

FSST NEWS

Forum of Superconductivity	No. 140
Science and Technology News	

発行
 一般社団法人
 未踏科学技術協会
 平成 26 年 1 月 27 日発行
 〒105-0003
 東京都港区西新橋 1-5-10
 新橋アマノビル 6 階
 Tel : 03-3503-4681
 Fax : 03-3597-0535
 Email : fsst@sntt.or.jp

<FSST NEWS No.140 目次>

<年頭所感>	
遠未来には	超伝導科学技術研究会会長／東京大学 下山 淳一……………2
<トピックス 1>	
高温超伝導体の物質設計に道を開く新たな理論計算手法の開発	東京大学 有田亮太郎 明石 遼介……………3
<トピックス 2>	
人口ピンニングセンター導入型 REBCO 超電導線材の開発とその応用	昭和電線ケーブルシステム 木村 一成 高橋 享……………7
<トピックス 3>	
電車走行試験に成功、鉄道用超電導ケーブルー実用化へ向け本格始動ー	鉄道総合技術研究所 富田 優……………12
<会議報告 1>	
第 82 回ワークショップ会議報告	古河電気工業 木村 昭夫……………15
<会議報告 2>	
第 7 回応用超伝導・低温工学アジア会議報告	物質・材料研究機構 熊倉 浩明……………16
<会議報告 3>	
ISS2013 会議報告	
(1) Physics	産業技術総合研究所 竹下 直……………17
(2) Films, Junctions and Electronics Devices	産業技術総合研究所 日高 睦夫……………18
(3) Wire & Tapes, Large Scale System Applications	昭和電線ケーブルシステム 小泉 勉……………19
<研究室紹介>	
(1) 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 有田研究室	……………21
(2) 鹿児島大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻 川越研究室、川畑研究室	……………22
(3) 東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センター	……………23
(4) 新潟大学大学院自然科学研究科電気情報工学専攻 岡徹雄研究室	……………25
○第 83 回ワークショップのご案内	……………27
○第 40 回シンポジウムのご案内	……………27
○研究会の動き	……………28
○国内超伝導関連会議／国際会議及び国外の主要な会議	……………29

〈年頭所感〉 遠未来には In the far future

超伝導科学技術研究会会長
東京大学大学院 工学系研究科
下山 淳一
Faculty of Engineering, The University of Tokyo
J. Shimoyama



明けましておめでとうございます。皆様方には旧年中の当会へのご協力に対しまして厚く御礼申し上げます。今年も皆様方と一緒に超伝導科学技術の発展を促進する活動を行ってまいりますので、引き続きご協力、ご意見等を賜りますよう、よろしく申し上げます。

本会は昨年、第80回ワークショップ「電力グローバルネットワークは実現するのか?」を1月16日に、第39回シンポジウム「超伝導2013 ー超伝導応用最前線ー」を4月16日に、第81回ワークショップ「極低温冷凍機の進展とその応用の広がり」を7月26日に、第82回ワークショップ「超伝導電磁石の大型化への挑戦」を12月26日に開催しました。また、新企画として若手研究者対象の「第1回超伝導科学技術セミナー」を2月22、23日に鬼怒川温泉で行い、単行本「これ1冊でわかる超伝導実用技術」(日刊工業新聞社)を2月26日に発刊し、さらに7月10-12日に米国オハイオ州デイトンで行われた第16回日米先進超伝導ワークショップにも協力しました。本年も第二期(2008年以降)の活動趣旨“超伝導産業を支える”に沿った諸活動を展開する予定です。

さて、世界を一時的な不況に陥れたりリーマンショックから5年が過ぎました。打撃が比較的弱くかつ成長力が大きな新興国、途上国の立ち直りが早かった一方、先進国の回復はやや遅く、EUでは金融不安が、日本では大震災が起こるなど、順調でなかったことは皆様、よくご存知の通りです。日本では昨年になってようやく景気が持ち直し始めたと言われ、株価も確かに上昇しました。総合的に見れば製造業も回復していますが、大企業が円安期に部品の調達や製造を国外に移した影響が残り、中小企業の多くは受注量が戻らない状態が続いています。このような世界情勢のなかで超伝導産業は景気変動の影響を受けず、世界で年5000億円前後の市場をこの数年維持し、むしろそれは漸増しています。この市場の約8割は医療用MRIであり、健康長寿という人間の根幹的な欲求を満足させる用途であることから、この需要は今後も保証されることでしょう。大半の超伝導に関わる研究者は、残りの2割の超伝導産業や次世代材料・機器の開発、さらに実用とは遠い基礎的な科学技術研究に携わっています。将来、超伝導市場の拡大と同時にMRIの比率の低下を起こすような、超伝導技術の新しい

用途での社会への広範な普及こそが本会の願いであります。

ところで、世界人口は2011年に70億人を超え、現在は71.5億人に達しており、これは1968年の倍にあたります。その年増加率は1970年頃の2.1%をピークに低下し、最近では1.2%程度になりましたが2000年以降の低下が小さく、毎年約8千万人の増加が続いています。国連が発表している人口予測も最近、多い方に修正され、50年後には100億人を超えることが予測されています。100億人とは現在の先進国人口の10倍に相当します。これから50年間には新興国、途上国の先進国化がかなり進みますから、当然、エネルギーや鉱物資源、さらに食料の需要が大幅に増えることになります。歴史を振り返ってみると、世界の人口は古くは食糧生産量の変動と伝染病の発生に翻弄されていたことがわかります。19世紀までの人口増加は穀物の品種改良による生産地域の拡大やアメリカ大陸の発見に由来するトウモロコシやジャガイモの世界的な普及がもたらしたものとされます。20世紀以降は化学肥料の利用などによる収率向上が食糧生産増に大きく寄与し、増加する人間の食生活を支えてきましたが、最近の急激な人口増加には追いつかず、飢餓人口は10億人に達しようとしています。沙漠化や農業用水の不足と水質の劣化によって耕地面積が容易に増えない今日、今後の食糧問題が非常に深刻であることは確かですが、数字上は現在の1.5倍程度の増産と流通の改善ができれば何とか克服できそうです。

これに対し、エネルギー需要は少なくとも3倍以上大きくなります。実際、この10年で世界の一次エネルギー消費は30%も増えましたが、人口は13%の増加でした。これは豊かになりつつある国が多いことを意味します。注目すべきはこの間世界の総発電量が39%も伸びたことです。つまり電力需要の増加はより急であり、この傾向が今後も継続することは間違いないでしょう。50年後の100億人時代に至るまでの電力需要増を現行システムの延長で対応できるのでしょうか。超伝導技術の利用は電力の有効活用の最も効果的な手段です。昨年末に無事に通電試験を終了した東電旭変電所における高温超伝導ケーブルや昨年始まった石狩新港地域での直流超伝導送電プロジェクトなど、国内でも超伝導の電

カインフラへの試用が始まっており、今後のさらに革新的な展開に期待が集まっています。一方、超伝導の発電応用の第一歩として核融合実験炉ITERが現在フランスで建設中ですが、その先の大規模発電を実証するための核融合原型炉の概念設計も始まっています。これが実現するのは遠い将来、100億人の時代になってしまいますが、本会ではこの設備に対する超伝導材料の適性や可能性について昨年より調査研究を開始しております。核融合炉は実用までに超伝導技術以外に多くの克服すべき課題があるものの、遠い未来には発電装置の主役になれる可能性を秘めています。同時に超伝導材料の高機能化、超伝導磁石技術・超伝導デバイス技術の向上が進めば、他方面にも超伝導技術の一層の普及が期待できます。このほか、同様に遠い未来の超伝導技術の実用を睨んだJSTによる戦略イノベーション研究(S-イノベ)、先端的低炭素化技術開発事業(ALCA)の成果も見え始めており、目が離せなくなってきました。今後も本会ではこれら超伝導技術の遠未来展開についてもタイムリーに議論する機会を設けていく所存です。

最後に読者の皆様のますますのご繁栄を祈念し、年頭の挨拶を結ぶことにいたします。

<トピックス 1>

高温超伝導体の物質設計に道を開く

新たな理論計算手法の開発

Opening the door to predictive calculation of high temperature superconductors

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
有田亮太郎、明石遼介

Department of Applied Physics, Univ. of Tokyo
R. Arita, R. Akashi

1. はじめに

相転移現象を前にしたとき、人は二通り興味の持ち方をするという。物質の個性に興味を持つ人は相転移が起こる転移温度に着目するが、物質の詳細によらない普遍的な振る舞いに興味をもつ人は臨界指数の値に注目する。物性理論を専門にする人の多くは、多様な物質の背後にある普遍的な理論や法則の構築を目指しているので、後者に惹かれる人が多いそうである[1]。

超伝導転移は固体が示す相転移現象の中でも最も興味深い現象のひとつであるが、その転移温度はご多分に漏れず物質の詳細にきわめて強く依存する量であり、物性理論の専門家があまり直接触れたがらない量のひとつとなっている。例えば、超伝導の標準的な理論であるBCS理論によれば、転移温度は

$$T_c = \omega_D \exp(-1/N(0)V)$$

と評価される。ここで、 ω_D はフォノンのエネルギースケールをあらわし、 $N(0)$ はフェルミ面の状態密度、 V は電子間有効引力を表す。これをみると、例えば状態密度の見積りをわずかに過大評価すると室温超伝導が容易に実現できてしまうことになる。このことから、しばしば教科書において「超伝導転移温度を理論的に評価するのは避けるべき」という趣旨の記述が見受けられる[2]。実際の研究の現場でも、理論計算において超伝導転移温度が定量的に議論されることはあまり多くなく、計算されることがあっても超伝導不安定性の相対比較、といった定性的な議論に用いられることが多い。

一方、新しい超伝導体が発見されたときに、人々がまず注目する物理量は転移温度であるといってもよいだろう。銅酸化物超伝導体の例は言わずもがな、最近の鉄系超伝導体や二ホウ化マグネシウム(MgB₂)に関する研究の急激な進展は、転移温度が高いこと自体が人々の知的興味を大いにかきたてることを雄弁に物語っている。また応用の面でも、室温超伝導体が合成されれば社会が大きく変化するであろうことは論を俟たない。このような点から「物質によって異なる転移温度を計

算によって再現・予言できるか」という点に興味を持つのは非常に自然なことであり、それを可能にするような高精度の計算法の確立は理論家にとっても積極的に取り組む価値がある課題と考える。

超伝導転移温度を予言できる計算手法を構築する場合、目指すべき手法は以下の条件を満たすものである。一つは、どのような物質でも同じ手続きが適用できることである。つまり、計算結果は強く物質依存をしても、計算手法は物質によらない普遍的なものでなければならない(その意味で、超伝導転移温度の計算法の開発は、本来理論家の興味をそそる挑戦的課題であると言える)。さらにもう一つ重要な条件は、実験結果を参照しなくてよい、つまり非経験的な計算手法である、ということであろう。これらの条件を満たす手法が完成すれば、統一的枠組みに基づく転移温度上昇機構の分析・理解のみならず高温超伝導体の理論的予言・設計が可能になる。

10年ほど前、そのような普遍的な計算手法の確立にむけて、重要な進展があった。超伝導密度汎関数理論の具体的定式化である[3]。この論文で示された定式にそって計算すると、アルミニウムや鉛、ニオブといった単純金属の転移温度を1 Kのオーダーで正確に再現できる。この後、 MgB_2 や CaC_6 などの超伝導体の転移温度も正確に評価できることが示された[4]。従って、フォノンを媒介とする、いわゆる従来型の超伝導体に限って言えば、転移温度が1 K程度であろうが、40 Kに迫ろうが、同じひとつの理論手法で再現できるようになったと言える。

さらに強調すべきことは、文献[3]で示された方法は完全に非経験的な手法であって、実験データを一切参照していないということである。従って、この方法を用いると(対象が従来型超伝導体に限られるが)、既知の物質の転移温度の高さについて実験を説明できるだけでなく、実験がされていない極限環境における転移温度の変化を予言することもできるし、さらには合成されていない未知の物質の転移温度も予言できる、ということになる。そこで、この方法の適用範囲を(しばしば非常に高い転移温度を実現する)非従来型超伝導体にも広げることが出来れば、理論計算によって室温超伝導体を探索できる時代が到来すると期待される。

超伝導密度汎関数理論自体は、超伝導の発現機構によらない枠組みであるので、原理的に文献[3]で示された具体的定式化を拡張することは可能であるはずだが、実際にそれを実行することは容易なことではない。悲観的な見通しを持つ研究者も多く、世界的に見ても研究例はほとんどないが、本稿では、この問題に関する我々の最近の研究結果[5]をご紹介します。

2. 超伝導密度汎関数理論

本題に入る前に、まず、文献[3]で定式化された方法論を概観することにする。標準的な密度汎関数理論[6]は、いわゆるHohenberg-Kohnの定理から出発する。この定理は、外部ポテンシャル(固体中に配列した原子核が作るポテンシャル)と基底状態の電子密度の一対一対応を保証する。基底状態の電子密度を求めるには、同じ電子密度分布を与える仮想一体系を導入して、Kohn-Sham方程式を自己無撞着に解く。Kohn-Sham方程式には、交換相関ポテンシャルという非自明な密度の汎関数が含まれる。原理的には、任意の物質の基底状態を与える、ある普遍的な交換相関ポテンシャルが存在するはずだが、人類はその具体形をまだ知らない。そこで局所密度近似などを導入し、交換相関汎関数に対して(物理的にも、そして計算コストの観点からも)適切と思われる関数形を仮定する。いったん関数形を決めたら、どのような物質についても同じものを用いる。今日、局所密度近似を用いた密度汎関数理論の計算が非常に広く用いられているのは、この一つのユニークな計算手法で物質の多様性を(ある程度)正確に記述でき、(調整パラメータを多く含むモデル計算と異なり)実験に対して一種の独立性、あるいは予言能力をもつと期待されているからである。

さて、基底状態が長距離秩序を持つ場合には、密度のほかにも他の密度を含めることがある。例えば、磁気秩序状態に対して、電子密度の他にスピン密度を含める(スピン密度汎関数理論)のはその典型例である。密度汎関数理論のこのような拡張は超伝導状態についても考えることができる。すなわち、正常電子密度のほかにも異常電子密度を考えるのである。この結果、Kohn-Sham方程式はKohn-Sham Bogoliubov-de Gennes方程式に拡張されることになり、さらにそこから線形化されたギャップ方程式が導かれる。ギャップ方程式は固有方程式の形をしているが、そのカーネルは交換相関エネルギーを異常密度で汎関数微分することによって求められる。考えたい超伝導機構を記述するのに十分な精度の交換相関エネルギーを用意し、そこから求めたカーネルを用いてこのギャップ方程式を解けば、任意の機構の転移温度に対する効果を見積もることが出来る。

超伝導密度汎関数理論の重要なメッセージは、この世には(従来型、非従来型を問わず)あらゆる超伝導体を正しく記述する交換相関汎関数が存在し、そこからギャップ方程式を構築すれば、任意の超伝導体の転移温度が実験を参照せずに計算できるということである。ただ、我々はその具体形をまだ知らないで、その形(あるいはそれに近い形)を探索する、ということが課題となる。文献[3]で示されている結果は、従来型超伝導

に対する一つの解答、ということができる。

ここで、超伝導密度汎関数理論と、グリーン関数を用いた、伝統的なMigdal Eliashberg理論を比較しておこう。Migdal Eliashberg理論について教科書を開いて調べてみると[7]、電子格子相互作用による電子の自己エネルギーの効果と、電子格子由来の相互作用とクーロン相互作用のエネルギースケールの違いがもたらす遅延効果が取り込まれている、と説明されている。Migdal Eliashberg理論におけるギャップ方程式は様々な近似を導入することで解くことができる。有名なものとして、転移温度をあわすMcMillanの式[8]というものがある。

$$T_c = \omega_D / 1.20 \exp(-1.04(1+\lambda)/(\lambda - \mu^*(1+0.62\lambda)))$$

ただし λ は電子格子相互作用をあらわし、 μ^* は遅延効果によって弱められた遮蔽クーロン相互作用の効果を表す。BCSの方程式と比べて、指数関数の中身が違っているが、分子が電子格子相互作用の結果、電子が重くなる効果をあらわし、分母にはクーロン相互作用によって電子間引力が弱められる効果が入っている。遅延効果を定量的に見積もるのは非常に難しく、多くの場合は μ^* をパラメータにおいて実験と比較することが多い。 μ^* を調整パラメータにしてしまうと、計算が経験的なものになってしまい、理論に予言能力を求めることができなくなってしまう。この点がMcMillanの式の限界とされている。

さて、密度汎関数理論において、電子の有効質量増大の効果や遅延効果はどのように表現されるのだろうか？ Migdal Eliashberg理論はGreen関数を基礎においているが、これらの効果を記述するのに、Green関数が周波数依存性をもつという事実が最大限に活用されている。一方、密度汎関数理論は、密度という静的な量を基礎においているので、これらの動的な効果を記述するのは一見不可能なように思える。しかしながら、超伝導密度汎関数理論のギャップ方程式のカーネルには周波数依存性はないものの、Kohn-Sham軌道依存性がある。実際、文献[3]で示されている、単体のアルミニウムやニオブに対する計算結果を見ると、フォノンに関する量はフェルミ面近傍、デバイ周波数程度のエネルギースケールの状態にのみ値があることがわかる。一方、例えばクーロン相互作用はフェルミエネルギー程度の高エネルギー状態の間にも有限の値がある。この異なるKohn-Sham状態依存性を考慮すると密度汎関数理論の枠内でも適切な大きさの転移温度が得られる、というわけである。この方法論では、McMillanの式における μ^* のような、経験的パラメータがいっさい登場しないという点を再度強調しておく。

3. プラズモン機構

前節で、超伝導密度汎関数理論の基本的な考え方を紹介した。文献[3]では、ギャップ方程式の中のカーネルをどのように構築していくか、が詳述されている。実際の構築にあたっては、フォノンを媒介とする標準的な超伝導体を念頭においてMigdal Eliashberg理論を参照にしているため、フォノン機構以外の超伝導体の転移温度を再現することについてはあまり期待できない。実際、文献[3]で示されているギャップ方程式を銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体に適用しても高い転移温度は得られない。最近の我々の計算例でも、数十Kの転移温度をもつ層状窒化物高温超伝導体[9]やフラーレン超伝導体[10]の転移温度は実験値の半分以下に過小評価されることがわかっている。

このような、従来型の機構ではその転移温度がよく理解できない物質に対しても有効な交換相関カーネルを構築することは、新超伝導体の物質設計の可能性を広げる上で重要な意味を持つと考えられる。非従来機構としては、スピン揺らぎ機構、軌道揺らぎ機構、エキシトン機構、プラズモン機構など、様々な機構が提案されているが、それらすべてを完璧に取り込む汎関数をいきなり目指すのは現実的でない。そこで、我々は、非従来機構超伝導を記述する超伝導密度汎関数理論の第一歩として、プラズモン機構を考慮にいれた交換相関汎関数を構築することを考えた [5]。

プラズモンを媒介として超伝導を実現するアイデアは、今から35年ほど前にTakadaによって提案された[11]。この論文では、2次元、3次元の電子ガスの基底状態の相図が求められている。それによると、フォノンが存在しない場合においても、電子の密度が十分に薄い場合は、プラズモンを媒介として、超伝導状態が実現することが示されている。最近、いくつかの半導体に強い電場をかけることで電荷を少量ドーピングし、系を超伝導状態にする実験が報告されている[12]。中には、超伝導転移温度を密度の関数としてプロットすると超伝導相がドーム状になる例も見つかっている[13]。Takada自身がモデル計算で示している様に[14]、電荷密度が薄くドーピングされた場合には、プラズモンのエネルギースケールが低くなってプラズモンがクーパーペア形成に重要な役割を果たし、フォノンと協調して超伝導転移温度を上昇させることがある。このため、プラズモン機構の超伝導は昨今注目を集めている。

文献[3]で示されている定式化では、プラズモン機構を超伝導密度汎関数理論に取り込むことができない。それは、教科書的なMigdal Eliashberg理論[3]に従って、遮蔽されたクーロン斥力に静的な近似が導入され、誘電関数の動的な構造の情報は一切入ってこないからである。一般に誘電関数の動的な構造のエネルギー

ケールはフォノンのエネルギースケールに比べると非常に大きいので、この近似は正当化されるが、プラズモンのエネルギースケールが小さい場合は適切な近似ではない。そこで我々は、フォノン媒介の引力だけでなく、遮蔽クーロン斥力の動的構造も取り込んだ定式化を行った[5]。我々の方法を用いれば、プラズモン機構の超伝導やプラズモンとフォノンの協調機構も統一的に取り扱うことができる。

4. 高圧下 Li への適用

前節で説明した手法の有効性を調べるため、我々は高圧下のLiの転移温度を計算した。単体のLiを調べる理由は二つある。一つは、単体Liの電子状態が非常に単純であることである。固体物理学の教科書にあるように、Liのバンドは自由電子ガスモデルでよく記述される。電子ガスモデルで表現されたときの電子密度も低く、ちょうどTakadaが35年前に考えた状況[11]に近い物質といえる。Liを調べるもう一つの理由は、転移温度が高いことである。Liの転移温度は常圧下では1 mKに満たない非常に低いものであるが、数十GPaの圧力をかけると十数Kにまで転移温度が上昇する。この転移温度は単体としては非常に高い転移温度で、その起源を明らかにすることは基礎科学的な観点からも興味深い。そこで、この高圧下での高い転移温度が新しい方法論で再現できるかを調べた。

まず、圧力をかけると、系全体が固くなるため、フォノンのエネルギースケールは高くなり、また、電子格子相互作用も強くなる。しかしながら、ここにクーロン斥力の効果を文献[3]に従って静的近似の範囲で導入すると、転移温度は過小評価される。一方、我々の新しい定式化に従って転移温度を見積もると、実験との一致がよく見ることが取れる(図1参照)。この計算は、高圧下のLiにおいて、プラズモンとフォノンが協調して高い転移温度を実現していることを強く示唆するものである。

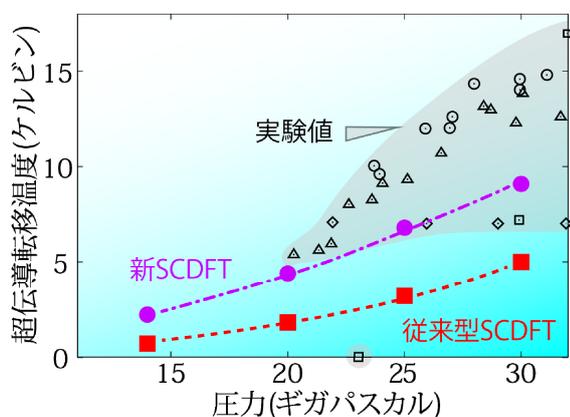


図1 高圧下Liの超伝導転移温度。赤線が従来型の超伝導密度汎関数理論の結果で、紫線が新しい方法論による見積もりを表す。

5. まとめ

以上、本稿では、非従来型超伝導を記述する超伝導密度汎関数理論の構築にむけての最近の我々の取り組みを紹介した。上でも述べたように、超伝導密度汎関数理論の枠組み自体は超伝導の発現機構によらずに成立する。従って、原理的には、この世には、あらゆる超伝導を記述する交換相関汎関数が存在するはずである。問題は、それが計算コストの観点からも取り扱いやすい形で表現できるか、という点である。この問題については、悲観的な見通しをたてようと思えばいくらでも悲観的になりえる。ここはむしろ意識して楽観的にならなければこの分野における興味深い進展はありえないと考えている。新春ということで、あえて威勢のよいことを書かせていただいた。

参考文献

- [1] これは筆者の一人(有田)が大学院生だったころ、ある統計力学の研究会で聞いた話であるが、身近な先輩にこの話をしたところ、その先輩は言下に「自分は理論家であるが、転移温度に興味をもつ」と断言された。物性理論の分野でどちらの量に興味を持つ人が多いかは意見のわかれるところかもしれない。
- [2] 強い物質依存性とは別個の問題として、第一原理電子状態計算は、通常数十 eV のエネルギースケールの計算をはじめるとい問題もある。その極めて大きいエネルギースケールの計算から 1 K 程度の超伝導転移温度という物理量が本当に精度よく求められるか、という問題は自明でなく、しばしば「自分は信じられない」といった厳しいコメントを頂くことがある。確かに第一原理計算でよく使われる局所密度近似では、バンド絶縁体のギャップを 1000 度以上の温度スケールで過小評価する傾向があることが知られている。そのような誤差を含んだ電子状態から出発して 1 K の精度で超伝導転移温度が計算出来る訳がない、という批判はもっともらしい。ただ、バンド幅 10 eV の系のハミルトニアンのすべてのパラメータを人工的に 1.1 倍に定数倍すると、転移温度はどれくらい増大するか? という問題を考えると、この問題に対して、それほど悲観的になる必要はないことがわかる。転移温度は 1 万度も増大するのではなく、単に 10 パーセントの誤差をもつだけである。
- [3] M. Lüders, M. A. L. Marques, N. N. Lathiotakis, A. Floris, G. Profeta, L. Fast, A. Continenza, S. Massidda, and E. K. U. Gross, Phys. Rev. B **72**, 024545 (2005). M. A. L. Marques, M. Lüders, N.

- N. Lathiotakis, G. Profeta, A. Floris, L. Fast, A. Continenza, E. K. U. Gross, and S. Massidda, Phys. Rev. B **72**, 024546 (2005).
- [4] A. Floris, G. Profeta, N. N. Lathiotakis, M. Lüders, M. A. L. Marques, C. Franchini, E. K. U. Gross, A. Continenza, and S. Massidda, Phys. Rev. Lett. **94**, 037004 (2005).
- [5] R. Akashi and R. Arita, Phys. Rev. Lett. **111**, 057006 (2013).
- [6] たとえば、R. Martin, “Electronic Structure”, Cambridge University Press
- [7] たとえば、J. R. Schrieffer, “Theory of Superconductivity”, Westview Press
- [8] P. B. Allen and B. Mitrović, in Solid State Physics, edited by H. Ehrenreich, F. Seitz, and D. Turnbull (Academic, New York, 1982), **37**, 1.
- [9] R. Akashi, K. Nakamura, R. Arita, and M. Imada, Phys. Rev. B **86**, 054513 (2012).
- [10] R. Akashi and R. Arita, Phys. Rev. B **88** 014514 (2013).
- [11] Y. Takada, J. Phys. Soc. Jpn. **45**, 786 (1978).
- [12] K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, H. T. Yuan, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa and M. Kawasaki, Nature Nanotechnology **6**, 408–412 (2011).
- [13] J. T. Ye, Y. J. Zhang, R. Akashi, M. S. Bahramy, R. Arita, and Y. Iwasa, Science **338**, 1193 (2012).
- [14] Y. Takada, J. Phys. Soc. Jpn. **49**, 1267 (1980).

<トピックス 2>

人工ピン止め点導入型 REBCO 線材

“nPAD-YBCO[®]”の開発と

Y 系超電導電流リードへの応用

Development of the artificial pinning centers doped REBCO coated conductors as “nPAD-YBCO[®]” and Y system superconducting current leads

昭和電線ケーブルシステム株式会社

木村 一成、高橋 亨

SWCC Showa Cable Systems Co., Ltd.

K. Kimura, K. Takahashi

1. はじめに

REBCO (RE: Rare earth) 超電導線材と称される REBa₂Cu₃O_{7-x} 超電導線材の性能が向上するにつれ、電力、医療など様々な分野において超電導機器の実用化に向けた開発が進んでいる。例えば、超電導加速器や回転機など高磁場領域で運転される機器応用を考えた場合、使用する超電導線材も磁場に晒される領域で使用されることになる。そのため、磁場中において優れた性能を有する線材が求められている。すなわち、REBCO超電導線材の磁場中特性向上は重要な研究開発課題である。

我々は、本焼工程にバッチ式一括焼成プロセスを用いた、有機酸塩塗布熱分解法 (Trifluoroacetate metal organic deposition: TFA-MOD法) によるREBCO超電導線材の開発を行っており、高 I_c 化、長尺化、長尺均一性および歩留り向上を主とした研究開発を進めている[1]。その中で、磁場中特性の向上を目的とした、人工ピン止め点 (Artificial Pinning Centers: APC) 導入型REBCO超電導線材の開発を行っている。線材の作製方法としては、Miuraらが開発したAPC導入型REBCO超電導線材の作製方法を当社のバッチ式プロセスに適用したものである[2-3]。また、APCについては、非超電導相であるBaZrO₃ (BZO) ナノ粒子を超電導層内に微細分散させる方法を採用した。開発した人工ピン導入型REBCO超電導線材は、“nPAD-YBCO[®]” (Nano- Particle Artificial-pinning-center Distributed YBCO) とした。本報告では、短尺試験片を使用した実験を基に、100 m級nPAD-YBCO[®]の作製を試みた。

また、我々は、1996年から、販売をしている超電導電流リードに着目した。現在、当社ではBi系超電導バルクを用いた電流リードの販売を行っている。しかし、それらは磁場にさらされる環境下での通電特性や機械強度に

課題を残していた[4-5]。また、大電流を要する超電導機器や電流リード設置場所の磁場環境によっては複数のBi系電流リードを使用する必要があった。このような問題点を解決するには、磁場中特性の向上及びバルク体の機械特性を向上させることが必須となる。そこで、我々は、超電導電流リードの超電導材料に、磁場中特性に優れたnPAD-YBCO[®]を適用することで問題解決を図った[6-7]。これにより、高磁場を発生する超電導マグネット近傍への設置が可能となる。また、超電導材料がバルク体からテープ線材に変更することにより、超電導電流リードの機械特性も改善され、特に曲げ歪等の外部より加えられる応力に耐え得るようになる。

2. 人工ピン止点導入型 REBCO 超電導線材 nPAD-YBCO[®]の開発

2-1 nPAD-YBCO[®]の作製方法と評価方法

当社ではいくつかの超電導テープ線材の開発を行っているが、磁場中特性の向上を目的とした開発では、Y元素をGd元素に一部置換したYGdBaCuO (YGdBCO) 超電導体を採用している(図1)。

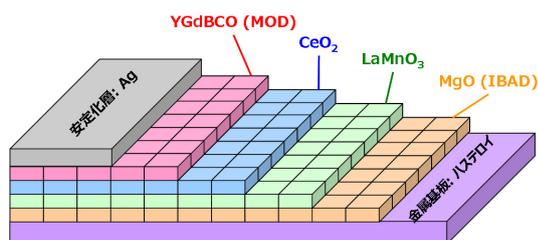


図1 nPAD-YBCO[®]の線材構造模式図

線材の作製方法を以下に示す。Y、Gd、Ba元素をトリフルオロ酢酸塩、Cu元素をオクチル酸塩とし、金属元素組成比がY:Gd:Ba:Cu=0.77:0.23:1.5:3.0になるように調製し、1-methoxy-2-propanolを用いて粘度調整を行い、MOD原料溶液とした。さらに、超電導体を構成する金属元素総量に対して2.0 at%のZr元素をオクチル酸塩として添加した。作製したMOD原料溶液をHastelloy[®]/GZO/Y₂O₃/MgO(IBAD)/LaMnO₃/CeO₂で構成される中間層付金属基板上に、Reel-to-reel (RTR)式塗布・仮焼装置にて、最高温度450 °C、線速5 m/hourの条件にて超電導前駆体膜を形成し、仮焼テープとした。その仮焼テープをバッチ式焼成炉にて、水蒸気を含む減圧低酸素雰囲気中、最高到達温度760 °C、保持時間10時間の条件下で本焼成を行った。その後、Ag安定化層を形成し、酸素雰囲気中、500 °Cで3時間保持することによってポストアニールを行い、目的とする人工ピン導入型REBCO線材(Y_{0.77}Gd_{0.23})Ba₂Cu₃O_y + BaZrO₃を得た。

作製したテープ線材のI_c値は、液体窒素中において、直流四端子法にて評価した。I_c値は電界基準 1×10⁻⁶ V/cmで定義した。長尺テープ線材のI_c分布は、RTR式の連続I_c測定装置にて、電圧端子間距離150 cmで直流四端子法にて測定し、電界基準 5×10⁻⁷ V/cmで定義した。また、印加磁場角度依存性についてはスプリット型の超電導マグネットを用い、外部印加磁場を3 T、サンプルの角度をab軸平行磁場の時が90°、c軸平行磁場の時を180°として20°~220°の角度範囲で測定を行った。

2-2 短尺試料の作製と評価

作製した仮焼膜から短尺試料を切り出し、本焼を行った。77 K、自己磁場中にて本試料のI_c測定を行ったところ、I_c = 660 A/cm-w (J_c = 3.5 MA/cm²)という高い特性が得られた。この短尺試料について磁場中の特性を評価した。J_cの液体窒素中、3 Tにおける磁場印加角度依存性評価結果を図2に示す[8]。

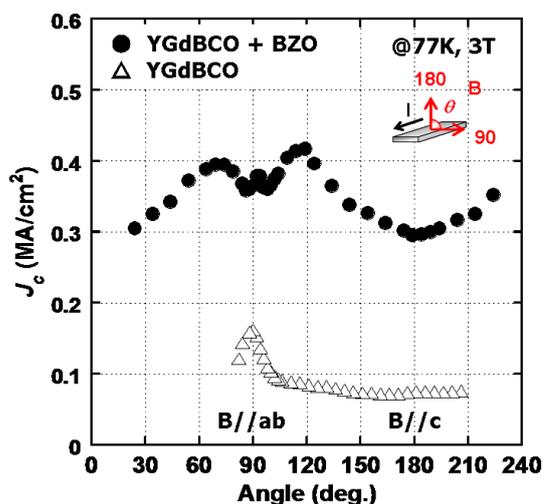


図2 nPAD-YBCO[®]のJ_c磁場印加角度依存性

人工ピン止め点を導入していないYGdBCO線材と比較すると、nPAD-YBCO[®]は、飛躍的な特性向上が認められた。I_c値については、56 A/cm-w(液体窒素中、3 T)であった。この結果から、人工ピン止め点が導入され、磁場中での特性が向上したことが判る。

2-3 長尺 nPAD-YBCO[®]の作製と評価

開発したnPAD-YBCO[®]の応用機器への展開を考えた場合、線材単長や線材コストが非常に重要になってくる。TFA-MOD法自体が低コストの手法ではあるが、歩留まり向上によって、さらに低コストでの製造ができる可能性がある。したがって、1バッチの一括焼成で可能な限りの線材を本焼することが有効になってくる。そこで、短尺試料の実験結果を基に、nPAD-YBCO[®]の長尺線材作製を試みた。本報告では、120 m級線材を作製し

評価した結果を示す。

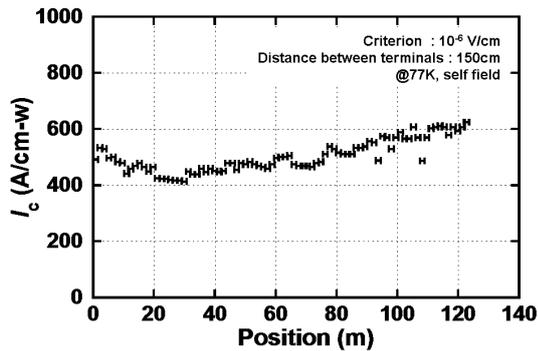


図3 120 m長nPAD-YBCO[®]の I_c 分布

作製した120 m長nPAD-YBCO[®]の長手方向の I_c 分布をRTR式連続通電 I_c 測定装置を用いて調査した。結果を図3に示す[9]。 I_c 値の最大と最小で200 A/cm-wの差はあるが、高特性を示す結果であった。この線材の磁場特性は120 mのうち、先端、後端、30 m位置(図中最も I_c 値が低い箇所)からそれぞれ短尺試料を切り出し、液体窒素中、3 Tの環境下で評価した(図4)[9]。いずれの試料も、磁場を試料面に対して垂直($B//c$)に印加した場合において最小値を示し、 $I_c > 50$ A/cm-w($J_c > 0.2$ MA/cm²)であることが判った。人工ピン止め点を導入していない線材と比較すれば磁場中において高特性が得られてはいるが、図2に示した短尺で作製した試料と比較すると特性としては劣る。短尺試料の特性を維持したまま、大型のバッチ式電気炉で長尺を作製することが今後の課題となる。

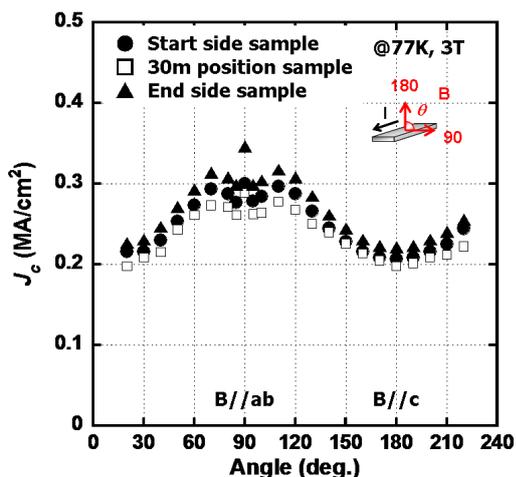


図4 120 m長nPAD-YBCO[®]の J_c 磁場印加角度依存性

3. 人工ピンニングセンター導入型イットリウム系超電導線材を用いた超電導電流リードの開発

3-1 nPAD-YBCO[®]を用いた超電導電流リードの作製

表1にnPAD-YBCO[®]を用いた超電導電流リードの仕様を示す。

表1 nPAD-YBCO[®]電流リードの仕様

項目	YPL①	YPL②	YPL③
通電容量	250 A	500 A	1,500 A
温度範囲	77 K-4.2 K		
外部磁場	0 T		
熱侵入量	0.02 W	0.05 W	0.11 W
サイズ (mm)	220 ^L × 9 ^w × 16 ^t	220 ^L × 16 ^w × 16 ^t	220 ^L × 23 ^w × 16 ^t

今回の実験では、表1に示した通電容量500 A級のnPAD-YBCO[®]電流リードを作製し評価を行った。本電流リードに使用したnPAD-YBCO[®]は、幅5 mm、厚さ0.12 mmであり、テープ線材4本を使用した。使用したnPAD-YBCO[®]は、 $I_c \geq 175$ Aであるため、電流リードの設計 I_c は700 A以上である。線材の両端を銅電極に半田を用いて接続し、GFRP製支持部材で補強して超電導電流リードとした。作製した電流リードの外観を図5に示す。

3-2 nPAD-YBCO[®]電流リードの通電特性

500 A級nPAD-YBCO[®]電流リードの通電特性を評価するため、各超電導線材上に電圧端子を設置した。電圧端子間距離は50 mmとし、電流リード全体の電圧は



図5 500 A級nPAD-YBCO[®]電流リードの外観

銅電極両端で測定し、電圧端子間距離を100 mmとした。電圧端子設置位置を図6に示す。電流リードは液体窒素中で浸漬冷却し、 I_c 測定を行った。 I_c 測定は直流4端子法を用い、1 μ V/cmの電圧発生時の電流値を I_c とした。さらに、冷却方法による I_c 値の相違を確認するため、伝導冷却においても測定を行った。ただし、設備の制約により、500 A級nPAD-YBCO[®]電流リードの1/4モデルで

実施した。1/4モデルは、nPAD-YBCO[®]を1本使用したもので、銅電極及び支持部材は同様とした。伝導冷却により電極両端を77 Kに制御し I_c 測定を行った。

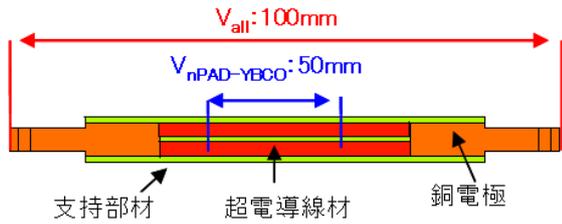


図6 電圧端子計測位置

図7に500 A級 nPAD-YBCO[®]電流リードの液体窒素中、自己磁界中における通電特性を評価した結果を示す。電極間電圧は両電極の接続抵抗を差し引いた電圧を示しており、全体の I_c 値は780 Aとなった。設計値を満たした I_c 値が得られ、500 A級nPAD-YBCO[®]電流リードとしては十分な特性を有していることが確認された。

電流リードの低温端側に配置されている銅電極のジュール発熱は、そのまま熱侵入量として超電導機器に侵入するため、この部分の接続抵抗を低く抑える必要がある。今回作製したnPAD-YBCO[®]電流リードの熱侵入量の目標を0.25 Wとし、線材と銅電極との接続抵抗を1.0 $\mu\Omega$ 以下となるように設計した。通電試験結果より200 A~400 A通電時の接続抵抗を求めたところ、低温端側の接続抵抗は0.71 $\mu\Omega$ であったことから、熱侵入量は0.18 Wと見積もられ、設計値を充分満たしていることが確認された。さらに、図7の結果より I - V カーブが立ち上がり始める電流値である600 Aで30分間通電出来ることを確認した。通電中、電極間からの発生電圧は一定で、クエンチなどの異常な挙動は認められず、安定した通電性能が確認された。

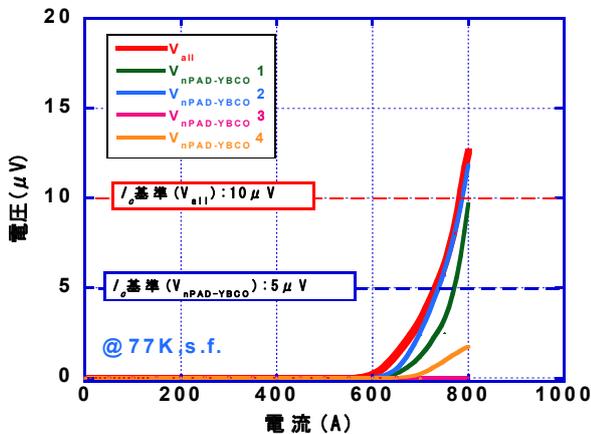


図7 77K、自己磁界における500 A級nPAD-YBCO[®]電流リードの通電特性

図8に77 K、自己磁界中における500 A級nPAD-YBCO[®]電流リードの液体窒素浸漬冷却とGM冷凍機による伝導冷却での通電試験の比較結果を示す。液体窒素浸漬冷却での I_c 値は200 Aであり、伝導冷却での I_c 値は206 Aとほぼ一致していることから、伝導冷却でも液体窒素浸漬冷却と同等の性能が得られることが確認された。これらの結果から、本500 A級電流リードにおいては、伝導冷却での使用においても設計通りの通電特性が得られることが確認された。

3-3 nPAD-YBCO[®]電流リードの熱侵入量評価

一般的には、電流リードの熱負荷には、外部より電流リードを通して伝達される熱と通電時に発生するジュール熱の二つがある。超電導電流リードの熱侵入量 Q_c は、次の方程式(1)によって記述される。

$$Q_c = \frac{S}{L} \int_{T_L}^{T_H} \lambda(T) dT + I_{op}^2 R_L \quad (1)$$

S は電流リードの断面積、 L は電極間距離、 T_H は高温端側の温度、 T_L は低温端側の温度、 λ は超電導体、構成部材の熱伝導率、 I_{op} は通電容量、 R_L は低温端側の接続抵抗をそれぞれ意味する。

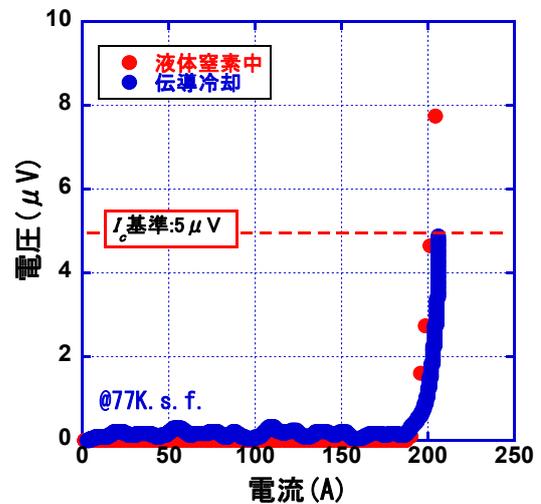


図8 500 A級nPAD-YBCO[®]電流リード1/4モデルの通電特性の比較

式(1)を用い、nPAD-YBCO[®]電流リードの T_H (77 K)から T_L (4.2 K)の間における熱侵入量 Q_c を算出した。従来品であるBi系超電導電流リードと熱侵入量を比較した結果を図9に示す。同様な通電電流値で両者を比較した場合、nPAD-YBCO[®]電流リードの熱侵入量は、Bi系電流リードの60%に低減されていることが判る。これはBi超電導バルク体よりも、nPAD-YBCO[®]の方が77 Kでの J_c が高いことから、使用する超電導体の総量を低減することが出来たためと考えられる。

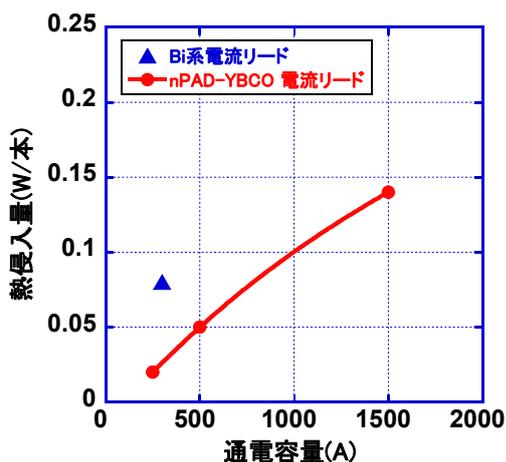


図9 4.2 Kから77 Kにおける通電容量に対する熱侵入量の比較

4. まとめ

TFA-MOD 法による APC 導入型 YGdBaCuO 線材 nPAD-YBCO[®]の開発を行った。得られた線材の磁場中特性を調べたところ、ピン止め点を導入していない線材と比較して特性が大きく向上しており、APCの導入効果が認められた。また、120 m級長尺線材の作製にも成功し、APC導入効果による磁場中での特性向上が確認できた。

また、nPAD-YBCO[®]を用いた電流リードの設計及び試作・評価を行った。500 A級nPAD-YBCO[®]電流リードの I_c は780 Aであり、設計値を満たす通電特性を有していることが確認された。連続通電試験では600 Aの電流を液体窒素中、自己磁界中において30分間安定して通電できることが確認された。さらには、冷凍機による伝導冷却において、液体窒素浸漬冷却と同等の通電特性が確認された。試作を行ったnPAD-YBCO[®]電流リードの77 Kから4.2 Kの熱侵入量は、従来品のBi系超電導電流リードとの比で、約60%の低減が確認された。今回開発したnPAD-YBCO[®]電流リードは低熱侵入量であり、磁場中での臨界電流密度を向上させたnPAD-YBCO[®]を適用していることから高磁場環境で運転される超電導機器への適用も期待される。

謝辞

本研究の一部は、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として、新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO)からの委託を受け実施したものである。また、電流リードの測定におきまして鉄道総合技術研究所にご協力頂きました。心より感謝致します。

参考文献

- [1] R. Hironaga, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference **87** (2013) 173.
- [2] M. Miura, *et al.*, Appl. Phys. Express **1** (2008) 051701.
- [3] M. Miura, *et al.*, Appl. Phys. Express **2** (2009) 023002.
- [4] 本庄 哲吏 他: 昭和電線レビュー **44** (1994) 108.
- [5] T. Honjo, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 1486.
- [6] A. Kaneko, *et al.*: Abstracts of CSSJ Conference, **74** (2006) 184.
- [7] Y. Yamada, *et al.*, Cryo. Soc. Jpn. **45** (2010) 246.
- [8] K. Kimura, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2013) 6601704.
- [9] K. Kimura, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference **88** (2013) 184.

<トピックス 3>

電車走行試験に成功、鉄道用超電導ケーブル —実用化へ向け本格始動—

Success of the train running test
by superconducting cables

— Go into high gear toward practical application —

(公財) 鉄道総合技術研究所
富田優

Railway Technical Research Institute
M. Tomita

1. はじめに

鉄道は将来にわたって人・ものの輸送の根幹となるものであり、高度な文明社会を支える公共性の高い技術であり、信頼性(安全性、安定性)、利便性(速達性、快適性)、経済性、環境調和性を有する鉄道は、エネルギー消費の徹底的な合理化・効率化が必要とされる今世紀に、ますます重要性を増していくと考えられる。鉄道技術基盤で電力・電気技術の果たす役割は大きい。そこでは、超電導の持つ低損失、高密度電流、高磁場といった特性に基づいた新しい機器やシステムが大いに活躍できる。特に電気抵抗がゼロで直流送電できる超電導技術を鉄道用の送電線などに適用することで、回生効率の上昇、電力損失の低減、変電所の負荷平準化や集約化、レール電位の抑制などが期待される。

これまで鉄道総研では、超電導ケーブルを送電線に適用することを想定し(図1)、研究開発を進め[1,2]、超電導線材の製作および特性評価[3]、それらの結果に基づいた超電導ケーブルのプロトタイプを製作し[4,5]、各種の特性評価試験を行ってきた。本稿では、30 m長の鉄道用超電導ケーブルを作製し、鉄道総研構内に導入し、超電導ケーブルを用いた電車の走行試験を行ったので報告する。

2. 30 m 長鉄道用超電導ケーブルの開発[6]

鉄道総研ではこれまで鉄道用超電導ケーブルの設計・検討を行ってきたが、それらの検討結果を踏まえ、30 m長鉄道用超電導ケーブルの製作をした。製作した超電導ケーブルは図2に示すように、液体窒素がフォーム内とケーブルと断熱管の間を流れる対向流型を採用した。

鉄道用超電導ケーブルの冷却システムでは、冷却システムの敷地は極限られた狭い空間であり冷却システムのコンパクト化は不可欠であるため、図3に示す従来

型の直接冷却方式ではなく、図4に示す間接冷却方式を採用した。ユニットを一体化できる間接冷却方式では、過冷却液体窒素の圧力を大気圧、即ち大気解放系にすることも可能で、液体窒素温度を圧力とは無関係に制御でき、冷却システムの制御性を格段に向上できる。

超電導ケーブル製作後の特性評価のため、超電導ケーブルの両端1 m程度(サンプルA、及びサンプルB)を切り出し、大気圧液体窒素中(77 K)で通電試験を行った。通電試験結果を表1に示す。線材本数から想定される超電導ケーブルの臨界電流値(I_c)は、往路導体層で6120 A(Bi系超電導線材34本)以上、帰路導体層で6840 A(Bi系超電導線材38本)以上であることから、ケーブル製作時の巻線による超電導特性の劣化はなく、また円筒配置による垂直磁場の低減効果により I_c の向上が確認された。

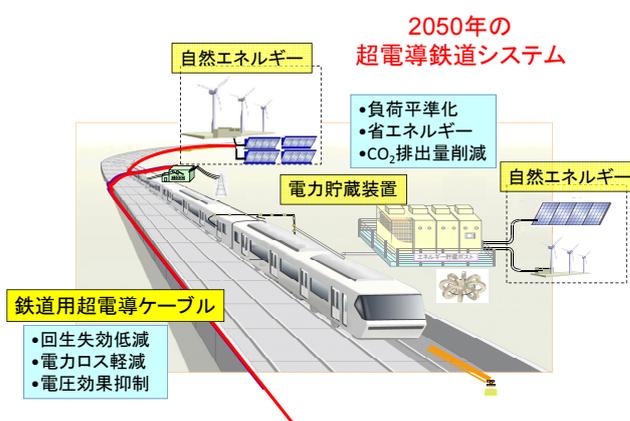


図1 次世代鉄道システム

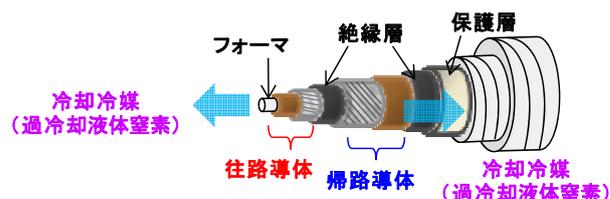


図2 対向流型超電導ケーブル

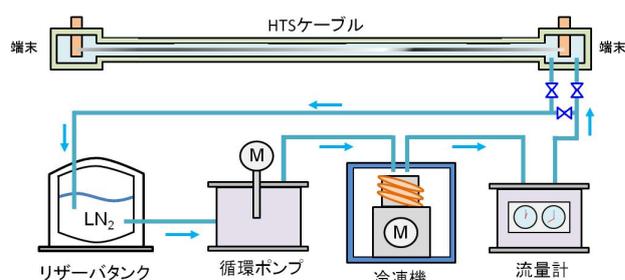


図3 直接冷却方式

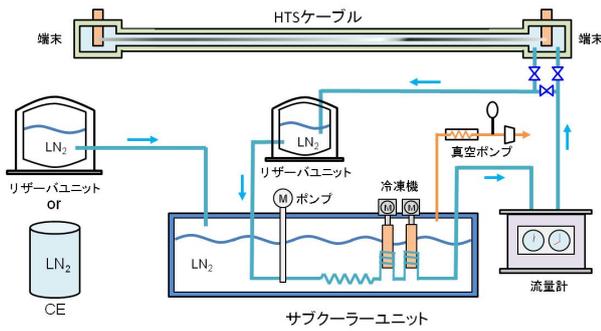


図4 間接冷却方式

表1 製作した鉄道用超電導ケーブルの
通電試験結果 (両端 1 m長)

サンプル	測定箇所	I_c 測定結果
A	往路導体層	6950 A
	帰路導体層	7450 A
B	往路導体層	6980 A
	帰路導体層	7420 A

図5に鉄道総研の構内試験線に敷設・導入した30 m長鉄道用超電導ケーブルを示す。超電導ケーブルの両端には電流末端が設置されている。超電導ケーブルはピット埋設方式により敷設しており、埋設部は15 mである。また、ケーブルの半径(R)は、両端の立ち上がり部では両端ともに $R = 5$ mで敷設を行った。

また冷却システムとしては低温発生ユニット(冷凍機とサブクーラ)とリザーバタンクと循環ポンプを全て一体とした一体型冷却システムを用いた。

3. 鉄道用超電導ケーブルを用いた車両走行試験

まず敷設した鉄道用超電導ケーブルシステムにおいて、通電試験を行った。図6に通電試験の結果を示す。ケーブル敷設による超電導特性の劣化はなく、また冷却、課電試験などの各種試験から、鉄道用超電導ケーブルシステムとしての健全性を確認し、鉄道用として運用可能であることを確認した。

そして2013年に世界初となる超電導ケーブルによる鉄道車両の走行試験に成功した[7]。走行試験に用いた鉄道車両を図7に示す。また、図8に超電導ケーブルを介した車両の走行試験の様子を示す。電車は最大5ノッチで加速させ、約40 km/hの速度で走行を行った。

車両走行試験時の列車速度、電流、電圧を図9に示す。図の赤線から、超電導ケーブルを介して車両に最大で200 A程度の電流が送られていることがわかる。また図の青線は電圧を示しており、一部電圧が低下しているが、これは回路に保護抵抗を導入しているためである。



図5 製作・敷設した30 m長鉄道用超電導ケーブル (鉄道総研 構内試験線)

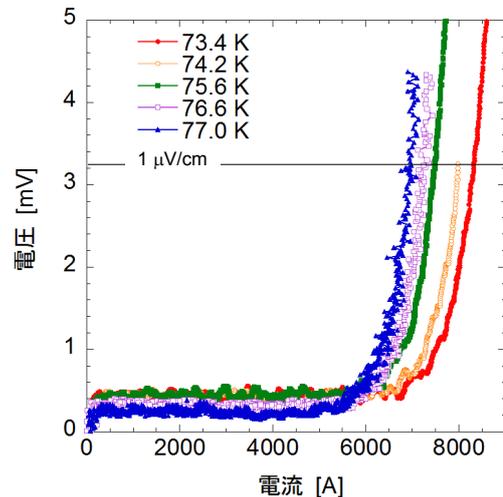


図6 30 m長鉄道用超電導ケーブルの通電試験結果

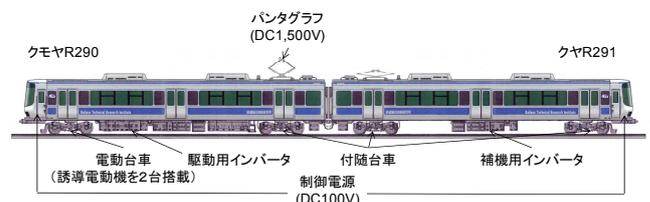


図7 走行試験に用いた車両



図8 超電導ケーブルを用いた車両走行試験

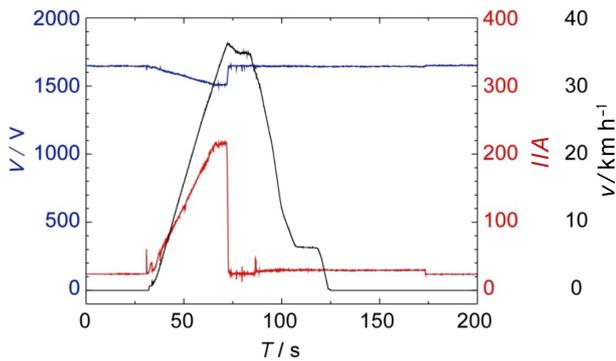


図9 車両走行試験時の速度、電流、電圧

4. まとめ

30 m長の超電導ケーブルを製作し、鉄道総研の構内試験線に敷設・導入を行った。このケーブルを用いて、冷却試験や、通電、課電試験などによる評価を経て、2013年に世界初となる超電導ケーブルによる車両の走行試験に成功した。今後は、検証試験を通して、運用上の課題、問題点を抽出し、鉄道事業用として、費用対効果も含め十分に適用可能な超電導ケーブルの実現を目指す。

謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)の「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援を受けて実施している。

参考文献

- [1] M. Tomita *et al.*: “Design of superconducting cable for railway system”, Abstracts of CSJ Conference **80** (2009) 181.
- [2] Tomita *et al.*: “Next generation of prototype direct current superconducting cable for railway system”, J. Appl. Phys. **109**, (2011) 063909.

- [3] Y. Fukumoto *et al.*: “Characterization of HTS wire for railway system”, Abstracts of CSSJ Conference **86** (2012) 101.
- [4] 富田 優, 他: 鉄道用超電導ケーブルの要素技術の構築, 鉄道総研報告, Vol. **26**, No. 12 (2012) 45.
- [5] M. Tomita *et al.*: “Development of 10 kA high temperature superconducting power cable for railway systems”, J. Appl. Phys. **111**, (2012) 063910.
- [6] M. Tomita *et al.*: “Research and Development of Superconducting Cables for Railway Systems”, Abstracts of CSSJ Conference **87** (2013) 20.
- [7] M. Tomita *et al.*: “Train Running Test Using Superconducting DC Cables for Railway Systems”, Abstracts of CSSJ Conference **88** (2013) 30.

<会議報告 1>

超伝導科学技術研究会 第 82 回ワークショップ会議報告 Report on the 82nd FSST Workshop

古河電気工業(株)
木村 昭夫
Furukawa Electric Co, Ltd
A. Kimura

超伝導科学技術研究会第82回ワークショップ「超伝導電磁石の大型化への挑戦」が、12月26日(木)に全日通霞ヶ関ビル大会議室で開催された。参加者は、53名であった。このワークショップは、(独)日本原子力研究開発機構委託調査事業で、現在進められている核融合実験炉ITERに続く原型炉のための調査の一環で開催された。

トップバッターとして、ヒッグス粒子発見によって今年のノーベル物理学賞に寄与したLHC (Large Hadron Collider)の現状と将来計画について、高エネルギー加速器研究機構の中本氏から「LHC加速器における超伝導技術」と題する講演があった。

LHCとは、世界最高エネルギー(7 TeV+7 TeV陽子)の衝突型円形加速器であり、その実現には超伝導電磁石がキーテクノロジーとなる。また、これらの超伝導電磁石は世界最大規模のシステムであり、周長27 kmの地下空間に長さ15 m、中心磁界8.33 T、1,232台の双極磁石をはじめとして多数の超伝導電磁石が配置されており、さらにこのシステムは超伝導ヘリウムにより1.9 Kに冷却されている。現在まで、4 TeVのエネルギーで運転されているが、2015年から6.5 TeVで運転する予定である。

次に「核融合開発の現状」と題して、核融合科学研究所の今川氏からの講演があった。

最初に核融合炉の基礎的な説明をされた後、現在建設中である核融合実験炉のITER(日本、EU、ロシア、アメリカ、中国、韓国、インドの7カ国の国際協力)とJT60SA(日本とEUの国際協力)の現状の紹介があった。ITERでは2019年に実験開始予定であるが、既に建築物の強度不足の修復や国際協力所以の決定に時間がかかっていることにより2024年頃に実験開始が遅れる見込みである、とのこと。超伝導導体は既に70%の生産が終了している。JT60SAは、ITERと同時平行でITERの補完研究や人材育成を目的として進められている。このようにITERの建設と運転を通して、原型炉に向けた開発課題が明確になることが期待され、期待通りのプラズマ閉じ込め性能が実証されれば、原型炉の建設段階に移行できる、とのことである。

「核融合原型炉の基本計画」と題して、日本原子力研究開発研究機構の飛田氏からは、実験炉であるITERから原型炉に向けた基本構想についての講演があった。

原型炉は、2030年代前半から建設が始まり2040年代後半から発電実証が開始されるスケジュールを想定している。原型炉の定義は国ごとに異なり、複数の形の原型炉もあり得るとのことである。日本の場合は、100万kW級の発電能力、1年程度の連続運転、トリチウム燃料の自給を目指している。炉心寸法は建設コストの制約により、ITERと同程度の寸法を想定している。超伝導コイルのトロイダル磁場コイルについてはITERより大型化を想定し、応力800 MPa、磁気エネルギー170 GJを設計値としている。使用される超伝導線材は、Nb₃SnとNb₃Alに絞られ、さらに熱処理方法のコストの観点からいずれもR&W法が必要であると考えられている。

休憩を挟んで、3件の超伝導材料に関する発表があった。

最初は、「ブロンズ法Nb₃Sn線材開発の現状と展望」と題して古河電工の杉本氏が報告された。

まず、核融合実験マグネット用のITER向けNb₃Sn線材について基本特性向上、量産性向上そして多重より線の通電性能向上(撚りピッチのショート化によるI_c劣化現象の抑制)が報告された。次に東北大学と進めているR&W型高強度Nb₃Snについての報告があった。Cu-Ni/NbTi強化やCuNb強化によるNb₃Sn線を開発してきたがR&W法においては、後者のCuNb強化法が重要な構成要素であることを説明された。これにより、R&W型Nb₃Sn線材に要求される方向性が見えてきたように思える。最後に核融合科学研究所と進めているアルミ合金被覆Nb₃Sn導体についての報告があり、FSW(摩擦攪拌接合)の適用により、アルミ複合化によるNb₃Sn導体への損傷が防止できることがわかり、大容量化+安定性への技術的課題を克服できる見通しがついた、とのことである。

「Nb₃Al線材開発の現状」について、物質・材料研究機構の伴野氏から、Nb₃Alの特徴と製法についてブロンズ法Nb₃Snと比較しながらその長所、短所を紹介された。最も大きな長所は耐歪特性でありR&W法線材として期待が寄せられている線材である。短所としては急熱急冷法という特殊な製法を利用すること、後付となる安定化銅の製作方法や量産化が課題である。

「HTS線材開発の現状」について、九州大学の木須氏から発表があった。

HTS線材として、Bi2212、Bi2223、RE123線材を例にあげてそれぞれの線材の長所、短所を比較した。Bi2212線材の長所としては、丸線化できる点であるが機械的強度に難点がある。Bi2223線材は、工業的に量

産されており、電流リードとしての実績もあるが、短所としては機械的柔軟性に劣る。RE123は柔軟性に優れ、線材の長さ方向の機械的強度も高いが、膜表面の垂直方向の機械的強度やテープ形状に起因する磁化電流の発生などに短所がある。

大型化を目指した試みとしていくつかの大容量導体の試作例の紹介があった。また、電流リードの紹介では、LHC加速器用として1000対以上のBi2223テープ線材をスタックしたものや、70 kA級のITER向けの電流リードの紹介があった。

磁石の大型化への挑戦として、磁石はNb系材料、電流リードはHTS材料と棲み分けが出来ており、特にNb系材料は要求仕様を満足させるための開発が着々と進められているという印象を受けたワークショップであった。

<会議報告 2>

第7回応用超伝導・低温工学アジア会議報告 Report on the 7th Asian Conference on Applied Superconductivity Conference

物質・材料研究機構 熊倉浩明

H. Kumakura

National Institute for Materials Science

7th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (ACASC 2013)が10月23-25日、トルコの Cappadocia で開催された。Cappadocia は世界遺産にもなっているトルコ有数の観光地であり、今回の会議ではアジアの多くの国から参加者があり、またアジア以外の国からも参加者があった。論文発表件数の多い国は、トルコ66件、日本30件、韓国29件、インド27件、中国21件、となっている。全体的に研究発表が活発に行われていたと思われるが、水準の高い論文発表は主に日本、韓国、中国、オーストラリアなどの国からなされていたと思う。本稿では、筆者にとって特に印象に残ったいくつかの研究発表について簡単に報告したい。

まず本会議の冒頭に、トルコ Ankara 大の Ali Gencer 氏がトルコの科学技術ならびに超伝導について講演した。まずトルコの科学技術について触れ、最近になって予算や学術論文数、ならびに世界におけるトルコの発表論文の割合も大きく増大していると強調した。同大では、現在 Center of Excellence for Superconductivity Research と命名された超伝導施設を建設中でありこのセンターについてもかなり詳しい紹介があった。同センターの設立は、国がお金を出した大きなプロジェクトで

あるとのことで、またどちらかというと基礎研究よりも超伝導の応用研究に重点を置いている様子がうかがわれた。特にビスマス系高温酸化物や MgB_2 の研究に力点を置くとのことであった。筆者はこの会議の後、同センターを訪問する機会を得たが、その建物の立派さには驚かされた。ACASC 2013での発表のレベルから判断して、現在のトルコの超伝導研究のレベルはまだ高くは無いと思われるが、今後大きく飛躍をして日本を脅かす存在になるのではないかと、という感想を持った。

中国科学院、電工研究所の Liye Xiao は「Review of recent progress of superconducting technology for powder in China」と題して講演した。中国においては、現在の発電量の950 GWのうち200 GWが国土の西側から大消費地の東側に送電されているとし、2050年には600 GWが西から東へ送電されるとの予想で、超伝導送電の有用性を強調した。また、超伝導トランス、超伝導限流器、SMESなどの開発についても触れ、これらに超伝導送電を含めた4つの要素からなる10 kWの Superconducting Substation が電工研究所に設置されて研究開発、試験が進められていると述べた。さらに、5層の Bi-2223 テープを使って直流の超伝導ケーブル(長さ360 m, 1.3 kW, 10 kA)を製造し、これによってアルミニウム製錬工場に電力を供給していると述べた。ちなみに5層のテープの内、4層は住友電工製、残りの1層は中国の INNOVA 製とのことである。

中国科学院の Dongliang Wang は「Superconducting properties of PIT processed MgB_2 wires and tapes at IEE, CAS」と題して in situ 法 MgB_2 線材について発表した。まず、高エネルギーボールミルを適用して高 J_c 化を達成している。純度96%の低品位結晶Bを使って80時間のボールミルを行うと、0.5時間のボールミルの場合の41倍の J_c が得られ、また上部臨界磁界や不可逆磁界も向上したとしている。また99.999%の結晶性Bを使い、ナノカーボンを添加して80時間ボールミルした混合粉末を使用して作製したテープの場合は、4.2 K、10 Tで43,000 A/cm²の高い J_c が得られたと述べた。 J_c は10,000 A/cm² 以上とのことである。また J_c の磁界方位による異方性も長時間のボールミルによって小さくなったと述べた。 J_c が向上する理由としてボールミルにより生成する MgB_2 の結晶粒が微細化し、ピンニング特性が向上したためとしている。次に原料混合粉末における有機物 $Y(C_2H_3O_2)_3$ 添加について話した。 $Y(C_2H_3O_2)_3$ 添加によって強磁界での J_c が向上するとし、最高値として4.2 K、12 Tで10,000 A/cm²に近い値が得られたとしている。 J_c が向上した理由としてBサイトのC置換の他に有効なピン止め点が導入されたためとしている。また in situ 素線材にホットプレスを行うことにより充填率を向上させて J_c を上昇さ

せることが出来ると報告した。130 MPaの圧力下で650°Cで5時間のホットプレスを行っている。ホットプレスによってMgB₂コアの断面積が30%ほど減少し、常伝導状態の抵抗率がかかり低下するとしている。ホットプレスは東海大の山田教授のところで行っている。

オーストラリア、Wollongong 大の J. H. Kimらは「Rational design of MgB₂ conductor toward practical applications」と題して発表した。まず、MgB₂においてはカーボンが高磁界での臨界電流特性を向上させるのに最も有効な添加物であるとし、リンゴ酸添加したMgB₂線材について発表した。高分解能透過電顕ならびに電子エネルギー損失分光 (EELS) の測定から、高磁界特性の向上はBサイトの空孔とこれに関連した積層欠陥であるとしている。また、リンゴ酸からのカーボンはほぼ均一にB粒子を覆い、これによってB粒子の凝縮が抑制されて生成されたMgB₂の充填率が上昇することがX線断層撮影から確認されたとしている。これによって高磁界のみならず低磁界側のJ_cも向上するとし、リンゴ酸を添加した線材のJ_cはSiC添加した場合よりも高く、4.2 KではNb-Ti 実用線材に匹敵するとしている。

インド、Variable Energy Cyclotron Centre (VECC) の Sahaは「Development of SMES system at VECC, Kolkata」と題して発表した。最終的には30 MJのSMESを開発する予定であるが、まずはsmall scale SMESとしてNb-Tiを使って1 MJのものを製作中であり、すでに、5.5 Tの磁界発生に成功していると述べた。またIntermediate scale SMESとして5 MJのものを計画している。さらに、これと平行してBi-2223コイルの開発も進めており、LTSコイルと合わせて9 Tの発生に成功したと述べた。

なお、今回の8th ACASC 2015は中国で開催されるが、場所は杭州市か、あるいは廈門市になるとのことである。

<会議報告 3>

ISS2013 会議報告 Report on the ISS 2013

(1) Physics

産業技術総合研究所
竹下 直
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
N. Takeshita

ISTECが主催する第26回国際超伝導シンポジウム (ISS2013) が11月18日より3日間の日程でタワーホール

船堀にて開催された。筆者はこれまでISSには参加したことがなかったのだが、今回大変ありがたいことに講演の依頼をいただいたので初参加させていただいた。ISSが超伝導の分野では日本ではきわめてメジャーな国際会議であるにも関わらず、これまで全く参加したことがなかったことには理由がある。一つは、私は高圧力下での物性測定を行う事を生業としているが、鉄ヒ素系高温超伝導体の出現まで、超伝導現象を主な研究対象としてこなかったことが挙げられる。これには特に深い理由はない。周りを取り巻く環境が、なんとなくそういう状況だったのである。さらに以前は重い電子系の超伝導を観測していたこともあるが、使用する圧力装置が大型のキュービックアンビル型高圧装置に移行したことで、極低温領域に出入りすることが難しくなり、それをきっかけに超伝導現象そのものから少し離れていた状態にあった。もう一つは、「超電導」と「超伝導」の違いである。銅酸化物高温超伝導体が世に現れたころには私はそちらには全く関わっていなかったせいもあり、ISSは比較的工学寄り、つまり「超伝導」というよりも「超電導」の会議である、という先入観があったため、あまり自分と関わりの合いがないかな? というイメージが先行していた。

今回、参加して分かったことは、そのイメージはある点では正しかったし、またある点では間違っていた、ということである。私は所用もあり今回は初日と二日目のみの参加となったが、初日にはマグネットやMRIの話、超伝導線材、おそらく大規模サーバーの(と理解していたのですが)省電力化に超伝導を用いる話、大規模な液体窒素冷却による超伝導線材による送電実験等、おそらく今まで私が触れたことのないような実用化に向けた内容の基調講演が多くあった。これらはすべて私にとっては目新しいもので、知らないことばかり、非常に刺激的だった。日頃、研究所の一般公開などで「あなたのその研究はいったい何の役に立っているのですか?」と聞かれることがある。もちろん、その時はいつものように、圧力は男のロマンなのです、そして超伝導現象はこんなふう役に立つのですよ、と答えるのだが、そこにはあまり実感は伴っていなかった。それはつまり、今回聞いたような内容をちゃんと直接聞くような機会がなかったからなのだな、と思える。私は、自身について、いわゆる基礎研究の、さらに基盤の部分を支えているようなポジションにいる、と思っているのだが、だからこそ実用化に向けてのいろいろな内容(特に、問題点も含むリアルな現状)を知っておかないといけな、と痛感した次第である。こういうのもきっと、井の中の蛙、というのですよね?

さてその一方で、非常に基礎的な研究に関する発表もあった。初日には大阪大学の北岡先生のマニアック

(?)な話もあったし、私も発表をさせていただいた二日目のPhysics and Chemistryセッションでは基礎研究全開の内容が続いた。全体からみると、やはりISSでは応用研究としての内容がメインだとは思いますが、ちゃんとこのような少数派(?)なものもバランスよく配置していただき大変ありがたい。こういった、いろんな研究の段階の内容を上手につないで、その連携や融合を加速させようという取り組みは、各組織でそのキャッチフレーズや論法はいろいろだろうが、多くなされている。ISSのようなスタイルでの会議は、そういった点からみて大変合理的にプログラムされているのではないかと思った。

たとえば私は物質に圧力をかけて縮めた時にどうなるか?ということに注目するが、実はこれは薄膜と大きな関連を持っている。そういった点で、薄膜に関する発表にはいつも関心があるのだが、逆に私の発表はなんとなくいつものスタイルで行ってしまい、聴衆の関心事やバックグラウンドをあまり意識できていなかったかもしれない。せっかくいつもと違う層の人たちが聞きに来てくれていたかもしれないのに!アピール不足この上ない。これは反省点である。

最後に、開催場所について。筆者の特性から、こういった催し物では、できるだけ辺鄙な珍しい所に行きたい、と思うことが多いのだが、今回はこんなに近場で(直線距離だと職場よりこちらのほうが近いです)これだけ内容の詰まった会議があるのだなということを実感させられた。皆さんご存知だと思いますが、タワーのてっぺんの展望室はなんと無料であり、夜9時半まで開いているため、素晴らしい夜景が楽しめる。もちろん私は昼・夜2回楽しんだ。7月には打ちあがる花火の向こうに東京スカイツリーがよく見えるはず。このような意義ある会議にまた呼んでいただけるように、面白い結果を出すべくさらに精進したいと思います。

ISS2013 会議報告 Report on the ISS 2013

— Between basic research and applied research —

(2) Films, Junctions and Electronics Devices

産業技術総合研究所

日高 睦夫

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

M. Hidaka

Films, Junctions and Electronics Devices関連は、オーラルとポスター合わせて合計59件の発表があった。内訳は、薄膜・接合が22件、SQUIDが15件、デジタルが12件、検出器が6件、量子ビットが1件、マイクロ波が3件

である。

薄膜・接合では、IFW DresdenのHolzapfel教授からヘテロ構造を用いた成膜により、高品質Fe系Ba-112および11薄膜が得られることが報告された。また、基盤の歪みを利用して超伝導特性を示す膜が得られた。これらの膜とTiO_xバリアを用いて $I_c R_n = 90 \mu V$ のジョセフソン接合と良好なFraunhoferパターンが得られることが示された。東京農工大の内藤教授からは、SmFeAs(O,F)薄膜にFをドーブするための2種類の方法が示された。一つは、SmFeAsO膜の上にSmF₃オーバーレイヤーを成膜し、Fを拡散させる2ステップ法であり、 $T_c^{end} = 56.4 K$ が得られた。もう一つは、FeF₂からFを成膜中に供給する1ステップ法であり、 $T_c^{end} = 54.0 K$ が報告された。

SQUID関連では、UC BerkeleyのClark教授が特別基調講演で通常MRIより4桁低い地磁気並みの130 μT で駆動できる超低磁場MRIの開発動向を報告した。この超低磁場駆動は、SQUIDを検出器として用いることにより実現できる。この方法では通常MRIほどの画像分解能は期待できないが、成分ごとに画像を分別して表示することが可能である。例として人間の脳のMRI像において、脊髄液と血液が別々に表示できることが示された。九州大学の円福教授は、JSTのS-イノベSQUIDプロジェクトの紹介を行った。このプロジェクトの特徴の一つは、共用できるSQUIDモジュールを開発して、各研究機関がそれぞれの応用に利用するスキームを作り上げたことにある。このスキームにより効率的に研究が進行できていることが示された。豊橋技大の田中教授は、高温超伝導SQUIDを用いてLiイオン電池中に含まれる金属異物検出技術を開発している。この異物は内部ショートの原因となるため、製造工程において検出することが強く望まれているが、現状技術では直径100 μm 以上のものしか検出できなかった。豊橋技大で開発された装置では、直径35 μm までの異物が検出可能であることが示された。

来年初めから開始される米国の超伝導スーパーコンピュータプロジェクトを取り仕切るS. Holmes氏から、京コンピュータの100倍の計算能力を持つ1 ExaスパコンではCMOS技術は消費電力的に行き詰まり、本質的に低消費電力な超伝導技術がその壁を乗り越える可能性を持っていることが述べられた。また、このプロジェクトで開発されるプロトタイプの様子が紹介された。超伝導検出器多ピクセル化における問題点は、増加する配線を介しての熱流入である。NICTの山下氏は、超伝導ストリップフオン検出器(SSPD)出力をSFQ回路で多重化して室温に取り出す実験について報告した。4個のSSPD出力がSFQ回路でマージされ1本で出力された。クロストークもなく安定した出力が得られた。この方法を

発展させることで多ピクセル検出器からの出力線が劇的に減少できる可能性が示された。横国大の吉川教授が発表した断熱型量子磁束パラメトロン(A-QFP)は、新しいタイプの超伝導デジタル回路であり、そのスイッチングエネルギーが10 ZJ (1×10^{-20} J)であることが実験で確認された。この値は論理素子として世界最小であり、従来の単一磁束量子(SFQ)回路と比べても3桁小さい。現在この回路を用いた8ビットの加算器を開発中である。

産総研の浮辺氏は100ピクセルの超伝導トンネル接合(STJ)検出器を用いた材料分析装置と質量分析装置を紹介した。これらの装置により、SiC中の軽元素であるN検出や同じ質量電荷比を持つ信号から質量を分離観測する世界初の成果が得られた。また、100ピクセルとすることで測定時間が大幅に短縮された。現在400ピクセルのSTJを開発中である。日大の山本教授から、透過確率50%のビームスプリッタを用いたSurface Plasmon Polariton (SPP)透過実験が報告された。SPPはBosonであるため、両方に2個ずつ透過するはずであるが、これを確認するにはSPPの個数を正確にカウントできる検出器が必須である。これが可能な唯一の検出器として産総研で開発された超伝導遷移端検出器(TEs)が用いられ、理論通りの結果が得られた。

東大の中村教授は、超伝導量子コンピュータの最近の進捗を紹介した。超伝導量子ビットの大きな課題の一つは、量子状態を維持できるコヒーレンス時間が短いことである。この量子状態を壊す要因が調べられ、一つ一つ対策が取られた結果、この10年間でコヒーレンス時間は当初の数百 p秒から数百 μ 秒へ6桁改善された。また、量子ビット同士を結合するためにマイクロ波回路のスキームが取り入れられ、レゾネータにより離れた場所にある二つの量子ビットが結合できるようになった。この方法をさらに推し進め、マイクロ波やフォトニクスをインターフェイスに用いて超伝導量子ビットとスピンなどの他の種類の量子ビットをハイブリッド化する構想が進んでいる。

CSIROのDu氏は、高温超伝導ステップエッジ接合を用いたマイクロ波とテラヘルツ応用について紹介した。マイクロ波応用では、ジョセフソンミキサを用いた8~10 GHzで動作するダウンコンバータが1チップに集積され、20~80 Kの広い温度範囲で動作が確認された。20 Kでのコンバージョンゲインは 1 ± 0.5 dBであり、高温超伝導ミキサーではこれまでで最高の値が得られた。テラヘルツ応用では、テラヘルツイメージング装置が開発され、600 GHzのイメージングにおいて可視光では見えない隠された物が明瞭に観察できることが示された。

ISS2013 会議報告 Report on the ISS 2013

— Between basic research and applied research —

(3) Wire & Tapes, Large Scale System Applications

昭和電線ケーブルシステム株式会社

小泉 勉

SWCC Showa Cable Systems Co., Ltd.

T. Koizumi

国際超伝導シンポジウム(ISS2013)が、2013年11月18日~20日の3日間にわたり、タワーホール船堀(東京都江戸川区)において開催された。今回のシンポジウムは、13各国から総勢512名の参加者を集め、口頭講演118件、ポスター講演274件の合計392件であった。以下、Wire & Tapes 及びLarge Scale System Applicationsのセッションにおいて印象に残った講演について記述する。

Wire & Tapesのセッションにおいて、(公財)国際超伝導産業技術研究センターのIzumiらは、PLD法を用いて作製したEuBCO層にBaHfO₃を添加した線材の長尺化(94 m)に成功したと報告した。 $I_{c, min.}$ は500 A/cm-幅(@65 K, 3 T)であり、今後の進展、機器応用が期待される。(株)フジクラのIijimaらは、商品化されたREBCO線材について報告した。全長600~700 mの線材の均一性は5.2~7.5%であり、さらに均一性が向上したとのことであった。本線材の I_c は、いずれも500 A/cm-幅を超える値を持っている。住友電気工業(株)のKagiyamaらは、商品化されたBi-2223線材について報告した。線材の厚さを低減し、 J_c 向上を試みた。また、これまで製造を行ってきた“Type H”について、引張応力を約10%向上(530 MPa)させた線材についても紹介があった。線材開発とともに、線材の評価方法や応用を見据えた開発にも進展があり、九州大学のKissらは、SHPM(走査型ホール素子顕微鏡)法を用いたREBCO線材の評価について報告した。本手法による評価結果と連続通電評価結果と比較し、同様な結果が得られることを示した。加えて磁場中での特性についても評価可能とのことであった。本手法は、REBCO線材を機器応用する上で、非常に有効な評価である。Korea UniversityのLeeらは、世界で初めてGdBCO線材の無抵抗接続の開発に成功したと報告した。240日間26 A連続通電を実施し、接続部の抵抗 $10^{-17} \Omega$ を保持したとのことであった。本開発の進展により、高温超伝導線材の永久電流モードが実現し、MRI、NMRなどへの応用が期待される。

Large Scale System Applicationsのセッションにおいては、高温超電導線材を用いた機器開発として、GE Global ResearchのMineらは、 MgB_2 線材を用いたMRIについて報告した。室温ボア径10インチ、発生磁場3 Tのマグネットを作製し試験を行った。作製当初のマグネットは、開発目標に至るものではなかった。しかしながら、線材性能の向上に伴い n 値を20以上に向上させることに成功し、その線材を用い、室温ボア径10インチのマグネットを作製したところ、高速励磁においても、問題となる電圧発生は認められず、安定に運転されたとのことであった。併せて、超電導接続についても開発を行い、 $1 \times 10^{-11} \Omega$ 以下の低抵抗接続にも成功したとのことであった。理化学研究所のYanagisawaらは、500 MHz（発生磁場11.74 T）のNMRを低温超電導線材及びREBCO線材を用いたハイブリッドマグネットを作製し、REBCO線材のNMRへ応用の可能性について議論した。NMRの要求性能は、高磁界且つ、均一磁場精度1 ppb（空間5 mm径）、時間安定度0.1 ppb/hが必要であるため、REBCO線材のNMRへの応用には、高い壁がある。まずは遮蔽電流の低減が不可欠であり、線材のマルチフィラメント化や細線化が必要であるとのことであった。しかしながら、高温超電導線材をNMRに用いること

には大きなメリットがあるため、今後も開発を続けていくとのことであった。京都大学のUrayamaらは、ヘリウムの枯渇問題への対応とし、ヘリウムレスを目的とした、Bi-2223線材を用いた3 T級“ヘリウムレスMRI”の開発状況について報告した。磁場の安定度を図るため、超安定化電源を用い、冷却には10 KタイプのGM冷凍機を用いた。コイル間接続については、半田による低抵抗接続とした。本システムを用い、1.5 Tにおいて脳の画像を撮影し、市販されているSiemens社製のMRI画像と比較を行ったところ、それとは遜色のない結果が得られており、開発の成功が証明された。しかしながら、複数回の励磁、減磁過程の3回目の減磁過程において、コイルのターン間で焼損が生じてしまったとのことであった。現在、原因究明中であるとのことである。これまで、高温超電導線材のMRIへの応用は非常に困難とのことではあったが、今回の成果により、MRIの高温超電導化への期待が高まった。

今回の会議においては、高温超電導線材を用いた機器の実証試験について多くの報告があった。次回開催予定の第27回 ISS2014は、2014年11月25日～27日の3日間とのことであり、今回の会議を凌駕する進展の報告があることが期待される。

<研究室紹介>

(1) 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 有田研究室 University of Tokyo, Graduate School of Engineering, Department of Applied Physics, Arita Laboratory

(1) 研究室の概略

本研究室では、第一原理的、非経験的計算手法に基づいた物性物理学の研究を行っています。非経験性に注目しているのは、実験事実の説明、再現だけではなく新超伝導体や新熱電材料などの新機能物質の設計を行う可能性を視野にしているからです。長期的には、新しい設計指針や指導原理の確立を理論物理学上の新概念の発見につなげたいと考えています。解析手段としては、密度汎関数理論に基づくものや、密度汎関数理論とモデル計算の融合によるものなど、状況に応じて柔軟に対応するようにしています。

研究対象としては、機能物質としての将来性や可能性を感じさせるものや物性理論上の新概念と密接に関連し特異な物性をもつ物質群に興味を持っています。

最近のいくつかの研究例を以下にご紹介すると

(a) 鉄系超伝導体

鉄系超伝導体は鉄の5つの d 軌道がすべて低エネルギーの物理にからむため、低エネルギー有効モデルの構築が難しい系です。我々は最局在ワニエ関数を基底にとったモデルの導出に取り組んできました。ハミルトニアンの一項目だけでなく、Hubbard U などの相互作用項、電子格子相互作用項、スピン軌道相互作用項、不純物ポテンシャルの大きさなど、この系の物性を微視的に計算する上で必要なパラメータのほぼすべてを世界にさきがけて評価してきました。これらの情報を用いて、磁性や超伝導対称性についてのモデル計算を実行しています。

(b) スピン軌道相互作用の強い系

$5d$ 遷移金属化合物や重い電子系などの有効モデルの導出とその詳細な解析にも世界にさきがけて取り組んできました。前者については、銅酸化物の $J_{\text{eff}} = 1/2$ analogとして注目を集めている Sr_2IrO_4 や Ba_2IrO_4 が単純なMott絶縁体ではないことを明らかにしています。後者については、 URu_2Si_2 の隠れた秩序の秩序変数の決定を行っています。また、 BiTeI などの巨大ラッシュバ系やトポロジカル絶縁体の電子状態の研究にも取り組んでいます。

(c) 炭素系超伝導体

フラーレン超伝導体や芳香族超伝導体の低エネルギー有効モデルの導出とその解析も行っています。フラーレンについては、超伝導密度汎関数理論の計算も行いました。これは分子性物質に対する世界ではじめての超伝導密度汎関数理論の計算になります。

(d) 超伝導密度汎関数理論の開発

非従来型超伝導体を記述する超伝導密度汎関数理論の開発に興味を持って取り組んでいます。特に最近ではプラズモン機構の超伝導を記述する交換相関カーネルの開発を行いました。

(2) 研究室の構成

研究室は准教授の有田亮太郎、助教の酒井志朗と4人の大学院生(D3 明石 遼介、D2 野村 悠祐、M2 林 克起、M2 富内 達矢)の計6名から構成されています。研究室自体は非常に小規模ですが、国内外の理論、実験グループと出来るだけ積極的に共同研究を行うよう心がけています。海外からの短期、長期滞在も頻繁に受け入れています。

(3) 研究室の特色ある装置

研究ではどこにでもある計算機クラスターを使っているぐらいで、特色のある装置は特にありません。

(4) 連絡先

email: arita@ap.t.u-tokyo.ac.jp web page: <http://arita-lab.t.u-tokyo.ac.jp>

(2)鹿児島大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻
川越研究室、川畑研究室
Kagoshima University, Graduate School of Science and Engineering,
Electrical and Electronics Engineering Course,
Kawagoe Laboratory and Kawabata Laboratory

(1)研究室スタッフ(平成 26 年1月現在)

川越研究室:川越明史 准教授、大学院生(修士)13名、学部4年生4名

川畑研究室:川畑秋馬 教授、平山斉 助教、大学院生(修士)5名、学部4年生7名

(2)川越研究室の研究内容

川越研究室では、「高性能超電導コイルの設計技術開発」に関するテーマと「超電導線材・導体・コイルの電磁・熱特性評価技術開発」の二つのテーマを実施しています。

「高性能超電導コイルの設計技術開発」に関するテーマでは、高い断面アスペクト比の線材や導体を活用することによって、超電導コイルの性能を格段に高めることを目指しています。線材形状がテープ形状であるイトリウム系やビスマス系の高温超電導線材のみならず、通常丸断面のNbTi線材やMgB₂線材でも、テープ形状にした方が臨界電流や交流損失などの電磁特性が格段に良くなります。横磁界中の電磁特性に異方性があるテープ線材の優れた電磁特性を活かすために、最近では、テープ面に垂直に加わる横磁界の変化分を抑えるコイル構造について研究しています。

「超電導線材・導体・コイルの電磁・熱特性評価技術開発」に関するテーマでは、ポインティングベクトル法と呼ぶオリジナルの交流損失測定法を応用して、新しい評価技術の開発を目指しています。様々な超電導体の電磁現象の解明に取り組む一方、コイルの運転監視・診断装置への応用を目指しています。最近では、空芯の高温超電導コイルや鉄心を持つ高温超電導変圧器に発生する局所的な常伝導転移を、室温空間から非接触で検出することに成功しました(図1参照)。さらに、測定結果から巻線の温度や臨界電流の低下などの異常を診断することを目指しています。

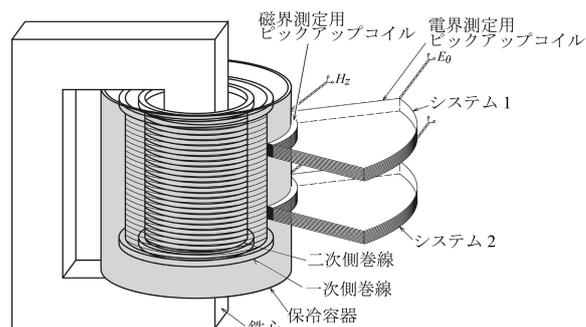


図1 高温超電導トランスの運転監視装置

(3)川畑研究室の研究内容

川畑研究室では、超電導電力応用に関する研究を行なっています。「高温超電導大型導体の基礎電磁特性評価」に関するテーマでは、試料導体に最大約1.5 Tの直流磁界を印加した状態で、77 K、66 K、4.2 Kの幅広い温度領域の試料導体の特性を評価できます。さらに超電導電流トランスを用いることで、50 A程度の小容量の電源で約1 kAの交流電流が可能で、これらの装置を活用し、超電導導体の交流損失や電流分布を測定しています(図2参照)。

「ピックアップコイルによる超電導線材の電流分布測定」に関するテーマでは、超電導機器の実用化のために、機器に用いる線材の電流分布を定量的に把握することを目指しています。ここでは、数十個の極小サイズのピックアップコイルで構成されるコイル群を用いて、試料線材内の電流分布特性を簡便にかつ定量的に評価できる非接触の測定法の確立を目指しています。

「超電導リアモータ」に関する研究では、リアスイッチトリラクタンスモータ(LSRM)の励磁巻線に高温超電導線材を使



図2 高温超電導大型導体の特性評価装置

用した新しいLSRMを提案し、その特性の検証を行なっています。数値解析を駆使し、インダクタンス・推力・垂直力などのモータ本体の特性解析・設計を行うとともに、制御装置やインバータなどのドライブシステムの性能検証も行なっています。

(4) 連絡先、ホームページアドレス

川越明史

E-mail: kawagoe@eee.kagoshima-u.ac.jp

TEL: 099-285-8403, FAX: 099-285-8413

川越研究室: <http://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~kawagoe>

川畑研究室: <http://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~kawabata>

(3) 東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センター High Field Laboratory for Superconducting Materials, IMR, Tohoku University

(1) スタッフ

センター長・教授: 渡辺和雄

准教授: 木村尚次郎、淡路 智

助教: 高橋弘紀、小黒英俊

技術職員: 佐々木嘉信、伏見和樹

秘書2名、学生: 博士課程2名、修士課程4名、学部2名

(2) センターの簡単な紹介

強磁場超伝導材料研究センター(以下強磁場センター)では、30 Tハイブリッドマグネットをはじめとし、28 T無冷媒ハイブリッドマグネット、18/20 T超伝導マグネットを含む3台の超伝導マグネット、20 T無冷媒超伝導マグネットを含む8台の無冷媒超伝導マグネットなど、それぞれ特徴を有する強磁場マグネット群を用いて、強磁場を用いた物性研究、超伝導材料研究、磁気科学等の幅広い研究分野をカバーしています。これらの装置は全国共同利用設備として開放され、日本国内だけでなく海外の研究者が自由に利用でき、約80を越えるグループが現在登録されています。強磁場センターの職員は、以下に述べるようなオリジナルな研究を実施しつつ、上記マグネットの維持管理から、共同利用研究を推進する役目も担っています。一方で、東北大学工学研究科応用物理専攻の協力講座として、総勢9名の学生を抱える研究室としての一面も有しています。強磁場センターが実施している研究は、大きく分けて以下の4つに分類されます。

(a) 強磁場マグネット開発(淡路、小黒、高橋)

強磁場センターでもっとも重要な強磁場発生装置としてのマグネット開発を行っています。中心となるのは、高強度Nb₃Sn線材・導体、高温超伝導線材開発に基づいた無冷媒超伝導マグネット開発ですが、ハイブリッドマグネットに用いる大電力水冷銅マグネット開発も行っています。装置の欄に述べるような独創的なマグネット開発を行うと共に、電磁力対策・安定性・クエンチ対策などのマグネット技術としての基礎的な技術開発も実施しています。

(b) 超伝導材料開発(淡路、小黒)

高強度Nb₃Sn線材開発、高温超伝導線材特性評価として、強磁場マグネット開発に必要な、線材の機械特性、臨界電流特性を中心とした物性研究を実施しています。必要に応じて、SPRING8の放射光やJ-PARC及び原子力機構の中性子を用いたひずみ評価も行い、超伝導線材における基本的な物性機構解明にまで踏み込んだ研究を行っています。これらの超伝導材料研究は、a)のマグネット技術との連携により、超伝導マグネット開発の両輪

をなします。

(c) 強磁場物性研究(木村、高橋)

光を中心とした強磁場・極低温を用いた物性研究を実施しています。フラストレーション系、強相関係、マルチフェロイックなど、広い意味の磁性体を対象に、可視光、ラマン分光、電子スピン共鳴(ESR)などを駆使しての磁場誘起現象を明らかにします。

また、強磁場・極低温研究として、28 T無冷媒ハイブリッドマグネットと希釈冷凍機を組み合わせた研究も行っています。2次元電子系の分数量子ホール効果や、強相関物質の低温物性研究など、東北大極低温科学センターと協力して実施しています。

(d) 磁気科学(木村、高橋)

磁場中の結晶成長や状態図などの研究を実施しています。磁性が関連する材料は、磁場中で状態図が大きく変化したり、結晶成長機構が変化します。これらの現象は主に、自由エネルギーにゼーマンエネルギーが寄与すること、さらには材料中の拡散反応によって大まかには理解できます。この現象を用いて、新しい材料合成方法を確立すべく、磁場中電気炉、磁場中示差熱分析、磁場中X線回折、高温磁化測定装置等を駆使しながら研究を推進しています。現在対象としている材料は、炭素鋼・アモルファス材料・磁気冷凍物質・磁性材料などです。さらに、20 Tを越える強磁場中では、大きな磁場勾配を用いて水やガラスなどの反磁性物質を磁気浮上させた微小重力環境をもちいた材料開発研究も実施しています。

(3) 特徴ある装置と最近のトピックス

強磁場センターには、紹介欄に述べたように多くの強磁場マグネットがあり、それぞれの特徴を生かした計測装置があります。例えば、磁化測定や電気抵抗などの基本測定は、ほとんどのマグネットが可能ですし、極低温や高温環境も整備され、30 mKから1200°Cまでの広い温度領域をカバーしています。また、独創的な装置としては5 Tスプリット型無冷媒超伝導マグネットと組合わせた強磁場 X線回折装置があります。本装置は4 Kから700 Kまでの広い温度範囲かつ、5 Tまでの磁場中で粉末 X線回折測定が可能となっています。これらの装置及びマグネットの多くはセンターで開発してきたものですが、すべてを紹介するには紙面が足りませんので、最近のトピックスとして28T無冷媒ハイブリッドマグネットと20 T無冷媒超伝導マグネットを以下に紹介します。

(a) 28 T 無冷媒ハイブリッドマグネット

高強度Nb₃Sn線材を用いた360 mm室温ボアの9 T大口径無冷媒超伝導マグネットと、8 MW-19 T大電力水冷銅マグネットを組み合わせ、28 Tを32 mmの室温空間に発生させます。無冷媒超伝導マグネットは、超伝導コイルを小型冷凍機を用いて熱伝導で冷却するタイプのマグネットです。液体寒剤を必要としない最近普及した超伝導マグネットです。本装置は、4台の4 K-GM冷凍機を用いて冷却され、2個の外層NbTiコイルと2個の内層CuNbTi/Nb₃Snコイルから構成されています。写真中央の青色が本マグネット、奥には30 Tハイブリッドマグネットも写っています。写真手前に見える赤茶色枠のラックは、希釈冷凍機の高スピンシステムです。希釈冷凍機との組み合わせにより、28 Tまでの強磁場で、30 mKまでの極低温環境の実験が可能となっています。最近の、高移動度を有するMgZnO/ZnO薄膜を用いた分数量子ホール効果の実験では、1/3の分数量子状態の観測に成功しました。



図1 HM室の様子。中心の青い装置が28 T無冷媒ハイブリッドマグネット、奥の銀色は30 Tハイブリッドマグネット。手前左の赤茶色枠ラックは希釈冷凍機の高スピンシステム。

(b) 20 T 無冷媒超伝導マグネット

20 T無冷媒超伝導マグネットは、NbTi、高強度CuNbTi/Nb₃Sn、銀シースBi2223の3種類のコイルで形成され、それぞれ独立な電源で運転されます。特に、高温超伝導マグネットを用いた実用超伝導マグネットとしては世界初と言えます。2002年に、本マグネットは18 T無冷媒超伝導マグネットとして開発されましたが、2013年に性能と強度の向上した新しいBi2223線材コイルへ置き換えることでアップグレードし、20 Tの磁場発生に成功しました。この

マグネットは52 mmの室温ボアを有し、強磁場電気炉や強磁場示差熱分析と組み合わせられ、磁場中材料合成に用いられる他、磁化測定やNMRなどの物性研究にも利用されようとしています。

ヘリウムの枯渇問題が深刻化しつつある昨今、液体ヘリウムを必要としない無冷媒超伝導マグネットは、改めてその価値が見直されています。強磁場センターではこの独創的な無冷媒超伝導マグネット技術と、強磁場用超伝導材料開発・評価を通じて、より高度な強磁場マグネット開発を推進しています。将来的には、上記のマグネット開発に加えて30 T無冷媒超伝導マグネットや50 T無冷媒ハイブリッドマグネットなどへの展開について、物材機構や東大物性研・阪大極限などと連携をとりながら、日本の定常強磁場分野の発展に寄与していく予定です。

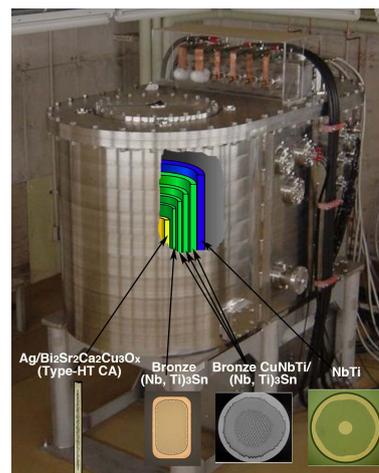


図2 20 T無冷媒超伝導マグネットの写真と内部イメージ。下方の写真は、用いた線材の断面。

(4) 連絡先、ホームページアドレス等

〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1
 東北大学 金属材料研究所 強磁場超伝導材料研究センター
 淡路 智
<http://www.hflsm.imr.tohoku.ac.jp/>

(4) 新潟大学大学院自然科学研究科電気情報工学専攻 岡徹雄研究室

T. Oka Laboratory, Electrical and Information Engineering Course,
 Graduate School of Science & Technology, Niigata University

(1) 研究室スタッフ(平成25年12月現在)

教授:岡徹雄、 大学院生:9名、 研究生:1名、 学部4年生:4名

(2) 研究室紹介

高温超伝導バルク磁石の材料に関する研究から強磁場応用までの広い範囲で研究開発を行っている。材料研究では超伝導と磁場との相互作用の研究を行っており、応用研究では磁気分離、NMRのための静磁場開発、永久磁石の着磁など強磁場を利用した新たな産業応用を目指している。

(3) 特徴ある装置

右図は本研究室で使用している対向型のバルク磁石装置である。バルク磁石は写真の中央付近で向かい合って固定されている筒状のチャンバー(磁極とする)の内部に設置されている。バルクは磁場中冷却(Field Cooling: FC)法で着磁ができ、またチャンバーを交換すれば、パルス着磁も可能である。装置の両端にはハンドルが付いており、磁極同士の距離を変えることができる。

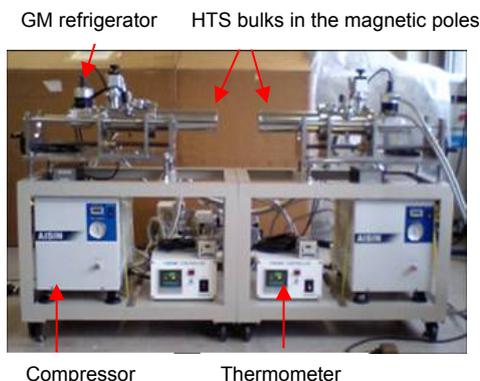


図: 対向型バルク磁極装置

(4) 研究チーム

[材料研究]

○バルク作製班

バルク磁石の着磁方法としてのパルス着磁法は、装置がコンパクトであるためにその応用への展開が期待されている。しかし、パルス着磁法では超伝導試料内部での磁束線の急激な運動により磁場捕捉性能の低下へ繋がる。磁束線は臨界電流密度 J_c の値が低いほど侵入しやすいことに着目し、熔融時に設置する種結晶の数や配置を工夫して、結晶成長の振る舞いが表面内の方位によって異なる試料を作製し、パルス着磁での磁場捕捉性能を評価した。その結果、異なる成長を呈する結晶成長領域(Growth Sector Region: GSRとよぶ)では磁束の侵入が異なり、従来の試料と比較して低い印加磁場領域での着磁が可能となり、磁場捕捉性能の向上への可能性を示した。

○パルス着磁班

超伝導バルク磁石は強い磁場捕捉性能を有しており、数Tを超える強力な疑似永久磁石として扱うことができる。本研究では冷凍機で冷却した超伝導バルク磁石にパルス着磁法(Pulsed Field Magnetization: PFM)を用いて磁場を捕捉させ、その際に起こる量子化磁束の侵入現象を磁場変化及び温度変化の観点から分析を行い、バルクの微細構造の分析を通じて、更に高い磁場捕捉への可能性を明らかにしている。

[応用研究]

○静磁場開発班

医療における生体内部の画像診断や物質の構造や性質を調査する分析機器として期待されているNMR(核磁気共鳴)やMRIなどを始め、強い静磁場を使った様々な産業応用に向け、均一で安定な磁場空間の開発研究に高温超伝導バルク磁石を用いることを提案している。従来の超伝導コイルに比べて気温や湿度に左右されずに安定かつ強力な磁場を継続して発生できることが特徴となっている。このバルク磁石に磁性体を組み合わせるなどして、非常に均一な磁場を発生させる開発を行っている。

○磁気分離班

磁気分離班では主にセシウム除去の研究を行っている。福島第一原発事故により発生した大量の汚染水により非常に深刻な問題が発生している。この汚染水に含まれる放射性セシウムを除去するにあたり、二次廃棄物が少ない磁気分離の技術が注目されている。高温超伝導バルク磁石を用いることにより更に新たな水質改善の方法が図れる。セシウムには磁性処理により鉄粒子に吸着させて、鉄として磁気分離をする。現在は球フィルタを用いた高勾配磁気分離法(High Gradient Magnetic Separation: HGMS)により、鉄濃度60 ppmの希薄な汚濁溶液において、一回の磁場処理で98.9%の高い分離率を達成している。

○永久磁石着磁班

永久磁石の着磁工程において主流な方法であるパルス着磁法にかわり、超伝導バルク磁石を用いた新たな着磁方法を提案している。モータの回転子に永久磁石を組み込んだ状態で着磁を行い、着磁対象を飽和状態に着磁させることが可能である。これによって、モータ回転子における設計の自由度の向上が示唆できる。現在はバルク磁石装置を用いた場合のその特徴的な磁場分布を使い、永久磁石の擬似的な着磁性能の研究を実施している。

(5) 連絡先

新潟大学工学部附属工学力教育センター

教授 博士(工学) 岡 徹雄 (Tetsuo OKA)

950-2181新潟市西区五十嵐2の町8050

Tel.025-262-7668 Fax025-262-7010, e-mail; okat@eng.niigata-u.ac.jp

第83回ワークショップ

「多ピクセル超伝導検出器で探る材料、核物質、宇宙の謎(仮)」

開催趣旨：

先端科学技術は検出技術の進歩によって支えられています。超伝導検出器は他のデバイスでは実現できない究極の感度・分解能を有しているため、様々な先端科学技術分野でなくてはならないツールとして使われています。特に微量原子の同定、微量核物質のガンマ線分光、宇宙からのX線などの撮像と分光は有力な応用分野と言われています。

超伝導検出器を使った計測システムをより使いやすいものにするために、検出器の多ピクセル化に向けた研究が世界中で活発に行われています。多ピクセル化が進展すれば、単に検出に必要な時間が短縮されるだけでなく、例えば点ではなくマップの取得が可能になるなど質的な飛躍が期待されます。一方、単純な多ピクセル化は極低温への入出力線数の増大を招き、これらを介した熱流入が冷却システムへの大きな負担になるなどの問題が発生します。

本ワークショップでは、前半で多ピクセル化による性能向上と顕在化した問題点を事例で紹介し、この問題点を解決する手段として注目されている超伝導単一磁束量子(SFQ)回路を用いたデジタル多重化、および共振現象を用いたマイクロ波多重化について現状を報告していただきます。後半では超伝導検出器の活躍が最も期待されている材料分析、放射線分析、宇宙観測の各分野において、技術の現状と多ピクセル化が進展すれば何が可能となるかについて解説していただきます。

これらの講演を通して、超伝導検出器多ピクセル化の重要性をご理解いただき、今後の開発の方向性を議論したいと考えています。

日時：2014年3月10日

場所：全日通霞が関ビル 8階 大会議室B

プログラム案：(タイトル、講演者は案)

13:30-13:35	挨拶	下山 淳一(東大)
13:35-13:50	イントロダクトリー	日高 睦夫(AIST)
13:50-14:20	100ピクセル検出器実現技術とその問題点	浮辺 雅宏(AIST)
14:20-14:50	SFQ回路を用いたデジタル多重化	吉川 信行(横国大)
14:50-15:20	マイクロ波共振に基づく周波数多重読出	神代 暁(AIST)
15:20-15:40	休憩	
15:40-16:20	電子顕微鏡による材料解析への超伝導検出器の応用と多ピクセル化への期待	原 徹(NIMS)
16:20-17:00	超伝導検出器を用いた放射線分析	高橋 浩之(東大)
17:00-17:40	超伝導検出器による宇宙観測	満田 和久(JAXA)
17:40-17:45	終わりの挨拶	木村 茂行(未踏協会)

第40回シンポジウム／第18回超伝導科学技術賞授賞式 超伝導2014「未来を拓く超伝導ケーブル(仮)」

日時：平成26年4月15日(火) 10:00～17:30

場所：タワーホール船堀 小ホール

研究会の動き

〔平成 25 年 (2013 年) 10 月 1 日～平成 25 年 (2013 年) 12 月 31 日〕

調査委員会 (日本原子力研究開発機構より受託調査)

平成 25 年度第 2 回

日 時:平成 25 年 10 月 7 日(月) 13:30～15:30

場 所:学術総合センター11 階 共用会議室

出席者:委員 10 名

事務局 2 名

議 事:

- (1) 第 1 回ワークショップ報告書について
- (2) 第 2 回ワークショップについて
- (3) 調査報告書について

幹事会

平成 25 年度第 4 回

日 時:平成 25 年 10 月 7 日(月) 15:45～16:45

場 所:学術総合センター11 階 共用会議室

出席者:幹事 8 名

事務局 1 名

議 事:

- (1) 第 82 回ワークショップについて
- (2) 第 83 回ワークショップについて
- (3) 第 18 回超伝導科学技術賞について
- (4) FSST NEWS について

賞審査委員会

平成 25 年度第 1 回

日 時:平成 25 年 12 月 9 日(月) 13:30～15:30

場 所:学術総合センター11 階 共用会議室

出席者:幹事 8 名

事務局 1 名

議 事:

- (1) 第 18 回超伝導科学技術賞の選考

幹事会

平成 25 年度第 5 回

日 時:平成 25 年 12 月 9 日(月) 15:45～17:30

場 所:学術総合センター11 階 共用会議室

出席者:幹事 7 名

事務局 1 名

議 事:

- (1) 第 82 回ワークショップについて
- (2) 第 83 回ワークショップについて
- (3) 第 40 回シンポジウム(来春)について
- (4) 第 18 回超伝導科学技術賞について
- (5) FSST NEWS について

調査委員会 (日本原子力研究開発機構より受託調査)

平成 25 年度第 3 回

日 時:平成 25 年 12 月 26 日(金) 10:00～11:30

場 所:全日通霞が関ビル 11 階 中会議室

出席者:委員 10 名

事務局 2 名

議 事:

- (1) 第 2 回ワークショップについて
- (2) 調査報告書について

第 82 回ワークショップ

<日本原子力研究開発機構 受託調査

第 2 回ワークショップ>

日 時:平成 25 年 12 月 26 日(木) 13:00～17:05

場 所:全日通霞が関ビル 8 階 大会議室 B

テーマ:「超伝導電磁石の大型化への挑戦」

参加者数:53 名

プログラム:

13:00-13:10 開会の挨拶

北口 仁(超伝導科学技術研究会副会長)

【座長 飯島 康裕(フジクラ)】

13:10-13:50 「LHC 加速器における超伝導技術

ー現状と将来計画ー」

中本 建志

(高エネルギー加速器研究機構)

13:50-14:30 「核融合開発の現状」

今川 信作(核融合科学研究所)

14:30-15:10 「核融合原型炉の基本計画」

飛田 健次(日本原子力研究開発機構)

【座長:西島 元(物質・材料研究機構)】

15:30-16:00 「ブロンズ法 Nb₃Sn 線材開発の現状と
展望」

杉本 昌弘(古河電気工業)

16:00-16:30 「Nb₃Al 線材開発の現状」

伴野 信哉(物質・材料研究機構)

16:30-17:00 「HTS 線材開発の現状」

木須 隆暢(九州大学)

17:00-17:05 閉会の挨拶

木村 茂行(未踏科学技術協会 理事長)

国内超伝導関連会議

Conferences related to Superconductivity (Domestic)

会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
応用物理学会／春季	H26.3.17～3.20	青山学院大学 相模原キャンパス (神奈川県相模原市)	応用物理学会
電子情報通信学会 総合大会	H26.3.18～3.21	新潟大学 五十嵐キャンパス (新潟市)	電子情報通信学会
日本物理学会／春季	H26.3.27～3.30	東海大学 湘南キャンパス (神奈川県平塚市)	日本物理学会
低温工学・超伝導学会 ／春季	H26.5.13～5.15	タワーホール船橋 (東京都江戸川区)	低温工学・超電導学会

国際会議及び国外の主要な会議

Conferences related to Superconductivity (International/Abroad)

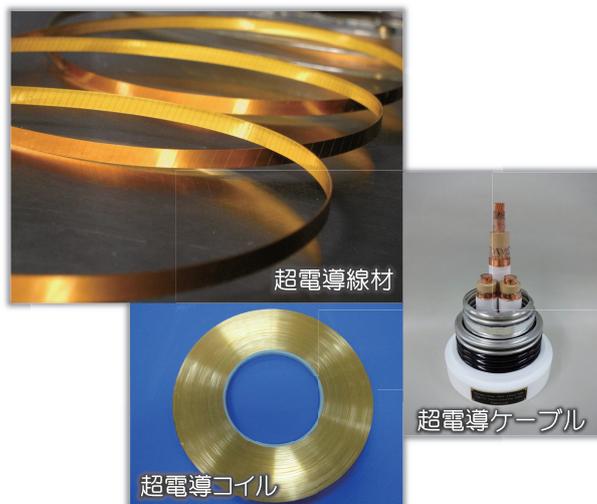
会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
APS March 2014	2014.3.3～3.7	Denver, Colorado (USA)	http://www.aps.org/meetings/march/index.cfm
2014MRS Spring Meeting	2014.4.21～4.25	San Francisco (USA)	http://www.mrs.org/spring2014/
ICSM2014	2014.4.27～5.2	Antalya (Turkey)	http://icsm2014.org/

超伝導科学技術研究会 編集委員会 委員

松本 明善	独立行政法人物質・材料研究機構 超伝導線材ユニット 主幹研究員	小泉 勉	昭和電線ケーブルシステム株式会社 技術開発センター 超電導線材開発グループ グループ長
荒井 有気	公共財団法人鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室 副主任研究員	日高 睦夫	独立行政法人産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 上級主任研究員
伊豫 彰	独立行政法人産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 超伝導エレクトロニクスグループ 上級主任研究員	木村 茂行	一般社団法人 未踏科学技術協会 理事長
		大貫留美子	一般社団法人 未踏科学技術協会 事務局長

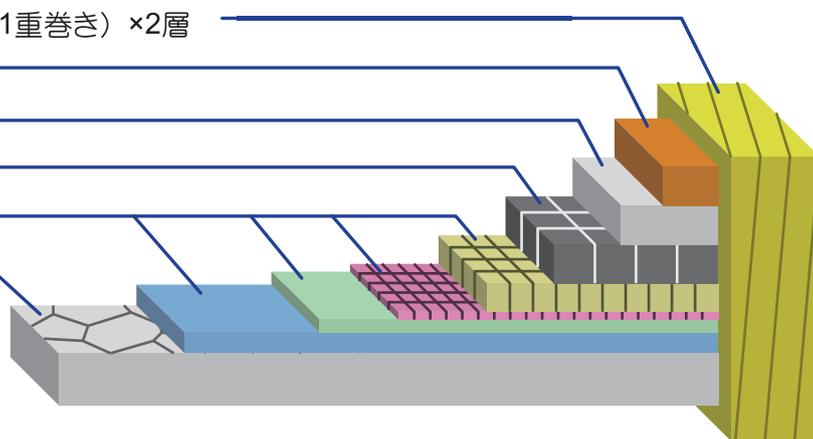
■ 特長

- 長い単長と高磁場中における高い臨界電流、長手方向に優れた均一性を実現
- 浸漬冷却・伝導冷却用コイル等、高磁場下の応用に適した高性能なコイルアプリケーションが可能
- 電力ケーブルの大容量・大電力化、コンパクト化、低送電損失化、高性能・高効率な超電導ケーブルが実現可能



■ 線材構造

- 絶縁テープ [ポリイミド] 12.5 μ m (突き合せ1重巻き) ×2層
- 安定化層 [Cu] 75, 100 μ m
- 保護層 [Ag] 2 μ m ~
- 超電導層 [GdBa₂Cu₃O_x] 2 μ m ~
- 中間層 [MgO, etc.] ~ 0.7 μ m
- 金属基板 [ハステロイ®] 75, 100 μ m



■ 標準仕様

- 線材幅 (5mm, 10mm)、金属基板厚さ (75 μ m, 100 μ m) に応じた製品ラインアップ
- 標準臨界電流 $I_c > 500\text{A/cm-wide}@77\text{K, S.F.}$
- 単長300m以上の長尺線材、ご要求仕様に応じた高性能の超電導線材が提供可能

型番	線材幅 [mm]	金属基板 [μ m]	安定化層 [μ m]	臨界電流 [A] @77K, S.F.
FYSC-SC05	5	75	75	> 250
		100	100	> 250
FYSC-SC10	10	75	75	> 500
		100	100	> 500
FYSC-S05	5	75	—	> 250
		100	—	> 250
FYSC-S10	10	75	—	> 500
		100	—	> 500

※ 仕様のご確認、ご要求等ございましたら、お問い合わせ頂けますようお願い致します。