高温超電導電流リードの技術要素と開発の現状

植 田 和 雄

富士電機㈱* 川崎市川崎区田辺新田 1-1

(1995年10月17日受理)

Technological Aspects and Recent Advances in HTS Current Lead

Kazuo UEDA

Fuji Electric Co., Ltd., 1-1 Tanabeshinden, Kawasaki-ku, Kawasaki 210

(Received October 17, 1995)

Synopsis :

Technological aspects and recent advances in the current leads incorporating high temperature superconductor (HTS) are described. HTS of sintered Bi-2223, melt cast Bi-2212, unidirectional Y-123 and Ag- or Ag alloy-sheathed Bi-2223 are being investigated and tested in models of current lead systems. Reduction of refrigerator power by a factor of 3 to 5 is demonstrated by model tests. Easy operation and a cryogen-free superconducting magnet has become available using HTS current leads. Researches concerning safety and reliability are being made, ac operation models are tested, and design studies for specific application in large systems are underway. We can expect that all of the Cu current leads will be replaced by HTS current leads.

Keywords : current leads, high-temperature superconductor, refrigeration load

1. はじめに

電流リードは超電導磁石の一構成部分で、室温にある電源から 4 K 付近の極低温にある超電導 コイルに電流を供給する役割をもつ。従来の超電導磁石ではこの電流リードに、良導電性金属である銅が用いられている。室温端から流入する熱および導体でのジュール発熱は、電流リードの低温端から導入された蒸発ヘリウムガスによって冷却される。電流リードの長さ、断面積あるいは材質などをいかに選んでも、低温端に流入する熱流あるいは所要ヘリウム流量には下限がある。これは、熱抵抗を高めようとすると電気抵抗も上がってジュール発熱が増えるからである。そして、4 K 領域で運転される超電導磁石システムにおいて、多くの場合、電流リードが熱負荷の最大の要因となっている。

高臨界温度超電導体 (HTS) が発見された直後から、

この材料の電流リードへの適用が考えられた。液体窒素温度 (77 K) 以上の高い温度まで超電導状態で発熱がない、熱伝導率が低いという電流リードとして理想的な材料であること、また、比較的低い磁場中で使用されること、高電流密度を要しない、長尺導体ではないなど開発に対するハードルが比較的低いことなどがその理由である。一方では、前記したように電流リードの熱負荷を低減できればその効果は大きいということがあって、ここ数年、HTS 適用電流リードの研究開発が活発に行われてきた。

HTS を電流リードに適用する場合、これを低温側に用い、室温側には従来と同様に銅製の導体を用いられる。

HTS 電流リードはすべての超電導磁石の電流リードと置き代わり得る。最近実用化が目覚ましく進んでいる冷凍機直冷式超電導磁石は、HTS 電流リードによってはじめて実現したものとも言える。また将来の交流電力機器、例えば限流器やトランスなどの実現可能性に大きな影響がある。さらに高エネルギー物理、

* 富士テクノサーベイ㈱に出向中

On leave for Fuji Technosurvey Co., Ltd.

Table 1 Performance of HTS conductor for current lead application.

Material	Bi-2223 sintered	Bi-2212 melt cast	Y-123 MTG	Y-123* unidirect.
Current density at 77 K J_c [MA/m ²]	12.0	6.0**	35	~100
Thermal conductivity integral in 4-77 K S_k [W/m]	130	103	1,100	350
Heat conduction per unit current and length 77→4 K S_k/J_c [μ Wm/A]	10.8	17.2**	31	~3.5
Reference	10	9**	9	11

* (Y, Ho)Ba₂Cu₃O_y, unidirectional solidification.

** Old data; new value is around $J_c=10-20$, $S_k/J_c=5-10$.

核融合, SMES などの大型システムにおける設備投資と運転費の削減に貢献する。

HTS 導体単体の研究および、電流リードへの HTS 適用の可能性検討 (FS) から はじまった 開発は、その後、実際の技術開発として、接続部、機械的保護、クエンチ対策、信頼性などの検討が行われ、HTS 導体材料としても、Bi 系 2223 焼結体から、Bi 系 2212 の溶融法によるもの、Y 系 (溶融法、一方向性)、銀合金シースなど広範に研究されてきた。以下では、HTS 電流リードに関わる技術要素と開発の現状について概説する。

2. 技術要素と研究開発状況

この章では、HTS 電流リードの設計製作に関わる主な技術要素について述べる。

2.1 HTS 導体

現在、電流リード用 HTS 導体の候補として考えられているおもなものは、Bi-2223, Bi-2212, Y-123 (一方向性) のバルク、それに銀または銀合金 シース Bi-2223 である。

Bi-2223 バルク 臨界温度が高く、熱伝導率も小さい。主に日本で開発が進められ^{1,2)}、これまでの試作電流リードの超電導部として多く採用されてきた。繰返し中間 CIP 法 (Cold Isostatic Pressing) による焼結体の丸棒、円筒、または板の形で電流リードに組み込まれる。

Bi-2212 バルク 主にヨーロッパ 4 社共同開発のプロジェクトの中で開発された^{3,4)}。溶融法で、MCP (Melt Cast Process) と呼ばれている。熱伝導率や、77 K での臨界電流密度は Bi-2223 バルクと同程度である。おもに円筒形で供給されている。安定した接続状態の銀電極がバルク材作成工程の中で取り付けられ

る。

Y-123 (一方向性)バルク 結晶方向を揃えて凝固させる方法で作成した Y 系バルク材は、バルク材としては極めて高い臨界電流密度をもつ。この材料は他の材料に比べて、熱伝導率はかなり大きい、磁場による臨界電流の劣化が非常に少ないので、漏れ磁場の大きい用途に適している。製作は他と比べて難しいがすでに電流リード用として試作試験されている^{5,6)}。

銀、銀合金シース Bi-2223 コイル用線材として開発されている銀シース線は、臨界電流密度がバルク材よりはるかに大きいので、たとえ熱の良導体が付いていても電流リードの導体材料の候補であり得る。銀比を下げたり、温度領域に応じて断面積 (テープ枚数) を変えた電流リード用導体が開発されている⁷⁾。さらに、超電導特性を劣化させずに銀に金を入れて合金化して熱伝導率を下げた電流リード導体が開発されている⁸⁾。シース導体は銀 (銀合金) が付いているので、電極ブロックとの接続や、クエンチへの対応が容易である。

HTS 導体部は上下端の他は特に冷却しないで用いられる場合が多い。その場合の低温端への熱侵入 Q_0 [W] は次式で表される。

$$Q_0 = (S_k(T_m) - S_k(T_0)) * A/L \div S_k(T_m) * A/L$$

 T_m, T_0 はそれぞれ上端, 下端温度で, A, L は導体の断面積, 長さである。 $S_k(T_m)$ [W/m] は熱伝導率積分 (thermal conductivity integral) で熱伝導率 $k(T)$ [W/(m·K)] の温度ゼロから T_m までの積分値である。所要断面積は電流密度 J から決まり, 通電電流 I 当たりの低温端熱侵入は次式となる。

$$Q_0/I = S_k(T_m)/(J * L)$$

Bi-2223 焼結体の場合, $S_k(77)$ は 80 [W/m] 程度で, J を 5 [MA/m²] (=5 [A/mm²] =500 [A/cm²]),

Fig. 1 Cooling schemes of a current lead having an HTS conductor.

L を 0.2 m として, $Q_0/I=0.08 [\text{mW/A}]$ となる。超電導の場合, L を長くすれば $Q_0/I [\text{W/A}]$ は原理的にはいくらでも小さくできる。

電流リード用材料として重要な特性である S_k , J_c , その比 S_k/J_c を Table 1 に示す。表の数字は文献により異なり, 設計に当たっては実際に用いる材料での測定値が求められる。

2.2 冷却方式と熱特性

HTS 電流リードの熱的な性能は冷却方式に依存する。また, 適用対象の冷却系構成を考慮した冷却方式を採用する必要もある。

従来の銅製のガス冷却式電流リードの冷却方式においては, リード下端 ($\sim 4.2 \text{ K}$) への伝導熱侵入で蒸発したヘリウムガスをその低温端から導入し, 電流リードに沿って向流的に導体を冷却しながら室温端から排出する。HTS 電流リードの冷却では HTS の性能を生かした幾つかの冷却方式が考えられる。Fig. 1 に主なものを示す。(a) は従来の電流リードのもので, 低温端には運転電流当たり 1.15 mW/A 程度の熱流入があり, ちょうどその熱流で蒸発する流量の液体ヘリウム 0.056 mg/s/A を リード全体に流す (自己冷却条件)。(b) は同じ方式を HTS 電流リードに適用したもので, 従来のものと直接置換するだけでよいという簡便さがあるが, 冷凍負荷は 3 割減程度にしかない。(c) は中間温度 ($50\sim 70 \text{ K}$) のヘリウムガスを HTS-Cu 接続部に供給して銅導体部を冷却するもので, (d) は同様に液体窒素を供給して蒸発窒素ガスを銅導体部に流すものである。熱効率的にはこれらが望ましい方式であ

る。(e) では銅リード下端と HTS リード下端がそれぞれ小型冷凍機 (通常 GM (Gifford-McMahon) 冷凍機) の 1 段目, 2 段目に熱接触して冷却される。この方式は冷媒なしの超電導磁石に用いられるもので, 極めて取り扱い容易な超電導磁石システムを構成できる。

熱的性能を従来の電流リードとあるいは HTS 電流リードの各種冷却方式の間で比較する場合, 低温端熱侵入を指標にすることができないことは図を見れば明らかであり, 共通して簡便な唯一の指標は冷却系の入力動力であると考えられる。電流リード部分の熱設計から冷却系への基本的要求 (冷媒温度, 流量など) が決まると冷却系の入力動力が概算できる。一般的な傾向を知るために理想的冷凍機で考え, Table 2 に試算例を示す¹²⁾。液体ヘリウムの温度よりずっと高温の冷媒を用いる (c) や (d) では従来比約 $1/4$ の冷却動力となり, 銅部の下端以外冷却しない (e) では約 $1/3$ となる。なお, Fig. 1 (c), (d) で, 接続部以外の銅リード部を冷却しない方式もシステム全体の構成によっては考え得る方式である。その場合の理想冷凍動力は (e) と同程度で従来比約 $1/3$ となる。Table 2 (理想動力の行の (c), (d), (e) カラム) でもわかるように, HTS 電流リードでは冷凍機動力の大半は銅部の冷却に費やされる。実際の冷凍機動力は理想動力を効率 % カルノーで割ったものになるが, % カルノーは冷凍機の規模などにより $2\sim 20\%$ と大きく異なる。Table 2 の冷凍機動力は冷却方式だけで決まるものではなく, 勿論電流リードそのものの設計 (寸法, 材料など) に依存する。

Table 2 An example of refrigeration load calculation for various cooling schemes.

Cooling scheme in Fig. 1	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Coolant for HTS Cu	4.2 K GHe	4.2 K GHe	uncooled 55 K GHe	uncooled 77 K GN ₂	point cool. at 4.2 K and 70 K
Coolant flow rate [mg/s/A]	0.059	0.039	0.069	0.115	—
Heat flow [mW/A] at temp. [K]	1.2 at 4.2 K	0.0 at 4.2 K	0.06 at 4.2 K and 3.5 at 65 K	0.16 at 4.2 K and 22.9 at 77 K	0.10 at 4.2 K and 41 at 70 K
Ideal refrigerator input power [W/A]	0.40	0.27	0.004 HTS +0.095 Cu =0.10 total	0.011 HTS +0.089 Cu =0.10 total	0.007 HTS +0.134 Cu =0.14 total
Relative input power	1.00	0.68	0.25	0.25	0.35

(a)-(d): Reference 12), (e): rough estimate for this article.

電流リードの熱設計計算は、導体とヘリウムについての1次元定常の熱バランスの式を数値的に解くことによって行われる。この際、導体と冷媒の物性値の温度変化も考慮される。HTS部をガス冷却する場合も基本的には同じである^{13,14)}。ガス冷却せず、かつ I_c 以下で用いる場合は、HTSについては、熱伝導率積分から決まる低温端熱侵入だけが問題となる。

2.3 HTS 電流リードの基本構造

HTS 電流リードの一方の端は4 K 近傍の超電導コイルなどの超電導導体に接続する端子で、反対側の端は室温にあって、電源からのバスに接続する端子である。HTS 部のバルク材の両端には銀電極が付けられており、その銀電極と銅端子がハンダ付けされる。HTS 導体部の低温側、場合によっては高温側には可撓性導体が接続されて熱応力を逃げるようにされる。漏れ磁場による電磁力が問題となる場合はエポキシ樹脂あるいはステンレスなどの機械的支持構造物を取り付けられる。高い安全性が要求される場合は、冷却系のトラブルなどによるクエンチに備えて、ステンレスなどでできた電流バイパス用導体が設けられる。HTS 部は通常、真空容器内の真空中に置かれる。上部の銅リード部は銅または銅合金の束またはフィン付き棒で、ステンレス管内に収められてガス冷却される。前節で触れたように中小電流容量で冷却効率よりも簡便さを重視する場合は、この銅リード部は単に銅または銅合金の線または板である。HTS 部-銅リード部の接続部には冷却のためのガスヘリウム配管または、液体窒素溜め、あるいは冷凍機の冷却ステージが設けられる。クライオスタット構造物との対地絶縁

が、最低温部、HTS-銅リード接続部、室温端子部の3か所必要である。それらの電気絶縁物が真空気密あるいは熱接触を兼ねる場合もある。

2.4 安全性と信頼性

前節で述べた基本構成のなかで、HTS 電流リード特有の問題でかつ実用に際しての安全性と信頼性に関わる事項を2つここで取り上げる。

(1) 接続抵抗 銀シース線以外のバルク材では酸化物と電極の銀との接続抵抗の値が問題となる。接続抵抗が十分小さくしなければならぬし、歩留りが良く、長期間の放置あるいは繰り返し運転-通電、非通電および室温、低温間のサイクルで劣化がないことが求められる。接続方法としてはこれまで、銀ペースト、銀溶射、銀箔張り付けなどが行われてきた。接続抵抗の測定例は多く、一応の目標とされる $1\mu\Omega$ at 77 K, $0.1\mu\Omega$ at 4.2 K をクリアしている例が多い。この抵抗値のとき、1 kA 通電時の発熱は1 W at 77 K, 0.1 W at 4.2 K となる。ところで接続抵抗の値が $[\Omega\text{cm}^2]$ で表現されることが多いが、超電導体との接続では接続抵抗が接続表面積に反比例するわけではないので、単に $[\Omega]$ で評価の方が实际的である。信頼性に関して、室温と77 K との間の数10回程度の熱サイクル試験では劣化が見られないようである。電流サイクル試験も行われた。これは磁気分離用超電導磁石への応用を想定して行われたもので、1サイクル当たり、通電30秒、停止30秒、を最大25万サイクルまで試験した結果、接続抵抗の値 $1.0\mu\Omega$ at 77 K, $I \leq 500$ A に変化がなかったと報告されている¹⁵⁾。また、冷媒なし超電導磁石中のHTS 電流リードで、13,000時間の

冷却時間経過のなかで接続抵抗の劣化はなかったという報告もある¹⁶⁾。このように接続抵抗はその値および信頼性においてほぼ実用レベルに達していると見られる。

(2) 保護導体 HTS 電流リードは超電導から常電導に転移する可能性があり、これへの対策をなにもしないと万クエンチしたときには、HTS の比抵抗が非常に高いために短時間で溶断して回路がオープンになって超電導磁石に回復不能な損傷を引き起こす恐れがある。HTS 導体のクエンチは例えば冷却系のトラブルによって HTS 部上端の温度が上昇することによって引き起こされる。保護動作としては例えば HTS 部両端電圧の出現を検知して、電流を減衰させて超電導コイルのエネルギーを電源側に戻すことになる。この間に電流をバイパスして流すための保護導体を HTS と並列に設ける。これを設けない場合は、電流リードクエンチ時にコイルと閉回路をつくるような抵抗体を 4 K 部内に設けて超電導コイルのエネルギーをクライオスタットの 4 K 部中で消費することになる。この方法は、最善ではないが伝導熱侵入を少しでも増やしたくないという場合に採用されることもある。伝導熱侵入が多少増えても 4 K 部を冷却するための動力は、電流リード全体を冷却する動力のうちの小部分なので、冷却系動力が従来の数分の一になるという HTS 電流リードの優位性を大きく損なうことにはならない。

保護導体の寸法は、保護動作中のバイパス電流による温度上昇が許容範囲内（例えば 300～400 K）に納まるように設計される¹⁷⁾。従って、減磁に時間を要すればそれだけ大きな熱マスが必要になり、たとえ銀合金シース導体を用いても、それに加えてステンレスを熱マスとして付ける必要が出てくる場合もある¹⁸⁾。

3. 試作研究の状況

この章では、最近の文献に見られる試作研究例を中心に紹介する。

3.1 一般の超電導磁石用 HTS 電流リードの可能性実証モデル

一般の研究設備用超電導磁石に従来から用いられてきた銅製のヘリウムガス冷却式電流リードに取って代わるものとして、HTS を下部に持つ、4 K 端子から室温端子までの一体の HTS 電流リードが試作され、可能性が実証された。この種の最初のものは、Wu ら¹⁹⁾ (Westinghouse, ANL; 1990) であった。次の

で、日本で 1 kA モデルの全長ヘリウムガス冷却方式で¹⁸⁾、後に中間温度ヘリウムガス冷却方式 (Fig. 1(c)) での実験が行われ²⁰⁾、HTS 電流リードの予期された有用性が実証された。

ヨーロッパでは独、仏の 4 社 (Hoechst, Rhone Poulenc, Siemens, Alcatel Alsthom) 共同で 1 kA/20 kV の HTS 電流リードの開発を行った。材料の製作法・特性測定、熱特性の計算検討などの系統的な研究開発を経て、1 kA モデルを完成させた²⁰⁾。HTS 導体は Melt Cast Process の Bi-2212 バルク円筒 (外径 35 mm, 長さ 200 mm) である。冷却は、HTS 部は真空中に置いて冷却せず (伝導冷却: conduction cooling と呼ばれる)、銅リード部は液体窒素の蒸発ガスで冷却する Fig. 1 (d) の方式である。当初の設計では定格 1 kA であったが、2 kA までの定常通電試験が可能であった。試験の結果から、従来の電流リードと比べて、液体ヘリウムの蒸発量は 1/10、電流リード全体の冷却負荷 (冷凍機入力動力) は 1/5 であることを実証した。また、20 kV の耐電圧試験も実施した。

3.2 大型システムへの適用検討と基礎実験

加速器、核融合、SMES などの大型システムにおける冷凍系の建設費、運転費の低減のために、HTS 電流リードの適用が検討され、設計研究や基礎的試作試験が行われている。下記に例を列挙するが、詳細は各文献を参照していただきたい。

(1) 日本の SMES 研究関係

- ・関西電力²¹⁾ 銀シース導体, 2.5 kA
- ・東北電力²²⁾ 銀合金シース, 500 A
- ・中部電力²³⁾ Bi-2223 焼結体, 3.6 kA
- ・九州電力¹⁷⁾ Bi-2223 バルク, 1 kA

(2) 米国の SMES 関係

- ・micro-SMES (電圧変動、瞬時停電に備える小型 SMES) 用に試作された²⁴⁾。銀添加 Y-123 焼結棒。1.5 kA。
- ・電力系統用 SMES 磁石の HTS 電流リードの概念設計が行われた¹⁸⁾。16 kA, 5 kV。HTS 導体部は Bi-2223 銀合金シーステープの積層体であるが、肉厚のステンレス円筒 (保護導体) の外周面の溝に埋め込まれる。

(3) 加速器関係

- ・小型放射光装置 NIJI-III での実用²⁵⁾。銀シース導体。1,730 A。冷却: HTS 部一蒸発 GHe, 銅リード部一液体窒素。1年以上の運転実績がある。

Table 3 HTS current leads in cryogen-free superconducting magnets.

Reference	29 Sumitomo HI	30 Toshiba	31 Mitsubishi	32 Oxford Inst.	33 Nihon Univ.
Magnet	$\phi 220$, 6 T	$\phi 100$, 10 T	Klystron remote cool.	2 T lab. mag.	exper. model
HTS material	Bi-2223 sintered tube	Bi-2212 laser FZ rod	Bi-2223 sintered slab	Bi-2212 melt cast? rods	Bi-2212 laser FZ rod
Dimensions [mm]	$\phi 23/20 \times 190$	$\phi 5 \times 50$	$1 \times 10 \times 200$	$\phi 5$ and $\phi 8$	$\phi 5 \times 100$
Operating temp.	5–40 K	4–20 K	6–60 K	10–40 K?	12–50 K
Operating curr. curr. density	152 A 1.5 MA/m ²	130 A 6.6 MA/m ²	18 A 1.8 MA/m ²	145 A 7.4 MA/m ²	30 A 1.5 MA/m ²
Remarks	under construction Bext 0.9–0.25 T		GFRP support	Bext 0.5–0.1 T	coil temp. 4 K

る。

- SSC の correction coil 用にプロトタイプの試作試験まで行われた²⁶⁾。
- LHC (Large Hadron Collider) の correction coil 用²⁷⁾。Bi-2212 棒, 60 K GHe 冷却, 25 A。プロトタイプ試作中。

(4) 核融合関係

- KfK (Kernforschungszentrum, Karlsruhe) で核融合装置 Wendelstein 7-X 用として概念設計が行われた²⁸⁾。20 kA。HTS 導体は銀合金シース Bi-2223 テープの集合体。自己磁場 0.16 T, 合計 0.25 T を考慮。銅導体部は 60 K GHe 冷却。冷却停止後の温度分布変化を計算し, 4~5 分許容できるとの結果を得ている。

3.3 冷凍機直冷式超電導磁石用 HTS 電流リード

液体ヘリウムを用いない超電導磁石が今脚光を浴びている。超電導コイルは冷凍機の低温側ステージと熱接触させて冷却される。この磁石で, 電流リードの低温側には HTS が用いられ, その低温端と中間温度部はやはり冷凍機で冷却される。冷凍機は GM タイプで, クライオポンプ用に量産されているものでは 10 K 近傍まで冷却できる。また, 最近開発された, 低温段に磁性蓄冷材を用いたものでは 4 K 近傍でもある程度の熱負荷をとれる。冷凍機冷却超電導コイル, さらに冷凍機冷却電流リードの考えは昔からあったが, ガス冷却しない金属製電流リードの低温端熱侵入は普通の小型冷凍機で扱える範囲のものではなかった。それは 1 mW/A のレベルではなくその約 1 桁上である。

それがガス冷却の HTS の登場により, ガス冷却なしに 0.1 mW/A レベルが可能となった。この電流リードと組み合わせて, 極めて取り扱い容易な超電導磁石が実現した。現在までに数社から発表されている。超電導磁石そのものは本稿の範囲外なので, そこに組み込まれた電流リードの HTS 導体部分について最近の文献から, Table 3 に HTS 導体材料・寸法, 運転条件などを示しておく。運転電流値はいずれも低く設計されている。運転温度は 77 K よりかなり低くされており, 漏れ磁場はかなり大きい, 電流密度はかなり安全を見た値になっていると思われる。

3.4 交流用 HTS 電流リード

最近盛んになってきた HTS 電流リードの開発に, 限流器やトランスなどの交流機器用電流リードがある。

(1) ヨーロッパ 3 社の共同開発

Alcatel Alsthom, Hoechst, Siemens の 3 社は共同で 5 kA_{rms}/50 kV の交流用 HTS 電流リードを開発中である。設計や開発の現状に関する資料は入手していないが ac ロスの計算に基づく電流リード熱特性に関する論文が発表されている³⁴⁾。4.2 K 部への熱侵入は 0.2 W/kA で, 中間温度部の冷凍負荷を加えても従来の金属電流リードの 1/3 の冷却系動力になるとしている。

(2) 東京電力/東芝; 1 kA 限流器用電流リード³⁵⁾

HTS 導体は Bi-2223 焼結円筒である。1 kA で 3 時間の安定通電を達成し, 電圧, 電流波形および温度分布から ac ロスが十分小さいことが確認された。

Fig. 2 Test model of an ac 2 kA current lead pair incorporating HTS³⁶⁾.

(3) 九大／富士電機／古河電工

2 kA/6.6 kV リードペアの試作試験が行われた³⁶⁾。Fig. 2 に試験装置の構造を示す。Bi-2223 焼結体スラブを1極当たり12枚で HTS リード部を構成した。12枚の全部のスラブにログスキーコイルを取り付けて分流状態が測定された。流れた電流の最大値と最小値の比は2:1であった。

4. あとがき

以上、HTS を用いた電流リードについて技術要素と最近の開発状況を概説した。ここ2年程の目立った状況として下記があげられる。

(1) HTS 電流リードを備えた冷凍機直接冷却式超電導磁石の実用化、商品化が急速に進んでいる。

(2) 試作電流リードの HTS 導体として、Bi 系 2223 焼結体中心から、Bi 系 2212、Y 系（一方向性）、銀合金シースなど多様になってきた。

(3) 交流用の試作研究が行われるようになった。

これらは以前から一部で行われていたが、それが今は大きな流れになっているように見える。

実用化が進む中で、コストや信頼性の重要性が増してきたように感じられる。

HTS 電流リードをはじめ、HTS 応用技術の開発では、材料関係者、冷却関係者を含めた広範な人間の協力が特に必要である。低温工学・超電導の社会でもコミュニケーションがさらに盛んになり、HTS 電流リードをはじめ、この分野全体の効率的な開発が推進され実用化が進展することを期待する。

参考文献

- 1) 宇野直樹ら：古河電工時報 No. 91 (1992) 6
- 2) 山田 豊ら：低温工学 **28** (1993) 86
- 3) K.G.Herd, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 1667
- 4) S. Elschner, et al.: presented at MT-14 paper E5, June, Finland (1995)
- 5) 木村信一ら：第52回秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (1994) 169
- 6) T. Masegi, et al.: *Advances in Superconductivity VII*, Springer-Verlag, Tokyo (1995) 1227
- 7) T. Kato, et al.: *Advances in Superconductivity V*, Springer-Verlag, Tokyo (1993) 1239
- 8) T. Sasaoka, et al.: *Advances in Superconductivity V*, Springer-Verlag, Tokyo (1993) 729
- 9) P. F. Herrman, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 876
- 10) Y. Yamada, et al.: Adv. Cryog. Eng. **40** (1994) 281
- 11) T. Masegi, et al.: *Advances in Superconductivity V*, Springer-Verlag, Tokyo (1993) 1227
- 12) K. Ueda, et al.: Supercollider **5** (1993) 575
- 13) K. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 400
- 14) T. Nishioka, et al.: *Advances in Superconductivity VII*, Springer-Verlag, Tokyo (1995) 1231
- 15) J. A. Selvaggi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 782
- 16) 渡辺和雄ら：第53回春季低温工学・超電導学会講演概要集 (1995) 100
- 17) 今吉忠利ら：低温工学 **30** (1995) 602
- 18) R. C. Niemann, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 789
- 19) J. L. Wu, et al.: IEEE Trans. Magn. **MAG-27** (1991) 1861
- 20) P. F. Herrmann, et al.: Cryogenics **34** (1994) 543
- 21) 加藤武志ら：電気学会論文誌 **A115** (1995) 251

- 22) K. Fukushima, et al.: *Advances in Superconductivity VII*, Springer-Verlag, Tokyo(1995) 1219
- 23) 向山晋一ら：第53回春季低温工学・超電導学会講演概要集 (1995) 38
- 24) R. C. Niemann, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 793
- 25) T. Masuda, et al.: *Advances in Superconductivity VII*, Springer-Verlag, Tokyo (1995) 1235
- 26) J. L. Wu, et al.: Supercollider **5** (1993) 567
- 27) A. Ballarino and A. Ijspeert: IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 805
- 28) R. Heller and J. R. Hull: IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 797
- 29) 直原和哲ら：第53回春季低温工学・超電導学会講演概要集 (1995) 101
- 30) 小柳 圭ら：平成7年度電気学会全国大会講演概要集 (1995) 5-266
- 31) S. Yokoyama, et al.: presented at MT-14 paper D 21, June, Finland (1995)
- 32) L. Cowey, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 825
- 33) 増山新二ら：低温工学 **30** (1995) 171
- 34) P. F. Herrmann, et al.: presented at MT-14 paper D 2, June, Finland (1995)
- 35) K. Yamamoto, et al.: *Advances in Superconductivity VII*, Springer-Verlag, Tokyo (1995) 1239
- 36) Y. Yasukawa, et al.: presented at MT-14 paper D 33, June, Finland (1995)