

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 30 日現在

機関番号：55402

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360394

研究課題名(和文) 船用電動機用高温超電導バルク磁石への実用的なパルス着磁技術の開発

研究課題名(英文) Development of the practical pulse magnetization technology for the high temperature superconducting bulk magnet for using the motors of the ship propulsion

研究代表者

井田 徹哉 (IDA, Tetsuya)

広島商船高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：80344026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の船舶推進用電動機/発電機に高温超電導バルク磁石を搭載してその性能を飛躍的に向上させるために必要な、バルク磁石へのパルス着磁技術の開発を行った。本研究課題ではバルク磁石の特性に合わせたパルス磁場を発生させることを目標として、30K以下までの温度制御が可能なパルス着磁装置、25kJ出力のパルス着磁電源と表面の磁束密度分布を1ms以内で続けて計測可能な磁場センサを開発し、パルス着磁実験を試みた。

研究成果の概要(英文)：We developed a pulse magnetization technology for a high temperature superconducting bulk magnet, because the motor / generator for next-generation ship propulsion that had the bulk magnet built-in improves the performance drastically. In this study, we aimed for generating a pulse magnetic field suitable for the characteristic of the bulk magnet. A pulse magnetization device possible of the temperature control to less than 30K, a pulse magnetization power supply of the 25kJ output and the magnetic field sensor which could measure surface magnetic induction distribution in succession within 1ms was developed each by us. We tried a pulse magnetization experiment by using them.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：高温超電導 パルス着磁 バルク磁石 超電導磁石 船用電動機 磁場センサ

1. 研究開始当初の背景

(1) ①今世紀に入り、低炭素社会の実現に向けた気運の高まりから、船用推進機の効率改善に関する技術革新が求められている。そのため、ディーゼル機関からの動力を変速機とシャフトを介してプロペラへ伝えてきた従来の船用推進機を、プロペラと直結した電動機へと置き換えて、CO₂排出量低減と共に積載能力と操船性能の向上を図るポッド推進機が注目を集めている。しかし、推進用電動機やガスタービン発電機に使用する電磁回転機自体は技術的に成熟しており、その信頼性の高さと引き替えに、内部構造の改善等による大幅な性能向上は期待できない。近い将来、より一層のCO₂排出量低減を求められることは想像に難くなく、スーパーエコシップの実用化に伴い本格的に電磁回転機が利用され始められれば、その次には回転機自体の性能向上が必要となる。

②電磁回転機の出力は機器内部に搭載している永久磁石あるいは電磁石の発する電磁力に依存する。現在実用化されている最も強力なNd-Fe-B系永久磁石は1.5Tを発生し、これが永久磁石形回転機の性能限界を決定している。一方、電磁石を用いれば1.5Tを超える磁場を発生可能であるが、大電流による発熱を抑えるために電磁石以上に巨大な冷却機構が必要なため、回転機全体の体積及び重量との兼ね合いから回転機の性能向上は実現し難い。ゆえに、高い効率と出力を兼ね備えた次世代推進機を実現するためには、より小型で高い磁場を発生可能な磁性材料が搭載された電磁回転機の実現が不可欠である。

(2) 超電導材料は従来の金属あるいは磁性材料と比べて非常に大きな電磁エネルギーを取り扱うことができる。超電導材料によって産業用電磁機器の大幅な小型化、高出力化、効率化を実現することで、電力、電子産業、輸送、環境、医療分野において、環境問題やエネルギー問題といった今世紀の課題解決に大きく役立つと考えられる。既に低温超電導材料は医療用途で実用化されている上、強磁場が必要な材料開発や運輸分野の研究用途に使用されている。ただし-260℃以下の極低温が必要なために運用コストが高く、そのあまりに低い温度のために大規模な機器へ利用することも難しい。一方、発見以来20年が経過した高温超電導材料は-180℃以下であれば利用が可能である。今世紀に入ってようやく実用的な特性を有する材料を量産できるようになったことから、近年様々な分野での実用化研究が進められている。特に高温超電導バルク材料を永久磁石とした場合、最強のNd-Fe-B系永久磁石の10倍を超える強磁場を達成可能である。高温超電導材料の発する大きな電磁エネルギーに注目し、本研究代表者は東京海洋大学と共同で、船用電気推進や風力発電装置などへ搭載可能な高温

超電導同期電動機の開発を進めている。

2. 研究の目的

高温超電導電動機は冷却機構を含めても従来型の電動機と比べて半分以下の寸法で実現が可能であり、出力効率も良いことから、次世代の電気推進機関や発電機として海洋分野の技術革新に寄与する可能性を持つ。その実現のためには、強磁場を発生させる高温超電導磁石の実用化が不可欠である。

本研究の目的は能動的に波形を整形したパルス磁場によって、高温超電導バルク磁石が本来有している大きな磁束と良好な捕捉磁場分布を、材質・形状に依存することなく十分に引き出せる実用的なパルス着磁技術を実用化することである。産業用電磁機器で高温超電導バルク磁石を利用するためにパルス磁場で着磁を行うと、磁場特性が大幅に劣化し、実験室で数時間を掛けた静磁場着磁を行えば引き出せる超電導材料本来の性能を発揮できない。その原因は、パルス磁場の急峻な立ち上がりによって内部へ急激に侵入する磁束が激しく運動するためにバルクが発熱して捕捉磁場特性の劣化を引き起こすことにあると考えられる。よって、バルクによる磁束の捕捉を妨げないように着磁磁場の発生を制御することで磁場特性の劣化の抑制が可能となる。本研究代表者はこの点に着目し、その材料に最適となるよう半導体チョップを用いて能動的に波形を整形したパルス磁場による着磁法を考案した(特開2006-066801「超電導体への最適化された着磁方法」)。

3. 研究の方法

(1) 本研究の元となる波形制御パルス着磁を実施する方法について述べる。①従来、パルス着磁に必要な高電圧、大電流は受動的なLCR過渡応答を利用して発生させてきた(図1の青色の曲線)。その際、パルス波形の立ち上がりが急峻なため、高温超電導バルク磁石へ印加される磁場は急増し、超電導材料の完全反磁性(マイスナー効果)を破って徐々にバルク磁石の内部へと侵入した多くの磁束が激しく運動することで発熱を生じ、温度上昇に繋がる。超電導現象は臨界温度に近づくほどその性能を低下させるため、この発熱によって高温超電導バルク磁石の捕捉磁場特性が劣化する。LCR過渡応答を用いて受動的に発生させたパルス磁場は、回路定数を変更してもその形状の示す傾向を大きく変えないことから、従来のパルス発生技術では高温超電導バルク磁石の持つ捕捉磁場特性を引き出すことが難しいと考えられる。

②一方、本研究では、能動的に波形を整形したパルス磁場による波形制御パルス着磁(図1の赤い曲線)を用いて捕捉磁場特性の劣化を抑制し、高温超電導バルク磁石の持つ捕捉磁場特性を産業用電磁機器であっても効率良く引き出せるパルス着磁技術の開発

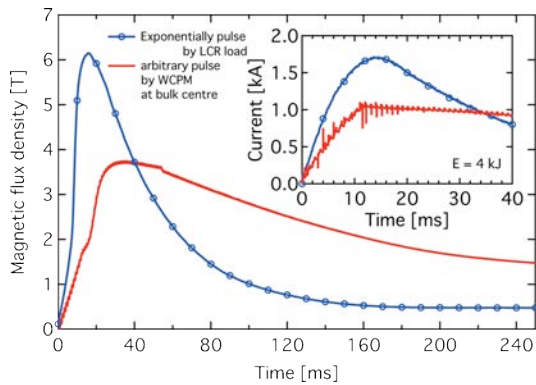


図1 $\phi 45$ の Gd 系バルクへのパルス着磁による侵入／捕捉磁束密度

を行った。波形制御パルス着磁は本研究代表者が考案した着磁方法で、コンデンサから着磁コイルへ至る放電電流の断続によってパルス磁場の立ち上がり時間の制御を行い、高温超電導バルク磁石における捕捉磁場特性の改善を試みることができる。

(2) このような波形制御パルス着磁を行うために、本研究では図2の構成を持つ波形制御パルス着磁装置が必要となる。この装置は交流電源を最大 1kV に昇圧してコンデンサを充電し、着磁コイルへ大電流放電を可能にする。この装置の特徴は、波形制御パルス着磁を行うために放電スイッチに IGBT (トランジスタの一種) を採用し、それを外部で発生したゲート駆動信号で連続的 10kHz で断続され、その時間を変えることでパルス磁場の波形を任意に制御できる。波形制御を行うためのパラメータについては事前に設定しておくほか、パルス着磁の間に高温超電導バルク磁石へ侵入している磁束の状況をフィードバックすることによって、捕捉磁場特性を更に向上させることができる。波形制御パルス着磁電源装置は既製品が存在せず、本研究開始時点で本研究代表者が開発中の装置を保有していた。本研究課題では波形制御パルス着磁実験に供するために、この装置の開発を継続して進めた。

(3) 高温超電導バルク磁石は臨界温度以下かつ低温であるほどに超電導特性が良好となる。一方、低温になると完全反磁性 (マイスナー効果) が強く働くようになるため、パルス磁場を印加しても高温超電導バルク磁石内部へ磁束が侵入できなくなる。以上のことから、高温超電導バルク磁石への波形制御パルス着磁を実現するためには、大型のバルク磁石を臨界温度以下で任意の温度に保つ高真空装置と冷却機構が必要となる。加えて、数百 ms という極めて短い時間に大電力を投入するパルス着磁は大きな電磁力が発生させる。波形制御パルス着磁を実現するためには、電磁力に耐えながらも高温超電導バルク磁石を一定温度に冷却することが可能な固定治具が必要である。本研究ではこのために

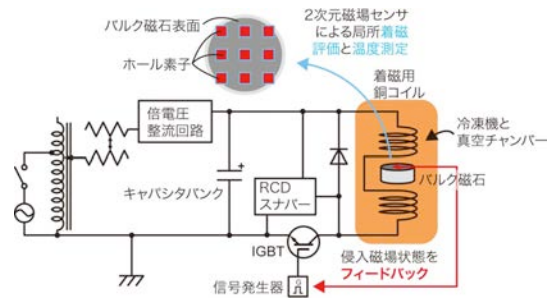


図2 波形制御パルス着磁装置の構成

使用可能な冷却装置や固定治具を保有しておらず、波形制御パルス着磁実験に供するためにこれらの新規開発を行った。

(4) 高温超電導バルク磁石におけるパルス磁場の捕捉は数百 ms 間で行われるため、パルス着磁技術の開発に際しては、1ms 程度の時間分解能による侵入／捕捉磁束密度の評価が重要となる。従来から高温超電導バルク磁石の表面数ヶ所にホール素子を貼り付け、磁束密度の測定を行ってきたが、局所的な磁束密度を測定することはバルク磁石表面の捕捉磁場分布を調べるために不十分である。しかし、面内の磁束密度を測定するためには長い時間を掛けてホール素子を二次元走査しなければならず、数百 ms 間で増減する侵入磁束を評価することができなかった。そこで本研究ではホール素子を高温超電導バルク磁石の表面へ等間隔に並べ、二次元面内の磁束密度分布を測定可能な二次元磁場センサの開発を行った。

4. 研究成果

(1) ①本研究の遂行には波形制御パルス着磁電源と低温パルス着磁装置が必要であった。従来の研究において、波形制御パルス着磁電源については 1kV/25kJ 程度の電力出力を持ち、その電力を 1ms 以下の任意のタイミングで断続できる性能を有する装置を開発してきた。このために必要な高圧回路は概ね完成しており、従来の実験に供してきた。しかし本研究課題では様々な条件で侵入磁束密度によるフィードバック制御を試みることを予定していたため、マイコンによる高度な制御を実現できなければならなかった。加えて、大電力を用いた実験を繰り返し行うために高い安全性が確保できなければならなかった。本研究では、この両方の性能を有するパルス着磁電源装置の開発を行った。図3にその外観を示す。装置全体は三段構造を採ったアルミフレームに格納しており、上段には制御回路と昇圧回路、中段にはキャパシタバンク、下段には放電回路が設置されている。このうち、中段と下段の回路は従来の研究において開発を進めてきたものを利用し、本研究課題では主に上段の回路を新規に設計、製作した。

②図3の波形制御パルス着磁電源装置は液体窒素温度以下でのパルス着磁実験にお



図3 波形制御パルス着磁電源装置

ける使用を想定して開発した。温度が下がるほど高温超電導体の完全反磁性による電磁力が強くなるため、パルス着磁を行うために大きなエネルギーが必要になることが予想できた。そこで、余裕を持って昇圧が行えるように、この波形制御パルス着磁電源装置では、15,000 μ F/400V もの大容量の電解コンデンサを用いた倍電圧整流回路を設けた。同時に、倍電圧整流回路に用いるダイオードについても安全係数を2以上に確保できるように容量の大きな製品を採用した。これによって研究代表者が従来使用していた倍電圧整流回路と比べて電力性能が50%増しの15kWで昇圧とキャパシタバンクへの充電を行えるようになり、パルス着磁電源装置の運用に余裕を持たせることができた。

③パルス波形の制御を行うために、H8/3052F (ルネサスエレクトロニクス製) を中心とした制御回路を開発した。この装置は波形制御に必要な条件として、キャパシタバンクの充電電圧と放電電流制限があり、デューティ比や周期を事前変更した上で、任意に選択した高温超電導バルク磁石の表面数ヶ所に貼付したホール素子から得られた侵入磁束密度とパルス電流波形を入力としてパルス着磁を行う。従って、様々な入力情報が必要とされているため、この装置ではテンキーとロータリーエンコーダによる条件入力、プッシュスイッチによる制御入力と、VFD 及び LED による状況表示を行えるよう、これらを前面パネルに設けている。この装置で取り扱うエネルギーは 25kJ と大きく、操作の誤りによる事故の発生を懸念した。そこで、H8 マイコンによる制御の自動化を図ると共に、インターロックを始めとする各種安全機構を設けて、不測が生じ難いように配慮した。以上の設計、部品加工と、組み立て調整は全て研究代表者の所属元にて行った。

④本研究で開発した波形制御パルス着磁電源装置の動作試験結果を図4及び図5に示す。図4の充電制御試験結果によれば、3~4%程度の定常偏差が残っているが、キャパ

シタバンクへの充電から放電へ移行する際の自己放電で相殺できるため大きな問題は無い。波形制御パルス放電試験に関しても、半導体スイッチの開閉に伴うインパルスノイズの影響を受けることなく、設定通りに放電制御を行えている。このように、本研究において高温超電導バルク磁石に対する波形制御パルス着磁が可能なパルス着磁電源を開発し、その動作を確認することができた。

(2) ①本研究で対象としている Gd 系酸化物高温超電導バルク磁石は臨界温度が 93K である。従来から研究代表者は 77K の液体窒素

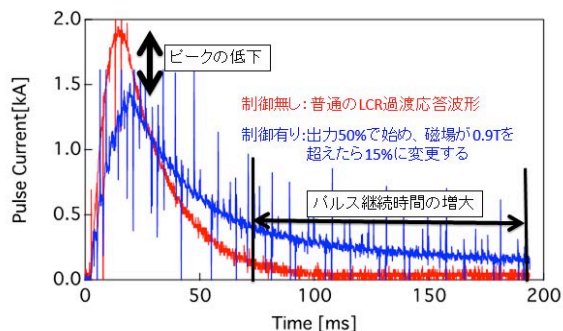


図5 波形制御パルス放電試験結果

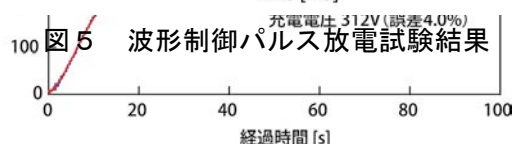


図4 充電制御試験結果

へ Gd 系高温超電導バルク磁石を直接浸漬してパルス着磁実験を行ってきたが、高い捕捉磁場性能を達成するためには、より低温でのパルス着磁実験が必要である。加えて、液体窒素へ浸漬すると、温度センサが液体窒素温度を示してしまうため、パルス磁場がバルク磁石へ侵入した際の温度変化を評価することができない。そこで、本研究では 30K まで冷却可能な GM 冷凍機を導入し、環境変化の少ない真空雰囲気中でパルス着磁実験を行うための装置を開発した。大型の高温超電導バルク磁石を冷却することを想定し、クーリングパワーが 300W@100K の GM 冷凍機 AL300 (CRYOMECH 製) を導入し、本研究専用にステンレス製の真空チャンバーを設計した。本研究ではパルス着磁の際に 2t 近い電磁力が発生すると予想できたため、万が一パルス着磁の際に破損した部品が飛び出す事態が想定された。そこで、GM 冷凍機を組み込む真空チャンバーに関しては、半導体製造などで使われる真空チャンバーと比べて厚いステンレス板を使用し、強固な構造となるように設計した。本研究で設計、製作したパルス着磁装置の外観を図6、7に示す。GM 冷凍機は通常吊り下げて使用するが、パルス着磁固定治具への取り付け易さを考慮して、天地を逆にして取り付けられている。それによる熱効率の低下が懸念されたが、導入時の冷却試験では 1K 上昇の 14K まで冷却できたことから、使用に耐えるものと判断した。真空チャンバーは三段構成になっており、下段に GM 冷凍機を取り



図6 パルス着磁装置の外観

付け、上段の内部にパルス着磁固定治具が配置されるようになっている。本研究では 100 本近いセンサの配線に加えて、大電流を流すための配線を要することから、中段に配線専用の真空チャンバーを設けて、パルス着磁固定治具の取り回しを向上させている。これらの真空チャンバー内は本研究課題で導入したターボ分子ポンプによって 5×10^{-4} Pa 以下の真空に保たれ、安定な環境で GM 冷凍機を動作させることが出来る。

②パルス着磁を行う高温超電導バルク磁石と、2 個のパルスコイル、それと各種センサを組み込み、30K から 77K の間の一定温度に冷却しながらパルス着磁時の電磁力に耐える固定治具を設計、製作した。支持構造については室温部分と接触させることが必要なため、高い機械的強度を持つと共に熱伝導性の悪い材料が必要であった。そこで、主な部品についてはステンレスを採用し、絶縁性が必要な部分にはガラスエポキシ材を使用した。逆に、GM 冷凍機によって吸熱、あるいは外部温度コントローラによって加熱する必要のある部分については、無酸素銅を利用して熱伝導性を確保した。このように設計、製作したパルス着磁固定治具の外観を図 8、9 に示す。高温超電導バルク磁石とパルスコイルはステンレス及び無酸素銅製のカセットに取り付けられており、その配置は東京海洋大学で開発中の船用高温超電導同期電動機と同等の内部配置になるよう設計した。

③冷却試験に関してはバルク表面及び固定治具各所に温度センサを貼付して温度評価を行った。GM 冷凍機を天地逆さまに設置したにも関わらず、冷却能力には余裕があり、冷凍機のコールドヘッドは冷却開始後数時間で 20K 台に到達した。しかし、バルク磁石表面での冷却速度が遅く、到達温度が低かった。パルス着磁の際の電磁力によって冷凍機に不要なストレスが加わることを懸念し、バルクとコールドヘッドの間の熱伝導を無酸素銅線によって確保していた。しかし、熱伝導線による熱抵抗が大きく冷却に十分な熱量が伝導していないことが予想された。そこ

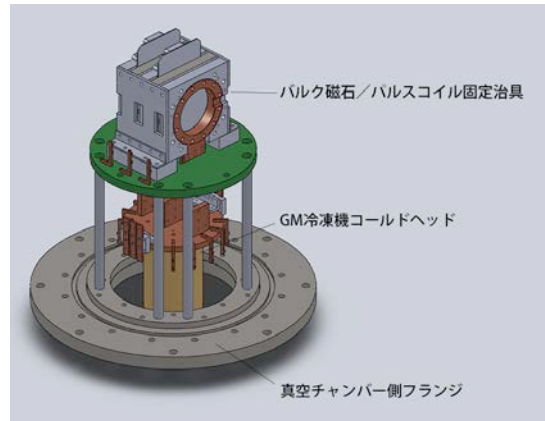


図7 パルス着磁固定治具の組み立て図

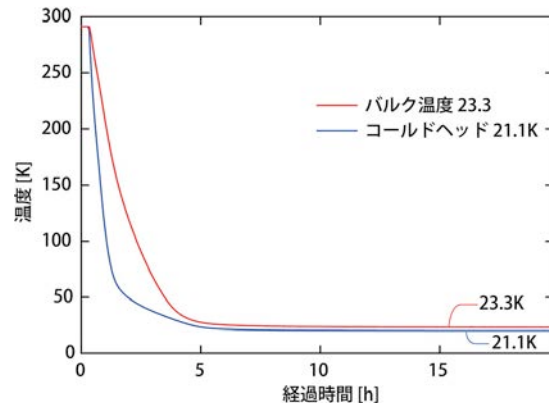


図8 パルス着磁装置の冷却試験結果

で、この部分を無酸素銅積層薄板による熱伝導へと設計変更し、約 64W の伝熱量を確保した。熱伝導系の部品の多くを作り直す必要が生じたが、この改修によってバルク磁石の冷却性能は向上した。しかし、着磁時の電磁力に耐えて、バルク磁石表面の温度を測定するための、温度センサの取り付けが難しく、取り付け治具を何度も作り直す羽目に陥った。

④パルス着磁装置に $\phi 45$ の Gd 系バルク磁石を固定し、冷却試験を行った結果を図 10 に示す。冷却開始後 3~4 時間で実用実験温度に達し、9 時間経過後には最低温度に達して安定した。無負荷で 14K まで冷却可能な GM 冷凍機であったが、本研究で設計したパルス着磁固定治具を取り付けた結果、最低温度 21.1K が得られた。このとき、バルク近傍の温度は 23.3K であり、このパルス着磁装置が高温超電導バルク磁石に対するパルス着磁実験に使用可能な冷却性能を有することが示された。

(3) 本研究では高温超電導バルク磁石へのパルス着磁の際に、侵入磁場の振る舞いを分析するために、従来から使用してきた 1 次元配置の磁場センサに代わる、新しい二次元磁場センサを開発した。このセンサはホール素子を平面上で等間隔に並べ、いくつかのグループ毎に 1 台の定電流源でセンサを駆動し、1 台の A/D 変換器でその結果を取得することができる。船用高温超電導同期電動機では $\phi 45$ 及び $\phi 60$ のバルク磁石の使用を想定しており、これらの測定を行うために、ホール素

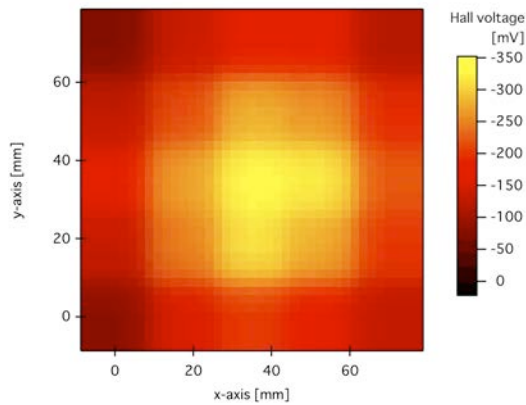


図9 5×5-二次元磁場センサによる
パルス磁場の測定結果

子を5mm間隔で、縦15×横15=225個を並べたセンサの設計を行い、組み立てに必要なリフロー装置等の工具を製作した。実際に二次元磁場センサの製作を行う際、試作したセンサでは雑音の影響が見られた。この原因究明と対策を講じた結果、本研究期間中では縦5×横5=25個のセンサを試作し、実験を行った。外部からパルス磁場を加えた際にこの二次元磁場センサで磁束密度を測定した結果を図11に示す。この測定では5組の定電流源及びA/D変換器を使用しており、必要な機材及び配線数を大幅に削減できている。特に配線数の減数はパルス着磁装置への取り付けの際に真空中から大気中へ配線をやり取りしなければならず、有用な技術である。この二次元磁場センサは1ms毎に平面の磁束密度を測定することが可能である。これは元々の設計であった15×15個の二次元磁場センサであったも同様であり、このセンサを利用することで従来成し得なかったパルス磁場印加中の侵入/捕捉磁束密度分布について詳細な解析を行うことが可能になった。なお、ホール素子は高速な測定ができず、1ms未満の短時間での測定を行うことが難しい。本研究では波形制御パルス磁場の継続時間が150msから1s程度の範囲であるため、1msの時間分解能であれば実用十分な精度での解析を行うことができる。以上の成果から、二次元磁場センサの動作が実証された。なお、本研究で開発した二次元磁場センサの仕組みについては特許の取得を検討している。

(4) φ45×19のGd系高温超電導バルク磁石(新日鉄住金製)に対してパルス着磁実験を試みた。30Kに冷却して16kJでパルス着磁を行った時、完全反磁性による逆磁場に耐えきれずバルク磁石固定治具が破砕し、固定治具から飛び出したコイルが衝突して真空チャンパーに亀裂を生じた。不本意なことに、この事故に対処するための再設計を行う間に本研究課題の期間が終了したため、本研究課題の目標達成できなかつた。真空チャンパーの修理が完了次第、本研究を引き続いて実施して船用高温超電導同期電動機に適したパルス着磁条件の最適化を図るべく研究を遂

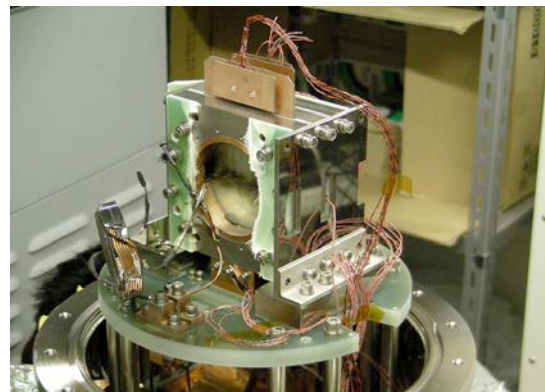


図10 破損したバルク磁石固定治具

行する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① M. Watasaki, M. Miki, B. Felder, K. Tsuzuki, R. Sato, S. Kase, M. Izumi and T. Ida, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.23, Issue 3, June 2013, (2013) Article#: 8201604, doi: 10.1109/TASC.2012.2236874

[学会発表] (計4件)

- ① T. Ida, M. Watasaki, Keita Tsuzuki, M. Miki, Zigang Deng and M. Izumi, EUCAS-ISEC-ICMC superconductivity Centennial Conference, September 18-23, 2011, Den Haag, Netherlands.
- ② T. Ida, M. Watasaki, Keita Tsuzuki, M. Miki and M. Izumi, 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011), October 24-26, 2011, Tokyo, Japan.
- ③ M. Watasaki, M. Miki, B. Felder, K. Tsuzuki, R. Sato, S. Kase, M. Izumi and T. Ida, Applied Superconductivity Conference (ASC 2012), October 7-12, 2012, Portland, Oregon, USA.
- ④ 吉村勇基、井田徹哉、電気学会中国支部第5回高専研究発表会、2013年3月8日、広島市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井田 徹哉 (IDA, Tetsuya)
広島商船高等専門学校・電子制御工学科
・准教授

研究者番号： 80344026

(2) 連携研究者

和泉 充 (IZUMI, Mitsuru)
東京海洋大学・海洋工学部・教授
研究者番号： 50159802