

Korkean lämpötilan suprajohtemagneetit

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Jade Junkkari
Tarkastaja:
Prof. Petriina Paturi

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Junkkari, Jade Korkean lämpötilan suprajohtodemagneetit

LuK-tutkielma, 18 s., 3 liites.

Fysiikka

Marraskuu 2025

Tutkielmassa tutustutaan suprajohtavuuteen, jonka pohjalta syvennyttään suprajohtodemagneettien toimintaan ja sovelluksiin. Tärkein painotus tutkielmassa on korkean lämpötilan suprajohtodemagneeteissa. Lisäksi vertaillaan korkean ja matalan lämpötilan suprajohtodemagneetteja toisiinsa. Nämä eroavaisuudet liittyvät pääosin niiden hyötyihin erilaisissa sovelluksissa, mutta otetaan myös taloudellinen kanta huomioon.

Asiasanat: suprajohtavuus, suprajohtodemagneetit, HTS, LTS

Sisällys

Johdanto	1
1 Suprajohteet	1
1.1 Resistanssi ja Meissnerin ilmiö	1
1.2 I ja II tyypin suprajohteet	2
1.3 Matalan ja korkean lämpötilan suprajohteet	4
2 Suprajohdemagneetit	6
2.1 Suprajohdemagneettien toiminta	6
2.2 Suprajohdemagneettien valmistus	8
3 Korkean lämpötilan suprajohdemagneetit	9
3.1 Yleistä	9
3.2 Sovellukset	10
4 Korkean ja matalan lämpötilan suprajohdemagneettien vertailua	12
5 Yhteenveto	14

Johdanto

Suprajohtavuudella ei ole kovin pitkä historia, sillä vasta vuonna 1911 hollantilainen Heike Kamerlingh Onnes havaitsi suprajohtavuusilmiön mittaamalla elohopean resistanssia matalilla lämpötiloilla [1]. Noin 4 K lämpötilassa resistanssi hävisi kokonaan ja tästä alkoi suprajohteiden laajempi tutkiminen [2].

Kuluneen yli sadan vuoden aikana suprajohteita on pyritty valmistamaan erilaisista materiaaleista, jotta suprajohtavuus säilyisi yhä korkeammissa lämpötiloissa ja magneettikentissä. Tällöin ne olisivat entistä hyödyllisempiä suprajohtodemagneeteissa ja niiden erilaisissa sovelluksissa, esimerkiksi lääketieteellisessä kuvantamisessa ja fuusioreaktoreissa. Suurimpana ongelmana suprajohtodemagneeteilla on sammutusten (engl. quench) minimoiminen, joka on niiden tutkimuksen yksi päätehtävistä. [3]

Tässä tekstissä perehdytään ensin suprajohtavuuden ilmiöön, jonka jälkeen pysytään syventymään suprajohteiden sovelluksiin, etenkin korkean lämpötilan suprajohtodemagneetteihin. Lopuksi vielä vertaillaan korkean ja matalan lämpötilan suprajohtodemagneetteja ja niiden hyötyjä sovelluksissa sekä molempien tulevaisuudennäkymiä.

1 Suprajohteet

1.1 Resistanssi ja Meissnerin ilmiö

Suprajohtavalla materiaalilla on kaksi tärkeää ominaisuutta, jotka ovat resistanssi ja Meissnerin ilmiö. Resistanssi kuvaa kappaleen, esimerkiksi johtimen, kykyä vastustaa sähkövirran kulkua. Suprajohteen saavuttaessa suprajohtavan tilan, sen resistanssi laskee nolnaan. Tämä ilmiö tapahtuu, kun lämpötila laskee materiaalin kriittisen lämpötilan T_c (engl. critical temperature) alapuolelle. Tällöin myös tapahtuu Meissnerin ilmiö, jonka havaitsivat kaksi saksalaista fyysikkoa Walther Meissner ja Robert Ochsenfeld vuonna 1933. Meissnerin ilmiössä ulkoinen magneettikenttä ei

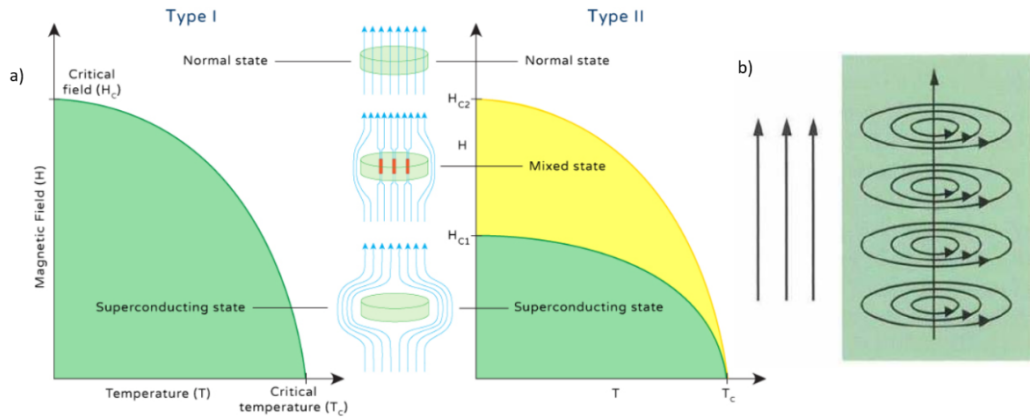
läpäise suprajohtavaa materiaalia [2]. Pian suprajohtavuuden löytymisen jälkeen havaittiin, että suprajohtavuus ei katoa ainoastaan kuumentamalla materiaalia vaan myös magneettikentän avulla [3]. Tyypin II suprajohtavuuden löytymisen myötä 1960-luvulla suprajohteiden käyttäytymisestä magneettikentässä tuli tärkeä tutkimuksen kohde [3].

1.2 I ja II tyypin suprajohteet

Suprajohteet voidaan jakaa kahteen eri luokkaan niiden ominaisuuksien perusteella. Nämä luokat ovat nimeltään tyypin I ja tyypin II suprajohteet. Tyypin I suprajohteet ovat materiaaleja, jotka ovat yleensä puhtaita alkuaineita. Näitä ovat muun muassa alumiini, lyijy ja elohopea [2]. Tyypin II suprajohtomateriaalit koostuvat seoksista ja tällaisia aineita ovat muun muassa NbTi eli niobium-titaani ja Nb₃Sn eli niobium-tina. Tyypin II suprajohteita käytetään erilaisissa sovelluksissa, kuten suprajohtomagneeteissa [3].

Tyypin I suprajohteissa tapahtuu täydellinen Meissnerin ilmiö, mikä on esitetty kuvassa 1 a). Kuvasta nähdään, että tyypin I suprajohte pystyy pitämään magneettikentän kokonaan ulkopuolella ja kykenee vastustamaan sitä, kunnes sen voimakkuus saavuttaa kriittisen magneettikentän voimakkuuden H_c . Tyypin I suprajohteita ei oikeastaan käytetä missään sovelluksissa niiden alhaisen kriittisen magneettikentän takia. [2]

Tyypin II suprajohte päästää sisälleen vortekseja eli virtapyörteitä. Vorteksit mahdollistavat sen, että tyypin II suprajohteilla on toinen kriittinen magneettikenttä H_{c2} , joka on hyvin suuri. Ensimmäinen kriittinen magneettikenttä H_{c1} on puolestaan pieni. Kuvassa 1 a) on myös esitetty magneettikentän käyttäytyminen tyypin II suprajohteen läheisyydessä, mikä on ensimmäiseen kriittiseen magneettikenttään asti samantapaista kuin tyypin I suprajohteen tapauksessa. Kuitenkin ylitettyään ensimmäisen kriittisen magneettikentän nähdään sektila (engl. mixed state) eli vor-



Kuva 1. a) Ulkoisen magneettikentän käyttäytyminen tyypin I ja II suprajohteiden läheisyydessä ja niiden TH -faasidiagrammit [4]. b) Vorteksit tyypin II suprajohteessa. Kenttäviivat sekä suprajohteen ulkopuolella että vorteksin keskipisteessä ovat merkitty suorilla nuolilla ja vorteksit ovat pyörteisiä suljetuilla kehänuolilla [2].

tekstitila, jossa vorteksit pääsevät materiaalin sisälle. Kuvasta 1 b) nähdään, että vorteksit ovat suuntautuneet ulkoisen magneettikentän suuntaisesti. Ne ilmestyvät heti, kun kriittinen magneettikenttä on riittävän suuri. Vorteksit voivat mennä sisään tai ulos materiaalista vain sen "sivupinnan" kautta. [2]

Suprajohteiden tärkein käyttötarkoitus on tuottaa korkeita magneettikenttiä. Tyypin II suprajohteita käytetään useimmissa sovelluksissa, koska ne pysyvät suprajohtavina paljon korkeammassa magneettikentässä kuin tyypin I suprajohteet [3]. Esimerkiksi elohopean, eli tyypin I suprajohteen, kriittisen magneettikentän voimakkuus on noin 40 mT hieman yli 4 K:n lämpötilassa [2]. Puolestaan tyypin II suprajohteen, Nb_3Sn :n, toisen kriittisen magneettikentän voimakkuus on lähes 30 T alhaisissa lämpötiloissa. Tyypin II materiaalit ovat usein korkean lämpötilan suprajohteita. Joillakin niistä H_{c2} on yli 100 T 4 K:n lämpötilassa ja ne pysyvät suprajohtavina paljon korkeammassakin lämpötiloissa, mikä avaa lisää mahdollisuuksia uusille sovelluksille [3].

1.3 Matalan ja korkean lämpötilan suprajohteet

Suprajohteet voidaan jakaa myös sen mukaan, missä lämpötilassa materiaali on suprajohtava eli matalan lämpötilan ja korkean lämpötilan suprajohteisiin. Matalan lämpötilan suprajohteiden (engl. low temperature superconductors), joista voidaan käyttää lyhennettä LTS, kriittiset lämpötilat ovat muutamia kelvinejä. Matalan lämpötilan suprajohteisiin kuuluu muun muassa NbTi, koska sen kriittinen lämpötila on 11 K. Korkean lämpötilan suprajohteiden (engl. high temperature superconductor), joista voidaan käyttää lyhennettä HTS, kriittiset lämpötilat ovat puolestaan kymmeniä kelvinejä [5]. Tästä syystä LTS:n jäähdyttämiseen tarvitaan nestemäistä heliumia, kun taas HTS:n jäähdyttämiseen riittää nestemäinen typpi [6]. Nestetyyppiä on huomattavasti helpompi käsitellä ja se on halvempaa kuin nestemäinen helium, jolla saavutetaan erittäin matalia lämpötiloja. Teknologian kehittyessä lämpöpumppuun perustuvat kryojäädyttimet ovat helpottaneet suprajohteiden jäähdytystä [3].

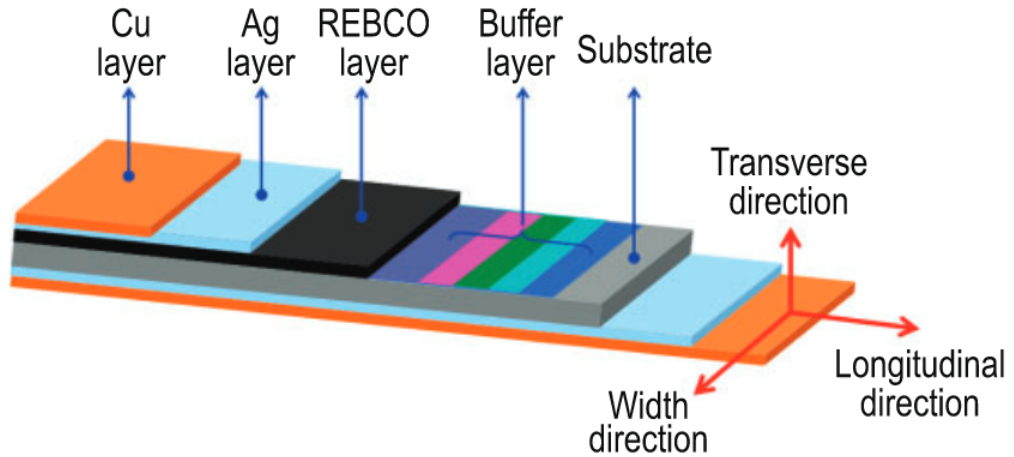
Suprajohtavuuden etsiminen suurella kriittisellä lämpötilalla, joka on yli nestemäisen typen lämpötilan 77 K, on ollut yksi haastavimmista tehtävistä suprajohtavuuden löytymisen jälkeen. Ennen vuotta 1986 korkein saavutettu siirtymälämpötila oli Nb₃Ge:lla eli niobium-germaniumilla vain 23,2 K. [3]

Vuonna 1986 löydettiin ensimmäinen korkean lämpötilan suprajohte: bariumin, lantaanin, kuparin ja hapen yhdiste eli La_{1,85}Ba_{0,15}CuO₄ (Ba-La-Cu-O). Tämän kriittinen lämpötila on noin 30 K. Ensimmäisestä keraamisesta korkean lämpötilan suprajohteesta kehitettiin edelleen toinen korkean lämpötilan suprajohte, YBa₂Cu₃O_{6+x} (YBCO) eli yttriumin, bariumin, kuparin ja hapen yhdiste, jonka kriittinen lämpötila on noin 92 K. Korkea kriittinen lämpötila mahdollistaa materiaalin käytön suprajohteena nestemäisellä tyypellä jäädytettynä. [3]

Tämän jälkeen on vielä kehitetty lisää korkean lämpötilan suprajohteyhdisteitä, joilla on monia erilaisia rakenteita, mutta yhteinen ominaisuus on kuparioksidikerrokset [3]. Yleensä suprajohteissa ei käytetä pelkkää yttriumia, vaan sekoitetaan

eri lantanoideja, jolloin käytetään termiä REBCO eli Rare-Earth Ba-Cu-O. Tällaisella suprajohteella on potentiaalia ylläpitää voimakkaampia magneettikenttiä kuin muilla suprajohtomateriaaleilla. Korkean kriittisen lämpötilansa ja kriittisen magneettikenttensä vuoksi tätä materiaalia on ehdotettu käytettäväksi suprajohtosovelluksissa [7]. REBCO-pinnoitetun johtimen kerroksien rakenne on esitetty kuvassa 2. Nämä kerrokset ovat kuparikerros, hopeakerros, REBCO-kerros, suojakerros ja substraatti. Yleensä suojakerroksia kutsutaan buffereiksi, ja niiden tarkoitus on sekä eristää REBCO kemiallisesti metallisubstraatista että tehdä kasvualustan kiderakenne REBCO:lle sopivaksi. Substraatilla tarkoitetaan perusmateriaalia tai kasvupohjaa, jota käytetään materiaalikerrosten, kuten kerrostettujen pinnoitteiden, tuottamiseen. Substraatin pinnan kunto vaikuttaa seuraavien kerrosten sidokseen. Substraatit ovat tärkeitä HTS-kalvojen kerrostumiselle [8][9].

Korkean lämpötilan suprajohtavuus on tällä hetkellä kehittymässä tutkimusalueelta kaupalliseksi teollisuudeksi etenkin suprajohtomagneettien osalta. HTS:n käyttö on kuitenkin odotettua vaikeampaa. [3]



Kuva 2. REBCO-pinnoitettujen johtimien rakenne [9].

2 Suprajohdemagneetit

2.1 Suprajohdemagneettien toiminta

Suprajohdemagneetti on sähkömagneetti, jonka käämi on valmistettu suprajohtavasta materiaalista. Toisin kuin tavalliset sähkömagneetit, suprajohdemagneetit voivat vaihdella sähkökentän voimakkuutta tuottamatta lämpöä, mikä mahdollistaa suuremmat virrantiheydet ja vahvemmat magneettikentät. Teknisten suprajohteiden kehitys 1960-luvulla mahdollisti suprajohdemagneetit. Sitten suprajohtavasta magneettiteknologiasta on tullut merkittävä maailmanlaajuinen teollisuudenala ja suprajohtavuuden tärkein sovellusalue. [10]

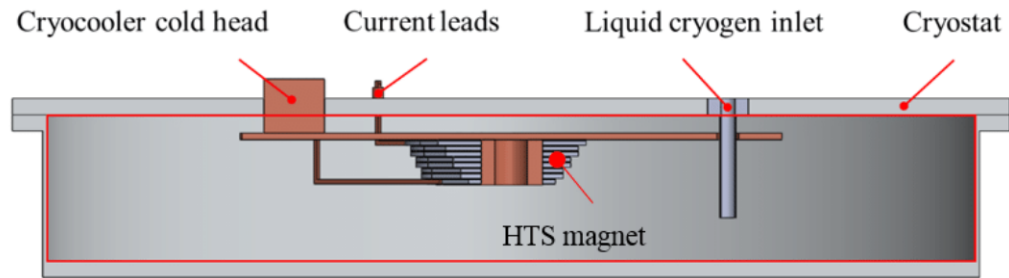
Kryogeniikka käsittelee hyvin alhaisten lämpötilojen tuottamista ja erilaisten materiaalien käyttäytymistä niissä lämpötiloissa. Kryogeniikkaa hyödynnetään suprajohdemagneettien tutkimuksessa, sillä kryogeenisissä, eli 4–80 K:n, lämpötiloissa kaikkien nykyään tunnettujen suprajohteiden täytyy toimia. Suprajohdemagneettien keloja säilytetään lämpö- ja kosteussäädelyssä kryostaatissa, jotta esimerkiksi korkean lämpötilan suprajohdemagneetti pysyisi vaaditussa lämpötilassa ja pystyisi

näin toimimaan luotettavasti ja tehokkaasti [10]. Kuvassa 3 on johtumisjäähdytteen (engl. conduction cooled) kryostaatti, joka sisältää viisi pääosaa: kryojäähdytteen kylmän pään, virtajohdon, nestemäisen kryogeenisen sisääntulon, kryostaatin ja HTS-magneetin. Lisäksi HTS-magneetti on kiinnitetty johtumisjäähdytettyyn kuparilevyyn ja koko kenttäkäämi on suojattu nestemäisellä typellä. Suprajohde jäähtyy, ja suprajohteen sekä kylmän pään välinen lämpötilaero tasoittuu.

On myös olemassa kryostaatteja, joissa suprajohde upotetaan kryogeeniseen nesteeseen eli nestemäiseen tyypeen tai heliumiin. Näitä kutsutaan dewar -tyhjiöpulloiksi. Dewarissa on eristys matalien lämpötilojen säilyttämiseksi ja se on oleellinen osa suprajohtemagneettien toiminnassa, sillä alhainen lämpötila tekee magneeteista suprajohtavia. [10]

Suprajohtavissa magneeteissa homogeenisuus tarkoittaa sitä, kuinka yhtenäinen magneettikenttä on. Korkean homogeenisuuden saavuttaminen on tärkeää MRI:n ja hiukkasfysiikan kaltaisissa sovelluksissa, sillä magneettikenttien vaihtelut voivat vaikuttaa niiden suorituskykyyn, jolloin on pidettävä magneettikentät tasaisina ja yhtenäisinä. [10]

Sammutus tapahtuu, kun suprajohtava magneetti yllättäen menettää suprajohtavuutensa, mikä johtuu usein lämpötilasta. Tämä voi aiheuttaa merkittävän lämpöenergian vapautumisen, jolloin on tärkeää, että on olemassa toimintatapoja tilanteen hallitsemiseksi ja kustannusten minimoimiseksi. Etenkin silloin, kun kyseessä on korkean lämpötilan suprajohteet, joilla on korkeat kriittiset lämpötilat, ja jotka voivat kuljettaa suuria virtoja. Tutkijat ovat keskittyneet parantamaan suprajohtavien rakenteiden ja magneettien vakautta paikallisten sammutusten aiheuttamien vaurioiden estämiseksi. [10]



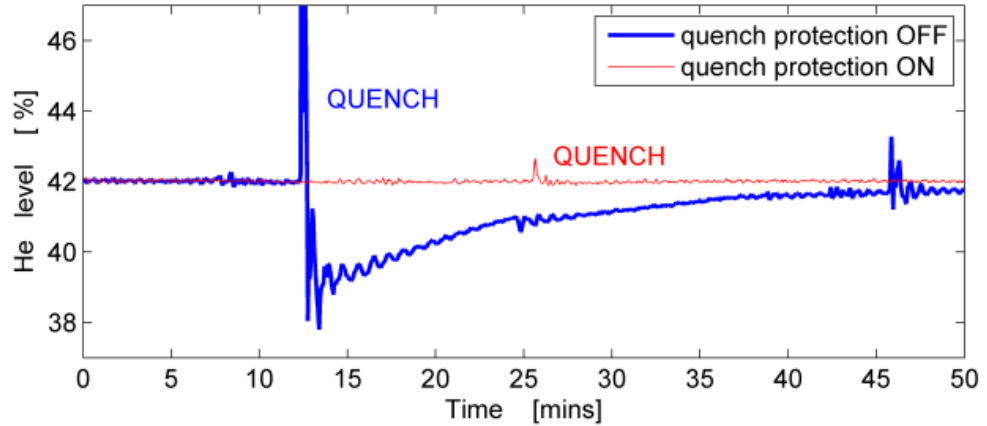
Kuva 3. HTS-magneetin jäähdytysjärjestelmä [11].

2.2 Suprajohdemagneettien valmistus

Suprajohdemagneettien valmistamiseen käytetään johtoja ja kaapeleita. Monoliittiset johtimet (engl. monolithic conductors) ovat monisäikeisiä johtimia, joita käytetään magneeteille, joiden toimintavirrat ovat enintään 500 A. Yksi monisäikeisen johtimen eduista on korkea pakkauskerroin (engl. packing factor), joka mahdollistaa käämipaketin (engl. winding package) suuren virrantiheyden ja siten kiinteät magneetit. Tämän tyyppinen johdin on myös suhteellisen helppo kiertää käämiksi. Korkeampien magneettikenttien saavuttamiseksi pyöreät monisäikeiset johdot kootaan kaapelin tai komposiittijohtimen muodostamiseksi. Tämä mahdollistaa enemmän vapautta johtimen stabilointiin sekä mekaaniseen suunnitteluun ja jäähdytykseen. [3]

Magneetteja suunnitellessa pitää myös ottaa huomioon yksittäisten säikeiden paikalliset viat tai häiriöt, jotta voidaan välttyä suuremmilta ongelmilta. Kaapelien haittapuolena on pienentynyt pakkauskerroin, jota voidaan osittain parantaa johtimien suorakulmaisen tai puolisuunnikkaan muotoisella poikkileikkauksella. [3]

Aikaisemmin mainittuja sammutuksia tulee aina tapahtumaan suprajohdemagneeteissa, jolloin laitteiden suojaamiseksi on magneettien tukijärjestelmä suunniteltava täysin turvalliseksi sammutuksien aikana. Ilman riittävää suojausta jopa melko pienet suprajohdemagneetit voivat tuottaa vaarallisen suuria jännitteitä ja virtoja. Tämä on erityisesti otettava huomioon korkean lämpötilan suprajohdemagneettien



Kuva 4. Heliumtason vaihtelut, jotka johtuvat havaitsemattomista ja toistuvista sammutuksista [12].

valmistuksessa [13]. Sammutussuojan on oltava luotettava ja vikaturvallinen. Tehokasta sammutussuojaa ei voi lisätä jälkeenpäin, jolloin se on otettava jo valmistusvaiheessa huomioon [10]. Kuvassa 4 on esitetty toistuvien sammutusten vaikutusta kryogeeneen järjestelmään sammutustunnistuksella ja ilman sitä. Havaitsemattomat sammutukset voivat tuottaa tarpeeksi lämpöä heliumin virtauksen häiritsemiseksi, mikä estää koneen toiminnan pitkiksi ajoiksi [12].

3 Korkean lämpötilan suprajohtodemagneetit

3.1 Yleistä

Korkean lämpötilan suprajohtodemagneetit ovat suprajohtodemagneetteja, joissa hyödynnetään korkean lämpötilan suprajohteita. Korkean lämpötilan suprajohtodemagneetit tuottavat vahvoja magneettikenttiä ja toimivat korkeissa lämpötiloissa. [10]

Korkean lämpötilan suprajohtodemagneettien rakentamiseen liittyy tyypillisesti käämin kyllästys nestemäisessä väliaineessa, kuten epoksissa, joka sitten kiinteytyy. Kyllästys antaa magneetille mekaanisen eheyden ja helpottaa lämmönsiirtoa. Kyllästämiseen käytettävän materiaalin valinta edellyttää materiaalien ominaisuuks-

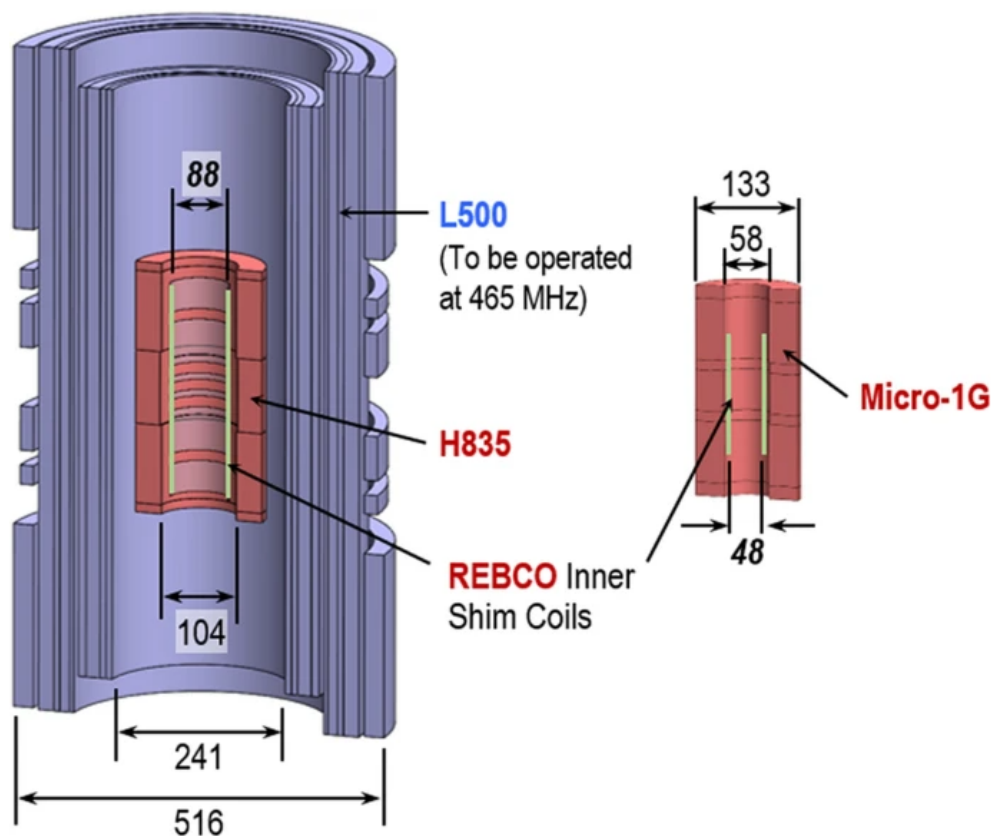
sien ja suorituskykyvaatimusten huolellista harkintaa, jotta magneettien toiminta on optimaalista. [14]

Korkean lämpötilan suprajohtemagneettien valmistuksessa pitää ottaa huomioon kunnollinen ja turvallinen sammutussuojaus. Kustannukset ja taloudelliset huolet ovat tämän ohella pieni ongelma HTS-magneettien tapauksessa. [15][10]

3.2 Sovellukset

Tyypin II suprajohteiden löytäminen on mullistanut suprajohtemagneettien tuotannon ja voimakkaiden magneettikenttien käytön. Laboratoriot voivat kätevästi käyttää nestemäisen heliumin avulla monia erilaisia suprajohtemagneetteja, jotka tuottavat yli 20 T:n magneettikentät [16]. Näitä kutsutaan korkean magneettikentän suprajohtemagneeteiksi [9]. Suprajohtemagneetteja käytetään erilaisissa sovelluksissa kuten suprajohtavissa energiavarastoissa (engl. superconducting magnetic energy storage) eli SMES:ssä, jossa sähkötehoa saadaan tehokkaasti ja nopeasti irti massiivisen suprajohtemagneetin magneettikentästä [10]. Toinen tärkeä suprajohtemagneettien sovellus on lääketieteellisessä magneettikuvauksessa eli MRI:ssä [7].

Erittäin korkeita magneettikenttiä varten pitää yhdistää matalan lämpötilan ja korkean lämpötilan suprajohtemagneetit, jolloin HTS-magneetti on LTS-magneetin sisällä (engl. LTS/HTS magnet system). Tämä rakenne on sekä tehollisesti että taloudellisesti erinomainen ratkaisu [18]. Erittäin korkeita magneettikenttiä tarvitaan muun muassa MRI-kuvauksissa ja ydinmagneettisessa resonanssissa (engl. nuclear magnetic resonance) eli NMR:ssä. Kuvassa 5 esitetty NMR:ssä käytettävä LTS/HTS-magneetti sekä REBCO-mikrokäämimagneetti. Korkean lämpötilan suprajohtemagneetit ovat osoittaneet paljon erilaisia etuja, kuten laadukas kryogeeninen toiminta ja korkean magneettikentän suorituskyky, kun niitä hyödynnetään MRI-järjestelmien keskeisinä komponentteina. Ydinmagneettinen resonanssi, jossa magneettikenttään laitettu atomiydin absorboi radioaaltojen energiaa tietyllä taajuudella, on MRI:n



Kuva 5. HTS/LTS-magneetti (vasemmalla) ja REBCO-mikrokäämimagneetti (oikealla), mitat millimetreinä [17].

perusta [10]. Viime vuosina on tehty intensiivistä tutkimusta HTS-magneeteista, ja niiden soveltaminen MRI:n ja NMR:n lisäksi on myös kasvamassa fuusioissa sekä hiukkasterapiassa (engl. particle therapy) [19][7].

REBCO:sta valmistetut suprajohdemagneetit ovat ihanteellisia plasman rajaamiseen fuusiokokeissa [16]. Tokamak-fuusioreaktori on toruksen muotoinen tyhjiökammio, jota ympäröivät voimakkaat suprajohdemagneetit [20]. Tokamak käyttää erittäin voimakkaita magneettikenttiä sitoakseen vetyplasman donitsin muotoisen sisuksensa sisälle. Tämä mahdollistaa plasman kuumentamisen erittäin korkeisiin lämpötiloihin niin, että vety-ytimet sulautuvat yhteen vapauttaen suuria määriä energiaa. REBCO pystyy tuottamaan erittäin korkeita magneettikenttiä, ja se voi myös kuljettaa erittäin suurien sähkövirran tiheyksiä jopa 20 K:n lämpötiloissa. Tut-

kimukset ovat osoittaneet, että materiaali saa aikaiseksi yli 20 T:n magneettikentän. Tämä on lähes kaksinkertainen verrattuna muihin vastaaviin suprajohdemagneettien sovelluksiin. Sittemmin tutkimukset ovat osoittaneet, että REBCO pystyy ylläpitämään 12 T:n magneettikenttää, joka soveltuu plasman rajoittamiseen tilavuudessa, joka on noin 30-40 kertaa pienempi kuin aiemmat fuusiolaitteet. REBCO mahdollistaa pienemmät kustannukset ja nopeammat aikataulut magneettisten koossapito-laitteiden rakentamiseksi fuusioenergiolaitoksille [16].

4 Korkean ja matalan lämpötilan suprajohdemagneettien vertailua

Korkean lämpötilan suprajohdemagneetin ja matalan lämpötilan suprajohdemagneetin kaksi eroa ovat käyttölämpötila ja lämpötilaväli, jonka yli magneetti pysyy suprajohtavana. Magneettikentän voimakkuus kuitenkin ratkaisee useimmiten sen, kumpi on hyödyllisempi sovelluksissa. [15]

Kaupallisten magneettien toistaiseksi yleisin materiaali on NbTi, eli matalan lämpötilan suprajohde, jota käytetään laajasti kaikissa aikaisemmin mainituissa sovelluksissa, joista MRI edustaa suurimpia markkinoita. Syy sen laajalle levinneeseen soveltamiseen on materiaalin sitkeys, joka mahdollistaa johtojen muodostamisen kaapeleiksi ja keloiksi ilman, että sen suprajohtavat ominaisuudet häviävät. NbTi:n käyttöä on edistänyt sen luotettavuus ja ennustettava käyttäytyminen, mikä mahdollistaa jatkuvan sekä suuren tuotannon useilla valmistajilla. Tämä vähentää materiaalin hintaa. Magneettisuunnittelu voi asettaa vaatimuksia johtimelle, jonka täytyy ylittää NbTi:n kyvyt. Silloin pitää vaihtaa Nb₃Sn:ään tai näiden kahden materiaalin yhdistelmään, kustannusten minimoimiseksi. Nb₃Sn on hauras, ja sen suprajohtavat ominaisuudet vaihtelevat voimakkaasti rasituksen mukaan. [7]

HTS-magneetin selkeitä etuja LTS-magneettiin verrattuna ovat korkeampien mag-

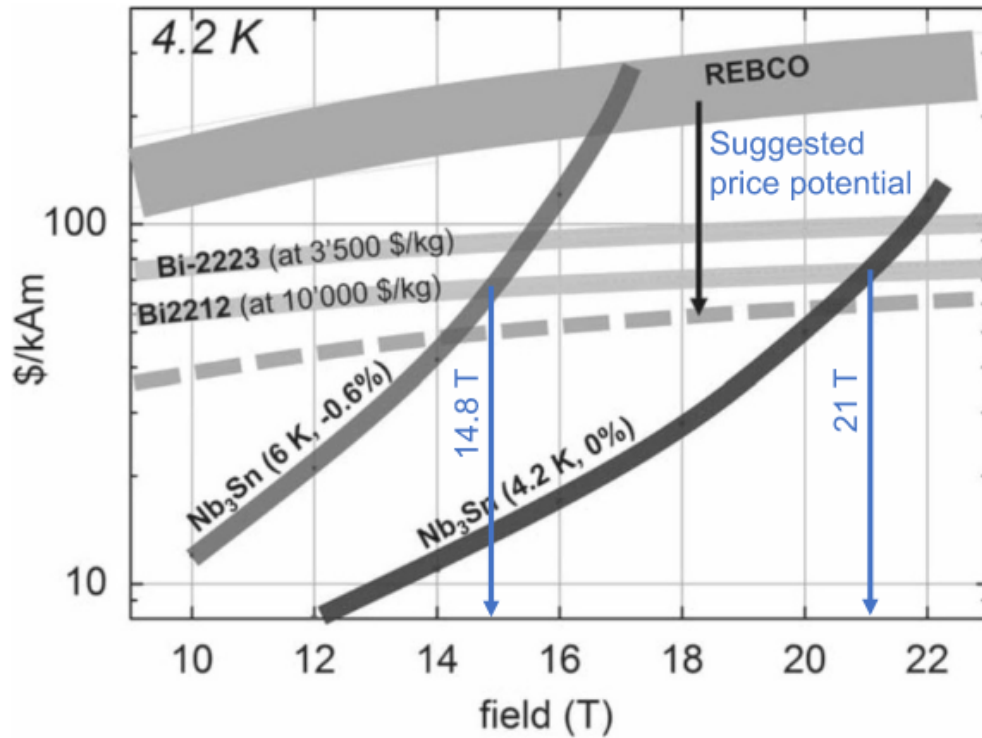
neettikenttien saavutettavuus ja mahdollisuus toimia korkeammissa lämpötiloissa. HTS:n kaupallinen soveltaminen magneeteissa on yleistynyt vasta viime aikoina, kun LTS:n magneettikentän rajat on saavutettu. [7]

HTS:n kehittyvät magneettisovellukset mahdollistavat kryogeenivapaita (engl. cryogen-free) magneettijärjestelmiä. Ilmastonmuutos ja siitä johtuvat muutokset politiikassa, jossa turvaudutaan vähemmän fossiilisiin polttoaineisiin, on johtanut nestemäisen heliumin saatavuuden heikkenemiseen. Tämä on ollut valtava kannustin toimia yli 4,2 K:n lämpötilassa, mieluiten kryogeenivapaassa ja johtumisjäähdytteisessä järjestelmässä, joka hyödyntää jäähdytystekniikan jatkuvaa kehitystä. HTS-magneettien toiminta johtumisjäähdytteisissä ympäristöissä tarjoaa paljon vakaammat magneettiset käyttöolosuhteet kuin LTS 4,2 K:n lämpötilassa. [7]

Jos vertaillaan kaupallisten magneettien johtimien hintatasoja, sisällyttäen hinnoitteluun johtimien virran kantokyvyn, kuten kuvassa 6 on esitetty 4,2 K:n lämpötilassa. Tästä vertailusta huomataan, että paljon edullisemmaksi vaihtoehdoksi tulee korkean lämpötilan materiaalit yli 4,2 K:n lämpötiloissa. 4,2 K:n lämpötilassa HTS-johtimen hinta kAm :a kohden on käytännössä riippumaton magneettikentästä. Tämä on jyrkässä ristiriidassa Nb_3Sn :n (ja $NbTi$:n) kanssa, mikä johtaa LTS-johtimien hinnan voimakkaaseen nousuun kAm :a kohden magneettikentän kasvaessa. [7]

Yhdeksi vertailun esimerkiksi voidaan ottaa suprajohteiden käyttö syöpäkasvain-ten säteilytyksessä lääketieteellisessä soveltamisessa taivutusmagneeteissa pyöriivissä telineissä sekä kiihdyttimissä. Perinteisesti käytetään enimmäkseen LTS:ää, mutta viime aikoina on julkaistu tutkimuksia, joissa tutkitaan HTS:n toteutettavuutta näissä sovelluksissa. Myös tässä nähdään suprajohtavien teknologioiden kryogeenivapaakäyttö, johon HTS soveltuu paljon paremmin kuin LTS. [7]

On selvää, että LTS-johtimien optimoinnissa on edistytty paljon, mutta Nb_3Sn :ssä on vielä potentiaalia. Sen mahdolliset lisähyödyt ovat tällä hetkellä enimmäkseen akateemisia, ja niitä on tutkittava tarkemmin. Sen sijaan HTS-magneetit tarjoavat



Kuva 6. Johtimen Nb₃Sn:n ja REBCO:n hinnat per kAm magneettikentän funktiona [7].

mahdollisuuksia toimia LTS:n magneettikentän ja lämpötilarajoitusten yläpuolella. Korkean lämpötilan suprajohde- ja magneettiteknologiat ovat kehittyneet ja mahdollistavat sovelluksen kaupallisissa kryogeenivapaissa magneettijärjestelmissä, joiden on toimittava luotettavasti monien vuosien ajan ilman merkittäviä vikoja. Rohkeiden sijoittajien ja yrittäjien tehtävä on vastata alkuvaiheen taloudellisiin haasteisiin. [7]

5 Yhteenveto

Suprajohtavuuden lyhyestä historiasta huolimatta ne ovat tulleet tärkeäksi osaksi fysiikan tutkimusta. Suprajohteiden pohjalta kehitetyt suprajohdemagneetit pystyvät vaihtelevaan sähkökentän voimakkuutta tuottamatta lämpöä, mikä on tehnyt suprajohdemagneettiteknologiasta merkittävän teollisuudenalan.

Korkean lämpötilan supraohdemagneettien yksi suurimmista ongelmista on sammutukset, mutta tähän osa-alueeseen keskitytään jo valmistusvaiheessa, jotta pystytään ennalta ehkäisemään suuremmat ongelmat. Suprajohtavien materiaalien aktiivinen tutkiminen sekä soveltaminen on jatkuvaa maailmanlaajuisesti ja se tulee kehittymään pitkälle. REBCO- materiaalista valmistetulla suprajohteella on potentiaalia ylläpitää voimakkaampia magneettikenttiä kuin muilla supraohdemateriaaleilla. REBCO:sta valmistetut HTS-magneetit soveltuvat tehokkaasti plasman rajoittamiseen fuusioreaktorissa, joka puolestaan mahdollistaa pienemmät kustannukset ja fuusiolaitteet. Tämä on yksi tärkeimmistä sovelluksista lääketieteellisuuden rinnalla.

HTS-magneetti luo korkeampia magneettikenttiä ja mahdollistaa toimimisen korkeammassa lämpötiloissa kuin LTS-magneetti. HTS:n kehittyvät magneettisovellukset perustuvat myös mahdollistamaan kryogeenivapaita magneettijärjestelmiä. Vaikka LTS-magneetit ovat tällä hetkellä käytetympi vaihtoehto sovelluksissa, HTS-magneetit tarjoavat mahdollisuuksia toimia LTS:n magneettikentän ja lämpötilarajoitusten yläpuolella. Supraohdemagneetteja pystytään kehittämään vielä pidemmälle niin korkeampien lämpötilojen kuin korkeampien magneettikenttien suhteen.

Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tässä kandidattutkielmassa ei ole käytetty tekoälyä.

Viitteet

- [1] H. K. Onnes, kirjassa *Communications from the Physical Laboratory of the University of Leiden*, Proc. of the Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam (KAWA, 1911), Vol. 120b, pp. 1479–1481.
- [2] V. L. Ginzburg ja E. A. Andryushin, *Superconductivity* (World Scientific Publishing Company, 2004).
- [3] B. Seeber, *Handbook of Applied Superconductivity, Volume 1* (IOP Publishing Ltd, 1998).
- [4] S. Bhuyan, <https://www.sciencefacts.net>.
- [5] G. Krabbes, G. Fuchs, W.-R. Canders, H. May ja R. Palka, *High Temperature Superconductor Bulk Materials: Fundamentals, Processing, Properties Control, Application Aspects* (John Wiley & Sons, 2006).
- [6] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity: Second Edition* (Courier Corporation, 2004).
- [7] A. Godeke, IOP Publishing **36**, 113001 (2023).
- [8] M. Paidpilli, J. Sandra, B. Sarangi, C. Goel, E. Galstyan, G. Majkic ja V. Selvamanickam, *Superconductor Science and Technology* **36**, 095016 (2023).
- [9] Y.-H. Zhou, D. Park ja Y. Iwasa, *National Science Review* **10**, 001 (2023).
- [10] H. Anagaw ja G. Mebratie, *Superconductor Magnets* (IntechOpen, 2024).
- [11] T.-D. Le, J. H. Kim, S. Lee, G.-M. Lee, S. Kim, H.-C. Kim ja H. Kim, *Information (Japan)* **18**, 3133 (2015).
- [12] C. Marshall, J. Fisher ja V. R. W. Schaa, kirjassa *Proceedings, 14th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems (ICALPECS 2013)*, ICALPECS (JaCoWGeneva, 2014).
- [13] B. Seeber, *Handbook of Applied Superconductivity, Volume 2* (IOP Publishing Ltd, 1998).
- [14] J. Feldman, W. Stautner, C. Kovacs, N. Miljkovic ja K. S. Haran, IOP Publishing **37**, 033001 (2024).
- [15] Y. Iwasa, *ScienceDirect* **43**, 303 (2003).
- [16] S. Jarman, <https://physicsworld.com/>.
- [17] D. Park, J. Lee ja J. Bascuñán, *Scientific Report* **10**, 21946 (2020).
- [18] L. Qin, J. Liu, L. Wang, K. Wang, B. Zhou, Y. Wang, H. Sun, C. Niu ja Q. Wang, *IEEE Transactions on Magnetics* **60**, 1 (2024).

- [19] Y. Li, IOP Publishing **38**, 063001 (2025).
- [20] J. Degrave, F. Felici, J. Buchli, M. Neunert, B. Tracey, F. Carpanese, T. Ewalds, R. Hafner, A. Abdolmaleki, D. de las Casas, C. Donner, L. Fritz, C. Galperti, A. Huber, J. Keeling, M. Tsimpoukelli, J. Kay, A. Merle, J.-M. Moret, S. Noury, F. Pesamosca, D. Pfau, O. Sauter, C. Sommariva, S. Coda, B. Duval, A. Fasoli, P. Kohli, K. Kavukcuoglu, D. Hassabis ja M. Riedmiller, Nature Publishing Group **602**, 414 (2022).