

ATS

3|2023

Vol. 52

YDINTEKNIikka

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA – ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND

ATS-ekskursio Olkiluotoon

Seuran Olkiluoto-ekskursiolla kuultiin esityksiä Olkiluoto 3 -yksikön käyttöönotosta ja päästiin kiertämään laitosalueella.

Hydratsiinin korvaajaa etsitään

Painevesireaktoreissa käytetään hydratsiinia hapen poistamiseksi vesikierroista, mutta sen mahdolliseen käyttökieltoon varaudutaan etsimällä korvaavia kemikaaleja.

STUKin laboratoriot uusiin tiloihin

Säteilyturvakeskuksen mittauslaboratorioiden muutto vaati perusteellista ennakkosuunnittelua ja hallittua käyttöönottoa.



Julkaisija / Publisher

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

Johtokunta / Board**Puheenjohtaja / President**

TkT Markus Airila
puheenjohtaja@ats-fns.fi

Varapuheenjohtaja / Vice President

DI Hanna Tynys
hanna.tynys@fortum.com

Sihteeri / Secretary General

FM Jussi Peltonen
sihteeri@ats-fns.fi

Rahastonhoitaja / Treasurer

DI Elina Syrjälahti
rahastonhoitaja@ats-fns.fi

Jäsenet / Board Members

DI Olli Nevander
olli480@hotmail.com

Prof., TkT Samuli Siltanen
samuli.siltanen@helsinki.fi

TkT Antti Snicker
antti.snicker@aalto.fi

Toimihenkilöt / Functionaries**ATS Young Generation**

DI Pekka Pihlanko
pekka.pihlanko@platom.fi

**Kansainvälisten asioiden sihteeri /
International Affairs**

DI Santeri Myllynen
santeri.myllynen@fortum.com

Women in Nuclear Finland

FM Jenna Levo
jenna.levo@tvo.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**

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

**Tieteellinen päätoimittaja /
Scientific Chief Editor**

FT Antti Rätty
antti.ratty@vtt.fi

**Ajankohtaispäätoimittaja /
Topical Chief Editor**

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

Ulkoasu ja taitto / Layout

Katariina Korhonen
Creatus
katariina@creatus.fi

Toimitus / Editorial Staff

FM Sophie Haapalehto
sophie.haapalehto@posiva.fi

DI Klaus Kilpi
klaus.kilpi@gmail.com

TkT Henri Loukusa
henri.loukusa@gmail.com

DI Aleksi Savolainen
aleksi.savolainen@tvo.fi

FT Mervi Söderlund
mervi.soderlund@fortum.com

Toimituksen yhteystiedot**ATS Ydintekniikka**

c/o Jarmo Ala-Heikkilä
PL 15100
00076 Aalto
p. 050 433 1198

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 seuran 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.

Tämä on ilmoitus ja pyyntö sinulle, hyvä jäsen

TOTESIMME JOHTOKUNNASSA, että varmin tapa tavoittaa koko jäsenistö on perinteinen lehti-ilmoitus, jota nyt luet. Pyyntömme koskee jäsentietojen tarkastamista ja täydentämistä tekstin lopussa annettujen ohjeiden mukaan.

Seuran sivusto on kevään ja kesän aikana uudistettu ja siirretty Yhdistysavain-nimisen palveluntarjoajan alustalle. Näin saimme kaikki yhdistykselle tarpeelliset toiminnot kuten jäsenrekisterin, laskutukset, tiedotteet ja verkkosivut samaan helppokäyttöiseen palvelukokonaisuuteen. Toivottavasti muutos näkyy jäsenille sivuston tuoreempaan sisältöön.

Parhaan hyödyn uudesta sivustosta saat kirjautumalla sivustolle jäsenenä. Silloin käytössäsi on kaikille avointen sisältöjen lisäksi "Jäsenten materiaalipankki", jossa on jäsenten käyttöön ladattavissa muun muassa Ydintekniikan sanasto ja ATS Ydintekniikan uusimmat numerot.

Sivustolle pääsee tutulla osoitteella ats-fns.fi niin tietokoneella kuin mobiililaitteellakin. Käyttöliittymä mukautuu laitteelle sopivaksi. Ohessa on ruutukaappaus älypuhelimien näytöltä.

Kokeilimme kesällä tekstiviestien lähettämistä, mutta rekisterissä olevilla tiedoilla tavoitimme alle puolet teistä. Sähköpostilla tavoitamme jäsenis-



tön jonkin verran kattavammin, mutta kaikkien jäsentiedoissa ei ole sähköpostiosoitetta, joistakin osoitteista saamme virheilmoituksen, ja lisäksi on tunnetusti vanhentuneita osoitteita. Siksi tämä lehti-ilmoitus.

OHJEET: Jos olet saanut loppukesän aikana sähköpostiisi ATS:n tiedotteita tai syyskuun alussa lähetetyn jäsenmaksulaskun, jäsenrekisterissä on toimiva osoitteesi ja voit alkaa käyttää jäsensivuja. Jos et ole vielä asettanut salasanaa, voit tehdä sen kirjautumissivulla (Valikko > Jäsensivut).

Kirjautuutasi käythen tarkistamassa ja täydentämässä omat jäsentietosi (oikean yläkulman ihmishahmo ja nimesi > Omat tiedot). Erityisesti ilahdumme toimivan sähköpostiosoitteen ja matkapuhelinnumeron saamisesta rekisteriin.

Jos tiedät, että rekisterissä ei ole toimivaa sähköpostiosoitteasi, lähetä viesti sihteerille osoitteeseen sihteeri@ats-fns.fi. Nyt on hyvä hetki alkaa käyttää sähköpostia, jos sitä on tullut tähän asti lykättyä. Merkittävä osa seuran ajankohtaisesta tiedotuksesta tapahtuu sähköpostitse.

Otamme mielellämme vastaan palautetta uuden sivuston sisällöstä ja toimivuudesta.

Johtokunta

SISÄLTÖ

Vakiopalstat

Johtokunnalta: Tämä on ilmoitus ja pyyntö sinulle, hyvä jäsen 3

Pääkirjoitus: Viranomaisten yhteisarvioinneilla turvallisuutta ja tehokkuutta 4

Editorial: Safety and efficiency through international assessments 5

Pakina:
Aasinsillan ja/tai kukkaruukun kautta itse asiaan asiassa kuin asiassa – siis pohdiskeleivissa turvallisuuskysymyksissään 42

Tapahtumat

ATS:n ekskursio Olkiluotoon 6

Lämpövoimakas at Torness
Nuclear Power Station 12

Rankkasadetta ja pienreaktoreita – DENSEn ensimmäinen vuosiseminaari Otaniemessä 28.–29.8.2023 14

Posivan "Safety case"-seminaari Helsingissä 16

Ajankohtaista

Säteilyturvakeskus muutti Vantaalle 19

ATS:n uusi julkaisu esittelyssä: Ydinenergian uranuurtajan Erkki Laurilan tuotanto ensi kertaa kartoitettuna 22

Nuclear Energy in Poland – an explosion of interest and plans 24

LDR-50-hankkeesta nousi uusi spinoff-yritys VTT:ltä 26

Tiede ja tekniikka

Hydratsiinia korvaavat kemikaalit painevesireaktoreissa 28
Konsta Sipilä

Multiphysical simulation of quasi-static fuel assembly bow 32
Stanislas de Lambert

Väitös: Telluurin käyttäytyminen ydinonnettomuustilanteissa 36
Anna-Elina Pasi

Diplomityö: Kiehumusvesireaktorien transienttimallinnusta Apros-S3K-koodikytkenällä 40
Verna Hakkarainen

Viranomaisten yhteisarvioinneilla turvallisuutta ja tehokkuutta

PETTERI ORPON HALLITUSOHJELMA asettaa Suomelle kunnianhimoisia energiapolitiittisia tavoitteita, joiden tavoitteena on yhtäältä vastata päästövähennysten tavoitteisiin, turvata edullisen energian saatavuus ja sen mahdollistama talouskasvu, toisaalta tehdä Suomesta ilmastopoliittisesti kokoaan suurempi. Lähtökohtina hallituksella on hyödyntää energiamurrosta sekä puhtaita teknologioita, joihin hallitus myös ydinvoiman lukee.

Ydinvoiman osalta hallitusohjelma on yksiselitteinen. Hallituksen mukaan ydinvoimaa Suomeen tarvitaan lisää sekä sähkön että kaukolämmön tuottamiseksi. Hallitus sitoutuu jo ennakkoon hyväksymään kaikki kriteerit täytävät periaatelopahakemukset sekä edistämään ydinvoimahankkeiden rahoitusratkaisuja. Muina keinoina hallitusohjelma nostaa ydinenergiailain kokonaisuudistuksen vuoteen 2026 mennessä. Lain uudistamisen yhteydessä halutaan helpottaa modulaaristen pienydinreaktoreiden (SMR) rakentamista. Lisäksi hallitus haluaa selvittää erikseen mahdollisuudet luopua raskaasta periaatelopamenettelystä juuri pienydinreaktoreiden osalta.

Ydinvoimateollisuus ja ydinvoimayhtiöt odottavat sitä, että laitokset kelpaisivat mahdollisimman samanlaisina eri maihin ja että luvitusta sujuvoitukseen maiden viranomaiset hyödyntäisivät toistensa arviointeja ja tarkastuksia. Jotta samanlaiset laitokset kelpaisivat eri maiden viranomaisille, tulisi vaatimusten ja niiden tulkinnan olla eri maissa pitkälti samoja. Jotta muiden maiden viranomaisten tekemisiä voitaisiin muissa maissa hyödyntää, tulisi arviointitavan ja sisällön olla samankaltaisia. Tällä hetkellä molemmissa on eroja.

Kansainvälinen työ edellä mainittujen tavoitteiden saavuttamiseksi on keskittynyt vaatimusten harmonisointiin erityisesti IAEA:ssa (International Atomic Energy Agency) ja WENRassa (Western European Nuclear Regulators Association). IAEA:n pääjohtajan pienydinvoimaloiden turvallista käyttöönnottoa edistävissä NHSI-hankkeessa (Nuclear Harmonization and Standardization Initiative)

huomiota on kiinnitetty myös siihen, miten muiden maiden viranomaisten töitä voitaisiin nykyistä paremmin hyödyntää miettimällä muun muassa tiedon jakamisen tapoja ja yhteistyömuotoja. Hankkeessa on yritetty edistää myös kansainvälistä esiluvitusprosessia, mutta se ei ole saanut kannatusta.

Työtä vaatimusten harmonisoinniseksi pitää jatkaa ja poistaa esteitä viranomaisten väliselle tiedon jakamiselle sekä resurssien tehokkaalle yhteiselle käytölle. Viranomaisten yhteisarvioinnit ovat mielestäni paras ja nopein tapa edistää molempia tavoitteita ja samalla mahdollistaa samankaltaisten laitosten rakentamista eri maihin. Yhteisarviointien kansallista ja globaalia vaikuttavuutta voitaisiin edelleen parantaa, jos mietittäisiin ja päätettäisiin yhdestä mitä asioita laitoksen, olipa se pieni tai suuri, turvallisuussuunnittelusta tulee arvioida ja miten.

Yhteisen arviointisapluunan etuna olisi se, että kaikki tietäisivät mitä joku toinen (yksin) tai toiset (yhdessä) ovat laitoksesta arvioineet. Samalla laitostoimittajat tietäisivät mitä heidän tulee laitoksensa turvallisuudesta esimerkiksi konseptisuunnitteluvaiheessa viranomaisille esittää ja osoittaa. Työn tuloksena tunnistettaisiin myös erot turvallisuusvaatimuksissa, jolloin niiden harmonisoinnin saisi konkretiaa. STUK on pitänyt tätä ajatusta esillä niin NHSI- kuin EU:n SMR Pre-Partnership-hankkeessa.

Yhteisarviointien onnistumiselle on luotava kansalliset edellytykset. Menossa olevassa laki- ja säännöstöuudistuksessa olennaista on määritellä laitoksen suunnittelun turvallisuutta koskevat tavoitteet ja jättää liikkumavaraa toimijoille toteutukseen ja viranomaisille toteutuksen arvioimiseen. Turvallisuustavoitteiden asettamisessa on huolellisesti arvioitava, onko



tarvetta "Suomi-lisälle", vai ovatko IAEA:n ja WENRA:n turvallisuustavoitteet meille riittäviä. On tärkeää, että tästä tarveharkinnasta keskustellaan rakentavasti STUKin ja sidosryhmien kesken.

Edellytykset on luotava myös yhteisarviointeihin osallistumiselle. Tämä tarkoittaa käytännössä työn rahoituksen järjestymistä sekä arviointien laitosvaihtoehtojen priorisointia kansallisista tarpeista katsoen. Yhteisarviointeihin satsaaminen maksaa itsensä takaisin turvalisina pienydinvoimalaitoksina (Euroopassa ja Suomessa) sekä sujuvana luvitus- ja turvallisuusarviointiprosessina, kun osaaminen syntyy ja laitosvaihtoehdot tunnetaan.

Petteri Tiippana

Pääjohtaja, diplomi-insinööri
Säteilyturvakeskus
petteri.tiippana@stuk.fi

Safety and efficiency through international assessments

PM **PETTERI ORPO'S** government programme sets ambitious energy policy goals for Finland, which aim to meet emission reduction targets, secure the availability of affordable energy, and enable economic growth, while making Finland bigger than its size in terms of climate policy. The Government's emphasis is to exploit energy transition and clean technologies, including nuclear power.

On nuclear power, the government programme is unambiguous. According to the Government, more nuclear power is needed in Finland to produce both electricity and district heat. The Government is committed to approving in advance all applications for decision-in-principle that meet the criteria and to promoting financing solutions for nuclear power projects. Additionally, the government programme highlights the overall reform of the Nuclear Energy Act by 2026. The reform of the law is, among other goals, intended to facilitate the construction of small modular nuclear reactors (SMRs). In addition, the Government wants to examine the possibility of abandoning the tedious decision-in-principle procedure for small modular reactors.

The nuclear industry and nuclear utilities expect plants to be as similar as possible across countries and for the authorities to use each other's assessments and inspections to streamline licensing. For similar plants to be acceptable to authorities in different countries, the requirements and their interpretation should be largely the same in each country. In order to make use of the work done by authorities in other countries, the method and content of assessment should be similar. At present, there are differences in both.

International work to achieve these objectives has focused on harmonisation of requirements, in particular within the IAEA (International Atomic Energy Agency) and WENRA (Western European Nuclear Regulators Association). The IAEA Director General's NHSI project (Nuclear Harmonization and Standardization Initiative)

to promote the safe commissioning of SMRs has also focused attention on how to make better use of the work of other countries' authorities, including ways of sharing information and forms of cooperation. The project has also tried to promote an international pre-certification process, but this has not gained support.

Work to harmonise requirements must continue as well as removing of barriers to information sharing between authorities and efficient pooling of resources. Joint assessments between authorities are, in my opinion, the best and quickest way to promote both objectives and, at the same time, to enable similar facilities to be built in different countries. The national and global effectiveness of joint assessments could be further enhanced by jointly considering and deciding which aspects of the safety design of a facility, whether small or large, should be assessed and how.

The advantage of a common safety review framework would be that everyone would know what someone else (individually) or others (collectively) have assessed about a facility. At the same time, the plant suppliers would know what they have to present and demonstrate to the authorities about the safety of their plant, for example at the concept design stage. The work would also result in the identification of differences in safety requirements, thus giving concrete tools to their harmonisation. STUK has promoted this idea in the NHSI project as well as the EU SMR Pre-Partnership project.

National prerequisites must be created for the success of joint evaluations. In the current legislative and regulatory reform, it is essential to define the safety objectives for the design of an installation and at the same time to leave sufficient space for vendors to implement and for the authorities to assess implementation. In setting safety objectives, we must carefully assess whether there is a need for a "Finland supplement" or whether the IAEA and WENRA safety objectives are sufficient for us. It is important that this is-

sue is discussed constructively between STUK and stakeholders.

Conditions must also be created for participation in joint assessments. In practice, this means organising financing for the work and prioritising the plant alternatives to be assessed according to national interests. Investing in joint assessments will pay off in the form of safe small modular reactors (in Europe and in Finland) and a smooth licensing and safety assessment process when expertise is built up and various plant concepts are well understood.

Petteri Tiippana

Director-general, MSc
Radiation and Nuclear Safety Authority
petteri.tiippana@stuk.fi

ATS:n ekskursio Olkiluotoon

ATS järjesti jäsenistölleen ekskursion Olkiluotoon 16.–17.8.2023. Osallistujia lähti kahdella bussilla pääkaupunkiseudulta. Ensimmäinen vuoro lähti Raumalle jo varsinaista vierailua edeltävänä iltapäivänä. Iltaohjelmassa heillä oli esitys Olkiluoto 3 -hankkeen historiasta ja tekniikasta. Seuraavana aamuna lähti toinen ryhmä kohti Raumaa ja ryhmät koottiin yhteen Olkiluodon vierailukeskuksen lounaspöytään. Ohjelmassa oli TVO:n yleisesittely, OL3:n käyttöönottoa koskevat tekniset esitykset ja bussilla tehty laitoskierros. Esittäjät kertoivat avoimesti käyttöönoton vaiheista ja vaikeuksista, ja yleisö oli aktiivista moninaisine kysymyksineen. Vierailukeskuksen näyttelyyn tutustumiselle jäi vielä hetki aikaa ennen bussin suuntaamista kohti Helsinkiä.

Teksti: Seija Suksi, Olli Nevander, Antti Rätty **Kuvat:** Teollisuuden Voima Oy

ATS:N TARKOITUKSENA ON sääntöjensä mukaan edistää ydintekniikan alan tuntemusta Suomessa, toimia yhdyssiteenä jäsentensä kesken kokemusten vaihtamiseksi ja ammattitaidon syventämiseksi. Olkiluodon ekskursio toteutti hienosti seuran sääntömääräisiä tarkoituksia. Ekskursioon osallistui yhteensä 52 seuran jäsentä, joista yhteiskäytöllä saapui Raumalle keskiviikkona 19 osallistujaa ja torstaina 15. Rauman seudulta tai omilla kyydeillä Olkiluoto-vierailulle saapui 18 osallistujaa.

Osallistujat edustivat voimayhtiöitä, yliopistoja, tutkimuslaitosta (VTT), insinööritoimistoja (kuten Platom) sekä vahvasti myös eläkeläiskaartiamme. Bussimatka sujui rattoisasti kuu-

lumisia vaihdellessa sekä ATS:n johtokunnan uuden jäsenen, teollisuusmatematiikan professori Samuli Siltasen (Helsingin yliopisto) ehdottamalla jäsenten esittäytymiskierroksella.

Esittelyistä saattoi todeta, miten valtava määrä ydinalan ja eri tekniikan alojen kokemusta bussissa oli. Jäsenten koulutustaustat vaihtelivat, ja moninaiset tekijät olivat olleet vaikuttamassa ydinvoima-alalle hakeutumiseen. Kaikilla matkalaisilla oli palava halu päästä tutustumaan Olkiluoto 3 -laitokseen.

Orientoituminen Olkiluoto-vierailuun

Tekninen ohjelma alkoi heti saapumisiltaan Rauman Kalliohovissa OL3:n ydinturvallisuus-

päällikkö Juha Poikolaisen esityksellä Olkiluoto 3:n tähänastisesta elinkaaresta merkkipaaluineen, suunnittelun tavoitteista ja rakentamisen eri vaiheista. Valtioneuvoston myönteisestä ja eduskunnan vahvistamasta periaatepäätöksestä, joka annettiin vuonna 2002, on kulu-
nut jo yli 21 vuotta.

Vuonna 2003 TVO tilasi saksalaisranskalaiselta konsortiolta (AREVA GmbH, AREVA NP SAS ja Siemens AG) European Pressurized Reactor (EPR) -tyyppisen ydinvoimalaitoksen. Laitoksen turvallisuussuunnittelua ja rakenteita muutettiin vuosien 2002–2004 aikana merkittävästi omistajan toiveiden ja suomalaisten viranomaisvaatimusten perusteella.

Poikolainen kertoi, että OL3:n reaktorin



FM Seija Suksi

Radiation and Nuclear Safety Expert
Freelance
seija.suksi@elisanet.fi



DI Olli Nevander

Nuconeva Oy
Olli480@hotmail.com



FT Antti Rätty

ATS Ydintekniikan toimituskunta
antti.ratty@vtt.fi

Olkiluodon ydinvoimalaitos,
Olkiluoto 3 kuvassa vasemmalla.



sisäosia (esimerkiksi säätösauvoja tai polttoainetta) ei ollut mitoitettu pääkiertoputken giljotiinikatkoksen aiheuttamille dynaamisille kuormituksille. OL3:n tapauksessa pääkiertoputken giljotiinikatkoksa määriteltiin kuitenkin suunnittelun perusonnittomuudeksi.

Reaktorin sisäosien mitoittaminen tästä seuraaville dynaamisille kuormille ei ollut käytännössä mahdollista, joten ratkaisuksi valittiin pääkiertoputkistojen varustaminen murtumatuilla, joiden tehtävä on rajoittaa katkenneen putken päiden liikkumista. Siten vapaa putkikatkoksen vuotopinta-ala voidaan rajoittaa 20 %:iin itse putken pinta-alasta. Tällöin dynaamiset kuormat voidaan hallita. Samaa ratkaisua on käytetty Ranskassa viimeisimpään N4-laitossukupolveen saakka.

Pääkomponenttien suunnittelun perusta.

Component	Origin
Reactor Pressure Vessel	Konvoi
Steam Generator	N4
Reactor Coolant Pump	N4
Reactor Coolant Lines	Konvoi+N4
Pressurizer	N4
CR Drive Mechanisms	Konvoi
Reactor Core	Konvoi+N4

Olkiluoto 3:lla kuitenkin toteutettiin Leak Before Break (LBB) -konseptin mukaisesti materiaalin valinnat, erityiset laadunvalvontatoimenpiteet, kohdistettu käytönaikainen tarkastusohjelma ja tarkat vuotojen mittausjärjestelmät, joilla on onnistuttu osoittamaan pääkiertoputkien murtumatukien tarpeettomuus monilla uusilla laitoksilla. Jo rakentamisluvan myöntämisen vaiheessa vuonna 2005 oli Olkiluoto 3 -laitoksen suunnitteluperusta muuttunut merkittävästi. Lukuisa joukko erilaisia laitosmuutoksia suunniteltiin ja toteutettiin rakentamisen ja käyttöönoton aikana.

Luvitus monessa vaiheessa

Kesällä 2005 voimalalle myönnettiin rakentamislupa ja sen rakentaminen aloitettiin. Suunniteltu valmistusvuosi oli 2009, mutta hanke myöhästyi lukuisia kertoja. Rakentamisvaiheen loppupuolella vuonna 2016 TVO haki laitossuunnittelun käyttöluvaa, jonka valtioturvasto myönsi Säteilyturvakeskuksen myönteisen lausunnon perusteella vuoden 2019 maaliskuussa.

Kaksi vuotta myöhemmin polttoaineen laatusuunnitelmaan sai STUKin luvan ja valmistui huhtikuussa 2021. Joulukuun 2021 puolesavälissä OL3 sai luvan reaktorin käynnistämiseen. Reaktorin käyttöönoton vaiheen D sisältämät kriittisyys- ja pientehokokeet saatoivat alkaa.

Reaktorilaitoksen voidaan katsoa käynnistyneen 21.12.2021, jolloin reaktorisydän teh-

tiin ensimmäistä kertaa kriittiseksi. Laitoksen käynnistämisen jälkeen TVO ja laitostoimittaja tekivät pientehokokeet, joilla varmistettiin, että reaktorisydän käyttäytyminen odotetusti ja sydän täyttää turvallisuusanalyysien oletukset. Pientehokokeita tehtiin useilla säätösauvojen asennoilla ja niissä mitattiin reaktorifysiikkaan liittyviä suureita, kuten kriittistä booripitoisuutta, isotermitä lämpötilakerrointa ja säätösauvojen reaktiivisuusvaikutusta.

Koko laitos käynnistyi virallisesti 12.3.2022, kun Olkiluoto 3 kytkettiin ensimmäistä kertaa tuottamaan sähköä valtakunnan verkkoon. Käyttöönottoon liittyneet viimeiset testit tehtiin onnistuneesti, ja käyttöönotto päättyi huhtikuun puolessa välissä 2023, minkä jälkeen OL3 aloitti kaupallisen käytön ja säännöllisen sähköntuotannon. Tämän myötä OL3:n käytön ja kunnossapidon kokonaisvastuu siirtyi laitostoimittajalta TVO:lle.

Vastuunjakolaitostoimittajan ja asiakkaan välillä

Laitostoimittaja oli vastuussa käyttöönotosta ja oli toiminnassa mukana käyttöönoton aikana, mutta TVO oli vastuussa toimenpiteiden suorittamisesta sekä ydin- ja säteilyturvallisuudesta. Vain STUKin hyväksymät TVO:n lisensioituiden ydinvoimalaitoksen ohjaajat saavat ohjata laitosta sen valvomosta. STUK tarkasti pientehokokeiden suunnitelmat ja ohjeet sekä seurasi niitä Olkiluodossa. Lisäksi STUK kävi läpi tehtyjen kokeiden tulokset.

Poikolainen kertoi EPR-reaktorin kehityksestä, suunnittelufilosofiasta ja erityisesti OL3:n suunnitteluperusteista ja suunnitteluun tehdyistä parannuksista. OL3-laitosyksikön rakentamisessa on hyödynnetty alan uusinta tietämystä ja vaatimuksia samalla, kun laitosyksikön tekniset perusratkaisut pohjautuivat esikuvana olleisiin ranskalaisten (N4/Framatome) ja saksalaisten (Konvoi/Siemens) ydinvoimalaitosten hyviin käyttökokemuksiin ja -tuloksiin.

Erityistä huomiota OL3:ssa on kiinnitetty turvallisuutta entisestään lisääviin tekijöihin sekä tuotannon tehokkuuteen ja taloudellisuuteen. Esimerkiksi vakavien reaktorionnettomuuksien hallinta on huomioitu monin parannettu ratkaisuin.

OL3:n turvallisuusjärjestelmissä on poikkeuksellisia tilanteita varten neljä rinnakkaista ja täysin toisiaan korvaavaa turvallisuustoimintoja suorittavaa osajärjestelmää. Näiden lisäksi tärkeimpiä turvallisuustoimintoja on varmennettu neljästä rinnakkaisesta osajärjestelmästä riippumattomilla ja niiden kanssa erilaisilla turvallisuustoiminnon suorittavilla kaksiredundantti-silla osajärjestelmillä.

OL3:ssa on useita toimivia ja hyväksi koettuja turvallisuusominaisuuksia. Kehittämisen pääpaino on ollut itse turvallisuusjärjestelmissä, häiriötilanteiden vaikutusten minimoinnissa sekä vakavien reaktorionnettomuuksien estämisessä. Häiriö- ja onnettomuustilanteissa laitosta ohjataan hyvin pitkälle digitaalisilla järjestelmillä. Reaktorin suojaus- ja turvallisuustoiminnot on automatisoitu, mikä antaa laitoksen käyttöä valvovalle henkilöstölle aikaa suunnitella korjaavia toimenpiteitä.

Turvallisuuden maksimoimiseksi, myös erittäin epätodennäköisissä digitaalisen järjestelmän laajoissa häiriöissä, on tärkeimpien digitaalisten turvallisuusjärjestelmien rinnalle asennettu langoitettu analoginen järjestelmä. Langoitetun järjestelmän kautta saatujen tietojen perusteella laitosyksikön ja reaktorin tilaa voidaan tarvittaessa arvioida oikeiden suojaustoimintojen käynnistämiseksi ja korjaavien toimenpiteiden tekemiseksi.

Haasteita digitaalisessa automaatiossa

Digitaalisen automaation suunnitteluun ja koko automaation viranomaishyväksyntään liittyneistä vaikeuksista Olkiluoto 3 -projektissa virisi keskustelua osallistujien kesken Poikolaisen esityksen aikana. Keskustelijat olivat yhtä mieltä siitä, että digitaalisen automaation suunnittelu- ja hyväksymisprosessin vaikeudet ja tämän prosessin yhteensopimat-

tomuus hankkeen muiden osa-alueiden suunnittelu- ja toteutusaikatauluun oli yksi suurimpia syitä Olkiluoto 3 -hankkeen viivästymiseen. Automaatioratkaisujen ja laitetekniikan nopean muuttumisen todettiin olevan yksi ydinvoimalaitoksen lupaprosessien kehittämisen haasteista myös jatkossa.

Poikolainen kertasi rakentamisen eri vaiheita ja kertoi tehokkeiden aikana merkittävimmistä viivästystä aiheuttaneista vioista ja häiriöistä, joista kuulumme myös varsinaisen Olkiluodon ekskursioiden aikana. Näistä tarkemmin jäljempänä TVO:n kehitysinsinööri Mika Hassisen esityksen referoinnissa otsakkeen 'OL3-käyttöönoton laitoskokeet' alla.

Poikolaiselta tiedusteltiin, mitä asioita hän pitää Olkiluoto 3 -projektista saatuna tärkeimpinä oppeina mahdollisia uusia ydinvoimalaitosprojekteja ajatellen. Poikolainen tiivistä kokemuksista saadut opit kolmeen tärkeimpään asiaan, mitä pitäisi olla valmiina ja arvioituna jo ennen projektin aloitusta: suunnittelun riittävä valmius, toimitusketjun kyvykyys sekä projektinhallinta ja sen integrointi olemassa oleviin rakenteisiin.

Poikolaisen esitystä seurasi illallinen, jolla päästiin toteuttamaan tavoitetta kokemusten vaihtamisesta ja ammatillisesta verkostoitumisesta sekä muutoin vaihtamaan kuulumisia ekskursiomatkalaisten ja muiden seuran jäsenten sekä jo eläköityneiden TVO:laisten kanssa.

Olkiluoto-vierailu 17.8.

TVO:n vierailutoimen päällikkö Mika Tanhuanpää toivotti alkajaisiksi auditoriossa ryhmämme tervetulleeksi. Tämä vuosi oli vierailujen osalta ollut ennätyksellinen. Viimeksi samankaltaisia kävijämääriä oli vuosituhannen vaihteessa. Tanhuanpää muisteli, että tuolloin ihmisiä tuotiin Rauman torilta puo-

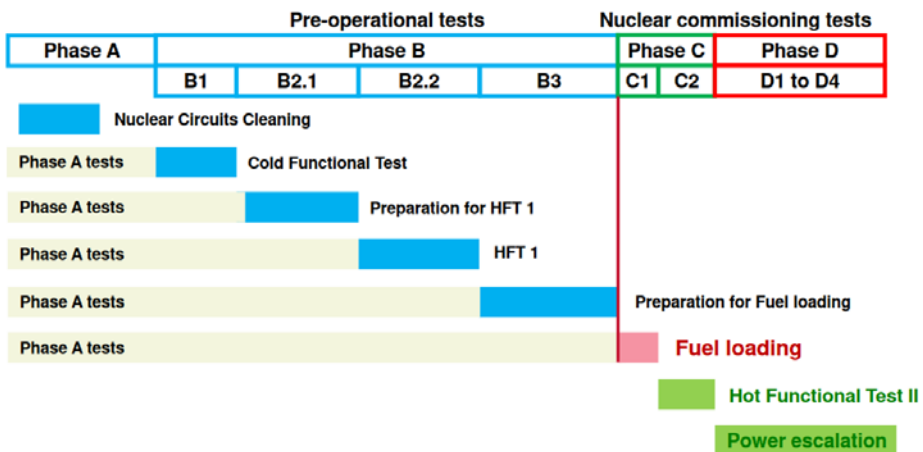
li-ilmaiseksi Olkiluotoon. Nyt ihmiset tulevat puhtaasta mielenkiinnosta. Toki ydinsähkö ja OL3:n käynnistyminen kiinnostaa. Pelkästään heinäkuussa Olkiluodossa kävi yli 2500 vierailijaa.

Tanhuanpää piti lyhyen briiffauksen Olkiluodosta ja TVO-konsernista, joka toimii Manakala-periaatteella tehden sähköä omakustannusperiaatteella vain omistajiensa tarpeisiin. Pieneltä alueelta Olkiluodossa tulee noin 30 % Suomen sähköntarpeesta.

Tanhuanpää esitteli Olkiluodon laitosaluetta ilmakuvasta, jossa näkyivät laitosyksiköt OL1, OL2 ja OL3 sekä infra niiden ympärillä. Laitosyksiköiden etualalla näkyi kuvassa myös käytetyn ydinpolttoaineen välivarasto ja laitokselle tulevan tien varrella käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitustila ONKALO sekä vastikään sinne rakennettu kapselointilaitos. Metsän siimeksessä, niemen pohjoispäässä oli voimalaitosjäteluola ja loppusijoitus matala- ja keskiaktiiviselle jätteelle.

Laitosten edustan merialueella jäähdytysveden purkualue on talvisin sulana ja siihen ohjataan paitsi laitosyksiköiden OL1 ja OL2 niin myös OL3:n jäähdytysvesi. Tanhuanpää kertoi, että jäähdytteenä käytetty merivesi lämpiää noin 11 °C laitoksen läpi kulkiessaan. Se onkin suurin ja näyttävin ympäristövaikutus Olkiluodossa varsinkin talvella, kun purkupuolella ei ole ollenkaan jäätä. Sula-alueen suuruus on aina erikokoinen riippuen talven kylmyydestä.

Jään puuttuminen ja lämpimät olosuhteet luovat tavallista edullisemmat olosuhteet pohjakasvillisuudelle ja eliöille, esimerkiksi kaloille, joten elämä on tuolla alueella tavallista runsaampaa. Vaikutusta on seurattu alusta asti ja meriveden lämpötilan nousulle on myös asetettu ympäristöluvassa raja, jota TVO ei saa ylittää. Sen suhteen TVO ei ole kokenut erityi-



Olkiluoto 3:n käyttöönoton vaiheet.

siä ongelmia. Käytännössä asia näkyy satunnaisina kalastajina merellä purkuvirrassa, josta kalan nappaaminen on tavallista helpompaa. Varsinaisessa purkukanavassa kuitenkin kalastaminen ja veneily on kielletty.

Olkiluoto 3:n käyttöönotto

Laitoksen käyttöönoton ajatuksena on aloittaa laitoksen testaaminen yksittäisistä laitteista ja järjestelmistä ja edetä kohti suurempien kokonaisuuksien testaamista. Tämän tavoitteena on varmentaa, että laitos suoriutuu sille asetetuista turvallisuustavoitteista ja tuotannollisista tavoitteista.

OL3:n käyttöönotto oli jaettu eri vaiheisiin, jotka TVO oli nimennyt vaiheiksi A, B, C ja D. Näistä vaiheet A ja B tapahtuivat ennen ensimmäistä polttoaineen latausta. Laitoksen rakentamisvaiheiden poikkeuksellisten viiveiden vuoksi myös käyttöönoton vaiheistus on ollut poikkeuksellinen ja käyttöönotossa on jouduttu turvautumaan erikoisratkaisuihin.

Perinteisesti käyttöönoton vaiheistus ja aikataulutus alkaa ensimmäisistä järjestelmäkokeista. Olkiluoto 3:n tapauksessa ensimmäiset järjestelmäkokeet valmistuivat jo vuonna 2009 ja suojarakennuksen painekoe tehtiin vuonna 2014. Järjestelmien kylmäkokeet valmistuivat vuonna 2017 ja kuumakokeet 2018. Tuolloin myös laitoksen operaattorit saivat hyväksynnän ja ottivat vastaan koestetut järjestelmät.

Myös OL3:n ydintekninen käyttöönotto, vaiheet C ja D, venyi joidenkin tapahtumien ja vikojen sekä niiden korjauksen vuoksi vuoden mittaiseksi rupeamaksi. Korjauksiin liittyneitä seisokkeja hyödynnettiin myös muiden laitteiden ja järjestelmien tarkastuksiin. STUK tarkasti tehtyjen käyttöönottokokeiden tulokset ja hyväksyi laitosyksikön koekäytön siirtymisen korkeammalle tehotasolle kolmessa vaiheessa: reaktoritehon ylittäessä 5, 30 ja 60 prosenttia täydestä tehosta.

OL3-reaktorisydämen käyttöönotto

Reaktorivalvonnan pääinsinööri Tommi Lamminpää aloitti esityksensä listaamalla ydinteknisen koekäytön merkittävät päivämäärät. Lamminpää esitteli käyttöönoton eri vaiheet, joista esitys paneutui vaiheisiin C, D ja E ja erityisesti näissä tehtyihin reaktorisydämen koestuksiin ja toimintaan. Esitys kohdistui ajoittain syvälle teknisiin yksityiskohtiin ja avasi kuulijalle tarkemmin eri vaiheita ja koestuksia kuvien ja graafien avulla.

Vaihe C kattoi reaktorin lataamisen ja kuumakokeet. Polttoaine saapui laitokselle vuonna 2017 useammassa erässä. Koska myös polt-

toaineen lataus reaktoriin viivästyi eikä tuoreen polttoaineen varastossa ollut riittävästi tilaa koko alkulataukselle, jouduttiin tuoretta polttoainetta säilyttämään jonkin aikaa polttoainevaraston boorivesialtaassa odottamassa latausta. Tämä ei ole tavanomainen menettely, mutta lyhytaikainen säilyttäminen boorivesialtaassa on normaalia eikä siitä ole haittaa polttoaineen pinnoitteelle.

Latauksessa pelkkää tuoretta polttoainetta

Lataaminen tehtiin TVO:n, Arevan sekä Framatomen yhteisorganisaatiolla, ja STUK valvoi toimenpidettä. Kaikki polttoaine reaktorissa oli tuoretta, mikä vaati erityisjärjestelyjä: 4 ylimääräistä neutronivuodetektoria kolmen tavallisen lähdealueen detektorin lisäksi reaktorin sisälle valvomaan alikriittisyyttä sekä kolme primäärineutronilähdettä. Reaktorin lataaminen sujui hyvin, vaikka polttoaineen siirtokoneiden kanssa olikin hieman haasteita vaiheen aikana. Vaiheelle oli varattu 10 päivää ja siitä käytettiin noin 6, vaikka vaiheen aloitus hieman viivästyi.

Vaihe D kattoi tehoajon alkaen ensimmäisestä kriittisyydestä yhteistoimintakokeisiin ja transienttikokeisiin. Tehoa nostettiin neljässä vaiheessa (vaiheet D1 – D4). Alun perin tähän vaiheeseen oli suunniteltu yhteensä 192 testistepiä, joiden määrä koekäytön aikana kuitenkin kasvoi. Koekäyttövaiheiden yhteydessä vaihdettiin myös kokemuksia Kiinassa vuosina 2018 ja 2019 käyttöönotettujen Taishan 1 ja 2 -reaktorien käyttöorganisaation ja laitostoitajan käyttöönottoon osallistuneiden henkilöiden kanssa.

Vaihe D1 (reaktoriteho 0–5 %) sisälsi ensimmäisen kriittisyyden (21.12.2021) ja reaktorisydämeen liittyviä pientehokokeita, jotka oli tehty jo ennen vuodenvaihdetta (29.12.2021). Kokeilla testattiin Olkiluoto 3 -reaktorin ominaisuuksia erilaisissa säätösauvakonfiguraatioissa, joihin päästiin työntämällä säätösauvoja ajoryhmä kerrallaan sisälle sydämeen ja sen jälkeen vetämällä niitä sekvenssin mukaisesti ulos sydäimestä.

Kukin säätösauvojen ajoryhmä muodostuu 1–3 osaryhmästä. Kussakin osaryhmässä on neljä säätösauvaa. Näiden 36 reaktoria säätävän sauvan lisäksi Olkiluoto 3 -yksiköllä on lisäksi 53 pikasulkusauvaa. Käyttöönottokokeiden aikana myös nämä pikasulkusauvat työnnettiin sisälle sydämeen pitäen reaktori samanaikaisesti kriittisenä. Pikasulkusauvojen sisääntyöntö tehtiin kahdena ryhmänä, mutta luonnollisesti reaktoria ei pidetty kriittisenä molemmat pikasulkuryhmät samanaikaisesti sisällä.

Teoria ja mittaukset

Pientehokokeiden tulokset olivat pääosin teoreettisten mallien mukaisia, mutta säätösauvasaryhmien reaktiivisuusvaikutusta mitattaessa kohdattiin ongelmia. Hyväksymiskriteeri reaktiivisuusvaikutukselle oli 10 % ero teoreettiseen arvoon, eikä sitä aluksi saavutettu neljän osaryhmän osalta.

Ongelman korjaamiseksi jouduttiin tekemään uusintamittauksia ja muuttamaan mitausmetodiikkaa, jotta tulokset saatiin hyväksyttäväksi. Mittausmetodiikan muutoksilla pyrittiin pääsemään eroon kaikista mahdollisista epävarmuuksista (muun muassa säätösauvojen varjostustekijöistä), mikä pidensi mitausten kestoa, mutta samalla paransi niiden tarkkuutta.

Toisena havaintona huomattiin, että reaktorin keskellä olevat sauvat olivat suhteessa tehokkaampia teoreettisiin arvoihin verrattuna kuin reunalla olevat, mikä kertoi tehojakauman piikittävän teoreettisia malleja enemmän sydämen keskelle. Sama ilmiö havaittiin myös myöhemmin korkeammilla tehotasolla tehdyissä tehojakaumamittauksissa. Kriittisen booripitoisuuden ja isotermitä lämpötilakerrointa koskevien mittausten mittaustulokset olivat hyvin lähellä teoreettisia arvoja.

Käyttöönottokokeissa Arevan teoreettiset arvot olivat virallisia arvoja, joihin mittaustuloksia verrattiin. Sen ohella myös TVO laskee omalla sydänmallillaan teoreettiset arvot. Kokonaisuutena TVO:n teoreettiset arvot olivat lähempänä mitattuja säätösauvojen reaktiivisuusvaikutusten osalta ja Arevan taas isoterminen lämpötilakerroimen osalta. Kriittiset booripitoisuudet menivät aika tasan.

Vaiheessa D2 (5–30 %) tehoa nostettiin 5 %:n portaissa 30 %:iin kalibroiden neutronitehomittaukset joka tehoportaalla. 25 % teholla tehtiin ensimmäinen tehojakauman mittaus ja sydäntoimintojen kalibrointi. Tehojakauman tulokset olivat samansuuntaisia kuin pientehokokeissa, eli tehojakauma piikitti enemmän keskelle kuin teoreettisissa malleissa.

Tehon nosto portaittain

Vaihe D3 (30–80 %) oli jaettu kahtia, sillä ennen STUKin hyväksyntää reaktorin tehoa ei saanut nostaa yli 60 % täydestä tehosta. Vaiheen päätyttyä saatiin jatkaa yli 80 % teholla pelkästään TVO:n hyväksynnällä seuraavaan vaiheeseen. 60 % teholla (14.–16.4.2022) tehtiin tehojakauman mittaus ja sydäntoimintojen kalibrointi, tehojakauman mittaus poikkeavissa sydänkonfiguraatioissa sekä sydämen säätötoimintojen testejä.

STUKin hyväksynnän jälkeen aloitettiin vaiheen loppupuolisko tehonsäätöä testaavalla ramppikojeella (7.9.2022), missä myös AO-säädin (sydämen aksiaalista tehojakaumaa kontrolloiva säätötoiminto) sekä P-ryhmän säädin (säätötoiminto, joka pitää säätävät säätösauvat halutussa syvyydessä), olivat päällä. Sydämen säätötoimintojen koestuksia ja isompia transienttikokeita lukuun ottamatta nämä säätimet olivat muuten pois päältä käyttöönoton aikana.

Loput vaiheen kokeet tehtiin käytännössä 80 % teholla. Näihin kuului tehojakauman mittausta ja sydäntoimintojen kalibrointi sekä tehojakauman mittausta poikkeavissa sydänkonfiguraatioissa, ksenonvärähtelyjen vaimentumista mittaava koe sekä sydämen säätöjärjestelmän testejä.

Vaiheessa D4 tehtiin tehojakauman mittausta ja sydäntoimintojen kalibrointi, höyrynkosteuden mittausta, Co-60-jäännösvirta-mittaukset reaktorin sisäisten neutronivuodetektoreista pikasulkukokeen jälkeen ja kaksi ramppikoetta.

OL3:n käyttöönotto jatkui vielä maaliskuuhetimitä vuonna 2023 kokeilla ja takuutes-teillä, jotka eivät enää varsinaisesti olleet osa käyttöönottoa. Vaihe E kesti 30 vuorokautta ja siinä tehtiin 10 vuorokauden suorituskykykoe, jonka piti osoittaa, että laitos pystyy operoimaan yhtäjaksoisesti täydellä teholla. Lisäksi tehtiin kolme tehonsäätökokeita, joilla osoitettiin laitoksen pystyvän tehoajoon TVO:n haluamalla tavalla.

OL3-käyttöönoton laitoskokeet

TVO:n kehitysinsinöörin Mika Hassisen esitys keskittyi OL3:n ydinkoekäyttövaiheiden aikaisiin laitostason kokeisiin ja vaiheen aikaisiin merkittävimpiin tapahtumiin. Käyttöönottokokeiden yhteydessä sattui kolme kokeisiin kuulumatonta reaktoripikasulkua.

4.1.2022 laitoksen tehoa alettiin nostaa portaittain 5 % reaktoritehosta 30 % reaktoriteholle. Tehonnoston eri vaiheissa suoritettiin lukuisa joukko reaktoriin ja laitoksen järjestelmien säätimiin liittyviä testauksia. Kun oli päästy 25 % reaktoriteholle, höyrystimien pinnansäätimien testauksen yhteydessä saatiin ensimmäinen varsinainen reaktoripikasulku, joka johtui höyrystimen korkeasta pinnasta. Tapahtuma johti tarpeeseen tehdä muutoksia pinnansäätimen toimintaan matalilla reaktoritehon tasoilla. Myös pinnansäätimen toiminnasta vaihdettiin kokemuksia Kiinan Taishanin yksiköiden kanssa.

Pikasulun jälkeen laitos saatiin varsin pikaisesti takaisin ylös ja vuorossa oli yksi laitoksen merkkipaalu, eli laitoksen tahdistus valtakun-

nan verkkoon. Ennen varsinaista tahdistusta verkkoon tehtiin lukuisa joukko turbiiniin ja generaattoriin liittyviä testejä. Varsinainen tahdistus oli vuorossa 29.1.2022, mutta tämä johti toiseen reaktoripikasulkuun reaktorin korkeasta tehosta generaattorin tehonmittauksessa olleen kytkentävirheen johdosta. Tämän toisen reaktoripikasulun jälkeen laitos ajettiin kylmään sammutustilaan korjaustöitä varten.

Töiden valmistuttua laitos ajettiin uudelleen ylös. 25 % reaktoriteholla saatiin kolmas reaktoripikasulku sekundääripuolen korkeasta höyrynpaineesta. Lauhteen säätöventtiileiden värähtely johti lauhdejärjestelmän menetykseen ja sitä kautta reaktoripikasulkuun korkeasta höyrynpaineesta. Kolmannestakin pikasulusta laitos saatiin nopeasti takaisin tehoille ja laitoksen ensimmäinen tahdistus verkkoon tapahtui 12.3.2022 klo 12:01.

Tahdistuksen jälkeen koekäyttöohjelmassa oli joukko laitoskokeita 30 % reaktoriteholla, jossa koko laitoksen toimintaa testattiin erilaisissa laitostransienteissa, kuten syötönvaihto 400 kV verkosta 110 kV verkkoon ja laitoksen sähkönmenetyskoe, jossa sähkönsyöttö siirtyi hätädieseleiden perään. Tässä kohtaa käyttöönotto sujui suunnitelmien mukaan, ja näissä vaativissa laitostransienteissa laitos toimi suunnitellusti.

Tehtyjen koetulosten analysoinnin ja viranomaiskäsitteilyn jälkeen jatkettiin laitoksen tehonnostoa vaiheittain 30 % reaktoriteholta 80 % teholle. 60 % reaktoriteholle saavuttaessa tehtiin laitoksen käyttäytymistä testaavat häiriötilannekokeet: pääkiertopumpun pysäytyskoe, sekä turbiini- ja reaktoripikasulkukokeet.

Reaktoripikasulkukokeen jälkeen laitos jouduttiin ajamaan taas kylmään sammutustilaan generaattorissa ilmenneen vetyvuodon johdosta. Kylmää sammutustilaa hyödynnettiin turbiinilaitoksella myös muiden tarkastusten suorittamisessa, joiden yhteydessä havaittiin irto-osia järjestelmissä, mikä johti kylmäseoskin pidentymiseen tarvittavien selvitysten ja korjaustöiden johdosta.

24.9.2022 käyttöönotossa jatkettiin laitoksen tehonnostoa 80 % tasolta 100 %:iin, johon päästiin ensimmäisen kerran 30.9.2022. Laitoskokeet aloitettiin syöttövesipumpun menetyskokeella ja reaktoripikasulkukokeella 100 % reaktoriteholta.

Säröt pääsyöttövesipumppujen juoksupyörissä

Laitosvaste näihin transientteihin oli suunnitellun mukainen, mutta laitos ajettiin lokakuussa 2022 etukäteen suunnitellun mukaisesti alas kylmään sammutustilaan yhden syöttövesi-

pumpun tiivistevuodon korjauksen johdosta. Tässä yhteydessä syöttövesipumppuihin tehtiin muitakin tarkastuksia, joiden yhteydessä havaittiin säröjä kaikkien pumppujen juoksupyörissä.

Tämä pidensi seisokkia aina joulukuun loppuun asti, ja 27.12.2022 laitos tahdistettiin uudelleen verkkoon viimeisten laitoskokeiden suorittamiseksi. Tämä loppuvaiheen testirupeama oli varsin mittava ja eteni suunnitellusti ilman keskeytyksiä siten, että koko käyttöönottovaiheen viimeinen laitoskoe saatiin tehtyä 9.1.2023. Syöttövesipumppujen juoksupyörien tarkastukset johtivat niiden vaihtoon. Uudet, muotoilultaan vahvistetut juoksupyörät vaihdettiin kaikkiin neljään pumppuun maaliskuussa 2023.

Käyttöönoton laitoskokeet onnistuivat hyvin, ja laitoksen käyttäytyminen näissä transienteissa oli suunnittelun mukainen. Kun käyttöönoton eri vaiheissa päästiin laitoskokeisiin, niin testit sujuivat lähes aikataulusaan. Käyttöönottokokeiden merkittävimmät haasteet olivatkin yksittäisten säätimien toiminnassa, joiden virittämiseen ja tarvittaviin muutoksiin kului iso osa käyttöönoton ajasta.

Käyttöönotoissa löydettiin joukko korjattavia laitoksen termohydrauliikan ja säätimien yhteistoimintaan liittyviä säätötarpeita, jotka korjattiin. Kaikkien säätötarpeiden havaitseminen ja korjaaminen vesi-höyryseoksen käyttäytymistä ja prosessia simuloivilla tietokoneohjelmilla ja simulaattorimalleilla ennen käyttöönottokokeita oli hyvin haastavaa.

Koko käyttöönoton aikana saatiin kolme suunnittelematonta reaktoripikasulkua, mitä voidaan pitää vähäisenä määränä. Yhdistävänä tekijänä näissä kaikissa pikasuluissa oli jonkin säätimen virheellinen tai puutteellinen toiminta. Reaktoripikasuluissa laitos kuitenkin toimi suunnitellusti, eivätkä tapahtumat vaarantaneet turvallisuutta.

Tekniset esitykset olivat mielenkiintoisia ja herättivät suuren joukon kysymyksiä, mutta ryhmä joutui siirtymään laitoskierrokselle.

Tutustuminen laitosalueeseen

Laitoskierros tehtiin suuren ryhmäkoon vuoksi bussikuljetuksella. Opastuksesta huolehti vierailutoimen päällikkö Mika Tanhuanpää. Etupenkillä istui myös turvajärjestelyistä vastaava vartija. Kierroksella pysähdyttiin ensin Posivan ONKALO-alueen reunalla, jonka pihalueta kunnostettiin ja asfaltointi oli parhaallaan käynnissä.

Alueelle oli rakennettu uudenuutukainen kapselointilaitos, jonka kaksi rakennusta maastoutuivat hyvin ympäristöön vihreän

Ekskursion osallistujat Olkiluodon vierailukeskuksen auditoriossa (kuva: Samuli Siltanen).



ulkokuorensa ansiosta. Matalampi rakennus on toimistorakennus ja korkeampi varsinainen kapselointilaitos, jonka korkean tornin sisäpuolella on nosturi, jolla siirretään käytettyä ydinpolttoainetta kapseliin sekä sitä sisältävää siirtosäiliötä tai kapselia. Tanhuanpää läpikävi kapselointiprosessin, mihin sisältyy käytettyjen polttoaineen nappujen kuljetus, kuivaus, asettaminen kapseliin, kapselin sulkeminen ja tarkastaminen ennen puskurivarastoon siirtämistä.

Kapselien valmistuttua yhden tunnelin tarpeisiin aloitetaan maanalaisten tunnelin täyttäminen yksi kerrallaan. Yhden tunnelin valmistuttua alkaa uusien kapselien täyttö seuraavaa tunnelia varten. Kaiken tämän toiminnan aloitus on jo lähellä. Joitakin kapseloinnin avainlaitteita ei ole vielä toimitettu. Hissit kapseloiden laskemiseksi luolaan suoraan kapselointilaitokselta sekä erillinen henkilöhissi ovat jo valmiina.

Seuraavaksi ajettiin kytkinkentän ohi ja pysähdyttiin parkkipaikalle OL2:n eteen katsomaan laitosta aidan takaa. OL2:n katolla oli vahvat pressut siellä tehtävän kattoremontin vuoksi. Laitoksen kyljessä näkyi uusien varavomadieseleiden rakenteita. OL1- ja OL2-laitosyksiköiden kaikki kahdeksan varavomadieselgeneraattoria vaihdetaan uusiin vaasalaisen Wärtsilä Finlandin varavomadieselgeneraattoreihin.

Varavoimauudistus käynnissä

Varavomadieselgeneraattoreiden vaihtotyö aloitettiin vuonna 2020, jolloin otettiin käyttöön uusi, tehoajon aikaisen dieselgeneraattorien uusinnan mahdollistava yhdeksäs vara-

dieselgeneraattori, jota käytetään korvaamaan kulloinkin vaihdon vuoksi irrotettua dieselgeneraattoria. Samana syksynä aloitettiin olemassa olevien dieselgeneraattorien vaihto purkamalla ja korvaamalla ensin yksi OL1:n dieselgeneraattori. Vuoden 2022 loppuun mennessä oli OL1:llä uusittu yksi dieselgeneraattori ja OL2:lla kaksi dieselgeneraattoria. Loput dieselgeneraattorit asennetaan ja otetaan käyttöön yksi kerrallaan kevääseen 2025 mennessä.

OL1/OL2-portilta ajettiin laitosten taitse ihailemaan OL3:sta. Paras näkymä oli OL3:n työntekijöiden parkkipaikalta, joka sijaitsee aivan jäähdytysveden purkukanavan vieressä. Laitoskompleksi kaikine rakennuksineen on vaikuttava.

Tanhuanpään opastuksella yritimme tunnistaa suojarakennuksen ja turbiinihallin lisäksi myös muita hänen mainitsemiaan rakennuksia, kuten esimerkiksi toista dieselrakennusta. OL3:n parkkipaikalta suuntasimme kohti voimalaitosjätteen (VLJ) loppusijoituspaikkaa ja sen maanpäällistä sisäänkulkua- ja valvomorakennusta, josta operoidaan 60 metrin syvyydessä olevaa jätteitä käsittelevää nosturia.

Matkalla ohitimme koulutuskeskuksen, jossa sijaitsee muun muassa OL3-valvomosimulaattori. Samana päivänä Olkiluodossa vierailijoiden ydinvoimaseniorien, joilla oli oma vierailuohjelmansa, mukaan valvomosimulaattori oli ollut heidän paras vierailukohde. TVO:lla jo 18 vuotta työskennellyt simulaattorikoulutuksen päällikkö (yksi alkuperäisistä OL3:n vuoropäälliköistä) oli esitellyt simulaattoria. Simulaattorikäynnillä korvataan käynti päävalvomoissa, jossa operaattoreil-

la on täysi työrauha eikä ulkopuolisia sinne päästetä.

Kiertoaajelun aikana seuran jäseniä kiinnosti TVO:n edustussuunnan olemassaolo ja sijainti sekä kaukana hämmäyttävät viiniviljelmät. Kiertoaajelun päätteeksi meitä odottikin kahvin lisäksi limonadipullot, joiden kauniin värinen sisältö oli valmistettu Olkiluodon viiniköynnösten rypäleistä. Limonadin maku oli raikas ja täyteläinen, joten varmasti erinomainen ruokajuomanakin. Kahvin jälkeen ei vierailukeskuksen näyttelyyn ennätetty juuriakaan enää tutustua bussin startatessa kohti Otaniemeä.

Kotimatka Högforsin kautta

Kotimatalla pysähdymme Karkkilassa Högforsin Tehtaan Hotellille ruokailemaan. Hotelli sijaitsee tunnelmallisessa ruokkiympäristössä, kuohuvan Karjaanjoen rannalla. Suomen mahdollista ruukkia, Högforsin valimoa, aikoinaan hallinneet ruukkipatruunat vaativat arvonsa mukaiset asunnot. Historiaa huokuvat talot on vanhaa kunnioittaen kunnostettu hotelli-, ravintola- ja juhlaikäyttöön sopiviksi.

Tehtaan Hotellin uusi omistaja oli ennätänyt olla puikoissa vasta 6 viikkoa. Ylpeänä hän kertoi alueen historiasta ja tulevaisuuden suunnitelmista toiminnan kehittämiseksi. Päivällinen oli seisovasta pöydästä, jossa oli tarjolla riistakäristystä ja herkullisia haukipihvejä, eli hauki-Wallenbergejä, joiden kuohkeuden salaisuutena oli tietenkin taikinan vaahdotettu kerma. Jatkoimme kotimatkaa kylläisinä ja vielä yhtä vierailukohdetta, jonne tekisi mieli palata, rikkaampana. Helsinkiin oli enää tunnin ajomatka. 🍷

Lämpövoimakkerho at Torness Nuclear Power Station

A year ago in August 2022, 14 energy technology students with Assistant Professor Annukka Santasalo-Aarnio from Aalto University headed to Iceland and Scotland for 16 days. The trip was an abroad excursion of the Energy Engineering Club 'LVK' (Lämpövoimakkerho). The main purpose of the journey was to get familiar with these two countries and their cultures, but also to get an update on the advances of local energy technologies and infrastructure. One of the highlights was the visit to the Torness Nuclear Power Station in Scotland. This article is part of the excursion magazine published in January 2023.

Text: Kasperi Haapanen **Photos:** Lämpövoimakkerho

OUR FIRST EXCURSION DAY in Scotland started on an autumn morning in Edinburgh. We walked from the motel to the city centre and the bus station, from where we took the bus towards Torness. The trip from Edinburgh to Torness took about an hour, so planning the schedule and buying the bus tickets wasn't easy. There is no sin-



Kasperi Haapanen

Tekniikan kandidaatti
Aalto-yliopisto, ATS YG representative
kasperi.haapanen@aalto.fi

gle operator in Scotland that operates in the same way as HSL in the entire Finnish capital region. However, we managed to find a local operator who drove to Torness directly from Edinburgh city centre. We didn't miss the cars that we had earlier in Iceland for long, because the bus connection worked well in the end.

After the bus ride we were not able to miss the power station. Our first reaction was a mixture of amazement, admiration, and caution. If you have seen a movie about nuclear power, the facade of the power station was exactly what you can imagine apart from the missing cooling towers. When we arrived at the plant gate, we were welcomed by three lovely ladies who worked as our tour guides.

What we knew when leaving Finland

In practice, the type of nuclear reactor is determined by the cooler and the neutron moderator. The cooler stabilises the heat produced by the reactor and transports the heat away from the reactor itself. The moderator reduces the kinetic energy of neutrons to de-

sired energy level by collisions with lighter nuclei, such as water or graphite.

All reactors operating in Finland are light water reactors. Fortum's reactors located in Loviisa are pressurised water reactors (PWR), where the primary coolant releases its thermal energy in the steam generator to the secondary steam turbine cycle. Olkiluoto's two old reactors are boiling water reactors (BWR), in which water is simply boiled in the reactor and the steam obtained from it turns a turbine. Olkiluoto 3 is a newer European pressurised water reactor (EPR), which is a third-generation nuclear reactor type.

AGR

Advanced gas cooled reactor (AGR) is a second-generation reactor type using graphite as the neutron moderator and carbon dioxide as coolant. One of the biggest differences to the reactors used in Finland is of course the absence of water as a large part of the system.

Another significant difference is in the operating conditions of the reactor. In the steam turbine circuit, the temperature affects the efficiency, but in BWR the temperature of the circulating coolant is practically limited to the boiling point of water. In PWR, the higher pressure keeps the water as a liquid, and the operating temperature of the reactor is thus higher as well.

Gas-cooled reactors do not have a corresponding limitation, which would result from the sensitive change in the state of water. In AGR reactors, the carbon dioxide coolant gets very hot in the reactor core, which results in high efficiency.

Torness NPP

There are two identical reactors in Torness and together they produce more than 1300 MW of carbon free electricity. As told, both the reactor and the plant differ in many ways from the nuclear power plants used in Finland, so we had a lot to learn. During our visit we were lucky to be able to see some main parts, such as the reactor hall, turbine hall, and control room in direct action.

One of the reactors was undergoing maintenance, and as we looked into the reactor hall, we saw a big machine above the reactor cover. It looked like a construction machine, but our

Students heading to the nuclear plant. The first view was rugged but caused an immediate desire to see what is inside.

guides specified that there was a refuelling going on so that mysterious machine was a refuelling machine.

We were first confused when the reactor produced electricity at about half the power. For example, when refuelling a BWR, the cover of the reactor's pressure vessel must be opened, and before that the plant must be disconnected from the grid and shut down. We were told that the gas cooled reactor can be refuelled during run as only part of the reactor is out of use.

Compared to Finland, the British nuclear power situation is partly similar but also different. The older facilities are getting old, and the aim is to continue using them as long as possible. However, reactors in the UK are completely different and so are their pros and cons.

Lifetime is one of the measures of profitability when planning any energy solution. In Finland for example, the use of older light water reactors is planned to continue for decades more. The service life of a gas cooled

nuclear reactor depends a lot on the graphite used, which sooner or later begins to crack as the radiation dose increases. Eventually, the cracking and expansion due to heat and pressure start to affect the core geometry and, for example, the integrity of the fuel and safety functions. During our visit we learned that even though AGR has relatively good efficiency, the lifetime is not so great.

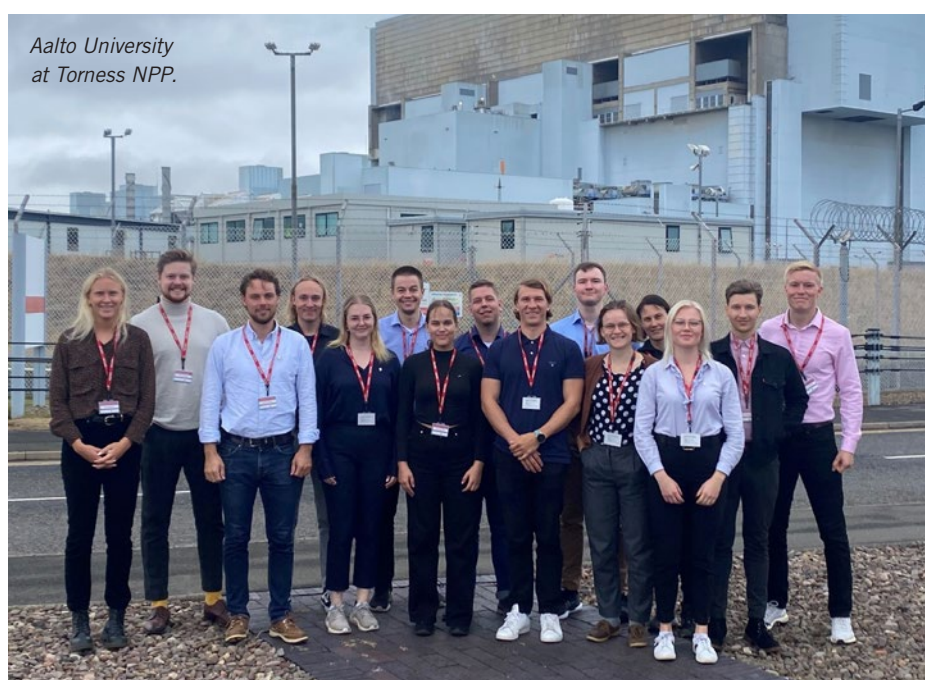
Conclusion

In Great Britain, a lot of new capacity is needed to replace the end-of-life gas-cooled AGR plants, and to reduce dependence on fossil fuels. We are looking forward to seeing which direction nuclear power technology is going in Great Britain: whether they will seriously start developing small modular reactors or are they going to invest in EPR's for example.

Overall, we were really satisfied with the excursion, it totally exceeded all our expectations. What really made the journey exciting was the fact that for most of us, this visit was the first ever to any kind of nuclear power plant.

Our guides were very pleased that they had a chance to hear our traditional Finnish excursion song. After visiting the Torness plant, we were advised to visit a beach just next to the plant area. After visiting the old and partly rugged power plant, the beautiful beach scenery and fresh air were a very nice experience before the long bus ride back to Edinburgh. The return trip was a bit longer, almost two hours, but at least we were able to see the local infrastructure and scenery outside of the city.

This article was originally published in Lämpövoimakerto's excursion publication in January 2023. You can read more about our trip at www.lvk.ayy.fi/en/overseas-excursion-2022



*Aalto University
at Torness NPP.*

Rankkasadetta ja pienreaktoreita

DENSEn ensimmäinen vuosiseminaari Otaniemessä 28.–29.8.2023

Ydinturvallisuuden ja ydinjätehuollon tutkimuskenttään kuuluu tieteenaloja fysiikasta, kemiasta, geologiasta ja insinööritieteistä psykologiaan ja sosiolgiaan. Kun altistetaan nuoret tutkijat tähän monitieteelliseen maailmaan, voidaan saada aikaan asiantuntijoita, jotka ymmärtävät oman erityisalansa lisäksi sen liittynyt suurempaan kokonaisuuteen. Tämä ymmärrys on keskeistä sekä tieteenalojen että kokonaisturvallisuuden edistymisen kannalta.

Teksti ja kuvat: Jarmo Ala-Heikkilä

TÄMÄN VUODEN ALUSTA ALOITTANUT uusi SAFER2028-tutkimusohjelma jatkaa aiempien SAFIR- ja KYT-ohjelmien perinnettä. Uutta tutkimusohjelmaa on avattu aiemmissa ATS Ydintekniikan numeroissa: STUKin Marja-Leena Järvisen ja Tomi Routamon artikkelissa numerossa 3/2022 ja ohjelmajohtaja Suvi Karvosen pääkirjoituksessa numerossa 1/2023.



Jarmo Ala-Heikkilä

TkT, asiantuntija
DENSE-verkoston koordinaattori
Aalto-yliopisto
jarmo.ala-heikkila@aalto.fi

Uuden ohjelman suurin uudistus on ydinturvallisuuden ja ydinjätehuollon tutkimusohjelmien yhdistäminen yhden sateenvarjon alle. Tästä odotetaan perustellusti saavutettavan synergiaetuja. Mielestäni toiseksi merkittävin uudistus on tohtoriohjelmaverkosto DENSEn perustaminen (Doctoral Education Network of SAFER). DENSEn tavoitteena on luoda verkostoja SAFERin sisällä toimivien tutkijoiden kesken sekä verkottaa yliopistot tiiviimmin muuhun SAFER-yhteisöön.

Taustalla viisivuotinen YTERA

Ydinenergia-alan tutkimuksen parissa pitkään toimineet saanevat DENSEstä de- ja -vu-elämyksen, ja sille on luonnollinen selitys. Vuosina 2012–16 oli toiminnassa Ydintekniikan ja radiokemian tohtoriohjelma YTERA, jossa yliopistoista mukana olivat Aalto, HY ja LUT sekä tutkimuslaitoksista VTT. Lisäksi alan viranomaiset, voimayhtiöt ja Posiva osallistuivat aktiivisesti YTERAN ohjaukseen ja yhtiöt myös rahoitukseen.

YTERAn ensimmäisestä vuosiseminaarista kerrottiin ATS Ydintekniikan numerossa 2/2012 ja sen toiminnan loppumisesta nu-

merossa 3/2015. Toimintavuosiensa aikana YTERAan osallistui yli 40 tohtoriopiskelijaa ja sen puitteissa julkaistiin yli 20 väitöskirjaa, joten konsepti oli selkeästi tuloksellinen.

YTERAlle koitti kuitenkin ennen aikainen loppu, koska opetus- ja kulttuuriministeriö (OKM) ja Suomen Akatemia (SA) päätyivät vuonna 2013 uudistamaan suomalaisen tohtorikoulutuksen. Aiemmasta keskitetystä mallista, jossa tohtorikoulutusverkostot perustettiin SA:n päätöksellä, siirryttiin yliopistojen ”autonomiia” korostavaan malliin. Lainausmerkit ovat tarpeen, koska valtaosa yliopistojen tutkimuksesta rahoitetaan kilpailullalla rahoituksella, jota myöntävät SA, EU ynnä muut rahoittajat omilla kriteereillään.

Verkosto osaksi tutkimusohjelmaa

Vuoden 2016 uudessa tilanteessa oli tavoitteena jatkaa YTERAn kaltaista toimintaa yliopistojen kesken. Kun kuitenkin kansalliselta verkostolta puuttui keskitetty rahoitus, yhteistoiminta jäi satunnaiseksi.

Positiiviset kokemukset YTERAsta jäivät toimijoiden takaraivoihin. SAFER2028-tutkimusohjelman suunnittelussa, kun tehtiin lakimuutoksia vaativia uusia ratkaisuja, oli tilaisuus ottaa ydinalan tohtorikoulutusverkosto haltuun luontevaan paikkaan, julkisrahoitteisen tutkimusohjelman yhteyteen. DENSEn perusteet ja kaavailut toimintamallit kirjattiin SAFER-runkosuunnitelmaan (www.safer2028.fi).

DENSEn rahoituselementtejä on kaksi: maksimissaan nelivuotinen palkkarahoitus päätoimisille tohtoriopiskelijoille sekä toimintatarhoitus verkostolle. Nämä molemmat alokoidaan SAFERin kokonaispotista, ja kun potti inflaatiokorjauksesta huolimatta pieneni uuden ohjelmakauden alkaessa, kilpailu osoitautui tiukaksi.

Verkostoitumista ulkomailta ja kotimaasta

Kuluvalle vuodelle saatiin DENSE-palkkarahotusta kolmelle tohtoriopiskelijalle, mikä oli ennakkoodotuksia vähemmän. Toimintarahasta, joka siis on koko verkoston käytettävissä palkkarahoituksen lähteestä riippumatta, voimme jakaa apurahoja konferenssi- ja kesäkouluosalistumisiin sekä tutkijavaihtoon. Sitä myönnettiin DENSElle koko kuusivuotiskaudeksi sen verran, että DENSE-ohjausryhmä voi myön-

Linda Kumpula työ- ja elinkeinoministeriöstä avasi ensimmäisen DENSE-vuosiseminaarin.

tää apurahan arviolta 10–15 tohtoriopiskelijalle vuodessa.

Osa DENSE-toimintarahasta käytetään konkreettiseen tieteelliseen verkostoitumiseen kotimaassa, mikä suomeksi tarkoittaa vuosiseminaarin järjestämistä. Vihdoin siis pääsemme otsikon asiaan: ensimmäinen DENSE-vuosiseminaari järjestettiin 28.–29.8.2023 Otaniemessä Aalto Design Factoryssa.

Aalto Design Factory (ADF) on Aalto-yliopiston perustamisesta alkaen toiminut tila, jonka tarkoituksena on toimia tuotekehityksen tutkimus- ja oppimisympäristönä. ADF edistää tieteidenvälistä ja ongelmalähtöistä oppimiskulttuuria, ja se muutti uusiin tiloihin tänä keväänä. DENSE hyödynsi ADF:ssä olevaa seminaarisalia ja sen oheistiloja sekä hengitti monitieteellistä ilmaa puolentoista päivän ajan.

Kolmenlaisia esityksiä

Ensimmäisen DENSE-seminaarin avaajana toimi Linda Kumpula työ- ja elinkeinoministeriöstä. Seminaarin puhujavieraiksi oli kutsuttu tämänhetkisen kuuman aiheen eli pienreaktorien (SMR) kehittäjiä: Ziemowit Iwanski kertoi Ultra Safe Nuclear -yhtiön (USNC) mikroreaktorista, joka on erityisesti LUT-yliopiston kiinnostuksen kohteena, ja Tuomo Huttunen kertoi Rolls-Royce SMR:stä, joka tuntuu kiinnostavan voimayhtiöitä.

Ohjelmassa kuultiin SAFER-tutkimuksen loppukäyttäjien eli STUKin ja ydinalan yhtiöiden esitykset niiden tämänhetkisestä tut-



kimus- ja kehitystoiminnasta ja lähivuosien painopisteistä. DENSE-verkoston tohtoriopiskelijathan ovat organisaatioiden potentiaalisia työntekijöitä muutaman vuoden päästä.

Seminaarin keskeistä sisältöä olivat tohtoriopiskelijoiden esitykset tutkimusprojekteistaan. Kuulimme esityksiä radiokemiasta, ydinjätehuollosta, bentoniitista, kalliomekaniikasta, käyttöturvallisuudesta, neutroniikasta ja lähedermistä. Esittäjät kattoivat Suomen ydinenergia-alan tutkimusorganisaatiot melkoisen hyvin: edustettuina olivat tutkimuslaitoksista VTT ja yliopistoista Aalto, Helsinki, Itä-Suomi, Jyväskylä ja Lappeenranta.

Verkostoitumisen edistämiseksi seminaari-ohjelmassa oli reilusti taukoja. Ensimmäiselle illalle kaavailtu pitempi peli- ja seurustelusesio kuitenkin kuivui vähän kasaan – tai oikeastaan huuhtoutui pois – koska 28.8. kertyi

Etelä-Espoossa viralliseen mittariin 46 mm sadevettä. Onneksi ADF:n tiloissa oli joitakin ajanviettomahdollisuuksia kuten pingispöytä ja pöytäfutis sekä kokoelma säkkituoleja.

Perustimme tutkijaverkoston

Tätä kirjoittaessani seminaaripalautteen kerääminen on vielä käynnissä, mutta tuntuma jäi voittopuolisesti positiivisen puolelle. Tältä pohjalta voimme lähteä suunnittelemaan toista DENSE-vuosiseminaaria vuodelle 2024.

Ensimmäisen DENSE-vuosiseminaarin teemaksi oli määritelty tutkijaverkoston perustaminen, ja mielestäni se tuli tämän yhdessäolon myötä saavutettua. DENSE-sähköpostilista, jolla on nyt 40 tohtoriopiskelijaa ja 20 vanhempaa tieteenharjoittajaa, ei vielä verkostoa luo, vaan oikea ihmisverkosto vaatii fyysisiä kohtaamisia. Verkoston toiminta kehittyi SAFER2028:n kuusivuotisen kauden aikana eteenpäin, ja näkymänä on tehdä verkostosta myös tulevien SAFER-tutkimusohjelmien tärkeä palanen.

Verkostoon voi liittyä helposti ottamalla yhteyttä DENSE-koordinaattoriin. Verkosto on tarkoitettu SAFERin tutkimushankkeissa toimiville tohtoriopiskelijoille ja heidän ohjaajilleen ja valvojilleen. Verkostoon voi liittyä myös, vaikka juuri tällä hetkellä ei nauttisi SAFER-rahoitusta mutta tekee ydinenergiaan liittyvää tutkimusta. Liittyminen ei velvoita mihinkään muuhun kuin vastaanottamaan muutaman DENSE-aiheisen sähköpostin silloin tällöin. Tervetuloa mukaan!

DENSE-vuosiseminaari pidettiin Aalto Design Factoryn salissa ja siihen osallistui noin 40 nuorempaa ja vanhempaa tieteenharjoittajaa.



Posivan "Safety case"-seminaari Helsingissä

Maailman ensimmäinen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen turvallisuusperustelun esittely herätti paljon kiinnostusta Posivan järjestämässä seminaarissa viime kesäkuussa. Posivan turvallisuusperustelun mukaan Olkiluodon kallioperä on soveltuva loppusijoitukselle.

Teksti: Sophie Haapalehto **Kuvat:** Sophie Haapalehto/Posiva Oy

POSIVA JÄRJESTI 15.6.2023 "Safety Case"-seminaarin helteisessä Helsingin Presidentti-hotellin auditoriossa. Seminaariin oli mahdollisuus myös osallistua etänä. Paikan päällä oli posivalaisten ja Posiva Solutionsin edustajien lisäksi edustajia ulkomaalaisista jäteorganisaatioista (SKB, NWMO), viranomaisedustusta (STUK, SSM) sekä konsulttiyritysten edustajia. Yleisön onneksi viiennetty auditorion täytti noin 80 henkilön joukko, ja linjoilla oli noin 150 henkilöä seuraamassa seminaarin esityksiä eri puolelta maailmaa.

Tilaisuus oli historiallinen, sillä kyseessä oli maailman ensimmäisen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen turvallisuusperustelun esittely. Turvallisuusperustelu kattaa kaksi loppusijoituslaitosta: käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen sekä matalan ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituslaitoksen. Turvallisuusperustelun kirjoittamisen aikana Posiva on tehnyt niin kutsutun aineiston jäädätyksen, jonka jälkeen konseptiin on tehty muutoksia ja näistä merkittävimmät esiteltiin yleisölle.

suusperustelu kiteyttää 40 vuoden ajan tehdyt tutkimukset. Turvallisuusperustelu perustuu voimassa oleviin lakeihin, viranomaisten vaatimuksiin ja sillä haetaan kansainvälistä vertaisuutta.

TURVA-2020-projektin projektipäällikkö Barbara Pastina esitteli Posivan "Safety case for the Operating Licence Application"-aineiston (SC-OLA) rakenteen sekä tämän pääraporttien roolin turvallisuusperustelussa. SC-OLA on jaettu kolmeen eri projektiin: TURVA-2020, "Olkiluoto Site Description" (OSD) sekä "Biosphere Assessment" (BSA), jotka osallaan ovat tuottaneet useita raportteja.

Turvallisuusperustelun kahdeksan pääraporttia sekä muut taustaraportit

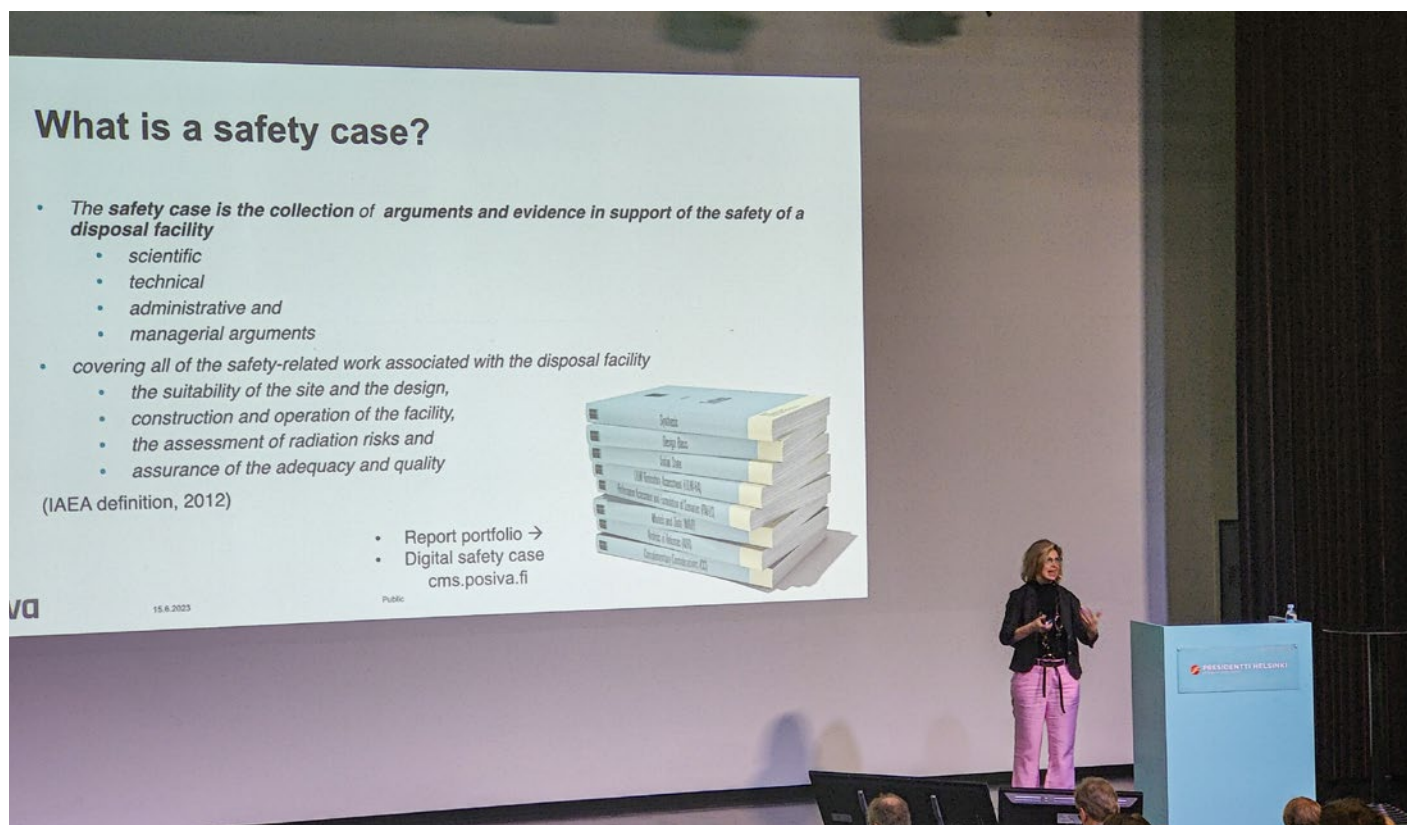
Turvallisuusperustelu on jaettu kahdeksaan pääraporttiin. Niistä jokainen osallaan tuottaa tiedot, joihin Olkiluodon soveltuvuus valittuun loppusijoituskonseptiin perustuu. SC-OLA:n ensimmäinen pääraportti on "Design Basis"-raportti, joka esittelee loppusijoitusta ohjaavat pitkäaikaisturvallisuusvaatimukset ja niiden väliset riippuvuudet. Loppusijoituksessa toteutetaan pitkäaikaisturvallisuusvaatimuksia, jotka ohjaavat muun muassa rakentamista ja sijoituspaikan valintaa. Vaatimusjärjestelmä



FM Sophie Haapalehto
Järjestelmävastaava
Posiva Oy
sophie.haapalehto@posiva.fi

TURVA-2020-projektin tarkoitus

Tilaisuuden avasi Posivan kehitysjohtaja Tiina Jalonen. Posivan käyttöluopan liitetty turvalli-



on hierarkkinen siten, että ylin taso ohjaa yleisiä asioita ja alin taso taas hyvin yksityiskohtaisia parametreja.

Seuraava raportti, "Initial State" (IS), esittää yksityiskohtaisen kuvauksen KBS-3V-konseptin mukaisesta loppusijoitusjärjestelmästä Olkiluodossa. Samassa raportissa arvioidaan myös siihen liittyvät epävarmuudet, sekä mahdolliset havaitsematta jäävät poikkeamat.

"Olkiluoto Site Description"-raportin esitteli OSD-projektin projektipäällikkö Susanna Aro. Kyseinen raportti ei ole osana turvallisuusperustelun pääraportteja, vaan on oma yksittäinen taustaraportti turvallisuusperustelun aineistolle. Raportti keskittyy Olkiluodon karakterisointiin eri luonnontieteen aloilla. Niihin tiivistyy paikkatutkimusten ja rakentamisen aikaiset havainnot Olkiluodon kallioperästä ja pintaympäristöstä kymmenien vuosien varrelta.

Yleisölle esiteltiin muun muassa kalliomekaanisten, hydrogeologisten ja hydrogeokemiallisten tutkimusten tuloksia. Useilla tieteenaloilla on tehty lukuisia mittauksia ja esimerkiksi hydrogeokemian näytteitä on analysoitu yli 2000 kappaletta vuosien saatossa. Olkiluodon kallioperä on geologisten tutkimusten perusteella yli 2 miljardia vuotta vanhaa. Tutkimustietojen avulla on pystytty määrittämään, kuinka Olkiluodon kallioperän vesikemia on muokkautunut nykyisenlaiseksi.

Geokemiallisesti Olkiluodon näytteissä havaitaan myös hydrogeologian paleologiset kehityssasteet, jotka vaikuttavat suoraan pohjavesien kemiallisiin ominaisuuksiin, esimerkiksi Litorinameren suotautumat kallion rakoja pitkin syvemmälle kallioon. Litorinameri on nykyisen Itämeren laajempi ja varhaisempi vaihe, jossa merivesi oli nykyistä suolaisempaa.

Mallit ja epävarmuudet kuvattu

ONKALON rakentamisen aloitusvuodesta 2004 saakka tutkimustuloksissa havaitaan maanalaisen rakentamisen vaikutukset pohjaveden virtaukseen ja kemiaan. Rakentamisen aikana on kuitenkin onnistuttu esimerkiksi tunneleiden tiivistämisellä pitämään rakentamisen vaikutukset mahdollisimman pieninä.

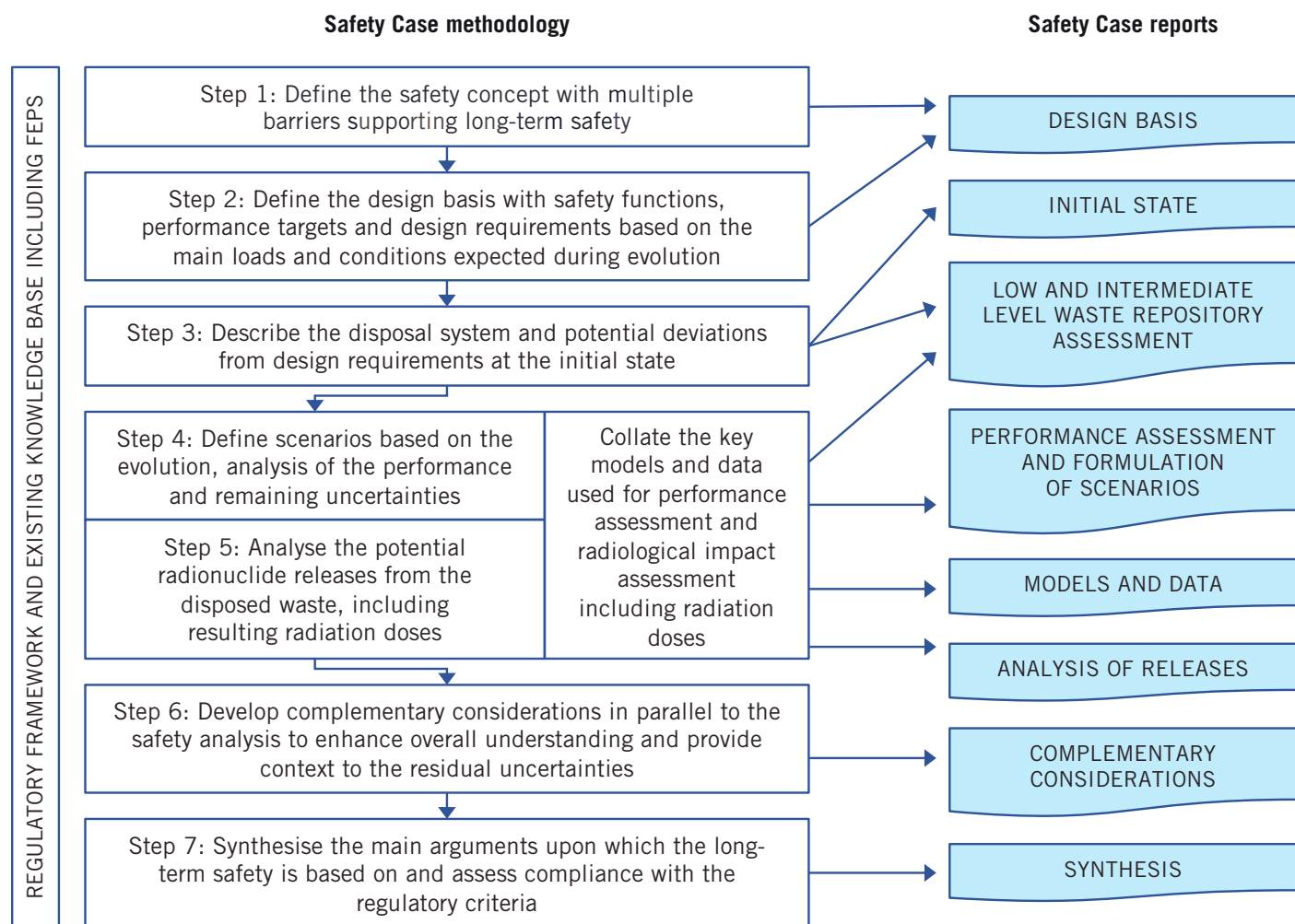
"Performance Assessment and Formation of Scenarios"-raportti (PAFOS) esittelee puolestaan toimintakykyarvion ja siihen liittyviä epävarmuuksia. Sellaisia epävarmuuksia ovat muun muassa IS:ssä esitelty havaitsematta jääneet poikkeamat. Lasse Koskinen kertoi, että epävarmuuksiin sisältyvät esimerkiksi ilmaston tuleva kehitys, maanjäristykset, kapselin mekaaninen kehitys, bentoniittipuskurin stabiilisuus, pohjaveden suolaisuuden kehitys ja kuparin sulfidikorroosio.

TURVA-2020-projektin projektipäällikkö Barbara Pastina esittelee yleisölle turvallisuusperustelun määrittelmän kuten IAEA sen määrittelee.

Kaikista epävarmuuksista on tehty eri parametreilla eri skenaariota. Näiden epävarmuuksien perusteella on laadittu "Analyses of Releases"-raportti. AOR:ssä on esitetty mahdollisia reittejä rikkoutuneesta kapselista vapautuneille nuklideille sekä mahdollisten päästöjen annoksia maan pinnalla. Antti Poteri kertoi, että näiden mallien mukaan mahdolliset päästöt pysyvät selvästi alle viranomaisten määrittämän 0,1 mSv annoksen.

"Complementary Considerations"-raportti esittelee muita Olkiluodon ulkopuolisia luonnon analogioita menneisyydestä ja tulevaisuudesta muun muassa Posivan Saimaa-projektin tulosten kautta. Saimaa-projektissa tutkittiin Etelä-Karjalaan kairattujen syväkairareikien avulla, kuinka jääkauden muodostaman jäätikön makea vesi suotautuu kallioon rakoja pitkin ja mitä vaikutuksia vedellä on kallioon ja pohjaveden geokemiaan.

Osana pääraporttisarjaa Posiva on myös laatinut "Models and Data"-raportin, "Synthesis"-raportin sekä "LILW-Repository Assessment"-raportin. Kyseiset raportit ovat keskittyneet



Posivan käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen turvallisuusperustelussa käytettiin kuvassa esitettyä metodologiaa. Jokainen vaihe on tuottanut lopputuloksena yhden turvallisuusperustelun pääraporteista.

järjestyksessä AOR-raportissa käytettyjen aineistojen ja mallien esittelyyn ja hallintaan, turvallisuusperustelussa käytetyn metodologian esittelyyn ja matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituslaitoksen ja käytetyn polttoaineen loppusijoituslaitoksen välisiin mahdollisiin vuorovaikutuksiin tulevaisuudessa.

Posiva toimitti myös kesällä 2023 turvallisuusperustelua täydentävän muistion, jossa on arvioitu vuoden 2018 aineiston jäädytysten jälkeen tapahtuneiden muutosten vaikutusta turvallisuusperusteluun. Arvion mukaan vaikutukset ovat jääneet pieniksi.

Myös STUK kertoi odotuksistaan

Jarkko Kyllönen Säteilyturvakeskuksesta (STUK) esitteli heidän odotuksensa esittelyssä

olevaan käyttöluvan turvallisuusperusteluun. STUK toimitti Posivalle loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemuksen käsittelyn yhteydessä 34 vaatimusta edellistä turvallisuusperustelua (TURVA-2012) koskien ja he tarkastavat, että kyseisiin vaatimuksiin on vastattu kattavasti. Erityisesti kapselin korroosioon liittyviin kysymyksiin tullaan kiinnittämään huomiota. STUK on toimitannut jo kaksi selvityspyyntöä liittyen toimitettuun turvallisuusperustelun aineistoon, ja he ovat siirtyneet jo seuraavaan tarkastusvaiheeseen.

Lopuksi Posivan kehitysjohtaja Tiina Jalonen kiitti yleisöä osallistumisesta seminaariin, puhujia esittelyistään ja hän päätti tilaisuuden esittelemällä vielä loppusijoituslaitoksen, sekä tulevan yhteistoimintakokeen nykytilan.

Kiinnostuneille lukijoille Posivan käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen turvallisuusperustelu löytyy cms.posiva.fi nettisivuilta.





Säteilyturvakeskus muutti Vantaalle

Säteilyturvakeskuksen uudet tilat Vantaalla valmistuivat 2022. Laboratoriotilojen suunnittelu, muutto ja käyttöönotto oli iso urakka. Uusissa tiloissa olemme päässeet opettelemaan työskentelyä monitilatoimistossa, jossa omia huoneita ei enää ole.

Teksti: Iisa Outola ja Roy Pöllänen

SÄTEILYTURVAKESKUKSEN (STUK) uudet tilat sijaitsevat Jokiniemessä, Vantaalla Keskusrikospoliisin naapurissa. Vanhat tilamme sijaitsivat Roihupellossa Helsingissä. Uudet tilat rakennettiin varta

vasten meitä varten huomioiden laboratorion ja valmiustoimintamme erityisvaatimukset. Keväällä 2022 valmistuneessa rakennuksessa on yhteensä 12 700 bruttoneliömetriä, mistä noin kolmannes on laboratoriotiloja.



FT Iisa Outola
Laboratoriojohtaja
Säteilyturvakeskus
iisa.outola@stuk.fi



FT Roy Pöllänen
Johtava asiantuntija
Säteilyturvakeskus
roy.pollanen@stuk.fi

STUKin uudessa toimitalossa työskentelee reilut 300 henkilöä (kuva: Jarkko Översti, Tosikuva).

Laboratorioväki oli tiiviisti mukana tilojen suunnittelussa

Me laboratoriossa työskentelevät olimme tiiviisti mukana rakennuksen suunnitteluvaiheessa ja tilojen suunniteltaessa pyrimme huomioimaan myös tulevaisuuden tarpeet. Rakentamisen aikana vierailimme useamman kerran katsastamassa tiloja yhdessä rakennuttajan kanssa. Yhteistyö oli tärkeää, koska laboratoriotuotantomme edellytti rakenteellisia ratkaisuja, joista rakennuttajalla ei ollut entuudestaan kokemusta. Tiiviin yhteistyön ansiosta saimme sellaiset tilat kuin tarvitsemme.

STUKissa käytetään korkea-aktiivisia säteilylähteitä kalibroitaessa säteilymittareita, ja säteilytyshallien rakenteelliset ratkaisut kuten seinien paksuudet ja läpiviennit johdoille mietittiin tarkkaan. Säteilytyshallien seinät rakennettiin raskasbetonista ja seinät ovat parhaimmillaan yli metrin paksuisia. Hallien massiiviset liukuovet valettiin paikan päällä.

Ympäristönäytteitä mitataan puolestaan laboratoriotiloissa, joiden rakennemateriaalien aktiivisuuspitoisuuden tulee olla mahdollisimman pieni. Mittaushuoneiden lattiat ja katot tehtiin betonista, joiden ainesosat – käytännössä sementti ja hiekka – tutkittiin ennalta. Monte Carlo -simulointien avulla päädyttiin ratkaisuun, jossa mittaushuoneiden seinät tehtiin betonin sijasta puupohjaisilla rakennuslevyillä. Lopputulemana oli se, että luonnon radionuklidien aiheuttama säteilytausta mittaustilaisiin on pienempi kuin vanhassa toimitalossamme.

Poliisirobotti avusti muutossa

Ennen kuin laitteet ja tavarat saatiin uusiin tiloihin, vanhat tilat piti käydä läpi ja kaikki laitteet pakata. Tiloista löytyi yhtä ja toista mielenkiintoista siivouksen yhteydessä. Röntgenlaboratorion kaapeista löytyi kasa hampaita ja kaksi pientä metallilevyä, jotka oli ruuvattu yhteen ja joiden välistä pilkisti filminpötkä. Pötkä oli lappu, jossa luki: ”sotasalaisuus, ei saa katsoa”.

Jo eläkkeelle siirtynyttä asiantuntijaa konsultoituessa selvisi, että sotasalaisuudessa oli kyse 1960-luvulla STUKissa tehdystä filmidosimetrikokeiluista, jossa tutkija oli ilmeisesti ollut humoristisella tuulella kokeita tehdessään. Hampaista emme lähteneet kyselemään, mistä mahtavat olla peräisin.

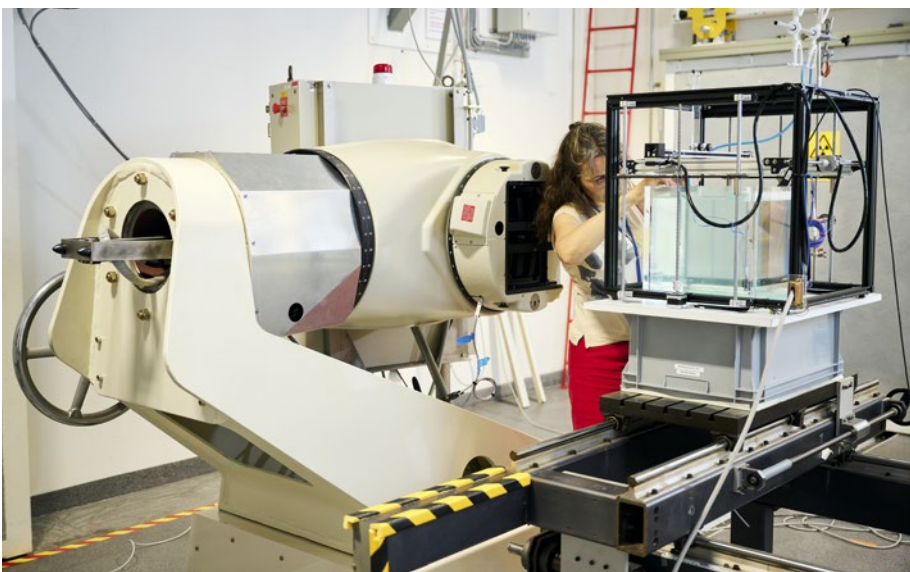
AJANKOHTAISTA



Uusissa tiloissa ei ole henkilökohtaisia huoneita vaan siellä työskennellään joko vuorovaikutteisissa, keskittyvissä tai hiljaisissa tiloissa (kuva: Jarkko Översti, Tosikuva).



Lapset pääsivät ottamaan röntgenkuvia leluista "lapset töihin"-päivänä STUKin röntgenlaboratoriossa (kuva: Ville Tiittanen, STUK).



STUKin säteilytyshalleissa kalibroidaan vuosittain noin 500 säteilymittaria. Kuvassa kalibroidaan sädehoidon annosmittauksissa käytettävää säteilymittaria Co-60-lähteellä (kuva: Jarkko Översti, Tosikuva).

Tiloja tyhjennettäessä olimme valppaana, jos säteilylähteitä putkahtaa esiin varastoista. Muutama kirjanpidon ulkopuolinen säteilylähde löytyikin esimerkiksi vanhaan mittalaitteeseen kiinnitettynä ja tyhjäksi luullun lyijysuojan sisältä.

Korkea-aktiivisten säteilylähteiden muutto aiheutti omat haasteensa. Säteilylähteitä sisältävien laitteiden pakkaus suunniteltiin yhdessä kuljetusyrityksen kanssa, ja säteilylaitteiden ja lähteiden kuljetus hoidettiin erityisjärjestelyin yön pimeinä tunteina poliisisaattueessa.

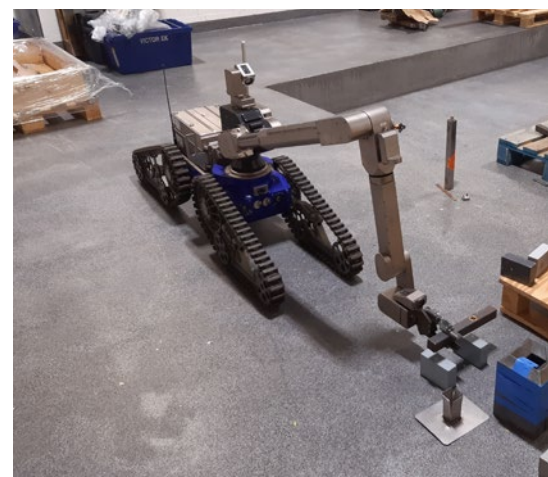
Hankimme muuton yhteydessä uuden gammasäteilyttimen ja korkea-aktiivisten lähteiden siirrossa vanhasta säteilyttimestä uuteen saimme apua poliisirobotilta, joka avusti lähteiden käsittelyssä. Tällä tavoin saatiin pienennettyä lähteiden siirrossa aiheutuvia säteilyannoksia.

Poliisirobotti harjoittelemassa lähteiden siirtoa. Kaksi korkea-aktiivista lähdettä siirrettiin STUKin vanhasta säteilyttimestä uuteen muuton yhteydessä (kuva: Reetta Nylund, STUK).

Gammaspektrometreillä havainnoidaan ympäristönäytteiden aktiivisuuspitoisuutta ja erittäin herkkien spektrometrien kuljettaminen tehtiin oman väen toimin. Tällä tavoin pyrittiin minimoimaan laitteiden rikkoutumisen mahdollisuus. Sen sijaan spektrometrien ympärillä olevien jopa kaksi tonnia painavien lyijysuojien kuljetus annettiin kuljetusyrityksen tehtäväksi.

Ilmastointiongelmia ja säteilyturvallisuuspoikkeama

Pääosin muutto ja uusiin tiloihin asettuminen sujui hyvin, mutta joitain ongelmiaakin oli. Isoimmat haasteet ovat liittyneet laboratoriotilojen ilmastointiin. Kalibrointitoiminnassa vaaditaan hyvin tarkat lämpötila- ja kosteusolosuhteet, ja aluksi



tehdyt ratkaisut eivät täyttäneet asetettuja vaatimuksia. Vuoden verran on jouduttu kokeilemaan erilaisia säätöjä ja vaihtamaan ilmastointilaitteet, jotta olosuhteet saataisiin halutunlaisiksi. Myös kemian laboratorioissa on jouduttu tekemään korjauksia ilmastointiratkaisuihin, kun ympäristönäytteiden poltossa syntyvät hajut kulkeutuivat aluksi toimistotiloihin.

Säteilytoiminnan osalta tarkastimme muuton jälkeen tarkasti vuotosäteilymittauksin, että tilojen suojaukset ovat riittävät. Röntgenlaboratorion oven lukkopesästä löytyi näissä mittauksissa kohta, josta säteilykeila pääsi läpi ja joka piti korjata.

Yksi säteilyturvallisuuspoikkeamakin muuton yhteydessä sattui. Asennettaessa säteilylähteitä uuteen säteilyttiimeen kaikki ei mennyt suunnitelmien mukaan: lähteiden lataamiseen käytetty uudentyypinen painava lataustanko jumiutui ja irtosi lähteitä asennettaessa. Asentaja sai tapahtumassa ylimääräisen 0,8 mSv efektiivisen säteilyannoksen ja 5 mSv sormiannoksen.

Ei omia huoneita vaan vuorovaikutteisia tai hiljaisia työalueita

Vaikka laboratoriotilojen suunnittelu ja toteutuksen seuranta olikin haasteellista, niin sitä oli myös muiden tilojen ja toimintojen vaatimusten huomioiminen. Tilaturvallisuus, kulkujärjestelyt ja tietotekniset vaatimukset ovat aivan toisella tasolla kuin mitä ne olivat vanhassa toimitalossamme uusista työtavoista eli ”käytäytymissäännöistä” puhumattakaan. Näissä oli meillä kaikilla runsaasti oppimista.

STUKissa ei enää ole omia työhuoneita vaan teemme työtä vuorovaikutteisissa, keskittyvissä tai hiljaisissa tiloissa – työskentelemme siis monitilatoimistossa. Työpiste pitää tyhjentää päivän päätteeksi. Hiljaisissa tiloissa on pääsääntöisesti ollut varsin vähän työntekijöitä

enemmistön työskennellessä vuorovaikutteisissa tai keskittyvän työn työalueilla.

Esimerkiksi Dosimetrialaboratoriossa yhteinen työtilamme sijaitsee laboratorioden läheisyydessä ja olemme sisäisesti sopineet, että työpisteelle saa jättää tavarat, jos työpisteellä jatkaa seuraavana päivänä. Jos on etänä tai lomalla, niin pöytä pitää tyhjentää. Koska koko tiimi istuu samassa tilassa, niin asioiden hoitaminen on nopeaa, kun voi vain huikata kollegalle asiansa ja apua saa nopeasti tarvittaessa. Toisaalta puheensorinaa on jonkin verran silloin, kun kaikki ovat paikalla yhtä aikaa.

Röntgenkuvia leluista ja muuta puuhaa muuton jälkeen

Muutto toteutettiin siten, että katkot tarjoamissamme mittauspalveluissa olivat mahdol-

lisimman lyhyitä. Tiettyjen mittausten osalta pyöritimme toimintaa samanaikaisesti sekä vanhoissa että uusissa tiloissa, jolloin katkoja ei ollut lainkaan. Muuton jälkeen urakka ei suinkaan ollut ohi vaan uusissa tiloissa riitti tehtävää, kun kaikki laitteet piti saada toimintakuntoiseksi, tehdä tarvittavat laadunvalvontamittaukset ja päivittää ohjeita. Muuttoprojekti vaati paljon venymistä henkilöstöltä.

Laboratoriotiloissa on ensimmäisen vuoden aikana käynyt paljon vieraita, kun olemme esitelleet tiloja niin sidosryhmille kuin omille työntekijöillemme. Kiinnostus on ollut suurta. Tiloja esiteltiin myös työntekijöiden lapsille ”lapset töihin”-päivänä lokakuussa, jolloin lapset pääsivät vanhempiensa kanssa ottamaan röntgenkuvia leluista, tutustumaan UV-laboratoriossa, miten aurinkorasva toimii, ja etsimään säteilylähteitä.

Se, että sai olla tiiviisti mukana suunnittelemassa uusia laboratoriotiloja ja toteuttamassa muuttoa oli mielenkiintoinen ja ainutkertainen kokemus. Tosin yksi tällainen muuttokokemus riittää vallan hyvin omalle työuralle. 

Ihmissen radioaktiivisuutta mitataan vanhasta laivateräksestä rakennetussa huoneessa. Huone siirrettiin paloittain vanhasta rakennuksesta uuteen ja tilan purku itsessään kesti yli kolme kuukautta (kuva: STUK).



Gammalaboratoriossa mitataan vuosittain 3000—4000 ympäristönäytettä (kuva: STUK).



ATS:n uusi julkaisu esittelyssä: Ydinenergian uranuurtajan Erkki Laurilan tuotanto ensi kertaa kartoitettuna

Fyysikko Erkki Laurila oli suomalaisen ydinenergian tuotannon tienraivaaja ja kummisetä. Hän oli keskeisin ydinenergian tuottamisen asiantuntija Suomessa ennen kuin varsinaiset ydinvoimalaitokset aloittivat toimintansa 1970–1980-lukujen vaihteessa. Tiedot hänen tutkimustyöstään ja lukuisista kirjoituksistaan on nyt koottu teokseen, jonka Suomen Atomiteknillinen Seura julkaisee 110 vuotta Laurilan syntymän jälkeen.

Teksti: Petri Paju



FT Petri Paju

Teknologian kulttuurihistorian dosentti
Turun yliopisto
petpaju@utu.fi

ERKKI LAURILA RYHTYI VUONNA 1955 perustetun Energiakomitean puheenjohtajana selvittämään atomienergian sopivuutta Suomeen ja hyödyntämistä kotimaassa, ja jatkoi sittemmin uuden alan koordinoitua Atomienegianeuvottelukunnan johdossa 1970-luvun puoliväliin. Sen jälkeen hänen, professori Pekka Jauhon ja muiden kouluttamat ihmiset tarttuivat ohjaimiin. Laurila puolusti ydinvoimaa julkisuudessa niin hyvinä kuin kriisiaikoina 1990-luvulle saakka.

Suomen Akatemian jäsen, professori Erkki Aukusti Laurila lienee edelleen jotenkin tuttu nimi useimmille ydinteknologian pariin koulutetuille. Hänen uransa perustiedot ja suuri roolinsa ydinvoiman rakentamisessa Suomeen löytyvät lukuisista kirjoista ja verkkolähteistä.

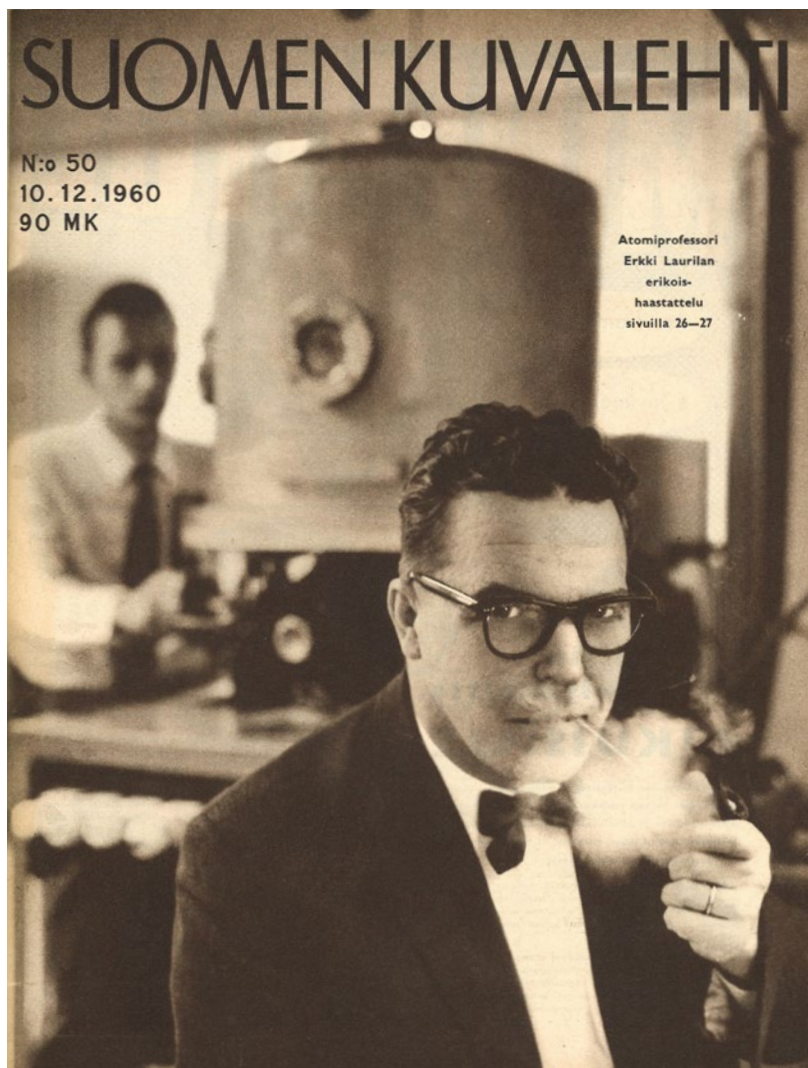
Professori, asiantuntija, akateemikko

Kertaus on tuskin haitaksi. Erkki Aukusti Laurila syntyi Hämeenlinnassa kesällä 1913 ja kuoli Porvoossa vuonna 1998. Laurila opiskeli vuodesta 1932 Helsingin yliopistossa, ja valmistui sieltä tohtoriksi väiteltään fysiikan alal-

ta vuonna 1940. Sota-ajan tehokas ja onnistunut kehitystyö Valtion lentokone-tehtaalla hyvää onnea unohtamatta johtivat hänet jo vuonna 1945 professoriksi Teknillisen korkeakouluun (osa nykyistä Aalto-yliopistoa) ja sen uuteen teknillisen fysiikan oppiaineeseen.

Niinpä Laurila ahkeroi esimerkiksi varhaisen tietotekniikan tutkimus- ja opetustyössä teknillisen fysiikan professorina vuonna 1955, kun hänet valittiin Energiakomitean puheenjohtajaksi valmistelemaan Suomea atomiaikaan. Ala oli aikansa lupaavin tekniikan uutuus, oikea ruusuisten tulevaisuudenkuvielmien runsaudensarvi. Laurila tarttui haasteeseen ja jatkoi kasvavan ydinalan ylimpänä asiantuntijana ja tutkimusrahoituksen koordinaattorina runsaat kaksi vuosikymmentä.

Jo 1950-luvulla Laurilasta kehkeytyi tasavallan presidentti Urho Kekkosen luottoasiantuntija nimenomaan ulkopoliittisesti painavissa ydinaiheissa. Työuransa sekä nuoruutensa valitut, parhaat palat Laurila esitteli vuonna 1982 kirjassaan ”Muistinvaraiset tarinat” omintakeisella kuivalla huumorillaan höystettynä. Arvioni on silti, että kaikkein mehevimmät



Ydinenergian koettua tulevaisuuden potentiaalia kuvaa, että "atomiprofessori" Erkki Laurila piippuineen nostettiin Suomen Kuvalehden kanteen vuoden 1960 lopulla. Tuleva Otaniemen koereaktori FIR 1 oli tuolloin edennyt hankintavaiheeseen.

juttunsa Kekkosesta Laurila kertoi ainoastaan suullisesti.

Kattava julkaisuluettelo

Erkki Laurilasta ei kaikesta huolimatta ole kirjoitettu elämäkertaa ja hänen tieteellinen ja muu tuotantonsa on lähinnä oletettu suunnilleen tunnetuksi. Osana tällaista elämäkertaan tähtäävää hanketta, josta on aiemmin julkaistu tutkimusartikkeleita, olen koonnut Laurilan julkaisuja ja havainnut, että oikeastaan kukaan ei ole tuntenut Laurilan aikaansaannoksia perusteellisesti. Jopa hänen itsensä eläkeiässä kokoama julkaisuluettelo jäi huomattavan aukolliseksi.

Laurilan tuotannon tarkastelu kertoo paljon lisää hänestä samoin kuin rikastaa ku-

vaa hänen saamistaan vaikutteista: hän teki monenlaista nyt jo lähes unohdettua, kuten julkaisi ulkomailla tieteellisiä ja teknisiä tutkimustuloksiaan sekä keksi ja patentoi teknologiaa etenkin kaivosteollisuuden tarpeisiin. Vastuunotto ydinenergiasta merkitsi hänelle tempautumista yhteiskunnallisempaan suuntaan ja lähemmäs politiikan maailmaa, mistä kaikesta hän sittemmin kirjoitti suhteellisen paljon eri foorumeilla ja samalla jätti kirjoituksillaan pitkät jäljet nykyajan historiankirjoitusta myöten.

Tutkijoille tärkeä lähdeosa on ollut Laurilan "Atomienenergian tekniikkaa ja politiikkaa" vuodelta 1967. Uudesta julkaisuluettelosta selvää, että kirjan kirjoittamisen lisäksi hän hyödynsi nimimerkkiä yrittäessään ohjata

poliittisia päätöksentekijöitä ripeämpään toimintaan.

Toimittaja ja radiojohtaja Eino S. Repo haastatteli Erkki Laurilaa joulukuussa 1983, jolloin tämä oli hiljattain jäänyt eläkkeelle Suomen Akatemian jäsenen virasta. Haastattelu sisältyy Urho Kekkosen arkiston kokoelmiin. Pikkujoulukauden grogilasin äärellä Laurila pohti, että hänen edellisenä vuonna ilmes-tyneiden muistelmiensa nimeksi olisi sopinut myös "Atomeiksi pirstoutunut elämä". Niin monenlaiseen oli mennyt aika ja työelämä, joka samalla oli paljossa pyörinyt ydinvoiman ympärillä.

Ajatus kuvitteellisen otsikon taustalla käy ymmärrettäväksi, kun tutustuu aikanaan kaikkien tuntemaan tutkijan ja vaikuttajan monipuoliseen tuotantoon. Väljästi tulkiten 'atomit', tai ydinaiheet, kuitenkin muodostivat kokonaisuudessa keskeisen jatkumon.

Merkkivuosi 2023

Vaikkapa tekoälyn kehitystä seurattaessa palaa mieleen Laurilan argumentti, jonka esimerkiksi Helsingin Sanomat liitti hänen muistokirjoitukseensa joulukuussa 1998: "Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuus ei muuttanut hänen vanhaa sanomaansa: 'Ydinvoimatekniikka kaikkine hankaluuksineen on ainoa tekniikan muoto, jonka riskit on tunnettu ja otettu huomioon jo siihen siirryttäessä. Muun tekniikan haitat paljastuvat vasta nyt, vuosikymmeniä tai -satoja myöhemmin.'"

Vuonna 2023 tulee kuluneeksi 110 vuotta Laurilan syntymästä ja 25 vuotta hänen kuolemastaan. Merkkivuoden päätteeksi julkaistaan kirjoittamani tutkielma ja luettelo Laurilan tuotannosta. Julkaisuun olen koonnut tiedot pääosasta Laurilan tuotantoa, minkä lisäksi esittelen ja pohdin yleisemmin Laurilan tekemisten eri puolia ja kokonaiskuvaa. Samoin Laurilan lyhyen elämäkerran on tarkoitus palvella kirjallisuusluettelon tulkintaa. Ydinenergia-alan varhais historian ja Erkki Laurilan tuntemuksen lisäämiseksi Suomen Atomiteknillinen Seura on saattanut julkaisun sähköisesti ja avoimesti saataville. 

Julkaisun tiedot

Petri Paju: Tehtävänä keksiä ja vai-
kuttaa. Erkki Laurilan tutkimus-
työ ja kirjallinen tuotanto. Suomen
Atomiteknillinen Seura 2023.
www.ats-fns.fi

Nuclear Energy in Poland – an explosion of interest and plans

Poland has been interested in nuclear energy since 1970s when construction works of a nuclear power plant were started. However, the power plant project was later abandoned. A new interest to build nuclear power plants has risen during the past decade. This article describes the current situation in Poland.

Text: Anna Talarowska **Photo:** Polskie Elektrownie Jądrowe

POLAND HAS BEEN INTERESTED IN nuclear energy since 1970s when the construction works for the NPP started. However, the first nuclear power plant project, which was in an advanced stage in Żarnowiec, was abandoned in the 1990s due to a political decision¹. Poland came back to the idea of nuclear power in its energy mix in 2014 with the first release of Polish Nuclear Power Programme (PNPP)². The decision was based on three pillars:

- Energy security, by means of diversification of fuel base of energy mix. Currently over 80% of electricity is produced from coal or lignite.
- Climate and environment – reduction of greenhouse gas emissions.
- Economy – stabilization of energy prices.

According to the Polish Nuclear Power Programme, 6–9 GWe power is planned using PWR reactors by 2045. The first power plant of 3.75 GWe will be located at the seaside.

Recently a significant progress in National Nuclear Power Plants programme has been made. The rise of energy prices after the Russian invasion on Ukraine shifted industry interest to nuclear as well, and as a result the National Energy Policy is being reviewed.

The version released to the public pre-consultations in 2023 assumes additionally that by 2030 the first SMR will produce 300 MWe, with additional six units by 2040. By 2040, four PWRs are stated in the Polish Energy Policy³. The PNPP and Energy Policy are two separate documents which are reviewed on a regular basis, so it is expected that changes in one of them will affect the other one.



Anna Talarowska, M.Sc.
Communication officer
Nuclear.pl
anna.talarowska@nuclear.pl

First Polish Nuclear Power Plant

The first Polish Nuclear Power Plant is going to be located at the seaside in Lubiatowo where the company received a positive environmental decision. The choice was based on the lacking electricity production in the region, especially with the disponible electricity sources. It will be built by Polskie Elektrownie Jądrowe (Polish Nuclear Power Plants, PEJ), a state-owned company with American companies' consortium Westinghouse and Bechtel⁴. It will consist of three AP1000 units.

In June 2023 the Polish Regulatory Body, National Atomic Energy Agency, released a statement in which it confirms that the scope of safety assessment proposed by PEJ is correct. The accepted document states the requirements, codes and standards that shall be met to ensure radiological safety of the plant⁵.

The environmental assessment has been submitted to The General Directorate for Environmental Protection. In late June 2023, the authority informed that the cross-border consultations are finished with Latvia, Sweden, the Czech Republic, Estonia, Finland, the Netherlands, Lithuania, Hungary, Germany, and Slovakia. There are ongoing works with Denmark and Austria.⁶

While the official work is ongoing, the PEJ employees take care of the local community as the company organized several meetings to answer their doubts and questions about the project.⁷ Currently, PEJ obtained positive decision in principle for the first NPP in Poland, which aims at general governmental approval for construction of a nuclear power plant in stated technology, power and location.

The construction start is planned for 2026, according to Polish Nuclear Power Programme. The operation permit for the first reactor of the plant is planned to be issued in 2033, which is an extremely ambitious goal⁸. The issuance of the operation permit for units 2 and 3 are planned for 2035 and 2037, respectively.

SMRs

A joint venture between the Polish petrochemical company Orlen and a chemical company Synthos, called Orlen Synthos Green Energy (OSGE) was established in 2022. OSGE together with the Ontario Power Generation, Tennessee Valley Authority and GE Hitachi are joint with a technical collaboration agreement to advance global deployment of GEH's BWRX-300 Small Modular Reactor⁹.

In April 2023 they announced potential sites for their small modular power plants

based on the BWRX-300 technology. These are Ostrołęka, Włocławek, Stawy Monowskie, Dąbrowa Górnicza, Kraków-Nowa Huta, the Tarnobrzeg-Stalowa Wola Special Economic Zone and Warszawa¹⁰. The sites will be studied from the geological point of view and only then the dialogue with local communities will be established.

The company claims that at least one plant will be constructed by 2030 (i.e., two years after planned startup of Canadian BWRX-300 in Darlington). For six of the locations mentioned above, application for decision in principle has been submitted. Beyond that, President of Orlen claimed that his company will construct 76 SMRs by 2038.

In June 2023, OSGE requested The General Directorate for Environmental Protection for the scope of an environmental assessment report that investor is obliged to prepare for each of the above-mentioned plant locations¹¹. Taking into account a significant amount of specialized workforce to implement such projects, OSGE signed a cooperation agreement with Łukasiewicz Research Network which aims to establish a European Excellence Centre for Training and Safety of Nuclear Energy (ECKKEJ) in Poland¹². The centre shall be operational in 2027, while the construction work is planned to start in 2026. Its location and scope are unknown.

Another SMR company NuScale and KGHM, which is an established multinational mining corporation headquartered in Lubin, Poland, are also working on the SMR implementation in Poland. As a mining company KGHM uses a lot of energy. In its strategic documents the need for decarbonisation is stressed with two milestones: 30% emission reduction by 2030 and net-zero by 2050.¹³ The implementation of nuclear power is in line with the climate neutral technological heat and electricity goal. In April 2023, KGHM applied for a decision in principle¹⁴. The application has been classified, so it is not known what location and technology it is about.

Industry interest in Gen III/III+ reactors

PGE Polska Grupa Energetyczna, a state-owned public owner company and a largest power producing company in Poland, with ZE PAK private equity announced in April that they established a joint venture called PGE PAK Energia Jądrowa (PGE PAK Nuclear Energy). The goal is to build a Nuclear Power Plant of two APR1400 reactors in Konin with a Korean partner (KHNP/KEPCO)¹⁵. The location is quite challenging due to the proximity to a closed opencast mine and lack of enough water for the construction of an open cooling system.



Visualisation of the First Polish Nuclear Power Plant.

¹ <https://tech.wp.pl/elektrownia-jadowa-w-zarnowcu-decyzja-ktora-zmienila-polska-energetyke,6917801029229408a>

² Polish Nuclear Power Programme, 1st release, 2014

³ Polish Energy Policy 2040, 3rd scenario for pre-consultation, June 2023

⁴ <https://nuclear.pl/wiadomosci,news,23052602,0,0.html>

⁵ <https://ppej.pl/aktualnosci/panstwowa-agencja-atomistyki-potwierdza-poprawnosc-zakresu-weryfikacji-analiz-bezpieczenstwa-dla-elektrowni-jadowej-na-pomorzu>

⁶ <https://nuclear.pl/wiadomosci,news,23062703,0,0.html>

⁷ <https://ppej.pl/aktualnosci/spolka-polskie-elektrownie-jadowe-odbyla-kolejna-serie-spotkan-z-mieszkancami-preferowanej-lokalizacji-elektrowni-jadowej-na-pomorzu>

⁸ <https://www.gov.pl/attachment/4cddd10a-5e8b-414d-bb95-670f6507d73e>

⁹ <https://osge.com/en/opg-helping-osge-build-the-npp-operator-organisation/>

¹⁰ <https://osge.com/en/first-potential-sites-announced/>

¹¹ <https://osge.com/en/osge-starts-the-environmental-proceedings/>

¹² <https://osge.com/en/osge-commits-to-build-training-centre/>

¹³ https://kgbm.com/sites/kgbm2014/files/strategia_do_2030_roku_z_horyzontem_roku_2040_-_cele_redukcji_emisji_kghm_oraz_glowne_kierunki_dekarbonizacji.png

¹⁴ <https://www.money.pl/gospodarka/kgbm-zbuduje-mala-elektrownie-jadowa-jacek-sasin-dziekuje-spolce-6887588205788064a.html>

¹⁵ <https://www.bankier.pl/wiadomosc/PGE-i-ZE-PAK-powolaly-spolke-PGE-PAK-Energia-Jadowa-8522276.html>

LDR-50-hankkeesta nousi uusi spinoff-yritys VTT:ltä

VTT:n kehittämä kaukolämpö-SMR-hanke eteni kesän aikana uudeksi spinoff-yritykseksi: Steady Energy. ATS Ydintekniikka -lehti haastatteli yrityksen toimitusjohtaja Tommi Nymania.

Teksti: Antti Rätty, Tommi Nyman **Kuva:** Jaakko Leppänen, VTT

Maailmassa on valtava määrä erilaisia SMR-konsepteja. Mitkä ovat LDR-50:n suurimmat edut kilpailussa?

LDR-50 on ainut nimenomaan lämmön- tuotantoon tarkoitettu reaktorityyppi, jolloin voimme keskittyä tiettyihin markkinoihin, ensimmäisenä tavoitteena kaukolämpöä tuottava laitos. Tekniseltä puolelta reaktorin matala lämpötila ja pienet paineet mahdollistavat korkean turvallisuustason kohtuullisilla kustannuksilla. Reaktorin perussuunnittelu on myös helppo muokata muihin käyttökohteisiin, ku-

ten esimerkiksi teollisuuden prosessihöyryn tuotanto tai suolanpoisto vedestä.

1970-luvulla suunniteltiin osin vastaavaa SECURE-reaktoria (katso esimerkiksi ATS Ydintekniikka 2/2012). Onko LDR-50:n suunnittelussa otettu oppeja SECURE-reaktorista?

Ei varsinaisesti. Pää tavoitteissa pyrkimys passiiviseen turvallisuuteen sekä valmistuksen modulaarisuuteen ovat samoja, mutta tekninen suunnittelu on tehty puhtaalta pöydältä. Nykyinen SMR-kehitys on tehty hyvin erilai-

sessä maailmantilanteessa, koska fossiiliset polttoaineet eivät ole enää samalla tavalla realistisia kilpailijoita tulevaisuuden ratkaisuksi.

Montako kaukolämpöverkkoa näette potentiaalisina asiakkaina Suomessa/muulla Euroopassa?

Kotimaassa keskitytään suurten kaupunkien lämpöverkkoihin. Toistaiseksi jo viisi kaupunkia (Helsinki, Tampere, Kuopio, Lappeenranta, Pori) on julkisestikin ilmaissut kiinnostuksensa ydinkaukolämpöön. Potentiaalisia asiakkaita ei voi kuitenkaan suoraan päätellä kaupungin asukasluvusta, koska markkinoihin vaikuttavat etenkin lämmönjake- luverkon laajuus, muu lämmöntuotanto verkossa ja isojen inventointien ajankohtaisuus.

Kunnilla on usein intressi säilyttää lämmön- tuotanto omana liiketoimintonaan. Miten LDR-50 vastaisi näihin vaatimuksiin?

Steady Energy on joustava liiketoimintamallissaan: tuotteena voi olla asiakkaan operoimaksi tarjottava lämpölaitostoimitus tai myös operointiin liittyvää palvelua. Tarkoituksena on joka tapauksessa, että kunnat säilyttävät omat asiakassuhteensa lämmön loppukäyttäjiiin ja saavat mahdollisuuden puhtaaseen ja toimitusvarmaan ydinkaukolämpöön.

Turvallisuuskriittisellä alalla innovaatioiden kehitys kaupalliseksi tuotteeksi voi olla pitkä. Millaisella aikaikkunalla näet, että SMR-reaktorit tulisi saada tuotantoon ja mitkä asiat näkisit tärkeimpinä suunnitelmien toteutumiseksi?

Tavoitteena on saada kaupallisesti toimiva demolaitos käyttöön vuonna 2030. Laitoksen oma tekninen rakennesuunnittelu tuskin muodostuu pullonkaulaksi. Verrattuna perinteisiin ydinvoimalaitoksiin laitospokonaisuus ja eri järjestelmien määrä on hyvin paljon pienempi. Lisäksi helpommat käyttöolosuhteet voivat tuoda etuja ja hyvin suunniteltuna mahdollistamme muille turvallisuuskriittisille teollisuuden aloille (esimerkiksi energia- ja kemian- teollisuus) tutun mitoituksen komponenteissa, jolloin komponenttien suunnittelu- ja valmistusvastuuta voi jakaa useammalle toimijalle.

Aluksi tavoitteena on rakentaa sähköenergi- aa käyttävä pilottilaitos, joka on suunniteltu soveltuvien osin ydinlaitoksen teknisillä vaatimuksilla. Tällöin saadaan käsitys valmistusketjujen kyvystä ydinlaitostoimituksia varten ja osoitus teknisten vaatimusten toteutumisesta (pois lukien polttoaine ja sydäninstrumentaatio). Toimet pienentävät investoinnin luvitusriskiä.

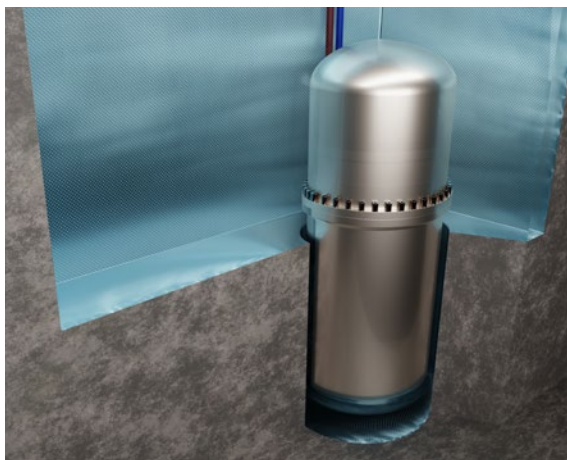
Tavoite liittyy myös uuteen ydinenergiala- kiin suunniteltuun konseptilupaun, jonka pe- riaatteet ovat vielä avoimina. Keskeinen ajatus



FT Antti Rätty
ATS Ydintekniikan toimituskunta
antti.ratty@vtt.fi



DI Tommi Nyman
CEO, Steady Energy Oy
tommi.nyman@steadyenergy.fi



Konseptikuva LDR-50 -reaktorin reaktorimoduulista lämpönieluna toimivassa vesialtaassa.

on, että pilottilaitoksen avulla voisimme hakea ennakkopäätöstä konseptista ja pääsisimme jo ennen rakentamislupahakemusta laitostoitittajana osoittamaan viranomaiselle keskeisten turvallisuusvaatimusten täyttymisen, muun muassa passiivisen jälkilämmönpoiston. Kun mahdolliset lisäosoitustarpeet tunnistetaan ajoissa, voimme toteuttaa parannukset ennen koko laitoksen suunnittelun edistämistä.

Steady Energy keskittyy laitoksen suunnitteluun. Millaisia toimintamalleja on suunniteltu reaktorin käyttöön kuuluviin muihin välttämättömiin toimintoihin, kuten ydinjätehuoltoon ja operatiiviseen säteilysuojeluun?

Mallit iteroituvat muun muassa sen mukaan montako SMR-reaktoria Suomeen rakennetaan, tai millaisen roolin lämpöyhtiöt haluavat ottaa kehityksessä ja millaisia palvelukonsepteja liiketoiminnan tueksi saadaan sovitua. Aiheesta varmasti käydään keskustelua eri osapuolten kanssa lähivuosina.

Mahdollisuuksia tekniseksi ratkaisuksi on monenlaisia. Esimerkiksi käyttöjätteiden osalta nykyisillä jäteluolilla on mahdollisuus solmia erillisiä sopimuksia pientoimijoiden jätteiden vastaanottamiseksi.

Steady Energy tekee yhteistyötä teollisuuden kanssa laitoksen suunnittelussa ja valmistuksessa. Mikä voisi olla valmiin LDR-50-reaktorin "kotimaisuusaste"?

Toistaiseksi pisimmälle on edetty pilottilaitoksen paineastian suunnittelussa. SMR-laitoksen kaupallisen kannattavuuden vuoksi modulaarisuus on tärkeää. Koska LDR-50-reaktorissa turvallisuusvaatimukset on helpompi täyttää, toimitusketjuihin voitaisiin saada useampia toimittajavaihtoehtoja. Tällä on merkitystä myös huoltovarmuuden kannalta, jottei varaosatoimitus ole vain yhden toimijan varassa.

Optimistisena arviona jopa 3/4 tuotannosta voisi olla kotimaista. Kuitenkin esimerkiksi polttoaineen valmistus ja sydäninstrumentointi jäisi siihen erikoistuneiden nykyisten toimijoiden työksi.

Mitä toivotte valtiotalta ja uudelta hallitukselta SMR-kehityksen edistämiseksi?

Uudessa hallitusohjelmassa SMR-kehityksen huomioiva ydinenergialain uudistuksen aikataulu on jopa kiihdytetty vuoteen 2026. Toivomme tietysti, että valtiotalta myöntää viranomaisille tarvittavan resurssoinnin tehokkaaseen työskentelyyn. Sisällöllisesti toivottavasti uudessa laissa mahdollistetaan myös uudenlaiset toimintamallit ja roolinjako, jolloin voimme ratkaista kuinka vastuu ydinturvallisuudesta määräytyy tilanteessa, jossa omistaja ja operaattori eivät välttämättä olisikaan sama taho. Ideaalisesti myös lupaprosessin periaatepäätösvaihe voisi sallia useampia samanlaisia pienreaktoreita esimerkiksi määrittäen rajan yhteisteholle. Lain uudistusprosessi on toki vielä kesken.

Helen on spekuloinut jo SMR:n rakentamisella esimerkiksi Hanasaareen (Kauppalehti 23.3.2023). Asukkaiden mielipiteet rajoittavat lähisijoittamista jatkossakin. Miten perustellisit LDR-50:n lähisijoittamista asukkaille?

Tämä on iso viestinnällinen haaste. Teknisen turvallisuuden osalta passiiviseen turvallisuuteen nojaavassa pienessä reaktorissa onnettomuuden riski on vähäinen ja vakavimmassakin onnettomuustilanteessa päästöjen säteilyhaitat olisivat pieniä. Lisäksi mahdollisuus maanalaiseen sijoitukseen eliminoi päästöjen leviämistä edelleen. Turvamielessä reaktori ei juurikaan eroaisi yhteiskunnan muunkaan kriittisen infrastruktuurin turvaamisesta.

Laajemmalta näkökannalta kannattaa miettiä myös energiantuotannon realistisia ratkai-

suvaihtoehtoja. Mikään tuotantomuoto ei ole täysin riskitön. Nykyisillä fossiililla ratkaisulla riskit on vain saatu suljettua pois silmistä, koska ilmastonmuutos ja sen ikävät seuraukset tulevat arkeemme viiveellä.

LDR-50-reaktoria on kehitetty VTT:llä vuodesta 2020 lähtien. Millainen työnjako on jatkossa VTT:n ja Steady Energy välillä?

Steady Energyllä on VTT:n kanssa voimassa oleva yhteistyösopimus, jossa VTT jatkaa teknologian kehittämistä. Kehitystyö siirtyy vähitellen analyysityöksi tuottaen turvallisuusperusteluita reaktorityypin PSAR:iin. Esimerkiksi VTT:n laskentaosaaminen on tässä olennaista.

Lähivuosina VTT jatkaa laitossuunnittelua Steady Energy keskittyessä enemmän pilottilaitoksen toteuttamiseen. Ensimmäisen laitoksen rakentamisen jälkeenkin Steady Energy tarvitsee useita järjestelmä- ja palvelutoimittajia, erityisesti jos laitystypille löydetään muita teollisia käyttökohteita.

Ulkomaisilla markkinoilla laitossuunnitteluun voi tulla myös paikallisia vaatimuksia, jolloin suunnittelua päivitetään tarvittavilta osin ja esimerkiksi komponenttitoimittajat saattavat vaihtua. Steady Energy pyrkii kuitenkin säilyttämään itsellään kriittisten osien teknologiaomistajuuden ja osaamisen kokonaisuuden hallinnasta.

Yhtiönä Steady Energy sai alkunsa VTT:n spin-off-palveluiden kautta. Oliko oma spinoff-yritys suunnitelmassa alusta lähtien? Miten kehitystyö on yleensä sujunut tutkimushankkeesta nykyiseen muotoonsa?

Innovaatioiden kaupallistaminen on osa VTT:n strategiaa, mutta tässä hankkeessa voisi sanoa, että askeleet kirkastuivat ajan myötä. VTT:n tavoitteena olisi joka tapauksessa ollut jatkaa laitoksen teknistä suunnittelua, ja yhteyksiä muihin toimijoihin haettiin jo aiemmissa vaiheissa. Steady Energy kaupallistamispolun kannalta erittäin tärkeä oli VTT:n hallituksen vuonna 2022 tekemä päätös 5 M€ investoinnista LDR-teknologian jatkokehitykseen. Tämän jälkeen Steady Energy on kerännyt jo 2 M€ investoinnit markkinoilta työn jatkamiseen, joten selvästikin kaupallistakin kiinnostusta on.

Kiitämme Tommi Nymania haastattelusta ja toivotamme Steady Energylle onnea jatkoon!

Lisätietoja

- Steady Energy -yhtiöstä: www.steadyenergy.com/
- LDR-50-reaktorin teknisestä kehitystyöstä: www.ldr-reactor.fi/

Hydratsiinia korvaavat kemikaalit painevesireaktoreissa

Konsta Sipilä
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Painevesireaktoreissa käytetään hydratsiinia vedessä olevan hapen poistamiseksi niin primääripiirissä kuin sekundääripiirissäkin. Hydratsiinin käyttöä voidaan kuitenkin tulevaisuudessa rajoittaa, koska sen on todettu olevan mahdollisesti karsinogeeninen ihmisille. Korvaavien kemikaalien löytäminen on siis ajankohtaista ja sen saralla on tehty aktiivisesti tutkimusta viime vuosina. Tässä artikkelissa käsitellään hapensyöjäkemikaalien käyttöä painevesilaitosympäristöissä ja esitellään uusimpia tutkimustuloksia hydratsiinia korvaavista kemikaaleista.

Hydrazine is used in pressurized water reactors to remove the oxygen in the water in primary and secondary circuits. However, the use of hydrazine may be restricted in the future, as it has been found to be potentially carcinogenic to humans. Finding replacement chemicals is therefore topical and research has been actively carried out in this field in recent years. This article discusses the use of oxygen scavenging chemicals in pressurized water reactor environments and presents the latest research results on hydrazine replacement chemicals.

Hydratsiinia lisätään painevesilaitosten primääripuolen sekä sekundääripuolen veteen poistamaan happea. Happipitoisuudet halutaan yleensä pitää mahdollisimman alhaisina käytön ja säilönnän aikana, jotta sen vaikutukset rakennemateriaalien korroosioon voitaisiin minimoida. Hydratsiini on osoittautunut vuosien saatossa erinomaiseksi hapenpoistokemikaaliksi ydinvoimalaitossovelluksissa ja sitä käytetäänkin laajasti maailmalla eri painevesilaitoksissa, myös Suomessa.

Hapensyöntireaktiossa hydratsiini reagoi hapen kanssa muodostaen tyyppiä ja vettä, jotka eivät merkittävästi vaikuta vesikemiaan. Korkeissa lämpötiloissa, joita tavataan esimerkiksi höyrystimessä, hydratsiini puolestaan hajoaa termisesti tuottaen ammoniakkia, tyyppiä ja vetyä, joista ammoniakkia käytetään monessa laitoksessa sekundääripuolella pH:n säätökemikaalina.

Vaikka hydratsiini on erittäin hyvin soveltuva kemikaali painevesilaitosten sekundääripuolten happitasojen kontrollointiin, sen käyttöön liittyy useita käyttöturvallisuuskäsitteitä. Hydratsiini on myrkyllistä ihmisille ja ympäristölle, minkä lisäksi sen on todettu mahdollisesti aiheuttavan syöpää ihmisille [1]. Tämän seikan vuoksi hydratsiini on lisätty vuonna 2011 Euroopan kemikaaliviraston ehdokasluetteloon erityistä huolta aiheuttavista aineista lupamenettelyä varten [2].

Ehdokasluetteloon joutuminen ei vielä rajoita kemikaalin käyttöä, vaan se on ikään kuin varoitus siitä, että kemikaalin käyttöä tullaan todennäköisesti tulevaisuudessa rajoittamaan. Rajoitettu käyttö tulee voimaan vasta kun kemikaali siirretään EU:n REACH-asetuksen liitteen XIV lupaluetteloon. Lupaluettelon sisältämien kemikaalien käyttö vaatii erillisen EU-komission myöntämän erityisluvan [3]. Tämän vuoksi hydratsiinille etsitään korvaavia kemikaaleja.

Hapensyöjäkemikaalilta vaadittavat ominaisuudet

Vaihtoehtoisen hapensyöjäkemikaalin tulisi siis löytyä kahden edellä mainitun EU:n ylläpitämien luetteloiden ulkopuolelta, eli korvaavien

kemikaalien ei tulisi olla karsinogeenisiä. Muita oleellisia seikkoja, joita tulisi ottaa huomioon vaihtoehtoista hapensyöjäkemikaalia valitessa ovat hapensyöntitehokkuus, vaikutukset vesikemiaan ja rakennemateriaalien korroosioon.

Hapensyöjäkemikaalin tulisi nimensä mukaisesti reagoida riittävän tehokkaasti hapen kanssa ja poistaa se vedestä, joten mahdollisilta korvaavilta hapensyöjäkemikaaleilta tulee olettaa samankaltaista hapensyöntitehokkuutta kuin hydratsiinilta. Puhtaat hapensyöjäkemikaalit reagoivat tyypillisesti tehokkaammin korkeissa lämpötiloissa. Huoneenlämpötilassa tai hieman korkeammassa höyrystimen säilönnän aikaisissa lämpötiloissa hapensyöntireaktio on kuitenkin hitaampi. Tätä on yleensä kompensoitu kaupallisissa tuotteissa lisäämällä katalyyttia hapensyöjäkemikaalin, mikä takaa nopeamman reaktion hapen kanssa myös alhaisemmissa lämpötiloissa.

Miten hapensyöjäkemikaaleja tutkitaan?

VTT:llä hapensyöjäkemikaaleja on tutkittu vuodesta 2016 lähtien. Tutkimus on keskittynyt sekundääripuolelle ja kolmeen eri osioon, jotka ovat hapensyöjäkemikaalien tehokkuus, niiden hajoamistuotteet ja vaikutus vesikemiaan sekä eri hapensyöjäkemikaalien vaikutus rakennemateriaalien korroosioon.

Neljän eri hapensyöjäkemikaalien (karbohydratsiini, dietyylihydrok-syyliamiini (DEHA), metyylietyyliketoksiimi (MEKO) ja erytorbiinihappo) tehokkuutta tutkittiin kolmessa eri lämpötilassa, huoneen lämpötilassa, 50 °C:ssa ja 228 °C:ssa. 50 °C kuvastaa höyrystimen säilönnän aikaista lämpötilaa, kun taas 228 °C kuvastaa sekundääripuolen syöttöveden lämpötilaa tehoajon aikana. Kahden alemman lämpötilan kokeet tehtiin 0,33 l lasiastiassa ja liuoksen pH oli vakioitu boraattipuskuriliuoksella. Happea liuoksessa oli noin 8 ppm (määrä, joka liukenee veteen normaalissa ilmanpaineessa) ja sen määrää mitattiin kaupallisella hap-pianturilla. Hapensyöjäkemikaalia lisättiin lasipurkkiin injektioneulalla

ja hapen kulumista seurattiin ajan funktiona. Koe toistettiin eri hapensyöjäkemikaalikonsentraatioilla ja joissain kokeissa liuokseen lisättiin myös 1 ppm magnetiittijauhetta.

Korkean lämpötilan kokeet toteutettiin erillisessä vesipiirissä, joka oli yhdistetty mitauskennoon. Tämä koejärjestely on kuvattu kuvassa 1. 200 litran sekoitussäiliö täytettiin ionipuhdalla vedellä ja sen pH säädettiin ammoniakkia käyttäen 9,6:een, joka on tyypillinen pH-arvo sekundääripuolen vedessä. Simuloitua sekundääripuolen vettä kierrätettiin sekoituspumpun avulla vesipiiriin matalapainepuolella (rajattu sinisellä värillä kuvassa 1) mittariston läpi, jotka mittasivat veden johtokykyä, happipitoisuutta, pH:ta ja lämpötilaa. Synteettisen ilman ja typen seosta käytettiin säätämään veden happipitoisuutta noin 100 ppb tasolle.

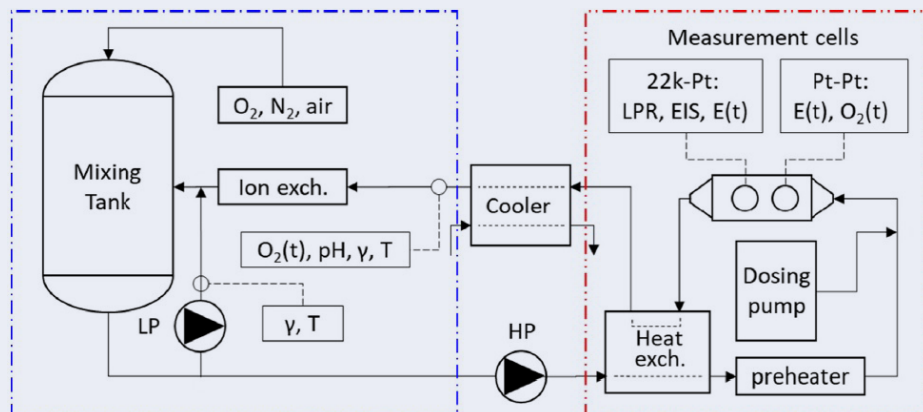
Matalapainepiiriin vesi paineistettiin ja pumpattiin korkeapainepumpulla vesipiiriin korkeapainepuolelle (rajattu punaisella värillä kuvassa 1). Korkeapainepuolella vesi virtasi mittauskennoon, johon oli asennettu kaksi sähkökemiallista kennoa reaaliaikaisia sähkökemiallisia mittauksia varten. Ensimmäinen kenno koostui hiiliteräksisestä (22K, Loviisan laitoksen höyrystimen runkomateriaali) työelektrodista, platinavastaelektrodista ja referenssielektrodista. Tällä mittakennolla mitattiin hiiliteräksen polarisaatiovastusta ja sähkökemiallista impedanssia.

Näiden mittausten avulla saatiin tietoa eri hapensyöjäkemikaalien vaikutuksesta hiiliteräsmateriaalin korroosioon. Toinen kenno koostui platina-platina-elektrodiparista sekä referenssielektrodista, joita käytettiin liuoksen redox-potentiaalin mittaamiseen. Redox-potentiaalimittausdatasta määriteltiin hapensyöntikemikaalien tehokkuudet. Mittauskennoista vesi virtasi jäähdyttimen kautta takaisin matalapainepuolelle, jossa suoritettiin vesikemian mittaukset. Happipitoisuutta mitattiin kaupallisella happianturilla, joten koejärjestely mahdollisti hapensyöntitehokkuuden määrittämisen kahdella eri menetelmällä.

Hapensyöjäkemikaalien ja hajoamistuotteiden konsentraatioita mitattiin erillisistä vesinäytteistä, joita otettiin sekä matalapainepuolen lähtevästä vedestä että korkeapainepuolen palaavasta vedestä. Vesinäytteiden analyysissä käytettiin spektrometriä, kaasukromatografisia menetelmiä ja elektroforeesin perustavaa menetelmää.

Hapensyöjäkemikaalien tehokkuus

Kuvassa 2A on esitetty, miten happipitoisuus pienenee ajan funktiona huoneen lämpötilassa, kun puskuriliuokseen lisätään eri määriä karbohydraattiin. Happipitoisuus pienenee lähes eksponentiaalisesti ensimmäisen noin 10 tunnin aikana hapensyöjäke-



Kuva 1. Käytetty koejärjestely korkean lämpötilan kokeissa. [4]

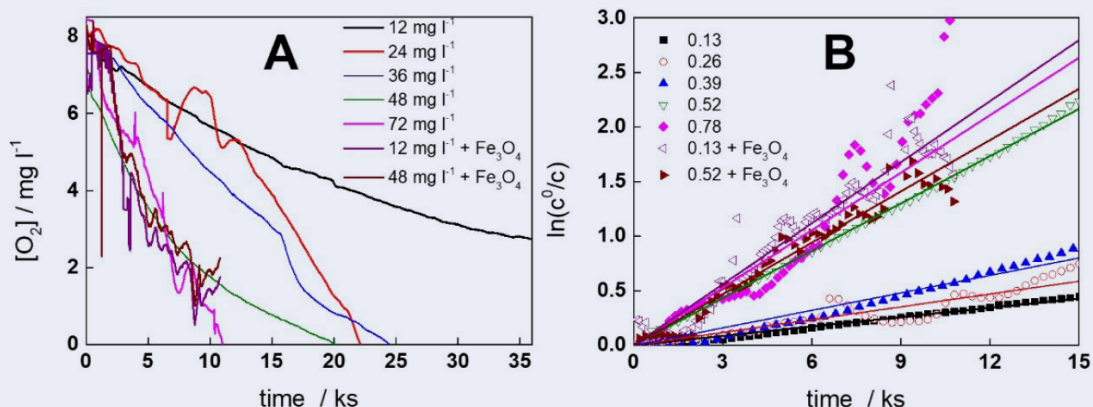
mikaalin lisäyksen jälkeen. Reaktion etenemistä voidaankin kuvata reaktioyhtälöiden avulla:

$$-\frac{dc_{O_2}}{dt} = kc_{O_2} \quad (1)$$

$$\ln\left(\frac{c_{O_2}^0}{c_{O_2}}\right) = kt \quad (2)$$

missä k on reaktiokvatio, c_{O_2} on hapen konsentraatio ajan hetkellä t , ja $c_{O_2}^0$ on hapen konsentraatio kokeen alussa. Reaktioyhtälö 2 on tyypillinen suoran reaktioyhtälö ja sen toimivuutta kuvaamaan karbohydraattiin hapensyöntireaktiota on testattu kuvassa 2B. Eri karbohydraattikonsentraatioista koostuviin datajoukkoihin sovitetut suorat korreloivat datapisteiden kanssa vähintään 98-prosenttisesti riippumatta alun karbohydraattikonsentraatiosta. Tämä osoittaa, että reaktioyhtälöä 2 voidaan käyttää hyvin suurella tarkkuudella arvioimaan karbohydraattiin ja hapen välisen reaktion etenemistä.

Karbohydraattiin ja DEHA:n tapauksissa reaktiokvatio k :lla todettiin lähes lineaarinen riippuvuus hapensyöjäkemikaalikonsentraatiosta huoneenlämpötilan vallitessa. MEKO:lla ja erytorbiinihapolla konsentraatiolla



Kuva 2. A – Hapen konsentraatio ajan funktiona eri karbohydraatti- ja magnetiittikonsentraatioilla. B – Reaktioyhtälön 2 validointi datapisteisiin sovitettujen suorien avulla. Koska suorat korreloivat erittäin hyvin datapisteiden kanssa, reaktioyhtälöä voidaan käyttää kuvaamaan karbohydraattiin hapensyöntireaktiota. [5]

ei ollut vaikutusta hapensyöntitehokkuuteen vastaavissa kokeissa. Magnetiitin lisäämisen puolestaan todettiin kiihdyttävän hapensyöntitehokkuutta kaikilla kemikaaleilla ja vaikuttavan reaktion konsentraatioriippuvuuteen karbohydraattiin tapauksessa.

Kaikkien neljän hapensyöjäkemikaalin reaktiovakion k :n arvot ovat esitetty kuvassa 3. Huoneenlämpötilassa tehtyjen mittausten perusteella tehokkaimmaksi hapensyöjäkemikaaliksi osoittautui erytorbiinihappo. Karbohydraatti oli toiseksi tehokkain hie-
man ennen DEHA:a. MEKO:n tehokkuus vaikutti olevan alhaisin neljästä tutkitusta kemikaalista.

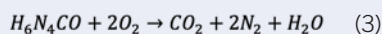
Reaktioyhtälöiden ja reaktiovakioiden määrittäminen happimittausten perusteella tehtiin vastaavasti kahdessa muussa lämpötilassa, 50 °C:ssa ja 228 °C:ssa. 50 °C:ssa kaikkien neljän vaihtoehdoisen kemikaalin hapensyöntitehokkuus oli riippuvainen hapensyöjäkemikaalin konsentraatiosta. Myös hydratsiinia tutkittiin 50 °C:ssa ja sen tehokkuus riippui myös konsentraatiosta, mutta riippuvuus ei ollut lineaarinen. Vaihtoehdoisten kemikaalien hapensyöntitehokkuusjärjestys oli sama kuin huoneenlämpötilassa, mutta hydratsiini vaikutti olevan kaikista tehokkain kemikaali.

228 °C:ssa kaikkien hapensyöntikemikaalien tehokkuus oli riippuvainen konsentraatiosta. DEHA:lla erytorbiinihapolla ja hydratsiinilla riippuvuus oli lineaarinen. Hapensyöntitehokkuutta verrattiin 25 µmol/l suuruisella hapensyöjäkemikaalikonsentraatiolla, joka oli kahdeksankertainen verrattuna kokeessa käytettyyn veteen liuenneen hapen määrään. Karbohydraatti osoittautui tehokkaimmaksi hapensyöjäkemikaaliksi. Hydratsiini ja erytorbiini olivat molemmat lähes yhtä tehokkaita, ollen näin toiseksi tehokkaimmat kemikaalit. DEHA oli neljänneksi tehokkain ja MEKO:n teho oli vertailuissa heikoin.

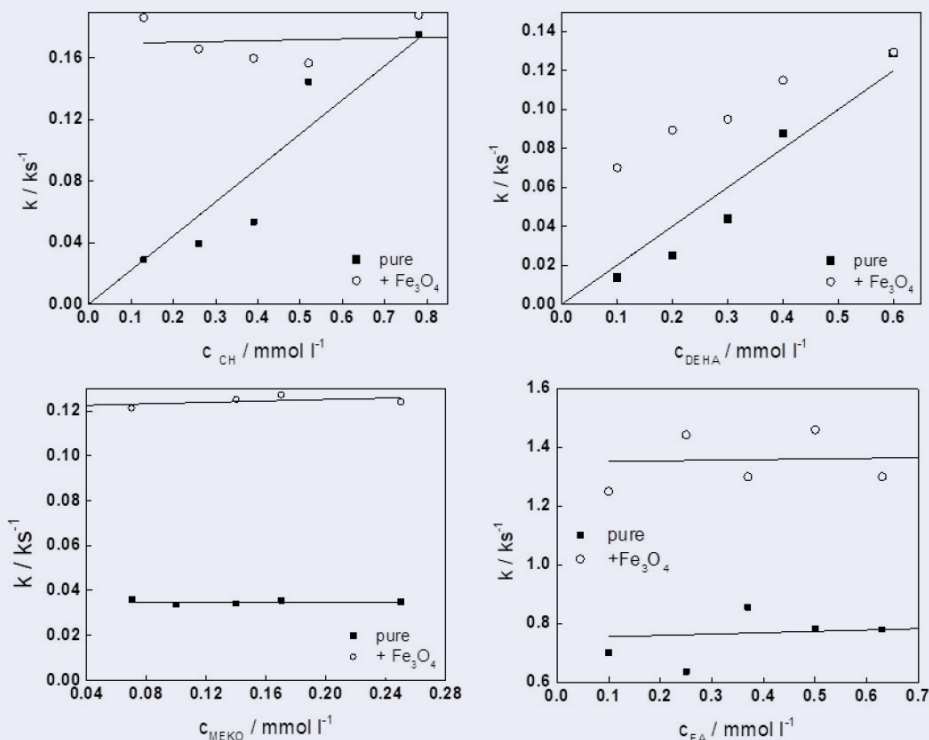
Tulokset pystyttiin myös toistamaan sähkökemiallisin mittauksin lähes kaikilla kemikaaleilla. MEKO:n tapauksessa korkeimmassa lämpötilassa happianturilla ja redox-mittauksilla saadut tulokset kuitenkin erosivat toisistaan, happianturin antaessa epäluotettavan suuren happipitoisuuden. Tämä johtuu MEKO:n hajoamistuotteista, tai tarkemmin ottaen dityppioksidin eli arkikielessä ilokaasun muodostumisesta, minkä happianturi tulkitsee hapeksi aiheuttaen virheellisen näyttämän happimittaukseen.

Hapensyöjäkemikaalien hajoamistuotteet ja vaikutus vesikemiaan

Karbohydraatti muodostaa tyypeä ja vettä reagoidessaan hapen kanssa, aivan kuten hydratsiininikin. Tämän lisäksi karbohydraattiin reaktiossa muodostuu myös hiilidioksidiä:



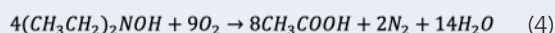
Termisesti hajotessaan yli 135 °C:ssa karbohydraatti muodostaa myös hydratsiinia ja yli 200 °C:ssa muodostuu myös ammoniakkia ja vetyä [6]. Suurien hiilihappomäärien muodostuminen vaikuttaa laske-



Kuva 3. Huoneenlämpötilassa määritetyt reaktiovakio k :n arvot eri hapensyöjäkemikaaleille (CH = karbohydraatti, DEHA = dietyylihydroksyliamiini, MEKO = metyylietyyliketoni ja EA = erytorbiinihappo) magnetiittisäyksellä ja ilman. [5]

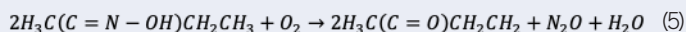
vasti veden pH-arvoon. Tämä vaikutus tulisi neutralisoida esimerkiksi syöttämällä amiinia vesikiertoon. VTT:n kokeissa hajoamistuotteilla todettiin myös pieni nostava vaikutus happamaan johtokykyyn.

DEHA reagoi hapen kanssa muodostaen lopulta eri välivaiheiden kautta asetaattia, tyypeä ja vettä:



DEHA:n hajoamistuoteanalyyssissa asetaldehydiä löydettiin selvästi eniten. Asetaattia, muurahaishappoa, dietyyliamiinia, nitraattia ja nitriittiä havaittiin myös, mutta selvästi vähemmän kuin asetaldehydiä. Muodostuessaan suurina määrinä DEHA:n hajoamistuotteet voivat nostaa johtokykyä ja niillä saattaa olla pieni nostava vaikutus pH-arvoon ja happamaan johtokykyyn.

MEKO reagoi hapen kanssa muodostaen metyylietyyliketonia, dityppioksidia ja vettä:



Hajoamistuoteanalyyssissa tunnistettiin metyylietyyliketonia ja asetaattia. Lisäksi dityppioksidista saatiin epäsuora havainto happimittauksessa. MEKO:n hajoamistuotteilla huomattiin olevan nostava vaikutus sekä johtokykyyn että happamaan johtokykyyn.

Erytorbiinihappo reagoi hapen kanssa hajoten useiksi erilaisiksi orgaanisiksi yhdisteiksi. Tunnistettuja yhdisteitä oli yhteensä yli 20 kappaletta, joista suurin osa erilaisia orgaanisia happoja. Erityisesti suurilla konsentraatioilla ne voivat laskea sekundääripiirin veden pH-arvoa useammalla yksiköllä, mikä havaittiin myös tehdyissä kokeissa. Ne vaikuttavat myös veden happamaan johtokykyyn merkittävästi, mikä

voi vaikeuttaa nykyisen kaltaista epäpuhtauksien monitorointia laitoksilla.

Yhteenveto

Hydratsiinia käytetään yleisesti painevesireaktoreissa poistamaan veteen liuennutta happea. Koska hydratsiini on todettu mahdollisesti ihmisille karsinogeeniseksi aineeksi, sen käyttöä voidaan rajoittaa tulevaisuudessa ja sen tilalle on tarve löytää korvaava hapenpoistomenetelmä. VTT on tutkinut neljää eri hapensyöjäkemikaalia, jotka saattaisivat olla potentiaalisia hydratsiinin korvaajia.

Tähän mennessä kootun tutkimusnäytön perusteella karbohydratsiini vaikuttaisi olevan suhteellisen hyvä kandidaatti korvaamaan hydratsiinia neljästä tutkitusta eri vaihtoehdosta. Karbohydratsiinin käyttöön liittyen tulisi huomioida hiilidioksidin ja hiilihapon muodostumisen vaikutus vesikemiaan sekä olla tietoinen hydratsiinin muodostumisesta korkeissa lämpötiloissa.

DEHA ja MEKO eivät olleet hapensyöntitehokkuudeltaan samalla tasolla karbohydratsiinin kanssa. Lisäksi niiden hajoamistuotteiden vaikutus vesikemiaan vaikuttaa monimutkaisemmalta. Erytorbiinihapolla oli hyvä hapensyöntitehokkuus, mutta sen tuotta-

Kemikaali	Reaktioyhtälö huoneen lämpötilalla	k huoneen lämpötilalla	Reaktioyhtälö 50 °C	k 50 °C	Reaktioyhtälö 228 °C	k 228 °C
CH	$r = kc_{O_2}^1 c_{CH}^1$	$0.22 \pm 0.022 \text{ l mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$r = kc_{O_2}^1 c_{CH}^1$	$252 \pm 2 \text{ l mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$r = kc_{O_2}^1 c_{CH}^{0.6}$	$0.52 \pm 0.01 \text{ l}^{0.6} \text{ mmol}^{-0.6} \text{ s}^{-1}$
DEHA	$r = kc_{O_2}^1 c_{DEHA}^1$	$0.20 \pm 0.016 \text{ l mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$r = kc_{O_2}^1 c_{DEHA}^1$	$28.7 \pm 0.1 \text{ l mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$r = kc_{O_2}^1 c_{DEHA}^1$	$0.45 \pm 0.05 \text{ l mmol}^{-1} \text{ s}^{-1}$
MEKO	$r = kc_{O_2}^1 c_{MEKO}^0$	$0.035 \pm 0.0011 \text{ ks}^{-1}$	$r = kc_{O_2}^1 c_{MEKO}^1$ *	$9.2 \pm 0.05 \text{ l mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$r = kc_{O_2}^1 c_{MEKO}^{0.5}$	$0.027 \text{ l}^2 \text{ mmol}^{-0.5} \text{ s}^{-1} \text{ **}$
EA	$r = kc_{O_2}^1 c_{EA}^0$	$0.75 \pm 0.084 \text{ ks}^{-1}$	$r = kc_{O_2}^1 c_{EA}^1$	$193 \pm 5 \text{ l mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$r = kc_{O_2}^1 c_{EA}^1$	$1.18 \pm 0.005 \text{ l mmol}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Hydrazine	-	-	$r = kc_{O_2}^1 c_{N_2H_4}^{0.2}$	$0.157 \pm 0.01 \text{ l mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$r = kc_{O_2}^1 c_{N_2H_4}^1$	$1.39 \pm 0.01 \text{ l mmol}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Taulukko 1. Hapensyöjäkemikaalien reaktiovakion arvoja ja reaktioyhtälöitä kolmessa eri lämpötilassa. * MEKO:lle määritetty reaktioyhtälö piti paikkansa vain alle 0,45 mmol/l konsentraatioilla. ** MEKO:lle reaktiovakion arvo pystyttiin määrittämään vain redox-mittauksesta.

mat hajoamistuotteet vaikuttavat merkittävästi vesikemiaan, minkä vuoksi se ei ole kovin käytännöllinen hapensyöjäkemikaali.

Vaihtoehtoisten hapensyöjäkemikaalien tehokkuus on joidenkin kemikaalien tapauksessa lähes samankaltainen kuin mitä on mitattu hydratsiinilla. Tarkasteltaessa eri vaihtoehtoisten kemikaalien hajoamistuotteita, niiden vaikutus vesikemiaan on moninaisempi kuin hydratsiinilla. Lisätutkimusta ja tarkempaa analyysia tarvitaan vielä vaihtoehtoisten kemikaalien hajoamistuotteiden vaikutuksesta vesikemian monitorointiin ja pitkäaikaisvaikutuksista rakennemateriaalien korroosioon.

Viitteet

- [1] European Chemicals Agency (ECHA). Hydrazine - substance information [Online]. Available: <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.005.560>
- [2] European Chemicals Agency (ECHA). 2011. Inclusion of Substances of Very High Concern in the Candidate List. c5b972a9-f57f-4fd5-8177-04b4e46c5e93 (europa.eu)
- [3] Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). Available: REACH Legislation - ECHA (europa.eu)
- [4] Jäppinen, E., Ikkäläinen, T., Lindfors, F., Saario, T., Sipilä, K., Betova, I., Bojinov, M., 2021, A comparative study of hydrazine alternatives in simulated steam generator conditions – oxygen reaction kinetics and interaction with carbon steel. Electrochimica Acta 369 (2021) 137697.
- [5] Jäppinen, E., Ikkäläinen, T., Mikkelsen, A., Niemelä, K., Saario, T., Sipilä, K., Betova, I., Bojinov, M., 2023. Potential oxygen scavenger chemicals in PWR secondary side – a comparative study between hydrazine and four alternative chemicals. Conference proceedings in NPC 2023 International Conference on Nuclear Plant Chemistry, 25th – 28th September 2023, Antibes, France.
- [6] M. M. Rahman, S. A. Al-Sulami, A. Almauli, Carbohydrazide vs Hydrazine: A Comparative Study, Power Plant Chem. 20(1) (2018)34-48.

Kirjoittaja



DI Konsta Sipilä

Senior Scientist

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
konsta.sipila@vtt.fi

Multiphysical simulation of quasi-static fuel assembly bow

Stanislas de Lambert
CEA

Over the past few years, in nuclear sciences, recourse to multiphysics and code coupling has become mandatory to depict intricate phenomena whose explanation is based on several fields of physics. Fuel assembly bow is an example, being at the center of mutual interactions between thermalhydraulics, mechanics and neutronics. In this article, we present a work carried out to set up physical bricks and their coupling (whether it be one-way or two-way). More precisely, we focus here on fluid-structure interaction and the chaining from mechanics to neutronics. An original approach consists in modelling the coolant as a network of hydraulic pipes, along with beam-like structures to simulate deformations over several operating cycles (quasi-static deformation). As a second step, deformations can be forwarded to a neutronic code (Monte Carlo or deterministic) to assess power map changes.

Viime vuosina ydinfysiikassa on tullut pakolliseksi turvautua multifysiikkaan ja koodien yhdistämiseen, jotta voidaan kuvata monimutkaisia ilmiöitä, joiden selittäminen perustuu useisiin fysiikan aloihin. Polttoaine-elementin taipuminen on esimerkki tästä, sillä se on termohydrauliikan, mekaniikan ja neutroniikan keskinäisten vuorovaikutusten aiheuttamaa. Tässä artikkelissa esitellään työ, joka on tehty fysikaalisten rakennuspalikoiden ja niiden kytkennän (joko yksi- tai kaksisuuntaisen) määrittämiseksi. Tarkemmin sanottuna keskitymme tässä yhteydessä nesteeseen ja rakenteen vuorovaikutukseen ja mallin ketjuttamiseen mekaniikasta neutroniikkaan. Alkuperäisessä lähestymistavassa jäähdytysaine mallinnetaan hydraulisten putkien verkostona yhdistettynä palkkimaisiin rakenteisiin, jotta voidaan simuloida useiden käyttöjaksojen aikana tapahtuvia muodonmuutoksia (kvasistaattinen muodonmuutos). Toisessa vaiheessa muodonmuutokset voidaan välittää neutroniikkakoodiin (Monte Carlo tai deterministinen) tehokartan muutosten arvioimiseksi.

The field of fuel assembly bow focuses on the deformation mechanism of fuel assemblies (Figure 1), which, in our case, are located in pressurized water reactors (PWR) and contain the fuel pellets. The interest in bow phenomenon generally dates back to the 1990's when it was observed for the first time, following incomplete rod cluster control assembly insertions (IRI) at the Ringhals Nuclear Power Plant in Sweden [1].

Ever since then, broader consequences were observed and studied. For instance, fuel assembly bow can relate to the nuclear core operation (asymmetry of the nuclear power in each core quadrant called tilt, local changes of the burnup, ...), but also fuel assembly handling (complication with insertion and removal of fuel assemblies, damaging of nuclear mixing grids, ...) or even in terms of core management (optimization of fuel assemblies reloading and reshuffling) [2].

Monitoring fuel assembly bow

In France, the deformation of fuel assemblies is tracked by EDF through measures of grid displacement with ultrasound (apparatus called DAMAC), outside the nuclear core [3]. Today, a sufficient knowledge of the mechanical behaviour of fuel assemblies enables engineers to correctly describe the structure including both mixing grids, guide tubes

Stanislas de Lambert voitti ENS High Scientific Councilin väitöstyöpalkinnon vuonna 2022. Lisätietoja ENS:n verkkosivuilta: www.euronuclear.org/news/dr-stanislas-de-lambert-wins-ens-high-scientific-council-phd-award-2022/

and fuel rods. However, the influence of thermalhydraulic in-core conditions and the numerous associated coolant redistributions remain grey areas in the scope of the fuel assembly bow mechanism [4, 5]. Thus, a simulation of a full nuclear core, which requires an extended knowledge of fluid-structure interactions of the assembly, is still currently a subject of major concern for industrial companies.

Neutronic consequences, like quadrant power tilts, call for dedicated modeling whatever is the scientific software used (i.e., either a Monte Carlo or deterministic solver). The interest of studying neutronic consequences lies for instance in the anticipation of tilt effects affecting the nuclear core operation, in radiation protection (change of dose rate), or even in the boiling crisis in nuclear reactor safety [6]. Neutron flux maps set up in operation can also be seen as indirect in-core measures of fuel assembly bow (measures are, as mentioned above, only realized outside the nuclear core today) [7].

In these instances, the work undertaken in our research activity can be gathered in two different research subareas. The first one is the fluid-structure interaction of the assembly, which allows, through simulation, to depict the mechanical flow-induced deflection. The second one is the study of neutronic consequences of fuel assembly bow. The latter section thus consists in setting up a link between the geometry of the deformed fuel assembly (which, for instance, stems from a fluid-structure interaction calculation), and its consideration within a Monte Carlo or deterministic neutronic code.

Fluid-structure research area

Within the scope of fluid-structure interaction of the fuel assembly, we took an interest in an important phenomenon, yet little studied, or even ignored in the literature: the coolant redistribution near mixing grids of the fuel assembly. The question arisen by this phenomenon is typically: which ratio of the flow rate goes into the grids, and which one goes into the bypass (area located between two adjacent fuel assemblies, also known as water gap)? (Figure 2). This ratio plays a key role because water gaps are not equally distributed in the core when fuel assemblies are bowed. Consequently, the pressure can take different values on both sides of one grid, leading to a hydraulic force exerting on the assembly.

First, our work aimed at depicting this flow redistribution through a simple approach: grids and bypasses were modeled with 1D hydraulic pipes and appropriate pressure

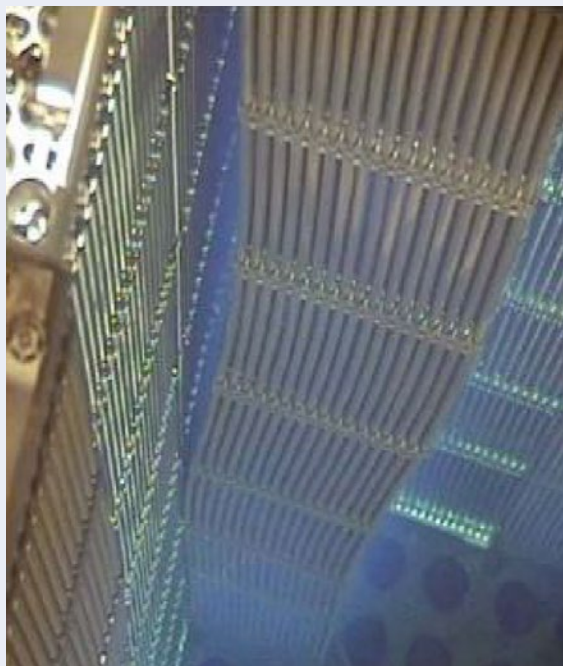


Figure 1. Assembly bow (source: Anna Franzén's Master Thesis, Uppsala Universitet, 2017).

loss coefficients. When two of these branches (grid and bypass) are joined together, one can set up a hydraulic network (Figure 2), which is similar to a nonlinear electric circuit (thanks to the law $\Delta P = KQ^2$ instead of the classical Kirchhoff's law $U = RI$).

These network laws are modified in order to take into account several physical effects. For example, a stagnation point effect (in other words, a 'peak pressure' upstream from a grid), or lateral hydraulic resistances owing to the presence of fuel rods below the grids [8]. These models were validated thanks to detailed simulations with the help of CFD software, but also experimentally, with the help of a dedicated mock-up specially designed for putting our approach to the test, made up of 3D printed grids [9].

Secondly, considering that these developments allowed to successfully reproduce the behaviors observed with both CFD simulations and the experimental mock-up, the work was focused on modeling a whole fuel assembly with the same hydraulic network

approach. In other words, the goal is to simulate the coolant flow over the full fuel assembly's height taking into account its internal and external parts (purpose of the previous models).

A numerical tool named Phorcys has been developed with the python language and dedicated to solving such systems. Hydraulic forces calculated through a network calculation are forwarded to a mechanical model of the fuel assembly structure, consisting of Timoshenko beams, which in return can estimate the assembly's displacement and change the bypasses width in the hydraulic network calculation. These return trips between hydraulics (Phorcys) and

mechanics (Cast3M) constitute the hydromechanical coupling of the whole fuel assembly (see [10] for more information). The latter was validated with success on the basis of tests run within the CEA's HERMES T hydraulic loop, analyzing the mechanical response of a fuel assembly in axial flow.

Thirdly, a row of fifteen fuel assemblies was simulated with the same coupling scheme (Figure 3), and the results were compared to the literature. The hydraulic network model is able to qualitatively reproduce (there are no experimental measures at such a scale) the main bowing patterns [10]. Finally, a simple hydraulic core model has been set up to depict the flow redistributions within a full 3D core. This model is based on successive calculations of independent 2D rows oriented towards the X/Y axes to estimate 3D hydraulic forces. At this time, this 'row sweeping' (faster) model is advised for future 3D couplings as comparison with real 3D redistribution – i.e.,

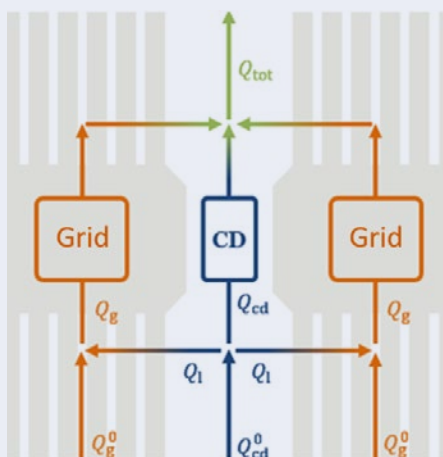


Figure 2. Illustration of flow rates redistribution upstream from the mixing grids: whether the fluid soaks into the grid itself, or into the bypass (named CD here).

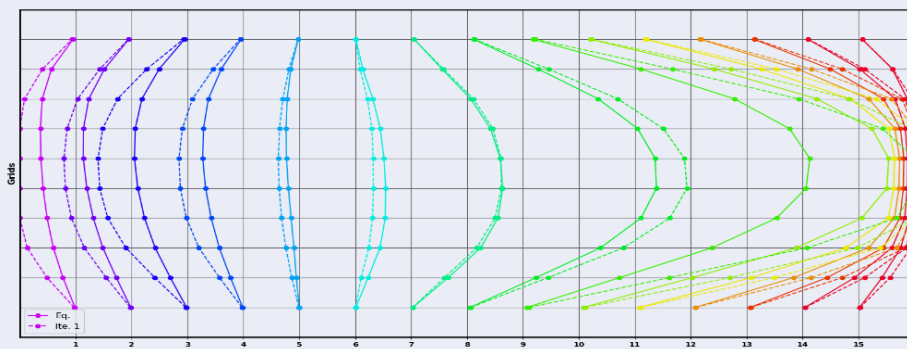


Figure 3. Illustration of the deformation of a row of 15 fuel assemblies deformed with the hydromechanical coupling.

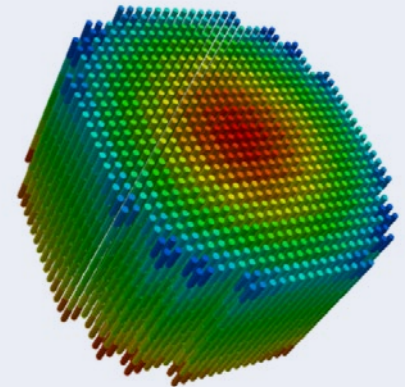


Figure 4. 3D flow redistribution calculation with Phorcys.

made of dependent rows – tends to highlight little differences in terms of forces distribution in the core (Figure 4).

Mechanics-neutronics research area

The link between deformation and its representation inside a neutronic code was also undertaken in several steps.

First, at the scale of a few fuel assemblies, the deformed fuel rods forming the whole structure are modeled through a series of small inclined cylinders (called segments). A python script generates every single element in a geometry format legible by a Monte Carlo code (in our work, the CEA's code TRIPOLI-4®) (Figure 5).

This discretization of fuel rods was validated with success by comparison with a continuous fuel rod (made of tori). Several deflection magnitudes were used (from 10 to 20 mm) along with several kinds of deformations (so-called 'C' shape and 'S' shape) [11]. Although this discretized approach (based on a Monte Carlo simulation) allows a priori to depict any deformation, it is time consuming. Therefore, 'segments' are

in theory limited to studies with a few assemblies. For instance, it can be useful to validate higher scale models with the help of a mini core.

Secondly, the core scale was modeled with the help of a deterministic code (which uses meshes for space and energy to solve the Boltzmann equation); in our case, the CEA's code APOLLO3®. The first step of this neutronic scheme is the production of a cross section library, thanks to fine 2D calculations in a quarter of assembly and depending on the adjacent bypass width (affected by deformation). This step is named 'lattice calculation'.

The fine calculation precisely describes the geometry inside a fuel rod, and the resultant flux enables to homogenize the cross sections over a less detailed geometry (for instance, only one cell per fuel rod). Thus, the second step is the use of the latter generated library of homogenized cross sections, but in wider and less detailed geometries (with one cell per fuel rod). This step is called 'core calculation'. The regular comparison of a mini core made up of 5x5 fuel assemblies (Figure 6) through several cases of deformation, with a reference Monte Carlo code (TRIPOLI-4®), allowed to validate the present approach in 2D.

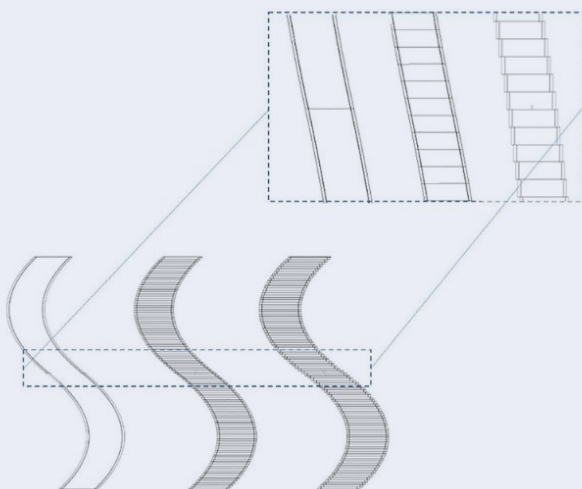


Figure 5. Discretizing a fuel rod with TRIPOLI-4®, the stacking modeling (right) is the one used in the literature, the segment modeling (center) has been set up in the work.

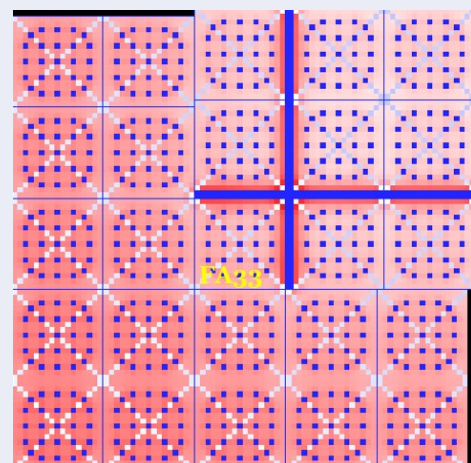


Figure 6. Core calculation run with APOLLO3® (5x5 fuel assemblies) realized with homogenized cross sections. The fuel assemblies in the top right-hand corner were displaced to depict their bowing and a gap enlargement next to FA33.

Conclusions and open prospects

The present article gives an overview of a research activity focusing on fuel assembly bow. The latter is divided into two subareas, one for fluid-structure interaction, and one for mechanics-neutronics interaction. In this multiphysical environment, the fluid is modeled through an original approach of hydraulic networks, which can be used to estimate forces exerting on the structure made of beam-like elements (hydro-mechanical coupling). Neutronic consequences of deformation can be evaluated either explicitly in 3D with a Monte-Carlo approach or, at this time in 2D, with a deterministic scheme based on a gap-dependent cross section library generated during this work.

There are many prospects regarding the research area. On the hydraulic side, the development of a similar 3D coupling of the whole core is ongoing, leaning on the same multi-1D description. In addition, the models developed in this work make use of a certain amount of param-

eters and correlations, and the consideration of boundary conditions (linked to the plena) is simplified. Within the scope of a new research project, a dedicated uncertainty analysis is in progress regarding the hydromechanical coupling.

On the neutronic side, the main prospect is the 3D extension of the deterministic scheme to simulate the whole core. This extension could consist of calculating the flux on a 3D simplified – yet possibly unstructured – mesh of fuel assemblies. In that case, one could use the 2D cross section library developed in this work using mean values of gaps.

Acknowledgments

The work presented in this article is the subject of a PhD entitled 'Contribution to the multiphysical analysis of fuel assembly bow', funded by the CEA, and defended on 3 March 2021 at the Paris-Saclay University.

References

- [1] Andersson, T.; Almberger, J. & Bjoernkvist, L. (2005). A decade of assembly bow management at Ringhals. Structural behaviour of fuel assemblies for water cooled reactors. Proceedings of a technical meeting. IAEA, Vienna.
- [2] Kerkar, N.; Paulin, P. (2008). Exploitation des cœurs REP. EDP Sciences.
- [3] IRSN (2012). Le point de vue de l'IRSN sur la sûreté et la radioprotection du parc électronucléaire français en 2010. Rapport DSR N°466.
- [4] Yan, J.; Zhang, Y.; Yang, B. & al. (2014). Influence of Spacer Grid Outer Strap on Fuel Assembly Thermal Hydraulic Performance. Science and Technology of Nuclear Installations 2014, 602062.
- [5] Bieder, U.; Genrault, C. & Ledac, P. (2020). Hydraulic forces acting on full cross section fuel assemblies with 17×17 fuel rods. Progress in Nuclear Energy 130, 103515.
- [6] Konheiser, J.; Brachem, C. & Seidl, M. (2016). Investigation of the effects of a variation of fuel assembly position on the ex-core neutron flux detection in a PWR. Journal of Nuclear Science and Technology 54, 2, pp. 188-195.
- [7] Wanninger, A. (2018). Mechanical Analysis of the Bow Deformation of Fuel Assemblies in a Pressurized Water Reactor Core. Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen.
- [8] de Lambert, S.; Cardolaccia, J.; Faucher, V & al. (2021). Semi-analytical modeling of the flow redistribution upstream from the mixing grids in a context of nuclear fuel assembly bow. Nuclear Engineering and Design 371, 110940.
- [9] Cardolaccia, J. & de Lambert, S. (2021). Investigation of the flow redistribution upstream of grid-like obstacles separated by a variable gap. Experimental Thermal and Fluid Science 121, 110289.
- [10] de Lambert, S.; Cardolaccia, J.; Faucher, V. & al. (2023). Semi-analytical fluid-structure model for the analysis of fuel assembly bow in full PWR cores. Progress in Nuclear Energy 160, 104668.
- [11] de Lambert, S.; Campioni, G.; Faucher, V. & al. (2019). Modeling the consequences of fuel assembly bowing on PWR core neutronics using a Monte-Carlo code. Annals of Nuclear Energy 134, pp. 330-341.

Writer



PhD Stanislas de Lambert

Research engineer
CEA Paris-Saclay
stanislas.de-lambert@cea.fr

Väitös: Telluurin käyttäytyminen ydinonnettomuustilanteissa

Anna-Elina Pasi
Chalmersin teknillinen yliopisto

Vakavassa ydinreaktorionnettomuudessa vapautuu suuria määriä radioaktiivista materiaalia ympäristöön, mikä voi aiheuttaa kohonneen säteilyannoksen vaikutuksesta terveysriskejä väestölle ja luonnolle. Radionuklidien vapautumiseen vaikuttavat merkittävästi niiden kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet, kuten haihtuvuus, liukoisuus tai olomuoto. Telluuri kuuluu helposti haihtuvien fissiotuotteiden ryhmään ja sen isotooppeja on vapautunut suurina aktiivisuuksina jodin ja cesiumin ohella sekä Tšernobylin että Fukushima onnettomuuden aikana. Tässä väitöstyössä tutkittiin telluurin käyttäytymistä ja kulkeutumista reaktorin suojarakennuksessa ydinonnettomuuden aikana. Työssä keskityttiin erityisesti reaktioihin, jotka tuottavat liukoisia ja haihtuvia telluuriyhdisteitä ja jotka voivat mahdollisesti lisätä radioaktiivisia päästöjä onnettomuustilanteessa.

One of the main concerns during a severe nuclear reactor accident is the release of radioactive material to the environment. The radionuclides with high volatility will escape the reactor core in early stages of the accident and are potentially released in high activities. The release behavior is governed by the physical and chemical characteristics of the element. One of the volatile fission products is tellurium. Alongside iodine and cesium, tellurium has been released in significant activities from both Chernobyl and Fukushima accidents. However, there are great uncertainties with the behavior of tellurium in severe accident scenarios. This thesis focused on the mobilization and management of tellurium in the containment. The focus was on reactions leading to soluble and volatile species potentially increasing the source term of tellurium.

Tämä väitöstyö tehtiin Chalmersin teknillisessä yliopistossa Göteborgissa Ruotsissa. Tavoitteena oli tutkia telluurin, helposti haihtuvan fissiotuotteen, käyttäytymistä erityisesti suojarakennuksen sisällä. Työssä tehtiin laboratoriokokeita, joissa simuloitiin vakavassa onnettomuudessa vallitsevia olosuhteita. Telluurin vapautuminen polttoaineesta ja kulkeutuminen reaktorirakennukseen on melko hyvin tunnettu, mutta onnettomuuden edetessä tapahtuvat reaktiot ovat jääneet vähemmälle huomiolle.

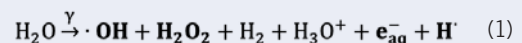
Tässä työssä keskityttiin suojarakennuksen nestefaaseihin ja hyödynnettiin gammalähdettä, jolla saatiin simuloitua korkeaa säteilyannosta ja tutkittua säteilyn aiheuttamia reaktioita. Tässä artikkelissa esitellään kolmea väitöskirjan kuudesta teemasta, jotka on esitetty kuvassa 1. Valitut teemat käsittelevät telluurin liukoisuutta, orgaanisten telluuriyhdisteiden muodostumista ja ruiskutusjärjestelmän tehokkuutta telluuriyhdisteiden poistossa. Viitteisiin on koottu alkuperäiset artikkelit, joihin väitöskirja pohjautuu.

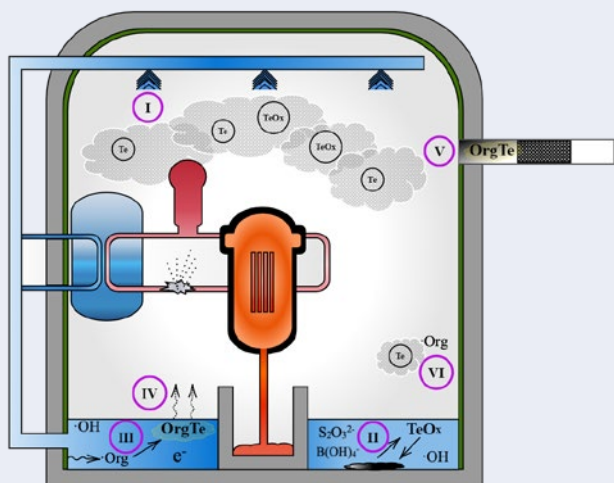
Telluurin radiolyttinen hapettuminen [2]

Telluuri on alkuainemuodossaan erittäin niukkaliukoinen vesiliuoksiin. Vaihtamalla kuitenkin olosuhteita, kuten pH:ta tai pelkistymispotentiaa-

lia, telluuri voi muodostaa hyvinkin liukoisia spesieksien. Tämä täytyy ottaa huomioon erityisesti sumpissa eli liuoksessa, joka kertyy reaktorirakennuksen pohjalle onnettomuustilanteessa. Sumppi on vesiliuos, jonka pääkomponentteja painevesireaktoreissa ovat emäs (esim. NaOH, KOH) ja boorihappo. Lisäksi sumppiin on mahdollisesti liuennut fissiotuotteita, orgaanisia yhdisteitä sekä muita rakennemateriaaleja, jotka voivat muuttaa vapautuvien yhdisteiden käyttäytymistä.

Polttoaineesta vapautuneet fissiotuotteet aiheuttavat sumppiin korkean säteilyannoksen, jonka seurauksena liuoksen vesimolekyylit hajoavat reaktiivisiksi radikaaleiksi. Nämä radikaalit voivat olla sekä hapettavia että pelkistäviä, ja voivat reagoida fissiotuotteiden kuten telluurin kanssa ja vaikuttaa niiden käyttäytymiseen. Tässä työssä tutkittiin telluurin käyttäytymistä sumppiluuksessa ja erityisesti veden radiolyysituotteiden vaikutusta telluurin liukoisuuteen. Reaktiossa 1 on esitetty veden radiolyysituotteiden muodostuminen. Hydrokssyyliradikaali ja vetyperoksidi ovat tärkeimmät hapettavat reaktiotuotteet, kun taas elektroni ja vetyradikaali tärkeimmät pelkistävät.

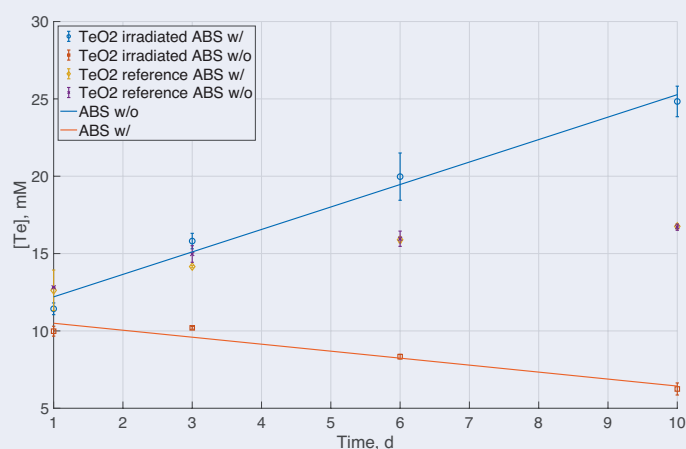




Kuva 1. Graafinen yhteenvedo väitöstyössä käsitellyistä ilmiöistä. Roomalaiset numerot viittaavat artikkeleihin, joihin väitöskirja pohjautuu: I. Ruiskutusjärjestelmän tehokkuus, II. Telluurin radiolyttinen hapettuminen, III. Orgaanisten telluuriyhdisteiden muodostuminen, IV. Dimetyyllitelluridin radiolyttinen hajoaminen, V. Aktiivihiilisuodattimien tehokkuus, VI. Telluurin ja orgaanisten yhdisteiden reaktiot kaasufaasissa.

Liukoisuuskokeet suoritettiin lisäämällä kiinteää telluuriidioksidia liuokseen, joka simuloi onnettomuudessa muodostuvaa sumppea. Näytteitä säteilytettiin Gammacell220 ^{60}Co -lähteellä, minkä jälkeen telluurin konsentraatio ja spesiaatio analysoitiin. Kokeiden tulokset on esitetty kuvassa 2, jossa telluurin konsentraatio on esitetty säteilytysajan funktiona.

Tulokset osoittavat, että veden radiolyysituotteilla on merkittävä vaikutus telluurin liukoisuuteen. Hapettavat radikaalit muuttavat telluurin hyvin liukoiseen muotoon, mikä nähtiin telluurin kokonaiskonsentraation kasvuna. Pelkistävien radikaalien havaittiin myös vaikuttavan telluurin käyttäytymiseen. Kun sumpppiin lisättiin natriumtiosulfaattia ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), joka eliminoi hapettavat radikaalit liuoksesta, telluuri pelkistyi alkuainemuotoon ja kokonaiskonsentraatio laski säteilytysannoksen



Kuva 2. Telluurin liukoisuus säteilytysajan funktiona sumpppiin lisätyllä tiosulfaattilla (sininen, o) ja tiosulfaatin kanssa (oranssi, +). Keskimäiset datapisteet (keltainen, violetti) esittävät referenssitapauksia säteilyttämättömissä liuoksissa.

funktiona. Erityisesti hapettuminen ja telluurin liukoisuuden kasvaminen on merkittävää, sillä liukoisena telluuri voi reagoida muiden sumpissa esiintyvien aineiden kanssa ja muodostaa entistä haitallisempia yhdisteitä sekä vaikuttaa muiden fissiotuotteiden vapautumiseen.

Orgaanisten telluuriyhdisteiden muodostuminen [3]

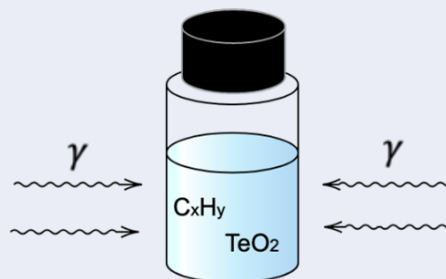
Fissiotuotteiden reaktiot orgaanisten yhdisteiden kanssa tuottavat helposti haittuvia yhdisteitä, jotka voivat lisätä radioaktiivista päästöä ydinonnettomuuden aikana. Jodin tiedetään reagoivan maalipinnoilta liuenneiden orgaanisten radikaalien kanssa ja se muodostaa muun muassa metyyliiodidia, CH_3I , jonka vapautumisen pidättäminen on muita yhdisteitä haastavampaa.

Telluurin vastaavia reaktioita ydinonnettomuusskenaariossa ei tunneta, vaikka organotelluridit eivät itsessään ole täysin harvinaisia ja niitä voi syntyä myös luonnossa. Tässä työssä tutkittiin orgaanisten telluridien muodostumista sumpppiin. Orgaanisena lähtöaineena käytettiin yhdisteitä, joiden tiedetään liukenevan reaktorirakennuksen maalipinnoilta: teksanolia, metyyliisobutyryliketonia ja toluenia. Näytteet valmistettiin liuottamalla telluuriidioksidia sumpppiin ja lisäämällä valittua maaliliuotinta. Onnettomuustilannetta simuloitiin säteilyttämällä näytteitä ^{60}Co -lähteellä, jolloin orgaaniset yhdisteet hajoavat tuottaen reaktiivisia radikaaleja, jotka voivat reagoida telluurin kanssa. Yksinkertaistettu koejärjestely on esitetty kuvassa 3.

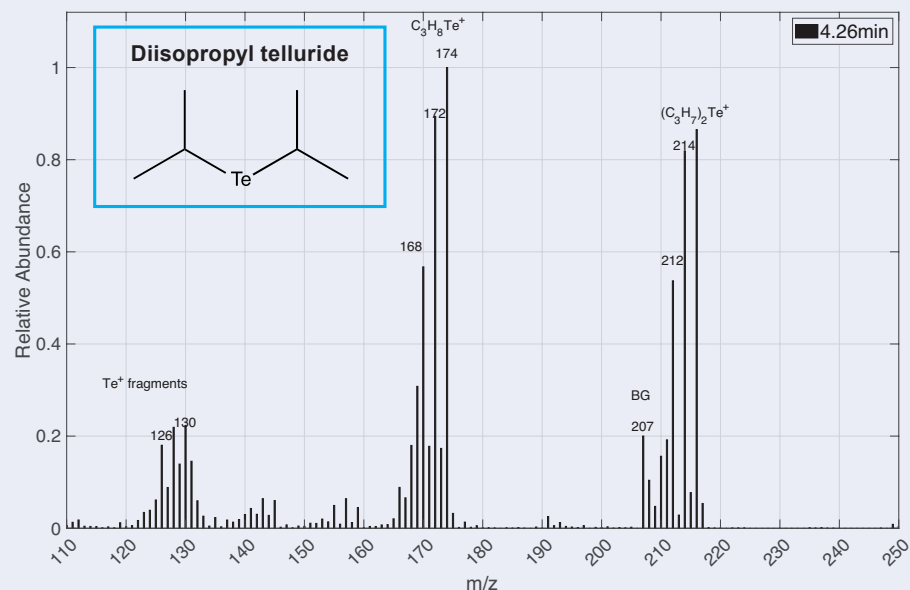
Säteilytyksen jälkeen näytteet analysoitiin kaasukromatografi-massaspektrometrillä ja useissa näytteissä havaittiin syntyneen orgaanisia telluuriyhdisteitä. Orgaanisilla telluuriyhdisteillä on hyvin tunnistettava massajakauma, jonka avulla eri yhdisteet pystyttiin tunnistamaan. Kuvissa 4 ja 5 on esitetty massaspektri sekä molekyyli rakenne diisopropyylitelluridille sekä metyyli-isopropyylitelluridille, joita syntyi säteilytyksen aikana. Orgaanisten telluridien muodostuminen onnettomuutta simuloivassa kokeessa on mielenkiintoista, mutta syntyvien yhdisteiden määrä ja sitä myöten merkittävyys vaatii lisätutkimuksia. Mikäli orgaaniset telluuriyhdisteet todetaan merkittäväksi säteilyturvallisuusriskiksi onnettomuustilanteessa, tulee niiden pidättymistä nykyisillä menetelmillä testata.

Ruiskutusjärjestelmän tehokkuus telluuriyhdisteiden poistossa [1]

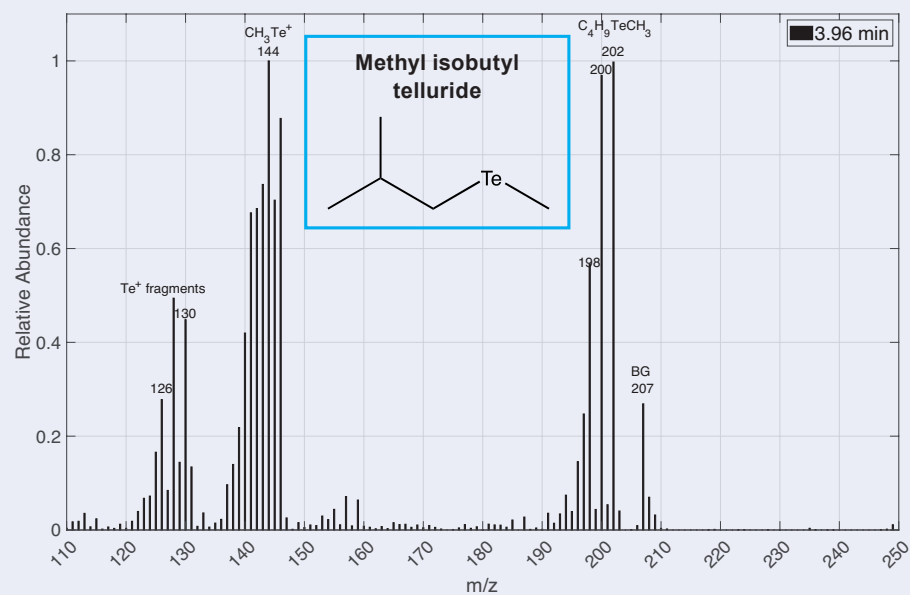
Väitöstyössä tutkittiin kulkeutumiseen vaikuttavien reaktioiden lisäksi turvallisuusjärjestelmien tehokkuutta. Yhtenä näistä keskityttiin ruiskutusjärjestelmään, joka on sijoitettu reaktorirakennukseen alentamaan painetta ja lämpötilaa sekä poistamaan partikkeleita ja kaasumaisia yhdisteitä suojarakennuksen kaasutilasta. Ruiskutusjärjestelmän tehokkuutta testattiin telluuriaerosolien poistoon eri olosuhteissa.



Kuva 3. Graafinen esitys kokeista, joissa tutkittiin orgaanisten telluuriyhdisteiden muodostumista sumpppiin.



Kuva 4. Diisopropyylitelluridin molekyyli rakenne ja massaspektri.



Kuva 5. Metyyli-isopropyylitelluridin molekyyli rakenne ja massaspektri.

Kuvassa 6 on esitetty koelaitteisto, joka sisältää putkiuunin, jota käytettiin telluuriaerosolien muodostamiseen, sekä säiliön, joka simuloi suojarakennusta. Noin 120 cm korkeisen säiliön kanteen oli sijoitettu suutin, joka simuloi ruiskutusjärjestelmää. Järjestelmän tehokkuus määritettiin analysoimalla telluuriaerosolien kokonaismäärä ensin ilman ruiskutusta ja vertaamalla tätä kokonaismäärään ruiskutuksen jälkeen. Kokeet suoritettiin kahdessa kaasussa, ilmassa ja työssä, sekä tutkimalla kosteuden vaikutusta lisäämällä virtaukseen vesihöyryä. Kolmantena parametrina tutkittiin muiden fissiotuotteiden vaikutusta telluurin poistoon lisäämällä virtaukseen cesiumjodidipartikkeleita. Koematriisi on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Ruiskutuskokeiden koematriisi.

Koe#	Lähtö- aine	Lämpö- tila, [K]	Kaasu	Höyry	CsI
1	TeO ₂	1150	Ilma		
2	TeO ₂	1150	Ilma	X	
3	TeO ₂	1150	Ilma	X	X
4	Te	810	Ilma		
5	Te	810	Ilma	X	
6	Te	810	Ilma	X	X
7	Te	810	N ₂		
8	Te	810	N ₂	X	
9	Te	810	N ₂	X	X

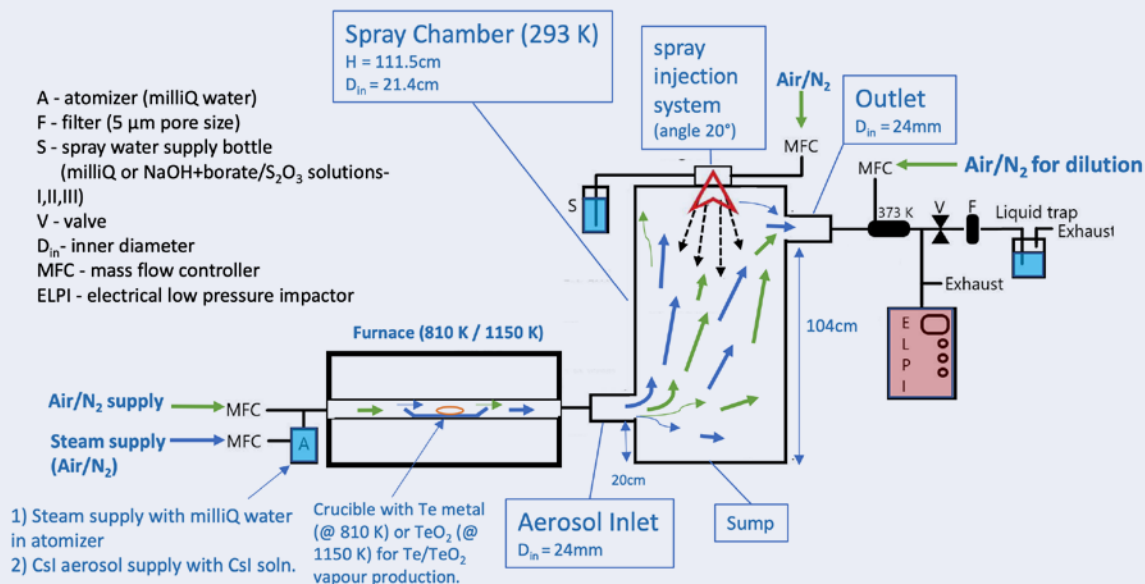
Tulokset osoittavat, että erityisesti hapettavissa oloissa telluuriaerosolien huuhteleva kaasutilasta on erittäin tehokasta. Tehokkuus oli yleisesti yli 90 % ja kasvoi höyryn ja cesiumjodidin lisäyksen myötä. Tehokkuuden kasvu johtuu hiukkaskoon kasvusta telluurin ja CsI-hiukkasten agglomeroitumista. Suuremmilla hiukkasilla tapahtuu enemmän törmäyksiä pisaroiden kanssa, jolloin tehokkuus kasvaa. Typpikaasussa muodostuneet telluurihiukkaset poistettiin heikommalla tehokkuudella johtuen todennäköisesti partikkelien kokojakauman pienenemisestä, mikä vaikuttaa aerosolien ja pisaroiden vuorovaikutukseen.

Kokeissa testattiin myös eri sprayliuoksia ja tutkittiin, onko liuoksen kemialla vaikutusta telluuriaerosolien poistamiseen. Liuoksina käytettiin vettä, natriumhydroksidia (NaOH) ja natriumhydroksidin ja natriumtiosulfaatin seosta (NaOH+Na₂S₂O₃). Tulokset osoittavat, että liuoksen kemialla ei ole suurta merkitystä sprayn tehokkuuteen. Telluurihiukkasten vuorovaikutukset pisaroiden kanssa ovat enemmän fysikaalisia, kuten törmäykset ja diffuusio, eikä kemiallisia, kuten liukeneminen.

Yhteenveto

Vakavien ydinreaktorionnettomuuksien tutkimisessa pyritään saamaan tietoa ilmiöistä, joita tapahtuu onnettomuuden aikana ja erityisesti niistä, jotka vaikuttavat radioaktiivisten aineiden vapautumiseen ympäristöön. Tässä väitöstyössä keskityttiin telluurin käyttäytymiseen ja kemiaan. Telluurin käyttäytymisen todettiin olevan oletettua monimutkaisempaa, erityisesti altistuessaan säteilylle.

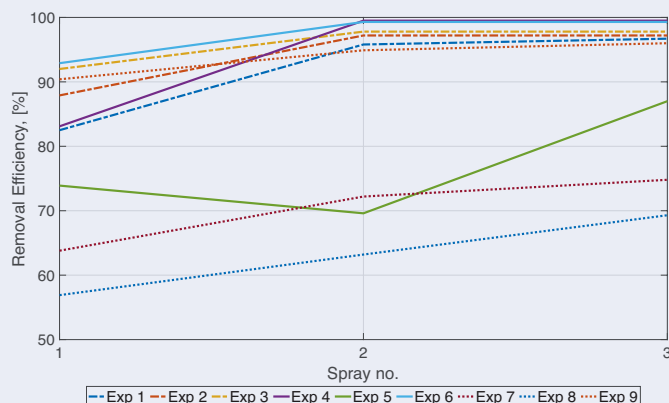
Telluurin radiolyttisen hapettumisen todettiin muodostavan anionisia telluurispesieksiä, jotka ovat erittäin liukoisia sumpissa. Nämä telluuriyhdisteet voivat reagoida edelleen muodostaen helposti kulkeutuvia



Kuva 6. Koelaitteisto, jota käytettiin ruiskutusjärjestelmän tehokkuuden testaamiseen.

yhdisteitä. Erityisesti helposti haihtuvien orgaanisten telluuriyhdisteiden muodostuminen oli merkittävä löytö, johon tulee keskittyä tulevaisuuden tutkimustyössä. Lisäksi työssä tutkittujen turvajärjestelmien todettiin pidättävän telluuriyhdisteitä tehokkaasti. Kokonaisuudessaan tämä väitöstyö tuotti merkittäviä tuloksia liittyen telluurin käyttäytymiseen ja korosti telluurin merkitystä onnettomuustutkimuksessa.

Väitöskirja "Mobilization and Management of Tellurium in Severe Accident Scenarios" on hyväksytty 8.12.2022 Chalmersin teknillisessä yliopistossa Ruotsissa.



Kuva 7. Ruiskutusjärjestelmäkokeiden tehokkuudet eri olosuhteissa. "Spray no." viittaa eri liuoksiin, joista 1. vesi 2. NaOH ja 3. NaOH+Na₂S₂O₃. Kokeista "Exp.1–6" on tehty hapettavissa olosuhteissa ja "Exp.7–9" typpi-atmosfääriä.

Viitteet

- [1] Kärkelä, T., Pasi, A. E., Espegren, F., Sevón, T., Tapper, U., & Ekberg, C. (2021). Tellurium retention by containment spray system. *Annals of Nuclear Energy*, 164, 108622.
- [2] Pasi, A. E., Glänneskog, H., Foreman, M. R. S. J., & Ekberg, C. (2021). Tellurium behavior in the containment sump: dissolution, redox, and radiolysis effects. *Nuclear Technology*, 207(2), 217-227.
- [3] Pasi, A. E., Foreman, M. R. S. J., & Ekberg, C. (2022). Organic Telluride Formation from Paint Solvents Under Gamma Irradiation. *Nuclear Technology*, 208(11), 1734-1744.
- [4] Pasi, A. E., Foreman, M. R. S. J., & Ekberg, C. (2023). Radiolytic degradation of dimethyl telluride in aqueous solutions. *Radiation Physics and Chemistry*, 207, 110850.
- [5] Pasi, A. E., Foreman, M. R. S. J., & Ekberg, C. (2022). Study of the removal efficiency of activated charcoals for dimethyl telluride. Manuscript.
- [6] Pasi, A. E., Kärkelä, T., Sandén, F. B., Tapper, U., Kajolinn, T., & Ekberg, C. Gas Phase Interactions between Tellurium and Organic Material in Severe Nuclear Accident Scenarios. Available at SSRN 4500546.

Kirjoittaja



FT Anna-Elina Pasi

Tutkija

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
 anna-elina.pasi@vtt.fi

Diplomityö: Kiehusvesireaktorien transienttimallinnusta Apros-S3K-koodikytkennällä

Verna Hakkarainen
Teollisuuden Voima Oyj

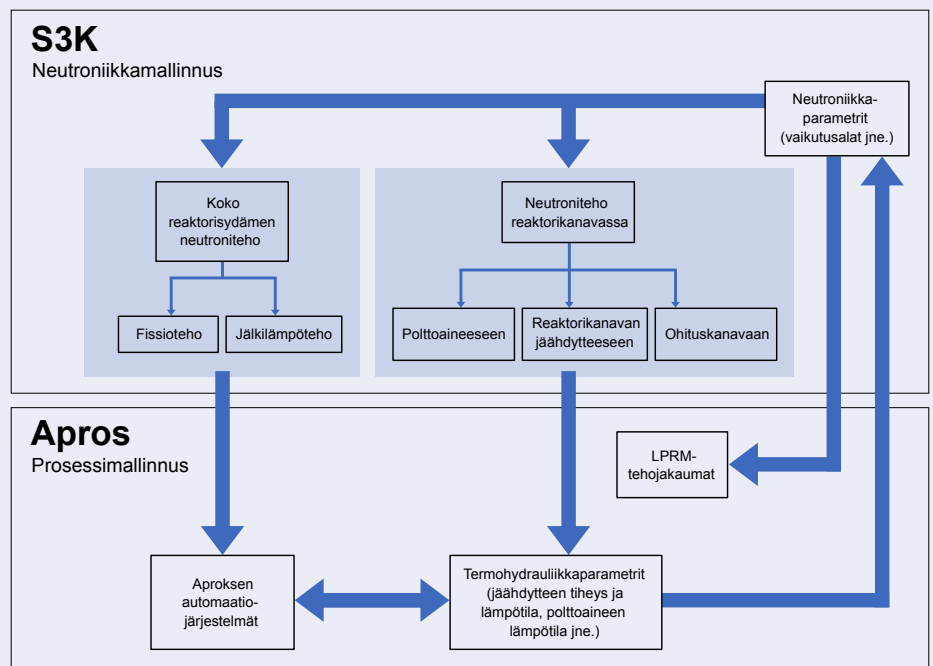
Ydinvoimalaitosten käyttäytymistä häiriö- ja onnettomuustilanteissa voidaan pyrkiä ennustamaan simuloimalla niiden transienteja laskentaohjelmistoilla, jotka voidaan koodikytkennöissä laittaa työskentelemään yhdessä tarkempien tulosten saamiseksi. Neutroniikkaohjelmisto SIMULATE-3K:n sekä suomalaiskehitteisen prosessisimulointiohjelmisto Aproksen koodikytkentä on yksi lupaava vaihtoehto kiehusvesireaktorien mallinnukseen.

The behaviour of nuclear power plants in operational disturbances and accidents may be predicted by simulating the transients with advanced software which can be coupled together to enable more accurate results. The coupling of process simulation software Apros and neutronics tool SIMULATE-3K is a promising option for the modelling of boiling water reactors.

Tein diplomityöni kiehusvesireaktorien transienttianalyseista kytketyllä neutroniikka-termohydrauliikkalaskennalla. Työpaikanani oli TVO:n ydinturvallisuussuunnittelun laitosturvallisuustiimi ja tavoitteena oli testata prosessisimulointiohjelmisto Aproksen ja neutroniikkalaskentaohjelmisto SIMULATE-3K:n (S3K) kytkennän kelpoisuutta ja turvallisuusanalyysikykyä mallintamalla Olkiluoto 1:n ja 2:n häiriö- ja onnettomuustilanteita. Ydinvoimaan liittyvä aihe valikoitui energiatekniikan opintojen sekä aiempien kesätyökokemusten perusteella.

Neutroniikan ja termohydrauliikan välinen vuorovaikutus on kiehusvesireaktoreissa hyvin herkkää pienillekin parametrien muutoksille. Monimutkaisten fysikaalisten ilmiöiden, kuten takaisinkytkentäketjujen oikeanlainen mallinnus on tärkeää ydinturvallisuussuunnittelussa, jotta laitoksen käyttäytymistä erilaisissa transienteissa voidaan ennustaa ja häiriötilanteisiin varautua.

Koodikytkennät ovat siitä kiinnostavia, että kullekin laskennan osa-alueelle, kuten neutroniikalle, lämmönsiirrolle ja virtausdynamiikalle voidaan käyttää kehittyneem-



Aproksen ja S3K:n välinen vuorovaikutus ja välitettävät systeemiparametrit.

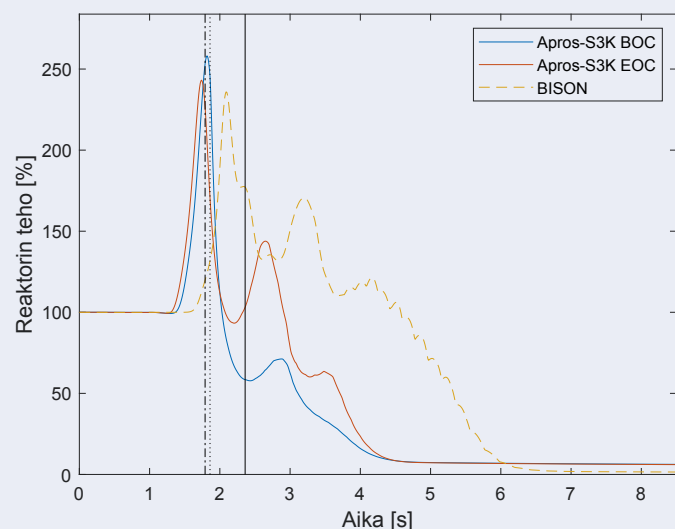
piä ohjelmia ja siten saada mahdollisesti tarkempia tuloksia. Apros-S3K-kytkennässä kaikki neutroniikkamallinnus tapahtuu S3K:ssa ja prosessisimulaatio eli termohydrauliikka- ja automaatiomallinnus Aproksessa.

Ohjelmat on kytketty toisiinsa dynaamisen kirjaston avulla. Yksinkertaistetusti laskenta tapahtuu siten, että Apros välittää S3K:lle laskennan aikana päivittyvää termohydrauliikkadataa, ja tämän tiedon sekä ennaltamäärättyjen sydänparametrien avulla S3K laskee neutronitehojakauman, joka välitetään Aprokseen seuraavalle aika-askeleelle. Apros on kytkennässä hallitseva pääohjelmisto, ja S3K suorittaa neutroniikkalaskennan Aproksen sekä käyttäjän käskyjen mukaan.

Laskentatapauksina erilaisia häiriötilanteita

Työn ensimmäinen laskentatapaus oli Olkiluoto 2:n häiriötilanteessa ilmennyt virtaustransientti, jossa viisi pääkiertopumppua pysähtyi, mikä johti lopulta reaktoripikasulkuun tehon noustessa liian suureksi pääkiertovirtaukseen nähden. Toisessa laskentatapauksessa simuloitiin Olkiluoto 1:llä tehtyä kuormanpudotuskoetta, jossa yhteys valtakunnan sähköverkkoon menetetään laitoksen pääkatkaisijan avautuessa ja laitos ajautuu omakäytölle. Kolmas laskentatapaus tutki oletettua onnettomuutta, jossa turbiinin säätöventtiilit ja ohitusventtiilit sulkeutuvat samaan aikaan, kun automaatio- ja suojaustoiminnoissa ilmenee useita yhtäaikaista vikoja, mistä seuraa jyrkkä reaktoripaineen ja -tehon nousu. Reaktoripikasulun aktivoituminen viivästyy vikojen vuoksi, jolloin luonnollisten takaisinkytkentöjen on alettava rajoittaa tehoa.

Herkkyysanalyysia tehtiin kolmannelle laskentatapaukselle palamaa vaihtamalla. Laskentatapauksia 1 ja 2 tutkittiin mallin validointitarkoitukseen, ja tuloksia vertailtiin laitosmittausdataan. Laskentatapauksella 3 oli tarkoitus tutkia mallin turvallisuusanalyysikykyä, ja sen vertailuaineistona oli laitostoimittajan BISON-ohjelmistolla suoritettu analyysi.



Apros-S3K-mallien kokonaisneutroniteho ja BISONin keskimääräinen suodattamaton APRM laskentatapauksessa 3. Säätösauvojen hydraulisen sisäänampumisen hetki on merkitty EOC-mallille pistekatkoviivalla, BOC-mallille pisteviivalla ja BISONille yhtenäisellä pystyviivalla. Teho alkaa laskea etenkin Doppler-ilmion takia.

Yhteenveto

Kytetty malli ennusti transienttien tehokäyttäytymistä hyvin laitosmittauksia vastaavasti. Havaitut poikkeavuudet johtuivat ensisijaisesti erilaisista reaktorikonfiguraatioista, laitoksen lähtötiloista, mittauslogiikoista sekä mallin herkkyydestä pienillekin parametrimuutoksille.

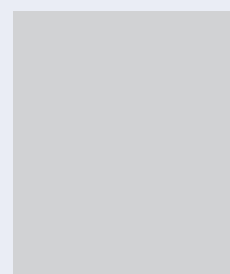
Kolmannessa laskentatapauksessa reaktorin fysikaalisten takaisinkytkentöjen ilmeneminen sekä BOC- että EOC-mallissa (Beginning Of Cycle = käyttöjakson alku, End Of Cycle = käyttöjakson loppu) vastasi hyvin laitostoimittajan ohjelmalla tehtyä analyysia ja oletetun onnettomuuden hyväksymiskriteerit täyttyivät. Palaman vaikutus paine-transienttiin oli muiden analyysien löydösten mukaista. Erot johtuivat etenkin erilaisista palamista ja ohjelmien laskentamenetelmien poikkeavuuksista.

Mallissa havaittiin joitakin päivytystarpeita ja kehityskohteita, ja siihen tehtiin myös korjauksia. Merkittävimpiä parannuksia olisivat ainakin mallin suojausautomaatioon kytkettävän tehonmittauksen muutos LPRM-signaaleista (Local Power Range Monitor = paikallinen tehoalue-mittaus) koostuvaksi APRM-tehoksi (Average Power Range Monitor = keskimääräinen tehoalue-mittaus) sekä pääkiertopumppujen kitkamallinnuksen muutos. Mahdollisesti vielä selvitettäviä tarkennuksia olisivat myös esimerkiksi säätösauvojen hydraulisen sisäänampumisen paineriippuvuuden huomiointi sekä sekasydämen mallinnus. Osa muutoksista ei ole vielä työssä testatuilla ohjelmaversioilla mahdollisia.

Kytetty malli vaikuttaa lupaavalta transientti- ja turvallisuusanalyysiin, mutta useampia transienttisimulaatioita ja systemaattista herkkyyssanalyysia tulisi suorittaa reaktoriparametrien muutosten vaikutuksen arvioimiseksi, jotta malli voidaan laajemmin todeta kelvolliseksi turvallisuusanalyysikäyttöön.

Opinnäyte on hyväksytty Tampereen yliopiston Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunnassa 7.9.2023.

Kirjoittaja



DI Verna Hakkarainen

Nuorempi laitosturvallisuusinsinööri
Teollisuuden Voima Oyj

Aasinsillan ja/tai kukkaruukun kautta itse asiaan asiassa kuin asiassa – siis pohdiskelevissa turvallisuuskysymyksissäkin

MITÄKÖHÄN TUO MEIDÄN turvallisuusfilosofimme nyt tällä kertaa yrittää tuollaisella otsikolla pakinassaan kertoa? Pitääpä käydä katsomaan.” ”Klick.” Näinhan se menee sähköisen nykaviestinnän otsikkojournalismin aikakaudella ja sitähän me jo vuosia olemme eläneet. Pakinan eli kolumnin tai milloin minkäkin jutun otsikko herättää lukijan mielenkiinnon tai ainakin uteliaisuuden, ja niin hän klikkaa uutiskirjeen otsikon auki älypelinä näytölle. Järjestelmän klikkauslaskuri rekisteröi klikkaajan lukeneen jutun. Oliko asia niin vaiko ”Kilroy vain käväisi siinä” juttua kuitenkin lukematta? Menestyksen mitasta siis kertoo klikkausten lukumäärä, mutta kiinnostiko pakina oikeasti vai oliko se limbo?

ATS Ydintekniikka on oman erityisalan johtava tieteellinen aikakauslehti Suomessa. Siitäkö syystä vaiko ehkä vakavaraisen jäsenistönsä konservatiivisesta jääräpäisyydestä johtuen se on edelleenkin paperinen julkaisu? Vain neljästi vuodessa ilmestyvä julkaisu ohjaa toki hötkyilemättömään julkaisutoimintaan, mikä on kuin suomalaisen kulttuuriin luontavat neljä vuodenaikaa, kun uutisjanoinen maailma muuten ylipäätään elää hektisesti ”päivä kerrallaan heti tässä ja nyt”-elämää.

Hyvää on, että meillä ehditään ajatellakin välillä eikä kaiken aikaa vain kohkata. Muistui mieleeni tässä, kuinka tasavallan presidentti Tarja Halonen aikoinaan vastasi lasten kysymykseen jossain tilaisuudessa. Rohkein ja reippain heistä kysyi: ”Kun presidentti on aina niin kiireinen, niin ehtiikö hän ollenkaan ajatella?” Presidentti vastasi: ”Voi lapsikullat, aina pitää olla aikaa ajatella, se on tärkeistä asioista kaikkein tärkeintä. Jos sitä ei ehdi tehdä, siitä ei todellakaan hyvää seuraa.”

KOSKA MEILLÄ ATS YDINTEKNIKKASSA julkaisu on paperinen ja sähköiseksi se muuttuu vasta vuoden päästä netissä jäsenmaksussa säästäville, niin otsikkoklikkauksella ei ole merkitystä, ainoastaan laadulla sitten kun paperijulkaisu kolahtaa postiluukusta. Vanhan liiton miehenä itsekin arvostan paperiversiota siinä, että paperiversiota on leppoisa lehteillä ja saman tien pikalukea juttuja siltä istumalta tai tarkemmin myöhemmin.



Sähköisten juttujen huonoin puoli on, että ne saattavat pahimmoillaan olla loputtoman pitkiä kuin nälkävuosi konsanaan. Hesaristakin selviää pikalehteillä säällisesti nukkumaan, kun taas sähköinen erityisraportti voi paitsi janottaa ja lihottaa niin myös verottaa tunnin yönistä, olkoonkin että on ehkä hyväkin juttu.

ATS Ydintekniikassa ollaan totuttu pakinoihin ja niitä myös toivotaan ja luetaan, joten raflaava klikkausotsikko ei ole välttämätön, joskin saa se toki avittaa ja houkutella lukijaa pakina lukemaan. Olennaisinta kuitenkin on jutun sisältö, sen ajankohtaisuus, laatu ja merkitys. Mutta siinäpä se onkin! Mitäs teet, kun yhteiskunnan uutisilmatila on täynnä kaikenlaista muuta kuin tylsää energia-alan nippelitekniikkaa?

OLIHAN TÄSSÄ KESÄLLÄ toki tosi merkittävääkin, muun muassa suprajohtavuus huoneenlämpötilassa, mutta vain muka ja vain muutaman päivän ajan. Samaan aikaan maailmanpolitiikassa oli päivittäin läpi kesän kesto-kerrottavaa ja Suomen sisäpolitiikassa tehtiin puolen vuoden ajan valtapoliittista vahdinvaihtoa ja opeteltiin käymään rasismi-, antirasismi-, syrjimättömyys-, yhdenvertaisuus- ja tasa-arvokeskustelua.

Aiemmissa turvallisuusfilosofin pakinoissani olen korostanut seikkaa, että Suomessa vähän asiassa kuin asiassa nykyään vasta opetellaan maailman tavoille ulko- ja turvallisuuspolitiikassa, talouskysymyksissä, ym. Täällä kun on eletty lintukodossa, varsinkin kesäisin. Käki, kuikat, joutsenpariskunta, matkaradio, netti, naisten

jalkapallo, yleisurheilu ja sukutapaamiset olivat kesän ilojani, empaattisesti kokemiani murheitaa maailman metsäpalot, tulvat, hirmumyrskyt, sodat ja konfliktit.

Sukutapaamiset olivatkin vuorovaikutteisina monessa mielessä opettavaisia ja hyödyllisiä. Kun kolmen sukupolven väkeä on useita päiviä yhdessä, tekee jouhevasti yhteistyötä päivien askareissa ja käy ajankohtaisia keskusteluja omista tärkeistä ja mielenkiintoisista asioistaan, oma ymmärrys asioista laajenee kuin

karkuun päässyt ilmapallo vappuna. Innostavaa on myös oppia uusia termejä ja käytänteitä kunakin ikäluokan arjesta.

TÄMÄN PAKINAN OTSIKON aasinsilta ja kukkaruukkukin ovat käytännössä sama asia: itselleni vanhimman sukupolven edustajana luontevasti aasinsilta, keskimmäisen sukupolven edustajalle jostain syystä kukkaruukku. Kun keskustelu-yhteys on hyvä ja ongelmaton, voi mennä itselle tärkeäksi näkemäänsä asiaan hyvinkin nopeasti ja syvällisesti. Keskustelut ovat tehokkaita ja tuloksekkaita, kuka asian sitten lanseeraakaan nostamalla kissan pöydälle.

Rasismi-aihepiirissä koin keskustelut sukula lähimpiirissä hyvinkin mielekkäiksi ja ymmärrystä laajentaviksi. Sen sijaan oudommissa porukoissa terassioluitten äärellä elokuun viimeisellä viikolla ja syyskuun ensimmäisellä viikolla kesän vieton jo käännyttyä arjen rutiineiksi rasismikeskustelu oli jokseenkin lohdutonta inttämistä. Lähinnä vain seurasin ja itsekseen analysoin muiden vääntöjä ja väitteitä.

KERRON VÄÄNNÖISTÄ JA VÄITTEISTÄ esimerkein, joista ensimmäinen tapahtui ja toinen olisi voinut tapahtua. Uuden Suomen uutiskirje kertoi, että ”Orpo ei puhu totta”. Erinomaisen toimiva klikkausotsikko! Kyseisen kirjoituksen oli kirjoittanut blogissaan 1.9.2023 lukion opettaja, kirjailija, filosofi Arno Kotro. Pääministeri Petteri Orpo oli julistanut hallituksen ehdotonta linjaa yhdenvertaisuuden, tasa-arvon ja syrjimättömyyden suhteen ja nollatoleranssia

rasismin suhteen. Kotro totesi kirjoituksessaan miesten asevelvollisuuden ja naisten roolin lasten synnyttäjänä ja johtopäätöksensä, että "Orpo ei puhu totta".

Sitten 8.9.2023 eduskunnan äänestettyä valtioneuvoston rasismitiedonannosta SDP:n puheenjohtaja Antti Lindtman kertoi Ylen toimittajalle, että "hallitus jatkaa, mutta jatkaa ontuen". Pahantahtoinen toimittaja olisi voinut uutisoida, että Lindtman loukkaa vammaisia. Onneksi sellaista pahantahtoista toimittajaa ei koskaan ilmaantunut. Jutun juurta ja taustaa olisi voinut saada presidentti Ahtisaaren ontumisesta ja Tapio Rautavaaran säveltämästä ja laulamasta ja Oiva Paloheimon kirjoittamasta 1950-luvun balladista "Ontuva Eriksson". Se oli aikoinaan esityskiellossa Yleisradiossa, koska siinä tulkittiin loukattavan vammaisia.

Menneet kuukaudet ovat olleet minun turvallisuusfilosofin näkökulmastani tylsän virikkeettömiä. Mitkään klikkausotsikot eivät näissä kisoissa olisi menestyneet megaluokan globaalien turvallisuusaiheisten kysymysten, esimerkiksi metsäpalojen rinnalla. Kesän 2021 metsäpalo Kalajoella mainittiin mediassa valtavaksi, äskettäin viimeksi Hesarin kertomana, kun hovioikeus vapautti Destian työntekijän tupakan tumppeineen käräjäoikeuden antamasta tuomiosta palon aiheuttajana. Kyseessä oli 2,3 neliökilometrin laajuinen palo.

Vertailun vuoksi metsäpalojen pinta-alat vuonna 2021 on arvioitu (The Washington Post) satelliittimittausten perusteella olleen Venäjällä 55 000, Kanadassa 16 000, Yhdysvalloissa 8 000 ja Brasiliassa 5 000 neliökilometriä. Euroopassa on tänä vuonna arvioitu palaneen 6 000 neliökilometriä metsää. Kalajoen metsäpalo on siis ollut kaikkea muuta kuin valtava verrattuna maailman metsäpalojen kokonaispinta-alaan vuonna 2021, oikeasti olempien 0,0023 %!

Tyypillinen metsäpalo Suomessa on alle 0,4 hehtaaria. Metsätieverkosto on tiheä, vapaapalokunnat ensimmäisinä paikalla kuin partiolaiset konsanaan sammutustöissä, ilma- ja satelliittivonta tehokasta. Meillä siis on asiat tässä suhteessa hyvin ja Ruotsissakin varsin hyvin, mutta muualla ei. Tulipahan tämäkin nyt tässä todetuksi, mutta ei tästä kannata isommin elämöidä – tulee muu maailma meille vielä kateelliseksi.

KUN TOSIASIASSA TÄMÄ OMA aikamme on nykyään tulvillaan turvattomuutta, globaaleja huolia, murheita ja haasteita, joihin me ihmisinä ja yksilöinä olemme kovin voimattomia vaikuttamaan, olen omassa tykönäni pitkäjänteisesti pohdiskellut, missä meillä Suomessa voisi olla menestymisen mahdollisuutta, ja jos niin kävisi, niin millä alalla ja mitä se voisi olla. Olen tuota pohdiskellut ja aihepiiriin myös perehtynyt

ja hankkinut monenlaista tietoa ja ymmärrystä. Voi sanoa, että ihan vuosikymmenien ajan, milloin enemmän, milloin vähemmän, aina kuitenkin suurella kunnioituksella ja arvostuksella.

Ala on koulutus, opiskelu ja opetustyö. Meillä Suomessa on kunnias sivistyksellinen ja kulttuurinen historia tällä yhteiskunnallisella toiminnallisella sektorilla. Toisaalta, 2000-luvun vuosina näiden alojen kehitys on ollut negatiivinen. Kansainvälisessä katsannossa tilanne Suomessa on ollut parhaimmillaan vuosituhanen alussa ja siitä on pikkuhiljaa tultu alaspäin.

Jos onnistuisimme kääntämään kehityksen kulun takaisin positiiviseksi, sillä olisi valtavan suuri myönteinen kansallinen vaikutus. Tässä kohden sanalla "valtava" on oikeutuksensa, toisin kuin Suomen metsäpalojen määräänä. Siinä samalla taklataisiin Suomen tosiasiallisesti rassistista ilmapiiriä, kenties suorastaan teknisen tyrmyksen arvoisesti. Olisi monia muitakin seurannaisvaikutuksia. Näitäkin asioita tulisi syvällisesti miettiä kesän sukutapaamisen yhteydessä, ja yritän seuraavassa selittää ajatusjuoksuani.

Ajatteluni perustavaa laatua olevana rakenteellisenä ominaisuutena on sukupolvien välinen vuorovaikutus, yhteistyö, työnjako ja vastuukysymykset. Kerroin jo, että meitä on tyypillisesti kolme eri sukupolvea. Päävastuu asioista on keskimmaisella sukupolvella siksi, että he ovat henkisesti ja fyysisesti toimintakykyisimpiä ja myös yhteiskunnan tämänhetkisiä päättäjiä ja tekijöitä.

Nuorin sukupolvi on toisaalta tärkein koulutustoimintojen kohde. Heidän myönteinen kehityksensä on kestäväntä tulevaisuutta, he siirtyvät aikanaan nykyisen keskimmäisen sukupolven asemaan ja tehtäviin. Vanhimman sukupolven roolina on paitsi pyrkiä huolehtimaan itsenäisesti ja mahdollisimman hyvin itsestään ja lähipiiristään ja toimia, sikäli kuin resursseja ja voimia on, nuorimman ja keskimmäisen sukupolven tukijoukkoina. Tällaisen sukupolvien toiminnallisen kehityksen näen mielekkääksi turvallisuutta tuottavaksi rakenteeksi niin kollektiivisesti kuin yksilön näkökulmasta.

LUKIJAA SAATTAA TÄSSÄ KOHDEN miettiä, että näinhän yhteiskuntamme eri sukupolvien tasoilla jo toimiikin. Itsekin näin ajattelen. Koulutuksen ja opiskelun aihepiirissä varhaiskasvatuksesta yliopistotasolle asti on kuitenkin paljon ja vakavia puutteita. Ne jopa tunnustetaan ja myönnetään, että ne korjaamalla opin polut ja tiet saataisiin tasaisiksi ja toimiviksi kullekin.

Keskeisiä ongelmakohtia ovat siirtymäkohdat koulutuksen eri vaiheiden välillä, niin sanotut nivelpohdat tai saranakohdat. Jo varhaiskasvatuksessa eri oppilasryhmät ovat eri valmiustasoilla.

Sama jatkuu siirryttäessä alakouluun, edelleen alakoulusta yläkouluun, sieltä lukioon ja ammattillisiin opintoihin ja lopulta ammattikorkeakouluihin ja yliopistoihin. Eri puolilla maata valmiudet ovat vaihtelevia ja erimittaisia, syrjäseutujen ja kasvukeskusten toiminnalliset "korjaussarjat" ongelmien ratkaisemiseksi ovat yksilöllisiä.

Samoilla käytännöillä ja ohjeistuksilla ja opetussuunnitelmilla ei pidä toimia koko maassa, vaan tarvitaan kulloisiin olosuhteisiin räätälöityjä ratkaisuja. Luokkakoot vaihtelevat, oppilasaines on epähomogeenista, oppilaitten kulttuuriset taustat ja valmiudet saattavat poiketa olennaisesti toisistaan. Pyrkimys ja vallitseva käytäntö toteuttaa inklusiota, jossa sama ikäluokka etenee kaikki samoissa tiloissa yhtä aikaa, tukea ja erityisopetusta tai erityisterveyspalveluja tarvitsevat, motivoituneet ja vähemmän motivoituneet.

Kerrotaan Ruotsissa asioiden olevan vielä Suomea huonommalla tolalla, on koulu-shoppailua ja päätötdistuksia annetaan ilman että kaikki kurssit on hyväksytysti suoritettu. Sellainen ei lohduta, vaan molempien maiden on pyrittävä parempaan.

Loppukesästä huomasin kirjamarkkinoille ilmestyneen kahden kirjailijan ja lukion äidinkielen opettajan Tommi Kinnusen ja Mirja Rytisalon yhdessä kirjoittaman vuorovaikutteisen, vuorotellen toisilleen kirjoittamista kirjeistä koostuvan kirjan "Huokauksia luokasta". Hankin sen äänikirjana ja kuuntelin suurella mielenkiinnolla. Jos sen antamia ideoita ja kritiikkiä ryhdyttäisiin avoimin mielin soveltavasti kuulemaan ja toteuttamaan kaikilla koulutuksen tasoilla ja tahoilla, niin huomattavasti parempaan päin oltaisiin menossa. Toivon ja toivotaan kaikille maamme opettajille ja oppilaille kaikkea hyvää heidän arjen aherruksessaan.

NÄIN SUOMEN JA SUOMALAISTEN havahduttua tänä vuonna jokseenkin vastentahtoisesti ja yllättäen siihen, että yhteiskunnassamme vallitsee merkillisen paljon merkittävää rasismia ja piilorasismia, yhdenvertaisuuden puutteita, tahallista väärynmärtämistä, epätasa-arvoa, vihapuhetta, kiusaamista ja syrjäytymistä, suosittelemme lukijaa kuuntelemaan YouTubeissa koulujen alkamisesta kertovan laulun, jossa Marjatta Leppänen laulaa Jukka Virtasen sanoittaman tarinan "Pikku Mirjamen jännä päivä".

Alun perin kyseessä on norjalainen laulu, joka sekin löytyy YouTubeista. Me kaikki tarvitsemme keskuuteemme noita pikku Mirjamen kaltaisia innokkaita koulutien aloittajia. Jonain päivänä nuo taaperot aikanaan tarttuvat yhteiskuntamme vastuullisiin tehtäviin, jotkut ehkä jopa omille energia-alamme erityisaloille.

Turvallisuusfilosofi

Palautusosoite:

Suomen Atomiteknillinen Seura
c/o Jussi Peltonen
PL 1000
02044 VTT

Osoitteenmuutokset:

sihteeri@ats-fns.fi



KANNATUSJÄSENET

FinNuclear ry

**Pohjoismainen
Ydinvakuutuspooli**

**Teknologian
tutkimuskeskus VTT Oy**

**Fortum Power
and Heat Oy**

Pohjolan Voima Oy

Teollisuuden Voima Oy

Konecranes Oy

Posiva Oy

TVO Nuclear Services Oy

Platom Oy

Sweco Finland Oy

Westinghouse