

ATS

YDINTEKNIikka

SUOMEN
ATOMITEKNILLINEN
SEURA –

ATOMTEKNISKA
SÄLLSKAPET
I FINLAND ry



2/2005

vol. 34

Tässä numerossa

Pääkirjoitus	
Vaikea hengittää	3
Editorial	
Harder and harder to breath	4
UUTISIA	5
Ydinturvallisuutta yliopistosta	6
30 vuotta ydinturvallisuus- tutkimusta Lappeenrannassa	9
Boorineutronisädehoidosta vaihtoehtoinen syövän hoitomuoto?	10
Fuusiolaitteen diverttori Missä tiede ja teknologia kohtaavat	13
Fuusio – fyysikon Graalin malja	16
MULTIPHYSICS – termohydrauliikka- ja rakenneanalyysejä linkittäminen nesterakennesysteemissä ..	18
Ydinvoimatutkimus Fortumissa	20
TAPAHTUMAKALENTERI ja seuran uudet jäsenet	23

ATS

2/2005, vol. 34

JULKAISIJA

Suomen Atomiteknillinen Seura –
Atomtekniska Sällskapet i Finland ry.

ATS WWW

<http://www.ATS-FNS.fi>

TOIMITUS

PÄÄTOIMITTAJA
DI Kai Salminen
Fortum Nuclear Services Oy
PL 100, 00048 Fortum
p. 010 453 3093
kai.salminen@fortum.com

ERIKOISTOIMITTAJA
TkT Eija Karita Puska
VTT Prosessit
PL 1604, 02044 VTT
p. 020 722 5036
eija-karita.puska@vtt.fi

ERIKOISTOIMITTAJA
DI Riku Mattila
Säteilyturvakeskus
PL 14, 00881 Helsinki
p. (09) 7598 81
riku.mattila@stuk.fi

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

ERIKOISTOIMITTAJA
TkL Jarmo Ala-Heikkilä
Teknillinen korkeakoulu
PL 2200, 02015 TTK
p. (09) 451 3204
jarmo.ala-heikkila@hut.fi

ERIKOISTOIMITTAJA
DI Olli Nevander
Teollisuuden Voima Oy
27160 Olkiluoto
p. (02) 8381 3220
olli.nevander@tvo.fi

JOHTOKUNTA

PUHEENJOHTAJA
DI Antti Piirto
TVO Nuclear Services Oy
27160 Olkiluoto
p. (02) 838 11
antti.piiro@tvo.fi

VARAPUHEENJOHTAJA
M.Sc. Lena Hansson-Lyyra
VTT Tuotteet ja Tuotanto
PL 1704, 02044 VTT
p. 020 722 6846
lena-hansson-lyyra@vtt.fi

SIHTEERI
DI Juha Poikolainen
VTT Prosessit
PL 1604, 02044 VTT
p. 020 722 5057
juha.poikolainen@vtt.fi

RAHASTONHOITAJA
DI Hanna Virlander
Teollisuuden Voima Oy
27160 Olkiluoto
hanna.virlander@tvo.fi

DI Harriet Kallio
Fortum Power and Heat Oy
PL 100, 00048 Fortum
p. 010 453 2463
harriet.kallio@fortum.com

TkT Risto Tarjanne
Lpr teknillinen yliopisto
PL 20, 53851 Lappeenranta
p. (05) 621 2776
risto.tarjanne@lut.fi

Ronnie Olander
Säteilyturvakeskus
PL 14, 00881 Helsinki
p. (09) 7598 8668
ronnie.olander@stuk.fi

MUU TOIMINTA

YLEISSIHTEERI
Liisa Hinkula
VTT Prosessit
PL 1604, 02044 VTT
p. 020 722 5097
liisa.hinkula@vtt.fi

KANSAINVÄL. ASIOIDEN SIHT.
DI Petra Lundström
Fortum Nuclear Services Oy
PL 10, 00048 Fortum
p. 010 453 5422
petra.lundstrom@fortum.com

YOUNG GENERATION
DI Atte Helminen
VTT Tuotteet ja tuotanto
PL 1301, 02044 VTT
p. 020 722 6447
atte.helminen@vtt.fi

ENERGIAKANAVA
TkT Karin Rantamäki
VTT Prosessit
PL 1604, 02044 VTT
p. 020 722 6376
karin.rantamaki@vtt.fi

EKSKURSIOSIHTEERIT
Tekn. yo Pekka Nuutinen
Lpr teknillinen yliopisto
pekka.nuutinen@lut.fi

Tekn. yo Anu Turtiainen
Lpr teknillinen yliopisto
anu.turtiainen@lut.fi

VIIDEN 2005 TEEMAT

1/2005
Nuoret ja fuusio

2/2005
Tutkimus

3/2005
OL3 rakentaminen

4/2005
Ekskursio Venäjälle

ILMOITUSHINNAT (mv.)

1/1 sivua 500 €
1/2 sivua 360 €
1/4 sivua 240 €

TOIMITUKSEN OSOITE

ATS Ydintekniikka
c/o Kai Salminen
Fortum Nuclear Services Oy
PL 10, 00048 Fortum
p. 010 453 3093
telefax 010 453 3403

Osoitteenmuutokset
pyydetään ilmoittamaan
Liisa Hinkulalle /
VTT Prosessit
telefax (09) 456 5097
e-mail: liisa.hinkula@vtt.fi

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

ISSN-0356-0473



441 194
Painotuote

Painotalo Miktor Ky

Vaikea hengittää

Suunnittele mahdollisimman nopeasti laite, joka kykenee tuottamaan Kuun kamaran koostumusta jäljittelevästä, Maassa valmistetusta koeaineksestä vähintään viisi kiloa happea kahdeksassa tunnissa. Laitteelle on asetettu rajoitukset painolle ja sähkövoimalle. Keksinnöllä voit auttaa astronautteja selviämään kuuasemalla. (HS:n verkkoliite 24.5.2005)

Laitteen keksimisessä on kyse yhdestä Yhdysvaltain avaruushallinnon NASAn Centennial Challenge -ohjelman kaikille avoimista kilpailuista (www.centennialchallenge.nasa.gov). Ohjelman avulla Nasa edistää tiedettä ja teknologista kehitystä, tekee hienoa PR:ää toiminnalleen sekä ulkoistaa tutkimustoimintaansa – vieläpä miltei ilmaiseksi. Kilpailuun voi osallistua kuka tahansa, ja voittajalle on luvassa 250 000 dollarin pääpalkinto.

Tutkiminen, uuden kehittäminen ja innovointi on luovaa työtä siinä missä kuvanveisto ja säveltäminen. Suhteellisuusteoriat, michelangelot ja finlandiat eivät synny pakottamalla tai tulospaineen alla. Eivätkä edes siksi, että niille olisi olemassa suoranainen tarve, vaikka historioitsijat yhteiskunnallisia murroksia helposti niistä peilaavatkin. Ihmismielen hienoimmat saavutukset ovat yhdistelmä sopivia olosuhteita, ennakkoluulottomuutta ja näkemysellisyttä.

Lapset ovat innovatiivisimpia ihmisiä. Leikissä lapset visioivat rohkeasti tulevaa eivätkä antaudu triviaalien ratkaisujen houkutukselle. Lisäksi lapset elävät koko ajan etsikkoaikaa, jossa elämä täyttyy uuden oppimisen riemusta, eikä tekemistä rajoita sovinnaisuus tai epäonnistumisen pelko.

Iän karttumisen myötä ihmisistä häviää lapsuuden kekseliäisyys. Tilalle tulevat säännöt, kokemukset ja heuristiikat, jotka ohjaavat ajatukset kulttuuriin vuosisatojen aikana uurretuille urille. Usein kuulee parjattavan koululaitosta lasten ajattelun homogenisoinnista ja kangistamisesta, mutta kyllä

syy on enemmän evoluutiossa. Yhteisten ajatusmallien omaksuminen ja tiukka sitoutuminen konventionaalisuuteen säästää kognitiivisia resursseja huomattavasti. Ihminen on laumaeläin.

Yliopistomaailmassa on viime aikoina kuohunut. Akateeminen vapaus aiotaan joidenkin käsitysten mukaan pullottaa tuomalla korkeakouluihin entistä voimakkaampi tulospalkkaus, jota kutsutaan kekseliäästi nimellä uusi palkkausjärjestelmä (UPJ). UPJ:n pelätään ”ekonomisoivan” tieteen tekemisen, rajoittavan yhteistyön mahdollisuuksia ja vievän yliopistoilta mahdollisuudet tutkimuksen vapauteen. Kun samaan aikaan yritysmaailmassa keskitytään entistä tiukemmin soveltavan tutkimuksen tekemiseen ja tuotekehitykseen, voi vain ihmetellä missä tulevaisuuden innovaatioiden vaatima perustutkimus tehdään.

Kansantaloudellisesti ongelma on merkittävä. Kulutusorientuneessa yhteiskunnassa taloudellinen kasvu lepää paljolti teknologisen kehityksen varassa. Teknospurttien aikaan talous kasvaa selvästi nopeammin kuin muuten luoden hyvinvointia kaikille. Tutkimuksen ja kehitystyön optimointi palvelemaan yritystoimintaa on kuitenkin periaatteellisesti väärin, koska akateemisen tutkimuksen tarkoituksena on luoda pohja kaupallisten innovaatioiden tekemiselle eikä kilpailla yritysten kanssa.

NASA on keksinyt oivan tavan leikata tuotekehityskuluja. Sopivan kutkuttavalla ongelmalla ja pienellä kilpailulla annetaan kaikille mahdollisuus leikkiä Pelle Pelotonta. Tulosvastuu on tietysti ankara (kaikki tai ei mitään), mutta tuskinpa kukaan tähän kisaan osallistuu rahapalkinto mielessä. Tähän myös tiedemaailmassa pitäisi pyrkiä; antaa ihmisille porkkanoita, jotka motivoivat ideoimaan, keksimään ja kehittämään uutta. Eikä porkkana ole raha – sitä useimmat tutkijat saisivat enemmän soittoaaniä koodaamalla – vaan tekemisen riemu ja vapaus.



Harder and harder to breath

There is a competition in the web: design a device that can produce five kg of oxygen in eight hours from a sample piece of dirt simulating the soil of the Moon. There are constraints to the weight and electric power of the device. With an invention you can help the astronauts to survive at the lunar space station. (www.centennialchallenge.nasa.gov)

The competition is one of the prize contests in the Centennial Challenge program of the National Aeronautics and Space Agency NASA. The challenges are open for everyone. With the program, NASA is promoting science and technology – and making PR to its mission plus outsourcing its R&D. The prize for the winner is 250 000 dollars, a fraction of the cost of any such R&D project.

Research, development and innovation are creative work comparable to sculpturing or composing. One can not force the birth of theories of relativity, michelangelos or classical symphonies. The fascinating pieces of art are not born because there is a desperate need for them, although many historians like to reflect cultural revolutions from these. The most exquisite demonstrations of the creative human mind are a mix of favorable circumstances, openmindedness and visionary thinking.

Children are the most innovative of us. The children playing have bold visions of the future and are not bound by trivial or conventional ways of doing things. They are constantly living their prime time, where life is filled with the joy of learning new things. Their efforts are not constrained by conservatism or fear of failure.

The innovative mind of the child disappears from all of us while we grow older. Instead of it, we have rules, experiences and heuristics that guide our minds to the traditional ways of thinking. One often hears that the school system is to blame

for homogenizing and limiting the children, but the real reason lies rather in evolution. Adapting to common patterns saves our cognitive resources for better use.

There has been a heated discussion in the Finnish academic world about the new compensation system to be introduced in the universities. It is claimed that the new system works more like an incentive system that capitalizes the academic world, limits the possibilities for co-operation and dispossess the freedom of the universities. At the same time, the businesses concentrate more and more on applied research and development. The basic research needed to breed innovations is despised by everyone.

On the national economy level, the problem is serious. In a consumption oriented society the economic growth rests strongly on technological development. During technological revolutions, like in the late 90's, the economy grows faster and creates wellbeing for all. In principle it is wrong to optimize academic research to serve businesses, because it is supposed to lay the foundations of the commercial innovations, not to compete with companies.

NASA has made up an excellent way to reduce the expenditure on R&D. By posing an intriguing problem and setting up a little competition we are all invited to release the child in us. The incentive system can be seen as an extreme one (all or nothing), but it is hardly the point of the entry. Similar things should be also implemented in the scientific world; to offer people carrots, which motivate to innovate and develop new things. And money is not the carrot but the pure enjoyment and freedom of doing things that matter. ■

Energia-asennetutkimus julkaistu

Suomalaisten energia-asenteita koskeva tutkimus on valmistunut vuoden 2004 osalta. Tutkimuksessa on kysytty noin 1200 suomalaiselta näiden asennoitumisesta eri energiantuotantomuotoihin. Kysely on toteutettu perusosiltaan vertailukelpoisessa muodossa vuodesta 1983. Tutkimuksen toteuttaa Yhdyskuntatutkimus Oy Fortumin ja Teollisuuden Voiman toimeksiannosta.

Tutkimuksen tuloksista selviää mm. että ydinvoiman kannatus on laskenut hieman vuoden 2003 huippulukemista, ja että Loviisassa ydinvoiman kannatus on selvästi korkeampi kuin Eurajoella. Tutkimus löytyy internetistä Energiateollisuus ry:n sivuilta: <http://www.energia.fi/page.asp?Section=3823&Item=3453>.

IYNC2006 - Keskiyön aurinkoa ja ydinvoimaa

International Youth Nuclear Congress (IYNC) saapuu Suomeen kesällä 2006. Kyseessä on ydinvoima-alan nuorten suurin kansainvälinen konferenssi, johon odotetaan yli 400 osallistujaa eri puolilta maailmaa. Viimeisimpään konferenssiin Torontossa 2004 osallistui yli 250 nuorta 40 maasta.

Kansainvälisessä järjestelytoimikunnan noin 15 jäsenen joukossa ovat **Kim Dahlbacka** (tekniset vierailut), **Petra Lehtinen** (varaukset Suomessa), **Kai Salminen** (tekninen ohjelma) ja **Anna-Maria Virolainen** (mediasuhteet). Konferenssin useimmista käytännön järjestelyistä vastaa paikallinen järjestelytoimikunta, johon kuuluu parikymmentä Suomen ja Ruotsin Young Generationin edustajaa.

Konferenssi järjestetään 18.-23.6.2006. Konferenssin seminaariosuus kestää Tukholmassa vietettävät kolme ensimmäistä päivää. Konferenssin teknistieteelliseen ohjelmaan kuuluu neljä osa-aluetta:

- 1) ydinvoimatekniikka ja -tutkimus,
- 2) ydinjätteet ja käytöstäpoisto,

- 3) muut ydintekniikan sovellutukset sekä
- 4) ydinvoimapolitiikka ja ydinvoiman taloudellisuus.

Nuorten omien paperien lisäksi konferenssiin kutsutaan lukuisia kokeneita luennoitsijoita esitelmöimään kiinnostavista ja ajankohtaisista aiheista.

Seminaarin neljäs päivä vietetään Olkiluodossa. Olkiluodossa osallistujilla on mahdollisuus valita joko tutustuminen TVO:n OL-3 hankkeeseen tai Posivan loppusijoitus-toimintaan.

IYNC2006 järjestelyt menevät eteenpäin täysillä. Konferenssin Call for Papers on julkaistu toukokuussa, katso www.iync.org/cfp. Samanaikaisesti teknisen ohjelman järjestelyiden kanssa suunnitellaan konferenssin oheisohjelmaa, jolla tarjotaan kaukaa tuleville vieraille skandinaavisia elämyksiä: luontoa, merta ja saaristoa sekä Suomen ja Ruotsin historiaa.

Lisätietoja: www.iync.org

WNU:n kesäkoulu heinä-elokuussa Idaho Fallsissa

World Nuclear University (WNU) järjestää kuusi-viikkoisen kesäkoulun "WNU Summer Institute" ydinalan nuorille ammattilaisille Idaho Fallsissa 9.7-20.8.2005. Kesäkouluun on valittu 75 osallistujaa 33 maasta, mm. **Kristiina Hyytinen** ja **Anssi Paalanen** TVO:sta.

WNU on ydintekniikan koulutusta antavien yliopistojen yhteenliittymä, joka perustettiin syyskuussa 2003. Sen tavoitteena säilyttää turvallinen ydinvoiman käyttö energioptiona maailmassa ja edistää ydinvoiman eri sovelluksia. Yliopistojen lisäksi WNU:n perustajaorganisaatioita ovat IAEA, NEA, WANO ja WNA. Suomalaisyliopistoista jäseniä ovat TKK ja LTY.

WNU:n konkreettinen toiminta alkaa oikeastaan Idaho Fallsin kesäkoulun myötä. Sen opetusohjelma on otsikkotavalla aika yleisluontoinen, mutta asioihin ehditään mennä syvälle kuuden viikon aikana. Suomessa järjestettyihin kansallisiin ydinturvallisuuskursseihin verrattuna WNU-kesäkoulussa painotus on selvästi vähemmän tekniikassa ja enemmän poliittisluonteisissa asioissa kuten kestävässä kehityksessä, ydinvoiman hyväksyttävyydessä ja johtajuudessa.

Lisätietoja: <http://world-nuclear-university.org>

Ydinturvallisuutta yliopistosta

Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla (LTY) on pitkät perinteet ydinvoimalaitosten tutkimuksessa ja LTY on kansallisessa ydinturvallisuuden tutkimusohjelmassa SAFIR toiseksi suurin toimija VTT:n jälkeen. Erityisosaamisena on ennen kaikkea termohydraulisten koelaitteistojen ja mittausjärjestelmien monipuolinen rakentaminen ja käyttö sekä niiden ilmiöiden analysointi. Tuotettua dataa käytetään ydinvoimalaitosten suunnitteluun ja turvallisuuden varmistamiseen joko suoraan päättelemällä tai suoritettuja kokeita simuloimalla. Tällä todennetaan, että laitosten analysointiin käytettävät tietokoneohjelmat toimivat oikein

Lappeenrannassa on rakennettu pitkä ketju Loviisan VVER-440 -tyyppistä ydinvoimalaitosta mallintavia koelaitteistoja. Ketjun lippulaiva on PACTEL, Parallel Channel Test Loop, joka mallintaa Loviisan reaktorin primääripiiriä järjestelmineen tilavuusmittakaavassa 1:305 ja korkeussuunnassa todellisuuden mukaisena 1:1 ollen maailman suurin VVER-440 -koelaitteisto.

PACTEL on taipunut kuitenkin myös monen muun laitystyyppin malliksi. Lisäksi sitä hyödynnetään erillisilmikokeissa mm. BWR-lauhdutusallaskokeiden höyrynlähteenä.

PACTEL sisältää kolme kiertopiiriä höyrystimineen ja pumppuineen, paineistimen, hätäjäähdytys- ja syöttövesijärjestelmät ja sydämessä 144 polttoainesaavaa, joita voidaan lämmittää yhteensä 1 MW sähköteholla, – mittausinstrumentteja.

PACTELin VVER-440-sovelluksia

Aivan alkuperäisellä suunnittelulla tehtiin useita sarjoja pienen vuodon kokeita. Tutkimuskohteena oli ennen kaikkea luonnonkierron syntyminen ja kehittymisen eli se, oliko lämmön siirtyminen Lo-

viisan monimutkaisissa jäähdytyspiireissä kaikissa olosuhteissa turvattu. Pääkiertopumppujen lisäämisen jälkeen vuotokokeita voitiin tehdä myös pakotetun virtauksen tapauksille.

Höyrystimet vaihdettiin melko pian korkeammiksi, jotta voitiin tutkia tärkeäksi osoittautunutta höyrystimien primääripuolen virtauksen sisäistä kiertoa. Mahdolliseksi tuli tällöin myös tutkia höyrystimien syöttöveden menetykseen liittyviä sekundääripuolen ilmiöitä, kuten höyrystimien pinnankorkeuksien vaikutusta luonnonkiertoilmiöihin.

Luonnonkiertoa on tutkittu myös useilla kokeilla, jotka selvittivät lauhtumattomien kaasujen vaikutusta. Niissä injektointiin primääripiiriin joko ilmaa (kuvaten tyyppiä) tai heliumia (kuvaten vetyä) niin, että kaasu pääsi kertymään höyrystinputkiin ja vaikuttamaan höyrystimien lämmönsiirtoon. PACTEL-laitteiston paineistimen avulla taas tutkittiin jäähdytteesen liuenneiden lauhtumattomien kaasujen vapautumista.

Suomessa pitää varautua sellaisiinkin häiriötilanteisiin, joissa tarvittava ketjureaktion sammuttava pikasulku ei toimi. Tällaisia ATWS-tilanteita simuloitiin erityyppisillä kokeilla tutkien primääripaineen käyttäytymistä säätösauvan ulosvetotilanteessa tai luonnonkier-

tokäyttäytymistä tilanteessa, jossa jäähdytteen määrä on vähentynyt.

Loviisassa mahdolliset vuotoreitit höyrystimien primääripuolelta sekundääripuolelle (PRISE) osoittautuivat niin suuriksi, että laitoksen höyrystimien rakennetta päätettiin uusia: maksimivuotoa rajoitettiin muuttamalla höyrystinkollektorien kansia. PACTELilla tehtiin 1999 kaksi koetta, joissa tutkittiin uuden konstruktion vaikutusta.

Erilliskoesovelluksia

Rakenteet väsyvät, jos niiden lämpötilat vaihtelevat jatkuvasti. Tällainen tilanne voi syntyä esim. virtausreittien yhtymäkohdissa. Muunnetulla PACTEL-laitteistolla on tutkittu jäähdytteen lämpötilakerrostumista T-haarassa. Kokeissa primääripiirin putkeen (243 mm) joko injektointiin tai sieltä poistettiin pieni jäähdytevirtaus. Tästä aiheutuvaa jaksollista lämpötilan vaihtelua ja sen aiheuttamia rasituksia rakenteisiin analysoitiin VTT:llä virtausmekaniikka- ja lujuusoppiohjelmilla verraten laskelmia koetuloksiin.

Kiehuvesireaktoreissa varaudutaan päänhöyryputken murtumaan ohjaamalla suojarakennuksen paineen alentamiseksi vuodot lauhdutusaltaaseen. Rakennetulla POOLEX-allaskoelaitteistolla on selvi-



PACTELin sydämen välitukihila, jossa on paikat 144 polttoainesauvalle kolmesta eri polttoainenipusta.

tetty lauhdutusaltaisiin liittyviä ilmiöitä, jotka voivat vaikuttaa turvallisuusjärjestelmien rakenteiden mitoittamiseen tai toimintaan. Ensimmäisissä kokeissa käytettiin ilmapuhallusta kuvaamaan suojarakennuksen tyypin tunkeutumista lauhdutusaltaaseen murtuman ensi vaiheessa. Kokeissa tutkittiin myös lauhtumattoman kaasun purkauksen vaikutuksia lauhdutusaltaassa sijaitsevien hätäjäähdytykseen liittyvien komponenttien, kuten imusihntien toimintaan.

Päähöyryputken murtuman myöhemässä vaiheessa puhallus altaaseen vaihtuu höyryksi, mitä on tutkittu injektioimalla PACTEL-laitteistolla tuotettua höyryä allaskoelaitteistoon käyttäen useita puhallusputken halkaisijoita. Juuri höyryn tuottaminen liittyy PACTELin allaslaitteiston oleelliseksi osaksi mahdollistamalla hetkellisesti jopa yli 2 MW lämpötehon käyttämisen höyryn puhalluksessa. POOLEX-allasta on käytetty myös BWR-laitosten eristyslauhduuttimien toimintaa testattaessa.

Uudentyyppisten kevytvesireaktoreiden tutkimus

Kehitettäessä uusia laitostyyppisiä halutaan järjestelmiä yksinkertaistaa. Tällä pyritään edistämään sekä taloutta että

turvallisuutta pienentämällä pääomakustannuksia ja huoltokustannuksia sekä toisaalta lisäämällä käyttövarmuutta. Aktiivisten komponenttien määrää järjestelmissä halutaan vähentää ja passiivisia, luonnonlakeihin nojautuvia ominaisuuksia lisätä. Uutena piirteenä on myös varautuminen vakavien onnettomuuksien jälkitilanteen hallintaan, mikä vaatii järjestelmiltä toisaalta suurta kestävyyttä vaikeissa olosuhteissa ja toisaalta toimintakykyä hyvinkin pitkään onnettomuuden jälkeen.

Lappeenrannassa on tutkittu monia uudentyyppisiä turvallisuusjärjestelmiä vaihtoehtoisesta pikasulkujärjestelmästä sulaneen sydämen jäähdytysjärjestelmiin. Näiden tutkimus on ennen kaikkea keskittynyt järjestelmien lämmönsiirto- ja virtausolosuhteiden termohydrauliseen tutkimukseen. Itse asiassa lähes kaikkien



Korkeamman PACTEL-höyrystimen primääripiiriin lämmönvaihtoputket.

Suomeen periaatepäätös vaiheessa tarjolla olleiden uusien laitostyyppien turvallisuusjärjestelmiä tutkittiin Lappeenrannassa erityyppisissä projekteissa. Uusimpana sovelluksena on Framatome ANP:n EPR -tyyppisen Olkiluotoon rakennettavan laitoksen sydänsulan leviämisalueen tutkimus.

Kiehutusvesireaktoreiden painesäiliön alapään rakenne on säätösauvayhteiden takia sellainen, ettei sydänsulaa pystytä siinä pysäyttämään ja jäähdyttämään. Sen sijaan painesäiliön alapuolelle voidaan konstruoida laajempi ns. sydänsieppari, jossa pysyvä jäähdytys toimii. Westinghousen BWR 90+ -konseptin sydänsulan jäähdyttämistä tutkittiin koelaitteistolla, joka kuvasi tasalevyistä viipaleita suunnitellusta sydänsiepparista. Sydänsulan lämmöntuottoa mallinnettiin sähköllä toimivilla patruunalämmittimillä, joilla tuotettiin enimmillään jopa yli 2000 kW/m² lämpövuoto. Laitteiston ja jäähdytteen käyttäytymistä voitiin tarkastella myös sivuilla olleiden ikkunoiden läpi.

Höyrykäyttöiset pikasulkujärjestelmät

Framatome ANP:n kiehutusvesireaktori-konseptin SWR 1000 normaalin pikasulun on suunniteltu tapahtuvan höyryn voimin tavallisesti käyttövoimana olevan paineistetun tyypin sijasta. Etuna olisi välttää tyypin syöttö jäähdytyspiiriin. Lauhtumattomana kaasuna typpi voisi myöhemmässä vaiheessa haitata lämmönsiirtoa. Järjestelmän toimivuutta tutkittiin Lappeenrannassa höyryä ja lämpötilaltaan kerrostunutta vettä sisältäneen säiliön avulla. Höyryn tilavuusosuutta ja kuumen vesi-kerroksen paksuutta vaihtelemalla etsittiin järjestelmälle optimaaliset käyttöparametrit.

SWR 1000 -konseptissa ketjureaktion sammutus on suunniteltu varmistettavaksi erillisellä nopealla boorinsyöttöjärjestelmällä, jos säätösauvoja ei onnistuta saamaan sydämeen. Järjestelmä ruiskuttaa suuresta tankista boorihappoliuosta

reaktoripainesäiliöön käyttäen injektointiin paineistettua höyryä. Lappeenrannan kokeissa säiliöjärjestely oli hyvin samankaltainen kuin em. pikasulkutankkikojeissa. Samalla tutkittiin booraussäiliön ja reaktorisäiliön välisen putkilinjan mekaanista käyttäytymistä paine- ja venymämittauksin. Tämä nopea boorausjärjestelmä todennettiin periaatteessa toimivaksi.

PACTEL uusina painevesireaktoreina

Westinghousen AP600-konseptiin on suunniteltu uusi passiivinen hätäjähdytysjärjestelmä CMT, Core Make-up Tank. Se korvaa pumpuilla toimivan korkeapainehätäjähdytysjärjestelmän. Primäärivuodon yhteydessä jäähdyte alkaa virrata luonnonkierrolla tiheyserojen ajamana CMT-säiliön kautta ja kylmempi vesi virtaa säiliöstä primääripiiriin. Järjestelmän ominaisuuksia testattiin Lappeenrannassa lisäämällä PACTEL-laitteistoon säiliö, joka oli yhdistetty putkilinjain primääripiiriin kylmään haaraan sekä aluksi myös paineistimen yläosaan.

Atomenergoexportin VVER-640 -konseptin pitkäaikaisjäähdytystä tutkit-

tiin lisäämällä PACTEL-laitteistoon kaksi 4,5 m korkuista avointa säiliötä, jotka kuvasivat laitoksen polttoainealasta ja hätäjähdytysvesialasta. Tällöin PACTELista jouduttiin poistamaan pääkiertopumput sekä primääripiirin putkilinjoja. Em. säiliöt yhdistettiin toisiinsa ja primääripiiriin uusilla linjoilla. Useita tunteja kestäneissä kokeissa selvitettiin luonnonkierron käynnistymistä säiliöiden kautta ja jälkilämmönpoiston tehokkuutta.

Näkymiä

Pienen maan olosuhteisiin sopeutuen on tutkimusta Lappeenrannassa aina pyritty tekemään käyttäen ja muuntaen olemassa olevaa laitteistoa mahdollisimman monipuolisesti. Myös korkea laboratorio on täysimääräisesti hyödynnetty rakentamisen laitteistoja sen kaikille ritilätasojille lattiasta kattoon – 17 m korkuinen PACTEL jatkuu jopa niiden ali ja yli lattian kuopasta kattoikkunakorotukseen. Tämä viimeksi mainittu tosin johtuu siitä, että säästöjen takia laboratorion korkeus jäi Loviisan primääripiiriä matalammaksi vastoin alkuperäistä suunnitelmaa.

Ahtaus voidaan nyt tarvittaessa ratkaista yhdistämällä laboratorio vierei-

seen yhtä laajaan tilaan. Luovien ratkaisujen perinteestä yritetään pitää kiinni myös kehittämällä projektia PACTELin muuntamisesta vielä pystyhöyrystintyyppiseksi, Olkiluoto 3:n ilmiöitä mallintavaksi laitteistoksi käyttäen alkuperäisen designin pitkiä höyrystimiä pystyyn käännettyinä.

Mittaustekniikkaa on juuri uusittu nopean tiedonkeruujärjestelmän ja nopean videokuvausjärjestelmän hankinnoilla. Infrastrukturi ja henkilöstö pyritään pitämään ajan tasalla ja vireänä talon alati uudistuvan nuoren opiskelijajoukon innoittamana. Yhdistelmä kokemusta ja nuoruutta näyttää toimivan ydinvoimatutkimuksessakin.

SAFIR ja muut tutkimusohjelmat verkottavat ydinvoima-alan kotimaisen tutkimuksen tehokkaasti. Kansainvälisesti osallistutaan aktiivisesti erityisesti EU-projekteihin sekä OECD:n ja IAEA:n toimintaan. Yhteydet Ranskaan ja pohjoismaihin ovat perinteisen tiiviit. Edellä kuvatut tutkimukset on toteutettu monen tyyppisinä toimeksiantoina ja projekteina eri yhteistyötahojen ja rahoittajien kanssa, joille kaikille kiitos.

Lappeenrannan koelaitteistoja

Laitteisto	Toimintavuodet	Kokeita
REWET-I	1976-80	227
REWET-II/III	1981-87	76/87
REWET-MARIA	1986-91	146
VEERA	1987-	68
PACTEL	1990-	239...

Näiden VVER-440 tyyppistä painevesireaktoria kuvaavien koelaitteistojen lisäksi käytössä on tai on ollut useita erilliskoelaitteistoja:

- 2-faasivirtausmittauslaitteisto
- Keko, kerrostumiskoelaitteisto
- kiehutusvesireaktorin eristyslauhdutin
- kiehutusvesireaktorin lauhdutusaltaat 1 ja 2
- lämpötilakerrostumiskoelaitteisto
- BWR 90+, sydänsieppari
- SWR 1000, nopea boorausjärjestelmä
- SWR 1000, pikasulkutankki
- EPR, sydänsulan levitysalue

TkT Riitta Kyrki-Rajamäki
Professori
Energia- ja ympäristö-
tekniikan osasto
LTY
riitta.kyrki@lut.fi



TkL Heikki Purhonen
Tutkimusyksikön johtaja
Energia- ja
ympäristötekniikan osasto
LTY
heikki.purhonen@lut.fi



30 vuotta ydinturvallisuustutkimusta Lappeenrannassa

Vuonna 1969 Saimaan rannalla aloitti toimintansa silloinen Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Opetusohjelmaan kuului pian myös ydintekniikka, jonka pitkäaikaisimpana professorina toimi **Heikki Kalli** 1979–2001. Suomi rakensi 70-luvulla omaa ydinvoimatuotantoa Loviisaan ja Olkiluotoon, mikä loi tarpeen myös ydinvoiman kokeelliselle tutkimukselle.

Vuonna 1975 aloitettiin yhdessä VTT:n kanssa ydinreaktoreiden termohydrauliikan tutkimus. Kokeellisen toiminnan rinnalla myös laskennallinen tutkimus on keskittynyt pitkälti termohydrauliikan ilmiöihin. Eri ohjelmistoilla (APROS, CATHARE, RELAP5, SMABRE) on sekä suunniteltu kokeita että analysoitu niitä jälkepäin. Myös ydinvoimalaitosten turvallisuusanalyysiin on osallistuttu vuosien varrella.

Ensimmäinen koelaitteisto oli tutkimusyksikön ensimmäisen johtajan, **Timo Kervisen** diplomityönään suunnittelema, yksisauvainen REWET-I. Sillä tutkittiin lähinnä polttoainesauvojen jälleenkastumisilmiötä ja lämmönsiirron perusilmiötä sekä veden liuenneen tyyppien vaikutusta niihin. Myöhemmin sen ainoa polttoainesauva korvattiin kolmen sauvan nipulla, minkä jälkeen laitteisto oli demonstraatio- ja opetuskäytössä. Nyt se on taas kunnostettu opetuskäyttöön.

Tutkimustyö jatkui REWET-II koelaitteistolla, jossa oli 19 täyspitkää sähköllä lämmitettävää polttoainesauvasimulaattoria ja mm. Loviisan voimalaitoksen painevesireaktorin (VVER-440) primääripiirin skaalattu tilavuus.

REWET-II rakennettiin jäähdytteenmenetysonnettomuuksien tulitusvaiheen ilmiöiden tutkimiseksi. Sillä tutkittiin myös boorihapon väkevöitymistä reaktorisydämen alueella pitkäaikaisjäähdytyksen aikana.

Vuonna 1985 REWET-II laitteistoon lisättiin höyrystin, kiertopiiri ja paineistin. Samalla laitteisto sai uuden nimen REWET-III. Se soveltuu VVER-440 -reaktoreiden primääripiirin luonnonkiertokokeisiin.

REWET-MARIA rakennettiin puolalaiseen MARIA-tutkimusreaktoriin suunnitellun polttoainekokeisiin tarkoitetun kiertopiirin reflood, boil-off ja ulospuhallus-ilmiöiden tutkimiseen.

REWET-MARIA rakennettiin puolalaiseen MARIA-tutkimusreaktoriin suunnitellun polttoainekokeisiin tarkoitetun kiertopiirin reflood, boil-off ja ulospuhallus-ilmiöiden tutkimiseen.

REWET-MARIA rakennettiin puolalaiseen MARIA-tutkimusreaktoriin suunnitellun polttoainekokeisiin tarkoitetun kiertopiirin reflood, boil-off ja ulospuhallus-ilmiöiden tutkimiseen.

REWET-MARIA rakennettiin puolalaiseen MARIA-tutkimusreaktoriin suunnitellun polttoainekokeisiin tarkoitetun kiertopiirin reflood, boil-off ja ulospuhallus-ilmiöiden tutkimiseen.



Näkymä REWET-MARIA ulospuhalluskokeesta vuodelta 1987. Nykyisin vilkkaan kadun sulkeminen höyryllä voisi olla kyseenalaisempaa.

VEERA-laitteisto rakennettiin yhteistyössä silloisen Imatran Voima Oy:n kanssa boorihapon käyttäytymisen tutkimuksiin reaktorisydämen jäähdytteenmenetysonnettomuuksissa aikaisempaa suuremmassa mittakaavassa. Myöhemmin laitteistoa muutettiin soveltumaan paremmin tulitusvaiheen ilmiöiden tutkimiseen. Viimeisimmät, vakaviin onnettomuuksiin liittyneet kokeet on sillä tehty vuonna 1999, mutta laitteisto on yhä käytettävissä.

PACTEL (Parallel Channel Test Loop) -koelaitteisto rakennettiin alun perin kuvaamaan VVER-440 -reaktorin pääosia ja -järjestelmiä pienen ja keskisuuren jäähdytteenmenetysonnettomuuden aikana. Se on kuitenkin taipunut myös muiden painevesireaktoreiden malliksi niiden turvallisuusjärjestelmien tutkimuksessa (AP-600, VVER-640). Laitteisto on toimintakunnossa ja käytössä myös erilliskoelaitteistojen apulaitteena mm. höyryntuottajana kiehumisvesireaktoreiden lauhdutusallaskoikeissa.

kennettiin alun perin kuvaamaan VVER-440 -reaktorin pääosia ja -järjestelmiä pienen ja keskisuuren jäähdytteenmenetysonnettomuuden aikana. Se on kuitenkin taipunut myös muiden painevesireaktoreiden malliksi niiden turvallisuusjärjestelmien tutkimuksessa (AP-600, VVER-640). Laitteisto on toimintakunnossa ja käytössä myös erilliskoelaitteistojen apulaitteena mm. höyryntuottajana kiehumisvesireaktoreiden lauhdutusallaskoikeissa.

*Tiedot koonnut Vesa Riikonen
Lisätietoa: <http://www.et.lut.fi/tyt>*



REWET-I keltahehkuisena valmiina hätäjähdytysveden ruiskutukseen lämmönsiirtokriisin jälkeisen jälleenkastumisnopeuden tutkimiseksi.

Boorineutronisädehoidosta vaihtoehtoinen syövän hoitomuoto?

Boorineutronisädehoidolla (BNCT) on saatu erinomainen hoitovaste pään ja kaulan alueen syöpää sairastaneella potilaalla, jolle muuta hoitovaihtoehtoa ei enää ollut tarjolla. Vaikka hoito on edelleen tutkimusluonteista, on siitä tulossa varteenotettava vaihtoehtoinen hoito tietyissä vaikeissa syöpätapauksissa. Tähän mennessä potilaita, joilla on ollut pahanlaatuinen aivokasvain tai pään ja kaulan alueen kasvain, on hoidettu jo yli 50 Otaniemen tutkimusreaktorille rakennetulla BNCT-hoitoasemalla. BNCT-hoitotoimintaa harjoittaa kansallisesta BNCT-hankkeesta syntynyt spin-off yritys Boneca Oy, jonka rahoittamana BNCT-hoidon kliininen tutkimustoiminta jatkuu Suomessa.



MRI-kuvantamisella osoitettu hoitovaste edenneessä nenäontelon kasvaimessa yhden BNCT-käsittelyn jälkeen.

B NCT-hoitojen käynnistyminen FiR 1:n epitermisellä neutronisäteilytysasemalla toukuussa 1999 oli lähes kymmenen vuotta kestäneen ydinteknisen, säteilyfysiikan ja lääketieteellisen fysiikan tutkimuksen merkittävä läpimurto. Hoitokokeisiin päästiin neljäntenä maailmassa Japanin, Yhdysvaltain ja Hollannin jälkeen. Silloin käynnistyneessä kliinisessä tutkimuksessa tavoitteena on selvittää BNCT-hoitomenetelmän turvallisuutta sekä tehoa pahanlaatuiseen aivokasvaimen, gliomaan, joka on aivon tukisolukon kasvain. Nyt tuossa tutkimuksessa on säteilytetty 30 potilasta ja on tulosten keräämisen aika.

Vuonna 2001 kliininen tutkimus laajeni uusiutuneisiin jo kertaalleen hoidettuihin aivokasvaimiin. Vuoden 2003 lopulla päästiin aloittamaan HYKS:ssä professori Heikki Joensuun johdolla kliininen tutkimus BNCT-hoidon soveltuvuudesta pään ja kaulan alueen kasvaimiin. Kaikissa tutkimuksissa boori kuljetetaan syöpäsolukoon boorifenyylialaniinin fruktoosikompleksilla (BPA-F). Aikaisemmin FiR 1:n BNCT-hankkeesta on kerrottu ATS Ydintekniikan numeroissa 3/1997, 2/2001 ja 2/2002.

Aivokasvaintutkimukset

Pahanlaatuiseen aivokasvaimen, gliomaan, sairastuneille on annettu perinteisen sädehoidon sijasta BNCT-hoito. BPA:n annostusta on nostettu 290:stä aina 500 mg/kg asti. Ensisijaisena tavoitteena on ollut tutkia hoidon turvallisuutta nostamalla booriannosta. Samalla pyritään saamaan alustava arvio hoitojen vaikutuksesta elinaikaan. Optimaalista olisi todeta merkittävä elinajan piteneminen historiallisiin kontrollipotilaisiin verrattuna.

Toisessa BNCT-potilastutkimuksessa tarjotaan mahdollisuutta BNCT-hoitoon mikäli potilaalla on todettu uusiutunut gliooma tai anaplastinen astroosytooma, molemmat aivojen tukisolukon kasvaimia. Ensi vaiheessa annetusta perinteisestä sädehoidosta on täytynyt kuluu ainakin kuusi kuukautta.

Uusi aluevaltaus – pään ja kaulan alueen kasvaimet

BNCT-hoitoa on vuoden 2003 lopusta lähtien annettu myös uusiutunutta pään ja kaulan alueen syöpää sairastaville potilaille, joille muuta hoitovaihtoehtoa ei



Potilas BNCT-säteilytyksessä FiR 1:n BNCT-asemalla.

enää ole tarjolla. Laajemman tutkimuksen aloittamisen taustalla on Suomen BNCT-hankkeen kesäkuussa 2004 julkaistava rohkaiseva tulos nenän sivuonteloiden syöpää sairastaneella potilaalla (Mauri Kouri, L. Kankaanranta et al, *Undifferentiated sinonasal carcinoma may respond to single-fraction boron neutron capture therapy*, *Radiotherapy and Oncology* 72 (2004) 83–85). BNCT-hoidolla on pystytty merkittävästi parantamaan pään ja kaulan alueen syöpää sairastaneiden potilaiden elämänlaatua.

Boorinkantaja-aineen kuvantamisella ratkaiseva merkitys hoidon menestykselle

Tutkimustoiminnan laajentumiselle uusiin kasvaintyyppeihin on ollut ratkai-

seva merkitys kantaja-aineen positroniemissiokuvantamisella (PET). ¹⁸F-BPA PET-menetelmällä pystytään mittaamaan kantaja-aineen keräytyminen syöpäsoluksoon. Siten on voitu todentaa kasvainten soveltuvuus BNCT-hoitoon ja kohdentaa säteilytys alueelle, jossa kertymää eli syöpäsolukkoa on havaittu. Myös syöpäsolukon häviäminen hoidon vaikutuksesta voidaan todentaa tällä kuvauksella. Potilaskuvaukset ja niihin tarvittavan merkkiaineen valmistus tapahtuu kiihdytinlaboratoriossa Turun PET-keskuksessa.

Parhailtaan tutkitaan mahdollisuuksia mitata kasvaimen BPA-pitoisuutta hoitoalueella magneettispektroskopian (MRS) avulla. Alustavat tulokset ovat rohkaisevia. Onnistuessaan menetelmä antaa mahdollisuuden tehdä potilaskohdittaiset annosuunnitelmat entistä tarkem-

min ja hoidon tehokkuus voisi näin parantua.

Tutkimushankkeen tilanne

Tällä hetkellä suomalainen BNCT-hoidon tutkimus ja kehitys on maailman huippuluokkaa. Alustavat tulokset sekä gliomapotilailla että pään ja kaulan alueen kasvaimilla ovat olleet niin lupaavia, että useat keskussairaalat Suomessa ovat lähettäneet potilaita BNCT-hoitoihin Otaniemeen. BNCT-hoitojen kysyntä ulkomailta on vilkastumassa.

Magneetti- ja PET-kuvauksin osoitetut hyvät hoitovasteet sekä aivokasvain-ten että pään ja kaulan alueen syövän hoidossa osoittavat BNCT-hoidolla olevia mahdollisuuksia näiden syöpätyyppien hoidossa. Käynnissä olevien faasi I/II -tutkimuksilla pyritään selvittämään

BNCT-hoitojen siedettävyys ja vaikutus elinaikaan.

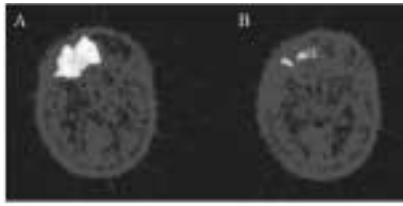
Alustavat tutkimustulokset glioomapotilailla näyttävät lupaavilta ja BNCT on ollut hyvin siedettyä. Hoitotiimillä on nyt vankka BNCT-osaaminen (56 hoitokertaa). Kantaja-aineen pitoisuuden nosto ja uusien, tehokkaampien kantaja-aineiden kehittäminen ja käyttöönnotto, puhumattakaan BNCT:n yhdistämisestä uusiin syöpälääkkeisiin, antavat uusia ulottuvuuksia jatkaa eteenpäin taistelussa syöpää vastaan.

Kansainvälinen tilanne

BNCT-tutkimuksen kärkimaat tällä hetkellä ovat Japani ja Suomi. Japanissa BNCT-tutkimus on erittäin aktiivista: siellä on useita hoitoja antavia ryhmiä ja säteilytyksissä on käytetty innovatiivisia ratkaisuja. Suomi kolmella rinnakkain pyörivällä kliinisellä tutkimushankkeella pärjää kansainvälisessä vertailussa hyvin.

BNCT-tutkimuksen painopiste on siirtynyt osittain uusiin maihin. Taiwanin THOR-reaktorille on valmistumassa uusi potilashoitoihin kykenevä BNCT-asema. Argentiinassa on annettu lokakuusta 2003 lähtien koeluonteisia BNCT-hoitoja raaajoissa oleviin melanoomiin Bariloche RA-6 reaktorilla (Bariloche Atomic Center, Argentine Atomic Energy Commission (CNEA)). Italiassa on hoidettu muutama maksasyöpätapaus poistamalla maksa potilaasta säteilytyksen ajaksi. Hallinnolliset ristiriidat ovat toistaiseksi estäneet kokeiden jatkumisen.

Italiassa on tällä hetkellä useita BNCT:hen liittyviä tutkimus- ja kehityshankkeita. ENEA:n Casaccian pienelle 10 kW:n nopealle TAPIRO-reaktorille on valmistumassa, rahoituksen sallimissa



Kasvaimen paikannus ennen hoitoa (vasemmalla) positroniemissioskuvantamisella (PET) käyttäen merkkiaineena ¹⁸F-leimattua boorifenyylialaniinia (18F-BPA) ja hoidon vaikutuksesta pienentynyt kasvain seitsemän viikkoa säteilytyksen jälkeen (oikealla).

puutteissa, potilassäteilytyksiin kelpaava epiterminen neutronisäteilytysasema. Torinoon on hankittu D-D-plasmageneraattori BNCT-neutronilähteeksi.

Pettenissä JRC:n HFR:llä huhtikuussa 2004 on aloitettu potilaskokeet melanooman aivometastaaseilla. Aiempi gliomatutkimus on päätynyt. BNCT:n uutta tulemistä 1990-luvulla vetäneessä USA:ssa ollaan kliinisen tutkimuksen luvituksen ongelmien takia siinä tilanteessa, että MIT:n uudella BNCT-asemalla ei hoideta potilaita. Kantaja-aineiden radiobiologiaa tutkitaan MIT:n termisellä BNCT-asemalla sekä WSU Pullmanin TRIGA-reaktorin BNCT-tutkimusasemalla. Ruotsissa Studsvik lopettaa BNCT-toiminnan reaktoreiden sulkeutuessa kesällä 2005. Rezissä Tsekinmaalla on annettu vain satunnaisia BNCT-hoitoja.

FiR 1:n rahoituksen tulevaisuus

TRIGA-reaktorit ovat ylläpidoltaan halvimpia reaktoreita ja senkin takia on

mahdollista myös taloudellisesti valjastaa tällainen reaktori lähes yksinomaan BNCT-toimintaan – toisin kuin esimerkiksi suuritehoisemmat materiaalitutkimusreaktorit. Kun BNCT-menetelmä hyväksytään ensisijaiseksi hoidoksi mm. pahanlaatuisille aivokasvaimille ja pään ja kaulan alueen kasvaimille, hoitotoiminnalla voidaan kattaa reaktorin ylläpitokulut.

Reaktorin ylläpitokustannukset on pystyttävä kattamaan myös läpi BNCT:n kehitysvaiheen. Tähän ollaan rakentamassa nyt uusia ratkaisuja, joilla reaktorin toiminnan tutkimuksellinen sekä opeustustoimintaan liittyvä osa saisi oman rahoituksen.

Kliiniset kokeet sekä niiden ulkopuolella annettavat BNCT-hoidot toteutetaan Boneca Oy:n toimesta yhteistyössä HYKS:n ja VTT:n kanssa. Boneca Oy on HYKS-instituutti Oy:n, Sitran ja VTT:n yhteisesti omistama sädehoitopalveluja tuottava yritys, jonka toimialana on syöpäkasvainten hoito boorineutronisädehoito-menetelmällä sekä hoitoihin tarvittavien tuotteiden ja teknologian kehittäminen ja myynti. ■



DI Iiro Auterinen
Erikoistutkija
BNCT-päällikkö
VTT Prosessit
iiro.auterinen@vtt.fi



LL Leena Kankaanranta
Erikoislääkäri
Syöpätaudit ja sädehoito
HYKS
leena.kankaanranta@hus.fi



FT Sauli Savolainen
Dosentti
Ylifyysikko
HUS-Röntgen
sauli.savolainen@hus.fi

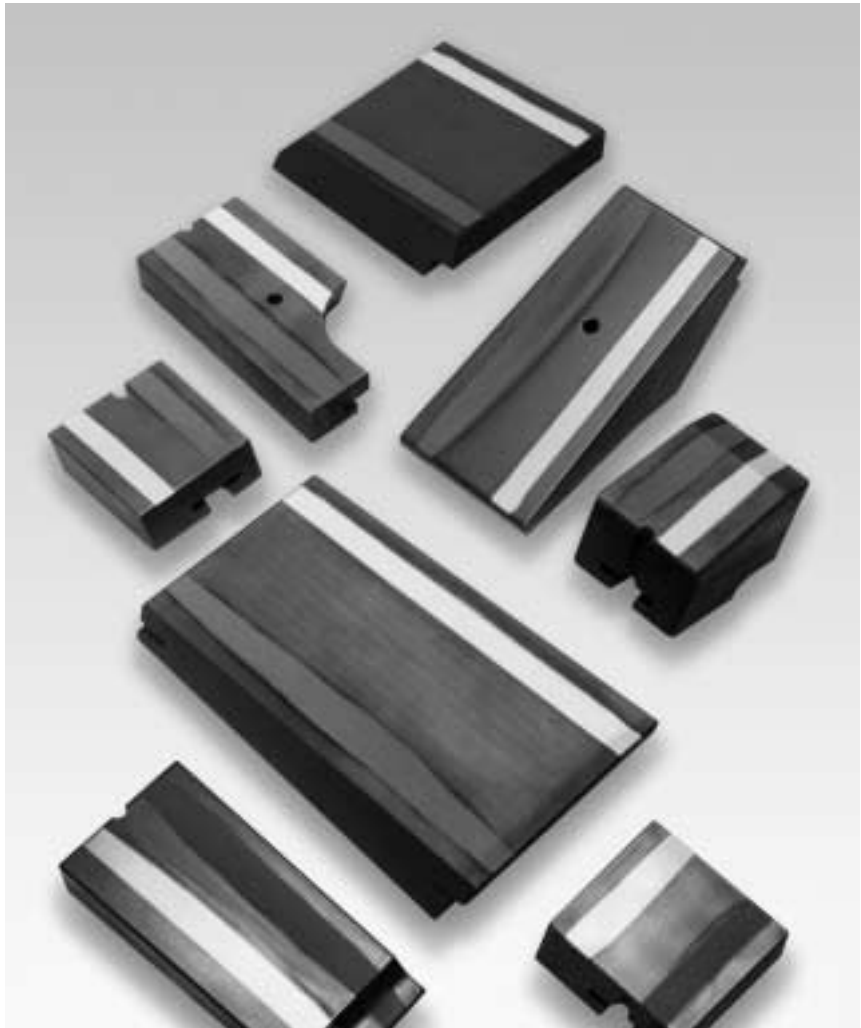
Fuusiolaitteen diverttori

Missä tiede ja teknologia kohtaavat

Fuusion tieteellisestä toteutettavuudesta ei liene epäilystä: suurissa kansainvälisissä fuusiokokeissa (JET, Englanti; JT-60U, Japani; ASDEX Upgrade, Saksa ja DIII-D, U.S.A.) on saavutettu ja ylitettykin kaikki rajaparametrit, jotka fuusioenergian nettotuottaminen vaatii. Tällaisia ovat esim. plasman tiheys, lämpötila ja koossapitoaika. Yhteistä näille kaikille fuusiokokeille on polttoaine, puhdas deuterium, joten fuusiopaloa ei voi merkittävässä määrin tapahtua. Fuusiopalon mukanaan tuomaa uutta fysiikkaa päästään tutkimaan vasta ITER-kooreaktorin rakentamisen myötä: ITERissä tullaan ajamaan deuterium-tritium-plasmoja, jolloin plasma kuumenee pääasiallisesti itse tuottamallaan fuusioenergialla. Tähän on aina pyrittykin, mutta se tuo mukanaan myös uusia haasteita.

E nsimmäisiin ITER-plasmoihin on vielä vuosia aikaa. Vaikka fuusion tieteellistä toteutettavuutta pidetään selvänä, ei fuusiotutkijoiden ole syytä seisokella kädet taskussa, sillä fuusioenergian teknologisen toteutettavuuden tiellä on vielä monta suurta kysymysmerkkiä. Ehkä tärkeimmässä roolissa ovat materiaalikysymykset: fuusiokattilaa ei voi vuorata millä tahansa rautakaupasta löytyvällä metallilevyllä. Raskaan termisen kuorman lisäksi fuusiokattilan ensiseinämän materiaalien pitää kestää säteilyolosuhteita, jotka saavat fissiokattilan vaikuttamaan lastentarhalta: fuusioneutroneillahan on jo syntyessään moninkertainen energia fissioneutroneihin nähden, ja lisäksi niiden syntykohdan ja ensiseinämän välissä ei ole mitään moderoivaa väliainetta – fuusioplasma on niin harvaa, että fuusiokattilassa on itse asiassa korkealuokkainen tyhjiö!

Plasman varatut hiukkaset pidetään erillään materiaalisista voimakkaalla magneettikentällä, mutta sen kahlitseva vaikutus ei ole absoluuttinen vaan kuumaa plasmaa tihkuu jatkuvasti plasman reunan yli nk. kuorintakerrokseen, SO-Liin (Scrape Off Layer). Kuorintakerroksessa magneettiset kenttäviivat on ohjattu osumaan plasmasta varsin etääl-



ASDEX Upgraden pinnoitettuja divertoritiliä. Tiilet on pinnoitettu muutaman mikrometrin paksuisilla hiili- ja volframikerroksilla.



VTT:llä käytössä oleva SIMS-koelaitteisto.

lä oleviin diverttoritiiliin, joiden tarkoituksena on toimia fuusiolaitteen 'laskeämpärinä': koska varatut hiukkaset voivat liikkua vapaasti ainoastaan kenttäviivojen suuntaan, päätyvät fuusioplasmaasta ulos tulleet varatut hiukkaset suoraan diverttoritiilille eivätkä pitkin fuusioakattilan seiniä. Tällä järjestelyllä saadaan suurimman hiukkaskuorman vastaanottavat pinnat rajattua. On selvää, että näillä pinnoilla käytettäville materiaaleille joudutaan asettamaan kaikista suurimmat vaatimukset, joten niiden kokonaispinta-alan rajoittaminen on fuusioenergian toteutettavuuden kannalta erittäin tärkeää.

Plasma-seinä -vuorovaikutukset

Diverttoritiilien sijoittamisella kauas fuusioplasmaasta on kaksi merkittävää etua:

1) Tiilistä irtoaa väistämättä epäpuhtausatomeja nopeiden ionien ja elektronien iskeytyessä niihin. On erittäin tärkeää pystyä estämään näiden, mahdollisesti suuren varausluvun omaavien atomien kulkeutumista kuumaan plasmaan, missä ne elektronien jarrutussäteilyn ansiosta jäädyttäisivät sitä.

2) Diverttoritiilien eteen voidaan puhaltaa puskuriksi jotain kevyttä alkuainetta, johon törmätessään plasmasta tulevat hiukkaset hidastuvat, jolloin tiilien vastaanottama kuorma kevenee.

Fuusioplasmaasta peräisin oleva hiukkas- ja termien kuorma vaikuttavat diverttoritiiliin usealla tavalla: tiiliin iskeytyvät hiukkaset aiheuttavat sekä kemiallista (hitaat hiukkaset) että fysikaalista (nopeat hiukkaset) eroosiota, jossa yksittäiset atomit ja molekyylit irtoavat tiilistä. Lisäksi iskeytyvät hiukkaset saattavat myös diffundoitua syvemmälle tiiliin ja aiheuttaa suuremmankin mitta-kaavan rakennevaurioita synnyttämällä hilavirheitä. Näiden ongelmien minimoimiseksi on pyrittävä minimoimaan diverttoritiilille saapuva hiukkas- ja termien kuorma.

Fuusioplasman diverttoritiilille kohdistama jatkuva kuorma on muutama MW/m², mihin tarpeeseen vastaavia materiaaleja löytyy jos nyt ei ihan lähikaupan hyllyltä niin kuitenkin kohtuullisen helposti. Diverttoritiilien todellinen murhe ei olekaan tämä jatkuva kuorma, vaan suorituskykyisille plasmoilte tyypillinen ELM (Edge Localized Mode) -ilmiö. ELMien aiheuttamat energia- ja

hiukkaspuurukset plasmasta iskeytyvät nopeasti diverttoritiilille ja vapauttavat koko energiasäilytönsä erittäin lyhyessä ajassa. Koska puurukset kulkevat kenttäviivoja pitkin, on niiden iskeytymiskohta tiilillä erittäin kapea, mikä johtaa suureen tehotehyyteen. Tyypin I ELMin diverttoritiiliin kohdistama tehotehyyden onkin kymmeniä tai jopa yli sata MW/m², mitä mikään tänä päivänä tunnettu materiaali ei kestä ilman merkittäviä vaurioita. Onkin arvioitu, että ITERin perusversion diverttoritiilet kestäisivät vain kymmenkunta I-tyypin ELMien dominoimaa plasmapurkausta.

Tähän ongelmaan on kaksi mahdollista ratkaisua:

1) Pyritään eliminoimaan ELMit tai räätälöimään ne paremmin käyttäytyviksi. Tämä on fuusioplasmafysiikan tutkimusalue, josta enemmän Saarelman artikkelissa.

2) Pyritään kehittämään diverttorisuunnittelua monipuolisesti siten, että käytetyt materiaalit ja pintoihin osuvat kuormat olisivat yhteensopivia. Tässä työssä merkittävässä roolissa ovat plasma-seinä -vuorovaikutukset.

Plasma-seinä -vuorovaikutusten tärkeydestä tämän päivän fuusiotutkimuksessa on hyvä osoitus se, että vuonna 2002 EFDA (European Fusion Development Agency) valitsi juuri tämän alueen toiseksi kahdesta avaintutkimusalueesta, jota varten perustettiin oma asiantuntijaryhmänsä.

Diverttoritiilet kerroskerrokselta

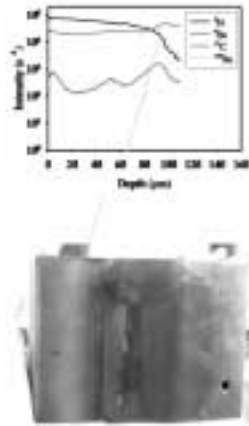
Suomessa plasma-seinä -vuorovaikutuksia tutkitaan kokeellisesti VTT:llä ja Helsingin yliopistolla sekä numeerisesti TKK:lla. VTT Prosesseissa ja Helsingin yliopiston Kiihdytinlaboratoriossa mitataan sekä JET- että ASDEX Upgrade-laitteiden ensiseinä - ja diverttoritiilien eroosiota ja niiden päälle syntyneitä kerrostumia. Osa diverttoritiilistä on pinnoitettu Suomessa ohuella hiili- tai metallikerroksella, jonka paksuus mitataan

ennen tiilien asentamista. Pinnoitteiden paksuus mitataan uudelleen koesarjan jälkeen ja mittausten perusteella päätellään, onko diverttoritiili kulunut vai onko sen päälle kasvanut kerrostumia.

Diverttoritiilien analyysillä voidaan selvittää sekä ensiseinä- että diverttoritiilien elinikä. Toinen tärkeä syy tiilien karakterisoinnille on se, että sekä nykyisten laitteiden että ITERin diverttorimateriaaliksi on valittu hiilikuitukomposiitteja, jotka kestävät suuria lämpö- ja hiukkaskuormia. Näistä materiaaleista irtoaa hiukkaspommituksen vuoksi hiilipartikkeleita. Ne sitovat itseensä fuusioplasmaasta karanteita vedyn isotooppeja muodostaen hiilivety-molekyylejä, jotka kulkeutuvat pääasiassa takaisin diverttorille. Diverttoritiilien pinnoille syntyy näin runsaasti vetyä sisältäviä kerrostumia.

Nykyisin hiilivetykerrostumat eivät aiheuta suuria ongelmia, koska laitokset ovat pääasiassa tutkimuskäytössä, polttoaine on deuteriumia ja diverttorit on suunniteltu vaihdettaviksi. ITERissä käytetään polttoaineena deuteriumin lisäksi vedyn radioaktiivista tritium-isotooppia, joka sitoutuu hiilen mukana diverttoritiiliin. Koska laitteeseen sitoutuneen tritiumin määrälle on asetettu yläraja, täytyy hiilivetykerrostumat ajoittain puhdistaa. ITERiä varten joudutaan kehittämään menetelmiä, joilla diverttoritiilien puhdistaminen voidaan tehdä fuusiokammion sisällä, koska tiilien irrottaminen ja puhdistaminen sen ulkopuolella on hankalaa. Luonnollisesti paras ratkaisu olisi vetytitoisten kerrostumien muodostumisen ehkäisy tai hidastaminen. Tämän takia hiilivetykerrostumien syntymekanismien, niiden kemiallisten ominaisuuksien sekä vedyn isotooppien diffuusion tutkiminen ja ymmärtäminen on ITERin kannalta erittäin tärkeää.

Ensiseinä- ja diverttoritiilien analysoimiseen on käytetty useita eri ionisuihkumenetelmiin perustuvia pinta-analyysimenetelmiä VTT:llä, Helsingin yliopistolla, JET:llä sekä ASDEX Upgradella. VTT:n sekundääri-ionimassaspekt-



VTT:n SIMS:llä mitattu syvyysprofiili JETin diverttoritiilestä. Kuvan alaosaan on osoitettu analyysikohta. Syvyysprofiilissa on piirretty deuteriumin (^2H), berylliumin (^9Be), hiilen (^{12}C) ja reniumin (^{185}Re) jakaumat näytteen pinnasta. Hiilikuitutiilen päälle oli kasvatettu ohut renium-kerros ennen tiilien asentamista.

rometrilla (SIMS) on pystytty määrittämään kerrostumien paksuudet ja Helsingin yliopiston ionisuihkuihdyttimellä niiden kemiallinen koostumus. Esimerkiksi JETin diverttoritiileissä runsaasti deuteriumia sisältävän kerrostuman paksuudeksi mitattiin noin 90 mikrometriä.

Laskentamenetelmiä kehitettävä

Eri pinta-analyysimenetelmillä on saatu runsaasti uutta tietoa ensiseinäkomponenttien kulumisesta ja kerrostumien kemiallisesta koostumuksesta, mutta kerrostumien syntymekanismia ja kemiallista koostumusta ei ymmärretä vielä riittävän hyvin, jotta voitaisiin tehdä tarkkoja ennusteita ITERiä varten. Mekanismit eivät liene kovin yksinkertaisia, sillä eri laitteissa kerrostumia muodostuu diverttorilla eri paikkoihin. Synty- ja kulkeutumismekanismien tutkimiseen käytetään erilaisia tietokonesimulaatioita. Vuodesta 2004 lähtien TKK on osallistunut Jülichin tutkimuskeskussa (FZJ) luodun ERO-koodin kehitystyöhön. ERO

mallintaa hiilen eroosiota ja redepositiota diverttorilla ja on ainoa laatuaan Euroopassa.

Tällä hetkellä eri simulaatiomallit eivät ole pystyneet selittämään kokeellisesti mitattuja, tuhansien erilaisten plasmapurkausten aikana syntyneitä muutoksia diverttoritiilien pinnalla. Osittain tämän vuoksi on viime vuosien aikana sekä JET:ssä että ASDEX Upgradessa puhallettu plasmaan metaania, joka sisältää merkkiaineena hiilen isotooppia ^{13}C , joka voidaan analysoida em. pinta-analyysimenetelmillä suhteellisen helposti. Näissä merkkiainekokeissa tyypillisesti ajetaan vain tietyn tyyppisiä plasmoja ja vain parin päivän ajan, joten kokeiden olosuhteet sekä mitattavan hiilivedyn määrä ovat hyvin kontrolloituja. Näiden kokeiden tulosten avulla voidaan kehittää ja korjata nykyisiä tietokonealleja, ja tältä pohjalta lopulta löytää tärkeimmät fysikaaliset ja kemialliset prosessit, jotka ovat vastuussa hiilivetykerrostumien synnystä.

Lähivuosina onkin toivottavissa, että tiivis yhteistyö saksalaisten fuusiolaboratorioiden (IPP ja FZJ) sekä JETin kanssa tulee ratkaisemaan 'kadonneen hiilen arvoituksen' ja kertomaan, minne hiili ja sen matkakumppanina kulkeva vety päätyvät eri plasmaolosuhteissa. Ja kun tapahtumaketjun fysiikka on tiedossa, niin fyysikot – tai viimeistään insinöörit – yleensä keksivät tavan kesyttää elämää hankaloittavat prosessit.

Dosentti Taina Kurki-Suonio
Opettava tutkija
Teknillinen fysiikka,
energiatieteet
Teknillinen korkeakoulu
Taina.Kurki-Suonio@tkk.fi



FT Jari Likonen
Johtava tutkija
VTT Prosessit
Jari.Likonen@vtt.fi

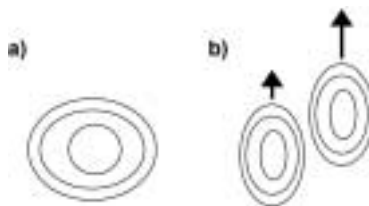


Fuusio – fyysikon Graalin malja

Fuusioenergian valjastaminen ihmisen käyttöön on yksi fysiikan pisimpään kestäneistä projekteista. Vetypommit saatiin toimiviksi jo 1950-luvulla, ja sen jälkeen odotettiin rauhanomaisen reaktorin tulevan nopeasti käyttöön. Fuusioreaktorin rakentaminen osoittautui kuitenkin paljon arveltua vaikeammaksi. Kuumen fuusiopolttoaineen, plasman, käyttäytyminen noista ajoista lähtien on sekä kiehtonut että välillä myös turhauttanut fyysikoita ympäri maailman.

Kokeet plasmakoneissa, teorian kehittelyt fyysikkojen kammioissa ja viime aikoina myös plasman simulointi supertietokoneilla laskien ovat vieneet ymmärtämystämme plasmasta harppauksin eteenpäin. Vielä on kuitenkin matkaa toimivaan fuusioreaktoriin. Suurin osa vaadittavasta kehityksestä on teknologiaan liittyvää. Kansainvälisen ITER-projektin painopiste onkin teknologian kehityksessä. Itse fuusioplasman fysiikassa suurimmat ongelmat ovat pääosin ratkaistu. Mitä plasmasta on opittu ja mitkä asiat vielä askarruttavat mieltä ennen kuin Graalin malja on käsissämme?

Fuusioreaktorissa plasma on pidettävä riittävän tiheänä ja kuumana, jotta fuusioreaktiot voivat tapahtua. Ongelmana on se, ettei kuumaan plasmaan voi koskea millään kiinteällä aineella, koska se höyrystyisi välittömästi. Magneettinen koossapito perustuu siihen periaatteeseen, että magneettikentässä varatut hiukkaset pysyvät magneettisten kenttäviivojen läheisyydessä. Hiukkaset pääsevät liikkumaan vapaasti kenttäviivoja pitkin, mutta kenttäviivojen poikki tapahtuva liike on estetty. Tämä mahdollistaa tiheys- ja lämpötilagradientin luomisen kohtisuoraan magneettikenttää vastaan, jolloin laitteen keskellä plasma voi olla kuumaa ja tiheää, mutta reunalla niin kylmää, etteivät laitteen seinämät vahingoitu. Ongelmaksi jää toki edelleen magneettikentän suuntainen



Turbulenssin vaimentuminen plasmavirtauksen ansiosta. Eri nopeuksilla virtaavat plasmakerrokset repivät turbulenssipyrteet erilleen ja siten lämmön siirtyminen ulos plasmasta hidastuu.

hiukkasten liike. Siitä päästään eroon kiertämällä laite toruksen eli rinkiän muotoon, jolloin kenttäviivat ovat suljettuja plasman sisällä. Toroidaaliset laitteet ovatkin olleet fuusiotutkimuksen ydintä jo vuosikymmeniä.

Fuusioreaktorin perusrakenne

Valitettavasti pelkkä toroidaalinen (pitkää kautta toruksen kiertävä) magneettikenttä ei riitä hiukkasten koossapitoon. Tällainen kenttä on voimakkaampi toruksen sisäreunalla kuin ulkoreunalla. Kentän voimakkuuden gradientti johtaa hiukkasen ajautumiseen toruksen ylä- ja alaosan riippuen hiukkasen varauksesta. Ionit ajautuvat eri suuntaan kuin elektronit. Tämä johtaa varausten erottumiseen, mikä puolestaan synnyttää sähkökentän.

Sähkökenttä aiheuttaa hiukkasten ajautumisen ulos laitteesta. Tämän estämiseksi torukseen pitää toroidaalisen magneettikentän lisäksi luoda poloidaalinen (lyhyttä kautta toruksen kiertävä) magneettikenttä, jolloin varausten erottuminen estyy. Poloidaalinen kenttä voidaan luoda joko plasmaan synnyttävän virran tai ulkoisten kelojen avulla. Tokamak ja stellaraattori ovat plasmakoneita, joissa magneettikentällä on sekä toroidaalinen että poloidaalinen komponentti.

Plasman koossapito

Tokamakin keksiminen 1960-luvulla vei plasman koossapidon tutkimusta vauhdilla eteenpäin. Hiukkasten suoran ulosajautumisen estämisen jälkeen vastaan tuli kuitenkin uusia ongelmia. Kun plasmaa alettiin kuumentaa ulkoisilla kuumennusmenetelmillä kuten hiukkassuihkuilla, osoittautui, että pelkän hiukkasten törmäilyyn perustuvan diffuusion sijaan lämpö karkasikin plasmasta kymmeniä tai satoja kertoja nopeammin.

Tämä oli paha takaisku, joka vei jo käsillä olleen fuusioenergian kauemmas tulevaisuuteen. Pian selvitettiin, mikä kuumennuksen mukana huononevan koossapidon syy oli. Plasman paineen kasvaessa siihen syntyi turbulenssia, mikä siirsi tehokkaasti lämpöä keskustasta reunalle. Mitä jyrkemmäksi painegradientti saatiin

nostettua, sitä voimakkaammaksi plasman pyörteisyys kävi. Turbulenssin mallinnus tietokonelaskennalla on noista ajoista lähtien ollut yksi tärkeimmistä teoreettisen tutkimuksen aiheista. Se on ollut myös yksi kiivaimmin kiistellyistä osin johtuen siitä, että plasman turbulensista ei ole ollut saatavissa kovin hyviä suorja mittauksia. Tällä hetkellä turbulenssin suurimmat avoimet kysymykset liittyvät siihen, lisääntyykö turbulenssi laitteen kasvaessa vai parantaako laitteen koon kasvattaminen koossapidon tehokkuutta johtuen siitä, että lämmön on kuljettava pidempi matka päästäkseen ulos plasman keskeltä. Tämä kysymys on kriittinen sen kannalta, miten nykyisistä pienistä tokamakeista voidaan ekstrapoloida ITERin ja sitä seuraavien suurien tokamakien suorituskyky.

Plasman koossapidon tutkimus on tuonut myös positiivisia yllätyksiä. Kun tokamakplasmaa kuumennettiin tarpeeksi kovalla teholla, sen koossapito yllättäen parani ja plasma siirtyi ns. hyvän koossapidon moodiin eli H-moodiin (high confinement mode) vastakohtana huonon koossapidon moodille eli L-moodille (low confinement mode). H-moodissa plasman reunalle syntyy voimakas sähkökenttä, joka aiheuttaa plasman pyörimistä. Eri nopeuksilla pyörivät plasmakerrokset repivät turbulenssin pyörteet erilleen toisistaan ja siten estää lämmön siirtymisen reunavyöhykkeen yli. Tämän ns. kuljetusvallin ansiosta painegradientti pääsee jyrkentymään selvästi L-moodin tilanteesta. Joissain tilanteissa on mahdollista aikaansaada myös plasman sisäinen kuljetusvalli (internal transport barrier, ITB), jonka avulla plasman keskustan paine saadaan hyvin korkeaksi.

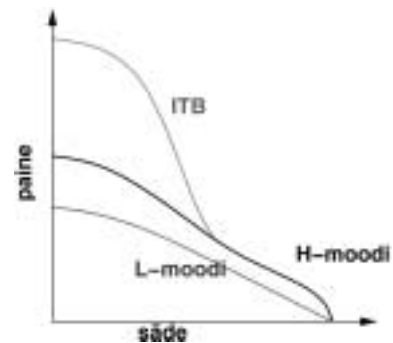
Epästabiilisuudet plasmassa

Plasman hyvä koossapito ei vielä riitä fuusioenergian tuottoon. Sen lisäksi plasmaan ei saa syntyä epästabiilisuuksia, jotka pahimmassa tapauksessa johtavat koko plasman paiskautumiseen tokamakin seiniin. Epästabiilisuudet ovatkin as-

karruttaneet fyysikoita ensimmäisistä tokamakeista JETiin asti. Tokamakplasma on kaksi vapaan energian lähdettä, paine ja sähkövirta. Paineeseen liittyviä epästabiilisuuksia voi ajatella polkupyörän sisäkumin avulla. Magneettikentän voimakkuus vastaa tässä analogiassa kumin kestävyyttä. Kun kumiin pumpppaa tarpeeksi ilmaa, se alkaa pullistua siitä kohdasta, missä kumi on heikointa. Kun paine kasvaa tarpeeksi, kumi puhkeaa ja kaikki ilma menetetään. Samalla tavoin plasman paineen kasvaessa suhteessa magneettikenttään plasma alkaa pullistua ja lopulta sen koossapito menetetään kokonaan. Epästabiilisuudet asettavat siis paineen ja magneettikentän suhteelle ylärajan, jota ei voi ylittää, vaikka koossapito saataisiin kuinka hyväksi. Tokamakissa kalleinta on voimakkaan magneettikentän luominen. Fuusioteho taas on riippuvainen plasman paineesta. Kehittämällä menetelmiä, joilla epästabiilisuudet voidaan välttää, on mahdollista nostaa paineen ja magneettikentän suhdetta ja siten parantaa fuusioenergian kannattavuutta.

Virran aiheuttamat epästabiilisuudet taas perustuvat siihen, että samansuuntaiset sähköjohtimet vetävät toisiaan puoleensa. Toruksessa tämä ilmenee siten, että virran kasvaessa liian suureksi, plasma menee kiemuralle, mikä johtaa nopeaan plasman koossapidon menetykseen.

Koko plasman koossapidon menetykseen eli disrupioon johtavien epästabiilisuuksien lisäksi plasmaan voi syntyä paikallisia epästabiilisuuksia. Jo mainittu H-moodin jyrkkä painegradientti aiheuttaa ns. ELMejä (Edge Localised Modes), joissa reunaplasman koossapito hetkeksi menetetään. ELMit eivät ole koko plasman koossapidon kannalta kovin haitallisia, mutta ne voivat aiheuttaa voimakasta kulumista laitteen pohjalla oleville diverttorilevyille. Plasman keskustaan voi myös ilmaantua erilaisia epästabiilisuuksia, jotka eivät johda koko plasman menetykseen, mutta saattavat huonontaa plasman koossapitoa. Joistain epästabiilisuuksista on jopa hyötyä, koska ne poistavat plasman keskustaan kertyviä epäpuhtauksia ja



Plasman paineen radiaalinen profiili tokamakin eri toimintamooideissa. H-moodissa ja ITB:ssä paineeseen syntyy jyrkkiä gradientteja turbulenssin kadotessa.

fuusioreaktioissa syntyvää heliumia. Kuten turbulenssia, myös epästabiilisuuksia tutkitaan plasmakokeiden lisäksi tietokonekoodeilla, joilla voidaan laskea, missä tilanteessa epästabiilisuuksia syntyy ja myös määrittää niiden luonnetta. Näiden tulosten perusteella voidaan muuttaa plasmaa niin, että epästabiilisuudet joko katoavat kokonaan tai niiden vaikutus on vähemmän haitallinen.

Koossapidon ja stabiilisuuden lisäksi on fuusiota toteutettaessa pitänyt selvittää pienempiä, mutta usein kriittisiäkin kysymyksiä kuten miten plasma ja kiinteät rakenteet vuorovaikuttavat keskenään, miten kuumennusjärjestelmistä saadaan suurin mahdollinen teho plasmaan tai miten plasmaan voidaan ajaa virtaa käyttämättä muuntajaperiaatetta.

Plasmafysiikan näkökulmasta tie kohti fuusiota on ollut pitkä ja mutkainen. Matkalla on tullut sekä positiivisia että negatiivisia yllätyksiä vastaan. Vaikka ITER tuleekin todennäköisesti toimimaan pääpiirteissään niin kuin sen nykyisin uskotaan toimivan, niin varmasti plasmafysiikoita odottaa sielläkin yllätyksiä. ■



MULTIPHYSICS – termohydrauliikka- ja rakenneanalyysien linkittäminen nesterakennesysteemissä

MULTIPHYSICS-projekti on Fortum Nuclear Services (FNS) Oy:n ja VTT:n yhteishanke, jonka tavoitteena on kehittää työkaluja virtaus-rakente-vuorovaikutusongelmien laskennalliseen analysointiin. Projektin sovelluskohteet tulevat ydinvoimateollisuudesta, mutta vuorovaikutusilmiöistä aiheutuvat ongelmat ovat hyvin tavallisia monenlaisessa teollisessa toiminnassa. MULTIPHYSICS-projektin tulokset soveltuvat siis myös muiden kuin ydinvoimateollisuuden hyödynnettäviksi. Projektin rahoitus tulee Tekesiltä ja Fortumilta, ja se kuuluu Tekesin Mallinnus ja Simulointi (MASI) -ohjelmaan.

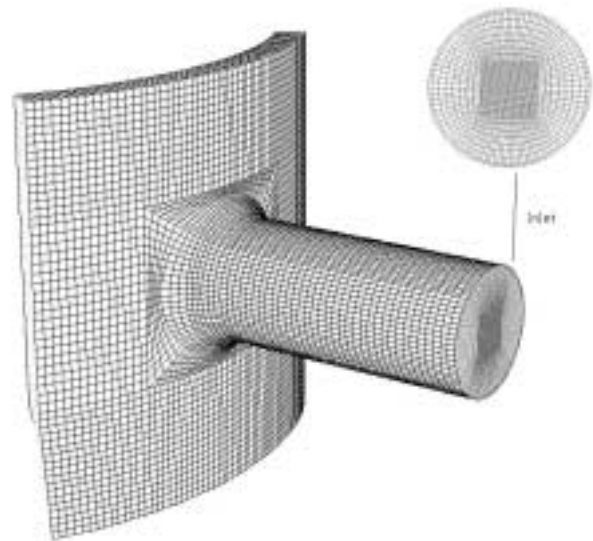
Virtausten ja rakenteiden vuorovaikutus (Fluid Structure Interaction, FSI) tarkoittaa sitä, että virtauksen rakenteisiin kohdistamat voimat kuormittavat rakenteita sekä mahdollisesti aiheuttavat rakenteiden siirtymiä. Kuormituksia aiheuttavien herätteiden lähde voi olla staattinen tai dynaaminen. Rakenteiden siirtymiä aiheuttavien herätteiden ollessa dynaamisia voi esiintyä rakenteiden värähtelyä. Mikäli nämä värähtelyt osuvat, kuten yleensä osuvat silloin kun värähtelyä ilmenee, materiaalin luonnolliselle värähtelytaajuudelle, voi syntyä materiaalivaurioita.

Ongelmia aiheuttavat staattiset herätteet voivat aiheutua virtauksen äkillisistä häiriöistä, kuten esimerkiksi putkikatosta tai venttiilin äkillisestä sulkemisesta. Dynaamiset voimat syntyvät usein virtauksen sisältämästä heilahtelusta, kuten turbulenssista, joka voi toimia rakenteen värähtelyn herätteenä. Tämä on huomioitava muun muassa siltojen suunnittelussa. Tällaisten ongelmien olemassaolo on luonut tarpeen kehittää niiden mallintamiseen soveltuvia simulointityökaluja.

Laskennallinen mallintaminen

Perinteisin tapa näiden ongelmien analysoinnissa on virtauksen aiheuttamien

kuormitusten mallintaminen jollakin suhteellisen karkealla menetelmällä minkä jälkeen rakenteiden lujuuslaskennat suoritetaan rakenneanalyysiohjelmissa (Finite Element Analysis, FEA). Esimerkki tällaisesta lähestymistavasta on kuormituksia aiheuttavien virtausilmiöiden laskeminen jollakin monifaasisysteemikoodilla (esim. APROS). Tällöin faasimuutosilmiöiden sisällyttäminen laskentaan on helppoa, mutta virtauksen yksityiskohtainen kuvaaminen ei ole kuitenkaan mahdollista.



Paineentät Loviisan kylmähaaran sisääntulossa LBLOCA -tilanteessa.

Toinen mahdollisuus on käyttää FSI:n ongelmien ratkaisuun suunniteltuja laske- taohjelmia, jotka kykenevät laske- maan sekä virtaus- että rakenneilmiöitä. Näissä ohjelmissa on kuitenkin yleensä jouduttu tekemään kompromisseja joko virtaus- tai lujuuslaskennan tarkkuudes- sa. Ohjelmistot ovat usein lujuuslasken- taohjelmistoihin pohjautuvia ja virtauksen mallinnusominaisuuksissa voi olla puutteita, jolloin virtauksen pienet yksi- tyiskohdat menetetään. Useissa tapauk- sissa näiden ohjelmistojen mahdollista-

ma virtauskentän kuvaus on kuitenkin tarkkuudeltaan riittävä.

Kolmas vaihtoehto on suorittaa termohydrauliset analyysit kolmiulotteisen virtauksen pienetkin yksityiskohdat huomioiden laskennallisen virtausmekaniikan (Computational Fluid Dynamics, CFD) avulla ja rakenteiden lujuuslaskennat rakenneanalyysiohjelmissa. Tällöin tarvitaan jokin menetelmä ohjelmistojen linkittämiseen. Linkityksen tulisi olla kaksisuuntaista. Linkitykseen voidaan käyttää ulkopuolista interpolointiohjelmaa, mutta ohjelmistovalmistajat ovat kehittämässä myös ohjelmiin valmiiksi sisältyviä linkitysmenetelmiä. CFD laskennan käytön suurin rajoite on faasimuutosten huomioimisen vaikeus. Mikäli faasimuutosten huomioiminen on laskennan kannalta välttämätöntä, on mahdollista käyttää monifaasisysteemikoodeja faasimuutosten laskentaan ja sisällyttää ne reunaehtojen avulla CFD laskentaan. MULTIPHYSICS-projektissa keskitytään tutkimaan CFD ja FEA ohjelmistojen linkitysmahdollisuuksia.

Sovelluskohde ja ohjelmat

Muun muassa viranomaisvaatimuksista johtuen ydinvoimateollisuudessa tärkeä FSI-sovelluskohde on sydämen sisärakenteiden kestävyys suunnitteluperusteisen onnettomuuden (Design Basis Accident, DBA) tapauksessa. Tällainen onnettomuus voi olla ydinvoimalaitoksen suuri jäähdytteenmenetysonnettomuus (Large Break Loss of Coolant Accident, LBLOCA), joka tarkoittaa sitä, että reaktoriin vettä tuova putki katkeaa juuri reaktorin paineastian ulkopuolelta.

MULTIPHYSICS-projektissa pyritään mallintamaan LBLOCA-tilanne likittämällä CFD-ohjelma FLUENT FEA-ohjelman ABAQUS kanssa. Linkitys tapahtuu kaksisuuntaisesti MpCCI-linkitysohjelmaa käyttäen. Painereunaehto putken katkeamiskohdassa mallinnetaan APROS ohjelmalla.

Laskenta

Putkikatkon tapahtuessa suurin paineen pudotus tapahtuu välittömästi katkeamisen jälkeen virtauksen ollessa vielä yksifaasitilassa. Hyvin pian katkeamisen jälkeen putkesta ulos virtaava neste alkaa kiehua ja virtaus saavuttaa kriittisen virtauksen rajan, jolloin paine putken katkeamiskohdassa nousee lähelle kylläistä tilaa. Näin ollen tilannetta voidaan tarkastella yksifaasitapauksena silloin, kun tavoitteena on analysoida rakenteisiin kohdistuvia maksimivoimia.

Tässä projektissa laskenta on tarkoitettu suorittamaan kolmessa vaiheessa. Ensin painereunaehto putken katkeamiskohdassa lasketaan APROS-ohjelmalla. Tätä reunaehto käytetään FLUENT-ohjelman reunaehtona. Reaktoriin etenevän paineaallon törmätessä reaktorin sisäpesään, syntyvät voimat aiheuttavat pesään rasituksia sekä siirtymiä. Voimat ja siirtymät saadaan laskettua ABAQUS-ohjelmalla, kun FLUENT:illa laskettu painekenttä interpoloidaan MpCCI-ohjelman avulla ABAQUS-ohjelmaan. Siirtymät kuitenkin vaikuttavat jossain määrin pesään kohdistuviin voimiin, joten painekenttä tulee laskea uudelleen. Tämä tapahtuu siten, että ABAQUS-ohjelmasta saadut rakenteiden siirtymät palautetaan FLUENT:iin ja painekenttä lasketaan uudelleen. Tätä tiedon vaihtoa jatketaan aika-askel kerrallaan kunnes paineaalto on edennyt reaktorissa halutun matkan.

Tulosten hyödyntäminen

FSI-ilmiöt ovat kaikessa teollisessa toiminnassa hyvin yleisiä. Ilmiöitä esiintyy sekä normaaleissa käyttötilanteissa että äkillisissä poikkeustilanteissa. FSI-ongelmien tehokkaampaa analysointia voitaisiin siis käyttää hyväksi sekä normaalien teollisuusprosessien tehostamisessa että turvallisuuden lisäämisessä esimerkiksi onnettomuustilanteissa. Projektin tuloksia voidaan siis käyttää hyväksi ydinvoimateollisuuden lisäksi minkä tahansa teollisuuden alan piirissä. ■

DI Ville Lestinen
Suunnitteluinsinööri
Termohydrauliikka
Fortum Nuclear Services
ville.lestinen@fortum.com



Ydinvoimatutkimus Fortumissa

Uuden kehittämistä ja osaamisen laajentamista

Fortumin ydinvoimaan liittyvän tutkimus- ja kehitystoiminnan (T&K) keskeinen tavoite on yhtiön omistamien ydinvoimalaitosten turvallisen ja taloudellisen käytön tukeminen lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Tärkeää on myös, että ydinvoima-alan pidemmän aikavälin kehitystä seurataan aktiivisesti esimerkiksi uusien reaktorityyppien osalta.



Loviisan voimalaitoksen käytön monipuolinen tukeminen on kaikkein keskeisin tavoite Fortumin ydinvoimatutkimuksessa. Sekä ydinenergialaindääntö että ydinenergiatoiminnan laatutavoitteet edellyttävät, että yhtiöllä on riittävä osaaminen ja osaava henkilökunta ydinvoimalan turvallista käyttöä varten.

Loviisan osalta tilanteen tekee vaativaksi se, että turvallisuuspiirteiltään laitos on monessa suhteessa ainutlaatuinen, eikä laitoksen turvallisuusteknistä kokonaisuutta hallitsevaa ulkopuolista laitostoitimittajaa ole olemassa. Tämän vuoksi Fortumissa on vahva traditio tarvittavien

ratkaisujen kehittämisestä talon sisällä. T&K-toiminta auttaa osaltaan tarpeellisen asiantuntemuksen ylläpitämisessä ja kehittämisessä sekä erityisesti uusien asiantuntijoiden kouluttamisessa.

Loviisan voimalaitoksen merkitys T&K-työn tulosten loppukäyttäjänä on edellä mainituista syistä johtuen korostunut, mutta samalla pyritään kehittämään osaamista ja valmiuksia myös Fortumin muita ydinvoimaomistuksia ajatellen.

Viisi T&K-ohjelmaa

Fortumin sähköntuotannosta vastaavassa Generation-liiketoimintayksikössä on

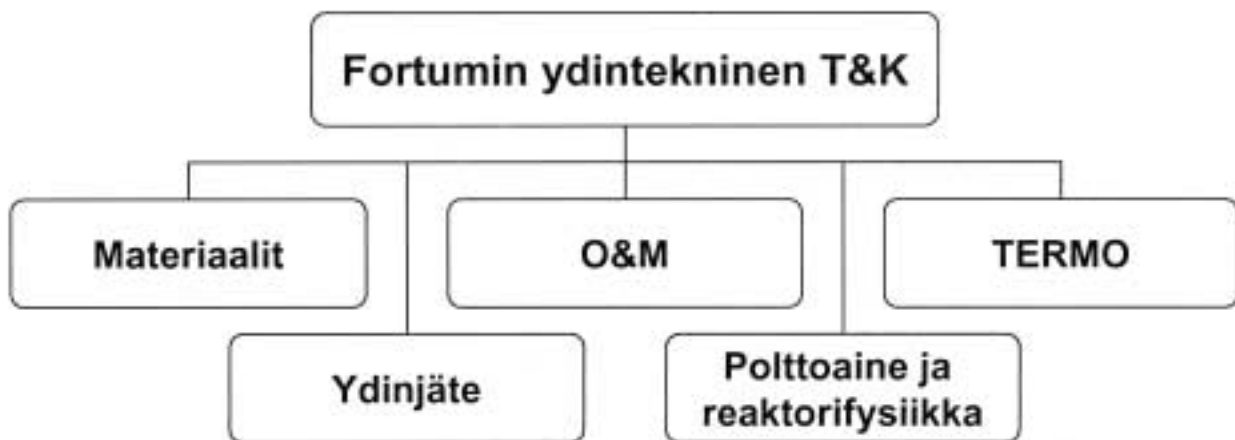
otettu käyttöön T&K-prosessi, jonka tavoitteena on T&K-ohjelmien toiminnan ja hallinnon täsmentäminen ja tehostaminen. Ydinvoimatutkimus on organisoitu viiteen T&K-ohjelmaan. Generationin T&K-panostusten pääpaino on soveltavassa tutkimuksessa sekä kehitystyyppisessä työssä.

T&K-ohjelmien tavoitteena on tukea laitosten jatkuvaa käyttöä toisaalta hakemalla ratkaisuja käytännössä jo havaittuihin ongelmiin ja toisaalta etsimällä ennakoivasti ja aktiivisesti vastauksia mahdollisiin tuleviin lisensiointikysymyksiin. Lisäksi T&K:n avulla pyritään parantamaan toiminnan kustannustehokkuutta.

Perustutkimusta, jossa yhtiön toiminnan kannalta tärkeää sovellus- tai parannuskohdetta ei ole määritelty, suoritetaan vain vähän. Hankkeiden perustelemiseksi käytetään tarveluokkia, joiden avulla voidaan ilmaista, onko kyseessä turvallisuustutkimukseen, kustannustehokkuuteen vai tietämyksen kehittämiseen liittyvä tutkimustarve.

Tutkimusyhteistyöstä synergiaetuja

Fortumissa on jatkuvasti panostettu oman ydinvoimaosaamisen kehittämiseen yhtiön sisällä. Samalla on myös nähty, että ydinvoimatutkimusta tulee edistää myös kansallisten ja kansainvä-



Fortumin ydinvoimatutkimusohjelmat.

listien projektien ja ohjelmien kautta. Tyypillisiä esimerkkejä löytyy esimerkiksi turvallisuustutkimuksen alueelta. Esimerkiksi vakavien reaktorionnettomuuksien ilmiöitä on ollut tarkoituksenmukaista tutkia myös laajoissa kansainvälisenä yhteistyöhankkeissa, joissa Fortum on ollut aktiivisesti mukana T&K-ohjelmiansa kautta.

Myös osallistumista kansalliseen SAFIR-turvallisuus-tutkimusohjelmaan ja alan Tekes-hankkeisiin ja -ohjelmiin pidetään tärkeänä. Yhteistyö VTT:n kanssa on tässä toiminnassa hyvin keskeistä, jotta pienen maan resursseja hyödynnettäisiin mahdollisimman järkevästi.

Fortumin ydinvoimatutkimuksen rakenne

Ydinvoimatutkimuksen viittä T&K-ohjelmaa kuvataan seuraavassa lyhyesti, toiminnan rakenne on esitetty oheisessa kaaviossa. Tarkempaan käsittelyyn otetaan TERMO-ohjelma, jonka tavoitteista ja hankkeista kerrotaan yksityiskohtaisemmin.

Fortumin ydinvoimatutkimuskokonaisuus on kasvanut hyvin konkreettisista Loviisan voimalaitoksen luvitus- ja muista tarpeista 80-luvusta lähtien. Uusin ohjelma, O&M (Operation & Maintenance), perustettiin vuonna 2004.

1. Materiaalitutkimus

Materiaalitutkimusohjelman painopistealueena on reaktoripainesäiliöiden luvitukseen liittyvän materiaalitietouden tuottaminen. Viime vuosina merkittävien tutkimuskohde on ollut hitsimateriaalin hehkutuksen jälkeisen haurastumisnopeuden määrittäminen. Hitsimateriaalin uudelleenaurastumisnopeus määritetään Loviisan voimalaitoksella suoritettavien säteilytyksin sekä osallistumalla kansallisiin ja kansainvälisiin tutkimusprojekteihin.

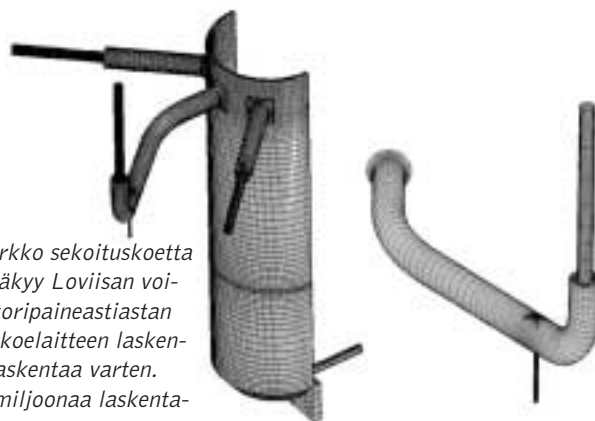
Ohjelman toisena tutkimusalueena on voimalaitoksen käyttöluvituksen oleellisesti liittyvän kriittisten komponenttien ja järjestelmien käyttöiän hallinnan edellyttämän materiaalitietouden ja analyysivalmiuksien luominen. Tällä tutkimusalueella on suora yhteys Loviisan käyttöiän hallinnasta vastaavaan organisaatioon.

2. Ydinjätetutkimus

Ydinvoimalaitoksen käyttäjä on tuottamiensa ydinjätteiden osalta huolehtimisvelvollinen ja varautumisvelvollinen. Ydinjätehuollon T&K-ohjelmassa selvitetään betonin ominaisuuksia kiinteytystä ja loppusijoitusta varten, kehitetään loppusijoituksen turvallisuuden arviointia ja saatetaan ajan tasalle ja kehitetään käytöstäpoistosuunnitelmaa. Ohjelmaan kuuluvat siis Posivan päätoimialan ulkopuoliset toiminnot.

3. Operation & Maintenance - O&M

O&M-tutkimusohjelman tavoitteena on tukea Loviisan voimalaitoksen lisensointia, käyttöiän hallintaa, käytön ja kunnossapidon optimointia sekä ylläpitää ja lisätä tutkimusalueen yleistä tietä-



Fluent-laskentaverkko sekoituskoetta varten. Kuvassa näkyy Loviisan voimalaitoksen reaktoripaineastiastan mallintavan PTS-koelaitteen laskentaverkko Fluent-laskentaa varten. Mallissa on noin miljoonaa laskentakoppia.

mystä. Tutkimusohjelma on käynnistynyt vuonna 2004 ja jatkuu vuonna 2005 pääosin samoilla painopistealueilla. Ohjelman tutkimusalueita ovat PSA:n kehitys, kunnossapidon menetelmät, automaatio ja valvomo, rakenteet ja rakenteiden mekaniikka sekä prosessiteknika. Esimerkiksi prosessiteknikan alueella tehdään tänä vuonna diplomityö jäälahduttimien taloudellisuudesta.

4. Polttoaine- ja reaktorifysiikan tutkimus

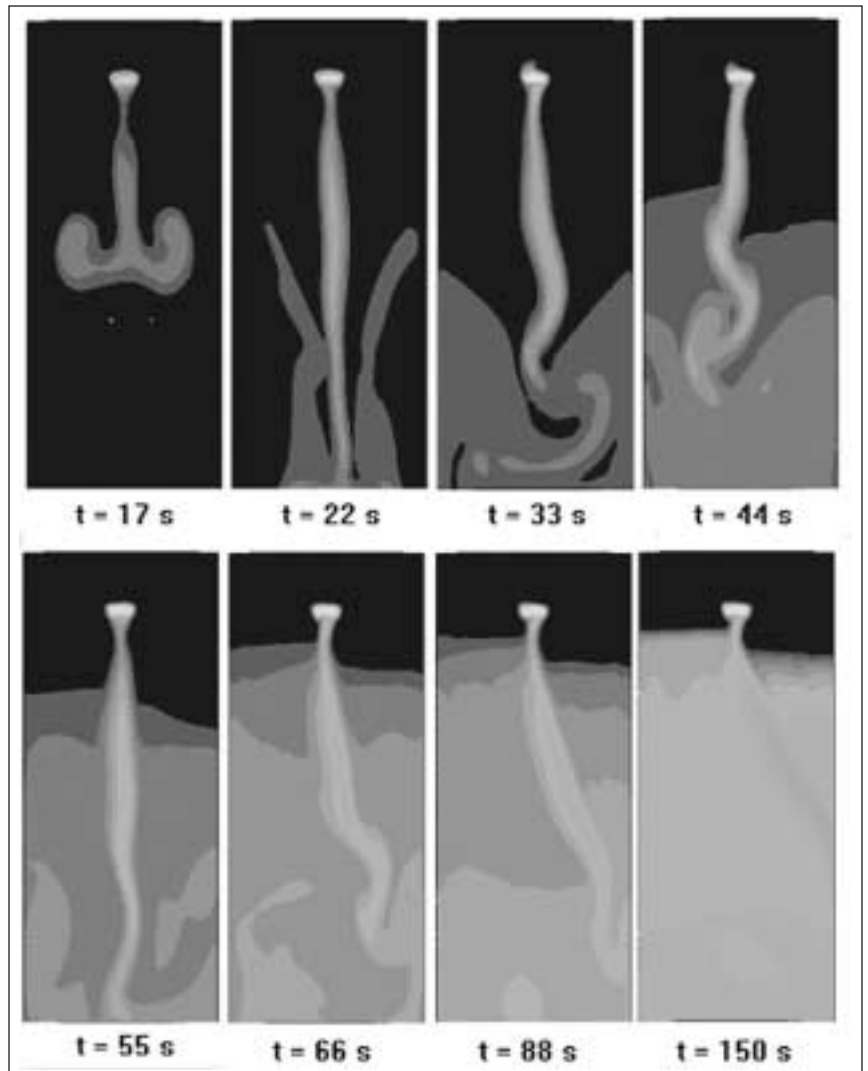
Polttoaine- ja reaktorifysikaalisten tutkimusten yleisempiä tavoitteita ovat:

- Ydinpolttotekniikan ja reaktoritekniikan tietotaitotason säilyttäminen. Tämän tavoitteen merkitys kasvaa vähitellen ydinvoima-alan asiantuntijoiden yleisen sukupolvenvaihdoksen myötä.
- Korkeapalamisen polttoaineen onnettomuuskäyttäytymisen riittävä ymmärtäminen.
- Muiden suorittamien VVER-polttoaineen tutkimusten tulosten saannin varmistaminen tietojen vaihdolla.
- Polttoaineen ja reaktorin käyttäytymisen analyysivalmiuksien ylläpito ja kehittäminen uusia polttoainetyyppejä ja/tai ydinvoimalaitoksia silmällä pitäen.

5. Lämpötekniinen ydinturvallisuus - TERMO

Kokeellisen ja laskennallisen lämpötekni- sen tutkimustoiminnan tarkoituksena on tukea Fortumin ydinvoimalaitosten käyttötoimintaa. Tarkoituksena on myös ennakoida ja selvittää luvituksen esteeksi nousevia kysymyksiä ja edesauttaa ydinvoiman yleistä hyväksyttävyyttä pienentämällä laitosten onnettomuuskäyttäytymiseen ja -päästöihin liittyviä epävarmuuksia. TERMO-tutkimusohjelman erityisenä tavoitteena on selvittää reaktori- piirin ja suojarakennuksen termohydrau- liikkaan liittyviä ongelmia.

TERMO-ohjelman tavoitteena on myös ydintekni- sen osaamisen ylläpitäminen ja erityisesti nuorten asiantuntijoi-



Laskentatuloksia syötetyn veden sekoittumiskäyttäytymisestä. Kuvissa näkyy hyvin tyypillinen esimerkki TERMO-hankkeesta, jossa kehitystyötä on tehty EU:n 5. puiteohjelman FLOMIX-R-tutkimusprojektin puitteissa laajassa kansainvälisessä yhteistyössä.

den kouluttaminen vaativiin turvallisuustekniisiin tehtäviin insinöörin ja käyttötoiminnan parissa. Koulutustavoite voidaan saavuttaa erinomaisella tavalla kansainvälisesti korkeatasoisissa T&K-projekteissa. Uuden osajasukupolven kasvattaminen ja pitäminen Fortumissa on ensiarvoisen tärkeä seikka Suomessa tänä päivänä, koska ydinvoimatekniikan osaajilla on alan organisaatioissa kysyntää ja rekrytointi on ollut aktiivista.

Vuoden 2005 TERMO-ohjelma

TERMO-ohjelmaan sisältyy useita EU:n

6. puiteohjelman tutkimushankkeita ja kansalliseen SAFIR-ohjelmaan raportoitavia hankkeita, joihin saadaan myös Tekes-rahoitusta. Kansainvälinen verkottuminen on aina ollut voimakkaasti esillä TERMO-ohjelman hankkeissa.

T&K-työtä on tehty TERMO-ohjelman tutkimusaiheista 80-luvulta lähtien. Kokeellisella työllä on perinteisesti ollut suuri merkitys. Alkuvaiheen hätäjähdytysveden sekoituskokeet ja 90-luvun vakavien reaktoreiden seurausten lieventämiseen liittyvät kokeet suoritettiin Viikissä sijainneessa Virtauslaboratoriossa. Omasta laboratoriosta luovuttiin vuonna 2004, mutta jatkossakin kokeellinen tut-

kimus, mallinnus ja mallien validointi ovat TERMO-ohjelman keskeisiä elementtejä.

Vuonna 2005 tutkimusohjelmaan kuuluu 19 osaprojektia, jotka jatkautuvat kolmelle pääalueelle:

1. käyttöiän hallinnan menetelmät ja termohydraulinen tuki,
2. valmistautuminen käyttöluvan uusimiseen,
3. kansainvälinen verkottuminen ja informointi.

Käyttöiän hallinnan pääalueella pyritään kehittämään numeerisen virtauslaskennan reaktorisovelluksia, esimerkkeinä voidaan mainita polttoainepipun virtauslaskentaa ja höyrystimen sekundääripuolen virtauskentän mallintamista. Tavoitteena on myös parempien laskentavalmiuksien aikaansaaminen neste/rakennevuorovaikutusten alueella, sovelluskohteina esim. reaktorin sisäosiin kohdistuvat termohydrauliset kuormat DBA-tilanteessa sekä vesi-iskukysymykset.

Käyttölupaan valmistautumisen pääalueen tärkein teema on APROS-ohjelmiston kehittäminen siten, että Loviisan suojarakennuksen lisensointianalyysit voidaan suorittaa APROS:illa vuonna 2006. Loviisan käyttölupahakemuksen PSA-laajennusten edellyttämien päästölaskentamenetelmien kehittäminen on myös tämän pääalueen keskeistä sisältöä.

Virtauslaskennan tuloksia

Hätäjäähdytysveden sekoittumista koelaitteen ns. downcomerissa voidaan verrata Virtauslaboratorion sekoituskokeissa mitattuihin tuloksiin. Koska laskenta vastaa koetuloksia varsin hyvin, voidaan kohtuullisella luotettavuudella soveltaa laskentamenetelmää myös tiettyihin todellisiin reaktorisovellutuksiin.

Esitetyn hanke-esimerkin tärkeimmät piirteet olivat tutkimusaiheen liittyminen ydinvoimalaitoksen keskeisiin luvituskysymyksiin, hyödyllisten laskentavalmiuksien ja osaamisen kehittäminen Fortumin sisällä sekä tiivis kansainvälinen yhteistyö. Nämä samat lähtökohdat ovat relevantteja TERMO-ohjelmakokonaisuudelle ja itse asiassa koko Fortumin ydinvoimaan liittyvälle T&K-toiminnalle.

*DI Petra Lundström
Teknologiapäällikkö
Turvallisuus ja polttoaine
Fortum Nuclear Services Oy
petra.lundstrom@fortum.com*



TAPAHTUMA- KALENTERI

**YG:n 1. Kesärieha 15.8.2005,
Soukanniemi, Espoo**

Kutsu yg-postituslistalle kesäkuussa
Lisätietoja: Atte Helminen, VTT Tuotteet
ja tuotanto (atte.helminen@vtt.fi)

**Säteilevät Naiset -seminaari 20.9. 2005,
Säätytalo, Helsinki**

Aiheena "Energiasta jätettä
– jätteestä energiaa"

Lisätietoja: Karin Rantamäki,
VTT Prosessit (karin.rantamaki@vtt.fi)

**ATS:n ulkomaan ekskursio 8.-16.10.2005,
Venäjä**

Kohteina (27.5. tiedon mukaan)

- TVEL/Elektrostahl polttoainetehdas

- Kurchatov-instituutti

- Kalinin-3 ydinvoimalaitos

Kutsu tulee syksyllä jäsenpostissa

Lisätietoja: Pekka Nuutinen, Teollisuuden
Voima (pekka.nuutinen@tvo.fi)

**ATS:n syysseminaari, Hotelli Lord,Helsinki
Viikolla 45 tai 46**

Kutsu jäsenpostissa

Lisätietoja: Juha Poikolainen,

VTT Prosessit (juha.poikolainen@vtt.fi)

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

UUDET JÄSENET

Varsinaiset jäsenet

Janne Nevalainen

Säteilyturvakeskus

+ kolme jäsentä, joiden nimeä ei julkaista

Nuoret jäsenet

Ville-Petteri Lehtonen

Fortum Nuclear Services

Suomen Atomiteknillisessä Seurassa oli 25.4.2005 pidetyn johtokunnan kokouksen jälkeen 621 varsinaista jäsentä ja 46 nuorta jäsentä eli opiskelijaa. Kunniajäseniä oli 10 ja kannatusjäseniä 20.

Seuran jäseneksi pääse johtokunnan hyväksymällä hakemuksella. Hakemukseen tarvitaan kahden jäsenen suositus. ATS:n jäsenhakemus internetissä:

<http://www.ats-fns.fi/info/jasenhakemus.pdf>.

SUOMEN
ATOMITEKNILLINEN
SEURA —

ATOMTEKNISKA
SÄLLSKAPET
I FINLAND ry



Kannatusjäsenet

Alstom Finland Oy
Fintact Oy
Fortum Oyj
Kemira Oy, Energia
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
Soffco Oy Ab
Teollisuuden Voima Oy
TVO Nuclear Services Oy
VTT Prosessit
VTT Tuotteet ja tuotanto
YIT Installaatiot

ATS internetissä:

<http://www.ATS-FNS.fi>