

電力系統における大型超電導エネルギー貯蔵の実用化のための 基礎開発研究

Basic Study of Superconductive Magnetic Energy Storage for Electric Utility

代表研究者	高エネルギー物理学研究所教授 Prof., National Laboratory for High Energy Physics Masayoshi MASUDA	増田 正美
協同研究者	近畿大学教授 Prof., Kinki Univ. Fujio IRIE	入江 富士夫
	電子技術総合研究所室長 Manager, Electrotechnical Laboratory Toshitada QNISHI	大西 利只
	大阪市立大学教授 Prof., Osaka City Univ. Toyoichiro SHIGI	信貴 豊一郎
	高エネルギー物理学研究所助教授 Ass. Prof., National Laboratory for High Energy Physics Takakazu SHINTOMI	新富 孝和
	電力中央研究所部長 Manager, Central Res. Inst. of Electric Power Industry Katsutoshi TANAKA	田中 祀捷
	東京大学教授 Prof., Tokyo Univ. Yuichi NISHIMATSU	西松 裕一
	大阪大学助教授 Ass. Prof., Osaka Univ. Yoshishige MURAKAMI	村上 吉繁

The Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) which has the properties of high efficiency and good response is one of the most respected means for load leveling of utilities. Although it has no technical breakthrough for the realization, there are many technical problems to be solved for scaling-up. The following three items have been studied as the basic and technical problems: firstly the development of Nb_3Sn superconductor which has low cost and high critical current density at low field, 5 T, secondly the development of liquid helium transfer lines which has characteristics of low heat losses, and lastly the experimental studies of protection methods of the large superconducting coils.

As the superconductor is a main part of the capital cost of SMES, it is very important to reduce the cost. A so-called pipe method, which is one of the internal tin diffusion methods, has been studied by testing the fabrication process with short samples. This fabrication process is simple in comparison with the commercially established bronze process. As a result, the

properties of the critical current density of 440 KA/cm² at 5 T and 4.2 K was obtained. This value is almost a champion data of Nb₃Sn.

The other methods of the internal tin diffusion, named as a solid liquid method and a modified jelly roll (MJR) method, have been also tested. They can be also the candidate for the superconductors of SMES because of the simple fabrication processes.

The SMES system needs transfer lines with low heat losses to transfer a large quantities of liquid helium for cooling the superconducting magnet. A transfer line intended to low heat losses less than 0.2 W/m has been fabricated and tested. The test results show the good properties of low heat losses below the design value.

The protection of the SMES superconducting coil is important to assure the reliability when it will be installed in utilities. The experimental studies with a 60 KJ magnet have been performed to obtain the information of the protections at light and heavy accidents of SMES. One of the experiments has simulated the energy discharge in a small part of a coil where is in a normal conducting state at the light accident. The other was to measure abnormal internal voltages inside a superconducting magnet when it is quenched at the heavy accident. These were compared with the calculated values in good agreement.

1. 序

超電導コイルを用いて電気エネルギーを直接貯蔵する超電導エネルギー貯蔵（以下 SMES と呼ぶ）は効率が 90% 以上であり、また、負荷変動にミリ秒で対応できる即応性がある。現在唯一実用に供されている揚水発電に比べて、単に効率が 20~30% 良いというだけでなく、電力貯蔵として優れた特性も有している。近年、原子力発電の比率が高まってきたため、負荷変動に応じて夜間には原子力発電設備の出力調整の比率が叫ばれるようになった。だが、原子力発電は、定格出力で運転することが最も望ましいことは、いうまでもない。SMES の実用化は、今後のわが国のエネルギー政策上必要であり、SMES はその優れた機能から最適であると考えられている。

これまで SMES の研究は、新エネルギー総合開発機構 (NEDO) およびエンジニアリング振興協会 (ENAA) が概念設計と経済評価を行ない¹⁾、米国では EPRI、ウイスコンシン大学などが同様の検討を行なってきた²⁾。その結果、技術上のブレークスルーはない、経済性が成り立つ可能性が十分にあるとの結論に達している。我が国では 1986 年に大学、主要企業が参加している超電導エネルギー貯蔵研究会が発足し、超電導エネルギー貯蔵の実用化をめざした研究を行っており、米国では、1987 年 11 月に 20 MWh SMES

の建設プロジェクトに着手した³⁾。

このような状況の下に、本研究では、超電導エネルギー貯蔵の実用化にとって重要と思われる基礎的な項目の内、以下の項目について研究を行った。

- (1) 低磁界、高性能 Nb₃Sn の開発研究
- (2) 低損失液体ヘリウム輸送間の開発研究
- (3) 超電導コイル保護法の研究

本論文はこれらの研究成果について述べるものである。

2. SMES の原理

SMES の原理は、図 1 に示すように、超電導コイル、それを超電導状態に保つための低温断熱容器 (クライオスタット)、冷凍機、入出力変換器で構成されている。夜間電力を入出力変換器により直流に変換して超電導コイルに貯蔵し、昼間の電力需要ピーク時に変換器によって発電する。電力

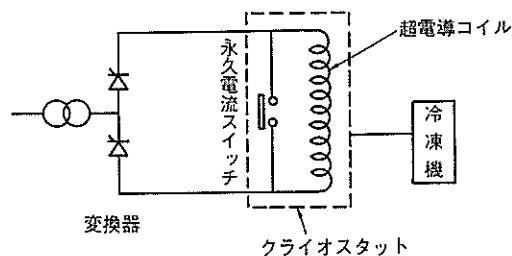
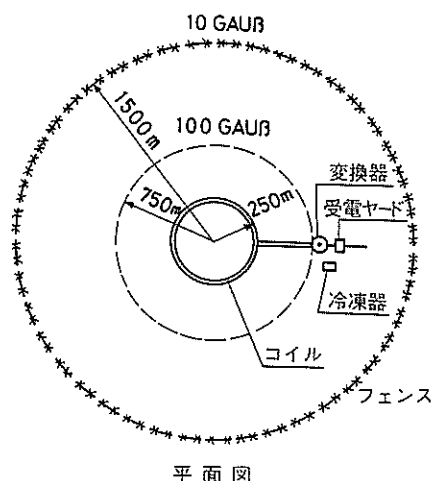
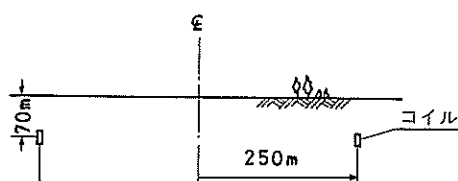


図 1. SMES の原理図。



平面図



断面図

図2. SMES の設計例.

は直接電気エネルギーとして貯えられるので効率が良い。

超電導コイルの規模は図2に示すように直径数百mになり、巨大な電磁力を支えるために経済的な理由から地下岩盤を利用する。例えば、ステンレス鋼のような通常の構造材料を用いるならば、重量が100万トン程度必要となり、それだけで経済分岐点を越えてしまう。既に述べたように、原理的には技術的な問題がないとされているが、実用化には、技術的、経済的観点に立って、超電導コイルそのものだけでなく、大型化に伴う種々の構成要素技術の開発が必要である。

3. 高磁界、高性能 Nb₃Sn の開発研究

3.1 必要性

SMESには従来の超電導コイルにない大量の導体を使用される。超電導線が価格に占める比率は20~30%になる。そこで、大量生産が可能な安価な超電導材料を開発することは、SMESの経

表1. Nb₃Sn と NbTi の比較.

項目	Nb ₃ Sn	NbTi
原料単価	100	130
歩留り	現状~60%	~80%
加工	将来 NbTi と同水準 やや複雑	簡単
臨界電流密度 (5 T, 2 K)	6.6×10^5 A/cm ²	3.8×10^5 A/cm ²

済性を発揮するための鍵となる。現在のところ、SMES用導体としては、NbTi と Nb₃Sn が有力候補である。両者の経済的、技術的検討を表1に示すが、既に製造法が確立されている NbTi に比べて、超電導特性が優れていることなどから、開発途上にある Nb₃Snの方が、将来価格が下がる可能性が大きいと考えられる。試算では、Nb₃Sn は NbTi に比べて将来の価格が1/1.5~1/2になると予想され、結果的に SMES の建設費を数百億円低減できる可能性がある。

Nb₃Sn で各種の製造法のうち市場化されているのはブロンズ法であるが、特性(臨界電流密度)が今一つ良くないこと、加工工程の複雑さのゆえに価格低減があまり期待できない。各種の製法の開発が進められているが、現状では核融合用の導体開発を目的としているため、10 T 以上の高磁界に的を絞っている。しかし、SMES用超電導コイルは5 T 近傍の低磁界で用いられるので、低磁界用 Nb₃Sn の開発が必要である。

ブロンズ法以外には、内部拡散法(内部拡散法、パイプ法、固液法など)、MJR法、粉末法、In Situ法などがある。これらの方法は NbTi の製法に比べて同等か、あるいはより簡単である。また、超電導特性も NbTi に比べて良い。しかし、これらの方法は開発途上にある技術であり、研究が必要である。

3.2 超電導線の特性改善に関する実験的研究

(a) パイプ法による Nb₃Sn 線の超電導特性

現在商用化されているブロンズ法は、工程が複雑なために NbTi よりも価格が高い。しかし、研究したパイプ法の製造工程は、ブロンズ法が必要とされている複雑な中間熱処理が一切なく、

表2. パイプ法 Nb₃Sn 短尺サンプルの主要諸元.

外径	0.804 mmφ
フィラメント数	7
フィラメント径	176 μmφ
銅比	1.98

NbTi の加工法とほぼ同じである。従って、原材料費が安く、超電導特性の良い分だけ、NbTi よりも価格が安くなると予想される。

優れた特性の線材開発の基礎研究のために、超電導特性に影響するパラメータであるフィラメント径、Sn 濃度、ならびに、Nb₃Sn 形成に必要な熱処理温度、熱処理時間を変えたサンプルを作り特性を測定した。表2に導体主要諸元を示す。基本特性をみるために、フィラメント数は通常より少ない本数に限定した。

Sn 濃度は 25~70%，熱処理を 675℃，2 時間~725℃，432 時間，また、線径を 0.5~0.8 mm の範囲で変え、それらのパラメータの超電導特性への影響を調べた。熱処理の Nb₃Sn 層形成への影響を図3に示す。また、線径と Sn 濃度を変えたときの臨界電流特性の結果を図4に示す。

この研究によって得られた成果は次の通りである。

(1) 線径に関しては、細い方が良い特性を示す

(2) Sn 濃度に関しては、35~40% が最適である

(3) 熱処理後は、725℃，100 時間で十分な Nb₃Sn 層を形成できる

(4) 臨界電流特性として、5 T，4.2 K で 440 kA/cm² と champion data に匹敵する高い値が得られた

(b) 固液法による Nb₃Sn 線の超電導特性
内部拡散法の一方法である固液法で超電導線を製作し、その評価を行なった。

試験方法はほぼパイプ法と同様、短尺のサンプルを製作し、熱処理温度を 650~730℃，熱処理時間を 25~100 時間と変えて、その特性を測定した。サンプル超電導線のパラメータを表3に、得られた結果を図5に示す。得られた超電導特性はパイプ法に比べて幾分劣っている。

(c) MJR 法による Nb₃Sn 線の超電導特性

MJR 法は (a) で述べたパイプ法よりも、Ni ロッドの組込みの手間が省けるために、より工程が簡単になる。この方法についても、サンプルを製作し、特性の測定をした。処理は 680℃，100 時間~720℃，48 時間とし、導体については表4

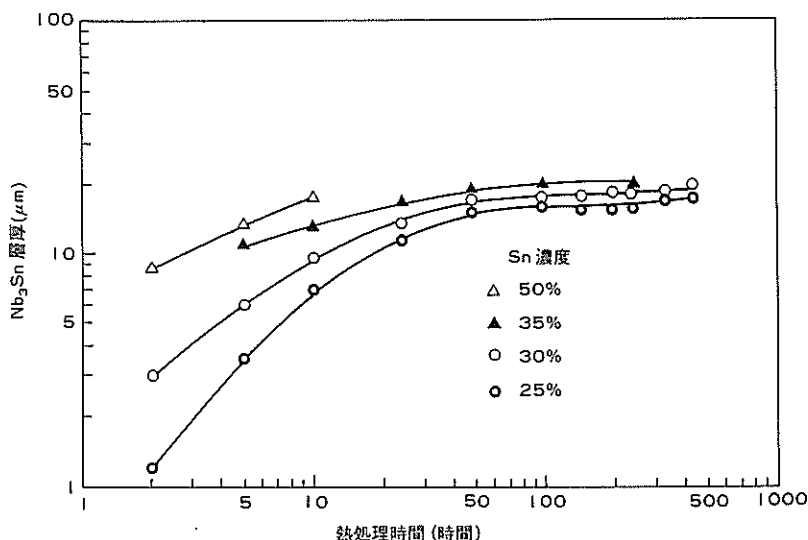


図3. Sn 濃度および熱処理条件に対する Nb₃Sn 層の形成状況.

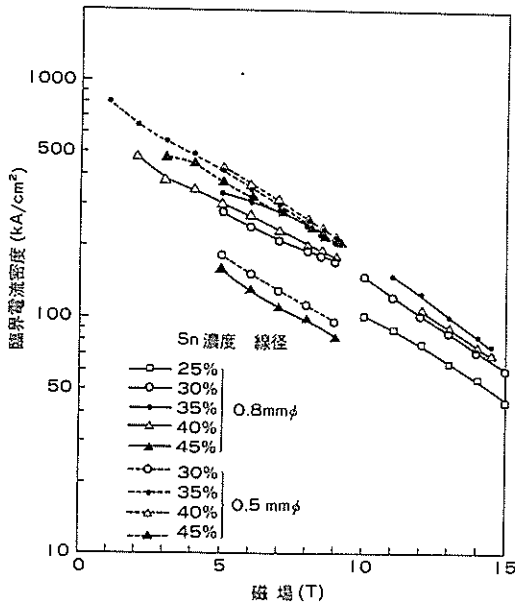


図4. パイプ法による Nb₃Sn の臨界電流特性.

表3. 固液法 Nb₃Sn 短尺サンプルの主要諸元

線径	0.76 mmφ
フィラメント数	61
フィラメント径	37 μmφ
銅比	0.8

表4. MJR 法 Nb₃Sn 短尺サンプルの主要諸元.

線径 (mm)	0.686	0.927
銅比	0.727	1.062

のごとく2種類選択した。

測定結果を図6に示すが、他の2方法とほぼ同様の特性が得られている。

3.3 実験結果

既に述べたように、パイプ法の加工はブロンズ法に比べて簡単である。この方法で、ブロンズ法で得られる以上の良好な特性を示す Nb₃Sn 超電導線が得られた。また、固液法と MJR 法でも、ほぼ同等の超電導特性を得ることができた。このことは、ここで試験した製作法をさらに改良すれば、将来安価な導体を得る可能性があり、初期の目的をほぼ達成できたといえよう。

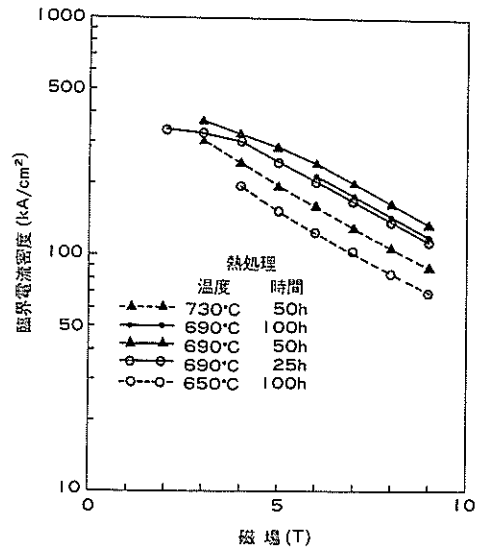


図5. 固液法による Nb₃Sn の臨界電流特性.

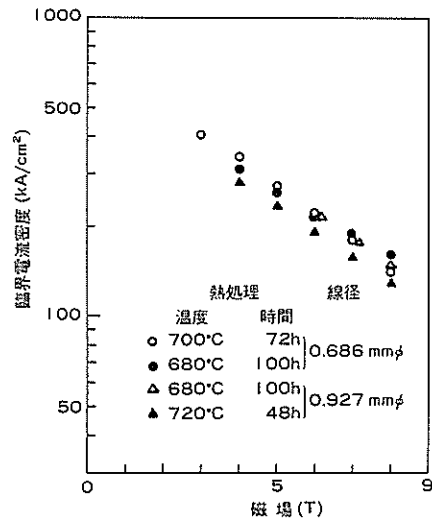


図6. MJR 法による Nb₃Sn の臨界電流特性.

4. 低損失液体ヘリウム輸送管の開発

4.1 必要性

SMES は効率が高いことが最大の特徴である。効率に影響するものに冷却系の熱負荷がある。SMES は超電導コイルを冷却するために、数百～数 km に及ぶ液体ヘリウム輸送用低温配管を必要とする。したがって、低温配管への入熱は無視できない。低温配管の高性能化は、所要冷凍負荷

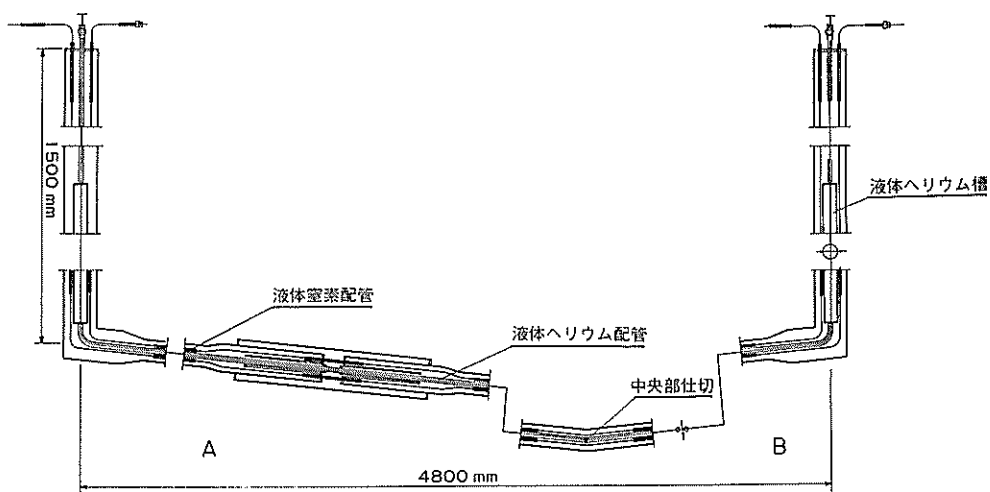


図7. テスト用液体ヘリウム輸送管の概略図。

を低減することになり、その開発は SMES の実用化にとって重要な課題の一つである。

4.2 従来の低温配管の構造および特性

断熱効果を高める方法の一つはフレキシブル多重配管方式である。この方式特徴は小口径の低温配管の場合、コイル状に巻いて輸送可能なため、条件を長くとれることである。しかし、多重管の間のスペーサを密に入れる必要があり、伝熱をいかに抑えるかが問題である。

他の方式は、液体窒素シールド付き配管である。これには液体窒素配管と液体ヘリウム配管の配置に関し、同心円状とする方式とがある。前者は、外管-液体窒素配管および液体窒素-液体ヘリウム配管との間に独立の断熱空間が必要であり、特に接続部の構造が複雑となる。それに対して、後者は構造が簡単という利点がある。

4.3 試験用低温配管の構造

この低温配管の試験では、構造が簡単な液体窒素シールド付き並列配置の方式を利用し、設計目標を次のように設定した。

- ① 液体ヘリウム配管は口径を $1/2 B$ とし、往復として 2 本とする。
- ② 入熱は接続部も含めて配管往復 1 本当たり 0.2 W/m 以下とする。
- ③ 液体窒素シールドの最高温度を 100 K 以

下に抑える。

- ④ 長尺の配管を模擬するために接続部を設け、その部分は溶接構造とする。
- ⑤ 輻射断熱にはアルミニウム薄膜を用いる。その概略構造を図 7 に示す。

試験用配管は、自然蒸発の計測により性能測定ができるように設計した。特に両端部からの入熱が測定の障害にならないよう、端部からの入熱を極力抑えるよう配慮した。テスト配管は、図 7 に示すように、液体ヘリウム配管の中央部に仕切りを設け、A 側は接続部を有し、B 側は接続部を持たない構造とし、接続部の熱侵入を測定できるようにした。

4.4 試験結果

試験では液体ヘリウム配管に液体ヘリウムを充填し、液体窒素槽に液体窒素を流し、十分に安定した後に、液体ヘリウムの蒸発量から、侵入熱を求めた。

両端部からの入熱を補正した後の侵入熱量は、接続部込みで、平均 0.178 W/m であった。この値は、設計目標である 0.2 W/m を十分下回っている。接続部の侵入熱量は往復 0.53 W/m であり、目標値を満足するものであった。測定結果は計算値ともよく一致し、接続部を含んだ値は、十分満足できる性能である。

5. 超電導コイルの保護法の研究

5.1 SMES の超電導コイルの保護法

SMES 用超電導コイルでは、コイルがクエンチを起こした時、従来のようにその貯蔵エネルギーを外部に放出して保護する方法を取ることができない。クエンチでコイルが焼損する温度になる前に、貯蔵エネルギーを外部に放出するためには、コイルに高い電圧を掛ける必要がある。たとえそれが高能でも、短時間に大電力を放出すると、

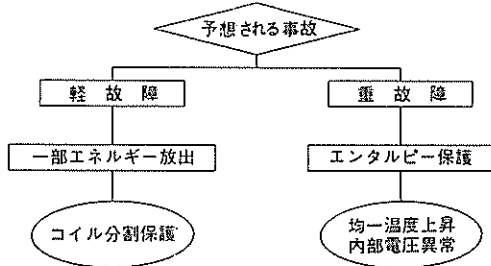


図 8. SMES に予想される事故.

表 5. 実験用コイルのパラメータ

貯蔵エネルギー	60 kJ
定格最大電流	850 A
コイル 内径	180 mm
外形	230 mm
高さ	210 mm
巻数	69×16 層
超電導線	NbTi

SMES が接続されている電力系統に大きな擾乱を生じる。

そこで SMES の場合、コイル保護のためにその貯蔵エネルギーをコイル自身の持つ熱容量（エンタルピー）で吸収し、その温度上昇がコイルが破損しない許容温度以下になるように設計し、保護する方法を取る。

しかし、その時に考慮しなければならないことは、コイルを均一に温度上昇させる必要があること、同時にコイル内部に異常な電圧が発生しない

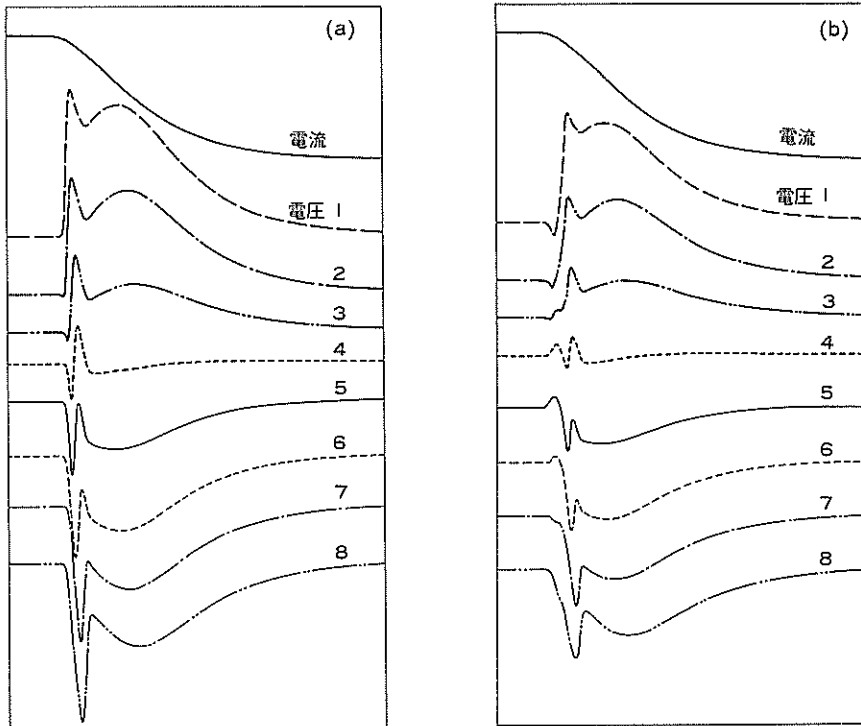


図 9. クエンチ時に発生するコイル内部電圧分布.

- (a) 最内層をクエンチした時
(b) 中間部をクエンチした時

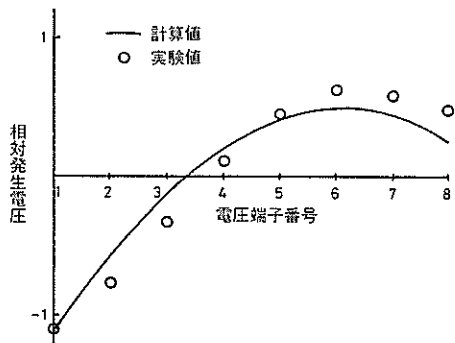


図10. クエンチ時に発生するインダクタンスによる内部電圧分布。

ようにすることである。

5.2 SMES の事故の分類

事故としては図8に示すように軽故障と重故障の2通りが考えられる。

その一つは、冷凍機の故障や断熱真空の緩慢な悪化によるヘリウム液面の低下で、超電導コイルが一部電導移転するような場合である。この場合には、現象がゆっくりしており、貯蔵エネルギーの一部を外部に放出することで対処できる。放出すべき貯蔵エネルギーが少ないので、十分に外部に放出できるわけである。

一方、ヘリウム容器や真空容器の急激な破損では、クエンチが急速に起こるので、エネルギーの外部放出では対処できず、コイルの熱容量で貯蔵エネルギーを吸収する方式を取らざるを得ない。

5.3 コイル分割保護の実験

軽故障はなんらかの擾乱によりコイルの一部が常電導転位した場合である。常電導転位した部分のエネルギー量が少ないので、他の正常な部分のエネルギーは永久電流スイッチを用いて永久電流モードで保持しつつ、常電導転位した部分のみのエネルギーを放出することが可能となる。このためには、スイッチで永久電流モードと運転モードとの切り換えが滑らかにできることが必要条件となる。

表5に示す超電導コイルを用いて両モード間の切り換えの実験を行なった。その結果、両モード間の切り換えが滑らかにできることの確認できた。

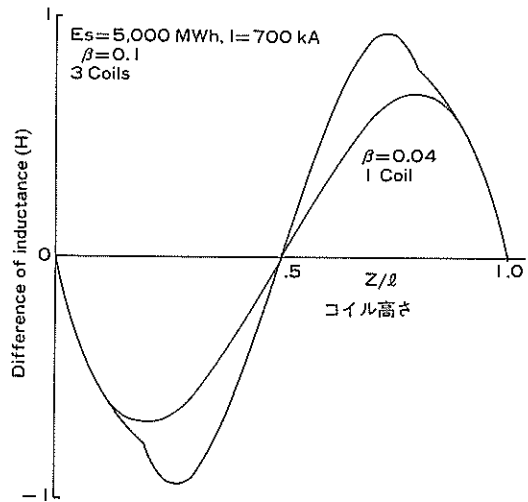


図11. 5 GWh SMES の超電導コイルのインダクタンス分布。

5.4 クエンチ時の発生内部電圧の測定

実験は同じく表5に示す超電導コイルで行なわれた。コイルには強制的にクエンチを起こさせるためのヒータが2箇所、また発生する内部電圧を測定する電圧端子が各層ごとに取り付けられている。

実験によって測定された内部電圧の分布の一例を図9に示す。(a)はコイル最内層に取り付けられたヒータによってクエンチを起こさせた時であり、(b)はコイル中間に取り付けられたヒータによるものである。クエンチの場所によって内部発生電圧の波形が異なっている。これは、クエンチの伝播の様子が、クエンチ発生部位によって異なるためである。

5.5 内部電圧発生に関する考察

図9に示す波形で、早い成分はクエンチによる巻線の抵抗分による電圧であり、また遅い成分がコイルのインダクタンスによるものであることが、計算機シミュレーションから分かった。又、シミュレーションからコイル温度が一樣になれば、抵抗による電圧分布は消滅することが分かった。したがって、いかにして均一に温度上昇させるかが今後の課題である。

一方、インダクタンスによるものは、図10に示すように計算とよく一致する。さらに、SMES

用大型コイルの電圧分布を計算すると図 11 のようになる。この発生電圧はコイル・ブロックごとにスイッチで短絡する方法で抑制できることが分かった。

6. ま と め

6.1 低磁界、高性能 Nb₃Sn の開発研究

内部拡散法（パイプ法、固液法、MJR 法）によって、低磁界で良好な臨界電流密度特性を持つ Nb₃Sn が開発でき、その特性は champion data にほぼ匹敵するものであった。その製造方法に対する最適処理条件をほぼ見つけることができた。

6.2 低損失液体ヘリウム輸送管の開発研究

低温配管の断熱特性を調べるためにテスト配管を製作し試験した結果、接続部を含めた総合入熱量として配管往復一本当たり 0.18 W/m を得た。この値は設計目標 0.2 W/m を下回るものであり、また接続部での侵入熱も当初設計通りの値が得られ、SMES に要求される長尺、高性能液体ヘリウム輸送管の開発の目処を得た。

6.3 超電導コイル保護法の研究

SMES 用大型超電導コイルの保護法の確立に必要なデータを得るための実験が行なわれ、それによって得られた結果と計算機を用いて計算した結果がよく一致することが分かった。このことから、事故時に発生する現象についての知見を得ることができ、また大型超電導コイルの保護法を研究する際、計算機のシミュレーションによって解析する目処を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) 超電導エネルギー貯蔵システムに関する調査研究、昭和 58 年度エネルギー総合開発機構委託研究成果報告書、NEDO-P-8408、昭和 60 年 6 月。超電導エネルギー貯蔵システムに関する調査研究報告書、エンジニアリング振興協会、ENAA 1985-ブ 3、昭和 61 年 3 月。
- 2) EPRI report, EPRI EM-3457, RP 1199-17, April 1984. Los Alamos National Laboratory report, LA-10320-MS, 1985. R. W. Boom, Proc. of UW-Japan Workshop on SMES, Madison, Oct. 1981, p. 44.
- 3) R. W. Boom, private communication.

研 究 発 表

- 1) M. Masuda and T. Shintomi: "Conceptual Design of 5 GWh SMES," Proceedings of the

- 9th Inter. Conference of Magnet Technology, Zurich, Sept. 1985., p. 357.
- 2) Y. Murakami, N. Ohuchi and J. Yamamoto: "Analyses and Measurements of AC Loss of 0.5 MJ Pulsed Magnet," Proceedings of the 9th Inter. Conference of Magnet Technology, Zurich, Sept. 1985, p. 520.
- 3) T. Shintomi and M. Masuda, K. Otani, G. Cha and Y. Kwon: "The Experimental Study of Protection Method of Large Superconducting Coil Systems," to be published in Proceedings of the 1986 Applied Superconducting Conference, Baltimore, Sept., 1986.
- 4) M. Masuda and T. Shintomi: "The Conceptual Design of Utility Scale SMES," to be published in Proceedings of the 1986 Applied Superconducting Conference, Baltimore, Sept., 1986.
- 5) 増田正美: "5 GWh 超電導エネルギー貯蔵の概念設計", 第 33 回低温工学研究発表会予稿集, 昭和 60 年 5 月, p. 130.
- 6) 新富孝和: "5 GWh 超電導エネルギー貯蔵コイル系", 第 33 回低温工学研究発表会予稿集, 昭和 60 年 5 月, p. 132.
- 7) 三谷康範, 村上吉繁, 他: "電力系統安定化装置としての超電導エネルギー貯蔵装置に関する基礎研究", 電気学会静止器研究会, SA-86-8.
- 8) 青木伸夫, 中村俊三郎, 鈴木英央, 新富孝和, 増田正美: "Nb チューブ法による Nb₃Sn 導体の低磁界特性の改善", 第 34 回低温工学研究発表会予稿集, 昭和 60 年 11 月, p. 128.
- 9) 新富孝和: "5 GWh SMES の概念設計", 第 34 回低温工学研究発表会予稿集, 昭和 60 年 11 月, p. 152.
- 10) 新富孝和, 大谷和弘, 増田正美: "大型超電導マグネットの保護に関する実験的研究", 第 35 回低温工学研究発表会予稿集, 昭和 61 年 5 月。
- 11) 増田正美: "SMES 内外の研究動向", 第 1 回超電導エネルギー貯蔵研究発表会論文集, 昭和 61 年 12 月, p. 1.
- 12) 田中祀捷: "電力における貯蔵装置とその運用戦略", 第 1 回超電導エネルギー貯蔵研究発表会論文集, 昭和 61 年 12 月, p. 16.
- 13) 西松裕一: "SMES 岩盤の諸問題", 第一回超電導エネルギー貯蔵研究発表会論文集, 昭和 61 年 12 月, p. 34.
- 14) 新富孝和: "SMES における超電導の安定と保護", 第 1 回超電導エネルギー貯蔵研究発表会論文集, 昭和 61 年 12 月, p. 44.
- 15) 増田正美, 新富孝和: "超電導エネルギー貯蔵におけるコイル安定性と保護", 文部省科学研究費補助金, エネルギー特別研究「電気エネルギーの有効利用に関する研究-昭和 61 年度研究成果報告書」, 昭和 62 年 2 月, p. 39.

- 16) 新富孝和, 増田正美: “超電導エネルギー貯蔵システム研究の現状”, エネルギー, 20, (3) 74, (1987), 日本工業新聞社発行.
- 17) 新富孝和, “超電導エネルギー貯蔵用試験プラントの設計”, 第37回低温工学研究発表会にて報告予定, 昭和62年5月.