

## 第10回国際超電導産業サミット (ISIS-10) 速報

当初、2001年10月に計画されながら、2001年9月の米国テロ事件などにより延び延びとなっていた第10回国際超電導産業サミット (ISIS-10) が、去る2002年3月14日から16日、米国ニューメキシコ州サンタフェで開催され、日米欧から経営トップ、技術幹部など多数が参加した。

今回のサミットは、「APPLICATIONS AND MARKETS」をメイン・テーマとして、4つのセッションからなるパネルディスカッション形式で行われ、活発な議論、意見交換が行われた。各セッションのテーマ及び日本側パネリストは以下の通りである。

セッション1: From Developer to User: Electric Power Applications for Superconductors

住友電気工業株式会社

中原恒雄特別技術顧問

東京理科大学 正田英介教授

セッション2: Commercial Applications for Superconducting Electronics

ISTEC/SRL 田中昭二所長

セッション3: Meeting the Needs of the 21st Century High Energy Physics Community

高エネルギー加速器研究機構

新富孝和教授

セッション4: The Outlook for Superconducting Medical Applications

株式会社日立製作所中央研究所

塚田啓二主任研究員

また、米国が次世代線材の開発加速を目的として推進している Accelerated Coated Conductor Initiative の一環として研究開発施設を重点整備したロスアラモス国立研究所の見学ツアーも生まれ、会議における種々の成果の他、米国の次世代線材にかける意気込みを肌で感じる事ができたことも非常に意義深いことであった。

(ISTEC国際部長 津田井昭彦)

## 【隔月連載記事】 バルク超電導磁石の誕生 (その2)

SRL/ISTEC 第1・3 研究部長  
村上雅人

### 1. はじめに

超電導磁石をつくりたいというオネスの夢は、第2種超電導体の登場で現実のものになるかと思われたが、思わぬ伏兵がいた。それは、混合状態で電流を流すと、電気抵抗がゼロにはならないという事実である。

ただし、電気抵抗が発生したからと言って、超電導状態が壊れているのではない。あくまでも磁束が運動することが原因で電気抵抗が発生しているのである。このため、この電気抵抗を磁束流抵抗と呼んでいる。

とは言っても、混合状態で電気抵抗がゼロにならないのでは、オネスの夢である超電導磁石をつくることはできない。これは、低温超電導や高温超電導に関係なく、第2種超電導体に一般にあてはまる現象である。やはりオネスの夢はかなわぬ夢なのであろうか。前号の最後に紹介したように、これにはピンニング効果 (pinning effect) という救世主が存在したのである。

### 2. ピンニング効果

混合状態で電流を流すと、量子化された磁束が動いてしまい、その結果磁束流抵抗と呼ばれる電気抵抗が発生する。ここで重要な点は、流れている電流そのものは、電気抵抗ゼロ

口の超電導電流であり、電気抵抗はあくまでも磁束が運動することで発生しているという事実である。

つまり、何らかの方法で磁束の運動を阻止することができれば、混合状態においても電気抵抗ゼロの電流を流すことができる。この働きをするのがピンニング効果である。

ここで、第2種超電導体の混合状態を思い出して欲しい。本来、超電導は磁場を嫌う性質を持っている。このため、マイスナー効果と呼ばれる超電導体が磁場を完全に排除する現象が観察される。しかし、磁場を排除するためには余分なエネルギーが必要になる。このエネルギーは外部磁場が大きいほど大きくなる。よって、第2種超電導体では、このエネルギーを緩和するために、ある限界の磁場 (下部臨界磁場) 以上では、超電導体内部への磁場の侵入を許すのである。この状態が混合状態である。

この時、超電導体内に磁場が侵入した領域では超電導が破れて常電導状態となっている。しかし、本来は超電導状態の方が安定な温度域であるので、この部分では局所的にエネルギーの高い状態となっている。つまり、混合状態では一部の超電導の犠牲を払って、トータル的自由エネルギーが低い状態をつくり出しているのである。この局所的に損しているエネルギーのことをペナルティエネルギー (penalty energy) と呼んでいる。

ここで、図1のように超電導体内部に常電導の部分が存在する場合を想定してみよう。すると、量子化磁

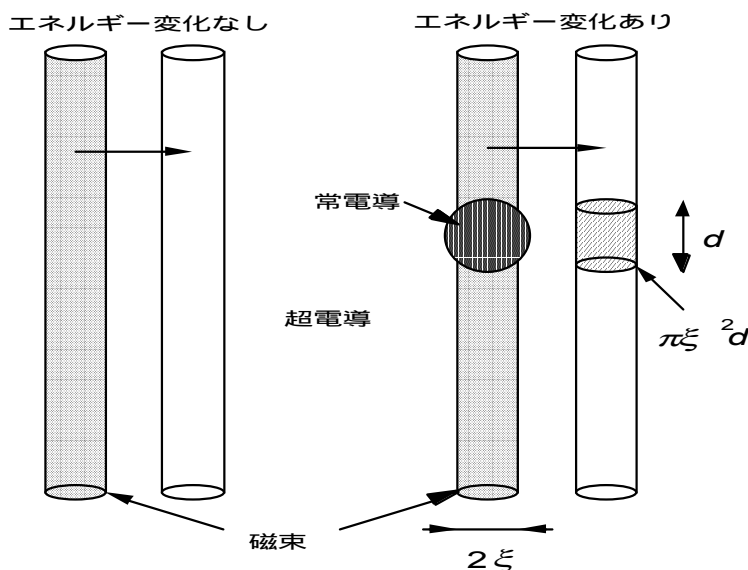


図1 ピン止め効果を示す模式図。純粋な超電導体内部では磁束は自由に動くことができる。これに対し、超電導体内に常電導部が存在すると、磁束はその位置ではペナルティを払わなくて済む。これがピン止め効果が生じる原因である。

束がこの部分に居ても、もともとが常電導であるから、ペナルティエネルギーを払う必要がない。一方、この磁束を、この位置から移動させようとすると、新たに超電導を壊す必要がある。つまりペナルティを払うことになる。このため、磁束はできるだけ、常電導部分に位置しようとする。これを、ピンで止めるというアナロジーから、ピン止め効果あるいはピンニング効果と呼んでいる。そして、このような常電導部分をピン止めセンター(pinning center)と呼んでいる。つまり、第2種超電導体の内部にピン止めセンターと呼ばれる常電導相が分散していれば、磁束の運動を止めることができるのである。

もちろん、ピンニング効果は、超電導体の内部にピン止めセンターがどのように分散しているかに依存する。そして、電流を流して発生するローレンツ力よりも、ピン止め効果(ピン止め力と呼んでいる)が強い間は、磁束線は動かずに、電気抵抗がゼロの超電導電流を流すことができるのである。ローレンツ力は

$$F_L = J \times B$$

のように、電流ベクトルと磁場ベクトルの外積となるが、磁場が強いほど、また流す電流が大きいほど大きくなる。よって、磁場が一定の時に流すことのできる電流の大きさは、ピン止め力(pinning force)の大きさを  $F_p$  とすると

$$F_p = J_c \times B$$

で与えられることになる。この電流ベクトルの大きさ  $J_c$  を臨界電流密度(critical current density)と呼んでいる。当然のことながら、この  $J_c$  は物質固有のパラメータではなく、組織敏感な値(structure sensitive value)である。

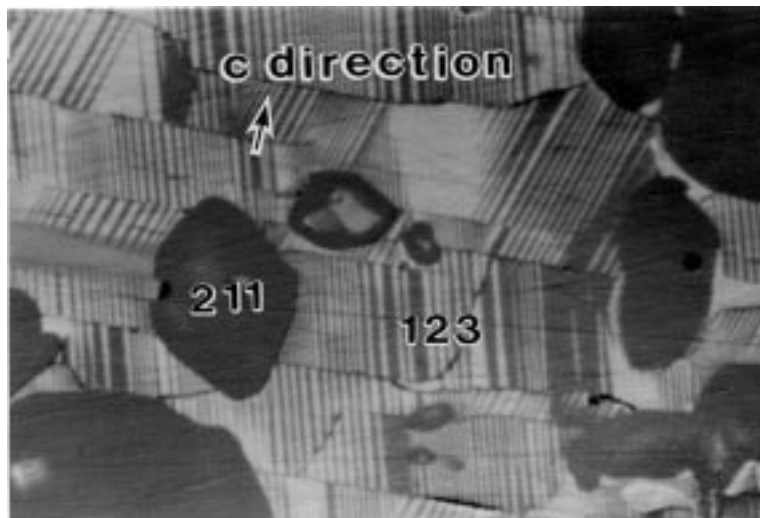


写真1 図のマトリックスで、双晶の入った領域がY-123超電導相(123と表記)であり、その中に分散した黒い粒子がY-211相である。この写真のスケールは、1cmが10 μmに相当する。

つまり、ピン止め力の大きい超電導体をいかにつくるかが、臨界電流密度向上、ひいては超電導磁石を実現するための鍵となる。そのためには、ピン止めセンターが分散した組織をいかにつくるかが最重要課題となる。事ここに及んで、オネスの超電導磁石実現の夢は、純粹物理の世界から工学プロセスの世界へとバトンを渡すことになる。

### 3. ピン止めセンターの導入

ここで、再び、高温超電導を否定する記事を書いた Science や Physics Today の議論を考えてみよう。以上のように、第2種超電導体の宿命として、混合状態において電気抵抗が発生するのは当たり前話である。よって、高温超電導体の臨界電流密度が本質的に低いという結論は間違いで、高温超電導体においてもピン止めセンターを導入すれば、高い臨界電流密度を達成できるはずである。

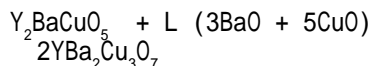
それでは、どうすればピン止めセンターを導入することができるのであろうか。高温超電導体であっても組織制御さえ行えば、臨界電流密度を高くできると豪語しても、それを実際に達成できなければ話にならない。

実は、ピンニング効果には研究者を悩ます問題が存在する。それは、ピンニング効果は中途半端という事実である。実用材料をつくるためには、組織制御によって積極的にピン止めセンターを導入し、臨界電流を高める必要がある。これが非常に難しい。一方、本来の物理的性質を調べるためには、徹底的に欠陥を減らす必要がある。つまり、ピン止めセンターとなる欠陥を除去しなければならない。これも非常に難しい。こ

のため、実用材料に供することもできず、かといって、物性研究にも役立たない中途半端な超電導材料が世の中には数多く存在することになる。

これは、低温超電導体にも言えることであり、数ある低温超電導体の中でピン止めセンターをうまく導入して実用レベルの臨界電流を達成できた材料が、現在実用化されている Nb-Ti 合金と Nb<sub>3</sub>Sn 化合物のたった2種類だけなのである。低温超電導体では、たまたま運が良かったから、少ないながらも2種類も見つかり、そのおかげでオネスの夢であった、超電導マグネットを実現できることになる。そして、現在では5T以上の磁場を発生する超電導マグネットが医療用の磁気断層撮影装置をはじめとして、数多くの分野で活躍している。オネスの夢である超電導磁石を高温超電導で実現することが可能なのであろうか。

しかし、これを実現するためには、低温超電導でさえ大変であったピン止めセンターの導入を、酸化物の高温超電導で行わなければならない。実は、これを意図的に実現できたのが、Y-Ba-Cu-Oバルク超電導体である。この系では



という包晶反応によって、半熔融状態から超電導相である YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (Y-123) が生成する。Lは液相(Liquid phase)を示しており、かつこ内はその組成である。この化学組成ならば、原理的にはY-123の超電導相しか生成しない。

この時、常電導相である Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> (Y-211) 濃度が高い側に、あらかじめ初期組成をずらすと、Y-123超電導相の中に常電導相であるY-211相が分散した組織をつくることのできる。すると、写真1に示すように、超電導相の内部に常電導相が微細に分散した組織をつくることのできる。われわれが、望んでいた組織が、この系ではうまくつくることができる。これこそ天恵であらう。

しかし、本当に使い物になる超電導体に育て上げるには、ピン止めセンターがあるというだけでは不十分である。それを有効に作用させるように、微細に分散させる必要がある。写真でみてわかるように、Y-211粒子の大きさは数10 μm程度である。これでは大きすぎる。その技術開発こそが重要なのである。組織制御については次回紹介する。