

Techno Scope

エネルギーロスのない 超伝導送電システムの実現を目指す

電気抵抗がゼロになる超伝導現象の発見から約100年、超伝導送電システムの実用化が、現実的になってきている。2006年には米国ニューヨーク州で超伝導ケーブルによる送電実験が行われ成果をあげている。日本でも2007年度から高温超伝導ケーブルによる実証実験が始まっており、2011年には実際の電力系統に接続する計画が進行中である。



現在、日本で超伝導送電実証試験が進行している。超伝導ケーブルは温度変化などの影響を確認された後、実証試験に使用される。写真は確認試験のようす。(写真提供 住友電気工業(株))



次世代インフラへの応用が期待される超伝導送電

地球環境への関心の高まり、新興国の経済発展、人口の増加、資源の枯渇など、エネルギー問題は喫緊の地球規模の課題である。先進国を中心として太陽光や風力などの自然エネルギーを導入する取り組みが進められているが、必要にして十分なエネルギーを安定して供給できる体制は整っていない。最近の電力供給においては、インターネットの普及とITサービスの利用増加によって各地に建設されているデータセンターが、世界的に電力消費量を押し上げている。さらに、電力消費量の増大に伴って、電力損失(送電ロス)も増大している。これらの課題を解決するための方法の一つとして、超伝導ケーブルによる送電システムへの期待が高まっている。

1911年に液体ヘリウム温度(約4K)に冷却した水銀で発見された超伝導現象は、その後、様々な元素でも起こることが発見されている。現在、高圧下も含めると、ほとんどの元素が超伝導を示すことが分かっている。

現在、実用化されている、あるいは実用化に向けて研究開発が進められている超伝導体には、金属系超伝導体と酸化物系超伝導体がある。金属系はさらに合金系と化合物系に分類できる。1986年以降に発見された酸化物系超伝導体は数多くある

■超伝導材料の応用分野

医療とバイオ技術

- MRI(磁気共鳴診断装置)
- NMR(核磁気共鳴分析装置)

超伝導材料技術 超伝導機器技術 冷却技術 計測機器技術

工場とモノ作り技術

- Si単結晶引上装置
- 磁気分離装置

暮らしとIT・ユビキタス技術

- マイクロ波フィルター
- インターネットデータセンター

地球とエネルギー・環境技術

- 電力ケーブル
- 発電機
- 限流器

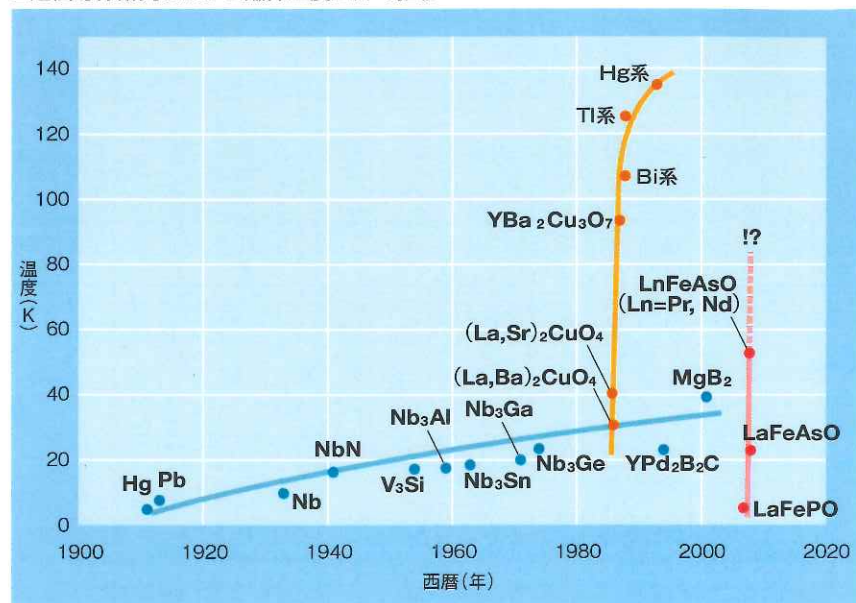
都市インフラと交通技術

- 超伝導電気自動車
- 超伝導モーター船
- リニアモーターカー

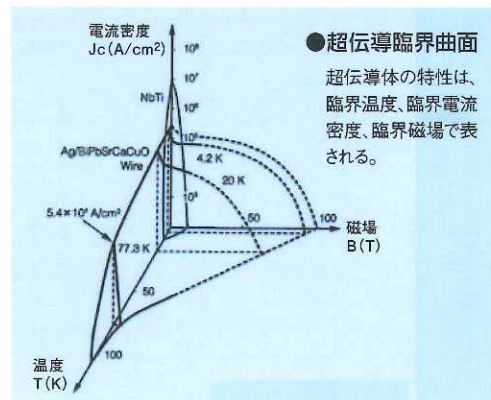
が、いずれも銅とランタン、あるいはイットリウム、ビスマス、タリウム、水銀などの系である。酸化物系超伝導体は、臨界温度が液体窒素の沸点(約77K)を超える90K級のYBaCuO系が発見されたことで、いわゆる超伝導フィーバーのきっかけとなった。さらに2008年には、鉄化合物の超伝導体が日本の研究者により発見され、超伝導現象の解明や臨界温度の向上への期待から、世界的に関心が集まった。現在、実用化の観点から研究が進んでいるのは、酸化物系超伝導体のYBaCuO系とBiSrCaCuO系、金属系(化合物系)のMgB₂である。

いくつかの超伝導体は、材料としてすでに多様な分野で利用されており、医療やバイオ分野で使用されるMRI(磁気共鳴診

■超伝導研究における臨界温度上昇の推移



1911年に超伝導現象が発見されて以来、臨界温度はゆっくりと上昇し、現在、20K以上の臨界温度を持つMgB₂の研究が進められている。1988年に発見された酸化物系超伝導体は、150Kを超える臨界温度を示す系もある。実用化の研究が進んでいるのは臨界温度が110KのBi系と90KのY系である。また2008年には鉄系超伝導体が発見されている。



断装置)やNMR(核磁気共鳴分析装置)、リニアモーターカーへの利用はよく知られている。また、現在フランスに建設中の国際核融合実験施設ITERや、J-PARCなどの巨大な加速器にも超伝導磁石が使用されている。意外なところでは、シリコンウェハを製造するためのシリコン単結晶引上装置にも、超伝導磁石が利用されている。その他にも超伝導磁束計、超伝導モータ推進船や超伝導モータを搭載した電気自動車の開発が進められている。これらはいずれも、超伝導により発生できる強力な磁力を利用するものであり、一般的に金属系のNb-Ti(合金)やNb₃Sn(化合物)、及び酸化物系のBiSrCaCuO系が超伝導材料として用いられている。

さらに近年、高温超伝導体と呼ばれている米国で発見されたYBaCuO系と日本で発見されたBiSrCaCuO系の線材化技術が進歩を遂げている。これに伴い、超伝導材料のもう一つの利用分野として、送電分野への超伝導利用に関心が高まっている。

超伝導材料線材化のための技術的ハードル

超伝導体の特性として、電気抵抗がゼロになる完全導電性とマイスナー効果(完全反磁性)が知られている。超伝導状態を維

持するためには、温度、電流、磁場がそれぞれ臨界温度(T_c)、臨界電流密度(J_c)、臨界磁場(H_c)以下でなければならない。磁石として利用する超伝導体の場合には、より高いH_cが求められ、送電に利用する場合にはより高いJ_cが必要になる。これらは相互に依存しており、温度、電流、磁場を軸とした超伝導臨界曲面を構成している。T_c以下の温度であっても、より低い温度環境であるほど超伝導状態は安定する。そのため、臨界温度が約10KのNb-Tiや臨界温度が約18KであるNb₃Snであっても、液体ヘリウム温度(約4K)で使用するようになる。臨界温度が液体窒素温度(77K)以上の高温超伝導体であれば、冷媒として安価な液体窒素を利用したり、冷凍機によって冷却して使用することが可能になる。現在、冷凍機によって20K程度までは比較的簡単に冷却できるため、20K以上の臨界温度を持つ超伝導体であれば、「ヘリウムフリー」で利用することが可能になる。2001年に日本で発見されたMgB₂の臨界温度は金属系では最も高温の約39Kであり、20Kを超える金属系超伝導体として注目された。また、一般に酸化物系超伝導体の臨界磁場は77Kにおいてはあまり高くないが、20K程度まで冷却することで、超伝導磁石としても十分に使用することが可能である。

超伝導体を線材としてコイルを作り磁石として利用する場合

■超伝導を示す元素

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	¹ H															² He		
2	³ Li	⁴ Be									⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne		
3	¹¹ Na	¹² Mg									¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar		
4	¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr
5	³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba		⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra		¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	¹¹⁰ Uun	¹¹¹ Uuu	¹¹² Uub						
													¹¹⁴ Ung					
				⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
				⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No	¹⁰³ Lr

高压条件では、金属元素の他にホウ素や酸素などの非金属元素も超伝導性を示すことが分かっている。

超伝導を示す元素

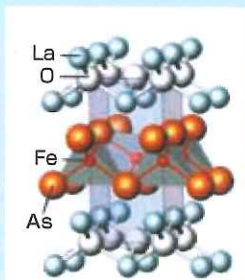
薄膜で超伝導を示す元素

加圧下で超伝導を示す元素

磁性元素

注目を集める鉄系超伝導体

2006年にLaFePO系で報告された鉄系の超伝導体は、その後、臨界温度が26KのLaFeAsO_{1-x}Fx系が報告されたことで高い注目を集めた。磁性体である鉄が超伝導を示すことと、Fe-Asが銅酸化物系の超伝導体と類似した構造を示すことから、超伝導現象解明への鍵となることが期待されている。なお、臨界温度はその後上昇し、中国の研究者が報告したSmFeAs_{1-x}Fx系の55Kが現在のところ最高である。



鉄系超伝導体の結晶構造

には、材料の強度も必要になる。これは、強力な磁場によって超伝導コイルの半径を広げようとする力（フープ力）が働くためである。超伝導状態は結晶構造に密接に関連しているため、結晶構造が歪むことによって一般的には臨界値が低下する。また、応力によって超伝導体に「割れ」が生じることもある。発生させる磁場の強さによって必要な機械特性は異なるが、200～400MPa程度の応力に耐える引張強度が必要とされている。

超伝導材料を線材化する際、多芯化することが必要となる。超伝導材料はその一部が超伝導状態から常伝導状態に戻ることがあり、この現象はクエンチ（Quench）と呼ばれている。クエンチは、微細構造の密着性が低いウィークリンクやフープ力による歪みなど、さまざまな原因によって発生するが、ケーブルの一部でクエンチが発生することにより、その部分の温度が上昇する。温度上昇により周囲の材料にもクエンチが発生し、これがなだれ状に拡大することでケーブル全体の超伝導状態が破壊される。こ

れを防止するために、超伝導材料を線材化するには、超伝導材料を銅や銀などの導電率の高いマトリックス材に納めた多芯構造とする必要がある。これによって、万一ケーブルの一部でクエンチが発生しても、過剰電流を周囲の銅や銀に流すことによって発熱を抑えることができ、ケーブル全体にクエンチが拡大することを防止するのである。

金属系のNb-Tiは、従来までの金属加工の技術により線材化は比較的容易であった。しかし、同じ金属系でも化合物系のNb₃Snの線材化は難しく、その実用化にはブロンズ法（コラム参照）が開発される必要があった。また、酸化物超伝導体は超伝導特性と結晶粒の集合組織に特に密接な関係があり、高い臨界電流密度とするためには集合組織の精密制御が不可欠であるため、このことが線材化を難しくする要因となっていた。

酸化物超伝導体の線材化技術

酸化物超伝導体、いわゆる高温超伝導体が送電用材料として早くから注目を集めた最大の理由は、液体窒素温度を超える高温で超伝導を示す点である。現実的な冷却コストで送電が可能になることに加えて、液体ヘリウム温度で利用する場合と比較して比熱が大きく、発熱に対する安定性も向上する。

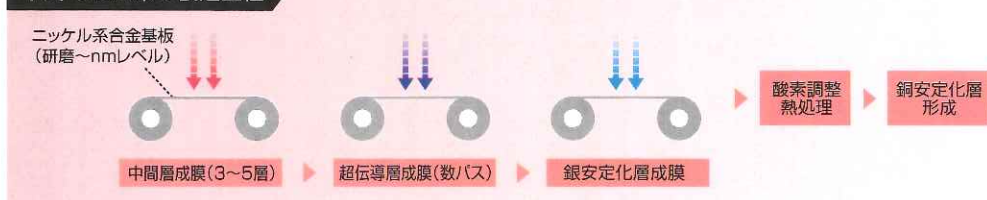
金属系超伝導体と比較して酸化物超伝導体の線材化が困難である要因として、結晶構造の配向性を挙げることができる。金属系は等方性であり、線材の断面形状が大きな制約を受けることはない。しかし、酸化物超伝導体は等方的な構造ではなく（連携記事のfig.1参照）、特定の方向にのみ電流が流れるため、結晶の向きをそろえる必要がある。

化合物系の金属系超伝導体の線材化に用いられているパウダー・イン・チューブ（PIT）法は、シースに出発材料を入れ、成形後に熱処理を行って超伝導材料を生成する手法で、Bi系の酸化物超伝導体の線材化にも応用されている。Bi系超伝導体

ビスマス系の製造工程



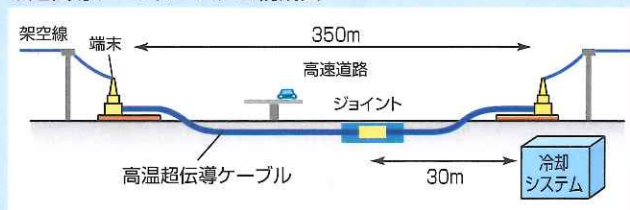
イットリウム系の製造工程



米国オルバーニー市における超伝導ケーブル送電実証試験



●超伝導ケーブルシステム構成図



2006年から約2年間にわたる長期実証実験では、ケーブル、ケーブルジョイントなどの検証が行われ、電力を安定して供給できることが確認された。



端末部は、実際の電力系統と超伝導ケーブルが接続する部分である。

●送電仕様

期 間：2006年7月～2007年5月、2008年1月～2008年4月
給電世帯数：約7万世帯
敷 設 条 件：地中管路(直径152mm)

●超伝導ケーブル仕様(三心一括型)

電 流・電 圧：34.5kV、800Arms
長 さ：第I期:Bi系350m
第II期:Bi系320m+Y系30m
短絡電流条件：23kA、38cycles
ケーブル外径：135mm
適 合 規 格：AEIC規格C55-94、IEEE規格404、IEEE規格48

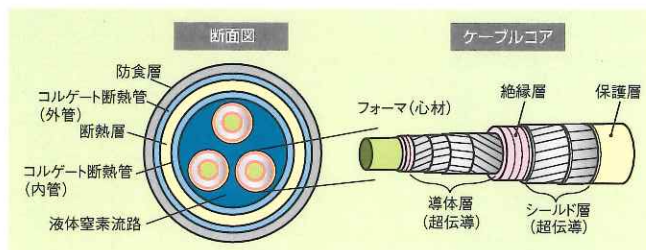
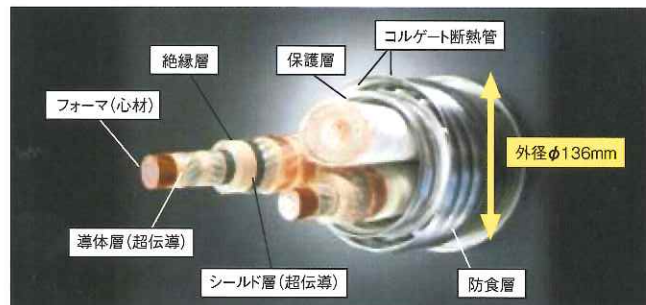
は出発物質を銀のシースに充填し、成形と加圧熱処理をくり返すことによって線材化でき、2004年には工業化されている。Bi系超伝導材料は、工程はやや複雑になるが、基本的には銅線と同様の製造工程で線材化できるため、製造コストを抑えることが可能になる。しかし現在、シースには銀以外の材料を用いることができないため、より安価にするためにはシース材料の低減や臨界電流密度の向上などが必要である。現在、臨界電流密度は銅の約200倍であるが、より大きな臨界電流密度を実現できれば、それに反比例して必要な超伝導線材の量は減少する。

より高い配向性を実現する必要があるY系超伝導材料の製造方法は、銅線を作るというよりも半導体の製造工程に近い。主流となっているのは、ハステロイなどの合金を基板として、気相合成によって超伝導層を生成する手法である。基板、中間層、超伝導層、安定化保護層と複雑な構造が必要のため、Bi系が1500～2000m程度の長尺化が可能であるのに対して、Y系では100～1000m程度までしか長尺化できていない。臨界電流密度や磁場依存性など優れた特性を持っているY系超伝導材料では、製造コストの低減と長尺化が大きな課題である。

世界各国で進む送電システム実証実験

超伝導ケーブルによる送電実験は、すでに世界各国で進められている。米国をはじめとして欧州、中国、韓国などでも大規模

■超伝導ケーブルの構造



な超伝導ケーブルプロジェクトが実施、または計画されている。特に米国ニューヨーク州オルバーニー市では、2006年から約2年間にわたって系統に接続した実証試験が行われた。約350mの地下ケーブルを超伝導ケーブルに置き換えて行われた送電試験では、Bi系超伝導ケーブルのケーブルジョイントや電力の安定性などが検証され、電力を安定して供給できることが実証されている。この実証試験では、Bi系超伝導ケーブルの一部、約30mをY系超伝導ケーブルに置き換え、Y系超伝導ケーブルの性能やBi

系とY系のケーブルジョイントについても検証された。

日本でも、2007年から超伝導ケーブルを電力系統に接続する実証試験が、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構の「高温超伝導ケーブル実証プロジェクト」の一環として開始されている。実証試験は東京電力の旭変電所(神奈川県横浜市)で行われる予定で、2011年には300m程度の超伝導ケーブルを、66kV、3000A級の実際の電力網に接続する計画になっている。

超伝導ケーブルによる送電を実用化するためには、コスト評価も重要である。電力ケーブルのコスト・性能比は、電流量とケーブル長当たりの価格(円/A・m)で表されるが、量産効果や製造工程の改良により、将来的には銅線とほぼ同等になると推測されている。また、超伝導ケーブルによる送電ロスの軽減によるコスト効果も期待できる。日本では50万ボルトの送電システムを利用し、さらに世界でも類を見ない100万ボルトの高圧送電システムを開発しているが、送電に伴う電力損失(送電ロス)は総発電量の約5%にも及び、これは100万kWクラスの原子力発電所5~6基分の発電量に匹敵する損失である。超伝導送電システムを導入することで送電ロスを従来の3分の1にまで抑えることができるため、現在、日本にある約21000kmの地中の高圧送電線を全て超伝導ケーブルに更新することによって、400万tonのCO₂が削減できるという試算もある。また、地中の高圧送電線の約50%は東京都とその周辺に存在している。将来的にいつそう高まる電力需要に対応するためには、送電容量を増加させる必要があるが、現在の銅線による送電には大きな空間が必要である。同じ電力を約200分の1の質量のケーブルで送電できる超伝導ケーブルを利用すれば、地下の管路などの既設の送電設備を利用して大容量送電が可能になるといわれている。

さらに、莫大な電力を消費するデータセンターでは、施設内に長大な電力ケーブルを有している。施設内での送電ロスは消費電力の20%にも及ぶとの試算もあり、これを超伝導ケーブルに置き換える取り組みも研究されている。

日本で開発されたブロンズ法

金属系でも加工性の低い化合物系であるNb₃Snを、極細多芯構造を持つ実用的な線材とする製造方法に、(独)物質・材料研究機構で開発されたブロンズ法(冷間圧延・拡散熱処理)がある。

磁石に使用する超伝導体には強い磁場を発生させるために、高い磁束線のピン止め力が必要になる。Nb₃Snでは結晶粒界がピン止めサイトとなるため、微細な結晶構造を持つことが望ましい。NbとSnを高温で熱処理した場合にはNb₃Snの結晶が大きくなりすぎ、低温で熱処理した場合には、なかなかNb₃Snが生成する反応が進まないという問題があった。しかし、銅とスズの合金(ブロンズ)にNbの芯を持つ複合材料を出発材料とすると、低温で熱処理しても、反応が速やかに進んで、微細なNb₃Sn結晶を生成することができる。これはCuの触媒効果によるものと推測されている。ブロンズ法によって、フィラメントと呼ばれる極細多芯構造を持つ超伝導線材が実現し、10T以上の高い磁場を発生させることが可能になった。

新たな可能性の鍵となる基礎研究

大容量の電力を低損失で送電できるコンパクトな超伝導ケーブルは、省エネルギー、省資源、自然エネルギーの利用促進など、さまざまなメリットがある。

現在、研究が進められている酸化物系超伝導体では、製造工程の低コスト化や品質管理も重要であるが、今にもまして微細構造の制御方法の研究・開発など、材料科学分野の知見の蓄積が不可欠である。例えば、現在製品化されているBi系超伝導線では、平均電流密度は400~500A/mm²であるが、中心部分と周辺部分では電流密度に違いがあることが分かっている。現状でも、中心部分では800~900A/mm²程度の電流密度を示していることから、微細構造を精密に制御すれば超伝導性能の飛躍的な向上が期待でき、今後の応用の可能性はさらに広がる。

また、液体窒素温度で高い性能を示すY系は希少金属であるYを使用している。新しい超伝導体の探索や代替元素の研究をさらに進めるため、今後は元素戦略も考慮に入れた開発が不可欠である。

解決すべき課題は少なくないものの、超伝導ケーブルによる送電は確実に実用化に向かって進んでいる。エネルギー問題を取り巻く環境の中で、超伝導材料には、ブレイクスルーを実現する可能性に、大きな期待が寄せられている。

●取材協力 (独)物質・材料研究機構、住友電気工業(株)
●文 杉山 香里

増加を続ける世界のエネルギー需要に対応するため、たとえばゴビ砂漠の半分の面積の太陽電池を使えば、全世界のエネルギー需要を賄えるといわれている。世界中の自然エネルギー発電所を超伝導ケーブルで結べば、自然エネルギーを安定的な電力として活用することが可能になる。(写真はイメージ)