

PRESS RELEASE

2019 年 9 月 27 日

理化学研究所

物質・材料研究機構

ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社

科学技術振興機構

2 種類の高温超電導を用いて 30 テスラ超の高磁場発生

—1.3 ギガヘルツ NMR に向けた大きな一歩—

理化学研究所（理研）放射光科学研究センター-NMR 研究開発部門超高磁場磁石開発チームの柳澤吉紀チームリーダーと末富佑研修生、物質・材料研究機構機能性材料研究拠点高温超伝導線材グループの西島元主幹研究員、ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社の齊藤一功技術総括部長、科学技術振興機構の前田秀明プログラムマネージャーらの共同研究グループは、高温超電導線材^[1]をらせん形状に巻いた超電導磁石^[2]において、これまで困難とされてきた 30 テスラ^[3]超の高磁場発生に成功しました。

本研究成果により、創薬や医療への貢献が大きく期待される次世代 1.3 ギガヘルツ^[4]（30.5 テスラ相当）核磁気共鳴（NMR）装置^[5]の開発に向けた重要な技術要件が満たされ、その実現に近づきました。

今回、共同研究グループは、超電導磁石に内側から①高磁場での超電導特性に優れるがコイル化が難しいレアアース（RE）系高温超電導線材を巻いた内層コイル、②高磁場での特性は一步劣るがコイル化しやすいビスマス（Bi）系高温超電導線材を巻いた中層コイル、③工業製品として確立された金属系低温超電導線材^[6]を巻いた外層コイルの 3 層構造の配置により、磁場の発生効率を最大に高めることで 31 テスラの高磁場を実現しました。これは、らせん形状に巻いたタイプの超電導磁石としては最高記録です。また、高磁場発生の際となる RE 系高温超電導コイルは焼損が生じやすいという課題がありましたが、絶縁のない RE 系高温超電導線材をらせん形状にコイルに巻き、層間に銅とポリマーの複合シートを挟み込む新しい製造法を適用することで焼損の防止にも成功しました。

本成果は、2019 年 9 月 27 日にカナダ・バンクーバーで開催される国際会議『26th International Conference on Magnet Technology』で発表されます。

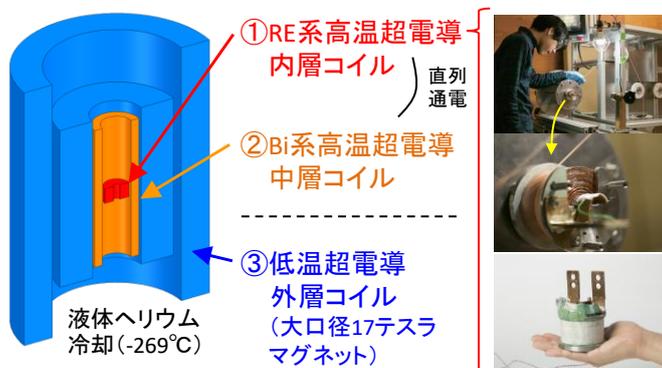


図 開発した超電導磁石内部のコイル構成

※共同研究グループ

理化学研究所 放射光科学研究センター NMR 研究開発部門 NMR 開発グループ

超高磁場磁石開発チーム

チームリーダー	柳澤 吉紀	(やなぎさわ よしのり)
特別研究員	朴 任中	(ぼく にんちゅう)
研修生	末富 佑	(すえとみ ゆう)
(千葉大学大学院 融合理工学府 博士後期課程/日本学術振興会 特別研究員 DC)		
研修生	高橋 俊二	(たかはし しゅんじ)
(上智大学大学院 理工学研究科 理工学専攻 電気・電子工学領域 博士前期課程)		
研修生	吉田 大佐	(よしだ たいすけ)
(上智大学大学院 理工学研究科 理工学専攻 電気・電子工学領域 博士前期課程)		

物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点

副拠点長	北口 仁	(きたぐち ひとし)
高温超伝導線材グループ 主幹研究員	西島 元	(にしじま げん)

ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社

企画管理部 技術総括部長	斉藤 一功	(さいとう かずよし)
全社技術アドバイザーフェロー	濱田 衛	(はまだ まもる)
マグネット工場技術グループ 主管部員	三好 康之	(みよし やすゆき)

科学技術振興機構 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型

プログラムマネージャー	前田 秀明	(まえだ ひであき)
-------------	-------	------------

上智大学大学院 理工学研究科 理工学専攻 電気・電子工学領域

教授	高尾 智明	(たかお ともあき)
----	-------	------------

※研究支援

本研究は主として科学技術振興機構 (JST) の未来社会創造事業 大規模プロジェクト型 エネルギー損失の革新的な低減化につながる高温超電導線材接合技術「高温超電導線材接合技術の超高磁場 NMR と鉄道き電線への社会実装(研究開発代表者:前田秀明)」(JPMJMI17A2) の支援を受けて行われました。また、一部は日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金特別研究員奨励費「1.3GHz NMR 装置の実現に向けた高温超伝導マグネット保護技術の構築(研究代表者:末富佑)」(19J11812) の支援を受けて行われました。高磁場発生試験は物質・材料研究機構 低温応用ステーションの共用設備を利用して実施されました。

1. 背景

核磁気共鳴 (NMR) 装置や核磁気共鳴画像 (MRI) 装置^[7]には、超電導磁石が使われており、磁場強度が高くなるほど装置の性能(感度と分解能)が向上します。

現在実用化されている NMR 装置や MRI 装置には、ニオブ (Nb) 系の金属系低温超電導線材が使われていますが、線材の物理的特性の制約から、24 テスラ程度が発生磁場の上限と考えられています。これに対して、レアアース (RE) 系やビスマス (Bi) 系の銅酸化物の高温超電導線材は、24 テスラを大幅に上回る高磁場においても超電導状態を保てると考えられています。そのためには、高温超電導線材で巻いたコイルを超電導磁石の内層高磁場領域に使う必要があり、この線材を活用した次世代超高磁場 NMR 装置の開発をめぐる国際的な競争が生じて

います。

共同研究グループは、次世代 1.3 ギガヘルツ永久電流^[8]NMR 装置の開発を進めており、これには 30.5 テスラという超高磁場が必要となります。高温超電導線材は薄くて幅広のテープ形状をしているため、これをコイルにするには、線材をロールケーキ形状に巻く方式が適しています（図 1a）。この巻線方式のコイルを採用した 32 テスラの超電導磁石が、米国のグループにより既に開発されており、超電導磁石の磁場としてはこれが最高記録です。

しかし、上記の巻線方式では線材同士のつなぎ目の数が膨大になります。NMR 装置に求められる永久電流運転にはつなぎ目を超電導接合^[9]にする必要がありますが、外周側のコイルとのわずかな隙間に多数の超電導接合を配置することは困難です。これに対し、線材をらせん形状に巻いて、つなぎ目が少なく、それらをコイル上部の広い空間に配置できる巻線方式が、永久電流運転には適していません（図 1b）。この巻線方式では、欧州のメーカーが開発を進める 1.2 ギガヘルツ NMR 装置における 28 テスラが最高で、1.3 ギガヘルツ NMR 装置に必要な 30.5 テスラの磁場の発生は達成されていませんでした。

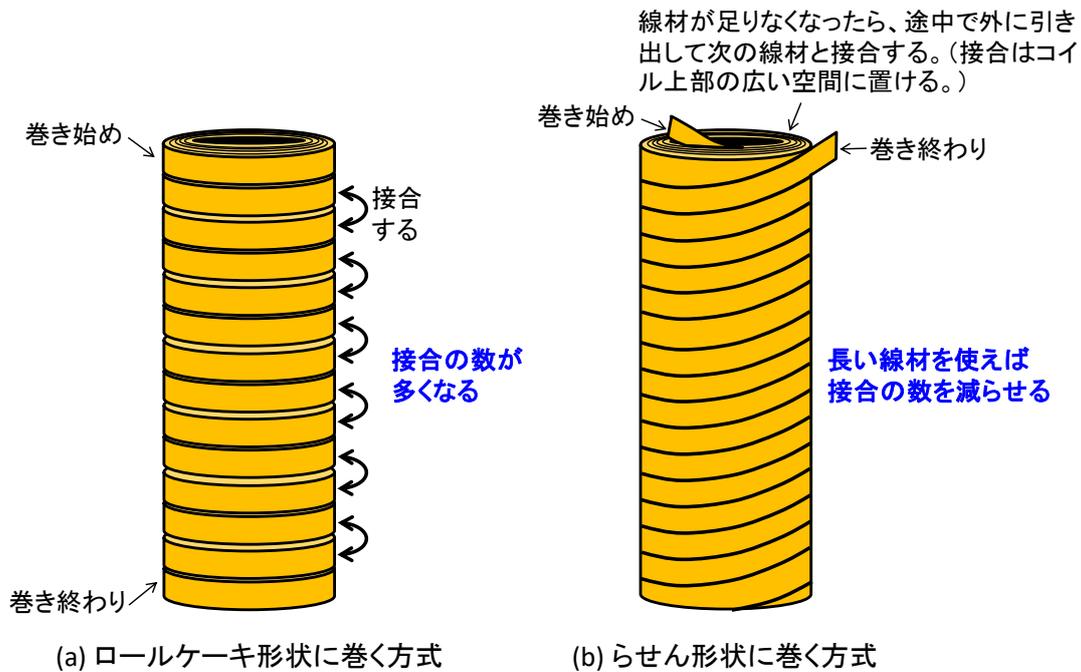


図 1 コイルの巻線方式

- a. ロールケーキ形状に巻く方式では、線材をロールケーキ形状に巻いたコイルを積み重ね、コイル同士を接合する。接合の数が多くなる。
- b. らせん形状に巻く方式では、線材をらせん形状に巻いてコイルにし、端まで巻いたら、次のコイルを外周側に積み重ねて巻く。途中で線材が足りなくなったら、線材を外に引き出し、新しい線材で次のコイルを巻き始める。以上を繰り返して巻き終わった後、引き出した線材同士を接合する。長い線材を使用すれば接合の数が少なくてすむ。

※応用超電導・磁石技術分野では、aの巻線方式は「パンケーキ巻き」、bは「レイヤー巻き」と呼ばれている。

2. 研究手法と成果

共同研究グループが開発を目指す 1.3 ギガヘルツ NMR 装置用の超電導磁石は、金属系低温超電導線材を巻いた外層コイル（以下低温超電導外層コイル）、Bi 系高温超電導線材の中層コイル（以下 Bi 系中層コイル）、さらに RE 系高温超電導線材の内層コイル（以下 RE 系内層コイル）から成ります。コイルはすべてらせん形状で巻かれます。このコイル構成は、金属系低温超電導線材より Bi 系線材の方が、Bi 系線材より RE 系線材の方が、より高い磁場の中でも電流を流すことができるという物理的特性を生かしたもので、共同研究グループ独自の構成です。

共同研究グループは、物質・材料研究機構低温応用ステーションで運用されている大口径 17 テスラ超電導磁石を低温超電導外層コイルとし、Bi 系中層コイルと RE 系内層コイルを組み込むことで、1.3 ギガヘルツ NMR 装置の超電導磁石と同様のコイル構成の超電導磁石を開発しました（図 2a）。今回の超電導磁石では、超電導接合は用いていませんが、コイルはすべてらせん形状に巻かれています。低温超電導外層コイルが発生する 17 テスラの磁場に加え、Bi 系中層コイルが 4 テスラを、RE 系内層コイルが 9 テスラを発生することで、中心部における 30 テスラ超の高磁場発生を目指しました。

しかし、高磁場に置かれた RE 系内層コイルには、クエンチ^[10]が起きた場合、コイル内部の局所的な常電導部が、わずかコンマ数秒で金属溶断温度にまで上昇して焼損してしまう問題があります。2016 年に柳澤チームリーダーらが 27.6 テスラを発生させた際にも、クエンチによって RE 系内層コイルが焼損しました。

そこで、今回、クエンチから RE 系内層コイルを守るために、絶縁を施さない線材を用いて、コイル層間に導体である銅フォイルと、絶縁体であるポリマーシートを複合材を挟み込んでコイルを巻く方式を適用しました。これによって、クエンチ時にコイル層内で電流が分流でき、過度な温度上昇を防ぐことが期待されます。この手法は「intra-Layer No-Insulation 法（以下 LNI 法）」と呼ばれ、共同研究グループは先行研究において、その効果を小さな試験コイルで確認していました（図 2b, c, d）。

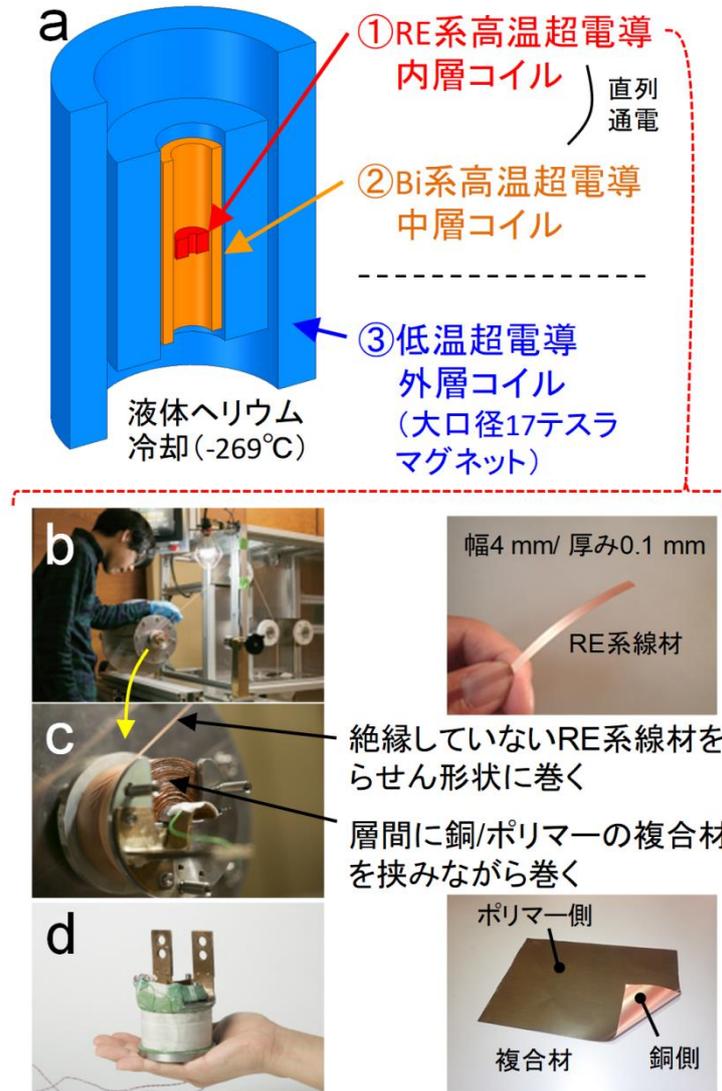


図 2 超電導磁石内部のコイル構成とレアアース系高温超電導最内層コイルの製作風景・外観

- a, コイルの断面図を示しており、青色で示した部分が低温超電導外層コイル、橙色で示した部分がビスマス (Bi) 系高温超電導中層コイル、赤色で示した部分がレアアース (RE) 系高温超電導内層コイルである。
- b, RE 系高温超電導内層コイルの巻線の様子。
- c, 巻線の様子の拡大写真：intra-Layer No-insulation 法 (LNI 法) を適用した。絶縁を施さない線材を用いて、コイル層間に導体である銅フォイルと、絶縁体であるポリマーシートの複合材を挟み込んでコイルを巻く。
- d, 完成した RE 系高温超電導内層コイル。

開発した超電導磁石の試験では、全てのコイルを液体ヘリウム温度 (-269°C) まで冷やし、まず低温超電導外層コイルに 241 アンペアの電流を流して 17 テスラの中心磁場を発生させました。その後、直列に接続した Bi 系中層コイル/RE 系内層コイルに電流を流し、最終的に 266 アンペアの電流で 30 テスラの中心磁場の発生に成功しました (図 3)。その後、それぞれのコイルの電流値を順次下げ、

消磁しました。

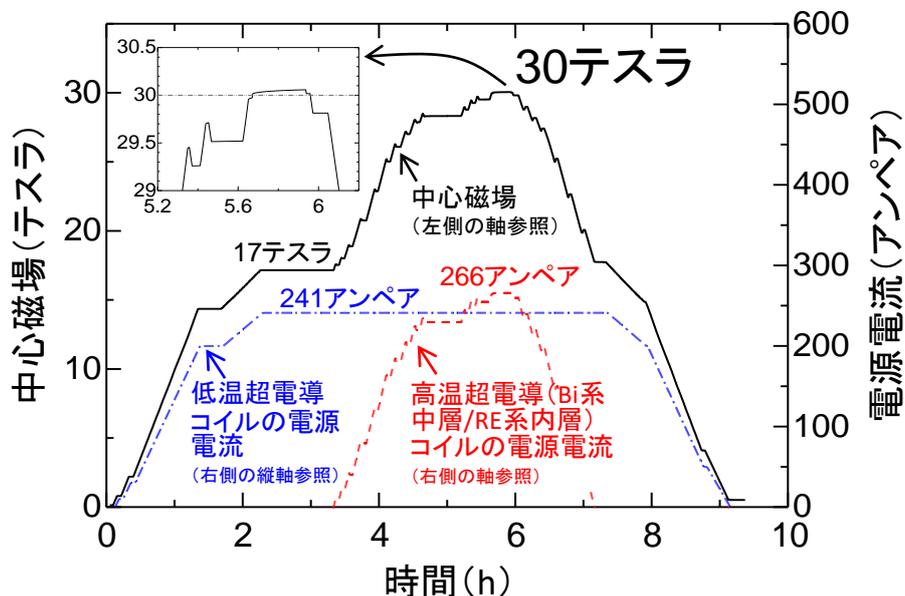


図 3 開発した超電導磁石による 30 テスラ超の高磁場発生試験結果

低温超電導外層コイルと高温超電導 (Bi 系中層/ RE 系内層) コイルに順次電流を流し、30 テスラの中心磁場発生に成功した。30 テスラ到達後は、順次コイルの電流を下げて消磁した。

次に、超電導磁石の限界試験として、クエンチが発生するまで Bi 系中層コイル/RE 系内層コイルの電流値を増加させました。すると、290 アンペアの電流に至ったところで、31 テスラの中心磁場が発生し、RE 系内層コイルがクエンチしました。電圧検出機能によって高温超電導に供給されている電流が遮断され、その後 1 秒程度で Bi 系中層コイル/RE 系内層コイルの磁場が消失しました(図 4)。残っていた低温超電導外層コイルの電流・磁場は、保護回路を使って消磁されました。

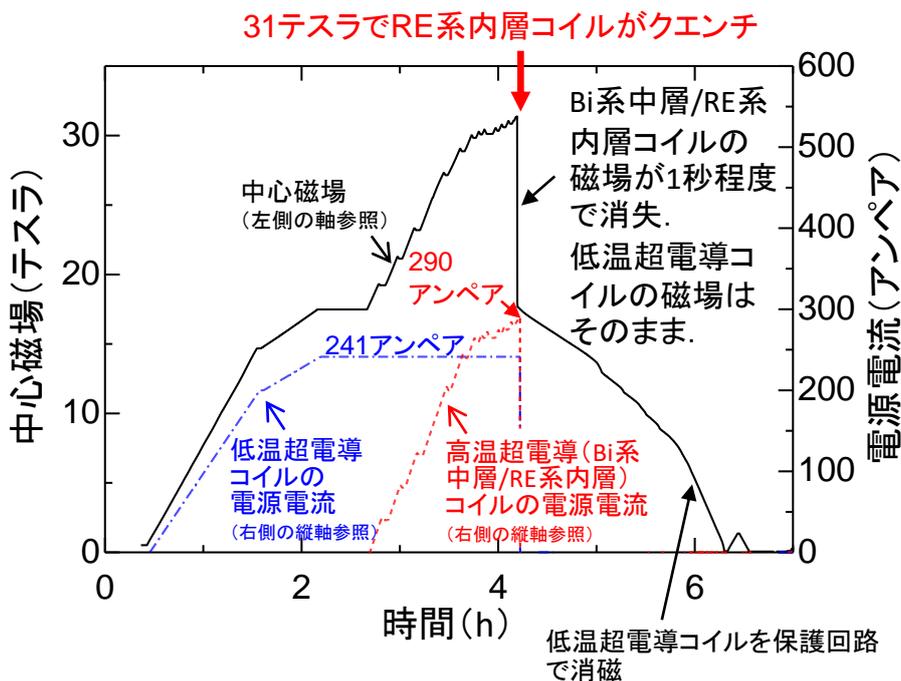


図 4 開発した超電導磁石の限界試験結果

図 2 の試験後に、限界試験を実施した。31 テスラ発生時にレアアース系内層コイルでクエンチが発生した。電源の検出電圧機能によって供給電流が遮断され、Bi 系中層/RE 系内層コイルの磁場が 1 秒程度で消失している。

一連の試験後、RE 系内層コイルを取り出し、液体窒素 (-196°C) で冷やして電流を流して検査したところ、コイルの電圧-電流特性が試験の前後で変わっていないこと、すなわちクエンチから保護されていることが確認できました(図 5)。

今回の試験によって初めて、らせん形状コイルの超電導磁石で 30 テスラ超の高磁場発生に成功しました。さらに、LNI 法によって、RE 系内層コイルをクエンチによる焼損から保護することにも成功しました。

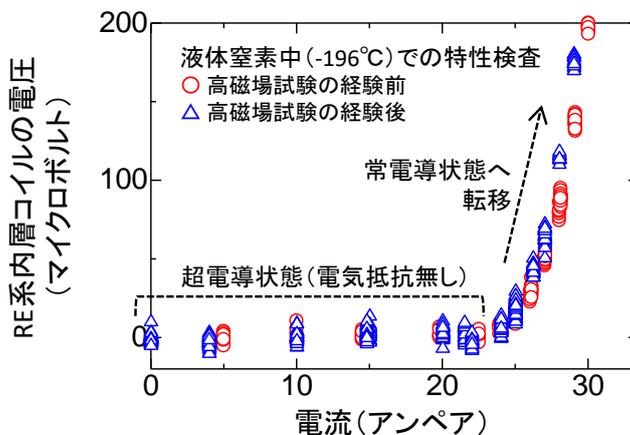


図 5 超高磁場試験の前後の RE 系内層コイルの特性

一連の高磁場試験の後に、RE 系内層コイル単体で液体窒素温度（ -196°C ）において通電試験を実施した。コイルの電圧電流特性が高磁場試験の経験前と変わらないことを確認した。

3. 今後の期待

今回の成果によって、次世代 1.3 ギガヘルツ NMR 装置の開発に向けた重要な技術課題の一つがクリアされ、その実現に近づきました。今後、別途開発を進めている超電導接合技術/永久電流運転技術^{注1)}と組み合わせて装置の実現を目指します。

次世代 1.3 ギガヘルツ NMR 装置が実現できれば、アルツハイマー病などの神経変性疾患の要因とされるアミロイド β ペプチド^[11]の構造情報の取得技術が飛躍的に進展するなど、創薬や医療への展開が期待できます。また、1.3 ギガヘルツ NMR 装置の開発を通して得られる先端技術により、すでに普及しているレベルの磁場の NMR 装置の小型化・省ヘリウム化などといった波及も期待できます。

注 1) 2018 年 11 月 2 日プレスリリース「高温超電導線材の超電導接合を持つ永久電流 NMR」
www.riken.jp/pr/press/2018/20181102_1/

4. 論文情報

<学会発表>

Y. Suetomi, T. Yoshida, S. Takahashi, T. Takao, G. Nishijima, H. Kitaguchi, Y. Miyoshi, M. Hamada, K. Saito, R. Piao, Y. Yanagisawa, H. Maeda, 30 T generation using an intra-layer no-insulation (LNI) REBCO coil in a 17 T LTS magnet, 26th International Conference on Magnet Technology (MT26), Vancouver, Canada, Sep. 27, 2019
URL: <https://indico.cern.ch/event/763185/contributions/3415510/>

5. 補足説明

[1] 高温超電導線材

銅酸化物高温超電導体を線材にしたもの。主にレアアース（希土類元素）系とビスマス系がある。液体窒素温度（ -196°C ）においても超電導状態を示し、また、液体ヘリウム温度（ -269°C ）においては、24 テスラを大幅に上回る高磁場においても超電導状態を維持できる。

[2] 超電導磁石

超電導線材で巻いたコイルを使った電磁石で、極めて少ない消費電力で、強力な磁場を発生することが可能。電気抵抗ゼロの超電導状態を保つために、液体ヘリウムや液体窒素といった冷媒に浸して冷却したり、冷凍機で冷却されたりする。ただし、超電導線材には、線材固有の臨界磁場（電気抵抗ゼロで電流を流せる磁場の上限）があるため、超電導磁石が発生できる磁場には上限がある。なお、「超電導」と「超伝導」はどちらも superconductivity の訳語であり、本リリースでは超電導に統一した。

[3] テスラ

磁場の単位。1 テスラはネオジム系などの強力永久磁石の表面磁場と同等の強さ。

[4] ギガヘルツ

周波数の単位。核磁気共鳴現象において、共鳴周波数は磁場に比例するため、NMR 装置では慣習的に磁場を周波数で表現する。30.5 テスラの磁場において、水素核は 1.3 ギガヘルツの周波数で共鳴する。ギガは 10 億。

[5] 核磁気共鳴 (NMR) 装置

磁場中に置かれた原子核の核スピンの共鳴現象により、物質の分子構造の解析や物性の解析を行う装置。分子の相互作用などの情報も得られるため、生命科学、医薬、化学、食品、材料物性といった幅広い分野で利用されている。NMR は Nuclear Magnetic Resonance の略。

[6] 金属系低温超電導線材

NbTi (ニオブチタン)、Nb₃Sn (ニオブスズ) に代表される金属系の超電導体を用いた超電導線材。NbTi は -263.7°C、Nb₃Sn は -254.9°C の極低温で超電導状態となる。NbTi と Nb₃Sn は NMR 装置において、NbTi は MRI 装置において広く実用化されている。Nb₃Sn 線材を使えば 24 テスラ程度の磁場が発生可能である。

[7] 核磁気共鳴画像 (MRI) 装置

核磁気共鳴現象を利用して人体などの断面撮像を行う装置。脳や血管などの画像診断に広く使われ、磁場を高くすることで、より高分解能の診断が可能となる。MRI は Magnetic Resonance Imaging の略。

[8] 永久電流

回路全体が超電導体でできているコイルに電流を流すと、抵抗がないため半永久的に電流が流れ続ける。この現象を永久電流と呼ぶ。

[9] 超電導接合

超電導線材のつなぎ目 (接合部) でも電気抵抗ゼロで電流を流す技術で、永久電流運転するために必要。酸化物材料を使った高温超電導線材の超電導接合は難しく、長らく不可能ともいわれていたが、近年目覚ましく技術が進歩しつつある。

[10] クエンチ

超電導体が、超電導状態から常電導状態に転移すること。

[11] アミロイド β ペプチド

アミロイド β 前駆体タンパク質からプロテアーゼにより切断されて産生される生理的ペプチド。アルツハイマー病で見られるアミロイド斑の構成成分として発見されたことから、この過剰な蓄積がアルツハイマー病発症の引き金と考えられている。Aβ はアミノ酸の長さで種類が分類されており、Aβ1-40、Aβ1-42 が同定されており、Aβ1-42 が最も神経毒性が高いとして解析が行われてきた。

6. 発表者・機関窓口



＜発表者＞ ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい

理化学研究所

放射光科学研究センター NMR 研究開発部門 NMR 開発グループ
超高磁場磁石開発チーム

チームリーダー 柳澤 吉紀（やなぎさわ よしのり）
研修生 末富 佑（すえとみ ゆう）

物質・材料研究機構

機能性材料研究拠点 高温超伝導線材グループ
主幹研究員 西島 元（にしじま げん）
TEL：029-863-5497 FAX：029-863-5599
E-mail：NISHIJIMA.Gen[at]nims.go.jp

ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社

技術総括部長 齊藤 一功（さいとう かずよし）

科学技術振興機構

未来社会創造事業 大規模プロジェクト型
プロジェクトマネージャー 前田 秀明（まえだ ひであき）

＜JST 事業に関すること＞

未来創造研究開発推進部 推進第1グループ
調査役 松尾 浩司（まつお こうじ）
TEL：03-6272-4004 FAX：03-6268-9412
E-mail：kaikaku_mirai[at]jst.go.jp

＜機関窓口＞

理化学研究所 広報室 報道担当
TEL：048-467-9272 FAX：048-462-4715
E-mail：ex-press[at]riken.jp

物質・材料研究機構 広報室

TEL：029-859-2026 FAX：029-859-2017
E-mail：pressrelease[at]ml.nims.go.jp

ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社

TEL：078-991-9445 FAX：078-991-9446
E-mail：tokyo-jastec[at]kobelco.com

科学技術振興機構 広報課

TEL：03-5214-8404 FAX：03-5214-8432
E-mail：jstkoho[at]jst.go.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。