



超電導パルスマグネットとその制御

村上吉繁*

1. はじめに

パルスマグネット研究の系譜は、1970年代の核融合用マグネットの開発にそって進んでいくことができる。プラズマは不安定であり炉中心に閉じ込めるには、敏感に作動する磁場で絶えずおさえ込まねばならない。またプラズマの加熱は、これを変圧器の2次コイルに見立て、1次コイルのパルス電流によって逆向きのアンペアターンに誘起されるプラズマ電流のオーム損失による。このような目的の1次パルスコイルは、実験炉でも数万アンペアの電流を通電し、磁場変化速度は10~100テスラ/秒が要求されるから、オーム損失の少ない超電導マグネットでなければならない。

さて、昭和55年に本学で超電導工学実験センターが発足するにあたり、主要設備としてどのような超電導マグネットを選択するかについて、センター長のもと専門委員の間で検討が重ねられた。パルスマグネットによれば、パルス励磁による時間変化磁場の発生とその磁場環境下の超電導材料の挙動、パルス励磁における交流損失の発生とその熱除去特性、マグネットの超電導維持に対する安定性と電磁力、交流損失の関係、マグネット電流および電力の吸収放出の計算機制御などの実験的研究を行うことができる。また将来、1,000~10,000 Mwh 級の揚水発電所規模の超電導エネルギー貯蔵を目指すとしても、安定性、冷却、制御の基礎研究を行うには、電流、電力、磁場が自在に制御できるパルスマグネットが最適であるとの結論に達した。

現在予定通り研究が進捗し、当初の研究目標が大筋で変更されることなく意欲的に追求され

ている段階で選択は誤っていなかったと確信している。以下に本実験センターのパルスマグネット開発の経緯、実験によって得られたマグネット特性およびその制御特性について述べておきたい。

2. 0.5メガジュール (MJ) パルスマグネットの開発

パルスマグネットはエネルギー貯蔵量 0.5メガジュール、定格電流 2,000アンペア、磁場変

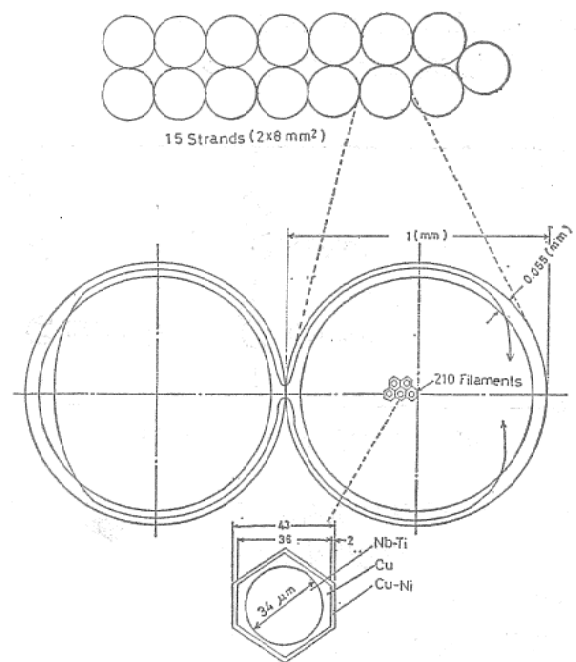


図1 0.5MJ マグネット超電導ケーブル

化速度 5 テスラ/秒、磁場利用空間確保のため内径 30cm とした。2,000 アンペアを通電する超電導ケーブルは、高変化磁場で交流損失がなく安定であることを目指し図1の構造が選ばれた。30 μ m の極細 Nb-Ti フィラメント線を銅で囲み、フィラメント間結合電流は、Cu-Ni 合金の高抵抗でおさえる 3層構造である。約 200本のフィラメントで素線(ストランド)が構成され、これを15本撚り合わせてケーブルと

*村上吉繁 (Yoshishige MURAKAMI), 大阪大学工学部, 電気工学科助教授, 工学博士, 電気工学

する。Cu-Ni の外皮で素線を包み、素線間結合電流も低くするようにしたのが新しい試みである。

このような極細多心ケーブルは、Cu-Ni 合金が比較的硬質の材料であることなどのため、線材の製作とコイル形成において困難があった。これを解決してダブルパンケーキ構造のわが国最大級のパルスマグネットを実現し、クエンチすることなく一挙に定格電流 2,000 アンペアに到達し、以後本センターにおけるパルス駆動でも高い安定性を示している。

3. 交流損失

超電導体にパルス電流が流れると無損失にならない。それは、超電導体にピン止め効果と呼ばれる非線形特性があり、磁場侵入時に生じる磁束量子が磁場と電流によるローレンツカを受けてもピンで止めたように固定する役目を果たすため損失なく直流電流を流すことができる。しかし交流磁場においては、ピン止めの作用で一

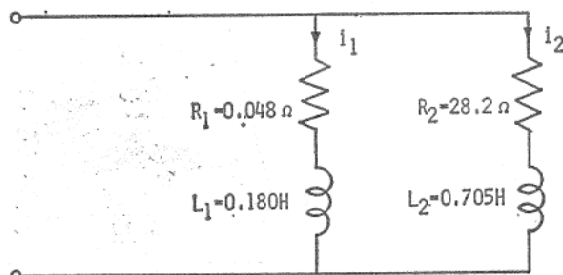


図2 0.5MJ マグネット等価回路

旦確立した電流は磁場逆転時にも流れ続けようとするため、強磁性体に類似のヒステリシス損失を生じる¹⁾。

超電導電流安定化のための Cu と Cu-Ni 合金においては、磁場変化による誘導電圧に起因するフィラメント間結合電流が流れる。このような交流損失を解析的に求めようのは、直線状ケーブルに対して磁場が直交する簡単な場合だけである。そこで筆者は不規則パルス電圧入力に対する出力電流からマグネット動特性を推定し、得られた伝達関数から図3に示す等価回路を導いた²⁾。

図において R_1 - L_1 は主回路電流で、 R_2 - L_2 に交流損電流が流れると考えられる。直流状態のインダクタンス $L_1 = 0.264$ ヘンリーに対し、

推定された L_1 はかなり小さく 0.18 ヘンリーである。これは推定の誤りでなく、パルス駆動状態においてステンレス鋼内に誘起される渦電流が磁場の増加を妨げる方向に働き磁束分布を減少せしめるからであると考えられる。5 テスラ/秒、最大 1,000 アンペアの三角波状電流パルスについて R_2 より交流損失を算出すると、1 パルスにつき 6,000~10,000 ジュール程度となり、ガス化したヘリウム量と矛盾しない。別にコイルのみの損失は 1 パルスにつき、800 ジュール程度と推定して極めて小さい。

したがって交流損失のほとんどはステンレス鋼クライオスタットの渦電流損が占めていると考えられる。強化プラスチック製クライオスタットの開発が望まれ現在計画中である。また常時パルス運転において交流損失と熱除去が釣り合う必要があり、等価回路による損失の表現はその特性解析に利用できよう。

4. 安定性

3. で述べた交流損失と安定性の関係は未だ解明されていない。超電導体の一部が破れて(クエンチ)電流が安定化導体をバイパスするときは、その抵抗の小さい Cu の方がオーム損失が少なく安定化に有利である。しかし 0.5 メガジュールマグネットケーブルの Nb-Ti/Cu/Cu-Ni の断面積比率は 25/42/33 (%) で Cu の面積が極めて小なるにもかかわらず 5 テスラ/秒 (=dB/dt) のパルス駆動でも高い安定性を示している。また別に高抵抗率安定化導体被覆の方がより高い dB/dt 値までクエンチしないという実験結果もある³⁾。

次のような熱力学的な考察が可能なように思われる⁴⁾。変化磁場においては超電導フィラメントと安定化導体間にしゃへい電流が流れケーブル内に磁場の不均一を生じる。磁場と温度の関数である熱力学的ポテンシャルは均一磁場で最低である。不均一磁場のいわば不安定平衡状態から最低の熱力学的ポテンシャルに移るとき磁束の跳躍(フラックスジャンプ)を生じ、これが大きければクエンチに至る。高抵抗安定化導体ではしゃへい電流が小さくより均一磁場分布に近くポテンシャルが低く磁束跳躍は小である。

5. にのべるように 計算機制御により任意の dB/dt 値でパルスコイルを駆動できるようになったので、実験的にこの観点を追求すべきであろう。

5. パルスマグネットの計算機制御

制御システムは、サイリスタ変換装置の直接デジタル制御部と保護シーケンス制御部より成る⁹⁾。シーケンス制御においては主回路のスイッチ開閉状態(モード)の切換が定められた順序にしたがって行われる。モード変化の際交流電源は短絡されてはならないが、マグネット電流の通電路はつねに確保しておかねばならないという矛盾した条件が満たされねばならない。

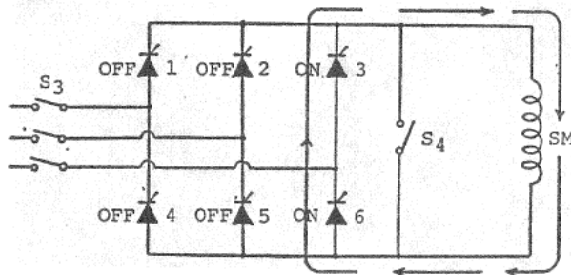


図3 スルーモード

そこで図3に示すスルーモードを置く。例えば SCR 3 と SCR 6 のように直列に接続されたサイリスタをモード変化の前に導通せしめる。これはマグネットの閉路を確保すると同時に交流電源の短絡を防いでいる。そこで S_4 を閉じることができる。この過渡特性は際どいものであるが、筆者の開発した CAD (Computer Aided Design) 手法により確認しパラメータを定め確実に動作している。

サイリスタゲートは、計算機出力により直接ゲートパルスが与えられる。多様な制御アルゴリズムを開発したが、状態ベクトルフィードバックによる線形2乗積分最適制御の結果を図4に示す。基準信号に精度よく追従し、当初の目標である5テスラ/秒、最大2,000アンペアのパルス駆動に成功している。

以上のように本センターにおいてパルスマグ

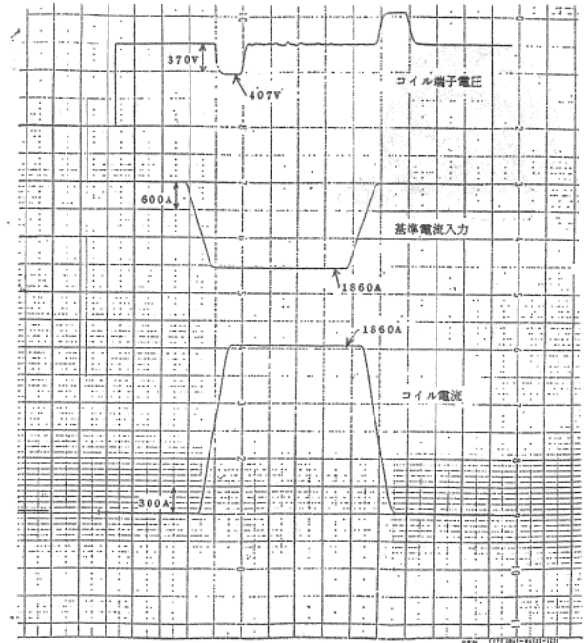


図4 0.5MJ マグネット電流制御

ネットの駆動から研究が開始されたが、研究課題が追求される過程で興味ある問題が派生し鮮明になった。これらの課題を各分野の研究者の協力で解明すればマグネット技術に一つの峰を形づくるものとなる。また新しい芽が生まれることも期待したい。

おわりに日頃ご指導を賜わる大石嘉雄超電導工学実験センター長、ご援助をいただくセンター運営委員、専門委員の各位に深い謝意を表する。

文 献

- 1) H. Brechna, Superconducting Magnet Systems, 4. (1973).
- 2) Y. Murakami et al, Dynamics and Control Characteristics of 0.5 MJ pulsed Magnet, ICEC9-ICMC CH3-1 (1982).
- 3) D. Itoh, Flux Jumps in Multifilament Superconducting Composites in a High dB/dt Time Dependent Magnetic Field, ICEC9-ICMC, (1982).
- 4) Al'tov et al, Stabilization of Superconducting Magnet Systems, chapter 2 (1977) Plenum Press.
- 5) 村上 他, 0.5 MJ パルスマグネットとその制御, 超電導工学実験センター報告第2巻 p. 5 (1982).