

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560286

研究課題名（和文） 列間高抵抗層によるクエンチバックの原理実証研究

研究課題名（英文） Feasible study on quench back with high-resistive sheets between turns

研究代表者

今川 信作 (IMAGAWA SHINSAKU)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：10232604

研究成果の概要(和文):超伝導マグネットのクエンチ保護には通常,外部抵抗が用いられるが,大型マグネットほど遮断電圧が高くなるなどの問題がある。そこで列間絶縁を高抵抗層に置き換えた直流マグネットを考案し,「クエンチバック」と呼ばれる内部発熱によるコイル保護の可能性を調べた。TiC添加Al₂O₃, SiC, 導電性樹脂などの低温での抵抗率を測定し,これらが候補材料となり得ることを確認したものの,導体との接触抵抗の制御に課題が残った。並行して,電流遮断時の温度解析プログラムを作成し,大型マグネットへの適用可能性を調べた。

研究成果の概要(英文): External dump resistors are usually adopted for quench protection of superconducting magnets. The higher voltage at shut-off is a problem in the larger magnets. Therefore, DC magnets, in which turn-to-turn insulation is replaced by conductive sheets, is proposed. Its availability for quench protection by internal-dump, which is called 'quench back', is investigated. The resistivities of the candidates such as Al₂O₃ with TiC, SiC, and epoxy resins with conductive filler are measured at low temperatures. Their values are acceptable, but the contact resistance between them and conductors must be improved for the actual use. The possible application of this method to large-scale magnets was examined with an analysis code for the coil temperatures at the current shut-off.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：超伝導工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：超伝導マグネット, 電気絶縁, クエンチ保護

1. 研究開始当初の背景

超伝導マグネットの大型化・強磁場化の課題として, 導体や製作法の開発の他に, 磁気エネルギーの増大に対する超伝導マグネットの保護が特に重要である。一般的には, 導体の動き等による局所的な常伝導転移(クエ

ンチ)の際には, マグネットを電源から切り離して外部保護抵抗に接続することにより電流を急速に減衰させて超伝導マグネットの焼損を防ぐ保護方法が用いられている。核融合装置用の大型マグネットでは, 磁気エネルギーが数10GJにも及ぶため, 熱容量の大

きな外部保護回路を必要とするだけでなく、電流遮断時の高電圧も問題となる。例えば、ITER のマグネットでは、クエンチの際には外部保護抵抗を用いて 10 秒程度の短い時定数で電流を減衰させる設計となっており、遮断時の最大電圧を 10 kV 程度に抑制するために導体の大電流化と保護回路の並列化が採用されている。さらに大型の超伝導マグネットの場合にも保護回路の並列数を増やすことによって最大電圧を抑制することは可能であるが、全ての保護回路を同時に働かせることが必要条件であることから、その信頼性が課題となる。このように、大型強磁場超伝導マグネットにおいては耐電圧特性およびクエンチ保護の方法が設計条件を大きく左右する因子となっている。

そこで、導体間の電気絶縁物を無くしてマグネット内部の強度部材を遮断時の保護抵抗として利用する方式の大型強磁場マグネットへの適用可能性を研究してきた。直流で使用される超伝導マグネットの場合には、励磁速度を十分に遅くすることによって列間の電気絶縁を抵抗体に置き換えることが可能である。クエンチ時には電源と切り離すだけでこの抵抗体に電流が転流するので、超伝導線材を強度部材や安定化材で囲う構造の場合には、全体の熱容量を有効に利用すれば、外部に保護抵抗を設けなくてもマグネットの温度上昇を十分に許容される範囲に抑制することができる。このように、強度部材等の巻線部そのものを保護抵抗として利用することができれば、最大電圧の大幅な低下とクエンチ保護の信頼性の飛躍的な向上が期待される。ただし、実用的な励磁時間を 1 時間程度と考えると、磁気エネルギーが 1 MJ クラスのマグネットにおいても列間抵抗体としてステンレス鋼のような実用的な金属材料を用いることは難しく、100 倍以上の抵抗率を必要とすることが最近の研究で分かってきた。核融合装置用のマグネットのように 100 GJ クラスのマグネットにおいては、励磁時間を 1 日程度に長くして数 10 kW の発熱を許容する場合でも、ステンレス鋼の 10,000 倍以上の抵抗率が必要となる。また、巻線部全体の熱容量を利用して温度上昇を抑制する保護方法なので、マグネット全体が速やかに常伝導転移を起こすこと（クエンチバック）が必要であり、そのためには列間抵抗の発熱によって超伝導線が効率良く加熱される必要があることが分かった。

2. 研究の目的

金属材料の 100 倍から 10,000 倍の電気抵抗率を有する抵抗体としては、半導体あるいは導電体と絶縁物の複合材料が候補として考えられる。また、この抵抗体と超伝導線の熱接触が良いことが要求されるため、実用的

には、導体と接触する位置に高抵抗の薄い層を挿入する案が有力な候補である。その材料として導電性樹脂を用いることができれば、一様性が向上して実用性が格段に良くなることが期待できる。本研究の目的は、導体間に高抵抗層を配置して、遮断時にはこの抵抗層に短絡電流を流して発熱させることによって、マグネット全体を短時間の内に常伝導転移させること（クエンチバック）によるマグネット保護の可能性を実証することにある。この高抵抗層の電気抵抗を大きくすることによって励磁時の交流損失を減らし、遮断時の電流減衰を早くすることが可能であるが、これらの材料の極低温での特性はほとんど分かっていない。

本研究では、まず、半導体や導電性樹脂の極低温における電気抵抗を調べ、有力な候補材料を選別する。続いて、その材料を用いてコイル試験体を製作して、励磁およびクエンチ時の温度上昇等の特性を調べ、解析と比較することにより、列間高抵抗層の汎用マグネットへの適用可能性を検討する。

クエンチバックによる超伝導マグネット保護の概念は古くに提案されており、電気ヒーターを用いて強制的に常伝導転移を拡大する方法は、加速器用マグネットにおいて外部保護抵抗との併用で実用化されている。しかし、列間絶縁を高抵抗層に置き換え、遮断時にヒーターとして利用することによって超伝導マグネットを保護する概念は全く新しいものであり、特に大型・強磁場超伝導マグネットの保護方法として新しい領域を切り開くことができる。列間電気絶縁を無くした超伝導マグネットには次のような利点が期待され、適用可能性を示すことによって、新しい大型直流マグネットの開発研究に発展することが期待される。

- (1) 外部保護回路が不要となり、電源との切り離しだけでクエンチ保護が可能となるため、信頼性を飛躍的に高めることができる。遮断時に高電圧が発生しないため、絶縁破壊の危険性が低下する効果も期待できる。
- (2) 大型（大電流）導体を用いる必要がなくなり、コイル電源や電流リードの設備の小型化が可能となる。
- (3) 層間絶縁は必要であるが、遮断時の印加電圧が大幅に下がるためセラミックスのような耐熱絶縁材料の適用が容易になる。そのため、A15 系や酸化物系の超伝導線材を適用する場合にワインド・アンド・リアクト（巻線後に反応熱処理を行う）法を採用することが可能となり、巻線が容易となることが期待される。

3. 研究の方法

まず、常温においてステンレス鋼の 100 倍以上の電気抵抗を有する半導体および複合

材料の調査を行い、5つの候補材料を選定した。候補材料は、アルミナやジルコニアを基材とした導電性セラミックス、導電性カーボン等を含む導電性樹脂、および、その樹脂を含浸したガラステープである。選定した材料の常温および極低温の電気抵抗を測定して、極低温においてステンレス鋼の1,000倍から100,000倍程度の電気抵抗を有する材料を選別した。電気抵抗測定には4端子法を用い、試料の冷却には液体窒素を利用した。

並行して、これまでの研究で考案した強度部材を保護抵抗とする超伝導マグネットの概念設計を進展させながら、列間抵抗をヒーターとして利用したクエンチバックによるクエンチ保護の原理実証のためのコイル試験体の設計を行った。励磁速度が同じ場合に、励磁時の列間短絡電流による発熱は1ターンのインダクタンスの二乗に比例し、列間抵抗に反比例する。列間抵抗は列間の面積に反比例するため、同じ材料（電気抵抗率）の列間抵抗体では、大型に（インダクタンスが大きくなる）ほど励磁時および遮断時の発熱密度が増加してしまう。そのため、コイル試験体と大型マグネットの等価性についての検討が必要である。列間抵抗体をガラステープ+導電性樹脂によって構成することができれば、超伝導線との熱接触および長手方向の一様性の問題は解決されることが期待される。導電性樹脂の使用が困難な場合には導電性セラミックスを導体間に挿入する案を候補と考えている。この場合には、超伝導線との熱接触の一様性を確保するための工夫が必要となると考えており、高伝熱性樹脂の利用を想定している。

平成21年度は、前年度の電気抵抗測定の再現性を調べた。接触抵抗を制御することが難しく、測定値が安定しないため、電極の固定方法をいろいろと試した。電気抵抗の測定試料の場合にはインジウムシートなどの柔らかい金属を導電性セラミックスと電極の間に挟む方式が有効であったが、コイル試験体に適用することには課題が残る。そこで、コイル試験体は、導体間の実効抵抗を測定することを目的として設計をやり直して、材料を準備した。

平成22年度は、コイル試験体を製作して導体間の実効抵抗を調べた。実験と並行して、熱解析プログラムを作成し、この概念を適用した大型マグネットや汎用マグネットの検討を行った。

4. 研究成果

(1) 高抵抗材料の候補材料の選定

常温においてステンレス鋼の100倍以上の電気抵抗を有する半導体および複合材料の調査を行い、候補材料として、TiC添加 Al_2O_3 、SiC、 ZrO_2 添加NbC、 ZrO_2 添加WCおよびC入りエ

ポキシ樹脂を選定した。柱状の試料を製作して常温から液体窒素温度の範囲での電気抵抗測定を行ったが、試料と測定子との接触抵抗の低減に課題が残った。これらの試料には半田付けが困難であるため、試行錯誤の結果、今年度においては、薄いインジウム板を挟んで銅製端子を端部に押し付ける方式により電気抵抗を測定した。試料を液体窒素から取り出して自然昇温の過程で中間温度の電気抵抗を測定した。接触抵抗の低減については、さらなる検討が必要である。

(2) コイル試験体の設計

これまでの研究で考案した強度部材を保護抵抗とする超伝導マグネットの概念設計を進展させながら、列間抵抗をヒーターとして利用したクエンチバックによるクエンチ保護の原理実証のためのコイル試験体の設計を行った。

列間絶縁無しのマグネットの基本構想は、次の通りである。

- 列間は電気絶縁無し（高抵抗層あり）。層間は電気絶縁。
- 列間抵抗が各列（ターン）のインダクタンスと並列回路
- 電源と切り離されると、全列間に電流が流れてマグネット全体で発熱

マグネットの概念図を図1に示し、その等価回路を図2に示す。

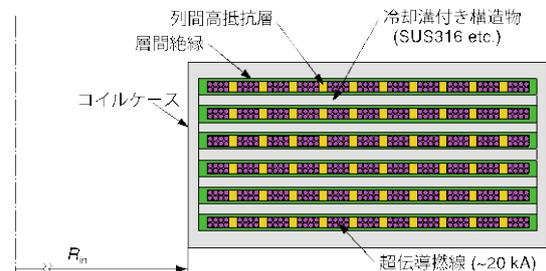


図1 列間絶縁無しマグネットの概念図

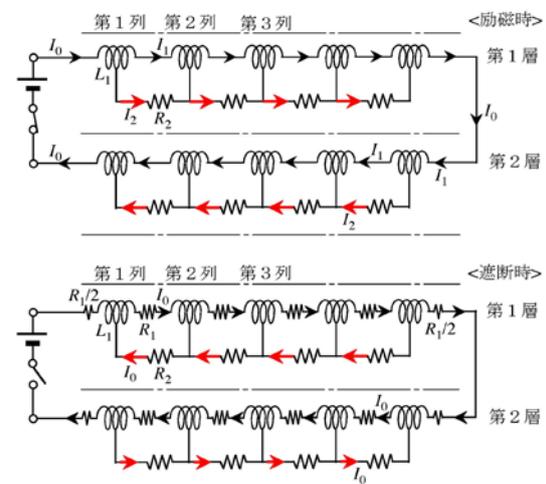


図2 列間絶縁無しマグネットの電気回路

励磁時の発熱は、次の式で与えられる。

$$\text{励磁電圧} \quad V_0 = L \frac{dI_1}{dt} = (mn)^2 L_1 \frac{I_1}{t_1}$$

$$\text{列間短絡電流} \quad I_2 = \frac{V_0}{mnR_2}$$

$$\text{抵抗発熱} \quad Q_{r,2} = mnR_2 I_2^2 = \frac{mn(L_1 mn I_1)^2}{R_2 t_1^2}$$

- L_1 : 1 ターンのインダクタンス
- m : 層数
- n : 列数
- I_1 : 導体電流値
- I_2 : 列間方向の短絡電流
- R_2 : 列間抵抗
- t_1 : 励磁時間

次に、クエンチ保護時の電圧は、次の式で与えられる。

$$\text{遮断抵抗} \quad R_{damp} = mnR_2$$

$$\text{電流減衰時定数} \quad \tau = \frac{L}{R_{damp}} = \frac{mnL_1}{R_2}$$

$$\text{最大両端電圧} \quad V_{damp} = I_1 R_{damp} = (mnI_1) R_2$$

励磁速度が同じ場合に、励磁時の列間短絡電流による発熱は1ターンのインダクタンスの二乗に比例し、列間抵抗に反比例する。列間抵抗は列間の面積に反比例するため、大型コイルを模擬するためには、コイル試験体の列間抵抗率を小さくしておく必要がある。また、クエンチバックの原理実証を行うためには、磁気エネルギーに対する熱容量を小さくしておく必要があることから、コイル電流密度を高くすると同時にできるだけインダクタンスを大きくする方針で、コイル試験体の設計を進めた。電気的特性と熱・機械特性を考慮すると導電性セラミックスが有力な候補材料であるが、半田接合などの冶金的な接合を採用できないため導体との接触抵抗を小さくすることが課題として残っている。そのため、列間抵抗を実測できるような試験体を準備した。

(3) 大型マグネットへの適用性検討

並行して、電流遮断時の温度解析プログラムを作成し、実測された列間抵抗値を用いて、本方式の大型マグネットへの適用可能性を検討した。

ヘリカル型核融合炉のヘリカルコイルを例にとり、蓄積磁気エネルギーが60 GJ、巻数 (mn) が 968、 $I_1=51.7$ kAの場合には、励磁時間 (t_1) を120 hrと長くしても、抵抗発熱 ($Q_{r,2}$) をプラント効率から許容される冷凍能力に相当する30 kW以下とするためには、表1に示すように、列間抵抗 (R_2) は1 $\mu\Omega$ 以上にする必要がある。もしもステンレス鋼 (電気抵抗率 0.7 $\mu\Omega\text{m}$) を用いる場合には、列間抵抗体の厚さが1 m程度も必要となり、

現実的でない。つまり、数GJの蓄積磁気エネルギーの大型マグネットの場合には、金属の1,000倍以上の抵抗率の列間抵抗体が必要であることが明らかとなった。また、導体との熱接触を良くするため、この高抵抗層は、熱伝導が良い材料とするか、薄いものとする必要がある。

金属の1,000倍以上の抵抗率を持つ導電体として入手可能な材料として、導電性セラミックスあるいは導電性樹脂が挙げられる。これらの代表的な物性値を表2に示す。文献および実験の結果から、極低温の抵抗率は、Cは数倍、セラミックスは100~1,000倍に大きくなると考えられる。よって、現時点では、TiC添加アルミナセラミックスとCフィラー入り導電性樹脂が有力候補と考えられる。極低温での抵抗率が0.03 ohm-mの材料を列間スペーサに用いる場合について、ヘリカル型核融合炉のヘリカルコイルを例にとり、列間絶縁無しマグネットの励磁時の発熱や遮断時電圧の計算結果を図3に示す。従来の外部保護抵抗によるクエンチ保護方式では、蓄積磁気エネルギーが100 GJ級の超伝導マグネットには100 kA級の大型導体が必要と考えられているが、列間絶縁無し方式の場合には、ターン数を増やすことにより20 kA級の導体でも設計可能であることが分かった。このことは、加速器用マグネットにおいて実績が豊富なラザフォード導体も選択可能となることを意味しており、巻線構造の自由度を拓げるものである。

表1. 核融合マグネットへの適用例。

項目 (単位)	設計例(120 GJ, 50 MA)	
層数×列数	22*44	40*80
導体電流値 (kA)	51.7	15.6
励磁時間 (hr)	120	120
高抵抗層の厚さ (mm)	0.205	0.225
列間抵抗 (ohm) (*1)	0.000001	0.000002
励磁時電圧/コイル (V) (*2)	5.4	17.8
励磁時の発熱 (kW)	29.9	49.4
遮断時の初期時定数 (hr)	12.91	21.33
遮断時の最大層間電圧(V)	50	100

(*1) 抵抗率 ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$): 0.03 ohm-m

(*2) 励磁時間: 120 hr

表2. 導電性セラミックス ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, SiC) と導電性樹脂 (Fujikura-kasei, Dotite®, A-3/C-3) の物性値

Materials		Al_2O_3 +TiC	SiC	A-3/C-3 (C filler)
抵抗率 (*1)	ohm-m	3.0E-05	1.0E+06	1.00E-02
熱伝導率	W/m/K	21	46	-
比熱	J/kg/K	790	670	-
密度	g/cm ³	4.24	3.10	-
熱拡散率	m ² /s	6.27E-06	2.21E-05	-

(*1) 293 K の値。低温では高くなる

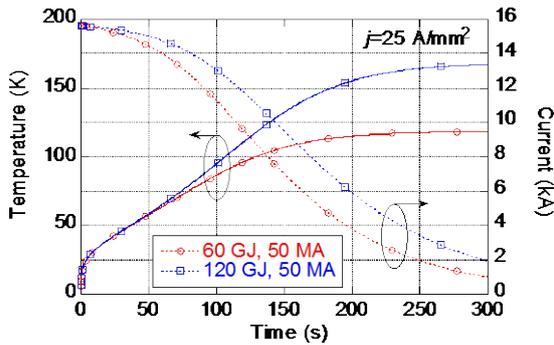


図3 蓄積磁気エネルギーが60 GJと120 GJのマグネットの内部抵抗保護の場合の電流と温度変化の計算値（電流密度 25 A/mm²の場合）

接触電気抵抗のばらつきは、電流遮断時の導体間横断電流による温度上昇を不均一にするが、マグネット保護の観点からは、個々の導体間抵抗に数倍の偏差があっても許容されるという結果が得られた。抵抗の偏差が大きいくほど常伝導に転移する時間の差が大きくなるが、全てが常伝導に転移するまでの発熱量は全磁気エネルギーの1%以下であることから到達温度上昇への影響は小さいためである。このことから、接触電気抵抗には抵抗体の数倍の偏差が許容されることがになり、実現性の観点で有利な結果が得られた。

(4) まとめ

超伝導マグネットのクエンチ時の保護には外部保護抵抗が用いられているが、蓄積磁気エネルギーの大きなマグネットほど遮断電圧が高くなり、高電圧遮断器や高耐圧電気絶縁が必要となる問題がある。列間絶縁を高抵抗層に置き換えた直流マグネットを考案し、「クエンチバック」と呼ばれる内部発熱によるコイル保護の可能性を調べた。マグネットを励磁電源から切り離すとコイル電流が高抵抗層を介して短絡するので、この抵抗層のジュール発熱によりマグネット全体が急速かつ一様に加熱されて常伝導に転移する。この方式には、外部保護回路が不要、遮断電圧が低い、さらに大電流導体が不要となる利点がある。この抵抗層にはステンレス鋼の1,000から100,000倍大きい抵抗率が最適である。汎用材料のものとしては、導電性セラミックスか導電性樹脂が候補材料となり、TiC添加Al₂O₃、SiC、あるいは導電性フィラー入り樹脂が挙げられる。これらの低温での抵抗率を測定し、候補材料となり得ることを確認したものの、導体との接触抵抗を制御することが難しく、実コイルを用いたクエンチバック原理実証までは達成できなかった。並行して、電流遮断時の温度解析プログラムを作成し、本方式の大型マグネットへの適用可能性を検討した。各列間の実効抵抗の積算が遮断時の層間電圧を決定するため、平均値の制御が重要である。一方で、場所毎のばらつ

きについては、数倍の偏差があっても許容されるという結果が得られた。抵抗の偏差が大きいくほど常伝導に転移する時間の差が大きくなるが、全てが常伝導に転移するまでの発熱量は全磁気エネルギーの1%以下であることから到達温度上昇への影響は小さいためである。このことから、接触電気抵抗には抵抗体の数倍の偏差が許容されることがになり、実現性の観点で有利な結果である。

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3件）

- ① S. Imagawa, A. Sagara, H. Yamada, N. Nakajima, A. Komori, O. Motojima, LHD Experiment Group, "Prospects Toward an Integrated Heliotron Fusion Reactor", Fusion Science and Technology, 査読有, Vol. 58, No. 1 (July 2010) 593-598.
- ② S. Imagawa, K. Takahata, H. Tamura, N. Yanagi, T. Mito, T. Obana and A. Sagara, "Concept of Magnet Systems for LHD-type Reactor, Nuclear Fusion", 査読有, Vol. 49 (2009) 075017(7pp)
- ③ S. Imagawa, A. Sagara, and Y. Kozaki, "Conceptual Design of Magnets with CIC Conductors for LHD-type Reactors FFHR2m", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 3 (July 2008) S1050-1-5.

〔学会発表〕（計3件）

- ① S. Imagawa, "Design study on DC superconducting magnets with conductive sheets between turns," Applied Superconductivity Conference 2010, Washington DC, USA, Aug.2-6, 2010, 5LPD06
- ② S. Imagawa, "A Conceptual Design of Heliotron DEMO Plant," APFA2009, Aomori, Japan, Oct. 27-29, 2009, G28-p4.
- ③ S. Imagawa, "Concept of Magnet Systems for LHD-type Reactor," 22nd IAEA Fusion Energy Conference, Geneva, Switzerland, Oct. 14-18, 2008, FT-P3-17.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今川 信作 (IMAGAWA SHINSAKU)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：10232604