

# 超電導装置用電流リード

上出 俊夫(うえで としむ)

植田 和雄(うえだ かずお)

伊藤 郁夫(いとう いくお)

## 1 まえがき

富士電機では昭和50年代の後半から超電導設備にとって不可欠な機器である電流リード<sup>1)</sup>の開発を積極的に推し進めている。

電流リード<sup>1)</sup>とは4K(-269°C)程度に冷却された超電導コイルに、室温中の電源装置から電流を供給するための接続装置であり、その性能が超電導設備全体の熱負荷に大きく影響するものである。

富士電機における電流リード<sup>1)</sup>の開発の歴史は大きく分けて次の三つの時期に区分できる。

- (1) 日本原子力研究所と共同で核融合実験炉用をめざし、定格電流30kA、定格電圧20kVという大電流・高電圧の電流リード<sup>1)</sup>を開発した開発初期。
- (2) 各超電導設備固有の要求を満たすための応用開発時期。この時期のものに次のような電流リード<sup>1)</sup>がある。
  - (a) 加速器用の高安定性電流リード<sup>1)</sup>（冷媒ガス停止後の通電継続可能時間の長いもの）。
  - (b) 核融合科学研究所と共同で開発した、大形超電導導体試験用短時間定格電流リード<sup>1)</sup>（短時間定格100kA）。
- (3) 高温酸化物超電導体を用いた電流リード<sup>1)</sup>や交流用の電流リード<sup>1)</sup>という新しい材料、新しい分野向けの開発を行っている新分野開拓時期（現在進行中である）。この開発では今までに次のようなものを開発してきている。
  - (a) 古河電気工業（株）との共同開発によるビスマス系バーガー高温超電導体を用いた1kA級電流リード<sup>1)</sup>。
  - (b) 九州大学との共同開発による5kA級交流用電流リード<sup>1)</sup>。

本稿では、上記の各種電流リード<sup>1)</sup>についてその概要を紹介する。

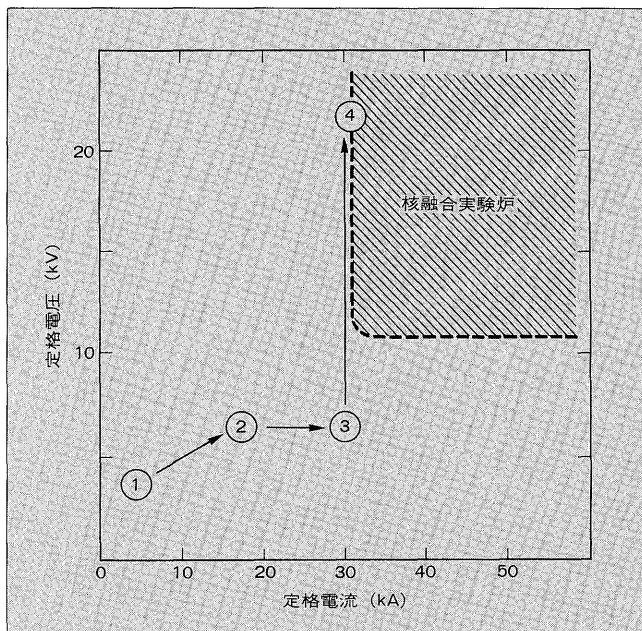
## 2 核融合装置用大電流電流リード<sup>1), (2)</sup>

富士電機の電流リード<sup>1)</sup>の開発は、日本原子力研究所と共同で実施した核融合実験炉用大電流・高電圧ガス冷却式電流リード<sup>1)</sup>の開発から本格的に始まったと言える。

表1 核融合実験炉用電流リードの開発目標

項目	目標仕様
定格電流	30kA以上
定格電圧	22kV
冷却ヘリウムガス流量	0.05g/s/kA
熱侵入量	1.0W/kA
常温端温度	280K以上
冷却ガス喪失時運転時間	10分以上

図1 核融合実験炉用電流リードの開発ステップ



この開発の目標を表1に、開発ステップを図1に示す。開発は理論解析（数値解析プログラムの開発）と実験的実証の両面から行った。

開発結果の例を図2、図3に示す。図2は開発ステップ②（図1参照）で開発した18kA電流リード<sup>1)</sup>の冷却ガス流量と低温端熱侵入の関係を示している。この電流リード<sup>1)</sup>では、電流値18kA、冷却ガス流量0.9g/sで安定した運転が

上出 俊夫

昭和44年入社。主として原子力プラントの制御設備および超電導応用機器の開発に従事。現在、エネルギー事業本部原子力事業部原子力技術部課長。

植田 和雄

昭和37年入社。超電導応用機器の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所応用装置研究所主任研究員。

伊藤 郁夫

昭和45年入社。電力用変圧器の設計・開発および超電導応用製品の設計・開発に従事。現在、千葉工場変圧器部主査。

図2 冷却ガス流量と低温端熱侵入量（18kA電流リード）

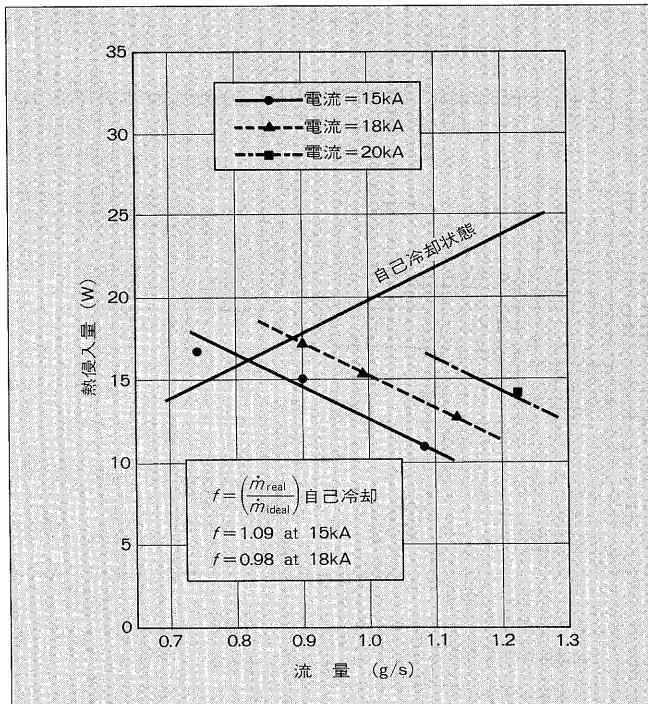
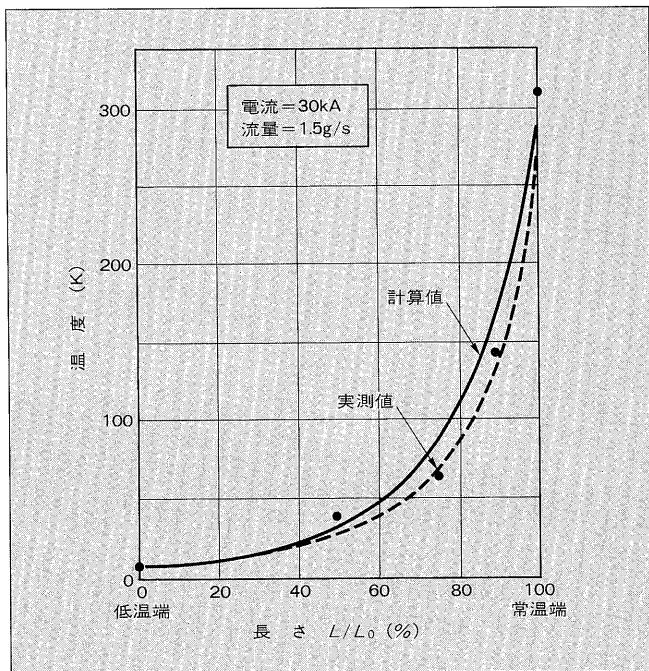
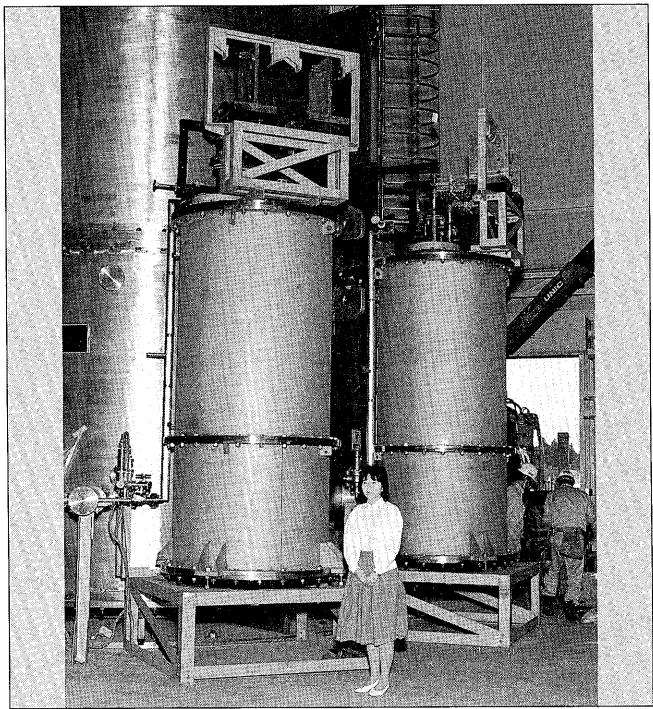


図3 30kA電流リードの温度分布（計算値と実験値の比較）



でき、その時の熱侵入量はほぼ 18W であった。これは、電流リードの理想的な熱特性（熱侵入量 1W/kA）にほぼ一致する。

図3は開発ステップ④（図1参照）で開発した30kA電流リードの温度分布について、計算値と実測値の比較をしたものである。二つの値はよく一致しており、新たに開発した解析プログラムの有効性を検証できた。耐電圧試験においては、空気霧囲気と比較して1/10以下の耐電圧しかない常温ヘリウムガス中で、下記の耐電圧を有していることを確認した。

図4 実証ポロイダル試験設備用電流リード  
(定格電流 30kA, 定格電圧 20kV)

N99-1686-1

- (1) 交流絶縁破壊電圧 45kV 以上
- (2) インパルス絶縁破壊電圧 70kV 以上

このたび開発した電流リードの構造は、多数の銅素線を束ね、ステンレス鋼管内に挿入したバンドル形と呼ばれるものである。

この電流リードの特徴は次のとおりである。

- (1) ほぼ理想的な熱特性を有する。
- (2) 耐電圧性能が非常に低いヘリウムガス霧囲気中で高耐電圧を有する。
- (3) 冷却ガス停止後も定格電流で長時間（10分程度以上）の運転が可能である。
- (4) 長尺から短尺までの製作と、さらに曲げなどの加工も可能である。
- (5) TIG溶接を採用したので、熱的・機械的に安定している。
- (6) 真空断熱層を設けることにより外部温度の影響を受けにくく熱的性能が安定している。

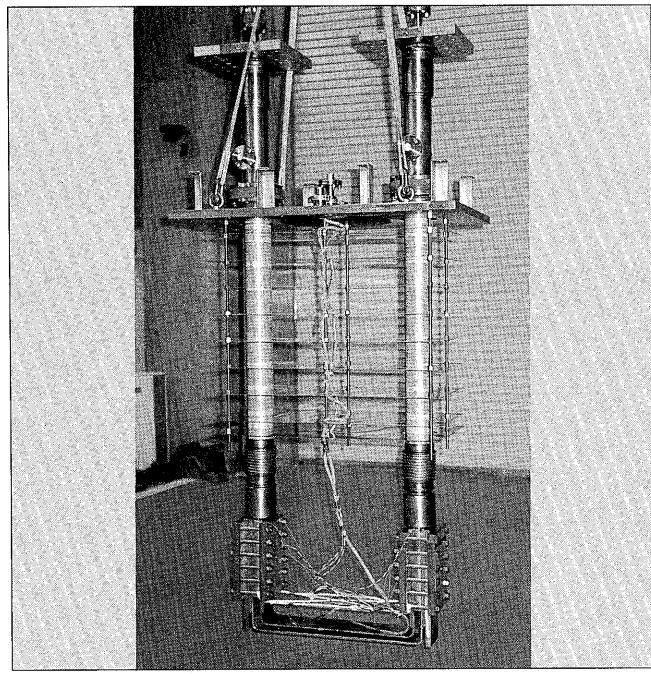
この開発により、大容量・高電圧電流リードが完成し、日本原子力研究所をはじめ核融合装置用超電導機器の開発に多く用いられている。図4はその実例であり、日本原子力研究所の実証ポロイダルコイル試験設備向けに納入したものである。さらに現在、日本原子力研究所向けに50kAリードを製作中である。

### ③ 短時間通電用大容量電流リード

核融合科学研究所では大型ヘリカル装置用超電導導体の臨界電流 ( $I_c$ ) 測定などのため、100kA の電流容量を持つ電源システムを準備することとなり、その一部として

表2  $I_c$  測定用 100kA 電流リードの主要パラメータ

導体構成	バンドルタイプ	
定格電流	過渡最大値 連続	100kA 40kA
電圧	1 kV	
有効長 (冷却長)	1.7 m	
導体断面積	2,700mm <sup>2</sup>	

図5  $I_c$  測定用 100kA 電流リード

AF522807

100kAまで通電できる電流リード<sup>(3), (4)</sup>を富士電機と核融合科学研究所で共同開発した。 $I_c$ 測定では電流をゼロから $I_c$ まで数分間で上昇させて遮断するという運転パターンが普通である。したがって短時間通電であることを考慮して、連続定格に対するものよりも断面積の小さい電流リードにして、非通電時の熱流入の低減を図ることとした。過渡100kA級の電流リードの開発に先立ち、過渡特性解析プログラムの開発とスケールダウンモデル（過渡30kA容量）の試作試験を行った。過渡解析プログラムは、一次元、非定常、非線形の差分式を解くものである。スケールダウンモデルでの試験結果と計算検討から、過渡100kAの電流リードは定常40kA相当の断面積とした。表2に製作した電流リードの主要パラメータを、図5に外観を示す。試験において、最大75kAまでの通電を行った。この電流値はその時点での電源の最大能力であった。図6に75kA通電時の電流変化パターンとそのときの電流リード上下端子間電圧の変化を示す。図に示すように、75kAまで5分間で上昇、75kAに10分間保持、0Aまで5分間で下降する運転が安全にできた。実際に通電したのは75kAまでであったが、0から75kAまで上昇したのち同じ速度で100kAまで上昇させた場合を想定すると、そのときの発熱量（エネルギー量）は、実際に運転した75kA-10分間の発熱量よりはるかに少なく、100kAまでの運転は十分可能

図6 75kA過渡通電時の電流変化と電流リード端子間電圧の変化

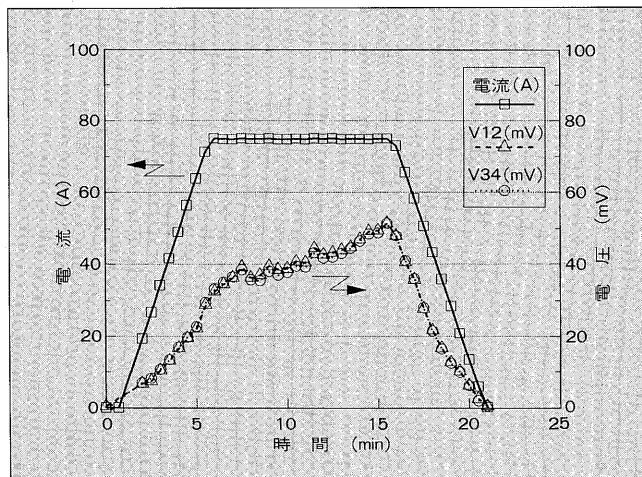


表3 交流用電流リードの設計諸元

項目	仕様
周波数	60Hz
定格電流	5,000A
耐電圧	1.5kV
リード全長	1,265mm
導体断面積	200mm <sup>2</sup>

であると推定できる。

#### 4 交流用電流リード

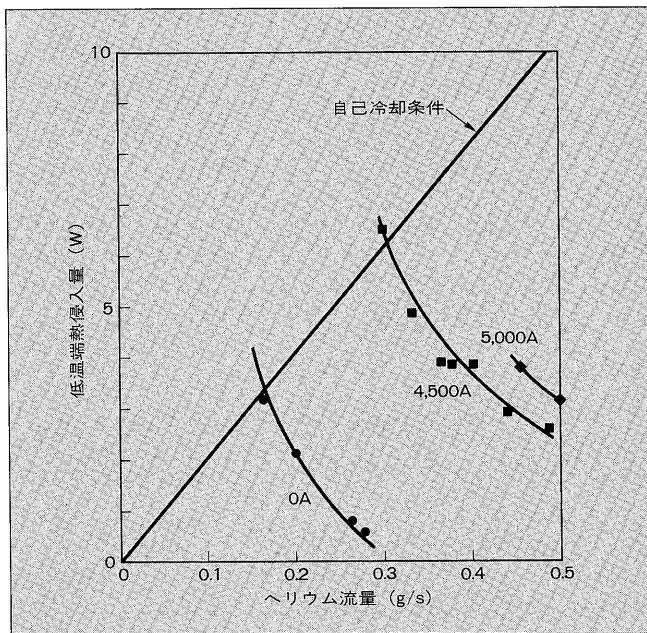
近年、交流超電導機器（変圧器、限流器など）の開発が盛んになってきている。しかし交流の場合、直流用電流リードと比較して、渦電流損失や表皮効果が問題となる。そこで富士電機では、これらの問題点に対策を施し、直流の電流リードと同程度の性能をめざして交流用電流リードを開発し、第一次試作を終了した。

表3は第一次試作電流リードの設計諸元である。この電流リードは、従来の直流用電流リードと比べて下記の特徴がある。

- (1) 交流電流による渦電流損失を低減するため、素線表面にクロムめっきを施した。さらに、表皮効果に対応するため、素線を円筒支持材外周に配置した。
- (2) 低温端子部は通常、矩形（くけい）断面形状であるが、コーナ部での集中的な発熱を避けるため中空円筒構造とした。

図7にこの電流リードの試験結果を示す。この図において自己冷却条件で4,500A通電時の熱侵入量は6.2Wであり、これは直流用電流リードの場合の約1.2倍である。今後さらに高性能化を図る予定である。

図7 交流用電流リードの低温端熱侵入量とヘリウム流量の関係



## 5 フィンタイプ電流リード

これまで記した電流リードでは、その導体部が多数の銅線の束で構成されていた（バンドルタイプ）。これに対して銅のロットにフィンを切った導体を用いるフィンタイプの電流リードでは、元々余分の熱容量を持っているので冷媒停止時の通電継続可能時間、いわゆるゼロフロースタビリティに優れている。富士電機が製作したフィンタイプのものに加速器用 5,000A 電流リードがある。導体部全長が約 0.6m と短く、かつ冷媒停止後 5 分間通電しても安全であることを目標としたためフィンタイプが適当と判断された。表4に主要諸元を、図8に概略構造図を示す。フィンと冷媒流路はらせん状を形成するが、その製作方法は通常のものと異なる（導体の斜視図は図8を参照）。

熱特性試験の結果、ヘリウム流通停止後 5 分間安全に通電できた。このとき導体の上端温度が 80°Cまで上昇した。短尺リードでさらに冷媒停止後の通電 5 分以上を確保するため、熱侵入特性は多少犠牲になっている。

## 6 酸化物超電導体を使用した電流リード

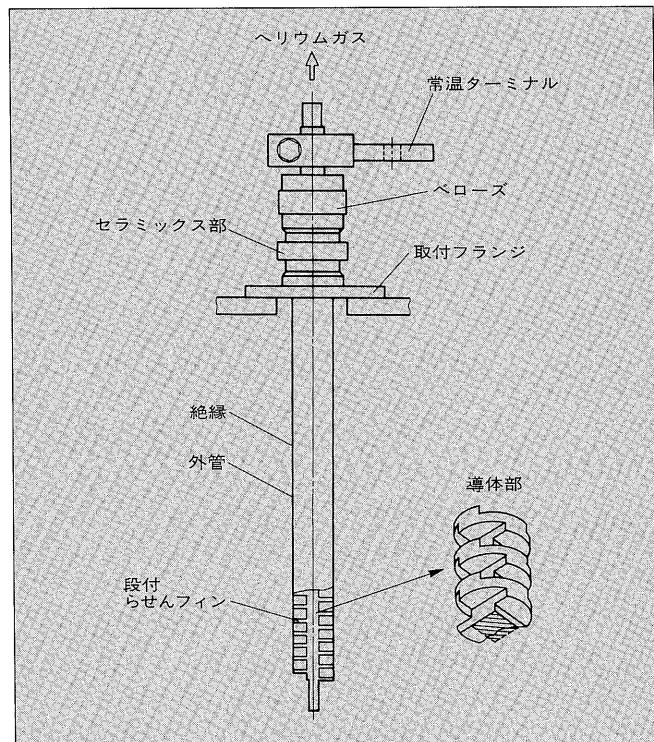
### 6.1 開発経緯

液体窒素の沸点（77K）を超える臨界温度を示す酸化物超電導体（HTS：High Temperature Superconductor）が発見されてすぐに、この材料を電流リードに応用することが考えられた。4.2K と約 300K の室温端を結ぶ電流リードのうち、低温側に HTS を用い、高温側には従来と同様に銅を用いることになる。HTS 材を用いると、この部分のジュール発熱がゼロになり、低熱伝導率のために熱流入が著しく減少する。電流リードの場合には、比較的低

表4 加速器用フィンタイプ 5,000A 電流リード

項目	仕様・諸元
定格電流	5,000A
リード本体部長さ	627mm
導体部断面積	202mm <sup>2</sup>
フィン外径	φ50mm
冷媒停止後通電時間	5 分以上
所要冷媒流量	0.35g/s
低温端熱侵入	7W

図8 フィンタイプ電流リードの構造



磁界の領域で用いること、特別な高電流密度が要らないこととも HTS の応用を早期に実現するために有利な点である。

富士電機でも数年前から古河電気工業(株)と共同で HTS を用いた電流リードについて、計算検討、要素技術開発、1,000A モデルの試作試験を実施してきた。<sup>(5)-(7)</sup> 以下にそれらの概要を紹介する。

### 6.2 HTS 電流リードの基本構成と冷却方式

HTS を用いた電流リードの熱特性は導体の構成と冷却方式に依存する。導体としてはバルク材を用いる場合と銀シース材を用いる場合とが考えられる。HTS バルク材の熱伝導率は銅に比べて 2 ~ 3 けた小さいので、これを用いると低温端での熱流入を大幅に低減できる。一方、銀シース材は電流密度が高いのでコンパクトにできるほか、熱的、電気的、機械的な安定性に優れる。しかし、銅リードに対して熱特性の劇的な改善は無理であろう。われわれの電流リードの試作研究では、熱特性の大幅改善が期待できるバルク導体を用いることにした。

図9 HTS電流リードの冷却方式

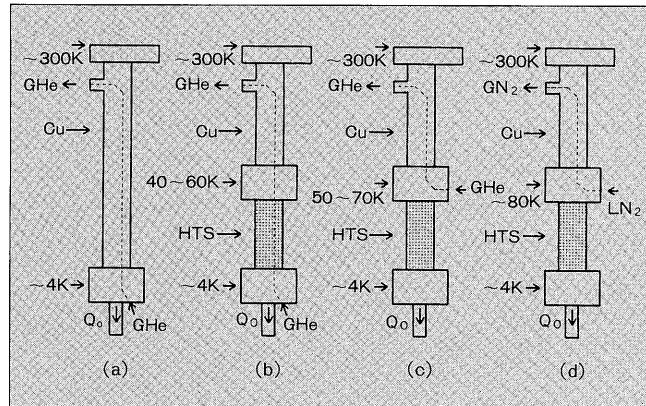


表5 HTS電流リード1,000Aモデルの主要パラメータ

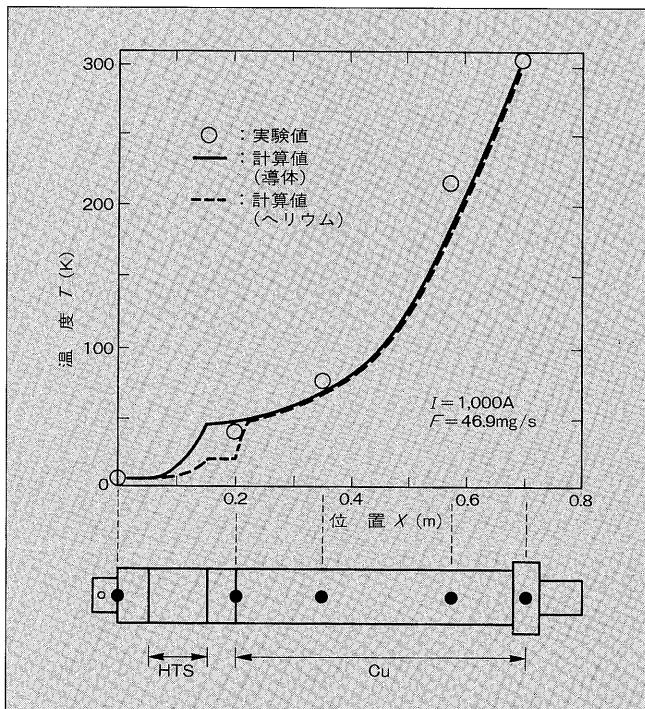
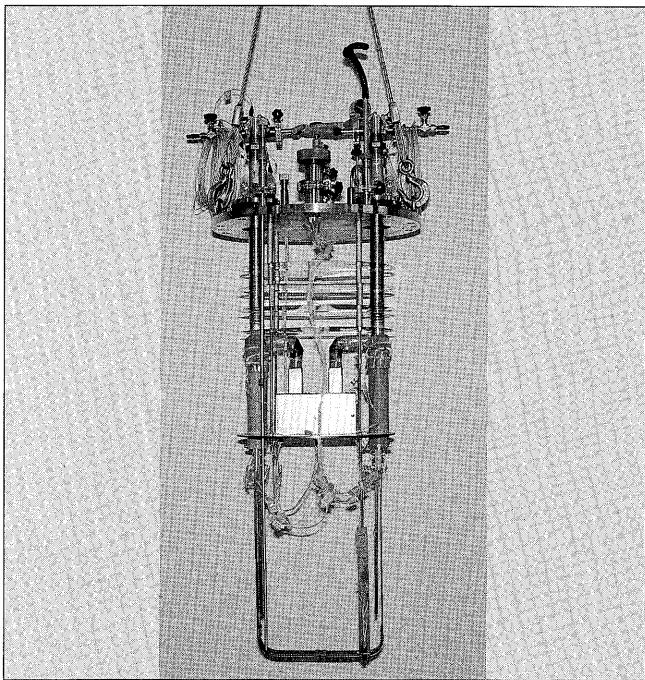
定格電流	1,000A
全長	0.867m
有効長 (冷却部長)	0.500m 0.100m
導体 銅線 HTS	$\phi 2.0\text{mm} \times 19$ $\phi 9.5\text{mm} \times 6$
冷却方式	全長 GHe 冷却

冷却方式はシステム全体の熱特性に大きく影響する。図9に幾つかの代表的な冷却方式を示す。(a)は従来の銅製電流リードの冷却方式である。すなわち低温端から4.2K程度のヘリウムガスを導入し、電流リードを冷却後、室温端から排出する。(b)はこれをHTS電流リードに適用したものである。(c)は銅導体部を中間温度のヘリウムガスで冷却し、HTS部は下端を除いて冷却しない方式である。(d)は銅部下端に供給した液体窒素とその蒸発ガスで冷却する方式である。比較のために例題として、6,600A、全長(有効長)0.7m(HTS部0.15m、銅部0.55m)の電流リードについて導体部の熱計算とそれに基づいて冷却システムの入力動力(理想的動力)を計算してみると、(a)の場合を1としたとき、(b)は約2/3、(c)と(d)はともに約1/4となった。

### 6.3 1kAモデル電流リードの試作試験

HTS電流リードの実際の製作経験を得るために、また設計計算の熱特性の確認のためモデル電流リードの試作試験を行った。表5に主要諸元を示す。HTS部は6本のビスマスマス系(2223)焼結体の棒を並列に配置したものである。各棒は直径9.5mm、長さ145mmで、両端の銀電極部を除く有効長が100mmである。銅部は従来と同様、バントル形導体(銅線の束)である。冷却方式は従来の銅リードと同じ、全長ヘリウムガス冷却方式であり、すぐにでも銅リードと置き換えて使うことができる。温度分布測定例を図10に示す。計算値に対して比較的良く合っている。各電流値において安定して通電できるための最小ヘリウム流量を求めるとき、1,000Aでは従来83%、このモデルリードに対する最適電流値と思われる800A付近では従来の約75%であった。ただし、従来の値は1.15W/kAの低温端熱

図10 1,000A HTS電流リードの温度分布(計算値と実験値)

図11 HTS電流リード1,000Aモデル  
(中間温度ヘリウムガス冷却実験用に改造したもの)

侵入での蒸発量である56.3mg/s/kAとした。

### 6.4 中間温度ヘリウムガス冷却の実験

全長ヘリウムガス冷却の一連の実験の後、1,000Aモデルリードは、中間温度ヘリウムガス冷却[図9(c)]の実験ができるように改造した。すなわち、銅部とHTS部との接続部付近に中間温度20~70Kのヘリウムガスを供給できるようにした。中間温度のヘリウムガスは、実際の大きなシステムでは、冷凍機の適当な段から取り出して配管に

表 6 HTS 電流リード 1,000A モデルの中間温度ヘリウムガス冷却実験結果

試験番号	500-2	750-1	750-4	1000-1
電流値 (A)	506	759	759	1,016
供給 GHe 温度 (K)	42.9	32.8	44.5	23.0
GHe 流量 (mg/s)	39.6	42.8	41.4	42.8
中間部銅温度 (K)	50.6	42.2	54.2	35.5
理想動力 (GHe) (W)	67.2	88.3	68.2	109.8
低温端熱侵入(HTS) (W)	0.136	0.098	0.153	0.072
低温端熱侵入(FRP) (W)	0.123	0.103	0.132	0.087
理想動力 (4K) (W)	18.2	14.2	20.1	11.2
理想動力 (計) (W)	85	103	88	121
理想動力 (従来比)	0.44	0.36	0.30	0.31

銅リードの場合の理想動力は、  
 $1.15\text{W}/\text{kA} \times 4.8 \times 70\text{W}/\text{W} = 386\text{W}/\text{kA}$  とした。

より導入する。このモデル実験では、クライオスタットの蒸発ガスを集めてダクトにより接続部へ導く。図11に改造後のモデルを示す。ガスを導くダクトの中には供給ガス温度調整のためのヒータと温度センサが設置されている。表 6 に定常運転における実験データ例とそれに基づいて計算される冷却系動力（理想動力）の値を示す。

理想動力 (GHe) は、供給 GHe 温度の GHe 流量（いずれも実験値）を供給する冷却系の理想動力を簡単な熱力学の原理から求めたものである。低温端熱侵入 (HTS) と低温端熱侵入 (FRP) は中間部銅温度（実験値）と熱伝導積分のデータから得られる。理想動力 (4K) を  $P_i$  とすると、 $P_i$  は低温端熱侵入合計  $Q_0$  に対して  $P_i = Q_0 \times 70$  (W/W) で算出した。表 6 に見られるように、実験データから推定される HTS 電流リード冷却のための理想動力は従来の銅リードの約 30% であった。これは理論値に近い値であり、中間温度ガス冷却方式がエネルギー効率の良いことが実証された。

## 6.5 HTS 電流リードの技術課題

これまでのわれわれの研究および他所での研究から、HTS 電流リードの優れた熱特性が実証されている。広く実用されるためにはさらに以下のような課題を解決していく必要があろう。

- (1)  $J_c$  の向上
- (2) バルク材と電極との接続部の接続抵抗の再現性、信頼性
- (3) HTS クエンチ時の安全性
- (4) 機械特性、支持構造
- (5) HTS 材の経時変化 ( $J_c$ 、機械特性など)

## 7 その他の電流リード

以上に述べた電流リードとは種類の異なるものに着脱式電流リードがある。この場合の技術要素としては、着脱に

適した十分な強度を持った構造、着脱コネクタ部の接触抵抗、着脱部の凍結防止を配慮した構造などがある。富士電機では研究開発マグネット用の 1,300A のものを製作した。特に接触抵抗については、液体ヘリウム中で、各種の接続方式に定格電流を流してデータを採った。その結果により接続構造を決定している。

加速器用超電導磁石の電流リードとしては、**5章**で述べたもののほか数 kA 級の各種のものを製作し、加速器施設で実用に供されている。

その他、超電導磁石の研究開発を行っている研究機関には多くの電流リード納入実績があり、そのなかには海外向けも含まれている。

## 8 あとがき

以上に概略を紹介したように、富士電機では各種の電流リードにおいて多くの製作実績を有している。特に数十 kA 級の大電流リードについては豊富なノウハウを蓄積している。さらに、酸化物超電導体電流リードなどのように新しい挑戦が必要な技術課題も多数存在している。富士電機ではそれらに積極的に取り組み、超電導装置システムの効率化に寄与していく考えである。

最後に、富士電機の電流リードの開発にあたり、多大なご指導、ご協力を賜った関係各位に感謝する。とりわけ、日本原子力研究所、核融合科学研究所、九州大学、高エネルギー物理学研究所、ならびに古河電気工業(株)の関係各位に厚くお礼申し上げる。

## 参考文献

- (1) 島本進ほか：核融合設備用大電流・高電圧電流リードの開発, FAPIG, No.114, p.25-30 (1986)
- (2) Tada, E. et al.: Development of high-current vapor-cooled current leads for fusion devices, Adv. Cryog. Enginrg., Vol.31, p.225-233 (1986)
- (3) Mito, T. et al. : Development of high current vapor-cooled current lead for large scale superconductor critical current measuring, IEEE Trans. Mag., Vol.28, No.1, p. 960-963 (1992)
- (4) Mito, T. et al. : Development of 100kA current leads for superconductor critical current measurement, Fusion Engineering and Design, Vol.20, p.217-222 (1993)
- (5) Ueda, K. et al. : Design and testing of a pair of current leads using bismuth compound superconductor, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, p.400-403 (1993)
- (6) 宇野直樹ほか：酸化物超電導体を用いた電流リード, 古河電工時報, No.91, p.6-11 (1992)
- (7) Ueda, K. et al.: Thermal performance of a pair of current leads incorporating bismuth compound superconductors, Advances in Superconductivity V, p.1235-1238 (1993)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。