

Ydinreaktiot energiantuotannossa

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Sannimari Kokkinen
Tarkastaja:
Prof. P. Paturi

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Kokkinen, Sannimari Ydinreaktiot energiantuotannossa

LuK-tutkielma, 16 s., 3 liites.

Fysiikka

Maaliskuu 2025

Tässä tutkielmassa käsitellään yleisesti ydinvoimaa energianlähteenä, ja syvennytään fissio- ja fuusioreaktioiden toimintaan. Aluksi esitellään reaktioiden toimintaperiaatteet, sekä niiden erilaisia toteutustapoja energiantuotannossa. Tutkielmassa syvennytään myös fuusioaktoreissa vaadittavan magneettisen koossapidon menetelmiin.

Lopuksi tutkielmassa käsitellään ydinvoiman ympäristövaikutuksia. Fissio- ja fuusioenergiaa vertaillaan muihin uusiutuviin energiamuotoihin, sekä pohditaan tulevaisuuden näkökulmia. Tutkielmassa käydään läpi myös ydinjätteeseen liittyviä ongelmia ja ydinjätteen loppusijoitusratkaisua.

Asiasanat: ydinreaktiot, ydinvoima, ydinenergia, fissio, fuusio

Sisällys

Johdanto	1
1 Atomin ydin	2
2 Fissioreaktio	2
2.1 Energia fissiossa	3
2.2 Fissioreaktorit	3
3 Fuusioreaktio	4
3.1 Energia fuusiossa	5
3.1.1 Lawsonin kriteeri	5
3.2 Plasman magneettinen koossapito	7
3.3 Fuusioreaktorit	7
4 Ydinvoima ja ympäristö	11
4.1 Ydinreaktiot ja uusiutuva energia	11
4.2 Ydinjäte	12
5 Yhteenveto	15

Johdanto

Ydinreaktioiden tutkimus räjähti nousuun 1930-luvun loppupuolella, kun toisen maailmansodan vuoksi valtiot kiinnostuivat fissioreaktion tuhoavista mahdollisuuksista. Vuonna 1942 maailman ensimmäisessä ydinreaktorissa Chicago Pile-1:ssä saatiin toimimaan fission ketjureaktio, mikä tarkoitti fissioenergian mahdollistumista. Fissiovoimaloita on ollut käytössä siis jo 1950-luvulta lähtien. [1]

Fuusioreaktioita alettiin tutkimaan ensimmäisen kerran jo 1930-luvulla Cambridgen yliopistossa. Vuonna 1932 Mark Oliphant onnistui ensimmäisen kerran toteuttamaan vedyn isotooppien fuusioreaktion. Vuonna 1951 Thomas Lawson toteutti ensimmäisen onnistuneen fuusiokokeen laboratoriossa. Fuusioenergian tutkimus lähti nousuun, ja vuonna 1983 the Joint European Torus (lyh. JET) onnistui tuottamaan ulos fuusioreaktion avulla enemmän energiaa, kuin mitä reaktorin plasman koossapitoon vaadittiin. Vielä fuusiovoimaloista ei kuitenkaan ole saatu kaupallisesti kannattavia energiantuotannon kannalta. [2]

Ihmiskunta nojaa tällä hetkellä voimakkaasti energiantuotannossa uusiutumattomiin fossiilisiin polttoaineisiin, sekä ympäristöstä riippuviin uusiutuviin energiamuotoihin, kuten tuuli-, vesi- ja aurinkovoimaan. Ilmaston lämpenemisen kiihtyessä on fossiilisista polttoaineista päästävä eroon, ja siirryttävä kohti uusiutuvaa energiantuotantoa. Ydinvoimassa voisi olla tähän ratkaisu.

Tämän tutkielman tekemisessä ei ole käytetty tekoälyä.

1 Atomin ydin

Atomiydin eli nuklidi koostuu positiivisesti varautuneista protoneista ja varauksettomista neutroneista [3]. Vetyä raskaammilla alkuaineilla on ytimessään vähintään kaksi protonia. Protonien samanmerkkiset varaukset hylkivät toisiaan voimakkaasti, eli vaaditaan suuri voima pitämään ydin koossa. Tätä voimaa kutsutaan vahvaksi vuorovaikutukseksi. [1]

Ydinreaktioksi kutsutaan reaktiota, jossa atomiydin joko hajoaa tai yhdistyy yhdeksi tai useammaksi uudeksi atomiksi. Tyypillinen ydinreaktio kirjoitetaan

$$a + X \rightarrow Y + b, \quad (1)$$

missä a on kiihdytetty partikkeli (esimerkiksi neutroni), X on kohde johon partikkeli osuu (esimerkiksi vedyn isotooppi), Y on reaktiossa syntynyt uusi (tai useampi) alkuaine, sekä b on reaktiossa vapautunut partikkeli. Reaktiossa vapautuva energia määräytyy Albert Einsteinin alunperin määrittelemän massan ja energian ekvivalenssin, eli

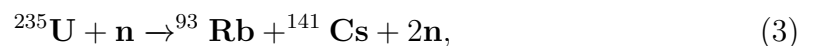
$$E = mc^2 \quad (2)$$

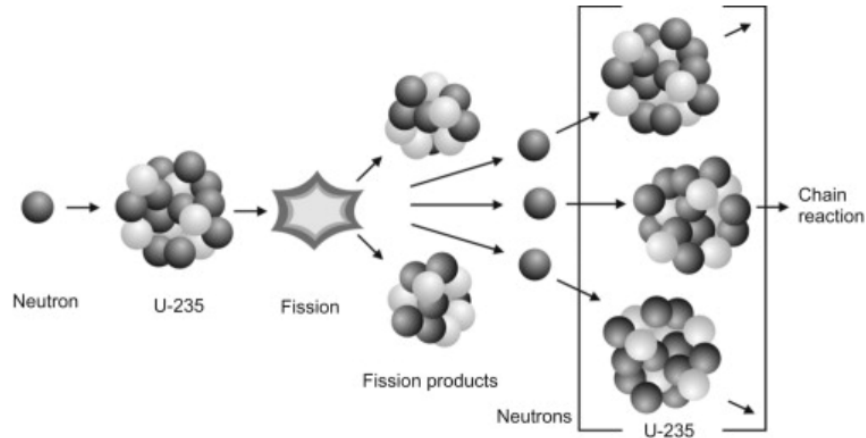
mukaan, missä m on massavaie ja c valonnopeus. [3]

2 Fissioreaktio

Fissioreaktioksi kutsutaan ydinreaktiota, jossa raskas atomiydin (kuten esimerkiksi uraani) hajoaa kahdeksi tai useammaksi kevyemmäksi atomiksi. Atomi hajoaa, kun sitä pommitetaan neutroneilla [2]. Tällä hetkellä energiantuotannossa käytettävä ydinvoima perustuu juurikin fissioreaktioon.

Kuvassa 1 havainnollistetaan tyypillistä ^{235}U isotoopin hajoamista fissioreaktiossa ja siitä mahdollistuvaa ketjureaktiota. Reaktioyhtälö tällaiselle fissioreaktiolle on





Kuva 1. ^{235}U isotoopin fissioreaktio. Fissionituotteina (eng. fission products) syntyy rubidiumia ja cesiumia, sekä neutroneita, jotka voidaan ohjata osumaan uusiin ^{235}U isotooppeihin. [1]

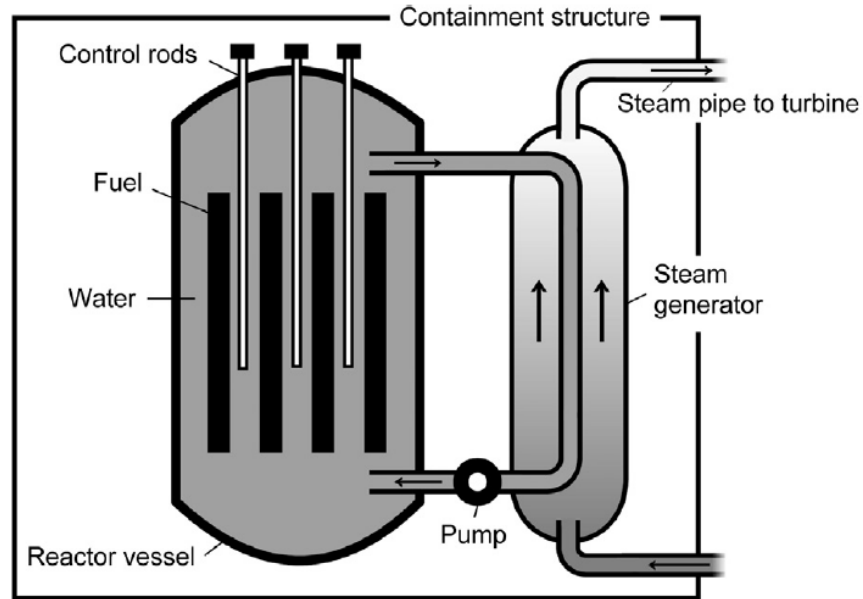
jossa uraanin isotooppi ^{235}U hajoaa rubidiumin ^{93}Rb isotoopiksi ja cesiumin ^{141}Cs isotoopiksi. Lisäksi reaktiossa vapautuu kaksi neutronia [3]. Fissioreaktiossa vapautuvia neutroneja voidaan käyttää taas uuteen fissioreaktioon. Tällaisen ketjureaktion vuoksi fissioreaktiosta saadaan itseään ylläpitävä [1].

2.1 Energia fissiossa

Fissiossa käytetyssä polttoaineessa on korkea energiatiheys. Kun atomi hajoaa, hajoaa myös sen ytimen koossa pitänyt vahva vuorovaikutus, mikä vapauttaa suuria määriä energiaa [1]. Raskaan uraanin ytimen sidosenergia on n. 7,5 MeV per nukleoni [3]. $E = mc^2$ mukaan kilo raskasta urania voi siis tuottaa fissiossa jopa $20 \cdot 10^{12}$ J energiaa.

2.2 Fissioreaktorit

Kun atomi hajoaa fissioreaktiossa kevyemmäksi atomiksi siihen pommitetun neutronin vaikutuksesta, vapautuu suuria määriä kineettistä energiaa. Fissioreaktoreissa tätä kineettistä energiaa käytetään lämmittämään ympäröivää vettä. Kuumen-

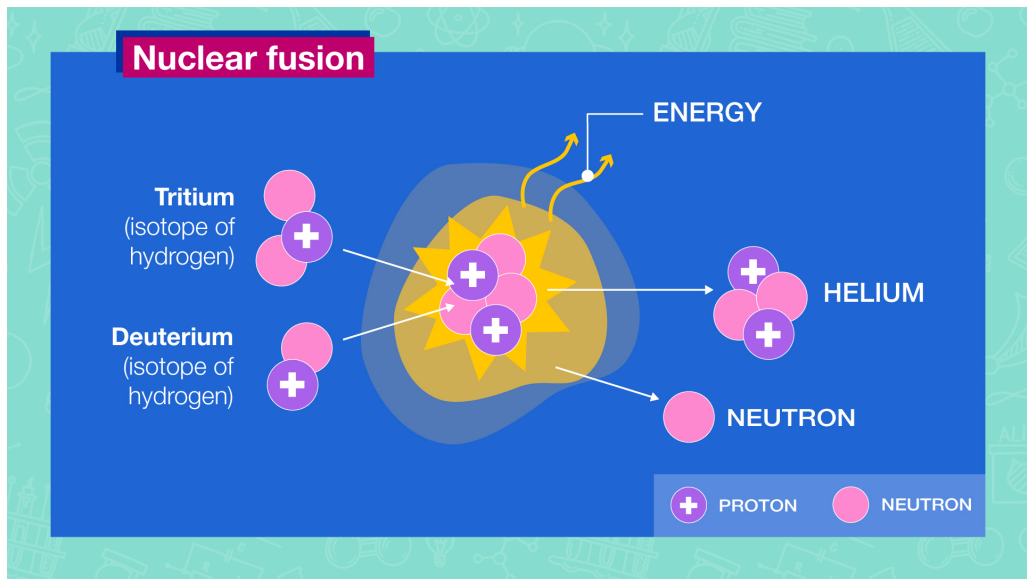


Kuva 2. Tyypillisen vesijäähdytteisen fissioreaktorin rakenne. Vesi ympäröi polttoainekapselit, joissa fissioreaktio tapahtuu. Säätosauvoja (eng. control rods), jotka on valmistettu neutroneja hyvin absorboivasta materiaalista, käytetään fissioreaktioiden hallitsemiseen ja erityisesti reaktion hallittuun pysäyttämiseen. [1]

tuessaan vesi höyrystyy ja höyry pyörittää turbiinia, jossa generaattori muuntaa liike-energian sähköenergiaksi. [2] Kuvassa 2 on esitetty tällaisen vesijäähdytteisen fissioreaktorin rakenne.

3 Fuusioreaktio

Fuusioreaktiossa kaksi atomiydintä yhdistyvät yhdeksi raskaammaksi ytimeksi. Kyseessä on sama ilmiö, kuin mistä Aurinko ja muut tähdet saavat energiansa. Tarpeeksi korkeassa paineessa vetyatomit fuusioituvat heliumiksi. Näin suurta painetta ei pystytä maassa luomaan, mutta fuusioreaktio voidaan saada aikaan käyttämällä vedyn isotooppeja. Maassa fuusiossa käytetäänkin siis vedyn isotooppeja deuteriumia ja tritiumia, joiden ytimissä on enemmän neutroneja, kuin tavallisessa vetyatomissa. [2] Kuvassa 3 havainnollistetaan tritiumin ja deuteriumin fuusioreaktiota, jossa isotoopit fuusioituvat heliumiksi ja vapaaksi neutroniksi.



Kuva 3. Tritiumin ja deuteriumin fuusioreaktio. [4]

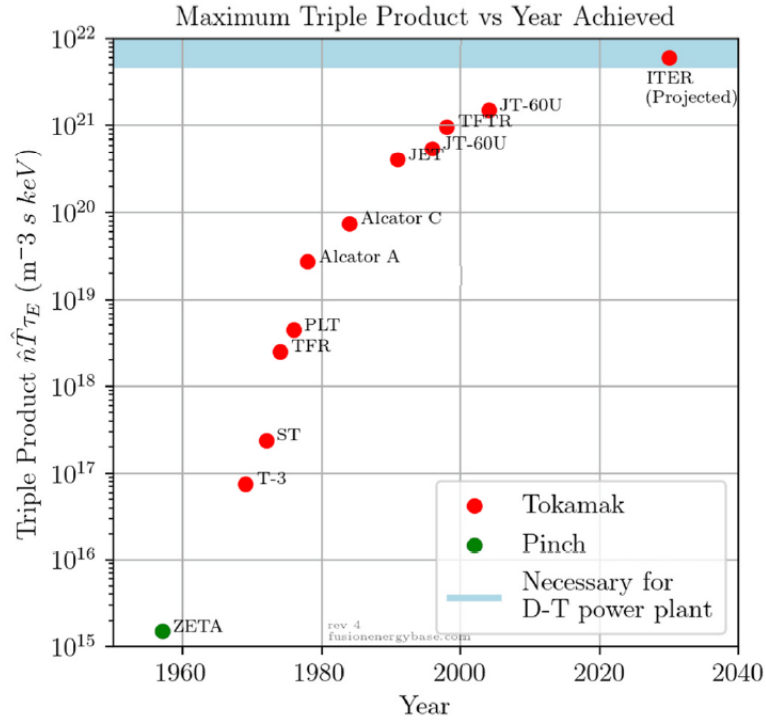
3.1 Energia fuusiossa

Fuusioreaktio vaatii korkean lämpötilan, tietyn hiukkastiheyden ja riittävän energiansitomisaajan (eng. energy constraint time) [5]. Polttoaine deuteriumia saadaan esimerkiksi rikastamalla vettä Girdler-Sulfide -prosessin avulla [2]. Tritiumia puolestaan saadaan raskasvesihidasteisista ydinreaktoreista, joissa tritiumia syntyy kun raskasta vettä, eli dideuteriumoksidia, käytetään jäähdyttimenä. Tritiumia voidaan saada myös fuusioreaktoreissa jalostamalla. Kun fuusioreaktiossa vapautuneet neutronit reagoivat reaktorikuoren sisällä olevan litium-6 isotoopin kanssa, syntyy heliumia ja tritiumia. Molemmat polttoaineet ovat siis maassa helposti saavutettavissa. [2]

$E = mc^2$:n mukaan kilo vetyä voi tuottaa fuusiossa jopa $7,5 \cdot 10^{14}$ J energiaa. Tämä määrä varmistaisi energiansaannin maapallolla jopa 10000 vuodeksi. [2]

3.1.1 Lawsonin kriteeri

Lawsonin kriteerillä tarkoitetaan ehtoa hyötysuhteeltaan tuottavimmalle fuusiosysteemille. Vuonna 1955 J. D. Lawson esitti, että fuusiosta saadun energian määrä



Kuva 4. Saavutettu fuusiokolmitulon arvo eri vuosina eri projekteissa. [2]

oikeissa olosuhteissa on lämpötilan T , polttoaineen ionien tiheyden n ja energian koossapitoajan (eng. energy confinement time) τ_E funktio. Tuloa $nT\tau_E$ kutsutaan Lawsonin parametriksi. Kun lämpötila ja Lawsonin parametri saavuttavat vaaditun arvon, plasma pitää itseään yllä ilman ulkoista lämmitystä. Tällöin plasman sanotaan saavuttaneen leimahdustilan (eng. ignition). Leimahdustilaa ei vaadita fuusioenergian tuotantoon, mutta tällöin fuusioreaktio on tuottavimmillaan. [6]

Fuusioreaktioon vaaditaan tietyt olosuhteet. Lawsonin kriteeri on ajan myötä muotoutunut erilaisiksi funktioiksi, joita käytetään kuvaamaan fuusion toimintaa. Yksi näistä on Lawsonin parametrin ja lämpötilan tulo, eli fuusiokolmitulo $nT\tau_E$ [6]. Mitä suurempi on fuusiokolmitulon arvo, sitä tehokkaammasta fuusioreaktiosta on kyse [2]. Kuvassa 4 on esitetty saavutettujen fuusiokolmitulojen arvoja vuosien kuluessa.

3.2 Plasman magneettinen koossapito

Plasma on aineen olomuoto, jossa aineen atomeista tietty osa on ionisoitunut. Plasmassa negatiivisesti varautuneet elektronit ja positiivisesti varautuneet ionit liikkuvat vapaasti lämpötilan ollessa riittävän korkea. Elektronien ja ionien välillä vaikuttaa niiden varauksista aiheutuva vahva, toisiaan hylkivä Coulombin voima. [7]

Fuusioreaktoreissa plasma on pidettävä koossa ja paikoillaan, koska kontakti reaktorin seinän kanssa aiheuttaisi plasman lämpötilan laskun. Coulombin voiman on siis kumouduttava reaktorissa, sillä plasman lämpötilan laskiessa fuusioreaktio pysähtyy [5]. Fuusioreaktoreissa toimivaksi ratkaisuksi plasman hallintaan on osoittautunut suprajohdeiden käyttö. Suprajohdeiden avulla pystytään luomaan magneettikenttä, joka pitää plasman koossa ja erossa reaktorin seinästä [2].

Magneettisen koossapidon menetelmiä on kahdenlaisia: avoimia ja suljettuja menetelmiä. Avoimessa koossapidossa useimmiten käytetään peräkkäisiä käämejä luomaan solenoidinen magneettikenttä. Magneettikenttä on voimakkaampi solenoidin kummassakin päässä, kuin sen keskiosissa. Tämän ansiosta suuri osa plasman varatuista ioneista ja elektroneista vaihtavat suuntaa solenoidin päädyissä, ja partikkelien liike saadaan rajattua solenoidin alueelle. Tällaista menetelmää plasman koossapitoon kutsutaan tämän ominaisuuden vuoksi "magneettiseksi peiliksi". [7]

Suljetussa koossapidossa toroidin muotoinen magneettikenttä ympäröi koko plasmaa. Tällöin plasman varatut partikkelit liikkuvat vapaasti ympäröivän magneettikentän sisässä. Lisäksi tarvitaan poloidinen (eng. poloidal) magneettikenttä, jonka ansiosta magneettikenttä kiertyy plasman ympärillä. Näin plasman partikkelit eivät pääse ajautumaan ulos magneettikentästä. [7]

3.3 Fuusioreaktorit

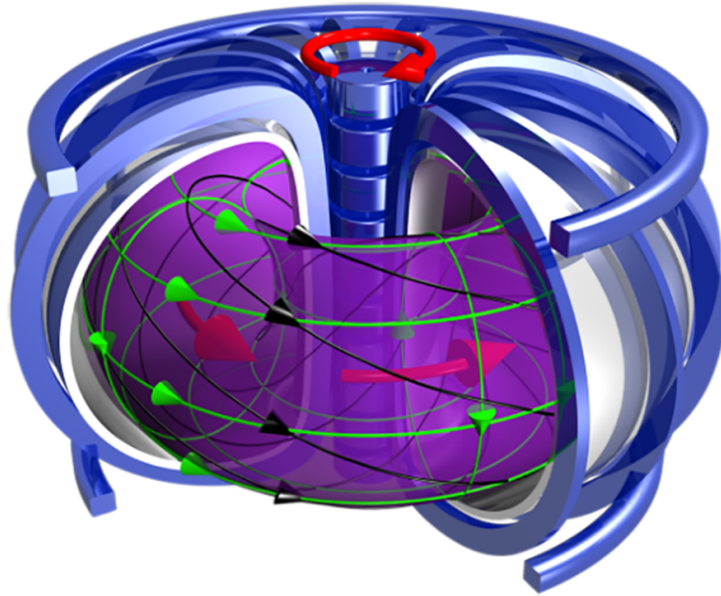
Fuusioreaktorissa tritiumia ja deuteriumia lämmitetään tyhjiössä noin 150 miljoonaa kelviniin muuttuvan magneettikentän avulla. Lämmityksen tavoitteena on luo-

da plasmaa, joka pidetään koossa magneettikentän avulla. Vedyn isotoopit fuusioituvat heliumiksi ja vapaiksi neutroneiksi, ja tämä reaktio vapauttaa kineettistä energiaa. Magneettikenttä ei vaikuta varauksettomiin neutroneihin, joten ne törmäävät reaktorin kuoreen. Neutronien kineettinen energia muuntuu lämpöenergiaksi, jolla lämmitetään vettä. Vesi saadaan täten höyrystymään ja pyörittämään turbiinia, joka tuottaa puolestaan sähköä, kuten fissioreaktoreissakin. [2]

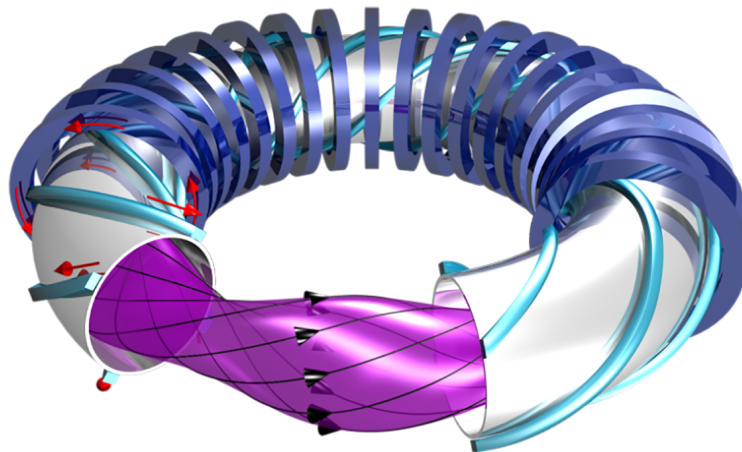
Tokamak-tyyppinen reaktori on donitsinmuotoinen magneettiseen koossapitoon perustuva laite, jossa käytetään vahvaa magneettikenttää pitämään vetyisotooppien muodostamaa plasmaa kasassa ja laitteen sisässä. Tokamak-reaktorin toimintaperiaatetta havainnollistetaan kuvassa 5. Yksi lupaavimmista fuusioreaktoriprojekteista on tällä hetkellä tokamak-mallinen ITER (the International Thermonuclear Experimental Reactor) [2]. ITER käyttää matalan lämpötilan suprajohteita (LTS, low-temperature superconductor) plasman magneettiseen koossapitoon. Tokamakeissa käytetään suljetun koossapidon menetelmää, eli magneettien avulla saadaan muodostettua toroidin muotoinen magneettikenttä, joka pitää plasman koossa [7]. Tokamak-tyyppin reaktoreissa voidaan myös käyttää korkean lämpötilan suprajohteita (HTS, high-temperature superconductor) plasman koossapitoon [8]. Tokamakia pidetään tällä hetkellä lupaavimpana reaktortyyppinä [9].

Stellaraattori-reaktoreissa käytetään kierrettyjä magneettikenttiä (eng. twisted magnetic fields) pitämään plasmaa paikoillaan ja kasassa. Stellaraattorin toiminta perustuu samaan ilmiöön kuin tokamak-reaktorien, mutta plasman hallintaan käytetty magneettikenttä on erilainen. [2] Stellaraattori-reaktorin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6.

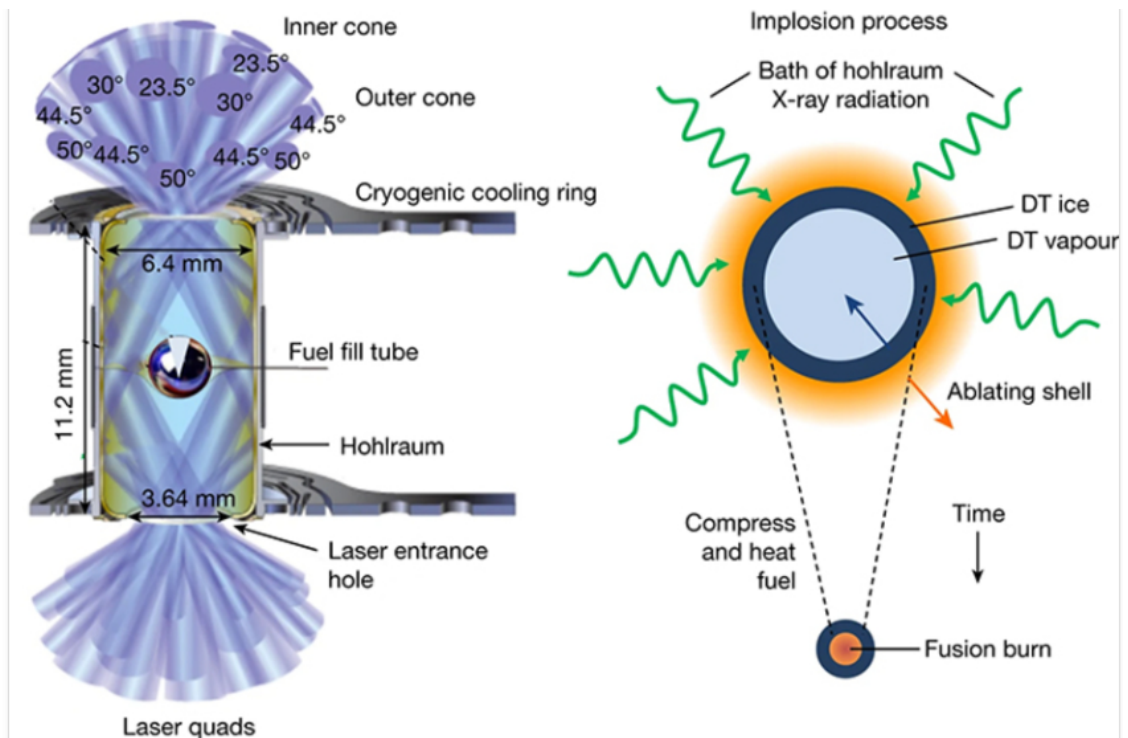
Laserfuusiossa (myös nimellä inertiaalinen koossapito) käytetään voimakkaita lasereita puristamaan ja lämmittämään fuusiopolttoainetta, joka on usein sekoitus tritiumia ja deuteriumia. Lämmitys tapahtuu ääriolosuhteissa, joissa fuusioreaktio mahdollistuu. [2] Laserfuusioreaktorin toimintaperiaate ja rakenne on esitetty ku-



Kuva 5. Tokamak-reaktorin toimintaperiaate. Plasman (violetilla) sisällä kulkee sähkövirta, joka luo magneettikentän (vihreällä). [10]



Kuva 6. Stellaraattori-reaktorin toimintaperiaate. Stellaraattorin sisällä on plasmaa (violetilla), joka pysyy kasassa kierrettyjen magneettikenttien avulla (mustalla). [10]



Kuva 7. Laserfuusioreaktorin toimintaperiaate. Hohltraum ja lasersäteet kuvattu vasemmalla, ja oikealla kohdekapselin rakenne. Kohdekapselissa osa polttoaineesta on kiinteässä ja osa kaasumaisessa muodossa. [11]

vassa 7. Laserfuusioreaktorissa lasersäteet ohjataan sylinteriin, jota kutsutaan hohltraumiksi. Hohltraumin sisässä oleva kohdekapseli (eng. target capsule) on täytetty deuterium-tritium polttoaineella. Laserit saavat hohltraumissa aikaan röntgensäteilyä, joka kasvattaa kapselin lämpötilaa ja painetta niin, että polttoaineessa voi tapahtua fuusioreaktio. [11]

Myös konseptia ydinreaktorien hybridimalleista on kehitetty ja tutkittu. Näissä reaktortyypeissä pyritään hyödyntämään energiantuotantoon niin fissio-, kuin fuusioreaktioitakin. Hyötypuolena fission ja fuusion yhdistämisessä olisi fissiosta syntyvän ydinjätteen mahdollinen polttaminen fuusiosta vapautuvien neutronien avulla. Tällaiset reaktortyytit ovat kuitenkin hyvin monimutkaisia, ja niiden kehittäminen on jäänyt vaadittavan teknologian haasteiden vuoksi vähemmälle. [2]

4 Ydinvoima ja ympäristö

Vuosi 2024 oli ensimmäinen vuosi maailman historiassa, jolloin maapallon keskilämpötila pysyi kokonaisen vuoden 1,5 celsiusastetta korkeamana kuin esiteollisena aikana. Vuosi 2024 oli täten siis maailman historian lämpimin vuosi. [12]

Aurinko-, tuuli- ja vesivoiman, sekä bioenergian ja geotermisen energian lisäksi myös ydinvoimaa on esitetty mahdolliseksi ratkaisuksi maailmanlaajuiseen energiakriisiin. Ympäristönäkökulmasta ydinvoimassa onkin monia etuja, mutta myös ongelmia ratkaistavaksi. [2]

4.1 Ydinreaktiot ja uusiutuva energia

Energiantuotannon kannalta fuusioenergia on paljon tehokkaampaa kuin fissioenergia. Keskikokoinen fissioenergiaan perustuva ydinvoimala voi tuottaa energiaa noin 1400 MJ/s. Fuusiovoimaloiden arviodaan tuottavan jopa 1 TJ/s tämän vuosisadan loppuun mennessä. Tällä hetkellä ITER:n alaisen DEMO -projektin reaktorin odotetaan tuottavan sähköverkkoon noin 300 — 500 MJ/s. Todennäköisesti fuusioreaktorit eivät vielä lähiaikoina korvaa fissioreaktoreita energiantuotannossa, mutta ennuste on, että fuusioenergia saataisiin toimimaan kaupallisesti kannattavasti vuoteen 2050 mennessä. [2]

Muut uusiutuvat energiamuodot ovat toki parempi vaihtoehto fossiilisille polttoaineille, mutta niilläkin on oma vaikutuksensa ympäristöön. Esimerkiksi aurinkoenergian ongelmakohdaksi on noussut aurinkopaneelien valmistuksen hiilijalanjälki, ja niiden kierättämisen rajoitteet. Tuulivoimalat puolestaan vaativat paljon tilaa luonnosta ja niiden asentaminen aiheuttaa äänisaastetta. Nämä seikat edistävät biodiversiteettikatoa. Yhden nykyteknologiaan perustuvan tuulimyllyn käyttöikä on suunnilleen 20 vuotta, ja se voi tuottaa sähköverkkoon noin 5 MJ/s. Tämän perusteella siis yksi fissiovoimala, tai samalla tehokkuudella toimiva fuusiovoimala voisi korvata 280 tuulimyllyä. [2]

Fissioenergia uusiutuvana energianlähteenä on väitely sen polttoaineen uraanin korkean radioaktiivisuuden vuoksi. Lisäksi esimerkiksi uraanin jalostaminen käyttökelpoiseksi fissioreaktorin polttoaineeksi voi vaatia suuria määriä energiaa, joka tällä hetkellä usein saadaan fossiilisista polttoaineista [13]. Fissioenergia kuitenkin luokitellaan EU:ssa uusiutuvaksi energiamuodoksi, ja siitä ulos saatu määrä energiaa on muihin uusiutuviin energiamuotoihin verrattuna suuri [2].

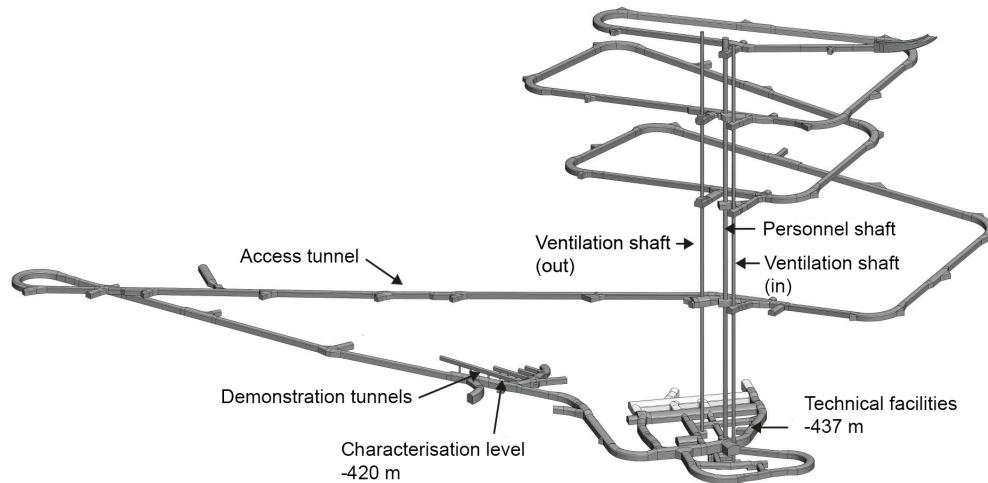
Fuusioenergian kehitykseen käytetään tällä hetkellä paljon aikaa ja resursseja, sillä sen toivotaan lopulta korvaavan energiantuotannossa niin fossiiliset polttoaineet, kuin muut uusiutuvat energiamuodotkin. 2020-luvun loppupuoli on luultavasti kriittinen aika fuusioenergian kehitykselle, ja ensimmäiset kaupalliset fuusioreaktorit voisivat mahdollisesti olla toiminnassa jo ennen arvioitua vuotta 2055. [2]

Fuusiovoimaloiden etu on myös se, että onnettomuuden sattuessa reaktorissa ei synny räjähdystä. Tämä johtuu siitä, että plasman koossapitoon vaaditaan niin korkea lämpötila. Täten esimerkiksi magneettikentän romahtaessa fuusioreaktio vain pysähtyy lämpötilan laskiessa. Onnettomuudessa ei siis synny vaaraa ympäristölle tai ihmisille, kuten esimerkiksi Tsernobylin fissiovoimalan onnettomuudessa 1986. [2]

4.2 Ydinjäte

Yksi suurimpia ongelmia fissioenergiassa on siitä syntyvä ydinjäte, ja reaktiossa käytetyn polttoaineen radioaktiivisuus. Fissiovoimassa käytetyn uraanin isotoopin ^{235}U sekä plutoniumin isotoopin ^{239}Pu puoliintumisaika on jopa 24000 vuotta. Pitkän puoliintumisaajan sekä korkean radioaktiivisuuden vuoksi fissiovoimaloissa syntyvää ydinjätettä on siis varastoitava turvalliseen paikkaan jopa tuhansiksi vuosiksi, ettei säteily pääse ilmakehään. Tällä hetkellä toimivin ratkaisu ydinjätteen varastointiin on kaivaa jäte syvälle kalliioon, joka estää säteilyn pääsyn ilmakehään. [2]

Toistaiseksi maailman ainoa ydinjätteen lopullinen varastointipaikka Onkalo si-



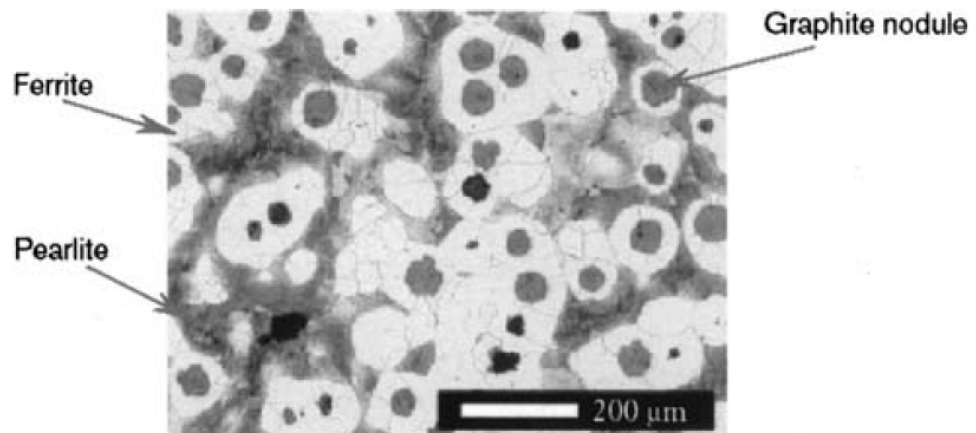
Kuva 8. Onkalon tämänhetkiset maanalaiset tilat. Demonstraatiotunneleissa on jokaisessa 30-40 lopullista hävitysaukkoa (final disposal deposition hole), joihin betonin sisään valettu ydinjäte tullaan sijoittamaan. [16]

jaitsee Suomessa Olkiluodon ydinvoimala-alueella Eurajoella. Onkalo on vasta rakenteilla, mutta sen arvioidaan valmistuvan käyttöön 2020-luvun puolivälissä [14]. Kuvassa 8 on esitetty Onkalon tämänhetkiset maanalaiset tilat. Loppusijoitusvaiheessa korkean radioaktiivisuuden ydinjätettä sijoitetaan kuparista ja pallografiittivaluraudasta valmistetuissa kapseleissa satojen metrien syvyyteen [15]. Kuvassa 9 on esitetty loppusijoituskapselin rakenne, ja kuvassa 10 pallografiittivaluraudan mikrokooppinen rakenne. Arviolta noin vuosisadan jälkeen loppusijoitustunnelit täytetään maa-aineksella ja sementillä, jolloin ydinjätteen on tarkoitus jäädä lopullisesti ja turvallisesti maan alle [14].

Fuusioon perustuva ydinvoima ei tuota lainkaan korkean radioaktiivisuuden ydinjätettä. Fuusiossa käytettävä tritium ^3H säteilee ainoastaan beetasäteilyä, jonka eteneminen on helposti estettävissä esimerkiksi alumiinilevyjen avulla. Ydinjätettä syntyy siis myös fuusioreaktiossa, mutta tämä ydinjäte ei ole korkeasti radioaktiivista, ja sen puoliintumisaika on paljon lyhyempi. Fuusiosta syntyvä ydinjäte menettää radioaktiivisuutensa vuosisadan sisällä, toisin kuin fissiosta syntyvä jäte. [2]



Kuva 9. Onkalossa käytettävän loppusijoituskapselin rakenne. Kapselin ulkokuori on valmistettu kuparista, ja sisäosa pallografiittivaluraudasta. [17]



Kuva 10. Pallografiittivaluraudan mikroskooppinen rakenne, jossa näkyvissä grafiitin pallomuodostumat, sekä ferriitti- ja perliittialueet. Pallografiittivalurauta kestää grafiitin pallomaisen muodon vuoksi hyvin painetta, joka loppusijoitustiloissa maan alla on hyvin suuri. [18]

5 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa käytiin läpi fissio- ja fuusioreaktion toimintaperiaatteita, sekä niiden käyttötapoja energiantuotannossa. Fissioreaktoreita on jo käytössä energiantuotannossa ympäri maailmaa, mutta tarpeeksi tehokkaiden fuusiovoimaloiden kehitys on vielä kesken. Tutkielmassa syvennyttiin lopuksi myös ydinvoiman ympäristövaikutuksiin, sekä vertailtiin ydinvoimaa muihin uusiutuviin energiamuotoihin.

Maapallon keskilämpötilan noustessa tarvitsemme kiireesti uusiutuvia ja kestäviä vaihtoehtoja fossiilisille polttoaineille. Ydinvoimaa on pohdittu ratkaisuksi maailmanlaajuiseen energiakriisiin, mutta siinäkin on omat haasteensa. Fissioenergian tapauksessa huolenaiheeksi nousee erityisesti kysymys korkeasti radioaktiivisen ydinjätteen loppukäsittelystä ja -sijoituksesta. Lisäksi fissiovoimaloiden onnettomuusrisikki on suurempi, sekä mahdollisen onnettomuuden vaikutukset vakavat. Fissioon perustuva ydinvoima ei kuitenkaan muuten aiheuta paljoa kasvihuonekaasupäästöjä, mikä on tietysti parempi vaihtoehto fossiilisille polttoaineille.

Fuusioenergiassa puolestaan on hyvinkin paljon potentiaalia korvaamaan tulevaisuudessa niin fossiiliset polttoaineet, kuin myös muut uusiutuvat energiamuodotkin. Fuusioenergiaan käytettäviä polttoaineita, tritiumia ja deuteriumia, on helposti saatavilla. Fuusioenergia ei myöskään tuota lainkaan korkean radioaktiivisuuden ydinjätettä. Jos fuusioenergia saadaan toimimaan kannattavasti, energiansaantimme olisi käytännössä loputonta. Tämä ratkaisisi maapallolla vallitsevan energiakriisin, joka puolestaan hidastaisi ilmaston lämpenemistä. Fuusioenergian haasteena on valitettavasti siihen vaadittavien olosuhteiden monimutkaisuus. Fuusioreaktorin toimintaan vaadittavat olosuhteet on haastavaa saavuttaa ja erityisesti pitää yllä, ja tutkimuksen edistäminen vaatii suuria rahamääriä. Fuusioenergian tulevaisuus vaikuttaa onneksi valoisalta: ensimmäisten kaupallisten fuusiovoimaloiden arvioidaan valmistuvan käyttöön jo 2050-luvun aikana [2].

Viitteet

- [1] M. Gill, F. Livens ja A. Peakman, kirjassa *Future Energy (Second Edition)*, second edition ed., toimittanut T. M. Letcher (ElsevierBoston, 2014), pp. 181–198.
- [2] E. R. Sadik-Zada, A. Gatto ja Y. Weißnicht, *Energy* **290**, 129 (2024).
- [3] K. S. Krane ja D. Halliday, *Introductory nuclear physics* (WileyNew York, 1987).
- [4] M. Barbarino, What is Nuclear Fusion?, <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion>, 2024.
- [5] Z. Wang, *Procedia Computer Science* **228**, 163 (2023).
- [6] S. E. Wurzel ja S. C. Hsu, *Physics of Plasmas* **29**, 062103 (2022).
- [7] L. R. Grisham, *Future Energy* (Elsevier, 2014), pp. 199–211.
- [8] E. Nasr, S. C. Wimbush, P. Noonan, P. Harris, R. Gowland ja A. Petrov, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **382**, 20230407 (2024).
- [9] S. Meschini, F. Laviano, F. Ledda, D. Pettinari, R. Testoni, D. Torsello ja B. Panella, *Frontiers in Energy Research* **11**, 1157394 (2023).
- [10] W. Picot, Magnetic Fusion Confinement with Tokamaks and Stellarators, <https://www.iaea.org/bulletin/magnetic-fusion-confinement-with-tokamaks-and-stellarators>, 2021.
- [11] A. B. e. a. Zylstra, *Nature* **601**, 542 (2022).
- [12] N. Lopez, Copernicus: 2024 is the first year to exceed 1.5°C above pre-industrial level, <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level>: :text=2024
- [13] D. A. Vallerio, *Future Energy* (Elsevier, 2014), pp. 551–581.
- [14] T. J. Foley, *Energy Research & Social Science* **72**, 101867 (2021).
- [15] Posiva Oy, Loppusijoituskapseli, <https://www.posiva.fi/loppusijoitusratkaisu/vapautumisesteet/loppusijoituskapseli.html>, 2020.
- [16] Posiva Oy, Introducing ONKALO and its principle of operation, <https://www.posiva.fi/en/index/news/pressreleasesstockexchangereleases/2024/thisisonkaloandthisishowitworks.html>, 2024.
- [17] Posiva Oy, Tunnelin täyttö ja tulppa, <https://www.posiva.fi/loppusijoitusratkaisu/vapautumisesteet/tunnelintayttojatulppa.html>, 2020.
- [18] P. Minnebo, K.-F. Nilsson ja D. Blagoeva, *Journal of Materials Engineering and Performance* **16**, 35 (2007).