

KAKEN
16360138

伝導冷却高温超伝導線材の クエンチ／熱暴走検出・保護技術に 関する研究

研究課題番号 (16360138)

平成16年度～平成17年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))

研究成果報告書

平成18年3月

研究代表者 早川 直樹

(名古屋大学大学院工学研究科助教授)

はしがき

本報告書は、平成16年度～17年度の2年間にわたって文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(研究課題番号16360138)の交付を受け、下記研究組織によって行った「伝導冷却高温超伝導線材のクエンチ/熱暴走検出・保護技術に関する研究」の研究成果報告書である。

研究組織

研究代表者：早川 直樹 (名古屋大学大学院工学研究科助教授)

研究分担者：大久保 仁 (名古屋大学エコトピア科学研究所教授)

研究分担者：加藤 克巳 (名古屋大学大学院工学研究科助手)

研究協力者：遠藤 奎将 (名古屋大学エコトピア科学研究所客員教授)

研究協力者：小島 寛樹 (名古屋大学エコトピア科学研究所助手)

研究協力者：野口 真希 (名古屋大学大学院工学研究科学生)

交付決定額 (配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成16年度	8,800	0	8,800
平成17年度	4,200	0	4,200
総計	13,000	0	13,000

研究発表

[I] 学術論文誌

- (1) H.Kojima, S.Noguchi, C.Kurupakorn, N.Hayakawa, M.Goto, N.Hirano, S.Nagaya, H.Okubo: "Temperature Dependence of Critical Current at 4.2K-55K of Conduction-cooled Bi2212/Ag Wires", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.2550-2553 (2005)
- (2) N.Hayakawa, S.Noguchi, C.Kurupakorn, H.Kojima, F.Endo, N.Hirano, S.Nagaya, H.Okubo: "Electrical and Thermal Characteristics of Bi2212/Ag HTS Coils for Conduction-cooled SMES", Journal of Physics: Conference Series (JPCS) (to be published)

[II] 国際会議

- (3) H.Kojima, S.Noguchi, C.Kurupakorn, N.Hayakawa, M.Goto, N.Hirano, S.Nagaya, H.Okubo: "Temperature Dependence of Critical Current at 4.2K-55K of Conduction-cooled Bi2212/Ag Wires", Applied Superconductivity Conference (ASC), 2MI08 (2004)
- (4) N.Hayakawa, S.Noguchi, C.Kurupakorn, H.Kojima, F.Endo, N.Hirano, S.Nagaya, H.Okubo: "Electrical and Thermal Characteristics of Bi2212/Ag HTS Coils for Conduction-cooled SMES", 7th European Conference of Applied Superconductivity (EUCAS), TU-P2-17 (2005)

- (5) H.Kojima, N.Hayakawa, S.Noguchi, F.Endo, N.Hirano, S.Nagaya, H.Okubo: "Thermal Runaway Characteristics of Bi2212 Coil for Conduction-cooled SMES", Applied Superconductivity Conference (ASC), 1LE05 (2006)

[III] 研究会

- (6) 野口真希, クハ°コンチャチャウ°ァン, 小島寛樹, 早川直樹, 遠藤奎将, 平野直樹, 長屋重夫, 大久保仁:「伝導冷却 SMES 用 Bi2212/AgHTS コイルにおける通電特性と熱伝導解析」, 電気学会超電導応用電力機器研究会, No. ASC-05-34 (2005)

[IV] その他の口頭発表

- (7) 野口真希, クハ°コンチャチャウ°ァン, 小島寛樹, 早川直樹, 後藤益雄, 平野直樹, 長屋重夫, 大久保仁:「伝導冷却 SMES 用 Bi2212/Ag 超電導線材の臨界電流特性」, 電気関係学会東海支部連合大会, No. 0-142 (2004)
- (8) 野口真希, クハ°コンチャチャウ°ァン, 小島寛樹, 早川直樹, 後藤益雄, 平野直樹, 長屋重夫, 大久保仁:「SMES 用伝導冷却 Bi2212/Ag コイルにおける臨界電流の温度依存性」, 電気学会全国大会, No. 5-028 (2005)
- (9) 野口真希, クハ°コンチャチャウ°ァン, 小島寛樹, 早川直樹, 遠藤奎将, 平野直樹, 長屋重夫, 大久保仁:「冷凍機伝導冷却 HTS コイルにおける通電特性および熱的特性」, 電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 376, pp. 277-278 (2005)
- (10) 野口真希, クハ°コンチャチャウ°ァン, 小島寛樹, 早川直樹, 遠藤奎将, 平野直樹, 長屋重夫, 大久保仁:「伝導冷却 SMES 用 Bi2212/Ag HTS コイルにおける熱暴走特性」, 電気関係学会東海支部連合大会, No. 0-170 (2005)
- (11) 野口真希, 中野俊一, 小島寛樹, 早川直樹, 遠藤奎将, 平野直樹, 長屋重夫, 大久保仁:「伝導冷却 SMES 用 Bi2212/Ag コイルにおける熱暴走特性と熱伝導解析」, 電気学会全国大会, No. 5-003 (2006)
- (12) 小島寛樹, 野口真希, 早川直樹, 遠藤奎将, 平野直樹, 長屋重夫, 大久保仁:「伝導冷却 SMES 用高温超電導コイルにおける熱暴走検出・状態監視に関する考察」, 2006 年度春季低温工学・超電導学会, 1C-p01 (2006)

研究成果による工業所有権の出願・取得状況

工業所有権の名称: 超電導コイルの状態監視装置, 超電導コイルの監視基準作成方法及び超電導エネルギー貯蔵装置

発明者名: 早川直樹, 小島寛樹, 大久保仁, 平野直樹, 長屋重夫

権利者名: 早川直樹, 小島寛樹, 大久保仁, 平野直樹, 長屋重夫

工業所有権の種類・番号: 特願 2006-88362

出願年月日: 2006 年 3 月 28 日

目次

第1章 緒論	1
1.1 超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)の開発意義.....	1
1.1.1 SMES システムの基本構成.....	2
1.1.2 SMES の特徴および適用範囲.....	2
1.2 超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)の開発状況.....	4
1.2.1 SMES 開発国家プロジェクト.....	6
1.2.2 内外の SMES 開発状況.....	8
1.2.3 高温超電導 SMES と冷凍機伝導冷却技術.....	12
1.3 本研究の目的および内容.....	16
【第1章の文献】	17
第2章 LHe 伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルにおける 臨界電流の温度依存性	19
2.1 まえがき	19
2.2 実験方法	20
2.2.1 Bi 2212/Ag コイルサンプル.....	20
2.2.2 コイルサンプルの配置.....	20
2.2.3 実験回路および実験方法.....	22
2.3 実験結果	22
2.3.1 常伝導領域の発生・伝搬過程.....	22
2.3.2 臨界電流の温度依存性.....	24
2.4 熱伝導解析による検討.....	27
2.4.1 解析モデル.....	27
2.4.2 解析結果および実験結果との比較検討.....	31
2.5 まとめ.....	33
【第2章の文献】	34
第3章 冷凍機伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルにおける 臨界電流の温度依存性	35
3.1 まえがき	35
3.2 実験方法	36
3.2.1 4.2 K GM 冷凍機.....	36
3.2.2 コイルサンプルの配置.....	36
3.2.3 実験回路および実験方法.....	39
3.3 実験結果	39
3.3.1 常伝導領域の発生・伝搬過程.....	39
3.3.2 臨界電流の温度依存性.....	41

3. 4	熱伝導解析による検討	41
3. 4. 1	解析モデル	41
3. 4. 2	解析結果および実験結果との比較検討	43
3. 5	まとめ	46
【第3章の文献】		47

第4章 冷凍機伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルにおける

熱暴走特性およびクエンチ・熱暴走検出技術

4. 1	まえがき	49
4. 2	連続通電による熱暴走特性	50
4. 2. 1	実験方法	50
4. 2. 2	実験結果	50
4. 2. 3	熱伝導解析による結果との比較検討	52
4. 3	実器運転パターンを模擬した通電による熱暴走特性	59
4. 3. 1	負荷変動補償を模擬した通電パターン	59
4. 3. 2	実験結果	59
4. 3. 3	熱伝導解析による結果との比較検討	61
4. 4	熱暴走・クエンチ検出技術に関する考察	65
4. 4. 1	熱暴走検出に関する評価パラメータの考察	65
4. 4. 2	熱暴走検出の具体例	66
4. 5	まとめ	71
【第4章の文献】		72

第5章 総括

5. 1	SMES の技術開発	73
5. 2	本研究で得られた成果および知見	74
5. 2. 1	LHe 伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導 コイルサンプルにおける臨界電流の温度依存性	74
5. 2. 2	冷凍機伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルにおける 臨界電流の温度依存性	74
5. 2. 3	冷凍機伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルにおける 熱暴走特性および検出技術	75

第1章 緒論

1.1 超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)の開発意義

電気エネルギーは比較的容易に制御可能で、かつ安全性の高いクリーンなエネルギーである。また大量のエネルギー輸送が瞬時にでき、他の熱源・動力などのエネルギーへの変換技術も確立されていることから、我々の生活は元より各種産業に至るまで、現代社会において重要な役割を果たしている^[1]。我が国の電力需要は電力化率で約4割程度であり、高度成長期にみる大幅な伸びはないものの今後も着実に増加し続けてくと予想されている^[2]。

このように電気エネルギーは極めて社会性が強い性格を有しているため、電力システムには高い信頼性が求められ、良質な電気エネルギーを安定的に供給する必要がある。特に近年の電力システムにおける情勢として、電力自由化の進展や分散電源の導入による電気エネルギー供給主体の多様化などを受け、電力供給の安定は緊急を要する課題である。また、発電設備を有効に利用することにより、電気エネルギーの低価格化を考えることは、近年叫ばれている環境への配慮の観点からも重要である。

これらの社会的需要に答えるべく検討されている次世代技術の一つとして、超電導エネルギー貯蔵装置(Superconducting Magnetic Energy Storage : SMES)がある。SMESは超電導コイルに直流電流を通電し、電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵する装置である。高効率、高速応答性、長寿命などの利点があるため、電力設備の利用率向上や電力システムの安定度向上などに貢献し得ると考えられている。SMESの研究開発は近年積極的に行われており、早期実用化が期待されている装置である^[3,4]。

1. 1. 1 SMES システムの基本構成

SMES は超電導コイルの他に、クライオスタット、冷却システム、交直変換装置、クエンチ保護システム、直流遮断器、永久電流スイッチなどから構成される。その基本構成と基本動作原理を Fig.1.1 および Fig.1.2 に示す^[5,6]。SMES は直流電流で電気エネルギーを貯蔵するので、実際の電力系統と接続するために交直変換装置を必要とする。永久電流スイッチによって、超電導コイルが電力系統との間でスイッチングされ、超電導コイルの動作が充電モード、貯蔵モード、放電モードと切り替えられる。クエンチ保護システムは、コイルの超電導状態が突然破壊されて常電導状態となってしまったときに、放電抵抗によって電流を急速放電することで超電導コイルを保護するためのものである。また冷却システムとしては、自然対流を利用した液体ヘリウムを用いる浸漬冷却方式や、導体内部にヘリウムを強制的に流す強制冷却方式^[7]の他に、近年注目されている、冷媒を用いない冷凍機による伝導冷却方式がある。冷凍機伝導冷却方式については、後の 1.2.3 項で詳しく述べる。

1. 1. 2 SMES の特徴, 適用範囲

以上に述べた基本構成から、SMES の特徴として次の事柄が挙げられる^[8]。

- ①電気エネルギーを電流の状態のコイルに磁気エネルギーとして保存するため、変換の際の損失が少なく貯蔵効率が 90%以上と高い。
- ②パワーエレクトロニクス技術を用いた瞬時の大電力の出し入れが可能であり、1 秒以下での応答が必要な瞬時電圧低下補償などへの適用も期待される。
- ③超電導コイルが極低温に維持されるため熱的劣化は無く、また化学反応を利用していないため電池のような化学的な劣化も無い。このことから高頻度の使用条件下でも長耐用年数が期待できる。

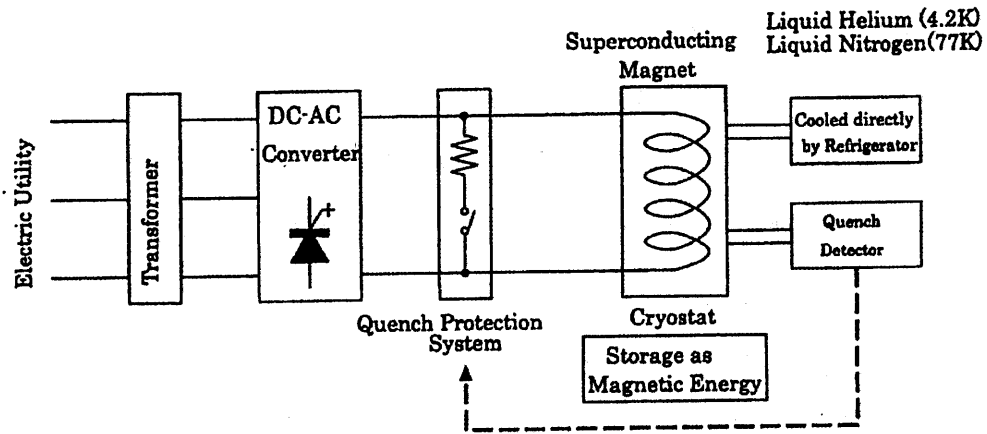


Fig.1.1 Fundamental structure of SMES^[9].

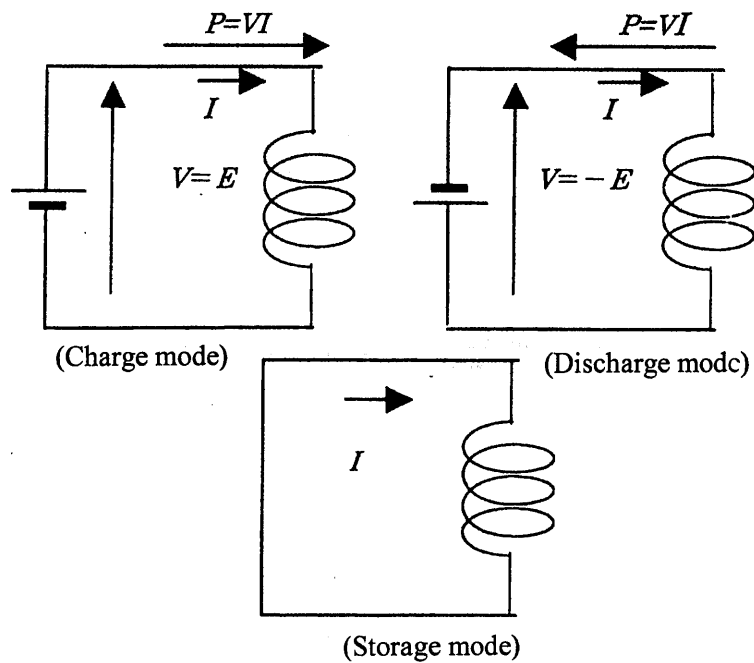


Fig.1.2 Principle of SMES^[10].

例えば、電気エネルギーを一旦化学エネルギーに変換し貯蔵する NaS 電池やレドックスフロー電池などの二次電池は、エネルギー変換に伴う損失などにより電力貯蔵効率が低く、瞬時の大電力の出し入れには適していない。その反面、電池と比較すると SMES に貯蔵されるエネルギー形態は、磁気エネルギーが電流の形で保存されているため変換による損失は存在せず電力貯蔵効率が低い。またエネルギー変換に伴う時間が必要ないため、瞬時の大電力の出し入れが可能であり電池のような化学的な劣化も無い。

これらの特徴を踏まえ、現在検討されている SMES の規模と用途および代表的な設置箇所について Fig.1.3 および Table 1.1 にそれぞれ示す^[9]。現在実用化が検討されているのは主に系統制御用 SMES であり、このうち最も規模が小さいものは 10Wh~1kWh の瞬時電圧低下補償用のものである。これは半導体製造工場や製紙工場などにおいて、落雷等による瞬時電圧低下が大きな損害をもたらすことを防ぐためのものである^[10]。貯蔵容量が 1kWh~1MWh の SMES は、系統安定化や負荷変動補償、および周波数調整など、一般的な系統制御としての用途が検討されている。これらの系統制御用 SMES よりもさらに規模が大きなものとして、発電設備の高効率化を可能とする貯蔵容量 10MWh 以上の負荷平準化用 SMES も検討されているが、貯蔵容量が非常に大きいことから技術的課題も多い^[11]。

1.2 超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)の開発状況

SMES の電力貯蔵装置としての基本的な考え方は 1969 年に九州大学から提案され、その後 1970 年にウィスコンシン大学において大規模 SMES の研究が開始された^[12]。当初はいわゆる負荷平準化用として、貯蔵容量にして GWh 級の揚水発電所を代替する大型の SMES が考えられていた。我が国での SMES の実験的研究は高エネルギー加速器研究機構と大阪大学のグループおよび産業技術総合

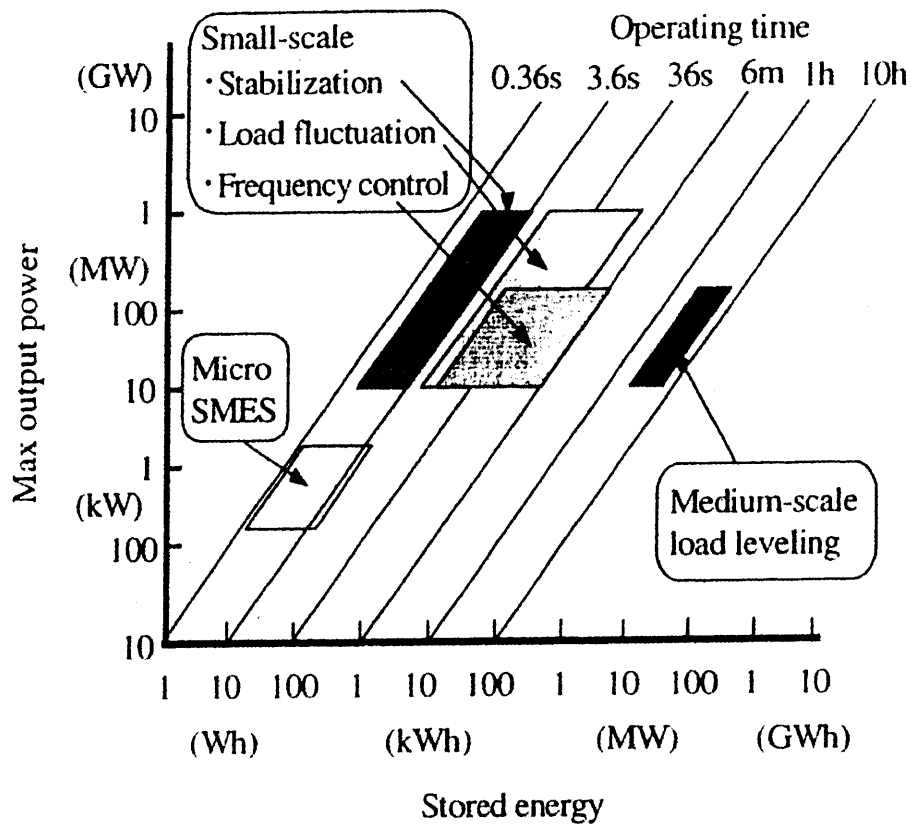


Fig.1.3 Applied area and scale of SMES^[13].

Table 1.1 Typical application of SMES^[12].

Classification	Objective	Application
Power system control	Bridging instantaneous voltage dips	Semiconductor plant
	Power system stabilization	Power supply system
	Load fluctuation compensation	Customers
	Frequency control	Backbone system
Load leveling	Load leveling	Customers

研究所と早稲田大学のグループにより 1975 年頃から開始された。その後、GWh 級 SMES の概念設計が、我が国の研究機関や企業においても開始された^[13]。しかしながら、GWh 級 SMES では超電導コイルが直径 100 m 級にもなり、これを岩盤に埋め込み、電磁力に対する支持構造を経済的に実現するのは難しいと考えられていた。1980 年代に入ると、国や大学等において種々の応用における SMES の基本特性や導入効果が検討され、数 10MJ 級の小型 SMES を電力系統安定化装置として導入することの有用性が示されてきた。また近年では、従来の金属系低温超電導体に比べてより高磁界化・コンパクト化の可能性がある、運転温度も広く設定できる高温超電導体を用いた SMES も検討されている^[14]。以下に我が国および諸外国における SMES の開発状況を示す。

1. 2. 1 SMES 開発国家プロジェクト

我が国における SMES 開発は、NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）から国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)が受託し、これに学識者・電力会社・メーカーが参画して推進されている。本格的な SMES 開発の第一歩として、1991 年から 8 ヶ年計画で Phase I 「超電導電力貯蔵システム要素技術調査」と称するプロジェクトが行われた^[15]。これは 20MW/100kWh の SMES を対象にした初期の技術的な見通しを得るためのもので、動作電流 20kA での安定な繰り返し運転に成功した。

しかしながらその結果、コスト低減化技術が重要な課題となり、引き続き 1999 年度から 5 ヶ年計画でこれを主眼に置いた Phase II 「超電導電力貯蔵システム技術」と称するプロジェクトが行われた。このプロジェクトでは、系統安定化用 SMES (100MW, 15kWh) と負荷変動補償・周波数制御用 SMES (100MW, 500kWh) の 2 つに的を絞り、既存の競合技術と比較して有利な製作費・経費での実現性を評価することを目的としている。これらのコイルの諸元を Table 1.2 に示す^[16]。この結果、①目標コストの設定、②システム詳細設計および導体試作・性能試

Table 1.2 Specifications of coils for SMES^[20].

	Power system stabilization	Load fluctuation compensation/ Frequency control
Conductor	NbTi/Al	NbTi/Cu
Max stored energy	2.9 MJ	10.5 MJ
Coil size	Inner diameter	1100 mm
	Outer diameter	400 mm
	Height	520 mm
Number of turns	16X24	24X24
Current	9.6 kA	10 kA
Voltage	430 V	115 V
Max magnetic field	5.66 T	4.8 T

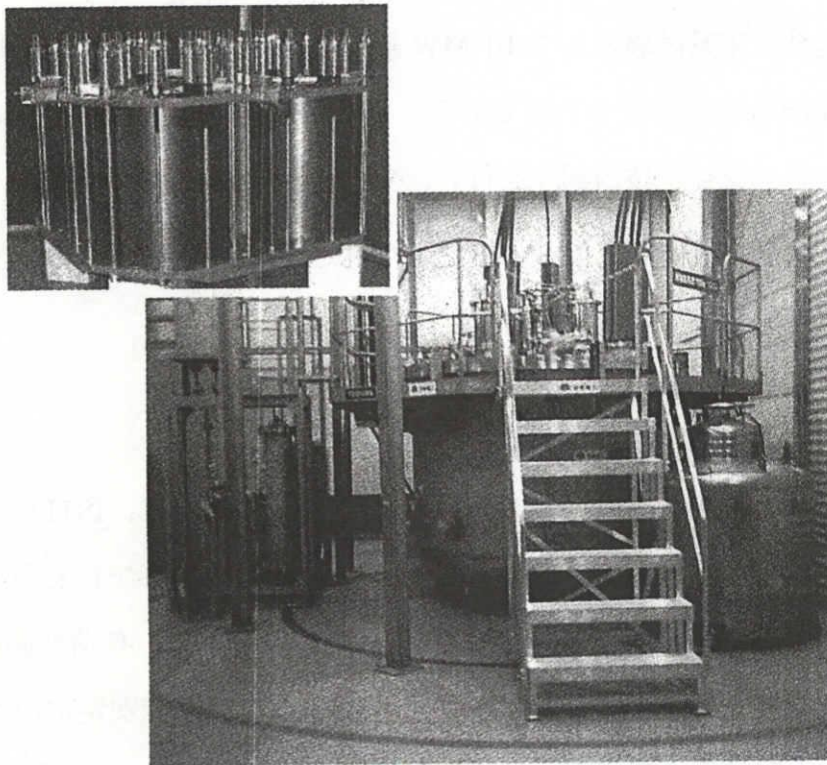


Fig.1.4 5MW-5MJ SMES^[6].

験に基づくコスト分析，③最適な超電導コイル方式（導体とコイル形状・配置方式）の決定がなされた．このプロジェクトにおいて，高温超電導体を使用した SMES の技術調査も行われ，酸化物系 SMES コイルによるシステム開発によってさらなるコスト低減，運用性向上の可能性が期待できることがわかった^[8]．

NEDO は，これらを踏まえて系統制御用 SMES の早期実現のために，2004 年度から 4 ヶ年計画の実用化システム技術確立を図る PhaseⅢ「超電導電力ネットワーク制御技術開発」と称するプロジェクトを打ち出した．このプロジェクトでは，SMES システム構成技術の開発として以下項目について開発を進めている．

- ① 出力 10 MW 級，2 万円/kW 以下の大容量電力変換システム
- ② 5 T を超える高磁場で使用可能な酸化物系 SMES コイル
- ③ 平均故障間隔 2 万時間以上の高信頼性極低温冷凍機
- ④ 耐電圧 DC 15kV 以上の高耐電圧伝導冷却電流リードシステム

また，実系統連系試験として 10 MW 級のパイロットシステムを設計製作し，システム性能の検証を行う予定である．さらにこれらの成果を踏まえてシステムコーディネーション技術開発を行い，負荷変動・周波数調整用 SMES として 14 万円/kW 以下，系統安定化 SMES としては 5 万円/kW 以下へのコスト低減を目標としている．

1. 2. 2 内外の SMES 開発状況

以上に述べてきたように，我が国における SMES 開発は，ISTEC が中心となり，電力会社およびメーカーがプロジェクトに参画する形で行われている．前項の PhaseⅡ「超電導電力貯蔵システム技術」においては，負荷変動補償・周波数制御用 SMES のコスト低減技術開発を中部電力が，系統安定化用 SMES のコスト低減技術開発を九州電力が実施した結果，SMES 実用化の要素技術が確立された^[8]．ここでは，国内における SMES 開発動向として，中部電力および九州電力の例について述べる．また，海外の主な SMES 開発についても触れる．

中部電力では、過去に低温超電導体 NbTi を用いた 1MJ の SMES「夢磁界 1 号」を開発し、負荷変動や系統安定度への適用可能性について、検討を行ってきた^[17]。近年においては、同じ LHe 浸漬冷却方式を採用した NbTi による出力 5MW、出力時間 1s の性能を持つ瞬時電圧低下補償用の SMES をシャープ亀山工場に設置し、フィールド試験を開始している。この概観図を Fig.1.4 に示す^[6]。これは、超電導電力機器が電力機器として日本で初めて実使用されたものである。寛政変電所超電導試験センターでは、強制冷却方式を採用した NbTi による 10.5 MJ の負荷変動補償・周波数調整用 SMES のモデルコイルおよび周辺装置の製作・組み立てを行い、性能検証試験が行われ、世界初の 10 kA 級充放電繰り返し通電などの成果が得られた^[11]。

また、高温超電導体である Bi2212 線材を開発し、これを用いた瞬時電圧低下補償用 10MJ の SMES も開発中である。同線材は 20 万 A/cm² 以上の高い臨界電流密度を有し、磁界による特性も非常に良い。この断面図および諸元を Fig.1.5^[16] および Table1.3^[17] にそれぞれ示す。また、この Bi2212 超電導線と Bi2223 テープ線材、金属系超電導線材の臨界電流密度特性の磁場依存性について Fig.1.6^[17] に示す。これを用いたコイルを製作することで、高磁界設計によるコンパクト化高温超電導 SMES の可能性が検討されている^[18-20]。製作されたコイルの諸元および概観図を Table1.4^[21] および Fig.1.7^[22] にそれぞれ示す。漏洩磁場の低減とエネルギー密度の向上を図るために、配置方式としてマルチポール方式を採用している。

九州電力では、系統制御用 SMES 開発に先立ち 1994 年から 1kWh/1MW のモデル機 ESK(Experimental SMES of Kyushu Electric Power)の開発を開始した^[23]。超電導コイルは NbTi 燃線導体を使用しており、6 個の要素コイルをトロイド型に配置することで漏れ磁界を低減している。1998 年からは同社の今宿総合試験センターにおいて実証試験が 2003 年までの期間で行われた。基本的な性能試験の

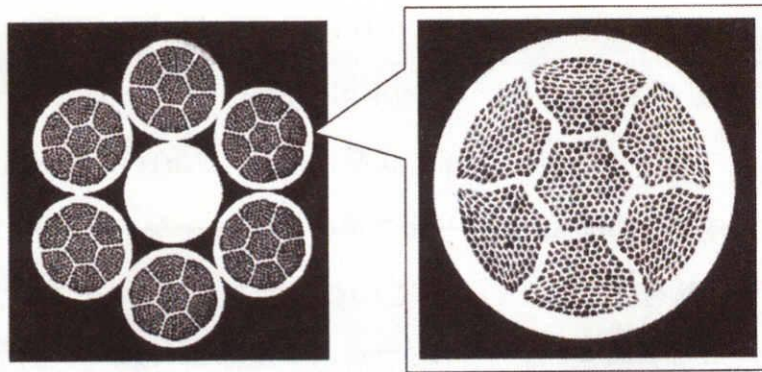


Fig.1.5 Cross sectional view of Bi2212/Ag^[20].

Table 1.3 Specifications of Bi2212/Ag^[21].

Diameter	1.01 mm
Number of filament	889
Ag rate	2.7
J_c (4.2K 10T)	200,000 A/cm ²
I_c (4.2K self-field)	1062 A

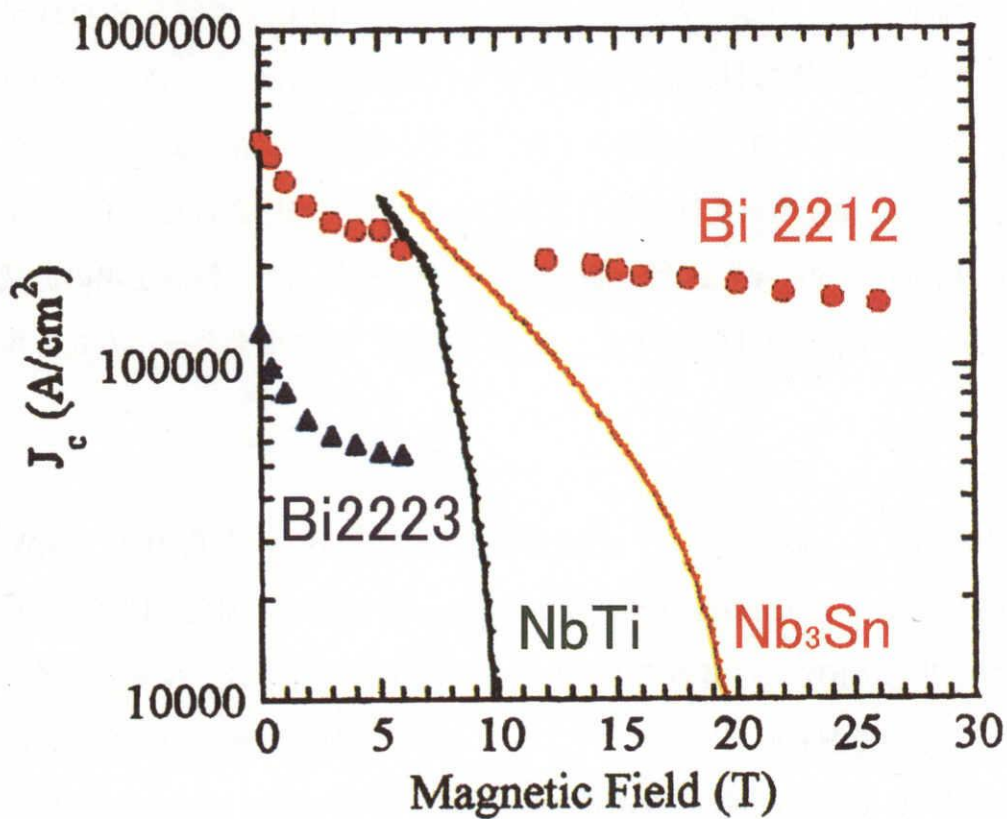


Fig.1.6 J_c as a function of magnetic field^[21].

Table 1.4 Specifications of the HTS coils for SMES^[25].

		4 unit coils (last time)	18 unit coils (this time)
Coil Type		Laminated single solenoid coil	
Coil Size	Inner Diameter	380 mm	380 mm
	Outer Diameter	700 mm	700 mm
	Height	127 mm	554 mm
Number of Turns		6 × 49	6 × 49
Voltage		625 V	2,500 V
Current		500 A	500 A
Inductance		0.72 H	7.87 H
Stored Energy		90 kJ	984 kJ

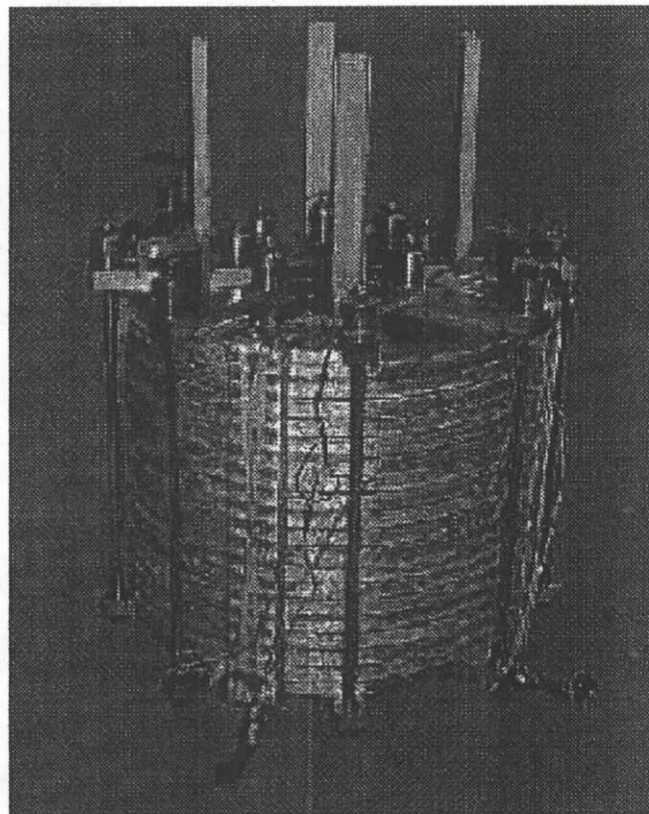


Fig.1.7 Appearance of the stacked HTS coils of 1MJ class for SMES^[26].

他にも、負荷変動補償動作、長期連続運転試験、過負荷運転試験、クエンチ試験など SMES を実系統に導入するためのデータが取得されている。

海外における SMES 開発の内、比較的大きな規模のものとしては、Bonneville Power Administration (BPA)の 30MJ/12MVA SMES の実運転や、Alaska Municipal Light and Power(ML&P)の 1.8GJ/50MW SMES の理論検討等がある^[24,25]。

海外における最近の SMES 開発として主なものを Table1.5 に示す。米国では AMSC 社、GE Industrial System 等によって 3MJ 規模の μ -SMES が商品化されている^[26]。また、欧州においては ACCEL によって 2MJ 規模の SMES が開発されている^[27]。ドイツの FZK では、TESLA(TeV Superconducting Linear Accelerator) プロジェクトが進行しており、237kJ の SMES を含む 25MW の電源が開発されている。イタリアの Ansaldo 社による 50kJ SMES を用いた HOTSMES プロジェクトでは、高速放電における超電導保持能力を中心とした評価を目的とし、Bi2223 テープ線材を用いたコイルを伝導冷却で運転する計画である。またドイツの Trithor による HIPOLITY プロジェクトでは、30 kJ, 40 kW の SMES によってシステムコストの検証や電圧レベル・クエンチ検出の検討を目的とし、Bi2223 テープ線材を用いたコイルを 25 K に伝導冷却して運転する計画である^[28-36]。

1. 2. 3 高温超電導 SMES と冷凍機伝導冷却技術

NEDO による国家プロジェクトの Phase II では、酸化物系の線材を用いた高温超電導 SMES の技術調査も対象としている。現状では Bi 系線材が機械特性、通電特性等の面から SMES コイル化が可能である。また、次世代 Y 系線材は磁界特性が Bi 系線材に比べて優れていることからコスト低減ポテンシャルが大きいと考えられている^[37]。SMES に酸化物系高温超電導線材を適用した場合、常電導転移が穏やかであり熱的挙動の時定数が長いことなどから、SMES の運用性が大きく向上する可能性が期待できる。また 20 K 以下の低温で使用した場合、酸化物系高温超電導線材は金属系超電導体よりも優れた磁界特性を有するため、

Table 1.5 Development of SMES in foreign countries^[28-36].

Country	Organisation	Type	Stored energy	Output
USA	B&W Tech.	LTS	1.8 MJ	-
USA	IGC	LTS	6MJ	0.45 MW
USA	ASC	LTS	1-3 MJ	0.5-3 MW
USA	CAPS	LTS	100 MJ	50 MW
Germany	FZK	LTS	0.237 MJ	25 MW
Germany	FZK	LTS	0.416 MJ	80 kW
Germany	ACCEL	LTS	2.1 MJ	800 kW
Italy	ELETTRA	LTS	4 MJ	1.2 MW
Germany	Trithor	HTS	0.030 MJ	40 kW
Germany	ACCELL	HTS	0.15 MJ	20 kW
Finland	Tampere University	HTS	0.01 MJ	-
Italy	Ansaldo	HTS	0.05 MJ	-
France	NEXANS	HTS	0.8 MJ	-
France	Delegatin	HTS	0.50 MJ	-
Poland	Elecyrotechnical Institute In warsaw	HTS	0.0058 MJ	-
Korea	KERI	HTS	3.0 MJ	750 kW
Korea	KERI	HTS	0.60 MJ	-
China	CAS	HTS	0.010 MJ	-
Israel	Bar-Ilan University	HTS	0.0010 MJ	5 kW

機器のコンパクト化，さらには低コスト化を図ることができる．さらに冷凍機による伝導冷却方式を採用することで液体ヘリウムなどの冷媒を用いる必要性から解放され，かつ運転温度を自由に設定できることから，近年この冷却方式が注目されている．先に述べた SMES 開発国家プロジェクトにおいても，Phase III で設計されている 100 MW 級 SMES に伝導冷却方式の適用が検討されている．

現在，冷凍機には GM (Gifford・McMahon) サイクルを用いた GM 冷凍機^[38]が広く用いられている．伝導冷却方式では，超電導コイルと常温部との温度差が生む電流リードからの侵入熱が支配的になるが，熱侵入を大幅に軽減する超電導電流リードを電流リードとして採用することで超電導コイルを 4 K レベルにまで冷却することが可能となった^[39,40]．Fig.1.8^[42]に(a)従来の超電導コイルと(b)冷凍機伝導冷却式超電導磁石の構成を比較して示す．同図(a)に示すように，従来の超電導磁石は液体ヘリウム中に超電導コイルを浸漬させており，2 段 GM 冷凍機による 2 重のサーマルシールドによって冷却されている．一方，伝導冷却方式では，同図(b)に示したように超電導コイルは真空容器中に設置され，伝熱板を介した熱伝導によって 4 K レベルに冷却される構造となっており，全体的にコンパクト化されている．また，Table 1.6^[38]に示すように，高温超電導電流リードと銅製電流リードを比較すると，熱侵入が 10 分の 1 以下になっていることがわかる．NEDO による国家プロジェクトの Phase II において，冷凍機伝導冷却高温超電導コイルの様々な温度，磁界下での通電特性が取得された．しかしながらこの結果，伝導冷却方式特有の問題点として，冷凍機の有する冷凍能力と超電導コイルにおける発熱による熱的安定性が損なわれ，熱暴走が発生する可能性が危惧された．例えば，直流電流の連続通電時，冷却能力よりも超電導コイルの発熱が大きい場合，温度が上昇し続け最終的にはコイルの焼損に至る．このような熱暴走特性を把握し，検出することによって超電導コイルを焼損から保護する技術を確立することが現在必要不可欠になっている^[41-43]．

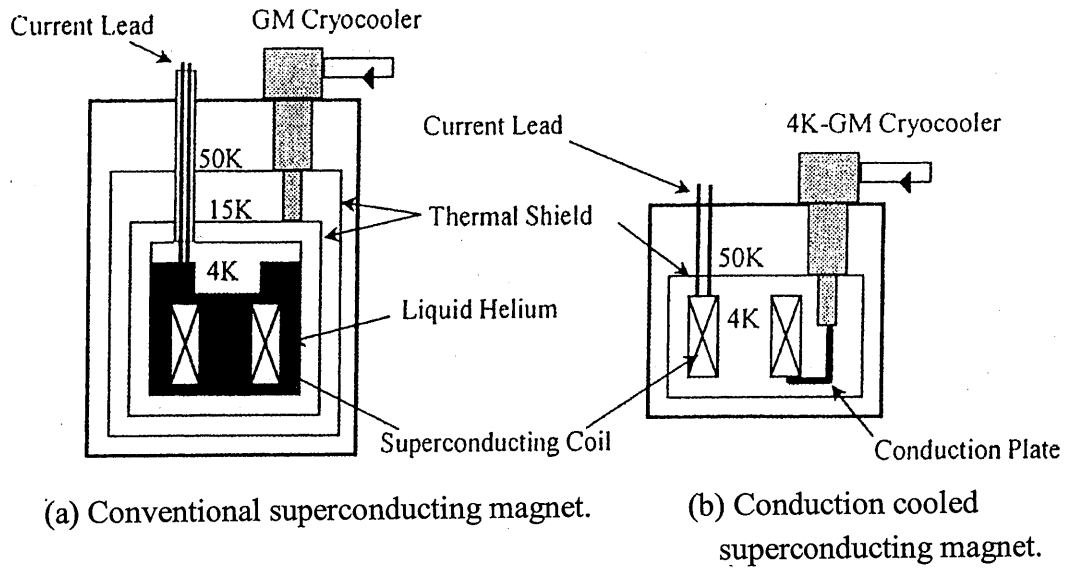


Fig.1.8 Construction of superconducting magnet cooled by GM cryo-cooler^[33].

Table 1.6 Example of heat leakage to 4 K level for conduction cooled superconducting magnet^[33].

Material of current lead	Cu	HTS
Radiation, conduction loss	0.4W	0.4W
Current leads loss	4.8W	0.4W
Total loss	5.2W	0.8W

1.3 本研究の目的および内容

以上に述べたように、高温超電導 SMES では冷凍機による伝導冷却方式が採用されているが、大電流通電時において熱暴走を起こす可能性が懸念されている。本研究では伝導冷却状態における超電導コイルのクエンチ・熱暴走特性に着目し、その電氣的・熱的特性について基礎的な検討を行うとともに、クエンチ・熱暴走の検出技術への適用可能性について検討することを目的とする。本報告書は 5 章から構成されており、第 2 章以降の各章の概要は以下の通りである。

第 2 章では、これまで SMES への適用が検討されてきた Bi2212/Ag 超電導線材を使用したコイルサンプルを液体ヘリウム (LHe) によって伝導冷却して通電試験を行い、臨界電流の温度依存性について検討を行う。さらに、コイルサンプルの形状および冷却構造を模擬した熱伝導解析による実験結果の検証も行う。

第 3 章では、冷凍機を用いた伝導冷却実験系において、第 2 章と同様の Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルに通電実験を行い、臨界電流の温度依存性について検討する。さらに、コイルサンプルにおける発熱の磁界依存性および冷凍機の冷凍能力を考慮した熱伝導解析による実験結果の検証を行う。

第 4 章では、第 3 章と同様の冷凍機を用いた伝導冷却実験系において、連続通電および実器 SMES における負荷変動補償パターンを模擬した通電を行い、それぞれの通電における熱暴走特性について検討する。また、熱伝導解析によって実験結果を検証し、熱暴走発生の境界レベルについての検討を行う。さらにこれらを踏まえ、伝導冷却超電導コイルにおけるクエンチ・熱暴走の検出技術についての考察を行う。

第 5 章では、本報告書を総括し、本研究で得られた成果をまとめる。

[第 1 章の文献]

- [1] 資源エネルギー庁:「電気事業便覧 (平成 17 年度版)」, pp.266-267 (2005)
- [2] 資源エネルギー庁:「総合エネルギー統計 (平成 16 年度版)」, pp.284-367 (2005)
- [3] A.Ichinose, et al. : "Reserch and Development of High-Tc SMES", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.1947-1950 (2004)
- [4] S.Nagaya, et al. : "Development of SMES for Power System Control", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.14, No.2, pp.693-698 (2004)
- [5] 仁田:「ここまで来た大型電力設備の性能と将来展望」, J. Plasma Fusion Res. Vol.80, No.7, pp.578-581 (2004)
- [6] 佐藤:「電力システム工学」, 丸善出版社, pp.176-236 (2002)
- [7] R.W.Boom and H.A.Peterson: "Superconductive Energy Storage for Power Systems", IEEE Transactions on Magnetics, MAG-8, p.701 (1972)
- [8] 電気学会:電気学会技術報告, No.946, pp.43-52 (2004)
- [9] 堤:「SMES コスト低減の必要性」, 低温工学, 37, No.3, p.92 (2002)
- [10] 中部電力株式会社:技術開発ニュース, 108, pp.5-7 (2004)
- [11] 電気学会:電気学会技術報告, No.897, pp.30-31 (2002)
- [12] F.Irie and K.Yamafuji: "Some Fundamental Problems with Superconducting Energy Storages", Proc.IIR A1/2 Meeting, p.411 (1969)
- [13] 「超電導エネルギー装置の開発動向」, 電学技報, II 部, No.166 (1983)
- [14] M.Minami, et al.: "Reserch and Development of Superconducting Magnetic Energy Storage System", Physica C, 357-360, pp.1323-1326 (2001)
- [15] 山本:「SMES プロジェクトの研究概要」, 低温工学, 33, No.7 p.454 (1998)
- [16] 電気学会:電気学会技術報告, No.800, pp.35-46 (2000)
- [17] 藤田:「SMES による安定度向上効果の実験的検証」, 平成 2 年電学全大, p.946 (1993)
- [18] K.Koyanagi et al. "Design of a High Energy-density SMES Coil with Bi2212 Cables", 19th International Conference on Magnet Technology, WEA09PO06 (2005)
- [19] S.Nagaya, et al.: "Development of MJ-Class HTS SMES for Bridging Instantaneous Voltage Dips", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.14, No.2, pp.770-773 (2004)
- [20] 平野:「高磁場コンパクト高温超電導 SMES の開発」, 2001 年春季低温工学・超電導学会講演概要集, p.157
- [21] 長屋:「MJ 級高温 SMES 用コイルの製作と冷却特性」, 平成 15 年電学全大, p.273 (2003)
- [22] K.Shikimachi, et al.: "Development of MVA Class HTS SMES System for Bridging Instantaneous Voltage Dips" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.1931-1934 (2005)
- [23] 堤:「九州電力における『超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)の開発』」, 電気設備学会誌, Vol.21, No.8 , p.693 (2001)
- [24] J.D.Rogers, et al.: "Operation of the 30MJ Superconducting Magnetic Energy Storage System in the Bonneville Power Administration Electrical Grid", IEEE Transactions on Magnetics, MAG-21, No.2 (1985)

- [25] S.F.Kral, et al.: "Superconducting Power Delivery Systems for Transmission and Distribution Applications", Proc. of the American Power Conf. 57th Annual Meeting, Vol.2, pp.1520-1523 (1995)
- [26] L.Borgard, "Grid voltage support at your fingertips" , Transm. Distrib. World(USA), Vol.51, No.9, pp.16-18 (1999)
- [27] H.Salbert, et al.: "2MJ SMES for an Uninterruptible Power Supply", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.10, No.1, pp.777-779 (2000)
- [28] R.Mikkonen: "Highlights of SC Power Applications in Europe", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.12, No.1, pp.782-787 (2002)
- [29] T.Stephanblome: "HTS-Micro-SMES for Power Quality Improvement", in Proc. EUREL. Munich: Quality Power Supply (2000)
- [30] J.Paasi: "Stability and Quench of a HTS Magnet with Hot Spot", Supercond. Sci. Technol., vol.13, pp.1-6 (2000)
- [31] J.F.Picard, et al.: "Technologies for High Field HTS Magnets", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.535-540 (1999)
- [32] B.Bellin, et al. "Cryogenic Design of a 800 kJ HTS SMES", 7th European Conference on Applied Superconductivity, TH-P2-18 (2005)
- [33] G.Wojtasiewicz, et al. "HTS Magnet for 5.8 kJ SMES System", 7th European Conference on Applied Superconductivity, TH-P2-20 (2005)
- [34] W-S.Kim, et al. "3MJ/750kVA SMES System for Improving Power Quality", 19th International Conference on Magnet Technology, WEA09P002 (2005)
- [35] H.J.Kim, et al. "Design of HTS Magnets for a 600 kJ SMES", 19th International Conference on Magnet Technology, THA09P005 (2005)
- [36] Q.Wang, et al. "Development of 10 kJ Conduction-Cooled High Temperature Superconducting Magnet", 19th International Conference on Magnet Technology, WEA09P001 (2005)
- [37] K.Shikimachi et al. "Electromechanical Studies of YBaCuO Formed on Hastelloy Substrates with IBAD Buffer Layers for Coil Applications", 7th European Conference on Applied Superconductivity, TH-P4-37 (2005)
- [38] M.O.Hoenig: "Design Concepts for a Mechanically Refrigerated 13 K Superconducting Magnet System", IEEE Transactions on Magnetics, MAG-19, pp.880-883 (1983)
- [39] 栗山:「冷凍機伝導冷却式超電導磁石の開発」, 低温工学, Vol.37, No.1, pp.18-21 (2002)
- [40] 平野:「SMES用酸化物電流リードの開発」, 低温工学, Vol.39, No.3, pp.85-89 (2004)
- [41] A.Ishiyama, et al. : "Transient Thermal Characteristics of Cryocooler-Cooled HTS Coil for SMES", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.1879-1882 (2005)
- [42] H.Miyazaki, et al. : "Thermal Runaway of a 1 T Cryocooler-Cooled Oxide Superconducting Pulsed Coil in Ac Operation", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.1663-1666 (2005)
- [43] 田崎:「伝導冷却超電導コイルの熱的安定性評価」, 低温工学, Vol.40, No.10, pp.404-419 (2005)

第2章 LHe 伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプル における臨界電流の温度依存性

2.1 まえがき

前章で述べたように，Bi2212/Ag などの高温超電導体は 20 K 以下の低温領域において優れた磁界特性を示し，これを SMES に適用することで更なるコンパクト化・低コスト化が期待されている．高温超電導体を用いた SMES には，冷却方式の一つとして冷凍機による伝導冷却方式が現在検討されている．しかしながら，伝導冷却 SMES の運転時において超電導コイルの発熱と冷凍機の有する冷却能力との熱的バランスが崩れて不安定になってしまう，いわゆる熱暴走の可能性があることが危惧されている^[1-4]．この熱暴走特性を把握するとともに，クエンチ・熱暴走発生時には早期にこれを検出し，超電導コイルを焼損から保護する技術を確立することが必要不可欠である．

そこで本章では，液体ヘリウム（LHe）を用いた伝導冷却状態を可能とする実験系を構築することにより，4.2 K～55 K の温度範囲において，クエンチ・熱暴走特性に関して重要なパラメータとなる Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルの臨界電流の温度依存性を取得する．さらに，コイルサンプルの形状および冷却構造をモデリングした熱伝導解析による実験結果の検証を行い，超電導コイルサンプルや伝導冷却板の有する比熱・熱伝導率などの熱的パラメータが臨界電流特性に及ぼす影響についての考察を行う．

2.2 実験方法

2.2.1 Bi2212/Ag コイルサンプル

Fig.2.1 および Table 2.1 に供試 Bi2212/Ag コイルサンプルの外観図および諸元をそれぞれ示す。供試コイルサンプルは、1層あたり 39~40 巻きの 4 層ソレノイド構造である。エポキシで含浸することによって電気絶縁された各層にはそれぞれ電圧タップを接続してあり、各層ごとの電圧分布を計測することが可能である。コイルサンプル最外層には厚さ 0.5 mm, 幅 9 mm, 24 枚の伝導冷却用高純度アルミニウム板（純度 99.99 %以上）が取り付けられており、これを介してコイルサンプルの巻き線部を伝導冷却することができる構造となっている。ほぼ同様な諸元のコイルサンプルを 3 つ製作し、それぞれコイルサンプル A, B, C とした。

2.2.2 コイルサンプルの配置

供試コイルサンプルの配置を Fig.2.2 に示す。アルミニウム容器内にコイルサンプルを配置し、最外層の冷却用アルミニウム板上部およびアルミニウム容器の底に温度センサをそれぞれ配置した。次にアルミニウム容器内をロータリーポンプおよびターボ分子ポンプで真空引きすることにより、容器内の圧力を 1×10^{-4} Pa に維持した。この状態でアルミニウム容器全体を LHe 中に浸漬することにより、アルミニウム容器とコイルサンプル最外層の伝導冷却用アルミニウム板を介して供試コイルサンプルを伝導冷却した。アルミニウム容器底部よりも下の高さで LHe の液面を制御することにより、供試コイルサンプルの周囲温度を 4.2 K~55 K の範囲で設定することを可能とした。

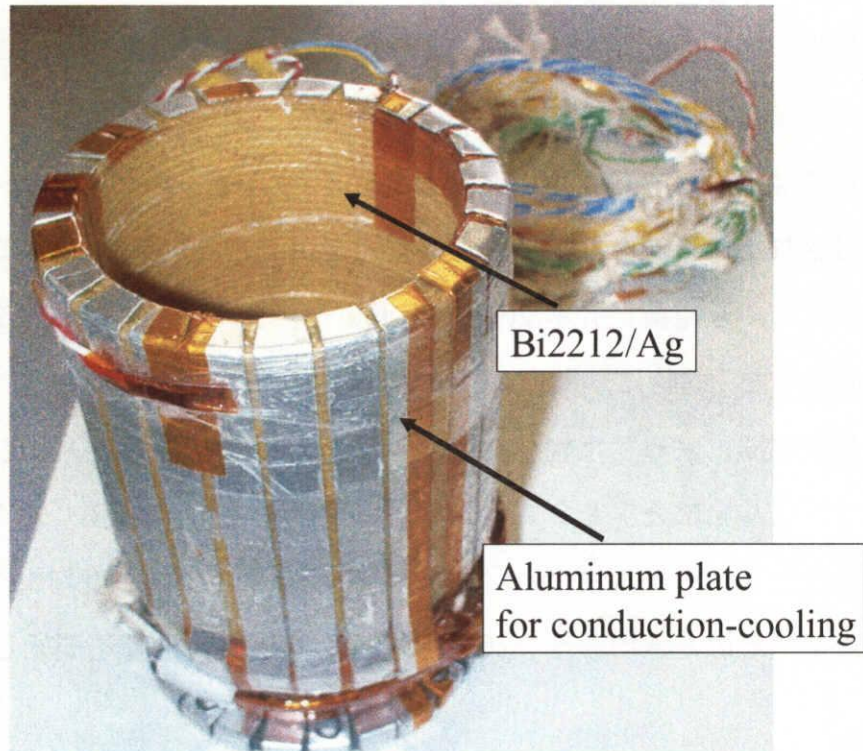


Fig.2.1 Bi2212/Ag coil sample.

Table 2.1 Specifications of Bi2212/Ag coil samples.

	Coil A, B	Coil C
Material	Bi2212/Ag	Bi2212/Ag
Ag rate (Ag/Bi2212)	3	3
Number of filament	127x7=889	127x7=889
Diameter of wire	1.02 mm	1.02 mm
Coil inner diameter	64 mm	67 mm
Coil outer diameter	79 mm	79 mm
Sample height	115 mm	100 mm
Number of layers	4	4
Number of turns	40 turns/layer	39 turns/layer
Inductance	1.12 mH	1.28 mH
Maximum field	2.20 mT/A	2.62 mT/A
Total length	36.0 m	35.8 m

2. 2. 3 実験回路および実験方法

コイルサンプルの臨界電流を測定するための実験回路を Fig.2.3 に示す. Fig.2.2 に示すサンプルをクライオスタット内に配置し, LHe を注入した. 供試コイルサンプルには電流リードを介して直流電源 (1000 A, 5 V) を接続し, 直流電源内部に配置されたシャント抵抗 (1 m Ω) で通電電流を測定した. 供試コイルサンプルに直流大電流を電流上昇率 20 A/s で通電し, デジタルレコーダを用いて通電電流を測定した. 同時に, 供試コイルサンプルに接続した各電圧タップからの出力を差動増幅器によって増幅した後, デジタルレコーダにより測定した.

コイルサンプル上部とアルミニウム容器底部の 2 箇所に設置したシリコンダイオード温度センサの出力により, 供試コイルサンプル内の温度勾配が無いことを確認した上でそのときの温度を通電開始温度 T_0 とし, 通電を開始した.

2. 3 実験結果

以上に述べた方法により各供試コイルサンプル (A~C) の伝導冷却状態における臨界電流 I_c の通電開始温度 T_0 依存性を温度範囲 4.2 K~55 K の間で取得した. 以下に実験結果として, 通電時の常伝導領域の発生・伝搬過程およびその波形から取得した供試コイルサンプルの臨界電流 I_c の通電開始温度 T_0 依存性について示す.

2. 3. 1 常伝導領域の発生・伝搬過程

波形例として, 通電時の各層における電圧の発生過程を Fig.2.4 に示す. 同図ではコイルサンプル A において, 通電開始時のコイルサンプル初期温度 $T_0 = 4.8$ K の場合を示している. 通電中には, 通電電流上昇率 20 A/s に対し, 供試コイルサンプルのインダクタンス 1.12 mH に相当する誘導起電力約 22 mV がコイル端子間に現れるが, その誘導起電力分は差し引いて示している. 通電電流の増加

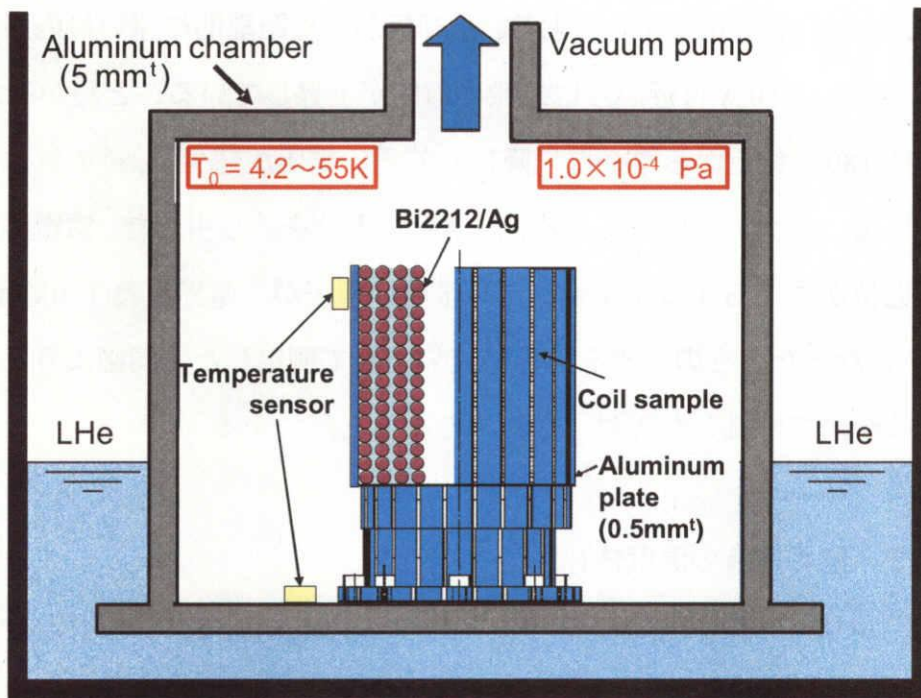


Fig.2.2 Cross sectional view of arrangement of coil sample.

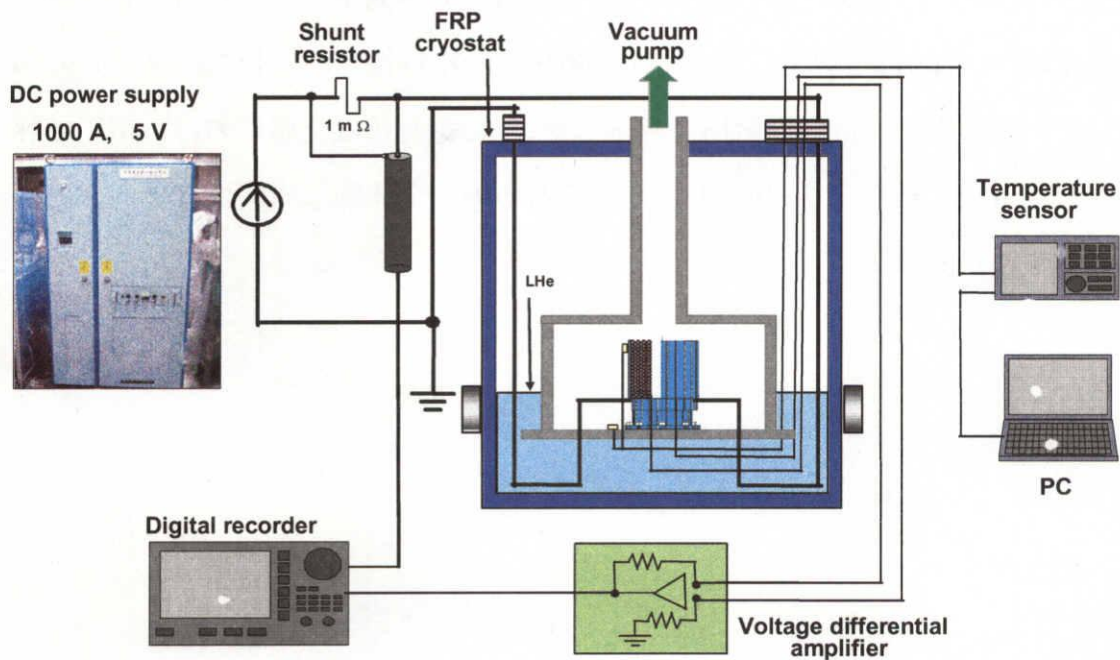


Fig.2.3 Experimental setup.

に従って、比較的磁界が集中しており、冷却板からも距離的に遠い最内層電圧が緩やかに上昇し、150 A 付近からは急激に電圧が上昇していることわかる。また、通電電流値 180 A 付近から第 2 層以降にも若干の電圧が発生し、その値は最内層に近づくに従って大きくなっている。誘導起電力分を差し引いた、常電導転移による発生抵抗がもたらすコイルサンプル全層の電圧が、電界定義(1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)である 3.6 mV となったときの電流を臨界電流 I_c として測定した。同図より、この条件における全層で評価した I_c は 183 A であることがわかる。

2. 3. 2 臨界電流の温度依存性

供試コイルサンプル(A~C)におけるコイル全層で評価した臨界電流 I_c の通電開始温度 T_0 依存性を Fig.2.5 にまとめて示す。同図より、各コイルサンプルの I_c - T_0 特性はほぼ一致している。 I_c は $10\text{ K} < T_0 < 55\text{ K}$ において T_0 の低下とともに約 2.5 A/K の上昇率で増加し、 $T_0 < 10\text{ K}$ においては飽和傾向にある。また、Fig.2.4 において、供試コイルサンプルの電圧がほぼ最内層にのみ発生していることを考慮し、コイルサンプル A について、最内層の電圧で I_c - T_0 特性を評価した結果を Fig.2.6 に示す。同図より、最内層電圧で評価した I_c の絶対値は全層における電圧で評価した場合と比較して約 10%小さくなるものの、全体的な傾向はほぼ同様であることがわかる。

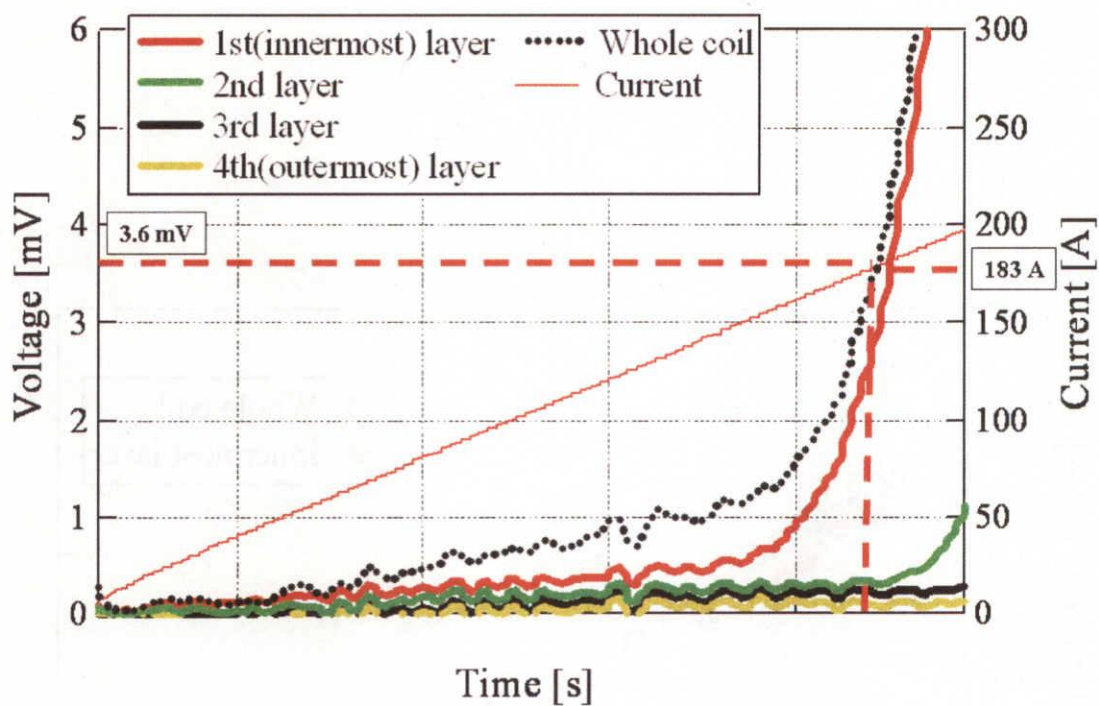


Fig.2.4 Temporal evolution of coil current and voltage (Coil A, $T_0=4.8$ K).

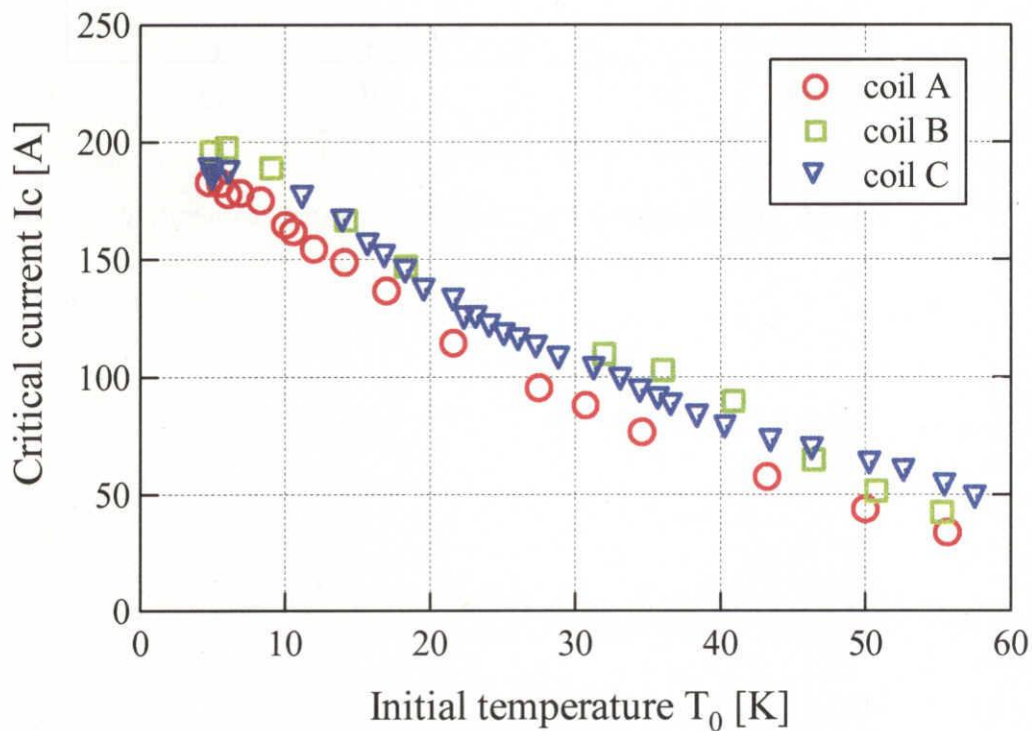


Fig.2.5 Critical current as a function of initial temperature for coil A, B, and C.

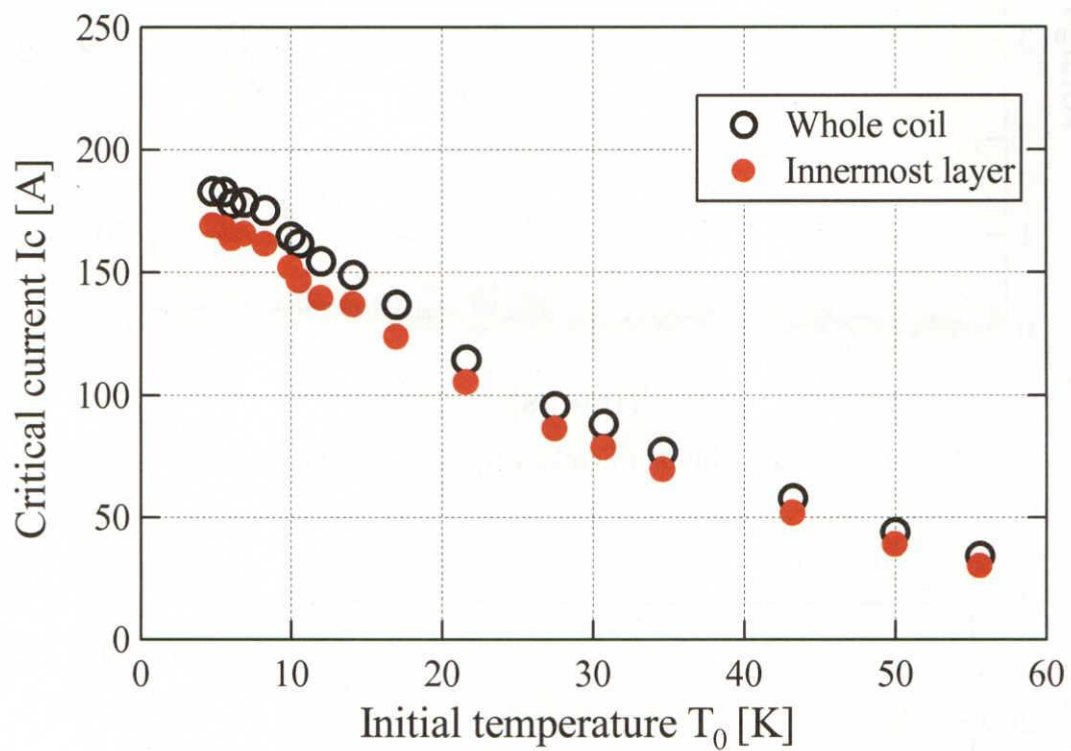


Fig.2.6 Critical current as a function of initial temperature.
(Coil A, Innermost layer)

2. 4 熱伝導解析による検討

前節で得られた実験結果を検討するために、コイルサンプルの発熱、伝導冷却用アルミニウム板における熱伝導を考慮した2次元熱伝導解析を行った。以下に解析モデル、解析結果および実験結果との比較検討を示す。

2. 4. 1 解析モデル

Fig.2.7 に解析モデルの概略図を示す。この解析において、供試コイルサンプルの最外層に取り付けた伝導冷却用アルミニウム板の温度分布を式(2.1)の1次元熱伝導方程式で与えた。

コイルサンプルにおける2次元温度分布に関しては、Fig.2.7 に示すように超電導線材の巻かれている部分を2次元の微小領域に分割し、各領域における発熱 Q を考えた。さらに領域間における熱の移動は、熱伝導率を 0.08 [W/mK]としたエポキシを介しての半径方向および高さ方向の熱伝達と、超電導線材に沿っての熱伝導の両方を考慮し、各領域の温度上昇を式(2.2)で与えた。

$$C_{Al} \frac{\partial T_{Al}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T_{Al}}{\partial x} \right) + q_{cond}(x) \quad \dots (2.1)$$

$$C_{sc} \frac{\partial T_{sc}}{\partial t} = Q - q \quad \dots (2.2)$$

ここで、 C_{Al} 、 T_{Al} 、 κ はそれぞれアルミニウム板の比熱、温度、熱伝導率であり、 x はアルミニウム容器からの距離である。 q_{cond} は超電導線材からアルミニウム板へ伝達する熱流束であり、線材とアルミニウムの温度差およびエポキシ樹脂の熱伝導率から計算される。 C_{sc} 、 T_{sc} はそれぞれ超電導線材の比熱、熱伝導率であり、 q は隣接する線材の領域やアルミニウム板への熱流束を表す。また、 C_{Al} 、 κ 、 C_{sc} 、アルミニウム容器の熱容量などの熱的パラメータは、すべて温度依存性を考慮して計算した。解析に用いた熱的パラメータの値として、Fig.2.8 に極低温領域に

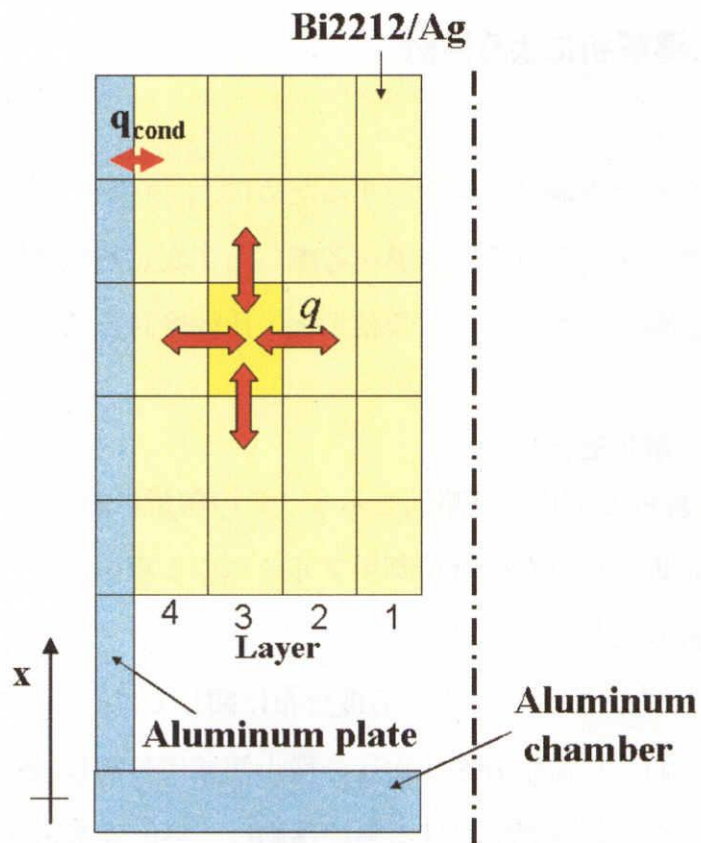


Fig.2.7 Calculation model.

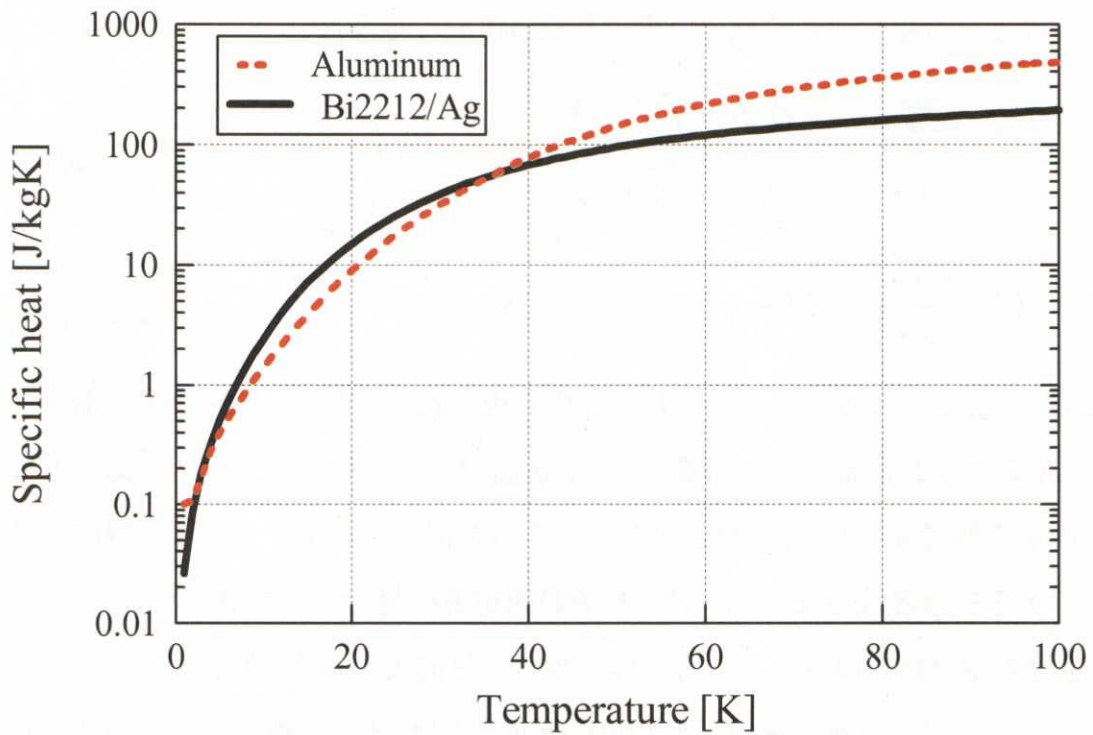


Fig.2.8 Temperature dependence of specific heat for Bi2212/Ag and Aluminum.

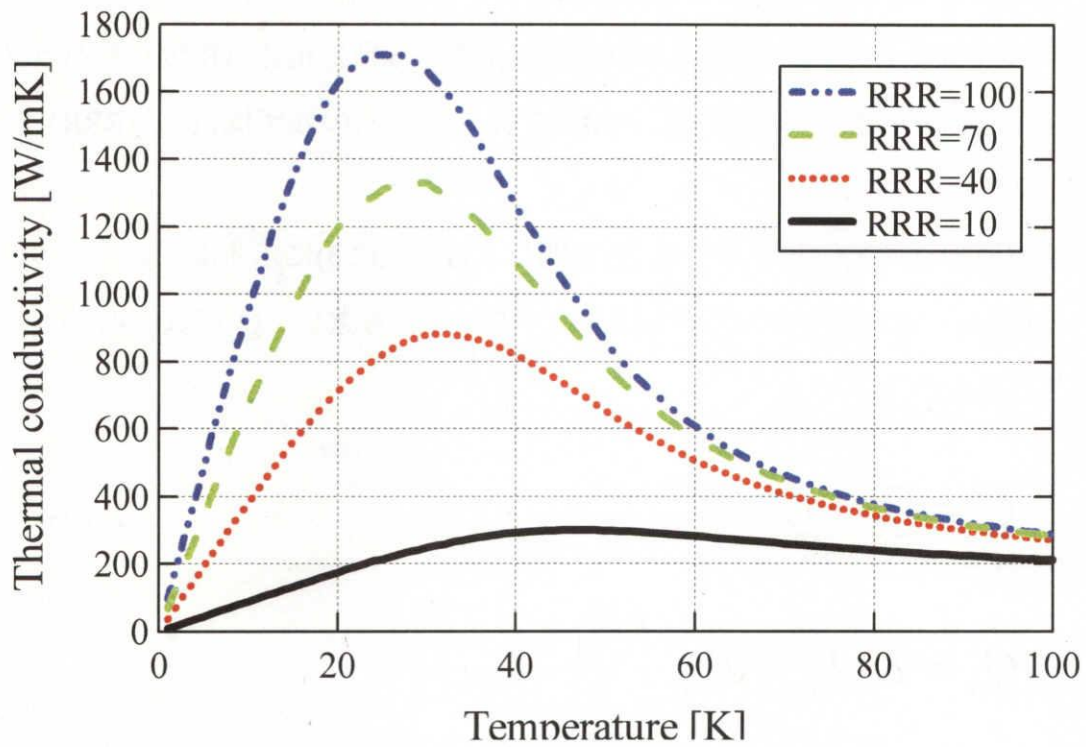


Fig.2.9 Temperature dependence of thermal conductivity for aluminum.

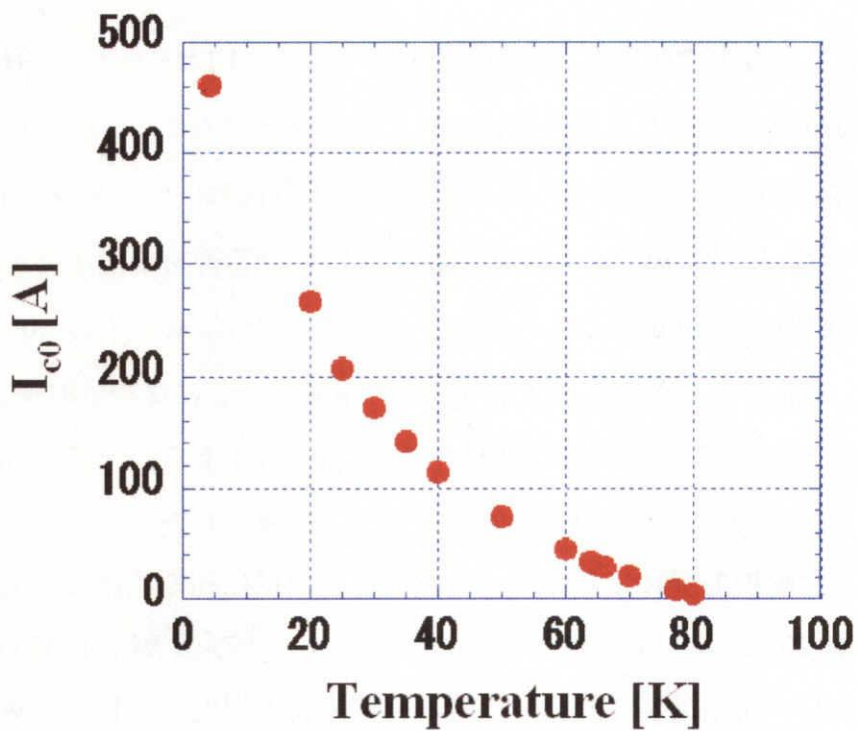


Fig.2.10 Critical current I_{c0} as a function of temperature in LHe and GHe.

における Bi2212/Ag 超電導線材とアルミニウムの比熱の温度依存性を示す、また、Fig.2.9 にアルミニウムの熱伝導率の温度依存性を残留抵抗比 (RRR) をパラメータとして示す。なお本解析では、冷却アルミニウムの残留抵抗比 (RRR) を 100 として計算した。

各超電導線材領域における発熱 Q に関しては、式(2.3)に示すように線材のジュール熱 Q_0 と電流リードからの侵入熱 Q_1 の二つを考慮し、 Q_0 は式(2.4)、 Q_1 は式(2.5)で与えた。

$$Q = Q_0 + Q_1 \quad \dots (2.3)$$

$$Q_0 = E \cdot I_{in} = E_c \left(\frac{I_{in}}{I_{c0}} \right)^n \cdot I_{in} \quad \dots (2.4)$$

$$Q_1 = R I_{in}^2 \quad \dots (2.5)$$

ここで、 E は各領域の電圧、 I_{in} は通電電流である。 I_{c0} は LHe および GHe 中などの十分な冷却効果が期待できる状態における臨界電流である。これは Fig.2.10 に示すように、温度が減少するに従って臨界電流が指数関数的に上昇する特性を有している。なお、 E_c は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の評価基準で決定される線材の電圧である。 n は Bi2212/Ag 超電導線材の n 値の大きさを示し、この解析においては 10 で一定と仮定した^[5]。電流リードからの侵入熱 Q_1 は、電流リードに接続されている最内層と最外層の下部を含む領域のみ検討し、式(3.5)に示すように定抵抗 R によるジュール熱として考慮し、本解析におけるパラメータとした。

以上のような解析モデルにおいて、実験条件と同様に初期温度 T_0 の状態から通電電流 I_{in} を 20 A/s で上昇させ、コイルサンプルおよび伝導冷却用アルミニウム板の温度分布・発生電圧を計算し、臨界電流の初期温度依存性を計算した。

2. 4. 2 解析結果および実験結果との比較検討

R をパラメータとして解析した臨界電流 I_c の通電開始温度 T_0 依存性を, 実験結果と共に Fig.2.11 に示す. 同図より, 解析によって得られた I_c は, R の値によらず T_0 の低下とともに増加し, $T_0 < 10$ K の低温域での飽和傾向を再現していることがわかる. さらに, R が増加するに従って飽和傾向はより顕著になり, $10 \mu\Omega < R < 30 \mu\Omega$ で実験結果とほぼ一致する.

このような I_c - T_0 特性が得られた原因の一つとして, 超電導線材やアルミニウムが有する極低温領域における比熱や熱伝導率の温度依存性が考えられる. Fig.2.8 および Fig.2.9 より, 超電導線材やアルミニウムの比熱は, 温度が低くなるに従ってその 3 乗に比例して減少する傾向がある^[6]. また, アルミニウムの熱伝導率は約 30 K で極大値を示し, それより低温になると減少する傾向にある. これらのことから, 30 K 以下の温度領域では, 超電導線材およびアルミニウムの低い比熱のために超電導線材の温度が上昇しやすく, アルミニウムの低い熱伝導率のために熱が超電導線材に溜まりやすい傾向があると考えられる. したがって, 伝導冷却状態における $T_0 < 30$ K の臨界電流 I_c は, 本質的な臨界電流 I_{c0} よりも著しく減少し, 侵入熱が大きくなるほど飽和傾向が顕著になると考えられる.

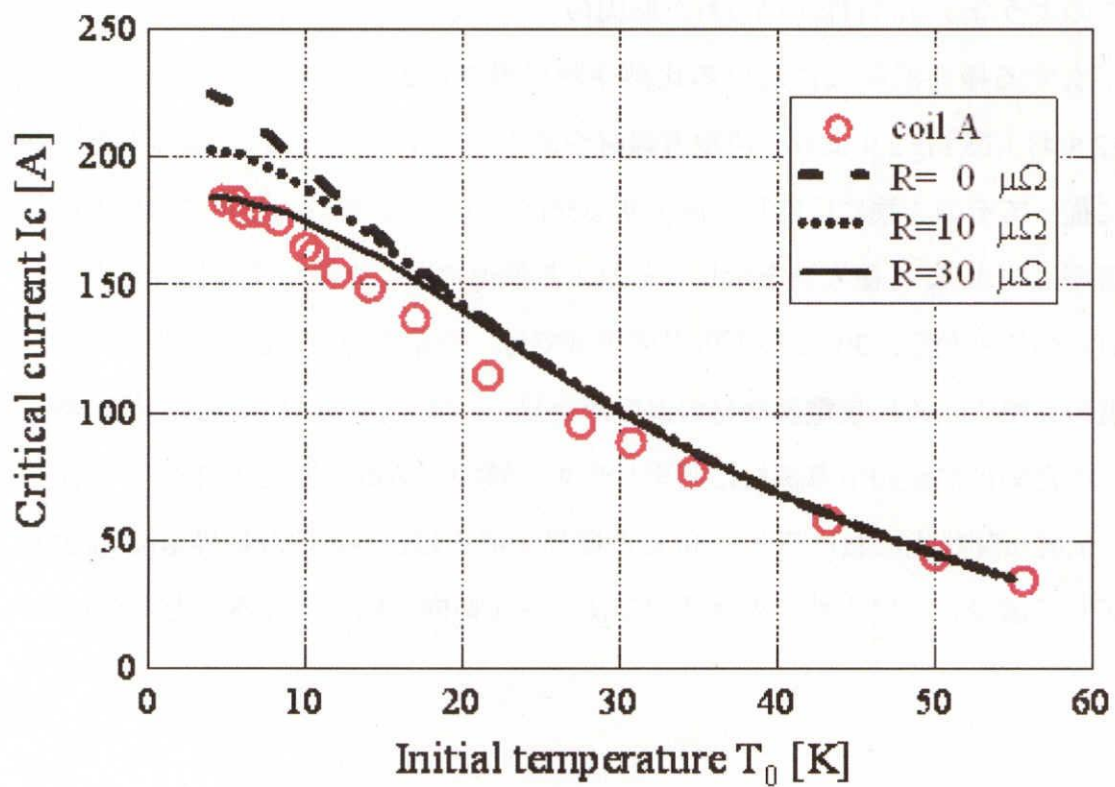


Fig.2.11 Calculated critical current as a function of initial temperature.

2. 5 まとめ

本章では、設計・製作した Bi2212/Ag コイルサンプルに直流通電を行い、LHe 伝導冷却状態におけるコイルサンプルの臨界電流 I_c の通電開始温度 T_0 依存性を把握した。続いてコイルサンプルの構造を模擬した 2 次元熱伝導解析を行い、実験結果との比較検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) LHe 伝導冷却状態における Bi2212/Ag コイルサンプルの臨界電流 I_c は、通電電流の増加に従って増加し、 $T_0 < 10$ K においては飽和傾向にあることを明らかにした。さらに、コイルサンプルの最内層電圧で評価した I_c については、全層電圧で評価した I_c - T_0 特性よりも約 10% 小さくなるもののほぼ同様の傾向が得られた。
- (2) 実験結果を検証するため、コイルサンプルの発熱、伝導冷却用アルミニウム板における熱伝導を考慮した 2 次元熱伝導解析を行った。その結果、30 K 以下の温度領域では、超電導線材およびアルミニウムの低い比熱のために超電導線材の温度が上昇しやすく、アルミニウムの低い熱伝導率のために熱が超電導線材に溜まりやすい傾向があることを明らかにした。すなわち、伝導冷却状態における臨界電流 I_c は、LHe および GHe 中などの十分な冷却効果が期待できる状態における超電導線材の本質的な臨界電流 I_{c0} よりも特に低温域において著しく減少し、 $T_0 < 10$ K の温度領域において飽和傾向を有することを明らかにした。

[第 2 章の文献]

- [1] 長屋: 「MJ 級高温 SMES 用コイルの製作と冷却特性」, 平成 15 年電学全大, p.273 (2003)
- [2] 柳井: 「SMES 用 HTS 小型モデルコイルの熱特性評価」, 平成 15 年電学全大, p.261 (2003)
- [3] 電気評論社:電気評論, 1, pp.111-112 (2002)
- [4] K. Sasaki, et al. “Test results and analysis of current limiting characteristics in conduction cooled Bi2223 fault current limiter”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.13, No.2, pp.2048-2051, (2003)
- [5] H. Fujishiro, et al. : “Thermal conductivity of Bi-2212 single crystals prepared by TSFZ method”, Physica C, Vol.235-240, Part 2, pp.1533-1534 (1994)
- [6] M. Ikebe, et al. : “Simultaneous measurement of thermal diffusivity and conductivity applied to Bi-2223 ceramic superconductors”, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 63, No. 8, pp.3107-3114 (1994)

第3章 冷凍機伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルにおける臨界電流の温度依存性

3.1 まえがき

前章では、Bi2212/Ag コイルサンプルに直流通電を行い、LHe 伝導冷却状態におけるコイルサンプルの臨界電流特性を実験的に取得した。続いてコイルサンプルの構造を模擬した2次元熱伝導解析を行い、実験結果との比較検討を行った。その結果、伝導冷却状態における臨界電流特性は、材料の有する比熱・熱伝導率などの熱的パラメータの影響を強く受け、特に10 K以下の温度領域では侵入熱が大きくなるほど飽和傾向が顕著になることを示した。

一方、実機器 SMES においては、冷凍機によって高温超電導コイルが伝導冷却される。SMES 用伝導冷却コイルのクエンチ・熱暴走特性を評価するためには、超電導コイルや冷却板における熱伝搬だけでなく、冷凍機の有する冷凍能力もあわせて考慮することが必要不可欠である^[1]。そこで本章では、冷凍機を用いた伝導冷却実験系において、第2章と同様の Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルに直流通電を行い、臨界電流の温度依存性について検討を行う。また、新たにコイルサンプルにおける発熱の磁界依存性および冷凍機の有する冷凍能力を考慮した熱伝導解析による実験結果の検証を行う。これらの結果を踏まえ、前章の結果と比較検討することにより、冷却方式の異なる実験系における超電導コイルサンプルの過渡特性を評価する。

3. 2 実験方法

3. 2. 1 4.2 K GM 冷凍機

Fig.3.1 および Table 3.1 に冷凍機の外観図および諸元をそれぞれ示す。この冷凍機は 4.2 K で 1.5 W の冷凍能力を有する GM 冷凍機である。また 4.2 K 以上の温度範囲では、Fig.3.2 に示すように冷凍能力が増加する。温度計測はコールドヘッドに取り付けた CERNOX 温度センサによって行い、同箇所に取り付けたヒータの出力を制御することにより、最低到達温度から 100 K 前後の範囲で温度制御が可能である。

3. 2. 2 コイルサンプルの配置

冷凍機を用いた伝導冷却の実験配置を Fig.3.3, Fig.3.4 に示す。実験には、前章で用いた Bi2212/Ag コイルサンプル A を用い、これを厚さ 8 mm の高純度アルミニウムフランジ上に配置した。冷凍機のコールドヘッドをアルミニウムフランジに熱的に接触させることにより、コイルサンプル最外層のアルミニウム板を介して巻き線部を伝導冷却した。ステンレス製の真空容器内はロータリーポンプおよびターボ分子ポンプを用いて真空引きすることにより圧力を 1×10^{-6} Pa 以下に維持し、常温部と熱的に絶縁を図った。電流リードを介した常温部からの熱侵入を軽減するため、Fig.3.4 に示すように電流リードを冷凍機の各所に熱的に接触させて冷却し、一部には HTS 電流リードを使用した。さらに常温部からの輻射による熱侵入を軽減するために、ステンレス製真空容器とコイルサンプルの間にアルミニウムおよび銅製の輻射シールドを設け、これを冷凍機の 1st stage によって冷却した。また今回の実験では、Fig.3.4 に示す電圧タップと同じ箇所に熱電対による計測点 ($T_1 \sim T_5$) を設置し、各点の温度計測を行った。

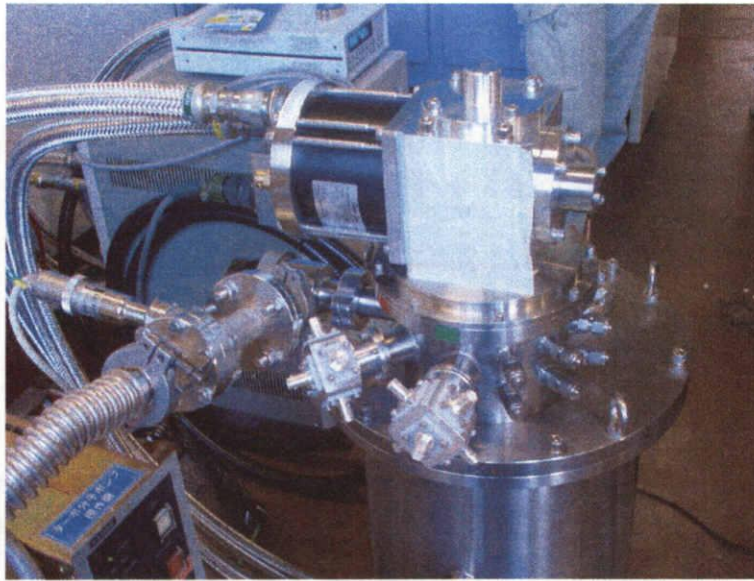


Fig.3.1 4.2 K GM cryocooler

Table 3.1 Specification of 4.2 K GM cryocooler.

Temperature ranges	Minimum temperature-100 K
Minimum temperature	Below 4.2 K
Cooling capacity	1.5 W at 4.2K
Temperature stability	0.5 K
Weight	18.5 kg
Power supply	AC200 V, 3 phase, 8.3 kW

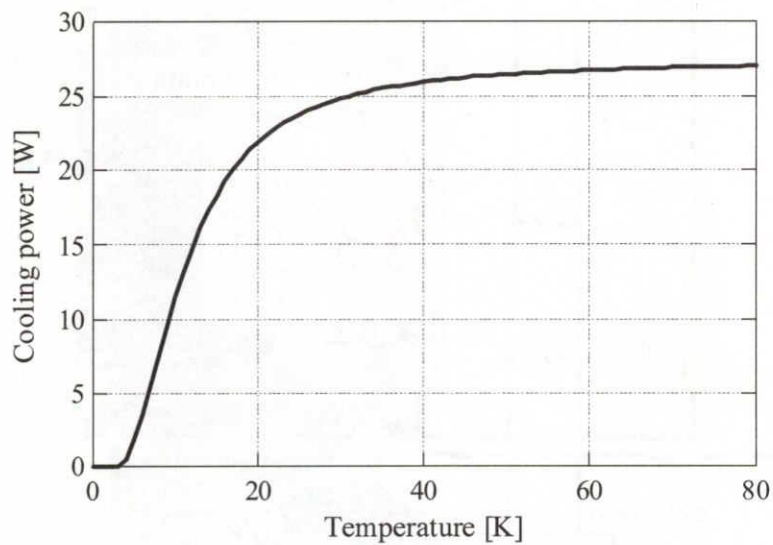


Fig.3.2 Cooling power of GM cryocooler as a function of temperature.

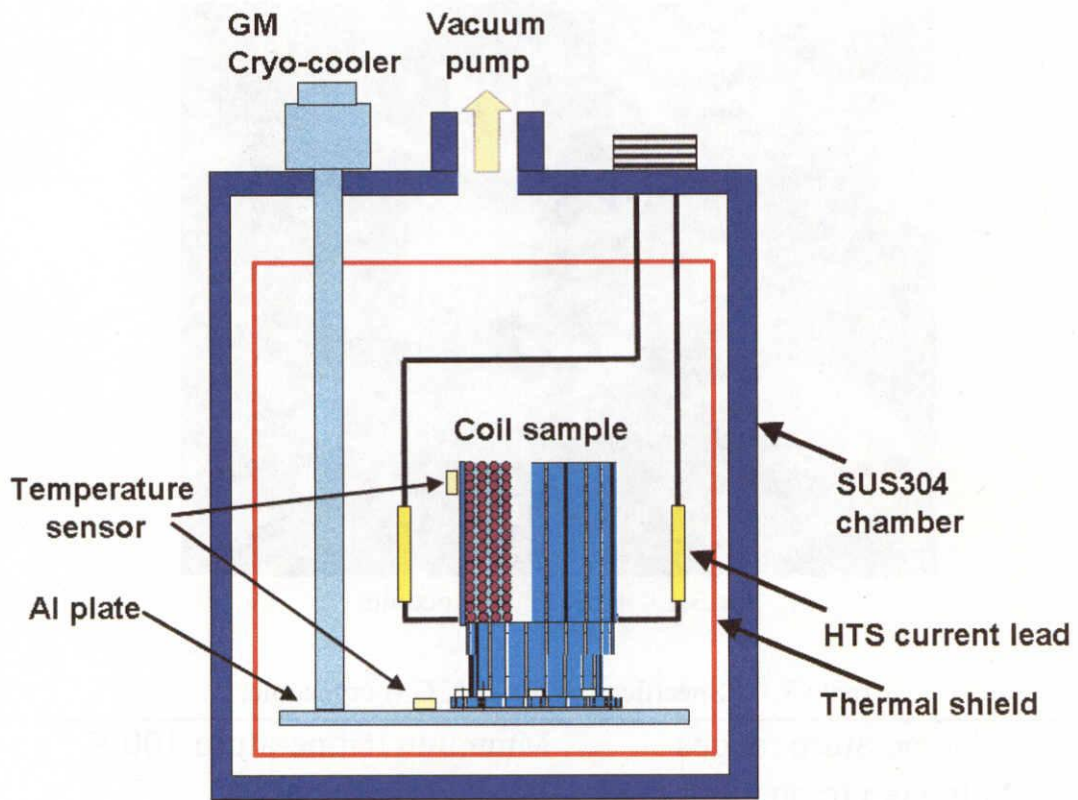


Fig.3.3 Experimental setup.

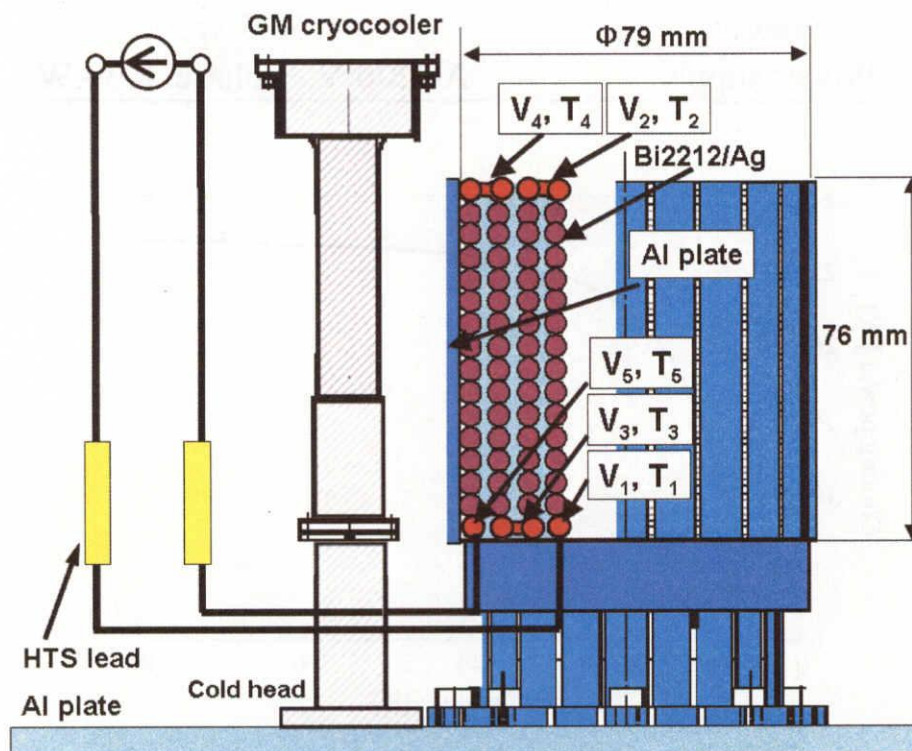


Fig.3.4 Experimental setup (Zoomed up).

3. 2. 3 実験回路および実験方法

コイルサンプルの臨界電流を測定するための実験回路および通電方法は前章と同様である。コイルサンプル各部($T_1 \sim T_5$)に設置した熱電対の起電力を計測することにより、供試コイルサンプル内の温度勾配が無いことを確認した上でそのときの温度を通電開始温度 T_0 として、前章と同様に 20 A/s の電流上昇率で通電を開始し、臨界電流の温度依存性を測定した。

3. 3 実験結果

以上に述べた方法により供試コイルサンプル A の冷凍機伝導冷却状態における臨界電流 I_c の通電開始温度 T_0 依存性を温度範囲 4.2 K ~ 40 K の間で取得した。以下に実験結果として、前章と同様に通電時の常伝導領域の発生・伝搬過程およびその波形から読み取った臨界電流の温度依存性について示す。

3. 3. 1 常伝導領域の発生・伝搬過程

波形例として、通電時の各層における電圧の発生過程を Fig.3.5 に示す。同図は、通電開始時のコイルサンプルの初期温度 $T_0 = 4.9$ K の場合であり、電流上昇に伴う誘導起電力分を差し引いた各層における発生電圧を示している。同図より、冷凍機伝導冷却による実験系においても、電流上昇率 20 A/s としたコイルサンプルにおける常伝導領域の発生・伝搬特性は、前章の LHe を用いた伝導冷却におけるものと同様の結果が得られた。すなわち、通電電流の増加に従って通電電流値 150 A 付近から最内層の電圧が急激に上昇している。また第 2 層以降にも若干の電圧が発生し、その電圧値は最内層に近づくに従って大きくなっていく。

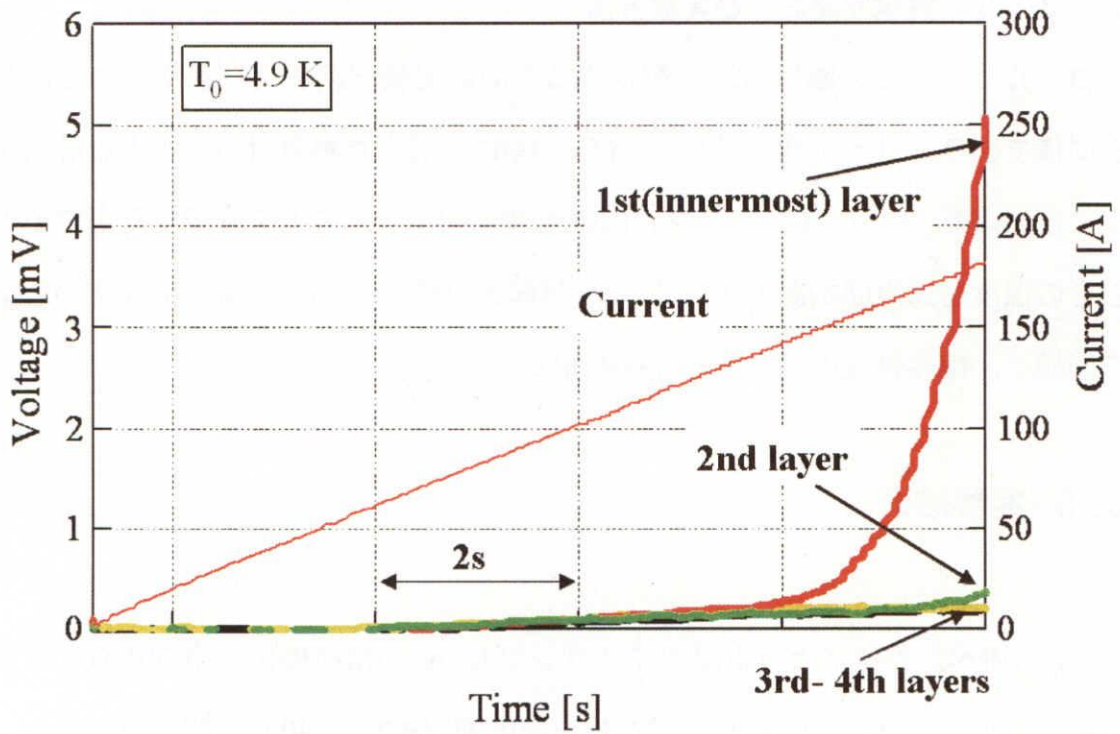


Fig.3.5 Temporal evolution of coil current and voltage($T_0=4.9$ K).

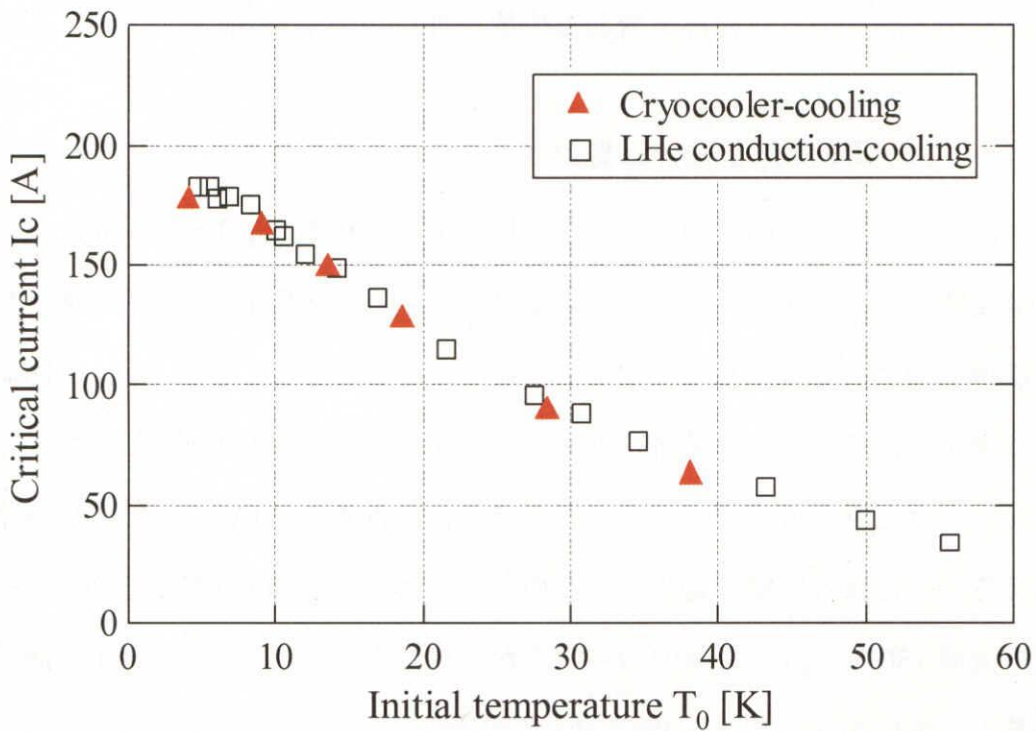


Fig.3.6 Critical current as a function of initial temperature.
(Whole coil)

3. 3. 2 臨界電流の温度依存性

冷凍機伝導冷却状態における臨界電流 I_c の通電開始温度 T_0 依存性を Fig.3.6 に示す. 同図より, I_c は $T_0 > 10$ K において T_0 の低下とともに約 2.5 A/K の上昇率で増加し, $T_0 < 10$ K においては飽和傾向にある. 同図には, 前章で取得した LHe 伝導冷却状態における I_c の T_0 依存性を併記しており, 冷凍機伝導冷却状態の実験とよく一致していることがわかる. また, 最内層の電圧で I_c - T_0 特性を評価した結果を Fig.3.7 に示す. 同図より, 最内層電圧で評価した I_c - T_0 特性も LHe 伝導冷却と同様の結果が得られた. すなわち, I_c の絶対値は全層で評価した場合と比較して約 10%程小さくなるものの, 全体的な傾向は全層の電圧で評価した臨界電流特性とほぼ同様である.

3. 4 熱伝導解析による検討

前節で得られた実験結果を検討するために, コイルサンプルの発熱, 伝導冷却用アルミニウム板における熱伝導を考慮した 2次元熱伝導解析を行った. この解析において, 新たにコイルサンプルにおける発熱の磁界依存性および冷凍機の冷凍能力を考慮した. 以下に解析モデル, 解析結果および実験結果との比較検討を示す.

3. 4. 1 解析モデル

解析モデルにおいて, コイルサンプルおよび最外層に取り付けた伝導冷却用アルミニウム板の分割方法や, 熱伝搬のモデリングは前章と同様である. 冷凍機による冷却能力をこの解析モデルに反映させるため, Fig.2.8 に示すアルミニウム容器の熱容量を本実験で用いたアルミニウムフランジの熱容量に置き換え, ここに Fig.3.2 に示す冷凍機の有する冷却能力および温度調節に用いたヒータの出力を境界条件として与えた. また, 電流リードからの侵入熱を表す(2.5)式中の定抵

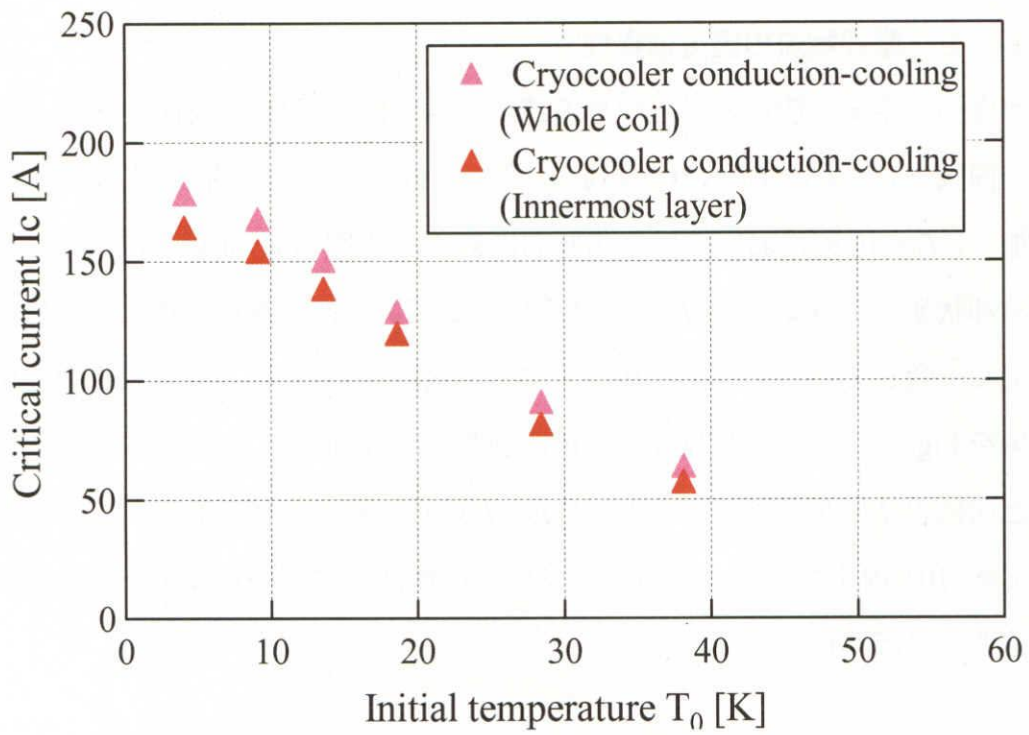


Fig.3.7 Critical current as a function of initial temperature. (Innermost layer)

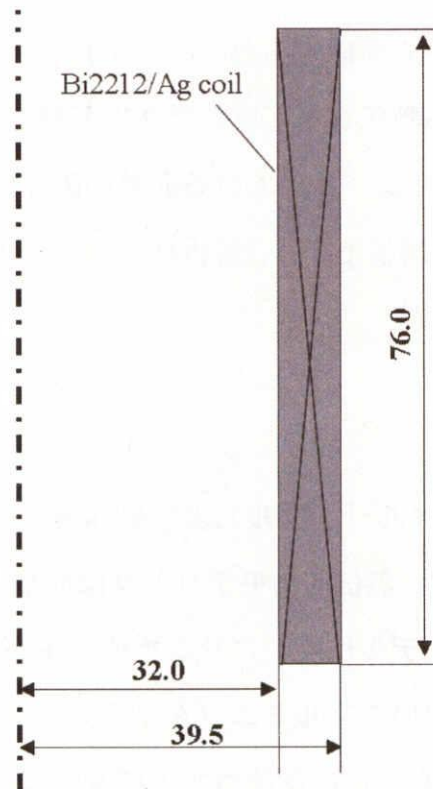


Fig.3.8 Calculation model.

抗 R は、 $40 \mu\Omega$ とした。

コイルサンプルにおける発熱の磁界依存性を考慮するため、まずコイルサンプルの磁界分布を有限要素法(FEM)によって解析した。解析モデルは Fig.3.8 に示すような同軸対称モデルとし、コイル中の電流密度は一定であると仮定した。解析結果を Fig.3.9 に示す。同図はコイルサンプルに 200 A の電流を通電したときの磁界分布であり、対称性からコイル上半分のみの磁界分布を示している。コイルの中央部の磁界に注目すると、最内層の磁界は 0.4 T 程度であり最外層の約 10 倍の大きさであることがわかる。簡単のために熱伝導解析におけるモデルでは、磁界強度はコイル中央部の強度で高さ方向に一定とし、各層間の磁界分布の違いのみを考慮した。これを踏まえ、Fig.1.6 に示す Bi2212/Ag 線材の有する臨界電流の磁界依存性に従って、式(2.4)に示す発熱式における I_{c0} の各層における磁界による減少を考慮することで、発熱の磁界依存性を解析に反映させた。

以上のような解析モデルにおいて、実験条件と同様の通電状態におけるコイルサンプルおよび伝導冷却用アルミニウム板の温度分布・発生電圧を計算し、臨界電流の初期温度依存性を計算した。

3. 4. 2 解析結果および実験結果との比較検討

Fig.3.10 に、解析によって得られた各層における電圧の発生過程を実験結果と共に示す。同図は通電開始温度 $T_0 = 4.9$ K の解析結果であり、最内層への発生電圧の集中を含めて実験結果をよく再現している。また、臨界電流 I_c の通電開始温度 T_0 依存性を、実験結果と共に Fig.3.11 に示す。同図より、解析によって得られた I_c 特性に関しても実験結果とよく一致しており、実験結果の $T_0 < 10$ K の低温域における飽和傾向を再現している。 I_c が $T_0 < 10$ K で飽和する要因に関しては、前章と同様の理由で説明される。すなわち伝導冷却状態においては、材料の有する熱伝導率や比熱などの温度依存性の影響により、低温域では超電導線材の温度が上昇しやすくなり、侵入熱が大きくなるほど I_c の飽和傾向が著しくなると考えられる。また Fig.3.5, Fig.3.6 において、LHe 伝導冷却および冷凍機伝

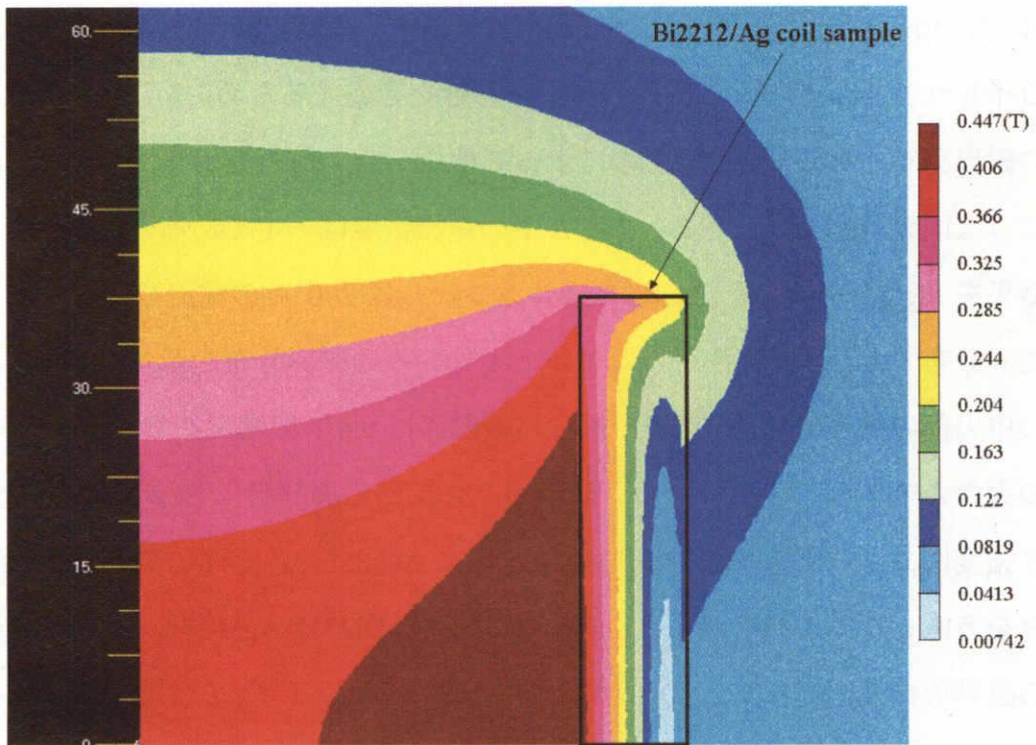


Fig.3.9 Magnetic field distribution of the coil sample (Current = 200 A).

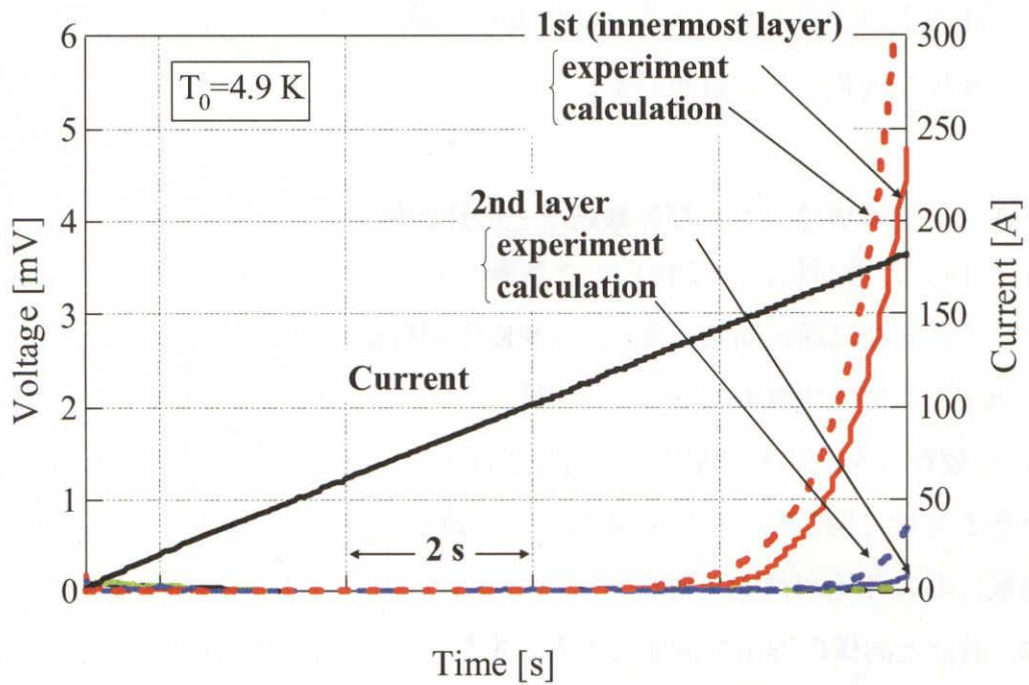


Fig.3.10 Experimental and calculation results on temporal evolution of coil voltage in each layer at $T_0 = 4.9$ K.

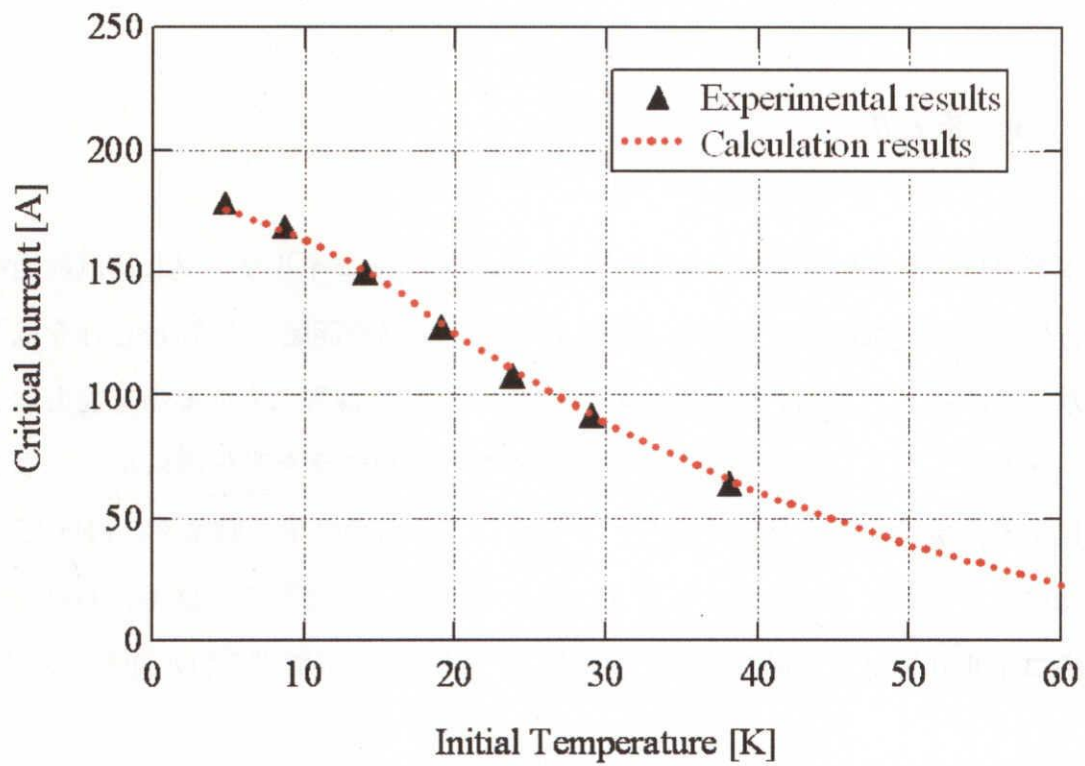


Fig.3.11 Experimental and calculation results on I_c as a function of T_0 .

導冷却といった冷却方式が異なる 2 つの実験系においてほぼ同様の常伝導発生・伝搬特性および I_c - T_0 特性が得られた理由として、通電電流の上昇に伴うコイルサンプルにおける発熱の時定数が、層間のエポキシおよび伝導冷却用アルミニウム板を介した伝導冷却の時定数よりも小さかったことが考えられる。このことから、20 A/s といった過渡的な通電に関しては、冷却方式よりもコイルサンプル自身が持つ比熱などの熱的パラメータの影響が大きくなると考えられる。

3. 5 まとめ

本章では、冷凍機を用いて伝導冷却した Bi2212/Ag コイルサンプルに直流通電を行い常伝導領域の発生過程および臨界電流 I_c の通電開始温度 T_0 依存性を取得した。続いて、前章で行った熱伝導解析に、新たに冷凍機の有する冷却能力およびコイルサンプルにおける発熱の磁界依存性を付け加えた熱伝導解析を行うことにより、実験結果の検証を行った。さらにこれらの結果を踏まえ、LHe 伝導冷却による結果と比較検討することにより、冷却方式の異なる実験系における超伝導コイルサンプルの過渡特性を評価した。以下に本章で得られた知見を示す。

- (1) 冷凍機による伝導冷却を可能とする実験系を構築し、Bi2212/Ag コイルサンプルの通電試験を行った。その結果、過渡的な通電による常伝導領域の発生特性および臨界電流特性は、LHe 伝導冷却状態における特性とほぼ同様の特性を有することを明らかにした。特に I_c は通電電流の増加にしたがって増加し、 $T_0 < 10$ K においては飽和傾向にある。
- (2) 実験結果を検証するため、新たにコイルサンプルにおける発熱の磁界依存性および冷凍機の冷凍能力を考慮した 2 次元熱伝導解析を行った。その結果、解析結果は常伝導領域の発生過程および臨界電流特性について実験結果を

よく再現した。これらを踏まえ、 I_c 特性に関しては前章と同様の理由により説明できることを示した。さらに冷却方式が異なる2つの実験系においてほぼ同様の常伝導発生・伝搬特性および I_c-T_0 特性が得られた理由として、過渡的なコイルサンプルにおける発熱の時定数が、層間のエポキシおよびアルミニウム板を介した伝導冷却の時定数よりも小さくなることを示した。これより、過渡特性に関しては冷却方式よりもコイルサンプル自身が持つ比熱などの熱的パラメータの影響が大きくなることを明らかにした。

[第3章の文献]

- [1] A.Ishiyama et al.: "A stability Criterion for Cryocooler-Cooled HTS SMES" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.1832-1835 (2001)

第4章 冷凍機伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルにおける熱暴走特性およびクエンチ・熱暴走検出技術

4.1 まえがき

第2章および第3章では、Bi2212/Ag コイルサンプルに直流通電を行い、LHe および冷凍機伝導冷却状態における過渡的な常電導領域の発生・伝搬特性や、臨界電流特性を実験的に取得した。続いてコイルサンプルの構造を模擬した2次元熱伝導解析を行い、実験結果との比較検討を行った。その結果、伝導冷却状態における臨界電流特性は、材料の有する熱的パラメータの影響を強く受け、特に10 K以下の温度領域では侵入熱が大きくなるほど飽和傾向が顕著になることを示した。また、2つの異なる冷却方式において過渡的な通電特性が同様であることから、過渡特性に関しては冷却方式よりもコイルサンプル自身が持つ比熱などの熱的パラメータの影響が大きくなることを明らかにし、伝導冷却状態における通電特性の基礎的な知見を得た。

一方、実器 SMES の熱的安定性を評価するためには、連続通電や繰り返し充・放電を行う際に発生する超電導コイルのクエンチ・熱暴走特性を考慮する必要がある。そこで本章では、冷凍機を用いた超電導コイルの伝導冷却実験系において、実器 SMES における負荷変動補償を模擬したパターンの通電を行い、クエンチ・熱暴走特性について検討するとともに、熱伝導解析によって実験結果を検証する。さらに、これらの実験的・理論的検討に基づいて、クエンチ・熱暴走に関する評価パラメータを考察し、その監視・検出方法について検討する。

4. 2 連続通電による熱暴走特性

4. 2. 1 実験方法

実験に用いたコイルサンプルおよびその配置は第3章と同様である。コイルサンプル各部に取り付けた熱電対の起電力を計測することにより、サンプル内の温度分布が無いことを確認した上でそのときの温度を通電開始温度 T_0 とした。コイルサンプルに一定の直流電流を連続通電し、コイルサンプル内の温度および電圧分布の時間変化を取得した。

4. 2. 2 実験結果

第3章で取得した、 $T_0 = 4.8$ Kにおける供試コイルサンプルの臨界電流 $I_c = 178$ A に対し、 I_c 以下の通電電流値 I をパラメータとして、供試コイルサンプルにおける長時間の連続通電による平均温度の時間推移を Fig.4.1 に示す。同図より、通電電流値が 145 A 以上になると供試コイルサンプルの温度が通電開始後約 400 s で急激に上昇して下に凸の曲線となり、熱暴走に至っていることがわかる。

$I = 145$ A における供試コイルサンプル内の電圧・温度分布の時間変化を Fig.4.2 に示す。同図より、通電開始後 400 s までの間は、電流リードが接続されているコイルサンプル下部の T_1, T_3, T_5 の温度がコイルサンプル上部の T_2, T_4 の温度に比べて上昇しており、電流リードの発熱によってコイル高さ方向に温度勾配が生じていることがわかる。さらに時間が経過すると、印加磁界が高い最内層の電圧が急激に上昇している。最内層の発熱がエポキシおよび超電導線材を介してコイルサンプル全体に伝達することにより $T_1 \sim T_5$ 間の温度差が減少し、コイルサンプル内部の温度分布は高さ方向および径方向にほぼ一様となり、最終的に熱暴走に至ったものと考えられる。

次に、 T_0 を 4.2 K から 15 K まで変化させ、通電時間を最長 300 s とした連続通電を行った場合の供試コイルサンプルにおける平均温度の時間変化を Fig.4.3(a) ~ (c) に示す。同図(a)~(c)より、通電開始温度が上昇するに従って、同じ通電電

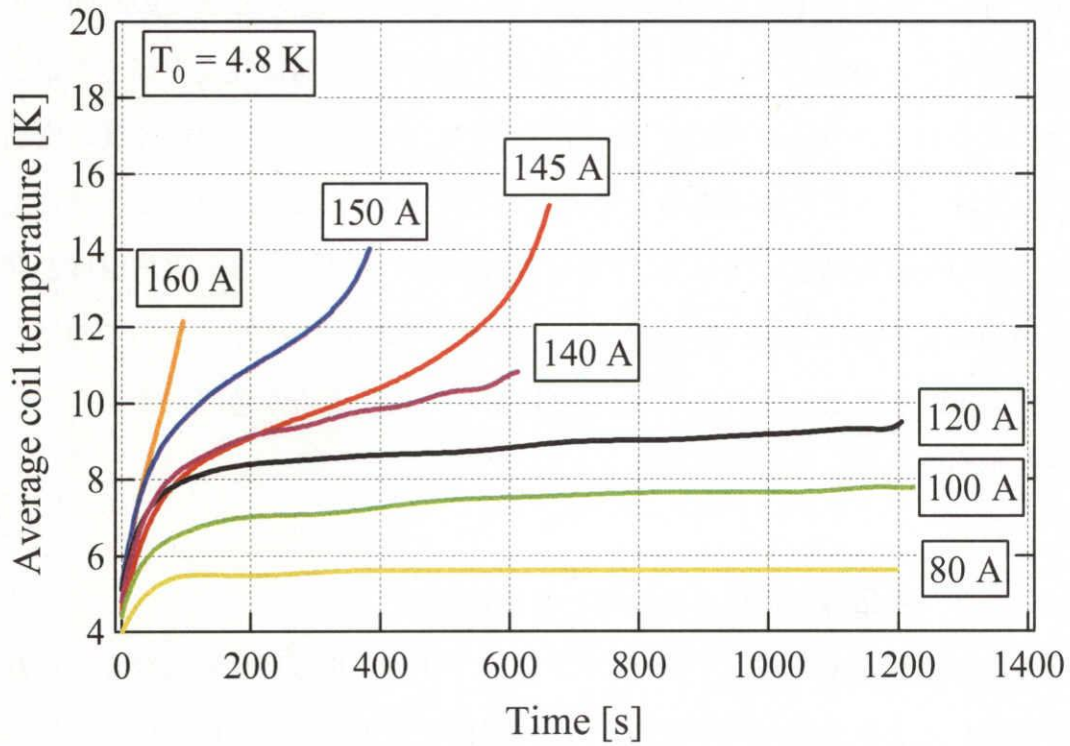


Fig.4.1 Temporal evolutions of average coil temperature for different current.

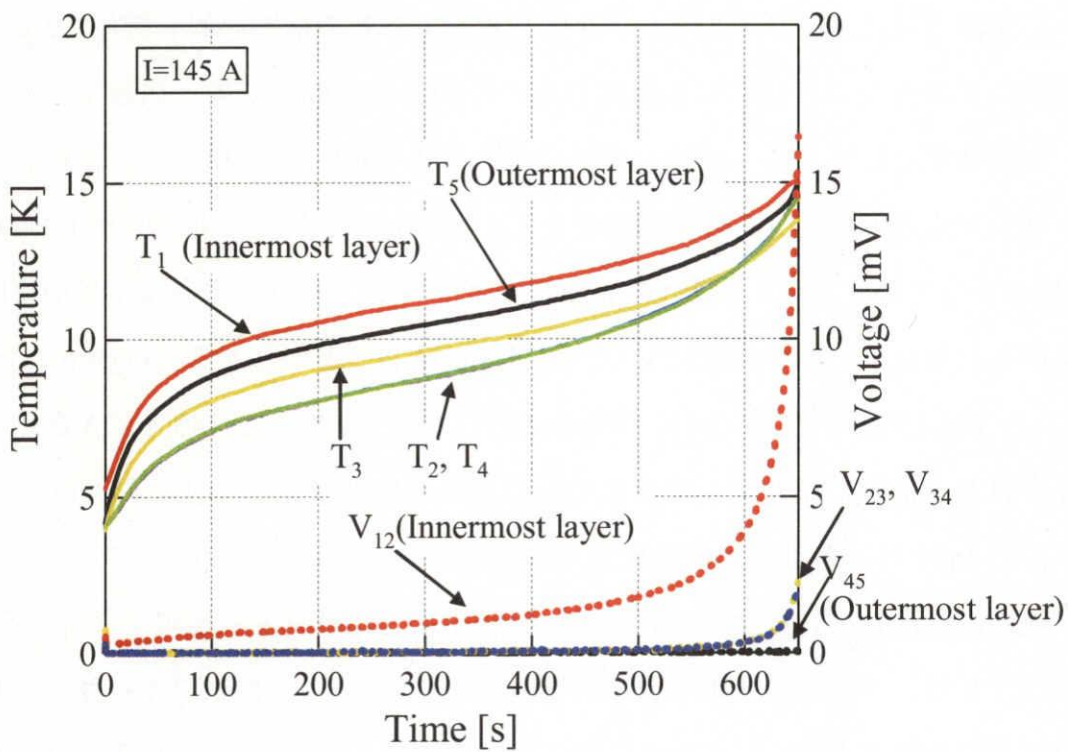


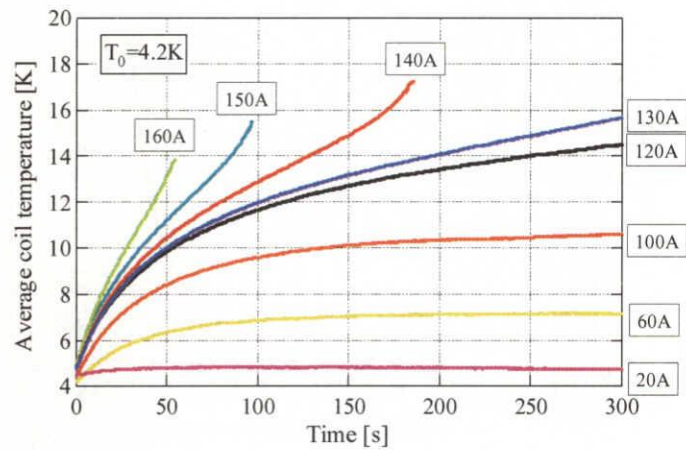
Fig.4.2 Temperature evolution of voltage and temperature in each coil layer.

流値に対して温度変化が下に凸の曲線になり, 熱暴走に達するまでの時間が短くなっていることがわかる. これは同じ電流値に対して, 通電温度を高く設定したことによるコイルサンプルの発熱の増加分がコイルサンプルの熱容量の増加分よりも大きくなったためであると考えられる. また, Fig.4.3 で温度上昇に飽和が見られなかった結果について, 通電中の供試コイルサンプルの平均温度と発生電圧の関係を Fig.4.4 に示す. 同図(a)~(c)より, それぞれの T_0 において熱暴走が発生する 130 A 以上の電流値では, 温度に対して電圧の方が急峻に上昇していることがわかる.

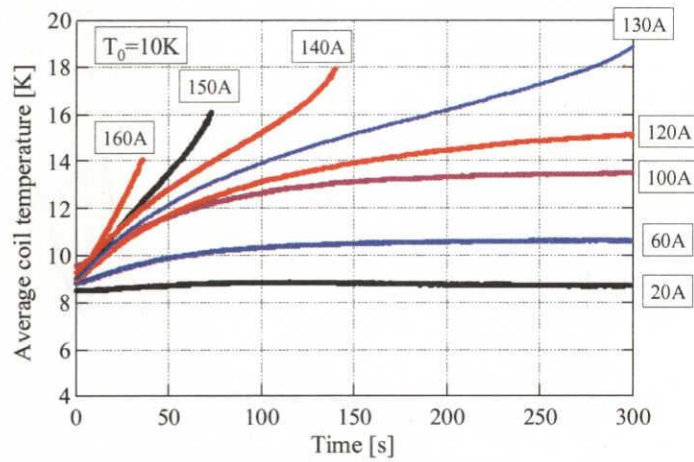
4. 2. 3 熱伝導解析による結果との比較検討

得られた実験結果を検討するために, コイルサンプルの形状およびその冷却構造を模擬した 2 次元熱伝導解析を行った. 解析モデルは第 3 章のものと同様であり, 供試コイルサンプルの発熱を各層ごとに発熱の磁界依存性を取り入れた n 値モデルで模擬し, 各材料パラメータの温度依存性を考慮している. この解析を用いて連続通電によるコイルサンプルの発熱および熱の伝搬過程を計算した.

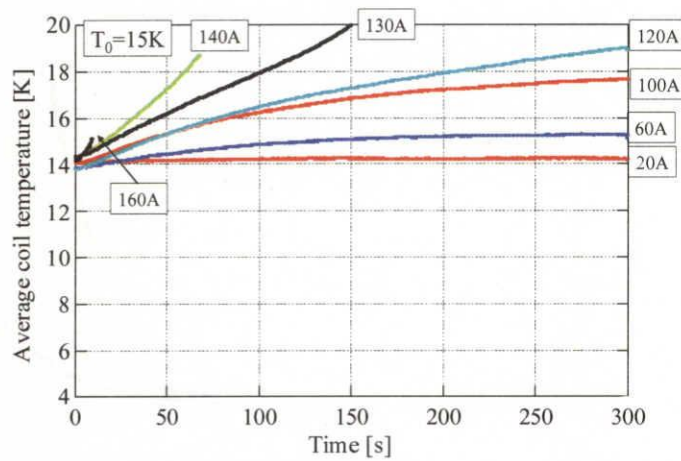
供試コイルサンプルにおける温度分布の時間変化を解析結果と比較するために, 実験結果として, $T_0 = 10$ K の条件において $I = 100, 130, 140$ A とした供試コイルサンプル内の温度分布の時間変化を Fig.4.5 (a)~(c)に示す. 同図(a)~(c)より, I を増加させていくと $I > 130$ A では供試コイルサンプル各点の温度上昇が時間の経過とともに下に凸の曲線になり, 熱暴走に至ることがわかる. Fig.4.6 (a)~(d)には, Fig.4.5 と同じ $T_0 = 10$ K の条件において, $I = 100, 130, 140, 145$ A として計算された, 供試コイルサンプル内の温度分布の時間変化を示す. 同図(a)および Fig.4.5 (a)より, 各部の温度変化が下に凸の曲線とならず, 供試コイルサンプルが熱暴走に達しない場合については, 実験結果を比較的よく再現できている. 供試コイルサンプルが熱暴走に至る同図(b), (c)の場合では, 供試コイルサンプル各点における温度上昇の時定数が実験に比べて大きくなっている. この要因とし



(a) $T_0 = 4.2$ K

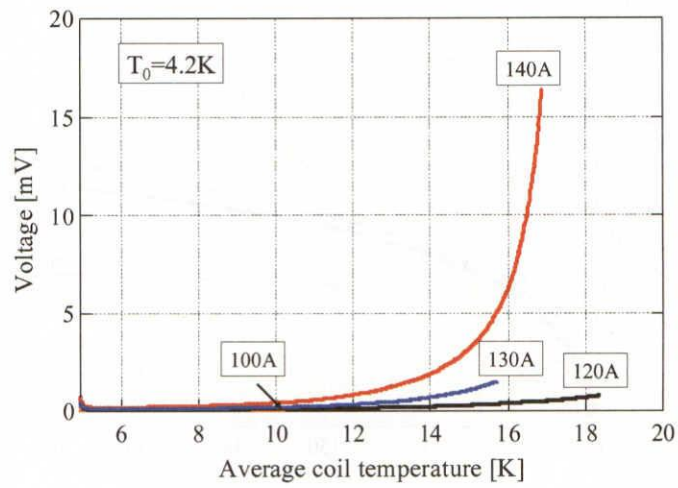


(b) $T_0 = 10$ K

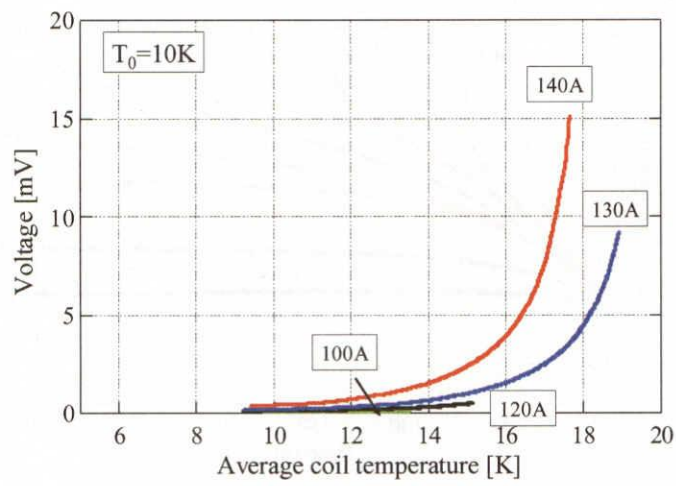


(c) $T_0 = 15$ K

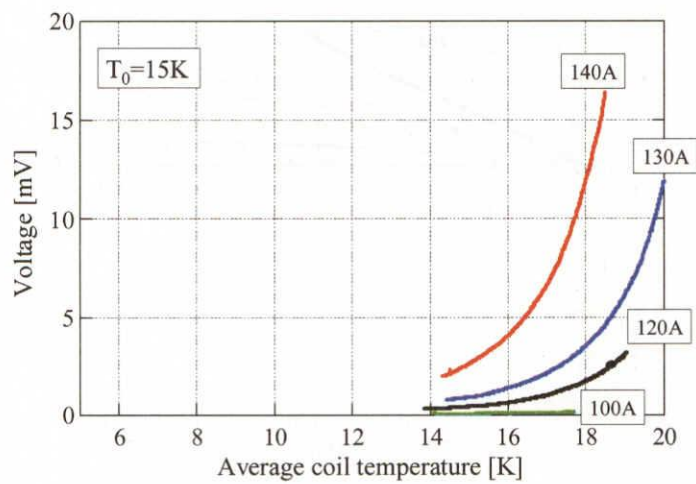
Fig.4.3 Temporal evolutions of coil temperature for different current.



(a) $T_0 = 4.2$ K



(b) $T_0 = 10$ K

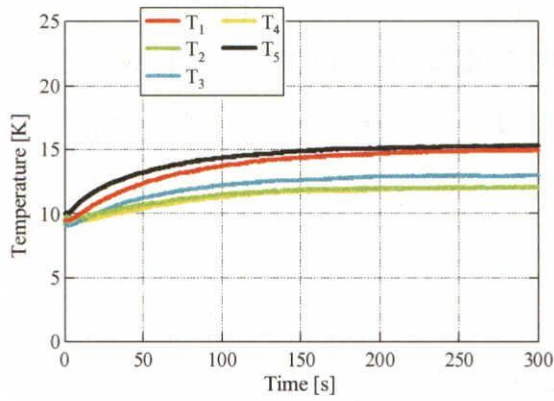


(c) $T_0 = 15$ K

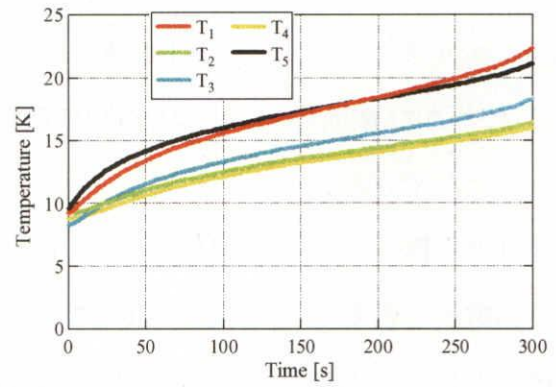
Fig.4.4 Temperature dependence of coil voltage for different current.

では、解析における通電前のコイルサンプルの温度分布が実験と若干異なることや、供試コイルサンプルにおける熱伝搬のモデリングに対する解析精度の問題などが考えられる。しかしながら、解析において $I=145\text{ A}$ とした同図(d)では、Fig.4.5 (c)に示す実験において $I=140\text{ A}$ とした場合の温度の上昇過程をほぼ再現できており、僅かな電流値の違いの範囲内で実験によって取得した熱暴走特性を評価することができた。

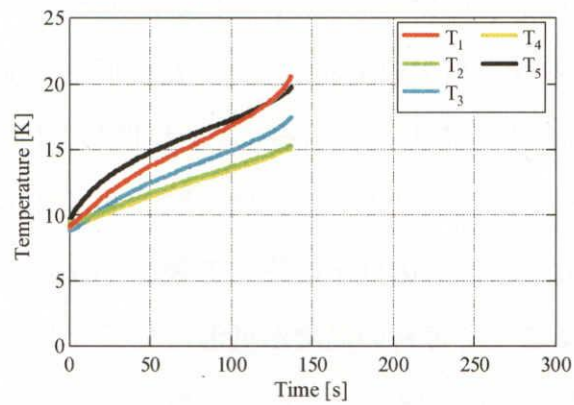
以上を踏まえ、熱伝導解析により、各 T_0 における連続通電時の熱暴走発生の限界電流を計算した結果を Fig.4.7 に示す。なおこの解析では、電流リードの発熱などによる外部からの熱侵入の影響を無視した理想的な伝導冷却状態を想定して計算しており、供試コイルサンプルの温度または発生電圧の時間変化が下に凸の曲線になった時点を経過したことを熱暴走とみなした。同図は各通電開始温度と通電電流に対し、熱暴走に至らなかったケースを○、熱暴走に至ったケースを×で表している。連続通電による熱暴走発生の限界電流は、 T_0 の低下に従って上昇し、 $T_0 < 15\text{ K}$ において飽和傾向にあることがわかる。これに関しては、第 2 章および第 3 章における臨界電流の T_0 依存性と同様の理由により説明される。すなわち、各材料の有する比熱が温度の T_0 の低下に従って著しく減少し、さらに熱伝導率は 30 K 以下で減少することで線材の温度が低温になるほど上昇しやすくなるため、熱暴走発生の限界電流が $T_0 < 15\text{ K}$ において飽和傾向にあると考えられる。



(a) $I = 100$ A

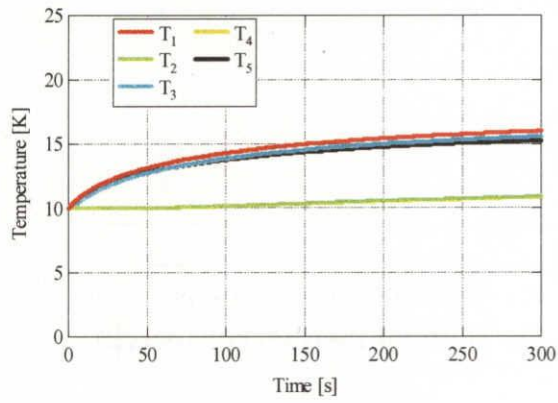


(b) $I = 130$ A

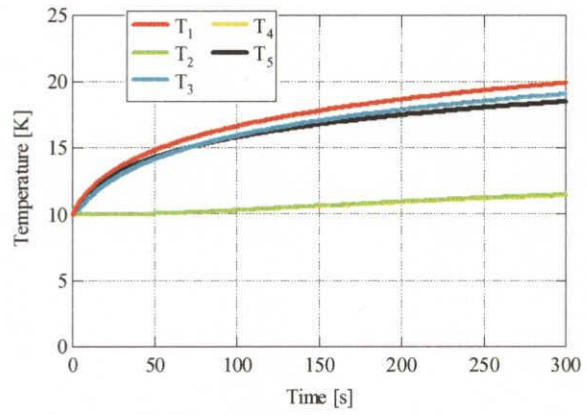


(c) $I = 140$ A

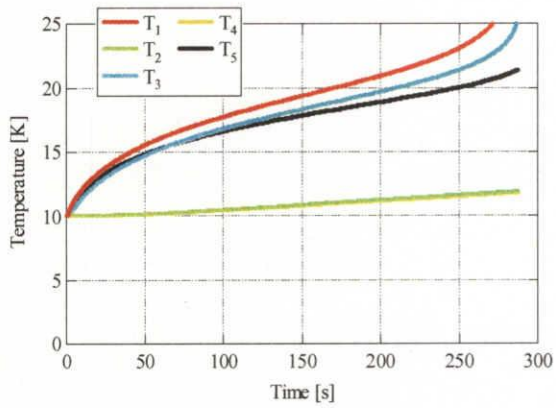
Fig.4.5 Temporal evolution of temperature in the coil (Experiment, $T_0 = 10$ K).



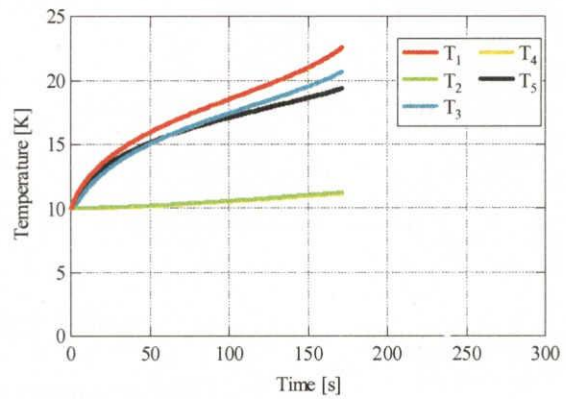
(a) $I = 100 \text{ A}$



(b) $I = 130 \text{ A}$



(d) $I = 140 \text{ A}$



(e) $I = 145 \text{ A}$

Fig.4.6 Temporal evolution of temperature in the coil (Calculation, $T_0 = 10 \text{ K}$).

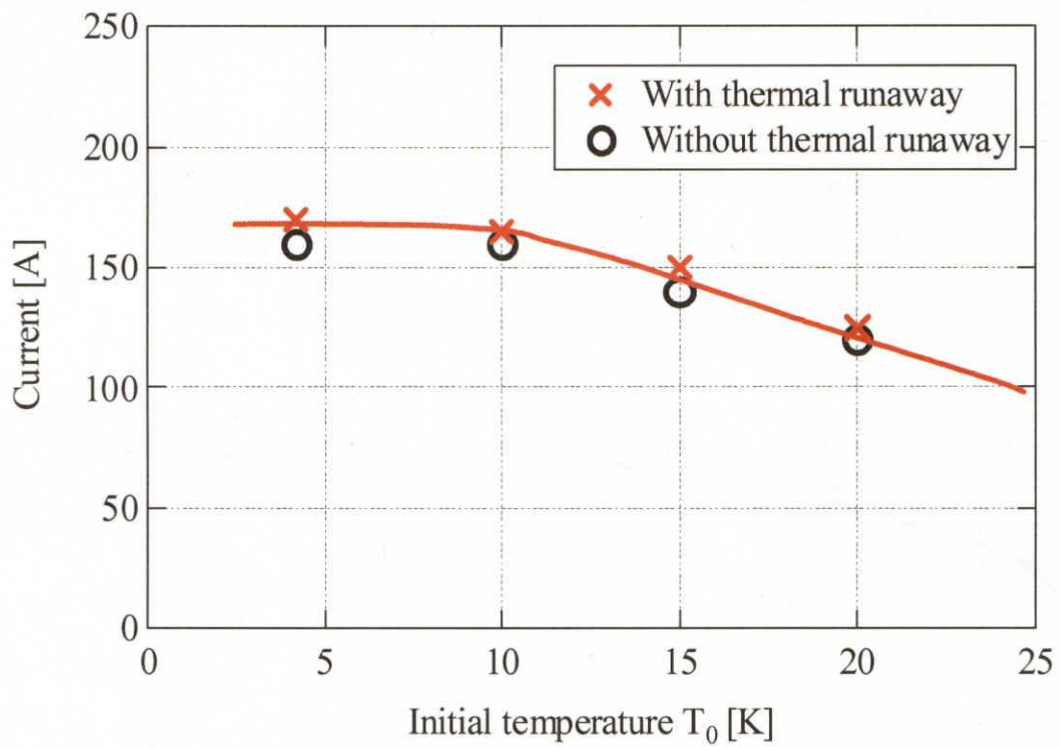


Fig.4.7 Thermal runaway current (Constant current).

4. 3 実器運転パターンを模擬した通電による熱暴走特性

前節では、供試コイルサンプルに直流電流を連続的に通電し、その熱暴走特性を検討した。しかしながら実器 SMES では、運転時に超電導コイルへの充電・放電を繰り返すため通電電流が変化する。このような状況において発生する熱暴走を検出し、超電導コイルを焼損から保護するためには、通電電流を変化させた場合の超電導コイルに発生する熱暴走特性を検討することが必要である。そこで、現在 SMES の適用が検討されている負荷変動に対する補償を想定した通電パターン^[1]による熱暴走特性を、供試コイルサンプルを用いて検討する。

4. 3. 1 負荷変動補償を模擬した通電パターン

Fig.4.8 に、評価に用いた負荷変動補償を模擬した通電パターンの波形^[1]を示す。波高値 90 A、18 s 周期の三角波 5 パルスであり、三角波通電前の待機電流 I_0 (10 ~ 90 A) および供試コイル内平均温度 T_0 をパラメータとした。実験を行うにあたり、コイルサンプルの配置は前節と同様であり、負荷変動補償パターンを通電時の供試コイルサンプル内における電圧・温度分布の時間変化を計測した。ただし、通電中に供試コイルサンプルの電圧が急上昇した場合はその時点で通電を中止した。

4. 3. 2 実験結果

実験結果の一例として、Fig.4.9 (a), (b) に、 $I_0 = 65$ A, $T_0 = 17.3$ K におけるコイルサンプル内電圧および温度の時間変化をそれぞれ示す。Fig.4.9 (a) より、通電電流上昇時、電流値がピークに達する近傍でコイルサンプル各層の電圧が急激に上昇しており、この時の電圧値は最内層に近づくほど大きくなっている。これは、最内層の磁界が最も高いこと、および冷却板が最外層に取り付けられていることによるものである。各通電パルスにおける最内層電圧 V_1 - V_2 のピーク値は、時間の経過に従って徐々に大きくなっている。特に、三角波通電開始後 80 秒後には V_1 - V_2

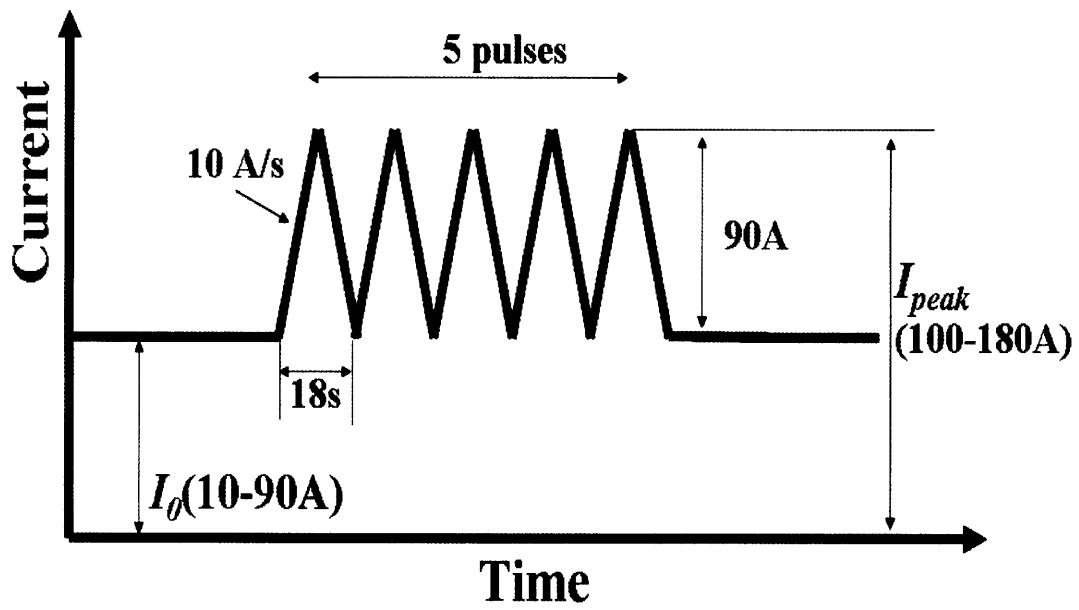


Fig. 4.8 Typical current pattern of SMES for load fluctuation compensation.

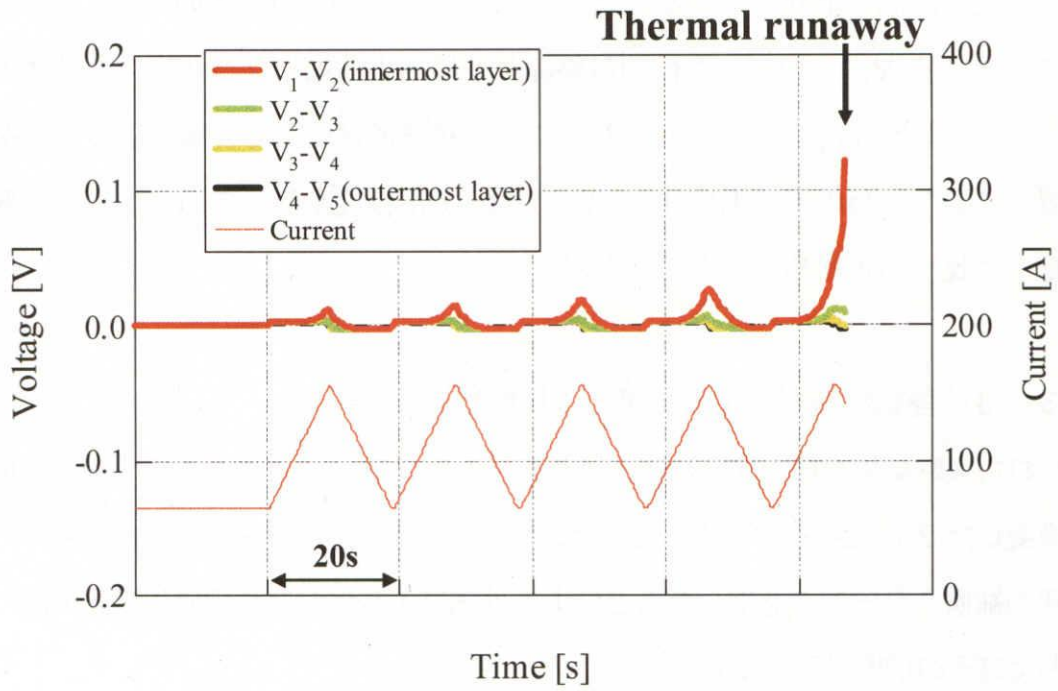
のピーク値が急激に上昇していることがわかる。ここでは、Fig.4.9 (a)のように各パルスにおける V_1 - V_2 のピーク値の包絡線が下に凸の曲線になった場合を熱暴走とみなした。また、Fig.4.9 (b)より、5パルスの三角波通電により各層の温度は徐々に上昇しており、最内層の温度 T_1 に関しては 10 K 程度上昇しているが、その変化は電圧に比べると緩やかであることがわかる。

4. 3. 3 熱伝導解析による結果との比較検討

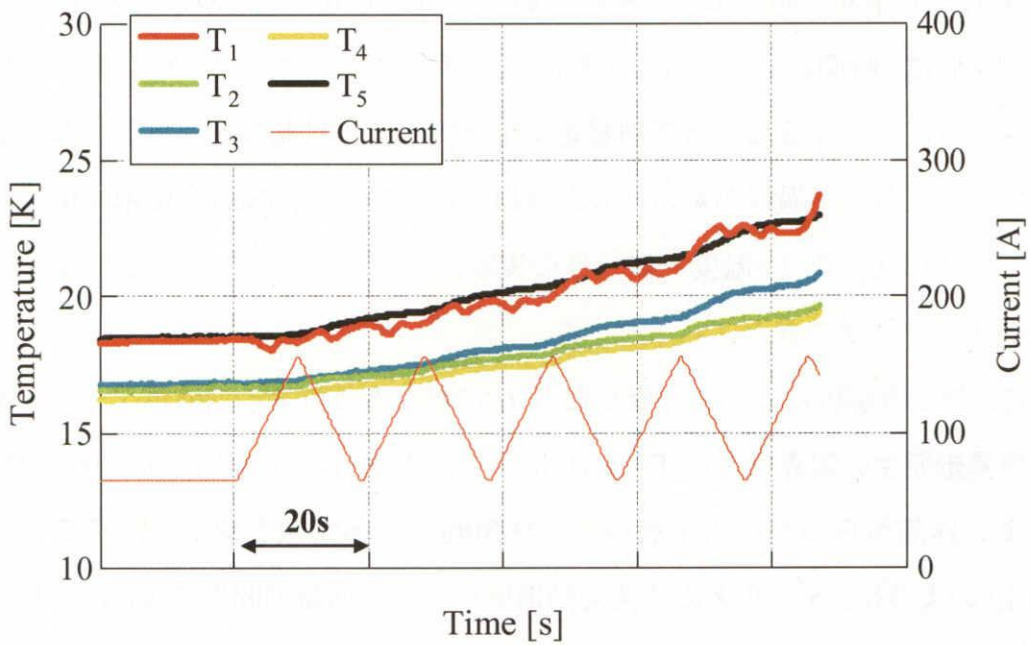
得られた実験結果を検討するため、供試コイルサンプルの形状およびその冷却構造を模擬した 2次元熱伝導解析を行った。解析モデルは前節のものと同様であり、負荷変動補償パターンを通電したことによる供試コイルサンプルの発生電圧・温度上昇およびその伝搬過程を計算した。

熱伝導解析によって計算した、Fig.4.9 の条件下における供試コイルサンプル各層の発生電圧・温度の時間変化を熱伝導解析によって求めた結果を Fig.4.10 (a), (b)にそれぞれ示す。両図より、解析においても各通電パルスの最内層電圧 V_1 - V_2 のピーク値は、時間の経過に従って徐々に大きくなっており、 V_1 - V_2 のピーク値の包絡線が下に凸の曲線になって熱暴走に至っている。供試コイルサンプルの温度上昇に関しても上昇過程が実験結果と概ね一致しており、Fig.4.9 に示す供試コイルサンプルの発生電圧・温度上昇特性の実験結果をシミュレーションによってほぼ再現することができた。

次に、熱伝導解析によって評価した各 T_0 における負荷変動補償パターン通電による熱暴走発生の限界電流を Fig.4.11 に示す。本解析では、電流リードの発熱などによる外部からの熱侵入を無視した理想的な冷却状態を想定し、ここでは、Fig.4.12 のように、5パルスの負荷変動補償パターン通電期間中に V_1 - V_2 のピーク値の包絡線が下に凸になった時点を熱暴走とみなした。Fig.4.11 において、初期通電条件(I_0 , T_0)に対し、熱暴走に至らなかったケースを○、熱暴走に至ったケースを×で表している。同図より、供試コイルサンプルにおける熱暴走発生の限界電

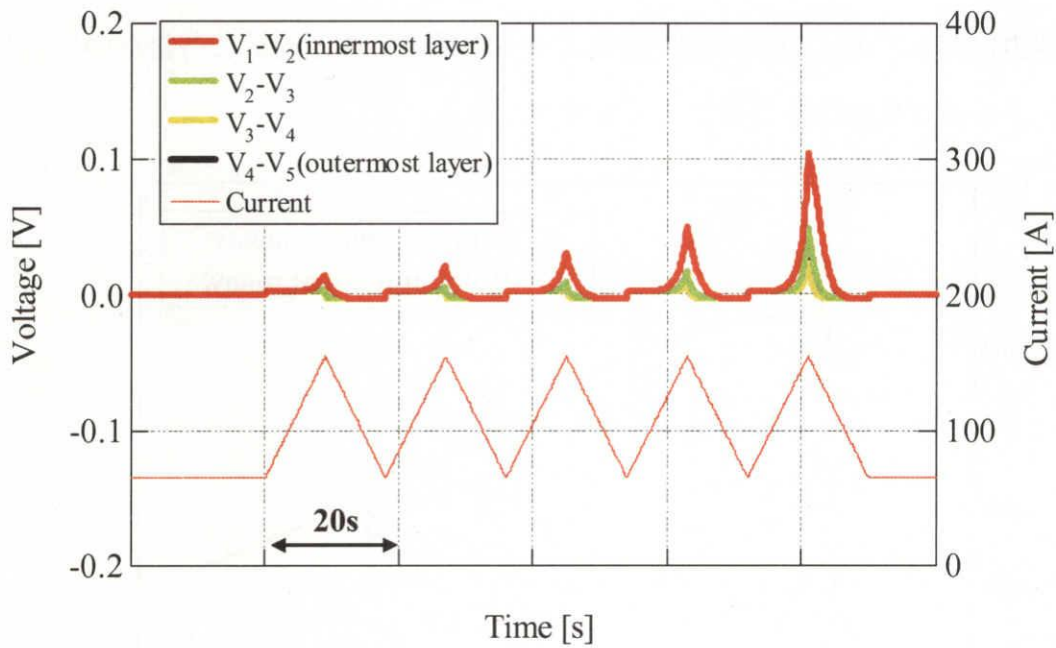


(a) Temporal evolution of voltage in each layer.

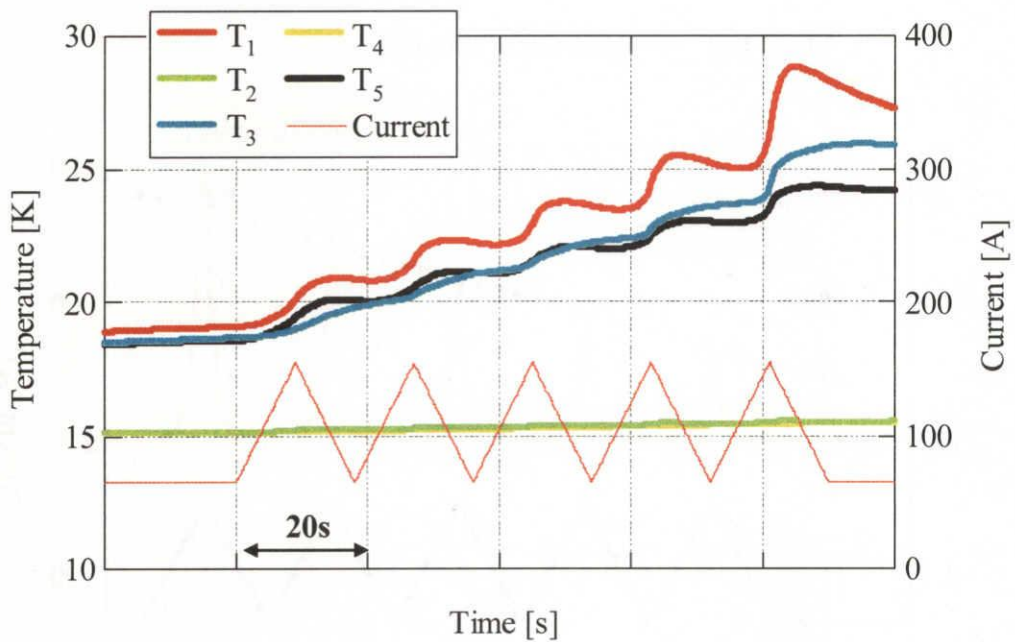


(b) Temporal evolutions of temperature in the coil.

Fig.4.9 Temporal evolution of voltage and temperature in the coil (Experiment, $I_0 = 65$ A, $T_0 = 17.3$ K).



(a) Temporal evolution of voltage in each layer.



(b) Temporal evolution of temperature in the coil.

Fig.4.10 Temporal evolutions of voltage and temperature in the coil (Calculation, $I_0 = 65$ A, $T_0 = 17.3$ K).

流は T_0 の低下に従って上昇し、 $T_0 < 10 \text{ K}$ において飽和傾向にあることがわかる。この理由に関しても、前節の連続通電による熱暴走特性と同様に各材料の熱的パラメータの温度依存性の影響によって説明される。

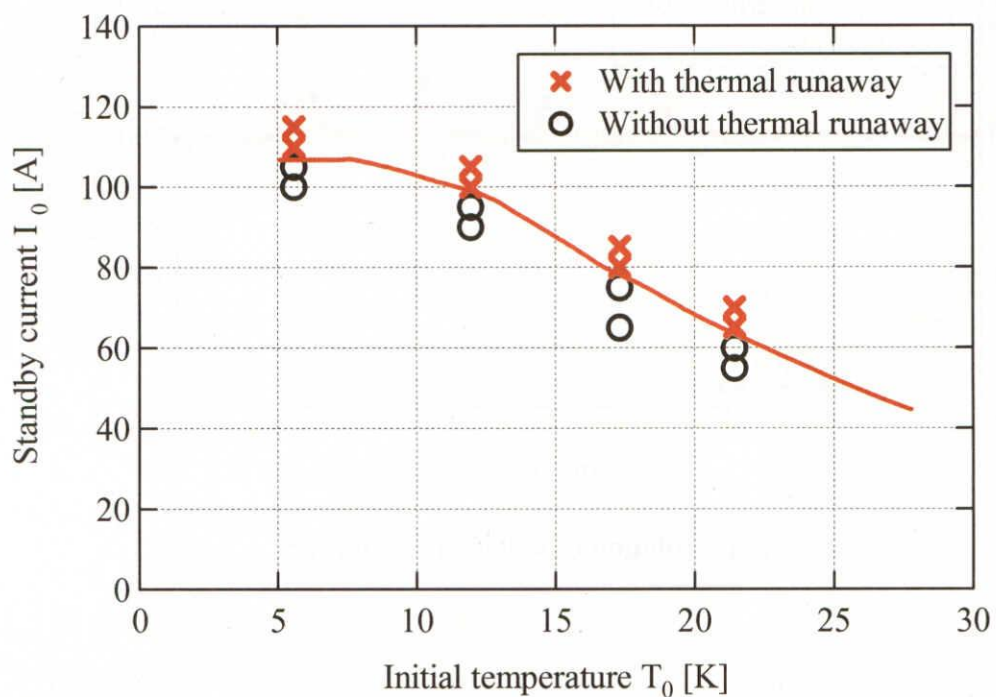


Fig. 4.11 Criterion of thermal runaway.

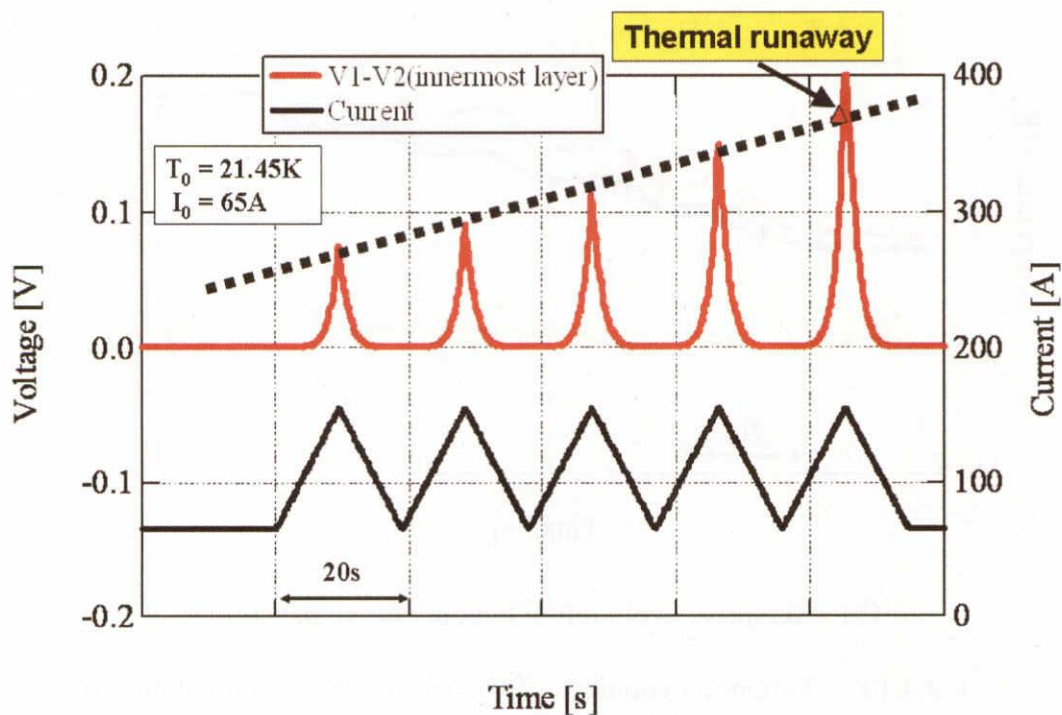


Fig.4.12 Detection of thermal runaway.

4. 4 熱暴走・クエンチ検出技術に関する考察

4. 4. 1 熱暴走検出に関する評価パラメータの考察

4.2 節および 4.3 節で行った実験的・理論的検討結果を踏まえて、超電導コイルのクエンチ・熱暴走検出に関する考察を行う。

これまでの検討より、伝導冷却された超電導コイルの熱暴走特性は、冷却板や超電導体などの有する比熱や熱伝導率などの熱的パラメータの温度依存性に強く影響を受けることが明らかになった。特に、 $T_0 < 10$ K の極低温領域では、各材料の有する比熱と熱伝導率が温度の低下に従って著しく減少するため超電導コイルの温度は上昇しやすい傾向にあり、超電導コイルの発熱と伝導冷却との熱的バランスは崩れやすくなる。このため、負荷変動補償パターン通電時において、熱暴走の発生する境界レベルは温度の低下とともに上昇せずに飽和する傾向があることを示した。また、負荷変動補償パターン通電時における超電導コイルの発生電圧・温度上昇特性から、熱暴走が発生した場合、超電導コイルの温度に比べ、各層の発熱の方が急峻に上昇することがわかった。

以上のことから、超電導コイルに生じる熱的な不安定状態を発熱の瞬時値を計測することによって検出するのがクエンチ・熱暴走の検出に最も有効であると考えられる。また、熱暴走の発生する境界レベルが温度によって異なる(Fig.4.7, Fig.4.11)ため、検出すべき発熱レベルは超電導コイルの温度に依存すると考えられる。すなわち、超電導コイルの発熱の瞬時値 P [W]と温度 T [K]を同時に計測することによって、その熱的な安定性を常時監視することが可能であると考えられる。以下にこの熱暴走検出方法の具体例を示す。

4. 4. 2 熱暴走検出の具体例

Fig.4.13(a)~(c)は、 $T_0 = 5.6 \text{ K}$, $I_0 = 65 \text{ A}$ の場合について計算した超電導コイル最内層の発熱 P [W]と温度 T [K]の軌跡を示しており、熱暴走検出点を各図中に▲印で併記している。ここで、Fig.4.12 に示す $T_0 = 21.45 \text{ K}$, $I_0 = 65 \text{ A}$ のケースのように、通電中に最内層電圧が上昇し、各パルスにおける最内層電圧のピーク値の包絡線が下に凸の曲線となり、第1パルスと第2パルスのピーク値を結ぶ直線よりも発生電圧が上まわった時点を熱暴走検出点とした。各図において、負荷変動補償通電パターンにおける各パルスの周期 $\Delta t = 18 \text{ s}$, 電流振幅 $\Delta I = 90 \text{ A}$ に固定し、電流上昇率 dI/dt をパラメータとした場合の軌跡を示している。各図において、5パルスの通電期間中に発熱および温度が上昇し、熱暴走に至っていることがわかる。

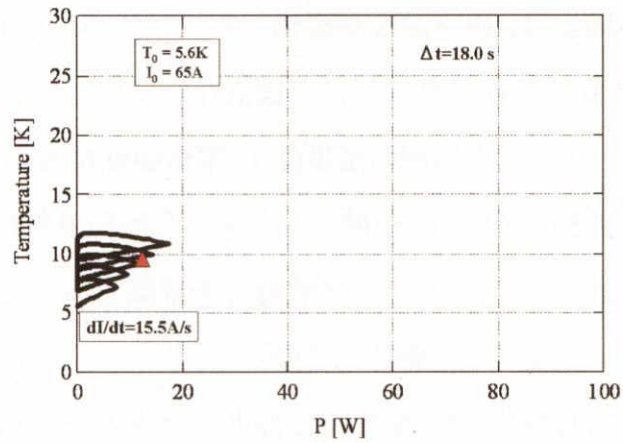
Fig.4.14 には、 $T_0 = 5.6 \text{ K}$, $I_0 = 65 \text{ A}$ および 110 A の場合について、 Δt , dI/dt , ΔI をそれぞれ Table 4.2 のように変化させた場合の熱暴走検出点をプロットしている。このとき、 Δt , dI/dt , ΔI のうち、1つのパラメータを基準パターン($\Delta t = 18 \text{ s}$, $dI/dt = 10 \text{ A/s}$, $\Delta I = 90 \text{ A}$)に固定し、他の2つのパラメータを変化させた。なお、負荷変動は5パルスで固定した。同図より、熱暴走検出点が P-T 空間で描く境界ラインは、これらのパラメータ範囲での待機電流 I_0 の値や、周期 Δt , 電流上昇率 dI/dt , 電流振幅 ΔI といった負荷変動パターンには依存していないことがわかる。このことから、種々の負荷変動パターンに対して熱暴走を監視・検出できる共通の評価基準を見出したとすることができる。また、Fig.4.15 に $I_0 = 65 \text{ A}$ および 110 A の場合について、Fig.4.14 の縦軸 $T[\text{K}]$ と横軸 $P[\text{W}]$ を逆にして示す。同図より、冷凍機の冷却能力とコイルの発熱とを比較すると、過渡的な負荷変動に対しては冷却能力よりもかなり高い発熱でも超電導コイルが熱暴走に至らないことがわかる。両者の差分は過渡的な負荷変動に対して超電導コイルが熱暴走に至るまでのマージンであると考えられる。 $T_0 = 21.5 \text{ K}$, $I_0 = 65 \text{ A}$ としたケースについて計算した熱暴走検出点が P-T 空間で描く境界ラインを Fig.4.16,

Fig.4.17 に示す. 同図より, 通電温度が変化した場合でも, 境界ラインは I_0 , Δt , dI/dt , ΔI といった負荷変動パターンにほぼ依存していないことがわかる.

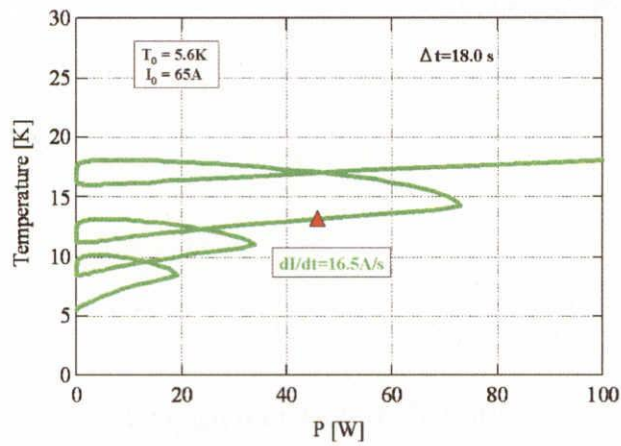
実器 SMES においても, 定格運転温度(T_0), 定格運転電流(I_0)に対して, 超電導コイルの形状およびその発熱・冷却構造を考慮した熱伝導解析により, 各種負荷変動パターン(Δt , dI/dt , ΔI)に対する発熱特性を評価することができる. これによって超電導コイルの温度と発熱との関係に検出すべき境界レベルを設けることが可能である. これに基づき, 運転時に温度と発熱とを実際に計測してコイルの熱的安定性を常時監視することにより, SMES をクエンチ・熱暴走から保護することができると考えられる.

Table 4.1 Calculation parameters.

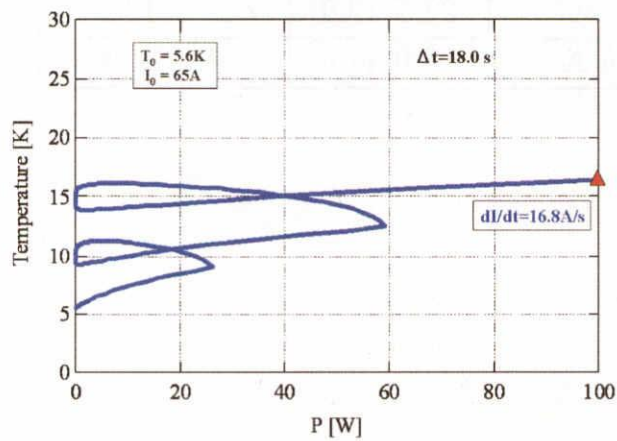
	Δt [s]	dI/dt [A/s]	ΔI [A]
Standard pattern	18	10	90
$I_0=65$ A	27.5-29.0	15.5-16.8	137.5-145.0
$I_0=110$ A	15.0-44.0	4.1-12.0	90.0-100.0



(a) $dI/dt = 15.5$ A/s



(b) $dI/dt = 16.5$ A/s



(c) $dI/dt = 16.8$ A/s

Fig.4.13 Loci in power (P)-temperature plane during load fluctuation compensation operation and detection points of thermal runaway ($T_0 = 5.6$ K, $I_0 = 65$ A).

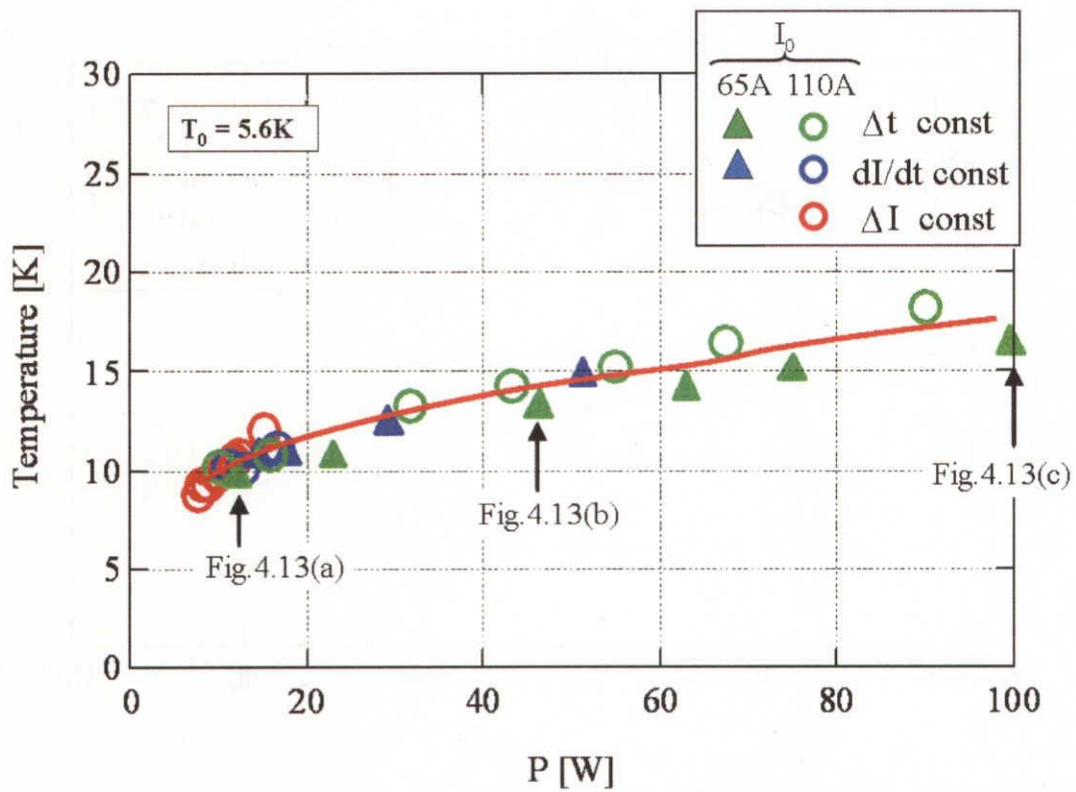


Fig.4.14 Thermal runaway detection points ($T_0 = 5.6$ K).

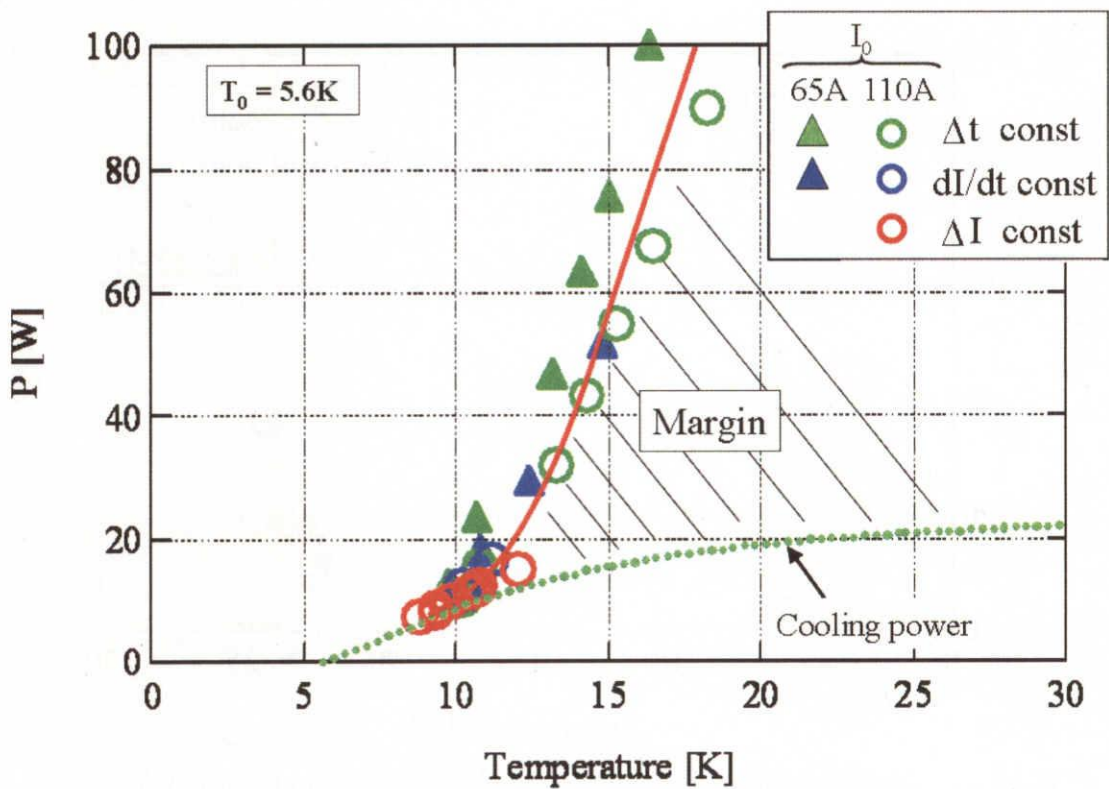


Fig.4.15 Heat generation P as a function of temperature in innermost layer at thermal runaway detection point ($T_0 = 5.6$ K, $I_0 = 65$ A, 110 A).

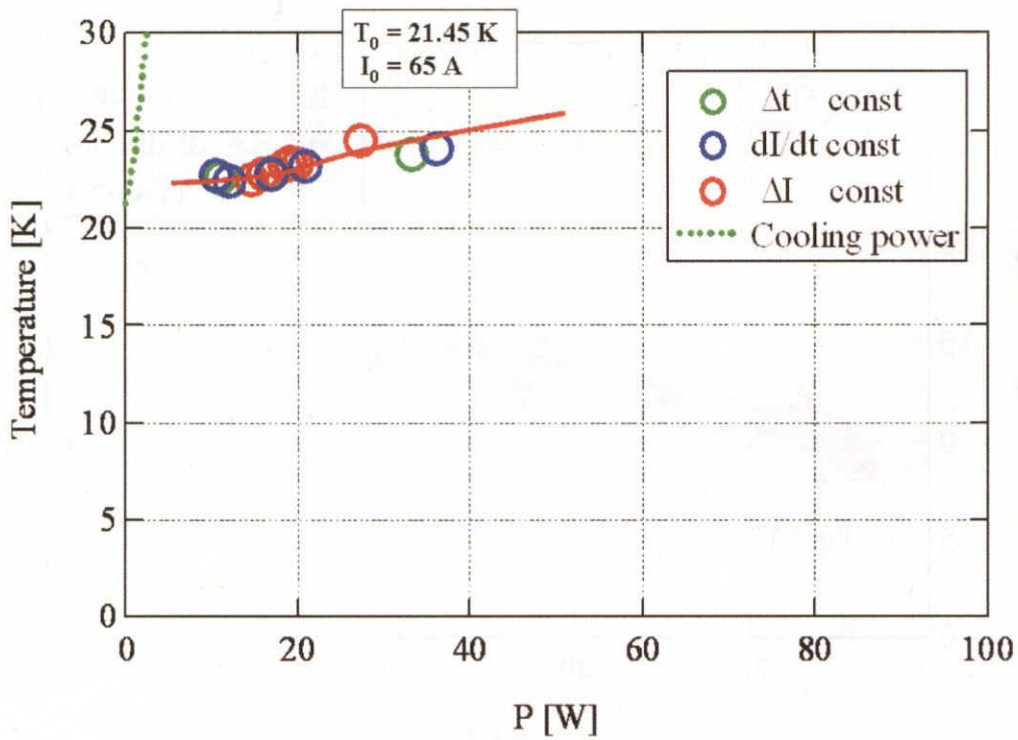


Fig.4.16 Temperature as a function of heat generation P in innermost layer at thermal runaway detection point ($T_0 = 21.45$ K, $I_0 = 65$ A).

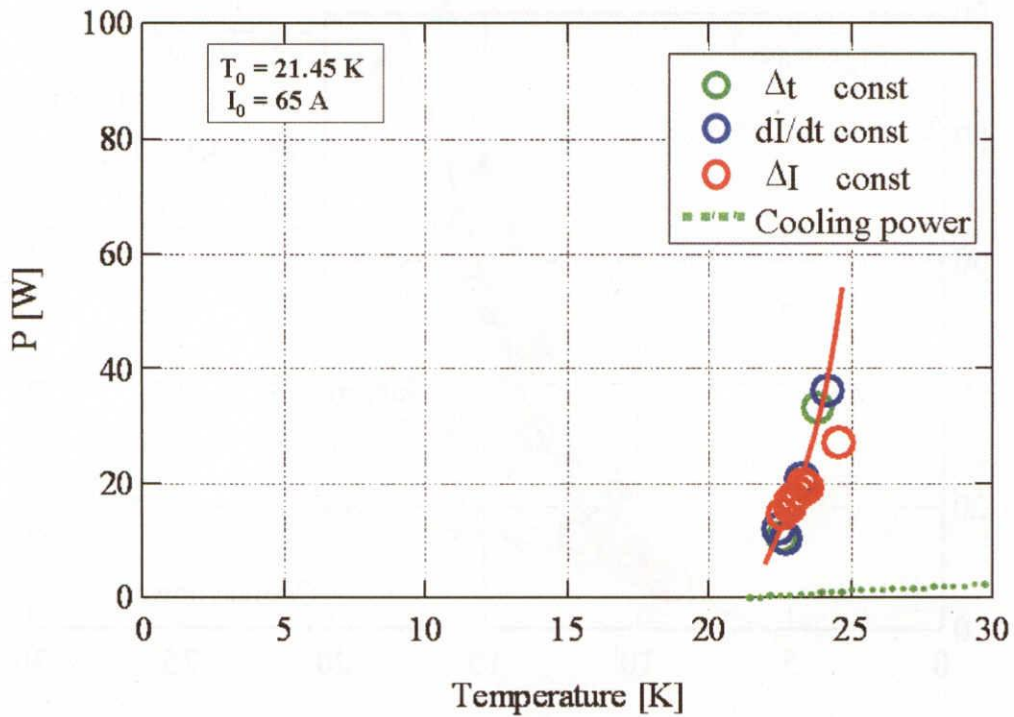


Fig.4.17 Heat generation P as a function of temperature in innermost layer at thermal runaway detection point ($T_0 = 21.45$ K, $I_0 = 65$ A).

4. 5 まとめ

本章では、冷凍機を用いて伝導冷却した Bi2212/Ag コイルサンプルに直流電流の連続通電および実器 SMES を想定した負荷変動補償パターンの通電を行い、その発生電圧・温度上昇特性を取得した。続いて、供試コイルサンプルの形状および冷却構造を模擬した熱伝導解析によって実験結果を検証し、供試コイルサンプルにおける熱暴走発生の境界レベルを評価した。さらにこれらを踏まえて、伝導冷却超電導コイルにおけるクエンチ・熱暴走の検出技術に関する考察を行った。以下に本章で得られた知見を示す。

- (1) 伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプルに直流電流の連続通電を行い、供試コイルの発熱・温度上昇特性を取得した。この結果、通電開始温度が上昇するに従って供試コイルサンプルが熱暴走に達するまでの時間が短くなることを明らかにした。この理由として、通電温度を高く設定したことによる供試コイルサンプルの発熱の増加分が供試コイルサンプルの熱容量の増加分よりも大きくなったためであることを示した。また、供試コイルサンプルにおける発生電圧と温度上昇との関係から、熱暴走が発生する付近では温度に対して電圧の方が急峻に上昇することを明らかにした。
- (2) 2次元熱伝導解析によって連続通電時の熱暴走電流の温度依存性を評価した。その結果、連続通電による熱暴走電流は通電開始温度 T_0 の低下に従って上昇し、 $T_0 < 15$ K において飽和傾向にあることを明らかにした。この理由として、各材料の有する比熱が温度の低下に従って著しく減少し、熱伝導率は 30 K 以下で減少することで線材の温度が低温なるほど上昇しやすくなるためであることを示した。

- (3) 供試コイルサンプルに負荷変動補償パターンを通電し，発熱・温度上昇特性を取得した．この結果，各通電パルスにおける最内層電圧のピーク値が時間の経過に従って上昇し，熱暴走に至ることを示した．また連続通電による実験結果と同様に，熱暴走発生時には，温度に対して電圧の方が急峻に上昇することを明らかにした．
- (4) 2次元熱伝導解析によって負荷変動補償パターン通電時における熱暴走発生の限界電流を評価した．この結果，熱暴走発生の限界電流は T_0 の低下に従って上昇し， $T_0 < 10\text{ K}$ において飽和傾向にあることを明らかにした．この理由に関しても，各材料の有する熱的パラメータの温度依存性の影響によって説明されることを示した．
- (5) 以上を踏まえて，SMES 用伝導冷却超電導コイルに発生するクエンチ・熱暴走を検出し，超電導コイルを焼損から保護する技術に関する考察を行った．その結果，超電導コイルに生じるクエンチ・熱暴走の検出には，超電導コイルの温度 $T[\text{K}]$ および発熱 $P[\text{W}]$ の瞬時値を計測することによって監視・検出するのが有効であることを指摘した．具体例として，P-T 空間に熱暴走の境界レベルを設けることができることを示し，この評価基準が負荷変動パターンの波形に依存しないことを見出した．さらに冷凍機の冷却能力と超電導コイルの発熱との比較より，過渡的な負荷変動に対するマージンの考え方を示した．

[第4章の文献]

- [1] 国際超電導産業技術研究センター：「超電導電力貯蔵システム技術開発 平成15年度成果報告書」，pp.235-236, (2004)

第5章 総括

5. 1 SMES の技術開発

現代社会において、電気エネルギーが果たす役割はますます重要なものになりつつある。特に、近年の情勢として、自由化の進展や、分散電源の導入によるエネルギー供給主体の多様化を受け、安定した高品質な電力の供給が重要な課題となっている。超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)は高効率かつ高速な応答速度を有しており、またエネルギー貯蔵の繰り返しによる劣化がなく、長耐用年数が期待できることから、系統制御への適用が期待されている。冷却方式としては、コンパクト化・低コスト化の観点や、最適な運転温度を設定できるという点から、冷凍機による伝導冷却方式が近年注目されている。熱侵入を大幅に軽減する超電導電流リードや、GM(Gifford・McMahon)サイクルを用いた GM 冷凍機の開発により、伝導冷却方式は現実のものとなり、電力系統への SMES の導入がいよいよ現実のものとなりつつある。

しかしながら、伝導冷却コイルにおいては、従来の液体ヘリウム浸漬冷却にはない技術課題として、超電導コイルの発熱と冷却能力との熱的バランスが崩れて不安定になってしまう、いわゆる熱暴走の可能性があることが危惧されている。これは SMES を構成する超電導線の焼損や機器の破損につながる恐れがあり、重要な技術課題である。

以上の観点から、本研究においては伝導冷却状態における Bi2212/Ag コイルサンプルに大電流通電を行い、さらにコイルの形状を模擬した熱伝導解析を行うことにより大電流通電時の電氣的・熱的挙動について基礎的な検討を行った。以下に、本研究で得られた成果および知見を各章毎に要約する。

5. 2 本研究で得られた成果および知見

5. 2. 1 LHe 伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプル における臨界電流の温度依存性

第 2 章では、設計・製作した Bi2212/Ag コイルサンプルに直流通電を行い、LHe 伝導冷却状態におけるコイルサンプルの臨界電流 I_c の通電開始温度 T_0 依存性を把握した。その結果、LHe 伝導冷却状態における Bi2212/Ag コイルサンプルの臨界電流 I_c は、通電電流の増加に従って増加し、 $T_0 < 10$ K においては飽和傾向にあることを明らかにした。続いてコイルサンプルの構造を模擬した 2 次元熱伝導解析を行い、実験結果との比較検討を行った。その結果、30 K 以下の温度領域では、超電導線材およびアルミニウムの低い比熱のために超電導線材の温度が上昇しやすく、アルミニウムの低い熱伝導率のために熱が超電導線材に溜まりやすい傾向があり、 $T_0 < 10$ K の温度領域において飽和傾向を有することを明らかにした。

5. 2. 2 冷凍機伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプル における臨界電流の温度依存性

第 3 章では、冷凍機を用いて伝導冷却した Bi2212/Ag コイルサンプルに直流通電を行い、 I_c - T_0 特性を取得した。その結果、過渡的な通電による常電導領域の発生特性および臨界電流特性は、LHe 伝導冷却状態における特性とほぼ同様の特性であることを明らかにした。続いて熱伝導解析によって実験結果をよく再現した。これらを踏まえ、 I_c 特性に関しては第 2 章と同様の理由により説明できることを示した。さらに冷却方式が異なる 2 つの実験系においてほぼ同様の常伝導発生特性および I_c - T_0 特性が得られた理由として、過渡的な発熱の時定数が、層間のエポキシおよびアルミニウム板を介した伝導冷却の時定数よりも

小さくなるためであることを示した。これより、過渡特性に関しては冷却方式よりもコイルサンプル自身の熱的パラメータの影響が大きくなることを明らかにした。

5. 2. 3 冷凍機伝導冷却 Bi2212/Ag 超電導コイルサンプル

における熱暴走特性および検出技術

第 5 章では、冷凍機伝導冷却 Bi2212/Ag コイルサンプルに直流電流を連続通電した場合の熱暴走特性を取得した。この結果、通電開始温度が上昇するに従って熱暴走に達するまでの時間が短くなることを明らかにした。この理由として、通電温度を高く設定したことによる供試コイルサンプルの発熱の増加分が熱容量の増加分よりも大きいためであることを示した。また、発生電圧と温度上昇との関係から、熱暴走が発生する近傍では温度に対して電圧の方が急峻に上昇することを明らかにした。続いて、2次元熱伝導解析によって連続通電時の熱暴走特性を評価し、連続通電による熱暴走発生の限界電流は $T_0 < 15$ K において飽和傾向にあることを明らかにした。この理由として、各材料の熱的パラメータの温度依存性が挙げられることを示した。さらに、負荷変動補償パターン通電時の熱暴走特性についても同様に取得し、熱伝導解析によって熱暴走特性を評価した。この結果、熱暴走発生の限界電流は T_0 の低下に従って上昇し、 $T_0 < 10$ K において飽和傾向にあることを明らかにした。この理由に関しても、各材料の有する熱的パラメータの温度依存性の影響によって説明されることを示した。

これらを踏まえて、クエンチ・熱暴走の検出技術に関する考察を行った。この結果、超電導コイルの温度 T [K]および発熱 P [W]の瞬時値を計測することによって熱暴走を検出するのが有効であることを示した。具体例として、 P - T 空間に熱暴走の境界レベルを設けることができることを示し、この評価基準が負荷変動パターンに依存しないことを見出した。また、過渡的な負荷変動に対するマージンの考え方を示した。

