酸化物系金属系ハイブリッドマグネットのクエンチ保護方法

正員 尾崎 修 (物質・材料研究機構, CREST)

非会員 木吉 司 (物質・材料研究機構, CREST)

非会員 松本真治 (物質・材料研究機構, CREST)

非会員 和田 仁 (物質・材料研究機構, CREST)

Quench Protection Method of HTS and LTS Hybrid Magnet Systems

Osamu Ozaki, Member (National Research Institute for Metals · CREST)

Tsukasa Kiyoshi, Non-Member (National Research Institute for Metals · CREST)

Shinji Matsumoto, Non-Member (National Research Institute for Metals · CREST)

Hitoshi Wada, Non-Member (National Research Institute for Metals · CREST)

Development of a 1 GHz-class NMR magnet system is going on at the Tsukuba Magnet Laboratory of the National Research Institute for Metals. This magnet will consist of the inner HTS coil and the outer LTS magnet, it is designed to generate a magnetic field of 23.5 T. We are planning to operate the inner HTS coil and the outer LTS magnet in series in order to obtain high stability of the central magnetic field. To achieve the stability of 0.01 ppm/h, the critical current of the inner HTS coil must be four times as high as the operating current. Simulation results of usual quench protection methods suggest that there is some possibility that the inner HTS coil is damaged when a quench occurs in the outer LTS magnet.

We designed a new quench protection circuit for the 1 GHz-class NMR magnet and confirmed its adequacy using quench simulation codes. Our new method is valid for any HTS-LTS hybrid magnet.

キーワード: 超伝導マグネット, クエンチ保護, 酸化物系インサートコイル

Keywords: superconducting magnet, quench protection, oxide insert coil

1. まえがき

金属系超伝導マグネットのみで発生できる定常磁場の最高記録は 21.7 T であり⁽¹⁾, それより高い定常磁場を得る手段として, 高磁場での特性に優れた酸化物系の超伝導マグネットを金属系マグネットの内側に組み込んだハイブリッドマグネットが有望視されている。

その例の一つとして, 金属材料技術研究所・強磁場ステーションでは 1 GHz 級 NMR マグネットシステムの開発を行っている^(2,3)。本マグネットは外層の金属系超伝導体からなるマグネットにより 21.14 T (¹H の核磁気共鳴周波数に換算して 900 MHz に相当) を発生させ, 残りの 2.35 T (100 MHz に相当) の磁場を Bi-2212 の導体からなる酸化物系内層コイルにより発生させる計画である。マグネットの断面図を図 1 に, 諸元を表 1 に示す。マグネット本体は加圧超流動ヘリウムにより 1.8 K に冷却される。加圧超流動ヘリウム槽への熱侵入を減らすためにマグネットの保護回路も加圧超流動ヘリウム槽内に配置している。

本マグネットに求められる磁場の均一度は径 10 mm 長さ 20 mm の円筒空間内で 0.1 ppm であり, 磁場の安定度は 0.01 ppm/h である。この様な高い磁場の安定度を実現する

ためには, 金属系外層マグネットと酸化物系内層コイルを直列に接続し永久電流モードで運転する必要がある。また, Bi-2212 超伝導体の n 値は他の金属系超伝導体に比べ

図 1 1 GHz 級 NMR マグネット断面

Fig. 1 Cross-sectional view of the 1 GHz-class NMR magnet.

表 1 1 GHz 級 NMR マグネット諸元
Table 1 Specifications of the 1 GHz-class NMR Magnet.

中心磁場	23.5 T (Oxide: 2.35 T)
通電電流値	250.56 A
インダクタンス	1128 H (Oxide: 0.23 H)
蓄積エネルギー	35 MJ (Oxide: 100 kJ)
磁場均一度	0.1 ppm at $\phi 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ with SCshim
磁場安定度	0.01 ppm/h

現状では低く、安定度を満足させるためには、酸化物系内層コイルを低い負荷率で運転する必要もある。

この様に、酸化物系内層コイルと金属系外層マグネットを直列に接続して励磁する場合、金属系外層マグネットにクエンチが生じると、酸化物系内層コイルに過大な電流が誘起されることになり、コイルが過大になった電磁力によって機械的に損傷を受けることが考えられる。よって、1 GHz 級 NMR マグネットシステムを模擬したモデルマグネットを考え、酸化物系内層コイルに損傷を与えることのない保護回路についてクエンチ解析を用いて検討を行った。

2. 酸化物系内層コイルの要求仕様

金属系超伝導体の単位長さ当たりの I-V 曲線は n 値を用いた以下の近似式で表されることが知られている。

$$V = V_0 \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (1)$$

ここで、 V_0 は臨界電流値を定義する電界値（通常 $10\text{ }\mu\text{V/m}$ 又は $100\text{ }\mu\text{V/m}$ ）、 I_c は臨界電流値である。この近似式が酸化物系 Bi-2212 の導体に成り立つとして、酸化物系内層コイルの抵抗値 R は以下で表される。

$$R = \frac{Vd}{I_{op}} \quad (2)$$

ここで、 I_{op} は通電電流値、 d は酸化物系内層コイルの導体長さである。電流の減衰率はコイルの抵抗とインダクタンスの比で表されるので、1 GHz 級 NMR マグネットの仕様である磁場の安定度 0.01 ppm/h を実現するために必要な酸化物系内層コイルの臨界電流値は以下の関係を満たす必要が有る。

$$\frac{R}{L} < \frac{0.01\text{ ppm/h}}{3600\text{ s}} = 2.78 \times 10^{-12} \quad (3)$$

ここで、 L は 1 GHz 級 NMR マグネットのインダクタンスであり、約 1100 H である。図 2 にこの関係をプロットした。

金属系超伝導体の n 値は 20 T 以上の高磁場での使用領域においても 25 以上の高い値が得られているが⁽⁴⁾、Bi-2212 導体は現状で 13 程度となっている。図 2 から n 値が 13 で 0.01 ppm/h を満足する臨界電流値を求めると、通電電流値 250.56 A の約 4 倍の臨界電流値が必要であることが分かる。それに対し、金属系超伝導体の n 値 25 の場合で

図 2 磁場安定度を満たす I_c/I_{op} と n 値の関係

Fig. 2 Relationship between I_c/I_{op} and n -index for magnetic stability.

は約 2 倍となっていることが分かる。よって、現状では、酸化物系内層コイルは金属系外層マグネットに比べて、低い負荷率で運転することが磁場安定度の点から要求される。

3. クエンチ時の問題点

通常、NMR マグネットは電源から切り離され、永久電流モードで 1 年以上の長期間運転されている。よって、クエ

図 3 (a)金属系マグネットのみでの保護回路, (b)酸化物系内層コイルを 1 つのセクションに取った保護回路
Fig. 3 (a) Protection circuit of the LTS outer magnet, (b) Protection circuit when the oxide inner coil is protected as one section.

ンチ保護の方法として、マグネットを数セクションに分割し、クライオスタット内に配置された保護抵抗を図 3 に示すように、各セクションに並列に接続する方法が採られている。この方法によって、あるセクションがクエンチを起こした場合、そのセクションの電流値を速やかに減少させ、超伝導導体が焼損することを防いでいる。このような内部保護法では、超伝導状態にある他のセクションも速やかに誘導クエンチを起こし、マグネット全体で電磁エネルギーを消費することが必要となる。

酸化物系金属系ハイブリッドマグネットに上記の方法を採用したと仮定すると、金属系外層マグネットにクエンチが起きた時、酸化物系内層コイルに金属系外層マグネットの電磁エネルギーが転送され、電流が誘起されることになる。誘導によって増加した電流値が Bi-2212 導体の臨界電流値を超えた時に酸化物系内層コイル内に常伝導部分が発生し、常伝導部の抵抗によって電流値が減少することになる。しかしながら、酸化物系内層コイルの負荷率は約 0.25 と低いので、常伝導が生じ難くなり、誘導電流が過大になると考えられる。その結果として、大きな電磁力が酸化物系内層コイルに働き、機械的に破損する恐れがある。

よって、1 GHz 級 NMR マグネットシステムを模擬したモデルマグネットを考え、酸化物系内層コイルに損傷を与えることの無い保護回路についてクエンチ解析を用いて検討した。以下、その結果について報告する。

4. クエンチ解析

(4・1) クエンチ解析手法 クエンチ解析を行うに際して、巻線部内は断熱と仮定し、液体ヘリウムによる冷却の効果を無視した。また、超伝導導体の長手方向の常伝導伝播速度よりも、ターン間の常伝導伝播速度が支配的だと考え、2次元モデルにて図 4 に示すように常伝導相が伝播すると仮定し、各コイルの常伝導相部分の体積、温度及び抵抗値を各時間ステップ毎に計算を行った。その各コイルの抵抗値とインダクタンスを用いて回路方程式を解き、各セクションの次ステップでの電流値を求めた⁽⁵⁻⁷⁾。この時、巻線部内の超伝導部分の交流損失を考慮に入れ、超伝導部分の温度が上昇し、臨界電流値が減少する効果も取り入れている⁽⁸⁾。

(4・2) クエンチ解析モデル クエンチ解析の計算を簡単にするために図 5 に示す断面形状のクエンチ解析モデルを考えた。表 2 にそのモデルの諸元を示す。表 1 と比較すると分かるように、中心磁場や蓄積エネルギーの大きさは 1 GHz 級 NMR マグネットと同等となるようにしている。また、金属系外層マグネットと酸化物系内層コイルの蓄積エネルギーの比も 1 GHz 級 NMR マグネットと同等にしている。よって、簡略化したモデルでも酸化物系内層コイルのクエンチ現象を模擬できると考えられる。

図 4 コイル内での常伝導伝播の模式図

Fig. 4 Schematic model of normal zone propagation in a coil.

図 5 クエンチ解析モデル断面

Fig. 5 Cross-sectional view of the model for quench analysis.

表 2 クエンチ解析モデル諸元

Table 2 Specifications of the model for quench analysis.

中心磁場	23.5 T (Oxide: 2.24 T)
通電電流値	256 A
インダクタンス	986 H (Oxide: 0.23 H)
蓄積エネルギー	32 MJ (Oxide: 100 kJ)

(4・3) 金属系外層マグネットのクエンチ保護回路

金属系外層マグネットを単独で励磁する場合のクエンチ保護回路は図 3-a に示すように、蓄積エネルギーが均等になるように全体を 15 等分にセクション分割し、それぞれのセクションに 0.1Ωの保護抵抗と 2 個のダイオードを極性を反転させて並列にしたものを並列に接続した構成としている。この構成により、金属系外層コイルは保護できることはクエンチ解析によるシミュレーション結果から確認されている。図 7 は酸化物系内層コイルが有る場合のクエ

図 6 酸化物系内層コイルを 1 セクションとして保護した場合のクエンチ時の電流変化

Fig. 6 Behaviors of quench currents when the oxide inner coil is protected as one section.

クエンチ時のフープストレスの変化であるが、金属系外層コイルのクエンチ挙動は酸化物系内層コイルの影響を大きく受けないので、この結果から金属系外層マグネットのクエンチ時のフープストレスは 300MPa 以下でありことが分かる。この値は使用する金属系超伝導体の 0.2% 耐力以下である。

(4・4) 酸化物系内層コイルを含むクエンチ保護回路

酸化物系内層コイルを一つのセクションとして、金属系外層マグネットの各セクションと同じ保護抵抗とダイオードを並列に接続した保護回路 (図 3-b) でのクエンチ挙動をクエンチ解析により計算した。Coil4-1 にクエンチが生じた場合の各セクションの電流変化を図 6 に示す。その時の酸化物系内層コイルのフープストレス変化を図 7 に示す。金属系外層マグネットの他のコイルにクエンチが生じた場合の酸化物系内層コイルに働く最大のフープストレスは表 3 にまとめている。Coil4-1 が最初にクエンチを起こした時、酸化物系内層コイルのフープストレスが最大になっている。図 6 から分かるように金属系外層マグネットの蓄積エネルギーが酸化物系内層コイルに転送されることによ

表 3 クエンチ中の酸化物系内層コイルの最大フープストレス

Table 3 Maximum Hoop-stress of the oxide inner coil in quenching.

Initial quench	Coil1	Coil2-2	Coil3-1	Coil4-1	Coil5-1	Coil6-1
最大 Hoop-stress(MPa)	230	280	350	390	140	140

図 7 酸化物系内層コイルを 1 セクションに取ったときの各コイルのフープストレス変化

Fig. 7 Behavior of hoop-stress in the coils when the inner oxide coil is protected as one section.

て臨界電流値の 1000 A 近くまで電流値が上昇している。その結果、フープストレスは 390MPa となり、酸化物系内層コイルは機械的に破壊されると考えられる。金属系外層マグネットにおいてはクエンチ時のフープストレスは最大で約 300MPa であるが、この応力値は使用する金属系超伝導体の 0.2% 耐力以下である。よって、図 3-b のような保護回路では金属系外層マグネットのクエンチ保護は出来るが、酸化物系内層コイルのクエンチ保護は出来ないことが分かる。

酸化物系内層コイルへの誘導電流を抑制する方法として、

酸化物内層コイルの保護抵抗値(Ω)

図 8 酸化物内層コイルにかかる最大フープストレスと酸化物系内層コイルの保護抵抗値の関係

Fig. 8 Maximum hoop-stress in the oxide inner coil vs. resistance of the dump resistor for the oxide inner coil.

酸化物系内層コイルの保護抵抗の抵抗値を大きくする方法が有る。酸化物系内層コイルの保護抵抗値を 0.1Ω 以上にした場合、クエンチ時にかかる酸化物系内層コイルの最大フープストレスを同様のクエンチ解析によって求めた。その結果を図8に示す。図8より分かるように、保護抵抗の

図9 酸化物系コイルを金属系マグネットの最内層セクションに組み込んだ保護回路

Fig. 9 Protection circuit when the oxide inner coil is protected with the innermost section of the LTS magnet.

図10 酸化物系内層コイルを金属系マグネットの最内層セクションに組み込んだときのクエンチ時の電流変化

Fig. 10 Behaviors of quench currents in a new protection circuit described in Fig. 8.

値が大きくなるに従って最大のフープストレスの値が小さくなっており、例えばフープストレスを 200 MPa 以下にするためには保護抵抗を 2Ω 以上にする必要がある。しかしながら、数 100 A の電流量を持ちなおかつ低温での抵抗値が 2Ω 以上ある体積の保護抵抗を加圧超流動ヘリウム槽内に配置することは困難である。よって、酸化物系内層コイルの保護抵抗の値を大きくし、誘導電流を抑える方法は現実には採用し難いと考えられる。

次に、金属系外層マグネットの最内層のセクションに酸化物系内層コイルを組み込んだクエンチ保護回路(図9)を考えた。この回路の場合、酸化物系内層コイルと同じセクション内に有る Coil1, Coil2-1 が誘導クエンチを起こすことにより、酸化物系内層コイルの誘導電流を抑える効果が期待できる。この回路でのクエンチ解析を行った。図10,

図11 酸化物系内層コイルを金属系マグネットの最内層セクションに組み込んだときのクエンチ時の酸化物系内層コイルのフープストレス変化

Fig. 11 Behavior of hoop-stress in the oxide inner coil predicted by a new protection circuit described in Fig. 8.

図12 酸化物系内層コイルを金属系マグネットの最内層セクションに組み込んだときのクエンチ時の電圧変化

Fig. 12 Behaviors of quench voltages(when the oxide inner coil is protected by a new protection circuit described in Fig. 8).

表4 Coil1,2-1 のクエンチ後のホットスポット温度
Table 4 Hot-spot temperatures of Coil1, 2-1 after quench.

	Coil1	Coil2-1
酸化物系内層コイル無し	130 K	107 K
酸化物系内層コイル有り	142 K	112 K

Initial quench: Coil4-1

11 にクエンチ時の電流変化、フープストレスの変化を示す。これらの図より分かるように、この回路では抵抗値の大きな保護抵抗を用いなくても、酸化物系内層コイルの誘導電流が抑えられ、フープストレスの最大値も 170 MPa 以下に抑えられている。この値のフープストレスが酸化物系内層コイルに働いてもコイルにダメージを受けないように補強することは可能である⁽⁹⁾。酸化物系内層コイルを同じセクション内に組み込んだことによる Coil1, Coil2-1 のクエンチ後のホットスポット温度の変化を表 4 に示す。酸化物系内層コイルを組み込んだことによる温度の上昇は Coil1 で約 10 K 程度であり、この回路によって、金属系外層マグネットに焼損等のダメージを与えることは無いと考えられる。

また、クエンチ時の各コイルの両端電圧の挙動を図 12 に示す。図より分かるように酸化物系内層コイルの両端に発生する電圧の最大値は約 500 V 程度であり、Coil1,2-1 では約 1000 V 程度となっている。これは従来の金属系マグネットのみの場合とほぼ同じ値である。よって、クエンチ時の電気絶縁は可能であると考えられる。

以上より、図 9 に示す保護回路によって、1 GHz 級 NMR マグネットの酸化物系内層コイルのクエンチ保護が可能であることが分かった。

5. まとめ

1 GHz 級 NMR マグネットを模擬したモデルを用いてクエンチ解析を実施し、酸化物系内層コイルのクエンチ保護方法に関して検討を行った。

その結果、金属系外層マグネットの最内層セクションに酸化物系内層コイルを組み入れ同一の保護抵抗とダイオードに並列接続することによって、酸化物系内層コイルのクエンチ保護が可能であることが分かった。

また、本稿で提案した保護方法は 1 GHz 級 NMR マグネットのみならず、酸化物系コイルと金属系コイルを電氣的に直列に接続するハイブリッドマグネットさらには電流の負荷率が大きく異なるコイルを組み合わせた超伝導マグネット一般に対しても有効であると考えられる。

(平成 13 年 1 月 29 日受付, 平成 13 年 4 月 3 日再受付)

文献

- (1) R. Hirose et al. " 21.7 T superconducting magnet using (Nb,Ti)₃Sn conductor with 14%-Sn bronze," in MT-15 Proc., L. Liangzhen, S. Guoliao, and Y. Luguang, Eds. Science Press, pp. 874-877, (1998)
- (2) T. Kiyoshi et al. " Development of 1 GHz Superconducting NMR Magnet at TML/NRIM," *IEEE Trans. Applied Super.* Vol. 9 No. 2, pp. 599-602, June (1999)
- (3) T. Kiyoshi et al. " Development and Operation of Superconducting NMR Magnet beyond 900 MHz," *IEEE Trans. Applied Super.* in press
- (4) T. Hase et al. " Bronze route conductors for 1 GHz NMR superconducting magnet," *IEEE Trans. Applied Super.* Vol. 10 No. 1, pp. 965-968, March (2000)
- (5) C. H. Joshi and Y. Iwasa " Prediction of current decay and terminal voltages in adiabatic superconducting magnets," *Cryogenics* Vol. 29 pp. 157-167, March (1989)
- (6) A. Ishiyama et al. " Quench propagation analysis in adiabatic superconducting windings," *IEEE Trans. Magn.* Vol. 27, No. 2, pp. 2092-2095, March (1991)
- (7) Z. P. Zhao and Y. Iwasa " Normal zone propagation in adiabatic superconducting magnets, Part 1: normal zone propagation velocity in superconducting composites," *Cryogenics* Vol. 31 pp. 817-825, September (1991)
- (8) O. Ozaki et al. " Quench Analysis of Multisection Superconducting Magnet," *IEEE Trans. Applied Super.* Vol. 5 No. 1, pp. 483-486, March (1995)
- (9) T. Wakuda et al. " Transport Properties of Bi-2212/Ag Multifilamentary Tape under a Large Electromagnetic Stress State," *IEEE Trans. Applied Super.* Vol. 9 No. 2, pp. 952-955, June (1999)

尾崎 修

(正員) 1965 年 8 月 16 日生。1989 年 3 月神戸大学理学部物理学卒業。1991 年 3 月同大学大学院理学研究科修士課程修了。同年株式会社神戸製鋼所入社。現在、独立行政法人物質・材料研究機構に出向。超伝導マグネットの開発に従事。低温工学協会会員

木吉 司

(非会員) 1959 年 8 月 4 日生。1983 年東京大学工学部原子力学科卒業。1988 年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年 4 月より文部科学省金属材料技術研究所勤務。現在、独立行政法人物質・材料研究機構強磁場研究グループ第 2 サブグループリーダー。主として強磁場用超伝導マグネットの開発に従事。低温工学協会、日本金属学会会員。工学博士。

松本真治

(非会員) 1968 年 5 月 19 日生。1992 年大阪大学基礎工学部物性物理工学科卒業。1998 年同大学大学院基礎工学研究科博士課程終了同年 CREST 研究員。1999 年 4 月より文部科学省金属材料技術研究所勤務。現在、独立行政法人物質・材料研究機構強磁場研究グループ研究員。主として、超伝導マグネットの開発に従事。低温工学協会、日本 MRS 会員。理学博士

和田 仁

(非会員) 1945 年 10 月 18 日生。1969 年東京大学工学部冶金学科卒業。1974 年同大学大学院冶金専門科博士課程修了。同年科学技術庁(現文部科学省)金属材料技術研究所に入所。現在、独立行政法人物質・材料研究機構強磁場研究グループ主幹研究員。超伝導国際標準化委員。低温工学協会、日本金属学会会員。工学博士