

**液体ヘリウム不要の超伝導磁石 世界最高磁場 24.6 テスラ発生に成功！**  
世界最高の実用無冷媒超伝導磁石を全国の研究者が使用可能に

【発表のポイント】

- コストや安全性などの面で多くのメリットを有する無冷媒超伝導磁石\*1 の発生磁場が世界記録（24.6 テスラ\*2）を更新。
- 加えて強磁場の発生を長時間安定的に維持できることを実証。
- 開発した超伝導磁石は共同利用として研究者が利用可能となり、強磁場研究に大きく貢献。また本技術の発展により超伝導磁石を用いた機器（MRI など）への応用が期待される。

【概要】

国立大学法人東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター（以下強磁場センター）は、株式会社東芝、古河電気工業株式会社と共同で、高温超伝導材料を用いた無冷媒高温超伝導磁石の開発を行い、直径 52 mm の室温実験空間に 24.6 テスラの強磁場を発生させ、無冷媒超伝導磁石の発生磁場世界記録を大きく更新しました。

無冷媒超伝導磁石は、他の強磁場磁石と比べて、コスト・安全性・利便性・柔軟性など多くのメリットを有する電磁石です。この利点を生かせば、内部磁場の解析手法である固体 NMR \*3 などの物性研究や、強磁場中の材料プロセス研究に広く用いることが可能となります。さらに今回、24.2 テスラの長時間保持が実証され、超伝導磁石を用いた世界最高磁場における NMR 測定にも成功しました\*4。

開発した無冷媒超伝導磁石は、世界最高の実用超伝導磁石として全国の研究者に公開され（全国共同利用）、今後 24 テスラ級の強磁場応用が拓かれていくものと期待されます。また開発によって得られた超伝導磁石技術は、より強い磁石の開発や超伝導磁石を用いた機器（MRI や加速器、核融合など）への応用が期待できます。本成果により未踏科学技術協会第 21 回超伝導科学技術賞を受賞することが決定しました（3 月 17 日授賞式）。

\*NMR 測定は日本原子力研究開発機構の酒井宏典博士によって行われました（H28 年度強磁場センター年次報告掲載予定）。

【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 淡路智教授コメント】

本研究は、高温超伝導材料を用いた次世代強磁場磁石開発を目的として実施しました。特に、大きな電磁力対策や安全対策など高温超伝導材料が抱える課題を克服することで、実用に耐えうる装置ができました。得られた知見を生かして、高温超伝導応用機器開発が今後さらに大きく展開していくことを期待します。



図 1.新しく開発した 25T 無冷媒超伝導マグネットの外観とコイルイメージ。高さ 1.2 m 幅 2.8 m × 奥行き 1.4 m。コイルは外からニオブチタン（水色）、ニオブ 3 スズ（青）、ビスマス系高温超伝導コイル（赤）の 3 種類によって構成されている。

## 【詳細な説明】

### ○研究背景

超伝導磁石は、高効率で高い精度の磁場を安定的に発生させることができる磁石として知られていますが、その多くは液体ヘリウムを用いて冷却することが必要です。しかし、1992 年頃から普及した無冷媒超伝導磁石は、超伝導コイルを小型の冷凍機で直接冷却するタイプの超伝導磁石であり、液体ヘリウムが不要、操作が簡単、長時間磁場が保持できるなどの利点があるため、広く普及しています。しかし、その発生磁場はこれまで高温超伝導材料を使っても、20.1 テスラが世界最高でした。超伝導磁石が発生させる磁場は主に、用いる超伝導材料の超伝導特性と機械特性によって制限されていましたが、近年優れた高強度超伝導線材の開発が進み、さらなる強磁場超伝導マグネット開発が世界中で実施されています。

通常の液体ヘリウムを用いた超伝導磁石開発では、2016年に理研が開発した高温超伝導磁石で記録した 27.6 テスラが世界最高で、次いで米国のグループが 27.0 テスラ、韓国のグループが 26.4 テスラを記録しています。しかし、いずれの磁石も実際に磁場を利用するには至っていません。

### ○成果の内容

今回、強磁場中でも高い超伝導特性を有する高温超伝導材料の内、住友電工によって新たに開発された高強度ビスマス系超伝導線材と、古河電工と東北大で共同開発した高強度ニオブ 3 スズ・ラザフォード導体を採用することで、より高磁場の無冷媒超伝導磁石の開発に成功しました。図 1 は、開発した 25 テスラ無冷媒超伝導磁石の外観とコイル内部イメージです。超伝導コイルは高強度ビスマス系高温超伝導内層コイル、高強度ニオブ 3 スズ・ラザフォードケーブル中層コイル、ニオブチタン・ラザフォードケーブル外層コイルの 3 種類のコイルで構成され、冷凍機によって熱伝導で冷却されています。図 2 に示すように、本コイルに通電することで最大 24.6 テスラの磁場発生を確認しました。無冷媒超伝導磁石による発生磁場記録は、強磁場センターが 2013 年に達成した 20.1 テスラが世界最高でした(図 3)。今回この世界記録を 4.5 テスラ更新することに成功しました。25 テスラ無冷媒超伝導磁石は定格である 24.5 テスラまで 1 時間で到達することができます。

さらに今回、超伝導磁石による世界最高磁場 24.2 テスラにおける固体 NMR 測定にも成功しました。その際の発生磁場記録を NMR 測定結果とともに図 4 に示します。約 4 週間の実験中、最大で 4 日間 24.2 テスラの磁場保持を行って NMR 信号を取得しました。この結果から、最高磁場で長時間の磁場保持と、固体 NMR 測定に必要な安定度があることが確認できました。原理的には液体ヘリウムの注液などのメンテナンスなしで最大 10000 時間の磁場保持も可能となります。挿入図は測定結果で、測定試料である  $\text{CeRh}_2\text{Si}_2$  の Si 原子核と、一緒に入れた Pt 原子核の核磁気共鳴(NMR)信号です。超伝導磁石を用いた NMR 測定は、これまで物質材料研究機構で達成した 1020MHz (24.0 テスラ)が世界最高でした。磁場の安定度や均一度は大きく異なりますが、今回その記録を 24.2 テスラと若干上回る磁場における NMR 測定にも成功しました。

### ○意義・課題・展望

本磁石は、全国共同利用によって多くの研究者に開放され、その特徴を生かした様々な物性研究、材料開発等に用いられます。さらに、開発によって得られた超伝導磁石技術は、超伝導磁石を用いた機器である MRI や加速器、核融合などへの応用が期待できます。本成果は、学術誌 *Superconducting Science and Technology* (IOP 出版)に掲載される他、未踏科学技術協会第 21 回超伝導科学技術賞を受賞することも決定しました(3 月 17 日授賞式)。

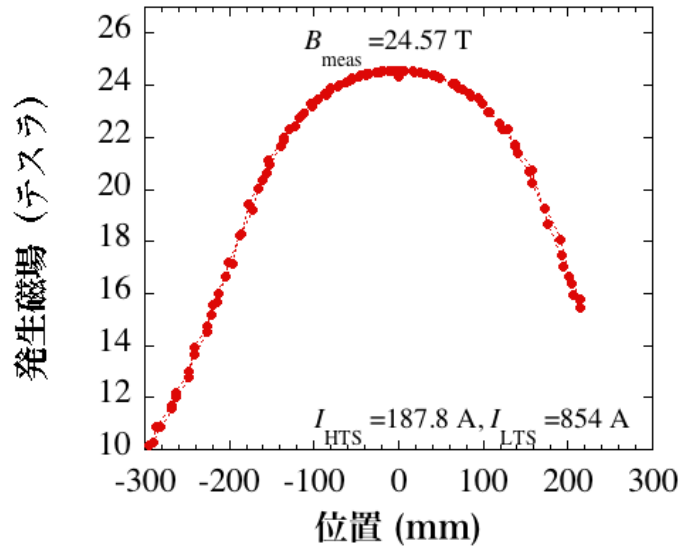


図 2.最高磁場発生時の鉛直方向磁場分布。中心で最大 24.6 テスラの磁場発生を確認した。

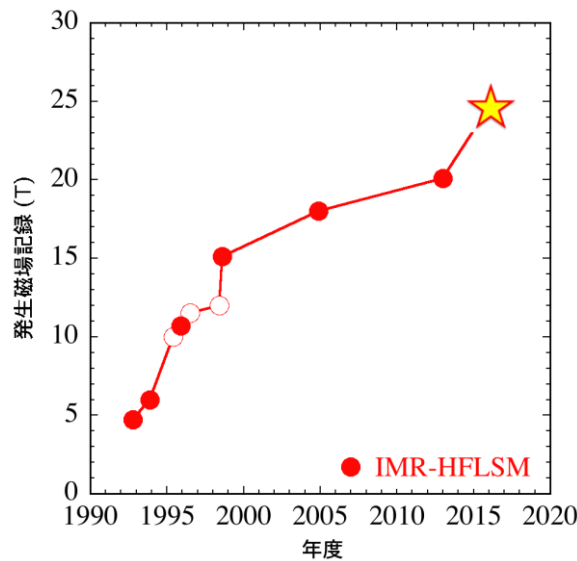


図 3.無冷媒超伝導磁石による発生磁場記録の推移。赤丸はすべて東北大金研で開発されたもの。今回、世界記録を 4.5 テスラ更新した。

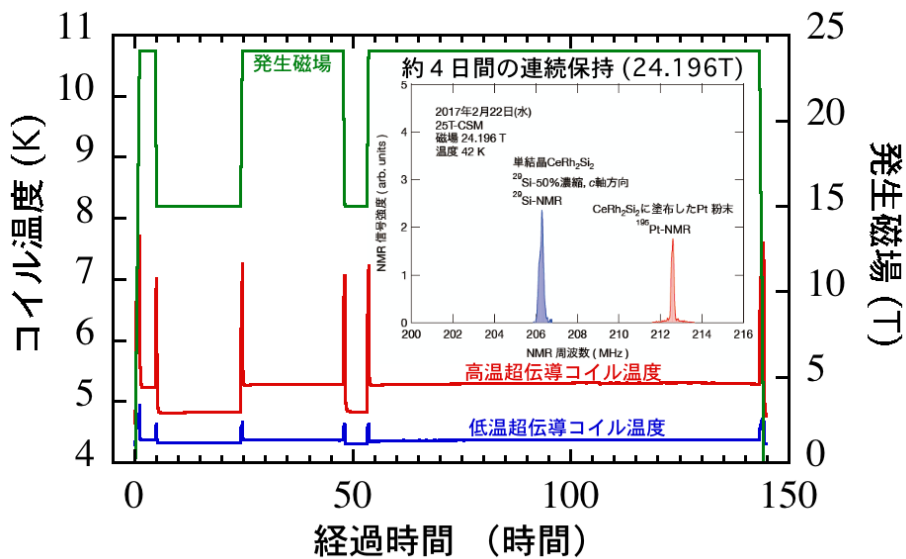


図 4.24 テスラ長時間発生時の磁場とコイル温度プロフィール。24.2 テスラの長時間発生時でもコイル温度は安定していることから、1ヶ月を超える長時間の磁場発生もヘリウム注液等の作業なしで可能。挿入図は 24.2 テスラにおける NMR 測定例。長時間の安定磁場により固体 NMR 測定にも成功した(挿入図)。

○発表論文

雑誌名: Superconducting Science and Technology, in press

英文タイトル: First Performance Test of a 25 T Cryogen-free Superconducting Magnet

全著者: Awaji, Satoshi; Watanabe, Kazuo; Oguro, Hidetoshi; Miyazaki, Hiroshi; Hanai, Satoshi; Tosaka, Taizo; Ioka, Shigeru

DOI: 10.1088/1361-6668/aa6676

○専門用語解説

- ※1 無冷媒超伝導磁石: 超伝導磁石を冷凍機で直接冷却するため、液体ヘリウムなどの液体寒剤を必要としない点が特徴。コイルは真空中に置かれ、熱伝導で冷却するため、磁場の上げ下げ時には、コイル温度の上昇が見られる。
- ※2 テスラ: 磁場(磁束密度)の単位。25 テスラは地磁気の約 50 万倍。
- ※3 固体 NMR: 固体試料の電子・磁気構造などを解析する手法の一つ。強磁場下の固体試料に高周波数の電磁波を加えると、試料中の原子の向きがいったん揃い、やがて元の状態に戻ってエネルギーが放出される。このとき原子核固有の周波数で強い放出が起こる(核磁気共鳴)が、その周波数は原子の化学的結合や内部磁場によってわずかにずれる(化学シフト)。この周波数スペクトルを計測することで、多くの微視的構造に関する情報を得ることができる。医療機器の MRI(磁気共鳴画像診断)はこの原理を応用している。固体 NMR は溶液 NMR(タンパク質の分子構造決定に用いられる)ほど高い磁場の安定度と均一度を必要としない点が特徴。
- ※4 常伝導磁石と超伝導磁石を組合わせたハイブリッド磁石や、水冷磁石を用いた固体 NMR 測定は、45 テスラ近傍まで海外で実施されている。

○共同研究機関および助成

本成果は、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターと(株)東芝、古河電気工業(株)の共同研究によるものです。本装置は強磁場コラボラトリーの一環として、学術会議マスタープランならびに文部科学省ロードマップの支援により整備されました。

本件に関するお問い合わせ先

◆研究内容に関して

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

022-215-2151

Email: awaji@imr.tohoku.ac.jp

◆報道に関して

東北大学金属材料研究所  
情報企画室広報班  
横山 美沙

TEL: 022-215-2144 FAX: 022-215-2482

Email: pro-adm@imr.tohoku.ac.jp