

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 12 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K20106

研究課題名（和文）ヘリウムフリーMRIのためのマグネット内蔵型安定化電源の開発

研究課題名（英文）Built-in type super-stable power supply for helium-free MRI magnet

研究代表者

福山 秀直（Fukuyama, Hidenao）

京都大学・充実した健康長寿社会を築く総合医療開発リーダー育成リーディング大学院・特任教授

研究者番号：90181297

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：天然資源であるヘリウムを100%輸入に依存する日本において、超伝導マグネットの冷却に液体ヘリウムを用いないヘリウムフリーMRIは、近い将来の実現を目指すべき重要な研究課題の対象である。しかし現在そのマグネットに必要な超安定化直流電源は、高価で低効率な上にマグネット事故のリスクを増大させているため、本研究では、極低温、超高真空、超高磁場のマグネット内に設置可能な電源の実現可能性に関して、基礎実験を通して検討した。その結果、その厳しい環境下でも液体窒素温度であれば動作する素子は多くあり、解決すべき課題は多々あるものの、可能性は充分にあるとの結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天然ガスの副産物として20世紀初頭から生産・貯蓄されてきたヘリウムは、シェールガスの台頭と共に生産量は低下する一方で需要は大きく伸び、近年、世界的な急激な価格上昇と供給不足の問題が起きており、100%を輸入に頼る日本では特に大きな問題となっている。今や临床上必須であるMRI装置が大量の液体ヘリウムを必要とすることを考えると、日本がその技術を誇る高温超伝導線材などを用いたヘリウムフリーMRIの開発、また、本研究で目指すマグネット内電源開発の意義は、学術的にも社会的にも非常に大きい。

研究成果の概要（英文）：Helium, one of the natural resources and 100% import in Japan, recently has a crisis of deficit and rapid price hike due to large unbalance of its demand and supply. Helium-free (HF) MRI, which does not use liquid Helium as a cryogen, is a vital target to realize in the near future, especially in Japan. Although a super-stable DC power supply is necessary for an HF-magnet, its cost is high; the efficiency is low; also, it increases risks of magnet troubles. Therefore, in this study, we investigated the possibility of an alternative power supply which is fixed in the HF-magnet under the severe environment such as low temperature, high vacuum, and high field. The results of our basic experiments showed that there is a enough number of elements and devices which work well in liquid nitrogen, so the possibility is sufficiently high although there are still problems to solve.

研究分野：神経内科学

キーワード：MRI 高温超伝導 ヘリウムフリーMRI 安定化電源

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

生体内の構造情報だけでなく、機能情報をも非侵襲的に得られる MRI 装置の重要性は非常に高く、今や臨床上、無くてはならない装置である。MRI 装置は、その強力な磁場をつくる超伝導マグネットを冷却するために液体ヘリウムを使用しているが、ヘリウムは天然ガスの副産物として得られる天然資源である上に、日本では 100%輸入に頼っており、近年、ヘリウムの供給不足と価格高騰が大きな問題となっている。そのため、ヘリウムを用いない、ヘリウムフリー MRI の開発が既に国内外で複数開始されている。

本研究で問題とする電源とは、ヘリウムフリーマグネットにおいて、この超伝導マグネットの電流を維持するための超安定化直流電源である。この電源と超伝導マグネットとの関係を図 1 に示す。

一般的な超伝導マグネット(図 1 左)は閉回路の全抵抗が 0 のため、励磁中は励磁用電源を接続するが、励磁後にその電源を外した後は、電流は減衰することなく永久電流となってマグネット内を流れ続ける。つまり、励磁/消磁時に電源は必要となるが、電流を維持するための直流電源は不要である。

一方でヘリウムフリーマグネットは、液体ヘリウムを用いないため運転温度が高くなることが問題となる。一般的な超伝導マグネットが液体ヘリウム温度である 4~4.2K であるのに対し、ヘリウムフリーマグネットでは 10K 以上、多くは 20K 以上を目標とする。そのため、超伝導線そのものは超伝導状態となるが、その接続部分で超伝導状態とならず、僅かに抵抗を持つ。その結果、非常に僅かではあるが、MRI としては致命的なレベルでの電流減衰が生じ、その電流を保持するために外部直流電源が必要となるのである(図 1 中)。

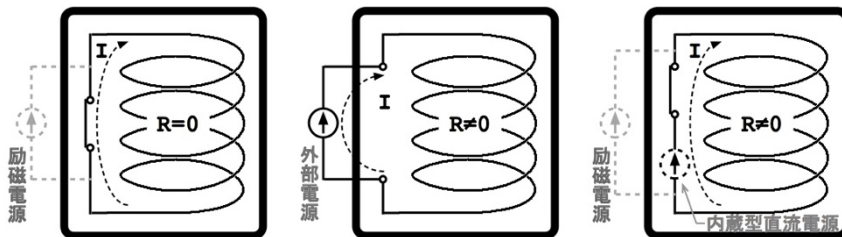


図 1 MRI 用超伝導マグネットと電源の構成図。左から順に、現在一般的な超伝導マグネット、現在主流となっているヘリウムフリーマグネットと外部直流電源、本研究で実現を目指すヘリウムフリーマグネットと内蔵型直流電源。ヘリウムフリーマグネットは、その高い運転温度のために非常に小さな抵抗値を持つ($R \neq 0$)ため、電流量の減衰を防ぐために常時電源を接続しておく必要がある(図中、右)。

この構成は、一般的な電磁石と同じであるが、この直流電源はその高い安定度のために非常に高価となる。MRI 用マグネットに要求される磁場の安定性、つまり電流の安定性は非常に厳しく、この直流電源の時間変動は一般的にサブ ppm 以下とされる。永久電流で動作する通常の超伝導マグネットの磁場の時間変動が、現在の計測系では計測困難なレベルで小さいことを考えると、サブ ppm レベルはまだ十分に大きい、これが高価格の主要因である。しかし一方で、ヘリウムフリーマグネットのもつ抵抗値は非常に小さく、電流量の減衰も日々毎秒 μA レベルであることを考えると、そのごく僅かな減少量を補うためには現在の電源は高価かつ過大である。

また、その高い電流安定性を保つため、フラックスゲート型の高感度電流センサーを電源内に有しているが、その為に磁場の高い超伝導マグネットの近くに設置することが出来ず、電源とマグネットを繋ぐリード線は長くなり、そのリード線の抵抗値が上昇、結果的に、電源の供給する電力の多くがリード線で消費されることとなる。加えて、マグネット内に流す電流量が 100~500A と非常に大きいために、数センチという太いリード線がマグネットの内外を繋ぐこ

とになり、その結果、リード線で発生した熱がその太く熱伝導の高い銅線を通して極低温のマグネット内に侵入してしまう。マグネット内は超高真空のために侵入した熱は冷凍機を通してしか外部に排出されず、冷凍機の負担が大きく増大、ランニングコストを増やすのみならず、マグネットの冷却不足によるクエンチや熱暴走、焼損のリスクを増大させる。

このような問題を解決する手法としては、図1右のように、マグネット内に内蔵するコンパクトな電源が考えられる。マグネット内で減衰する僅かなエネルギー量に見合った電力量により動作する小型の物で、大電流の電流路をマグネット内部に収めることで、外部からの熱侵入を抑えることが可能となる。問題となるのは、極低温、超高真空、超高磁場のマグネット内部で動作する電源があり得るか、である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、極低温・超高真空・高磁場という環境下での電源の実現可能性について、実験を通じた基礎的検討を行うことである。行った実験は2種、極低温下で動作するための高精度磁場計測系に関する基礎実験と、同じく極低温下で動作する安定化直流電源に関する基礎実験である。

3. 研究の方法

3-1. 極低温下で動作するための高精度磁場計測系に関する基礎的検討

一般的な超安定化直流電源は、電流の安定性を確保するために、フラックスゲート型の非接触高精度電流計を用いてリアルタイムで電流量を計測、フィードバックするシステムを有している。しかし、フラックスゲート型センサーは電流変動による微小な磁場変動を用いて計測しているため、マグネット近くの高磁場下では使用することが出来ない。そのため、高磁場下でも使用可能な高精度電流計、もしくは磁場計測系が必要となる。マグネット内は高真空かつ極低温であるため、このような環境下で使用出来るもので最も精度の高いものはホールセンサー(磁場センサー)のみとなり、必要なサブ ppm レベルの計測する手法は現在のところない。最も精度の高い磁場センサーは NMR プローブとされているが、極低温下では多くの物質は固体となり、T2 減衰が早いために十分な周波数分解能を得ることが出来ない。

そこで今回我々は、水素吸蔵金属であるマグネシウムに水素分子を吸収させた MgH_2 に着目した。 MgH_2 内の H_2 濃度は液体水素より高いと言われ、液体窒素温度でも NMR 信号を観測でき、その T2 値は 0.7 秒と非常に長い、と言う報告がある(田中他、京都産業大学論集、2012)。もしこの結果が再現出来れば、液体窒素温度で動作するサブ ppm レベルの分解能を持つ高精度磁場計測系が開発可能となる。そのため本研究では、 MgH_2 を用いた NMR プローブを開発し、常温及び液体窒素温度での NMR 信号の有無とその有用性を調査した。

使用した MgH_2 は、和光純薬社製の純度 100% のもの(試料 1) と MgH_2 が含まれている入浴剤(試料 2) の 2 種である(図 2)。 MgH_2 はその製法により水素分子の挙動が異なる事が知られており、上記報告で使用されたものの入手を試みたが既に製造中止となっていたため、これら 2 種を使用した。 MgH_2 粉末を 3D プリンターで作成した非磁性試験管に封入し、臨床用 3 テスラ MRI 装置内に設置した自作の NMR 計測系によりスピネコー信号を計測した。極低温下で NMR 信号が得られるかどうかを確認するため、常温の状態と、液体窒素に NMR プローブごと浸漬した状態で、それぞれ計測した。

図 3 に計測結果を示す。どちらの試料も、常温下でも液体窒素温度でも、共鳴周波数は水を試料としたときと同じ、123.2575MHz であった。ただし NMR 信号は観測出来たものの、どちらの試料も極低温下では信号減衰が数百 μ sec と非常に短くなり、十分な磁場分解能は得られないことが分かった。一方で非常に興味深いことに、常温下では 2 つの試料に 5 倍程度の信号減衰速度の差があり、試料によっては可能性が残されていることが示唆された。

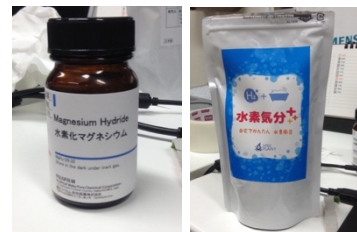


図 2 今回の用いた 2 種の MgH_2 試料

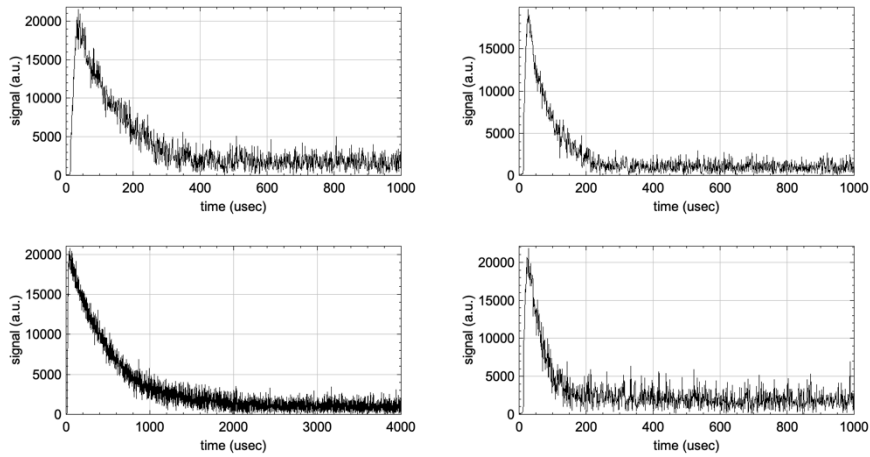


図3 MgH₂ 試料から得られたNMR信号。上段が試料1、下段が試料2であり、左側が常温下、右側が液体窒素温度下での結果である。横軸はNMR信号の収集時間であるが、左下のグラフのみ、その範囲が0~4 msec と他より広いことに注意。

図が0~4 msec と他より広いことに注意。

3-2. 極低温下で動作する安定化直流電源に関する基礎実験

まず最初に、MOSFET や抵抗など、電気回路に使用する素子が極低温下で動作するかどうかを常温の状態と液体窒素に浸漬した状態とで比較した。その結果、寒冷地仕様の素子を選択したためか、実験した素子は全て、液体窒素温度でも動作した。逆に、素子の持つ抵抗値が下がり、パワーエレクトロニクス回路としては良い方向に変化した。

極低温下用安定化直流電源としては、一般的な、電磁誘導コイルの出力を整流回路で直流化する構成を想定した。ただし、本電源のように電流量が数百 A となるコイルには、一般的なダイオードを用いた整流回路は損失が大きい上に出力の安定度も低いため、パワーMOSFET を用いた低抵抗型同期整流回路の開発を目指した。一般的に超伝導線の接続部位一箇所当たりの抵抗

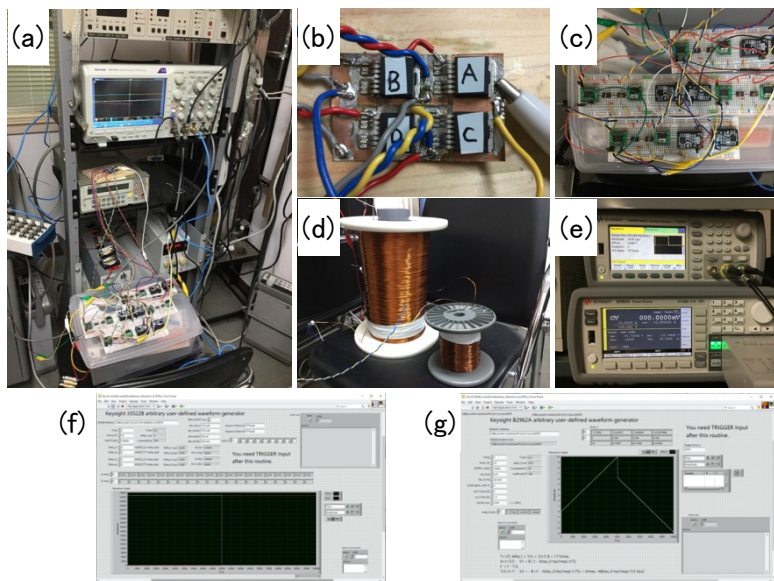


図4 安定化直流電源開発実験のために構築したシステム。(a)システム全景、(b)同期整流回路、(c)その駆動回路、(d)電磁誘導コイル(左)と模擬マグネット(右)、(e)整流回路駆動用ファンクションジェネレータ(上: キーサイト社製 33522 B)と電磁誘導コイル駆動電源(下: キーサイト社製 B2961A)、(f) 33522B 駆動プログラム、(g) B2961A 駆動プログラム

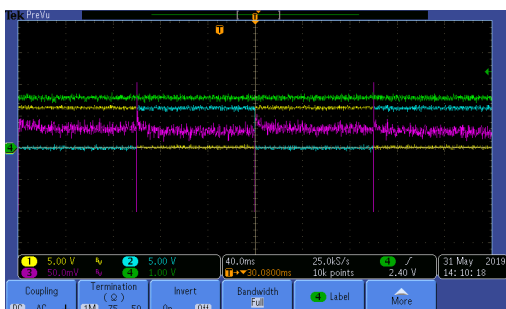


図5 開発した電源を駆動した時に模擬マグネットかかる電圧変化(紫)

値は10nΩ程度、マグネット全体での接続箇所が数百から一千程度と考えられるため、全マグネットの電気抵抗は、パワーMOSFETのそれより充分小さく無視出来る。結果、電源の出力として必要となるのは、電流値数百 A、電圧数 10mV と想定した。

図4に開発したシステムを、図5には10Hzの三角波を電磁誘導コイルに流すことにより、模擬マグネットに20~30mV程度の一定の起電力を発生

させた時の電圧波形を示す。限られた期間内で開発したシステムであるため調整が全く不足し、電圧波形の安定度は決して高いとは言えないが、電圧波形に見られる小さな周波数のノイズに関しては、一般的なMRI用マグネットのインダクタンスが100Hを大きく越え、使用した模擬マグネットよりも数桁上であること考慮すると、その大きなインダクタンスにより抑えられる可能性はある。また100msecおきに生じているスパイクノイズに関しては、MOSFET内部の寄生容量が原因で起こることを突き止めており、回路構成を見直すことで低減可能であると考えている。

4. 研究成果

以上の様に、本研究においては、ヘリウムフリーマグネット内に設置可能な直流電源の実現可能性に関して、基礎実験を通して検討した。その結果、液体窒素温度であれば、寒冷地仕様素子の多くは、特性値は変わるものの問題なく動作することがわかり、マグネット内電源の可能性は大きく上がったと考えられる。ただその実現には、未だ多くの段階を経る必要があることも明確となった。

一方で、この数年の間に3つの大きな変化もあった。まず一つは、ヘリウムの供給状況が2018年秋から更に大きく悪化したことである。その主な要因は、米国でのヘリウム生産、保管施設の事故により、米国からの供給が止まったことである。このような米国からの供給停止によりヘリウム不足が生じた事例は過去にもあったが、今回は、米国内でもヘリウム確保が困難であるなど、状況はより深刻であった。そのため、2018年秋から2019年初等までの間に我々は、ヘリウム価格の2割以上の高騰を経験した。このような供給不足は、今後、より頻度高く生じると考えられており、その意味では、本研究の様にヘリウムフリーMRI用マグネットの必要性が上がったと考えられる。

二つ目の変化は、将来のヘリウムフリーマグネット用線材として最も期待されているReBCO線材に関して、超伝導接続法が開発されたことである。このReBCO線材は、BSCCO線材が第1世代線材と呼ばれているのに対し、第2世代線材と呼ばれており、BSCCO線よりも超伝導特性が高く、MRI用高温超伝導マグネットとしては最も期待され、現在、主に研究されている線材である。この線材に関して超伝導接続法が開発されたと言うことは、将来的にはこのReBCO線材を用いたマグネットは、従来の超伝導マグネット同様、永久電流による運転が可能となり、つまり本研究で目指す安定化直流電源は不要、と言うことになる。ただし、ReBCO線材は未だ大量生産法が開発されていないために価格が高い上に十分な量の確保も難しい。加えて長尺の物も入手出来ないために接続箇所は数百から千箇所程度と予想され、完全な永久電流運転を確立するためには、その全ての接続箇所100%の確度で超伝導接続が出来なければならず、これらが全て解決されるには、まだまだ時間がかかると予想される。逆に、高温超伝導線の超伝導接続技術が確立したとしても、技術的に容易で安価な安定化直流電源を用いたマグネット運転が確立しておれば、この技術も選択肢としては充分に残りうるとも考えられる。

三つ目の変化は、Philips社が液体ヘリウムを7Lしか使用しない1.5T-MRI装置の実用化に成功し、販売を開始したことである。その技術の詳細は明らかでは無いが、軽量な上に、使用するヘリウム量が少なくヘリウムが気化してもマグネット内に収めておくことができるためにクエンチダクトが不要となるなど、ヘリウム量以外のこの装置の利点は大きい。おそらくこの技術は今後、出荷台数の大きい3T-MRI装置に適用されると予想され、そうなると、高温超伝導MRIマグネットは、7T-MRI等の超高磁場装置向けに限定される可能性が高い。

いずれにせよ、今後ヘリウム供給は更に減少し、需要は更に増大するため、ヘリウムの確保は更に難しくなることは必至である。そのため、近い将来にMRI用マグネットとしてはヘリウムフリーマグネットが主流となることは十分に考えられ、それに向けた開発を続けることは非常に重要である。本研究で目指したマグネット内安定化直流電源も、今回の成果を踏まえて、確実に段階を経る必要があると考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 0 件）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等 無し

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名： 浦山 慎一

ローマ字氏名： Shin-ichi Urayama

所属研究機関名：京都大学

部局名：充実した健康長寿社会を築く総合医療開発リーダー育成リーディング大学院

職名：特定助教

研究者番号（8桁）：10270729

研究分担者氏名： 上野 智弘

ローマ字氏名： Tomohiro Ueno

所属研究機関名：京都大学

部局名：医学研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：10379034

研究分担者氏名： 鈴木 崇士

ローマ字氏名： Takashi Suzuki

所属研究機関名：京都大学

部局名：充実した健康長寿社会を築く総合医療開発リーダー育成リーディング大学院

職名：特定助教

研究者番号（8桁）：10572224

研究分担者氏名： 松原 明

ローマ字氏名： Akira Matsubara

所属研究機関名：京都大学

部局名：理学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：00229519

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。