



# 高磁場超伝導マグネットの設計および磁場安定化技術の研究

大塚, 昭弘

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2011-03-25

(Date of Publication)

2011-05-11

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5308

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005308>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 大塚 昭弘  
博士の専攻分野の名称 博士（工学）  
学 位 記 番 号 博い第 5308 号  
学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当  
学位授与の日付 平成 23 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

高磁場超伝導マグネットの設計および磁場安定化技術の研究(Research of High-Field Superconducting Magnet Design and Magnetic Field Stabilization Technology)

審 査 委 員

主 査 教 授 武田 実  
教 授 山内 知也  
教 授 阿部 晃久  
グループリーダー 木吉 司

## 論文内容の要旨

氏 名 大塚 昭弘

専 攻 海 事 科 学 専 攻

論文題目

高磁場超伝導マグネットの設計および磁場安定化

技術の研究

指導教員 武田 実 教授

超伝導技術の応用分野の一つに高分解能核磁気共鳴分光装置(Nuclear Magnetic Resonance: NMR)がある。これは外部静磁場に置かれた原子核スピンのゼーマン効果によって磁場強度に比例するエネルギー差を生じ、これに対応する電磁波を吸収・放出する共鳴現象を利用している。共鳴周波数は原子の回りの電子により差異が生じ、これを化学シフトと呼ぶ。この化学シフトにより、分子構造や原子の結合状態を求めることができる。NMRの感度は磁場の3/2乗に比例するので、マグネットの高磁場化はNMRの性能向上に大きく寄与してきた。2010年になって23.5 T(プロトン<sup>1</sup>Hの共鳴周波数が1 GHzに相当する)マグネットが開発されたが、これには従来からのNbTiとNb<sub>3</sub>Snの金属系低温超伝導線(Low-Temperature Superconductor: LTS)が使用された。しかし、23.5 T以上になると、これら金属系超伝導材料は臨界電流が急激に低下するので、これ以上の高磁場を発生することができない。

1986年にベドノルツとミュラーによって発見された酸化物超伝導材料(LaBaCuO)の臨界温度 $T_c$ は約30 Kであったが、翌年には $T_c=90$  K級のYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO)が発見され、引き続き $T_c=110$  K級のBi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub> (Bi-2223)が見つかった。これらは従来からの超伝導体と比べて臨界温度が高いことから酸化物系高温超伝導体(High-Temperature Superconductor: HTS)と呼ばれる。これらは $T_c$ が高いだけでなく、4.2 Kにおいて臨界磁場が100 Tを超えるという特徴がある。このため20 Tを超える領域で優れた臨界電流特性を有するので、4.2 Kにおける高磁場マグネットへの応用が期待されてきた。しかし、酸化物は基本的に脆弱で加工が難しく、実用に耐える製品化はなかなか進まなかった。最近、Bi-2212、Bi-2223およびYBCO等において超伝導線の開発が進み、実用に耐える臨界電流特性や長尺の線材が得られるようになりつつある。

このような状況の下、本論文ではまず始めにNbTiとNb<sub>3</sub>SnのコイルにHTSコイルを組み合わせた25~30 T規模のマグネットについて基本設計を行った。設計に当たっては、約200~230 MPaのフープ応力基準を適用した。通常、マグネットの運転電流は超伝導線材の臨界電流値で決められるが、HTSを加えることで臨界電流に対する制約は軽減された。高磁場を発生させようとすると、線材の経験磁場が高い領域では臨界電流値で制限されるが、経験磁場が少しでも下がると臨界電流よりもむしろ線材に働くフープ応力で制約されるようになることが分かった。概略設計を行った結果、線材質量、蓄積エネルギー共に、23 T以上で急激に増加する。線材重量に関して1 GHzマグネットを基準に考えると、1.1 GHzでは2倍に、1.2 GHzでは3.3倍に、1.3 GHzでは7.8倍に増加していく。この度合いは、磁場の約8乗に比例するという非常に強い磁場依存性があることが分かった。

(氏名:大塚 昭弘 NO. 2)

そこでコイルに加わる簡便な電磁力の指標としてフープ応力に着目し、超伝導線材の臨界電流値には関わらずフープ応力だけで制約された場合のマグネット設計を行い、発生する磁場とコイル体積や蓄積エネルギーなどの相関について解析を行った。その結果、コイル外径、コイル体積、蓄積エネルギー、漏洩磁場などの重要な諸元と中心磁場の間に規則性があることが分かった。それは、これらの諸元が中心磁場の2乗の指数関数に比例するというものである。この規則性は高磁場マグネットの基本設計にも当てはめることが可能であり、フープ応力一定モデルの有効性を示すことができた。これらの解析の結果として、マグネットの小型化には高いフープ応力を基準とした設計が必要不可欠であることが示された。

ハステロイ製基材に超伝導体を形成するReBCO超伝導線などのCoated Conductorは、700 MPaの高い引張り応力下でも特性劣化が小さい。YBCOに代表されるReBCO線材を用い、500 MPaの高いフープ応力設計条件下で1.3 GHz (30.5 T) NMRマグネットの設計を行った。この結果、低応力のLTS+HTSマグネットの設計と比較して、線材重量が1/15になる小型で軽量のマグネットを設計できることを示した。

しかし、Bi-2223やReBCO線材のようなテープ形状をした線材の場合、超伝導線に垂直な径方向磁場成分が作用すると、これを打消すように遮蔽電流が流れ、中心磁場と逆向きの遮蔽磁場を形成する。ReBCO線材を用いて設計した1.3 GHz (30.5 T)NMRマグネットにおいて遮蔽磁場の大きさを数値計算で求めた。この結果、遮蔽磁場の設計磁場に対する比率は約 $6 \times 10^{-2}$ であり、通常の励磁操作において無視できないレベルであることが分かった。補正コイルは遮蔽磁場を低減する効果があるが、従来設計の補正コイルでは効果が限られていた。均一磁場空間を広げる新たな補正コイルを工夫することで、約10%遮蔽磁場を低減できることを示した。過去にコイル設計で遮蔽磁場の低減を目指した例は少なく、本方式はReBCO超伝導線を使ったマグネットの実用化につながる重要な成果である。

NMR用超伝導マグネットの場合、化学シフトやスピン結合のような共鳴周波数の僅かな共鳴周波数の差を識別するため $1 \times 10^{-8}$  /hの高い磁場安定度が必要とされている。従来はNbTiやNb<sub>3</sub>Snの線を用いて超伝導接続を行い、永久電流モードで運転して高い磁場安定度を達成することができた。しかし、酸化物超伝導線の場合、微小抵抗の存在や超伝導接続技術が確立していないことにより、永久電流モードではNMRとして使用可能なレベルの磁場安定度(ドリフト)の達成は困難とされている。そこで、フラックスポンプを利用したドリフト補償ユニットを考案し、ドリフト値が $-6.65 \times 10^{-7}$  /hと通常より70倍大きい600 MHz (14.1T)NMRマグネットに組込んだ。ドリフト補償ユニットの1次コイル電流を増減する手法により、ドリフト値を $-8.24 \times 10^{-12}$  /hに改善することができた。このドリフト補償ユニットは測定時間に制約があるものの、永久電流スイッチを使用しないのでスイッチ操作に伴う磁場の急激な変化は生じない特徴を有する。

(氏名:大塚 昭弘 NO. 3)

ドリフトが更に大きいマグネットの場合、フラックスポンプによるドリフト補償には限界があるので、電源駆動モードでの運転が想定されている。通常のNMR用超伝導マグネットは永久電流モードで使用することを前提として設計されており、そのままでは電源駆動モードでの運転に不都合が生じる。フラックスポンプの実験に使用したマグネットを使って電源駆動モードでの長期間運転が可能となるよう改造を施した。マグネットは永久電流スイッチを取り外して電源駆動モード専用とした。クライオスタットは4K-GM (Gifford-McMahon) 冷凍機を組み込んで蒸発したヘリウムガスを再液化し、電流リードに酸化物系高温超伝導材料を使うことでヘリウム槽への浸入熱を低減した。この結果、電源駆動モードで励磁中であっても液体ヘリウムの蒸発量をゼロに抑えることができた。

マグネットの励磁にはペルチェ素子を使って制御回路の温度補償を行う高安定度電源を用いた。この電源で励磁した結果、300時間では約6 ppmの変動だが、30時間では約2 ppmに抑えられた磁場安定度が得られた。この磁場変動を補償するため、磁場のz成分を補正する超伝導シムコイルの電流をフィードバック制御した結果、平均値ではあるが $1 \times 10^{-10}$  /h以下の低ドリフトを達成することができた。更に、電源駆動モードで14.1 Tの磁場を発生させた状態で294日間保持した。この間、液体ヘリウムの補充は全く行っておらず、改造したクライオスタットの性能および長期信頼性を実証することができた。

長期的な変動は超伝導シムコイルを用いて補償することは可能だが、短期的な変動磁場についての対策が必要なが明らかとなった。そこで、変動磁場対策としてBi-2223超伝導線を用いた磁気ダンパーコイルを製作し、磁場中で冷却して超伝導状態にした。この磁気ダンパーにより、変動磁場を1/50に低減できることを実証した。これらの結果は、酸化物超伝導線を用いた1 GHz以上の高磁場NMRマグネットにおいて、高い磁場安定度の実現が可能であることを示すものである。

電源駆動モードの試験に使用した600 MHz NMRマグネットの内層Nb<sub>3</sub>SnコイルをBi-2223コイルで置き換えたHTS-500を製作した。このマグネットを、超高安定度電源を使って電源駆動モードで運転し、高分解能NMRスペクトルを取得した。この結果、従来の永久電流モードでの高分解能NMRスペクトルと遜色のない1~3次元のNMRスペクトルデータを得ることができた。これは将来HTSを用いた1.3 GHz (30.5 T)NMRマグネットが開発された場合、電源駆動モードでも高分解能NMR測定が可能であることを示している。

本研究は従来のLTSでは不可能な1 GHz以上の高磁場領域において、HTSを用いたNMR用超伝導マグネットの実用化に結び付く重要な成果を上げることができた。

氏名	大塚 昭弘		
論文 題目	高磁場超伝導マグネットの設計および磁場安定化技術の研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	武田 実
	副査	教授	山内 知也
	副査	教授	阿部 晃久
	副査	グループリーダー	木吉 司
要 旨			
<p><b>【論文概要】</b></p> <p>超伝導技術の応用のひとつとして、核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance: NMR) が良く知られている。NMR は原子核スピンのゼーマン効果によって、磁場強度に比例するエネルギー差を生じ、これに対応する電磁波を吸収・放出する共鳴現象を利用している。この現象を利用することにより、分子構造や原子の結合状態を調べることができる。NMR の感度は磁場の3/2乗に比例するので、超伝導マグネットの高磁場化はNMR の性能向上に大きく寄与している。従来のNMR ではNbTiやNb<sub>3</sub>Sn等の金属系低温超伝導体 (Low-Temperature Superconductor: LTS) を使用しており、磁場 23.5 T (プロトンの共鳴周波数が1. GHz) 以上では臨界電流が急激に低下するので、これ以上の高磁場を発生することが困難であった。</p> <p>ところで、1986年に酸化物高温超伝導体 (High-Temperature Superconductor: HTS) が発見されて以来、臨界温度 <math>T_c = 90</math> K 級の YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO) や <math>T_c = 110</math> K 級の Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub> (Bi-2223) 等においてHTS線材化の研究開発が進み、実用化の段階に入ってきた。これらのHTSでは <math>T_c</math> が高いだけでなく、4.2 Kにおいて臨界磁場が100 Tを超えるという特徴がある。このため20 Tを超える高磁場領域で優れた臨界電流特性を示すので、HTSは4.2 Kにおける高磁場超伝導マグネットへの応用が期待されている。しかし、HTSでは超伝導接続技術が確立していないこと、<math>n</math> 値が低く内部に微小な抵抗が存在すること等の問題が未だ残っていた。このため永久電流モードの運転ができないので、<math>1 \times 10^{-4}</math> h 以下の高い磁場安定度 (ドリフト) が得られないという問題があった。</p> <p>そこで本研究では、HTSを応用した1 GHz以上のNMR用超伝導マグネットの開発を目指して、設計・計算および実験の両面から研究を進めている。前者では、コイルに加わる電磁応力のうちフープ応力に着目して、フープ応力基準の設計手法および遮蔽磁場の影響について詳細な検討を行っている。後者では、高い磁場安定度を得る実験技術として、新たにフラックスポンプの利用および電源駆動モード運転を提案し、これらの磁場安定化技術の有効性について吟味している。</p> <p>博士論文は、9章で構成されている。</p> <p>第1章では、研究の背景、NMR用超伝導マグネットの課題について述べた後で、本研究の目的を示している。第2章では、NbTiとNb<sub>3</sub>SnのLTSコイルにHTSコイルを組み合わせた高磁場マグネットの基本設計について述べている。第3章では、コイルに加わるフープ応力に着目して、フープ応力だけで制約されたマグネットの設計を行い、発生する磁場とコイル体積や蓄積エネルギーとの相関について解析している。第4章では、高いフープ応力条件下で1.3 GHz (30.5 T) NMR用超伝導マグネットの設計を行うとともに、遮蔽磁場を低減するための補正コイルについて述べている。</p> <p>続いて第5章では、HTSコイルベースのNMR用超伝導マグネットの高い磁場安定度を達成するために、フラックスポンプを利用したドリフト補償ユニットを考案し、その有効性を実験的に示している。第6章では、ドリフト補償の別の方法として電源駆動モード運転を提案し、その低ドリフト性を実証している。第7章では、短期的な変動磁場対策として作製したHTSダンパーコイルについて詳述し、磁気ダンパーとして有効であることを明らかにしている。第8章では、電源駆動モードの試験に使用したNMR用超伝導マグネットの内層コイルをHTSコイルに置き換え、超高安定度電源を用いて電源駆動モードで運転し、計測した高分解能NMRスペクトルについて述べている。</p> <p>以上の研究成果を第9章でまとめ、結論としている。</p>			

氏名	大塚 昭弘		
<p><b>【審査内容および評価】</b></p> <p>本申請者は、始めにLTSコイルにHTSコイルを組み合わせた25~30 T規模の高磁場マグネットの概念設計を行い、超伝導線材の経験磁場が高い領域では臨界電流で制限されるが、経験磁場が少しでも下がると臨界電流よりもむしろ線材に働くフープ応力 (電磁応力) で制限されることを初めて明らかにした。また、フープ応力だけで制約されたマグネットの場合、コイル体積や蓄積エネルギーは中心磁場の2乗の指数関数に比例することを見出したことは、高く評価できる。続いて、高いフープ応力条件下で1.3 GHz超伝導マグネットの設計を行い、従来の設計と比べて線材重量が1/15に軽量化できるが、遮蔽磁場の影響が無視できないことを明らかにしている。この遮蔽磁場を低減するためには、均一磁場空間を広げた補正コイルが有効であることを提案している。</p> <p>一方、LTSコイルにHTSコイルを組み合わせたNMR用高磁場マグネットの磁場安定化技術において、フラックスポンプを利用したドリフト補償ユニットおよび電源駆動モードにより、高い磁場安定度を得ることに成功している。同時に、長期的な変動磁場は超伝導シムコイルを用いて、また短期的な変動磁場はHTSダンパーコイルを用いて、低減できることを実証している。さらに、600 MHz NMRマグネットの内層Nb<sub>3</sub>SnコイルをHTSコイルで置き換え、超高安定度電源を用いて電源駆動モードで運転し、従来の永久電流モードと遜色のないNMRスペクトルデータの取得に成功している。</p> <p>以上のとおり、本研究は従来のLTSでは不可能な1 GHz以上の高磁場領域において、HTSを用いたNMR用超伝導マグネットの設計および磁場安定化に不可欠な重要な知見を得たものとして価値ある集積と認める。よって、学位申請者の大塚昭弘は、博士 (工学) の学位を得る資格があると認める。なお、本研究に関する公表論文は、有審査論文10編である。</p>			
<p>[1] A. Otsuka, T. Kiyoshi, S. Matsumoto, K. Kominato, and M. Takeda, "Drift compensation of 600 MHz NMR magnet," <i>IEEE Transactions on Applied Superconductivity</i>, Vol. 17, pp. 1442-1445, 2007.</p> <p>[2] A. Otsuka, T. Kiyoshi, and S. Matsumoto, "HTS magnetic field damper for short-term fluctuations in the driven-mode," <i>IEEE Transactions on Applied Superconductivity</i>, Vol. 18, pp. 848-851, 2008.</p> <p>[3] A. Otsuka, T. Kiyoshi, and M. Takeda "A 1.3 GHz NMR magnet design under high hoop stress condition," <i>IEEE Transactions on Applied Superconductivity</i>, Vol. 20, pp. 596-599, 2010.</p> <p>[4] A. Otsuka, Y. Yanagisawa, T. Kiyoshi, H. Maeda, H. Nakagome, and M. Takeda "Evaluation of the screening current in a 1.3 GHz NMR magnet using ReBCO," <i>IEEE Transactions on Applied Superconductivity</i>, in press.</p> <p>[5] 大塚昭弘, 木吉司:「フープストレス一定条件下での高磁場マグネット設計」、低温工学 42 (2007) pp. 196-205.</p> <p>[6] 大塚昭弘, 木吉司, 松本真治, 小湊健太郎, 竹田雅詳:「フラックスポンプによる600 MHz NMR マグネットのドリフト補償」、低温工学 43 (2008) pp. 50-54.</p> <p>[7] 大塚昭弘, 木吉司, 松本真治, 野口隆志, 小湊健太郎, 竹田雅詳:「600 MHz NMR マグネットの電源駆動モードにおける磁場安定度」、低温工学 43 (2008) pp. 287-295.</p> <p>[8] T. Kiyoshi, A. Otsuka, S. Choi, S. Matsumoto, K. Zaitu, T. Hase, M. Hamada, M. Hosono, M. Takahashi, T. Yamazaki, and H. Maeda "NMR upgrading project towards 1.05 GHz," <i>IEEE Transactions on Applied Superconductivity</i>, Vol. 18, pp. 860-863, 2008.</p> <p>[9] S. Matsumoto, S. Choi, T. Kiyoshi, A. Otsuka, K. Itoh, and T. Asano "Hoop stress tests of Bi-2223 coils," <i>IEEE Transactions on Applied Superconductivity</i>, Vol. 18, pp. 1224-1227, 2008.</p> <p>[10] T. Kiyoshi, S. Choi, S. Matsumoto, K. Zaitu, T. Hase, T. Miyazaki, A. Otsuka, M. Yoshikawa, M. Hamada, M. Hosono, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, M. Takahashi, T. Yamazaki, and H. Maeda "HTS-NMR: Present status and future plan," <i>IEEE Transactions on Applied Superconductivity</i>, Vol. 20, pp. 714-717, 2010.</p>			