# 任意波形磁界発生装置の試作とそれによる高温超電導バルク体の 着磁と消磁

加賀野井 啓介\*1,石郷岡 猛\*2,二ノ宮 晃\*3

Manufacture of Universal-Wave-Shape Magnetic Field Generator and Magnetization/Demagnetization of Bulk HTS Conductor

Keisuke KAGANOI<sup>\*1</sup>, Takeshi ISHIGOHKA<sup>\*2</sup>, Akira NINOMIYA<sup>\*3</sup>,

**ABSTRACT**: The authors carried out an experiment of the magnetization of HTS using various wave-shapes including a single shot DC magnetic pulse field, a gradually increasing magnitude AC field, and a constant magnitude AC field, etc.. The experimental result shows that the magnetization efficiency is improved by introducing an initial AC constant magnitude field succeeded by a gradually decreasing DC magnetic field. The magnetization efficiency is about 2 times better than a single shot DC pulse field with the same height and the duration.

Keywords : high temperature superconductor, bulk, pulse magnetization

(Received March 25, 2005)

# 1.はじめに

バルクの高温超電導体(HTS: High Temperature Superconductor)は、そのピンニング特性を利用し、永久 磁石の10倍以上の磁束密度をもつ強力な磁石にするこ とができる。その強力な磁力は、電動機や発電機、ある いは超電導浮上式鉄道への応用が期待されている。バル ク超電導磁石の着磁法には、超電導磁石の磁界を用いる 準静磁界着磁法(ゼロ・フィールド・クール法及びフィ ールド・クール法)と<sup>1),2)</sup>、着磁コイルにパルス電流を流 してパルス磁界によって着磁するパルス着磁法がある。 準静磁界着磁法によれば、強い着磁ができるが、着磁装 置自体が大きく、高温超電導体を機器に組みこんだ状態 でのオンサイト着磁は困難である。これに対しパルス着 磁法では機器に組み込んだ状態でオンサイト着磁ができ るので実用性が高い。

しかしながら,現在行われているパルス着磁の研究の ほとんどは,バルク体の上部臨界磁界を超える大きな単 発パルス磁界を発生させることで,数千 Gauss の着磁を 可能としている。これには大容量・高耐圧のコンデンサ を使用し,コイルに瞬間的に数 kA にもなる電流を流す ことが必要である。即ち,別に着磁専用のコンデンサバ ンクが必要となる。このため,本研究では着磁専用コン デンサバンクを用いずにインバータを着磁に応用するこ とを考えたものである<sup>3)</sup>。コンデンサバンクを用いる場合 と異なり,利用できる電圧・電流は大幅に制限される が,その一方,パルス幅可変インバータを用いる事によ り波形を任意に調整できる。

本研究では,バルク体の着磁に適した任意波形の磁界 を印加することで,着磁磁界を高める可能性に着目した。 Gm 系 HTS バルク体を用いた着磁実験の結果,本方式を 用いれば同じピーク値を持つ直流磁界および単発パルス 着磁に比較して,より大きな着磁磁束が得られることを 確認した。

## 2.原 理

本研究では 0.355T (3550Gauss)を印加磁界の上限と した実験を行った。この磁界は,一般的なパルス着磁法 と比較すると 1/20 程度の印加磁界であるが,本研究では 着磁磁界の大きさそのものではなく,フィールドクール

<sup>\*1:</sup>工学研究科電気電子工学専攻修士学生

<sup>\*2:</sup> 電気電子工学専攻教授 (ishigoka@st.seikei.ac.jp)

<sup>\*3:</sup>電気電子工学専攻助手

や単発パルスによる磁化との比較を第一の目的として行 ったものである。

一般に,高温超電導バルク体では,振動磁界を印加す ると,交流損による発熱により最外周部の温度が上昇す る。これによりさらに内側に熱が伝わり,磁束の侵入を 抑制するピン止め力が低下してフラックス・ジャンプが 起こり,磁束はより内側に侵入する。この方法を活用す れば,比較的に低い磁界でもバルク体内部まで磁束を侵 入させることができる。その後印加磁界を緩やかに減少 させれば,バルク体内部に達した磁束は冷却に伴いピン 止めされ,同一の大きさの直流による着磁よりも大きい 着磁量が得られることが期待される。

# 3.実験装置

図1に、使用した新日本製鉄㈱製のGd(ガドリニウム) 系高温超電導材料を示す。寸法は直径20mm,厚さ10 mm,重さは21.32g,臨界温度は91Kである。



図1 高温超電導バルク体



図2 着磁用銅コイル

図 2 に,着磁用銅コイルを示す。着磁用コイルの中心 部にはバルク体を設置できるスペースが設けられている。 寸法は外径 140mm 内径 36mm 高さ 72mm 巻線断面 52mm×36mmである。線材には 1.3mmのホルマール銅 線を用い,18層で合計 979 ターン巻きである。



20mm 高温超電導バルク体

図4 高温超電導バルク体とホール素子の位置関係

着磁磁界の検出にはホール素子を使用し,これをX・ Y方向に任意のピッチで駆動制御できるパルスステージ に固定した。磁界測定範囲を図3に,バルク体とホール 素子との位置関係を図4に示す。

## 4.任意波形磁界発生装置の製作

必要な印加電圧波形を得るため,Labview 開発言語を 用いてインバータ素子のON-OFF 信号と直流電源電圧の 両方を制御した。希望する波形は PC のソフトウェアの みで得ることができる。

任意波形電流電源は、PC からのプログラマブルコント ロール専用に設計した任意波形磁界を得るためのインバ ータである。本装置はコイルへの電流供給を行う主回路, PC 本体、プログラムの不具合による事故を防ぐための保 護回路,制御信号と主回路を絶縁し IGBT 素子のゲート 信号を生成する駆動回路,大容量直流電源の出力電圧・ 電流制御用信号の整合回路で構成した。図5 に主回路を 示す。着磁コイルのインダクタンスによる誘導電圧を吸 収し,素子の破壊及と直流電源への逆流を防止するため, 外部コンデンサと直流電源の出力端子に耐圧 1200V のダ イオードを取り付けている。



図5 主回路

図6および図7に,任意波形電流電源の外観および内部 を示す。



図6 任意波形電流電源の外観



図7 任意波形電流電源の内部

5.実験結果と検討

5.1 静磁界着磁法によるバルク体の着磁

任意波形磁界発生装置によるパルス着磁に先立ち,静 磁界着磁法によるバルク体の着磁を行った。

フィールド・クール法による最大着磁磁界は,印加磁 界 3550Gauss の条件下において 2218Gauss であった。こ れに対し, ゼロ・フィールド・クール法による最大着磁 磁界は,印加磁界 3550Gauss の条件下で 199Gauss の捕捉 磁界であった。フィールド・クール法に比べゼロ・フィー ルド・クール法による最大着磁磁界は 1/10 以下であるが, 本研究では,これをどの程度向上出来るかを目指した研 究を行った。

#### 5.2 消 磁

着磁実験の際,前に行った実験の捕捉磁界が残ってい ては,重ねて着磁することになるため,正確なデータが 得られないので,消磁が必要である。確実な消磁方法と しては,高温超電導バルク体を臨界温度以上に昇温する 方法があるが,これを繰り返すとバルク体の劣化を招く と共に実験時間が長くなる。そこで,振動パルス磁界を 印加し,その振幅を漸減させて,交流損による発熱も活 用し消磁する手法を用いた。図8に示す消磁磁界波形を 元に,印加磁界の大きさ,および周波数等のパラメータ を変え,効率よい消磁が得られる波形を求めた。実験の 結果,印加磁界の周波数を上げてパルス数を増やすと消 磁効率が上がり,20Hz で99%の消磁効率が得られた。そ の結果を図9,10に示す。





高温超電導バルク体の捕捉磁界は,振動パルス磁界を 印加していくと,磁束が侵入しやすい状態になり,高温 超電導バルク体の温度上昇とヒステリシス特性により消 磁できると考えられる。

## 5.3 直流磁界による着磁

ー定磁界を十分長い時間印加すれば,磁束密度は一定 になるはずである。この時間を調査した。また,磁束が 侵入し始める下部臨界磁界についても調査した。図 11 に示す直流印加磁界波形のピークホールド時間,大きさ を変え,それぞれの実験を行った。





図 11 において,高温超電導バルク体の表面磁界はコイ ル電流から計算した印加磁界よりも大幅に小さい。これ は高温超電導バルク体が混合状態(超電導状態と常電導 状態)に止まっており,マイスナ-効果により,高温超 電導バルク体内に完全に磁束が入り込めないためである と思われる。なお,印加磁界 3550 Gauss における最大着 磁磁束密度は 230 Gauss であった。

高温超電導バルク体の捕捉磁界の変化の観測結果から, ピークホールド時間が3秒まではピークホールド時間を 伸ばすことにより捕捉磁界の増加が見られるが,それ以 上ではほとんど変化がないことが判った。

なお、印加磁界の大きさによる高温超電導バルク体の 捕捉磁界の変化に関しては、360Gauss 以下の印加磁界で は着磁できず、720Gauss 以上から着磁できることが判っ た。すなわち、この間に下部臨界磁界があり、これより 小さい印加磁界ではバルク体内部に磁束は入らないので 磁界を捕捉することはできないこと、また、本実験での 標準的印加磁界である 3550Gauss では十分混合状態に入 っていることが判った。

## 5.4 脈流・直流複合磁界による着磁

高温超電導バルク体は,振動磁界を印加すると,交流 損による発熱により温度が上昇し,磁束の侵入を排除す るマイスナー効果が低減,ピン止め力が低下し,磁束が バルク体中心部まで侵入しやすくなる。この状態でバル ク体内部まで磁束を侵入させ,その後印加磁界を緩やか に減少させれば,冷却によりバルク体内部に収まってい る磁束はピン止めされ,同一の大きさの直流準静磁界に よる着磁よりも大きい着磁量が得られると推定される。 この考えに基づき 図 12 に示す印加磁界波形を用いて着 磁を行った。すなわち,交流部は正の範囲で振動する脈 流磁界とし,その後に緩やかに減減する直流部を持つ磁 界を印加した。その結果の着磁磁界分布を図 13 に示す。



図 12 脈流・直流複合印加磁界と バルク体中心磁界の変化 (印加磁界ピーク値 3550 Gauss)



5.5 交流・直流複合磁界による着磁

前節では,印加磁界の前半部における振動磁界部に負 の部分がない方が着磁効率が良いと考え,前半部は正の 範囲で振動する脈流磁界による着磁特性について述べた が,本節では,前半部に正負両極に振動する交流振動磁 界を印加した実験結果について述べる。

実験の結果,前半の交流磁界印加時間が4秒以上にな ると捕捉磁界が増えることが確認できた。印加磁界に対 する高温超電導バルク体の表面磁界の割合は,交流磁界 印加時間が3秒の場合は16.5%なのに対し,4秒では 21.3%,5秒では30.4%に達した。交流振動時間を増加さ せることで,交流損による発熱で高温超電導バルク体の 温度が上昇し,磁束の侵入を排除するマイスナー効果を 低減する。この状態で直流磁界に切り替えることでバル ク体内部まで磁束が侵入し,より大きい着磁量が得られ たと推定できる。

図 14 に 交流磁界印加時間が 5 秒の場合の印加磁界波 形とバルク体中心磁界の変化を 図 15 に着磁後の捕捉磁 界分布を示す。



図 14 交流印加磁界時間 5 秒の場合の印加磁界波形と バルク体中心磁界の変化



図 15 交流印加磁界時間 5 秒の場合の着磁磁界分布

#### 5.6 検討

前節で述べたように、交流・直流複合磁界による着磁に おいて得られた最大の捕捉磁界 456 Gauss は,ゼロ・フ ィールド・クール法による捕捉磁界 199Gauss の 230%に 達し,フィールド・クール法による捕捉磁界 2218 Gauss の 21%となった。図 16 に各着磁方式による捕捉磁界の 大きさの比較を示す。



なお,本実験において着磁用コイルは液体窒素中に浸 漬して通電したが,交流通電時間を5秒以上にすると液 体窒素の沸騰が顕著になり,コイル焼損のおそれがある ため,最大交流通電時間を最大5秒に止めた。

## 6.むすび

本研究では,インバータを用いた任意波形磁界発生装 置を試作し,交流磁界と直流磁界を組み合わせた最適着 磁波形を得ることを試みた。その結果,同じ大きさの直 流磁界によるゼロ・フィールド・クール法に比べ,約2.3 倍の捕捉磁界が得られ,よりフィールド・クール法の捕 捉磁界に近づいた。

今回の実験結果から,振動磁界から直流磁界へのスム ーズな切替が効果的であることがわかった。また,正方 向だけの脈動磁界よりも,正負両極性(振幅は2倍)の 交流磁界の方が着磁効率が高いことがわかった。

本実験では,絶対量としての捕捉磁界の大きさは小さ かったが,本方式を用いれば,印加磁界に対する着磁効 率を改善出来る可能性があることがわかった。

なお,任意波形磁界発生装置の周波数を向上し,同一 の交流通電時間でもより大きなサイクル数を使用する事 により一層着磁効率が向上する可能性があると思われる。

#### 参考文献

- 1)加賀野井 啓介,石郷岡 猛,二ノ宮 晃,「HTS バ ルク体の磁化過程における AE の検出」,2003 年電気 学会全国大会,No.5-136,2003 年3月
- 2)加賀野井 啓介,石郷岡 猛,二ノ宮 晃,「HTS バ ルク体の着磁過程に発生する AE の観測」第15回「電 磁力関連のダイナミクス」シンポジウム,金沢,2003 年5月28~30日,No.3A13,pp.305~308
- 3)加賀野井 啓介,石郷岡 猛,二ノ宮 晃,「任意波 形磁界発生器を用いた高温超電導バルク体の着磁」, 成蹊大学工学研究報告, Vol.41, No.2, pp.45-46, 2004 年12月