

ATS YDINTEKNIikka

1/2026

Vol. 55

YDINJÄTEHUOLTOA KANSAINVÄLISESTI?

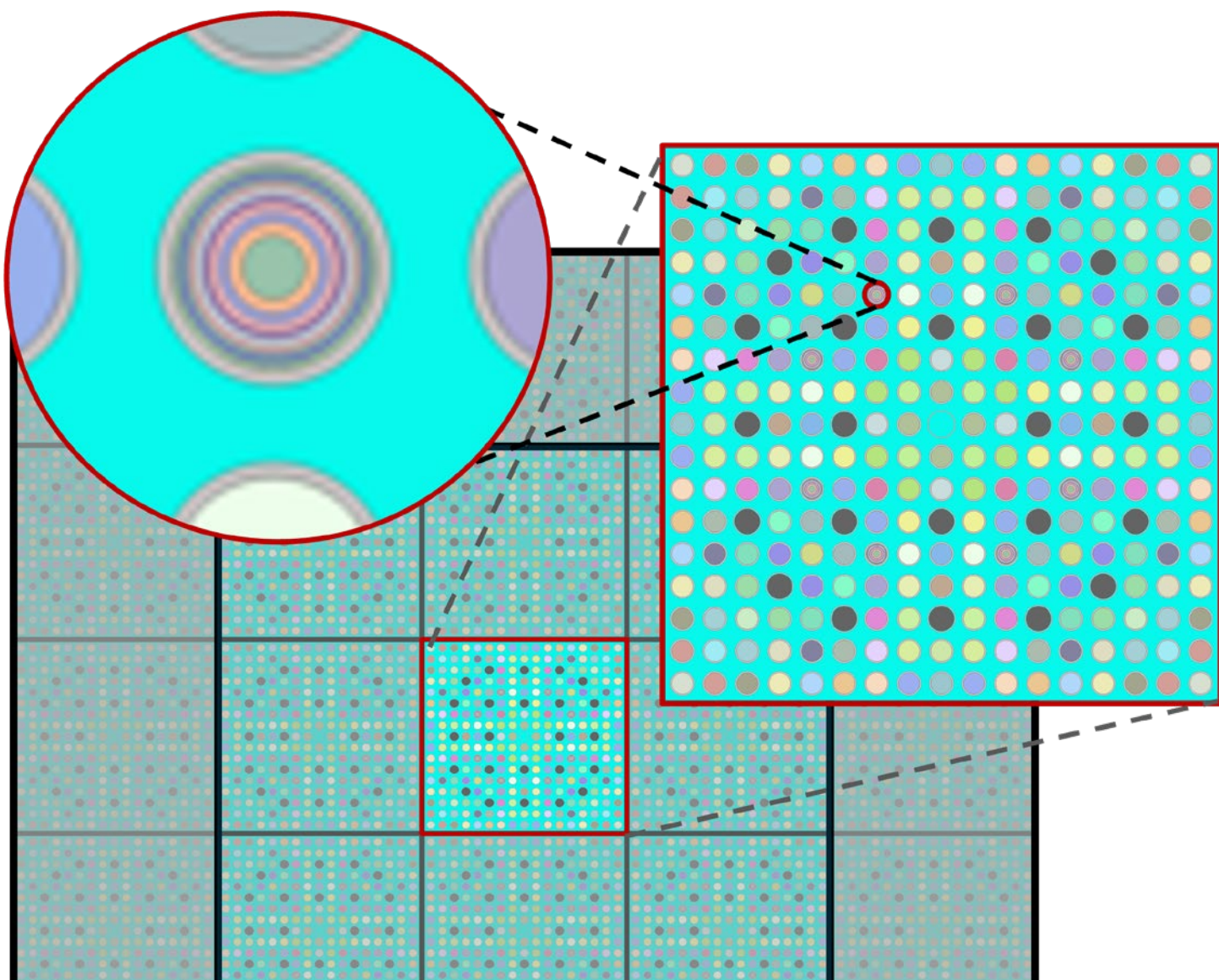
Ydinjätteen loppusijoituksen ratkaisuja voidaan kehittää kansainvälisen liiketoiminnan näkökulmasta.

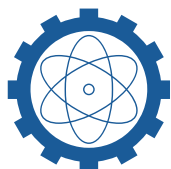
SÄHKÖMARKKINAT MUUTTUVAT

Ydinvoiman perinteistä roolia perusvoiman tuottajana on muokattava muuttuneessa markkinatilanteessa.

SAFER2028 PUOLIVÄLISSÄ

Kuusivuotinen ydinturvallisuuden ja ydinjätehuollon tutkimusohjelma kokoontui puolivälitarkasteluun.





ATS YDINTEKNIikka

Julkaisija / Publisher

Suomen Atomiteknillinen Seura – Atomtekniska Sällskapet i Finland r.y.

www.ats-fns.fi

Johtokunta / Board

Puheenjohtaja / President

DI Hanna Tynys

puheenjohtaja@ats-fns.fi

Varapuheenjohtaja / Vice President

TkT Antti Hakola

antti.hakola@vtt.fi

Sihteeri / Secretary General

FM Tommi Lyytinen

sihteeri@ats-fns.fi

Rahastonhoitaja / Treasurer

DI Topi Tupasela

topi.tupasela@stuk.fi

Jäsenet / Board Members

PhD René Bes

rene.bes@helsinki.fi

FT Jani Huttunen

jani.huttunen@tvo.fi

Dos. Taina Kurki-Suonio

taina.kurki-suonio@aalto.fi

TkT Jaakko Leppänen

jaakko.leppanen@vtt.fi

DI Janne Valkonen

janne.valkonen@platom.fi

Toimihenkilöt / Functionaries

ATS Young Generation

DI Roope Lipiäinen

roope.lipiainen@fortum.com

Kansainvälisten asioiden sihteeri / International Affairs

MSc Ana Jambrina

ana.jambrina@vtt.fi

Women in Nuclear Finland

DI, FM Jenna Järvenpää

jenna.jarvenpaa@vtt.fi

Www-vastaava / Webmaster

DI Teemu Sällylä

webmaster@ats-fns.fi

ATS-Seniorit / ATS-Seniors

TkT Riitta Kyrki-Rajamäki

rkyrki@gmail.com

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

DI Unna Lauranto

unna.lauranto@vtt.fi

TkT Henri Loukusa

henri.loukusa@gmail.com

DI Aleks Savolainen

aleksi.savolainen@tvo.fi

FT Mervi Söderlund

mervi.soderlund@fortum.com

TOIMITUKSEN YHTEYSTIEDOT

ATS Ydintekniikka

c/o Jarmo Ala-Heikkilä

PL 15600

00076 Aalto

p. 050 433 1198

Painopaikka

PunaMusta Oy, Espoo

ISSN-0356-0473

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

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.



UUTTA JA VANHAN PIDENNYSTÄ

Eurooppalaisten ydinteknisten seurojen kattojärjestö ENS vietti 50-vuotisjuhliaan viime vuonna. Myöhästyneet onnittelut omasta puolestani ja pitkää ikää ENS:lle!

ENS-vuosikertomuksessa puheenjohtaja Stefano Monti nostaa esiin paitsi ydinvoiman suuren potentiaalin ja tämän päivän korkeat odotukset niin myös keskeiset haasteet: taidot, investoinnit, säännöstöjen yhdenmukaisuus ja kansalaisten luottamus. Nämä kaikki ovat jo yksistään kovia haasteita, mutta kun ne ovat keskenään linkittyneitä, niin päähkinän kovuus nousee yli asteikon.

Eri toimijoiden yhteisvoimin, kansallisesti ja kansainvälisesti, voidaan päähkinää lähteä särkemään. Ydinteknisten seurojen tehtävät liittyvät mainituista haasteista ensimmäiseen ja neljanteen. Kun uusia mielenkiintoisia koulutusaloja, vaikkapa kvanttilaskenta tai tekoäly, nousee kilpailemaan opiskelijoiden kiinnostuksesta, ATS:n ja sen sisarseurojen on todellakin syytä panostaa ydinenergian näkyvyyteen ja houkuttelevuuteen sekä huolehtia, että alan koulutusresurssien riittävyys ymmärretään.

Huolehtimalla osaltaan tiedon levittämisestä ATS voi myös edistää ydinvoiman yleistä hyväksyttävyyttä, vaikka Suomessa ei kannatuslukujen nousua oikeastaan tarvita. On kuitenkin eri asia kannattaa ydinvoimaa yleisesti kuin hyväksyä kaukolämpöreaktori viereisellä teollisuusalueella.

Euroopassa uusien ydinvoimaprojektien käynnistymistä odotetaan. Samalla on kuitenkin kaikin puolin järkevää pitää nykyiset ydinvoimalaitokset käyttökunnossa alkuperäistä suunnitelmaa pitempään. ENS:n tieteellinen neuvosto antoi oman lausuntonsa tästä asiasta helmikuun alussa. Lausunnon tiivistelmä löytyy tästä lehdestä, samoin linkki kokotekstiin.

Jarmo Ala-Heikkilä

Vastaava päätoimittaja

SISÄLTÖ

VAKIOPALSTAT

PÄÄTOIMITTAJALTA

Uutta ja vanhan pidentystä..... 3

PÄÄKIRJOITUS

60 vuotta mittariin – ydinteknillinen seura suomalaisen osaamisen vaalijana..... 4

EDITORIAL

Filling 60 years – nuclear Society caring for Finnish knowhow..... 5

TAPAHTUMAT

SAFER2028-tutkimusohjelman puoliväliseminaari..... 6

Jäsentilaisuus: Uutta liiketoimintaa ydinjätteen loppusijoituksen ympärille?..... 8

AJANKOHTAISTA

Kelpaisiko ulkomaalainen laitos?..... 10

Ydinvoiman rooli muuttuvassa sähkömarkkinassa..... 14

Fortum rakentaa osaamista pienimuotoisten vetyhankkeiden kautta..... 17

On the importance of extending the operation of the existing European nuclear fleet..... 18

TIEDE JA TEKNIikka

Kaupallisten, monikansallisten loppusijoituslaitosten avaamat mahdollisuudet uudella ydinvoimaliiketoiminnalle..... 20

Rauli Partanen

Pienydinreaktorien käytetty polttoaine ja radionuklidien kulkeutuminen..... 24

Sami Naumer, Miiko Pöyhönen, Pirjo Hellä

Sääntelyerojen vaikutukset ydinvoimaloiden rakennuskustannuksiin ja -aikatauluihin..... 28

Laura Heikkilä

60 VUOTTA MITTARIIN – YDINTEKNILLINEN SEURA SUOMALAISEN OSAAMISEN VAALIJANA

Tänä vuonna seuramme täyttää jälleen pyöreitä vuosia, kun perustamisvuodestamme 1966 tulee kuluneeksi tasan 60 vuotta. Tähän varsin merkittävään ikään mennessä seuramme on ehtinyt nähdä monenlaisia käänteitä alallamme. Esimerkiksi 30 vuotta sitten seuran 30-vuotisjuhlavuonna pääkirjoituksessa pähkäiltiin, josko ydinvoima on maineeltaan auringonlaskun ala: "Nyt väitetään, että ydinvoima on out, ja vanhentuneet ydininsinöörit kituvat lamassa töiden puutteessa."

Seuran jälkimmäisinä 30 vuotena on kuitenkin ehditty kokea jo useampi ydinvoiman renessanssi, joista viimeisin on parhaillaan menossa. Millaisia tulevaisuudennäkymiä ydinvoimalle sitten kaavailtiinkin seuran eri vuosikymmeninä, lienee toutuma näyttäytynyt aivan toisenlaiselta.

Loviisan "saattohoidosta" oli seuran jäsenistö myös jo tuolloin 1996 esittänyt kysymyksiä silloisen pääkirjoituksen laatijalle. Vaan ehkä näiden kyselijöiden hämmästykseksi siellä laitos yhä porskuttaa, onhan suunnitelma jatkaa vuoteen 2050 saakka.

Vanhojen ja uudempien laitostemme lailla seurakin porskuttaa eteenpäin omaa tuttua rataansa: lehti kolahtaa jäsenistölle postiluukuista neljästi vuodessa, jäsenistö tapaa kahvin merkeissä Tieteiden talolla, seminaarit ja webinaarit tarjoavat uutisia ja tietoiskuja läheltä ja kaukaa.

Samoin kuin voimalaitokset, myös seuran toiminta vaatii jatkuvaa parantamista ja remonttia silloin tällöin. Vuodenvaihteen jäsenpalautteissa toivottiin niin ekskursioita kuin parempaa tiedottamista sekä enemmän ihan normaaleja jäsentapahtumia.

Eniten mainintoja parhaana tapahtumana keräsi menestyksekkäästi järjestetty Suomalaisen Ydintekniikan Päivät, jota pidettiin myös osallistujien keskuudessa onnistuneena. SYP:n aloittamisen jälkeen tapahtumakalenteriin on kuitenkin tullut myös Nordic Nuclear Forum, joten SYP:n roolia ja sijoittumista tapahtumakartalle lienee merkityksellistä pohtia lisää lähivuosina. Missä muodossa se sitten tapahtuunkaan, seuraava SYP järjestetään 2028.

Seuran toiminnassa arvokkaana pidetään erityisesti ATS Ydintekniikkaa, ja siksi lehti saikin oman kyselynsä alkuvuodesta. Johtokunta ja toimihenkilöt pohtivat toimia palautteiden perusteella ja toivottavasti pystymme jatkossa palvelemaan jäseniä entistä paremmin.

Erityisesti Women in Nuclear on viime vuosina kasvattanut toimintaansa ja ottanut tähtäimeen myös suuren yleisön jäsenistölle järjestettävien tapahtumien rinnalle. Toimiryhmä on saanutkin viime vuonna aikaan oikein menestyksekkäitä kohtaamisia alan ulkopuolisten kanssa muun muassa SYP:n oheistapahtumassa. Tätä varmasti näemme myös jatkossa WiN:n ja ehkä myös emoseuran toimesta.

Tauon jälkeen työhön on viime vuonna ryhtynyt myös seuran sanastotyöryhmä. ATS:n ydintekninen sanasto on päivitetty viimeksi vuonna 2013, joten uudistusväliksi tulee 13 vuotta. Aiempi sanastoversio on jaossa seuran nettisivujen jäsenosiossa, mutta uudistuksen myötä avoimuutta halutaan lisätä ja sanasto tullaan avaamaan myös seuran ulkopuolisille tahoille.

Vuoden 2013 sanastouudistuksen jälkeen maailma on kielipolitiikaltaan muuttunut. Itse olin vuonna 2013 yliopisto-opiskelija ja pakarsin ydinvoimatekniikan opintojani vielä suomen kielellä. Reilussa kymmenessä vuodessa englannin kieli on vahvistanut asemaansa akateemisena kielinä Suomen yliopistoissa. Suomenkielisen terminologian haltuunotto ei tuleville sukupolville ole itsestään selvää ilman tukea, jos työyhteisöissäkin kasvavissa määrin opetetaan englanniksi.

ATS:n tehtäviin kuuluu edistää alan tuntemusta ja kehitystä Suomessa, ja nyt vuonna 2026 pidänkin seuran tärkeänä roolina myös suomen kielen vaalimista ydintekniikan alalla. Tämä voisi tarkoittaa alan terminologian tarjoamisen lisäksi myös suomenkielisiä esityksiä huippuosaajilta ja ydinvoimateknologian aihepiirien kansantajuistamista suomeksi.

Maailma ja ydinvoima-ala on kokenut monia mullistuksia 60 vuoden aika-



na, kuten varmasti myös ATS verrattuna alkuaikoihinsa. Seuran toiminta ei 60. toimintavuotenaan tule kokemaan suuria mullistuksia verrattuna viime vuosien järjestöarkeen. ATS keskittyy edelleen tarjoamaan kiinnostavia katsauksia ydinenergiaan ja mukavia kohtaamisia muiden alalla työskentelevien kanssa.

Seuran 60 menestyksekkästä toimintavuotta ovat kuitenkin mahdollistaneet ennen kaikkea seuran omat aktiivit. Haluankin lopuksi osoittaa kiitokseni kaikille teille, jotka osallistutte seuran toiminnan pyörittämiseen johtokunnassa, toimihenkilöinä, YG-yhteyshenkilöinä, WiN:n koordinoitiryhmässä, Senioreissa, ATS Ydintekniikan toimituksessa, SYP-toimikunnassa, Sanastotyöryhmässä tai jossakin muussa roolissa. Kiitos myös jäsenille aktiivisuudestanne ja seuran toiminnan tukemisesta.

DI Hanna Tynys

ATS:n puheenjohtaja (2024–2025)
puheenjohtaja@ats-fns.fi

FILLING 60 YEARS – NUCLEAR SOCIETY CARING FOR FINNISH KNOWHOW

This year, our Society is celebrating another milestone, as it is exactly 60 years since our founding in 1966. By this remarkable age, our Society has seen many changes in our field. For example, 30 years ago the editorial of the Society's 30th anniversary issue pondered whether nuclear power was on the decline: "Now it is claimed that nuclear energy is out, and aging nuclear engineers are struggling in a recession due to a lack of work."

However, during the last 30 years the Society has witnessed several nuclear power renaissances, the latest of which is currently underway. Whatever the future prospects for nuclear power were envisioned in different decades, the reality has probably turned out to be quite different.

ATS members had already in 1996 posed questions about the "end-of-life care" of Loviisa to that editorial writer. Perhaps to the surprise of those who asked the questions, the plant is still going strong, with plans to continue until 2050.

Like our old and newer facilities, the Society is also forging ahead on its familiar path: this journal arrives in members' mailboxes four times a year, members meet for coffee at the House of Sciences, and seminars and webinars provide news and information from near and far.

Just like power plants, the Society's activities require constant improvement and renovation from time to time. In the member feedback at the turn of the year, there were requests for excursions, better communication, and more member events of the regular kind.

The most frequently mentioned event was the successfully organized Finnish Nuclear Science and Technology Symposium (SYP), which was also considered a success by its participants. However, since the launch of SYP, Nordic Nuclear Forum has also been added to the event calendar, so it will be important to further consider the role and positioning of SYP in the coming years. Whatever form it takes, the next SYP will be held in 2028.

ATS Ydintekniikka is considered particularly valuable in the Society's activities, which is why we conducted a journal-specific survey at the beginning of the year. The board and functionaries are considering actions based on the feedback, and we hope to be able to serve our members even better in the future.

In particular, Women in Nuclear has expanded its activities in recent years and set its sights on events organized for the general public alongside those for its members. Last year, the working group held very successful meetings with people outside the field, for example at a side event organized before SYP. We will certainly see more of this in the future, organized by WiN and perhaps also by the Society.

After a break, the Society's glossary working group also resumed its work last year. The ATS nuclear glossary was last updated in 2013, so it has been 13 years since the last update. The previous version of the glossary is available in the members' section of the ATS website, but with the update, we want to increase transparency and make the terminology available to parties outside the Society as well.

Following the 2013 glossary reform, the world has changed in terms of language policy. In 2013, I was a university student and was still studying nuclear power engineering in Finnish. In just over a decade, English has strengthened its position as the academic language at Finnish universities. Mastering Finnish terminology will not be easy for future generations without support, especially if English is increasingly used in workplaces, too.

One of the tasks of ATS is to promote knowledge and development in the field in Finland, and now in 2026, I also consider it an important role for the Society to preserve the Finnish language in the field of nuclear technology. In addition to providing terminology for the field, this could also mean Finnish-language presentations by leading experts and popularizing top-

ics related to nuclear power technology in Finnish.

The world and the nuclear power industry have undergone many changes over the past 60 years, as has ATS compared to its early days. In its 60th year of action, the Society will not experience any major changes compared to the routines of recent years. ATS will continue to focus on providing interesting insights into nuclear energy and pleasant encounters with others working in the field.

However, the 60 successful years of operation of ATS have been made possible above all by its own active members. Lastly, I would like to express my gratitude to all of you who participate in running the Society as members of the board, functionaries, YG contacts, WiN coordination group, Seniors, ATS Ydintekniikka editors, SYP committee, glossary working group, or in any other role. Thank you also to our members for your active participation and support of the activities of our Society.

M.Sc.(Tech.) Hanna Tynys

Chair of the board of ATS (2024–2025)
puheenjohtaja@ats-fns.fi



SAFER2028-TUTKIMUS-OHJELMAN PUOLIVÄLI-SEMINAARI

SAFER2028-tutkimusohjelma (National Nuclear Safety and Waste Management Research Programme 2028) on nyt päässyt kolmen vuoden kunniakkaaseen ikään. Ihmisellä kyseessä olisi uhmaikä parhaimmillaan, mutta miten on ydinturvallisuustutkimuksen laita – selvittiinkö herkästä vaiheesta kunnialla? Seminaarin sisältö oli kovaa tiedettä mutta myös inhimillisiä pilkahduksia ja yhteisöllisyyden kokemuksia.

Teksti: Suvi Karvonen, Anna Korpinen, Essi Immonen

Kuvat: Essi Immonen

Suomessa on tehty riippumatonta ydinturvallisuus- ja ydinjätehuollon tutkimusta jo vuosikymmeniä. SAFER2028 on kuitenkin ensimmäinen tutkimusohjelma, jossa nämä kaksi osa-aluetta yhdistyvät saman sateenvarjon alle.

Tavoitteena on keventää hallintoa ja löytää synergiaa samalla säilyttäen ydinenergialaissa ohjelmalle asetetut tavoitteet kansallisen osaamisen kasvattamisessa.

Viranomaisilla on oltava käytettävissään heidän tehtävissään tarvittava tieto ja osaaminen. Tutkimusohjelmassa on myös käynnistetty tohtorikoulutusverkosto DENSEä väitöskirjatutkijoiden alalle integroitumiseksi sekä ydinturvallisuuden aihepiiristä tehtävien väitösten edistämiseksi.

Melko juhlavia tavoitteita siis, vaan miten on käynyt? Tässä artikkelissa ohjelman

hallintoa pyörittävät henkilöt antavat täysin subjektiivisia ja epävirallisia vastauksia siihen, onko näissä tavoitteissa onnistuttu samalla reflektoiden seminaarin antia.

POLITIikkaa JA POHDISKELUA

Seminaarin avasivat työ- ja elinkeinoministeriön teollisuusneuvos Juho Kortenieniemi ja Säteilyturvakeskuksen pääjohtaja Petteri Tiippana. Esityksissä kuului tutkimuksen rahoituksen jatkosta ja ydinenergian kannattavuudesta. SAFERin rahoitushan kerätään ydinenergialain mukaisesti luvanhaltijoilta ja ydinjätevastuullisilta. Samaa pohdiskelua jatkoi lopun yhteenvedossa tutkimusohjelman johtoryhmän puheenjohtaja Tomi Routamo, joka kiinnitti erityishuomiota kansainvälisen tutkimuksen rahoitukseen.

Kansainvälisessä tutkimuksessa SAFERin kannalta tärkein kanava on OECD NEA, jonka pienempien projektien kansallisia osallistumismaksuja on tyypillisesti rahoitettu SAFERista. NEA:n projekteista saatiin myös kuulla esitys NEA:lla työskentelevältä Vile Tulkilta, joka toi esiin muun muassa NEA:n uusia avauksia tekoälyn ydinturvallisuussovelluksissa. Suomalaiset otettaisiin mielellään mukaan näihin hankkeisiin, jos rohkeita yksilöitä ja vielä rohkeampaa rahoitusta tähän aiheeseen löytyy.

SYNERGIAA ETSIMÄSSÄ

Entä juhlatavoitteet eri osa-alueiden yhdistämisestä? Johtotähtenä SAFIR- ja KYT-ohjelmien yhdistämisessä oli saattaa yhteen nämä kaksi ihmisalajia eli ydinjätetutkijat ja ydinturvallisuustutkijat, joista toiset rakastavat maanalaista pimeyttä ja toiset kirkasta ydinreaktiota kuin päivänsäde ja menninkäinen ikään. Välikatsauksena on todettava, että tämä kohtaaminen ei nyt ehkä onnistunut juurikaan laulun tarinaa paremmin, vaan projektit ovat melko siiloutuneita omiin (ohjaus)ryhmiinsä.



TKT Suvi Karvonen

SAFER2028-tutkimusohjelman johtaja
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
suvi.karvonen@vtt.fi



DI Anna Korpinen

SAFER2028-hallinnon asiantuntija
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
anna.korpinen@vtt.fi



DI Essi Immonen

SAFER2028-hallinnon asiantuntija
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
essi.immonen@vtt.fi

Kohtaamiset sekä todellinen yhteistyö jäävät melko vähiin.

Poikkeuksiakin toki on: betonin käyttäytymistä tutkivat hankkeet sisältävät molempia puolia hyödyttäviä osia ja SMR-tutkimuksessa monet kysymykset kietoutuvat molempien aihepiirien ympärille. Yhteisen hallinnon ja samojen käytäntöjen alle molemmat puolet toki saatiin ja eri yhteyksissä pyritään vielä jatkossakin luomaan uutta yhteistyötä.

INFRASTRUKTUURIKEHITYKSEN PITKÄ KAARI

Vuosi 2025, ja tämä SAFERin puoliväliseminaari, olivat siitä merkityksellisiä, että VTT:n Ydinturvallisuustalon VYR (Valtion Ydinjätehuoltorahasto) -tuki päättyi. VTT:n Wade Karlsen kertoi seminaarisessa kymmenvuotisen investointi- ja vuokratukihankkeen (loppuvaiheessa nimeltään RADCONS) vaiheista. VYR tuki tänä aikana Ydinturvallisuustalon vuokria 25 miljoonan euron edestä, mikä on suomalaisittain merkittävä rahoitus tutkimusinfrastruktuurille. Taloudellisesti riippumattomana ei kuumakammioiden toiminta vieläkään ole, mutta toiminnan volyymia on vuosi vuodelta kasvatettu.

Infrastruktuurin kehitykseen otti kantaa myös kyseisen ohjausryhmän puheenjohtaja Mikko Lemmetty Teollisuuden Voimasta, joka korosti sitä, miten pitkiä aikajäniteitä työssä on. Suomessa ydinturvallisuustutkimuksen kannalta tärkeää infrastruktuuria on VTT:n kuumakammioiden ja muiden laboratorioden lisäksi myös yliopistoilla, joista varsinkin Lappeenrantaan-Lahden teknillisen yliopiston termohydrauliikkalaitteistot ovat uniikkeja koko Euroopassa.



Juho Korteniemi avaa seminaaria.

Oman infrastruktuurin ylläpidolla pyritään varmistamaan edellytykset tutkimukselle ja se, että Suomessa on oma valmius reagoida yllättäviin tilanteisiin ja tehdä tarpeellista tutkimusta asioiden selvittämiseksi nopealla aikataululla. Globaali geopoliittinen tilanne huomioiden tämä ei varsinkaan nyt ole ollenkaan huono tavoite.

TOHTOREITA JA TULOXSIA

SAFER2028-tutkimusohjelman päätavoite lienee juuri osaamisen varmistaminen ja kasvattaminen Suomessa. Nyt ohjelman puolivälissä päästiin kuulemaan tohtorikoulutusverkostoa vetävän Aalto-yliopiston asiantuntijan Jarmo Ala-Heikkilän yhteenvetoa DENSEn alkutaipaleesta.

Verkostossa on mukana jo 50 jatko-opiskelijaa ja lisäksi heidän ohjaajiaan ja valvojiaan. Kun lisäksi huomioidaan, että

SAFERin kahden ensimmäisen vuoden aikana ohjelmassa on valmistunut jo 7 väitöstä ja 18 gradua tai diplomityötä, voidaan katsoa, että osaamisen ja osaajien kasvataminen ainakin näillä mittareilla näyttää erittäin hyvältä.

Tutkimusohjelman tuloksista ei toki voi puhua ilman myös tulosten tieteellisen tason arviointia. Kahtena ensimmäisenä vuotena valmistui yhteensä 60 tieteellistä artikkelia ja 223 konferenssijulkaisua tai muuta raporttia. Joukkoon mahtuu sekä vallitsevaa tieteellistä käsitystä haastavia tuloksia esimerkiksi hapen läsnäolosta syvällä kalliooperässä tai kahden faasin kriittisen virtauksen käyttäytymisestä, mutta samalla lailla arvokkaita olivat ne tulokset, joilla varmistettiin, että tehdyt oletukset turvallisuusperustelussa ovat oikeita.

QUO VADIS, SAFER2028?

Seminaarin lopuksi Tomi Routamo kertoi vielä siitä, mitä tutkimusohjelmassa seuraavaksi tapahtuu. Tarkoituksena on muun muassa tehdä tutkimusohjelman itsearviointi ja toteuttaa kansallinen osaamiskartoitus ydinturvallisuuden ja ydinjätehuollon aloilta. Näin voimme selvittää onko kansallinen osaaminen riittävällä tasolla mahdollisesti nopeastikin kehittyvässä toimintaympäristössä.

Pikkuhiljaa alkaa myös seuraavan tutkimusohjelman suunnittelu ja keskustelu siitä, millaista tutkimusta Suomessa tarvitaan ydinturvallisuuden ja ydinjätehuollon aihepiireissä. Siinä onkin kysymys, johon vastaamiseksi tarvitsemme laajaa joukkoa edustamaan koko alan näkemyksiä ja ehkä myös kristallipalloa. 🌀

Paasitornin puitteet olivat juhlalliset ja yleisö kiinnostunutta.



JÄSENTILAISUUS: UUTTA LIIKETOIMINTAA YDINJÄTTEEN LOPPUSIJOITUKSEN YMPÄRILLE?

ATS käynnisti uuden vuoden räväkästi järjestämällä 13.1.2026 jäsentilaisuuden, jossa pureuduttiin ydinjätteen loppusijoituksen tarjoamiin kaupallisiin mahdollisuuksiin. Tilaisuuteen osallistui yli 80 aktiivista seuran jäsentä, joista puolet oli tullut paikan päälle Tieteiden talolle ja loput osallistuivat etäyhteyden kautta.

Teksti: Janne Valkonen

Kuvat: Taina Kurki-Suonio

Tilaisuuden käsikirjoitus oli ennakoon mietitty hyvin suoraviivaiseksi: Rauli Partanen esitteli edustamansa DeepGEO-yhtiön konseptin käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitukseen liittyen, TEM:n Linda Kumpula kommentoi aihetta lainsäätäjän ja ministeriön näkökulmasta ja VTT:n Antti Hakola moderoi keskustelua ATS:n varapuheenjohtajan ominaisuudessa. Yleisölle oli varattu runsaasti mahdollisuuksia kysymyksille ja kommentoille.

Tietokirjailijanakin tunnettu Partanen siirtyi suoraan asiaan ja esitteli DeepGEO:n konseptin keskeiset periaatteet sekä esimerkkilaskelmia loppusijoituslaitoksen kustannuksista, rahoituksesta ja tuottojen rahastoinnista. Hän käsitteli myös yhteiskunnallisia näkökulmia, toiminnan mahdollista volyymia sekä erilaisia vaihtoehtoja monikansallisen loppusijoituskonseptin toteuttamiseksi uudistuvan ydinenergiailain puitteissa.



DI Janne Valkonen

Head of Engineering
Platom Oy

janne.valkonen@platom.fi



Partasen alustuksen jälkeen Kumpula kiinnitti keskustelun voimassa olevaan lainsäädäntöön ja taustoitti historian vaiheita ja syitä siihen, miksi Suomessa syntyneet ydinjätteet on voimassa olevan lain mukaisesti käsiteltävä, varastoitava ja loppusijoitettava Suomeen.

Alustusten jälkeen moderaattori Hakola päästi ääneen myös asiantuntevan yleisön, jolla oli sekä aihetta täydentäviä että kriittisiä kannanottoja ja kysymyksiä. Keskustelu eteni luontevasti eri teemoihin: lainsäädäntöön, loppusijoituksen tekniseen toteutukseen ja turvallisuuteen sekä laajempiin yhteiskunnallisiin kysymyksiin.

Jäsentilaisuuden alussa kuultiin ATS:n johtokunnan terveiset ajankohtaisiin asioihin liittyen.

Tilaisuus oli kaikin puolin onnistunut: esittäjät hallitsivat aiheensa erinomaisesti, yleisökysymykset olivat odotetun teräviä, ja koko osallistujajoukko sai uusia näkökulmia ja ajateltavaa tärkeän aiheen ympärille.

Rauli Partanen on kirjoittanut tähän ATS Ydintekniikan numeroon (s. 20–23) artikkelin, joka kokoaa ja täydentää tammikuisen jäsentilaisuuden sisällön. Artikkelia täydentää Linda Kumpulan kommentti. 



Tilaisuus houkutteli Tieteiden talolle ja etäyhteyden päähän yhteensä yli 80 tiedonjanoista ATS:n jäsentä.



Panelistit Kumpula (vasemmalla) ja Partanen (oikealla) moderaattori Hakolan (keskellä) tiukassa valvonnassa.

KELPAISIKO ULKOMAALAINEN LAITOS?

Maailmalla on useita ydinvoimalaitoksen toimittajia. Heidän laitoksensa eivät kuitenkaan kelpaa sellaisenaan Suomeen, vaikka niitä olisi jo maailmalla rakennettu. Suomessa kuten muissakin maissa on ydinturvallisuuden varmistamiseksi kansalliset vaatimukset, jotka tänne rakennettavien laitosten pitää täyttää. Tässä kirjoituksessa pohditaan oman ydinvoimasäännösten seuraamuksia erityisesti ydinvoimalan suunnitteluvaatimusten osalta.

Teksti ja kuvat: Tapani Raunio



DI Tapani Raunio
Pääsuunnittelija
tapani.raunio@iki.fi

Yksi kansallisen säännösten seurauksista on, että jokainen Suomeen rakennettava uusi ydinvoimalaitostyyppi pitää suunnitella ja sovittaa suomalaisille ydinvoimavaatimuksille. Tämä johtaa tarpeeseen suunnitella osa laitoksesta uudestaan, jotta STUKin määräysten ja YVL-ohjeiden vaatimukset täyttyvät. Koska järjestelmät ovat toistaan riippuvaisia, voi tämä tarkoittaa hyvin suuria laitosmuutoksia.

Laitoksen osittainen uudelleensuunnittelu vie runsaasti aikaa ja rahaa. Tämän seurauksena jokainen Suomeen rakennettava laitos on tyypiltään uniikki tai "First of a kind", ellei Suomeen rakenneta useampi samanlainen reaktori kerrallaan. Jopa uuden EPR:n rakentaminen sisältäisi luvutusriskin laitoksen osittaisesta uudelleensuunnittelusta, koska OL3 on rakennettu kahden säännösten voimassaolon aikana ja koska säännöstö sekä ydinenergialaki uusiutuvat, ennen kuin uusi projekti ehtisi lähteä liikkeelle.

Olisi kätevää, jos Suomeen olisi mahdollista rakentaa muualla hyväksytty ja rakennettu reaktori sellaisenaan eli "next of a kind", jolloin laitoksen yksityiskohtaisesta suunnittelusta ja rakentamisesta olisi opittu jotain. Motivaationa on sama kuin insinööriydessä yleensäkin – käyttää rahaa te-

hokkaasti. Ihannetapauksessa Suomeen rakennettavaan laitokseen tehtäisiin vain laitospaikan erityispiirteistä johtuvia muutoksia, ja näidenkin muutosten määrä olisi hyvin maltillinen.

HINNASTA POIS KOLMANNES

Suuntaviivaa rahaeroissa uniikin ja sarjatuotantona tehtävän reaktorin rakentamisesta voidaan ottaa Kanadaan rakennettavien BWRX-300-yksiköiden hinta-arvioista¹. Ontarioon on tarkoitus rakentaa neljä BWRX-300-reaktoria. Kaikkia reaktoreita palvelemaan yhteiseen infrastruktuuriin tarvitaan 1,6 miljardia Kanadan dollaria.

Ensimmäinen reaktorin on arvioitu maksavan 6,1 miljardia ja seuraavien reaktorien aina hieman edellistä vähemmän. Neljäs reaktori maksaa enää 4,1 miljardia. Vaikka kyseessä onkin ennen rakentamista tehty arvio, on säästöodotuksena kolmannen sulaminen hinnasta pois.

On hyvä pohtia, mistä säästöjä syntyy. Yksi selvä säästökohde on, että reaktoriyypin ja teknisten ratkaisuiden luvitus tehdään vain kerran eikä neljästi. Kanadan tapauksessa jää epäselväksi, onko luvittamisen hinta jyvitetty tasajaolla eri yksiköille tai sisällytetty yhteiseen infraan. Projektin kokonaishinnassa se joka tapauksessa on.

Suuri säästökohde on asian tekeminen monta kertaa peräkkäin ja rakentamisprosessin parantaminen joka kerralla. Toistamalla samaa asiaa useasti insinööri pystyy hiomaan ja optimoimaan prosessia, joka johtaa samaan lopputulokseen halvemmalla. Äärimmäisenä esimerkkinä useaan kertaan tekemisen eduista on autojen tekeminen sarjatuotantona.

YDINWOIMAA SUOMEEN

Kuvitellaan ajatusleikkinä, että voimayhtiö Ab YdinVoima Oy haluaa rakentaa Suomessa uutta ydinvoimaa ja on saanut myönteisen periaatepäätöksen valtioneuvostolta. Laitostoimittajan valinnassa ovat jäljellä enää vaihtoehdot A ja B, joilla molemmilla on tarjota oleellisesti samanlaiset laitokset (sähköteho, käyttökustannukset, turvallisuus) hyvillä rakentamiskokemuksilla. Eroksi oletetaan, että laitostoimittajalla A on tarjota suomalaisen ydinvoimasäännösten sellaisenaan täyttävä laitos.

Kuinka paljon halvempi pitää B:n tarjous olla, jotta YdinVoima pitäisi tarjouksia yhdenvertaisina? Riittäkö 100 miljoonaa euroa? Miljardi? Tarkkaan lukuun vaikuttaa myös YdinVoiman valitsema riskitaso, koska hintaan sisältyy myös luvituksen hinnan epävarmuus.

Kuvitellaan, että hintaeron pitäisi olla 100 miljoonaa, jotta YdinVoima arvioisi laitostointimittajien laitokset yhtä houkutteleviksi. Mitä rahalla saisi? Sata miljoonaa vastaa karkeasti 1 000 henkilötyövuotta, jos oletetaan 100 t€/a riittävän pitämään työntekijä, verottaja ja työeläkeyritykset tyytyväisinä. Työn määrä on suuri, mutta toisaalta työvuosia palaa luvituksessa toimittajalla, voimayhtiöllä ja viranomaisella.

Lähtöoletuksiin jo sisältyikin, että laitokset olisivat yhtä turvallisia. Mikäli näin olisi, luvitusprosessin päähyödyksi jäisi uniikin laitoksen toteutus sekä laitoksen paremmin tunteva viranomainen ja voimayhtiön henkilöstö. Lisäksi laitostointimittaja tuntisi paremmin suomalaisen säännösten, mistä ei ole liikoja iloa isojen reaktorien kohdalla, koska säännöstö ehtii muuttua, ennen kuin Suomeen mahtuisi taas uusi laitosyksikkö.

Tarpeettomiin muutoksiin taas kuuluisivat turvallisuuden kannalta yhden tekevät laitosmuutokset, joiden suunnittelu työllistäisi kaikkia osapuolia. Oletus yhtäläisestä turvallisuudesta on kenties epäreilu, sillä laitostyypeissä on eroja. Toisaalta arvelen markkinoilla olevien suurten kevytvesireaktorien olevan suunnilleen yhtä turvallisia, vaikken niitä yksityiskohtaisesti tunnekaan.

Hankaluutena on, että hyvää yhteismitallista tapaa mitata turvallisuutta ei löydy. Erot laitostyyppien sydänvauriotaajuudessa voivat yhtä hyvin kuvastaa eroja PRA-mallin laajuudessa ja mallinnusratkaisuissa kuin todellista eroa turvallisuudessa. Suunnitteluvaatimusten osalta on

taas vaikea vertailla niiden vaikutusta turvallisuuteen.

YDINTURVALLISUUDEN MITTAAMINEN

Yksiselitteinen ydinturvallisuuden mittatikka mahdollistaisi toisen maan säännösten mukaan suunnitellun ydinvoimalaitoksen arvioinnin. Tällöin olisi mahdollista tietää suoraan, onko laitos sellaiseen riittävän turvallinen Suomeen.

Jos turvallisuuden paras mittatikka olisi laitoksen sydänvauriotaajuus, herää kysymys mihin tarvitaan suunnitteluvaatimuksia? Voitaaisiinko heittää YVL-ohjeiden laitoksen suunnitteluvaatimukset romukoppaan, määrätä suurin sallittu sydänvauriotaajuus, ja keskittyä säätelemään PRA-mallin laajuutta ja mallinnusta?

Tällainen olisi kyllä ylivoimaisen yksinkertainen periaate. Tee mitä lystää, kunhan sydänvauriotaajuus on riittävän alhainen ja ympäristöä sekä ihmisiä suojellaan ionisoivan säteilyn haitallisilta vaikutuksilta.

Suunnitteluvaatimusten turvallisuusmerkityksen mittaamisen haasteena on arvioida ja kvantifioida yksittäisten vaatimusten tai vaatimusryhmän vaikutus. Mikä on turvallisuusparannus siitä, että suomalaisessa DEC A -tilanteessa erilaisuusperiaatteen toteuttava ratkaisu täyttää yksittäisvikakriteerin? Varautuminen yhä epätodennäköisempiin tilanteisiin liian pitkälle vietyinä pienentää sydänvauriotaajuutta vain marginaalisesti ja maksaa kohtuutonomasti saatua parannukseen verrattuna.

Jos yritetään huomioida yksittäisen suunnitteluvaatimuksen kohdalla estettävien onnettomuuksien todennäköisyydet, ollaankin takaisin todennäköisyyspohjaisessa riskimallissa. Jolloin herää kysymys, riittääkö pelkän PRA-mallin sääntely?

Tässä kohtaa on mainittava, että syvyyssuuntaisen turvallisuusajattelun mukaista on olla laittamatta kaikkia muna samaan koriin, joten joitain suunnitteluvaatimuksia on syytä edellyttää, vaikka todennäköisyyspohjainen arviointi olisi kaikista tärkein mittari.

Laitoksen suunnitteluvaatimustason optimaalinen asettaminen on haastavaa. Liian vaativaksi asetetuilla suunnitteluvaatimuksilla saadaan järeämmin rakennettuja, kalliimpia sekä järjestelmien lukumäärän kasvaessa myös monimutkaisempia laitoksia. Vaaditun turvallisuustason asettaminen on haastava tehtävä, ja asetetaanpa se minne tahansa, voidaan valittu taso kyseenalaistaa turvallisuuden tai talouden (ja miksei molempien) näkökulmasta.

Pohdinnan lopputuloksena voidaan todeta, ettei ole hyvää yhteismitallista tapaa verrata eri maan säännösten vaikutuksia turvallisuuteen. Siispä jatketaan analyysia korkealentoisesti konkretian sijaan.

MUIDEN MAIDEN SÄÄNNÖSTÖ MUSTIKKA?

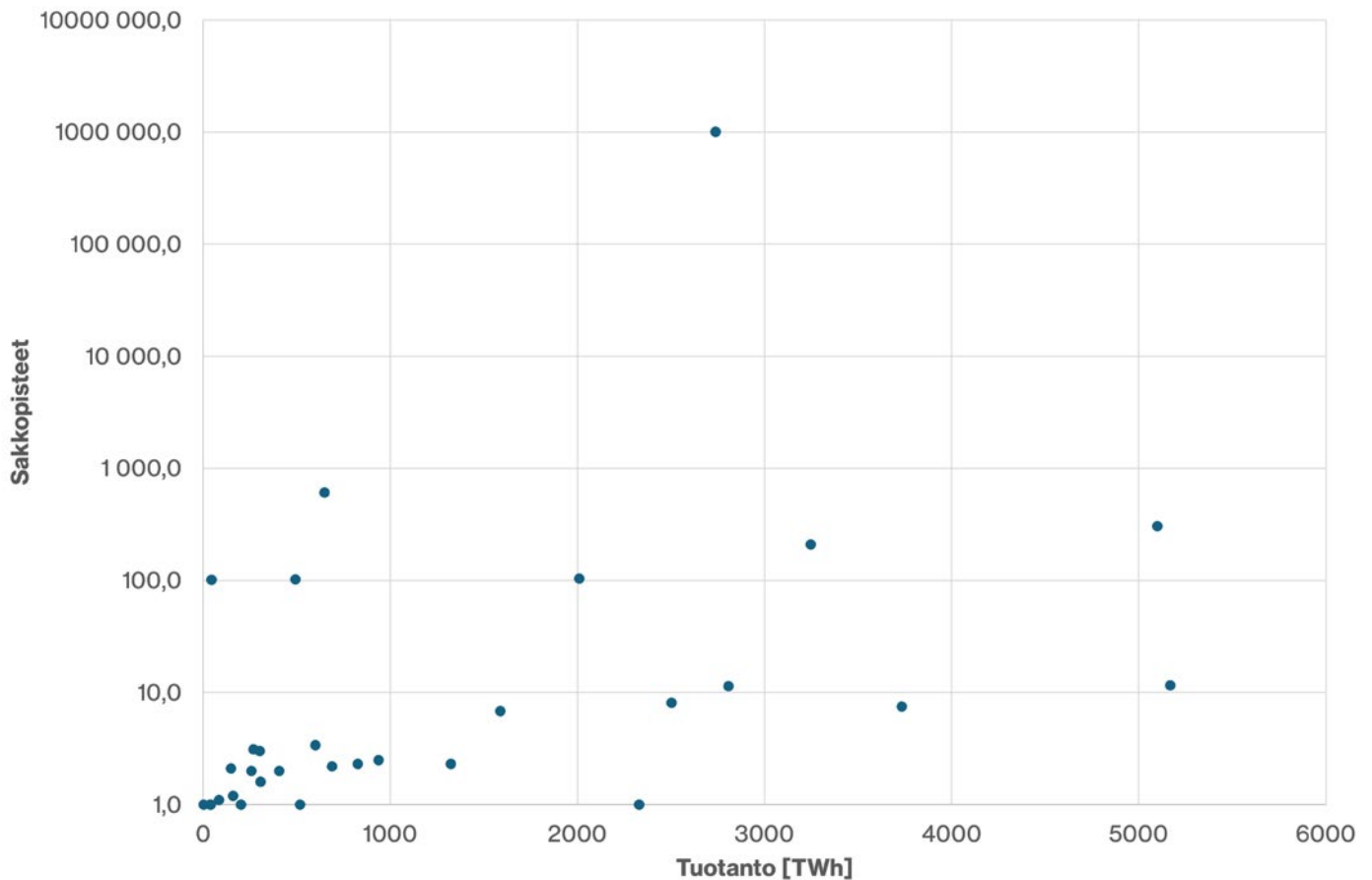
Pohditaan seuraavaksi säteilevää kysymystä. Jos laitos on luvitettu ja rakennettu Fukushimaa jälkeen johonkin Euroopan maahan, parantaako laitoksen turvallisuutta sen muokkaaminen suomalaiset ydinvoima-vaatimukset täyttäväksi? Riippuuko vastaus siitä, mihin Euroopan maahan laitos on rakennettu?

Asiaa voidaan pohtia myös toiselta kantilta. Jos laitos on rakennettu Suomeen ja täyttää suomalaiset vaatimukset, tuoko lisäärvaa laitoksen mukauttaminen vaikkapa englantilaisiin vaatimuksiin, jos laitosta rakennetaan Iso-Britanniaan? Miksei Hinkley Point C -laitoksen EPR-yksiköt ole yksi yhteen kopioita Olkiluoto 3 -laitoksesta?

Äkkiseltään ajattelisi, että läntisen Euroopan eri maiden viranomaisten säännökset johtavat kutakuinkin yhtä turvallisiin laitoksiin. Sitä voisi ajatella, että Englantiin tai Ranskaan rakennettavan EPR:n turvallisuustaso olisi sama kuin Olkiluoto 3 -yksikössä. EPR:n perustyyppi ei kelvannut Englantiin sellaisenaan, vaan EDF arvioi 2024, että Hinkley Point C -projektissa rakennettava EPR-tyyppi vaati 7 000 muutosta, jotta EPR täyttää brittiläiset säännökset. Muutosten takia laitos tarvitsee 35 % enemmän terästä ja 25 % enemmän betonia².

Maa	Tuotanto [TWh]	INES-tapaukset	INES-sakkopisteet	TWh/sakkopisteet
Kiina	2330	0	1,0	2330
Taiwan	1324	4	2,3	576
Slovakia	518	0	1,0	518
Etelä-Korea	3734	29	7,5	498
Saksa	5168	61	11,6	445
Sveitsi	938	15	2,5	375
Suomi	826	4	2,3	359
Tšekki	689	3	2,2	313
Ruotsi	2502	8	8,1	309
UK	2807	24	11,4	246

Kymmenen maan kärki vuosina 1981–2019 ydinvoimalla tuotetun sähkön määrän ja voimalaitoksissa tapahtuneiden INES-tapausten perusteella laskettujen sakkopisteiden suhteen.



Hajontakuvio vuosina 1981–2019 ydinvoimalla tuotetun sähkön määrän ja sakkopisteiden suhteen. Sakkopisteet ovat logaritmisella asteikolla ja kuvioon on otettu mukaan vain alle 6 000 TWh tuottaneet maat.

Jykevämmät seinämät rakentamalla saa vaikkapa suuremman maanjäristyksen kestävä laitoksen, mutta yllätyisin jos Ranskan, Brittien ja Suomen EPR-laitosten sydänvauriotaajuudet eroavat oleellisesti toisistaan. En ole vakuuttunut, että turvallisuuden päämittarina pitäisi olla reaktorilaitoksen teräksen ja betonin tonnimäärä tehomegawattia kohden.

Mikäli maakohtaiset säännökset johtavat samanlaiseen ydinturvallisuuden tasoon, on saman laitostyyppin muokkaaminen useamman kansallisen ydinvoimasäännösten mukaiseksi kallista saavutettaviin hyötyihin nähden. Ihanteellinen ratkaisu olisi, jos Euroopassa olisi vain yhden ydinvoimavaatimukset, joiden perusteella laitostyyppin saisi luvitettua Euroopan maihin. Säännösten harmonisointi on hyvinkin tervetullutta ydinvoimalalla.

Yhteinen säännöstö ei toki ratkaisisi kaikkia ongelmia, sillä vaatimuksia lopulta aina tulkitaan. Maakohtaisia eroja syntyy myös yhtenäisellä Euroopan säännöstöllä,

sillä kansalliset viranomaiset ja voimayhtiöt tekisivät omat tulkintansa säännöistä.

MAAILMAN PARAS YDINVOIMASÄÄNNÖSTÖ

Ydinvoimaa koskevissa säännöstoissa on maakohtaisia eroja, jotka voivat vaikuttaa myös ydinvoimalan turvallisuuteen. Edesmennyt Mikko Saarela analysoi maiden välisiä eroja vuoden 1980 julkaisussa, jonka päätelmä ydinvoimasta tiivistetyksi oli "uraani halkeaa ja tuottaa lamppuun valkeaa" sekä "millään muilla mailla kuin Suomella se ei oo riskiä vailla". Päivitetty analyysi voisi päättyä toisenlaiseen tulokseen maiden välisten erojen vaikutuksista, joten aihetta on syytä tarkastella uudestaan.

Paremmen puutteessa mittariksi otetaan ydinvoimalla tuotetun sähkön määrä (TWh) kertyneitä INES-sakkopisteitä vastaan. INES (International Nuclear and Radiological Event Scale) on IAEA:n luo-

kittelujärjestelmä radioaktiivisiin aineisiin liittyviin tapahtumiin ja onnettomuuksiin. Mitä enemmän saadaan sähköä tuotettua INES-tapahtumien määrään nähden, sitä onnistuneempi on kansallinen säännöstö ja viranomaistoiminta. Koska tapahtuman INES-luokitus kertoo tapahtuman vakavuusasteen, muunnetaan INES-tapahtumat niiden luokitukset huomioiden INES-sakkopisteiksi, jotka lasketaan yhteen.

Ennen analysointia on syytä huomauttaa, että analyysin tekeminen on syvästi vastoin INES-luokituksen tarkoitusta. INES on tarkoitettu tapahtumien vakavuudesta viestimiseen, ei eri maiden väliseen vertailuun. Tässä tapauksessa kadonneita avaimia yritetään etsiä katulampun alta, koska muualla on liian pimeää.

INES-luokituksen on tarkoitus olla logaritmien, joten INES 3 -tapahtuma olisi noin kymmenen kertaa vakavampi kuin INES 2 -tapahtuma. Määritellään sakkopisteet seuraavasti

$$Sakko_{maa} = 1 + \sum_{i=1}^7 10^{i-2} n_{maa,i}$$

missä i on INES-luokitus ja $n_{maa,i}$ tarkastellussa maassa INES i -tapahtumien lukumäärä tarkastellulla ajanjaksolla. Sakkopisteet lähtevät yhdestä liikkeelle, jottemme jakaisi nolllalla. Laskennan lähtötiedot haalitaan Ourworldindata.org -sivustolta³ sekä ETH Zürichin tekemästä tietokannasta maailman tapahtumista, joille on arvioitu INES-luokka⁴. Arvioitu INES-luokka ei aina vastaa tapahtuman virallista INES-luokitusta, mutta tietokannassa on suurempi määrä arvioituja INES-luokkia kuin virallisia luokituksia.

Huomioidaan tietokannasta arvioidut INES 1–7 -tapahtumat, jotka ovat tapahtuneet ydinvoimalaitoksissa, sillä suuri osa INES-tapahtumista on ydinvoimaan liittyttämiä altistustapauksia. Tarkasteluun otetaan vuodet 1981–2019, koska INES-tapausten tietokanta kattaa vain osan vuodesta 2020 ja toisaalta Saarela analysoi jo vuotta 1981 aiemmat vuodet. Tietojen

yhteensovittamisessa on pieniä haasteita muutaman maan kohdalla puuttuvien sähköntuotantotietojen takia, joten näissä tapauksissa huomioidaan tarkasteluväliltä ne vuodet, joille sähköntuotantotiedot löytyvät.

Maiden sakkopisteistä ja ydinvoimatuotannosta piirretyssä hajontakuviassa erottuu, että INES 3 ja sitä vakavammat tapaukset erottavat maita eri ryhmikseen. Toisien sanoen näiden tapausten lukumäärä ei näytä riippuvan tuotetun sähkön määrästä. Lievempien INES 1–2 -tapahtumien kohdalla kertyvien sakkopisteiden ja ydinvoimalla tuotetun sähkön määrässä on korrelaatio.

Oikeastaan analyysi kattoi viranomaisen, viranomaissäännösten ja voimayhtiöiden toiminnan yhteisvaikutusta. Mikäli INES-tapahtumat on raportoitu kaikissa maissa yhtä tunnollisesti, kertoisi lopputulos parhaiten ydinvoiman hyödyntämisessä onnistuneen maan.

Tulosten perusteella Saarelan analyysin päivitetty versio voisi kuulua ”millään muilla mailla kuin Kiinalla se ei oo INES-tapauksia vailla”. Loppupäätelmässä otettiin taiteellisia vapauksia, sillä tarkastelujaksolla oli muutama muukin maa ilman INES-tapauksia, mutta Kiinan ydinvoimalla tuotettu sähkömäärä tarkastellulla ajanjaksolla oli omaa luokkaansa.

KANSALLISESTA SÄÄNNÖSTÖSTÄ YLIKANSALLISEEN

Maiden säännösten hyvyyden mittarina yritettiin käyttää INES-tapahtumien määrää ja vakavuutta epäluotettavien tuloksien. Yritetään silti luovia eteenpäin.

Tässä kirjoituksessa ei löydetty yksiselitteistä mittaria ydinturvallisuudelle eikä mittaria eri laitosten turvallisuuden keskinäiseen vertailuun. Saatu lopputulos toisaalta tarkoittaa, etteivät eri maiden viranomaisetkaan pysty perustelemaan omien ydinturvallisuusvaatimuksiensa ylivertaisuutta millään objektiivisella mittarilla.

Kansallinen säännöstö syntyy, kun viranomaisen kirjoittaa osaamisensa perusteella vaatimukset riittävästä turvallisuustasosta. Itse asiassa osaamisen ohuus tai jopa puute ei estä kansallisen vaatimustason rakentamista, sillä uudessa ydinvoima-
maassa tarvitaan säännöstö siinä vaiheessa, kun viranomaisen oma osaaminen on vielä jyrkällä kasvukäyrällä.

Hyvä puoli on, että uusi ydinvoimaa hyödyntävä maa voi säännöstöpohjansa luomisessa hyödyntää monenlaisia lähteitä sekä yhteistyötä muiden viranomaisten kanssa. Huono puoli on, että lopputulos on taas uusi ja erilainen näkemys vaadittavista ydinvoiman suunnitteluvaatimuksista.

Kenties kansallisten säännösten erillaisia vaatimustasoja pitäisi ajatella kansallisina eroina riskiensietokyvyssä. Mitä epätodennäköisempiä tilanteita halutaan huomioida, sitä pienempiä riskejä ollaan valmiita hyväksymään. Ääripäässä mikä tahansa riski on liikaa, ja ydinvoiman hyödyntäminen on maassa kielletty. Sääli, että tällaisessa tilanteessa naapurimaa voi käyttää mielin määrin ydinvoimaa.

Eri EPR-versioiden kohdalla epäilen, että kansalliset erikoisuudet ydinvoiman suunnitteluvaatimuksissa tekevät ydinvoimasta kalliimpaa tuomatta todellista parannusta ydinturvallisuuteen. Herää kysymys, mikä estää toisiinsa luottavia eri maiden ydinvoimaviranomaisia hyväksymästä omaan maahansa toisen maan suunnitteluvaatimusten mukaisesti suunnitellun laitoksen?

Haluaisin nähdä tulevaisuuden, jossa eurooppalaiset kansalliset vaatimukset suppenevat kohti yhtäläisiä eurooppalaisia vaatimuksia. Mieluiten jo työurani aikana. Tämän edellytys on, että eri tahoilla olisi rohkeutta luopua omista tiukimmista tai erikoisimmista vaatimuksista ja hyväksyä yleinen vaatimustaso. Muutoin päädyttäisiin tilanteeseen, jossa yhteiseen vaatimus pohjaan valitaan kaikkien maiden tiukimmat vaatimukset, ja samalla heitetään lisää esteitä järkevän energiantuotantomuodon eteen. ⚙️

VIITTEET

- 1 World Nuclear News, uutisartikkeli (haettu 5.1.2026): <https://www.world-nuclear-news.org/articles/what-is-the-budget-for-canadas-first-smr-project>
- 2 World Nuclear News, uutisartikkeli (haettu 5.1.2026): <https://www.world-nuclear-news.org/articles/edf-announces-hinkley-point-c-delay-and-big-rise-i>
- 3 Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025) – with major processing by Our World in Data. “Electricity generation from nuclear” [dataset]. Ember, “Yearly Electricity Data Europe”; Ember, “Yearly Electricity Data”; Energy Institute, “Statistical Review of World Energy” [original data] (haettu 5.1.2026): <https://ourworldindata.org/nuclear-energy>
- 4 A. Ayoub, A. Stankovski, W. Kröger, D. Sornette, The ETH Zurich curated nuclear events database: Layout, event classification and analysis of contributing factors, Reliability Engineering and System Safety, Volume 213, September 2021, <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107781>

YDINVOIMAN ROOLI MUUTTUVASSA SÄHKÖMARKKINASSA

Ydinvoiman merkitys sähkömarkkinoilla on murroksessa. Sähköjärjestelmän nopea muutos, tuotannon vaihtelu ja markkinoiden jatkuva kehitys ovat haastaneet ydinvoiman perinteisen roolin pelkästään vakaana perusvoiman tuottajana ja pakottaneet tarkastelemaan sen asemaa uudesta näkökulmasta. Muutoksen keskellä ydinvoimatoimijoiden on kyettävä vastaamaan myös omistajiensa muuttuviin tarpeisiin ja odotuksiin uudella tavalla.

Teksti: Rasmus Somerkoski



DI Rasmus Somerkoski
Sähkömarkkinapäällikkö
Teollisuuden Voima Oyj
rasmus.somerkoski@tvo.fi

Eurooppalainen sähköjärjestelmä on siirtymässä määrätietoisesti kohti hiilidioksidipäästöttömyyttä. EU-tason sääntely ja erityisesti päästökauppa ovat nopeuttaneet fossiilisen tuotannon poistumista — juuri sellaisten laitosten, joita on käyttöhistorialtaan totuttu hyödyntämään kulutuksen mukaan säädettävänä kapasiteettina. Samanaikaisesti tuuli- ja aurinkovoiman voimakas kasvu on muuttanut tuotantopalettia ja lisännyt hetkellisten vaihteluiden tasapainottamisen tarvetta. Tuotantorakenne on lyhyessä ajassa siirtynyt kohti mallia, jossa yhä suurempi osuus sähköstä syntyy sään mukaan.

Sähköjärjestelmässä tuotannon ja kulutuksen tasapainon on kuitenkin toteuduttava joka hetki. Kun osa aiemmin käytävissä olleesta fossiilisesta, kulutuksen mukaan säädettävästä tuotannosta on poistunut, tasapainottaminen nojaa yhä enemmän säästä riippumattomaan tuotantoon, vesivoiman ja muiden joustoresurssien tuomaan säätökykyyn, kulutusjouston hyödyntämiseen sekä reservimarkkinoiden toimivuuteen. Tämä kehitys on haastanut ydinvoiman perinteisen aseman pelkästään vakaana sääriippumattomana tuotantona (ns. perusvoimana).

Ydinvoiman vahvuudet, jotka ovat korkea käytettävyyys, ennustettavuus ja hiilidioksidivapaus, asemoivat sen edelleen sähköjärjestelmän vakauttavaksi perustaksi, mikä vakauttaa hintoja ja mahdollistaa

yhä kasvavan sähkönkulutuksen. Mutta aiemmin mainitut perustavaa laatua olevat muutokset luovat uusia vaatimuksia myös ydinvoiman operointiin.

MIKSI SÄHKÖMARKKINAT OVAT OLEMASSA – JA MITEN NE TOIMIVAT?

Sähkömarkkinoiden tehtävänä on tarjota avoin ja tehokas kohtaamispaikka sähkön ostajille ja myyjille, jolloin kysyntä ja tarjonta pääsevät määrittämään sähkön hinnan mahdollisimman läpinäkyvästi. Viime vuosien markkinamuutokset ovat siirtäneet kaikki keskeiset markkinatuotteet tuntitasolta varttitalolle (15 minuuttia), jotta markkinat voivat reagoida aiempaa tarkemmin sääriippuvan tuotannon vaihteluihin ja kulutuksen nopeisiin muutoksiin.

Suomessa käytössä oleva energyonly-markkinamalli tarkoittaa, että tuotantokapasiteetille ei makseta erillistä kapasiteettikorvausta, vaan tuottajien tulot syntyvät pääasiassa päivittäin määritettävällä day-ahead-markkinalla. Day-ahead-markkinoilla sähkön hinta muodostuu seuraavan vuorokauden jokaiselle vartille kysynnän ja tarjonnan perusteella. Intraday-markkinat tarjoavat puolestaan mahdollisuuden tarkentaa ennusteita toimitushetkeen asti ja tasapainottaa tuotannon ja kulutuksen välisiä poikkeamia entistä hienojakoisemmin.

Sähköjärjestelmän tekninen tasapaino varmistetaan reservimarkkinoilla, jotka toimivat erillään varsinaisesta kaupankäynnistä. Reservimarkkinoiden tarkoituksena on varmistaa, että järjestelmässä on joka hetki riittävästi käyttövalmiita resursseja vastaamaan tuotannon ja kulutuksen äkillisiin muutoksiin. Fingridillä on käytössään reservimarkkinoilla useita erilaisia tuotteita, joilla voidaan ylläpitää sähköjärjestelmän tehotasapainoa kulloisenakin hetkenä. Reservimarkkinoilla osallistujat voivat saada korvausta joko kapasiteetin ylläpidosta, eli valmiudesta muuttaa tehoa tarpeen mukaan, tai aktivoidusta säädöstä silloin, kun reserviä todella käytetään.

Suomi toimii osana yhteisiä eurooppalaisia sähkömarkkinoita, joissa siirtoyhteydet yhdistävät eri maiden tuotanto- ja kulutusalueet. Yhteiset markkinasäännöt ja yhteen kytketyt markkinajärjestelmät lisäävät kilpailua, tehostavat tuotantoresurssien käyttöä ja parantavat toimitusvarmuutta. Sähkö virtaa rajojen yli sinne, missä sitä kulloinkin eniten tarvitaan, ja markkinat muodostavat kokonaisuuden, jossa kansalliset ja alueelliset resurssit täydentävät toisiaan.

TUOTANTOMUOTOJEN ROOLIT JA SÄÄTÖKYVYT MUUTTUVASSA SÄHKÖJÄRJESTELMÄSSÄ

Sähköjärjestelmän tasapaino perustuu useiden erilaisten tuotantomuotojen yhteisvaikutukseen. Vesivoima tarjoaa no-

peaa ja pitkäkestoista säätökykyä, kun taas yhteistuotantolaitokset tuottavat vakaata ja pitkäkestoista säätöä hieman hitaammalla reagointinopeudella. Akut tuottavat hyvin nopeaa mutta lyhytkestoista joustoa, ja tuulivoima voi tietyissä tilanteissa osallistua lyhyisiin säätöihin, vaikka sen tuotanto on täysin sääriippuvaista.

Perinteisesti ydinvoima on tarjonnut hidasta mutta erittäin pitkäkestoista tehonmuutoskykyä, mikä on sopinut tilanteisiin, joissa tuotantoa on voitu säätää ennakoitusti pidemmällä aikavälillä. Uudemmissa laitostyypeissä, kuten EPR-laitoksissa joita Olkiluoto 3 edustaa, tehonmuutoskykyä on kuitenkin parannettu merkittävästi.

Sähköjärjestelmä kytkeytyy yhä tiiviimmin myös muihin energiajärjestelmän osa-alueisiin, kuten lämmitykseen, teollisuuden sähköistyviin prosesseihin ja liikenteeseen. Tätä kokonaisuutta kutsutaan sektori-integraatioksi: energiajärjestelmää ei enää tarkastella irrallisina sektoreina, vaan yhtenä kokonaisuutena, jossa ratkaisut vaikuttavat toisiinsa.

Sektori-integraatio lisää sähkönkulutusta, mutta tarjoaa myös uusia joustomahdollisuuksia esimerkiksi lämpöpumppujen, sähkökattiloiden ja teollisten prosessien ohjauksen kautta. Erityisesti nopeasti yleistyneet sähkökattilat muodostavat merkittävän kulutusjouston lähteen, sillä ne voivat muuntaa sähköä lämmöksi matalien hintojen aikana.

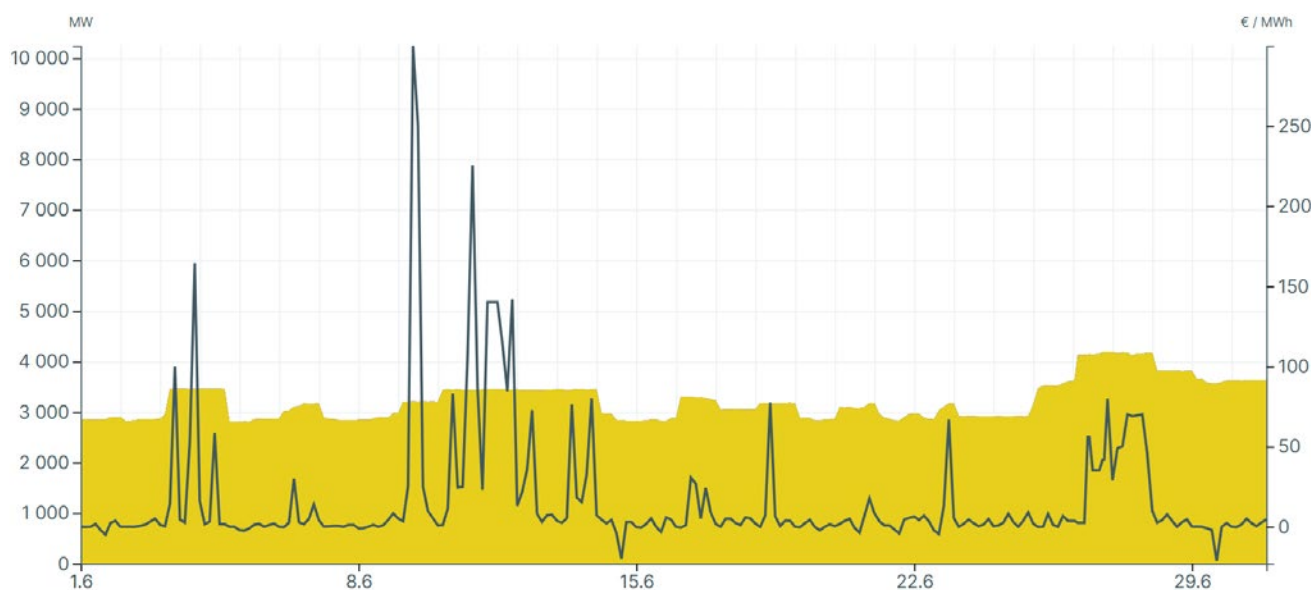
Kun sähkökattiloita täydennetään lämmön varastoinnilla, niiden joustopotentii-

aali kasvaa huomattavasti: lämpö voidaan varastoida ja purkaa lämmitysverkkoon myöhemmin, jolloin sähkökuormaa voidaan siirtää pois huippukuormitusjaksoilta. Energiajärjestelmän optimointi on kuitenkin tehtävä kolmen peruspilarin, toimitusvarmuuden, kustannustehokkuuden ja kestävyysnäkökulmasta niin, ettei yksittäinen sektori optimoi itseään muun järjestelmän kustannuksella.

YDINVOIMAN ROOLI MARKKINOILLA JA SEN MUUTTUMINEN

Ydinvoiman markkinarooli perustuu pääasiassa sen kykyyn tuottaa pitkäkestoista, sääriippumatonta ja ennustettavaa tehoa. Perinteisesti ydinvoima on vastannut erityisesti dayahead-markkinoiden tarpeisiin, joissa tuotanto sovitetaan vuorokausi- ja viikkotason kulutusmuutoksiin. Olkiluoto 3:n edustama EPR-teknologia mahdollistaa aiempaa tarkemmat ja nopeammat tehomuutokset, mikä voi laajentaa osallistumismahdollisuuksia myös intraday-markkinoille silloin, kun laitoksen tekniset reunaehdot sen sallivat.

Reservimarkkinoilla ydinvoiman osallistuminen määräytyy laite- ja reunaehtojen perusteella. Olkiluoto 3 osallistuu Fingridin reagointialtaan hitaimmasta päästä olevalle säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoille, joissa tehonmuutoksen on toteuduttava noin viidentoista minuutin



Kesäkuun 2025 ydinvoiman tuotanto ja sähkön vuorokausimarkkinan hinta. Ydinvoimaa säädetään sähkön hinnan perusteella aktiivisesti (kuva: Fingrid).

kuluessa pyynnöstä. Ydinvoimaa osallistuu lisäksi taajuusohjatuille häiriöreservimarkkinalle, jonka vaatimukset kohdistuvat nopeaan reagoitakykyyn sähköjärjestelmän taajuuden muuttuessa äkillisesti häiriöiden seurauksena.

Käytännön operatiivinen toiminta konkretisoi muutoksen ydinvoiman roolissa. Olkiluoto 3:ssa toteutuu vuosittain useita satoja tehomuutoksia, jotka voivat syntyä joko markkinaperusteisesti tai järjestelmäsuojan vaikutuksesta.

Järjestelmäsuoja on Fingridin toteuttama kantaverkon suojausjärjestelmä, joka varmistaa kantaverkon toimivuuden mahdollisissa Olkiluoto 3:n äkillisissä häiriötilanteissa. Järjestelmäsuojaan kuuluu joukko nopeasti irrotettavia kulutuskohteita, jotka ovat pääasiassa teollisuus- ja kulutuskohteita. Näillä kohteilla on etukäteen määritetyt hinnat ja niiden päiväkohtainen saatavuus vaihtelee. Kulutuskohteita tilataan osaksi järjestelmäsuoja silloin, kun niiden hinta on alhaisempi kuin markkinoilta ennustettu saatava hyöty, ja jo tämä optimointi aiheuttaa luonnollista tehonmuutostarvetta laitokselle.

Lisäksi päivän aikana valittuihin kulutuskohteisiin kohdistuvat nopeat kulutusmuutokset heijastuvat suoraan Olkiluoto 3:n ajettavaan tehotasoon: jos kohteen kuorma pienenee äkillisesti, laitoksen tuotantoa on alennettava vastaavasti sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitämiseksi. Näin järjestelmäsuojan vaihteleva käyttäytyminen muodostaa oman, markkinaohjautuvaa ja reserviaktiivoinneista syntyvää säätöä täydentävän säätökomponenttinsa, mikä tekee ydinvoiman tuotannosta aiempaa dynaamisemmän osan sähköjärjestelmää.

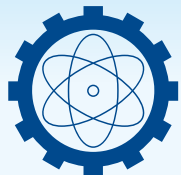
OMISTAJIEN TARPEET JA PÄÄTÖKSENTEON REUNAEDOT OSUUSVOIMALAITOKSESSA

Suomessa ydinvoimaa on rakennettu laajasti osuusvoimalaitosmallilla, jossa useat omistajat jakavat investoinnin ja tuotannon hyödyt. Mankala-malli on mahdollistanut suurten hankkeiden toteuttamisen kustannustehokkaasti, mutta dynaamisesti muuttuvilla sähkömarkkinoilla yhteiso-

mistus edellyttää selkeitä ja joustavia toimintasääntöjä, joiden puitteissa omistajat voivat hyödyntää tuotantoosuuttaan mahdollisimman tehokkaasti.

Tavoitteena on luoda omistajille mahdollisimman toimivat ja joustavat toimintaperiaatteet ja kehittää niitä jatkuvasti, jotta tuotanto kykenee vastaamaan sähköjärjestelmän muuttuviin tarpeisiin ja omistajat voivat toimia markkinoilla tehokkaasti. Samalla varmistetaan, että toimintamallit ovat kilpailuvoimallisesti asianmukaisia ja noudattavat markkinoiden sääntelyä.

Ydinvoimayhtiöiden ja heidän omistajiensa yhteistyö perustuu pitkäjänteisyyteen ja vastuullisuuteen. Tavoitteena ei ole nopeiden hyötyjen hakeminen, vaan laitosten turvallinen ja kestävä käyttö vuosikymmeniksi eteenpäin. Siksi kaikkien sääntötoimien kustannukset ja riskit punnitaan huolellisesti, jotta ydinvoimalaitokset voivat toimia sähköjärjestelmän selkäranka-
na vielä pitkälle tulevaisuuteen. 



ATS

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

YHDISTYKSEN KOTISIVUT

www.ats-fns.fi



JÄSENHAKEMUS

www.ats-fns.fi/seura/jasenhakemus



FORTUM RAKENTAA OSAAMISTA PIENIMUOTOISTEN VETYHANKKEIDEN KAUTTA

Vety ei ole enää pelkkä tulevaisuuden visio – askel askeleelta siitä on tulossa Euroopan puhtaan energiasiirtymän mahdollistaja. Kun teollisuus, liikenne ja energijärjestelmät etsivät hiilineutraaleja ratkaisuja ja toimitusvarmuutta, vety tarjoaa monipuolisen keinon vähentää päästöjä niillä sektoreilla, joilla suora sähköistäminen ei ole mahdollista.

Teksti: Satu Sipola



Satu Sipola
VP, P2X & Project Execution
Fortum Oyj
satu.sipola@fortum.com

Fortumilla olemme valinneet vaihteellisen lähestymistavan vetyyn, ja näemme vedyn olennaisena osana tulevaisuuden kestävästä energijärjestelmästä. Uusiutuva sähkö yhdessä ydinvoiman kanssa muodostaa selkeän puhtaan vedyn tuotannolle elektrolyysin avulla. Tätä vetyä voidaan sitten käyttää raskaassa teollisuudessa, pitkän matkan kuljetuksissa ja energian varastoinnissa – tukien sekä ilmastotavoitteita että energiaturvallisuutta.

KASVAVA KYSYNTÄ EUROOPASSA

Täysin uuden teollisuudenalan rakentaminen vie luonnollisesti aikaa, mutta ensimmäiset askeleet otetaan jo nyt. Ensimmäinen konkreettinen hankkeemme

on testilaitoksen rakentaminen Loviisan Kallaan. Hankkeen päätavoitteena on vedyn tuotannon pilotointi ja referenssin luominen tuleville P2X-hankkeille (Power-to-X, synteettisten polttoaineiden teko sähköllä).

Testaamme koelaitoksella kahta eri teknologiaa, Alkali- ja PEM-elektrolyysereitä, joiden avulla voimme vertailla niiden ominaisuuksia ja suorituskykyä. Lisäksi haluamme ymmärtää vedyn tuotannon turvallisuutta, suorituskykyä ja kunnossapitoa sekä testata joustavuuden potentiaalia.

Rakennustöiden valmistuttua ensimmäiset vetykilot tuotettiin loppuvuodesta 2025 ja täysimittainen tuotanto käynnistyy huhtikuussa 2026. Tuotanto jatkuu noin kaksi vuotta vuosien 2025 ja 2028 välillä. Tämä aikataulu antaa meille mahdollisuuden kerätä arvokasta dataa ja kokeista, jotka tukevat mahdollisia tulevia P2X-hankkeita.

Puhdasta vetyä koskevan kysynnän odotetaan kasvavan Euroopassa nopeasti tulevan vuosikymmenen aikana. Teollisuudenalat kuten teräs, kemikaalit ja jalostamot tutkivat jo vetyyn perustuvia prosesseja fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi. Samaan aikaan kansainvälinen yhteistyö ja infrastruktuurin kehittäminen – putkistoista varastointiin – etenee vauhdilla.

FORTUMIN ROOLI JA YHTEISTYÖN VOIMA

Tällä hetkellä strateginen painopisteemme on pienimuotoisissa hankkeissa, joiden avulla voimme kartuttaa osaamistamme ja testata ratkaisuja kehittyvillä markkinoilla. Kun sääntely- ja markkinaympäristö kypsyvät, olemme valmiita tekemään päätöksiä toimintamme laajentamisesta ja siirtymisestä suurempiin, monimutkaisempiin hankkeisiin.

Siirtymä ei tapahdu yhdessä yössä. Se vaatii investointeja, innovaatioita ja yhteistyötä yritysten, hallitusten ja yhteisöjen välillä. Mutta yksi asia on selvä: vetyyn perustuva talous ei ole kysymys jos, vaan milloin. Toimimalla nyt voimme varmistaa, että Eurooppa pysyy puhtaiden teknologioiden kärjessä – luoden työpaikkoja, kilpailukykyä ja kestävästä tulevaisuutta.

Vety on enemmän kuin energian kantaja. Se on mahdollisuus muokata teollisuutta uudelleen, vähentää päästöjä vaikeasti sähköistettävillä sektoreilla ja turvata kestävä energijärjestelmä tuleville sukupolville. Tutkimme aktiivisesti vetykonsepteja ja liiketoimintamahdollisuuksia voidaksemme tarjota asiakkaillemme parhaat tulevaisuuden ratkaisut heidän liiketoimintaansa varten. 🌱



EUROPEAN NUCLEAR SOCIETY

EUROPEAN NUCLEAR SOCIETY – HIGH SCIENTIFIC COUNCIL:

ON THE IMPORTANCE OF EXTENDING THE OPERATION OF THE EXISTING EUROPEAN NUCLEAR FLEET

As climate change poses a major global threat and decarbonisation is among top priorities, adopting a decarbonisation pathway that combines economic sustainability, cost-efficiency, and security is vital for the EU to meet its climate goals and reinforce its competitive position, as emphasised in the Draghi report, while avoiding unnecessary societal burdens. In this route towards decarbonization, nuclear technologies have an important role to play and the awareness of that role is steadily increasing within the international community including Member States of the European Union, as shown by the inclusion of nuclear energy in the European Commission policies for the energy transition. To reach the EU's Net-Zero-by-2050 goal, the power sector must achieve carbon neutrality by 2040 because of its foundational role in decarbonizing the entire economy.

Providing a comprehensive overview of the EU's nuclear ecosystem, the EURATOM Nuclear Illustrative Programme (PINC 2025) sets out a renewed and ambitious vision for the role of nuclear energy in achieving Europe's climate neutrality, while supporting energy security and affordable energy prices, in line with the highest level of nuclear safety. The PINC 2025 'base case' scenario of 109 GWe of net electricity generation capacity from large-scale nuclear reactors in 2050 relies both on planned reactor new build projects and the extension of the service life of existing units beyond their original design lifetime (Long-Term Operation, LTO). Clearly, nuclear energy newbuilds and LTO are not only of strategic importance to the EU, but also to Europe in general, and to the rest of the world.

The recognition of the need for extending the operational lifespan of existing nu-

clear power plants is indeed instrumental to achieving the challenging goals set by the EU energy trilemma of ensuring a secure, sustainable and fair energy transition toward net zero. All this could be strongly supported by LTO programs, that can bridge the gap between the loss of generation arising from currently planned closures of existing nuclear power plants and the upcoming availability of new builds. Such LTO programs ensure:

- **Energy Security and Sovereignty:** through stable and reliable electricity supply, especially in the transition away from fossil fuels dependency, by reducing the electricity system stress in maintaining ancillary services for the grid which could be achieved in systems with higher shares of variable renewable energies at significantly higher costs. LTO programmes also

provide benefits in terms of capacity preservation for Europe's nuclear industry sovereignty by preserving the entire supply chain and by maintaining core competences, helping to retain its industrial background and the highly-skilled workforce needed for future nuclear new builds and small modular reactors.

- **Environmental Sustainability:** nuclear power is a low-carbon energy source, and extending the life of existing plants will contribute to meeting climate goals and reducing greenhouse gas emissions.
- **Economic Benefits:** by maintaining energy affordability for all EU consumers and hence EU industry competitiveness, as it is the lowest cost option for generating low carbon electricity on a levelized cost of electricity basis. LTO programmes have been shown to provide a mature solution, competitive in terms of realization time, with preparatory work performed while the plant is in operation - as was successfully demonstrated on many projects and now a standard practice in providing a longer period of revenue generation of existing plants. LTO programs allow to reduce the scale of the short-term needs for new nuclear builds, required to maintain the share of nuclear energy in Europe's electricity production, thus offering some near-term economic advantage. By reducing the electricity system stress, LTO programmes also help to limit grid reinforcement needs and other system effects, that could increase the overall integration costs associated with a high share of variable renewable energies.

The benefits of adopting LTO programmes are readily available, provided that they can demonstrate safe reactor operations. The adoption of LTO programmes is inherently consistent with current nuclear licensing arrangements which require all operating nuclear power plants to undergo Periodic Safety Reviews (PSR) throughout their lifetimes. The PSR process ensures the timely implementation of reasonably practicable safety improvements in order to ensure that plants meet the updated safety standards and can operate safely for the extended period in accordance with the latest available regulations, knowledge and operating experience. During LTO, nuclear power plants may undergo extensive

refurbishment; where deemed necessary, parts of their structures, systems and components will be maintained or replaced under the supervision of regulatory bodies of the operating countries. Individual country licensing arrangements will control the extension of nuclear power plant operations once the licensee has demonstrated that it has addressed all safety and technical issues required by the PSR process.

However, the adoption of an LTO strategy will require careful attention to several key needs and critical objectives, to ensure that LTO goals can be achieved. To do this will require continued actions to timely address the technical challenges/opportunities in various domains - either technical or regulatory. Some of those actions, in particular in the RD&I technical areas are also significant contributors in preserving EU sovereignty in its key nuclear competences.

For the reasons set out above, the HSC believes strongly that extending the operational lifespan of existing nuclear power plants is of critical importance for the social and economic well-being of Europe and particularly the EU community and that EU cannot afford to prematurely retire reliable, low-carbon energy generators that support the entire electricity system. A technology-neutral policy framework is therefore essential for Europe and the EU to benefit from the potential of all net-zero technologies, and thus nuclear, in the form of both LTO and new build, must continue to play a key role in the energy transition.

Therefore, the HSC makes the following recommendations to governments, policy makers, industry and regulators in European countries including those in the EU:

1. LTO of existing NPPs is a strategic asset in the fight against climate change, bridging the gap to the commissioning of new nuclear builds during the energy transition, supporting integration of renewables and helping to meet the imperatives of security of energy supply including grid stability, while ensuring energy affordability. As such, NPP LTO should be fully integrated into national and EU energy strategies.
2. The EU taxonomy and sustainable finance frameworks should be aligned to recognize NPP LTO as an eligible activity so as to attract investment.
3. LTO of existing NPPs will rely on the continuation of robust nuclear safety and security regulatory frameworks to provide confidence to gov-

ernments, investors and the public that LTO of NPPs will be delivered safely and securely and as such, governments should ensure that regulatory frameworks can accommodate NPP LTO. All stakeholders should encourage transparent communication on the safety, security, environmental and economic benefits of LTO.

4. The contribution of NPP LTO in the maintenance and development of existing nuclear supply chains should be recognized.
5. The important role NPP LTO can play in the maintenance and development of skilled nuclear workforce, as well as national and EU R&D capabilities, that will be needed to support both near-term and long-term nuclear energy strategies, should be recognised. 

Link to Position Paper:



KAUPALLISTEN, MONIKANSALLISTEN LOPPUSIJOTUSLAITOSTEN AVAAMAT MAHDOLLISUUDET UUDENLAISELLE YDINVOIMALIIKETOIMINNALLE

Rauli Partanen
DeepGeo Finland Oy

Monikansallisten loppusijotuslaitosten mahdollisuuksia ja hyötyjä käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoittamiseen on selvitetty ja esitetty useaan otteeseen. Tässä artikkelissa tarkastellaan uusia mahdollisuuksia, palveluita ja liiketoimintamalleja, joita nämä laitokset voisivat synnyttää ja edistää voimakkaasti kehittyvällä ydinvoima-alalla. Kirjoitus on mukailtu lyhennelmä ja käännös 2025 Waste Management Symposium -konferenssissa julkaistusta paperista nimeltä "Exploring the New Advanced Nuclear Business Models that Commercial Multinational Repositories Facilitate", jonka kirjoittivat Rauli Partanen, David Hess ja Laura Salonga Deep Geo Inc yhtiöstä.

The possibilities and benefits of multinational final disposal facilities for spent nuclear fuel have been investigated and discussed on many occasions. This article examines the new opportunities, services, and business models that these facilities could create and promote in the rapidly developing nuclear industry. This article is a translated summary of a paper published at the 2025 Waste Management Symposium titled "Exploring the New Advanced Nuclear Business Models that Commercial Multinational Repositories Facilitate", written by Rauli Partanen, David Hess, and Laura Salonga of Deep Geo Inc.

Ydinjätehuollon nykyisen paradigman mukaan jokaisen maan tulisi huolehtia ja loppusijoittaa oma radioaktiivinen jätteen- sä. On kuitenkin perusteltua esittää tähän liittyvä kysymys: jos jokin loppusijoittami-

seen soveltuvan kallioperän omaava maa tai kaupallinen toimija saa ratkaistua kansainväliseen loppusijotuslaitokseen liittyvät yleiseen hyväksyntään, politiikkaan ja kansainväliseen sääntelyyn, sopimuksiin

ja lainsäädäntöön liittyvät ongelmat ja esteet, miksi pakottaissimme jokaiseen maahan oman ratkaisunsa, jos se on kalliimpi, heikompileatuinen ja kenties vähemmän turvallinen?

Yksin nykyisten käytetyn polttoaineen varastojen perusteella jaettujen loppusijotuslaitosten taloudelliset hyödyt Euroopalle on arvioitu 15–25 miljardin euron suuruiseksi [1]. Tämä hyöty on selvä ja olemassa olevaan jäteinventariin perustuva. Ydinenergia on kuitenkin lähdössä uuteen nousuun myös Euroopassa, kun juhlapuheiden lisäksi monet maat ovat tosissaan suunnittelemassa uusia ydinvoimaprojekteja ja uudentyypisiä reaktoriteknologioita ja liiketoimintamalleja kehitetään. Kaupallinen, luotettava ja osaava jätehuoltoratkaisu voisi nopeuttaa ja helpottaa näiden teknologioiden ja toimintamallien kehitystä ja käyttöönottoa merkittävästi. Alla lyhyesti muutamia tapoja.

KEHDOSTA HAUTAAN

Venäjän ydinvoimateollisuus tarjoaa asiakkailleen Rakenna-Operoi-mallia, joka voi olla erityisen houkutteleva uusille ydinvoimamaille, sillä se vähentää riskejä ja nopeuttaa näiden maiden ydinohjelmia merkittävästi. Osana tätä mallia Venäjä tarjoaa palvelua, jossa se ottaa käytetyn polttoaineen takaisin, erottelee siitä voimakkaasti radioaktiiviset fissiotuotteet arvokkaammista aineista ja lähettää fissiotuotteet takaisin. Tämä pienentää ydinjätteen loppusijoittamisen mittakaavaa ja voi lyhentää esimerkiksi loppusijoituksen turvallisuustarkastelun aikajännettä.

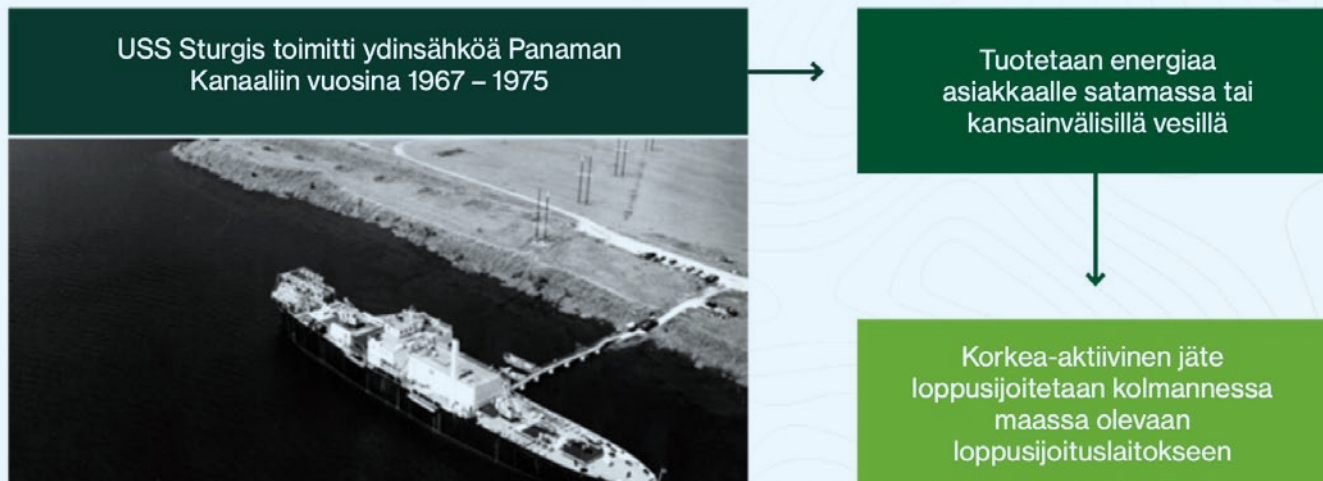
Tämä osittainen "elinkaari palvelu" on yksi Venäjän ydinvoimateollisuuden kilpailuvalteista, kun se myy tuotteitaan ja palveluitaan. Jos myös läntiset toimijat voisivat tarjota vastaavaa, tai jopa täyttää elinkaari palvelua sisältäen loppusijoituksen yhdessä monikansallisia palveluita tarjoavan kumppanin kanssa, lisäisi se niiden kilpailukykyä globaalilla markkinalla huomattavasti.

YDINENERGIA PALVELUNA

Kun kehdosta hautaan ideaa viedään vielä hieman pidemmälle, voidaan puhua ydinenergiasta palveluna. Siirrettävät tai hinattavat ydinvoimalat voidaan rakentaa lähes käyttövalmiiksi tehtaalla tai telakalla ja kuljettaa periaatteessa lähes mille tahansa markkinalle maailmassa. Siellä laitoksen voi omistaa ja sitä operoida ammattitaitoinen palvelun tarjoaja, ja energian käyttäjä vain ostaa energian (kuva 1). Esimerkiksi telakkavalmisteisten ydinvoimaloiden etuja

Ydinenergiaa palveluna

Uusi tapa ottaa käyttöön ydinvoimaa



Kuvan lähde: <https://www.nab.usace.army.mil/Media/Images/igphoto/2001966083/>

1

Kuva 1. Kuvassa USS Sturgis toimittamassa ydinsähköä Panaman Kanavalle. Monikansallinen, kaupallinen loppusijoituspalvelu mahdollistaisi vastaavanlaisen "ydinenergia palveluna"-konseptin, joka voisi olla erinomainen ratkaisu esimerkiksi maissa, joihin pysyvien ydinvoimaloiden rakentaminen ei syystä tai toisesta onnistu, tai esimerkiksi hätätilanteissa.

on selvitetty [2, 3, 4], ja tämä uusi toimitustapa voi lyhentää toimitusaikoja erityisesti maihin, joissa ei vielä ole ydinvoimateollisuutta, instituutioita ja osaamista.

Ydinenergia ostettavana palveluna, erityisesti kun mukana on kolmannen osapuolen tarjoama jätehuolto ja loppusijoitus, yksinkertaistaisi ja nopeuttaisi monen energiaa kipeästi tarvitsevan maan pääsyä ydinenergian käyttäjäksi ilman että alan turvallisuus heikentyisi. Luotettava, puhdas energia puolestaan parantaisi ihmisten elämänlaatua, tuottavuutta, terveyttä ja elintasoa valtavasti ilman fossiilisen energian käyttämiseen liittyvää ilmastonmuutoksen kiihtymistä.

Liikuteltaviin reaktoreihin, sekä myös ydinvoiman käyttämiseen laivojen propulsioon, liittyy paljon sääntelyä, lakeja ja kansainvälisiä sopimuksia. Siellä on myös paljon avoimia kysymyksiä radioaktiivisen materiaalin omistukseen, vastuisiin, liikutteluun ja loppusijoitukseen liittyen. Kaupallinen, luotettava palveluntarjoaja auttaisi ratkaisemaan monia näistä ongelmista ja kysymyksistä. Loppusijoituspalvelun tarjoaja voi myös toimia eräänlaisena varavaroituskautena tai lisävarustuksena esimerkiksi konkurssitilanteiden varalta, mikä vähentää toimijoiden ja rahoittajien kokemaa riskiä jätehuoltoon ja sen vastuisiin liittyen.

YDINPOLTTOAINEEN LIISAUS

Ydinpolttoainekierron sulkemiseen kykeneviä hyötöreaktoreita kehitetään nyt vauhdilla, ja niitä voi tulla kaupallisesti saataville verraten lähiaikoina. Näiden kehittäjiä ja tulevia omistajia kiinnostaa myös nykyinen käytetty ydinpolttoaine, esimerkiksi siksi, että siinä oleva plutonium on oiva käynnistyspolttoaine monille hyötöreaktoreille.

Mikäli tätä materiaalia on suhteellisen suuria määriä kaupallisen, vastuullisen toimijan hallussa, sen kierrättäminen uudeksi polttoaineeksi voi olla suoraviisaisempaa kuin lukuisten pienten kansallisten varastojen ja jätehuolto-organisaatioiden kanssa neuvottelemisen. Monikansallinen jätehuolto-yhtiö voi kiihdyttää näiden teknologioiden käyttöönottoa esimerkiksi liisaamalla varastoissaan olevaa käytettyä polttoainetta ja ottamalla lopulta vastaan syntyneet radioaktiiviset jätteet ja loppusijoittamalla ne vastuullisesti.

Toisesta näkökulmasta kaupallinen jätehuoltopalvelu mahdollistaa nykyisille ydinpolttoaineen toimittajille polttoaineen liisauksen asiakkailleen. Monet ydinvoimayhtiöt eivät välttämättä ole kiinnostuneita ostamaan ja omistamaan ydinpolttoainetta, mutta ovat siihen pakotettuja. Polttoainetoimittaja voisi toimittaa poltto-

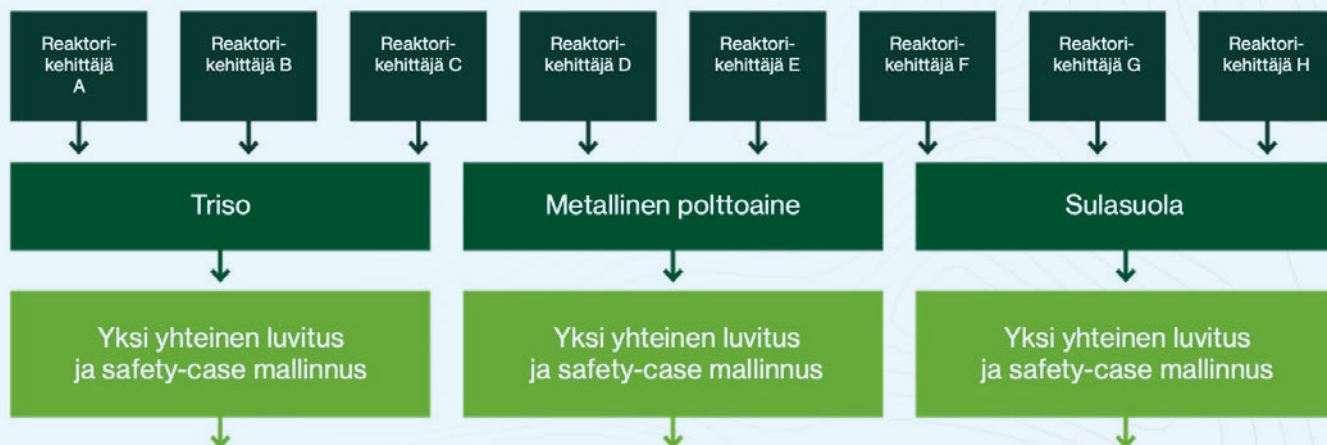
toaineen liisauksopimuksella, jonka jälkeen sen kumppanina toimiva loppusijoitusyhtiö ottaisi käytetyn polttoaineen haltuunsa.

KÄYTETYN POLTTOAINEEN JÄLLEENKÄSITTELY JA KIERRÄTYS

Kun ydinenergian käyttö kasvaa voimakkaasti, voidaan kohtuullisesti odottaa, että myös käytetyn polttoaineen uudelleen käsittelypalveluiden tarve kasvaa. Uudelleen käsittelylaitosten rakentaminen ja käyttäminen on kallista, ja tällä hetkellä käytössä on vain muutamia. Jotta investointi laitoksiin olisi edes teorias- sa houkuttelevaa, on tarjolla oltava riittävän suuri määrä käsiteltävää raaka-ainetta. Monikansallisella loppusijoitusyhtiöllä tätä raaka-ainetta on lähtökohtaisesti huomattavasti enemmän kuin useimmilla pienillä ja keskisuurilla ydinvoimavaltioilla.

Monikansalliset jätehuolto-yhtiöt voivat, isäntämaansa sallien, mahdollistaa käytetyn polttoaineen jälleenkäsittelylaitosten syntymistä joko investoimalla niihin itse tai toimimalla kumppanina ja raaka-aineen toimittajana toiselle toimijalle. Ne voivat myös huolehtia syntyneestä uudesta radioaktiivisesta jätteestä.

Harvinaisten ydinpolttoainetyyppien loppusijoitus



Eri polttoainetyypeille soveltuva loppusijoitussuunnitelma ja toteutus

Kuva 2. Keskitetty jätehuolto ja loppusijoitusyhtiö voisi luvittaa ja mallittaa eri polttoainetyypeille soveltuvia ratkaisuja siten, että useammat kyseistä polttoainetyyppejä käyttävät reaktorit voisivat käyttää kyseistä loppusijoituskonseptia. Tämä säästäisi kaikkien resursseja ja antaisi reaktorikehittäjien keskittyä oman teknologiansa kaupallistamiseen.

JOKO AJAN HAMMAS PUREE TUONTIKIELTOA?

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoittamisesta säädetään ydinenergialaissa (990/1987). Lakia on muutettu noin 30 kertaa. Suurin muutos tehtiin vuonna 1994, kun ydinjätteen vienti ulkomaille ja tuonti ulkomailta kiellettiin: "Ydinjätteet, jotka ovat syntyneet Suomessa tapahtuneen ydinenergian käytön yhteydessä tai seurauksena, on käsiteltävä, varastoitava ja sijoitettava pysyväksi tarkoitettulla tavalla Suomeen. Vastaavasti ydinjätteitä, jotka ovat syntyneet muualla kuin Suomessa tapahtuneen ydinenergian käytön yhteydessä tai seurauksena, ei saa käsitellä, varastoida tai sijoittaa pysyväksi tarkoitettulla tavalla Suomessa."

Voimassa oleva ydinenergialaki kumotaan uudella ydinenergialailla. Lain ydinjätehuoltoon liittyvät vaatimukset perustuvat ydinjätedirektiiviin (2011/70/Euratom) ja Kansainvälisen atomiener-

giajärjestön turvallisuusstandardeihin ja suosituksiin. Ydinjätteen tuontia ja vientiä koskevaa sääntelyä selkeytetään, mutta peruseriaa ei muuteta. Ydinjätedirektiivin periaatetta "kullakin jäsenvaltiolla on oltava perimäinen vastuu siinä syntyneen käytetyn ydinpolttoaineen ja radioaktiivisen jätteen huollosta" tulkitaan rajoittavasti: "Suomessa syntyneet ydinjätteet on edelleen lähtökohtaisesti loppusijoitettava Suomeen, ja muualta ei saa tuoda Suomeen ydinjätteitä loppusijoitettavaksi."

Vuoden 1994 lakimuutoksen valmistelun aikaan Suomi kävi neuvotteluita liittymisestä Euroopan unioniin. Hallituksen esityksessä kiistettiin vienti- ja tuontikiellon liittyminen Suomen jäsenyyteen EU:ssa. Muutosta perusteltiin pääosin kansainvälisillä syillä: "Kansainvälinen mielipideilmasto on yhä selkeämmin ryhtynyt suhtautumaan kielteisesti siihen, että ydinjätteen lopullinen sijoittaminen tapahtuisi muualla kuin siinä valtiossa, jossa ne on alun perin hyödynnetty. Tästä ovat hyvänä osoituksena erityisesti ne lainmuutokset, joilla Ranskassa ja Ruotsissa on toteutettu kieltä loppusijoittaa vierasperäisiä ydinjätteitä."

Hallituksen esityksen toinen peruste oli kansallinen: "Periaatteelliselta kannalta on tärkeänä tavoitteena pidettävä sitä, että täällä tuotettujen ydinjätteen käsittelyssä ja loppusijoituksessa noudetaan korkeatasoisia suomalaisia turvallisuus- ja ympäristönsuojeluväitteitä. Tästä voidaan lopullisesti varmistua vain siten, että täällä tuotettujen ydinjätteen loppusijoitus ja sitä välittömästi edeltävät ydinjätehuollon toimenpiteet suoritetaan Suomessa." Onnistumisen mahdollistajiksi todettiin soveltuva kallioperä ja korkeatasoinen ydinjätehuollon asiantuntemus. Samalla muualla tuotettujen ydinjätteen jätehuolto Suomessa nähtiin aiheelliseksi kieltää "johdonmukaisuuden ja selvyyden vuoksi".

Mielipideilmasto on jälleen kääntynyt ja suomalaiset turvallisuus- ja ympäristönsuojeluväitteet ovat vaihtuneet eurooppalaisiin. Soveltuva kallio on ja pysyy, mutta säilyykö korkeatasoinen ydinjätehuollon asiantuntemus, ellei alalle suoda loppusijoitettavaa kaupallisin perustein myös rajojemme ulkopuolelta?

TkT Linda Kumpula
Erityisasiantuntija
Työ- ja elinkeinoministeriö
Linda.Kumpula@gov.fi

HARVINAISEMMAT REAKTORITYYPIT JA NIIDEN KÄYTETTY POLTTOAINE

Isompi, keskitetty jätehuolto-yhtiö voi palvel-la harvinaisempia polttoainetyyppejä käyttävien reaktorikehittäjien tarpeita (kuva 2). Keskitetty toimija voi vastaanottaa vaikkapa käytettyä TRISO-polttoainetta useammalta toimijalta ja hoitaa turvalliseen varastointiin ja loppusijoitukseen liittyvät tutkimukset, mallinnukset, kustannustehokkuuden optimoinnin sekä viranomaisluvut kerralla kyseisen polttoainetyypin osalta, mikä säästää kustannuksia kaikilta.

Reaktorikehittäjät puolestaan voivat keskittyä teknologiansa kehittämiseen ja kaupallistamiseen jätehuollon pohtimisen ja luvittamisen sijaan. Uskottava kumppani jätehuollossa on uudentyypisen reaktorin kehittäjälle arvokas lisä yleisen hyväksyttävyyden näkökulmasta, ja se voi myös helpottaa sijoittajien sekä julkisen rahoituksen saamista.

YHTEENVETO JA LOPPUSANAT

Ydinalla elää pitkän stagnaation ja puolustustaistelun jälkeen taas jännittävää, kas-

vun ja mahdollisuuksien aikaa myös länsimaissa. Tämä ”renessanssi” on syntynyt ilmastonmuutoksen hillinnän, energiaturvallisuuden ja omavaraisuuden tärkeyden korostumisen myötä viimeisten vuosien ja vuosikymmenen aikana.

Tekoälyn ja robotiikan kasvava energiantarve on kiihdyttänyt renessanssia entisestään. Uusi sukupolvi on löytänyt ydinvoiman sekä tehokkaana ratkaisuna ilmastonmuutoksen hillintään että kiehtovana ja lukemattomia mahdollisuuksia tarjoavana teknologiana. He haluavat nyt lunastaa nämä mahdollisuudet.

Voidaan sanoa, että koko ydinvoima-ala on murroksessa. Sääntely, liiketoimintamallit, teknologiat, asenteet, kumppanuudet ja eri toimijoiden roolit ovat liikkeessä. Tämä on todennäköisesti tullut perinteiselle ydinvoimateollisuudelle yllätyksenä, sillä se on tottunut hitaammin liikkuvaan ympäristöön.

Monikansalliselle loppusijoitukselle on syntymässä sekä palava tarve että kasvava hyväksyntä, kun keskustelua ei enää hallitse säteilypelko vaan uudet mahdollisuudet ja näkymä energiarikkaammasta tulevaisuudesta.

”Entä se jäte?” tulee todennäköisesti olemaan ydinvoiman käyttöä ohjaava ky-

symys jatkossakin. Kaupalliset, monikansalliset väliaikaisvarastot ja loppusijoituslaitokset ovat elegantti vastaus tähän kysymykseen siellä, missä kansalliset ratkaisut eivät ole edenneet tai eivät kykene palvelemaan vaikkapa uusia ydinvoiman käyttömuotoja. Ne ovat hyvä ja toimiva ratkaisu niin tekno-ekonomisesti, turvallisuuden kuin ympäristönkin näkökulmasta, ja voivat osaltaan jouduttaa ydinvoiman renessanssia, muovata globaalia toimintaympäristöä ja parantaa sekä planeetan että ihmiskunnan hyvinvointia.

Suomen näkökulmasta kyseessä on tuoreen selvityksen perusteella erittäin kiinnostava mahdollisuus [5]. Olemme vähintään vuosikymmenen edellä muita toimijoita ja ensimmäisenä ottamassa käyttöön kansallisen loppusijoituslaitoksen, todennäköisesti vielä tämän vuoden (2026) puolella.

Laki, sekä nykyinen että uuden lain luonnos, kuitenkin edelleen kategorisesti kieltää käytetyn ydinpolttoaineen tuonnin ja viennin loppusijoitusta varten. Laki laadittiin Suomen liittyessä Euroopan Unioniin, varsin erilaisessa toimintaympäristössä. On syytä käydä huolellinen keskustelu siitä, onko tuolle laille enää perusteita ja haaluammeko todella luovuttaa kovalla työllä saavuttamamme etumatkan kilpailijamaille.

VIITTEET

- [1] Work Package 3: Economic Aspects of Regional Repositories (SAPIERR II – Strategic Action Plan for Implementation of European Regional Repositories: Stage 2).
- [2] E. INGERSOLL AND K. GOGAN, The Missing Link, Lucid Catalyst (2020)
- [3] E. INGERSOLL, K. GOGAN AND J. ABORN, Rethinking Deployment Scenarios for Advanced Reactors, EPRI, (2021)
- [4] R. PARTANEN, Shipyard Nuclear in Finland, Think Atom (2022)
- [5] R. PARTANEN, The Case for Waste – The Opportunities and Obstacles for Commercial, Multinational Spent Fuel Repositories in Finland, Think Atom (2024)

KIRJOITTAJA



Rauli Partanen

Toimitusjohtaja

DeepGeo Finland Oy

rauli.partanen@deepgeo.earth

(kuva: Raisa Ranta)

PIENYDINREAKTORIEN KÄYTETTY POLTTOAINE JA RADIONUKLIDIEN KULKEUTUMINEN

Sami Naumer, Miiko Pöyhönen, Pirjo Hellä
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Työssä tutkittiin kevytvesijäähdytteisten pienydinreaktoreiden käytetyn polttoaineen ominaisuuksia ja sen loppusijoittamista. LDR lite- ja Rolls-Royce-pienydinreaktorien käytetyn polttoaineen mallinnus tehtiin Serpent-koodilla. LDR liten matalan palaman vuoksi sen radionuklidi-inventaari oli Rolls-Royceen verrattuna pienempi ja sen vuoksi myös sen käytetty polttoaine on vähemmän radioaktiivista. Loppusijoittamista tutkittiin mallintamalla rikkoutuneesta kuparikapselista vapautuneiden radionuklidien kulkeutumista GoldSim-ohjelmalla. Mallinnus on ensimmäisiä kevytvesijäähdytteisten pienydinreaktorien käytetyn polttoaineen loppusijoittamisen numeerisia arviointeja.

Characteristics of small modular reactor spent nuclear fuel, and its disposal, were investigated in this study. The characterisation was carried out using Serpent code for the LDR lite and Rolls-Royce SMRs. Due to the lower burnup of the LDR lite, its radionuclide inventory was smaller and the spent nuclear fuel less radioactive. Disposal of the spent nuclear fuel was investigated with GoldSim software. The modelling acts as a first step in quantitative assessments of spent nuclear fuel disposal of small modular reactors.

Suomessa on suunnitteilla useita pienydinlaitoshankkeita, joista suurimmas-
sa osassa harkitaan pienydinreaktoreiden käyttöä kaukolämmön tuotantoon. Pienydinreaktorikonseptien kirjo on kuitenkin varsin laaja, ja niiden ominaisuudet voivat poiketa toisistaan huomattavastikin.

Loppusijoituksen kannalta merkittävimmät erot liittyvät sellaisiin reaktorin piirteisiin, joilla on vaikutusta käytetyn polttoaineen ominaisuuksiin. Näitä ovat varsinkin polttoaineen väkevöinti ja poistopala-
ma. Tämän tutkimuksen [1] tavoitteena

olikin mallintaa eri pienydinreaktoreiden käytettyjä polttoaineita ja käytetyn polttoaineen ominaisuuksien vaikutusta loppusijoitustiloista vapautuviin radionuklideihin.

MILLAISTA ON PIENYDINREAKTOREIDEN KÄYTETTY POLTTOAINE?

Pienydinreaktorien käytetyn polttoaineen ominaisuuksien selvittämiseksi valittiin aluksi mallinnettavat reaktorikonseptit.

Tutkimusta varten oli oleellista, että pienydinreaktorien ominaisuudet erosivat selkeästi sekä toisistaan että nykyisten suurten ydinreaktoreiden ominaisuuksista. Kuten kuvasta 1 nähdään, monien pienydinreaktorien polttoaineiden palamat (noin 40–50 MWd/kgU) ja väkevöinnit (noin 5%) ovat hyvin lähellä nykyisiä voimalaitoksia.

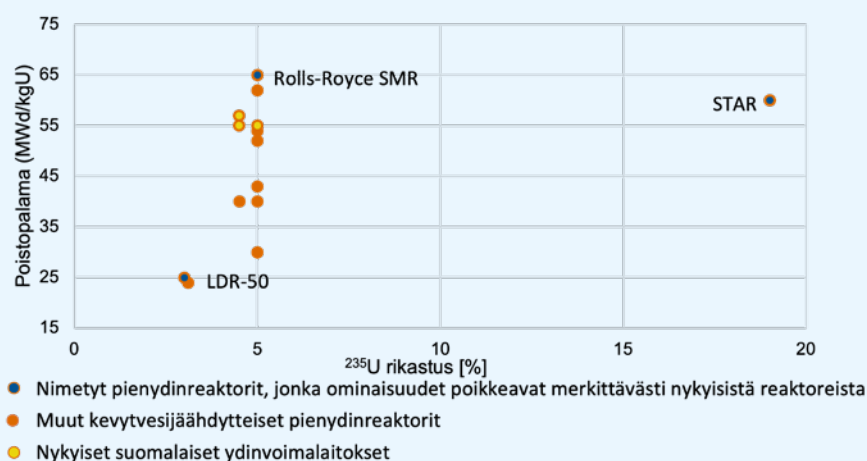
Kuitenkin lämmöntuotantoon tarkoitettujen pienemmät reaktorit sekä muutama muu pienydinreaktori erosivat palaman suhteen merkittävästi. Matalan palaman reaktoriksi valittiin LDR-50:n avoimesti saatavilla oleva vertailutapaus LDR lite [2], koska se on ajan-
kohtainen Suomessa. Matalan palaman lisäksi sillä on myös matalampi väkevöinti nykyisiin voimalaitoksiin verrattuna, joten mallinnus antaisi myös tietoa väkevöinnin vaikutuksesta. Toiseksi reaktoriksi valikoitui Rolls-Royce SMR, sillä sen suunniteltu palama on merkittävästi suurempi (60 MWd/kgU) kuin nykyisillä reaktoreilla.

Käytetyn polttoaineen mallinnus suoritettiin Serpent-koodilla. Mallinnus perustui yhden polttoainenipun 2D-poikkileikkaukseen heijastavasti äärettömässä hilassa. Molempien reaktoreiden polttoainenipun poikkileikkaus perustui LDR liten vertailumalliin, joka taas perustui EPR-tyyppiseen polttoainenippuun. Rolls-Roycen tapauksessa uraanin väkevöinti muutettiin korkeammaksi ja uraanin massa vastaamaan Rolls-Roycen pienydinreaktorin polttoainenipun massaa. Mallin polttoaineniput koostuivat polttoainesauvoista, joista osassa oli gadoliniumia, joita ympäröi suojakuori. LDR litelle mallinnettiin kolme erilaista polttoainenippua (katso taulukko 1). Nipun 2D-poikkileikkaus on esitetty kuvassa 2.

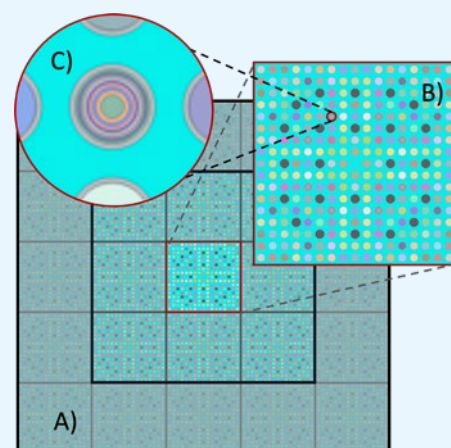
Mallinnuksen tuloksena saatiin käytetyn polttoaineen radionuklidi-inventaarit kaikille neljälle nipulle taulukon 1 mukaisilla poistopalamilla. Inventaari määritettiin 41 tärkeimmälle radionuklidille [4], joita käytettiin myöhemmässä radionuklidien kulkeutumismallinnuksessa.

Rolls-Roycen reaktorilla saavutettiin merkittävästi suurempi poistopalama, jonka vuoksi suurempi määrä fissiiliä materiaalia köyhtyi fissiotuotteiksi. Tämä tarkoittaa sitä, että Rolls-Roycen reaktorin käytetty polttoaine on radioaktiivisempaa, ja sen jälkilämpöteho on suurempi. Tämän lisäksi Rolls-Roycen reaktorin polttoaine ja muut nipun komponentit ovat tiheämmässä neutronivuossa pidemmän aikaa, jolloin myös aktivoitumistuotteita on sen käytetyssä polttoaineessa enemmän.

LDR liten tapauksessa käytetty polttoaine on vastaavasti vähemmän radioaktiivista. On kuitenkin mielenkiintoista, että taulukon 1 poistopalamilla fissiilin



Kuva 1. Eri kevytvesipohjaisten pienydinreaktorien käytetyn polttoaineen poistopalamat ja polttoaineen ^{235}U -väkevöinti. LDR-50 edustaa matalan palaman kaukolämpöreaktoria, Rolls-Royce SMR korkean palaman sähköä tuottavaa pienydinreaktoria ja STAR korkean väkevöinnin pienydinreaktoria. (Kuva laadittu viitteen [3] tietojen perusteella.)



Kuva 2. A) Mallinnettu polttoainenippu äärettömässä hilassa, jossa on heijastavat reunaehtot, B) nipun geometria, C) polttoainesauvat.

uraani-235 määrä on A-nipulle yli 60 % ja B- sekä C-nipulle 40 % reaktorista poistettaessa verrattuna tuoreeseen polttoaineeseen. Tämä tarkoittaa sitä, että LDR-liten mallinnusparametreilla ydinpolttoaineen käyttö on hyvin tehotonta. On mahdollista, että tehokkuutta pyritään parantamaan reaktorin käyttöasetuksilla.

Huomionarvoista on myös se, että näin suuri fissiilin materiaalin määrä käytetyssä polttoaineessa voi johtaa ongelmiin kriittisyysturvallisuudessa. Kriittisyysturvallisuutta ei kuitenkaan tutkittu vielä tässä vaiheessa.

RADIONUKLIDIENTEN VAPAUTUMINEN LOPPUSIJOITUSTILOISTA

Kevytvesijäähdytteisten pienydinreaktorien käytetyn polttoaineen loppusijoittaminen on todennäköisesti mahdollista nykyisillä loppusijoituskonsepteilla kuten KBS-3-ratkaisulla, jossa käytetty polttoaine pakataan kupari-rautakapseleihin, jotka sijoitetaan usean sadan metrin syvyyteen kallioperään louhittavien tunnelien lattiasta porattaviin reikiin. Kapselin ja kallon väli täytetään paisuvalla bentoniittisavella. Loppusijoitustunnelit ja muut maanalaiset tilat täytetään.

Loppusijoituskonseptin soveltuvuus pienydinreaktorien käytetyn polttoaineen loppusijoituksen on kuitenkin tärkeä varmistaa ja ymmärtää, mitä eroja siihen liittyy verrattuna perinteisten suurien laitosten käytettyyn polttoaineeseen. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli alustavasti selvittää näitä eroja. Tätä varten laadittiin uusi

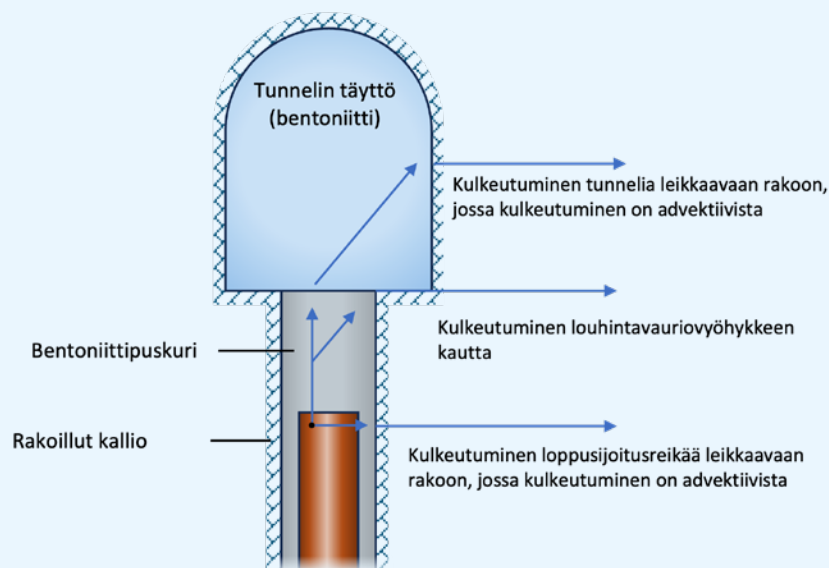
radionuklidien kulkeutumismalli Posivan aiempien mallien perusteella [4].

Lähialuemalli tehtiin GoldSim-ohjelmalla ja se koostuu kuparikapselista, joka on sijoitettu bentoniitilla täytettyyn loppusijoitusreikään. Mallissa on myös lyhyt jakso bentoniittitäytteistä loppusijoitustunnelia. Mallissa oletetaan, että kuparikapseliin ilmestyy pieni reikä 1 000 vuotta loppusijoituksen jälkeen, jonka jälkeen kapselissa oleva tila täyttyy vedellä ja polttoaine alkaa liueta.

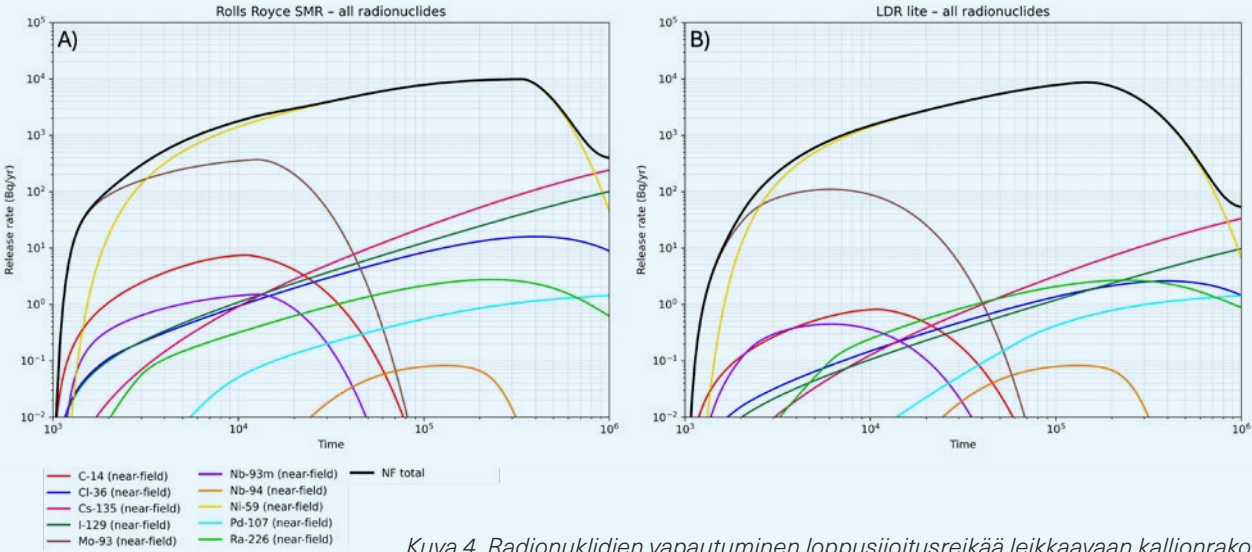
Kapselista vapautuvat radionuklidit kulkeutuvat diffusiivisesti bentoniittiesteiden läpi, kunnes päätyvät johonkin kolmesta

kulkeutumisreitistä (katso kuva 3) ja edelleen kallioperään, jossa kulkeutuminen etenee pääasiassa kallon rakojen kautta advektiivisesti. Kallioperäkulkeutumisen mallinnusta ei käsitelty vielä tässä tutkimuksessa.

Lähialuemallissa radionuklidien kulkeutumista hidastavat polttoaineen hidas liukenemisnopeus, materiaalien huokosissa ja raoissa olevan veden radionuklidikohtaiset liukenemisrajat sekä radionuklidien sorptio kiinteiden aineiden pinnalle. Mallin loppusijoitusskenaarioksi ja lähtöaineistoksi valittiin referenssiskenaario BS-RC [4], sillä ennen pienydinreaktorien käytetyn polttoaineen



Kuva 3. Lähialuemallin komponentit ja vapautumisreitit.



Kuva 4. Radionuklidien vapautuminen loppusijoitusreikää leikkaavaan kallionrakkoon A) Rolls-Royce- ja B) LDR Lite -pienydinreaktorin käytetylle polttoaineelle.

mallinnusta oli hyvä varmistua siitä, että mallilla saadaan toistettua aiemmat tulokset.

LÄHIALUEEN PÄÄSTÖT

Lähialuemallinnuksen merkittävimpänä erona aiempiin Posivan malleihin nähden oli kapselin sisältävän käytetyn polttoaineen inventaari, sillä Posivan käyttämän inventaarin sijaan käytettiin kummankin pienydinreaktorin inventaareja (LDR litelle vain aktiivisimmalle inventaarille kolmesta nipusta). Pienydinreaktorien käytetylle polttoaineelle ei vielä ole niille erikseen suunniteltuja loppusijoituskapaseleita. Tässä tutkimuksessa oletettiin, että käytetty polttoaine voidaan sijoittaa OL3-tyyppisiin kapseliin, jotka ovat lyhennetty pienydinreaktorin polttoainepupujen pituutta vastaaviksi.

Kuten aiemmin mainittiin, tässä tutkimuksessa ei tehty kriittisyystarkasteluja, joten kyseisten kapselien käyttö on alustava oletus, joka on tarkistettava tulevaisuuden tutkimuksissa. Ennen pienydinreaktorien käytetyn polttoaineen radionuklidien kulkeutumismallinnusta varmistettiin, että mallilla saadaan samat tulokset BS-RC-skenaariolle kuin Posivan käyttämällä inventaarilla.

Mallinnuksen tuloksina saatiin eri radionuklidien päästöt ajan funktiona sekä niiden yhteenlaskettu kokonaispäästö miljoonan vuoden aikana lähialuemallin kolmelle vapautumisreitille. Kuvaajia varten valittiin muutamia turvallisuuden kannalta tärkeimpiä radionuklideja [4] ja kaikkien 41 radionuklidien summa. Näiden nuklidien vapautuminen lähialueelta loppusijoitusreian halkaisevaan kalliorakkoon molemmille tarkastelluille pienydinreaktoreille on esitetty kuvassa 4.

Kuvien 4A ja 4B tulokset ovat pääpiirteissään hyvin samankaltaiset. Lähialueelta vapautuvien radionuklidien kokonaispäästöä ja maksimivapautumisnopeutta tarkastelemalla (taulukko 2) voidaan kuitenkin havaita käytettyjen polttoaineiden välillä eroja. LDR liten kokonaispäästö miljoonassa vuodessa on paljon pienempi kuin Rolls-Roycen pienydinreaktorin. Suurimpana syynä tähän on se, että Rolls-Roycen polttoaineput ovat pitempiä, joten yhdessä kapselissa on suhteessa enemmän käytettyä polttoainetta. Toisaalta ero johtuu myös LDR liten pienemmästä palamasta,

jolloin käytetyn polttoaineen aktiivisuuskin on pienempi.

Mielenkiintoista on, että radionuklidien maksimivapautumisnopeuksien ero on melko pieni. Tämä johtuu osaltaan siitä, että hiili-14, nikkeli-59 ja molybdeeni-93 ovat kaikki neutronivuon seurauksena syntyviä aktivoitumistuotteita. Niitä muodostuu pääasiassa polttoainepun rakenteellisissa teräsosissa olevien aineiden aktivoimisessa. Polttoainepupujen rakenteellisten osien geometria on nippujen välillä massaa lukuun ottamatta sama, jolloin erot aktivoitumistuotteista johtuvat lähin-

Taulukko 1. Mallinnettujen polttoainepupujen tiedot

Nipputyyppe	²³⁵ U-väkevöinti (%)	Gd-konsentraatio (%)	Poistopalama (MWd/kgU)	Aika reaktorissa (d)
LDR lite - A	1,50	6,00	6,0	560
LDR lite - B	2,40	9,00	18,0	1682
LDR lite - C	2,40	5,00	18,0	1682
Rolls-Royce SMR	4,95	9,00	65	2041

Taulukko 2. Tutkittujen pienydinreaktoreiden käytetyn polttoaineen radionuklidien kokonaispäästö ja vapautumisnopeudet lähialueelta.

	LDR lite	Rolls-Royce SMR
Kokonaispäästö* [GBq]	2,9	8,9
Maksimivapautumisnopeus [Bq/a]	8 670	9 880
Maksimivapautumisnopeuden ajankohta loppusijoituksen jälkeen [a]	140 000	350 000

*miljoonan vuoden aikana

nä massaeroista ja Rolls-Roycen reaktorin tiheämmästä neutronivuosta.

Huomionarvoista on kuitenkin se, että käytetyn polttoaineen mallinnuksessa käytettiin polttoainenipun 2D-läpileikkausta. Tällöin iso osa polttoainenipun teräsosista jää mallintamatta ja varsinkin teräksessä olevien tyypiepäpuhtauksien aktivoituminen hiili-14:ksi jää todellista vähemmäksi. Esimerkiksi Posivan referenssipolttoaineessa nämä muut teräsosat on otettu mukaan polttoainemallinnukseen ja hiili-14:n vapautuminen on paljon suurempaa [4].

TUTKIMUKSEN SEURAAVAT VAIHEET

Tässä tutkimuksessa tehtiin alustava kulkeutumismallinnus kevytvesijäähdytteisten pienydinreaktoreiden käytetyille polttoaineelle. Työ on ensimmäinen askel osana

laajempaa tutkimusta, jossa tutkitaan pienydinreaktorien käytetyn polttoaineen loppusijoituksen radionuklidipäästöjä.

Työssä käytetyt menetelmät soveltuvat hyvin eri pienydinreaktorien käytetyn polttoaineiden ominaisuuksien erojen määrittämiseen ja edelleen radionuklidien vapautumisen arvioimiseen. Tutkimustulosten perusteella on kuitenkin vielä vaikea vertailukelpoisesti arvioida, miten eri pienydinreaktorikonseptien käytetyn polttoaineen erot vaikuttavat radionuklidipäästöihin. Tätä varten malleja tulee jatkokehittää.

Tällä hetkellä mallien kehitys jatkuu siten, että käytetyt polttoaineet ja niiden määrä loppusijoituskapselissa ovat vertailukelpoisia. Tätä varten määritettiin uuden suuren ydinvoimalaitoksen vertailupolttoaine, ja yksinkertaistettiin loppusijoituskapselista siten, että niihin sijoitettava käytetyn polttoaineen määrä on sama reaktorikonseptista riippumatta.

Radionuklidien vapautumiserojen vertailun lisäksi tämä mahdollistaa päästöjen ja tuotetun energiamäärän suhteen laske-
misen. Tämä suhdeluku antaa lisätietoa siitä, tuottavatko pienydinreaktorit enemmän ydinjätettä kuin suuret voimalaitokset ja jos tuottavat, mitä se tarkoittaa loppusijoituksen kannalta.

Näiden muutosten lisäksi tehtiin kallio-
perässä tapahtuvaa kulkeutumista kuvaa-
va GoldSim-malli. Näillä päivitettyillä mal-
leilla saatuja tuloksia tullaan esittämään
maaliskuussa Yhdysvalloissa WM2026-
konferenssissä, jonka jälkeen ne julkais-
taan osana konferenssijulkaisua. Tulevissa
malleissa olisi myös hyvä tarkastella, tu-
lisiko käytetty polttoaine mallintaa 3D-
polttoainenippuputasolla, jotta kaikissa ni-
pun teräsosissa aktivoituneet radionukli-
dit saataisiin huomioitua inventaarissa.

VIITTEET

- [1] Naumer, S., Pöyhönen, M., Pulkkanen, V.-M., Hellä, P., & Seppälä, A. (2025). Characterisation and transport modelling of spent nuclear fuel from LWR SMRs. In Proceedings of the Finnish Nuclear Science and Technology Symposium 2025 (pp. 1–9). Finnish Nuclear Society, Espoo, Finland. https://bin.yhdistysavain.fi/1608821/9pqmwscIIXJa9mtQyWn0cznD6/Sami_Naumer_Characterisation%20and%20Transport%20Modelling%20of%20Spent%20Nuclear%20Fuel_paper.pdf
- [2] R. Komu, R. Tuominen. "LDR lite benchmark specifications. LDR design document", LDR-PUB-VTT-10002-R4, VTT Technical Research Centre of Finland, 2024.
- [3] International Atomic Energy Agency, "Small Modular Reactor Technology Catalogue 2024 Edition", 2024. [Online]. Available: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_catalogue_2024.pdf
- [4] A. Poteri, H. Nordman, V.-M. Pulkkanen, P. Smith, "Radionuclide Transport in the Repository Near-Field and Far-Field", 2014, Posiva 2014-02

KIRJOITTAJAT



DI Sami Naumer

Tutkija

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Sami.Naumer@vtt.fi



TkK Miiko Pöyhönen

Tutkimusavustaja

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Miiko.Poyhonen@vtt.fi



DI Pirjo Hellä

Johtava tutkija

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Pirjo.Hella@vtt.fi

Diplomityö

SÄÄNTELYEROJEN VAIKUTUKSET YDINVOIMALOIDEN RAKENNUSKUSTANNUKSIIN JA -AIKATAULUIHIN

Laura Heikkilä
Fortum Power and Heat Oy

Paikallisen lainsäädännön ja muun sääntelyn vaikutus uuden ydinvoiman rakennusprojekteihin on merkittävä ja usein vaikeuttaa kustannusten ja aikataulun arvioimista. Tässä diplomityössä mallinnettiin neljän eri ydinvoimalaitoksen rakennusprojekteja näiden kustannusten arviointiin tarkoitetulla NCET (Nuclear Cost Estimation Tool) -koodilla. Työn tavoitteena oli tarkastella, miten sääntelyerot vaikuttavat keskenään samankaltaisiin reaktorimalleihin ja niiden rakentamiseen.

Local laws and regulations have a significant impact on the construction projects of new nuclear power plants, which often complicates the estimation of project costs and schedules. In this thesis, construction projects of four different nuclear power plants were modelled using Nuclear Cost Estimation Tool (NCET), designed for estimating these project costs. The aim of the work was to examine how regulatory differences impact similar reactor models and their construction.

Viime vuosina valmistuneet ydinvoimalaprojektit ovat osoittaneet luotettavien kustannus- ja aikatauluarvioiden haastavuuden. Pahimmillaan kustannukset ovat moninkertaistuneet ja aikataulut venyneet yli kymmenellä vuodella alkuperäisiin suunnitelmiin verrattuna. Tärkeä ydinvoimaprojekteihin vaikuttava tekijä on paikallinen sääntely, jonka vaikutus näkyy projektin kaikissa vaiheissa luvituksesta käyttöönottoon asti.

Sääntelyerot johtavat usein suunnittelumuutoksiin sekä joissakin tapauksissa täysin uuden laitostyyppin kehittämiseen, minkä seurauksena projektien suunnitteleminen ja aiemmista projekteista kerätyn tietotaidon hyödyntäminen vaikeutuvat. Jo valmiiksi pääomaintensiivisellä alalla rakentamiseen liittyvät epävarmuudet vaikeuttavat projektien suunnittelua sekä lopullisten sijoituspäätösten tekemistä.

TARKASTELEVAT LAITOSTYYPI

Työssä tarkasteltiin neljää eri ydinvoimalaitosta. Näistä kaksi ensimmäistä olivat Korea Hydro & Nuclear Powerin (KHNP) ja Korea Electric Power Corporationin (KEPCO) suunnittelemat APR-tyyppiset laitokset APR1000 ja APR1400. Näistä APR1000 on suunniteltu soveltuvaksi eurooppalaiseen sääntelyyn hyödyntäen pohjana APR1400:n mallia [1].

Näitä laitoksia mallinnettiin työssä yleistyksinä laitostyypeistä, eivätkä ne vastaa mitään tiettyä rakennettua tai rakenteilla olevia laitoksia. APR-laitoksia mallintamalla oli tarkoitus havainnollistaa, miten samaa alkuperää olevat laitostyyppit saattavat rakennusprosessin osalta merkittävästi erota toisistaan.

APR-laitosten lisäksi tarkasteltavaksi valittiin kaksi tapaustutkimusta Framatomen ja Siemensin suunnittelema EPR-laitoksesta: Hinkley Point C (HPC) -laitos Isossa-Britanniassa sekä Taishanin laitos Kiinassa. Näistä HPC-laitoksen rakennusprosessi on edelleen kesken, kun taas Taishanin laitoksen jälkimmäinen reaktori liitettiin sähköverkkoon vuonna 2019. Molemmilla laitoksilla on kaksi EPR-yksikköä, joista kummatkin huomioitiin tässä työssä. EPR-laitoksia mallintamalla tarkoituksena oli havainnollistaa, miten kahden saman reaktorityypin laitosten rakennusprosessit voivat erota toisistaan.

NCET-TYÖKALU

Ydinvoimalaitosten rakennusprojektien kustannuksia ja aikatauluja sekä näihin liittyviä riskejä mallinnettiin Massachusetts Institute

of Technology -yliopistossa kehitetyllä Nuclear Cost Estimation Tool (NCET) -työkalulla [2]. Työkalun tuottamat arviot eri systeemien ja komponenttien kustannuksille sekä niiden vaatimille työtunneille perustuvat Energy Economic Data Base (EEDB) -tietokannassa julkaistuihin painevesireaktorille ilmoitettuihin arvoihin [3]. Uusin versio tietokannasta on vuodelta 1987, josta kustannukset on skaalattu vuoteen 2023 ydinvoima-alan kustannusten nousu huomioiden.

NCET-työkalu arvioi jokaisen osaluonnon vaatimat suorat kustannukset sekä työtunnit skaalaamalla vastaavia arvoja EEDB-tietokannasta mallinnettavan laitoksen parametrien perusteella. Rakennusaikataulu ratkaistaan optimointiongelmalla hyödyntäen tehtävien keskinäistä järjestystä sekä työntekijämäärille asetettuja rajoitteita. Aikataulun perusteella arvioidaan rakennusprojektin epäsuorat kustannukset, jotka riippuvat projektin kestosta.

Determinististen tulosten lisäksi NCET-työkalu huomioi kustannus- ja aikatauluviivityksiin liittyvät riskit ja antaa näille luottamusväliä. Luottamusväliä arvioidaan Monte Carlo -menetelmällä ottamalla huomioon sekä lähtöparametreihin liittyvät epävarmuudet että aiempien ydinvoimaprojektien perusteella arvioidut rakennusprosessiin liittyvät riskit. Näitä ovat tuotantoketjun viiveet, ihmisten tekemät virheet, muutosvaatimukset sekä alhainen työteho. Riski virheisiin pienenee aiemmista vastaavista

reaktoreista kerätyn tietotaidon myötä, minkä huomioimiseksi työssä mallinnettiin reaktoriyksiköitä ensimmäisestä (First-of-a-Kind, FOAK) kymmenenteen (10th-of-a-Kind, 10-OAK).

SÄÄNTELYN VAIKUTUKSET

APR-laitosten keskeisimpiä eroja ovat APR1000:n malliin lisätyt sydänsieppari sekä ulompi suojarakennus, joista kumpakaan ei ole APR1400-mallissa. Molempia näistä muutoksista voidaan perustella eurooppalaisella sääntelyllä: esimerkiksi Suomessa Säteilyturvakeskus (STUK) vaatii vakavassa reaktorionnettomuudessa muodostuvan sydänsulan vakauttamista ja jäädyttämistä sekä primäärisen suojarakennuksen kaasutilasta vuotavien radioaktiivisten aineiden ohjaamista sekundäärisen suojarakennukseen [4].

Edellä mainittujen suunnittelumuutosten lisäksi on todennäköistä, että APR1000-laitokseen on toteutettu myös muita sääntelypohjaisia muutoksia, joita ei kuitenkaan ole yksiselitteisesti eritelty. Esimerkiksi teholtaan pienemmän APR1000-laitoksen rakennuksista monet ovat pinta-alaltaan APR1400-laitoksen vastaavia suurempia, mikä saattaa selittyä esimerkiksi kattavammilla turvallisuusjärjestelmillä.

Koska HPC:n ja Taishanin laitokset edustavat samaa EPR-reaktorityyppiä, erot laitosten välillä eivät ole yhtä selkei-

tä kuin tarkasteltujen APR-laitosten välillä. Mallissa huomioituista eroista olennaimmat olivat HPC:n laitokselle asennettu kaksinkertainen Instrumentation & Control (I&C) -järjestelmä, kattavampi ulompi suojarakennus sekä paksummat betoniperustukset reaktorihallin ja sitä ympäröivien rakennusten alla.

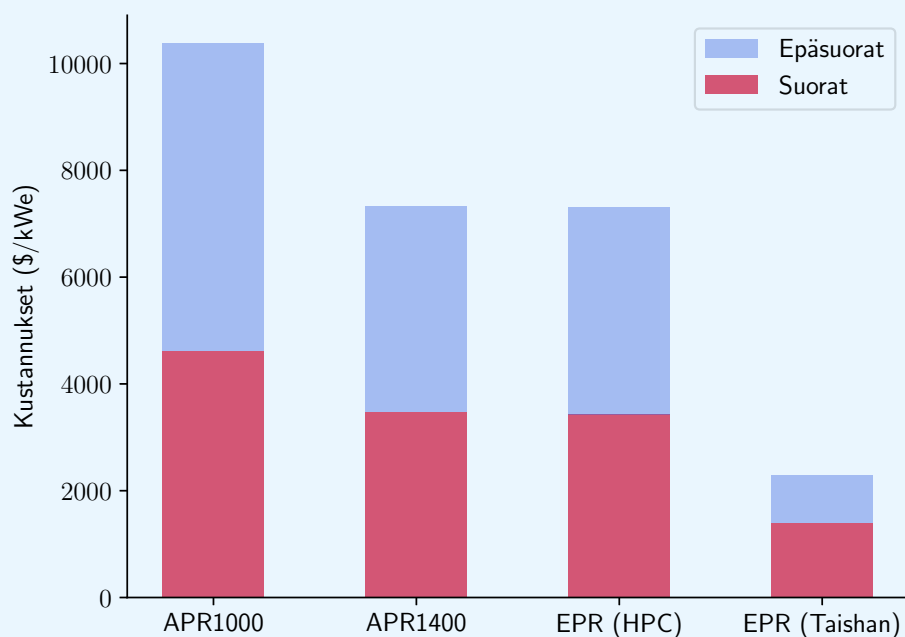
Näistä I&C-järjestelmän kaksinkertaistaminen on perusteltavissa sääntelyllä [5], mutta muiden muutosten osalta taustalla saattaa olla myös muita syitä liittyen esimerkiksi laitospaikkojen eroihin. Julkisesti saatavilla olevan dokumentaation rajallisuuden takia suunnittelumuutosten taustoittaminen on kuitenkin haastavaa. Laitoserojen lisäksi Taishanin ydinvoimalaitoksen mallissa on huomioitu Kiinan alhaisemmat materiaali- ja työvoimakustannukset sekä pienemmät myöhästymiseen liittyvät riskit, joista jälkimmäiset perustuvat oletukseen paikallisista ja vakiintuneista tuotantoketuista.

MALLINNUKSEN TULOKSET

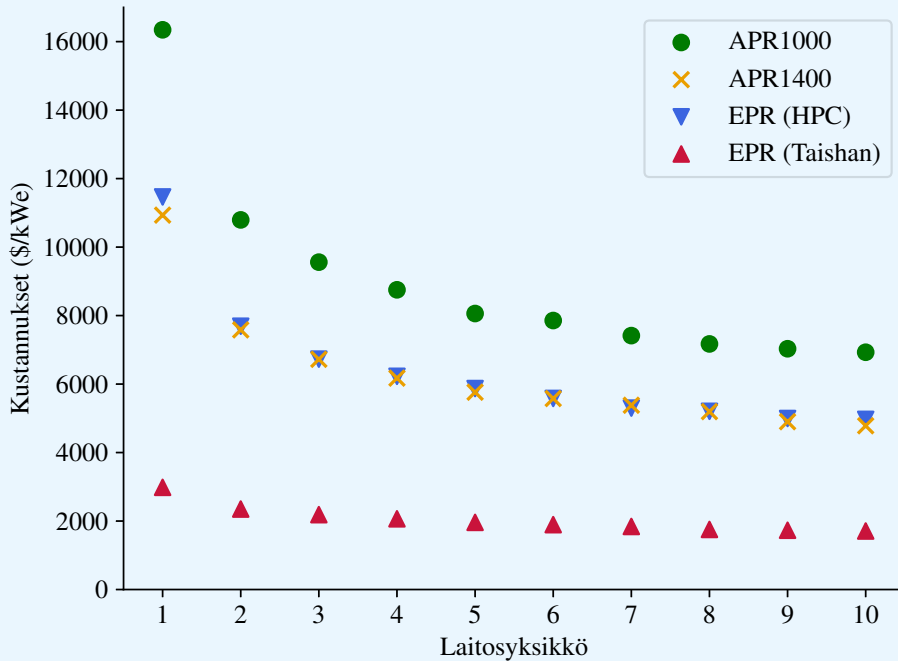
Työn kannalta olennaimmat NCET-työkalun laskemat tulokset olivat suorat ja epäsuorat kustannukset, rakennusprojektin kesto sekä näihin liittyvät riskit. Ennen riskien huomioimista arvioidut deterministiset suorat ja epäsuorat kustannukset Yhdysvaltain dollareina (USD) suhteutettuna laitoksen sähkötehoon (kWe) on esitetty kuvassa 1.

APR1000-laitoksen suhteelliset kustannukset ovat selkeästi korkeimmat, kun taas Taishanin laitoksen vastaavat kustannukset ovat matalimmat. APR1400- ja HPC-laitosten suhteelliset kustannukset ovat näiden välillä ja hyvin lähellä toisiaan. Epäsuorien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista on merkittävä, yli 50 % kaikille laitoksille lukuun ottamatta Taishania.

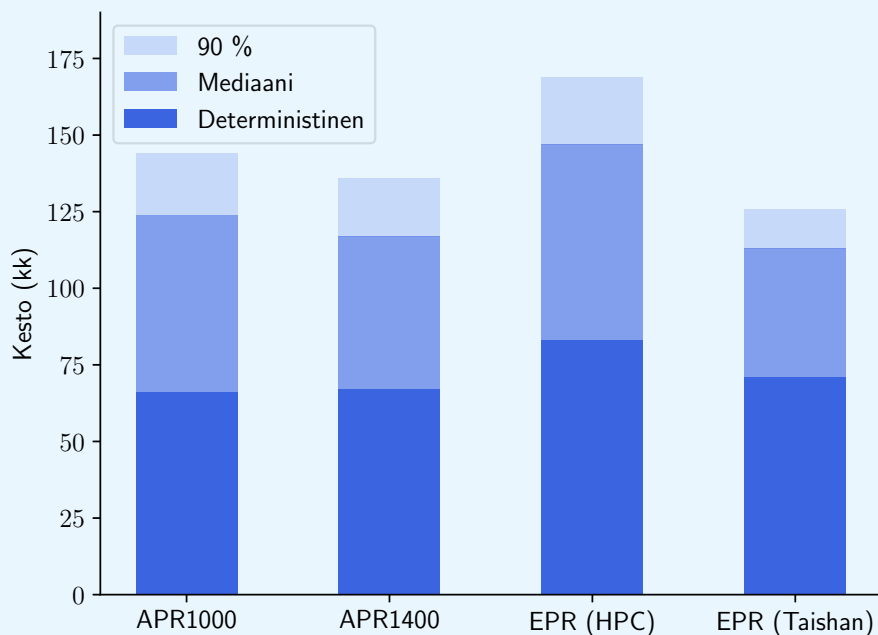
APR1000-laitoksen kustannuksia nostavia tekijöitä vertailemalla havaittiin, että näistä viisi merkittävintä nostivat APR1000:n kustannuksia yli 500 miljoonalla USD:lla APR1400:n kustannuksiin verrattuna. Näiden joukossa olivat sekä sydänsieppari että ulompi suojarakennus, jotka molemmat selittyvät suoraan sääntelyvaikutuksilla. Muut kustannusnousut selittyvät pinta-alaltaan suuremmilla rakennuksilla, joiden taustalla saattaa olla esimerkiksi paloturvallisuuteen tai turvallisuusjärjestelmien laajuuteen liittyviä vaatimuksia. EPR-laitosten väliset erot johtuvat pitkälti Ison-Britannian ja Kiinan rakennusolosuhteiden eroista, mutta myös esimerkiksi sääntelyperusteinen kaksinkertainen I&C-järjestelmä nostaa HPC:n kuluja merkittävästi.



Kuva 1. Deterministiset suorat ja epäsuorat kustannukset suhteutettuna laitoksen sähkötehoon.



Kuva 2. Kokonaiskustannukset mediaaniriskiskenaariossa kymmenelle ensimmäiselle laitokselle suhteutettuna laitoksen sähkötehoon.



Kuva 3. Arvioidut rakennusaikataulut deterministisessä skenaariossa sekä riskit huomioivissa skenaarioissa.

Determinististen kustannusten lisäksi työssä arvioitiin kokonaiskustannuksia, kun projektiin liittyvät riskit otetaan huomioon. Mallinnus toteutettiin jokaisen laitosyyppin kymmenelle ensimmäiselle yksikölle oppimisella saavutettavien hyötyjen huomioimiseksi. Mediaaniriskiä vastaavat tulokset mallinnuksesta on esitetty kuvassa 2, jossa kustannukset on suhteutettu laitoksen sähkötehoon. Tulokset osoittavat mediaaniriskin merkittävän vaikutuksen kokonaiskustannuksiin deterministisiin arvoihin verrattuna sekä samanlaisia yksiköitä rakentamalla saavutettavissa olevat kustannushyödyt.

Kuvassa 3 on esitetty aikataulumallinnuksen tulokset deterministisessä tilanteessa sekä riskit huomioivissa skenaarioissa mediaanin ja 90 % luottamusvälin avulla ilmoitettuna. APR-laitosten deterministiset aikataulut ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta APR1000-laitokselle viivästymisten riskit ovat hieman suuremmat. Muihin laitoksiin verrattuna HPC erottuu pisimmällä deterministisellä aikataululla sekä korkeimmilla riskeillä. Taishanin laitokselle riskit aikataulun ylittymiselle ovat neljästä mallinnetusta laitoksesta pienimmät.

Sääntelyeroista johtuvien suunnittelu- ja muutosten aikatauluvaikutusten havainnollistamiseksi sydänsiepparin asentamisen kesto tarkasteltiin työssä erikseen. APR1000-laitoksen deterministisessä aikataulussa sydänsiepparin asennuksen arvioitiin kestävän kymmenen kuukautta, mutta mediaaniriski huomioitaessa arvioitu kesto kaksinkertaistui ja 90 %:n luottamusvälillä yli kolminkertaistui. Koska sydänsiepparin asennus on reaktorihallin rakentamisen kannalta kriittisellä polulla, viivästymiset sen asennusvaiheessa venyttävät koko rakennusprojektin kesto.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä saatujen tulosten verifiointiseksi niitä vertailtiin julkaistuun tietoon valmistuneista sekä keskeneräisistä ydinvoimaprojekteista. Tarkoituksena oli tarkastella tuloksia suuntaa antavasti, sillä erityisesti epäsuorien kustannusten määrittely sekä aikataulussa huomioitavat työvaiheet vaihtelevat lähteestä riippuen, eikä näitä ole usein tarkkaan määritelty. NCET-työkalu onkin ensisijaisesti suunniteltu laitosten keskinäiseen vertailuun absoluuttisten tulosten laskemisen sijaan [6].

Haasteena työssä oli myös lähtödatan kerääminen, sillä vaaditun tiedon saatavuus on ydinvoima-alan luonteesta johtuen usein rajoitettua. Puutteellisten tietojen sekä mallin rajoitteiden takia kaikkia suun-

nittelumuutoksia ei myöskään ollut mahdollista eritellä ja mallintaa. Kuitenkin esimerkiksi HPC-laitokselle Ison-Britannian sääntelyn perusteella toteutetut 7 000 suunnittelumuutosta [7] väistämättä vaikuttavat rakennusprojektin aikatauluun ja kustannuksiin.

APR-laitoksia vertailemalla havaittiin, kuinka olennaisesti sääntelyperusteiset muutokset APR1000-laitoksen mallissa APR1400-laitokseen verrattuna nostivat

kustannuksia sekä budjetin ylittymiseen ja aikataulun viivästymiseen liittyviä riskejä. EPR-laitosten keskinäinen vertailu sen sijaan osoitti, miten samaa reaktortyyppiä olevien laitosten rakennusprojektit saattavat erota toisistaan paikallisesta hintata-sosta sekä riskeistä riippuen.

Tarkastelemalla kustannusten kehitystä FOAK-yksikön jälkeen havaittiin merkittäviä kustannusvähennyksiä, jotka osoittavat pysyvällä reaktorimallilla saavu-

tettavissa olevat hyödyt. Mikäli laitoksen mallia joudutaan sääntelyerojen myötä muuttamaan, aiemmista rakennusprojekteista kerätyn tietotaidon hyödyntäminen vaikeutuu, mikä osaltaan aiheuttaa viivästyksiä sekä kustannusylityksiä.

Diplomityö on hyväksytty Aalto-yliopiston Perustieteiden korkeakoulussa 16.12.2025.

VIITTEET

- [1] K-Next. "APR1000". Saatavissa: <https://www.k-next.kr/newEn/contents.do?mid=0103030000>. (Viitattu 20.10.2025.)
- [2] Stewart W.R., ja Shirvan K. "Capital cost estimation for advanced nuclear power plants". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 155, pp. 111880, 2022.
- [3] United Engineers & Constructors Inc. "Phase 9 update (1987) report for the Energy Economic Data Base Program EEDB-IX". U.S. Department of Energy, 1988.
- [4] Säteilyturvakeskus. "Ydinvoimalaitoksen suojarakennus". YVL B.6. 2019.
- [5] Framatome. "UNICORN: Non-Computerized Safety Class 1 I&C Platform". 2018. Saatavissa: <https://www.framatome.com/solutions-portfolio/docs/default-source/default-document-library/product-sheets/a0620-p-ge-g-en-0620-201806-unicorn.pdf>.
- [6] Stewart W.R. "Capital cost evaluation of advanced reactor designs under uncertainty and risk". PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2022.
- [7] Jack S. "Hinkley C: UK nuclear plant price tag could rocket by a third". BBC, 2024. Saatavissa: <https://www.bbc.com/news/business-68073279>. (Viitattu 22.10.2025.)

KIRJOITTAJAT



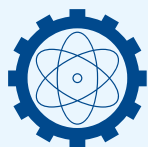
DI Laura Heikkilä
Design Engineer, PRA
Fortum Power and Heat Oy
laura.heikkila@fortum.com

Palautusosoite:

Suomen Atomiteknillinen Seura
c/o Tommi Lyytinen
PL 1000
02044 VTT

Osoitteenmuutokset:

sihteeri@ats-fns.fi

**ATS**

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

**KANNATUS-
JÄSENET**

AFRY FINLAND OY

FINNUCLEAR RY

FORTUM POWER AND
HEAT OY

HELEN OY

KONECRANES OYJ

LUT-YLIOPISTO

PAGODE OY

PLATOM OY

POHJOISMAINEN
YDINVAKUUTUSPOOLI

POHJOLAN VOIMA OYJ

POSIVA OY

STEADY ENERGY OY

SWECO FINLAND OY

TEKNOLOGIAN TUTKIMUS-
KESKUS VTT OY

TEOLLISUUDEN VOIMA OYJ

WESTINGHOUSE