

Plasmasuihkufuusio

LuK tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2024
Fil. yo. Tomas Niemi
Tarkastaja:
Prof. Matti Murtomaa

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Niemi, Tomas Plasmasuihkufuusio

LuK-tutkielma, 14 s., 3 liites.
Fysiikka
Maaliskuu 2024

Globaalin energiantarve on rajussa kasvussa, ja perinteisten energiantuotantomuotojen, kuten hiilen, öljy ja maakaasun, käytön vähentyessä tarve uusille teknologioille kasvaa. Uusiutuvien energialähteiden lisäksi ydinenergiarintamalla on kaksi lupavaa ehdokasta: ydinfuusio ja ydinfissio. Fissioteknologiaa käytetään laajalti ympäri maailmaa, mutta fuusioteknologia on edelleen kehittyvässä vaiheessa. Korkean potentiaalın vuoksi sitä tutkitaan kiivaasti siinä toivossa, että saataisiin yhä halvempaa, paremmin saatavilla olevaa ja puhtaampaa energiaa.

Tässä tutkielmassa tutkitaan pintatasolla fuusioenergian kehitystä, esitellään teollisen fuusion pääpiirteet, sekä syvennytään tarkemmin yhteen sen sovelluksista: plasmasuihkufuusioon. Tutkielmassa tarkastellaan kyseisen menetelmän vaatimuksia sekä kokeellisen reaktorin oleellisimpia komponentteja. Lisäksi tutkielmassa pohditaan, olisiko hyötysuhdetta mahdollista parantaa.

Plasmasuihkufuusio on edelleen kokeellinen menetelmä, mutta tutkimus aiheesta edistyy vuosi vuodelta. Kyseistä teknologiaa ei tulla näkemään vielä pitkään aikaan kaupallisessa käytössä. Sen sijaan kokeellisessa ympäristössä ollaan jo saatu aikaiseksi onnistuneesti plasmasuihkuja. Ratkaistavana on vielä tritiumin, mahdollisesti oleellisen reaktiokomponentin, uudelleentuotto reaktiosta, plasmatykkien lopullinen ja kustannustehokas rakenne sekä reaktorin komponenttien yhteistoiminta. Voidaan todeta, että plasmasuihkufuusion päätyminen teolliseen käyttöön vaatii edelleen merkittäviä tieteellisiä ponnistuksia.

Asiasanat: Plasmasuihkufuusio, Coulombin kynnys, Flibe-vaippa, Fuusioajuri

Sisällys

Johdanto	1
1 Ydinfuusio	1
2 Fuusioreaktorien rakenne ja toiminta	3
3 Magneetti-inertiafuusio	5
4 Plasmasuihkufuusio	6
4.1 Liner	8
4.2 Plasmasuihkutykit	9
4.3 Flibe-vaippa	10
4.4 Aneutroninen fuusio	11
5 Ongelmat, riskit ja tulevaisuuden näkymät	11
6 Yhteenveto	12
Viitteet	14

Johdanto

Klassiset ydinreaktorit, fissioreaktorit, olivat aikanaan merkittävä edistysaskel kohti lähes päästötöntä energiaa. Fissioreaktoreiden suurimmat ongelmat johtuvat polttoaineen aggressiivisesta luonteesta, joka altistaa reaktorin täydelliselle sulamiselle ja räjähdykselle. Lisäksi polttoaineen radioaktiivinen lopputuote vaatii asianmukaisen käsittelyn, jottei se altista ympäristöä haitalliselle säteilylle. Suomen Onkalo on pätevä, mutta väliaikainen ratkaisu ydinjätteen varastointiin. Fuusipolttoaineella näitä riskejä sen sijaan ei ole, tai ne ovat minimaaliset.

Fuusio on edelleen kehittyvässä vaiheessa, ja vaatii valtavan määrän kollektiivista ponnistelua ja valtioiden välistä yhteistyötä. Kenties merkittävin 2020-luvun esitys tästä on ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), jonka määrä aloittaa toiminta vuonna 2034. ITER tulee toimimaan kokeellisena reaktorina, eikä sen ole tarkoitus tuottaa sähköä sähköverkkoon. Projektissa on mukana 35 suurta valtiota, mukaan lukien Kiina, Venäjä, Yhdysvallat sekä Ranska.

ITER luokitellaan niin kutsutuksi magneettifuusioreaktoriksi. Tämä on toinen teollisen fuusion päähaaroista. Toinen päähaara on inertiafuusio. Tutkielman tarkastelun kohteena oleva plasmasuihkufuusio kuuluu näiden yhdistettyyn alalajiin, magneetti-inertiafuusioon, jossa yhdistyy päähaarojen ominaisuudet.

Plasmasuihkufuusio ei ole yhtä edistyneellä tasolla. Menetelmällä on omat hyötynsä ja haasteensa, joihin tässä tutkielmassa perehdytään tarkemmin. Suurimmat syyt, miksi kyseistä menetelmää tutkitaan kiivaasti, ovat suuremman hyötösuhteen tavoittelemisen, kustannustehokkuus sekä reaktorin koko.

1 Ydinfuusio

Atomin ydin koostuu nukleoneista. Ytimessä vallitsee vahva vuorovaikutus, joka pitää nukleonit yhdessä ja ytimen koossa. Ytimellä on myös aina positiivinen nettova-

raus, joka saa ytimet hylkimään toisiaan. Ydinfuusiossa kaksi ydintä yhdistyy, kun ne tuodaan niin kutsutun Coulombin kynnyksen yli, jolloin ytimen vahva vuorovaikutus alkaa dominoimaan Coulombin voiman yli. Coulombin kynnyksellä tarkoitetaan potentiaalienergian maksimia, jossa Coulombin voima ja vahva vuorovaikutus ovat yhtäsuuret. Coulombin kynnyksen läpi on myös mahdollista tunneloitua. Näin tapahtuu esimerkiksi auringossa, mutta siihen vaadittavat olosuhteet on vaikea saavuttaa teollisissa olosuhteissa [1]. Kevyillä alkuaineilla Coulombin kynnys on erittäin suuri, ja fuusion onnistuminen vaatii hiukkasilta paljon energiaa. Käytännössä tämä edellyttää korkeaa painetta ja lämpötilaa reaktio-olosuhteissa. [2]

Ensimmäisen sukupolven fuusioreaktoreiden pääasiallinen polttoaine tulee olemaan deuteriumin ${}^2_1\text{H}$ ja tritiumin ${}^3_1\text{H}$ seos. Reaktiota kuvataan yhtälöllä

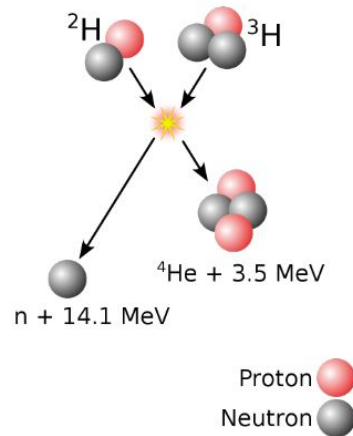


jossa D on deuteroni, T tritoni, He helium ja n neutroni. Reaktio on esitelty kuvassa 1, josta ilmenee reaktiossa vapautuva energia kummallekin tuotehiukkaselle. Fuusiossa vapautuva energia saadaan Einsteinin erityisessä suhteellisuusteoriassa johdetulla kaavalla

$$\Delta E = \Delta mc^2 , \quad (2)$$

jossa ΔE on energian muutos, Δm lähtöaineiden ja tuotteiden massaero, ja c on valonnopeus. Yleisesti fuusion kannalta oleelliset reaktiot ja niissä vapautuvat energiat on esitelty kuvassa 2. Näistä $\text{D}+{}^3\text{He}$ -fuusiota tutkitaan aneutronisena vaihtoehtona, ja tätä käsitellään lisää kappaleessa 4. [2]

Deuterium on lupaava vaihtoehto polttoaineeksi, koska sitä on helposti saatavilla: sitä ilmenee kovana vetenä D_2O normaalissa vedessä noin 166ppm [2]. Jos kaiken tämän deuteriumin kuluttaisi DD-reaktioissa, vuoden 2018 kulutuksella tästä riittäisi energiaa 25 miljardiksi vuodeksi [3]. Tritiumia sen sijaan ei löydy luonnosta suuria määriä sen radioaktiivisuuden takia, mutta sitä voidaan tuottaa fuusioreaktion sivutuotteena litiumin avulla. [2]

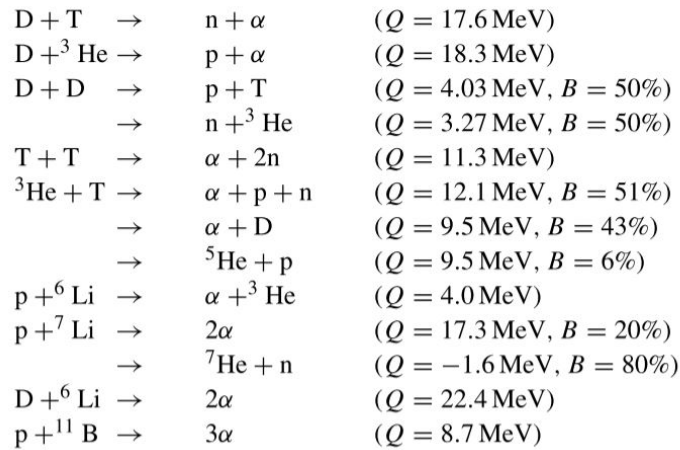


Kuva 1. Deuteronin ja tritonin fuusio sekä energian jakautuminen tuotehiukkasten kesken. [1]

Saatavuuden lisäksi DT-polttoaineen etuna on sen hyvä vaikutusala. Vaikutusala on suure, jolla voidaan kuvata reaktion reaktiivisuutta. Edellä mainittujen lisäksi DT-fuusiossa tuotetut hiukkaset eivät häiritse reaktiota tai reaktorissa vallitsevaa magneettikenttää. Varaukseton neutroni sinkoaa reaktorin kuorelle ja luovuttaa energiansa joko litiumiin tai reaktorin lämpökiertoon, ja alfahiukkanen luovuttaa energiansa reaktorissa reaktioiden ylläpitämiseksi. [2]

2 Fuusioreaktorien rakenne ja toiminta

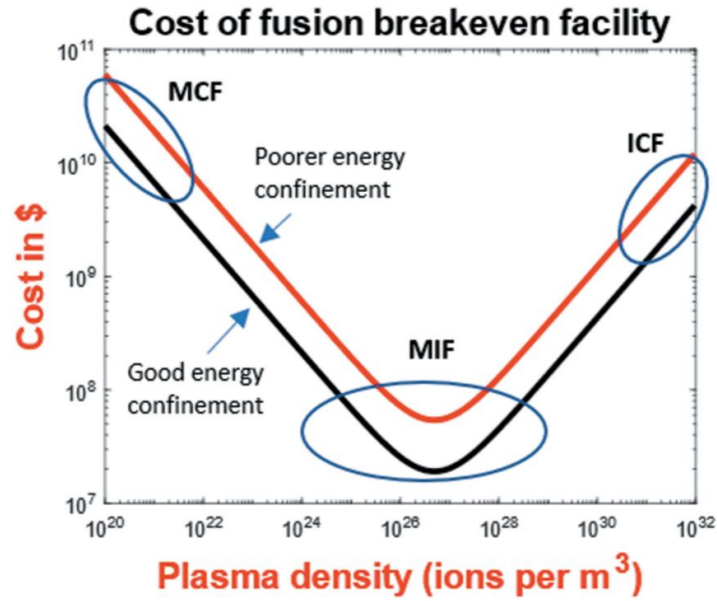
Fusion saavuttaminen teollisesti ei ole helppoa. DT-fuusio vaatii vähintään 100 000 000 K lämpötilan, jotta plasman reaktiivisuus on tarpeeksi korkea riittävän tuoton saavuttamiseksi. Yleisin reaktorimalli magneettifuusiolle on niin kutsuttu tokamak, joka on magneettifuusioreaktori. Sana tokamak tulee venäjän kielestä, ja tarkoittaa toroidista kammiota magneettikäämeillä. Tokamakeissa hyödynnetään vahvoja magneetteja, joilla hallitaan reaktorissa olevaa kuumaa plasmaa. Näin plasma ei pääse sulattamaan reaktorin seinämää. Lisäksi käämien avulla saadaan lämmitettyä plasmaa, sillä plasma toimii johteena, ja sillä on jokin tietty vastus. Suurilla indusoi-



Kuva 2. Ydinfuusion perusreaktiot. Yhtälöissä on merkitty $D = {}^2_1\text{H}$, $T = {}^3_1\text{H}$ ja $\alpha = {}^4_2\text{He}$. Q kuvaa reaktiossa vapautuvaa energiaa, ja B kertoo reaktion todennäköisyyden, jos sillä on useampi mahdollinen lopputulos. [3]

duilla virroilla tehohäviöt plasmassa lämmittävät sitä. Tämä on kuitenkin tehokasta vain tietyn suuruisiin lämpötiloihin asti, sillä plasman resistanssi pienenee lämpötilan kasvaessa. Tällöin voidaan käyttää esimerkiksi korkeatehoisia radioaaltoja, jotka oskilloisivat plasman taajuden kanssa. Tämän tyyppin fuusiotä kutsutaan magneettifuusioksi (MCF, engl. Magnetic Confinement Fusion). Tällainen 1000 - 1500 kuutiometrin kokoinen reaktori pystyisi arvioiden mukaan tuottamaan sähköenergiaa jopa 1GW edestä.[4] [2]

Vaihtoehtona magneettifuusiolle on niin kutsuttu inertiafuusio (ICF, engl. Inertial Confinement Fusion), jossa voimakkaiden magneettien sijaan hyödynnetään tehokkaita ajureita (engl. driver) sekä erittäin korkeita paineita. Fuusioajuri on laite, jolla aiheutetaan polttoaineen sisäänpäin räjähtäminen eli imploosio. Tyypillisiä fuusioajureita on esimerkiksi laserajuri ja plasma-ajuri. Laserajurilla lämmitetään pienen polttoainepelletin kuori korkeaan lämpötilaan, jolloin se laajentuessaan puristaa pelletin sisäisen polttoaineen korkeaan paineeseen. Tarkoituksena on, että korkean paineen saavutettuaan fuusioreaktiot alkavat, ja alfahiukkaset lämmittävät edelleen plasmaa, kun taas neutronit sinkoavat plasmasta ulos kuoren läpi reaktorin



Kuva 3. Fuusiolaitoksen kustannukset plasman tiheyden funktiona. [5]

lämpökiertoon, jossa neutronien liike-energia muutetaan lämpöenergiaksi. Inertia-fuusiossa polttoaineen tiheys on paljon korkeampi, kuin magneettifuusiossa, mutta käytetyt lämpötilat sen sijaan merkittävästi pienempiä. [2]

3 Magneetti-inertiafuusio

Magneetti-inertiafuusio (MIF, engl. Magneto-Inertial Fusion) yhdistää fuusion kaksi päähaaraa; magneettifuusion ja inertiafuusion. Menetelmässä hyödynnetään kohdeplasman magnetisaatiota, jolla tämä eristetään ja minimoidaan lämpöhäviö. Toisaalta puristukseen käytetään eräänlaista plasmalineriä, jolla puristetaan esilämmitetty ja magnetisoitu kohdeplasma korkeaan paineeseen ja lämpötilaan lähes adiabattisessa puristuksessa [5]. Plasman puristus on parhaimmillaan yli 1000-kertainen [6]. MIF-luokan fuusiosta on kaksi lupaavaa vaihtoehtoa: plasmasuihkufuusio (PJ-MIF, engl. Plasma-Jet Driven Magneto-Inertial Fusion) ja fuusio laserajurilla (engl. laser driver). Tässä tutkielmassa keskitytään näistä ensimmäiseen. [6]

MIF-tyypin reaktoreissa plasman tiheys pyritään saamaan ICF- ja MCF -menetelmien

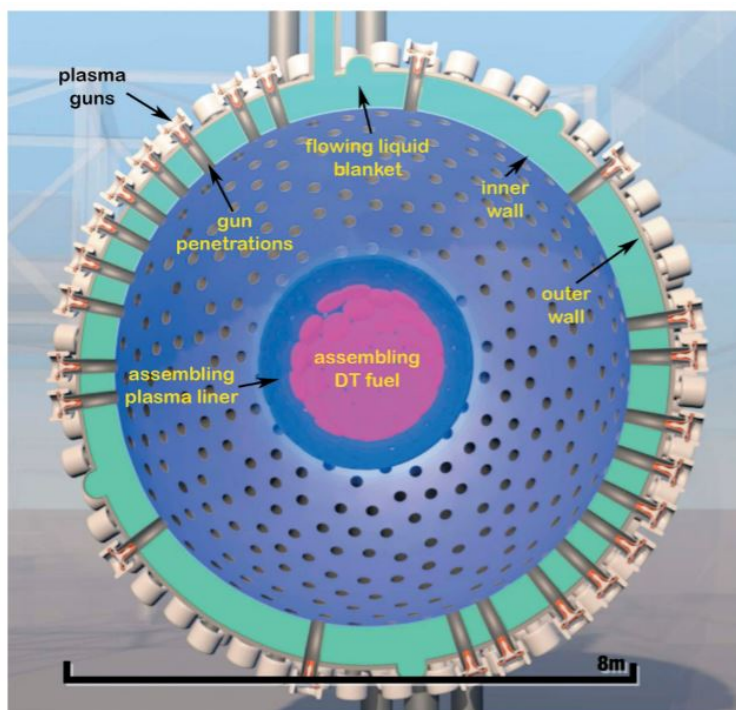
välille. Tämä havaitaan kustannusten laskuna kuvassa 3 siirryttäessä kohti tiheyden välialueita. Kustannusten laskuun vaikuttavia tekijöitä on muun muassa polttoaineen reaktiivisuuden kasvu sekä reaktorin vaaditun koon pieneneminen polttoaineen tavoitetiheyden kasvaessa. Lisäksi MIFille tyypillinen kohdeplasman voimakas magnetisaatio eristää sen reaktoriympäristöstä ja ehkäisee lämpöhäviötä, mikä puolestaan parantaa reaktorin hyötysuhdetta [7]. Toisaalta kustannuksia ajaa ylöspäin esimerkiksi se, että tiheämpi plasma vaatii tehokkaamman fuusioajurin (engl. fusion driver), jotta voidaan saavuttaa tarpeeksi tehokas puristus [5].

Myös reaktorin ulkoiset ominaisuudet, kuten sen muoto, vaikuttavat merkittävästi kustannuksiin. MIFille tyypillinen reaktori on muodoltaan pallomainen, ja plasman puristuksessa tähdätään pallosymmetriaan. Pallosymmetrinen puristus on tehokas tapa lämmittää ja tiivistää kohdeplasmaa, verrattuna esimerkiksi jatkuvaan magneettiseen eristykseen magneettifuusiossa [6].

4 Plasmasuihkufuusio

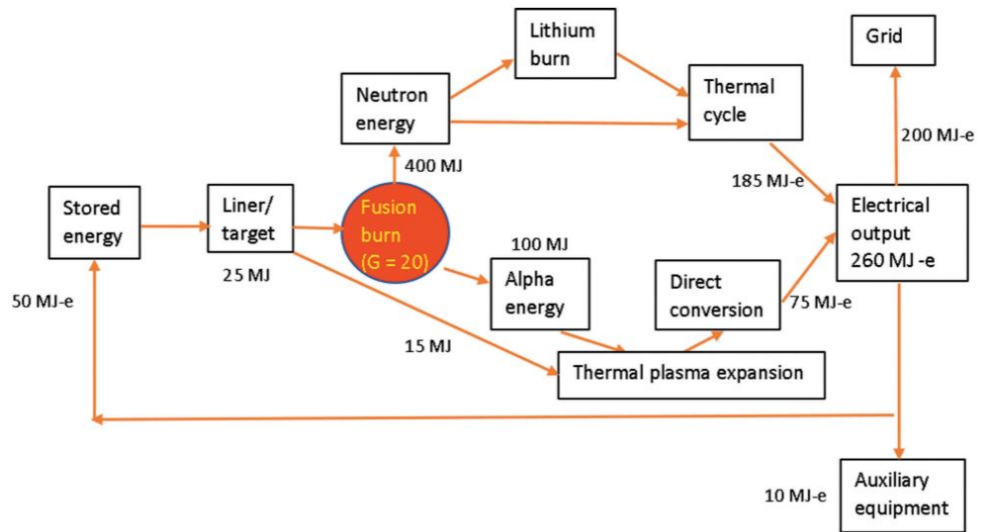
MIF-tyypin fuusioreaktio voidaan saavuttaa niin kutsutuilla plasmasuihkuilla (engl. plasma jets), jotka ammutaan suurilla lähtönopeuksilla esimerkiksi reaktorin ulkoiselta oikeanlaisista plasmatykeistä (engl. plasma guns). Plasmatykkien toimintaperiaate esitellään tarkemmin kappaleessa 4.1.2. Eräänlainen plasmatykeillä varustettu reaktori on esitelty kuvassa 4. Plasmatykkejä on kaksi sarjaa: plasmatykit polttoaineelle ja plasmatykit linerille. Linerin toiminta esitellään kappaleessa 4.1.1. Kuten myös tavallisemmassa MCF-luokan reaktorissa, tritiumin tuotto toteutetaan Flibe-vaipalla, joka esitellään kappaleessa 4.1.3. Mahdollisen jälkipolton käyttö ja toiminta esitellään kappaleessa 4.1.4. Energian talteenotto tapahtuu ydinreaktoreille tyypillisellä termodynaamisella kierrolla. [5]

Kuvassa 5 on esitelty PJMIF-luokan reaktorin laskennallinen energiakaavio. Reaktori on pulssityyppinen, ja sen on tarkoitus toimia noin 1-2Hz taajuudella. 50MJ



Kuva 4. Eräs PJMIF-luokan reaktorin konsepti. [8]

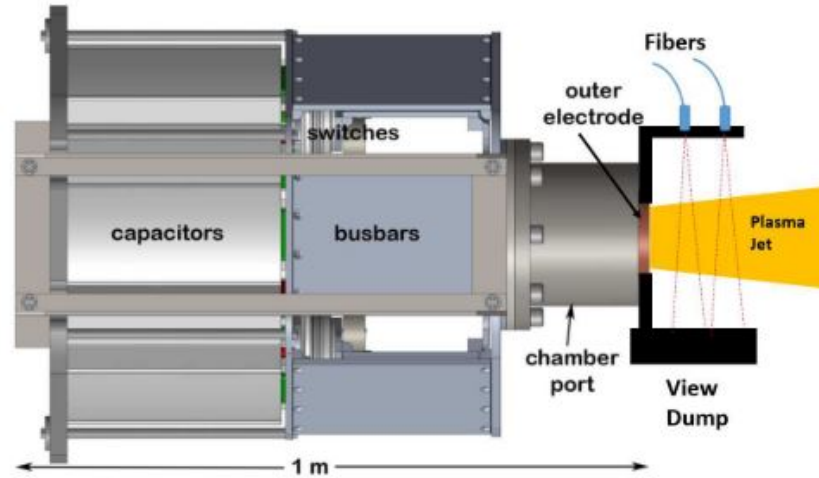
sähköenergiaa, jolla ajetaan plasmatykit, on varastoitu niiden kondensaattorimoduuleihin. 50% hyötysuhteen tykeillä ajetaan lineri ja puristetaan kohde fuusioolosuhteisiin. DT-fuusion lopputuotteista neutroni tuottaa noin 400MJ lämpöenergiaa, ja alfa-hiukkaset noin 100MJ. Flibe-vaipassa neutronin ja litiumin reaktio tuottaa edelleen tritiumin lisäksi noin 125MJ lämpöenergiaa. Neutronien kautta fuusiosta saadaan kokonaisuudessaan 525MJ lämpöenergiaa, joka 35% hyötysuhteen termodynaamisella syklillä muutetaan n. 185MJ:ksi sähköenergiaa. Linerin aiheuttaman puristuksen paine purkautuu alfa-hiukkasten lämmityksen ja jälkipolton seurauksena, ja plasma laajenee nopeasti kohti reaktorin seinämää. Noin 65% laajenevan plasman lämpöenergiasta saadaan suoran muunnon avulla muutettua sähköenergiaksi. Kokonaistuotto 50MJ sähköenergiansyötöstä on 260MJ sähköenergiaa, josta 50MJ käytetään plasmatykkien uudelleenlataamiseen, ja 10MJ reaktorin avustaviin toimintoihin. [5]



Kuva 5. Kuvan 4 mukaisen reaktorin energiakaavio. Avainvaiheet ovat itse fuusio (fusion burn), sekä energian talteenotto sähköverkkoon (grid). [5]

4.1 Liner

Liner on sekä itse polttoaineesta, että painavasta alkuaineesta, esimerkiksi jalokaasu argonista, muodostettu plasmakuori. Sen tarkoitus on suurella liikemäärällä puristaa kohdeplasmaa pallosymmetrisesti kohti reaktorin keskustaa. Linerin nopeus voi olla suuruusluokkaa 50km/s [9]. Kun liner iskee kohdeplasmaan, aiheuttaa se siinä paineaaltoja, jotka auttavat plasman lämmityksessä lähes adiabaattisen puristuksen lisäksi. Fuusioreaktioiden käynnistyessä kohdeplasman paine kasvaa räjähdysmäisesti ja fuusioitava plasma vapauttaa ulospäin etenevän paineaallon, joka pysäyttää linerin etenemisen sisäänpäin. Linerin muodostumisen yhtenäisyys on yksi kriittisimmistä asioista tutkia, ja se riippuu pitkälti plasmatykkien yhteistoiminnasta. Mikäli lineri ei pääse muodostumaan yhtenäisesti, voi sen ja kohdeplasman rajapinnalle päästä muodostumaan epävakaisuuksia. Toisin sanoen linerin materiaali ja kohdeplasma pääsevät pienissä määrin sekottumaan. Tämä heikentää plasman puristusta fuusio-olosuhteisiin.[10] [11]



Kuva 6. PLX- α -kokeen plasmatykin rakenne. [12]

4.2 Plasmasuihkutykit

Oleellista reaktorin toiminnan kannalta on hyvin suunnitellut plasmatykit. Niiden tulee kestää muun muassa räjähdysmäinen fuusioreaktio ja siitä vapautuvien neutronien aiheuttama vahinko. Plasmasuihkutykkien kehitys on edelleen vaiheessa ja niiden malli riippuu merkittävästi suunniteltavan reaktorin koosta ja tykkien lukumäärästä. Yhdysvaltojen New Mexicon osavaltiossa Los Alamosin kansallisessa laboratoriossa (engl. Los Alamos National Laboratory, LANL) sijaitsee PLX-laitos (Plasma Liner eXperiment), jossa on tarkoitus suorittaa kokeita liittyen PJMIF-luokan reaktorin linerin muodostamiseen plasmasuihkutykkeillä. PLX- α -kokeessa käytettävien plasmatykkien alustava rakenne on esitelty kuvassa 6. Oleellinen osa kokeita on samalla kehittää plasmatykkeitä. Tärkeintä plasmatykkien yhteistoiminnan kannalta on se, että plasmasuihkut olisivat keskenään tiheyksiltään, nopeudeuksiltaan ja Mach-luvuiltaan yhteneviä. Niissä on käytössä ns. laatta-moodi (engl. slab-mode), jossa kaasu injektoidaan ensin tykin kammioon muodostaen niin sanotun laatan. Kaasulaatta ionisoidaan sytytintapeilla (engl. ignitor pin) noin $580\mu\text{s}$ kaasun injektion jälkeen ennen tykin laukaisua. Tykin takaosassa sijaitsevalla n. $575\text{--}600\ \mu\text{F}$

kondensaattoripankilla (engl. capacitor bank) ajetaan esi-ionisoitu plasma reaktoriin. Muita mahdollisia moodeja ovat niin kutsutut leimahdus- ja lumiaura (engl. snowplow) -moodit. Osa yksityiskohdista liittyen tykkien elektrodihin, kaasuventtiiliin, sytytintappeihin ym. on vielä toistaiseksi yksityistä, joten näiden komponenttien toimintaa ei käsitellä tässä tutkielmassa. [5] [12] [10]

Oleellinen osa sekä linerin, että plasmatykkien, tutkimusta on simulaatioiden käyttö. PLX-alpha -kokeessa on käytetty mm. SPFMax- ja FronTier-koodeja. Ennen kokeellista tutkimusta simulaatioilla voidaan selvittää plasmasuihkujen ja linerin vaadittuja parametrejä. [10]

Viimeisimmässä tutkimusartikkelissa käsitellään kokeellisia tuloksia 36 plasmatykin yhteistoiminnasta, jossa linerinä käytettiin jalokaasu argonia. Siinä missä aiempi kokeellinen tutkimus 1-7 plasmatykillä on keskittynyt ko. tykkien kehittämiseen, niin näissä viimeisimmissä kokeissa ollaan keskitytty vierekkäisten plasmasuihkujen sulautumiseen. Lisäksi tutkimuksen kohteena on kokeellisen pallosymmetrisen linerin yhteneväisyys. Kokeissa havaittiin mielenkiintoinen ilmiö: useassa toistossa yksi tai useampi plasmatykki jätti laukaisematta, mutta viereinen plasmasuihku osittain paikkasi näitä puuttuvia plasmasuihkuja. [9]

4.3 Flibe-vaippa

Valtaosa reaktorissa käytettävästä tritiumista tuotetaan reaktorin kuoressa virtaavalla nestemäisellä Flibe-vaipalla. 1200 asteinen vaippa koostuu pääosin fluorista, litiumista ja berylliumista. Berylliumin läsnäolo vaipassa on erityisen tärkeä sen ($n, 2n$) reaktion vuoksi. Tämä mahdollistaa kasvavan määrän neutroneita, jotka törmätessään litiumiin tuottavat tritiumia. Tärkeä parametri tritiumin tuottoa ajatellen on myös flibe-vaipan paksuus. Flibe-vaippa ei ole ainoa mahdollinen vaihtoehto tritiumin tuottamiseksi. ITERissä on tarkoitus tutkia materiaaleiltaan ja muilta ominaisuuksiltaan erilaisia vaippamoduuleja. Siinä ei siis ole mitään yhtenäistä tritium-

mintuottovaippaa. [8] [4]

Ongelmaksi koituu korrossiivisen tritiumfluoridin TF muodostuminen flibe-vaipan redox-reaktiossa. TF on vahingollista reaktorin rakenteille, ja heikentää muun muassa reaktorin seinämän lujuusominaisuuksia. TF määrän säätelyä on tutkittu JUPITER-II -ohjelmassa. Säätely perustuu reaktioon $\text{Be} + 2\text{TF} = \text{BeF}_2 + \text{T}_2$. Säätely voidaan toteuttaa esimerkiksi Be-säätösauvoilla, jotka on todettu toistaiseksi lupaavimmaksi vaihtoehdoksi. [13]

4.4 Aneutroninen fuusio

Aneutronisten polttoaineiden fuusion lopputuotteena ei vapaudu neutronia. Sen sijaan tuotehiukkanen voi olla protoni, jonka avulla olisi tarkoitus saada Faradayn lain mukaisesti aikaan suora sähkönsiirto. Tätä ideaa jalostetaan Helion plasmakiihdyttimellä (engl. Helion plasma accelerator), joka on amerikkalaisen yrityksen Helion Energy, Inc. prototyypireaktori. Reaktorissa on kaksi vastakkaista plasmoidia, joista ammutaan suurilla nopeuksilla aneutronista polttoainetta, D-³He -seosta, toisiaan kohti. Protonien vapautuessa fuusioreaktioiden käynnistyessä magneettivuo reaktorin ympärillä muuttuu, ja reaktoria ympäröiviin käämeihin indusoituu Faradayn lain mukainen virta. Näin olisi teoriassa mahdollista saavuttaa jopa 70% hyötysuhde, tavallisen 30% termodynaamisen kierron hyötysuhteen sijaan.[6] [14] [15]

5 Ongelmat, riskit ja tulevaisuuden näkymät

Fuusioenergia on pääasiassa turvallisempaa kuin fissioenergia. Radiologinen riski fuusioreaktoriin läheisyydessä on yleisesti n. 10 000 kertaa pienempi, kuin perinteisessä fissioreaktorissa [3]. Kokonaisvaltainen reaktorin sulaminen on käytännössä lähes mahdotonta, johtuen pienistä polttoainemääristä ja lyhyistä reaktioajoista [2]. Tämä pätee etenkin magneetti-inertiafuusiolle, joka toimii lyhyissä sykleissä. Lisäk-

si fuusiolle otolliset olosuhteet ovat vaativat, ja näiden luhistuessa reaktiot loppuvat kokonaan. Esimerkiksi magneettikentän vikaantuessa plasma voisi päästä koskettamaan reaktorin seinämää ja sulattamaan sen, mutta tällöin plasma jäähtyy äkillisesti, ja fuusioreaktiot loppuvat. [3] [4]

Vaikka fuusioenergia on puhdasta ja turvallisempaa, kuin fissioenergia, on siinä silti omat riskinsä [3]. Reaktorin seinämien altistuminen neutroneille on merkittävä tekijä reaktorin materiaalien suunnittelussa. Pitkällä aikavälillä neutronivahinko on heikentää mm. materiaalin lujuusominaisuuksia [1]. On myös todettu, että osa DT-reaktion lopputuotteena vapautuneista neutroneista läpäisee reaktorin seinämän. Tämä on mahdollinen turvallisuusriski, joka pitää huomioida suunnittelussa. [8]

Käytöstä poistetun fuusioreaktorin aktiivisuuden on laskettu olevan aluksi samoissa suuruusluokissa kun fissioreaktorin. Oikeanlaisilla materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa radioaktiiviseen hajoamiseen pitkällä aikavälillä. Jopa 10 000 kertainen aktiivisuuden vähentyminen 100 vuoden aikana voidaan saavuttaa. Tämä poistaa tarpeen ydinjätteen tai reaktorin jäänteiden pitkäaikaisvarastoinnille, ja voidaan kierrättää uudelleen suhteellisen lyhyessä ajassa verrattuna siihen, kuinka kauan fissioreaktorin ydinjätteen täytyy olla eristettynä. [4]

6 Yhteenveto

Fuusioteknologialla on korkea potentiaali olla ympäristöystävällinen, turvallinen ja energiatehokas energiantuotantomuoto. Sillä on kuitenkin omat haasteensa, kuten monimutkaiset fyysiset vaatimukset sekä vaativat fuusio-olosuhteet. Edistynein haara fuusiosta on toinen sen päähaaroista: magneettifuusio. Suurin kansainvälinen projekti ITER on paraikaa valmistumassa Ranskassa, mutta ITER-reaktori on vasta koereaktori, eikä sillä pyritä tuottamaan sähköä verkkoon, eikä uutta tritiumia. Ajatus plasmasuihkuilla ajetusta fuusiosta on tuorempi. Tämä magneettinertiafuusiomenetelmä on pulssimaisesti toimiva reaktori, jossa pieni määrä polt-

toainetta esilämmitetään voimakkaassa magneettikentässä, ja puristetaan erittäin korkeaan paineeseen plasmasuihkuilla. Korkea paine ja lämpötila yhdistettynä aikaansaavat suotuisat olosuhteet fuusioreaktiolle. Lisäksi plasmasuihkufuusio on mahdollista aikaansaada aneutronisella polttoaineella, eli polttoaineella, jonka tuotteena ei synny neutronia. Tyypillisesti tuotehiukkasena syntyvä protoni on varauksellinen hiukkanen, jonka ollessa liikkeessä se muuttaa magneettikenttää. Näinollen höyryturbiinien käyttötarve poistuisi, ja hyötysuhdetta saataisiin merkittävästi nostettua.

Viitteet

- [1] R. Alba, R. Iglesias ja M. A. Cerdeira, *Materials* **15**, 6591 (2022).
- [2] M. Kikuchi, kirjassa *Fusion Physics*, toimittanut M. Q. Tran ja K. Lackner (International Atomic Energy Agency, 2012).
- [3] E. Morse, *Nuclear fusion* (Springer, 2018).
- [4] J. Ongena, R. Koch, R. Wolf ja H. Zohm, *Nature Physics* **12**, 398 (2016).
- [5] Y. C. F. Thio, S. C. Hsu, F. D. Witherspoon, E. Cruz, A. Case, S. Langendorf, K. Yates, J. Dunn, J. Cassibry, R. Samulyak, P. Stoltz, S. J. Brockington, A. Williams, M. Luna, R. Becker ja A. Cook, *Fusion science and technology* **75**, 581 (2019).
- [6] S. V. Ryzhkov, *Applied sciences* **13**, 6658 (2023).
- [7] Y. C. Thio, R. Kirkpatrick, C. Knapp, F. Wysocki ja E. Panarello, *Magnetized Target Fusion in a Spheroidal Geometry with Standoff Drivers* (Canadian Science Publishing (NRC Press), 1999).
- [8] L. M. Rolison, M. L. Fensin, Y. C. F. Thio, S. C. Hsu ja E. J. Cruz, *Fusion Science and Technology* **75**, 438 (2019).
- [9] A. L. LaJoie, F. Chu, A. E. Brown, S. J. Langendorf, J. P. Dunn, G. A. Wurden, F. D. Witherspoon, A. Case, M. Luna, J. Cassibry, A. Vyas ja M. Gilmore, *Phys. Plasmas* **31**, (2024).
- [10] S. C. Hsu, S. J. Langendorf, K. C. Yates, J. P. Dunn, S. Brockington, A. Case, E. Cruz, F. D. Witherspoon, M. A. Gilmore, J. T. Cassibry, R. Samulyak, P. Stoltz, K. Schillo, W. Shih, K. Beckwith ja Y. C. F. Thio, *IEEE transactions on plasma science* **46**, 1951 (2018).
- [11] Y. F. Thio, C. E. Knapp, R. C. Kirkpatrick, R. E. Siemon ja P. J. Turchi, *Journal of fusion energy* **20**, 1 (2001).
- [12] K. Yates, S. Langendorf, S. Hsu, J. Dunn, M. Gilmore, S. Brockington, A. Case, E. Cruz, D. Witherspoon, F. Thio, J. Cassibry ja K. Schillo, *Physics of Plasmas* **27**, (2020).
- [13] S. Fukada, K. Katayama, T. Terai ja A. Sagara, *Fusion science and technology* **52**, 677 (2007).
- [14] C. L. Nehl, R. J. Umstattd, W. R. Regan, S. C. Hsu ja P. B. McGrath, *Journal of fusion energy* **38**, 506 (2019).
- [15] J. T. Slough, U.S. Patent 11 049 620 B2 (2021).