

ATS

YDINTEKNIikka

SUOMEN
ATOMITEKNILLINEN
SEURA -

ATOMTEKNISKA
SÄLLSKAPET
I FINLAND ry



1/99, vol. 28

Tässä numerossa:

Turvallisuutta on monenlaista	3
RESUMÉ: Various types of safety	4
ALWR-teknologiaohjelma tutkii uuden sukupolven ydinvoimaloita	5
Sydän sulaa	8
Rakenteellinen turvallisuustutkimus	11
FINNUS-ohjelma käynnistynyt	13
Toimintatavat ja turvallisuuskulttuuri	15
Ohjelmoitava automaatio	18
Uusi Euratomin tutkimusohjelma käynnistyy	21
Ydinturvallisuusyhteistyömme tulokset lähialueilla	24
Polttoainetutkimuksen haasteet	27
Brief Description of VVER-640	30
Kolumni: <i>Energiailmasto</i>	34
In Memoriam	35

ATS

1/1999, vol. 28

JULKAISIJA

Suomen Atomiteknillinen Seura –
Atomtekniska Sällskapet i Finland ry.

TOIMITUS

Päätoimittaja
DI Jorma Aurela
Fortum Power and Heat Oy
PL 23, 07901 Loviisa
p. (019) 550 3070
jorma.aurela@ivo.fi

Erikoistoimittaja
TkL 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

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.tvo.elisa.fi

Toimitussihteeri
Minna Rahkonen
Fancy Media Ky
Mannerheimintie 8, 9. krs.
00100 Helsinki
p. (09) 612 7464
fancymedia@clarinet.fi

JOHTOKUNTA

Puheenjohtaja
TkT Seppo Vuori
VTT Energia
PL 1604, 02044 VTT
p. (09) 456 5067
seppo.vuori@vtt.fi

Varapuheenjohtaja
FK Anneli Nikula
Energia-alan Keskusliitto ry.
PL 21, 00131 Helsinki
p. (09) 6861 6222
anneli.nikula@finergy.fi

FK Elina Martikka
Säteilyturvakeskus
PL 14, 00881 Helsinki
p. (09) 7598 8373
elina.martikka@stuk.fi

Rahastonhoitaja
TKL Juhani Vihavainen
Lappeenrannan Teknillinen
Korkeakoulu
PL 20, 53851 Lappeenranta
p. (05) 621 2781
juhani.vihavainen@lut.fi

DI Tapio Saarenpää
Teollisuuden Voima Oy
27160 Olkiluoto
p. (02) 8381 4312
tapio.saarenpaa@tvo.tvo.elisa.fi

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

DI Olli Nevander
Fortum Engineering Oy
01019 IVO
p. (09) 8561 2613
olli.nevander@ivo.fi

TOIMIHENKILÖT

Kansainväl. asioiden siht.
DI Jussi Palmu
Posiva Oy
Mikonkatu 15 A
p. (09) 2280 3750
jussi.palmu@posiva.fi

Ekskursios sihteeri
DI Herkko Plit
Fortum Engineering Oy
01019 IVO
p. (09) 8561 2644
herkko.plit@ivo.fi

UUODEN 1999 TEEMAT

1/99
Tutkimus ja turvallisuus

2/99
Ympäristövaikutusten
arviointi

3/99
Nuoret ja ydinvoima

4/99
Ekskursio Kiinaan

ILMOITUSHINNAT

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

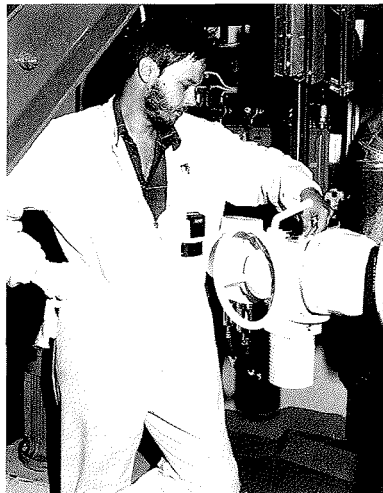
TOIMITUKSEN OSOITE

ATS Ydintekniikka
c/o Jorma Aurela
Fortum Power and Heat Oy
Loviisan voimalaitos
PL 23
07901 Loviisa
p. (019) 550 3070 (suora)
telefax (019) 550 4435

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



DI Jorma Aurela on Fortum Power and Heat Oy:n Loviisan voimalaitoksen turvallisuusinsinööri sekä ATS Ydintekniikka-lehden päätoimittaja.
Puh. 019 - 550 3070,
e-mail: jorma.aurela@ivo.fi

Turvallisuutta on monenlaista

Ydinvoiman käytön on oltava turvallista. Tästä olemme periaatteessa kaikki samaa mieltä, niin idässä kuin lännessä. Ongelma on, että itse käsite turvallisuus on epäselvä. Suomestakin löytyy erilaisia turvallisuuskäsitteitä, mutta voimmehan aina ottaa ydinenergiain ja lukea käsitteen sieltä. Silti heti kun jätämme maamme rajat, törmäämme mitä moninaisimpiin ristiriitoihin ydinvoiman turvallisuuskysymyksissä.

Niin, se suomalainen määritelmä? "Ydinenergian käytön on oltava turvallista eikä siitä saa aiheutua vahinkoa ihmisille, ympäristölle tai omaisuudelle". Tämä ydinenergiain § 6 on kuulemma tarun mukaan syntynyt aamuäreän ministerin toimesta, kun asian ympärillä oli jähkattu riittävän pitkään. Toinen esimerkki suomalaisesta ajattelusta on Loviisan voimalaitoksen laatupolitiikka, jossa todetaan: "Turvallisuus on edellytys yhteiskunnallisen hyväksyttävyyden säilyttämiseksi ja parantamiseksi".

Vaihdetaanpa maata, aluksi länteen. Siellä on turvallisia ydinvoimaloita, sillä sielläkään ei saa käyttää laitoksia, jotka eivät täytä suomalaistyyppisiä normeja. Mutta Ruotsissa ydinvoimalla ei ole yhteiskunnallisen hyväksyttävyyden kohdalla hurraamista. Maan pääministerin mukaan sivistysvaltio ei käytä ydinvoimaa. Entä sitten käynti idässä? Siellä on voimaloita, joita ei niin sanotuissa länsimaissa käytettäisi. STUK:n pääjohtajan kerrotaan sanoneen, että todennäköisyys vakavalle reaktorionnettomuudelle on joitakin prosentteja. Entä mitä venäläinen asiasta ajattelee? Entinen suurlähettiläs Juri Derjabin toteaa muistelmissaan, että "venäläisille oli Loviisan tapauksessa mahdollonta ymmärtää suomalaisia, ja heidän vaatimuksiaan voimalan turvallisuuden parantamisesta. Neuvostoliitossahan oli jo samanlaisia voimaloita hyvällä käyttökokeuksella". Derjabin jatkaa: "mutta sitten tuli Tshernobyl."

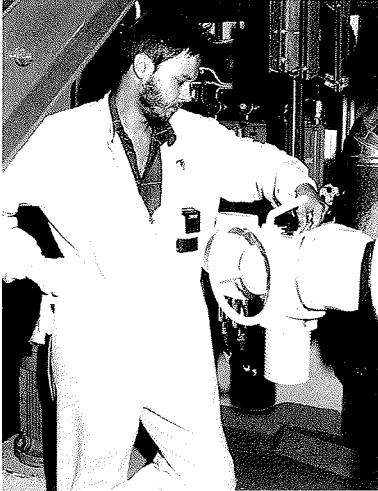
Idän voimalaitokset ovatkin ydinvoiman riski. Nykyisin on jo hyväksytty sekä idässä

että lännessä, että voimaloiden käyttöaika olisi minimoitava, mutta käytännössä tästä ei ole päästy eteenpäin. Ei kai valoja voi noin vain sammuttaa. Kuin huomaamatta on myös hyväksytty, että länsi osallistuu idän laitosten turvallisuuden parantamiseen lähes vastikkeetta. Ja rahojen jakaminenkin on osoittautunut mutkikkaaksi varsinkin EU:n piirissä. Silti on selvää, ettei esimerkiksi Tshernobylin voimalaitoksen nelosyksikön toista sarkofagia ukrainalaisilla voimavaroilla rakenneta. Kaikki hyvin?

Ei, sillä vielä tämäkään ei ulkomaailmalle riitä. Amerikkalais-suomalainen tutkija Tomas Ries on palkattu Maanpuolustuskorkeakouluun tutkimaan Suomen turvallisuuskysymyksiä, erityisesti ns. NATO-kysymystä. Ykkösuhkana Suomelle uudessa tutkimuksessaan Tomas Ries näkee tuhoisan ydinvoimalaonnettomuuden Venäjällä. Vasta sen jälkeen tulevat listalla mm. suuri humanitaarisen avun tarve Venäjällä tai itse maan hajoaminen entisen Jugoslavian tyyliin. Näin siis turvallisuuspolitiikan asiantuntija.

Entä tavallinen ihminen? Viime marraskuussa julkaistiin tutkimus ihmisten toiveista EU:n Pohjoisen ulottuvuuden osiksi. "Erittäin tärkeänä" suurin määrä kyselyn vastaajista nimesi "ydinvoiman turvallisuuden lisäämisen alueella". Itämeren puhdistaminen sentään voitti, jos mukaan lasketaan "melko tärkeät".

Molemmat edellä mainitut näkemykset ovat kaukana monen ydintekniikan ammattilaisen näkemyksistä. Silti jo alan tulevaisuuden vuoksi on tärkeää ymmärtää muun yhteiskunnan keskustelua alastamme. Ydinturvallisuus on merkittävä kysymys. Tuokaamme ydinturvallisuuden hyväksi tehtävää tutkimusta ja turvallisesti käyviä ydinlaitoksia. Näin me kaikki voimme hyvin ja maailma pelastuu, tai ainakin se pelastuminen edistyy.



Various types of safety

It must be safe to use nuclear power; there is a wide unanimity about this, both in the east and in the west. However, the concept of safety is not unambiguous. There are various safety concepts also in Finland, but we have the Nuclear Energy Act to refer to and a definition of the concept in this act. But as soon as we cross the Finnish border, we are faced with a variety of conflicts concerning nuclear safety.

The Finnish definition? "The use of nuclear energy must be safe and it may not cause any damage to people, environment or property". It is said that a grumpy minister specified this paragraph 6 of the Nuclear Energy Act in the morning, after sufficient shilly-shallying around this issue. Another example of the Finnish philosophy is the quality policy of the Loviisa Power Plant: "Safety is a prerequisite for keeping up and improving the social acceptance."

But let us first go to the west. They have safe nuclear power plants, as it is not allowed to operate plants that would not meet the requirements of the Finnish type of standards. However, in Sweden nuclear power is not particularly acceptable from the social viewpoint. According to the Swedish Prime Minister, a civilised nation does not use nuclear power. How about the east? They have power plants that would not be used in so called Western countries, and it is said that the high official of the Finnish Nuclear Safety Authority has reported the probability of a serious reactor accident to be a few per cent in these countries. But what is the Russian view? Former ambassador Juri Derjabin writes in his memoirs: "It was impossible for the Russians to understand the Finns and their requirements to improve safety of the Loviisa power plant, particularly as the Soviet Union already had similar power plants, and they had good operating experience" Mr Derjabin continues: "But then there was Chernobyl".

Power plants in the east constitute a risk factor. Today it has been accepted, both in

the east and in the west, that the service life of the power plants should be minimised, but in practice this is a dead end. People need electricity, and almost unnoticed we have accepted that the Western countries participate in the improvement of eastern plants' safety almost gratuitously. It has proved to be problematic to allocate financing for such projects, particularly in the European Union. Anyway, it is more than obvious that it is impossible to build the second sarcophagus for unit four of the Chernobyl power plant with the Ukrainian resources alone. Everything OK?

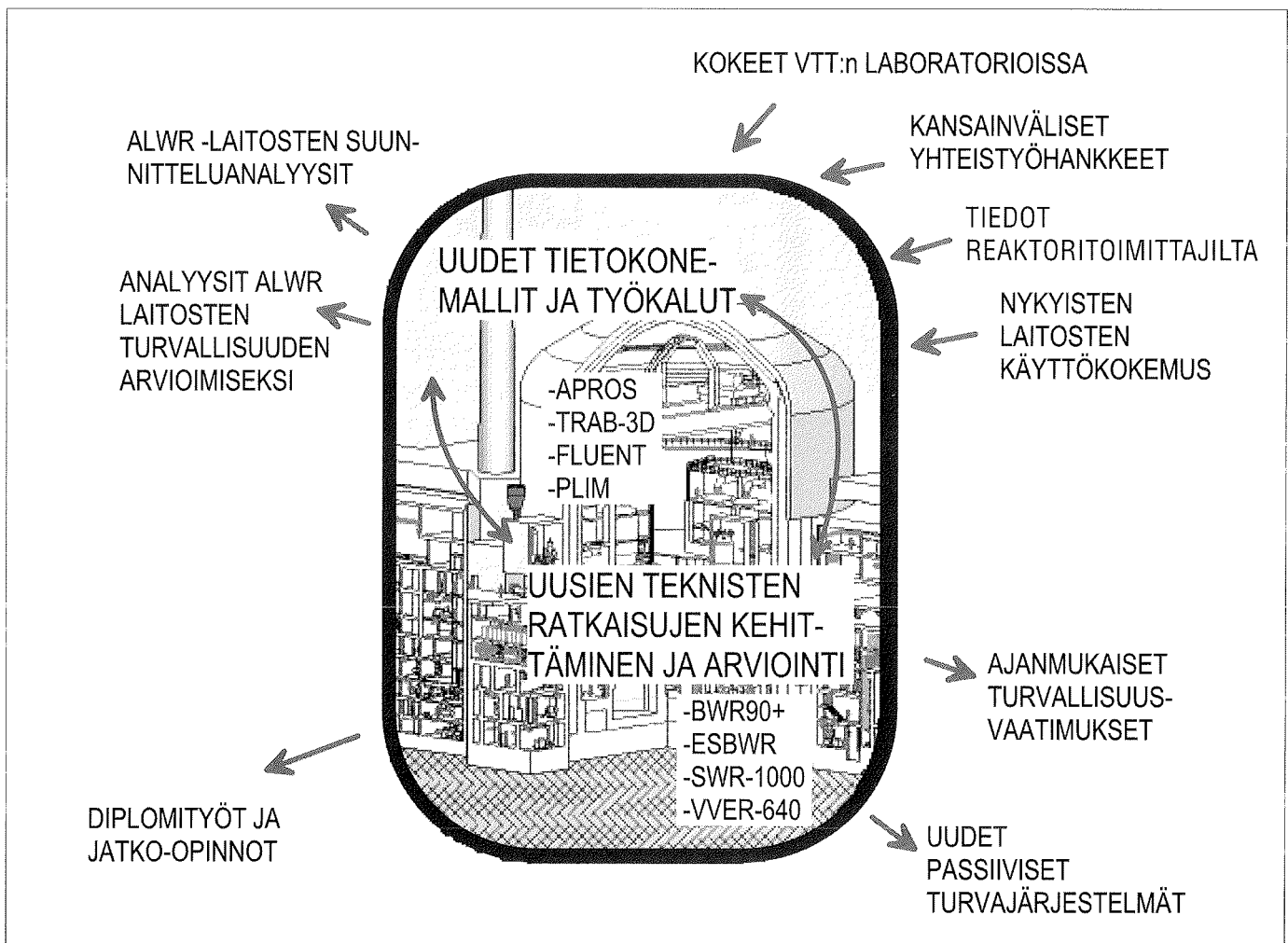
The answer is no, because even this is not enough for the outside world. Tomas Ries, an American-Finnish researcher, was employed by the National Defence College of Finland to study safety issues in Finland, particularly the so-called NATO issue. Tomas Ries considers a disastrous accident in a Russian nuclear power plant to be the primary threat for Finland. The huge need of humanitarian aid in Russia or the disruption of the country itself, in the same way as former Yugoslavia, are secondary threats in his list. Says an expert in safety policy.

How about ordinary people? In November 1998, results of a research into Finnish people's wishes as part of the European Union's Northern dimension were published. Most of the answers said that they see "improved safety of nuclear power in this area as a highly important question". Only cleaning of the Baltic Sea was even more important, if we consider the "fairly important" answers as well.

Both of the above views differ very much from those of the nuclear power experts. However, it is important to understand the discussion in the rest of the society, for the sake of the future of this industry. Nuclear safety is an important issue both nationally and internationally. It is worth supporting the research work which is done to advance nuclear safety and safe nuclear power plants. ■

ALWR-teknologiaohjelma tutkii uuden sukupolven ydinvoimaloita

VTT käynnisti vuoden 1998 alussa nelivuotisen "Uuden Sukupolven Ydinvoimalat (ALWR)" -teknologiaohjelman. Ohjelman tavoitteena on lisätä ALWR-laitosten tuntemusta niiden taloudellisen kilpailukyvn ja turvallisuuden arvioimiseksi sekä hankkia asiantuntemusta ja kehittää työkaluja mahdollisten uusien ydinvoimaloiden tehokkaaseen suunnitteluun ja rakentamiseen. Ohjelmaan osallistuvat VTT:n lisäksi voimayhtiöt FORTUM ja TVO, sekä TEKES, LTKK, TKK ja STUK. Ohjelma sisältää myös EU:n tutkimusohjelmien hankkeita. Vuoden 1998 aikana päättyivät VTT:n PACTEL-laitteistolla tehdyt passiiviset hätäjähdytyskokeet AP600-reaktorin CMT-tankin tutkimiseksi. Vuonna 1998 parannettiin myös VTT:n APROS-tietokoneohjelman lauhtumis- ja veden lämpötilakerrostumismalleja sekä käytettiin Fluent-virtauslaskentaohjelmaa GE:n ESBWR-laitoksen suojarakennuksen jäähdytysjärjestelmän analysointiin. Vuoden 1999 alussa käynnistyy uusia hankkeita ABB:n BWR-90+, Siemensin SWR-1000 sekä venäläiseen VVER-640-reaktorikonseptiin liittyen.

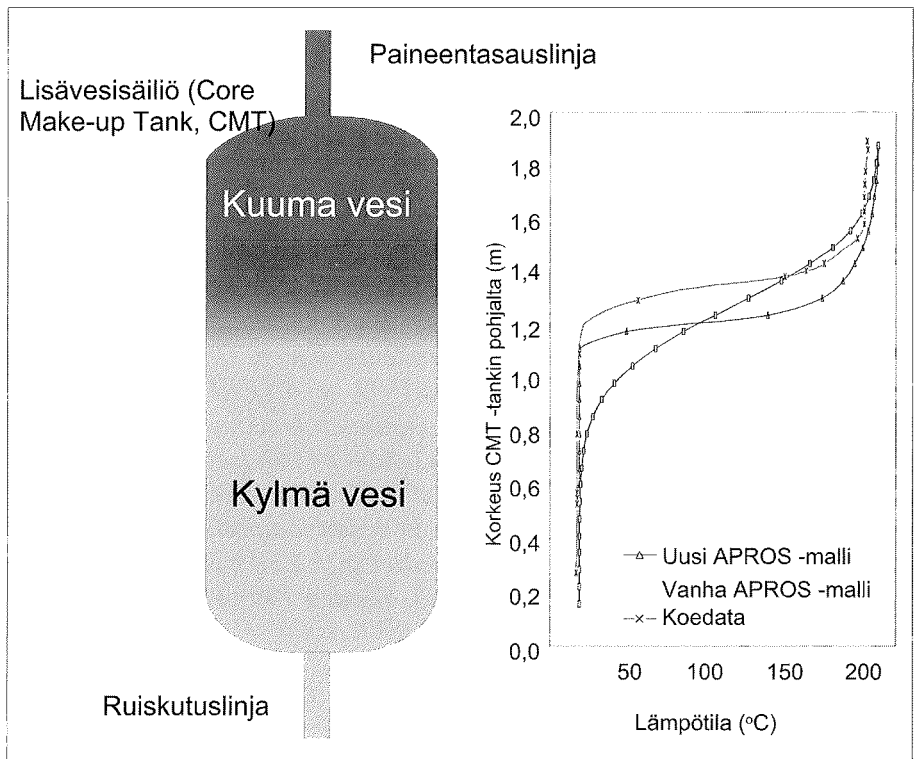


VTT:n ALWR-teknologiaohjelman rakenne.

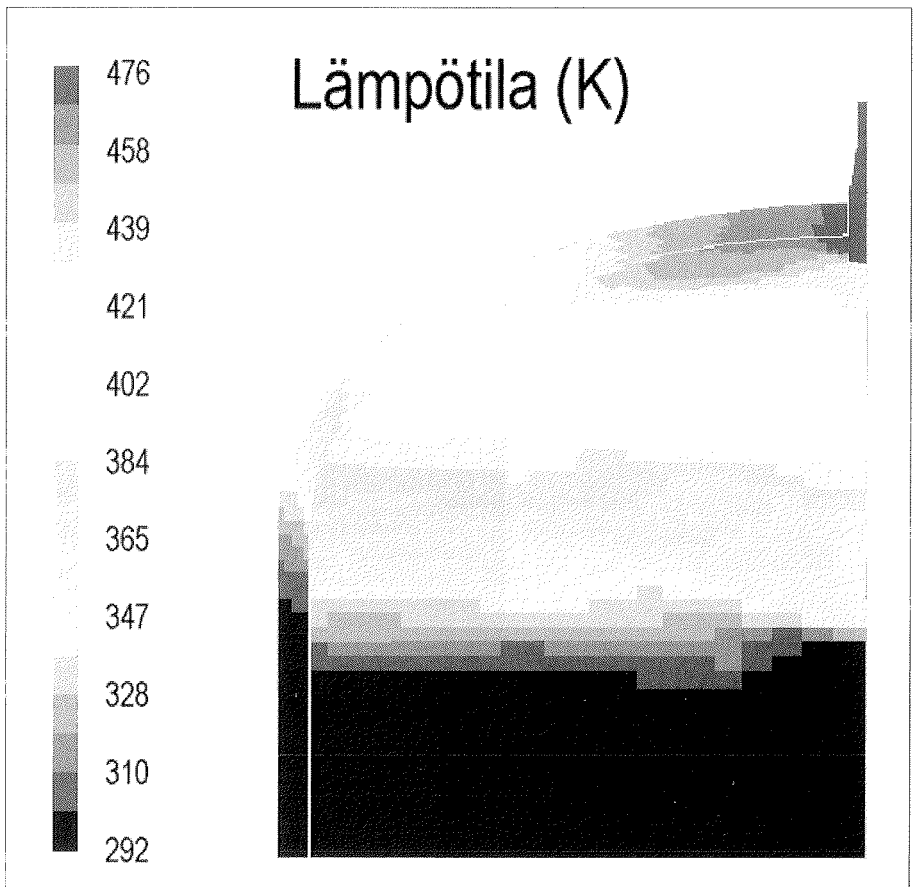
Ydinvoiman laajamittainen käyttö sähkön tuotannossa myös tulevaisuudessa edellyttää ydinvoimalaitosten turvallisuuden ja taloudellisuuden jatkuvaa kehittämistä. Kun ydinvoimaloiden rakentaminen ja käyttö on tiukasti säänneltyä, turvallisuuteen mahdollisesti vaikuttavien muutosten toteuttaminen vaatii erittäin perusteellista suunnittelua. Uuden tekniikan käyttöönotto edellyttää usein raskaita todentamismenetelyitä. Parannuksia onkin pitkään toteutettu pienin askelin lähinnä lisäämällä ja monipuolistamalla erilaisia teknisiä järjestelmiä. Taloudellisen kilpailukykyyn säilyttämiseksi tarvittava laitoskoko on tällöin kasvanut niin, että uusimpien jo kaupallistettujen (esim. GE:n ABWR) tai pian valmistuvien konseptien (esim. ranskalais-saksalaisen NPI:n EPR) yksikkökoko on 1400 - 1800 MWe.

Myös pienempi kilpailukykyinen yksikkökoko olisi kuitenkin toivottava mm. tarvittavan kertainvestoinnin pienentämiseksi ja laitoksen sähkömarkkinoille tuomista helpottamaan. Niinpä on ryhdytty kehittämään myös pienempikokoisia laitostyyppejä (600 - 1200 MWe), joissa kannattavuuteen ja samalla vähintään entisen tasoiseen turvallisuuteen pyritään yksinkertaistamalla laitosten rakennetta ja käyttöä. Käytettyjä keinoja ovat uusien materiaalien ja uuden teknologian (mm. tietokonepohjaiset suunnittelumenetelmät ja valvomot, ohjelmoitava automaatio) hyödyntämisen ohella entistä laajempi ns. luontaisten turvallisuusominaisuuksien ja passiivisten turvajärjestelmien käyttö. Saatavissa oleva rahoitus ja aikataulukusymykset eivät mahdollista demonstraatiolaitosten rakentamista, joten konseptien käytännön toimivuus ja turvallisuus on varmistettava laajalla erillisten kokeiden ja laskennallisten analyysien yhdistelmällä. Uusia perusteellisesti validoituja suunnittelu- ja turvallisuusanalyysimenetelmiä tarvitsevat niin laitosten toimittajat ja voimayhtiöt kuin myös turvallisuusviranomaiset.

Suomessa uuden sukupolven ydinvoimalaitosten tutkimus on tällä hetkellä perusteltua keskittää ns. Advanced Light Water Reactor (ALWR) -konsepteihin, jollaisia useat valmistajat ovat jo osin tuoneet markkinoille tai pyrkivät saamaan kaupalliseksi tuotteeksi lähimmän viiden vuoden aikana.



VTT:n APROS-ohjelmaan kehitetty lämpötilakerrostunismalli paransi merkittävästi voimakkaasti lämpötilakerrostuneen vesikerroksen lämpötilajakauman simuloinnin tarkkuutta.



CMT-tankin kuvaamiseen Fluent/UNS-ohjelmalla on rakennettu 2D-malli.

Tavoitteet monipuoliset – toteutus kansainvälinen

VTT:n ALWR-teknologiaohjelman tavoitteena on

* lisätä uuden sukupolven ydinvoimalaitosratkaisujen tuntemusta niiden taloudellisen kilpailukykyyn ja turvallisuuden jatkuvaksi arvioimiseksi,

* päästä vaikuttamaan uusien ydinvoimalaitosratkaisujen kehitystyöhön aikaisessa vaiheessa,

* hankkia asiantuntemusta ja kehittää työkaluja mahdollisten uusien ydinvoimaloiden tehokkaaseen suunnitteluun ja rakentamiseen, ja

* tukea opiskelijoiden ja tutkijoiden perus- ja jatko-opintoja, sekä edistää kokeempien asiantuntijoiden täydennyskoulutusta.

Tavoitteeseen päästään osallistumalla EU:n puiteohjelmien ALWR-hankeisiin ja reaktoritoimittajien kehitystyöhön yhdessä voimayhtiöiden kanssa. Kokeellista tutkimustietoa saadaan omista tutkimuksista VTT:n laboratorioissa sekä kansainvälisten yhteistyöhankkeiden kautta. Saatua tietoa käytetään uusien laitosratkaisujen arviointiin ja kehittämiseen, omien tietokoneohjelmien mallien parantamiseen sekä uusien, tarkempien analyysimenetelmien käyttöönottoon. Osa työstä toteutetaan tutkijoiden ja opiskelijoiden opinnäytteinä. Tuloksena ovat parannetut tietokoneohjelmat ja mallit, joita voidaan tarvittaessa käyttää uusien laitosratkaisujen analysointiin. Lisäksi hankkeet antavat tietoa uusien laitosten viranomaisvaatimusten kehittämistä var-
ten.

Tuloksia jo vuodelta 1998

Vuoden 1998 aikana saatiin päätökseen kaksi EU:n neljännen puiteohjelman tutkimushanketta. Näistä suuremmissa suoritettiin kokeita VTT:n PACTEL-koelaitteistolla Westinghousen AP600-reaktorin passiivisen lisävesijärjestelmän (Core Make-up Tank, CMT) toiminnan tutkimiseksi sekä analysoitiin valikoituja kokeita eri tietokoneohjelmilla. Kokeissa simuloitiin tankin toimintaa pienen vuodon jäähdytteen menestystilanteissa. Kokeissa CMT-tankki toimi suunnitellulla tavalla aina, kun CMT-tankkiin oli asennettu tankkiin tulevaa virtausta ohjaava suutin. Suuttimen poisto johti on-

gelmiin höyryn lauhtuessa voimakkaasti säiliössä. Kokeiden tietokoneanalyysit toivat esiin puutteita ohjelmien kyvyssä mallintaa veden lämpötilakerrostumista ja lauhtumista tankissa.

EU:n BWR Cluster -hankkeessa laskettiin Siemensin SWR-1000-kielutuslaitoksen hätälauhdutinta simuloivia NOKO-kokeita sekä GE:n SBWR-laitosta tutkivia PANDA-kokeita. Analyysien perusteella tehtiin parannuksia APROS-tietokoneohjelmaan. Parannukset liittyivät ohjelman lauhtumisen laskennassa käyttämiin lämmönsiirtokorrelaatioihin sekä malleihin, jotka huomioivat lauhtumattomien kaasujen vaikutukset lämmönsiirtoon lauhtumisessa.

PACTEL-laitteiston CMT-tankkikokeiden APROS-analyysien jälkeen aloitettiin uuden lämpötilakerrostumismallin kehitystyö. Mallilla pyrittiin eliminoimaan ohjelman numeerisesta laskentamenetelmästä aiheutuva lämpimän veden diffuusio kylmän veden alueille. Ohjelman uusi lämpötilakerrostumismalli huomioi kolmen rinnakkaisen laskentatilavuuden lämpötilan laskettaessa veden virtausta tilavuudessa, jossa vesi on voimakkaasti kerrostunutta. Ohjelman uusi lämpötilakerrostumismalli paransi merkittävästi laskentatarkkuutta simuloitaessa PACTEL-laitteistolla tehtyjä CMT-tankkiko-
keita.

Perinteisten ohjelmien lisäksi aloitettiin Fluent-virtauslaskentaohjelman käyttö GE:n ESBWR-laitoksen suojarakennuksen jäähdytysjärjestelmän lauhtuttimien (Passive Containment Cooling System, PCCS) ja PACTEL-laitteiston CMT-tankin analysointiin. Lämmönvaihtimen analyysissä simuloitiin lauhtumattomien kaasujen jakaamaa lämmönvaihtimen yläkolektorissa höyryn lauhtuessa sekä aerosolien depositiota lämmönvaihtimien yläkolektorin lauhtumattomien kaasujen jakauma ei ole tasainen, sillä osa lauhtumattomien kaasujen mukana kollektoriin virtaa-



Forsmark 3 edustaa kehittyneintä ruotsalaista ydinvoimalaitossuunnittelua.

vasta höyrystä lauhtuu kollektorissa. Lauhtuminen kollektorissa vaikuttaa lämmönvaihdinputkille virtaavan höyryn ilmapitoisuuteen ja täten lauhtuttimen tehojakautumaan. CMT-tankkianalyysissä keskityttiin eri turbulenssimallien vertailuun laskettaessa voimakkaasti kerrostuneen lämpimän veden käyttäytymistä.

Uusia hankkeita vuonna 1999

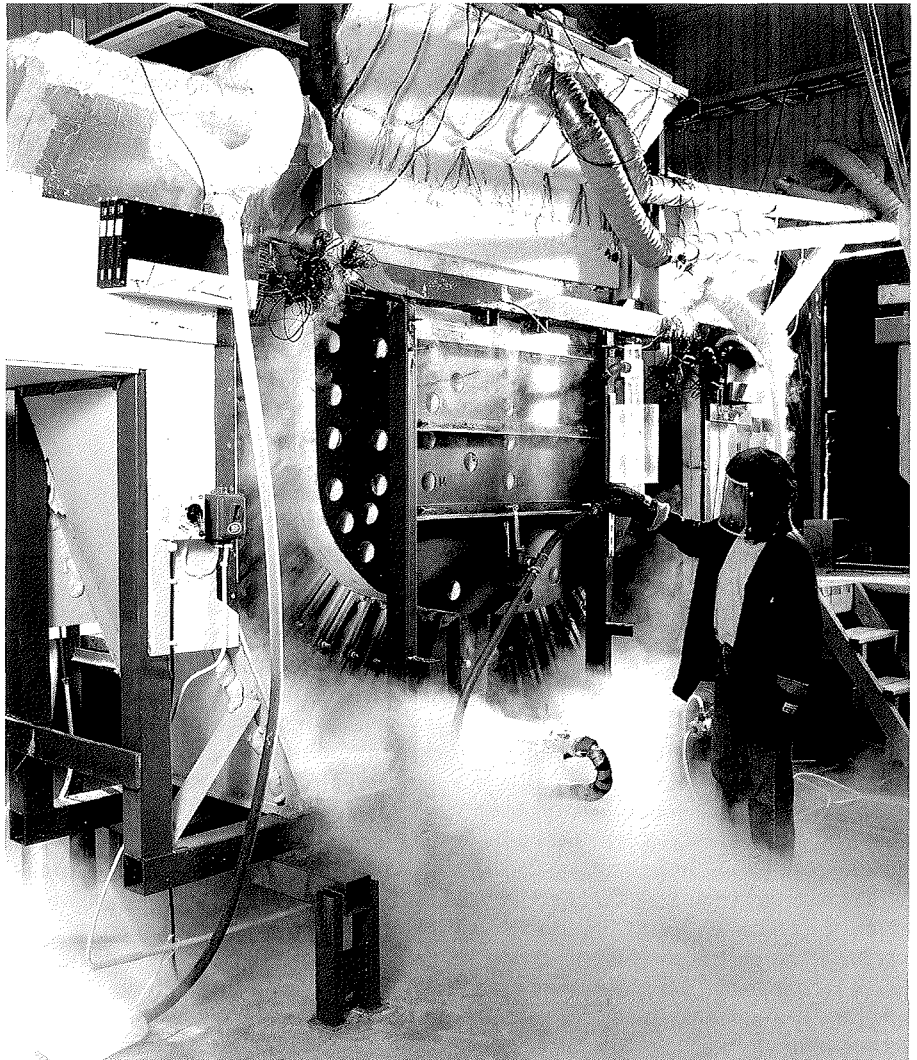
Vuonna 1999 käynnistyy uusia hankkeita ABB:n BWR-90+ ja Siemensin SWR-1000-laitoksiin liittyen. Lisäksi aloitetaan kokeet PACTEL-koelaitteistolla venäläisen VVER-640 reaktorin jälkilämmönpoistojärjestelmien tutkimiseksi sekä osallistutaan sveitsiläisellä PANDA-laitteistolla suoritettavaan kansainväliseen standardiprobleemaan. Vuonna 1999 aloitetaan myös aerosolien depositiokokeet yhden lämmönvaihdinputken koelaitteistolla.

Tekn.tri Jari Tuunanen
on VTT Energian
erikoistutkija ja ALWR-
ohjelman johtaja.
p. 09 - 456 5081,
jari.tuunanen@vtt.fi



Sydän sulaa

Ydinreaktorit suunnitellaan siten, ettei niiden sydän saa onnettomuustilanteissakaan vaurioitua saati sitten sulaa. Arviot osoittavat, että vaurioitumisriski on häviävän pieni. Vaatimukset edellyttävät tämän pienen riskin, eli vakavien onnettomuuksien huomioonottamista, ja niitä onkin viime vuosina tutkittu paljon. On selvítettävä, mitä sydämelle sulaessa tapahtuu. Minne joutuvat ytimien hajoamistuotteet ja mistä räjähdysaltis vety on peräisin? Minne sydän lopulta joutuu? Uhkaako Kiina-ilmiö?



Maria Helle ajaa tyypijäähdytettyä COPO-koetta.

Vakavien onnettomuuksien hallinnasta on viime vuosina puhuttu paljon, ja Suomen laitoksille on tehty ja tehdään mittavia muutostöitä suojarakennuksen eheyden varmistamiseksi. Olkiluodossa muutokset tehtiin vuosikymmenen vaihteessa. Loviisassa prosessi on ollut paljon pidempi: vedyn hallinnan hehkutulpat asennettiin 1980-luvun alussa ja suojakuoren ulkopinnan ruiskutukset asennettiin viime vuosikymmenen vaihteessa. Toimenpiteet sydänsulan pidättämiseksi paineastian sisälle ja vedyn hallinnan uudistaminen ovat laitoksen lähivuosien suurprojekteja.

Mittavien perusparannusten täytyy perustua vakavien onnettomuuksien ilmiöiden hyvään ymmärtämiseen. Tärkeintä on tunnistaa onnettomuudesta aiheutuvat uhat suojarakennuksen eheydelle ja ymmärtää niihin liittyvä fysiikka. Näiden taustana on, että ymmärretään miten sydämen jäänteet

käyttäytyvät sydämen tuhoutumisen jälkeen. Jo varhaisessa vaiheessa sulaneille sydämen jäänteille otettiin käyttöön nimitys corium, jolle suomalaisena vastineena käytämme termiä sydänsula. Tässä artikkelissa kerron tämän monimutkaisen aineen kemiasta ja fysiikasta sen eläessä elämäänsä ensin alkuperäisen reaktorisydämen alueella, sitten reaktoripaineastian pohjalla ja lopulta, jos paineastia hajoaa, reaktorirakennuksen lattialla tai sydänsieppareissa.

Sydän tuhoutuu

Jos reaktorin sammuttamisen jälkeen fissiotuotteiden jälkilämpöä ei saada kuljetettua pois, sydän alkaa kuumeta ja lämpötila nousee jäähdytteen häviämisen myötä jo ensimmäisen tunnin aikana paljon yli tuhannen asteen. Reaktorin ohjaamiseen käytetyt säätösauvat tai -elementit alkavat sulaa ja polt-

toainesauvojen suojakuoren sirkonium-metalli alkaa hapettua voimakkaasti. Kuumeneminen kiihtyy, syntyy suuria määriä vetykaasua ja lämpötila kohoaa niin, että itse polttoaine sulaa yli kahden tuhannen asteen kuumuudessa. Rakenne- ja polttoainekomponenttien välille syntyvät eutektiset seokset sulavat jo alemmissakin lämpötiloissa.

Sydänalueelle kehittyvä tilanne, jossa alosa tukkeutuu ylhäältä valuneesta ja jäähdytetyneestä materiaalista (ensinnä sulaneet eutektiset aineet, säätösauvamateriaalit ja suojakuorten hapettumaton sirkonium). Keskele alkaa muodostua sula allas, joka koostuu polttoaineen uraanidioksidista, sirkoniumdioksidista, metalleista ja ytimien hajoamisen tuloksina syntyneistä fissiotuotteista. Merkittäviä osa fissiotuotteista tosin poistuu jo kuumenemisvaiheessa: kaikki jalokaasut sekä pääosa helpohkosti haihtuvista jodista ja cesiumista.

Myöhemmin tämä lämpöä tuottava kuuma allas syö tiensä läpi reaktorisydämen rakenteista niin, että se valuu paineastian pohjalle. Onnettomuus etenee näin pitkälle vain kun jäähdytysvetä ei ollenkaan saada reaktoriin. Muodostuvilla sydänsula-altailla on paljon yhteisiä piirteitä riippumatta siitä, missä vaiheessa onnettomuutta ollaan ja missä altaat sijaitsevat.

Sydänsulan muodostama allas

Kuumeneva sydän sulaa altaaksi jo alkuperäisellä paikallaan, mutta vielä selvemmin tämä tapahtuu paineastian pohjalla. Jälkilämpö ja reunoilta tapahtuva jäähdytys saa sulamassan pyörimään. Syntyvä kiertovirtaus on sellainen, että eniten lämpöä pääsee siirtymään altaasta ylöspäin ja sivuille. Jos paineastia on onnettomuuden aikana veden ympäröimä, on mahdollista, että sula saadaan pysäytettyä pysyvästi astian pohjalle. Paksun paineastian seinät tosin sulavat sisäpuolelta, mutta jäljelle jäänyt teräskerros kestää, varsinkin jos reaktoripiirin paine ei ole hirveän suuri. Loviisan laitoksen vakavien onnettomuuksien hallinta perustuukin juuri tämän ilmiön käyttämiseen.

Kun on haluttu todella varmistua siitä, että sulamassa pysyy teräsastian sisällä, sydänsulan ominaisuuksia on tutkittu monilla koelaitteistoilla. Uusimmat kokeet oikeilla uraani-sirkonium-oksidiseoksilla on tehty OECD:n Rasplav-projektissa Kurtshatov-instituutissa Moskovassa. Koeohjelman johtaja, prof. Vladimir Asmolov on onnistunut keräämään projektiin Neuvostoliiton perua syntyneitä korkeiden lämpötilojen tekniikan osaamista niin, että vaativat kokeet lähes 2800°C lämpötilassa saadaan onnistumaan. Lämmönsiirto-ominaisuuksien lisäksi tavoitteena on selvittää, mitä kaikkia fysikaalisia ja kemiallisia vuorovaikutuksia voi konvektiivisessa sula-altaassa esiintyä. "Olemme onnistuneet kehittämään tarvittavat teknologiat, jotka tarvittiin 200 kg sydänsulalämpun paistamiseksi paineastian pohjan olosuhteissa", toteaa professori Asmolov. "Mittava määrä pienempiä materiaalikokeita tarvittiin isojen kokeiden suunnitteluun."

Oksidit ja metallit eivät liukene toisiinsa, joten sulamassaan syntyy luonnostaan kaksi kerrosta. Kerroksien tiheydet ovat melkein samat, mutta uraanisisältönsä vuoksi oksidikerros on sen verran raskaampaa, että me-

tallit kelluvat pinnalla. Fissiotuotteet ovat pääosin oksidikerroksessa, jota jälkilämpö kuumentaa voimakkaasti. Pienet fissiotuotemäärät vaikuttavat myös osaltaan oksidikerroksen kemiallisiin ominaisuuksiin.

Koska oksidipitoisen materiaalin sulamispiste on korkea, ympäröi oksidimassaa kiinteä kuorikerros. Kuoresta on se etu, että sulamassa ei pääse suoraan syövyttämään paineastiaterästä ja astia voi säilyä ehjänä. Kuoren paksuus vaihtelee eri suunnissa, ja yläkuoren päällä on sula metallikerros. Metallien sulamislämpötila on paljon matalampi. Jos metallikerros on sopivan paksuinen, siitä voi tulla paineastian kestämistä rajoittava tekijä, koska metallikerrosta ei ympäröi suojaava kuorikerros.

Outoja ominaisuuksia

Sydänsulalla ei ole yhtä tiettyä sulamispistettä. Seokselle voidaan määritellä alempi sulamislämpötila eli solidus-piste, jossa ensimmäiset komponentit alkavat sulaa kiinteässä massassa. Lämpötilaa nostettaessa saavutaan lopulta ylempään sulamispisteeseen eli liquidus-pisteeseen, jossa koko massa on sulanut. Näiden lämpötilojen väli voi olla monta sataa astetta. Seoksen fysiikka ja kemia riippuu tällä välillä voimakkaasti lämpötilasta. Esimerkiksi viskositeetti pienenee oleellisesti vasta lähellä liquidus-lämpötilaa. Itse sulamassan liukkaus onkin sitten viskositeetiltaan veden luokkaa.

Kokeiden tekemistä vaikeuttaa se, että vain harvat aineet kestävät niin korkeissa lämpötiloissa. Wolfram ja tantaali sulavat vasta yli kolmessa tuhannessa asteessa, mutta niitä ei saa päästää kosketuksiin metallisten sulakomponenttien kanssa, joihin ne liukenevat ahnaasti. Sirkoniumkarbidit olisivat yhteensopivampia, mutta niiden tekniikkaa ei vielä hallita riittävästi. Mittauksien tekeminen on myös vaatinut mittavaa kehitystyötä.

Rasplav-kokeissa yllätyksenä tuli, että kerrostumista tapahtuu oksidikerroksen sisälläkin. Riippuvuus koko oksidisysteemin kemiasta ja muiden aineiden pienistä pitoisuuksista on mutkikasta ja se on aiheuttanut paljon vaivaa tutkijoille. Yhdeksi osatekijäksi nousi uraani-sirkoniumbrikettien valmistusprosessista tullut hiiliepäpuhtaus. Kuten projektin OECD-yhteyshenkilö, prof. Bal Raj Sehgal Tukholman teknillisestä korkeakoulusta on todennut, kerrostumisilmiö

pyrkii tasoittamaan lämmönsiirtoprofiilia ja lienee peräti hyödyllinen pidätettäessä sulan eteneminen astian sisään. Kemiallisesti ei ole oikeilla materiaaleilla tehdyissä kokeissa havaittu uusia paineastiaa vaarantavia ilmiöitä.

Simulanttikokeet

Oikeilla aineilla tehtävät kokeet ovat kalliita ja hankalia. Usein kokeet tehdäänkin simuloivilla aineilla. Korkeisiin lämpötiloihin päästään helposti termittireaktioilla, jossa rautaoksidin ja alumiinimetallin jauheosot poltetaan. Tuloksena saadaan kaksikomponenttinen seos rautaa ja alumiinioksidia. Komponentit erottuvat reaktion jälkeen muutamassa sekunnissa ja kerrostuvat. Korkeasta lämpötilasta ja suosiostaan huolimatta kyseinen seos ei kuitenkaan kuvaa aineominaisuuksiltaan kovin hyvin oikeata sydänsulaa.

Yllättävää kyllä vedellä tehtävät kokeet ovat lämmönsiirron tutkimiseksi monessa mielessä sopivia. IVOssa, eli nykyisessä Fortumissa, on tehty kolme sarjaa kokeita COPO-laitteistolla, jossa sula-allasta kuvataan paineastian pohjalla kymmenen senttiä paksulla vesiviipaleella mittakaavassa 1:2. Vastaavia koelaitteita hieman eri tavalla mallinnettuina ovat ACOPO Kalifornian Santa Barbarassa ja BALI Ranskan Grenoblessa, joiden kanssa on tehty yhteistyössä rinnakkaiskokeita. Toisin kuin oikeilla aineilla tehtävissä kokeissa, näillä kaikilla päästään tilannetta hyvin kuvaavan Rayleigh'n luvun osalta oikeaan suuruusluokkaan. Uusimmissa COPO-kokeissa jäähdytys hoidetaan nestetypellä. Typen avulla saadaan muodostettua jääkuori, minkä vuoksi kokeet tehdään aivan toisessa päässä lämpötilaskaalaa. Luonnollisestikaan näillä kokeilla ei voida vastata kemiallisia ilmiöitä koskeviin kysymyksiin. Simulanttikokeita on tehty myös vaativilla sulasuoloilla.

Paineastia rikkoutuu

Useimmissa reaktoreissa ei onnettomuustilanteissa reaktoriastiaa voi jäähdyttää vedellä sulamassan pitämiseksi astian sisällä. Enemmän tai myöhemmin astia rikkoutuu ja sulamassa purkautuu reaktorirakennukseen. Paineastian rikkoutumistapa vaikuttaa seurauksiin, ja siihen edellä kuvattu tutkimus on osaltaan antanut vastauksia.



Prof. Asmolov tutkii Rasplav-kokeessa sulatettua sydänalaa.

Jos reaktorirakennuksessa on vettä lattialla, suihkuava kuuma massa joutuu tekemisiin veden kanssa. Nopea lämmönsiirto voi johtaa ns. höyryräjähdyksiin. Sulamassan veteen sekoittumisesta aiheutuvia höyryräjähdyksiä tutkittiin aiemmin paineastian pohjalla. Viime vuosina on sydänsulan ja veden sekoittumisprosessista sekä sulamassan fysiikasta opittu paljon uutta. Timo Okkosen Tukholmassa viime marraskuussa hyväksytyt väitöskirja toi uutta tietoa ilmiön peruslämmönsiirrosta ja oikeiden sydänsulainaineiden merkityksestä. "Teoria tuntuu hyvin lupaavalta ja odotamme niiden vahvistuvan sitä mukaa kun saamme vertailua varten lisää kokeellisia tuloksia", sanoo tekn. tri Okkonen. Tällaista vahvistusta on jo saatu EU:n tutkimuskeskuksessa Italian Isprassa tehtävistä FARO- ja KROTOS-kokeista. Näissä kokeissa yhtenä kolmesta johtavasta tutkijasta on ollut tekn. tri Ilpo Huhtiniemi. Tulokset osoittavat, että uraani-sirkonium-oksidiin sydänsula ei tarjoakaan niin otollisia olosuhteita höyryräjähdyksille kuin sulat metallit tai kuin simulanttikokeista oksideille voitiin päätellä. Tällä hetkellä ainakin FARO-kokeet ovat vaakaaludalla kustannusäästöjen vuoksi, mutta odotamme hyviä tuloksia höyryräjähdyksen osalta KROTOS-kokeista.

Sydänsula lattialla

Kun sydänsula leviää pitkin reaktorirakennuksen lattiaa, se reagoi voimakkaasti betonin kanssa. Betoni hajoaa kuumuuden vaikutuksesta, sen sisältämästä kalkkikivestä vapautuu sitoutunutta hiilidioksidia ja kidevesi höyrystyy. Pieni viskositeetti auttaa sydänsulaa leviämään tehokkaasti mikäli se on alunperin selvästi liquidus-lämpötilan yläpuolella. Tämä onkin todennäköistä, sillä paineastian sulaminen puhki viivästyy edellä kerrottujen ilmiöiden vuoksi ja sulamassa ylikuumentuu. Kun sulamassaan sekoittuu betonin sisältämiä kevyitä oksideja, oksidikerroksesta tulee kevyempi ja ne nousevat massan pinnalle.

Mikäli reaktorirakennuksen lattialla on vettä sydänsulan pudotessa, tapahtuu vesikerroksen paksuuden mukaan hyvinkin erilaisia vuorovaikutuksia veden ja sydänsulan välillä. Sydänsula fragmentoituu eli siitä tulee soramaista sen sammussa veteen. Jos reaktio johtaa höyryräjähdykseen sydänsula muuttuu oksidijauhoksi. Jos vettä ei ole kovin paksua kerrosta, sydänsula törmää lattiaan ja leviää helposti veden alla. Myöhempiin jäähdytettävyyteen nämä ilmiöt vaikuttavat paljon.

Sulamassan leviämisestä on tehty viime aikoina paljon kokeita erityisesti EU:n tutkimusohjelman alaisessa projektissa. Merkittäviä kokeita tehdään Saksassa Siempekkamp-yhtiön valimossa, jossa voidaan sulattaa tomiluokkaa oksidista massaa ja levittää sitä eri alustoille. Ranskan Cadarachessa tehdään myös melko ison mittakaavan VULCANO-kokeita. Tukholmassa prof. Sehgalin ryhmässä on tri Truc Nam Dinh kehittänyt omia hyvin suunniteltuja pienmittakaavaisia kokeita käyttäen teoriaa, joka pystyy selittämään leviämisen erittäin hyvin.

Jos sulamassa on levinnyt tasaisesti laajalle lattiapinnalle, on se mahdollista jäähdyttää ohuena kerroksena melko nopeasti kiinteäksi niin, että betonin syöpyminen loppuu. Monissa laitoksissa on reaktorin alapuolinen tila kuitenkin melko rajoitettu ja niissä betonin kuumeneminen ja syöpyminen voi jatkua pitkäänkin. Koska sulamalli laajenee sekä sivusuuntaan että alaspäin, kasvaa sen tilavuus koko ajan. Pahimmillaan sula voisi syödä eräissä laitoksissa tienensä peräti pohjalaatan läpi. Lopputuloksena olisi kuitenkin aina jokseenkin rajoitetun kokoinen sula-allas, jonka rajakoon määrää jälkilämmön kehityksen ja ympäristöön tapahtuvan lämmönsiirron tasapaino. Ulkopinnaltaan sitä aina rajoittaa paksu lasimainen kuorikerros, joka tehokkaasti estäisi radioaktiivisten aineiden leviämisen. Kiina-ilmiön osalta nyt tiedetään hyvin, että sulamassalla ei ole mitään erityistä ominaisuutta edetä yhä syvemmälle maaperään.

Päämääränä pidetään kuitenkin sydänsulan pitämistä kokonaisuudessaan reaktorirakennuksen sisällä. Useimmissa laitoksissa on mahdollista peittää koko sulamassa vedellä. Hyvin ohuena kerroksena massa jäähtyy helposti. Paksummille kerroksille on toteutettu USA:n sähkövoimateollisuuden tutkimuslaitoksen EPRIn koordinoimana laajoja kokeita MACE-koeohjelmassa Argonnes-

sa lähellä Chicagoa. Lopullista varmistusta ei ole tuloksista saatu, koska kokeet ovat osoittautuneet hyvin vaikeiksi. On kehitetty uusi innovaatio tuottaa suuri määrä lähes oikeaa sydänsulaa termiittireaktiolla. Lopullisia tuloksia koskein sydänsulan jäähdytettävyyttä ei kuitenkaan ole saatu.

Tämän vuoksi erityisesti uusille laitoskonsepteille suunnitellaan sydänsieppari-konsepteja. Ajatuksena näissä on saada kaappattua paineastiasta suihkuavat sydämenjäänteet niin, että ne ovat helposti jäähdytettävissä. Aihe on inspiroinut melkein kaikkia alan tutkijoita ja niinpä patentoituja ja patentoimattomia konsepteja löytyykin yli sata.

Kriittisyys

Kiehtova ja vaikeasti tutkittava kysymys on ollut, voivatko sydämen jäänteet päätyä josakin vaiheessa sellaiseen geometriaan, jossa ne voisivat muodostaa kriittisen kokonaisuuden. Kevytvesireaktoreissa jäänteet voivat tulla kriittiseksi vain, jos onnistutaan sekoittamaan oikeassa suhteessa sydänmateriaaleja veden kanssa. Kriittisyysuhan perustuu alunperin vedellä moderoituihin termisiin neutroneihin. Toisaalta hyötöreaktoreissa sulaneen sydämen kriittisyyteen varauduttiin: näille reaktoreille kehitetyt sydänsieppari-konseptit suunniteltiin nimenomaan levittämään sulan muotoa sellaiseksi, ettei kriittisyys muodostu vaaraksi.

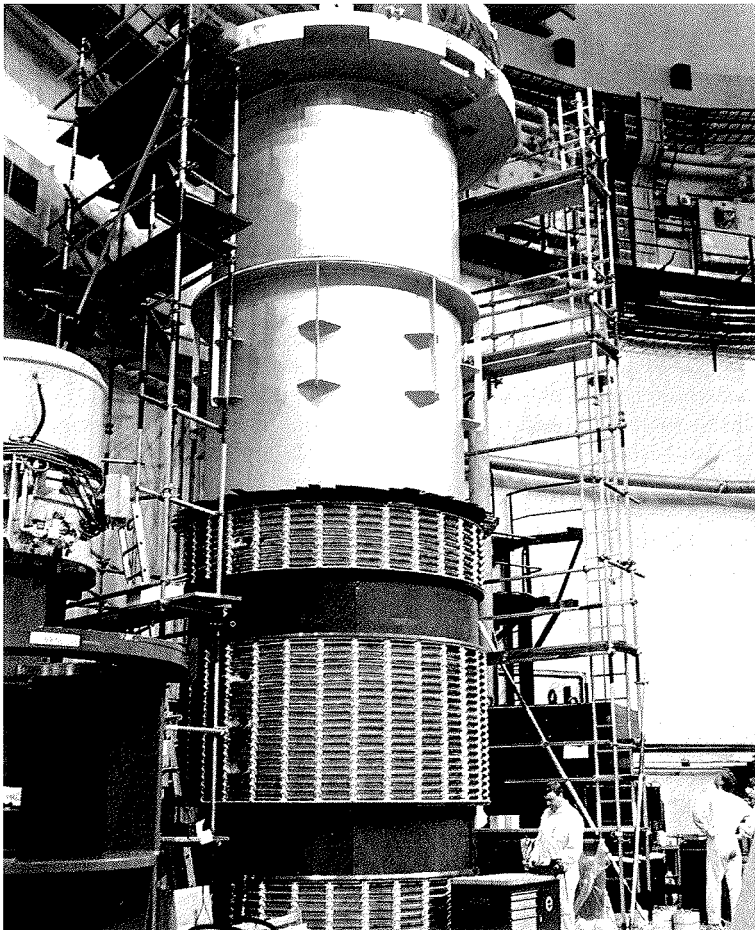
Elefantin jalat

Moni on nähnyt kuvia Tshernobylin elefantin jaloista. Reaktorin jäänteet valuivat reaktorirakennuksessa kuumana tahvana jähmettyen ajan mukana pötkylöiksi, joista saivat nimensä. "Sulan korkea viskositeetti oli seurausta siitä, kun reaktorin hehkuviin jäänteisiin heitettiin helikoptereista suuri määrä muita aineita kuten lyijyä, booria, savea", kertoo prof. Asmolov.

TkT Harri Tuomisto on
Fortum Engineering Oy:n
ydinturvallisuuden
tutkimuspäällikkö.
p. 09-8561 2464,
harri.tuomisto@ivo.fi



Rakenteellinen turvallisuustutkimus



Loviisan ydinvoimalaitosyksiköiden käyttöikä on ylittänyt jo 20 vuotta ja Olkiluodonkin yksiköt ovat lähes samanikäisiä. Suomessa noudatetun käyttöluvamenettelyn mukaan laitosyksiköillä ei ole ennalta määrättyä kiinteää käyttöikää, vaan käyttöluvut on myönnetty määräaikaisina. Käyttöluvan myöntämisen yhteydessä Säteilyturvakeskus tekee laitosyksikköjä koskevan laajan turvallisuusarvioinnin, johon se perustaa käyttöluvaa koskevan lausuntonsa kauppa- ja teollisuusministeriölle. Käyttöiän hallinnan perusvalmiudet ovat myös keskeisessä asemassa arvioitaessa mahdollisesti rakennettavien uusien ydinvoimalaitosten liittyviä suunnitteluperusteita. Rakennerratkaisut, käyttöolosuhteet ja tarkastusohjelmat on suunniteltava siten, että ikääntymisilmiöt voidaan joko eliminoida tai että niiden vaikutukset käyttöturvallisuudelle ovat mahdollisimman vähäiset.

Kuva Loviisa 1:sen hehkutuksesta vuonna 1996.

Valtioneuvosto myönsi huhtikuun 1998 alussa Imatran Voima Oy:n hakemuksen mukaisesti käyttöluvan Loviisan laitosyksiköille vuoden 2007 loppuun saakka. Teollisuuden Voima Oy:n hakemuksen mukaisesti valtioneuvosto myönsi Olkiluodon laitosyksiköille käyttöluvut vuoden 2018 loppuun asti. Kaikkien neljän yksikön osalta tulee alkaneen käyttö- ja turvallisuusarviointijakson aikana laitojen järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden ikääntymisilmiöiden tuntemusta kehittää siten, että laitosyksiköiden turvallisen käytön edellytyksiä voidaan luotettavasti arvioida.

Osallistumalla kansainvälisten yhteisöjen toimintaan voidaan muualla tehtävää käyttöiän hallintaan liittyvää selvitys- ja tutkimustyötä seurata sekä koota ulkomaisilta ydinvoimalaitoksilta kertyviä käyttökokemuksia. Saatavan tiedon avulla arvioidaan muualla tapahtuneiden vaurioiden merkitystä omien laitojen kannalta. Julkisrahoittei-

nen tutkimusohjelma sitä ohjaavine elimineen tarjoaa hyvän foorumin näiden aktiviteettien kansalliselle koordinoinnille.

Vuodesta 1989 lähtien on julkisrahoitteinen ydinenergiatutkimus organisoitu tutkimusohjelmien muotoon. Kauppa- ja teollisuusministeriön (KTM) rahoituksella käynnistettiin vuosikymmenen alussa kolme tutkimusohjelmaa, jotka selvittivät reaktoriturvallisuutta (RETU), rakenteellista turvallisuutta (RATU) ja ydinjätteiden loppusijoitusta (JYT). Rakenteellisen turvallisuuden tutkimus selvitti mm. ydinvoimalaitoksissa käytettyjen materiaalien ja turvallisuuden kannalta keskeisten osien kestävyyttä. Tutkimukset tähtäsivät paineastian ja putkistojen murtumisriskin pienentämiseen ja seisokkien vähentämiseen. RATU-projekteihin kuuluneet tutkimukset ovat menestyksellisesti suoritettu ja valtaosin raportoitu vuoden 1998 loppuun mennessä. Kansallinen ydinvoimalaitosten turvallisuustutkimus on tämän vuoden alussa käynnistyneessä FIN-

NUS - tutkimusohjelmassa yhdistetty yhdeksi ohjelmaksi jonka puitteissa myös rakenteellisen turvallisuuden tutkimus jatkuu. Uusi tutkimusohjelma sisältää kolme rakenteelliseen turvallisuuteen liittyvää projektia, joissa komponenttien ja materiaalien ikääntyminen on tarkastelujen lähtökohtana.

Laitosten ikääntymisilmiöt

Ydinvoimalaitosten järjestelmien mekaaniset rakenteet ja sähköiset laitteet altistuvat käyttöikänsä aikana useille erilaisille niiden ominaisuuksiin vaikuttaville tekijöille, kuten mm. lämpötila, kemiallinen ympäristö, säteily, valmistuksesta, käytöstä tai muista ulkoisista tekijöistä johtuvat jännitykset.

Projektin tavoitteena on luoda kokeellisella tutkimuksella pohja ikääntymisilmiöiden syvälliselle ymmärtämiselle, jolloin voidaan luotettavasti ennustaa ilmiöiden tulevaa kehitystä, arvioida niiden seurantaan,

eliminointiin ja korjaamiseen suunniteltuja toimenpiteitä sekä antaa lähtötiedot NDE-menetelmien pätevöinnille.

Tutkimusaiheet

- Rakennemateriaalien korroosiomekanismien ymmärtäminen ja mallintaminen erilaisissa paine- ja kiehutusvesireaktoreiden vesikemian olosuhteissa, erityisesti:
 - jännityskorroosio reaktoripaineastian sisäosissa, reaktoripaineastian yhteissä sekä putkistoissa
 - säteilyn kiihdyttämä jännityskorroosio reaktoripaineastian sisäosissa
 - reaktorijärjestelmän pinnoille muodostuvien oksidikalvojen ominaisuudet ja aktivoitumistuotteiden synty, kulkeutuminen ja kerääntyminen primääripiirissä.
- Reaktoripaineastiamateriaalin elvytyshehkuksen jälkeinen uudelleenaurastuminen.
- Rakennemateriaalien kestävyys syklisen väsyttävien kuormitusten alaisena;
- kuormitustavasta ja käyttöympäristöstä johdettavat nopeutuneet väsymisen mekanismit.

Lujuuden varmistaminen

Ikääntymisilmiöiden merkitystä voidaan analysoida lujuusteknisesti osoittamalla, että turvamarginaalit kysymykseen tulevien vaurioitumismekanismien suhteen säilyvät jäljellä olevan käyttöajan riittävinä. Niihin vaikuttavat materiaaliominaisuudet on voitava määrittää käyttäen myös todellista ainevahvuutta huomattavasti pienempiä koesauvoja. Erityisiä valmiuksia tarvitaan eri kuormitustilanteiden paikallisten vaikutusten kuten virtausilmiöiden ja iskujen sekä vaurioitumismekanismien mallinnukseen. Rakenteiden ja laitteiden lujuuden varmistamiseksi tehtävän tutkimuksen tavoitteena on kelpoistettujen kokeellisten ja laskennallisten valmiuksien luominen.

Tutkimusaiheet

Lujuuden varmistamista koskevat tutkimusaiheet ovat v. 1999 alustavasti seuraavat:

- Menetelmien kehittäminen erityisesti säteilytettyjen rakenneaineiden sitkeysomi-

naisuuksien määrittämiseksi pienten koesauvojen tulosten avulla

- murtumisitkeyden määrittäminen konventionaalista pienempien koesauvojen avulla

- murtumisitkeyden määrittäminen korrelaatioiden avulla muista suoraan murtumisitkeyttä mittaavista koesauvoista

- sitkeysominaisuuksien määrittäminen laskennallisesti vetokokeiden tuloksista.

- Rakenteisiin ja laitteisiin erilaisissa käyttö- ja onnettomuustilanteissa syntyvien kuormitusten mallintaminen käyttämällä uusia virtausteknisiä laskentamenetelmiä:

- erilämpötilaisten virtausten kohtaamisesta johtuvien kuormitusten määrittäminen uusimmilla virtausteknisillä menetelmillä

- onnettomuustilanteissa (ei sisällä nk. vakavia onnettomuuksia) esim. putki-iskuista, raskaiden kappaleiden käsittelystä, suihkuvoimista, räjähdyksistä jne. rakenteisiin aiheutuvat kuormitukset

- kuormitustietojen jälkikäsitely ja siirtäminen lujuusanalyysiohjelmiin.

- Ydinvoimalaitoksen rakenteiden ja rakenneaineiden murtumismekanismeja koskevat selvitykset

- paineastiateräksille määritettyjen murtumisitkeysarvojen ja särön pysähtymissitkeysarvojen välillä havaittuihin eroavuuksiin vaikuttavat tekijät

- teräsbetonirakenteiden murtumisen kuvaamiseen tarvittavien laskentamenetelmien soveltuvuuden arviointi

- komponenttien turvamarginaalien ja murtumisriskien arviointiin soveltuvien determinististen ja todennäköisyyspohjaisten menetelmien kehittäminen.

- Laskentaohjelmien laadunvarmistuksen ja kelpoistamisen kehittäminen sekä osallistuminen tarkoituksenmukaisiin kansainvälisiin vertailututkimuksiin yhteistyöverkoston puitteissa (AMES, NESC, EPERC, IAEA, OECD/CSNI).

Tarkastukset ja kunnonvalvonta

Rakenteiden ja laitteiden uusilla kehittyneillä tarkastustekniikoilla sekä käytönaikaisilla kunnonvalvontamenetelmillä parannetaan edellytyksiä laitosten turvallisen käytön jat-

kamiselle. Tarkastusmenetelmiä ja -tekniikoita sekä niiden pätevöintiä kehitetään ja yhdenmukaistetaan teollisuuden toimista EU:n piirissä yhteisesti sovittujen vaatimusten mukaisesti. Projektin tavoitteena on antaa viranomaistoimintaa tukevaa taustatietoa rikkomattomista tarkastusmenetelmistä ja niiden pätevöinnistä sekä kunnonvalvonnassa sovellettavista teknisistä ja hallinnollisista menetelmistä. Lisäksi ohjelmassa kehitetään luotettavia menetelmiä erityisesti vaativien kohteiden tarkastukseen.

Tutkimusaiheet

- Uusimpien rikkomattomien (NDE) tarkastusteknisten menetelmien ja tulosten analysointijärjestelmien kehittäminen

- mekanisoidun ultraäänitarkastuksen tarkastusohjeen kehitys huomioiden pätevöinnin vaatimukset

- valmiuksien luominen ultraäänitarkastusten simuloinnille ja mallinnukselle.

- NDE-järjestelmien pätevöintimenettelyjen arviointiin tarvittavien taustaselvitysten laadinta

- pätevöintimenettelyssä keskeisten muuttujien merkityksen arviointi ja yleisesti hyväksyttävien arvojen etsiminen niille

- pätevöintikappaleisiin tehtävien referenssivikojen toimivuuden ja valmistustekniikoiden selvittäminen ja kehittäminen

- pätevöintimenettelyjen kehityksen seuranta kansainvälisellä tasolla ENIQ:n (European Network for Inspection Qualification) kautta.

- Laitteiden ja rakenteiden kunnonvalvontaan liittyvien menetelmien kehittäminen

- rikkomattomien menetelmien käyttökel- poisuuden arviointi vanhenemisilmiöiden mittaamiseen osallistumalla AMES-työryhmään (European Action Group for Ageing Materials Evaluation and Studies).

- Betonirakenteiden kunnonvalvontaan soveltuvien tarkastus- ja arviointimenetelmien kehittäminen

- kartoitetaan suomalaisten laitosten rakenteissa esiintyvät ongelma-alueet ja selvitetään nykyisin käytössä olevia mittaus- ja monitorointimenetelmiä.

DI Pertti Aaltonen on
VTT Valmistustekniikan
ryhmäpäällikkö.
p. 09 - 456 6864,
pertti.aaltonen@vtt.fi



TkL Matti Sarkimo on
VTT Valmistustekniikan
erikoistutkija.
p. 09 - 456 4132,
matti.sarkimo@vtt.fi

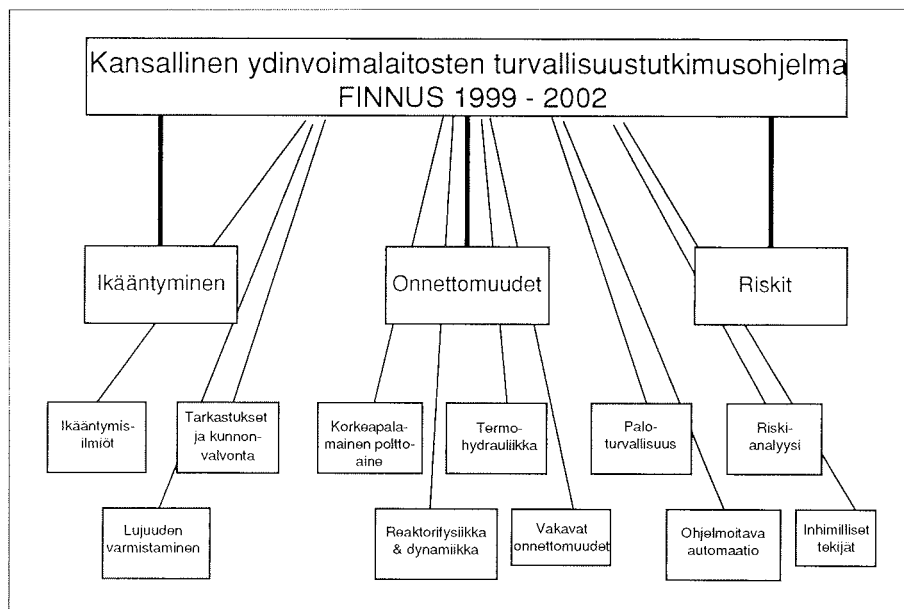


DI Heikki Keinänen on
VTT Valmistustekniikan
erikoistutkija.
p. 09 - 456 6431,
heikki.keinanen@vtt.fi



FINNUS-ohjelma käynnistynyt

Vuoden alusta VTT:llä käynnistyi nelivuotinen kansallinen ydinvoimalaitosten turvallisuustutkimusohjelma FINNUS. Se kattaa ydinvoimalaitosten rakenteellisen ja toiminnallisen turvallisuustutkimuksen. Tärkeimpinä teemoina ovat laitosten ikääntymisilmiöt, onnettomuusanalyysi ja riskien hallinnan menetelmät. Pääosin julkisrahoitteisella ohjelmalla varmistetaan riippumaton kansallinen osaaminen.



Ohjelman tutkimusteemat ja projektit.

Ydinvoimalaitosten julkinen turvallisuustutkimus on kuluvan vuoden alusta järjestetty laajaksi hankkeeksi, jossa yhdistyvät laitosten rakenteiden ja käytön turvallisuuskysymykset. FINNUS (1999-2002) ohjelman keskeisten tutkimusteemojen, ikääntymisen, onnettomuuksien ja riskien alalle on käynnistetty kaikkiaan 11 tutkimusprojektia. Ohjelma on jatkoa vastikään päättyneille nelivuotisille Reaktoriturvallisuuden (RETU) ja Rakenteellisen turvallisuuden (RATU2) ohjelmille. Uuteen ohjelmaan on yhdistetty myös edellisellä kaudella ohjelmien ulkopuolella ollut ohjelmoitavan automaation turvallisuustutkimus.

FINNUS-ohjelman keskeisenä tavoitteena on kehittää turvallisuustutkimukseen tarvittavia välineitä ja menettelyjä viranomaisten ja voimayhtiöiden käyttöön. Tutkimus tukee pyrkimystä ylläpitää ja edelleen kohottaa laitosten turvallisuutta kiinnittämällä huomion mahdollisiin ongelmiin ja etsimällä niihin ratkaisuja. Samalla pohjustetaan turvallisuuteen liittyvää päätöksentekoa. Viime aikoina yhä keskeisemmäksi tavoitteeksi on tullut uusien asiantuntijoiden koulutus tutkimukseen, viranomaistoimintaan ja voimayhtiöiden tarpeisiin. Jatkuvana tehtävänä on seurata maailmalla esiin nousseita turvallisuuskysymyksiä ja hankkia tietoa uusista teknologioista.

Kauppa- ja teollisuusministeriö on käynnistänyt ohjelman ja rahoittaa siitä suoraan noin kolmanneksen. VTT:n rahoitusosuus on suunnilleen saman suuruinen. Kolmas keskeinen rahoittaja on Säteilyturvakeskus STUK. Ydinvoimayhtiöt osallistuvat rahoitukseen pääasiassa maksamalla osuuksia suurten kansainvälisten hankkeiden maakohtaisista panoksista. Muutamille hankkeilla saadaan lisärahoitusta yhteisöpohjoisesta reaktoriturvallisuuden tutkimuksesta, OECD:n Halden-projektista ja eräistä EU:n tutkimusprojekteista. Ohjelman vuosittainen kokonaisrahoitus on noin 25 milj. mk/v ja työpanos noin 30 henkilötyövuotta/v.

Tutkimuksessa ovat mukana VTT:n toimintayksiköistä Energia, Valmistustekniikka, Kemianteekniikka, Automaatio ja Rakennustekniikka. Lisäksi Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu ja Fortum Engineering Oy osallistuvat ohjelmassa tehtäviin toimiin. VTT koordinoi ohjelmaa.

Tutkimuksen tieteellisistä tuloksista raportoidaan kansainvälisillä foorumeilla. Kotimaassa järjestetään seminaareja ja tuloksista laaditaan laajahkot raportit ohjelman puolivälissä ja lopussa. Ohjelman rahoittajia edustava johtoryhmä ja alan kotimaisista asiantuntijoista koostuvat tukiryhmät osallistuvat tutkimuksen vuotuisen suunnitelun ja seuraavat jatkuvasti tutkimuksen

edistymistä. Näiden ryhmien kautta hoidetaan myös suuri osa tulosten kotimaisesta tiedotuksesta. Ohjelman uudelleensuuntaamistarpeita arvioidaan vuosittain.

Painoa ikääntymisilmiöihin

Mekaanisten ja sähköisten komponenttien, polttoaineen ja rakenteiden ikääntyminen on yksi tärkeimmistä ydinvoimalaitoksen jäljellä olevaa käyttöikää rajoittavista tekijöistä. Kriittisten komponenttien, ikääntymismekanismien ja käyttöolosuhteiden muutosten tunnistaminen on keskeistä, jotta voidaan kehittää ennalta ehkäiseviä toimia ja korjausmenetelmiä, ja jotta jäljellä olevaa käyttöikää ylipäätään voidaan arvioida. Alan tutkimusprojektissa kehitetään menetelmiä ikääntyvien materiaalien ja komponenttien todellisten käyttöolosuhteiden mittaamiseksi. Tarkoituksena on myös mallintaa vesikemian ja säteilytyksen yhteydet ikääntymisilmiöihin ja erityisesti hehkutuksen jälkeisen uudelleensäteilytyksen vaikutukset paineastiamateriaaliin.

Laitteistojen ja rakenteiden vanhenemista ja vanhenemisen vaikutusta turvallisuusmarginaaleihin voidaan ennustaa laskennallisesti. Tarvittavat materiaaliominaisuudet tulee karakterisoida hyvin, käyttäen mieluummin mahdollisimman pieniä näytteitä. Materiaalin epähomogeenisuuksien

ja paikallisten kuormitusten mallintamiseen tarvitaan erityismenetelmiä. Lujuuden varmistamis-projektin päätavoitteina on kehittää olemassaolevia laskentamenetelmiä ja luoda uusia sekä varmistaa niiden soveltuvuus komponenttien jäljellä olevan eliniän ja onnettomuustilanteiden sietokyvyn arviointiin.

Käytönaikaisessa kunnonvalvonnassa sovelletaan ainetta rikkomattomia testausmenetelmiä (NDT) kriittisten komponenttien lujuuden varmistamiseen. Tekniikan kehittäminen, systemaattinen soveltaminen ja tehokkuuden arviointi ovat ensiarvoisen tärkeitä, jotta käytönaikaisen kunnonvalvonnan luotettavuutta voidaan parantaa. Aiheeseen tutkimusprojektissa tarkastusmenettelyjen ja tekniikoiden laadunvarmistus kehitetään vastaamaan parasta kansainvälistä tasoa. Projektissa arvioidaan on-line monitorointitekniikoiden soveltuvuus lujuuden varmistamisdatan keruuseen. Samoin arvioidaan ainetta rikkomattomien menetelmien kyky mitata materiaaliominaisuuksia. Erikoistapauksena kunnonvalvonnan menetelmiä kehitetään teräsbetonirakenteiden ikääntymisilmiöiden selvittämiseen.

Onnettomuuksien hallinta

Reaktoripolttoaineen tutkimus on viime aikoina suuntautunut polttoaineen ja suoja-kuoren lämpömekaanisen käyttäytymisen ja turvallisuuden arviointiin korkeilla poistopalamalla sekä normaalikäytössä että häiriöissä. Tutkimus keskittyy maamme laitosten polttoainetyyppeihin. Poistopalamiesten nostaminen parantaisi polttoainetaloutta ja pienentäisi ydinjättemäärää. Turvallisuusviranomaiset kautta maailman ovat kuitenkin ilmaisseet huolensa, että suunnittelun perustana olevien onnettomuuksien hyväksymiskriteerien tietopohja ei ole riittävä palaman nostolle. Tällä hetkellä on menossa laajoja kansainvälisiä kokeellisia hankkeita, joilla pyritään ilmiöiden parempaan tuntemukseen ja mallien kehittämiseen. Näihin hankkeisiin Suomi osallistuu kansallisessa ohjelmassamme.

VTT:lle on luotu tietokoneohjelmisto ja osaaminen laitostemme tarvitseman reaktorifysiikka- ja dynamiikkalaskennan tarpeisiin. Reaktorifysiikassa varmistetaan kattavan laskentaohjelmiston käytettävyys ydinmateriaalidatan kehittämiseen uusia

polttoainetyyppejä sekä häiriö- ja onnettomuusanalyysijä varten. Menetelmiä tarvitaan myös vuo-, annosnopeus- ja kriittisyysturvallisuustutkimuksiin. Reaktoridynamiikan laskentamenetelmät täydennetään ja kelpoistetaan niin, että ne soveltuvat monimutkaisiin reaktiivisuustransientteihin ja reaktorisydämen stabiilisuusanalyysiin. Dynamiikkaohjelmien termohydrauliikkamalleja parannetaan kehittämällä ja ottamalla käyttöön uusia menetelmiä. Tutkimusprojekti osallistuu myös VVER-laitosten kansainväliseen analyysivalmiuksien parantamishankkeeseen.

Termohydrauliikan ilmiöihin keskittyvässä projektissa pääpaino on koetoiminnassa, jonka tuloksia sitten myös käytetään turvallisuusanalyysin laskentamallien kelpoistukseen. Päätyökalu kokeissa on Lappeenrannassa sijaitseva PACTEL-laitteisto, joka mallintaa Loviisan laitoksen toimintaa. Erillisilmiökokeilla selvitetään mm. laitosten ikääntymisilmiöitä kuten putkistojen lämpöväsytystä.

Ydinvoimalaitostemme turvallisuutta vakavia reaktorionnettomuuksien varalta on parannettu merkittävästi viimeisen vuosikymmenen aikana laajoin tutkimuksin ja laitosmuutoksien avulla. Vakaviin onnettomuuksiin liittyvät laitostemme kannalta vielä muutamia merkittäviä epävarmuuksia, kuten vaurioituneen sydänmateriaalin jäädytettävyyden, paineastian puhkikulamistapa ja fissiotuotteiden käyttäytyminen erityisesti jäädytyspiirissä.

Alan projektissa keskitytään epävarmuuksien pienentämiseen ja paremman kuvan saamiseen paineastian pohjan käyttäytymisestä sen joutuessa kosketuksiin sydänsulan kanssa. Keskeisiä selvityskohtia ovat lisäksi rikkoutuneen sydämen jäädytettävyyden, fissiotuotejodin kemia ja suojarakennuksen termohydrauliset kuormitukset. Tietämystä sovelletaan kehitettäessä koulutusmenetelmää vakavien onnettomuuksien lieventämiseen.

Riskien hallinta

Ydinvoimalaitosten paloturvallisuustutkimuksessa selvitetään kokeellisesti savun ja lämmön vaikutusta elektroniikkaan ja ohjelmoitavaan logiikkaan, joka laitosuudistusten myötä on tulossa osaksi turvajärjestelmiä. Paloturvallisuusanalyysin soveltuvuu-

ta systemaattiseen riskianalyysiin kehitetään, lähtökohtana nykyisten laitosten kannalta keskeisimmät paloriskisiin liittyvät tahtumaketjut.

Ohjelmoitavan automaation turvallisuuden ja luotettavuuden arviointiin kehitetään ja testataan uusia kustannustehokkaita menetelmiä. Tutkimuksella tuetaan viranomaisia ja voimayhtiöitä niiden selvittäessä ohjelmoitavaan automaatioon perustuvien turvajärjestelmien luvituskysymyksiä. Työssä kehitetään sopivia luotettavuusanalyysimenetelmiä ja toisaalta tehdään menetelmien soveltuvuuskokeita.

Todennäköisyyspohjaisen turvallisuusanalyysin tutkimuksessa kehitetään riskitietoisesta päätöksenteon menetelmiä sekä helpotetaan näiden käyttöönottoa. Osa tutkimuksesta suuntautuu luvituskäytäntöjen sekä riskin tärkeyden ja epävarmuuden menetelmäkehitykseen. Tavoitteena on myös kouluttaa asiantuntijoita ydinvoiman riskianalyysiin.

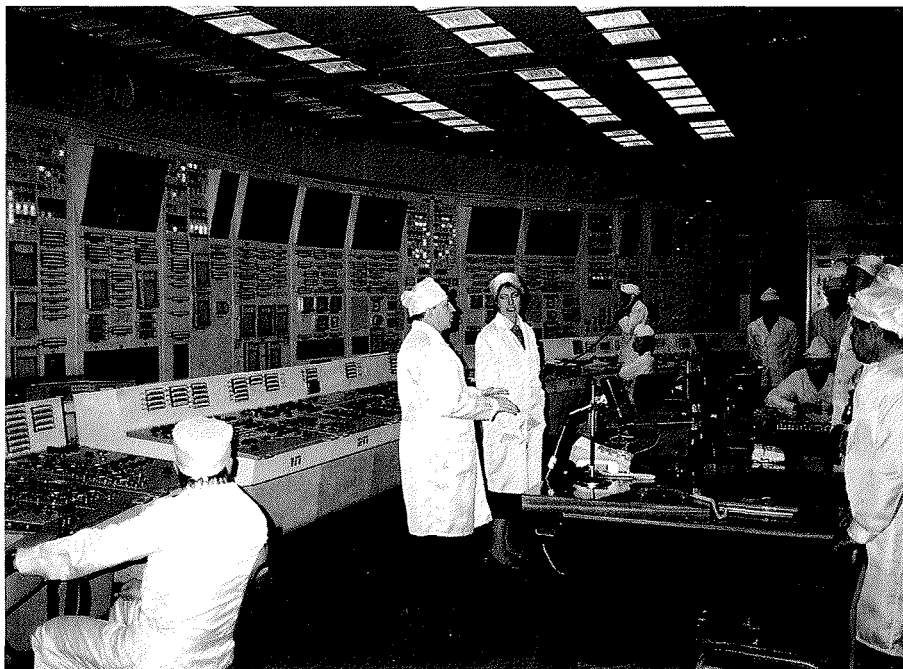
Valvomotyöskentelyn arviointiin on kehitetty analysointimenetelmä, jota on voitu soveltaa henkilökunnan simulaattorikoulutuksessa. Menetelmää kehitetään edelleen tähän tarkoitukseen. Todennäköisyyspohjaisen turvallisuusanalyysiin yhdistettynä menetelmää sovelletaan valvomoinformaation esitystavan arviointiin. Turvallisuuskulttuurin tutkimuksessa analysoidaan organisaation yhteistoimintaa ja työhön liittyviä julkilausumattomia normeja. Näin pyritään saamaan esiin turvallisuuskulttuurin konkreettisia piirteitä sellaisina kun ne esiintyvät henkilöstön käsityksissä ja yksilöiden päivittäisissä toimintatavoissa.

TKT Timo Vanttola
johtava tutkija
VTT Energiassa ja
FINNUS-ohjelman
johtaja.
p. 09 - 456 5020
timo.vanttola@vtt.fi



Toimintatavat ja turvallisuuskulttuuri - tutkimuksia ja kehityshankkeita ydinvoimalaitoksilla

Ydinvoimateollisuudessa on jo pitkään pidetty tärkeänä, että tuotantoprosessin teknisen kehittämisen ohella kiinnitetään huomiota myös niin sanottuihin inhimillisiin ja organisatorisiin tekijöihin. Sekä arkikäytäntö että varsinkin vakavat häiriö- ja onnettomuustapaukset ovat osoittaneet, että turvallisuuskriittisissä prosesseissa ja tietointensiivisissä tehtävissä ihmisen merkitys on olennainen - toiminnan luotettavuutta ei voi taata automaatiolla, ohjeistuksella eikä käyttöliittymillä. Toimintatavat ja turvallisuuskulttuuriaihetta tutkitaan FINNUS-ohjelman WOPS-projektissa.



Kuvassa Sosnovy Borin ykkösyksikön valvomo.

Työntekijöiden on usein vaikea hahmottaa perustehtävänsä eli sitä, mikä on työn turvallisuuden ja laadun kannalta oleellista ja mistä näin ollen on huolehdittava kaikissa olosuhteissa. Koska tuotantoon ja työhön kohdistuu sekä ulkoisia että sisäisiä muospaineita, työn perustehtävät muuttuvat. Tästä syystä myös käsitys kyseisen työn yleisistä ammattitaitovaatimuksista saattaa olla puutteellinen ja esimerkiksi työntekijöiden valinnassa tai koulutuksessa painotetaan ehkä osittain vääriä asioita.

Hyvin olennaista on, ettei ammattitaitoisesti suoritettu normaali työ muodostuisi rutiiniksi. Vaarana on välinpitämättömyys ja ylivarmuus työn päivittäisten vaatimusten suhteen sekä oppimisen estyminen - mitä opittavaa samana toistuvista tilanteista olisi. Yhtä tärkeää on huolehtia siitä, että mahdolliset hätätilanteet eivät lamaannuta työntekijöitä, vaan että heillä on kyky toimia yllättävissä tilanteissa ja vaikeissa olosuhteissa. Henkilöstön ammattitaitoon tulee sisältyä kyky ylläpitää ja ohjata omia henkisiä voi-

mavarojaan tilanteen kannalta tarkoituksenmukaisella tavalla.

Kyky omien voimavarojen osuvaan hallintaan edellyttää, että työntekijät ovat henkilökohtaisella tavalla oivaltaneet työnsä perustehtävän. Näkemys perustehtävästä ohjaa tulkintaa siitä, mitä on tehtävä eri toimintatilanteissa, ja saa aikaan vaatimuksia vastaavan energettisen panoksen. Tämä ei kuitenkaan riitä, vaan työntekijöiden täytyy saada kokea työyhteisössään, että heidän ammattitaitoaan arvostetaan nimenomaan heidän erityisen ja henkilökohtaisen työpanoksensa mielessä. Ilman tätä tunnetta ja sen herättämää innostusta vaativassa työssä saavutetaan vain riittävä taso, mutta ei kullekin työntekijälle mahdollista toimintatavaa eikä yrityksen kannalta huipputulosta.

Miten tutkia inhimillisiä tekijöitä osuvasti ja monipuolisesti?

Ydinvoiman tuotannon inhimillisiä tekijöitä on VTT Automaatiassa tutkittu psykologian, ydintekniikan sekä riski- ja luotetta-

vuusteorian ammattilaisten välisenä yhteistyönä. Suomessa on myös tarjoutunut erityisen hyvät mahdollisuudet käytännölliseen yhteistyöhön voimalaitosten kanssa niin, että tutkimuksia on voitu tehdä "kentällä" ja "kohteen" kanssa. Myös viranomaiset ovat tukeneet tätä suuntausta.

Edellä mainittujen tekijöiden vaatimuksesta ja niiden ansiosta VTT Automaation ihminen-konepsykologian tutkimustiimi on kehittänyt erityisen tutkimustavan. Se poikkeaa tavanomaisesta virheiden analysointiin keskittyvästä lähestymistavasta, jossa ajatuksena on verrata toiminnan onnistuneisuutta johonkin määrättyyn, ideaalisena pidettyyn toimenpidesarjaan tai lopputulokseen. Tällaisten vertailukriteerien määrittelyssä on sekä käytännöllisiä että myös toiminnan luonnetta koskeviin käsityksiin liittyviä ongelmia. On esimerkiksi erittäin vaikea löytää työn luonteen kannalta osuvia mutta samalla yksinkertaisia tuloskriteerejä pätevien ammattimiesten toiminnalle. Aloitteijat on helpompi erottaa. Toimijat itse pitävät virhekeskeisen lähestymistavan pohjalta tehtyjä analyysejä jälkiviivisina ja epäoikeudenmukaisina. Analytiikkohan tuntee koko tapahtumaketjun, kun toimija sen sijaan kohtaa tilanteen, jossa sekä histo-

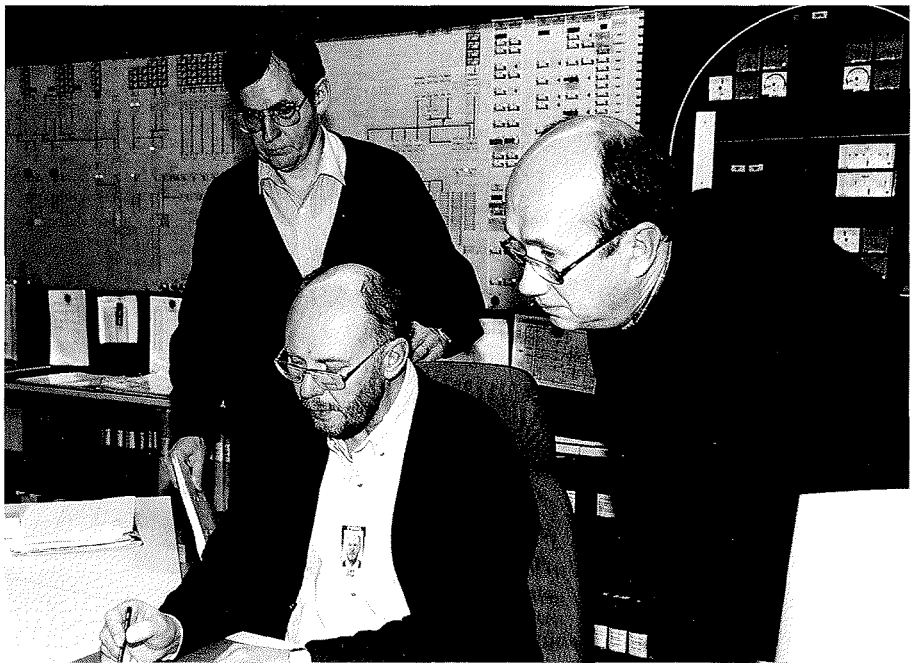
Inhimilliset tekijät tutkimusongelmana

ria että tulevaisuus ovat epäselviä. Lisäksi on ilmeistä, että lähestymistavassa joudutaan käyttämään yleisluontoisia arviointikriteereitä, joissa on mahdotonta ottaa huomioon tilannekohtaisia tekijöitä, joihin älykäs toiminta aina suuntautuu. Virhekeskeisessä lähestymistavassa toimintaympäristöä käsitellään erillisten vaikuttavien tekijöiden summana, ei toimijalle merkityksellisenä toimintatilanteena, jonka subjektiivinen mieli ohjaa toimintaa.

Virhekeskeisen lähestymistavan ongelmia on pyritty poistamaan tutkimustiimissä kehittyissä menetelmissä, joita selostetaan yksityiskohtaisemmin viitteissä (1-3). Niiden periaatteena on arvioida prosessien hallinnassa käytettyjen toimintatapojen ja työvälineiden tarkoituksenmukaisuutta. Arvioinnissa toiminta suhteutetaan hallittavan kohteen ja työn luonteen asettamiin toimintavaatimuksiin, joita eritellään psykologisesta näkökulmasta. Tällä tavalla määritellyt perustehtävät ilmaisevat siis sen, mitä tietynlaisessa toimintaympäristössä selviytyminen edellyttää.

Ihmisten toiminnan ymmärtämisen kannalta on olennaista, että sitä analysoidaan luonnollisissa toimintatilanteissa. Näiden ei tarvitse olla hätä- tai häiriötilanteita. Käytetyn menetelmän ansiosta henkilöstön toimintaa voidaan mielekkäästi tutkia yhtä hyvin normaaleissa prosessin hallintaa ja päätöksentekoa edellyttävissä tilanteissa kuin erikoistilanteissa. Viimeksi mainittuja ovat esimerkiksi raportoidut häiriö- tai onnettomuustilanteet. Varta vasten suunnitellut simulaattori- tai valmiusharjoitukset tarjoavat tarpeellisen mahdollisuuden harjoitella ja analysoida toimintaa vaativissa erikoistilanteissa, joita vain harvoin jos koskaan tulee todellisuudessa vastaan. Näissä tilanteissa tehtyjen tutkimusten erityispiirteenä on tietysti se, että tapahtumat itsessään noudattavat ennalta ajateltua kulkua, mikä nimenomaan ei vastaa aitoja toimintatilanteita. Niissähän prosessin hallinnan ydinongelma on juuri tapahtumien ainutkertaisuus.

Kehittämiemme tiedonhankinta- ja analyysimentelmien avulla erittelemme, miten toimijoiden reaalin vuorovaikutus ohjataan prosessiin ja kanssatoimijoihin etenee. Näin saadaan tietoa erilaisista tavoista ottaa huomioon käytännöllisten tilanteiden asettamat rajoitukset ja niiden tarjoamat mahdollisuudet. Analysien perusteella tehdään sitten johtopäätöksiä henkilöiden ja ti-



Turbiinin kuormanpudotus omakäytölle 12.11.1997. Koe liittyi Loviisan voimalaitoksen tehoerotukseen ja sitä ovat tässä seuraamassa (vasemmalta) käyttöryhmän päällikkö Markku Tiitinen, käyttöinsinööri Lars Illman ja STUK:in paikallistarkastaja Pauli Kopiloff.

mien toimintatavoista ja kuvataan niiden erityispiirteitä ajatellen juuri toiminnan tilannekohtaista tarkoituksenmukaisuutta. Menetelmän avulla saadaan myös tietoa toimintatapojen taustalla olevista käsityksistä koskien esimerkiksi ohjattavan prosessin ennustettavuutta, prosessista saatavan tiedon luonnetta, omia mahdollisuuksia ohjata prosessia jne. Toimintatapojen ja prosessia koskevien käsitysten selvittämisen merkitys on siinä, että työntekijät tulevat tietoisiksi toimintansa perusteista ja voivat niiden erittelyn ja arvioinnin tuloksena muuttaa ja kehittää konkreettisia toimintatapojaan. Oppimisen ja uusien työvälineiden ansiosta toimijat syventävät ja laajentavat toimintaympäristönsä käyttömahdollisuuksia ja kehittävät samalla työnsä perustehtävää.

Virheiden käsittelyä ei ole kuitenkaan syytä hylätä kokonaan. Virheet tuovat esiin toiminnan kannalta kriittisiä vaatimuksia ja niihin liittyy normaalia voimakkaampi tunnelaus. Etenkin viimeainitusta syytä tilanteet, joissa jokin meni pieleen, muistetaan ja niistä voidaan oppia (asiaa tarkastellaan Maaria Nuutisen meneillään olevassa työssä). Virheitä on kuitenkin pyrittävä tarkastelemaan aiempaa enemmän toimijan itsensä näkökulmasta, ei poikkeamina jostain objektiivisesta kriteeristä, jonka ulkopuolinen tarkkailija voi havaita. Tämän näkökulman etuna on paljon hienovaraisempi toiminnan tarkastelu. On selvää, että toimija itse huomaa pienetkin häiriöt toiminnan ohjauksessa ja normaalisti hän myös pyrkii

korjaamaan suoritustaan. Tämä kaikki tapahtuu ulkopuolisen tarkkailijan havaitsematta mitään erityistä. Kun tarkastellaan virheitä subjektiivisesta näkökulmasta, suuntaudutaan siihen, miten ihminen kokee hallitsevansa tilanteen ja missä hän taas kokee menettävänsä hallinnan. Nämä seikat eivät riipu vain tilanteen ehdoista, vaan yhtä lailla siitä, miten henkilö tulkitsee itsensä toiminnan subjektina. Näin päästään vähin erin pureutumaan ammatillisen itsetunnon ja identiteetin kysymyksiin, jotka vaikuttavat voimavarojen käyttömahdollisuuksiin eri tilanteissa. On huomionarvoista, että onnistumisista voitaisiin oppia vielä enemmän kuin virheistä, koska niihin liittyvä tunnelaus on myönteinen. Kulttuuriset tekijät vaikuttavat siihen, että onnistumisia ei useinkaan noteerata muiden taholta eikä itsekään muisteta. Tuloksena on, ettei oppimismahdollisuuksia hyödynnetä. Yhteisössä vallitsevaan kulttuuriin on siis myös syytä kiinnittää huomiota toimintaa tutkittaessa ja kehitettäessä (asiaa tarkastellaan Teemu Reimanin meneillään olevassa työssä).

Mitä juuri nyt tutkitaan?

Tähän astisissa tutkimuksissamme olemme analysoineet ydinvoimaoperaattoreiden työssään käyttämiä toimintatapoja. Olemme tarkastelleet erityisesti päätöksenteko- ja yhteistoimintatavan piirteitä, sekä kehittäneet arviointimenetelmän simulaattorikoulutuksen tueksi. Olemme myös arvioineet

valvomojärjestelmien tarkoituksenmukaisuutta (viite 4) sekä yhdessä riskianalyttikojen kanssa kehittäneet lähestymistavan, jonka avulla inhimillisiä tekijä voidaan ottaa osuvammin huomioon todennäköisyyspohjaisessa riskitarkastelussa (viite 5). Tarkoituksena on jatkaa näissä tutkimuksissa luotujen menetelmien kehittämistä tutkimushankkeessa, joka kohdistuu inhimillisiin tekijöihin palotilanteissa. Niissä operaattoreiden toimintaa vaikeuttaa erityisesti se, että heidän käytössään olevat informaatio- ja ohjausressurssit ovat merkittäväällä tavalla heikentyneet. Pyrimme riskianalyysin avulla arvioimaan näiden tekijöiden vaikutusta laitoksen kokonaisturvallisuuteen, mutta samalla samme informaatiopuutetilanteen kautta mahdollisuuden erittellä operaattoreiden havaitsemis- ja tulkintatapoja sekä niiden herkkyyttä informaation puutteille ja epävarmuudelle. Tutkimus suoritetaan simulaattorilla.

Vaativien tilanteiden kohtaaminen

Aiemmissa tutkimuksissamme olemme keskittyneet simulaattorilla tehtyihin häiriötilanteiden yhteistoiminnallista hallintaa koskeviin toimintatapa-analyysiin. Pelkäämään simulaattoritutkimus ei kuitenkaan saadakaan realistista kuvaa operaattorien normaalista työstä. Siinä painottuvat normaalityössä erittäin harvinaisia olevien tilanteiden eli häiriötilanteiden hallinta. Toiseksi niissä huomio on kiinnittynyt työn kognitiivisiin ja yhteistoiminnallisiin vaatimuksiin, kun taas emotionaaliset vaatimukset ovat jääneet vähemmälle huomiolle. Suorittamamme informaatiotuen validointitutkimuksen eräs keskeinen tulos oli, että vuoropäällikön johtamistavalla on melko vahva yhteys koko vuoron suoriutumiseen häiriötilanteessa (viite 4). Erityinen merkitys näyttäisi olevan sillä, että vuoropäällikkö saavuttaa ja säilyttää kokonaisuuden hallinnan. Lisäksi informaatiotuen käytön yhteydessä koettu stressin väheneminen voi olla yhteydessä juuri sen kontrollintunnetta tukevassa luonteessa.

Tutkimme voimavarojen hallintaan liittyvää monimutkaista problematiikkaa analysoimalla valvomon vuoropäällikköiden käsitteitä eri tyyppisistä vaativista tilanteista ja niistä selviämisen keinoista. Tavoitteena on myöhemmin tutkia vaativien tilanteiden hal-

lintaa todellisissa toimintatilanteissa, kuten esimerkiksi vuosihuoltoseisokin aikaisissa toimintatilanteissa valvomossa. Pyrimme tutkimuksen avulla syventämään käsitystä operaattoreiden ydintehtävästä, erityisesti huomioimalla työhön liitetyt tunteet. Entistä realistisemmän kuvan muodostaminen operaattorien työstä on katsottu tärkeäksi, kun suunnitellaan uusien operaattoreiden alkukoulutusta.

Turvallisuuskulttuurin muodostuminen käytännössä

Aiemmissa tutkimuksissa huomiomme on kiinnittynyt operaattoreiden toimintatavoissa ja käsityksissä oleviin eroihin. Kulttuuria koskeva tutkimus suuntautuu seikkoihin, jotka näyttävät olevan yhteisiä tiettyissä yhteisöissä toimiville ja työskenteleville ihmisille ja jotka juuri tämän piirteensä kautta vaikuttavat käytännön tilanteissa yksin tai ryhmässä tehtyihin ratkaisuihin. Tulemme tarkastelemaan turvallisuuskriittisissä organisaatioissa vallitsevaa kulttuuria, jota voidaan organisaatioiden erityisluonteen takia kutsua myös turvallisuuskulttuuriksi.

Tutkimuksen tavoitteena on kehittää turvallisuuskriittisten organisaatioiden kulttuurin tutkimukseen soveltuva käytännöllinen menetelmä, jolla on lähestymistapamme kanssa yhteensopiva teoreettinen perusta. Tutkimus etenee vaiheittain. Ensimmäisessä kehittelyvaiheessa, joka suoritetaan Säteilyturvakeskuksessa, tavoitteena on ensinnäkin selvittää turvallisuuskulttuurin käsitteellistä sisältöä sekä määrittellä sen mitattavia piirteitä. Tämän perusteella kehitetään turvallisuuskulttuuriin kohdistuva oma kyselylomake. Kehittelyssä käytetään hyväksi mm. erästä olemassaolevaa organisaatiokulttuuria- ja ilmapiiriä mittaavaa menetelmää. Sen avulla tutkimukseen osallistuvan organisaation henkilöstölle luodaan mahdollisuus peilata organisaatiotaan ja omia käsityksiään siitä. Kehittelyn tuloksena syntyyvää menetelmää kokeillaan ja kehitetään myöhemmin muissa turvallisuuskriittisissä organisaatioissa.

Lopuksi

VTT Automaation ihminen-konepsykologian tutkimustiimi ei ole erikoistunut ydinvoiman tuotantoon liittyviin inhimillisiin tekijöihin. Erilaisissa tietointensiivisissä ja

turvallisuuskriittisissä töissä, esimerkiksi lennonjohdossa tai leikkauspotilaan nukuttamisessa esiintyy vastaavanlaisia tutkimusongelmia, joita olemme myös yrittäneet ratkoa. Mahdollisuus analysoida vaatimuksiltaan erilaisia, mutta toisaalta keskeisiltä tavoitteiltaan vertailukelpoisia työtehtäviä parantaa olennaisella tavalla mahdollisuuk-siamme arvioida ja parantaa tutkimustulostemme osuvuutta ja yleistettävyyttä.

Viitteet

- (1) Norros, L. (1995). An orientation-based approach to expertise. In: Hoc J-M, Cacciabue, P.C. & Hollnagel, E. (Eds.) *Expertise and technology: Cognition and human-computer cooperation*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 141-164.
- (2) Hukki, K. & Norros, L. (1998). Subject-centered and systemic conceptualization as a tool of simulator training. *Le Travail Humain*, 313-331.
- (3) Norros, L. & Klemola, U.-M. (accepted for publication). *Methodological considerations in analyzing anaesthetists' habit of action*. *Ergonomics*.
- (4) Norros, L., Holmberg, J. Hukki, K. & Nuutinen, M. (1997). *Validation of NPP control room information aid*. Unpublished report.
- (5) Holmberg, J. Hukki, K. Norros, L. Pulkkinen, U. Pyy, P. (in press) *An integrated approach to human reliability analysis*. *Decision Analytic dynamic reliability model*. *Reliability Engineering and System Safety*.

Phd Leena Norros on
VTT Automaation
erikoistutkija.
p. 09 - 456 6551,
leena.norros@vtt.fi



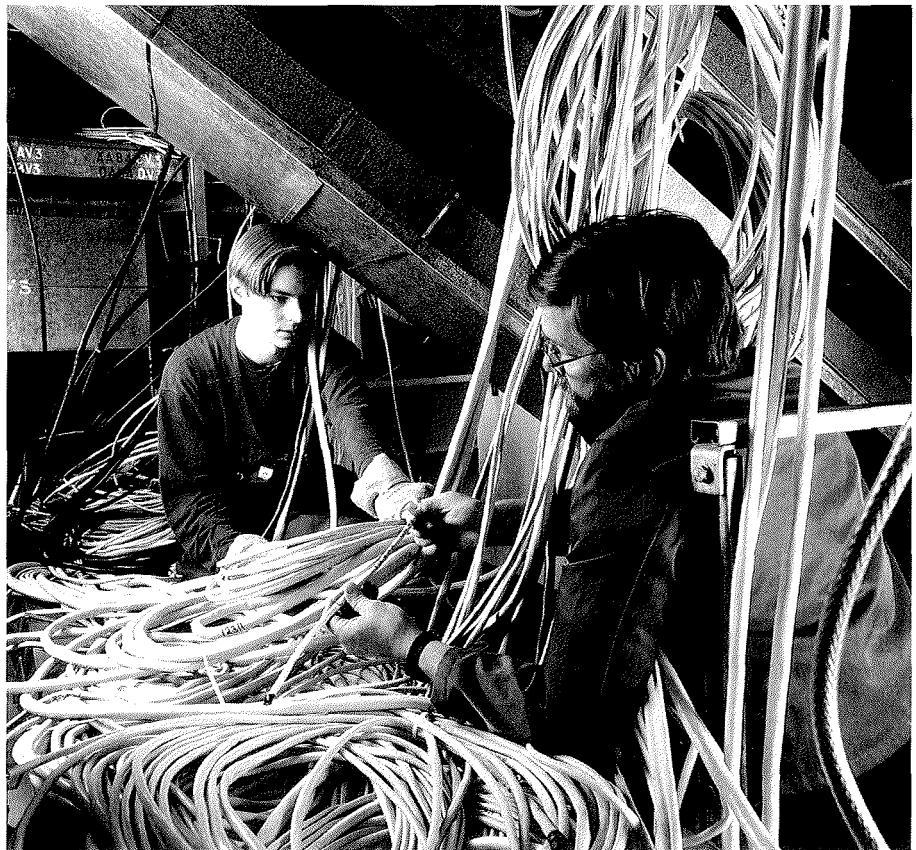
Maaria Nuutinen on
VTT Automaation
tutkija.
p. 09 - 456 6758,
maaria.nuutinen@vtt.fi



Ohjelmoitava automaatio

Ohjelmoitavan automaation käyttöönotto turvallisuudelle tärkeissä toiminnoissa on merkittävin näköpiirissä oleva tekninen muutos ydinvoimalaitoksissa. Uudenlaisista vikaantumistavoista johtuen ohjelmoitavien järjestelmien luotettavuuden ja turvallisuuden arviointi on kuitenkin vaikea tehtävä, jossa perinteiset luotettavuustekniikan menetelmät ovat osoittautuneet riittämättömiksi. FINNUS-ohjelman PASSI-projektissa kehitetään uusia arviointimenetelmiä ja luodaan tietopohjaa niiden soveltamiselle.

Ohjelmoitavaan automaatioon liittyi myös suuri määrä kaapeliasennuksia. Kaapelit järjestettiin ensin valvomon relehuoneen alle odottamaan relekaappeihin kytkemistä. Kuva: Teollisuuden Voima Oy:n arkisto.



Ohjelmoitavien tietokoneiden ja mikroprosessorien käyttöön perustuva tekniikka on viimeisten 10-15 vuoden aikana valloittanut automaatiomarkkinat lähes täydellisesti, ja koko vanhan analogisen tekniikan käyttöä tukeva infrastruktuuri (niin laitteiden toimittajat kuin suunnittelun, käytön ja ylläpidon hallitseva henkilökunta) on tämän muutoksen myötä

nopeasti hupenemassa. Tämä merkitsee myös sitä, että vaikka nykyisillä ydinvoimalaitoksilla ei mitään merkittäviä automaation vanhenemisesta johtuvia vika-
taajuuksien kasvatrendejä olekaan havaittavissa, vanhojen analogisten automaatiojärjestelmien teknis-taloudellinen elinikä on täyttymässä ja järjestelmät joudutaan nykyisillä laitoksilla korvaamaan uudella tekniikalla. Uusilla laitoksilla ohjelmoitava tekniikka otetaan käyttöön heti alusta pitäen.

Ohjelmoitavasta tekniikasta on jo runsaasti myönteisiä kokemuksia konventionaalisilta voimalaitoksilta ja muusta prosessiteollisuudesta. Ydinvoimalaitoksilla uutta tekniikkaa on toistaiseksi sovellettu vähän - johtuen osittain siitä, että laitoksia on maailmalla viimeisen vuosikymmenen aikana rakennettu harvaan - ja

kokemuksia, erityisesti turvallisuuskriittisistä sovelluksista, on vielä niukasti. Viime vuosina on kuitenkin otettu käyttöön joitakin uusia laitoksia, joilla sekä käyttö- että turvallisuusautomaatio on toteutettu ohjelmoitavalla tekniikalla (Darlington, Sizewell B, Chooz B, Kashiwazaki-Kariwa 6&7). Vanhoilla laitoksilla on ohjelmoitavaa tekniikkaa alettu ottaa käyttöön turvallisuuden kannalta tärkeissä toiminnoissa mm. Ruotsissa, Saksassa, Sveitsissä, Unkarissa ja USA:ssa. Suomessa on TVO:n Olkiluodon laitoksella jo otettu käyttöön ohjelmoitavaa tekniikkaa kahdessa 2-luokan (sydämen valvonta ja pääkiertopumppujen sähkökäytöt) ja kahdessa 3-luokan (turbiinin säätö ja latauskoneen ohjaus) järjestelmässä; näiden lisensointi on osittain vielä kesken. Vastaavanlainen uusintatyö on vähitellen alkamassa myös Loviisassa.

Ohjelmoitavan automaation kelpoistaminen turvallisuuskriittisiin sovelluksiin on kuitenkin kaikkialla osoittautunut vaikeaksi ja suuritöiseksi tehtäväksi, sillä vakiintuneita menetelmiä sovellusten luotettavuuden ja turvallisuuden arviointiin ei ole ollut käytet-

Man-years of effort put into Sizewell B primary protection system assurance

Design by Westinghouse	200 man-years
V&V by Westinghouse	50 man-years
Design assessment by NE (PPG)	40 man-years
Engineering confirmation by NNC	40 man-years
Independent Design Assessment by NE (STB)	40 man-years
MALPAS confirmatory analysis by TACSL	80 man-years
Misc. assessment by other parties	20 man-years
Dynamic testing by RR & A	15 man-years
Safety monitoring by NE (HSD)	15 man-years

Total 500 man-years

Lähde: Nucl. Eng. Intl., March 1993, p33

tävissä. Oheisessa taulukossa on esimerkin vuoksi esitetty Sizewell B-laitoksen reaktorisuojajärjestelmän kelpoistamiseen käytetty työpanos.

Seuraavassa on lyhyesti tarkasteltu automaatiolle asetettavia turvallisuusvaatimuksia, ohjelmoitavan automaation luotettavuuden arviointiin soveltuvia menetelmiä ja niihin liittyviä ongelmia sekä lopuksi PASSI-projektin (Programmable Automation System Safety Integrity) tehtäviä.

Vaatimukset

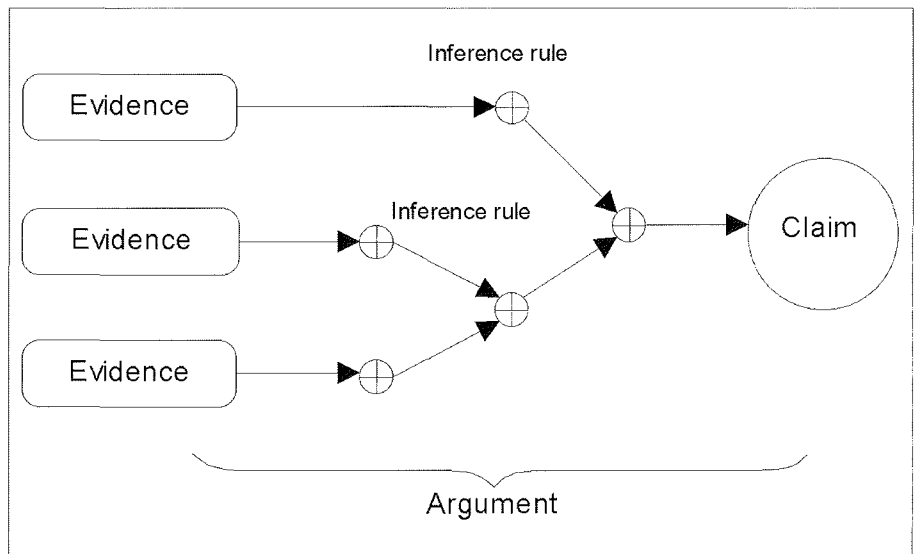
Perusturvallisuusvaatimukset on Suomessa asetettu valtioneuvoston päätöksessä (395/91) ja niitä on edelleen täsmennetty STUK:n julkaisemissa YVL-ohjeissa. Automaatiota koskevat tärkeimmät vaatimukset sisältyvät ohjeisiin YVL 1.8, YVL 2.0, YVL 2.1, YVL 2.8 ja YVL 5.5.

YVL 2.8 asettaa numeeriset luotettavuustavoitteet eräille kaikkein turvallisuuskriittisimmille ydinvoimalaitosten turvallisuustoiminnoille. Kvantitatiiviset luotettavuustavoitteet on asetettu reaktorin pikasululle, syöttöveden lisäämiselle, reaktorin hätäjäähdytykselle sekä suojakennuksen eristämiseksi. Esimerkiksi reaktorin pikasulkutoiminnolle vaaditaan epäonnistumistodennäköisyyden (pfd) olevan vähemmän kuin 10^{-5} /vaade.

Laitostason PSAta varten luotettavuusarvioita tarvitaan myös monille muille turvallisuuteen vaikuttaville automaatiojärjestelmille.

Luotettavuuden arviointi

Kvantitatiiviset luotettavuusvaatimukset kohdistuvat ensisijaisesti turvallisuustoimintoihin. Nämä on tavallisesti (eräissä tapauksissa tämä on YVL-vaatimus) toteutettu useammalla kuin yhdellä erillisellä osajärjestelmällä. Redundanssia käytetään suojaamaan järjestelmän toimintaa ikääntymisen aiheuttamia komponenttien satunnaisia yksittäisvikoja vastaan, redundanssien fyysisistä erotellua ulkoisia riippuvuuksia (esim. tulipalot, tulvat jne.), jotka mahdollisesti voisivat aiheuttaa redundanttisten järjestelmien yhteisvikaantumisen vastaan ja diversiteettiä suojaautumaan suunnitteluvirheiden (esim. ohjelmistovirheiden) aiheuttamia yhteisvikaantumismahdollisuuksia vastaan. Näiden suunnitteluperiaatteiden asianmu-



kaisella soveltamisella voidaan yksittäiselle osajärjestelmälle asetettavat luotettavuusvaatimukset alentaa hallittavissa olevalle tasolle. Käytännössä on kuitenkin usein vaikeaa ratkaista millaista luotettavuutta yksittäiseltä osajärjestelmältä tulee vaatia jotta järjestelmätason luotettavuusvaatimus tulee täytetyksi; erityisesti tämä on vaikeaa diversien tietokonepohjaisten järjestelmien kohdalla. Usein esitetään väite, että riippumattomasti kehitetyt (yhteisestä vaatimusmäärittelystä, nk. "design diversity") osajärjestelmät vikaantuvat toisistaan riippumatta, mutta on olemassa käytännön kokemusta siitä, että näin ei välttämättä ole. Diversien osajärjestelmien riippumattomuutta ei siis voida pitää itsestään selvänä. Esimerkiksi on arvioitu, että ohjelmoitavien järjestelmien ohjelmistovirheistä 30 – 55 % on peräisin vaatimusmäärittelyjen puutteista.

Ohjelmoitavien järjestelmien luotettavuuden arviointiin on sovellettu kahta periaatteessa erilaista menettelyä, joita voitaisiin kutsua suoraksi ja epäsuoraksi menettelyksi. Suorat menettelyt perustuvat järjestelmän ominaisuuksien tilastolliseen evidenssiin ja epäsuorat järjestelmän ja sen kehitysprosessin laatuvidenssiin. Molemmilla menettelyillä on kuitenkin käytännössä vakavia puutteita.

Perinteinen tapa rakentaa luotettavuusmalli (kun huolena ovat piilevät ohjelmistovirheet) ohjelmoitavalle järjestelmälle ei ole mahdollinen, koska järjestelmää ei voida jakaa sellaisiin osajärjestelmiin, joille tilastollista luotettavuusdataa on saatavissa.

Tämän vuoksi vaaditaan suoraa tilastollista evidenssiä systeemitasolla. Tämä voi periaatteessa perustua joko käyttökokemukseen tai tilastolliseen testausdataan.

Käytännössä käyttökokemuksen soveltuvuus on hyvin rajoitettua, koska suunnitteluvirheiden aiheuttama epäluotettavuus ei riipu pelkästään järjestelmästä vaan myös sen käyttöympäristöstä ("käyttöprofiilista"). Tavallisesti vain vähän tai ei ollenkaan dataa on saatavissa oikeasta käyttöprofiilista. Tämä koskee erityisesti suojausjärjestelmiä, jotka toimivat vaadepohjalla ja nämä, esim. reaktorin pikasulut, ovat käytännössä harvinaisia ilmiöitä. Perusautomaatiojärjestelmän muista erilaisista sovelluksista saatua ja käyttökokemustietoja on myös ehdotettu käytettäväksi. Tämäkin on vaikeaa ja vaatii uusien menetelmien kehittelyä.

Todellisen käyttöprofiilin mukainen tilastollinen testaus on itse asiassa ainoa eheä menetelmä ohjelmoitavan järjestelmän luotettavuuden määrittämiseksi. Käytännössä tähän liittyy kuitenkin vakavia ongelmia. Testitapausten generointi käyttöprofiilista on vaikeaa ja vaadittavien testitapausten määrä nousee korkeaksi, kun on demonstroitava korkeita luotettavuuksia. Tarvitaan kunnollinen automatisoitu testi ympäristö, jonka toteuttaminen myös on hankalaa. Testaamiseen tarvittava aika ja kustannukset nousevat näinollen helposti sietämättömän korkeaksi.

Epäsuorat menetelmät perustuvat siihen intuitiiviseen oletukseen (jonka tueksi kyllä on olemassa runsaasti käytännön kokemus-

ta), että kun järjestelmän kehitysprosessissa (so. määrittely, suunnittelu, toteutus, käyttöönnotto, käyttö ja kunnossapito) käytetään parhaita saatavilla olevia menetelmiä, työkaluja ja käytäntöjä tiukan laatu- ja luotettavuuden alaisuudessa, myöskin järjestelmän luotettavuus on riittävän korkealla tasolla. Lähempi tarkastelu kuitenkin osoittaa, että useimpia laatu- ja luotettavuuden ongelmia aiheuttavat tekijöitä on vaikea mitata ja niiden vaikutusta lopputuotteen luotettavuuteen vielä vaikeampi arvioida. Asiantuntija-arviomenettelyn soveltaminen näyttää lupaavalta keinolta näiden ongelmien ratkaisuun.

Uusi lähestymistapa eo. arviointimenetelmiin liittyvien ongelmien ratkaisuun näyttää olevan niiden yhdistäminen bayesilaisista todennäköisyystarkastelua käyttäen. Tällöin laaditaan apriori oletus järjestelmän luotettavuudesta käyttäen laadullista evidenssiä ja käytettävissä olevaa kokemustietoa, jota sitten tarvittaessa päivitetään tilastollisella testauksella posteriori arvioksi. Tarvittavien testien määrää voidaan tällöin laskea hallittavissa olevalle tasolle tai tilastollinen testaus jopa välttää kokonaan silloin kun luotettavuustavoite ei ole aivan huippuluokkaa.

Apriori oletuksen muodostamiseksi on kyettävä yhdistämään kaikki saatavilla oleva kvalitatiivinen laatu- ja luotettavuus-evidenssi ja kvantitatiivinen käyttökokemus- ja testusdata edellisen sivun kuvassa esitetyn SHIP-projektissa kehitetyn mallin mukaisesti. Mallin mukaisessa päättelyssä käytetyt argumentit voivat olla deterministisiä, todennäköisyyspohjaisia tai kvalitatiivisia.

Tehtävät

PASSI-projektin työ kohdistuu toisaalta ohjelmoitavien automaatio- ja ohjelmistojen luotettavuuden arviointimenetelmien kehittelyyn ja arviointiin, toisaalta näiden menetelmien kokeellisiin sovelluksiin, joissa luodaan menetelmien käytön vaatimaa tietopohjaa.

Ensin mainitulla alueella kehitetään menetelmiä ja työkaluja, joita tarvitaan erilaisten kvantitatiivisten ja suunnitteluprosessin laatua osoittavien kvalitatiivisten evidenssien yhdistämiseen järjestelmän luotettavuusarvioiksi. Työn kohteina ovat käyttökokemusanalyysi, asiantuntija-arviot sekä erilaisen evidenssin yhdistämistavat.

Yleinen tapa toteuttaa ohjelmoitavia sovelluksia on implementoida (konfiguroida) tarvittavat toiminnot laajasti käytettyyn

teolliseen automaatiojärjestelmään. Eräs tämän toteutustavan suuri etu on se, että käytettävissä on runsaasti kokemusta järjestelmän erilaista sovelluksista. Tämän kokemuksen pitäisi taata järjestelmän komponenttien ja suunnittelu- ja V&V-työkalujen korkea laatu luotettavien sovellusten toteutuksessa. Käyttökokemuksen soveltaminen spesifisen sovelluksen luotettavuuden suoraan arviointiin ei kuitenkaan ole suoraviivaista koska sovellus ja sen käyttöprofiili saattaa poiketa suuresti aikaisemmista. Suuria vaatimuksia asetetaan myös käyttökokemuksen keruun, dokumentoinnin ja analysoinnin laadulle. Tavoitteena on kehitetään luotettavuusmalleja ja menetelmiä perusjärjestelmän muista sovelluksista saadun käyttökokemustiedon hyväksikäytölle ohjelmoitavan sovelluksen luotettavuuden arvioinnille.

Ohjelmoitavan järjestelmän turvallisuuden ja luotettavuuden arviointi perustuu suurelta osin sovelluksen kehitysprosessin korkeaa laatua osoittavan evidenssin arviointiin. Kehitysprosessin laatu- ja luotettavuuden vaikuttavista tekijöistä on vaikeasti mitattavia ja tilastollinen evidenssi niiden vaikutuksesta sovelluksen luotettavuuteen on harvaa. Asiantuntija-arvioita tarvitaan mittaamaan kehitysprosessin laatua ja arvioimaan laatuargumenttien vaikutusta sovelluksen turvallisuuteen ja luotettavuuteen. Tavoitteena on määrittellä menetelmät ja työkalut asiantuntija-arvojen soveltamiseen suunnitteluprosessin laadun arviointiin ja niiden vaikutukseen sovelluksen luotettavuuteen.

Ohjelmoitavan sovelluksen turvallisuuden arviointi edellyttää monenlaisten ja vaikeasti yhteismitallisten kvantitatiivisten ja kvalitatiivisten evidenssien yhdistämistä sovelluksen luotettavuusarvioiksi. Tavoitteena on määrittellä menetelmät ja työkalut erilaisten evidenssien painottamiseen ja yhdistämiseen sovelluksen luotettavuusarvioiksi. Menetelmät käsittävät mm. bayesilaiset uskomusverkot (BBN) tai muut yleisemmät vaikutusverkot. Edelleen määrittellään päätösanalyttisten menetelmien rooli lisensiointiprosessissa.

Kehitettyjen menetelmien ja työkalujen todellinen arvo ja tehokkuus voidaan arvioida ainoastaan soveltamalla niitä realististen sovellusten luotettavuuden arviointiin. Vain menetelmien laajalla käytännön soveltamisella voidaan luoda uskottava tietopohja turvallisuus- ja luotettavuusväitteiden oikeu-

tukselle. Tällaisten sovellusten laajuudesta johtuen tarvitaan kansainvälistä yhteistyötä ja järjestelmätoimittajien vahvaa osallistumista hankkeisiin. Tulevina vuosina tällaiset sovellushankkeet muodostavat PASSI-projektin keskeisen alueen. Tavoitteena on kansainvälisten yhteistyöhankkeiden valmistelu ja sopivan yhteishankkeen käynnistäminen esim. benchmark-hankkeen muodossa. Keskusteluja on käyty seuraavien osapuolien kanssa, EU, NEA PWG5, JRC/ISPRA, HRP, SKI, ABB Atom, GRS/IsTech ja Siemens AG.

Ehdotetun benchmarkin tavoitteena on vertailla osallistuvien asiantuntijaryhmien käyttämiä menetelmiä ja työkaluja ja näiden tuloksia sopivan ohjelmoitavan pilottijärjestelmän luotettavuuden arvioinnissa. Edustavan järjestelmätoimittajan, joka on valmis luovuttamaan tarvittavan järjestelmää ja sen suunnitteluprosessia koskevan informaation asiantuntijaryhmien käyttöön, osallistumisen on ehdoton edellytys hankkeen onnistumiselle.

Edelliseen liittyen pilottijärjestelmän todellista luotettavuutta pitäisi arvioida tilastollisella testauksella. Näiden kokeiden tuloksia vertaamalla saadaan aikaan arvokasta tietopohjaa menetelmien muita sovelluksia varten.

DI Pentti Haapanen on
VTT Automaation
erikoistutkija,
p. 09 - 456 6433,
pentti.haapanen@vtt.fi



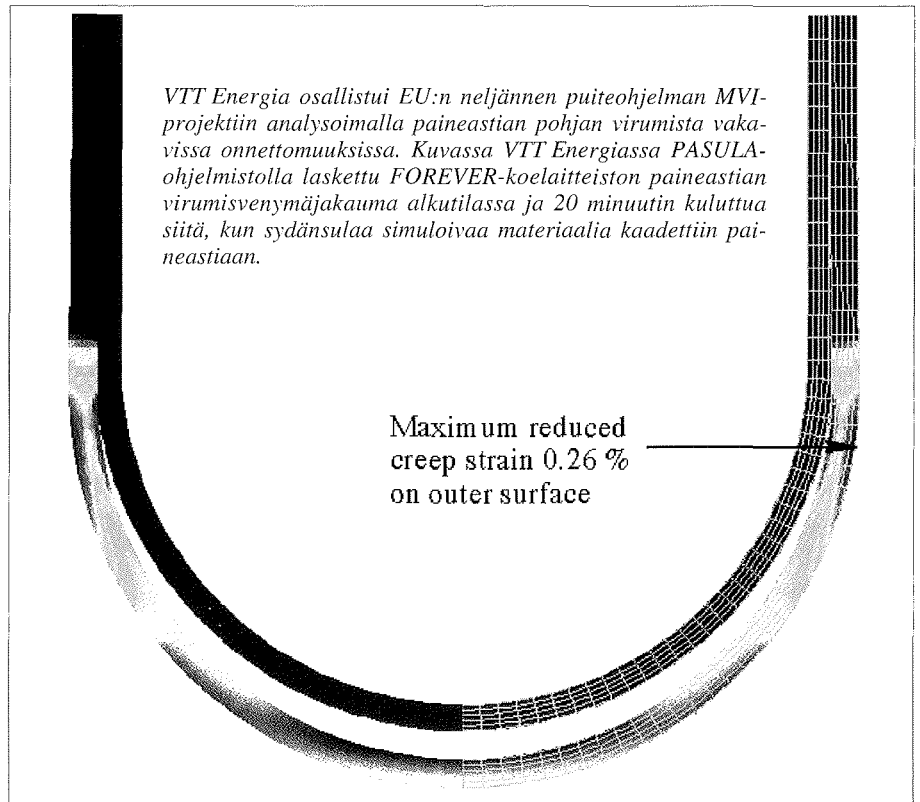
TKT Urho Pulkkinen on
VTT Automaation
erikoistutkija,
p. 09 - 456 6468,
urho.pulkkinen@vtt.fi



Uusi Euratomin tutkimusohjelma käynnistyy – ja näyttää lupaavalta

Suomalaiset menestyivät hyvin EU:n neljänten tutkimuksen puiteohjelmaan kuuluvan Euratomin Nuclear Fission Safety -tutkimusohjelman projektikilpailuissa.

Monilla alueilla EU-rahoitus samoin kuin projekteissa ja verkostoissa luodut suhteet ovat olleet tärkeitä osaamisemme kehittämisessä. Byrokratia osoittautui ennakko-odotusten mukaisesti aikamoiseksi, mutta sekin opittiin hallitsemaan. Kun menettelytavat ovat nyt tutut, pystyimme uudessa ohjelmassa entistä paremmin keskittämään panostamme aiheisiin, joissa EU-tutkimusyhteistyöstä on saatavissa paras hyöty.



VTT Energia osallistui EU:n neljännen puiteohjelman MVI-projektiin analysoimalla paineastian pohjan vauriota vakavissa onnettomuuksissa. Kuvassa VTT Energiassa PASULA-ohjelmistolla laskettu FOREVER-koelaitteiston paineastian vauriovenymäjakama alkutilassa ja 20 minuutin kuluttua siitä, kun sydänsulaa simuloivaa materiaalia kaadettiin paineastiaan.

Maximum reduced
creep strain 0.26 %
on outer surface

Suomalaiset tahot osallistuivat Euratomin Nuclear Fission Safety (NFS-2) -ohjelmassa vuosina 1995-1999 kaikkiaan 59:ään hankkeeseen. Niistä 37 oli varsinaisia yhteisrahoitteisia tutkimusprojekteja (shared-cost action), joissa komissio maksaa tyypillisesti noin puolet hankkeen kustannuksista. Loput olivat lähinnä verkostotyypisiä yhteistyöhankkeita, joissa komissio maksaa koordinaattorille hallinnointityöstä, mutta muille osanottajille vain matkoista.

Suomeen saatu EU-rahoitus oli kaikkiaan n. 5,5 Meuro eli 33 Mmk. EU-rahoitus ohjelman vapaasti kilpailtuihin tutkimus- ja verkostohankkeisiin oli yhteensä n. 135 Meuro, josta Suomen laskennallinen maksumuus on n. 1,4 % eli alle 2 Meuro. Yhtenä, vaikkakin puutteellisena menestymiskriteerinä käytetty palautussuhde Brysselistä ylittää siis reilusti ykkösen.

EU-ohjelmaan kuuluva tutkimus on myös syytä suhteuttaa koko kansallisen tut-

kimuksemme laajuuteen. Kun kansallinen rahoitus tyypillisesti reilusti kaksinkertaistaa EU-hankkeiden koon, voidaan niiden viime vuosien kokonaislaajuudeksi arvioida 15-20 Mmk vuodessa, mikä on n. 10 % arvioidusta kaiken ydinenergiatutkimuksen laajuudesta Suomessa. Tämä osuus lienee selvästi suurempi kuin keskimäärin EU:n ydinenergiamaissa. Panostuksemme on kuitenkin varsin järkevä, jos kohteet osoittautuvat tulosten loppuinventoinninkin jälkeen oikein valituiksi.

Osallistumistamme NFS-2-ohjelmaan voidaan pitää hiukan pirstaloituneena. Varsinaisissa projekteissa suomalaisten osallistujien keskimäärin saama EU-rahoitus oli alle 100 keuro, ja suurinkin potti alle 300 keuro. Monissa muissa ohjelmissa suomalaisten osallistujien keskimäärin saama EU-rahoitus oli luokkaa 200 keuro ja yli miljoonan euron jättipottejakin oli runsaasti. Tähän tilanteeseen olivat syynä varmaankin mm. suuri alkuinnostus, eli halu mennä mu-

kaan mahdollisimman moneen hankkeeseen, joihin vain kutsu kävi, sekä kokemuksen puutteesta aiheutunut pelko ryhtyä koko hankkeen koordinaattoriksi. Rohkeimmin koordinaattoreiksi uskaltautuivat STUKkilaiset, hekin erityisesti vasta ohjelman toisella tarjouskierroksella.

Uudessa ohjelmassa kannattaa ryhtyä useammin koordinaattoriksi. Siten voi saada paljon vaikutusvaltaa hankkeen sisältöön, merkittävän suuren rahoituserän ja aivan kohtuullisen palkan hallinnollisistakin vai-voista. Olennaista on, että hankkeen valmisteluvaiheessa on käytettävissä kokemusta ja resursseja myös byrokratian hoitamiseen ja että aiemmat suhteet antavat mahdollisuuden valita osaavat ja vastuunsa kantavat partnerit. Nyt kun tiedämme olevamme arvostettuja osallistujia, voimme muutenkin olla hiukan valikoivampia ja pyrkiä saamaan entistä lihavampia viipaleita projekteista. Meillä toimii hyvin tutkimusyksiköiden yhteistyö tulosten loppukäyttäjien eli voimayhtiöiden ja viranomaisten kanssa. Osallistukaamme siis entistäkin useammin yhdessä hankkeisiin, sillä uuden ohjelman

Oppia päättyvän ohjelman kokemuksista

projektien valintakriteereissä korostetaan tulosten saattamista loppukäyttäjille - ja sehän onnistuu parhaiten, kun nämä ovat suoraan mukana projekteissa.

Suorastaan yllättävää oli osallistumisemme tasainen jakautuminen NFS-2 -ohjelman kaikille päälohkoille: reaktoriturvallisuus ja -tekniikka (uudet laistyyppit), ydinjätehuolto ja säteily suojele toivat kukin noin kolmanneksen EU-rahoituksesta. Olemme siis onnistuneet hyödyntämään ohjelmaa hyvin kattavasti.

Uuden ohjelman sisältö näyttää lupaavalta

Komissio aloitti viidennen puiteohjelman systemaattisen ja vuorovaikutteisen valmistelun jo keväällä 1996. Suomestakin toimitettiin ydinenergiatutkimuksen sisältöä koskeva toivelista kesällä 1996. Olemme myös jatkuvasti olleet monin tavoin suorassa yhteydessä komission kanssa. Komission edustajia on kutsuttu erilaisiin tapahtumiin Suomessa, suomalaisia on työskennellyt komissiossa ja suomalaisia asiantuntijoita on kutsuttu erilaisiin valmisteleviin ryhmiin. Komissio tuntuu kuuntelevan suomalaisia erityisen valppaasti. Olemmekin aika poikkeava tapaus: meillä valmistellaan jopa uuden ydinvoimakapasiteetin rakentamisesta ja ydinjätehuollon ohjelma etenee aika-aulun mukaisesti.

Ei siis ehkä olekaan ihme, että uuden ohjelman sisällyslueetelo näyttää meille varsin lupaavalta - melkein kuin itse kirjoitetulta.

(Ks. taulukko 1; Euratomin ydinfiisiotutkimuksen aiheet 1998-2002).

Euratomin ydinenergiatutkimuksen erityisohjelman 1998-2002 kokonaisbudjetti on 1260 Meuro, josta ydinfiission tutkimukseen kaikkiaan 191 Meuro. EU:n hallinnointi ja erilaiset tutkimuksen tukitoimet vievät aikamoisen osan varoista, joten varsinaisiin vapaasti kilpailuviin ydinfiission tutkimus- ja yhteistyöhankkeisiin jää vajaat 160 Meuro. Tämä on selvästi enemmän kuin NFS-2 -ohjelmassa. Fissionenergian turvalliseen ja taloudelliseen tuotantoon keskittyvään, tiukasti tavoitteelliseen Ydinfiisio-avaintoimintoon kohdistetaan runsaat 120 Meuro, ja yleisempään ja joustavampaan radiologisten tieteiden ns. geneeriseen tutkimukseen n. 35 Meuro.

Fuusiotutkimukselle on Euratomin uudessa ohjelmassa osoitettu 788 Meuro.

Taulukko 1:

EURATOMIN YDINFIISIO-TUTKIMUKSEN AIHEET 1998-2002

YDINFIISIO-AVAINTOIMINTO

Nykyisten laitojen käyttöturvallisuus

- Laitosten käyttöiän pidentäminen ja hallinta
- Vakavien reaktorionnettomuuksien hallinta
- Evoluutiokonseptit - turvallisuus ja polttoaineet

Polttoainekierron turvallisuus

- Runsasaktiivisen jätteen ja käytetyn polttoaineen huolto ja loppusijoitus
- Erottelu ja transmutaatio (P&T) - erityisesti kiihdytin pohjaiset järjestelmät (ADS)
- Ydinlaitosten käytöstäpoisto - lähinnä vain tietokantatyötä

Tulevaisuuden teknologioiden turvallisuus ja tehokkuus

- Innovatiiviset ja uudelleen harkittavat teknologiat - reaktorit sekä polttoaineet ja polttoainekierrot

Säteily suojele (vain ydinlaitoksia koskeva)

- Riskien hallitseminen - arviointi, hallinta ja sääntely
- Ammatillisten annosten seuranta ja arviointi
- Pelastuspalvelu - päätöksenteko ja ympäristön monitorointi
- Kontaminoituneiden alueiden kunnostus ja pitkäaikainen hallinta

GENEERINEN T&K - RADIOLOGISET TIETEET

Säteily suojele ja terveys

Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen ympäristössä

Säteilyn teollinen ja lääketieteellinen käyttö sekä luonnonsäteily

Sisäinen ja ulkoinen dosimetria

Tämä on hiukan vähemmän kuin päättyvässä ohjelmassa, mutta mahdollistaa edelleen suuren mittakaavan kooreaktorin, esim. ITER, rakentamiseen tähtäävän suunnittelu-työn määrätietoisin jatkamisen.

JRC:n eli EU:n yhteisen tutkimuskeskuksen työ tähtää entistä enemmän EU:n

operatiivisen työn tukemiseen. JRC:lle ydinenergiatutkimukseen suoraan osoitetusta yhteensä 281 Meuro rahoituksesta käytetäänkin suurin erä eli 138 Meuro ydinmateriaalien safeguards-valvontaan. Ydinturvallisuustutkimuksellekin tulee kuitenkin varsin merkittävä summa, 122 Meuro. JRC on

Taulukko 2:

EURATOMIN YDINFIISIO-TUTKIMUKSEN KONTAKTIHENKILÖITÄ SUOMESSA

Ohjelmakomitea (CCP) - fissiokokoonpano

Timo Haapalehto, KTM, varsinainen edustaja

Raimo Mustonen, STUK, erityisesti geneerinen tutkimus ja säteily suojele

Timo Vanttola, VTT Energia, avaintoiminto, erityisesti reaktoriturvallisuus

Komissiolle neuvoa antava ryhmä, External Advisory Group (EAG)

Lasse Mattila, VTT Energia

Kansallinen tukiryhmä

Timo Haapalehto, KTM, pj

Lasse Reiman, STUK

Sisko Salomaa, STUK

Heli Talja, VTT Valmistustekniikka

Harri Tuomisto, Fortum Engineering

Eero Patrakka, TVO

Kaisa Simola, VTT Automaatio

Jussi Vira, Posiva

Jukka Lehto, Helsingin yliopisto

Runar Blomqvist, Geologian tutkimuskeskus

Mukana myös CCP- ja EAG-jäsenet sekä

Tekesin EU-T&K-sihteeristön edustaja

velvoitettu sopeuttamaan hyvin oma tutkimuksensa vapaasti kilpailtavaan tutkimukseen, joten JRC tulee useilla avaintoiminnon alueilla olemaan uudessakin ohjelmassa mielenkiintoinen partnerimahdollisuus.

Tiedotus on vauhdissa ja apua valmisteluihin on tarjolla

Oheisessa tietolaatikossa on esitetty suomalaiset edustajat komission Nuclear Fission-tutkimuksen ohjauksessa sekä KTM:n Suomessa asettaman kansallisen tukiryhmän jäsenet. Tukiryhmä toimii toisaalta foorumina, jossa EU:n elimissä olevat edustajamme evästetään, ja toisaalta se levittää edelleen nopeasti ja laajasti ohjelmasta saatua tietoa mm. järjestämällä erilaisia tiedotustilaisuuksia ja perustamalla myös verkkosivut. Osa toiminnasta tullaan toteuttamaan yhdessä Tekesin kanssa, jolla on paljon kokemusta ja resursseja EU-tutkimusohjelmiin osallistumisen tukemisessa. Käytännössä kansallisten reaktoriturvallisuuden ja ydinjätehuollon tutkimusohjelmien FINNUS ja JYT2001 sekä VTT:n ALWR-teknologia-ohjelman johtoryhmät ja projektien tukiryhmät tullevat olemaan useiden EU-projektien tiedonvälityksen polttopisteitä.

(Ks. taulukko 2; Euratomin ydinfissiotutkimuksen kontaktihenkilöt Suomessa).

Uuden EU:n tutkimuksen puiteohjelman valmistelu on pitkä ja vaivalloinen prosessi. Kun kaikki poliittiset päätökset on lopulta saatua tehtyä, tässä tapauksessa varmaankin helmikuun 1999 aikana, komissio pystyy etenemään hyvin nopeasti. Entistä laajemmalla sähköisen tiedonsiirron käytöllä pyritään nopeuttamaan käytännön hallinnollisia prosesseja, kuten tarjouspyyntöjen jakelua, hanke-esitysten vastaanottoa ja käsittelyä sekä lopullisten tutkimussopimusten laatimista.

(Ks. taulukko 3; Euratomin ydinfissiotutkimuksen hallinnollinen aikataulu).

Eväitä tarjouskilpailuissa menestymiselle

Kaikille puiteohjelman tutkimus- ja muille kokonaisuuksille on valmisteltu yhtenäiset hanke-esitysten arvioinnin kriteerit ja menettelyohjeet. Yksittäiset ohjelmat voivat rajoitetusti modifioida niitä, kuten lisätä täsmennyksiä ja vaihdella hieman eri kriteereiden painoarvoja. Eri tekijöille annettavat

Taulukko 3:

EURATOMIN YDINFISSIOTUTKIMUKSEN HALLINNOLLINEN AIKATAULU (ALUSTAVA)

15.3.1999	Ensimmäinen haku, kaikki aiheet
17.6.1999	Tarjoukset aiheista Avaintoiminto: vakavat onnettomuudet Geneerinen tutkimus: säteilysuojelu ja terveys
4.10.1999	Tarjoukset muista avaintoiminnon ja geneerisen tutkimuksen aiheista
Vuonna 2000	Väliarviointi ja mahdolliset tarkistukset ohjelmaan
Lokakuu 2000	Toinen haku, kaikki aiheet
Tammikuu 2001	Tarjoukset kaikista toisen haun aiheista
Lokakuu 2001	Kolmas haku, vain yhteistyötutkimukset ja verkostohankkeet
Tammikuu 2002	Tarjoukset kaikista kolmannen haun aiheista

Geneerisen tutkimuksen ja tukitoimenpiteiden (infrastruktuuri, kuten koelaitteiden yhteinen käyttö ja tietokantojen rakentaminen, koulutus ja tutkijanvaihto,...) esityksiä voidaan toimittaa jatkuvasti, mutta ne arvioidaan kootusti yllä esitettyjen tarjousten määräaikaisten mukaisesti.

Taulukko 4:

NELJÄNNEN TUTKIMUKSEN PUITEOHJELMAN HANKKEIDEN ARVIOINTIKRITEERIT

Tieteellinen ja tekninen laatu ja innovatiivisuus	- Laatu ja merkitys ajatellen ohjelman tavoitteiden saavuttamista - Uutuusaste - Riittävyys ohjelman tavoitteiden saavuttamisen kannalta
Eurooppa-lisäarvo ja merkitys EU:n tavoitteiden edistämiseksi	- Eurooppa-ulottuvuus - Tutkimuskonsortion Eurooppa-lisäarvo - Merkitys EU:n yleisten tavoitteiden edistämiseksi, mm. standardointi ja säännöstö
EU:n sosiaalisten tavoitteiden edistäminen	- Elämänlaatu, terveys ja turvallisuus - Työllisyys - Ympäristön suojelu
Taloudellinen kehitys ja teknis-tieteellinen potentiaali	- Sovellusten hyödyllisyys ja laajuus, hyödyntämissuunnitelmat - Strateginen vaikutus - Tulosten viestintäsuunnitelmat
Resurssit, osallistujat ja hallinto	- Projektin hallinnon laatu - Osanottajaryhmän laatu - Resurssien asianmukaisuus ja tehokas käyttö

painoarvot vaihtelevat myös erityyppisten kokonaisuuskesken.

(Ks. taulukko 4; neljännen tutkimuksen puiteohjelman hankkeiden arviointikriteerit).

Varsinaisissa yhteisrahoitteisissa tutkimusprojekteissa tieteellinen ja tekninen laatu on tärkeintä, mikä usein tarkoittaa mm. sitä, että todellisia osajia on niukasti ja siten osanottajien määrä kannattaa pitää kohtuullisena, esim. 4-5 kpl. Verkostohankkeissa taas korostuu laajasta EU-yhteistyöstä saatava lisäarvo, mikä saattaa merkitä hyvin suurtakin osanottajamäärää. Hallinnon tehokkuuteen, laajasti käsitettynä, kiinnitetään suuri huomio kaikissa tapauksissa.

Aiemmin arviointiraateihin osallistuneiden pääohje esitysten tekijöille on: pelkäs-

tään esityksen tiivistelmästä pitää jo selvästi käydä ilmi, että työ on laadukasta ja innovatiivista, se kohdistuu tärkeisiin aiheisiin ja se tehdään tehokkaasti.

Tuorella tiedolla Euratomista saa aina verkosta osoitteesta:
<http://www.tekes.fi/eu/euratom/index.html>

TkT Lasse Mattila
VTT Energia Ydin-
energia-tutkimusalueen
tutkimuspäällikkö.
puh. (09) 456 5001
lasse.mattila@vtt.fi



Ydinturvallisuusyhteistyömme tulokset lähialueella



Suomen bilateraalinen yhteistyö Luoteis-Venäjällä ja Baltian maissa on kohdistunut ydinvoimaloiden turvallisuusparannuksiin, ydinjätehuoltoon, ydinmateriaalien valvontaan ja viranomaisyhteistyöhön. Ulkoasiainministeriö arvioitutti viime vuonna tähänastiset yhteistyöhankkeet. Oliko lähes sadan miljoonan markan suomalaisella tuella vaikutusta ongelmavyöhyteen, jonka ratkaisemiseen länsimainen tuki kokonaisuudessaankaan ei riittä ilman kohdemaiden omaa panostusta?

Venäjän luoteisosassa on poikkeuksellisen paljon ydinreaktoreita. Vaikka tämä enimmäkseen johtuukin ydinsukellusveneistä, niin myös alueen ydinvoimalla tuotetun sähkön osuus on suuri. Laivareaktorit, radioaktiivisten materiaalien moninainen muu käyttö sekä ydinvoimalaitokset ovat luoneet vakavan ydinjäteongelman, joka on erityisen akuutti Kuolan niemimaalla. Ydinmateriaalien valvonta on myös ollut huolen aiheena.

Radioaktiivisten jätteiden aiheuttamat riskit ovat selvästi ydinvoimalaitosten aiheuttamia riskejä pienemmät. Tästä syystä Suomen ydinturvallisuusyhteistyö, jota seuraavassa kutsutaan Ohjelmaksi, onkin keskittynyt Kuolan (KoNPP) ja Leningradin ydinvoimalaitoksien (LNPP) parannustöihin.

Suomen panos 5% länsimaitten kokonaisavusta

Itä-Euroopan ydinvoimaloiden turvallisuusongelmat ovat huolestuttaneet kaikkia länsimaita. Tämä on johtanut kansainvälisiin

avustusohjelmiin, joita ovat organisoineet IAEA, EC Tacis- ja Phare-ohjelmiansa kautta sekä G-7-maiden perustama EBRD:n ydinturvarahasto NSA. Monenkeskisten ohjelmien lisäksi useilla länsimailla on ollut bilateraalaisia yhteistyöhankkeita Itä-Euroopassa.

Vuosina 1991–97 Suomen Ohjelman osuus länsimaisesta kokonaisrahoituksesta KoNPP:llä ja LNPP:llä, yhteensä reilusta 160 MECU:sta, oli noin 5%. Suomen Ohjelman kokonaissummasta 75% on kuvan 1 mukaisesti käytetty ydinvoimaloiden turvallisuusparannuksiin, kun huomioidaan Suomen maksuosuus EBRD:n ydinturvarahastoon. Tämä on sopusoinnussa uhkakuvioiden kanssa.

Kun tarkastellaan ydinturvallisuusalan yhteistyötä, on syytä pitää mielessä, että erityisesti Luoteis-Venäjällä ongelmat ovat niin valtavia, että niiden laaja ratkaiseminen on täysin Suomen Ohjelman ulottumattomissa. Jopa suurimmat kansainväliset tekniset avustusohjelmat voivat vain täydentää kohdeorganisaation omia investointeja ja omaa työtä. Tässä tilanteessa kansainvälis-

ten hankkeiden koordinointi ja priorisointi ovat ratkaisevan tärkeitä. Suomen Ohjelma voi tehokkaasti toimia katalysaattorina sekä muiden yhteistyökumppaneiden aloitteiden tukijana.

Suomalaisen ydinvoimalaitososaamisen soveltamista

Alusta pitäen Kuolan voimalaitoksen suomalaisissa turvallisuusparannushankkeissa on käytetty hyväksi Loviisan voimalaitoksesta saatua tietotaitoa ja kokemusta. Loviisan reaktorinhan ovat lähellä VVER-440/213-tyyppiä.

Alkuperäisissä KoNPP:n turvallisuusparannuksien suunnitelmissa oli monia kunnianhimoisia hankkeita: lisähätäsyöttövesijärjestelmän rakentaminen, sydämen kiehumavaran valvontajärjestelmä, hätäjäähdytysakkujen lämmitys, instrumentointi- ja ohjausjärjestelmälaitteiden olosuhdekeilu, varautuminen primääri-sekundääri-vuotoihin ja boorin suunnittelemattoman laimentumisen hallinta primääripiirissä. Nämä projektit on viety suunnitteluvaiheen läpi, mutta useissa tapauksissa toteuttaminen on pysähtynyt rahoituksen puutteeseen ja ydinvastuukysymyksiin.

Viimeisimmät KoNPP-hankkeet ovat olleet APROS-laitosanalyysointin ja -koulutussimulaattorin toimitus sekä turvallisuusparametrien näyttösystemin kehittäminen yhdessä norjalaisten kanssa.

Sosnovy Borin hankkeissa oli alkuvaiheessa ominaista opettelujakso, koska RBMK-laitostyyppi oli länsimaissa tuntematon. Yksityiskohtaisia turvallisuusselvityksiä ovat haitanneet LNPP:n yksikköjen yksilöllisyys, jonka vuoksi kukin yksikkö vaatii oman analyysinsä.

Suomen Ohjelman päähankkeita LNPP:ssä ovat olleet: käyttöturvallisuuden arviointi yhdessä venäläisen turvallisuusviranomaisen GAN:n edustajien kanssa, LNPP:n henkilökunnan koulutus STUK:ssa ja Olkiluodossa, paloturvallisuusparannukset, paineenalaisten komponenttien tarkastusmenetelmät ja lujuusanalyysit, laitospuhelinjärjestelmä, fyysiset turvajärjestelyt sekä aikaisen hälytyksen lähettävien paneelien asennus. Laitoksen ympärille on lisäksi rakennettu säteilyvalvontaverkosto. Samoin kuin KoNPP:ssä, Ohjelman hankkeet on kohtuullisen hyvin koor-

dinoitu muiden länsimaisten avustushankkeiden kanssa.

Jätehuoltoa ja viranomaisyhteistyötä

Kuolan ja Leningradin voimalaitosten lisäksi laajan ongelmakentän Suomen lähi-alueella muodostaa radioaktiivinen jäte. Ohjelman ydinjätehuoltohankkeista voidaan mainita nestemäisen radioaktiivisen jätteen käsittely IVO:n NURES-laitteistolla sekä Paldiskin entisessä ydinsukellusveneiden miehistön koulutuskeskuksessa Virossa että Murmansk Shipping Companyn huoltotelakalla Murmanskissa. LSK Radon, joka on vastuussa Venäjän luoteisalueiden teollisuuden, sairaaloiden ym. laitosten radioaktiivisista jätteistä, on arvostanut STUK:n viranomaistukea.

Ydinmateriaalivalvonnan safeguards-hankkeet Ukrainassa, Baltiassa ja Venäjällä ovat perusteltavissa ydinsulkusopimuksen tavoitteilla. Ukrainassa ja Baltian maissa yhteistyön tavoitteena on ollut tukea ydinsulkusopimuksen edellyttämää ydinmateriaalien valvontaa IAEA:n alaisuudessa. Näissä maissa on tuettu kansallisen kirjanpito- ja valvontasysteemin luomista ydinmateriaaleja varten sekä ydinmateriaalien salakuljetusten estämistä. Lisäksi tämän

aihepiirin hankkeet ovat keskittyneet raja-alueen tehostamiseen Baltian maissa sekä Venäjän ja Suomen rajalla.

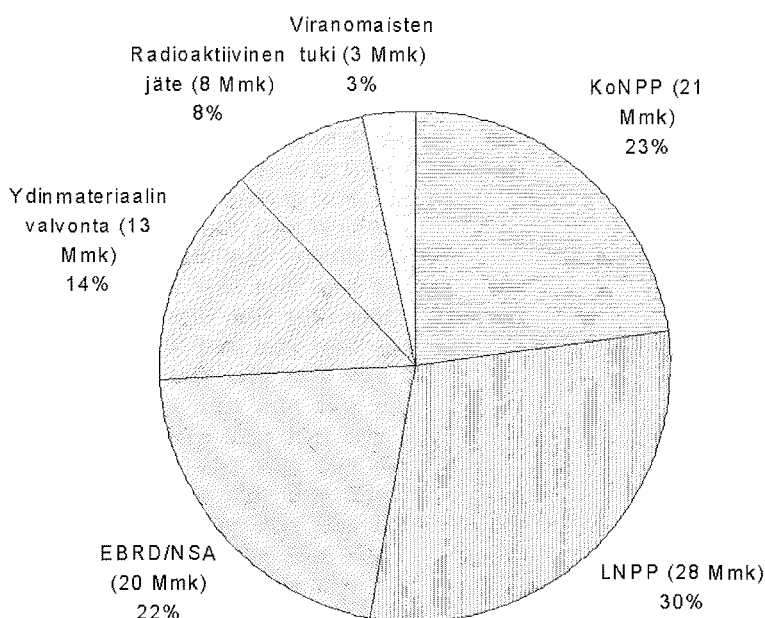
Yhteistyö kansallisten viranomaisten ydinturvallisuusasiantuntijoiden kanssa on osittain sisällytetty Ohjelman muihin hankkeisiin, mutta viime aikoina STUK on eriyttänyt nämä projektit oman otsikkonsa alle. Hankkeet ovat sisältäneet kokemustenvaihtoa, viranomaistarkistusten käytäntöä, koulutusta ja osallistumista alan kansainväliseen yhteistyöhön.

Yhteistyö arvioitiin tehokkaaksi

Viime vuonna kirjoittajien muodostama evaluointiryhmä arvioi Ulkoasiainministeriön toimeksiannosta Ohjelman toteutusta 1991–97. Ryhmää täydensi Tsekinmaan turvallisuusviranomainen, M. Hrehor, joka pystyi tuomaan esiin vastaanottaja-osapuolen näkemyksiä.

Vaikka tehtävänä ei ollut arvioida lähi-alueen venäläisten ydinvoimalaitosten turvallisuutta, voidaan kuitenkin kysyä johtiko Ohjelma turvallisuusparannuksiin?

KoNPP:n ja LNPP:n käyttötilastot todellakin osoittavat positiivista kehitystä. Lähi-alueen laitokset ovat tulleet luotettavammiksi, ja joidenkin indikaattorien mukaan



Taulukko 1.

Eri projektikategorioiden rahoitus ja osuudet Suomen Ohjelmassa 1991–97.

KoNPP	20 928 kmk	22,7%
LNPP	27 766 kmk	30,1%
Radioaktiivinen jäte	7 781 kmk	8,5%
Viranomaisten tuki	3 116 kmk	3,4%
Ydinmateriaalin valvonta	12 880 kmk	14,0%
EBRD/NSA	19 827 kmk	21,5%
Yhteensä	92 298 kmk	100,0%

niiden käyttö on yhtä hyvää tai jopa parempaa kuin vastaavankäisillä länsimaisilla laitoksilla.

Hyvät käyttötulokset ovat kuitenkin vain yksi puoli turvallisuudesta. Voimalaitosten ikäongelma säilyy: nämä vanhat venäläislaitokset on varustettu järjestelmillä, jotka eivät ole riittäviä vakavista onnettomuuksista selviämiseen. Huolimatta laajoista uudelleenrakennus- ja parannusohjelmista monet länsimaaiset asiantuntijat ovat edelleen sitä mieltä, että nämä laitokset tulisi sulkea välittömästi ja niiden jatkettulle käytölle ei tulla antaa minkäänlaista tukea.

Vaikka useilla Ohjelman projekteilla on ollut selvä suorakin vaikutus, on kohtuullista arvioida, että Suomen Ohjelman päävaikutus lähialueen ydinvoimalaitosten turvallisuuteen on ollut epäsuoraa: muutoksia asenteissa, käyttömenetelmissä, tarkistus-tekniikoissa, koulutuksessa — yhteisellä termillä laitosten turvallisuuskulttuurissa. Viranomaisten avustusprojektien vaikutus on ollut samankaltaista.

Ohjelma on lisännyt suomalaista asiantuntemusta venäläisistä voimalaitoksista sekä edistänyt organisaatioidemme valmiuksia osallistua monenkeskisiin avustusohjelmiin. Ohjelma on luonut hyviä referenssejä suomalaisten tietotaidosta ydinturvallisuusallalla: esimerkkinä mainittakoon APROS-simulaattorin toimitus KoNPP:lle ja nestemäisen jätteen käsittely NURES-laitteistolla.

Ohjelma on suoraan myötävaikuttanut väestön riskien pienenemiseen niin ydin-

voimalaitosten läheisyydessä kuin kauempanakin, mm. Suomessa. Säteilyvalvonta- ja valmiushankkeiden seurauksena aikaisten, tarkkojen ja luotettavien hälytysten saanti on tullut todennäköisemmäksi. Nämähän ovat oleellisia väestön turvallisuudelle voimallaonnottomuuden sattuessa.

Jätehuoltohankkeilla oli myös suora vaikutus lähialueen ympäristöriskien pienentämisessä. Viranomaistoimintaan ja ydinmateriaalien valvontaan liittyvä yhteistyö lähinnä tuki ydinturvallisuusalan infrastruktuurin rakentamista, mikä on oleellista korkean turvallisuustason saavuttamiseksi ja ydinmateriaalien leviämisen estämiseksi.

Jatketaanko yhteistyötä?

Tulevaisuus tuo mukanaan selviä muutoksia yhteistyöympäristöön. Ydinvoimalat vanhenevat ja lähestyvät suunnitellun käyttöikänsä loppua. Tuoreiden uutisten mukaan Venäjä suunnittelee vanhimpien laitosten käyttöönsä pidentämistä. Evaluointiryhmä arvioi, että LNPP- ja KoNPP-yksiköiden aikainen sulkeminen on epätodennäköistä. Laitosten jatkokäyttö on EBRD/NSA:n asettamien avustusehtojen vastaista, mutta mitään pakotteita ei ole, varsinkin kun NSA:n määrärahat on jo käytetty loppuun.

Suomen asema Luoteis-Venäjän sähköntuotantosektorin kehityksessä on tärkeä. Suomen energiapolitiikka ja yhteistyöohjelma eivät saa missään tapauksessa kannustaa sähköntuotantoa vanhoissa, turvallisuudeltaan heikoissa laitoksissa. Ydinturvallisuus-

yhteistyön pitäisi tukea uusien turvallisempien voimalaitosten rakentamista, koska vanhat yksiköt suljetaan vasta, kun uutta tuotantokapasiteettia on tarjolla. Suomen osallistumisen pitäisi siis kohdistua korvaavien energialähteiden rakentamiseen, energian säästön edistämiseen sekä uusien ja turvallisten voimalaitosten kehittämiseen.

Evaluointiryhmän arvioinnin mukaan Suomen ydinturvallisuusalan yhteistyö lähialueella on ollut tehokasta ja tyydyttävästi organisoitua, ja sillä on ollut positiivinen vaikutus. Tätä yhteistyötä tulee jatkaa. Luonnollisesti tulevaisuuden suuntaviivojen määrittely vaatii lieviä uudelleenlinjauksia ja huolellisia poliittisia keskusteluja, joissa tulee ottaa huomioon mm. Suomen ”EU:n pohjoinen ulottuvuus” -aloitteen päämäärät. Lisäksi on huomioitava suurissa kansainvälisissä ydinturvallisuusalan avustusohjelmassa odotettavissa olevat muutokset: EU:n avustusohjelmien merkitys korostuu, kun EBRD:n rahoitus kohdistuu jatkossa Tshernobylin suojarakennushankkeeseen. Lisäksi kohdealueen taloudellinen kehitys, joka evaluoinnin toteutuksen jälkeen on ollut edelleen huonompaan suuntaan, on varsin ratkaisevassa asemassa kohdealueen omien investointien kannalta.

Tarkempaa tietoa on saatavissa evaluointiraportista:

H. Kalli, R. Salomaa, M. Hrehor, J. Ala-Heikkilä: "Evaluation of the Finnish Nuclear Safety Co-operation in the Neighbouring Areas". Ministry for Foreign Affairs, Helsinki, 1998.

Lähialueyhteistyön muotoja, tuloksia ja ongelmia on aikaisemmin käsitelty useissa ATS Ydintekniikan ja ALARA-lehden numeroissa.

TkL Jarmo Ala-Heikkilä,
tutkija TKK:n Energia-
teknologiat-laborato-
riossa sekä ATS:n
johtokunnan sihteeri,
puh. 09 - 4513204,
jarmo.ala-heikkila@hut.fi



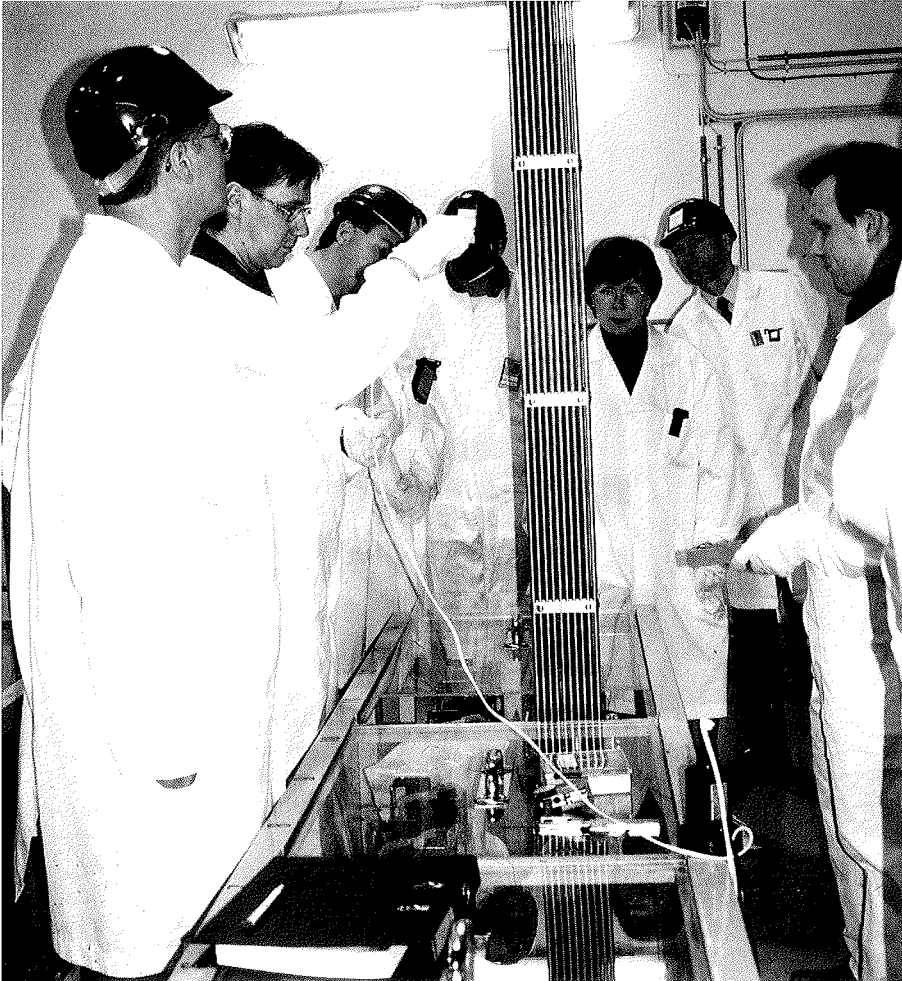
Professori Heikki Kalli,
LTKK:n Ydinvoima-
tekniikan laboratorion
esimies,
puh. 05 - 6212 705,
heikki.kalli@lut.fi



Professori Rainer
Salomaa, TKK:n
Energiateknologiat-
laboratorion esimies,
puh. 09 - 4513 199,
rainer.salomaa@hut.fi



Polttoainetutkimuksen haasteet



Ydinvoimalaitosten polttoaine on viimeisen 20 vuoden aikana kokenut huomattavia muutoksia. Tämän kehityksen käynnistävänä voimana on ollut polttoaineen käytön tehostaminen, joka näkyy lähinnä polttoaineen palaman jatkuvana kasvuna. Palaman kasvaessa on törmätty polttoaineen käyttöä rajoittaviin ilmiöihin. Näiden rajoitusten voittamiseksi on tehty tutkimustyötä, joka on keskittynyt pääasiassa polttoaineen käyttäytymisen tutkimiseen normaaleissa käyttötilanteissa. Transientti- ja onnettomuustilanteisiin liittyvää turvallisuustutkimusta ei aivan viime vuosia lukuun ottamatta ole 80-luvun puolivälin jälkeen juurikaan tehty. Polttoaineeseen liittyvä tutkimus suuntautui tuolloin vakavien onnettomuuksien puolelle.

Kuvassa tuoreen polttoaineen vastaanottotarkastus Olkiluodossa.

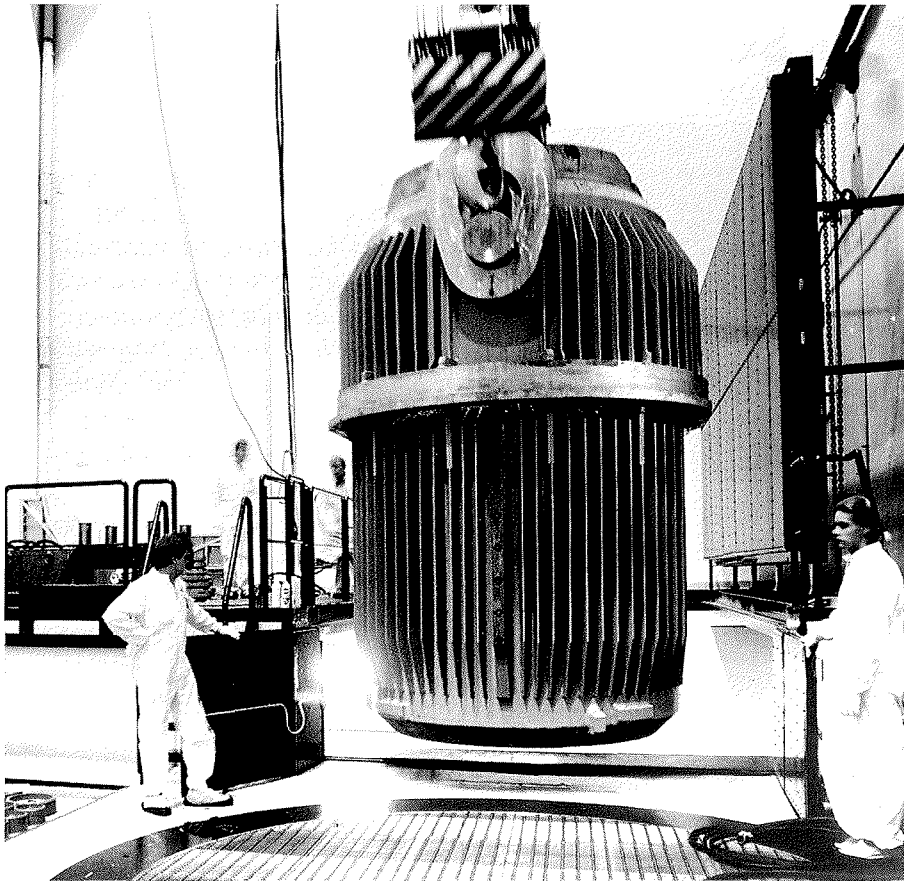
Nykiset polttoaineen transientti- ja onnettomuustilanteita koskevat suunnittelurajat on kehitetty 60- ja 70-luvun aikana tehtyjen polttoainetutkimusten pohjalta. Suunnittelurajoja määriteltäessä tapahtumat jaettiin tuolloin yksinkertaisuuden vuoksi kahteen luokkaan: odotettavissa oleviin käyttöhäiriöihin ja oletettuihin onnettomuuksiin. Odotettavissa oleviksi käyttöhäiriöiksi luokiteltiin tapahtumat, joiden taajuus on kerran laitosten eliniän aikana. Kaikki tätä epätodennäköisimmät tapahtumat luokiteltiin oletetuiksi onnettomuuksiksi.

Odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä suunnittelurajaksi otettiin, että vain pieni osa reaktorisydämessä olevista polttoainesauvoista saa näissä tapahtumissa kokea lämmönsiirtokriisin. Käytännössä tämä tarkoittaa, että polttoaineaurioiden todennäköisyys on tässä tapahtumaluokassa erittäin pieni.

Oletettuja onnettomuuksia koskevat suunnittelurajat perustuvat kahteen onnettomuuteen: jäähdytteenmenetysonnettomuuteen (LOCA) ja reaktiivisuusonnettomuuteen (RIA). Näiden tapahtumien taajuus on erittäin pieni. Tämän seurauksena odotettavissa olevien käyttöhäiriöiden ja oletettujen onnettomuuksien välille jäi suuri aukko. Jotta luoduilla suunnitteluperusteilla voitiin kattaa kaikki tapahtumat ja jotta tapahtumien seuraukset olisivat suhteessa niiden todennäköisyyteen, edellytettiin lisäksi analyyseja tehtäessä eräitä konservatiivisia oletuksia, jotka olivat tärkeä osa itse suunnitteluperusteita. Näin saatiin riittävät turvallisuusmarginaalit, jotta selvittäisiin kaikista ajateltavissa olevista tapahtumista. Nämä suunnitteluperusteet loivat myös kriteerit polttoaineen käytölle normaaleissa käyttöolosuhteissa. Polttoaineen kunto ei käytönaikaisessa säteililytyksessä saanut heikentyä siinä määrin, ettei se kestäisi odotetta-

vissa olevissa käyttöhäiriöissä ja onnettomuuksissa syntyviä kuormituksia edellä esitettyjen kriteerien puitteissa. Näitä suunnitteluperusteita luotaessa polttoaineen maksimi palamat olivat luokkaa 30 MWd/kgU ja palamariippuvia polttoaineen suunnittelurajoja ei ollut syytä laatia.

70-luvun lopun ja 80-luvun alun aikana tehdyissä polttoainekokeissa saatiin lisätietoa siitä miten polttoaine käyttäytyy LOCA- ja RIA-olosuhteissa. Tähän uuteen tietoon perustuen 80-luvulla puolivälissä poistettiin osa laskentamenetelmistä käytetyistä konservatiivisista oletuksista ja siirryttiin käyttämään ns. "best estimate" -laskentamenetelmiä. Kun tämä päätös tehtiin, osa polttoaineen suunnittelurajoihin sisällyneestä alkuperäisestä ideasta menetettiin ja jäljelle jäivät kriteerit isolle LOCA:lle ja RIA:lle. Tämä päätös yhdessä polttoaineteknologiassa tapahtuneiden muutosten vuoksi antoi mahdollisuuden nostaa laitosp-



yksiköiden tehotasoja, lisää polttoaineen palamaa ja pidentää käyttöjaksoja. Tavoitteena oli vähentää polttoainekustannuksia ja ennen kaikkea käytetyn polttoaineen määrää. Tähän mennessä joissakin maissa käyttöjaksot ovat pidentyneet 24 kuukauteen ja polttoaineen maksimipalama ylittää jo 60 MWd/kgU tason. Korkealla polttoaineen palamalla tarkoitetaan yleensä yli 45 MWd/kgU palamaa.

Muutokset polttoaineessa ja reaktorin käyttötavoissa

Polttoaineen palaman kasvattaminen ja käyttöjaksojen pidentäminen vaikuttaa sekä reaktorisydämen lataustapoihin että polttoaineen rakenteeseen, jotka puolestaan vaikuttavat polttoaineen käyttäytymiseen transienteissa ja onnettomuuksissa. Aikaisemmin tuore polttoaine ladattiin reaktorin keskialueelle ja palaman kasvaessa se vähitellen siirrettiin reaktorin reuna-alueelta, matalan tehon aluetta, kohti. Kun noudatettiin tätä ns. vähävuotoista lataustapaa polttoaineen käyttäytymisen kannalta keskeinen lineaariteohistoria laski monotonisesti palaman funktiona.

Polttoaineen palaman kasvattaminen merkitsee myös sitä, että tuoreen polttoai-

neen määrä pienenee. Tämä puolestaan johtaa siihen, että tuoreen polttoaineen reaktiivisuutta on lisättävä, jotta päästään saman pituisiin tai pidempiin käyttöjaksoihin. Jotta voidaan säilyttää reaktorisydämen suunnittelurajat, sellaiset kuin suurin sallittu lineaariteho, sammutusmarginaali ja riittävä marginaali lämmönsiirtokriisiin, on tässä uudessa tilanteessa korkeapalamaiset polttoainepiput ladattava myös tuoreiden, entistä reaktiivisempien polttoaineniippujen viereen reaktorin keskialueelle eli korkean tehon alueelle. Näin polttoaine kokee käyttöhistoriansa aikana tehotransientin, eli lineaariteohistoria ei enää olekaan monotonisesti laskeva. Tämä vaikuttaa moniin transientti- ja onnettomuusikäytämisen kannalta merkittäviin asioihin polttoaineessa, kuten esimerkiksi polttoaineen kaasutilaan tapahtuvan fissiokaasujen vapautumiseen. Näillä tekijöillä on ratkaiseva merkitys polttoaineen käyttäytymisen kannalta normaaleissa käyttöolosuhteissa, transienteissa ja onnettomuuksissa siten, että korkeapalamainen polttoaine seuraa vieressä olevan tuoreen polttoainepipun käyttäytymistä.

Tuoreiden polttoaineniippujen reaktiivisuuden nostaminen on myös johtanut eräisiin merkittäviin muutoksiin polttoaineniippujen rakenteessa. Korkeampi polttoai-

neniippujen reaktiivisuustaso voidaan saavuttaa joko lisäämällä polttoaineen rikastustasetta tai vähentämällä polttoaineen määrää (lisäämällä veden määrää) polttoaineniippuissa. Myöskin ohuempien polttoainesauvojen käyttö on tullut välttämättömäksi lineaaritehojen pitämiseksi kurissa. Polttoaineniippujen rakennetta onkin muutettu radikaalisti kuluneiden 10 vuoden aikana. Niippujen sauvahilat ovat muuttuneet kiehutusvesireaktoreissa 8 x 8 hilasta 10 x 10 hilaan ja painevesireaktoreissa 14 x 14 hilasta 17 x 17 hilaan. Kiehutusvesireaktoreissa käytetään lisäksi nipun sisällä vesikanavia ja osapitkiä polttoainesauvoja. Lisäksi molemmissa laistotyypeissä polttoainesauvojen paksuus vaihtelee nipun eri osissa. Kaikella tällä pyritään nipun sisäisen tehokautuman tasoittamiseen ja sitä kautta lineaaritehojen pitämiseen kurissa. Reaktiivisempien polttoaineniippujen käyttö on merkinnyt myös sitä, että polttoainesauvoissa on reaktiivisuuden kompensoimiseksi käytettävä entistä enemmän palavaa myrkyä. Tämä omalta osaltaan heikentää uraanidioksidin lämmönjohtavuutta.

Korkeampi polttoaineen palama merkitsee myös merkittäviä muutoksia polttoaineen ominaisuuksissa. Merkittävimmät näistä muutoksista ovat:

- uraanidioksidin lämmönjohtavuuden heikkeneminen
- polttoainetablettien reuna-alueelle syntyvä erittäin korkean palaman alue (ns. rim-ilmio)
- fissiokaasujen syntyminen polttoainetablettiin ja sen vapautuminen polttoainesauvan kaasurakoon
- polttoainesauvan suojakuoren hapettuminen ja siihen liittyvä hydridoituminen
- polttoainesauvojen ja -niippujen taipuminen
- polttoaineen ja suojakuoren välinen kemiallinen vuorovaikutus (ns. bonding-ilmio)
- polttoainetablettien taipumus murentua transienteissa ja onnettomuuksissa polttoainematriisissa olevien korkean fissiokaasumäärien vuoksi.

Näillä tekijöillä saattaa olla merkittävä vaikutus yhdessä uuden polttoaineen lataustavan kanssa polttoaineen käyttäytymiseen transienteissa ja onnettomuuksissa. Yksi merkittävä tekijä on korkeapalamaisen polttoaineen lämpötila eli varastoitunut energia. Vaikka polttoainepipun teho palaman funk-

tiona vähitellen laskee ja näin ollen sen lämpötila pyrkii myös tätä kautta laskemaan, vaikuttavat uraanidioksidin lämmönjohtavuuden pieneneminen, rim-ilmio, fissiokaasujen vapautuminen polttoainesauvan kaasurakoon, polttoainesauvan hapettuminen ja palavan myrkyin käyttö polttoainesauvoissa toiseen suuntaan. Näiden tekijöiden ja uuden lataustavan seurauksena korkeapalalaisen polttoaineen lämpötila saattaa olla yhtä korkea kuin tuoreessakin.

Polttoaineen suojakuoren hapettuminen ja hydridoituminen heikentää polttoaineen suojakuoren kestävyttä. Nykyisin tyypillinen suurin sallittu oksidipaksuus normaaleissa käyttöolosuhteissa on noin 100 mikrometriä. Tämä on suunnilleen sama oksidipaksuus, joka suojakuorelle sallitaan onnettomuustilanteissa. Ongelmaksi muodostuu, kuinka tämä transientin alkutilassa oleva oksidikerros otetaan huomioon transientitilanteissa.

Polttoainesauvojen ja -nippujen taipumat vaikuttavat lähinnä nippujen reaktiivisuuteen ja sauvojen jäähtytävyyteen.

Palaneen polttoainetabletin taipumus murentua saattaa lisätä fissiotuotteiden vapautumista onnettomuustilanteissa, kun polttoainesauva korkean lämpötilan seurauksena pullistuu ja puhkeaa. Tällöin murentunut polttoaine saattaa päätyä jäähtytteeseen ja sitä kautta myös ympäristöön.

Polttoainetutkimuksen näkymät

Polttoainetutkimus on keskittynyt viimeisten 10 - 15 vuoden aikana varmistamaan, että polttoaineen kestävä normaaleissa käyttöolosuhteissa. Tämä tutkimus on lähinnä keskittynyt polttoaineen suojakuorimateriaalin parantamiseen. Suurimpana ongelmana on ollut suojakuorimateriaalin hapettuminen ja huonot PCI (pellet cladding interaction) -ominaisuudet. Näitä ongelmia on pyritty poistamaan suojakuorimateriaalin lämpökäsittelyä parantamalla ja muuttamalla suojakuorimateriaalin koostumusta. Näissä yrityksissä onkin onnistuttu hyvin ja normaaleissa käyttöolosuhteissa polttoainevaurioiden määrä on yleisesti ottaen laskenut.

Korkeapalalaisen polttoaineen tutkiminen transientti- ja onnettomuusolosuhteissa on sen sijaan ollut hyvin puutteellista aivan viime vuosiin asti. Muutamia yksittäisiä ko-

keita on tehty sekä LOCA- että RIA-olosuhteissa. Merkittävin koesarja on tehty Ranskan Cadarachessa, jossa on tutkittu polttoaineen käyttäytymistä RIA-olosuhteissa. Puutteena näissä kokeissa oli, että koelaitteisto oli alun perin tehty nopeiden hyötöreaktoreiden polttoaineen tutkimista varten ja jäähtyneenä oli natrium. Tämän seurauksena polttoaineen käyttäytymistä voitiin tutkia vain aivan RIA:n alkuhetkillä. Lisäksi neutronitehon puoliarvoleveys on liian pieni verrattuna kevytvesireaktoriolosuhteisiin.

Nämä kokeet kuitenkin paljastivat sen, että korkeapalalaisen polttoaineen vaurioitumisrajat ovat paljon alempana kuin tuoreella polttoaineella. Japanilaiset korkeapalalaiselle polttoaineelle tekemät kokeet vahvistavat tämän tuloksen. Nämä koesarjat eivät kuitenkaan vielä riitä ongelman selvittämiseen ja uusien polttoaineen suunnittelurajojen määrittämiseen, vaan lisäkokeita tarvitaan todellisissa kevytvesireaktoriolosuhteissa. Etenkin lämmönsiirtokriisin merkitys polttoaineen käyttäytymiselle RIA-olosuhteissa tulee selvittää.

Cadaracheen onkin tarkoitus rakentaa olemassa olevaan laitteistoon vesipiiri ja jatkaa tällä koelaitteistolla koeohjelmaa. Neuvottelut koeohjelman rahoituksesta on parhaillaan meneillään. Uusi vesipiiri on tarkoitus rakentaa seuraavan parin vuoden aikana ja koeohjelma on suunniteltu saatavan loppuun vuoteen 2005 - 2006 mennessä.

Yksittäisiä LOCA-kokeita on toistaiseksi tehty korkeapalalaiselle polttoaineelle vain Ranskassa. Sielläkin on lähinnä keskittynyt suojakuoren hapettumisen tutkimiseen. Näiden kokeiden tuloksena on ollut tieto, että olemassa oleva oksidikerros suojakuoren pinnalla kiihdyttää polttoaineen suojakuoren hapettumista onnettomuusolosuhteissa. Integraalisia kokeita LOCA-olosuhteissa korkeapalalaiselle polttoaineelle on toistaiseksi tehty vain yksi Ranskassa ja sekin tehtiin lähinnä fissiotuotteiden vapautumisen tutkimiseksi eivätkä koelolosuhteet kaikilta osin olleet kohdallaan. Tältäkin osin lähitulevaisuudessa tilanne tulee paranemaan kun USA:ssa NRC käynnistää Argonnen kansallisessa laboratoriossa tutkimusohjelman, jossa tutkitaan monipuolisesti korkeapalalaisen polttoaineen käyttäytymistä LOCA-olosuhteissa. Tutkimusohjelma on tarkoitus viedä läpi vuoteen 2002 - 2003 mennessä.

Tilanne Suomessa

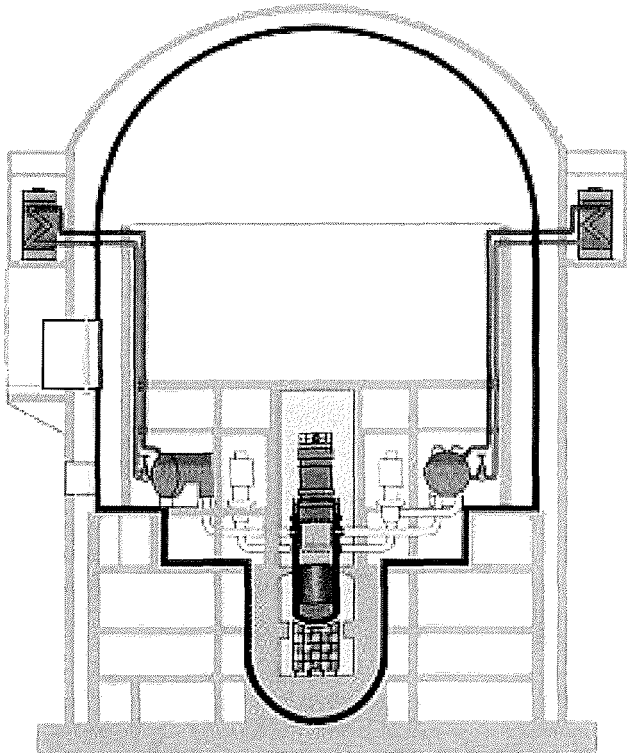
Polttoaineen palaman osalta tilanne Suomessa on toistaiseksi hyvä. Polttoaineen palamat ovat sekä Loviisassa että Olkiluodossa rajoitettu tasolle, jossa korkeapalailmiöt eivät vielä tule esiin. Näin ollen olemassa olevia polttoaineen suunnittelurajoja transientti- ja onnettomuustilanteissa voidaan edelleen käyttää sellaisinaan eikä lisärajoitusten tarvetta tällä hetkellä ole. Lisäksi Loviisassa tilanne polttoaineen hapettumisen osalta on hyvä. Loviisassa suojakuoren hapettumista rajoittaa suojakuorimateriaali, reaktorin alhainen käyttölämpötila ja vesikemia.

Polttoaineen ja reaktorin uudenlainen käyttötapa sekä ns. "best estimate" -analyysimenetelmien käyttöönotto yhdessä polttoaineen palamaan mahdollisesti liittyvien muutosten vuoksi on kuitenkin johtanut siihen, että polttoaineen suunnittelurajoja tultaneen tulevien vuosien aikana joiltakin osin muuttamaan. Tämä vaatii kuitenkin kokeellisen tiedon saamista korkeapalalaisen polttoaineen käyttäytymisestä transientti- ja onnettomuustilanteissa.

FK Keijo Valtonen on ylitarkastaja Säteilyturvakeskuksen ydinvoimalaitosten valvontaosastolla.
Puh. 09 - 7598 8331,
keijo.valtonen@stuk.fi



Brief Description of VVER-640



Steam generator passive heat removal system

Development and realization of NPP new designs with improved technical characteristics and economic indices is an urgent necessity for progress in the nuclear power, being a part of the Russian fuel-and-power complex, and a priority-oriented problem of the RF Nuclear Power Ministry (Minatom). Within the scope of the state Programme "Ecologically Pure Power" there was developed the design of the new generation medium-power NPP with a VVER-type reactor of 640 MW electric power (with a B-407 reactor plant).

The new generation NPP design completely meets the most stringent up-to-date safety requirements of the world and home codes and standards and ensures the competitiveness with the best world analogues as regards the technical characteristics and economic indices.

The NPP with VVER-640 is at a stage of the detail design, including along with the technical and economic studies the "Preliminary Safety Analysis Report" and "Probabilistic Safety Analysis", allowing to carry out a full-scope procedure of the design qualification and licensing.

Meeting the home safety standards by the design is assured proceeding from the applicable Russian laws, due to the licensing procedure accepted by GOSATOMNADZOR (Nuclear and Radiation Safety Authority) of Russia to confirm NPP safety. At present for the Kola-2 NPP and Scientific-and-Industrial Centre of Nuclear Power (SIC NP) in Sosnovy Bor permits (licenses) are issued for the sites and construction, it shall be stated that these permits are the first

ones in Russia since the licensing procedure has been introduced.

Apart from the review in the appropriate home supervisory authorities to confirm the correspondence of the accepted solutions to the world safety criteria and requirements, the design was subjected to a comprehensive examination by the leading expert company of Germany in the sphere of nuclear power - Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH- (GRS), which positively appraised the presented documentation.

This design due to positive appraisals both in Russia and abroad attracts the attention of the world-known Western companies advising their co-operation within its frames.

Nowadays such co-operation is being implemented in particular with Siemens AG in the field of substantiation of the containment reliability, development and delivery of I&C systems, severe accident analysis and other sections of the design.

The advantages of the considered design made it possible for Minatom to come to a

decision to select it as a principal one among the base designs for development of nuclear power in Russia for a period up to 2015.

Now the Federal and local authorities have made the decisions aimed at construction of eight nuclear power units with VVER-640 on the territory of Russia (one unit as a part of SIC NP in Sosnovy Bor, three units at the Kola-2 NPP and four units at the Dalnevostochnaya NPP), the work related to the preparatory period at the Kola-2 NPP and in Sosnovy Bor has already been started.

At present time Russian utility picked up positive review from Gosatomnadsor RF for start construction SIC NP at Sosnovy Bor and first unit at Kola-2 NPP.

The design of the NPP with VVER-640

The design of the NPP with a VVER-640 (B-407) reactor plant was developed in compliance with the State Programme

"Ecologically Pure Power". The responsibility for this design development and realization in compliance with the Russian laws and normative documentation in force is placed on:

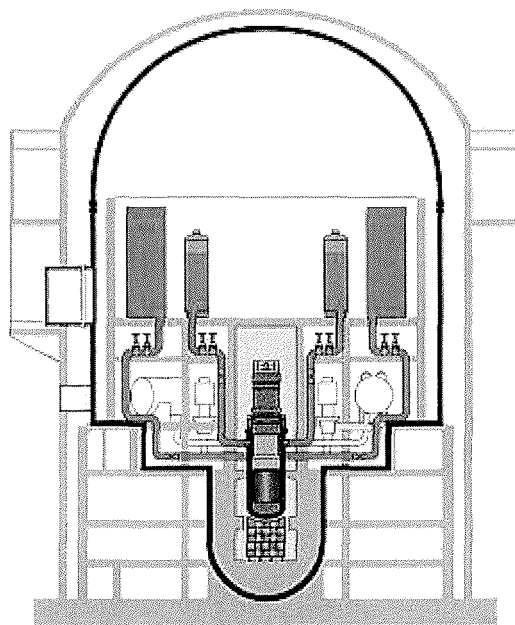
- St. Petersburg Institute "Atomenergoproekt" (SPAEP), General designer of the new generation NPP with a VVER-640 reactor plant (196036, Saint Petersburg, Suvorovsky pr., 2a)
- OKB "Gidropress" (OKB GP) General designer of the VVER-640 (B-407) reactor plant (142103, Podolsk, Moscow region)
- Russian Scientific Centre "Kurchatov Institute" Scientific manager (123182, Moscow, Kurchatov sq., 1).

The principal engineering objectives solved in the design of the NPP with VVER-640:

- enhance the NPP safety by passive systems under different accidental situations including the refuelling and repair work without any limitation in time, in principle, and without any off-site power sources;
- raise the level of reliability, safety and availability due to utmost utilization of experience in creation and operation of power units with VVER-440 and VVER-1000 reactors;
- lower the NPP response to personnel errors and extreme external events;
- improve the specific technical-and-economic indices on fuel, rolled steel, reinforced concrete, etc. thanks to optimization of systems, equipment and modernization of the reactor core.

A 35-year experience in creation of NPPs with VVER in Russia and abroad (Finland, Germany, Czech Republic, Slovakia, Bulgaria, etc.) is a strong foundation for realization of the objectives stated in the design of the NPP with VVER-640 (B-407). This development has accumulated, in a considerable degree, the knowledge of leading designers and experience in designing, manufacture, adjustment and operation of NPPs with VVER-440 and VVER-1000 in compliance with the international requirements. The operating time of this type NPPs makes up:

- NPPs with VVER-440 - more than 430 reactor-years
- NPPs with VVER-1000 - more than 130 reactor-years.



ECCS accumulator tank system and ECCS

The power unit of the NPP with VVER-640 is intended for electric power generation under base load conditions. Provision is made for possible heat supply to off-site consumers (an alternative has been studied with a possible heat output up to 1000 Gcal/h). In the design the evaluations are given, which show that there is a possibility, in principal, to realize the power cycling. The power unit basic design characteristics are presented in Table 1.

The NPP power unit includes: the reactor building, turbine building, auxiliary building, control building, complex of general-station auxiliary buildings. Layout of the power unit main buildings is presented in Figures 1 and 2.

The NPP power unit consists of the reactor plant B-407 and turbine plant. The two-circuit thermal diagram is used for the power unit. The primary circuit includes: thermal-neutron reactor VVER-640 (B-407), four primary circulation loops, steam pressurizer and auxiliary equipment located within the tight containment. The every loop comprises: horizontal steam generator, reactor coolant pump, primary circulation pipeline Dnom 620 of stainless steel.

From the viewpoint of safety enhancement the following alterations in comparison with the VVERs of previous generations are important:

- lower power density in the core due to reactor thermal power decrease, its pressure vessel and internals being unified with those for the VVER-1000;

- lower neutron flux on the reactor pressure vessel due to thermal power decrease and envisaged refuelling procedure, which enables to reduce the neutron leakage from the reactor core;
- higher effectiveness of the reactivity control system by increasing the number of control and protection system mechanical operating devices (121 pcs instead of 61 pcs for the analogue);
- reduced diameter of the reactor pressure vessel nozzles (620 mm instead of 850 mm for the analogue), therefore stainless steel pipelines can be used and there is a possibility to lower emergency loads and aftereffects of accidents caused by the primary circulation pipeline rupture;

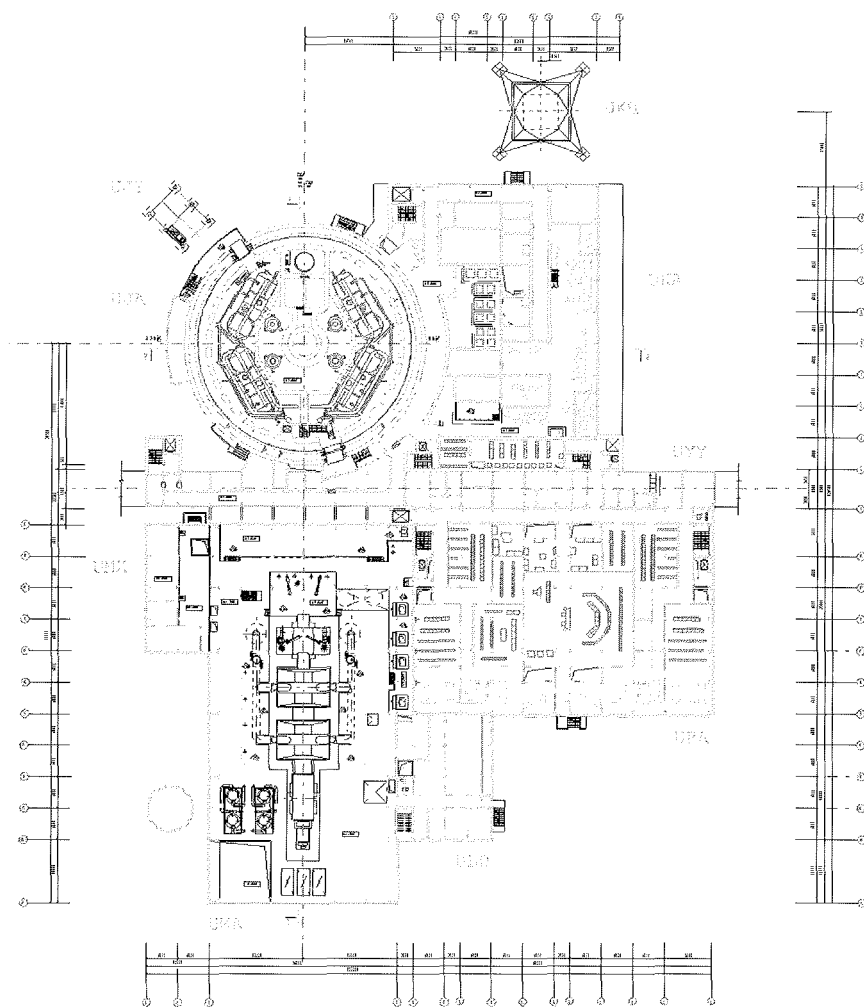
- improved design of reactor internals and shielding tube unit, which enables to solve the problems induced by the fuel assembly geometry change during operation and, as a result, sticking the control and protection system absorbing rods.

The lower thermal power value for the VVER-640 core considerably enlarges the available departure from the nucleate boiling for coolant (2.77 and 1.85 at the rated power level for VVER-640 and VVER-1000 accordingly), thus new qualitative advantages are created as regards the reliability margins of the medium-power unit.

It is essential to emphasize a number of preferable features characteristic of the NPP with VVER-640, following from complete functionality of the emergency protection, which assures, with no regard to the action of the most effective absorbing rod in the control and protection system, having been stuck in the extreme top position, compensation of the summary influence, produced by the following factors:

- fuel temperature change at reactor power variation from 100% to 0% with subsequent fuel cooling down to 373 K;
- coolant mean temperature change from a rated one to 373 K with simultaneous unfrozen boric acid concentration lowering in the primary circuit down to 0.

The reduced specific loads, large reserves of the primary coolant and feed water in steam generators, layout, ensuring developed natural circulation in the circuits, removing heat from the reactor core to the ultimate heat sink, relative to the power rated



Explication of Power Unit Buildings and Structures

UJA	Reactor Building
UKA	Auxiliary Building
UBA	Control Building
UYY	Trestlework Building
UMA	Turbine Building
ULD	Condensate Purification Building
UMX	Cooldown and Oil Facilities Building
UJY	Transport Trestlework
UKH	Ventilation Stack with Air Ducts

level, when compared with a reactor plant of the NPP with

VVER-1000, - all these factors create actual advantages of the VVER-640 reactor plant as regards its stable withstanding the power transients and assuring safe run of emergency conditions with coolant leaks. The controlled area in accordance with this design is located within the NPP site fence. Following the requirements of the normative documents determined were the radii of the supervised area and emergency planning area, they are 30 km and 1.5 km accordingly.

Basic design characteristics of the power unit

N	Name	Unit of measurement	Table 1 Design value
1	2	3	4
1	Design lifetime:		
	- power unit	year	50
	- reactor vessel	year	60
2	Reactor plant		VVER-640 (B-407)
3	Power:		
	- thermal power	MW	1800
	- electric power	MW	640
4	Average specific power density of reactor core	kW/l	64.5
5	Primary circuit coolant pressure	MPa	15.7
6	Coolant temperature:		
	- at reactor core inlet	°C	293.9
	- at reactor core outlet	°C	323.3
7	Number of circulation loops	pc.	4
8	Steam pressure at steam generator outlet	MPa	7.06
9	Turbine		K-600-6.9/50
10	Number of turbines per power unit	pc.	1
11	Turbine capacity	MW	645
12	Generator		T3B-640-2Y3
13	Power unit net Efficiency	%	33.3

Safety systems

The safety systems include both conventional systems, based on the principles of coolant forced injection and circulation and having emergency power supply from diesel-generator plants, and systems for passive heat removal to the ultimate heat sink, which enable to overcome all design-basis accidents without off-site power supply.

Steam generator passive heat removal system

Steam generator passive heat removal system consists of trains, performed independently by the process connections. Every system train includes passive heat removal heat exchanger, startup valves and pipelines and in complete set with the steam generator forms unified system, performing the function of the reactor plant cool-down. The system consists of four independent trains with redundancy 4x50%. To perform its functions the system does not require electric power supply sources and it is intended for residual heat removal from the reactor under conditions of complete loss of electric power supply sources at the reactor plant primary and secondary circuits being tight, and also for pressure decrease in the primary circuit in case of accident with the primary circuit small and medium breaks.

ECCS accumulator tank system and ECCS tank system

ECCS accumulator tank system is intended for the cooling water supply at the core inlet and for keeping the coolant volume in the primary circuit under conditions of leakages with the primary circuit pressure $P_{1k} < 4.0$ MPa. The system consists of four independent trains with redundancy of 4x50%. Every train includes accumulator tank with boron solution reserve under the pressure, being created by the nitrogen cushion, valves and pi-

pelines. Every accumulator tank is connected to the reactor collecting chamber by the pipeline with diameter of 219 mm, where to check valves are installed, which are intended for the accumulator tank cutoff from the reactor at the reactor plant normal operation with $P_{1k} > 4.0$ MPa. The system is operating in accordance with the passive principle, therefore, to activate the system it is not required to have any control signals and interlockings.

ECCS tanks (tanks of atmospheric type) are intended for the reactor core flooding with the aim of long-term residual heat removal and they are operating at the primary circuit pressure of 0.29 MPa, as minimum. The system consists of four independent trains with redundancy of 4x50%. Every train includes the tank of atmospheric type, filled up with boron solution, valves and pipelines. ECCS tanks are connected to the reactor pressure chamber by the pipeline with diameter of 159 mm. At every pipeline two check valves are installed, which are intended for the tank cutoff from the reactor under the conditions of the reactor plant normal operation. Working pressure difference between the reactor and tank ensures reliable isolation of the check valve gate and the tank protection against the reactor overpressure. The system is operating under the hydrostatic force effect, therefore, for the system activation any control signals and interlockings are required.

Anatoli V. Molchanov
piti tämän esitelmän
ATS seminaarissa syksyllä 1998.

Anatoli V. Molchanov is
Head of Department,
Saint Petersburg Research and
Design Institute ATOMENERGOPROEKT,
Tel (812) 2778587, fax (812) 2770703.

REACTOR PLANT B-407

Rated thermal power, MW	1800
Number of loops, pcs	4
SG steam pressure, MPa	7.06
Reactor core outlet pressure, MPa	15.7
Reactor coolant temperature:	
inlet, K	569.5
outlet, K	600.0
Makeup fuel enrichment, %	3.6
Average fuel burnup, MW*day/kg (U)	40.4
Average specific power density of reactor core, kW/l	65.4
for comparison in reactor plants:	
VVER-1000, kW/l	109
VVER-440, kW/l	86.3

TURBINE PLANT

K-600-6.9/3000 manufactured by "Steel Works" (MZ) Saint Petersburg

The turbine plant developed at MZ is delivered in complete set with the turbogenerator developed at "Elektrosila"

Turbine rated capacity, MW	645.0
Possible heat output, Gcal/h	250.0
Speed, rpm	3000
Parameters of main steam before turbine:	
pressure, kgf/cm ²	68.0
temperature, °C	284.5
degree of dryness	0.995
Condenser pressure, kgf/cm ²	0.049
Specific heat flowrate, kcal/kW.h	2389.5

The turbine plant is a tandem-compound steam turbine with a high-pressure cylinder, an intermediate pressure cylinder and two double-flow low-pressure cylinders. The last stage is fitted with a 1200 mm long titanium blade. The generator is provided with complete water cooling, the hydrogen being unnecessary. The auxiliary consumers power supply is ensured at 6 kV, 0.4 kV and 220 V D.C.

CONTAINMENT

Inside diameter, m	41
Total volume, m ³	60000
Design pressure, MPa	0.5
Design temperature, °C	150
Design leakage from the inner containment	no more than 0.1% tight space during 24 hours

The containment is a structure composed of two concentrically placed inner and outer containments, their simultaneous damage being in practice impossible. The inner containment is designed to withstand loads arising at reactor plant accidents. The outer containment is intended for protection of the inner one against external effects. In a space between the inner and outer containments small underpressure is maintained and exhaust air passes through filters to the ventilation stack.

The inner containment is made of steel and has a form of a cylinder with a semi-spherical dome.

The outer containment is made of reinforced concrete and designed for external effects:

- aircraft wreck
- blast wave
- seismic effects.

Energiailmasto

Teknillistieteelliset akatemit on vastikään julkaissut raportin Ilmastopöytäkirja ja Suomen energiatalous. Siinä tarkastellaan Suomen energiatalouden ja -politiikan kykyä sopeutua kansainvälisten sopimusten asettamiin vaatimuksiin. Raportti on sattuvasti ajoitettu vuonna 1997 hyväksytyyn Suomen energiastrategian toteutumisen tarkasteluvaiheeseen, ja se puuttuu samoihin kysymyksiin kuin kauppa- ja teollisuusministeriön asiaa koskevat selvitykset. Raportti tarjoaa kiihköttömän tieteellisen analyysin eri toimien tarjoamista mahdollisuuksista ja niiden rajoituksista. Silläkin uhalla, että toistan tässäkin lehdessä jo esillä olleita teemoja, tarkastelen raportin keskeisiä johtopäätöksiä - asiahan ei ole vältettävissä energia-alan työssä.

Raportin lähtökohtana on luonnollisesti ilmastopöytäkirja ja Kioton pöytäkirja. On syytä muistaa, että ilmastopöytäkirjan eräänä mallina on ollut yläilmakehän otsonikerroksen suojelua koskeva kansainvälinen sopimus, joka erityisesti kohdistuu CFC-kaasujen käyttöön. Tämä sopimus on johtanut hyvään tulokseen, sillä näitä kaasuja on esimerkiksi korvattu muilla vaarattomammilla aineilla. Raportissa muistutetaan, että kasvihuonekaasuja on oleellisesti vaikeampi vähentää kuin CFC-kaasuja. Kasvihuonekaasujen päästön rajoittaminen koskee paljon laajempaa teollista toimintaa kuin CFC-kaasujen. Toiseksi se koskettaa välittömästi ja laajasti myös kehitysmaita. Kolmanneksi hiilidioksidin poistoon savukaasuista ei ole vielä pitkään aikaan käytettävissä taloudellisesti soveliaa tekniikkaa. Niinpä kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisestä on tullut ongelma, josta sekä poliittiset että taloudelliset valtiopiirit kiistelevät voimakkaasti.

Suomi on sitoutunut täyttämään ilmastopöytäkirjan ja Kioton pöytäkirjan mukaiset velvoitteet. Hallitustenvälinen tieteellinen ilmastopaneeli suosittelee seuraavia keinoja velvoitteiden täyttämiseksi: tehokkuuden parantaminen energian tuotannossa ja käytössä, kivihiiheen käytön vähentäminen sekä päästöttömien ja uusiutuvien energianlähteiden käytön lisääminen. Suomelle nämä keinot eivät tarjoa suuria mahdollisuuksia. Suomessa oli jo vuoteen 1990 mennessä suureksi osaksi toteutettu em. paneelin suosittelemat energian käytön ja tuotannon tehostamistoimet. Raportti käy läpi keinovalikoiman ja tulee siihen tulokseen, että ydinvoiman lisärakentaminen on realistinen ja kasvihuonekaasujen päästön vähentämisen kannalta tehokkain vaihtoehto. Maamme vesivoimavarathan ovat jo lähes täysin hyödynnetyt ja ilmastolliset olosuhteet tarjoavat vain rajoitettuja mahdollisuuksia tuuli- ja aurinkoenergian käyttöön.

Ydinenergia pystyisi korvaamaan fossiiliset polttoaineet sähköntuotannossa suuressa osassa teollisuusmaita, jos se saa-

vuttaisi riittävän yhteiskunnallisen hyväksynnän. Ilmastomuutoksen torjunnan kannalta se on tietysti ihanteellinen ratkaisu, koska kasvihuonekaasuja syntyy vain välillisesti voimaloiden rakentamisen ja polttoaineen valmistuksen yhteydessä. Käytettävissä olevat uraanivarat eivät aseta rajoituksia ydinvoiman käytön laajentamiselle. Itse asiassa suurvaltojen ydinasevarastojen purku merkitsee erittäin suurta potentiaalista ja taloudellisesti edullista energiavarantoa. Useimmissa kehitysmaissa ei ole vielä moniin vuosikymmeniin sellaista infrastruktuuria, jonka puitteissa turvallinen ydinenergia käyttö on mahdollista.

Johdonmukainen lukija päättelee raportin perusteella, että teollisuusmaiden veloitteena on suosia fossiilisten polttoaineiden korvaamista uusiutuvilla energialähteillä ja ydinvoimalla. Kasvihuoneilmiö on noussut yleiseksi puheenaiheeksi, ja sen luulisi vaikuttavan energiamaailman ydinvoimaa suosivasti. Ainakaan toistaiseksi näin ei ole käynyt. Television ajankohitaisohjelmissa esiintyy niin koti- kuin ulkomaisiakin asiantuntijoita, jotka todistavat, että ydinvoiman lisärakentaminen ei ole mahdollista, koska "kukaan järkevä ihminen ei voi suosia ydinvoimaa". Suoranaiseen akrobatiaan ylsi se selittäjä, joka ilmoitti ydinvoiman olevan poissa pelistä, koska "se on toisaalta liian kallista ja toisaalta liian halpaa" — liian kallista kilpailemaan mm. maakaasun kanssa ja liian halpaa edistämään energian säästöä.

Kansalaiset ovat tottuneet siihen, että valtio pitää huolen maan infrastruktuurista. Energiahuolto on vanhastaan luettu valtiovallan kaitsemiin perusasioihin, mikä oletamus pätkin aivan viime vuosiin asti. Siihen on siis vara suhtautua asenteellisesti, koska sen taattu ja turvattu asema sallii yliolkaisten ja huolettoman kiukuttelun. Onneksi vastuullisessa asemassa olevat päättäjät ovat jo tiedostaneet muuttuneen tilanteen, ja poliittinen keskustelu energiantuotannosta yleensä ja ydinvoimasta erityisesti on Suomessa tällä hetkellä paljon asiallisempaa kuin useissa muissa Euroopan unionin maissa. Maamme energiailmasto mahdollistaa ympäristösopimuksen velvoitteiden täyttämisen, kuten raportissa todetaan, mutta tämä edellyttää sekä merkittäviä poliittisia päätöksiä että huomattavia taloudellisia panostuksia. Tehtävää on sekä uudella hallituksella että perusenergiaa käyttävällä teollisuudella.

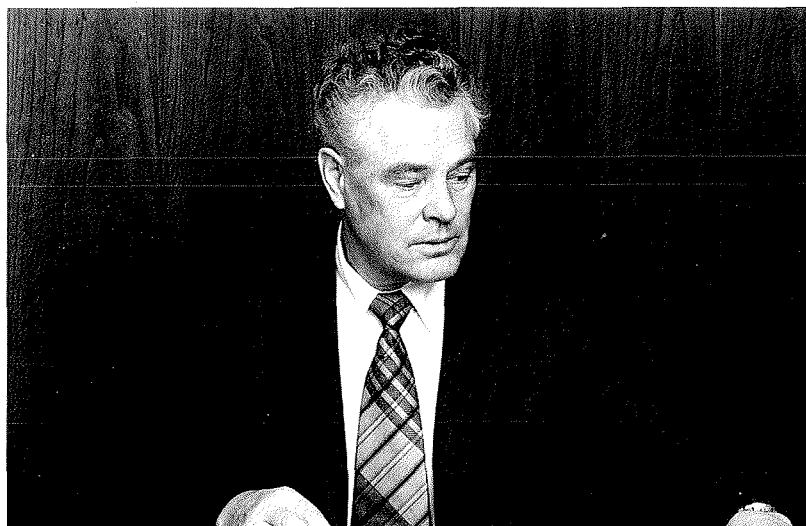


In Memoriam



*Tämän talven aikana ovat meidät jättäneet Suomen Atomiteknillisen Seuran kunniajäsenet **Erkki Laurila** (yllä) ja **Pentti Alajoki**. Yhdessä monien muiden kanssa nämä henkilöt ovat olleet suomalaisen ydinvoiman uranuurtajia.*

Erkki Laurila nimitettiin Teknillisen korkeakoulun ensimmäiseksi teknillisen fysiikan professoriksi vuonna 1945. Siitä lähtien myöhemmällä akateemikolla oli suuri osuus Suomen ydinvoimateollisuuden henkisen ja fyysisen infrastruktuurin luomisessa. Käytännön työn sinetöi Suomen ensimmäisen tehoreaktorin rakennuttaminen. ImatranVoima Oy:ssä tämän hankkeen vei päätökseen vuorineuvos Pentti Alajoki.



SUOMEN
ATOMITEKNILLINEN
SEURA -

ATOMTEKNISKA
SÄLLSKAPET
I FINLAND ry



Kannatusjäsenet

ABB Power Oy
Fortum Oil and Gas Oy
Fortum Power and Heat Oy
Fintact Oy
Oy Helium Gas Research HGR Ltd
Kemira Oy, Energia
Mercantile-KSB Oy Ab
NAF Oy
Perusvoima Oy
Pohjolan Voima Oy
Posiva Oy
PRG-Tech Oy
Rados Technology Oy
Rejlers Engineering Oy
Saario & Riekkola Oy
Siemens Oy
Soffco Oy Ab
Suomen Atomivakuutuspooli
Suomen Malmi Oy
Teollisuuden Voima Oy
VTT Energia
YIT-Yhtymä

ATS internetissä: <http://www.vtt.fi/ene/eneydi/ats/index.html>