

氏名(本籍地)	玉田 大輝
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 7245 号
学位授与年月日	平成 27 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理解物質科学研究科
学位論文題目	

高温超伝導バルク磁石を用いた MR microscope の開発

主査	筑波大学教授	理学博士	巨瀬勝美
副査	筑波大学教授	工学博士	伊藤雅英
副査	筑波大学教授	工学博士	喜多英治
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	柳原英人

論文の要旨

磁気共鳴イメージング(Magnetic Resonance Imaging: MRI)装置は、医療診断装置として、広く普及し、現在では、医療において欠くことができない装置となっている。MRI では、永久磁石や超伝導磁石が使用されており、それぞれ、長所と欠点を有している。永久磁石は、寒剤補充などのメンテナンスが不要で、オープンな磁石が作りやすいという長所を有しているが、あまり強い静磁場を得ることができず(最大 2T 程度)、また静磁場の時間的安定性において大きな問題がある。超伝導磁石は、強力で時間的に安定した磁場が得られるという長所を有しているが、超伝導線材を液体ヘリウム温度に保持しなければならず、そのための真空容器が大きくなり、また、寒剤(液体ヘリウム)を補充しなければならないという欠点を有している。特に、後者の欠点は、ヘリウムガス資源の枯渇が懸念される現状では、早急に解決しなければならない課題である。

これに対し、1986 年に発見された高温超伝導材料は、液体ヘリウムの問題を解決すると期待され、特に、これを用いたバルク超伝導磁石は、高磁場を、簡単な構造を有するクライオスタットで実現できると期待されてきた。このような状況の下で、理化学研究所の仲村高志らは、2006 年、世界で初めて、バルク超伝導体を用いた磁石による NMR 信号(共鳴周波数 123.4MHz, スペクトル幅 320kHz)を観測することに成功した。これをきっかけとして、バルク超伝導磁石の静磁場均一性に関する改良はさらに進み、2011 年、小川と仲村らは、外径 60mm, 内径 28mm, 高さ 20mm のバルク超伝導磁石を 6 枚スタックすることにより、4.7T の静磁場を捕捉して、直径 6.2mm, 長さ 9.1mm の円柱状の領域において、31ppm (peak-to-peak: pp) の静磁場均一性を達成し、水ファントムや、化学固定マウスなどの明瞭な MR 画像を取得することに成功した。

ところが、この先行研究には、(1)静磁場均一性が不足する部分があり、画像に信号欠損がみられた、(2)設計どおりの勾配磁場効率が達成されなかった、という問題点があった。そこで、本研

究では、上記の問題点を解決するために、まず、バルク超伝導磁石の着磁過程を明らかにし、さらに上記の問題点を解決することを目的とした。

着磁過程の計測に用いたバルク超伝導磁石は、外径 60mm、内径 28mm、厚さ 23mm のバルク磁石を上下両端に置き、外径 60mm、内径 32mm、厚さ 18.5mm のバルク磁石 4 個をその間に鉛直方向に沿って積層して作成した、EuBCO 系のバルク磁石(超伝導転移温度 93K)である。このバルク磁石を、パルスチューブ冷凍機によって冷却するクライオスタット(室温ボア 23mm)内に設置し、着磁のための NMR 分光計用超伝導磁石(室温ボア径 89mm、最高静磁場強度 7T)の室温ボア内中央に挿入した。

バルク磁石の着磁方法は、以下の通りである。(1)バルク磁石に外部超伝導磁石により 4.74T の静磁場を印加して 100K まで冷却し、外部超伝導磁石の超伝導シムコイルを用いて静磁場の均一化を行う、(2)バルク磁石を 50K まで冷却する、(3)外部超伝導磁石の静磁場をゆっくりと減少させ、ゼロとする(この過程で磁束が捕捉される)、(4)バルク磁石を外部超伝導磁石のボアからゆっくりと取り出す。そして、この過程において、水ファントムと三次元スピネコー法による位相法を用いて、バルク磁石内の静磁場分布、共鳴周波数、勾配磁場電流効率などを計測した。

その結果、100K から 50K への冷却プロセスでは、直径 6mm、長さ 9mm の円柱状の領域で、静磁場不均一性が 7.2ppm (pp, 以下同様)から 4.5ppm へと減少し、共鳴周波数は、202.08MHz から 202.13MHz へと上昇した。また、消磁プロセスにおいては、静磁場不均一性は、4.5ppm から 28ppm へと上昇し、共鳴周波数は、202.13MHz から 202.05MHz まで下降した。そして、冷却プロセスにおいて、バルク磁石の超伝導転移温度以下では、勾配磁場電流効率の明瞭な低下が見られ、これは、バルク磁石のマイスナー効果によるものと判断した。

さて、以上のように観察された静磁場不均一性と、マイスナー効果の影響の問題を解決するために、シングルレイヤーシムコイル(SLSC)と、マイスナー効果を取り入れた勾配磁場コイルの設計方法を開発し、その製作を行った。

SLSC は、まず複数の円形コイルの重ね合わせにより発生する磁場を表現し、それが不均一磁場を最適近似できるように、それぞれに流れる電流値を決め、これらの電流から全電流分布を求め、それからストリームラインを求めることにより、電流パターンを決定することにより作成した。なお、実際に流す電流は、その逆向きの電流となる。また、勾配磁場コイルは、超伝導体の存在を考慮した上で、有限差分法とターゲットフィールドを用いた独自の設計方式を開発して作成した。そして、SLSC の使用の有無による静磁場不均一性を計測したところ、直径 8.4mm、長さ 10mm の円柱状の領域において、使用していない場合には 63.2ppm (pp)、使用した場合には、15.4ppm (pp)と、大幅に改善することができた。また、静磁場不均一性の空間的成分を評価したところ、三次式で表される高次の成分も補正できていることが明らかとなった。

次に、作成した勾配磁場コイルの電流効率を計測したところ、 G_x と G_y コイルに対する設計値 5.3G/cm/A に対して実測値 5.2G/cm/A、 G_z コイルに対する設計値 7.4G/cm/A に対して実測値 7.2G/cm/A と、良好な一致を得た。また、従来型勾配磁場コイルよりも、さらに広い勾配磁場線形領域を得ることに成功した。

以上のように、先行研究よりも広い領域において、より高い静磁場均一性を達成することができ、

また、勾配磁場コイルも、設計通りの仕様を満足することができたので、化学固定マウスを撮像することにより、MR microscope としての有用性を評価した。その結果、先行研究において撮像されたマウスの画像よりも、画像コントラスト、信号の空間的均一性などの点で、遙かに優れた画像を取得することができた。

以上より、先行研究よりも、すべての点で優れた、バルク超伝導磁石を用いた MR microscope を開発したと結論した。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本研究は、同じ研究グループによる先行研究(2011年発表)における問題点を、一つ一つ検証した上で、それらを見事に解決し、より高性能な MR microscope を実現したという点で、高く評価できる。特に、静磁場均一性の改良という点では、申請者が考案してすでに論文発表を行っている、円電流の重ね合わせによるシングルレイヤーシムコイルの設計手法が、非常に大きな貢献を果たしている。また、超伝導体の中における勾配磁場コイルの設計も、オリジナルな手法であり、この点でも、申請者の数理物理的能力は、高く評価できる。

〔最終試験結果〕

平成27年2月13日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。