoimayhtiöt tekivät sopimuksia jälleenkäsittelystä Ranskassa ja Englannissa. Jo vuodesta 1994 alkaen yhtiöt ovat voineet perustaa käytetyn polttoaineen huollon suunnittelun myös suoralle loppusijoitukselle. Saksassa on myös valtion ylläpitämiä alueellisia



välivarastoja, joista osaan on sijoitettu tai on mahdollista sijoittaa välivarastoitavaksi käytettyä polttoainetta. Sittemmin hallitus teki päätöksen, että jatkossa käytetyn polttoaineen välivarastointi tulee ensisijaisesti hoitaa ydinvoimalaitosten yhteyteen rakennettavissa pitkäaikaisvarastoissa. Myös voimalaitosjätteitä välivarastoidaan laitospaikoilla. Vuonna 2014 on tarkoitus ottaa käyttöön voimalaitosjätteidensä loppusijoituslaitos Konradissa. Syvälle kallioperään rakennettava laitos soveltuu myös muiden pitkäikäisten ydinjätteiden loppusijoitukseen, lukuun ottamatta käytettyä polttoainetta tai korkeaaktiivista jälleenkäsittelyjätettä.

Saksan hallitus ja neljä suurinta ydinvoimayhtiötä ovat allekirjoittaneet kesäkuussa 2001 sopimuksen, jossa sovitaan maan ydinvoimalaitosten sulkemisen aikataulusta ja niiden tuottamien ydinjätteiden loppusijoituksen periaatteista. Sopimuksen pohjalta on atomienergi lakiin tehty vastaava muutos ja tämä viimeisin atomienergi lain muutos tuli voimaan huhtikuussa 2002. Sopimuksen ja lakimuutoksen mukaan ydinpolttoaineen jälleenkäsittely lopetetaan niin pian kuin se on mahdollista rikkomatta jo tehtyjä jälleenkäsittelysopimuksia. Ydinpolttoaineen kuljetukset jälleenkäsittelylaitoksille eivät ole enää olleet mahdollisia 1.7.2005 jälkeen. Jälleenkäsittelyssä erotettu plutonium on käytettävä MOX-polttoaineena saksalaisissa ydinvoimalaitoksissa. Voimayhtiöt velvoitettiin rakentamaan mahdollisimman nopeasti polttoaineen välivarastot kunkin voimalaitoksen yhteyteen tai lähistölle, jotta voitiin välttää kuljetuksia tai ainakin vähentää niiden määrää. Käytettyä polttoainetta voitiin kuitenkin kuljettaa alueellisiin välivarastoihin, kunnes paikalliset varastot ovat valmiit. Kaikkiaan on vuoden 2008 loppuun mennessä otettu käyttöön paikalliset välivarastot 12 laitospaikalla ja viimeisimmän jo käytöstä poistetun Obrigheimin reaktorin osalta on myös paikallisen kuivavaraston rakentamislupahakemus viranomaisten käsittelyssä.

Hallitus sitoutuu edelleen vastaamaan loppusijoituksesta. Toteutuksesta vastaamaan on ympäristöministeriön (BMU) alaisuudessa toimiva liittovaltion säteilysuojelutoimisto (BfS) asettanut erillisen yhtiön (DBE, Die Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH). Viranomaisvalvonnasta vastaa ympäristöministeriö (BMU) ja tässä tehtävässä sitä tukee Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) sekä reaktoriturvallisuus- ja säteilysuojeluneuvottelukunnat. Ympäristöministeriölle on asetettu jo vuonna 2001 tehtävä valmistella laajapohjainen kansallinen suunnitelma kansalliseksi radioaktiivisten jätteiden huolto-ohjelmaksi. Ministeriöllä on tavoitteena esittää luonnos ohjelmasta vuoden 2009 kuluessa.

Lopullista päätöstä käytetyn polttoaineen ja korkea-aktiivisen jätteen loppusijoituslaitoksen paikasta ei ole tehty eikä myöskään kiinnitetty minkä tyyppiseen kalliomuodostelmaan loppusijoitus tapahtuisi. Loppusijoitustilan käyttöön otolle asetettu aikataulutavoite on vuosi 2035. Aiemmin Saksassa tutkittiin erityisesti suolamuodostelmia korkea-aktiivisen jätteen loppusijoituspaikoiksi, mutta Gorlebenin valmistelevat työt päätettiin vuonna 2000 keskeyttää hukkainvestointien välttämiseksi siihen asti kunnes eräät geologiseen loppusijoitukseen yleensä (mm. palautettavuuden tarve) ja suolakivisijoituksen turvallisuuden erityisesti liittyvät kysymykset on selvitetty, kuitenkin vähintään kolmeksi ja enintään kymmeneksi vuodeksi. Saksan lokakuussa 2009 muodostetun uuden hallituksen ohjelmaan sisältyy suunnitelma Gorlebenin tutkimusten käynnistämisestä uudelleen. Gorlebeniin on jo rakennettu pilottilaitos käytetyn polttoaineen käsittelyä loppusijoitusta varten. Laitosta ei ole vielä kuitenkaan otettu lopullisesti käyttöön, vaan sitä käytetään ainoastaan vioittuneiden kuljetus- ja varastoastoiden korjaamiseen.

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

### 2.4.11 Sveitsi

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 5 kpl; 3 200 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 39,2 %

Sveitsin lainsäädännön mukaan kaikki radioaktiiviset jätteet on sijoitettava tarkoitukseen soveltuviissa geologisissa muodostumissa sijaitseviin loppusijoitustiloihin. Ydinvoimayhtiöiden ja valtion yhteinen yhtiö NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) vastaa kaikkien Sveitsin ydinjätteiden loppusijoituksen suunnittelusta. Turvallisuusvalvonnasta vastaa itsenäinen viranomaisena ENSI (Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat) ja se aloitti toimintansa vuoden 2009 alusta. Sen edeltäjä oli HSK, joka toimi liittovaltion energia-asioista vastaavan organisaation yhteydessä. Muutoksella on tavoitteena edistää viranomaistoiminnan riippumattomuutta. Sveitsin lainsäädännön mukaan voimayhtiöt voivat valita käytetyn polttoaineen huollon perusratkaisuksi joko jälleenkäsittelyn tai polttoaineen suoran loppusijoituksen. Kuitenkin vuodesta 2006 lähtien on 10 vuoden ajan voimassa kielto toimittaa käytettyä polttoainetta ulkomaille jälleenkäsiteltäväksi.

Tällä hetkellä käytettyä polttoainetta varastoidaan sekä kunkin ydinvoimalaitoksen yhteydessä olevassa välivarastossa että vuonna 2001 Würenlingenissä käyttöön otetussa keskitetyssä välivarastossa (ZZL, Zentrale Zwischenlager Würenlingen), jonka käytöstä vastaa ydinvoimayhtiöiden yhdessä omistama Zwiilag-niminen yhtiö. Voimayhtiöillä on myös sopimuksia jälleenkäsittelystä ulkomailta ja vuoden 2007 loppuun mennessä 1 139 tonnia käytettyä polttoainetta on toimitettu jälleenkäsiteltäväksi Ranskassa ja Isossa-Britanniassa. Jälleenkäsittelyssä erotettua plutoniumia on hyödynnetty MOX-polttoaineen valmistukseen ja edelleen käytettäväksi Sveitsin ydinvoimalaitoksilla. Vuoden 2007 loppuun mennessä 50 % Ranskassa jälleenkäsittelystä sveitsiläisestä polttoaineesta peräisin olevaa korkea-aktiivista lasitettua jätettä on palautettu Sveitsiin.

Aiempi lainsäädäntö oli ydinjätehuollon osalta puutteellinen. Alkuvuodesta 2000 valmistui energiaministerin asettaman EKRA-työryhmän mietintö, jossa asetettiin voimakkaasti kannattamaan geologista loppusijoitusta ainoana strategiana, joka täyttää pitkäaikaisturvallisuuden vaatimukset. Työryhmä edellytti loppusijoitukselta myös palauttavuutta, jonka tarvetta tarkkailtaisiin erillisen pilottivaraston avulla. Muun muassa EKRA:n suosituksiin perustuen uusittu ydinenergi laki astui voimaan helmikuussa 2005. Sveitsin liittohallitus esitti uuden kansallisen energiatekniikan strategian, johon liittyy myös mahdollisuus rakentaa uusia ydinvoimalaitoksia.

Korkea-aktiivisen jätteen tai käytetyn polttoaineen loppusijoituksen osalta sijoituspaikkatutkimuksia on Sveitsissä toteutettu jo 1970-luvulta lähtien. Alkuvaiheessa keskityttiin lähinnä kiteisen kallioperän tutkimuksiin ja myöhemmin liittohallituksen määräyksestä alettiin tutkia myös sedimenttikivistä koostuvia kallioperämuodostelmia. Tutkimusten perusteella Nagra valitsi Zürichin kantonin pohjoisosassa sijaitsevan Opalinus-savimuodostelman jatkotutkimusten kohteeksi ja perusti Mont Terrin kalliolaboratorion. Nagra toimitti vuonna 2002 savimuodostelman sijoituspaikkatutkimusten pohjalta laaditun loppusijoituksen toteutettavuuden osoittavan selvityksen viranomaisten arvioitavaksi ja liittohallitus hyväksyi selvityksen vuonna 2006. Seuraavana vuonna liittovaltion viranomaiset laativat sijoituspaikan valinnassa noudatettavia menettelyjä kuvaavan suunnitelman, josta käytiin myös laaja kansalaiskeskustelu. Liittohallitus hyväksyi käsittelyn pohjalta uudelleen muotoillun sijoituspaikan valintamenettelyn huhtikuussa 2008 [DETEC 2008]. Valintamenettelyyn sisältyy kolme vaihetta, joista ensimmäinen

mäisessä vaiheessa nimetään loppusijoitukseen soveltuvia alueita eri jätetyypeille. Nagra esitti syksyllä 2008 kuusi matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoitukseen soveltuvaa aluetta sekä kolme korkea-aktiivisen jätteen geologiseen loppusijoitukseen soveltuvaa aluetta (Zürcher Weinland, pohjois-Lägeren ja Bözberg) [Nagra 2008]. Toisessa vaiheessa valituilta alueilta valitaan tarkemmin tutkittavat kohteet ja verrataan niitä keskenään alustavissa turvallisuusarvioissa. Kolmannessa vaiheessa jäljellä oleville paikoille (vähintään kaksi kullekin jätetyypille) suoritetaan yksityiskohtaisia paikkatutkimuksia ja suoritetaan perusteellinen turvallisuusarviointi kullekin paikalle erikseen. Tämän kolmannen vaiheen tulosten perusteella valitaan sijoituspaikat sekä korkea-aktiivisten jätteiden että matala- ja keskiaktiivisten jätteiden loppusijoituslaitoksille. On myös mahdollista, että samalle paikalle sijoitetaan sekä voimalaitosjätteiden että korkea-aktiivisen jätteen/käytetyn polttoaineen loppusijoituslaitokset. Kaikkiin kolmeen sijoituspaikan valintaprosessin vaiheeseen sisältyy laaja julkinen kuuleminen sekä Sveitsissä että myös naapurimaissa.

### 2.4.12 Venäjä

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 31 kpl; 21 700 MW
- Rakenteilla olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 9 kpl; 7 100 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 16,9 %.

Käytetyn polttoaineen huollossa perusratkaisu nojautuu jälleenkäsittelyyn. Vuodesta 1977 lähtien käytettyä polttoainetta, joka on peräisin VVER-440-reaktoreista, Beloyarskin nopeista reaktoreista BN-350 ja BN-600 sekä ydinkäyttöisistä jäänmurtaajista, on jälleenkäsittely Mayakin laitoksella (RT-1) Tseljabinskissä. Laitoksen käsittelykapasiteettia on suunniteltu kasvatettavaksi ja vuodelle 2007 asetettu tavoite oli 300 tonnia vuodessa ja lopulliseksi kapasiteetiksi on kaavailtu 400 tonnia vuodessa. Myös Loviisan ydinvoimalaitokselta on toimitettu polttoainetta Mayakin laitokselle. Tällä hetkellä Venäjän ulkopuolelta toimitetaan polttoainetta jälleenkäsitteltäväksi vain Bulgariasta ja Ukrainasta. Kapasiteetin riittämättömyyden vuoksi polttoainetta varastoidaan väliaikaisesti polttoainealtaissa. Toisen jälleenkäsittelylaitoksen (RT-2) rakentaminen Krasnoyarskiin on suunnitteilla ja sen on esitetty valmistuvan vuoden 2020 jälkeen. Laitoksen suunniteltu lopullinen kapasiteetti olisi 1 500 tonnia vuodessa. Laitoksella on tarkoitus ensisijaisesti käsitellä kevytvesireaktorien (VVER-1000) polttoainetta. Myös Krasnoyarskin laitoksella on jo käytössä allastyypinen välivarasto (6 000 tonnia). Sen sijaan RBMK-reaktorien polttoainetta ei nykyisen käytännön mukaan pyritä jälleenkäsittelyyn ja niiden polttoaine välivarastoidaan toistaiseksi ydinvoimalaitoksilla, mutta periaatteessa RT-2:n suunnitelmissa on varauduttu myöhemmässä vaiheessa jälleenkäsittelyyn myös RBMK-polttoainetta.

Aiemmin Venäjällä on tutkittu nestemäisen korkea-aktiivisen jätteen pumppaamista suoraan syväälle maankamaraan ulottuviin porareikiin. Tähän menetelmään perustuen rakennettujen loppusijoitusjärjestelmien käyttö lopetetaan aikavälillä 2010–2020. Muissa maissa suunniteltujen kaltaisen kiinteitetyn korkea-aktiivisen jätteen loppusijoituslaitoksen sijoituspaikkatutkimuksia on tehty usealla alueella. Mayakin laitoksen läheisyydessä on tutkittu vulkaanisperäisen kallioperän (mm. tuhkakivi) soveltuvuutta ja yksityiskohtaisempia tutkimuksia jatketaan kahdella alueella ja on tarkoitus rakentaa myös kalliolaboratorio jatkotutkimuksia varten. Krasnoyarskin alueella lupaavimmat potentiaaliset sijoituspaikat ovat Nizhnekanskiin granitoidi-massiivin alueella sijaitsevat Verkhneitatskii ja Yeniseiskii,

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

joista jälkimmäiselle on suunniteltu myös kalliolaboratoriota. Kiinteytettyjen korkea-aktiivisten jätteen geologisen loppusijoituslaitoksen käyttöönotto on suunniteltu tapahtuvan vuoden 2020 jälkeen.

### 2.4.13 Yhdysvallat

- Käytössä olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 104 kpl; 101 100 MW
- Rakenteilla olevien reaktorien määrä ja tuotantokapasiteetti lokakuussa 2009: 1 kpl; 1 200 MW
- Ydinenergian osuus sähkön tuotannosta vuonna 2008: 19,7 %

Kaavailut käytetyn polttoaineen/korkea-aktiivisen jätteen loppusijoittamisesta geologisiin muodostumiin ovat Yhdysvalloissa alkaneet jo 1950-luvun puolivälissä. Kaupallisten ydinvoimalaitosten käytetyn polttoaineen jälleenkäsittely on Yhdysvalloissa ollut kiellettyä vuodesta 1977 lähtien. Vuonna 1982 säädettiin ns. ydinjätelaki, Nuclear Waste Policy Act, jonka mukaan tällä hetkellä toimitaan. Laissa on määritelty käytetyn polttoaineen suora geologinen loppusijoitus maan viralliseksi pitkän tähtäimen toimintastrategiaksi. Vielä vuonna 2008 Yhdysvalloissa esitettiin näkemyksiä kansainväliseen yhteishankkeeseen GNEP (Global Nuclear Energy Partnership) liittyen, että kotimaista jälleenkäsittelyä harkittaisiin osana pitkän aikavälin suunnitelmia edistyksellisten polttoainekiertoratkaisujen ja uuden sukupolven nopeiden reaktorien käyttöönottoa. Vuoden 2009 alussa energiaministeriö (DOE) päätti kuitenkin peruuttaa GNEP-aloitteen ohjelmallisen ympäristövaikutusten arviointiprosessin, koska kotimaista jälleenkäsittelyä ei tässä vaiheessa nähdä tarpeellisenä.

Ydinjätehuollosta ja loppusijoituksesta on vastuussa energiaministeriön (DOE, Department of Energy) alaisuudessa toimiva yksikkö (OCRWM, Office of Civilian Radioactive Waste Management). Ydinjätehuolto rahoitetaan ydinjäterahastosta, jonka varat kertyvät ydinvoimayhtiöiden suorittamista, voimantuotannon ja -myynnin määrän mukaan määräytyvästä maksusta (1 US\$/MWh). Syyskuuhun 2007 mennessä varoja on näin kerätty 27 miljardia dollaria ja käytetty 7 mrd. Ydinjätehuollon ja loppusijoituksen turvallisuusvalvonnasta vastaa ydinturvallisuusviranomainen (NRC, Nuclear Regulatory Commission). Loppusijoituksen ympäristö- ja säteilyturvallisuusvaatimusten asettamisesta puolestaan vastaa ympäristöviranomainen (EPA, Environmental Protection Agency).

Mainitun ydinjätelain ohjaamana tutkittiin aluksi kolmea erityyppistä kalliomuodostelmaa (basaltti, Washingtonin osavaltiossa; suola Teksasissa ja tuhkakivi Nevadassa). Näiden alustavien loppusijoituslaitoksen paikanvalintavaiheiden jälkeen vuonna 1987 kongressi kehotti energiaministeriötä keskittämään paikkatutkimukset Yucca Mountainin (Nevada) alueelle. Vuonna 2002 senaatti hyväksyi Yucca Mountainin valinnan loppusijoituslaitoksen sijaintipaikaksi. Yucca Mountain -hankkeen aikataulua on useaan otteeseen lykätty ja alkuperäinen aikataulutavoite käyttöön otolle on vähitellen lykkääntynyt 2010-luvun loppupuoliskolle.

Yucca Mountainin tutkimusalue koostuu vulkaanisesta kivilajista (tuhkakivestä) ja loppusijoitustilat on suunniteltu rakennettavan 300 m:n syvyyteen. Paikalle on rakennettu maanalaiset tutkimustilat, joissa on suoritettu muun muassa täyden mittakaavan loppusijoituskokeita. Laitokseen loppusijoitettaiisiin käytettyä ydinpolttoainetta, joka on kertynyt paitsi ydinvoimaloista myös puolustusvoimien toimintoista, tutkimusreaktoreista (ml. ulkomailta toimivat tutkimusreaktorit) ja ydinkäyttöisistä aluksista. Loppusijoituslaitokseen voidaan sijoittaa myös ydinkärjistä purettavaa plutoniumia ja ydinaseohjelmista peräisin olevaa korkea-aktiivista lasitettua jätettä. Nykyinen laki rajoittaa loppusijoitettavan

## 2. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto

jätelmäärän 70 000 tonniin. On arvioitu olettaen kaikkien 104 reaktorin saavan 20 vuoden pidennyksen käyttöluupaansa, että vuoteen 2055 mennessä käytettyä ydinpolttoainetta kertyy USA:ssa 130 000 tonnia.

Kesäkuussa 2008 DOE toimitti rakentamislupahakemuksen ydinturvallisuusviranomaisen (NRC) käsiteltäväksi. On arvioitu, että NRC:n turvallisuusarviointiin kuluisi ainakin kolme vuotta. Kuitenkin uuden presidentin Barack Obaman astuttua virkaansa 2009 Yhdysvaltain hallitus leikkasi merkittävästi Yucca Mountain -hankkeen rahoitusta tasolle, joka riittää pelkästään vastausten valmisteleminen kysymyksiin, joita NRC lupakäsittelyn yhteydessä esittää. Tämän on arvioitu merkitsevän, että Yucca Mountain -hanketta ei ole kokonaan keskeytetty, mutta lupakäsittelyn aikana hallitus valmistelee tulevaa vaihtoehtoista strategiaa, jonka yksityiskohdista ei toistaiseksi ole käytettävissä tietoja.

New Mexicon osavaltiossa Carlsbadissa otettiin v. 1999 käyttöön maanalainen, maailman ensimmäinen pitkäikäisille ydinjätteille tarkoitettu loppusijoituslaitos WIPP (Waste Isolation Pilot Plant). Laitos on tarkoitettu USA:n ydinasetuotannossa kertyville matala- ja keskiaktiivisille transuraanipitoisille ydinjätteille. Loppusijoitusluolastot sijaitsevat 650 m:n syvyydessä suolamuodostumassa.

## 3 Voimalaitosjätteiden huolto

### 3.1 Suomen ydinvoimalaitoksilla käytössä olevat voimalaitosjätteiden huollon järjestelmät

Voimalaitosten käytön aiheuttamat voimalaitosjätteet käsittävät prosessivesien puhdistuksessa syntyviä ioninvaihtohartseja, haihdutuslietteitä, suodattimia ja niiden osia, kontaminoitunutta metalliromua, aktivoituneita metallijätteitä ja erilaisia lievästi saastuneita työvälineitä, suojavaatteita sekä puhdistusmateriaaleja. Nämä jätteet ovat enimmäkseen hyvin vähän aktiivisia ja niiden aktiivisuustaso laskee täysin vaarattomaksi muutamassa sadassa vuodessa.

#### 3.1.1 Voimalaitosjätteiden käsittely

Keski- ja matala-aktiivisten jätteiden käsittely jaetaan yleensä kolmeen vaiheeseen: (1) esikäsittely, (2) tilavuuden pienennys sekä (3) loppukäsittely ja pakkaaminen. Esikäsittelyn päätarkoituksena on helpottaa jätteen jatkokäsittelyä. Siihen voi kuulua jätteen kerääminen, lajittelu, neutralointi tai muu kemiallinen säätö, dekontaminointi ja alkukarakterisointi. Jätteiden lajittelu aktiivisuustason mukaan on tärkeätä mahdollisen valvonnasta vapauttamisen kannalta [STUK 2004, VTT 2004].

Märät jätteet koostuvat erilaisista massoista ja lietteistä, joita saadaan ioninvaihtimista, suodattimista ja haihduttimista. Nestemäisten jätteiden tilavuuden pienennykseen voidaan käyttää muun muassa seuraavia menetelmiä: ioninvaihto, mekaaninen suodatus, haihdutus, kemiallinen saostus, sentrifugointi, ultrasuodatus, käänteinen osmoosi ja poltto. Kiinteiden jätteiden tilavuutta voidaan puolestaan pienentää polttamalla, kokoonpuristamalla, paloittelemalla tai sulattamalla. Tilavuudenpienennyksen seurauksena joudutaan usein päästämään vähäisiä määriä kaasumaisia tai nestemäisiä radioaktiivisia aineita ympäristöön. Jätteiden käsittelyn tehokkuuden indikaattoreita ovat tilavuudenpienennyskerroin ja dekontaminointikerroin. Edellinen ilmaisee loppukäsittelyn ja pakatun jätteen tilavuussuhteen ilman tilavuudenpienennystä ja sen kera. Jälkimmäinen puolestaan ilmaisee tietyn nuklidin määrän talteen otetussa jätteessä verrattuna sen määrään puhdistetussa, yleensä valvonnasta vapautuvassa jätteessä.

Esimerkki tehokkaasta tilavuudenpienennysmenetelmästä on Fortum Oyj:ssä kehitetty NURES-prosessi, jolla voidaan erottaa cesiumia, strontiumia, kobolttia ja booria nestemäisistä radioaktiivisista jätteistä. Suodattimet käsitellään radioaktiivisena jätteenä ja puhdistunut neste voidaan laskea valvotusti mereen ylittämättä Säteilyturvakeskuksen asettamia päästörajoja.

Loppukäsittelyssä jätteet saatetaan pysyvään muotoon ja pakataan säiliöön varastointia, kuljetusta ja loppusijoitusta varten. Nestemäiset ja hienojakoiset jäteaineet saatetaan yleensä pysyvämpään muotoon kiinteyttämällä ne sopivaan matriisiin, kuten betoniin (Loviisan ydinvoimalaitoksella) tai bitumiin (Olkiluodon ydinvoimalaitoksella).

Kuivat voimalaitosjätteet koostuvat ns. huoltojätteestä, käytöstä poistetuista metallikomponenteista ja ilmansuodattimista. Suodattimet suljetaan yleensä ilman käsittelyä astiaan. Huoltojäte voidaan puristamalla pakata astiaan tai osa siitä voidaan polttaa ja sulkea tuhka sellaisenaan tai kiinteytettynä astiaan. Metallikomponentit voidaan dekontaminoida ja paloitella ennen astiaan sulkemista. Loppusijoitus voidaan suorittaa samaan tapaan kuin kiinteytettyjen märkien voimalaitosjätteiden tapauksessa.

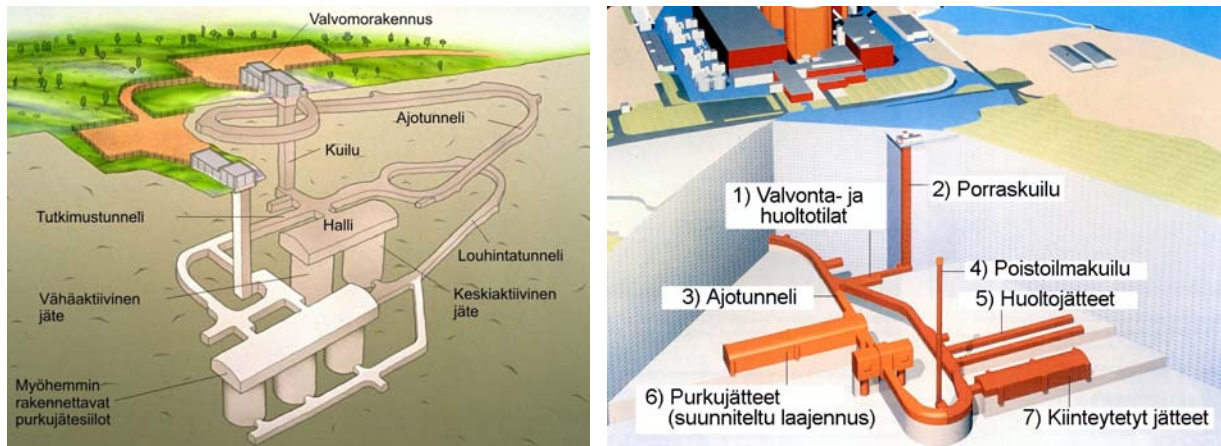
#### 3.1.2 Voimalaitosjätteiden loppusijoitus

Erityisesti keski-aktiiviset voimalaitosjätteet sisältävät siinä määrin radioaktiivisia aineita, että ne täytyy eristää elinympäristöstä muutaman sadan vuoden ajaksi. Käytännössä yleisimpinä tapoina muissa maissa ovat olleet ns. maahanhautaus eli loppusijoitus maaperään sekä mereen upotus, mikä nykyisten kansainvälisten säännösten mukaan ei enää ole mahdollista. Ruotsissa ja Suomessa on valittu ratkaisuksi loppusijoittaminen kallioperään. Ruotsissa tällainen loppusijoituslaitos on käytössä lähellä Forsmarkin ydinvoimalaitosta, ja Olkiluodossa loppusijoituslaitos otettiin käyttöön toukokuussa 1992. Vastaava laitos on käytössä Loviisassa, ja sen ensimmäinen vaihe otettiin käyttöön vuonna 1998. Vuonna 2008 Loviisassa otettiin käyttöön nestemäisten jätteiden kiinteytyslaitos ja näitä jätteitä varten loppusijoituslaitoksessa on erillinen tunneli.

Suomessa otettiin jo 1980-luvun alussa lähtökohdaksi, että ydinvoimalaitosten keski- ja matala-aktiivisten jätteiden loppusijoituslaitokset rakennetaan kyseisten ydinvoimalaitosalueiden kallioperään. Olkiluodossa otettiin loppusijoituslaitos käyttöön vuonna 1992. Laitos muodostuu kahdesta suuresta siilosta, joista toinen on tarkoitettu matala-aktiivisille jätteille ja toinen, betonisella sisäsiilolla varustettu, keskiaktiivisille jätteille. Siellä on myös valtion hallussa olevien pienjätteiden välivarasto. Vastaavanlainen, kallioperään noin 100 metrin syvyyteen rakennettu loppusijoituslaitos otettiin vuonna 1998 käyttöön Loviisan Hästholmenin voimalaitosalueella.

Molemmat maamme ydinvoimayhtiöt aikovat loppusijoittaa myös ydinvoimalaitoksia purettaessa syntyvät keski- ja matala-aktiiviset jätteet vastaavalla tavalla laajentamalla nykyisiä loppusijoituslaitoksiaan.

### 3. Voimalaitosjätteiden huolto



Kuva 4. Poikkileikkauskuvat Olkiluodon ja Loviisan nykyisten ydinvoimalaitosyksiköiden matala- ja keskiaktiivisten voimalaitosjätteiden loppusijoitustiloista, joita on suunniteltu laajennettavaksi ottaen huomioon purkujätteiden loppusijoitus.

## 3.2 Yleiskatsaus voimalaitosjätteiden loppusijoituksen tilanteeseen eri maissa

Keski- ja matala-aktiivisia jätteitä on loppusijoitettu jo 1950-luvulta lähtien. Taulukossa 4 esitetään yhteenveto ydinenergiamaissa käytössä olevista tai olleista sekä suunnitelluista loppusijoituslaitoksista. Pääasiallisina lähteinä on käytetty Käytetyn polttoaineen ja radioaktiivisen jätteen huollon turvallisuutta koskevaan yleissopimukseen [IAEA 2009a] liittyviä kansallisia selontekoja sekä EU-maiden osalta myös viitteeseen [EU 2008] sisältyviä tietoja. Nähdään, että nykyisin on käytössä lähinnä kahdentyyppisiä loppusijoituksen periaateratkaisuja: betonibunkkeri maan pintakerroksissa ja luolasto keskisyvytydessä kallioperässä. Näennäisestä erilaisuudesta huolimatta radioaktiivisten aineiden eristäminen perustuu molemmissa ratkaisuissa suurelta osin samoihin ilmiöihin [STUK 2004]:

(1) kestävät jättepakkaukset, (2) betonirakenteiden eristyskyky ja niiden aikaansaama suotuisa kemiallinen ympäristö, (3) vähäinen pohjaveden virtaama sijoitustilojen läheisyydessä, (4) radionuklidien hidas kulkeutuminen sijoitustiloista ympäröivän maa- tai kallioperän kautta ihmisen elinpiiriin.

Merkittävin ero näiden kahden ratkaisumallin välillä on, että maan pintakerrokseen sijoitettu loppusijoituslaitos edellyttää valvontaa muutaman sadan vuoden ajan laitoksen sulkemisen jälkeen. Valvonta on tarpeen muun muassa sen varmistamiseksi, etteivät loppusijoitustilan päällä olevat eristekerrokset heikkene eroosion tai ihmisen toiminnan seurauksena. Sen sijaan kallioperässä olevan loppusijoitustilan turvallisuus ei edellytä valvontatoimia laitoksen sulkemisen jälkeen.



### 3. Voimalaitosjätteiden huolto

Taulukko 4. Käytössä ja suunnitteilla olevia keski- ja matala-aktiivisten jätteiden loppusijoituslaitoksia eri maissa.

Maa	Loppusijoituspaikka	Laitostyyppi	Käyttöjakso
Belgia	Dessel; suunnitteilla, rakentaminen 2011→	Maahanhautaus	—
Bulgaria	Suunnitteilla; rakentaminen 2015→	Muu kuin maahanhautaus	—
Espanja	El Cabril	Betonibunkkeri maan pintakerroksessa	1992 →
Iso-Britannia	Drigg	Maahanhautaus	1959 →
Japani	Rokkasho	Betonibunkkeri maan pintakerroksessa	1992 →
Kanada	Bruken ydinvoimalaitoksen alueella Kincardin kunnassa	Syvä (680 m) geologinen loppusijoitus; rakennuslupa noin 2012	2018→
Liettua	Stabatiškė, suunnitteilla rakentaminen 2012→	Osin maanpinnan lähelle; osin keskisyvyydelle	2015→
Norja	Himdalen	Kiteinen kallioperä lähellä maanpintaa	1998 →
Ranska	Centre de la Manche Centre de l'Aube Centre de Morvilliers	Maahanhautaus Betonibunkkeri maan pintakerroksessa Hyvin alhaisaktiivisille jätteille	1969–1994 1992 → 2003 →
Romania	Suunnitteilla; rakentaminen → 2014	Maanpinnan läheisyydessä	—
Ruotsi	Forsmarkin ydinvoimalaitos	Kiteinen kallioperä lähellä maanpintaa	1988 →
Saksa	Asse	Kallioluolasto suolamuodostelmassa	1967–1978
	Morsleben	Kallioluolasto suolamuodostelmassa	1981–1999
	Konrad	Kallioluolasto syvällä sedimentti-kivessä (pitkäikäiselle keski- ja matala-aktiiviselle jätteelle)	2014 →
Slovakia	Mohovce	Betonibunkkeri maan pintakerroksessa	2000 →
Sveitsi	Paikanvalintaprosessi 2008 →	Syvällä sijaitseva muodostelma	2030 →
Suomi	Olkiluodon ydinvoimalaitos	Kiteinen kallioperä lähellä maanpintaa	1992 →
	Loviisan ydinvoimalaitos	Kiteinen kallioperä lähellä maanpintaa	1998 →
Tšekki	Dukovany	Betonibunkkeri maan pintakerroksessa	1995 →
Unkari	Bátaapáti, rakenteilla; maanpäällinen varasto-osa käyttöön 2008	Maanalainen (n. 200 m syvyydessä)	2010→
USA	Beatty, Nevada	Maahanhautaus	1962–1992
	Barnwell, Etelä-Carolina	Maahanhautaus	1971 →
	Hanford, Washington	Maahanhautaus	1965 →
	Carlsbad, New Mexico	Luolasto syvällä suolamuodostumassa (pitkäikäiselle keski- ja matala-aktiiviselle transuraanipitoiselle jätteelle)	1998 →

## 4 Ydinvoimalaitosten käytöstä poisto ja purkujätteidien huolto

Ydinvoimalaitosten käytön aikana eräät järjestelmät ja laitteet tulevat radioaktiivisiksi. Laitosten käytöstä poiston tavoitteena on huolehtia, että näistä radioaktiivisista aineista ei ole haittaa ympäristölle laitosten hyötykäytön päättymisen jälkeen.

Käytöstä poisto voidaan toteuttaa monilla tavoin. On teknisesti mahdollista purkaa koko laitos muutamana vuoden kuluessa hyötykäytön jälkeen. Viivästetty käytöstäpoisto, jossa aktivoituneet komponentit ja rakenteet puretaan valvotun säilytyksen jälkeen, on kuitenkin sekä teknistaloudellisesti että työntekijöiden kokonaissäteilyaltistuksen kannalta parempi vaihtoehto.

Betonirakenteista aktiivisin osa – painesäiliötä ympäröinyt, neutronivuossa aktivoitunut biologinen suoja – puretaan kokonaan. Muista rakenteista poistetaan yleensä ainoastaan kontaminoitunut pintakerros erilaisin työstömenetelmin.

Ydinlaitosten purku on suurelta osin keski- ja matala-aktiivisten jätteidien huoltoa: teräs- ja betonirakenteiden paloittelua, pakkaamista ja loppusijoittamista. Työ on teknisesti ja säteilysuojelullisesti vaativaa, sillä osa rakenteista, lähinnä reaktorisäiliö ja sen sisäosat, säteilee hyvin voimakkaasti ja edellyttää etäkäsittelyä. Kontaminoituneita rakenteita purettaessa puolestaan on estettävä radioaktiivisen pölyn leviäminen ja pääsy hengitysilmaan.

Käytöstäpoistojätteet on sekä Loviisan että Olkiluodon laitoksilla suunniteltu loppusijoitettaviksi myöhemmin rakennettaviin voimalaitosjätteidien sijoitustilojen laajennuksiin (ks. kuva 4). Purkukohteista tärkein on reaktoripainesäiliö sisäosineen. Loviisan reaktoreiden painesäiliöiden osalta on laadittu suunnitelma niiden siirtämiseksi kokonaisina voimalaitosalueen kallioperään noin 100 metrin syvyyteen louhittavaan loppusijoitustilaan. Myös Olkiluodon nykyisten yksiköiden reaktoripainesäiliöt on päivitettyissä suunnitelmissa kaavailtu loppusijoitettavan kokonaisina.

Syksyyn 2009 mennessä 90 kaupallisesti toimineen reaktorin toiminta on lopetettu [WNA 2009c] ja IAEA:n tilastotietojen mukaan vuoden 2005 loppuun mennessä kahdeksan reaktorin käytöstä poisto ja purkaminen on toteutettu kokonaisuudessaan siten, että kyseiset laitospaikat on voitu luovuttaa muuhun käyttöön ilman rajoituksia. Lisäksi 17 reaktorin osalta purkaminen on toteutettu osittain ja kyseiset laitokset on saatettu turvalliseen sulkutilaan. Lisäksi 31 reaktoria ollaan purkamassa ja edelleen 30 reaktoria ollaan valmistelemassa turvalliseen tilaan odottamaan viivästettyä purkamista. Viitteessä [WNA 2009c] on esitetty tarkempi reaktoriyksikkökohtainen yhteenveto merkittävimmistä laitosten purkuhankkeista. IAEA:n, OECD:n ydinennergiajärjestön sekä EU:n piirissä on yhteistyöhankkeita, joissa kerätään kokemuksia konkreettisista ydinlaitosten purkuhankkeista.

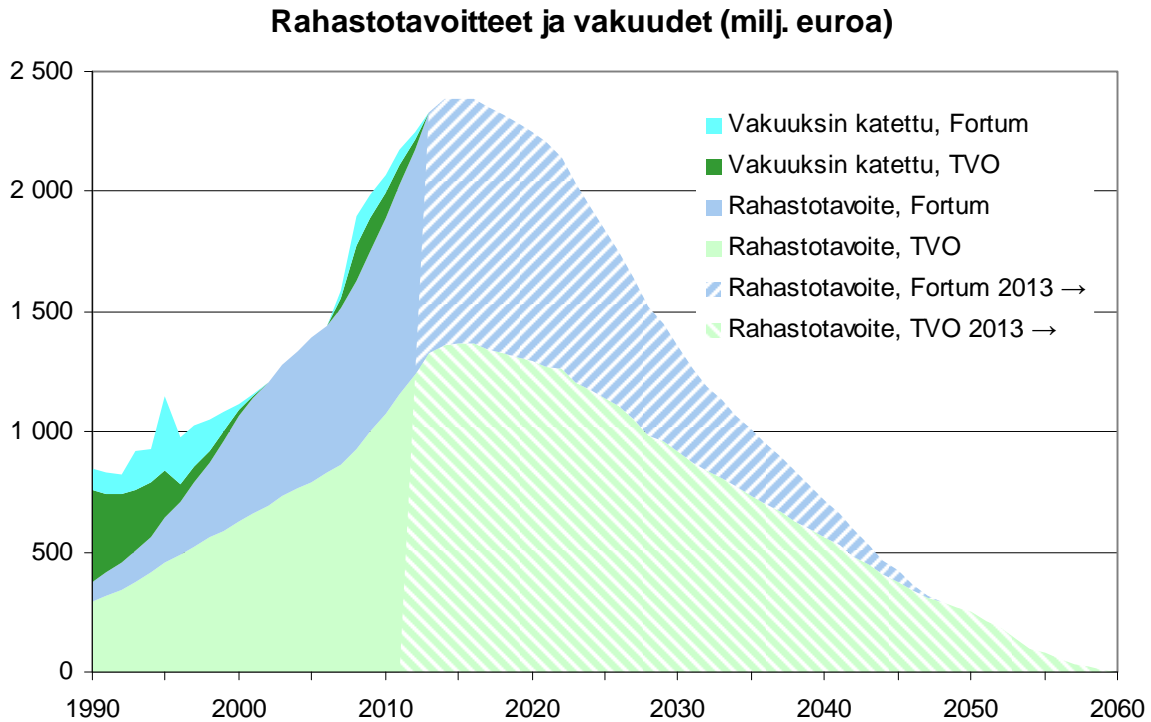
## 5 Ydinjätehuollon kustannuksiin varautuminen

Ydinjätteiden tuottajat ovat Suomen lainsäädännön mukaan velvollisia huolehtimaan kaikista ydinjätehuoltoon kuuluvista toimista ja varautumaan jätehuollosta aiheutuviin kustannuksiin. Kustannuksiin sisältyy myös laitosten käytöstä poisto ja purkujätteiden loppusijoitus. Ydinvoimalla tuotetun sähkön hintaan sisältyy siten myös ydinjätehuollon kustannukset. Aiheuttamisperiaatteen toteutumisen varmistamiseksi työ- ja elinkeinoministeriön alaisuudessa toimii valtion ydinjätehuoltorahasto. Sinne kerätään ydinjätteen tuottajilta vuosittain varoja niin, että ydinjätehuoltoon tulevaisuudessa tarvittavat toimenpiteet voidaan varmuudella kaikissa olosuhteissa hoitaa.

Ydinjätehuoltovelvollisen vastuumäärällä tarkoitetaan edellisen kalenterivuoden loppuun mennessä tuotettujen ydinjätteiden huollosta tulevaisuudessa aiheutuvien kustannusten kokonaismäärää. Jätehuoltovelvollisen on esitettävä kustannusarvioiden pohjana oleva suunnitelma eli jätehuoltokaavio ministeriön hyväksyttäväksi ensimmäisen kerran riittävän ajoissa ennen ydinjätteitä tuottavan toiminnan aloittamista ja viimeistään tätä toimintaa koskevan lupahakemuksen yhteydessä. Jätehuoltovelvollisen on myöhemmin täydennettävä kolmen vuoden välein jätehuoltokaaviota ja esitettävä riittävän yksityiskohtaisiin suunnitelmiin perustuva arvio jätehuollon kustannuksista. Jätehuoltosuunnitelman tulee perustua käytettävissä olevien tietojen mukaan toteuttamiskelpoisiin perusratkaisuihin. Kustannustietojen epävarmuus on kohtuullisessa määrin otettava huomioon arvioita nostavana tekijänä.

Vastuumäärää vastaavien varojen keräämiseksi jätehuoltovelvollisten on maksettava valtion ydinjätehuoltorahastoon ydinjätehuoltomaksuja. Työ- ja elinkeinoministeriö vahvistaa vuosittain rahastotavoitteen, joka määrätään ydinenergiaa tuottaville laitoksille siten, että rahasto-osuus vähitellen kattaa vastuumäärän ja on tämän suuruinen viimeistään 25. toimintavuotta seuraavana vuonna. Vastuumäärän ja olemassa olevan rahasto-osuuden ero katetaan jätehuoltovelvollisen antamalla takuilla. Nykyisin käytössä olevien ydinvoimalaitosyksiköiden yhteenlaskettu vastuumäärä vuoden 2009 alussa on runsaat 2 miljardia euroa, mikä on arvioitu tähän mennessä syntyneen ydinjätteen määrän perusteella. Rahastoon talletettujen varojen yhteissumma on lähes 1,8 miljardia euroa. Vastuumäärän ja rahastoon jo talletettujen varojen erotuksen osalta voimayhtiöt ovat luovuttaneet valtiolle vakuudet (kuva 5). Rahastoon kertyneitä varoja voidaan antaa lainaksi jätehuoltovelvolliselle tai valtiolle kahdentoista kuukauden Euribor-korkoon perustuen. Tällä tavoin tai muilla turvallisiksi katsottavilla sijoituksilla varmistetaan rahaston varojen reaaliarvon säilyminen.

## 5. Ydinjätehuollon kustannuksiin varautuminen



Kuva 5. Fortum Power and Heat Oy:n (Fortum) ja Teollisuuden Voima Oyj:n (TVO) rahastotavoitteet nykyisin käytössä oleville neljälle reaktoriyksikölle valtion ydinjätehuoltorahastossa sekä vakuuksin katetut osuudet. Rahastoon talletetuilla varoilla voidaan toteuttaa tarkasteluhetkeen mennessä kertyneiden ydinjätteiden jätehuolto ja loppusijoitus sekä reaktorien käytöstä poisto. Summaan ei sisälly jo toteutettujen ydinjätehuoltotoimien kustannukset, kuten käytetyn polttoaineen välivarastot ja voimalaitosjätteiden loppusijoitustilat eikä jo toteutettujen tutkimus- ja kehitystoimien kustannukset.

Komissio on vuonna 2004 Euroopan parlamentille ja neuvostolle esittämänsä kertomuksen loppupäätelmissä todennut käytöstä poiston menetelmien ja rahoitustapojen vaihtelevan eri jäsenvaltioissa huomattavasti. Uudessa kertomuksessaan [EU 2007] vuonna 2007 komissio toteaa viimeisten kahden vuoden aikana tehdyn selvitystyön edelleen vahvistaneen tätä käsitystä. Komission teettämässä selvityksessä [Wuppertal 2007] laadittiin laaja katsaus eri jäsenmaissa ydinjätehuoltorahastojen osalta noudatettaviin periaatteisiin ja menettelytapoihin. Vaikka toimintatapojen yhtenäistämällä voi olla huomattavan myönteisiä poliittisia vaikutuksia, kaikille samaa vaihtoehtoa tarjoavan lähestymistavan mahdollisiin seurauksiin on kiinnitettävä huomiota. Komission työ on lisännyt luottamusta siihen, että jäsenvaltiot perustavat ja hallinnoivat käytöstä poistoon tarkoitettuja rahastoja vastuullisella tavalla. Esimerkkinä mainitsemisen arvoisista hyvistä käytännöistä mainitaan Suomessa ja Ruotsissa kansalliseen lainsäädäntöön kirjattu periaate, jonka mukaan jätteen tuottajan on maksettava täysimääräisesti jätehuollosta aiheutuvat kustannukset. Ranskassa vuonna 2006 hyväksytty laki tarjoaa toisen, uudemman esimerkin siitä, miten valtio voi ottaa huomioon kansalaisissa epävarmuutta aiheuttavan ydinvoimateollisuuden puolen.

## 6 Ydinjätehuollon kansainvälinen yhteistyö

Tärkeä osa ydinenergian turvalliseen käyttöön tähtäävää kansainvälistä yhteistyötä on ydinjätehuollon ja geologisen loppusijoituksen teknologiaan ja turvallisuuteen liittyvä yhteistyö sekä kansainvälisten organisaatioiden piirissä että myös valtioiden kahden- tai monenvälisenä yhteistyönä. Ydinjätehuollon teknisten ratkaisujen kehittämisen ohella keskeinen yhteistyökohde on myös kokemusten vaihto yhteiskunnallisen hyväksyttävyyden saavuttamisessa. Erityisesti vaihdetaan kokemuksia yhteiskunnallisesta keskustelusta eri osapuolten välillä valittaessa ydinjätteiden käsittelyyn ja loppusijoittamiseen tarkoitettujen laitosten sijoituspaikkoja ja arvioitaessa niiden aiheuttamia ympäristö- ja sosiaalisia vaikutuksia.

### 6.1 Kansainvälinen atomienergiajärjestö (IAEA)

Kansainvälinen atomienergiajärjestö (IAEA) on YK:n alainen erillisjärjestö ja sen toimialaan kuuluvat monipuolisesti erilaiset ydinvoiman käyttöön, turvallisuuteen, säteilysuojeluun, ympäristövaikutuksiin sekä ydinmateriaalivalvontaan liittyvät tehtävät. Ydinjätehuollon osalta tarkastellaan sekä eri käsitteilyvaiheissa tarvittavia teknologioita että niihin liittyviä turvallisuusvaatimuksia. Järjestön toiminta tähtää monipuolisesti eri vaiheet kattavien menettelytapaohjeiden laadintaan, ottaen huomioon jäsenmaissa saadut kokemukset, sekä eritasoisten suositusluontoisten turvallisuusvaatimusten laadintaan. Niissä pyritään antamaan yhteiset perusteet jäsenmaiden turvallisuusvaatimuksille ja harmonisoimaan niitä keskenään. Ylimpänä tasona ovat yleiset turvallisuusperiaatteet (Safety Fundamentals). Ydinjätehuoltoa koskien on koottu asiakirja, Radioaktiivisen jätteen huollon periaatteet [IAEA 1995], jossa kuvataan ydinjätehuollon ja loppusijoituksen perustavaa laatua olevat keskeiset turvallisuusperiaatteet, jotka liittyvät seuraaviin osa-alueisiin:

- (1) Ihmisen terveyden suojele, (2) Ympäristön suojele, (3) Suojelun katettava yli valtiorajojen ulottuvat vaikutukset ihmisten terveyteen ja ympäristöön, (4) Tulevien sukupolvien suojele eli ennustetut terveysvaikutukset tuleville polville eivät saa olla suurempia kuin nykyisin hyväksyttävät vaikutukset, (5) Tuleville sukupolville ei saa siirtää kohtuuttomia taakkoja, (6) Ydinjätehuoltoa varten on oltava kansallinen lainsäädäntö, jossa on määriteltävä selkeä vastuunjako eri toimijoiden välillä ja taattava riippumaton viranomaisvalvonta, (7) Jätteiden kertymisen minimointi, (8) Jätteiden kertymisen ja ydinjätehuollon eri vaiheiden välisten riippuvuuksien huomioon ottaminen sekä (9) Ydinjätehuollon laitosten turvallisuus niiden elinkaaren kaikissa vaiheissa.

## 6. Ydinjätehuollon kansainvälinen yhteistyö

IAEA on myös vastannut ydinjätehuollon osalta keskeisen kansainvälisen yleissopimuksen valmistelusta perustuen suurelta osalta edellä mainittuun keskeiset turvallisuusperiaatteet määrittelevään asiakirjaan. Tämä yleissopimus (Käytetyn polttoaineen ja radioaktiivisen jätteen huollon turvallisuutta koskeva yleissopimus) solmittiin 1997 ja astui voimaan vuonna 2001. Sopimus on laillisesti sopijamaita sitova ja se on virallisesti vahvistettu myös Suomessa vuonna 2001 (asetus 36/2001). Sopimuksessa kuvataan ne periaatteet, joita asianmukaisesti toteutetussa ydinjätehuollossa tulee noudattaa. Sopimuksessa erityinen paino asetetaan kansalliseen lainsäädäntöön ja valvontajärjestelyihin liittyviin näkökohtiin. Sopimuksen noudattamisen seurantaan liittyen järjestetään kolmen vuoden välein erityisiä seurantakokouksia, joissa eri sopijamaiden ydinjätehuollon toteutusohjelmien ja lainsäädännön kehitystä tarkastellaan etukäteen valmisteltujen kansallisten selontekojen pohjalta. Viimeisin seurantakokous järjestettiin keväällä 2009. Suomessa selonteon laadinnasta päävastuu on Säteilyturvakeskuksella. Suomen kolmas selonteko on julkaistu raporttina [STUK 2008]. Linkit muiden maiden selontekoihin on mainittu yleissopimuksen kotisivulla [IAEA 2009a]. Näiden selontekojen tietoja on käytetty yhtenä keskeisenä lähdeaineistona myös tässä katsauksessa.

### 6.2 OECD:n ydinenergiajärjestö (NEA)

Ydinjätehuollon osalta OECD:n ydinenergiajärjestön (NEA) ja sen ydinjätekomitean tavoitteena on tukea jäsenmaiden keskinäistä yhteistyötä radioaktiivisten jätteiden ja materiaalien huoltoon liittyen. Toiminnassa keskeisenä kohteena on yleisten toimintastrategioiden kehittäminen siten, että jätehuolto voidaan toteuttaa turvallisesti, kestävä kehityksen mukaisesti ja laajasti hyväksyttävällä tavalla. Toiminnassa painotetaan erityisesti käytetyn polttoaineen ja muiden pitkäikäisten jätteiden huoltoa ja geologista loppusijoitusta.

Erytystavoitteina on luoda yhteinen, laajaperustainen näkemys ydinjätteiden huollon toteuttamisessa. Lisäksi pyritään myötävaikuttamaan kansallisten ja kansainvälisten jätehuoltostrategioiden kehittämiseen yhteisiä periaatteita noudattaen sekä edistämään yhdenmukaisten viranomaiskäytäntöjen kehittämistä ydinjätehuollon osalta. Laadittavissa katsauksissa ja muissa vastaavissa asiakirjoissa hyödynnetään ajantasaisista kansainvälistä tieteellis-teknistä osaamista eri jäsenmaissa. Yksityiskohtaisten raporttien ohella ydinjätekomitea on julkaissut yhteisinä näkemyksinä periaatteellisempia kannanottoja eri aihepiireistä. Vuonna 1995 julkaistiin kannanotto geologiseen loppusijoitukseen liittyvistä eettisistä näkökohdista [OECD 1995]. Vuosina 1999 ja 2008 on julkaistu katsaukset geologisen loppusijoituksen kehitystilanteesta eri maissa [OECD 1999 & 2008]. Viimeisimmän katsauksen johtopäätöksissä todetaan, että geologinen loppusijoitus on useimmissa tapauksissa valittu referenssiratkaisuksi siitä huolimatta, että erityisesti sijaintipaikan valinnassa on kohdattu ongelmia laajan poliittisen ja yhteiskunnallisen hyväksyttävyyden kannalta. Viimeaikaisten kokemusten perusteella on nähtävissä, että avoin ja laajasti eri osapuolet huomioon ottava vuorovaikutteinen ja asteittain etenevä lähestymistapa on välttämätön edellytys onnistuneelle sijoituspaikan valintamenettelylle<sup>4</sup>. Julkaisussa [OECD 2009a] kuvaillaan 12 OECD-maassa sovellettuja menettelytapoja geologisen loppusijoituspaikan valinnan osalta.

---

<sup>4</sup> Tämä lähestymistapa on ollut vallitseva Suomessa jo 1980-luvulta lähtien.

### 6.3 EU:n tutkimusyhteistyö

EU:n piirissä ydinerogia-alan keskeinen yhdistävä tekijä on Euratom-sopimus, joka tehtiin alun perin mm. ydinerogian rauhanomaista käyttöä koskevan tutkimuksen koordinoimiseksi jäsenvaltioissa. Euratom-säädöksiä on annettu myös esimerkiksi säteilysuojelun alalla. Unionilla ei ole varsinaista ydinturvallisuutta koskevaa lainsäädäntöä, jonka on perinteisesti katsottu kuuluvan jäsenvaltioiden toimivaltaan ja jota toisaalta säädellään myös kansainvälisin sopimuksin. Kesäkuussa 2008 EU:n Neuvosto antoi ydinlaitosten ydinturvallisuutta koskevan direktiivin (2009/71/EURATOM), jonka tavoitteena on pitää yllä ja edistää ydinturvallisuuden ja sen valvonnan jatkuvaa parantamista ja varmistaa, että jäsenvaltiot huolehtivat asianmukaisista kansallisista järjestelyistä ydinturvallisuuden korkean tason varmistamiseksi. Ydinvoimalla on tärkeä asema EU:n energialähteiden valikoimassa ja on ensiarvoisen tärkeää huolehtia asianmukaisesti ydinturvallisuudesta. Tämän mukaisesti komissio on perustanut kansallisten ydinalan sääntelyviranomaisten korkean tason ryhmän ENSREG (European Nuclear Safety Regulators Group), jonka tehtävänä on kehittää edelleen yhteisymmärrystä ja eurooppalaisia sääntöjä ydinturvallisuuden ja ydinlaitosten turvajärjestelyjen osalta.

Strategisessa energiaturkimussuunnitelmassa (SET Plan) EU pitää myös tärkeänä säilyttää johtoasemansa ydinvoimateknologian alalla. Siihen kuuluu myös ydinturvallisuus, ydinainesten valvonta, ydinjätehuolto, voimalaitosten käytöstä poisto ja väestön säteilysuojelu. Tähän liittyen syyskuussa 2007 perustettiin teknologiayhteisö Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNE TP). Teknologiayhteisössä laadittu strateginen tutkimusagenda julkaistiin toukokuussa 2009 [SNETP 2009]. Yhtenä tutkimuksen pääteemana on edistyksekkien ydinpolttoainekiertojen ja radioaktiivisten aineiden tehostettuun erotukseen ja transmutaatioon soveltuvien tekniikoiden kehittäminen. Tavoitteena on tehostaa ydinpolttoainevarojen käyttöä ja pyrkiä alentamaan loppusijoitusta edellyttävien jätteiden määrää sekä niiden lämmönkehitystä ja potentiaalista vaarallisuutta.

Marraskuussa 2009 järjestettiin nimenomaan geologiseen loppusijoitukseen painottuvan toisen teknologiayhteisön (IGD TP, Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform) käynnistystilaisuus. Tämän teknologiayhteisön visioraportti [IGDTP 2009] julkistettiin käynnistystilaisuudessa. Teknologiayhteisön tavoitteina on:

- määritellä, priorisoida, käynnistää ja toteuttaa eurooppalaisia strategisia hankkeita, jotka edistävät askelittain eteneviä käytännön hankkeita turvallisten, syvään geologiseen loppusijoitukseen perustuvien ratkaisujen kehittämiseen käytetylle polttoaineelle, korkea-aktiivisille jätteille ja muille pitkäikäisille ydinjätteille ottaen huomioon vielä jäljellä olevat tieteelliset ja yhteiskunnalliset haasteet ja
- tukea jäsenmaiden ydinjätehuollon toteutusohjelmia.

## 7 Yhteenveto

Ydinenergiaa tuottaessa radioaktiivisia aineita sisältäviä ydinjätteitä syntyy ydinpolttoainekierron kaikissa vaiheissa. Suomessa ei ole polttoainekierron alkupään teollisuutta, joten maamme jätehuolto kattaa pelkästään polttoaineketjun loppupään eli reaktorien käytöstä aiheutuvien keski- ja matala-aktiivisten laitosjätteiden, käytetyn polttoaineen sekä laitosten käytöstä poistamisen edellyttämät käsittely-, varastointi-, kuljetus- ja loppusijoitustoimenpiteet.

Ydinvoimaloiden käytöstä ja huoltotoimenpiteistä aiheutuvien matala- ja keskiaktiivisten jätteiden huolto perustuu laitospaikalla tapahtuvaan käsittelyyn, varastointiin ja loppusijoitukseen. Olkiluodossa on jo pitkään ollut käytössä sekä jätteiden käsittelylaitteistot että välivarastot. Voimalaitosjätteiden loppusijoituslaitos otettiin Olkiluodossa käyttöön vuonna 1992. Myös Loviisan laitoksella on käytössä vastaava loppusijoituslaitos ja matala-aktiivisten jätteiden loppusijoitukseen tarkoitettu osa laitoksesta otettiin käyttöön vuonna 1998. Vuonna 2008 Loviisassa otettiin käyttöön nestemäisten jätteiden kiinteytyslaitos ja näitä keskiaktiivisia jätteitä varten loppusijoituslaitoksessa on erillinen tunneli.

Korkea-aktiivisen käytetyn ydinpolttoaineen jätehuollossa käytäntö perustui Loviisan laitoksen osalta vuoteen 1996 asti käytetyn polttoaineen toimittamiseen takaisin polttoaineen toimittajalle Neuvostoliittoon ja myöhemmin Venäjälle. Olkiluodon laitoksen käytetyn polttoaineen osalta suunnitelmat ovat lähes laitosten käyttöönotosta lähtien perustuneet loppusijoitukseen Suomen kallioperään ilman jälleenkäsittelyä. Ydinenergialakiin vuoden 1994 lopussa tehtyjen muutosten mukaisesti myös Loviisan laitoksen käytetyn polttoaineen huollon tulee perustua kotimaiseen loppusijoitukseen. Niinpä voimayhtiöt ovatkin sopineet yhteistyöstä, jota käytännössä toteuttaa vuoden 1996 alussa toimintansa aloittanut Posiva Oy.

Ydinenergialaissa ja -asetuksessa on määritelty, että ydinenergiaa tuottavilla voimayhtiöillä on kokonaisvastuu ydinjätehuollon toteutuksesta kattuen suunnittelu-, tutkimus- ja toteutusvaiheet sekä taloudellisen vastuun kaikista näistä vaiheista. Ydinjätehuolto-ohjelman vaiheet aikataulutavoitteineen on alun perin määritelty valtioneuvoston vuonna 1983 tekemässä periaatepäätöksessä, jota on myöhemmin täydennetty kauppa- ja teollisuusministeriön (KTM), nykyisin työ- ja elinkeinoministeriö (TEM), päätöksin. Vaiheistettu ohjelma mahdollistaa useaan otteeseen tulosten huolellisen väliarvioinnin ennen etenemistä turvallisuuden tai kustannusten kannalta merkittävään seuraavaan vaiheeseen.

Ydinjätehuollon toteuttaminen edellyttää turvallisuuteen vaikuttavien prosessien ja luonnonilmiöiden ymmärtämistä, monipuolista teknistä osaamista sekä tiukkaa turvallisuuskulttuuria. Osa ydinjätehuollon merkittävistä päätöksistä ja toimista ajoittuu useiden vuosikymmenien päähän. Pitkäjänteisellä tutkimuksella on varmistettava, että sekä jätehuoltoa toteuttavilla voimayhtiöillä että sitä valvovilla



viranomaisilla on aikanaan käytettävissä tarpeellinen asiantuntemus. Ydinjätehuollon kustannusten hoitamiseen on Suomessa luotu kattava rahastointijärjestelmä, jolla varat tuleviin jätehuoltotoimiin kerätään voimalaitosten käytön aikana.

Ydinvoimayhtiöillä ja niiden yhteisesti omistamalla jätehuoltoyhtiöllä on oma jätehuoltotietämys ja -organisaatio. Lisäksi Suomessa on varsin pitkälle kehittynyt säännöstö ja viranomaisvalvonta. Ydinenergialaki määrittelee jätehuollon toiminnot luvanvaraisiksi ja jo tutkimusvaiheesta lähtien viranomaisvalvonnan alaisiksi. Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM) päättää jätehuollon tavoitteista, aikatauluista ja varautumisesta kustannuksiin. Säteilyturvakeskus (STUK) valvoo jätehuoltotoimien turvallisuutta ja tutkimuksen toteutumista sekä on keskeisimpiä lausunnonantajia voimayhtiöiden jätehuolto-ohjelmien kattavuuden ja painotuksen arvioinnissa.

Suomessa on hyvät yleiset edellytykset ja lähtökohdat toteuttaa ydinjätehuolto turvallisesti ja asianmukaisesti. Pääkysymyksiä on osoittaa perusteellisesti ja selkeästi, että käytetyn polttoaineen loppusijoitukseen kehitettävien teknisten ratkaisujen ja sijoituspaikan valinnan kautta saavutetaan hyväksyttävä turvallisuustaso, ja toteuttaa nämä ratkaisut käytännössä. Loppusijoituspaikan valinta edellytti valtioneuvoston periaatepäätöstä ja sitä koskeva hakemus jätettiin valtioneuvostolle keväällä 1999. Valtioneuvosto teki periaatepäätöksen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen sijoittamisesta Eurajoen Olkiluotoon ja eduskunta vahvisti päätöksen toukokuussa 2001. Myöhemmin, toukokuussa 2002, eduskunta hyväksyi lisäpäätöksen, jonka mukaisesti myös viidennen ydinvoimalaitosyksikön käytetty polttoaine voidaan loppusijoittaa Olkiluotoon. Suunnitelmien mukaan loppusijoituslaitos voisi aloittaa toimintansa noin vuonna 2020. Ruotsissa käytetyn polttoaineen loppusijoituslaitoksen toiminta on suunniteltu aloitettavaksi vuonna 2023 ja Ranskassa vuonna 2025. Korkeaktiivisen ydinjätteen loppusijoituksen aloittaminen ajoittuu useimmissa muissa ydinenergiaa käyttävissä maissa nykyisten suunnitelmien mukaan vasta aikavälille 2030–2050.

## Lähdeluettelo

- Anttila, M., Björnberg, M. & Vuori, S. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen huollon vaihtoehdot: Pitkääkaikeisvarastointi ja transmutaatio. Kauppa- ja teollisuusministeriö KTM, energiaosasto, Helsinki. 64 s. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 10.
- CoRWM 2006. Managing our Radioactive Waste Safely – CoRWM's recommendations to Government (Ch 10 Identifying and shortlisting waste management options). Committee on Radioactive Waste Management, CoRWM Doc 700, July 2006. 195 s.
- CoRWM 2009. CoRWM Report to Government – Geological Disposal of Higher Activity Radioactive Wastes. Committee on Radioactive Waste Management, July 2009. 74 s. <http://www.corwm.org.uk/Pages/Current%20Publications/2550%20CoRWM%20Report%20n%20Geological%20Disposal%20Final%2031%20July%202009.pdf>.
- Defra 2008. Managing Radioactive Waste Safely – A Framework for Implementing Geological Disposal. Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra), June 2008. 22 s. <http://www.official-documents.gov.uk/document/cm73/7386/7386.pdf>.
- DETEC 2008. Sectoral Plan for Deep Geological Repositories – Conceptual Part, Department of Transport, Energy and Communications (DETEC), Switzerland. [http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=en&name=en\\_821844489.pdf&endung=Sectoral Plan for Deep Geological Repositories – Conceptual Part](http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=en&name=en_821844489.pdf&endung=Sectoral Plan for Deep Geological Repositories – Conceptual Part).
- ENRESA 2006. Sexto Plan General de Residuos Radiactivos. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. [http://www.enresa.es/files/multimedios/6PGRR\\_Espa\\_ol\\_Libro\\_versi\\_n\\_indexada.pdf](http://www.enresa.es/files/multimedios/6PGRR_Espa_ol_Libro_versi_n_indexada.pdf).
- EU 2007. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille ja neuvostolle: Ydinlaitosten käytöstä poistoon sekä käytetyn polttoaineen ja radioaktiivisen jätteen huoltoon tarkoitettujen varojen käyttöä koskeva toinen kertomus. Bryssel 12.12.2007, KOM(2007) 794 lopullinen. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0794:FIN:FI:PDF>.
- EU 2008. Draft Commission Staff Working Document, Sixth Situation Report, Radioactive Waste and Spent Fuel Management in the European Union. Brussels, 8 September 2008, SEC(2008)2416, [http://www.ipex.eu/ipex/webdav/site/myjahiasite/groups/CentralSupport/public/2008/SEC\\_2008\\_2416/COM\\_SEC\(2008\)2416\\_EN.pdf](http://www.ipex.eu/ipex/webdav/site/myjahiasite/groups/CentralSupport/public/2008/SEC_2008_2416/COM_SEC(2008)2416_EN.pdf) Liittyy komission tiedotteeseen: Komission kertomus Euroopan parlamentille ja neuvostolle – Kuudes tilannekatsaus radioaktiivisen jätteen ja käytetyn ydinpolttoaineen huoltoon Euroopan unionissa KOM(2008)542. Bryssel, 8.9.2008.
- IAEA 1995. Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals Safety Series No. 111-F. International Atomic Energy Agency, Vienna. [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub989e\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub989e_scr.pdf).
- IAEA 2009a. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. <http://www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.htm> ja [www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/1997/infirc546.pdf](http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/1997/infirc546.pdf).
- IAEA 2009b. Power Reactor Information System – PRIS. <http://www.iaea.org/programmes/a2/>.

- IGDTP 2009. Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform Vision document. [http://www.igdtp.eu/Documents/Visiondoc\\_final\\_oct23.pdf](http://www.igdtp.eu/Documents/Visiondoc_final_oct23.pdf).
- Nagra 2008. Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager – Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA). Technischer Bericht 08–03, Oktober 2008. 458 s. [http://www.nagra.ch/documents/database/dokumente/%24default/Default%20Folder/Publikationen/NTBs%202005-2009/d\\_ntb08-03.pdf](http://www.nagra.ch/documents/database/dokumente/%24default/Default%20Folder/Publikationen/NTBs%202005-2009/d_ntb08-03.pdf).
- NWMO 2009a. Implementing Adaptive Phased Management 2009 to 2013. Nuclear Waste Management Organization (NWMO). [http://nwmo.ca/uploads\\_managed/MediaFiles/361\\_ImplementingAdaptivePhasedManagement2009to2013.pdf](http://nwmo.ca/uploads_managed/MediaFiles/361_ImplementingAdaptivePhasedManagement2009to2013.pdf).
- NWMO 2009b. Project Description of Canada's Long-Term Plan for Used Nuclear Fuel Management. Nuclear Waste Management Organization (NWMO). [http://www.cna.ca/english/pdf/Waste/NWMO/ProjectDescrip\\_used\\_Fuel.pdf](http://www.cna.ca/english/pdf/Waste/NWMO/ProjectDescrip_used_Fuel.pdf).
- NWMO 2009c. Status of National Used Fuel / High-Level Radioactive Waste Management Programs. Nuclear Waste Management Organization (NWMO), Canada. <http://www.cna.ca/english/pdf/Waste/NWMO/High-LevelRadioactiveWasteManagement.pdf>
- OECD 1995. The Environmental and Ethical Basis of the Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Waste – Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee. <http://www.nea.fr/html/rwm/reports/1995/geodisp/collective-opinion.html>.
- OECD 1999. Progress Towards Geologic Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? – An International Assessment. <https://www.nea.fr/html/rwm/reports/1999/progress.pdf>.
- OECD 2000. Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options – A Comparative Study. OECD, Nuclear Energy Agency, Paris. 68 s. + liitt. 53 s.
- OECD 2008. Moving Forward with Geological Disposal of Radioactive Waste – An RWMC Collective Statement. <http://www.nea.fr/html/rwm/docs/2008/rwm2008-5-rev2.pdf>.
- OECD 2009a. Partnering for long-term management of radioactive waste – overview of evolution and current practice in twelve countries. <http://www.nea.fr/html/rwm/docs/2009/rwm-fsc2009-2.pdf>.
- OECD 2009b. Radioactive Waste Management Programmes in OECD/NEA Member Countries. <http://www.nea.fr/html/rwm/profiles/welcome.html>.
- Rasilainen, K. & Vuori, S. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto. Suomalaisen suunnitelman pääpiirteet. VTT Tiedotteita 1953. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 50 s. + liitt. 7 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1999/T1953.pdf>.
- Rasilainen, K., Suolanen, V. & Vuori, S. 2000. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto. Turvallisuuden arvioinnin perusteet. VTT Tiedotteita 2033. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 57 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2033.pdf>.

- Rasilainen, K., Suolanen, V. & Vuori, S. 2001. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto. Turvallisuusanalyseissa laskettujen säteilyvaikutusten havainnollistaminen. VTT Tiedotteita 2080. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 58 s. + liitt. 5 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2080.pdf>.
- Rogers, K.A. 2009. Fire in the hole: A review of national spent nuclear fuel disposal policy. Progress in Nuclear Energy 51 (2009), s. 281–289.
- Rossi, J., Raiko, H., Suolanen, V. & Ilvonen, M. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen normaalikäytön, käyttöhäiriöiden ja onnettomuustilanteiden aiheuttamien säteilyannosten arviointi. Posiva, Helsinki. Raportti POSIVA 99-16. 85 s.
- Rossi, J., Raiko, H. & Suolanen, V. 2009. Olkiluodon ydinjätelaitoksen normaalikäytön, käyttöhäiriöiden ja onnettomuustilanteiden säteilyannosten arviointi. Posiva Oy, Eurajoki, Työraportti 2009-70. 65 s.
- Siltanen, S. 2003. Teknisiä ja taloudellisia näkökohtia käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen palauttavuudesta. Kirjallisuusselvitys. VTT Tiedotteita 2187, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 72 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2187.pdf>.
- SNETP 2009. Strategic Research Agenda of Sustainable Nuclear Energy Technology Platform. <http://www.snetp.eu/www/snetp/images/stories/Docs-AboutSNETP/sra2009.pdf>.
- SSM 2009. Nationell plan för allt radioaktivt avfall. Strålsäkerhetsmyndigheten. 92 s. [http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Myndighetshandling/Regering\\_suppdrag/Nationell\\_plan\\_for\\_allt\\_radioaktivt\\_avfall\\_2009.pdf](http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Myndighetshandling/Regering_suppdrag/Nationell_plan_for_allt_radioaktivt_avfall_2009.pdf).
- STUK 2004. Säteily- ja ydinturvallisuus – Ydinturvallisuus, luku 7: Radioaktiiviset jätteet. [http://www.stuk.fi/julkaisut\\_maaraykset/kirjasarja/fi\\_FI/kirjasarja5/](http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja5/).
- STUK 2008. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. 3rd Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention. STUK-B 96. STUK, Helsinki 2008. <http://www.stuk.fi/julkaisut/stuk-b/stuk-b96.pdf>.
- Suolanen, V., Lautkaski, R. & Rossi, J. 1999. Käytetyn ydinpolttoaineen kuljetusten terveystarkastusten arviointi. Posiva Oy, Helsinki, Raportti POSIVA 99-17. 139 s.
- Suolanen, V., Lautkaski, R., Rossi, J., Nyman, T., Rosqvist, T. & Sonninen, S. 2004. Käytetyn ydinpolttoaineen kuljetusriskitarkastelun päivitys. Posiva Oy, Eurajoki, Raportti POSIVA 2004-4. 158 s.
- Vieno, T. & Nordman, H. 1999. Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara – TILA-99. Posiva Oy, Helsinki, Report POSIVA 99-07.
- VTT, 2004. Energia Suomessa – Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset, luku 5.4.6 Ydinjätehuolto ja laitosten käytöstäpoisto. Edita Prima Oy, Helsinki, 2004.
- VTT, 2009. Energy Visions 2050 – Yhteenveto. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. 32 s. [http://www.vtt.fi/files/research/ene/energysystems/\\_energy\\_use/ev2050\\_yhteenveto\\_low.pdf](http://www.vtt.fi/files/research/ene/energysystems/_energy_use/ev2050_yhteenveto_low.pdf).

- Vuori, S. 1996. Käytetyn ydinpolttoaineen suoraan loppusijoitukseen ja jälleenkäsittelyyn perustuvien huoltovaihtoehtojen säteily- ja ympäristöturvallisuus. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Helsinki. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 8. 68 s.
- Vuori, S., Lautkaski, R., Lehtilä, A. & Suolanen, V. 2002. Katsaus eri energiantuotantomuotojen ympäristövaikutuksiin. VTT Tiedotteita 2127. Espoo, VTT Prosessit. 87 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2127.pdf>.
- Witherspoon, P.A. & Bodvarsson, G.S. 2006. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation, Fourth Worldwide Review. Earth Sciences Division, Ernest Orlando Lawrence, Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, April 2006, Report LBNL – 59808. 295 s. <http://esd.lbl.gov/NW/pdfs/lbnl-59808-wwr4.pdf>.
- WNA 2009a. Waste Management in the Nuclear Fuel Cycle, Appendix 3: National Policies, June 2009. World Nuclear Association. <http://www.world-nuclear.org/info/inf04ap3.html>.
- WNA 2009b. Nuclear share figures, 1998–2008. (<http://www.world-nuclear.org/info/nshare.html>) World Nuclear Power Reactors (operable and under construction). World Nuclear Association. <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>.
- WNA 2009c. Decommissioning Nuclear Facilities. World Nuclear Association. <http://www.world-nuclear.org/info/inf19.html>.
- Wuppertal 2007. Comparison among different decommissioning funds methodologies for nuclear installations. Wuppertal, Final Report on behalf of the European Commission, Service Contract TREN/05/NUCL/S07.55436, Editor: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. 194 s. [http://www.wupperinst.org/uploads/tx\\_wiprojekt/EUDecommFunds\\_FinalReport.pdf](http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/EUDecommFunds_FinalReport.pdf).





Tekijä(t) Seppo Vuori & Kari Rasilainen		
Nimeke <b>Katsaus ydinjätehuollon tilanteeseen Suomessa ja muissa maissa</b>		
Tiivistelmä Ydinenergia-asetus edellyttää, että periaatepäätöksen ratkaisemista varten työ- ja elinkeinoministeriön on toimitettava valtioneuvostolle erityinen katsaus käytössä oleviin ja suunniteltuihin ydinjätehuollon menetelmiin, niiden turvallisuuteen, ympäristövaikutuksiin, taloudellisuuteen ja soveltuvuuteen Suomen oloihin. Tähän raporttiin sisältyvä katsaus on laadittu erityisesti tätä tarkoitusta varten, mutta katsauksella katsotaan olevan myös laajempaa käyttöä kuvaamaan ydinjätehuollon ajankohtaista tilannetta Suomessa ja muissa maissa. Suomessa on ydinjätehuollon yleiset tavoitteet ja tavoiteaikataulu vahvistettu jo vuonna 1983 valtioneuvoston periaatepäätöksellä. Matala- ja keskiaktiivisen eli ns. voimalaitosjätteen loppusijoituslaitokset ovat olleet käytössä Olkiluodossa vuodesta 1992 ja Loviisassa vuodesta 1998 lähtien. Uusien suunniteltujen reaktoriyksiköiden voimalaitosjätteiden käsittely, varastointi ja loppusijoitus on suunniteltu toteutettavaksi saman kaltaisiin menetelmiin perustuen. Sekä Teollisuuden Voima Oyj että Fortum Power and Heat Oy ovat lisäksi laatineet varsin perusteelliset suunnitelmat nykyisin käytössä olevien ydinvoimalaitosyksiköiden käytöstä poistamisesta sekä purkujätteiden loppusijoittamisesta. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitosta koskien valtioneuvosto teki vuonna 2000 ydinenergialain mukaisen periaatepäätöksen laitoksen sijoittamisesta Eurajoen Olkiluotoon ja eduskunta vahvisti päätöksen toukokuussa 2001. Myöhemmin, toukokuussa 2002, eduskunta hyväksyi toisen periaatepäätöksen, jonka mukaisesti myös viidennen ydinvoimalaitosyksikön käytetty polttoaine voidaan loppusijoittaa Olkiluotoon. Suunnitelmien mukaan loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemus jätetään valtioneuvoston käsiteltäväksi vuonna 2012. Laitoksen käyttö on tarkoitus aloittaa vuonna 2020. Voimalaitosten käytöstä aiheutuvien keski- ja matala-aktiivisten voimalaitosjätteiden loppusijoitukseen on ollut jo pitkään käytössä loppusijoituslaitoksia useissa eri maissa. Sen sijaan korkea-aktiivisen jätteen tai käytetyn polttoaineen loppusijoitukseen ei ole vielä käytössä loppusijoituslaitoksia missään maassa. Tällä hetkellä konkreettisimmat suunnitelmat näiden jätteiden loppusijoituksen aloittamiselle jo 2020-luvun alkupuoliskolla on Suomessa, Ruotsissa ja Ranskassa. Yhdysvalloissa on ollut käytössä vuodesta 1999 syvälle suolamuodostelmaan rakennettu maailman ensimmäinen pitkäikäisille matala- ja keskiaktiivisille transuraanipitoisille ydinjätteille tarkoitettu loppusijoituslaitos.		
ISBN 978-951-38-7544-2 (nid.) 978-951-38-7545-9 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinnumero 39783
Julkaisu-aika Joulukuu 2009	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 59 s.
Projektin nimi TEM yjh-katsaus		Toimeksiantaja(t) Työ- ja elinkeinoministeriö
Avainsanat Nuclear waste, spent nuclear fuel, nuclear waste management, final disposal, safety, costs		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374







Series title, number and  
report code of publication

VTT Research Notes 2515  
VTT-TIED-2515

Author(s) Seppo Vuori & Kari Rasilainen		
Title <b>Review of status of plans and implementation of nuclear waste management in Finland and other countries</b>		
Abstract <p>The Nuclear Energy Decree requires that for the Decision in Principle (DiP), the Ministry of Employment and the Economy shall submit to the Government a special review of the methods of nuclear waste management that are currently applied and planned, their safety, environmental effects, costs and applicability to Finnish conditions. The review contained in this report has been prepared especially for this purpose, but it is anticipated that this review can provide useful background information also to a broader audience regarding the status of nuclear waste management in Finland and other countries.</p> <p>In Finland the general objectives and the overall schedule of the national nuclear waste management programme have been defined already in 1983 as the policy decision of the Government. The repositories for disposal of low- and medium-level operational wastes have been in operation in Olkiluoto since 1992 and in Loviisa since 1998. The treatment, storage and disposal of the operational wastes from the possible new reactor unit(s) are proposed to be performed employing similar methods. The operators of the existing reactors have prepared rather detailed plans for the decommissioning and dismantling of the reactor units including plans for final disposal of the decommissioning wastes.</p> <p>The previous DiP on the construction of the repository for final disposal of spent nuclear fuel was made by the Government in 2000 and ratified by the Parliament in 2001. The Parliament approved in 2002 a further DiP to expand the capacity of the facility to cover also the spent fuel arising from the fifth reactor unit in Finland. According to the present plans the application for construction licence for this facility will be submitted to the Government in 2012. It is expected that the disposal facility can start operation in 2020.</p> <p>Repositories for operational wastes have been operated for a long time in several countries, but no repositories are so far in operation for disposing of high-level waste or spent fuel in any country. The most concrete plans to start operation of repositories for these type of wastes already in early 2020's are in Finland, Sweden (2023) and France (2025). The plans are also progressing in Germany after the decision to restart detailed studies at Gorleben. The deep geological disposal facility Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in New Mexico in USA for intermediate level transuranic wastes has been operating successfully since 1999.</p>		
ISBN 978-951-38-7544-2 (soft back ed.) 978-951-38-7545-9 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )	Project number 39783	
Date December 2009	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 59 p.
Name of project TEM yjh-katsaus		Commissioned by The Ministry of Employment and the Economy
Keywords Nuclear waste, spent nuclear fuel, nuclear waste management, final disposal, safety, costs		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P. O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374

## VTT Tiedotteita – Research Notes

- 2502 Tommi Kaartinen, Paula Eskola, Elina Vestola, Elina Merta & Ulla-Maija Mroueh. Uudet jätteenkäsittely-keskusten vesienhallintatekniikat. 2009. 94 s. + liit. 11 s.
- 2503 Sebastian Teir, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Antti Arasto, Antti Tourunen, Janne Kärki, Matti Nieminen & Soile Aatos. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). 2009. 61 s.
- 2504 Sirkku Kivisaari, Lauri Kokkinen, Juhani Lehto & Eveliina Saari. Sosiaali- ja terveydenhuollon systeemisen innovaation johtaminen – kahden tapaustutkimuksen opetuksia. 2009. 69 s. + liitt. 16 s.
- 2505 Annele Eerola & Torsti Loikkanen. Governance and Research of Nordic Energy System Transition. Summary Report of the GoReNEST project. 2009. 45 p. + app. 3 p.
- 2506 Pertti Koukkari (ed.). Advanced Gibbs Energy Methods for Functional Materials and Processes. ChemSheet 1999–2009. 2009. 145 p.
- 2507 Kati Koponen, Sampo Soimakallio & Esa Sipilä. Assessing the greenhouse gas emissions of waste-derived ethanol in accordance with the EU RED methodology for biofuels. 2009. 42 p. + app. 7 p.
- 2508 Pentti Vähä, Jari Kettunen, Tapani Ryyänen, Minna Halonen, Jouko Myllyoja, Matti Kokkala, Maria Antikainen & Jari Kaikkonen. Palvelut muokkaavat kaikkia toimialoja. Palveluliiketoiminnan toimialakohtaiset tiekartat. 2009. 128 s.
- 2509 Maija Ruska & Göran Koreneff. Ydinvoimalaitoshankkeiden vaikutukset kilpailuun sähkömarkkinoilla. 2009. 57 s. + liitt. 12 s.
- 2510 Jyrki Poikkimäki, Katri Valkokari & Juha-Pekka Anttila. Teräspalvelutoiminnan tulevaisuus Suomessa. 2009. 48 s. + liitt. 21 s.
- 2511 Minna Kurkela (ed.). Advanced Biomass Gasification for High-Efficiency Power. Publishable Final Activity Report of BiGPower Project. 2009. 53 p.
- 2512 Kati Tillander, Tuula Hakkarainen, Helena Järnström, Tuomas Paloposki, Juha Laitinen, Mauri Mäkelä & Panu Oksa. Palokohteiden savu-, noki- ja kemikaalijäämät ja niiden vaikutukset työturvallisuuteen, osa 2. Polttokokeet, case-tapaukset tutkimukset ja altistumisen arviointi. 2009. 59 s.
- 2513 Krzysztof Klobut, Jorma Heikkinen, Jari Shemeikka, Ari Laitinen, Miika Rämä & Kari Sipilä. Huippuenergiatehokkaan asuintalon kaukolämpöratkaisut. 2009. 68 s.
- 2515 Seppo Vuori ja & Kari Rasilainen. Katsaus ydinjätehuollon tilanteeseen Suomessa ja muissa maissa. 2009. 59 s.
- 2517 Amar Mahiout, Jarmo Siivinen, Juha Mannila, Juha Nikkola, Riitta Mahlberg, Jyrki Romu, Risto Ilola, Outi Söderberg, Jorma Virtanen, Antero Pehkonen, Raisa Niemi, Tuomas Katajarinne, Jari Koskinen, Seppo Kivivuori & Simo-Pekka Hannula. Hybridipinnoitteilla lisäarvoa metallituotteille. 2009. 69 s.