



Title	SMES用 高温超電導電流リード線の開発
Author(s)	岸田, 卓也; 寺井, 晴一郎; 増田, 孝人 他
Citation	電気材料技術雑誌. 1994, 3, p. 62-68
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/81554
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

SMES用 高温超電導電流リード線の開発

岸田 卓也、寺井晴一郎、増田 孝人*、加藤 武志*

関西電力株式会社 総合技術研究所

兵庫県尼崎市若王寺 3-11-20

*住友電気工業株式会社 電力システム技術研究所

大阪府大阪市此花区島屋 1-1-3

*住友電気工業株式会社 大阪研究所

大阪府大阪市此花区島屋 1-1-3

Development of High-Tc Superconducting Current Lead for SMES

Takuya KISHIDA, Seiichirou TERAJ

Technical Research Center, The Kansai Electric Power Company, Inc.

11-20 Nakoji, 3-chome Amagasaki, Hyogo-ken

Takato MASUDA

Electric Power System Technology Research Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd.

1-3, Simaya 1-chome, Konohana-ku, Osaka

Takeshi KATO

Osaka Research Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd.

1-3, Simaya 1-chome, Konohana-ku Osaka

We made high Tc superconducting 500A current lead to reduce liquid He consumption during operation of SMES and practically used it for 400KJ SMES coil.

The current lead was made by stacking a silver-sheathed Bi-based superconducting wires thick in a high temperature region and thin in a low temperature region to reduce the heat conduction through the silver sheath. It was fixed on a FRP by a resin to improve the mechanical properties. The loss of liquid He from one current lead was 0.14W when it carried 500A. This represents about 75% reduction of liquid He consumption of Cu lead that is usually used.

キーワード：超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)，電流リード，銀被覆 Bi 系高温超電導材

1. まえがき

昭和62年秋に、液体窒素温度領域で超電導となる高温超電導材が発見され超電導研究のフィーバーが起った。これに伴って、液体ヘリウム温度領域で超電導となる金属系超電導の研究も加速され、超電導を応用した電力機器の小型実験機が各所で作られ、特性試験が行われた。

現在、高温超電導材の特性は、まだ電力機器を作るところまでは向上していないが、銀被覆 Bi 系の超電導材は数100mから 1 km程度の線材が作られるようになり、又その臨界電流密度も 2 W/A/cm^2 まで向上してきた。

一方我々は400kJのエネルギーを持つコイルを複数個使った超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)の研究も行っている。これにはNbTiや、Nb₃Snの超電導材を使用しており液体ヘリウムで冷却しているが、液体ヘリウムの原料コストや製造コストが高く、その消費量をできるだけ押さえることが一つの研究課題となっている。

この対策として、今回SMESの電流リードに銀被覆 Bi 系の高温超電導材を使用し効果があることを確認したので報告する。

2. 400kJ SMESの概要

SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)は、抵抗の無い超電導コイルに電流を流

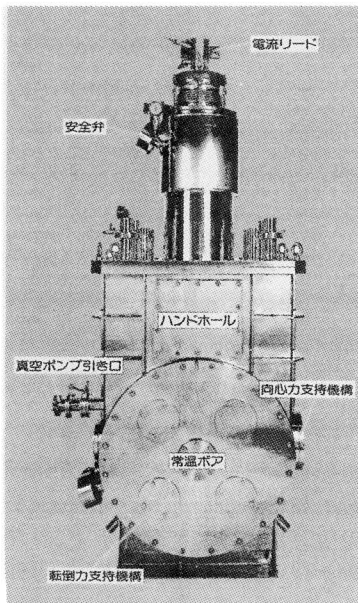


図1 400kJ SMES
Fig1. 400kJ SMES

し、コイルに永久電流としてエネルギーを貯えておき、必要な時にそれを取り出して電力として使うものであり、超電導技術を使った新しい応用として注目されている。

400kJ SMES(350A)の外観を図1に示す。内部構造の概略図を図2に示す。

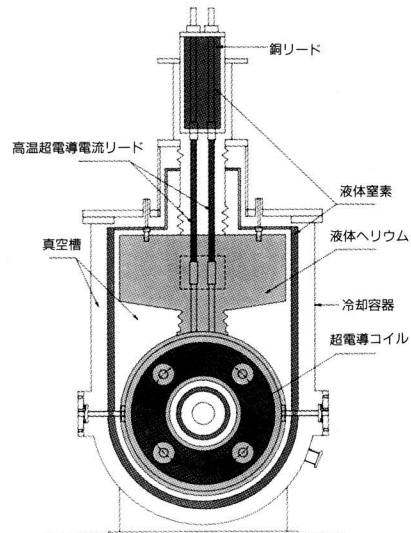


図2 SMES内部構造の概略図
Fig2. Schematic view of the inside of the SMES.

超電導コイルは冷却容器の中で液体ヘリウム中に置かれ、外部から電流リードを通してコイルに電流を流す。

一般に熱は伝導、対流、軸射の形で侵入することから、構造材は熱伝導の小さな材料を用い、容器を2重構造にして真空層を設け、真空層の中に熱の反射層を設けて熱侵入を防止している。

一方電流リードは電気的な良導体を使う必要があり、従来は銅製であったが熱伝導率も大きくジュール発熱もあるため、今回のコイルは上部の液体窒素温度より高い部分のみ銅パイプを用い、下部のヘリウムガスによって液体窒素温度領域に冷えている部分には Bi 系超電導材を使用した。これにより熱伝導とジュール発熱の減少を図った。

銅パイプ中には外部へ放出されるヘリウムガスが通るようになっており発熱を押えている。

3. 銀被覆 Bi 系電流リード

目標仕様として、電流容量350A、長さ500mm～700mmとした。

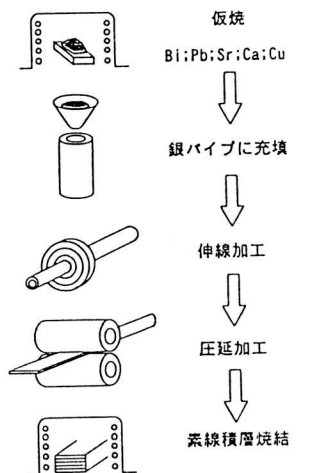
主な技術課題は次のa～cに示す通りであり、

それらに対する検討内容について以下に述べる。

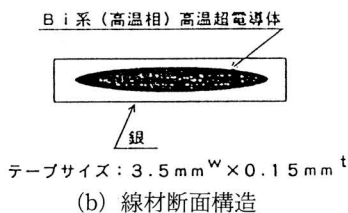
- 電流量の確保
- 熱侵入量の低減
- 機械的特性の向上

(1) 線材

銀被覆 Bi 系超電導線材の製作方法と断面構造を図3に示す。高温超電導材はセラミックスであるため、そのみで長尺化することは難しく金属被覆法が主流となっている。この方法の特徴は、長尺化が容易かつ圧延加工等によって超電導体を高配向化することが出来るため、臨界電流密度や磁界特性の良い物が作り易いことにある。



(a) 製造プロセス



(b) 線材断面構造

図3 銀被覆Bi系高温超電導線材の製造

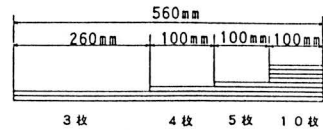
Fig3. Manufacturing of a silversheathed Bi-based superconducting wire.

材料は Bi, Pb, Sr, Ca, Cu = 1.8 : 0.4 : 2.0 : 2.2 : 3.0 の混合比で配合した粉末で、これを数回仮焼した後、銀パイプに充填し、伸線、圧延加工しテープ状とする。これを必要枚数積層し、焼結を行って電流リード用超電導線材を得る。

(2) 電流リードの構造

上記技術課題を満足させるため図4に示す構造とした。超電導線材は低温側は薄く高温側は厚く積層し、これを FRP 製補強材にエポキシ系樹脂

を用い固定している。電流リードの外観を図5に示す。



(a) 線材の積層構造



(b) FRPに補強された状態

図4 電流リードの構造

Fig4. Structure of the current lead.



図5 電流リード

Fig5. Current Lead

(3) 電流量の確保

テープ状の超電導線材1枚では電流量が不足するため積層して容量を確保した。400kJ SMESに使われている電流リードの超電導体部分の温度を、1次試作した電流リードを用い測定した。図6に示すように液体ヘリウム温度(4.2K)から60Kまで分布しており、この温度に合わせて積層枚数を調整した。

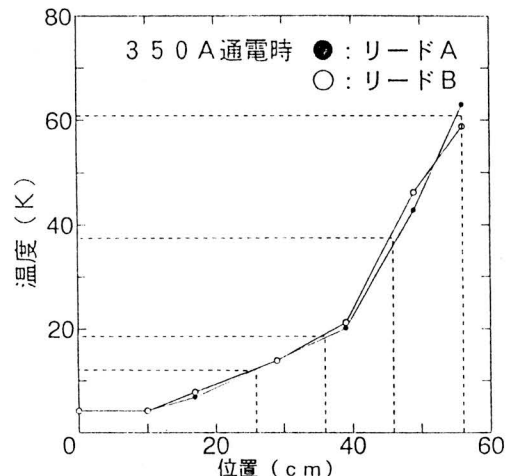


図6 電流リードの各部の温度

Fig6. Temperature of the current lead.

まず2枚の超電導線材サンプルについて、77Kでの臨界電流と積層枚数の関係を調べたが、表1に示すようにほぼ比例していることがわかった。

次にこの超電導線材の77.3Kと4.2Kにおける臨界電流値を表2に示す。温度と臨界電流の関係

表1 77Kにおける積層枚数と臨界電流値

Table1. Critical current and number of stack of the wire at 77K.

積層枚数	臨界電流 (A)	
	サンプルA	サンプルB
10	219	199
5	110	110
4	87	91
3	70	65

はほぼ線形であると考えられるため、表2の2点のデータから、図6に示された各温度での臨界電流値を算出し、常に350Aの通電容量が確保出来るように電流リードの各部の積層枚数を決定した。

表2 温度と臨界電流の関係
Table2. Critical current and temperature.

温度 (K)	臨界電流 (A)
77.3	25.5
4.2	165.3

又超電導線材の臨界電流値は、まわりの磁場に影響されるため、電流リードまわりの磁場を測定した。

コイルに近い下端側で約0.4T、コイルから離れた上端側で約0.03Tであり、この磁場での超電導線材の特性を調べた結果、超電導線材のテープ面に平行に磁場がかかる時は臨界電流の低下はほとんどなく、垂直方向にかかる時に低下することがわかった。このためSMESコイルの発生する磁場方向を考慮して電流リードを設置することにより、磁場による臨界電流の低下を抑制することができた。

(4) 熱侵入の低減

電流リードからの熱侵入は、熱伝導とジュール発熱の2つの要因によるもので夫々次の各部分で発生する。

- ①熱伝導：銀被覆、超電導体、FRP補強材
- ②ジュール発熱：超電導線、銅リードおよびコイルとの接続部

まず、熱伝導に関して考える。

熱伝導率は、超電導体が銅の1/10～1/100、FRPは更にこれより小さいため影響は少ないが、銀は極低温下で銅の10倍と大きいため銀の量を必要最小限度にする必要がある。

このため電流リードの構造を図4に示すように

超電導線材の段差式構造とした。超電導体は、温度が低い程臨界電流値が高くなるため、液体ヘリウム側の超電導線は液体窒素側よりも必要な積層枚数が少なくでき、低温側の銀量を大幅に低減できる構造になっている。銀の熱伝導率は、低温側で高いので非常に効果大きい。

次にジュール発熱については、超電導線そのものおよび超電導線と銅リードおよびコイルの銅端子との接続部の接続抵抗が考えられる。

超電導線については、抵抗零で用いるため問題はない。超電導線と銅端子の接続は、超電導線が銀で被覆されているので半田付けすることとした。この時の接続抵抗を減らすため接続部のラップ長をある程度長くする必要があり、図7に示すように30mm程度で $10^{-8}\Omega$ 台と非常に小さな抵抗となった。又銀は超電導体と密につながっているため、この間の抵抗は無視してよい。

(5) 機械的特性の向上

超電導線材は、銀被覆で包まれているが、厚さ約0.15mmと非常に薄くそれ自体の強度はあまり無い。このため使用時にかかる比較的大きな電磁力を考えると機械的強度の補強が必要となる。補強材の条件としては熱伝導が小さく、機械的強度が大きく、更に超電導線材に与える歪を小さくするため線材との熱収縮率の差が小さいことである。

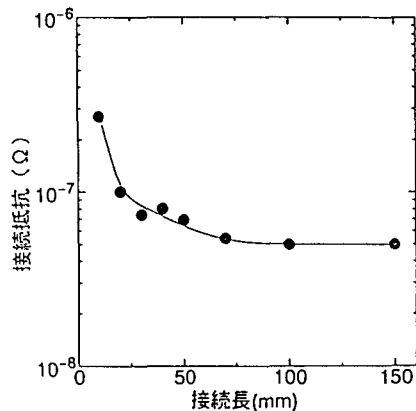


図7 接続長と接続抵抗の関係
Fig7. Connecting length and resistance.

この条件を満足する材料としてFRP材を採用した。図4に示すようにFRP補強材に収納用の溝を設け、そこに超電導線材をエポキシ樹脂で含浸接着固定した。

3. 電流リードの単体性能

試作した電流リード2体を図8に示すような構成で組み込み、通電試験を行い侵入熱の測定を行った。

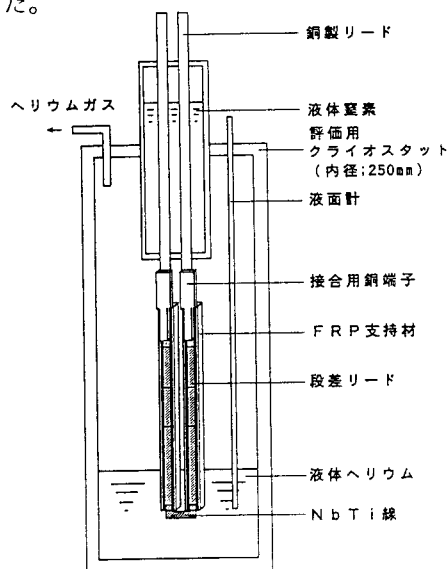


図8 電流リードの試験状況の概略図
Fig8. Schematic view of the measurement.

(1) 試験結果

侵入熱の測定は、クライオスタット内の液体ヘリウムの液面の変化を液面計から読みとり、その変化から侵入熱の換算を行った。

電流リードを組み込む前の、クライオスタットのみの侵入熱による液体ヘリウム液面低下カーブを図9に示す。

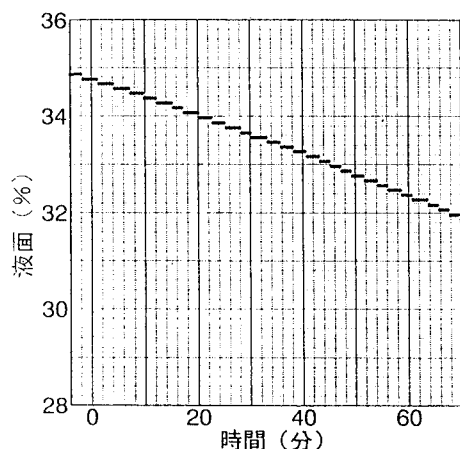


図9 クライオスタットの侵入熱測定結果
Fig9. Result of the heat leak measurement with cryostat.

これから侵入熱を求めた結果を表3、図10に示す。電流を0～500A通電しても侵入熱は0.14W/本で上昇しておらず、ジュール損失は無いことがわかる。銅の電流リードと比較して350A通電時には約40%に又500A通電時には約25%に低減できた。

表3 電流リードの侵入熱
Table3. Current lead heat leak.

電 流 (A)	侵 入 熱 (W/本)
0	0.14
350	0.14
500	0.14

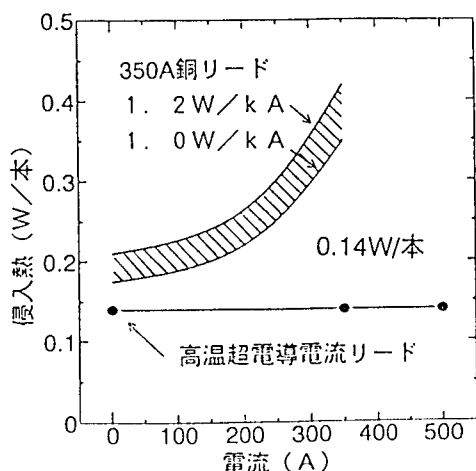


図10 熱侵入量の比較
Fig10. Current lead heat leak.

次に通電時の安定性を見るために電流リード各部の温度を熱電対により測定した。

熱電対取付位置を図11に示す。

各部の温度は、図12に示すように液面が時間の経過に対して徐々に減少するため緩かな上昇が見られるが、変化は小さく非常に安定に動作している。

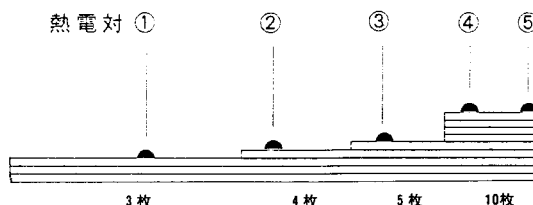


図11 熱電対取付位置概略図
Fig11. Position of thermocouples.

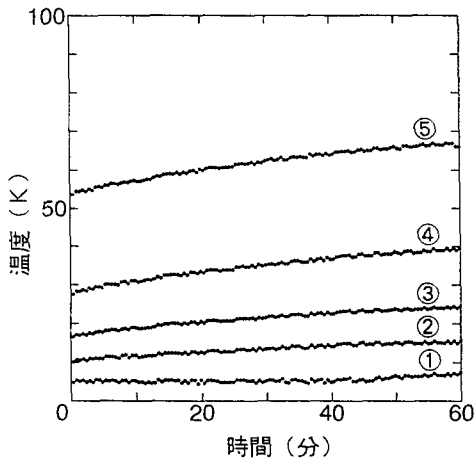


図12 500A通電時の温度変化

Fig12. Temperature transition of the current lead at 500A.

4. SMESに組み込んだ時の性能

電流リードを図13に示すようにSMESに組み込み性能試験を行った。電流リードは、下端は液体ヘリウム温度、上端は銅端子を介して液体窒素温度となっている。

(1) 試験結果

電流リードをSMESに使用した時の侵入熱を、単体試験と同様に、液体ヘリウムの液面の変化か

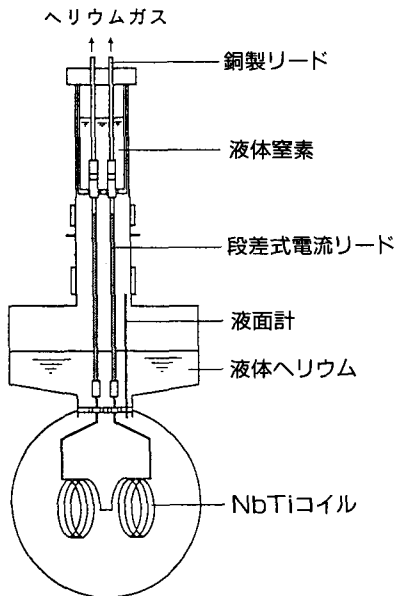
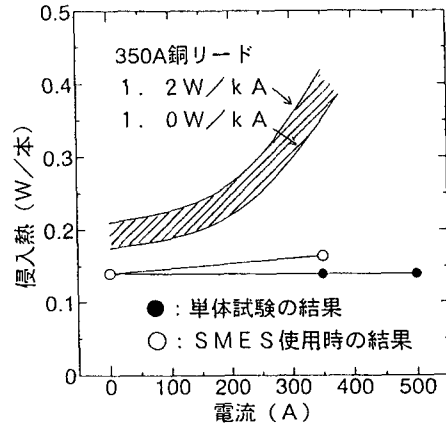


図13 SMES使用時のパワーリードの試験状況概略図

Fig13. Schematic view of the measurement with 400kJ SMES.

図14 電流リードの侵入熱
Fig14. Current lead heat leak.表4 400kJ SMESに使用したときの侵入熱
Table4. Current lead heat leak at 400kJ SMES.

通電電流 (A)	0	350
熱侵入量 (W/本)	0.14	0.165

ら測定した。この結果を表4、図14に示す。これからほぼ単体試験の時と同等の特性がでているのがわかる。350A通電時に0.16W/本と単体試験時より侵入熱がわずかに増加しているのは、電流リード各部の電圧を測った結果、下端の接続部の抵抗によるジュール熱の発生が原因であることがわかった。今後この点を改善することにより、通電時の侵入熱を非通電時と同じ値にすることができると考えている。

5. まとめ

今回高温超電導材の電力機器への応用として、最も早期に可能性のある電流リードの研究を進めてきたが、銀シースビスマス系超電導線を用いて500A級電流リードを開発し、400kJ 定格350A NbTi製のSMES超電導コイルに組み込み、侵入熱の低減を確認した。又、この電流リードを基本にして、このユニットを集合することで2.5kA電流リードの開発にも成功した。

これらの成果は、今後高温超電導材の他の電力機器への応用を拡大していくと考えている。

参考文献

- (1) 佐藤、他：1993年度春季低温工学・超電導学会 E2-21
- (2) 寺井、他：1993年度秋季低温工学・超電導学会 B3-4
- (3) Development of High-Tc Superconducting Current Lead.
ISS'92

(1994年6月30日受理)



岸田 卓也

昭和19年3月30日生。昭和41年3月神戸大学電気工学科卒業。同年4月関西電力株式会社入社、現在に至る。
超電導研究に従事。



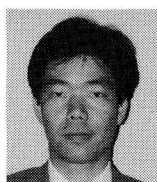
増田 孝人

昭和37年1月23日生。昭和62年3月大阪府立大学大学院修士課程工学研究科修了。同年4月、住友電気工業株式会社入社、現在に至る。超電導マグネットの研究、開発に従事。



寺井 晴一郎

昭和15年8月15日生。昭和39年3月富山大学電気工学科卒業。同年4月関西電力株式会社入社、現在に至る。
超電導研究に従事。現在北陸支社勤務。



加藤 武志

昭和40年11月28日生。平成2年3月広島大学大学院修士課程工学研究科修了。同年4月住友電気工業株式会社入社、現在に至る。銀被覆Bi系高温超電導線材の研究、開発に従事。