

# ATS

YDINTEKNIikka

SUOMEN  
ATOMITEKNILLINEN  
SEURA —

ATOMTEKNISKA  
SÄLLSKAPET  
I FINLAND ry



2/2006

vol. 35

## Tässä numerossa

### PÄÄKIRJOITUS:

Kehittyvä ydinjätehuolto ..... 3

### EDITORIAL:

Nuclear waste  
management develops ..... 4

Uutisia ..... 5

Antti Vuorinen ydinasioista kultuna .... 6

Uraanin tarve,  
tuotantonäkymät ja kustannukset ..... 9

Palamahyvitys ja käytetyn ydin-  
polttoaineen kriittisyysturvallisuus ..... 11

Käytetyn polttoaineen  
varastojen kapasiteettia lisätään ..... 14

Ikiroutatutkimukset Kanadassa ..... 16

Loviisan ja Olkiluodon  
voimalaitosten käytöstäpoisto ..... 19

Ydinjätehuollon  
tutkimusohjelman tuloksia ..... 23

Posivan ensimmäinen kilometri ..... 26

Japanese nuclear  
waste management ..... 28

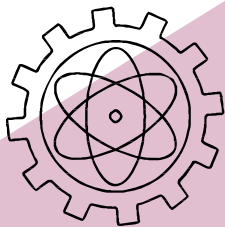
Diplomityö ..... 31

Väitöskirja  
ydinvoimatekniikan alalta ..... 32

### KOLUMNI:

Kuudennen reaktorin aika? ..... 34

Tapahtumakalenteri  
ja seuran uudet jäsenet ..... 35



# ATS

2/2006, vol. 35

## VUODEN 2006 TEEMAT

### 1/2006

Kansallinen  
ydinturvallisuus - YK3  
Koulutus ja osaaminen

### 2/2006

Ulkomaiden laitoshankkeet,  
jätehuolto ja loppusijoitus

### 3/2006

YG-numero

### 4/2006

Syysseminaari, ekskursion

## ILMOITUSHINNAT

1/1 sivua 700 €

1/2 sivua 500 €

1/4 sivua 300 €

## TOIMITUKSEN OSOITE

ATS Ydintekniikka  
c/o Kai Salminen  
Fortum Nuclear Services Oy  
PL 100, 00048 Fortum  
p. 010 453 3093  
telefax 010 453 3403  
toimitus@ats-fns.fi

ISSN-0356-0473

Painotalo Miktor Ky



441 194  
Painotuote

## JULKAISIJA / PUBLISHER

Suomen Atomiteknillinen Seura –  
Atomtekniska Sällskapet i Finland ry.

## ATS WWW

www.ats-fns.fi

## Toimitus / Editorial Staff

### Päätoimittaja / Chief Editor

DI Kai Salminen  
Fortum Nuclear Services Oy  
PL 100, 00048 Fortum  
p. 010 453 3093  
fax 010 453 3403  
paatoimittaja@ats-fns.fi

### Toimitussihteeri / Subeditor

Minna Rahkonen  
Fancy Media Ky  
Uusi Porvoontie 857  
01120 Västerskog  
p. 0400 508 088  
fancymedia@saunalahti.fi

### Erikoistoimittajat /

#### Members of the Editorial Staff

TkL Jarmo Ala-Heikkilä  
Teknillinen korkeakoulu  
jarmo.ala-heikkila@tkk.fi

DI Riku Mattila

Säteilyturvakeskus  
riku.mattila@stuk.fi

FM Johanna Hansen

Posiva  
johanna.hansen@posiva.fi

DI Eveliina Takasuo

VTT  
eveliina.takasuo@vtt.fi

TkT Jari Tuunanen

Teollisuuden Voima  
jari.tuunanen@tvo.fi

## Johtokunta / Board

### Puheenjohtaja / Chairperson

DI Harriet Kallio  
Fortum Power and Heat  
PL 100, 00048 Fortum  
p. 010 453 2463  
puheenjohtaja@ats-fns.fi

### Varapuheenjohtaja /

#### Vice-chairperson

DI Harry Lamroth  
Fortum Nuclear Services  
harry.lamroth@fortum.com

### Sihteeri /

#### Secretary of the Board

DI Juha Poikolainen  
VTT  
sihteeri@ats-fns.fi

### Rahastonhoitaja / Treasurer

DI Käthe Sarparanta  
Teollisuuden Voima  
kathe.sarparanta@tvo.fi

### Jäsenet /

#### Other Members of the Board

FM Johanna Hansen  
Posiva  
johanna.hansen@posiva.fi

DI Ronnie Olander

Säteilyturvakeskus  
ronnie.olander@stuk.fi

DI Olli Nevander

Teollisuuden Voima  
olli.nevander@tvo.fi

## Toimihenkilöt / Officials

### Jäsenrekisteri /

#### Membership Register

Liisa Hinkula  
Fujitsu-Siemens  
p. 020 722 5097  
liisa.hinkula@fi.fujitsu.com

### Kv. asioiden sihteeri /

#### Secretary of International Affairs

DI Satu Siltanen  
Fortum Nuclear Services  
satu.siltanen@fortum.com

### Energiakanava /

#### Energy Channel

TKT Karin Rantamäki  
VTT  
karin.rantamaki@vtt.fi

### Young Generation

DI Satu Siltanen  
Fortum Nuclear Services  
satu.siltanen@fortum.com

### Ekskursiosihteerit /

#### Excursion Secretaries

DI Pekka Nuutinen  
Teollisuuden Voima  
pekka.nuutinen@tvo.fi

DI Kristiina Turtaainen

Teollisuuden Voima  
kristiina.turtaainen@tvo.fi

Suomen Atomiteknillisen Seuran (perustettu 1966) tarkoituksena on edistää ydintekniikan alan tunte-  
mista Suomessa, toimia yhdysiteenä jäsentensä kesken kokemusten vaihtamiseksi ja ammattitaidon  
syventämiseksi sekä vaihtaa tietoa ja kokemuksia kansainvälisellä tasolla.

ATS Ydintekniikka on neljä kertaa vuodessa ilmestyvä lehti, jossa esitellään ydintekniikan tapahtumia,  
hankkeita ja ilmiöitä numeroittain vaihtuvan teeman ympäriltä. Lehti postitetaan seuran jäsenille. Jä-  
seneksi pääsee johtokunnan hyväksymällä hakemuksella. ATS:n jäsenhakemus löytyy internetistä pdf-  
muodossa: <http://www.ats-fns.fi/info/jasenhakemus.pdf>.

Lehdessä julkaistut artikkelit edustavat kirjoittajien omia mielipiteitä, eikä niiden kaikissa suhteissa  
tarvitse vastata Suomen Atomiteknillisen Seuran kantaa.



## PÄÄKIRJOITUS

## Kehittyvä ydinjätehuolto

”Ydinjätehuoltoa on kehitetty Suomessa pitkäjänteisesti vuosikymmenten ajan.” Suomen ydinjätehuollon tärkeys oli tiedossa jo 1960-luvulla ydinvoimalaitosten hankinnan alkaessa. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto nähtiin tuolloin osana ydinpolttoainekiertoa. Vielä 1970-luvun alussa uskottiin, että uraanivarat käyvät pian vähiin ja että ainoa järkevä vaihtoehto käytetylle polttoaineelle on sen jälleenkäsittely.

Sekä Loviisan että Olkiluodon voimalaitosten käytetyn polttoaineen huollolle haettiin jälleenkäsittelyyn perustuvaa ratkaisua. Tulos oli kuitenkin toinen. Loviisan käytetty polttoaine sovittiin lähetettäväksi Neuvostoliittoon ilman velvollisuutta ottaa takaisin jälleenkäsittelyjätettä. TVO I ja TVO II -laitosyksiköiden käyttöluopien käsittelyn yhteydessä valtiovalta viestitti, että ensisijaisena tavoitteena tulee olla käytetyn polttoaineen ulkomaille vienti. Tähän liittyen valtioneuvosto teki vuonna 1983 erittäin kauaskantoisen periaatepäätöksen, joka siitä lähtien on ohjannut maamme ydinjätehuollon kehittämistä. Jos käytetyn polttoaineen maasta vienti ei onnistu, tulee edetä suoraan loppusijoitukseen kokonaisvaltaisen suunnitelman mukaisesti, johon sisältyy kotimaisen loppusijoituspaikan valinta vuonna 2000 ja loppusijoituksen aloittaminen vuonna 2020, mihin päädyttiin Olkiluodossa.

**YDINENERGIALAIN MUUTOS** vuonna 1994 kielsi käytetyn polttoaineen maasta viennin, minkä seurauksena Teollisuuden Voima Oy ja Imatran Voima Oy sopivat yhteisen yrityksen – Posiva Oy:n – perustamisesta vuonna 1995. Vuosituhannen vaihteeseen asti Posivan oli luotava edellytykset loppusijoitustoiminnan yhteiskunnalliselle hyväksynnälle, mikä onnistuikin: ydinenergiain edellyttämä periaatepäätös vahvistettiin eduskunnassa vuonna 2001. Nyt Posivan työ on edennyt vaiheeseen, jossa haasteet ovat valtaosin teknisiä: on osoitettava, että

loppusijoitus pystytään toteuttamaan suunnitelmien mukaisesti.

**POSIVAN TOIMINTA** konkretisoituu tällä hetkellä maanalaisen tutkimustilan ONKALON rakentamiseen. Vuonna 2004 aloitettu tunnelin louhintatyö on nyt edennyt yli kilometrin päähän ja noin sadan metrin syvyyteen. Tarkoituksensa mukaisesti ONKALOA hyödynnetään alusta pitäen tutkimustarkoituksiin. Posiva jatkaa loppusijoituksen tutkimus-, kehitys- ja suunnittelutyötä aikaisemmin määriteltyjen tavoitteiden mukaisesti. Seuraava merkittävä välitavoite on vuoden 2006 lopussa julkaistava TKS-2006-ohjelma ja siihen liittyvä päivitetty laitoskuvaus. Yhtenä yhtiön tks-työn kulmakivenä on yhteistyö kotimaisten asiantuntijaorganisaatioiden kanssa sekä ulkomaisen osaamisen hyödyntäminen.

**SUOMEN YDINVOIMALAITOSTEN** ydinjätehuoltoa on kehitetty suunnitelmallisesti ja pitkäjänteisesti. Asetetut tavoitteet on pystytty saavuttamaan sovittuun aikataulun mukaisesti. Tämän seurauksena Suomesta on tullut yksi ydinjätehuollon toteutuksen edelläkävijöistä. Useissa maissa ydinjätehuollon ratkaisut ovat lykkääntyneet, eivät niinkään teknisistä kuin poliittisista syistä. Tämä koskee niin voimalaitosjätteen loppusijoitusta, joka Suomessa jo on toteutettu, kuin korkea-aktiivisen jätteen – käytetyn polttoaineen tai jälleenkäsittelyjätteen – loppusijoitusta.

Suomen ydinjätehuollon toteutusta pidetään kansainvälisesti esimerkillisenä. Toimintamme tuntuu herättävän kasvavaa mielenkiintoa, mikä näkyy muun muassa vilkkaana vierailuohjelmalla. Esikuvaksi emme ole pyrkineet, mutta velvollisuutemme on toimia siten, että edistämme omalta osaltamme turvallisen ydinjätehuollon toteutusta kestävästä kehityksen periaatteen mukaisesti. ■

EDITORIAL

# Nuclear waste management develops

**//** In Finland, nuclear waste management has been subject to systematic development efforts for several decades. The significance of Finnish nuclear waste management was recognised already in the 1960s when the nuclear power plant projects started. At that time spent nuclear fuel management was considered a part of the nuclear fuel cycle. Even in early 1970s it was still believed that uranium resources would soon be depleted and the only sensitive alternative was to reprocess spent fuel.

A solution based on reprocessing was under investigation for management of spent nuclear fuel generated at both Loviisa and Olkiluoto power plants. However, the outcome was different. For spent fuel from Loviisa an agreement was concluded to the effect that spent fuel would be sent to the Soviet Union, without an obligation to receive the reprocessing waste. When the operating licences for TVO I and TVO II plant units were under deliberation, the Government's message was that plans should primarily be based on export of spent fuel. To this extent, in 1983 the Government made a far-reaching policy decision, which ever since has steered the development of nuclear waste management in Finland. Pursuant to the decision, should export of spent fuel prove impossible, the option of direct final disposal according to a comprehensive plan shall be adopted, as was done at Olkiluoto. The plan specified that the site for the final disposal facility was to be selected in 2000, and final disposal of spent fuel is to start in 2020.

After the Nuclear Energy Act was amended in 1994, the option of exporting spent nuclear fuel was no longer available. This led to Teollisuuden Voima Oy and Imatran Voima Oy establishing in 1995 a jointly owned company for nuclear waste management – Posiva Oy. Until the turn of the millennium Posiva's activities focused on acquiring society's approval for final disposal, and the work paid off: the policy decision required by virtue of the Nuclear Energy Act was ratified by the Parliament in 2001. Today, Posiva's operation has

reached a stage where most of the challenges are of technical nature: the Company must prove that final disposal can be implemented according to plans and specifications.

**AT PRESENT**, the concrete focal area of Posiva's operation is the construction of the underground research facility ONKALO. The excavations were started in 2004, and the tunnel is now more than one kilometre in length and reaches down to depth of about one hundred metres. ONKALO is serving its purpose as a research facility already at the construction stage. Posiva continues research, development and design activities on final disposal in compliance with previously specified objectives. The next important milestone is the publishing of the RDD-2006 programme and updated repository description toward the end of the year. One cornerstone of Posiva's RDD efforts is cooperation with Finnish expert organisations and utilising international expertise.

Development of nuclear waste management has been a long-term, consistent priority for Finnish nuclear power plants. The specified objectives have been achieved in keeping with schedules. As a result, Finland has become one of the pioneers in the implementation of nuclear waste management. In many countries decisions on nuclear waste management have been postponed, more for political than for technical reasons. This applies both to final disposal of L/ILW, which is already a reality in Finland, and to final disposal of HLW – spent fuel or reprocessing waste.

**THE IMPLEMENTATION** of nuclear waste management in Finland is considered exemplary on the international scene. Our operation appears to attract increasing interest, reflected in the high number of international visitors to our facilities. It has not been our ambition to set standards in our field, but we are committed to ensuring for our part that safe nuclear waste management is implemented pursuant to the principle of sustainable development.



# UUTISIA

## ENS:n TopSeal-kokous syyskuussa Olkiluodossa

**EUROPEAN NUCLEAR Society (ENS)** järjestää ydinjätehuoltoon keskittyvän TopSeal-ammattikokouksen kolmen vuoden välein. Tänä vuonna kokouksen järjestelyissä ovat mukana OECD/NEA ja ATS. Kokouspaikaksi on valittu Olkiluoto, jossa rakenteilla olevien Onkalon ja EPR:n odotetaan kiinnostavan alan eurooppalaisia asiantuntijoita.

**TOPSEAL-KOKOUKSEN AJANKOHTA** on 17.-20.9. ja siihen odotetaan kattavaa osallistujajakaartia laitosoperaattoreita kalliorakentamisasiantuntijoihin ja viranomaisiin. Aiheina ovat mm. käytössä olevat vähä- ja keskiaktiivisten jätteen varastot, suunnittelun alla olevat loppusijoituskonseptit sekä lainsäädännölliset näkökulmat.

**LISÄTIETOA:** [www.topseal2006.org](http://www.topseal2006.org)

[www.ats-fns.fi](http://www.ats-fns.fi)

## EU:n ministerineuvosto sopi seitsemännen tutkimuksen ohjelman puitteista

**EUROOPAN KOMISSION** tutkimuksen seitsemännen puiteohjelman budjetista vuosiksi 2007-2011 on päästy poliittiseen sopuun ministerineuvostossa. Euratomin ydinenergiatutkimuksen laajuudeksi sovittiin 2.75 miljardia euroa. Summa jakaantuu fuusion, ydinturvallisuuden ja säteilynsuojelun sekä JRC:n kesken siten, että fuusio vienee valtaosan eli noin 2 M eur. Ydinenergiatutkimuksen laajuus edellisessä kuudennessa puiteohjelmassa oli 1,23 M eur, josta fuusion osuus oli 750 milj. eur, ydinjätetutkimuksen 90 milj. eur, säteilynsuojelun 50 milj. eur, ydintekniikan ja -turvallisuuden 50 milj. eur ja JRC:n 290 milj. eur. Tutkimusrahoitus on siis kasvamassa merkittävästi erityisesti fuusiotutkimuksen alueella. (Lisätietoja : ENDS Europe DAILY 2144, 26/07/06 ja <http://cordis.europa.eu/fp6/budget.htm>).

## Tietoisku uraanikaivoksista

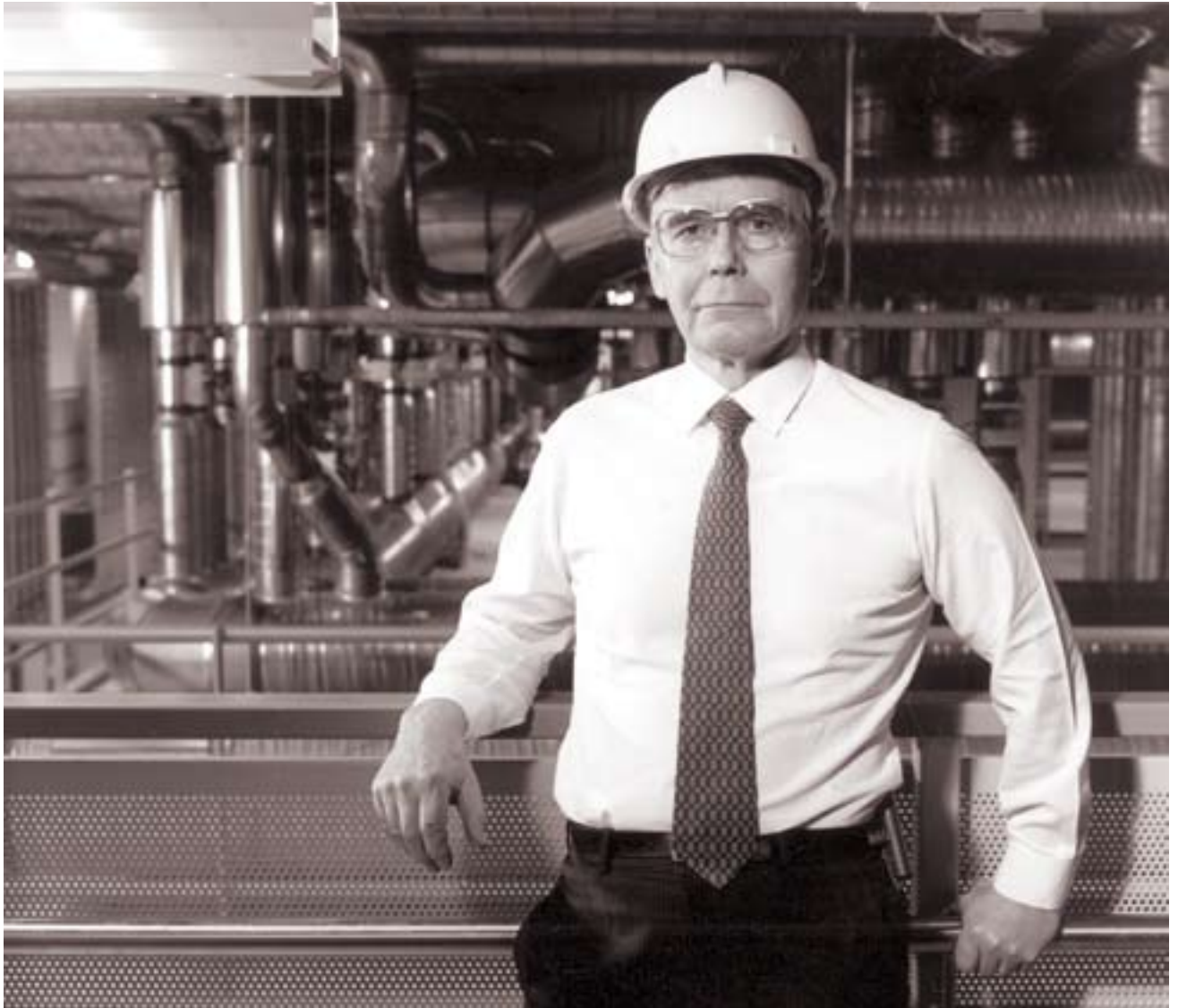
**TIETEIDEN TALOSSA** 31.5. järjestetyssä ATS-jäsenkokouksessa teemana oli uraanikaivostoiminta, joka on ollut vahvasti esillä myös valtamediassa. Paikalla oli noin 40 ATS:n jäsentä ja keskustelu oli harvinaisen aktiivista, mikä osoitti aiheen kiinnostavuuden.

**ESKO RUOKOLA (STUK)** aloitti esitelmällä "Uraanikaivosten ympäristövaikutukset". Oleellimmat ympäristönäkökohdat ovat louhinnassa syntyvä sivukivi, joka voidaan yleensä loppusijoittaa sellaisenaan, sekä rikastusjäte, joka välivarastoidaan lietemäisenä patoaltaisiin ja loppusijoitetaan kaivosonkaloihin tai kaivantoihin. STUK:n rooli nykyisessä etsintävaiheessa on lähinnä tiedotustoiminta, mutta koelouhintaan vaaditaan STUK:n YVA-lausunto. Ennen mahdollista kaivostoimintavaihetta STUK antaa myös lausuntonsa sekä valvoo sen aikana säteilyturvallisuutta, ydinmateriaaleja sekä jätehuoltoa.

Illan toisessa esitelmässä **Krister Söderholm**in (KTM) otikkona oli "Edellytykset uraanikaivostoiminnalle Suomessa". Malminetsinnän panostukset maailmalla ovat olleet selkeästi kasvusuunnassa koko maailmassa. Suomessa ei ole tällä hetkellä uraanikaivoksia tai -kaivoshankkeita, mutta uraanin kysynnän kasvaessa myös kiinnostus Suomen kallioperään on lisääntynyt. Tästä ovat osoituksena tarkempia etsintöjä valmistelevien varaus- ja valtaushakemusten ryöppy. Kiinnostavia uraanipitoisia alueita on Lapissa, Pohjois-Karjalassa ja Uudellamaalla.

**ILKKA MIKKOLA (TVO)** täydensi tietoiskua esitelmällään "Uraani-boomi taas". Uraanin kysyntää on kasvattanut näköpiirissä oleva ydinaseuraanin laimennuksen loppuminen ja uraanivarastojen ylijäämän väheneminen. Sinänsä nykyiset tunnetut varat riittävät nykykäytöllä 86 vuodeksi ja arvioidut varat vielä kolme kertaa pitempään. Ydinpolttoaineen jälleenkäsittely ei vielä pitkään aikaan vaikuta taloudellisesti kannattavalta, sillä uusia kaivoksia ollaan avaamassa mm. Kanadassa, Australiassa ja Kazakstanissa. Uuden kaivoksen avaaminen kestää kuitenkin 7-20 vuotta, mikä selittää kaivosyhtiöiden etsintätoiminnan kiihtymisen.

**JÄSENKOKOUKSEN ESITYKSET** löytyvät ATS:n verkkosivulta: [www.ats-fns.fi/info/arkisto.html](http://www.ats-fns.fi/info/arkisto.html) sekä tämän lehden sivuilta 9-10.



Antti Vuorinen toimi Säteilyturvakeskuksen pääjohtajana 1983 - 1997.

# Antti Vuorinen ydinasioista kuultuna

*"Asuimme vielä vuosi valmistumiseni päälle Teekkarikylässä, muuttimme vuonna 1959 Otanotko -nimiseen taloon ja vuonna 1967, nelilapsiseksi kasvaneena perheenä, isompaan asuntoon Otakalliossa palattuamme Wienistä, jossa olin ollut pari vuotta IAEA:n palveluksessa. Nyt olemme sitten lasten lähdettyä vaimon kanssa kahdestaan, täällä tai Lammilla."*

Istumme Hotelli Radisson SAS Otaniemmen lobbyssa keskustelemassa Antti Vuorisen kanssa hänen 40 -vuotisen työuransa tärkeistä vaiheista. Nauhuri nauhoittaa hiljaisena todistajana Antti Vuorisen tarinaa. Minun epäkiitollinen tehtäväni on supistaa tarina lehteä varten kymmenenteen osaan.

Tarina soljuu ajassa eteen ja taakse päin niin kuin tarinat yleensä, varsinkin kun haastatteliija tulee toisinaan väliin. Antti

Vuorinen on hämeenlinnalaisen työläisperheen yhdeksästä veljeksestä keskimäinen. Omista kahdesta pojastakin tuli insinöörejä mutta esivanhemmissa ei ollut tekniikan ihmisiä vaan esikuvana on ollut vanhin sähköinsinööri, IVO:n palveluksessa ollut, jonka kautta Antti Vuorinen sai lukioajoista lähtien kesätyöpaikan aina jollain IVO:n sähköasemalla.

Käymme Novosibirskin nootin aikaan syksyllä 1961 Laurilan delegaatiossa hankkimassa Neuvostoliitosta rikastettua uraanipolttoainetta Triga –reaktoriin, tokamakitkin näimme, ja akateemikko **Emeljanof** tietää kertoa että fuusio tulee 40 vuoden päästä. Odotellessa voidaan toki rakentaa näitä vanhanaikaisiakin laitoksia. Syksymmällä on San Diegossa Trigan operaattorikurssi **Bjarne Regnellin** kanssa. Regnellistä tulee käyttöpäällikkö ja Vuorisesta säteilysuojelupäällikkö. Näyttää ”työtie” vievän ydinturvallisuus- ja säteilysuojeluvallontatyöhön. *Kysyin: ”Laurilako työtä johti?”*

## Säteilyturvakeskus syntyy

”Laurila ja Jauho. Olen joskus miettinyt, mikä hän on ollut Laurilan merkitys minunkin uralleni? Laurila johti atomienenergiälainsäädännön ja säteilysuojelulainsäädännön kehitystyötä, missä tarkoituksena oli mm. perustaa säteilyfysiikan laitos valvomaan säteilyturvallisuutta maassa. DI-työn valinnassa oli merkitystä, että Laurilan tuttava **Kauno Salimäki** oli yliopiston sisätautisairaалassa sädehoitofysiikkona. Rupesin valmistamaan suomalaista röntgensäteilymittausstandardia, ja kun helmikuussa 1958 valmistuimme, niin heinäkuussa perustettiin Lääkintöhallituksen alaisuuteen Säteilyfysiikan laboratorio, nykyisin STUK.

Niin syntyi Säteilyfysiikan laboratorio, jossa Antti Vuorinen toimi vuodet 1958 - 1961. Kymmenen vuotta myöhemmin syksyllä 1968 KTM kutsui Antti Vuorisen valmistelemaan ydinvoimalaitosten turvallisuusvalvontaa sijoituspaikkana nykyinen Säteilyturvakeskus. Hänestä tuli ensin STUK:n apulaisjohtaja, sitten ylijohdaja ja lopulta pääjohtaja eläkkeelle menoon asti vuonna 1997. Suomessa ydinturvallisuus-

den ja säteilysuojelun valvonta on järjestetty muista maista poiketen. Suomessa on ensin tarpeelliseen säteilyvalvontaan yhdistetty myöhemmin perustettu ydinturvallisuusvalvonta, sillä pienen maan resurssien käyttö yhdistettynä katsottiin tehokkaaksi. Muissa maissa nämä kaksi viranomais-toimintaa eriytettiin. Vasta viime aikoina on joissain maissa kuten Ruotsi ja Ranska ruvettu selvittämään ja harkitsemaan, voitaisiinko ja pitäisikö toiminnot yhdistää samaan organisaatioon, sillä ydinturvallisuus- ja säteilysuojeluihmisten eriseuraisuus on ollut alan käytäntö.

”Sain tietyn aitiopaikan vuoden 1985 lopulla, kun IAEA:n pääjohtaja perusti International Nuclear Safety Advisory Groupin ja kutsui minut siihen puheenjohtajaksi. Olimme juuri saaneet valmiiksi työohjelmamme, joka sisälsi muutaman ydinturvallisuuden perusteita koskettelevan kirjasen, kun Tsernobylin onnettomuus tapahtui, ja meidän piti ruveta työskentelemään senkin kanssa.

”Oli tosi vaikeata saada saksalaista, amerikkalaista ja ranskalaista kollegaa yhtymään käsitykseen, että ydinturvallisuus on lopulta säteilyturvallisuusasia.”

”Oliko ydinturvallisuus sitten heidän mielestään vain teknistä varmuutta ja luotettavuutta, sitä että *vehkeet toimii?*”

”Nimenomaan. Olihan se luonnollistakin, sillä ydinturvallisuuden perustahan oli ja on edelleenkin siinä, että systeemit, tekniikka ja tieto toimivat eivätkä brakaa. Eli jos ne brakaa, niin sitten tulee säteilyongelma. Kolme muuta asiaa olivat yhtä vaikeita. Eli turvallisuuskulttuuri -käsitteen sisältö, ”Search for excellence” ja numeerinen riskitaso. Kiistat Adolf Birkhoferin, Pierre Tanguy’n ja Herbert Kautsin kanssa unohutuivat, kun he huomasivat, että dokumenteista tuli IAEA:n best-sellereitä.

## Vakavista onnettomuuksista

”Varsinaisestihan vakavien onnettomuuksien aika ja tutkimus alkoi Harrisburgin onnettomuuden seurauksena. Ruotsissa seuraus oli ehkä suurin kaikista, kun pantiin pystyyn referendum.”

”Kyllä, kyllä siinä varmaan omat Jakobin painit käytiin niin voimayhtiöiden kuin viranomaisten puolella. Esimerkiksi itselläni aihepiiri syveni, kun olin toista kertaa Wienissä vuosina 1982–1983 ja tulin sieltä takaisin syksyllä 1983. Tällöin oli IVO:n pääkonttorin yläkerrassa seminaari, jossa kerroin mielipiteeni, että uskokaa tai älkää mutta seuraavassa laitoksessa tulee vaatimuksia vakavan onnettomuuden suhteen. Vielä samana syksynä valmistui STUK:n ensimmäinen versio vakavien onnettomuuksien huomioonottamisista. Raportti sai siten hyvin kylmän vastaanoton Euroopassa. Birkhofer ei koskaan suoraan sanonut minulle, mutta kuulin kiertoteitse hänen sanoneen, että pienten maiden edustajien ei pitäisi tällaisia asioita tuoda julkisuuteen.”

”Ahaa, Suomen kaltainen pieni maa ei siis saa sanoa?”

”Niin, heillähän, saksalaisilla ja ranskalaisilla, oli se asenne, että mitään lisävaatimuksia ei pidä kehittää, koska se samalla merkitsee, että aiemmin rakennetut laitokset eivät ole riittävän turvallisia.”

”Tuttua ajattelua. Amerikassa autoteollisuus ei halunnut turvaväiden käyttöä, jottei suuri yleisö rupea ajattelemaan, että autoilu on jotenkin vaarallista.”

”Näyttäisi olevan edelleen tiettyjä viitteitä, että amerikkalaisten mielestä cost benefit –analyysit osoittavat, ettei vakavien onnettomuuksien huomioon ottamista tarvita eli että erityiset järjestelyt eivät ole hyödyllisiä. Mutta silloin kun me jo vuonna 1983 pohdimme tätä tilannetta, tulimme siihen tulokseen, että Three Mile Island demonstroi, että yksikin hallitsematon päätös merkitsee ydinenergiakauden loppumista, jos se tapahtuu länsimaissa. Siis, sitä ei saa sattua. Ja mehän olemme yrittäneet STUK:ssa tuoda sen jälkeen esiin sitä ajatusta, joka säteilysuojelussa on jo vuodesta 1964 lähtien ollut vallitseva peruseriaate. Säteilysuojelussa puhutaan ALARA-prinssiipistä (As Low As Reasonably Achievable), ja me kehitimme vastavan sloganin SAHARA (Safety As High As Reasonably Achievable). Elikkä se täyden-



Antti Vuorinen (toinen vas.)  
tutkimustyössään Loviisan voimalaitoksella.

## Assosiaatiosanaleikki

*"Nyt sanon sanoja tai asioita ja katso-  
taan mitä sinulle tulee mieleen lyhyenä  
vastauksena. Sellainen assosiaatiosa-  
naleikki kuin on Arto Nyberg –showssa  
TV:ssä. Kokeillaanko?"*

*"Selvä."*

- *"Ydinturvallisuuskulttuuri?"*
- "Vaikea välttämättömyys."*
- *"Hyötöreaktori?"*
- "Tulevaisuudessa todennäköinen."*
- *"Fuusioreaktori?"*
- "Toivotaan."*
- *"Ihmisen toiminta vai  
automatoitu toiminta reaktori-  
turvallisuustoiminnassa?"*
- "Eivät sulje toisiaan pois."*
- *"SECURE & PIUS?"*
- "Hyvä asia joka jäi kesken."*
- *"Kumpi merkitsi enemmän,  
Harrisburg vai Tsernobyli, ja miksi?"*
- "Ai lyhyesti?"*
- "Aika lyhyesti."*
- "Tsernobyli herätti lopullisesti."*
- *"Eduskunnan kaksoisrooli ydin-  
energiailaissa?"*
- "Ikävä välttämättömyys."*
- *"Todennäköisyysperustainen  
turvallisuusanalyysi."*
- "Välttämätön lisämenetelmä."*
- *"Paras Suomen laitosten vakavia  
onnettomuuksia estävä yksittäinen  
toimenpide?"*
- "Ennakkohuolto silmäteränä."*

tää tätä DBA-filosofiaa. Ja on Search for excellence periaatteen mukainen."

## Ydinjätehuollosta

*"Mennään ydinjätehuollon kysymyksiin, se on myös lehden tämän numeron yhtenä teemana. Kerran, taisi olla 1990-luvun alkupuolella, kysyin nyt jo edesmenneeltä kollegaltani Timo Vienolta, missä tehdään parasta ydinjätetutkimusta?" Timo sanoi, että "Japanissa, Sveitsissä, Ruotsissa ja Suomessa." "Japanissa?"; kysyin. "Kyllä, tutkimus on hyvää, mutta he eivät saa mitään päätöksiä ja strategioita aikaiseksi, sillä eri tahot siellä ovat niin riitaisia keskenään.", sanoi Timo. "Entä muut kolme maata sitten?"; kysyin. "Ne ovat pieniä, protestanttisia maita", oli Timon naseva vastaus."*

"Kyllä kai Vienon vastaus oli hyvin terävä ja oikea. Isoilla ydinasemilla on asennoituminen liittynyt ydinaseteknologiaan siten että heillä on niin paljon asejätettä, jonka valtio lopulta jollakin tavalla hoitaa ettei ole tarpeen hötkyillä siviilijätteen kanssa. Sitä on siis merkityksettömän vähän (joskus kauan sitten) sotilasjätteiden rinnalla. Sen sijaan Ruotsissa, Suomessa ja Sveitsissä perustuslainsäädäntö alun perin sisältää velvoitteen, että jätteen tuottajan pitää huolehtia jätteestä. Mutta Suomessakin oli 1980-luvun alussa ajattelua, että tämä on niin vaikea ja tärkeä asia, että vain valtio voi siitä huolehtia. Loviisan polttoaineen leasauksen eli palautussopimusta vastustettiin myös, haluttiin plutoniumin jäävän maahan. Minun mielestäni leasaus oli kuitenkin parhaita sopimuksia, mitä suomalainen yritys on koskaan tehnyt. Mutta ympäris-

tönsuojelijat ja poliitikot romuttivat tämän ajatuksen."

*"Sellainen kysymys ydinjätehuollosta, kun olen tällainen konemies, että kun joku kootaan, esimerkiksi joku auto ja kun se puretaan, niin se puretaan päinvastaisessa järjestyksessä. Miksei tämä periaate toimi tuolla ydinjätepuolella, siis se että ydinjäte purettaisiin osiin?"*

"Se on yksi asia, josta on keskusteltu ja tietyssä mielessä minusta on vahinko että poliittisista syistä sitä linjaa ei ole jatkettu. Se linjahan oli hyvin menossa, mutta presidentti Carterin kannanoton mukaan kaikki sellainen toiminta, joka edesauttaa polttoaineen jälleenkäsittelyä ja joka samalla saattaisi edistää pommin valmistusta, pitää kieltää. General Electricin siviilijälleenkäsittelylaitos oli juuri valmistunut, mutta poliittisen tahon määräyksestä se "pantiin koi-pussiin". Ydinjäteturvallisuusmiehenä käsitykseni on, että polttoainematriisi, ohuen putken sisällä oleva uraanidioksidipulveri on mahdollisimman huono matriisi. Sitä voisi parantaa. Mutta sehän edellyttäisi jälleenkäsittelyä. Luultavasti sillä tavalla päättäisiin parempaan tulokseen kuin nykyisellä tavalla.

"Onko tämä nykyinen tapa sitten riittävän hyvä, se on kai makuasia? Vielä tarvitaan tutkimusta ja olen aina kannattanut SAHARA-ajatusta, myös jätehuollosta, ja olen melko vakuuttunut, että 20 vuoden päästä ei enää olla tällä tiellä. Intressinhän on breederien kehittäminen, ellei nyt sellaista ihmettä tapahdu että fuusioreaktori tulee nopeasti. Elikkä nykyisinhän uraanista otetaan vain pari prosenttia siitä energiasta, mitä siitä olisi saatavissa. Onhan globaali energiapoliittinen intressi ottaa tietystä uraanimäärästä enemmän energiaa ulos."

*"Niin varmasti."*

*Kiitos ja hyvää kesän jatkoa!"*

DI Klaus Kilpi  
ent. erikoistutkija  
VTT:n ydinenergiaosastolta  
klaus.kilpi@welho.com





# Uraanin tarve, tuotantonäkymät ja kustannukset

*Ydinvoimalla on USA:n, EU:n, Japanin ym. maiden sähkön tuotannossa jo huomattava asema. Se tuotti vuonna 2005 noin 33% EU:n sähköstä. Polttoaine oli väkevöity 0,02 miljoonasta tonnista raakaurania, jonka arvo oli viime vuoden keskihinnan mukaan 0,7 mrd \$. (Vrt. 200+ milj. t hiiltä.)*

**P**olttoaineen jälleenkäsittely ja uudelleen käyttö (MOX) termisissä reaktoreissa on eri lähteiden mukaan nykyisillä hinnoilla vähintään kaksi kertaa niin kallista kuin kertakäyttö, tosin paljon halvempaa kuin hiilen tai kaasun polttaminen.

Jälleenkäsittelyä ja kierrätystä on kuitenkin taas lanseerattu sen varalta, että ydinvoiman tuotanto 5-10-kertaistuu ilmasto-vaatimusten myötä. Reitti olisi neljännen sukupolven reaktorit, myös nopeat reaktorit. Pomminvarma polttoaineen kierrätys ja jätteen transmutaatio nopeiden reaktorien avulla on kuitenkin edelleen vasta tutkimusasteella. Silti vaihtoehtojen tutkiminen ja kehittäminen on hyvin tärkeätä epävarman tulevaisuuden varalta.

Taloudellinen ydinvoima voi nojata vuosikymmeniä kertakäyttöön ja lisääntyviin uraanivaroihin. Tunnettuja uraanivaroja on maailmassa nykyisellä kulutuksella 86 vuodeksi ja arvioituja lisävaroja 240 vuodeksi.

Köyhempiä esiintymiä on kaikkialla, fosfaateissakin 440 vuodeksi, ja graniiteissa ja merivedessäkin on urania. Köyhää urania erotetaan vain esim. liuosuuttoon soveltuvista esiintymistä. Uraanin tuottamisen historia on nimittäin muhin metallei-

hin verrattuna lyhyt, ja pitkään löytyy lisää rikkaitakin uraanivaroja mm. Kanadassa ja Australiassa.

Uraanivarojen kustannusrajallakin raakauraanin osuus ydinvoiman tuotantokustannuksesta on vain 2-3 euroa/MWh, kymmenesosa hiilen kustannuksesta. Teoria on, että jos hyväksytään malmin puolta alhaisempi rajapitoisuus, niin varat 10-kertaistuvat, mutta ydinvoiman kustannus nousee 2 euroa/MWh.

Toinen kokemus on, että malmien tuotantokustannukset ovat jatkuvasti reaalisesti laskeneet.

## Ylituotannosta alituotantoon

USA:n jäykät väkevöintisopimukset 1970-luvulla olivat yksi syy uraanin ylituotantoon ja korkeaan hintaan.

Hinta laski 1980, kun sopimukset joustivat tarpeen mukaan. NL:n hajoaminen 1991 romahdutti hinnan. Varastouraanin, kierrätysuraanin ja laimennetun aseuraanin kaupat pitivät hintaa alhaalla ja lopettivat paljon uraanituotantoa.

Uraanikilon keskihinta oli 1990-luvulla Euratomin tilastossa 35-45 euroa. Kulutuksesta vain noin 60% on katettu kaivos-

tuotannolla. Venäjän laimennettu aseuraa-  
ni on käyttänyt 10 vuotta puolta USA:n yli  
100 voimalaitoksesta ja jo yli 10 000 ydin-  
kärjen aineet on tuhottu, mutta tämä toi-  
minta romahdutti uraanin hinnan, tuotan-  
non ja etsinnän.

## Uusi uraaniboomi

Nyt on uusia ydinvoimalaitoksia raken-  
teilla ja lisää näköpiirissä. Uraanin tuotan-  
to on ollut viime vuosina vain noin 40 000  
tonnia vuodessa, mutta jo lähivuosina  
tarve on 70 000 tonnia. Kysyntää on lisän-  
nyt tieto, että ilmeisesti Venäjä tarvitsee  
varastoissaan olevat aseuraanit itse vuo-  
den 2013 jälkeen. Sen korvaamiseksi län-  
simarkkinoilla tarvitaan vuosittain 6000-  
9000 tonnia raakaurania.

Markkinahinta onkin noussut vuoden  
2001 pohjasta noin 20 euroa/kgU kevääl-  
lä 2006 huipputasolle 90 euroa/kgU. Rea-  
lihintä on tuskin puolet vuoden 1979 huip-  
puhinnasta, mutta näillä hinnoilla kaivos-  
hankkeet ja uraanin etsintä ovat kuitenkin  
jo lähteneet taas vilkkaasti liikkeelle.

Uusien kaivosten kehittäminen kestää  
kuitenkin 7 – 20 vuotta, joten lähivuosi-  
en lisätuotanto pitää saada nykyisistä tai  
hankkeilla olevista kaivoksista tai "in situ"  
-tuotantokentiltä.

## Uraanituotannon uusjako

Vuoden 1980 tienoilla USA tuotti 25 %  
maailman uraanista ja NL:n etupiiri tuot-  
ti noin 30 %. USA:n talous on ollut lyhyt-  
jänteistä ja reagoi nopeasti hintoihin, tuo-  
tanno oli viime vuonna vain pari prosenttia  
maailman tuotannosta. Venäjän tuotanto  
oli sentään seitsemän prosenttia.

Tuotanto on siirtynyt Kanadaan ja Aust-  
raliaan, jotka tuottivat parina viime vuon-  
na yli puolet maailman uraanista. Lääke-  
tieteen ja armeijoiden tarkoituksiin uraa-  
nia tuotettiin 1910–1970 esiintymistä, jois-  
sa oli alle kilo urania tonnissa kiveä (alle  
0,1 %).

Viime vuosina on löydetty kymmenen  
tai sataakin kertaa rikkaampia esiintymiä.  
Vuonna 2000 Kanadassa vihittiin käyttöön

kaivos, jossa malmin pitoisuus on 20 %, ja  
uusi samanlainen kaivos käynnistyy vuo-  
den kuluessa.

Australiassa on mahdollista lisätä tuo-  
tantoa paljon. Mm. Olympic Dam kupari-  
kaivoksen tuotannon ja samalla uraanituo-  
tannonkin kolminkertaistamista suunnitel-  
laan. Kazakstan tuotti vuonna 2005 jo noin  
10 % uraanista, ja siellä on hankkeita nelin-  
kertaistaa tuotanto vuoteen 2015 menses-  
sä. Tuotantotapa on liuosuutto ja hankkeis-  
sa on mukana yhtiöitä Kanadasta, Ranskas-  
ta, Kiinasta ja Venäjältä. Nigerissä, Namibi-  
assa ja Etelä-Afrikassa on myös hankkeita  
lisätä uraanin tuotantoa.

## Uraanin jatkojalostus

Uraanirikaste toimitetaan Suomeakin var-  
ten yleensä Ranskan, Kanadan tai Venä-  
jän puhdistuslaitokselle. Se puhdistetaan  
ja konvertoidaan UF<sub>6</sub>-suolaksi, joka väke-  
vöidään eli rikastetaan AREVAlla, Urencolla  
tai Venäjällä. Väkevyöity uraani valmistetaan  
polttoainenipuiksi Ruotsissa, Saksassa, Es-  
panjassa tai Venäjällä.

TVO:n polttoaineella on tullissa sen EU-  
maan alkuperä, jossa polttoaine on valmis-  
tettu eli Ruotsi, Saksa tai Espanja. Uraani-  
polttoaine on "EU-maista" polttoainetta.  
Sen lisäksi polttoaineella on Euratomin sa-  
feguards-valvontakoodi.

## Uraanin vaarallisuudesta ja tuotannosta Suomessa

Säteilyturvakeskuksen tutkimusjohtaja  
**Sisko Salomaa** totesi haastattelussa (HS  
11.1.2001) uraanista: "Vaikka sitä 300 gram-  
man ammusta kanniskelisi amulettina kau-  
lassaan, niin leukemiariski on aivan mitä-  
tön." ja edelleen: "Pahimmissakin skenari-  
oissa pohjaveden uraanipitoisuus nousi  
Kosovossa korkeintaan samalle tasolle  
kuin se on Suomessa pysyvästi."

Hinnan noustessa uraaniyhtiöt valtasivat  
eri maissa paljon alueita, joilta oli joskus  
havaittu indikaatioita uraaniesiintymistä.  
Mukana on alueita Ruotsista ja Suomesta.

Kiinnostus näihin alueisiin riippuu siitä,  
mitä yhtiöt löytävät muualla, ja lisätutki-  
musten tuloksista. Sopii toivoa, että Suo-

mesta löytyy jostakin takakorvesta suuri ja  
rikas uraaniesiintymä, joka hyödynnettyinä  
tuottaa seudulle paljon vaurautta. Köyhä  
kaivos on aina hankala tapaus talouden ja  
ympäristön kannalta.

Voimayhtiöille on samantekevää, oste-  
taanko uraani Suomesta vai muualta, kun-  
han se ostetaan kannattavasta ja hyvin  
hoidetusta kaivoksesta. Uraani pitää ensin  
kuitenkin viedä pois maasta. Määrät ovat  
niin pieniä, että yksi uraanin jalostuslaitos  
palvelee monien maiden tarvetta. Tärkeää  
on, että Suomessakin tuotettu uraani on  
IAEA:n valvonnassa ja pysyy rauhanomai-  
sessa käytössä.

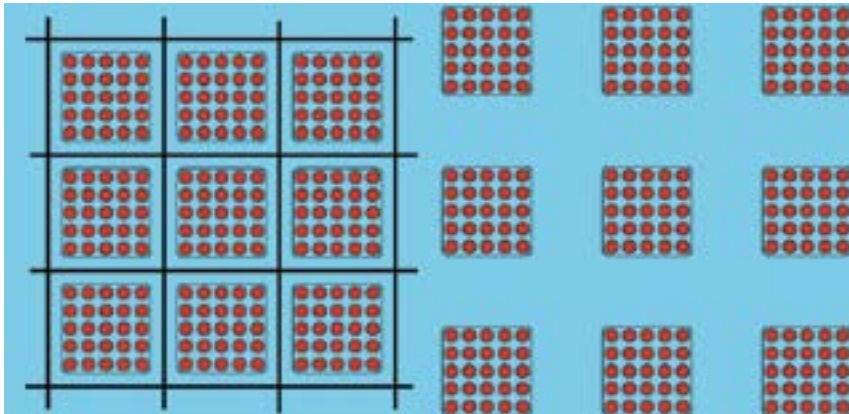
Vertailukohtana mainittakoon, että Ka-  
nadan tuotanto on harvaan asutulla seu-  
dulla. Pohjoisen kylistä on kaivoksille mat-  
kaa satoja kilometrejä, joten niille lenne-  
tään. On kuin Kilpisjärveltä, Utsjoelta, Ou-  
lusta ja Kemijärveltä lennettäisiin töihin  
Kittilään 7 päiväksi kerrallaan. Toiset 7 päi-  
vää kukin olisi kotikylässä, kalassa, poron-  
hoidossa jne. Lapin omat firmat hoitaisivat  
kuljetukset, koneet, tavarat, ruokalan.

Intiaanipäällikkö **Harry Cook** kävi selos-  
tamassa tätä Olkiluodossa. Samalla ryhmä  
hänen heimonsa intiaaneja tutustui Suo-  
messa puun jalostamiseen mm. mökeiksi. ■

Ilkka Mikkola  
toimistopäällikkö  
TVO:n polttoaine-  
hankinta-osasto  
ilkka.mikkola@tvo.fi



# Palamahyvitys ja käytetyn ydinpolttoaineen KRIITTISYYSTURVALLISUUS



Kuva 1. Tiheiden ja harvojen telineiden periaatekuva

## Reaktoripolttoaineen ylijäämäreaktiivisuus

**Y**dinreaktori poikkeaa muista kattilalaitoksista siinä, että polttoainetta ladataan kerralla pitkän ajan tarpeisiin. Nykyisistä kevytvesireaktoripolttoaineista otetaan energiaa irti yli 40 megawattipäivää uraanikiloa kohti. Neutronitalouden kannalta ajateltuna polttoaineniippu toimii ensimmäisen puolikkaan eliniästään neutronien luovuttajana. Tämä edellyttää tuoreelta polttoaineelta ylijäämäreaktiivisuutta, jolla kompensoidaan säteilytyksen aikana tapahtuvat muutokset: fissiilin materiaalin kulumisen ja neutroneita absorboivien myrkkujen syntyminen. Lisäreaktiivisuustarvetta tulee käyttöolosuhteiden korkean lämpötilan, fissiomyrkkujen ja mahdollisen veden höyrypitoisuuden kompensoinnista.

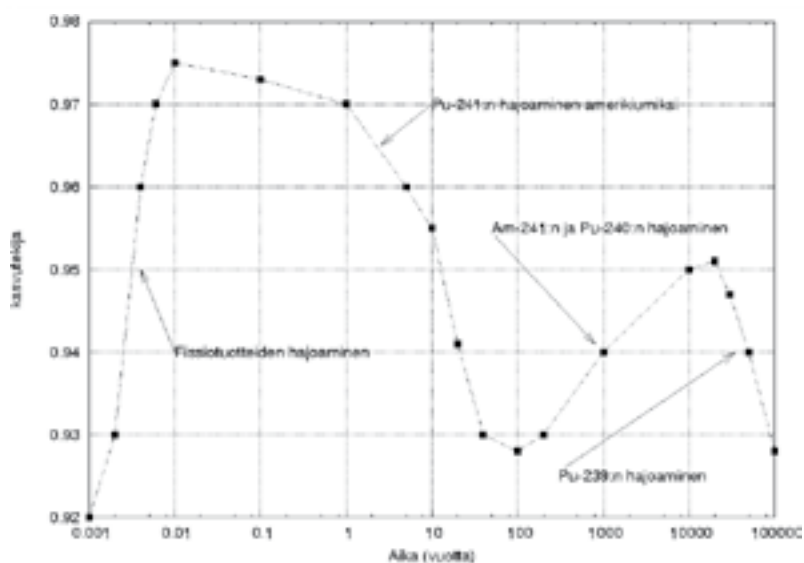
Tuoreen, 45 MWd/kgU palamalle suunnitellun painevesireaktorin polttoaineniipun kasvutekijä  $k_{\infty}$  on säännöllisessä hilas-

sa huoneenlämpöiseen veteen upotettuna n. 1,3 – 1,4, eli siinä on n. 30 000 – 40 000 pcm (pcm = per cent mille = 0,00001) ylimääräistä reaktiivisuutta kriittiseen konfiguraatioon ( $k_{\infty} = 1$ ) verrattuna. Suuruusluokkia voi hahmottaa ajattelemalla, että kriittiseksi tulon jälkeen jokainen pcm ylijäämäreaktiivisuutta nostaa polttoaineniipun tehoa n. promillen verran käytön aikaisesta nimellistehosta eli useita kilowatteja. Tehon millisekunneissa moninkertaiseksi nostava kerkeä kriittisyys syntyy, kun kasvutekijä ylittää ykkösen n. 500 – 700 pcm:llä.

Polttoaineen turvallinen varastointi edellyttää, että nipuilla on riittävä marginaali kriittisyyteen. Kansainvälisesti on päädytty käytäntöön, jossa kasvutekijän pitää laskentajärjestelmän epävarmuuksien ja valmistustoleranssien huomioonottamisen jälkeen olla pienempi kuin 0,95 epäedullisimmassakin varastointiolosuhteissa. Tämän vaatimuksen toteutumisen osoittaminen on tärkeä osa sekä varastotelineiden että uusien polttoaineniippujen luovutusprosessia.

## Varastointitarpeet

Ydinpolttoaine viettää aikaansa tehtaalta lähdön jälkeen monenlaisissa telineissä ja kuljetussäiliöissä. Reaktiivisuuden hallinnan kannalta telineet voidaan karkeasti jakaa kahteen luokkaan: harvat ja tiheet telineet (kuva 1). Tiheissä telineissä käytetään niippujen välissä neutroneita absorboivia rakenteita, kuten booriteräslevyjä. Harvoissa telineissä polttoaineniiput sijoitetaan niin etäälle toisistaan, että niiden välinen vesi toimii neutroniabsorbaattorina. Materiaalikustannusten kannalta harva teline on edullisempi, mutta sen ongelmia ovat suuri allastilan tarve sekä riippuvuus niippujen välisestä vedestä alikriittisyyden varmistajana.



Kuva 2. Käytetyn polttoaineen reaktiivisuusmuutokset säilytyksen aikana.

Ydinvoimalaitoksilla telineitä on sekä tuoreen että käytetyn polttoaineen varastointia varten. Tuoreelle polttoaineelle tarvitaan varastotilaa muutaman vuoden nipumäärää varten. Käytetyn polttoaineen varastotarve on selvästi suurempi, koska niput pitää säilyttää näissä varastoissa ainakin siihen asti, että niiden lämmöntuotto on laskenut jälleenkäsittelyn mahdollistavalle tasolle. Suomessa tällä hetkellä suunniteltavan suoran loppusijoituksen tapauksessa niput viettävät käytetyn polttoaineen varastossa kymmeniä vuosia, jolloin tilaa tarvitaan tuhansille nipuille laitosyksikköä kohti.

Koska käytetyn polttoaineen varastointi on kallista, on ympäri maailmaa noussut esiin kysymys, missä määrin polttoaineen käytön aikana pienentynyt reaktiivisuus voitaisiin ottaa huomioon altaiden kriittisyysturvallisuusanalyseissa. Tästä aiheesta käytetään nimitystä palamavytys (burnup credit, utbränningskreditering).

## Nuklidikoostumuksen määrittäminen

Pohjimmiltaan palamavytyksen käyttö on yksinkertaista: lasketaan kutakin nipun palamaa vastaava polttoaineen nuklidikoostumus, ja käytetään sitä tuoreen polttoaineen uraanidioksidin sijasta laskettaes-

sa telinegeometrian kasvutekijää. Kun lasut toistetaan eri väkevöintiasteen polttoaineille, tuloksena saadaan telineelle ns. lauskaikä, joka ilmoittaa polttoainenipun alkuväkevöinnistä riippuvan vähimmäis-palaman, joka nipulla täytyy olla, jotta se voidaan sijoittaa ko. telineeseen.

Käytännössä asia ei ole yhtä suoraviivaista. Ongelmia aiheutuu pääasiassa kolmesta syystä:

Polttoaineen nuklidikoostumuksen **laskemiseen käytettävät ohjelmat** on pääosin suunniteltu ja kelpoistettu tuottamaan dataa reaktorin käytönsuunnittelun tarpeisiin. Näissä laskuissa relevantit nuklidit poikkeavat jonkin verran kriittisyysturvallisuuslaskuissa tarvittavista. Asian korjaamiseksi on käynnissä useita projekteja, joissa hankitaan kokeellista tietoa käytetyn polttoaineen nuklidikoostumuksista palamavytyyslaskentajärjestelmien validoinnin pohjaksi.

**Polttoaineen käyttöhistoria** vaikuttaa nuklidikoostumukseen. Neutronispektiriä koventavat olosuhteet (suuri aukkoisuus, korkea booripitoisuus, korkea pelletin tai jäähdytteen lämpötila, lähellä sijaitseva säätösauva) lisäävät plutoniumin tuottoa ja nostavat käytetyn polttoaineen reaktiivisuutta. Jos polttoainenipun vieressä on ollut säätösauva, sen toisen pään pa-

lama voi olla merkittävästi keskipalamaa pienempi. Kriittisyysturvallisuuden kannalta nipun keskipalamaa tärkeämpi asia on sen pienipalamaisen pätäkä, joka yleensä on painevesireaktoripolttoaineessa ylin, kie-hutusvesireaktoripolttoaineessa alin puoli metriä nipun päästä. Rajoittavan käyttöhistorian määrittäminen kullekin polttoaineelle ja reaktorille on vaativa tehtävä.

**Varastoinnin aikana tapahtuu hajoamisreaktioita**, jotka muuttavat polttoaineen nuklidikoostumusta. Näiden muutosten laskeminen jää usein nippupalamaohjelmien suorituskyvyn ulkopuolelle. Vain osa nuklideista on niin pitkäikäisiä, että niitä voidaan käyttää palamavytykseen. (kuva 2)

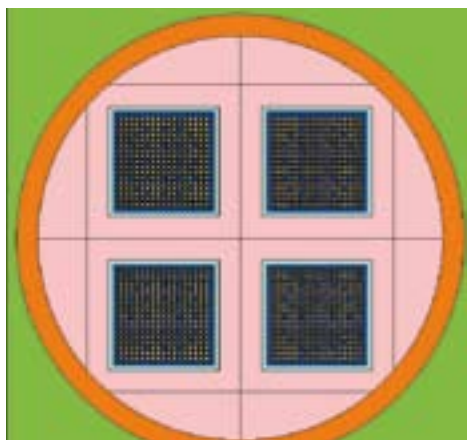
Palamavytyksellä saatava laskennallinen lisämarginaali riippuu siitä, kuinka suurta nuklidimäärää laskuissa seurataan. Karkeasti menetelmät voidaan jakaa vain aktinideja tai sekä aktinideja että fission-tuotteita käyttäviin.

Kummassakin lähestymistavassa käytettävät nuklidit pitää valita niin, että tulokset ovat varmasti konservatiivisella puolella, joten esim. lyhytikäisiä fission-tuotteita ei voi laskuissa huomioida, elleivät ne hajoa pitkäikäisiksi, neutroniabsorptioltaan tehokkaammiksi tytärnuklideiksi. Kunkin nuklidin pitoisuudessa pitää ottaa huomioon laskentaohjelman epävarmuudet, joiden arviointi perustuu käyttöhistorialtaan tunnetun polttoaineen nuklidikoostumusten kokeelliseen määrittämiseen.

## Loppusijoituksen erityiskysymyksiä

Suomessa on tämänhetkisten suunnitelmien mukaan tarkoitus loppusijoittaa käytetty polttoaine kokonaisuudessaan jälleenkäsittelyä. Tämä tuo kriittisyysturvallisuustarkasteluihin vielä yhden aspektin: hyvin pitkien aikavälien tapahtumat.

Lähtökohta on, että kriittisyysturvallisuuden tulee olla taattu myös tilanteessa, jossa loppusijoitusastia jostakin syystä puhkeaisi ja täytyisi vedellä. Veden ja polttoainesauvan pitkäaikainen vuorovaikutus muuttaa konfiguraatiota sekä kemiallisesti että fy-



Kuva 3. Suunniteltu BWR- ja PWR-polttoainennippujen sijoittelu loppusijoitusastiaan

sikaalisesti ja saattaa muun muassa johtaa polttoainepellettien uudelleensijoittumiseen nipun tukirakenteiden pettäessä. Eriytyisen haastava tapaus on PWR-polttoainennippu: suuren kokonsa vuoksi nippu vastaa fissiiliin aineen määrältään kolmea - neljää BWR- tai VVER- nippua (kuva 3).

Loppusijoituksen kriittisyysturvallisuuden parantamiseksi on tuotu esiin ajatus PWR-nippujen pilkkomisesta pienempiin osiin tai esim. nipun sisään jäävän tyhjän tilan hiekkatäytöstä, jolla pienennettäisiin kapselin puhkeamisen seurauksena sauvahilaan pääsevän veden määrää sekä estettäisiin nipun tukirakenteen pettämisestä aiheutuvat relokaatiot.

## Kansainvälinen tilanne

Eri maissa lähtökohdat ja palamavytyksen käyttöön ajavat syyt poikkeavat jonkin verran toisistaan. Monessa maassa käytetyn polttoaineen välivarastointivaihe on kasvanut pidemmäksi kuin alun perin suunniteltiin.

Eriyisesti voidaan mainita Saksa, jossa käytetyn polttoaineen varastotila on poliittisista syistä johtuvan umpikujan vuoksi hyvin kallista. Yhdysvalloissa polttoaineen pakkaustiheyden kannalta tärkeät paikat liittyvät laajamittaisiin maantiekuljetuksiin, joilla käytetty polttoaine on määrää kuljettaa kaikilta laitospaikoilta keskitettyyn loppusijoitustilaan. Ruotsissa pinnalla on keskitetyn käytetyn polttoaineen välivaraston

(CLAB) kyky ottaa vastaan yhä korkeammalle väkevöityä polttoainetta.

Palamavytyksen ympärille on perustettu OECD:n kriittisyysturvallisuustyöryhmän alle Burnup Credit-alaryhmä, jonka työn seurauksena on mm. käynnistetty kansainvälisiä hankkeita säteilytettyjen polttoainesauvojen nuklidikoostumusten kokeelliseksi määrittämiseksi.

Työryhmässä on myös käsitelty menetelytapoja, joilla standardisoituja polttoaineen kuljetussäiliöitä voitaisiin käyttää eri laitosten käytetyn polttoaineen kuljetuksiin.

Yksi toiminnan keskeisiä tavoitteita on yhteisten käytäntöjen luominen palamavytystä käyttävien laskentajärjestelmien kehittämistä ja käyttöä varten.

## Missä meillä mennään

Suomessa palamavytystä ei varsinaisesti ole tähän mennessä tarvittu. Polttoainetelineet on hankintavaiheessa suunniteltu täyttämään kriittisyysturvallisuusvaatimukset tuoreen polttoaineen oluoksella.

Poikkeuksena on BWR-polttoaineen palava myrky, jolle on käytetty hyvitystä niin, että tuoreen polttoaineen sijasta on laskuissa käytetty sellaista palamaa ja käyttöhistoriaa, jotka maksimoivat polttoaineen reaktiivisuuden. Varsinaisesta palamavytyksestä ei tässä tapauksessa kuitenkaan voi puhua.

Polttoaineen palaman vähitellen kasvavassa on sen alun ylijäämäreaktiivisuus koko ajan lisääntymässä. Vaikka uudet telineet edelleen mitoitettaisiin kestämaan kaikki hankintahetkellä käytössä olevat polttoaineniput ilman palamavytystä, laitoksilla on kuitenkin suuri määrä vanhoja telineitä, joiden kanssa voi jatkossa tulla tarve palamavytyksen käyttöön.

Viimeistään asia tulee vastaan runsaan viidenkymmenen vuoden päästä, jos PWR-polttoainetta aletaan loppusijoittaa nykyisten suunnitelmien mukaisesti.

Suomalaisen käytännön mukaan koko polttoaineketjun kriittisyysturvallisuus selvitetään kuitenkin jo ennen polttoaineen käyttöönottoa. ■

DI Riku Mattila  
tarkastaja  
Säteilyturvakeskus  
riku.mattila@stuk.fi



# Käytetyn polttoaineen VARASTOJEN KAPASITEETTIA LISÄTÄÄN

Loviisan polttoaineen palautus päättyi 1996. Alun perin Loviisan käytetty polttoaine oli tarkoitus palauttaa Venäjälle (Neuvostoliittoon) kolmen vuoden jäähtymisajan jälkeen. Laitoksen käytetyn polttoaineen varaston 1 tilat mitoitettiin tällä perusteella.

1980-luvun alussa vastaanottaja piden si jäähtymisajan viiteen vuoteen. Tällöin Loviisaan rakennettiin käytetyn polttoaineen varasto 2, jossa oli kolme varastollasta. Avoimilla telineillä varustettuna tilaa saatiin lisää 1560 käytetylle polttoainepullelle.

Ydinenergialakiin vuonna 1994 tehdyn muutoksen nojalla käytetty polttoaine on käsiteltävä, varastoitava ja sijoitettava pysyvällä tavalla Suomeen. Viimeinen käytetyn polttoaineen kuljetus Venäjälle tapahtui 1996 lopussa. Vuosina 1981–1996 Loviisasta palautettiin Venäjälle 15 erässä yhteensä 2823 käytettyä polttoainepussia, mikä vastaa noin 336 tonnia uraania.

## Varastojen laajentaminen

Palautusten päätyttyä käytetyn polttoaineen varastoa oli laajennettava. Mittavan selvitystyön jälkeen todettiin edullisimmaksi tavaksi lisäaltaiden rakentaminen. Vuosina 1996–1999 käytetyn polttoaineen varastoon tehtiin neljä lisäallasta. Avoimilla telineillä laskettuna lisäkapasiteettia tuli 2080 nipulle, mikä vastaa noin 10 vuoden aikana syntyvää käytetyn polttoaineen määrää. Kapasiteetin arvioitiin riittävän silloisen 30 vuoden käyttöiän loppuun eli vuoteen 2010.

Varastoa rakennettaessa otettiin huomioon myös tiheiden telineiden asentamismahdollisuus. Esimerkiksi pohjarakenteet mitoitettiin tiheiden telineiden mukaan ja



Loviisan käytetyn polttoaineen varasto 2 laajennuksen jälkeen.

*Loviisan ja Olkiluodon nykyisten voimalaitosten käyttö jatkuu näillä näkymin pitkälle tulevaisuuteen. Laitoksilla syntyvä käytetty polttoaine varastoidaan pitkäksi ajaksi jäähtymään ja odottamaan loppusijoituksen alkamista. Laitospaikkojen nykyinen käytetyn polttoaineen varastokapasiteetti alkaa käydä riittämättömäksi lähitulevaisuudessa. Kummallakin laitospaikalla onkin käynnissä hankkeet varastokapasiteetin lisäämiseksi.*

altaiden jäähdytyskapasiteetin nostamiseen varauduttiin jo suunnitteluvaiheessa.

Vuonna 2004 tehdyssä laajennusselvityksessä tarkasteltiin sekä lisäaltaiden rakentamismahdollisuutta että nykyisten altaiden varustamista tiheillä telineillä. Tällä kertaa tiheät telineet vaikuttivat paremmalta ratkaisulta. Niiden etuina olivat mm. hieman edullisempi kokonaishinta, vähemmän tapahtuva toteutus ja parempi kriittisyysturvallisuus.

## Laajennettu kapasiteetti riittää

Tiheillä telineillä saatava varastokapasiteetti riittää 50 vuoden käyttöikänsä saakka.

Vuoteen 2020 mennessä, jolloin käytetyn polttoaineen loppusijoituksen on määrä alkua, tarvitaan 10 telinettä. Ne on suunniteltu hankittavaksi kaksittain vuosina 2007, 2010, 2013, 2016 ja 2018. Nämä 10 telinettä lisäävät varaston kapasiteettia 3000 nipulla. Tarvittaessa telineitä voidaan hankkia enemmänkin.

Tiheä teline seisoo altaan pohjassa olevien tukipisteiden päällä eikä tukeudu altaan seiniin. Yhteen tiheään telineeseen voidaan sijoittaa 352 polttoainepussia, kun avoimessa telineessä on paikkoja 130 nipulle. Yhteen altaaseen mahtuu neljä tiheää tai avointa telinettä. Tarkoitus on si-

joittaa yhteen altaaseen kaksi tiheää telinettä ja kaksi avointa.

Tiheä teline koostuu massiivisesta pohjalevystä ja siihen kiinnitetystä kanavista. Polttoaineniippujen jäähditys tapahtuu luonnonkiertona pohjalevyssä olevien reikien kautta. Teline on valmistettu ruostumattomasta teräksestä ja se painaa tyhjänä noin 25 tonnia ja polttoaineniipuilla täytettynä noin 100 tonnia. Kuhunkin kanavaan on kiinnitetty kuusi booriteräslevyä pannoilla. Levyt ovat vain sillä osalla, jossa polttoaineniipussa on uraania.

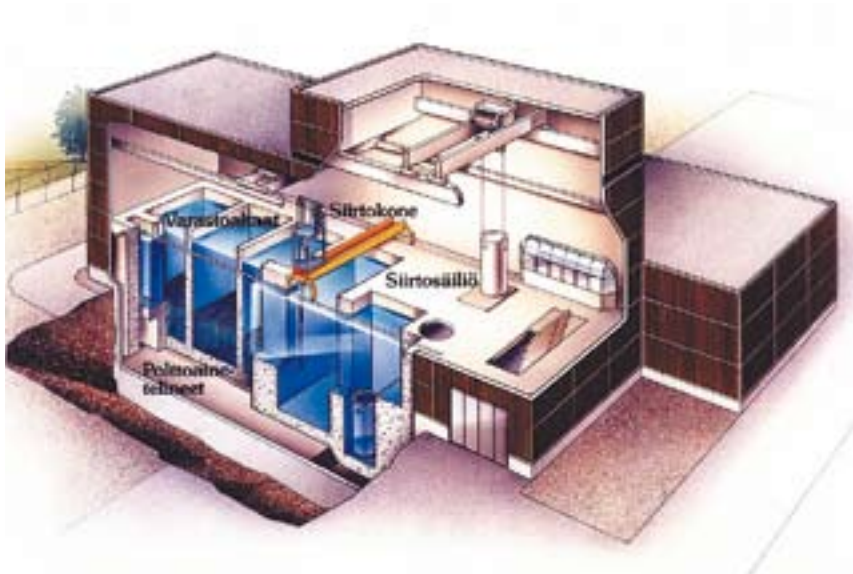
## Olkiluotoon neljä lisäällasta

Olkiluodossa käytettyä polttoainetta varastoidaan väliaikaisesti voimalaitosyksiköillä ja voimalaitosalueella olevassa käytetyn polttoaineen välivarastossa (KPA-varasto). Vuonna 1987 valmistuneessa varastossa oli vuoden 2005 lopussa varastointikapasiteettia 7146 polttoaineniipulle. KPA-varastoon mahtuu olemassa olevien laitosisyksiköiden noin 30 vuoden toiminnasta kertyvä polttoainemäärä.

TVO:n KPA-varastoa on tarkoitus laajentaa neljällä lisäällalla, joista kolmeen ensimmäiseen hankitaan tiheitä polttoainetelineitä OL3-laitosisyksikköä varten. Neljäs lisäävarastoallas rakennetaan evakuointitarkeitusta varten.

## Polttoaineet samaan varastoon

Olkiluotoon rakenteilla olevan uuden ydinvoimalaitosisyksikön (OL3) on suunniteltu



TVO:n käytettyä polttoainetta varastoidaan vesialtaissa vuonna 1987 valmistuneessa KPA-varastossa.

aloittavan toimintansa vuonna 2009. Myös tämän laitoksen polttoaine varastoidaan aikanaan KPA-varastolle rakennettavaan laajennusosaan.

OL1- ja OL2-laitosisyksikköjen käyttöikää jatketaan 60 vuoteen. Tämän lisääntyneen varastointitarpeen tyydyttämiseksi KPA-varastoa joudutaan laajentamaan. Varaston laajennusosan on alustavasti suunniteltu valmistuvan vuonna 2013 ja olevan täydessä käytössä 2014.

## Laajenuksessa huomioidaan kapselointilaitos

Käytetyn polttoaineen loppusijoitus alkaa Olkiluodossa vuonna 2020. Polttoaineen

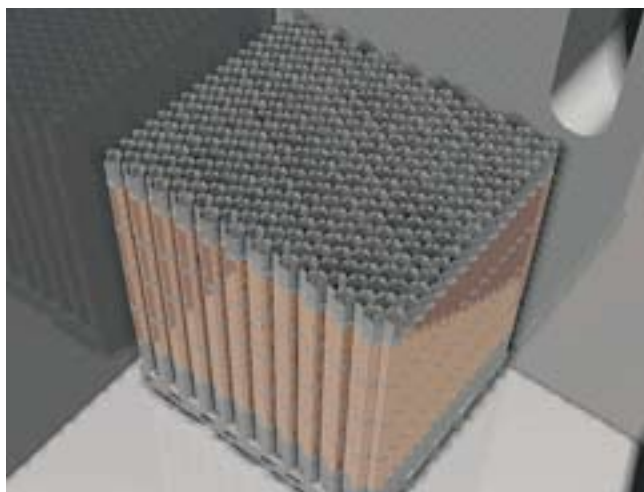
varastointitarve kasvaa loppusijoituksesta huolimatta kunnes Olkiluodon toinen laitosisyksikkö lopettaa toimintansa noin vuonna 2040.

Tuleva, laajennettu KPA-varasto riittää nykyisten kahden ja uuden kolmannen ydinvoimalaitosisyksikön tarpeisiin mikäli Olkiluotoon ei rakenneta lisää ydinvoimalaitosisyksiköitä.

Nykyinen laajennus suunnitellaan siten, ettei lisärakentamismahdollisuuksia kuitenkaan suljeta pois.

Käytetyn ydinpolttoaineen kapselointilaitoksen vaihtoehtoinen sijaintipaikka on KPA-varaston yhteydessä.

Toinen vaihtoehto on sijoittaa kapselointilaitos loppusijoitustilan yläpuolelle. KPA-varaston laajennusosan suunnittelussa tehdään tarpeelliset varaukset, jotta kapselointilaitos voidaan haluttaessa kytkeä KPA-varaston laajennusosaan.



Loviisan käytetyn polttoaineen tiheä varastoteline.

DI Ossi Koskivirta  
Johtaja  
Polttoaineen hankinta  
Fortum Nuclear Services Oy  
ossi.koskivirta@fortum.com

DI Juha Riihimäki  
TVO:n rakennustekniikka  
-toimiston toimistopäällikkö  
juha.riihimaki@tvo.fi



Kansainvälinen tutkimusryhmä Lupinin kaivoksessa 1130 m syvyydessä. Kirjoittajat kolmas ja viides oikealta.

# Ikiroutatutkimukset Kanadassa

*Geologit tutkimassa mikrobeja ja pohjavesien geokemiaa ikijään alla kilometrin syvyydessä! Kanadan arktisella tundralla on ollut käynnissä Geologian tutkimuskeskuksen vetämä Permafrost-projekti, joka tutkii syvän ikiroudan vaikutuksia kallioperän pohjavesiolosuhteisiin. Ydinvoimaloiden korkea-aktiivisen jätteen loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuutta käsittelevä safety case saa tästä tutkimuksesta uutta tietoa, joka perustuu tutkijoiden omakohtaiseen havainnointiin. Monitieteellinen työ opettaa tekijöitään toimimaan ääriolosuhteissa paitsi ilmaston, myös logistiikan ja kaivosteollisuuden nopeatempoisen yrityskulttuurin ehdoilla.*

**S**uomen ydinvoimaloiden käytetylle uraanipolttoaineelle on olemassa monipuolisesti tutkittu geologinen loppusijoitussuunnitelma. Jäteky-symyksen ratkaisua ja lopullisia päätöksiä kohden edetään kuitenkin harkiten, koska loppusijoituksen toiminta- ja turvallisuusnäkökohdat on pystyttävä ym-

märtämään inhimillisesti katsoen hyvin pitkällä aikavälillä. Tulevaisuuden ennustaminen esimerkiksi sadantuhannen vuoden tähtäyksellä ei ole mahdollista, mutta geologisesta menneisyydestä saadaan tietoa siitä miten maapallon olot ovat vaihdelleet menneinä vuosimiljoonina.

Suomen pohjoinen sijainti heijastuu vahvasti myös tulevaisuus-skenaarioihin, joita turvallisuustarkasteluissa joudutaan huomioimaan. Fennoskandiaa lukuun ottamatta lähes koko pohjoinen pallonpuolisko on tälläkin hetkellä Helsingin leveysasteelta pohjoiseen ikiroudan peitossa. Reilut 20 000 vuotta sitten koko Fennoskandia oli mannerjään peitossa, ja sitä ennen arktisen tundran ja syvän ikiroudan vaihetta kesti ilmeisesti kymmeniä tuhansia vuosia. Tämä tilanne saattaa toistua myös tulevaisuudessa, vaikkakin ihmisen toiminta vie tällä hetkellä ilmaston kehitystä aivan eri suuntaan.

Ikiroudan ja jäätiköitymisen vaikutuksia syvälle kallioperään sijoitettuun ydinjätteeseen on parin viime vuosikymmenen aikana tarkasteltu useissakin Posivan ja SKB:n tutkimuksissa. Niiden lähtökohta on kuitenkin ollut etupäässä teoreettisiin las-



kelmiin ja tarkasteluihin pohjautuva. Noin kuusi vuotta sitten pääasiassa suomalaisista geotieteilijöistä koostuva tutkijaryhmä alkoi pohtia mahdollisuutta tutkia ikeroutaa todellisissa olosuhteissa. Tiedettiin hyvin sekä teoreettiselta pohjalta että käytännön kaivoshavainnoista, että arktisilla alueilla, esimerkiksi Siperiassa, kallio on ikeroudassa jopa puolentoista kilometrin syvyyteen. Toisaalta lähes kaikki aikaisempi ikeroutatutkimus oli keskittynyt maanpinnan routimisilmiöihin ja mm. niiden vaikutukseen rakentamisessa.

Tutkimusidea sai laajaa tukea ydinjätteen loppusijoitusorganisaatioilta. Hankkeen takana olivat alusta lähtien Posivan ja SKB:n lisäksi UK Nirex Ltd. ja Ontario Power Generation Kanadasta. Hankkeella nähtiin olevan myös yleistä geologista ja arktiseen tutkimukseen liittyvää mielenkiintoa, joten myös GTK on alusta saakka osallistunut hankkeen rahoitukseen. Vastaavaa tutkimusta ei ole aiemmin tehty missään päin maailmaa.

Hankkeen kannalta kriittisin kysymys oli tutkimuspaikka. Missä olisi mahdollista tutkia Suomen kallioperää vastaavaa, mutta jäätyntä kiteistä kalliota yli puolen kilometrin syvyydessä? Ensimmäiset yhteydenotot tehtiin Siperian suuntaan, mutta mahdollisia tutkimuspaikkoja ei tuntunut löytyvän. Keskeinen ongelma oli, että kallioperä Siperian tundran alla on pääosin hyvin erilaista kuin Fennoskandian kilvellä. Ihanteellinen ratkaisu löytyi lopulta Kanadan suunnalta. Tutkimusryhmämme yksi aktiivijäsenistä, professori Shaun Frap Waterloo yliopistosta oli nuorena geologina kartoittanut Kanadan arktista tundraa ja hänellä oli runsaasti kontakteja sikäläiseen kaivosteollisuuteen. Tutkimuskohteeksi valittiin Lupinin kultakaivos Nunavut-territoriassa, noin 1400 km Edmontonista pohjoiseen ja varsinaiset tutkimukset käynnistyivät kesällä 2001.

## Tutkimuskohde

Keskellä Pohjois-Amerikan tundraa sijaitseva Lupinin kultakaivos on suunnilleen Kemin korkeudella. Ilmasto on siellä kui-

tenkin hyvin erilainen. Vuotuinen keskilämpötila on noin -11 astetta. Talvi on vähäluminen, mutta tuulinen ja kylmä. Tuulen ja pakkasen yhteisvaikutuksen takia teholliset pakkaslukemat ovat tyypillisesti -40° – -60° C tuntumassa.

Muutaman lämpimän kesäkuukauden aikana järvien jäät ehtivät juuri ja juuri lähteä ja ikerouta sulaa pinnastaan muutaman metrin syvyyteen. Matala tundrakasvillisuus puhkeaa kukkaan ja tarjoaa elinmahdollisuuden äärimmäisiin oloihin sopeutuneille eläimille, kuten myskihärille, harmaakarhuille ja karibuille sekä pienemmille eläimille. Näissä olosuhteissa alueelle on vajaan 10 000 vuoden kuluessa muodostunut yli puolen kilometrin syvyyteen ylettyvä ikerouta.

Kaivos on kokonaisuudessaan maanalaisten lukuun ottamatta tuotantorakennuksia ja asuintiloja. Tuotannon ollessa käynnissä kaivoksen henkilökunta lennätettiin paikalle Edmontonista. Intensiivisen työskentelyjakson (2 – 6 viikkoa) jälkeen he palasivat vapaajaksolle omille asuinpaikkakunnilleen. Sama koski suomalaisista tutkimusryhmää, jolla kotimatka oli vielä selvästi pidempi kuin keskivertomainarilla. Paikan päällä liikkuminen oli kuitenkin helppoa. Maanpäällisestä asuin kompleksista pääsi kätevästi kaivoshissillä esimerkiksi kilometrin syvyydessä sijaitsevalle tutkimuspaikalle muutamassa minuutissa.

## Tutkimusidea

Luonnollisena johtajatuksena Lupinin ikeroutahankkeessa oli tarkastella erityisesti niitä asioita, jotka oli koettu tärkeiksi ydinjätteen loppusijoitusta suunnittelevien osallistujamaiden kannalta, mikäli niiden ilmasto tulevaisuudessa muuttuisi Lupinin alueen nykyolojen kaltaiseksi.

Kuivan kallion ominaisuudet ovat likimain samat riippumatta siitä onko sen lämpötila veden jäätympisteen ylä- vai alapuolella. Kalliossa olevan veden suhteen tilanne muuttuu olennaisesti. Veden jäätyessä siihen liuenneet suolat eivät sitoudu jäähän vaan saattavat teoriassa muodostaa alapäin etenevän jäätymsrintaman alle suolavesirintaman, kuten voi tapahtua hyvin huokoisissa kivissä. Toimiiko sama mekanismi kiteisessä kalliiossa, jossa vesi liikkuu pääasiallisesti harvahkossa rakoverkostossa, vai jäävätkö suolaerkaumat erillisiksi taskuiksi? Vesi laajenee jäätyessään. Voiko se aiheuttaa muutoksia syvällä kalliiossa? Veden jäätyminen sulkee kalliiossa olevat veden kulkeutumisreitit, mutta keräytyykö jäätyneen kiven alareunaan esimerkiksi kalliopohjavesien metaania muodostaen metaanijäättä eli ns. klatraatteja? Järvien alla ei ole ikeroutaa, mikäli järvi ei talven aikana jäädy pohjaa myöten. Suurehkojen järvien alla oleva kallio saattaa säilyä jäätyttömänä muodostaen kalli-



*Pohjavesinäytteenottoa 1130 m syvyydessä, jossa tutkimusreiässä on lähes 60 barin paine.*

oon jopa ikiroudan läpi ulottuvia pystyjä talik-rakenteita, joissa vesi voi päästä virtaamaan pitkin kallion rakoja.

## Tutkimustoiminta

Mahdollista suolavesirintamaa lähdettiin jäljittämään maanpinnalta GTK:n geofysikaalisella mittauskalustolla. Kun mittausaineisto oli käsitelty ja tulkittu, tulos näytti selkeältä. Likimain heti jäätyneen kallion alapinnan tasolla kallion sähkönjohtavuus kasvoi moninkertaiseksi, mutta johtavuus-



Satumaailma maan alla noin 500 m syvyydessä.

kontrasti näytti vaimenevan läheisen Lake Contwoy-järven rantaan kohti. Oliko suolavesirintama löytynyt heti ja samalla saatu viitteet järven alla olevasta talikista? Muutakin tutkimusta voitiin tehdä maan pinnalta. Seismisillä tutkimuksilla etsittiin kallioperästä rikkonaisuusvyöhykkeitä, joissa jäätyntä vettä voisi erityisesti esiintyä. Talvella läheisen Lake Contwoy-järven jäältä tutkittiin maatutkalla järven pohjan jäätymisolosuhteita.

Suurin voimanponnistus GTK:n geologiaryhmälle oli epäilemättä kahden tutkimusreiän kairaaminen kaivostunnelista ikiroudan alapintaan. Varsinaisen kairauksen suorittanut urakoitsija oli kaivoksen läpikotaisin tunteva ammattilainen, mutta nyt kairaukselle esitetyt vaatimukset olivat poikkeukselliset. Me ikiroutatutkijat emme olleetkaan kiinnostuneita kullasta, vaan kallion raoissa olevasta vedestä ja siihen liuenneista kaasuista. Koska tarkoituksena oli erityisesti varmentaa oliko ikiroudan alla kalliiossa suolaista vettä, normaalisti kylmissä oloissa kairauksen huuhteluvetenä käytetty suolavesi ei tullut kysy-

mykseenkään. Makea kairausvesi taas täytyi hakea maan pinnalta ja kuljettaa säiliöissä vinotunnelia pitkin kairauspaikalle puolen kilometrin syvyyteen. Tämä operaatio vei käytännössä kairauksen apumiehen työajan liki täysin ja kairausta valvova geologi sai tehdä apumiehen työt sikäli kun ei päässyt kairauskoneen käyttäjäksi.

## Ikirouta ja pohjavedet

Tutkimusten perusteella vaikuttaa siltä, että kiteisissä kivissä ikiroudan alle ei pääse muodostumaan samanlaista suolaisen veden rintamaa kuin huokoisemmissa sedimenttikivissä. Lupinissa lähinnä ikiroudan alapintaa olevien vesien suolaisuus ei mitenkään poikkea yli 500 metrin syvyydessä normaalistakin esiintyvien pohjavesien suolaisuudesta.

Ikirouta estää tehokkaasti pinnallisten vesien imeytymistä syvälle kalliioon. Yleisvaikutelmaksi ikiroudan alaisista kaivostiloista jäi niiden poikkeuksellinen kuivuus. Tutkijoiden mieltä on jäänyt askarruttamaan syy siihen miksi pohjaveden pinta on usein selvästi ikiroudan alapintaa syvemmällä. Todennäköisesti se johtuu kaivoksen kuivattavasta vaikutuksesta, mutta voisiko tällainen kuiva vyöhyke kuitenkin olla tyypillinen ikirouta-alueille? Yleensä ottaen pohjavesiolosuhteet näyttävät säilyvän varsin vakaina ikiroudan suojassa. Radiohiiliajoitusten mukaan ikiroudan alaiset pohjavedet ovat reilusti yli 20 000 vuotta vanhoja. Tosin joitakin viitteitä mahdollisesti talikkien kautta kulkeutuneista nuoremmista vesistä saatiin yli kilometrin syvyydestä. Metaanijäästä ei saatu havaintoja, vaikka vedessä on runsaasti liuenneita metaania. Yhdiste hajoaa hyvin herkästi lämpötilan tai paineen muuttuessa, joten kiteisen kiven huokosiin muodostunut vähäistä määrää klatraattia on todella vaikea havaita. Tutkimuksissa ei ole toistaiseksi tullut esille mitään loppusijoitustilan pysyvyyden kannalta huolestuttavaa. Alkuperäisen suunnitelman mukaisesti joitakin selvityksiä tehdään vielä toisissa kohteissa, jotta havaintojen yleistäminen olisi varmemmalla pohjalla.

## Geomikrobiologia

Ydinjätteen loppusijoituksen pitkäaikais-turvallisuus ei ole ainoa asia, joka ajaa tutkijoita äärimmäisiin oloihin. Yhdysvaltain avaruustutkimusjärjestö NASA rahoittaa laajaa tutkimusohjelmaa, jossa valmistellaan Mars-planeetan tulevia tutkimuksia. Elämän mahdollisuudet Marsissa kiehtovat edelleen niin, että NASA rahoittaa erillistä Astrobiologian Instituutti-organisaatiota (NAI). Lupinin kaivoksella syntyi tiivis yhteistyö Indianan yliopiston professori Lisa Pratt'n johtaman NAI-tutkimusryhmän kanssa, jota kiinnostaa nimenomaan mikrobiologia kylmissä olosuhteissa. Yhteistyöstä hyötyvät kaikki osapuolet ja suomalaisen ydinjätetutkimus saa lisäarvoa Yhdysvaltojen Mars-tutkimusohjelmasta.

## Tulevaisuus

Lupinin kultakaivoksen toiminnan loppumista ei voinut estää edes kullon nykyinen korkea hinta. Viimeinen ikirouta- ja geomikrobiologiahankeiden yhteinen näytteenottokampanja tehtiin ennen viime vuoden vaihdetta, jolloin kaivoksen maanalainen toiminta oli jo loppunut. Ainutlaatuisissa näytteissä riittää vielä tutkimista, mutta uudet tutkimus- ja näytteenottosuunnitelmatkin etenevät. Katse on nyt Lupinin kaivostakin pohjoisemmassa kohteessa, High Lakessa, jonka etuna on se, että siellä ei vielä ole aloitettu kaivostointia. Maanalaisista tiloista on toisaalta paljon apua tutkimuksen kannalta, mutta samalla ne myös häiritsevät luontaisia pohjavesiolosuhteita. Tulevana kesänä High Lakessa tehdään yhteistyössä NASA:n kanssa tutkimuskairauksia, joiden avulla toivotaan saatavan vahvistusta Lupinissa saaduille havainnoille.

Dos. Lasse Ahonen  
Erikoistutkija  
Geologian tutkimuskeskus  
lasse.ahonen@gtk.fi

FK Timo Ruskeeniemi  
Hankepäällikkö  
Geologian tutkimuskeskus  
timo.ruskeeniemi@gtk.fi



# Loviisan ja Olkiluodon voimalaitosten käytöstäpoisto

*Loviisan ja Olkiluodon voimalaitoksia on käytetty tähän mennessä vain noin puolet niiden suunnitellusta käyttöajasta. Silti suunnitelmia niiden käytöstä poistamiseksi on tehty jo 1980-luvulta alkaen. Suunnitelmia tarkistetaan säännöllisin väliajoin.*

**K**auppa- ja teollisuusministeriön (KTM) 1991 ja 1995 tekemissä päätöksissä on määritelty tavoitteet Loviisan ja Olkiluodon ydinvoimalaitosten ydinjätehuollolle. Päätöksien mukaisesti luvanhaltijan tulee toimittaa ydinvoimalaitoksen käytöstäpoistosuunnitelma viranomaisten tarkastettavaksi viiden vuoden välein.

Viimeisimmät käytöstäpoistosuunnitelmat on tehty vuosina 1993, 1998 ja 2003. Seuraavat suunnitelmat on toimitettava vuoden 2008 loppuun mennessä. Voi-

mayhtiöt ovat varautuneet tuleviin jätahuoltokustannuksiin ydinenergialain ja asetuksen mukaisesti. Varautumisjärjestelyillä varmistetaan, että Valtion ydinjätahuoltorahastossa (VYR) on aina olemassa varat, rahastoituna tai vakuuksina, kaikkien jo kertyneiden ydinjätteiden huollon sekä ydinvoimalaitosten käytöstäpoiston turvalliseksi järjestämiseksi.

Ydinjätehuollon kustannusarvioita tarkistetaan vuosittain toimenpiteiden edistymisen ja kustannustason muuttumisen perusteella. Loviisan ja Olkiluodon voima-

laitosten käytöstäpoistoon on vielä vuosikymmeniä aikaa. Tässä esitettyjä käytöstäpoistoperiaatteita on mahdollista edelleen kehittää ja optimoida ennen kuin laitosten käytöstäpoisto ja sitä seuraava purkaminen tulevat ajankohtaiseksi.

## Loviisan voimalaitoksen käytöstäpoisto

Fortum Power and Heat Oy:n Loviisan voimalaitoksella on kaksi painevesireaktoria, kumpikin nimellisteholtaan 488 MWe (netto). Alustava selvitys voimalaitoksen käytöstäpoistosta tehtiin jo vuonna 1982. Seuraava, erittäin yksityiskohtainen suunnitelma, valmistui vuonna 1987. Edellä mainittujen KTM:n päätösten mukaisesti seuraavat selvitykset tehtiin vuosina 1993, 1998 ja 2003.

Käytöstäpoistosuunnitelman keskeiset osa-alueet ovat syntyvien jätteiden aktiivisuusinventaari, työsuunnitelmat (aika-aulut, purkumenetelmät, henkilötyömäärät, jätemäärät, jätepakkaukset, loppusijoitus, kustannukset), säteilyannosarviot sekä jätteiden loppusijoituksen turvallisuusanalyysi.

## Loviisassa noudatettavat periaatteet ja lähtökohdat

Voimalaitoksen uusin käytöstäpoistosuunnitelma tehtiin vuonna 2003 ja sen periaatteita ja lähtökohdita ovat seuraavat:

- ✓ voimalaitosyksiköiden käyttöiäksi on suunniteltu 50 vuotta
- ✓ laitoksella voidaan käyttää väkevyysasteeltaan 4 % polttoainetta
- ✓ käytettyä ydinpolttoainetta varastoidaan voimalaitosalueella 20 vuotta käytön päättymisen jälkeen
- ✓ reaktorin paineastia sisäosineen poistetaan kokonaisuudessaan ja paineastiaa käytetään hyväksi loppusijoituspakkauksena
- ✓ kaikki aktivoitunut ja kontaminoitunut materiaali puretaan viranomaisten määrittämään ominaisaktiivisuus- tai aktiivisuuskaterajaan saakka (valvonnasta vapautusraja)
- ✓ kaikki oleelliset käytöstäpoistotoimenpiteet optimoidaan säteilysuojauksen suhteen (ALARA-periaate)
- ✓ käytöstäpoistojätteiden (purkujätteidien) loppusijoitustilat rakennetaan olemassa olevan voimalaitosjätteen loppusijoitustilan yhteyteen
- ✓ käytöstäpoistosuunnitelmaan sisältyvät myös voimalaitoksen kaupallisen käytön päättymisen jälkeen itsenäistettävät laitteistot ja rakennukset sekä loppusijoitustilan sulkeminen.
- ✓ tekninen suunnitelma ja kustannusarvio perustuvat nykyään käytettävissä oleviin menetelmiin ja tekniikkaan.

Käytöstäpoistosuunnitelman peruslähtökohdita on voimalaitosyksiköiden välitön purkamisen niin pian kuin se on mahdollista. Purkamisessa otetaan huomioon muu laitospaikalla tapahtuva ydintekninen toiminta.

Voimalaitoksen järjestelmien ym. valmistelu purettaviksi ja varsinaiset purkutyöt on suunniteltu tehtäväksi voimalaitoksen ammattitaitoisen ja hyvän laitostuntemuksen omaavan voimalaitos- ja käyttöhenkilökunnan johdolla.

## Valmista 2053 mennessä

Käytöstäpoistosuunnitelman yleisaikataulun mukaan käytöstäpoisto alkaa vuonna 2027 ja päättyy vuonna 2053. Voimalaitoksen yksiköiden käytöstäpoiston kolmen vuoden vaiheistus (LO1 vuonna 2027 ja LO2 vuonna 2030) tukee käytöstäpoiston valmistelutöiden ja purkutöiden tarkoituksenmukaista toteuttamista.

Vaiheittaisella käytöstäpoistolla saavutetaan seuraavia etuja:

- ✓ käytöstäpoiston aloittaa parhaiten laitoksen (Loviisa 1) tunteva henkilöstö;
- ✓ Loviisa 1:n valmistelutöistä sekä purkutöistä saadaan arvokasta tietoa Loviisa 2:n vastaaville töille;
- ✓ vaiheistuksen avulla voidaan paremmin hyödyntää purkamisessa tarvittavien erikoislaitteiden käyttöä (osin samoja erikoislaitteita käytetään molemmilla yksiköillä);
- ✓ laitoksen oma organisaatio on hyvin motivoitunut ja käytettävissä, kun Loviisa 2 on vielä käytössä; sekä
- ✓ käytöstäpoiston ammattitaitoisuus, turvallisuus sekä taloudellisuus paranevat.

## Kahden vuoden valmistelu

Käytön päättymistä seuraa kahden vuoden valmistelujakso ennen varsinaisten purkutöiden aloittamista. Valmistelujakson aikana siirretään käytetty polttoaine reaktorirakennuksen altaista polttoainearastoihin, suoritetaan prosessijärjestelmien tyhjenykset ja dekontaminoinnit sekä rakennetaan tarvittavat kuljetusaukot suurten laitteiden siirtoja varten.

Laitoksen radioaktiivisten osien purkaminen ja käsittely voidaan toteuttaa jo nykyisin käytössä olevilla menetelmillä ja laitteilla. Loviisan voimalaitoksen käytöstäpoistossa on lähtökohdita suurten laitteiden, kuten reaktoripaineastioiden ja höyrystimien, loppusijoittaminen kokonaisina.

Näin vältetään aikaa vievältä ja säteilyannoksia aiheuttavalta paloittelutyöltä.

Purkutyöt alkavat reaktoripaineastian ja muun aktivoituneen materiaalin käsittelyllä ja jatkuvat primääripiiriin ja muiden kontaminoituneiden järjestelmien purkamisella. Viimeisinä puretaan itsenäistetyt käytetyn ydinpolttoaineen varasto ja nestemäisten jätteiden kiinteytyslaitos.

## Reaktorin biologinen suoja mittava työ

Reaktoripaineastian ja sisäosien vaikeiden käytöstäpoistotoimenpiteiden ohella aikaa vievin ja monimutkaisin toimenpide on reaktoripaineastiaa ympäröivän biologisen suojan purkaminen vapautusrajan allittavalle syvyydelle. Reaktorin käytön aikana reaktorikuopan lämpöeristelevyistö, biologinen kuivasuoja ja sen takana oleva rakennusbetoni aktivoituvat neutronisäteilystä. Rakenteiden purku vaatii erityistä säteilysuojautta ja kauko-ohjattua käsittelyä. Purettavan materiaalin määrä on noin 615 t ja purkaminen vaatii aikaa 18 kuukautta.

Reaktoripaineastiat ja niiden aktivoituneet sisäosat loppusijoitetaan sellaisenaan. Suojaelementit sijoitetaan reaktoripaineastiaan polttoaineniippujen paikoille. Reaktoripaineastia toimii tällöin jätepakkauksena. Muu aktivoitunut materiaali paloitellaan ja pakataan erityyppisiin betoni- ja puulaatikoihin. Aktivoituneen purkujätteen paino ilman pakkauksia on 2260 t ja tilavuus pakattuna on 4120 m<sup>3</sup>.

Aktivoituneen purkujätteen kokonaisaktiivisuus 196 000 TBq (kahden vuoden jäähtymisajan jälkeen) on yli 99,9 % kaikkien purkujätteiden kokonaisaktiivisuudesta. Purkutoimenpiteiden säteilyturvallisuuden kannalta tärkein nukliidi on Co-60. Loppusijoitustilan pitkäaikaisturvallisuuden kannalta puolestaan C-14, Ni-59 ja Mo-93 ovat useimmissa tapauksissa merkittävimpiä.

## Isot kokonaisina

Primääripiiriin kontaminoituneista laitteista loppusijoitetaan kokonaisina höyrystimet, paineistimet ja puhallussäiliöt ja apujärjestelmien laitteista mm. haihduttimet.

Muu jäte pakataan betoni- ja puulaatikoihin. Kontaminoituneen purkujätteen paino on ilman pakkauksia 6 330 tonnia ja tilavuus pakattuna on 9 310 m<sup>3</sup>.

Kontaminoituneen jätteen aktiivisuus 68 TBq (so. 34 TBq / laitosyksikkö, kahden vuoden jäähtymisajan jälkeen) on erittäin pieni verrattuna aktivoituneen purkujätteen aktiivisuuteen, mutta paino ja tilavuus ovat yli kaksinkertaisia.

Voimalaitosaluetta ei pyritä palauttamaan luonnontilaan, vaan Loviisan voimalaitoksen käytöstäpoisto rajoittuu radioaktiivisia aineita sisältävien järjestelmien, laitteiden ja rakenteiden purkamiseen ja poistamiseen laitokselta purkujätteiden loppusijoitustilaan. Niiltä osin kuin "puhtaiden" rakennusten uudelleenkäyttö ei ole tarkoituksenmukaista, rakennukset voidaan purkaa myöhemmin. Laitosaluetta voidaan vastaisuudessa käyttää esimerkiksi voimantuotantoon. Käytöstäpoistettu ydinvoimalaitos ei säteilyturvallisuusmielessä rajoita alueen käyttöä millään tavoin.

Käytettyä ydinpolttoainetta varastoidaan voimalaitosalueella 20 vuotta voimalaitoksen kaupallisen käytön päättymisen jälkeen. Varastoinnin jälkeen käytetty polttoaine kuljetetaan kapselointilaitokseen Olkiluotoon, josta se siirretään edelleen käytetyn polttoaineen loppusijoituspaiikkaan.

## Käytöstäpoistojätteiden loppusijoitus

Käytöstäpoistoperiaatteen mukaan reaktorin paineastiat, sisäosat, suojaelementit ja suuret kontaminoituneet primääripiirin komponentit loppusijoitetaan kokonaisina. Muu materiaali paloitellaan, pakataan erityyppisiin betoni- ja puulaatikoihin kuljetuksen sekä loppusijoituksen edellyttämällä tavalla. Käytöstäpoistossa syntyvä huoltojäte pakataan tavallisiin 200 litran tynnyreihin.

Loviisan voimalaitoksen toiminnan aikana kertyvät vähä- ja keskiaktiiviset voimalaitosjätteet ja käytöstäpoiston yhteydessä muodostuvat purkujätteet loppusijoitetaan voimalaitosalueen kallioperään



jo osittain valmiiksi rakennettuihin loppusijoitustiloihin. Loppusijoitustilat sijaitsevat maan alla noin 110 metrin syvyydellä ja sinne johtaa maan päältä 1 170 metrin pituinen ajotunneli.

Voimalaitosjätteitä on jo siirretty loppusijoitustiloihin vuodesta 1998 lähtien. Käytöstäpoistojätteen loppusijoitustilat on suunniteltu voimalaitosjätteen loppusijoitustilojen yhteyteen niin, että tilat muodostavat yhtenäisen toimivan kokonaisuuden.

## Turvallisuudesta huolehditaan

Käytöstäpoistossa on turvallisuuden kannalta erityispiirteinä henkilökunnan säteilyturvallisuus purkutöiden aikana sekä puretun radioaktiivisen jätteen loppusijoitukseen liittyvät turvallisuusnäkökohdat.

Purkutöihin osallistuvan henkilöstön kollektiiviseksi säteilyannokseksi on arvioitu noin 9,5 manSv. Loviisan voimalaitoksen käyttöiän suunnitellun pidennyksen ja eräiden rakenteiden aktiivisuusarvion nousun takia on annosarvio hieman kasvanut edellisiin arvioihin nähden.

Käytöstäpoistojätteiden loppusijoituksen turvallisuutta on selvitetty erillisessä turvallisuusanalyysissä. Selvitysten mukaan jätteiden loppusijoituksesta sijoituspaikan ympäristön väestölle aiheutuvat säteilyannokset ovat hyvin pieniä. Sijoituspaikan välittömässä läheisyydessä oletetun kaivon kautta väestön yksilölle aiheutuva efektiivinen annosnopeus on realistisesti arvioituna noin 3 µSv/a.

Vesistöjen kautta aiheutuva annosnopeus on alle 1 µSv/a. Konservatiivisesti ar-

vioituna annokset ovat jonkin verran suurempia, mutta kuitenkin voimalaitosjätteen loppusijoitusta koskevan efektiivisen vuosiansiannon oletusarvon ylärajan 0,1 mSv alapuolella. Vertailun vuoksi voidaan mainita, että suomalaisten keskimääräinen vuosittainen säteilyannos on noin 4 mSv.

## Yli 200 milj. euron urakka

Loviisan voimalaitoksen käytöstäpoiston kustannukset on arvioitu esitettyjen suunnitelmien ja työmääräarvioiden perusteella. Erityyppisten hankintojen osalta arviot perustuvat Fortumissa olevaan kokemusperäiseen kustannustietoon ja laitetoimittajilta saatuihin kustannusarvioihin. Kokonaisuutena käytöstäpoisto on hyvin työvaltainen projekti, jolloin henkilökustannusten määrä on erittäin merkittävä.

Loviisan voimalaitoksen käytöstäpoiston kustannusarvio on noin 216 miljoonaa euroa. Kustannusarvioissa ei ole otettu huomioon käytöstäpoistettuun laitokseen tai laitosalueeseen liittyviä mahdollisia positiivisia arvoja, kuten metallien, laitteiden tai rakennusten arvoa kierrätettyinä ja uudelleenkäytettyinä, eikä voimalaitosalueen arvoa esimerkiksi voimantuotantoon.

## Olkiluodon käytöstäpoisto

Olkiluodon ydinvoimalaitoksen käytöstäpoiston lähtökohdat ovat pääpiirteiltään samat kuin Loviisassa, mutta erojakin löytyy:

- ✓ Olkiluodon voimalaitosyksiköiden käyttöiäksi on suunniteltu 60 vuotta,
- ✓ Käytöstäpoistosuunnitelma perustuu OL1:n ja OL2:n osalta 30 vuodella viivästetyn purkuun,

✓ OL3-laitosyksikön osalta päävaihtoehto on välitön purku, jolloin kolmen laitosyksikön purku voisi tapahtuisi peräkkäin.

OL1:n ja OL2:n viimeisin käytöstäpoistosuunnitelma on laadittu vuonna 2003. Suunnitelman lähtökohtana oli 40 vuoden käyttöikä. OL3:n osalta alustava käytöstäpoistosuunnitelma tarvitaan laitoksen käyttölu-pahakemukseen.

Vuoden 2008 loppuun mennessä päivitettävässä käytöstäpoistosuunnitelmassa tarkennetaan käytöstäpoiston kustannusarviota, päivitetään suunnitelmat vastaamaan 60 vuoden käyttöikää, päivitetään käytöstäpoistojätteen turvallisuusanalyysi sekä otetaan suunnitelmiin mukaan OL3:n käytöstäpoisto.

## Aikataulu aina 2100-luvulle

Vuoden 2003 käytöstäpoistosuunnitelman aikataulu on laadittu OL1:stä ja OL2:sta varten olettaen laitoksille 40 vuoden käyttöikä. Jos yksiköille oletetaan 60 vuoden käyttöikä, niin päädytään aikatauluun, jonka mukaan käytöstäpoisto alkaa OL1:n alasajolla vuonna 2038. OL2 ajetaan vastaavasti alas vuoden 2040 alussa. OL1:n alasajon jälkeen alkaa laitosyksiköiden valmistelu valvottuun säilytykseen, joka kestää vuoteen 2042 saakka.

Valvottu säilytys päättyy vuonna 2068 eli 30 vuoden kuluttua OL1:n alasajosta, jolloin varsinaiset purkutytöt alkavat. Purkutytöt päättyvät vuonna 2072 ja purkujätteen loppusijoitustilat saadaan suljettua vuonna 2075. Edellä esitetty aikataulu on suuntaa antava ja se tulee muuttamaan, kun OL3:n purkutytöt otetaan suunnitelmiin mukaan.

## Tuhansia tonneja purkujätettä

OL1:lta ja OL2:lta kertyvän aktivoituneen purkujätteen paino ilman pakkauksia on 3 978 t ja tilavuus pakattuna on 4 434 m<sup>3</sup>. Aktivoituneen purkujätteen kokonaisaktiivisuus on 24 000 TBq. Vastaavasti kontaminoituneen purkujätteen paino ilman pakkauksia on 5 630 tonnia ja tilavuus pakattuna on 20 921 m<sup>3</sup>.

Kontaminoituneen jätteen aktiivisuus on 2,4 TBq eli hyvin pieni verrattuna aktivoituneen purkujätteen aktiivisuuteen. Lisäksi laitoksilta kertyy hyvin vähäaktiivista jätettä reaktorin lähialueelta 1254 m<sup>3</sup>. Tähän ryhmään kuuluvat mm. biologisen suojan uloimmat kerrokset.

## Vain aktiiviset puretaan

Olkiluodon ydinvoimalan käytöstäpoistosuunnitelman lähtökohtana on, että ainoastaan aktiiviset laitososat puretaan. Purkutöiden aikaan laitosalueella on käytössä myös muita ydinteknisiä toimintoja. Laitosyksiköiden sulkemisen jälkeen alueelle jää toimimaan käytetyn polttoaineen väli-varasto sekä Posivan käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitustilat sekä kapselointilaitos.

Purkutöiden ehkä vaativin vaihe on sisäosilla täytetyn reaktoripaineastian nosto ja siirto loppusijoitustilaan. Sisäosilla pakattu ja betonilla osittain täytetty paineastia painaa noin 1500 tonnia. Paineastia voidaan nostaa joko suurella torninosturilla tai riskikorakenteiden varaan rakennettavalla nostojärjestelmällä. Vastaavaa nostojärjestelmää voidaan käyttää myös laskettaessa paineastia loppusijoituskiluun.

## Jätteiden loppusijoitus

Olkiluodon ydinvoimalaitokselta kertyvät käytöstäpoistojätteet loppusijoitetaan käytössä olevan voimalaitosjätteen loppusijoitustilan yhteyteen rakennettavaan laajennukseen. Reaktoripaineastiat ja astioihin pakatut reaktorin sisäosat sijoitetaan erilliseen paineastian loppusijoituskiluun.

Käytöstäpoisto- ja voimalaitosjätteen loppusijoitustilan laajennuksen periaatesuunnittelu on aloitettu. Laajennus on tarkoitus tehdä siten, että sinne saadaan mah-tumaan kaikkien laitosyksiköiden 60 vuoden käytön aikana syntyvät jätteet.

Purkujäte pakataan betoniin tai puiisiin laatikoihin ja tynnyreihin. Prosessijärjestelmien isoja komponentteja ei pakata loppusijoitusta varten vaan ne sijoitetaan loppusijoitustilaan sellaisenaan.

## Säteilyannokset pyritään minimoimaan

Kaikille OL1:n ja OL2:n käytöstäpoiston päävaiheille on tehty arviot työntekijöiden kollektiivisista säteilyannoksista. Vuoden 1998 purkusunnitelmassa oletettiin, että paineastiat paloitellaan, jolloin työntekijöiden saamaksi kollektiiviseksi annokseksi tuli 5 910 manSv. Vuoden 2003 suunnitelmassa paineastioiden paloitelusta luovuttiin. Paineastioiden loppusijoittaminen kokonaisuena pienensi työntekijöiden kollektiivisiä annoksia merkittävästi arvoon 3598 manSv.

Käytöstäpoistojätteiden loppusijoituksen turvallisuusanalyysi on tarkoitus uudistaa vuoden 2007 aikana. Päivityksessä otetaan huomioon OL3:n jätteet sekä OL1:n ja OL2:n käyttöäin pidentämisen vaikutukset.

## Tiukkenevat rajat mukana kustannusarvioissa

Olkiluodon ydinvoimalaitoksen käytöstäpoiston kustannuksiksi OL1:n ja OL2:n osalta on arvioitu 140 miljoonaa euroa. Kustannusarviossa on varauduttu purkutöiden laajentamiseen tiukkenevien valvonnasta vapautuksen rajojen johdosta.

Vuonna 2008 päivitettävässä suunnitelmassa kustannuksiin otetaan huomioon myös OL3- laitosyksikkö.

*Fortum Power and Heat Oy, Summary Report  
TJATE-G12-81, Decommissioning of the Loviisa NPP, Ilpo  
Kallonen, Tapani Eurajoki and Elias Mayer,  
Fortum Nuclear Services Ltd, Vantaa December 2003.  
ISSN 1457-3342, ISBN 951-591-081-1.*

*Teollisuuden Voima Oy, Raportti TVO-1/03, Olkiluodon  
ydinvoimalaitoksen käytöstäpoiston suunnitelma 2003,  
Teollisuuden Voima Oy, Posiva Oy ja Safram Oy,  
Rauma Joulukuun 2003. ISSN -1465-1514.*

*DI Ilpo Kallonen  
Ydinjäteasiantuntija  
Turvallisuus ja polttoaine  
Fortum Nuclear Services Oy  
ilpo.kallonen@fortum.com*



*TkT Jari Tuunanen  
TVO:n tutkimus- ja kehitys-  
toimiston toimistopäällikkö  
Ydintekniikka -osasto  
jari.tuunanen@tvo.fi*



# Ydinjätehuollon tutkimusohjelman tuloksia

*Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma (KYT) on siirtynyt uuteen vaiheeseen. Vuosina 2002-2005 toteutettu ensimmäinen tutkimuskausi on raportoitu ja saadut tulokset tukevat käsityksiä ydinjätteidien geologisen loppusijoituksen turvallisuudesta. Tutkimusohjelmassa on myös havaittu haasteita koko suomalaiselle ydinjätetutkimukselle.*

**K**YT käynnistyi vuonna 2002 itenäisten rahoittajien tutkimusohjelmassa, jossa johtoryhmään osallistuivat potentiaaliset rahoittajatahot. Vuonna 2004 toteutettiin ydinenergia-alan uudistus, jonka tavoitteena oli vakauttaa kansallisten ydinenergia-alan tutkimusohjelmien rahoituksen taso, sillä valtion budjetin kautta tulleen rahoituksen tasossa oli usein epävarmuustekijöitä. KYTin osalta uudistus tarkoitti, että rahoitus tulee valtion ydinjätehuoltorahastoon (VYR) perustetusta ydinjätetutkimusrahastosta. Varat rahastoon kerätään vuosittain suoraan jätehuoltovelvollisilta suhteessa niiden vastuumäärään, kultakin 0,08 % vastuumäärästä.

KYT-johtoryhmään osallistuivat Kauppa- ja teollisuusministeriö (KTM), Säteilyturvakeskus (STUK), Fortum Oyj, Teollisuuden Voima Oy, Posiva Oy ja Teknologian kehittämiskeskus (Tekes). KYTin johtoryhmän puheenjohtajana ensimmäisen kaksivuotiskauden (2002-2003) aikana toimi **Anne Väättäinen** (KTM). Toisen kaksivuotiskauden aikana (2004-2005) puheenjohtajana toimi **Esko Ruokola** (STUK). Tämän kirjoittaja toimi tutkimusohjelman koordinaattorina.

Nelivuotisen historiansa aikana KYT on toteuttanut vähintään 15 tutkimushanketta vuosittain, vuotuinen tutkimusbudjetti on ollut noin miljoona euroa. Internetistä löytyy tilastoa hankkeiden jakautumisesta eri tutkimusaiheisiin sekä eri tutkimusaiheiden rahoitusosuuksien kehittymisestä ajan funktiona (ks. s. 25).

## Loppusijoitustutkimusten tuloksia

Turvallisuusanalyysimetodologia-aihepiirissä on osallistuttu kytketyn mallinnuksen tutkimuksiin kansainvälisessä DECOVALEX-projektissa etupäässä bentoniitin ja kallioperän aihekokonaisuuksissa.

IAEA:n koordinoitussa tutkimusprojektissa on osallistuttu luonnon turvallisuusindikaattoreita selvittävään työhön, johon kerättiin Suomen luonnossa esiintyvien aineiden pitoisuuksia ja massavirtoja vertailukohdaksi turvallisuusanalyysissa lasketuille.

Rinnan IAEA:n hankkeen kanssa on kehitetty reaktiivisen kulkeutumismallinnuksen valmiuksia kansainvälisenä yhteistyönä.

Radionuklidien vapautuminen loppusijoitustilasta -aihepiirissä selvitettiin kokeellisesti kuparin korroosiota bentoniittiy-

päristössä suolaisessa pohjavedessä sekä kytkettyä kuparin korroosiota ja virumista. Kirjallisuusselvityksessä tutkittiin kuparin korroosiotuotteiden esiintymistä suolaisessa ja pelkistävässä pohjavesiympäristössä. Kirjallisuusselvityksen avulla selvitettiin toistuvien jääytymisten ja sulamisten vaikutusta bentoniitin vedenjohtavuudelle. Bentoniitin kytketyn termo-hydro-mekaanisen (THM) käyttäytymisen kuvaamiseksi tarkasti on kehitetty mallinnusvalmiuksia; tästä DECOVALEX-projektissa tehdystä työstä on tekeillä väitöskirja.

Kallioperä ja pohjavesi -aihepiirissä on selvitetty kiteisen kallioperän lujuutta ja ajasta riippuvaa rakoilua; viimeksi mainittu hanke tehtiin osana DECOVALEX-projektia ja siitä on tekeillä väitöskirja. Kallioperän rakoilun ja hydrogeologian suhteesta on kehitetty systemaattista tulkintamodiikkia, missä yhteydessä on tehty kaksi diplomityötä.

Jääkausisyklit aiheuttavat kallioperän redox-olosuhteissa muutoksia ja nämä puolestaan voivat mobilisoida esim. uraania; näiden mobilisaatioiden tulkintamenetelmiä on kehitetty systemaattisesti. Aiheesta on valmistunut väitöskirja ja diplomityö. Kaasujen alkuperää kallioperässä on selvitetty kokeellisesti merenpohjan sedimenteistä. Ikiroudan kallioperässä aiheuttamia vaikutuksia on selvitetty kansainvälisenä yhteistyönä kanadalaisessa Lupin Mine -kaivoksessa, joka ulottuu ikiroudan alapuolelle.

Suomen kallioperäliikunnoista ja niiden keskeisimmistä syistä on laadittu yhteenveto. Palmotun uraaniesiintymässä tehdyistä luonnonanalogiatutkimuksista on laadittu aiemmat tulokset yhteen vetävä tiivistelmä.

Radionuklidien kulkeutuminen kallioperässä -aihepiirissä on tutkittu nuklidien pidättymistä laboratoriomittakaavan merkkiainekokein ja niihin liittyvin mallinuksin; etupäässä on selvitetty matriisidiffuusion merkitystä nuklidien pidättymisessä toisinaan tukevin kolonni- ja rakokokein.

Kokeellisista merkkiainetutkimuksista on valmistunut väitöskirja. Kalliomatrii-

sin huokoisuusrakennetta on selvitetty kokeellisesti käyttämällä rinnan useita menetelmiä, esim. C-14-PMMA, konfokaalimikroskopia ja röntgentomografia. Työ alkaa edetä laboratoriomittakaavasta in situ -mittakaavaan, testejä on tehty kansainvälisenä yhteistyönä Grimselin kalliolaboratoriossa Sveitsissä.

Aiheesta on tehty väitöskirja ja toinen on tekeillä. Radionuklidien sorptiota tunnelitaytemateriaaliin on tutkittu kokeellisesti ja teoreettisesti. OECD/NEAN asian tuntiryhmiin termodynaamisten tietokantojen ja sorption aihekokonaisuuksissa on osallistuttu.

Biosfäärianalyysi-aihepiirissä on keskitytty ympäristön säteilysuojeluun testamalla Monte Carlo -menetelmään perustuvaa laskentamallia kirjallisuudessa raportoituissa tapauksissa.

## Strategisten tutkimusten tuloksia

Ydinjätehuollon strategisen tutkimukset -aihepiirissä on osallistuttu OECD/NEAN asiantuntijaryhmien työskentelyyn kehittyneiden ydinpolttoainekiertojen selvittämiseksi.

Kehittyneissä polttoainekierroissa pyritään lähinnä mahdollisimman tehokkaaseen ydinpolttoaineen hyödyntämiseen, mikä käytännössä tarkoittaa esim. käytetyssä polttoaineessa jäljellä olevan halkeamiskelpoisen aineen palauttamista polttoainekiertoon (ns. jälleenkäsittely). Erottelu ja transmutaatio (P&T) on yksi jälleenkäsittelykiertojen aihepiiri.

KYT-ohjelman erityistavoitteena on ollut hahmottaa kehittyneiden polttoainekiertojen vaikutusta ydinjätehuoltoon. Rajallisen panoksen toteutettu osallistuminen on tuottanut perustuntuman aihepiiriin, joka on nykyisin varsin vilkkaan kansainvälisen tutkimuksen kohteena.

KYT-ohjelman tutkimuksiin ovat osallistuneet VTT, Geologian tutkimuskeskus (GTK), Helsingin yliopisto, Jyväskylän yliopisto, Teknillinen korkeakoulu sekä Framcom Oy.

## Laajapohjainen yhteistyöfoorumi

KYT on ollut kansallinen yhteistyöfoorumi, jossa käytävään keskusteluun ovat osallistuneet ydinjätehuollon viranomaiset, jätahuoltovelvolliset ja tutkimuslaitokset. Näin laajapohjainen osallistuminen on mahdollistanut keskustelua myös tutkimusprioriteeteista. Se onkin ollut tarpeen, koska rajallisilla resursseilla on pyrittävä tekemään mahdollisimman hyvää tutkimusta mahdollisimman keskeisistä aiheista. KYT:ssä onkin ollut paljon eri tutkimuslaitosten yhteistyöhankkeita, joissa on pyritty yhdistämään eri laitosten vahvuuksia.

Yhtenä tutkimusohjelman sisäisen tiedonvälityksen kanavana ovat olleet julkiset seminaarit, joita on pidetty KYT-puiteohjelmasta, radionuklidien kulkeutumisen kemiasta, jääkausien vaikutuksesta pohjavesikemiaan, suomalaisista DECOVALEX-projektin kontribuutioista, Palmotun analogiatutkimusten tuloksista sekä erottelu- ja transmutaatiotutkimuksesta (P&T). KYT-ohjelman loppuseminaari pidettiin 22.3.2006.

Lisäksi toteutettiin hanke-esittelyt reaktiivisesta kulkeutumismallinnuksesta ja EU-hankkeen FUNMIG eräistä migraatiotutkimuksista.

KYT-ohjelman perusrooli on vastata viranomaisten tutkimustarpeisiin. Koko suomalaisen ydinjätetutkimuksen kenttää ajatellen sen tehtävä on lähinnä täydentää Posivan tutkimusohjelmaa, koska vuositasolla KYTin volyyymi on vain noin kymmenesosa Posivan tutkimusbudjetista.

KYTin vipuvaikutus tutkimuskenttään voi kuitenkin olla merkittävä. Näin siksi, että julkisen tutkimusohjelman tulokset ovat julkisia myös jätahuoltovelvollisille, joten esimerkiksi KYT:ssä kehitettyjä tutkimusmenetelmiä voivat viranomaisten lisäksi hyödyntää kaikki suomalaiset ydinjätehuollon toimijat.

Vaikka KYT on ollut kansallinen tutkimusohjelma, sillä on myös merkittävää kansainvälistä yhteistyötä. Erityisesti osallistuminen DECOVALEX-projektiin on tuo-



nut kytkettyyn mallinnukseen liittyvää osaamista. Tärkeitä monenkeskisiä yhteistyökumppaneita ovat olleet IAEA ja OECD/NEA:n erilaiset asiantuntijaryhmät. Näiden lisäksi yksittäisillä hankkeilla on ollut suora yhteistyötä ulkomaisten tutkimusohjelmien ja -kumppaneiden kanssa.

## Uusien asiantuntijoiden koulutus

Uusien tutkimustulosten lisäksi tutkimusohjelman yksi tärkeä tehtävä on ollut osaltaan edistää uusien asiantuntijoiden kouluttamista alalle. Se on tarpeen, koska kokeneimmat suomalaiset ydinjätealan asiantuntijat lähestyvät eläkeikää ja kansallisesti on tärkeää varmistaa jo saavutetun osaamisen jatkuvuus.

KYTin piirissä koulutus on toteutunut etupäässä opinnäytetöiden muodossa ja tutkimushankkeissa on valmistunut useita tohtorinväitöksiä ja diplomitöitä ydinjätehuollon aihepiiristä.

Opinnäytemielessä KYT onkin erinomainen ympäristö, sillä tutkimusohjelmassa on valmis tutkimusverkosto, jota opinnäytetyön tekijät voivat hyödyntää hakiessaan monipuolista näkökulmaa aiheeseensa.

## Joustava toimintatapa

KYTin toiminnan pääelementit ovat puiteohjelma, hankehaut ja johtoryhmän rahoitus-suositus. Viime kädessä rahoituspäätöksen tekee valtion ydinjäterahaston (VYR) johtokunta KTM:n virallisen esityksen pohjalta.

Puiteohjelma on johtoryhmän tutkimusohjelman alussa muotoilema sisältökehys siitä millaiset tutkimusaiheet voivat periaatteessa kuulua KYT-ohjelmaan. Koska puiteohjelma on tarkoitettu koko tutkimuskaudelle, se on luonteeltaan väljä eikä siitä ole yritettykään pilkuntarkkaa säädös-kokoelmaa.

Tarkoitus on ollut, että sitä käytetään sisällöllisenä selkänäojana, kun hanke-esityksiä laaditaan tai arvioidaan.

KYTin sisältö perustuu vuosittaisiin julkisiin hankehakuihin, jonka tuloksista johtoryhmä valitsee rahoitettavat hankkeet.

Menettelytapa korostaa johtoryhmän näkemystä siitä, millaista tutkimusta kannattaa rahoittaa. Menettely on joustava, koska näin johtoryhmä voi joka vuosi halutesaan tarkentaa puiteohjelman kehystä.

Toimintatapa on sovittanut yhteen tutkimuksellisia tarpeita ja käytettävissä olevia resursseja. Sitä voidaan kuitenkin aina parantaa.

Tässä mielessä on keskusteltu mahdollisuudesta jo hankehaun kutsukirjeessä korostaa niitä tutkimusaloja, joita johtoryhmässä pidetään ajankohtaisina. Tällöin pystyttäisiin jo hakuvaiheessa viestittämään tutkimuslaitoksille havaituista erityisistä tutkimustarpeista.

## Tutkimushaasteita

KYTin piirissä käydyssä keskustelussa on tunnistettu myös katvealueita, joihin suomalainen tutkimus ei toistaiseksi ole osoittanut tarpeeksi huomiota. Bentonitiin kytketty termo-hydro-mekaanis-kemiallinen (THMC) käyttäytyminen on osoittautunut erittäin haasteelliseksi sekä kokeellisessa että mallinnusmielessä, vaikka bentoniittia sinänsä onkin tutkittu vuosikautia.

Toisaalta tiukemmat vaatimukset osaamiselle ovat tulleet esille vasta, kun käytetyn polttoaineen loppusijoitusohjelma on edennyt lähemmäs toteutusvaihetta.

Reaktiivinen kulkeutumismallinnus on myös jäänyt liian vähälle huomiolle; siinä yhdistetään pohjaveden virtausmallinnuksen ja geokemiallisen mallinnuksen viimeisin osaaminen. Toistaiseksi geokemiallinen kytkentä on turvallisuusanalyysimallissa kuvattu yksinomaan tasapainosorptiota edustavalla jakautumiskertoimella (ns. Kd arvo).

Reaktiivinen kulkeutuminen koskee kaikkia veteen liuenneita aineita, ei pelkästään radionuklideja, vaan myös esim. kuparia korrodoivien aineiden massavirtoja.

Kolmas aihepiiri, jossa Suomessa tarvitaan enemmän systemaattista panostusta, on mikrobitoiminnan parempi kytkeminen loppusijoituksen turvallisuuden arviointiin. Mikrobitoiminta vaikuttaa pohjaveden geokemiallisiin olosuhteisiin, mikä puoles-

taan vaikuttaa kaikkeen kulkeutumiseen. Siksi se voi vaikuttaa sekä teknisten vapautumisesteiden toimintaan että radionuklidien leviämiseen loppusijoitustilasta.

Käytetyn polttoaineen loppusijoitustila on eräiltä osin avoin noin 100 vuotta, mikä osaltaan vaikuttaa tarkasteltaviin mikrobikantoihin, koska ihminen tuo väistämättä mukanaan mikrobeja loppusijoitustilaan.

## Jatkoa seuraa

KYT-ohjelmaa seuraava uusi viisivuotinen tutkimusohjelma KYT2010 on jo käynnissä. Se noudattaa pääosin jo KYT-kaudella luotuja käytäntöjä. Ydinenergialain muutoksen jälkeen 2004 KYTin hallinnolliset käytännöt ovat alkaneet vakiintua, joten niiden jatkaminen on luontevaa.

Uutena elementtinä KYT2010-ohjelmassa on johtoryhmän apuna toimiva tukiryhmä, joka on tutkimusohjelman teknisteellinen asiantuntijaelin. Sillä pyritään entisestään parantamaan tutkimusohjelman sisällöllistä vuoropuhelua tutkimuslaitosten ja johtoryhmän välillä.

Uuden ohjelman johtoryhmän puheenjohtajana toimii **Tero Varjoranta** (STUK), tukiryhmän puheenjohtajana **Esko Ruokola** (STUK) ja koordinaattorina **Heikki Leinonen** (Carrum Oy). ■

Tarkempaa tietoa KYT-ohjelman tuloksista on saatavissa tutkimusohjelman englanninkielisestä loppuraportista (VTT Research Notes 2337, <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2337.pdf>).

TkT Kari Rasilainen  
Erikoistutkija  
VTT  
kari.rasilainen@vtt.fi

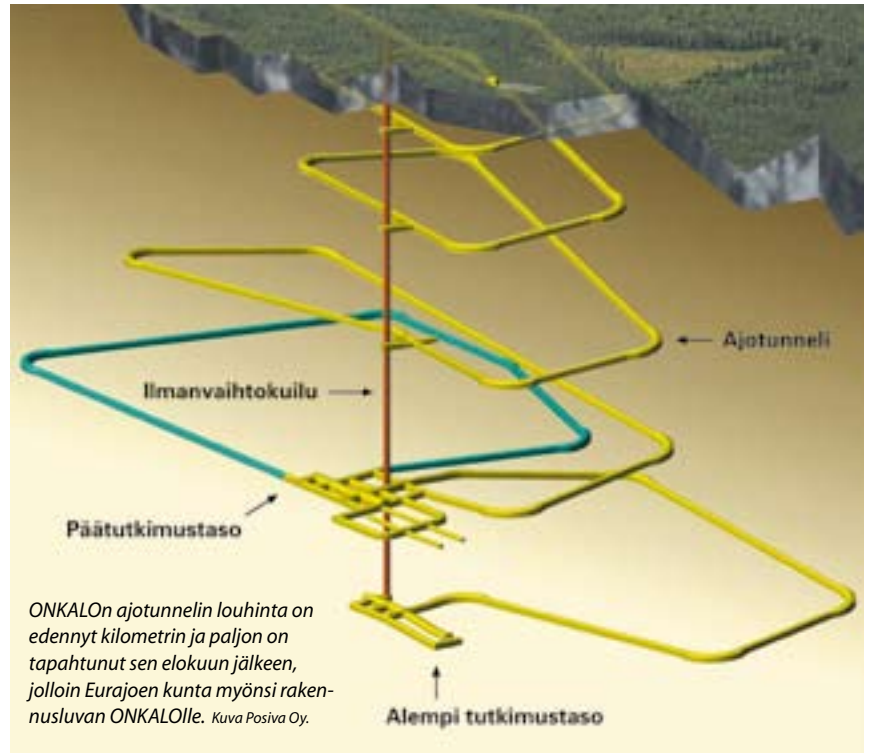


# Posivan ensimmäinen kilometri

Vuoden 2003 päättyessä käynnistettiin ONKALOn paikan valmistelut maanpäällisillä aluetöillä, jolloin tarvittava infrastruktuuri rakennettiin Olkiluodon saaren keskiosaan. Seuraavaksi valmistui tutkimushalli, jossa geologit tänä päivänä kartoittavat ONKALOn ja Olkiluodon alueelta kairattuja kivisydämiä, sekä laboratorio-osa Posivan kasvaneen vesinäytteenoton analytiikan hoitoon. Olkiluodon infrastruktuurin muutokseen on ONKALOn rakentamisen aloittamisella vain pieni vaikutus. Suurin osa toiminnasta kun tapahtuu maan alla ja raskas liikenne kulkee Louhetietä pitkin läjitysalueelle joka palvelee myös OL3:n rakentamista. Työmaa-alueelle on rakennettu tähän mennessä selkeytsaltaat, ajoneuvojen pesuhalli, porttirakennus, tunnelitekniiKKarakennus, työmaatoimistot sosiaalitaloineen ja ONKALO-projektin konttorirakennus.

## Häiriöiden pienentäminen tärkeää

Kesällä 2004 polkaistiin käyntiin ensimmäinen urakkaosuus ONKALOn. Avoleikkauksen louhinnan, lujituksen ja tiivistämisen jälkeen varsinaisen kalliolouhinta alkoi syyskuussa. ONKALOn louhitaan aivan tavanomaisesti poraus-räjätysmenetelmällä, mutta haasteelliseksi työn tekee louhittavien tilojen pitkät käyttöikä, erittäin tiukat vuotovesivaatimukset ja loppusijoituslaitoksen asettamat vaatimukset rakentamiselle. ONKALOn alueen hydrologisiin ja geokemiallisiin olosuhteisiin aiheutetaan mahdollisimman vähän häiriötä ja tämän takia kallioista tunneliin vuotavan veden määrä minimoidaan. Normaali tiivistystapa on injektoida sementtiä kalliorakoihin. Tunneli etenee yksiperälouhinta ja syvyyden kasvaessa injektointitarve vähenee, mutta lisääntyneen hydrostaattisen paineen ja pienentyvien rakoavaumien johdosta muuttuu työ haastavammaksi. Myös kallion lujitukseen kiinnitetään erityistä huomiota. ONKALOn valuvan pohjaveden suolaisuus kasvaa alaspäin mentäessä



*ONKALO eli maanalainen kallioerän karakterisointia varten louhittava tila palvelee useita eri tarkoituksia. Olkiluodon kallioerästä tehdyillä tutkimuksilla saadaan tutkimustietoa varsinaisten loppusijoitustilojen rakentamisen lupahakemusta varten. ONKALOn rakentamisen yhteydessä kehitetään työmenetelmiä, joita voidaan käyttää loppusijoitustilojen rakentamisessa, ja aikanaan ONKALO toimii myös yhtenä kulkureittinä varsinaisiin loppusijoitustiloihin. ONKALO koostuu pääosin spiraalinmuotoisesta ajotunnelista 520 metrin syvyyteen, päätutkimustasosta 420 metrin syvyydessä sekä kuiluista, jotka aikanaan toimivat kulkureitteinä henkilöille sekä tulo- ja pois-toilmakanavistona*

ja kaikki materiaalivalinnat suunnitellaan huolellisesti etukäteen. Yksi ONKALOn rakentamisen haasteista on seurata ja monitoroida rakentamisesta johtuvia muutoksia luotettavasti ja dokumentoida rakentamisaikaiset tapahtumat huomattavasti tarkemmin kuin normaaleissa kallionrakennuskohteissa yleisesti on tapana. Toinen haaste on sovittaa tutkimustyö ja louhinta yhteen. ONKALOn kun ei louhita samal-

la tahdilla kuin maantietunnelia, missä ajalista säästöä tulee useamman perän yhtäaikaisesta louhinnasta. ONKALOn louhittavien eteneminen keskeytyy määräajoin pilottireikien kairaamista varten. Nämä tunnelin profiiliin sisälle kairatut reiät antavat mahdollisuuden tehdä ennusteita geologisista rakenteista, injektointitarpeesta, lujituksesta, vesikemian olosuhteista. Po-raajien, panostajien ja louheenkuljettaji-

en lisäksi maan alla ahtaissa tiloissa työskentelee aika ajoin kartoittajia, kairajia, tutkijoita, sekä kemistejä apujoukkoineen. Syy ONKALON ajotunnelin kapeuteen löytyy käyttökohteesta. Pitkäaikaisturvallisuuden kannalta on hyvä että tilavuudeltaan pieni ONKALO vähentää ympäröivään kalliioon kohdistuvia häiriöitä. Lisäksi tilojen sulkemisen yhteydessä on täytettävä tilavuus pienempi. Ajotunnelin tulee kuitenkin olla sovittavissa loppusijoitustoimintaan esim. toimimalla vaihtoehtoisena kapselien kulkureittinä loppusijoitustiloihin.

## Myös maan päällä tapahtuu

ONKALON rakentaminen ei suinkaan poista tarvetta Olkiluodon alueen geologisille, geofysikaalisille ja geokemiallisille selvityksille. Samaan aikaan kun ensimmäistä kilometriä louhittiin maan alla, niin olemassaolevien kolmenkymmenen kolmen syvän kairanreiän lisäksi maan päältä kairattiin 7 uutta reikää. Näiden tarkoituksena on antaa ONKALON ympäristön alueella sijaitsevien geologisten rakenteiden ja piirteiden ominaisuuksista lisäinformaatiota. ONKALON alueen geologinen malli esiteltiin syksyllä 2005 ja samalla käynnistettiin työ, jonka tavoitteena on luoda Olkiluodon alueen kalliomalli, jossa geologia, geokemia, geohydrologia ja kalliomekaniikka yhdistyvät yhdeksi kokonaisuudeksi hyödyttäen pitkäaikaisturvallisuuden, suunnittelun ja rakentajien tarpeita.

Louhinnan myötä kallioperään joutuu normaaleja rakennusmateriaaleja, joiden pitkäaikaisvaikutukset tulee arvioida. Orgaaniset materiaalit tai sementistä liukevat aineet saattavat joutua vuorovaikutukseen moniestejärjestelmän komponenttien kanssa kulkeutuessaan loppusijoitustunneleihin ja heikentää näiden toimintakykyä. Kaikki poistettavissa olevat ylimääräiset rakennusmateriaalit tullaan poistamaan ennen tilojen sulkemista. Lujitukseen käytettävät pultit, kallioperään injektioitu sementti ja juotoslaasti jäävät pysyvästi kallioperään. Määrät ovat sen verran merkittäviä, että sementille ja juotoslaastille kehitetään pitkäaikaisturvallisuuden



ONKALON työmaa-alue kesällä 2006. Tunnelin suuaukon vieressä sijaitsee vuonna 2005 valmistunut tunnelitekniikkarakennus. Kuva: Timo Seppälä.

### Materiaali Kulutettu määrä (1000 m)

|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| <b>Injektointi</b>            |                        |
| Sementti                      | 372 160 kg             |
| Notkistin                     | 7 377 kg               |
| Silika                        | 27 113 kg              |
| <b>Ruiskubetoni</b>           |                        |
| Sementti                      | 166 610 kg             |
| Notkistin                     | 917 kg                 |
| Kiihdytin                     | 7 167 kg               |
| Silika                        | 6 783 kg               |
| <b>Juotoslaasti</b>           |                        |
| Sementti                      | 12 556 kg              |
| <b>Räjähdyksaineet</b>        |                        |
| Hatut, nallit, räjähteet      | 2,99 kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Muut orgaaniset aineet</b> |                        |
| Maaliväri                     | 332,4 l                |
| <b>Metallit</b>               |                        |
| Harjateräspultit              | 1 626 kpl              |
| Kallioankkurit                | 200 kpl                |
| CT-pultit                     | 277 kpl                |
| Ruiskubetonikuidut            | 90 kg                  |

den kannalta käyttökelpoisia normaalia sementtiä pysyvämpiä materiaaleja. Taulukossa on esitetty ensimmäisen kilometrin louhinnan osalta rekisteröidyt loppusijoittamisen kannalta vieraat aineet, joita on yhteensä noin 750 000 kiloa. Osa materiaaleista poistuu heti louhinnan jälkeen eikä jää pysyvästi loppusijoitustiloihin.

Louhintatyön jatkuttua vuoden verran Posiva teki tulevaisuuden kannalta tärkeän päätöksen. Normaali urakointitapa eli avaimet käteen tunneli vaihtui urakkamuodoltaan toisenlaiseen eli Posiva siirtyi tunnelin tilaajasta toteuttajaksi. Kyseinen louhintamuoto on normaalia kaivosympäristössä, jossa projektit ovat usein pitkiä. Näin jo ONKALON louhinta on osa työmenetelmien sisäänajovaihetta varsinaisten loppusijoitustunneleiden rakentamista silmälläpitäen. Vaikka loppusijoitustilojen rakentamisesta ei ONKALON osalta ole kysymys, STUKin kanssa on sovittu käytännöistä, joilla viranomaisen seuraa tiiviisti ONKALON rakentamista ja etenemistä. Aikataulullisesti ensimmäisen kilometrin louhintaan kului aikaa reilun vuoden verran. Maanpinnan lähellä kallioperä on rikkonaista ja tiivistystä tarvitaan enemmän kuin satojen metrien syvytydessä. Lisäksi ensimmäisen kilometrin aikana on selvitetty yksityiskohtaisemmin ajotunnelin lävistämien rakenteiden ominaisuuksia ja tutkimusten tekemiseen louhinnan lomassa on käytetty runsaasti aikaa. ONKALO tavoittaa loppusijoitusvyöhykkeen muutamien vuosien kuluessa ja siihen mennessä on kokemus ja tiedon taso kehittynyt sille asteelle, jota tarvitaan loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemusta varten. Kilometrin louhintaan mahtuu yllättävän paljon tutkimusta, raakaa työtä, sementtiä, ulkomaisia vieraita, kansainvälisiä yhteistyökumppaneita, kokouksia ja yhteen hiileen puhaltamista. Tästä on hyvä jatkaa eteenpäin, varsinkin kun kaikki merkit näyttävät että Olkiluodon kallioperä soveltuu kaikilta osin hyvin loppusijoituslaitoksen sijaintipaikaksi. ■

joitustunneleiden rakentamista silmälläpitäen. Vaikka loppusijoitustilojen rakentamisesta ei ONKALON osalta ole kysymys, STUKin kanssa on sovittu käytännöistä, joilla viranomaisen seuraa tiiviisti ONKALON rakentamista ja etenemistä. Aikataulullisesti ensimmäisen kilometrin louhintaan kului aikaa reilun vuoden verran. Maanpinnan lähellä kallioperä on rikkonaista ja tiivistystä tarvitaan enemmän kuin satojen metrien syvytydessä. Lisäksi ensimmäisen kilometrin aikana on selvitetty yksityiskohtaisemmin ajotunnelin lävistämien rakenteiden ominaisuuksia ja tutkimusten tekemiseen louhinnan lomassa on käytetty runsaasti aikaa. ONKALO tavoittaa loppusijoitusvyöhykkeen muutamien vuosien kuluessa ja siihen mennessä on kokemus ja tiedon taso kehittynyt sille asteelle, jota tarvitaan loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemusta varten. Kilometrin louhintaan mahtuu yllättävän paljon tutkimusta, raakaa työtä, sementtiä, ulkomaisia vieraita, kansainvälisiä yhteistyökumppaneita, kokouksia ja yhteen hiileen puhaltamista. Tästä on hyvä jatkaa eteenpäin, varsinkin kun kaikki merkit näyttävät että Olkiluodon kallioperä soveltuu kaikilta osin hyvin loppusijoituslaitoksen sijaintipaikaksi. ■

FM Johanna Hansen  
Suunnittelukoordinaattori  
Loppusijoitustekniikka  
Posiva Oy  
johanna.hansen@posiva.fi



*Japan, a country rich in traditions, has a modern nuclear waste management program. Photo: J. Hansen.*



# Japanese nuclear waste management

Japanese nuclear fuel cycle policy is based on two key documents: the Framework for Nuclear Energy Policy (Atomic Energy Commission, AEC) of October 2005 and the Basic Energy Plan (Cabinet Resolution) of October 2003. The advantages of stability of fuel supply and competitive cost, combined with no emissions of carbon dioxide (a cause of global warming), make nuclear a key power source in Japan. Japanese policy also calls for reprocessing, with a view to ensuring effective re-use of materials such as plutonium and uranium recovered from spent fuel; this results in further improvement of fuel supply stability. The Basic Energy Plan states that nuclear power production should be promoted as national policy. As of the end of March 2006, there were 55 commercial nuclear reactors (approximately 50 GW) in operation in Japan, providing approximately one third of the country's electricity needs.

*With a view to ensuring effective use of natural resources and a secure energy supply, Japanese nuclear fuel cycle policy calls for reprocessing of spent fuel to allow re-use of materials such as plutonium and uranium. In many ways, Japan has a unique radioactive waste management program, which is introduced briefly in this paper.*

Radioactive waste in Japan is classified into two main categories according to its level of activity, namely high-level waste (HLW) and low-level waste (LLW). Depending on its origin, LLW is further subclassified into waste from power reactors, waste containing transuranic nuclides (TRU), uranium waste and radioactive waste from medical, industrial and research facilities.

In Japan, disposal of LLW from nuclear reactors at Japan Nuclear Fuel Limited's (JNFL) Rokkasho facility in Aomori Prefecture has been ongoing since 1992. For disposal of vitrified high-level waste (HLW)

from reprocessing of spent fuel, the Specified Radioactive Waste Final Disposal Act came into force in June 2000; this defines the procedure for disposal site selection, the responsible implementing entity and the arrangements for accumulation of the necessary funds. For disposal of other radioactive wastes such as TRU, waste from uranium fabrication facilities, etc., basic regulatory principles still have to be established.

The basic policy, however, is that responsibility for treatment and disposal of radioactive waste lies with the operators who have generated the waste.

## HLW

The implementing entity responsible for disposal of HLW, the Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), was established in October 2000. In order to ensure the transparency of its activities, NUMO openly announced a basic policy for site selection. In the belief that the support of local communities is indispensable to the success of this highly public, long-term project, the policy adopts an open solicitation approach for inviting volunteer candidate sites. In December 2002, NUMO announced the commencement of this open solicitation of volunteer municipalities. Related information packages have been sent to all municipalities in Japan.

High-level waste is mixed with molten glass and encapsulated in stainless steel canisters, producing a stable vitrified waste form that is suitable for geological disposal.

If all the spent fuel arising from the generation of nuclear power as of the end of 2005 were to be converted into vitrified waste, it would amount to around 19,300 canisters. Around 2,200 canisters of vitrified waste are to be shipped back from reprocessing in France and the U.K. As of the end of 2005, 1,016 canisters had already been returned from France and are now stored at (JNFL) Vitrified Waste Storage Center in Rokkasho. 206 canisters of vitrified waste produced from spent fuel reprocessing by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) are also stored at Tokaimura in Ibaraki Prefecture (as of the end of 2005). Japan's policy is to store vitrified high-level waste for 30 to 50 years for cooling and then to dispose of it geologically, isolated by a multi-barrier system, in a suitable rock formation at a depth of more than 300 meters. The planned repository will be required to receive 40,000 canisters of vitrified waste and will cost approximately three trillion yen. The number of canisters is roughly equivalent to the spent fuel that has been already reprocessed and will be reprocessed within the capacity of the Rokkasho reprocessing plant. The disposal

costs are included in the price of electricity and are determined according to the level of use of nuclear power.

Regarding R&D on HLW disposal, NUMO is responsible for conducting research focused on the safe implementation of disposal using the best available technology, taking economic and practical aspects into consideration. The Government and other relevant organizations carry out R&D in support of the regulatory framework and on other fundamental issues related to repository safety assessment. These include geoscientific studies and repository technology development aimed at increasing confidence in the disposal concept. In this context, JAEA (a merger of JNC and JAERI formed in October 2005) is required to develop reliable repository technology and to establish safety assessment methodologies based on previous experience and technical achievements. This work is being carried out as part of research projects on crystalline and sedimentary rocks at the underground research laboratories (URL) currently under construction in Mizunami and Horonobe respecti-

vely, as well as in the ENTRY and QUALITY facilities at Tokai.

Surface-based site investigations at the Mizunami URL have been in progress since 1996. Mizunami City proposed transferring the activities to a municipally owned area and an agreement between the city and JNC (now is JAEA) for use of this area was signed in January 2002. Shaft sinking started in 2003, with the main excavation of the research drift to be completed by 2009. The Horonobe URL project was approved in an agreement between the affected local governments and JNC in November 2000. A JNC office was opened in Horonobe in April 2001 and surface-based investigations started. JNC (now is JAEA) then selected the site for constructing an underground research facility in the region of Horonobe town in July 2002. Shaft sinking began in 2005, aiming for completion of the major part of the drift by 2010.

## Waste from power reactors

This waste is divided further into four categories based on its radioactivity content and the chosen disposal concept: Clearan-



Shaft construction at Mizunami URL  
(Photo:NUMO archive)



Mizunami underground research laboratory (Photo: NUMO archive).

ce Level Waste (CLW), Very Low-Level Radioactive Waste (VLLW), Low-Level Radioactive Waste (LLW), and waste with comparatively high radioactivity. VLLW is concrete or metal waste that is not solidified in a container and is disposed of in a shallow burial facility with no engineered containment structures. LLW is solidified in containers and disposed of in a shallow burial facility with engineered containment structures. Upper limits for radioactivity concentrations are specified for LLW and VLLW for disposal in these facilities. The JNFL low-level radioactive waste disposal facility at Rokkasho in Aomori Prefecture has been in operation since 1992. JNFL is permitted to dispose of 400,000 drums in the facility and, by March 2005, had buried around 174,411 drums of homogeneous solidified LLW from the nuclear power plants.

The AEC Advisory Committee on Nuclear Fuel Cycle Backend Policy has discussed the policy for disposing of wastes containing comparatively high levels of beta and gamma emitting radionuclides, such as control rods, burnable poisons and reactor internals arising from the operation and decommissioning of nuclear power plants. The Advisory Committee published its findings in October 1998, proposing the concept of underground disposal at a depth of 50-100 meters. Following this proposal, the Nuclear Safety Commission of Japan (NSC) issued a report on the basic policy for regulation and specification of radionuclide

concentration limits for disposal of these wastes. Since 2002, and following a one-year preliminary study, JNFL has been conducting a detailed survey of the geology and groundwater at Rokkasho with a view to constructing such a disposal facility.

### Waste containing transuranic radionuclides (TRU)

This is low-level radioactive waste arising from spent fuel reprocessing and mixed oxide fuel fabrication that contains radionuclides of atomic number larger than uranium (e.g. neptunium, plutonium, americium, etc.). TRU waste is generated at the JAEA Tokai reprocessing plant and at mixed oxide (MOX) fuel fabrication facilities. TRU waste from the reprocessing of Japanese spent fuel overseas will soon be returned to Japan and the JNFL commercial reprocessing plant at Rokkasho will also generate the same type of waste. The NSC is currently discussing basic policy for regulating disposal of this waste.

Discussions on the additional institutional framework required for geological disposal of TRU waste have started. AEC's subcommittee has reviewed co-disposal of TRU waste with HLW based on a technical report produced by the utilities and JAEA. Based on the results of the review, the additional institutional framework, financing scheme, etc. will be considered by the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI).

## Uranium waste

Uranium waste contains naturally occurring uranium, but not other radionuclides generated by nuclear activities. Uranium has a very long half-life and radioactivity increases with time due to accumulation of its daughter radionuclides. Based on these considerations, the AEC Advisory Committee on Nuclear Fuel-Cycle Backend Policy has investigated a disposal strategy and published a report in December 2000. The Committee concluded that the waste volume should be reduced by controlling generation at relevant facilities, decontaminating it to clearance level and re-using the uranium recovered from the waste.

Uranium waste should be disposed of in the same manner as LLW. However, considering its very long half-life and the increasing uncertainty of future scenarios, models and data, it should be considered whether to apply a dose rate limit higher than the  $10 \mu\text{Sv/y}$  for VLLW and LLW disposal (which is specified as the exemption dose by the Radiation Council).

## Radioactive waste from medical, industrial and research facilities

The Committee also discussed the treatment and disposal of low-level wastes arising from nuclear research and the use of radioisotopes in medicine and industry. In May 1998, it issued a report entitled "Guidelines on Treatment and Disposal of Radioactive Waste from Radioisotope Use, Nuclear Research and Other Related Activities". Since then, the NSC has been discussing basic policy for regulating disposal of these wastes. JAEA is the main producer of these wastes and has been conducting studies with a view to implementing a disposal solution in the near future.

Makoto Asakawa  
Section Chief of International Affairs  
and Technical Cooperation  
International Affairs and Technical Cooperation  
Nuclear Waste Management  
Organization of Japan (NUMO)  
masaka@numo.or.jp

## Loviisan ydinvoimalaitoksen suojarakennuksen eristäminen seisokitilanteissa

**D**iplomityön tarkoituksena on kartoittaa suojarakennuksen eristystoimenpiteisiin liittyviä ongelmia ja tarvittavia toimenpiteitä ydinvoimalaitoksen vakavassa reaktorionnettomuudessa. Seisokin aikana eristykseen on otettava huomioon liittyvät käyttörajoitukset (TTKE) ja muut erityisehdot, joita voi seisokin aikana esiintyä. Eristyksen osa-alueina otettiin huomioon suojarakennuksen läpiviennit, reaktorikuopan sulkeminen ja siihen liittyvä lämpösuojan alaslasku sekä sumppien eristys.

**SELVITYKSESSÄ TARKEMMAN** tarkastelun kohteena on ydinvoimalaitoksen ns. polttoaineenvaihtoseisokki. Eristyksen kannalta on huomioitava kolme eri asiaa: onnettomuustyyppi ja sen vaikutukset suojarakennuksen olosuhteisiin, suojarakennuksen tila onnettomuuden sattuessa sekä mahdolliset meneillään olevat huoltotyöt, jotka vaikuttavat eristyksen onnistumiseen. Eristyksen onnistumisen takaimiseksi on erityisen tärkeätä määrätä eristystoimenpiteiden suorittamisjärjestys. Eristäminen on tehtävä joidenkin venttiilien kohdalla manuaalisesti, jolloin on huomioitava suojarakennuksen sisäiset olosuhteet sekä säteilyn että lämpötilan kannalta. Suojarakennuksen eristys kuvataan vikapuuna RiskSpectrum ohjelmassa. Mallinnukseen sisältyy tärkeimmät eristyksen osa-alueet: läpivientien, reaktorikuopan sekä sumppien luotettava eristys. Lisäksi mallissa on reaktoripaineastian ulkopuolinen jäähdytys, jonka toimiminen on varmistettava reaktorikuoppaa suljettaessa.

**TÄMÄN TYÖN** perusteella nousi esiin muutama ongelmallinen kohta, jotka muodostavat huomattavan riskin seisokin aikana laitosturvallisuudessa. Tärkein lisäselvityksiä vaativa kohde oli lämpösuojaa kylmä- ja latausseisokissa kannattelevat kiilat. Turvallisuuden parantamiseksi olisi syytä kehittää uusi kiilausmenetelmä läm-

pösuojalle, jotta alaslasku olisi tulevaisuudessa vaivattomampaa. Reaktoripaineastian jäähdytysten varmentaminen on yksi vakavan onnettomuuden hallinnan perusteista Loviisan ydinvoimalaitoksella. Sen vuoksi on välttämätöntä varmistaa, ettei toiminto voi epäonnistua.

**DIPLOMITYÖSSÄ ESITETTIIN** eristämisstrategia, jota verrattiin eri onnettomuustilanteisiin. Onnettomuustilanteiden aikajanat otettiin huomioon ja verrattiin eristämiseen kuluvaan aikaan. Eristämisaikojen kartoittamiseen käytettiin laitokselta saatuja asiantuntijoiden arvioita tarvittavasta ajasta eri töiden suorittamiseen. Useimpien onnettomuussekvenssien kohdalla aika osoittautui riittäväksi eristyksen onnistumiseen. Joissakin onnettomuuksissa on kuitenkin epäselvää onko tilojen luoksepääsevyys säteilyn kannalta mahdollinen. Sen vuoksi on tarkasteltava tarkemmin ohjeistusta töiden suorittamisesta ja mietittävä mahdollisia parannuksia, jotta laitoksen turvallisuustasoa saisi nostettua.

**RISKSPECTRUMILLA TEHDYLLÄ** PSA-mallilla tarkasteltiin eristämisstrategian toimivuutta, joka osoitti, että strategiassa on keskitytty oikeisiin riskitekijöihin. Vastaisuudessa tämä diplomityö voi toimia referenssinä laadittaessa virallista seisokin aikaista eristämisstrategiaa Loviisan voimalaitokselle. ■

Ann-Sofie Björklöf  
Suunnitteluinsinööri  
Turvallisuus ja polttoaine  
Fortum Nuclear Services  
ann-sofie.bjorklof@fortum.com

# VÄITÖS YDINVOIMATEKNIIKAN ALALTA:

## Ydinvoimalaitosten turvallinen käyttö eri tilanteissa varmistetaan tietokoneohjelmien avulla

**V**TT Prosessien erikoistutkijan **Anita Hämäläisen** väitöskirja 'Applying thermal hydraulics modeling in coupled processes of nuclear power plants' tarkastettiin 4.11.2005 Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa. Väitös kuuluu ydinvoimalaitosten termohydrauliikan alaan ja käsittelee kytkettyjen prosessien mallintamista. Vastaväittäjänä toimi professori Kostadin Ivanov Pennsylvania State University:stä USA:sta ja väitöstilaisuuden valvojana professori **Riitta Kyrki-Rajamäki** Lappeenrannan teknillisestä yliopistosta.

**Y**dinvoimalaitoksissa varaudutaan siihen, että kaikissa tilanteissa laitoksen turvallinen käyttö on mahdollista. Koska kaikkia tilanteita ei voida tutkia kokeellisesti jo niiden monimutkaisuuden, mutta myös turvallisuuden takia, on ydinvoimalaitoksien turvallisuus häiriö- ja onnettomuustilanteiden varalta varmistettava laskennallisesti. Laskennassa käytettävien tietokoneohjelmien oikea toiminta on kuitenkin varmennettava.

Ohjelmissa kuvattavia tärkeitä prosesseja ovat reaktorisydämen neutroniikka, polttoaineen lämmönsiirto ja mekaaninen käyttäytyminen sekä jäähdytteen termohydrauliikka. Nämä eri osa-alueet kytkeytyvät läheisesti toisiinsa, joskin alkuaan niitä on simuloitu erillisillä tietokoneohjelmilla. Neutroniikkaa nykyisissä ohjelmissa laskeetaan kolmiulotteisilla nodaalisilla dynaamisilla ratkaisijoilla. VTT:ssä tällaisia ohjelmia ovat HEXTRAN ja TRAB-3D. Näihin kytkettyinä piiriin termohydrauliikkaa laskee SMABRE, sekin VTT:n omaa tuotantoa.

Väitöskirja käsittelee näiden ohjelmien kytkemistä toisiinsa ja kytkettyjen ohjelmien kelpoistamista. Väitöskirjatyö on

tehty VTT:ssä Otaniemessä osana ydinvoiman turvallisuustutkimusta. Väitöskirjassa on seitsemän erillisjulkaisua ja yhteenveto, jossa käsitellään lisäksi alan suomalaisten tietokoneohjelmien kehitystyötä, ydinvoimalaitoksilta kerätyn mittaustiedon soveltamista kelpoistamiseen sekä ydinvoimalaitosprosessien termohydraulisen mallintamisen yksityiskohtia.

Esimerkkinä kytkettyjen ohjelmien käytöstä turvallisuusanalyysissä väitöskirjassa käsitellään turbiinille menevän höyryputken katkeamisonnettomuutta Loviisan voimalaitoksessa. Höyryputkenkatko on ollut myös useiden kansainvälisten vertailulaskujen (benchmark) kohteena. Työssä on käsitelty ja vertailtu tätä varsin epäsymmetristä sydämen jäähtymistransienttia useammalle erilaiselle laitokselle.

Väitöskirjassa on myös kuvattu uusi kytkentä amerikkalaisen polttoaineohjelman FRAPTRAN ja suomalaisen termohydraulisen ohjelman GENFLO välillä. Tämä kuvastaa nykyistä tilannetta, jossa polttoaineen käyttäytymisohjelmiin tarvitaan tarkempaa termohydrauliikkaa transienttikuvaukseen sekä VTT:llä myös tehtävää aina tarkempien polttoainemallien lisäämistä reaktoridynamiikkaohjelmiin.

Ohjelmien ja kytkösten monimutkaisuudessa konservatiivisuuksien yksikäsitteinen asettelu transienttianalyysiin on tullut kyseenalaiseksi. Laskut pyritäänkin tekemään 'best-estimate'-periaatteella, joka tarvitsee tuekseen lisätarkasteluja. Uutena piirteenä suomalaisen turvallisuusanalyysiin väitöskirjassa esitelläänkin systemaattista epävarmuus- ja herkkyysanalyysiä yhdistettynä transienttianalyysiin. Käytetty saksalainen GRS:n menetelmä tarjoaa myös mahdollisuuksia pyrittäessä määrittämään pysytäänkö analyysoitavissa tilan-

teissa suomalaisille laitoksille asetetuissa polttoainesauvojen rikkoontumismääräarvoissa: 1 % transienteissa ja 10 % suunnitellun perusteena olevissa onnettomuuksissa.

### Ohjelmien kelpoistaminen

Ohjelmat varmennetaan ja kelpoistetaan vertaamalla laskettuja tuloksia mitattuihin arvoihin tai vertaamalla eri ohjelmilla saatuja tuloksia keskenään. Mittausarvoja saadaan koelaitteistoista, tutkimusreaktoreista ja toimivista ydinvoimalaitoksista. Kussakin tavassa on omat hyvät ja huonot puolensa. Koelaitteistomittauksiin vertaamalla voidaan varmentaa ohjelmien oikeellisuutta, joskin tyypillisesti koelaitteistoissa tehdään kokeita rajoitetuissa mittakaavassa ja vain rajoitetuissa olosuhteissa. Termohydraulisten ohjelmien kelpoistamiseen on käytettävissä paljon tällaista mittausdataa, joka on keskitetysti kerätty kelpoistumatriiseihin.

Kun kyseessä ovat sydämen neutroniikkaa laskevat ohjelmat, ovat tutkimusreaktorit ja toimivat ydinvoimalaitokset lähes ainoat käyttökelpoisten mittausten lähteet. Toimivilla ydinvoimalaitoksilla mitattavat suureet ovat taas melko riittämättömiä verrattuna tutkimusreaktoreihin ja koelaitteistoihin; mittauksia on vähän, mitausväli on iso ja aikavakiot mittauksissa muodostuvat tärkeiksi. Myös onnettomuustapahtumista on vain vähän mitattua dataa saatavilla, onneksi, joten neutroniikkaohjelmien ja kytkettyjen neutroniikka/termohydrauliikkaohjelmien kelpoistaminen tapahtuu usein ohjelmia vertaamalla kansainvälisissä projekteissa. Vastaväittäjä, professori Ivanov, on keskeinen henkilö OECD:n kansainvälisten vertailulaskujen järjestäjänä ja suunnittelijana ja kustos myös alan pioneereja.





Vastaväittäjä professori Kostadin Ivanov PSU/USA ja kustos professori Riitta Kyrki-Rajamäki LTY yhdessä väittelijän kanssa.

Useat väitöskirjan erillisjulkaisut käsittelevät kelpoistamista. VTT on yhdessä useiden VVER-reaktoreita hyödyntävien maiden kanssa EU:n projekteissa kerännyt arvokasta mittaustietoa olemassa olevilla laiteyksillä tapahtuneista transienteista.

### Ohjelmien kehitysnäkymiä

Neutroniikkaa lasketaan ohjelmissa kolmiulotteisesti, mutta termohydrauliikan dynaaminen laskenta on suureksi osaksi vielä yksiulotteista. Väitöskirjassa kuvataan useita mallintamiseen liittyviä yksityiskohtia, joita tarvitaan kolmiulotteisten ilmiöiden laskentaan. Kuitenkin työssä peräänkuulutetaan kolmidimensioista termohydrauliikkaa, joka ratkaisisi monet ongelmat turvallisuustutkimuksessa. Kolmiulotteisen termohydrauliikan myötä kenties poistuisi osa epävarmuuksista liittyen isojen tilavuuksien, kuten vaakahöyrystimen, paineistimen sekä etenkin reaktori-paineastian eri osien ja siinä avoimen sydämen käyttäytymiseen ääritilanteissa. Tähän mennessä useat termohydrauliset ohjelmat ovat esitelleet kolmiulotteisia versi-

oita, esim. RELAP5-3D, TRAC ja CATHARE, ATHLET, joskin näiden kolmiulotteisuus on lähinnä yksi- tai kaksiulotteisten termohydrauliikkakomponenttien käyttöä yhdistettynä poikkivirtauksiin tai tiheään laskentahilaan. Mutta jo nämä kolmiulotteiset komponentit ovat vaatineet ratkaisumenetelmien muuttamista ohjelmissa laskennan nopeuttamiseksi. CFD-ohjelmat ovat työkalu aitoon kolmiulotteiseen termohydrauliikkaan, mutta koska höyryn ja veden vuorovaikutuksen mallinnus vielä ontuu pahasti ja ohjelmien käyttämä tietokoneaika on huikea käytettäväksi transienttien laskentaan, soveltuvat ne lähinnä erillisilmiöiden kuvaamiseen.

'Porous codes', eli ohjelmat, jotka perustuvat huokoisuusperiaatteeseen ovat tällä hetkellä kehityskelpoinen ratkaisu termohydrauliikan kolmiulotteiseen laskentaan. Ohjelmien käyttäminen niin pienessä kuin isossakin laskentahilassa samankaltaisesti on myös näiden ohjelmien merkittävä etu. VTT on mukana kehityksen kärjessä tällä saralla.

# VÄITÖSKIRJA

TKT Anitta Hämäläinen  
Erikoistutkija  
VTT, Ydinenergia  
anitta.hamalainen@vtt.fi



## Kuudennen reaktorin aika?

**T**ätä kirjoitettaessa on kesä alkamassa. Ensi keväänä ovat taas eduskuntavaalit, ja ne ohjaavat suomalaista yhteiskunnallista päätöksentekoa koko ensi talven. Moni puolueista on jo aloittanut mielipiteiden väännön ja käännön energiasta. Puolueiden energiapolitiikka on täynnä vihreän aatteen lehtiä ja bioenergiaa. Bioenergia on puhdas ja neutraali kotimainen aihe – ilman mitään negatiivista. Kotimaisen biomassan riittämättömyyttä energiatarpeen tyydyttämiseen ei äänestäjä kuitenkaan ymmärrä.

Ydinvoima taas on rumaa ja sisältää eduskunnan periaatepäätöksen jälkeen vain vähän poliittisesti pyriteltäviä elementtejä. Käytännön energiatuotannossa ydinvoima, tuulivoima ja bioenergia tukevat hyvin toisiaan, eivätkä kilpaile keskenään.

Energiapuun viljely ja poltto sekä tuulivoimalan rakentaminen vaativat kuitenkin valtion tukea kannattaakseen.

**EDUSKUNTA HYVÄKSYI** 6.6.2006 valtioneuvoston selonteon lähiajan energia- ja ilmastopolitiikan linjauksista. Tässä asiakirjassa (TaVM 8/2006) todetaan talousvaliokunnan suulla, ettei ”investointien lisääntyminen ole oletettavaa elleivät Suomen keskeiset energiapolitiittiset tavoitteet ja päätoimintalinjaukset ole eri toimijoiden tiedossa huomattavasti strategiaa pidemmäksi ajaksi eteenpäin.”

Samassa dokumentissa sanotaan: ”Valtioneuvosto katsoo, että mitään vähäpäästöistä tai päästöjen kannalta haitatonta ja kustannustehokasta tuotantomuotoa ei tule sulkea pois jatkossakaan

uutta kapasiteettia rakennettaessa.” Näiden linjauksien mukaan on poliittista työtä hyvä jatkaa.

**SÄHKÖN KULUTUS** jatkaa suoraviivaista kasvuaan tehdastuotannon kehittyessä ja erilaisten sähkölaitteiden täyttäessä kodit.

Suomen kuudennen reaktorin rakentamishanke odottaa poliittista tilausta. Kuudennen reaktorin tarvitsemat ympäristöselvitykset ja periaatepäätöshakemuksen valmistelu voitaisiin käynnistää heti, jos poliittinen kasvihuone lämpenisi asialle.

Energiayhtiöiden johdon etu ei ole turvata Suomen sähkön saantia ja edullista hintaa. Sähkön niukkuus lihottaa varmemmin heidän tilipussinsa. Pallo on energiapolitiikan tekijöillä!

**KASVIHUONEILMIÖN, ÖLJYN** ja maakaasun hinnan nousun ja väestönkasvun yhdistelmän käynnistettyä ydinvoiman uuden tulemisen on käytännön ydinvoimaosaajille taas tarvetta.

Ensi vuosikymmenellä käynnistyy hankkeita monissa maissa ja ne tarvitsevat osaamista, jota olemme nyt hankkimassa. Kännnykkämyynnin luoma kuva Suomesta teknologian osaajana saa näin jatkoa myös ydinvoiman avulla.

**OLKILUOTO 3** projekti etenee hiukan harjoitteluna, mutta etenee. Pieniä vaikeuksia on ollut, kun saimme saksalaisen joustavuuden ja ranskalaisen täsmällisyyden, vaikka odotimme jotain muuta.

Ihanteellisessa hankkeessa kohtaisivat venäläinen luovuus, saksalainen tarkkuus, ranskalainen rentous ja ruotsalainen ydinvoimapolitiikka.

Ruotsalaisethan suosivat päätöksenteon sijaan keskustelua ja ostavat ydinsähkönsä mieluiten "pestynä" ja kotiinkuljetuksella naapurimaasta.

**OLKILUOTO 3** projektin ranskalaisvetoinen suunnittelu ja toteutus etenee joskus kuin seuraavassa tarinassa. Kolme projektimestä, ranskalainen lakimies, saksalainen tekniikan tohtori ja suomalainen insinööri, tuomittiin entisessä Ranskan siirtomaassa kuolemaan projektin viivyttämisestä. Tuomio pantiin täytäntöön giljotiinilla ja herrat saivat valita, kärsivätkö he tuomionsa kasvot ylös- vai alaspäin. Ensimmäisenä oli lakimies, joka valitsi kasvot alaspäin, mutta terä pysähtyi muutama sentin päähän hänen niskastaan. Tätä pidettiin Jumalan armahduksena ja lakimies vapautettiin. Saksalainen tohtori valitsi saman tavan, mutta taas terä pysähtyi ja mies vapautettiin. Viimeisenä oli suomalainen projekti-insinööri. Hän valitsi kasvot ylöspäin, mutta juuri ennen kuin terä pudotettiin, hän huudahti: "Odottakaa, nyt tiedän miksei terä tullut aiemmin alas asti!"

**TARINAN OPETUS:** "Ei ole viisasta ehdottaa ranskalaiseen laitteeseen muutoksia enää viime vaiheessa!"

■  
Olli Nevander  
Teollisuuden Voima Oy

## TAPAHTUMAKALENTERI

### YG:n kesärieha, 24.8.2006, Olkiluoto

Lisätietoja: Kristiina Turtiainen, TVO  
(kristiina.turtiainen@tvo.fi)

### ATS:n syysseminaari ja 40-vuotisjuhla, 13.10.2006, Hotelli Crowne Plaza

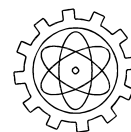
Kutsu jäsenpostissa  
Lisätietoja: Harry Lamroth, Fortum Nuclear Services  
(harry.lamroth@fortum.com)

### Ulkomaanekskursio Japaniin, 20.10.–28.10.2006

Vierailukohteina mm. JAERI ja  
Kashiwazaki-Kariwan voimalaitos  
Kutsu lähetetty jäsenpostissa 5.6.  
Lisätietoja: Kristiina Turtiainen, TVO  
(kristiina.turtiainen@tvo.fi)

### YG:n syysseminaari, 3.11.2006, Kulttuurikeskus Hanasaari

Lisätiedot: Satu Siltanen, Fortum Nuclear Services  
(satu.siltanen@fortum.com)



Lisätietoja kaikista ATS:n tapahtumista löytyy internetistä:  
[www.ats-fns.fi](http://www.ats-fns.fi)

## UUDET JÄSENET

### Varsinaiset jäsenet

- Sami Asikainen, Teollisuuden Voima
- Reko Rantamäki, Fortum Nuclear Services

Suomen Atomiteknillisessä Seurassa oli 9.6.2006 pidetyn johtokunnan kokouksen jälkeen 644 varsinaista jäsentä ja 50 nuorta jäsentä eli opiskelijaa. Kunniajäseniä oli 10 ja kannatusjäseniä 17.

Seuran jäseneksi pääse johtokunnan hyväksymällä hakemuksella. Hakemukseen tarvitaan kahden jäsenen suositus. ATS:n jäsenhakemus internetissä: <http://www.ats-fns.fi/info/jasenhakemus.pdf>.

SUOMEN  
ATOMITEKNILLINEN  
SEURA —

ATOMTEKNISKA  
SÄLLSKAPET  
I FINLAND ry



Palautus  
**Suomen Atomiteknillinen Seura**  
c/o VTT (Lämpömiehenkuja 3A)  
PL 1000  
02044 VTT

## **Kannatusjäsenet**

Alstom Finland Oy  
Fintact Oy  
Fortum Oyj  
Metso Powderment Oy  
Patria Finavitec Oy  
Platom Oy  
Pohjolan Voima Oy  
Posiva Oy  
PRG-Tech Oy  
Pohjoismainen Ydinvakuutuspooli  
PrizzTech Oy  
Rados Technology Oy  
Saanio & Riekkola Oy  
Siemens Osakeyhtiö  
Teollisuuden Voima Oy  
TVO Nuclear Services Oy  
VTT Prosessit  
VTT Tuotteet ja tuotanto

## **ATS internetissä:**

<http://www.ats-fns.fi>