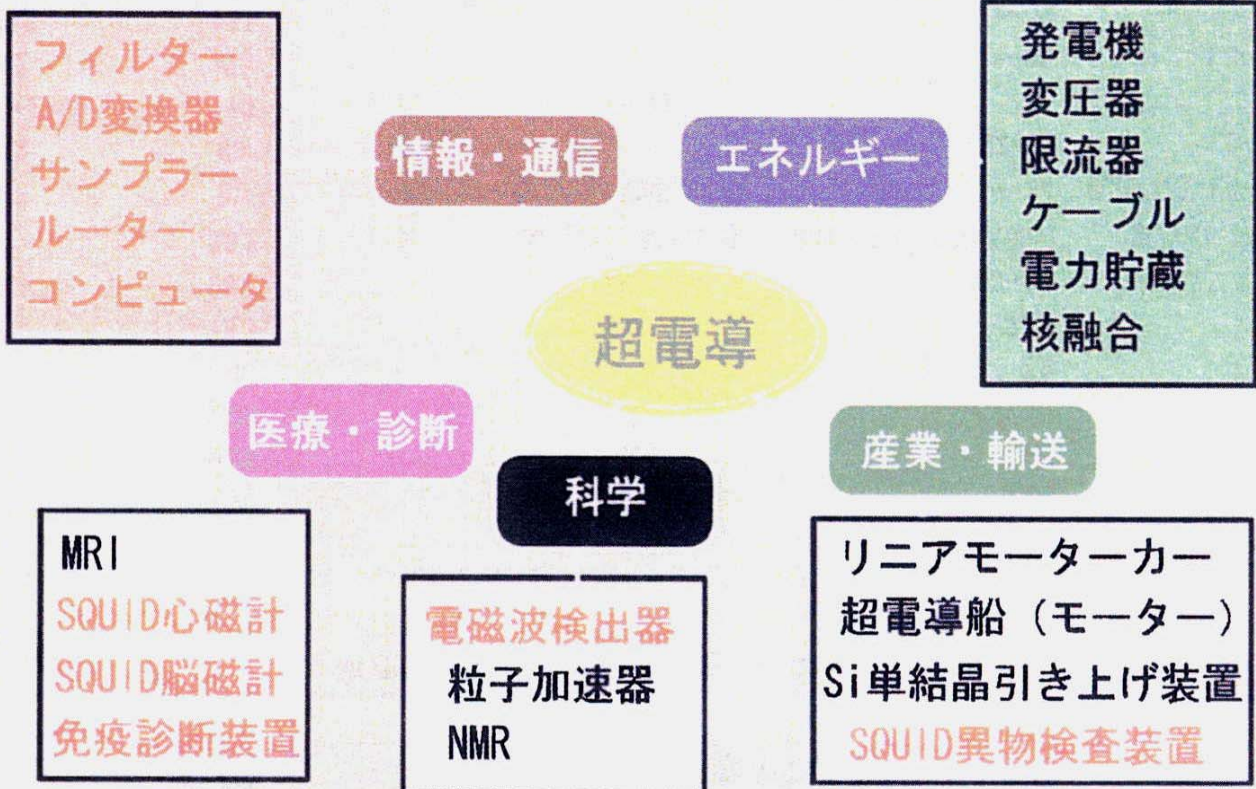
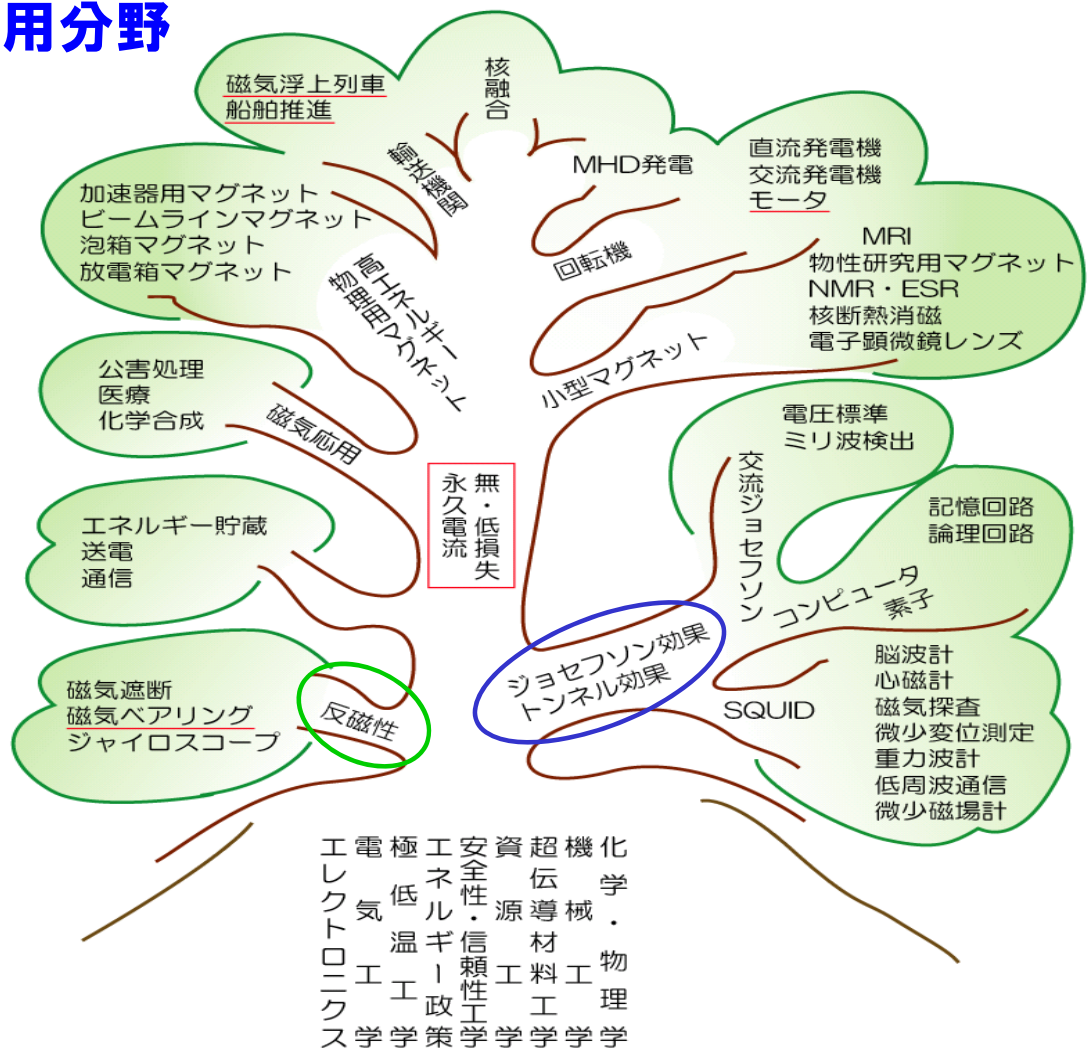


超伝導現象の応用

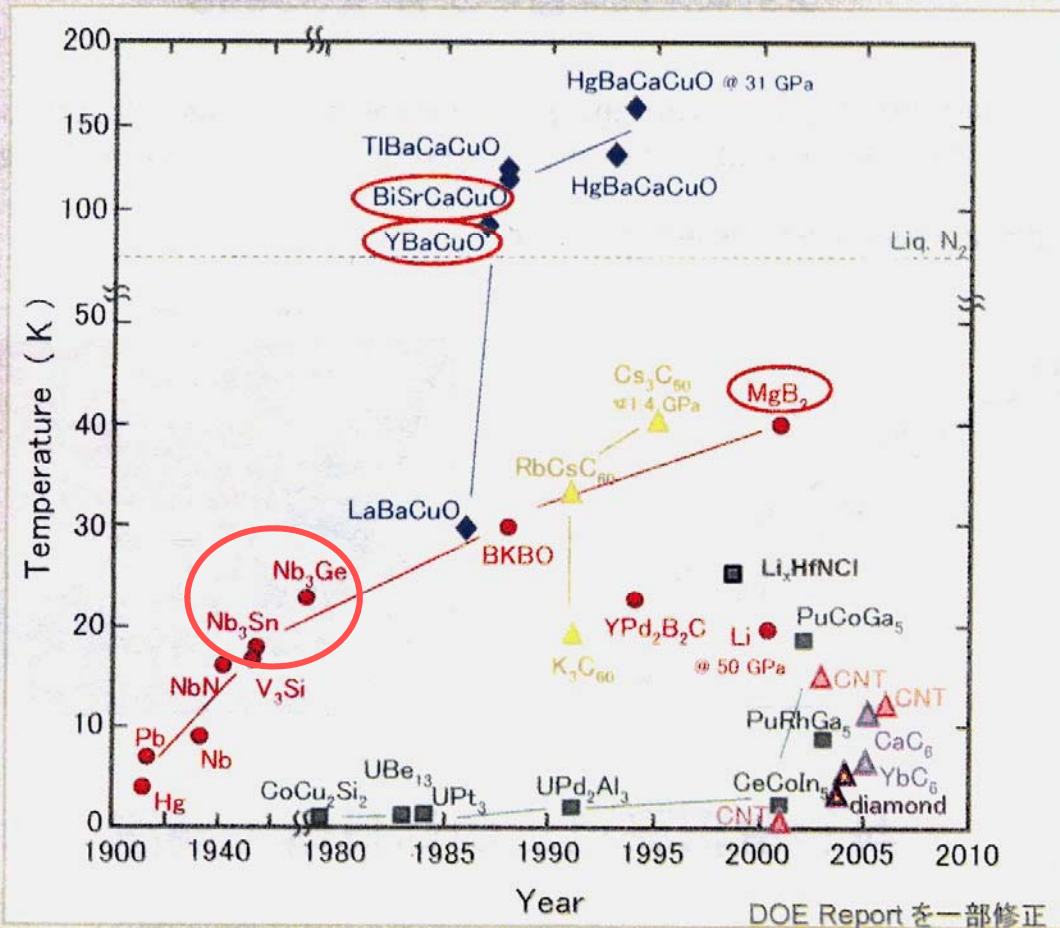
超伝導応用マップ



超伝導の応用分野



1. 主要な超伝導材料の特性



主要な超電導材料の物性パラメータ

超電導材料	T_c (K)	異方性パラ メータ γ	上部臨界磁場 $B_{c2}(0)$ (T)	エネルギーギャップ $\Delta(0)$ (meV)	コヒーレンス長 $\xi_{GL}(0)$ (nm)
Al	1.20			0.17	1600
Pb	7.20			1.36	83
Nb	9.25		0.404	1.5	39
Nb-Ti	9.08		15		
NbN	16			2.9	4
Nb ₃ Sn	18.3		29	3.55	3
Nb ₃ Ge	23.2		38	3.8-4.1	3
MgB ₂	39.2	2	38 (//c), 60 (\perp c)	2.0-2.4(π), 6.5-7.5(σ)	2(//c), 7-9(\perp c)
YBCO	93	7	72 (//c), 350 (\perp c)	~34	0.2(//c), 1.5-2(\perp c)
Bi-2212	90	>90		~32-40	1.5-2(\perp c)
(Bi,Pb)-2223	110	50	60 (//c), 850 (\perp c)		
Tl-2212	110			~35	1.5-2(\perp c)
Hg-2212	127			~50	

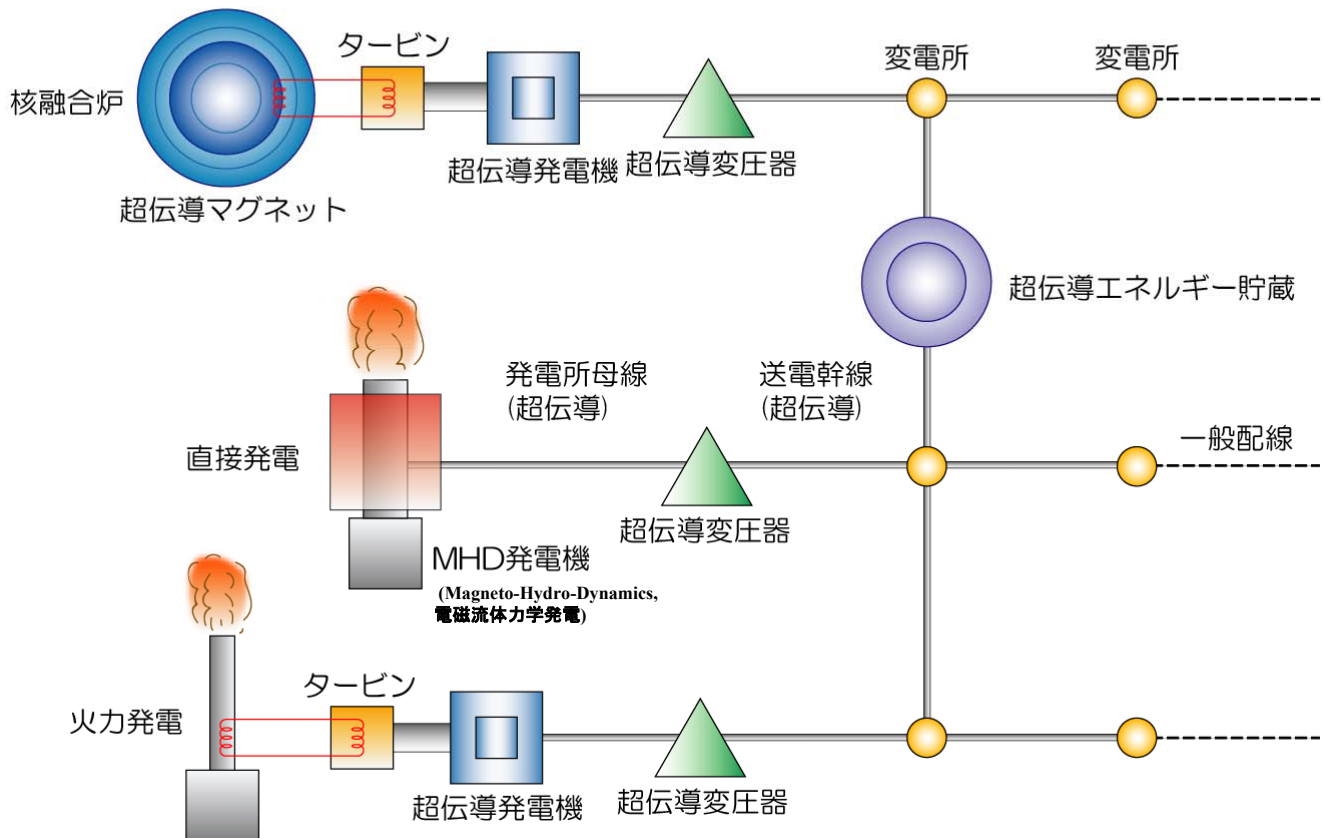
MgB₂ : 異方性は比較的小さい、低コスト、Nb系化合物の代替(4-30 K)

Bi-2212 : 異方性大、低温(4 K)での超高磁場応用

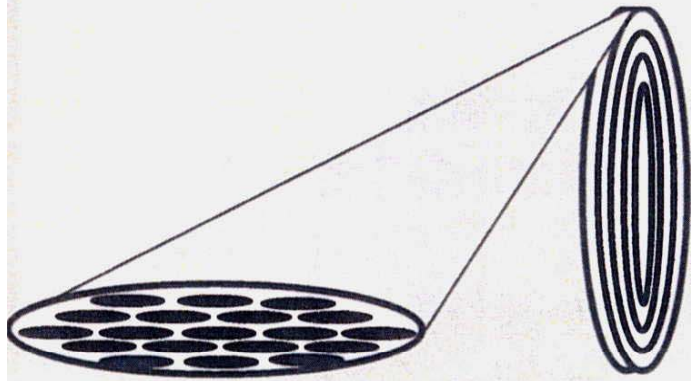
Bi-2223 : 異方性は2212より小、77 Kでの低磁場応用、低温(4-20 K)での高磁場応用

YBCO : 異方性は銅酸化物中で最小、77 Kでの低磁場・エレクトロニクス応用、高磁場応用(20-77 K)

未来の電力エネルギーの超伝導化



線材プロセス

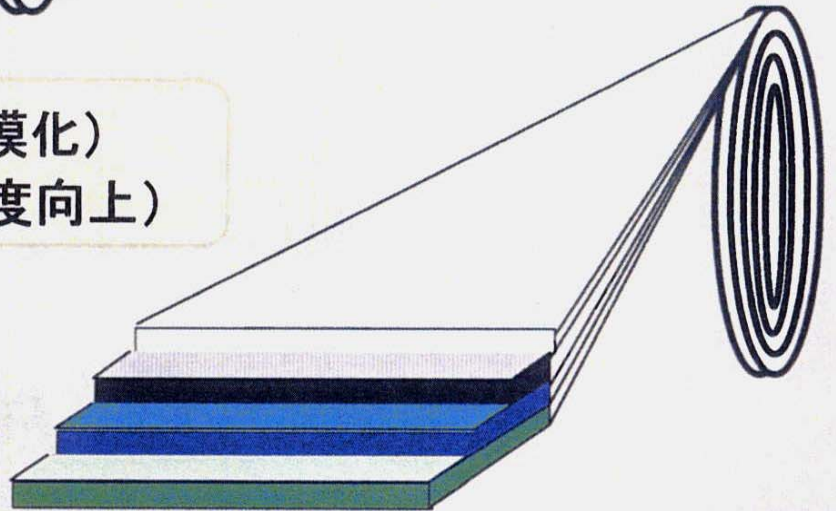


第一世代:
Bi系銀シース線材

課題

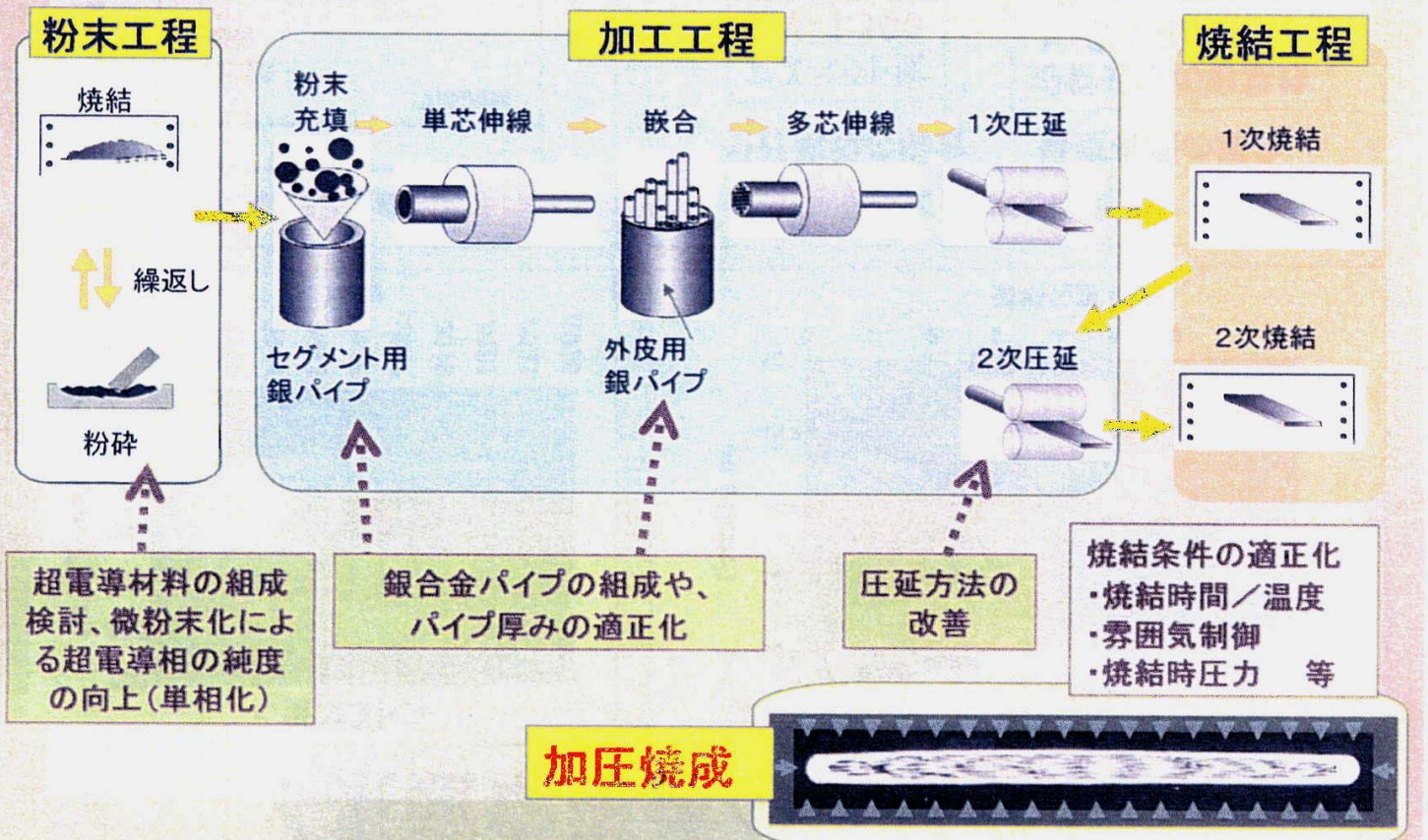
- ・高 I_c 化(高 J_c 化、厚膜化)
- ・低コスト化(製造速度向上)

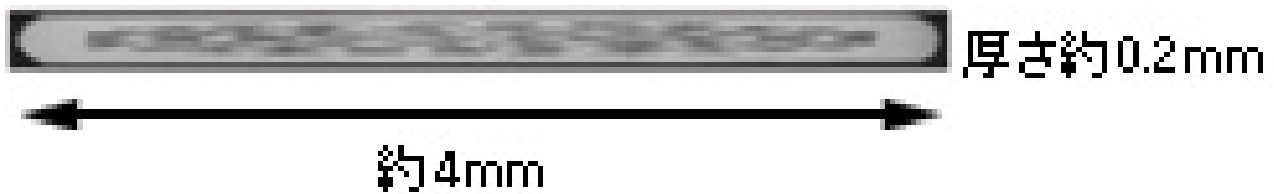
第二世代:
Y系テープ線材



ビスマス系超電導線材

Bi系超電導線材新プロセス(住友電工)

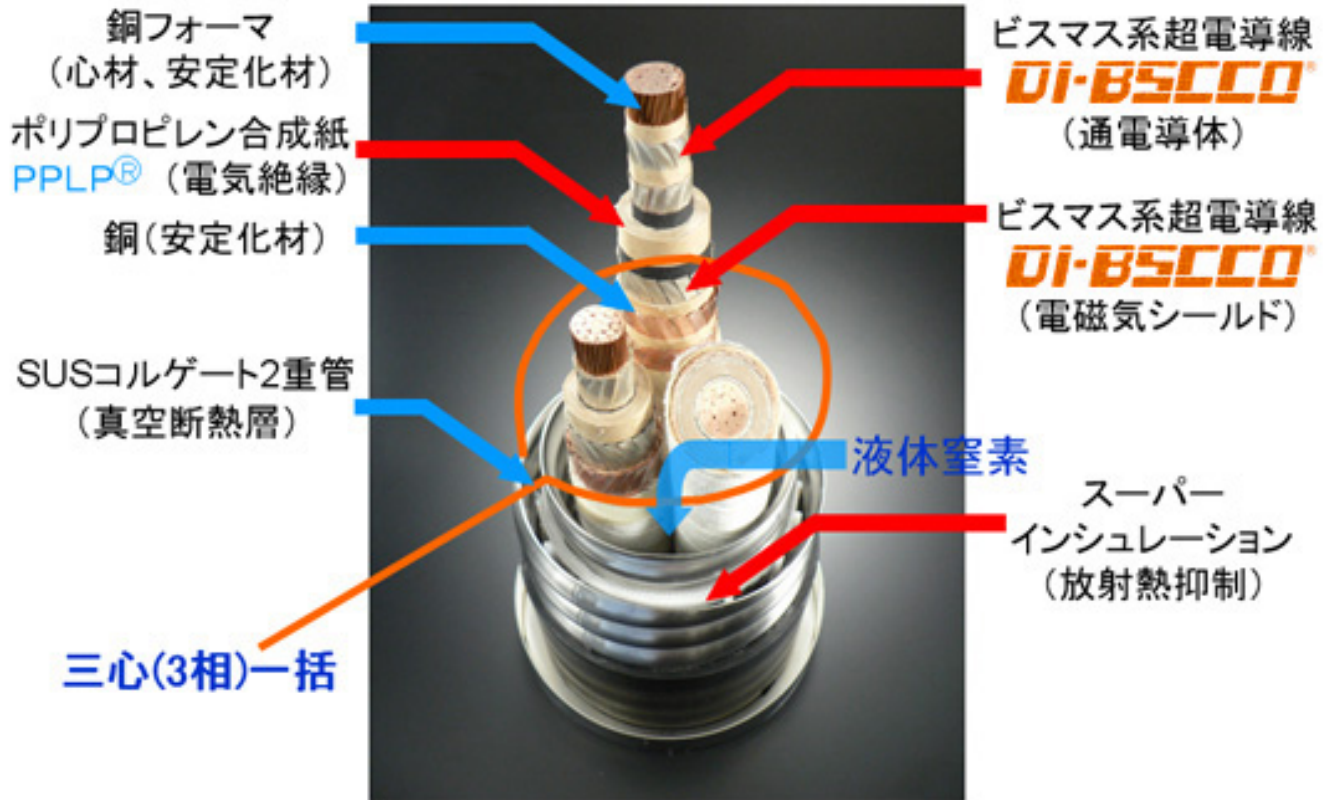




ビスマス系超電導材料は、日本発の技術です。この材料を世界で初めて長尺線材化し、既にグローバルスタンダードとなっています。ビスマス系超電導材料とは、Bi(ビスマス)-Sr(ストロンチウム)-Ca(カルシウム)-Cu(銅)-O(酸素)で構成されるもので、特にBi、Sr、Ca、Cuの組成比が2:2:2:3となる2223相は臨界温度が110Kと高く、発見直後から最も実用化に近い材料として注目されてきた。

銀とビスマス系高温超電導材料を複合加工する固相法を中心に開発を進めてきましたが、このたび、革新的なプロセス開発 (Controlled Over Pressure:CT-OP)により、ビスマス系高温超電導線材の飛躍的な品質向上と生産性の大幅な向上を同時に達成した。

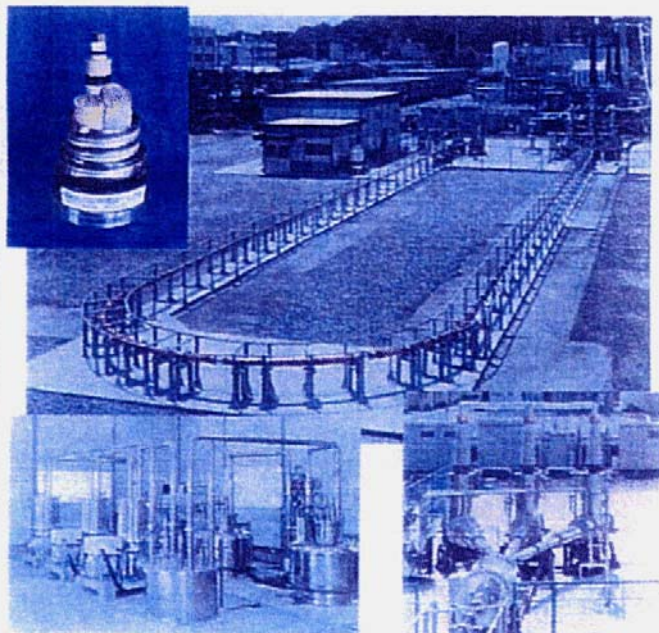
超電導ケーブル



(注) 安定化材: 事故時の電流分担



Bi2223系線材による高温超電導ケーブル



長さ 100m
 定格電圧 66kV
 定格電流 1kA
 形状 3芯一括型
 外径Φ136mm
 冷却システム 液体窒素加圧
 循環方式
 実証試験を 2002-2003に実施

66 kV実系統に接続しての実証試験
 2007-2011に実施予定(NEDOプロジェクト)

東京電力-住友電工のご好意による

シリコン単結晶引上げ用超電導マグネット

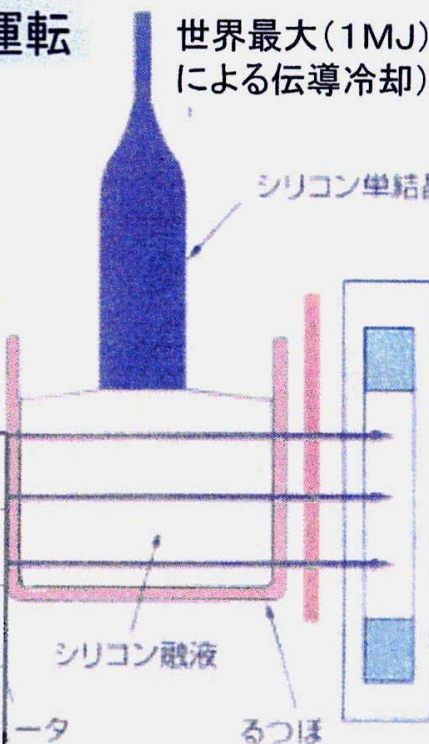
20K運転による冷却コスト低減
 クエンチ無しによる安定運転

東芝、住友電工、信越半導体の共同開発
 世界最大(1MJ)の高温超電導コイル(冷凍機
 による伝導冷却)

超電導マグネット

シリコン単結晶

コイル直径	φ 1200mm
運転電流	200A
蓄積エネルギー	1MJ
運転温度	20K
最大磁場Br	1.8T



シリコン単結晶引上げ用
 Bi系高温超電導コイル

エレクトロニクス応用

(1) 高周波応用 (低損失、シャープカット) 両面HTS薄膜

マイクロ波フィルター
超電導アンテナ

携帯基地局、地デジ中継局
衛星応用

(2) センサー応用 (超高感度) HTS薄膜1層 + 2 JJ

磁気センサー
電磁波センサー

SQUID(医療応用、各種検査装置)
電波天文、X線検出器、テラヘルツ
高品質SIS接合必要

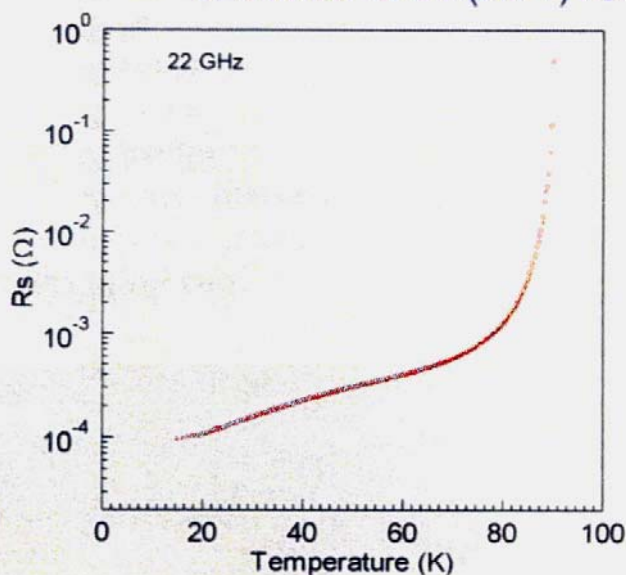
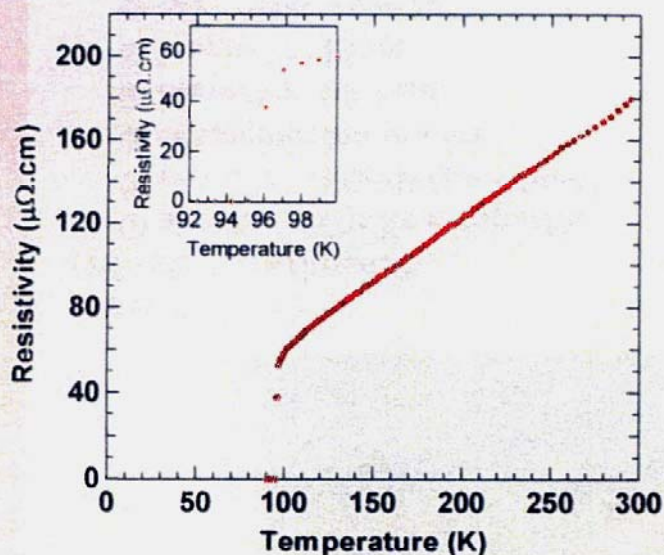
(3) デジタル応用 (超高速、低消費電力) HTS薄膜3層 + 多数JJ

SFQデバイス

ルーター、コンピューター、計測器
JJ高集積必要

高品質RE-123薄膜の例

Nd-123 film by MBE
J. Kurian et al. (NTT) ISS04



T_C ~94 K
 ρ_{RT} 150 - 200 $\mu\Omega$
(ρ_{300K}/ρ_{100K}) ~3
 J_C ~4.5 MA/cm² @ 77 K

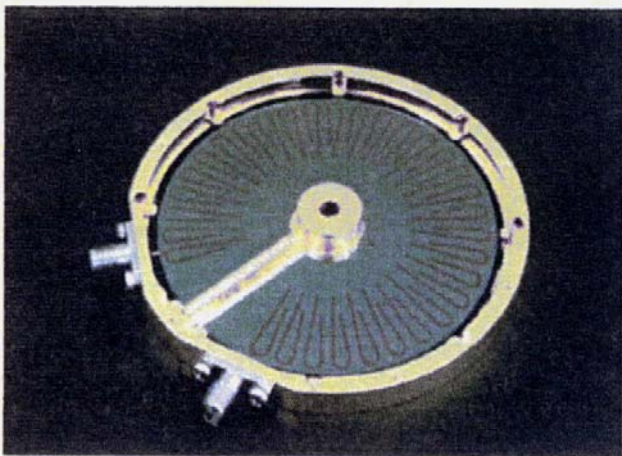
- Low microwave R_s
 - 800-1000 $\mu\Omega$ @ 77 K
 - 165-205 $\mu\Omega$ @ 10 GHz, 77 K
 - 100-150 $\mu\Omega$ @ 20 K

11.2.5 通信分野への応用

超伝導体では、基本的には電気抵抗がゼロであるからマイクロ波通信用の高性能アンテナとして利用できる。また、必要な周波数帯のマイクロ波を選別するフィルターなどへの応用も考えられる。ただし、実際には変動する高周波に対して表面抵抗はゼロとはならない*1。その場合でも、金属よりも表面抵抗が1桁小さいことが報告されており、高性能アンテナ、フィルターとしての利用が可能である。表面抵抗は、薄膜の表面性状にも依存することから、今後も薄膜製造プロセスの改善などによって、表面抵抗を低下させることが重要である。

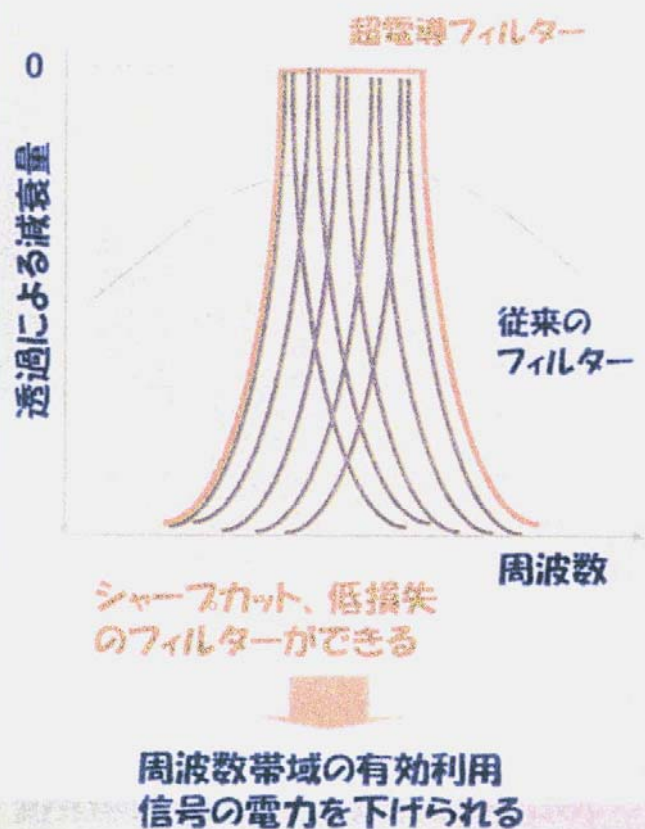
高温超伝導体では冷凍機冷却によって、比較的簡単に超伝導を利用できることから、通信分野での中継基地への応用が期待されている。

高温超電導フィルター

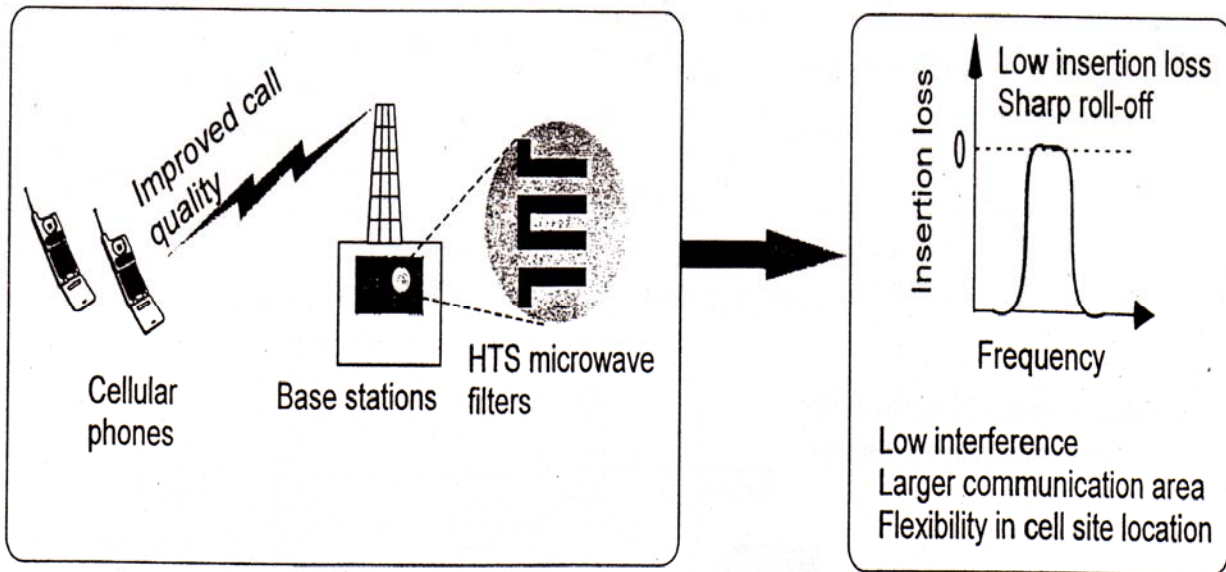


YBCO薄膜を用いた32段フィルター
クワイオテバイス社製

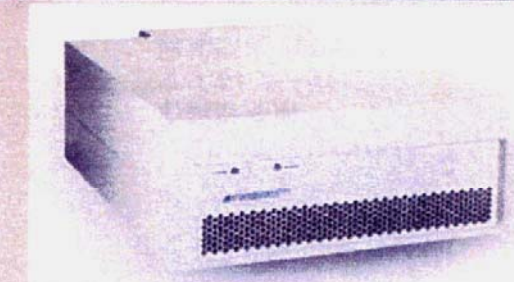
応用物理 72巻 No.1 (2003)



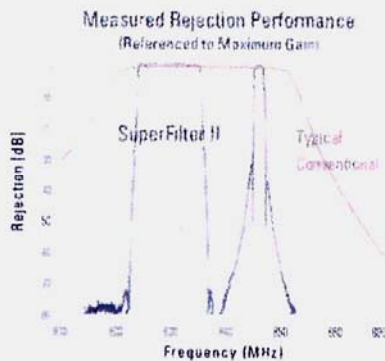
Microwave filter for cell phone base station



携帯通信基地局用受信サフシステム



STI社(米国のベンチャー企業)が販売している受信用サフシステム
(超電導フィルターと半導体増幅器を冷凍機冷却、850 MHz帯)



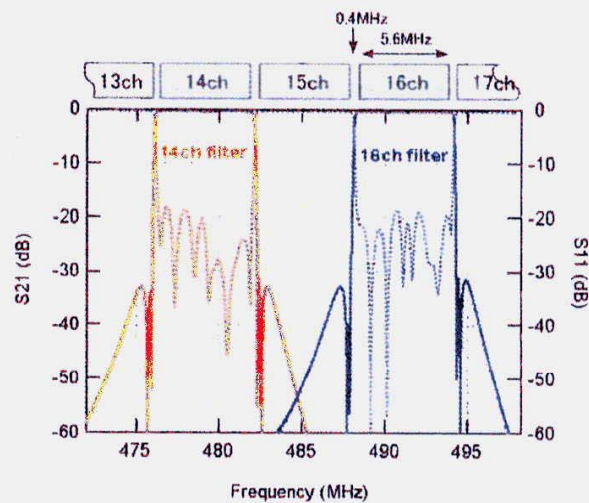
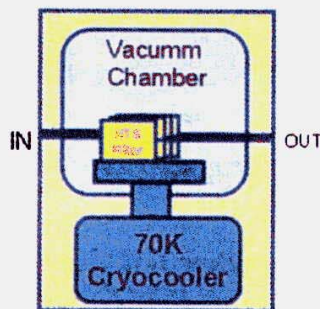
米国での周波数割り当てに対応した性能をもつ → 約5000台導入済



富士通開発の塔頂配置型システム
(1.9 GHz帯、第3世代 IMT-2000用)
まだ導入には至っていない

地上デジタル放送中継局用受信フィルター

TOSHIBA Superconducting Filter Unit for DTTB Relay Station



The HTS filter unit was jointly developed by NHK and Toshiba.

要求仕様は十分満足、課題はコスト(特に冷凍機)と送信フィルター開発

HTS接合、回路の作製はなぜ困難なのか

酸化物高温超電導体の性質に起因

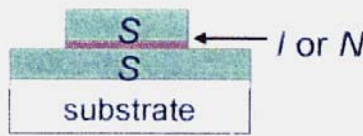
- 構造や組成が複雑(酸素欠損→超電導性消失)
- コヒーレンス長が短い(1-2 nm)
 - 構造が乱れた領域はオーダーパラメータが低下、絶縁体化
- 薄膜は基本的には方位のそろった多結晶体(結晶粒界が存在)
- 結晶化温度が高い(薄膜成長温度~700°C)
 - 粒界に沿った元素拡散が生じやすい

コヒーレンス長の長い MgB_2 の場合は容易か?

それほど簡単ではない(成長温度~300°C)

HTSジョセフソン接合の種類

■積層型 (LTS, HTS)

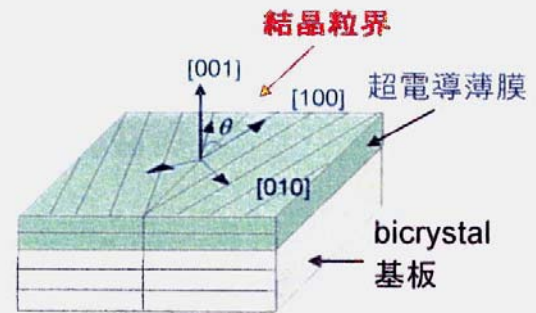


例: Nb/AlOx/Nb

固有ジョセフソン接合 (Bi-2212 etc.)

■粒界型 (HTS) SQUID

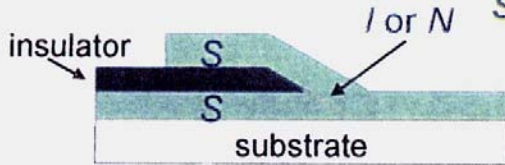
◆バイクリスタル接合



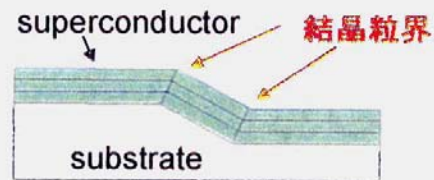
[001]-tilt 粒界接合

■ランプエッジ型 (HTS)

SFQデバイス
SQUID

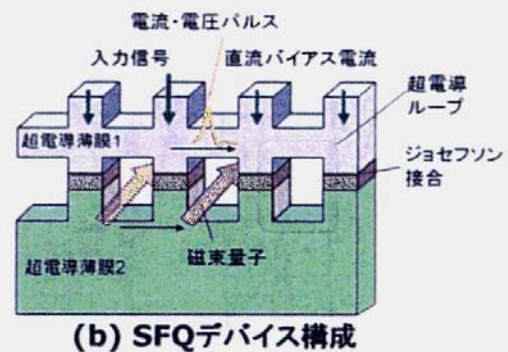
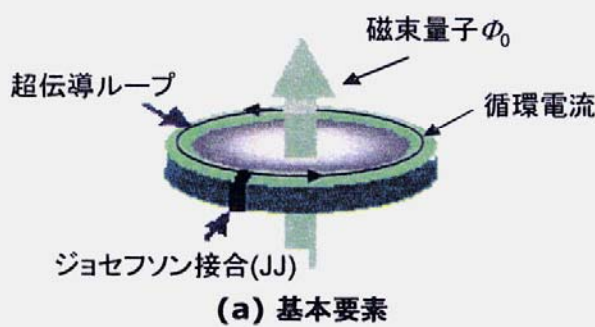


◆ステップエッジ接合 SQUID



単一磁束量子 (Single Flux Quantum) デバイス

半導体の限界を打破する次世代デバイス(超高速・低消費電力)として期待されている

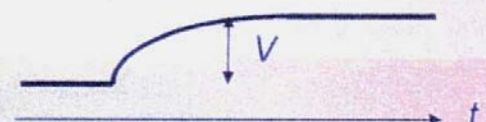
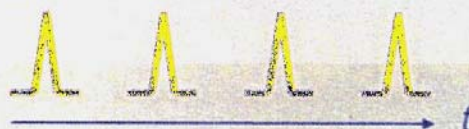


○磁束量子 ($\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb) を情報担体とする超電導電子デバイス
超電導ループに磁束量子が1つ存在する状態 “1” 存在しない状態 “0”

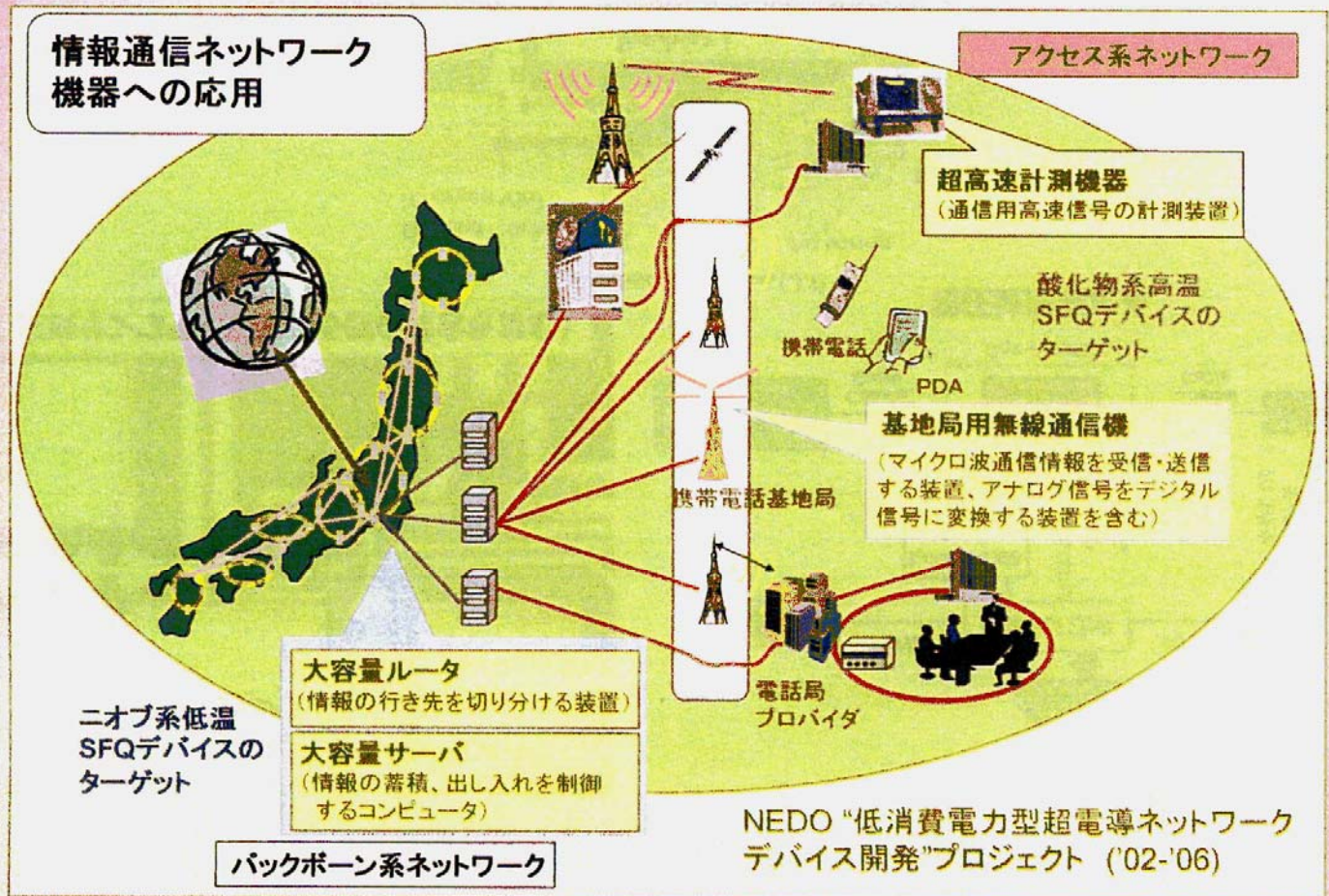
○ジョセフソン接合をスイッチとして用い磁束量子を隣の超電導ループに転送する
同時に超電導配線上を鋭い電圧パルス (SFQパルス、高さ mV、幅 2-6 ps) が
伝搬していく → パルス論理回路 (半導体はレベル論理回路)

パルス論理 (SFQデバイス)

レベル論理 (半導体)



SFQデバイスの期待される応用分野



現状の高温超電導SQUID磁気センサーの課題

バイクリスタル粒界接合

50 μm

電極

ピックアップコイル

15 mm

心磁計測用
マグネトメータ(日立)
磁場感度 100 fT/Hz^{1/2}

磁気シールド中で使用するが、磁場感度が不十分

ステップエッジ粒界接合

ステップエッジ粒界接合

ピックアップコイル

15 mm

異物検査用
マグネトメータ(住友)
磁場感度 0.3-1 pT/Hz^{1/2}

5 mm

10 mm

ピックアップコイル

フィードバックコイル

粒界接合

10 μm

バイクリスタル粒界接合

スリットサイズ 3 μm × 15 μm

製品非破壊検査用
グラジオメータ(豊橋技大)
磁場耐性 << 0.1 mT

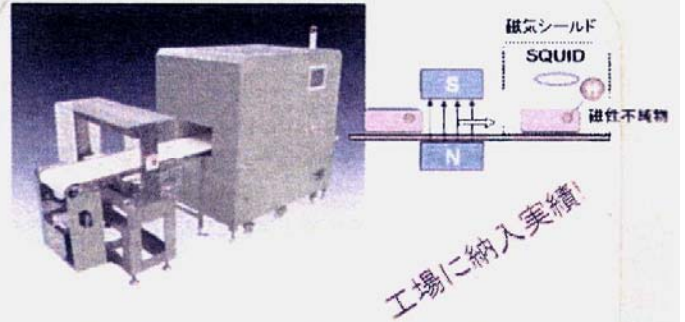
シールドなしで使用、磁場耐性が不十分

- ・いずれも高温超電導薄膜1層、粒界ジョセフソン接合で構成される
- ・磁場感度、磁場耐性に課題
- ・デバイス特性の経時変化が大きい

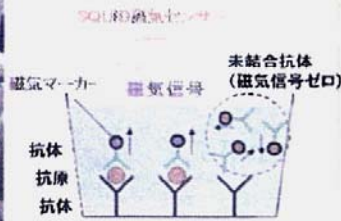
高温超電導SQUIDを用いた検査装置開発例



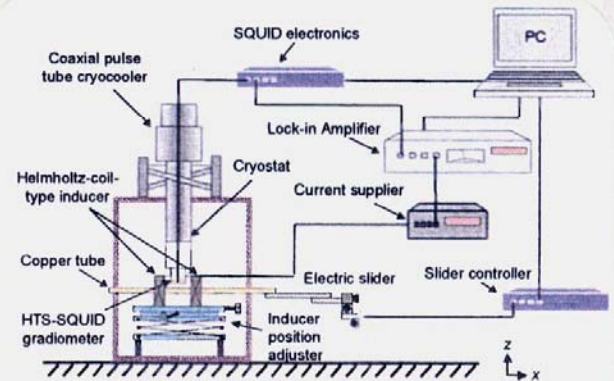
51 ch 心磁検査装置 (日立)



食品中異物検査装置(住友、豊橋技大)



磁氣的免疫検査装置(日立、九大)

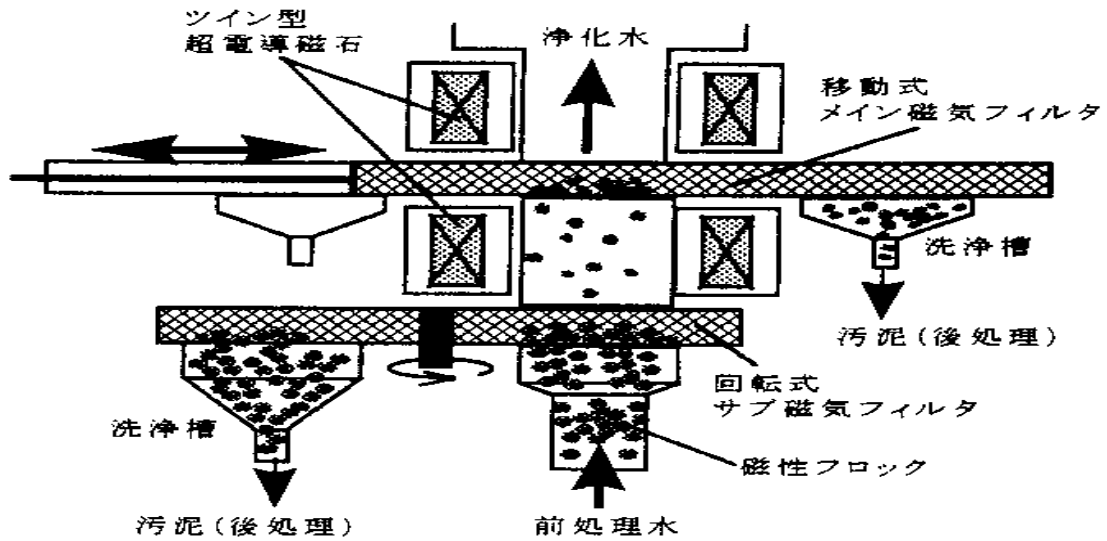


製品非破壊検査装置(豊橋技大)

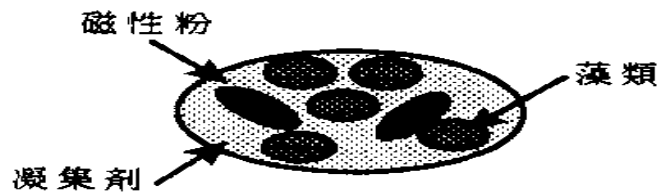


出典：日立メディコホームページより
<http://www.hitachi-medical.co.jp/product/mri/echelon/usability.html>

超電導磁石を用いたアオコ除去装置



連続磁気分離の構造



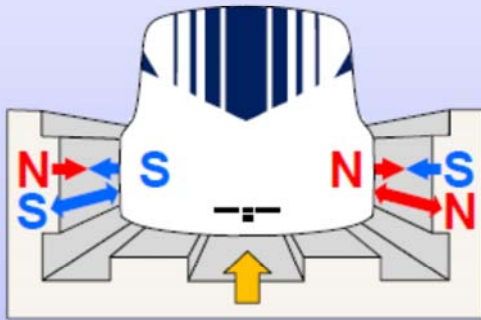
超伝導磁気浮上リニアーマーター列車



- **超スピード** → 時速603km (2015年)
- **浮上走行** → **超電導磁石**を使って可能

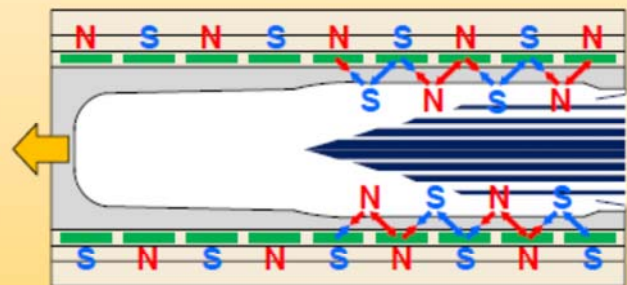
浮上の原理

ガイドウェイの側壁両側に浮上・案内コイルが設置されており、車両の超電導磁石が高速で通過すると両側の浮上・案内コイルに電流が流れて電磁石となり、車両（超電導磁石）を押し上げる力（反発力）と引き上げる力（吸引力）が発生します。



推進の原理

ガイドウェイの推進コイルに電流を流すことにより磁界（N極・S極）が発生し、車両の超電導磁石（N極・S極を交互に配置）との間で、引き合う力と反発する力が発生します。これを利用して車両（超電導磁石）が前進します。

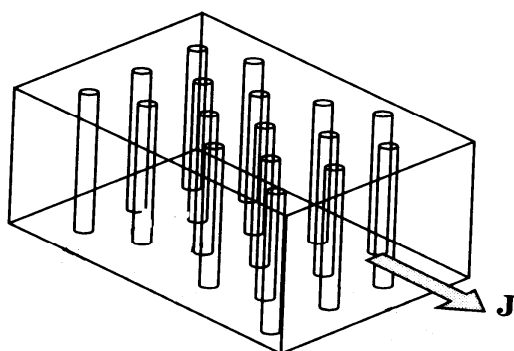


超伝導の応用：レポート10

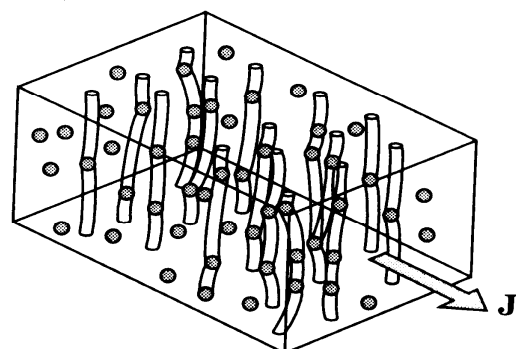
第2種超伝導体の混合状態に電流を流した時、

- (a) 磁束に働く力の方向、大きさ、および磁束が動くことによって発生する電場の方向と大きさを求めよ。
- (b) 超伝導線に電流を流すためには、磁束をピン留めすることが必須である。そのピン留め中心となる不均一性として、不純物以外の原因を挙げよ。

(a)



(b)



高温超伝導体の製造プロセスと応用

超伝導は冒頭でも紹介したように、超伝導でしか得られない機能が多いため、応用という点に関しては、既存材料の単なる代替ではないという利点を有している。これら特徴を機能別に列挙すると

- ①電気抵抗ゼロあるいは永久電流
- ②完全反磁性
- ③磁束量子化
- ④ジョセフソン効果(クーパー対のトンネル効果)
- ⑤ピニング効果による反磁性および強磁性

の五つにまとめられる。

超伝導の応用にとって重要であるのは、これら機能を最大限に引き出しながら、利用できるかたちに材料をつくりこむことである。例えば、①の特性では、すぐに送電用ケーブルへの応用が思いつくが、そのためには、超伝導体を長い線材に加工しなければならない。

また、③あるいは④の特性の場合には、薄膜のかたちで利用される場合が多いが、この場合も超伝導薄膜に複雑な回路を形成したり、外部との接合などが必要となるため、やはり材料プロセスが鍵を握っている。

この章では、まず高温超伝導体の製造プロセスについて簡単に紹介し、次に高温超伝導体の応用の現状と課題について解説する。

11.1 高温超伝導体の製造プロセス

11.1.1 焼結法

高温超伝導体の製造方法としては、通常のセラミックスと同様に焼結法が一般には広く用いられる。これは、組成比を制御した原料粉(酸化物や炭酸塩など)を混合し、適当な温度で仮焼して炭酸などを除去したのち、ペレットなどの形状に成型して、ふたたび適当な温度で焼結(固相反応)する方法である。比較的簡単な手法であり、形状を自由に変えられるなどの利点がある。また、高温超伝導体においては、焼結試料で簡単に抵抗ゼロが確認できるため、その製法として広く利用されてきている。

しかし、焼結法で作製した試料は多結晶体となるが、高温超伝導体ではほとんどの結晶粒界が弱結合となるため、臨界電流を高くできないことが分かった。特に、Y-Ba-Cu-O系の結晶粒界の問題は深刻であり、焼結材料の実用化は難しいと考えられている。圧力や磁場を利用して、結晶を配向させることで弱結合の軽減も試みられてはいるが、大きな改善は認められない。一方、Bi-Sr-Ca-Cu-O系においては、その結晶構造の2次元性の強さから、焼結法(固相反応)によっても結晶配向が可能である。実際に焼結法で作製された超伝導材料が、磁気シールドや電流リードなどに利用されている。

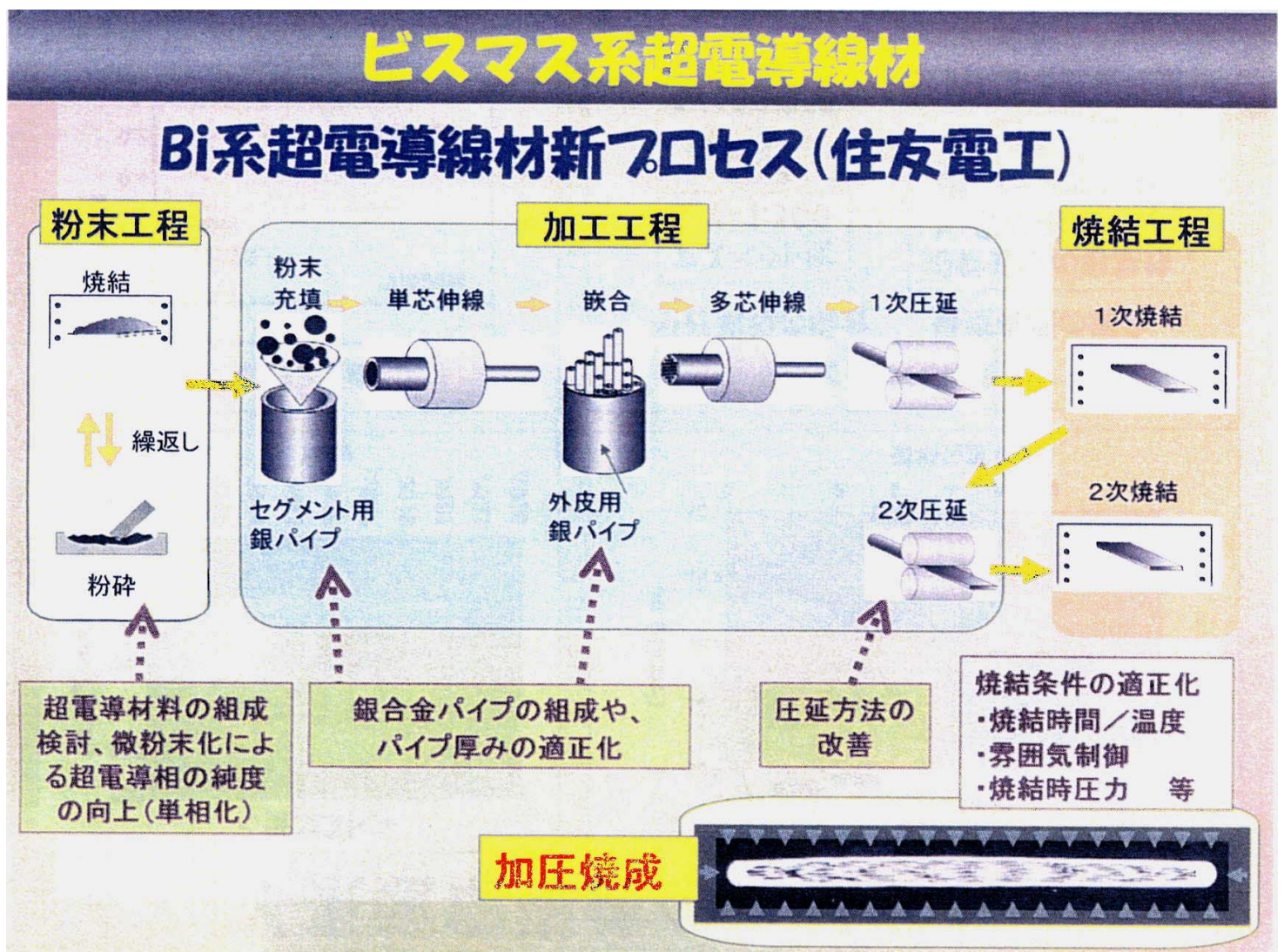
Pt, CeO₂ 添加などによって、分散する Y 211 相を微細化することが可能である(図 10-3 参照)。この微細分散によって高い臨界電流密度を達成できる。

11.1.3 線材製造法

超伝導の多くの応用においては、超伝導体を線材に加工できるかが重要な鍵を握っている。低温超伝導体においても、NbTiが広く利用されているのは、臨界電流密度の高い線材が製造できるからである。

高温超伝導体が脆い酸化物であることから、当初は長い線材に加工するのが困難であると考えられていた。しかし、金属製パイプ(主として銀)にBi-Sr-Ca-Cu-O原料粉を封入し、引き伸ばし加工したのち、熱処理する、いわゆる粉末チューブ(powder-in-tube)法によって1 kmを超す長い線材がつくられるようになってきている。この系では結晶構造の2次元性が強く、加工熱処理によって配向化が可能であるが、超伝導電流の流れやすい方向に結晶が成長するという特徴がある。このおかげで、長い線材においても弱結合の問題がない。

この系では、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ および $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$ の2種類の超伝導相のテープ状線材が製造されている。また、最近では、機械的特性を向上させるため、銀合金をシースとする試みも行われている。米国や日本において工業的プロセスとして確立しつつある。



11.1.4 薄膜製造方法

超伝導体をセンサーやデバイスとして応用するには、薄膜が必要となる。このため、高温超伝導発見当初から薄膜製造が試みられている。薄膜製造法については、高温超伝導体のために特別に開発された手法はなく、従来、半導体や誘電体の成膜に用いられていた手法を、酸化物用に工夫して適用している。成膜法の原理は簡単で、適当な基板の上に、物理的あるいは化学的な方法で超伝導体(あるいはその前駆体)を堆積させるものである。

物理的プロセスとは、薄膜原料の供給が物理的に行われる手法で、蒸着法やスパッタ法が代表的である。蒸着法は、低圧ガス中で原料を加熱蒸発して基板上に蒸着させる手法であるが、その加熱方法によって、電子ビーム蒸着、抵抗加熱蒸着、レーザー蒸着などに分類される。スパッタ法は、原料蒸気をイオン衝撃などで得る方法で高温超伝導薄膜の製造に最も広く利用されている。スパッタ法も、その手法によってマグネトロン、イオンビーム、レーザーなどに分類される。

化学的プロセスとは、膜形成時に何らかの化学反応を伴うものであり、有機、無機の原料を気相中で分解しながら膜形成を行う CVD (chemical vapor deposition) 法がよく用いられる。

ただし、薄膜に要求される性能は応用と密接な関係にあり、その使用目的に合わせて基板選定や製造プロセスを検討する必要がある。

11.2 高温超伝導体の応用

11.2.1 線材応用

超伝導線材の応用としては、送電線とマグネットが一般的である。特に超伝導マグネットは、医療用磁気断層撮影装置や磁気浮上列車など広い応用範囲がある。現在、Bi-Sr-Ca-Cu-O テープ線材を図 11-2 に示すようなパンケーキコイルに巻いて、20 K で 7 T の磁場を発生することにも成功している。しかし、Bi 系では、その強い 2 次元性のために高温でのピニング力が弱く、30 K 以上の温度では強磁場マグネットの製造が困難であると考えられている。

送電ケーブルにおいては、それほど強い磁場がかからないため、Bi 系線材でも応用が可能と考えられ、実際に 50 m の送電ケーブルも試作され、その実証実験が行われている。ただし、送電は基本的には交流で行われるので、ケーブル構造のコンパクト化を目指した臨界電流密度の向上とともに、交流ロスを低減する対策(具体的には多芯構造とし、線径を 5 μm 以下程度にするなど)も必要である。

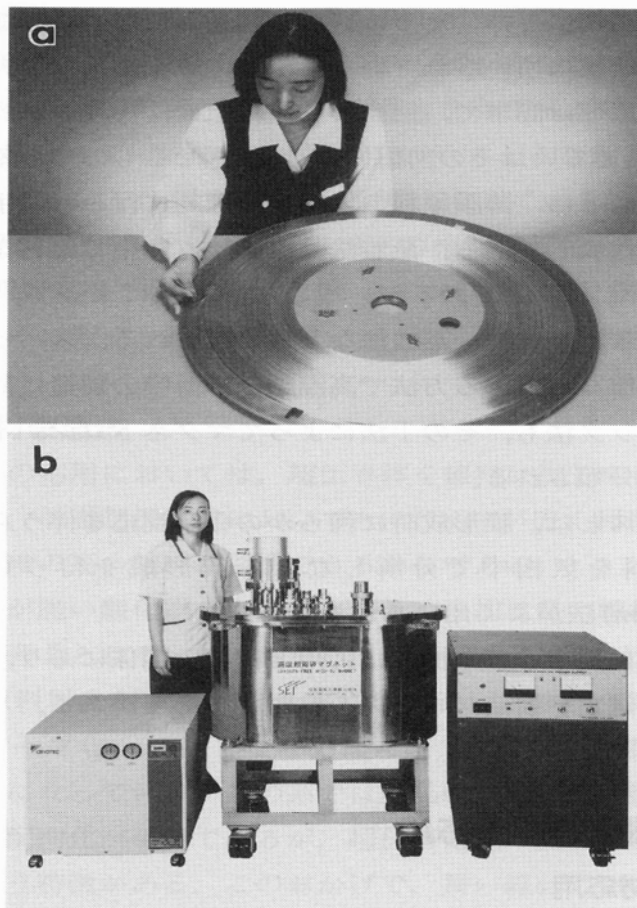


図 11-2 (a) Bi-Sr-Ca-Cu-O テープ線材を巻いて作製したパンケーキコイル。
(b) (a)のパンケーキコイルを複数個重ねて製造した超伝導マグネットの外観。すでに 7 T は発生するマグネットが製造されている(住友電工, 佐藤謙一博士の好意による)。

このような研究開発とともに、Bi-Sr-Ca-Cu-O 系に高温で有効なピンングセンターを導入するという観点からの基礎研究も行われている。一方、ピンング特性に優れた Y-Ba-Cu-O 系や Tl-Ba-Ca-Cu-O 系での線材開発も活発化している。

線材開発においては、長尺線材加工には結晶配向のしやすい 2 次元性の強い(結晶構造および超伝導特性の異方性が強い)Bi 系が有利であるが、ピンング効果が小さいという欠点を有している。一方、ピンング効果という観点では 3 次元性の強い Y-Ba-Cu-O 系が有利であるが、結晶配向しにくいという欠点がある。それぞれの欠点をいかに克服するかが今後の課題であろう。

11.2.2 電流リード応用

高温超伝導体は、(超伝導状態では)よく電流を通すが、熱は通しにくい(熱伝導率が小さい)という特徴を持っている。この性質は、外部からの熱流入を嫌う電流リードとしての用途に適している。Bi-Sr-Ca-Cu-Oの焼結体で電流リードを構成することで、それまで不可能であった冷凍機冷却による超伝導マグネット(NbTi, Nb₃Sn コイル)の製造が可能となり、大きな注目を集めている(図11-3参照)。

従来の超伝導マグネットでは、液体ヘリウムを冷媒として用いるため、一部の専門家しか利用できないという問題があったが、冷凍機冷却が可能になったことで、コンセントに差し込むだけで強磁場を利用できるという手軽さが受けて、多くの分野への波及が期待されている。

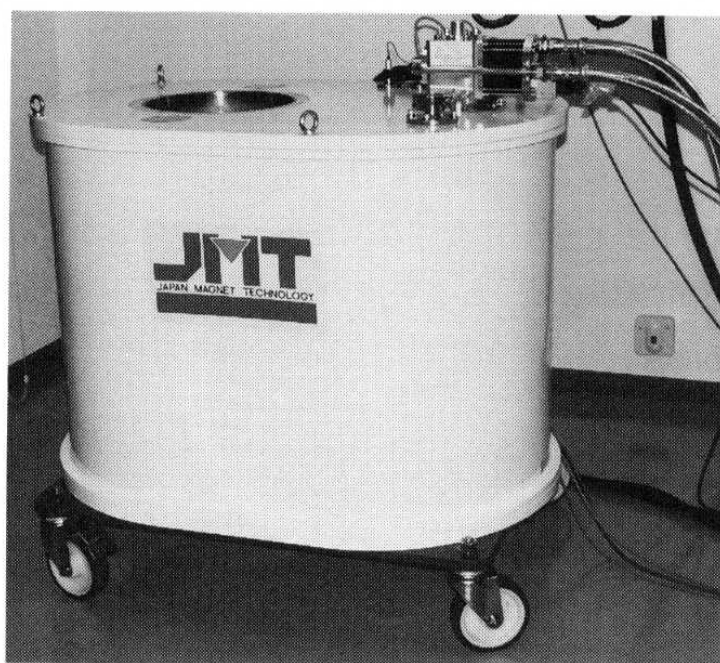


図11-3 液体ヘリウムフリー超伝導マグネットの外観。

室温ボア径が30 cmあり、5 Tの磁場を発生することが可能である。超伝導コイルに外部から電流供給するリードとして高温超伝導体のBi-Sr-Ca-Cu-Oが利用されている。また、液体ヘリウムを使用しないため、マグネット上部がすっきりしている。さらに、マグネットを横置きにして使用することも可能である。電源があれば使用可能であるため、広い分野への波及が期待されている。

11.2.3 バルク応用

低温超伝導体に大電流を流す場合には、安定化が必要である。低温超伝導体では、極低温でしか超伝導にならないため、比熱が小さく、わずかな熱擾乱によって発熱が生じると、ある限界のサイズ(最小伝搬領域：minimum propagating zone)以上では冷媒によってこの熱を取り去ることができず、

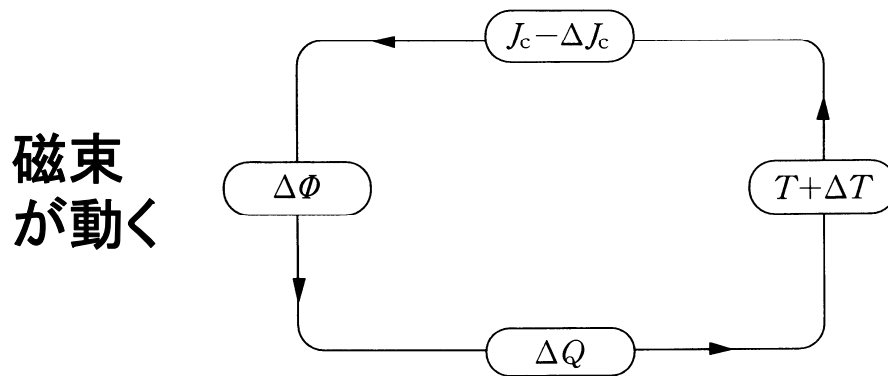


図 11-4 超伝導体がクエンチにいたる模式図。超伝導体内で磁束が動く ($\Delta\phi$) と発熱 (ΔQ) が生じ、それが取り払われないと温度が上昇 (ΔT) する。これにより、臨界電流密度が低下 ($-\Delta J_c$) する。この影響でさらに磁束が侵入するため、このサイクルが繰り返され、ついには超伝導がやぶれるクエンチに至る。

試料全体に熱が伝わり超伝導が突然やぶれる クエンチ (quench) という現象が観察される (図 11-4 参照)。

このため、線材を製造する場合も、何本もの細い線に加工して、そのまわ

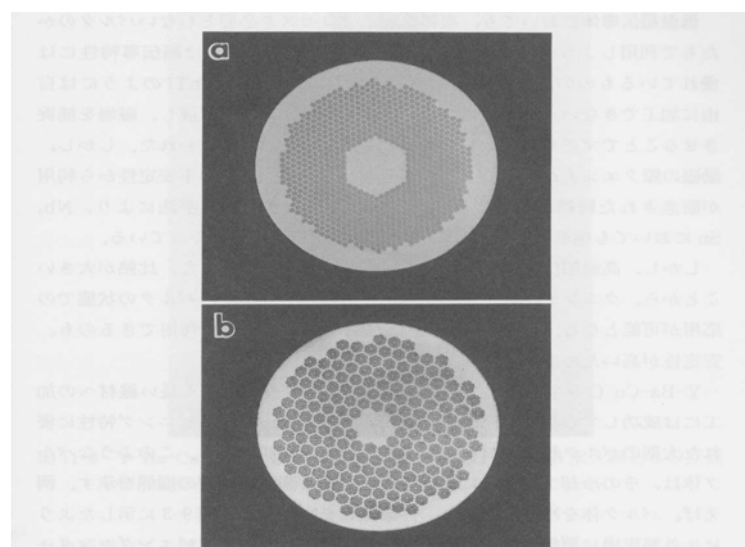


図 11-5 NbTi 超伝導線材の断面構造(極細多芯構造)。
 (a) 線径 1.07 mm の銅の中に 25 μm の細い NbTi フィラメントが 740 本埋め込まれている。
 (b) 実際の線材では、この線を束ねて線引加工することで、さらにフィラメント径を細くしている。写真は、線径が 0.103 mm の銅マトリックスの中に、フィラメント径が 0.5 μm の NbTi 線が 9720 本埋め込まれている。
 このように、線径の小さい超伝導体を伝導性にすぐれた銅でくるむことで安定化が図られる。ただし、この場合でも、超伝導マグネットの励磁速度 ($d\phi/dt$) が限界値以上になると、冷却が追いつかず、図 11-4 のサイクルに従って超伝導マグネットはクエンチする(写真提供は、昭和電線、東芝)。

- 抵抗が完全にゼロ・永久電流が流れる
→ 超遠距離無損失送電, 電源不要の強力磁石
- マイスナー効果 (磁力線を排除) とピン止め効果 (磁力線を補足)
→ 安定磁気浮上, 無摩擦回転
- ジョセフソン効果と電子波のコヒーレンシー
→ 超高速・超低消費電力電子素子, 超高感度センサ

表 11.1 超伝導 3 つの超能力. アンダーライン部が本章の地球ネットワークに使われる。

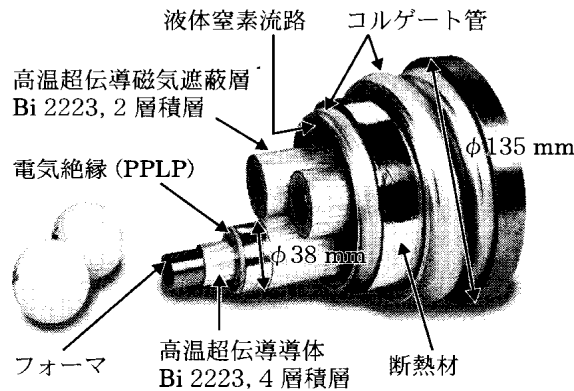


図 11.1 高温超伝導ケーブルの構造 (住友電工・東京電力共同開発)。

りを銅など熱伝導性のよい金属で取り囲んで安定化させる図 11-5 に示したような極細多芯構造が採用されている。このような構造では、超伝導体に発熱が生じても、銅によってすぐに冷却されクエンチに至らない。

低温超伝導体においても、複雑な加工プロセスを必要としないバルクのかたちで利用しようという試みもあった。例えば、 Nb_3Sn は超伝導特性には優れているものの、金属間化合物であるため、金属の NbTi のようには自由に加工できない。このため、焼結法によってリングを形成し、磁場を捕捉させることでマグネットとして利用しようという試みが行われた。しかし、励磁の際クエンチが生じてリングが破壊してしまい、その不安定性から利用が断念された経緯がある。その後、拡散法という画期的手法により、 Nb_3Sn においても極細多芯化が可能となり、実用化が可能となっている。

しかし、高温超伝導体では、高温で利用できること、また、比熱が大きいことから、クエンチがほとんど問題にならない。よって、バルクの状態での応用が可能となる。 $Bi-Sr-Ca-Cu-O$ が電流リードとして利用できるのも、安定性が高いためである。

Y-Ba-Cu-O系では、弱結合の問題があり、現在のところ長い線材への加工には成功していないが、溶融法を用いると弱結合がなくピンング特性に優れた大型のバルク超伝導材料を製造することが可能である。このようなバルク体は、その冷却プロセスによって、反磁性と強磁性両方の機能を示す。例えば、バルク体を冷却したのち、外部磁場を印加すると図9-3に示したように、外部磁場は超伝導体内に侵入するが、侵入した磁束はピンングセンターに捕えられて、内部に侵入できない。この侵入できる距離 λ (m)は、磁場強度を H (A/m)、超伝導体の臨界電流密度を J_c (A/m²)とすると

$$\lambda = H/J_c \quad (11.1)$$

で与えられる。例えば、 $\mu_0 H = 1$ T ($H \cong 8 \times 10^5$ A/m)の外部磁場の場合、 J_c が 10^9 (A/m²)とすると、侵入距離(λ)は0.8 mm程度である。よって、数cmサイズのバルク超伝導体では、ほぼ完全に磁気しゃへいできることになる。この効果で大きな反磁性が得られる。

大きな反磁性効果を利用すると、**図11-6**に示すように永久磁石との反発

力を利用して人間を浮上させることも可能である。この浮上の利点は、単なる永久磁石の反発と異なり、浮上が安定する点にある。これは、侵入した磁束がピンングセンターに捕えられて、横ずれが抑えられるためである。この安定浮上を利用することで、非接触ベアリングやそれを利用した超伝導浮上型フライホイールなど数多くの応用が提案され、現在その検討が行われている。

一方、バルク超伝導体を冷却する前に磁場を印加したのち、冷却して外部磁場を取り去ると、**図11-7**に模式的に示すように、磁束がピンングセンターに捕捉されて、永久磁石と同様の機能を示す。捕捉磁場は(11.1)式から計

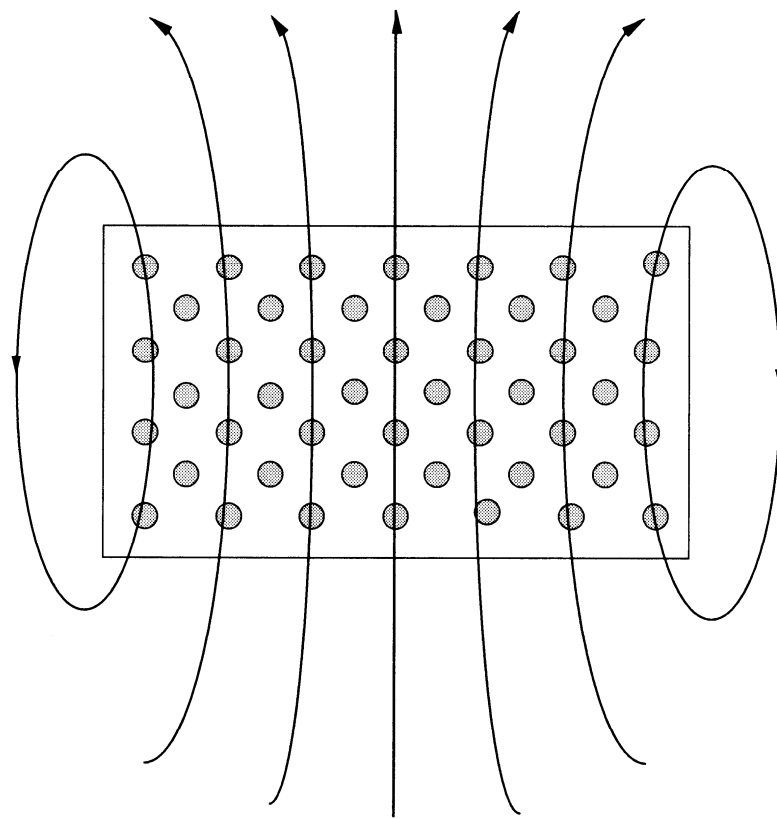


図 11-7 ピン止め効果を示す超伝導体を磁場中冷却したのち外部磁場をゼロとしたときの模式図。図に示すように、量子化磁束はピン止めセンターに捕捉され、ちょうど永久磁石と同様の機能を示す。

算できる ($H = J_c \lambda$)。反磁場効果などの補正は必要となるが、例えば、 J_c が 10^8 A/m^2 とすると、直径 (2λ) が 8 cm (0.08 m) のバルク体では、 $4 \times 10^6 \text{ A/m}$ 、すなわち約 5 T の磁場が発生できることになる。 また、永久磁石と異なり捕捉できる磁場に原理的な限界は存在しないので、非常に強力な磁石を製造することが可能である。 50 K で 10 T の磁場捕捉にも成功しており、 新機能材料として注目を集めている。 鉄道総合技術研究所では、この特性に着目して、次世代型の磁気浮上列車のマグネットとしての可能性について研究を開始している。

また、バルク体の反磁性を利用して磁気シールド装置の開発も行われている。低温超伝導体でも磁気シールドについては検討が行われたが、冷却コストの問題で実用化までには至っていない。高温超伝導体では冷却コストが大幅に低下するため、その実用化が期待されている。Bi-Sr-Ca-Cu-O 系においては、大型の磁気シールド装置が開発されているが、変動磁場に対してはシールド効果が弱いという問題から、Y-Ba-Cu-O 系でのシステム開発が望まれている。