

ATS

YDINTEKNIikka

SUOMEN
ATOMITEKNILLINEN
SEURA –

ATOMTEKNISKA
SÄLLSKAPET
I FINLAND ry



2/2001 vol. 30

Tässä numerossa: Tutkimus

Pääkirjoitus: Ydinvoimatutkimuksen haasteet ja murros	3
Resume: Challenges of nuclear power research	4
Suomi valitsi loppusijoituspaikan mutta miten periaatepäätös syntyi? ..	5
Posiva suunnittelee käytetyn polttoaineen kapselointia loppusijoitusta ja kuljetuksia	7
Ydinvoimalaitosten ympäristö- vaikutukset tarkassa seurannassa ...	10
Ydinvoimalaitospäästöjen ympäristö- ja ilmaleviämismallit	13
Fuusioenergian 50 vuoden synnytys	16
Mesopotamialaisten jäljillä	19
Uuden sukupolven ydinvoimalat	21
FINNUS-ohjelma vauhdissa	24
Neutronikaappaushoitoa kehitetään BNCT-asemalla	26
Uraaniammukset – hiipivä kuolema vai paljon melua tyhjästä?	31
Vaakahöyrystimien asiantuntijat koolla viidennen kerran	33
Koulutusta energiakanava- laisille bio- ja tuulienergiasta	35
ATS:n Tshernobyl-onnettomuuden 15-vuotisseminaari	36
ATS:n opintomatka Sosnovy Boriin ..	38
Kansallinen ilmastostrategia ja suomalainen sähkö	40
Kolumni: Pappia kyydissä	43

ATS

2/2001, vol. 30

JULKAISIJA

Suomen Atomiteknillinen Seura –
Atomtekniska Sällskapet i Finland ry.

ATS WWW

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

TOIMITUS

PÄÄTOIMITTAJA

DI Olli Nevander
Fortum Nuclear Services Oy
PL 10, 00048 Fortum
p. 010 453 2613
olli.nevander@fortum.com

ERIKOISTOIMITTAJA

TkT Eija Karita Puska
VTT Energia
PL 1604, 02044 VTT
p. (09) 456 5036
eija-karita.puska@vtt.fi

ERIKOISTOIMITTAJA

DI Arto Isolankila
Säteilyturvakeskus
PL 14, 00881 Helsinki
p. (09) 7598 8314
arto.isolankila@stuk.fi

TOIMITUSSIHTEERI

Minna Rahkonen
Fancy Media Ky
Immersbackantie 85
01100 Östersundom
p. (0400) 508 088
fancymedia@saunalahti.fi

ERIKOISTOIMITTAJA

DI Milja Walsh
Energia-alan Keskusliitto ry.
PL 21, 00131 Helsinki
p. (09) 6861 6608
milja.walsh@finergy.fi

ERIKOISTOIMITTAJA

TkL Eero Patrakka
Teollisuuden Voima Oy
27160 Olkiluoto
p. (02) 8381 3300
eero.patrakka@tvo.fi

JOHTOKUNTA

PUHEENJOHTAJA

TkT Harri Tuomisto
Fortum Nuclear Services Oy
PL 10
00048 Fortum
p.010 453 2464
harri.tuomisto@fortum.com

VARAPUHEENJOHTAJA

FT Rolf Rosenberg
VTT Kemiantekniikka
PL 1404, 02044 VTT
p. (09) 456 6342
rolf.rosenberg@vtt.fi

SIHTEERI

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

RAHASTONHOITAJA

Tekn.yo. Reetta Rääkkälä
Luuvaniementie 8 A 19
00350 Helsinki

DI Kari Kaukonen

Teollisuuden Voima Oy
27160 Olkiluoto
p. (02) 8381 2120
kari.kaukonen@tvo.fi

DI Kirsi Alm-Lytz

Säteilyturvakeskus
PL 14, 00881 Helsinki
p. (09) 7598 8663
kirsi.alm-lytz@stuk.fi

DI Martti Kätkä

Teollisuuden Voima Oy
Töölönkatu 4, 00100 HKI
p. (09) 6180 3130
martti.katka@tvo.fi

MUU TOIMINTA

YLEISSIHTEERI

Liisa Hinkula
VTT Energia
PL 1604, 02044 VTT
p. (09) 456 5000
liisa.hinkula@vtt.fi

KANSAINVÄL. ASIOIDEN SIHT.

DI Olli Nevander
Fortum Nuclear Services Oy
PL 10, 00048 Fortum
p. 010 453 2613
olli.nevander@fortum.com

EKSKURSIOSIHTEERI

DI Kai Salminen
Fortum Nuclear Services Oy
PL 10, 00048 Fortum
p. 010 453 3093
kai.salminen@fortum.com

YOUNG GENERATION

DI Jari Siitonen
Fortum Nuclear Services
PL 10, 00048 Fortum
p. 010 453 2459
jari.siitonen@fortum.com

ENERGIAKANAVA

TkT Eija Karita Puska
VTT Energia
PL 1604,02044 VTT
p. (09) 456 5036
eija-karita.puska@vtt.fi

UUODEN 2001 TEEMAT

1/2001
Ydinvoima ja internet

2/2001
Tutkimus

3/2001
Young Generation
-teemanumero

4/2001
ATS:n ekskursio Espanjaan

ILMOITUSHINNAT

1/1 sivua 2.000 mk
1/2 sivua 1.400 mk
1/4 sivua 1.000 mk

TOIMITUKSEN OSOITE

ATS Ydintekniikka
c/o Olli Nevander
Fortum Nuclear Services Oy
PL 10, 00048 Fortum
p. 010 453 2613 (suora)
telefax 010 4533 403

Osoitteenmuutokset
pyydetään ilmoittamaan
Liisa Hinkulalle /
VTT Energia
telefax (09) 456 5000
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

Painotalo Mictor Ky

TkT Harri Tuomisto on Fortum Nuclear Services Oy:n tutkimuspäällikkö ja ATS:n johtokunnan puheenjohtaja, p. 010 453 2464, E-mail: harri.tuomisto@fortum.com



Ydinvoimatutkimuksen haasteet ja murros

Ilmastomuutoksen uhka on kääntymässä ihmiskunnan suurimmaksi haasteeksi. On selvää, että vain suurilla energiaratkaisuilla uhkaa voidaan torjua. Energiapolitiikan hämärtäminen näpertelevillä ympäristöargumenteilla on vastuutonta. Laajan energiantuotannon ilmastouhkiin voidaan oikeasti vaikuttaa vain käyttämällä massiivisia, päästöttömiä energiamuotoja. Kun vesivoima on jo rakennettu, ei vaihtoehdoksi laajalle perusvoiman tuotannon laajentamiselle jää kuin ydinvoimien vapauttaminen.

Pitkällä tähtäimellä fuusioon perustuva tuotanto tarjoaa käytännössä rajattoman ja erityisen puhtaan vaihtoehdon. Nykyisen sukupolven suuri haaste on pitää yllä fuusioon johtavan teknologian kehitystä. Parhaimmillaan fuusio alkaa todella näkyä sähköntuotannossa vasta kuudenkymmenen vuoden kuluttua. Siihen asti vesi- ja fissiovoima pysyvät tärkeimpinä puhtaina lähteinä.

Fissiovoimaloilla on siis kaksi tärkeää tehtävää tulevaisuudessa. Niiden avulla voidaan taata laajamittainen puhdas voimantuotanto fuusion tulemiseen asti. Sen jälkeenkin niitä tarvitaan fuusiota täydentämään. Toisaalta ydinvoimateknologian korkea taso on pidettävä yllä niin, että ajan tullessa on olemassa osaavaa teollisuutta fuusiovoimaloiden rakentamiseen.

Suomi on niitä harvoja maita, joka suhtautuu vastuullisesti puhtaaseen voimantuotantoon. Eduskunta on nyt hyväksynyt lopullisesti käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen periaatteen. Ja kuten tiedetään, TVO:n seuraavan ydinvoimayksikön periaateluvan käsittely etenee.

Julkista ydinvoimatutkimusta tehdään Suomessa ydinturvallisuuden, ydinjäteratkaisujen ja fuusion kehittämiseksi. Euroopan seuraavaan puiteohjelmaan ydinturvallisuuden ja fuusion osuutta on esitetty pienennettäväksi. Fission osalta ohjelma on nimetty vain ydinjätteiden mukaan. Lehtemme tässä numerossa esitellään Suomen ohjelmien tuloksia ja katsellaan tulevia suuntaviivoja.

Uudet tutkimusohjelmat ovat muokattavina. Millaiset mahdollisuudet julkinen tutkimus saa vastatakseen haasteisiin? Entä millä panoksella teollisuuden tutkimusta tehdään tulevaisuudessa? Sukupolven vaihdos on lähestymässä, joten resursseja pitäisi ennen muuta riittää myös nuorten kouluttamiseen vaikeisiin asiantuntijatehtäviin.

Monestakin syystä Suomen tilanne näyttää huolestuttavalta. Julkisen tutkimuksen rahoitusta on vuosien varrella järjestelmällisesti pienennetty. Fortumin mahdollisuudet ovat heikentymässä voimalaitostekniikan ja teknologiayksikön rajujen alasajojen myötä. Sen maineikasta virtauslaboratoriota ollaan lakkauttamassa. Nuoria osaajia on poistunut alalta. VTT Energia on arvaamattomasti hajottanut parhaita ydinvoimayksiköitään. Otaniemen Triga-reaktorin tulevaisuus on jälleen kerran vaakalaudalla.

Vastapainoksi näkyy myös positiivisia piirteitä. VTT Kemiantekniikka ja Valmistustekniikka ovat ottaneet entistä enemmän vastuuta. Fortum Nuclear Services jatkaa omana yhtiönään koko konsernin ydinvoimatekniikan osaajana. Lappeenrannan TKK on ottanut koko PACTEL-ryhmän piiriinsä. Ydinjätetutkimus kanavoituu entistä selvemmin Posivan kautta luvanhaltijan puolelta ja erillisenä ohjelmalla julkisen puolen tutkimuksena. TEKESin rooli on ilahduttavasti korostunut uusien teknologioiden kehityksen tukijana niin käyttöään hallinnan, uusien voimalaitostyyppien kuin fuusiokehityksen osalta.

Nyt on aika terävöittää otetta. Tehokas tutkimus luo uusia osaajia alalle. Tätä varten on myös kokeelliseen tutkimukseen panostettava. Tärkeä osaaminen on saatava säilymään. Kaikkia rakenteita ei tulisi tuhota, ennen kuin uusia on saatu luoduksi.

Challenges of nuclear power research

The climate change and its potentially disastrous consequences are becoming one of the major challenges of the mankind. It is quite evident that the threat can be prevented only by large-scale energy solutions. Various small-scale solutions that have been very popular in public discussions, do not bring any real benefit from the viewpoint of environment. It would be fatally irresponsible from the current generation to rely on such inefficient solutions. Now, when there are only limited possibilities to increase hydropower production, the only real alternative for clean baseload power production is nuclear power.

In the long run, the thermonuclear fusion offers an unlimited and exceptionally clean energy source. It is a big challenge for the current generation to ensure the development of fusion technology. It can be expected that fusion starts to have a role in the world's power production only after the sixty years from now. Until that, the fission power and hydropower will remain the most important clean power sources.

The current nuclear technology has two significant roles in respect to the future energy systems. First, the high-quality fission technology can ensure a large-scale clean power production until the fusion technology could take over. On the other hand, a successful construction of fusion plants requires that a vigorous nuclear industry is available to supply the technology.

Currently, Finland is one of the few countries aiming at further exploitation of nuclear power. Finland's parliament just recently backed the proposal to build a final repository for the country's radioactive nuclear waste. At the same time, the proposal for the fifth nuclear power unit proceeds steadily in the government.

There are public research programmes in Finland for nuclear safety and nuclear waste as well as for fusion physics and technology. The country participates actively in the

Euratom's framework programmes of research in these areas. This issue of our society journal describes many of these efforts, their results and future prospects.

Unfortunately, the nuclear research field suffers of the budget constraints as in most other countries. There are also fast structural changes taking place in the energy market, in energy companies as well as in research organisations. The Finnish nuclear engineering field has been, however, successful in attracting very capable young people. It will be a major challenge in future to maintain the new young nuclear experts and transfer the know-how from the older, retiring generation. One of the best ways to respond to this challenge is to maintain and develop vital and interesting research programmes that can serve as a platform for the education and know-how transfer.

■

Suomi valitsi loppusijoituspaikan – mutta miten periaatepäätös syntyi?

Eduskunta vahvisti 18. toukokuuta valtioneuvoston periaatepäätöksen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen rakentamisesta Eurajoen Olkiluotoon. Käytetyn ydinpolttoaineen huolto tuntuu etenevän Suomessa ripeästi ja vaivattoman tuntuisesti. Maailmalla ihmetellään ja ehkä ihailaankin suomalaisten pragmaattista ja määrätietoista tapaa edetä ydinjätehuollon päätöksissä. Mutta onko kaikki ollut niin vaivatonta kuin miltä se on näyttänyt?



Kun historiaa tutkitaan, törmätään väistämättä valtioneuvoston vuonna 1983 tekemään ydinjätehuollon tutkimuksen, selvityksen ja suunnittelutyön tavoitteita koskevaan päätökseen, joka määritteli varautumisen Suomessa tapahtuvaan loppusijoitukseen. Päätöksen mukaan loppusijoituspaikka valitaan vuoden 2000 loppuun mennessä ja valmius loppusijoituslaitoksen rakentamiseen tarvittavien suunnitelmien esittämiseen tulisi olla kymmenen vuotta myöhemmin, 2010. Suunnittelulähtökohtana pidettiin sitä, että loppusijoitus voitaisiin aloittaa vuonna 2020.

Maailma on kahdenkymmenen vuoden takaisesta melkoisesti muuttunut ja tekniikkakin kehittynyt, mutta aikoinaan luotu ydinjätehuollon ohjelma on käyttökelpoinen vielä tänäänkin. Siihen on sitouduttu eikä sen muuttamiseen ole ollut tarvetta. Vuonna 1983 tehty päätös on varmasti yksi suoma-

laisen ydinjätehuollon menestyksen kulmakivistä.

Lainsäädäntö on seurannut ajan henkeä

Ydinjätehuollon ohjelmaa ja loppusijoituksen hyväksyttävyyttä on tukenut myös yhteiskunnallisen arvomaailman ja mielipideilmaston mukaan muokkautunut lainsäädäntö, joka on sitouttanut valtioelimet aikoinaan luotuun ydinjätehuollon ohjelmaan. Vuoden 1987 ydinenergialaissa tai pareminkin sen perusteluissa määritellään loppusijoitus Suomen kallioperään ydinjätehuollon vaihtoehtona ulkomaille viennin ohella. Kun ydinenergialakia muutettiin vuonna 1994, keskeistä siinä oli ydinjätteiden viennin ja tuonnin kieltäminen. Vientimahdollisuudesta luovuttiin ja näin eduskunta “virallisesti” loppusijoituksen suomalaisen ydinjätehuollon strategia.

Paikallinen hyväksyntä

Ydinenergiain mukaan myönteisen periaatepäätöksen edellytyksenä on loppusijoitukseen ehdolla olevan kunnan hyväksyntä. Sen jälkeen kun yksityiskohtaiset paikatutkimukset alkoivat 1980-luvun lopulla, on loppusijoitukseen ehdolla olevia kuntia ollut useita. Kuntalaisten enemmistön hyväksyntää loppusijoitushankkeelle ei kuitenkaan saavutettu muualla kuin ydinvoimalaitoskunnissa Eurajoella ja Loviisassa. Niissä asukkaat ovat tottuneita ydinvoimaan ja hyötäneet laitoksista niiden tarjoamien työmahdollisuuksien ansiosta.

Se, että periaatepäätöshakemuksessa valinta kohdistui vain Eurajoen kuntaan eikä Loviisaan, johtui useasta tekijästä. Vaikka enemmistö Loviisan asukkaista suhtautui myönteisesti loppusijoitukseen, jakoi hanke kuntalaiset selvästi kahteen toisille vastakaiseen leiriin. Eurajoella tällaista polarisoitumista ei juurikaan esiintynyt. Toisaalta valtaosa käytetystä polttoaineesta sijaitsee ja nykytilanteessa myös syntyy Eurajoen Olkiluodossa. Eurajoen kohdalla kuljetusten tarve on vähäisempi kuin Loviisan tapauksessa.

Palautettavuus ja polttoainemäärä

Merkityksetöntä periaatepäätösprosessin etenemisen kannalta ei varmasti ollut sekään, että valtioneuvoston keväällä 1999 hyväksymässä päätöksessä loppusijoituksen turvallisuudesta edellytettiin ydinpolttoaineen palautettavuutta takaisin maan pinnalle, ”mikäli kehittyvä tekniikka tekee sen taroituksenmukaiseksi.” Tähän kysymyseen on sittemmin monta kertaa törmätty hankkeen eduskuntakäsittelyn aikana. Ihmiset kaihtavat ”lopullisten” päätösten tekoa, joten palautettavuus on tarjonnut virallisen takaportin loppusijoitusratkaisun peruuttamiseen. Lisäksi se tarjoaa tuleville sukupolville mahdollisuuden arvioida nyt suunnitellun ratkaisun järkevyyttä.

Periaatepäätöshakemuksen tarkentaminen koskemaan vain nykyisten ydinvoimalaitosten toiminnassa syntyvää käytettyä ydinpolttoainetta on ollut omiaan helpottamaan valtioelinten päätöksentekoa. Valtioneuvoston joulukuussa 2000 tekemässä periaatepäätöksessä todetaankin, että ”loppusijoitustiloja voidaan rakentaa enintään sille määrälle käytettyä ydinpolttoainetta kuin Suomen nykyisten ydinvoimalaitosten kul-

loinkin voimassa olevien käyttöluopien perusteella arvioidut loppusijoitustarpeet edellyttävät...”

Eduskuntakäsittely

Kun periaatepäätöksen eduskuntakäsittely alkoi kuluvan vuoden helmikuussa, lähtökohdat periaatepäätöksen vahvistamiselle olivat – edellä mainituista syistä – tukevat. Lähes viisituntisessa lähetekeskustelussa käytettiin yli 70 puheenvuoroa, jotka lähes poikkeuksetta – varauksin tai varauksitta – olivat periaatepäätöksen hyväksymisen kannalla. Ehkä keskeisimmin keskustelussa esille nousivat ydinpolttoaineen palautettavuus, loppusijoitustilojen monitorointi sulkemisen jälkeen sekä eduskunnan rooli loppusijoituslaitoksen rakentamisluvan yhteydessä. Muun muassa näillä eväyksillä periaatepäätös lähetettiin talousvaliokuntaan ja sille lausuntoa valmistelemaan ympäristövaliokuntaan.

Eduskunnan ympäristövaliokunta sai lausuntonsa valmiiksi hyvissä ajoin ennen sille asetettua määräaika. Yksimielisessä lausunnossaan ympäristövaliokunta toteaa, että ”ympäristön ja turvallisuuden kannalta ei ole esteitä hyväksyä valtioneuvoston periaatepäätöstä.” Lausunnossa keskitytään pitkälti niiden kriittisten näkemysten argumentointiin, jotka tulivat esille lähetekeskustelussa ja valiokunnan asiantuntijakuulemisten yhteydessä. Joidenkin mielestä päätöksentekoa tulisi siirtää, jolloin ainoana vaihtoehtona olisi maanpäällisen varastoinnin jatkaminen. Ympäristövaliokunnan viesti tähän on kuitenkin se, että maanpäällinen ydinjätteen varastointi on ympäristön ja turvallisuuden kannalta suurempi riski kuin ”jätteen syvälle kallioperään hautaaminen.” Valiokunnan mukaan ydinpolttoaineen pysyvä sijoittaminen on toteutettava aikana, jolloin jätteestä vastuulliset eli ydinvoima-yhtiöt ovat vielä toiminnassa.

Selonteko vai selvitys?

Myös talousvaliokunta päätyi yksimielisesti ehdottamaan valtioneuvoston periaatepäätöksen voimaan jättämistä. Valiokuntien yksituumaisuutta mielipiteitä jakavassa ydinjättekysymyksessä voitaneen pitää ainutlaatuisena ja valiokuntien hyvän yhteistyön ovat vahvistaneet myös näiden puheenjohtajat. Jonkin verran näkemyseroja syntyi sen suhteen, miten eduskunnan rooli rakentamisluvan yhteydessä tulisi määrittellä. Laki-

han lähtee siitä, että rakentamisluvasta päättää valtioneuvosto. Kun valtioneuvosto joulukuussa hyväksyi periaatepäätöksen, liitettiin siihen lausuma, jonka mukaan valtioneuvosto informoi eduskuntaa ennen rakentamisluvan myöntämistä pääministerin ilmoituksella tai asianomaista valiokuntaa informoimalla. Tämä määrittely ei tuntunut kansanedustajille riittävän ja siksi ilmoittamisen muoto haluttiin määrittellä valtioneuvoston (hallituksen) selontekona eduskunnalle. Selontekohan on valtiosääntöön kirjattu informoinnin määritelmä, josta voidaan eduskunnassa äänestää. Siitä, voidaan selonteko kytkeä menettelytapana rakentamislupaprosessin yhteyteen ja onko se ydinenergiain hengen mukaista, voidaan olla montaa mieltä. Joka tapauksessa valiokunnat pääsivät asiasta yksimielisyyteen ja selonteon sijasta päädyttiin selvitykseen, jonka valtioneuvosto antaa eduskunnalle ennen rakentamisluvan myöntämistä.

Päätös

Eduskunnan laajasta yksimielisyydestä huolimatta periaatepäätöksestä jouduttiin lopulta äänestämään. Periaatepäätös vahvistettiin 18.toukokuuta äänin 159 - 3. Jälkeenpäin ajatellen päätöksen syntyminen tällä tavalla oli parempi, sillä viestinä äänestyspäätös on uskottavampi kuin täydellinen yksimielisyys, jota maailmassa tuskin vallitsee. Selvän äänestystuloksen taustalta on nostettavissa lukuisten kansanedustajien viesti siitä, että tämän sukupolven on kannettava vastuunsa ydinjätteistä ja siksi loppusijoitukseen tähtäävän ratkaisun edistäminen on parempi ratkaisu kuin pelkkä väliavarastointiin tukeutuminen. ■

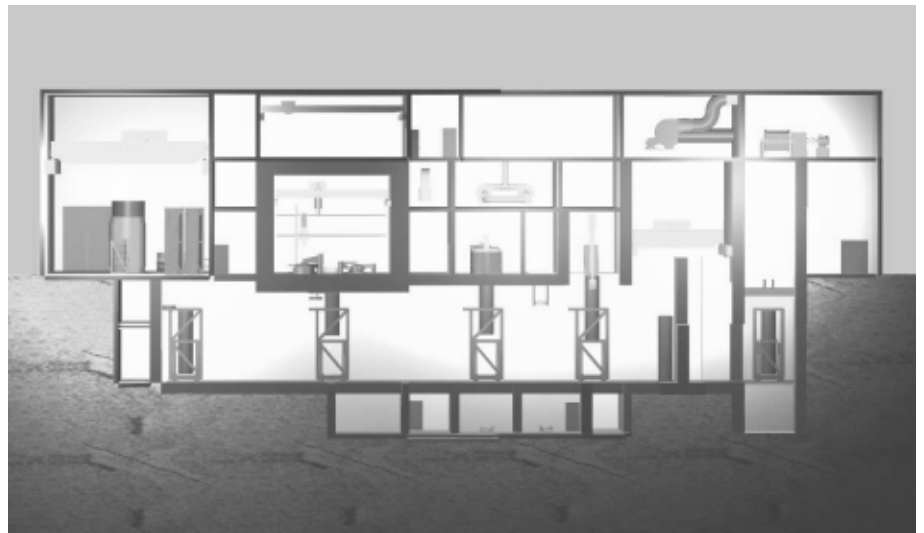
MMM Timo Seppälä,
viestintäpäällikkö
Posiva Oy,
puh. 09 - 2280 3763,
timo.seppala@posiva.fi



Posiva suunnittelee käytetyn ydinpolttoaineen kapselointia, loppusijoitusta ja kuljetuksia

Joulukuussa 2000 julkaistu POSIVAn ohjelmaraportti kuvaa käytetyn polttoaineen loppusijoitukseen liittyvän tutkimus-, kehitys- ja teknisen suunnittelutyön tavoitteet loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemukseen mennessä. Rakentamislupahakemus jätettäneen kauppa- ja teollisuusministeriölle vuoden 2010 tienoilla. Esivalmisteluun kuuluu myös maanalaisen tutkimustilan, ONKALOn, rakentaminen Olkiluotoon. ONKALOn rakentamisen suunnitellaan käynnistyvän 2003-2004.

Tämä artikkeli kuvaa teknisen suunnittelun ohjelmaa käytetyn ydinpolttoaineen kapseloinnille, loppusijoitukselle ja kuljetuksille.



Kapselointilaitos.

Teknisen kehitys- ja suunnittelutyön päätavoitteena ohjelmakaudella on saavuttaa tekninen valmius loppusijoituslaitosta koskevien urakkatarjousten laadintaa varten sekä riittävä luottamus siihen, että kapselointi- ja loppusijoitustoiminnot voidaan suorittaa suunnitelmien mukaisesti. Paikkatutkimuksissa keskeistä on varmistaa nykyinen käsitys Olkiluodon soveltuvuudesta loppusijoitustarkoitukseen, tunnistaa loppusijoitukseen sopivat kalliolohtot Olkiluodon alueella sekä määrittää nykyistä tarkemmin loppusijoituskallion ominaisuudet teknistä suunnittelua, rakentamista ja turvallisuuden arviointia varten.

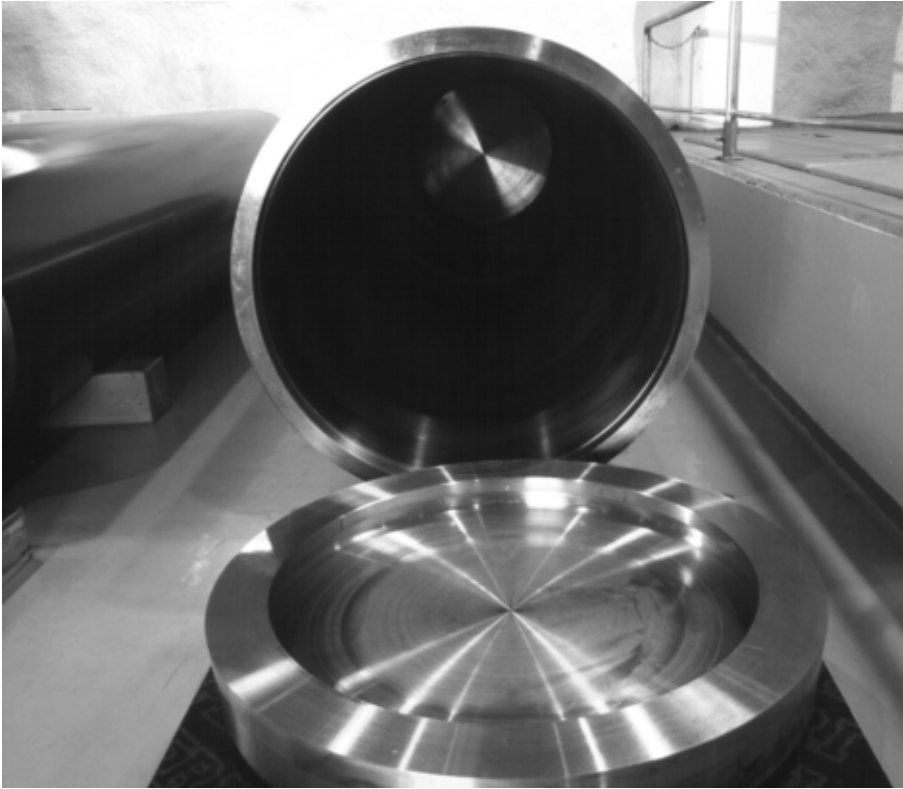
Tekninen suunnittelutyö ja paikkatutkimustulokset luovat pohjan rakentamisluvan perusteeksi tarvittavalle turvallisuusarviolle ja sitä tukevalle aineistolle. Pitkäaikais- ja turvallisuuksia koskeva arvio tulee edelleen perustumaan pitkälti kvantitatiiviseen turvallisuusanalyysiin, mutta entistä enemmän

painoa pannaan myös analyysiä tukevalle muulle tekniselle ja tieteelliselle aineistolle.

Huomattava osa ohjelmasta vaiheistuu suunnitellun maanalaisen tutkimustilan, ONKALOn, edistymisen mukaan. Suunnitelman mukaan ONKALOn rakentamistyöt käynnistyvät 2003 - 2004. Tätä ennen Posiva tuottaa selvitykset, joihin sisältyy

- Olkiluodon perustilan kuvaus
- suunnitellun maanalaisen tutkimustilan tekninen kuvaus
- suunnitelma maanalaisille tutkimuksille
- katsaus niistä kallion ominaisuuksista, jotka ovat tärkeitä loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuudelle ja arvio ONKALOn vaikutuksista niihin.

Myöhemmin vuonna 2005 Posiva julkaisee väliraportin kaikista siihenastisista tutkimuksista. Raporttiin sisältyy myös nykyistä yksityiskohtaisempi kuvaus kymmenvuotisen ohjelmavaiheen jälkipuoliskon toiminnasta.



Vuonna 1999 valmistunut Posivan ensimmäinen koekapseli.

Tässä artikkelissa keskitytään kuvaamaan teknologiaa koskevaa ohjelmaa, joka on jaettu kapselointitekniikkaan, loppusijoitustilojen suunnitteluun, laitoksen käytönäikaisen turvallisuuden varmistamiseen, polttoaineen kuljetusten suunnitteluun, safeguards-näkökohtien huomioonottamiseen ja kustannusten arviointiin.

Loppusijoituslaitoksen suunnittelu

Vuonna 2000 julkaistuissa suunnitelmissa loppusijoitus perustuu KBS-3 tyyppiseen ratkaisuun. Suunniteltu itsenäinen loppusijoituslaitos muodostuu kahdesta osasta:

- maanpäällisestä laitosalueesta, jonka keskeisenä osana on kapselointilaitos. Loviisan ja Olkiluodon ydinvoimalaitoksilta toimitettava käytetty ydinpolttoaine otetaan vastaan ja pakataan loppusijoitussäiliöihin kapselointilaitoksessa

- syväällä kalliiossa olevista tunneleista, joihin kapseloitu käytetty polttoaine sijoitetaan.

Kapselointilaitos sijaitsee em. suunnitelmissa suoraan kapselikuilun yläpuolella, joten polttoainekapseli voidaan siirtää kapselointilaitoksen puskurivarastosta suoraan kapselihissiin ja sillä edelleen loppusijoitustilaan.

Loppusijoituslaitoksen suunnittelun yleiset tavoitteet ovat ohjelmakaudella:

- sovittaa itsenäisen loppusijoituslaitoksen esisuunnitelma Olkiluotoon sekä tehdä vaihtoehtoinen suunnitelma, jossa kapselointilaitos sijaitsee KPA-varaston yhteydessä ja valita näistä tarkoituksenmukaisempi vaihtoehto jatkosuunnittelun lähtökohdaksi.

- tehdä edellä mainitun valinnan jälkeen tarkennettu suunnitelma loppusijoituslaitoksen maanpäällisistä ja -alaisista osista ja toiminnoista.

- varautua siihen, että rakentamislupaa varten tarvittavat loppusijoituslaitoksen suunnitelmat ovat valmiina vuoden 2010 loppuun mennessä.

Loppusijoituslaitoksen toiminnallisena tavoitteena on, että normaalikäytössä radioaktiivisten aineiden päästöt ympäristöön jäävät merkityksettömän pieniksi. Suunnittelussa varaudutaan myös käyttöhäiriöihin ja onnettomuustilanteisiin. Lähtökohtana on, että säteilyaltistus pidetään kaikissa tilanteissa niin alhaisena kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista (ALARA-periaate). Kun kapselia käsitellään kapselointilaitoksessa tai loppusijoitustiloissa, tulee sen säilyttää tiiveytensä myös käyttöhäiriöiden ja onnettomuuksien seurauksena.

Loppusijoituslaitoksen järjestelmien ja komponenttien turvallisuusluokitus tehdään soveltuvin osin YVL-ohjeen 2.1 mukaisesti. Turvallisuusluokitukseen sisällytetään myös pitkäaikaisturvallisuuden asettamat erityis-

vaatimukset. Loppusijoituslaitoksen suunnittelussa otetaan lisäksi huomioon sekä valmius- ja turvajärjestelyjen että safeguards-valvonnan tarpeet.

Kapselointilaitos ja loppusijoituskapseli

Kapselointilaitoksen suunnittelun tavoitteina on kehittää toimiva ja luotettava kapselointiprosessi, joka täyttää sille asetetut laatu- ja turvallisuusvaatimukset. Keskeisiä työkohteita ovat mm. polttoaineen ja kapselien käsittelyjärjestelmien, kuumakammion ja kuparikannen sulkemishitsauksen suunnittelu. Kapselointiprosessin tärkeimmät osat suunnitellaan ja mahdollisesti testataan vuoden 2008 loppuun mennessä.

Tällä hetkellä suunnitelmien perustana oleva polttoaineen loppusijoituskapseli koostuu pallografiittivalurautaisesta sisärakenteesta ja sitä ympäröivästä 50 mm paksumasta kuparivaipasta. Kapseli painaa 19 - 25 t, kapseli on tiivis, korroosionkestävä ja mekaanisesti luja. Sekä Olkiluodon BWR- ja Loviisan VVER- polttoainekapselin rakennatarkaisut ovat periaatteessa samanlaiset. Säiliön pituus ja sisärakenteen aukkojen muoto eroavat.

Kapselin suunnitteluperusteet ovat yhdenmukaiset SKB:n kapselin kanssa, sillä kapselin suunnittelu- ja laatuvaatimuksia on määriteltä yhteistyössä ruotsalaisten kanssa. Tämänkaltaista yhteistyötä pyritään jatkamaan. Näin halutaan edistää kansallisten lisensiointivaatimusten yhtenäistämistä ja täten yksinkertaistaa tulevaa lisensiointiprosessia kummassakin Pohjoismaassa.

Tavoitteena on kehittää ja demonstroida teknisesti toimiva ja taloudellinen loppusijoituskapselien valmistusmenetelmä.. Kapselien eheys- ja muut laatuvaatimukset ovat korkeita, mikä edellyttää myös tarkastustekniikoiden selvittelyä ja kokeilua.

Posiva on tähän mennessä valmistanut koemielessä yhden kokonaisen kapselin. Kapselin vaippa tehtiin kahdesta kuumavalssatusta kuparilevystä taivuttamalla ja hitsaamalla puolikkaat yhteen elektronisuihkumenetelmällä.

Valmistuskokeet ovat jo osoittaneet pitkittäishitsien valmistuksen nykytekniikalla mahdolliseksi, mutta jatkokehitystyössä pyritään lieriön osalta saumattomaan ratkaisuun. Tämänhetkisen näkemyksen mukaan saumaton, yhdestä kappaleesta muokkamalla valmistettu putkivaippa hitsattavilla kansilla on kapselivaipan edullisin valmis-

tustapa, joka täyttää kapselin laatuvaatimukset.

Kapselin sulkemistekniikka on loppusijoituskonseptin tärkeimpiä prosesseja ja eräs konseptin hyväksymisedellytyksistä. Elektronisuihkuhitsaus (EB) on kokeissa osoittautunut käyttökelpoiseksi kannen sulkemismenetelmäksi. Suurimpana ongelmana sen käytössä on ollut kannen hitsauksessa tarvittavan ”päättymättömän” hitsauksen lopetus. Myös hitsausvirheiden korjaus sekä prosessin toistotarkkuuden osoittaminen ovat olleet kehitystyön kohteina. On kuitenkin tarkoituksenmukaista selvittää myös muiden modernien hitsaustekniikoiden mahdollinen soveltuvuus kannen sulkemiseen. Esimerkiksi SKB on selvittänyt kitkattapuhitsausmenetelmän käyttöä.

Kapselivaipan valmistustekniikan sekä kannen sulkemistekniikan kehitystyötä jatketaan kapselointitekniikan, laatuvaatimusten ja tarkastustekniikan kehityshankkeiden kanssa. Vuosina 2001-2005 tarkennetaan kapselin ja sen materiaalien valmistuksen laatuvaatimukset. Kapselirakenteen kehitystyö tullaan saattamaan keskeisiltä osiltaan valmiiksi vuoden 2007 loppuun mennessä, jotta kapselia voitaisiin pitää tarkasti määriteltynä ja ominaisuuksiltaan tunnettuna rakenteena pitkäaikaisturvallisuusanalyysissä, jotka päivitetään vuoden 2007 jälkeen.

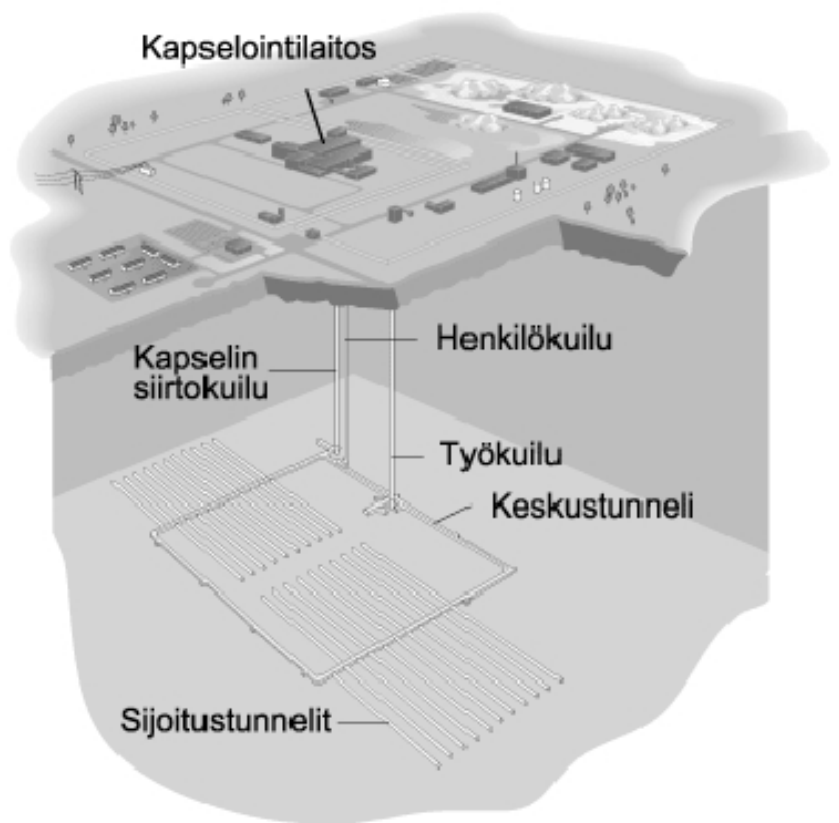
Loppusijoitustilat

Loppusijoitustilojen kehitystyön perustana on toiminut KBS-3-konsepti, joka on kuvattu vuonna 2000 valmistuneessa esisuunnitelmassa.

Tutkimusjakson 2001-2010 päätavoite on kehittää, testata ja demonstroida loppusijoitustilojen rakentamisen ja käytön tekniikat sellaiselle tasolle, että rakentamislupahakemuksessa tarvittavat tekniset suunnitelmat, käyttösuunnitelma ja käytön-aikainen turvallisuusarvio voidaan laatia vuoteen 2010 mennessä.

Vuosina 2001-2002 tehdään vertailuselvitys, jonka tavoitteena on tarkistaa Olkiluotoon sopiva loppusijoituskonsepti. Vaihtoehtoina ovat KBS-3-konsepti ja MLH-konsepti (Medium Long Hole). Sijoitustunnelien täyttörakenteiden selvitykset ovat tärkeinä perusteena vuonna 2002 tehtävässä konseptin valinnassa.

Vuosina 2001-2002 laaditaan loppusijoitustilojen kaksikerrosratkaisun suunnitelmat ja yhteensovitetään ONKALON ja loppusijoitustilojen tekniset suunnitelmat. Maan-



KBS-3-konsepti perusmuodossaan noin 1400 kapselia varten.

alaisten tutkimustilojen suunnittelussa varaudutaan siihen, että ne voivat olla osa loppusijoitustilojen aputiloja.

Tutkimusjakson keskeinen tavoite on laatia Olkiluoto-kohtainen loppusijoitustilojen suunnitelma. Tällöin tarkennetaan loppusijoitustilojen järjestelmä-, tila- ja sijaintisuunnitelmat ja ne kohdistetaan Olkiluodon kallioperään Tärkeä osatehtävä on täyttö- ja sulkurakenteiden kehittäminen suolaisiin pohjavesiolosuhteisiin mahdollisimman hyvin soveltuvaksi. Loppusijoituskonseptin loppullinen vahvistaminen rakentamislupahakemuksen valmistelua varten tehdään vuonna 2008.

Teknisen suunnittelun rinnalla kehitetään loppusijoitustilojen rakentamisen, käyttövaiheen loppusijoitustoiminnan ja tilojen sulkemisvaiheen tekniikoita. Rakentamiseen liittyvää kehitystyötä tehdään mm. louhinta-, lujitus- ja tiivistystekniikan osalta. Lisäksi kehitetään menetelmiä, joiden avulla teknistä suunnittelua ja rakentamista voidaan ohjata työn aikana todennetun kallio- laadun perusteella. Loppusijoitustoiminnan tärkeimpiä kehityskohteita ovat kapselin siirto- ja asennustekniikat sekä sijoitusreikien ja -tunnelien täyttötekniikat. Sulke- misvaiheen tekniikoiden kehittäminen kohdistuu loppusijoitustason keskustunneliin ja

aputilojen sekä maanpinnalle johtavien reittien täyttö- ja sulkurakenteisiin.

Kuljetukset

Tehdyt selvitykset ovat osoittaneet, että käytetyn polttoaineen maantie-, rautatie- ja merikuljetukset voidaan suorittaa turvallisesti Eurajoen Olkiluodon ja Loviisan Hästholmenin välillä. Vuonna 2003 tarkistetaan maantie-, rautatie- ja merikuljetussysteemit Loviisan käytetyn polttoaineen kuljettamiseksi Olkiluotoon. Kuljetustavan, reittien ja kuljetussäiliöiden tarkastelun lisäksi päivitetään kuljetusten kustannusarvio. Vastaavanlainen kuljetussysteemin päivityskierros suoritetaan uudelleen vuoden 2008 loppuun mennessä. Tässä yhteydessä tarkistetaan, tarvitseeko myös kuljetusten turvallisuusarvioita päivittää.

TkL Jukka-Pekka Salo,
Posiva Oy:n suunnittelupäällikkö
loppusijoitustekniikan aluella,
puh. 09 - 2280 3744,
jukka-pekka.salo@posiva.fi



Ydinvoimalaitosten ympäristövaikutukset tarkassa seurannassa

Suomen ydinvoimalaitosten ympäristövaikutuksia on seurattu laajojen tarkkailuohjelmien avulla koko voimalaitosten käyttöhistorian ajan. Tarkkailuohjelmia edeltäneet perustilaselvitykset aloitettiin Loviisassa jo 1966 ja Olkiluodossa 1972, eli hyvissä ajoin ennen voimalaitosten rakennustöiden aloittamista. Ympäristön säteilyvalvonnan lisäksi alueilla tehdään vesistötarkkailua, jolla seurataan veden laatua ja lämpimän veden vaikutuksia voimalaitoksia ympäröivillä vesialueilla, sekä kalataloudellista tarkkailua. Vaikka tietyissä ympäristönäynteissä havaitaan säännöllisesti pieniä määriä voimalaitoksista peräisin olevia radioaktiivisia aineita, niiden merkitys ympäristön asukkaiden tai muun eliöstön saaman säteilyaltistuksen kannalta on varsin vähäinen. Lämminvesipäästöillä on ollut selvä vesikasvillisuutta rehevöittävä vaikutus, mutta se on rajoittunut suhteellisen pienille alueille jäädytysveden purkupaikkojen läheisyyteen.



Laskeuman kerääjä Olkiluodossa.

Kiinteät ympäristön säteilyvalvontaohjelmat aloitettiin Loviisassa vuonna 1976 ja Olkiluodossa 1977, eli vuotta ennen ensimmäisten voimalaitosyksikköjen käynnistämistä. Siitä alkaen ohjelmat ovat pyörineet yhtäjaksoisesti siten, että niitä on tarkistettu saatujen kokemusten perusteella aina viiden vuoden välein.

Säteilyvalvontaohjelmia varten Loviisan ja Olkiluodon ympäristöistä otetaan yhteensä lähes 1 000 näytettä vuodessa. Valtaosa (noin 500) näistä on ilma- ja laskeuma (= sadevesi) näytteitä, joita kerätään jatkuvatoimisilla kerääjillä neljässä pisteessä kummankin voimalaitoksen ympäristössä. Etäisimmät kerääjät ovat noin 10 kilometrin

päässä voimalaitoksista. Muita maaympäristön näytekohhteita ovat maaperä ja laidunruoho, elintarvikkeista maito, talousvesi, vilja ja liha, puutarhatuotteista salaatti, viinimarja ja omena, keräilytuotteista sienet ja metsämarjat, sekä ns. indikaattorinäyteinä karhunsammal, poronjäkäle ja männyn neulas. Meriympäristön näytekohhteita ovat merivesi, neljä kalalajia, pohjalle laskeutuva eli sedimentoituva aines, pohjasedimentit sekä indikaattorinäyteinä ns. perifyton-kasvusto, viherlevä, rakkolevä, eräät putkilokasvit, simpukat ja äyriäiset. Näytteenotto on joko jatkuvaa tai sitä tehdään 1 - 4 kertaa vuodessa. Näytepisteiden sijoittelussa on otettu huomioon tärkeimmät leviämisuunnat maalla ja merellä. Suurin osa näytepis-

teistä on enintään 5 kilometrin etäisyydellä voimalaitoksista ja lähes kaikki enintään noin 10 kilometrin säteellä voimalaitoksista. Yleensä näytteistä analysoidaan gammasäteilijät, osasta näytteistä analysoidaan myös tritium, strontium ja plutonium.

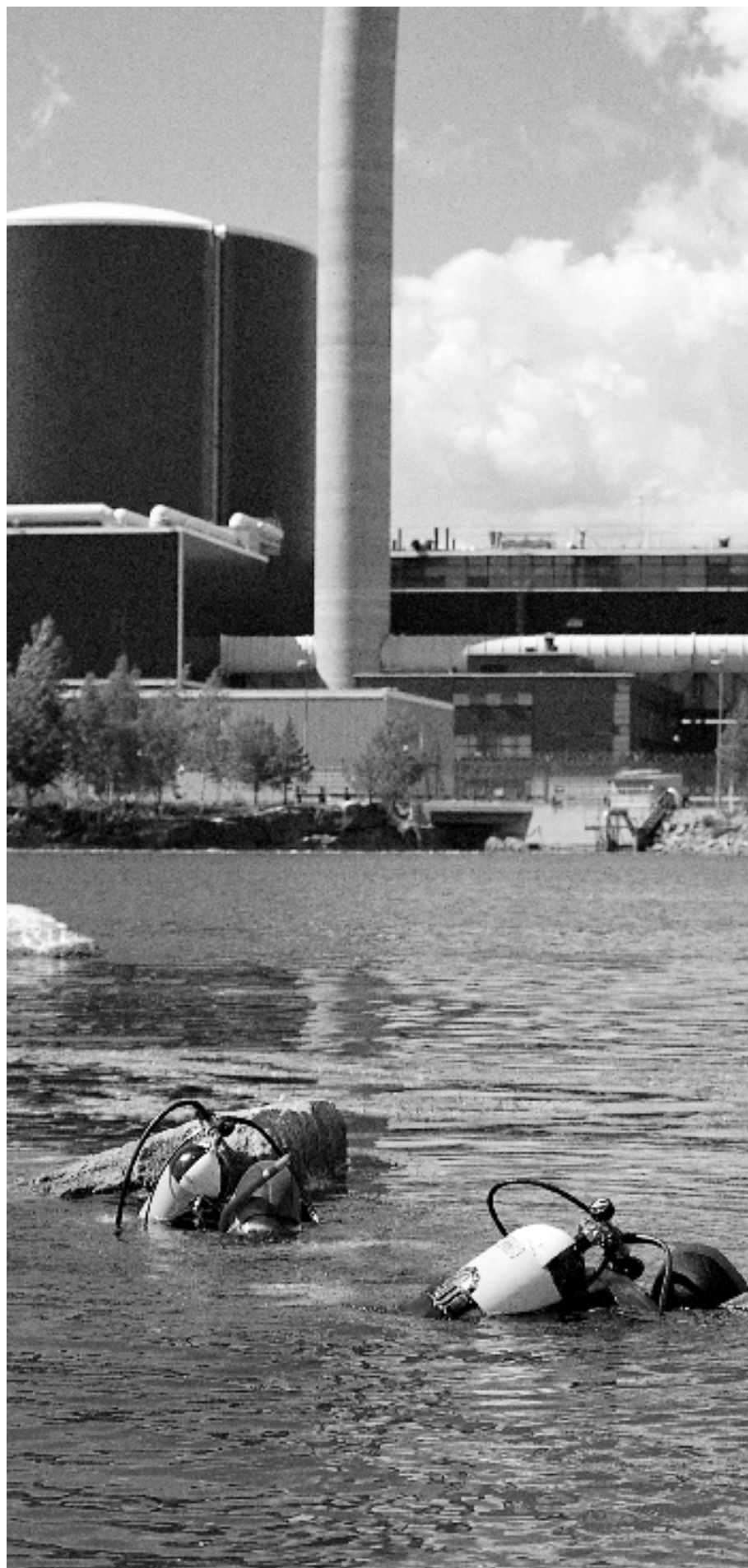
Ympäristön säteilyvalvontaan kuuluu tietysti myös ulkoisen säteilyn mittauss verkko (noin 20 jatkuvatoimista mittausasemaa molempien voimalaitosten ympäristössä), mutta sen tulokset välittyvät suoraan valtakunnalliseen säteilyvalvontaverkkoon, eikä siitä tule näytemittauksia.

Kansainvälisessä vertailussa Suomen ydinvoimalaitosten ympäristössä tehtävät säteilyvalvontaohjelmat ovat yleisesti saaneet kiitosta. EU:n asiantuntijaryhmä suoritti Olkiluodon ympäristön säteilyvalvontaa koskevan tarkastuksen vuonna 1998 ja tarkastajat olivat varsin tyytyväisiä näkemäänsä.

Meriympäristön näytteissä pieniä määriä paikallisia päästönuklideja

Maaympäristöstä otetuissa näytteissä havaitaan Suomen voimalaitoksista peräisin olevia radioaktiivisia aineita suhteellisen harvoin. Ilma- ja laskeumanäytteissä havaintoja tehdään muutama vuosittain, mutta tällöinkin pitoisuudet ovat olleet merkityksättömän pieniä. Elintarvikkeissa havainnot ovat olleet äärimmäisen harvinaisia; esimerkiksi maito-, vilja-, liha- ja keräilytuotteenäytteissä ei ole havaittu kertaakaan paikallisesta voimalaitoksesta peräisin olevia radioaktiivisia aineita koko voimalaitosten käyttöhistorian aikana. Kaikissa ympäristönäytteissä havaitaan kuitenkin edelleen Tshernobylin onnettomuudesta ja ydinasekokeista peräisin olevia radioaktiivisia aineita.

Meriympäristössä paikallisista päästöistä peräisin olevia aineita havaitaan useammin. Ilmais- eli indikaattorinäytteissä, jotka keräävät tehokkaasti näitä aineita ympäristöstä – sellaisissa kuten levissä, muissa vesikasveissa, pohjaeläimissä ja sedimentoituvassa



Levänytteet otetaan sukeltamalla.

aineksessa – havaitaan säännöllisesti pieniä määriä paikallista alkuperää olevia radioaktiivisia aineita, mutta niissäkin Tshernobylin ja ydinasekokeiden aiheuttamat jäämät ovat selvästi suurempia. Kaloissa on havaittu vain harvoin erittäin pieniä määriä (alle 1 Bq/kg) paikallisia päästönuklideja.

Yleisimmin ympäristönäytteissä havaittuja paikallisia päästönuklideja ovat olleet koboltti-60, mangaani-54, koboltti-58, kromi-51, hopea-110m ja tritium. Niiden pitoisuudet ovat kuitenkin olleet niin pieniä, että ne ovat olleet ympäristön asukkaiden, purkualueella kalastavien sekä muiden luontokappaleiden saaman säteilyaltistuksen kannalta jokseenkin merkityksettömiä.

Lämpökuormitus lisää rehevöitymiskehitystä

Voimalaitosten vesistötarkkailun seuranta-kohteita ovat meriveden laatu ja hydrografia, kasviplankton ja sen perustuotanto, pohjaeläimistö ja vesikasvillisuus. Vedenlaatutarkkailussa seurataan mm. meriveden lämpötiloja, suola-, happi-, ravinne- klorofylli- ja kiintoainepitoisuuksia. Perustuotantomittausten, pohjaeläimistön ja kasvillisuustutkimusten avulla seurataan lämpimän veden vaikutuksia meren eliöstöön. Vesikasvillisuutta tutkitaan parin vuoden välein vakiolinjoilla tehtävillä sukelluskartoituksilla.



Ympäristön säteilyvalvontaohjelmaa varten istutettu salaattimaa Loviisassa.

Selvimpiä lämminvesipäästöjen ympäristövaikutuksia ovat olleet meriveden lämpötiloissa, jääoloissa ja virtauksissa tapahtuneet muutokset. Näkyvin biologinen muutos, jolla on selvä yhteys voimalaitosten lämpökuormitukseen, on ollut vesikasvillisuuden runsastuminen voimalaitosten jäähdytysveden purkupaikkojen lähialueilla.

Eräät putkilokasvit (kuten tähkä-ärviä ja ahvenen vita) ja niiden päällyskasvustona esiintyvät rihmalevät ovat muodostaneet purkualueille tiheitä ja reheviä kasvustoja. Lisäksi kasviplanktonin perustuotannon taso on kasvanut Loviisassa jäähdytysveden purkualueella suhteessa ottoalueen perustuotantotasoon. Lämpövaikutusta enemmän perustuotantotason kasvuun on vaikuttanut kuitenkin Suomenlahden yleinen rehevöitymiskehitys.

Ravinnepitoisuuksien kasvusta johtuva rannikkovesiemme rehevöityminen on ollut merkittävä taustavaikuttaja lähes kaikissa voimalaitosten meriympäristössä viimeisten 20 vuoden aikana tapahtuneissa biologisissa muutoksissa. Lämpötilan nousu on vaikuttanut rehevöitymiskehitykseen vasta sekundaarisesti niillä alueilla, missä kasvukausi on pidentynyt lyhentyneen jäätalven seurauksena tai missä kasvukauden aikana esiintyy kohonneita lämpötiloja.



Vesikasvillisuustutkimus käynnissä.

FK Erkki Ilus on
Säteilyturvakeskuksen
Tutkimus ja ympäristövalvonta-
osaston Ydinvoimaloiden
ympäristö-laboratorion johtaja.
Puh. 09 - 7598 8595
erkki.ilus@stuk.fi



Ydinvoimalaitospäästöjen ympäristö- ja ilmaleviämismallit

Ydinvoimalaitokselta ilmakehään pääsevien radioaktiivisten aineiden leviämisen ennustaminen on tärkeätä, jotta vastatoimista voitaisiin päättää. Laskentamalleja on kehitetty Suomessa jo 1970-luvulta alkaen. Tietotekniikan jatkuva kehitys tarjoaa alalla edelleen uusia mahdollisuuksia. Viimeisintä kehitystä malleissa edustaa VTT:n ja Ilmatieteen laitoksen yhteistyönä tehty SILAM-leviämis- ja annoslaskentamalli.

Kyсыttäässä ydinvoimalaitosonnettomuuden seurauksiin vaikuttavia tekijöitä asioita hieman enemmän pohdiskellut maallikokin varmaan vastaisi, että seuraukset riippuvat siitä, mistä suunnasta tuulee ja sateellakin on oma merkityksensä. Alan kirjallisuus tuo esiin ilmakehän tuulet ja turbulenssin, jotka hajottavat ja laimentavat päästövänaa, hiukkasten kuivan ja märän laskeuman, radioaktiivisten aineiden hajoamisketjut, radionuklidien kulkeutumisen luonnossa ja ravinnossa, ympäristön käytön ja ihmisten elintavat - unohtamatta vuodenaikojen vaikutuksia.

Suuren tapausmäärän laskemisen jälkeen saadaan arvioiduksi päästöstä aiheutuvien erisuuruisten säteilyannosten ja niiden pienentämiseen tähtävien suojatoimenpiteiden vaikutusten sekä toimenpiteiden aiheuttamien kustannusten todennäköisyydet. Toisaalta valmiustoiminnassa lasketaan todennäköisyyksien sijasta tarkemmin yksittäisen onnettomuuden seurauksia, jotta voitaisiin ennusteiden perusteella suunnitella toimenpiteitä.

Liikkeellelähtö Suomessa

Ydinvoimalaitoksen radioaktiivisten päästöjen leviämisen ja vaikutusten arviointia on Suomessa kehitetty siitä saakka, kun ensimmäisten laitosten rakentaminen käynnistyi. Merkittävän sysäyksen työn sisällölle ja laskentamallien kehittämiseksi antoi vuonna 1975 ns. Rasmussenin raportti (WASH-1400), jossa arvioitiin päästöistä aiheutuva riski ympäristössä.

Ydinvoimalaitosten ilmaan ja veteen tapahtuvien päästöjen leviämiseen ja säteilyannosten arviointiin liittyvää mallinkehitystyötä tekivät Suomessa samanaikaisesti tutkimuslaitokset, voimayhtiöt ja säteilysuojeluviranomainen. Tässä rajoitutaan kertomaan tärkeimmistä VTT:n ja Ilmatieteen laitoksen sekä voimayhtiöiden piirissä kehitetyistä laskentaohjelmista.

VTT ja Ilmatieteen laitos

Ilmatieteen laitos ja VTT kehittivät 1970-luvun loppupuolella tietokonepohjaisen seurausten arviointiohjelman ARANO, joka laskee ilmaan tapahtuvasta päästöstä aiheutuvat terveydelliset ja taloudelliset vaikutukset. Mallinnus kattaa radioaktiivisista aineista aiheutuvat ulkoiset ja sisäiset säteilyannokset mukaan lukien maataloustuotteiden käytön. Arviointi ottaa huomioon väestönsuojelutoimet, niiden tehokkuuden säteilyannosten pienentämisessä ja niistä aiheutuvat kustannukset. ARANO oli (ja on siis luonnollisesti edelleenkin) niin nopea ohjelma, että sillä voitiin laskea suuri joukko erilaisia päästöjä ja säätilanteita, jolloin onnettomuuden seurauksille saatiin todennäköisyysjakauma. ARANO-ohjelmiston ensimmäinen ja tähän mennessä laajin sovelluskohde on ollut 1970-luvulla pääkaupunkiseudulle kaavailun kaukolämpöä ja sähköä tuottavan ydinvoimalaitoksen sijoituspaikkavaihtoehtojen vertailu ympäristövaikutusten kannalta.

Voimayhtiöt

Imatran Voima Oy kehitti Loviisan ympäristöön sovitun ohjelman DOSES, ja Teollisuuden Voima Oy Olkiluotoon ohjelman ZEUS, KRONIC, PAMEDO ja MARI. Säättietoina käytetään laitospaikkojen säähavaintoja. Eri altistusreiteillä, kuten päästölaskeuma-laidunruoho-lehmä-maito-ihminen, käytettävät siirroskertoimet on mahdollisuuksien mukaan valittu paikallisten havaintojen perusteella. Ohjelmilla arvioidaan vuoden aikana tasaisesti tapahtuvista päästöistä aiheutuvat ns. kriittisen ryhmän yksilön säteilyannokset. Kriittinen ryhmä ei tässä tarkoita ydinvoiman vastustajia, vaan erilaisia mielipiteitä omaavia henkilöitä käsitellään tasapuolisesti; kriittinen ryhmä on eniten altistuneiden yksilöiden ryhmä. Yksilöiden säteilyannosten lisäksi lasketaan alle 100 km etäisyydellä asuvan väestön yksilöi-

den säteilyannosten summa, jota kutsutaan väestöannokseksi. Nämä 1980-luvun alussa valmistuneet ohjelmat ovat hyväksi havaittuja ja siksi vähäisten modernisointien jälkeen yhä käytössä.

Kehitys 1980-luvulla

Ilmatieteen laitoksen ja VTT:n yhteistyö johti TRADOS-ohjelman kehittämiseen, jolloin voitiin laskea kaukaa saapuvan radioaktiivisen päästön vaikutukset. Ohjelma ottaa huomioon epäpuhtauksien kokeman säteilanteen muuttumisen kulkeutumisen aikana ilmakehässä. Myös TRADOS on niin nopea ohjelma, että sillä voitiin laskea paljon tapauksia, ja siten määritellä seurausten todennäköisyydet. Mallia käytettiin myös Tshernobylin onnettomuuden aiheuttamien säteilyvaikutusten laskennalliseen arviointiin.

VTT kehitti lisäksi radioaktiivisten aineiden kulkeutumista ympäristössä kuvaavan lokeromallin (kompartimentimallin) DET-RA, joka sopii käytettäväksi vesistö- ja maaekosysteemien kuvauksen yhteydessä. Mallissa esimerkiksi edellä mainittu laidunruoho muodostaa yhden lokeron, ja aineiden siirtymistä eri lokeroiden välillä kuvataan siirrokertoimilla.

Valmiustoimintaa varten voimayhtiöt tilasivat 1980-luvun lopussa VTT:ltä ARANO-ohjelmaan perustuvan säteilyannosten reaaliaikaisen arviointiin sopivan ohjelman ROSA, joka laskee säteilyannokset ulkoisesti suoraan päästövanasta, hengityksen kautta kehoon joutuneista aineista ja laskeuman aiheuttamasta ulkoisesta säteilystä. Ravintoketjuja ei tarkastella. Ohjelma on edelleen käytössä Olkiluodossa, mutta Loviisassa tietokonekannan vaihtamisen vuoksi ROSA jouduttiin korvaamaan Ruotsissa kehitetyllä LENA-ohjelmistolla.

Tshernobylin onnettomuuden (26.4.1986) vauhdittama leviämismallien kehitys voimayhtiöissä tähtäsi onnettomuuspäästöjen aiheuttamien säteilyannosten todennäköisyyspohjaiseen tarkasteluun. Voimayhtiöt rahoittivat yhdessä Imatran Voima Oy:ssä kehitetyn ohjelman TUULET. Ohjelma käyttää laitosalueiden kronologisia säähavaintoja, jolloin pitkään kestävänpäästön aikana tapahtuva sääolosuhteiden vaihtelu voidaan ottaa huomioon. Vuodenaikojen ja sadonkorjuun eri vaiheiden erottelemiseksi vuosi on mallinnettu kuukausittain. Perinteisten maataloustuotteiden lisäksi ohjelma laskee myös luonnontuotteiden kautta aiheutuvat säteilyannokset.

1990-luku ja uusin kehitys

1990-luvulla VTT ja Ilmatieteen laitos jatkoivat leviämismallien kehittämistä aluksi vanhan TRADOS-mallin pohjalta. Säteilyannosten todennäköisyyspohjaiseen laskentaan suunnatusta mallista kehitettiin ns. valmiusversio, jossa oli parannettu yksittäisen tilanteen laskennan tarkkuutta ja otettu mukaan laskettaviksi suureiksi myös annosnopeudet, pitoisuudet ilmassa ja laskeumamäärät.

Ohjelmaan liitettiin myös X-ympäristössä toimiva ikkunoitu graafinen käyttöliittymä, joka jo ennen www-selainten valtakautta mahdollisti ohjelman joustavan käytön myös internetyhteyden yli.

Tietokoneiden laskentakapasiteetin jatkuvasti kasvaessa todettiin, että mahdollisuudet huomattavasti tarkempienkin ennusteiden tekemiseen olivat olemassa, mutta TRADOS-ohjelman laskentakoodia (vanha Fortran) oli vaikea muuttaa riittävästi kaikkien uusien mahdollisuuksien hyödyntämiseksi. Niinpä vuonna 1995 käynnistettiin täysin uuden SILAM-laskentamallin (tuolloin vielä SILJA) kehittäminen.

Ensimmäisiä laskelmia sillä päästiin tekemään 1996, ja vuonna 1997 kyettiin jo mm. tuottamaan ajallisesti ja paikallisesti tarkkoja simuloituja mittauksia suurelle joukolle radioaktiivisia nuklideja INEX-2-FIN-harjoitusta varten Säteilyturvakeskuksen käyttöön.

Myös SILAM-mallin käyttöä haluttiin helpottaa graafisella käyttöliittymällä, jolla voisi samassa integroidussa ympäristössä muokata syötetietoja ja visualisoida laskentatuloksia. Tähän tarkoitukseen kehitetty VALMA-ohjelma valmistui vuonna 1999. Siihen integroitiin samalla useita periaatteellisia toimintavaihtoehtoja laskennan suorittamiselle. VALMalla voidaan käyttää SILAM-mallia sellaisenaan tai vain annoslaskentaosaa, jolla voi siten suorittaa nopeampia variointiluonteisia tarkasteluja samoista leviämislaskennan tuloksista lähtien. Menettely perustuu Monte Carlo -tyyppisten partikkelien liikeratoja ja säätilannetta kuvaavien tietojen tallentamiseen sellaisenaan välitiedostoihin.

Lisäksi VALMA-käytössä integroitiin laskentakoodiin mahdollisuus laskea säteilyannoksia voimalaitoksen säämastossa (tai useammassa mastoissa) mitatusta säädatasta lähtien siten, että annoslaskenta näkee saman tietoteknisen rajapinnan kuin numeerista säädataa käytettäessä.

Leviämisen ja annoslaskennan perusasteet SILAM-mallissa

Numeerinen säädädata

Leviämisen ja annosennusteen tekemiseksi tärkeimmät lähtötiedot ovat päästötiedot ja ilmakehän meteorologinen tilanne. Hyvin yksinkertaisessa leviämismallissa, jolla laskeetaan aivan päästölähteen lähialuetta, riittää tuntee jopa vain tuulen suunta ja nopeus sekä muutama muu suure yhdellä ajanhetkellä. Pidemmällä aika- ja paikkavälillä tarvitaan kuitenkin suurempi määrä erilaisia meteorologisia suureita neliulotteisesti ajan ja paikan funktiona. Luonnollisesti leviämisenusteen tarkkuus ei voi olla parempi kuin käytettävän säädätän. SILAM-malliin säätieto saadaan Ilmatieteen laitoksen HIRLAM-mallista, jolla tuotantokäytössä laskeetaan Suomen sääennusteetkin. HIRLAM laskee pallokoordinaatistohilassa, jossa ekvaattori on siirretty kulkemaan Helsingin läheltä. Suurin laskenta-alue kattaa Pohjois-Atlantin ja aluetta pienennetään portaittain lähestyttäessä Suomeen tähdyttyjä tarkempia ennusteita.

Päästötiedot (lähdetermi)

Päästö voi sisältää suuren määrän erilaisia radioaktiivisia nuklideja. SILAM-malli ei rajoitu mihinkään tiettyihin 'vakiopäästöihin', joskin sellaisia voidaan helposti määrittellä myöhemmää käyttöä varten. Päästön alkuperäiset aineet muuttuvat toisikseen ketjuhajoamisen määräämällä tavalla, joten radiologisesti vähämerkityksinenkin nuklidi voi tyttäriensä kautta aiheuttaa suurempia haittavaikutuksia. Tavallisesti laskennassa on käytetty noin sataa tärkeimmäksi katsottua nuklidia reaktorin inventaarista, mutta useille sadoille on dataa helposti käytettävissä. Mallin syötetietona ovat siis tarkastellusta ydinlaitoksesta ympäristöön vapautuvien nuklidien valinta ja päästömäärät (aktiivisuudet). Lisäksi jokaisen nuklidin päästönopeus ja nousukorkeusjakauma ovat vapaasti ajan funktiona määrättävissä. Tavallisesti kuitenkin ajatellaan samantyyppisten nuklidien käyttäytyvän näissä suhteissa samalla tavalla.

Kulkeutuminen ja turbulenttinen diffuusio

SILAM on Monte Carlo -tyyppinen partikkelimalli (tyypillinen partikkelimäärä kym-

meniä tuhansia), jossa kukin mallihiukkanen noudattaa päästölähteestä lähdettyään itsenäisesti ilmakehän virtauksia eli tuulikenttää. Tosin on kehitetty myös apumalleja, jotka mahdollistavat laskennan pienemällä partikkelimäärällä. Partikkelin liikertaa (trajektoria) lasketaan iteratiivisella menetelmällä. Eroa eri partikkelien trajektoreihin syntyy siitä, että ilmakehän turbulenssin aiheuttama lisääntyminen kuvataan poikkeutteleamalla partikkeleita satunnaisesti valitsevien olosuhteiden mukaisesti. Yleisesti ottaen leviäminen riippuu tuulensuunnan vaihteluista ja pienemmän mittakaavan turbulenssista. Lähialueella pelkkä laajan skaalan tuuli johtaisi liian vähäiseen leviämiseen, mutta se on suurilla etäisyyksillä eniten leviämistä aiheuttava tekijä. Toisaalta turbulenssia ei kyetä kuvaamaan suoraan virtauskentän avulla, koska resoluutio ei siihen riitä. Leviäminen pysty- ja vaakasuunnassa poikkeavat ilmakehän rakenteen vuoksi oleellisesti toisistaan. Pystysuunnassa sekoittunutta kerrosta rajoittaa alhaalla maanpinta ja ylhäällä (yleensä 200... 1500 m) ns. sekoituskorkeus, joka muodostaa vaikeasti ylitettävän rajapinnan.

Lähde- ja nieluprosessit

Lähde- ja nieluprosesseilla tarkoitetaan leviämismalleissa ilmiöitä, jotka advektiosta (tuulesta) ja turbulenssista riippumatta tuovat aineita systeemiin tai poistavat niitä siitä. SILAM-mallissa niitä ovat päästölähteen lisäksi radioaktiivinen ketjuhajoaminen ja laskeumasprosessit. Ketjuhajoaminen laskeetaan lyhyille ketjuille nopealla analyttisellä ratkaisulla ja pidemmille matriisieksponenttimenetelmällä. Laskeumaa muodostuu muista kuin kaasumaisina esiintyvistä nuklideista. Kuiva laskeuma syö pilveä jatkuvasti läheltä maanpintaa, märkä laskeuma puolestaan huuhtelee sateen sattuessa koko sateen alapuolista pilven osaa. Tunnetusti sade on sateisen alueen itsensä kannalta pahimpia suureen säteilyaltistukseen johtavia tekijöitä.

Laskettavat suuret

SILAMista saatavia tulossuureita ovat radioaktiivisten aineiden nuklidikohtaiset pitoisuudet ilmassa (Bq/m^3), laskeumamäärät (Bq/m^2), annosnopeudet (Sv/s) ja annokset (Sv). Kaikki saadaan ajan ja paikan funktiona. Paikkaa tarkastellaan yleensä vain 2-ulotteisesti eli lähellä maanpintaa. Annoksia voidaan helposti laskea eri altistusreiteille

(ulkoiset/sisäiset) ja joko efektiivisenä annoksena tai valituille kohde-elimille. Pilvi-gamma-annoksen laskennassa otetaan huomioon kunkin nuklidin kaikki todelliset fotoni vaihtelevine energioineen sellaisenaan. Nopean menettelyn ansiosta ryhmittelyä energiaryhmiin tms. ei tarvita. Yhdessä ajossa laskettavien suureiden määrää rajoittaa lähinnä suuri muistinkäyttö laskennan aikana.

Käyttö valmius- ym. harjoituksissa

SILAMia on käytetty sekä valmius- että tutkimustoimintaan liittyvissä harjoituksissa ja koodivertailuissa. Esimerkkejä Suomessa järjestetyistä valmiusharjoituksista, joihin SILAMilla on tuotettu simuloitua säteilydataa, ovat huhtikuun 1997 INEX-2-FIN ja syyskuun 2000 pelastuspalveluharjoitus. Kummassakin ajateltuna päästölähteenä oli Loviisan laitos. Enemmän tutkimuspainotteisia ovat olleet RTMOD- ja tällä hetkellä meneillään oleva ENSEMBLE-harjoitussarja. Niissä useiden maiden tutkimuslaitokset ovat laskeneet omilla leviämismalleillaan samaa hypoteettista päästöä ja mallien tulokset on asetettu www:hen vertailtavaksi erilaisten laskennallisten kriteerien perusteella. RTMOD-projektissa laskettiin myös Espanjan Algecirassa 29.5.1998 sattunut todellinen Cs-päästö.

Www-pohjainen käyttöliittymä

SILAM-mallille ollaan ajan hengen mukaisesti tekemässä web-tekniologiaan pohjautuvaa käyttöliittymää. Silloin käyttöliittymä toimii vain yhdessä paikassa (www-palvelimella) ja laskentamalli joko samalla tai toisella läheisellä koneella. Käyttäjät voivat käyttää mallia mistä päin maailmaa tahansa ja monenlaisilta laitealustoilta tarvitsematta asentaa itselleen mitään ohjelmaa. Vastavia systeemejä on maailmalla joitakin jo käytössä.

Muut sovellukset

Vaikka ydinräjähdysten uhka nykymaailmassa rajoittuukin lähinnä terroriteon pie-nehköön mahdollisuuteen, on siihenkin liittyvään leviämisen- ja annosennusteseen esiintynyt mielenkiintoa. SILAM-malli tarjoaa hyvän lähtökohdan, koska suuri osa tarvittavista toiminnoista on jo luonnostaan valmiina. Ydinvoimalaitosonnettomuudesta poikkeavia tekijöitä ovat mm. erilainen nuklidikoostumus, erilainen hiukkaskokojakau-

ma sekä lähdealueen laajuus ja muoto. Luotettavien lähtötietojen saaminen nuklidi-koostumuksesta ja hiukkaskokojen jakaumista eri tapauksissa on vaikeata. Mallin kehityksen kannalta nuklidit ja lähdealue eivät ole ongelma, sen sijaan laaja skaala erilaisia hiukkaskokoja ja vaatimus laskeumakentän muodostumisesta puhtaasti hiukkasten laskeutumispaiikkojen perusteella tekee käsitteilyn Monte Carlo -mallissa jossain määrin laskennallisesti raskaaksi.

VALMA

Mitatun säädäntä käyttö

Varsinaisen laskennan kannalta VALMA-ohjelman erityispiirre (SILAM-laskennan hallinnan lisäksi) on mahdollisuus laskea mitatulla säädäntällä. Tällöin tuulen suunnat ja nopeudet sekä stabiilius- ja sadetiedot saadaan esim. voimalaitoksen säämaston tuottamista lukemista. Yhden pisteen mitauksilla voidaan laskea päästölähteen lähialuetta (mieluiten vain < 20 km). Mittauspisteiden määrän kasvaessa mahdollisuudet paranevat, mutta numeerisen säämallin kaltaiseen konsistenssiin ei toki helpolla päästä. Menettelylle on kuitenkin ajateltu olevan sovelluksia mm. tehtävissä, joissa haluttaisiin selvittää ilmassa havaittujen radioaktiivisten aineiden alkuperää ja kyseiselle alueelle ei ole numeerista säädäntää saatavissa, mutta mittauspisteitä voitaisiin asentaa. ■



DI Mikko Ilvonen on VTT Energian ydinvoimalaitospäästöjen leviämisen- ja annoslaskentamallien tutkija, puh. 09 - 4565054, mikko.ilvonen@vtt.fi

TkL Lauri Rantalainen on Fortum Nuclear Service Oy:n Ympäristökonsultoinnissa leviämisen- ja annoslaskelmista vastaava asiantuntija, puh. 010-4534 557, lauri.rantalainen@fortum.com

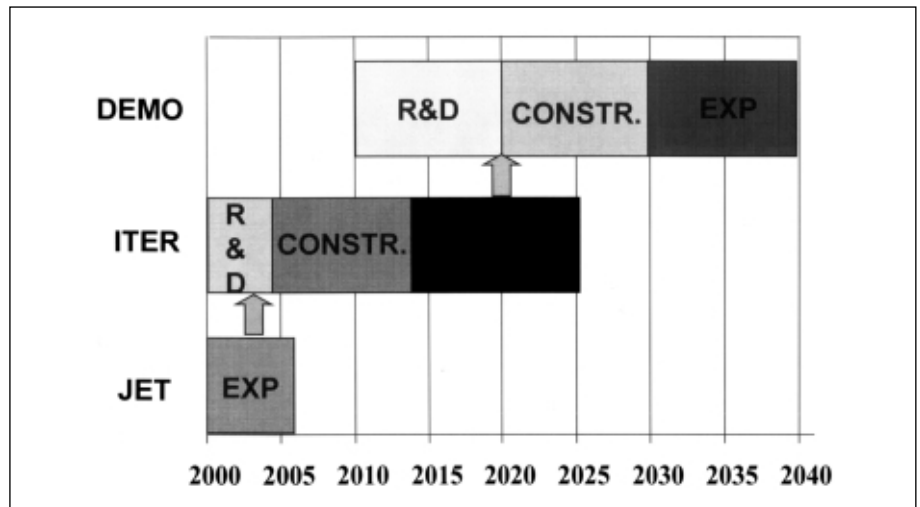


Fuusioenergian 50 vuoden synnytys

Vuoteen 2020 mennessä meitä on 8 miljardia, vuonna 2050 lähes 10 miljardia. Ihmiskunnan suurin huolenaihe on lisääväestö, jolle on turvattava puhdasta vettä, ravintoa ja siedettävät elämänolot. Tämä vaatii paljon lisää energiaa: nykytasolla pysyminen johtaisi lähivuosisikymmeninä energiankulutuksen kaksinkertaistumiseen.

Kestäviä ratkaisuja kuten aurinko, fuusio- tai hyötöreaktoreihin pohjautuvaa fissioenergiaa joudutaan vielä odottamaan.

Vaikka näiden tekniikka olisikin kypsää, kaukonäköinen poliittinen



Kuva 1: Jotta vuonna 2020, jolloin energiakysymysten oletetaan kärjistyvän, olisi selvyyttä siitä onko fuusioenergia todellinen vaihtoehto, on ITERin rakentamispäätös tehtävä heti. Laajamittainen fuusioenergian käyttö on mahdollista vasta v. 2050 jälkeen.

Jos väestöngelman hallinnassa epäonnistutaan, seurauksena on kaaos. Ei ole vaikea erottaa näitä merkkejä jo tämän päivän konflikteissa. Tasaisen kehityksen perusedellytys on siis lisäenergian saanti. Näkymät eivät valitettavasti ole erityisen valoisat: Fossiilisten polttoaineiden käyttö lisää kasvihuonekaasujen päästöjä, vesivoima on monin paikoin täysin valjastettu, ydinvoiman – etenkin nopeiden hyötöreaktorioiden – poliittinen hyväksyttävyyden huono, biopolttoaineet ja tuulienergia voivat olla vain osaratkaisua. Uusien energialähteiden kehittyminen on ollut tuskastuttavan hidasta. Köyhiltä mailta puuttuu energiaratkaisujen tekoon tarvittavat resurssit ja kehittyneissä maissa päätöksentekoa summentaa energiamarkkinoiden liberalisointi ja ”markkinavoimien” lyhyen tähtäimen poliittinen ja taloudellinen egoismi. Suuria oraakkelinlahjoja ei tarvita ennustamaan, että 20-50 vuoden päästä väestö- ja energiaongelmat eivät ole helpottuneet.

Ratkaisevia, nopeita muutoksia energian kulutuksessa voi olettaa vain joissain kaa-

osskenaarioissa: diktatoriset pakkotoimet, globaalit mullistukset tautien, aatteellisten virtausten tai esimerkiksi keinovaltion mielihyvystimulanttien vuoksi. Odotettavampaa on, että energiapulan lievittämiseksi energian käytön tehostamisen ohella kaikki mahdolliset energialähteet on valjastettava. Poliittisesti helppoja patenttiratkaisuja ei yksinkertaisesti ole olemassa. Tulevaisuudessa energiajärjestelmät perustuvat entistä vaativampiin teknisiin ratkaisuihin, ydinreaktoreihin, fotoniiikkaan, tai esimerkiksi geenitekniikkaan perustuviin keksintöihin, ja energia-aspektien sulauttamiseen käyttökohteisiinsa nykyisen tietotekniikan tavoin.

Fuusiovoima voisi olla ideaaliratkaisu

Siirtyminen energiamuodosta toiseen, puusta hiileen, öljyyn ja kaasuun, ja toisaalta energian käyttötapojen, esim. eri liikenne- ja teollisten prosessien historialliset muutokset tapahtuvat hyvin hitaasti.

Uusiin järjestelmiin tehtävät perusinvestoinnit on maksettava vanhojen avulla eikä ihmisenkään kovin hanakasti kulutustottumuksiaan vaihda. Tällaisessa aikaperspektiivissä fuusioenergian viidenkymmenen vuoden kehityskaari on luonnollinen. Peruspulma on kuitenkin, että tänään globaalit reunaehdot dominoivat ennennäkemättömällä tavalla. Vaarana on, että aika loppuu ennustettavalta kehitykseltä.

Energiaintensiivisessä tulevaisuuden yhteiskunnassa fuusioenergia olisi ideaalinen energialähde. Polttoainetta on lähes rajattomasti: kaikissa vesissä on luonnostaan vedyn raskasta isotooppia deuteriumia ja toinen polttoainekomponentti tritium voidaan hyötää fuusioreaktiossa vapautuvan neutronin avulla litiumista, jota myös on runsaasti. Deuterium-tritium fuusioreaktiossa ei synny ydinjätteitä eikä kasvihuonekaasuja; myöskään sydämen sulamisen kaltaisia vakavia onnettomuuksia fuusioreaktorissa ei voi tapahtua. Fuusioreaktorissakin toki on jonkin verran säteilyongelmia: tritiumia, fuusioneutronin aktiivisia rakenteita sekä

fuusioteknologiaan väistämättä liittyvää ydinaseproblematiikkaa. Fuusioenergian suurin pulma on, että sen vaatima teknologia on erittäin vaikeaa ja voimalaitosten perusinvestoinnit hyvin kalliit.

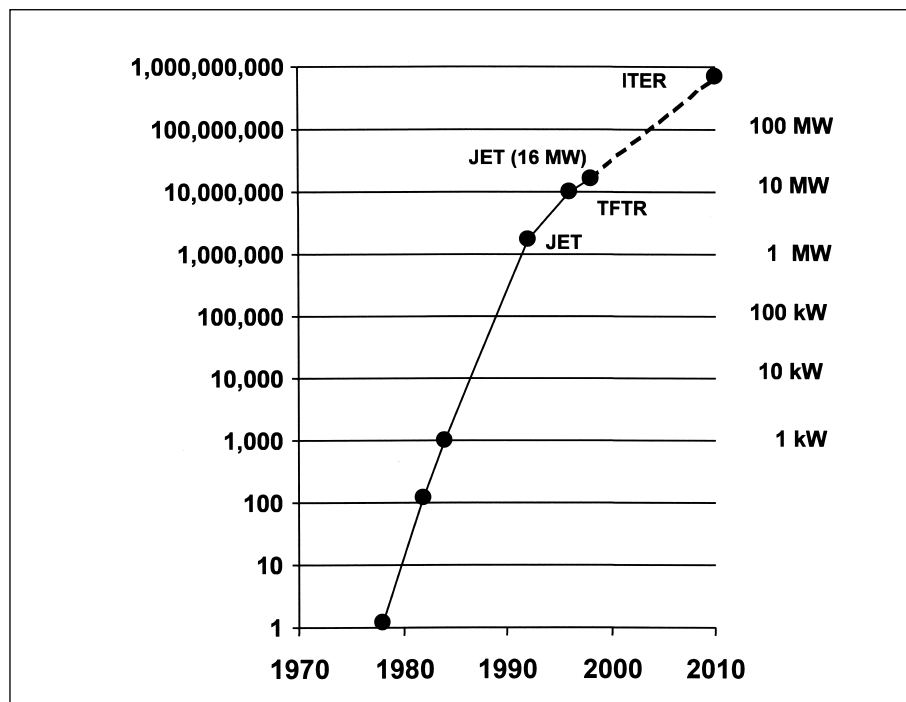
Fuusioreaktoria ei voi demonstroida pienkokeilla

Fuusioreaktorin toteuttamiseksi tunnetaan kaksi vaihtoehtoa¹: magneettikoossapito sekä inertiaalikoossapito. Inertiaalikoossapitossa miniatyyrikokoisia deuterium-tritium nappeja räjäytetään laser- tai hiukkassuihkujen avulla. Magneettisessa koossapidossa, johon seuraavassa keskitytään, vetyisotopien väliset fuusioreaktiot tapahtuvat plasmamuodossa olevassa kuumassa, harvassa polttoaineseoksessa, joka on vangittu magneettikenttien muodostamaan ”pulloon”. Tällaisia laitteita ovat mm. tokamakit ja stelaraattorit. Nettoenergian tuoton perusedellytyksenä on, että fuusiopolttoaine on kyllin kuumaa (100 milj. astetta) ja että se pystytään pitämään koossa tarpeeksi kauan, jotta reaktioita ehtii riittävästi tapahtua. Fuusiotutkimuksen virstanpylväinä pidetään sekä breakeven-tilannetta, jossa fuusioreaktioissa vapautuu energiaa yhtä paljon kuin mitä polttoaineen kuumennukseen käytetään, että syttymistä, jossa fuusioreaktioissa vapautuvat heliumytimet eli alfahiukkaset pystyvät ylläpitämään fuusiopalon edellyttämää lämpötilaa ja jolloin polttoaineen ulkoinen kuumennus voidaan kytkeä pois.

Fuusioplasman breakeven ja syttyminen ovat täysin analogisia märkien puiden polttamisen ja niiden syttymisen kanssa. Pienessä fuusio-koneessa energia karkaa reunahäviöiden takia. Syttyminen tapahtuu vasta kun alfahiukkasan jarruuntumispituus on plasman dimensioita pienempi. Fuusiotutkimuksen tekee hankalaksi se, että tutkimusta voidaan tehdä vain täysmittaisessa reaktorissa! Tällaisen rakentaminen on erittäin kallista ja sen vuoksi suunnitteluperusteiden on oltava vankalla pohjalla. Liian suuria harppauksia ei voi tehdä ja siksi tie fuusiovoimalaan on pakko kulkea useiden väli-tappien kautta.

Fuusiovoimala on edelleen 50 vuoden päässä

Fuusiotutkimus on 50 vuoden aikana edennyt tilanteeseen, jossa breakeven on tokamakissa saavutettu. Nykyisen lippulaivan, Oxfordin lähellä Culhamissa sijaitsevan



Kuva 2: Fuusiotehon kehittyminen. ITERin terminen teho on 400-700 MW.

JET-tokamakin suunnittelu aloitettiin 1973, sijoituspaikka valittiin kahden vuoden kändevään jälkeen 1977 ja kokeet käynnistyivät 1983. JETin alunperin 12 vuoden mittaiseksi suunniteltua koejaksoa on useampaan otteeseen jatkettu; näillä näkymin toiminta loppuu vuoden 2006 jälkeen. Lähes 30-vuotias JET on ollut välttämätön plasmakone seuraavan sukupolven laitteen, ITERin suunnittelemiseksi. ITER olisi jo todellisen reaktorin hieman riisuttu prototyyppi, jossa keskeisimmät tutkimuskohteet olisivat syntyneen plasmakoneen selvittäminen sekä fuusioteknologiaturkimus. ITERiä seuraisi aikanaan varsinainen täysmittainen fuusioreaktorin prototyyppi, josta yleensä käytetään nimeä DEMO.

Kansainvälisissä fuusiostrategioissa on tähdätty siihen, että nykytilasta päästäisiin yhdellä harppauksella DEMO-luokan reaktoriin. Koska sekä ITERin että DEMOn rakennusajat olisivat kymmenkunta vuotta ja niillä olisi suoritettava kokeita useita vuosia ennen seuraavan laitoksen rakennuspäätöstä, optimistisimmankin aikataulun mukaan kaupallisia tokamak-tyyppin fuusiovoimaloita voisi ilmestyä vasta vuosisadan puolivälissä (Kuva 1). Kaupallisen fuusioenergian tulo kestää edelleen 50 vuotta. Tänäpäin kuitenkin tiedetään, että megawattiluokan tokamak-laitteita pystytään rakentamaan; ensimmäis-

ten fuusioenergiaennustajien aikaan realistisia reaktorikonsepteja ei vielä oltu edes keksitty ja vasta vuosikymmenien vastoinkäymisten ja uusien innovaatioiden ansiosta nousiin milliwattitason reunaplasma-kokeista todellisiin fuusio-kokeisiin (Kuva 2).

JET on osoittanut tokamak-reaktorin tieteellisen toteutettavuuden

JET-tokamak kuuluu suurten tokamak-tyyppisten plasmakoneiden sukupolveen. Muista saman ikäpolven koneista Yhdysvaltojen TFTR on jo poistettu käytöstä ja japanilaisten JT-60 tokamakia modifioidaan mm. muuttamalla sen koossapitomagneetit suprajohdaviksi. Sekä TFTR:ssä että JET:ssä on ajettu aitoja deuterium-tritium purkauksia. Fuusiotehon ennätysarvo on 16 MW, jonka JET saavutti hetkellisesti; tätäkin tärkeämpi tulos oli 4 MW fuusiotehon ylläpitäminen JET-purkauksissa, jotka olivat jatkuvia luonteeltaan. JETillä on opittu hallitsemaan kuuma fuusio-plasma ja sillä saavutettujen kokemusten perusteella ITERin käyttäytyminen on hyvin ennustettavissa.

Vuonna 2000 JET-toiminta muuttui oleellisesti. Aiemmin JET oli itsenäinen koelaitos, jolla oli oma henkilökuntansa ja joka itse päätti toiminnastaan, toki eurooppa-

laisten johtoryhmien valvonnassa. Uusi JET (www.efda.jet.org) on aidosti Euroopan fuusiolaboratorioiden yhteiskäytössä oleva laite. Pysyvää henkilökuntaa edustavat JETin hallinnosta vastaava esikunta (Close Support Unit) sekä tekninen käyttöorganisaatio UKAEA. Kaikki kokeet suunnitellaan kollektiivisesti JETin jäsenlaboratorioiden projektiryhmissä (Task Force) ja toteutetaan komentamalla tutkijat koekampanjoiden ajaksi Culhamiin. Myös suuret tekniset parannustyöt toteutetaan eurooppalaisina yhteisprojekteina. JETiä trimmataa nostamalla plasman kuumennusteho nykyisestä noin 20 MW:sta lähes 50 MW:in ja uusimalla plasman hallintaan liittyviä komponentteja. Tärkeimmät muutostyöt tehdään vuoden 2004 huoltoseisokissa. Suuruusluokaltaan 50 MW fuusiohuipputehoja on odotettavissa laitteen viimeisenä toimintavuonna 2006. JET-kokeet on täysin valjastettu ITERiä tukevaan työhön.

Tieteellisen menestyksen ohella JET on ollut oiva demonstraatio EU:n ajamasta "European research area" -ideologiasta. Hanke on taannut Euroopan kiistattoman johtoaseman fuusioreaktoritutkimuksessa. JETin kollektiivikäyttö on monista epäilyistä huolimatta onnistunut erinomaisesti. Tutkimusryhmien osallistumista JETin toimintaan kehitetään edelleen luomalla etäosallistumismahdollisuuksia telekonferensseista kokeiden reaaliaikaiseen seuraamiseen sekä joidenkin osatoimintojen, kuten diagnostiikan, aktiiviseen etäkäyttöön. Jo nyt kaikki JETin koedata ja tietokoneet ovat mm. suomalaisen tutkijoiden käytössä. JET vahvistaa uskoa että vieläkin laajemmat kansainväliset konsortiot, joita tarvittaisiin ITERin ja DEMOn toteuttamiseksi, voisivat toimia.

ITER osoittaisi tokamakin teknisen toteutettavuuden

Euroopan Unionin fuusiotutkimuksen päätaivoite on fuusiovoimalan kehittäminen ja siksi jo pitkään on suunniteltu JETin seuraajaa - Next European Torus/Next Step/NET. Hanke on kuitenkin niin mittava, että EU, USA, Japani ja Venäjä päättivät yrittää toteuttaa seuraavan sukupolven laitteen, ITERin² (www.iter.org) laajana kansainvälisenä yhteistyönä. Yritys ei ollut ensimmäinen: ITERin edeltäjää INTORia suunniteltiin jo 70-80 lukujen taitteessa IAEA:n puitteissa. ITERin alustava suunnittelu toteutettiin vuosina 1988-1990 ja yksityiskohtainen suunnittelutyö EDA (Engineering Design

Activities) vuosina 1992-1998. EDA jatkuu vielä tämän vuoden heinäkuulle. EDA:n lopputuloksena syntyivät ITERin yksityiskohtaiset tekniset suunnitelmat sekä myös suuri joukko kriittisten reaktorikomponenttien prototyyppisiä jättimäisiä suprajohdemagneetteja, täysikokoisia vakuunikammion osia, huolto-robotiikkaa, jne. Eri laitteiden integrointi toimivaksi reaktorikokonaisuudeksi on yksi ITERin keskeisimpiä tavoitteita.

ITERin teho olisi ollut 1500 MW edustavan varsin suurta loikkaa suoraan DEMO-luokkaan. Mitoiltaan ITER olisi ollut noin kolminkertainen JETiin verrattuna. Fuusioyhteisössä vallitsee muutamia soraääniä lukuunottamatta kohtalainen yksimielisyys siitä, että ITERiin tarvittava tieto on kyllin luotettavaa. Vaikka ITERin T&K-työ etenikin ripeästi, sen rakentamispäätös osoitautui hyvin vaikeaksi. Hankkeen kustannusten - vajaan 7 mrd. euroa - myöntämiseen ei riittävää poliittista tahtoa löytynyt. USA irtautui ITER-hankkeesta kesällä 1999 päätöksenteon vaikeuteen suivaantuneena sekä ehkä myös omista sisäisistä rahoituskiihdoistaan johtuen. Jäljelle jääneet ITER-partnerit päättivät etsiä ratkaisua, jonka kustannukset olisivat noin puolet alkuperäisestä ja jossa samalla tietysti suorituskyvystä hieman jouduttaisiin tinkimään. Tämän uuden version, nimeltään ITER FEAT tai pelkkä ITER, joka myöskin on jo yksityiskohtia myöten suunniteltu, teho olisi noin 500MW ja hinta noin 3.5 miljardia euroa. Kompromissina jouduttiin purkauksen pituudesta, materiaalien säteilytystestausmahdollisuuksista sekä toimintamarginaaleista tinkimään.

Rakennetaanko ITER, minne ja milloin?

ITERin rakentamispäätöksen teko ei vielä näytä helpolta, sillä vaikka ITERin hinta on puolitettu, USA on toistaiseksi edelleen poissa kuvioista ja kansainväliset talousnäkymät ovat heikentäneet etenkin Japanin rahoitustilannetta. Maailma kuitenkin kipeästi tarvitsee fuusio-optionsa, jonka vuoksi mm. Euroopan tutkimusministerit päätyivät alkuvuodesta ITER-myönteiseen kantaan ja jota myös Komission kuudennen puiteohjelman budjettiehdotus myötäilee. Mihin ITER sitten rakennettaisiin? Kuluvaan vuoden heinäkuussa odotetaan virallisia sijoituspaikkatarjouksia: alustavia ehdokkaita ovat Cadarache Ranskassa, Clarington (Darlington) Kanadassa, sekä Japanissa kol-

mekin paikkaa, Naka, Rokkasho-Mura ja Tomakomai. Periaatteessa vertailut vaihtoehtojen välillä tehdään hintavertailuina, mutta todellisuudessa suurin osa toimituksista lienee in-kind toimituksia, joiden hinnoittelu on sumeaa. Käynnissä ovat myös selvitystyöt minkälaiseen lailliseen muotoon (legal entity) ITER voitaisiin perustaa.

ITER CDAn alkupäivinä optimistisesti uskottiin, että sijoituspaikkapäätös tehtäisiin 1995 - tästä ollaan kohta vuosikymmen lip-suttu, sillä EUssa kaavaillaan päätösajan-kohdaksi aikaväliä 2003-2004. Kanadalaisilla on varsin pitkälle mietitty yksityiskohtainen ehdotus, mutta kanadalaisten into saattaa hiipua eurooppalaisten ja japanilaisten jähkailuun. Kuudennen puiteohjelman fuusio budjettiehdotus iskee myös pahoin Euroopan kansallisten assosiaatioiden omaan koetoimintaan, joka saattaa laimentaa ITER-intoa. Huomattavaa on myös että ITER tulisi olemaan teollisuusvetoinen hanke ts. perustutkimuksesta olisi siirrettävä resursseja teknologiaan. Tahto fuusioenergian tulemiseksi on koetuksella. Fusionin tuleminen tällä hetkellä viivästyttää ensi sijassa päätöksentekoa, ei enää lapsenkengissä oleva teknologia.

1) *Ns. myonikatalysoitu fuusio on tieteellisesti mahdollinen. Kylmäfuusiota tutkivat enää viimeiset "tosiuskovat". Episodin tuloksena syntyi hyödyllistä tietoa vetyvarastoista, mutta ei fuusioenergiaa.*

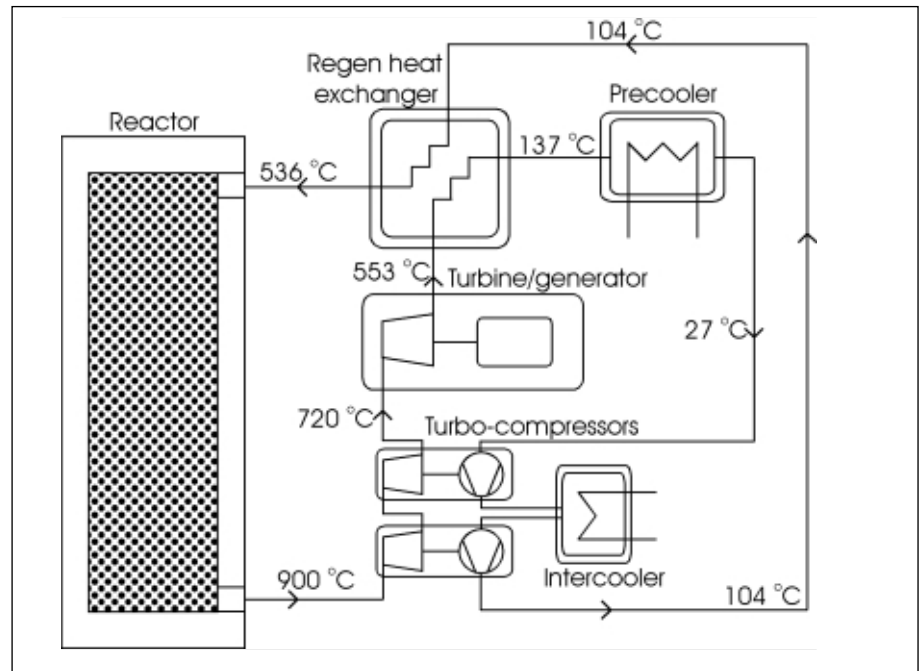
2) *ITER (latinaksi tie) on lyhenne sanoista International Tokamak Experimental Reactor*

Rainer Salomaa,
teknillisen fysiikan professori,
TKK; laser- ja plasmafysiikka,
fissio- ja fuusiotekniikka,
puh. 09 - 4513 199,
rainer.salomaa@hut.fi



Mesopotamialaisten jäljillä

Monissa insinööritieteissä pyritään soveltamaan periaatetta, että pyörää ei kannata yrittää keksiä uudestaan. Ydintekniikka poikkeaa tästä yleislinjasta niin, että tietyillä ideoilla on tapana pulpahtaa vuosikymmenen-parin välein yhä uudestaan esiin. Viimeksi pari poliitikkosukupolvea sitten haudattu kuulakekoreaktori on hyvä esimerkki: erimuotoisia kaasujäähdytteisiä korkealämpötilareaktoreja on tutkittu ja rakennettu 1950-luvulta alkaen mm. Saksassa, Iso-Britanniassa, Yhdysvalloissa, Kiinassa ja Japanissa tarkoituksena saada aikaan kevyt-vesi-reaktoria halvempi ja hyötysuhteeltaan parempi reaktori.



Kuva 1. PBMR-reaktorin toimintakaavio

Nyt kuulakekoreaktori on tullut ajan-kohtaiseksi, koska Etelä-Afrikan sähköstä 98% tuottava Eskom on ilmoittanut aikovansa aloittaa lähiaikoina 110 megawatin prototyypireaktorin rakennustyöt Koebergin laitospaikalle, jossa nykyisin toimii kaksi 900 megawatin painevesilaitosta. Eskomin PBMR-kuulakekoreaktoriprojektissa (Pebble Bed Modular Reactor) on vähemmistöosakkaina mukana mm. Britannian Magnox-reaktoreita hallitseva BNFL (22.5%) ja amerikkalainen ydinvoimayhtiö Exelon (12.5%), jonka tarkoituksena on ilmoituksensa mukaan selvittää, olisiko PBMR mahdollinen ratkaisu amerikkalaisen ydinvoiman kilpailukyvyyn parantamiseen.

Etelä-Afrikan sähköverkkoon Kapkaupungin lähelle rakennettava PBMR-laitos sopisi hyvin, koska maan energiantuotannon perusongelma on hiiliesiintymien sijainti tuhansien kilometrien päässä tärkeimmistä kulutuskeskuksista ja siirtokapasiteetin vähäisyys. PBMR-reaktorin yksikköko on varsin pieni: yhden yksikön eli ns. modulin sähköteho on noin 110 MW. Konseptin perusidea on, että laitospaikalle voi-

daan tarpeen mukaan rakentaa useampia moduleja. Taloudellisesti ajatellen useamman modulin rakentaminen on mielekkästä, sillä tällöin on mahdollista hyödyntää jo olemassa olevaa infrastruktuuria, mikä pienentää kokonaiskustannuksia.

Tekniikkaa

Eskomin PBMR-laitos perustuu pitkälti Saksassa 1980-luvulla toimineisiin korkealämpötilareaktoreihin (HTR-100 ja THTR-300), joiden lisenssit yhtiö osti laitokset suunnitelleilta ABB:lta ja Siemensiltä vuonna 1996. Reaktoriin on suunnittelutyön kuluessa tehty parannuksia mm. turbiinitekniikan osalta (höyrykierron sijasta käytetään suoraa heliumkiertoa) ja sen tehoa on pienennetty. PBMR-reaktorin perusrakenne selviää kuvasta 1. PBMR-moduli koostuu kolmesta paineastiasta, jotka on sijoitettu yhteisen betonirakennuksen sisään. Ensimmäinen paineastia pitää sisällään itse reaktorin. Toiseen paineastiaan on koottu kaksi turbokompressoria ja välijäähdytyn. Kolmannessa paineastiassa ovat generaattori, lämmönvaihdin sekä esijäähdytyn. Reaktori-

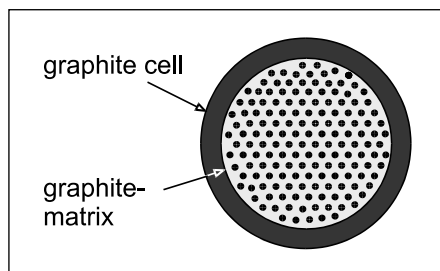
paineastia on halkaisijaltaan 6 metriä ja sen korkeus on 20 metriä. Varsinainen reaktori-sydän (kuulakeko) on halkaisijaltaan 3 metriä ja korkeudeltaan 10 metriä. Kuulakeko koostuu noin 440 000 kuulasta, jotka ovat halkaisijaltaan 6 cm suuruusluokkaa. Arviolta 330 000 näistä kuulista sisältää polttoainetta ja loput 110 000 kuulaa ovat moderaattorikuulia eli sisältävät pelkästään grafiittia.

PBMR:n jäähdytteenä käytetään heliumia. Helium on inertti kaasu, joten se reagoi heikosti muiden materiaalien kanssa. Helium johdetaan sisään reaktorin yläosaan, jolloin sen lämpötila on suurin piirtein 500 °C. Kaasu virtaa alaspäin kuulakeon läpi. Tällä matkalla sen lämpötila nousee suunnilleen 900 °C:een. Reaktorin jälkeen kaasu virtaa kahden sarjassa olevan turbiinin läpi, jotka kumpikin pyörittävät omaa turbokompressoriaan. Tässä vaiheessa noin 720-asteinen kaasu johdetaan varsinaiseen generaattoria pyörittävään turbiiniin. Tältä turbiinilta tullut kaasu johdetaan lämmönvaihtimeen, missä ylijäämälämpöenergia käytetään kompressoreilta tulevan kaasun lämmittämiseen. Lämmönvaihtimen jälkeen

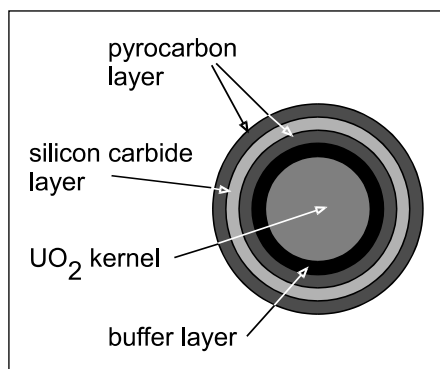
noin 140-asteinen helium jäädytetään noin 30 °C:een, jonka jälkeen se johdetaan kompressoreille. Kompressoreilta tuleva noin 100-asteinen kaasu lämmitetään lämmönvaihtimessa runsaaseen 500 °C:seen, jonka jälkeen se syötetään takaisin reaktorin yläosaan.

Korkean lämpötilan vuoksi reaktorissa ei voida käyttää metallisia osia. Metallia sisältävien polttoaine-elementtien sijasta on kehitetty elementti, jossa grafiittimatriisiin sisään on sijoitettu pieniä tarkoituksenmukaisesti päällystettyjä polttoainehiukkasia. Polttoainetta sisältävän grafiittimatriisin halkaisija on noin 5 cm, ja sen päällä on 5 mm:n paksuinen grafiittikuori, joten elementin kokonaishalkaisijaksi tulee 6 cm. Polttoainealueessa on kaikkiaan noin 15 000 päällystettyä halkaisijaltaan millimetrin luokkaa olevaa polttoainehiukkasta. Polttoaine-elementin paino on kaikkiaan 202 grammaa, mistä 9 grammaa on väkevöinniltään 7-8 painoprosentista uraania. PBMR-reaktorin polttoaineen suunnitteluparametrit on saatu suoraan saksalaisten THTR-reaktorin polttoaineenkehitysprojektista.

Päällystettyjä polttoainehiukkasia kutsutaan TRISO-hiukkasiksi (tristructural isotropic). TRISO-hiukkanen ei ole uusi keksintö, sillä niitä käytettiin jo vuonna 1967 brittiläisessä DRAGON-reaktorissa. TRISO-hiukkanen koostuu polttoaineytimestä sekä sen päällä olevista neljästä kerroksesta. Hiukkasen keskellä on puoli millimetriä halkaisijaltaan oleva varsinainen polttoainemateriaali (UO₂). Uraanidioksidin pinnalla on huokoinen hiilikerros, joka toimii ns. puskurialueena. Puskurialueen tarkoitus on suojata ulompia kerroksia fissiotuotteiden rekyylivaikutuksilta ja toimia kaasutilana vapautuville fissiokaasuille. Puskurialueen päällä on pyrolyyttinen hiilikerros. Sen tarkoitus on suojata hiukkasen sisäosia myöhemmässä valmistuvaiheessa, jossa hiukkasen pinnalle lisätään piikarbidikerros. Piikarbiidi luo suojakerroksen, joka estää pyrolyyttisen hiilikerroksen läpäisseiden metallisten fissiotuotteiden pääsyn ulos. Tällaisia fissiotuotteita ovat mm. barium, strontium ja cesium. Piikarbidikerros estää myös fissiokaasujen vapautumisen polttoainehiukkasen sisältä sekä vahvistaa hiukkasen rakennetta. Vaihtoehtoisena materiaalina voidaan käyttää zirkoniumkarbidia. Uloimpana kerroksena TRISO-hiukkasessa on jälleen pyrolyyttinen hiilikerros. Tämä kerros toimii piikarbidikerroksen suojana polttoaine-elementin grafiittimatriisiin valmistuksessa.



Kuva 2. PBMR-polttoainekuulan rakenne



Kuva 3. TRISO-hiukkasen rakenne

Jatkuva lataus

PBMR:n erikoisuus on jatkuvasti liikkuva kuulakeko. Tämän vuoksi yksittäisen polttoaine-elementin tarkkaa sijaintia ei tunneta. Ongelman ratkaisemiseksi asiaa on käsitelty tilastollisilla menetelmillä.

Reaktorisydämen tehokkaan laske- miseksi täytyy neutroniikka- ja palamalas- kenta sekä polttoaine-elementtien liikkeen simulointi kytkeä toisiinsa.

PBMR:n latausprosessi on pohjimmiltaan yksinkertainen. Polttoaine-elementit poistetaan reaktorin alaosasta ja niiden säteily- spektri mitataan. Spektrin perusteella määri- tetään elementin palama. Jos elementin pala- ma on riittävän alhainen, se palautetaan reak- torin yläosaan. Muussa tapauksessa elementti poistetaan kierrosta ja se korvataan tuoreella elementillä. Reaktorisydämen 440 000 polttoaine-elementistä arviolta 3000 kappaletta käsitellään päivittäin. Tästä määrästä n. 350 tulee hylätyksi. Käytetyn polttoaineen loppu- sijoituksesta ei ole olemassa tarkkoja teknisiä suunnitelmia. Radioaktiivisten aineiden va- pautumisen kannalta polttoaine-elementissä itsessään on jo useampia esteitä. TRISO- hiukkasen neljästä pintakerroksesta tärkein on piikarbidikerros, joka tehokkaimmin estää radionuklidien vapautumisen. Polttoaine-ele- mentin grafiittikerros estää puolestaan tehok- kaasti korrodoitumisen.

Koska polttoaineen rakenne poikkeaa täysin kevytvesireaktorien polttoaineesta ja sen väkevöinti ylittää nykyisin monien polttoainetehtaiden lisensoinnissa käytetyn 5% rajan, PBMR-projekti edellyttää samalla polttoainetehtaan rakentamista. Tehtaan suunnitteluun osallistuu saksalaisten HTR-polttoainetehtaan aikanaan rakentanut Nukem, ja sen paikaksi on suunniteltu v. 1989 toimintansa lopettaneen uraaninväkevöinti- laitoksen laitospaikkaa Pelindabassa Pretorian lähellä. Eskom on arvioinut polttoaine- tehtaan kustannuksiksi n. 6 miljoonaa dol- laria, ja sen kapasiteetti vastaisi kolmen PBMR-modulin polttoaineenkulutusta.

Aikataulu

Eskom on lähtenyt reaktoriprojektiinsa kun- nianhimoisella aikataululla: alun perin en- simmäisen modulin rakennustöiden oli määrä alkaa vuoden 2001 aikana, laitoksen piti valmistua kolme vuotta myöhemmin ja tulla kaupalliseen käyttöön vuonna 2005. Etelä-Afrikan omaan käyttöön oli määrä ra- kentaa nopealla aikataululla kymmenen reaktoria ja lisäksi myydä 20 ulkomaille. Tämänhetkisen tiedon mukaan ensimmäisen demonstraatiolaitoksen rakennustöihin pitäisi päästä vuoden 2002 toisella neljän- neksellä, jos tarvittavat luvat saadaan siihen mennessä. Reaktorin lisensoinnin on määrä edetä rakennustyön kuluessa. Jos Eskomin suunnitelmat osoittautuvat realistisiksi ja eteläafrikkalaiset onnistuvat kehittämään reaktorinsa toimivaksi ja taloudelliseksi, voitaneen sanoa, että PBMR-reaktori mer- kitsee HTR-tekniikalle samaa kuin poltto- moottorin keksiminen pyörälle.

Lähteet:

[1] <http://www.gametrail.co.za/basecamp/Earthyear/Volume22/pebble%20bed%20reactor.htm>



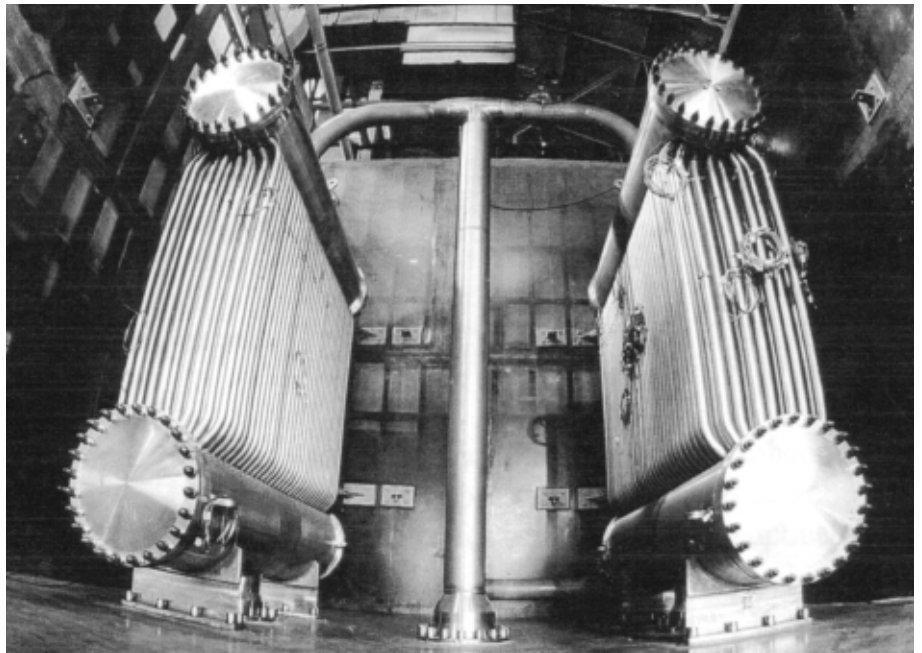
Saku Latokartano,
tutkija, VTT Energia,
saku.latokartano@vtt.fi



Riku Mattila,
tutkija, VTT Energia,
riku.mattila@vtt.fi

Uuden sukupolven ydinvoimalat

VTT:n nelivuotinen “Uuden Sukupolven Ydinvoimalat (ALWR)” -teknologiaohjelma käynnistyi vuoden 1998 alussa. Ohjelmassa perehdytään lyhyellä tähtämellä saatavilla oleviin uusiin ydinvoimalaitosvaihtoehtoihin, joista osa on mukana myös TVO:n periaatepäätöshakemuksessa. Ohjelmaan osallistuvat VTT:n lisäksi voimayhtiöt TVO ja Fortum, sekä Tekes, LTKK, TKK ja STUK. Ohjelma sisältää myös EU:n tutkimusohjelmien hankkeita. Vuoden 2001 aikana suoritetaan kokeita Westinghouse Atomin BWR 90+ reaktorin sydänsiepparin jäähdytykseen ja virtaukseen liittyen, testataan Framatome ANP:n SWR 1000 reaktoriin suunnittelemaa uutta pikasulkutankkia sekä arvioidaan SWR 1000 -reaktorin paineastian pohjan läpivientien kestävyyttä vakavissa reaktorionnettomuuksissa. Lisäksi analysoidaan APROS -ohjelmalla höyrystimen putkikatkoa Westinghousen EP 1000 painevesireaktorissa. Amerikkalaisen ESBWR reaktorin kehityshankkeisiin osallistutaan osana EU -tutkimushanketta sekä Tekesin rahoituksella yhdessä TVO:n kanssa. Yhteisenä keskeisenä piirteenä ohjelmassa on ollut lisääntynyt monidimensioisten virtauslaskentaohjelmien (CFD) käyttö osana tutkimus- ja kehityshankkeita.



ESBWR -laitoksen suojarakennuslauhdutinta (PCC) tutkittiin kokeellisesti Italiassa PANTHERS koelaitteistolla täydessä mittakaavassa. ALWR -ohjelman tutkimushankkeissa on analysoitu lauhduttimen toimintaa CFD Fluent ohjelmalla sekä selvitetty kokeellisesti aerosolien depositiota lauhdutinputkissa.

Uuden sukupolven ydinvoimalaitokset (Advanced Light Water Reactors, ALWR) on perinteisesti jaettu nykyisiin laitoksiin pohjautuviin evoluutiolaitoksiin sekä paljon uusia turvallisuuspiirteitä sisältäviin innovatiivisiin ratkaisuihin. Edellistä kehityssuuntaa edustavat Japaniin ja Taiwaniin rakennetut GE:n ABWR -laitokset. Hyvä esimerkki jälkimmäisistä on Westinghousen AP600 painevesireaktori. Edellisten lisäksi maailmalla on viimeaikoina herännyt uudelleen mielenkiinto kaasujäähdytteisiä korkealämpötilareaktoreita kohtaan. Merkittävin esimerkki tästä on Etelä-Afrikkalaisen Eskomin suunnitelma rakentaa 110 MW tehoinen kuulakekoreaktorin (PBMR, Pebble Bed Modular Reactor) prototyyppi Kobergiin Etelä-Afrikkaan. Syyinä uuteen mielenkiintoon on osittain kaasuturbiinitekniikan viimeaikojen kehitys, joka mahdollistaa reaktorissa kuumentuneen heliumin johtamisen suoraan kaasuturbiiniin ja täten lähes kolmanneksen nykyistä paremman sähköntuotannon hyötysuhteen.

Uusien ydinvoimalaitosten markkinatilanne on muuttunut merkittävästi viimeisen vuoden aikana. Vielä vuoden 2000 alussa Westinghouse katsoi AP600 -reaktorin päämarkkina-alueen olevan Kiinassa ja piti mahdollisuuksia uusiin laitoshankkeisiin Yhdysvalloissa pienenä. Tällä hetkellä näyttää mahdolliselta, että uusien laitosten rakentaminen voitaisiin aloittaa jälleen sähköpulanasta kärsivässä Yhdysvalloissa ennen kuluun vuosikymmenen päättymistä.

VTT:n ALWR teknologiaohjelmassa on perehdytty niihin uusiin ydinvoimalaitoskonsepteihin jotka voisivat tulla kyseeseen, mikäli Suomeen rakennetaan uusi ydinvoimalaitosyksikkö. Ohjelmassa on ollut mukana kaikkien merkittävimpään kiehumusvesilaitosten toimittajien uusia laitoksia (GE:n ESBWR, Westinghouse Atomin BWR 90+, Framatome ANP:n SWR 1000). Lisäksi ohjelman yksittäisissä hankkeissa on osallistuttu painevesityyppisten EP 1000 ja VVER-640 -laitosten tutkimuksiin. Ohjelman päärahoittajina ovat olleet TVO, Tekes ja VTT Energia. Viime vuosina ohjelma on

saanut rahoitusta myös suoraan reaktoritoimittajilta (Westinghouse Atom, Framatome ANP).

Yhteisenä piirteenä ALWR -ohjelman tutkimushankkeille on ollut lisääntynyt monidimensioisten virtauslaskenta-ohjelmien (CFD) käyttö. Virtauslaskentaohjelmien käyttö ydinvoimalaitosten analyysityökaluna on osoittautunut erittäin hyödylliseksi siitäkkin huolimatta, etteivät ohjelmien kaksifaasivirtausta ja faasien välisiä vuorovaihtuksia kuvaavat mallit ole kovin yksityiskohtaisia.

Uusille laitoksille tehdyissä analyyseissä on myös käytetty ja kehitetty VTT:n omia reaktorifysiikan sekä lämpö- ja virtaustekniikan analyysityökaluja (TRAB-3D ja APROS). Omaa kokeellista toimintaa ohjelmassa on suoritettu Lappeenrannan Teknillisellä Korkeakoululla (LTKK). Tutkimuksiin ovat osallistuneet VTT Energian ja VTT Valmistustekniikan lisäksi LTKK:n ja TKK:n tutkijat ja opiskelijat.

Ohjelman sisältö ja tuloksia

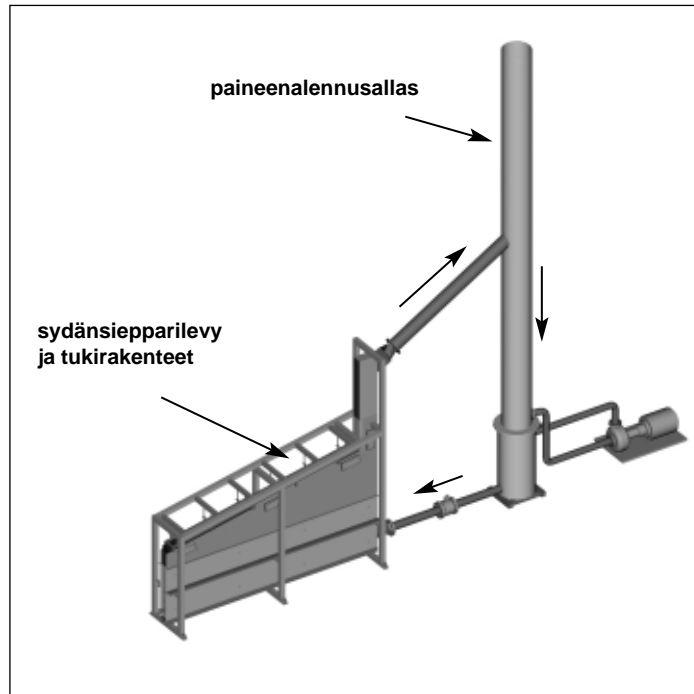
Seuraavassa on esitetty esimerkkejä eri laitosvaihtoehtoihin liittyvistä tutkimushankkeista.

AP600 & EP1000

Westinghousen AP600 -reaktori on hyvä esimerkki runsaasti uusia, passiivisia turvajärjestelmiä sisältävästä laitospohjasta. Laitoksen piirteisiin voi tutustua esimerkiksi Westinghousen internet -sivuilla (<http://www.ap600.westinghouse.com/>). EP1000 -reaktorissa on mukana AP600 -reaktorin uudet passiiviset turvajärjestelmät mutta laitoksen tehoa on nostettu. Laitos on myös suunniteltu täyttämään eurooppalaiset turvallisuusvaatimukset (EUR).

AP600 reaktoriin liittyen suoritettiin EU:n neljännen puiteohjelman tutkimushankkeessa passiivisia hätäjähdytyskokeita LTKK:ssa PACTEL koelaitteistolla. Kokeissa perehdyttiin yhden uuden passiivisen turvajärjestelmän, passiivisen hätäjähdytys-tankin (Core Make-up Tank, CMT), toimintaan erilaisissa pienen vuodon onnettomuustilanteissa.

Westinghousen suurempaan passiiviseen painevesilaitokseen (EP 1000) liittyen suoritetaan parhaillaan analyysejä APROS-ohjelmalla. Laskuissa tarkastellaan laitoksen käyttäytymistä höyrytymisen yhden putken putkikatossa.



BWR 90+ laitoksen sydänsiepparia kuvaava koelaitteisto. Laitteistossa on kuvattu viipale sydänsiepparilevyn pohjalta sekä siepparia jäähdyttävä virtauspiiri. Kokeilla selvitetään lämmönsiirtoa levyn ja jäähdytteen välillä sekä jäähdytteen virtausta jäähdytyspiirissä.

BWR 90+

Westinghouse Atomin BWR 90+ -reaktori pohjautuu viimeisiin ruotsiin rakennettuihin kiehutusvesilaitoksiin ja TVO:n laitoksiin. Laitoksen kehittämisessä on otettu huomioon tiukentuneet suomalaiset turvallisuusvaatimukset. Tätä varten laitoksessa on esimerkiksi mukana vanhoista kiehutuslaitoksista tutut eristyslauhduttimet.

BWR 90+ -laitokseen liittyen on toteutettu useita tutkimushankkeita. Työ aloitettiin suorittamalla boorisammutusjärjestelmän analyysejä VTT:n TRAB-3D ohjelmalla, laskemalla turpiinin pikasulkutilannetta VTT:n APROS -ohjelmalla sekä selvittämällä laitoksen sydänsiepparin materiaalivaihtoehtoja, siepparin kestävyttä vakavissa onnettomuuksissa sekä sydänsiepparin jäähdytystä. Parhaillaan on käynnissä sydänsiepparin jäähdytykseen ja jäähdytysvirtaukseen liittyvät kokeet LTKK:ssa sekä kokeita tukevat analyytit VTT Energiassa. Vuoden 2001 aikana käynnistyy mahdollisesti uusia tutkimushankkeita, joissa tutkitaan eristyslauhduttimen toimintaa lauhduttimen käyttöönotossa sekä selvitetään mahdollisuuksia käyttää uutta pinnoitemateriaalia säätösauvojen ohjausputkissa.

ESBWR

GE:n ESBWR -kiehutusvesireaktorin erityispiirteenä on se, ettei laitoksessa ole lain-

kaan pääkiertopumppuja. Laitoksessa on lisäksi mukana lukuisia passiivisia turvajärjestelmiä.

GE:n ESBWR -laitokseen liittyvät analyytit ovat keskittyneet laitoksen passiiviseen suojarakennuslauhdukseseen (PCC). Ensimmäisissä tarkasteluissa selvitettiin lauhduttimien kaasujen käyttäytymistä lauhduttimen yläkolektorissa. Laajimmassa hankkeessa on suoritettu aerosolien depositionsanalyysejä ja kokeita yhden lämmönvaihdinputken koelaitteessa. Aerosolitutkimuksen yhteydessä on kehitetty uusi tarkka lauhduttimismalli CFD Fluent virtauslaskenta-ohjelmaan. Mallia voidaan soveltaa laajemmin lämmönvaihtimien analyyseihin. Parhaillaan käynnissä olevassa EU -rahoitteisessa tutkimuksessa VTT:n osuutena on selvittää PCC -lämmönvaihtimen toimintaa höyryä kevyempien lauhduttimien kaasujen virratessa lämmönvaihtimeen. Analyytit ovat havainnollistaneet miten Sveitsiläisissä PANDA -kokeissa havaittu kevyiden lauhduttimien kaasujen kiertovirtaus lämmönvaihtimissa syntyy.

SWR 1000

Framatome ANP:n SWR 1000 -reaktori on tyypillinen innovatiivinen kiehutusreaktori. Laitoksessa hyödynnetään runsaasti passiivisia turvajärjestelmiä. Tavoitteena suunnittelussa on ollut rajoittaa vakavimpienkin onnettomuuksien seuraukset laitoksen sisälle.

Framatome ANP:n SWR 1000 laitoksen tutkimukset aloitettiin laitoksen pikasulkutankkikokeilla ja analyyseillä. Työtä jatkettiin analysoimalla laitoksen paineastian ulkopuolista jäähdystystä CFD Fluent ohjelmalla. Analyyseillä avustettiin Framatome ANP:tä paineastian ulkopuolista jäähdystystä tutkivan koelaitteiston suunnittelussa. Vuoden 2001 suunnitelmiin sisältyy hanke jossa selvitetään paineastian pohjan läpivientien kestävyyttä vakavissa reaktorionnettomuuksissa. Analyyseissä käytetään samoja VTT:ssä kehitettyjä työkaluja, joita on käytetty TVO:n laitoksen vastaavissa analyyseissä. Lisäksi parhaillaan on käynnistymässä EU:n viidennen puiteohjelman kaksivuotinen hanke, jossa tutkitaan uutta nopeaa boorisammutusjärjestelmää. VTT:n osuus hankkeesta on hankkeen koordinoinnin lisäksi boorijärjestelmään liittyvien reaktorifysikaalisten analyysien teko TRAB-3D ohjelmalla. Toinen suomalainen partneri LTTK osallistuu hankkeeseen suorittamalla boorijärjestelmäkokeita.

VVER 640

VVER 640 reaktori ei kuulu maamme uusien laitosvaihtoehtojen joukkoon, mutta laitos on mielenkiintoinen siitä syystä, että sellaista on suunniteltu rakennettavan Sosnovy Boriin Pietarin lähelle. Tutkimusohjelman hankkeessa suoritettiin jälkilämmönpoistokokeita VVER 640 laitokselle LTKK:ssa PACTEL laitteistolla.

Ohjelman jatko

Vuonna 2001 käynnistyvistä uusista hankkeista osa jatkuu vuosien 2002 ja 2003 puolelle. Vuoden 2001 syksyllä järjestetään VTT:ssä ALWR -teknologiaohjelman seminaari, jossa esitellään suoritettuja tutkimuksia ja keskustellaan tulevaisuuden tutkimustarpeista.

.....
Tkt Jari Tuunanen,
VTT Energia,
ALWR ohjelman johtaja,
jari.tuunanen@vtt.fi



Nuori nainen! Liity Energia- kanavaan

ATS Energiakanava on Suomen Atomiteknillisen Seuran naisten muodostama työryhmä. Se perustettiin syksyllä 1990 ja siinä on noin 70 jäsentä. Energiakanava on myös kansainvälisen ydin-alan naisten muodostaman WIN Globalin jäsen.

Energiakanavaan kuuluu joukko energiantuotannon, säteilyn ja niihin liittyvän tutkimuksen, valvonnan ja viestinnän parissa työskenteleviä naisia. Energiakanava järjestää erilaisille kohderyhmille tiedotus- ja keskustelutilaisuuksia, joiden tarkoituksena on välittää tieteellistä tietoa energia- ja säteilyasioista. Toivomme, että myös naiset ottavat kantaa energia-asioihin.

Vuonna 2001 järjestämme mm. seuraavat tilaisuudet:

- ATS:n ja Energiakanavan kesäseminaari, keskiviikkona 13.6.2001
- Säteilevät Naiset Seminaari, tiistaina 18.9.2001

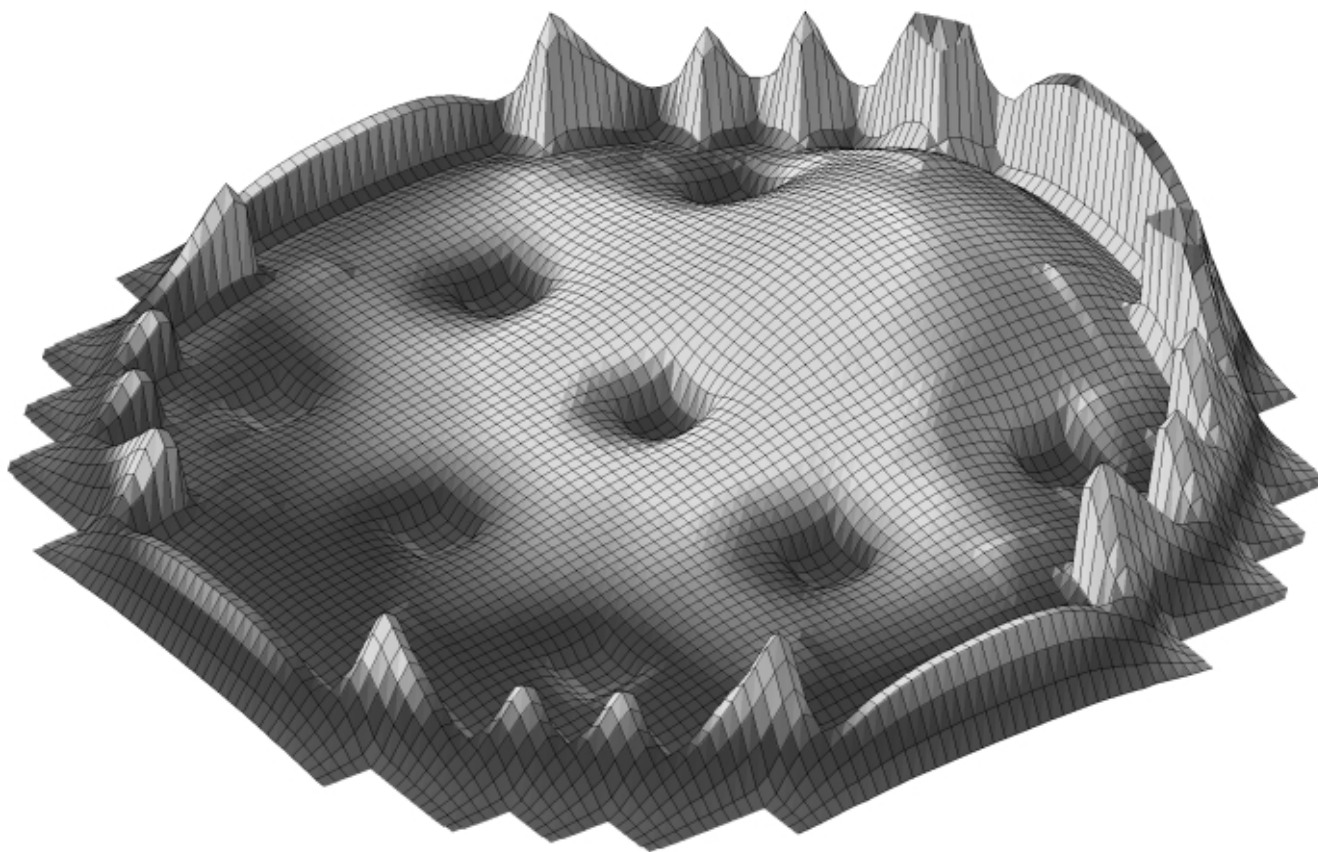
***Nuori nainen, ilman yläikärajaa,
jos olet kiinnostunut toiminnastamme, ota yhteyttä:***

*Eija Karita Puska
Energiakanavan puheenjohtaja
TkT, erikoistutkija, VTT Energia
puh. 9-4565036
fax: 9-4565000
email: Eija-Karita.Puska@vtt.fi*

FINNUS-ohjelma vauhdissa

Kansallinen ydinvoimalaitosten turvallisuustutkimusohjelma FINNUS (1999-2002) on hyvässä vauhdissa. Puoliväliseminaari on pidetty ja työskentely kiivaimmillaan. Tämän pääosin julkisrahoitteen ohjelman tarkoitus on varmistaa riippumaton kansallinen osaaminen ja se keskittyy ennen kaikkea nykylaitosten turvallisuuden varmistamiseen, mutta projektien tukiryhmissä on myös mietitty, miten TVO:n uutta laitosta koskeva periaatepäätöshakemus vaikuttaa alan tutkimustarpeisiin.

FINNUS-turvallisuustutkimusohjelman keskeisten tutkimusteemojen ikääntymisen, onnettomuuksien ja riskien alalla toimii kaikkiaan 11 tutkimusprojektia. Ohjelman rakenteesta ja tavoitteista ilmestyi kirjoitus ATS Ydintekniikassa 1/99. Kattava selostus ensi vuosien saavutuksista on puoliväliraportissa /1/, jonka saa VTT:n nettisivuilta www.inf.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2000. FINNUS-ohjelman omilta sivuilta löytyy vaikkapa, että pro-



Terminen vuojakautuma reaktorin sydämessä ja heijastinalueella, painaumien kohdalla on säätösauva sydämessä (kansainvälinen testitapaus).

jektit ovat toistaiseksi ”tuottaneet” 354 julkaisua, neljä tohtoria, yhden lisensiaatin ja yhdeksän uutta akateemista henkilöä (www.vtt.fi/ene/tutkimus/finnus).

Ohjelman kattama tutkimusalue on laaja ja heterogeeninen. Tätä on yritetty hyödyntää aloittamalla tutkimuskohteita, joissa osaamisia yhdistämällä ja ketjuttamalla saavutetaan uutta ja syvällisempää tietoa. Projektien yhteishankkeita onkin syntynyt kii-

tettävästi, joten alla olevan lyhyen katsauksen tutkimusteemoja ei voi sijoittaa vain tiettyihin tutkimusyksiköihin tai projekteihin.

FINNUS on kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimusohjelma. Sen päärahoittajat ovat KTM:n ohella VTT ja Säteilyturvakeskus. Myös ydinvoimayhtiöt osallistuvat rahoitukseen pääasiassa maksamalla osuuksia suurten kansainvälisten hankkeiden maa-kohtaisista panoksista. Muutamille hankkeille saadaan lisärahoitusta yhteispohjois- maisesta reaktoriturvallisuuden tutkimuksesta, OECD:n Halden-projektista ja eräistä EU:n tutkimusprojekteista. Ohjelman vuosittainen kokonaisrahoitus on noin 22 milj. mk/v ja työpanos noin 30 henkilötyövuotta/v.

Tutkimuksessa ovat mukana VTT:n toimintayksiköt Energia, Valmistustekniikka, Kemianteeniikka, Automaatio ja Rakennustekniikka sekä Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu ja Fortum Nuclear Services Oy, joka osallistuu eräisiin ohjelmassa tehtäviin kokeisiin. TVO taas on mukana rahoittamassa eräitä kokeita.

Tutkimusohjelman tarkoitus on varmistaa riippumaton kansallinen osaaminen ennen kaikkea viranomaisten tarpeisiin, mutta myös voimayhtiöiden hyödyksi. TVO:n uutta laitosta koskeva periaatepäätöshakemus sinänsä loi tiettyjä uusia tarpeita viranomaiselle. Osoittautui kuitenkin, että perusosaamisen vaatimus, uuden polven koulutusnäkökohdat ja menetelmien kehittämistarve ovat samoja sekä ikääntyville että uusille laitoksille. Eri alojen uutta teknologiaa pitää ottaa käyttöön niin vanhoissa kuin uusissakin laitoksissa.

Ikääntyminen

Ydinvoimalaitosten ikääntymisen vaikutuksia tutkitaan intensiivisesti, jotta rakenteellisen turvallisuuden kannalta voidaan arvioida keskeisten komponenttien jäljellä oleva elinaika ja mahdollisten korjaavien toimien tehokkuus. Ikääntymisteemassa FINNUS-ohjelma keskittyy metallisten komponenttien materiaalitekniikkaan, lujuuden varmistamisen menetelmiin sekä tarkastus- ja kunnonvalvontatekniikoihin. Myös sähköisten komponenttien ikääntymisilmiöt ovat tarkasteltavana.

Materiaalitutkimuksessa on kehitetty uusia tehokkaita mittausten menetelmiä, joilla voidaan jäljitellä ydinvoimalaitoskomponenttien todellisia kuormitusolosuhteita kuten

altistusta jännityskorroosiolle ja säteilyn kiihdyttämälle jännityskorroosiolle laitokselle tyypillisissä vesikemiaolosuhteissa. Kokeissa on erityisesti onnistuttu selvittämään näytepalojen koon vaikutusta havaittavaan särönkasvuun. Komponenttien pinnoille syntyvän oksidifilmin ominaisuuksista ja aktivoitumismekanismista on saatu hyvä käsitys mallintamalla filmien ominaisuuksia ja kehittämällä sähkökemiallisia mittausten menetelmiä. Näitä menetelmiä on voitu käyttää myös polttoainesauvojen suojakuoren korroosiomäärittäykseen. Tärkeä tutkimuskohde on Loviisan ykkösreaktorin paineastian toivutushehkuksen jälkeinen säteilyhaurastuminen. Työssä mallinetaan haurastumista, arvioidaan koemateriaalia ja tutkitaan pienten näytteiden käyttökelpoisuutta murtumissitkeyden määrittämisessä.

Sähköisten laitteiden ikääntymisen arviointi on aloitettu. Ensimmäiset havainnot viittaavat siihen, että komponenttien fyysistä ikääntymistä kriittisempiä kysymyksiä ovatkin niiden teknologinen vanhentuminen ja yhä tiheämmin vaihtuvan uuden korvaavan teknologian hallinta.

Rakenteiden lujuuden varmistaminen vaatii kelpoistettuja kokeellisia ja laskennallisia menetelmiä komponenttien jäljellä olevan käyttöajan määrittämiseen ja onnettomuustilanteiden aiheuttamien kuormien arviointiin. Erityisesti haurasmurtumasitkeyttä on selvitetty sekä kokeellisesti että mallintamalla. Kokeet osoittivat, vastoin haurasmurtumateoriaa, että miniatyyrinäytteistä saadut tulokset aliarvioivat suurten näyte-kappaleiden murtumissitkeyden. Hauraan materiaalin murtumissitkeyden määrittämiseen kehitettyä Master Curve -menetelmää ollaan laajentamassa sitkeästi käyttäytyvän särön mallintamiseen. Sitkeän aineen murtumisvastuksen mallintamiseen kehitetään mikromekaanisia laskentamenetelmiä.

Tarkastusten ja kunnonvalvonnan suunnittelua on edesautettu hankkimalla tietokoneohjelmia ultraäänitestauksen mallintamiseen. Ainetta rikkomattoman tarkastustoiminnan pätevoittämistä varten on kehitetty keinovikojen valmistusmenetelmiä. Uutena aiheena on aloitettu teräsbetonirakenteiden kunnonvalvontaan soveltuvien menetelmien kartoitus.

Onnettomuuksien hallinta

FINNUS-ohjelman onnettomuusteemassa keskitytään sekä käyttöturvallisuuden tutkimukseen että onnettomuuksien hallintaan.

Kohteina ovat polttoaine ja sydämen reaktorifysikaaliset ominaisuudet sekä onnettomuusanalyysi laitostransienteista vakaviin onnettomuuksiin saakka.

Tutkimusohjelma on tehnyt konkreettista kansainvälistä yhteistyötä polttoaineen korkean palaman lämpömekaanisessa mallinnuksessa: ranskalaiseen transienttiohjelmaan on luotu polttoaineen ja suojakuoren virumismalli ja yhdysvaltalaiseen ohjelmaan on liitetty suomalainen hydraulikkamalli. Haldenin koereaktorin mittaustuloksia taas on hyödynnetty staattisen mallin kelpoistuksessa.

Reaktorifysiikassa on tietokonekapasiteetin kasvaessa pystytty laajentamaan Monte-Carlo-menetelmän käyttämistä aina monimutkaisempiin geometrioihin. Samoin kolmiulotteisuuden käyttöönotto transportohjelmissa on huomattavasti parantanut laskennan tarkkuutta laitoksen komponenttien saamien neutroni- ja gammasäteilyannosten laskennassa. Reaktorin sydämen laskentaan on kehitetty uusi menetelmä, jolla pystytään tarkasti mallintamaan hankalimmatkin kohdat säätösauvojen päiden ja sydämen reunojen kohdalla.

Uutta kolmiulotteista reaktoridynamiikkamallia on menestyksellä kelpoistettu sekä Olkiluodon laitostransienteja että kansainvälisiä vertailutapauksia laskien. Yksiulotteisessa dynamiikkaohjelmassa kiehtusvesireaktoria ollaan mallintamassa uudella tarkalla hydraulikkaratkaisijalla. Myös sekä omia että kansainvälisiä termohydrauliikkaohjelmia on kelpoistettu useissa testitehtävissä.

Termohydrauliikan koelaitteistolla PACTEL on suoritettu uudentyyppisiä kokeita, joissa oletetun häiriön jälkeen pikasulku epäonnistuu. Tällöin reaktorisydämen fisisio-teho elää sydämen jäädytteen tiheyden vaihdellessa. Seurauksena oli voimakkaita virtauksia ja tehotason värähtelyitä. Toisessa kokeessa testattiin höyrystimen kollektorissa tapahtuvan murtuman koon vaikutuksia. Lappeenrantaan rakennettiin myös uusia pienempiä koelaitteistoja eri tarkoituksiin, mm. lämpötilakerrostumisen tutkimiseen.

Vakavien onnettomuuksien hallinnassa on oleellista tietää, miten ja milloin reaktorin paineastia saattaa vaurioitua. Tämän tutkimiseksi on kehitetty PASULA-lujuuslaskentaohjelma, jota on kelpoistettu hyödyntäen Sandian laboratorion korkeassa paineessa tehtyjä paineastian virumismurtumakokeita ja VTT:n omia uusia kokeita kuivan

partikkelikeon jäädytettävyydestä. Seuraava VTT:n koelaitteisto mären keon lämmönsiirtokriisin määrittämiseksi on valmistumassa. Kansainvälisessä projektissa on osallistuttu orgaanisen jodin kulkeutumisen mallinnukseen vakavien onnettomuuksien aikana ja tutkittu metyylijodin lähdermin pienennysmahdollisuuksia. Tutkimusaiheena on ollut myös Olkiluodon reaktorirakennuksen rakenteiden mahdollinen vahingoittuminen vetyräjähdyksessä. Analyysi sisältää sekä vetypilven virtauksellisen muodostumisen, kemiallisen räjähdysten että rakenteiden kuormituksen.

Riskien hallinta

Riskitutkimuksessa keskitytään yhtäältä edistyskellisten riskimenetelmien kehittämiseen ja soveltamiseen ja toisaalta valittujen prosessien tai teknologioiden riskin arviointiin. FINNUS-ohjelmassa jälkimmäiseen ryhmään kuuluvat paloriskit, uuden ohjelmoitavan teknologian turvallisuus sekä inhimillinen ja organisatorinen käyttäytyminen.

Uutena riskienhallintamenetelmänä on sovellettu asiantuntijapaneelin käyttöä riskitietoisessa päätöksenteossa. STUK testasi menetelmää kunnonvalvontasovelluksessa, jossa asiantuntijapaneelin tehtävänä oli yhdistää deterministinen tieto materiaalin heikkenemismekanismeista todennäköisyyspohjaiseen tietoon putkirikon seurauksista. Epävarmuusanalyysin käyttöalaa ollaan laajentamassa fysikaalisten ilmiöiden ja mallinnuksen epävarmuuksien arviointiin, erityissovelluksena passiivisten järjestelmien luotettavuus ja niiden luvitusvaatimukset. Tutkimuksessa on myös paneuduttu riskintärkeysmittojen kehittelyyn.

Palotutkimuksessa kehitettiin laskentamenetelmä metallisissa suojakoteloissa olevan ohjauslaitteiston kriittiselle lämpenemisajalle. Savun välittömiä vaikutuksia ohjelmoitavaa automaatiota toteuttaville sähköpiireille tutkittiin kokein. Tuloksista johdettiin mallit tärkeimmille ilmiöille, joita olivat noen kertyminen, eristysvastuksen aleneminen ja päällysteen mitoitustarve; selvisi nimittäin, että kaupallisesti sovellettavien piirien lakkapäällyste torjuu tehokkaasti savun aiheuttamia sähköisiä muutoksia. Palovaroitin- ja sprinklerijärjestelmien luotettavuutta on mallinnettu ydinvoimalaitoksilta ja muusta teollisuudesta kerätyn aineiston pohjalta. Riskimenetelmiä on sovellettu myös tilanteeseen, jossa palamaan syttynyt kaapelihylly voisi sytyttää saman

kaapelitunnelin toisessa reunassa olevan varmistavan kaapeloinnin. Paloriskien analyysiin on myös kehitteillä inhimillisen toiminnan arviointimenettelyjä.

Turvallisuuskriittisen ohjelmoitavan automaation luotettavuuden arvioinnissa painotetaan kvantitatiivisia menetelmiä, joita sekä viranomaiset että voimalaitokset voivat soveltaa luvituskysymyksissä. Hyväksi lähestymistavaksi on osoittautunut Bayes-verkostot, joilla on mahdollista yhdistää läpinäkyvästi erityyppistä todistusaineistoa. Menettelyä testataan aluksi laitetoimittajalta saatavaan ohjelmoitavaan releeseen.

Työtapojen tutkimuksessa on kehitetty ydintehäväanalyysiä prosessinohjaustyössä. Vaativien tilanteiden hallintaan on tehty motivaatioon perustuva malli, jonka keskeinen käsite on yksilön identiteetti suhteessa työyhteisöön. Käsite rakentuu henkilön työn mielekkyydestä, ammatillisesta itseluottamuksesta ja hallinnan tunteesta. Organisaatio- ja turvallisuuskulttuuritutkimuksessa on keskitytty organisaatioihin, joilta edellytetään suurta luotettavuutta. Kehitettyjä menettelyjä sovellettiin STUKin ydinturvallisuusosaston toimintaan. Viime aikoina on tarkasteltu myös ydinvoimalaitosten huoltoon liittyviä inhimillisiä tekijöitä.

Viite:

1. "FINNUS, The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety, Interim Report 1999 – August 2000", toim. T. Vanttola, E. K. Puska & A. Marttila, VTT Research notes 2057, Espoo 2000.



TKT Riitta Kyrki-Rajamäki on johtava tutkija VTT Energiassa ja FINNUS-ohjelman nykyinen johtaja. Puh. 09 - 456 5015, riitta.kyrki@vtt.fi



TKT Timo Vanttola on johtava tutkija VTT Energiassa ja FINNUS-ohjelman johtaja 1999 - 2001. Puh. 09 - 456 5015, timo.vanttola@vtt.fi

Neutronikaap – Aivokasvainpot

Boorineutronikaappaushoitojen potilaskokeet on aloitettu touko-kuussa 1999 FiR 1 - tutkimusreaktorin BNCT-asemalla. Toiminta tapahtuu Säteilyturvakeskuksen (STUK) NC-Hoito Oy:lle myöntämällä turvallisuusluvalla. Kohteena on pahanlaatuinen, primaari tai uusiutunut aivokasvain, glioblastoma multiforme. Hoidon parametrien lisäksi kehitetään menetelmiä ja standardeja säteilyannosten määrittämiseksi. VTT:n BNCT-säteilytysasemaa varten kehittämä ja valmistama neutronihidastainaine menestyy maailmanmarkkinoilla.

paushoitoa kehitetään BNCT-asetamalla

ilaita hoidettu jo kaksi vuotta



Potilaasta otetaan verinäytettä FiR 1 BNCT-asetamalla juuri ennen säteilytyksen aloitusta.

yksi vuosi. Voimakkaasta solunsalpaajien kehittytyöstä huolimatta ei yksittäisillä solunsalpaajilla tai hoitoyhdistelmillä ole toistaiseksi saavutettu merkittävää elinajan pitenemistä. Kasvaimen uusiutumisvaara on erittäin korkea, koska syöpäsolut ovat levinneet kylläkin rajatulle alueelle mutta terveen kudoksen sekaan niin, että kasvain voidaan harvoin kirurgisesti poistaa tai tuhota perinteisellä geometrisesti kohdistettavalla gamma-sädehoidolla. BNCT soveltuu gliooman hoitoon, koska kyseessä on syöpäsoluihin kohdistuva täsmäsädehoito.

Kaksi hoitotutkimusta käynnissä

Suomessa on tällä hetkellä glioblastooma potilaalle avoimena kaksi BNCT-hoitotutkimusta. Molemmissa boorinkantaja-aineena käytetään boorifenyylialaniinin fruktoosikompleksia (BPA-F). Ensimmäinen hoitotutkimus käynnistyi toukokuussa 1999 ja hoitoja on annettu ensiksi boorinkantajan lähtötasolla (290 mg/kg) nostoen annosta säteilytysaikaa pidentämällä ja sitten boorinkantaja-ainepitoisuutta kasvattaen. Ensimmäisenä tavoitteena on tutkia hoidon turvallisuutta nostoen booriannosta. Optimaalista olisi todeta merkittävä elinajan piteneminen historiallisiin kontrollipotilaisiin verrattuna. Tässä tutkimuksessa on toistaiseksi säteilytetty 13 potilasta, joista kolme on tullut Ruotsista.

Toisessa avoimessa BNCT potilastutkimuksessa tarjotaan mahdollisuutta BNCT-hoitoon mikäli potilaalla on todettu uusiutunut gliooma ja ensimmäisestä sädehoidosta on kulunut ainakin kuusi kuukautta. Tavoitteena on tutkia BNCT:n turvallisuutta yhdistettynä perinteiseen sädehoitoon ja havaita mahdollinen elinajan pidentyminen. Tässä keväällä 2001 käynnistyneessä tutkimuksessa on toukokuuhun 2001 mennessä hoidettu kolme potilasta.

BNCT-hoito käytännössä

BNCT-lääkäriin hyväksytyä potilaan hoitotutkimukseen alkaa hoidon suunnittelu pään

Syövän boorineutronikaappaus- (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) sovelletaan säteilyn kemiallista kohdentamista. Menetelmä perustuu boori-10 atomiytimen ominaisuuteen kaapata termisiä neutroneja ja sen seurauksena haljeta kahtia, energieettisiksi litium- ja heliumytimiksi, jotka jarruuntuvat nopeasti ja kohdistavat tuho vaikutuksensa paikallisesti käytännössä yhteen tai kahteen soluun.

Menetelmän onnistumiseksi tarvitaan boorinkantaja-aine, joka esim. verenkiertoon injektoiduna hakeutuu valikoidusti kasvainsoluihin ja aiheuttaa kasvaimen riittävän suuren boorikertymän (suuruusluokkaa 50 ppm) ja samalla riittävän boorikontrastin terveeseen kudokseen verrattuna. Toiseksi koko kasvainalueelle on kyettävä aikaansaamaan riittävän korkea termisten neutronien vuo ilman, että terve kudokseen kohdistuvan gamma-säteilyn ja nopeiden neutronien määrä nousee liian suureksi. Neutronit tuotetaan joko ydinreaktorilla tai kiihdytinläh-

teillä. Toistaiseksi potilaskokeissa on ollut käytössä vain tutkimusreaktoreille rakennettuja säteilytysasemia, joissa tuotetaan joko terminen ($E < 0,5$ eV) tai sitä nopeampien epitermisten (0,5 eV – 10 keV) neutronien kenttä. Aivokasvainten hoidossa terminen säteilytys vaatii kallon avaamista neutronien johtamiseksi kasvainalueelle, kuten Japanissa tehdään. Epiterminen neutronikeila tunkeutuu hoitoalueelle kallon luiden läpi ja tätä hoitotapaa sovelletaan Suomessa.

Potilashoitokokeet

Potilashoitokokeet FiR 1:n BNCT-asetamalla käynnistyivät toukokuun lopussa 1999. Kohteena on pahanlaatuinen aivokasvain, glioblastoma multiforme (gliooma gradus IV). Näille kasvaimille ei tunneta tällä hetkellä parantavaa hoitoa. Näitä kudostyyppitään pahanlaatuisimpia hermotukikudoskasvaimia sairastavien potilaiden keskimääräinen elinaika leikkauksen jälkeen on noin

alueen MRI- kuvauksella. Nämä ns. annossuunnittelukuvat siirretään Otaniemeen, missä fyysikko Tiina Seppälä vastaavan onkologin kanssa laatii potilaalle annossuunnitelman erityistä BNCT-annossuunnitteluohjelmaa käyttäen. Säteilytystä edeltävänä päivänä potilas tulee Syöpätautien klinikalle ja muutamaksi tunniksi BNCT-asemalle asemointiin, jossa tarkastetaan annossuunnitteluohjelman osoittamat keilasunnat ja valmistetaan potilasta tukevat koveuttavat, polystyreenirakeita sisältävät vakuumityyny. Hoitopäivän aamuna potilas saa Otaniemessä boorinkantajan vähintään kaksi tuntia kestävässä infuusiassa. Veren booripitoisuutta seurataan 20 minuutin välein otettavilla verinäytteillä. Boori analysoidaan verinäytteistä BNCT-aseman ICP-atomiemisiospektrometrillä. Ensimmäisen keilan säteilytys aloitetaan noin tunti infuusion päättymisen jälkeen. BNCT- neutronikeila suunnataan kasvainalueelle yleensä kahdesta eri suunnasta säästäten vastakkaista aivopuoliskoa ja hoitoaika on noin 15-30 minuuttia keilaa kohden. Säteilytyksen jälkeen potilas palaa Meilahteen syöpätautien klinikalle seurantaan muutamaksi päiväksi. Jos potilas valitsisi normaalin hoidon, hän kävisi fotonisäteilytyksessä päivittäin 2 – 6 viikon ajan.

Potilastutkimukset ovat kesken ja tulokset ovat varsin alustavia seuranta-ajan ollessa edelleen varsin lyhyt. Akutteja vakavia tai yllättäviä sivuvaikutuksia ei ole todettu ja potilaat ovat sietäneet hoidon kohtalaisen hyvin. Alustavat hoitotulokset mitattuna muun muassa kokonaiselinajan pidentymisellä ovat lupaavia.

BNCT-tutkimusjohtajan, prof. Heikki Joensuu (HUS, Syöpätautien klinikka) johdolla on valmisteilla on kaksi uutta BNCT-potilashoitotutkimusta. Toisessa tutkitaan, olisiko BNCT-hoito tehokkaampi, jos hoito annetaan kahdessa osassa esimerkiksi neljän viikon välein. Toisessa hoitotutkimuksessa tutkitaan BNCT:n ja stereotaktisesti annetun fotonisädehoidon yhdistelmän siedettävyyttä ja tehokkuutta.

BNCT:n soveltuvuutta muihin kasvaimiin selvitetään

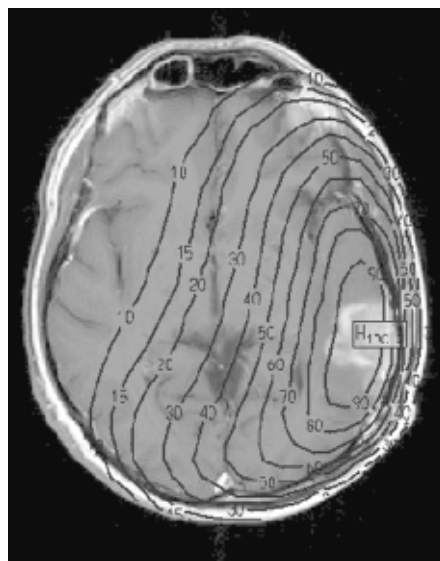
BNCT-tutkimusryhmä sai dosentti, neurokirurgi Juha Jääskeläisen johdolla merkittävän apurahan Yhdysvalloista tutkimukseen, jossa selvitetään Suomessa käytössä olevan boorinkantajan (BPA-F) ja FiR 1 BNCT-aseman soveltuvuutta ns. NF2-tautia pote-

vien potilaiden hoitoon. Usein näillä potilailla on keskushermostossa lukuisia kasvainpesäkkeitä, tarkkarajaisia schwannoomia ja meningeoomia, joita ei ainakaan kaikkia voida poistaa kirurgisesti. BPA:n kertymistä näihin kasvaimiin selvitetään ja annoslaskentaohjelmalla mallinnetaan FiR 1:n epitermisellä neutronikeilalla aikaansaattavia annosjakauksia. Jos tulokset ovat lupaavia, voidaan tämän harvinaisen sairauden hoitotutkimukset aloittaa Suomessa ja oletettavaa on, että potilaita ohjautuisi hoitoon luultavasti Euroopasta ja kauempaakin, esimerkiksi Yhdysvalloista.

Kansainvälinen tilanne

Euroopassa potilaskokeita on käynnissä neljällä epitermisellä säteilytysasemalla, Petteinissä, Hollannissa vuodesta 1998, Otaniemessä vuodesta 1999, Rezissä Tsekeissä viime syksystä ja Studsvikissa Ruotsissa tästä keväästä lähtien. Iso-Britanniassa Birminghamissa on rakenteilla protonikiihdytimeen ja litiumkohtioon perustuva BNCT-asema. Sillä ei ole kuitenkaan vielä pystytty tuottamaan hoitoihin vaadittavaa intensiteettiä. Tavoitteena siellä on aloittaa hoitokokeet vuonna 2002.

BNCT-tutkimuksen uranuurtaja, Brookhavenin kansallisen laboratorion (BNL, Long Island, USA) lääketieteellinen tutkimusreaktori suljettiin viime vuonna. Ensimmäiset hoitokokeet 1950-luvulla tehtiin



MRI kuva glioblastoma multiforme kasvaimesta aivoissa ja BNCT- annossuunnitelman antamat säteilyannosisodoosit.

siellä termisillä neutroneilla ja vuodesta 1994 siellä ehdittiin hoitaa epitermisellä neutronisäteilytyksellä ja BPA-kantaja-ainetta käyttäen yli viisikymmentä glioomapotilasta.

Reaktorin sulkeminen johtunee siitä, että Brookhavenin isompi korkeavuoreaktori jouduttiin sulkemaan ja siten käyttötuki pienemmälle lääketieteellisen osaston reaktorille olisi tullut entistäkin kalliimmaksi. Myös lääketieteellisen osaston tutkimustoiminnan organisointi oli saanut ankaraa kritiikkiä. Syynä sulkemiseen ei ollut BNCT-kokeiden epäonnistuminen. Kokeissa ehdittiin selvittää säteilyn turvallisuusraja BPA-kantaja-ainetta käytettäessä. Hoidon tehossa ei valitettavasti käytetyillä boorinannostelumäärillä ja tavoilla saatu merkittäviä parannuksia verrattuna perinteisiin hoitomenetelmiin.

Yhdysvaltojen energiaministeriön (DOE) vetäytyttyä potilaskokeiden rahoitamisesta etsitään MIT:n uudella epitermisellä säteilytysasemalle uutta rahoituslähettä terveyshallinnon puolelta. Vanha säteilytysasema konvertoidaan termiseksi radiobiologisia kokeita varten.

Kaliforniaan, Sacramentoon on valmistumassa BNCT-asema McClellanin entisen lentotukikohdan TRIGA-reaktorille. Asema tulee Kalifornian yliopiston, UC Davis, käyttöön. UC Davisissä ja muuallakin Kaliforniassa on runsaasti boorinkantajatutkimusta, joten sopii toivoa, että siellä onnistutaan tavoitteessa ottaa käyttöön uusia kantaja-aineita.

Japanissa on JAERI:ssä otettu käyttöön syksyllä 1998 uusi BNCT-asema, jossa voidaan antaa joko terminen tai epiterminen säteilytys tai näiden yhdistelmä, aivan kuten aiemmin uudistetulla Kioton yliopiston tutkimusreaktorin (KURRI) BNCT-asemalla. Molemmilla asemilla on toistaiseksi käytetty vain yhdistelmäkenttiä ja säteilytys on tapahtunut perinteiseen japanilaiseen tapaan kalloon avatusta aukosta. Japanissakin käytetään yhä vain jo pitkään käytössä olleita BSH- ja BPA-kantaja-aineita.

BNCT-tutkimus edistyy myös muualla maailmassa. Argentiinassa on valmistumassa lääketieteellinen epiterminen säteilytysasema. Taiwanissa on käynnistynyt hanke aseman rakentamiseksi heidän TRIGA-reaktorilleen. Eläikokeisiin tarkoitettujen pienempiä asemia on valmistumassa Italiassa (ENEA, Casaccia) ja Yhdysvalloissa (Washington State University (WSU), Pullman).

Dosimetrinen tutkimus

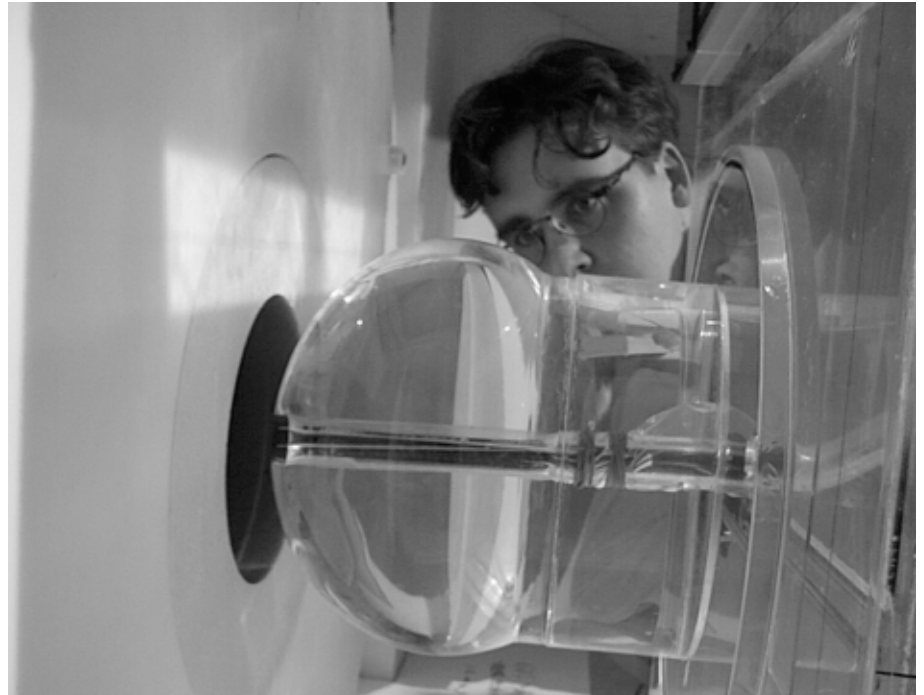
Suomen BNCT-hankkeella on ollut vahva rooli BNCT-hoitojen vaatiman dosimetrian systemaattisessa kehittämisessä. Suomalaisen aloitteesta käynnistettiin EU:n neljännen puiteohjelman SMT-ohjelmassa vuonna 1998 hanke, jossa luodaan eurooppalainen ”Code of Practice” BNCT-asemien neutronikeilojen dosimetriaan. Siinä tullaan suosittelemaan menetelmiä neutronikeilan neutronispektrin ja intensiteetin määrittämiseksi sekä neutronikeilan tuottaman säteily- ja annosjakautumien määrittämiseksi standardiolosuhteissa väliaineessa, niin sanotussa fantomissa. Suomalaisen panos on ollut merkittävä sekä aktivointi-, ioinsaatiokammio- että termoluminesenssi (TLD)-tekniikoiden kehittämisessä. Code of Practice valmistuu kesällä 2002.

MIT:n BNCT-hankkeen aloitteesta on käynnistetty hanke potilashoitoja antavien BNCT-asemien dosimetrian maailmanlaajuiseksi interkalibraatioksi. Näin osaltaan varmistetaan, että eri säteilytysasemilla annettavat potilashoidot ovat vertailukelpoisia. Osakassa viime syksynä pidetyssä aloituskokouksessa sovittiin, että interkalibraatiossa noudatetaan eurooppalaisen ”Code of Practice”-hankkeen suosituksia.

Epitemisen neutronisäteilytyksen ja BNCT:n radiobiologiaa on tutkittu kansainvälisessä yhteistyössä muun muassa Oxfordin yliopiston radiobiologisen yksikön ja Pettenin BNCT-hankkeen kanssa. FiR 1:n BNCT asema on myös mukana IAEA:n tukemassa hankkeessa, jossa Belgian Louvainin katolisen yliopiston koordinoimana tutkitaan eri BNCT-asemien epitermisten neutronikeilojen suhteellista biologista tehokkuutta.

Tänä vuonna on käynnistymässä hanke, jossa kehitetään laitteisto potilaan kasvaimessa ja terveessä kudoksessa olevan boorin mittaamiseksi hoidon aikana. Laitteisto perustuu boorineutronikaappausreaktiossa emittoituvaan gammasäteilyyn. Viime vuonna alkaneessa, dosentti Sauli Savolaisen vetämässä hankkeessa tutkitaan magneettispektroskopialla BPA-kantaja-aineen jakaumaa aivokasvaimessa ja terveessä aivokudoksessa.

Perustuen VTT Kemiantekniikassa jo aiemmin kehitettyyn edistyneeseen puuoniverkkotekniikkaan on VTT:llä kehitetty säteilyn kulkeutumisen mallintamiseen MultiTrans SP3 -ohjelma. BNCT:n annosuunnittelua silmälläpitäen yhteistyössä TKK:n



Säteilyannosta mitataan ionisaatiokammioilla potilaan päätä simuloivassa fantomissa.

kanssa on kehitetty algoritmi, jolla kolmiulotteinen puuoniverkko on luotavissa segmentoiduista CT-kuvista.

VTT:llä kehitetty neutronihidastinaine menestyy maailmalla

VTT:n FiR 1-tutkimusreaktorin säteilytysasemassa on onnistuttu luomaan aivokasvainhoitoihin soveltuva epitermisten neutronien kenttä, joka on ominaisuuksiltaan yksi maailman parhaista. VTT Kemiantekniikan kehittämän uuden neutronihidastinaineen (Fluental™) ansiosta FiR 1:llä päästään samaan ja jopa parempaan neutroni-intensiteettiin ja epitermisten neutronien puhtautteen kuin muualla kymmenen kertaa suuremmalla reaktoriteholla.

Fluental™-neutronihidastinainetta on myyty viiteen tutkimushankkeeseen Yhdysvalloissa, Englannissa ja Taiwanilla. UC Davisin McClellanin TRIGAlle rakenteilla oleva BNCT-hoitoasema, Birminghamin yliopiston kiihdyttimelle rakennettava hoitoasema sekä WSU:n radiobiologinen asema perustuvat Fluentalin käyttöön. Fluental tarjoaa kompaktimman ja säteilykestävemmän, mutta toisaalta kalliimman, neutronihidastinvaihtoehdon kuin MIT:n ja Studsvikin uusissa asemissa käytetty Teflonin® ja alumiinin yhdistelmä.

FiR 1:n BNCT-aseman suoritusarvojen parantaminen

Valmistuessaan nykyiseen muotoonsa vuonna 1997 FiR 1:n BNCT-säteilytysaseman suoritusarvot olivat maailman parhaat. Vuonna 2000 valmistui Studsvikissa Ruotsissa ja MIT:ssä USA:ssa epitermiset säteilytyskeilat, joilla päästään vielä parempiin suoritusarvoihin. Niinpä VTT:llä on selvitetty mahdollisuuksia parantaa FiR 1:n epitermisten neutronikeilan suoritusarvoja.

Vuonna 2000 Tekesin osin rahoittamassa tavoitetutkimushankkeessa selvitettiin, että FiR 1 BNCT-säteilytysasemalla voidaan ottaa käyttöön hoitosyvyyttä kasvattava litiumfilteri, jollainen on käytössä myös Studsvikin BNCT-asemalla Ruotsissa. Litiumfilteri muokkaa säteilykeilan laatua siten, että neutronisäteily tunkeutuu syvemmälle kudokseen, jolloin pystytään paremmin hoitamaan laajalle levinneet kasvaimet. Filteri kuitenkin myös vaimentaa keilaa kasvattaen hoitoajat noin kaksinkertaisiksi. Tämän vuoksi nykyisissä primäärikasvaimen hoidoissa filterin käyttö olisi kyseenalaista, ellei reaktorin tehoa korotettaisi. Selvityksen perusteella reaktori saadaan säädettyä nykyisestä 250 kW:n tehosta yli 500 kW:n teholle pienellä polttoainelatauksen muutoksella ja nykyisellä säätökoneis-

tolla. Kriittinen tekijä korotetun tehon ajon luvittamiseksi on alumiinikuoristen polttoaine-elementtien luotettava turvallisuusanalyysi, sillä oleellinen taloudellinen tekijä on mahdollisuus käyttää latauksessa uudempien teräskuoristen elementtien lisäksi vanhoja alumiinikuorisia polttoaine-elementtejä. Toisaalta uusissa hoitokokeissa varsinkin uusiville kasvaimille annetaan säteilyä vähemmän ja siten hoitoajat niissä pysyisivät kohtuullisen pituisina nykyisellään reaktorihoitoholla filteriä käytettäessä.

Reaktorin tehon korottaminen on melko kallis hanke ja sen toteuttaminen on kiinni koko BNCT-hankkeen rahoitustilanteen kehittymisestä. Lähiajan tavoitteena on ottaa Li-filtri käyttöön niissä potilaskokeissa, joissa se on mahdollista nykyisellä reaktorin teholla.

FiR 1:n rahoituksen tulevaisuus

Valtioneuvosto on 11 marraskuuta 1999 myöntänyt reaktorille uuden käyttöluvan vuosiksi 2000 – 2011. Tässä uudessa käyttöluvassa yksi reaktorin pääkäyttötarkoitus on BNCT-hoidot. Reaktorirakennuksen peruskorjauksen (1996-97) yhteydessä uusittiin reaktorin jäähdytysjärjestelmä. Reaktorin säätöinstrumentaatio (vuodelta 1982) ja säätökoneistot vaativat asteittaista uusimista. Itse reaktorin sydän ja tankki ovat hyvässä kunnossa. FiR 1:n BNCT-aseman suoritussarvot, laadukkaat, potilashoitoihin hyvin soveltuvat tilat ja aseman hyvä käytettävyyden sekä reaktorin puolesta että sairaalan läheisyyden takia ovat tuoneet sille kiitosta myös muiden BNCT-tutkimusryhmien taholta.

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 ensisijaisesti hoidoksi mm. glioblastoomapotilaille, hoitotoiminnalla voidaan kattaa reaktorin ylläpitokulut.

Reaktorin ylläpitokustannukset on pystyttävä kattamaan myös läpi BNCT:n kehitysvaiheen. VTT pitää BNCT-aseman toimintaa strategisesti merkittävänä ja on vahvasti sitoutunut BNCT-hankkeeseen. VTT:n budjettirahoitus kuitenkin sitoutuu yhä enemmän yhteisrahoitteisiin hankkeisiin, eikä sitä siis ole enää aikaisemmassa määrin käytettävissä reaktorin ylläpitoon. Nyt aseman valmistuttua tulisi sillä harjoitettavan

tutkimuksen kyetä kattamaan myös reaktorin kustannukset. Tämä on kuitenkin osoittautunut ongelmalliseksi.

HYKS-Instituutin koordinoiman Teke-sin, HYKS erikoisvaltionosuuksien (EVO) ja VTT:n rahoittaman BNCT-hoidon kehityshankkeen päätyttyä vuonna 1999 gliomahoitojen kehitystyön rahoitus on jäänyt nyt lähes yksinomaan HYKS Instituutin ja VTT:n yhdessä omistaman NC-Hoito Oy:n rahoituksen varaan siten, että pääomasijoittajien lisäksi rahoittajana on ollut Tekes. Lääketieteellisen fysiikan, erityisesti annosuunnittelun ja dosimetrian kehitystä on rahoittanut Helsingin yliopisto, Suomen akatemia ja EU. Boorinkantajan kuvantamista potilaasta magneettiresonanssitekniikalla kehitetään EVO-rahoituksella. Tällä akateemisluontoisella rahoituksella kyetään kattamaan vain osa hankkeen tutkijoiden palkoista eikä rahoitusta rahoitusehtojenkaan mukaan voida ohjata kattamaan reaktorin ylläpitokustannuksia. Kuitenkin FiR 1-reaktorin olemassaolo luo pohjan kaikelle BNCT-tutkimukselle Suomessa.

Kohti kansallista ja kansainvälistä hoitotutkimusta

Tilanteesta yritetään ulospääsyä rakentamalla kansallinen BNCT-hanke. Hankehan on jo nyt useamman yliopiston ja tutkimuslaitoksen yhteistyötä. Helsingin seudulta siihen osallistuvat Helsingin yliopistollinen keskussairaala (HUS-HYKS), Helsingin yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, VTT ja STUK, Turusta on mukana Turun PET-keskus. Tutkimukseen osallistuu yli kolmekymmentä tutkijaa, heistä enemmistö osaa-aikaisesti tai oman toimensa ohella, ja henkilötyövuosia kertyy vuodessa kymmenkunta. Nyt on tarkoitus saada mukaan myös muut yliopistolliset keskussairaalat. Lisääntyvän potilasmäärän lisäksi tämän toivotaan luovan uusia mahdollisuuksia kansallisen tutkimusrahoituksen saamiselle hankkeelle ja siten myös FiR 1-tutkimusreaktorille.

Ruotsissa, jossa on vanhemmat perinteet BNCT-tutkimuksessa, varsinkin boorinkantajien kehityksessä, on onnistuttu nyt Studsvikin BNCT-aseman myötä saamaan aikaan kansallinen BNCT-hanke ja sille merkittävä perusrahoitus. Suomen ja Ruotsin hankkeiden yhteistyö tulee olemaan jatkossa entistä tärkeämpää sekä tutkimuksellisten tavoitteiden nopeammaksi saavuttamiseksi että poliittisten paineiden luomiseksi EU:n BNCT:lle antaman tutkimusrahoituksen ohjaami-

seksi myös Suomen ja Ruotsin BNCT-asemilla tehtäviin hoitotutkimuksiin. Tähän asti EU on tukenut yksinomaan Pettenissä, Hollannissa EU:n JRC:n korkeavuoreaktorin BNCT-aseamalla tehtyjä potilaskokeita.

Suomi pääsi BNCT-tutkimuksen kansainväliseen kärkeen kehittämällä pienelle FiR 1-reaktorille silloin sekä intensiteettitään, epitermisen neutronikeilan puhtaudeltaan että hoitoon soveltuvilta tiloiltaan maailman parhaan BNCT-aseman. Suomen BNCT-hanke on pitänyt kärkiasemansa käynnistämällä ensimmäisenä maailmassa perinteisen sädehoidon jälkeen uusien gliomien hoitokokeet tänä keväänä. Nyt on kansallisella ja kansainvälisellä yhteistyöllä varmistettava resurssit tämän kärkiaseman säilyttämiseksi ja BNCT:n kehittämiseksi hoidoksi glioma- ja muillekin syöpäpotilaille.

Toistaiseksi alustavat tutkimustulokset gliomapotilaille näyttävät lupaavilta. BNCT on ollut varsin hyvin siedettyä ja akuutteja toksisia sivuvaikutuksia ei ole todettu. Hoitotiimillä on nyt vankka BNCT-osaaminen ja potilaalle BNCT on gammahoitoa helpompi vaihtoehto. Kantaja-aineen pitoisuuden nosto ja uusien, tehokkaampien kantaja-aineiden kehittäminen ja käyttöönotto, puhumattakaan BNCT:n yhdistämisestä uusiin syöpälääkkeisiin, antavat uusia ulottuvuuksia ja tarmoa jatkaa eteenpäin taistelussa syöpää vastaan.



DI Iiro Aueterinen, erikoistutkija, VTT Kemiantekniikka, BNCT-asemahankkeen projektipäällikkö, puh. 09 - 4566 353, iiro.aueterinen@vtt.fi



LL, Leena Kankaanranta, BNCT-tutkijalääkäri, Syöpätautien osaamiskeskus, HUS, puh. 09 - 4719 51350, leena.kankaanranta@hus.fi



STUK:n Tero Varjoranta ja uraaniammus.

Uraaniammukset – hiipivä kuolema vai paljon melua tyhjästä?

Loppuvuodesta 2000 uraaniammukset nousivat julkiseen keskusteluun, kun lehtitietojen mukaan Balkanilla palvelleiden italialaisten YK-sotilaiden leukemia-tapauksia ilmaantui käsittämättömän runsaasti. Näiden tapausten syyksi spekuloiitiin Naton käyttämien ammusten uraanipenetroattoreita. Uutisen pysyminen otsikoissa ei ollut varmaan mikään yllätys media-asiantuntijoille, esiintyvähän tässä yhdessä uutisaiheessa julkisuuden rakastamista iskusanoista peräti kolme: uraani, säteily ja syöpä.

Tosiasia kuitenkin on, että suureen palstamillimetrien määrään mahtuu paljon epätäydellisiä ja jopa täysin virheellisiä tietoja. ATS halusi kuulla asioiden oikean laidan kotimaisilta asiantuntijoilta ja vuosikokous helmikuun lopussa tarjosi tähän oivan tilaisuuden. Vuosikokouksessa STUK:n asiantuntijat Wendla Paile ja Roy Pöllänen sekä VTT:n asiantuntijat Riitta Zilliacus ja Markku Anttila valottivat asiaa eri näkökulmista. Tämä artikkeli perustuu näihin esitelmiin ja pyrkii tiivistämään esitelmien oleellisen sisällön pariin sivuun.

Uraanin aiheuttamat terveysriskit tunnetaan

Uraanin aiheuttamat riskit sille altistuvien ihmisten terveydelle tunnetaan erittäin hyvin. Vuosikymmenien aikana uraanin sotilaallisen ja rauhanomaisen käytön sivutuotteena

on kertynyt tietoa ammattialtistuksen riskeistä erilaisilla altistustasoilla. Se seikka, että uraaniammukissa käytetään köyhdytettyä uraania luonnonuraanin sijaan (eli U-235:n 0,7%:n luonnollisesta osuudesta luonnonuraanissa reilu puolet on korvattu U-238:lla) ei muuta uraanin säteilyriskejä oleellisesti eikä kemiallisia riskejä ollenkaan.

Uraanin ominaisaktiivisuus on niin alhainen, että uraaniammuksen penetraattori ei pysty aiheuttamaan säteilypalovammaa. Mikäli tällaista penetraattoria pitää muistoesineenä hyllynreunalla vuosikausia, se aiheuttaa laskennallisesti 2 syöpätapausta 100 000 rauhanturvaajan joukossa ja näistä syövästä edelleen vain 1/10 on leukemioita. Jo tästä voidaan päätellä, että Italiassa havaitut syöpätapaukset eivät suurella todennäköisyydellä johdu altistumisesta näille uraaniammukseille. Ei ole edes vielä osoitettu, että syöpä olisi rauhanturvaajien joukossa yhtään yleisempää kuin muussa väestössä.

Uraani muodostaa suuremman terveysriskin sisäisenä lähteenä. Jos uraanipölyä kantautuu hengityksen kautta keuhkoihin, seurauksena on keuhkosityöpäriskin kasvu. Lisäksi erittäin suurina annoksina uraanipölyn hengittäminen tai syöminen voi johtaa munuaisvaurioihin, mutta tämä riippuu uraaniyhdisteen liukoisuudesta. Uraanin työsuojelullinen altistusraja määräytyy nimenomaan sen kemiallisesta myrkyllisyydestä, ei säteilyvaarallisuudesta.

Altistus mahdollisista uraaniammuksen sirpaleista, joita osa Balkanin väestömuuttamat Persianlahden sodassa palvelleet sotilaat yhä kantaavat ruumiissaan, on hyvin paikallinen. Uraanin lähettämä alfasäteily tappaa sirpaleen ympärillä olevan solukeroksen, mutta koska uraanin liukoisuus sirpalemuodossa on heikko, vaikutusalue ei kasva ajan myötä. Näinollen tästäkään ei tule kovin merkittävää terveysriskiä.

Kaiken kaikkiaan on varmastiärkevää kerätä maastosta löytyvät uraanipenetrattorit pois lasten ulottuvilta. Järjestelmällinen ammusten etsintä on kuitenkin vaikeaa, koska uraani on niin heikko säteilijä, että se ei helposti erotu normaalin taustasäteilyn seasta.

Balkanilla ammuttujen uraaniammusten tai niistä vapautuneen uraanipölyn määrä ei missään tapauksessa voi olla kovin merkittävä riskitekijä, sillä tavallisessa kiviaineksessa, sekä kalliiossa että hiekkapölyssä, on jonkin verran uraania. Avustusvarat kannattaa suunnata konkreettisempiin kohteisiin.

Uraaniammuksen koostumus selvitettiin

STUK ja VTT analysoivat tänne saadun esimerkkipenetrattorin käyttäen mm. alfa-, gamma- ja massaspektrometriaa. Gamma-analysien perusteella saatiin selville, että isotooppien U-235 ja U-238 suhde penetrattorissa oli noin 0,002 eli kyseessä oli selvästikin köyhdytetty uraani.

Penetrattorista porattiin pieniä lastuja alfa- ja massaspektromittauksia varten. Alfa-spektreissä saatiin esiin luonnollisten uraani-isotooppien U-234, U-235 ja U-238 piikkien lisäksi heikko piikki U-236:n alfa-energian kohdalla. ICP-MS-massaspektromittauksella U-236:n olemassaolo saatiin varmistettua. Tämän U-235:stä neutronikaappauksen kautta syntyvän isotoopin olemassaolo on selvä merkki siitä, että penetrattorin uraani on jossain vaiheessa ollut

ydinreaktorissa. U-236:n suhde U-238:aan oli noin 0,00003.

Uraanin isotooppien lisäksi penetrattorista havaittiin titaania 0,7–1,0%. Titaania käytetään penetrattorin mekaanisten ominaisuuksien parantamiseen. Muita metalleja oli alle 0,01%. Joidenkin uraanipenetrattoreita analysoineiden ulkomaisten laboratorien raportoimaa plutoniumia ei Suomessa tehdyissä mittauksissa havaittu.

Kun uraanipenetrattorin dimensiot ja koostumus oli saatu selvitettyä, Monte Carlo –simuloinnilla voitiin arvioida ulkoisen säteilyn aiheuttama annos. Penetrattori voi aiheuttaa lyhyessä ajassa merkittäviä ihoannoksia. Esimerkiksi suorassa kontaktissa ihon kanssa vuosianssoraaja tyvisolukerokselle voi ylittyä jopa yhdessä vuorokaudessa. (Yleisölle ihon ekvivalenttiannos vuodessa neliösenttimetriä kohden ei missään kohtaa ihoa saa ylittää arvoa 50 mSv.) Näin ollen se ei ole täysin harmiton taskussa tai kaulariipuksena. Säteilyvaikutus kohdistuisi kuitenkin lähinnä ihon pintakeroksiin tai välittömästi sen alla oleviin kudoksiin ja mahdollisesta erittäin pitkäaikaisesta altituksesta koitua vaurio olisi hyvin paikallinen. Säteilypalovammat ovat kuitenkin erittäin epätodennäköisiä.

Mistä ammusuraani on peräisin?

Köyhdytetty uraani on uraanin väkevöinti-prosessin jätettä. Kosovossa käytettyjen, amerikkalaista alkuperää olleiden uraaniammusten materiaali on siksi peräisin jostain USA:n kolmesta kaasudiffuusiotekniikkaan perustuvasta väkevöintilaitoksesta (Oak Ridge, Portsmouth ja Paducah).

Yhdysvallat tuotti 1990-luvun alkuun mennessä sotilaallisiin tarkoituksiin 994 tonnia pitkälle väkevöityä (U-235-pitoisuus yli 20%) uraania. Maa lopetti uraanin väkevöinnin ydinaseisiin vuonna 1964 ja 1990-luvun alussa katsottiin myös laiva-reaktoripolttoaineen väkevöinti tarpeettomaksi. Yhdysvalloissa on nykyisin vajaat 500 000 tonnia köyhdytettyä uraania. Siitä ilmeisesti noin puolet on peräisin sotilaallisesta tuotannosta.

Yhdysvaltain uraaniammusten raaka-aine on peräisin sotilaallisesta tuotannosta. Se on ilmeisesti kokonaan valmistettu Paducahin väkevöintilaitoksella, jota aikoinaan käytettiin tuottamaan kahdelle muulle laitokselle väkevöinniltään noin prosentin luokkaa ollutta uraania. Paducahin proses-

siin syötettiin paitsi luonnonuraania niin myös jälleenkäsittelyssä erotettua uraania (RepU) ja muiden väkevöintilaitosten jätevirtaa eli köyhdytettyä uraania. Monimutkaisen ja laajan tuotantoprosessin takia Yhdysvaltain väkevöintilaitosten ja muidenkin uraankäsittelylaitosten massatasehistorioiden selvittäminen on osoittautunut vaikeaksi. Siksi myös lopullisen totuuden selvittäminen köyhdytetyn uraanin koostumuksesta vienee vielä vuosia.

Paducahin laitoksella jälleenkäsittelyuraania tiedetään käytetyn vuosina 1953-64 ja satunnaisesti vielä vuosina 1968-77. Aluksi RepU:n osuus oli noin puolet ja on arvioitu, että vuosina 1953-76 RepU:n keskimääräinen osuus olisi ollut noin 13%.

Paducahissa valmistettiin metallista köyhdytettyä uraania vuosina 1957-73. Yhdysvaltain uraaniammusten raaka-aine on siis peräisin ajalta, jolloin Paducahissa käytettiin jälleenkäsittelyuraania. Siksi uraaniammuksia analysoidessa näkyy myös U-236. Periaatteessa voisi olla mahdollista havaita merkkejä plutoniumin ja neptuniumin läsnäolosta.

Nykyisten arvioiden mukaan Paducahiin tulleessa jälleenkäsittelyuraanissa olisi ollut kaikkiaan noin 20 kg neptuniumia ja hieman yli 300 g plutoniumia sekä hieman teknetiumia. Todennäköisesti huomattava osa neptuniumista ja plutoniumista erottui kuitenkin uraanista jossakin prosessin vaiheessa eikä siten päätynyt myöskään köyhdytettyyn uraaniin.

Tiedot Neuvostoliiton/Venäjän fissiilin materiaalin tuotannosta pohjautuvat edelleen ulkopuolisiin arvioihin. Neuvostoliitto hankki ilmeisesti noin 660 000 tonnia luonnonuraania, josta noin 400 000 tonnia käytettiin ydinaseplutoniumin tuottamiseen. Oleg Buharinin, Neuvostoliitosta Yhdysvaltoihin 1990-luvun alussa siirtyneen tutkijan mukaan lähes kaikki Neuvostoliiton väkevöimästä aseluokan uraanista, yhteensä 1450 tonnia, valmistettiin plutoniumin tuottamiseen käytetystä uraanista. Siten myös suuri osa itänaapurimme köyhdytetystä uraanista sisältänee säteilytyksen seurauksena syntyneitä uraani-isotooppeja ja myös muita epäpuhtauksia.

Buharinin väitteen tueksi on olemassa epäsuoria todisteita. Yhdysvaltalaiset ja neuvostoliittolaiset tutkijat pääsivät 1980-luvun lopulla mittaamaan Neuvostoliiton ydinkärjen lähettämää gamma- ja neutronisäteilyä. Gammaspetereissä näkyi selvästi säteilytyksen seurauksena syntyvän U-

232:n tytärnuklidin Tl-208:n lähettämän energieettisen fotonin piikki.

Yhdysvallat ja Venäjä sopivat 1990-luvun puolivälissä, että USA ostaa Venäjältä 500 tonnia aseluokan uraania, joka tuli laimentaa Venäjällä 4,4-prosenttiseksi. Yksi sopimuksen toimeenpanoa hidastanut tekijä oli, että venäläisten asiantuntijoiden oli kehitettävä erityinen prosessi, jotta laimennettu uraani täyttäisi isotooppikoostumuksille asetetut länsimaiset puhtausnormit.

Yhteenveto

NATO:n Balkanilla käyttämistä uraaniammuksista noussut mediakohu oli suurelta osin asioiden turhaa paisuttelua varsinkin kun vastaava näytelmä oli jo nähty Persianlahden sodan jälkeen ainakin Yhdysvalloissa. Samalla on kuitenkin todettava, että vaikka Yhdysvalloilla ja ilmeisesti myös NATO:lla oli tiedossa uraaniammusten koostumus ja ammuksiin liittyvät vähäiset terveysriskit, niin kaikkea tietoa ei tuotu julkisuuteen ajoissa.

Joka tapauksessa sekä YK:n rauhanturvajoukoilla että Balkanin asukkailla on muita huomattavasti merkittävämpiä huolenaiheita, mm. tuhoutujen teollisuuslaitosten aiheuttamia ympäristöongelmia, joiden selvittelyyn kansainvälisen panostuksen tulisi jatkossa keskittyä.

Vaakahöyrystimien asiantuntijat koolla viidennen kerran

Jo viidettä kertaa kuluneen kymmenen vuoden aikana kokoontuivat vaakahöyrystimien asiantuntijat Lappeenrantaan. VVER-reaktorien vaakatyyppinen höyrystin eroaa monessa suhteessa yleisemmin käytetystä pystyhöyrystimestä. Erityisen mielenkiinnon kohteena olivat käyttökokeemukset voimalaitoksilta.

Vaakahöyrystimillä on merkittävä vaikutus VVER-reaktorien käyttäytymiseen mahdollisten häiriö- ja onnettomuustilanteiden aikana. Näiden ominaisuuksien tutkimus tuntui pitkään olleen enemmänkin sattumanvaraista ja hajanaista. Kaikkea onnettomuuksien etenemisestä hankittua tietoa ei aluksi saatu tehokkaasti vietyä analointiin käytettäviin tietokonekoodeihin. Kun nämä vaikeudet selvästi korostuivat kymmenisen vuotta sitten, virisi Suomen ydinalan organisaatioiden keskuudessa ajatus sellaisen seminaarin järjestämisestä, joka kokoaisi asiantuntijat keskustelemaan avoimessa ilmapii-
rissä.

Ensimmäisestä seminaarista lähtien, joka järjestettiin Lappeenrannassa maaliskuussa 1991, on aihe houkutellut asiantuntijoita useimmista VVER-reaktoreja käyttävistä maista Suomeen. Tämänkertainen seminaari oli järjestyksessä jo viides. Osallistujia oli viitisenkymmentä ja he tulivat kahdeksasta eri maasta. Käytännön järjestelyistä vastasivat ennen muuta Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu ja Fortum. Kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA osallistui maksamalla matkakulut parille kymmenelle ekspertille Keski- ja Itä-Euroopan maista.

Käyttökokeuksista uutta kehitystä

Vaakahöyrystimien pääsuunnittelija on venäläinen insinööritoimisto OKB Hidropress, jonka toimipaikka on Podolsk lähellä Mos-

kovaa. Tri Nikolai Trunov kertoi, miten Hidropress on hyödyntänyt käyttökokeuksia nykyisten höyrystimien parantamiseksi. Hyvät kokemukset ovat myös auttaneet uusien höyrystimien suunnittelua aina 1500 MWe laitospäätöön saakka.

Säteilyturvakeskuksen Juhani Hyvärinen raportoi VVER-reaktoreita luvittavien viranomaisen muodostaman foorumin työstä. Foorum nimitti työryhmän keräämään VVER-440 -reaktorien höyrystimien käyttökokeuksia. Työryhmän laatima raportti käy hyvin perusteellisesti läpi kokemukset ja esittelee ryhmän yhteiset johtopäätökset ja suosituksen. Merkittävää on, että lämmön-siirtoputkien tulppauksia ei ole juurikaan tarvinnut tehdä, vaikka laitoskohtaisia eroja löytyykin.

Kokeilla tietoa höyrystimistä

Höyrystimien käyttäytymistä häiriöiden ja onnettomuuksien aikana on tutkittu integraalisilla koelaitteilla Lappeenrannassa ja Budapestissä. Lappeenrannan PACTEL-laitteisto ja sitä käyttävä ryhmä tuottavat edelleen merkittävimmät tulokset VVER-440 -reaktoreille. Tällä kertaa esittelyvuorossa olivat luonnonkiertokokeet tilanteessa, jossa jäähdytyspirissä esiintyy myös lauhumattomia kaasuja.

Suomessa hyvin tunnettu, Hidropressin kokenut tutkija Jurij Bezrukov esitteli VVER-1000 -höyrystimien höyrynerottimien suunnittelun eteen tehtyä kokeellista työtä.

sia nykyisten höyrytimien parantamiseksi. Hyvät kokemukset ovat myös auttaneet uusien höyrytimien suunnittelua aina 1500 MWe laitostokoon saakka.

Säteilyturvakeskuksen Juhani Hyvärinen raportoi VVER-reaktoreita luvittavien viranomaisten muodostaman foorumin työstä. Foorum nimitti työryhmän keräämään VVER-440 -reaktorien höyrytimien käyttökokemuksia. Työryhmän laatima raportti käy hyvin perusteellisesti läpi kokemukset ja esittelee ryhmän yhteiset johtopäätökset ja suositukset. Merkittävää on, että lämmönsiirtoputkien tulppauksia ei ole juurikaan tarvinnut tehdä, vaikka laitoskohtaisia eroja löytyykin.

Kokeilla tietoa höyrytimistä

Höyrytimien käyttäytymistä häiriöiden ja onnettomuuksien aikana on tutkittu integraalisilla koelaitteilla Lappeenrannassa ja Budapestissä. Lappeenrannan PACTEL-laitteisto ja sitä käyttävä ryhmä tuottavat edelleen merkittävimmät tulokset VVER-440 -reaktoreille. Tällä kertaa esittelyvuorossa olivat luonnonkiertokokeet tilanteessa, jossa jäähdytyspiirissä esiintyy myös lauhumattomia kaasuja.

Suomessa hyvin tunnettu, Gidropressin kokenut tutkija Jurij Bezrukov esitteli VVER-1000 -höyrytimien höyrynerottimien suunnittelun eteen tehtyä kokeellista työtä.

Radiologian alaan liittyviä kokeita tekee VTT ja Fortum yhteistyössä PACTELin vanhoilla höyrytimillä. Mielenkiinnon kohteena on sulavasta sydäimestä vapautuvien aerosolien pidättymien höyrytimen lämmönsiirtoputkissa. Jorma Jokiniemi toimii koordinaattorina Euratomin 5. puiteohjelman tutkimusprojektissa, jossa aerosolien

pidättymistä tutkitaan primääripuolelta sekundääripiiriin sattuneissa vuotoilanteissa. Kokeiden tuottama tieto on ainutlaatuista.

Mallinnuksen eteneminen

Analysointiin tarvittavien koodien osalta kehitys on johtanut luonnonkierron mallinnuksen tarkentumiseen. Erityisen huomion kohteena oli tsekkiläisen Pavel Králin havainnot epätavanomaisen luonnonkiertomoodin esiintymisestä pienten jäähdytysvoimien jälkitilanteissa. Merkitystä sillä on varsinkin paineastian paineellisten lämpösokkien tutkimuksessa. Integraalisilla koelaitteilla olisikin hyvä saada lähitulevaisuudessa tehdyksi kokeita, joilla nämä laskennalliset havainnot voitaisiin todentaa.

Laskennallisen virtausmekaniikan alueelta VTT:n Jaakko Miettinen esitti hyvin optimistisia arvioita kaksifaasimallinnuksen edistymisestä. Höyrytimien kannalta tällainen analysointikyky voisi olla suureksi avuksi sekä suunnittelijoille että onnettomuustilanteiden arvioijille.

Materiaalien lujuus

Laitokset käyttävät edistyneitä tarkastusmenetelmiä höyrytimien kollektorien ja lämmönsiirtoputkien eheyden toteamiseksi. Näin voidaan vuotomahdollisuuksia rajoittaa laitoksen käynnin aikana. Sekundääripiirin vesikemialla ja epäpuhtauksien jakautumisella höyrytimen vaippapuolella on tärkeä osuus vauriomekanismien synnyn estämiseksi. Myös vesipuolen pinnankorkeutta on hallittava menestyksellisesti laitoksen eri toimintatiloissa.

Tri Trunov totesi, että VVER-1000 -höyrytimien vaihtoihin johtaneet syyt hallitaan pitkällisten tutkimusten jälkeen. Uusissa

höyrytimissä ei enää kylmän puolen primäärikollektorista ole löytnyt säröilyä. Kokemus on osoittanut, että luotettavien arvioiden tekeminen edellyttää saumatonta yhteistyötä termohydraulikkojen sekä lujuus- ja materiaali-insinöörien välillä. Istuntojen aikana esitetyistä esitelmistä selviää, että samoin termohydrauliikan ja epäpuhtauksien jakautumisen tutkiminen tulee integroida.

Onnettomuuksien hallinta

Erityisesti primääripiiristä sekundääripuolelle tapahtuvat vuotojen eli nk. PRISE-onnettomuuksien hallinta on haasteellinen tehtävä. Edullisissa tapauksissa hallintatoimilla voidaan vähentää oleellisesti laitoksesta ympäristöön tapahtuvien päästöjen riskiä. PRISE-onnettomuudet ovat luonteeltaan mutkikkaita hallittavia. Tämän vuoksi on tärkeätä, että uudet menetelmät ja lisääntynyt tietokonekapasiteetti tekevät mahdolliseksi suorittaa suuren määrän erilaisia herkkyysajoja. Huomiota pitää kiinnittää edelleen siihen, että tapauksiin liittyvät ilmiöt ja fysiikka ymmärretään oikein ja osataan kuvata oikein.

Yhteistyön jatko

Seminaarin lopuksi keskusteltiin ehdoista, joilla voitaisiin harkita vaakahöyrystiverkoston luomista Euratomin tutkimuksen seuraavan puiteohjelman alle. Myös IA EA:n rooli tulee jatkossakin olemaan aktiivinen yhteistyön ylläpitäjänä.

Vaikka muita yhteistyökanavia on jo toiminnassa ja uusiakin on syntymässä, osantajat pitivät tämän muotoisia seminaareja hyvin tärkeinä. He rohkaisivat suomalaisia jatkamaan seminaarien järjestämistä myös tulevaisuudessa.

Fifth International Seminar on Horizontal Steam Generators 20-22 March 2001, Lappeenranta, Finland

Organising Committee:

Dr. Harri Tuomisto, Fortum
Mr. Juhani Vihavainen, LUT
Mr. Heikki Purhonen, LUT
Dr. Jozef Misak, IAEA

Objectives:

- to enhance understanding of horizontal SG behaviour during normal operating and accidental conditions,
- to discuss operational experience, structural integrity and ageing issues of the horizontal SGs,
- to collect new operational, experimental and theoretical results,
- to provide an open forum for discussion among the experts, and thus
- to aim at enhancing the safety and economy of VVER operation.

TKT Harri Tuomisto työskentelee Fortum Nuclear Services Oy:n tutkimuspäällikkönä. Hän on Suomen Atomiteknillisen Seuran johtokunnan puheenjohtaja, puh. 010 45 32464, harri.tuomisto@fortum.com.





Koulutusta energiakanavalaisille bio- ja tuulienergiasta

ATS-Energiakanava järjesti 28.3. 2001 jäsenilleen koulutustilaisuuden bio- ja tuulienergiasta. Tilaisuudessa tuotepäällikkö Eija Alakangas VTT Energiasta luennoi bioenergiasta ja tuotepäällikkö Hannele Holttinen tuulienergiasta. Koulutustilaisuuteen osallistui parikymmentä energiakanavalaista. Tilaisuuden jälkeen kalvot jaettiin kaikille Energiakanavan sähköpostijakeluun kuuluville. Nyt kaikilla ATS:n jäsenillä on mahdollisuus tutustua esitelmien yhteensä 52 kalvoon verkkolehdessemme www.ats-fns.fi.

Bioenergia EU:ssa ja Suomessa

Bioenergiakalvojen aiheina ovat:

- Bioenergian käyttö EU-maissa
- Uusiutuvien energialähteiden edistämishjelma
- Puupolttoaineiden tuotanto ja käyttö
- Kierrätyspolttoaineet

Tuulivoima Suomessa ja maailmalla

Tuulivoimaa on asennettuna maailmalla tällä hetkellä noin 20 GW mikä vastaa reilun 40 TWh vuosituotantoa. Vuosittainen rakennustahti on edelleen kasvussa, vuonna 2000 asennettiin yli 4000 MW. Eurooppa on tuulivoiman polttopisteessä, suurin osa uudesta kapasiteetista ja erityisesti laitteiden valmistuksesta on Euroopassa. Suomessa tuulivoiman käytössä otetaan ensiaskeleita, v. 2000 kapasiteetti 38 MW ja tuotanto 77 GWh. KTM Uusiutuvien energialähteiden edistämishjelmassa tavoitteena 500 MW

vuonna 2010. Tuulivoimapotentiaali Suomessa on suuri varsinkin merialueilla. Hyviä sijoituspaikkoja löytyy rannikolta ja Lapin tuntureilta. Merituulivoima on tällä hetkellä Euroopassa suurin kehityskohde. Tuotantokustannukset merituulivoimalle (yli 30 p/kWh ilman tukia) ovat vielä suuremmat kuin maalle rakennettaessa, mutta tekniikan kehittyessä ja parhaiden rannikko-paikkojen rakentamisen jälkeen merituulivoima on kilpailukykyistä.



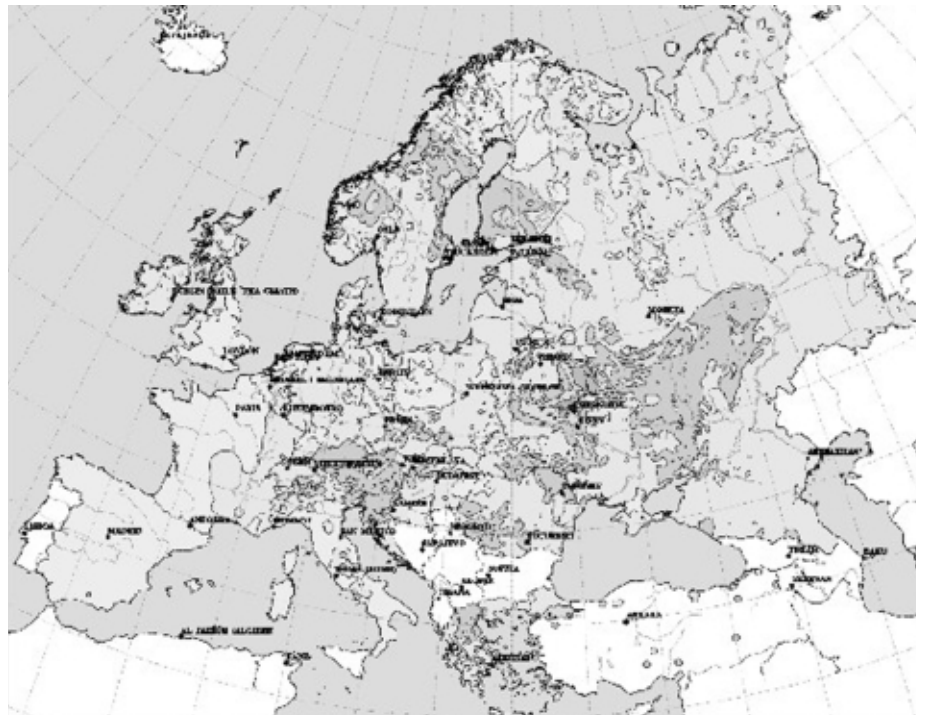
DI Hannele Holttinen,
tuotepäällikkö,
VTT Energia.
hannele.holttinen@vtt.fi



DI Eija Alakangas,
tuotepäällikkö,
VTT Energia.
eija.alakangas@vtt.fi

ATS:n Tshernobyl-onnettomuuden 15-vuotisseminaari

Maailman pahimmasta ydinvoimalaitosonnettomuudesta on 15 vuotta. Perusominaisuuksiltaan virheellisesti suunnitellun grafiittihidasteisen kanavatyyppisen reaktorin (RBMK) teho ja lämmön tuotanto kasvoivat hallitsemattomasti yli satakertaiseksi, aiheuttaen reaktorin täydellisen rikkoutumisen. Onnettomuusreaktorista levisi radioaktiivisia aineita laajoille alueille pohjoisella pallonpuoliskolla, eniten lähialueille Ukrainassa, Valko-Venäjällä ja Venäjällä. Myös Pohjoismaihin ja Etelä- ja Keski-Euroopan maihin kulkeutui merkittäviä määriä radioaktiivisia aineita. Suomen Atomiteknillisen Seuran huhtikuussa järjestämässä asiantuntijaseminaarissa kerrattiin tosiasioita tapahtuneesta sekä saatiin uutta tietoa onnettomuuden pitkäaikaisista terveysvaikutuksista. Seuraavassa on lyhyt kuvaus seminaarin annista.



Maailman pahin ydinonnettomuus sattui Tshernobylin ydinvoimalaitoksen nelosyksikössä Ukrainassa 26.4.1986 eli 15 vuotta sitten. ATS:n seminaarissa neljä asiantuntijaa kertasi ja analysoi onnettomuuden kulkua ja tutkittuja ympäristövaikutuksia uusimman tiedon avulla.

VTT:n reaktoriteknikan asiantuntijan Timo Vanttolan mukaan onnettomuus johtui pääosin reaktorin epäedullisista fysikaalisista ominaisuuksista. Tämän tyyppisessä reaktorissa ketjureaktio vain kiihtyy jäädytteen määrän vähentyessä. Vastaavassa tilanteessa esimerkiksi Loviisan tai Olkiluodon tyyppisen reaktorin ketjureaktio ja teho vähenee nopeasti. Onnettomuudessa tehtiin myös joukko käyttövirheitä ja turvajärjestelmiä otettiin ohjeiden vastaisesti pois päältä.

Säteilyturvakeskuksen reaktoriteknikan ja -fysiikan asiantuntijan Keijo Valtosen

mukaan edelleen käytössä oleviin kolmeentoista RBMK-reaktoriin on onnettomuuden jälkeen suunniteltu ja toteutettu monia turvallisuutta parantavia muutoksia. Samanlaisen onnettomuuden syntyminen ei siis enää ole mahdollista, mutta kaikkia reaktorin perusominaisuuksia ei ole voitu muuttaa. Reaktorien turvallinen käyttö on yhä hankalaa ja niiden onnettomuusriski on yhä esimerkiksi EU-maissa käytössä olevia reaktortyyppisiä korkeampi.

Grafiittipalo levitti päästöjä

Hidastimena toimivan grafiitin roihuava palo nostatti jopa 50 metrin korkuisen liekin ja kuumat palokaasut nostivat radioaktiiviset aineet hyvin korkealle. Ydinvoimalaitospäästöjen leviämisen ja annoslaskennan asiantuntijan Mikko Ilvosen mukaan ensimmäisen onnettomuuspäivän palo nosti reaktorista vapautuneita aineita jopa 2000 met-

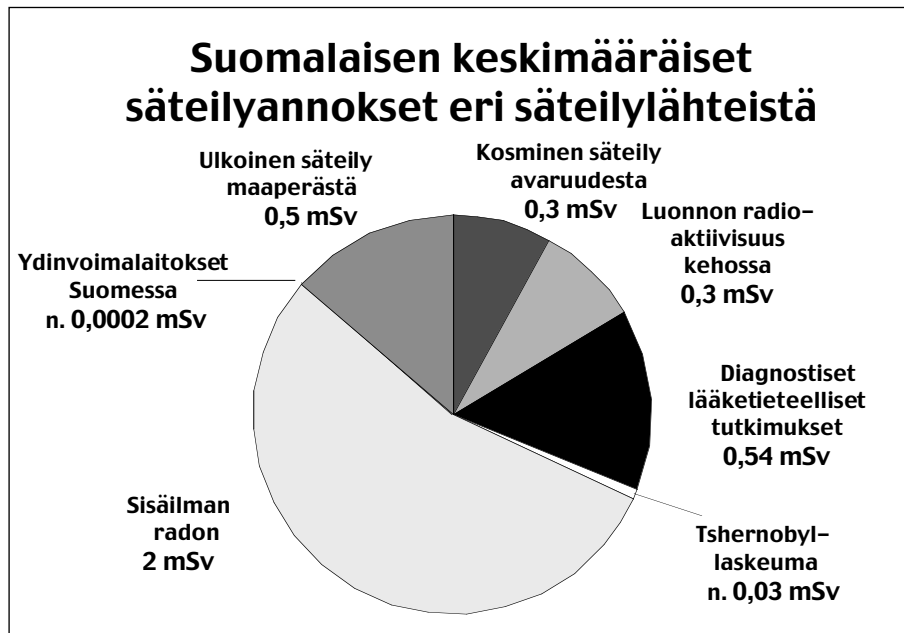
rin korkeudella olevaan ilmakerrokseen ja toisena päivänäkin vielä 1000 metriin. Arviolta 50 % jodista ja 30 % cesiumista vapautui reaktorista. Aineiden kulkeutumisajaksi Helsinkiin oli noin yksi vuorokausi. Ensimmäiset havainnot pilvestä saatiin onnettomuutta seuraavana päivänä, kun osa aineista tuli sateen mukana alas Keski-Ruotsissa. Pohjoismaihin ilmapirtausten mukana kulkeutuneet radioaktiiviset aineet tulivat laskeutuneena maanpinnalle pääasiassa sateen mukana. Sateiden kuroittaisuudesta johtuen laskeuman suuruus vaihtelee voimakkaasti eri paikkakunnilla. Kaikkiaan alle 1 % päästöjen kokonaismäärästä kulkeutui entisen Neuvostoliiton alueen ulkopuolelle. Voimakkaat päästöt reaktorista kestivät kaikkiaan noin 10 päivää. Merkittävien osa päästöistä loppui valuneen ja levinneen sulan reaktorimassan jähmettyessä tuhoutuneen reaktorirakennuksen alaosiin.

Lääkärien tietämys säteilystä heikko

Säteilyturvakokeskuksen säteilyn lääketieteellisten vaikutusten asiantuntijan Wendla Pailen mukaan Tshernobylin onnettomuuden vaikutuksia eri maiden väestöön on selvitetty laajalti. Säteilyn merkittävin riski on syöpä ja säteily antaa tulosten mukaan pysyvän, annoksen mukana kasvavan lisäriskin. Geneettisen riskin kasvu on syöpärisäkin verrattuna pieni eikä sitä ole ihmisillä koskaan varmuudella osoitettu. Riskiarvio perustuu eläinkokeisiin. Tshernobylin alueen väestöllä epämuodostumien määrä ei ole lisääntynyt. Puhdistustyöntekijöillä ja onnettomuusalueen väestössä on havaittu erilaisia oireita, joista suurimman osan on todettu johtuvan henkisistä syistä. Lääkäreiden tietämys säteilyn vaikutuksista on usein puutteellista, mikä on ollut omiaan lisäämään väestön huolestuneisuutta ja pelkoa.

Kilpirauhassyöpä lisääntyi lapsilla - ei aikuisilla

Lasten kilpirauhassyöpätapausten määrä lähialueilla kasvoi merkittävästi neljän vuoden kuluttua onnettomuudesta. Sairastuneita on nyt yli 1000. Lapsilla sairastumisriski on ilmeisesti verrannollinen maidon määrään ravinnossa. Suurin riski on niillä, jotka olivat onnettomuuden aikaan alle viisivuotiaita. Paikallisesti tuotetun maidon käyttö lähialueilla kiellettiin vasta 2 viikkoa onnettomuuden jälkeen. Nopeammalla käyttökiel-



Kaikkiaan Tshernobyl-laskeumasta on arvioitu kertyvän noin 2 millisievertin säteilyannos eli puolet suomalaisen joka vuosi saamasta annoksesta.

lolla ja joditablettien jakelulla olisi ilmeisesti vältetty merkittävä osa kilpirauhassyöpätapauksista.

Aikuisten kilpirauhassyöpän kasvua ei ole havaittu luotettavista väestötilastoista. Leukemiatapausten määrän kasvua väestössä ei ole voitu osoittaa. Puhdistustyöntekijöiden joukossa on todennäköisesti joitakin kymmeniä ylimääräisiä leukemiatapausta. Epävarmuus leukemian taustailmaantuvuudesta kuitenkin vaikeuttaa tulkintaa.

Maailman väestön syöpäriski

Laskennallinen syöpäkuolemien kokonaismäärän kasvu koko maapallon väestölle on 30 000 syöpäkuolemaa. Arvion perustana on tällöin koko ihmisen eliniän mitta eli noin 80 vuotta. Kokonaismäärästä 40 prosenttia eli 12 000 esiintyy entisen Neuvostoliiton alueella. Vuonna 1986 entisessä Neuvostoliitossa asui 280 miljoonaa ihmistä, joista noin 60 miljoonaa (runsas 20 prosenttia) kuolee syöpään muista syistä. On selvää, että Tshernobylin onnettomuuden laskennallinen vaikutus häviää syöpäkuolemien lukumäärän tilastolliseen vaihteluun. ■



ATS:n opintomatka Sosnovy Boriin

Suomen Atomiteknillinen Seura on järjestänyt perinteisesti keväällä opintomatkan johonkin kotimaiseen seuran toimintaan liittyvään kohteeseen. Uusia vierailukohteita ei voi kuitenkaan poimia mielenkiintoisten kohteiden rajoitetusta joukosta ikuisuuksiin. Osin tästä syystä ATS:n vuoden 2001 kevään opintomatalla suunnattiin Suomenlahden etelärannalle, Sosnovy Boriin Venäjälle 17.-18.5. Sosnovy Borissa 19 opintomatkaista tutustuivat kahteen kohteeseen, Leningradin ydinvoimalaitokseen ja NITI-instituuttiin.

Kuvassa opintomatkan osallistujat ryhmäpotretissa RBMK-reaktorin tasaisesti värisevässä reaktorikannella.

Sosnovy Bor on noin 60 000 asukkaan kaupunki Suomenlahden rannalla, 80 kilometriä Pietarista länteen. Kaupunki syntyi varsin keinotekoisesti 1960-luvun puolivälissä, kun Neuvostoliiton atomienministeriö päätti rakentaa alueelle merkittävän ydinteknologiakeskuksen. Tällöin Sosnovy Borin alueelle siirrettiin korkeasti koulutettua työvoimaa Neuvostoliiton muista osista.

Runsaan työvoiman ja merkittävän taloudellisen tuen ansiosta Sosnovy Borin lähistölle saatiin valmiiksi vuosien 1974 ja 1981 välisenä aikana neljä 1 000 MW:n RBMK-tyyppistä ydinvoimalaa ja ydinsukellusvenien reaktoritekniikkaa tutkiva keskus (NITI).

Sosnovy Borin kaikki neljä voimalaa ovat yhä toiminnassa. NITIssä painopiste on nykyisin VVER-640 -laitostyyppin kehittämisessä ja vakavien reaktorionnettomuuksien ilmiöiden tutkimisessa.

16 ATS:n jäsenen lisäksi opintomatalle osallistui 3 Ruotsin sisarseuramme Föreningen Kärnteknikin jäsentä. Ruotsalaiset kollegamme olivat mielissään tämänkaltaisen yhteistyöstä, varsinkin kun vastaavanlainen opintomatkaileminen ei Ruotsissa kuulemma tunnu ottavan tuulta purjeisiin.

Kuoppaisia teitä ja tullimuodollisuuksia

Matkareitti Sosnovy Boriin kulki Tallinnan ja Narvan kautta. ATS:n delegaatio saapui

Tallinnaan aamun ensimmäisellä kantosiipi-aluksella, ja siirtyi satamasta tilauslinja-autolla Tallinnan lentokentälle odottelemaan Ruotsista saapuvia osallistujia.

Matkalla Narvaan Viron keväistä maalaismaisemaa jouduttiin valitettavasti ihailemaan vain bussin ikkunoiden läpi, sillä tiukassa aikataulussa ei ollut tilaa ylimääräisille pysähdyksille. Viron ja Venäjän kuoppaisilla teillä keskinopeus ei päättä huimannut, vaikka virolaisessa linja-autonkuljettajassa oli havaittavissa selviä rallikuskin lahjoja.

Oman jännitysmomenttinsa tarjosivat myös rajanylitykset Viron ja Venäjän välillä. Menomatalla kaikki sujui onneksi suhteellisen ripeästi, ja ekskursionaiset pääsivät jatkamaan matkaansa noin tunnin synnäämisen jälkeen. Paluumatkalla onni ei ollut aivan yhtä suosiollinen, sillä tulliselvityksessä (johon luonnollisesti mahtuu ainoastaan yksi linja-autollinen matkustaja kerrallaan) oli ruuhkaa. Virolaisten leirikoululaisten paimentamisen jälkeen ATS:n ekskursionporukka oli ilmeisesti tullille helppo, koska itse muodollisuuksiin tuhlautui tällä kertaa vähemmän aikaa. Kokonaisuudessaan raja-alueen ylittämiseen meni paluumatkalla parisen tuntia.

Reaktorikannella

Kaikkien viivytysten ja pomppuisten pikku-teiden jälkeen ekskursionaiset saapuivat Leningradin ydinvoimalaitokselle parisen tuntia myöhässä. Tämä ei näyttänyt vaivaavan

venäläisiä isäntiämme, sillä vieraiden saapumista oli jaksanut odotella puolisen tusinaa laitoksen edustajaa.

Ennen varsinaista laitoskierrosta laitoksen tiedotuspäällikkö Sergei Averyanov, varapäällikö Juri Garousov ja laitoksella toimiva Venäjän turvallisuusviranomaisen paikallistarkastusyksikön päällikkö Gennadi Poltarakov esittelivät Leningradin voimalaitoksen nykytilaa. Kaikkien puheista heijastui selvästi tarve korostaa turvallisuusasioiden olevan etusijalla laitoksella. Turvallisuusparannusten toteuttamiseen tarvittavien varojen puute on laitoksella ilmeinen. Ulkomailta saatujen avustusten turvin toteutetut turvallisuusparannukset ja -järjestelmät tuntuvat ilmeisesti tiukan valvonnan ansiosta onnistuneen laitoksella paremmin kuin venäläisten omat hankeet. Esimerkiksi STUKin avustamana laitoksen ympäristöön rakennettu säteilyvalvontaverkko toimii moitteettomasti.

Vierailun varmasti odotetuksi osa oli tutustumiskierros laitoksen ykkösyksikössä. Kierroksen aikana osallistujat pääsivät tutustumaan yksikön valvomoon ja valtavaan, lähes puoli kilometriä pitkään turpiinihalliin, joka on yhteinen kahdelle vierekkäiselle reaktoriyksikölle. Turpiinihallissa normaalisti tuotettava sähköteho, n. 2 GWe, vastaa yli 20 % koko Suomen keskimääräisestä sähkönkulutuksesta.

Kierroksen viimeisenä pysähdyskäsena oli reaktorihalli, jossa ekskursiolaiset pääsivät kävelemään reaktorikannella, 10 metriä reaktorisydämen yläpuolella. RBMK-reaktorit on suunniteltu ladattavaksi käytön aikana, joten reaktorihallissa oli nähtävillä lataukseen käytettävä kone ja tuoreita polttoainenuppuja. Reaktorista vaihdetaan päivittäin kolme nippua. Yhden nipun vaihtaminen vie useita tunteja, joten latauskonetta käytetään lähes keskeytyksettä. Voimalan alueella on käytetyn polttoaineen varastointitila, johon reaktorirakennuksessa pari vuotta jäähtyneet polttoainenuppu sijoitetaan. Laitoksella suunnitellaan tulevaisuudessa siirryttävän kuivaan välivarastointiin.

Vierailu Leningradin ydinvoimaitoksella päättyi laitoksen tarjoamaan päivälliseen Sosnovy Borin kaupungissa. Päivällinen tarjottiin voimalan omistamassa uudessa urheilu- ja vapaa-ajankeskuksessa. Päivällisen yhteydessä matkan johtajana toiminut Pentti Varpasuo Fortumista luovutti isännille ATS:n viirin. Vastalahjana ATS sai kehystetyn kuvan voimalaitosalueesta iltämäärässä.



Ruotsin ATS:n edustajat Maarit Veho (vas.) ja Sverre Haukeland tarkkailemassa valvomon toimintaa.

Ekskursiolaiset majoittuvat laitoksen omistamassa leirikeskuksessa Kopanskojel-la, 15 kilometriä laitokselta.

Sukellusveneinstituutissa

Toisen ekskursiopäivän ohjelmana oli vierailu A.P. Alexandrov Research Institute of Technologyssä, lyhyesti NITissä. Kylmän sodan aikana NITI oli merkittävä sotilaallinen tutkimuskeskus, jossa nykyisen tiedon mukaan keskityttiin ydinsukellusveneissä käytettävien pienten painevesireaktorien tutkimukseen ja rakentamiseen.

Nykyisin NITI pyrkii saavuttamaan jalansijaa merkittävänä vakavien reaktorionnettomuuksin tutkimuskeskuksena Venäjällä. Lisäksi NITI osallistuu yhtenä tutkimuslaitoksena VVER-640 -reaktorin kehittämiseen. NITIn alueelle onkin tarkoitus rakentaa lähivuosina VVER-640 -koereaktori.

Osallistujat:

Kirsi Alm-Lytz	STUK
Sverre Haukeland	Westinghouse Atom
Erkki Jantunen	Platom
Päivi Maaranen	STUK
Jaakko Miettinen	VTT Energia
Jorma K. Miettinen	
Ronnie Olander	STUK
Heikki Purhonen	LTKK
Minna Rasimus	Westinhouse Atom
Kai Salminen	Fortum Nuclear Services
Jukka Sorjonen	Platom
Kim Söderling	STUK
Paavo Tammi	TKK
Heikki Tirkkonen	Suur-Svon Sähkö
Pentti Uuspää	VTT Energia
Pentti Varpasuo	Fortum Nuclear Services
Seppo Vatanen	UPM-Kymmene
Maarit Veho	Westinhouse Atom
Juhani Vihavainen	LTKK

Tämä hanke, kuten moni muukin hanke NITissä, on seisahduksissa, eikä sen toteutumisesta yleensä ole varmaa tietoa.

NITIn vierailun pääkohteena oli valtava KMS-koelaitteisto. KMS on VVER-640 -laitoksen täyspainesuojarakennuksen pienoismalli lineaarisessa mittakaavassa 1:3. Laitteistoa on tarkoitus käyttää tulevaisuudessa VVER-640:n passiivisten turvajärjestelmien testaamiseen ja kehittämiseen. Laitteiston on tarkoitus valmistua vuoden 2002 aikana.

Ekskursiolaiset kuuluivat aluksi Sosnovy Borin kaupungitalossa NITIn edustajien esitelmät VVER-640 -konseptista ja KMS-koelaitteesta. Tämän jälkeen siirryttiin linja-autolla NITIn alueella nelikertaisen piikkilanka-aidan (!) takana sijaitsevalle KMS:lle. Itse laitteisto oli jo noussut harjakorkeuteensa noin 30 metriin. NITIn kansainvälisten asioiden johtaja Jevgeny Filippov kertoi laitteiston koeponnistuksen tapahtuvan kesän aikana. Tämän jälkeen laitteistoon aletaan asentaa kokeissa tarvittavia instrumentointeja.

KMS oli koelaitteistoksi ällistyttävän suuri. Kiipeäminen ruostuneita portaita ylös alas laitteiston vierellä hirvitti varmasti monia osallistujia. KMS:n valtava koko selittyi sillä tutkittavilla ilmiöillä. Vakaviin reaktorionnettomuuksiin liittyviä suojarakennuksessa tapahtuvia passiivisia luonnonkiertovirtauksia ei välttämättä saada syntymään pienissä koelaitteistoissa.

KMS:n käynnin jälkeen NITI tarjosi ekskursiolaisille tukevan lounaan. Ruokailun aikana nostettujen maljojen maljapuheissa kiiteltiin vieraita ja isäntiä sekä toivottiin maiden välisen ydintekniikan alan yhteistyön jatkuvan hedelmällisenä. Luonnollisesti myös NITIn edustajille luovutettiin ATS:n viiri kiitoksena erinomaisesti sujuneesta vierailusta.

DI Kai Salminen,
Fortum Nuclear Service Oy,
ATS:n ekskursios sihteeri,
puh. 010 453 3093,
kai.salminen@fortum.com



Kansallinen ilmastostrategia ja suomalainen sähkö

Valtioneuvosto hyväksyi 15.3. kansallisen ilmastostrategian annettavaksi selontekona eduskuntaan. Eduskunta käsittelee ilmastostrategiaa parhaillaan. Ilmastostrategian avulla Suomi pyrkii toteuttamaan Kioton pöytäkirjan ja EU:n taakanjaon mukaiset tavoitteensa, joiden mukaan kasvihuonekaasujen päästöjen pitäisi vuosina 2008-2012 olla vuoden 1990 tasolla.

Ilmastostrategian sisältöä on esitelty laajalti lehdistössä. Strategia, sen taustaraportti ja tiivistelmä löytyvät KTM:n internet-sivuilta osoitteesta <http://www.vn.fi/ktm/3/ilmasto>. Käsittelem tässä kirjoituksessa ilmastostrategiaa pääosin Suomen sähkönhankinnan kannalta.

Ilmastostrategian taustaraportissa on arvioitu kasvihuonekaasujen päästöjen perusura (business as usual eli BAU-skenaario). Skenaario päättyy siihen, että nykykehityksellä Suomen päästöt lisääntyisivät noin 14-15 miljoonaa tonnia vuodessa hiilidioksidiekvivalenteiksi laskettuna vuoteen 2010 mennessä. Arvio sisältää jo tehdyt päätökset ohjauskeinoista ja arvion nykyisestä teknologisesta kehityksestä. Tämän verran päästötä ilmastostrategian avulla siis pyritään vähentämään.

Strategia on koottu siten, että eri ministeriöt ovat valmistelleet sektorikohtaiset arviot ja toimenpide-ehdotukset ja niistä on koottu ilmastostrategia ministerityöryhmässä. Alhaalta ylöspäin tehdyn työn tuloksena strategia sisältää valtavan määrän erilaisia toimia päästöjen vähentämiseksi lyhemmällä ja pidemmällä aikajänteellä. Varsinaista kustannustehokkuustarkastelua toimenpiteiden kesken ei ole yritettykään tehdä. Osa toimista on päästökehityksen kannalta melko merkityksellisiä.

Muita kasvihuonekaasuja tukevat toimet ovat lähinnä metaanipäästöjen vähentämistä kaatopaikoilla. Myös ne pyritään toteuttamaan kaikissa etenemisvaihtoehdoissa.

Edellä mainitut ovat toimia, joiden pohjaksi on jo aiemmin tehty laskelmia ja toimenpidesuunnitelmia. Ilmastostrategian keskeinen lopputulos on, että loput – noin puolet – päästövähennemistä saavutetaan toimilla, jotka kohdentuvat sähkön hankintaan. Sähkön hankinnan osalta on esitetty kaksi päävaihtoehtoa. Toinen perustuu ydinvoiman lisärakentamiseen ja toinen kivihiiilestä luopumiseen ja sen korvaamiseen maakaasulla. Strategian mukaan näistä vaihtoehdoista on muodostettavissa yksi toimintalinja.

Ilmastostrategian mukaan päätökset tehdään vaiheittain

Strategia on kirjoitettu niin, että sähkön hankintaan liittyviä energiapolitiittisia päätöksiä tehdään vaiheittain. Avainasemassa on ydinvoiman lisärakentamispäätös, joka tehdään ydinenergialain mukaisessa järjestyksessä. Mikäli lisäydinvoimaa voidaan rakentaa, muihin sähkön tuotantomuotoihin ei tarvitse puuttua energiapolitiittisella ohjauksella niin paljon kuin jos ydinvoimapäätös olisi kielteinen. Joka tapauksessa bioenergian kilpailukykyä pyritään entisestään kohtamaan.

Jos ydinvoimaa ei voitaisi rakentaa lisää, päästöjen vähenemä syntyisi siitä, että maakaasu korvaisi kivihiiilen sähkön ja osin lämmön tuotannossa. Koska tämä ei tapahdu markkinaehtoisesti, jouduttaisiin kivihii- len käytölle asettamaan merkittäviä kieltoja ja rajoituksia. Rajoitusten määrään vaikuttaisi päästökehitys, Kioton mekanismien käyttömahdollisuudet, maakaasumarkkinoiden tilanne ja sähkön tuonnin määrä. Valtioneuvosto varautuu tekemään tarvittavat päätökset, kun nämä asiat aikanaan selviävät.

Päätöksenteko on siis todellakin vaiheittainen eikä julkisen keskustelun ja uutisoinnin välittämästä mielikuvasta huolimatta

Toimet summaamalla päädytään siihen, että päästöt vähenevät seuraavasti:

Toimenpide:	vaikutus:
- uusiutuvan energian edistäminen	4-5 Mt CO ₂ -ekv.
- energian säästö	3-4 Mt CO ₂ -ekv.
- muita kasvihuonekaasuja tukevat toimet (erit. jätehuolto)	yli 1 Mt CO ₂ -ekv.
- sähkön hankinta	6-10 Mt CO ₂ -ekv.
Päästöjen vähentämistarve yhteensä	14 Mt CO ₂ -ekv.

Ilmastostrategian mukaan toteutetaan vuonna 1999 laadittu uusiutuvien energialähteiden edistämishjelma ja vuonna 2000 laadittu energiansäästöohjelma. Strategia lähtee siitä, että nämä toteutetaan joka tapauksessa.

mitään lopullista päätettä vielä ilmastostrategian hyväksymisen yhteydessä. Tämä koskee paitsi tuotantotapoja, myös ohjauskeinoja, kuten verotusta. Vaikka taustalaskelmissa on esitetty merkittäviäkin veronkorotuksia, niitä toteutetaan vain, mikäli se on mahdollista kilpailukyky yms. seikat huomioiden. Ilmastostrategia on siis sikäli viisaasti laadittu, että päätöksiä ei juuri tehdä ennen kuin se on välttämätöntä.

Ilmastostrategian vaikutus sähkön hankintarakenteeseen

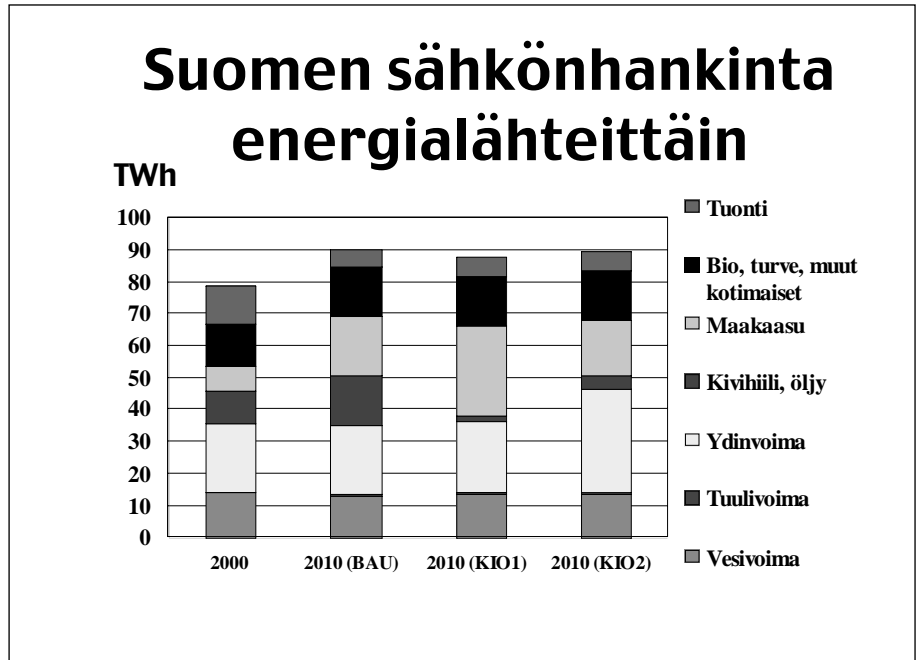
Valittu lähestymistapa luo muutospaineita erityisesti eri sähköntuotantomuotojen keskinäiselle asemalle ja kilpailukyvyille. Kuvassa 1 on esitetty arvio siitä, miten Suomen sähkönhankinta muuttuu ilmastostrategian perusvaihtoehtoilla vuosina 2010 verrattuna nykyiseen tilanteeseen ja taustaselvityksen mukaiseen perusuraan. Sähkön tuonti on kaikissa vaihtoehtoissa asetettu 6 TWh:ksi vuodessa. Tämä tekee vaihtoehtojen vertailun tasa-arvoiseksi, vaikka sähkömarkkinoilla eri hankintavaihtoehdot todennäköisesti johtaisivat myös keskenään erilaiseen sähkön nettotuontiin tai -vientiin. Sähkön tuonnin arvio perustuu siihen, että pohjoismaisilta sähkömarkkinoilta ei ole enää nettotuontia saatavilla vuoden 2010 tilanteessa.

Ydinvoiman lisärakentamispäätös avainasemassa

Koska sähkönhankinta on niin oleellinen osa kansallista ilmastostrategiaa, ydinvoiman lisärakentamispäätös ratkaisee myös hyvin suuren osan muista ilmastostrategian toimista. Ilmastostrategia ei ota kantaa ydinvoimaan, vaan se esitetään tasa-arvoisena vaihtoehtona niin sanotun maakaasuvaihtoehdon kanssa. Näille vaihtoehtoilta on tehty runsaasti kansantaloudellisia tarkasteluja, jotka osoittavat ydinvoiman olevan taloudellisesti maakaasuvaihtoehtoa parempi toimintalinja. Taulukossa 2 (sivulla 42) on esitetty yhteenveto näistä laskelmista.

Maakaasuvaihtoehto kustannuksiltaan ja varmuudeltaan riskialtis

Erityisesti Energia-alan keskusliitto Finergy ja Teollisuus ja työnantajat ovat tuoneet esille, että maamme teollisuuden kilpailukyvyn, energiahuollon varmuuden sekä kan-



Kuva 1. Suomen sähkönhankinta energialähteittäin vuonna 2010 ilmastostrategian päävaihtoehtoilla. BAU = perusura eli arvio nykykehityksestä, KIO1 = nk. maakaasuvaihtoehto ja KIO2 = nk. ydinvoimavaihtoehto.

santalouden ja kansalaisten kustannusten kannalta yksinomaan maakaasuun perustuva ratkaisu ei ole todellinen vaihtoehto. Kivihiilen kieltäminen merkitsisi hintareferenssin poistumista muilta polttoaineilta. Suomi olisi maakaasun osalta yhden kaasuvoimittajan varassa. Kun lisäksi on odotettavissa, että maailman kasvihuonekaasupäästöjä joudutaan edelleen tulevaisuudessa vähentämään, kohdistunee tämä vähentämistarve jatkossa maakaasuun. Mistä löytyisivät ne tahot, jotka uskaltaisivat investoida maakaasuun perustuvaan sähkön tuotantoon näissä oloissa?

Lisäksi maakaasuvaihtoehtoon kytkökseen oleva kivihiilen kieltäminen aiheuttaisi energia-alan LTT-konsultoinnilla teettämän arvon mukaan 22 miljardin markan tuoton aleneman, joka olisi valtion korvattava tuottajille.

Sähkönhankinnan vaihtoehdot ratkeavat vasta tulevaisuudessa

Koska päätöksentekoon vaadittavat oleelliset kysymykset ovat vielä auki, sähkönhankinnan tulevaisuus Suomessa on vielä hyvin avoin. Tilanne ei ole toimijoille mitenkään mieluinen, koska investointipäätöksiin liittyviä laskelmia on nykyoloissa vaikea tehdä.

Ainakin seuraavat reunaehdot tulevat muovaamaan suomalaista sähkönhankintaa merkittävästi, mikäli Suomi etenee ilmastostrategiansa määrätietoisesti kohti alenevia päästöjä:

- ydinvoiman lisärakentamiskysymys
- maakaasuverkon kehittyminen ja yhdistyminen eurooppalaiseen verkkoon
- Kioton pöytäkirjan kansainvälinen neuvottelutilanne ja ratifiointi EU:ssa
- Kioton mekanismien rooli ja käyttökelpoisuus Suomen ja suomalaisten toimijoiden kannalta
- muiden maiden sähköntuotannon kehitys erityisesti pohjoismaiden alueella
- päästökaikitys muilla sektoreilla
- bioenergian osalta metsäteollisuuden kehitys ja suhdanteet.

Nämä reunaehdot huomioiden kansallisen politiikkamme pyrkii ohjaamaan tuotantolämäämme ja kansalaisten kulutuskäyttäytymistä siten, että se olisi kansantaloutemme menestys ja päästökaikityksemme on kansainvälisten sopimustemme mukaista. Tehtävä ei ole helppo eikä ainakaan parane sillä, että yksityiskohtaisia päätöksiä tehdään etujassaan.

Taulukko 1. Ilmastostrategian aiheuttamat näkymät eri energiantuotantomuodoille ja energiankulutukselle.

Vaikutus primäärienergian kokonaiskulutukseen	Lähes kolmannes arvioidusta kasvusta leikkautuu pois, vuonna 2010 kulutus on 11 % suurempi kuin vuonna 1999
Vaikutus sähkön kulutukseen	Viidennes sähkön arvioidusta kasvusta leikkautuu, vuonna 2010 sähkön kulutus on 13 % suurempi kuin vuonna 1999
Ydinvoima	Strategia sisältää kaksi toimintalinjaa: lisäydinvoimalla ja ilman lisäydinvoimaa. Strategiassa esitetyt laskelmat osoittavat lisäydinvoiman edullisemmaksi vaihtoehdoksi kaikilla mittareilla. Ilmastostrategia ei ota kantaa ydinvoimaan, vaan siihen liittyvät päätökset tehdään ydinerгияlain mukaisessa järjestyksessä.
Kivihiili	Kivihiilen käyttöä pyritään rajoittamaan. Uusi kivihiileen perustuva lauhdutusvoima kiellettäisiin, samoin estettäisiin kivihiileen perustuva uusi yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto. Strategiassa varaudutaan kieltämään kivihiilen käyttö tarvittaessa kokonaan. Mikäli lisäydinvoimaa voidaan rakentaa, kivihiilen käyttö vähenee merkittävästi.
Maakaasu	Strategia suosii maakaasua. Maakaasun tulisi korvata hiilivoima, mikäli lisäydinvoimaa ei voida rakentaa. Uuden maakaasuputkityhteyden toteutumista selvitetään kaupalliselta pohjalta.
Turve	Turpeen kilpailukyvyistä yhdistetyssä tuotannossa pidetään huolta kuitenkin vaarantamatta metsähakkeen käytön kehittämistä. Turpeen käyttö säilyy määrällisesti nykyisellä tasolla.
Vesivoima	Uusiutuvien edistämishojelman mukaan pienvesivoiman (<10 MW) tuotantoa lisätään 1 TWh/a vuoteen 2010 mennessä verrattuna vuoteen 1995.
Bioenergia	Uusiutuvien energialähteiden edistämishojelman mukaan bioenergian käyttöä lisätään 2,3 Mtoe ja bioenergialla tuotetun sähkön määrä kasvaa 6,2 TWh/a, nämä molemmat vuoteen 1995 verrattuna. Merkittäviä lisäpanostuksia teknologian kehittämiseen. Verotuki säilytetään. Investointituen piiriin jotkut pienkäyttäjryhmit. Tukea energiapuun korjuulle ja metsähakkeen tuotantoketjulle.
Tuulivoima	Tuulivoimaa tuetaan investointituella ja verotuella. Vuonna 2010 Suomessa tavoitteena tuottaa tuulisähköä 1,1 TWh/a.
Aurinkovoima	Uusiutuvien edistämishojelman mukaan aurinkosähköä tuotetaan 0,05 TWh/a vuonna 2010.
Sähkön tuonti	Kaikissa vaihtoehdoissa 6 TWh/a Venäjältä, Pohjoismaisen sähkökaupan osalta Suomen nettotuonti ja nettovienti ovat nolla.

Taulukko 2. Sähkön hankinnan perusvaihtoehtojen taloudelliset vaikutukset. Vaihteluvälit tulevat eri energiaverovaihtoehdoista ja eri tutkimuslaitosten malleista.

Vaikutus	Kivihiilen korvaaminen maakaasulla, ei lisäydinvoimaa	Lisäydinvoimaan perustuva ratkaisu
Energian käyttäjien energiakustannusten kasvu	5,2 – 7,5 miljardia mk / vuosi	2,8 – 5,5 miljardia mk / vuosi
Bruttokansantuotteen alenema	0,5 – 0,6 %	0,2 – 0,4 %
Kotitalouksien kulutusmenojen alenema	3,9 - 5,0 miljardia mk / vuosi	2,1 - 3,7 miljardia mk / vuosi
Työllisyyden alenema	n. 8 000 henkilötyövuotta / vuosi	n. 6 000 henkilötyövuotta/vuosi
Valtiolle aiheutuva korvaamisveloite kivihiilen kiellosta	Vähintään 700-800 miljoonaa mk kertakorvauksena - energia-alan teettämän arvion mukaan 22 miljardia mk	ei korvausveloitetta valtiolle

Näiden lisäksi valtion rahoitus ja verotuki uusiutuvien energialähteiden tukemiseen, energiansäästöön ja asuinrakennusten lämmitystapakorjauksiin keskimäärin 1080 Mmk vuoteen 2010 asti (kasvu n. 400 Mmk/vuosi). Tämä toteutuisi molemmissa sähkönhankintavaihtoehdoissa, koska strategia lähtee siitä, että uusiutuvien energiamuotojen edistämistoimet ja energiansäästötoimet toteutetaan joka tapauksessa.

.....
Jukka Leskelä,
T&K koordinaattori,
Energia-alan Keskusliitto ry,
puh. 09 - 6861 6615,
jukka.leskela@finergy.fi



Pappia kyydissä

Valtioneuvoston periaatepäätös 21.12.2000 Posiva Oy:n hakemukseen Suomessa tuotetun käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen rakentamisesta toteaa seuraavaa: Suomen nykyisten ydinvoimalaitosten toiminnassa syntyvän käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen rakentaminen Eurajoen kunnan Olkiluotoon on yhteiskunnan kokonaisedun mukaista. Eduskunta lähetti päätöksen talousvaliokunnan valmisteltavaksi ja pyysi siitä myös lausuntoa ympäristövaliokunnalta. Talousvaliokunta antoi asiasta mietinnön 3.5.2001. Vaivaan lukijaa lainaamalla otteita talousvaliokunnan mietinnöstä. Mielestäni niiden lukeminen on vaivan arvoista.

Talousvaliokunta esittää, että periaatepäätös jää sellaisenaan voimaan. Lain mukaan Suomessa syntyneet ydinjätteet on käsiteltävä, varastoitava ja sijoitettava pysyväksi tarkoitettulla tavalla Suomeen. Muualla kuin Suomessa syntyneitä ydinjätteitä ei saa käsitellä, varastoida tai loppusijoittaa Suomessa. Talousvaliokunta pitää turvallisuuden kannalta ydinjätteen loppusijoitukseen tähtäävän prosessin jatkamista parempana kuin pitkäaikaista väli-varastointia, joka edellyttää jatkuvaa huoltoa ja valvontaa. Loppusijoitusratkaisun kehittämisessä peruskallioon Suomi on ensimmäisiä maita maailmassa. Prosessin jatkuminen keskeytyksittä on tärkeää, jolloin tiedoille ja menetelmille saattaa avautua vientimahdollisuuksia. Nykyisen tiedon mukaan turvallisin ja tarkoituksenmukaisin tapa on eristää käytetty ydinpolttoaine sijoittamalla se lopulliseksi tarkoitettulla tavalla syvälle kallioperään. Loppusijoituksen tarkoituksena on jätteen pysyvä ja lopullinen sijoittaminen. Tehdyt selvitykset osoittavat, että loppusijoitusalan avaaminen on mahdollista nykyisellä tekniikalla. Jos tulevaisuudessa tekniikka kehittyy niin, että käytetyn ydinpolttoaineen palauttaminen jälleenkäsiteltäväksi ja -käytettäväksi kannattaa taloudellisesti, valiokunnan käsityksen mukaan

palautuskustannukset maksaa se, joka haluaa hyödyntää palautuksen.

Eduskunta yhtyi talousvaliokunnan ehdotukseen ja vahvisti periaatepäätöksen 18.5.2001 äänin 159 puolesta, 3 vastaan.

Käytetyn ydinpolttoaineen PAPin syntymisen varmisti se, että ydinenergialakiin on selvästi kirjattu vaatimus huolehtia ydinjätteistä Suomessa. Tämä rajoitti mahdollisuuksia politikoida asialla. Argumentoinnin tuli perustua kolmeen kovaan t:hen – turvallisuuteen, tekniikkaan ja taloudellisuuteen – ynnä ympäristöystävällisyyteen. Puolihuolimattomien ja perustelemattomien heittojen viljely ei käynyt päinsä.

Käsittelyä odottaa toinenkin PAP-hakemus. Miltä kuulostaisi seuraava päätös: Valtioneuvoston periaatepäätös Teollisuuden Voima Oy:n hakemukseen Suomeen rakennettavasta uudesta ydinvoimalaitosyksiköstä toteaa, että uuden ydinvoimalaitosyksikön rakentaminen Suomeen on yhteiskunnan kokonaisedun mukaista. Talousvaliokunta voisi mietinnössään esittää, että periaatepäätös jää sellaisenaan voimaan, koska Suomessa on huolehdittava riittävästä sähkön tuottamisesta turvallisuudella, ympäristöystävällisellä ja taloudellisella tavalla. Sähkön tuontiin voi turvautua vain, jos se täydentää tilapäistä kotimaista tuotantovajausta ja jos tuotu sähkö täyttää samat turvallisuus- ja ympäristövaatimukset kuin kotimainen sähkö. Uuden ydinvoimalaitosyksikön rakentaminen on nykyistenkin yksiköiden turvallisen käytön kannalta suotavaa, sillä se varmistaa korkeatasoisen asiantuntemuksen säilymisen ja kehittymisen. Ydinvoiman käytössä Suomi on maailman johtavia maita Loviisan ja Olkiluodon laitosten käyttökokemusten perusteella. Nykyisen tiedon mukaan ydinvoima on turvallinen ja taloudellinen tapa tuottaa sähköä. Kehitteillä on uusiutuviin energialähteisiin samoin kuin fuusioon perustuvia sähkön tuotantomuotoja, mutta niiden laajamittainen kaupallinen hyödyntäminen on vielä vuosien päässä. Uuden ydinvoimalaitos-



yksikön rakentaminen ei estä näiden mahdollisuuksien tutkimista ja kehittämistä, ja ne voidaan tulevaisuudessa ottaa käyttöön. En panisi pahakseni, jos eduskunta yhtyisi talousvaliokunnan ehdotukseen ja vahvistaisi periaatepäätöksen selvin luvin.

Asiassa on yksi mutta. Ydinenergialaki ei velvoita tuottamaan sähköä turvallisuudella, ympäristöystävällisellä ja taloudellisella tavalla. Se ei sitä estäkään, mutta termiä yhteiskunnan kokonaisuus tulkitaan uuden ydinvoiman tapauksessa aivan toisin kuin ydinjätteen loppusijoituksen yhteydessä. Vaivaan lukijaa uusilla otteilla. “Meidän mielestämme ihmiset käyttävät aivan liikaa energiaa nykyään.” “Iso yksikkö toisi markkinoille kerralla paljon halpaa sähköä. Tämä vetäisi kerralla maton alta kotimaisen ja uuden energiatekniikan yrityksiltä. ... Kallis voimala jättäisi myös vähemmän rahaa sijoitettavaksi muuhun.” “Jo huoltovarmuuden vuoksi on perusteltua löytää keinoja kotimaisuusasteen kohoittamiseksi ja samalla sen perustamiseksi uusiutuviin energialähteisiin, joihin hajautettu tuotantomalli sopii sovellettavaksi erinomaisesti.” “Kun toimitaan yhteisillä pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla, on valtion tuettava tavalla tai toisella kotimaista tuulivoimatuotantoa.” “Pahimmillaan on pelättävissä, että jos Suomessa todella edetään rakentamisvaiheeseen, reaktiot maailmalla ovat samantyyppisiä kuin Bushin politiikkaa kohtaan. Suomea syytettäisiin äärimmäisestä itsekkyydestä ja yhteisen hyvän unohtamisesta. ... Suomi voisi eräänä maailman ympäristönsuojelun lippulaivana keskittyä oman ympäristöagendansa kehittämiseen ja toteuttamiseen.”

Nämä ovat siis vain otteita, ja lisää seuraava lähikuukausina. Oletko valmis? Tämä on kylmää kyytiä.

SUOMEN
ATOMITEKNILLINEN
SEURA —

ATOMTEKNISKA
SÄLLSKAPET
I FINLAND ry



Kannatusjäsenet:

ABB Power Oy
Fortum Oyj
Fintact Oy
Oy Helium Gas Research HGR Ltd
Kemira Oy, Energia
Mercantile-KSB Oy Ab
NAF Oy
Patria Finavitec Oy
Perusvoima Oy
Pohjolan Voima Oy
Posiva Oy
PRG-Tech Oy
Rados Technology Oy
Platom Oy
Saanio & Riekkola Oy
Siemens Osakeyhtiö
Soffco Oy Ab
Suomen Atomivakuutuspooli
Teollisuuden Voima Oy
VTT Energia
VTT Kemiantekniikka
VTT Valmistustekniikka
YIT-Huber Oy

ATS internetissä:

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