

ATS Ydintekniikka

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA - ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND RY

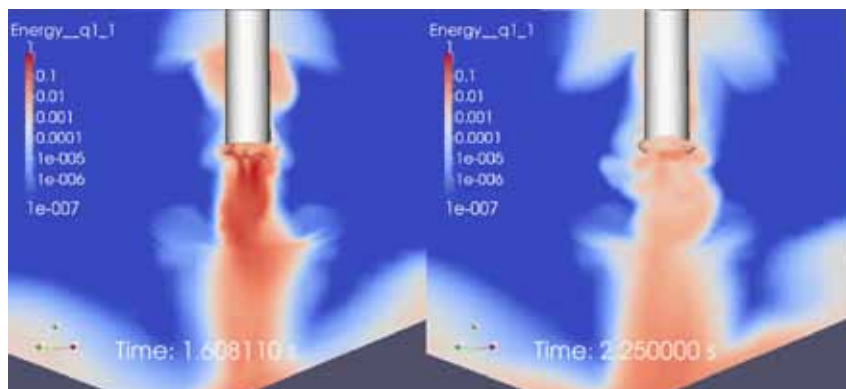
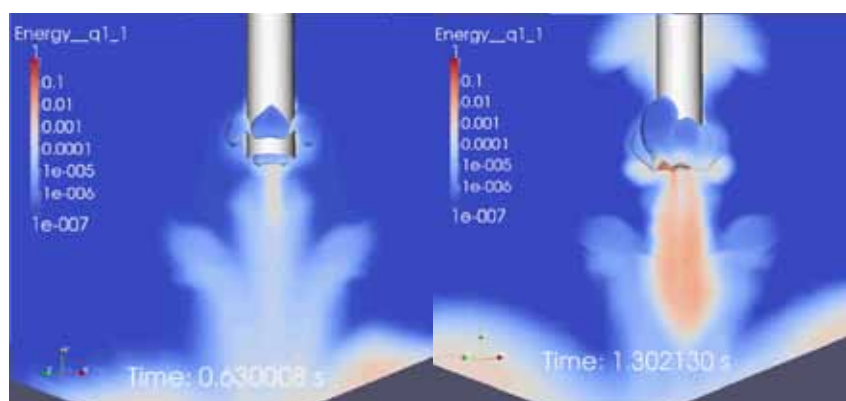
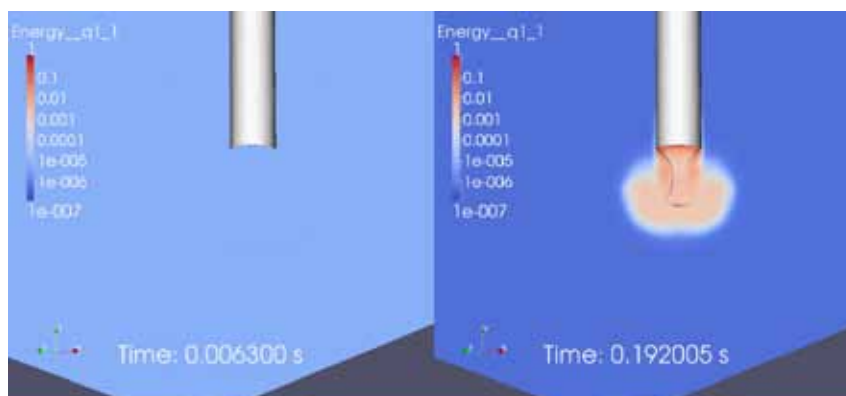
1  2012 vol. 41

Gen4

NETNUC

Tässä numerossa:

- 3** Pääkirjoitus: Neljäs reaktorisukupolvi ja resurssien riittävyys
- 4** Editorial: Fourth Generation of Reactors and Resources
- 5** Tapahtumia
- 9** Osaamistyöryhmän työ valmistui
- 12** NETNUC-projekti
- 15** HPLWR:n reaktoridynamiikan mallintaminen
- 17** Jyväskylän kiihdytinlaboratorion mittaukset
- 22** Toriumpolttoaineen tutkimus Aalto-yliopistolla
- 25** Turvallisuusperiaatteet ja ulkoiset uhat
- 27** Diplomityöt
- 33** Reaktorin laidalla
- 34** Yhteystiedot



Kuva: Vesa Tanskanen, LUT.

Päätoimittajalta

ATS Ydintekniikka on jäsenkäselyn perusteella yksi arvostetuimmista ja konkreettisimmista jäseneduista, mitä seuran jäsenmaksulla saa. Lehteä on perinteisesti toimitettu oman työn ohessa. Lehti on yhtä kuin alan asiantuntijoiden kirjoitukset.

Tieteellisen seuran suomenkielillä toimitettu jäsenlehti on tärkeä väline alan parissa käytävälle keskustelulle. Ydinenergian käyttö vaatii suurta tarkkuutta, perinpohjaista vastuullisuutta ja syvää asiantuntemusta. Siitä käytävän

keskustelun on oltava niin ikään tieteellisesti arvioitavaa ja todennettavaa.

Tämä lehden numero on ensimmäinen kaltaisensa. Uudistunutta ulkoasua ja uuden päätoimittajan linjaa hiotaan vielä, mutta suunta on selvä: lehden tieteellinen anti halutaan pitää keskiössä. Toisaalta myös ammatillista puolta ja seuran toimintaa halutaan nostaa esiin aiempaa näkyvämmiin. Katsotaan, mihin yhteiset rahkeemme riittävät.

Kertokaa, kirjoittakaa ja vinkatkaa alan tapahtumista, hankkeista ja tiedo-

tusvastuullisista hankehallinnoijista. Seuraava lehti on aina valmisteilla.

Kommentoikaa, laittakaa risuja ja ruusuja!

Anna-Maria Länsimies
päätoimittaja
ATS Ydintekniikka



Onko Sinulla kuvia tai ideoita seuraavaksi kuvavalinnaksi? Vinkkejä ja palautetta odotetaan anna-maria@lansimies.com.

Kevään kuva

ITER-työmaa maaliskuussa 2012. Tokamak-rakennus perustetaan 1,7 metriä korkeiden pilareiden ja seismisten eristeiden päälle päälle maanjäristyksien varalle. Tilaan jätetään kulku säännöllisiä tarkastuksia varten.
Kuva: www.iter.org



Neljäs reaktorisukupolvi ja resurssien riittävyys

Törmäsin aiheeseen neljännen sukupolven reaktorit ensimmäistä kertaa joskus loppuvuodesta 1999, siis jo viime vuosituhanella. Tarina on klassinen, satuin olemaan toimiston käytävällä väärään aikaan. Silloinen esimieheni VTT:llä etsi kuumeisesti henkilöä, joka voisi mennä kokoukseen puolestaan.

Istuin siis yhden iltapäivän kokouksessa kuuntelemaan esityksiä neljännen sukupolven reaktoriteknologian tulemisesta, suljetuista polttoainekiertoista, natriumjäähdytteestä, korkeasta paineesta ja ylikriittisestä fluidista. Viimeksi mainittu oli minulle tutuin aihe, olinhan työskennellyt uusien kattilaputkimateriaalien kanssa, mutten ihan heti käsittänyt miten tämä liittyy ydinenergian tuotantoon.

Kokousvieraat kuitenkin innostivat kuulijoita. Tässä oli jotain uutta, olisi syytä selvittää tarkemmin mistä olisi kyse. Tarkempi selvitys jatkui edelleen ”sattumien tietä”, ainakin henkilökohtaisesti näin, sillä muutin vuosi tapahtuneen jälkeen Saksaan Karlsruheen vaihtotukijamatkalle silloiseen FZK:hon (nykyinen KIT) aiheenani ylikriittisen kevytvesireaktorin materiaaliveitohdot.

2000-luvun alussa käynnistyi VTT:llä pitkä yhteistyö ja projektijakso High Performance Light Water Reactor hankkeen saatua Euratomin siunauksen. VTT rakensi ainutkertaiset ylikriittisiin arvoihin yltävät autoklaavit, kehitti instrumentointia ja mallinnusta, muutama diplomityökin valmistui aiheesta.

Myös Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa käynnistettiin tutkimusta ja kehitettiin mallinnusta. Kiinnostuksen laajetessa



Suomessa vastasi ministeriö, silloinen KTM ja nykyinen TEM, haasteeseen perustamalla Gen4Fin työryhmän, johon kutsuttiin kaikkien ydinenergia-alan toimijoiden edustajat.

Teimme aiheesta *state of the art* -raportin, joka herätti runsaasti myös kansainvälistä huomiota. Suomalainen tapa tehdä yhteistyötä, keskittymällä tekemiseen omien resurssien puitteissa, mutta niitä kehittäen, perustuu tietysti hyviin perinteisiin mutta rehellisesti sanoen myös resurssien niukkuuteen. Suomalaista mallia verkostoitumisessa laajennettiin NKS-yhteistyöksi vuonna 2009 ja nyt tähän toimintaan on halukkaita jo Keski-Euroopastakin.

Tämän vuosikymmenen käynnistyessä neljäs sukupolvi sai näyttävän osan uutta SNE TP -foorumia, jossa merkittäviä demonstraatiotavoitteita on asetettu jo ensi vuosikymmenen loppuun. Suomalaisilla alan toimijoilla on nyt pähkinä ratkaistavanaan millä strategialla ja resurssilla tähän kehitykseen osallistutaan, pureudutaanko isojen kylkeen vai verkostoidutaan ko pienten kanssa vai toimitaanko hajautetulla mallilla, kukin tahollaan. Tätä linjausta mietittäessä on mielestäni hyvä kysyä mitä muuta siis neljäs reaktorisukupolvi voi merkitä meille kuin kovaa teknologiaa ja uudenlaisia reaktorimalleja? Gen4Fin verkoston keskusteluissa on esitetty mm. seuraavaa:

- Tutkimuksella uusien osaajien kasvattaminen ja tieteellisen tutkimustyön tekeminen
- Uudet haasteet edellyttävät uusien tutkimuslaitteiden kehittämistä, mikä edelleen lisää osaamista ja tuo myös uusia mahdollisuuksia nykylaitosten tarpeisiin
- Kokonaisajattelun oppiminen konseptivaiheen tutkimuksessa syvällisen tutkimustiedon ohella.
- «Out of the box»- ajattelua turvallisuustutkimuksen rinnalle, tästä syntyy hedelmällistä vuoropuhelua
- Ennen kaikkea kurkistusikkuna tulevaisuuteen, joka sekä haastaa että innostaa alalla toimimiseen ja sen kehittämiseen.

Toinen iso kysymys on riittääkö Suomessa tutkijoita neljännen sukupolven aiheisiin kun alan osaajista on melkoinen kysyntä tämän päivän teknologiankin parissa. Vastakkain asettelu ei varmaankaan tuo vastausta tähän vaan on tunnustettava että resurssien riittävyyteen voidaan vaikuttaa positiivisesti vain pitkäjänteisellä suunnittelulla, koulutuksella ja toimijoiden välisellä hyvällä yhteistyöllä, neljäs sukupolvi on varmasti yksi tukeva askel tässä portaikossa.

Fourth Generation of Reactors and Resources

The first time I heard about the topic of fourth generation nuclear reactors was already in 1999, meaning in the last millennium. The situation was classic, wrong timing for me, I happened to meet my chief walking along the office corridor. He was seeking for someone to attend a meeting for him.

So, I sat in a meeting for one afternoon listening to presentations about the coming new technologies, fourth generation, closed fuel cycles, sodium coolants, high pressures and about the supercritical fluid. The last mentioned was most familiar to me, I had worked with the superheater materials for boilers in some previous research projects. However, I could not instantly link the fluid to the production of nuclear energy. Our visitors were very enthusiastic about their new ideas and they were able to convince the listeners that there is something new around and that this would be worthwhile to study a bit more. And the studies led to further steps, with the help of some unplanned coincidences. I moved to Karlsruhe in Germany to work at KIT (FZK at that time) one year after this meeting to study the supercritical light water reactor concept and possible material choices for it.

In the beginning of 2000 a long co-operation within the Euratom High Performance Light Water Reactor project started at VTT. Very soon VTT built an autoclave with very unique characteristics to reach supercritical conditions, instrumentation to monitor the material changes during autoclave tests was developed, modelling tools were modified and upgraded and a few master thesis were finished around these topics. Also Lappeenranta University of Technology was active in the field from the beginning. And very soon our ministry MEE (KTM at that time) made a decision to establish a working group around the topic of fourth generation reactors. All nuclear stakeholders were invited to participate in the working group and first a state of the art report was done to understand the challenges and possibilities for R&D better. The working group made this with the resources available and employed our good traditions in adding contributions according to capabilities and possibilities of each group member. This way of co-operation possibly has roots in a Finnish very poor soil - not so many extra skills and resources are available. This Finnish network was, however, an European pioneer in the field. Later on the Nordic network was built and it got financing from NKS. Today there are partners from North

ern Europe as well joining this Nordic network, benefiting the forum of good information exchange and new ideas of young scientists.

In the beginning of this decade, in 2010, the fourth generation got an important role in the new SNE TP forum. SNE TP Industrial Initiative has goals to demonstrate the concepts already towards the end of the 2020s. This development has created questions for the Finnish nuclear community, how to participate in the European programmes: what is our strategy and where are the resources. Should we try to get a role in the mainstream of the big players or would it be better to network with the smaller actors. Or would it be advisable to have several models depending on the partners. While we are now thinking about these questions it is a good opportunity to list also other benefits that would be gained besides the "hard technology" and new reactor models. In the Gen4Fin network we have discussed about the following possibilities:

- We can train new experts in the Gen4 R&D work and participate scientific projects.
- New types of reactor environments call for new research equipment and tools, this will further increase skills and knowledge that can be used in the work for present reactors as well.
- A new reactor concept will offer a possibility to learn wider thinking - a young scientist can and has to consider a full range of conceptual issues when tackling his or her own scientific topic.
- Out of the box thinking - not "only" safety research, good communication between new technologies and long term research tradition is expected.
- Last but not least a window into the future, there are challenges but also an exiting field for researchers for new development.

The other big question of today is the management of resources, are there enough experts for these challenges of fourth generation while there is a big need of experts for the work of today in the nuclear energy field in Finland. Concentration on opposing interests might not be the right angle to find an answer. We should understand that the resources can only be increased with long term planning, training and co-operation of stakeholders when and where appropriate. The fourth generation will be one important step in these staircases.



Vuosikokoukseen osallistui 39 jäsentä

Vuosikokous järjestettiin 13.3.2012 Tieteiden talolla Helsingissä. Vuosikokous eteni tutulla kaavalla sääntömääräisten asioiden puitteissa.

Puheenjohtaja *Eija Karita Puskan* esittelemän toimintakertomuksen perusteella, voitaneen sanoa vuoden 2011 toiminnan olleen varsin aktiivista. Esille kannattaa nostaa esimerkiksi kaikkiaan neljästä järjestetystä jäsentilaisuudesta



Vuosikokouksen puheenjohtajana toimi Antti Piirto ja sihteerinä Anna Nieminen.

Erkki Laurila -palkinto Lappeenrantaan

Vuosikokouksessa jaettiin Erkki Laurila -palkinto vuoden 2011 parhaalle *ATS Ydintekniikka* -kirjoittajalle. Saajina olivat tällä kertaa *DI Heikki Suikkanen* ja *DI Ville Rintala* artikkeliltaan *"Kulakekoreaktorin mallinnus Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla"*.

Kirjoittajille luovutettiin kunniakirja ja 500 euron stipendi. Perusteina mainittiin seuraavaa: "Sujuvasti kirjoitettu kuvaus LUT:n PBMR-mallinnuksesta. Projektia on LUT:ssa tehty neljän vuoden ajan, ja keskeiset tulokset on onnistuttu hyvin tiivistämään 3 sivuun. Kuvat ovat laadukkaita ja ne on selitetty kuvateksteissä selkeästi." Artikkelit on luettavissa *ATS Ydintekniikan* numerosta 3/2011. Onnea!

Suomen Atomiteknillinen Seura on jakanut Erkki Laurila -palkintoa vuodesta 2000 lähtien *ATS Ydintekniikka* -lehden parhaasta kirjoituksesta. Aka-

merkittävän suosion saanut Fukushima-aiheinen tilaisuus, joka keräsi noin 150 osallistujaa, ja vuoden kruunannut 45-vuotisjuhla.

Seuran johtokunnassa tapahtui merkittäviä muutoksia, sillä erovuorossa olivat puheenjohtaja *Eija Karita Puska* (VTT), varapuheenjohtaja *Veijo Ryhänen* (TVO), sekä jäsenet *Jari Tuunanen* (Fortum) ja *Kai Salminen* (Fennovoima). Lisäksi sihteeri *Silja Häkkinen* (VTT) oli luopunut tehtävästään äitiysloman vuoksi.

Vuosikokouksessa kuultiin Petri Kinnusen mielenkiintoinen esitys Ranskassa rakenteilla olevasta Jules Horowitz -materiaalintestausreaktorista ja Suomen osuudesta hankkeessa.

*Teksti: DI Anna Nieminen, VTT
ATS:n sihteeri*



Ville Rintala ja Heikki Suikkanen

Johtokunnan uudet jäsenet

**Puheenjohtaja
Liisa Heikinheimo**

Seuran uudeksi puheenjohtajaksi valittiin Tkt *Liisa Heikinheimo*, joka on toiminut TVO:n tutkimus- ja kehityspäällikkönä vuodesta 2009 lähtien. Aiemmin hän työskenteli VTT:llä muun muassa tutkimus- ja teknologiapäällikön tehtävissä Energiatekniikan laitemateriaalien osaamiskeskuksessa ja johtavana tutkijana. Heikinheimo toimii työssään aktiivisesti kansallisten tutkimusohjelmien suuntaamisessa ja osallistuu kansainvälisen tutkimusyhteisön kehittämiseen sekä Euratom SNE-TP:ssä että FORATOMin ja IAEA:n tutkimustyöryhmissä.

Sihteeri Anna Nieminen

Seuran uusi sihteeri *Anna Nieminen* työskentelee VTT:llä tutkijana vakavien ydinonnettomuuksien hallinnan tutkimusryhmässä. Hän on vastavalmistunut diplomi-insinööri, joka opinnoissaan syventyi teknilliseen termodynamiikkaan ja lämmönsiirto-oppiin. Niemisen diplomityö käsitteli sydänsulan käyttäytymistä paineastian pohjalla vakavan onnettomuuden loppuvaiheessa.

Timo Vanttola

Tkt *Timo Vanttolan* opintosuuntana oli teknillinen fysiikka/ydintekniikka. Hän on työskennellyt vuodesta 1974 VTT:llä ydinenergian piirissä. Vanttolan tutkijan ura on liittynyt turvallisuusanalyysiin ja siinä reaktoridynamiikkaan sekä termohydrauliseen koetoimintaan. Alan kansallisia tutkimusohjelmia hän on ollut koordinoimassa 1990-luvun ajan. Viime vuosina Vanttolan työtehtävät ovat keskittyneet tutkimushallintoon, nykyisin hän toimii ydinenergia-osaamiskeskuksen päällikkönä.

Tapani Raunio

Tapani Raunio aloitti Fortumilla vuonna 2008 ja on siitä saakka työskennellyt suunnitteluinsinöörinä ydinturvallisuusosastolla Keilaniemessä. Hänellä on mainittavaa taustaa ATS:n luottamustöissä muun muassa ATS YG:n puheenjohtajana ja varapuheenjohtajana. Koulutukseltaan Raunio on diplomi-insinööri Teknillisen fysiikan koulutusohjelmasta TKK:lta.

Energiakanava ja ATS seniorit
28.2.2012

Viestintäseminaari

Energiakanavan ja ATS Senioreiden Yhteinen Ydinenergiaviestintäseminaari keräsi lähes 60 osallistujaa Tieteiden talolle Helmikuun lopussa. Puhujina olivat mm. Antti Ruuskanen ja Magnus von Bonsdoff. Esitykset löytyvät ATS:n nettisivuilta.



ATS Jäsentilaisuus 10.5.

Alan osaaminen tulevaisuudessa?

Osaamistyöryhmän raportin pohjalta käytiin aktiivinen keskustelu ydinenergiaan liittyvästä koulutuksesta ja osaamistarpeista Tieteiden talolla seuran jäsentilaisuudessa 10.5.

Julkisuudessa paljon kritisoitu korkeakoulu-uudistus näkyy rahoitusmuutoksina myös ydinenergia-alan jatkokoulutusmahdollisuuksissa.

”Uudenlaisten ongelmien ratkaisemissa tohtorin tutkinto on ehdoton etu”, totesi Lappeenrannan teknisen yliopiston professori *Riitta Kyrki-Rajamäki*. Verkostojen ja alan yritysten tuki on tärkeää, kun resurssien jakoperusteita mietitään korkeakoulujen sisällä.” Aalto-yliopiston toiminnasta kertoi professori Rainer Salomaa.

Keskustelussa todettiin, että Suomessa valmistustaan korkeakoulusta yleisosajaksi, kun taas esimerkiksi Ranskassa koulutus tähtää suoraan erikoisosamiseen. Meillä ydinalan tehtävät opitaan vasta työssä.

”Kaikki henkilöt, jotka tulevat alalle, on saatava pidettyä alalla. ATS:llä on tärkeä rooli verkostoitumisessa ja alan yleisen toimintakulttuurin siirtämisessä uusille ihmisille”, totesi Fennovoiman kommenttipuheenvuoron käyttänyt Malla Seppälä.

Olkiluodon YG vieraili

Rauman telakalla

Olkiluodon YG-ikäisille suunnattu ekskursio järjestettiin maaliskuussa STX Finland Oy:n Rauman telakalle. Ryhmän isäntänä toimi laivaprojektin tuotantopäällikkö Lassi Pöyhönen.

S.A. Agulhas II on Etelä-Afrikan ympäristöministeriön tilaama monitoimialus, joka toimii muun muassa huolto-, tutkimus- ja matkustajaluksena sekä jäänmurtaajana. Aluksella kuljetetaan muun muassa rahtia Etelä-Afrikan Antarktisen tutkimusasemalle.

Nyt Etelä-Afrikalla on käytössään vuonna 1977 Japanissa rakennettu huolto- ja tutkimusalus *S.A. Agulhas I* ja uuden *Agulhas II*:n olisi tarkoitus korvata vanha ja liikennöidä uudet vähintään kolme vuosikymmentä.

Aluksella on valmiudet suorittaa meritieteellisiä tutkimuksia ja merenpohjan geologisia tutkimuksia. Lisäksi se voi kuljettaa noin sata matkustajaa, jotka koostuvat suurimmaksi osaksi tutkijoista.

Alus sisältää useita mielenkiintoisia innovaatioita, kuten meriveden tutkimukseen tarkoitetun Moon Pool -tutkimusreiän ja lintuhavaintoihin tehdyn tähytysytin.

Laivalla tullaan tekemään mittauksia

eri meteorologisista muuttujista Etelä-Afrikan sääpalveluille. Alus viettää merellä useita kuukausia ja siinä on myös kuusi eri tutkimustarkoituksiin olevaa laboratoriota.

Aluksella pidetään meteorologista keskusta ja se toimii kahden helikopterin laskeutumis- ja suojapaikkana. Laivalla on myös kuntosali, kirjasto ja pieni sairaala.

Reikä laivan pohjassa?

Aluksella käyntiä varten oli pukeuduttava turvavarusteisiin. Laivakierrokselle mukaan liittyi myös isäntien puolelta aluepäällikkö *Kai Soini*.

Laivassa nähdystä kohteista mainittakoon aluksen erikoisuus, merenpohjajutkimuksiin käytettävä reikä laivan pohjassa!

Laivalla nähtiin myös laboratorioita, taukotila, hyttejä. Ryhmä kävi myös kannella, konehuoneessa ja komentosillalla, josta oli laaja näköala tuuliselle telakka-alueelle ja Rauman saaristoon.

134 metriä pitkän jäävahvisteisen aluksen kotisatama on tästä eteenpäin Kapkaupunki. Keskiviikkona 4.4.2012 *S.A. Agulhas II* luovutettiin Etelä-Afrikan ympäristöministeriölle. Laiva lähti seuraavana päivänä matkaan 14 solmun vauhdilla ja perillä sen olisi tarkoitus olla toukokuun alkupuolella.

Toivottavasti aluksen purjehduksilla kerättävät tulokset hyödyttävät myös Aboa-asemalla, Suomen yliopistoissa sekä Ilmatieteen laitoksella suoritettavaa Antarktis-tutkimusta.

Teksti: Helena Urpulahti, Posiva

Kuva: Lassi Pöyhönen, STX





Energiakanava palkitsi viestintäkonkareita

Energiakanavan perustajiin kuuluvat Käthe Sarparanta, Anneli Nikula ja Sirpa Kulmala palkittiin Säteilevät Naiset -juhlaseminaarissa ansiokkaasta työstä ydinenergiaviestinnän saralla.

Ensimmäinen Säteilevät Naiset -seminaari järjestettiin Lord-hotellissa vuonna 1992. Kaksikymmentä vuotta ja kuusitoista seminaaria myöhemmin Säteilevät Naiset -seminaareissa on käynyt yhteensä yli 1100 osallistujaa, pääosin muilla aloilla työskenteleviä naisia.



Elinkeinoministeri Jyri Häkämies saapui avaamaan Säteilevien Naisten juhlaseminaarin suoraan lasten parlamentin kyselytunnilta.

Seminaari aiheita ovat olleet vuosien varrella säteilyn eri käyttömuodot, kestävä kehitys ja eri energiamuodot.

Juhlaseminaarin avasi elinkeinoministeri Jyri Häkämies. Muita puhujia olivat johtaja Tellervo Kylä-Harukka-Ruonala EK:sta ja johtava tutkija Eija Karita Puska VTT:ltä. Esitykset löytyvät ATS:n nettisivuilta.

Juhlaseminaariin oli kutsuttu myös ydinvoimayhtiöiden johtoporrasta tutustumaan toimintaan ja tuomaan yhtiötervehdykset 20 vuotta kestäneelle toiminnalle.

Juhlaseminaarin yhteydessä julkaistiin *Naiset säteilyn ja ydinenergian asiantuntijoina, Säteilevät Naiset 20 vuotta* -esite, joka löytyy pdf-versiona osoitteesta www.energiakanava.fi.

Esitettä voi myös tilata ATS Ydintekniikan yhteystiedoilla Anna-Maria Länsimieheltä.



” Olen mieleissäni monesti miettinyt miten ja miksi Posiva on pystynyt etenemään tavoitteiden mukaisesti asetetussa aikataulussa. [...] Koko ohjelmaa aloitettaessa omaksuttiin toimintaan liittyviksi periaatteiksi, että:

- tiedotetaan jatkuvasti ja avoimesti siitä, mitä tehdään
- tulokset saatavat aineistot ovat julkisia ja kaikkien saatavilla
- tiedottaminen on rehellistä ja asiantuntijuuteen perustuvaa, ja että
- asiantuntijat kertovat itse omasta työstään.”

Varatoimitusjohtaja Timo Äikäs, Posiva Oy Säteilevät Naiset -seminaarissa 23.3.2012.”

Kuvat: Juhani Eskelinen



Kuvia konferenssista ja abstraktit esityksistä löytyvät ENS:n kotisivuilta www.euronuclear.org.

European Nuclear Society'n Top Safe 2012 -konferenssi järjestettiin huhtikuun lopussa Helsingissä.

Pääjohtaja Tero Varjoranta STUKista totesi avauspuheessaan, että ydinvoiman tarpeen globaalit tekijät eivät ole muuttaneet Fukushima onnettomuuden myötä. Ydinvoiman turvallisuuden kulmakivenä on alun perin ollut onnettomuuksien estäminen, mutta onnettomuuksien seurauksien lieventäminen on tullut yhtä tärkeäksi. Uusissa laitoksissa on robustisuudella, turvajärjestelyillä ja valmiustoinnilla kasvava rooli. Hän korosti uusien, vasta ydinvoiman käyttöä aloittelevien maiden ja yhtiöiden voimakasta tuen tarvetta.

Lasse Reimanin mukaan Fukushima onnettomuus ei tuonut esille mitään sellaista, joka edellyttäisi WENRAn uusille laitoksille asettamien turvallisuustavoitteiden muuttamista. WENRAn on valmistelemaan seitsemää position paperia, jotka selventävät näitä turvallisuustavoitteita. Position paperit ovat olleet teollisuudella kommentoitavana, ja ENISS on hoitanut tämän kommentoinnin koordinoimisen. Ulkoisiin riskitekijöihin varautumisessa Reiman piti PRA:ta tärkeänä työkalua deterministisen suunnitteluperustan lisäksi.

John Nakoski NEAsta painotti vahvan viranomaisen merkitystä joka voi pystyä luomaan edellytyksiä kansainväliselle yhteistyölle. Hän painotti myös eri teollisuuden alojen mahdollisuuksia oppia hyviä käytäntöjä toisiltaan. Hän nosti esille ilmailun, mistä ydinvoimateollisuudella olisi paljon opittavaa käyttäytymisen tutkimuksessa, prekursorien analysoinnissa ja ennen kaikkea systemaattisessa ja formaalissa kommunikoinnissa niin normaaleissa käyttötilanteissa kuin häiriöissäkin.

GRS:n uusi tieteellis-tekninen johtaja Frank-Peter Weiss korosti robustisuutta keinona luonnonilmiöiden cliff-edge -ominaisuuksiin varautumisessa. Tämä koskee hänen mukaansa



Lasse Reiman puhuu, Tero Varjoranta ja Risto Himanen kuuntelevat. Artikkelin kirjoittaja Risto Himanen toimi konferenssin puheenjohtajistossa.

kaikkia turvallisuustoimintoja, niin reaktiivisuuden hallintaa, polttoaineen jäädytystä kuin suojarakennustoimintoakin. Onnettomuudet saattavat johtaa hyvin negatiiviseen tulevaisuuden kuvaan ydinvoimalle, kuten Saksassa on käymässä Fukushimaa jälkeen.

Teksti: Risto Himanen
Teollisuuden Voima Oyj
risto.himanen@tvo.fi
Kuva: Emilia Janisz, ENS

Keskustelutilaisuus stressitesteistä STUKissa 16.5.2012

Ydinturvallisuustyö Fukushimaa jälkeen

Fukushima Dai-ichin onnettomuuden jälkeen 151 maata on käynnistänyt IAEA:n puitteissa laajat arviointiohjelmat ydinturvallisuuden parantamiseksi. Ydinturvallisuutta arvioidaan tehostetusti myös mm. kansallisilla turvallisuusselvityksillä, EU:n stressitesteillä, vertaisarvioinneilla sekä erilaisten kansainvälisten järjestöjen ja yhteistyösopimusten puitteissa.

Suomessa STUK lähetti TEMin aloitteesta selvityspyynnön kolmelle voimayhtiölle heti onnettomuuden jälkeen maaliskuussa 2011, Yhtiöt toimittavat vastaukset ja lisäselvityspyynnöt viranomaisille joulukuussa 2011.

STUKin selvityksessä ei tullut esiin sellaisia uusia uhkatekijöitä tai puutteita, jotka olisivat vaatineet laitosten alasajoa tai

niiden välittömiä turvallisuusparannuksia.

STUK tekee lopulliset päätökset vaadittavista uusista toimenpiteistä kesäkuussa 2012. Erityistä huomiota kiinnitetään tilanteisiin, joissa useat rinnakkaiset turvallisuusjärjestelmät tai syvyysuuntaisen puolustuksen tasot vaarantuvat samanaikaisesti.

”Mikään suuronnettomuus ei johdu yksittäisestä asiasta, vaan monista peräkkäisistä ja rinnakkaisista asioista, jotka kaikki menevät pieleen”, STUKin pääjohtaja Tero Varjoranta muistutti.



Vasemmalla sivulla osaamistyöryhmän jäseniä tiedotustilaisuudessa 26.3.2012. Vasemmalta Kaisa Koskinen, STUK, Marja-Leena Järvinen, STUK, Eija Karita Puska, VTT, Heikki Purhonen, LUT, Mikko Paunio, STM, Juhani Hyvärinen, Fennovoima, Riku Huttunen, EMV, Petteri Kauppinen, OKM, Jaana Avolahti, TEM, Jarmo Ala-Heikkilä, Aalto-yliopisto, Sami Hautakangas, Fortum, Jorma Aurela, TEM, Marjatta Palmu, Posiva, Miliza Malmelin, YM ja Liisa Heikinheimo, TVO.

Osaamistyöryhmän työ valmistui

Työ- ja elinkeinoministeriö asetti lokakuussa 2010 työryhmän kartoittamaan ydinenergia-alan pitkän aikavälin osaamistarpeita. Työryhmä luovutti raporttinsa ministeri Jyri Häkämiehelle 26.3.2012 valtioneuvoston linnassa.

Selvitystyö toteutettiin ydinenergia-alaa laajasti edustaneella asiantuntijajoukolla. Keskeinen johtopäätös oli korkeatasoisen ja kattavan kansallisen osaamisen tarve niin alan yhtiöissä, tutkimuslaitoksissa kuin viranomaistenkin osalta.

Ydinenergia-alan asiantuntemuksen tarve Suomessa on kasvava. Käytössä olevat ydinvoimalaitosyksiköt sekä rakenteilla oleva Olkiluoto 3 -yksikkö tarvitsevat jatkuvasti osaavaa työvoimaa. Posivalla tulee olla valmius käytetyn polttoaineen loppusijoituksen aloittamiseen noin vuonna 2020.

Erityisesti asiantuntijoiden tarvetta lisäävät uudet ydinvoimahankkeet, Teollisuuden Voiman Olkiluoto 4 ja Fennovoiman ydinvoimalaitos, jotka saivat valtioneuvoston myönteisen periaatepäätöksen vuonna 2010.

Vahvistaessaan periaatepäätökset

1.7.2010 eduskunta edellytti lausumansa, että hallitus luo osaltaan edellytyksiä suomalaisen työvoiman, osaamisen ja yrityskentän mahdollisimman laajalle hyödyntämiselle ydinvoimahankkeissa. Tämä antoi taustaa osaamistyöryhmän työlle.

Japanin luonnononnettomuuksia maaliskuussa 2011 seurannut Fukushima Dai-ichin ydinvoimalaitosonnettomuus muistutti myös osaltaan alan asiantuntemuksen ja vahvan turvallisuuskulttuurin tarpeesta.

Työhön osallistui kattava asiantuntijajoukko

Työryhmän puheenjohtajaksi nimettiin Riku Huttunen. Ryhmän pääsihteerinä on toiminut Jorma Aurela ja sihteerinä Eriika Melkas ja Jaana Avolahti, kaikki työ- ja elinkeinoministeriöstä.

Varsinaisiksi jäseniksi kutsuttiin sosiaali- ja terveysministeriön, ympäristöministeriön, opetus- ja kulttuuriministeriön, Säteilyturvakeskuksen, VTT:n, yliopistojen, teollisuuden, voimayhtiöiden ja Posivan edustajat.

Käytännön työ tehtiin laajalti kuudessa jaostossa. Jaostot vastasivat raportin lukujen kirjoittamisesta vetäjiensä koordinoimana. Tehdyt johtopäätökset hyväksyttiin työryhmätasolla. Sekä työryhmä että jaostot toimivat avoimesti hyödyntäen laajaa ydinenergia-alan asiantuntijajoukkoa. Kaiken kaikkiaan työhön osallistui siten yli sata asiantuntijaa eri organisaatioista.

Alan henkilöstötarpeet

Muun muassa henkilöstötarpeiden kartoittamiseksi tehtiin kattava kysely alan



Osaamistyöryhmän raportin luovutustilaisuus pidettiin 26.3.2012 valtioneuvoston linnan tiedotustilassa. Median tentittävinä ovat ministeri Jyri Häkämies ja työryhmän puheenjohtaja Riku Huttunen. Mainittakoon, että tätä puhujakoroketta kutsutaan "lauteiksi", sillä joskus siellä olijat tuntevat olevansa saunassa.

toimijoille. Sen mukaan alalla nyt työskentelevistä 3 300 henkilöstä noin 80 %:lla on korkeakoulututkinto (yliopisto tai AMK), tyypillisesti teknistieteellinen tai luonnontieteellinen.

Kokemusvuosijakauma on toimialan historiasta johtuen "kaksikyttäinen": henkilöstössä on paljon sekä uusia että hyvin kokeneita työntekijöitä, mutta vähän 10-20 vuotta alalla olleita.

Henkilöstötarpeet kasvavat arviolta lähes 40 % vuoteen 2025 mennessä, jolloin ydinenergia-alalla tarvitaan noin 4 500 henkilöä. Kokeneimpien asiantuntijoiden siirtyminen eläkkeelle lisää uusien osaajien tarvetta ja tutkimuksen mukaan kaiken kaikkiaan vuoteen 2025 mennessä tarvitaan 2400 uutta henkilöä.

Määrällisesti eniten uusia asiantuntijoita tarvitsevat voimayhtiöt ja Posiva. Suurin kasvun tarve kohdistuu niin sanotuille konventionaalisen tekniikan aloille.

Kyselyn heikkous oli siinä, että vain 64 organisaatiota vastasi kyselyyn ilmeisesti vaikeaksi koetun kyselylomakkeen vuoksi. Kysely lähti noin 300 osoitteeseen ja vastausprosentti oli vain 21,4. Toisaalta työryhmä varmisti, että kaikki suuret organisaatiot vastasivat kyselyyn.

Vastaamatta jättivätkin pienemmät teollisuusyritykset. Tämän vuoksi on kuitenkin selvää, että todelliset luvut sekä nykyresurssista että tulevaisuuden tarpeista ovat suuremmat kuin raportissa esitetyt.

Keskeiset suositukset

Ydinenergian käytön laajuuden Suomessa määrittävät valtioneuvoston ja eduskunnan päätökset. Ydinlaitosten turvallinen ja luotettava toiminta edellyttää, että alan kansallinen osaamis pohja on vahva. Vaikka kansainvälinen ja EU:n säännöstö kehittyvät, antaa korkeatasoinen kansallinen lainsäädäntö tulevaisuudessakin parhaat puitteet alan toiminnalle. Ydinturvallisuussäätelyä tulee jatkossakin kehittää vastaamaan ajan haasteisiin.

Pää- ja sivuainetasoista opetusta antamaan tarvitaan lisää yliopisto-opettajia. Tällä hetkellä Suomessa on vain kaksi varsinaista ydintekniikan professuuria,

Asettamiskirjeessä 27.10.2010 osaamistyöryhmälle annettiin seuraavat tehtävät:

- selvittää ydinvoima-alan toimijoiden nykyiset henkilöresurssit
- kartoittaa laajasti suomalaisen perus-, jatko- ja täydennyskoulutuksen tarve
- selvittää suomalaisen osallistumisen mahdollisuudet tulevissa suurissa ydinlaitoshankkeissa
- kartoittaa ydinvoima-alan toimijoiden käytössä oleva tutkimusinfrastruktuuri
- kartoittaa Suomen osallistuminen kansainväliseen tutkimustyöhön
- käydä läpi VTT:n tutkimusreaktorin tilanne.

Aalto-yliopistossa ja Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa, sekä radiokemian professuuri Helsingin yliopistossa.

Yliopistojen ja muiden alan organisaatioiden yhteistyötä tarvitaan muun muassa pätevän sivuaineopetuksen järjestämiseksi.

Kansainvälinen koulutusyhteistyö on välttämätöntä, erityisesti jatkokoulutusvaiheessa. Ydinenergia-alalla on kuitenkin erityisesti ydinturvallisuutta koskevia kansallisesti asetettuja vaatimuksia, joita kansainvälinen koulutus ei voi täysin kattaa.

Säteilyturvakeskuksen korkea asiantuntemus hyödyntää koko ydinenergia-alaa. STUK:n resurssit ja vahva osaaminen tulee varmistaa jatkossakin.

Päävastuu ydinenergiatutkimuksen rahoittamisesta on nyt ja jatkossa alan yhtiöillä. Voimayhtiöt Fortum ja Teollisuuden Voima samoin kuin niiden omistama Posiva tekevät merkittävää omaa tutkimusta. Valtion tulee kuitenkin osaltaan huolehtia riittävästä tutkimuspanostuksesta muun muassa Valtion ydinjätehuoltorahaston tutkimusrahoituksen kautta. Yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa, erityisesti VTT:ssä, tehdään laadukasta tutkimusta, jonka rahoituksesta tulee huolehtia.

Ydinenergia-alan suomalaisen tutkimuksen tulevat tarpeet ja painopisteet on tarpeen tämentää ja laatia tutkimustoiminnan kehittämiseksi pitkän aikavälin strategia.

Sen valmisteleminen edellyttää eril-



Ydinenergia-alan lukumääräinen henkilöstötarve kokonaisuutena.
Lähde: Kansallisen ydinenergia-alan osaamistyöryhmän raportti. TEM 2012.

ATS:n jäsen voi tilata raportin omaan käyttöönsä lähettämällä meilin aila.tienhaara@tem.fi. Raportti ilmestyy suomeksi ja englanniksi.

listä, alan tutkimus-organisaatioiden ja muiden toimijoiden yhteistä hanketta. TEM onkin jo päättänyt perustaa työryhmän ja se aloittaa työnsä ensi syksynä.

Kansainvälinen yhteistyö välttämätöntä

Suomen kokoisessa maassa voidaan säästää huippuosaaminen vain rajallisella määrällä ydintekniikan osa-alueita. Myös mittavien koelaitteistojen tarve tekee kansainvälisestä tutkimusyhteistyöstä välttämättömän. Suomalainen osallistuminen kansainvälisiin hankkeisiin on usein järkevintä toteuttaa kansallisen projektin puitteissa, mikä edesauttaa tiedon leviämistä.

Suomalaisen tutkimusinfrastruktuurin ylläpito ja uudistaminen edellyttävät pitkäjänteistä kansallista panostusta.

Ajankohtaisista hankkeista VTT:n Ydinturvallisuustalo hyödyttää laajasti suomalaista ydinenergia-alaa materiaali- teknisen tutkimuksen osalta.

VTT:n tutkimusreaktorin toiminta on tarpeen turvata ottaen nykyisen lääketieteellisen käytön ohella nykyistä enem-

män huomioon sen merkitys tutkimus- ja koulutustoiminnassa.

Ydinenergia-alan laaja-alaista yhteistyötä Suomessa tulee kehittää. Yhteiset koulutushankkeet, erityisesti ydinturvallisuuden ja ydinjätehuollon osalta, ovat hyödyllisiä. Tutkimusta ja koulutusta kehitettäessä myös alueelliset tarpeet ja synergiat tulee huomioida.

Esimerkiksi Fennovoiman ydinvoimalaitoksen rakentaminen Pyhäjoelle edellyttää alueellista koulutusyhteistyötä. Viranomaisvalvonnan osaamista ja resursseja tulee kehittää kattavasti alue- ja paikallistasolla.

Vaikka Suomessa ei ole kotimaisia ydinvoimalaitostoimittajaa, lukuisat suomalaiset ydinenergia-alan laite- ja palvelutoimittajat voivat tarjota vahvaa osaamistaan sekä kotimaisiin että ulkomaisiin hankkeisiin. Suuriin hankkeisiin mukaan pääsemiseksi yritysten tehokas verkottuminen on avainasemassa.

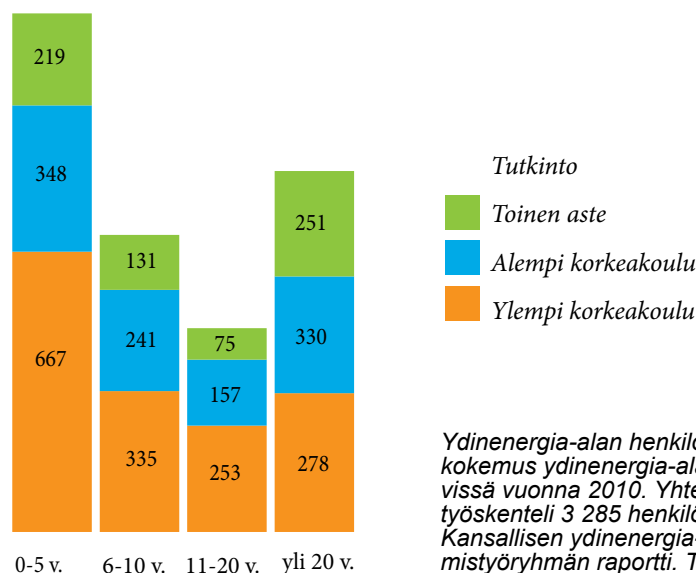
Työ jatkuu

Osaamistyöryhmän työhön osallistui suuri määrä ihmisiä. Noin 30 työryh-

män tai sen jaostojen kokousta antoivat alan ihmisille ainutlaatuisen tilaisuuden verkottua. Eräässä koulutustyöryhmän ko-kouksessa oli läsnä 12 suomalaista professoria.

Lisäksi työryhmän työtä voidaan käyttää myös kansainvälisessä yhteistyössä. Sillä kuitataan IAEA:n Fukushima-ohjelman (Action Plan) Capacity Building -osion itsearviointi ja lisäksi sitä esitellään jo nyt esimerkkinä tällaisesta alan resurssien läpikäymisestä ja kartoittamisesta.

Tehtyillä työllä onkin monta tasoa. Oman organisaation ja sen tarpeitten tuntemus on etusijalla, mutta sen jälkeen saatiin tieto kansallisesta tasosta ja tämä tieto voidaan viedä kansainvälisille foorumeille. Työtä jatketaan Suomen ydinturvallisuustutkimuksen strategian uudelleenkirjoittamisella.



Ydinenergia-alan henkilöstön työkokemus ydinenergia-alan tehtävissä vuonna 2010. Yhteensä alalla työskenteli 3 285 henkilöä. Lähde: Kansallisen ydinenergia-alan osaamistyöryhmän raportti. TEM 2012.

VTM Riku Huttunen
ylivohtaja
Energiamarkkinavirasto
riku.huttunen@emv.fi



DI Jorma Aurela
yli-insinööri
Työ- ja elinkeinoministeriö
jorma.aurela@tem.fi



Neljännän reaktorisukupolven tutkimusta NETNUC-projektissa

Suomen Akatemian Sustainable Energy (SusEn) –tutkimusohjelman nelivuotinen New Type Nuclear Reactors (NETNUC) –projekti päättyi vuoden 2011 lopussa.

Neljännän sukupolven (Gen IV) reaktorien kehittämistä on Lappeenrannan teknillinen yliopisto (LUT) koordinoi projektia, jossa LUT:n lisäksi olivat mukana Aalto-yliopisto ja VTT.

Projektin aikana perehdyttiin laajalaisesti neljännän sukupolven reaktoritekniikoihin, mutta syvennyttiin myös valikoituihin yksityiskohtiin. Kiinnostuneita maailmanlaajuisesti. Kivainta kehitystyö lienee Kiinassa, jossa on suunnitteilla ja rakenteilla useita eri reaktorityyppejä.

Myyös EU:n sisällä on käynnissä useita suuren mittakaavan koe- ja demonstraatiolaitosten rakentamiseen tähtäviä ohjelmia. Tuoreimpana ja ehkä jopa hieman yllättävänä esimerkkinä mai-

nittakoon ruotsalaisten Oskarshamniin kaavailema lyijyjäähdytteinen nopea koereaktori ELECTRA (European Lead Cooled Training Reactor).

Suomi ei toistaiseksi ole lähtenyt Gen IV:n kehittämiseen samassa mittakaavassa, vaan käytettävissä olevat tutkimusresurssit kohdentuvat pääasiassa nykyisten ja tulevien kevytvesilaitosten tarpeisiin. Vaikka Suomen rooli jäisikin vaatimattomaksi uusien reaktorityyppien kehittämisessä, on silti tärkeää pitää tuntuma uuteen ydintekniikkaan pienelläkin panostuksella.

Suurista kansainvälisistä hankkeista Suomi on mukana Jules Horowitz materiaalitutkimusreaktori -projektissa, joka jatkossa antaa kokeelliset valmiudet sekä nykytyyppisten Gen II ja Gen III

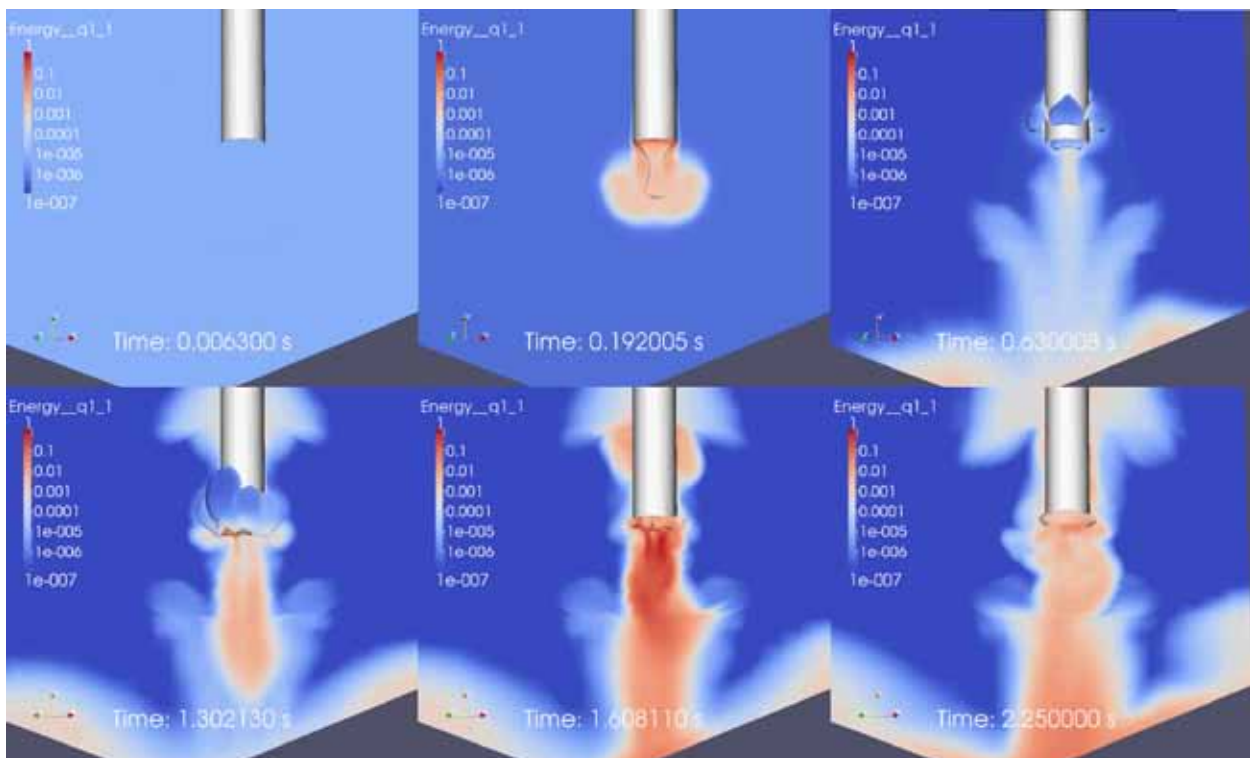
-reaktorien että Gen IV -reaktorien tutkimukseen. Kansallisella tasolla Suomen Akatemian NETNUC-projekti on pirstänyt ydinalan tutkimusta Suomessa mahdollistamalla panostuksen Gen IV -aihepiiriin neljän vuoden ajan.

Tutkimusta kolmessa organisaatiossa

NETNUC:n tutkimusta ohjaavina teemoina oli pyrkiä ymmärtämään uudentyyppisten reaktorien turvallisuuden erityispiirteet, tarkastella niiden tehokkuutta ja taloudellisuutta sähkön ja lämmön tuottamiseen sekä tutkia kehittyneitä reaktoreita ja polttoainekiertoja kestäväen kehityksen näkökulmasta.

Käytännön tutkimustyö jakautui usei-

Turbulenssin kineettinen energia POOLEX STB-28 lauhdutusallaskokeen simulaatiossa 3D NEPTUNE_CFD -koodilla laskettuna käyttäen Hughes-Duffeyn kontaktilauhtumismallia. Altaaseen iskeytyvät höyrypatsaat lisäävät veden pyörteisyyttä, mikä johtaa nopeutuvaan lauhtumiseen ja chugging-ilmion tehostumiseen. Kuva: Vesa Tanskanen, LUT.





Lappeenrannassa järjestettiin syksyllä 2010 GEN4FIN-seminaari, joka keräsi NETNUC-projektin tutkijat yhteen esittelemään tutkimustuloksiaan. Seminaarissa oli lisäksi osallistujia ja puhujia Gen IV -tutkimusta tekevästä organisaatiosta ympäri Eurooppaa. Kuva: Timo Mikkola, LUT.

siin osa-alueisiin, joista materiaalitekniikan, reaktorifysiikan ja -dynamiikan sekä termohydrauliikan tarkastelut voidaan mainita suurimpina. Tutkimus jakautui eri organisaatioihin kunkin valmiuksien ja vahvuuksien mukaisesti.

Lauhtumismalleja ja kuulakekoreaktorin mallinnusta LUT:ssa

LUT:ssa hyödynnettiin olemassa olevaa kevytvesijäähdytteisten reaktorien termohydrauliikan kokeellista ja laskennallista osaamista lauhtumismallien kehittämiseen.

Omat POOLEX-laitteistolla tehdyt kokeet tarjoavat validointitietoa, jota hyödynnettiin mallinkehityksessä.

Mallinnustyökaluina käytettiin CFD (Computational Fluid Dynamics) -koodoja TransAT ja NEPTUNE_CFD. Tehty työ mahdollistaa jatkossa lauhtumistarkastelut myös ylikriittisen veden tapauksessa.

Täysin puhtaalta pöydältä aloitettiin kuulakekotyyppisen kaasujäähdytteisen korkealämpötilareaktorin mallinnus. Työssä kehitettiin menetelmiä ja työkaluja polttoainekuulien pakautumisen, reaktorifysiikan ja jäähdytevirtauksen sekä lämmönsiirron mallinnukseen reaktorisydämessä.

Kuulien pakautumisen mallinnukseen käytettiin LUT:ssa kehitettyä DEM (Discrete Element Method) -menetelmään perustuvaa koodia. Reaktorifysiikkaa laskettiin VTT:n Serpent Monte Carlo -koodilla ja termohydrauliikkatarkastelut tehtiin ANSYS Fluent CFD-koodilla. Työstä julkaistiin erillinen juttu ATS Ydintekniikan numerossa 3/2011.

Lisäksi tarkasteltiin kehittyneiden polttoainekiertojen ympäristövaikutuksia ja taloudellisuutta sekä perehdyttiin eri tyyppisissä reaktoreissa mahdollisiin eksotermisiin kemiallisiin reaktioihin.

Reaktorifysiikkaa ja toriumpolttoainetarkasteluja Aallossa

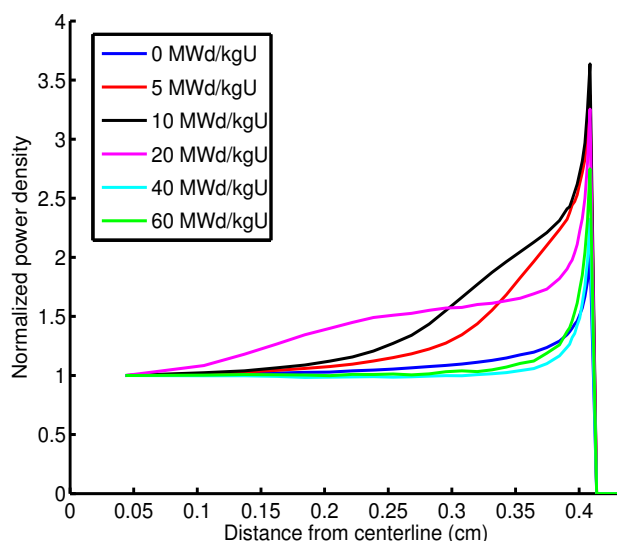
Aalto-yliopistossa keskityttiin pääasiassa neutroniikka- ja palamalakentaa varten tarkasteltiin ja kehitettiin aikadiskreetointimenetelmiä. Lisäksi tutkittiin polttoainesauvan radiaalin lämpötilajakauman vaikutusta palamaan.

Toriumin hyödyntämistä tarkasteltiin eri näkökulmista. Toriumin käyttöä kevytvesireaktoreissa mallinnettiin CASMO-4E:llä, SIMULATE-3:lla ja Serpentillä.

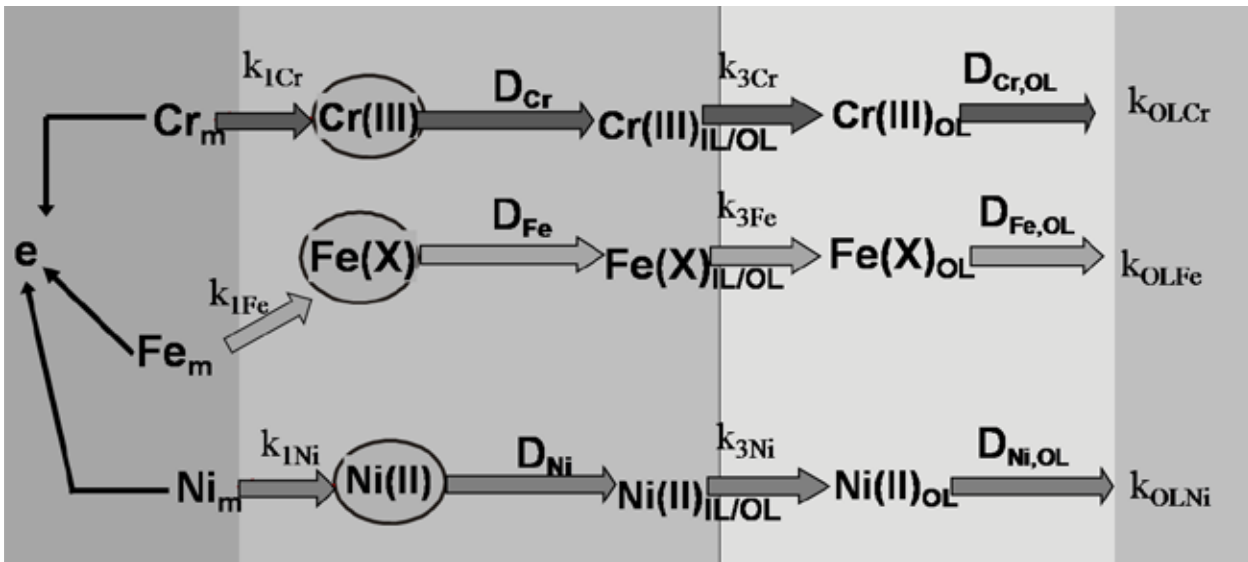
Toriumin käyttäytymistä korkeissa palamissa laskettiin FE-MAXI-6:lla. Myös käytetyn toriumpolttoaineen säteilymyrkyllisyyttä, toriumin käytön taloudellisuutta ja proliferaatioturvallisuutta tutkittiin.

Aallossa tehtiin projektin aikana useita erityistarkasteluja eri Gen IV -teknologioista. Esimerkkeinä mainittakoon transmutaatiotarkastelut FLUKA Monte Carlo -koodilla ja lämmönsiirron mallinnus ylikriittisessä vedessä OpenFOAM CFD-koodilla sekä APROS:illa.

Aallossa tehtiin projektin aikana useita erityistarkasteluja eri Gen IV -teknologioista. Esimerkkeinä mainittakoon transmutaatiotarkastelut FLUKA Monte Carlo -koodilla ja lämmönsiirron mallinnus ylikriittisessä vedessä OpenFOAM CFD-koodilla sekä APROS:illa.



Polttoainesauvan säteen suuntainen tehojakauma eri palamilla laskettuna 8 eri lämpötila-alueella sauvan sisällä. Kuva: Ville Valtavirta, Aalto.



Havainnekuva sisemmän ja ulomman oksidikerroksen kasvusta teräksen päälle perustuen MCM (Mixed Conduction Model) -malliin. Kuva: Sami Penttilä, VTT.

Materiaalitekniikkaa ja mallinnusta VTT:llä

VTT:n materiaalitutkimuksessa keski-tyttiin eri materiaaliryhmien ominaisuuksien karakterisointiin vaativissa olosuhteissa. Kokeita suoritettiin ferriittis-martensiittisille teräksille, austeniittisille ruostumattomille teräksille, nikkelipohjaisille seoksille ja ODS (Oxide Dispersion Strengthened) -teräksille.

Erityisesti keskityttiin elinikää rajaaviin materiaaliominaisuuksiin kuten hapettumiseen, jännityskorroosioon, virumiseen ja väsymiseen korkeissa lämpötiloissa ja ylikriittisessä vedessä.

Lisäksi kehitettiin uusia mallinnustyökaluja perustuen sekä MCM (Mixed Conduction Model) -malliin hapettumisnopeuden ennustamiseksi ylikriittisen veden olosuhteissa että uusia malleja virumisen ja virumis-väsymisen mallinukseen.

Omia laskentaohjelmia kehitettiin ja hyödynnettiin NETNUC-tutkimuksessa. APROS ja TRAB3D/SMABRE -ohjelmilla laskettiin ylikriittisellä vedellä jäähdytettyä reaktoria. Palamalaskentaa varten Serpentiin kehitettiin tarkka ja tehokas CRAM (Chebyshev Rational Approximation Method) -matriisieksponenttimenetelmä palamayhtälöiden ratkaisuun. Nopeiden natriumjäähdytysten reaktoriin neutroniikkaa laskettiin sekä Serpentillä että CEA:n deterministisellä ERANOS-koodilla.

Yhtenä tutkimusaiheena VTT:llä oli myös ydinvoiman käyttö lämmönlähteenä biojalostamossa. Lämmönlähteenä tarkasteluissa käytettiin sekä Gen III että

Gen IV -reaktoreita. Tutkimuksessa kartoitettiin myös mahdollisia käyttökohteita Suomessa.

Positiivinen koulutusvaikutus

NETNUC:n aikana projektin kokonaan tai osittain rahoittamana syntyi muutama väitöskirja ja lisensiaattityö sekä useita diplomi- ja kandidaatintöitä. Projektilla on ollut huomattava koulutusvaikutus, ja etenkin yliopistoissa on alalle kasvatettu useita nuoria tutkijoita. Koulutuksessa on myös pystytty hyödyntämään EU:n projekteissa järjestettyjä kursseja.

Opinnäytetöiden lisäksi projektin tuloksia on julkaistu vertaisarvioituissa tiedelehdissä sekä kansainvälisissä konferensseissa ja seminaareissa. Kotimaisella tasolla projektin tuloksia on esitelty erityisesti GEN4FIN-seminaareissa, joita on järjestetty sekä LUT:n että VTT:n toimesta.

Lappeenrannan seminaarit on perinteisesti järjestetty kahden vuoden välein ja mukaan on kutsuttu myös kansainvälisiä puhujia. Lisäksi Lappeenrannassa pidettiin NETNUC:n päätöseminaari syksyllä 2011. Projekti onkin lisännyt organisaatioiden välistä verkostoitumista ja toisten työn tuntemista merkittävästi.

Jatkonäkymät

Mielenkiinto neljännen sukupolven reaktoritutkimukseen tuskin päättyy NETNUC:n loputtua. Vaikkei vastaavan kaltaista yhteisprojektia ole vielä näköpiirissä, jatkon kannalta mahdollisuuksia NETNUC-tyyppiseen tutkimukseen an-

tavat vuoden 2012 alusta alkanut Ydintekniikan ja radiokemian tohtoriohjelma (YTERA), EU:n puiteohjelmien projektit sekä toivottavasti tulevat pienemmät projektiavaukset Suomen Akatemialta.



DI Heikki Suikkanen
Nuorempi tutkija
Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Ydinvoimatekniikan laboratorio
heikki.suikkanen@lut.fi



TKT Riitta Kyrki-Rajamäki
Professori
Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Ydinvoimatekniikan laboratorio
riitta.kyrki-rajamaki@lut.fi

Kiitokset myös artikkelin laatimisessa avustaneille Timo Vanttolalle ja Sami Penttilälle (VTT).

HPLWR:n reaktoridynamiikan mallintaminen

HPLWR (High Performance Light Water Reactor) on eräs mahdollinen toteutus ylikriittisessä paineessa toimivasta kevytvesireaktorista (SCWR, Supercritical-Water-Cooled Reactor).

Kansainvälisessä yhteistyössä kehitettyä reaktorikonseptia on tutkittu kahdessa Euroopan unionin rahoittamassa tutkimushankkeessa: HPLWR (2000–2002) sekä HPLWR Phase 2 (2006–2010).

HPLWR-reaktori poikkeaa muista SCWR-toteutuksista etenkin monimutkaisen virtausjärjestelynsä kannalta: jäähdyte jaetaan kahtia heti paineastian sisääntulossa, josta puolet jäähdytteestä ohjataan suoraan alatilaan, kun taas toinen puolisko kierrätetään alatilaan erityisten moderaattorikanavien kautta.

Alatilasta alkava kolmivaiheinen sydänvirtaus on toteutettu siten, että ensin koko jäähdytevirtaus kulkee reaktorin keskiosassa ylöspäin, sitten toisella kehällä alaspäin, ja lopulta uloimmalla kehällä vielä ylöspäin ennen poistumistaan paineastiasta. Monimutkaisen virtausjärjestelyn toteuttamiskelpoisuuden varmistaminen vaatii reaktorin dynamiikan perusteellista laskennallista analysointia.

Teknologian tutkimuskeskus VTT osallistui HPLWR Phase 2 -tutkimusprojektiin muun muassa mallintamalla reaktorin dynamiikan käyttäytymistä erilaisissa transientti- ja onnettomuustilanteissa käyttäen kahta systeemimittakaalan analyysiohjelmistoa: APROS:ta sekä TRAB3D/SMABRE:a.

Kumpikin näistä työkaluista on kehitetty VTT:llä pitkäjänteisen työn tuloksena viimeisten kolmen vuosikymmenen aikana, ja niitä on perinteisesti sovellettu nykyään käytössä olevien toisen sukupolven ydinreaktorien mallinnukseen.

Eriyisesti pienten jäähdytteenmenetysonnettomuuksien laskentaan kehitetty SMABRE perustuu ns. drift-flux-, eli 5-yhtälömalliin.

Yleiskäyttöisempi APROS puolestaan sisältää useita erilisiä termohydraulisia malleja, joista ylikriittisen painealueen laskuja lasketaan useimmiten kaksifluidi-, eli 6-yhtälömallilla.

tä niin koodin sisältämien fysikaalisten mallien, kuin myös numeerisen ratkaisijan osalta.

Uusia fysikaalisia malleja tarvittiin muun muassa seinämälämmönsiirron ja -kitkan vaikutusten arvioimiseen ylikriittisissä olosuhteissa, joissa koodeissa tavanomaisesti käytetyt mallit eivät ole enää päteviä.

Ratkaisun numeriiikan kannalta erityisen haasteelliseksi koetinkiveksi osoitautui nopeat paineenpudotustransientit, joissa jäähdytepiirin paine laskee äkisti ylikriittiseltä alueelta kaksifaasi-alueelle.

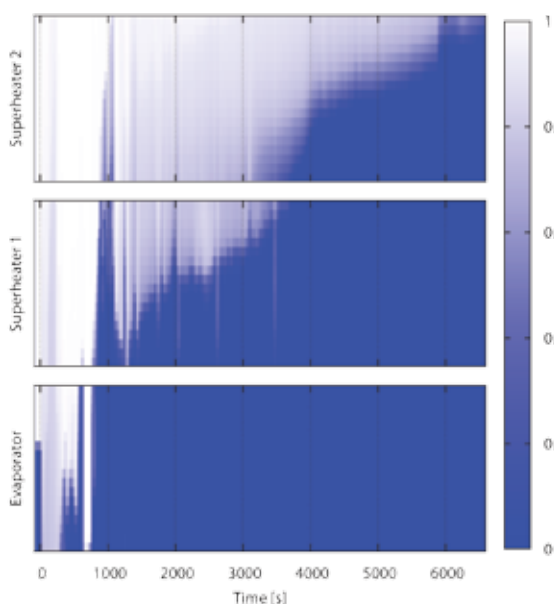
Projektin kuluessa toteutettujen parannusten jälkeen sekä APROS että SMABRE saavuttivat tilan, joissa niitä voidaan soveltaa termohydrauliikan mallintamiseen tavanomaisten painealueen lisäksi myös ylikriittisissä olosuhteissa.

Koodeihin lisätyt ylikriittisen painealueen lämmönsiirto- ja kitkamallit eivät kuitenkaan ole kaikilta osin aivan yhtä tarkkoja kuin tavanomaisissa paineissa käytetyt mallit, mikä heikentää laskentatulosten luotettavuutta jossain määrin.

Laskentatulosten epävarmuuden arvioimiseksi ja koodin kelpoistamiseksi tarvittaisiin seuraavaksi kokeellista dataa, jota vasten tuloksia voitaisiin verrata.

Dynaamisia analyysejä

Päivitettyjä APROS:ta ja SMABRE:a sovellettiin useiden alustavien HPLWR-reaktorin turvallisuusanalyysien laskentaan reaktorikonseptin toteutettavuuden arvioimiseksi. VTT:llä lasketut dynaa-

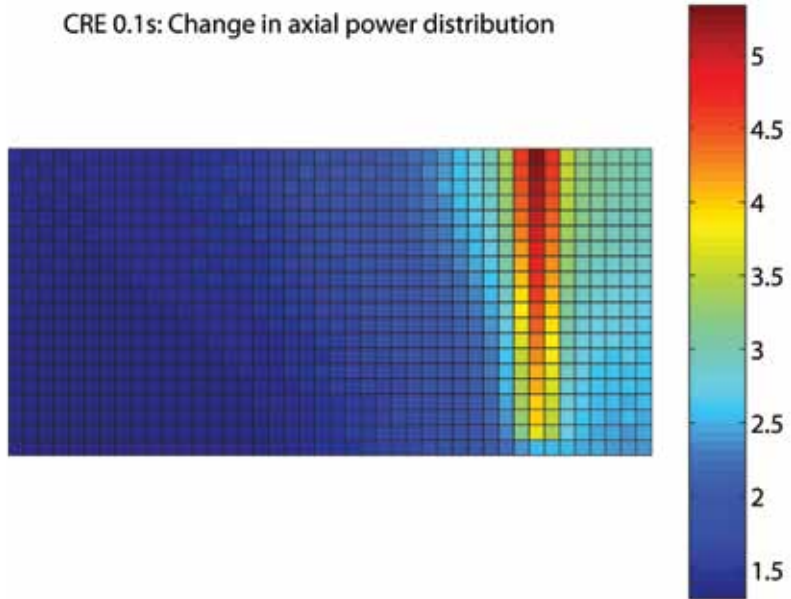


Ylikriittisyyden haasteita

HPLWR-reaktorin jäähdytteen mallintaminen muodosti kuitenkin haasteen analyysikoodeille, joita ei alun perin ollut kehitetty ylikriittistä painealuetta silmällä pitäen: uusi termodynaaminen toimintalue vaati lisäkehitys-

Aukko-osuus HPLWR-reaktorin sydänkanavissa isoa jäähdytteenmenetysonnettomuutta seuraavan uudelleentäytymisen aikana APROS-analyysin perusteella. Reaktorin välitila imaisee sydänkanavat taas tyhjiksi, juuri kun ensimmäinen "Evaporator"-vyöhyke on täyttynyt.

CRE 0.1s: Change in axial power distribution



miset neutroniikka/termohydrauliikka-analyysit sisälsivät muun muassa pumpputrippejä, isoja sekä pieniä höyryputken katkoja sekä säätösauvan uloslento-onnettomuuden.

SMABRE-laskuissa reaktorin neutroniikan käyttäytyminen ratkaistiin kytke-tyllä TRAB3D-ohjelmalla, joka perustuu kaksiryhmäneutronidiffuusioyhtälöiden ratkaisemiseen kehittyneellä nodaalimenetelmällä. APROS-laskuissa neutronidiffuusioyhtälöt ratkaistiin koodin sisäisellä kolmiulotteisella differenssiratkaisijalla.

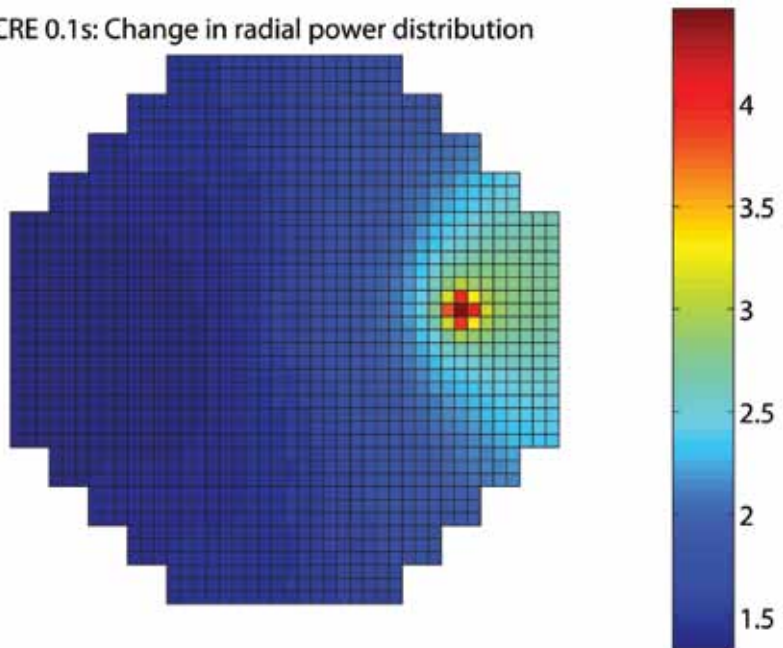
APROS:illa sekä TRAB3D/SMABRE:lla tehtyjen laskujen seurauksena HPLWR-konseptissa havaittiin joitakin ongelmakohtia, joiden vuoksi muun muassa reaktorin virtauspolkuihin tehtiin muutoksia tutkimushankkeen edetessä: esimerkiksi reaktorin moderaattorivirtauksen huomattiin kääntyvän epätoivottuun suuntaan tietyissä onnettomuustilanteissa. Lisäksi havaittiin reaktorin polttoainenippujen väliin jäävän tilan aiheuttavan epäsuotuisan imuvai-kuksen isoa jäähdytteenmenetysonnettomuutta seuraavan uudelleentäyttö-vaiheen aikana.

Toisaalta laskentatulosten perusteella pystyttiin myös mitoittamaan hätäjähdytysjärjestelmän vaatimuksia, muun muassa arvioimalla tehoa jota hätäjähdytysvesipumpuilta on vaadittava, jotta sydämen sulamiselta vältyttäisiin jäähdytteenmenetysonnettomuuden seurauksena.

Eurooppalainen SCWR-reaktorien tutkimus jatkuu parhaillaan käynnissä olevassa SCWR-FQT -projektissa (2011-2014), jossa valmistaudutaan SCWR-polttoaineen koestukseen tsekkiläisen tutkimusreaktorin sisään sijoitettavassa ylikriittisessä koelaitteistossa. Myös tässä projektissa VTT:llä kehitetyt turvallisuusanalyysityökalut ovat tärkeässä roolissa.

Suhteellinen muutos HPLWR-reaktorin tehojakaumassa 0,1 s säätösauvan uloslennon jälkeen, TRAB3D/SMABRE-analyysin perusteella.

CRE 0.1s: Change in radial power distribution



TkL Joona Kurki
VTT Ydinenergia
Tutkija
Ydinvoimalaitosmallinnus
joona.kurki@vtt.fi



Jyväskylän kiihdytinlaboratorion massaerotinlaitteisto



Kuva: Pavel Krömer <http://commons.wikimedia.org>.

Neljännän sukupolven GEN4-reaktorien suunniteluun käytetään simulaatioita ja simulaatioissa korostuu aina simuloitavan ilmiön tarkka tuntemus. Junk in, junk out.

Reaktorisimulaatioiden luotettavuutta rajoittaa niihin käytetyn ydinfysikaalisen datan luotettavuus. Reaktorin simulointiin tarvitaan ainakin fissio- ja neutronisieppausvaikutusaloja, fissioreaktion neutronimultiplisiteettiä, fissiotuottojakaumia ja beetan viivästämien neutronien tuotto- ja energijakaumia.

Ydindatan vertailuun, evaluointiin ja luettelointiin käytetään kohtalaisesti resursseja, mutta lopulta ainoa tie luotettavampaan kokeelliseen dataan on ydinfysiikan perustutkimus.

Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen (JYFL) kiihdytinlaboratorion IGISOL (Ion Guide Isotope Separator On-Line) massaerottimella on tutkittu raskaiden ytymien fissiota kokeellisesti jo 30 vuoden ajan.

Alun perin fissiotutkimuksen tavoitteena oli ydinrakenteen perustutkimus. Kiihdyttimestä saadulla protonisuihkulla indusoidulla luonnonuraanin ja -to-

riumien fissiolla tuotettiin neutronikkaita isotooppeja spektroskopiaa varten.

Fissiotuottojakaumia alettiin ensin tutkia sen arvioimiseksi, mitä isotooppeja voidaan tuottaa tutkimustarkoituksiin. Tarve tuottojakaumien tieteelliseen arvioimiseen johti teoriayhteistyöhön pietarilaisen Khlopinin Radiuminstituutin kanssa 1990-luvulla.

2000-luvulla kokeellisia fissiotuotantomittauksia tehtiin yhteiseurooppalaisen EURISOL-projektin tarpeisiin.

Viimeisten puolen vuosikymmenen aikana olemme huomanneet, että Jyväskylän fissiotutkimuksen tuottama data on hyödyllistä myös GEN4 -reaktoritutkimuksen näkökulmasta.

Reparaattori kaupan päälle

JYFL:n kiihdytinlaboratoriossa on tutkittu ydinrakennetta 1970-luvulta lähtien. Laboratorion ensimmäinen hiukkaskiih-

dytin, kevyt-ionisyklotroni, otettiin käyttöön 1974.

Tarjouskilpailun voitti syklotronien valmistajana ensiaskeleitaan ottava Scannordix. Fysiikan laitoksen ensimmäinen professori, edesmennyt *Juhani Kantele* totesi 1990-luvun alussa kahvipöytäkeskustelussa, että valinnan ratkaisi lopulta Scannordixin kaupantekijäisiksi lupaama isotooppiseparaattori.

”Sehän oli 1970-luvun tyyli, että kinkku kaupan päälle.”

Yliopiston omaisuusrekisteriinkin laitteet on kirjattu yhtenä vientinä: syklotroni ja reparaattori.

Ennen kuin lyöntivirheen synnyttämää ”reparaattoria” voitiin tosissaan käyttää ydinfysiikan tutkimukseen, sen ionilähde täytyi yhdistää kiihdyttimeen ”on-line” eli tuottaa tutkittavat isotoopit ydinreaktiolla joko itse ionilähteessä tai hyvin lähellä sitä.

Tässä yhteydessä innovoitiin ioniohjaintekniikka, jonka kehittäjiä olivat mm.

Kielikolikka

Sanoja neutronikas ja protonikas ei tunnustavan käyttämään kukaan muu kuin minä. Ne ovat kuitenkin suomen kielen sääntöjen mukaan muodostettuja, samalla lailla kuin mahakas tai voimakas. Neutronirikas, protonirikas, maharikas ja voimarikas sen sijaan ovat ilmiselviä sveltisimejä ja sellaisina hetimiten hylättävä.

Jose Tain Valencian yliopistosta etsii viivästettyjä neutroneita Jyväskylässä keväällä 2010 taskulampun kanssa. Belen Gomes (Barcelonan polyteknillinen yliopisto) luottaa siihen, että hänen suunnittelemansa neutroni-ilmaisain toimii niin kuin pitää.



professori *Kalevi Valli*, jatko-opiskelija, nykyinen laboratorionsinööri *Juha Ärje* sekä etenkin yliassistentti, nykyinen Fysiikan tutkimuslaitoksen johtaja, professori *Juha Äystö*. Juha Äystö sai vuoden 2010 European Physical Society'n Marie Curie -palkinnon ansioistaan ioniohjaintekniikan kehittäjänä.

Fission tuotteet

Ioniohjaintekniikan universaalisuus on ilmeinen etu raskaiden ytimien kuten uraanin tai toriumin fission tuotteiden tutkimisessa.

Fissiossa syntyy yli neljäkymmentä alkuainetta, ja kaikista niistä voidaan ioniohjaintekniikalla muodostaa massalajiteltu ionisuihku.

Lisäksi kaikki massalajitellut ionit ovat primäärisiä fission tuotteita, koska ionit muodostuvat isotoopit synnyttäneessä ydinreaktiossa. Ioniohjaimen kyllä kertyy fission tuotteita ja niiden hajoamistuotteita, mutta ne eivät enää voi ionisoitua.

Ioniohjaintekniikalla muodostetusta ionisuihkusta voi siten suoraan määrittää riippumattomat fission tuotteet.

Ioniohjaintekniikka sovellettiin 20 MeV protoneilla indusoituun luonnonuraanin fission jo 1983, mutta fission tuotteita ei heti alettu mitata.

Fissiolle haluttiin valmistaa neutronikkaita ytimiä niiden ydinrakenteen tutkimista varten. Tämä onnistui paremmin kuin kukaan osasi odottaakaan.

JYFL:n fission tuotetutkimukseen liittyen olemme löytäneet 30 uutta neutronikasta isotooppia ja parikymmentä aiemmin tuntematonta neutronikkaiden

isotooppien isomeerista tilaa.

Fission tuotteita alettiin Jyväskylässä mitata 1980-luvun lopulta lähtien. Ensisijainen kiinnostuksen kohde oli, kuinka neutronikkaisiin ytimiin uraanin fission oikein voitaisiin päästä.

Tyypillisessä mittauksessa seurattiin massalajitellun fission tuotteen hajoamista, tavallisesti gammaspektroskopiolla. Tuottoja on vuosien mittaan mitattu niin protonilla, deuteriumilla kuin nopealla neutronilla indusoidulle fissionelle.

Tuotteita mittausta saivat aivan uutta virtaa, kun JYFL:n IGISOL-massaerottimen yhteyteen rakennettiin 2000-luvun alussa 7 teslan Penningin loukku, JYFLTRAP. Käyttämällä JYFLTRAP:ia suuren resoluution massaerottimena fission tuotteiden määritys voidaan palauttaa ionien laskemiseen.

Erityisesti tämä helpottaa lähellä stabiilisuutta olevien primäärisien fission tuotteiden tuoton määrittämistä, koska niistä monet ovat hyvin pitkäikäisiä, ja kun ne eivät hajoa, niitä ei oikein voi laskea radioaktiiviseen hajoamiseen perustuen.

Beetahajoamisen viivästämät neutronit

Beetahajoamisen viivästämällä neutroneilla on tunnetusti merkittävä rooli termisten reaktoreiden neutronivuon stabiloinnissa.

Ydinrakennetutkimuksen kannalta beetahajoamisen viivästämä neutroniemissio kertoo neutronin sidosenergian suuruudesta.

Kaikkein eksoottisimpien ytimien havaitsemiseen ja esimerkiksi ytimien puoliintumisaikamittauksiin viivästettyjen neutroneiden havaitseminen on erittäin herkkä menetelmä.

JYFL:n massaerottimella beetaviivästettyjä neutroneita mitattiin 1990-luvulla yhteistyössä Mainz'n yliopiston kanssa, jolloin määritettiin puoliintumisaika noin puolelle tusinalle aiemmin tuntemattomalle neutronille isotoopille Mainz'n yliopiston ³He-ilmaisilmaislaiteita käyttäen.

Beetaviivästettyjen neutronien mittausta on jatkettu 2000-luvulla yhteistyössä lähinnä espanjalaisten yliopistojen ja tutkimuslaitosten kanssa.

Euratomin Fission-ohjelmaa kuuluvasa ANDES (Accurate Nuclear Data for nuclear Energy Sustainability) R&D-projektissa Jyväskylässä mitataan eräiden

valittujen isotooppien beetaviivästetyn neutroniemission haarauma (p_n value) ja energiaspektri.

Hajoamislämpö ja Pandemoniumin pirut

Kaikki fissiosta saatavissa oleva energia ei vapaudu heti. Raskaiden ytimien fissio johtaa radioaktiivisiin hajoamistuotteisiin, joiden hajoamisketjut ovat hyvinkin pitkiä.

Jopa 8 % reaktorin energiasta voi tulla fissiotuotteiden hajoamisesta. Tämä energian vapautuminen tunnetaan hajoamislämpönä. Koska hajoamislämmön vapautuminen ei lakkaa reaktorin pysähtyessä, sen huomioiminen on tärkeä reaktorisuunnittelun reunaehto, niin kuin viimeistään kantapään kautta Fukushimaa on opittu.

Hajoamislämmön vapautumiseen mikroskooppisella tasolla liittyy kysymys hajoamisenergian jakautumisesta beeta-hiukkasten ja gammasäteilyn välillä.

Fissiotuotteiden tunnetuista hajoamiskaavioista laskettu beeta- ja gammasäteilyn suhde ydinreaktorin hajoamislämmössä on selvästi poikennut kokeellisesti määritetystä. Tämä kutsutaan beeta-gamma-poikkeamaksi.

Taustalla on ilmeisesti ns. pandemonium-ilmio (Pandemonium on Helvetin pääkaupunki Millsin ”Kadotetussa paratiisissa”).

Kun hajoamiskaavioita määritetään hyväresoluutioisilla germaniumilmais-

illa tehdyistä mitGermatauksista, osa gammasäteilystä jää havaitsematta ja puuttuva energia tulkitaan virheellisesti beetasäteilyksi.

Hajoamiskaaviot ovat siis väärin - simuloi siinä hajoamislämpöä niillä sitten.

Pandemoniumin instrumentaalisten pirujen sarvet voi kuitenkin tylsyttaa käyttämällä beetavoimakkuuden mittaamiseen kokonais-gamma-absorptiospektrometriä (Total Absorbtion Gamma Spectrometry eli TAGS, useimmiten vain TAS), jossa mitataan hajoamisen gammasäteilyn kokonaisenergia.

Kriittisimpien beeta-gamma-poikkeaman aiheuttavien isotooppien epäiltiin olevan teknetiumia ja niobia.

Näistä alkuaineista koostuvia massaseparoituja suihkuja ei ole tarjolla kovin monessa paikassa maailmassa.

Jyväskylän ioniohjaintekniikalle ne eivät kuitenkaan ole mikään ongelma. TAS-spektrometrin rakenne on oleellisesti tukeaineesta tehty pullo, jonka sisään radioaktiivinen näyte laitetaan. Gammasäteilyn havaitsemistehokkuus on oleellisesti 100 %, eikä yksittäisiä gammafotoneita yritetäkään erottaa toisistaan.

Yksittäistä havaittua hajoamista ei voi mitenkään suoraan liittää tiettyyn hajoamiseen spektrometrillä saatavan informaation perusteella. TAS-mittauksia helpottaa siksi suunnattomasti, jos spektrometriin tuotava näyte koostuu vain yhdestä isotoopista, eikä kaikista saman massaluvun fissiotuotteista. Jyväskylässä

tämäkin voidaan toteuttaa käyttämällä JYFLTRAP-loukkua massafiltertinä.

Myöhään syksyllä 2004 kuubalais-syntyinen *Alejandro Algora* vieraili noin kymmenen laboratorion ja puolensadan tutkijan TAS-kollaboraation edustajana Jyväskylässä selvittämässä mahdollisuutta tuoda laitteistonsa Jyväskylään.

Olimme sattumalta jo sopineet IGISOL-tutkimusryhmän seminaaripäivän Ränssin kievariin Jyväskylän lähelle, jossa keskusteltaisiin meneillään olevista hankkeista ja aivomyrskyttäisiin uusia ideoita.

Tohtori Algora pyydettiin luonnollisesti mukaan. Koska seminaarissa oli hyvin vähän ulkopuolisia osallistujia, esitelmissä käsiteltiin poikkeuksellisen räväkästi kaikkea sitä, mikä oli mennyt vikaan.

Kuunneltuaan aamukymmenestä iltakuuteen esitelmää, joissa puitiin ioniohjaimen vikoja ja puutteita, syötyään suomalaista perinneruokaa, saunottuaan sähkövalottomassa saunassa ja uituaan avannossa vieraamme oli edelleen sitä mieltä, että TAS-laitteiston tuominen Jyväskylään olisi hyvä idea.

Vuonna 2010, lukuisia Jyväskylässä tehtyjä mittauksia myöhemmin, Physical Review Letterissä julkaistussa raportissa (PRL 105, 202501, doi:10.1103/PhysRevLett.105.202501; katso myös artikkelia taustoittava Physics Viewpoint-artikkeli DOI: 10.1103/Physics.3.94) voitiin osoittaa uusien, TAS-mittauksilla määritettyjen beetavoimakkuusfunktoiden selittävän suurimman osan beeta-gamma-poikkeamasta.

Kohti neutroni-indusoitua fissiota

Marraskuussa 2011 vihittiin käyttöön JYFL:n uusi protonikiihdytin MCC30, josta saatavien protonien energia rajoittuu 18 ja 30 MeV:n välille, mutta jonka protonisuihkun suurin mahdollinen intensiteetti on vähintään 100 μ A.

IGISOL-massaerotinlaitteisto, joka on kaksi vuosikymmentä ollut 20 - 30 MeV protonisuihkujen suurin käyttäjä, päätettiin siirtää MCC30-kiihdytintä varten rakennettuun laboratorion laajennusosaan mahdollisimman lähelle sitä.

Uusitun massaerotinlaitteiston rakennustyö on vielä kesken, mutta ensimmäinen ydinreaktiolla tuotettu, massaerottelu radioaktiivinen ionisuihku on jo testimielessä kuljetettu tutkimuslaitteiston mittausalueelle.

Jotta tarjolla olevista intensiivistä

⁶²Ga-kokeen tuloksena JYFLTRAP-ioniloukun avulla saatiin erotettua puhdasta galliumin isotooppia ⁶² helmikuussa 2005. Kuva: <https://www.jyu.fi/fysiikka/en/research/accelerator/igisol/trap/photos>



Ioniloukku

Ioniloukut mahdollistavat ionien säilyttämisen ja manipuloimisen sähkö- ja magneettikenttien avulla. JYFL:n kiihdytinlaboratorion ioniloukkuja ovat radiotaajuinen kvadrupoliloukku (RFQ), jota käytetään massalajitellun ionisuihkun pysäyttämiseen ja kimputtamiseen, sekä JYFLTRAP, saman 7 T suprajohdavan magneetin sisään sijoitetut kaksi lineaarista Penningin loukkuja.

Penningin loukussa magneettikenttä pakottaa varaukselliset hiukkaset loukun keskiakselille, ja akselin suunnassa ionit kohdistetaan jännitetasoilla luotuun potentiaalikuoppaan. Hiukkasten liike muodostuu kolmesta ominaisliikkeestä, joiden suhteellista intensiteettiä voidaan muuttaa radiotaajuisilla dipoli- ja/tai kvadrupolisähkökentillä.

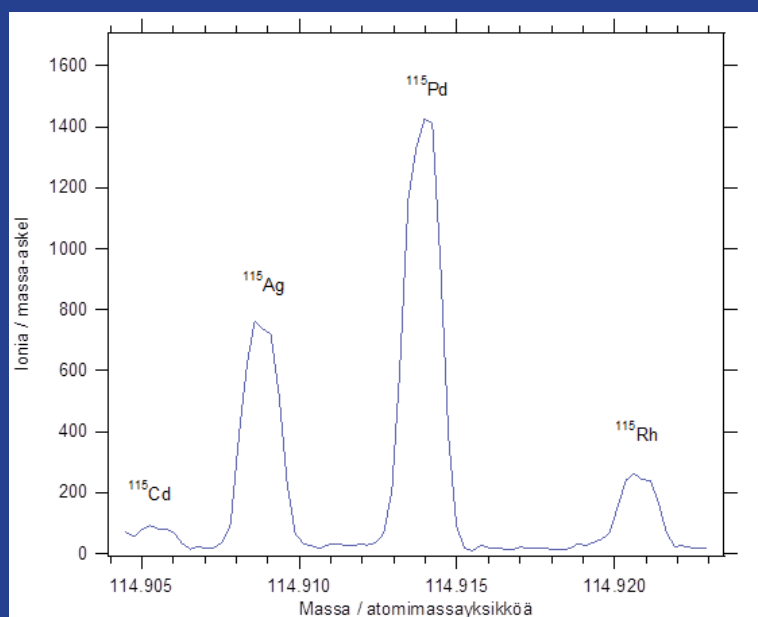
Loukkuja voidaan käyttää hyvin kapeakistaisten massasuodattimena, jonka erottelukyky dM/M voi olla parempi kuin 1:100000. Tämä on riittävä saman massaluvun (esim $A = 115$) isotooppien erottelamiseen (^{115}Rh , ^{115}Pd , ^{115}Ag , ^{115}Cd muodostavat läpäisykai-

taa skannatessa massaspektriin kukin oman massapiikkinsä). Tätä moodia voi käyttää monoisotooppisen näytteen valmistamiseen, jossa siis ennen radioaktiivista hajoamista on pelkästään esimerkiksi ^{115}Pd -ytimiä.

Käyttämällä JYFLTRAP:lla kehitettyä Ramsey-puhdistukseksi nimettyä kikka kolmesta voidaan saavuttaa lähes 1:1000000 erottelukyky. Erotteluun kuuluva aika on joitakin satoja millisekunteja. Jos erotteluvaatimus ei ole kovin tiukka, erottelu-aika voi olla alle sata millisekuntia.

Toinen tapa käyttää Penningin loukkuja on lentoaikaresonanssin määrittäminen, joka mahdollistaa isotooppien atomimassojen määrittämisen jopa alle 1 keV/c² tarkkuudella. JYFLTRAP:lla mitatut atomimassat löytyvät osoitteesta http://research.jyu.fi/igisol/JYFLTRAP_masses/. Mitatut massat ovat merkittävästi tarkentaneet yli 200 isotoopin atomimassaa ja paljastaneet taulukoiduissa atomimassoissa jopa 1 MeV/c² suuruisia virheitä.

Massaluvun $A = 115$ Penning-loukulla eroteltu massaspektri ^{nat}U :n protonilla indusoidussa fissionissa. Massaerottelukyky tässä spektrissä on noin 1:80000. Kunkin piikin korkeus vastaa fissionuottoa, vain ^{115}Rh tulee pieni korjaus sen lyhyen, 0,99 s puoliintumisajan vuoksi.



kiihdyttimen protonisuihkuista saatasiin suurin mahdollinen hyöty, olemme aloittaneet protoni-neutroni-muunnoskohtion suunnittelun ja rakentamisen yhteistyössä Upsalan yliopiston kanssa.

Neutronien tuotto muunnoskohtiossa on noin yksi neutroni sataa protonia kohti, mutta tätä kompensoi ioniohjaimen parempi geometria ja se, että neutronit eivät ionisoi ioniohjaimessa virtaavaa heliumkaasua ollenkaan siinä määrin kuin protonit.

Erityinen merkitys neutronikohtiolla on fission tuottojakaumien mittaamiselle.

Protoni- ja deuteroni-indusoidulla fissiolla mitatut tuottojakaumat, joita IGISOL-massaerottimella on tähän saakka mitattu, antavat tietoa myös neutroni-indusoidun fission tuottojakaumista, mutta vain epäsuorasti, koska neutroni- ja protoni-indusoitu fissio johtavat eri väliyttimeen.

Ydinreaktorin toiminnan kannalta nimenomaan neutroni-indusoitu fissio on oleellinen. Jos kuitenkin teoreettinen malli kuvaa protoni-indusoidun fission jollakin alueella oikein, saman mallin pitäisi periaatteessa kuvata oikein myös neutroni-indusoitu fissio vastaavalla alueella.

Neutronikohtio mahdollistaa GEN4-kehitystyön kannalta oleellisen nopeilla neutroneilla indusoidun fission tuottojakautumien suoran mittaamisen.



FT Heikki Penttilä
Tutkimuspäällikkö
Fysiikan laitos
Jyväskylän Yliopisto
heikki.penttila@jyu.fi



Mittaus toistetaan harvoin samanlaisena, joten mittausasema täytyy yleensä rakentaa aina uudelleen. Antti Saastamoinen (nykyinen Texas A&M post doctoral -tutkija) ja JYFL:n yliopistotutkija Iain Moore pyrkivät saamaan kaiken ensimmäisellä kertaa oikein.

Ioniohjaintekniikka

Ydinreaktion syntymiseksi ammuksena käytetyt atomit on kiihdytettävä, jotta kohtio- ja ammusytimien sähköinen poistovoima ylittyisi (poikkeuksena tietysti neutronit, joilla ei ole sähkövarausta). Jos kohtio on ohut, reaktiotuote sinkoaa ammuksen liikemäärän turvin ulos kohtiosta.

Perinteisessä on-line isotooppiseparaattorissa tutkittavat isotoopit synnytetään ydinreaktiolla, pysäytetään kuumaan pintaan tai matriisiin ja ionisoidaan. Ydinreaktiossa syntyvät isotoopit ovat kuitenkin jo valmiiksi ionisoituneita, yleensä vielä moninkertaisesti. Ioniohjaintekniikka perustuu tämän ydinreaktiossa tapahtuvan ionisaation hyödyntämiseen: valmiiksi ionimuodossa olevia isotooppeja ei päästetä enää neutraloitumaan.

Ne pysäytetään kohtion ulkopuolella virtaavaan jalokaasuun, joka on tavallisesti heliumia. Koska heliumin ionisaatiopotentiaali on korkeampi kuin muiden alkuaineiden, heliumiin pysäytetty positiivinen ioni pysyy ionina. Ionit kuljetetaan kaasuvirtauksen avulla pienempään paineeseen, jossa ne erotellaan neutraalista heliumkaasusta sähkökenttien avulla ja ohjataan massaseparaattorin kiihdytinasteeseen.

JYFL:n IGISOL-massaerottimessa käytetään erotteluun 55° itsefokukoivaa dipolimagneettia, jonka 50 % massaerottelukyky dm/M ioniohjainta käytettäessä on noin 1:500.

Se on riittävä massalukujen erottamiseksi toisistaan, mutta saman isobaarin atomit (atomit, joilla sama massaluku A) tulevat samaan massapiikkiin. Isobaarin

hajottamiseen käytetään JYFL:ssä Penningin loukkua, jolla saavutettu massaerottelu voi olla parempi kuin 1:100000.

Ioniohjainmenetelmä kehitettiin 1980-luvun alussa Jyväskylässä. JYFL:n lisäksi menetelmä on käytetty ainakin seuraavissa laboratorioissa: Sendain yliopisto, Japani; Varsovan yliopisto, Puola; Leuvenin katolinen yliopisto, Belgia; Helmholtzzentrum Gesellschaft für Schwerionenforschung Institut (HZ-GSI), Darmstadt, Saksa; Michigan State -yliopiston National Superconducting Cyclotron Laboratory (NSCL), Michigan, Texas A&M -yliopisto, Texas, sekä Argonne National Laboratory, Illinois, Yhdysvallat. Fissioreaktiota on käytetty tutkimukseen Sendaissa, Leuvenissa ja ja Argonnessa.

IGISOL Portrait

European Physical Journal A:n erikoisnumero "Topical collection: An IGISOL Portrait - Selected Contributions" (EPJA 48 numero 4) ilmestyi huhtikuussa 2012. Lehden artikkelit käsittelevät JYFL:n IGISOL-laboratoriossa tehtyä tutkimusta viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana.

Aiheena ovat mm. fissiotutkimus ja JYFLTRAP. Täydellinen "IGISOL Portrait" käsittää lisäksi 20 muuta artikkelia,

joista suurin osa on jo ilmestynyt Hyperfine Interactionissa. Koko IGISOL Portrait tulee olemaan luettavissa JYFL:n verkkosivujen kautta syksyllä 2012.





Kuva: Balcer <http://commons.wikimedia.org>.

Torium on uraanin lisäksi ainut luonnossa esiintyvä alkuaine, jota voidaan käyttää polttoaineena ydinvoimalassa. Sitä on käytetty koeluentoisesti ydinvoiman alkuaikoina, mutta melko nopeasti se jäi uraanin jalkoihin. Nyt ydinvoiman uusi tuleminen ja neljännen sukupolven reaktorien tutkimus on herättänyt kiinnostuksen toriumiin uudelleen.

Suomessa toriumtutkimusta on tehty Teknillisessä Korkeakoulussa ja sittemmin Aalto-yliopistolla. Tässä jutussa kerätään toriumtutkimuksen tulokset yhteen.

Toriumilla on vain yksi luonnossa esiintyvä isotooppi, ^{232}Th , joka on fertiili kuten ^{238}U :kin eikä siten kykene ylläpitämään ketju-reaktiota yksin. Säteilytettäessä siitä muodostuu fissiiliä ^{233}U :a yhdellä neutronikaappauksella ja kahdella beta-hajoamisella.

Torium ei siis kelpaa yksinään reaktoriin polttoaineeksi vaan tarvitsee seurakseen jonkin fissiilin isotoopin, joita ovat luonnonuraanin ^{235}U ja jälleenkäsittelystä saatava ^{239}Pu . Toriumia onkin esitetty tavaksi polttaa pois kertyneitä plutoniumvarantoja. Lisäksi toriumiin siirryttäessä jälleenkäsittelystä saisi myös ^{233}U :a.

Käytetty toriumpolttoaine

Toriumin mainitaan usein olevan hyvin proliferaatioresistanttia eli toriumin käyttö hankaloittaa ydinmateriaalien ei-toivottua leviämistä. Käytännössä tällä

tarkoitetaan toriumista hyödetyn uraanin voimakasta gamma-aktiivisuutta, sillä pääasiallinen hyötötuote ^{233}U on hyvinkin pommikelpoista materiaalia. (Paljaan pallon kriittinen massa on 15,8 kg, vrt. 16,9 kg aseplutoniumille.) Kaiken lisäksi ^{233}U on kemiallisesti erotettavissa toriumista, minkä voidaan ajatella lisäävän proliferaatoriskiä. Tämä voidaan kiertää lisäämällä polttoaineeseen jonkin verran köyhdytettyä uraania, joka toisaalta lisää käytetyn polttoaineen säteilymyrkyllisyyttä, jolloin osa siitä hyödyntäminen menetetään.

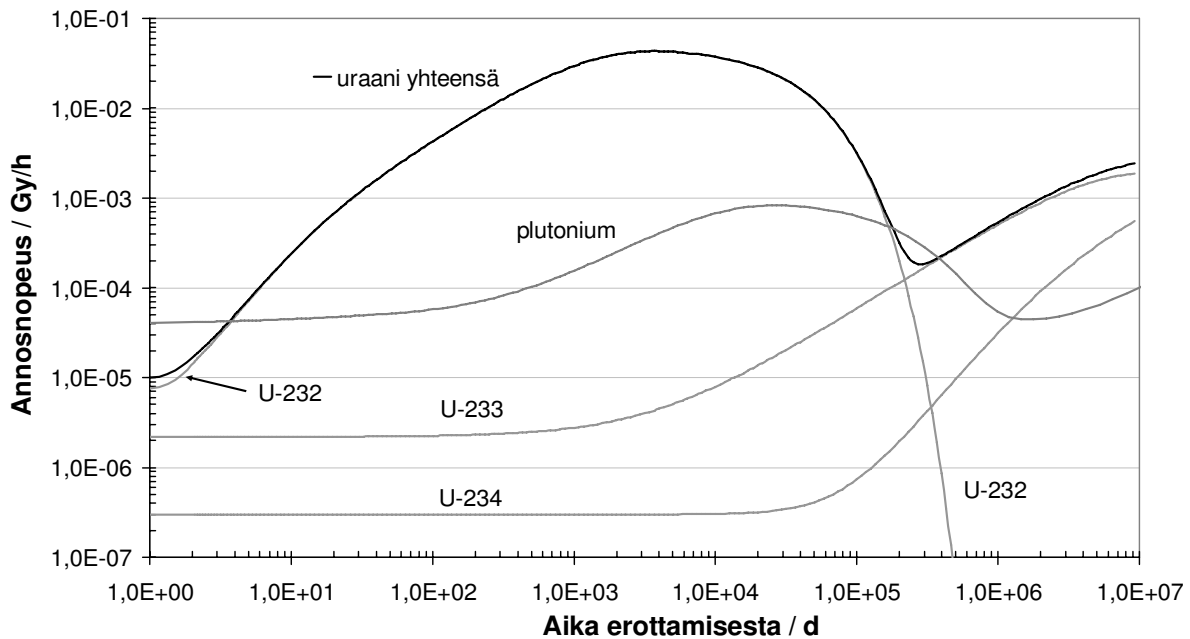
Toriumia säteilytettäessä syntyy siis pääasiassa ^{233}U :a, mutta myös muita uraanin isotooppeja, josta tässä yhteydessä tärkeä on ^{232}U , jota syntyy vuosta, geometriasta ja palamasta riippuen 500-3000 ppm hyödettyyn uraaniin. ^{232}U :n hajoamisketjun viimeinen epävakaakin ydin, ^{208}Tl emittoi 2,6MeV:in hyvin läpituokevan gamman. Tämä tekee toriumista hyödetyn uraanin käsittelystä hankalaa ja kuljetukset helposti havaittaviksi.

Kuvassa 1 on esitetty annosnopeus metrin etäisyydellä 5 kilosta

hyödettyä uraania ja 5 kilosta reaktoriplutoniumia. Uraanille on merkitty erikseen kunkin isotoopin hajoamisketjun kontribuutiot annosnopeuteen. Uraanin koostumukseksi on otettu 500ppm ^{232}U , 10 % ^{234}U , 5 % ^{235}U , 5 % ^{236}U , 300 ppm ^{238}U ja loput eli noin 80% ^{233}U . Kuvaan on merkitty vain 10^{-8} Gy/h ylittävät osuudet. Tältä säteilyltä suojautuminen tai sen kätkeminen on hankalaa, koska vielä 60 mm lyijysuojan kanssa vuoden vanhalla uraanilla annosnopeus on metrin etäisyydellä noin 1 mGy/h.

Toinen usein mainittu hyötynäkökohta on käytetyn toriumpolttoaineen alhainen säteilymyrkyllisyys. Tämä pitää osittain paikkansa, käytetyn toriumpolttoaineen säteilymyrkyllisyys on noin dekadin tai kaksi pienempi aina 100 000 vuoteen asti kun verrataan tavalliseen uraanipolttoaineeseen tai eritoten MOX-polttoaineeseen.

Fissiotuotteissa ei eri fissiileillä isotoopeilla ole kovinkaan suurta eroa, ja fissiotuotteiden kontribuutio pitkän aikavälin säteilymyrkyllisyyteen on pieni. Merkittävin ero uraanipolttoaineeseen



Kuva 1. Käytetystä toriumpolttoaineesta erotetun uraanin aiheuttama annosnopeus nuklideittain eroteltuna. Kuva: Aarno Isotalo, Aalto-yliopisto.

on muodostuvien aktinidien määrä: torium on kevyempi kuin uraani, joten plutoniumia ja muita uraania raskaampia, pitkäikäisiä aineita muodostuu paljon vähemmän kuin uraanipolttoaineessa. Aktinidit, eritoten plutonium, vastaavat hajoamistuotteineen lähes yksin käytetyn polttoaineen säteilymyrkyllisyydestä noin 500 vuoden jälkeen.

Etu matalasta säteilymyrkyllisyydestä kuitenkin merkittävästi vähenee, jos $\text{Th-}^{233}\text{U}$ -polttoaine denaturoidaan ^{238}U :lla asemateriaalin erottamisen estämiseksi

tai jos sitä käytetään kertyneiden plutoniumvarojen polttamiseen.

Toriumin käyttö reaktorissa

Toriumia on käytetty reaktorissa jo ydinvoiman alkuaikoina. Tunnetuin esimerkki lienee Shippingportin toriumhyötöreaktori, joka osoitti kevytvesijäähdytteisen hyötöreaktorin olevan mahdollinen $\text{Th-}^{233}\text{U}$ -polttoaineella.

Reaktorissa oli erikoisuutena mm. säätöön käytetyt siirreltävät polttoaine-

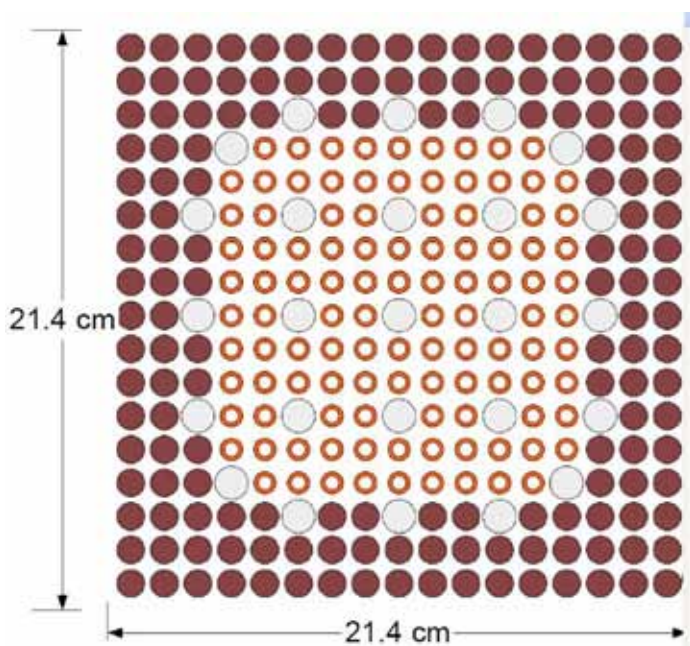
elementit, jotta neutronialous saatiin paremmaksi. Se toimi vuodesta 1977 vuoteen 1982 yhteensä 1200 täystepäivää, jona aikana fissiili-inventaari 1.015 kertaistui.

Yhtenä ensimmäisistä Teknillisen Korkeakoulun fissiotutkimuksen uuden tuleminen tutkimuksena tehtiin erikoistyö, jossa tämä Shippingportin toriumsydän mallinnettiin Monteburns-koodilla.

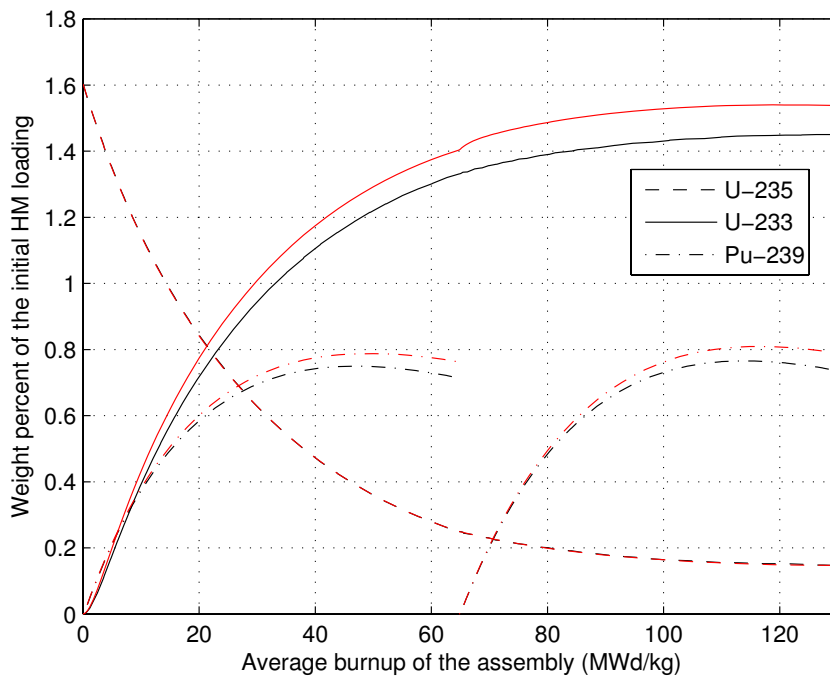
Tarkoituksena ei niinkään ollut tarkka kopioiminen, vaan ideoiden saaminen ”ikuista” toriumsydäntä varten. Laskuissa jouduttiin tekemään karkeita oletuksia johtuen käytössä olleista koodeista, mm. vaikutusalat olivat tilavuuspainotettuja vuo-tilavuuspainotuksen sijaan. Tästä huolimatta toriumsydän saatiin hyötämään, yhtä vähän ja hitaasti kuin esikuviansakin.

Tämän ensimmäisen reaktorifysiikan erikoistyön jälkeen toriumin käyttöä on tutkittu useammassakin eri kandidaatin-, erikois- ja diplomitöissä.

Radkowsky-nippu on yksi tunnetuimmista visioista käyttää toriumia nykyisissä painevesilaitoksissa. Siinä nipun kes-



Kuva 2. Radkowsky-nippu: keskellä korkeasti väkevöityä uraania sisältävät siemensauvat ja ympärillä toriumia sisältävät vaippasauvat. Kuva: Jaakko Kuopanportti, Aalto-yliopisto.



Radkowsky-nipun siemenen ^{239}Pu ja vaipan ^{233}U ja ^{235}U inventaarit yhden vaippasyklin eli kahden siemensyklin aikana. Kuva: Jaakko Kuopanportti, Aalto-yliopisto.

kiosassa on korkeaväkevöityä uraania, ns. siemen, ja uloimmat sauvat toriumia (vaippa), johon tosin on sekoitettu jonkin verran niinkään korkeaväkevöityä uraania. (kuva 2.)

Tulokset osoittavat, että tällä konseptilla toriumin käytöstä on hyötyä vasta erittäin pitkällä säteilytysjaksoilla ja korkeilla palamilla. Nipusta vaihdettaisiin siemensauvat kolmen 18 kuukauden jakson jälkeen ja vaippa kahden siemensyklin välein, jolloin poistopalamiksi tulee 130 MWd/kg ensimmäiselle ja 124 MWd/kg toiselle siemenelle ja 76 MWd/kg vaipalle.

Kuvassa 3 on esitetty ^{233}U ja ^{235}U -inventaarit vaipalle ja ^{239}Pu -inventari kummallekin siemenlataukselle jotka kuluvat yhden vaippasyklin aikana. ^{233}U määrä kasvaa koko säteilytyksen ajan, mikä osoittaa toriumin tarvitsevan pitkät säteilytysajat ja korkeat palamat tavoiteltaessa taloudellisesti ja fysikaalisesti tehokasta toriumin käyttöä.

Kiehuvesilaitoksen toriumpolttoainetta tutkittiin yhdessä tuoreimmista diplomitoista. Siinä visioitiin viisi erilaista toriumia sisältävää nipputyyppeä viisierälatauksella toimivaan kiehuvesilaitokseen ja verrattiin niitä tavalliseen uraanipolttoaineeseen.

Työkaluina käytettiin CASMO-4E -koodia nippujen ryhmävakioiden laskeamiseen ja SIMULATE-3 -koodia kokosydänlaskuissa. Kultakin nipputyypiltä tarkasteltiin monia parametrejä, mutta yksikään toriumia sisältävä nippu ei ol-

lut uraanipolttoainetta parempi kaikilla osa-alueilla. Joillain konsepteilla tehon piikittyminen oli pienempää, lähes kaikilla kasvutekijän muutos tasaisempaa ja takaisinkytkennät voimakkaampia, mutta selvää eroa ei saatu.

Toriumin taloudellisia näkymiä

Edellä on näytetty että torium toimii ydinreaktorissa, mutta sillä ei ole mitään ehdotonta etua verrattuna uraaniin. Siten käytännössä toriumin käyttöönoton suurin este on hinta, jossa tosin on vielä valtavat epävarmuudet.

Itse toriumin hinta on suuri kysymysmerkki: toriumia on runsaasti, mutta tällä hetkellä sitä ei eroteta vaan se menee erinäisten kaivosten jätekasoihin. Hinta on tällä hetkellä alhainen, mutta kysynnän kasvaessa hintaan vaikuttaa erotuskapasiteetin lisäysnopeus, sen kustannukset jne.

Sama epävarmuus koskee myös polttoaineen valmistusta ja mahdollista jälleenkäsittelyä. Yleisesti arvioidaan että toriumpolttoaineen valmistus tulee olemaan teollisessakin mittakaavassa jonkin verran kalliimpaa, mikä johtuu mm. korkeammista sintrauslämpötiloista.

Jälleenkäsittelyssä taas vaikuttaa toriumoksidin stabiilius: se ei liukene pelkkään typpihappoon kuten uraanidioksidi vaan tarvitsee lisäksi fluorihappoa, joten THOREX-prosessin arvioidaan yleensä olevan 1,5 kertaa kalliimpi kuin

PUREX:in. Toisaalta toriumpolttoaine voidaan loppusijoittaa kuten uraanikin.

Plutoniumvarastojen kasvaessa niiden polttaminen voi olla jossain kohtaa niin toivottua, että niistä saa toriumin tarvitseman fissiilin materiaalin halvalla. Joisain visioissa plutoniumin polttamisesta saatetaan tulevaisuudessa jopa maksaa.

Verrattaessa toriumin kustannuksia uraanin vastaaviin ja tehtäessä herkkyytarkasteluja saadaan arvioksi että uraanin hinnan pitäisi kohota nykyisestä noin sadasta noin 500 euroon kilolta, jotta torium tulisi kannattavaksi. Vastavasti plutoniumkilon poispolttamisesta tarvitsisi saada 85000 euroa.

Yhteenvetona voinee todeta, että torium ei vielä ole valmis uraanin kilpailijaksi, mutta ilman tutkimusta siitä ei sellaista tulekaan. Ja tutkimus tapahtuu ensin akateemisessa maailmassa kunnes asia on kypsä kaupalliselle läpimurrolle.

DI Lauri Rintala
Tohtorikoulutettava
Aalto-yliopisto
Teknillisen fysiikan laitos
lauri.rintala@aalto.fi



Turvallisuusperiaatteet ja ulkoiset uhat

Jotta voitaisiin ymmärtää Fukushima onnettomuudesta saatuja kokemuksia, on hyödyllistä kerrata ydinvoimalaitoksissa noudatettavia yleisiä ydinturvallisuuden periaatteita.

Teksti on lyhennelmä Säteilyturvakeskuksen tekemän selvityksen "Varautuminen ulkoisiin tapahtumiin suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla" liitteestä 2. Selvitys julkaistiin 16.5.2011 ja se löytyy kokonaisuudessaan http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/fi_FI/fukushima-selvitykset/. Lyhennelmä julkaistaan STUKin luvalla.

Suurin onnettomuusriski ydinvoimalaitoksessa johtuu siitä, että radioaktiivisten fission tuotteiden hajoaminen kehittää reaktorissa lämpöä vielä ketjureaktion pysähtymisen jälkeenkin. Mikäli polttoainesauvoja jäädyttävä vesi menetetään, polttoainesauvat ylikuumenevat ja vaurioituvat.

Vesi voi hävitä, jos jäähdytyspiiriin tulee vuoto. Ylikuumenemisen estämiseksi reaktori varustetaan hätäjäähdytysjärjestelmillä, jotka syöttävät reaktoriin uutta vettä. Vesi voi hävitä myös kiehumalla, ellei lämpöä saada siirrettyä pois reaktorin jäähdytyspiiristä. Lämmönsiirto reaktorin jäähdytyspiiristä esimerkiksi meriveteen voidaan hoitaa useilla rinnakkaisilla järjestelmillä.

Sähkönsaannin varmistaminen on oleellinen osa ydinvoimalaitoksen turvallisuuden varmistamista, sillä useimpien turvallisuusjärjestelmien käyttövoimana on sähkö. Sähkökatkon estämiseksi käytetään useita rinnakkaisia sähkölähteitä.

Ydinvoimalaitoksen turvallisuus varmistetaan monella tasolla. Tätä toimintatapaa sanotaan syvyysuuntaiseksi puolustusperiaatteeksi. Syvyysuuntaisen puolustusperiaatteen mukainen turvallisuustoimintojen puolustus perustuu viiteen peräkkäiseen tasoon, joista kaksi alinta tasoa on tarkoitettu ehkäisemään onnettomuuksia ja muut tasot tarkoitettu suojaamaan laitosta ja sen käyttäjiä sekä ympäristöä onnettomuuden haitallisilta vaikutuksilta.

Syvyysuuntaisten puolustustasojen on oltava toisistaan riippumattomia siten, että yhden tai useamman puolustustason menetys ei olennaisesti vaikuta

puolustustasojen toimintaan.

Riippumattomuuden on perustuttava fyysisen erottelun, toiminnallisen erottelun ja erilaisuusperiaatteen riittävään soveltamiseen puolustuslinjojen välillä.

Suomen toiminnassa olevilla ydinvoimalaitosyksiköillä on Tshernobylin onnettomuuden jälkeen toteutettu laaja ohjelma vakaviin onnettomuuksiin (reaktorisydämen sulamiseen) varautumiseksi. Tämän ohjelman perusstrategia on, että reaktorin suojarakennuksen eheyttä uhkaavat ilmiöt on tunnistettu ja kunkin ilmiön varalle on suunniteltu uudet turvajärjestelmät, joilla suojarakennuksen eheys turvataan. Nämä uhat ovat:

- vetyräjähdys
- reaktorisydämen sulaminen korkeassa paineessa ja reaktorin jäähdytyspiiristä purkautuvan sulan massan voimakas kemiallinen reaktio suojarakennuksen ilman kanssa
- reaktorisuojarakennuksen hidas paineen kasvu
- sulaneen reaktorin aiheuttama suojarakennuksen puhkeaminen

Edellä kuvattu varautuminen vakaviin reaktorionnettomuuksiin toiminnassa olevilla ydinvoimalaitoksilla ei ole normaali kansainvälinen käytäntö. Suomen lisäksi ainoastaan Ruotsissa on tehty vastaavat toimenpiteet.

Uusille yksiköille varautuminen reaktorisydämen sulamiseen on alun perin suunnitteluperusteena.

Laitoksen rakentamis- ja käyttöluvavaiheiden turvallisuusarviointien lisäksi Suomessa laitoksille tehdään määrävällein kattavat turvallisuusarvioinnit. Turvallisuusarvioinnit tehdään käyttö lupien uusinnan yhteydessä. Mikäli käyttö lupa-

jakson pituus on ollut pidempi kuin 10 vuotta, on lupajakson aikana edellytetty tehtävän määräaikainen turvallisuusarviointi. Käyttölupien ja määräaikaisten turvallisuusarviointien yhteydessä laitosten turvallisuus arvioidaan vastaavasti kuin laitoksen alkuperäistä käyttölupaa annettaessa.

Ulkoiset uhat

Ydinvoimalaitosten suunnittelussa on otettava huomioon mm. seuraavat ulkoiset tapahtumat ja niiden mahdolliseksi arvioidut yhdistelmät:

- sääilmiöt
- voimakas tuuli, mukaan lukien trombit ja syöksyvirtaukset
- vesisade, lumisade ja lumikuorma, raesade ja jäätävä sade
- ilman kosteus, sumu, huurtuminen
- salammat
- ulkoilman korkea ja matala lämpötila
- meriveden korkea ja matala lämpötila
- jäähdytysveden saannin tukkeutumisvaaraa aiheuttavat ilmiöt
- levä ym. kasvusto ja eliöstö sekä muu merimoska
- jää ja suppo
- öljy- ym. kemikaalipäästöt merivedeen
- maanjäristykset
- räjähdyspaineaallot
- palavien, myrkyllisten ja tukahduttavien kaasujen päästöt
- lentokoneen törmäys

Tässä selvityksessä ei käsitellä laitoksen tahallista vahingoittamista.

Äärimmäisten sääilmiöiden ja muiden luonnoilmiöiden voimakkuudelle tietyllä laitospaikalla ei voida määrittää täsmällistä ylärajaa. Ilmiöille määritetään ääriarvojakauma. Mittaustietoa on käytettävissä tyypillisesti vain noin sadan vuoden ajalta. Ydinvoimalaitosten turvallisuus suunnittelussa myös erittäin pienet vuotuiset todennäköisyydet ovat kiinnostavia. Suunnittelu arvojen valinnassa on tarpeen käyttää matemaattisten menetelmien lisäksi asiantuntija-arvioita ja soveltaa riittäviä varmuusmarginaaleja.

Turvallisuusjärjestelmien suunnittelussa noudatetaan seuraavia yleisiä periaatteita:

Moninkertaisuusperiaate

Turvallisuusjärjestelmässä on useita toisiaan korvaavia identtisiä osajärjestelmiä. Turvallisuustehtävä täytetään, jos esimerkiksi kaksi neljästä tai yksi kolmesta osajärjestelmästä toimii.

Erotteluperiaate

Rinnakkaiset osajärjestelmät suunnitellaan niin, että niiden yhtäaikainen vaurioituminen on epätodennäköistä. Osajärjestelmät sijoitetaan eri tiloihin tai samassa tilassa kauas toisistaan. Osajärjestelmät erotetaan toisistaan toiminnallisesti ja toisiinsa liittyvien järjestelmien haitalliset vuorovaikutukset estetään.

Erilaisuus- eli diversiteettiperiaate

Sama toiminto toteutetaan eri toimintaperiaatteisiin perustuvilla järjestelmissä. Esimerkiksi reaktorin sammuttaminen voidaan tehdä säätösauvojen avulla tai pumppaamalla booriliuosta reaktoriin.

Turvallisen tilan periaate

Jos laite menettää käyttövoimansa, se päätyy laitoksen turvallisuuden kannalta mahdollisimman turvalliseen tilaan. Esimerkiksi sähkönsyötön menetys turvajärjestelmien käynnistämisestä huolehtivassa suojausjärjestelmässä johtaa turvallisuusjärjestelmien käynnistämiseen.

Riittävä harkinta-aika

Onnettomuuden alkuvaiheessa tarvittavat turvallisuustoimenpiteet käynnistyvät automaattisesti. Ohjaajille jää riittävästi aikaa harkita jatkotoimenpiteitä, tyypillisesti 30 minuuttia. Henkilökunta voi ryhtyä toimenpiteisiin aikaisemminkin, mutta automaattisia toimenpiteitä ei voida pysäyttää ellei toimenpiteen käynnistänyt raja-arvon ylittänyt suure ole palannut normaalille tasolle.



Vikasietoisuuden tutkiminen todennäköisyysperusteisen riskianalyysin avulla

Diplomityössä on tarkasteltu uusien YVL-ohjeluonnosten vikasietoisuusanalyysin vaatimuksia sekä kehitetty menetelmä ja vikasietoisuuden lisäarvomitta (VM).

Säteilyturvakeskus laatii YVL-ohjeet, jotka koskevat ydinvoimalaitosten turvallisuutta, ydinmateriaaleja ja ydinjätteitä sekä ydinenergian käytön edellyttämiä turvallisuus- ja valmiusjärjestelyjä. Viime vuosina STUK:ssa on ollut meneillään mittava säännöstöuudistusprojekti, jossa tavoitteena on muun muassa selventää nykyisiä YVL-ohjeita, poistaa niiden keskinäiset ristiriitaisuudet sekä tehdä ohjeista nykyistä käyttäjystävällisempiä.

Diplomityössä on tarkasteltu uusien YVL-ohjeluonnosten vikasietoisuusanalyysin vaatimuksia sekä kehitetty menetelmä ja vikasietoisuuden lisäarvomitta (VM), joilla vaatimusten toteutumista voidaan tarkastella todennäköisyysperusteisen riskianalyysin (Probabilistic Risk Assessment, PRA) avulla.

Ydinvoimalaitosten vikasietoisuudella tarkoitetaan, että turvallisuustoiminnolla on kyky täyttää sille asetetut vaatimukset kaikissa tilanteissa ja saattaa laitos hallittuun tilaan ja siitä edelleen turvalliseen tilaan, vaikka mikä tahansa järjestelmän yksittäinen laite olisi toimintakyvytön ja vaikka mikä tahansa turvallisuustoimintoon vaikuttava laite olisi samanaikaisesti poissa käytöstä korjauksen tai huollon vuoksi.

Vikasietoisuusanalyysissä on osoitettava turvallisuustoimintoa

toteuttavien järjestelmien välinen riippumattomuus, joka voidaan saavuttaa riittävällä turvallisuusperiaatteiden (erottelu-, moninkertaisuus- ja erilaisuusperiaate) soveltamisella. Järjestelmien ja laitteiden muodostamiin turvallisuustoimintoihin on sovellettava YVL-ohjeen mukaisia vikakriteereitä, jotka määrittelevät järjestelmien moninkertaisuus- ja erotteluperiaatteen vähimmäisvaatimukset tilanteiden ja tapahtumien luokittelun pohjalta.

Diplomityössä kehitetty menetelmä perustuu työssä kehitettyyn vikasietoisuuden lisäarvomittaan (VM), joka kuvaa turvallisuustoimintoa toteuttavien järjestelmien välistä varmuuden hyötyä. Vikasietoisuuden lisäarvomitta on laskettava sekä järjestelmä- että perustapahtumatasolla. Järjestelmätason VM antaa yleisen kuvan varmuuden hyödyistä. Tarkempi tarkastelu suoritetaan komponenttitasolla tutkimalla riippuvuutta aiheuttavia perustapahtumia. Mitan arvot sijoittuvat asteikolla nolasta yhteen. Jos mitta saa arvoksi nolla, on varmuuden tuoma lisäys hyödytön. Tuloksen ollessa yksi saavutetaan varmuuksella teoreettinen maksimihöyty. Lisäksi mitta voi saada ei-numeerisia arvoja, jotka kuvaavat järjestelmien täydellistä riippumattomuutta tarkasteltavan perustapahtuman osalta.

Menetelmä pohjautuu sekä de-

terministiseen että todennäköisyysperusteiseen tarkasteluun. Menetelmän deterministisessä tarkastelussa tunnistetaan perustapahtumat, jotka eivät aiheuta turvallisuustoimintoa toteuttavien järjestelmien välille riippuvuutta. Todennäköisyysperusteinen tarkastelu tutkii riippuvuutta aiheuttavia perustapahtumia sekä niiden turvallisuusmarginaaleja.

Menetelmä pohjautuu turvallisuustoimintoa toteuttavien järjestelmien vikapuiden tarkasteluun valitun alkutapahtuman osalta. Vikapuiden ottaessa huomioon riippuvuuksien lisäksi muun muassa onnistumiskriteerit ja alkutapahtumariippuvuudet voidaan menetelmän avulla arvioida myös YVL-ohjeen vikakriteereiden toteutumista.

Opinnäyte hyväksytty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa.



DI Essi Ahonen
Tarkastaja
Ydinvoimalaitosten valvonta
Säteilyturvakeskus
essi.ahonen@stuk.fi



Lähetä tiivistelmä tai vinkki ydinenergian käyttöön ja säteilyyn liittyvistä diplomitoista, pro graduista tai muista opin-
näytteistä osoitteeseen anna-maria@lansimies.com.

Yhteisvikojen syntymisen estäminen ydinvoimalaitosten sähköjärjestelmissä sähköverkon häiriöissä

Diplomityössä päätavoite oli tutkia Suomen ydinvoimalaitosten rakenteen kannalta, kuinka ulkoisilta verkkohäiriöiltä voitaisiin suojautua paremmin.

Forsmark 1 ja 2 sekä Olkiluoto 1 laitoksilla vuosina 2006–2008 tapahtuneista sähköhäiriöistä saadut käyttökokemukset ovat osoittaneet, että nykyisellä kantaverkkoliityntämallilla toimittaessa kantaverkon häiriöt voivat päästä tunkeutumaan kantaverkosta ydinvoimalaitosten kaikkiin neljään rinnakkaiseen turvallisuusjärjestelmään, jotka vastaavat voimaloiden sisäisestä sähköön jakelusta.

Häiriöt ovat aiheuttaneet turvajärjestelmissä myös vaurioita heikentäen ydinturvallisuutta. Verkkohäiriöihin on perinteisesti pyritty varautumaan laitteiden mitoituksella siten, että ne kestävät odotettavissa olevat häiriöt ja niiden seuraukset.

Käyttökokemusten myötä on kuitenkin tullut pohdittavaksi nykyisten laitesuojauksien lisäksi sähköjärjestelmien suojausmalleja, joilla voitaisiin suojata yksittäisen laitteen lisäksi kokonainen turvallisuusjärjestelmä, ja näin parantaa ydinvoimalaitosten sähköjärjestelmien luotettavuutta sekä siten ydinturvallisuutta.

Diplomityössä päätavoite oli tutkia Suomen ydinvoimalaitosten rakenteen kannalta, kuinka ulkoisilta verkkohäiriöiltä voitaisiin suojautua paremmin. Työn alussa tutustutaan ydinvoimaloiden sähköjärjestelmiin ja sähköverkkohäiriöihin. Tämän jälkeen tutustutaan erilaisuusperiaatteen soveltamiseen ydinvoimaloita koskevissa sähköjärjestelmissä, koska erilaisuus on yksi varimmista tavoista ennaltaehkäistä yhteisvikojen syntymistä ja leviämistä.

Kokonaisen turvallisuusjärjestelmän suojaamiseksi työssä esitellään ja tarkastellaan neljää erityyppistä kantaverkkoliityntämallia ja osin toiminnallista mallia.

Malleista ensimmäisessä voimalaitoksen kaksi neljästä osajärjestelmästä saavat sähkönsyöttönsä 110 kV:n ja toiset kaksi osajärjestelmää 400 kV:n verkosta normaalin toiminnan aikana. Tässä mallissa voimalaitos jaetaan sähköisesti kahtia yhteisen pisteen ollessa useiden kilometrien, jopa kymmenien kilometrien, päässä.

Toisessa mallissa voimalaitoksella on yksi itsenäinen, muista erillään oleva, osajärjestelmä jännitteettömässä ("kylmässä") tilassa siten, että se otetaan käyttöön vasta todellisen vaaran uhatessa.

Kolmas malli on toiminnallinen ja siinä pohditaan

voimalaitoksen omakäytölle eli saarekkeeseen siirtymisen vaikutuksia.

Viimeisessä mallissa pyritään selvittämään eroja yhden ja kahden turbiini-generaattorilaitosten välillä. Esiteltäviä kantaverkkoliityntämalleja on käytössä eri puolilla maailmaa.

Työn tuloksena annetaan muutamia ehdotuksia järjestelmien teknisiin ja toiminnallisiin muutoksiin. Lisäksi nostetaan esiin muutamia lisätutkimusta kaipaavia osa-alueita. Valmiita suunnitelmia tai ratkaisuja parannusten läpiviemiseksi ei anneta, vaan muutosehdotuksien tarkoituksena on herättää laajempaa keskustelua ja tuoda nykyisen keskustelun tueksi lisätietoa.

Muutosehdotuksina esitetään muun muassa kantaverkkoliityntän muuttamista työn ensimmäisen mallin mukaiseksi ja suositellaan kantaverkon varayhteyden kaapelointia nykyistä enemmän.

Opinnäytetyö on tehty Säteilyturvakeskuksessa ydinvoimalaitosten valvontaosaston sähkö- ja automaatiojärjestelmät -toimistolle kesän ja syksyn 2011 aikana.

Opinnäytetyö on hyväksytty Tampereen teknillisessä yliopistossa 7.12.2011.



*DI Samuli Hankivuo
Tarkastaja
Ydinvoimalaitosten valvonta
Säteilyturvakeskus
samuli.hankivuo@stuk.fi*

Nopean reaktorin laskentaa ERANOS-ohjelmistolla

Diplomityön tavoitteena oli selvittää aikariippumattoman nopean reaktorin neutroniikkalaskentaa kehitetyn deterministisen ERANOS-koodin käyttökelpoisuutta VTT:llä.

VTT:llä neljännen sukupolven nopeiden reaktoreiden laskentavalmiuksien kehittäminen nähdään ennen kaikkea osana kehittyneiden polttoainekiertojen tutkimusta. Suomessa ERANOS on kohtalaisen tuntematon koodi, joten työtä voi luonnehtia lähinnä tutkimusretkeksi ERANOS-paketin maailmaan.

Nopean reaktorin neutroniikkalaskenta ei teorian tasolla poikkea mitenkään vastaavasta termisen reaktorin laskennasta. Termisille reaktoreille kehitetyt deterministiset laskentakoodit eivät kuitenkaan sovellu nopeiden reaktoreiden laskentaan, sillä ne on yleensä rakennettu toimimiaan nimenomaan termisessä neutronispektrissä ja jättämään huomioimatta monet nopeassa spektrissä esiintyvät ilmiöt.

Jatkuvaenergisissä Monte Carlo -koodeissa ei ole spektriin liittyviä käyttörajoitteita, mutta niiden avulla ei välttämättä suurellakaan laskentateholla ja -ajalla saada riittävän tarkkoja tuloksia. Siksi deterministiset koodit ovat edelleen tarpeellisia.

Ranskalaisen CEA:n hallinnoima ERANOS on modulaarinen ohjelmistopaketti, joka soveltuu kaikkien tunnetuimpien nopeareaktorityyppien laskentaan. Sen tärkeimpiä moduuleja ovat ryhmävakioiden laskemisesta huolehtiva nippukoodi ECCO, jonka juuret ovat erillisessä brittiläisessä projektissa, sekä sydänlaskentakoo-

dit BISTRO ja VARIANT, joista jälkimmäinen oli alun perin ja on edelleen amerikkalaisen DIF3D-ohjelmopakettin laajennusosa. BISTRO käyttää diskreettiordinaattamenetelmää (S_N), kun taas VARIANT perustuu variaationodallimenetelmään (VNM). Moduulit sisältävät hieman eri ominaisuuksia, joten tutkittavasta tapauksesta riippuu, kumpaa on syytä käyttää.

Diplomityössä perehdyttiin ERANOS-2.2-koodiin natriumjähdytteisen kriittisen ZPR-6-nolalatehoreaktorin mittauksista koostetun reaktorifysiikkabenchmarkin osittaisella laskennalla. Työssä laskettiin benchmarkin kriittisyysturvallisuusmalli ja kaksi erilaista natriumin aukko-osuusreaktiivuusmallia. Laskujen tarkoitus oli selvittää eri laskentamenetelmien, -parametrien ja käytetyn geometrian vaikutuksia tuloksiin. Lisäksi tutkittiin, minkälaisia tuloksia ERANOS tuottaa suhteessa kokeellisiin tuloksiin JEFF-3.1 ja 3.1.1-pohjaisia ydinlakiokirjastoja käyttämällä. Joitain vertailulaskuja tehtiin myös Monte Carlo -koodi Serpentillä.

Tulokset olivat vaihtelevia: esimerkiksi VNM-laskut tuottivat mittaustulosten kanssa hyvin yhdenmukaisia Na-aukko-osuusreaktiivuuksia, mutta etenkin laajemmalla Na-aukolla ero S_N -laskuihin oli huomattava. Vastaavanlaisia laskuja esitelleissä julkaisuissa ei tällaista eroa ollut havaittu. Toisaalta esim. JEFF-kirjaston versioiden

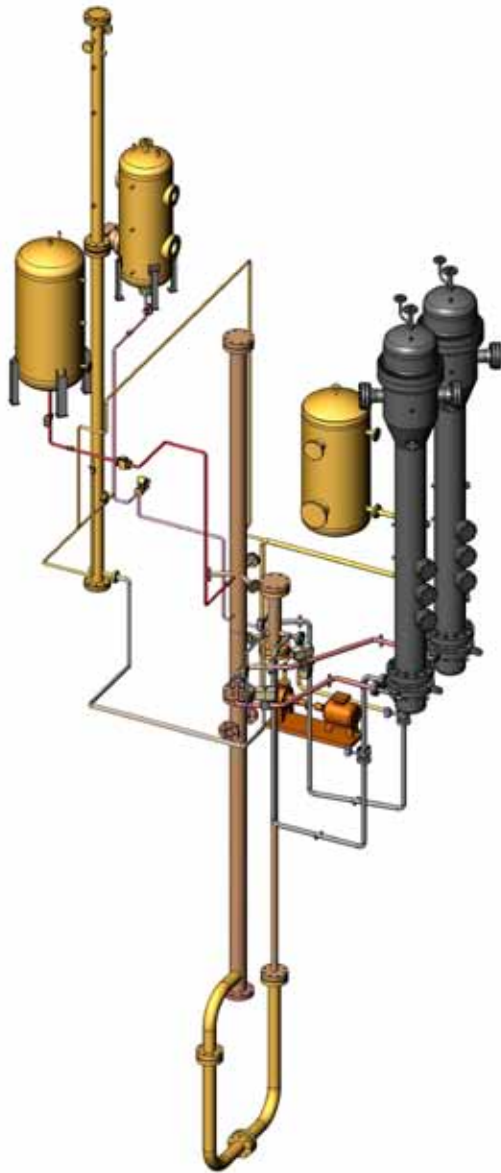
väliset erot olivat samantasoisia aiempien laskujen kanssa. Yksityiskohtaisemmillä parametreilla oli vain vähän vaikutusta. Yleisesti voidaan joka tapauksessa sanoa, että kunnollinen ERANOS-käyttö vaatii hyvin perusteellista syventymistä ohjelman saloihin.

Opinnäyte hyväksytty Aalto-yliopiston Perustieteiden korkeakoulussa.



DI Pauli Juutilainen
Tutkija
VTT
pauli.juutilainen@vtt.fi

Aukko-osuuden mittausmenetelmien kartoitus PWR PACTEL -koelaitteiston pystyhöyrystimen sekundääripuolella



Kuva 1. PWR PACTEL -koelaitteisto.

Diplomityössä kartoitettiin mahdollisuuksia aukko-osuuden mittaamiseksi PWR PACTEL -koelaitteiston pystyhöyrystimen sekundääripuolella.

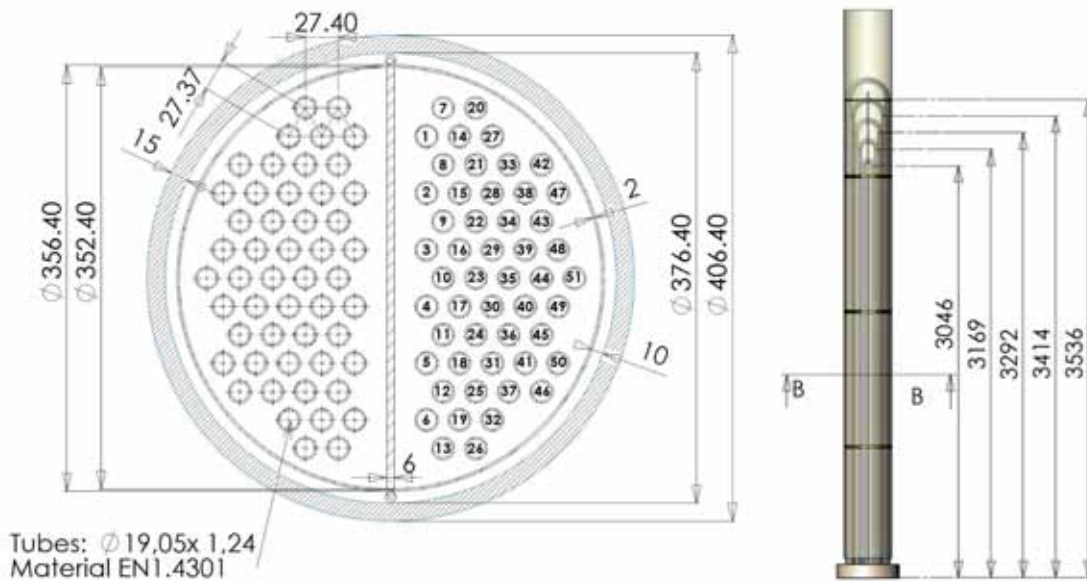
Diplomityö on tehty osana kansallista SAFIR2014-ydinturvallisuustutkimusohjelmaa (Safety of Nuclear Power Plants – Finnish National Research Programme). Vuonna 2011 SAFIR2014-ohjelman yhtenä projektina oli PWR PACTEL -kokeet (PAX, PWR PACTEL experiments). PAX-projektin yhtenä osaprojektina puolestaan oli diplomityönä toteutettu aukko-osuusmittausselektio.

Diplomityön tavoitteena oli löytää kustannuksiltaan mahdollisimman järkevä ja toimiva menetelmä aukko-osuuden määrittämiseksi PWR PACTELin höyrystimen sekundääripuolella. Aukko-osuuden mittaaminen on tärkeää, jotta saataisiin lisää tietoa kaksifaasivirtauksen käyttäytymisestä sekundääripuolella. Aukko-osuusmittausdataa tarvitaan muun muassa laskentakoodien validointiin.

PWR PACTEL on Lappeenrannan teknillisen yliopiston ydinvoimatekniikan tutkimuslaboratoriossa sijaitseva koelaitteisto, joka mallintaa EPR-tyyppisen (European Pressurized Reactor) painevesireaktorilaitoksen termohydrauliikkaa niin normaaliolosuhteissa kuin onnettomuusilanteissakin. Laitteiston avulla kerätään tietoa termohydrauliikkamallinnus- sekä CFD-laskentaohjelmien validointia varten. PWR PACTEL koostuu sydänsosan sisältävästä reaktoripainesäiliön mallista, kahdesta pääkiertopiiristä, joissa kussakin on pystyhöyrystin, paineistimesta sekä hätäjähdytysjärjestelmästä. Koelaitteisto on esitetty kuvassa 1. Höyrystimet voidaan nähdä kuvan oikeassa laidassa. Höyrystinputkien asettelu höyrystimessä on puolestaan esitetty kuvassa 2.

Mittausmenetelmät jaettiin kolmeen ryhmään

Diplomityössä tarkasteltiin erilaisia olemassa olevia aukko-osuuden mittausmenetelmiä ja arvioitiin kunkin menetelmän soveltuvuutta sekundääripuolen aukko-osuusmittaukseen. Aukko-osuusmittaus perustuu aina kaksifaasivirtauksen faasien poikkeavuuteen tietyn suureen suhteen. Mittausmenetelmät jaettiin fyysikaalisten periaatteidensa mukaisesti kolmeen ryhmään: sähköisiin ominai-



Kuva 2. PWR PACTEL -koelaitteiston höyrystinputkien asettelu.

suuksiin perustuvat menetelmät, säteilyn vaimenemiseen perustuvat menetelmät sekä optiset menetelmät.

Työssä esiteltyjä sähköisiin ominaisuuksiin perustuvia menetelmiä ovat sähkönjohtavuutta mittaava neulamainen mittaussondi, erilaiset virtauskanavan seinämille sijoitettavat impedanssia mittaavat elektrodit sekä WMS-mittarit (Wire Mesh Sensor). Säteilyn perustuvia menetelmiä ovat gammadensitometri, gamma- ja röntgentomografia sekä neutroniradiografia. Optisia mittaamenetelmiä ovat väliaineen taitekerrointa mittaava mittaussondi sekä valon vaimenemiseen perustuva menetelmä.

Aukko-osuuden mittaaminen höyrystimen sekundääripuolella osoittautuu käytännössä erittäin hankalaksi. Pääasiassa tämä johtuu höyrystimen rakenteesta sekä mittaamenetelmien korkeista kustannuksista. Höyrystinputkien kolmiohilarakenteen vuoksi neulamaisten mittaussondien

sijoittaminen sekundääripuolelle on hankalaa. Lisäksi höyrystinputket itsessään rajoittavat virtauskanavan ulkoseinämälle sijoitettavien mittaaselektrodien, WMS-tekniikan sekä valon vaimenemiseen perustuvan mittaamenetelmän käyttöä.

Korkeat kustannukset tulevat ongelmaksi niiden mittaamenetelmien kohdalla, joiden käyttöönotto vaatisi höyrystimen purkamista ja uudelleenkokoaamista. Säteilyn vaimenemiseen perustuvien menetelmien kohdalla säteilylähteiden ja -ilmaisimien korkeat kustannukset ovat rajoittava tekijä. Tomografiamenetelmien tapauksessa ongelmana on myös koelaboratoriotilojen ahtaus, jonka vuoksi vaadittavien säteilysuojauksen järjestäminen on hyvin hankalaa.

Koska aukko-osuusmittaus höyrystimen sekundääripuolella osoittautuu hyvin hankalaksi, tarkasteltiin diplomityössä myös edellytyksiä aukko-osuuden mittaamiselle erillisessä höyrystin-

tä mallintavassa koelaitteistossa. Mikäli aukko-osuutta haluttaisiin mitata erilliskoelaitteistossa, tulisi höyrystinmallin rakennetta, materiaaleja tai kiertoainetta muuttaa PWR PACTELin höyrystimeen verrattuna. Vaadittavia muutoksia tarkasteltiin erikseen kunkin mittaamenetelmän osalta. Diplomityössä tarkasteltiin myös näiden muutosten vaikutusta aukko-osuusmittaukseen.

*DI Joonas Telkkä
Projektitutkija
Ydinturvallisuuden
tutkimusyksikkö
Lappeenrannan teknillinen
yliopisto
joonas.telkka@lut.fi*

Uuden yksityiskohtaisen 3-D sydänmallin luonti ja testaus Olkiluoto 1 -kiehutusvesireaktorille Apros-ohjelmistolla

Kandidaatintyön tavoitteena oli tehdä täysimittainen 500-kanavainen 3D-reaktorimalli Apros-mallinnusohjelmalla, päivittää aiempi 5-yhtälömalli 6-yhtälömalliksi sekä yhdistää sydän voimalaitosmalliin.

Ydinvoimalaitosten suunnitteluvaiheessa ja myös käytön aikana tehdään useita erilaisia turvallisuuslaskelmia laitoksen turvallisuuden varmistamiseksi sekä mahdollisten vikojen ja puutteiden havaitsemiseksi. Yksi tärkeä osa turvallisuuslaskelmia on voimalaitosmallinnus, jossa simuloidaan jonkin laitoksen osan tai koko laitoksen toimintaa tietokoneella. Laitosmallinnusta varten on kehitetty useita ohjelmistoja, joista yksi on VTT:n ja Fortumin kehittämä laskentakoodi Apros. Transienttilaskujen avulla tutkitaan laitoksen käyttäytymistä yllättävien onnettomuus- tai häiriötilanteiden aikana. Tärkeä osa laskentakoodien kehityksestä on mallien validointi vertaamalla saatuja laskentatuloksia voimalaitoksilla tehtyjen mittausten tai kokeiden tuloksiin.

Kandidaatintyön tavoitteena oli tehdä täysimittainen 500-kanavainen 3D-reaktorimalli Apros-mallinnusohjelmalla, päivittää aiempi 5-yhtälömalli 6-yhtälömalliksi sekä yhdistää sydän voimalaitosmalliin. Työn pohjana oli vanha 250-kanava-

vainen malli, joka on tehty VTT:llä vuonna 1997. Lisäksi mallin toimivuus testattiin simuloimalla TVO:n OL1-laitoksella vuonna 1998 tehty kuormanpudotuskoe.

Kuormanpudotuskokeen tarkoituksena oli varmistaa, että laitos selviää kuormanpudotuksesta 2500 MW tehotasolta omakäyttäjälle. Kuormanpudotuksessa tapahtui pääkiertopumppujen alasajo ja laukesi osittainen pikasulku siten, että laitoksen teho asettui noin 30 % tasolle. Laitos siirtyi syöttämään omakäyttöä siten, että ylimääräishöyry johdettiin lauhduttimeen. Laitos käyttäytyi kokeessa suunnitellusti. Reaktorin paine ja pinta pysyivät sallitulla alueella. Kun kuormanpudotuksen jälkeen oli todettu laitoksen stabiloituvan syöttämään omakäyttöä n. 10 MW:n teholla, tahdistettiin generaattori takaisin valtakunnan verkkoon. Kuormanpudotuskokeesta saatiin hyvää materiaalia 3-D koodien validointiin, koska transientti on epäsymmetrinen reaktorissa ja tehomittausdataa oli saatavilla sekä radiaalisesti että aksiaalisesti useista kohdista reak-

toria. Myös kanavavirtauksista oli saatavissa mittaustuloksia useista kanavista.

Simulointitulokset osoittivat, että Apros pystyi toistamaan kaikki tärkeimmät tapahtumat kuormanpudotuskokeesta. Pieniä epätarkkuuksia kuitenkin esiintyi ja mallin jatkokehitys on edelleen tarpeen.

Tekijä piti andidaatintyöstä esityksen ENS:n TopSafe2012 -konferenssissa Helsingissä 24.4.2012.

*Tekn. yo. Sampsa Lauerma
Tutkimusharjoittelija
Ydinvoimalaitosmallinnus
VTT
sampsalauerma@vtt.fi*



Lähetä tiivistelmä tai vinkki ydinenergian käyttöön ja säteilyyn liittyvistä diplomitöistä, pro graduista tai muista opinnäytteistä osoitteeseen anna-maria@lansimies.com.

Fukushima ja kalatalous

Pakina

Ydinvoimalaitosten ja kalastuselinkeinin suhde on monimutkainen. Kaikkien lauhdevoimaloiden tapaan myös ydinvoimalaitokset käyttävät suuria määriä merivettä lauhdutukseen, ja niiden välissä tapaa kohtalonsa valtaisa joukko kaloja. Toisaalta lämmin lauhdevesi tarjoaa poistopuolella erinomaiset elinolot erilaisille kala- ja rapulajeille. Erityisesti Neuvostoliitossa tähän lämpimän veden hallittuunkin käyttöön on paneuduttu, ja kalanviljelystä lauhdeveden lämmittämässä vedessä on saatu loistavia tuloksia.

Myös raakavesialtaat muodostavat ympäristön, jossa vesieläimistö viihtyy. Olkiluodon raakavesiallas Korvensuolla on ollut kuuluisia mahtavista rapusaaliistaan. Voimalaitoksilla on kuitenkin myös paljon sellaisia altaita, joissa kala ei ui. Tärkeimpiä näistä ovat erilaiset demineralisoidun veden altaat: hätäsyöttövesitankit, polttoainealtaat ja reaktoriallas.

Fukushiman onnettomuuden seurauksena ydinvoimalaitosohjeet kiristyvät, ja laitospaikoille rakennetaan uusia palo- ja demivesialtaita varmistamaan vedensaantia. Kalastuksen näkökulmasta olisi sääli jättää nämä altaat tyhjilleen, vaille suomaisia ystäviämme. Ongelmana on tietysti se, että voimayhtiöt eivät istuta kaloja altaiisiin pelkästä istuttamisen riemusta. Olisi oltava selkeä syy sille, miksi kalaa uusiin altaiisiin kannattaisi istuttaa.

Demineralisoitu vesi on tunnetusti kaloille hankala ympäristö. Ensinnäkin ongelmaksi muodostuu ravinnonsaanti: mitä kala söisi? Luonnollisesti levää. Ydinvoimalaitosympäristössä järkevintä olisi valita levä, joka kerää alustastaan radioaktiivisia yhdisteitä. Sijoittamalla levä kasvamaan voimakkaasti kontaminoituneen romun pinnalle voitaisiin hiljalleen puhdistaa romun pinnalta ja huokosista loppusijoituksen kannalta hankalia isotooppeja, kuten ¹³⁷Cs ja ⁹⁰Sr. Sopiva pohjalevää syövä kala, esimerkiksi monni tai lahna, konsentroidisi isotoopit itseensä tehokkaasti. Kalan lihasta ja ruodoista isotoopit voitaisiin eristää lopulliseen loppusijoitusmuotoon esimerkiksi tuhkaamisella.

Jätehuollollinen kala-allas ei sopisi demineralisoidun veden altaaksi, mutta jätehuoltokala-altaan vesi olisi lasketavissa mukaan, kun arvioidaan laitospaikan selviämistä erittäin harvinaisten Fukushima-tyyppisten tapausten aikana.

Kalastajan kannalta onnetonta asiassa on luonnollisesti se, että ydinjätehuoltoon käytettävän kalan liha ei olisi sömälkelpoista. Tämä veisi pohjan altaiden käytöltä perinteiseen kalastukseen. Ainoastaan ns. "catch-and-release" pyynti olisi mahdollista. Toisaalta ne vaativat harrastajakalastajat, jotka ovat tottuneet tähän pyyntitapaan, eivät välttämättä olisi tyytyväisiä ydinvoimalaitoksen allasikalastuksen tarjoamaan kokemukseen.

Sellainen kala, joka suostuu syömään levää kontaminoituneen romun pinnalta, ei valitettavasti iske kiinni perhoon. Jopa uistimeen tällaista kalaa voisi olla hankala saada suostumaan. Tärkeimmiksi kalastusmenetelmiksi jäisivät väistämättä onginta pohjaongella, tuulastus, rysäkalastus ja verkkopyynti. Nuotantaveto, joka voisi olla erinomainen TYKY-päivän yhteishenkeä nostattava kohokohta, lienee mahdotonta siksi, että se vaatisi aivan valtavan altaan. Tosin emme vielä tiedä, miten valtavia lisäaltaita viranomaisen laitoksilta tulee vaatimaan. Ehkä näemme vielä soutuveneitä vetämässä nuottaa ydinvoimalaitoksen palovesialtaassa (esim. kuva).

Olivatpa lopulliset kalastusmenetelmät mitä hyvänsä, vaikuttaa selvältä, ettei ydinvoimalaitoskalastuksesta koskaan tule merkittävää suomalaisen matkailuelinkeinon piristystä. Yhtä varmaa on se, ettei kaloja tulla näkemään reaktorialtaissa. Tämän vuoksi pakinoitsija joutuu tulevaisuudessaakin tyytymään varpaitensa huljutteluun reaktorissa. Onkea ei kannata ottaa mukaan suojarakennukseen.

Oheisen kuvan kalastajat eivät vedä nuottaa ydinvoimalaitoksen hätävesialtaassa, minkä voi havaita siitä, että henkilöstö ei ole pukeutunut valvotun alueen haalariin.





ATS

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA -
ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND r.y.
FINNISH NUCLEAR SOCIETY

Johtokunta

Puheenjohtaja Chairperson	TkT Liisa Heikinheimo Teollisuuden Voima Oyj Puhelin (02) 83 811 puheenjohtaja@ats-fns.fi
Varapuheenjohtaja Vice-chairperson	FM Timo Seppälä Posiva Oy timo.seppala@posiva.fi
Sihteeri Secretary	DI Anna Nieminen Anna Nieminen sihteeri@ats-fns.fi p. +358 40 159 1156
Rahastonhoitaja Treasurer	DI Risto Vanhanen Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu risto.vanhanen@tkk.fi
Jäsenet Board Members	TkT Olli Okko STUK olli.okko@stuk.fi DI Tapani Raunio Fortum Power and Heat Oy tapani.e.raunio@fortum.com TkT Timo Vanttola VTT timo.vanttola@vtt.fi

Toimihenkilöt

ATS Young Generation	DI Tero Jännes Fennovoima Oy tero.jannes@fennovoima.fi
Kv-asioiden sihteeri International affairs	TkT Jari Tuunanen Fortum jari.tuunanen@fortum.com
Energiakanava Energy Channel WiN Finland	DI, FM Anna-Maria Länsimies Kymen Ydinviestintä anna-maria@lansimies.com
Ekskursios sihteeri	
Www-vastaava	DI Heikki Suikkanen Lappeenrannan teknillinen yliopisto webmaster@ats-fns.fi
ATS-Info	TkT Seppo Vuori VTT seppo.vuori@welho.com
ATS Seniorit	Tekn.lis. Eero Patrakka Teollisuuden Voima Oyj eero.patrakka@tvo.fi

Toimitus ja yhteystiedot

Julkaisija
Suomen Atomiteknillinen Seura ry
PL 78, 02151 Espoo
www.ats-fns.fi

Lehti ilmestyy neljä kertaa vuodessa.
ISSN-0356-0473
Painotalo Miktor Oy

Vuoden 2012 lehtien teemat:
1/2012
Gen IV
2/2012
Ydinvoimalaitosten
sähkölaitteet
3/2012
Seniorit
4/2012
Sysseminaari ja ekskursio

Päätoimittaja, Editor in Chief
DI, FM Anna-Maria Länsimies
ATS Ydintekniikka
c/o Kymen Ydinviestintä
PL 39, 48101 Kotka
anna-maria@lansimies.com
p. 050 561 5176

Taitto: Kymen Ydinviestintä

Yhteydenotot yleisissä asioissa,
jäsenhakemuksissa, osoitteen
ja sähköpostin muutoksissa
seuran sihteeriin:
Anna Nieminen
sihteeri@ats-fns.fi
p. +358 40 159 1156

Erikoistoimittajat
DI Lauri Rintala
lauri.rintala@aalto.fi

DI Eveliina Takasuo
eveliina.takasuo@vtt.fi

FM Johanna Hansen
johanna.hansen@posiva.fi

DI Pekka Nuutinen
pekka.nuutinen@fortum.com

DI Kai Salminen
kai.salminen@fennovoima.fi

FM Sini Gahmberg
sini.gahmberg@tvo.fi

Haastattelutoimittaja:
DI Klaus Kilpi
klaus.kilpi@welho.com





ATS:n
uudet jäsenet

Varsinaiset jäsenet:

Veikko Vävilä, AON Finland Oy,
VVConsulting, AGH Associates Ltd
Sanna Järvenpää, Fortum
Hanna Tauru, Fortum
Kalle Koivula, Aon Finland Oy
Jouko Salo, TVO
Calle-Heikki Korhonen, Fortum
Linda Kumpula, Posiva Oy
Markus Olin, VTT

Opiskelijajäsenet:

Juha-Pekka Hyvärinen, LUT

Palautusosoite:
Suomen Atomiteknillinen Seura
PL 78
02151 ESPOO

Kannatusjäsenet:

Alstom Finland Oy

B+Tech Oy

Fennovoima Oy

FinNuclear ry

Fortum Power and Heat Oy

Mirion Technologies (RADOS) Oy

Platom Oy

Pohjoismainen Ydinvakuutuspooli

Pohjolan Voima Oy

Posiva Oy

PrizzTech Oy

Saanio & Riekkola Oy

Siemens Osakeyhtiö

Teknologian tutkimuskeskus VTT

Teollisuuden Voima Oyj

TVO Nuclear Services Oy

Voimaosakeyhtiö SF Oy

Wärtsilä Finland Oy

YIT Installaatiot