

ATS

2|2019

Vol. 48

YDINTEKNIikka

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA – ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND

SMR-teknologian käyttöönotto edellyttää valmistautumista

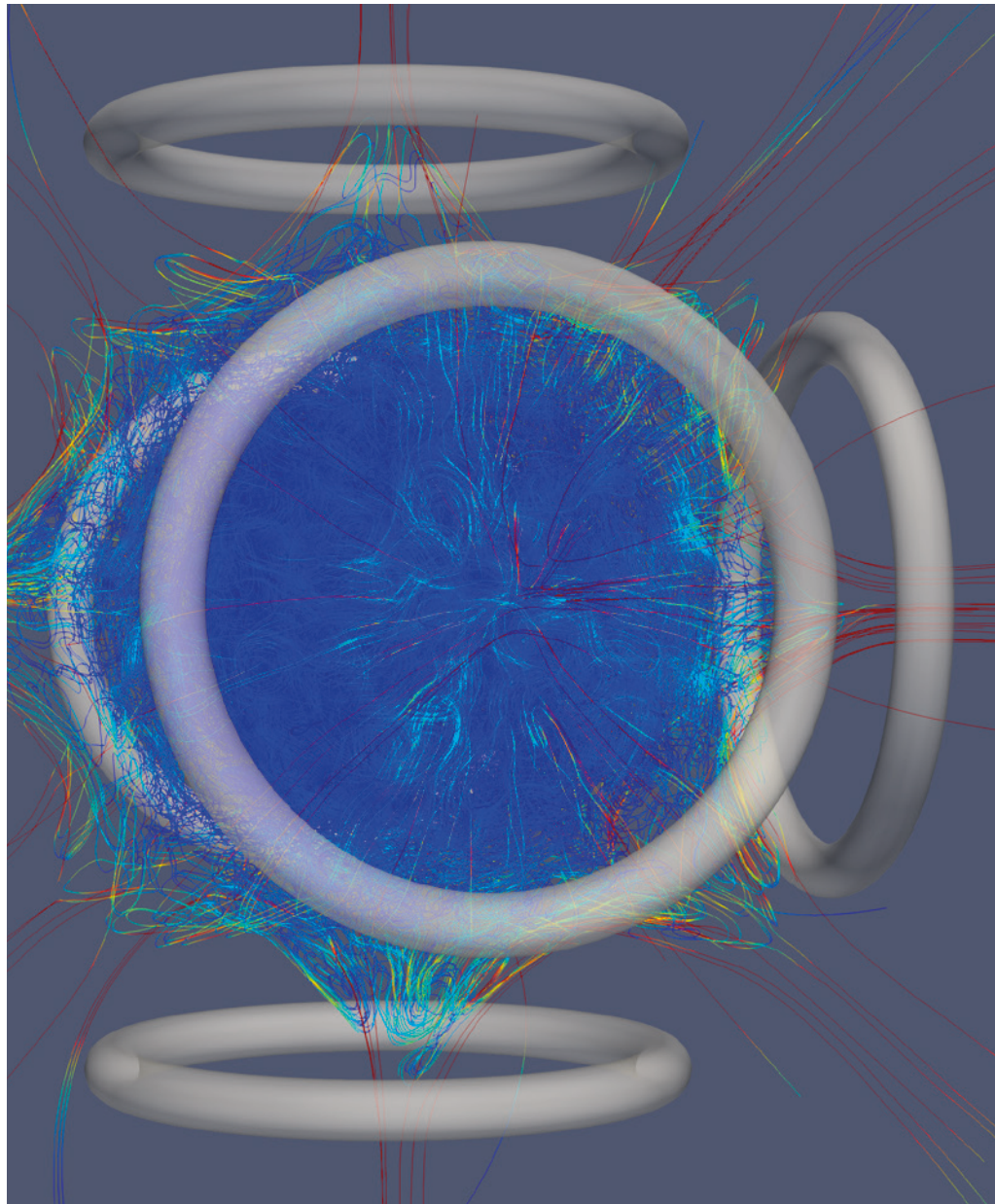
SMR:ien luvitukseen liittyviä keskeisimpiä haasteita ratkotaan kansainvälisenä yhteistyönä.

Ydinvoiman joustava käyttö

Millaisia vaikutuksia luonnonolosuhteista riippuvan sähköntuotantokapasiteetin lisäys asettaa ydinvoiman tuotannolle?

Loviisan ydinvoimalaitoksen automaatio-uudistus

Kolmen uudistusvaiheen käyttöönotto toteutettiin perättäisinä vuosina suunnitellussa aikataulussa ja budjetissa, normaalien vuosihuoltopituuksien puitteissa.



Julkaisija / Publisher

Suomen Atomiteknillinen Seura – Atomtekniska Sällskapet i Finland r.y.
www.ats-fns.fi

Johtokunta / Board**Puheenjohtaja / President**

DI Tuomas Rantala
puheenjohtaja@ats-fns.fi

Varapuheenjohtaja / Vice President

TkT Jaakko Leppänen
jaakko.leppanen@vtt.fi

Sihteeri / Secretary General

FM Antti Rätty
sihteeri@ats-fns.fi

Rahastonhoitaja / Treasurer

DI Pekka Kupiainen
rahastonhoitaja@ats-fns.fi

Jäsenet / Board Members

DI Lauri Rintala
lauri.rintala@fennovoima.fi

DI Simo Saarinen
simo.saarinen@fortum.com

TkT Vesa Tanskanen
vesa.tanskanen@lut.fi

Toimihenkilöt / Functionaries**ATS Young Generation**

DI Antti Lammela
antti.lammela@fennovoima.fi

**Kansainvälisten asioiden sihteeri /
International Affairs**

DI Henri Ormus
henri.ormus@fennovoima.fi

Women in Nuclear Finland

FM Eveliina Muuri
eveliina.muuri@helsinki.fi

www.vastaava / Webmaster

DI Juha-Pekka Hyvärinen
webmaster@ats-fns.fi

ATS-Seniorit / ATS-Seniors

TkL Eero Patrakka
eero.patrakka@kolumbus.fi

Toimitus / Editors**Vastaava päätoimittaja / Editor-in-Chief**

DI Anna Korpinen
anna.korpinen@vtt.fi

**Tieteellinen päätoimittaja /
Scientific Chief Editor**

TkT Jarmo Ala-Heikkilä
jarmo.ala-heikkila@aalto.fi

**Ajankohtaispäätoimittaja /
Topical Chief Editor**

DI Tapani Raunio
tapani.e.raunio@fortum.com

Toimitussihteeri / Lay-out Editor

Katariina Korhonen
Suunnittelutoimisto Creatus
katariina@creatus.fi

Toimitus / Editorial Staff

DI Klaus Kilpi
klaus.kilpi@welho.com

DI Lauri Rintala
lauri.rintala@fennovoima.fi

DI Henri Loukusa
henri.loukusa@vtt.fi

FM Sophie Haapalehto
sophie.haapalehto@posiva.fi

Toimituksen yhteystiedot**ATS Ydintekniikka**

c/o Anna Korpinen
PL 1000
02044 VTT
p. 040 159 1156

Painopaikka

Hämeen Kirjapaino Oy, Espoo

ISSN-0356-0473

Vuonna 1966 perustetun Suomen Atomiteknillisen Seuran (ATS) tarkoituksena on edistää ydintekniikan alan tuntemusta ja kehitystä Suomessa, toimia yhdyssiteenä jäsentensä kesken kokemusten vaihtamiseksi ja ammattitaidon syventämiseksi sekä vaihtaa tietoja ja kokemuksia kansainvälisellä tasolla. ATS on Tieteellisten seurain valtuuskunnan jäsenseura.

ATS Ydintekniikka on ATS:n julkaisema, neljästi vuodessa ilmestyvä aikakautinen julkaisu. ATS:n tavoitteena on, että ATS Ydintekniikka on johtava teknistieteellinen ammattijulkaisu Suomessa.

ATS ei vastaa julkaistuissa artikkeleissa ja kirjoituksissa olevista tiedoista ja näkökannoista. Toimitus pidättää itsellään oikeuden lyhentää, tiivistää ja muokata julkaistavaksi tarkoitettuja artikkeleja ja kirjoituksia.

Ratkaisuja ja lisäkysymyksiä



TUTKIMUKSEN TARKOITUKSENA ON selvittää syy- ja seuraussuhteita sekä korrelaatioita ja pyrkiä näiden pohjalta tekemään erilaisia ennusteita. Projektien rahoitushakemuksissa tyypillisesti luvataan selvittää perinpohjaisesti, minkälaiset seikat vaikuttavat tiettyyn ilmiöön ja miten saamme tämän kaiken simuloitua mahdollisimman tuudenmukaisesti. Monesti kuitenkin käy niin, että asiaan syvällisemmin puretuessa törmää uusiin, monesti entistä haastavampiin, kysymyksiin. Löytyy lisää parametreja, jotka näyttävät vaikuttavan lopputulokseen merkittävästi. Todetaan että kaikkia skenaarioita ei olekaan osattu aiemmin huomioida.

Tämä on osa tutkimuksen luonnollista kiertokulkua. Hankalaksi tilanteen tekee se rahoitushakemuksessa tehty lupaus. Lopulliseen rat-

kaisuun ei päästy vaan oikeastaan pitäisi tehdä lisää tutkimusta ja yleensä vähintään saman verran kuin alkuperäisessä projektissa. Ilman lupausta ratkaisusta ei saa rahoitusta, mutta harvemmin lopullinen ratkaisu todella löytyy. Tässä vaiheessa joko korostetaan liiaksi niitä tuloksia mitä on saatu aikaan tai nöyryytään ja tunnustetaan että tavoitteeseen ei päästy.

Olisi ihanteellista, mikäli tutkimusprojekteissa olisi enemmän vapautta ja rahoitus olisi samaan aikaan turvattu pidemmälle jaksolle. Säännöllisin väliajoin tulisi tällöin olla tarkastuspisteitä, joissa arvioitaisiin tavoitteet uudelleen sekä tehtäisiin tarvittavat muutokset ja täsmennykset alustaviin suunnitelmiin. Liian aikaisessa vaiheessa lukkoon lyödyt päämäärät pahimmillaan ohjaavat tutkimusta väärään suuntaan.

Uusia kysymyksiä löytyy aina, mutta josain vaiheessa pitäisi myös hyväksyä saavutettu tarkkuus. Malleja voi aina parantaa, mutta tiettyssä pisteessä niiden antama tulos ei enää merkittävästi muutu varsinkaan, kun malteaan ottaa askel kauemmas ja tarkastellaan isompaa kokonaisuutta. Iso kokonaisuus on kuitenkin se mikä ratkaisee.

Anna Korpinen

Vastaava päätoimittaja

SISÄLTÖ

Vakiopalstat

Päätoimittajalta:
Ratkaisuja ja lisäkysymyksiä 3

Pääkirjoitus: SMR teknologian sujuva käyttöön-otto edellyttää ennakkointia myös viranomaisilta 4

Editorial: Implementing SMR technology fluently requires proactivity also from the authorities 5

Tapahtumat

Ydinvoiman joustava käyttö – näkökulmia Pohjanlahden toiselta puolen 6

SMR:t tulevat, oletko valmis? 8

Katsaus turbokonetekniikan tutkimukseen – 13. ETC-konferenssi 10

Ajankohtaista

Matkakertomus: ATS YG Tšernobyliissa 13

Tiede ja tekniikka

JYTKYT – 30 vuotta julkisia koordinoituja tutkimusohjelmia ydinjätehuollosta 18
Kari Rasilainen, Seppo Vuori

Vierailulla fuusioyhtymässä Kaliforniassa 25
Tomas Lindén

ELSA-projekti:

Loviisan ydinvoimalaitoksen automaatio-uudistus aikataulussa ja budjetissa 29
Mika Heikkilä, Miikka Jokelainen, Petteri Lehtonen, Antti Rantakaulio, Maria Vuokko

Diplomityö: Ydinvoimalaitoksen kontaminaationhallinta päästöön johtavassa onnettomuustilanteessa 34
Liisa Salminen

SMR-teknologian sujuva käyttöönotto edellyttää ennakointia myös viranomaisilta

KESKUSTELUSSA TULEVAISUUDEN energiapaletista on yhdeksi vaihtoehdoksi esitetty pienten- ja keskisuurten modulaaristen ydinreaktoreiden (SMR) hyödyntämistä sähkön ja kaukolämmön tuotannossa. Aiheen saama suuri huomio on herättänyt myös viranomaiset pohtimaan valmiuttaan SMR:ien luvittamiseen, turvallisuuden arviointiin ja valvontaan. Keskustelu ja pohdinta ovat tarpeen, sillä teknologia ja odotukset kehittyvät tällä hetkellä sääntelyä nopeammin.

SMR-ratkaisujen kaupallinen ja tuotannollinen tehokkuus perustuu massatuotantoon ja monistamiseen. Reaktorit halutaan sijoittaa asutuksen läheisyyteen ja niitä tulisi voida luvittaa kerralla useille laitospaikoille. Lupaa haettaessa luvanhakija haluaa hyödyntää laitostoimittajan mahdollisesti toisessa maassa hankkimaa tyyppihyväksyntää. Edellä mainitut seikat tarkoittaisivat perustavaa laatua olevaa muutosta nykyisiin lupakäytänteisiin, ja tuovat siten syötettä työ- ja elinkeinoministeriön harkinnassa olevaan ydinenergialain uudistamiseen.

SMR:stä käytävä keskustelu kohdistuu pääasiassa reaktorityyppien mukanaan tuomiin uusiin käyttömahdollisuuksiin. Vähemmälle keskustelussa tuntuu jäävän ydinjätehuollon, ydinmateriaalivalvonnan ja turvajärjestelyjen sekä ydinvastuun pohtiminen. On myös muistettava, että SMR:ää käytävä luvanhaltija on vastuussa laitoksen turvallisuudesta ja vastuun kantamiseen tarvitaan riittävien taloudellisten edellytysten lisäksi alan erityisosaamista. Tätä vasten ajatellen kuntien ja pienten kaupunkien energiahuollon järjestäminen SMR:illä voi tuoda alalle uudenlaisia liiketoiminta-ajatuksia ja -malleja.

Säteilyturvakeskus (STUK) on keskustelua seurattessaan nostanut esiin tarpeen käynnistää selvityksiä ja osaamisen kehittämistä koskien SMR:ien turvallisuutta, turvallisuuden arviointia sekä luvittamista. Olemme tätä jo oma-aloitteisesti pienellä panoksella tehneet, koska pidän tärkeänä, että viranomainen py-



syy kärryillä oman alansa tekniikan kehityksessä ja on valmis neuvomaan, arvioimaan ja valvomaan uusien teknologioiden hyödyntämistä sekä kehittämään lainsäädäntöä mahdollistamaan uusien turvallisten teknologioiden käyttöönoton.

SMR:t virkistävät myös kansainvälisiä ydinturvallisuusyhteistyötä. Olemme mukana viranomaisyhteistyössä IAEA:n yhteydessä toimivan SMR Regulators Forumissa. Forum on käsitellyt muun muassa SMR:ien luvittukseen liittyviä keskeisimpiä haasteita. Huhtikuudessa WENRAn (Western European Nuclear Regulators Association) kokouksessa otimme tehtäväksemme eurooppalaisten turvallisuustavoitteiden ja -vaatimusten pohdinnan käynnistämisen. Tavoitteena on saada aikaan eurooppalainen käsitys ja linjaus SMR:ien turvallisuustavoitteista ja ajan myötä niille sovellettavista turvallisuusvaatimuksista. Mikäli tässä onnistumme, voisi viranomaisyhteistyönä tehtävälle ylikansalliselle turvalli-

suusarvioinnille olla edellytykset. Tämä voisi aikanaan mahdollistaa eurooppalaisen tyyppihyväksynnän.

Ydinenergian käytön perusedellytys on jatkossakin turvallisuus. Laitosteknologiasta ja laitoksen sijaintipaikasta riippumatta laitoksen lähellä asuvien ihmisten turvallisuus on varmistettava ja turvallisuuden on osoitettava olevan vähintään samalla tasolla kuin nykyisin. Vastuu turvallisuudesta on nyt ja jatkossakin luvanhaltijalla. Kun turvallisuustavoitteet täyttyvät, ei STUK ole estämässä uuden teknologian hyödyntämistä. Jotta tavoitteemme mahdollistavasta viranomaistoimintaympäristöstä toteutuu oikea-aikaisesti, tarvitaan kansallisen tason satsauksia osaamiseen ja turvallisuustutkimukseen sekä kansainväliseen yhteistyöhön.

DI Petteri Tiippana
Pääjohtaja
Säteilyturvakeskus

Implementing SMR technology requires proactivity also from the authorities

WHEN DISCUSSING ABOUT the future energy palette, one of the suggested possibilities has been to utilize small and medium-sized modular reactors (SMRs) in electricity and district heat production. The great attention given to the topic has awoken also the authorities to evaluate their readiness to license, oversee and evaluate the safety of SMRs. Discussion and consideration are needed, as technology and expectations are currently evolving faster than regulation.

Efficiency of SMRs' commerciality and production is based on mass production and the use of the same design more or less everywhere. Reactors are to be located in the vicinity of population and licensed at several sites at once. When applying for a license, the licensee wants to benefit from a type-approval of the technology possibly obtained in another country. The above points would mean a fundamental change to the existing licensing practices and therefore serve as an input to the renewal of the Nuclear Energy Act that is under consideration in the Ministry of Economic Affairs and the Employment.

The discussion on SMRs focuses mainly on new possibilities that the reactor type enables. It seems that the discussion is less focused on nuclear waste management, safeguards and security, and nuclear liability. It should be remembered that the licensee is always responsible for the safety of the plant, and to ensure that adequate financial resources are needed as well as special expertise. With this in mind, using SMRs to supply energy to municipalities and small towns may result in new business ideas and models.

When following the discussion, Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) has highlighted the need to launch studies and competence development regarding safety and safety assessment of SMRs, and licensing. We have already started this with a small in-house contribution. I think it is important for the authority to keep up with the technological

developments to be ready to advise, evaluate and oversee the use of new technologies, and to develop legislation to enable the introduction of new safe technologies.

SMRs have also refreshed international nuclear safety cooperation. We are participating in the SMR Regulators Forum which has addressed, among other things, the key challenges associated with SMR licensing. At WENRA (Western European Nuclear Regulators Association) meeting in April, we took the initiative to start a consideration of European safety goals and requirements for SMRs. The objective at the end should be to develop a European vision and alignment of SMRs' safety objectives and safety requirements. If we succeed in this, it would lay a foundation for a multinational safety assessment to be carried out in cooperation with the authorities. This could enable a common type approval in Europe.

Safety is the prerequisite for the use of nuclear energy also in the future. Regardless of the plant technology and the location of the plant, the safety of people living near the plant must be ensured and demonstrated to be at least on the same level as today. Responsibility for safety remains with the licensee. When the safety objectives are met, STUK will not prevent the use of new technologies. However, to achieve our goal on enabling regulatory framework on time, there is a need for investments on the national level into expertise, safety research and international cooperation.

Petteri Tiippana, M.Sc. (Tech.)

Director General

Radiation and Nuclear Safety Authority

Ydinvoiman joustava käyttö – näkökulmia Pohjanlahden toiselta puolen

Pohjoismaisen energiajärjestelmän lähtökohdat ovat muuttumassa, kun luonnonolosuhteista – erityisesti tuulesta ja auringosta – riippuva sähköntuotantokapasiteetti lisääntyy. Millaisia vaikutuksia tällä on energiajärjestelmälle ja miten ydinvoimalaitosten on mahdollisesti tarpeen muuttaa toimintaansa uudentyypisessä ympäristössä? Energiforsk järjesti vuotuisen ydinvoimakonferenssinsa tänä vuonna temalla ”Flexible nuclear power and ancillary system services”. Seminaari tarjosi paljon ajatuksia myös tälle puolen Pohjanlahtea.

Teksti: Matti Kattainen

ENERGIFORSK ON RUOTSALAINEN energiatutkimukseen ja -osaamiseen keskittynyt organisaatio. Sen asiakkaisiin kuuluvat teollisuuden ja energiayhtiöiden ohella Ruotsin hallitus sekä erilaiset ammattilliset yhteisöt, konsultit ja kansalaisjärjestöt.

Tammikuussa 2019 Energiforskin vuotuisen ydinvoimakonferenssin aiheena oli tällä kertaa ydinvoiman joustava käyttö muuttuvassa maailmassa. Seminaariin osallistui myös suomalaisia aiheesta kiinnostuneita. Suurimpana ryhmänä olivat joukko fortumlaisia, mukaan lukien tämän artikkelin kirjoittaja. Seuraavassa teen muutamia nostoja konferenssin laadukkaasta tarjonnasta.



DI Matti Kattainen

Head of Nuclear Safety Engineering Department
Fortum Power and Heat Oy
matti.kattainen@fortum.com

Ydinvoimaa käytetään jo joustavasti monissa maissa

Tyypillisesti ydinvoimalla on tuotettu ja tuotetaan perusvoimaa. Keskeisiä syitä tähän ovat taloudelliset syyt, kuten ydinvoiman korkeat kiinteät mutta verraten matalat muuttuvat kustannukset, sekä käyttötekniset syyt, erityisesti perusvoiman tuotannon ”helppous” ja muutuvan tuotannon vaikutukset operoinnille sekä laitteiden ja järjestelmien hallinnalle.

Ydinvoimaa käytetään kuitenkin jo nyt useissa maissa joustavasti. Keskeisiä syitä tähän ovat kulutuksen seurannan tarpeet, joissakin tapauksessa taajuudensäätö sekä myös verkko-operaattorin vaateet. Esimerkkejä näistä löytyy verraten läheltä, esimerkiksi Ranskasta, Saksasta sekä Ruotsista.

Pohjoismainen energiajärjestelmä muutoksessa

Osa pohjoismaisista ydinvoimalaitoksista on alun perin suunniteltu joustavaa käyttöä varten ja monia laitosyksiköitä on erityisesti niiden elinkaaren alkuvaiheessa käytettykin tuolla tavoin. Energiatarpeen kasvun myötä ydinvoimasta tuli nopeasti perusvoimaa ja säätöön otettiin käyttöön muita keinoja. Erityisesti tuulivoiman lisääntyvä määrä Pohjoismaissa ja osin myös muun muassa sähköverkon rajoitteet ja vaatimukset johtavat

siihen, että ydinvoiman säätöä aletaan taas tarvita enenevässä määrin.

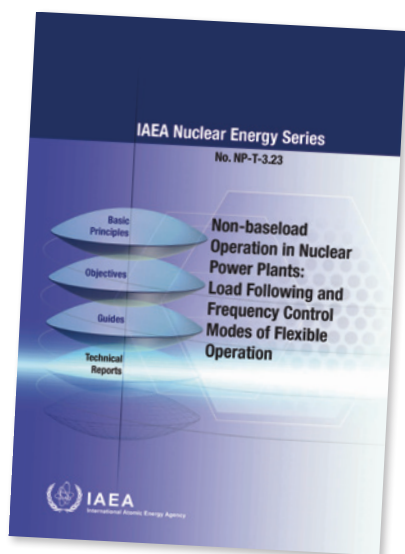
Ilmastotavoitteetkin vaikuttavat

EU:n ja kansainvälisten ilmastotavoitteiden täyttämiseksi tulevaisuudessa tarvitaan merkittävästi lisää sekä uusiutuviin energialähteisiin että ydinvoimaan perustuvaa tuotantoa. Säätöä sekä vuorokauden- ja vuodenajoin- ta riippuvan tuotannon lisääntyminen sekä ydinvoimakapasiteetin kasvu johtavat siihen, että myös ydinvoiman tuotannolle tulee tarpeita joustaa.

Monenlaisia joustamisen keinoja

Ydinvoiman tuotantoa on teknisesti mahdollista säätää alas- ja alhaalta ylöspäin, tietyn fyysikaalisen ja turvallisuuteen liittyvin rajoittein. Tämän tyyppisen jouston ohella kyseeseen voi kuitenkin tulla myös kulutukseen vaikuttaminen, jolloin vältytään laitoksen transienteilta tai lievennetään niitä.

Keinoja voivat olla vaikkapa erilaiset tuotetun sähkön välittömän tai välillisen varastoinnin ratkaisut (sähköakut, liikenteen sähköistymisen tuomat mahdollisuudet, pumppuvoimalat ynnä muut) sekä tuotetun energian varastointi tavalla tai toisella lämpönä tai muussa muodossa (esimerkiksi kaukolämmön tuottaminen, kaukolämpöverkkoon liitetyt lämpöakut, vedyn



IAEA:n julkaisu NP-T-3.23 vuodelta 2018 käsittelee laajasti ja monipuolisesti ydinvoiman joustavan tuotannon eri aspektejia: www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1756_web.pdf.

tuottaminen, ja niin edelleen). Luonnollisesti myös verkkoyhteyksien lisääntyminen maiden sisällä ja välillä on tekijä, jolla on merkittävä vaikutus joustotarpeisiin.

Tällaiset mahdollisuudet luonnollisesti palvelevat koko energiajärjestelmää, ja konferenssissa keskityttiinkin erityisesti ydinvoiman tuotannon säätöön liittyviin kysymyksiin.

Useita ulottuvuuksia

Toisin kuin äkkipäätä saattaisi ajatella, ydinvoiman joustava käyttö on paljon muutakin kuin tekninen kysymys. Keskeisiä elementtejä, joita konferenssissa käsiteltiin, ovat muun muassa

- joustavaan käyttöön liittyvät ohjeet ja menettelytavat,
- vaikutukset eri tuotantomuotojen ja laitosten optimoinnin kannalta,
- taloudelliset tekijät,
- poliittinen ulottuvuus sekä
- viranomaisvaatimukset.

Säädön arvo

Tuotannon vakaudella ja toisaalta joustoilla voi olla liiketaloudellista arvoa, joita ei välttämättä ole vielä huomioitu nykyisillä sähkömarkkinoilla. Vähähiilisistä tuotantomuodoista vesivoiman kapasiteetti tukea tuotannon vakautta

ja joustoa on usein jo lähes täysimääräisesti käytössä. Tulevaisuudessa myös ydinvoiman tuotannon vakaudella ja toisaalta säätökyvyllä voi siksi olla erityistä lisäarvoa, ja joustava tuotanto ydinvoimalla ei näin välttämättä tarkoita pelkkiä tuotannon- ja tulonmenetyksiä. Luonnollisesti tällöin tarvitaan markkinamekanismeja, joilla noteerataan ydinvoiman ja sen antaman vakauden sekä säätökyvyn arvo energiajärjestelmän kokonaisuudessa.

Hyviä kokemuksia – turvallisuudesta tinkimättä

Konferenssissa kuultiin EDF:n 30 vuoden kokemuksesta ydinvoiman joustavassa tuotannossa. EDF:n kokemusten mukaan tekniset ratkaisut ovat olemassa, ja tuotannon jouston sivuvaikutukset hyvin hallittavia. Kokemuksista mainittakoon erityisesti

- painevesilaitoksilla joustavan tuotannon merkittävimmät vaikutukset ovat sekundääripuolella, eivät primääripuolella (!),
- vaikutukset polttoaineen käyttäytymiseen ovat vähäisiä ja hallittavia,
- turvallisuuteen vaikuttavia, joustavaan tuotantoon liittyviä käytötapauhtumia ei juuri ole ilmennyt,
- perusvoimaa tuottamaan valittujen ja joustavaan tuotantoon nimettyjen laitosten välillä ei tunnistettavissa olevia eroja laitteiden ja järjestelmien kulumisessa ja ikääntymisessä, lukuun ottamatta tiettyjen ”kuluvien osien”, kuten säätösauvakoneistojen, tiheämpää uusintatarvetta,
- vaikutukset jätehuoltoon ovat vähäisiä, lähinnä hieman suurempi ioninvaihtohartsien kulutus, ja
- laitosten pitkän käyttöiän (yli 50 vuotta) estäviä tekijöitä ei ole nähtävissä.

Osaamista ja koulutusta tarvitaan

Joustavan ydinvoimatuoannon eniten työtä teettäväksi asiaksi esitettiin osaaminen ja

koulutus. Erityisesti valvomo-operaattoreilta vaaditaan hyvin erilaista osaamista ja rutiinia, jos laitoksen tuotannon tehotasoa muutetaan mahdollisesti jopa useita kertoja vuorokaudessa. Tämä edellyttää uudenlaisia asioita myös koulutukselta ja ohjeistukselta.


Kannattaa lukea lisää!

Konferenssin esitykset ovat tätä kirjoitettaessa saatavissa pdf-tiedostoina osoitteesta: www.energiforsk.se/konferenser/genomforda/energiforsk-annual-nuclear-conference-2019.

Suurin osa esityksistä on kirjoitettu niin kattavasti, että niiden perusteella saa hyvän käsityksen konferenssin annista. Erityisesti seuraaviin edellämäinintun linkin takaa löytyviin esityksiin tutustumista voi suositella:

- Increasing Incitation for Non-Baseload Operation of Nuclear Power Plants - IAEA's Observations. Ness Kilic, IAEA
- Nuclear Power Plant Flexibility at EDF: 30 years of experience. Patrick Morilhat, EdF
- System challenges, flexibility and nuclear power, Maja Lundbäck, Svenska Kraftnät

Energiforskillalla muutakin kiinnostavaa

Energiforskin sivustolta löytyy tulevia tilaisuuksia, joista osa liittyy myös ydinvoimaan. Monet tapahtumat järjestetään englanninkielisinä. Aiempien kokemusten perusteella Energiforskin järjestämät konferenssit ja muut tapahtumat ovat laadukkaita ja usein matkan arvoisia. 



SMR:t tulevat, oletko valmis?

Suomen Ekomodernistit ry järjesti maaliskuun lopussa seminaarin otsikolla "Clean District Heating with Small Nuclear Reactors", jossa aiheena oli otsikon mukaisesti pienten modulaaristen reaktoreiden (Small Modular Reactor, SMR) käyttö kaukolämmöntuotantoon. Tilaisuudesta huokui optimismi ja usko SMR:ien tulemiseen, niiden luonnollisesti pe- lastaen samalla maapallon ilmastonmuutokselta. Toisaalta myös suomalaisen ydinvoima-alan säännösten soveltumattomuus SMR:ien säänte- lyyn puhutti paljon.

Teksti ja kuvat: Lauri Rintala

YDINVOIMAN RENESSANSSIN jossain määrin hiivuttua Fukushima onnet- tomuuden johdosta vuonna 2011 on ydinvoima-alan huomio kääntynyt kohti pieniä modulaarisia reaktoreita (SMR). Seuramme- kin on noteerannut uuden aihealueen käsitte- mällä aihetta jäsentilaisuuksissa ja esimerkiksi myöntämällä Pekka Jauho tiedonjulkistamis- palkinnon TkT Ville Tulkkille vuonna 2018 juuri pienten modulaaristen reaktoreiden tutkimukses- ta ja siihen kuuluvasta asiantuntijaviestinnästä.

Mikään uusi keksintö nämä eivät ole, vaan vastaavien käyttöä suunniteltiin myös Suomessa ja Ruotsissa 60- ja 70-luvuilla. Ruotsissa Äges-

tassa sijainnut R3-reaktori ehti tuottaa kym- menen vuotta kaukolämpöä Tukholman ete- läosissa ennen sulkemistaan ja esimerkiksi Asea-Atom Ab:n SECURE-reaktorikonseptista on kirjoitettu ATS-ydintekniikassa Erkki Laurila -palkinnon arvoisesti vuonna 2012.

Seminaari

Ekomodernistien tilaisuus pidettiin Sitran tiloissa Helsingin Ruoholahdessa missä osanottajina oli pieni kattaus suomalaisia energia-alan toimijoita, muun muassa ydin- voimayhtiöt ja Helen, TEM ja STUK sekä luonnollisesti ATS. Seminaarin avasi ja luot- sasi läpi yhdysvaltalainen entinen ooppera- laulaja, nykyinen ydinvoiman puolestapuhuja Eric G. Meyer. Suomalainen kuulijakunta, ja ehkä muutkin, varmasti hämmästyivät laulua sisältäneistä puheenvuoroista.

Seminaarin ohjelmassa oli aamupäivällä enemmän aihepiiriä taustoittavia esityksiä ja iltapäivällä teknisemmät esitykset merkittävim- miltä reaktorivalmistajilta, tai ehkä ennemmin reaktorisuunnittelijoilta.

Lainsäädäntöä ja visioita

Ensimmäisen puheenvuoron piti Sitran Janne Peljo, jonka esityksessä nostettiin esille mer- kittävä aspekti Suomen energiahuollosta:

sähköntuotanto on jo hyvin pitkälle hiilidiok- sidivapaata, mutta esimerkiksi kaukolämmön tuotanto ei ole. Suomen kannattaisikin siirtyä sähkön käyttöön missä se vain on mahdolis- ta, jotta hiilidioksidipäästöjä voidaan alentaa.

Tämän jälkeen Ville Tulkki loi katsauksen SMR:iin: mitä termillä tarkoitetaan, minkälaisia reaktoreita on suunnitteilla ja mitä etuja SMR:illä on lämmöntuotannossa verrattuna isoihin re- aktoreihin. Seuraavana Rauli Partanen esitteli tuloksia Nuclear District heating in Finland -jul- kaisustaan, jossa on verrattu erikokoisten kau- punkien kaukolämmön tuotantoa hyödyntäen 200 MWt ja 24 MWt SMR:iä. Loppupäätelmänä oli, että lähes kaikki Suomessa kaukolämmön- tuotantoon käytettävät fossiiliset polttoaineet oli- sivat korvattavissa ydinvoimalla.

Päivän merkittävimmäksi muodostuneen esityksen piti STUK:in projektipäällikkö Minna Tuomainen, jossa käsiteltiin ydinvoimalaitok- sen luvitusta Suomessa ja SMR:ien lupapro- sessiin mahdollisia muutoksia verrattuna nykyiseen verrattain raskaaseen prosessiin, jossa laitospaikka ja laitosyksilö luvutetaan yh- dessä. SMR:ille voisi olla mahdollista esimer- kiksi laitostyyppin ja laitospaikkojen hyväksy- minen erikseen. Valmiustoimintaan liittyvät vaatimukset suojavyöhykkeestä ja varautumi- salueesta voisivat olla huomattavasti nykyistä pienempiä, koska mahdolliset seuraukset ovat merkittävästi isoja reaktoreita pienemmät tai esimerkiksi ydinjätehuolto voisi olla hoidettu keskitetysti yhden toimijan toimesta. Toisaalta haasteina nähdään mahdollinen pienten yksi- köiden etäkäyttö: miten turvataan tietoturvas- tuus ja fyysinen turvallisuus.

Esitystä seuranneessa paneelikeskustelus- sa Juhani Hyvärinen nosti esille kysymyksen olisiko pieniä reaktoreita mahdollista luvittaa jatkossa jopa ilman raskasta periaatepäätös- prosessia. Tähän ei tullut suoraa vastausta, mutta tuskin kukaan sellaista odottikaan. Merkittävää keskustelua herätti eräänlainen muna-kana -ongelma, eli pitäisikö säädökset päivittää ensin yhteensopiviksi SMR:ien kans- sa vai pitäisikö teollisuuden olla ensin aloit- teellinen ja ruveta ajamaan uudentyyppisiä laitoksia Suomeen jotta säädökset muuttuisi- vat. STUK kertoi heidän alustavasti pohtineen asiaa, mutta jotta ohjeiston päivitys saataisiin toteutettua, tarvittaisiin selkeä signaali – ja ra- haa – ohjaavalta ministeriöltä.

Paneelikeskustelun jälkeen ohjaavan mi- nisteriön edustaja Jaakko Louvanto kertoi, että ydinenergialakia ja asetusta ollaan päivittä- mässä ja päivitysprojektin aikana tullaan harkitse- maan myös SMR-näkökulmaa. Aivan selkeää käsitystä kuulijakunnalle ei tullut siitä, kuka lo- pulta on vastuussa siitä, että alan ohjeisto, joka nyt on rakennettu aikalailta suoraan suurille te-



DI Lauri Rintala

Säteilyturvallisuusinsinööri
Fennovoima Oy
lauri.rintala@fennovoima.fi



Eric G. Meyer (vas.) ohjasi myös aamupäivän puhujien paneelikeskustelua. Paneelissa mukana Minna Tuomainen, Ville Tulkki, Janne Peljo ja Rauli Partanen.

horeaktoreille, päivitetään huomioimaan myös muun tyyppiset laitoskonseptit.

Laitoskonseptejä

Ilmapäivällä oli vuorossa reaktorivalmistajien esitykset joissa kukin paikalle saapunut valmistaja sai esitellä oman konseptinsa. Kaikki esitellyt konseptit olivat termisiä reaktoreita, jolloin kaiken innostuksen keskellä kirjoittajaa jäi pohdittamaan uraanin riittävyys jos joka kaupungille kaavaillaan omaa pientä kaukolämpöreaktoria.

Erityisesti esityksistä jäi mieleen tanskalainen Seaborg Technologies, Tanska kun on perinteisesti suhtautunut hyvinkin negatiivisesti ydinvoimaan, ja luonnollisesti LUTin 24 megawatin FinReactor-konsepti. Seaborgin sulasuolareaktorikonsepti hakee hyväksytävyyttä hyödyntämällä toriumia, jolloin heidän mukaansa asekelpoista materiaalia ei ole mahdollista erottaa missään kohtaa sykliä ja transuraanit ilmeisesti on tarkoitus polttaa pois erottamatta niitä missään kohtaa suolasta. Juhani Hyvärinen esitteli LUTissa kehitel-

tyä FinReactor-konseptia, joka on suunniteltu pelkästään kaukolämmöntuotantoon. Siten reaktorissa voisi olla hyvin alhainen paine ja lämpötila verrattuna muihin tilaisuuksissa esitelyihin SMR-konsepteihin ja suunnittelijoiden näkemyksen mukaan tällöin paineestiakin voisi olla turvallisuusluokkaa 2, mikä tarkoittaisi myös kustannussäästöjä.

Jäämme innolla odottamaan mitä näistä kahdesta kuullaan vielä. Muut esiintyjät tilaisuudessa olivat NuScale, Terrestrial Energy, GE Hitachi ja KAERI.

Lisätietoa:

1. Ekomodernistien youtube-kanavalla on julkaistu videot päivän esityksistä.
2. Nuclear District heating in Finland, Think Atom -ajatushautomon julkaisu ydinkaukolämmöntuotannon mahdollisuuksista, saatavilla myös sähköisenä versiona nettisivuilta thinkatom.net (ISBN 978-952-7139-14-1)
3. ATS Ydintekniikka, numerot 1/2018 ja 2/2013

Suomen Ekomodernistit ry on vuonna 2015 perustettu ihmis- ja tiedemyönteinen ympäristöliike, jonka päätavoitteena on ympäristön ja ihmisten hyvinvoinnin parantaminen, ei tiettyjen ratkaisujen vastustaminen tai edistäminen. Yhdistyksen toimintaan kuuluu seminaarien järjestäminen, lausuntojen ja kannanottojen jättäminen esimerkiksi lakiluonnoksiin sekä osallistuminen ekomodernistiseen kansainväliseen yhteistyöhön.

Lisätietoa: ekomodernismi.fi

Swiss Tech (STCC)- konferenssi keskus Lausannessa sijaitsee EPFL:n kampusalueella.



Katsaus turbokonetekniikan tutkimukseen – 13. ETC-konferenssi

Turbokonetekniikan tutkimuksella selvitetään sekä kokeellisesti että laskennallisesti koneiden optimoitua rakennetta ja energiatehokkaampaa käyttöä.



DI Merja Väänänen
Projektipäällikkö
Fortum Power and Heat Oy
merja.vaananen@fortum.com

Teksti ja kuvat: Merja Väänänen

JOKA TOINEN VUOSI pidetty 13. eurooppalainen turbokonetekniikan konferenssi (European Turbomachinery Conference) järjestettiin 8.–12.4.2019 Sveitsissä ja järjestäjäorganisaatioina olivat Lausannen (EPFL), Firenzen sekä Napolin teknilliset yliopistot. Aiempina vuosina kyseinen konferenssi on pidetty mm. Lappeenrannan LUT-yliopistossa. Kon-

ferenssi käsittelee laaja-alaisesti turbokonetekniikkaan liittyvää virtauslaskentaa sekä termodynamiikkaa aina radiaalikompressoreista puhaltimiin, sekä lentokoneturbineista suuriin voimalaitosturbiineihin. Tässä artikkelissa tehdään lyhyt katsaus konferenssin esityksiin ja artikkeleihin. Julkaisut on saatavissa lähteestä www.euroturbo.eu/publications.

Turbiinien laskennan kehitys

Monet edelleen käytössä olevista laskentayhtälöistä on kehitetty menneillä vuosikymmenillä. Nykyaikaiset 3D turbiinisiivet vaativat laskentayhtälöiden tarkentamista, koska tekniikka on kehittynyt edelleen siitä, mihin aiemmat yhtälöt on kehitetty. Esityksissä perehdyttiin muun muassa reaali kaasun ilmiöihin. Kosteanhöyryn turbiinien toimintapisteet ovat pääosin kaksifaasivirtauksen alueella, jolloin tulee huomioida vierekkäisten molekyylien väliset vuorovaikutukset. Turbulenssimalleina käytetään yleisesti edelleen joko $k-\omega$ tai $k-\epsilon$ -malleja riippuen sovelluksesta.

Raul Vazquez Rolls Roycelta toi laitevalmistajan näkökulmaa vaativiin laskelmiin. Tyypillisesti uuden konseptin valmistuminen tuotteeksi markkinoille saakka kestää jopa 15 vuotta, josta kymmenen vuotta kuluu laskennassa ja suunnittelussa, ja noin viisi vuotta testaamisessa. Nykyisin kysyntä on kasvanut huomattavasti, mikä asettaa tiukempia aikatauluvaatimuksia myös turbiinisuunnittelijoille.

Parantunut laskentakapasiteetti on mahdollistanut entistä tarkempien mallien käytön; -90-luvulla laskettiin vielä 2D-siipiprofiileja, -95 käytettiin yhdelle siipivyöhykkeelle 3D-laskentaa, 2000-luvun alussa mallinnettiin

stationääritilassa usean siipivyöhykettä ja nykyään lasketaan jo 3D-malleilla monivyöhykeisiä malleja epästationaaritilassa.

Tulevaisuudessa turbulenssimallit voisivat olla tapauskohtaisesti sovitettuja tarkkuuden lisäämiseksi. Jokaisella turbulenssimallilla on kuitenkin rajoitteensa, mikä vaikeuttaa keinoälyn käyttöä. Miten opettaa algoritmeille kaikki, mitä on opittu turbulenssin käyttäytymisestä vuosikymmenien aikana?

Matalapaineturbiinin suorituskyky

Voimalaitosten matalapaineturbiinien suorituskykyä parannetaan tyypillisesti joko kasvattamalla siiven pituutta tai parantamalla siipiprofiilin aerodynaamisia ominaisuuksia. Matalapaineturbiinien viimeisten siipivyöhykkeiden ominaisuuksilla on suuri merkitys turbiinin hyötysuhteeseen. Mitä korkeampi tangentiali- ja aksiaalivoimien suhde on siipiprofiilissa, sitä paremmin siipiprofiili muuttaa energian vääntömomentiksi. Näitä kehitysprojekteja esiteltiin myös konferenssissa.

Viimeisen vyöhykkeen siipien virtauksissa esiintyy vaikeasti mallinnettavia transsoonisia ja ylisoonisia virtausalueita. Ohjelmistot eivät välttämättä tuo esille ilmiöitä, joita siipiprofiilien ja virtauksen vuorovaikutuksista syntyy.

Tämän vuoksi laskennallisten tulosten rinnalle tarvitaan kokeellisia mittauksia.

Värähtelyt

Laitetoimittajilla on paine kehittää entistä ohuempia, pidempiä ja kevyempiä siipiä, jolloin siipiprofiilin riski värähtelyyn kasvaa. Heräte voi aiheuttaa aerodynaamista epästabiliutta ja edelleen voi aiheuttaa värähtelyä (flutter) siipiprofiiliin ja edelleen liiallisia amplitudeja, jotka voivat pahimmillaan johtaa siipivaurioon. Flutter-tyyppinen siiven värähtely voi aiheuttaa mm. epävakasta virtauksesta.

Konferenssissa esiteltiin CFD-laskentaa, jossa oli mallinnettu kehävanteellisen viimeisen vyöhykkeen siipien värähtelyä. Mallinnuksessa kehävanne oli katkaistu mallista pois ja mallinnettu ilmapäli siiven ylitse, mikä kuvaa virtauksen ohivuotoa. Toisaalta todettiin, että siiven ylitse kulkeva virtaus voi aiheuttaa virhettä siiven aerodynaamiseen vaimennukseen. Konferenssissa esitettiin myös laskentaa perinteisesti kehävanne huomioiden.

Professori Francesco Martelli avasi 13. Euroturbon konferenssin.



Uudet koelaitteistot

Yliopistojen ja teollisuuden yhteistyönä on rakennettu erilaisia koelaitteistoja fysikaalisten ilmiöiden selvittämiseksi.


Akselitiivisteiden koelaitteisto oli rakennettu tiivisteiden virtauksen selvittämiseksi. Tiivisteiden tulisi säilyttää oikea välilyös myös transientitilanteissa, kuten ylös- ja alasajon aikana. Testilaitteistossa tulovirtaus jakaantui tutkittavalle tiivisteelle, roottorin päätytiivisteelle sekä pesän ja roottorin väliselle tiivisteelle. Tutkimuksessa mitattiin erityisesti akselitiivisteiden vuotovirtausta sekä jäykkyys- ja vaimennuskertoimia. Jatkossa laitteistolla tutkitaan paineaktivoituvaa lehtitiivistettä kaasuturbini-sovelluksiin.

Höyryturbiinin säätöventtiileiden koelaitteistolla haluttiin selvittää muun muassa säätöventtiilin kriittiset toimintapisteet. Kuristettaessa virtausta esimerkiksi osakuorma-ajoa varten voi

tästä aiheutua paineheilahtelua venttiiliin läpi kulkevaan virtaukseen, mikä voi edelleen toimia herätteenä värähtelyille, nopeuttaa komponentin ikääntymistä ja aiheuttaa vikaantumisia.

Haastavimmat koestukset on toteutettu monen tahon yhteistyönä. Vaikuttavimpiin koelaitteistoihin kuului kaasuturbiinistausta varten rakennettu koelaitteisto, jota ovat kehittäneet kaikki eurooppalaiset suuret lentokonevalmistajat. Koneikon ohjaamista varten oli rakennettu jopa oma valvomo. Laitteiston tekemiseen on kulunut kahdeksan vuotta ja nyt sitä voidaan käyttää mittauksiin. Eniten aikaa oli vienyt eri tahojen komponenttien yhteensovittaminen. CAD-suunnittelun kokonaisuudesta olikin vastannut yksi henkilö koko projektin ajan. Laitteisto sisältää lukuisia mittausmahdollisuuksia aina näkölasista virtauksen mittauksiin viisireikäsondilla. Pääkomponentit on asennettu kiskoille, jolloin laitteiston tutkittavia osia ja mitata-antureita saadaan asennettua paikoilleen.

Lopuksi

Tutkimusta tehdään teollisuuden todellisista tarpeista ja ongelmakohtista lähtien. Konferenssissa korostettiin tutkimuslaitosten tarvitsevan yhteistyökumppaneita teollisuudesta laskentatapojen kehittämiseksi. Jatkuvat energiatehokkuusvaatimukset nostavat myös turbiinitekniikan uudelle tasolle, jolla fluidista saatava energia saadaan mahdollisimman pienin häviöin muunnettua hyötykäyttöön. Toisaalta tiukentuvat vaatimukset voivat aiheuttaa ongelmia esimerkiksi värähtelyissä, kun valmistetaan koneita aiempaa tiukemmilla toleransseilla. Tällöin myös turbiinin käyttäjien tietotaito omasta turbiinista korostuu. 

Vuoristoa Lac Lemanin vastarannalla.



Matkakertomus: ATS YG Tšernobylissa

*Sähköverkkovalvomo, jossa työntekijät vastailivat lankapuhelimiinsa ja kirjasivat jotakin muistilehtiöihin tupakansavun keskellä, oli kuin kurkistus menneisyyteen.
Kuva: Olli-Pekka Rauhala.*



DI Hanna Tynys
Project Engineer
Fortum Power and Heat Oy
hanna.tynys@fortum.com

ATS YG kävi huhtikuussa Ukrainassa tutustumassa Tšernobylin ydinvoimalaan, Prypjatin autiokaupunkiin ja muihin alueen kohteisiin, kuten Dugatutkaan. Kahden päivän turistikiertokierros sisälsi myös visiitin laitoksen kolmosyksikölle. Laajalti kiinnostusta herättäneellä matkalla mukana oli peräti 40 YG-ikäistä työntekijää ja opiskelijaa eri yrityksistä ja oppilaitoksista.

Teksti: Hanna Tynys

ATS YG TEKEE PERINTEISESTI opintomatkan ulkomaille joka toinen vuosi, ja ydinvoima-alan must-see-kohde Tšernobyl valikoitui seuraavaksi vierailukohdeksi lukuisien toiveiden perusteella kesällä 2018. Matka herätti laajalti kiinnostusta YG-ikäisten keskuudessa, ja mukaan lähtijävälintaan ilmoittautui noin 100 halukasta, joista lopulta 40 onnekasta sai paikan joko yrityskiintiöistä tai arvalla. Edustusta oli laajalti eri yrityksistä ja yliopistoilta; tahoillaan osallistujia valitsivat Fennovoima, Fortum, TVO/Posiva, ÄF, Platom, VTT, Energateollisuus ja Helsingin yliopiston radiokemian laitos. Lisäksi mukana oli opiskelijoita Lappeenrannasta, Tampereelta ja Aalto-yliopistosta.

Torstai 11.4. Tšernobylin kaupunki, Prypjat ja Duga

Aamulla suuntasimme kahdella pienellä bussilla kohti varsinaista retkikohdettamme Tšernobylin suojavyöhykettä. Bussimatalla

oppaamme kertoivat meille ohjeita alueella oleskeluun (ei saa syödä ulkona, koskea eläimiin, eikä uida vesistöissä), ja katsoimme dokumentin onnettomuudesta.

Tšernobylin suojavyöhyke eli "exclusion zone" on jaettu kahteen vyöhykkeeseen, joille pääsyä valvotaan. Ulompi vyöhyke rajautuu noin 30 kilometrin päähän voimalaitoksesta, ja sen sisältä on rajattu vielä saastuneempi 10 kilometrin vyöhyke omaksi alueekseen. Saavuimme ulomman 30 km suojavyöhykkeen rajalle ja läpäistyämme rajamuodollisuudet, kuten lipun ja passin tarkastukset, saimme jokainen vierailun ajaksi henkilökohtaisen dosimetrin.

Rajan sisäpuolella pääsimme ensiksi tutustumaan Zalissyan autiokylään, joka on yksi monista pienistä maalaiskylästä, joita ennen maanviljelykseen keskittyneellä alueella oli useita. Sieltä ajoimme tutkimaan Tšernobylin kaupunkia. Tšernobylin kaupunki on noin 15 km päässä laitoksesta, joka on nimetty kaupungin mukaan. Ulommalla suojavyöhyk-



Kolmannen yksikön valvomossa laitospölyn opas kertoi koko ryhmälle onnettomuudesta ja laitoksen toiminnasta sen jälkeen. Kuva: Henri Ormus.

keellä, eli Tšernobylin kaupungissa ja ympäröivällä maaseudulla asuu noin 2000 ihmistä, joista osa on paluumuuttajia, mutta enemmistö alueella kausiluontoisesti työskenteleviä. Tšernobylin kaupungissa on myös pieni kauppa, ja hotelli, jossa majoituimme.

Hotellilla nautitun lounaan jälkeen tutustuimme vesisateessa erilaisiin kohteisiin, mm. onnettomuudesta kertovaan museoon ja palomiesten muistomerkkiin Tšernobylin kaupungissa. Sieltä suuntasimme sisemmän 10 km suojavyöhykkeen sisälle jälleen yhden passintarkastuksen läpi. Sisemmän suojavyöhykkeen sisällä ei ole asutusta, ja sen sisällä olevat metsäalueet voivat olla edelleen huomattavan kontaminoituneita.

Ensimmäisenä ajoimme entiseen Neuvostoliiton sotilastukikohtaan katsomaan Duga-sotilastutkaa. Valtava metallirakennelma, joka tunnetaan myös nimityksellä ”Russian woodpecker” on noin 150 metriä korkea, ja 500 metriä leveä. Tutka on rakennettu vuonna 1976, ja ollut toiminnassa vielä onnettomuuden jälkeenkin. On kerrottu, että

Alun perin voimalaitostyöntekijöiden asuinpaikaksi rakennettu Prypjatin kaupunki sijaitsee vain muutaman kilometrin päässä vaurioituneesta 4 yksiköstä. Aavekaupunki on erityisesti kesällä runsaan kasvillisuuden peitossa. Kuva: Henri Ormus.

rakennelma on ollut osa Neuvostoliiton kylmän sodan aikaista ohjuspuolustusjärjestelmää.

Vierailimme seuraavaksi monista valokuvista tutussa autoituneessa lastenkodissa, josta ajoimme kaikkein kontaminoituneimman alueen Red Forestin läpi Prypjatin kaupunkiin. Red Forest sijaitsee aivan laitoksen vieressä ja on saanut nimensä siitä, että onnettomuuden jälkeen puut värjäytyivät punaisiksi. Opas ker-

toi, että ”punaisessa metsässä” yleinen säteilytaso on bussin ulkopuolella paikoitellen 50 $\mu\text{Sv/h}$ luokkaa. Kaikkein kontaminoituneimmat puut on haudattu maahan metsän toisella laidalla. Metsän alueella ei saanut pysäyttää bussia tai päästää ihmisiä ulos.

Prypjatissa vierailimme muun muassa valokuvista tutulla uimahallilla, 9-kerroksisen rakennuksen katolla, poliisiasemalla, laitoksella käytetyllä kontaminoituneella kauhal-



Onnettomuuden aikaan yksikkö numero 5 oli valmis jo 70 prosenttisesti, mutta onnettomuuden jälkeen rakennusurakkaa ei koskaan jatkettu. Kuva: Henri Ormus.

la, joka on hylätty metsän laitaan ja tietysti alueen ikonisimmassa valokuvauskohteessa: huvipuistossa. Prypjatin kaupunki on kokonaisuudessaan rakennettu 70-80-luvuilla aikanaan moderniksi asuinpaikaksi ydinvoimalan henkilöstölle, ja ennen onnettomuutta siellä on asunut noin 50 000 ihmistä. Rakennuskanta on onnettomuuden aikaan ollut melko tuoretta eikä esimerkiksi huvipuistoa ollut ehditty ottaa lainkaan käyttöön. Kaupunki on nykyisellään melko metsittyä, ja kasvuston lisäksi eläimet ovat alueella ottaneet vallan, tästä esimerkkinä bussin ikkunoista nähdyt villihevoset.

Etenkin suuremmalla ryhmällä kierros venyi pitkälle iltaan, ja hotellilla oltiin vasta noin 20:30 pimeään jo laskeuduttua. Hotellilla pieni baari palveli janoisia turisteja klo 21:00 asti, jonka jälkeen oleskelu olikin mahdollista vain omista huoneissa, sillä ulomman suojavyöhykkeen alueella ei saa yöaikaan liikua ulkona.

Perjantai 12.4. Laitosvierailu yksiköllä 3

Yö hotellissa oli koea, sillä lämmitys oli suljettu kevään takia. Kevät ei retkeläisiä juuri lämmittänyt, sillä lämpötila pyöri päivälläkin noin +12°C asteessa, ja edellisenä päivänä alkanut sade jatkui pitkälle iltapäivään. Hotellilla myös aamiaiseksi oli jo tuttuun tapaan kaalia, perunamuusia ja kanaa.

Aamun ensimmäisenä kohteena olivat keskeneräiseksi jääneiden yksikköjen 5 ja 6 jäädytystornit. Valmiimpi jäädytystorni oli vaikuttava näky, sillä betonirakenne oli ehditty rakentaa lähes täyteen korkeuteensa. Toinen jäädytystorni oli ehditty rakentaa vasta noin 20% valmiiksi. Näimme myös läheisen kalan kasvattamon, jossa oli tutkittu alueen kaloja onnettomuuden jälkeisenä aikana.

Seuraava vierailukohde oli varmasti retken odotetuin: visiitti itse laitoksille. Koko 40 hengen ryhmä tutustui yhdessä ensiksi paikalliseen valmiuskeskukseen, ja sitten

Rakenteilla olleiden yksikköjen jäädytystornit eivät koskaan ehtineet käyttökuntoisiksi, vaikka valmiimpi kohosikin oppaan sanojen mukaan noin 80%:iin lopullisesta korkeudestaan. Osa yläosan rakennustelineistä oli jo pudonnut maahan. Kuva: Henri Ormus.



itse laitoksiin. Kierros kulki pitkin ”kultaista käytävää” yksikköiden 1 ja 2 läpi yksikön 3 valvomoon, jossa meille kerrottiin laitoksista. Onnettomuuden jälkeen 1- ja 2-yksiköt otettiin turvallisuusparannusten jälkeen takaisin käyttöön heti syksyllä 1986, ja nelosyksikköön merkittävästi kytköksissä ollut kolmosyksikkö suuremman erotus- ja parannustyön jälkeen pari vuotta myöhemmin. Viimeinen käytössä ollut yksikkö on suljettu vuonna 2000, mutta voimalaitosalueella on edelleen noin 2000 henkeä töissä, mm. käytöstäpoistotöihin liittyen. Polttoaine on pois-

tettu yksikköiden 1, 2 ja 3 reaktoreista ja on varastoituna laitosalueen lähellä olevassa väli-varastossa, josta se on tarkoitus siirtää uuteen kuivavarastoon, joka on melkein valmiina laitosalueen toisella laidalla.

Valvomon jälkeen laitoimme maskit naamalle ja lähdimme katsomaan räjähdysken aikaan nelosyksikön pääkiertopumpputilassa olleen Valeriy Khodymchukin muistomerkkiä aivan nelosyksikön viereen, ja sen jälkeen kolmosyksikön pääkiertopumppuja. Pumppuja on 4 kappaletta, ja ne ovat identtiset vaurioituneen yksikön pumppujen kanssa. Kierroksen





Laitoskierroksella koko 40 hengen ryhmä kulki letkassa yksikköjen 1 ja 2 läpi "kultaista käytävää" pitkin aina onnettomuudessa vaurioituneen yksikön 4 rajalle. Käytävällä oli paljon liikennettä siihen nähden, että yksikään yksikkö ei ole ollut toiminnassa 20 vuoteen. Kuva: Vesa Laitinen.

lopussa kurkistimme myös toimivaan sähköverkkoalvomoon.

Ennen lounasta ehdimme vielä katsomaan uutta suojarakennusta ulkoa, ja viereiseen demonstraatiotilaan katsomaan kuvia ja videoita uuden sarkofagin rakentamisesta ja animaatioita sen sisällä tehtävästä purkutyöstä. Tilassa oli myös pienoismalli vanhasta sarkofagista ja sen sisällä olevista tiloista. Uusi metallinen suojarakennus "New safe confinement" (NSC) on rakennettu laitosalueen laidalla, ja siirretty paikoilleen vanhan sarkofagin päälle vuonna 2017. Rakennelma on varustettu nykyaikaisilla etäohjettavilla nosturi- ja säteilymonitorointijärjestelmillä, ja sen sisällä on tarkoitus toteuttaa vanhan sarkofagin ja alkuperäisen laitosrakennuksen epävakaiden rakenteiden purkutyötä. Pitkän aikavälin tavoitteena on saada laitosyksikkö purettua, ja polttoaine loppusijoitukseen, mutta aikataulu tämän toteuttamiseen ei ole vielä selvillä. Kokonaisuudessaan onnettomuuden kustannukset korjaus- ja dekon-

taminointitöinä ovat olleet Ukrainalle merkittävät, vaikka neljännen yksikön purkuun liittyviin töihin saadaankin rahoitusta ulkomailta, mm. EU:lta.

Ruokailu tapahtui laitoksen kanttiinissa, ja sen jälkeen kävimme katsomassa lähempää keskeneräiseksi jäänyttä vitosyksikköä. Työmaalla olivat nosturitkin paikoillaan, ja yksikkö näytti juuri siltä, että on ruostunut paikallaan yli 30 vuotta. Onnettomuuden aikaan vitosyksikkö on ollut noin 70 % valmis, kun taas kuutosyksikkö enemmän kesken. Vaikka muita yksikköjä on otettu onnettomuuden jälkeen takaisin käyttöön, ei keskeneräisten rakentamista koskaan jatkettu.

Seuraava kohde oli vanha rautatieasema hylättyine junineen, ja sen jälkeen suuntasimme takaisin Prypjatiin, jossa kierroksemme viimeisinä kohteina olivat edellisenä päivänä näkemättä jääneet vanha sairaala ja näkymä 16-kerroksisen rakennuksen katolta. Sairaalassa muut kerrokset olivat täysin tyhjiä, mutta yhdessä kerroksessa oli paljon ruostu-

nutta sairaalavälineistöä. Tämä herätti epäilyksiä, josko ainakin osa rekvisiitasta oli jätetty tiloihin erityisesti turisteja varten.

Lauantai 13.4. Päivä Kiovassa ja tapaaminen muiden YG-edustajien kanssa

Lauantaina tutustuimme Kiovan kaupungin nähtävyyksiin, kahviloihin ja historiaan opastetulla kierroksella. Kiovan vanhat osat ovat täynnä historiallisia rakennuksia, ja vierailimme muun muassa Unescon maailmanperintökohteessa Saint Sofian katedraalissa.

Illalla nautimme illallista Ukrainan YG:n ja myöskin Tšernobylin vierailijain Slovenian ja Kroatian YG:läisten kanssa verkostoituen. Keskustelujen perusteella ydinvoiman hyväksyttävyyden kansan parissa on Ukrainassa selvästi Suomen tasoa alhaisempi, ja paikallinen ydintekninen seura tekee kovasti töitä hyväksyttävyyden paranemisen eteen. Paikallinen seura järjestää muun muassa kesäkouluja ja

ydinvoimalaitosvierailuja opiskelijoille yhteistyössä Ukrainan ydinvoimalaitosoperaattorin kanssa.

Turistiksi Tšernobyliin?

Retki Tšernobyliin valotti jokaiselle osallistujalle, millaista tuhoa traaginen onnettomuus sai aikaan, paitsi voimalaitoksella, myös ympäröivällä seudulla. Näimme kierroksella paitsi massiivisia rakennelmia, kuten keskeneräiset jäähdystornit, valtavan uuden suojarakennuksen ja 500 metriä leveän tutkarakennelma Dugan, myös ympäröivät aavekaupungit. Suojavyöhykkeellä saimme huomata, että kolmessakymmenessä vuodessa luonto ottaa vallan autioituneissa kaupungeissa. Rakennuksia on kolmessa vuosikymmenessä sortunut etenkin ympäröivällä maaseudulla, mutta myös Prypjatin kaupungin vanhimmissa osissa. Rakennusten kunto tulee heikkenemään lisää lähivuosina, ja jo nyt on alueen sääntöjen mukaan kiellettyä viedä turisteja sisään sortumavaarallisiin rakennuksiin.

Yleinen säteilytaso alueella ei itse laitosta ja ”punaista metsää” lukuun ottamatta ollut mer-

kittävästi taustasta poikkeava. Annoskertymä kahden päivän vierailusta laitosvierailuineen jäi arviolta alle 10 μSv :iin, vaikkakaan virallista alueen rajalla annetun dosimetrin lukemaa emme saaneet ainakaan vielä tietoomme. Säteilyannos visiitillä Tšernobyliin ei siis ole korkeampi, kuin edestakaisen lentomatkan aiheuttama annos.

Tänä päivänä voimalaitos ympäristöineen on jopa yllättävän suosittu turistikohde. Alueella liikkui melko paljon turisteja minibusseilla, ja edes autiokaupunki Prypjat ei tuntunut kovin autiolta, vaikka varsinainen sesonki ilmeisesti on vasta kesäkaudella. Alueelle saapuvia ihmisiä valvotaan suojavaikokkeiden rajoilla passintarkastuksilla, eikä vyöhykkeelle siis ole asiaa ilman koulutettua opasta ja ennakkoon tehtyjä paperitöitä. Meidän oppaamme olivat molemmissa busseissa ja laitoskierroksella asiantuntevia, ja pääsimme heidän johdollaan näkemään paljon. Vierailu Tšernobylin alueella on varmasti jokaiselle ydinvoima-alan ammattilaiselle vaikuttava kokemus, joka konkretisoi onnettomuuden aiheuttamaa massiivista inhimillistä katastrofia. ☸

Tšernobylin ydinonnettomuus 26.4.1986

Epäonnistuneen turvallisuuskokeen yhteydessä nelosyksikön reaktori tuhoutui räjähdysmäisesti synnyttäen massiivisen tulipalon.

Pelastustöihin osallistuneet saivat suuria säteilyannoksia, 28 kuoli akuuttiin säteily sairauteen.

Kaikki leviämisseet menetettiin kerralla ja radioaktiivinen päästö kulkeutui ympäri Eurooppaa.

Historian pahin ydinvoimalaonnettomuus, jonka pitkäaikaisvaikutuksia tutkitaan edelleen.

Lähde: Jaakko Leppäsen esitys ATS:n vuosikokouksessa 5.3.2019



JYTKYT – 30 vuotta julkisia koordinoituja tutkimusohjelmia ydinjätehuollosta

Kari Rasilainen, Seppo Vuori
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Tänä vuonna tuli suomalaisille julkisille koordinoituille ydinjätehuollon tutkimusohjelmille 30 vuotta täyteen. Artikkelissa luodaan lyhyt silmäys tutkimusohjelmien kehittymiseen ydinjätehuollon toimintaympäristön kehittymisen mukana. Kirjoittajat tietävät mistä puhuvat, sillä he ovat yhteensä koordinoineet päättäneestä seitsemästä ohjelmasta kuutta. Saatiinko siis mitä tilattiin?

This year is the 30th anniversary of the coordinated public Finnish research programmes on nuclear waste management. The article provides a brief overview for the development of research programmes with the development of the waste management environment. The authors know what they are talking about, because they have coordinated six out of the seven programmes concluded so far. Did we get what we ordered?

Taustaa julkisille ydinjätehuollon tutkimusohjelmille

Suomen ydinjätehuollon ohjelman peruseräaateet, kansallinen työnjako ja pääpiirteinen aikataulu suunniteltiin 1970- ja 1980-luvuilla. Tuolloin otettiin käyttöön nykyisin toiminnassa olevat ydinvoimalat, annettiin ydinjätehuoltoa ohjaavia valtioneuvoston päätöksiä sekä muotoiltiin ydinenergialaki. Vuonna 1978 valtioneuvosto päätti, että ydinjätteiden tuottajat vastaavat jätehuollosta. Samana vuonna perustettiin Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta (YJT) koordinoimaan voimayhtiöiden tutkimuksia.

Julkiset ydinjätehuollon tutkimusohjelmat tähtäsivät alusta, eli vuodesta 1989, lähtien suomalaisten ydinjätehuollon viranomaisten työn tukemiseen. Lainsäädännön mukaan ydinjätteiden tuottajat vastaavat tuottamiensa jätteiden turvallisesta huollosta (tutkimus, suunnittelu, toteutus ja kustannukset). Ydinjätehuolto kattaa ydinvoiman käytön yhteydessä syntyneiden radioaktiivisten jätteiden koko käsittelyketjun, joka päättyy loppusijoitukseen. Tätä työtä valvovat viranomaiset tarvitsevat luotettavaa ja ydinjätteiden tuottajista riippumatonta tutkimustietoa oman työnsä selkänäjäksi.

Ydinjätehuolto on luvanvaraista toimintaa, jossa toiminnan aloittamiseksi luvanhakijan on saatava lupa toimivaltaiselta viranomaiselta. Suomessa Säteilyturvakeskus (STUK) määrittelee erilaisissa ohjeissa ja määräyksissä mitä kuuluu turvalliseen ydinjätehuoltoon, se esimerkiksi asettaa turvallisuuskriteerit. Luvan saamisen välttämätön ehto on siis täyttää viranomaisvaatimukset. Näin ollen turvallisuusviranomaisen tieteellinen maailmankuva vaikuttaa suoraan myös luvanhakijoihin ja niiden tutkimushankkeisiin.

Suomen ydinjätehuollon kenttä on muuttunut paljon kuluneen 30 vuoden aikana ja julkinen tutkimusohjelma siinä mukana. Yksi vaikuttanut tekijä on suomalainen porrastettu luvituskäytäntö, jossa merkittävät ydinjätehankkeet tarvitsevat kolme peräkkäistä lupaa (periaatepäätös, ra-

kentamislupa ja käyttö lupa). Lupaehdot tiukkenevat portaittain ja jokaisesta lupakäsittelyä on edeltänyt intensiivinen tutkimusrupeama. Erityisesti käytetyn ydinpolttoaineen luvitus on rytmittänyt koko suomalaista ydinjätetutkimusta, esim. loppusijoituksen laajoja turvallisuusanalyseja on tehty 1985, 1992, 1996, 2000 ja 2012. Kaksi viimeistä liittyvät periaatepäätöshakemukseen ja rakentamislupahakemukseen. Taulukossa 1 on poimintoja suomalaisen ydinjätehuollon keskeisimmistä tapahtumista.

Tutkimusohjelmien organisointi

Julkiset ydinjätehuollon tutkimusohjelmat ovat olleet kauppa- ja teollisuusministeriön (KTM) ja sittemmin työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) organisoimia tutkimusohjelmia. Ne ovat alusta alkaen olleet selkeän viranomaisvetoisia, mutta kuitenkin niin, että suomalaiset ydinjätehuollon toimijat ovat olleet kaiken aikaa mukana, esimerkiksi tukemassa tutkimustarpeiden määrittelyä.

Alkuvaiheessa tutkimusohjelma kattoi sateenvarjon tavoin itsenäisten rahoittajien (esim. KTM, STUK, Posiva) hankkeita. Hanke-esitykset toimitettiin rahoittajille, jotka arvioivat ne itsenäisesti. Rahoituspäätöksiä tehtiin organisaatioiden omien aikataulujen mukaan, niitä saattoi tulla pitkin vuotta. Vuodesta 2004 lähtien pääasiallinen ulkopuolinen rahoitus tuli Valtion ydinjätehuoltorahastoon (VYR) perustetusta erillisestä Ydinjätetutkimusrahastosta.

Vuositasolla tutkimusohjelmien rahoitus on pysynyt kohtuullisen tasaisena: alkuvaiheen alle 1 miljoonasta eurosta on 30 vuodessa päästy hieman yli 2 miljoonaan euroon. Ulkopuolisen rahoituksen lisäksi tutkimusta tekevät organisaatiot ovat usein osoittaneet hankkeisiinsa myös omaa rahoitusta, viime vuosina yhteensä noin miljoona euroa vuodessa.

Hallinnointikäytännöt ovat pysyneet periaatteessa ennallaan. Johtoryhmän tehtäviin on kuulunut tutkimuksen laajempien sisällöllisten suuntaviivojen laatiminen ja hankkeiden edistymisen seuranta. Johtoryhmän puheenjohtaja on ollut STUKista tai TEM:stä (aikaisemmin KTM:stä). Tutkimusohjelman johtaja (ohjelmakielellä koordinaattori) on valittu julkisen kilpailun tuloksena; hän on aina toiminut johtoryhmän sihteerinä. Vuodesta 2006 lähtien johtoryhmä on nimittänyt tukiryhmiä

hanke-esitysten arviointia ja hankkeiden tieteellistä seuranta varten: niidenkin puheenjohtajat ovat olleet STUK:sta tai TEM:stä. Johtoryhmä on laatinut tukiryhmien hankearviointien pohjalta hankehaun rahoitus-suosituksen TEM:lle, joka puolestaan on laatinut virallisen rahoitusesityksen VYR:lle. Taulukossa 2 on yhteenveto ydinjätehuollon tutkimusohjelmien jatkumosta.

Taulukko 1. Ydinjätehuollon ohitettuja etappeja Suomessa. VN = valtioneuvosto, VLJ = voimalaitosjäte, KPA = käytetty ydinpolttoaine. Ydinjätelaitosten lupahakemuksia on aina edeltänyt turvallisuusanalyysiin kulminoitunut intensiivinen tutkimusvaihe.

Vuosi	Tapahtuma	Kommentti
1962	Otaniemen tutkimusreaktori käynnistetään	Tutkimus ja koulutus suomalaisessa FIR 1 -ydinreaktorissa käynnistetään
1977	Loviisan ensimmäinen reaktori otetaan käyttöön	LO-1 kaupallinen käyttö alkaa
1978	VN:n päätös ydinjätehuollon järjestämisestä	Ydinjätehuollon peruseriaatteet, geologinen loppusijoitus, ydinjätteiden tuottaja vastaa jätehuollosta
1978	Voimayhtiöiden ydinjätetoimikunta (YJT) aloittaa	Voimayhtiöiden koordinoitu ydinjätetutkimus alkaa Suomessa
1979	Olkiluodon ensimmäinen reaktori otetaan käyttöön	OL-1 kaupallinen käyttö alkaa
1981	Loviisan toinen reaktori otetaan käyttöön	LO-2 kaupallinen käyttö alkaa
1982	Olkiluodon toinen reaktori otetaan käyttöön	OL-2 kaupallinen käyttö alkaa
1983	VN:n päätös ydinjätehuollon tutkimus-, selvitys- ja suunnittelutyön tavoitteista	Ensisijaisesti pyritään viemään KPA ulkomaille jälleenkäsiteltäväksi ja loppusijoitettavaksi. Toissijaisesti hahmotellaan KPA:n huollon aikataulu Suomessa, esim. loppusijoituslaitoksen paikka vuoden 2000 loppuun mennessä
1987	Ydinenergilaki (990/1987)	Muodostaa ydinenergian käytön ja ydinjätehuollon laillisen perustan, esim. vastuut, rahoitusjärjestelyt
1988	Valtion ydinjätehuoltorahasto (VYR) perustetaan	Jätehuoltovolliset varaavat järjestäytyneesti rahat tuottamiensa jätteiden tulevaisuudessa tapahtuvaan turvalliseen huoltoon
1992	Olkiluodon VLJ-luola otetaan käyttöön	VLJ:n loppusijoitus alkaa Olkiluodossa
1994	Ydinenergilain päivitys	KPA:n loppusijoitus Suomessa, ei vientiä eikä tuontia. Loviisan KPA:n palautus Venäjälle/ Neuvostoliittoon lopetetaan
1995	Posiva Oy perustetaan	Posivan omistajien (TVO ja Fortum) KPA:n loppusijoituksen valmistelu Suomeen aloitetaan
1998	Loviisan VLJ-luola otetaan käyttöön	VLJ:n loppusijoitus alkaa Loviisassa
2001	VN:n periaatepäätös KPA:n loppusijoituslaitoksesta	Olkiluoto valitaan loppusijoituspaikaksi, tarkemmat kallioperätutkimukset käynnistetään, maanalaisen ONKALO-tutkimustilan rakentaminen alkaa vuonna 2004
2015	VN:n rakentamislupa KPA:n loppusijoituslaitokselle Olkiluotoon	Maanalaisten loppusijoitustilojen rakentamistyöt käynnistetään
2015	Otaniemen tutkimusreaktori suljetaan	Ensimmäisen suomalaisen ydinreaktorin käytöstäpoiston suunnittelu, luvitus ja valmistelu käynnistetään

Taulukko 2. Julkisten koordinoitujen tutkimusohjelmien jatkumo.

Tutkimusohjelma	Ohjelman nimi	Tutkimuskausi	Hankkeiden lukuaäärä*	Tutkimusohjelman johtaja**
JYT [1,2,3]	Julkisrahoitteisen ydinjätetutkimuksen ohjelma	1989–1993	10	Seppo Vuori, VTT
JYT2 [4]	Julkishallinnoidun ydinjätetutkimuksen ohjelma	1994–1996	14	Seppo Vuori, VTT
JYT2001 [5]	Julkishallinnon ydinjätetutkimusohjelma	1997–2001	17	Seppo Vuori, VTT
KYT [6]	Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma	2002–2005	20	Kari Rasilainen, VTT
KYT2010 [7]	Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma	2006–2010	44	Heikki Leinonen, Carrum Oy
KYT2014 [8]	Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma	2011–2014	39	Kari Rasilainen, VTT
KYT2018 [9]	Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma	2015–2018	32	Kari Rasilainen, VTT
KYT2022 [10]	Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma	2019–2022	29	Suvi Karvonen, VTT

* Jotkut hankkeet ovat voineet vaihtaa nimeä kesken kauden, jolloin uudetkin hankkeet on laskettu mukaan.

** Tutkimusohjelman johtaja on valittu avoimella kilpailutuksella tutkimuskaudeksi.

Tutkimusohjelman organisointi on kehittynyt alkuvaiheen improvisoinnista kohti vakiintuneita käytäntöjä. Koska hallintokäytännöistä kertyy kokemusta hitaasti, muutokset on toteutettu tutkimusohjelmasta toiseen siirryttäessä. Organisointi on tähdännyt vuosittain rahoitettavan tutkimuskokonaisuuden tukemiseen. Tässä mielessä käytäntöjen vakiintuminen on ollut nopeaa, koska vuodesta 2006 lähtien tutkimusohjelmien toiminnallinen perusrakenne ei ole merkittävästi muuttunut. Tutkimusohjelmatasolla siihen on kuulunut:

- puiteohjelma tutkimuskaudelle
- vuotuisen hankehaut, johon liittyy johtoryhmän hakukohtainen sisällöllinen ohjeistus
- hanke-esitysten arviointi
- vuosisuunnitelma hanke-esitysten pohjalta
- osavuosisuunnitelmat hankkeiden edistymisraporttien pohjalta
- seurantakokoukset
- temaattiset julkiset seminaarit
- vuosikatsaukset saavutettujen tulosten pohjalta
- kansainvälinen arviointi
- loppuraportti.

Tutkimusohjelman organisoinnin kannalta tärkeitä muutoksia ovat olleet ydinenergiain muutoksen jälkeen VYR-rahoituksen alkaminen vuonna 2004 ja ydinenergiain seuraavan muutoksen jälkeen VTT:n Ydinturvallisuustalon ja sen infrastruktuurin rahoittaminen myös KYT-ohjelmasta, alkaen vuodesta 2016.

Tutkimusohjelmien johtoryhmissä ovat olleet mukana työ- ja elinkeinoministeriö (aiemmin kauppa- ja teollisuusministeriö), Säteilyturvakeskus, sosiaali- ja terveysministeriö, ympäristöministeriö, Fortum Power and Heat Oy, Teollisuuden Voima Oy, Posiva Oy ja Fennovoima Oy.

Tutkimuksia tekemässä ovat olleet olleet Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Aalto-yliopisto (aiemmin Teknillinen korkeakoulu), Fracom Oy, Geologian tutkimuskeskus (GTK), Helsingin yliopisto, Itä-

Suomen yliopisto, Jyväskylän yliopisto, Ludus Mundi Oy, Numerola Oy, Säteilyturvakeskus (STUK), Tampereen teknillinen yliopisto, Tampereen yliopisto ja Vibrometric Oy.

Tutkimuksen sisältö

Tutkimusohjelmien tieteellinen sisältö on johdettavissa muutamasta peruslähteestä: suomalaisten toimijoiden tutkimustarpeet, tutkimusohjelmien kansainväliset arviot, jos niitä on ollut, ja kotimainen ydinjätehuollon strateginen ajattelu. Hankittu palaute tutkimusohjelman sisällä johtoryhmästä, tukiryhmistä ja hankepäälliköiltä on tutkimusohjelman kannalta erityisen relevanttia. Ydinjätetutkimus on kansainvälistä, joten kansainvälisillä tieteellisillä foorumeilla esitetyt ajatuksia on tullut mukaan sekä johtoryhmän että tutkimuslaitosten kautta.

Taulukon 1 kuvaama suomalaisen ydinalan ja ydinjätehuollon vaiheittainen eteneminen on vaikuttanut tutkimuksen sisällön painopisteisiin. Tutkimuksen näkökulmat ovat muuttuneet jonkin verran ajan funktiona, mutta itse tutkimusaiheet ovat pysyneet melko vakioina. Rahoitetuista teknis-luonnontieteellisistä aihepiireistä loppusijoituskapselin tutkimuksen ja käytöstäpoistotutkimuksen kohdalla esiintyy vaihtelua tutkimuskausien välillä. Myös yhteiskuntatieteellisissä tutkimuksissa on esiintynyt vaihtelua. Erityisen paljon julkisiin tutkimusohjelmiin on vaikuttanut käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitushanke, koska se on täysin dominoinut kotimaisen ydinjätehuollon tutkimuspanostuksia. Siinä metodina on ollut kehittää rinnan paikkatutkimuksia ja loppusijoituskonseptia sekä mitata siihenastinen ymmärryksen taso toistuvien loppusijoituksen turvallisuusanalysein. Taulukossa 3 on läpileikkaus julkisten tutkimusohjelmien pääasiallisista tutkimusaihepiireistä. Eri tutkimusohjelmissa aihepiirin strateginen ryhmittely on vaihdellut, mutta taulukossa on pysytely samalla otsikkotasolla. Taulukossa esitetyt otsikot ovat jo itsessään laajoja kokonaisuuksia, joten tutkimusohjelmat ovat kokonaisuutena kattaneet varsin laajaa kenttää.

Taulukko 3. Pääasialliset tutkimusaihepiirit JYT- ja KYT-ohjelmissä. JYT-kaudella ydinjätehuollon teknologiat kattoivat myös kustannuskysymysten tarkastelua. K = koordinoitu usean tutkimusorganisaation yhteishanke erityisen tärkeänä pidetyssä aihepiirissä. KPA = käytetty polttoaine.

Pääaihepiiri	JYT	JYT2	JYT2001	KYT	KYT2010	KYT2014	KYT2018	KYT2022
Teknis-luonnontieteelliset tutkimukset								
Kallioperä ja pohjavesi	x	x	x	x	x	x	x	x
Mikrobiologian vaikutukset					x	x	K	K
Luonnonanalogiatutkimukset	x	x	x					
Loppusijoituskapseli (KPA)	x			x	x	K	K	K
Bentoniittipuskuri ja täyteaineet (KPA)	x	x	x	x	x	K	K	K
Radionuklidien vapautuminen ja kulkeutuminen	x	x	x	x	x	x	x	x
Biosfääritutkimukset				x	x	x	x	x
Loppusijoituksen toimintakyvyn arviointi	x	x	x	x	x	K	K	K
Ydinjätehuollon teknologiat	x	x	x	x	x	x	x	x
Voimalaitosjätteen tutkimukset				x	x	x	x	x
Käytöstäpoisto	x						x	x
Ydinjätetutkimuksen infra							x	x
Yhteiskuntatieteelliset tutkimukset								
Ympäristövaikutusten arviointi		x	x					
Julkinen tiedotus ja imagokysymykset			x					
Hyväksyttävyyden, luvitus			x		x	x	x	x

Vaikka tutkimusaiheet ovat pysyneet melko muuttumattomina, tutkimusten näkökulma on vähitellen muuttunut prosessiasiantuntemuksen kehittämisestä prosessien turvallisuusmerkityksen selvittämisen suuntaan. Toinen trendi on ollut pyrkiä turvallisuudelle tärkeiden ilmiöiden monitieteelliseen tutkimiseen, jossa lisäosaamista saadaan eri tieteenalojen menetelmien yhteiskäytöllä. Kolmas edellisistä johdettava looginen pyrkimys on ollut tunnistaa loppusijoituksen turvallisuuden arvioimisen kannalta kaikkein tärkeimmät aihepiirit ja kehittää niiden tutkimiseksi erityisiä koordinoituja hankkeita, jossa aihepiiriä tutkitaan usean eri tutkimusorganisaation yhteisvoimin nimetyn hankkekoordinaattorin johdolla. Koordinoidut hankkeet tulivat mukaan, kun KYT2010-ohjelman kansainvälisessä arvioissa kiinnitettiin huomiota tutkimusohjelman useisiin pieniin ja pirstaleisiin hankkeisiin.

Tutkimusohjelmista JYT2001:n tutkimuskauteen osui käytetyn polttoaineen loppusijoituksen periaatepäätöksen valmistelu Suomessa, mikä vaikutti tutkimusohjelmaan. Tuolloin yhteiskuntatieteellisiä hankkeita oli lukuisia seuraamassa muun muassa ympäristövaikutusten arviointitilaisuuksia ja muita tiedotustilaisuuksia loppusijoituslaitoksen vaihtoehtoisissa sijoituskunnissa, julkista keskustelua medioissa sekä paikkanvalinnassa vaikuttavia imagokysymyksiä. Teknisluonnontieteellisellä puolella VTT:llä laadittiin käytetyn polttoaineen huollosta pelkistetty suomenkielinen raporttitrilogia [11,12,13], joka suunnattiin nimenomaan päätöksentekijöille. Raportit lähetettiin muun muassa kaikille kansanedustajille.

Tutkimusohjelman suora sisällön ohjaus perustui vuoteen 2018 asti rahoituksen suuntaamiseen suotavina pidettyihin hanke-esityksiin. Tässä oli ongelmana se, että mikäli hanke-esityksiä ei tule johonkin tärkeänä pidettyyn aiheeseen, tai ne eivät täytä laatuvaatimuksia, kyseisen aiheen tutkimuksia ei voida rahoittaa. Vuonna 2018 sovittiin TEM:n kanssa, että johtoryhmä voi päättää julkisen haun ulkopuolella niin kutsutun pienhankkeen käynnistämistä tärkeänä pitämästään aiheesta. Tämä antoi johtoryhmälle käyttökelpoisen välineen tutkimuksen sisällön ohjaukseen.

JYT- ja KYT-hankkeet ovat tähänneet etupäässä kansallisten tutkimusvalmiuksien ja asiantuntemuksen kehittämiseen. Alusta alkaen nähtiin kuitenkin myös, että osaaminen voi kehittyä myös kansainvälisissä hankkeissa ja että suomalaisten tutkijoiden pääsy mukaan isompiin kansainvälisiin hankkeisiin edellyttää aina omaa kunnollista osaamista. JYT- ja KYT-hankkeilla on ollut kansainvälistä yhteistyötä esim. OECD NEA:n, IAEA:n ja EU:n Euratom-ohjelmien tutkimushankkeiden kanssa. Yhteistyö on ollut joko suoraa hankkeidenvälistä tai epäsuoraa, jolloin JYT- ja KYT-hankkeiden edustajat ovat mukana kansainvälis-

sä hankkeissa muiden projektien kautta. Epäsuora yhteistyö on ollut yleisempää; tällöin JYT- ja KYT-hankkeiden saama hyötykin on ollut epäsuoraa.

Tutkimusohjelmien tulokset

Tutkimusohjelmien tuloksia voidaan mitata monella tavalla. Yleisimmin on käytetty akateemista mittaria, jossa listataan tutkimuskaudella laadittuja julkaisuja sekä suoritettuja akateemisia opinnäytteitä ja tutkintoja. Julkisten tutkimusohjelmien vuosi- ja loppuraporteissa kirjaamiskäytännöt ovat vaihdelleet ohjelmasta toiseen, joten kattavan yhteenvedon tekeminen niiden pohjalta sisältää epävarmuuksia. Taulukossa 4 on suuntaa antava tilasto tutkimusohjelmittain. Kiinnostunutta lukijaa kehoitetaan tutustumaan tutkimusohjelmien loppuraportteihin. Alun julkaisukiihdytyksen jälkeen tiedossa oleva keskimääräinen tahti on ollut noin yksi tohtori ja 50 julkaisua vuodessa.

Epäsuorat tulokset ovat myös kiinnostavia. Yksi koko ydinjätehuollon tutkimuskenttää hyödyttävä tulos on tutkimusryhmien välinen yhteistyö. KYT-ohjelmien koordinoitujen hankkeiden välinen yhteistyö on lisääntynyt kaiken aikaa ja se helpottaa myös uusien tutkimusideoiden kehittämistä. Suomalainen ydinjätetutkimus on nimittäin niin pitkällä, että julkisten tutkimusohjelmien käytettävissä olevalla rahoituksella osaamisen kehittäminen edellyttää monitieteistä yhteistyötä.

Edellä mainittiin, että vuonna 2016 KYT-ohjelma alkoi rahoittaa suomalaista ydintutkimusinfrastruktuurin kehittämistä VTT:n Ydinturvallisuustaloon. KYT-ohjelman kontribuutiolla kehitetään ydinjätetutkimuksen kokeellisia valmiuksia ja uuteen laitekantaan liittyvää osaamista. Vaikka infra on VTT:n tiloissa, se on koko ydinjäteyhteisön käytettävissä.

Ulkopuolisia näkemyksiä tutkimusohjelmista

Mistä tiedetään, meneekö tutkimusohjelmalla hyvin? Yksi tapa saada tietoa on tilata aiheesta riippumaton ulkopuolinen arvio.

Suomen ydinjätehuollon ohjelma ja etenkin sen eteneminen on kiinnostanut ulkomailla jo pitkään, koska täällä pidetään harvinaisen sinnikkäästi kiinni jo vuonna 1983 hahmotelluista ydinjätehuollon suunnitelmista ja aikataulusta.

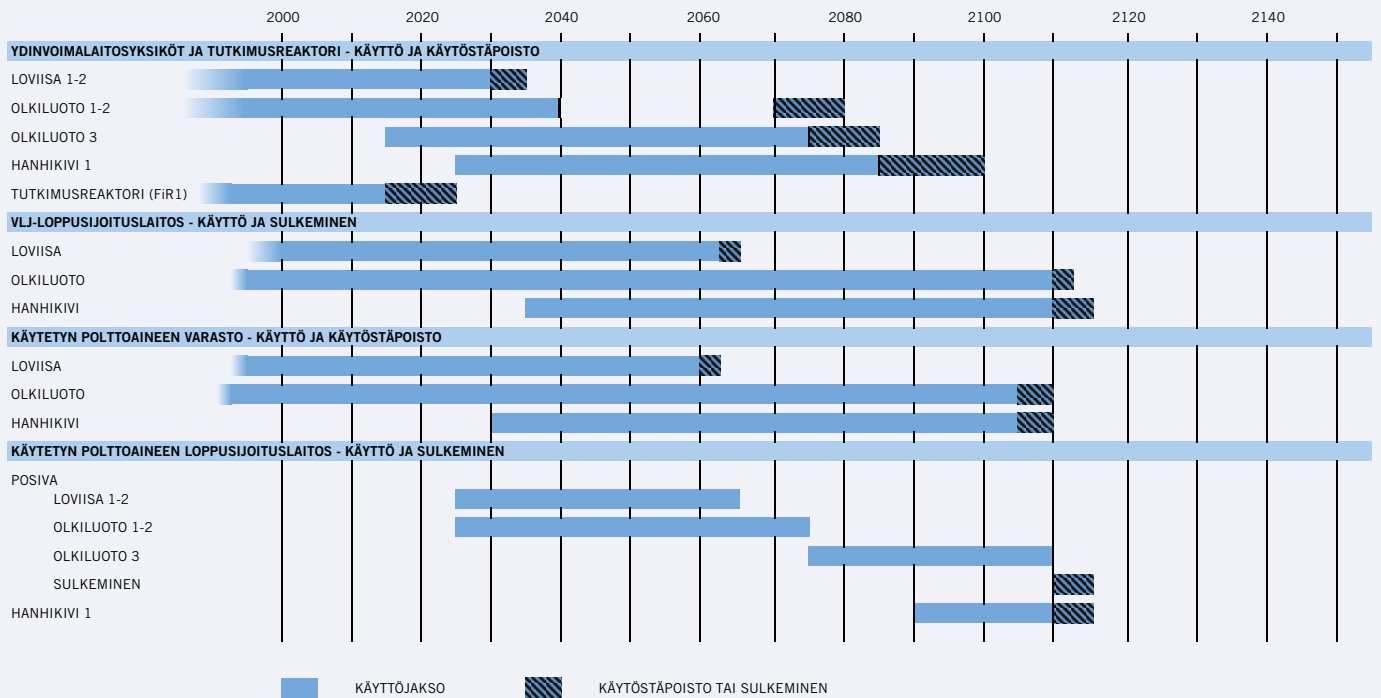
Yhdysvalloissa perustettiin 1989 Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB) arvioimaan sikäläisen ydinjäteohjelman tieteellistä tasoa ja osana tätä työtä ryhmä tutustui omasta aloitteestaan muiden maiden vastaaviin ohjelmiin. Suomessa ryhmä kävi vuonna 1992, missä yhteydessä kirjoittajat esittelivät JYT-ohjelmaa. Ryhmä raportoi [14] tarkkanäköisesti havainnoistaan kongressille ja energiaministerille.

KTM tilasi vuonna 1992 IAEA:n WATRP-ohjelmasta (Waste Management Assessment and Review Programme) kansainvälisen arvon Suomen ydinjätehuollon ohjelmasta. Vierailu toteutettiin vuonna 1993 ja siinä yhteydessä myös JYT-ohjelman vuosiraportit lähetettiin arviointiryhmälle; kirjoittajat tapasivat arviointiryhmän jäseniä. Ministeriö raportoi [15] tulokset omassa julkaisusarjassaan.

TEM on toistaiseksi tilannut kansainväliset arviot tutkimusohjelmille KYT2010, KYT2014 ja KYT2018. Arviot on yleensä tilattu noin tutkimusohjelman puolenvälin tienoilla. Arviointiryhmät ovat perehtyneet lähetettyyn kirjalliseen aineistoon ja haastatelleet tutkimusohjelman hallinnon keskeisiä henkilöitä ja hankepäälliköitä. Arviointiraportit on julkaistu ministeriön julkaisusarjoissa [16,17,18]. Johtoryhmä on käsitellyt arviointiraportit heti niiden valmistuttua ja ottanut suosituksia huomioon mahdollisuuksien mukaan jo menossa olevassa tutkimusohjelmassa. Arviointiraportin syvähyödyntäminen on kuitenkin tapahtunut seuraavan tutkimusohjelman suunnitteluryhmän työssä.

Taulukko 4. Julkisten tutkimusohjelmien julkaisujen ja opinnäytteiden suuntaa antava yhteenvedo. KYT2010-ohjelman loppuraportissa niitä ei ollut koottu.

Tutkimusohjelma	Ohjelman kesto vuosina	Julkaisut	Opinnäytteet (tohtorit)
JYT	5	392	
JYT2	3	117	13 (8)
JYT2001	5	221	9 (7)
KYT	4	102	2 (2)
KYT2010	5	-	-
KYT2014	4	224	47 (6)
KYT2018	4	286	36 (12)



Kuva 1. Suomen ydinjätehuollon kokonaisaikataulu [19].

Tässä yhteydessä relevantein on KYT2018-ohjelman arvio. Arvioinnin mukaan KYT2018-tutkimusohjelmalla on kattava ja syvälinen osaaminen ydinjätehuollosta ja tutkimusohjelman hallinto on toteutettu tehokkaasti. Tutkimusohjelman tukiryhmät ovat luoneet toimivan tutkimusyhteisön ja tutkimusohjelma edistää keskustelua viranomaisten, ydinjätehuollon vastuuorganisaatioiden ja tutkijoiden välillä.

Arvioinnin mukaan KYT2018-tutkimusohjelman tutkimusaiheet on kuitenkin rajattu liian tiukasti vain viranomaisia hyödyttäväksi ja tutkimus on eriytynyt liiaksi muusta Suomessa toteutettavasta ydinjätehuollon tutkimuksesta. Arviointiryhmä näki tarpeelliseksi vahvistaa tutkimusohjelman tieteellistä ohjausta ja kohdistaa tutkimusta tarkemmin vielä avoinna oleviin haasteisiin, kuten loppusijoituslaitoksen käyttöturvallisuus ja onnettomuuksien hallinta. VTT:n Ydinturvallisuustalon infrastruktuurin hyödyntäminen nähtiin hyödylliseksi sekä tutkimuslaitteiden että tutkimusyhteisön näkökulmasta ja samalla talon hyödynnettävyys nähtiin myös lähivuosien haasteeksi.

30 vuotta viranomaisten tukena

Julkiset tutkimusohjelmat alkoivat 1989 ja ne ovat edenneet alkuvaiheen improvisoinnista nykyiseen järjestäytyneeseen toimintaan. Itsenäisten rahoittajien aikana rahoituspäätösten eriaikaisuus aiheutti tyhjäkäyntiä, mutta vuodesta 2004 lähtien, kun ulkopuolinen rahoitus alkoi tulla VYRistä, toiminta on saanut vakiintuneet muodot.

Ydinjätehuollon tutkimuskenttä on erittäin laaja ja kotimaisten resurssien rajallisuus, koskien rahoitusta, tutkimusvälineitä ja asiantuntijoiden määrää, pakottaa älykkääseen yhteistyöhön, koska yksittäisen tutkijan tai tutkimusryhmän suorituskyvyn rajat tulevat nopeasti vastaan. Kansainvälinen yhteistyö on tässä ollut suureksi avuksi.

Tutkimushankkeet ansaitsevat kunnollista ohjausta, mutta tukiryh-

mien käytettävissä olevat resurssit ovat rajallisia ja riippuvat vain tukiryhmäläisen kotiorganisaation suopeudesta. Tutkimusohjelma ei rahoita tukiryhmien (eikä johtoryhmän) kuluja, joten tältä osin kyse on talkootyöstä. Tukiryhmien organisaatioiden sitoutuminen tutkimusohjelmaan on ollut koetuksella, jos tutkimusohjelman ei ole koettu tukevan riittävästi omaa toimintaa. On myös havaittu, että jos tukiryhmäorganisaatio itse päättää olla osallistumatta aktiivisesti hankevalmisteluun, sen näkökantoja ei siinä paljon oteta huomioon.

Julkisista ydinjätehuollon tutkimusohjelmista on alusta alkaen rajattu pois vireillä oleviin luvituksiin suoraan liittyvät tutkimushankkeet. Tämä aiheuttaa sen, että tutkimusohjelman välitön hyöty viranomaisille, ja myös luvanhakijoille, ei ole niin suuri, kuin joskus on toivottu. Tutkimusohjelman tuloksena voidaan kuitenkin pitää, että viranomaiset saavat omalle työnsä tieteellistä tukea. Mikäli hankittu tutkimustieto siirtyi tieteellisesti perusteltuihin viranomaisen määräyksiin ja ohjeisiin, tilanteesta hyötyy pidemmällä tähtäimellä koko ydinjäteyhteisö.

Tarina päättyy eli jatkuu

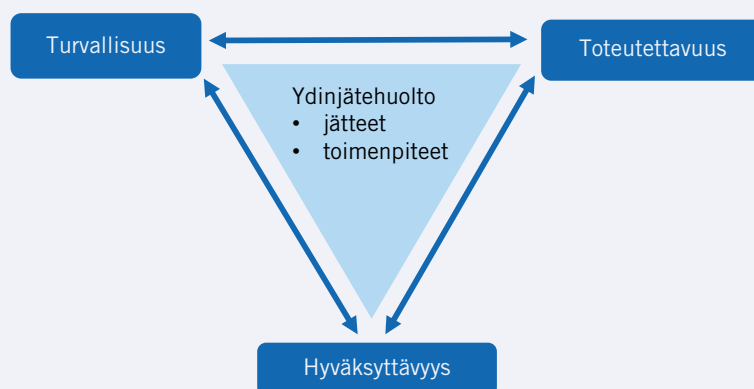
Itsenäisten julkisten ydinjätehuollon tutkimusohjelmien tarina päättyy nyt menossa olevaan KYT2022-ohjelmaan. Sen päättyttyä tarkoitus on nykykaavailujen mukaan yhdistää julkiset ydinjätehuollon ja ydinturvallisuuden tutkimusohjelmat eli KYT- ja SAFIR-ohjelmat. Suomen ydinjätehuollon ohjelma jatkuu kuitenkin vielä noin 100 vuotta (kts. kuva 1). Ydinjätetutkimuksen tarve ei katoa mihinkään, eikä myöskään viranomaisten tarve saada riippumatonta tutkimustietoa.

Suomen ydinjätehuollon ohjelma on edennyt suunnitellusti, mutta maailmalla on esimerkkejä siitä, että eteneminen ei ole mikään luonnonlaki. Useimmiten päätöksenteko hyytyy ydinjätteen loppusijoituslaitokseen liittyviin epäluuloihin, mikä ilmenee vaikeutena löytää lop-

pusijoituspaiikka. Kansainvälinen tilanne oli tiedossa, kun KYT2022-puiteohjelmaa suunniteltiin. Siellä muotoiltiin niin, että etenevä ydinjätehuollon ohjelma edellyttää, että loppusijoituslaitos on turvallinen, toteutettavissa oleva ja hyväksyttävissä oleva (kts. kuva 2). Kuvassa esitetty pelkistetty kytkiö muistuttaa siitä, että kaikki kolme komponenttia ovat välttämättömiä, mikä korostaa teknistieteellisen (turvallisuus, toteutettavuus) ja yhteiskuntatieteellisen (hyväksyttävyys) tutkimuksen yhteistyön tarvetta.

Oleennaista kuvassa on nähdä, että turvallisuus, toteutettavuus ja hyväksyttävyys vuorovaikuttavat keskenään. Näitä kaikkia on syytä ydinjäteyhteisössä analysoida, että ne tulevat asianmukaisesti tarkastelluiksi. Ydinjäteyhteisö on merkittävä toimija, mutta ydinjätehuollon päätöksentekoon tuovat argumenttejaan myös muut tahot.

KYT2010-ohjelman kotisivut löytyvät osoitteesta www.ydinjatetutkimus.fi/. KYT2014-ohjelman kotisivut löytyvät osoitteesta <http://kyt2014.vtt.fi/>. KYT2018-ohjelman kotisivut löytyvät osoitteesta: <http://kyt2018.vtt.fi/>. Siellä ovat myös linkit tutkimusohjelman puiteohjelmaan, kansainväliseen arviointiraporttiin ja loppuraporttiin. Kotisivuilla on myös pääsy seminaarien aineistoihin.



Kuva 2. KYT2022-tutkimusohjelman pääaihepiirit [10].

Viitteet

- [1] Vuori, S. (ed.) 1991, JYT Publicly financed nuclear waste management research programme. Annual report 1990, Helsinki, Ministry of Trade and Industry, Reviews B:101, 97 p. + app. 24 p., ISBN 951-47-4465-9, ISSN 0788-8546
- [2] Vuori, S. (ed.) 1992, JYT Publicly financed nuclear waste management research programme. Annual report 1991, Helsinki, Ministry of Trade and Industry, Reviews B:121, 84 p. + app. 22 p., ISBN 951-47-5895-1, ISSN 0788-8546
- [3] Vuori, S. (ed.) 1993, JYT Publicly financed nuclear waste management research programme. Annual report 1992, Helsinki, Ministry of Trade and Industry, Reviews B:147, 127 p. + app. 21 p., ISBN 951-47-7240-7, ISSN 0788-8546
- [4] Vuori, S. (ed.) 1997, Publicly Administrated Nuclear Waste Management Research Programme 1994-1996. Final Report, Ministry of Trade and Industry Finland, Studies and Reports 22/1997, 204 p.
- [5] Rasilainen, K. (ed.) 2002, Nuclear Waste Management in Finland. Final report of Public Sector's Research Programme JYT2001 (1997-2001), Ministry of Trade and Industry Finland, Studies and Reports 15/2002, 204 p. 258 p.
- [6] Rasilainen, K. (ed.) 2006, The Finnish Research Programme on Nuclear Waste Management (KYT) 2002-2005. Final Report. VTT Research Notes 2337, 246 p. + app. 45 p. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2006/T2337.pdf>
- [7] TEM, 2011. KYT2010, Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma 2006-2010. Loppuraportti, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja ilmasto 22/2011, 138 s., <https://tem.fi/documents/1410877/3346190/KYT2010+Kansallinen+ydinj%C3%A4tehuollon+tutkimusohjelma+2006-2010+07062011.pdf>
- [8] TEM, 2015, KYT2014. Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma 2011-2014. Loppuraportti, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja ilmasto 59/2015, 115 s., http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/74970/TEMjul_59_2015_web_19112015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [9] TEM, 2019, KYT2018. Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma 2015-2018. Loppuraportti. Työ -ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia 2019:20 165 s., http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161509/TEM_20_19_KYT2018_Kansallinen_ydinjatehuollon_tutkimusohjelma_20152018_Loppuraportti.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] TEM, 2018, Kansallinen ydinjätehuollon tutkimusohjelma KYT2022. Puiteohjelma tutkimuskaudelle 2019-2022. Työ -ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia 24/2018, 56 s., <http://kyt2018.vtt.fi/hankehaku2019/Puiteohjelma%20KYT2022.pdf>
- [11] Rasilainen, K. & Vuori, S. 1999, Käytetyn ydinpolttoaineen huolto. Suomalaisen suunnitelman pääpiirteet, VTT Tiedotteita 1953, 50 s. + liitt. 7 s.
- [12] Rasilainen, K., Suolainen, V. & Vuori, S. 2000, Käytetyn ydinpolttoaineen huolto. Turvallisuuden arvioinnin perusteet, VTT Tiedotteita 2033, 57 s.
- [13] Rasilainen, K., Suolainen, V. & Vuori, S. 2001, Käytetyn ydinpolttoaineen huolto. Turvallisuusanalyseissa laskettujen säteilyvaikutusten havainnollistaminen, VTT Tiedotteita 2080, 58 s., liitt. 5 s.
- [14] NWTRB, 1993, Sixth report to the U.S. Congress and the U.S. Secretary of Energy from the Nuclear Waste Technical Review Board, Washington, D.C. s.39-58, <https://www.nwtrb.gov/docs/default-source/reports/6report.pdf?sfvrsn=7>
- [15] KTM, 1994, Suomen ydinjätehuolto-ohjelman arviointi. Jätehuollon tekninen tarkastus- ja arviointiohjelma (WATRP), Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, Katsauksia B:180, 46 s.

- [16] Apted, M., Papp, T. & Salomaa, R. 2008, KYT2010 Review Report. Publications of the Ministry of Employment and the Economy, Energy and Climate 2/2008, 26 p. http://kyt2014.vtt.fi/docs/kyt2010_review_temjul_2_2008_energia_ilmasto.pdf
- [17] Apted, M., Karlsson, F. & Salomaa, R. 2013, KYT2014 Review Report, Publications of the Ministry of Employment and the Economy, Energy and the climate 10/2013, 29 p. http://kyt2014.vtt.fi/docs/TEM_report_10_2013_final.pdf
- [18] Pellegrini, D., Simic, E. & Salomaa, R. 2017, KYT2018 Review Report, Ministry of Economic Affairs and Employment, MEAE guidelines and other publications 9/2017, 29 p. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/160365/TEM_guides_9_2017_KYT2018_Intermediate_Review_Report_11122017.pdf
- [19] TEM, 2015, Käytetyn ydinpolttoaineen ja muun radioaktiivisen jätteen huolto Suomessa - Euroopan unionin neuvoston direktiivin 2011/70/Euratom 12 artiklan mukainen kansallinen ohjelma, 31 s., <https://www.stuk.fi/documents/12547/554501/National+Programme+072015docx+14072015+lopullinen.pdf/80f849a5-2d56-42e7-9afb-a49948d281c1>

Kirjoittajat



TKT Kari Rasilainen
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Johtava tutkija, KYT-, KYT2014- ja
KYT2018-tutkimusohjelmien koordinaattori
kari.rasilainen@vtt.fi



TKT Seppo Vuori
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Eläkkeellä, JYT-, JYT2- ja JYT2001
-tutkimusohjelmien koordinaattori

Vierailulla fuusioyrityksissä Kaliforniassa

Tomas Lindén
Fysiikan tutkimuslaitos

Kaliforniassa on muutamia yksityisiä yrityksiä, joiden toiminta liittyy fuusion. Kävin Kaliforniassa maaliskuuhuhtikuun vaihteessa ja tapasin edustajia Energy Matter Conversion Corporation, Lockheed Martin ja TAE Technologies -yrityksistä. Seuraavassa kerron vierailuista ja yrityksiä uusimmista tuloksista.

There are a few private companies in California working on topics related to fusion. I visited California at the turn of the month in March-April and met representatives from the companies Energy Matter Conversion Corporation, Lockheed Martin and TAE Technologies. In the following I will discuss the visits and the most recent results of the companies.

Osallistuin maaliskuun lopussa HEPiX-työpajaan La Jollassa, San Diegon pohjoispuolella Kaliforniassa USA:ssa (www.hepix.org). HEPiX järjestettiin University of California San Diegon (UCSD) San Diego Supercomputing Center (SDSC) superlaskentakeskuksessa. Jäin HEPiX-kokouksen jälkeisellä viikolla muutamaksi päiväksi Kaliforniaan ja tapasin matkan aikana edustajia kolmesta eri fuusiota kehittävästä yrityksestä.

EMC2

Maaliskuussa tapasin kahteen otteeseen Jaeyoung Parkin Energy Matter Conversion Corporation (EMC2) -yhtiöstä La Jollassa. EMC2 on rakentanut yhdeksäntoista Polywell-laitetta tutkimus- ja kehitystyötä varten. Suurin ja monimutkaisin heidän rakentamansa Polywell on WB-8. Ensimmäisellä tapaamiskerralla Park vei minut katsomaan kuvassa 1 näkyvää WB-8 laitetta.

Näin myös muita heidän rakentamiaan pienempiä Polywell-laitteita, kuten laitteen jossa osoitettiin että elektronien koossapito paranee merkittävästi, jos plasman paine saadaan nostettua riittävän korkeaksi. Plasman paineen ja magneettisen paineen suhdetta kutsutaan betaksi.

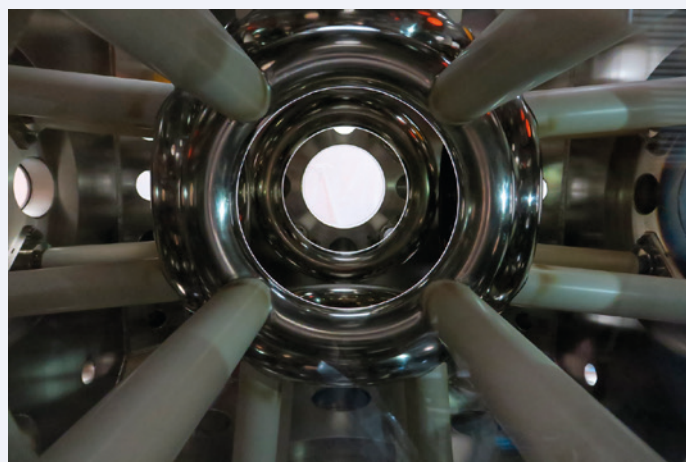
Viime vuosina EMC2 on kehittänyt yhteistyökumppaniensa kanssa ECsim-ohjelmistoa, jolla Polywell-konseptia ja muita magneettisia cusp-laitteita on tutkittu [1]. Plasman sähkönjohtavuus on erittäin hyvä, ja jos se altistetaan ulkoisille magneetikentille, niin silloin plasmaan indusoituu virtoja, jotka pyrkivät hävittämään ulkoisen magneetikentän, eli plasmalla on diamagneettinen ominaisuus (kuva 2).

Plasman ja magneetikentän rajapintoja esiintyy magneettisen koossapidon fuusiolaitteissa, mutta myös maan magnetosfäärissa ja aurin-gossa. Rajapinnan paksuutta ja pintavirtojen yksityiskohtia ei tunneta kovin hyvin, koska yleensä plasmasimulaatioissa simuloidaan vain ionien liikettä ja elektroneja käsitellään jatkuvana nesteenä. ECsim-ohjelmisto sallii yksittäisten elektronien liikkeen simuloimisen ja sen lisäksi hiukkasten törmäyksissä ohjelmisto toteuttaa energian säilymisen. ECsim-simulaatioiden perusteella rajakerrokseen muodostuu elektronien liikkeestä sähkökenttä ja sen paksuus on elektronien gyrosäteen luokkaa.

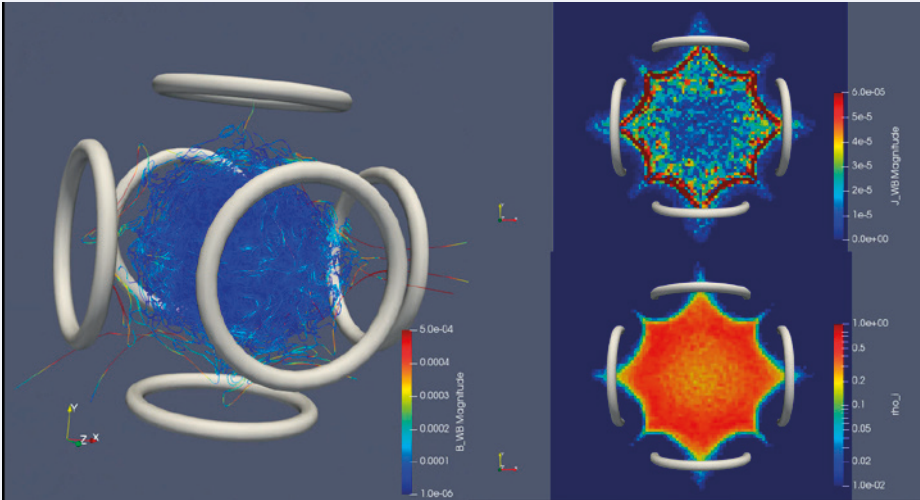
Park on myös käyttänyt ECsim-ohjelmistoa vertailemaan Polywellien sekä myös muiden aikaisempien magneettisten peilikokeiden dataa uusiin simulaatioihin. Avaruustieteen alalta on paljon kokeellista tietoa, jota voisi verrata näihin simulaatioihin. Näitä tuloksia voisi soveltaa myös muihin fuusiolaitteisiin.

Polywell on magneettinen cusp-laite, eli siinä on avoimia kenttäviivoja. Cusp-laitteiden suurin haaste on hiukkashäviöt avoimien kenttäviivojen kautta. Polywell on monipuolinen laite ja käsitys siitä miten sitä kannattaa käyttää on muuttunut tutkimuksen edetessä.

EMC2:n uusimmassa patenttihakemuksessa esitetään, miten Polywell toimisi energiaa tuottavana fuusioreaktorina tai isotooppigeneraattorina ilman suurenergisen elektronisuihkun aikaansaamaa potentiaaliuoppaa, jotta tarvittavaa lämmitystehoa voisi pienentää. Uusin



Kuva 1. Suurin EMC2:n rakentama Polywell on WB-8. Kuvassa näkyy tyhjiökammion sisällä olevat metallikuoriset magneetit ja magneettien tukivarret (kuva: Tomas Lindén).



Kuva 2. Polywell-simulaatio suurella betan arvolla. Kuvissa näkyy magneettikenttä, virtatiheys ja ionien hiukkastiheys (kuva: EMC2).

ajatus käyttää Polywellia on hyödyntää avoimia kenttäviivoja suurenergisien ionisuihkun ampumiseksi tiheään plasmaan, joka on aikaansaatu yhdellä tai useammalla plasmageneraattorilla [2]. Esimerkiksi tokamakissa, Lockheed Martinin CFR-laitteessa, FRC:ssa ja muissa suljettuja kenttäviivoja käytävissä laitteissa ioneja ei voi suoraan ampua plasmaan, vaan on käytettävä neutraaleja hiukkassuihkuja, mikä rajoittaa hiukkassuihkun intensiteettiä ja hyötysuhdetta.

Patenttijulkaisussa on esimerkki deuterium-tritium-fuusiolla 90 MW tuottavasta Polywell-laitteesta, jonka magneettisen cusp-systeemin säde olisi 2,5 m, magneettikenttä 6 T, ionisuihkun teho 5,5 MW ja Q-arvo noin 16. EMC2 ei ole voinut rahoituksen puutteen takia raken-



Kuva 3. TAE Technologies -yhtiöllä on 180 työntekijää. Kuvassa he ovat noin 30 m pitkän C-2W (Norman) koelaitteiston päädyn edessä (kuva: TAE Technologies).

taa uusimpien tutkimustuloksensa mukaista laitetta, jolla voitaisiin kokeellisesti tutkia voiko Polywell skaalautua energiantuotantoon vai ei. Tällä tavalla käytettynä Polywell muistuttaa Lockheed Martinin CFR-konseptia, sillä siinäkin muodostetaan $\beta=1$ plasma, jota lämmitetään ulkoisilla hiukkassuihkuilla.

TAE Technologies

Huhtikuun ensimmäisenä päivänä vuokrausin auton La Jollassa ja ajoin 112 km matkan Irvinen kaupunkiin, jonka lähetyillää TAE Technologies sijaitsee. Vuokra-auton navigaattorin virransyöttö osoittautui rikkinäiseksi, joten käytin navigoimiseen Googlen karttoja, joita olin tulostanut etukäteen paperille. Moottoriteillä oli yhteen suuntaan kais-toja kuudesta-kahekseen kappaletta, joten ajaminen vaati hyvää keskittymistä Suomen kapeampiin ja vähemmän ruuhkaisiin teihin tottuneelta ajajalta. Liikenneuhkien ja on-

nettomuuksien takia matka-aika oli lähes kaksinkertainen verrattuna siihen, mitä etäisyydestä olisi voinut arvioida.

TAE Technologies sijaitsee Foothill Ranchissa teollisuusalueella isossa valkoisessa anonyymissa hallissa, jonka seinässä on vain pieni logo ja osoitenumero. Ovikellon näppäimistössä ei ole minkäänlaisia tekstejä eikä lasiovellakaan ole yrityksen nimeä tai mitään muitakaan tekstejä tai logoa, joten hetken mietin että olenko oikeassa paikassa. He eivät ilmeisesti halua kutsumattomia vieraita, koska heidän WWW-sivuiltaan ei löydy yrityksen osoitetta.

Sihteeriltä sain neljäsviuisen, kolmivuotisen vaihtolopimuksen alkikirjoitettavaksi. Sopimus kielsi mm. valokuvauksen TAE:n tiloissa.

Isäntäni Hiroshi Gota otti minut vastaan ja katsoimme yrityksen esittelyvideon ja puhuimme hänen työhuoneessaan.

TAE:n nykyinen laitteisto C2-W (Norman) on heidän viidettä sukupolveaan ja maailman suurin FRC-koelaitteisto (kuva 3). Gota vei minut C2-W:n kontrollihuoneeseen ja seurassimme siellä kun C2-W:hen ammuttiin kaksi plasmoidia, jotka törmäsivät laitteen keskellä muodostaen yhden kuumemman FRC-plasmoidin. Pulssista kuuluva ääni kantautui selvästi kontrollihuoneeseen, mutta se ei ollut kuitenkaan mikään pamaus. C2-W:lla plasmapulseja voidaan ajaa jopa kahdeksan minuutin väliajoin. Kiersimme koehallia ja katsoimme Normanin keskiosaa, johon neutraalisuihkut ammutaan. Näimme myös TAE:n ensimmäisen koelaitteiston, jolla he aloittivat kaksikymmentä vuotta sitten.

Norman on nyt toisessa vaiheessaan ja sen plasmaa voidaan

lämmittää 21 MW:n neutraalisuhkuteholla kahdeksan injektorin avulla. Suihkujen energia on 15 - 40 keV. Tyhjiö pumpataan noin 10⁻¹⁰ torr:n paineeseen ja diverttoripumpujen kapasiteetti on 2 MI/s. Teholähteiden energia riittää 30 ms pituisiin pulsseihin, mutta tähän asti plasmoidien eliniäksi on saatu noin 9 ms. Käytetty magneettikenttä on 0,1 - 0,3 T.

FRC-plasmoidi on halkaisijaltaan 40 cm ja pituudeltaan 3 m. Tähän mennessä TAE on saavuttanut $3 \cdot 10^{19} / \text{m}^3$ tiheyden ja ionien lämpötilan 1 - 2 keV sekä elektronien lämpötilan 0,2 - 1 keV [3]. TAE on ottamassa käyttöön aktiivista takaisinkytkentäjärjestelmää plasmoidin stabilisoimiseksi. TAE:n tavoite Norman-kokeilla on tutkia divertteita, plasman rajapintaa, plasman lämmitystä ja hallintaa sekä pyrkiä yhdenmukaistamaan teorian, kokeiden ja simulatioiden tuloksia.

TAE suunnittelee jo seuraavaa Copernicus-laitettaan, josta tulee yli 30 m pitkä. Sillä on tarkoitus tutkia plasmaa reaktoriolosuhteissa eli tavoite on saavuttaa yli 10 keV plasman lämpötila. Arvio Copernicus-kokeen hinnasta on 200 MUSD. Tähän mennessä TAE on kerännyt yhteensä 600 MUSD perustamisestaan lähtien.

TAE Life Sciences on spin-off yritys, jossa käytetään TAE:n neutraalisuihkuteknologiaa boorineutronikaappaushoidossa (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT). TAE yrittää kaupallistaa sen käytössä olevaa teknologiaa myös kuljetussektorin käyttöön. Copernicus tulee olemaan niin iso että se ei mahdu Normanin rakennukseen, mutta sijoituspäätöstä ei ole tehty. Kun Normanin tavoitteet on täytetty, on tarkoitus antaa myös muille mahdollisuus tehdä kokeita sillä.

Kiertokäynnin jälkeen juttelimme hetken Gotan toimistossa ja sen jälkeen palasin Irvineen. Paluumatkalla vaihdoin vuokra-autoa ja sain siten navigaattorin toimimaan.

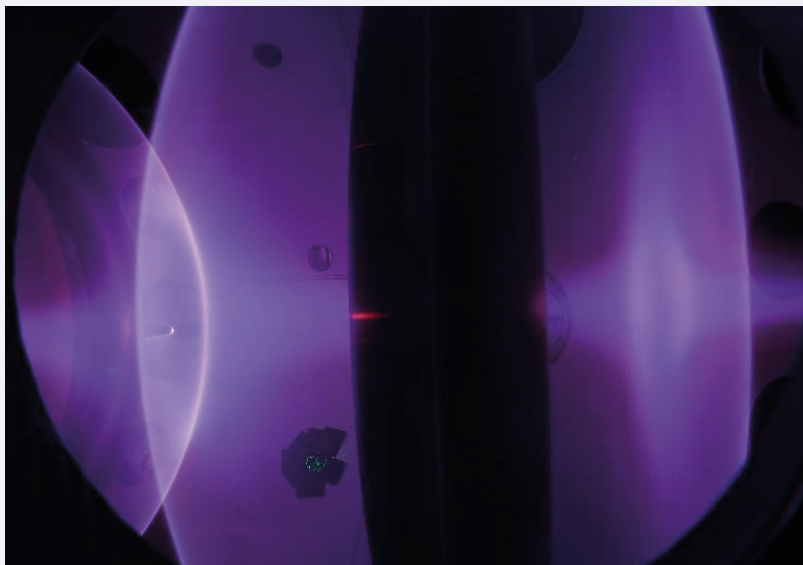
Lockheed Martin CFR

Seuraavana päivänä ajoin Irvinesta Palmdalen kaupunkiin, jossa Lockheed Martinin fuusioryhmä sijaitsee. Interstate 5 -moottoritie oli jo aamulla niin jumissa, että jouduin ottamaan hieman pidemmän 209 km pitkuisen reitin, joka sekini oli aika ruuhkainen ja hidas. Lockheed Martin on sotilasteknologiaa valmistava yritys, joten oli alusta alkaen selvää, että en pääse turvallisuussyistä Tom McGuiren fuusiolaboratoriota katsomaan ja tapasimme siksi Palmdaleessa ravintolassa.

Nykyään Lockheed Martinin toimenkuvaan kuuluu myös energiateknologia, mutta on kuitenkin yllättävää, että Lockheed Martin kehittää fuusiota. Lockheed Martinin Compact Fusion Reactor (CFR) -hankkeen alullepanija oli Charles Chase, joka haaveili lentokoneiden kantaman parantamisesta. Lentokoneiden kantamaa rajoittaa kemiallinen polttoaine, joten Chase ajatteli, että merkittävä parannus voitaisiin saavuttaa vain fuusioenergian avulla. Hän perusti siksi fuusiota kehittävän ryhmän.

Heidän ensimmäiset ideansa eivät toimineet toivotulla tavalla, joten he muuttivat konseptiaan. Tom McGuire lainasi ideoita mm. Polywellista, FRC-kokeista ja fuusoreista ja loi siten CFR-konseptin. Hänen mukaansa CFR:n etu on se, että sen rakenne on lineaarinen ja siksi helpompi rakentaa ja sylinterisymmetrian takia myös yksinkertaisempi.

LM aloitti fuusioprojektinsa paljon myöhemmin kuin useat muut fuusiota kehittävät yritykset, ja he eivät ole siksi vielä edenneet yhtä pitkälle. Koska LM on iso yritys, niin heillä on hyvät mahdollisuudet rahoittaa fuusioprojektia ilman ulkopuolista rahoitusta niin kauan, kun tulokset vaikuttavat lupaavilta.

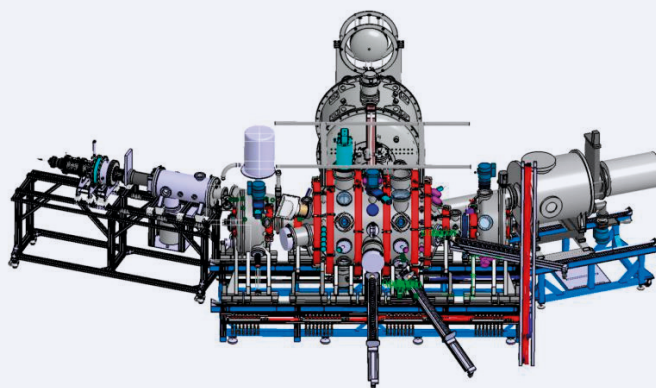


Kuva 4. Lockheed Martin T4B-kokeen injektorin plasmapurkaus (kuva: Lockheed Martin).

Ensimmäinen julkisuuteen tuotu koe T4 on edelleen testikäytössä. Lockheed Martinin nykyinen koelaitteisto on nimeltään T4B (kuva 4). Sen tilavuus on 0,2 m³ ja siinä on 250 kW RF-tehoa ja 250 kW neutraalisuihkutehoa plasman lämmittämiseksi. McGuire on raportoinut vuodesta 2015 alkaen vuosittain CFR-hankkeesta APS:n plasmafysiikan konferensseissa, joten tietoa projektin etenemisestä on saatavilla.

T4B:llä saavutettu plasman tiheys on noin $6 \cdot 10^{19} / \text{m}^3$ [4]. CFR-hankkeessa työskentelee noin 25 - 30 henkilöä. Osa magneeteista ja niiden tukivarsista on plasman sisällä, joten häviöiden vähentäminen varsiin on tärkeä ongelma, jota LM tutkii ja johon haetaan ratkaisua magneettisella suojuksella.

Seuraava koe T5 on rakenteilla uuteen laboratoriotilaan ja kokeet aloitetaan sillä tämän vuoden aikana (kuva 5). T4B- ja T5-kokeet tuovat siis olemaan eri tiloissa, joten tämä mahdollistaa kokeiden teon samaan aikaan kahdella laitteella. T5:n tilavuus on 0,3 m³ ja neutraalisuihkujen teho tulee olemaan 3-4 MW. Kokeen tavoitteena on mitata plasman häviöitä ja epästabiilisuuksia, tutkia plasman laajenemista paineen kasvaessa sekä demonstroida tiheän plasman injektointia, neutraalivirtojen kaappausta ja koossapitoa.



Kuva 5. Lockheed Martinin rakenteilla oleva T5-koe (kuva: Lockheed Martin).

LM kehittää korkean lämpötilan suprajohteita (HTS) fuusiokäyttöön kuten Commonwealth Fusion Systems ja Tokamak Energy. Suprajohtavia magneetteja on tarkoitus käyttää seuraavassa T6-laitteessa. T7-kokeella on tarkoitus tutkia deuterium-deuterium-reaktoriolosuhteita täydessä koossa ja sen jälkeen T8-kokeen tavoitteena on demonstroida palavaa deuterium-tritium-plasmaa sekä tutkia alfa-hiukkasten koossapitoa ja stabiiliisuutta. TX-kokeessa on tarkoitus tehdä reaktorikehitystyötä.

Tapaamisen lopuksi McGuire vinkkasi minulle komeasta kaliforniantuliunikkojen kukinnasta ja otin vinkistä vaarin ja suuntaisin Antelope Valleyyn luonnonsuojelualueelle ihailemaan kaunista luonnonilmiötä (kuva 6). Lopuksi ajoin Los Angelesiin, josta lensin takaisin Suomeen.

Oli hienoa päästä näkemään mielenkiintoisia fuusiokoelaitteita ja tapaamaan niitä tekeviä plasmafysikoita. EMC2, TAE ja LM ovat kaikki edistyneet vajaan parin vuoden aikana fuusiokemistyönsä. Yksityisrahoitteinen fuusiotutkimus näyttää vilkastuvan, koska näitä yrityksiä on jo yli kaksikymmentä ja alalle tulee lisää rahoitusta. Rahoitus ja henkilöresurssit ovat kuitenkin yhä kehityksen suurimmat pullonkaulat. Tämä ala on kiinnostavassa vaiheessa ja sen kehitystä on mielenkiintoista seurata.



Kuva 6. Kalifornian osavaltion tunnuskasvi on lailla rauhoitettu kaliforniantuliunikko. Sen kukinta värjäsi Palmdalen seudulla olevan Antelope Valleyyn luonnonsuojelualueen kukkulat keltaisiksi ja oranssiksi (kuva: Tomas Lindén).

Lisää samasta aiheesta: O. Asunta ja T. Lindén, Yksityisrahoitteinen fuusiotutkimus, *ATS Ydintekniikka*, 4/2017, s. 20–24.

Viitteet

- [1] J. Park, G. Lapenta, D. Gonzalez-Herrero ja N. Krall, Discovery of an Electron Gyroradius Scale Current Layer Its Relevance to Magnetic Fusion Energy, Earth Magnetosphere and Sunspots, <https://arxiv.org/abs/1901.08041>.
- [2] J. Park ja N. Krall, Generating Nuclear Fusion Reactions with the Use of Ion Beam Injection in High Pressure Magnetic Cusp Devices, WIPO Patent Application. WO/2018/208953, www.freepatentsonline.com/WO2018208953A1.html
- [3] M. Binderbauer, Progress and Next Steps at TAE, 39th FPA Annual Meeting, December 5, 2018, http://firefusionpower.org/FPA18_TAE_Binderbauer.pdf.
- [4] T. McGuire, Compact Fusion Reactor – CFR, 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, November 5-9, 2018; Portland, Oregon.

Kirjoittaja



FT Tomas Lindén
Projektipäällikkö
Fysiikan tutkimuslaitos
Tomas.Linden@Helsinki.fi

ELSA-projekti: Loviisan ydinvoimalaitoksen automaatiouudistus aikataulussa ja budjetissa

Mika Heikkilä, Miikka Jokelainen, Petteri Lehtonen, Antti Rantakaulio, Maria Vuokko
Fortum Power and Heat Oy

Loviisan ydinvoimalaitoksen kriittisimmät automaatiojärjestelmät uusittiin kahdessa perättäisessä projektissa. Viimeisimmässä, ELSA-projektissa, sovellettiin edellisten projektien oppeja sekä muun muassa ADLAS[®] lisensointimenettelyä ja Apros[®]-simulaattoreita tehokkaasti, tuloksena kolmen uudistusvaiheen käyttöönotto perättäisinä vuosina 2016, 2017 ja 2018 suunnitellussa aikataulussa ja budjetissa, normaalien vuosihuoltopituuksien puitteissa.

The most critical Instrumentation & Control systems of Loviisa NPP were renewed in two consecutive projects. In the latest project, called ELSA, the lessons were learnt from the previous projects together with e.g. ADLAS[®] licensing methodology and Apros[®] simulators were utilized effectively, resulting in commissioning of three renewal stages in consecutive years 2016, 2017 and 2018 in planned schedule and budget, within regular outage durations.

Loviisan kaksi VVER-440 -laitosyksikköä otettiin käyttöön vuosina 1977 ja 1980. Automaatiojärjestelmien sekä niiden varaosien tilaa alettiin kartoittaa 20 vuoden käytön jälkeen, kun alkuperäisten komponenttien ja varaosien valmistus oli loppumassa. 2000-luvun alussa päätettiin käynnistää automaatiouudistusprojektiin valmistelu laitoksen varaosatilanteen, korkean käytettävyyden, lisensoitavuuden sekä osaavan henkilöstön takaamiseksi laitoksen käyttöänsä loppuun saakka. Digitaaliset automaation laitealustat valittiin kaikkiin turvallisuusluokiteltuihin sekä käyttöautomaation automaatiojärjestelmiin. Näiden lisäksi suunniteltiin kattavat analogista ja diversia digitaalista automaatioteknologiaa käyttävät varmentavat järjestelmät.

Automaatiouudistusprojektit

Ensimmäisen koko laitoksen kattavan automaatiouudistusprojektin (LARA) sopimus allekirjoitettiin Framatome ja Siemens konsortion kanssa 2004. Alusta lähtien oli nähtävissä, että koko laitosaunomaation laajuus yhdessä lukuisten turvallisuus- ja käytettävyydenparannusten kanssa toi paljon monimutkaisuutta. Suuri laajuus pilkkottiin neljään uudistusvaiheeseen. Tämä puolestaan loi tarpeen lukuisille väliaikaisratkaisuille uusien järjestelmien kytkeytyessä ensin vanhoihin ja tulevaisu vaiheissa uusiin järjestelmiin. Suunnittelun viivästyessä toistuvasti jäädytetty projektillaajuus jouduttiin avaamaan käyvän laitoksen jatkuvasti ilmentyvien pienempien uudistus- ja parannustarpeiden johdosta. Tämä puolestaan johti uusiin viiveisiin, ja lopulta uudelleenarviointiin, oliko projektin alkuperäiset tavoitteet mahdollista saavuttaa ennustettavassa aikataulussa ja kohtuullisilla käyttöönottovuosihuoltojen pituuksilla.

Koska ennustettavuus projektin toteutuksesta oli menetetty, käynnistettiin valmistelut uudesta projektista. Jo aikaisessa vaiheessa selvisi, että tietyt strategiset muutokset projektillaajuuteen sekä toimintatapo-

hin on tehtävä projektin toteutettavuuden ja hallittavuuden varmistamiseksi. Uudessa ELSA automaatiouudistusprojektissa toteutuslaajuus keskitettiin strategisesti tärkeimpiin automaatiojärjestelmiin ja rajoitettiin kriittisimpiin turvallisuusparannuksiin. Uudistuslaajuuteen liittyvät tarkat toimitusrajat sekä vastuukysymykset tarkennettiin yhteistyössä toimittajaehdokkaiden kanssa.

Uudistuslaajuudelle sekä sovellettavalle teknologialle haettiin esi-projektivaiheessa hyväksyntä viranomaiselta laajennetulla periaatesuunnitelmalla kattaen mm. alustavat laatu- ja kelpoistussuunnitelmat, arkkitehtuurikuvaukset, järjestelmämäärittelyt, komponenttien ja järjestelmälustojen kuvaukset sekä suunnittelijan ja luvanhaltijan turvallisuusarviot. Periaatesuunnitelma tehtiin kahden toimittajaehdokkaan kanssa, ja teknisesti, taloudellisesti ja organisatorisesti parhaiten soveltuva valittiin.

Sopimus Rolls-Royce Civil Nuclearin kanssa allekirjoitettiin 2014. Projektin kesto suunniteltiin mahdollisimman lyhyeksi projektillaajuuteen väistämättä ajan myötä tulevien muutostarpeiden minimoimiseksi ja siten konfiguraation hallittavana pitämiseksi. Uudistus suunniteltiin tehtäväksi kolmessa vaiheessa, mutta erityisen haastavaksi suunnitelman teki jokaisen vaiheen käyttöönotto perättäisinä vuosina 2016, 2017 ja 2018, ja vieläpä molemmilla laitosyksiköillä samana vuonna. Vuosihuoltojen välillä oli vain yksi viikko taukoa.

Uusi suppeampi uudistuslaajuus tarkoitti myös erillisten uudistus- ja varaosatarpeiden tehokkaampaa seurantaa ja tunnistamista käyttöön jäävien järjestelmien osalta. Tätä varten perustettiin automaatiouudistusprojektien ohjelmajohtamisen menettely. Sen jatkokehityksenä muotoutui ELSA-R ohjelma yhteisine ohjelmatoimistoineen ja keskitettyine ohjelmanhallinnan rutiineineen. Näin hallinnoitiin ELSA-projektin uudistuslaajuuteen keskeisesti liittyvien projektien toteuttamista, joiden toteuttaminen aikataulussaan oli keskeistä ELSA-projektin onnistumiselle.

ELSA-projekti	Rolls-Royce					
Uudet järjestelmät 9	Uudet automaatiokaapit 96					
Suunnitteluaineistot 4400	Valvomo- ja kenttäliitynnät 2088					
Uutta kaapelointia 170 km	Mittapisteet 29230	fortum	Henkilötyövuosia 207	Tarkastusraportit 2100	Suunnitteluaineistot 950	Muutetut vanhat automaatiokaapit 100

Kuva 1. Tunnuslukuja ELSA-projektista.

Pääpaino vaatimuksissa projektin alusta alkaen

Fortumin kehittämää ADLAS® menetelmää hyödynnettiin projektissa alusta alkaen määrittelemään laitos- ja toiminnallisen tason vaatimukset uusille automaatiojärjestelmille. Menetelmän mukaisesti vaatimuksia määritettiin hierarkkisesti laitostasolta lähtien. Tätä varten laitoksen onnettomuuden hallinnan periaatteet ja toiminnallinen arkkitehtuuri määritettiin menetelmän mukaisessa formaatissa. Toiminnallisessa arkkitehtuurissa kuvattiin kaikki laitoksen turvallisuustoiminnot, mukaan lukien olemassa olevat sekä uusittavat toiminnot. Tällöin turvallisuustoiminoille pystyttiin määrittämään vaatimuksia liittyen moninkertaisuus-, erilaisuus- sekä erotteluperiaatteisiin.

Koko uudistuslaajuudelle määritettiin automaatioarkkitehtuuri, jossa kuvattiin turvallisuustoimintojen jaottelu uusille järjestelmille sekä uusien järjestelmien keskinäiset rajapinnat sekä rajapinnat vanhoihin järjestelmiin. Tämän pohjalta pystyttiin määrittelemään ja jyvittämään automaatioarkkitehtuurille sekä sitä kautta eteenpäin uusille automaatiojärjestelmille kohdistuvat turvallisuusvaatimukset. Tätä arkkitehtuuria tarkennettiin vaihekohtaisesti, jolloin ei ollut tarvetta palata laitos- ja arkkitehtuurikysymyksiin järjestelmäsuunnitteluvaiheessa.

Uusien automaatiojärjestelmien toimivuus osana laitosta verifioitiin vaiheittain alkaen järjestelmätason analyyseistä laitostason analyyseihin. V&V-menettelyjen aluksi analyysilaajuus määriteltiin analyysikonseptilla, jossa määritettiin mitä eri analyyseja tehdään ja mikä niiden tarkoitus on. Erilaisiin analyyseihin kuului muun muassa arkkitehtuurin rajapinta-analyytit sekä järjestelmien yksittäis- ja yhteisvika-analyytit. Projektin yhteydessä laitoksen turvallisuusanalyysit uusittiin täysin Apros®-ohjelmistolla. Tällä osoitettiin, että uudet automaatiojärjestelmät toimivat suunnitellusti muiden järjestelmien rinnalla ja laitos saadaan siirrettyä turvalliseen tilaan mahdollisissa häiriö- ja onnettomuustilanteissa.

Menetelmän käyttö yhdessä projektin muiden käytäntöjen kanssa edesauttoi että projekti eteni suunnitellusti ja niin sanotut suuret asiat ratkaistiin mahdollisimman alkuvaiheessa ja järjestelmäsuunnitteluvaiheessa ei ollut tarvetta palata yltäosan vaatimuksiin.

Apros®-simulaattorien laaja-alainen soveltaminen

Apros®-simulaatio-ohjelmistoa hyödynnettiin ELSA-projektissa laaja-alaisesti. Alkuvaiheessa uusi toiminnallinen arkkitehtuuri validoitiin päivittämällä Loviisan voimalaitoksen Apros-analyysimalli ja turvallisuusanalyysit. Aikaisilla analyyseillä osoitettiin laitoksen ydinturvallisuuden säilyminen ja parantaminen. Perussuunnitteluvaiheessa mallinnettujen automaatiologiikoiden toiminta validoitiin reaaliaikaisilla dynaamisilla testeillä yhteistyössä lisensioitujen operaattorien kanssa. Dynaamiset testit toistettiin ja reaktorin uusi tehonsäätäjä viritettiin Rolls-Roycen toimittamilla automaation emulaatioilla ennen kaappien valmistusta. Automaatiotestauksen lisäksi simulaattoria hyödynnettiin käytön ohjeiden ja valvomokonseptin validointiin sekä operaattorien koulutukseen.

Apros-malli yhdistettiin laitokselle toimitettavaan automaatiokaappeihin ELSA-projektin testikentällä. Emuloidut automaatiot korvattiin valmistuksen edetessä yksi kerrallaan oikeilla automaatiokaapeilla ja siten dynaaminen testaus voitiin aloittaa heti ensimmäisen järjestelmän valmistuessa. Apros-pohjaisen testaustavan joustava hyödyntäminen mahdollisti järjestelmien välisten kytkentöjen testauksen aikaisessa vaiheessa sekä järjestelmien käyttäytymisen tarkastamisen eri laitostiloissa. Testaustapa myös validoi emulaatioiden toiminnan, vähensi testikentällä suoritettavien testien määrää ja nopeutti testausta kokonaisuudessaan noin seitsemän kuukautta.

STUKen pyynnöstä Apros-pohjaisella testikentällä ajettiin niin sanottuja ”beyond design basis” testejä. Testitapauksena ajettiin muun muassa samanaikaisesti tapahtuva lähetinhuoneen menetys tulipalon seurauksena ja toisen redundanssin automaatiokaappien sähkönmenetys. Ylimääräiset testit validoivat diverssien järjestelmien toiminnan sekä arkkitehtuurin ja syvyysuuntaisen puolustuksen toiminnan monimutkaisissa onnettomuustapauksissa.

Valvomosuunnittelu

Fortum on suunnitellut ja kehittänyt Loviisan voimalaitosten valvomoita ja käyttöliittymiä vuosikymmenten ajan. ELSA-projektissa Fortumin vastuulla oli valvomotilojen suunnittelu, käyttöliittymien pe-

russuunnittelu sekä ergonomian arviointi. Automaatiotoimittaja vastasi käyttöliittymien yksityiskohtaisesta suunnittelusta, toteutuksesta ja käyttöönotosta. Tehdyt valvomomuutokset perustuivat automaatiojärjestelmissä tehtyihin uudistuksiin ja vaiheistuksiin. Lisäksi toimintaa onnettomuustilanteissa kehitettiin tekemällä ohjepäivityksiä sekä vahvistamalla turvallisuusluokkaperusteista erottelua myös käyttöliittymissä. Valvomosuunnittelun onnistuneen lopputuloksen varmisti Loviisan operaattoreiden osallistuminen suunnitteluun täysipäiväisesti usean vuoden ajan. Yhteistyötä tehtiin myös turvallisuus-, ohje- ja automaatiosuunnittelun sekä simulaattori- ja koulutus-asiantuntijoiden kanssa.

Vanhojen laitosten valvomoiden haasteena on useat erilaiset järjestelmät, joiden käyttöliittymien esitystavat ja toiminnot poikkeavat toisistaan. Myös ELSA-projektissa valvomosuunnittelun lähtökohdaksi oli eri-ikäisiä langoitettuja ja näyttöpohjaisia käyttöliittymiä sisältävä hybridivalvomo. Suunnittelun tavoitteeksi asetettiin uusien käyttöliittymien integrointi vanhoihin käyttöliittymiin siten, että informaation esitystapojen riittävä yhdenmukaisuus eri valvomotoiminnoissa säilyy riippumatta laitekniikasta tai projektin vaiheistuksesta. Tavoitteen saavuttamiseksi käyttöliittymäsuunnittelua ohjaamaan kirjoitettiin tyylipöytä (style guide), johon kirjattiin ergonomiset suunnittelutavoitteet ja -vaatimukset. Lisäksi projektin aikana tehtiin ja kehitettiin tehtäväänalyyssejä liittyen uusiin ja uudistettaviin järjestelmiin. Tehtäväänalyysien avulla varmistettiin, että inhimilliset tekijät tulevat huomioituksi viranomaisvaatimukset täyttävällä tavalla ja että suunnittelun lopputulos, kuten käyttöliittymät, täyttävät operaattoreiden vaatimukset sekä erilaiset standardeissa ja suunnitteluoheissa esitetyt Human Factors Engineering (HFE) vaatimukset.

Valvomovalidointi

Valvomosuunnittelun edetessä suoritettiin useita verifiointi- ja validointitoimenpiteitä (V&V), kuten tehtävä- ja tyyliverifiointeja sekä riippumattoman arvioijan (VTT) osajärjestelmävalidointeja. Niiden avulla voitiin varmistaa, että suunnitellut valvomomuutokset vastasivat suunnitteluvaatimuksia ja valitut ratkaisut mahdollistavat laitoksen turvallisen ajamisen eri käyttötilanteissa tukemalla valvomo-ohjaajien toimintaa ja päätöksentekoa. Validointeja suoritettiin kehityssimulaattorilla Keilaniemessä hyödyntäen Apros-malleja ja koulutussimulaattorilla Loviisassa. Lopuksi, ennen viimeisen vaiheen käyttöönottoa, koulutussimulaattorilla suoritettiin integroitu järjestelmävalidointi (ISV), jolla osoitettiin, että operaattorit kykenevät operoimaan laitosta turvallisesti automaatio- ja valvomouudistuksen jälkeen.

Suunnittelun aikana simulaattoritestejä täydennettiin hyödyntämällä Fortumissa kehitettyä uutta virtuaalitekniikkaa. Virtuaalivalvomoon on mallinnettu valvomotilojen lisäksi Apros-simulointiohjelmistoon kytketyt käyttöliittymät. Virtuaalivalvomo mahdollistaa koko valvomuoron yhtäaikaisen toiminnan harjoituksessa, ja myös valvomon ulkopuoliseen kommunikointiin tarvittavat puhelinyhteydet kenttäoperointien simuloimiseksi. Ensimmäinen valvomuorojen suorittama testi virtuaalivalvomossa toteutettiin marraskuussa 2016. Testi sisälsi mm. päävalvomon menetystilanteen, joka savuineen ja naapuriyksikön valvomoon



Kuva 2. Virtuaalivalidointi päävalvomon menetystilanteessa.

siirtymiseen ei ole mahdollista kehitys- tai koulutussimulaattoreilla. Testitilanne on havainnollistettu kuvassa 2.

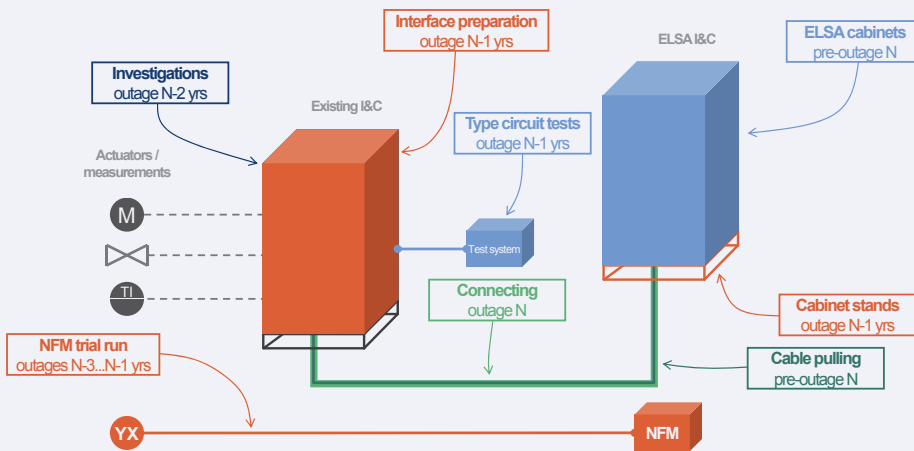
Ensimmäisen testin tavoitteena oli selvittää, miten hyvin virtuaalivalvomo soveltuu ja tukee suunnittelun varhaisen vaiheen valvomovalidointia sekä testata ja edelleen kehittää 3D-valvomoympäristön teknistä ratkaisua. Tuloksena ensimmäisestä virtuaalivalidoinnista saatiin arvokasta tietoa menetelmän kehitystarpeiden lisäksi myös käyttöliittymien ja ohjeiden parantamiseen. Koska ensimmäisen virtuaalitestin tulokset olivat erittäin lupaavia, suoritettiin toinen validointi virtuaalivalvomossa marraskuussa 2017 parannetulla virtuaaliympäristöllä, jossa käyttöliittymät, ohjeet ja valvomotila vastasivat lopullista toteutusta. Toisen virtuaalivalidoinnin ansiosta voitiin luottavaisin mielin edetä toteutukseen ja myöhemmin varsinaiseen integroituun järjestelmävalidointiin Loviisan koulutussimulaattorilla.

Käyttöönotto

Projektin käyttöönottoon ja asennuksiin alettiin valmistautua hyvissä ajoin projektin alkumetreillä. Vuoden 2014 vuosihuollossa suoritettiin kartoituksia voimalaitoksella ja valmistelevia töitä jatkettiin käynnin aikana sekä seuraavan vuoden vuosihuollossa, vuosi ennen ensimmäisiä käyttöönottovaiheita.

Järjestelmäusuntoihin valmistauduttiin perusteellisilla valmisteleville toimenpiteillä, kuten laitospaikkaselvityksillä, rajapintojen ja uusien kaappien jalustojen esiasennuksilla sekä neutronivuomittauksen koe-käytöllä. Uusien järjestelmien väliset yhteydet sekä uusien ja vanhojen järjestelmien rajapintojen yhteensopivuus varmistettiin tyyppi-piiritesteillä. Kaapelit ja automaatiokaapit asennettiin valmiiksi, ja uusien kaappien väliset kytkennät sekä kaappien toiminnallisuus kuljetuksen ja asennuksen jälkeen testattiin ennen varsinaista vuosihuoltoa. Vuosihuollon aikana tehtiin ainoastaan kytkennät olemassa oleviin kenttälaitteisiin, mittauslähettämiin sekä valvomon uusiin langoitettuihin käyttöliittymiin. Periaatteita on havainnollistettu kuvassa 3.

Käyttöönottestauksen suunnittelu tehtiin alusta saakka yhdessä operaattoreiden ja voimalaitoksen automaatiokunnossapidon kanssa.



Kuva 3. Käyttöönnoton aikatauluriskien minimoinnin periaatteet.

Tällä varmistettiin toimintamallien yhteensopivuus niin prosessin tilojen kuin koestusten organisoinnin osalta. Operaattoreita tarvittiin erityisesti prosessiohjausten koestuksissa, sillä valvomo-ohjauksia saa tehdä vain operaattorilisenssin omaavat henkilöt.

Käyttöönottoon osallistui kattavat organisaatiot sekä Fortumin että Rolls-Roycen puolelta ja tiukka aikataulu edellytti tiivistä yhteistyötä molemmilta osapuolilta. Käyttöönottotöitä tehtiin kahdessa vuorossa pääsääntöisesti aamu seitsemästä ilta yhteentoista ja yöt pyhitettiin levolle. Tiedonkulku käyttöönnoton aikana varmistettiin sekä yhteisillä aamu- että iltapäiväpalavereilla, jossa hyödynnettiin tehokkaasti perinteistä kanban-taulua ja projektin viimeisessä vaiheessa myös kanban-taulun digitaalista versiota. Keskeytyksettömän käyttöönottokoestustoiminnan varmistamiseksi mahdolliset ongelmatapaukset siirrettiin tekniselle tukioorganisaatiolle ratkaistavaksi.

Ensimmäisessä käyttöönottovaiheessa aineistojen käsittely pohjautui hyvin pitkälti perinteiseen paperien pyörytykseen. Kaikki aineistot tulostettiin paperille, täytettiin ja skannattiin digitaaliseen muotoon. Toimintamallissa on hyvät puolensa, mutta se osoittautui kuitenkin hyvin raskaaksi ja edellytti lisäresursseja aineistojen käsittelyssä. Projektin yleisen kehitysmönteisyyden turvin toimintamalleja muutettiin kevyemmäksi ja entistä enemmän digitaaliseksi heti ensimmäisten kokemusten jälkeen. Viimeisessä vaiheessa koestukset suoritettiin pääasiassa hyödyntäen tietokantapohjaista työkalua ja kaikki aineistot käsiteltiin alusta loppuun saakka digitaalisessa muodossa. Kehitystyötä edesauttoi se, että sama organisaatio toimi käyttöönnototehtävissä projektin kaikissa vaiheissa ja että toimintamalleja voitiin testata ja tarvittaessa hienosäätää kahdella laitossyksiköllä jokaisessa vuosihuollossa.

Projektinhallinnan menettelyt

ELSA-projektin käynnistämisen yhteydessä tehtiin lukuisia kriittisiä muutoksia automaatiouudistusstrategian ja -laajuuden lisäksi projektinhallintamenettelyihin ja -organisaatioon. Alusta asti oli selvää, että

projekti tullaan toteuttamaan aikatauluohjattuna, äärimmäisen tiukat turvallisuusvaatimukset kuitenkin täyttäen.

Aikatauluohjaus näkyi alusta lähtien monessa seikassa, lähtien lisensiointiaikataulun laatimisesta jo ennen varsinaisen projektin aloittamista. Sen tärkeimpänä tarkoituksena oli edellisen projektin oppien pohjalta muodostaa lisensiointidokumenttipaketit, jotka mahdollistivat viranomaisen sujuvan dokumenttikäsittelyn kaiken käsittelyn kannalta olennaisen dokumentaation ollessa samaan aikaan tarjolla. Lisäksi määritettiin aikataulu dokumenttipaketeille lähtien käyttöönottoajankohdasta taaksepäin, huomioiden viranomaiskäsittelyn vaatima aika sekä mahdollisuus tarkennuspyynnöille. Tämä lisensiointiaikataulu oli yhteinen järjestelmätoimittajalle sekä voimayhtiölle ja sitä käytettiin resurssisuunnitteluun dokumenttien laatimisessa sekä niiden tarkastamisessa, mutta olennaista oli odotetun käsittelyaikataulun viestiminen myös viranomaiselle mahdollistaen heidän resurssintensa optimoimisen.

Aikataulun lisäksi myös Rolls-Roycen ja Fortumin lisensiointidokumentaation korkea laatu mahdollisti sujuvan käsittelyn ja viranomaiskäsittelyssä tarvittavien versioiden määrän minimoimisen.

Projektin edistyminen varmistettiin soveltamalla aikatauluja usealla eri osa-alueella järjestelmätoimittajan ja voimayhtiön päässä. Tärkeimpiä olivat mm. ylätasen sopimusaikataulu, projekti- ja aikataulu, esiasennusten aikataulu sekä käyttöönottoaikataulut. Tärkeimmät aikataulut olivat yhteisessä käytössä, ja niiden tilanne tarkistettiin ja tarvittaessa päivitettiin yhdessä vähintään kerran kuussa. Vaikka tärkeimmät työvaiheet projekti- ja aikataulussa laadittiin heti projektin alkaessa loppuun saakka, eikä niitä matkan varrella muutettu, oli kantavana periaatteena päivittää aikatauluja jatkuvasti olemaan tarkka vähintään seuraavan kuuden kuukauden ajalla. Tämä tarjosi mahdollisuuden tehdä tehokasta ja käytännönläheistä riskienhallintaa: tehtävien ollessa myöhässä tai riskissä myöhästyä, nähtiin myöhästymisen vaikutukset aikataulusta selkeästi. Vaikutusten pohjalta pystyttiin arvioimaan tarvittavat kiihdytystoimenpiteet sekä allokoimaan riittävät resurssit ongelmien ratkaisemiseksi. Kriittisinä käyttöönottoa edeltävinä aikoina riskienhallintaa tehtiin aikataulupohjaisesti viikoittain.

Vaikka työnjako toimittajan ja tilaajan välillä oli selvä ja huolellisesti määritetty, kyettiin toimintaa optimoimaan esim. toimittajan dokumentaatiossa havaittujen puutteiden osalta. Dokumentteja ei tällöin vain hylätty, vaan näissä tapauksissa kuvattiin puutteet mahdollisimman tarkasti ja tarjottiin apua kokouksen muodossa sopiaksemme miten ongelma tullaan korjaamaan ja varmistaaksemme että puutteet tulevat kerralla kuntoon. Projektioorganisaatiota mukautettiin ketterästi kunkin projektivaiheen tarpeen mukaisesti. Tämä mahdollistettiin sisällyttämällä tärkeimmät resurssien sekä hyötytavoitteen omistajat projektin ohjausryhmään. Projektissa käytettiin tehokkaasti fyysisiä, verkko- ja puhelinkokouksia projektivaiheesta ja -tanhasta riippuen viikoittain, kuukausittain tai neljännesvuosittain. Käyttöönottovaiheessa kokoonnuttiiin kaikkien osapuolien välillä vuorokausittain kahdesti projektitilanteen ja tiedonkulun varmistamiseksi.

Yhteenveto

Projektin haastavuus yhdistettynä tiukkaan aikatauluun ja osaavaan, innostuneeseen projektihenkilöstöön mahdollisti monien ketterien suunnittelu- ja viestintätyökalujen kehittämisen ja hyödyntämisen. Simulaattoriavusteinen testaus mahdollisti jo aikaisessa vaiheessa vanhan ja uuden automaation rajapintojen tarkastuksen, uusien automaatiojärjestelmien testauksen koko laitosmallia vasten, operaattorien osallistumisen järjestelmätestaukseen ja virheiden havaitsemisen. Myös uusi reaktorin tehonsäätäjä viritettiin onnistuneesti Aprosien avulla, todellinen laitosvaste käyttöönottoesteissä vastasi tarkasti säätimen simuloitua käyttöönottoestettä.

Valvomovalidoineissa otettiin perinteisten menettelyiden rinnalle onnistuneesti käyttöön virtuaalivalidointi, jolla kyettiin todentamaan uu-

sien käyttöliittymien toiminta todellisuudessa hankalasti järjestettävissä tapauksissa kuten päävalvomon menetykseen johtavassa tulipalossa. Käyttöönotoissa puolestaan keskityttiin mm. tilannekuvan viestinnän optimointiin ja työskentelyn tehokkuuteen vähentämällä turhia työvaihteita ja hyödyntämällä digitaalisia työkaluja.

Kaikki edellä mainitut tekijät huomioiden ELSA-projektin tärkeimmäksi onnistumisen edellytykseksi nousee osaavan ja innostuneen henkilöstön yhteinen tahtotila Fortumin sisällä sekä Rolls-Roycen kanssa selkeästi viestityn, vaikkakin erittäin haastavan, tavoitteen saavuttamiseksi. Näin mahdollistettiin projektin suorittaminen asetetussa aikataulussa ja budjetissa ilman ylimääräisiä viiveitä käyttöönottovuosihuolloissa, samalla parantaen laitoksen turvallisuutta ja ylläpidettävyyttä sekä pitäen Loviisan käytettävyyttä vähintään yhtä korkealla tasolla kuin ennenkin.

Kirjoittajat



DI Mika Heikkilä

Suunnitteluinsinööri,
automaatio- ja valvomosuunnittelu
Fortum Power & Heat Oy
mika.heikkila@fortum.com



DI Miikka Jokelainen

Suunnitteluinsinööri,
automaatio- ja simulaattorisuunnittelu
Fortum Power & Heat Oy
miikka.jokelainen@fortum.com



DI Petteri Lehtonen

Kehityspäällikkö,
automaatio- ja sähkösuunnittelu
Fortum Power & Heat Oy
petteri.lehtonen@fortum.com



DI Antti Rantakaulio

Suunnitteluinsinööri, turvallisuussuunnittelu
Fortum Power & Heat Oy
antti.rantakaulio@fortum.com



Ins. Maria Vuokko

Pääsuunnittelija, valvomosuunnittelu
Fortum Power & Heat Oy
maria.vuokko@fortum.com

Diplomityö: Ydinvoimalaitoksen kontaminaationhallinta päästöön johtavassa onnettomuustilanteessa

Liisa Salminen
Teollisuuden Voima Oyj

Diplomityössä tutkittiin OL1/OL2 ja OL3 laitoksille analysoitujen vakavien reaktorionnettomuuksien päästöjen vaikutusta laitosalueen ja sen välittömän läheisyyden säteilytasoihin onnettomuuden ensimmäisen 3 vuorokauden ajalta ja luotiin kontaminaationhallintajärjestelyt toiminnan johtamisen kannalta merkittävillä tiloilla sekä alustavia reittisuunnitelmia laitosalueella liikkumiseen.

In this thesis the radiation levels on the plant site during the first 72 hours of a severe reactor accident were analyzed based on the emissions analysis of severe reactor accident scenarios of plants OL1/OL2 and OL3. Contamination control arrangements and route plans for the emergency management rooms and plant area were created.

Efektivistä annosnopeutta ja laskeuman annosnopeutta laitosalueella tutkittiin neljässä eri meteorologisessa tilanteessa. Tulosten perusteella arvioitiin laitosalueen käytettävyyttä ja luotiin tarvittavat kontaminaationhallintamenettelyt valmiustiloille. Kontaminaationhallinnan onnistumisen kannalta merkittäväksi nousivat oikea-aikainen ilmastointien ohjaus sekä suojavarusteiden käyttö ja kenkärajakäytännöt. Koska säteilysuojelliset päätökset onnettomuustilanteessa tehdään pääasiassa annosnopeustietojen perusteella, on niitä käytetty myös työn pohjana.

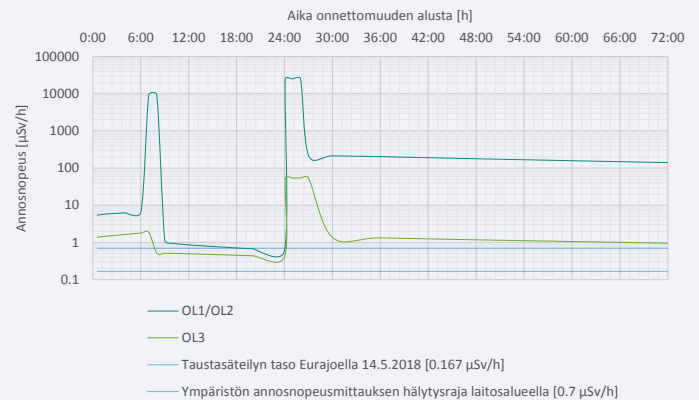
Annosnopeudet laitosalueella

Olkiluodon laitosyksiköiden vakavien onnettomuuksien päästöanalyseistä valittiin laitosalueen annosnopeuksien kartoittamiseksi onnettomuustapaukset, joissa jalokaasut pois lukien vapautuvien radioaktiivisten aineiden määrä oli suurin. Tällöin laskeuman aiheuttamalle annosnopeudelle saatiin korkein teoreettinen arvo. OL1/OL2 laitosyksiköillä onnettomuusskenaarioksi valikoitui giljotiinikatkos syöttövesilinjassa yhdistettynä täydelliseen vaihtosähkömenetykseen ja OL3 laitosyksiköllä LBLOCA (large break loss of coolant accident) eli suuren putkirikon aiheuttama jäähdytteenmenetysonnettomuus. Molemmissa tapauksissa päästöjaksoja oli useita.

Annosnopeudet eri etäisyyksillä (0.2 km – 5 km) päästölähteestä mallinnettiin VTT:n kehittämällä ROSA-ohjelmistolla. Korkeimmat efektiiviset annosnopeudet aiheutuivat päästöpilven ylituksesta laitosalueen lähietäisyydellä ennen päästön laimenemista. Laskeuman annosnopeuteen laitosalueella ja sen läheisyydessä vaikutti eniten sademäärä. Kuvassa 1 on esitetty efektiivinen annosnopeus 0.2 km etäisyydellä päästölähteestä säätyypissä 4, jossa ilman stabiiliusluokka on neutraali, tuulen nopeus 6.2 m/s ja sataa kovaa.

Annosnopeudet nousevat STUK:n ohjeessa VAL 1 työntekijöiden suojelemiseksi asetetun alimman toimenpidetason (10 $\mu\text{Sv/h}$) yli OL1/OL2 tapauksessa vain päästöjaksojen aikana päästöpilven ylittäessä tarkasteluajan sekä märkälaskeuman tapauksessa toisen päästöjakson jälkeen. Ulkona tehtävien toimien keskeyttämiseen kehottava toimen-

Efektiiivinen annosnopeus 0.2 km etäisyydellä päästölähteestä säätyypissä 4



Kuva 1. Efektiiiviset annosnopeudet OL1/OL2 ja OL3 vakavissa onnettomuuksissa 0.2 km etäisyydellä päästölähteestä. Kuvassa myös taustasäteilyn taso Eurajoella (STUK 2018) sekä ympäristön säteilymittaus-verkon hälytysraja laitosalueella.

pidetaso (1000 $\mu\text{Sv/h}$) ylittyy vain päästöpilven ylityksen aikana. OL3 tapauksessa 10 $\mu\text{Sv/h}$ ylittyy vain päästöjakson aikana ja efektiivinen annos-nopeus jää koko 72 h aikana reilusti alle 1000 $\mu\text{Sv/h}$.

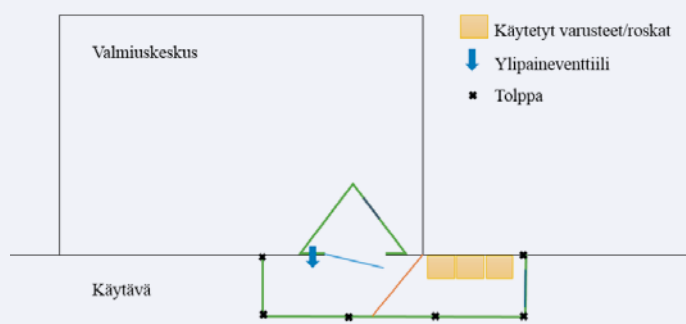
Näiden tietojen perusteella toiminnan johtamiseen varatut valmiustilat ovat käytettävissä tarkasteltavan ajan, kun varmistetaan niiden kontaminaationhallinta ja laitosalueella voidaan suorittaa onnettomuuden hallintaan liittyvät tarpeelliset toimenpiteet.

Onnettomuudenaikainen kontaminaationhallinta

Kontaminaationhallinnan perusajatuksena on rajata kontaminaatio joko sisään tai ulos ja estää sen leviäminen. Kontaminaationhallinnan tulee perustua luotettaviin mittaustuloksiin ja suojarusteiden käytön pitää olla riittävää ja oikea-aikaista. Lisäksi on huomioitava päästön koostumus ja leviämismuoto, sillä esimerkiksi jalokaasujen suodattuminen on melko vähäistä.

Toiminnan johtamiseen varatut valmiustilat on sijoitettu tiloihin, joiden ilmastointi on suodatettavissa ja asetettavissa sulkutilaan. Ilmastointeja säädettäessä on huomioitava, että ilmastoinnin sulkutiloja voidaan käyttää hyödyksi vain rajallisia aikoja, joten ne tulee ajoittaa oikeaan hetkeen parhaan suojaustason saavuttamiseksi. Lisäksi suodattamattomat perusilmastoinnit tulee sulkea riittävän aikaisessa vaiheessa, ettei kontaminaation leviämistä sisätiloihin edesauteta.

Ilmassa leviävän kontaminaation ohella on suojauduttava ihmisten ja tavaroiden mukana kulkeutuvalta kontaminaatiolta käyttämällä riittäviä suojarusteita, noudattamalla hyvää kenkärajakulttuuria sekä yhtenäisiä kulkureittejä. Diplomityössä suunniteltiin kahden sisäkäden kenkäräjän malli ja yksityiskohtaiset järjestelyt kaikille tiloille. Tarkoituksena on, että kengänsuojat ja päällimmäiset kumikäsineet riisutaan jo saavuttaessa rakennukseen ja muut suojarusteet valmiustilojen sisäänkäyntien edustoilla olevilla kenkäräjoilla. Sisäänkäyntien edustojen kenkäräjojen toimivuutta voidaan edistää käyttämällä erillisiä telttarakenteita, esimerkiksi valmiita väestönsuojien sulkuteltoja tai asbestinpurkutelttoja. Esimerkki kenkäräjäjärjestelyistä huonetiloiille on esitetty kuvassa 2. Henkilöt ja tavarat mitataan kontaminaation ja



Kuva 2. Esimerkki valmiuskeskuksen kenkäräjästä. Vihreät viivat kuvastavat telttojen reunoja ja siniset kulkuaukkoja. Oranssilla viivalla kuvataan kenkäräjäpuomia.

annosnopeuden suhteen sisemmällä kenkäräjällä ja tarvittaessa suoritetaan karkea dekontaminointi. On myös huomioitava, ettei sähkönmetystilanteessa ole välttämättä saatavilla vettä, joten valmiustilat tulee varustaa vedestä riippumattomilla puhdistusvälineillä.

Tärkein osio kontaminaationhallinnan onnistumisessa on kuitenkin ihmistoiminta. Sen onnistumisen todennäköisyyttä voidaan parantaa harjoittelemalla kontaminaationhallintaa osana valmiusharjoituksia. Valmiusharjoituksiin suositellaan lisättävän kokonaisuus, johon sisältyy kontaminaationhallinta käytännössä, käytettävät kulkureitit ja suojarusteet, jottei valmiusorganisaation stressinsietokykyä valmiustilanteessa yllärioida ja jotta suojarusteissa toimiminen olisi tuttua koko valmiusorganisaatiolle.

Diplomityö on hyväksytty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa 6.6.2018.

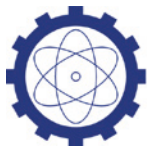
Kirjoittaja



DI Liisa Salminen
Säteilysuojeluinsinööri
Teollisuuden Voima Oyj
liisa.salminen@tvo.fi

Palautusosoite:

Suomen Atomiteknillinen Seura
PL 78
02151 ESPOO



ATS

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

KANNATUSJÄSENET

A-Insinöörit Civil Oy

**Pohjoismainen
Ydinvakuutuspooli**

TVO Nuclear Services Oy

Fennovoima Oy

Pohjolan Voima Oyj

Voimaosakeyhtiö SF Oy

FinNuclear ry

Posiva Oy

Wärtsilä Projects Oy

**Fortum Power
and Heat Oy**

**Teknologian
tutkimuskeskus VTT Oy**

Westinghouse

Platom Oy

Teollisuuden Voima Oyj