

## ISTEC 臨時理事会開催

財団法人国際超電導産業技術研究センター(略称ISTEC:理事長 荒木 浩)は、平成13年7月4日、芝パークホテルにおいて第6回臨時理事会及び第3回臨時評議員会を開催した。理事・評議員の選任、専務理事の互選について審議し、満場一致で承認された。なお、樋口正治専務理事の辞任に伴い、後任には斎藤茂樹(前 特許庁 審査業務部長)が専務理事に選任された。(ISTEC 総務部 安住光弘)

## 国際超電導ワークショップを終えて

1989年から高温超電導体の特定テーマに関する最新研究成果の報告と討論を通じ、超電導研究の促進と国際交流の推進を目的としてスタートした国際超電導ワークショップは、2001年ハワイで開催した第13回目をもってその幕を閉じることになった。

本ワークショップは、当初から日本自転車振興会の補助金を受け、13年に亘り毎年開催した。また、第2回以降、当財団ISTECと米国材料学会(Materials Research Society: MRS)との共催で隔年開催した。毎年その年度にふさわしいトピックスを選び、討論中心の肩のこらないフランクな雰囲気の中で、研究者の方々に議論を深めて頂くことを心がけてきた。

1989年、神奈川県大磯町にて『高温超電導体の臨界電流密度』のテーマで第1回会議を開催して以降、全13回分の経過を別表にまとめた。毎年5カ国から17カ国の参加のもとで、延べ1,961人の参加者と延べ1,100件の論文発表があった。

この間、高温超電導発現機構や高温超電導体の素性も徐々に明らかとなり、薄膜、線材並びにバルクの材料プロセスの技術開発やデバイス開発に大きく貢献できた。特に、SFQ回路、km級のピスマス系銀シース線材、10m-60m級のイットリウム系線材、直径100mmの単ドメインバルク超電導磁石など実用化への基盤技術の構築に大きく貢献できた。さらに、ADコンバータ、超電導変圧器、単結晶引き上げ装置、電力ケーブル、冷凍機冷却型超電導マグネット、フライホイール用超電導軸受け、磁気分離浄水装置など、着実に広がりを見せている応用分野の進展にも大きく貢献できたと自負している。

本ワークショップを締めくくるにあたり、参加された研究者の方々はもとより、その組織化、企画、運営に携わられた多くの方々に対して、この場を借りて感謝申し上げたい。なお、次頁の過去13回の国際超電導ワークショップを一覧され、さらに詳しい情報Extended Abstractがご入用の方は、当超電導Web21編集局又は財団法人国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)までご一報いただければ幸甚に存じます。

(ISTEC 国際部長 津田井 昭彦)



(第1回国際超電導ワークショップ風景)

## ワークショップ印象記

中部電力株式会社  
技術開発本部 電力技術研究所 電力Gr.  
超電導・新素材チームリーダー 研究主査  
長屋重夫

ワークショップ印象記をということで、振り返ってみると、バルク体の応用ということで、フライホイール開発計画を紹介したマウイ島でのワークショップが、その後の当社の開発に大きな影響を与えていました。

当時は、こんなフライホイールが出来たら、こんなシステムを目指してみたい、と夢を紹介させて頂いたわけですが、その後、一気に実現に向かって大きく動き出しました。

その理由は、このワークショップで、それまではお互い顔を知っている程度の間柄の方がたたちと、ハワイという場所の魔力?でつい本音を語り合ってしまった、これが後に計画にも、実際の開発にも大きな影響を与えました。今振り返れば、あのワークショップに行っていなければ、現在の当社のフライホイールは無かったかもしれません。

そんなハワイのワークショップも今回で終了と聞き、是非、また違う形で開催して、また新たな飛躍を超電導に、と思っているのは、私だけでしょうか。

MRSとの共催ということで、事務局の方々のご苦勞、大変だったと思います。長い間、お疲れさまでした。そして、有り難うございました。

## 超電導関連8-9月の 催し物案内

8/27-30

5th EUCAS2001

<http://www.eucas2001.dk>

場所: Copenhagen, Denmark (主催: EUCAS)

8/31-9/3

SQUID2001

<http://www.squid2001.org>

場所: Stenungsbaden, Sweden

9/7-8

第2回材料研究会 / 東北・北海道支部合同研究会及び東北電力竜飛ウィンドパーク見学会, 場所: 浅虫観光ホテル、青森市 (主催: 低温工学会)

9/19-21

8th IEC/TC90 Superconductivity Meeting

場所: Seoul, Korea, (主催: IEC/TC90)

9/24-28

17th International Conference on Magnet Technology

<http://www.cern.ch./MT-17/>

場所: Geneva, Switzerland (主催: CERN)

9/24

Workshop on Mechano-Electromagnetic Property of Composite Superconductors

場所: 神戸国際会議場、(ISSサテライト会議)

9/25-27

14th International Symposium on Superconductivity (ISS2001)

<http://www.istec.or.jp/ISS/indexJ.html>

場所: 神戸国際会議場、神戸市

(主催: ISTEC)

9/26-28

国際IT業界産業展2001

場所: 神戸国際会議場、神戸市

## 目次

|                       |   |
|-----------------------|---|
| ISTEC臨時理事会開催          | 1 |
| 国際超電導ワークショップを終えて      | 1 |
| ワークショップ印象記            | 1 |
| 超電導関連8月-9月の催し物案内      | 1 |
| 過去13回の国際超電導ワークショップ一覧表 | 2 |
| 特許情報                  | 2 |
| 超電導の時代はすでに始まっている      | 3 |
| ビジネスの鼓動               | 4 |
| 国際超電導ワークショップトピックス     | 5 |
| 新聞ヘッドライン              | 6 |
| SFQワークショップ報告          | 6 |
| 超電導「超」ギャップの神秘(その3)    | 6 |
| 読者の広場(Q&A)            | 8 |

## 過去 13 回の国際超電導ワークショップ一覧表

### 第 13 回

開催年月日： H 13 年 6 月 24 日 ~ 27 日  
 場所：米国ハワイ州ホノルル、ハイアット・リージェンシー・ワイキキ  
 テーマ：高温超電導体、プロセス及びその応用  
 プログラム委員長：超電導工学研究所 第4研究部長 塩原 融, オークリッジ 国立研究所 ロバート・ホージー博士  
 参加国： 6  
 参加人数： 100  
 発表論文数 82

### 第 12 回

開催年月日： H 12 年 6 月 19 日 ~ 22 日  
 場所：島根県松江市、クニビキ・メッセ  
 テーマ：高温超電導材料の応用：構造と特性との関連  
 プログラム委員長：超電導工学研究所 副所長 腰塚 直己  
 参加国： 7  
 参加人数： 129  
 発表論文数 87

### 第 11 回

開催年月日： H11 年 6 月 27 ~ 30 日  
 場所：米国ハワイ州カウアイ島カウアイ・マリオット・リゾート & ビーチクラブ  
 テーマ：高温超電導材料及びデバイスのエレクトロニクス応用  
 プログラム委員長：早川尚夫名大教授、J. タルバッチオ博士 ノース ロップグラマン社  
 参加国： 8  
 参加人数： 114  
 発表論文数 83

### 第 10 回

開催年月日： H10 年 7 月 12 ~ 15 日  
 場所：沖縄県那覇市  
 テーマ：HTS 線材とバルク材応用における材料および技術的課題  
 プログラム委員長：岸尾光二東大教授  
 参加国： 17  
 参加人数： 141  
 発表論文数 95



### 第 9 回

開催年月日： H9 年 6 月 15 ~ 18 日  
 場所：ハワイ、ハワイ島  
 テーマ：HTS 応用に適合した材料とプロセス; これからの 10 年に向かって  
 プログラム委員長：梶村皓二電総研次長、E. ヘルストローム ウイスコンシン大教授  
 参加国： 14  
 参加人数： 150  
 発表論文数 126

### 第 8 回

開催年月日： H8 年 6 月 24 ~ 27 日  
 場所：岩手県八幡平  
 テーマ：高温超電導エレクトロニクス  
 プログラム委員長：岡部洋一東大教授  
 参加国： 10  
 参加人数： 154  
 発表論文数 70

### 第 7 回

開催年月日： H7 年 6 月 18 ~ 21 日  
 場所：ハワイ、マウイ島  
 テーマ：高温超電導体のプロセス  
 プログラム委員長：北澤宏一東大教授 K.C. ゴレッタ博士、ANL  
 参加国： 15  
 参加人数： 181  
 発表論文数 158

### 第 6 回

開催年月日： H6 年 6 月 6 ~ 9 日  
 場所：京都市  
 テーマ：高温超電導体の臨界電流  
 プログラム委員長：松下照男九工大教授  
 参加国： 17  
 参加人数： 181  
 発表論文数 90

### 第 5 回

開催年月日： H5 年 6 月 28 日 ~ 7 月 1 日  
 場所：北海道函館市  
 テーマ：高温超電導体のキャラクターゼーション  
 プログラム委員長：小間 篤東大教授  
 参加国： 13  
 参加人数： 134  
 発表論文数 73

### 第 4 回

開催年月日： H4 年 6 月 23 ~ 26 日  
 場所：ハワイ、ホノルル市  
 テーマ：高温超電導体の結晶成長  
 プログラム委員長：川合知二阪大教授、E.N. カウフマン博士 ANL  
 参加国： 15  
 参加人数： 179  
 発表論文数 130

### 第 3 回

開催年月日： H3 年 5 月 13 ~ 15 日  
 場所：熊本市  
 テーマ：新しい超電導体材料  
 プログラム委員長：内田慎一東大教授  
 参加国： 7  
 参加人数： 143  
 発表論文数 35

### 第 2 回

開催年月日： H2 年 5 月 28 ~ 30 日  
 場所：鹿児島市  
 テーマ：高温超電導体薄膜のプロセス  
 プログラム委員長：坂東尚周京大教授  
 参加国： 6  
 参加人数： 185  
 発表論文数 36

### 第 1 回

開催年月日： H 元年 2 月 1 ~ 3 日  
 場所：神奈川県大磯  
 テーマ：高温超電導体の臨界電流密度  
 プログラム委員長：梶村皓二電総研部長  
 参加国： 5  
 参加人数： 170  
 発表論文数 35  
 ( 肩書きは開催当時のもの )  
 ( ISTE C 国際部長 津田井 昭彦 )

## 特許情報

### 平成 13 年度第 1 四半期の公開特許

平成 13 年 4 月 ~ 6 月間に公開された ISTE C 出願の特許をお知らせします。

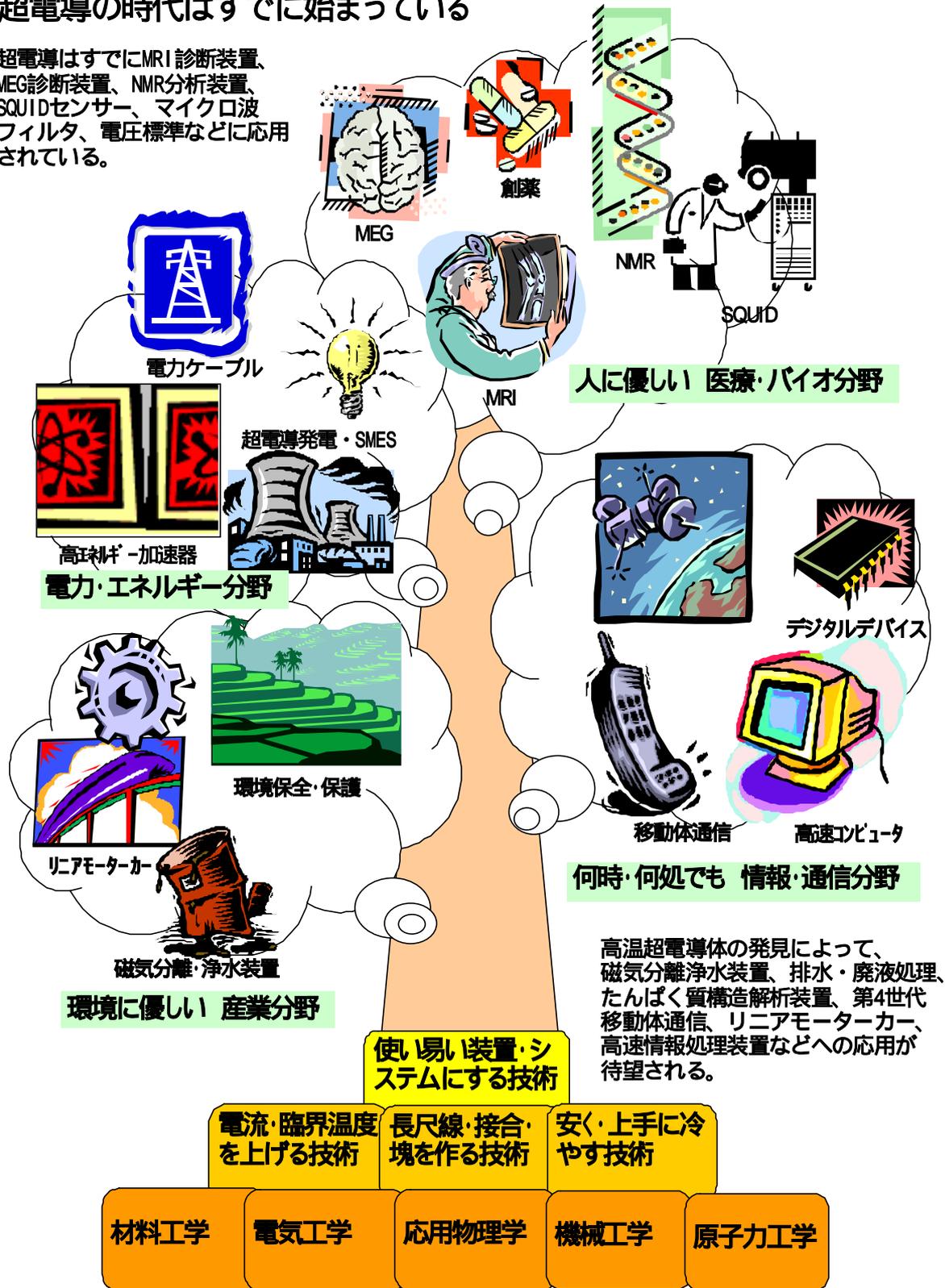
詳しい内容をお知りになりたい方は特許庁のホームページ内の特許電子図書館等の特許データベースをご利用下さい。

- (1) 特開 2001-93728 「磁極が異なる複数のバルク超電導磁石連結体の着磁方法」
- (2) 特開 2001-101930 「酸化物超電導積層基板とその製造方法及び超電導集積回路の製造方法」
- (3) 特開 2001-110255 「高強度配向多結晶金属基板および酸化物超電導線材」
- (4) 特開 2001-114518 「酸化物超電導体及びその製造方法」
- (5) 特開 2001-127351 「超伝導回路装置及びその製造方法」
- (6) 特開 2001-155566 「超電導体の接合方法及び超電導体接合部材」

( SRL / ISTE C 開発研究部長 中里克雄 )

# 超電導の時代はすでに始まっている

超電導はすでにMRI診断装置、MEG診断装置、NMR分析装置、SQUIDセンサー、マイクロ波フィルタ、電圧標準などに応用されている。



高温超電導体の発見によって、磁気分離浄水装置、排水・廃液処理、たんぱく質構造解析装置、第4世代移動体通信、リニアモーターカー、高速情報処理装置などへの応用が待望される。

# ビジネスの鼓動

## 超電導機器の開発方法

### 1. 超電導と省エネルギー

本号で、超電導はすでにMRI診断装置等に应用されているという紹介があった。この他にも半導体のシリコン単結晶引き上げ装置には超電導装置が使われており、威力を発揮している。こんな話は、知る人ぞ知るで、世間一般にはあまり知られていない。医療用MRIを除けば、産業用あるいは研究開発用としての用途であり、家電等にも使われていないからである。

そういえば、昨年の超電導のあるシンポジウムで、私の講演の後で、青森大学教授でジャーナリストの見城美枝子氏が、「超電導は情報公開がほとんどなされていないのか、一般の生活にまで届くようなことが考えてこられてなかったのか、超電導により電気エネルギーの効率がよくなるということ、私達の生活の省エネとの関係を明確にするためにも、情報公開が必要であり、一般の人たちの興味をどうつなぐかが関係者に求められているのではないだろうか」という厳しい指摘があった。

当財団が行った「超電導応用の省エネ効果に関する調査」に関する記事が「文芸春秋(2001.8)」に掲載された。田中所長(SRL/ISTEC)がインタビューに答えるという形で、内容は、インターネット等のIT技術の利用が進めば進むほど消費電力が莫大になるというもので、消費エネルギーを減少させるには省エネしか方法はなく、そのためには超電導が有力な方法のひとつであるというものである。大変時機を得たものであり、先の見城氏の期待にも応えるものと思われる。

省エネの定量的な検討はすでに行われており、電力機器、産業機器及び電子機器に超電導を用いると、それぞれの機器に対して、原油換算でどれほどの節約ができるか、CO<sub>2</sub>の排出をどれほど抑えられるかということも大略調べられている。その効果は莫大で、今話題の京都議定書実現にも大きな効果がある。

そんなに効果のあるものならばすぐにでも超電導を使えばよいではないかと考えたくなるが、残念ながら冒頭に述べたように極く限られた機器にしか適用されていないのが実情である。

### 2. 超電導の使われ方と普及

なぜ極く限られた機器にしか使われていないのか？

低温超電導技術には90年の歴史があり、技術の完成度もかなり高いにも関わらずあまり普及していない理由の一つは、液体ヘリウム温度(マイナス269 )

などの極低温領域で使わなければならないというハンディキャップがあるからである。

一方、14年前に発見された高温超電導体は機器を作るには材料技術が未熟で、もう少しの時間が必要である。材料開発、とりわけ液体窒素温度(マイナス196 )で使用できる、Y系等の次世代材料の開発ができれば、超電導機器は各種産業界に一気に普及するものと予想している。ここ数年で、高温超電導のバルク体、線材、素子の各作製技術は大きな進展を見せている。あと5年から10年で、次世代超電導材料を使った各種機器が実現すると考えている。

材料開発と並行して、機器開発も進めておかなければならない。

日米欧は国をあげて材料開発、機器開発に取り組んでいる。

機器開発では、日本を含め各国ともに、とりわけ電力应用に関する機器開発が活発である。

電力は社会のインフラだから国をあげて開発を進めることは当然としても、技術的に極めて難しい課題を抱えている。課題を惹起していることの一つは交流使用であること。もう一つは、超電導機器単独で使われることが少なく、電力系統の中に組み込まれることが多いということである。系統に組み込まれた場合、万一の事故があると頗る大きな影響がでる。ということと、実系統への導入には信頼性を徹底的に追求し、技術を熟したものにしないと実用にはならない。

一つ目の課題である交流使用であるが、元々超電導は「電気抵抗がゼロ」であるというのは直流使用の場合に当てはまることであって、交流で使用すると損失が発生する。このことのために、交流損失の少ない材料開発を進めなければならないし、機器開発に関しても交流損失の少ない機器構成を考えなくてはならない。

二つ目の課題である、他の機器との連携で使用されるということに関してであるが、それならば超電導機器単独で使える分野に注力し、そこで技術を十分成熟させてから電力分野に展開するという方法が考えられる。

超電導技術(機器)がどのような分野に使われているか(使われようとしているか)を知ってもらうために、前頁にある「超電導の時代はすでに始まっている」の絵を今一度見て頂きたい。極めて広範な分野に利用されようとしていることが分かる。

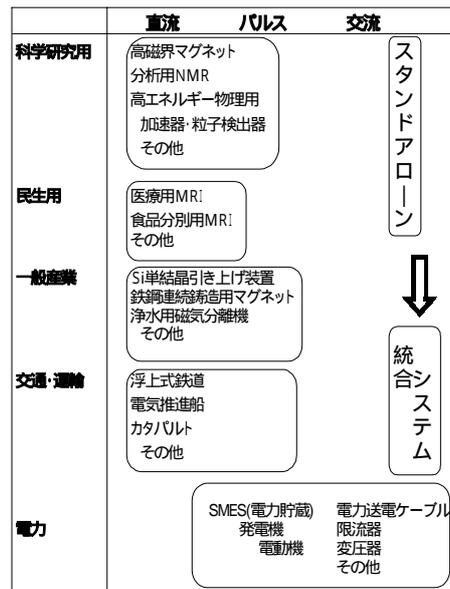
### 3. 超電導機器開発の方法論

さて、これらの機器をどのような順序で開発していくかについて日頃考えているところを紹介したい。

超電導が使われようとしている機器の運転形態を見ると、直流、パルス、交流という使い方に分けることができる。

一方、使用形態は、例えば医療用MRIのように病院内で、その機器だけで完結して使われる場合と、先に述べた電力機器のように、他の機器との連携により使われる場合とがある。前者をスタンドアローンのな使われ方と呼び、後者を統合システミックな使われ方と呼ぼう。

技術開発は、直流 パルス 交流の順に難しくなり、信頼性が利用者にも与える影響は、科学技術分野 一般産業 電力・運輸等社会インフラ分野の順に大きくなると考えられる。図はこれらを纏めたものである。



開発の順序は図中の左上から右下に向けて行われるべきではないかと考えている。右下に示した製品ほど技術開発の困難度も大きく、製品不具合の社会にも与える影響度も大きい。従って、国が相応の支援をして開発を進めなければならないことは当然としても、それと並行して、スタンドアローンで直流機器の開発にも注力し、そこで蓄積された技術を、次のステップに活かしながら着実に技術を開発し、実現場で使用しながら技術を成熟させていくという手法が是非とも必要と思われる。鉄鋼や半導体産業のような産業応用のために各企業が超電導機器を各自で開発することは、資金的にも技術的にもリスクが大きすぎる。従って、国は社会インフラに関わるものだけではなく、このような分野にも支援することが結局は、電力や運輸等の社会インフラとしての超電導技術を確立する早道だと考えるのだがいかがであろうか？

字数と拙文の関係で思いを十分表せなかったが、「読者の広場」の欄などを通じて、興味ある方との意見交換を望みたい。

(SRL/ISTEC 特別研究員 堀上 徹)

# 国際超電導ワークショップ トピックス

## 次世代線材用中間層基板技術で世界をリード

2001年6月、(株)フジクラ、中部電力(株)及び超電導工学研究所は、ハワイにおいて開催された第13回国際超電導ワークショップにおいて、イットリウム系酸化物超電導テープ用中間層の成膜技術を60m長の製造によって実証したことを明らかにした。

従来からイットリウム系酸化物超電導体は、液体窒素温度77Kにおける臨界電流密度の高磁界特性が優れており、すでに開発が進んでいるビスマス系酸化物線材に継ぐ次世代線材としてその開発が望まれている。イットリウム系酸化物超電導線の中間層基板に関する基本的成膜技術は、1991年にフジクラがIon Beam Assisted Deposition (IBAD)法として開発したもので、すでに世界によく知られている。この技術における重要な技術課題は、酸化物超電導体を成膜する前段階における結晶配向した中間層基板の製造速度をいかに向上できるかであった。

今回つぎの2つの技術を駆使して、中間層の製造速度を従来の約20倍に向上し、その技術を60m長の長尺中間層テープの連続製造によって実証した。すなわち、i) 面内配向したモザイク状中間層を成膜するためのイオン源の工夫とリール間多重掛け連続成膜装置の開発によってその製造速度が6倍乃至10倍向上したこと、及びii)中間層の膜材の種類を従来のイットリウム安定化ジルコニアYSZからパイロクロア型結晶構造の $Zr_2Gd_2O_7$ という新しい材料に換えることによって製造速度を倍増した。パイロクロア型結晶構造の中間層に関する詳しい情報は、文末に示す第13回国際超電導ワークショップの概要集を参照されたい。

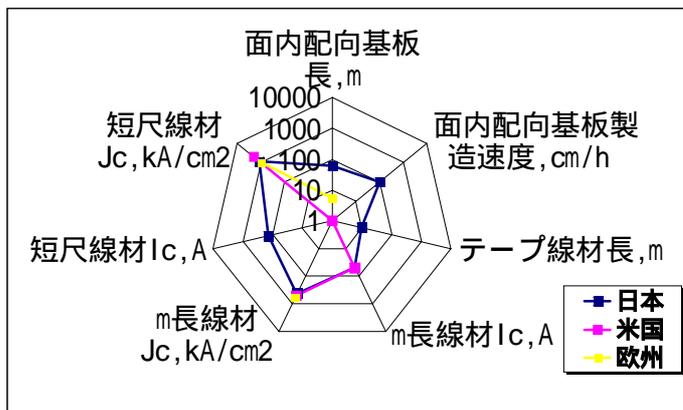
この中間層基板技術を含め第13回国際超電導ワークショップで明らかにされた次世代線材に関する米国及び欧州における要素技術開発との比較を行うと、現状では日本における次世代線材の要素技術開発が先行していることがわかった。図に示すように、面内配向した中間層基板テープの長さ、中間層基板の製造速度、超電導体被覆テープの長さ、超電導テープの臨界電流値などの工業的な要素技術並びに短尺線材特性においても日本が先行している。また、これらの研究開発成果は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)受託プロジェクトである「超電導応用基盤技術研究開発」の目標達成に有力な見通しを示唆している。この成果によって、電力ケーブル、超電導エネルギー貯蔵装置、超電導マグネットを利用する機器など現在進められている技術開発とその応用に弾みがつくことを期待したい。

Y. Iijima et al.: Program and Extended Abstracts of 2001 International Workshop on Superconductivity, June 24-27, 2001 Honolulu, Hawaii, U.S.A., S2-3

(編集局 田中靖三)



60m長中間層基板  
(株)フジクラ提供



次世代線材の要素技術比較(2001年夏)

## 電力応用への期待高まる

高温超電導応用に関しては、6月26日(火曜日)の夜にランプセッションが設けられ、全部で7件の報告があった。以下筆者が聴講できたものを報告する。

九大のFunakiらは、Bi2223線で作った高温超電導トランスのField-Testの結果を報告した。22kV/6.9kV単相の装置で、効率は99.4%に高まり、また、重量も変圧器に比べて約半分になる。九州電力の系統内でのField-Testでは、144時間途中の液体窒素の補給なしでうまく稼動したとのこと。将来の実用化にまた近づいた印象を受けた。

Waukesha Electric SystemsのMentaraらは、高温超電導変圧器の概念設計を紹介した。今、米国では18,866台の老朽化した変圧器があり、ここ数年-10年程度で取り替えの時期を迎えるとのこと。Time Windowと称していたが、この期間にHiTcが間に合えば取替え可能であるが、それを逃すとまた、数十年後の寿命までチャンスを持たなくてはならない。

特に、電力関係の開発にはタイミングが重要と認識した。

日立のOkadaらは、Bi2212線によるROSAT Wireの発表を行なった。世界最長の3.5km線ができたことは、完全な商用化に入ったことを意味する。あとは、コストの問題が次第にクローズアップされてくるであろう。他方、この線でしか出せない20T以上の高磁場を使い1GHz NMRの開発が物材研とともに進められている様子が紹介された。

PirelliのNassiらは、ASC社のBi2223線を使い欧米での5つのケーブルプロジェクトを紹介した。中でも現在進行中のデトロイトのFrisbie変電所でlive networkにつなげて行なう試験準備の様子は迫力があった。老朽化した従来の銅線ケーブルをリプレースするが、泥水の溜まった劣悪な地下の敷設環境でも安全かつケーブルを劣化させずに配線できると盛んにPRしていた。また、「ケーブルが頑丈でフレキシブルなので、素人でも敷設が簡単です。」とEPRIのGrant氏が配線敷設作業を手伝っている様子をOHPでユーモラスに紹介し、実用性問題がないと思わせる印象を聴衆に与えた。本試験は、今年度の後半に通電試験が行なわれ、うまくいけば、24kVで100MWを400フィートのケーブルに流すことになる。

東芝のKubotaらは、YBCO膜による限流器を紹介した。YBCO膜と基板上の金属膜を電氣的に並列接続した構造を提案し、これによれば限流器に必要な長さが1/10になるとのことであった。これからの大型化が期待される。

(SRL/ISTEC 第5研究部 山田 穰)

## 新聞ヘッドライン (6/19-7/19)

超電導バルク 30Kで捕捉磁場 16テ  
スラ 6/18 化学工業日報  
医療産業 飛躍への一步 最新鋭機  
器ズバリ並ぶ 6/19日本経済新聞夕刊  
人・モノ往来活発に リニア新幹線、  
実験着々と 6/20 日本経済新聞夕刊  
甞れニッポン 広島大学「すまの  
科学」開拓 6/20 日本工業新聞  
二ホウ化マグネシウム  
うっかり酸素混入 電流密度アップ  
6/20 日刊工業新聞  
ITER計画 米に再参加呼びかけ  
6/20 日刊工業新聞  
磁性と超電導両立を確認  
6/21 日刊工業新聞  
ITER推進に意欲 6/27日本工業新聞  
ポスト原発誘致合戦 核融合実験炉  
5000億円事業に食指 6/27 朝日新聞  
環境ホルモン 超電導磁石で回収  
6/29 日刊工業新聞  
科学技術予算「実益型」重視で配分  
へ 6/29 朝日新聞  
タンパク質の立体構造解明へ 7/3  
日本工業新聞  
特殊ガス 半導体からMRIまで 超  
電導や宇宙開発分野にも  
7/5 日刊工業新聞  
「国際熱核融合実験炉」誘致 候補  
地選び着手 文科省 7/5日経産業新聞  
極低温2K効率よく実現 物材研と東  
芝 小型冷凍機を開発 7/11日刊工業  
新聞、日本工業新聞、7/16 日経産業  
新聞  
横浜サイエンスフロンティア  
理研ゲノム研核に産学が連携  
7/12 日刊工業新聞  
高温超電導線材、実用段階へ 総コ  
ストは銅線なみ 日米軸に開発レース  
激化 7/13 日経産業新聞  
トリチウム透過1/1000に 原研など  
セラ皮膜を開発 7/17 日刊工業新聞  
超電導電力貯蔵装置 大型ビルの瞬  
停対応 中部電 毎秒1万kW級試作  
7/17 日刊工業新聞  
低レベル廃棄物受入れ検討 ITER誘  
致に着々と布石 7/18 電気新聞  
ゲノム創薬に的 激化の国際競争  
7/18日本工業新聞  
超電導材料、日本が優勢 20年後は  
20兆円市場に 7/19 日本経済新聞



## SFQ ワークショップ報告 【 隔月連載記事】

2001年6月23日、大阪大学にて「SFQ  
ワークショップ」が開催された。その  
中から超電導SFQデバイスの高速度につ  
いて報告する。

高速デジタル応用として、米国のTRW  
はハッキリとHTSに見切りをつけている。  
それでも米国のNorthrop GrummanはHTS  
を用いるならADCが最適であるといい、  
その理由として熱雑音の許容量が大きい  
ことを挙げている。

米国がLTSに傾く理由は高速デジタルデ  
バイスの熱雑音対策にあるらしい。77K  
で動作させることが不可能なら、実績の  
あるLTSにまず特化したいということら  
しい。そこで、SFQ高速デジタルデバイ  
スの動作温度に注目してみよう。

日立の齊藤氏は、温度30Kで100GHz級  
の高速動作をコンパレータで実現し、最  
大の課題は寄生インダクタンスの低減と  
熱雑音を考慮に入れた回路設計である  
という。日電の日高氏は、40Gb/sを一つ  
の束とする光通信のサンプラー計測器と  
して利用するためには3倍の120GHzの性能  
をもつ必要があるという。

現在室温動作の回路になっているトリ  
ガ発生器、プログラマブル遅延器、コン  
パレータ、周波数分周器などをすべて  
HTSに置き換える必要があるとともに、  
動作温度を20K程度にする必要があると  
いう。

TRWのJ. Spargo氏はLTSを用い1200GHz  
動作のデジタル周波数分周器を1000素子  
で実現したという。最大の課題はLTSで  
もプロセスの安定性であり、高速度ゆえ  
に電気的評価技術の完成度であるとい  
う。

熱雑音も $I_c R_n$ 積との兼ね合いで決ま  
るとするならば、HTSを低温にすればLTSよ  
り有利になるはずである。

ところが、カリフォルニア・パークレイ  
大のT. V. DuzerはNb系5層構造(Nb/  
NbTiN/TaN/NbN/Nb)にてHTSの実績に相当  
する $I_c R_n = 2.4 \text{mV}$ を発表した。  
高速デジタルデバイスにおけるHTSの有  
利さは、日立と日電の発表からして温度  
20Kないし30Kにて動作でき、その結果  
冷凍機に対する負担が大きく低減できる  
ということにある。

さて、超電導からシリコンに目を向け  
ると、6月25日、IBMはシリコン・ゲル  
マにて2年後に100GHzの通信用チップを  
商用生産すると発表した。とすると、シ  
リコンの特徴は微細加工とプロセス安定  
性であることからして、100GHz動作にお  
ける熱雑音対策はTRWの指摘したプロセ  
ス安定度との兼ね合いも大きそうであ  
る。プロセス安定度を横軸に動作温度を  
縦軸に、そして $I_c R_n$ 積などの材料パラ  
メータでくくった動作速度(GHz)特性マ  
ップが重要である。超電導SFQデバイスは  
THzに迫る高速度が要求されそうである。  
課題は動作温度の上昇とプロセス安定性  
の向上のようである。

(SRL/ISTEC第7研究部 鈴木克己)

## 超電導エネルギーギャ ップの神秘(その3)

東京大学大学院  
新領域創成科学研究科  
教授 内田慎一

### 7. 位相のコヒーレンスと 準粒子

BCS理論で最も難解なところは(従っ  
て最も本質的なことは)、超電導状態  
では「クーパー対の位相がそろおう」と  
いうことと、クーパー対が壊れると「準  
粒子」に分裂するということである。  
この2つは不離一体のもので、超電導  
ギャップの存在がそれらを支えている。  
エネルギーギャップは、一般に、外か  
らの作用に対してある状態が壊れない  
ように保護する役割を果たす。身近な  
言葉でいうと、その状態に「固さ」を  
もたれているのである。例えば、固  
体が外力に対して変形し難い・固い・  
のは、フォノンを励起するのに有限の  
エネルギー(ギャップ)を必要とするか  
らである。前に、超電導ギャップは  
クーパー対を安定化すると表現したが、  
より正確には、クーパー対の位相を固  
くし、外力(この場合は磁場)によ  
って位相が一様性を失わない様にしてい  
るのである。その結果、磁場に対する  
特異な応答、「マイスナー効果」がも  
たらされる。位相がそろった(コヒー  
レントな)状態として、よく引き合い  
に出されるのがレーザー光線である。  
単にエネルギーがそろった光子(フォ  
トン)の集団である単色光に比べ、位  
相もそろっているレーザー光は、著  
しい干渉効果を示す。同様に、超電導  
状態もSQUIDとして利用できるよう  
電子の高い干渉性が特徴である。

レーザー光の場合は、人為的に光子  
の位相をそろえるのに対して、超電導  
では電子がフォノン等の助けを借りつ  
つ、自発的にその位相をそろえるので  
ある。ここで量子力学の問題に直面す  
る。多数の粒子からなる系で、粒子の  
位相がそろうためには、粒子の数がゆ  
らがないなければならない。よく知ら  
れているように量子力学は、粒子の位置  
と運動量とを同時に特定できないとい  
う不確定性関係  $x \sim p \sim h(x, p)$   
は、それぞれ位置、運動量の不確定さ、  
 $h$ はプランク定数)に基いている。例  
えば、金属中の伝導電子は、その位置  
を特定できない( $x \sim$ )ほぼ自由  
な電子である。従って、 $p \sim 0$ であ  
り、運動量によって指定される状態に  
ある。その波動関数は  $(x) \sim e^{ipx/h}$   
で表される。同様な不確定性関係が位相  
と量子数 $n$ との間に、 $n \sim 1$   
という形で存在するのである。金属(正  
常状態)の伝導電子の位相は上記の波  
動関数  $(x)$ において指数関数の肩にあ

(次頁に続く)

る $px/h$ と考えてよい。既に述べたように、パウリの原理により、各運動量状態にはいれる電子は高々2個なので、殆どの電子は異なった運動状態に存在し、従って異なった位相をもつことになる。すなわち、位相のゆらぎ(不確定性)が非常に大きな状態ということができる。その結果、伝導電子の数は殆どゆらがないのである。実際、この状態は図4(6月号の図3を再掲載)で表される。

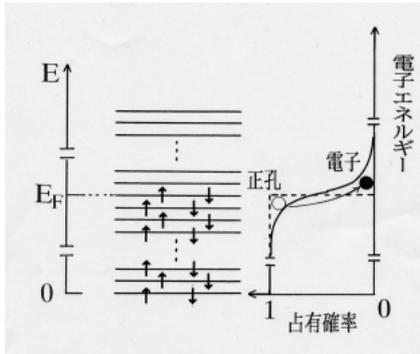


図4. 金属(正常相)における電子構造と、各準位の占有確率(T=0、破線)、超電導状態(T=0)におけるクーパー対の占有確率を実線で示した。

各準位は、それぞれ異なった運動量状態に対応し、伝導電子はフェルミエネルギー $E_F$ に対応する運動量状態まで占有している。伝導電子の数は、 $E_F$ 以下のエネルギーをもつ準位の数で決まっており、ゆらぐことはない。

では、電子がクーパー対を組むと何故位相がそろうのであるか?クーパー対の間には、もはやパウリの原理が働かないので、同一の状態(例えばクーパー対の運動量 $p=0$ の状態)にいくつでも入りうる。BCS理論は、同一の状態にはいるクーパー対の数が多ければ多い程、クーパー対をつくるきっかけとなった引力によるエネルギー利得が大きくなることを示した。すなわち位相をそろえれば、系のエネルギーを低くすることができるのである。しかし、対と対の間には何か力が働いて位相をそろえているわけではない。対の位相がそろうように仕向けているのはパウリの原理である。クーパー対の空間的拡がり、通常1000以上であり、1つのクーパー対の占める空間には $10^9$ 個以上の対が重なって存在している。パウリの原理は、電子はどれも見分けがつかないということから導かれるもので、電子の重なりが大きくなると、その効果も大きくなる。煩雑な数式を使わないでの説明は困難であるが、

クーパー対を構成する個々の電子の運動を制約するパウリの原理によって位相のそろったエネルギーの低い状態が自発的に選択されているといえる。

次の問題は、エネルギーの利得が位相をそろえる動機になるとしても、前記の不確定性原理 $n \sim 1$ の制約をどう克服しているかである。実際、クーパー対を組むのは金属中の伝導電子であり、この数は固定されている。

そのトリックは、図4に示された金属の電子状態においてフェルミ準位近くの電子の占有状況をあいまいにしてみようことにある。そのためには、 $E_F$ の下にいる電子を「確率的」に $E_F$ の上にあげてしまえばよい。図4のグラフはエネルギー準位の占有確率を表したものであるが、正常状態では破線で示すように占有確率は $E_F$ で1から0へと不連続的に変化する。それを実線で示すようななめらかなものにするのである。 $E_F$ 近くの準位に電子がいるかいないか従って、その電子がクーパー対を組んでいるかいないかは確率的にしかわからない。これは、 $E_F$ の下の電子が $E_F$ の上に励起され、その結果、下の準位に、相対的に正に帯電した電子の孔(正孔)がつくられるというプロセスを想定していることになる。このプロセスは運動エネルギーの増大(損失)を招くが、そのプロセスが起こるのを $E_F$ の近くだけ( $k_B T$ 程度)に限れば、引力からのエネルギー利得を、損失を補って余りあるようにできる。1つの電子がもう1つの電子を捕えてクーパー対をつくる時、その置き土産として正孔が残される。その結果として、クーパー対の位相がそろうことになるのである。

最後に、クーパー対が分離すると何になるか考えよう。磁場により磁束(ポルテックス)が侵入したり、あるいは磁性不純物などにより超電導がコヒーレンス長より広い範囲で破壊された場合、クーパー対は単に元の2つの電子に分かれるだけである。一方、温度上昇やギャップ2より大きなエネルギーをもった光の照射によってもクーパー対は解離する。温度上昇が $T_c$ に達しない程度、あるいは解離するクーパー対の数が甚大にならない程度の光照射ならば、全体として位相がそろったコヒーレントな状態が保持される。この場合、クーパー対は2つの電子ではなく、もとの電子と、それが残した正孔とが混ざった電子と正孔が(量子力学的に重ね合わされた)粒子に分離することになる。これが準粒子と呼ばれるものである。準粒子は、電子でもなく正孔でもない粒子である。今、超電導体中に位相のコヒーレンスを乱さない正に帯電した「弱い」不純物が存在しているとすると、準粒子がそ

の不純物に近づくと、その電子成分が不純物に捕獲される。その時、準粒子の正孔成分は不純物のまわりをグルグル回ることになるであろう(図5)。低温走査型トンネル電子分光技術の発展により、現在では、このような準粒子の正孔/電子成分を直接観測できるようになった。<sup>1), 2)</sup>

参考文献

- 1) A. Yazdani *et al.*, Science **275**, 1767 (1997).
- 2) E. Hudson *et al.*, Nature **411**, 920 (2001).

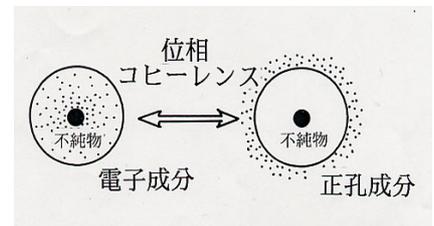


図5. 「弱い」不純物に捕えられた準粒子。不純物により超電導秩序が破壊されない場合、すなわち位相のコヒーレンスが保たれる場合、不純物に捕えられた準粒子の電子成分につき従うように不純物のまわりを回転する正孔成分が観測される。

(10月号に続く)



## 読者の広場

### Q&A

**Q :** 宇宙でも超電導応用はされているのでしょうか？

**A :** すでに宇宙でも超電導応用はされています。

代表的な2つのプロジェクトを紹介しましょう。

一つは、飛翔体である気球によって宇宙線などを観測するプロジェクトです。



初代の名前は、1996年に終了した「宇宙線観測装置 (BESS) 用超電導薄肉ソレノイド」その2代目の名前は次期観測装置 BESS-Polar に組み込む「宇宙飛翔体用超電導マグネットの開発」で、いずれも (財) 日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環です。

このプロジェクトの目的は、気球飛翔体による宇宙科学観測装置に不可欠な超電導マグネットを開発することです。直径 780mm の大口徑、厚さ 110mm の薄肉、長さ 1500mm、1.2T の高磁界、かつ 100 日間の測定に耐える超電導マグネットは、地上では比較的容易に調達できます。しかし、気球では十分な電源設備が確保できないため、超電導マグネットには 400 リットルの液体ヘリウム貯液槽を備え、地上でパルス管冷凍機によって冷却後、打ち上げ時に冷凍機を切り離し 100 日間低温維持する必要があります。また、飛翔体に搭載する超電導マグネットは、宇宙線など粒子透過性能に優れ、軽量、高強度、巻き枠無し構造、低熱侵入設計が要求されます。この目的のために高強度アルミニウム安定化超電導線と酸化物超電導電流リードが適用されます。2002 年には、この超電導マグネットが観測装置に組み込まれ宇宙に再び飛び立ちます。

もう一つは、人工衛星に搭載する次世代無人宇宙実験システムを開発するプロジェクトです。



その名前は、「微小重力環境利用超電導材料製造技術の開発」で、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が推進する「国際研究協力関連事業」の一環として実施しています。

このプロジェクトの目的は、宇宙環境利用実験の低コスト化を可能とする次世代無人宇宙実験システムを開発するとともに、同システムを利用して地上では製造が難しい希土類酸化物系超電導材料の大型結晶の製造を行うことです。重力の影響を受けない微小重力下での実験は、10秒程度の無重力落下カプセルを利用する方法、10分程度の飛行機による慣性落下を利用する方法及び人工衛星を利用する方法があります。超電導材料の製造実験を実施するための宇宙実験システム構築のために、それぞれの方法を駆使し、大型結晶育成のための技術的検討に加え、低コスト化、短納期化のための技術開発が続けられています。これらの研究成果は、2002年以降に実施される人工衛星への搭載実験に反映されます。

(編集局 田中靖三)

「読者の広場」へのご意見ご質問等みなさんの投稿をお待ちしております。



e-mail to:  
[web21@istec.or.jp](mailto:web21@istec.or.jp)

### ホームページへのリンク

・国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)  
<http://www.istec.or.jp>

### 9/26-28 国際コソニア産業メッセ2001

<http://www.kobefair.com>

神戸国際展示場、神戸市

(主催: 国際コソニア産業メッセ実行委員会)

ISS2001 隣接会場にて超電導関連  
約 20 ブース展示予定!

## 第14回国際超電導シンポジウム (ISS2001)

特別基調講演、基調講演プログラムの概要固まる

日時 2001年9月25日(火)

開会式 (10:00 ~ 10:30)

特別基調講演 (10:30 ~ 11:50)

・茅陽一 (地球環境産業技術研究機構 RITE)

「Long Term Strategy for Mitigating Global Warming」

・Paul Grant (Electric Power Research Institute)

「Superconductivity for Electric Power Applications」

昼食 (11:50 ~ 13:00)

基調講演 (13:00 ~ 17:30)

休憩 15:00 ~ 15:30)

・秋光 純 (青山学院大)

「Superconductivity in MgB<sub>2</sub>」

・D.K. Finnemore (Iowa State University)

「Superconductivity in MgB<sub>2</sub>」

・S. Berkowitz (Conductus)

「Current State of HTS for Wireless Applications and Future Needs」

・関 秋夫 (JR 東海)

「Remarkable Progress in the JR-Maglev」

・X. Obradors (ICMAB-CSIC)

「Bulk Superconductors with Tuned Properties for Fault Current Limiters」

・腰塚直己 (SRL/ISTEC)

「Present Status of R&D of Superconducting Bearings of Flywheel Energy Storage」

(敬称省略)

## 超電導 Web21 8月号

2001年8月発行

< 発行者 >

(財) 国際超電導産業技術研究センター内  
超電導 Web21 編集局

〒105-0004

港区新橋 5-34-3 栄進開発ビル 6F

Tel 03-3431-4002

Fax 03-3431-4044



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。