

Ellinoora Tolvanen

FUUSIOENERGIAN TULEVAISUUS

Tie Kaupalliseen Sähköntuotantoon

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Kesäkuu 2024

TIIVISTELMÄ

Ellinoora Tolvanen: Fuusioenergian tulevaisuus

Future of the fusion energy

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaattiohjelma, ympäristö- ja energiatekniikan opintosuunta
Kesäkuu 2024

Fuusioreaktiossa kaksi kevyttä atomiydintä yhdistyy yhdeksi ytimeksi vapauttaen samalla suuren määrän energiaa. Reaktiota tapahtuu koko ajan tähdissä. Jos fuusioreaktori saataisiin toimimaan Maassa, se tarjoaisi loputtoman energianlähteen, koska se käyttää polttoaineenaan kahta vedyn isotooppia.

Tässä kirjallisuusselvityksessä tutustutaan fuusioreaktoreiden tulevaisuuteen, kuinka reaktoreiden tulisi kehittyä, jotta niitä voitaisiin käyttää kaupallisessa sähköntuotannossa. Ennen tulevaisuuteen perehtymistä työssä tutustutaan fuusioon ilmiönä, fuusioreaktoreiden historiaan ja nykypäivän tilanteeseen.

Fuusioreaktoreiden kehitys on keskittynyt vahvasti kahteen eri fuusioreaktoriluokkaan. Luokat ovat magneettiseen koossapitoon perustuva fuusio ja inertiaalinen fuusio. Magneettisessa koossapidossa plasmavirtaa hallitaan voimakkailla magneeteilla, joiden avulla plasma lämmitetään tarpeeksi korkeaan lämpötilaan, jossa fuusioreaktio voi tapahtua. Magneettisen koossapidon reaktoreista käytetään lyhennettä MCF-reaktori (eng. magnetic confinement fusion). MCF-reaktorit voidaan jakaa muotonsa perusteella kahteen eri malliin, tokamakkeihin ja stellaraattoreihin. Tokamak on toruksen muotoinen ja stellaraattori mutkittelevan toruksen muotoinen. Inertiaalisessa fuusiossa suurienergiseillä ajurisuihkulla ammutaan pienikokoiseen pellettiin. Suihku tuo energiaa pellettiin niin paljon, että pelletti kokoon luhistuu eli muuttuu pieneksi plasmakeskittymäksi. Plasmakeskittymän palaessa tapahtuu fuusioreaktio. Tällaisia reaktoreita kutsutaan ICF-reaktoreiksi (eng. inertial confinement fusion).

MCF-reaktoreiden tutkimus on alkanut 1950-luvulla ja ICF-reaktoreiden 1960-luvulla. Tämänhetkisen ennätykset tokamak-reaktorilla on 69 MJ vapautunutta energiaa, stellaraattorilla 1300 MJ energianvaihto ja ICF-reaktorilla 3,85 MJ vapautunutta energiaa. ICF-reaktori on ainut, joka on pystynyt vapauttamaan enemmän energiaa kuin sen fuusion syyttämiseen on tarvittu.

Stellaraattorit ovat kehityksessä viimeisimpänä. Niiden suurin haaste on seinien liika kuumeneminen. Sekä tokamak- että ICF-reaktoreista on suunniteltu DEMO-reaktorit, joiden on tarkoitus olla toiminnassa 2050-luvulla. Niiden tarkoitus on osoittaa fuusioreaktoreiden käyttökelpoisuus kaupallisessa sähköntuotannossa.

Jotta DEMO-reaktorit saataisiin toimimaan ja niiden jälkeen voitaisiin rakentaa kaupalliseen käyttöön tarkoitetut reaktorit, on testireaktoreiden vielä kehityttävä. ICF-reaktoreissa ajurisuihkuja pitää saada voimakkaammiksi ja pellettien hyötysuhdetta parannettava, jotta ne voivat vapauttaa enemmän energiaa. Tokamakien plasman pulssin pituutta tulee kasvattaa, plasman hallintaa parantaa ja reaktoreiden materiaalien kehittyä. Fuusiotutkimus tarvitsee paljon kansainvälistä yhteistyötä ja rahallisia investointeja pysyäkseen DEMO-reaktoreiden nykyisessä aikataulussa.

Avainsanat: Fuusioenergia, magneettinen koossapito, inertiaalinen fuusio, tokamak, stellaraattori

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

LYHENTEET

DEMO	a DEMOnstration fusion power plant, suunnitteilla oleva reaktori, joka tulee tuottamaan ensimmäisenä fuusioreaktorina sähköä
DT	Deuteriumista ja tritiumista koostuva ensimmäisen sukupolven fuusioreaktoreiden polttoaine
HIPER	High Power Energy Research, projekti, jonka tavoite oli saada luotua fuusio lasereilla, HIPER+:n edeltäjä
HIPER+	High Power Energy Research Plus, projekti, jonka tavoite on rakentaa ICF-reaktori Eurooppaan 2050-luvulle mennessä. HIPERin seuraaja
ICF	Inertial confinement fusion, Inertiaalinen fuusio
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor, viimeinen koetokamak-reaktori, joka on rakenteilla Ranskaan
JET	Joint European Torus, nykyään käytöstä poistettu tokamak-reaktori, joka sijaitsee Englannissa
JT-60SA	Japanese Torus-60 Super Advanced, tällä hetkellä maailman suurin tokamak-reaktori, joka sijaitsee Japanissa
MCF	Magnetic confinement fusion, Magneettiseen koossapitoon perustuva fuusio
NIF	National Ignition Facility, maailman suurin laser, joka sijaitsee Pohjois-Amerikassa
W7-X	Wendelstein 7-X, maailman suurin stellaraattori-reaktori, joka sijaitsee Saksassa

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. FUUSIO ILMIÖNÄ JA REAKTORITYYPIT	3
2.1 Fuusio ilmiönä	3
2.2 Magneettinen koossapito: MCF-reaktori	4
2.3 Inertiaalinen fuusio: ICF-reaktori	5
3. FUUSIOVOIMAN LÄHIHISTORIA	7
3.1 MCF-reaktorit	7
3.2 ICF-reaktorit	10
4. FUUSIOVOIMAN NYKYTILANNE	12
4.1 MCF- ja ICF-reaktorit	12
4.2 EUROfusion	13
5. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT	16
5.1 ITER	16
5.2 DEMO	19
5.3 ICF-reaktorit	20
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	21
LÄHDELUETTELO	23

1. JOHDANTO

Elämme energiakriisin keskellä. Tavoitteena on päästä irti fossiilisista polttoaineista, mutta nykYTEKNOLOGIAN uusiutuvat energianlähteet eivät yksinään pysty tuottamaan kaikkea energiaa, jota yhteiskuntamme tarvitsee. Fissioenergia on ydinvoiman perinteinen muoto, mutta sillä on oma negatiivinen puolensa, radioaktiivinen jäte. Fuusiovoima toimiessaan ratkaisisi energiakriisin, sillä se ei ole riippuvainen sääolosuhteista niin kuin uusiutuvista energian lähteistä esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoima, eikä siitä synny lopputuotteena radioaktiivista jätettä.

Fuusioreaktiota tapahtuu koko ajan tähdissä. Reaktiossa kaksi kevyttä atomiydintä yhdistyy muodostaen yhden raskaamman ytimen ja vapauttaen samalla suuren määrän energiaa. Fuusioreaktio tapahtuu tähtien ytimessä plasmassa, joka on kuuma varautunut kaasu. Se koostuu positiivisista ioneista ja vapaasti liikkuvista elektroneista. Tämän takia sillä on ainutlaatuisia ominaisuuksia, joita kiinteillä aineilla, nesteillä ja kaasuilla ei ole. (Chatzis & Barbarino, 2021)

Tähdissä fuusio tapahtuu valtavassa paineessa ja lämpötilassa. Valtava paine syntyy tähtien suuren massan takia. Maassa ei voida jäljitellä tähtien massaa, ja tämä aiheuttaa haasteen otollisen olosuhteen luomiselle fuusioreaktiota varten. Fuusioreaktoreiden suurin haaste on pystyä luomaan tarpeeksi korkea lämpötila, jotta fuusioreaktio voi tapahtua. Lisäksi haasteena on plasman hallitseminen.

Syksyllä 2023 fuusioreaktoreihin liittyen tehtiin läpimurto Japanissa, kun plasmaa pystyttiin hallitsemaan kymmenen sekuntia (Davis, 2023a). Edellinen läpimurto tapahtui vuotta aikaisemmin Yhdysvalloissa, kun ensimmäisen kerran fuusioreaktori tuotti enemmän energiaa kuin mitä reaktion hallitsemiseen kului (Yhdysvaltojen energiaministeriö, 2022). Läpimurrot saavutettiin kahdessa erilaisessa reaktorityypissä, ja näihin tyypeihin tässä työssä perehdytään syvällisemmin.

Tässä kandidaatintyössä tarkoituksena on tutkia miten fuusioreaktoreiden pitäisi kehittyä, jotta ne saataisiin kaupallisen sähköntuotannon käyttöön. Jotta tulevaisuuden tilannetta voidaan tutkia, työssä perehdytään myös fuusiotutkimuksen historiaan ja nykypäivän tilanteeseen. Fuusiotutkimus vaatii kansainvälistä yhteistyötä, mutta sen rakenteilla olevat reaktorit ovat maantieteellisesti keskittyneet pitkälti Eurooppaan, joten tulevaisuuden käsittelyssä keskitytään vahvasti Euroopassa tapahtuvaan tutkimukseen.

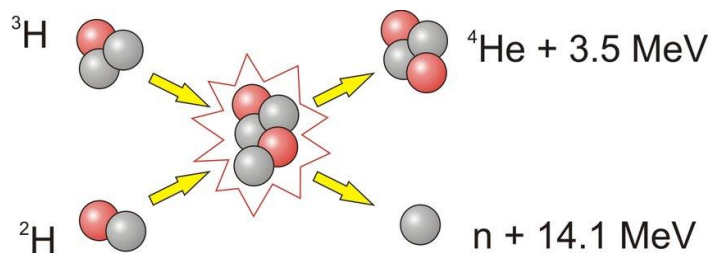
Fuusiotutkimuksen suurimmat läpimurrot on saavutettu viime vuosina, joten tietoa on tarjolla monipuolisemmin kuin koskaan aiemmin. Aiemmat aiheeseen liittyvät tutkimukset ovat keskittyneet vahvasti ITER-projektin ympärille, mutta nyt yhdysvaltalaisten saavutuksen myötä lasereiden avulla sytytettävä fuusio on myös toinen täysin mahdollinen tulevaisuuden sähköntuotantotapa. Työ tehdään kirjallisuuskatsauksena.

Toisessa luvussa perehdytään fuusioon ilmiönä ja reaktoreiden tyypeihin. Kolmannessa luvussa kuvataan fuusiovoiman lähihistoria ja neljännessä luvussa tämänhetkinen tilanne. Viidennessä luvussa tutkitaan fuusiovoiman tulevaisuuden näkymiä, ja viimeisessä luvussa esitellään työn johtopäätökset.

2. FUUSIO ILMIÖNÄ JA REAKTORITYYPIT

2.1 Fuusio ilmiönä

Ensimmäisen sukupolven fuusioreaktorit perustuvat kahden vedyn isotoopin, deuteriumin (2_1H) ja tritiumin (3_1H), väliseen reaktioon. Deuteriumin ja tritiumin välisessä reaktiossa vapautuu alfahiukkanen, eli heliumatomin ydin (4_2He), sekä energiaa suurienergisestä neutronin kautta (Kuva 1). (Euroopan komissio, 2005) Alfahiukkasen mukana vapautuu 3,5 MeV energiaa ja neutronin mukana 14,1 MeV. Deuteriumin ydin koostuu yhdestä protonista ja yhdestä neutronista, ja tritiumin ydin yhdestä protonista ja kahdesta neutronista. Normaaleissa olosuhteissa vety-ydinten positiivinen varaus pitää ne erillään. Lämpötilan noustessa ytimiä ympäröivät elektronit irtoavat kuoriltaan ja näin muodostuu ainetta, jossa on positiivisesti varautuneita ytimiä ja negatiivisesti varautuneita elektroneja. Tätä ainetta kutsutaan plasmaksi ja sen tärkein ominaisuus fuusion kannalta on sähköisesti varautuneet komponentit. (Kikuchi, et al., 2012, pp. 14-15)



Kuva 1: Deuteriumin ja Tritiumin välinen reaktio (Loewenhoff, 2012), punaiset pallot kuvaavat protoneita ja harmaat pallot neutroneita.

Jotta fuusioreaktio pystyy tapahtumaan, ytimien välillä olevan arraktiivisen voiman tulee olla suurempi kuin positiivisista varauksista johtuvan hylkivän sähköisen vuorovaikutuksen. Arraktiivinen vetovoima saadaan tarpeeksi suureksi, kun ytimet viedään tarpeeksi lähekkäin. Fuusioituvien ytimien yhteismassa on suurempi kuin reaktiotuotteiden massa. Tämän vuoksi massaa siis muuttuu energiaksi fuusioreaktiossa. (Kikuchi, et al., 2012, pp. 14-15) Massan muuttumisen energiaksi todisti Albert Einstein vuonna 1905 suhteellisuusteoriassaan (Einstein, 1905).

Deuteriumia esiintyy luonnossa ja sitä voidaan valmistaa vedestä. Tritiumia ei esiinny luonnossa, joten sitä pitää tuottaa fuusioreaktoreita varten. Tritiumia valmistetaan luonnossa esiintyvistä litiumista. (Euroopan komissio, 2005) Fuusioreaktio voi tapahtua

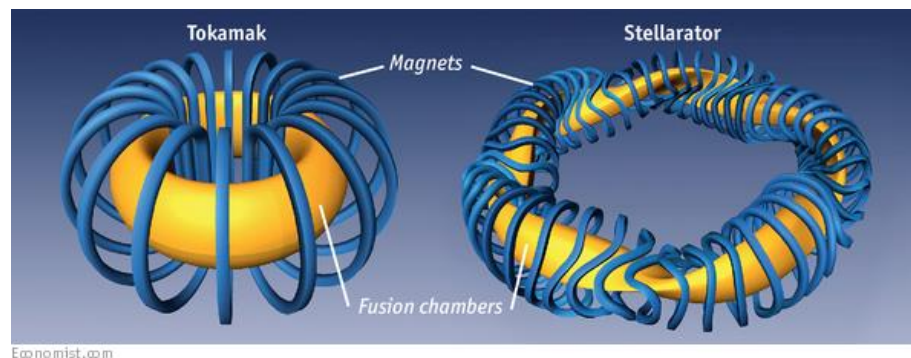
myös muilla kevyillä atomiytimillä. Fuusioreaktoreissa muita käytettyjä polttoaineita ovat kahden deuteriumin tai kahden protiumin (1_1H) eli vedyn normaalin isotoopin välinen reaktio.

Tällä hetkellä edistyneimmät fuusioreaktoryypit ovat magneettista koossapitoa käyttävät (MCF) ja inertiaaliseen fuusioon (ICF) perustuvat reaktorit. Näiden lisäksi tutkimusta on tehty myös reaktoreilla, jotka toimisivat kylmäfuusiolla tai plasmaa kuumentamalla. Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan tarkemmin MCF- ja ICF-reaktoreita.

2.2 Magneettinen koossapito: MCF-reaktori

Magneettisessa koossapidossa plasmaa hallitaan voimakkaiden magneettikenttien avulla tyhjiökammiossa. Plasmassa varautuneet hiukkaset liikkuvat magneettisten kenttäviivojen suuntaisesti. Jotta hiukkaset saadaan pysymään kaukana seinistä ja plasma kasassa, magneettikenttä taivutetaan ympyrän muotoiseksi. Ympyrämuoto mahdollistaa sen, etteivät hiukkaset turhaan törmäile kammion seiniin kuluttaen energiaa törmäyksiin ja laskien lämpötilaa. Magneettikentät luodaan kammion ympärillä olevien käämien avulla. Käämeissä kulkeva voimakas sähkövirta luo ympärilleen voimakkaan magneettikentän. Myös plasmassa kulkee sähkövirtoja, jotka vahvistavat käämien luomia magneettikenttiä. (Euroopan komissio, 2005)

MCF-reaktorit voidaan jakaa kahteen ryhmään: tokamakkeihin ja stellaraattoreihin (Kuva 2). Tokamak-reaktorissa magneettikenttä on toruksen muotoinen ja se luodaan poloidi- ja toroidaalikelojen avulla. Nämä kelat toimivat ensiökääminä ja sähkövirran muutos niissä indusoi plasmaan sähkövirran. Kammiossa kulkeva plasmavirta toimii toisiokääminä magneettikentälle. Muuntajilla tuotettu tasavirta on pätkivää, ja tämän takia plasmapurkaus ei ole jatkuvaa. Jotta tokamak-reaktori saataisiin jatkuvatoimivaksi, niin jatkuvuus pitäisi taata jollain muulla tavalla. (Euroopan komissio, 2005)



Kuva 2: Tokamakin ja stellaraattorin rakenne (The Economist, 2015) , keltaiset osat kuvaavat reaktoreissa olevaa plasmakammioita (fusion chambers) ja siniset kammioita ympäröiviä magneettikenttiä (magnets).

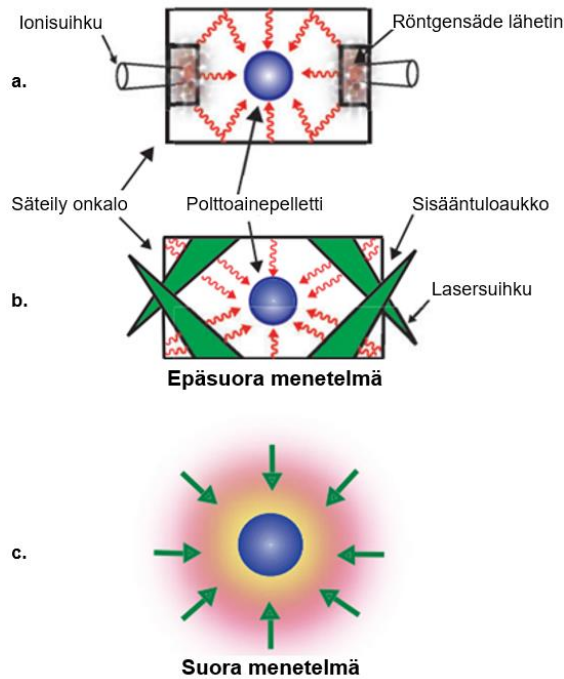
Stellaraattori-reaktorissa magneettikenttä luodaan kokonaan ulkoisilla käämeillä, jotka ovat mutkikkaan muotoisia. Toisinkuin tokamakissa plasma on koko ajan stellaraattorissa sisällä ja tämän takia jatkuvatoimisuus on mahdollista. (Euroopan komissio, 2005) Stellaraattoreiden magneettikentän monimutkainen rakenne aiheuttaa kuitenkin haasteita varsinkin magneettikenttäkelejen rakentamiseen (Yhdysvaltojen energiaministeriö, Department of Energy, ei pvm).

2.3 Inertiaalinen fuusio: ICF-reaktori

Inertiaalisessa fuusiossa laserilla tai ionisuihkulla ammutaan pieneen pellettiin, joka koostuu deuteriumista ja tritiumista. ICF-reaktorissa ammuksena käytettävää suihkua kutsutaan ajurisuihkuksi. Jotta fuusioreaktio saadaan aikaan pelletissä, sen lämpötilan ja tiheyden pitää kasvaa valtavasti. Nämä olosuhteet luodaan kokoon luhistamalla pelletti. Ajurisuihku aiheuttaa pelletissä hetkellisesti suuren lämpötilan ja paineen nousun, minkä vuoksi pelletti saadaan kokoon luhistettua. (Prager & Najmabadi, 2024)

Pelletti on rakenteeltaan monikerroksinen. Kerrokset on suunniteltu niin, että kokoon luhistumisessa energiaa kuluu vain pelletin luhistumiseen ja turhan lämpöenergian syntyminen on minimoitu. Kun kokoon luhistuminen on tapahtunut loppuun asti, pelletin tiheys on puristunut 1000–10 000-kertaiseksi kuin maapallolla tyypillisesti esiintyvän kiinteän aineen tiheys. (Prager & Najmabadi, 2024)

ICF-reaktorissa kokoon luhistuminen voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla: suoralla ja epäsuoralla menetelmällä (kuva 3). Suorassa menetelmässä ajurisuihku ammutaan suoraan pelletin pintaan. Epäsuorassa menetelmässä reaktioon käytettävä energia muutetaan röntgensäteiksi, jotka täyttävät onkalon pelletin ympärillä. Röntgensäteet absorboituvat pelletin pintaan luoden ablaatiopaineen. Tämän myötä pelletti kokoon luhistuu. Suoraa ja epäsuoraa menetelmää voidaan myös yhdistää, ja tätä menetelmää kutsutaan hybridimenetelmäksi. (Kikuchi, et al., 2012, pp. 1044-1046)



Kuva 3: Epäsuora- ja suoramenetelmä pelletin kokoon luhistamiseen, muokattu lähteestä (Nakai & Mima, 2004), epäsuora menetelmä on kuvattu a-kohdassa käyttäen ajurisuihkuna ionisuihkua ja b-kohdassa lasersuihkua, c-kohdassa on kuvattu suora menetelmä.

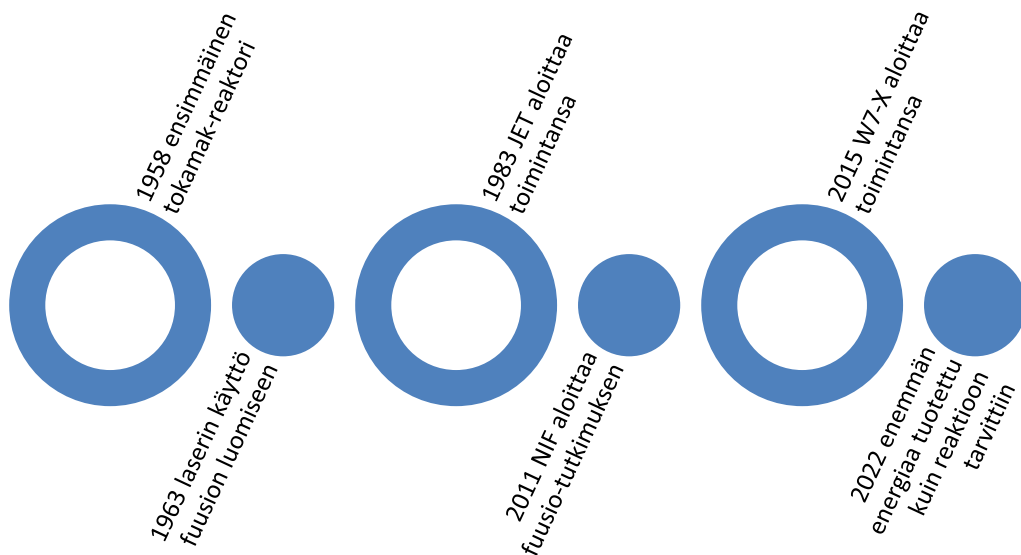
Fuusioreaktio pitää tapahtua pelletissä hyvin nopeasti ennen kuin pelletti hajoaa. Kokoon luhistumisajan pitää olla lyhyempi kuin pelletin hajoamisaika. Fuusio voidaan käynnistää kokoon luhistuvassa pelletissä kahdella eri tavalla: keski- tai nopealla sytytyksellä. (Kikuchi, et al., 2012, pp. 1044-1046) Kun ajurisuihku osuu pellettiin, pelletissä syntyy iskuja, jotka aiheuttavat kokoon luhistumisen. Pelletti on suunniteltu niin, että iskut osuvat samaan kohtaan pelletin keskellä. Tämä reaktio aiheuttaa pelletin keskikohdan lämpenemisen fuusioreaktioon tarvittavaan lämpötilaan. Pelletin lämpiäminen leviää ulospäin alfahiukkasten törmäysten myötä lämmittäen koko pelletin tarpeeksi korkeaan lämpötilaan. Tämän jälkeen pelletti kokoon luhistuu ja muuttuu tiiviiksi plasmakeskittymäksi. Fuusioreaktio tapahtuu, kun plasma palaa pienessä mikroräjähdyksessä. (Prager & Najmabadi, 2024) Koska kokoon luhistuminen lähtee etenemään pelletin keskeltä, tätä tapaa kutsutaan keskisytytykseksi.

Nopeassa sytytyksessä ajurisäde lämmittää pelletin samalla tavalla kuin keskisytytyksessä. Tämän jälkeen pellettiin ohjataan lyhyt ja voimakas lasersäde. Lasersäteen käyttö nopeuttaa fuusion syntymistä, kun se tuo mukanaan lisää lämpöenergiaa pellettiin. Nopean sytytyksen hyötysuhde on parempi kuin keskisytytyksen. (Prager & Najmabadi, 2024)

3. FUUSIOVOIMAN LÄHIHISTORIA

3.1 MCF-reaktorit

Fuusiotutkimuksen alku pohjautuu 1920-luvulle, kun hahmotettiin, miten aurinko tuottaa energiansa (Parisi & Ball, 2019, luku 1). Toisen maailmansodan jälkeen fuusio herätti kiinnostusta aseellisuudessa, kun haluttiin luoda uusi voimakkaampi atomipommi. Asetutkimuksen pohjalta Princetonin yliopistossa Yhdysvalloissa alettiin myös kehittää ensimmäistä versiota stellaraattorista. Pian myös tokamakin suunnitelmat kokivat päivänvalon. Näistä ideoista syntyi energiakentällä lähtölaukaus fuusiotutkimukselle. (Parisi & Ball, 2019, luku 2) Kuvaan 4 on koottu aikajanelle työssä käsiteltävän fuusiotutkimuksen historian pääkohdat.



Kuva 4: Aikajana työssä käsitellyn fuusiotutkimuksen historian pääkohdista, ylärivillä MCF-reaktoreiden pääkohdat ja alarivillä ICF-reaktoreiden.

Ensimmäinen tokamak-reaktori rakennettiin vuonna 1958 Neuvostoliitossa. Aluksi fuusioreaktio yritettiin saada aikaiseksi raskailla epäpuhtailla atomeilla. Vuonna 1968 Neuvostoliitossa tehtiin läpimurto, kun T-3 tokamak tuotti ennätyksellisen 1 keV energiamäärän. Aluksi tulosta ei uskottu todeksi kansainvälisessä tiedeyhteisössä, joten neuvostoliittolaiset kutsuivat brittiläisen tutkijajoukon vieraillemaan luokseen. Britit todistivat tulokset oikeiksi ja näin tokamak-tutkimus syrjäytti stellaraattorit valtaapaikalta. (Parisi & Ball, 2019, luku 4 ja 6)

Euroopan vanhin tokamak-reaktori, The Joint European Torus (JET), sijaitsee Culhamissa Englannissa. JETin suunnittelu aloitettiin vuonna 1973 ja sen päätehtävä on ollut toimia ensimmäisenä testireaktorina ITERiä varten. ITER tulee olemaan ensimmäinen MCF-reaktori, joka tuottaa enemmän energiaa kuin sen fuusioreaktion syöttämiseen ja ylläpitämiseen tarvitaan. ITERiin perehdytään tarkemmin luvussa 5.1. Fuusiotutkimus on ollut pitkään kansainvälisen yhteistyön tekemistä ja näin on ollut myös JETin tapauksessa: vuonna 1979 11 maata oli jo mukana projektissa. Reaktori aloitti toimintansa 25.6.1983. JET on ainoa tokamak-reaktori maailmassa, jonka polttoaineena on käytetty deuteriumtritiumia. Ensimmäisen kerran kyseistä polttoainetta käytettiin 9.10.1991, jolloin reaktorissa tuotettiin 1,7 MW tehoa. (EUROfusion, ei pvm a) Ensimmäisen maailmanennätyksensä JET tuotti 22.9.1997 (EUROfusion, ei pvm a), kun reaktorissa vapautui energiaa 22,7 MJ (EUROfusion, 2024).

JETin tutkimuksessa keskityttiin 2000-luvulla tutkimaan, miten deuteriumtritium toimii ITERin tulevassa toimintaympäristössä. JETin reaktoria uudistettiin vastaamaan ITERin reaktoria. Vuonna 2006 magneettikenttä muutettiin vastaamaan ITERin magneettikenttää ja vuonna 2011 reaktorin seinämät uudistettiin (EUROfusion, ei pvm a). Tutkimukset osoittivat, että plasmasta tulevaa kuumaa lämpöä voidaan pehmentää sen mennessä poistoon ja plasman reunaa voidaan hallita vakaasti. Hallinnan myötä energiapurkaukset eivät pääse saavuttamaan reaktorin seiniä. Molemmat, lämmön pehmentäminen ja plasman hallinta, edesauttavat tulevien reaktoreiden seinämateriaalin kestämistä. (EUROfusion, 2024)

Uudistusten jälkeen JET teki vielä kaksi uutta ennätystä. Joulukuussa 2021 energiaa vapautui 59 MJ ja JETin historian viimeisessä ajossa loppuvuodesta 2023 tehtiin uusi maailmanennätys 69 MJ. JETin toiminta lopetettiin joulukuussa 2023 neljänkymmenen vuoden käytön jälkeen. (EUROfusion, 2024)

ITERin toinen koereaktori, Japanese Torus-60 Super Advanced (JT-60SA), sijaitsee Nakassa Japanissa. Sen suunnittelu on aloitettu jo vuonna 2005 (JT-60SA, ei pvm a) ja päätös sen rakentamisesta tehtiin 5.2.2007, kun Japani ja Euroopan maat päättivät yhteistyön aloittamisesta (JT-60SA, ei pvm b). JT-60SAN tarkoitus on tutkia plasman hallintaa ITERiä varten ja se tulee olemaan maailman suuritehoisin tokamak (EUROfusion, ei pvm b). Reaktori valmistui syksyllä 2023 ja sen ensimmäinen plasma saavutettiin 23.10.2023, jolloin se syrjäytti JETin maailman suurimpana tokamak-reaktorina (Davis, 2023b).

JT-60SAN polttoaineena toimii protium tai deuterium. Koska JT-60SAN toiminta keskittyy plasman hallinnan tutkimiseen, polttoaineen ei välttämättä tarvitse fuusioitua. Deuterium

mallintaa polttoaineena tarpeeksi hyvin deuteriumtritiumia, mutta ei tuota niin paljon neutroneita tai ylimääräistä lämpöä, jotka ovat tässä tutkimusvaiheessa turhia. JT-60SA voi tulla radioaktiiviseksi käyttövaiheessa ja tämän takia plasmaa pitää pysytellä hallitsemaan myös kauko-ohjattavasti. (JT-60SA, ei pvm a) Oikea toiminta aloitettiin joulukuussa 2023, jolloin saatiin luotua voimakkuudeltaan 1 MA plasmavirta (Davis, 2023a).

Maailman suurin stellaraattori-reaktori, Wendelstein 7-X (W7-X), sijaitsee Saksassa Greifswaldissa. W7-X on tutkimusreaktori, ja siinä tehtävällä tutkimuksella on tarkoitus todistaa, että stellaraattori on varteenotettava fuusioreaktorimalli. W7-X suunnittelu on aloitettu vuonna 1980 ja rakentaminen aloitettiin heinäkuussa 1980 (IPP, ei pvm a).

W7-X otettiin käyttöön 10.12.2015, kun ensimmäinen testiajo tehtiin käyttäen polttoaineena heliumia. Vaikka fuusioreaktorit käyttävät polttoaineenaan vedyn eri isotoopeja, niin helium oli toimiva koepolttoaine, koska se on helpompi muuttaa plasmaksi kuin vety. Plasman elinaika oli 0,1 sekuntia ja sen lämpötila oli 1 miljoonaa astetta. (Milch, 2015)

Ensimmäinen vetyplasma W-7X:ssa nähtiin 3.2.2016. Plasma kesti 0,25 sekuntia ja lämpötila nousi 80 miljoonaan asteeseen. Samalla alkoi tutkimusreaktorin ensimmäinen tutkimusvaihe, joka kesti reilun kuukauden päättyen 10.3.2016. (Milch, 2016a) Ensimmäisessä tutkimusvaiheessa plasmapulssin kesto saatiin ajallisesti pidennettyä ja lämpötiloiksi plasmassa saavutettiin 100 miljoonaa astetta elektroneille ja 10 miljoonaa astetta ioneille. Ensimmäistä tutkimusvaihetta pidettiin hyvin onnistuneena. (Milch, 2016b)

W-7X:n toinen tutkimusvaihe alkoi 7.9.2017. Tutkimusvaiheiden välissä plasmakammion seiniä vahvennettiin, jotta ne kestäisivät korkeampia lämpötiloja. Myös plasman hallinta parani uusien laitteiden myötä, kun nyt plasman puhtautta ja tiheyttä voitaisiin säädellä. Toisen tutkimusvaiheen tavoitteet olivat pidentää plasman elinikää ja nostaa lämmitysenergiaa ja -tehoa määrää. Saman vuoden joulukuussa saavutettiin W7-X:n ensimmäinen maailmanennätys, kun fuusiotuotteen ennätys rikottiin. Fuusiotuote kuvaa plasman olosuhdetta. Fuusiotuotteen pitää olla sopiva, jotta plasma saadaan syttymään ja fuusion luominen on mahdollista. W7-X:ssä päästiin historian lähimmäksi tätä olosuhdetta stellaraattori-reaktorilla. (Milch, 2018a) 19.10.2018 toinen tutkimusvaihe saatiin päätökseen. Plasman eliniäksi saavutettiin 100 sekuntia ja sen energiatiheys saatiin paremmaksi. (Milch, 2018b)

Toisen tutkimusvaiheen jälkeen reaktorin viilennysjärjestelmää parannettiin ja lämmitysjärjestelmää uudistettiin. Näiden parannusten myötä reaktoriin voisi luoda

suurienergisempää plasmaa, joka mahdollistaisi fuusioreaktion. Kolmas tutkimusvaihe alkoi 27.7.2022. (IPP, 2022) W7-X:n suurin läpimurto saavutettiin 15.2.2023, kun plasmaa saatiin hallittua 8 minuutin ajan ja energianvaihdoksi saavutettiin 1300 MJ (IPP, 2023). Fuusioreaktiota tällä olosuhteella ei kuitenkaan vielä pystytä sytyttämään.

3.2 ICF-reaktorit

Idea lasereiden käytöstä fuusioreaktion aikaan saamiseksi keksittiin Neuvostoliitossa vuonna 1963. Japanissa ja Yhdysvalloissa lasereiden käyttöön herättiin vasta vuonna 1972, kun molemmat maat julkistivat kansallisen ICF-tutkimuksen. Japanilaiset pääsivät nopeasti mukaan kehitykseen, kun he keksivät vuonna 1975 ensimmäisen version epäsuorasta ajosta, Cannonball target. (Yamanaka, 1999)

ICF:ssä käytettävän pelletin suuri tiheys aiheutti pitkään haasteita tutkijoille. Sekä tarpeeksi tiheän pelletin valmistaminen että pelletin ulkokuoren tasainen sulattaminen lasereita käyttäen, olivat suuria haasteita. Vuonna 1987 japanilaisten laser GEKKO XII sai sulatettua pelletin ulkokuoren tasaisesti. 1990-luvun puolivälissä saatiin kehitettyä tarpeeksi tiheä pelletti. (Yamanaka, 1999)

ICF-tutkimus koettiin aluksi turvallisuusriskinä, koska siinä työskenneltiin korkeaenergisten lasereiden kanssa. Tämän takia jokainen maa teki tutkimustaan täysin itsenäisesti. Vuonna 1988 julkaistiin Madridin manifesti, jossa vaadittiin turvaluokituksen poistoa ICF-tutkimuksesta. Manifestin myötä ICF-tutkimuksessa alkoi kansainvälinen yhteistyö. Yhdysvallat poisti oman turvaluokituksensa vasta 6 vuotta myöhemmin, vaikka heidän tutkijansa olivatkin allekirjoittaneet Madridin Manifestin. (Yamanaka, 1999)

ICF-tutkimuksessa on tapahtunut monta läpimurtoa 2020-luvulla. Läpimurrot on saavutettu käyttäen maailman suurinta laseria, National Ignition Facilityä (NIF), joka sijaitsee Kaliforniassa Yhdysvalloissa. NIF koostuu 192 yksittäisestä laserista ja sen toiminta on aloitettu vuonna 2009, ja fuusiotutkimusta siellä on tehty vuodesta 2011 lähtien. (LLNL, ei pvm) NIF käyttää epäsuoraa ajoa pelletin kokoon luhistamisessa (LLNL, 2023).

Ensimmäisen läpimurtonsa fuusion saralla NIF saavutti marraskuussa 2020, kun tutkimuksessa saatiin aikaan palava plasma ensimmäisen kerran maailmassa ICF-tutkimuksessa. Palava plasma on edellytys fuusioreaktion tapahtumiselle. Sen myötä lämpötilan on mahdollista nousta tarpeeksi korkeaksi, jolloin fuusioreaktio voi tapahtua. (Zylstra, et al., 2022)

Toinen merkittävä läpimurto tehtiin 8.8.2021, kun fuusion sytyttämiseen käytettiin 1,92 MJ energiaa ja fuusio tuotti energiaa ulos 1,3 MJ. ICF-tutkimuksessa oli siis päästy

hyvin lähelle sitä, että fuusio tuottaisi enemmän energiaa kuin sen sytyttäminen vaatisi. Elokuun testin jälkeen lasereista muokattiin tehokkaampia ja niiden pulssien energiabalanssia parannettiin. Jotta fuusioreaktorista saataisiin enemmän energiaa, pulssin energiabalanssin pitää olla tietynlainen pulssin eri vaiheissa. Sopiva energiabalanssi voidaan määrittää pulssin aallon pituuden avulla. (LLNL, 2023) Fuusiotutkimuksen suurin läpimurto tähän mennessä saavutettiin NIF:ssä 5.12.2022, kun ensimmäisen kerran maapallon päällä fuusioreaktio tuotti enemmän energiaa, mitä sen sytyttämiseen tarvittiin (LLNL, 2022)

4. FUUSIOVOIMAN NYKYTILANNE

4.1 MCF- ja ICF-reaktorit

Viimeisessä ajossaan lokakuussa 2023 JET teki kolmannen ja viimeisen maailman ennätöksensä. Reaktorista vapautui 69 MJ energiaa, joka on suurin vapautunut energiamäärä koskaan millään fuusioreaktorilla. Plasmapulssi kesti yli 6 sekuntia ja polttoainetta käytettiin 0,21 mg. Sama määrä energiaa pystyttäisiin vapauttamaan polttamalla 2 kg kivihiiltä. (CCFE, 2024) Fuusioreaktori tarvitsee siis hyvin minimaalisia määriä polttoainetta tuottaakseen suuren määrän energiaa.

Vaikka JET vapautti valtavan määrän energiaa, sen fuusioreaktion käynnistämiseen ja hengissä pitämiseen tarvittiin vielä enemmän energiaa. JET pystyi tuottamaan fuusioenergiaa noin 60 % siitä määrästä energiaa, joka sinne syötettiin. Reaktoriin syötettiin noin 115 MJ edestä energiaa. Tällä hetkellä toimivista MCF-reaktoreista mikään ei ole vielä pystynyt tuottamaan enemmän energiaa mitä reaktorin fuusion syöttämiseen tarvitaan. (EUROfusion, ei pvm i)

Japanilaisen JT-60SAn tavoite on kasvattaa tämänhetkistä 1 MA plasmavirtaa suuremmaksi. Tämä on tarkoitus luoda olosuhteilla, jossa plasma lämmitetään yli 100 miljoonaa asteeseen sadan sekunnin ajaksi. Aikaisemmissa tutkimuksissa plasmaa on lämmitetty yhden kerran tutkimusta varten. JT-60SAn tavoite on saada plasman lämmitys jatkuvaksi. Plasmaa on tarkoitus lämmittää tunnin välein sadan sekunnin ajaksi. (JT-60SA, ei pvm a) Jatkuvatoimivuus on edellytys kaupalliselle sähköntuotannolle.

Maailman suurimman stellaraattorin W7-X:n tavoite on lämmittää plasma 100 miljoonaa asteiseksi ja hallita plasmaa yhtäjaksoisesti puoli tuntia. Nämä olosuhteet mahdollistaisivat energianvaihdoksi 18 000 MJ, joka on neljätoista kertainen reaktorin nykyiseen ennätykseen nähden. Stellaraattoreiden suurin haaste on tällä hetkellä plasmasäiliön seinien liika kuumeneminen. (IPP, 2023) Plasmaa ei siis pystytä hallitsemaan niin, etteivät seinät kuumenisi liikaa.

Joulukuussa 2022 NIF käytti energiaa fuusioreaktion luomiseen 2,05 MJ ja reaktiosta vapautui energiaa 3,15 MJ. Tämä oli ensimmäinen kerta koskaan, kun fuusioreaktorissa syntyi enemmän energiaa kuin sinne vietiin. (LLNL, 2022) Samanlainen tulos on pystytty toistamaan NIF:ssä kolmesti uudestaan eri energiamäärillä yhden vuoden aikana. Paras suhde saatiin 30.7.2023, kun syöttämiseen käytettiin energiaa 2,05 MJ ja fuusio vapautti 3,88 MJ energiaa. (LLNL, 2023)

Vaikka ICF-reaktori pystyy vapauttamaan energiaa enemmän kuin fuusioreaktion sytyttäminen tarvitsee, sen tuottama energiamäärä on merkittävästi pienempi kuin MCF-reatoreista saatava energiamäärä. Tällä hetkellä MCF-reaktorin vapauttama energia on 20-kertainen verrattaessa ICF-reaktorin vapauttamaan energiaan. ICF-reaktorin energiamäärä on riippuvainen laserin voimakkuudesta, jolla pellettiä ammutaan sekä siitä kuinka paljon pelletti pystyy vapauttamaan energiaa kokoon luhistuessaan. Jotta ICF-reaktorit pääsevät samoihin energiatasoihin MCF-reaktoreiden kanssa, lasereiden tehokkuutta pitää kasvattaa ja pellettejä kehittää.

4.2 EUROfusion

EUROfusion toimii fuusiotutkimuksen organisaattorina Euroopassa. Se on perustettu 9.10.2014 ja sen jäseniä ovat Euroopan unionin maat, Norja, Sveitsi ja Iso-Britannia. Sen missio on raivata tie fuusioreaktorille kaupalliseen käyttöön ja visio hiilidioksidivapaasta sähköstä, joka on tuotettu fuusioenergialla. (EUROfusion, ei pvm c)

EUROfusionin yhteistyökumppaneita ovat Fusion For Energy, EIROforum ja ITER. Fusion For Energy vastaa fuusioreaktoreissa käytettävien laitteiden koordinoinnista ja etsii laitteiden kehittäjiä ITERiä ja DEMOa varten, eli se vastaa fuusiotutkimuksen teknisemmästä puolesta. EUROfusion on yksi EIROforumin kahdeksasta jäsenestä, jonka tehtävä on tukea eurooppalainen tieteentekeminen huippuunsa. (EUROfusion, ei pvm d)

EUROfusionin toiminnalla on kaksi päätavoitetta: valmistautuminen ITERin kokeisiin ja DEMOn konseptin kehittäminen (EUROfusion, ei pvm e). Jotta tavoitteisiin päästäisiin, niin sitä varten on luotu tiekartta. EUROfusionin lyhyen ja keskipitkän aikavälin tavoitteet on koottu yksityiskohtaisesti Taulukkoon 1. Lyhyen aikavälin keskeisin tavoite on toteuttaa tutkimustyö ITERiä varten ja saada sen rakentaminen valmiiksi. Keskipitkän aikavälin keskeisin tavoite on päästä hyödyntämään ITERin tutkimustuloksia DEMOn suunnittelussa.

Taulukko 1: EUROfusionin lyhyen ja keskipitkän aikavälin tavoitteet (EUROfusion, ei pvm f)

Lyhyt aikaväli	Keskipitkä aikaväli
ITERin rakentaminen	ITERin ensimmäiset tieteelliset ja teknilliset hyödyntämiset
Tutkimus- ja kehitystyö ITERiä ja DEMOa varten	Fuusiomateriaalitutkimuksen hyödyntäminen
DT-tutkimus JETissä	DEMON insinöörisuunnitteluvaihe teollisuuden avustamana
Alustava suunnitelma DEMOa varten	Voimalaitosten materiaalien ja teknologioiden kehittäminen
Fuusiomateriaalien testauslaitoksen rakentaminen	Mahdollisesti stellaraattoreiden jatkokehitys
Tieteellinen ja teknillinen hyödyntäminen stellaraattorista	

Pitkän aikavälin tähtäin on luoda fuusioreaktoreille mahdollisuus muuttua tiede- ja laboratoriopohjaisesta teollisuus- ja teknologiapohjaiseksi. Todellinen kaupallinen sähköntuotanto tulee tapahtumaan teollisuus- ja teknologiapohjaisissa reaktoreissa. (EUROfusion, ei pvm f)

EUROfusionin alla toimii 10 reaktoria (kuva 5). Lippulaivana on toiminut JET. Vaikka JET on tehnyt urauurtavaa työtä, niin senkään tutkimus ei ole ollut kaiken kattavaa. Tutkimusta, jota ei ole pystytty tekemään JETissä, on tehty EUROfusionin neljässä keskikokoisessa tokamakissa. (EUROfusion, ei pvm g) Jokaisella näillä kymmenellä reaktorilla on oma tutkimusalueensa.



Kuva 5: EUROfusionin alla toimivat Euroopassa sijaitsevat fuusioreaktorit ja rakenteilla oleva ITER-reaktori.

ASDEX Upgrade sijaitsee Saksassa samassa tutkimuslaitoksen alaisuudessa kuin W7-X. Se tutkii plasman olosuhteita, eli tiheyttä ja painetta sekä reaktorin seinämiin kohdistuvaa painetta. (IPP, ei pvm) TVC sijaitsee Sveitsissä ja se tutkii plasman erilaisia muotoja eli poikkileikkauksia (EPFL, ei pvm).

MAST Upgrade sijaitsee Englannissa samassa tutkimuskeskuksessa JETin kanssa. Sen avulla tutkitaan erilaisten divertorien toimintaa. Divertori käsittelee plasmasta poistettua polttoainetta ja lämpöä. Tällä hetkellä MAST Upgrade toimii super-X divertorilla, mutta se toimii myös muilla divertoreilla. (CCFE, ei pvm) Myös toinen neljästä reaktorista tutkii divertoria, mutta WESTissä Ranskassa tutkitaan ITERiin tulevan divertorin toimintaa (IRFM, ei pvm).

Normaalisti fuusioreaktori seisoo pystyssä, mutta vaakatasossa olevilla reaktoreilla pystytään paremmin tutkimaan plasman ja seinän yhteisvaikutuksia. Tällaisia laitteita toimii EUROfusionin alla neljä, kaksi niistä sijaitsee Hollannissa ja kaksi Saksassa. (EUROfusion, ei pvm h) Stellaraattori W7-X toimii myös EUROfusionin alaisuudessa ja EUROfusion tekee kansainvälistä yhteistyötä Japanin kanssa JT-60SAn parissa (EUROfusion, ei pvm g).

5. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

5.1 ITER

ITER (alun perin International Thermonuclear Experimental Reactor) tulee olemaan valmistuessaan maailman suurin koekäyttöinen fuusioreaktori. Se on malliltaan tokamak ja tulee käyttämään polttoaineenansa deuteriumtritiumia. ITERin on tarkoitus olla ensimmäinen fuusioreaktori, joka on nettoenergialtaan positiivinen. Se tuottaa siis enemmän energiaa, kuin sen fuusion sytyttämiseen tarvitaan. Energiaa on tarkoitus tuottaa 10-kertaisesti sytytysenergiaan nähden. (Fusion For Energy, ei pvm) Tällä hetkellä kaiken tokamakkeihin liittyvän tutkimuksen tarkoitus on tukea ITERin valmisteluja.

ITERin alkua on vuodesta 1985, kun Yhdysvallat ja Neuvostoliitto sopivat yhteistyöstä, jonka tavoite oli kehittää fuusioenergiaa rauhanomaisiin tarkoituksiin. Vuonna 1986 Euroopan unioni, Japani, Neuvostoliitto ja USA sopivat pyrkivänsä suunnittelemaan yhdessä fuusiovoimalaitoksen. Suunnittelun ensimmäinen vaihe käynnistyi vuonna 1988 ja sai loppuhyväksynnän vuonna 2001. Saman vuonna projektiin liittyivät Kiina ja Etelä-Korea. Vuonna 2005 projektiin liittyi vielä Intia ja maat pääsivät yhteisymmärrykseen ITERin rakennuspaikasta. Paikaksi valikoitui Etelä-Ranskan Cadarache. ITERin rakentaminen aloitettiin vuonna 2009. Nykyään ITERin päivittäisestä toiminnasta vastaa the ITER Organisation, joka on perustettu 24.10.2007. (iter, ei pvm a)

ITERin suunnittelussa on ollut viisi pääkohtaa:

1. ITERin on tarkoitus saavuttaa DT-plasma, jossa fuusioreaktion olosuhteet pystytään ylläpitämään suurimmaksi osaksi fuusion oman lämmön tuoton avulla (iter, ei pvm b).
2. ITER tulee tuottamaan 500 MW tehoa 7 minuutin ajan (Fusion For Energy, ei pvm).
3. ITERissä tehtävä tutkimus tulee tuottamaan tietoa, kuinka sen kokoluokan laitoksessa fuusioreaktori toimii. Tutkijat pääsevät oppimaan, kuinka plasma käyttäytyy täysin uusissa olosuhteissa. Teknologian puolella päästään testaamaan lämmitystä, plasman hallintaa, analysointia, etähuoltoa ja kryogeniikkaa eli matalien lämpötilojen fysiikkaa. (iter, ei pvm b)

4. ITER tulee testaamaan tritiumin valmistamista tyhjiökammiossa. Tämänhetkinen tapa valmistaa tritiumia ei ole riittävä kattamaan tulevien fuusiovoimalaitosten tarvetta. (iter, ei pvm b)
5. ITERin tehtävä on myös osoittaa fuusioreaktoreiden turvallisuus. Turvallisuuteen liittyvä suuri virstanpylväs saavutettiin vuonna 2012, kun ITERille myönnettiin ydinvoimalaitoksen toimilupa Ranskassa. Päätöstä puolsivat vahvasti tarkasti tehdyt turvallisuussuunnitelmat. (iter, ei pvm b)

ITER ei tule tuottamaan vielä sähköenergiaa, mutta se valmistelee tietä tuleville fuusiovoimalaitoksille, jotka tulevat tuottamaan sähköä. Kaikki ITERin suunnittelun viisi pääkohtaa ovat tärkeitä tulevaisuuden reaktoreiden kannalta. (iter, ei pvm b) Ensimmäinen plasma ITERissä on tarkoitus olla vuonna 2025, mutta reaktori tulee toimimaan kunnolla vasta vuonna 2035 (Barbarino, 2020).

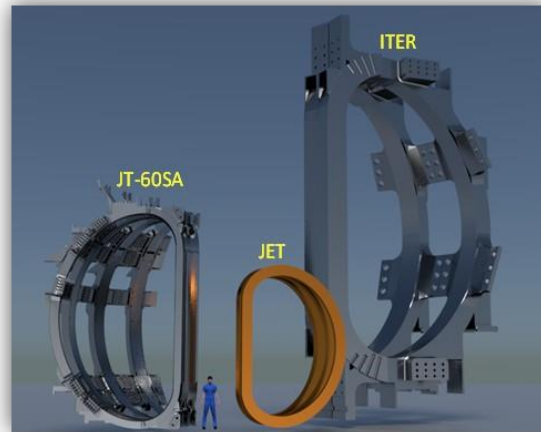
ITER tulee olemaan maailman suurin tokamak-reaktori valmistuessaan (kuva 6). ITERin reaktorirakennus tulee kohoamaan 60 metriä maan päälle ja kaivautumaan 13 metriä maan alle. Lisää ITERin sekä JT-60SAn (luku 3.1) teknisiä tietoja on listattu taulukkoon 2. Vertailu on tehty JT-60SAn ja ITERin välillä, koska JT-60SA tulee olemaan ITERin viimeinen koereaktori. ITERissä plasma virta tulee olemaan kolminkertainen, plasman määrä kuusin kertainen ja fuusion pituus nelinkertainen verrattuna JT-60SAn. Plasman venymä on ainut asia, jonka koko tulee olemaan pienempi ITERissä kuin JT-60SAssa. Tämä on vain hyvä asia, sillä mitä pienempi plasman venymä on, sitä paremmin plasmaa hallitaan.

Taulukko 2: JT-60SAn ja ITERin teknisiä tietoja (JT-60SA, ei pvm c)

	JT-60SA	ITER
suuri säde (m)	~ 3	~ 6,2
pieni säde (m)	< 1,18	< 2,0
plasmavirta (MA)	< 5,5	< 15
plasman venymä	< 2,0	< 1,8
plasman tilavuus (m ³)	~ 140	~ 840
induktiopulssin pituus (s)	100	> 400

Plasmakammiossa plasma lämpötilan on tarkoitus nousta 150 miljoonaa asteiseksi. Samaan aikaan jättimäiset magneetit on jäädytettävä -269 °C, jotta saadaan estettyä

plasman ja seinämien välinen kosketus. Jäähdyessään magneeteista tulee suprajohtavia ja ne muodostavat magneettisen häkin kammion seinämien ympärille. (Fusion For Energy, ei pvm) Plasman ollessa 150 miljoona asteista, mikään materiaali ei kestä olla kosketuksissa näin korkean lämpötilan kanssa.



Kuva 6: JT-60SAn, JETin ja ITERin toridaalikelojen koko verrattuna ihmiseen (JT-60SA, ei pvm c), julkaistu JT-60SAn luvalla.

ITERin onnistuminen tulee olemaan suuri merkkipaalu sekä MCF-reaktoreiden että ylipäättänsä fuusiotutkimuksessa. Jos taas projekti epäonnistuu, niin fuusioenergian saaminen kaupalliseen sähköntuotantoon tulee myöhästymään vuosikymmeniä. ITERin tutkimus tulee olemaan fuusiotutkimuksen keskiössä seuraavat 15 vuotta, sillä se on ensimmäinen seuraavan vaiheen reaktoreista, joka käynnistyy. Vaikka Kiina ja Etelä-Korea ovat mukana ITERissä, niillä on kehityksen alla myös omat kansalliset ITERiä vastaavat reaktorit. (Parisi & Ball, 2019)

Tällä hetkellä tutkijat tuntevat olevan hyvin varmoja siitä, että ITER aloittaa toimintansa vuonna 2025 ja on täysin toiminnassa vuonna 2035. Kyseessä on kuitenkin yksi maailman historian suurimmista tiedeprojekteista, joten sen lopullista valmistumisaikataulua on vaikea sanoa vielä. Vuoden 1998 Roy Bickertonin näkemyksen mukaan ITERin olisi pitänyt olla toiminnassa vuonna 2005 ja mahdollisesti malliltaan stellaraattori-reaktori. Näkemys on nyt osoittautunut hyvinkin optimistiseksi. ITER tulee maksamaan valtavasti ja siitä on vastuussa laaja tiedeyhteisö eikä vain yksi yritys. Suurimman haasteen luo kuitenkin se tosiasia, että tämä on ensimmäinen kerta, kun fuusioreaktoria rakennetaan tässä kokoluokassa. (Windsor, 2019) Vielä vuonna 2007 arvioitiin että ITERin ensimmäinen plasma saavutettaisiin vuonna 2016 (Holtkamp & ITER Project Team, 2007). Onkin siis edelleen haastavaa arvioida, milloin ITER on kokonaan toiminnassa.

5.2 DEMO

EUROfusionin tiekartan viimeinen kohta ja pitkän aikavälin tavoite on rakentaa DEMO (a DEMOnstration fusion power plant), joka on tokamak-reaktori. DEMOn edeltäjä ITER tulee olemaan vielä laboratorioreaktori, mutta DEMO tullaan tekemään yhteistyössä teollisuuden kanssa. DEMO projektin onnistumisen jälkeen vastuu fuusioreaktoreista siirtyy tieteeltä teollisuudelle, kaupalliseen fuusiovoimaan. Tieteestä teollisuuteen siirtymiseen ei riitä pelkkä yhteistyö teollisuuden kanssa vaan se vaatii myös kansainvälistä tiedeyhteistyötä. (EUROfusion, ei pvm f) Tarvitaan myös paljon lisää rahallista panostusta fuusiotutkimukseen (Parisi & Ball, 2019)

DEMOn tarkoitus on osoittaa, että fuusiovoimalla voidaan tuottaa sähköä. Nettosähkötehon on tarkoitus olla 300–500 MW (Ciattaglia, et al., 2017). Sähkön tuotantotapa tulee olemaan samanlainen kuin fissiovoimalaitoksissa, eli perinteinen höyryvoimalaitos. Fuusioreaktiosta vapautuneella energialla lämmitetään vettä höyryksi, joka pyörittää turbiinin lapoja. Turbiini taas pyörittää generaattoria, joka muuttaa liike-energian sähköksi. (Barucca, et al., 2018)

Jotta sähköntuotanto onnistuisi, DEMOn on tarkoitus ratkaista lopullisesti kaikki fuusioreaktorin teknologiaan ja fysiikkaan liittyvät haasteet. Näitä haasteita ovat plasman tasainen tila, korkea tiheys ja hallinta, lämmityksestä aiheutuvien kaasujen poisto ja plasmavirran katkaisu. Kaupallisen sähköntuotannon kannalta on tärkeää, että sähköä pystytään tuottamaan luotettavasti tarpeeksi pitkän ajan. DEMOssa tämä on tarkoitus taata vähintään kahden tunnin kestoisella plasmapulssilla. (Fericci, et al., 2016)

DEMOn valmistelut ovat jo pitkällä, mutta vielä on ratkaistavana muutamia haasteita. Koska DEMO tulee tuottamaan itse tritiuminsa, niin tritiumin valmistukseen liittyvät haasteet pitää ratkaista. Valmistuksen suurin haaste on viilentäminen. (Fericci, et al., 2016) Tritiumin valmistuksen minimoimiseksi DEMO tulee toimimaan suljetulla polttoainekierrolla, eli polttoaineen tritium käytetään uudelleen (Ciattaglia, et al., 2017).

DEMOLle pitää valita sopiva divertori ja plasmakammion seinän materiaali. Lämmityksen ja sähkövirran ohjauksen yhteensovittamista pitää tutkia ja etähuoltojärjestelmä suunnitella. Kammiossa olevan plasman koostumusta on tulevaisuudessa tärkeä osata arvioida etukäteen ja turvallisuuteen liittyviä järjestelmiä on vielä paranneltava. Käsiteltävä plasma on satojen miljoonien asteiden lämpöistä, joten reaktorin viilennys pitää toimia tarvittaessa todella nopeaa. (Fericci, et al., 2016) DEMOn on tarkoitus olla toiminnassa tämän vuosisadan puolessa välissä (EUROfusion, ei pvm f).

5.3 ICF-reaktorit

NIF:n läpimurto mahdollistaa ICF-tutkimuksen siirtymisen seuraavaan vaiheeseen. Nyt tutkijoiden tavoitteena on saada aikaan tehokas fuusion sytyttäminen. Pellettien ominaisuuksia halutaan parantaa niin, että ne vapauttaisivat 100-kertaisesti sen energiamäärän, mitä lasereilla on niihin tuotu. NIF:n tutkimuksessa on saatu paljon arvokasta tietoa, joka auttaa tutkijoiden kouluttautumisessa. ICF-tutkimuksen päätätään on luoda voimalaitos, jossa sekunnissa kokoon luhistettaisiin 10 pellettiä. Jotta tämä on mahdollista, pitää voimalaitokselle kehitellä perusrakenteet, sopivat materiaalit ja teknologia. (Batani, et al., 2023)

EUROfusionin alla toimii myös ICF-tutkimukseen keskittynyt projekti HiPER+ (High Power Energy Research Plus). Sen tavoitteena on rakentaa ICF-demoreaktori Eurooppaan 2050-luvulle mennessä. Reaktorin olisi siis tarkoitus mallintaa kaupalliseen sähköntuotantoon sopivaa ICF-voimalaitosta. Projektia johtaa Euroopan laserfuusio tutkimuskeskus, mutta tutkijoita projektiin osallistuu ympäri maailmaa. (Batani, et al., 2023)

HiPER+:n tausta on HiPER-projektissa (High Power Energy Research). Edeltäjäprojektin tavoitteena oli saada luotua fuusioreaktio lasereilla. Tutkimus NIF:ssä kuitenkin oli sen verran edellä, että HiPER-projekti lakkautettiin vuonna 2013. Kun NIF onnistui vapauttamaan fuusioreaktiossa enemmän energiaa kuin reaktion sytyttämiseen tarvittiin vuonna 2022, HiPER+ käynnistettiin uudelleen tämän läpimurron jälkeen. (Batani, et al., 2023)

Tulevan ICF-voimalaitosten on tarkoitus olla modulaarisia tekniikaltaan eli niitä voidaan helposti irrottaa sähköverkosta ja kytkeä takaisin kiinni. Tämä mahdollistaa huomattavan juostavuuden sähköntuotannossa ja parantaa kaupallista toimintakykyä. (Batani, et al., 2023) ICF-voimalaitosten olisi siis mahdollista toimia säätövoimana esimerkiksi tuulivoimalle. Jos tuulivoimaa ei ole tarpeeksi saatavilla, niin ICF-voimalaitos voitaisiin kytkeä päälle. Säätövoiman tarkoitus on siis pystyä pitämään sähköntuotanto kulutusta vastaavalla tasolla (Energiateollisuus, ei pvm).

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, miten fuusioreaktoreiden tulisi kehittyä, jotta ne soveltuisivat kaupalliseen sähköntuotantoon. Tulevaisuuteen perehtyessä on tarpeellista tietää mitä aiemmin on tehty. Tämän takia työssä tavoitteena oli myös tutustua fuusiotutkimuksen historiaan ja tämänhetkiseen tilanteeseen. Työssä perehdyttiin näiltä osin kahteen eri reaktorityyppiin, magneettisen koossapidon reaktoreihin (MCF) ja inertiaalisen fuusion reaktoreihin (ICF). Näissä reaktoreissa tutkimustyö on edennyt kaikista pisimmälle.

MCF-reaktoreissa plasmaa hallitaan ja lämmitetään fuusio-olosuhteisiin voimakkailla magneeteilla. MCF-reaktoreita on kahdenlaisia, tokamakkeja ja stellaraattoreita, joihin molempiin työssä tutustuttiin. Tokamak on muodoltaan toruksen muotoinen ja stellaraattori mutkittelevan toruksen. Fuusio tapahtuu plasmassa, kun sen lämpötila on noussut riittävän korkeaksi. ICF-reaktoreissa fuusio saadaan aikaan kohdistamalla voimakasenerginen ajurisuihku pieneen pellettiin. Ajurisuihkusta tulleen energian myötä pelletti kokoon luhistuu eli muuttuu pieneksi plasmakeskittymäksi. Fuusio tapahtuu plasmakeskittymän palaessa.

MCF-reaktoreiden tutkimus on alkanut 1950-luvulla. Aluksi oltiin kiinnostuneempia stellaraattoreista, mutta 1960-luvun lopulla tokamak meni stellaraattoreiden ohi kehityksessä. Tilanne on samanlainen edelleen tänä päivänä, sillä tokamakilla on pystytty tuottamaan energiaa 60 % suhteella 69 MJ, kun stellaraattorilla päästy vain 1300 MJ energianvaihtoon, eli fuusioreaktiota ei ole vielä muodostunut ollenkaan. Maailman suurin toiminnassa oleva tokamak sijaitsee Japanissa ja sen tutkimusalue koostuu plasman hallinnasta.

Ensimmäinen MCF-reaktori, jonka on tarkoitus vapauttaa enemmän energiaa, kuin sen fuusion sytyttämiseen ja ylläpitämiseen tarvitaan, on rakenteilla Etelä-Ranskaan. Reaktoriprojektin nimi on ITER ja sen on tarkoitus aloittaa toimintansa vuonna 2025. Täydessä toiminnassa sen on tarkoitus olla vuonna 2035. ITER tulee olemaan viimeinen testireaktori, jonka tehtävä on ratkaista kaikki tokamakin tekniset ongelmat. Sen jälkeen on tarkoitus rakentaa teollisuuden kanssa yhdessä ensimmäinen DEMO-reaktori. DEMOn on tarkoitus olla viimeinen askelma kohti kaupallista fuusioreaktoria. DEMO tulee olemaan ensimmäinen voimalaitos, joka tuottaa sähkönsä fuusiovoimalla. Nettosähköteho tulee olemaan 300–500 MW. DEMOn on tarkoitus olla toiminnassa 2050-luvulla.

ICF-reaktoreiden tutkimus on alkanut 1960-luvulla. Pitkään tokamak oli edellä ICF-reaktoreita kehityksessä, mutta joulukuussa 2022 Yhdysvalloissa saatiin vapautettua enemmän energiaa laserilla sytytetyssä fuusiossa kuin sytyttämiseen kului. Tämä on fuusiotutkimuksen suurin saavutus. Myös ICF-reaktorista on suunnitteilla demoreaktori, jonka on tarkoitus olla toiminnassa 2050-luvulla.

Jokaisella reaktoryypillä on omat haasteensa, jotka tulee ratkaista ennen kuin kehittämistyö voi jatkua, ja fuusioreaktori saadaan kaupalliseen sähköntuotantoon. Stellaraattorin suurin haaste on seinien liika kuumeneminen. Tokamakin plasman pulssin pituutta on kasvatettava ja plasman hallintaan parannettava sekä reaktorin materiaalin kehityttävä. ICF-reaktoreiden energiamäärät ovat vielä pieniä, mutta niitä voidaan kasvattaa käyttämällä voimakkaampia ajurisuihkuja ja parantamalla pellettien hyötysuhdetta. Jotta nämä haasteet saadaan ratkaistua, ja fuusiovoimalaitos on mahdollista saada kaupalliseen sähköntuotantoon, tarvitaan paljon kansainvälistä yhteistyötä ja rahallisia investointeja fuusiolaitosten tekniikan kehittämiseksi.

LÄHDELUETTELO

Barbarino, M. A. (2020). Brief history of nuclear fusion. *Nat. Phys.* **16**, s. 890–893. <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0940-7>

Barucca, L. & al. (2018). Status of EU DEMO heat transport and power conversion systems. *Fusion Engineering and Design*. vol 136 part B, pp. 1557-1566

Batani, D. et al. (2023). Future for inertial-fusion energy in Europe: a roadmap. *High Power Laser Science and Engineering*. vol 11, pp. e83. doi: 10.1017/hpl.2023.80.

CCFE. (2024). Fusion research facility JET's final tritium experiments yield new energy record. Saatavissa (viitattu 8.5.2024): <https://ccfe.ukaea.uk/fusion-research-facility-jets-final-tritium-experiments-yield-new-energy-record/>

CCFE. MAST Upgrade is the UK's national fusion experiment. Saatavissa (viitattu 6.4.2024): <https://ccfe.ukaea.uk/programmes/mast-upgrade/>

Chatzis, I. & Barbarino M. (2021). What is Fusion, and Why Is It So Difficult to Achieve?. IAEA bulletin. Vol. 60-2, pp.4-5

Ciattaglia, S., Federici, G., Barucca, L., Lampasi, A., Minucci, S. & Moscato, I. (2017). The European DEMO fusion reactor: Design status and challenges from balance of plant point of view. *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*. Milan, Italy. pp. 1-6. doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977853.

Davis, S. (2023a). 1 MA plasma current. JT-60SA News. Saatavissa (viitattu 20.3.2024) <https://www.jt60sa.org/wp/category/ceremony/>

Davis, S. (2023b). First plasma 23 October. JT-60SA News. Saatavissa (viitattu 20.3.2024) <https://www.jt60sa.org/wp/category/ceremony/>

Einstein, A. (1905). Suhteellisuusteoria

Energiateollisuus. Säättövoima. Saatavissa (viitattu 9.5.2024): <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima>

EPFL. TVC. Saatavissa (viitattu 6.4.2024) <https://www.epfl.ch/research/domains/swiss-plasma-center/research/tcv/tcv-research-areas/tcv-new-shapes/>

EUROfusion. (2024). Breaking New Ground: JET Tokamak's Latest Fusion Energy Record Shows Mastery of Fusion Processes. EUROfusion News. Saatavissa (viitattu 20.3.2024) <https://euro-fusion.org/eurofusion-news/dte3record/>

EUROfusion. (ei pvm a). JET History. Saatavissa (viitattu 15.3.2024) <https://euro-fusion.org/devices/jet/jet-history/>

EUROfusion. (ei pvm b). JT-60SA. Saatavissa (viitattu 20.3.2024) <https://euro-fusion.org/devices/jt-60sa/>

EUROfusion. (ei pvm c). About EUROfusion. Saatavissa (viitattu 6.4.2024) <https://euro-fusion.org/eurofusion/>

EUROfusion. (ei pvm d). EUROfusion Partners. Saatavissa (viitattu 6.4.2024) <https://euro-fusion.org/eurofusion/partners/>

EUROfusion. (ei pvm e). Programme. Saatavissa (viitattu 6.4.2024) <https://euro-fusion.org/programme/>

EUROfusion. (ei pvm f). The Road to Fusion Energy. Saatavissa (viitattu 6.4.2024) <https://euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/>

EUROfusion. (ei pvm g). Devices. Saatavissa (viitattu 6.4.2024) <https://euro-fusion.org/devices/>

EUROfusion. (ei pvm h). Linear devices. Saatavissa (6.4.2024) <https://euro-fusion.org/devices/linear-devices/>

EUROfusion. (ei pvm i). How much more energy will it take a Tokamak over the “break-even point” to actually produce power due to loss of energy in the processes of electricity production? Saatavissa (viitattu 9.5.2024): <https://euro-fusion.org/faq/breakeven-point-to-actually-produce-power/>

European komissio, Tutkimuksen ja innovoinnin pääosasto. (2005). Fuusiotutkimus: tavoitteena tulevaisuuden energiavaihtoehto Euroopalle. Julkaisutoimisto

Federici, G. & al. (2016). Overview of the design approach and prioritization of R&D activities towards an EU DEMO. Fusion Engineering and Design. vol. 109-11, part B, pp. 1464-1474. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.11.050>.

Fusion for Energy. ITER. Saatavissa (viitattu 9.4.2024) <https://fusionforenergy.europa.eu/iter/>

Holtkamp, N. & ITER Project Team. (2007). An overview of the ITER project. Fusion Engineering and Design. vol 82(5-14), pp. 427-434. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.03.029>

IPP. (2022). Wendelstein 7-X on the verge of new peak performance. Saatavissa (viitattu 27.3.2024) https://www.ipp.mpg.de/5272648/03_22

- IPP. (2023). Wendelstein 7-X reaches milestone: Power plasma with gigajoule energy turnover generated for eight minutes. Saatavissa (viitattu 27.3.2024) https://www.ipp.mpg.de/5322229/01_23
- IPP. (ei pvm a). Milestones. Saatavissa (viitattu 27.3.2024) <https://www.ipp.mpg.de/17019/meilensteine>
- IPP. (ei pvm b). ASDEX Upgrade. Saatavissa (viitattu 6.4.2024) <https://www.ipp.mpg.de/16195/asdex>
- IRFM. WEST. Saatavissa (viitattu 6.4.2024) <https://irfm.cea.fr/en/west/index.php>
- iter. (ei pvm a). The ITER Story. Saatavissa (viitattu 9.4.2024) <https://www.iter.org/proj/iterhistory>
- iter. (ei pvm b). What Will ITER Do?. Saatavissa (viitattu 9.4.2024) <https://www.iter.org/proj/inafewlines#2>
- JT-60SA. (ei pvm a). The Device. Saatavissa (viitattu 23.3.2024) <https://www.jt60sa.org/wp/the-device/>
- JT-60SA. (ei pvm b). Achievements. Saatavissa (viitattu 23.3.2024) <https://www.jt60sa.org/wp/achievements/>
- JT-60SA. (ei pvm c). Main Research Objectives of JT-60SA. Saatavissa (viitattu 9.4.2024) <https://www.jt60sa.org/wp/main-research-objective/>
- Kikuchi, M., Lackner, K. & Tran, M. Q. (2012). Fusion Physics. International Atomic Energy Agency, Wien.
- LLNL. (2022). Lawrence Livermore National Laboratory achieves fusion ignition. Saatavissa (viitattu 2.4.2024) <https://www.llnl.gov/article/49306/lawrence-livermore-national-laboratory-achieves-fusion-ignition>
- LLNL. (2023). Star Power: Blazing the Path to Fusion Ignition. Saatavissa (viitattu 2.4.2024) <https://lasers.llnl.gov/news/star-power-blazing-the-path-to-ignition>
- LLNL. Achieving Fusion Ignition. Saatavissa (viitattu 2.4.2024) <https://lasers.llnl.gov/science/pursuit-of-ignition>
- Loewenhoff, T. W. (2012) Deuterium-tritium fusion. Saatavissa (viitattu 11.3.2024): https://www.researchgate.net/figure/Deuterium-tritium-fusion-Deuterium-and-tritium-form-an-intermediate-state-5-He-with-a_fig3_270507557
- Milch, I. (2015). The first plasma: the Wendelstein 7-X fusion device is now in operation. Saatavissa (viitattu 27.3.2024) https://www.ipp.mpg.de/3984226/12_15

- Milch, I. (2016a). Wendelstein 7-X fusion device produces its first hydrogen plasma. Saatavissa (viitattu 27.3.2024) https://www.ipp.mpg.de/4010154/02_16
- Milch, I. (2016b). Wendelstein 7-X: Upgrading after successful first round of experiments. Saatavissa (viitattu 27.3.2024) https://www.ipp.mpg.de/4073918/07_16
- Milch, I. (2018a). Wendelstein 7-X achieves world record. Saatavissa (viitattu 27.3.2024) https://www.ipp.mpg.de/4413312/04_18
- Milch, I. (2018b). Successful second round of experiments with Wendelstein 7-X. Saatavissa (viitattu 27.3.2024) https://www.ipp.mpg.de/4550215/11_18
- Nakai, S. & Mima K. (2004) Rep. Prog. Phys. 67 321. doi: 10.1088/0034-4885/67/3/R04.
- Parisi, J. & Ball, J. (2019) The Future of Fusion Energy. World Scientific, New Jersey
- Prager, S. C. & Najmabadi, F. (2024). fusion reactor. Encyclopedia Britannica. Saatavissa (viitattu 11.3.2024) <https://www.britannica.com/technology/fusion-reactor>
- The Economist. (2015). Saatavissa (viitattu 20.3.2024) <https://www.economist.com/science-and-technology/2015/10/24/stellar-work>
- Windsor, C. (2019). Can the development of fusion energy be accelerated? An introduction to the proceedings. Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20170446. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0446>
- Yamanaka, C. (1999). Inertial fusion research over the past 30 years. Fusion Engineering and Design. vol 44, issues 1-4, pp. 1-12 [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(98\)00369-X](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(98)00369-X)
- Yhdysvaltojen energiaministeriö, Department of Energy. DOE Explains...Stellarators. Saatavissa (viitattu 15.3.2024) <https://www.energy.gov/science/doe-explainsstellarators>
- Yhdysvaltojen energiaministeriö, Department of Energy. (2022). DOE National Laboratory Makes History by Achieving Fusion Ignition. Saatavissa (viitattu 20.3.2024) <https://www.energy.gov/articles/doe-national-laboratory-makes-history-achieving-fusion-ignition>
- Zylstra, A.B., Hurricane, O.A., Callahan, D.A. et al. Burning plasma achieved in inertial fusion. Nature 601, 542–548 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04281-w>