



TEKNIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Sähkötekniikka

Sähkövoimatekniikka

INSINÖÖRITYÖ

FUUSIOVOIMA

**Työn tekijä: Harri Vuorinen
Työn valvoja ja ohjaaja:
Sampsa Kupari**

Työ hyväksytty: __. __. 2010

**Sampsa Kupari
lehtori, dipl.ins.**

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Harri Vuorinen	
Työn nimi: Fuusiovoima	
Päivämäärä: 19.4.2010	Sivumäärä: 48
Koulutusohjelma: Sähkötekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka
Työn valvoja ja ohjaaja: lehtori, dipl.ins. Sampsa Kupari, Metropolia Ammattikorkeakoulu	
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin fuusion syntyä fuusioreaktiossa sekä fuusioiden tyyppejä. Nykyisin paras kolmesta tarkastellusta reaktiosta (teoriassa) saatiin 45 miljoonan asteen lämpötilassa, kun yhdistettiin yksi deuterium ja yksi tritiumatomi. Nykyään ainoa toimiva fuusioreaktorin sovellus on vetypommi. Esimerkiksi, kun 1 kilogramma vetyä palaa eli yhtyy hapen kanssa vedeksi tavallisessa kemiallisessa reaktiossa, energiaa vapautuu 119 megajoulea. Mutta kun 1 kilogramma vetyä fuusioituu heliumiksi Auringon ytimessä, energiaa vapautuu noin 600 terajoulea eli viisi miljoonaa kertaa enemmän.</p> <p>Lisäksi tutkittiin, mikä olisi paras reaktori fuusioon. Vaihtoehtoja oli kolme: Tokamak, stelaraattori ja laserfuusiolaitte. Niistä vaihtoehtoista paras ja helpoin oli Tokamak, koska Tokamak on suhteellisen yksinkertainen rakenteeltaan. Tämän takia Tokamakeja on rakennettu moniin maihin.</p> <p>Ensimmäiset fuusioreaktorit rakennettiin 1970-luvulla ja niiden kehitys on ollut joidenkin mielestä hidasta toiset taas ajattelevat, että se on ollut nopeaa. Nykyisin paras fuusioreaktori on JET (Joint European Torus), koska se on jo tuottanut yhtä paljon energiaa kuin kuluttaa. Seuraavaksi olisi vuorossa ITER-reaktori (International Thermonuclear Experimental Reactor), joka valmistuu vuonna 2016.</p> <p>Fuusiovoiman tärkeys on kasvanut vuosi vuodelta, koska fossiilisten polttoaineiden käyttöä yritetään vähentää niiden korkeiden hiilidioksidipäästöjen takia.</p>	
Avainsanat: fuusio, fuusiovoima, fuusioreaktio, ITER-reaktori	

ABSTRACT

Name: Harri Vuorinen

Title: Fusion Power

Date: 19.4.2010

Number of pages: 48

Department: Electrical Engineering

Study Programme: Electrical Power Engineering

Instructor and supervisor: Lecturer, M.Sc. Sampsa Kupari, Metropolia University of Applied Sciences

This work studies the generation of fusion in a fusion reactor and different types of fusion. One aim was to determine what the best reactor to the fusion would be. Today the best reaction of three alternatives (in theory) was achieved in a temperature of 45 million degrees of Celsius when one deuterium atom and one tritium atom was merged. Today the only working application of the fusion reactor is the hydrogen bomb. For example if 1 kilogram of hydrogen burns or combines with oxygen to water in a normal chemical reaction 119 megajoules of energy is released. But when 1 kilogram of hydrogen atoms fuses into helium atoms in the core of the Sun about 600 terajoules of energy is released, which is 5 million times more.

In order to determine the best fusion reactor, this study indicates that there are three alternatives. These include Tokamak, stellarator and laser fusion device. The best and the easiest of the above alternatives turned out to be Tokamak due to its relatively simple structure. This is why Tokamaks have been built in many countries.

The first fusion reactors were built in the 1970's and some say that the development of fusion reactors has been slow while others think it has been fast. Today the best fusion reactor is JET (**J**oint **E**uropean **T**orus) because it has produced as much energy as it uses. The next will be ITER reactor (**I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor) which will be completed in 2016.

The importance of fusion power has grown every year as a common objective for most countries is to reduce the use of fossil fuels.

Keywords: Fusion, fusion reactors, fusion power, ITER reactor

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	FUUSIOTUTKIMUS	2
2.1	Tähtien energialähde	2
2.2	Fuusiotutkimuksen tila kymmenen vuotta sitten	3
2.3	Fuusioenergia tuotanto	4
2.4	Fusion turvallisuus	4
2.5	Fusion ympäristövaikutukset	5
2.6	Fuusiotutkimuksen edistysaskeleet	5
2.7	Eurooppalainen tutkimusalue - fuusio	6
3	FUUSIOREAKTIO	8
3.1	Fuusioreaktio muuttaa massan energiaksi	9
3.2	Fuusioreaktio radioaktivoi fuusioreaktorin aineen	9
3.3	Fuusioituvan vetyplasman koossapito on vaikeaa	10
3.4	Fusion edellytykset	10
3.5	Fuusioreaktio vaatii riittävän lämpötilan ja tiheyden sekä koossapitoajan	11
4	FUUSIOREAKTORI	12
4.1	Lawsonin kriteeri	13
4.2	Fuusioreaktorityypit	13
4.2.1	<i>Tokamak-reaktori</i>	13
4.2.2	<i>Stellaraattori-reaktori</i>	15
4.2.3	<i>Laserfuusio-reaktori</i>	15
4.3	Plasman kuumentaminen	16
5	FUUSIOENERGIA	16
6	FUUSIO JA KYLMÄFUUSIO	17
6.1	Ponsin ja Fleischmannin kylmäfuusio	17
6.2	Mosier-Bossin kylmäfuusio	18

6.3	Muut kylmäfuusion tyypit	18
7	FUUSIOREAKTOREIDEN HISTORIA JA TULEVAISUUS	19
8	ITERIN HISTORIA JA KÄYTTÖ	21
8.1	ITER numeroina	22
8.2	ITERin komponentit	23
8.2.1	<i>Tokamak</i>	23
8.2.2	<i>Ulkoiset järjestelmät</i>	35
8.3	ITERin tavoitteet	44
9	FUUSIOVOIMA JA ILMASTONMUUTOS	44
10	FUUSION HYÖDYT JA HAITAT	45
11	FUUSION TULEVAISUUS	46
12	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET	48

1 JOHDANTO

Aurinko, kuten muutkin tavalliset tähdet, tuottaa energiansa fuusioimalla vetyä heliumiksi. Tämän prosessin ensimmäisen vaiheen vaikutusala on hyvin pieni, minkä ansiosta aurinko kuluttaa vetypolttoainettaan sen verran hitaasti, että sitä riittää noin kymmeneksi miljardiksi vuodeksi.

Fuusioreaktori on reaktori, joka tuottaa energiaa ydinfuusion avulla. Tavallisimmassa fuusioreaktioissa vety yhdistyy heliumiksi ja tuottaa energiaa. Fuusioreaktorin sanotaan olevan turvallisempi kuin nykyisin käytössä olevat fissioon perustuvat ydinreaktorit. Ydinfuusio tuottaa suuria energiamääriä fuusioituvaa ainekiloa kohden, ja fuusioituva aine vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine.

Tässä insinööriyössä tutkitaan, miten fuusioreaktio saataisiin aikaan maan päällä. Työssä tutkitaan kolmea eri vaihtoehtoa fuusion aikaan saamiseksi. Vaihtoehtoja verrataan tehojen tarpeella, eli kuinka paljon tietty fuusioreaktio tarvitsee tehoa saadakseen lämpötilan tarpeeksi korkeaksi. Alin lämpötila on paras vaihtoehto.

Työssä käydään läpi muutamia fuusioreaktoreita, ja mikä niistä sopisi parhaiten fuusiovoimalan fuusioreaktoriksi. Vaihtoehtoja on kolmea eri tyyppiä. Jokaisesta fuusioreaktorista selvitetään taustaa sekä siitä, miten fuusioreaktorit toimisivat.

Työssä tarkastellaan ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)-reaktorin komponentteja. ITERin ulkoiset ja sisäiset järjestelmät. Tarkastelussa on myös fuusioreaktorin edut ja haitat sekä historia ja tulevaisuus.

2 FUUSIOTUTKIMUS

Fuusioon tarvittavat lämpötila ja tiheys on saavutettu. Samoin plasman pitäminen koossa onnistuu kohtalaisen hyvin. Ongelma fuusiokokeiluissa on ollut plasman ns. ylläikkyminen magneettisesta pullostasta. Tutkimuksessa on pyritty hitaasti yhä parempiin teholumemiin, mutta reaktorista on saatu vain hetkellisesti enemmän tehoa, kuin reaktion ylläpitämiseen on vaadittu.

Fuusiota on pystytty tähän asti pitämään käynnissä vain muutamia sekunteja. Kaikki rakennetut laitteet ovat olleet vasta koelaitteita. Fuusiokokeille ominaista on ollut, että yhden ongelman ratkaiseminen synnyttää uusia ongelmia. Todellisen reaktorin oloja ei ole tutkittu. Tutkimuksen painopiste on siirtymässä reaktorimateriaaleihin.

Reaktorin pintamateriaalien tulisi kestää kovaa kuumuutta ja neutronisäteilyä, ja kuitenkin jäähdytyksen olisi toimittava hyvin pitkiä aikoja. Samalla kun reaktorin pintamateriaali hehkuu kovassa kuumuudessa, sen käämien olisi pysyttävä noin 200 pakkasasteessa suprajohtavuuden säilyttämiseksi.

Litiumvaippa jäähdyttää reaktorin sisäpinnan. Monet ehdotetut materiaalit ovat joko nopeasti lämmössä ja säteilyssä kuluvia, hidastavat pieninä määrinä hiukkasina leijuessaan fuusioreaktiota tai muuttuvat reaktorin säteilyssä helposti radioaktiivisiksi. /1./

2.1 Tähtien energialähde

Fuusio on auringon ja muiden tähtien energianlähde. Kevyet atomiytimet yhdistyvät raskaammiksi ja samalla vapautuu energiaa. Auringon keskustassa vallitseva valtava paine ja noin 10 miljoonan asteen lämpötila tekevät fuusioreaktiot mahdollisiksi.

Korkeassa lämpötilassa kaasusta tulee plasmaa, jossa elektronit ovat täysin irtaantuneet atomiytimistä (ioneista). Plasma on aineen neljäs olomuoto omine erityispiirteineen, jota tutkiva tieteenala on plasmafysiikka. Vaikka plasma on maapallolla harvinainen olomuoto, yli 99 % maailmankaikkeuden tunnetusta materiasta on plasmatilassa.

Maan päällä ei yllätä auringon sisäosien paineeseen, ja lämpötila onkin nostettava yli 100 miljoonaan asteeseen, jotta fuusioenergiaa voi vapautua merkittäviä määriä. Näin korkeiden lämpötilojen saavuttaminen edellyttää tehokasta plasman kuumennusta ja lämpöhäviöiden minimoimista eristämällä plasma-astian seinämistä.

Tämä voidaan tehdä vangitsemalla plasma voimakkaista magneettikentistä muodostuvaan toridaaliseen häkkiin, joka estää sähköisesti varattuja plasmahiukkasia pakenemasta. Magneettinen koossapito on pisimmälle kehittynyt fuusioteknologia, johon Euroopan fuusiotutkimusohjelmassa on keskitytty. /2. s. 10./

2.2 Fuusiotutkimuksen tila kymmenen vuotta sitten

Fuusiotekniikkaa on tutkittu 1950-luvulta lähtien. Euroopan tunnetuimmassa fuusiolaitteessa JETissä (Joint European Torus) saatiin 1991 noin 1 megawatti 2 sekunnissa, mutta energiankulutus oli 15 megawattia. Tämä tulos oli huomattavasti parempi kuin 70-luvulla, jolloin toiveet fuusiosta ennen vuotta 2000 olivat jo hiipuneet.

1994 USA:ssa tuotettiin 10,7 megawattia yhden sekunnin ajan satojen megawattien kulutuksella. Edistys on ollut aikaisemmasta valtavaa: 1970-luvulla saatiin fuusiokokeissa ulos vain watin tuhannesosia. Kaikkien aikojen kestävin fuusioreaktio on mitattu ranskalaisessa kooreaktorissa: kuusi ja puoli minuuttia.

Fuusioreaktorin tekniikka on osoittautunut odotettua vaikeammaksi. Lisäksi tutkijoiden on ollut vaikeaa saada rahoitusta tutkimuksilleen niiden hitaan etenemisen ja pitkän aikajänteen takia. /1./

2.3 Fuusioenergia tuotanto

Ensimmäisen polven fuusioreaktorien kehitystyö perustuu kahden vedyn isotoopin, deuteriumin (D) ja tritiumin (T) väliseen reaktioon. Muut reaktiot vaativat korkeamman lämpötilan. Deuterium on luonnossa esiintyvä ei-radioaktiivinen isotooppi, jota saadaan vedestä keskimäärin 35 grammaa kuutiometriä kohden. Tritiumia ei esiinny luonnossa, joten sitä tuotetaan fuusioreaktorin sisällä litiumista, joka on kevyt, maankuoressa runsaana esiintyvä metalli. Jokainen fuusioreaktio tuottaa alfa-hiukkasen (heliumin) ja suurienergisen neutronin.

Neutronit karkaavat plasmasta ja hidastuvat plasmaa ympäröivässä vaipassa. Siellä litiumia muuntuu tritiumiksi, joka kierrätetään takaisin plasmakammioon polttoaineena. Neutronien vapauttamalla lämmöllä voidaan tuottaa höyryä, joka pyörittää turbiineja sähkön tuottamista varten. Vain pieni kuorma-autolastillinen polttoainetta riittää tuottamaan sähköä vuodeksi noin miljoonan asukkaan kaupungille. /2. s. 11./

2.4 Fuusion turvallisuus

Fuusioreaktori on kuin kaasupoltin, jossa sisään syötetty polttoaine palaa. Reaktorin sisällä kerrallaan olevan polttoaineen määrä on hyvin pieni (suunnilleen 1 gramma DT-polttoainetta/1 000 m³), ja jos polttoaineen syöttö jostakin syystä keskeytyy, fuusiopalo jatkuu vain muutaman sekunnin ajan.

Mikä tahansa häiriötilanne reaktorissa aiheuttaa plasman nopean jäähtymisen ja fuusiopalon sammumisen. Fuusion peruspolttoaineet, deuterium ja litium, sekä reaktiotuotteena syntyvä helium eivät ole radioaktiivisia. Litiumista syntyvä välituote, tritium, hajoaa suhteellisen nopeasti (sen puoliintumisaika on 12,6 vuotta), ja hajoamisessa syntyvällä elektronilla on hyvin pieni energia. Ilmassa tämä elektroni voi kulkea vain muutaman millimetrin, eikä se läpäise edes paperiarkkia.

Tritium on kuitenkin haitallista, jos sitä pääsee elimistöön. Siksi fuusioreaktoriin on suunniteltu omat järjestelmät tritiumin turvallista käsittelyä varten. Fuusiovoimalaitokseen ei tarvitse kuljettaa säännöllisesti radioaktiivista polttoainetta, koska fuusioreaktiossa tarvittava tritium tuotetaan paikan päällä reaktorissa. /2. s. 12./

2.5 Fuusion ympäristövaikutukset

Fuusioreaktioista vapautuva energia käytetään sähkön tuottamiseen, teollisuuden prosessilämmöksi tai mahdollisesti vedyn tuottamiseen. Fuusiovoimala tulee tarvitsemaan hyvin vähän polttoainetta. Fuusiolaitos, jonka sähköteho on 1 gigawattia, tarvitsee vuodessa noin 100 kilogrammaa deuteriumia ja kolme tonnia luonnon litiumia tuottaen noin 7 miljardia kilowattituntia.

Kivihiilellä toimiva voimala, ilman hiilidioksidin talteenottoa, tarvitsee noin 1.5 miljoonaa tonnia polttoainetta tuottaakseen saman määrän energiaa! Fuusioreaktorit eivät tuota kasvihuonekaasuja tai muita päästöjä, jotka voisivat vahingoittaa ympäristöä tai aiheuttaa ilmastonmuutoksia. Fuusioreaktiossa syntyvät neutronit aktivoivat plasman ympärillä olevia materiaaleja.

Reaktorin sisäosien materiaalien huolellinen valinta mahdollistaa sen, että noin sadan vuoden kuluttua voimalan lakkauttamisesta niitä ei enää tarvitse valvoa ja ne voidaan myös mahdollisesti kierrättää. Näistä syistä fuusiovoimaloiden jäte ei ole taakka tuleville sukupolville. /2. s.13./

2.6 Fuusiotutkimuksen edistysaskeleet

Culhamissa Englannissa sijaitseva eurooppalainen JET-Tokamak (Joint European Torus) on maailman suurin fuusiolaitte ja voi nykyisin ainoana maailmassa käsitellä DT-polttoaineseosta. JET on saavuttanut kaikki alkuperäiset tavoitteensa ja on joissain tapauksissa ylittänytkin ne. Fuusiotehon maailmanennätys 16 megawattia saavutettiin sillä vuonna 1997.

Euroopassa on lukuisia tärkeitä koelaitteita, joilla luodaan fuusiotutkimuksen etenemiseen vaadittavaa perustietoa. Ranskalaisella Tore Supra -Tokamakilla, jolla tutkitaan fuusiolaitteiden jatkuvatoimisuutta, on saavutettu yksi lähivuosien merkittävistä tuloksista: vuonna 2003 sillä tehtiin ennätyspitkä suuritehoinen purkaus, kuusi ja puoli minuuttia. Plasman ylläpitoon syötettiin tänä aikana yli yksi gigajoule energiaa, joka myös piti poistaa lämpönä (1 000 miljoonaa joulea, riittävästi kiehattamaan kolme tonnia vettä). /2. s. 14./

Fuusiolaitteiden suorituskykyä mitataan fuusiovahvistuksella Q , joka on tuotetun fuusiotehon suhde plasman kuumennukseen käytettyyn tehoon. Fuusioplasmassa syttyy itseään ylläpitävään palo ($Q = \infty$), kun fuusioreaktioiden aikaansaama kuumennusenergia kompensoi plasman energiahäviöt. Tällöin ulkoista kuumennusta ei enää tarvita ylläpitämään korkeaa fuusiolämpötilaa. Plasman palo jatkuu kuten tuli nuotiossa, niin kauan kuin se saa uutta polttoainetta. Tulevaisuuden fuusioreaktorien ei tarvitse ylittää palo-olosuhteisiin, vaan ne voidaan suunnitella tehovahvistimiksi.

JET on tuottanut 16 megawattia fuusiotehoa Q -arvolla 0.65. Seuraava kone, ITER, pyrkii Q -arvoon 10 ja tulevaisuuden fuusioreaktoreilla Q voi ehkä ylittää arvoon 40 tai 50.

Koska useat nykyiset fuusiolaitteet eivät vielä käytä tritiumia polttoaineena, niiden suorituskykyä mitataan sillä, kuinka lähelle niiden plasmametrit pääsevät fuusiolle välttämättömiä olosuhteita. Suorituskykyisimmillä laitteilla saavutetut plasmametrit ovat lähellä reaktorin vaatimia arvoja. /2. s. 15./

2.7 Eurooppalainen tutkimusalue - fuusio

Euroopan fuusiotutkimuksen keskeinen piirre on ainutlaatuinen koordinointi, jonka ansiosta kaikki asiaankuuluvat tutkimus ja kehitys -resurssit voidaan tehokkaasti käyttää eurooppalaisen yhteistyön tärkeimpiin tutkimusalueisiin. Erityisen tärkeitä kohteita ovat JETin yhteiskäyttö sekä eurooppalaisen fuusiotutkimussopimuksen EFDA:n (European Fusion Development Agreement) oheistama toimiva teknologiaohjelma, joka suuntautuu voimakkaasti ITERiin, mutta sisältää myös DEMOn toteuttamiseen liittyvää tutkimustyötä.

Koordinoituun fuusiotutkimusohjelmaan osallistuu sekä suuria että pieniä laboratorioita, ja tämä kattava ohjelma on malliesimerkki eurooppalaisesta tutkimusalueesta, ja se on nostanut Euroopan magneettisen koossapidon fuusiotutkimuksen kansainväliseen kärkeen. Euratomin liittosopimukseen kuuluvissa laboratorioissa saavutettu menestys on tehnyt mahdolliseksi JETin rakentamisen ja nostanut tutkimuksen tasolle, jolla ITER voidaan toteuttaa. Tähän ei ainoakaan Euroopan valtio olisi yltänyt.

Varsinaisen kansainvälisen ITER-yhteistyön ohella eurooppalaisten ja Euroopan ulkopuolisten laboratorioiden välillä on tehty maailman parhaan asiantuntemuksen kokoamiseksi joukko kahden- ja monenvälisiä sopimuksia, jotka koskevat osapuolia yhteisesti kiinnostavia tutkimuskohteita.

Euratom-sopimuksen mukaan fuusioenergian tutkimus- ja kehitystyötä koordinoi Euroopan komissio. Työn toteuttamiseksi on luotu

- liittosopimus jäsenvaltion tutkimuslaitosten tai organisaatioiden ja Euratomin puiteohjelman välillä
- EFDA-sopimus, joka kattaa liittosopimusosapuolten ja teollisuuden teknologia-aktiviteetit, JET-koneen yhteiskäytön ja Euroopan panostuksen ITERiin ja muihin kansainvälisiin yhteisiin hankkeisiin
- määräaikaiset yksittäissopimukset sellaisten valtioiden välillä, jotka eivät ole solmineet fuusiota koskevaa liittosopimusta
- tutkijoiden liikkuvuutta edistävä sopimus ja Euratomin tutkija-apurahat.

EU:n kuudennessa puiteohjelmassa (2002 - 2006) fuusioenergiatutkimus on temaattinen prioriteettialue, jonka EU-budjetti on 750 miljoonaa euroa (tästä 200 miljoonaa euroa voidaan käyttää ITERin rakentamisen aloittamiseen). Euroopan fuusiotutkimuksen onnistumisen takana on noin 2 000 fyysikon ja insinöörin työpanos eurooppalaisissa laboratorioissa ja teollisuuslaitoksissa.
/2. s. 18 - 19./

3 FUUSIOREAKTIO

Fuusiota kutsutaan lämpöydinreaktioksi, koska fuusio saadaan nykyteknikalla aikaan vain erittäin korkeassa lämpötilassa n. 20 - 100 miljoonassa asteessa (silloin muodostuu täysin ionisoitunut kaasu eli plasma). Plasma on aineen neljäs olomuoto. Korkeassa lämpötilassa tapahtuu jatkuva energiankehitys plasmassa olevien aineiden kesken (taulukko 1). Tärkeimmät fuusiotyypit ovat:

Taulukko 1. Fuusioprosessien paremmuusjärjestys /3, s. 64 – 65./

Järjestys	Fuusioprosessi	Tarvittava lämpötila(°C)	Energian tuotto (keV)
1	$D + T \rightarrow He^4 + N$	45 000 000	17 600
2	$D + He^3 \rightarrow He^4 + P$	350 000 000	18 300
3	$D + D \rightarrow He^3 + N$	400 000 000	4 000

D = Deuterium

T = Tritium

He^3 = Helium 3

He^4 = Helium 4

N = Neutroni

P = Protoni

Järjestysnumeroiden selitykset

1. Reaktoriin soveltuvat vedyn isotoopit, deuterium ja tritium, sillä niiden fuusio syntyy matalimmassa lämpötilassa.
2. Tässä prosessissa vapautuu paljon energiaa, mutta se tarvitsee korkean lämpötilan ja helium 3 on vain vähän.
3. Prosessia ei voida käyttää, sillä se vaatii liian paljon energiaa suhteessa vapautuvan energian määrään. /3, s. 62 - 67./

3.1 Fuusioreaktio muuttaa massan energiaksi

Fuusioreaktiossa muunnetaan massaa energiaksi. Fuusiossa syntyvän ytimen massa on pienempi kuin sen muodostaneet erilliset alkeishiukkaset. Tämä osa massasta muuttuu suhteellisuusteorian mukaisesti energiaksi. Fuusioreaktio vaatii kuitenkin korkean lämpötilan.

Esimerkiksi auringon ja muiden tähtien lämpö- ja valosäteily syntyy fuusioreaktioista. Maan päällä fuusio saadaan toteutumaan helpoimmin vedyn kahden raskaan isotoopin deuteriumin ja tritiumin välillä. Tässäkin reaktiossa plasman lämpötila tulee olla yli sata miljoonaa astetta celsiusta. Reaktion lopputuotteina syntyy heliumia ja neutroneja. Fuusioreaktioon tarvittavia raaka-aineita on hyvin saatavilla.

Deuteriumia voidaan erottaa helposti merivedestä, ja litiumia on maankuorella lähes rajattomasti. Kun litiumia säteilytetään fuusioreaktiossa muodostuvilla neutroneilla, saadaan tritiumia. Kyseessä on hyötyprosessi, sillä tritiumia syntyy vaipassa enemmän, kuin sitä palaa fuusioreaktioissa.

Fuusiossa syntyvät neutronit kuumentavat reaktorin vaipan ja syntyneellä lämmöllä voidaan tuottaa höyryä kuten perinteisessä voimalaitoksessa. Plasma eli kokonaan ionisoitunut kaasu pidetään koossa ja erillään reaktorikammion seinämistä magneettikenttien avulla. Polttoaineen kuumennukseen plasman ja fuusioreaktion aikaansaamiseksi käytetään tehokkaita hiukkas-suihkuja tai radiotaajuusaaltoja.

Yhdestä grammasta deuteriumin ja tritiumin seosta voidaan tuottaa 100 000 kilowattituntia sähköä eli saman verran kuin polttamalla kahdeksan tonnia hiiltä. 1 000:n megawatin fuusiosuurvoimalaitos käyttäisi päivässä noin 250 grammaa polttoainetta. Reaktiossa syntyisi ns. päästöinä 200 grammaa heliumia eikä yhtään kasvihuonekaasuja. /4./

3.2 Fuusioreaktio radioaktivoi fuusioreaktorin aineen

Fuusioreaktiot vapauttavat ylimääräisiä neutroneita tai protoneja, jotka ovat vaarallista ionisoivaa säteilyä ja saattavat radioaktivoida reaktorin materiaaleja. Tämän takia yhtä fuusioreaktoria voidaan käyttää vain muutaman vuosikymmenen ajan korkeintaan.

Lopulta reaktorin materiaalit alkavat säteillä vaarallisesti, reaktori on hajotettava ja haudattava esim. betonin sisään. Reaktorin osat saattavat pysyä vaarallisen radioaktiivisina muutamia satoja vuosia. /5./

3.3 Fuusioituvan vetyplasman koossapito on vaikeaa

Fuusioitava vety on kuumennettava korkealämpötilaiseksi plasmaksi, jota voidaan pitää koossa magneettikentillä ns. magneettisessa pullossa. Plasmassa ovat positiivisesti varautuneet atomin ytimet ja elektronit irti toisistaan. Vety on plasmaa yli 100 000 kelvinin lämpötilassa.

Pullon vaatimat voimakkaat magneettikentät on saatu aikaan suurilla suprajohtavilla käämeillä, joissa kulkee valtava virta. Plasman pidempiaikainen koossa pitäminen on osoittautunut ongelmalliseksi. Kuumassa, magneettisessa plasmassa on nimittäin monia epävakaisuusilmiöitä.

Magneettifuusiolaitteissa kuumennettu vety on pidettävä irti reaktorin seinämistä, koska mikään seinämä ei kestä plasman 100 miljoonan asteen lämpötilaa. Plasmassa on epävakaisuuksia, eli se värähtelee. Usein yritykset vakauttaa plasmaa ovat tuottaneet uusia epävakaisuuksia. Eri fuusiolaitteilla on eri epävakaisuuksia. Eräs kaikille laitteille tyypillinen on uurre- eli vaihtoepävakaisuus. Yleensä epävakaisuudet johtuvat magneettikentän voimaviivojen kaartumisesta. /5./

3.4 Fuusion edellytykset

Atomiydin koostuu protoneista ja neutroneista, joita yhdessä kutsutaan nukleoneiksi. Niiden välillä vaikuttaa vahva ydinvoima, joka pitää atomiytimen koossa. Lisäksi positiivisen sähkövarauksen omaavien protonien välillä on hylkivä sähkömagneettinen voima. Vahva ydinvoima on näistä vahvempi, mutta sen kantama on hyvin lyhyt, kun taas sähkömagneettisen voiman kantama on rajaton.

Siksi vahva voima jaksaa pitää pienet ytimet koossa, mutta kun ydintä kasvatetaan lisäämällä siihen protoneja ja neutroneja, saavutetaan ennen pitkää raja, jolla vahva voima ei enää yllä ytimen laidalta toiselle. Jaksollisessa järjestelmässä tämä raja on raudan kohdalla.

Mentäessä rautaa raskaampiin alkuaineisiin ytimet käyvät huterammiksi, ja liian raskaat ytimet hajoavat itsestään fissioreaktiossa, kun protonien välinen hylkimisvoima voittaa vahvan voiman. Kun kaksi kevyttä ydintä pääsee hyvin lähelle toisiaan, vahva ydinvoima vetäisee ne yhteen, ja ne fuusioituvat. Mutta päästäkseen riittävän lähemmäksi niiden on ensin ylitettävä niin sanottu Coulombin valli eli potentiaalienergiavalli, joka aiheutuu siitä, että vähänkin suuremmilla etäisyyksillä ytimet tuntevat ainoastaan hylkivän sähkömagneettisen voiman eli Coulombin voiman.

Pystyäkseen ylittämään Coulombin vallin ytimet tarvitsevat suuren liike-energian. Hiukkasten keskimääräinen liike-energia on sama asia kuin niistä muodostuvan kaasun lämpötila, joten kaasun on oltava hyvin kuumaa, jotta siinä voisi tapahtua fuusioreaktioita. Lisäksi sen on oltava riittävän tiheää, jotta hiukkaset kohtaavat toisensa riittävän usein.

Coulombin valli on pienin vety-ytimille, joissa on vain yksi protoni. Vahva ydinvoima ei pysty yhdistämään kahta yksinäistä protonia, vaan mukaan tarvitaan neutroneja, joten helpoimmin fuusioituvia ytimiä ovat vedyn raskaat isotoopit deuterium ja tritium. Niiden seoksessa, jota suunnitellaan käytettäväksi fuusiovoimalan polttoaineena, Coulombin valli on 0,1 megaelektronivoltia.

Tämä vastaa noin miljardin kelvinin (tai celsiusasteen) lämpötilaa. Lämpötila on kuitenkin vain kaasun hiukkasten *keskimääräinen* liike-energia, ja osalla yksittäisistä ytimistä energiaa on aina enemmän, osalla vähemmän. Selvästi viileämmässäkin kaasussa voi siis tapahtua fuusioreaktioita, koska pienellä osalla ytimistä on riittävästi energiaa. /5./

3.5 Fuusioreaktio vaatii riittävän lämpötilan ja tiheyden sekä koossapitoajan

Fuusio on vaikea toteuttaa, koska kaikki atomiytimet ovat positiivisesti varautuneita ja siten hylkivät toisiaan. Ytimiä ympäröi sähköinen suojavalli, joten niiden välillä vaikuttaa poistovoima. Jos kuitenkin ytimiä puristetaan tai törmäytetään kyllin lujaa toisiaan vastaan, atominytimet yhdistyvät. Fysiikasta tiedetään, että lämpö on aineen pienimpien osasten liikettä. Lämpötilan kasvaessa atomit, ja niiden ytimet liikkuvat yhä nopeammin.

Riittävän korkeissa lämpötiloissa atomin ytimet liikkuvat niin nopeasti, että törmäävät toisiinsa sähköisistä poistovoimista huolimatta. Törmäyksessä ytimet yhdistyvät ja vapautuu suuri määrä energiaa. Maan oloissa 100 - 150 miljoonan asteen lämpötilassa vetyatomien liike on jo niin nopeaa, että vetyytimien positiiviset varaukset eivät enää riitä hylkimään atominytimiä. Aurin-gossa fuusio tapahtuu jo matalammassa, kymmenen miljoonan asteen luok-kaa olevassa lämpötilassa, sillä aineen tiheys on siellä huomattavasti suu-rempi. Fuusiota siis edistää korkean lämpötilan lisäksi suuri tiheys. /5./

4 FUUSIOREAKTORI

Fuusioreaktiossa kevyet alkuaineet yhtyvät raskaammiksi alkuaineiksi. Ylei-sin fuusioreaktio on vetyatomien yhdistyminen heliumiksi. Fuusioreaktiota tapahtuu luonnossa muun muassa Auringon ja tähtien ytimissä.

Vetypommissa tapahtuu atomipommilla sytytetty hallitsematon fuusio, joka tapahtuu sekunnin murto-osissa. Fuusioreaktorin on kuitenkin toimittava huomattavasti pidempään ja hallitusti. Fuusiotutkijoita onkin sanottu ns. ve-typommin kesyttäjiksi.

Parhaiten onnistuneissa kokeissa fuusioitava aine on puristettu kasaan hyvin voimakkailla magneettikentillä ja kuumennettu erittäin suurilla sähkövirroilla plasmaksi. Yleensä tutkimusfuusioreaktorit ovat munkkirinkilän, toruksen muotoisia Tokamak-laitteita. Tokamak toimii harvoin pitkään, koska niissä kuuma plasma ns. läikkyä yli magneettikentästä.

Fuusiolaitteiden edistys on ollut huimaa, 2000-luvun fuusiolaitteet tuottavat tuhat- miljoonakertaisesti enemmän energiaa kuin 1970-luvun laitteet ja ny-kyään ollaankin jo melko lähellä jatkuvatoimista, runsaasti energiaa tuotta-vaa reaktoria. Seuraava fuusiolaite onkin tehokas koereaktori ITER, joka ei tuota sähköä, mutta jossa tutkitaan kaupallisen fuusioreaktorin tekniikkaa. /1./

4.1 Lawsonin kriteeri

Jotta fuusioreaktio alkaisi, fuusioituva vety pitää kuumentaa riittävän korkeaan lämpötilaan, puristaa riittävän tiheäksi ja pitää koossa riittävän kauan. Näin fuusiolaitetta luonnehtii se, täyttääkö se tietyssä lämpötilassa tarvittavan hiukkastiheyden n ja koossapitoajan τ (*tau*) tulon. Tietylle lämpötilalle $N \cdot \tau$ on Lawsonin kriteeri. /1./

4.2 Fuusioreaktoryypit

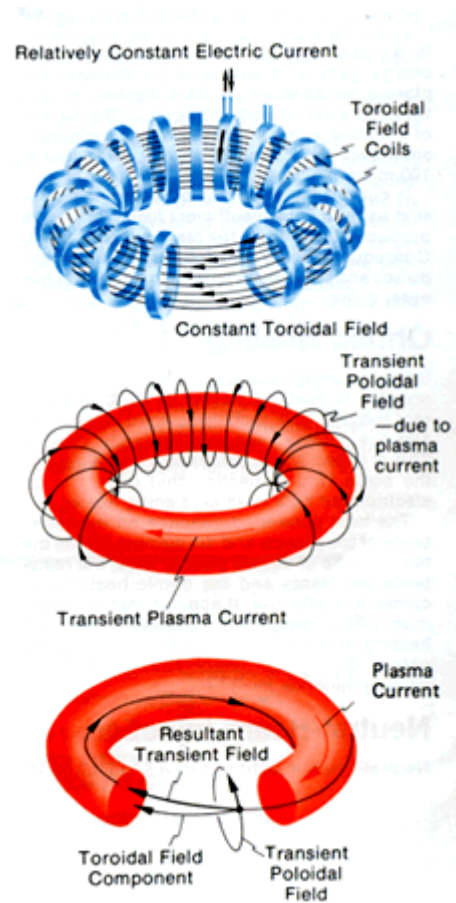
Fuusio pyritään saada aikaan fuusioreaktoreissa. Yleisimmät reaktoryypit ovat Tokamak, stellaraattori ja laserfuusio.

4.2.1 Tokamak-reaktori

Tokamak on tavallisin tapa toteuttaa fuusioreaktoriin liittyvissä tutkimuksissa fuusiolaite. Tokamak on suhteellisen yksinkertainen rakenteeltaan ja helppo toteuttaa. Tämän takia Tokamakeja on rakennettu moniin maihin. Tokamak on munkkirinkilän eli toruksen muotoinen tyhjiökammio, jota ympäröivät voimakkaat magneetit. Kammion keskellä on ohut kuuma vetyplasma, jota kuumennetaan ja pidetään paikoillaan miljoonien ampeerien suuruisilla sähkövirroilla. Magneettikentät ovat monia tesloja, ja Tokamak vaatii kymmenien megawattien sisäänsyötön toimiakseen.

Tokamakissa fuusioituva deuterium kuumennetaan vaihtuvalla magneettikentällä kuumaksi plasmaksi, joka pidetään renkaanmuotoisen kammion keskellä. Alussa plasmaa kuumentaa muuttuvien magneettikenttien aiheuttama virta noin 30 miljoonaan asteeseen asti, myöhemmin jokin muu, esimerkiksi hiukkassuihkut tai radiotaajuinen sähkökenttä.

Plasman keskellä lämpötila on 100 miljoonaa astetta, reunalla 2 000 astetta. Plasmaa pitävät koossa ulkoiset magneettikentät ja plasmassa tapahtuvien virtojen aiheuttamat kentät. Nimi Tokamak tulee venäjän sanoista тороидальная камера в магнитных катушках (*toroidal'naya kamera v magnitnykh katushkakh*; toroidinen kammio magneettikäämien sisässä). Tokamakin idean esittelivät venäläiset fyysikot Tamm ja Saharov 1951. (Kuva 1.)



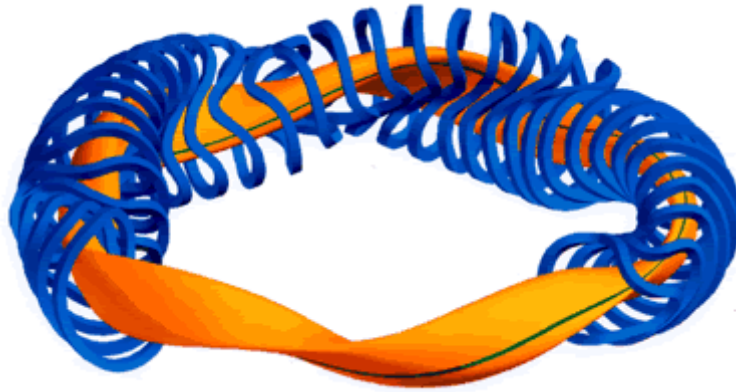
Kuva 1. Tokamakin toiminta

Tokamakin kehittäminen alkoi vakavasti aikaisemmin Neuvostoliitossa 1960-luvulla. Tuleva koefuusioreaktori ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) on rakenteeltaan Tokamak. Koska plasmassa oleva magneettikenttä on torusmainen, se vakauttaa plasmaa luonnostaan. Plasma näet pyrkii vaeltamaan pitkin magneettikenttää, ja suorassa päistään puristetussakin ikään kuin tukitussa magneettikentässä plasma karkaa helposti.

Magneettikenttä on renkaassa olevan ruuvikierteen muotoinen. Rengaskammion poikkileikkaus on yleensä ulospäin osoittava D. Toruksen muoto on sopiva, koska plasmalla on taipumus virrata tiettyyn suuntaan pitkin magneettikentän voimaviivoja. Näin plasma kiertää toruksessa. Tokamakissa on teoriasta huolimatta monia epävakaisuusilmiöitä, ja näin ollen siinäkin ei ole onnistuttu pitämään fuusioreaktiota käynnissä kyllin kauan. /5./

4.2.2 Stellaraattori-reaktori

Toinen ratkaisu, stellaraattori, muistuttaa Tokamakia, mutta plasmavirroilla ei siinä ole merkitystä plasman koossa pitämisessä. Stellaraattoria on tutkittu vähemmän kuin Tokamakia. (Kuva 2.)



Kuva 2. Stellaraattorin esimerkkikuva

Stellaraattorissa pyritään välttämään joitain plasmalle tyypillisiä epävakaisuuksia, joita Tokamakissa on. Stellaraattori on Tokamakia mutkikkaampi käytännössä ja teoriassa. Monet stellaraattorin osat ovat vaikeampia tehdä kuin Tokamakin osat. Jotkut plasmatutkijat pitävät USA:ssa 1950-luvulla kehitettyä stellaraattoria Tokamakia kehittyneempänä, parempana ratkaisuna. Stellaraattoria on tutkittu Yhdysvalloissa, Saksassa ja Japanissa. Stellaraattorin plasmatilaa on mutkainen torus. /5./

4.2.3 Laserfuusio-reaktori

Laserfuusiolaitteessa lasersäteet puristavat fuusioituvaa ainetta sisältävän pienen pillerin (pelletin) kasaan. Puristuminen perustuu kuumenemisen aiheuttamaan pelletin pintakerroksen laajenemiseen. Näissä tutkimuksissa ei ole saatu fuusiota aikaan. On myös tutkittu pelletin puristamista ioneilla tuloksetta. Ei ole kehitetty tarpeeksi tehokkaita lyhytaaltoisia lasereita. Vuoteen 1999 tutkittiin fuusion sytyttämistä NOVA-laserilla, ja nykyään NIF:llä (**N**ational **I**gnition **F**acility). /5./

4.3 Plasman kuumentaminen

Tokamak-plasmassa kulkeva sähkövirta kuumentaa plasmaa. Kun plasman lämpötila nousee, tämän nk. ohmisen kuumennuksen teho laskee. Tällä menetelmällä plasma voidaan kuumentaa vain muutamaa miljoonaa asteeeseen, mikä on noin 10 kertaa liian matala, jotta fuusioreaktioita voisi tapahtua riittävässä määrin. Korkeampiin lämpötiloihin pääsemiseksi tarvitaan ulkoisia kuumennusmenetelmiä.

Suurtaajuuskuumennus käyttää voimakkaita sähkömagneettisia aaltoja, jotka siirtävät energiansa plasmaan resonanssiabsorption kautta. Nykyisin on olemassa kolme suurtaajuusjärjestelmää:

1. ionisyklotroniresonanssikuumennus (20 - 55 megahertsiä),
2. elektronisyklotroniresonanssikuumennus (100 - 200 gigahertsiä, pääasiassa mikroaaltoja)
3. alahybridikuumennus (1 - 8 gigahertsiä).

Plasmaan voidaan ampua hiukkassuihku, joka koostuu neutraaleista atomeista. Suihku tunkeutuu plasmaan ja ionisoituu. Hiukkasten energia siirtyy plasmaan hiukkastörmäysten välityksellä. /2. s. 24./

5 FUUSIOENERGIA

Fuusioenergian valjastaminen ihmiskunnan käyttöön on unelma, jota on yritetty toteuttaa 1950-luvulta lähtien. Tutkimustyö on ollut intensiivistä, ja se on johtanut merkittäviin edistysaskeliin vuosien varrella. Käytännön sovelluksiin on kuitenkin vielä pitkä aika, parhaassa tapauksessakin useita vuosikymmeniä. Fuusioenergiassa on siis kyse atomien yhtymis- eli fuusioreaktiosta. Jotta yhdistyminen voi tapahtua, täytyy atomit kiihdyttää nopeuteen jossa atomin liike-energia on suurempi kuin niitä eristävä sähköinen voima.

Kiihdytys onnistuu hiukkaskiihdyttimillä, tosin sen tarvitsema energia on tähänastisissa kokeissa ollut suurempi kuin vapautuva energia. Toinen vaihtoehto on nostaa lämpötila 100 miljoonaa asteeseen, jolloin ytimillä on lämpöenergian vaikutuksesta tarvittava liike fuusioon. Lämpötilaa täytyy kyetä ylläpitämään riittävän kauan, että fuusio ehtii tapahtua.

Reaktiossa vapautuvat energiamäärät ovat valtavia. Deuteriumin ja tritiumin fuusiossa vapautuu 95 000 kilowattituntia energiaa grammaa polttoainetta kohden. Vertailun vuoksi, grammasta polttoöljyä saadaan energiaa 0,01 kilowattituntia. /6./

6 FUUSIO JA KYLMÄFUUSIO

Fuusiota kutsutaan lämpöydinreaktioksi, koska fuusio saadaan nykyteknikalla aikaan vain erittäin korkeassa lämpötilassa n. 20 - 100 miljoonassa asteessa (silloin muodostuu täysin ionisoitunut kaasu eli plasma). Plasma on aineen neljäs olomuoto. Korkeassa lämpötilassa tapahtuu jatkuva energiankehitys plasmassa olevien aineiden kesken. /3./

Kylmäfuusio tarkoittaa fuusioreaktion aikaansaamista ilman suuria lämpötiloja. Fuusiossa energiaa vapautuu samalla kun kaksi atomiydintä yhdistyy (eli fuusioituu) yhdeksi ytimeksi. Normaalisti ydinfuusio vaatii miljoonien celsiusasteiden lämpötilan. Käyttökelpoisimpana fuusiona pidetään lähinnä deuterium- tai tritiumytimien fuusioitumista heliumiksi.

Kylmäfuusiosta puhuttaessa viitataan yleensä kahden kemistin, Stanley Ponsin ja Martin Fleischmannin väitteeseen hyvin yksinkertaisilla laitteilla toteutetusta fuusioreaktiosta. Kylmäfuusioksi voidaan kuitenkin lukea myös muut, enemmän tai vähemmän tieteellisesti hyväksytyt yritykset saada aikaan hallittu fuusioreaktio ilman korkeiden lämpötilojen käyttöä. Kylmäfuusiotutkimusta harjoitetaan edelleen ympäri maailman, erityisesti Japanissa. Siitä ei ehkä ole kaupalliseen energiantuotantoon, mutta toimivana kylmäfuusio voisi esimerkiksi tuottaa neutroneja lääketieteen tarpeisiin. /7./

6.1 Ponsin ja Fleischmannin kylmäfuusio

Kylmäfuusio nousi maailman tietoisuuteen 23. maaliskuuta 1989, kun kemistit Stanley Pons ja Martin Fleischmann Utah'n yliopistosta väittivät saaneensa aikaan fuusioreaktion lähes huoneenlämmössä ja ns. lukiotason välineillä.

Kokeessa palladium-elektrodi upotettiin raskaaseen veteen. Tästä kehittyi lämpöä, neutroneja ja gammasäteilyä. Väite herätti paljon huomiota, mutta yksikään toinen tutkija ei pystynyt toistamaan koetta.

Fleischmannin ja Ponsin mukaan tämä johtui siitä, että testausympäristö ei ollut täysin yhdenpitävä heidän kokeensa kanssa. Kuitenkaan he eivät halunneet avustaa muiden tutkijaryhmien testeissä todistaakseen teoriansa. Koko väite onkin leimattu uutisankaksi ja huijausyritykseksi. Fleischmannin ja Ponsin laitteiden esittämien ns. kiistattomien todisteiden epäillään olevan aivan luonnollista taustasäteilyä tai peräisin jostakin koetilassa olleesta laitteesta. /7./

6.2 Mosier-Bossin kylmäfuusio

Vuonna 2009 kalifornialaisen SPAWAR-tutkimuslaitoksen Pamela Mosier-Boss ja hänen kollegansa kertoivat havainneensa kokeessaan korkeaenergisiiä neutroneita, joiden he uskovat olevan peräisin deuteriumin ja tritiumin fuusiosta. /7./

6.3 Muut kylmäfuusion tyypit

Nykyaikainen fysiikan tuntemus ei kiistä, etteikö fuusioreaktiota voitaisi aikaansaada myös muilla keinoin kuin korkeassa lämpötilassa. Keskeisin kysymys onkin, saavutetaanko muilla menetelmillä riittävää hyötysuhdetta reaktion ylläpitämiseen käytetyn energian ja siitä saatavan energian välillä.

Nykyään on olemassa erilaisia kylmäfuusiotekniikoita

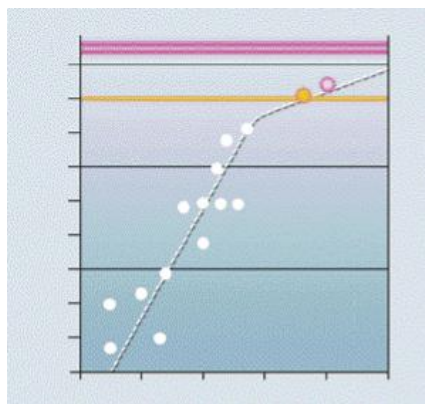
- **myonikatalysoitu fuusio**, jossa deuteriumytimet (tai tritium) saadaan ohjattua lähekkäin korvaamalla ydintä kiertävä elektroni myonilla. Myoni vastaa sähköisiltä ominaisuuksiltaan elektronia (negatiivinen alkeisvaraus), mutta on painavampi ja näin kiertää lähempänä ydintä, jolloin atomin koko pienenee ja fuusioreaktioon osallistuvat ytimet saadaan lähemmäs toisiaan. Ongelmana on kuitenkin myonien tuotanto, johon vaadittava energia laskee hyötysuhdetta niin paljon, että myonikatalysoidun fuusion mahdollisuuksia energiantuotannossa ei pidetä lupaavina ainakaan ilman teknologisia läpimurtoja.
- **pyroelektrinen fuusio**, jonka UCLA:n ryhmä, vuonna 2005, raportoi saaneensa aikaan fuusioreaktion pyroelektrisessä kiteessä. Kiteen sisälle synnytettiin erittäin voimakas sähkökenttä (noin 25 GV/m), jolla kiihdytettiin ja törmäytettiin deuteriumydin deuteriumia sisältävään

materiaaliin. Koe on tämän jälkeen toistettu onnistuneesti muissa laboratorioissa. Energiantuotantoon siitä ei kuitenkaan ole, sillä prosessi vaatii enemmän energiaa kuin tuottaa.

- **antimateriaalla aikaansaatu fuusioreaktio**, tässä menetelmässä käytetään pieni määrä antimateriaa aloittamaan fuusioreaktiopulssi. Menetelmä on kuitenkin kaukana ratkaisusta energiaongelmiin jo antimaterian tuotantokustannusten vuoksi. Aihetta onkin tutkittu lähinnä avaruussovellukset mielessä.
- **kuplafuusio**, josta Rusi P. Taleyarkhan kertoi, vuonna 2002, saaneensa aikaan kylmäfuusion sonoluminesenssin avulla. Menetelmässä synnytetään ääniaaltojen avulla lyhytikäisiä kuplia nesteseen. Kuplat romahtavat nopeasti syntymisensä jälkeen synnyttäen hetkellisesti ja paikallisesti erittäin korkean lämpötilan, jossa fuusioreaktio voisi tapahtua. Tiedeyhteisön suhtautuminen kuplafuusioon ei ole yksimielistä, ja koetta toistaneet tutkijat ovat antaneet ristiriitaisia raportteja. /7./

7 FUUSIOREAKTOREIDEN HISTORIA JA TULEVAISUUS

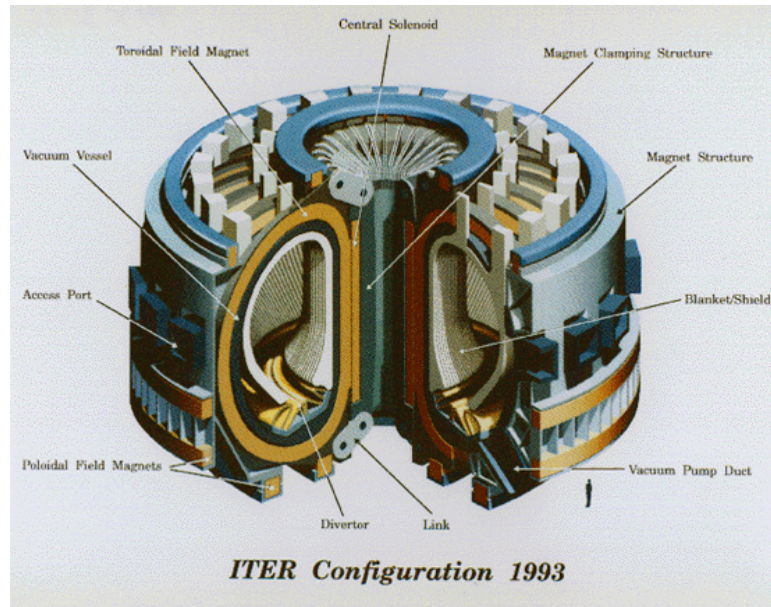
Ensimmäiset koekäyttöön tarkoitetut fuusioreaktorit rakennettiin jo 1970-luvulla. Sen aikaiset reaktorit kuluttivat enemmän tehoa kuin tuottivat. Fuusioreaktoreiden kehitys on ollut hidasta ja sitten vuonna 2003 saatiin valmiiksi reaktori, joka tuottaa ja kuluttaa yhtä paljon tehoa. Se tapahtui JET-fuusiotutkimuslaitoksella. (Kuva 3.)



Kuva 3. Reaktorikuvaaja [lähde 2, s.63 mukailen]. Valkoiset pisteet ovat heikkoja koereaktoreita, keltainen piste on JET, ja lila piste on ITER. Keltainen viiva tarkoittaa sitä, että reaktori tuottaa energiaa yhtä paljon kuin kuluttaa, ja lila viiva tarkoittaa, että reaktori on kannattava. Jakoväli on 10 vuotta.

Nyt on suunnitelmassa rakentaa ITER-reaktori Ranskan Cadaracheen. Sen rakentaminen on tarkoitus aloittaa vuonna 2008 ja Tokamakin kokoaminen vuonna 2011. /8./

ITERissä on osallisena seitsemän valtiota tai ylikansallista yhteisöä eli Euroopan Unioni, Yhdysvallat, Japani, Venäjä, Intia, Kiina ja Etelä-Korea /5./ (Kuva 4.)



Kuva 4. Vuoden 1993 ITER -reaktorin kuvaus

Suomi osallistuu ITER-projektiin luomalla testiympäristön ITERin Tokamak-reaktorin huoltojärjestelmälle. Tätä varten VTT:n Tampereen osastolle on perustettu ITERin huoltojärjestelmien eurooppalainen testauskeskus. Projektin toteutusta varten Tampereelle rakennetaan mittasuhteiltaan identtinen, neljäosan alkuperäisestä kattava jäljennös Tokamak-reaktorista. Tarkoituksena on testata reaktorin huoltorobotin toimintaa reaktoritoruksen sisällä. Projektin rahoitus tulee ITER-projektin lisäksi TEKESiltä ja VTT:ltä. /8./

8 ITERIN HISTORIA JA KÄYTTÖ

ITER-hanke alkoi 1985 EU:n EURATOM, Yhdysvaltojen ja sittemmin myös Neuvostoliiton ja Japanin välisestä yhteistyöstä. Konseptisuunnittelu alkoi 1988 ja sitä seurasi insinöörisuunnittelun vaihe 1991. Tänä aikana tehty fuusion fysiikan tutkimus ja fuusiotekniikan kehitystyö loi perustan plasman käyttäytymisen ennusteille ITER mittakaavassa. ITERissä tarvittavia korkean tekniikan osia kuten suprajohtavat kelat, korkeaa lämpötilaa kestävä materiaalit ja kaukokäyttöiset käsittelyjärjestelmät kehitettiin ja nyt ne ovat valmiit tuotantoon.

Insinöörisuunnitteluvaiheen valmistuttua 2001 lopullinen suunnitelma saatiin osapuolten arvioitavaksi. Tämä johti rakennuspäätökseen ja paikanvalintaa käsitteleviin neuvotteluihin.

Tänä aikana hankkeen osallistujakaarti oli muuttunut ja laajentunut. Venäjä korvasi romahtaneen Neuvostoliiton, Yhdysvallat vetäytyi hankkeesta 1999 mutta liittyi takaisin 2003. Kanada osallistui hankkeeseen 2001 - 2003 tavoitellakseen sijoituspaikkaa. Kiina ja Etelä-Korea liittyivät 2003. Uusin jäsen on joulukuussa 2005 liittynyt Intia.

2005 julkaistiin virallisesti, että ITER rakennetaan eteläisen Ranskan Cadaracheen. Sijoituspaikan valinta saatiin aikaan kompromissilla EU ja toisen mukana olleen vaihtoehdon eli Japanin kanssa. Kompromissiin kuuluu, että 20 prosenttia tutkimushenkilökunnasta tulee olla japanilaisia, sekä että hankkeen hallinnonjohto ja toinen tutkimuskeskus sijoitetaan Japaniin. Lisäksi EU on lupautunut kustantamaan noin puolet tästä keskuksista.

ITERin rinnalla toimii materiaalien tutkimuslaitos **International Fusion Materials Irradiation Facility** eli **IFMIF**, jossa kehitetään mahdollisissa tulevaisuuden fuusiolaitoksissa käytettäviä äärimmäisiä olosuhteita kestäviä materiaaleja. ITERiä ja IFMIFiä on suunniteltu seuraavaan demonstraatiofuusiovoimalaitokseen eli DEMOon. Tämän on tarkoitus olla ensimmäinen kaupallinen fuusiosähköä tuottava laitos.

Nopein etenemisarvio on seuraava: mikäli ITER todistaa Tokamak-tyyppisen rakenteen hyvän soveltuvuuden sähköntuotantoon, ensimmäinen varsinainen voimalaitos liitettäisiin verkkoon 2050, joka saattaisi johtaa merkittävään fuusion käyttöön

ITER on kansainvälinen Tokamak-koe, jolla pyritään osoittamaan että täysimittaisen fuusioreaktorin rakentaminen on tieteellisesti ja teknologisesti mahdollista. Se perustuu aikaisemmista koereaktoreista (kuten TFTR, JET, JT-60 ja T-15) saatuihin tutkimustuloksiin. Valmistuttuaan ITERistä tulee näitä huomattavasti suurempi reaktori. Projektin hinnaksi arvioidaan 10 miljardia euroa, ja se kestää 30 vuotta; rakennusvaihe kestää 10 vuotta ja käyttöaika on 20 vuotta.

Nimi tuli alun perin sanoista *International Thermonuclear Experimental Reactor* (kansainvälinen lämpöydinkoereaktori), mutta tämä merkitys ei ole enää voimassa. Latinankielinen sana *iter* tarkoittaa keinoa, joten nimi viittaa siihen, miten ITERin avulla saadaan valjastettua ydinfuusio rauhanomaiseksi ydinenergian lähteeksi. ITER on tarkoitus ottaa käyttöön 2016. /8./

Cadarachen energiatutkimuskeskus Aix-en-Provencen kaupungin kupeessa Etelä-Ranskassa on valtava kompleks. Yli 1 600 hehtaarin kokoinen, tarkoin vartioitu alue on täynnä erilaisia koevoimaloita, tutkimuslaitoksia ja toimistoja, joiden väliä kuljetaan sisäistä linja-autoreittiä pitkin.

Cadarachessa on 15 000 työntekijää. Alue kasvaa lähivuosina tuntuvasti, kun kansainvälinen fuusiokoereaktori ITER rakennetaan keskuksen kupeeseen. Ranskan valtio on luvannut antaa ITER-voimalan käyttöön 180 hehtaarin maa-alueen tutkimuskeskuksen vierestä.

Fuusiovoimaloiden kehittäminen nytkähti askelen verran eteenpäin, kun ITER-koereaktorin sijoituspaikkasopimus saatiin viimein allekirjoitettua tämän vuoden kesäkuussa yli vuoden kestäneiden tiiviiden neuvottelujen jälkeen Euroopan unionin, Japanin, Kiinan, Etelä-Korean, Venäjän ja Yhdysvaltojen kesken. EU:n esittämä Cadarache kilpaili Japanin sijoituspaikkaehdokkaan Rokkashon kanssa. /9./

8.1 ITER numeroina

Munkkirinkilän eli Tokamakin läpimitta 12,4 metriä ja sen paksuus on 4 metriä. Tokamakiin mahtuu 837 kuutiometriä plasmata ja plasmavirta on 15 miljoonaa ampeeria lisäksi tarvittava magneettikenttä on 5,3 teslaa. ITER tarvitsee 50 megawattia kuumennustehoa ja ulos pitäisi tulla 500 megawattia.

8.2 ITERin komponentit

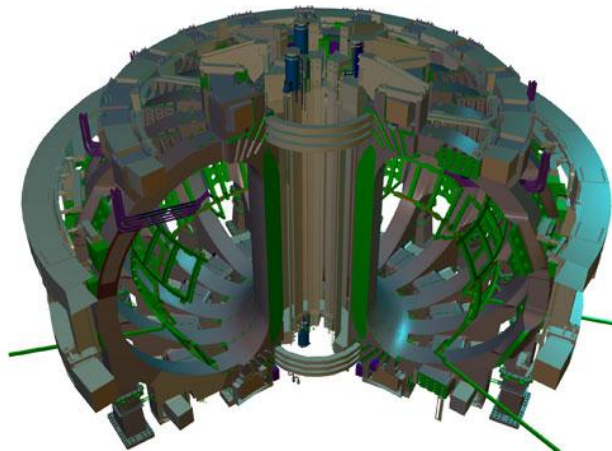
ITER koostuu kahdesta suuresta järjestelmästä: Tokamakista ja ulkoisista järjestelmistä. Tokamakiin kuuluu magneetteja, tyhjiösäiliö, suoja, diverttoreita, diagnostiikkaa, ulkoisia kuumennuslähteitä, NBI (Neutral Beam Injection), ICRH (Ion Cyclotron Heating), ECRH (Electron Cyclotron Heating), gyrotroni ja kryostaatti. Ulkoisiin järjestelmiin kuuluu tyhjiö ja kryogeniikka, kauko-ohjaus, teholähde, polttoaineen juoksutus, kuumakenno, jäähdytys ja tritiumin syöttö.

8.2.1 Tokamak

Tokamak sisältää magneetteja, tyhjiösäiliön, suoja, diverttoreita, diagnostiikkaa, ulkoisia kuumennuslähteitä sekä kryostaatin. Nämä komponentit varmistavat, että Tokamak pysyy kasassa koko prosessin ajan.

Magneetit

ITERistä löytyy kuvan 5 mukainen magneetti, joka pitää plasman koossa.



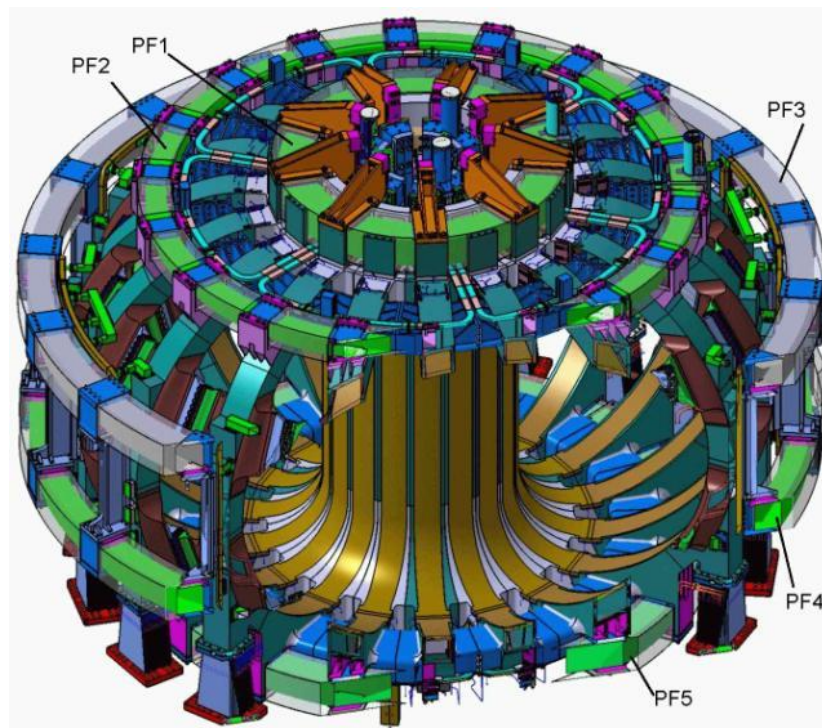
Kuva 5. ITERin magneettijärjestelmä, joka sisältää 48 elementtiä. Magneetti tuottaa 200 000 kertaisen magneettikentän verrattuna Maan magneettikenttään

Tokamakissa käytettävät magneetit sisältävät 18 suprajohtavaa toroidimaista kela (kuva 6), 6 poloidimaista kela (kuva 7) sekä keskussolenoidista (kuva 8). Lisäksi ylimääräisiä keloja asennetaan, joilla helpotetaan Edge Localized Modes (ELM). ELM ovat suuria energisiä purskahduksia lähellä plasman reunaa. Jos ne jätetään huomioimatta, plasma hävittää osan energiastaan.



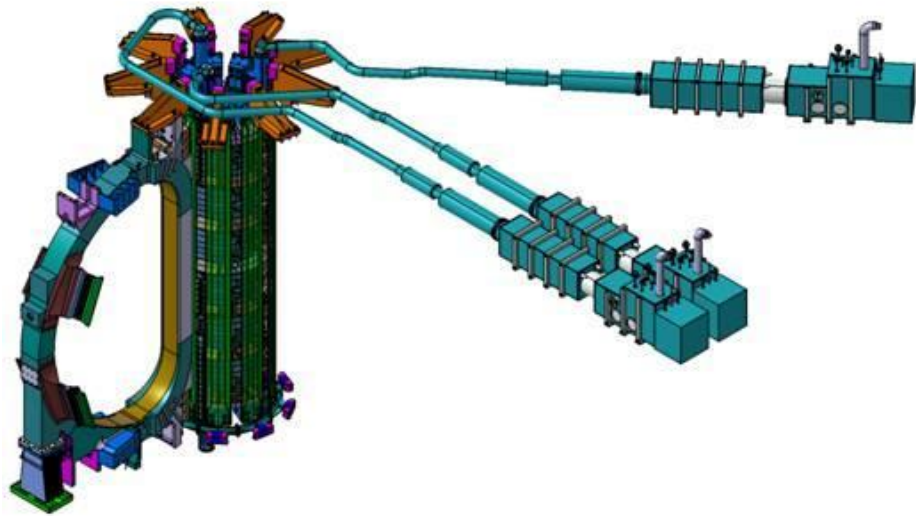
Kuva 6. Toroidal Field system coil eli toroidimainen kela

Toroidimaiset kelat (kuva 6) tuottavat magneettikentän Tokamakin ympärille, joiden päätehtävä on pitää plasma kasassa. Nämä kelat on suunniteltu saamaan yhteensä 41 gigajoulea magneettista energiaa, ja niiden maksimaalinen magneettikenttä on 11,8 teslaa.



Kuva 7. Poloidal Field coil system eli poloidaalinen kela

Nämä poloidaaliset magneetit (kuva 7) pitävät plasman poissa seiniltä ja auttavat pitämään plasman kasassa sekä vakaana.

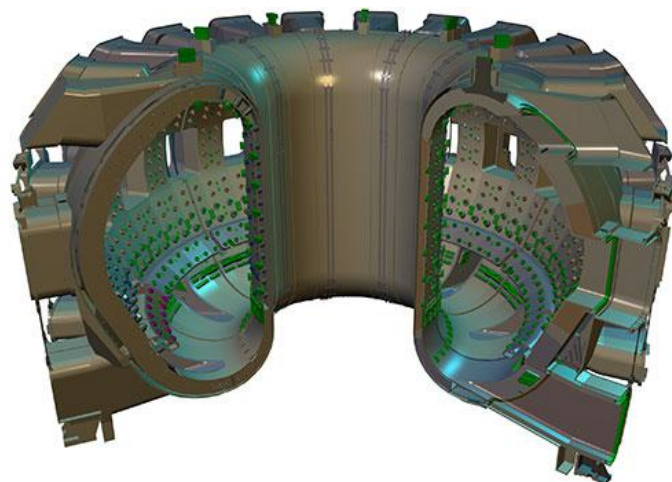


Kuva 8. Keskussolenoidi, joka on magneettijärjestelmä selkäranka

Keskussolenoidin (kuva 8), joka on pääasiassa suuri muuntaja, vaihteleva virta indusoi pääplasmavirran. Se myötävaikuttaa induktiiviseen vuohon, joka ajaa plasmaa. /10./

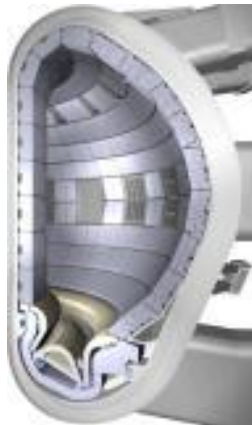
Tyhjiösäiliö

Tyhjiösäiliö (kuva 9) on sinetöity ilmatiiviisti kryostaatin sisälle, joka sisältää fuusioreaktion ja toimii ensimmäisenä turvasuojana. Tyhjiösäiliö on donitsin muotoinen kammio, jossa plasmahiukkaset pyörivät ympyrää jatkuvasti koskematta seiniin.



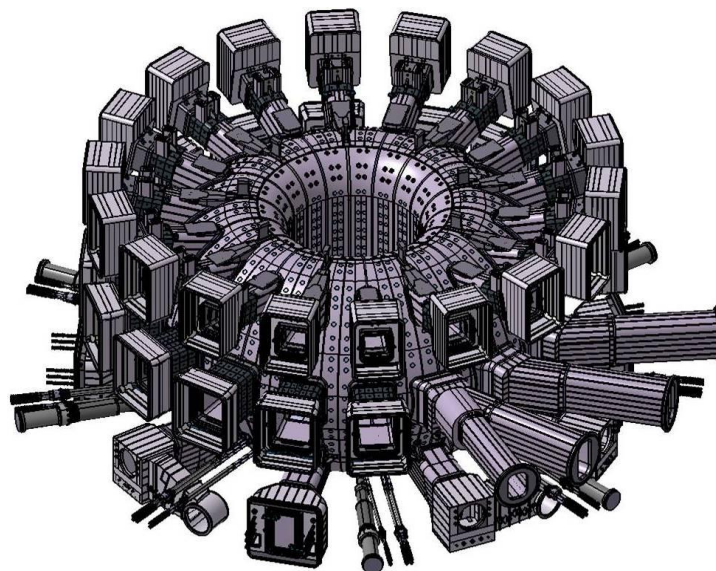
Kuva 9. Suuri tyhjiösäiliö tuottaa suljetun tyhjiön ympäristön fuusioreaktiolle.

Tyhjiösäiliössä (kuva 10) tulee olemaan kaksoisteräseinät, joissa on pääsy jäähdytysvedelle seinien väliin. Siellä vesi kiertää ja jäähdyttää samalla. Säiliön sisimmät pinnat päällystetään suojamoduuleilla. Ne suojaavat korkeaa-energisiltä neutroneilta, joita syntyy fuusioreaktiossa. Osa suojamoduuleista käytetään myös myöhemmässä vaiheessa testimateriaaleina tritiumin syötössä.



Kuva 10. Poikkileikatussa tyhjiösäiliössä näkyy, miten suojamoduulit on kiinnitetty sisäseinään ja diverttorit pohjalle.

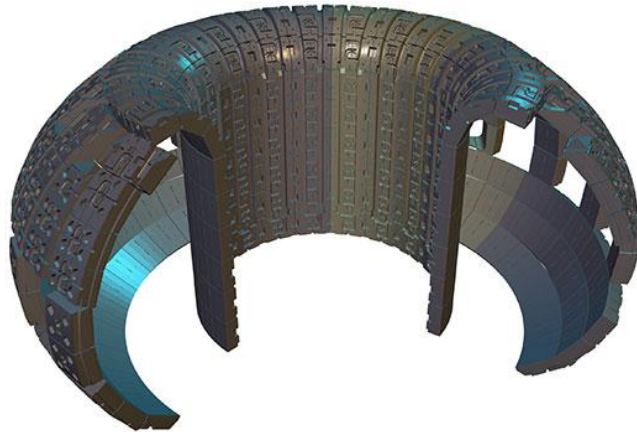
Tyhjiösäiliön 44 porttia (kuva 11) tarjoavat pääsyn kauko-ohjaus operaatioille, diagnostiikkajärjestelmille, kuumennukselle sekä tyhjiöjärjestelmille: 18 yläporttia, 17 keskiporttia ja 9 alaporttia. /10./



Kuva 11. Tyhjiösäiliö näyttää tällaiselta 44 portin kanssa. Kokonaispainoa on tällä säiliöllä 8 000 tonnia, joten se painaa hieman enemmän kuin Eiffel-torni.

Suojat

Suoja (kuva 12) peittää säiliön sisäpinnat suojaen säiliötä ja suprajohtavia magneetteja lämmöltä ja neutronivuolta fuusioreaktiossa. Neutronit hidastetaan suojaissa, jossa niiden kineettinen energia muutetaan lämpöenergiaksi ja kerätään jäähdytysnesteellä. Fuusiovoimalassa tämä energia käytetään sähkön tuottamiseen. /10./



*Kuva 12. Suojamoduulit suojaavat kuumilta latauksilta säiliön sisällä ja korkeaaner-
gisiltä neutroneilta, joita syntyy fuusioreaktiossa.*

Diverttori

Tyhjiösäiliön pohjalla sijaitseva ITER diverttori (kuva 13) on tehty 54 kasetista, jotka voidaan poistaa kauko-ohjauksella. Jokainen kasetti (kuva 14) sisältää kolme plasmaan suunnattua komponenttia tai kohdetta. Nämä ovat sisäiset ja ulkoiset pystysuuntaiset kohteet sekä kupu. Kohteet sijaitsevat magneettikenttäviivojen risteyskohdassa, jossa korkeaanergetiset plasmahiukkaset iskeytyvät komponentteihin.

Niiden kineettinen energia muutetaan lämmöksi, näiden komponenttien saama lämpövuoto on erittäin voimakas ja vaatii aktiivista vesijäähdytystä. Diverttorin pintamateriaalin valitseminen sopivaksi on tärkeää. Vain muutama materiaali pystyy kestäämään 20 vuoden ajan ITERissä yli 3 000 celsiusasteen lämpötilaa, näitä kokeillaan tulevaisuudessa ITERissä.

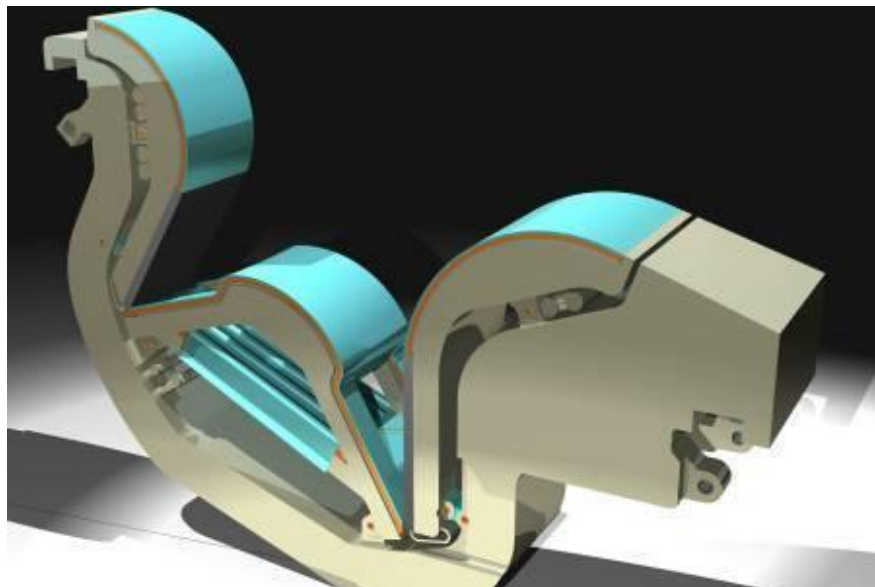


Kuva 13. Diverttori on yksi ITERin avainkomponenteista. Se sijaitsee tyhjiösäiliön pohjalla. Sen tehtävänä on uuttaa lämpöä ja helium-tuhkaa, fuusioreaktioon tarvittavat tuotteet, sekä muita epäpuhtauksia plasmasta. Se toimii kuin jättimäinen pakoputki. Se sisältää kaksi pääosaa: ruostumattomasta teräksestä tehdyn kannatinrakenteen ja olasmaan suunnatusta komponentista. Painoa diverttorilla on 700 tonnia. Plasmaan suunnattu komponentti tehdään volframista materiaalista, joka kestää korkeaa kuumuutta.

ITER aloittaa toimintansa hiilikuituvahvisteisella hiiliyhdisteellä diverttorissa.

Tämä materiaali antaa korkeaan lämmönjohtavuuteen etuja, ja se mahdollistaa helpomman oppimisprosessin ITERin ensimmäisten vuosien toimintaan.

Toinen diverttori erä tehdään volframista, jolla on etuna matalampi eroosioaste ja siten pidempi elinaika. /10./

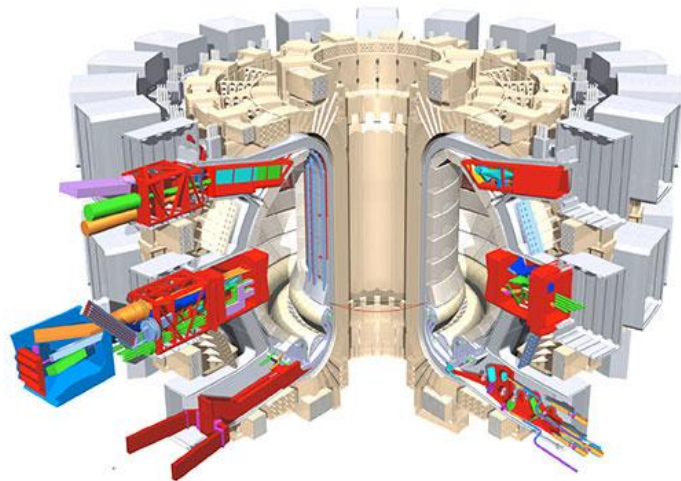


Kuva 14. Kolme plasmaan suunnattua komponenttia ITER-diverttorissa, sisäiset ja ulkoiset pystysuuntaiset kohteet sekä kupu.

Diagnostiikka

ITERiin asennetaan laaja diagnostiikkajärjestelmä (kuva 15), joka tarjoaa tarvittavia mittauksia ohjaamaan, arvioimaan ja optimoimaan plasman tehokkuutta ITERissä sekä ymmärtämään enemmän plasman fysiikasta. Näitä ovat lämpötilan mittaus, tiheyden mittaus, epäpuhtaus pitoisuuksien mittaus sekä hiukkasten ja energioiden synnytyksaikojen mittaus.

Järjestelmä sisältää noin 50 yksittäistä modernista mittausjärjestelmää plasmadiagnostiikkatekniikoista, sisältäen lasereita, röntgensäteitä, neutronikameroita, epäpuhtauksien valvontaa, hiukkasspektrometrejä, säteilybolumetrejä, paineen ja kaasun analysointia sekä optisia kuituja.



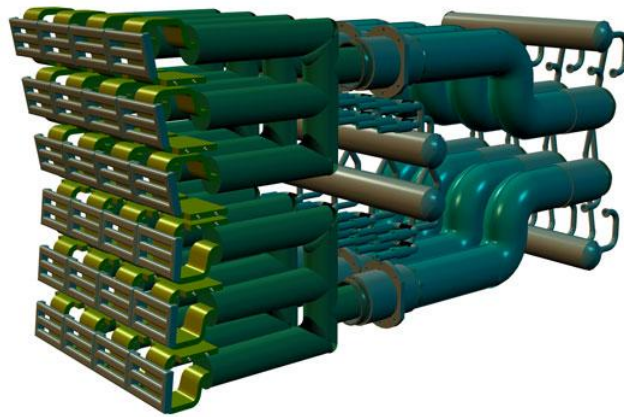
Kuva 15. Noin 50 yksittäistä mittausjärjestelmää (kirjavat kohteet) auttaa ohjaamaan, arvioimaan ja optimoimaan plasman tehokkuutta ITERissä sekä ymmärtämään enemmän plasman fysiikasta.

Koska tyhjiösäiliön sisällä on rankka ympäristö, näiden järjestelmien on selviydyttävä ilmiöistä, joita ei olla ennen kohdattu diagnostiikan toteutuksessa. Samalla järjestelmien on suoriuduttava tehtävistään tarkasti. Neutraalien hiukkasten vuon taso, neutronivuo ja juoksevuus, tulee olemaan vastaavasti noin 5, 10 ja 10 000 kertaa korkeampi kuin kovimmat ympäristöt nykyisille koneille. Fuusioreaktion pulssin pituus tai aika, jolloin reaktio on pysyvä on noin 100 kertaa pidempi. /10./

Ulkoinen kuumennus

Lämpötilan ITERin Tokamakin sisällä pitää saavuttaa 150 miljoonaa celsius-astetta, jotta tyhjiökammiossa oleva kaasu saavuttaa plasmatilan ja fuusio-reaktio tapahtuu. Kuumen plasman pitää pysyä äärimmäisessä lämpötilassa kontrolloidusti, jotta energia voidaan ottaa talteen.

ITERin Tokamak luottaa kolmeen lähteeseen ulkoisissa kuumennuksissa (kuva 16), jotka toimivat yhteistyössä tarjoten 50 megawatin edestä kuumennustehoa, jotta plasma saadaan tarvittavaan fuusiolämpötilaan. Nämä ovat Neutral Beam Injection (NBI) ja Ion Cyclotron Heating (ICRH) sekä Electron Cyclotron Heating (ECRH).



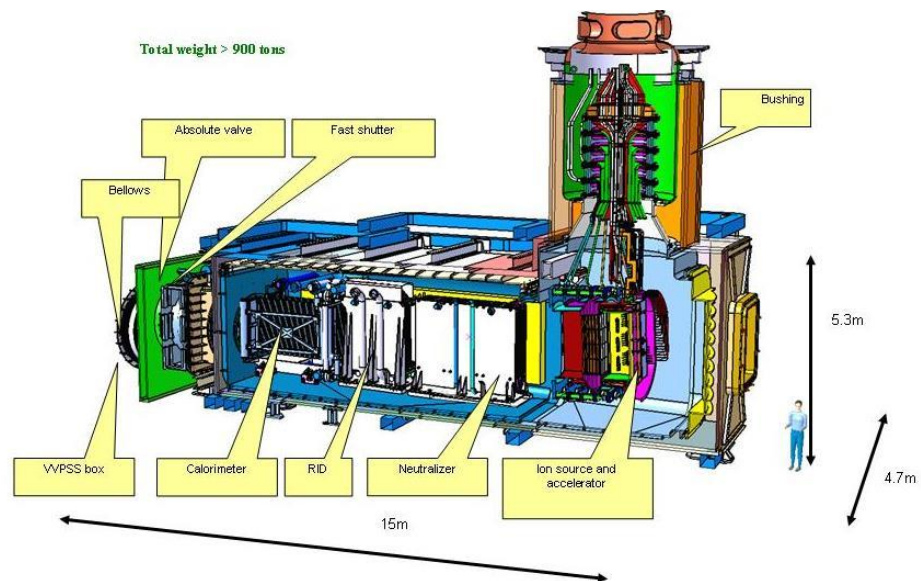
Kuva 16. ITERin Tokamak luottaa kolmeen ulkoisen kuumennuksen lähteeseen, jotka pitävät plasman lämpötilan sopivana fuusioon.

Lopulta tutkijat toivovat saavuttavansa ns. palavan plasman. Palavassa plasmassa fuusioreaktiossa syntyneen heliumytimen energia riittää pitämään yllä plasman lämpötilaa. Kun plasma pysyy oikeassa lämpötilassa, voidaan ulkoisia kuumennuksia pienentää tai jopa sammuttaa. Palavassa plasmassa, jossa on vähintään puolet fuusioon tarvittavasta energiasta tuotetaan sisäisesti. Se on tärkeä askel fuusioenergian tuotannossa.

NBI (Neutral Beam Injection)

ITERin Tokamakissa käytetään ruiskutusta polttoaineen lämmittämiseen, jota voi kuvailla esimerkiksi kotitalouksien cappucino keittimeen, jossa maito lämmitetään höyryllä. NBI:llä (kuva 17) ammutaan varauksettomia korkea-energisii hiukkasia plasmaan, jossa ne siirtävät energiansa plasmahiukkasiin törmäyksillä.

Ennen ruiskutusta deuterium atomit pitää kiihdyttää Tokamakin ulkopuolella 1 megaelektronivoltin kineettiseen energiaan. Sähkökenttä voi kiihdyttää vain positiivisia tai negatiivisia atomeja. Tämän takia neutraaleista atomeista pitää poistaa elektroneja, jotta saataisiin positiivisesti varautunut ioni. Prosessi pitää sitten vielä kääntää ennen ruiskutusta fuusioplasmaan, muuten plasmahäkin magneettikenttä torjuu sähköisesti varautuneen ionin. NBI järjestelmällä ionit pääsevät plasmahäkin läpi, josta ne saavat takaisin puuttuvan elektroninsa ja voidaan ruiskuttaa plasmaan.



Kuva 17. Kaikki on kiinni kineettisestä energiasta. NBI kiihdyttää nopeasti neutralisoidut deuterium-hiukkaset plasmaan

ITERin suuri plasman määrä asettaa uudet vaatimukset tähän todistettuun ruiskutustapaan. Hiukkaset tullaan siirtämään 3 – 4 kertaa nopeammin kuin aikaisemmissa järjestelmissä, jotta ne saadaan syvemmälle plasmaan ja näillä korkeimmilla nopeuksilla positiivisesti varautuneet ionit ovat vaikeampia neutralisoida. Ensimmäistä kertaa ITERissä negatiivisesti varautuneet ionilähteet on valittu kiertämään tätä ongelmaa.

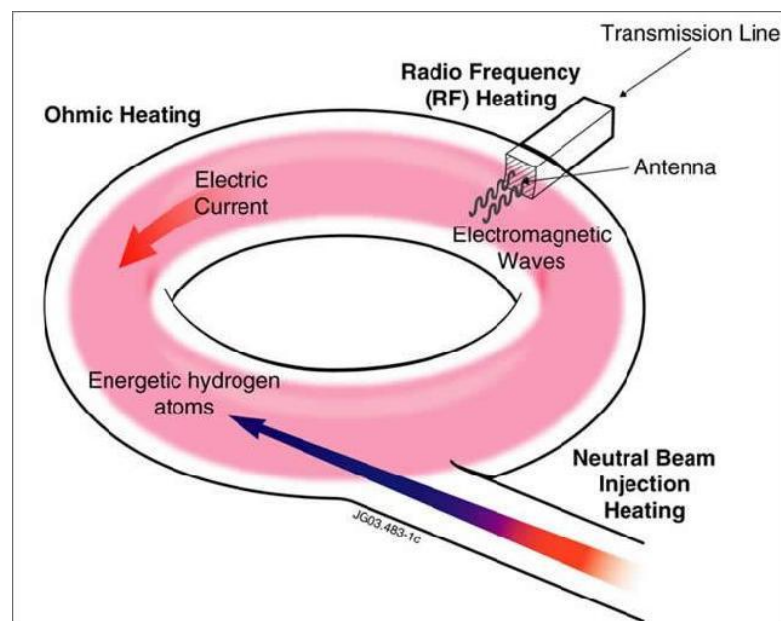
Vaikkakin negatiivisesti varautuneet ionit on helpompi neutralisoida, ne on myös haastavampia luoda ja käsitellä kuin positiiviset ionit. Ylimääräinen elektroni, joka antaa ionille sen negatiivisen varauksen, on vain löysästi kiinni ja niinpä mielellään kadoksissa. ITERiin ennustetaan kahta NBI:tä ja kolmatta käytetään diagnostiseen tarkoitukseen. /10./

ICRH (Ion Cyclotron Heating)

ICRH ja ECRH menetelmät käyttävät eri taajuisia radioaaltoja plasman kuumentamiseen kuten esimerkiksi mikroaaltouuni, joka kuumentaa ruuan mikroaalloilla. ICRH:ssa (kuva 18 ja kuva 19) energia siirretään ioneihin plasmassa suuritehoisella sähkömagneettisella säteilyllä 30 –50 megahertsin taajuuksilla.



Kuva 18. ITERin ICRH-antennit näyttävät näiltä, jotka asennetaan JET -reaktoriin Isossa-Britanniassa.



Kuva 19. NBI ja ICRH sekä ECRH auttavat pitämään plasman yli 150 miljoonassa celsiusasteessa.

ICRH:ssa tarvitaan generaattori, voimansiirtojohto ja antenni. Generaattori tuottaa voimakkaita radiotaajuusaaltoja, jotka kulkevat voimansiirtojohtoja pitkin tyhjiösäiliössä sijaitsevaan antenniin ja sitä kautta plasmaan. /10./

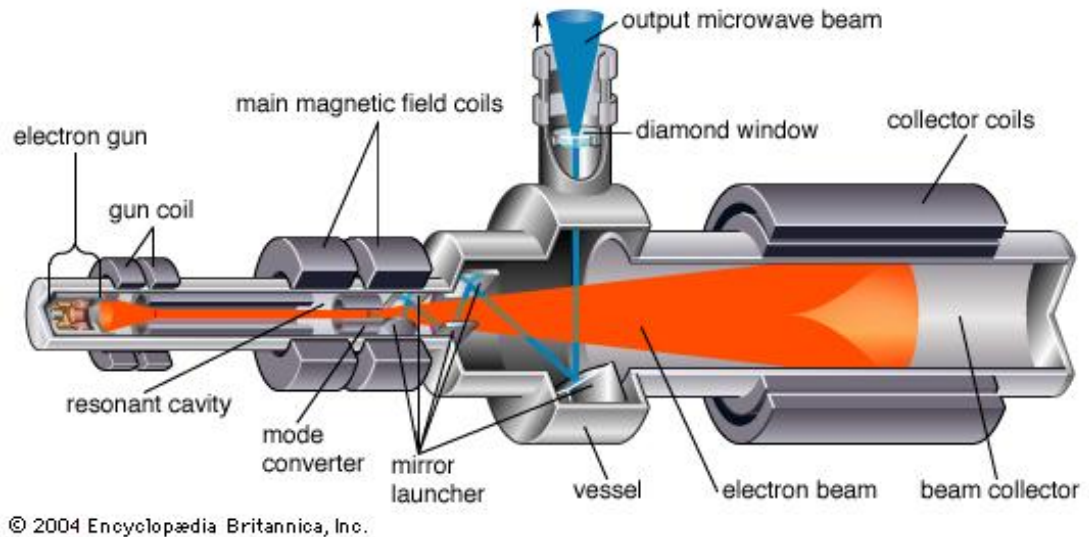
ECRH (Electron Cyclotron Heating)

ECRH kuumentaa elektronit plasmassa suuritehoisilla sähkömagneettista säteilyä sisältävällä säteellä, taajuuksilla 100 - 200 megahertsiä, elektronien resonanssitaajuudella. Elektronit vuorostaan siirtävät imetyn energian ioneille törmäysten välityksellä.

ECRH järjestelmää käytetään myös tallentamaan lämpöä tiettyihin paikkoihin plasmassa eräänlaisena mekanismina minimoida tiettyjä kasaantuneita epävakaisuuksia, jotka jäädyttävät plasmaa. Verrattaessa ICRH järjestelmään ECRH edut on siinä, että säteen voi ampua ilman läpi. Se yksinkertaistaa suunnitelmaa ja sallii lähteen olla kaukana plasmasta ja yksinkertaistaa huoltokustannuksia. Tehon järjestelmälle tuottaa voimakas korkeataajuusgyrotroni. ITERin suunnitelma sisältää 1 megawatin gyrotronin kehityksen, joka toimii 170 gigahertsin alueella ja sen kehittämisen pulssin kesto sekunteina on 500 sekuntia. /10./

Gyrotron

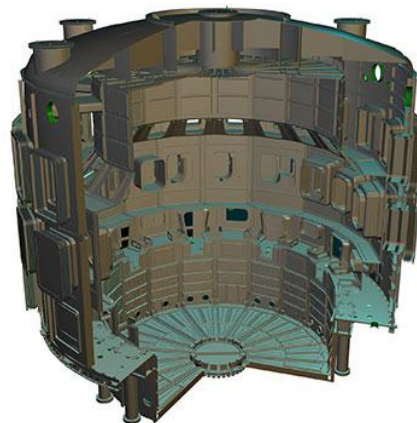
Gyrotronit (kuva 20) ovat suurtehoisia tyhjiöputkia, jotka tuottavat erittäin suurtaajuisia säteitä kasaamalla elektroneja yhteen syklotronin liikkeiden avulla vahvassa magneettikentässä. Ulostulon taajuusalueet ovat 20 - 250 gigahertsiä, jotka kattavat mikroaalloista terahertsien reuna-alueelle. Tyypillinen ulostulotehoalue on kymmenistä kilowateista 1 - 2 megawattiin. Gyrotronit voidaan suunnitella lähettämään pulsseja tai jatkuvaan käyttöön. /11./



Kuva 20. Gyrotronin malli

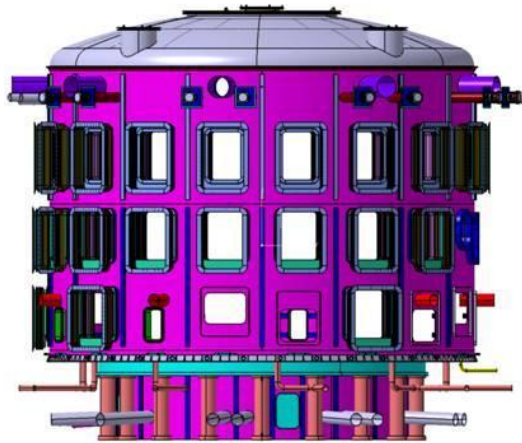
Kryostaatti

Kryostaatti (kuva 21 ja kuva 22) on suuri, ruostumatonta terästä oleva rakennelma. Se ympäröi tyhjiösäiliötä ja suprajohtavia magneetteja tarjoten alijäähtynyttä tyhjiöympäristöä. Se on tehty kahdesta samankeskisestä seinästä, jotka on yhdistetty vaakasuorilla ja pystysuorilla kaarilla. Kahden seinän välinen tila täytetään heliumilla hieman korkeammaksi kuin yksi ilmakehä toimien siten lämpöesteenä.



Kuva 21. Koko tyhjiösäiliö suljetaan kryostaattiin tai kylmälaatikkoon, joka tarjoaa eristystä suprajohtaville magneettijärjestelmille ja muille komponenteille.

Kryostaatissa on monta aukkoa, joista suurimmat ovat halkaisijaltaan neljä metriä. Ne tarjoavat pääsyn tyhjiösäiliöön jäähdytysjärjestelmille, magneettien syöttölinjoille, apukuumennukseen, diagnostiikalle sekä siirrettäville suoille ja diverttoreille. Suuret tyhjät tilat kryostaatin ja tyhjiösäiliön välissä sallivat rakenteiden lämpölaajenemisen ja -supistuksen. Kryostaattia ympäröi kauttaaltaan betonikerros, joka tunnetaan myös biosuojana. Kryostaatin yläpuolella biosuoja on kahden metrin paksuinen. /10./



Kuva 22. ITERin kryostaatti tulee olemaan 31 metriä korkea ja melkein 37 metriä leveä.

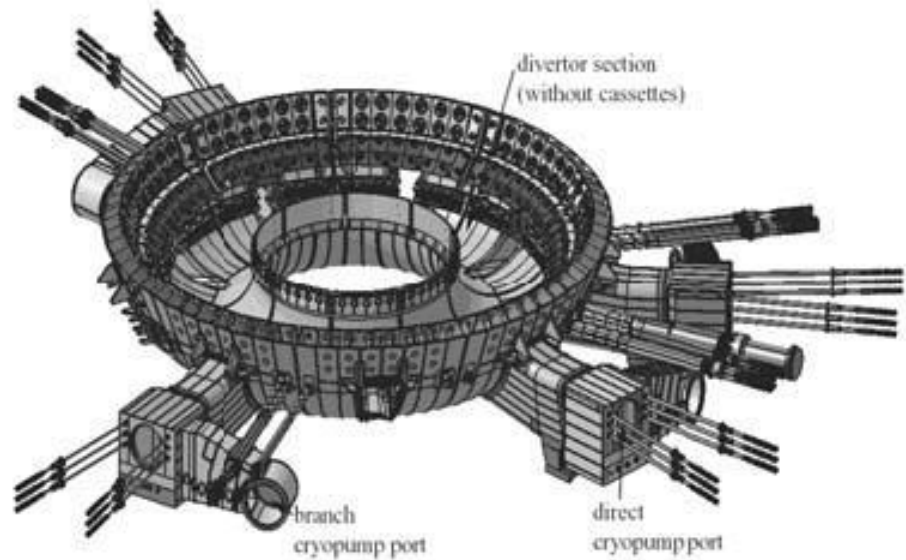
8.2.2 Ulkoiset järjestelmät

ITERin ulkoisiin järjestelmiin kuuluu myös tyhjiö ja kryogeniikka. Lisäksi niihin kuuluu kauko-ohjaus, ulkoinen teholähde, polttoaineen juoksutus, kuumakemno jäähdytysvesi sekä tritiumin syöttö.

Tyhjiö ja kryogeniikka

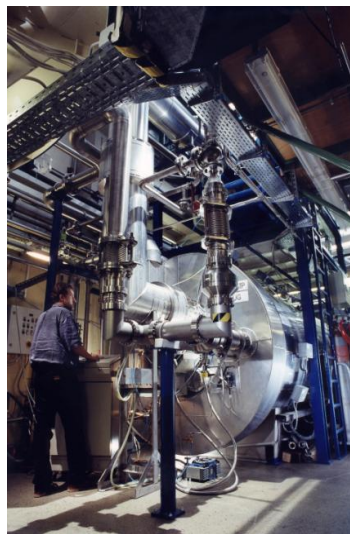
Tilavuuksiltaan 1 400 m³ ja 8 500 m³, ITERin tyhjiösäiliö ja kryostaatti kuuluvat maailman suurimpiin rakennettuihin tyhjiöjärjestelmiin. Näiden järjestelmien valvontaan ja huoltoon tarvitaan parempia tekniikoita. Kun järjestelmä on toimintakunnossa, järjestelmän sisälle ei enää pääse.

Aivan ensimmäiseksi, jotta fuusio saataisiin aikaan, täytyy luoda tyhjiö. Sillä eliminoidaan kaikki orgaaniset lähteet, jotka muuten saattaisivat rikkoa kuuman plasman. Tyhjiön pumppausta tarvitaan myös, jotta voidaan luoda matala tiheys, noin miljoona kertaa matalampi kuin ilman tiheys.



Kuva 23. Hahmotelma toruspakoputkipumppujärjestelmän geometriasta. Kuvassa näkyy neljä pumppaus porttia, joissa molemmissa on kaksi kryopumppua

Mekaaniset pumput ja voimakkaat kryogeeniset pumput poistavat ilman säiliöstä ja kryostaatista kunnes paine sisällä on pudonnut miljoonanteen osaan normaalista ilmakehän paineesta. ITERin koon takia aikaa kuluu 24 - 48 tuntia.

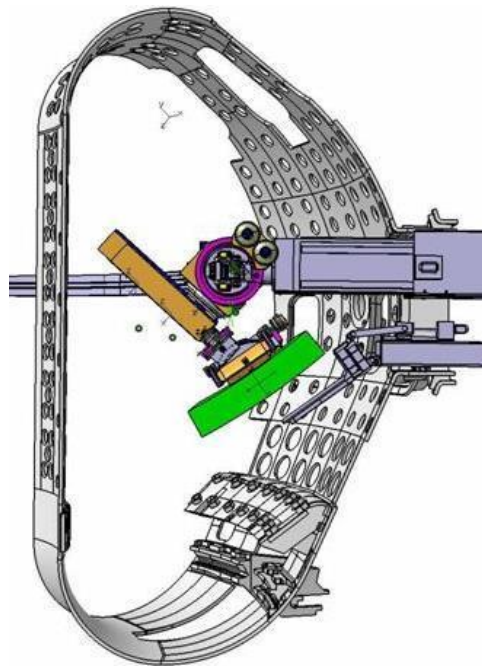


Kuva 24. ITERin kryopumpun mallia testataan TIMO testilaitoksessa Karlsruhessa Saksassa. Kuva: Forschungszentrum Karlsruhe (FZK).

Pääpumpausjärjestelmään kuuluu kahdeksan toruspakoputkipumppua (kuva 23), neljä kryopumppua (kuva 24) NBI-järjestelmää varten, joita käytetään plasman kuumennuksessa. Sekä kaksi kryopumppua, ITERin kryostaattia ja suprajohtavia magneetteja varten. Ne jäähdytetään alijäähdytetyllä heliumilla. /10./

Kauko-ohjaus

Kaukokäytöllä (kuva 25) on tärkeä osa ITERin Tokamakin käytössä. Kun operaatio alkaa, on mahdotonta tehdä muutoksia, tarkastuksia tai korjata Tokamakin komponentteja aktivoitulla alueella muuten kuin kauko-ohjauksella. Tarvitaan erittäin luotettavia ja kestäviä kaukokäyttötekniikoita, jopa 50 tonnin painoisten komponenttien muokkaukseen ja vaihtamiseen. Näiden tekniikoiden luotettavuudella on osansa koneen sulkemisvaiheiden pituuteen.



Kuva 25. ITER -laitteiston sujuva toiminta luottaa suurimmaksi osaksi kaukokäyttöjärjestelmään. Kuvassa on hahmoteltu, kuinka yksi 440 suojamoduulista vaihdetaan.

Kaikki kauko-ohjaustekniikat, jotka on kehitetty ITERiä varten, toimivat samalla periaatteella. Kaukomanipulaattoria käytetään irrottamaan komponentti. Irrotuksen jälkeen komponentti poistetaan portin kautta ja asetetaan telakoituun kuljetuslaatikkoon. Laatikko suljetaan, jotta estetään komponentin saastuminen.

Seuraavaksi laatikko siirretään ilmassa kohti kuumakennoa. Kuumakennossa tapahtuu samanlainen telakointi, ja komponentti siirretään korjattavaksi tai se vaihdetaan. Sen jälkeen komponentti vietään samalla tavalla, mutta käänteisesti, takaisin tyhjiösäiliöön. /10./

Teholähde

ITER -voimalan ja laitosten sähkövaatimukset vaihtelevat 110 megawatista jopa 620 megawattiin 30 sekunnin huippujaksoissa plasmatoiminnan aikana. Teho välitetään 400 kilovoltin piiristä (kuva 26), joka jo toimittaa läheiselle CEA Cadarahren laitokselle tehoja. Jotta ITER voitaisiin liittää verkkoon, tarvitaan kilometrin mittainen jatko piiriin.



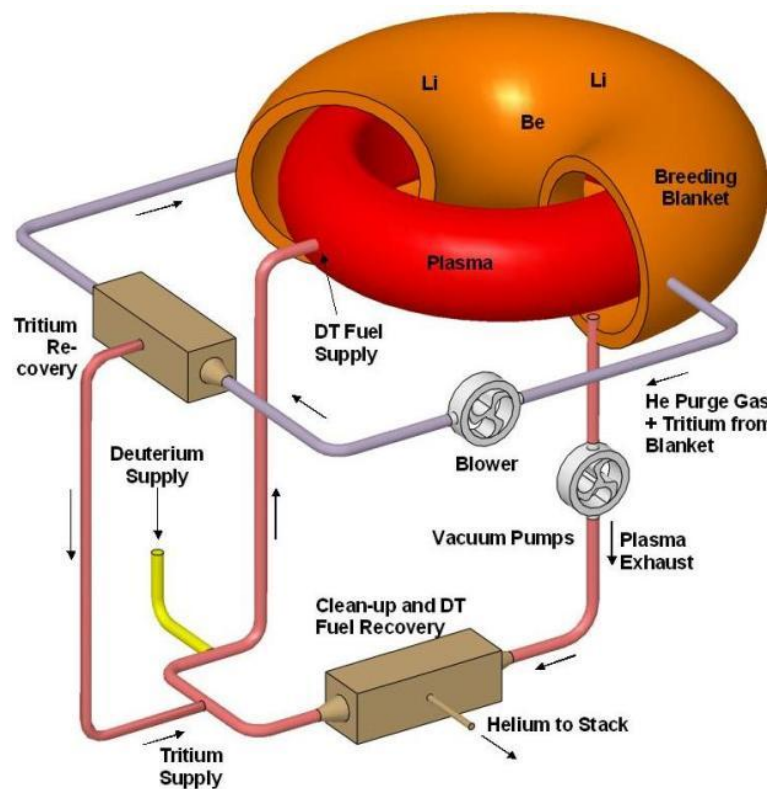
Kuva 26. ITERin tehomuuntimen prototyyppiä testattiin 1998.

ITERissä tulee olemaan vakaa sähkönjakelujärjestelmä, joka toimittaa tarvittavan sähkön koko laitokselle, toimistot ja operatiiviset laitokset mukaan lukien. Jäähdytysvesi- ja kryogeenijärjestelmät vievät yhdessä noin 80 % toimitettavasta sähköstä.

Toista pulssilla toimivaa voimajärjestelmää käytetään plasmaoperaatioiden aikana tarjoamaan suprajohtaville magneettikeloille, sekä lämmitys ja virran ajojärjestelmille niiden tarvitseman suuren tehon tarpeen. Sähkö 400 kilovoltin piiristä muutetaan keskijännitteeksi (69 kilovoltia) kolmivaihemuuntajan läpi. ITER -voimalan ja laitosten varavoimajärjestelmä toimii kahdella dieselgeneraattorilla. /10./

Polttoaineen juoksutus

ITERissä käytettävät polttoaineet valmistetaan suljetussa prosessissa (kuva 27). ITERin Tokamakissa fuusioreaktion saa tehonsa vedyn kahdesta isotoopista, deuteriumista ja tritiumista. ITER on ensimmäinen fuusiolaitteisto, joka on suunniteltu toimimaan deuteriumilla ja tritiumilla. Polttoaineen juoksutus tapahtuu kolmessa vaiheessa: ensin tapahtuu vetyoperaatio, seuraavaksi deuteriumoperaatio ja lopulta täysi deuterium-tritiumoperaatio.



Kuva 27. ITERin ns. suljettu DT -polttoainesilmukka. Varastoitu deuterium ja tritium ruiskutetaan tyhjiökammioon, jossa pieni osa polttoaineesta käytetään. Plasma-höyryt poistetaan ja käsitellään isotooppierotusjärjestelmän läpi, joka poistaa fuusiopolttoaineen uudelleenruikutettavaksi polttoainekierto.

Fuusioreaktion ensimmäisenä askeleena on saada kaikki ilma ja epäpuhtaudet poistettua tyhjiösäiliöstä. Voimakkaat magneetit, jotka auttavat eristämään ja hallitsemaan plasmaa, käynnistetään, ja kaasu, jonka tiheys on matala, ruiskutetaan tyhjiösäiliöön.

Kun polttoaine on syötetty tyhjiökammioon, sähkövirtaa aletaan ohjata järjestelmään, joka saa kaasun hajoamaan sähköisesti eli ionisoitumaa plasmaksi. ITERiä varten kehitetyt voimakkaat pumput ruiskuttavat kaasupitoisen fuusiopolttoaineen tyhjiökammioon. ITERiä varten kehitetty ruiskutusjärjestelmä, keskimäärin $200 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ läpisyötöllä ja huipuissa $400 \text{ Pa m}^3/\text{s}$, on yhtä suuruusluokkaa suurempi kuin missään jo olemassa olevassa Tokamakissa.

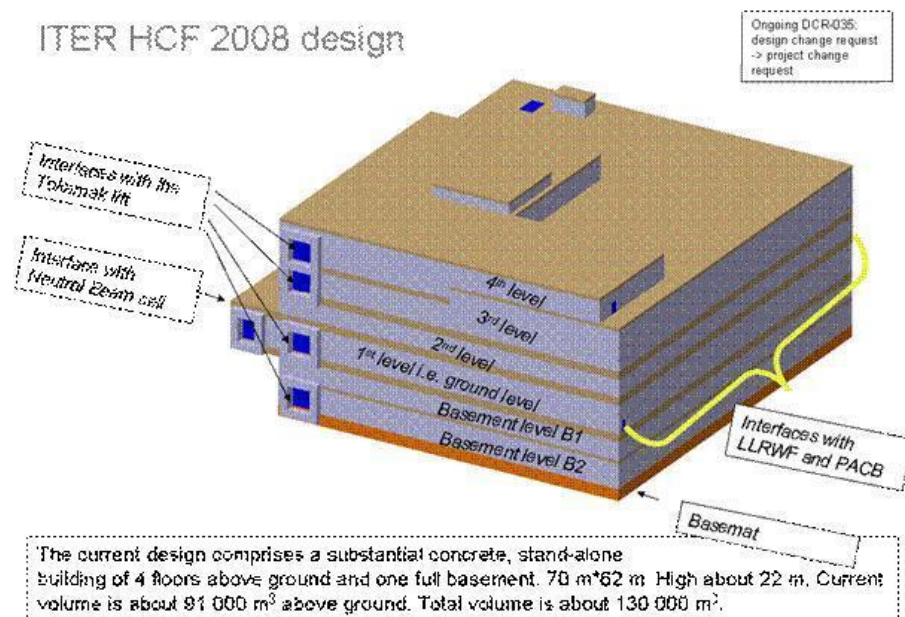
Toista polttoainejärjestelmää, pellettiruiskutusjärjestelmä, tullaan käyttämään ITERissä. Pellettiruiskutusjärjestelmä on pääasiassa erittäin tehokas jäänvalmistaja. Puserrin työntää ulos muutaman millimetrin kokoisia deuteriumtritium jääpellettejä, joita kaasutykki kuljettaa $3\,600 \text{ km/h}$ nopeudella. Pelletit ovat nopeita ja tarpeeksi kylmiä lävistääkseen plasmaytimen. Jäätäneet pelletit ruiskutetaan ohjausputken läpi, joka sijaitsee tyhjiösäiliön sisäseinällä.

Pellettiruiskutusjärjestelmä on pääasiallinen väline, jota käytetään plasman tiheyden hallintaan, ja se on myös tehokas hallitsemaan ELM:iä. Nämä energiset purkaukset virtaavat ulos ympäröivästä magneetikentästä ja aiheuttavat energiahäviöitä. Ampumalla jäätyneitä polttoainepellettejä siellä missä niitä tarvitaan, pellettiruiskutusjärjestelmä on tehokas ELM:in hallintaan. Erikoisteknologiaa kehitetään, jotta nämä pelletit voisivat lentää mutkikkaita lentoratoja saavuttaen erityisiä alueita plasmassa, joissa ELMit pääosin häiritsevät.

Alle gramma fuusiopolttoainetta on koko ajan tyhjiösäiliön sisällä. Tyhjiösäiliön pohjalla sijaitseva diverttori sallii käyttämättömän polttoaineen kierrätyksen. Palamaton polttoaine virtaa diverttoriin, josta se pumpataan ulos ja erotetaan fuusioreaktiossa syntyneestä heliumista. Sen jälkeen polttoaine sekoitetaan tuoreeseen deuteriumiin ja tritiumiin ja ruiskutetaan takaisin tyhjiökammioon. /10./

Kuumakenno

Kuumakennolaitos (kuva 28) on pakollinen ITERin toiminnalle, koska se tarjoaa turvallisen ympäristön käsittelylle, korjauksille tai kunnostuksille, sekä testauksiin että neutroneille altistuneiden komponenttien hävittämiseen. Vaikka fuusioreaktio ei tuota radioaktiivisia tuotteita, energiset neutronit, jotka joutuvat kosketuksiin tyhjiösäiliön seinien kanssa, ns. aktivoituvat ajan mittaan. Materiaalit voivat altistua beryllium- ja volframipölylle kuten myös tritium.



Kuva 28. Kuumakennolaitoksen nykyinen suunnitelma. 130 000 m³ rakennus on suuri rakennuskompleksi, sisältäen neljä maanpäällistä kerrosta ja yhden ison kellarin.

Raskaat kunnostustoiminnot kuumakennolaitoksen sisällä tehdään kauko-ohjausjärjestelmällä, joka pystyy käsittelemään koulubussin kokoisia komponentteja. Kuumakennolaitos sisältää myös kauko-ohjausvälineitä simulaatioihin ja operaatioiden harjoituksiin.

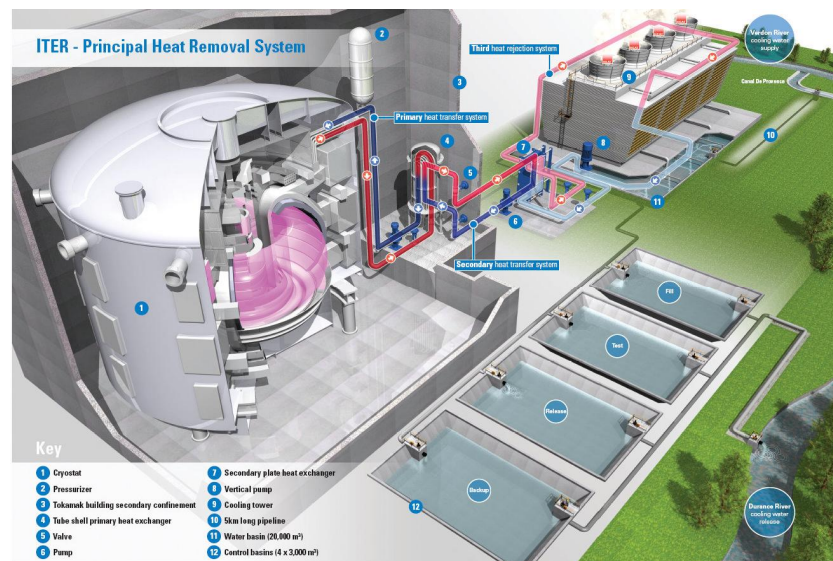
Kuumakennolaitos myös suorittaa tritiumin poiston komponenteista ja materiaaleista, jotka ovat altistuneet tritiumille. Tämä operaatio tehdään turvallisella, rajoitetulla ja suojatulla alueella, jossa on analysointijärjestelmä tritiummittauksille sekä tritiuminpoistojärjestelmä kaasupitoisille virroille päästöjen ja jätteiden minimoimiseksi.

Kaikki jättemateriaalit käsitellään, pakataan ja varastoidaan väliaikaisesti kuumakennolaitokseen ennen kuin ne annetaan Ranskan viranomaisille.
/10./

Jäähdytysvesi

ITERiin asennetaan vesijäähdytysjärjestelmä (kuva 29) hillitsemään lämmön syntyä Tokamakin ollessa toiminnassa. Vettä läheisestä Canal de Provencesta käytetään poistamaan lämpöä tyhjiösäiliöstä ja sen komponenteista sekä jäähdyttämään diagnostiikka-, lämmitys-, teho- ja kryogeenijärjestelmiä. Vesijäähdytysjärjestelmä on jaettu kahteen suljettuun lämpöä siirtävään piiriin sekä jäähdytystornien avoimeen piiriin.

Vesi virtaa ITER -voimalan primääri ja sekundaari lämmönvaihtimista, jotka pudottavat veden lämpötilan maksimiarvoonsa 50 celsiusasteeseen. Lämpö päästetään ympäristöön jäähdytystornien läpi vastaten noin 450 megawatin edestä lämpövoimaa plasmaoperaation aikana.



Kuva 29. ITERin jäähdytysvesijärjestelmän kaavio.

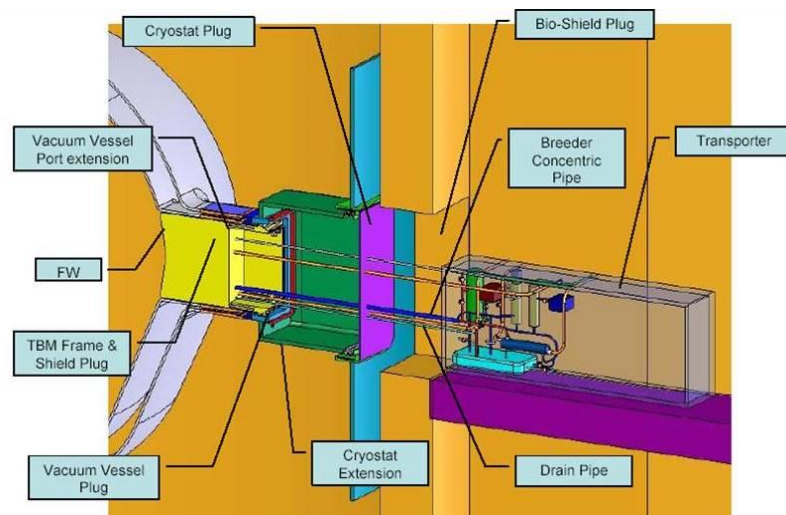
Koska ITER on tutkimuslaitos eikä voimala, suurin osa jäähdytysvedestä haihtuu jäähdytystorneissa. Loput vedestä menee jäähdytysaltaiden läpi. Ensimmäiseksi allas kerää voimalan pakoputkista tulevan veden.

Sitten vesi testataan erilaisilla parametreilla kuten veden lämpötilana (max 30 astetta), veden pH-arvona, hiilivetynä, kloridina, sulfaatteina ja tritiumina. Nämä arvot annetaan paikallisille viranomaisille. Vain puhdas vesi päästetään Durance-jokeen. /10./

Tritiumin syöttö

Tritium ja deuterium ovat vedyn kaksi isotooppia, joita käytetään ITERissä fuusioreaktion polttoaineena. Deuteriumia voidaan uuttaa merivedestä rajoittamattomia määriä, mutta tritiumvarastot maan kuoressa on rajoitetut, nykyään arviolta 20 kiloa. Kuitenkin toinen tritiumlähde on olemassa: tritiumia voidaan tuottaa Tokamakin sisällä neutronien pakenemasta plasmasta erityisellä tekijällä, litiumilla, jota on suojissa. Tämän tyyppinen tritiumin syöttäminen fuusioreaktion aikana on tärkeä osa tulevaisuuden suuria fuusiovoimaloita varten.

ITER tuottaa tarvittavan tritiumpolttoaineen sen 20-vuotisen eliniän ajaksi maailmanlaajuisesta varastosta. Mitä DEMO-voimalaan tulee, niin sen seuraavaan askeleeseen kaupalliseen fuusiovoimaan tarvitaan noin 300 grammaa tritiumia päivässä, jotta se voisi tuottaa 800 megawattia sähkövoimaa. Maailmassa ei ole riittävää tritiumin lähdettä fuusioenergia kehitykseen ITERin jälkeen, joten fuusioenergian tulevaisuuden kannalta on tärkeää kehittää menestyvä tritiumin syöttöön perustuva järjestelmä.



Kuva 30. Tyypillisen TBM testiporttikammion asetelman näkymä..

ITER antaa erityisen mahdollisuuden testata erilaisia syöttämismallia, joita kutsutaan Test Blanket Moduleiksi eli TBM (kuva 30), oikeassa fuusioympäristössä. Näiden testisuojiin sisällä tutkitaan mahdollisia tekniikoita varmistamaan tritiumin syötön omavaraisuutta. /10./

8.3 ITERin tavoitteet

ITERillä on useita tarkoin määriteltyjä tavoitteita, jotka tähtäävät käytännöllisen fuusiovoimalan kehittämiseen. Niistä tärkein tavoite on tuottaa fuusion avulla hetkellisesti kymmenen kertaa enemmän energiaa, kuin mitä järjestelmään syötetään (Q-arvo on tällöin 10).

Seuraavaksi tärkein on sytyttää ns. palava (itseään ylläpitävä) plasma sekä tuottaa vakaata plasmaa, jonka Q-arvo on suurempi kuin 5. Joiden jälkeen pitää fuusiopulssia pitäisi pitää yllä kahdeksan minuutin ajan sekä kehittää fuusiovoimalassa tarvittavia prosesseja ja teknologiaa, joihin kuuluvat mm. venäläisessä T-15:ssä käytetyt suprajohtavat magneetit sekä robottikäyttöiset etähallintajärjestelmät, joita kehitetään Suomessa.

9 FUUSIOVOIMA JA ILMASTONMUUTOS

Fuusiovoiman kehittäminen on edennyt liian hitaasti, jotta sen avulla pystyttäisiin pysäyttämään ilmastonmuutos. Energiankulutus kasvaa lähivuosina voimakkaasti. Maapallon lämpeneminen on niin mittava ongelma, etteivät uudet saasteettomat energiamuodot ehdi vastata ilmastonmuutoksen tuomiin haasteisiin.

Etelä-Ranskan Cadarachen energiatutkimuskeskuksen tutkimusjohtaja Michel Chatelier uskoo, että fuusiovoiman kehittäminen tulee 20 - 30 vuotta liian myöhään, vaikka fuusion mahdollisuuksista on tiedetty vuosikymmeniä. Paineet ydinvoimasta luopumiseen ovat jatkuvasti olemassa, joten Chatelier'n mukaan Euroopan on sitouduttava vahvasti uusien energiamuotojen kehittämiseen. Viime vuosina on voitu osoittaa, että fuusioenergian vapauttaminen hallitusti on mahdollista, ja aika on kypsä harpata pitkä askel kohti fuusioenergian kaupallista tuotantoa.

ITER -kooreaktorin rakennushankkeen oli määrä käynnistyä Ranskassa vuonna 2008, ja fuusiovoiman demonstraatiovoimala saadaan käyttöön 2030-luvulla. Kaupallisen fuusiovoimalan prototyyppi valmistuu 2050-luvulla.

Hankkeen tavoite on osoittaa, että fuusioenergian tuottaminen on toteutettavissa. Fuusion etuina ovat rajattomat polttoainevarannot, turvallisuus ja ympäristöystävällisyys. Rakennuskustannuksiksi arvioidaan lähes 10 miljardia euroa.

Suomalaisilla on hyvät mahdollisuudet osallistua investointiin. Tietä tasoitamaan on aloitettu FinnFusion-teollisuusyhteistyö, jota johtaa satakuntalainen kehittäjäorganisaatio Prizztech Oy. /9./

10 FUUSION HYÖDYT JA HAITAT

Fuusio on parempi energianlähde kuin biomassa, tuulivoima, vesivoima tai aurinkoenergia. Sillä on etuja, kun sitä verrataan tavalliseen ydinvoimalaan tai hiilivoimalaan. Fuusiossa yhdistyvät monet ydinvoiman, polttoaineita polttavien ja luonnosta saatavien, kuten vesivoiman tapaisten energianlähteiden edut. Fuusiovoimala voidaan rakentaa minne tahansa, sen käyttöön saa loppumattomasti polttoainetta, ja se toimii säästä riippumatta.

Fuusion etuna on käytetyn polttoaineen yleisyys ja runsas energiantuotto ainekiloa kohden. Vedyn polttaminen sekä kemiallisesti että ydinreaktiossa on runsaasti energiaa tuottavaa. 1 kilogramma vetyä tuottaa kemiallisesti palamalla 119 megajoulea. 1 kilogramma vetyä fuusioreaktiossa tuottaa yli viisi miljoonaa kertaa enemmän, 600 terajoulea. Kemiallinen palaminen vapauttaa kemiallisen sidoksen energiaa, mutta ydinreaktio atominytimen sisäistä vahvan ydinvoiman sidosenergiaa.

Fuusion käyttö ydinvoiman tuotannossa toisi monia etuja suhteessa nykyisissä voimaloissa käytettyyn fissioreaktioon. Fuusion polttoainetta on luonnossa käytännössä rajattomasti, sillä vety on hyvin yleinen alkuaine. Deuteriumia saadaan merivedestä valtavat määrät, koska joka 5 000:s vetyatomi on deuteriumatomi. Tritiumia saadaan tuotettua litiumista pommittamalla ainetta neutroneilla. Lisäksi fuusion tuotteena syntyvä helium ei ole radioaktiivista tai muutenkaan vaarallista, joten mitään käytetyn polttoaineen sijoitusongelmaa ei synny.

Fuusioreaktori on turvallinen, koska fuusio ei reaktori sammutettuna jatku minuuttia kauemmin. Fuusioreaktiota on helpompi hallita kuin fissiota, koska fuusio vaatii äärimmäiset olosuhteet, tarkoin määritetyn magneettikentän, sekä tarkat lämpötila- ja paineolosuhteet.

Vaikka fuusioreaktorin jäähdyttimeksi ja tritiumin raaka-aineeksi tarkoitettu litium on helposti syttyvää, sitä on reaktorissa kerrallaan vain noin kilon verran. Reaktori saattaa vaurioitua magneetin räjähtäessä, mutta tämä vastaa lähinnä normaalia teollisuusonnettomuutta.

Ei tiedetä, tuleeko fuusiovoimalasta suhteellisen kallis tai halpa rakentaa ja käyttää. Jotkut olettavat fuusion olevan hieman halvempaa kuin toiset energianlähteet. Ja toiset arvelevat fuusion olevan muutaman kerran kalliimpaa.

Aivan täysin ongelmaton fuusioreaktori ei ole. Fuusioreaktorin ennustetaan saastuvan ajan myötä vaarallisen radioaktiiviseksi, koska fuusioreaktori säteilee neutroneja noin 100 kertaa enemmän kuin fissioreaktori.

Arvailujen mukaan fuusioreaktorin radioaktiivisuus kestää muutaman sadan vuoden ajan, joka on kuitenkin melko lyhyt aika verrattuna uraanipohjaisen fissioreaktorin tuottamaan jätteeseen, joka pysyy vaarallisen radioaktiivisena kymmeniätuhansia vuosia. /5./

11 FUUSION TULEVAISUUS

Kansainvälisenä yhteistyönä aiotaan rakentaa ITER-tutkimuslaitos, jolla pyritään saavuttamaan energiantuotannossa pitkään jatkuva positiivinen hyötysuhde. ITER-hanke on kohdannut monia takaiskuja ja koereaktorin paikka on kiistelty, mutta paikaksi on lopulta valittu Ranska. Sen jälkeen rakennetaan DEMO, ensimmäinen kaupallisen fuusioreaktorin prototyyppi. Venäjä on nykyäänkin fuusiotutkimuksen johtavia maita.

Nykyisin näyttää siltä, ettei fuusiovoima tule kaupallisesti kannattavaksi ennen vuotta 2050. Fuusiovoima saattaisi edistää siirtymistä vetytalouteen. Jos fuusiovoimala saadaan toimimaan, ehkä noin muutama kymmenen vuotta sen jälkeen fuusiovoimaloista voitaisiin saada pienikokoisempia ja kevyempiä. Sitten niitä voitaisiin asentaa esim. avaruusaluksille ja ihmiset voisivat päästä tutkimaan avaruutta paremmin.

12 YHTEENVETO

Tämä insinööri työ koski suurelta osin fuusiovoimaa ja fuusiovoimaloiden laitteistoa sekä niiden toimintaa. Ainoa tekijä, joka vaikeutti työn tekoa oli se, että aineistoa ei ollut kirjallisena muutamaa fuusiovoimaa koskevaa artikkelia lukuunottamatta. Suurin osa aineistosta löytyi pelkästään internetistä. Lisäksi tekstit olivat englanniksi, josta ne piti kääntää suomeksi, mikä oli melko haastavaa.

Työstä tuli lopulta selkeä fuusiovoimaa käsittelevä dokumentti, joka täytti päämääriltään hyvin aihealueen. Fuusiota käsittelevästä osiosta selviää, mitä fuusiovoima on ja miten se saavutetaan tulevaisuudessa.

Prosessien kuvauksessa pyrittiin selkeyteen. Fuusiosta tuli myös esille sekä hyödyt että haitat, ja miten tärkeä fuusio on tulevaisuudessa ihmiskunnalle.

Fuusioreaktoreista oli mukana reaktorit, joilla parhaimmat mahdollisuudet saada fuusioreaktio aikaan. On mahdollista, että uusiakin reaktorityyppejä on jo suunnitteilla.

Fuusiovoimalaa koskeva osio työstä tuli hyvin ja selvästi esille. Se antaa selkeän käsityksen siitä, miten fuusiovoimala toimii.

Lopulta kaikista kerätyistä tiedoista saatiin koottua riittävän kattava fuusiovoimaa käsittelevä dokumentti. Kokonaisuudessaan työ onnistui hyvin ja siitä saa selkeän ja kattavan kuvan fuusiovoimasta.

Näiden tietojen perusteella voi sanoa, että nykyisin fuusiovoima on vielä lapsenkengissä. Uusien kehitettävien menetelmien avulla, fuusiovoima voidaan saada kaupalliseen käyttöön aikaisintaan vuonna 2050.

LÄHTEET

- [1] Wikipedia. *Fuusioreaktori* [verkkodokumentti, viitattu 6.1.2009]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Fuusioreaktori>
- [2] Euroopan komissio. *Fuusiotutkimus* [verkkodokumentti, viitattu 7.8.2009]. Saatavissa: http://www.fusion-eur.org/booklet/booklet_fi.pdf
- [3] Frederiksen, Dan. *Fuusioreaktori myötätuulessa. Tieteen Kuvalehti* Nro. 5/2005
- [4] Finpro. *Fuusio ja ITER* [verkkodokumentti, viitattu 18.5.2009]. Saatavissa: <http://www.finpro.fi/fi-FI/Business/Programs/Tieteen+suurhankkeet/Fuusio+ja+ITER.htm>
- [5] Wikipedia. *Fuusiovoima* [verkkodokumentti, viitattu 6.3.2009]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Fuusiovoima>.
- [6] Energiaverkko. *Fuusioenergia* [verkkodokumentti, viitattu 18.5.2009]. Saatavissa: http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/energiaverkko/energian_tuotanto/fuusioenergia.htm
- [7] Wikipedia. *Kylmäfuusio* [verkkodokumentti, viitattu 25.5.2009]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Kylmäfuusio>
- [8] Wikipedia. *ITER –fuusioreaktori* [verkkodokumentti, viitattu 30. 1.2009]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/ITER>.
- [9] Kainulainen, Tuomas. *Fuusiovoima ei ratkaise ilmasto-ongelmaa. Turun Sanomat* 7.11.2005.
- [10] ITER. *ITER* [verkkodokumentti, viitattu 16. 8.2009]. Saatavissa: <http://www.iter.org/mach/Pages/Tokamak.aspx>
- [11] Wikipedia. *Gyrotron* [verkkodokumentti, viitattu 16.8.2009]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Gyrotron>