

ATS

YDINTEKNIikka

SUOMEN
ATOMITEKNILLINEN
SEURA —

ATOMTEKNISKA
SÄLLSKAPET
I FINLAND ry



2/2009

vol. 38

Tässä numerossa

Pääkirjoitus:

Tutkimus varmistaa ydinturvallisuuden 3

Editorial:

Nuclear safety is
secured through research 4

Uutisia 5

Suomen Atomiteknillisen
Seuran vuosikokous 2009 6

Viranomaisten teettämät
riippumattomat turvallisuusanalyysit ... 9

Sydänsulan kokeellinen
tutkimus VTT:llä 12

Arkiston helmiä:

Reaktoriturvallisuustudkimus USA:ssa
TMI-onnettomuuden jälkeen 15

Reactor Safety research in
the USA after TMI 16

B+Tech Oy tekee uutta
tutkimusta Suomessa 18

KYT2010-tutkimusohjema kehittyy 20

Loppusijoituslaitoksesta koetaan
uhkaa Eurajoella 22

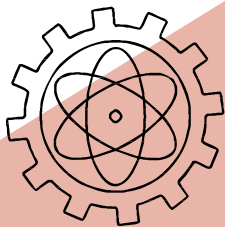
Lappeenrannassa kaikki Suomen
laitokset samassa hallissa 24

Asiantuntijuuden kehittyminen
ydinvoima-alalla 26

PORFLO-porositeettimalli kaksi-
faarivirtauksen 3D-laskentaan 28

Diplomityöt 31

Tapahtumakalenteri
ja seuran uudet jäsenet 35



ATS

2/2009, vol. 38

VUODEN 2008 TEEMAT

1/2009

Reaktorisydän
ja -fysiikka

2/2009

Turvallisuus
ja tutkimus

3/2009

Säteily

4/2009

Syysseminaari,
ekskursio

ILMOITUSHINNAT

1/1 sivua 700 €

1/2 sivua 500 €

1/4 sivua 300 €

TOIMITUKSEN OSOITE

ATS Ydintekniikka
c/o Riku Mattila
Säteilyturvakeskus
PL 14
00881 Helsinki
Puhelin 09 759 88680
Telefax 09 759 88382
toimitus@ats-ydintekniikka.fi

ISSN-0356-0473

Painotalo Miktor Oy



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 Riku Mattila
Säteilyturvakeskus
paatoimittaja@ats-ydintekniikka.fi

Toimitussihteeri / Subeditor

Minna Rahkonen
p. 0400 508 088
fancymedia@saunalahti.fi

Erikoistoimittajat /

Members of the Editorial Staff

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

FM Sini Gahmberg

Teollisuuden Voima Oyj
sini.gahmberg@tvo.fi

FM Johanna Hansen

Posiva
johanna.hansen@posiva.fi

DI Tommi Henttonen

Fortum Nuclear Services
tommi.henttonen@fortum.com

DI Kai Salminen

Fennovoima Oy
kai.salminen@fennovoima.fi

DI Eveliina Takasuo

VTT
eveliina.takasuo@vtt.fi

Haastattelutoimittaja /

Journalist reporter

DI Klaus Kilpi
klaus.kilpi@welho.com

Johtokunta / Board

Puheenjohtaja / Chairperson

Tkt Eija-Karita Puska
VTT
PL 1000, 02044 VTT
p. +358 20 722 5036
puheenjohtaja@ats-fns.fi

Varapuheenjohtaja /

Vice-chairperson

DI Yrjö Hytönen
Säteilyturvakeskus
yrjo.hytonen@stuk.fi

Sihteeri /

Secretary of the Board

DI Malla Seppälä
VTT
sihteeri@ats-fns.fi

Rahastonhoitaja / Treasurer

DI Anna-Maria Länsimies
Energiateollisuus ry
anna-maria.lansimies@energia.fi

Jäsenet /

Other Members of the Board

Tkt Jari Tuunanen
Fortum Nuclear Services
jari.tuunanen@fortum.com

DI Kai Salminen

Fennovoima Oy
kai.salminen@fennovoima.fi

DI Veijo Ryhänen

Teollisuuden Voima Oyj
veijo.ryhanen@tvo.fi

Toimihenkilöt / Officials

Jäsenrekisteri /

Membership Register

DI Malla Seppälä
VTT
sihteeri@ats-fns.fi

Kv. asioiden sihteeri /

Secretary of International Affairs

DI Tommi Henttonen
Fortum Nuclear Services
tommi.henttonen@fortum.com

Energiakanava /

Energy Channel

Tkt Karin Rantamäki
VTT
karin.rantamaki@vtt.fi

Young Generation

DI Toivo Kivirinta
Fortum Power and Heat Oy
toivo.kivirinta@fortum.com

Ekskursiosihteeri /

Excursion Secretary

DI Jani Pirinen
Fortum Nuclear Services
jani.pirinen@fortum.com

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

ATS Ydintekniikka on neljä kertaa vuodessa ilmestyvä lehti, jossa esitellään ydintekniikan tapahtumia, hankkeita ja ilmoittaa numeroitain vaihtuvan teeman ympäriltä. Lehti postitetaan seuran jäsenille.

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

Tutkimus varmistaa ydinturvallisuuden



YDINVOIMAN TURVALLISEN käytön edellytyksenä on tutkimustoiminnan tuoma varmuus siitä, että ympäristöä voidaan suojella ydinvoiman haitallisilta vaikutuksilta. Tutkimuksen rooli ja sisältö on jatkuvasti laajentunut laitoksilla tapahtuneista käyttöhäiriöistä ja onnettomuuksista saatujen opetusten seurauksena.

YDINVOIMAN KÄYTÖN alkuaikoina määriteltiin vakavimmat ajateltavissa olevat onnettomuudet, jotka tuolloin olivat halkaisijaltaan suurikokoisimman primääripiirin putken katko tai pahin mahdollinen reaktiivisuusonnettomuus, säätösauvan uloslento.

Näiden onnettomuuksien ympärille luotiin nykyisinkin menestyksellisesti käytetty syvyysuuntainen turvallisuusperiaate. Tutkimushankkeet kohdistettiin tämän suunnittelufilosofian kehittämiseksi, ja se kattoi laajasti reaktorifysiikan, termohydrauliikan ja materiaalitekniikan.

YDINVOIMALAITOSTEN OMINAISUUDET eivät käyttökokemusten ja erityisesti TMI-onnettomuuden myötä osoittautuneet riittäviksi, vaan alkuperäisten suunnitteluperusteiden lisäksi tutkimus kohdennettiin laajempaan joukkoon erityyppisiä häiriöitä ja onnettomuuksia. Myös inhimilliset tekijät ja vakavien onnettomuuksien hallinta otettiin tarkemman tarkastelun kohteeksi.

Tshernobylin onnettomuuden opetukset korostivat edelleen reaktiivisuusonnettomuuksien ja vakavien onnettomuuksien tutkimisen tarvetta. Myös laitosten käyttöorganisaatioiden turvallisuuskulttuurin merkitys oivallettiin ja liitettiin osaksi tutkimusohjelmia.

Myöhemminkin on syntynyt laitosten käyttökokemusten kautta tarve käynnistää uusia tutkimushankkeita.

YDINVOIMALAITOKSISSA OTETAAN jatkuvasti käyttöön uusia materiaaleja, polttoaine kehittyä, ja uutta tekniikkaa otetaan käyttöön etenkin automaatioissa. Oleellisemmat tutkimukset on siksi toistettava ja niiden tulokset arvioitava uudelleen. Vuosien myötä myös ydinvoimalaitosten suunnitteluun liittyvät ulkoiset uhat ovat muuttuneet, ja uusien uhkien ympärille on jouduttu luomaan varsin laajoja tutkimusohjelmia.

UUSISSA YDINVOIMALAITOKSISSA tullaan ottamaan käyttöön uudentyyppisiä järjestelmiä ja laitteita, joiden toiminta voidaan osoittaa hyväksyttäväksi vain kokeiden avulla. Lisäksi suunnitteilla on aivan uuden sukupolven laitoksia (tyypillisesti kaasujäähdytteisiä ja hyötöreaktoreita), jotka toimivat eri periaatteella kuin nykyisin käytössä olevat. Vuosikymmenien aikana saatuja kokemuksia nykyisin käytössä olevista laitoksista on nyt sovellettava suunniteltaessa uuden tyyppiin ydinvoimalaitoksiin liittyviä tutkimusohjelmia.

YDINVOIMALAITOSTEN LUVITUSMENETTELY edellyttää, että viranomaisella on jatkuvasti käytettävissä ydinvoimalaitosten valmistajista riippumaton tutkimustietoa. Kansalliset ja kansainväliset tutkimusohjelmat antavat mahdollisuuden tämän tiedon hankkimiseen. Näihin tutkimushankkeisiin osallistuminen on myös keino kouluttaa tulevia ydinvoimalan asiantuntijoita ymmärtämään syvällisesti ydinvoiman perusluonne.

YDINVOIMAN HISTORIA on opettanut, että tutkimustoiminta on monessa mielessä oleellinen osa turvallisuuden jatkuvaa parantamista. Sen avulla luotujen ja ylläpidettyjen valmiuksien avulla voidaan nopeasti reagoida käyttökokemusten kautta esiin nouseviin turvallisuusongelmiin. ■

Nuclear safety is secured through research

A PREREQUISITE for safe utilization of nuclear energy is certainty - based on research - that the environment can be protected against the harmful effects of nuclear power. The role and scope of research has been constantly widened as a consequence of lessons learnt from incidents and accidents that have occurred.

IN THE early days of nuclear power, the design bases were defined based on the most severe accidents deemed possible. These included a break in the largest pipe of the primary circuit and the worst possible reactivity accident, ejection of a control rod. Around these design basis accidents, a defence-in-depth safety principle was generated, which continues to be successfully applied today. Research programmes were aimed at developing this design philosophy, and it widely covered fields such as reactor physics, thermal hydraulics and material technology.

OPERATIONAL EXPERIENCE, and especially the accident at Three Mile Island NPP proved that the characteristics of nuclear power plants were not sufficient, and research was directed towards a wider range of occurrences and accidents. Human factors and management of severe accidents were taken under closer examination. Lessons from the Chernobyl accident further emphasized the need to study reactivity accidents, as well as severe accidents. The significance of the safety culture of the utilities' organizations was recognized and included in the research programmes. Even later on, operational experiences have proven new research projects necessary.

NEW MATERIALS are constantly introduced at nuclear power plants. Fuel is being developed further, and new technology is taken into use, especially in

the I&C field. The most significant research projects must therefore be repeated (or at least re-evaluated), and their results assessed against the current situation. In the course of time, the external threats relating to design of nuclear power plants have changed, and rather wide research programmes have been generated around the new issues that have emerged.

NEW TYPES of systems and equipment will be taken into use at the new NPP:s, and their operation and reliability may be proved acceptable only through experiments. In addition, an entirely new generation of NPP:s based on entirely new principles is under development, including gas cooled high temperature reactors, breeders etc. The experience gained during decades of operation of the current generation NPP:s must now be taken into use in designing research programmes for the new types of nuclear power plants.

THE LICENSING process of nuclear power plants makes it necessary for the nuclear safety authority to have access to research and information independent of the plant manufacturers. National and international research programmes give an opportunity to get this information. Taking part in such research programmes is also an effective way to educate future experts in the nuclear field to profoundly understand the fundamental characteristics of nuclear energy.

THE HISTORY of nuclear energy has shown that research activities are in many ways an essential part of continuous safety improvement. The capabilities resulting from research enable rapid response to safety problems emerging from operational experience. ■

UUTISIA

SMiRT-konferenssi kokosi reaktoriteknologian asiantuntijat Otaniemeen

REAKTORITEKNOLOGIAN JA mekaniikan alan haasteet olivat esillä alan kansainvälisen yhdistyksen IASMiRT (International Association of Structural Mechanics in Reactor Technology), VTT:n, TKK:n ja Suomen ydinalan toimijoiden järjestämässä, järjestyksessään kahdennessakymmenessä SMiRT-konferenssissa, joka järjestettiin Espoon Dipolissa 9.-14.8.2009.

KONFERENSSIIN OSALLISTUI yli 400 asiantuntijaa keskustelemaan ydinenergia-alan nykytilanteesta, käynnissä ja suunnitella olevista laitoshankkeista sekä niiden rakenteille, materiaaleille ja kunnossapidolle asettamista haasteista.

Konferenssin *www-sivut löytyvät osoitteesta*
<http://www.vtt.fi/smirt20>

Tutkimusreaktorin seisokki aiheuttaa isotooppipulaa

KANADASSA, ATOMIC Energy of Canada Ltd:n (AECL) Chalk River -laboratoriossa sijaitsevassa NRU-tutkimusreaktorissa havaittiin keväällä raskasvesivuoto, jonka seurauksena 52-vuotias reaktori on pysäytetty tutkimus- ja huoltotöitä varten. Tämänhetkisten arvioiden mukaan reaktori päästään käynnistämään vuoden 2010 ensimmäisellä neljänneksellä.

NRU ON tuottanut noin kolmasosan maailman lyhytikäisistä lääketieteellisistä isotoopeista, ja isotooppien saatavuuden varmistamiseksi pienemmät tuotanto-reaktorit Euroopassa ja Etelä-Afrikassa ovat pyrkinet koordinoimaan toimintaansa. Tilannetta pahentaa, että myös toisella merkittävällä isotoopintuotantoreaktorilla, Alankomaiden Pettenissä sijaitsevalla HFR:llä, on havaittu vuoto, jonka seurauksena reaktori on määrä ajaa huoltoseisokkiin viimeistään maaliskuussa 2010.

(Lähde: World Nuclear News)

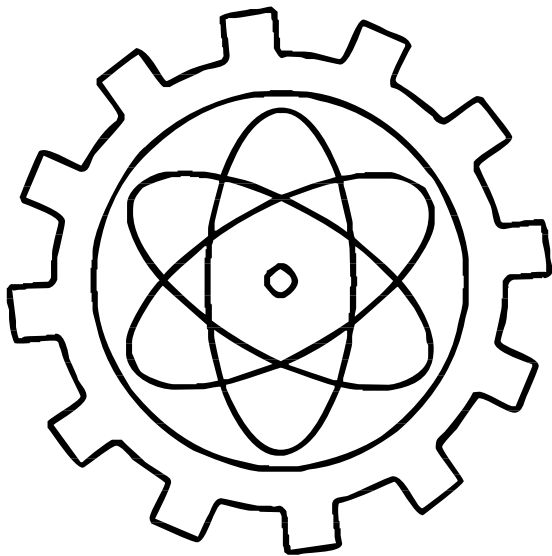
www.ats-fns.fi

Väitöstutkimus ydinenergian tulosta Suomeen

ÅBO AKADEMISSA tarkastettiin 14.8.2009 väitöskirja, joka analysoi Suomen ydinenergia-alan alkuvaiheita ja erityisesti kotimaisen konepajateollisuuden roolia ensimmäisen laitossukupolven hankinnassa ja toteutuksessa.

VÄITÖSTUTKIMUKSEN "Introduktionen av kärnkraften i Finland" tekijä on ATS:n perustajajäsen ja pitkän uran Finnatom Oy:n toimitusjohtajana tehnyt **Tkt Daniel Jäfs**. Tekijän työurasta on kerrottu enemmän "Ydinasioista kultuna" -haastattelussa ATS Ydintekniikan numerossa 3/2007, ja väitöskirjasta on luvassa artikkeli numeroon 3/2009.

Suomen Atomiteknillisen Seuran vuosikokous 2009



ATS:n vuosikokous pidettiin 26. helmikuuta jo perinteeksi muodostuneessa Tieteiden talossa Helsingissä. Kokouksessa käsiteltiin yhdistyksen sääntöjen määräämät asiat sekä johtokunnan aloitteesta ehdotus uusiksi säännöiksi. Tilaisuudessa myös julkaistiin vuoden 2008 Erkki Laurila -palkinnon saaja. Kokouksen lopuksi kuultiin kaksi esitelmää, jotka käsitelivät muutoksia ydinvoimasäännöstössä.

Seuran puheenjohtaja **Harriet Kallio** toivotti kokousväen tervetulleeksi ja esitteli jäsenistölle vuoden 2008 toimintakertomuksen kertoen lyhyesti vuoden aikana järjestetyistä tapahtumista. Vuosikokouksen lisäksi seura järjesti syysseminaarin. Syysseminariin aihe oli "FIN6 ja FIN5:n kokemuksia" ja tilaisuuteen oli kutsuttu ulkomailta laitostoimittajia kertomaan uusista laitospäätöksistä.

Young Generationin ja Energiakanavan toiminta

ATS Young Generation (YG) huolehti viimein vuonna aktiivisesti seuran nuorten jäsenten hyvinvoinnista. YG järjesti paljon kiinnostusta herättäneen ekskursion Pietarin alueelle, kesätapahtuman Helsingin Lauttasaareen sekä syksyllä "Viestintä ydinvoima-alalla" -aiheisen seminaarin Espoon Hanasaareen. Opiskelijainfoja pidettiin Teknillisessä korkeakoulussa Otaniemessä, Lappeenrannan ja Tampereen teknillisissä yliopistoissa sekä Turussa Åbo Akademin ja Turun Yliopiston opiskelijoille. ATS YG osallistui myös Next Step koulu-

tu- ja työpaikkamessuille. YG toimi myös osana kansainvälistä yhteisöä isännöimällä ENS YGN Core Committee Meeting -kokouksen Helsingissä. Kokous sai erittäin myönteistä palautetta 11 maan osallistujakunnalta. Iso joukko YG:n jäseniä osallistui myös kansainväliseen nuorten ammattilaisten IYNC2008-konferenssiin Sveitsissä.

Energiakanava on jatkanut tiedon levittämistä energia-asioista, säteilystä ja radioaktiivisuudesta päätöksentekijöille ja muille sidosryhmille, erityisesti naisille. Energiakanavan perinteinen vuoden 2008 Säteilivät Naiset -seminari siirrettiin järjestettäväksi keväällä 2009. Vuoden 2007 seminaarin esitysten pohjalta toimitettu tiedotuslehti jaettiin koko jäsenistölle ATS Ydintekniikka -lehden välissä vuoden 2008 lopulla. Energiakanava osallistui myös kansainvälisen WIN Global -järjestön toimintaan.

Suurin osa johtokunnasta uusia jäseniä

Johtokunnasta oli erovuorossa poikkeuksellisesti neljä jäsentä: puheenjohtaja Har-

riet Kallio (Fortum), varapuheenjohtaja **Harry Lamroth** (FNS), jäsen **Olli Nevannder** (FNS) ja jäsen **Johanna Hansen** (Posiva). Uudeksi puheenjohtajaksi vuosikokous valitsi **Eija-Karita Puskan** (VTT) ja varapuheenjohtajaksi johtokunnassa jäsenenä olleen **Yrjö Hytösen** (STUK). Sihteerinä jatkaa **Malla Seppälä** (VTT) ja rahastonhoitajana **Anna-Maria Länsimies** (ET). Uusiksi jäseniksi johtokuntaan valittiin **Jari Tuunanen** (FNS), **Kai Salminen** (Fennovoima) ja **Veijo Ryhänen** (TVO).

Uudet säännöt hyväksyttiin

Vuoden 2008 vuosikokouksessa ehdotus sääntöjen muuttamiseksi esiteltiin jäsenistölle ensimmäisen kerran. Johtokunta sai tällöin paljon hyvää palautetta siitä, kuinka uudet säännöt voisi kehittää vielä paremmiksi ja tämän palautteen pohjalta johtokunta valmisteli uuden ehdotuksen, joka esiteltiin ja hyväksyttiin ensimmäisen kerran jäsenkokouksessa 21.1.2009 Helsingissä. Sääntöjen mukaan uudet säännöt tulevat hyväksyä kahdessa peräkkäisessä kokouksessa, joista toinen on vuosikokous.

Sääntömuutosehdotuksen tarkoituksena on lähinnä selvittää terminologiaa, parantaa läpinäkyvyyttä jäsenistöön päin sekä lisätä toimintatapojen joustavuutta. Esimerkiksi johtokunnan koko voi uusien sääntöjen mukaan vaihdella seitsemästä yhdeksään jäseneseen, millä pyritään mahdollistamaan, että myös alalle perustetut uudet yritykset saavat halutessaan edustajan johtokuntaan. Pykälät, joihin on tehty sanamuotojen päivittämistä suurempia muutoksia, on tarkastutettu Patentti- ja rekisterihallituksessa, jotta uudet säännöt ovat varmasti yhdistyslain mukaiset.

Sääntömuutosehdotus oli selvästi vakaammalla pohjalla kuin vuotta aiemmin, sillä jäsenistöstä ei enää saatu parannusehdotuksia. Uudet säännöt hyväksyttiin yksimielisesti ja ne astuivat voimaan välittömästi. Säännöt löytyvät ATS:n www-sivuilta www.ats-fns.fi.

Erkki Laurila -palkinto 2008

Tilaisuudessa julkistettiin vuoden 2008 Erkki Laurila-palkinto, joka jaetaan parhaalle ATS Ydintekniikka -lehden artikkelin kirjoittajalle. Johtokunta valitsi lehden toimituksen ehdotuksen perusteella voittajaksi AREVA:ssa työskentelevän **Mika Yli-Kauhaluoman** ja hänelle annettiin kunniakirja ja 500 euron stipendi. Yli-Kauhaluoman artikkeli otsikolla "Kuulumisia Saksasta" julkaistiin lehden numerossa 4/2008.

Kokouksen lopuksi kuultiin kaksi mielenkiintoista ja keskustelua herättänyttä esitelmää ydinvoimasäännösten muutoksista. Ensiksi **Riku Huttunen** (TEM) kertoi katsauksen ydinenergialainsäädännön uudistamiseen ja soveltamiseen. Toisen esitelmän piti **Pentti Koutaniemi** (STUK) otsikolla "STUK-YVL -ohjeuudistus ja WENRA-hankkeet".



Puheenjohtajan esittely

EIJA KARITA PUSKA työskentelee erikoistutkijana VTT:llä. Hän toimii kansallisen ydinturvallisuuden tutkimusohjelman SAFIR2010 johtajana. Työtehtäviin VTT:llä kuuluvat mm. ydinvoimalaitosmallinnus -tiimin vetäminen, ydinenergia-alueen tutkimuskoordinaattorina toimiminen, tilaustyöt ja APROS-ohjelmiston kaikinpuolinen edistäminen.

Taustaa VTT:n tehtävissä ydinenergia-alalla on vuodesta 1978, ensin noin 8 vuotta polttoainemallinnuksesta ja vuodesta 1986 lähtien ja edelleen APROS-ohjelmiston kehityksen ja sovellusten parissa sekä ydinturvallisuuden tutkimusohjelmissa Finbus 1999-2002 tutkimuskoordinaattorina ja SAFIR 2003-2006 ohjelman johtajana.

Koulutukseltaan Eija Karita on teknillisen fysiikan osaston kasvattaja Otaniemestä ja tekniikan tohtori. ATS-taustalta löytyvät rahastonhoitajuus, pitkäaikainen ATS-Ydintekniikka -lehden erikoistoimittajapesti ja toimiminen ATS-Energiakanavan koordinaatioryhmässä ja sen puheenjohtajana.

ATS:n toiminnassa Eija Karitan pyrkimyksenä on terävöittää seuran roolia tieteellisenä seurana.



DI Malla Seppälä
Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus
Tutkija
Reaktoridynamiikka
malla.seppala@vtt.fi

Johtokunnan jäsenten esittely



JARI TUUNANEN on työskennellyt vuoden 2008 helmikuusta alkaen Fortum Nuclear Services Oy:n Ydinjäteteknologia -osaston johtajana. Osaston vastuulla on mm. ydinjätteen loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuden arviointi, ydinvoimalaitosten käytöstä poiston suunnittelu sekä nuklidierotusjärjestelmien suunnittelu ja myynti.

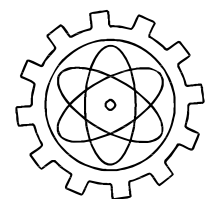
Aikaisempaa työkokemusta Jarilla on TVO:n tutkimus- ja kehityspäällikön sekä VTT:n erikoistutkijan tehtävistä.

Jari on 46 vuotias ydinreaktoreiden termohydrauliikasta Lappeenrannan Teknisestä Yliopistossa väitellyt tekniikan tohtori, jonka perheeseen kuuluu vaimo, kaksi teini-ikäistä tytötä ja koira.



KAI SALMINEN on 32-vuotias teknillisen fysiikan diplomi-insinööri Teknisestä korkeakoulusta ja toimii Fennovoiman ydinturvallisuuspäällikkönä. Tässä tehtävässä hän on toiminut syksystä 2007. Sitä ennen Kai työskenteli vuodesta 2000 Fortumissa muun muassa konsernin tutkimus- ja kehitystehtävissä, Loviisan käyttöluvan uusimishankkeessa ja APROS-ohjelmiston kehitystehtävissä.

ATS:ssä Kai on toiminut aikaisemmin ATS Ydintekniikan päätoimittajana, Young Generationin puheenjohtajana ja ekskursionsihteerinä. ATS:n toiminnassa Kai painottaa seuran aseman vahvistamista ja tunnettuuden lisäämistä ydintekniikan alan ammattiyhteisönä.



VEIJO RYHÄNEN työskentelee johtavana asiantuntijana TVO:ssa. Hän hoitaa kansainvälisiä asioita, minkä lisäksi hänellä on muun muassa ydinjätehuoltoon ja ydinenergia-alan T&K-toimintaan liittyviä tehtäviä.

Veijolla on ydinenergia-alan kokemusta vuodesta 1975 alkaen. Ennen nykyistä työvaihetta hän toimi ydinjätehuollon projekti- ja johtotehtävissä VTT:llä, TVO:ssa ja Posivassa, kaikkiaan lähes kolmen vuosikymmenen ajan.

Veijo on valmistunut diplomi-insinööriksi Otaniemestä teknillisen fysiikan osastolta.

Viranomaisten teettämät riippumattomat turvallisuusanalyysit

Ydinturvallisuustutkimus viranomaisen näkökulmasta

Turvallisuustutkimusta aiheena on käsitelty laajasti useissa ATS Ydintekniikka -lehden aiemmissa numeroissa. Arkiston helmiä ovat olleet mm. Tapio Eurolan kirjoittama "Turvallisuustutkimuksen näköalat Suomessa turvallisuusviranomaisen kannalta" alun perin numerossa 4/1979 ja uudelleen numerossa 4/2008. 30 vuodessa turvallisuusviranomaisen periaatteelliset tarpeet ovat samat, laajennettuina kuitenkin uusien teknologioiden ja materiaalien haasteilla.

Tutkimuslaitoksen kannalta asiaa on pohdittu laajasti **Eija Karita Puskan** artikkelissa "Ydinturvallisuustutkimus nyt ja kohta: Safir ja Safir2010" numerossa 1/2006. Lisäksi **Timo Vantto** on merkinnyt muistiin Olkiluoto 3 -projektin tarpeet numerossa 3/2005 artikkelissa "VTT's role in the Olkiluoto 3 project as technical support organization of STUK". "Ydinturvallisuutta yliopistosta" ovat **Riitta Kyrki-Rajamäki** ja **Heikki Purhonen** käsitelleet numerossa 2/2005, jossa samassa numerossa on myös **Petra Lundströmin** artikkeli "Ydinvoimatutkimus Fortumissa". Muita tutkimusaiheita on raportoitu ansiokkaasti useissa muissakin ATS Ydintekniikka -lehden numeroissa. Lisäksi netissä osoitteessa <http://www.ats-fns.fi/info/arkisto.html> on laaja arkisto pidetyistä esitelmistä ym. Saatuaani päätoimittajalta haasteellisen tehtävän kirjoittaa otsikon mukaisesta aiheesta en aio toistaa em. kirjoit-

tusten asioita. Nuorempia lukijoita / jäseniä kannustan kuitenkin lukemaan / kertaamaan yo. artikkelien asiat YK-kurssin materiaalien lisäksi. Pysin lyhyesti kuvaamaan nykyisen tilanteen ja esittämään STUKin tilaustutkimustoiminnan (TTR) muuttumisen teknisen tuen toimeksiannoiksi (TAS).

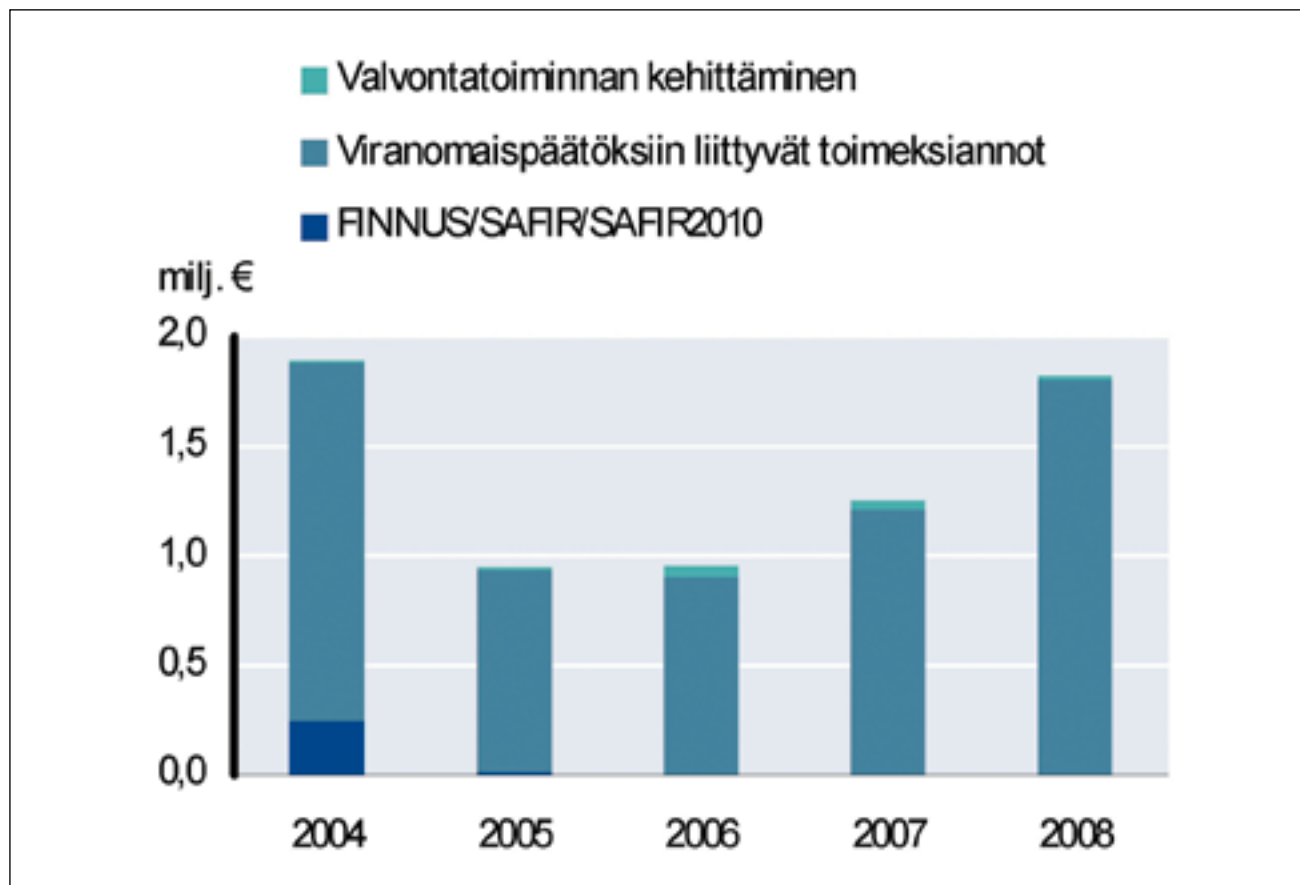
TTR:sta TAS:iin

Ydinvoimalaitosten turvallisuutta koskevan valtioneuvoston asetuksen mukaisesti turvallisuutta on jatkuvasti kehitettävä ottaen huomioon käyttökokemukset, turvallisuustutkimusten tulokset sekä tieteen ja tekniikan kehittyminen. Varsinainen turvallisuustutkimus toteutetaan SAFIR2010-tutkimusohjelman projekteissa. STUKissa laaditun TAS2009-suunnitelman hankesitykset, toteutuessaan muun em. tutkimuksen ja valvontatoiminnan ohella, muodostavat merkittävän tekijän ydinenergian käytön turvallisuuden varmistamisessa.

Luvanhaltijat ovat ydinenergiain mukaisesti vastuussa ydinenergian käytön turvallisuudesta. Tämä edellyttää heiltä riittävä panostusta käytön turvallisuuteen liittyvään tutkimukseen ja STUKin tunnistamien ydinturvallisuushaasteiden käytännön selvitystyöhön.

Ydinenergiain mukaisesti STUKin tehtävänä on valvoa ydinenergian käytön turvallisuutta. Olennaisena osana valvontaan liittyy luvanhaltijoista riippumaton "varsinainen" turvallisuustutkimus (SAFIR2010), mutta myös riippumattomat turvallisuusanalyysit sekä muut selvitykset (TAS2009).

Seuraavan sivun kuvassa esitetään teknisen tuen tilauksista aiheutuneet menot vuosina 2004-2008. Ennen vuotta 2005 menoissa näkyy valvonnan teknisen tuen toimeksiantojen lisäksi kansallisen ydinturvallisuustutkimuksen (Finnus) menoja. Vuoden 2008 menot liittyivät lähinnä rakenteilla olevan laitossyöksen vertailu- ➔ ➔



Ydinvoimalaitosten turvallisuutta koskevien tilaustutkimusten ja teknisen tuen toimeksiantojen toteutuneet kustannukset /3/ vuosina 2004 - 2008. Vuoden 2009 teknisen tuen toimeksiantojen kokonaissuunnitelman kustannusarvio on kolme miljoonaa euroa.

analyysihin ja riippumattomiin arviointeihin. Vuosittain julkaistavan ydinenergian käytön vuosiraportin / 3 / liiteaineistossa esitetään luettelo valmistuneista STUKin rahoittamista teknisen tuen toimeksiannoista.

STUKin rahoittaman TAS-toiminnan päämääränä on ydinenergian käytön turvallisuuden varmistaminen. Tähän liittyvät yksityiskohtaisemmat tavoitteet ovat seuraavat:

- päätöksenteon perusteeksi tarvittavan riippumattoman tiedon tuottaminen
- tieteen ja tekniikan kehittymisen huomioon ottaminen ydinenergian käytön turvallisuuden varmistamisessa
- turvallisuusarvioinnissa tarvittavan asiantuntemuksen ja resurssien ylläpitäminen ja kehittäminen STUKissa ja muissa asianomaisissa organisaatioissa valvontamenetelmien kehittäminen.

Päätöksenteon perusteeksi tarvittavat toimeksiannot ovat yleisiä selvityksiä tai Loviisan ja Olkiluodon ydinvoimalaitok-

sia suoraan koskevia. Laitoksia koskevat hanke-esitykset voivat puolestaan liittyä ajankohtaisiin turvallisuusongelmiin tai ne varmistavat turvallisuuden kehittämistyötä pitkällä aikavälillä.

Kuluvan vuoden TAS2009-suunnitelmasa esitetään STUKin ydinvoimalaitosten valvontaosaston (YTO) turvallisuusvalvontaa tukevat, päätöksenteon perusteeksi tarvittavat teknisen tuen toimeksiantoehdotukset vuonna 2009 voimayhtiöittäin, laitoksittain ja toimistoittain.

Suunnitelmassa ehdotetut teknisen tuen toimeksiannot tilataan ulkopuolisilta tutkimusorganisaatioilta, tarkastuslaitoksilta tai konsulteilta uusien hankintaohjeiden mukaisesti kilpailuttamalla. Säteilyturvakeskukseen asiantuntijat ohjaavat toimeksiantojen toteuttamista ja tarvittaessa joissakin hankkeissa osallistuvat myös itse selvityksen, analyysin tai tutkimuksen tekoon.

Ns. "vanhassa YTO:ssa" toimi apulaisjohtajan puheenjohtajana ns. "tilaustutkimusryhmä", joka seurasi kaikkien tutki-

mussuunnitelmien toteutumista ja laati uusia vuosisuunnitelmia. Ryhmä sai nimen TTR, jota perua on myös edelleen käytössä oleva TTR-tietokanta, jossa on tuhansien tutkimusten ja toimeksiantojen tietoja, muistioita ja selvityksiä sekä analyysituloksia vuosikymmenten ajalta. Hitaasti, mutta varmasti nykyinen TTR-tietokanta tulee korvautumaan STUKin dokumenttien hallinnan Dohan RM-laajenuksella, kun STUK on siirtynyt dokumenttien hallinnasta asianhallintajärjestelmään.

Kansainvälinen tutkimusyhteistyö

12.-13.3.2009 Espoon Hanasaaressa pidetyssä SAFIR2010-ydinturvallisuustutkimusohjelman puoliväliseminaarissa on ehkä tuorein katsaus niin kotimaiseen kuin alan kansainväliseen turvallisuustutkimustilanteeseen ja käynnissä oleviin tutkimusprojekteihin. Seminaariaineisto ym. kuten projektiluettelo ym. suunnitelmat johto- ja tukiryhmien kokoonpanot ovat luettavissa

ohjelman kotisivuilta (<http://virtual.vtt.fi/virtual/safir2010/>).

STUKin painopisteenä ovat myös OECD NEA:n tietokantaprojektit (<http://www.nea.fr/html/jointproj/welcome.html>) SAFIR2010-ohjelman projekteissa olevien hankkeiden lisäksi. Aihe liittyy niin kotimaisten kuin ulkomaisten ydinvoimalaitosyksiköiden käyttökokemusten hyödyntämiseen viranomaisen suorittamassa valvonnassa ja tarkastustyön kohdentamisessa. Merkittävimmillä tietokannoilla, kuten ISOE, FIRE, ICDE, OPDE, SCAP ja COMPSIS on STUKissa nimetyt vastuuhenkilöt. OECD NEA:n toimistossa Pariisissa laaditaan säännöllisesti ao. "selvitystalon" (clearing house) avustuksella yhteenvetoja ja trenditietoja ilmiöistä ja tapahtumista viranomaisten käyttöön. Suomesta STUKin vastuuhenkilöt puolestaan toimittavat asianmukaiset kuvaukset käyttötapah- tumista sovitussa formaatissa ao. clearing housen käyttöön ja tietokantaan tallennettavaksi. Esimerkiksi jo yli 50 vuotiaasta OECD Halden-projektista tuttu norjalainen tutkimusorganisaatio IFE (Institut for energiteknikk) toimii COMPSIS-tietokanta- projektin "selvitystalona".

Joitakin uusimpia STUKin asiantuntijoiden ohjaaman ja seuraaman turvallisuustutkimuksen tuloksia, joilla on merkitystä arkipäivän elämään.

1. Esimerkki: Mallintarkastukseen perustuva suojausautomaation verifiointi MODSAFE-projektissa kehitetyllä menetelmällä /1,2/.

On osoittautunut, että mallintarkastus on tehokas formaali menetelmä ohjelmistojen automaattiseen verifiointiin. Menetelmässä ns. mallintarkastinta käytetään työkaluna, joka testaa kattavasti, täyttääkö turva-automaatiojärjestelmän malli jonkin formalisoidun vaatimuksen. Menetelmän teho perustuu siihen, että mallintarkastin käy läpi kaikki järjestelmästä tehdyn mallin mahdolliset tilat. Tehoa kuvaa se tosiasia, että reaaliajassa testaamalla ja simuloimalla mahdollon tehtävä saadaan tehdyksi muutamassa minuutissa, millä on

merkittävä vaikutus ydinturvallisuuteen. Esimerkiksi Sizewell B:n reaktorisuojausjärjestelmän testausta tehtiin luokkaa 600 htv ennen sen hyväksymistä käyttöön.

Eriyisen hyvin mallintarkastus soveltuu ns. negatiivisten vaatimusten tarkastukseen. Eräänä esimerkkinä negatiivisista vaatimuksista ovat mm. ohjelmistoa koskevat tietoturva-vaatimukset. Perinteisellä simuloinnilla ja testauksella varmistetaan, että järjestelmä tekee sen, mitä vaatimusmäärittelyssä halutaan eikä mitään muuta (unintended functions). Tähän asti saatujen kokemusten mukaan on löydetty STUKin tarkastuksen kohteena olevista ennakkotarkastusaineistoista suunnitteluvirheitä, joita ei enää pitänyt esiintyä. VTT on käynnistänyt jo uuden hankkeen "Mallintarkastusvalmiuksien kehittäminen" (MODCHECK), johon on etsitty ja menestyksellisesti löydetty muidenkin kuin yvl-alan yritysten kannalta kiinnostavia turvallisuuteen liittyviä sovelluksia.

2. Esimerkki: "TITAN-Tietoturva teollisuusautomaatioon"-projekti /5/:

Kaksivuotinen tutkimushanke saatiin käyntiin VTT:llä vuoden 2008 aikana pitkän valmistelun jälkeen päätavoitteena selvittää teollisuusautomaatioympäristöön soveltuvat tietoturvanenettelyt ja ratkaisut sekä kehittää niitä niin viranomaisten kuin teollisuuden tarpeet huomioon ottaen. STUKin lisäksi hankkeessa on mukana Huoltovarmuuskeskus (HVK) viranomais- tahona. Hankkeen osatavoitteina on mm. laatia suuntalinjoja automaatio- ja prosessiteollisuudelle tietoturva-vaatimusten asettamiseksi, näiden vaatimusten täyttämiseksi sekä niiden riittävyyden valvomiseksi. Hanketta toteuttavat VTT ja TTY omalla, Tekesin ja yritysten sekä STUKin ja HVK:n rahoituksella. Tärkeiden teollisuus- automaatiojärjestelmien tietoturvatesta- us sekä monitorointi ja niihin liittyvä menetelmäkehitys on saatu hyvään vauhtiin v. 2009 aikana. STUKin koordinoimana työnä saatiin v. 2008 aikana kommentoitua kehitteillä oleva kansainvälinen IAEA:n ohje koskien ydinvoimalaitosten tieto- ja automaa-

tiojärjestelmien tietoturva-vaatimuksia ja viranomaisvalvontaa.

3. Esimerkki: "Vertailuanalyysin käyttö termohydraulisten koelaitteistojen tulosten laitosmittakaavaan skaalautumisen tutkimisessa" /4/.

STUKin TR-sarjassa on alkuvuodesta julkaistu **Petteri Suikkasen** diplomityö, jota on käsitelty myös ATS Ydintekniikan numerossa 4/2008. Aihe on vertailuanalyysin tarkkuuden ja tulkinnan kannalta tärkeä. Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella termohydraulisten koelaitteistojen skaalauksessa käytettäviä periaatteita ja menettelyjä ja vertailla Apros-simulaattori-ohjelmalla laskettuja kahden koelaitteistomallin ja EPR-mallin tuloksia. Työn tuloksena tiedämme, että erityistä harkintaa tulee käyttää koelaitteistojen tulosten hyödyntämisessä, sillä mittakaava vaikuttaa ilmiöiden esiintymiseen. Koelaitteistojen tulosten perusteella kelpoistetaan laskentaohjelmia, joita käytetään ydinvoimalaitosten turvallisuustutkimuksessa.

Viitteet:

1. VTT Systeemitutkimus, esite "Mallintarkastus turva-automaation verifiointityökaluna"

2. Eija Karita Puska (Ed.), SAFIR2010, The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 2007 - 2010, Interim Report, VTT Research Notes 2466

3. Ydinenergian käytön vuosiraportti 2008, STUK-B 101/Huhtikuu 2009

4. Petteri Suikkasen, Vertailuanalyysin käyttö termohydraulisten koelaitteistojen tulosten laitosmittakaavan skaalautumisen tutkimisessa, diplomityö, STUK-TR8, Helsinki 2009

5. <http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Turva/fi/system/projekti.html?id=9580649&nav=Projekti>

Harri Heimbürger
Tutkimuskoordinaattori
Ydinvoimalaitosten valvonta
Säteilyturvakeskus
Harri.Heimbuerger@stuk.fi

Sydänsulan kokeellinen tutkimus VTT:llä

Vakavien ydinvoimalaitosonnettomuuksien tutkimus on Suomessa ajankohtaista erityisesti Olkiluodon 3-yksikön vaatimien analyysien takia. Myös mahdollisten tulevien laitosten onnettomuuksienhallintakonseptien toimivuus tulee varmistaa lainsäädännön ja YVL-ohjeiden mukaisesti. VTT:llä tehdään tällä alueella kansainvälisesti korkeatasoista kokeellista tutkimusta.

Vakavalla ydinvoimalaitosonnettomuudella tarkoitetaan sitä epätodennäköistä tilannetta, jossa reaktorin polttoaineesta merkittävä osa vaurioituu, käytännössä jäähdytteenmenetyksen seurauksena. Suuri osa VTT:n tutkimuksesta tällä alueella tapahtuu SAFIR2010-ohjelman puitteissa. Ohjelman vakavien onnettomuuksien tutkimusalueella on tällä hetkellä neljä projektia, jotka kaikki sisältävät erilaisten laskenta-analysien lisäksi kokeellista tutkimusta. VTT:n koelaitteistojen avulla voidaan tutkia sydänsula-betoni vuorovaikutuksia, sydänromukasan eli partikkelikeon jäähdytettävyyttä sekä suojarakennukseen vapautuvien fissiotuotteiden, erityisesti jodin, käyttäytymistä. Seuraavassa esitellään sydänsula-betoni vuorovaikutukseen keskittyvä HECLA -koesarja sekä partikkelikeon jäähdytettävyyttä tutkivat STYX -koesarjat. HECLA -kokeet sisältyvät SAFIR2010 -ohjelman COMESTA -projektiin. STYX -kokeet puolestaan on aloitettu jo vuonna 2002, mutta uusimmat koesarjat tehtiin viime vuonna HYRICI -projektissa.



HECLA -koelaitteisto. Uhrausbetoniastia on kammion sisällä kuvassa näkyvän luukun takana.

Sydänsulan ja betonin vuorovaikutukset

Vakavassa onnettomuudessa sydänsula eli corium voi valua paineastiasta reaktorikuiluun. Höyryräjähdysriskin välttämiseksi monilla laitoksilla, kuten Olkiluoto 3:ssa, reaktorikuilussa ei ole vettä, joka jäädyttäisi coriumia. Tällöin sydänsula pääsee kosketuksiin betonilattian ja -seinien kanssa. Korkean lämpötilan ja jälkilämpötehon vaikutuksesta betoni alkaa sulaa. Ilmiöstä käytetään nimeä sydänsula–betoni-vuorovaikutus (molten core – concrete interaction, MCCI).

Onnettomuustilanteen simuloimiseksi täytyy mallintaa lämmönsiirto sulasta betoniin. Mallinnusta vaikeuttaa se, että kuumasta betonista vapautuu vesihöyryä ja hiilidioksidia. Seurauksena on kupliva sulallas, ja kaasukuplien vapautuminen tehostaa lämmönsiirtoa merkittävästi. Ilmiötä on tutkittu kokeellisesti mm. Yhdysvalloissa ja Ranskassa. Kokeissa on havaittu, että eri betonityypeillä lämpövuon jakautuminen lattian ja seinien välillä on täysin erilainen.

EPR:n vakavien onnettomuuksien hallintastrategiaan kuuluu sydänsulan pidättäminen reaktorikuilussa pari tuntia, jonka jälkeen sula pääsee virtaamaan sydänsieppariin. Siellä corium leviää ohueksi kerrokseksi suurelle alueelle, jolloin se pystytään jäädyttämään tehokkaasti. Sydänsula pidätetään väliaikaisesti reaktorikuilussa, jotta kaikki materiaali ehtii valua ulos paineastiasta. Kun suuri määrä sulaa virtaa kerralla sydänsieppariin, varmistetaan, että se leviää koko alueelle.

Väliaikainen pidättäminen reaktorikuilussa on toteutettu puolen metrin kerroksella "uhrausbetonia" kuilun seinissä ja lattiassa. Kun tämä kerros on sulanut, lattiasta syntyy aukko, josta corium pääsee virtaamaan sydänsieppariin. EPR:ssä käytetään erikoista, hematitiä (Fe_2O_3) sisältävää uhrausbetonia. Sulan hematitiin sekoittuminen coriumiin alentaa seoksen sulamislämpötilaa, mikä osaltaan helpottaa leviämistä sydänsiepparissa. Hematiitti pystyy myös hapettamaan zirkoniumia synnyttämättä vetyä. Tämän erikoisbetonin käyt-

täytymisestä korkeissa lämpötiloissa on hyvin vähän kokeellista tietoa. Tämän takia VTT:llä aloitettiin HECLA -kokeet.

HECLA –koesarja

HECLA -kokeissa 50 kg ruostumatonta terästä sulatetaan induktiouunissa ja kuumennetaan lähelle 1800 °C:ta. Sula kaadetaan betoniastiaan ja mitataan, kuinka nopeasti betoni sulaa astian pohjassa ja seinässä. Betoniastia on sylinterin muotoinen, ja sen sisähalkaisija on 28 cm. Tällöin sula-altaan syvyydeksi tulee noin 15 cm.

Betonin sisään on valettu noin 50 termoparia, joilla mitataan lämpötiloja astian seinässä ja pohjassa. Näistä voidaan päätellä betonin sulamisnopeus. Kokeissa keskitetään vuorovaikutuksen alkuvaiheeseen, eli miten kylmä betoni käyttäytyy, kun sen päälle kaadetaan erittäin kuumaa materiaalia. Sulaa ei lämmitetä kaadon jälkeen, joten reaktio kestää pari minuuttia, jonka jälkeen teräs on jähmettynyt. Koska reaktiossa syntyy vetyä, kokeet tehdään suljetussa kammiossa ja suojakaasuna käytetään tyypeä.

Koesarjaan kuului viisi koetta, joista ensimmäinen oli pienen mittakaavan esikoe laitteiston turvallisen toiminnan varmistamiseksi. Täyden mittakaavan kokei-

ta on tehty neljä, joista yksi tavallisella silikaattibetonilla ja loput EPR:n uhrausbetonilla. Viimeisen kokeen analysointi on vielä kesken.

Mitatut betonin sulamissyvytykset ovat välillä 0–30 mm sekä pohjassa että seinässä. Pienet arvot osoittavat, että mitään dramaattisia ilmiöitä, kuten suurten palojen lohkeilua betonista nopean lämpöshokin vaikutuksesta, ei ole tapahtunut. Reaktorimittakaavassa sula-altaan massan suhde lämmönsiirtopinta-alaan on tietysti paljon suurempi, joten betonia sulaa enemmän.

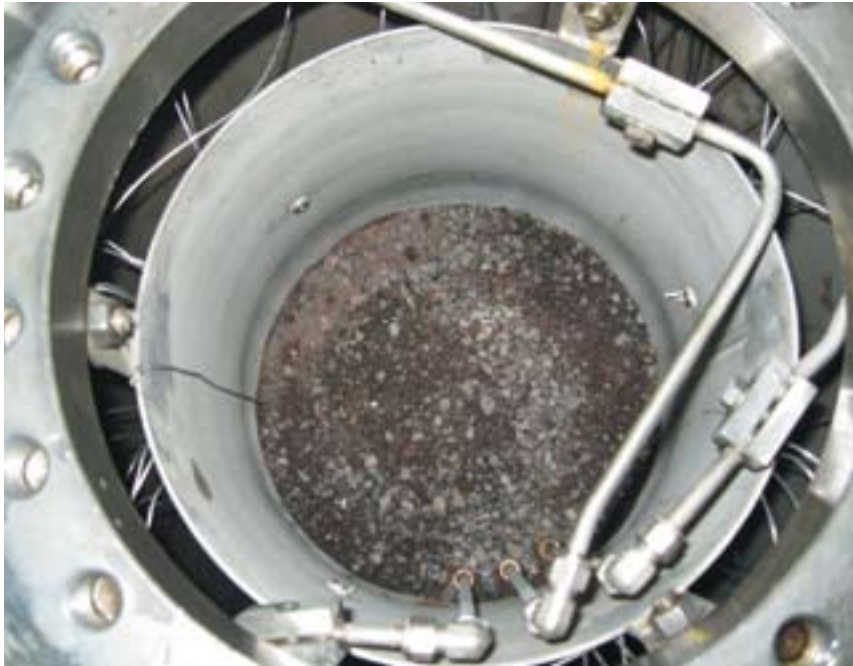
Näissä metallisulalla tehdyissä kokeissa ei ole havaittu selviä eroja tavallisen silikaattibetonin ja EPR:n uhrausbetonin välillä. Reaktorissa suurin osa coriumista olisi tietysti oksidi-muodossa. Tämän takia uhrausbetonin kokeellista tutkimusta jatketaan syksyllä Cadarachessa Ranskassa VTT:n ja CEA:n yhteistyönä. Ranskassa pystytään käyttämään oikeaa coriumia, joka sisältää uraani- ja zirkoniumdioksidgeja. Tässä kokeessa sulaa lämmitetään vielä kaadon jälkeen jälkilämpötehon simuloimiseksi.

Sydänromun jäädyttäminen vesialtaassa

Olkiluodon kiehumusvesilaitoksilla sydänsula stabiloidaan suojarakennuksen alakuiva-



HECLA-4 -kokeen lopputila. Teräs on jähmettynyt betoniastiaan.



STYX -partikkelikeko sisäsylinterissä ylhäältä kuvattuna.



STYX -koelaitteiston sisäsylinteri asennustöiden aikana. Partikkelikeko on sylinterin sisällä.

tilaan, joka tulvitetaan ennen paineastian puhkeamista onnettomuustilanteessa. Sydänromu pirstaloituu ja jäähtyy alakuivatiilaan vesialtaan pohjalle, jossa se muodostaa jälkilämpötehon takia itsestään kuumenevan huokoisen partikkelikeon. Jälkilämpöteho tulee kyetä siirtämään ympäröivään vesialtaaseen, jotta estettäisiin materiaalin mahdollinen uudelleensulamminen ja lattiaan kohdistuvat kuormitukset.

Epäsäännöllisistä alumiinioksidipartikkeleista koostuvan, sylinterimäisen keon jäähdyttävyyttä tutkitaan STYX -koe-

laitteistolla, jossa jälkilämpötehoa simuloidaan vastuskuumentimilla. Koekeko on asennettu paineastiaan, joka sallii testaamisen painevälillä 2-7 barin paineesaväliillä. Jäähdytettävyyden mittaaminen tarkoittaa käytännössä lämpötilojen seuraamista kylläistä vettä ja höyryä sisältävässä keossa. Kun lämpötila jossakin kohtaa kekoa alkaa selvästi nousta kylläistä lämpötilaa korkeammaksi, kuivumislämpöteho on saavutettu ja keko ei enää ole jäähdytettävissä.

STYX -koesarjat 1-9 suoritettiin vuosina 2002-2005. Keon partikkelien kokojakauma valittiin alun perin vastaamaan mahdollisimman hyvin Olkiluoto 1- ja 2 -laitoksille kirjallisuudesta saadun tiedon perusteella arvioitua jakaumaa. Koejärjestelyissä vesi virtaa keon sisään vain keon yläpinnan kautta ylöspäin nousevaa höyryvirtausta vastaan, mikä on konservatiivinen oletus. Kokeissa huomioitiin myös mahdollisessa höyryjäähdyksessä syntyvät hienommat partikkelit, joiden oletettiin muodostavan kerroksen varsinaisen karkeamman partikkelikasan päälle. Näiden kokeiden jälkeen laitteiston käytössä oli muutama vuoden tauko.

Uusimmat STYX -kokeet

Laitteisto otettiin uudelleen käyttöön vuonna 2008, jolloin sisäsylinteriin asennettiin läpivientiputket, joiden avulla tutkittiin poikittaisvirtauksen vaikutusta kui-

vumislämpötehoon. Uusissa koesarjoissa, STYX 10-13, osa jäähdytysvedestä valuu läpivientiputkien kautta keon päällä olevasta vesitilavuudesta keon pohjalle, jota kiehuminen pyrkii kuivattamaan.

Uusien koesarjojen tavoitteena oli tuottaa vertailutietoa laskentaohjelmien kelpoisuudesta varten. Samalla kokeet edustavat realistisempaa lähestymistapaa todellisia onnettomuuskenaarioita ajatellen, koska on epätodennäköistä, että partikkelit jatkautuvat tasaisesti leviämistilan pohjalle kuumen sydänmateriaalin pudotessa vesialtaaseen. Sen sijaan erilaiset epähomogeeniset, epäsäännöllisen muotoiset keot ovat mahdollisia. Tavallisesti epähomogeeniset keot ovat helpommin jäähdytettävissä, koska näin saadaan ainakin osassa kekoa aikaiseksi samansuuntainen höyryvesivirtaus.

STYX -kokeiden tulosten mukaan testatut keot ovat jäähdytettävissä laitostilanteessa paineen ollessa yli 2 bar. Uusissa kokeissa keon pohjalle kohdistetun sivuttaisvirtauksen avulla jäähdytettävyyden parani enimmillään noin 25 %. Hienon partikkelikerroksen läsnäolo keon päällä kuitenkin huonontaa jäähdytettävyyttä ja monimutkaistaa tilannetta. Laskenta-analysit kokeista ovat käynnissä ja kokeiden arvioitiin mallinnusohjelmilla on tarkoitus saattaa loppuun tänä vuonna. Koetoiminta kuitenkin jatkuu, sillä valmistellaan uusi koelaitteisto, jonka avulla voidaan tutkia kartionmuotoisen keon jäähdytettävyyttä ja verrata sitä "perinteisen" sylinterikeon jäähdytettävyyteen.

DI Tuomo Sevón
Tutkija
COMESTA-projektipäällikkö
VTT
Tuomo.Sevon@vtt.fi

DI Eveliina Takasuo
Tutkija
HYRICI-projektipäällikkö
VTT
eveliina.takasuo@vtt.fi

Reaktoriturvallisuustutkimus USA:ssa TMI-onnettomuuden jälkeen

Artikkeli on julkaistu edellisen kerran *ATS Ydintekniikan* numerossa 4/1979.

Suomessa vieraili 4.12. lähinnä Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) kutsumana korkean tason amerikkalainen reaktoriturvallisuustutkimuksen asiantuntijaryhmä. Ryhmä edusti Yhdysvaltojen ydinturvallisuusviranomaisen (Nuclear Regulatory Commission, NRC) suurinta reaktoriturvallisuusprojektia LOFT (Loss of Fluid Test), jonka kokonaiskustannukset ovat tähän mennessä olleet n. 300 M\$.

Ryhmän jäsenet olivat:

Dr. G. D. McPherson,
LOFT-ohjelmajohtaja, NRC
NRC on LOFT-projektin
päärahoittaja ja määrittelee
sen tavoitteet.

Mr. J. E. Solecki, LOFT-projektitoimiston
päällikkö, Energiaministeriö (DOE)
DOE omistaa Idahon tutkimuskeskuksen
ja valvoo projektin toteutusta.

Mr. L. P. Leach, LOFT-koeohjelma-
päällikkö, EG & G Idaho
EG & G Idaho on yksityinen yhtiö,
joka on tehnyt sopimuksen DOE:n
kanssa projektin toteuttamisesta
käytännössä.

LOFT-projektissa suoritetaan kaupallisia ydinvoimalaitoksia realistisesti jäljittelevällä 55 megawatin tehoisella painevesireaktorilaitoksella jäähdytysputkiston murtumia ja vuotoja vastaavia kokeita. Jäähdytteen menetyksestä johtuvat onnettomuudet ovat keskeisessä asemassa reaktoriturvallisuustutkimuksessa. Tämän vuoden keväällä tapahtuneen Harrisburgin onnettomuuden jälkeen on myös LOFT-ohjelmaan tehty suuria muutoksia siten, että lähiaikoina pääpaino on pienten murtumien

kokeilla. Ensimmäiset pienen murtuman jäljittelykokeet LOFT-laitoksella on jo suoritettu. LOFT-projekti on kuvattu tarkemmin *ATS Ydintekniikka* -lehden numerossa 3/1979, s. 78-88.

Laaja kansainvälinen yhteistoiminta on luonteenomaista reaktoriturvallisuustutkimukselle. Erityisesti Suomen kaltaiselle pienelle maalle se on ainoa tapa varmistaa uusimman tiedon riittävän nopea ja kattava saanti. Kansainvälisiin tutkimusprojekteihin on mieluummin pyritty osallistumaan asettamalla henkilöstöä yhteisprojektien palvelukseen, suorittamalla osa projekteista Suomessa, vaihtamalla tutkimustuloksia tai toimittamalla osia koelaitteistoihin. Useasti on tehty yhteistyösopimuksia yhdessä muiden Pohjoismaiden kanssa. Näin on laita myös LOFT-projektin tapauksessa, johon USA:n lisäksi osallistuvat Japani, Saksan Liittotasavalta, Itävalta, Hollanti, Sveitsi ja neljän Pohjoismaan ryhmä. Viimeksi mainitun muodostavat ko. maiden valtiolliset tutkimuslaitokset, Suomesta VTT. Pohjoismaista on LOFT-projektityöhön Idahon tutkimuskeskuksessa Yhdysvalloissa ollut jatkuvasti sijoitettuna 1...2 tutkijaa. Suomen osallistumisesta laajemmin mm. *ATS Ydintekniikan* numeroissa 3/1979, s. 69-95 (VTT) ja 1/1979, s. 54-69 (NEA).

Dr. G. Donald McPherson piti vierailun osana Atomienergianeuvottelukunnan ja ATS:n järjestämässä tilaisuudessa esitelmän TMI-onnettomuuden vaikutuksesta USA:n reaktoriturvallisuustutkimukseen yleensä ja LOFT-projektin ohjelmaan erityisesti. Oheisena julkaistaan McPhersonin esitelmästään toimittama tiivistelmä. ATS järjesti samassa yhteydessä myös lehdistötilaisuuden, joka saavutti hyvän menestyksen.

ARKISTON HELMIÄ

Reactor safety research in the USA after TMI

This article is a reprint from ATS Ydintekniikka 4/1979. It is a summary of a presentation given by Dr. G. D. McPherson of the United States Nuclear Regulatory Commission (NRC) at a meeting organized by the Finnish Nuclear Advisory Committee and the Finnish Nuclear Society on December 4, 1979.

As part of its charter involving the licensing of commercial power reactors, the U.S. Nuclear Regulatory Commission is responsible for the performance of research for the purpose of confirming various considerations used in their design. Prior to the TMI reactor accident last March, the focus of this research was the large loss-of-coolant accident during which the worst single failure in the Engineered Safety System must be assumed to occur simultaneously. Reasons for this originate in the 1972-1973 hearings on Emergency Core Cooling Systems and the "10CFR 50 Appendix K" rule which resulted. This rule placed considerable emphasis on safety during large pipe breaks and only slight attention was given to small breaks.

The TMI Accident

The events at TMI served to demonstrate that the NRC and the nuclear industry should have paid more attention to other matters. During that accident, machines, instruments and men failed. Features of the reactor design that had never come under close regulatory review because they were not regarded as "safety related" actually contributed to the accident. Control room instruments were inadequate in range, location and information measured.

Operators made mistakes. Communication links failed to function, in part because the telephone system was jammed; in part, because individuals did not understand what they were supposed to report. The power company didn't inform the NRC, during the first day, of dangerously high temperatures, nor of a hydrogen explosion in the containment building. Worse still, it turned out that a warning provided by a similar initiating event at another plant earlier, had been ignored by the NRC.

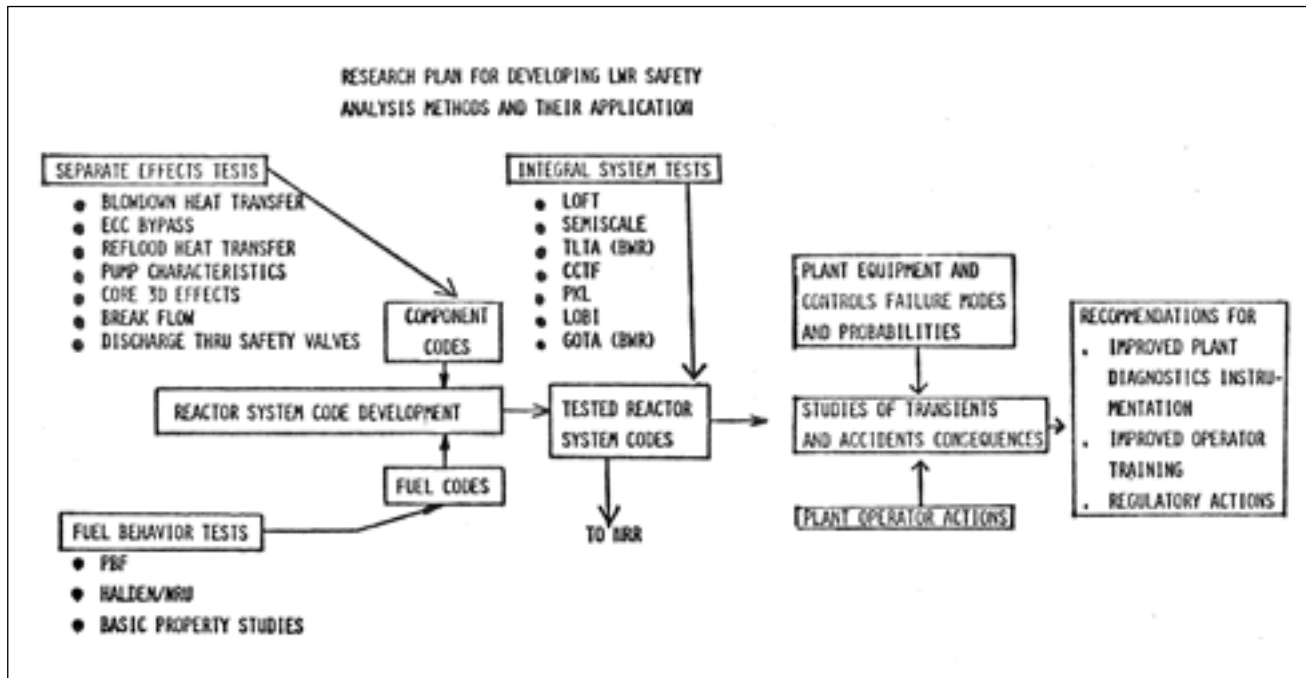
Many of the specific deficiencies in plant design and operator procedures can be corrected relatively easily and some corrections have already been implemented. Reactor systems that were not reviewed will be reviewed. New control room instruments and arrangements are being required. A stricter program for operator training and qualification is underway. NRC will require instruments to permit accurate measurements of offsite releases. Emergency planning for evacuation of those living near reactors will be required as a condition of reactor operation. Direct phone lines have already been installed between NRC and all reactors. A new NRC office has already been established to ensure that all operating experience and safety information is reviewed more closely and systematically.

NRC's Reactor Research Program

To describe the changes which have been made in NRC's reactor research program, it is best to refer to the attached figure which shows the relationship between the experimental and analytical components. The thermal-hydraulic and fuel experiments support the development of computer codes.

The codes are assessed in terms of integral system behavior tests and then released for use by NRR, the Nuclear Reactor Regulatory office of NRC, and by the nuclear industry for purposes of licensing, assessing safety margins and improving operational safety. Changes have occurred in emphasis in the majority of the components of this program such that the various deficiencies which came to light after TMI are now being addressed.

- These changes can be categorized as
- (a) better understanding of transient and small LOCA accidents
 - (b) enhanced operator capability
 - (c) plant response under accident conditions
 - (d) post mortem examination and plant recovery
 - (e) improved risk assessment
 - (f) improved reactor safety.



Changes in the LOFT Research Program

The Loss-Of-Coolant Test, LOFT, is the most important single component in NRC's reactor research program. It is therefore of interest to focus on this project, the results obtained to date and the changes in its program since TMI. LOFT is a small PWR scaled to model the behavior of commercial PWR's under loss-of-coolant and other anomalous transient conditions. The main goal of this project is to provide data under these conditions for the development and assessment of computer codes needed to describe behavior of large PWR's.

As in the case of the other NRC experimental facilities, prior to TMI the LOFT program focused on the large pipe break LOCA. From 1976 to 1978 a series of non-nuclear experiments provided important information on the behavior of systems intended to deliver emergency coolant to the reactor core during large pipe break accidents.

Subsequently two large break tests were performed with the reactor generating nuclear power. The results of these tests, which will be discussed in greater length during the presentation, have been very important in assessing the LOCA computer codes and in providing an understanding of the phenom-

na which occur in commercial PWR's during large break LOCA's.

Originally it was intended that the large break LOCA series be completed, and then, in 1981, the program would perform, alternately one test from each of the other series planned. These include series of small breaks, intermediate sized breaks, large breaks with alternate ECCS, hot leg breaks, anomalous transients and large breaks with simultaneous steam generator tube ruptures.

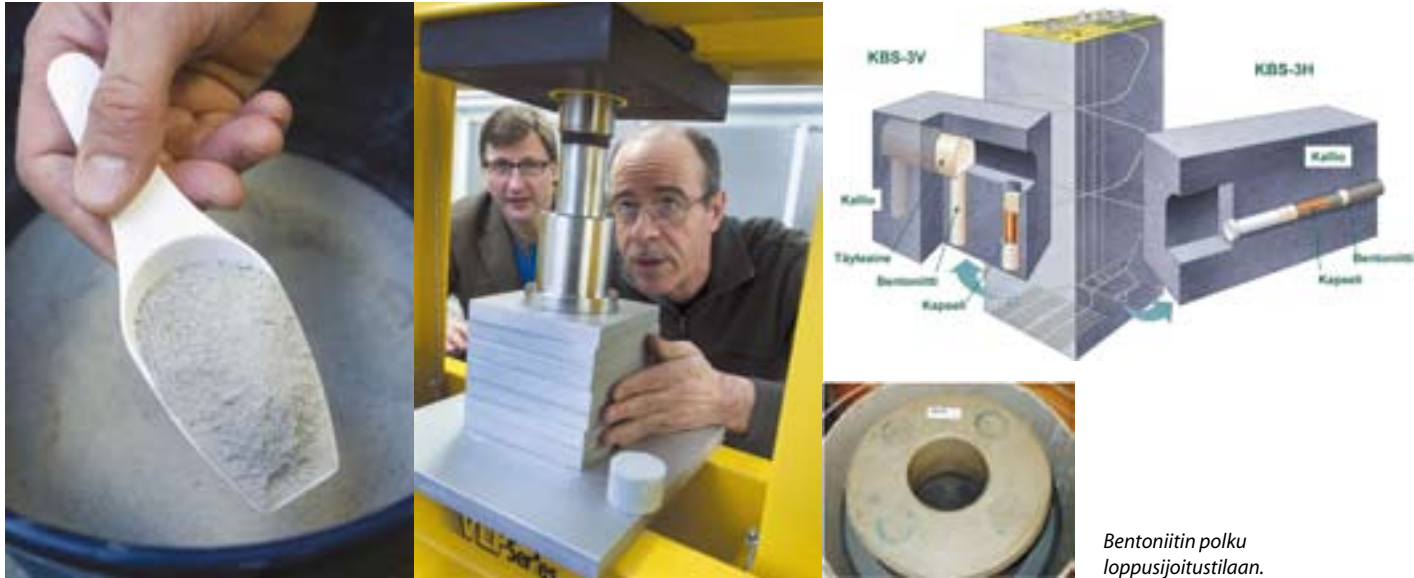
Following TMI, this plan was changed such that the large break series is now delayed for approximately one year, while we perform several small break and anomalous transient tests. In fact, two small break tests have already been performed and the results are now being used to assess the small break performance of commercial PWR's.

Other changes to the LOFT program include the addition of a fault diagnostics computer to study the best way of analyzing and presenting operational off-normal information to reactor operators so that they can quickly analyse a fault and take the best action to correct it. In addition special experimental instruments in the LOFT reactor are being used to assess the need for extra or different instruments in commercial reactors. Also, the experience

of operating LOFT through actual accident conditions is providing important suggestions for improvements in reactor design and control. Much of this new work is just beginning, but already many important ideas have resulted.

In the future the NRC sees this new LOFT program and the many new changes in the entire reactor research program as leading to significant improvements in safety to the operation of commercial power reactors.

*Dr. G. D. McPherson
LOFT Program Manager
United States Nuclear
Regulatory Commission (NRC)*



Bentoniitin polku loppusijoitustilaan.

B+Tech Oy tekee uutta tutkimusta Suomessa

Loppusijoitusosaamisen varmistamiseksi kotimaassa on perustettu B+tech, tavoitteena tuottaa korkealaatuista asiantuntemusta erityisesti bentoniitin osalta.

Loppusijoitustunneleissa käytettävien bentoniittisavien ja täyttömateriaalien tutkimus on oleellinen osa käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusratkaisun kehittämistä. Pitkäikäiseksi suunniteltu kupari-rautakapseli ja bentoniittisavesta tehty puskuri kallion ja kapselin välissä muodostavat yhdessä tärkeimmän osan käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusratkaisua. Merkittävä painopistealue on bentoniittipuskurin kehittäminen, sillä lisätietoja tarvitaan muun muassa loppusijoitustilojen rakentamisluvan edellyttämää turvallisuusperustelua varten. B+Tech Oy on erikoistunut loppusijoituksessa tarvittavan bentoniittisaven, täyttömateriaalien ja näistä muodostuvien vapautumisesteiden (Engineered Barrier Systems) tutkimiseen.

Bentoniitin rooli loppusijoituksessa

Bentoniitti on luonnossa esiintyvää paisuvahilaista savea, jota louhitaan yleisesti eri puolilla maailmaa eri tarkoituksiin. Mineralogisesti bentoniitin oleellinen osa on veden vaikutuksesta paisuva montmoril-

loniittisavi. Kastumisen seurauksena bentoniitti paisuu ja siitä tulee erittäin tiivistä plastista materiaalia. Bentonitti pystyy absorboimaan suuria määriä vettä ja nimillään laajenemaan tilavuudeltaan jopa kymmenkertaiseksi. Plastisuus, tiiveys ja pitkäikäisyys tekevät bentoniittisavesta ainutlaatuisen hyvän materiaalin käytettäväksi esimerkiksi ydinpolttoaineen loppusijoituksessa.

Termiä bentoniitti käytettiin ensimmäisen kerran kuvaamaan savea, joka löytyi vuonna 1890 Fort Bentonin kaupungista Wyomingista USAssa. USA:ssa onkin maailman tunnetuimmat Na-bentoniittiesiintymät. Muita merkittäviä bentoniittin tuottajamaita ovat mm. Intia, Kreikka ja Kiina. Montmoriloniitti on bentoniitin tärkein savimineraali, joka pääosin aiheuttaa sen hyödylliset ominaisuudet (Kuva 1).



Kaksi erityyppistä bentoniittisavea sekä mikroskooppikuva niistä.
(MX-80 tyyppinen Wyomingin Na-bentoniitti ja kreikkalainen Ca-bentoniitti Deponit Can)



B+Tech Oy:n laboratorio Helsingin Kannelmässä. Tim Schatz tutkijassa bentoniitissa tapahtuvia prosesseja.

Nimensä mineraali puolestaan on saanut saviesiintymästä Montmorillonista Etelä-Ranskassa.

Bentoniittipuskuri on loppusijoituksen avainosa. Sitä käytetään loppusijoitusreissä erityisesti eristämään kuparinen polttoainekapseli ympäröivästä kallioperästä. Kallioperän rakoverkostossa oleva pohjavesi imeytyy bentoniittipuskuriin, joka paisuu ja muodostaa kuparikapselin ympärille tiiviin, joustavan ja pitkäikäisen kerroksen. Tiiveys estää haitallisten aineiden, kuten mikrobien, kapselia korrodoivien aineiden tai mahdollisesti myöhemmin radionuklidien kulkeutumisen. Joustavuus suojaa kapselia kallion mahdollisilta liikunnoilta esimerkiksi maanjäristysten seurauksena. Pitkäikäisyys takaa suojaavat olosuhteet yli seuraavien jääkausien. Käytetyn polttoaineen loppusijoituksen turvallisuus perustuu useisiin suojaesteisiin ja bentoniittipuskurilla on merkitystä erityisesti jos jokin näistä muista

Kotimaisin voimin

Posiva käynnisti keväällä 2006 laajamittaisen tutkimus- ja kehitysohjelman BENTOn, jonka päällimmäiseksi tavoitteeksi asetettiin asiantuntijoiden ja asiantuntemuksen kehittäminen bentoniitti- ja mahdollisesti muidenkin savimateriaalien käyttäytymistä koskeissa asioissa Suomessa. Tavoitteena on tuottaa mahdollisuudet erilaisen bentoniittimateriaalien käyttäytymisen tutkimiseen loppusijoitusoloja riittävän

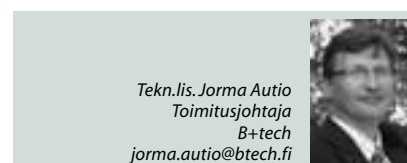
hyvin kuvaavissa säädeltävissä olosuhteissa sekä kehittää tällaisiin tutkimuksiin tarvittava asiantuntemus käyttämällä hyväksi olemassa olevia henkilöresursseja, mutta samalla kouluttaen alalle uusia keskeisten osaamistarpeiden mukaan suuntautuneita asiantuntijoita. BENTOn tarkoituksena on osaltaan varmistaa, että Suomessa on riittävä tieto ja koulutetut asiantuntijat suorittamaan tarpeellinen suunnittelutyö ja osoittamaan bentoniittipuskurin vaadittu toimintakyky loppusijoitustilojen rakentamislupaa varten tarvittavia turvallisuustodisteita varten.

Bentoniitin asiantuntemuksen ja kokeellisen toiminnan kehittämiseksi perustettiin 2007 bentoniittimateriaaleihin keskittyvä yritys, B+Tech Oy, jonka toiminta pitää sisällään neljä avainaluetta: teoreettinen tutkimus ja numeerinen mallinnus, kokeellinen tutkimus, teknisten päästöesteiden suunnittelu ja valmistus erityisesti bentoniittipuskurin osalta. Tärkeänä osana toimintaansa B+Tech otti kesällä 2008 käyttöön tutkimuslaboratorionsa, joka on tietävästi maailman ainoa pelkästään bentoniittitutkimuksiin suunniteltu laboratorio.

Bentoniittisaven sinällään yksinkertaiset hyvät ominaisuudet perustuvat monimutkaisiin kemiallisiin tapahtumiin. Tutkimuksissa selvitetään muun muassa erilaisten bentoniittisavien kemiallista koostumusta ja ominaisuuksia. Lisäksi tutkitaan, miten bentoniitti käyttäytyy loppusijoitusolosuhteissa, erityisesti vuorovaikutuksessa poh-

javeden ja tilojen rakentamisessa käytettävien raudan ja sementin kanssa. Eräs tarkasteltava tilanne on myös jääkauden ja siihen mahdollisesti liittyvän ikiroudan aiheuttaman jäätyksen ja sulamisen vaikutus bentoniittipuskurin toimintaan. Tuloksia tullaan hyödyntämään sekä bentoniittikomponenttien suunnittelussa että loppusijoitustilojen toimintakyvyn arvioinnissa. B+tech tuottaa BENTOLle tutkimuksia yhteistyössä muiden kotimaisten tutkimuslaitosten ja yritysten, kuten VTT, Pöyry Infra, Afore Consulting ja lukuisten muiden kanssa.

B+Tech Oy:n omistaa suomalainen insinööri-toimisto Saanio & Riekkola Oy ja ruotsalainen ClayTechnology AB. Yritys aloitti varsinaisen toimintansa vuoden 2008 alussa jolloin yrityksessä oli kaksi työntekijää ja työ alkoi tutkimuslaboratorion suunnittelulla. Tällä hetkellä yrityksellä on käytössä pelkästään bentoniittitutkimuksiin suunniteltu laboratorio. Yritys solmi yhteistyösopimuksen Posivan kanssa marraskuussa 2008 ja nykyään yrityksessä on kymmenen työntekijää ja lisää avainosaajia etsitään edelleen. B+Tech Oy:n myötä suomeen perustettiin uudentyyppistä osaamista ja uusia työpaikkoja.



*Tekn. lis. Jorma Autio
Toimitusjohtaja
B+tech
jorma.autio@btech.fi*

KYT2010

tutkimusohjelma kehittyy

Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma (KYT) on edennyt jo toisen ohjelmakauden (2006-2010) jälkipuoliskolle ja tähyää tulevaisuuden haasteita. Tuloksena on tuotettu lukuisia julkaisuja sekä opinnäytteitä. Tuleva kehitys edelleen tiivistää ohjelman rakennetta ja sisältöä.

KYT-toiminta alkoi 2002 itsenäisten rahoittajien tutkimusohjelmalla, josta kehittyi vuoden 2004 ydinenergialain uudistuksen jälkeen rahoitus-pohjaltaan vakiintunut tutkimusohjelma. Tällä hetkellä on menossa toinen ohjelmakausi, joka alkoi 2006 ja kestää vuoteen 2010.

Ohjelmasatolla on tavoitteena turvata aihealueen kotimainen asiantuntemus ja tietotaito ydinjätehuollon laajapohjaiseen tutkimukseen. Pääasiallisena rahoittajana toimii valtion ydinjätehuolto-rahastoon (VYR) perustettu ydinjätetutkimusrahasto. Varat rahastoon kerätään vuosittain suoraan jätehuoltovelvollisilta suhteessa niiden vastuumäärään, kultakin 0,08 % vastuumäärästä. Rahaston myöntämä KYT-rahoitus on vakiintunut noin yhden miljoonan euron vuositasolle.

Tutkimusohjelmassa on ollut vuosittain käynnissä 15-20 hanketta, joiden aihealueet ovat käsittäneet ydinjätehuollon näkökohtia luonnontieteellisestä perustutkimuksesta aina yhteiskuntatieteellisiin tutkimuksiin. Oleellisia kriteerejä tutkimushankkeiden arvioinnissa ovat tutkimustulosten hyödynnettävyys ydinjätehuollon pitkäaikaisturvallisuutta arvioitaessa ja hankkeiden koulutusvaikutus. Tutkimusten tulokset on oltava julkaistavissa ja kulloisenkin tutkimuksen alue on rajattava siten, että tulokset ovat sovellettavissa useamman kuin yhden luvanhaltijan käyttöön.

Tutkimusten sisältö

Ohjelman sisällössä painotetaan viranomaisten tarpeita. Kehitetyillä asiantunte-

muksella ja valmiuksilla on pystyttävä arvioimaan sellaisten seikkojen merkitystä, joita ei ole ollut mahdollista ottaa ennalta huomioon ja joita tarvitaan ydinjätehuollon erilaisten toteutustapojen ja menetelmien vertailuun.

Toisen ohjelmakauden loppupuoliskolla KYT2010-tutkimusohjelman tavoitteisiin ja sisältöön vaikuttaa loppusijoituslaitoksen rakentamislupakäsittelyn läheisyys. Käsitteilyn tukena viranomaisen käytössä tulee olla riittävä alan kotimainen tieto ja asiantuntemus.

Hankkeet ovat pääosin tieteellis-teknisiä tutkimuksia, jotka liittyvät turvallisuusperusteluun ja loppusijoitustilan pitkäkestoisen toimintakyvyn arviointiin. Loppusijoituksen turvallisuuteen liittyvien hankkeiden lisäksi KYT2010-ohjelmaan sisältyy ydinjätehuollon vaihtoehtoselvityksiä ja yhteiskuntatieteellistä tutkimusta.

KYT2010-ohjelmaan osoitettu VYR-rahoitus painottuu ohjelmakauden lopul-

la selkeästi teknisten vapautumisesteiden tutkimukseen (Kuva 1). Aiemmin painotetuista osa-alueista radionuklidien kulkeutumiseen sekä kallioperään ja pohjaveteen liittyvien hankkeiden suhteellinen rahoitusosuus on supistunut.

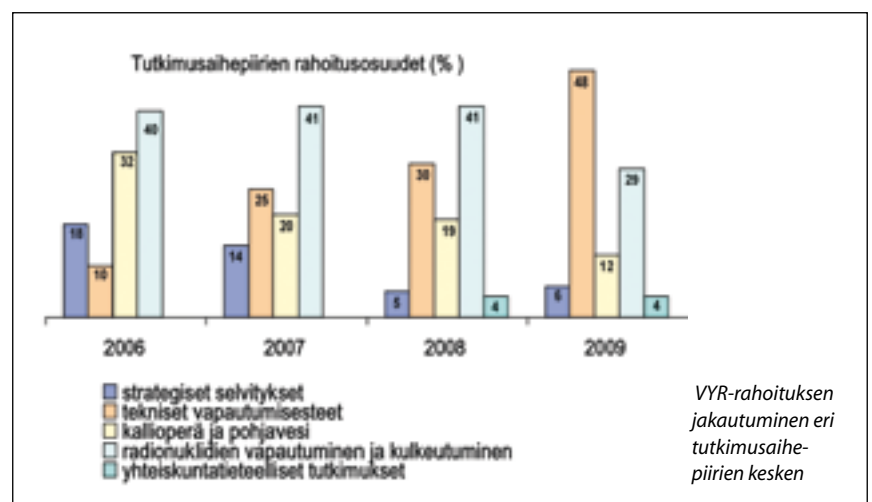
Tekniset vapautumisest

Teknisiä vapautumisesteitä koskevat hankkeet jakautuvat kahteen päähaaraan, kuparikapselia ja bentoniittipuskuria käsitteleviin hankkeisiin.

Kapseli on suomalaisen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituskonseptin tärkein yksittäinen vapautumiseste, jonka tehtävänä on eristää käytetty polttoaine ympäristöstään riittävän pitkäksi aikaa.

Kapselin eliniän arvioimiseen liittyviä KYT2010-ohjelman tutkimuksia ovat virumiskestävyyden, jännityskorroosion ja deformaatiomekanismien tutkimukset.

Bentoniittipuskuriin liittyvät hankkeet kehittävät puskuria kuvaavaa kytkettyä



mallia, jolla mallinnetaan puskurin pitkäaikaista suorituskykyä. Työssä on pitkän tähtäimen päämääränä THMC-malli. Lisäksi selvitetään bentoniittikolloidien osuutta radionuklidien kulkeutumisessa. Teknisten vapautumisestaiden tutkimukseen kuuluu myös hanke, joka mallintaa betonin ikääntymistä voimalaitosjätteen loppusijoitustilan rakenteissa.

Teknisten vapautumisestaiden osalta tulevaisuuden haasteina on nähty kehittyvän teknologian mahdollisesti tuomat muutokset pitkäaikaisturvallisuuden arviointiin. Esimerkkinä polttoaineen evoluution liittyvät kysymykset, jotka esitetään jätehuollon turvallisuusketjun kannalta, kuten EPR-polttoaineen korkean palaman vaikutukset.

Kallioperä ja pohjavesi

Kallioperä ja pohjavesi aihepiirissä tutkimuksen painopiste on menetelmäkehityksessä. Suomalaisen konseptin mukainen loppusijoitus kallioperään edellyttää kykyä monipuoliseen loppusijoitustilan ja ympäröivän kallioperän olosuhteiden ennakointiin. Aihepiiriin puitteissa kehitetään kalliomekaniikkaan liittyviä menetelmiä kallion luokittamiseksi ja rakennuspaikan jännitystiloin in situ mittauksiin. Lisäksi käynnissä on hanke, jossa tutkitaan kallioperän kaasujen esiintymistä suhteessa mikrobeihin.

Radionuklidien vapautuminen ja kulkeutuminen

Myös kulkeutumistutkimuksessa on menetelmäkehitys keskeisenä elementtinä mukana. KYT2010 ohjelmassa tutkitaan kallioperä- ja biosfäärikulkeutumiselle suotuisien olosuhteiden muodostumismekanismeja ja varsinaisia kulkeutumisen mekanismeja.

Mikrobitoiminnan kytkemiseksi loppusijoitustilan olosuhteiden muodostumiseen kehitetään molekyylibiologiaan perustuvia mikrobiologisia monitorointimenetelmiä, joita voidaan hyödyntää geomikrobiologisten prosessien tutkimisessa. Sorptiomekanismeja selvitetään atomi- ja molekyyliatasolla kolmenarvoisille aktinideille. Menetelmiä kehitetään kivimatriisin heterogeenisyyden ja alkuaineiden kalliokulkeutu-

misen määrittämiseksi in situ olosuhteissa. Biosfäärikulkeutumisen osalta tutkitaan aineiden siirtymistä maasta kasveihin ja eläimiin. Mukana on myös radiohiilen käyttäytyminen mahdollisessa siirtymäketjussa maaperästä biosfääriin.

Kulkeutumistutkimuksen osalta tulevaisuuden haasteina on nähty myös muiden kuin radionuklidien massavirtojen kuvaaminen loppusijoitustilassa. Reaktiivista kulkeutumismallinnusta tulisi soveltaa loppusijoitusympäristön kemialliseen mallintamiseen ja olosuhteiden muutos kytkää loppusijoitustilan toimintakykyyn.

Muut tutkimukset käsittävät strategisen selvityksen ja yhteiskuntatieteellisen hankkeen. Strategisella selvityksellä tuotetaan tietoa käytetyn polttoaineen suoran loppusijoituksen vaihtoehtoista sekä kehittyneiden reaktorien ja polttoainekiertojen mahdollisesta vaikutuksesta ydinjätehuoltoon.

Yhteiskuntatieteellinen tutkimushanke seuraa ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen sosio-ekonomisia vaikutuksia ja tiedonvälitystä Eurajoen ja sen naapurikuntien asukkaiden näkökulmasta.

Ohjelman organisaatio

Työ- ja elinkeinoministeriö on nimennyt KYT2010-tutkimusohjelmalle johtoryhmän, jonka puheenjohtaja ja varapuheenjohtaja ovat Säteilyturvakeskuksesta. Johtoryhmässä ovat edustettuina Säteilyturvakeskus, Työ- ja elinkeinoministeriö, Posiva Oy, Teollisuuden Voima Oyj, Fortum Power and Heat Oy ja Teknologian kehittämiskeskus. Johtoryhmä vastaa ohjelman strategisista linjauksista, tekee ministeriölle vuosittaisen suosituksen VYR-rahoituksesta ja valvoo tutkimusohjelman toteuttamista.

Tutkimusohjelmalla on tieteellis-teknisenä asiantuntijana tukiryhmä, joka valmistelee arvion hanke-ehdotuksista. Ryhmä myös arvioi ja tarvittaessa valmistelee palautteen toteutuneiden hankkeiden tuloksista. Tukiryhmän asema on vakiintunut toisen KYT-ohjelmakauden alkupuoliskolla ja ryhmää johtaa puheenjohtaja, jonka johtoryhmä on nimennyt Säteilyturvakeskuksesta.

Kehittämistoimet

Ministeriö toteutti vuonna 2007 KYT2010-tutkimusohjelman kansainvälisen arvioinnin ja kutsui tehtävään kolmihenken arviointiryhmän. Ryhmä totesi, että tutkimusohjelma on tasapainoinen, mutta tasapainon ylläpitäminen saattaa edellyttää vuorovaikutuksen laajentamista. Johtoryhmä käynnisti kehittämistoimet, joilla vahvistetaan tutkijoiden ja tulosten loppukäyttäjien vuorovaikutusta.

Ensisijainen toiminnan kehittämiskohde on kummitoiminta joka tukee vuorovaikutusta hankkeiden ja loppukäyttäjien välillä. Johtoryhmä laatii tutkimusohjelmalle kirjallisen toimintaohjeen, ja lisäksi selvittää keinoja ydinjätehuollon kansallisen tason koulutuksen järjestämiseksi sekä turvallisuusanalyysimenetelmiin erikoistuneen osaamiskeskuksen luomiseksi.

Kummitoimintaa on kehitetty tukemaan ja siirtämään nopeasti tietoa loppukäyttäjien käytettäväksi. Kullekin tutkimushankkeelle nimetään kummiryhmä suorittamaan tutkimusryhmän mentorointia sekä tieteellistä ohjausta ja valvontaa. Käytännössä kummitoimintaa toteutetaan vieraillemalla tutkimusryhmien luona. Vierailujen aikana keskustellaan vapaamuotoisesti kaikista KYT-tutkimukseen liittyvistä asioista. Tavoitteena on olla yhteydessä hankkeen tosiasiallisiin tutkijoihin ja kuulla heidän mielipiteitään, käsityksiään ja toiveita sekä tuoda esille loppukäyttäjien tarpeet ja toiveet hankkeiden sisältöön ja suuntaukseen liittyen. Tärkeää tukiryhmän ja kummitoiminnan osalta on se, että STUKin asiantuntijoiden lisäksi myös muiden toimijoiden kuten Posivan ja voimayhtiöiden asiantuntijat osallistuvat toimintaan. Näin pidetään yllä elävää ja laajapohjaista keskustelua, joka mahdollistaa tutkimusohjelman suhteellisen vaatimattoman resurssin kohdistamisen kansallisen ydinjätehuollon kannalta tehokkaasti. ■

FT Heikki Leinonen
Carrum Oy
heikki.leinonen@carrum.fi



Loppusijoituslaitoksesta koetaan uhkaa Eurajoella

Suomen ydinjätehuollossa valmistaudutaan käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen rakennuslupavaiheeseen. Myös laitoksen laajennusta koskeva päätöksentekoprosessi on vireillä. Vuonna 1999, ennen periaatepäätösvaihetta, lähes 60 % eurajokelaisista hyväksyi laitoksen sijoittamisen Olkiluotoon. Viime vuonna suoritettu kysely antaa viitteitä siitä, että varautuneisuus on lisääntynyt Eurajoella.

Teollisuuden Voiman (TVO) ja Fortum Power and Heatin (FPH) ydinvoimaloiden käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksesta vastaava Posiva on laajentamassa loppusijoituslaitosta.

Eduskunta on tähän mennessä hyväksynyt kaksi periaatepäätöstä (PAP), jotka kattavat yhteensä 6 500 tU. Neljän käytössä olevan ydinvoimalaitosyksikön osalta päätös tehtiin toukokuussa 2001 ja OL3-yksikön osalta toukokuussa 2002.

Posivan 1990-luvun lopulla toteuttama ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA) kattoi kaikkiaan 9 000 tU. Yhtiö jätti OL4-yksikön käytettyä polttoainetta (2 500 tU) koskevan PAP-hakemuksen valtioneuvostolle yhtä aikaa TVO:n hakemuksen kanssa huhtikuussa 2008.

Ja lisää on luvassa. Parhailaan Posiva on loppusuoralla YVA-menettelyssä, joka koskee FIN7- ydinvoimalaitosyksikön tuottamaa käytettyä ydinpolttoainetta (3 000 tU). Jos FPH jättää FIN7-hakemuksen valtioneuvostolle, niin samalla Posiva jättää jälleen uuden loppusijoituslaitoksen laajennusta koskevan hakemuksen.

Vielä suunnittelupöydällä oleva loppusijoituslaitos saattaa siten laajentua koskemaan yhteensä 12 000 tonnia käytettyä ydinpolttoainetta. Edellä mainittu määrä ei sisällä Fennovoiman suunnitteleman ydinvoimalaitosyksikön käytettyä polttoainetta.

Fennovoima esitti loppusijoituslaitoksen laajennuksen YVA-ohjelmasta antamassaan palautteessa, että Posivan laitoksen kapasiteetti tulisi nostaa 18 000 tU. Posiva on tyrmännyt ajatuksen yhteistyöstä. Loppusijoitusta koskevassa keskustelussa päällimmäisenä onkin ollut Posivan ja Fennovoiman välinen sanasota.

Varautuneisuus lisääntynyt Eurajoella

Loppusijoituslaitoksen laajennusta koskeva keskustelu on jäänyt hyvin laimeaksi, niin Eurajoella kuin laajemminkin. Pinnan alla näyttäisi kuitenkin olevan huolia ja loppusijoituslaitoksesta koettua uhkaa.

Posivan YVA-selostuksessa käsitellään suhtautumista loppusijoitukseen. Selostuksen tiedot perustuvat muun muassa Posivalle tehtyyn **Johanna Ahon** pro gradu-työhön ja siihen liittyvään kyselyyn. Gradun kysely toteutettiin syksyllä 2007. Aineisto koostuu vajaan kahden sadan eurajokelaisen vastauksista.

Posivan esittämiä tuloksia voidaan verrata Eurajoen ja sen naapurikunnissa tehtyyn asukaskyselyyn, jonka Jyväskylän yliopisto ja Tampereen yliopisto suorittivat osana Kansallista ydinjätetutkimusohjelmaa (www.ydinjatetutkimus.fi).

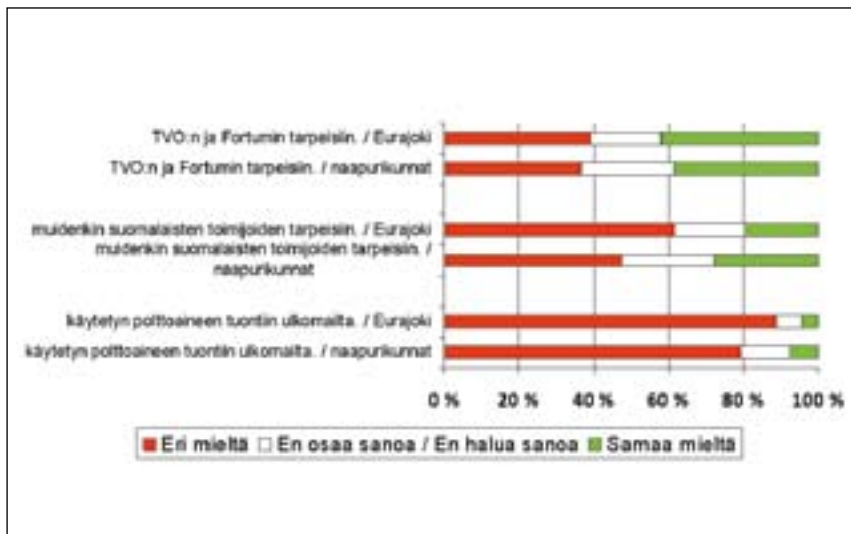
Kysely toteutettiin kesäkuussa 2008. Vastausprosentti oli 20 %. Vastajia oli yhteensä 606 henkilöä, joista 245 Eurajoelta.

Posivan YVA-selostuksen ja Ahon gradun mukaan noin 40 % eurajokelaisista suhtautuu myönteisesti käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitukseen. Neutraalisti suhtautuvia on 12 % ja kielteisesti suhtautuvia 35 %.

Muutos suhtautumisessa on ilmeinen, jos mielipiteitä vertaa tilanteeseen kymmenen vuotta sitten. Vuonna 1999 ennen loppusijoituslaitoksen PAP-hakemuksen jättämistä Posiva teetätti mielipidekyselyn eurajokelaisten suhtautumisesta asiaan. Tuolloin 59 % eurajokelaisista hyväksyi Suomessa tuotetun ydinjätteen loppusijoittamisen kuntaansa, mikäli tutkimukset ja viranomaisten turvallisuusarvio osoittaisivat oman kunnan turvalliseksi. 32 % ei hyväksynyt loppusijoitusta turvallisuusviitauksista huolimatta.

Yliopistojen tekemä kysely antaa vahvistusta käsitykselle, että varauksellisuus on lisääntynyt. Kyselyssä kävi ilmi, että loppusijoituslaitoksen laajentamista TVO:n ja Fortumin tarpeisiin kannattaa 42 % eurajokelaisista. Vastaan on 39 % kuntalaisista. Eurajoen naapurikunnissa mielipiteiden jakauma ei näyttäisi juurikaan eroavan Eurajoesta. Vastajia jotka eivät osanneet tai halunneet kertoa kantaansa oli tosin enemmän naapurikunnissa kuin Eurajoella (ks. kuva).

Laitoksen laajentaminen muiden suomalaisten toimijoiden tarpeisiin saa yllät-



Mielipiteiden jakaumat (%) Eurajoella ja sen naapurikunnissa kysyttäessä mielipidettä väittämiin "Hyväksyn loppusijoituslaitoksen laajentamisen ..."

Lähde: Jyväskylän yliopiston ja Tampereen yliopiston SEURA-kysely, kesäkuu 2008.

täen enemmän kannatusta ja vähemmän vastustusta Eurajoen naapurikunnissa. Sen sijaan Eurajoella yli 60 % kuntalaisista vastustaa laitoksen laajentamista muiden kuin Posivan omistajayhtiöiden tarpeisiin. Eurajoen kunnanvaltuuston myönteinen suhtautuminen on edellytys loppusijoituslaitoksen laajentamiselle. Valtuustolla on PAP-menettelyssä veto-oikeus.

Kyselystä käy myös ilmi, että loppusijoituslaitoksen laajentaminen ulkomailta tuotua käytettyä ydinpolttoainetta varten torjutaan hyvin selvästi. Eurajoella lähes 90 % vastaajista vastustaa laitoksen laajentamista ulkomailta tuotua ydinjätettä varten. Nykyinen ydinenergilaki kieltää ydinjätteen viennin ja tuonnin.

Uhan koetaan kohdistuvan erityisesti tuleviin sukupolviin

Suhtautumisesta Posivaan YVA-selostus antaa hyvin myönteisen kuva. Ahon gradun perusteella Posivan YVA-selostuksessa todetaan, että 56 % vastanneista koki saaneensa riittävästi informaatiota loppusijoitukseen liittyvistä asioista. Ja edelleen YVA-selostuksen mukaan 69 % piti Posivaa luotettavana asiantuntijaorganisaationa.

Yliopistojen kyselyn tulokset antavat osin toisenlaisen kuvan. Kaikista vastaajista 29 % arvioi, että heillä on riittävästi tietoa loppusijoituksesta. 40 % oli eri mieltä väittämästä "mielestäni minulla on riittä-

västi tietoa loppusijoitushankkeesta". 31 % suhtautui väittämään neutraalisti. Eniten lisätietoa kaivattiin ympäristö- ja terveysvaikutuksista.

Vaikka Eurajoen luvuissa näkyy vuosikymmeniä jatkuneen tiedotuksen tulos, niin silti sielläkin on selvä lisätiedontarve. Vastaajista 32 % oli sitä mieltä, että heillä on riittävästi tietoa. 34 % oli eri mieltä ja 34 % suhtautui oman tiedon riittävyyttä koskevaan väittämään neutraalisti.

Kyselyn mukaan loppusijoitushankkeen riskien arvioinnissa Posivaan luotti 36 % kaikista vastaajista. Epäluottamusta Posivaan riskien arvioinnissa koki yhtä moni, 36 %. Loput 28 % suhtautuivat neutraalisti. Eurajokelaisista Posivaan luotti 39 %. Samoin epäluottamusta koki 39 %.

Posivan YVA-selostuksen ja yliopistojen kyselyn luvut poikkeavat jossain määrin toisistaan. Erot voivat osin selittyä eroilla tiedonkeruumenetelmissä ja ajankohdassa, mutta epäilemättä luvut antavat aihetta myös tarkemmille jatkopohdinnolle.

Hälyyttävien tulosten kyselyssä oli se, että yli 50 % vastaajista koki vähintään selkeää uhkaa kohdistuvan loppusijoituslaitoksesta tulevien sukupolvien terveydelle, turvallisuudelle ja hyvinvoinnille. Uhkaa koki liki 80 % vastaajista, jos lukuun otetaan mukaan heidät, jotka kokivat vähintään lievää uhkaa. Posivan YVA-selostuksen mukaan 45 % eurajokelaisista pelkää ainakin

jossain määrin laitoksen sijoittumista kotikuntaansa.

Ihmetystä herättääkin se, että jos uhkaa todella kokevat näin monet, niin miksi paikallinen keskustelu on niin lamaantunutta? Jos selityksenä on asukkaiden "kuoreen vetäytyminen" ja turhautuminen vaikutusmahdollisuuksiin, niin mitkä ovat seuraukset, jos uhan kokeminen ja pelko patoutuvat?

Vaikka kyse on koetusta, subjektiivisesta uhkasta, niin luvut ovat niin korkeita, että loppusijoituslaitoksen rakennuslupavaiheeseen valmistautuvat ydinjätehuollon toimijat eivät voi jättää asiaa huomioimatta. Asukkaiden pelko haastaa alan toimijat pohtimaan sitä, miten loppusijoituksesta koettua uhkaa voidaan lieventää. ■

YTL Matti Kojo
politiikan tutkija
Tampereen yliopisto
Politiikan tutkimuksen laitos
matti.kojo@uta.fi

Lappeenrannassa kaikki Suomen laitokset samassa hallissa

Ydinreaktoreiden lämpö- ja virtaustekniikkaa on tutkittu kokeellisesti Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa (LUT) jo yli 30 vuoden ajan.

Laitoksen koelaitteistojen kirjo on laaja, sillä ne perustuvat jo olemassa ja rakenteilla oleviin laitoksiin sekä suunnitteluasteella oleviin laitosratkaisuihin. Erikoisuutena tälle kaikelle on, että koelaitteistot on rakennettu samaan laboratoriohalliin. Tutkimusta on tehty mm. CCFL-ilmiöstä, lämpötilan kerrostumisesta lauhdutusaltaassa ja lauhtumattomien kaasujen vaikutuksesta höyryn lauhtumiseen. Kaiken kaikkiaan eri koelaitteistoilla on tehty yli 700 koetta.

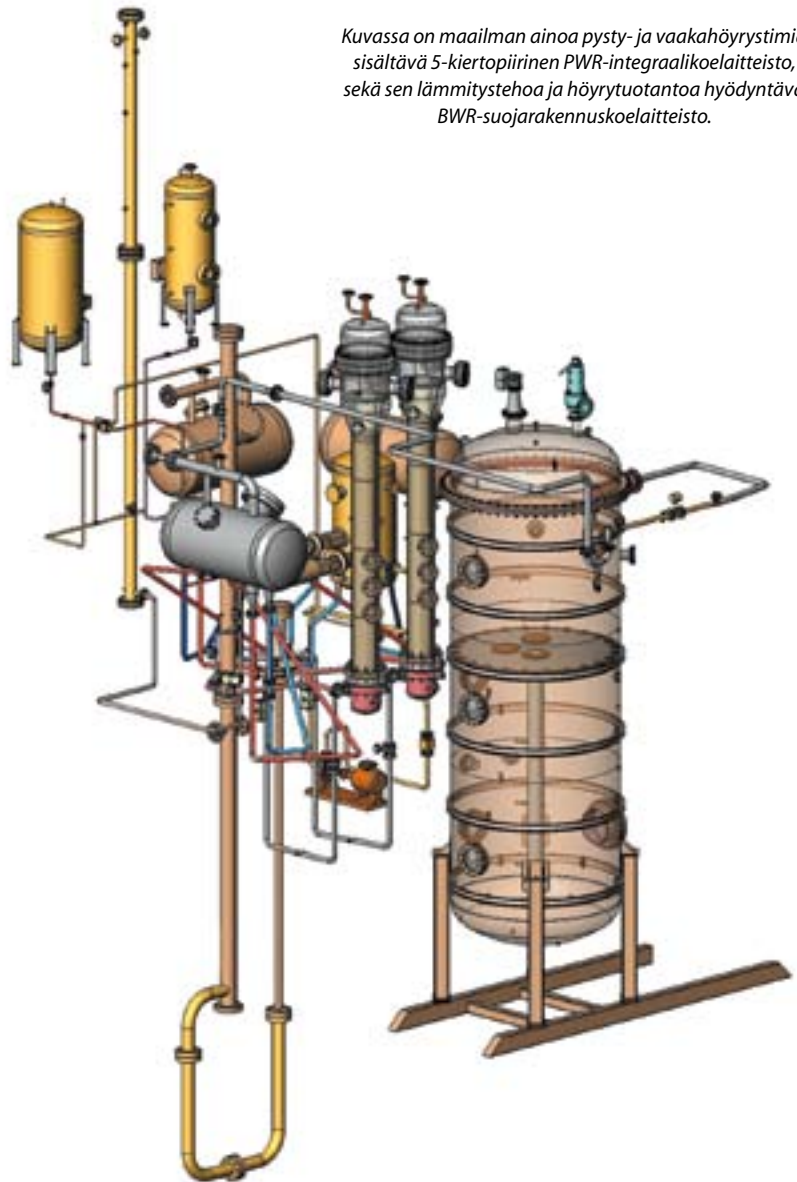
PACTEL (VVER PACTEL)

Vuonna 1990 valmistunut Parallel Channel Test Loop (PACTEL) -integraalikoelaitteisto on Lappeenrannan suurin koelaitteisto. PACTEL kuvaa VVER440-tyyppisen laitoksen primääripiiriä, referenssilaitoksena on Loviisan voimalaitos. Referenssilaitoksen kuutta vaakahöyryntintä mallinnetaan laitteistossa kolmella höyryntimellä kiertopiireineen. Tilavuus on skaalattu suhteessa 1:305 ja korkeus 1:1. Koelaitteisto on maailman suurin reaktoripiirejä simuloiva VVER-440-koelaitteisto. Laitteistolla on tehty vuosien varrella yli 200 erilaista koetta liittyen VVER-tyyppisten laitosten turvallisuustutkimukseen. Kokeita on tehty muun muassa luonnonkiertoon ja pieneen vuotoon liittyen. PACTEL-laitteistoa on hyödynnetty monissa muissakin yhteyksissä, kuten esimerkiksi lauhdutusallaskoekoiden höyryntuotannossa. Koelaitteiston muunneltavuutta on hyödynnetty esimerkiksi uusimman PWR PACTEL -koelaitteiston suunnittelussa ja toteutuksessa.

PWR PACTEL

Kevätalvella 2009 valmistunut PWR PACTEL -laitteisto on muokattu versio PACTEL-

Kuvassa on maailman ainoa pysty- ja vaakahöyryntimiä sisältävä 5-kiertopiirinen PWR-integraalikoelaitteisto, sekä sen lämmitystehoa ja höyryntuotantoa hyödyntävä BWR-suojarakennuskoelaitteisto.



laitteistosta. PWR PACTEL -laitteiston sydänosa ja paineistin ovat samat kuin PACTEL-laitteistossa. Täysin uutta PWR PACTEL -laitteistossa ovat siihen rakennetut kaksi kiertopiiriä ja pystyhöyryntintä, esi-

kuvanaan PWR/EPR-tyyppiset vastaavat komponentit. VVER PACTEL - ja PWR PACTEL -laitteistot ovat kuin "siamilaiset kaksoiset", käyttäen samoja sydän- ja paineistinosia mutta omia erillisiä kiertopiirejään. Tut-

kimusaiheesta riippuen sopivan laitteistokonstruktion käyttöönotto tai eristys hoidetaan kohtuullisen pienillä muutostöillä. Näin tämän uudemman laitteistokonstruktion käyttöönotto merkitsee laajempaa kirjoa koko PACTEL-laitteistopakettien sovelluskohteisiin samalla ylläpitäen alkuperäinen laitteistokonstruktio rinnalla tulevaisuuden tarpeisiin.

PWR PACTEL -projektin tarkoituksena on tutkia erityisesti PWR-tyyppisten pystyhöyrystimien toimintaa käyttö- ja häiriötilanteissa. Tutkimustoiminta projektissa on aloitettu karakterisoivien kokeiden sarjalla. PWR PACTEL -projektissa on järjestetty asiantuntijakoukkuja, joihin on osallistunut tutkijoita sekä Suomesta että ulkomailta. Viimeisin kokous järjestettiin Lappeenrannassa 21.4.2009.

PPOOLEX

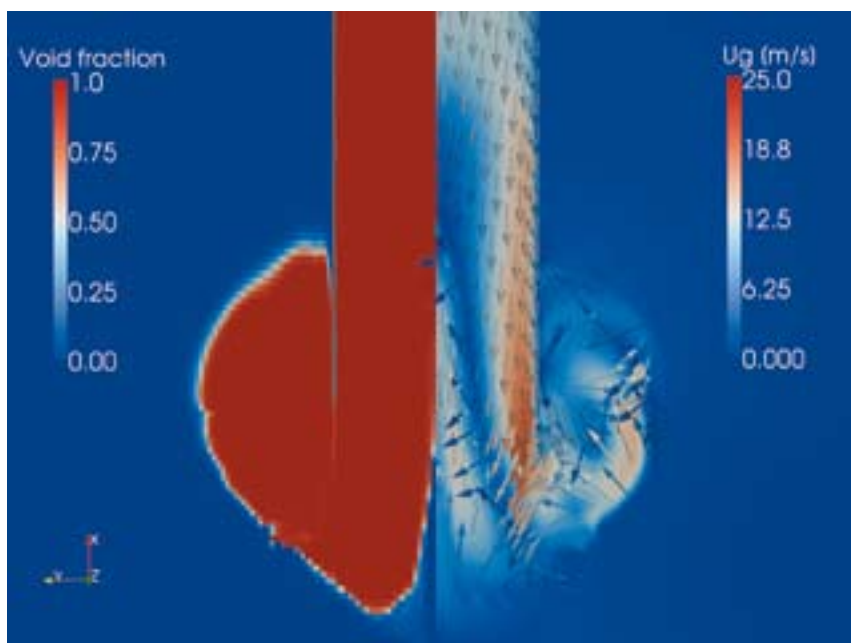
PPOOLEX -koelaitteistolla tutkitaan kiehumusvesilaitosten suojarakennusta. Laitteisto kuvaa lauhdutusallasta, jossa on mukana myös ylätila. Laitteiston sallittu maksimikokonaispaine on 5 bar. Altaaseen voidaan puhalttaa niin ilmaa kuin höyryäkin, joka tuotetaan VVER PACTEL:illa. Laitteistolla on tutkittu monia eri ilmiöitä, muun muassa suorakontaktilauhtumista, lämpötilakerrostumista altaassa, painevärähtelyjä ja neste-rakennevuorovaikutusta.

Erillisilmiötutkimusta

LUT:ssa on tehty myös paljon tutkimusta erilaisista erillisilmiöistä. Erilaisilla koelait-



Kuvassa olevalla SUPA-koelaitteistolla on tutkittu Loviisan voimalaitoksen suojarakennuksen lattiaaivojen eli sumppien imusuodattimien toimivuutta oletetussa suuressa jäähdytteenmenetysonnettomuudessa.



LUT:ssa on laskettu Neptune CFD-ohjelmistolla PPOOLEX-koelaitteiston kokeita. Kuvassa näkyy puhallusputken suulla paisuneen höyrykuplan tila ja höyryn nopeuskenttä kuplan romahtamisen alkaessa.

teistoilla on tutkittu muun muassa reaktoripainesäiliön ulkopuolista jäähdyttämistä, suodatinelementin toimintaa onnettomuustilanteessa sekä reaktoripainesäiliön ulkopuolelle levinneen sydänsulan jäähdyttämistä.

Tietokoneohjelmistojen käyttö tutkimuksessa

Laitteistoista saatuja koetuloksia on laajalti hyödynnetty systeemikoodien ja CFD-ohjelmistojen validoinnissa. Neste-rakennevuorovaikutusilmiöitä (FSI) on tutkittu lauhdutusallaskokeiden yhteydessä ja tuotettu kelpoistusdataa CFD- ja rakenneanalyysiohjelmien yhteiskäytölle. Systeemikoodeja käytetään myös apuna koesuunnittelussa. Lappeenrannassa on laajaa käyttökokemusta useista eri ohjelmistoista, kuten systeemikoodeista CATHARE, APROS, RELAP5, TRACE sekä CFD-koodeista Fluent, Neptune ja TransAT.

GENIV

LUT on myös mukana SusEn NETNUC -projektissa TKK:n ja VTT:n kanssa. Projektissa tutkitaan 4. sukupolven uusia reaktorityyppejä. Tutkimusta on tehty tähän mennessä vain tietokoneohjelmilla. Tutkimuksen

kohteena on ollut muun muassa kaasujäähdytteisten korkean lämpötilan kuula-kekoreaktoreiden jäähdytteen virtaus sydämessä.

Lopuksi

Lappeenrannassa suunnitellaan 2-faasi-ilmiöiden tutkimuksen laajentamista. Tämä saattaa tarkoittaa koelaitteistokapasiteetin kasvattamista esimerkiksi läpinäkyvällä laitteistolla tai tomografiamittauslaitteilla. Eikä siinä vielä kaikki, PACTEL-laitteiston käyttöparametrit ja sydänsulan rakenne mahdollistavat kiehumusvesilaitoksen tarkemman kokeellisen tutkimisen. Jonain päivänä Lappeenrannassa saatetaan siis nähdä myös BWR PACTEL...

Tekn. yo. Antti Rantakaulio
Lappeenrannan teknillinen yliopisto
antti.t.rantakaulio@lut.fi

DI Virpi Kouhia
Tutkija
Lappeenrannan teknillinen yliopisto
virpi.kouhia@lut.fi

Asiantuntijuuden kehittyminen ydinvoima-alalla

Asiantuntijuuden kehittyminen ydinvoima-alalla kestää vuosia. Sekä itse asiantuntijat että ydinvoima-alan organisaatiot hyötyvät menetelmistä tai käytännöistä, jotka jouduttavat asiantuntemuksen kehittymistä. Laaja ja pitkäaikainen työkokemus, ammatilliset verkostot sekä organisaation tuki luovat hyvät perusedellytykset asiantuntijuuden kehittymiselle.

Asiantuntemukseen perustuva tieto on monen yrityksen ja organisaation menestyksen perusta. Ydinvoima-ala on tästä erinomainen esimerkki. Turvallisen ydinvoiman tuottaminen vaatii monenlaista asiantuntemusta sekä yksilö- että organisaatiotasolla. Alalla on useita toimijoita, jotka kukin vastaavat omasta asiantuntemusalueestaan: viranomaiset valvovat ja luvittavat, voimayhtiöt tuottavat sähköä ja tutkimuslaitokset kouluttavat asiantuntijoita sekä kehittävät osaamista tutkimuksen kautta. Nämä asiantuntemusalueet kietoutuvat kuitenkin yhteen ja toimijoilla on siten myös yhteisiä tavoitteita, kuten turvallinen sähkön tuottaminen. Työterveyslaitoksen ja Teknillisen korkeakoulun työ- ja organisaatiotutkimuksen asiantuntijat ovat SAFIR2010-ohjelman rahoituksella tutkineet kuinka asiantuntijuus ja osaaminen kehittyvät kotimaisessa ydinvoimayhteisössä.

Asiantuntijuudelle on tyypillistä, että sen kehittyminen kestää vuosia. Asiantuntijaksi ei tulla suoraan koulun penkiltä, vaan asiantuntijuus, sen edellyttämä tieto, osaaminen ja ammattitaito, kertyvät vuosien kokemuksen ja harjoittelun myötä, toimimalla erilaisissa työtehtävissä ja tilanteissa. Tällainen ammatillisen kokemuksen kautta syntynyt tieto, niin sanottu hiljainen tieto, edellyttää monenlaisen tiedon soveltamis-

ta ja erilaisten tietosisältöjen yhdistämistä. Asiantuntijuus ydinvoima-alalla tarkoittaa siis paitsi syvällistä osaamista omalla erityisalueella, myös laajempaa toimintaympäristön ja sen eri rajapintojen tuntemusta. Osa ydinvoima-alan asiantuntemusta ovat myös sosiaaliset ja ammatilliset verkostot.

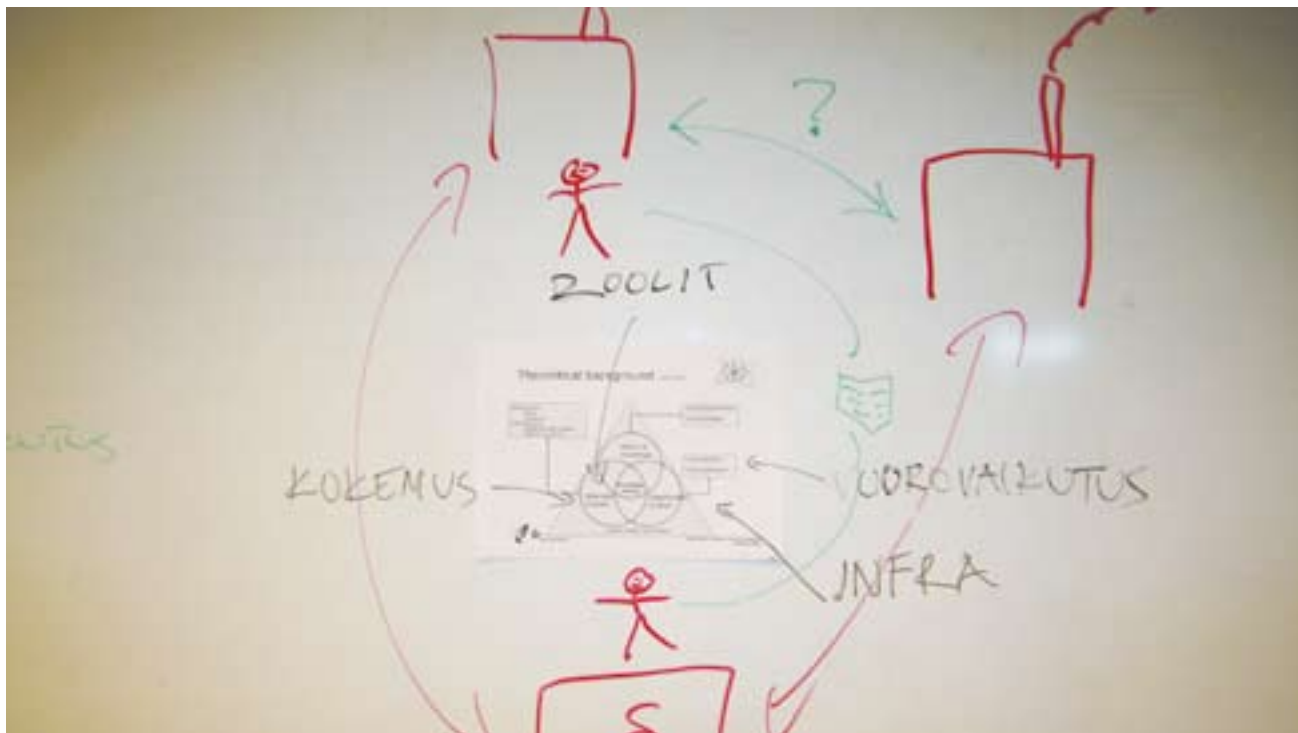
Asiantuntijuus kehittyy sosiaalisessa vuorovaikutuksessa

”Työ tekijäänsä opettaa” sanoo suomalainen sananlasku. Niinhän se on; asiantuntijuus kehittyy työtä tekemällä, työntekijän ja tekemisen kohteen vuorovaikutuksessa. Asiantuntijuuden kehittyminen vaatii kuitenkin myös ihmisten välistä vuorovaikutusta. Työntekijät kehittävät ja kasvattavat asiantuntemustaan toimiessaan muiden, saman ja eri alojen, asiantuntijoiden kanssa. Yhtenä asiantuntemuksen kehittymisen organisatorisena vaatimuksena onkin oppimisen ja kehittymisen infrastruktuurin luominen. Asiantuntijoille pitää luoda mahdollisuuksia asiantuntijuutensa kehittämiseksi. Haastavat ja mielenkiintoiset tehtävät sekä aktiivinen asiantuntijoiden verkosto tarjoavat näitä mahdollisuuksia. Erityisesti nuorille työntekijöille on tärkeää tarjota riittävästi opastusta työtehtävissä sekä mahdollisuuksia työskennellä muiden asiantuntijoiden kanssa. Nuoret työntekijät kaipaavat myös pitkän aikavälin kehitys- ja

urasuunnittelua, jotta he pystyisivät kehittämään omaa asiantuntemustaan suunnitelmallisesti ja tavoitteellisesti. Kun uudella työntekijällä on mahdollisuus tietoisesti perehtyä kokeneemman asiantuntijan osaamisalueeseen, paranee myös organisaation kyky hallita osaamisen häviämistä.

Organisaation tuki on tärkeää

Asiantuntijuuden kehittyminen on tärkeää sekä organisaatioiden että asiantuntijoiden itsensä kannalta. Organisaatiot eivät voi ylläpitää ja kehittää toimintaansa ellei työntekijöiden asiantuntemus kehity vastaamaan esimerkiksi toimintaympäristön muutosten myötä syntyneitä uusia osaamistarpeita. Työn mielekkyyden kannalta on tärkeää, että työntekijät, niin uudet kuin kokeneet konkaritkin, voivat kokea kehityvänsä työssään ja pystyvänsä hyödyntämään omaa osaamistaan. Vaikka työntekijöiden omalla motivaatiolla ja kyvykkyydellä on keskeinen vaikutus asiantuntijuuden kehittymisessä, voi organisaatio tukea tätä kehittymistä monella tavoin. Tällaisia menetelmiä ovat muun muassa systemaattiset työnopastuskäytännöt, riittävä perehdytys ja palaute, toimiva ja oikea-aikainen koulutus sekä mentorointi. Tärkeää on lisäksi kehittää yhteistyötä voimallisuuden eri yksiköiden ja osaamisalueiden välillä, samoin kuin yhteistyötä laajemmin



ydinvoimayhteisössä niin kansallisella kuin kansainväliselläkin tasolla.

Asiantuntijuuden kehittymisestä ovat vastuussa sekä asiantuntija itse että hänen organisaationsa. Asiantuntijan on itse oltava aktiivinen osaamisensa kehittämisessä. Toisaalta, organisaation tulee tarjota mahdollisuuksia ja olosuhteet tiedon ja osaamisen kehittämiseksi sekä sen jakamiselle asiantuntijoiden kesken. Ydinvoima-alalla työn ja toiminnan turvallisuuspainotteiset tekijät ovat keskeisiä. Näistä tuleekin organisaatioissa keskustella avoimesti.

Keskeistä on myös esimiesten toiminta. Heidän haastavana tehtävänä on tukea työryhmänsä osaamisen kehittämistä huomioimalla sekä yksittäisen työntekijän kehittämistarpeet että organisatoriset asiantuntemukseen liittyvät kehittämistarpeet.

Asiantuntijuuden kehittyminen vie aikaa; ydinvoima-asiantuntijat itse arvioivat syvällisen asiantuntemuksen kehittämisen vaativan vuosia. Ydinvoimaympäristö asettaa haasteita asiantuntemuksen omaksumiselle ja kehittämiselle.

Kaikkein opettavaisimmat tapahtumat, kuten käytön häiriöt tai vaaratilanteet, tulevat eteen (onneksi!) hyvin harvoin. Näin niistä ei pääse syntymään kokemusta kuin harvoille asiantuntijoille. Simulaattorikoulutus ja tapahtumien sekä niiden syiden kattava analyysi ja dokumentointi eri keinoin

ovat olleet pyrkimyksiä vastata tähän haasteeseen.

Suomalaisen ydinvoima-asiantuntijuuden tulevaisuuden haasteet

Suomalainen ydinvoima-ala joutuu tulevaisuudessa vastaamaan useaan osaamisen ja asiantuntemuksen ylläpitämisen ja kehittämisen haasteeseen. Ensinnäkin, suuri osa ydinvoima-alan asiantuntijoista on jäämässä eläkkeelle lähivuosina. Tällöin ydinvoima-alan organisaatiot ovat vaarassa menettää paljon kokemukseen perustuvaa asiantuntemusta. Toiseksi, OL3:n käyttöönotto ja mahdolliset uudet voimailaitokset lähitulevaisuudessa tarkoittavat että uusille asiantuntijoille on kovasti kysyntää. Läheinen yhteistyö esimerkiksi korkeakoulujen kanssa on välttämätöntä uusien asiantuntijoiden kouluttamiseksi. Kolmanneksi, ydinvoima-ala joutuu kilpailemaan muiden toimialojen kanssa uusista työntekijöistä ja osaavista asiantuntijoista. Pienenevien ikäluokkien Suomessa ydinvoima-alan on pystyttävä varmistamaan houkuttelevuutensa tulevaisuuden työpaikkana. Ja neljänneksi, ydinvoima-asiantuntijoiden työmarkkinat ovat kansainväliset, joten Suomessa toimivat organisaatiot joutuvat kilpailemaan tulevaisuuden osaajista muiden eurooppalaisten alan organi-

saatioiden kanssa. Hyvät käytännöt osaamisen kehittämisen tukemisessa tukevat tässä kilpailussa menestymistä.

Työterveyslaitoksen ja Teknillisen korkeakoulun SAFEX-tutkimusryhmä esitteli tutkimustuloksiaan SAFIR2010 puoliväliseminaarissa maaliskuussa 2009. Näitä tuloksia on saatavissa osoitteesta <http://virtual.vtt.fi/virtual/safir2010/>. SAFEX-hankkeen tulokset 2007-2010 julkaistaan hankkeen päättyessä 2010.

PsM Tanja Kuronen-Mattila
Tutkija
Teknillinen korkeakoulu
Informaatio- ja luonnontieteiden tiedekunta
Tuotantotalouden laitos
Tanja.Mattila@tkk.fi

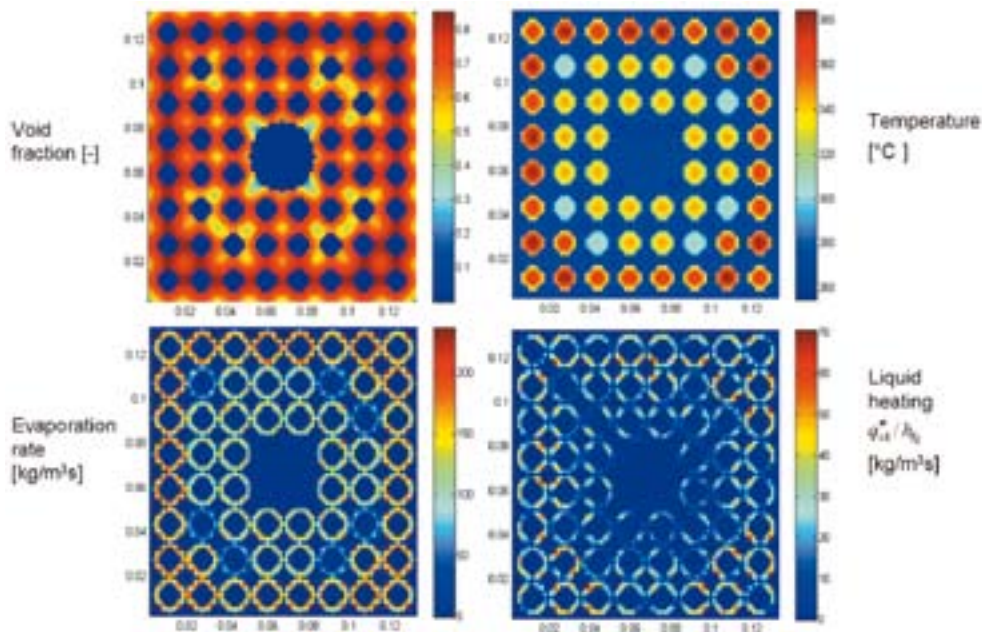
TkT Eerikki Mäki
opettava tutkija
Teknillinen korkeakoulu
Informaatio- ja luonnontieteiden tiedekunta
Tuotantotalouden laitos
Eerikki.Maki@tkk.fi

YTM Krista Pahkin
tutkija
Työterveyslaitos
krista.pahkin@ttl.fi

FT Anneli Leppänen
tiimipäällikkö, dosentti
Työterveyslaitos
anneli.leppanen@ttl.fi

TkT Eila Järvenpää
professori
Teknillinen korkeakoulu
Informaatio- ja luonnontieteiden tiedekunta
Tuotantotalouden laitos

PORFLO-porositeettimalli kaksifaasivirtauksen 3D-laskentaan



Esimerkki laskentatuloksista
BFBT-polttoainenipun ulostulossa.

VTT:n kehittämän porositeettimallin tavoitteena on yhdistää yksiulotteisten systeemikoodien nopeus ja kolmiulotteisten virtauslaskentaohjelmien tarkkuus veden ja höyryn kaksifaasivirtauksen mallintamisessa. Mallia sovelletaan muun muassa kiehtusvesireaktorin polttoainenipun virtaukseen ja eristyslauhduuttimen toimintaan.

Ydinvoimalaitosten termohydrauliikan eli jäähdytteen lämmönsiirto- ja virtauslaskennan alalla pyritään laskennallisesti selvittämään jäähdytteen virtauskenttään liittyviä virtausnopeuksia, paineita, entalpioita, lämpötiloja ja aukkosuuksia (höyryn tilavuusosuuksia koko fluiditilavuudesta) ajan ja paikan funktiona, kun tarvittavat alku- ja reunaehdot on annettu. Termohydrauliikka on keskeisessä osassa ydinvoimalaitosten turvallisuustutkimuksessa, mutta vuosikymmenten työn jälkeen epävarmuudet ovat yleisesti suurempia kuin toisen pääalueen, fissiotehon laskemiseen liittyvän neutroniikan puolella. Suurimpiin epävarmuuden aiheuttajiin

kuuluvat kaksifaasivirtauksen, ja erityisesti turbulenssin, vaikea perusluonne ja sen mallintaminen. Toisaalta laskentakapasiteetin kasvu on tuonut paljon edistystäkin, ja usein sama koodi voi toimia riittävän nopeasti niin tutkimus- kuin simulaattorisovelluksissakin.

Laskentakapasiteetti kasvaa

Kansainvälisesti tutkimuksen eturintama käy kohti eri mittakaavojen (laitossysteemi, komponentti, paikallinen ja mikrokaala, kuten yksittäiset kuplat) simuloinnin joustavaa yhdistämistä ja jopa koko ketjun kytkentää neutroniikkalaskentaan. PORFLO-ohjelman kehityksellä pyritään olemaan

mukana tässä ketjussa komponentti- ja paikallisen tason kohdalla siten, että kytkentä VTT:n omiin systeemitermohydrauliikka- ja neutroniikkakoodeihin olisi myös kohtalaisen helposti mahdollista.

Tietokoneiden kapasiteetin kasvu on johtanut viime aikoina CFD-tyyppisen laskennan voimakkaaseen kehitykseen varsinkin yksifaasisovelluksissa, mutta kasvavassa määrin myös useissa monifaasisovelluksissa. Varsinkin yksittäisten laitoskomponenttien kuvaamisessa on siirrytty perinteisistä yksiulotteisista systeemikoodeista enemmän kolmiulotteisen CFD-laskennan suuntaan. Tapahtuneesta kehityksestä ja kapasiteetin kasvusta huolimatta

tyypillinen CFD-tasoinen simulointi vie kuitenkin edelleen liian paljon aikaa ollakseen käyttökelpoinen työkalu suurta laskentatapausten määrää tai pitkää simuloitavaa aikaa vaativissa analyyseissä. Tämän lisäksi esim. suuria laitoskomponentteja, kuten reaktori ja höyrystin, simuloitaessa geometrian tarkka kuvaus on usein käytännössä mahdotonta.

Porositeettimallin perusteet

PORFLO on kolmiulotteinen, veden ja höyryn kaksifaasivirtausten mallintamiseen tarkoitettu laskentaohjelma, jonka kehittämisen, alkuaan hyvin yksinkertaisessa muodossa ja eräitä SMABRE-systeemikoodin perusajatuksia soveltaen, aloitti Jaakko Miettinen VTT:llä vuosituuhannen vaihteessa. Tarkoituksena oli kehittää laitoskomponenttien mallinnukseen ohjelma, jossa yhdistyisivät yksiulotteisten systeemikoodien (APROS, TRACE) nopeus ja kaupallisten CFD-koodien (Fluent, CFX) kyky mallintaa kaksifaasivirtauksia kolmiulotteisissa geometrioissa. Lähtökohdaksi otettiin porositeettimallinnus, jossa vastoin CFD-laskennassa yleisintä käytäntöä laskenta-alue jaetaan laskentakoppeihin rakenteen ja fluidin välisistä rajapinnoista piittaamatta. Fluidin tilavuusosuutta jokaisen laskentakopin kokonaistilavuudesta kuvataan porositeetilla: $\epsilon = V_{\text{fluid}} / V_{\text{cell}}$.

Porositeettimallinnuksesta saadaan mahdollisimman suuri hyöty, kun käytetään suorakulmaista karteesista laskentahilaa, mikä yksinkertaistaa säilymisyhtälöiden diskretointia ja mahdollistaa mm. limitetyn nopeushilan käytön. Suurimmat työajassa saavutettavat hyödyt puolestaan saadaan hilan generoinnissa, mikä on monissa CFD-sovelluksissa varsin aikaa vievää. Rakenteisiin soveltamisen sijasta lasketaan hilakoppien porositeetteja, lämpöpinta-aloja ja muita geometrisia suureita, mikä onnistuu numeerisesti verrattain vähäisellä ja triviaalilla ohjelmoinnilla, vaikka geometria olisi mutkikaskin.

Myös laskentakoppien kokonaismäärä voidaan usein valita vapaammin kuin CFD-laskennassa, koska laskentahilaa ei tarvit-

se sovitaa tarkasti myötäilemään rakenteen ja fluidin välisiä rajapintoja. Porositeettimallinnuksen hyödyllisyydestä kertoo myös porositeettimallien yleistymisen kaupallisissa CFD-koodeissa; mm. Fluentissa voi määrittää halutun osan laskenta-alueesta huokoiseksi väliaineeksi, jonka läpi kulkeva virtaus ratkaistaan porositeettimallin avulla. Näin joudutaan käytännössä väistämättä toimimaan esim. VVER-laitoksen vaakahöyrytimen sekundaaripuolen tapauksessa.

Porositeettimallinnuksen heikkouksiin puolestaan kuuluvat mm. turbulenssin ja seinämäkitkan kuvaaminen, kun ei varsinaisesti tiedetä, missä seinät ovat; hienostuneen seinämäkitkan sijaan joudutaan usein tyytymään yksinkertaisiin painehäviötermeihin ja turbulenssin syntymisen ja häviämisen arvioinnissa huokoisessa väliaineessa on omat vaikeutensa. Tätä aihepiiriä on viime vuosina tutkittu aktiivisesti erityyppisille väliaineen morfologioille mm. ranskalaisen CATHARE-3-koodin 3D-osan kehityksen yhteydessä. Näistä rajoituksista huolimatta porositeettimallilla saadaan monissa tapauksissa varsin käyttökelpoisia tuloksia, mutta mallien asettamat rajoitukset on otettava huomioon jo sovelluskohdetta valittaessa, kuten kaikessa mallinnuksessa yleensäkin.

Säilymisyhtälöt ja ratkaisualgoritmi

PORFLO:n ratkaisu perustui alkuaan yksinomaan 5-yhtälömalliin, jossa kirjoitetaan yhtälöt kummankin faasin massan ja energian säilymiselle, mutta vain yksi yhteinen yhtälö seoksen liikemäärän säilymiselle. Faasien välinen nopeusero määräytyy empiirisen korrelaation, ns. Zuber-Findlay drift-flux -mallin, mukaan. Nykyisin käytössä oleva ratkaisualgoritmi puolestaan perustuu alun perin kaksifaasilaskentaan tarkoitettuun SIMPLE-algoritmiin (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), jossa säilymisyhtälöt ratkaistaan erotetusti (peräjälkeen) ja paine- ja nopeuskentät kytketään toisiinsa erityisten painekorjausyhtälöiden avulla. Alkuperäis-

tä SIMPLE-algoritmia on muokattu, jotta se soveltuisi kaksifaasilaskentaan, mm. lisäällä faasinmuutoksista johtuvat tilavuudenmuutostermi tarvittaviin yhtälöihin, ja muuttamalla painekorjausyhtälöryhmä tilavuuden säilymiseen pohjautuvaksi alkuperäisen massan säilymisen sijaan. SIMPLE-algoritmi on iteratiivinen ratkaisumenetelmä, jossa konvergoituneen ratkaisun saavuttamiseksi tarvitaan useita iteraatio-kerroksia, sekä ratkaistavien yhtälöryhmien epälineaarisuudesta että peräkkäisestä erotetusta ratkaisusta johtuen.

Nykyään PORFLO:ssa on valittavissa myös 6-yhtälömalliin perustuva ratkaisumenetelmä, jossa sekä massan, liikemäärän että energian säilymisyhtälöt kirjoitetaan kummallekin faasille. Ratkaisualgoritmi perustuu myös tässä tapauksessa alkuperäisen SIMPLE-algoritmin muunnelmaan (Phase-Coupled SIMPLE), joka on käytössä myös mm. Fluentin Euler-Euler -mallissa. Erona edellä esitettyyn 5-yhtälömalliin kanssa käytettävään ratkaisualgoritmiin on ratkaistavien liikemääräyhtälöiden määrä ja painekorjausyhtälöt, jotka sisältävät sekä höyryn että veden liikemäärän muutoksista johtuvia termejä.

PORFLO:n sovellukset

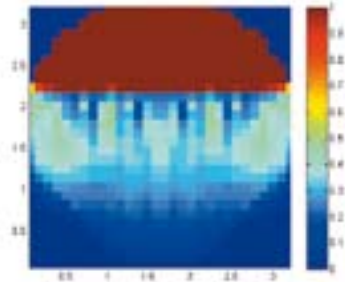
PORFLOlla on sen historian aikana pyritty mallintamaan mm. vakavan onnettomuuden seurauksena syntyvän sydänsulasta muodostuvan partikkelikehon jäädyttävyyttä, kiehutusvesireaktorin ns. eristyslauhduttimen toimintaa, sekä viime aikoina erityisesti kiehutusvesireaktorin polttoainepun virtausta ja painevesilaitoksen vaakahöyrytimen sekundaaripuolen virtausta. Kiinnostava tuleva sovellus on kokonaisen avonaisen reaktorisydämen virtaussimulointi.

Kiehutuslaitoksen puolella on pyritty laskemaan kansainvälisen, OECD:n ja NRC:n hallinnoiman benchmark-harjoituksen BFBT (BWR Full-size Fine-mesh Bundle Tests) tehtäviä, joissa kysytään mm. nipun yläpäässä vallitsevaa aukko-osuusjakamaa, kun geometria, tehojakauma ja sisään tulevan veden ominaisuudet on annettu.

Japanilainen NUPEC on aikoinaan mitannut jakaumaa tomografialaitteistolla, joten kohtuullinen mittausdata tulosten vertaillemiseksi on olemassa. Yleisesti vaikuttaa siltä, että BFBT:n osallistujat eivät päässeet kovin lähelle mitattua tulosta; monet tulokset ovat kuitenkin parempia kuin PORFLO:lla tähän mennessä saavutetut. Tilanne ei kuitenkaan lannista mallin kehitystä, koska monet asiaan vaikuttavat kehityskohteet ovat hyvin tiedossa, ja toteutus on vain ajan kysymys.

Liiketyhtälöihin vaikuttavista voimatermeistä seinämäkitka, faasien välinen kitka ja lift-voima vaativat vielä kehittämistä. Turbulenssimallia tarvitaan, jotta virtauksen efektiivinen viskositeetti, aukko-osuuden ja lämpötilan tasoittuminen ja lämmönsiirron suuruus yleensäkin saadaan kohdalleen. Lämmönsiirto- ja faasinmuutosilmiöistä on tietyllä perustasolla toteutettu seinämälämmönsiirto, faasien välinen lämmönsiirto ja johtuminen rakenteen sisällä, mutta jopa säteily voi tulla tarpeelliseksi, kunhan CHF-olosuhteet (kriittinen lämpövuoto) ylitetään. Faasien jakaumasta ei tällä hetkellä tehdä mitään oletuksia, vaan tiedossa on vain koppikohtainen veden ja höyryn määrä, mutta jatkossa on mahdollista, että virtausmoodia aletaan systemaattisemmin tunnistamaan sekä mahdollisesti laskemaan vesipisaroihin ja höyrökuplia erillään vastaavista jatkuvista faaseista. Silti lähestymistapa pyritään pitämään niin mekanistisena kuin mahdollista, kuten tähänkin asti: ei oleteta jotain tapahtuvaksi, vaan annetaan menettelyn itse kertoa, mitä laskenta-alueessa tapahtuu.

Tällä hetkellä PORFLO-ohjelmassa on noin 50000 riviä Fortran-koodia (f77, f90). Kehitystyötä on tehty pääasiassa SAFIR2010-tutkimusohjelmaan kuuluvasa TRICOT-projektissa. Vuoden 2009 päätavoitteisiin kuuluvat mm. höyryn ja veden liiketyhtälöiden erilaisten voimatermien tarkentaminen, ratkaisijan stabiiliuden ja nopeuden parantaminen edelleen, turbulenssimallin kehitys sekä tietotekniikkatasolla rinnakkaislaskennan ja visualisoinnin kehittäminen.



Laskettu aukko-osuus Loviisan höyrytimen poikkileikkauksessa.

DI Ville Hovi
Tutkija
VTT
ville.hovi@vtt.fi



TkL Mikko Ilvonen
Erikoistutkija
VTT
mikko.ilvonen@vtt.fi



Epävarmuusanalyysityökalun kehittäminen APROS-turvallisuusanalyysiympäristöön

Ydinvoimalaitoksen turvallisuus ja sen eri turvajärjestelmien toimivuus tulee osoittaa sekä kokeellisin että laskennallisin menetelmin. Deterministisessä turvallisuusanalyysissä voimalaitoksen käyttäytymistä mallinnetaan jonkin oletetun alkutapahtuman, esimerkiksi primääripiirissä tapahtuvan putkirikon jälkeen. Analyysillä tulee osoittaa, että todennäköisyys viranomaisen eri laitosparametreille asettamien rajojen ylittymiselle on riittävän pieni.

Johtuen muun muassa laskentakapasiteetin ja tiedon rajallisuudesta analyysiohjelmien antamat tulokset eivät ole koskaan täysin todellisuutta vastaavia. Tämä analyysiin liittyvä epävarmuus on perinteisesti huomioitu tekemällä alku- ja reunaehtoihin kohdistuvia konservatiivisia oletuksia, joilla pyritään saamaan aikaan todellisuutta pessimistisempiä laskentatuloksia. Kriteerien täytyessä tällaisessa konservatiivisessa analyysissä niiden voidaan perustellusti olettaa täyttyvän myös todellisuudessa.

Monimutkaisissa turvallisuusanalyysissä konservatiivisten oletusten tekeminen vaatii huomattavaa asiantuntemusta. Eräs tapa vähentää riippuvuutta asiantuntijoiden arvioista on soveltaa niin sanottua BEPU-lähestymistapaa (Best-Estimate Plus Uncertainty), jossa konservatiivisten oletusten sijaan sovelletaan jotain systemaattista tilastollisiin menetelmiin perustuvaa epävarmuusanalyysimenetelmää. Epävarmuusanalyysissä tulosparametreille saadaan yhden konservatiivisen arvion sijaan epävarmuutta kuvaava tilastollinen luottamusväli, toisin sanoen ylä- ja alaraja. Tällaista realistisempaa lähestymistapaa on tutkittu laajasti eri puolilla maailmaa ja sovellettu jo muutamissa maissa perinteisen konservatiivisen tavan rinnalla.

Fortum Nuclear Services Oy:lle tehdyssä diplomityössä tarkasteltiin systemaattisen epävarmuusanalyysin soveltuvuutta APROS:n simulointiympäristöön. Kattavan kirjallisuuskatsauksen jälkeen päätettiin soveltaa Saksan GRS:llä kehitettyä epävarmuusanalyysimenetelmää. Siinä käyttäjä valitsee analyysitapauksen epävarmuuden kannalta merkittävimmät syöteparametrit sekä määrittää näiden epävarmuutta kuvaavat vaihteluvälit ja subjektiiviset todennäköisyysjakaumat. Nämä niin sanotut epävarmuusparametrit ovat tavallisesti alku- ja reunaehtoja sekä erilaisia malliparametreja. Termiä subjektiivinen käytetään siksi, että parametrien karakterisointi perustuu käytettävissä olevan kokeellisen datan ja kirjallisuuden lisäksi myös asiantuntijoiden subjektiivisiin näkemyksiin.

Varioimalla epävarmuusparametreja samanaikaisesti ja satunnaisesti niille määritettyjen rajojen ja jakaumien puitteissa sekä ajamalla analyysimallia näin saaduilla parametriyhdistelmillä saadaan tarkasteltaville tulosparametreille tilastolliset luottamusvälit. Tarvittavien ajojen määrä määräytyy vaadituista tilastollisista luottamustasoista: tavanomaisilla 95 % tasoilla tarvitaan noin 100 ajoa. Tulosparametrien käyttäytyessä satunnaismuuttujan tavoin varioitavien epävarmuusparametrien määrän lisääminen ei sitä vastoin kasvata ajojen määrää, mikä onkin eräs menetelmän suurimmista vahvuuksista.

Ajojen määrän kasvaessa menetelmän soveltaminen oli automatisoitava. Yhteistyössä VTT:n kanssa kehitettiin testausohjelma Testing Stationiin perustuva analyysityökalu, joka arpoo epävarmuusparametreille arvot ohjelmaan syötetyistä rajoista ja jakaumista sekä ajaa APROS-mallia näin saaduilla parametriyhdistelmillä. Lisäksi työkalun sisältämien herkkyysanalyysitoimintojen avulla käyttäjä voi vertailla eri epävarmuusparametrien vaikutuksia tulosparametrien epävarmuuteen.

Kehitettyä analyysityökalua testattiin Loviisan voimalaitokselle suoritettussa LOCA-analyysissä (Loss Of Coolant Accident), jossa varioitiin kahtatoista asiantuntijoiden avustuksella valittua ja karakterisoitua epävarmuusparametria. Analyysissä saadut kokemukset olivat rohkaisevia. Epävarmuusanalyysimenetelmän soveltaminen oli suhteellisen suoraviivaista ja analyysityökalun käyttö vähensi huomattavasti vaadittua työmäärää. Kokemusten perusteella jatkossa tulisi keskittyä etenkin parametrien valinta- ja karakterisointiprosessin kehittämiseen. Tämän analyysin lopputuloksen kannalta merkittävimmän vaiheen tulisi mahdollisimman pitkälle perustua kokeellisen datan ja erilaisten dokumentointien systemaattiseen hyödyntämiseen, jotta riippuvuus asiantuntijoiden subjektiivisista arvioista olisi mahdollisimman vähäinen.

Opinnäyte hyväksytty Teknillisessä korkeakoulussa.

DI Lauri Peltokorpi
Suunnitteluinsinööri
Fortum Nuclear Services Oy
Turvallisuusosasto
lauri.peltokorpi@fortum.com



Lauhtumattomien kaasujen laskennan kehittäminen APROS-koodiin

Diplomityöni lähtökohtana oli laajentaa ydinvoimalaitosten turvallisuusanalyysiin käytettävän APROS-koodin lauhtumattomien kaasujen virtauslaskentaa. Päätaavoitteena oli, että työn jälkeen APROS pystyisi mallintamaan lauhtumattoman kaasun ja veden muodostaman kaksifaasivirtauksen siten, että osa lauhtumattomasta kaasusta voi kulkeutua myös liuenneessa muodossa nestemäisen veden mukana. Aivan uudesta asiasta APROS:in suhteen ei ollut kysymys, sillä vesihöyryn ja lauhtumattoman kaasun seoksen virtauksen simulointi on ollut jo aiemmin mahdollista. Suurimpana haasteena oli lähinnä lisätä veteen liunneen kaasun kulkeutumisen mallinnus ottaen huomioon kaasun liukenemis- ja vapautumisilmiöt.

Laskentamallin perusteet

Typillisimmät ydinvoimasovelluksissa tavattavat lauhtumattomat kaasut ovat typpi, happi ja vety. Niiden erityisenä ominaisuutena on se, että ne liukenevat pieninä määrinä nesteisiin, kuten veteen. Henryn lain mukaan liunneen kaasun massaosuus nesteessä tasapainotilassa on suoraan verrannollinen kaasun osapaineeseen kaasufaasissa nesteen lämpötilasta riippuvalla verrannollisuuskertoimella. Kirjallisuudesta on löydettävissä Henryn vakiot useille eri kaasuille eri nesteissä laajoilla lämpötila-alueilla.

Dynaamisten vapautumis- ja liukenemisilmiöiden mallintamiseksi mallissa oletetaan, että vapautumiseen tai liukenemiseen liittyvä kaasuvirta faasien välillä on suoraan verrannollinen hetkelliseen liunneen kaasun konsentraatioon ja Henryn laista lasketun maksimikonsentraation erotukseen olosuhteista riippuvalla verrannollisuuskertoimella. Lauhtumattomien kaasujen kulkeutumisen mallinnus laskentanoodien välillä perustuu oletukseen, että kaasumaisen/liunneen lauhtumattoman kaasun nopeus on sama vesihöyryn/veden kanssa vastaavassa järjestyksessä.

Mallin sovelluskohteet PWR-laitoksissa

Ydinvoimalaitoksiin liittyvissä turvallisuusanalyysissä ollaan erityisen kiinnostuneita typen liukoisuudesta, koska sitä käytetään painekaasuna erilaisissa säiliöissä. Esimerkkinä voidaan mainita Loviisan ydinvoimalaitoksen neljä hätäiläisvesiakkua. Ne ovat tilavuudeltaan 70 m³ säiliöitä, joissa on 45 m³ boorihappoa sisältävää vettä ja veden yläpuolella 25 m³ 35 barin paineeseen paineistettua typpikaasua. Henryn lain ja ideaalikaasuoletuksen avulla voi-

daan laskea, että kaasumaista typpeä on tasapainossa 608 kg ja vedessä liunneena noin 21 kg. Typpi on ongelmallinen kaasu primääripiiriin jäädytyksen kannalta, koska se voi kerääntyä suurina kaasutilavuuksina esimerkiksi paineastian tai höyrystintputkien yläosaan tukkien jäädytyskierron. Tämän takia jäädytteenmenetyssonnettomuudessa akun vedenpinnan laskiessa tietyn rajan alle akku pyritään aina eristämään, jotta estetään akkuveden yläpuolella olevan typpikaasun pääsy primääripiiriin.

Akkuihin liittyvissä turvallisuusanalyysissä on otettava huomioon, että osa tuestä joutuu primääripiiriin liuenneessa muodossa akkuinjektioon aikana. Mahdollisen ongelman muodostavat pienemmät primääripiiriin vuodot, joissa tilanteen hallitsemiseksi primääripiiriin painetta ja lämpötilaa joudutaan laskemaan hyvin hitaasti monien tuntien aikana. Tällöin primääripiirissä pidempään kiertävä typpikonsentroitunut vesi voi saavuttaa saturaatioolosuhteet, joka johtaa kaasun vapautumiseen ja mahdollisesti suurien kaasutaskujen muodostumiseen.

Mallin soveltaminen Loviisassa

Mallin varsinaisena sovellusanalyysinä laskettiin höyrystimen kollektorin murtumasta johtuva primääri-sekundääri-juoto auki juuttuneella sekundääripuolen varoventtiilillä. Kyseessä on siis suora jäädytvejuoto primääripiiristä sekundääripiiriin kautta ympäristöön, jonka lopettamiseksi primääripiiriin paine pitää laskea 2 barin tasolle. Simuloinnin aikana yhden vesiakun annettiin injektoida typpikonsentroituneen vetensä primääripiiriin.

Simuloinnin aikana seurattiin primääripiirissä olevaa typen kokonaismäärää sekä paikallisia typpikonsentraatioita. Lisäksi seurattiin primääripiiriin laskentanoodien Henryn laista laskettua minimisaturaatiokonsentraatiota. Tärkeänä tuloksena oli, että paikalliset liunneen typen konsentraatiot pysyvät selvästi saturaatiokonsentraatioiden alapuolella, jolloin typen vapautumista ei esiintynyt. Simuloinneista saatiin myös paljon muutakin hyödyllistä tietoa mm. akkujen käyttäytymisestä tyhjenemisen aikana.

Opinnäyte hyväksytty Teknillisessä korkeakoulussa.

DI Esa Ahtinen
Fortum Nuclear Services Oyj
Suunnitteluinsinööri
Turvallisuussuunnittelu
esa.ahtinen@fortum.com

Tapahtumien tutkinnan systematisointi Loviisan voimalaitoksella

Työn lähtökohtana oli yhtenäistää Loviisan voimalaitoksen tapahtumien tutkintaa. Työssä esitettiin Loviisan voimalaitoksella nykyisin käytössä olevia menetelmiä ja tutustuttiin uusiin menetelmiin. Näiden pohjalta kehitettiin uusi järjestelmällinen tapa erilaisten tapahtumien tutkintaan. Työn tavoitteena oli kehittää menettely, jolla saada tutkintatuloksina yhtäläistä tietoa, jota olisi helppo verrata keskenään ja havaittaisiin yhteiset tekijät erilaisista tapahtumista.

Tarkoituksena oli kehittää tutkimusta myös siten, että perustutkimus antaa hyvän ja helposti syvennettävän pohjan jatkotutkimuksille. Näin enemmän aikaa ja resursseja vaativia tutkimuksia tehtäisiin vain tapahtumista, joiden tutkimisesta on todellista hyötyä. Tällöin tutkinnat menisivät syvemmälle tapahtumaan johtaneisiin syihin ja löydettäisiin syiden joukosta varmemmin perussyyt.

Työssä panostettiin alimman tason tapahtumien ja läheltä piti -tapahtumien tutkinnan kehittämiseen. Korkeamman tason tapahtumilta voidaan välttyä tutkimala perusteellisesti matalan tason tapahtumat ja löytämällä niihin oikein määritetyt toimenpiteet sekä toteuttamalla ne oikeaan aikaan.

Matalan tason tapahtumien tutkintaan kehitettiin luokittelukaavio, jolla saadaan helposti selville tapahtumien ongelma-alueet. Jokaiseen kysymykseen vastataan kyllä tai ei. Mikäli tapahtuma poikkeaa oletetusta tapahtuman kulusta, on kysymyksen jälkeen luokiteltu, mihin osa-alueeseen korjaavissa ja ehkäisevissä toimenpiteissä pitäisi kiinnittää huomiota.

Luokittelukaavio on kehitetty tapahtumiin, joissa on jossain vaiheessa tapahtunut inhimillinen virhe. Inhimilliset virheet ovat hyvin yleisiä ja melkein jokaisesta tapahtumasta löytyy inhimillinen virhe. Luokittelukaavio mahdollistaa myös tapahtumien laaja-alaisen luokittelun, ja trendien seurannan kautta voidaan havaita eri tapahtumien kautta esiin tulleita yhteisiä ongelma-alueita.

Tapahtumien tutkintaan liittyy myös tapahtumien riskiarviointi. Tässä diplomityössä on esitetty matriisi, jota suositellaan käytettäväksi tapahtuman vakavuuden ja jatkoselvitystarpeen arvioinnin apuna. Matriisissa on huomioitu ydin-, säteily-, ympäristö- ja työturvallisuus sekä tuotannonmenetykset. Osa-alueet on valittu siten, että ne antavat laaja-alaisen kuvan tapahtumasta. Matriisi auttaa myös ymmärtämään, kuinka vakava tapahtuma olisi voinut olla,

jos vielä jokin muu asia ei olisi mennyt suunnitelmien mukaisesti.

Työssä käytiin läpi myös tapahtuman tutkinnan tuloksena tulleiden toimenpiteiden priorisointi. Toimenpiteiden priorisoinnin tarkoituksena on auttaa hahmottamaan toimenpiteiden toteutusjärjestystä. Jos toimenpiteitä ei priorisoida, on hankalaa hahmottaa mikä niistä on tärkein. Tämä voi johtaa siihen, että merkittävä toimenpide, jolla ehkäistään tapahtuman toistuminen tai syntyminen, jää tekemättä, koska resursseja on käytetty merkitykseltään vähäisemmille toimenpiteille. Työssä esiteltiin matriisi, joka on yksi malli toimenpiteiden priorisoimiseksi. Matriisissa on kuvattu pystyakselilla tapahtuman toimenpiteiden tärkeyttä ja vaakakselilla toimenpiteiden kiireellisyttä.

Työssä käytiin myös läpi perussyyanalysimenetelmiä. Loviisan voimalaitoksella käytössä oleva HPES-menetelmä on raskas, mutta kuitenkin hyvä ja toimiva. Laitoksella uutena menetelmänä tämän diplomityön tekijä tutustui AcciMap-menetelmään. Tämä menetelmä pyrkii tunnistamaan toimijat tapahtuman taustalla. Menetelmä on selkeä ja helppokäyttöinen, mutta ei tunnista syiden joukosta perussyitä.

Työn tuloksena Loviisan voimalaitoksella otettiin käyttöön luokittelukaavio, jonka avulla vuoden 2008 tapahtumat analysointiin ja havaittiin eri raporttien taustalla olevat yhteiset tekijät. Toimenpiteiden priorisointia ja riskimatriisin käyttöä tapahtumien tutkinnassa suositeltiin. Perussyyanalysimenetelmistä AcciMap-menetelmää suositellaan käytettäväksi seuraavan inhimilliseen toimintaan liittyvän perussyyanalysin yhteydessä. ■

Opinnäyte hyväksytty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa.

Taija Solja
Turvallisuusinsinööri
Fortum Generation
Loviisan voimalaitos
taija.solja@fortum.com



Matala-aktiivisen metallijätteen aktiivisuusmittaukset Loviisan voimalaitoksella

Loviisan voimalaitoksen valvonta-alueella metallijätettä tuotetaan keskimäärin 25 000 kg vuodessa. Suurin osa tästä on niin matala-aktiivista, ettei sen käsittely ydinjätteenä ole optimointiperiaatteen mukaan perusteltua. Tällainen metallijäte voidaan vapauttaa valvonnasta ja kierrättää tavanomaisen metallijätteen tapaan, kun sen aktiivisuuden on todennettu alittavan viranomaisen asettamat rajat. Myös metallijätettä vastaanottavalla käsittelylaitoksella mitataan jätteen radioaktiivisuutta. Käsittelylaitoksella ei sovelleta viranomaisen asettamia raja-arvoja, vaan toimenpideraja on mittausherkeyden mukainen.

Diplomityön lähtökohtana oli metallijätteen mittausten menetelmien kehittäminen Loviisan voimalaitoksella. Työn taustalla oli myös Säteilyturvakeskuksen antaman ohjeen YVL 8.2 ”Ydinjätteiden ja käytöstä poistettujen ydinlaitosten vapauttaminen valvonnasta” uusinta. Diplomityön tavoitteena oli tuottaa tietoa, jonka perusteella voidaan valita menetelmä, jolla metallijätettä voidaan mitata luotettavasti ja vapauttaa valvonnasta täyttäen sekä YVL 8.2 -ohjeen että jätteen vastaanottajan vaatimukset.

Diplomityössä verrattiin eri mittausten menetelmien havaitsemia aktiivisuuksia metallijätteessä testikappaleiden avulla. Verrattavia mittauksia olivat suora kontaminaatiomittaus, mittaus Canberran Condor E -monitorilla, gammaspektrometrinen mittaus sekä kuiva-, märkä- ja happopyyhintänäytteet. Testikappaleet mitattiin myös ajoneuvojen säteilymittauslaitteistolla. Mitatut testikappaleet valittiin Loviisan voimalaitoksen valvonta-alueella saatavilla olevista metallijätteistä. Kappaleet olivat materiaaliltaan ruostumatonta terästä sekä rautaa, kuten suurin osa voimalaitoksella syntyvästä metallijätteestä.

Suorassa kontaminaatiomittauksessa detektori viedään mitattavan pinnan päälle ja mitataan pinnalta detektoriin kohdistuvan säteilyn määrä. Tässä diplomityössä testikappaleet mitattiin kahdella tukeilmaisimella varustetulla kontaminaatiomittalaitteella; beetasäteilyä havaitsevala Electralla ja gammaherkällä TSA-PRM470CG-mittarilla. Myös Condor E -monitori mittaa kokonaisgamma-aktiivisuutta muovituikeanturilla.

Gammaspektrometrisessä mittauksessa mitataan näytteen gammaspektri monikanava-analysaattorilla ja analysoidaan mitattu spektri. Gammaspektrometriset mittaukset suoritettiin Loviisan voimalaitoksen tynnyrinmittauslaitteistolla.

Pyyhintänäytteessä kappaleen pintaa pyyhitään huokoisesta materiaalista valmistetulla pyyhintänäytelapulla, joka analysoidaan. Kuivapyyhintänäytteenotossa pinnasta otettiin pyyhintänäyte puuvillaisella näytelapulla. Märkäpyyhintänäytteenotossa pyyhintänäyte otettiin liuotainneella kostutetulla näytelapulla. Pyyhintänäytteet analysoitiin Loviisan voimalaitoksen radiokemian laboratorion gammaspektrometrillä. Märkäpyyhintänäyte analysoitiin lisäksi Nutronic NT200 -pyyhintänäytteenalysaattorilla.

Loviisan voimalaitoksella käytössä oleva Thermo Electron 8000 -ajoneuvojen säteilymittauslaitteisto (ASMI) koostuu kahdesta ajokaistan molemmin puolin sijoitetusta muovituikekäteellä varustetusta gammadetektorista. ASMI:a käytetään Loviisan voimalaitoksella varmentavana mittausten menetelmänä, eikä yksin sen perusteella voida vapauttaa materiaalia valvonnasta.

Tulokset saatettiin vertailukelpoiseen muotoon laskeamalla eri mittausten menetelmillä saaduista tuloksista kokonaisaktiivisuuskatteet. Gammaspektrometrin ja Condor E -monitorin osalta näytteet laskettiin kappaleen arvioitua pinta-alaa kohti. Muiden menetelmien kohdalla näytteet laskettiin näytepinta-alaa kohti. Tulosten perusteella voidaan todeta että kaikilla muilla menetelmillä havaitut aktiivisuudet ovat samalla dekadilla, lukuun ottamatta TSA:lla havaittuja tuloksia, jotka ovat dekadia korkeammalla kuin muiden menetelmien.

Mittausmenetelmän valinta vaikuttaa metallijätteen logistiikkaketjuun. Eri mittausten menetelmillä metallijätteen käsittelyajat ja -tarve poikkeavat huomattavasti toisistaan. Suoran tai epäsuoran kontaminaatiomittauksen etu on, ettei metallijätettä tarvitse juuri käsitellä. Toisaalta pyyhintänäytteiden laboratorioanalysointi ja suora kontaminaatiomittaus vievät huomattavasti aikaa. Gammaspektrometriset analyysit vaativat metallijätteen pakkaamisen tynnyriin, joten suuret metallijättekappaleet on paloiteltava. Myös Condor E -monitorin käyttö rajoittaa metallijättekappaleiden kokoa. Näiden menetelmien analysointiajat taas ovat lyhyemmät. ■

Opinnäyte hyväksytty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa.

DI Elina Kälviäinen
Jätehuoltoinsinööri
Fortum Generation
Loviisan voimalaitos
elina.kalviainen@fortum.com

TAPAHTUMAKALENTERI

JÄSENTILAISUUS

7.10.2009 klo 15.00 STUK

Päivi Kurttio:

"Säteily ja terveys -tutkimukset Säteilyturvakeskuksessa"

Lisätietoja ja ilmoittautumiset: Yrjö Hytönen
yrjo.hytonen@stuk.fi

ATS syysseminaari

5.11.2009 Hotelli Linnassa, Helsingissä.

Kutsu jäsenpostissa.

Lisätietoja ja ilmoittautumiset: Malla Seppälä
malla.seppala@vtt.fi

ATS ekskursion 6.-14.11.2009 Etelä-Korea

Tutustumisia ja vierailuja Soulin ja Busanin alueella.

Kutsu ja ohjelma jäsenpostissa syyskuun alussa.

Lisätietoja ja ilmoittautumiset: Jani Pirinen
jani.pirinen@fortum.com

*Lisätietoja kaikista ATS:n tapahtumista
löytyy internetistä: www.ats-fns.fi*

HALUATKO KIRJOITAA ATS YDINTEKNIikkaAN?

ATS Ydintekniikka julkaisee ydintekniikan aihepiiriin kuuluvia artikkeleita jäsenistöä ja lehden lukijakuntaa kiinnostavaksi arvioituista aiheista.

Jos sinulla on asiaa, josta haluat lehteen jutun, se käy seuraavasti:

- kirjoita artikkeli haluamallasi tekstinkäsittelyohjelmalla
- sopiva jutun pituus on 3 000 merkkiä (1 sivun juttu) - 15 000 merkkiä (4 sivun juttu parilla kuvalla)
- liitä mukaan juttua tukevat ja elävöittävät kuvat mahdollisimman hyvällä resoluutiolla ja mieluummin erillisissä jpg / eps / tif -tiedostoissa
- lähetä juttu sähköpostilla osoitteeseen toimitus@ats-ydintekniikka.fi

Tuo oma näkökulmasi ydintekniikkaan muidenkin tietoon!

JÄSENET

UUSIA JÄSENIÄ

Varsinaiset jäsenet:

- Jani Pirinen, Fortum Nuclear Services
- Jussi Kumpula, TVO
- Jouko Koivula, Prizztech Oy
- Leena Nolvi, Posiva Oy
- Eriika Melkas, TEM
- Jarmo Kovanen, Alstom Finland Oy
- Jorma Ahonen, Fortum Power and Heat Oy
- Pasi Natri, Fennovoima
- Esa Ahtinen, Fortum Nuclear Services
- Tapani Karjanlahti, TVO
- Antti Huusko, Fortum Nuclear Services
- Tero Jännes, TKK

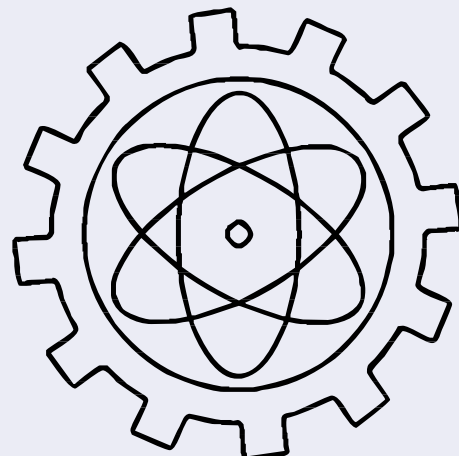
Nuoret jäsenet:

- Atte Moilanen, TVO
- Matleena Rytönen, TTY
- Henni Simpanen, LTY
- Kaisu Leino, LTY
- Topi Kärkkäinen, LTY

Suomen Atomiteknillisessä Seurassa oli 21.8.2009 pidetyn johtokunnan kokouksen jälkeen 544 varsinaista jäsentä ja 37 nuorta jäsentä eli opiskelijaa. Kunniajäseniä oli 11 ja kannatusjäseniä 19.

Seuran jäseneksi pääse johtokunnan hyväksymällä hakemuksella. Hakemukseen tarvitaan kahden jäsenen suositus.

*ATS:n jäsenhakemus internetissä:
<http://www.ats-fns.fi/info/jasenhakemus.html>*



SUOMEN
ATOMITEKNILLINEN
SEURA —

ATOMTEKNISKA
SÄLLSKAPET
I FINLAND ry



Palautus
Suomen Atomiteknillinen Seura
c/o VTT (Tietotie 3, Espoo)
PL 1000
02044 VTT

Kannatusjäsenet

Alstom Finland Oy
Fennovoima Oy
Fortum Oyj
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 Oyj
TVO Nuclear Services Oy
Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT
Voimaosakeyhtiö SF Oy
Wärtsilä Finland Oy
YIT Installaatiot

ATS internetissä:

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