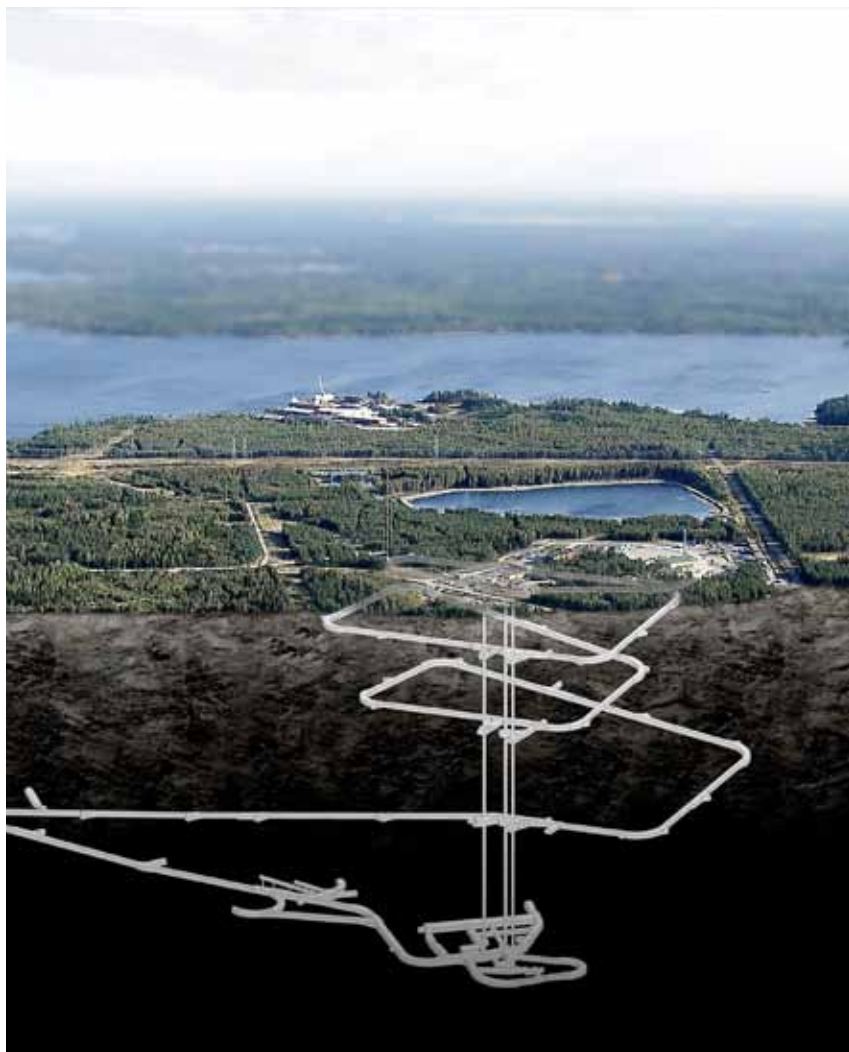


ATS Ydintekniikka

SUOMEN ATOMITEKNILLINEN SEURA - ATOMTEKNISKA SÄLLSKAPET I FINLAND RY

2  2013 vol. 42



Tässä numerossa:

- 3** Pääkirjoitus: Tärkeiden päätösten kynnyksellä
- 4** Editorial: On the Threshold of Important Decisions
- 5** Jäsentilaisuus 31.5.2013 Eurooppalainen energiapoliikka
- 6** Fukushima onnettomuuden mallintaminen MELCORilla
- 9** FinPSA - riskianalyysiohjelma laitoksen koko elinkaarelle
- 10** Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen haasteiden ja epävarmuuksien tulevaisuushallinta
- 15** Loppusijoitustilojen tulppausyhteistyötä eurooppalaisittain
- 18** Pienet modulaariset reaktorit
- 21** Väitöskirjat
- 25** Diplomityö
- 26** Matkakertomukset Japaniin ja Paldiskiin
- 29** Reaktorin laidalla
- 30** Yhteystiedot
- 31** ATS:n uudet jäsenet

Teemana tutkimus:

Megaluokan sosiotekninen projekti väliarvioinnissa

Päätoimittajalta

Elokuussa tuli kuluneeksi sata vuotta akateemikko **Erkki Laurilan** (1913–1998) syntymästä. Aalto-yliopistolla järjestettiin merkkipäivän kunniaksi Erkki Laurilan 100-vuotissymposiumi, joka kokosi vaikuttavan joukon akateemikon kollegoja, oppilaita, ystäviä ja sukulaisia muistelemaan tätä tieteen monialaosaajaa.

Laurilan elämä ajoittui aikaan, jolloin sodanjälkeinen Suomi tarjosi huiimia kehitysmahdollisuuksia parhaimmille osaajilleen. Haasteita riitti: tiede kehittyi nopeaa vauhtia sotavuosien jälkeen ja tekninen perusosaaminen piti rakentaa käytännössä tyhjästä. Toisaalta tarvittiin myös ymmärrystä yhteiskunnallisesta päätöksenteosta ja hyvät välit presidentti Kekkoneseen, jotta asiat saatiin etenemään. Erkki Laurila hallitsi kaikki nämä elementit ja enemmänkin.

Ydinenergian käyttö edellyttää, että yhteiskunta ymmärtää siitä aiheutuvat riskit ja hyödyt ja on valmis ne

hyväksymään. Energia- ja ilmastopoliitikassa keskustelijoita riittää, sillä ideologista hattaraa on helppo myydä kadunkulmassa. Ja näitä ilmastokioskeja riittää.

Liian usein myös törmää väitteisiin, joissa päämäärä näyttää pyhittävän keinot ja argumentit. Ja aina ei päämäärä edes avaudu, vaan argumentit tuntuvat palvelevan puhtaasti poliittisia tarkoituksia.

Tieteen popularisointi on kokonaan oma taiteenlajinsa, joka oikein toteutettuna vaatii erityislaatuista osaamista ja suurta tarkkaavaisuutta. Tätä pohdittiin muun muassa Tiedetoimittajien maailmankonferenssissa, joka kokosi kesäkuussa Helsinkiin 800 tiedetoimittajaa 80 eri maasta. Ydinvoima oli esillä monessa sessiossa.

Tiede tutkii asioita, joiden merkitys avautuu kokonaisuudessaan mahdollisesti vasta vuosikymmenten kuluttua. Tiedeyhteisön lisäksi tutkijoiden on vakuutettava myös muu yhteiskunta ja päättäjät siitä, että valintatilanteissa

keskitytään oikeisiin asioihin. Taitavia popularisoijia ei koskaan ole liikaa.

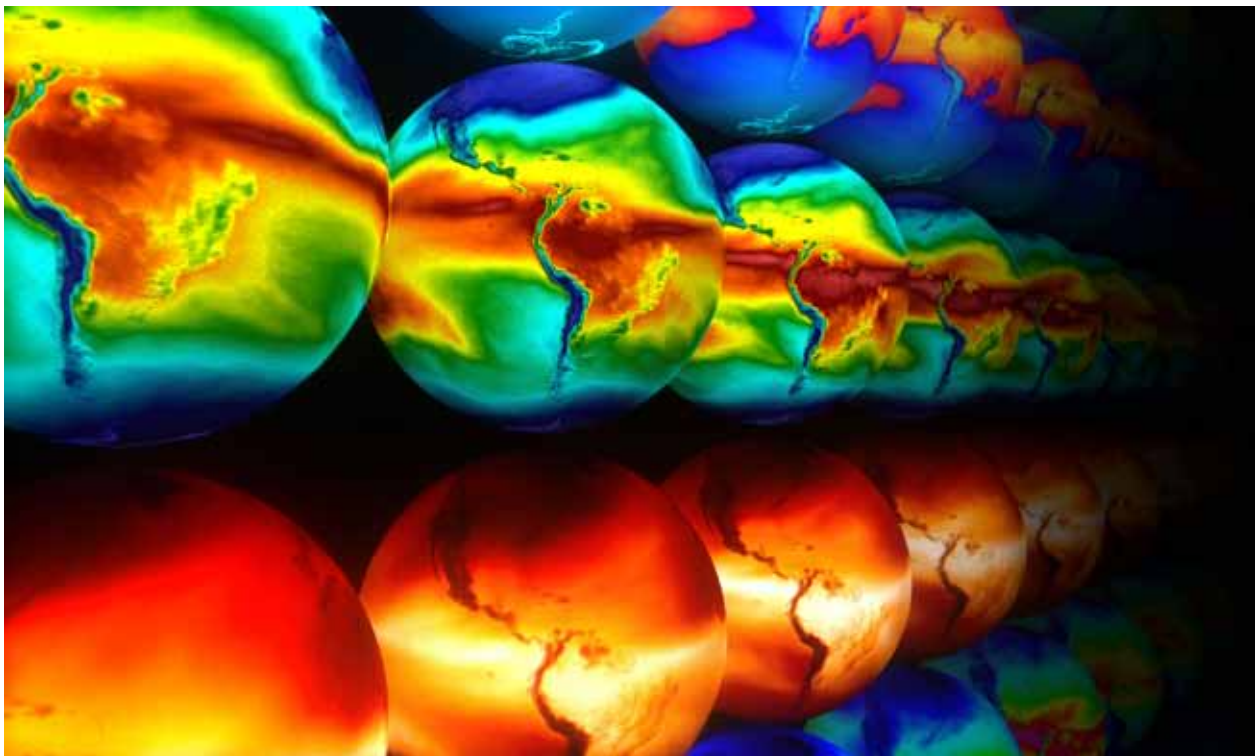
Tiedetoimittajia tuntui painavan yhteinen huoli mediatalojen murroksen vaikutuksista uutisoinnin laatuun. Kuukausipalkkaisten toimittajien määrä vähenee ja samalla juttuja ja uutisia pitää tehdä aiempaa nopeammin. Ammattitaitoisia freetoimittajia on, mutta kuka on valmis maksamaan jutusta käypää hintaa työmäärään nähden?

Tänä päivänä jokaisen tutkimushankkeen osana laaditaan viestintäsuunnitelma. Toteuttaminen vaihtelee usein hankevastaavan aktiivisuudesta ja ajankäytöstä riippuen. "Atomi-tekniikan" alalla helppo tapa viestiä hankkeista ja verrytellä näppituntumaa hyvin tiedotteisiin on laittaa niistä kuulumisia vaikkapa meille tänne ATS Ydintekniikkaan. Julkisuus on taattu, joskin aikataulu saattaa tökkiä. Mutta aikanaan lehti aina ilmestyy. On aina ilmestynyt.

*Anna-Maria Länsimies
päätoimittaja*

Kannen kuva: Posiva Oy:n rakentamislupahakemus.

Kesän kuva



Ilmakehän veden höyrystymistä mallintamalla tutkitaan muun muassa veden kiertokulkua ja ilmakehän säteilytasetta. Kuva: Oak Ridge National Laboratory. Lisää huikeita tiedekuvia osoitteessa <http://www.flickr.com/photos/oakridgelab>.

Tärkeiden päätösten kynnyksellä

VTT julkisti viime marraskuussa suuren tutkijajoukon työn tuloksena Low Carbon Finland 2050 –energiaskenaariot. Suomen on mahdollista päästä EU:n asettamaan 80 prosenttia kasvihuonekaasujen vähennystavoitteeseen vuoteen 2050 mennessä. Vähäpäästöiseen energian tuotantoon siirtymisen olennainen tekijä oli kaikissa skenaarioissa ydinenergian käytön lisääminen. OL3:n jälkeen rakennettiin skenaarioissa kahdesta neljään uutta laitosta. Sähköstä tuotettiin 31-52% ydinvoimalla vuonna 2050. Skenaarioihin ydinenergian osalta ei valittu taloudellista optimia, joka olisi merkinnyt vielä suurempaa ydinvoiman osuutta, vaan käytettiin omia asiantuntija-arvioita.

Parhaillaan on käynnissä on kansallisen energia- ja ilmastotiekartan laatiminen vuoteen 2050. Laajapohjaisesti valmisteltava tiekartta on suunniteltu annettavan eduskunnan käsittelyyn kevään 2014 aikana.

Lisääntyvä ydinvoiman turvallinen ja kustannustehokas käyttö edellyttää ydinenergiatutkimuksen lisäämistä. Tulevaisuudessa tarvitaan paljon lisää ydinvoimaosaajia, joiden tarvetta arvioitiin viime vuonna tuloksensa esittäneensä osaamistyöryhmässä. Parhaillaan ydinvoimalan tutkimustrategiaa (YES) työstetään työryhmässä, ja sen tulokset saadaan tulevana keväänä.

Aalto-yliopisto, Lappeenrannan teknillinen yliopisto ja VTT ovat yhdessä suunnitelleet kokeellisen tutkimuksen infrastruktuuria tavoitteenaan sen kansallinen status. VTT:llä on **edessä ydinenergian vanhevan kokeellisen tutkimuksen** laitteiston uusiminen rakennettaviin tiloihin, ja suurimmat investoinnit tarvitaan kuumakammioihin.

Sekä yritysten että julkisen sektorin rahoituksen lisäys tutkimukseen on välttämätöntä ydinenergian käytön lisääntyessä, vaikeasta taloudellisesta tilanteesta huolimatta. Kun yhä useammat yritykset tunnistavat ydinenergia-alan kasvavat liiketoimintamahdollisuudet sekä Suomessa että kansainvälisesti, myös Tekes-rahoituksen kasvu on mahdollista. Nyt Tekes on merkittävä eurooppalaisen JHR-tutkimusreaktorin suomalainen rahoittaja. Yliopistoissa on tehty merkittäviä päätöksiä ydinenergia-alan professuurien lisääksestä.



Julkaisu ja sen julkistamistilaisuuden materiaalit ovat ladattavissa VTT:n kotisivuilta.

On the threshold of important decisions

VTT published last November scenarios for Low Carbon Finland 2050 as a result of a work of large number energy technology experts. Finland will be able to reach EU's 80 % target for the reduction of greenhouse gas emissions by 2050. An essential factor needed for the transfer towards a low carbon energy system was in each scenario the increase of nuclear energy production. After Olkiluoto3, from two to four new nuclear power plants were built. Nuclear power would account 31-52 % of the total supply in 2050. Cost optimization of the whole energy system would have led to a higher amount of nuclear power plants, but the maximum amount of nuclear power was set by experts for each scenario.

Presently, a national energy and climate roadmap to 2050 is being prepared broad-based. It will be introduced to the Parliament before summer 2014.

Increased use of nuclear energy safely and cost-efficiently requires more investments in nuclear energy research than today. In the future, the need for expertise in nuclear energy sector is growing significantly according to the Committee for Nuclear Energy Competence that published its results last year. A national strategic research agenda for nuclear energy sector is currently being conducted, and the conclusions will be available next year.

Aalto University, Lappeenranta University of Technology and VTT have planned in co-operation the future of their experimental research infrastructure, aiming at a national status. VTT is facing a renovation of old experimental nuclear energy research infrastructure in a new building, and the largest investments would be needed for hot cells.

More investments from companies and public sector on research are needed when the use of nuclear energy is increasing, regardless of overall difficult economic situation. When more and more companies have identified increasing business opportunities both in Finland and internationally, also the increase of the funding from Tekes, Funding Agency for Technology and Innovation, could be possible. Presently, Tekes is providing a major Finnish funding for the European research reactor JHR. Universities have made significant decisions on new professorships.



The publication can be downloaded from www.vtt.fi.

Jäsentilaisuus 31.5. TVO:n Kuparissalissa, Helsingissä

Eurooppalainen energiapoliikka keskustelua ydinenergian näkökulmasta

Euroopan Parlamentti hyväksyi 3.7.2013 Komission esityksen päästöoikeuksien väliaikaisesta poistamisesta markkinoilta vuosina 2013–15. Niin sanotun Backloadingin tuloksena 900 miljoonan huutokaupattavaa päästöoikeutta siirretään käytettäväksi myöhemmin.

Backloading -esityksen taustalla on huoli päästöoikeuksien alhaisesta hinnasta. Hinnan alhaisuus on pitkälti seurausta Euroopan monivuotisesta talouskriisistä, kun päästöt ovat vähentyneet erityisesti energiavaltaisessa teollisuudessa ja sähkön tuotannossa.

Asian käsittely oli vielä kesken, kun

MEP **Eija-Riitta Korhola** ja johtaja **Pertti Salminen** ET:stä kertoivat eurooppalaisen energiapolitiikan tulevaisuudesta ATS:n jäsenille toukokuussa 2013. Tässä puhujien näkemyksiä backloadingista parlamentin heinäkuisen äänestyksen jälkeen.

Sopu 2030 päästökatoista on löydettävä heti

Parlamentti hyväksyi komission ehdotuksesta 3.7. jonkin verran muuttuneen kompromissin päästöoikeuksien siirrosta (ns. backloading) kaudella 2013–2020.

Backloading -esityksen taustalla on huoli päästöoikeuksien alhaisesta hinnasta. Hinnan alhaisuus on pitkälti seurausta Euroopan monivuotisesta talouskriisistä, kun päästöt ovat vähentyneet erityisesti energiavaltaisessa teollisuudessa ja sähkön tuotannossa.

Backloading -päättös ei korjaa energia- ja ilmastopoliittisissa ohjausjärjestelmissä ilmenneitä ongelmia.

Toimintaympäristöön tarvitaan selvästi pitkäjänteisempiä ja vaikuttavampia rakenteellisia muutoksia, jotka tukevat kustannustehokkaita investointeja, markkinoiden toimivuutta ja päästökauppajärjestelmän ohjaavuutta.

Päästökaupan rakennetta on kehitettävä niin, että se on 2020 alkavalla kaudella huomattavasti nykyistä ennustettavampi, stabiilimpi ja laajapohjaisempi ohjausmekanismi

Sopu vuoden 2030 päästökatoista olisi löydettävä mahdollisimman nopeasti. Markkinoiden on saatava signaali siitä, että päästökauppa on ja pysyy keskeisenä ohjauskeinona ja että nykyinen päästövähennysvauhti ei vielä vastaa EU:n tavoitetta.

Pertti Salminen
Johtaja
Kansainväliset ja EU-asiat
Energiateollisuus ry



Vähentämisestä haluttiin tehdä kallista

Päästökaupassa on kyse Euroopan kurtistamisesta, ei ilmaston- tai ympäristönsuojelusta, kuvasi ympäristöjohtaja Juha Ylimaunu (15.7.) Outokumpu-konsernista terästeollisuuden tunnelmia Kainuun Sanomissa. Lainsäätäjän näkökulmasta voin yhtyä huoleen. Suomen hallitus on valinnut epäreilun linjan puolustaessaan hinnannostoa EU:n kuumimmassa ilmastokiistassa, ns. backloadingissa, jossa päästöoikeuden hintaa pyritään nostamaan ottamalla päästöoikeuksia pois markkinoilta.

Keskustelu on tärkeää, sillä asia ei ole loppuunkäsittely. Europarlamentissa olen johtanut vastustajien rintamaa. Emme vastustaneet päästöjen vähentämistä, vaan sitä että vähentämisestä haluttiin tehdä kallista. Päättös nostaa EU-kansalaisten sähköhintaa ja heikentää teollisuuden kilpailukykyä. Mitään ilmastohyötyä kallis hinta ei välttämättä takaa.

Päästökauppa voisi periaatteessa olla erinomaisesti toimiva päästövähennysmekanismi, eikä sitä kannata tappaa, mutta nykytilanteessa sillä ei tehdä hyvinvointia sen enempää ilmastolle kuin Euroopallekaan.

EU vastaa 10 prosentista globaaleista päästöistä. Vuonna 2020 osuutemme on noin 8%, vuonna 2030 4%. Mitä teemme, sen tulisi olla sillä tavalla tehokasta, etteivät ponnistelumme valu hukkaan tai käännä meitä vastaan.

Euroopan teollisuus on ollut maailman puhtainta, jos ajatellaan päästöjä tuotantotonna kohden. Ylimaunun ala on siitä hyvä esimerkki. EU:n päästökauppa on tuottanut eurooppalaiselle teollisuudelle kustannuslisän, jota muilla ei ole. Käytännössä tällainen kustannuslisä antaa kilpailuedun saastuttavammal-

le tuotannolle, haluttiin sitä tai ei.

Päästökaupan alkuperäinen idea oli etsiä kustannustehokkain tapa päästöjen vähentämiseen. Sen ei ollut tarkoitus olla erityisesti kallista tai edes halpaakaan vaan etsiä markkinoilta edullisin tapa. Nyt kun hinta on alhainen, yhtäkkiä tämä mekanismi ei kelpaakaan, vaikka päästöt direktiivin mukaisesti vähenevät entiseen tahtiin. Kysymykseni on: teemmekö Euroopalle tai edes maailmalle oikein, jos ajamme yksipuolista ja kallista ilmastopoliittikkaa?

Tulokset eivät ainakaan häikäise: EU on kasvattanut päästöjään, kun myös kulutus otetaan huomioon: vain tuotannon päästöt ovat vähentyneet. En voi arvioida mikä on syy ja mikä seuraus, mutta fakta kuitenkin on, että satoja miljardeja maksaneiden ilmastotoimien aikana Eurooppa on kasvattanut kokonaispäästöjään. Me tuomme entistä enemmän muualta, ja tuonnin päästöt nollaavat tuotannossamme tapahtuneen vähennyksen. Samalla päästöt globaalisti kasvavat niin absoluuttisesti kuin suhteellisestikin.

Euroopassa ei toisin sanoen tehdä ilmastopoliittikkaa vaan paikallista vähähiilisyympoliittikkaa. Samalla se merkitsee eurooppalaisen tuotannon ja työn alasajoa. Meillä on käsissämme oikea ongelma. EU haluaa olla ilmastajohtaja mutta se pettää itseään. Mielestäni se pettää myös kansalaisiaan. Jokaisen, joka puolustaa nykyisiä ilmastotoimia, pitäisi kertoa, miksi valittu strategia pelastaisi ilmastoon.

Eija-Riitta Korhola
europarlamentin ympäristövaliokunnan jäsen
Raaseperi
Mielipidekirjoitus
16.7.2013



Fukushiman onnettomuuden mallintaminen MELCORilla



USA:n tiedeakatemia vieraili Fukushiman Daiichi ykkös- ja kakkosyksiköiden valvomossa marraskuussa 2012. Kuva: TEPCO.

Oikean reaktorionnettomuuden mallintaminen on – onneksi – harvinaista herkkua vakavien onnettomuuksien tutkijoille. Fukushima tarjosi kuitenkin kerralla kolme sydämen sulamiseen johtanutta onnettomuutta, joita voidaan käyttää laskentamallien kehittämiseen.

11. maaliskuuta 2011 kello 14.46 paikallista aikaa Japanin rannikolla tapahtui maanjäristys, joka johti lopulta kolmen reaktorin sydämen sulamiseen Fukushima Daiichin voimalaitoksella. Itse järjitys ei tämänhetkisten tietojen mukaan aiheuttanut paljoakaan vahinkoa voimalaitoksella. Järjitys kuitenkin katkaisi kaikki sähkölinjat, joilla laitos oli yhteydessä Japanin sähköverkkoon.

Ulkoisen sähköverkon menetys ei ole ydinvoimalassa kovinkaan vakava tapahtuma. Myös Fukushimassa oli sen varalta dieselgeneraattorit, jotka käynnistyivät automaattisesti ja tuottivat sähköä reaktoreiden jäähdytysvesipumpuille. Vaikeaksi tilanne kävi vajaata tuntia myöhemmin, kun maanjäristyksen synnyttämä tsunami aiheutti laitoksella tulvan.

Suunnitteluvirheen takia varasähköä tuottavat generaattorit oli sijoitettu kellariin, joten ne jäivät veden alle. Vesi myös tuhosi suuren osan laitoksen sisäisestä sähköverkosta, joten jäähdytyspumpuille ei saatu syötettyä sähköä edes siirrettävillä generaattoreilla. Kaiken lisäksi suurin osa akuilla toimivasta tasavirtajärjestelmästä tuhoutui tsunamissa, ja laitos jäi kokonaan ilman sähköä.

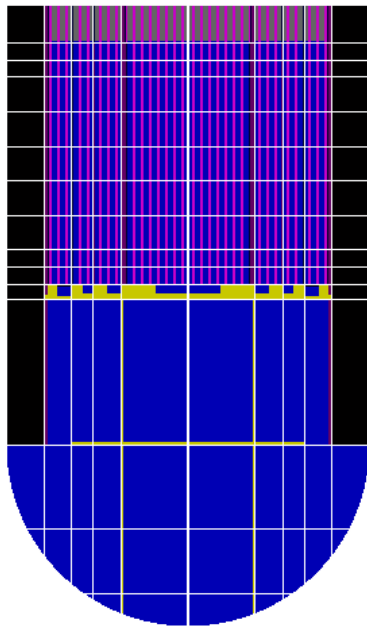
Jäähdytystä ilman sähköä

Fukushimassa oli myös ilman sähköä toimivia jäähdytysjärjestelmiä. Pahaksi onneksi ykkösreaktorin eristyslauhduttimen venttiili sattui olemaan kiinni juuri sillä hetkellä, kun sähköt menetettiin. Ilman sähköä venttiiliä ei saatu avattua uudelleen, ja reaktori menetti kaiken jäähdytyksen. Ykkösreaktori olikin se, jonka

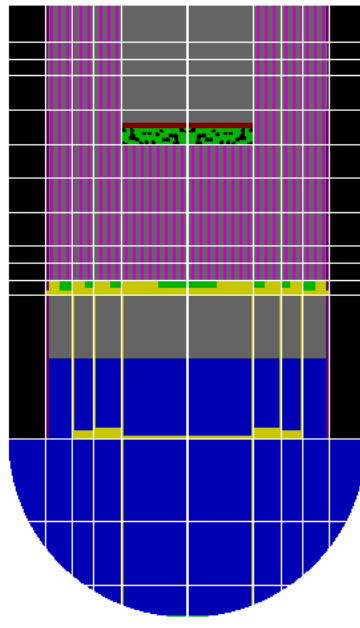
sydän alkoi sulaa ensimmäisenä.

Kakkos- ja kolmosreaktoreilla oli jäähdytysvesipumput, jotka toimivat ilman sähköä. Ne saivat käyttövoimansa pienestä höyryturbiinista, joka toimi reaktorin jälkilämpötehon kiehuttamalla höyryllä. Järjestelmän nimi on RCIC, Reactor Core Isolation Cooling, lempinimeltään *riksi*.

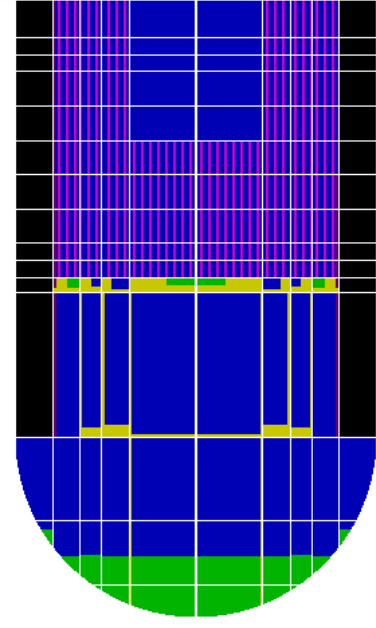
Tämä juttu keskittyy kakkosreaktorin onnettomuuteen. Siinä turbiinikäyttöinen RCIC-pumppu toimi peräti 66 tuntia ja piti reaktorisydämen veden alla. Näin pitkä toiminta-aika oli yllätys, koska akkusähkön menetyksen jälkeen RCIC-järjestelmää ei pystytty ohjaamaan, vaan säätöventtiilit jäivät niihin asentoihin, missä ne sattuivat tsunamin aikana olemaan. Ilman säätömahdollisuutta vedenpinta reaktorissa nousi, ja todennäköisesti RCIC-turbiiniin pääsi



74 h 44 min



79 h 38 min



95 h

MELCORilla laskettu Fukushima kakkosreaktorin sydänvaurio kolmella ajanhetkellä: noin 75 tuntia, noin 80 tuntia ja 95 tuntia maanjäristyksen jälkeen. Punaiset pystyviivat ovat polttoainesauvoja, keltaiset teräsrakenteita, vihreä tarkoittaa sulanutta ja uudelleen jähmettynyttä polttoainetta ja sininen vettä.

höyryn lisäksi vettä. Veden oli kuvitelu hajottavan turbiinin hetkessä, mutta yllättäen se jatkoi toimintaansa lähes kolme vuorokautta.

RCIC-järjestelmän hajottua kakkosreaktorikin jäi kokonaan ilman jäähdytystä, ja muutamaa tuntia myöhemmin reaktorin sydän alkoi paljastua. 11 tuntia RCIC-pumpun pysähtymisen jälkeen voimalaitoksen työntekijät onnistuivat liittämään paloauton reaktorin putkistoihin. Reaktorin paine oli kuitenkin niin korkea, että paloauton pumpun teho riitti vain mitättömän pienen vesimäärän pumppaamiseen. Kului vielä noin 14 tuntia lisää, ennen kuin reaktorin paine oli laskenut tarpeeksi ja paloauto pystyi pumppaamaan riittävästi merivettä reaktoriin. Reaktorin sydän ehti olla paljaana parikymmentä tuntia.

Laskentamallissa vielä suuria epävarmuuksia

MELCOR on Sandia National Laboratoryn kehittämä laskentakoodi. Suomessa se on tärkein työkalu vakavien onnettomuuksien laskentaan. Laskentamallit perustuvat pääasiassa pienoismallikoeksiin, koska vakavia onnettomuuksia tapahtuu niin harvoin. Three Mile Islandin onnettomuutta on voitu käyttää painevesireaktorien mallien kehitykseen, mutta Fukushima oli ensimmäinen vaka-

va onnettomuus kiehumisvesireaktorissa. Meille laitostietojen tekijöille Fukushima tarjoaa ainutlaatuisen tilaisuuden harjoitella vakavan onnettomuuden mallintamista. Näitä oppeja voidaan hyödyntää Olkiluodon, Loviisan ja Hanhikiven onnettomuusskenaarioiden laskennassa.

Tässä jutussa esiteltävä kakkosreaktorin MELCOR-malli perustuu Fukushima laitostietoihin, jotka olivat julkisesti saatavilla toukokuussa 2013. Tärkeimpiä tietolähteitä olivat japanilaisten onnettomuustutkintaryhmien raportit sekä voimayhtiö TEPCOn tiedotteet. Valitettavasti japanilaiset eivät ole julkistaneet läheskään kaikkia laitostietoja. Esimerkiksi reaktorin sisäosien mittoja on heikosti saatavilla, samoin kuin reaktorirakennuksen yksityiskohtia.

Fukushiman puuttuvia laitostietoja on kerätty sisarlaitokselta, Peach Bottom -reaktorista Yhdysvaltain Pennsylvaniasta. Peach Bottom on samantyyppinen kuin Fukushima mutta teholtaan selvästi suurempi. Sen takia laitoksen mittoja piti skaalata Fukushima pienempään mitta-kaavaan, mikä edelleen kasvattaa laskennan epävarmuuksia.

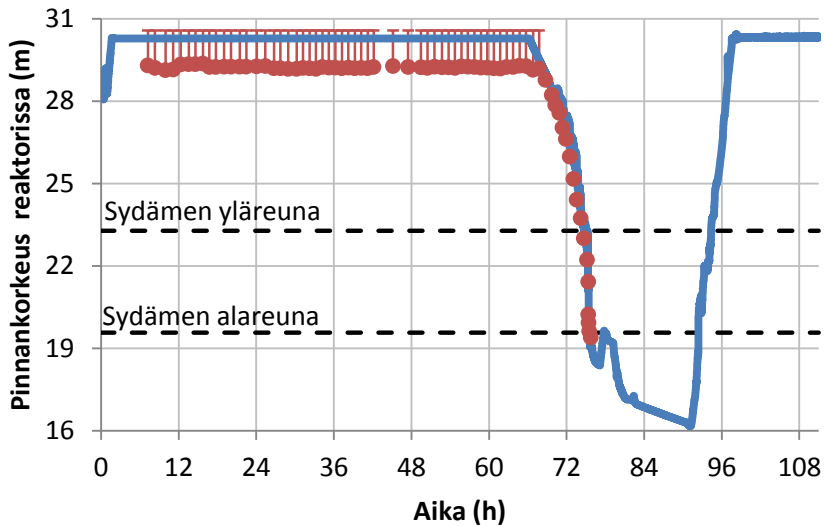
Amerikkalaisten ja japanilaisten tietojen julkisuudessa on valtava ero. Eräs tärkeimmistä tietolähteistä oli Peach Bottom -raportti vuodelta 1978. Se sisältää yksityiskohtaiset piirustukset reaktorin sisäosista mittatietoineen. Amerikkalai-

set ovat skannanneet 35 vuotta vanhan raportin ja laittaneet sen julkisesti saataville nettiin. Toki ero voi johtua osittain kielimuurista – en tiedä, kuinka paljon Fukushima-tietoa on jaossa japanin kielellä.

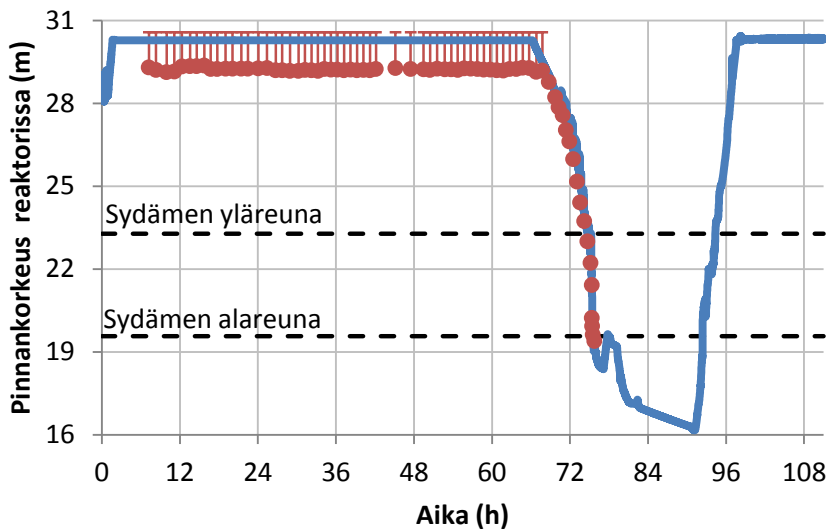
Radioaktiivinen päästö alkoi 78 tuntia maanjäristyksen jälkeen

MELCOR-mallilla laskettua sydänvauriota on havainnollistettu oheisella kolmen kuvan sarjalla. Ensimmäinen kuva on vajaan 75 tuntia maanjäristyksen jälkeen, kun reaktorin sydän on juuri alkanut paljastua. Toinen kuva on viisi tuntia myöhemmin, kun polttoainesauvat alkavat sulaa reaktorin keskellä, missä jälkilämpöteho on suurin. Kolmas kuva on neljä vuorokautta maanjäristyksen jälkeen, kun reaktori on pumpattu täyteen merivettä. Tämän laskun mukaan noin 13 prosenttia polttoaineesta olisi valunut paineastian pohjalle ja jähmettynyt sinne. Kaikki polttoainesauvat ovat kuitenkin käyneet niin kuumina, että niiden suoja-kuoret ovat alkaneet vuotaa ja fissiotuotteita on vapautunut.

Mittausten mukaan suojarakennuksen paine ensimmäisen kolmen vuorokauden aikana nousi selvästi odotettua hitaammin. Tämän voi selittää kahdella tavalla. Joko suojarakennuksessa oli



Vedenpinnan korkeus Fukushiman kakkosreaktorissa. Sininen viiva on laskentatulokset ja punaiset pisteet mittausdataa. Mittausten virherajat osoittavat, että mitattu pinnankorkeus oli mittausyhteen korkeudella ja paine-eroon perustuva mittaus ei pysty mittaamaan tätä korkeampia arvoja.



Suojarakennuksen paine Fukushiman kakkosreaktorissa. Sininen viiva on laskentatulokset ja punaiset pisteet mittausdataa.

suuri vuoto, tai sitten tsunamista tullut vesi tulvi reaktorirakennuksen kellarin ja jäädytti suojarakennuksen toruksen muotoisen märkätilan teräseinää ulkopuolelta. Onnettomuuden aikana laitoksen työntekijät kävivät reaktorirakennuksen kellaritiloissa ja havaitsivat, että sinne valui vettä jostakin. Suuri vuoto on epätodennäköinen, koska myöhemmin paine nousi yli 0,7 megapascaliin, mikä ei olisi mahdollista, jos suojarakennuksessa olisi suuri reikä. Paljon parempi vastaavuus laskenta- ja mittaus tulosten välillä saavutettiin olettamalla lämmön siirtyminen toruksen seinän läpi veteen.

Kakkosyksikkö on ainut, jonka reaktorirakennuksessa ei tapahtunut vetyräjähdystä. MELCOR-mallin mukaan vetypitoisuus reaktorirakennuksessa kävi yli kymmenessä prosentissa, mutta samaan aikaan höyrypitoisuus oli reilusti yli 55 prosenttia, mikä estää vedyn palamisen.

MELCOR-laskuista saadaan myös ra-

dioaktiivisten aineiden päästöt. Tämän laskentamallin mukaan 90 % kakkosreaktorin jalokaasuista ja vajaat 0,1 % cesiumista pääsi ympäristöön. Päästö alkoi 78 tuntia maanjäristyksen jälkeen, ja toinen suuri päästö tuli 90 tunnin kohdalla, kun suojarakennuksen vuoto suureni. Cesium-päästön epävarmuus on tutkimusten tässä vaiheessa hyvin suuri, suurempi kuin tekijä kymmenen. Eli päästö on saattanut olla jopa yli prosentin sydäminventaarista.

Tämä on vasta ensimmäinen versio VTT:n MELCOR-mallista, ja laskennan epävarmuudet ovat suuret. Näyttäisi kuitenkin siltä, että kakkosreaktorissa paineastian pohja olisi ehjä ja sulanut polttoaine olisi pysynyt reaktorin sisällä. Viime vuonna tehdyn MELCOR-mallin perusteella ykkösreaktorin paineastia on todennäköisesti hajonnut ja sulaa polttoainetta on valunut suojarakennuksen lattialle. Näitä tuloksia ei ole pystytty vie-

lä varmentamaan, koska TEPCO ei ole pystynyt uuttamaan kameraan reaktorin sisään. Kolmosreaktoria on tarkoitus mallintaa ensi vuonna, jos siihen saadaan rahoitusta. Fukushiman onnettomuuden analysointi työllistää vakavien onnettomuuksien tutkijoita vielä vuosikausia.



DI Tuomo Sevón
Erikoistutkija
VTT
tuomo.sevon@vtt.fi

FinPSA – riskianalyysiohjelma laitoksen koko elinkaarelle

Kattavan todennäköisyyspohjaisen riskianalyysin suorittaminen ja analyysitulosten hyödyntäminen päätöksenteossa vaatii joustavaa ja luotettavaa työkalutukea. Tähän tarkoitukseen on Suomessa kehitetty jo vuosia FinPSA-ohjelmistoa.

Tämän päivän kehityssuuntana ovat yhä tehokkaammat ja tuotavammat laitoskokonaisuudet. Kehitystrendi heijastuu aina järjestelmistä komponenttitasolle asti ja realisoituu usein yhä automatisoituneempina ja monimutkaisempina teknisinä osakokonaisuuksina. Tällainen kehitys tarkoittaa myös toimintojen ja järjestelmien välisten riippuvuuksien kasvamista, jolloin kattavilla analyysillä on yhä suurempi merkitys turvallisuuden, käytön ja kunnossapidon kannalta.

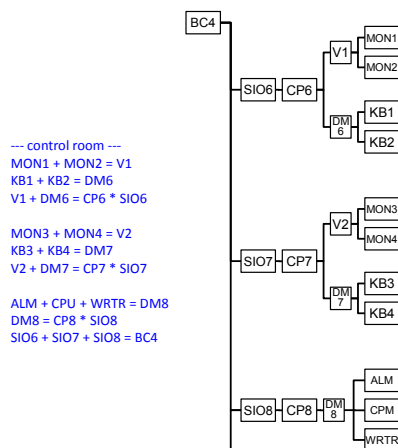
Etenkin turvallisuuskriittisissä järjestelmissä heikkouksien tunnistaminen ja tasapainoisen lopputuloksen aikaansaaminen ovat avaintekijöitä, joiden saavuttamista voidaan tukea todennäköisyyspohjaisella riskianalyysillä (probabilistic risk analysis, PRA).

Menetelmän soveltuvuus ja käyttökelpoisuus ovat johtaneet ydinvoima-alalla myös standardi- ja viranomaisvaatimukseen koskien menetelmän käyttöä sekä analyysitulosten raportointia ja katselointia. Laitosmittakaavan analyysien tekeminen vaatii työkalutukea ja tähän tarkoitukseen on kehitetty FinPSA-ohjelmisto.

Historia ja kehitys

Vuonna 1988 Säteilyturvakeskus (STUK) aloitti omien tarpeidensa pohjalta

Esimerkki automaatiojärjestelmän kuvauskielestä (valvomon kuvaus)



SPSA-tökalun kehittämisen todennäköisyyspohjaiseen riskianalyysiin. Ydinvoimalaitoksia koskeva tason 1 analyysityökalu saatiin kokeilukäyttöön vuonna 1991. Tason 1 PRA:ssa analysoidaan sydänvaurio-onnettomuuteen johtavat tapahtumaketjut.

Vastaava tason 2 ohjelmisto valmistui vuonna 1993. Tason 2 PRA:ssa analysoidaan ulkoisen radioaktiivisen päästön tapahtumaketjut.

Vuosia kestäneiden koekäytön ja kelpoistuksen jälkeen ensimmäinen molemman tason sisältävä SPSA-malli valmistui Teollisuuden Voiman Olkiluodon laitokselle 1997. Saatujen kokemusten pohjalta ohjelmistoa lähdettiin päivittämään vuonna 2000 ja uudistunut ohjelmisto julkaistiin nimellä FinPSA vuonna 2005. FinPSA-ohjelmiston ylläpito ja kehitys ovat nykyään VTT:n vastuulla. Uusia kehittäjiä koulutetaan parhaillaan FinPSA tietämysensiirtoprojektissa osana ydinvoimalaitosten turvallisuustutkimusohjelmaa SAFIR2014. Projektin rahoittajina toimivat Valtion ydinjätehuoltorahasto ja FinPSA:n asiakkaat.

FinPSA

FinPSA on suunniteltu laitosmittakaavan PRA-tökaluksi, jota voidaan hyödyntää useissa elinkaaren eri vaiheissa. Se tarjoaa kattavat ja luotettavat piirteet sekä tukee ryhmätyöskentelyä. FinPSA:ta voidaan käyttää tavallisessa Microsoft Windows -työasemassa ja tietojen siirto sovelluksesta toiseen on vaivatonta leikepöydän kautta. Lähes kaikki tietosisältö, kuten mallin vika- ja tapahtumapuut sekä analyysitulokset, voidaan siirtää eri formaateissa.

Mallintajan työtä helpottavat hasarditaulukot (hazard tables), joilla kuvataan ulkoiset tapahtumat (esim. tulipalo tietyssä huonetilassa) ja niistä aiheutuvien komponenttien vikaantumisien ehdolliset todennäköisyydet. FinPSA:ssa ei ole täten tarvetta muokata alkuperäisiä järjestelmää kuvaavia vikapuita, mutta ehdolliset hasardit näkyvät kuitenkin vikapuissa. Perinteisten symmetristen

yhteisvikamallien lisäksi epäsymmetrisin yhteisvikaantumismallein voidaan mallintaa osittaitakin erilaisuutta (diversiteettiä). Automaatiojärjestelmät kuvataan omina kokonaisuuksinaan tehtäväpohjaisesti. Mallintamista varten on kehitetty kuvauskieli, jolla laajatkin kokonaisuudet esitetään tiivistetysti.

FinPSA:ssa on tehokkaat ja monipuoliset onnettomuusketjujen minimikatkosjoukkoratkaisijat. Laajoja malleja voidaan ratkoa moniydintietokoneilla ja verkossa olevia muitakin vapaita laskentaresursseja voidaan hyödyntää. Resurssi voi liittyä dynaamisesti laskentaan mukaan ja kontrolli resurssin jakamisesta on käyttäjällä. FinPSA havaitsee mallipäivitykset ja ratkaisee mallin vain tarvittavilta osin uudelleen. Tämä pätee jopa keskeytettyihin analyysihin, joiden osatuloja voidaan myös tarkastella, vaikka kokonaisuutta ei olisi vielä loppuun asti ratkaistu.

Tapahtumapuiden onnettomuusketjut tavallisesti ryhmitellään seurausten mukaan ja analyysitulokset voidaan yhdistää ja visualisoida annetun ryhmittelyn perusteella. Tulosten luottavuuden kannalta jäljitettävyyttä alkuperäisiin syihin on tähdellistä. FinPSA tukee minimikatkosjoukon jäljitettävyyttä aina tuloksista alkuperäiseen, jopa dynaamisesti luotuun, vikapuuhun asti. Tasapainoisen järjestelmän aikaan saaminen edellyttää tärkeysmittojen käyttöä. FinPSA:n interaktiivisten karttojen avulla voidaan tarkastella mm. perustapahtuman todennäköisyyksiä, turvamarginaaleja ja Fussell-Vesely-tärkeysmittoja.

FinPSA tarjoaa mahdollisuuden kattavan riskianalyysin suorittamiseen ja analyysitulosten hyödyntämiseen. Ohjelmiston avulla voidaan ylläpitää laitoksen PRA-mallia koko elinkaaren ja hyödyntää analyysin tuloksia laitos- ja operointimuutoksissa.

DI Teemu Mätäsniemi

Tutkija

VTT

teemu.matasniemi@vtt.fi

Megaluokan sosiotekninen projekti väliarvioinnissa

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen haasteiden ja epävarmuuksien tulevaisuushallinta

Ydinjäteyhtiö Posiva jätti käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemuksen vuoden 2012 lopussa. Kolmekymmentä vuotta jatkunut megaluokan tiedeprojekti on saapumassa välietapille.

Hankkeen tulevaisuushorisontti ulottuu pelkän laitoksen käyttäjän takia seuraavaan reiluun sataan vuoteen, mutta radioaktiivisten aineiden puoliintumisaikojen takia pisimmillään kymmeniin ja satoihin tuhansiin vuosiin, jopa miljoonaan vuoteen.

Itse hakemusta tärkeämpi asiakirja tai itse asiassa asiakirjojen kokonaisuus on niin kutsuttu turvallisuusperustelu. Siinä yhtiön on esitettävä ja dokumentoitava ydinenergiain vaatimat perustelut loppusijoituksen turvallisuudesta. Asiasta tarvitaan julkista keskustelua, koska kyse on paitsi merkittävästä yhteiskunnallisesta päätöksestä niin myös moraalaisesta kannanotosta.

Luvituksessa lausuntoja on pyydetty paitsi viranomaisilta myös kansalaisilta sekä esimerkiksi ympäristö- ja elinkeinöjärjestöiltä. Kuulemis aika on parhailaan käynnissä. Se jatkuu vuoden 2013 syyskuuhun saakka. Toistaiseksi julkinen keskustelu asiasta on ollut olematonta.

Rakentamislupa on kolmivaiheisen lupamenettelyn toinen tarkastuspiste. Ensimmäinen oli vuosina 2000–2001 eduskunnan käsittelyssä ollut periaatepäätös. Hyväksyvä päätös merkitsi Posivalle, että valmistelutyö saattoi jatkua aina seuraavaan vaiheeseen asti.

Alunperin Posivan piti toimittaa rakentamislupa työ- ja elinkeinoministeriön vuonna 2010, mutta kauppa- ja teollisuusministeriö tarkisti lokakuussa

2003 aikataulua niin, että selvitysten täytyy olla valmiina vuoden 2012 loppuun mennessä. Samalla annettiin vaatimus esittää väliselvitys hankkeen tilanteesta vuoden 2009 loppuun mennessä.

Valtavan mittaluokan tiede- ja teknologiaprojektin voi katsoa käynnistyneen vuoden 1983 Valtioneuvoston päätöksestä.

Siinä asetettiin ydinjätehuoltovelvollisille vaiheittainen aikataulu, jonka pohjalta edetä ensin sijoituspaikan etsimisessä. Tosin päätöksen ensisijainen tavoite oli pyrkimys kansainvälisiin, keskitettyihin loppusijoitusratkaisuihin.

Ennen varsinaista lupamenettelyä välietappeja on ollut useita. Valtioneuvosto asetti vuoden 1983 päätöksessä välitavoitteet: vuoden 1985 loppuun mennessä selvitys sopivista alueista ja päivitetty tekninen selvitys jätteen sijoittamisesta; vuoden 1992 loppuun mennessä alustavat sijoituspaikkatutkimukset ja täydennetty tekninen suunnitelma; vuoden 2000 loppuun mennessä yksityiskohtaiset sijoituspaikkatutkimukset joiden perusteella valitaan yksi paikka, jolle laaditaan tekninen sijoitussuunnitelma.

Lisäksi Posivan tutkimus-, kehitys- ja suunnittelutyöt ovat olleet viranomais-tarkastelussa. Esimerkiksi *TILA-96* on Posivan tutkimus, joka on jatkoa *TVO-92* –turvallisuusanalyysille. Sitä ennen soveltuvuusselvityksiä ovat olleet sellaiset vuosien 1982 ja 1985 Teollisuuden Voiman raportit kuin *TVO-82* ja *TVO-85*, jotka ovat läpikäyneet viranomaistarkastuksen.

Niiden johtopäätös on ollut, että käytetylle ydinpolttoaineelle suunniteltu loppusijoitusratkaisu toteuttaa säteilyturvallisuusvaatimukset. Posivan vuonna 1999 jättämästä periaatepäätöshakemuksesta STUK on esittänyt alustavan

turvallisuusarvionsa. Sitten Posiva on jatkanut turvallisuusperustelujen tarkastelemista, mikä nyt esitetään kootusti yhtiön jättämässä rakentamislupahakemuksessa.

Loppusijoituslaitokselle määriteltiin alunperin 101 soveltuvaa sijoituspaikkaa osin geologisin kriteerein ja osin ei-geologisin kriteerein, kuten asutus, kuljetus ja maanomistus. Vuonna 1987 sijoituspaikkakandidaattien määrä pudotettiin viiteen ja vuoden 1992 loppuun mennessä mahdollisten sijoituspaikkojen määrä karsittiin kolmeen.

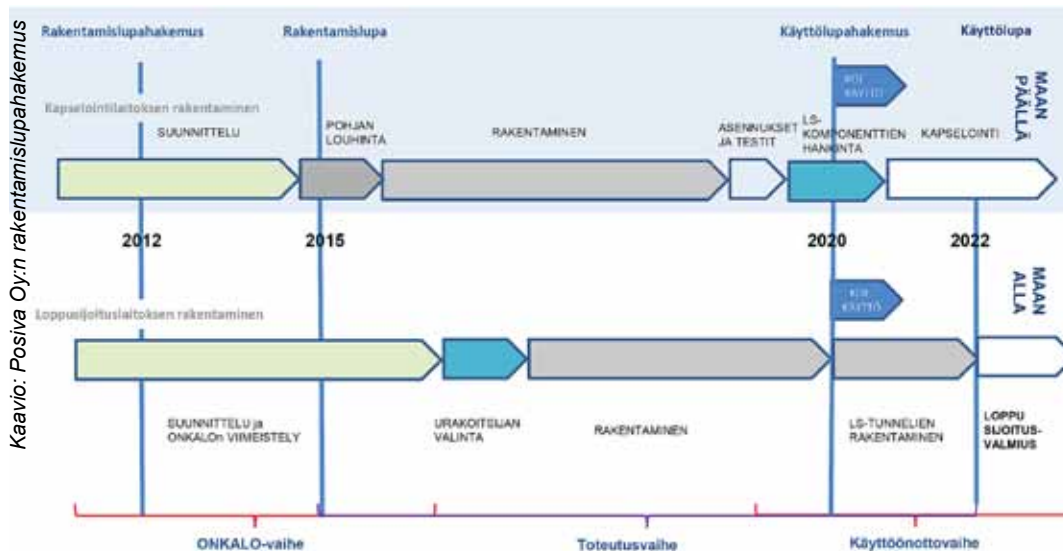
Paikanvalinnassa otettiin huomioon myös yhteiskunnallis-poliittisia tekijöitä, kun ydinvoimapaikkakunnat Eurajoki ja Loviisa valittiin mahdollisiksi sijoituspaikoiksi ohitse alkuperäisen listan.

Vuosina 2013–2018 loppusijoitushanke on Posivan omien sanojen mukaan toteuttamisvaiheessa. Yhtiö toteaa rakentamislupahakemuksessaan, että loppusijoitusvalmiuden saavuttaminen noin vuonna 2020 on mahdollista, jos kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen rakentaminen pääsee alkamaan viimeistään vuoden 2015 alkupuolella.

Lisäksi yhtiö edellyttää paitsi rakentamisluvan saamista vuoden 2014 aikana myös sitä, että päätös voidaan panna täytäntöön mahdollisista valituksista huolimatta. Posivan on määrä jättää loppusijoituslaitoksen käyttöluupahakemus vuonna 2018. Loppusijoituksen olisi tarkoitus alkaa vuonna 2020.

Jos kaksi vuotta alkuperäisestä aikataulusta jäljessä toimitettu hakemus hyväksytään, se antaa Posivalle mahdollisuuden ryhtyä todentotta rakentamaan maanalaista loppusijoitusluolastoa ja maanpäällistä kapselointilaitosta Eurajoen Olkiluotoon. Tosiasiassa Olkiluodon kallioperässä on jo osa luolastoa raken-

Alkuperäinen artikkeli lähdetietoi-
neen on julkaistu Tulevaisuuden-
tutkimuksen seurana Futura-lehden
vuoden 2013 numerossa 2. Lehden
Internet sivut löytyvät osoitteesta:
<http://www.futurasociety.fi/>



nettuna. Maanalaisen kallioperän tutkimustila ONKALOn rakentaminen aloitettiin jo vuonna 2004 periaatepäätöksen nojalla. Posiva saavutti 420 metrin syvyyden huhtikuussa 2011. Tällä tasolla on jo niin sanottuja demonstraatiotunneleita.

Suomalaista tiedehistoriaa

Tietehistoriassa Posivan projektin kaltaiset tutkimushankkeet kulkevat nimellä megatiede, Big Science. Termillä tarkoitetaan toisen maailmansodan aikoihin tapahtunutta muutosta tieteessä. Tieteellisten projektien mittakaavat alkoivat kasvaa.

Megatieteen tunnusmerkkejä ovatkin suuret budjetit, suuret henkilöstömäärät, suuret koneet ja suuret laboratoriot. Tulee kuitenkin huomata, että Posiva tähtää jo toimintapolitiikkansa mukaisesti kustannustehokkaaseen loppusijoittamiseen.

Termi Big Science kätkeekin alleen syvempiä merkityksiä. Megaprojekteista ei pidä katsoa pelkästään isoja instrumentteja ja kalliita laitteita, vaan niiden viestimiä perustavanlaatuisia muutoksia.

Näihin monimutkaisiin sosio-tekniisiin hankekokonaisuuksiin perehtyminen paljastaa, että ne 1) integroivat muuta yhteiskuntaa itseensä, ohitse kapea-alaisesti määritellyn tieteellisteknologisen projektin, 2) tuottavat uusia institutionaalisia, poliittisia ja organisaattorisia muotoja, 3) keskittävät tutkimuskeskusten resursseja tiettyyn tehtävään, johtavat erikoistumisiin ja vaativat monimutkaisia hallintajärjestelmiä, 4) edellyttävät vahvaa sosiaalista ja poliittista oikeutusta ollakseen olemassa ja siten tarvitsevat myös ideologista työnteokoa muun yhteiskunnan suuntaan, 5) ovat itsessään vaikuttavia sosiaalishistoriallisia monumentteja, jotka puolestaan voivat muuttaa paikallisesti tai globaalisti kehi-

tyksen suuntaa.

Yksi ajankohtainen esimerkki tällaisesta megatieteestä on Sveitsin ja Ranskan rajalla sijaitseva maailman suurin hiukkaskiihdytin ja hadronien törmäytin (Large Hadron Collider, LHC).

CERNin hallinnoima laite käynnistettiin ensimmäisen kerran 10.9.2008, mutta sen suunnittelu oli käynnistynyt jo 1980-luvun alussa. Forbes-lehti kirjoitti äskettäin, että Higgsin hiukkasen löytämisen kustannuksiksi tuli noin 13 miljardia dollaria.

ITER-hankkeen tavoitteena on puolestaan rakentaa maailman suurin fuusioreaktori ja osoittaa, että fuusioenergian tuotanto on mahdollista. Ranskan Cadaracheen sijoittuvan projektin rakennuskustannuksiksi arvioidaan 10-13 miljardia euroa. Vuonna 2008 alkanut hanke tulee kestävänsä 30 vuotta, mistä rakennusvaihe kestää 10 vuotta ja käyttöaika on 20 vuotta.

Vastaavia miljardiluokan megatiedeprojekteja ovat myös Manhattan-projekti, ihmisen geneettisen perimän kartoitus ja Mars-tutkimus. Manhattan-projekti oli tieteellinen kilpajuoksu, jonka päätteeksi Yhdysvalloilla oli käytössä ensimmäinen ydinpommi. Yhdysvaltain atomienergiakomission vuosien 1939–1945 historiaa käsittelevässä kirjassa esitetään, että vuoden 1996 dollareissa Manhattan-projektin kustannukset olisivat olleet 21 miljardia. Vastaavasti vuonna 1990 aloitettu ihmisen geneettistä perimää kartoittavan hankkeen kustannukset liikkuvat 3,8 miljardin dollarin paikkeilla. NASAn Mars-tiedelaboratorion kustannuksista tiedetään, että Curiosity-mönkijän saaminen Marsiin on maksanut noin 2,5 miljardia dollaria. Lukuun ei ole laskettu niitä 1960-luvulla alkaneita mittavia tieteellisteknisiä pyrintöjä, jotka ovat edeltäneet tätä onnistunutta Mars-hanketta.

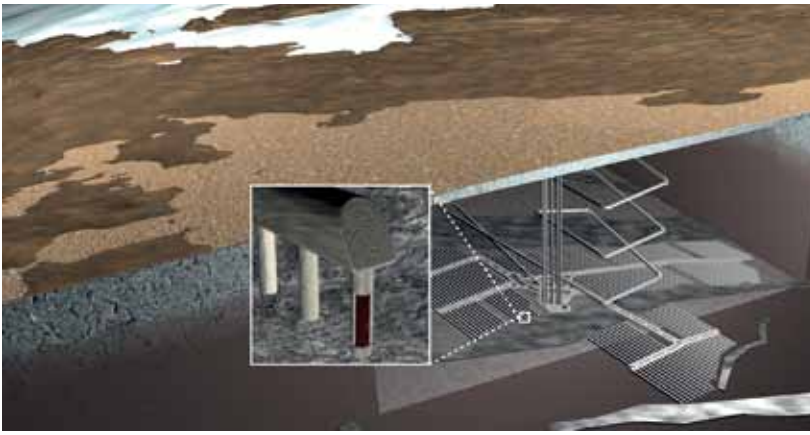
Posivan johtama käytetyn ydinpoltoaineen loppusijoitusprojekti täyttää megatieteen tunnusmerkit. Kustannuksiksi yhtiö ilmoittaa noin 3,3 miljardia euroa. Sillä on tällä hetkellä noin 90 työntekijää ja mittava ONKALO-laboratorio. Joidenkin mielestä hanke on vuosisatojen ympäristönsuojeluhanke ja toisten mielestä ydinvoiman lisärakentamisen tulva-portit avannut faustinen sopimus.

Mittava hallinnollinen valvontaoperaatio

Tämän tiede- ja teknologiaprojektin toiminta edellyttää myös julkista valvontaa. Yleisvalvonta kuuluu työ- ja elinkeinoministeriölle, mutta turvallisuuden valvonta puolestaan Säteilyturvakeskukselle (STUK), joka on sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön alainen asiantuntija- ja tutkimuslaitos. Ministeriö päättää periaatteet ja luo aikataulut, joita voimayhtiöiden on noudatettava. STUK valvoo ydinjätteen käsittelyn, varastoinnin ja loppusijoituksen turvallisuutta. STUK:ssa on henkilöresursseja projektin valvontaan. Ydinjätteiden ja ydinmateriaalien valvonnan osastolla työskentelee 31 henkilöä, joista 17 on keskittynyt ydinjätehuoltoon.

STUK onkin valmistautunut rakentamisluvan turvallisuusperustelujen arviointiin jo vuodesta 2000 lähtien. STUK on esimerkiksi arvioinut Posivan käytetyn ydinpoltoaineen loppusijoituksen tutkimus-, kehitys- ja suunnittelutyötä koskevia TKS-ohjelmia. Näitä yksiin kansiin koottuja ohjelmia on 2000-luvulla julkaistu kaikkiaan neljä: TKS-2003, TKS-2006, TKS-2009 ja YJH-2012 (ydinjätehuollon ohjelma).

Oli Posivan varsinaisesta tavoitteesta mitä mieltä tahansa, niin tiede- ja teknologiaprojekti on mittava. Esimerkiksi TKS-2009-ohjelma on yli 500-sivuinen dokumentti. Siinä kuvataan loppusi-



Havainnekuva loppusijoitustiloista tilanne 100 000 vuoden kuluttua.
Kuva: Posiva Oy.

joituslaitoksen rakentamislupahakemukseen tähtäävää tks-työtä. STUK:n TKS-2009 lausunnosta voisi nostaa esiin useita kiinnostavia huomioita, mutta yksi merkittävä koskee analyysin laajentamista koskemaan koko loppusijoitusjärjestelmää yksittäisten kapselien analyysin sijaan:

”STUK nostaa esiin Posivan alustavasta hakemusaineistosta tehdyssä lausunnossaan seuraavat keskeiset pitkäaikais-
turvallisuuden perustelemiseen liittyvät puutteet tai kehitystarpeet:

- Toteutettu turvallisuusanalyysi ei kata koko loppusijoitusjärjestelmää, vaan perustuu suurelta osin yhden kapselin analysointiin [...]

- Kokoava, perusteellinen ja kattava epävarmuuksien analysointi ja raportointi puuttuu vielä toistaiseksi. (Hämäläinen 2010, 14–15)

Kiinnostavaa on myös STUK:n aika-
taulua koskeva huomio. Tiukka aikataulu merkitsee STUK:n mukaan, että osa pitkäaikaisista tutkimuksista tulee jatku-
maan vuoden 2012 jälkeen. Näistä tutkimuksista tuli alustavia tuloksia ennen rakentamislupahakemusta, mutta lopulliset tulokset saadaan vasta vuoden 2012 jälkeen. STUK:n näkemyksen mukaan rakentamislupahakemusta on täydennettävä myöhemmin saatavilla tutkimustuloksilla, jos näillä nähdään olevan merkitystä turvallisuuden osoittamiselle.

Hankkeen tieteellisen mittakaavan hahmottamiseksi voi ottaa esiin myös Suomen ydinjätehuoltoa käsittelevän yhteiskuntatieteellisen kirjallisuuden määrän. Vuosien 1990 ja 2010 välisenä aikana on julkaistu lähes 120 tieteellistä artikkelia, raporttia tai kirjaa aiheesta. Tämä tutkimus on vähäistä luonnontieteellis-teknisen kirjallisuuden rinnalla, mutta havainnollistaa hankkeen virittämää tieteellistä tutkimusta.

Osa näistä yhteiskuntatieteilijöiden tutkimuksista on kirjoitettu julkishallin-

non ydinjätehuollon tutkimusohjelmissa, osa on Posivan tilaamia ja pieni osa on vapaata akateemista tutkimusta. Kansalliset ydinjätehuollon tutkimusohjelmat perustuvat ydinenergialakiin ja rahoitus Valtion ydinjäterahastoon, jonka pääomaa kartuttavat Fortumin ja TVO:n eli ydinjätehuoltovelvollisten vuosimaksut.

Loppusijoitus kansalaisten valvonnan kohteena

Loppusijoitusprojektin sujuva eteneminen on ollut laajan kansainvälisen kiinnostuksen kohteena. Kuinka hankkeen edistyminen on ollut mahdollista Suomessa ja Ruotsissa, kun muissa maissa vastaavat hankkeet ovat kohdanneet niin merkittävää vastarintaa?

Asiaan vaikuttavia osatekijöitä on monia. Hankkeeseen myönteisesti suhtautuvat korostavat etenkin hankkeen korkeaa tieteellistä ja teknologista tasoa sekä erinomaista viranomaisvalvontaa. Hankkeeseen epäillen suhtautuvat puolestaan tuovat mieluummin esiin hankkeen taustalla vaikuttavia taloudellisia intressejä, kuten metsäteollisuuden, valtion, elinkeinoelämän ja ammattiyhdistyskentän vahvaa sitoutumista ydinsähköllä ylläpidettävään kilpailukykyyn.

Yksi keskeisimmistä sosioteknisistä haasteista on kansalaisten hyväksyntä. Vuonna 2008 julkaistu *Eurobarometrira-portti 297* keskittyi eurooppalaisiin ydinjäteasenteisiin. Tulokset puhuvat selkeää kieltä siitä, ettei kansalaisten mielestä ole olemassa turvallista tapaa päästä eroon ydinjätteistä. Kymmenestä vastaajasta seitsemän on tätä mieltä (72%).

Vuoden 2005 eurobarometrissä vastaava luku oli korkeampi, 78 prosenttia. Posivan ja ruotsalaisen ydinjäteyhtiö SKB:n edistämä jätehuoltoratkaisu, käytetyn ydinpolttoaineen maanalainen loppusijoitus, saa Euroopan Unionin kansalaisilta ristiriitaisen vastaanoton.

Ratkaisun hyväksyy 43 prosenttia Euroopan Unionin kansalaisista, kun taas kolmannes (36%) vastustaa tätä ratkaisumallia ja viidennes (21%) ei kyennyt ottamaan kantaa puoleen tai toiseen.

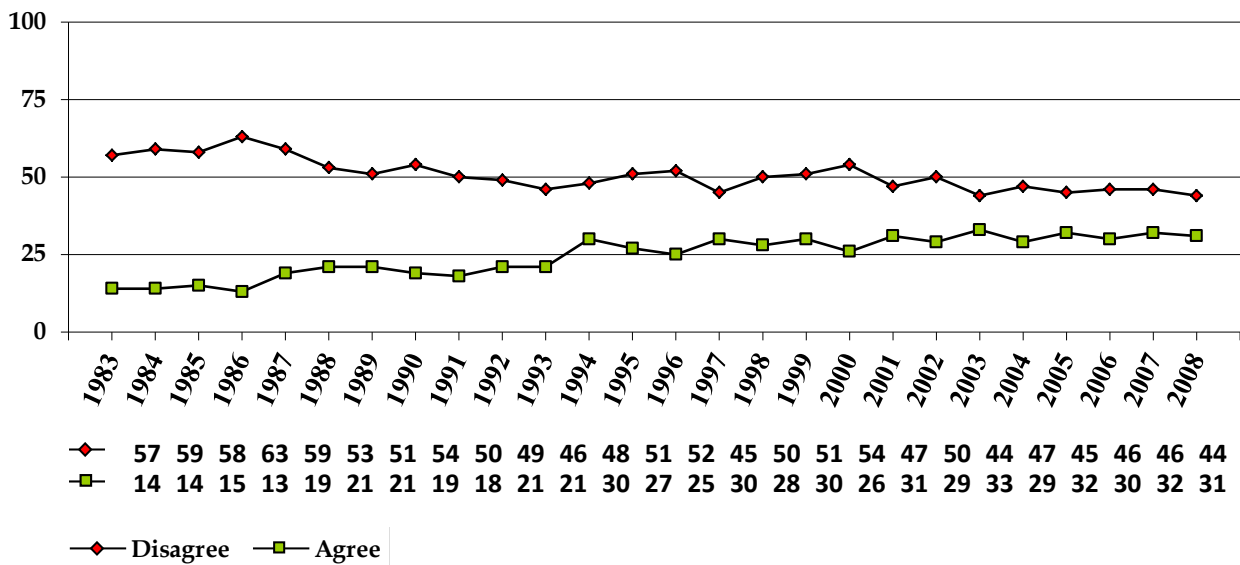
Vuonna 2010 julkaistussa raportissamme esitettiin oheinen kuvio, joka perustuu suomalaisten energia-asenteiden pitkäaikaiseen seurantaan. Ylempi aikasarja kertoo, että 1980-luvun alussa epäluottamus loppusijoitusmalliin oli hyvin suurta. Vuosina 1983-1988 noin 60 prosenttia vastaajista oli eri mieltä väittämästä, että loppusijoitus Suomen kallioperään on turvallista. 1980-luvun lopulta vuoteen 2008 eri mieltä olevien osuus on vaihdellut 63 prosentista 44 prosenttiin. Kriittisesti väittämään suhtautuvien määrä on vaihtelusta huolimatta kehityssuunta ollut hivenen laskeva. Myönteisesti väittämään suhtautuvien määrä on puolestaan ollut hitaasti kasvava. 1980-luvun alussa kallioperäsijoituksen turvallisuuteen luotti vain noin viisi-toista prosenttia suomalaisista. Tultaessa 2000-luvulle luottamus on vakiintunut noin 30 prosentin paikkeille.

Vastaavasti Posiva toteaa rakentamislupahakemusta varten päivitetystä YVA-raportissaan, että vuonna 2011 tehdyssä tutkimuksessa vajaa kolmannes (29%) katsoo ydinjätteiden loppusijoituksen Suomeen turvalliseksi ja että epäileviä on enemmän, runsas puolet (53 %) väestöstä. Sen sijaan Eurajoella hanke jatkaa mielipiteitä siten, että noin 40 prosenttia suhtautuu hankkeeseen myönteisesti, kun taas noin 45 prosenttia asukkaista suhtautuu hankkeeseen kielteisesti.

Loppusijoituksen sosiotekniset haasteet

Jyväskylän ja Tampereen yliopistojen uusimmassa tutkimushankkeessa tarkastellaan loppusijoituksen sosioteknisiä haasteita. Keväällä 2012 julkaisimme maaraportin aiheesta. Tutkimuksemme on osa Euroopan komission seitsemättä puiteohjelmaa. Kolmentoista partnerin muodostaman tutkimusprojektin *International Socio-Technical Challenges for Implementing Geological Disposal* (InSOTEC; kts.www.insotec.eu) tavoitteena on kartoittaa ydinjätteiden geologisen loppusijoituksen nykyisiä ja tulevia sosioteknisiä haasteita. Lisäksi projektimme on osa kansallista KYT2014-tutkimusohjelmaa, jonka tavoitteena on vahvistaa viranomaisten ydinteknistä asiantuntemusta ydinjätehuollon erilaisten toteutustapojen ja menetelmien vertailuun.

InSOTEC -tutkimusryhmää on yhdistänyt teoreettinen ajatus siitä, että lop-



Suomalaisten suhtautuminen väittämään, että loppusijoitus kallioperään on turvallista (%). Aikasarja perustuu kansallisiin energia-asennetutkimusaineistoihin, joita säilytetään Yhteiskuntatieteellisessä Tietoarkistossa.

pusijoituksen tekniset kysymykset eivät ole erillisiä sosiaalisista, poliittisista ja taloudellisista asioista. Tätä on pyritty havainnollistamaan termillä sosiotekninen, jolla halutaan yhdistää tekniset ja sosiaaliset kysymykset siten, että nähtäisiin ylitse perinteisen jaottelun ja hahmotettaisiin mahdollisia uusia, poikkitieteellisiä haasteita.

Erityisesti kiinnostavia ovat tilanteet ja aiheet, joissa teknisen ja sosiaalisen suhde on epävakaa, epäselvä ja ristiriitainen. InSOTEC-tutkimusryhmä on myös kiinnostunut ongelman määrittelyyn ja suositeltaviin ratkaisuihin johtavista neuvotteluista, jotka voivat vaihdella vähäisistä kiistelyistä lievään epäjärjestykseen ja avoimiin konflikteihin. Sosiotekniset kysymykset konkretisoituvat myös esimerkiksi turvallisuusasioissa.

Kaikkien loppusijoitusmallia on kehitetty ja se kehittyy jatkuvasti. Siihen ei vaikuta ainoastaan tieteellisen tiedon kehitys, vaan myös se, kuinka teknologia nivelletään yhteiskunnan osaksi. Tämä integrointi yhteiskunnan osaksi näkyy muun muassa kansallisissa ydinenergiassa ja -jätteitä koskevilla laeissa. Loppusijoitusmalli on sosiotekninen, mikä on näkynyt esimerkiksi edeltävien vuosikymmenten yhteiskunnallisissa neuvotteluissa ja arvokeskusteluissa.

Loppusijoitusprojektin epävarmuustekijät

Yhteenkietoutuneiden sosioteknisten kysymysten tarkastelulla on tuotettu tietoa Suomen loppusijoitusprojektin erilaisista epävarmuustekijöistä. Maaraportissa osoitamme, kuinka loppusijoituslaitoksen laajentamisesta keskusteltaessa nähtiin neljä laajempaa sosioteknistä haas-

tetta: 1) esteiden kestävyys, 2) laitoksen laajentaminen, 3) pitkäaikaisturvallisuus, 4) kuntien tietotarpeet. Nämä tutkimustulokset perustuivat loppusijoituslaitoksen laajennuksesta annettujen 21 lausunnon analysointiin. Suuresta määrästä lausuntoja valittiin juuri nämä 21, koska niissä eriteltiin kiinnostavia sosioteknisiä haasteita.

Ensimmäinen haaste esteiden kestävydestä tarkoittaa kuparikapseleiden teknisen kestävyden tieteellistä ja tietoteoreettista epävarmuutta. Esimerkiksi kuparin korroosiosta hapettomassa ja puhtaassa vedessä on käyty tieteellisiä keskusteluja jo 1970-luvun lopulta lähtien, mutta nyt ne ovat tulleet laajempaan julkiseen keskusteluun. Voidaanko esimerkiksi luottaa siihen, että nykytestien avulla ennustetaan kuparin kestävyys kymmeniksi tuhansiksi vuosiksi. Myös kuparin ominaisuuksista ja teknisestä varmuudesta esitetään näkemyksiä tutkituissa lausunnoissa. Samoin suunniteltujen uusien ydinvoimaloiden uudentyyppisen polttoaineen vaikutuksista tekniseen kestävyteen ilmaistiin epävarmuutta.

Toinen haaste liittyy loppusijoituslaitoksen laajentamiseen. Sen nähdään edellyttävän lisää tutkimusta ja suunnittelua. Lisäksi keskustelu laajentamisen haasteista osoittaa, yhtäältä kuinka poliittinen päätös ydinvoiman lisärakentamisesta vaikuttaa suoraan teknologiseen projektiin. Toisaalta vuosien 2002 ja 2010 poliittiset päätökset uusista voimalaitosyksiköistä/reaktoreista mahdollistivat pitkälti sen vuoksi, että ydinjäteongelma koettiin ratkaistun vuoden 2000 valtioneuvoston periaatepäätöksellä, jonka eduskunta jätti voimaan vuonna 2001.

Kolmas haaste liittyy pitkäaikaistur-

vallisuuteen. Epävarmuudet ja puuttuva tieto mainittiin asioina, joissa tarvitaan seurantaa. Epävarmuuksia nähtiin muun muassa suunnitelluissa vapautumiseissa ja kallioperän ominaisuuksissa.

Viestinnälliset haasteet olivat neljäs ryhmä sosioteknisiä haasteita. Ongelmaksi koettiin, kuinka pitää kunnat informoituina teknisistä ja sosiaalisista kysymyksistä. Ydinvoimateollisuuden, tutkijoiden ja viranomaisten todellinen viestinnällinen haaste on kehittää ja ylläpitää kansalaisten tietämystä hankkeesta sekä organisoida kuntalaisten osallistumista, mutta myös antaa kuntalaisten näkemysten vaikuttaa tekniseen suunnitteluun, kehitystyöhön ja tekniseen toteutukseen. Tätä jälkimmäistä ajatusta monet kavahtavat, koska maallikoiden näkemysten huomioiminen esimerkiksi suunnittelussa merkitsee lisää neuvonpitoa, arviointia ja suunnittelua.

Kuitenkin kansalaiskeskustelua myös teknisestä suunnittelusta tarvitaan. Parhaimmillaan ”joukkoäly” on tuottanut merkittäviä uusia näkemyksiä ja parannuksia tekniseen suunnitteluun. Väheksy ei voi myöskään demokraattisen keskustelun arvoa.

Pelko sosioteknisen hallintajärjestelmän epävakauudesta

Maaraporttiamme varten haastatellut ydinjätehuollon asiantuntijat painottivat hieman toisenlaisia sosioteknisiä haasteita kuin kirjallisen lausunnot jättäneet toimijat. Osa asiantuntijoista toi esiin haasteet ongelmina, jotka tul- laan ratkaisemaan. He painottivat, että epävarmuuksia on, mutta ne kuuluvat hankkeen kehittämiseen ja että ne ovat jatkuvan tutkimuksen kohteena. Osa

haastatelluista oli tosin enemmän huolis-
saan epävarmuuksista kuin toiset.

Sosioteknisinä haasteina tuotiin esiin
1) pohjaveden virtaukset, 2) jääkauden
jälkeiset sulamisvedet, 3) tuotetun in-
formaation luotettavuus siinä mielessä,
että oikeita malleja ja testejä oli käytetty,
4) uusien ydinvoimaloiden polttoaine,
5) vähäiset, vaikkakin tärkeät, ilmasto-
muutokseen liittyvät ympäristöriskit, 6)
ihmisen tunkeutuminen loppusijoitus-
laitokseen, 7) käytetyn ydinpolttoaineen
väliaikaisvarastoinnin riskit suhteessa
geologiseen loppusijoitukseen tuotiin
esiin viitaten Fukushima ydinvoimala-
onnettomuuteen, 8) erityisen tärkeänä
asiana useat haastateltavat näkivät en-
ergiapolitiikan poliittisen konsensuksen ja
vakauden. Vakaus nähtiin merkittävänä
tekijänä, jotta loppusijoitus voitaisiin
ratkaista kansallisesti ja kansainvälisesti.
Suomen ydinjätehuollon sosiotekninen
haaste on siten asiantuntijoiden näke-
myksen mukaan myös jätehuoltoon liit-
tyvien poliittisten tekijöiden ennustetta-
vuus.

Toisaalta tutkiessamme, kuinka ydin-
voimateollisuuden asiantuntijat kirjoit-
tavat ydinjätehuollon sosioteknisistä
haasteista ATS Ydintekniikka -lehdes-
sään havaitsimme puolestaan, että tässä
ryhmässä haasteina keskusteltiin: 1) itse
sosioteknisestä hallintajärjestelmästä, 2)
sosiaalisesta hyväksyttävyydestä, 3) tie-
don tuottamisen ja ylläpitämisen haas-
teista, 4) turvallisuudesta, 5) rakentamis-
haasteista ja 6) tulevaisuuden mukaan
tuomien asioiden edellyttämästä jousta-
vuudesta.

Epävarmuuden hallinta ja sietäminen

Yksi asiantuntijahaastatteluissa esiin
noussut havainto on epävarmuuden sie-
ttäminen. Epävarmuuksia tulee olemaan
jatkoksin, mutta malleja sopeutua
niihin ja käsitellä niitä kehitetään. Tut-
kimustuloksista hahmottuu myös se,
kuinka tarpeellista on refleksiivisyys. On
tärkeä olla varautunut suunnittelema-
ttiin asioihin tai siihen, että suunnitel-
mia pitää kenties muuttaa mahdollisten
haasteiden pohjalta – jopa sellaisiin yhe-
teiskunnallisiin kehityskuluihin, jotka
saattaisivat vaarantaa koko projektin
toteutuksen. Sosioteknisenä haasteena
nähtiin myös tutkimuksen jatkuva kan-
sallinen ja kansainvälinen päivittäminen
sekä se, kuinka säilyttää tietoa satoja tai
tuhansia vuosia ja siirtää tietoa-taitoa tu-
leville sukupolville.

Pitkäkestoinen ja ison mittakaavan
tieteellistekninen projekti sisältää eri vai-

heissaan monenlaista yhteiskunnallisten
ja teknisten asioiden vuorovaikutusta.
Yksi ajankohtainen esimerkki tästä on
Fennovoiman ydinvoimalan käytetty
ydinpolttoaine. Fennovoiman tavoitte-
ena on ollut yhteistyö Posivan kanssa.

Mikäli Fennovoima ei pääse mukaan
Posivan projektiin, yhtiöllä on edes-
sään ydinjätteiden loppusijoituspaikan
etsintä. Tätä esimerkkitapausta ei mai-
nittu asiantuntijahaastatteluissa, vaan
haastateltavat painottivat kansallisen
energiapolitiikan vakautta. Oletettavasti
tämä kertonee tarpeesta säilyttää ydin-
jätehuoltojärjestelmän vakaus. Toisaalta
tutkija **Markku Lehtonen** on eritellyt
sitä, kuinka toisissa maissa tärkeät lop-
pusijoitukseen liittyvät kysymykset eivät
toisissa maissa nostakaan laajaa yhteis-
kunnallista keskustelua. Tutkiessaan
niin kutsuttua palautettavuus-keskustelu
Suomessa, Ranskassa ja Iso-Britanniasa
Lehtonen havaitsi, miten suppean teknis-
taloudellisenä asiana palautettavuudesta
keskusteltiin Suomessa toisin kuin esi-
merkiksi Ranskassa.

Eri vaiheissa ilmenee erilaisia haas-
teita. Osasta niistä käynnistyy julkista
keskustelua, jotka puolestaan voivat
vaikuttaa suunnitelmiin, tutkimuksiin
ja tekniseen toteutukseen. Haasteet
ovat myös yhteydessä ydinjätehuollon
ohjelman edistymiseen. Tarkentuvat
tutkimustulokset saattavat paljastaa uu-
sia ratkaisuja vaativia ongelmia, joihin
asiantuntijapiiriin ulkopuolinen yhteis-
kunta joutuu ottamaan kantaa. Kehi-
tystyön ja teknisen toteutuksen edisty-
minen puolestaan saattaa nostaa esiin
ennakoimattomia ongelmia, joiden välit-
tymistä julkiseen keskusteluun on vaikea
ennakoida. Samoin kuin sitä miten ne
vaikuttavat poliittiseen päätöksentekoon.

Inhimillinen sosiotekninen yhteensulautuma

Megaluokan tiede- ja teknologiaprojekti
etenee, ja päätöksenteko rakentamis-
luvasta lähestyy. Rakentamisluvassa ja
sen turvallisuusperusteluissa solmitaan
yhteen monia teknisiä ja poliittisia kysy-
myksiä. Onko valitun loppusijoitusmal-
lin turvallisuus hyväksyttävällä tasolla?
Onko tutkimustyötä tehty huolella? Voi-
ko tutkimuksessa käytettyihin teoreetti-
siin oletuksiin ja malleihin sekä tieteel-
lisiin testeihin luottaa? Onko hankkeen
valvonta ollut riittävää? Onko teknisen
hankkeen eettiset seuraukset ratkaistu
oikealla tavalla?

Megaluokan teknologiaprojektin kat-
sominen sosioteknisestä näkökulmasta
osoittaa, kuinka teknologia on mahdol-

listunut sitomalla inhimillisiä resursseja
vuosikymmenten ajaksi määrätietoiseen
työskentelyyn. Periaatteessa alkuvai-
heessa on ollut vain uskomus siitä, että
toiminta kohti päämäärää on järkevää ja
että lupaus turvallisuudesta voidaan saa-
vuttaa.

Hankkeen suunnitteluvaiheen muut-
tuminen toteutusvaiheeksi tarkoittaa
myös sitä, että pioneerisukupolvi siir-
tyy vähitellen sivuun. Jos rakentamislupa
myönnetään vuoden 2015 tienoilla,
hankkeen käynnistäneet sukupolvet nä-
kevät visioidensa materialisoituvan. He
ovat kohdanneet oman aikansa sosio-
teknisiä haasteita, joita varmasti myös
tulevat sukupolvet kohtaavat rakenta-
essaan laitosta vuoteen 2020 mennessä,
yrittäessään saada käyttöluvan ainutlaa-
tuiselle tieteellis-teknologiselle laitoksel-
le ja käyttäessään laitosta reilun sadan
vuoden ajan.

Loppusijoitushankkeen nimeäminen
sosiotekniseksi hankkeeksi perustuu
ajatukseen, että tämä teknologinen ke-
hityshanke edellyttää paljon inhimillisiä
resursseja, sosiaalista vuorovaikutusta,
poliittisia päätöksiä, kansalaiskeskustelua
ja juridis-hallinnollista säätelyä. Yhteen-
sulautuma on omanlaisensa juridiikan,
talouden, politiikan, kulttuurin, tieteen
ja teknologian inhimillinen aikaansaam-
nos. Hyväksyttävyyden saavuttamiseksi
ja ylläpitämiseksi yhteensulautuman au-
kikeriminen on kuitenkin ensiarvoisen
tärkeää.

YTT Tapio Litmanen
Akatemiatutkija

Yhteiskuntatieteiden ja
filosofian laitos

Jyväskylän yliopisto
tapio.litmanen@jyu.fi



YTL Matti Kojo
tutkija

Johtamiskorkeakoulu
Tampereen yliopisto
matti.kojo@uta.fi



YTM Anna Nurmi
Jyväskylän yliopisto





Loppusijoitustilojen tulppausyhteistyötä eurooppalaisittain

Posiva on aktiivinen eurooppalaisessa loppusijoitusyhteistyössä sekä EURATOMin puiteohjelman tutkimushankkeissa.

Posiva koordinoi paraikaa loppusijoitustilojen sulkemiseen liittyvää tutkimushanketta DOPAS -projektia, jonka puitteissa testataan tulppia ja sulkurakenteita täydessä mittakaavassa maanalla. Posiva testaa loppusijoitustunnelin tulpan toteutusta ONKALOSSa todellisissa loppusijoitusolosuhteissa ja tämä edelläkävijänä tehty koejärjestely tuottaa ainutlaatuisia kokemuksia ja toimintamalleja myös muille eurooppalaisille ydinjätteistä huolehtiville organisaatioille.

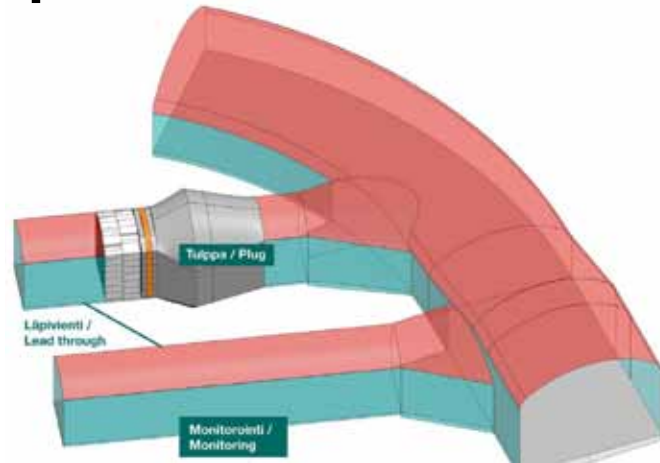
Posiva on tähän mennessä osallistunut suoraan tai suomalaisten kumppaniorganisaatioiden kanssa yhteensä 13 seitsemännen puiteohjelman projektiin, joiden kokonaiskustannusarvio on lähes 67 M€.

Posivan aktiivinen rooli hankkeissa ja geologisen loppusijoituksen teknologia-yhteistyössä IGD-TP:ssä on luonut edellytyksiä myös uusien alan toimijoiden osallistumiselle kansainväliseen ydinjätetuollon T&K yhteistyöhön.

Käynnissä olevista projekteista, joihin Posiva osallistuu ja koordinoi, on laajuudeltaan suurin ja rahallisesti merkittävin «Full-scale Demonstration of Plugging and Sealing» eli DOPAS-projekti. Projektin puitteissa toteutetaan mm. loppusijoitustunnelin tulpan täyden mittakaavan testi (POPLU-koe) Posivan ONKALOSSa Olkiluodossa.

DOPAS -projektissa kehitetään ja testataan

DOPAS -projektin kokonaiskustannusarvio on 15,4 M€, josta Euroopan komission tuki on 8,7 M€. Posivan tehtäväkokoisuuden osuus projektissa on 2,8 M€, josta Euroopan komission tuki on noin puolet.



Syyskuussa 2012 käynnistynyt ja neljä vuotta kestävä DOPAS -projekti keskittyy erityisesti tulppiin liittyvän uuden teknologian kehittämiseen ja tulppien toimintakyvyn arviointiin.

Projekti kokoaa yhteen sulkemismenetelmien suunnitteluperusteet, kehittää uutta teknologiaa ja materiaaleja tulppien ja sulkujen toteutusta varten sekä suunnittelee ja toteuttaa kokonaan tai osittain viisi loppusijoitustiloihin liittyvää tulppakoetta eri puolilla Eurooppaa.

Täyden mittakaavan tulppia toteutetaan Olkiluodon ONKALON lisäksi Ranskassa, Tšekin tasavallassa, Ruotsissa ja Saksassa erilaisissa geologisissa ympäristöissä sijaitsevilla maanalaisilla tutkimustiloissa. Lisäksi rakennettujen tulppien toimintakykyä arvioidaan turvallisuusvaatimuksia vasten.

Projektin tehtävänä on lisäksi välittää tietoa, kokemuksia ja toimintamalleja, joita syntyy tulppatestien tuloksina kansainvälisissä tieteellisissä tapahtumissa Euroopan laajuisesti eri sidosryhmille.

Projektin viimeisenä vuonna 2016 DOPAS -projekti-konsortio järjestää kansainvälisen tieteellisen nimikkoseminaarin, joka keskittyy loppusijoitustilojen sulkemisteknologiaihin. Neljätoista ydinjätetuollasta vastaavaa yhtiötä ja tutkimuslaitosta yhteensä kahdeksasta Euroopan maasta osallistuu DOPAS-projektiin, joka käynnistyi yhteiseurooppalaisen geologisen loppusijoituksen teknologia-yhteistyön (IGD-TP) strategisen tutkimusohjelman aloituksesta.

ONKALOSSa alkamassa testivaihe

Posiva saa Euroopan komission tukea sekä DOPAS-projektin koordinointiin ja johtamiseen että ONKALOSSa suoritettavaan täyden mittakaavan tulppademonstraatiota suunnitteluun ja toimintakykyarviointiin.

Lisäksi Posiva panostaa myös suoraan itse kokeen toteuttamiseen, jonka haasteet ovat tämän jutun ytimenä. ONKALO tulee olemaan jatkossa osa maanalaista loppusijoituslaitosta, ja jo testien tekeminen maan alla varsinaisen tulevan loppusijoitusalueen ulkopuolella edellyttää ydinlaitoksen toimintamallien käyttöä, joita ei ole muissa maanalaisissa kalliolaboratorioissa tai tutkimuslaitoksissa tarvinnut huomioida.

POPLU-kokeen toteuttaminen tuo arvokasta kokemusta Posivalle ja DOPAS -projektin kautta tietoa välittyy myös muille eurooppalaisille toimijoille tulevaa silmälläpitäen.

KBS-3V -ratkaisun moniesteperiaate edellyttää useiden toisiaan täydentävien teknisten vapautumisesteiden rakentamista loppusijoitustiloihin. Loppusijoitustunnelin tulppa yhdessä tunnelitäytön kanssa muodostaa yhden näistä esteistä (EBS eli Engineered Barrier Systems).

Posivan loppusijoituslaitoksen käyttövaiheen aikana tulee vuosittain suljettavaksi yksi loppusijoitustunneli, joten keran vuodessa tulee myös toteutettavaksi yksi tulppa, jonka rakentamisen tulee olla pitkälle viety ja rakentamisprosessin



DOPAS projektin jäseniä tutustumassa SKB:n tulppademonstraatioon Äspön kalliolaboratoriossa Oskarshamnissa. Kuva: Pär Graham, SKB.

optimoitu.

Tulpan ensimmäisessä testauksessa aikaa kuluu vielä enemmän ja POPLU -koetulpan suunnitteluun ja rakentamiseen on varattu 1,5 vuotta.

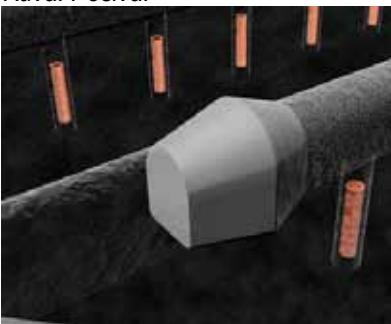
Osa ajasta tietyksi kuluu kokeen edellyttämien asioiden suunnitteluun kuten monitorointiin ja tulpan toiminnan testaamiseen, joita ei käyttövaiheessa enää tehdä. Tieto tarvitaan kuitenkin ennalta mm. tulpan toimintakyvyn osoittamiseksi ja loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuden varmistamiseksi mm. testamalla materiaalien yhteensopivuutta ja tulpan vaatimusten täyttymistä.

Tulpan suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta, mutta tulpan toiminnalle on asetettu toimintakykyvaatimuksia, joista osa kohdistuu koko loppusijoituksen keston ajalle.

Tulpan tulee olla vesitiivis elinkaarensa alkuvaiheessa ja kestää tunnelintäytöltä tulevaa paisuntapainetta sekä pohjaveden painetta (yhteensä yli 7MPa). Pitkälläkään aikavälillä tulpan materiaalit eivät rapautuessaan saa aiheuttaa tyhjää tilaa tulpan alueelle.

Tulpassa käytettävät materiaalit eivät saa olla haitallisia muille vapautumisestille pitkäikäisen ajan kuluessa ja tästä

Posivan loppusijoitustunnelin tulppatesti, joka toteutetaan DOPAS projektin puitteissa, on noin 6 metriä pitkä ja halkaisijaltaan yli 5,5 metriä. Kuva: Posiva.



syystä moni normaalirakentamisessa käytetty rakennusaine käy läpi tiukan valvontakontrollin ja välillä vieraiden materiaalien määrää joudutaan rajoittamaan tai etsimään tilalle kemiallisesti sopivampia tuotteita.

Kokemuksia kertyy loppusijoituksen käyttövaihetta varten

Tulpan suunnittelun, rakentamisen ja toimintakyvyn arvioinnin lisäksi kokeen toteutukseen liittyy paljon käytännön asioita, joiden ratkaiseminen tässä vaiheessa hyödyttää suoraan käyttövaihetta ja samalla saadaan selville mm. mahdolliset jatkokehitystarpeet ja -kohteet, joita vielä voidaan tulevissa testeissä huomioida.

Suunnittelun ja toteuttamisen eri vaiheiden yhteen sovittaminen ja Posivan organisaation valmistautuminen pilotoimaan ja kehittämään tulevaa toimintamallia on oleellinen osa POPLU -kokeen tuotosta. Näin Posiva voi arvioida paremmin esimerkiksi käyttötoiminnan resurssitarpeita tulevaa toimintaa varten.

Suunnittelu on avainasemassa

DOPAS -projekti käynnistyi syksyllä 2012. Samalla käynnistyi myös POPLU-kokeen suunnittelu. Keväällä 2014 suunnitellaan valettavaksi massiivinen teräsbetonitulppa, jonka toimintaa monitoroidaan ja testataan vuonna 2015. Tällä hetkellä käynnissä olevan suunnittelun eri osa-alueita ovat:

- Tulpan alueen louhinta, joka tulee toteuttaa siten ettei tulpan alueelle tule louhinnasta johtuvaa rikkonaisuusvyöhykettä;
- Tulpan yksityiskohtainen rakenne.
- Tulpan materiaalit ja niiden koostumukset, jotka tulee hyväksyttäväksi

käytettäväksi ONKALOSSA.

- Tulpan taakse tulevan täytön rakenne, joka testin lyhyen keston vuoksi ei voi olla yhdenmukainen tulpan taakse tulevan tunnelintäytön kanssa.
- Tulpan monitorointi ja koestus, jotka edellyttävät ylimääräisiä läpivientejä seurantaan varten.

Tulpassa käytetään kokeeseen kehitettyä matalan pH:n betonia, jossa käytettävän sementin huokosveden pH ei ole liian emäksinen.

Betonireseptin suunnittelussa on hyödynnetty kokemuksia maailmalta ja myös Posivan injektointimateriaalien kehitystyöstä, jossa silikan avulla on saatu pH laskemaan halutulle tasolle.

Matalan pH:n betonin käyttäytymisen varmistetaan erilaisin kokein laboratorio-olosuhteissa ja myös pH-arvot varmistetaan erikseen uutokokeilla.

Lisäkokeita ja selvitystyötä tarvitaan myös, koska infrarakentamisen betoninormit eivät ole suoraan sovellettavissa loppusijoitustiloissa käytettäviin materiaaleihin.

Tulevissa loppusijoitustiloissa käytettävien materiaalien tulee myös läpikäydä erillinen hyväksymismenettely, joka varmistaa että ONKALOOSSA jäävät materiaalit ovat loppusijoituksen kannalta hyväksyttävää.

Tulpan suunnitelman ja eri osasuunnitelmien hyväksymisen jälkeen voi käynnistyä toteutusvaihe, joka on haasteellinen, koska ONKALOSSA ei ole vastaavaa toteutettu aiemmin.

Tulpan toteutusprojekti toteutustapa-suunnitelmien, työselostuksineen ja laadunvarmistusmenettelyineen on pilotti tulevia testejä varten ja kokeen toteutusaikataulu on tiukka vuoden 2016 ensimmäisellä puoliskolla päättyvän DOPAS -projektin takia.

Miksi sitten tarvitaan kokemuksia useista testitulppista?

Täyden mittakaavan demonstraatioista on jo kokemusta maailmalta ja mm. Äspössä toteutetaan jo neljättä täyden mittakaavan tulppaa, joka on matalan pH:n omaava kupolitulppa (DOMPLU -koe).

Pitkäaikaisen yhteistyön ansiosta Posiva voi hyödyntää SKB:n kokemuksia tulpan rakentamisen suhteen ja välttyä monilta kehityshankkeen sudenkuopilta.

Kokemusten vaihto myös muiden DOPAS-projektin tulppakokeiden kanssa on hyödyksi kokeen eri osa-alueilla vaikka osa kokeista toteutetaankin erilaisessa geologisessa ympäristössä kuten savessa [ja suolassa].

Posivan loppusijoitustilassa tarvitaan



Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksen rakentamislupahakemuksen myötä on Posivan toiminnan painopiste muuttumassa toteuttavaksi organisaatioksi ja teknisten vapautumisesteiden toimintakyvyn testaaminen ja osoittaminen on nousemassa tärkeään rooliin käyttöluvapaiheeseen valmistautumista varten.

Tähän mennessä maanalaisessa tutkimustilassa ONKALOssa on oppimismielessä toteutettu ja kehitetty loppusijoitustilojen rakentamista (louhintaa, lujitusta ja tiivistystä), kallioperän soveltuvuuden arviointia, loppusijoitustunneleiden louhintaa ja loppusijoitusreikien porausta, yksityiskohdista tutkimusta liittyen ympäröivän kallioperän kemiallisiin, hydrologisiin ja mekaanisiin olosuhteisiin ja menettelyjä tulevan ydinlaitoksen rakentamista silmälläpitäen.

ONKALOssa on jo rakennettu demoalueelle loppusijoi-

tustunnelien vaatimusten mukaisia testitunneliteita ja porattu täyden mittakaavan loppusijoitusreikiä testi- ja tutkimuskäyttöön.

Yksi kolmasosamittakaavan puskuribentoniittikoe on käynnissä, ja sen tavoitteena on tuottaa taustatietoja varsinaisten EBS komponenttien testejä varten monitoroinnin ja kokeiden seurannan osalta. Samalla tietysti saadaan kokeesta puskuribentoniitin käyttäytymisestä.

Seuraavassa vaiheessa testataan loppusijoitustunnelin tulpan rakentamista (ks. oheinen artikkeli) ja puskurin sekä kapselin asentamista. Näitä seuraa tunnelintäytön asennuskokeet eri komponenttien osalta ja käyttöluvahakemusta varten on tavoitteena testata kaikkien EBS komponenttien yhteistoimintaa ja alkutilan saavuttamista.

käytännössä yli 100 tulppaa ja olosuhteet eri tunneleissa vaihtelevat, joten on hyvä olla olemassa kaksi erilaista suunnitteluratkaisua loppusijoitustunnelin tulppaamiseen. Lisäksi kehitysprosessi tapahtuu vaiheittain ja optimointi tuotantokäyttöön perustuu oppeihin aiemmista kokeista.

Tulpan toimintaa mallinnetaan teoreettisesti ja varsinaisen tulpan toimintaa testivaiheen aikana arvioidaan tarkastelemalla sitä, miten tulppa on täyttänyt sille asetetut vaatimukset tulpan keinotekoisien paineistuksen jälkeen.

DOPAS-projektin puitteissa kehitetään malleja loppusijoitustilojen tulppien käyttäytymisen arviointia varten ja Posivan tulppaprojekti tuottaa lähtötietoja tähän työhön, jotka toteutetaan pääosin Saksassa ja Hollannissa.

Kotimaisin voimin

Posivan apuna ovat POPLU-kokeen toteuttamisessa myös DOPAS-projektin

muut suomalaiset partnerit eli Valtion Teknillinen tutkimuskeskus (VTT) ja B+Tech Oy.

VTT:n Rakenteiden toimivuus ja turvallisuus -osaston vastuulla on tulpan monitoroinnin suunnittelu, joka sisältää vaativan instrumentoinnin tulpan toimintakyvyn seurantaan ja myös tulpan testaamiseen liittyvien laitteistojen kehitystyötä sekä tulpan ja sen komponenttien monitorointia ONKALOn olosuhteissa. Lisäksi VTT on mukana matalan pH:n betonin kehitystyössä ja reseptien optimointityössä sekä betonin toimintakyvyn varmistamisessa laboratorioolosuhteissa. VTT:n asiantuntijoita avustaa myös projektinhallinnossa ja POPLU kokeen eri osa-alueiden toteuttamisessa.

B+Tech on yrityksenä erikoistunut ydinjätteen loppusijoituksessa käytettävän bentoniittimateriaalin selvityksiin ja DOPAS hankkeessa heidän tehtävät kohdistuvat tulpan eri komponenttien kuten täyttökomponentin mallintamiseen ja toimintakykyyn.

Lisäksi POPLU tulpan suunnitteluun, toteutukseen ja seurantaan osallistuu lukusia muita kotimaisia yrityksiä ja myös yrityksiä, jotka ovat olleet mukana toteuttamassa ruotsalaisten tulppaprojektia Äspön kalliolaboratoriossa (Äspö Hard Rock Laboratory, Oskarshamn, Sweden).

Kirjoittajat:

FM Johanna Hansen

Posiva Oy

T&K Koordinaattori

Loppusijoitusjärjestelmä

DOPAS projektikoordinaattori

johanna.hansen@posiva.fi

DI, MBA Marjatta Palmu

Posiva Oy

Vanhempi asiantuntija

Kehitys

marjatta.palmu@posiva.fi

http://www.igdtp.eu

http://www.posiva.fi/dopas

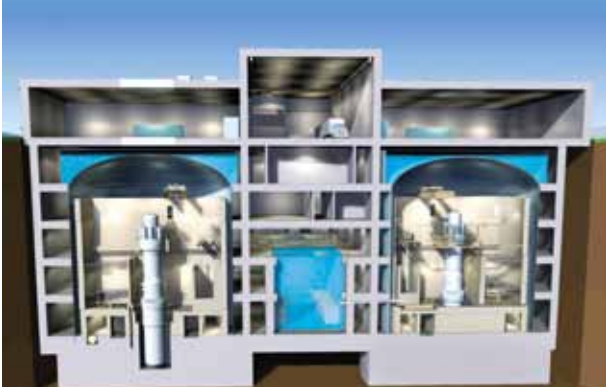
Suomalaiset ja EU:n tutkimuksen seitsemäs puiteohjelma (2007-2013)

Euroopan komission tietokannasta löytyy päivitettyä informaatiota (26.2.2013) suomalaisten organisaatioiden osallistumisesta EU:n tutkimuksen 7. puiteohjelmaan (2007-2013). Posiva oli yrityspuolella Suomen TOP 10 listalla rahoituksen

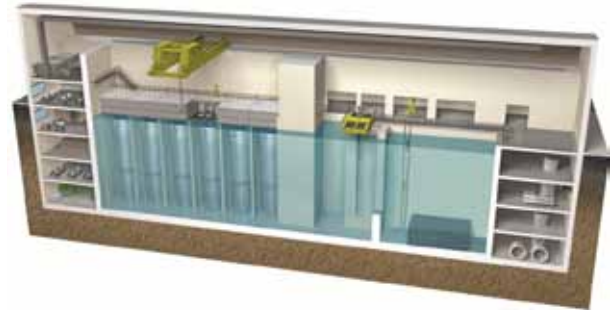
saajista viidentenä CSC:n, UPM:n, Nokian ja Wärtsilän jälkeen osallistumalla kymmeneen T&K-projektiin, joita avustaa Euratom. (Suomenkielinen kooste löytyy Tekesin sivuilta EU:n tutkimus ja innovaatio-ohjelmien uutisista *Suoma-*

laiset ja EU:n tutkimuksen seitsemäs puiteohjelma (2007-2013) -koosteesta, joka julkaistiin 8.4.2013.

Pienet modulaariset reaktorit



mPower SMR konsepti (lähde www.babcock.com/products/modular_nuclear)



NuScale SMR konsepti (lähde www.nuscalepower.com/reactorbuildingsandbarriers.aspx)

Pienet modulaariset reaktorit (Small Modular Reactor - SMR) ovat nousseet viime aikoina kiinnostuksen kohteeksi ydinvoima-alalla.

Suurten ydinvoimalaprojektien haasteet, sekä pienten reaktoreiden erityiset käyttömahdollisuudet ovat lisänneet kiinnostusta pienempiin reaktoriyksiköihin.

SMR on kansainvälisesti käytetty termi, niin pienten modulaaristen reaktoreiden yhteydessä, kuin myös lyhenteenä pienille ja keskisuurille reaktoreille (Small and Medium Size Reactors - IAEA). Molemmissa käyttötarkoituksissa pienet reaktorit on rajattu kooltaan alle 300MWe. IAEA:n käyttämän määritelmän mukaan keskisuuret reaktorit ovat kooltaan alle 600MWe.

Suurin mielenkiinto pienten modulaaristen reaktorien kehitykselle on ollut viime aikoina niiden mahdollinen käyttö erilaisiin energiaa vaativiin sovelluksiin, kuten suolan erotukseen merivedestä, mutta myös perinteisempiin ydinvoimalaitossovelluksiin kuten sähkön ja lämmön tuotantoon.

Pienen kokonsa ansiosta SMR:t ovat soveltuvia myös pienemmän mittakaavan tuotantoon, ja näin ollen soveltuvat useampaan käyttökohteeseen.

Kustannusrakenteeltaan pienemmän alkupääoman vaativat SMR projektit ovat useampien ostajien saavutettavissa ja kustannusriskit projektien osalta ovat huomattavasti suuria ydinvoimalaprojekteja pienemmät.

Sitoutunut pääoma on pienempi ja rakentamisaika lyhyempi, jolloin takaisinmaksuaika on huomattavasti lyhyempi kuin suurilla voimalaitoksilla. Nämä kustannusrakenteen ominaisuudet tekevät SMRistä mielekkäitä sijoituskohteita ja soveltuvat useampien sijoittajien strategialle.

Eräs SMR-seminaari alkoi hyvin kuvaavalla esityksellä,



missä SMRiä verrattiin muffineihin, suurten reaktoreiden esittäessä täytekakkua. Kuvittele mielessäsi suuri täytekakku ja mieti kuinka paljon vaivaa ja aikaa sen tekeminen on vaatinut. Täytekakkuja leivotaankin yleensä vain erityisiä juhlia varten. Kun puolestaan mietit muffineita kahvipöydässä, voi kyseessä olla tavallinen kahvihetki ystävien kanssa, eikä leivontakaan ole luultavasti ollut erityisen vaativaa. Tämä muffini-vertaus sopii erittäin hyvin SMR:ien erityispiirteisiin, muffineita kun voi leipoa enemmän tai vähemmän vieraiden määrän mukaisesti, yhteen muffiniin kuluu vähemmän taikinaa kuin suureen täytekakkuun ja ne on myös nopeampi paistaa. Muffinit voi sitten asetella suureksikin kakuksi niin haluttaessa. Myös yhden muffinin epäonnistumisriski on pienempi, kun niitä on jo valmistettu monia ja monia aiemmin, jolloin valmistusprosessi on hioutunut sujuvaksi ja optimoiduksi. Tästä päästäänkin takaisin SMR:ien pariin, pitäen muffinivertaus mielessä.






Nykyinen SMR kehitys on keskittynyt kahteen eri suuntaan teknologiamielessä: kevytvesireaktoreihin ja muihin teknologioihin, ns. Gen 4 -reaktoreihin. Kevytvesiteknologiaa käyttävät SMR:t ovat erityisesti olleet USA:ssa kehityksen kohteena.

Nämä reaktorit on muutamaa laitoskonseptia lukuun ottamatta suunniteltu pääasiassa painevesilaitoksiksi sillä erolla nykyisin käytössä oleviin PWR:iin, että niissä on käytetty ns. integroitua rakennetta.

Kaikki primäärikomponentit on sijoitettu paineastian sisään, jolloin varsinaista primääripiiriä ei näissä laitoksissa ole. Näin ollen tietyt onnettomuustyytit kuten primääripiirin putkikatkot on voitu rajata pois jo laitoksen suunnittelun avulla.

Muiden kuin LWR-teknologiaan perustuvien laitosten esimerkinä voidaan esittää Venäjällä suunnitteilla oleva SVBR-100 laitos, joka toimii lyijy-vismutti-jäähdytteellä ja perustuu Venäjän laivaston sukellusvenereaktoreihin. SVBR-100 on AKME Engineeringin suunnittelema laitos ja se on suunniteltu rakennettavaksi hyvin haastavalla aikataululla niin että ensimmäinen reaktori olisi valmis jo vuonna 2019. AKME Enginee-

LIGHT WATER REACTORS

	CAREM (CNEA, Argentina)
	FBNR (FURGS, Brazil)
	CNP-300 (CNNC, China)
	Flexblue (DCNS, France)
	IMR (Mitsubishi Heavy Industries, Japan)
	SMART (KAERI, Republic of Korea)
	ABV-6M (OKBM Afrikantov, Russian Federation)
	SHELF (NIKIET, Russian Federation)
	RITM-200 (OKBM Afrikantov, Russian Federation)
	VK-300 (RDIPE, Russian Federation)
	VBER-300 (OKBM Afrikantov, Russian Federation)
	WWER-300 (OKBM Gidropress, Russian Federation)
	KLT-40S (OKBM Afrikantov, Russian Federation)
	UNITHERM (RDIPE, Russian Federation)
	IRIS (IRIS, International Consortium)
	mPower (Babcock & Wilcox, USA)
	NuScale (NuScale Power Inc., USA)



Westinghouse SMR (Westinghouse, USA)

HEAVY WATER REACTORS



EC6 (AECL, Canada)



PHWR-220 (NPCIL, India)



AHWR300-LEU (BARC, India)

GAS COOLED REACTORS



HTR-PM (Tsinghua University, China)



PBMR (PBMR Pty, South Africa)



GT-MHR (General Atomics, USA)



EM² (General Atomics, USA)

LIQUID METAL COOLED REACTORS



CEFR (CNEIC, China)



4S (Toshiba, Japan)



PFBR-500 (IGCAR, India)



BREST-OD-300 (RDIPE, Russian Federation)



SVBR-100 (AKME Engineering, Russian Federation) ..



PRISM (GE-Hitachi, USA)



G4M (Gen4 Energy Inc., USA)

ring on muutenkin mielenkiintoinen venäläinen toimija, sillä se on ensimmäinen osittain yksityisesti omistettu venäläinen ydinvoimalaitostoimittaja.

Erilaisia SMR reaktoreita on maailmalla eri suunnittelun tasoilla IAEA:n mukaan useita kymmeniä. Tosin osa näistä on nykyisten laitosten tyyppisiä painevesilaitoskonsepteja (PWR), joihin tässä esitetyt perustelut eivät sovellu. Modulaarisuus ja yksinkertaistus suunnittelussa ovat perusteena SMR:ien kilpailukyvyille ja niiden mahdolliselle läpilyönnille ydinvoima-alalla.

USA:ssa on kehitetty PWR SMR:iä, joita U.S. Department of Energy (DoE) on rahoittamassa suunnittelun ja lisensioinnin mahdollistamiseksi lähivuosina. B&W:n suunnittelema mPower on USA:ssa SMR:ien eturintamassa, voitettuaan DOE:n rahoituksen 2012.

mPower SMR on suunnitteilla rakennettavaksi Tennessee Valley Authorityn Clinch Riverin laitospaikalle, jossa ensimmäinen yksikkö on suunniteltu valmistuvan vuonna 2021. mPower SMR on tehotasoltaan 180 MWe/reaktorimoduuli, joita on standardilaitoksessa kaksi, muodostaen yhteensä 360MWe tehosen laitoskonseptin.

Westinghouse SMR, NuScale ja Holtecin HI-SMUR ovat myös USA:ssa kehitettyjä LWR-konsepteja, jotka ovat toden-



IAEA julkaisi syyskuussa 2012 raportin, jossa esitellään eri maissa kehitteillä olevia pieniä ja keskisuuria reaktoreita. Lisätietoja: aris.iaea.org. Kuvat: IAEA

näköisesti kilpailemassa vuonna 2013 myönnettävästä DOE:n toisesta rahoituksesta. Nämä konseptit hakivat myös DOE:n ensimmäisen kierroksen rahoitusta tulematta kuitenkaan valituiksi.

Näistä SMR vaihtoehdoista on NuScalen design mielenkiintoinen sisältäen erityisen pieniä 45 MWe tehoisia reaktorimoduuleja, kukin omalla turbiinilla. NuScalen reaktorimoduulit toimivat täysin passiivisesti ilman pääkiertopumpuja ja tässä konseptissa on suojarakennus muodostettu paineastian ympärillä olevasta toisesta suuremmasta ”paineastiasta”. Tämä suojarakennus on sijoitettu suureen vesialtaaseen ja sijaitsee monen muun SMR:n tavoin maanpinnan alapuolella.

Konsepteja suunnitteilla eri puolilla maailmaa

Venäjän ja USA:n lisäksi useissa muissa maissa on SMR-konsepteja eri suunnittelun asteilla. Koreassa KAERI on jo pitkällä SMART-konseptin kanssa ja Kiinassa ollaan voimakkaasti toteuttamassa useita eri konsepteja, mm. kuulakekoreaktoria. Myös mm. Argentiina, Kanada ja Ranska ovat kehittäneet omia SMR-laitoksiaan.

SMRien suunnittelussa on myös käytetty mielikuvitusta uusien laityyppien suunnittelussa ja niitä onkin suunniteltu mm. lautan päälle, sekä meren pohjaan. Osa konsepteista on suunniteltu täysin tehdasvalmisteisiksi niin, että reaktorimoduuliin jopa ladataan polttoaine jo tehtaalla, kuljetetaan laitospaikalle, käytetään pitkä latausjakso (pienillä Gen 4-tyyppisillä reaktoreilla jopa useampi vuosikymmen), jonka jälkeen kuljetetaan pakettina loppusijoitukseen.

Tämän tyyppisissä hyvin pienissä reaktorisovelluksissa kohdistuu kiinnostus vaikeakulkuisille alueille, mm. Kanadan pohjoisosiin. Näissä sovelluksissa myös etäkäyttämömahdollisuus on keskustelun kohteena niin, että operaattori olisi mahdollisesti kaukana itse laitoksesta.

Kaikkien SMR laitosten suunnitteluperusteena on konseptin yksinkertaistaminen suuriin laityksiköihin verrattuna, sekä passiivisuus turvallisuustoimintojen toteuttamisessa. Näin ollen turvallisuustasoa on pyritty edelleen parantamaan ja mahdollisimman monia onnettomuustyyppisiä rajaamaan pois suunnittelusta.

Modulaarisuus on erityisesti LWR-tyyppisissä SMR:issä yksi kilpailukyvyyn kannalta oleellisista suunnitteluperusteista. Suurin osa SMR laitoksista onkin

suunniteltu modulaarisiksi sekä rakentamisen että reaktorien osalta niin, että yhdessä laitoksessa voi olla monta reaktorimoduulia.

Reaktorit on suunniteltu riippumattomiksi pienemmiksi yksiköiksi, joilla kullakin on omat riippumattomat turvallisuusjärjestelmänsä turvallisuustoimintoja toteuttamassa. Näitä reaktorimoduuleja voi sisällyttää useampia yhteen laitokseen kasvattaen laityksikön tehoa tiettyyn tasoon saakka.

Esimerkkinä modulaarisuudesta voi käyttää NuScale SMR reaktoria, joka sisältää 6 tai jopa 12 reaktorimoduulia. NuScale onkin SMR laitoksista modulaarisin tässä suhteessa.

Myös modulaarisuusaste rakentamisen osalta on tärkeä suunnitteluperuste, esimerkiksi voidaan käyttää Westinghousen AP1000 konseptia, jonka modulaarisuusaste on noin 30%.

AP1000-konseptiin perustuva Westinghousen SMR-konsepti on suunniteltu rakennettavaksi täysin modulaarisesti. Modulaarisuus tuo mukanaan paljon etuja, kuten nopeamman rakentamisaikataulun, sillä moduuleja valmistetaan tehtaissa ja ne vain kuljetetaan laitospaikalle asentamista varten.

Tällainen rakentamistapa mahdollistaa päällekkäisen rakentamisen/valmistamisen huomattavasti laajemmalla mittakaavassa kuin perinteinen laitospaikalla rakentaminen. Myös työn laatu ja kustannukset on havaittu paremmiksi ja kilpailukykyisemmiksi perinteiseen rakentamiseen verrattuna.

Yksi suunnitteluperusteista SMR:ien taustalla on komponenttien koon rajoittaminen niin että ne voidaan toimittaa laitospaikalle yhdessä osassa, joko rautatietä tai maantietä pitkin. Paineastia onkin tehotason kannalta rajoittava komponentti, ja useissa designeissa sen koon rajoitusta on käytetty perusteena koko laitoksen suunnittelulle.

SMRiä voidaan myös suunnitella rakennettavaksi usean yksikön sarjana yhden suuren yksikön sijaan. Näin suunniteltaessa SMRien rakentaminen voidaan suunnitella tarpeen mukaisesti, aloittaen pienemmällä määrällä yksiköitä ja lisätessä niitä porrastetusti tarpeen mukaan. Tällaisen laitoksen kompleksin liiketoimintamallissa onkin otettava huomioon oppimiskäyrän ja muiden erityispiirteiden vaikutus. Kustannuslaskentamalleja on kehitetty maailmalla SMRien laskentaan. Yhden mainitakseni INCAS on Politekniko Milanon kehittämä, erilaisia skenaarioita kuvaava laskentamalli erityisesti SMRille.

Lisensiointi on yksi ydinvoima-alan

projektien suurista haasteista vaikuttaneen sekä laatuaspekteihin, että projektin kustannuksiin ja aikatauluun. Lisensiointi on SMR:ien osalta mietittävä uudelleen, sillä monet SMR:ien erityispiirteet vaativat uudentyyppistä lisensiointia ja painotusalueiden muutosta. Sekä lisensiointiprosessi, että varsinaiset lisensiointivaatimukset (Suomessa YVL-ohjeisto, sekä valtioneuvoston asetukset) on käytävä läpi ja niiden soveltamista SMRille on pohdittava. Usean reaktorin laityksikonseptit, sekä useiden laityksikon rakentaminen sarjassa, ei istu hyvin nykyiseen lisensiointikäytäntöön, jonka mukaisesti koko lisensiointiprosessi tulee läpikäydyksi jokaisen reaktorin osalta uudelleen. Jossain määrin lisensioinnissa voisi ottaa oppia esimerkiksi lentoteollisuuden sertifiointiprosessista tai USA:ssa käytettävästä design sertifiointista. SMR:ien valmistuksen ja rakentamisen periaate on hyvin toisenlainen nykyisiin ydinvoimaloihin ja projekteihin verrattuna. SMR:ien osalta myös valvonta painottunee entistä enemmän tehtaille ja valmistusorganisaatioille itse laitystyömaan sijaan. Lisensioinnin painotuttava entistä enemmän moduulin kuljettamiseen ja ydinmateriaalivalvontaan. Näissä uuden tyyppisissä tilanteissa on kansainvälisyydellä entistä suurempi painoarvo myös lisensioinnissa, valmistajaorganisaation ottaessa entistä suuremman vastuun laitoksen turvallisuusaspekteista.

Kansainväliset organisaatiot ovat jo avanneet keskustelun SMR:ien lisensiointihasteiden osalta. IAEA INPRO on perustanut työryhmän kehittämään lisensiointivaatimuksia soveltuviksi SMR:ien erityispiirteisiin. Yksi keskustelun kohteista on syvyysspuolustuslinjojen määrittely SMR:ille, joiden turvallisuussuunnittelun filosofia poikkeaa jossain määrin nykyisistä suurista reaktoreista. Lisensiointikeskustelu on varmasti tarpeen aloittaa Suomessakin, mikäli SMR:ien kehitys tuo ne realistisiksi vaihtoehdoiksi.



DI Kristiina Söderholm
Licensing and Safety Manager
Fortum Power and Heat Oy
kristiina.soderholm@fortum.com

Ydinvoimalaitoksen turvallisuus on yhdistelmä tekniikkaa, ihmisen ja organisaation toimintaa

Väitöskirja käsittelee turvallisuuskulttuuria organisaatiokulttuurin osana ja pyrkii tuomaan esille uusia turvallisuusjohtamisen työkaluja, jotka auttavat laitoksen johtoa turvallisuuteen liittyvien asioiden käsittelyssä laajentamalla päätöksenteon perustana olevaa tietämystä. Uudet menetelmät kattavat alueita, joista nykyisin menetelmin ei ole yksinkertaista saada luotettavaa tietoa.

Tutkimus on rajattu koskemaan kaupallisia sähköenergian tuottamiseen tarkoitettuja ydinvoimalaitoksia Suomessa. Niiden tuotantotoimintaa, erityisesti käyttöä ja kunnossapitoa, tarkastellaan ensisijaisesti turvallisuuden näkökulmasta.

Erityisen tärkeää on varmistaa laitoksia käyttävän henkilöstön osaaminen uusilla yksiköillä ja jo käytössä olevilla yksiköillä, kun yli kolmenkymmenen vuoden tuotantotoiminnan jälkeen kokenut käyttökäyttöön vaihtuu vähemmän kokeneeseen.

Uusien laitosten käyttökäytön aiempaa korkeampi nimellisteho merkitsee myös riskin lisääntymistä. Tämä täytyy

kaan ydinvoimalaitos-organisaatiossa aina ole, kun arvioidaan, miten strategiset ylätason tavoitteet toteutuvat tekijätasolla.

Tässä tutkimuksessa esitetään, että turvallisuuskulttuuri on välttämätön, mutta ei riittävä ehto ydinvoimalaitoksen käytön turvallisuuden varmistamiseksi.

Turvallisuuskulttuurijattelun lisäksi tarvitaan proaktiivisia ohjelmia sekä näyttöä proaktiivisesta turvallisuuden parantamisesta tähtäävästä työstä.

Tällaisen työn tulee sisältää ainakin inhimillisten virheiden vähentämiseen tähtäviä toimenpiteitä, menetelmien kehittämistä, koulutustoiminnan

russyitä analysoitaessa on todettu, että organisatoriset tekijät ovat usein olleet yksittäisen työntekijän inhimillisiä virheitä merkittävämpiä.

Kun ydinvoimalaitosten lukumäärä ja tuotantoteho kasvavat, onnettomuusriskit lisääntyvät. Viimeaikaisten suurten ydinvoimalaitosonnettomuuksien vaikutukset ovat lähialueen lisäksi saattaneet ulottua kauas useiden valtioiden alueelle. Ihmiset ovat huolissaan onnettomuuden katastrofaalisista seurauksista. Ydinvoimalaitosten suunnitteluperusteita joudutaan tarkistamaan, koska aiemmat kriteerit eivät ole olleet riittäviä turvallisuuden varmistamiseksi.

Käyttöhenkilöstön kompetenssijakauma Self-Organising-Map (SOM)-esityksenä: parhaat operaattorit vasemmassa yläkulmassa, huonoimmat oikeassa alakulmassa

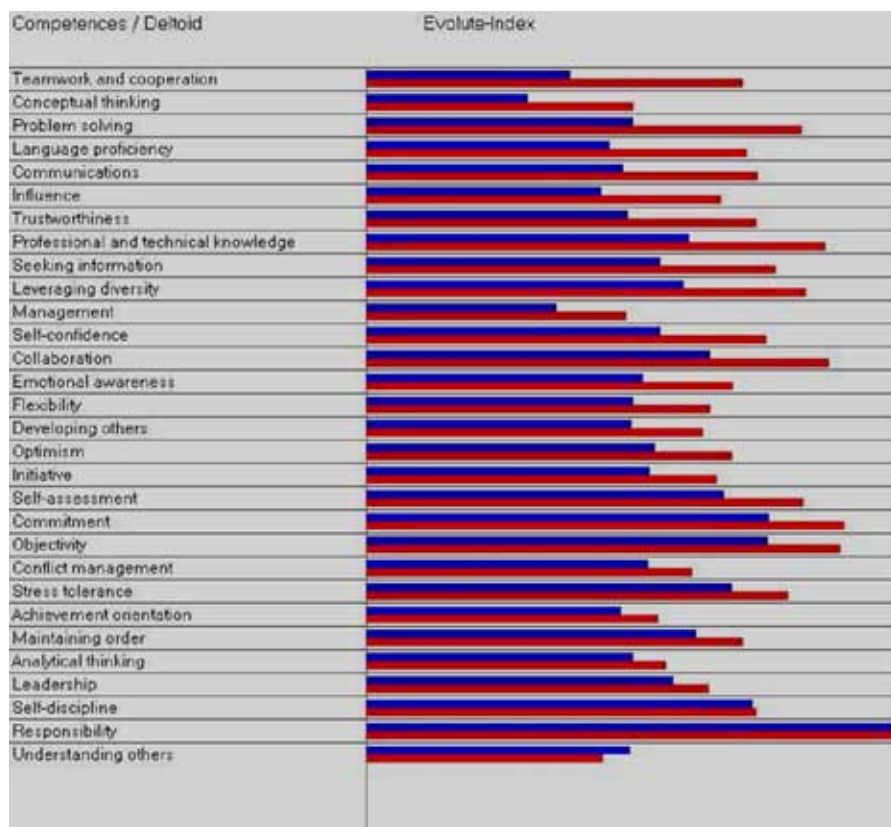


Turvallisuus on yhdistelmä tekniikkaa, ihmisen ja organisaation toimintaa

Ydinvoiman turvallisuuskulttuuriin kohentamisessa tulisi nostaa inhimilliset tekijät ja koko organisaation toiminnan osuus voimallisemmin esiin.

Ydinvoimalan käyttöorganisaation ja sen toimintatapojen analysointi on jäänyt vähemmälle. Alan tutkimusta tulisikin lisätä. Teknisiin uudistuksiin verrattuna halvempaa ja tehokkaampaa on investoida inhimillisiin voimavaroihin ja analysoida sitä, miten toiminnot turvallisuuden kannalta parhaiten järjestetään.

Tekniikkaan on kiinnitetty huomiota alusta saakka mutta inhimillisten tekijöiden huomioiminen toiminnassa ja organisatoristen turvallisuustekijöiden analyttinen käsittely on vielä tekemättä.



Käyttöhenkilöstön kompetenssit Peter Senegen luovan jännitteen malliin perustuen: nykytila sinisellä ja tavoitella punaisella

Lähtökohtana tulisi olla, että turvallisuus on yhdistelmä tekniikkaa, inhimillistä toimintaa ja organisaation toimintaa.

Ydinvoimalaitosten turvallisuusjohtamisen pitää muuttua läpinäkyvämmäksi, jotta voidaan varmistua siitä, että asioita hoidetaan hyvin. Parasta yhteiskuntavastuuta on huolehtia lähi-seudun ihmisten turvallisuudesta.

Teknologian kehityksen myötä myös turvallisuutta varmistavia analyysijä, menetelmiä ja toimintatapoja tulee kehittää vastaavasti. Tarvitaan uutta ajattelua ja uusia menetelmiä, joilla turvallisuus voidaan varmistaa monipuolisesti.

Muutoksiin reagoiminen edellyttää huomion kiinnittämistä organisaation kykyyn oppia uusia turvallisuutta varmentavia asioita sekä soveltaa aiempaa ydinvoimalaitosten käyttökokemustietoa.

Tutkimuksen yhteydessä on useiden vuosien aikana kehitetty *Co - Evolute* -järjestelmän erilaisia sovellutuksia. Näistä etenkin käyttövuorojen kompetenssia ja kunnossapitohenkilöstön kompetenssia koskevat sovellutukset auttavat organisaation jäseniä ja johtoa

laatimaan arviointitulosten pohjalta kehityssuunnitelmia ja seuraamaan niiden vaikutusta. Tutkimuksessa on useiden case-tutkimusten kautta osoitettu arviointijärjestelmän hyöty organisaatiolle.

Toimintatapojen ja -menettelyjen arviointia organisaationäkökulmasta voidaan soveltaa ydinvoimalaitosten käyttötoiminnan lisäksi myös muihin korkean riskin tuotantoaloihin, kuten ilmailuun, merenkulkuun tai öljynpo-rauslaituille.

Tutkimuksessa on esitetty laajasti *knowledge management* -asioita Nonakan malliin perustuen. Teollisuudessa pitkään käytössä olleen laatu- ja turvallisuuden soveltamista turvallisuuskulttuurin rakentamiseen tulisi harkita.

Tällöin tieto työhön liittyvistä turvallisuusvaatimuksista tavoitaisi paremmin tekijät ja yhteisesti sovitut kehitysehdotukset kulkisivat organisaation jatkokäsittelyyn.

Lisäksi tulisi määrittää ja dokumentoida, miten turvallisuus liittyy henkilöstön käytännön työhön. Näin turvallisuuskulttuurista tulisi konkreettinen työkalu. Dokumentoitu turvallisuus-

ajattelu antaa organisaatiolle yhteisen lähtökohdan tulevalle kehitystoiminnalle.

Tuotantotalouden alaan kuuluva väitöskirja "Safe Operation of Nuclear Power Plants – Is Safety Culture an Adequate Management Method" tarkastettiin perjantaina 30. marraskuuta 2012 Porin yliopistokeskuksessa. Vastaväittäjinä toimivat professori Waldemar Karwowski Floridan yliopistosta ja professori Evangelos Markopoulos Piraeuksen yliopistosta. Väitösti-laisuuden valvojana oli professori Hannu Vanharanta Tampereen teknillisen yliopiston Porin yksiköstä.



TkT Antti Piirto
Managing Director
AP Safety
Management Ltd
 antti.piiro@apsafety.fi

Numeerisia menetelmiä ydinpolttoaineen palamalaskuihin

Palamalaskuilla mallinnetaan ydinpolttoaineen materiaalikoostumuksen muuttumista reaktorissa energiantuotannon aikana ja sen jälkeen. Väitöskirjassa on tutkittu sekä palamalaskuihin liittyviä numeerisia ratkaisumenetelmiä että reaktorifysiikan laskentamallien herkkyys- ja epävarmuusanalyysiä. Tutkimuksen päätulos on uusi ratkaisumenetelmä palamayhtälöiden ratkaisemiseen.

Ydinreaktorissa polttoaineen materiaalikoostumus muuttuu jatkuvasti energiantuotannon aikana neutronireaktioiden ja radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Radioaktiivinen hajoaminen jatkuu vielä sen jälkeen kun polttoaine on poistettu reaktorista. Ydinpolttoaineen materiaalikoostumuksen muuttumista mallintavat palamalaskut ovat keskeinen reaktorifysiikan osa-alue. Ydinturvallisuuden kannalta on tärkeää, että näiden laskentamenetelmien numeerinen tarkkuus on mahdollisimman hyvä, ja että tulosten luotettavuutta kyetään arvioimaan niiden perustana olevan kokeellisen neutronimittausda-

tan luotettavuuden perusteella.

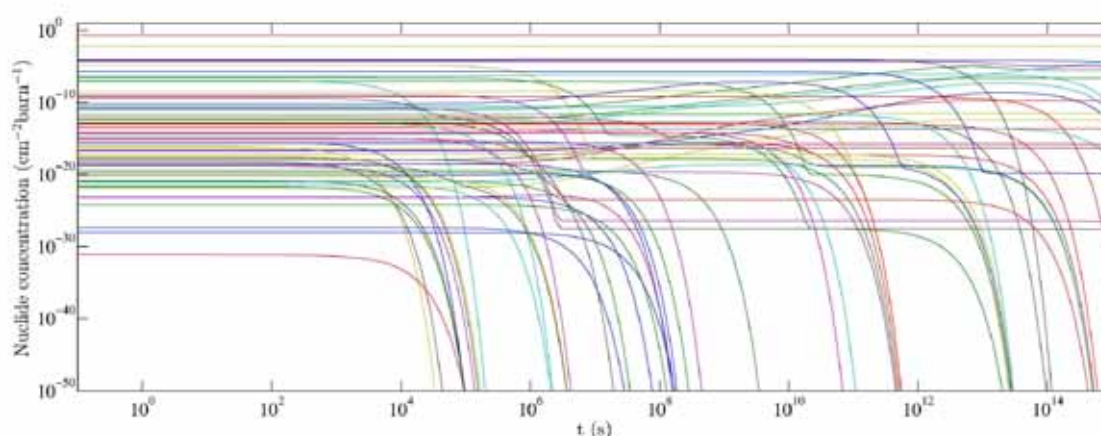
Palamalaskuissa kaksi keskeistä yhtälöä

Palamalaskut tehdään käytännössä erikoistuneilla palamalaskentaohjelmilla. Mallinnus rakentuu kahden keskeisen yhtälön ympärille, jotka ovat neutronien kuljetusyhtälö ja palamayhtälöt. Kuljetusyhtälö ratkaistaan tyypillisesti ajasta riippumattomana ominaisarvo-ongelmana eli kriittisyysyhtälönä, jolloin ratkaisuksi saadaan neutronitiheysjakauman lisäksi systeemin aikariippuvuutta kuvaava ominaisarvo eli kasvutekijä. Kuljetus-

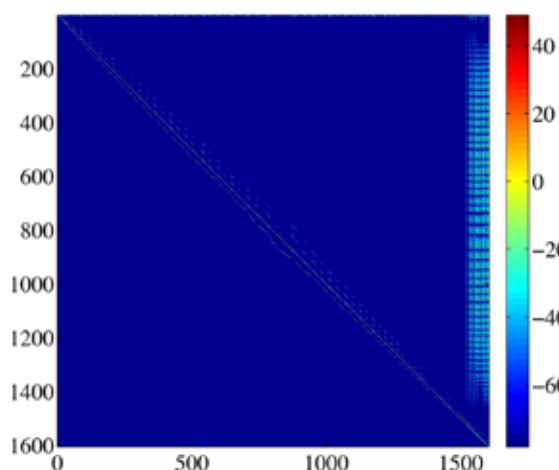
yhtälöstä ratkaistun neutronijakauman perusteella on mahdollista laskea systeemin nuklidien reaktionopeudet ja muodostaa palamayhtälöt, jotka kuvaavat nuklidikonsentraatioiden muutosta ajan funktiona. Palamalaskuissa kuljetusyhtälö ja palamayhtälöt ratkaistaan jatkuvasti vuorotellen, jolloin tarkasteltavaa systeemiä voidaan simuloida ajassa eteenpäin haluttuun ajanhetkeen saakka.

Palamayhtälöiden ratkaisemista pidetty hankalana

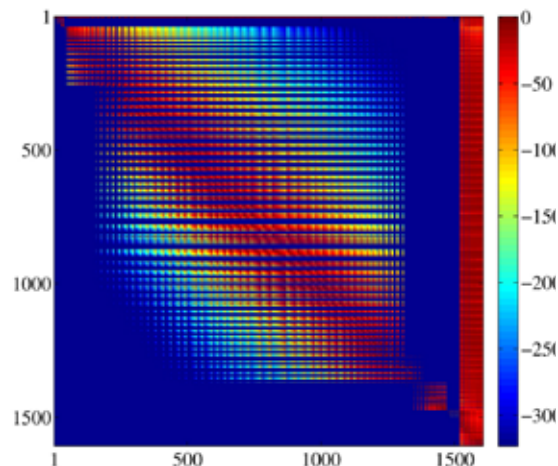
Palamayhtälöt muodostavat 1. kertaluvun differentiaaliyhtälösystemin, joka



Käytetyn polttoaineen nuklidikonsentraatiot muuttuvat jatkuvasti radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Kuvassa on esitetty 1531 nuklidista muodostuvan hajoamissysteemin aktinidien konsentraatiot ajan funktiona.



Palamamatriisi 1532 nuklidista muodostuvalle systeemille kuvattuna logaritmisella asteikolla. Matriisin alkioiden suuruudet vastaavat nopeuksia, joilla systeemin nuklidit muuttuvat toisiksi systeemin nuklideiksi.



Viereisessä kuvassa esitetyn palamamatriisin matriisieksponentti kuvattuna logaritmisella asteikoilla. Matriisin alkiot kuvaavat sitä kuinka paljon systeemin nuklidista muodostuu muita systeemin nuklideita tarkasteltavan aika-astekeen aikana.

voidaan periaatteessa ratkaista matriisieksponentin avulla. Energiantuoton aikana ydinpolttoaineen muutamasta eri lähtönuklidista, esimerkiksi uraanisotoppeista ja hapestä, muodostuu tuhansia eri nuklideita. Koska eri nuklidien puoliintumisajat vaihtelevat dramaattisesti, ongelma on numeerisesti vaikea, ja matriisieksponentin laskemista kaikki nuklidit sisältävälle systeemille on aikaisemmin pidetty käytännössä mahdottomana. Ongelmaa hankaloittaa myös käytettyjen aika-askelten suuri vaihteluväli muutamasta tunnista useisiin kuukausiin ja jopa tuhansiin vuosiin, jos tarkastellaan pelkkää radioaktiivista hajoamista.

Näiden syiden vuoksi matriisieksponentin laskennassa on jouduttu tarkastelemaan yksinkertaistettua systeemiä, jossa osa nuklideista jätetään huomioimatta tai niiden kontribuutio approksimoidaan erillisellä semianalyttisellä käsittelyllä.

Uusi ratkaisumenetelmä palamayhtälöiden ratkaisemiseen

Väitöskirjassa tutkittiin ensimmäistä kertaa systemaattisesti palamamatriisien matemaattisia ominaisuuksia. Yksi päätuloksista oli, että palamamatriisien ominaisarvot sijaitsevat kompleksitasossa negatiivisen reaaliakselin läheisyydessä, mitä voidaan hyödyntää

palamayhtälöiden ratkaisemisessa. Osoittautui, että Chebyshevin rationaalinen approksimaatio negatiivisella reaaliakselilla on sekä erittäin tarkka että nopea menetelmä palamamatriisin eksponentin laskemiseen ja mahdollistaa ensimmäistä kertaa kaikki mahdolliset nuklidit sisältävän systeemin käsittelyn samanaikaisesti. Menetelmä toteutettiin VTT:llä kehitettävään Monte Carlo -menetelmään perustuvaan reaktorifysiikan palamalaskentaohjelmaan Serpent jo tutkimuksen alkuvaiheessa. Uusi menetelmä paransi sekä palamayhtälöiden ratkaisemisen tarkkuutta että nopeutta.

Kriittisyysyhtälön herkkyys- ja epävarmuusanalyysi

Epävarmuusanalyysin tavoitteena on selvittää, miten matemaattisen mallin parametreihin liittyvä epävarmuus kulkeutuu laskujen tuloksiin. Herkkyysanalyysin avulla voidaan päätellä, mikä tekijä aiheuttaa eniten epävarmuutta lopputulokseen. Ihanteellisesti herkkyys- ja epävarmuusanalyysi haluttaisiin liittää kaikkeen ydinreaktorien sovelluksiin liittyvään numeeriseen mallinnukseen.

Reaktorifysiikassa yhtenä merkittävänä epävarmuuden lähteenä pidetään ydinreaktorin ytimien vuorovaiikutustodennäköisyyttä kuvaavat suuret, vaikutusalat. Kuljetusyhtälöä rat-

kaistaessa ydinreaktorin kirjasto sisältää tyypillisesti vähintään kymmeniätuhansia epävarmoja parametreja, minkä takia tilastollinen lähestymistapa voi olla laskennallisesti liian raskas. Epävarmuusanalyysi voidaan kuitenkin toteuttaa tehokkaasti deterministisesti hyödyntämällä matemaattisen adjungaatin käsitettä.

Väitöstutkimuksen tuloksena oli deterministinen laskentajärjestelmä, joka mahdollistaa ydinreaktorin kirjastosta aiheutuvan epävarmuuden kuljetuksen kriittisyysyhtälön läpi. Menetelmä muokattiin osaksi kaupallista laskentaohjelmistoa CASMO-4.

Matematiikan alaan kuuluva väitöskirja hyväksyttiin Aalto-yliopiston perustiedteiden tiedekunnassa 24.5.2013. Vastaväittäjänä toimi professori Antonella Zanna Munthe-Kaas, Bergenin yliopistosta Norjasta. Valvoja oli professori Olavi Nevanlinna Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulusta, Matematiikan ja systeemianalyysin laitoksen

TkT Maria Pusa
Tutkija
VTT
maria.pusa@vtt.fi



Pienet modulaariset reaktorit: erityiset turvallisuuspiirteet

Diplomityössä on selvitetty pienille modulaarisille reaktoreille tyypillisiä turvallisuuspiirteitä ja tuotu esiin niiden eroja suurten kevytvesireaktoreiden turvallisuuspiirteisiin nähden. Pienten modulaaristen reaktoreiden turvallisuutta on myös arvioitu YVL-ohjeita vastaan.

Pienen modulaarisen reaktorin on määritelty olevan sähköteholtaan alle 300MW. Pieni teho mahdollistaa esimerkiksi laajan passiivisten turvallisuustoimintojen käytön.

Laitoksen modulaarisuus tekee puolestaan sarjatuotannon hyödyntämisen mahdolliseksi useissa projektin vaiheissa. Sarjatuotanto laskee kustannuksia ja tehdasvalmisteisuus on myös huomattavasti tehokkaampaa kuin rakentaminen työmaalla. Pieniä reaktoreita on käytetty jo pitkään esimerkiksi sukellusveneissä, mutta niitä ei vielä käytetä laajamittaisessa sähköntuotannossa. Esimerkiksi USA:ssa ensimmäisen mPower-laitoksen on tarkoitus valmistua vuoteen 2022 mennessä.

Pieniä reaktoreita on useaa eri tyyppiä, mutta työssä on keskitytty painevesireaktoreihin. Erityisesti tarkastelussa ovat integroidut reaktorit, joissa reaktorimoduulin sisään on sijoitettu paineistin, höyrytimet sekä säätösauvakoneisto. Tämän tyyppisiä reaktoreita ovat esimerkiksi USA:ssa kehitettävät mPower- ja NuScale-reaktorit. Integroitu rakenne vähentää paineastian läpivientejä ja pienentää jäähdytystuoto-onnettomuuden riskiä.

Passiivisuutta on mahdollista hyödyntää tehokkaammin pienissä reaktoreissa. Esimerkiksi NuScale-reaktoria voidaan tarvittaessa jäähdyttää antamalla lämmön siirtyä reaktorimoduulin seinämän läpi ulkoiseen vesialtaaseen. Reaktori toimii normaalikäytössään luonnonkierrolla ilman pääkiertopumppuja. NuScalen lämpöteho on noin 160 MW. Suurissa reaktoreissa vastaavanlainen jäähdytystapa ei ole mahdollinen jo pelkästään suuren tehon vuoksi.

Perusturvatoiminnoiltaan pienet reaktorit eivät eroa suuresti nykyisistä reaktoreista. Edellä mainituissa mPower:ssa ja NuScalessa reaktiivisuutta hallitaan säätösauvojen ja palavien absorbaattorien avulla. Booria käytetään hätätapauksissa sammuttamaan reaktori. Radioaktiivinen materiaali on polttoainesauvojen sisällä ja sillä on vastaavat etenemisesteet

kuin suurissakin reaktoreissa. Lisäksi edellä mainitut reaktorit on sijoitettu maan alle. Reaktoreiden jälkilämmönpoisto eroaa esimerkiksi NuScalen tapauksessa suurista reaktoreista aiemmin kuvatulla tavalla.

Uusien YVL-ohjeiden osa B.1 määrittelee ylätasoa vaatimukset ydinvoimaloiden turvajärjestelmien suunnittelulle. Vaatimusten mukaan esimerkiksi passiivisia ja luontaisia turvallisuustoimintoja tulisi aina suosia mikäli mahdollista. Tämä on selvä vahvuus pienillä reaktoreilla, joissa on paljon kyseisiä turvallisuustoimintoja. Toisaalta passiivisilta turvatoiminnoilta vaaditaan myös redundanssia ja diversiteettiä, vaikka esimerkiksi painovoimaan perustuva järjestelmä ei välttämättä voi vikaantua samalla tavalla kuin sähkön avulla toimiva. Monet vaatimukset on Suomessa tietysti tehty suuria laitoksia varten ja niiden soveltaminen pieniin reaktoreihin voi olla osittain haastavaa.

USA:ssa suunniteltujen reaktorien lisensoiminen Suomeen on todennäköisesti mahdollista, mutta vaatii tarkempaa tarkastelua ja enemmän tietoa reaktoreista kuin mitä julkisista lähteistä on saatavilla.

Diplomityö on hyväksytty Aalto-yliopiston Perustieteiden korkeakoulussa.

DI Hannes Alarotu
Fortum Power and Heat Oy
Co-Owned Nuclear & Thermal
Hannes.Alarotu@fortum.com



Seminaarimatka Japaniin – Teemana Fukushima Daiichin ydinvoimalaonnettomuus

The 2nd International Seminar on Global Nuclear Human Resource Development for Safety, Security and Safeguards – Fukushima Daiichi Accident

18.2-26.2.2013



Onagawan kaupunki

Tokion teknillinen instituutti järjesti helmikuussa ydinvoima-alan opiskelijoille ja nuorille ammattilaisille suunnatun seminaarin, jonka teemana oli Fukushiman ydinvoimalaonnettomuus.

Seminaariin osallistui yli 30 kutsuttua opiskelijaa Japanista ja muualta Aasiasta, Euroopasta ja USA:sta, sekä ydinvoima-alan yhtiöiden edustajia Japanista. Lisäksi seminaarin esitelmöijät edustivat useita eri tahoja, kuten viranomaisvalvontaa, voimalaitosten suunnittelua ja koulutusohjelmia.

Seminaarin aihepiiri oli laaja, esitelmissä käsiteltiin lähinnä Fukushima Daiichin onnettomuuden syitä ja seurauksia sekä myös ydinvoiman ja ydinvoima-alan koulutuksen asemaa Aasiassa ja maailmalla. Esitelmien lisäksi opiskelijoille järjestettiin kenttätöitä 50 km säteellä Fukushiman voimalaitoksesta sekä vierailu Onagawan ydinvoimalaitoksessa, joka oli lähimpänä vuoden 2011 maanjäristyksen episentrumia oleva ydinvoimalaitos, vain 123 km päässä.

Tokion yliopiston emeritusprofessori *Yotaro Hatamura*, onnettomuutta tutkineen komitean puheenjohtaja, summasi omia ja komitean johtopäätöksiä onnet-

tomuustutkinnasta.

Viranomaisten toiminta onnettomuuden hoitamisessa paljasti merkittäviä heikkouksia viranomaistoiminnassa ja tiedonkulussa. Onnettomuuden jälkeisiin muutoksiin kuuluikin riippumattoman valvojan viraston (Nuclear Regulatory Agency, NRA) perustaminen ympäristöministeriön alaisuuteen.

Fukushima Daiichin onnettomuuden jälkeen japanilaisten luottamus ydinvoimayhtiöitä ja säätelevää viranomaista kohtaan on alhainen ja vain kaksi ydinvoimalaa on tällä hetkellä käytössä.

Tiukennettujen turvallisuusmääräysten ja stressitien kautta Japani pyrkii kuitenkin käynnistämään lisää reaktoreita. Arvioiden mukaan Japani käyttää 40 miljardia dollaria vuodessa öljyn ja kaasun hankintaan korvaamaan Japanin energiatarvetta ydinvoimaloiden ollessa pois käytöstä.

Tämä käy kalliiksi Japanin taloudelle ja herättää myös kysymyksiä maan

tulevasta energiastategiasta. Nykyinen strategia tähtää uusiutuvien energiamuotojen osuuden kasvattamiseen, ydinvoiman vähentämiseen, energian tehokkaan käyttöön ja säästämiseen.

Todellisuudessa Japanilla tuskin on varaa luopua ydinvoimasta kokonaan jos maa haluaa ylläpitää talouden vakaan kehityksen.

Vietnam ajaa ydinohjelmaansa eteenpäin

Seminaarissa keskusteltiin myös uusien ydinvoimaa suunnittelevien Aasian maiden Vietnamin, Indonesian ja Malesian asemasta, joista Vietnam oli kaikkein selkeimmin ajamassa ydinvoimaohjelmaansa eteenpäin.

Vietnamin suunnitelmien mukaan ensimmäinen reaktori otettaisiin käyttöön jo 2020 kun Indonesiassa ja Malesiassa vielä toistaiseksi pidättydytään seuraamaan Vietnamin hankkeen edistymistä.



toiminnot eivät vaurioituneet, vaikka laitoksen suunnitteluperusteena ei ollutkaan niin voimakas maanjäristys kuin mitä siihen 2011 kohdistui.

Onagawan suunnitteluperusteissa oli huomioitu 9,1 m tsunamin mahdollisuus siinä missä Fukushima Daiichissa oli pe-



Erityisiä puhdistustoimia vaativa alue on rajattu 20 km laitoksesta tai jos annosnopeus ylittää 20 mSv/a. Intensiivinen puhdistusalueen rajana pidetään 0,23 μ Sv/h annosnopeuden ylitystä eli yli 2 mSv vuosiannosta.

Normaali taustasäteily Japanissa on 1

mSv/a ja puhdistustoimilla pyritään vähentämään onnettomuuden aiheuttama lisäys tähän tasoon 1 mSv vuositason. Esimerkiksi Suomessa normaali taustasäteilyn annosnopeus on 0,05-0,30 μ Sv/h eli 0,5-2,7 mSv/a.

Puhdistustoimenpiteinä mainittakoon esimerkiksi pintamaakerroksen kuoriminen, pudonneiden lehtien kerääminen sekä talojen seinien pyyhkiminen, mitkä kaikki tuottavat valtavat määrät matala- ja keskiaktiivista jätettä.

Näille jätteille on suunnitteilla väliaikainen varastointilaitos vuoden 2015 alusta ja jätteiden loppusijoitus on suunniteltu aloitettavaksi 30 vuoden kuluttua.

Ympäristön puhdistuksesta kertyvien jätemäärien lisäksi Japanilla on vielä ratkaistavana Fukushima Daiichin käytöstäpoistosta syntyvän korkea-aktiivisen jätteen käsittely, oli se sitten suora loppusijoitus tai jälleenkäsittely.

*FM Sinikka Virtanen
Tohtorikoulutettava
Helsingin yliopisto
Radiokemian laitos
sinikka.m.virtanen
@helsinki.fi*



Matkakertomus

Johanna Hansen, Maria Palomäki ja Topias Siren



Paldiskin käytöstäpoistettavat reaktorit löytyvät tämän hallin uumenista. Kuva: Maria Palomäki

Ensimmäisen kerran kuulin paikasta nimeltä Paldiski Jaakko Laitisen romaanista Kuoleman kellarit 90-luvun alussa. Fiktiivinen tarina alkaa, kun Suomenlahden eteläpuolella on tapahtunut ydinräjähdys. Tappava säteily saavuttaa Varsinais-Suomen tuntien kuluttua...



Sirpin ja vasaran edustalla poseeraavat Paldiskin kävijät ja eturivissä vasemmalta ovat tämän artikkelin laatijat Topias Siren, Johanna Hansen ja Maria Palomäki.

Kyseisen kirjan lukemisen jälkeen Paldiski jäi mieleen kiinnostavana kohteena, vaikkei kirjassa varmastikaan ollut totta muuta kuin paikannimet. Parikymmentä vuotta myöhemmin tarjoutui mahdollisuus järjestää TVO:n ja Posivan väen vierailu Paldiskin tukikohtaan.

Paldiski oli neuvosto-aikaan suljettu sotilasalue Pohjois-Virossa. Paldiskin kaupunkikuvaa hallitsevat Neuvosto-aikaiset kolhot betonilähiöt, mutta toisaalta rannikon upeat kalkkikivimuodostumat majakoineen korostavat niemimaan luonnon kauneutta.

Paldiski on toiminut satamana 1700-luvulta lähtien, ja rautatie rakennettiin kaupunkiin jo 1800-luvun lopulla. Koska kulkuyhteydet olivat hyvät ja niemimaa helposti eristettävissä, oli Paldiski erittäin hyvä paikka sotilastukikohdalle. Neuvosto-aikaan koko Paldiski oli aidattu, ja sinne kulkua rajoitettiin. Paikalliset asukkaat oli siirretty tukikohdan alta pois. Heidän tilalla oli ollut kiivaimpaan asevarustelu-aikaan 16 000 neuvostoliittolaista sotilasta ja upseeria. Kaikkea alueella tapahtunutta sotilastoimintaa ei varmaan ole edes kerrottu suurlle yleisölle.

Keskellä Paldiskia vielä nykypäivänä sijaitseva iso neuvostomainen rakennuskolossi toimi koko Neuvostoliiton sukellusvenemiestien koulutuspaikana. Hieman syrjässä - vain muutaman kilometrin päässä kaupungin keskustasta - sijaitsi koulutuskeskus, jolla aikanaan oli kaksi koulutuskäyttöön tarkoitettua ydinsukellusvenettä. Vierailukohteen me oli juuri tämä, nykyisin Eesti Alaran



hallinnoima alue, joka on tänä päivänäkin aidattu ja tiukan turvatarkastuksen takana.

Käytöstäpoistoa ja välivarastointia

Paldiskin ydinsukellusvenelaivaston koulutustukikohdan rakentaminen alkoi jo 60-luvulla. Koulutus jatkui aina vuoteen 1993 asti - jopa Viron itsenäistymisen jälkeen. Koulutuksen tukena toimivat oikeat sukellusveneet, jotka tosin eivät ikinä tainneet päästä mereen saakka. Vanhemmassa sukellusveneen voimälähteenä oli 70 MW:n painevesireaktori, joka oli koulutusikänsä vuodesta 1968 lähtien. Toisen sukellusveneen uudempi 90 MW reaktori käynnistettiin vuonna 1983. Molemmat reaktoreista suljettiin tammikuussa 1989.

Neuvostoliiton hajotessa Paldiskin kohtalo oli ratkaistava. 90-luvun alussa alueella oli vielä entisen Neuvostoliiton laivaston henkilöstöä. Alueen ylläpito luovutettiin vuonna 1995 Virolle, joka käynnisti oman käytöstäpoisto-ohjelmansa vuonna 1997. Viron valtion omistama ydinjäte-yhtiö Eesti Alara perustettiin vuonna 1995 huolehtimaan käytännön toimenpiteistä ja yhtiön pääasialliset tehtävät liittyvät alueen monitorointiin sekä matala- ja keskiaktiivisten jätteiden käsittelyyn sekä välivarastointiin sekä ympäristön siisteydestä huolehtimiseen.

Ympäristön monitorointiin kuuluvat mm. kuukausittaiset gammamittaukset ja neljännesvuosittaiset näytteenotot

Lähikosketus sukellusveneen kylkeen betonisen sarkofagin sisäpuolella. Sarkofagin sisällä annosnopeus on alueen normaalin luonnon taustasäteilyn tasoa 0,07 μ Sv/h ja suojavausteita ei tarvita. Reaktorin kyljessä annosnopeus on noin 1 mSv/h tasoa, mutta sinne ei vieraita päästetty. Kuva: Maria Palomäki.

yhdestä alueen kairanreiästä sekä alueen valumavesistä. Tätä paikkakohtaista seurantaohjelmaa täydentää Eestin Meri-Instituutin (Estonian Marine Institute) näytteenotto-ohjelma. Merinäytteitä seurataan myös HELCOM sopimuksen puitteissa.

Paldiskin alueen kunnostamiseen on saatu varoja länsimaista ja EU:lta. Lisäksi kansainvälistä ydinjätehuollon asiantuntemusta on ollut mukana projektin erivaiheissa. Tavoitteena on ollut eristää alue viidenkymmenen vuoden ajaksi ja välivarastoida turvallisesti alueella olevat ydinjätteet sekä huolehtia matala- ja keskiaktiivisten jätteiden loppusijoituksesta. Lopullisella aikataululla ei ole kiirettä, koska rakenteiden ja jätteiden aktiivisuus laskee koko ajan, jolloin jätteiden käsittely helpottuu.

Paikan päällä

Alueella sijaitsevat nykyisin osittain puretut sukellusveneet reaktoreineen sekä niiden käyttö- ja käytöstäpoistojätteiden välivarastot. Reaktoreiden polttoainesauvat ja merkittävät aktiiviset komponentit on palautettu Venäjälle 90-luvun alkupuolella, kuten myös suurin osa sukellusvenien metallisista rakenteista. Sukellusvenien keskiosat ovat vielä paikoillaan sisältäen niiden voimälähteeksi rakennetut reaktorit. Molemmat reaktorit ja niitä ympäröivät sukellusvenien rakenteet on suojattu ympäristöstä alipaineistetulla teräsbetonisilla sarkofageilla, joista toiseen ryhmämme pääsi tutustumaan.

Vierailun aikana saimme tutustua myös matala- ja keskiaktiivisten jätteiden varastointiin. Koulutuskeskuksen käytön aikana tuottaman radioaktiivisen jätteen ja sen purkumateriaalien lisäksi alueella välivarastoidaan teollisuuden, tutkimuksen ja sairaaloiden tuottamaa aktiivista jätettä. Välivarastoina toimivat suuret betonikuutiot.

Paldiski ei siis ole enää täysin suljettu vaan verrattuna menneeseen hyvin vieraanvarainen. Ydinvoiman ja ydinjätehuollon parissa työskentelevä ryhmämme pääsi tutustumaan sarkofageihin sekä välivarastoon. Turvallisin mielin voimme todeta, että Paldiskissa asioita hoidetaan tänä päivänä avoimesti ja tulevaisuudesta huolehditaan moitteettomasti.

Kirjoittajat: Johanna Hansen, Posiva Oy Maria Palomäki, TVO Oyj ja Topias Siren, Posiva Oy

Säätövoimatekniikan perusteet

”Venäläisestä nappulasta ovat erityisen kiinnostuneita Fortum ja Fennovoima.”

Tarkasteltuaan suomalaisen ydinvoimarakentamisen historiaa Fennovoima on tullut johtopäätökseen, että ydinvoimalaitoshankkeen valmistelu jokseenkin suoraviivaisesti johtaa katastrofaaliseen toteutukseen. Sen sijaan sekoilu ja tempoilu valmisteluvaiheessa – nuorisokielellä *säätäminen* – johtaa sujuvaan rakennusprojektiin ja hienosti toimivaan laitokseen.

Jos olisi seurannut läheltä, miten koville hakijat periaatepäätösvaiheessa laitettiin, hämmästyttäisi, miten kevyesti jatkuva teutarointi Hanhikivihankkeen ympärillä on poliittisesti otettu. Fennovoiman hankkeessa johto, omistuspuhja, osaaminen, toteutusajataulu, laitostoimittaja ja laitoksen sähköteho ovat ristiriidassa hakemuksen kanssa, ja muutokset on annettu ilmoitusluontoisina asioina. Laitoksen sijoituspaikka on sentään pysynyt periaatepäätöshakemuksessa esitetyissä vaihtoehdoissa.

Reaktori-insinöörille ei ole niinkään tärkeää kuka tekee ja mihin, kunhan tehdään hyvin. Vain silloin päteville tekijöille on kysyntää. Tässä mielessä Hanhikivihankkeen raskain synty on oman osaamisen kehittämisen laiminlyönti – traditio, jonka TVO aloitti Olkiluoto 3 -hankkeen myötä.

Puolentoista vuoden ajan reaktori-insinööri on vierailut päivittäin Fennovoiman rekrytointisivuilla katsomassa, että milloin tuleva rakentamisluvan hakija hakee joukkueeseensa ”introverttia ja eksentristä, ja niillä muodoin pätevää reaktoriketiikan huippuasiantuntijaa”. Turhaan, kun koko aikana ei ole haettu muita kuin harjoittelijoita ja lopputyön tekijöitä.

Yhtäällä säädetään muuttuneiden olosuhteiden takia, toisaalla säädetään ihan lämpimikseen. Joku on syöttänyt IAEA:n kansainväliselle IRRS-tarkastusryhmälle savulohen ja leipäjuus-

ton ohessa ajatuksen siitä, että Suomessa ydinturvallisuusviranomaisen riippumattomuudessa on ongelmia. Tai oikeastaan ulkopuoliselle saattaa näyttää siltä, että riippumattomuudessa voi teoriassa olla ongelmia, vaikka todellisuudessa niitä ei ole kukaan koskaan pystynyt havaitsemaan.

Kesälomakauden jo käynnistyttyä sähköpostiin tupsahti luonnos hallituksen esityksestä, jolla ydinenergiakia muutettaisiin. Sen sijaan, että olisi maltettu odottaa lupailtua ydinenergiakokonaisuudistusta periaatteellisten kysymysten avaamiseksi kunnon pohdintaan, lakiin aiotaan ikään kuin ohimennen ja IRRS-suositusten täyttämiseksi paaluttaa merkittäviä muutoksia periaatepäätösmenettelyyn ja valvontaviranomaisen toimivaltaan.

Tulee väkisin mieleen vanha kasku amerikkalaisesta, saksalaisesta ja suomalaisesta, jotka kohtasivat savannilla elefantin. Jenkki mielti mielessään, miten norsulla voisi lyödä rahoiksi. Saksalaisen ajatuksissa pyöri, miten noin mahtavan eläimen voisi valjastaa koneen voimanlähteeksi. Suomalainen oli huolissaan: mitähän tuo elefanti minusta oikein ajattelee?

Loman lähestyessä loppuaan Yle uutisoi STUKin pääjohtajan viransijaisuuden täyttämisestä. Reaktori-insinööriä ilahdutti, että tehtävään valittiin talon sisältä henkilö, jossa yhdistyvät edeltäjiensä parhaat ominaisuudet.



Venäläisen Novovoroneshin ydinvoimalaitoksen kolmosreaktorin valvomopaneelit. Huomaa punainen kaksoiskytkekin keskikuljetin vasemmassa reunassa, josta kytketään päälle ja pois laitoksen käyttämiseen tarvittava organisaatio ja osaaminen. Kytkimen viisaalla käytöllä voidaan säästää huomattavasti rakentamis- ja käyttökustannuksissa. Kuva: Wikimedia Commons / RIA Novosti, Sergey Pyatakov.



ATS

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

Johtokunta

Puheenjohtaja Chairperson	TkT Liisa Heikinheimo Teollisuuden Voima Oyj Puhelin (02) 83 811 puheenjohtaja@ats-fns.fi
Varapuheenjohtaja Vice-chairperson	TkT Olli Okko STUK olli.okko@stuk.fi
Sihteeri Secretary	DI Anna Nieminen VTT sihteeri@ats-fns.fi p. +358 40 159 1156
Rahastonhoitaja Treasurer	DI Arto Ylönen Lappeenrannan teknillinen yliopisto rahastonhoitaja@ats-fns.fi
Jäsenet Board Members	DI Ilkka Männistö Fennovoima ilkka.mannisto@fennovoima.fi
	DI Juhani Palmu Posiva juhani.palmu@posiva.fi
	DI Tapani Raunio Fortum Power and Heat Oy tapani.e.raunio@fortum.com
	TkT Filip Tuomisto Aalto-yliopisto filip.tuomisto@aalto.fi
	TkT Timo Vanttola VTT timo.vanttola@vtt.fi

Toimihenkilöt

ATS Young Generation	DI Antti Paajanen Fortum antti.paajanen@fortum.com
Kv-asioiden sihteeri International affairs	TkT Jari Tuunanen Fortum jari.tuunanen@fortum.com
Energiakanava Energy Channel WiN Finland	DI, FM Anna-Maria Länsimies, Fortum anna-maria.lansimies@fortum.com
Ekskursios sihteeri	DI Juhani Palmu Posiva Oy juhani.palmu@posiva.fi
Www-vastaava	DI Heikki Suikkanen Lappeenrannan teknillinen yliopisto webmaster@ats-fns.fi
ATS-Info	TkT Seppo Vuori VTT seppo.vuori@welho.com
ATS Seniorit	Tekn. lis. Eero Patrakka Teollisuuden Voima Oyj eero.patrakka@tvo.fi

Toimitus ja yhteystiedot

Julkaisija:

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

Lehti ilmestyy neljä kertaa
vuodessa.

ISSN-0356-0473

Miktor

Vuoden 2013 lehtien teemat: 1/2013

Jätenumero

2/2013

Tutkimus

3/2013

ATS Työryhmät

4/2013

Ekskursio

Päätoimittaja, Editor in Chief:

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

Taitto: Kymen Ydinviestintä

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

Erikoistoimittajat:

DI Lauri Rintala
lauri.rintala@aalto.fi
DI Eveliina Takasuo
eveliina.takasuo@vtt.fi
FM Johanna Hansen
johanna.hansen@posiva.fi
DI Riku Mattila
riku.mattila@stuk.fi
DI Pekka Nuutinen
pekka.nuutinen@fortum.com
DI Juha Luukka
juha.luukka@fennovoima.fi
FM Tiina Kuusimäki
tiina.kuusimaki@tvo.fi
Haastattelutoimittaja:
DI Klaus Kilpi
klaus.kilpi@welho.com





**ATS:n
uudet jäsenet**

Varsinaiset jäsenet:

Markus Hartikainen, Fortum
Jonne Kanerva, Fortum
Antti Ikonen, Saanio & Riekkola Oy

Opiskelijajäsen:

-

Palautusosoite:
Suomen Atomiteknillinen Seura
PL 78
02151 ESPOO

Kannatusjäsenet:

Alstom Finland Oy

B+Tech Oy

Fennovoima Oy

FinNuclear ry

Fortum Power and Heat Oy

Mirion Technologies (RADOS) Oy

Platom Oy

Pohjoismainen Ydinvakuutuspooli

Pohjolan Voima Oy

Posiva Oy

PrizzTech Oy

Saanio & Riekkola Oy

Siemens Osakeyhtiö

Teknologian tutkimuskeskus VTT

Teollisuuden Voima Oyj

TVO Nuclear Services Oy

Voimaosakeyhtiö SF Oy

Wärtsilä Finland Oy