

# Fuusiopalosta ehtymätöntä perusvoimaa

■ Markus Airila ja Seppo Karttunen

**Fuusioreaktorissa humisee eksoottinen tuli. Kuten kemiallinen palaminen fuusiopalokin voi ylläpitää itseään niin kauan kuin polttoainetta riittää. Fuusioreaktiossa vapautuu kuitenkin miljoonia kertoja enemmän energiaa kuin kemiallisessa palamisreaktiossa, ja tämä energia on valjastettavissa laajamittaiseen sähköntuotantoon. Houkuttelevaksi energianlähteeksi fuusion tekevät myös käytännössä rajattomat polttoainevarat ja puhtaus. Fuusiopalo vaatii yli sadan miljoonan asteen lämpötilan, joten fuusioenergian valjastaminen on merkittävä tekninen haaste.**

Fuusio pitää yllä maapallon elämää. Aurinko, kuten muutkin tähdet, on valtava fuusioreaktori. Auringosta avaruuteen säteilee noin  $4 \times 10^{26}$  wattia lämpöä ja valoa, josta vähäinen murtoosa osuu maapallolle ja riittää pitämään yllä veden kiertokulkua, tuulia ja biosfääriä. Niinpä valtaosa käyttämästämme energiasta on peräisin fuusiosta, mukaan lukien fossiilisiin polttoaineisiin varastoitunut kemiallinen energia, joka muodostaa nykyisin yli 80 % maailman primäärienergian kulutuksesta.

Energiakeskustelu käy vilkkaana erityisesti ilmastokysymyksen ympärillä. Samalla kun hiiltä vapauttavista energiantuotantomenetelmistä pyritään luopumaan, maailmanlaajuisesti on odotettavissa merkittävä energian-, erityisesti sähköntarpeen kasvu. Väestönkasvun rinnalla kehittyvien maiden suuret väestöt vaurastuvat ja lisäävät kulutustaan. Ennusteiden mukaan primäärienergian kulutus kasvaa 15 terawatista noin kaksinkertaiseksi vuoteen 2050 mennessä [1, 2]. Annettujen reunaehtojen puitteissa mikään yksittäinen energianlähde ei pysty vastaamaan tähän kysyntään, vaan kaikki kestävät vaihtoehdot – vesivoima, bioenergia, tuuli, aurinko, fissio ja fuusio – on valjastettava käyttöön.

Fuusioteknologian kehitystyö on kesken, eikä fuusio ehdi ensi hätään auttamaan kasvihuonekaasujen leikkaamisessa. Pitkällä aikavälillä fuusio on kestävä ratkaisu osana CO<sub>2</sub>-vapaata energiantuotantoa. Sillä on myös muita kiistattomia vahvuuksia, joiden vuoksi se kannattaa kehittää valmiiksi sovellukseksi. Fuusio on turvallinen ja ympäristöystävällinen, erityisesti perusvoiman tuotantoon suurissa yksiköissä soveltuva energiamuoto, jonka käytettävissä on käytännössä rajattomat, maailmanlaajuisesti tasaisesti jakautuneet polttoainevarat. Sen on myös helpompi saavuttaa poliittinen ja yleinen hyväksyntä kuin perinteisen ydinvoiman, koska fuusiopalo ei voi karata hallinnasta, eikä siinä synny radioaktiivisia palotuotteita.

Fuusiolta vaadittava teknologia on osoittautunut vaikeammaksi kuin viime vuosisadan puolivälissä osattiin odottaa. Tuolloin arvioitiin yleisesti, että fuusioenergialla tuotettaisiin vuonna 2000 merkittävä osa maailman sähköstä. Tälläkin hetkellä matkaa kaupalliseen tuotantoon on vuosikymmeniä, mutta reitti perille on jo näkyvissä. Ranskassa rakenteilla olevan Iter-tutkimusreaktorin koeohjelmasta saatavien tieteellisen tiedon ja teknisten kokemusten perusteella voidaan rakentaa sähköä tuottava demonstraatiovoimala, joka onnistuessaan avaa markkinat kaupalliselle tuotannolle. Koska merkittävät muutokset laajoissa energijärjestelmissä tapahtuvat hitaasti, fuusio tavallaan häämöttää jo näköpiirissä myös kansallisesta näkökulmasta katsottuna. Esimerkiksi Olkiluodon ydinvoimalaitosten käyttöikä on useita kymmeniä vuosia ja niiden korvaaminen vuosisadan jälkipuoliskolla voisi tapahtua jo fuusiolaitoksilla.

Tämä artikkeli on katsaus fuusioenergian perusteisiin, vallitsevaan teknologiaan ja tutkimuksen nykytilaan. Koska fuusiolla on keskei-

nen rooli maailmankaikkeuden aineen ja energian kierrossa, johdantona esitetään perusteet tähtien toiminnasta. Seuraavaksi tutustutaan fuusiotutkimuksessa käytettäviin teknologioihin ja erityisesti rakenteilla olevaan seuraavan sukupolven Iiter-kooreaktoriin. Lopussa on lyhyt katsaus suomalaisten yliopistojen, tutkimuslaitosten ja yritysten roolista fuusiotutkimuksessa sekä Suomen fuusiotutkimuksen organisoinnista osana eurooppalaista tutkimusohjelmaa.

### **Painovoiman puristus sytyttää tähdet**

Atomiytimet koostuvat protoneista ja neutroneista, ja protonien lukumäärä (eli järjestysluku  $Z$ ) on kullekin alkuaineelle ominainen. Erilaisien ytimien ja yksittäisten neutronien välisissä törmäyksissä protonit ja neutronit voivat järjestyä uudelleen. Ydinreaktiot siis muuttavat alkuaineita toisiksi ja niiden avulla esimerkiksi kullan valmistaminen muista metalleista on mahdollista. Ytimen ns. sidosenergia, joka olisi vapautunut, jos ydin olisi konkreettisesti muodostunut vapaista protoneista ja neutroneista, voidaan laskea Einsteinin kuuluisasta yhtälöstä  $E = mc^2$  vertaamalla yksittäisten protonien ja neutronien massaa ytimen massaan. Saman yhtälön perusteella tietyssä reaktiossa vapautuva tai sitoutuva energia saadaan suoraan reaktiotuotteiden ja lähtöydinten massaeron perusteella.

Ydinreaktio kahden hiukkasen välillä voi tapahtua vain, jos hiukkasilla on riittävästi energiaa, massa mukaan lukien, lopputuotteiden muodostumiseksi – ja erityisen kiinnostavia ovat ne reaktiot, joissa energiaa jää yli eli vapautuu hiukkasten liike-energiana. Alkuaineista tiukimmin sitoutunut ydin on raudalla ( $Z = 26$ ) eli sen sidosenergia massayksikköä kohden on eniten negatiivinen. Tämä avaa kaksi reittiä vapauttaa energiaa ydinreaktioissa: rautaa kevyempien ytimien yhdistäminen eli fuusio ja rautaa raskaampien ytimien halkaiseminen eli fissio. Raskaiden ytimien, kuten uraanin, plutoniumin ja toriumin, halkaisemiseen perustuva perinteinen ydinvoima valtasi jo 1970-luvulla merkittävän osuuden maailman energiantuotannossa.

Tähtien energiantuotto puolestaan perustuu kevyiden ytimien yhtymiseen raskaammiksi. Siten fuusiolla on myös tärkeä rooli vetyä raskaampien alkuaineiden tuottajana. Aurinon kaltaisissa tähdissä tärkein reaktio koostuu sarjasta yksittäisiä reaktioita, joiden tuloksena neljä vetyatomia ydintä (eli protonia) muodostaa kahdesta protonista ja kahdesta neutronista koostuvan heliumytimen. Koska protoni-protonireaktio tapahtuu hitaasti, polttoainetta riittää pitkään ja tähden aktiivinen kausi kestää miljardeja vuosia. Huolimatta reaktion pienestä todennäköisyydestä fuusiopalo syttyy ja pitää itseään yllä tähden painovoiman puristaessa kaasun hyvin tiheäksi. Mitä massiivisempi tähti on, sitä tiheämmäksi aine puristuu ja sitä kiihkeämmäksi fuusiopalo käy vapauttaen enemmän energiaa. Vety kuluu siksi nopeammin ja huolimatta suuremmasta kokonaisuudesta raskas tähti palaa loppuun nopeammin kuin kevyt tähti. Tähden elinkaaren loppuvaiheessa reaktiotuotteiden, kuten heliumytimien, osuus tähden koostumuksessa nousee merkittäväksi ja myös fuusioreaktiot niiden välillä yleistyvät, ja näin jatketaan kohti raskaampia alkuaineita aina rautaan saakka. Sammuvan tähden massa ratkaisee, miten näyttävästi sen elinkaari päättyy. Kevyet tähdet hiipuvat vähitellen ruskeiksi kääpiöiksi, kun taas Aurinon kaltaiset tähdet laajenevat ensin punaisiksi jättiläisiksi ja sen jälkeen niiden ydin muodostaa hiipuvan valkoisen kääpiön. Massiivisten tähtien elämä päättyy rajuun supernovaräjähdykseen, josta voi jäädä jäljelle äärimmäisen tiheä neutronitähti tai musta aukko. Supernovaräjähdyksissä syntyy rautaa raskaampia ytimiä, kuten urania, johon varastoinutta supernovaenergiaa vapautetaan nykyisissä ydinvoimaloissa.

### **Keinotekoinen fuusioplasma leijuu magneettikentässä**

On olemassa fuusioreaktioita, jotka saadaan tapahtumaan merkittävästi helpommin kuin tähdissä hallitseva protonien välinen reaktio. Suurin vaikutusala on DT-fuusiolla, jossa vedyn raskas isotooppi deuterium (D) ja radioisotooppi tritium (T) fuusioituvat tuottaen heli-

umytimen, neutronin ja 17,6 MeV energiaa (joka vastaa noin 100 000 kWh polttoainegrammaa kohden). Merkillä pantavaa tässä on se, että radioaktiivisesta polttoaineesta (T) syntyy fuusiopaloissa ei-radioaktiivista heliumia. Tämänkin reaktion valjastaminen nettoenergian tuotantoon vaatii polttoaineen kuumentamisen noin sadan miljoonan asteen lämpötilaan. Näin kuumissa oloissa atomit ionisoituvat täysin ja muodostavat plasman, jossa positiivisesti varatut ytimet ja negatiivisesti varatut elektronit liikkuvat toisistaan vapaina.

Auringon gravitaation kaltaista voimaa ei ole laboratorioissa käytettävissä fuusiopolttoaineen koossapitoon. Ensimmäisenä fuusio saatiin toimimaan vetypommissa ns. inertiaakoossapitoa käyttäen. Tällöin polttoainekohtiota puristetaan nopeasti moninkertaiseen tiheyteen, jolloin se samalla kuumenee syttymislämpötilaan. Puristus voidaan toteuttaa räjäyttämällä polttoainetta ympäröivä fissionpanos, josta vapautuva röntgensäteily puristaa fuusiokohtion syttymistilaan. Jos polttoainetta on runsaasti, sen hitaus riittää pitämään plasman koossa niin kauan, että merkittävä osa polttoaineesta ehtii fuusioitua ennen paineen nousun aiheuttamaa räjähdysmäistä laajenemista.

Rauhanomaisilta sovelluksilta vaaditaan, että vapautuva energia on hallittavissa, minkä vuoksi räjäytettävän fuusiokohtion massa voi olla vain muutama milligramma. Pelletti pitää voida puristaa äärimmäisen symmetrisesti, jotta plasman ennenaikainen purskahtelu ja hävikki vältetään. Käytännössä tähän tarvitaan useita tarkoin kohdistettuja, tehokkaita ja erittäin lyhyitä laserpulsseja. Inertiaalikoossapidon hankkeista USA:n NIF (*National Ignition Facility*) -hanke on juuri lähtenyt käyntiin ja valmistelevia kokeita on jo tehty megajoulen laserpulsseilla [3].

Jäljempänä keskitytään kuitenkin magneettiseen koossapitoon, joka muodostaa Euroopassa fuusiotutkimuksen valtavirran. Fuusio-reaktioiden vaatimien lämpötilojen perusteella on ilmeistä, että plasmaa ei voida hallita kiinteitä astioita käyttäen. Sen sijaan magneettikenttä rajoittaa varattujen hiukkasten liikkeen yksinomaan kentän suuntaiseksi ja näin plasma

voidaan eristää astian seinistä. Muotoilemalla magneettikenttä renkaaksi saadaan myös päätyhäviöt eliminoitua. Pisimmälle kehittynyt magneettisen koossapidon tekniikka on nimeltään *tokamak*, munkkirinkilän muotoinen laite, jossa plasmaa koossapitävä magneettikenttä muodostuu yhdessä ulkoisissa kelojen ja itse plasmassa kulkevan voimakkaan sähkövirran yhteisvaikutuksesta.

## 16 megawattia fuusiotehoa

Tavallisiin, varauksettomista molekyyleistä koostuviin kaasuihin ja nesteisiin verrattuna magneettikentässä pidettävässä plasmassa esiintyy suunnaton määrä erilaisia hiukkasten välisiä kollektiivisia ilmiöitä ja epästabiilisuuksia. Osa näistä ilmiöistä luo mahdollisuuksia plasman kuumentamiseen ja kontrollointiin, toiset taas rajoittavat operointimahdollisuuksia, esimerkiksi tekevät plasman epävakaksi sen tullessa liian tiheäksi. Fuusion turvallisuus perustuu juuri siihen, että fuusiopalo sammuu kaikissa häiriötilanteissa. Palotilassa kullakin hetkellä oleva pieni polttoainemäärä kuluu muutamassa sekunnissa loppuun. Toisaalta nimenomaan plasman oikukkaan käyttäytymisen parissa on tuskailtu ne vuosikymmenet, joiden aikana fuusio toivottiin jo saatavan laajaan käyttöön.

Fuusiotutkimus on siis pitkään painottunut voimakkaasti plasmafysiikkaan. Tarpeetonta radioaktiivisten aineiden käsittelyä halutaan välttää, ja siksi nykyisissä tokamakeissa on luotu pääasiassa vety-, deuterium- ja heliumplasmaa, joissa fuusio-reaktioita tapahtuu hyvin vähän. Varsinaisia fuusiokokeita deuteriumin ja tritiumin (DT) seoksella on tehty vain harvoin. Ne ovat kuitenkin osoittaneet, että fuusiosta osataan vapauttaa hallitusti huomattavia tehoja. Vuonna 1997 tehdyissä DT-kokeissa Englannissa Oxfordin liepeillä toimivassa JET-tokamakissa (*Joint European Torus*) onnistuttiin tuottamaan 16 megawatin fuusioteho lyhytkestoisessa purkauksessa [4, 5].

## Iter on teknistieteellinen koe

Suurimmat nykyiset tokamakit ovat suorituskykyinsä rajoilla. On toki odotettavissa, että seu-

raavissa JET:illä tehtävissä DT-kokeissa saavutetaan suurempi fuusioteho kuin yli 15 vuotta aiemmin sekä plasmafysiikan osaamisessa että itse koelaitteen kuumennus- ja plasman hallintajärjestelmissä tapahtuneen kehityksen ansiosta. Pohjimmiltaan JET on kuitenkin liian pieni saavuttaakseen taloudelliselta voimallisuudelta vaadittavan energiavahvistuksen – sen tulee olla useita kymmeniä. Tähän mennessä on päästy lähelle ns. breakeven-tasoa eli tehovahvistusta yksi, jolloin plasmaa kuumennetaan saman verran kuin se tuottaa fuusiotehoa.

Energiavahvistus kasvaa voimakkaasti, kun fuusiolaitteen kokoa kasvatetaan. Tähän on yksinkertainen syy: Plasman tilavuuteen verrannollinen fuusioteho kasvaa säteen kolmannessa potenssissa, kun taas plasman pinta-alaan verrannolliset häviöt vain säteen toisessa potenssissa. Todellisuudessa riippuvuus on vielä voimakkaampi, koska suuren laitteen keskustassa saavutetaan pientä laitetta suurempi tiheys ja korkeampi lämpötila eli suurempi fuusiotehotiheys. Niinpä taloudellinen fuusiovoimala on väistämättä suuri, noin gigawatin sähkötehon tuottava yksikkö. Senärkevin käyttötapa on jatkuva, vakiotehoinen perusvoiman tuotanto, koska kustannusrakenne on pääomavaltainen. Myös tekniseltä kannalta on edullista toimia vakioteholla ja välttää tarpeettomia komponenttien lämpötilojen vaihtelua.

Tieteellisessä mielessä olisikin suhteellisen suoraviivaista siirtää voimalaitoskokoluokan fuusiokokeisiin. Edellä mainitut tilavuus- ja pinta-alariippuvuudet kääntyvät kuitenkin tekniseksi ongelmaksi. Koska plasman tuottaman fuusiotehon vastaanottava pinta ei kasva samassa suhteessa kuin fuusioteho, joudutaan materiaalien kestäkyvyn ääri rajoille eli jopa yli 10 megawatin lämpökuormiin neliometriä kohti. Materiaalikysymysten lisäksi suurten suprajohdattavien magneettien, tehokkaiden kuumennusjärjestelmien ja monimutkaisten metallirakenteiden valmistaminen on teknisesti äärimmäisen haastavaa. Tähän haasteeseen vastataan kansainvälisessä Iter-hankkeessa [6], jossa tavoitteena on osoittaa fuusioenergian teknistieteellinen toteutettavuus. Iterin missiona on siis osoittaa,

että fuusio on tulevaisuudessa todellinen energiavaihtoehto.

Iter-tokamak on suunniteltu tuottamaan 500 megawatin fuusioteho, kun plasman ulkoiseen kuumennukseen ja hallintaan käytetään 50 megawattia eli Iterissä pyritään saavuttamaan 10-kertainen tehovahvistus. Hanke on maailmanlaajuinen ja sen toteuttavat yhdessä EU (+ Sveitsi), Intia, Japani, Kiina, Etelä-Korea, Venäjä ja Yhdysvallat, eli mukana on yli puolet ihmiskuntaa. Itse tokamak on rakenteilla Cadarachesa Etelä-Ranskassa ja sen on tarkoitus tuottaa ensimmäinen tekninen plasmansa ennen vuotta 2020. Varsinaiset fuusiokokeet DT-plasmalla alkavat vuoden 2025 tienoilla, kun käyttökemusta on riittävästi ja järjestelmien luotettavuus on osoitettu. Fuusiokokeissa fuusioneutronit aktivoivat fuusiokammion sisä rakenteet ja ensiseinä on kontaminoituu tritiumilla, joten fuusiokokeiden alettua kaikki huolto joudutaan tekemään kauko-ohjatusti.

Vuoden 2009 lopussa Iter-tiimissä Cadarachesa työskenteli 450 henkeä, joille on rakennettu tilapäiset toimistotilat. 42 hehtaarin kenttä laitosrakennuksia varten valmistui huhtikuussa 2009 ja itse rakennustyöt alkavat tänä tai ensi vuonna. Suurten komponenttien kuljetukseen tarvittava 106 kilometrin parannettu tie satamasta (Fos-sur-Mer) Cadaracheen on valmistumaisillaan. Rakennusten ja tärkeimpien komponenttien, kuten magneetit ja vakuuikammio, hankintajärjestelyt ovat käynnissä.

## **Voimalaitos tuottaa puolet polttoaineestaan itse**

Tritiumia esiintyy luonnossa hyvin vähän. Sitä syntyy raskasvesireaktoreissa, mutta liian vähän fuusiopolttoaineena käytettäväksi. Siksi Iterissä testataan tritiumin hyötöä litiumista fuusiossa vapautuvien neutronien avulla. Hyötö perustuu litiumytimien ja neutronien välisiin ydinreaktioihin, joissa tritiumia syntyy enemmän kuin fuusiopalossa kuluu. Siksi fuusioplasmaa ympäröivä Li-vaippa on olennainen osa fuusioreaktoria. Itse asiassa DT-fusion primääripolttoaineet ovatkin siis deuterium (erotettavissa vedestä) ja litium (esiintyy maankuoreessa ja merivedessä).

Molemmat ovat niin yleisiä, että ne riittäisivät fuusioreaktorissa käytettyinä kattamaan ihmiskunnan nykyisen energiankulutuksen miljoonien vuosien ajan.

Iter on koealite, jota käytetään vajaa kymmenen minuuttia kerrallaan, ja siksi sen tritiumin tarve voidaan tyydyttää muualta hankitulla tritiumilla. Hyötöä kokeillaan testimoduuleissa, jotka peittävät vain pienen osan plasmasta ja vastaavasti hyödyntävät vain pienen osan syntyvistä neutroneista. Fuusioteholtaan monta kertaa suuremmissa, jatkuvatoimisissa voimalaitoksissa tritiumin kulutus tulee olemaan yli satakertainen Iteriin verrattuna, minkä vuoksi ne suunnitellaan omavaraisiksi tritiumin suhteen. Todellisen hyötövaipan pitää hyödyntää vapautuvat neutronit tehokkaasti ja siksi ympäröidä plasma mahdollisimman kattavasti.

Tritium on radioaktiivista ja puoliintuu 12 vuodessa beetahajoamisen kautta. Koska tritium on kemialliselta luonteeltaan vetyä, se on normaalioloissa herkkäliikkeen kaasu ja voi myös muodostaa radioaktiivista vettä yhtyessään happeen. Näiden ominaisuuksien vuoksi tritiumin käsittely vaatii suurta huolellisuutta ja tarkkaa kirjanpitoa laitoksella olevan tritiumin määräästä ja sen jakautumisesta eri kohteisiin. Onkin suuri etu, että käytettävä tritium myös tuotetaan fuusiolaitoksella, jolloin vältetään kokonaan sen kuljetukset laitosalueen ulkopuolella, laitoksen aloitusvarantoa lukuun ottamatta.

Fuusiovoimalassa esiintyvä radioaktiivisuutta myös neutronien takia. Monet atomiytimet kaappaavat vapaita neutroneja, minkä seurauksena ne voivat muuttua radioaktiivisiksi. Siksi voimalaitoksen rakenteista syntyy keskiaktiivista jätettä, vaikka itse reaktiotuote helium on täysin harmiton. Materiaalivalinnat ratkaisevat syntyvien radioaktiivisten aineiden määrän ja puoliintumisaikat. Kehitystyön tavoitteena on löytää ja ottaa käyttöön sellaiset rakennemateriaalit, jotka voidaan reaktorissa käytettyinä vapauttaa säteilyvalvonnasta ja kierrättää sadan vuoden säilytyksen jälkeen. Kauempina tulevaisuudessa siintää myös mahdollisuus käyttää sellaisia fuusioreaktioita, joissa ei synny neutroneja eikä muuta radioaktiivisuutta. Tällaisia reaktiioi-

ta tunnetaan, mutta ne ovat monin verroin vaikeammin käynnistettävissä kuin deuteriumin ja tritiumin reaktio.

## Kustannuksista

Iterin kustannusarvio laadittiin teollisuuden kanssa vuonna 2001 ja sen loppusummaksi rakentamisen osalta saatiin noin 5 miljardia euroa. Iterin suunnittelu on päivitetty ja kustannusten uudelleenarviointi on käynnissä. Uuden hinnan odotetaan yleisesti olevan vähintään kaksinkertainen aiempaan nähden. Raaka-aineet, insinööryö ja rakennuskustannukset ovat arviointien välillä kallistuneet merkittävästi inflaatiota nopeammin, mutta osan noususta selittää myös se, että vanhassa kustannusarviossa oli puutteita, marginaaleja ei huomioitu eivätkä varaosat olleet mukana. Iterin arvo tulevaisuuden energiaratkaisun avaimena ymmärretään poliittisella tasolla, kohoavista kustannuksista huolimatta EU:n ministerineuvosto onkin ilmaissut tukensa hankkeen jatkamiselle.

EU:lla on Iter-konsortiossa isännän ja toisaalta myös maksumiehen rooli. EU kantaa lähes puolet rakentamiskustannuksista, ja muut osapuolet jakavat loppuosan kulut tasan. Suurin osa panostuksesta hoidetaan tarvikeoimituksina, joka takaa kaikille osapuolille mahdollisuuden fuusioteknologian kehittämiseen, mutta samalla monimutkaistaa laitoksen rakentamista ja nostaa sitä kautta myös kustannuksia.

Demo-reaktori on fuusioteholtaan todennäköisesti noin 2–3 GW, siis jopa 6-kertainen Iteriin verrattuna. Kustannukset eivät nouse samassa suhteessa, sillä kooltaan Demo ei ole paljoa Iteriä suurempi ja siinä tarvitaan paljon vähemmän kallista erikoistunutta diagnostiikkaa. Sen tilalle tulee perinteistä voimalaitostekniikkaa sähkön tuotannon demonstroimiseksi. Lisäksi Demolla tuotettu sähkö tuo takaisin osan kustannuksista.

On hyvin spekulatiivista arvioida fuusiosähkön hintaa. Se tulee varmasti olemaan kalliimpaa kuin nykyinen ydinvoima, mutta selvästi halvempaa kuin aurinkosähkö. Fossiilisten polttoaineiden ehtyessä ja kallistuessa tulevaisuuden energiamarkkinatilanne on kuitenkin hyvin eri-

lainen kuin tänään, joten fuusio voi olla hyvin kilpailukykyinen kestävien energiavaihtoehtojen joukossa. Pääomavaltaisena fuusiovoimalla soveltuu parhaiten perusvoiman tuotantoon ja ei siksi kilpaile uusiutuvien energialähteiden kanssa, joilla voidaan kattaa loppuosa energiatarpeesta.

## Suomi mukana fysiikassa ja teknologiassa

Suomen fuusiotutkimus on integroitu täysin EU:n fuusio-ohjelmaan Euratomin ja Tekesin välisellä assosiaatiosopimuksella. EU:n fuusio-ohjelmaan kuuluu tehokkaat keinot tutkijoiden liikkuvuuden mahdollistamiseksi Euroopassa ja myös Yhdysvaltoihin ja Japaniin. Suomessa fuusiofysiikan tutkimusta tehdään Aalto-yliopiston teknillisessä korkeakoulussa, Helsingin yliopistossa ja VTT:llä. Suomalaisen tutkimusohjelman painopistealueina fysiikan alalla ovat Iterin kannalta kaikkein keskeisimmät kysymykset: plasman reuna-alueen ilmiöt sekä plasman ja seiniämien välinen vuorovaikutus. Suomessa ei ole omaa plasmafysiikan koelaitetta, mutta tutkijoilamme on hyvin keskeinen rooli yhteiseurooppalaisen JET- ja saksalaisen AUG -tokamakien [7] koeohjelmien suunnittelussa ja toteutuksessa sekä tulosten analysoinnissa. JET on maailman suorituskykyisin fuusiolaite ja AUG:lla tehdään erittäin relevanttia tutkimusta Iterin kannalta.

Fuusioteknologiassa mittavin Suomessa toteutettava hanke on VTT:n ja Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) yhdessä rakentama täysikokoinen Iterin diverttorialueen huoltojärjestelmä (DTP2), jolla voidaan simuloida ja harjoitella reaktorikammiossa etäkäytöllä tehtäviä huoltotoimia. Teknologiaohjelmassa on mukana myös lukuisia suomalaisia yrityksiä kehittämässä mm. uusia valmistus-, liitos-, pinnoitus- ja karakterisointimenetelmiä Iterin komponentteja varten.

## Yhteenveto

Nykyisillä fuusiokoelaitteilla on demonstroitu fuusioenergian tuottamisen tieteellinen toteutettavuus, ja fuusiotutkimus on siirtymässä uuteen vaiheeseen. Iter on globaali projekti, jonka tavoitteena on demonstroida fuusion teknistieteellinen toteutettavuus. Jos tässä onnistutaan, fuusio on todellinen energiavaihtoehto perusvoiman tuotantoon tämän vuosisadan loppupuoliskolla, jolloin sitä tarvitaan. Iter on ehkä ihmiskunnan haastavin teknologiaprojekti ja sellaisena se on todellinen teknologiaveturi ja mahdollisuus teollisuudelle ei vain liiketoimintana vaan myös teknologiankehittäjänä. Iterin rinnalla tarvitaan vahva materiaalitutkimusohjelma optimaalisten materiaalien kehittämiseksi Demo-laitokselle ja kaupallisille fuusiovoimaloille. Suomen fuusiotutkimus ja teollisuus ovat aktiivisesti mukana Euratomin fuusio-ohjelmassa ja Iter-hankkeessa.

## Lähteet

- [1] *World Energy Outlook 2008*, IEA.
- [2] *Energy Visions 2050*, VTT 2009.
- [3] NIF-hankkeen www-sivut <https://lasers.llnl.gov/about/nif/> Viitattu 28.3.2010.
- [4] JET-tokamakkin www-sivut <http://www.jet.efda.org/> Viitattu 17.5.2010.
- [5] J. Jacquinot and the JET team, *Plasma Phys. Control. Fusion* 41, A13 (1999).
- [6] Iter-hankkeen www-sivut <http://www.iter.org/> Viitattu 17.5.2010.
- [7] ASDEX Upgrade -tokamakkin www-sivut <http://www.aug.ipp.mpg.de/> Viitattu 17.5.2010.

**Markus Airila on Aalto-yliopiston teknillisen korkeakoulun dosentti ja VTT:n tutkija. Seppo Karttunen on Aalto-yliopiston teknillisen korkeakoulun dosentti ja VTT:n johtava tutkija. Artikkelin perustuu Airilan Tekniikan päivillä 14.1.2010 pitämään esitelmään.**