

## 【隔月連載記事】

### やさしい超電導電力機器のおはなし(その1)

横浜国立大学  
大学院工学研究院  
名誉教授 塚本修巳

某日某所で、大手商社の経営に携わっている役員の叔父さんと、メーカーの研究所で高温超電導機器開発に携わっている甥との間で超電導応用のことが話題になりました。

#### 1.1 高温超電導、室温超電導?

甥：叔父さん久しぶりですね。昨今の先行き不透明の中で、会社の経営は大変ですね。

叔父：やあ君、会社を取り巻く環境は厳しく、目先のことに追われとても先のことには気が回らないよ。これではいけないと十分承知はしているのだが。ところで君は今会社で超電導電力機器の開発に携わっているそうだね。夢があっていいな。もう20年位前だったか高温超電導(HTS)フィーバがあったことを覚えているよ。わが社でも超電導で何かビジネスができるか調べさせたことがあったけれど、最近あまり話を聞かないのでHTSの話はもう終わったと思っていたよ。やはり室温超電導が出てこないかね。

甥：超電導のこと覚えていて頂けただけでも幸いです。

叔父：それくらいのことは知っているよ。超電導は非常に低い温度に冷やすと電気抵抗がゼロになり、電流を流しても発熱がないから、効率の良い電気機器が実現できると言うくらいは知っている。自分は文系とはいえ、高校では理系の科目も少しは習ったからね。

甥：高温超電導技術の開発は、終わるところか、現在世界各国でデットヒートと言っていいような開発競争が繰り広げられています。確かに室温超電導が出てくればそれに越したことはないのですが、われわれは室温超電導が出てこなくても、液体窒素温度レベル(77K)で超電導になるHTSを用いて十分実用になる機器ができていると思っています。もし、今日仮に室温超電導材料が発見されたとしても、応用機器が実現するには20年、30年以上かかります。長い導体を作り、実用に足る大きな電流を抵抗ゼロで流せるように、しかも、実用に耐えるコストで実現するには大変な研究開発努力と資金が必要です。このためだけでも長い時間がかかってしまいます。実際、HTSの材料が1986年に発見されてから20年以上過ぎた現在、コスト的にも、性能的にも将来性があると期待されているイットリウム系薄膜導体で数百mの長尺化がやっと可能になりました。これからはコストダウンを目指した実用化導体の製造方法の開発段階になってきている状況です。従って、いつ出てくるかわからない室温超電導の出現を待つよりも、現在得られているHTS材料の応用技術開発を進めたほうが良いというのが世界の趨勢です。

叔父：ところで超電導技術を応用したらどんないいことがあるのかね。

甥：超電導の応用と一言で言っても、電気抵抗がゼロになることを利用したいいわゆる強電応用から、超電導特有の量子効果を利用したエレクトロニクス応用までその範囲は非常に広いです。電力・エネルギー・環境の分野から、産業・輸送、医療・診断、情報・通信の分野まで、現在政府が重点施策を行っている重点4分野すべてに関係します。

現在、経済産業省はこの重点4分野について、重要技術項目を選び出し、技術戦略マップを2005年から策定しています。マップの策定は、国の研究開発資金、資源を重点的に配分し、関連の技術

者、研究者が将来像を共有し、民間企業が自ら効率的な事業展開のために体制を作り、研究開発の推進に役立せることを目指したものです。超電導技術は重点分野すべてにかかわるので、分野にまたがる独自の位置付けとして 2007 年からマップの策定が開始されました。現在も急速に進展する技術の状況に合わせてローリングがなされています。

叔父：技術戦略マップの話は聞いている。我社の技術部門にも将来のビジネスチャンスを探すためにいろいろ検討はさせている。ただ、超電導のマップのことは知らなかった。

甥：超電導の応用分野の中で私が関係している超電導電力機器に関して説明しましょう

叔父：我社は昔から発電事業に国内はもとより海外にも進出しているから、大いに興味があるよ。

## 1.2 電力システムと超電導技術

甥：電力システムは情報通信システムと並んで、人間が作った最も複雑なシステムといえます。特に、電力システムは個々には予測不可能な需要の生起に対して瞬時に供給が対応しなければならない、すなわち、生産と消費が瞬時でつりあっていなければならない物理的な強い拘束があることです。電話では輻輳が起きればお話中になってしまうことが許容されるのですが、電力システムはこのようにいかないのです。生産と消費のバランスが崩れると、システムは不安定となり、最悪の場合広域の大停電が起きてしまうのです。有名なのは 2003 年の 8 月に北米東海岸で起き、5 千万世帯が被害を受けた大規模停電です。このときの夜間の衛星写真はインターネットで簡単に探し出せますが、それを見るとニューヨーク市地区、ニューイングランド地区が文字通りブラックアウトしています。また、最近ではヨーロッパでも一昨年の 11 月に大規模停電が起きています。

このような大規模かつ複雑な電力システムですが、近年の情報化社会の進展、CO<sub>2</sub> 削減など環境問題が深刻化している中、それを取り巻く種々の課題が顕在化してきています。

すなわち、

情報通信量の急速な増大に伴う大都市地区での電力需要密度の大幅増と、電力設備増強に対する用地難、コスト増の深刻化：

情報処理機器個々の消費電力はそれほど多くないにしても、大規模データセンター内のサーバー、ルータなど設備の消費電力が大きく、また、これらの空調も必要で、情報量の急速な増大に伴い特に都市部で消費電力が急増すると予測されています。これに対応して都市部の電力設備の増強はご承知のように大きなコストがかかります。

益々強くなってきている電力の高品質化・高信頼度化に対する要求：

近年は家庭電化製品から工場の生産ラインにまで無数のデジタル演算回路チップが入っており、コンマ数秒以下の短い瞬時での電圧低下（瞬低）でも大きな障害が発生する可能性があります。また、E-コマースではサーバーの停止は莫大な損失をもたらします。アメリカの電力研究所 (EPRI)/CEIDS が出したレポートでは、時間の長短にかかわらず停電による損害は年 1000 億から 1600 億ドルを超え、瞬低による被害もこれとは別に 150 億から 240 億ドルという大きな損害があるといっています。日本ではこの種の統計はないのですが、最新鋭の半導体工場では一回の瞬低で数億円の被害が出るといわれています。従って、この種の損害を抑えるために、瞬低のない高品質で、停電が少ない高信頼性の電力が情報化社会では重要です。

叔父：外資系の金融会社が入っているビルでは自家発電/無停電電源装置の設置を要求されると聞いているが、このような膨大に損害があるとはあまり知らなかった。

甥：さらに話を続けますが、

分散電源、自然エネルギー電源導入量の着実な増加と、それに伴う電力システム運用への不安定要因の増大：

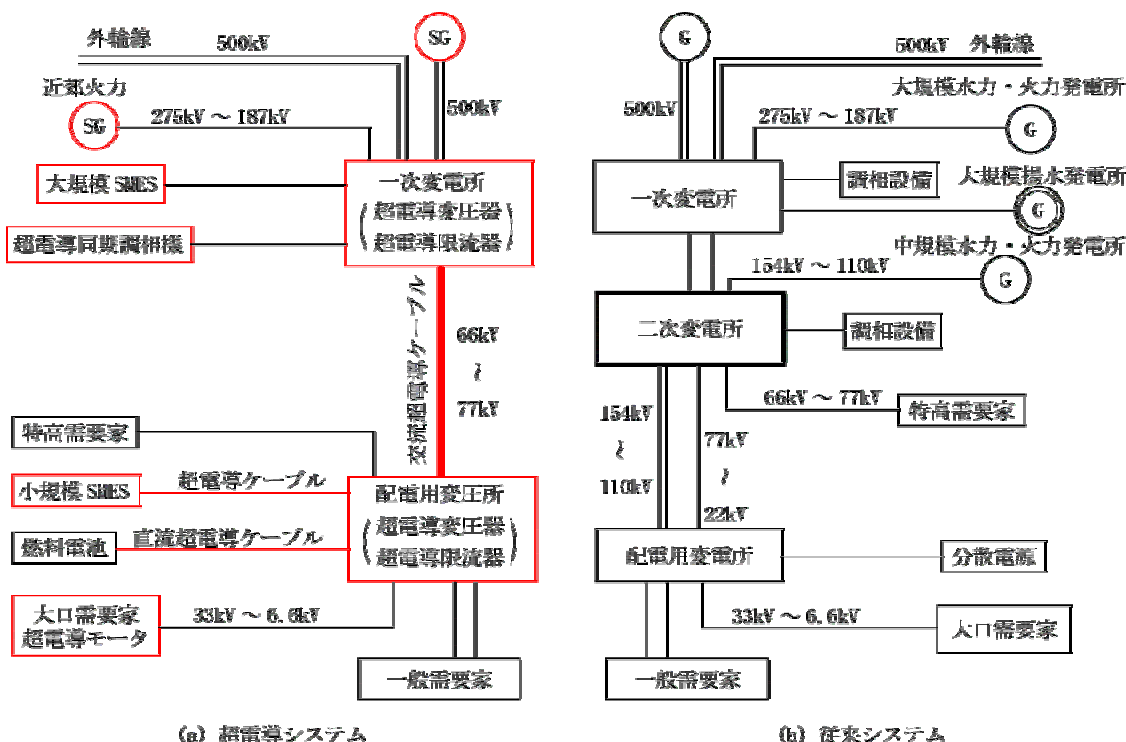
これらの電源は供給に不確定要因が多く、必要なときに予定した電力が得られない可能性があり、

電力システム運用上の障害になると考えられます。

これらの問題は現状の技術の延長では対応が困難になりつつあります。

超電導技術を電力機器に応用することにより、機器の高効率化、軽量・コンパクト化、高容量密度化、さらに、従来にない新機能を持つ機器の実現が可能となります。特に液体窒素温度領域で超電導になる HTS は冷却に対する負担が少なく、実用化に大きな期待が寄せられています。このため超電導技術は今まで述べてきたような問題の重要な“Solution”となることが期待されています。アメリカでは電力業界の規制緩和に伴い広域停電が頻発したのを受け、エネルギー省送配電局がアメリカの将来の送配電の長期ビジョン「Grid 2030」を奇しくも前記の北米大停電が起きる直前に発表しました。この中で、超電導技術が重要技術として位置づけられています。我国でも、超電導技術の電力機器への応用の重要性は早くから認識され、NEDO（新エネルギー産業総合開発機構）のプロジェクトを主体としてここ 20 年以上にわたって超電導電力機器の開発が続けられてきています。ヨーロッパでも、中国、韓国でも継続的な研究開発が行われてきています。最近の HTS 線材技術の著しい進展により超電導応用電力機器の開発が世界各国で加速されてきています。

### 1.3 超電導電力システム



甥：図 1 は日本の電力システムの構成を概念的に示したもので、超電導技術を導入した場合の構成がどのようになるかの概念的な例を示しました。ご承知のように電力量は電圧と電流の積で決まります（厳密に言うと交流の場合はこの値より少し少なくなりますが）。大きな電力を送るには、電圧を高くするとともに電流も大きくする必要があります。電流を大きくするにしても送電線、配電線を太くしないとジュール損失が大きくなるので、電流を増やすのには限界があります。このため、

輸送する電力量が大きいほど電圧を高くする必要があります。従って、図1の(b)のように送電電力量に応じて何段もの電圧階級が決まっています。超電導技術を導入した場合、発電機や変圧器など個々の機器を超電導化した場合のメリットのほかに、電力システムの構成を変えることによるメリットが非常に大きいです。超電導電力ケーブルは大きな電流を損失少なく流せるので、つまり大電力を、電圧をあまり大きくしなくても送れるので、図1(a)に示してあるように、電圧階級を整理し、途中の2次変電所を省略することにより、用地問題の緩和、送電系増力に当たっての大幅な低コスト化が可能になります。さらに、電流を自律的に制限できる限流器、電気を一時的に貯めることのできる SMES 超電導磁気エネルギー貯蔵装置など、超電導特有の機器を導入することにより、電力品質、信頼性の向上ができます。

叔父：いろいろ超電導技術の導入によっていいことがありそうだね。

甥：次の機会に個々の機器についてももう少し詳しく説明することにします。興味を持ってもらえればありがたいです。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 【隔月連載記事】

### やさしい超電導電力機器のおはなし(その2)

横浜国立大学  
大学院工学研究院  
名誉教授 塚本修巳

某日某所で、大手商社の経営に携わっている役員の叔父さんと、メーカーの研究所で高温超電導機器開発に携わっている甥との間で超電導応用のことが話題になりました。その続きで、超電導電力ケーブルが今回のテーマです。

#### 2.1 はじめに

叔父：君の話聞いて、電力システムに超電導技術を導入することによって、設備の用地問題、住民問題に対応しつつ省エネルギーが実現できる。さらに、近年非常に重要になってきた電力の信頼性、品質の向上にも役立つことなど多くのメリットがありそうだということは理解できてきた。そこで、個別の機器について、もう少し具体的に話をしたい。また、海外でも開発研究が盛んと聞いたので海外の状況も聞かせてもらえるとありがたいのだが。

甥：承知しました。個別の機器の話に入ると少し技術的な話が入っているのですがいいですか。

叔父：まあやむを得ないだろう。

甥：超電導電力ケーブルの話からしましょう。現在最も多くの国で研究開発が行われている HTS 応用機器で、現在実用化一歩手前というところでしょうか。

#### 2.2 従来型ケーブルの問題点

甥：現在、大都市の人口密集地帯での大きな電力需要をまかなうために、地下に掘られた洞道(トンネル)内に敷設された電力ケーブルが用いられています。図1の写真は洞道内の写真ですが、この洞道は直径4mから大きいものでは5m以上になります。大都市部ではこのような洞道は多くの主要幹線道路の地下に掘られています。洞道に入っている電力ケーブルは銅の導体を用いており、ケーブルに電流を流すとジュール熱が発生します。洞道内で発生した熱が周りの土を伝わってやがては外気に逃げるのですが、この熱の伝わり方はあまり良くないため、ジュール熱が発生しすぎると洞道内の温度が上昇します。そうするとケーブルの温度が上昇し、ケーブルの抵抗が増すため、ますますジュール発熱が大きくなる。



図1 送電ケーブル用洞道

なってしまいます。このため、1つの洞道で送れる電力の量は制限されます。従って、電力需要の増大に伴って輸送する電力量を増すためには洞道の数を増やす必要があります。1つの洞道に電力ケーブルをいっぱい押し込んでもジュール発熱が増すだけです。洞道1つあたりの輸送電力量を増すことはできません。都心部での洞道の新設は工事のための交通渋滞を引き起こすとともに、多大な費用がかかりますのでおそれと洞道の新設というわけにはいきません。このため、電力需要が増大する都心部への電力供給が追いつかなくなる可能性があり、対応が迫られています。

### 2.3 高温超電導 (HTS) ケーブルのメリット

甥：HTSを電力ケーブルに応用すると、ケーブルの発熱がほとんどない状態で大きな電流を流すことができるので、小さいケーブルの断面積で大きな電力を送ることができます。図2には今用いられている電力ケーブルを用いて100万kWの電力(一般家庭の数10万戸分の消費電力に相当)を送る場合と、同じ電力をHTSケーブルで送る場合とで、ケーブルの大きさの比較がしてあります。

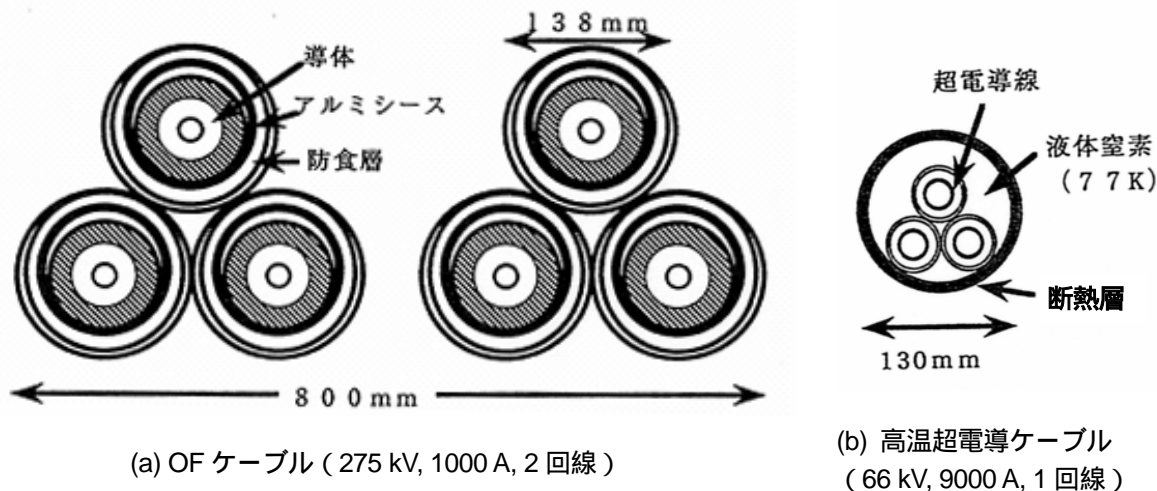


図2 容量100万kWの従来型ケーブルと同等容量のHTSケーブルの断面比較

図中でケーブルが3本セットになっているのは大電力を送るには位相がそれぞれ120度ずつずれている3相の電流を流して送るためです。従来型のケーブルですと、2線路が必要で、その設置幅は1m近くなるのに対して、HTSケーブルでは外径が13cm程度に収めることが可能と考えられています。HTSケーブルの圧倒的なコンパクトさが分かると思います。これにより、図1に示したような洞道を作らなくても、図3に示したような管路にHTSケーブル敷設することにより大電力を送ることができるのです。

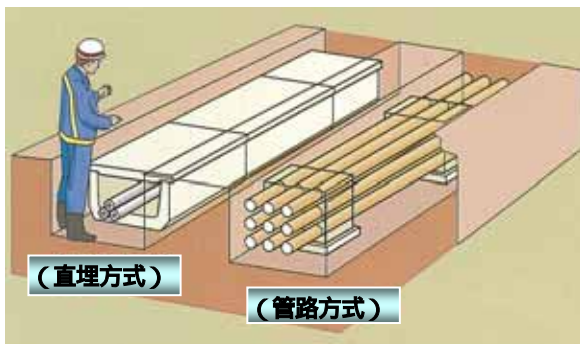


図3 管路方式(図の右側の方式)

このような管路はたとえば道路の脇や、鉄道線路脇におくことができ、さらには橋梁に沿わせることができます。したがって、送電ルート選択の自由度が大きく広がり、線路の建設コストも大幅に削減できます。諸外国では図4に示すような電力ケーブルを直接地下に埋設すること(直埋)が良く行われていますが、HTSケーブルもこのような敷設も可能で、大電力を送るこ

とができます。また、大電流を損失少なく送れるので、すでに前回に話しましたように従来型ケーブルのように電圧を上げなくても良く、送電システムの電圧階級を簡単化することができます。



図4 直埋方式の電力ケーブル

これらの HTS ケーブルのメリットをまとめたものが図5です。

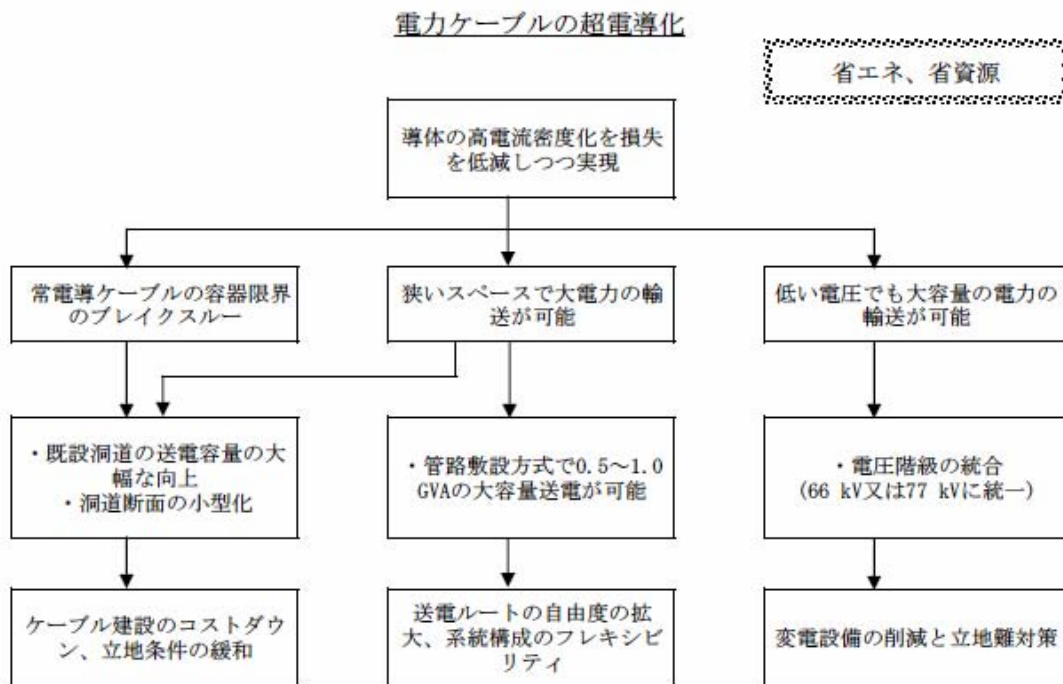


図5 HTS ケーブルのメリット

## 2.4 HTS ケーブルの構造とシステムの構成

叔父：ちょっと待ってくれ。HTS ケーブルが狭いスペースでも大電力が送れるということだが、ケーブルを超電導に保つために少なくとも液体窒素温度レベルに保つ必要があるだろう。どうやって長い距離をそのような極低温に保つのかね？また、極低温冷凍装置も必要であろう？その装置を置く場所はどうかね。

甥：良い質問ですね。HTS ケーブルの冷却技術の開発は重要な課題です。超電導ケーブルは図6に示したように2重の可撓性のあるステンレススチール管の間に断熱材を入れて真空にした構造のク

ライオチューブと呼ばれる管に、超電導体でできたケーブルコアを入れた構造になっています。このクライオチューブとケーブルコアとの隙間に液体窒素を循環させて、ケーブルコアの超電導状態を保ちます。断熱材としてはスーパーインシュレーターと呼ばれるものが用いられ、これを真空に保てば 1 cm 程度の厚さで十分クライオチューブの内部を液体窒素温度に保つことができます。このような長尺の断熱技術はかなり開発が進んでおり、一本の長さ数 km ケーブルの冷却は可能と考えられています。ケーブルの液体窒素温度領域に外部から侵入する熱とケーブルコアに交流電流を流すと発生する損失（交流損失といいますが）は液体窒素を循環させて冷却します。さらに、常温の外部導体と超電導ケーブルコアを接続するターミナル部分でも熱損失があり、これも循環液体窒素で冷却します。これらの熱を吸収した液体窒素はケーブルの出口では温度が高くなっており、冷凍機により冷やし再びケーブルの入り口から送り込みます。液体窒素温度領域の冷凍機の効率はあまり良くなく、液体窒素温度領域での 1 W の損失を冷却するには 20 ~ 30 W の電力を必要とします。

したがって、ケーブルシステムの効率を良くするには、極力液体窒素領域への熱侵入を抑え、冷凍機の効率を高め、ケーブルコアに発生する交流損失を少なくする必要があります。特に、効率が良くかつ保守の手間のかからない高信頼の冷凍機を開発することと、交流損失の抑制が、現在、超電導ケーブルの研究開発の重要課題となっています。確かに冷凍機は実際のケーブルシステムでは数 km 間隔で置く必要がありますが、その体積はあまり大きくなく設置場所に大変困るということはないと考えられます。従来の洞道でも、内部の温度上昇を抑えるために冷却水パイプを洞道中に設け、そこに水を循環させることが行われております。冷却水を冷やすための装置はかなり大きく、これに比べると液体窒素冷凍機は小さいと考えられます。

叔父：ところで、交流損失ということだが超電導は抵抗が零なのだから交流を流しても損失はゼロなのではないか。

甥：確かに超電導は直流電流を流したときには抵抗が零です。しかし、ちょっと話は難しくなるけれど、超電導体内部の電流分布は電流の方向が変わると変わり、交流電流を流すと履歴現象が起きて損失が発生します。交流損失は通電電流が大きくなると急激に大きくなるため、ケーブルの容量が大きくなるにつれて、交流損失の問題は深刻になります。Bi 銀シース線材と比較し、Y 系薄膜導体はケーブルコアの構造をうまくすると交流損失を大きく減らすことができるので、Y 系線材ケーブルの開発への期待が大きいのです。

甥：ところで、ケーブルコアの構造について言い忘れました。図 6 を見てもらうとわかるように、クライオチューブの中に 3 相電流を流すために 3 本のケーブルコアが入っています。ケーブルコアの構造は通電電流を流すための HTS テープで構成された通電部があって、それを取り巻くように



図 6 3 心一括型 HTS ケーブル（住友電工・東京電力提供）



絶縁層を間に挟んで HTS テープが配置されています。これはシールド層と呼ばれ、通電部が作る磁界を遮蔽し、ケーブルコアの外側には磁界を出さないようになっています。このような工夫により1本のクライオチューブの中に3本のケーブルコアを入れても交流損失を大きくしないで3相交流電流が流せるのです。また、超電導ケーブルはこのような構造を持っているので、ケーブル外部には磁界が漏れず、電磁的な障害をなくすことができます。

## 2.4 国内外での開発状況

叔父：日本を初め諸外国でも開発が盛んということだが様子はどうか。

甥：表1には世界の主な超電導ケーブルプロジェクトの概要が示してあります。表には少し技術的に細かい内容が入っていますが、これが分からなくても世界の開発状況は分かると思います。現在通電試験済みでもっとも長いものは、単相のケーブルですが日本で開発された500m長のもので、我国の長尺超電導ケーブルプロジェクトではBi系銀シース線材が用いられていますが、より一層の低交流損失化、高電流容量化を目指し、Y系導体を用いたケーブルの開発研究も進められています。

表1. 主な世界の超電導電力ケーブルプロジェクト  
(2007年末現在)

No.	国名	プロジェクト実施者/電力業者/場所	電圧/電流/長さ	線材供給/ケーブル製造者	開発状況	超電導材料/低温絶縁(CD), 室温絶縁(WD)/構造
1	日本	Super Ace / 東電 / 電中研横須賀 中電 関電	1 77kV / 1.0kA / 500m	古河 / 古河	2005年3月 終了	Bi2223 / CD / 単心
2	日本	住友 / 東電 / 未定 東電	3 66kV / 3kA / 200-300m	住友 / 住友	2012年3月 終了予定	Bi2223 / CD / 3心一括
3	中国	Innopower / 雲南電力 / 昆明	3 35kV / 2kA / 33.5m	Innost / 上海ケーブル他	運用中	Bi2223 / WD / 単心
4	中国	中国科学アカデミー / Chang Tonケーブル / 慶州	3 15kV / 1.5kA / 75m	AMSC / Chang Ton Cable社	2006年終了	Bi2223 / WD / 単心
5	韓国	DAPAS / KEPCO /	3 22.9kV / 1.2kA / 30m	AMSC / LG Cable	運用中	Bi2223 / CD / 3心一括
6	韓国	KEPRI / KEPCO / Kochang	3 22.9kV / 1.2kA / 100m	住友電工 / 住友電圧	運用中	Bi2223 / CD / 3心一括
7	アメリカ	Super Power / Niagara-Mohawk / Albany	3 34.5kV / 0.8kA / 350m	住友・SuperPower / 住友	Bi系運用済 Y系設置中	Bi2223-YBCO / CD / 3心一括
8	アメリカ	AMSC / Long Island電力局 / Long Island	3 138kV / 2.4kA / 660m	AMSC / Nexans	2007未運用 開始予定 次期	Bi2223 / CD / 単心 YBCO / CD / 単心 (Bi2223の 置き換え)
9	アメリカ	Ultera / アメリカ電力社 / Columbus	3 13.5kV / 3kA / 200m	AMSC / Ultera	運用中	Bi2223 / CD / 3相同軸
10	アメリカ	South wire / Entergy / New Orleans	3 13kV / 60MVA / 1.1マイル	未 / NKT	次期	Bi2223 / CD / 3相同軸
11	アメリカ	Dep of Homeland Security / Con Edison / Manhattan	3 13kV / 4kA	AMSC / 未	次期	Bi2223 / CD / 3相同軸

海外における HTS ケーブルの開発は、米国、中国、韓国で盛んです。特に米国での開発努力は注目すべきものがあり、現在、3件のプロジェクトが進行中です。アルバニーのプロジェクトでは全長350mのうち320mはBi系銀シース線材を用い30mはY系線材を用いています。すでにBi系ケーブルの部分は7000時間の通電試験が行われ、現在、Y系ケーブル部分の接続が終わり、近

いうちに全長での試験が実施される予定です。ロングアイランドのプロジェクトでは単心ケーブルを3本並べるもので、定格電圧が138 kV と他のケーブルのほぼ倍以上と高く、送電容量も560 MVA と他のものより格段に大きいです。コロンバスのプロジェクトは3相導体を同軸状に配置した独特のケーブル構造をしており、3 kA と大きな電流値が特長です。これらのプロジェクトではいずれも実際に電力システムに連系して試験が行われているか、もしくはその予定です。中国のプロジェクトでもケーブルを実システムにつなぎ試験をしていますし、日本でも現行のプロジェクトで開発されるケーブルは実システムに導入して試験が行われる予定です。このように超電導ケーブルは実用化に向かって着実に開発が進められています。

叔父：ということはまだ設備とし実用に供されている HTS ケーブルはないということだな。それからヨーロッパはどうなっているのかね？

甥：まずヨーロッパの状況に関してですが、一時世界をリードするくらい HTS ケーブルの開発に熱心でしたが、その後は低調になりました。しかし最近、日米の成功例に刺激され、また復活する兆しがあります。

確かに、まだ実用の設備として HTS ケーブルが導入されているところはどこにもありません。ご承知のように、電力システムは社会生活の重要なインフラで、電力の供給に支障があれば大きな社会的な影響があります。したがって、電力システムに新開発の機器を導入するにあたっては、一般的に言えることですが、機器の信頼性、運用性などを慎重に評価する必要があり、ステップバイステップの開発が必要です。アメリカの次期プロジェクトでは開発されたケーブルは実用設備として組み込まれる予定となっています。その意味で現在は実用化一歩手前ということです。

数年後には HTS ケーブルの実用化が始まると期待されています。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 【隔月連載記事】

### やさしい超電導電力機器のおはなし (その3)

横浜国立大学  
大学院工学研究院  
名誉教授 塚本修巳

某日某所で、大手商社の経営に携わっている役員の叔父さんと、メーカーの研究所で高温超電導機器開発に携わっている甥との間で超電導応用のことが話題になりました。その続きで超電導電限流器が今回のテーマです。

#### 3.1 はじめに

**甥：**今回は超電導限流器の話です。限流器の説明となるとかなり技術的な話をしなければならないので少し我慢をして聞いてもらうことになるかもしれません。

**叔父：**そもそもゲンリユウキとは何だね？

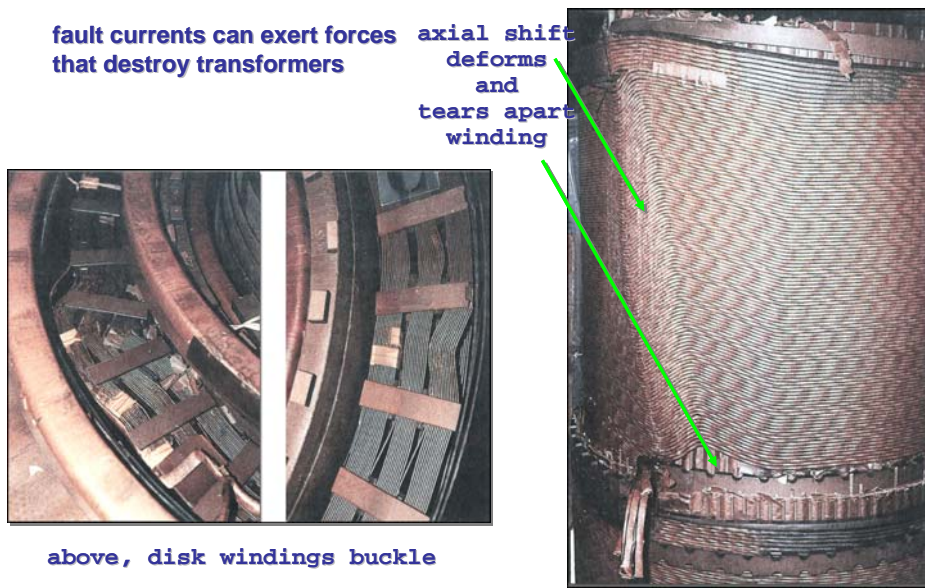
**甥：**限流器の説明をするにはまず電気系統の短絡（ショート）事故の話をしてしましよう。今はあまりなくなりましたが、昔はコンセント等の電線がショートして火花が散り、電線が焼けたり溶けたり、家の中の分電盤にあるヒューズが飛んでしまうこともありましたね。最近ではブレーカーがしっかりしており、大きな電流が流れるとすぐブレーカーが動作し電流を遮断して、ヒューズが飛ぶことはめったにありません。しかし、もし、ブレーカーが壊れ、また、ヒューズに銅線をつないであったとしたらどうでしょう。

**叔父：**ヒューズがよく飛んでしまうことがあっても絶対に銅線にしないようにという注意は承知している。そんなことをしたら屋内の配線に大きな電流が流れ火事になってしまう。

**甥：**電力系統で短絡事故が起きたらどうでしょう。もちろん、大きなブレーカーがあり（電力用では遮断器と言います）電流を遮断します。短絡事故が起きると定格電流（常時流れる電流の許容値）より1桁大きい電流が流れます。もし、この短絡電流が大きすぎて遮断器の遮断電流容量を超えると、電流が遮断出来ず大電流が流れ続け、送電線のみならず、送電線につながっている多くの変圧器などの電力設備機器が破損し大きな損害が発生します。したがって、今の電力系統はすべての場所で短絡電流が遮断器の容量を上回らないようにしっかり計算して構成されています。短絡電流の大きさは、短絡事故がどこで起きるかによって異なります。すなわち、短絡が起きるのが基幹電力系統である上位系統か、その下につながる中位系統か、さらにその下につながる配電系統のような下位系統であるかによって異なります。遮断容量が大きい遮断器はコストが高いため、それぞれの系統のレベルに応じて適切な容量の遮断器が用いられています。電力の供給信頼度を高くするためには、多くの系統をつなぎ系統の容量を大きくし、ある系統で故障があってもただちに他の系統から電気が供給できるようにすればよいのです。しかし、多くの系統をつなぐと短絡電流も大きくなるので、遮断器の容量を超えないように系統容量の大きさを制限しなければなりません。電力系統設計技術者は、複雑大規模な電力系統のどのような場所でも、短絡事故が起きたら確実に電流が遮断できるようにしなければならず、他の種々の制約をも考慮して、コストの最適化を図りつつ信頼性の高い系統を構成する必要があります。ここに彼らの腕の見せ所があるのです。

**叔父：**と言っても、要は遮断器の容量の大きいものをどんどん開発して、系統に入れていけばいいのではないかね。

甥：それは一部正しいです。遮断器の大容量化の開発は行われており、日本の技術は世界に冠たるものがあります。大容量遮断器では、電流があるレベルを超えたことを検出することにより短絡事故が起きたことを検出し、それから電流接点を開く機構が動作しだします。それと同時に、開き始めた接点の間にアークが飛びますが、高圧に圧縮した遮断絶縁性能のよいガスをアークに吹きつけて、これを吹き飛ばし電流を遮断します。アークが生じている限り接点がいくら開いていても電流は切れません。このように遮断動作は能動的なもので、これら動作の一部でも故障があれば電流は遮断できないことになります。遮断の失敗は許されないのです、特に高い信頼性が必要な大容量遮断器はさまざまな信頼性検証しなければならず、どんどん開発というわけにはいきません。また、短絡が起きたら上記の一連の動作が必要で、瞬時に電流を遮断することはできません。したがって、電流が遮断されるまでは、一般に交流の数サイクル程度（0.1秒程度）の短い間ですが大きな短絡電流が流れてしまいます。大きな電流が機器に流れると大きな電磁力が働き、焼損は起きないほど短い時間でも、機器は機械的に破損する可能性があります。図1は短絡事故に伴い設計値を超えた過電流で変圧器の巻線が電磁力で破壊された例です。電力系統ではどの電圧レベルの系統でも遮断器につながる変圧器などの機器は設置点における短絡電流による電磁力には耐えるようになっています。従って、遮断器の性能のみを上げておだめで、つながっているすべての機器も耐短絡電流容量の大きいものに代えなければなりません。このため、まったく新しく系統を構成するなら別ですが、膨大な投資がなされている既存の系統の短絡容量を、単に遮断器の容量を増すだけで増すことはなかなか難しいです。



Giorgio Bertagnolli, "Short-Circuit Duty of Power Transformers, The ABB Approach",  
ABB Transformatore-Legnano (Milano)-Italy

図1 過大な電流で損傷を受けた変圧器の巻線

近年、太陽光、風力などの自然エネルギー発電や発電事業の自由化などにより既存の電力系統に電源を新たに導入する機会が多くなってきています。しかし、新たな電源の導入は短絡電流の増大を引き起こし、導入が制約されることが多くなってきています。

叔父：そういえば、知り合いの会社が発電事業参入を目指し、発電機を系統につなぐべく電力会社に相談に行ったところ、いろいろ制約を付けられ計画を大幅に変えざるを得なくなったと、その会社の者が怒っていたよ。

甥：いま、もし、短絡事故が起き短絡電流がある閾値を超えたら即座に確実に電流を制限する装置

(限流器といいます) ができたら、上述の短絡電流の制約が大きく緩和され電力系統の構成の自由度が大きくなります。より電力供給の信頼性が向上し、より多くの自然エネルギー発電の導入、さらにより自由な発電事業者の参入が可能になります。したがって、優れた性能・信頼性の限流器が開発されれば、電力の安定供給、供給信頼度の向上、CO<sub>2</sub>の削減等により、電力エネルギーシステムの抱える課題の解決に大いに貢献すると考えられます。

このような限流器が超電導技術を応用することで実現できるのです。そのため、超電導限流器に対する強いニーズがあり、現在、世界の多くの国で開発が行われています。

### 3.2 限流器の動作原理

**甥：**超電導限流器に関しては従来多くの種類のものが考えられ、開発が行われて来ています。ここでは、現在世界で開発の主流になっている2種類、抵抗型(超電導・常電導転移型)限流器、および鉄心飽和型限流器を紹介します。説明には少し電気工学の知識が必要となりますが勘弁してください。

#### a. 抵抗型限流器

これは超電導・常電導転移型とも呼ばれています。超電導体は、超電導状態のときは抵抗がゼロで電圧の発生がなくそのまま電流が流れますが、電流が臨界電流値を超えるとただちに常電導転移を起こし抵抗が発生する性質があり、これを利用したものです。図2は抵抗型限流器の基本的な原理図を示したもので、超電導体で構成された超電導限流器素子とバイパスのインピーダンス素子(交流を流したときに電圧降下を起こす素子で、コイルや抵抗等の素子)から構成されています。正常運転時には負荷電流は超電導状態にある超電導限流素子に電圧降下無しでそのまま流れ、バイパスインピーダンスには電流は流れません。短絡事故が起きて限流素子の臨界電流値を超える大きな負荷電流が流れると、常電導転移を起こし超電導限流素子には電流が流れにくくなり、バイパスインピーダンスに電流が移ります。バイパスインピーダンスに電流が流れれば電圧降下により負荷電流の大きさを制限し続けます。バイパスインピーダンスは無くてもよいのですが、超電導限流素子に常電導転移後も電流が流れ続けると、発熱により温度が上がり過ぎ素子が破損する恐れがあるので、これを防ぐために用いられます。

抵抗型超電導限流器では限流開始値は超電導限流素子の臨界電流値で決まり、制御を必要とせずに瞬時に自動的に限流を行うことができます。しかも、正常時にはほとんど損失がないという特長を持っています。超電導限流器素子の構造は簡単で、高温超電導線巻いたもの、高温超電導のロッドなどが用いられます。最近は薄膜線材技術が進歩しYBCO線を用いた前者のほうが限流性能、低コスト性に優れており、これからの開発の主流となると考えられます。ただし、高い電圧に耐えるためには、線材を長くせねばならず、また、線材を長さ方向に均一に常電導転移させる必要であるなどの課題があります。このため、導入されるのは数万V以下の配電系レベルの系統と考えられています。

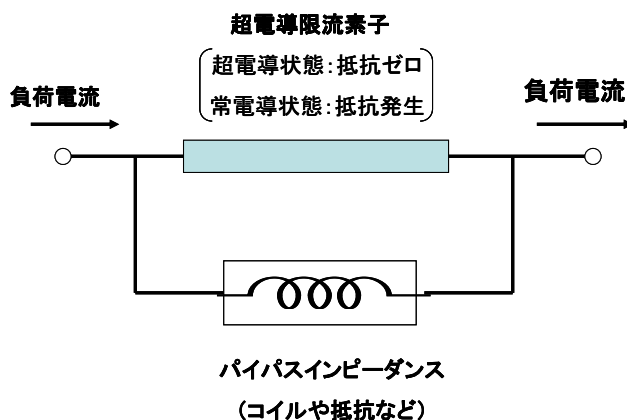


図2 抵抗型超電導限流器の原理図

b. 鉄心飽和型限流器

鉄心飽和型限流器は抵抗型限流器に比べると重く、大きいのですが、高耐電圧性が優れ、限流電流値を調整できるなどの特長があるため開発が進められています。

鉄心飽和型限流器の原理を図3に示します。まず、鉄心の働きを説明しましょう。鉄心にコイルを巻いてコイルに電流を流すと鉄心の中に磁束ができます。鉄心にできる磁束の量はコイルのターン数と電流の積（アンペアターンと言います）にほぼ比例します。鉄心がない空心コイルでもアンペアターンに比例した磁束が生じますが、鉄心がある場合の方が同じアンペアターンでも磁束のできる量が数千倍多いです。ただし、鉄心コイルではアンペアターンが大きくなりすぎると飽和現象が起きて、飽和すると、アンペアターンの増加分に対して磁束の増加分は大きく減り、空心コイルとほとんど変わらなくなります。鉄心であれ空心であれコイルにできる磁束の変化速度に比例して逆起電圧が発生します。鉄心コイルに交流を流した場合、鉄心が飽和していないときには大きく磁束が変化し大きな逆起電圧が生じ電流の流れが阻害されます。しかし、鉄心が何らかの理由により飽和しているときは、コイルの逆起電圧が小さく電流はよく流れます。

図3に示してある左右の2つの鉄心に共通して巻いてある超電導コイルに直流バイアス電流を流し、鉄心を十分飽和させておきます。図の左右の鉄心にはそれぞれ銅コイルが巻かれており、巻く向きは互いに逆になっています。この2つの銅コイルを直列につなぎ、交流の負荷電流を流します。鉄心に加わるアンペアターンは、鉄心に巻かれている銅コイルと超電導コイルの巻き方向が同じ場合は両コイルのアンペアターンの和になり、逆の場合はその差になります。正常状態では、超電導コイルのアンペアターンに対して銅コイルのアンペアターンが十分小さくなるようにしておきます。このため、正常状態では鉄心が飽和状態になっているので、少ない電圧降下で交流負荷電流は流れます。しかし、短絡事故が起こり大きな交流負荷電流が流れると、交流電流の向きにより図3のどちらかの鉄心は、そこに巻かれている銅コイルのアンペアターンが超電導コイルのアンペアターンを減ずる方向になります。その鉄心が短絡電流で飽和状態でなくなるように直流バイアス電流を調整しておきます。すると、この鉄心の銅コイルには電流が流れにくくなります。負荷電流の向きが変わると他の方の鉄心が飽和状態でなくなり、やはり電流が流れにくくなります。したがって、負荷電流がある閾値を超えて大きくなると直列につながれたどちらかの銅コイルに電流が流れにくくなるので、負荷電流はその向きにかかわらず限流されることとなります。この方式の限流器も抵抗型と同じように負荷電流がある閾値を超えると自律的かつ瞬時に限流動作に入ります。この方式では直流バイアス電流の大きさを定めることによりある程度限流電流値を変える事ができます。また、抵抗型のものに比べ、正常時の損失特性は劣りますが、高耐電圧化への適応性が優れています。この方式で直流バイアス用のコイルに超電導が用いられているのは、限流器の動作中はバイアス電流を流し続ける必要があるため、そのための損失を減すためです。バイアスコイルも銅コイルしたのでは効率が悪く実用的ではありません。

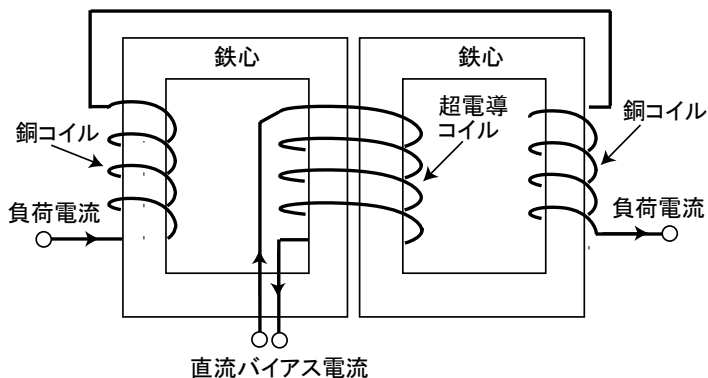


図3 鉄心飽和型超電導限流器の原理図

対して銅コイルのアンペアターンが十分小さくなるようにしておきます。このため、正常状態では鉄心が飽和状態になっているので、少ない電圧降下で交流負荷電流は流れます。しかし、短絡事故が起こり大きな交流負荷電流が流れると、交流電流の向きにより図3のどちらかの鉄心は、そこに巻かれている銅コイルのアンペアターンが超電導コイルのアンペアターンを減ずる方向になります。その鉄心が短絡電流で飽和状態でなくなるように直流バイアス電流を調整しておきます。すると、この鉄心の銅コイルには電流が流れにくくなります。負荷電流の向きが変わると他の方の鉄心が飽和状態でなくなり、やはり電流が流れにくくなります。したがって、負荷電流がある閾値を超えて大きくなると直列につながれたどちらかの銅コイルに電流が流れにくくなるので、負荷電流はその向きにかかわらず限流されることとなります。この方式の限流器も抵抗型と同じように負荷電流がある閾値を超えると自律的かつ瞬時に限流動作に入ります。この方式では直流バイアス電流の大きさを定めることによりある程度限流電流値を変える事ができます。また、抵抗型のものに比べ、正常時の損失特性は劣りますが、高耐電圧化への適応性が優れています。この方式で直流バイアス用のコイルに超電導が用いられているのは、限流器の動作中はバイアス電流を流し続ける必要があるため、そのための損失を減すためです。バイアスコイルも銅コイルしたのでは効率が悪く実用的ではありません。

叔父：鉄心に巻いた負荷電流用の銅コイルもいっそのこと超電導にしたらもっと損失が減るのではないかね。

甥：いい質問ですね。超電導は交流で使うと、前にも言ったと思いますが交流損失が発生します。

交流損失の低減の方法については現在鋭意研究がされていますので、将来少ない交流損失の超電導コイルが開発されたら叔父さんの言うようになると思います。

### 3.3 海外の開発状況

甥：海外の開発状況のお話をざっとしておきましょう。表1は海外の超電導限流器の研究開発状況を示したものです。開発されている機器規模いろいろありますが、多くの国で開発研究が進められているのがわかります。

表1 世界の主な限流器開発プロジェクト (2007年末現在)

国名	プロジェクト名/実施者/電力会社比	定格or動作電圧/電流	開発状況	形式	仕様材料
1 日本	Super Ace/三菱・東芝/電中研	3Φ 6.6kV / 1kA	2005年終了	抵抗型	YBCO薄膜
2 日本	Super Ace/東芝/	3Φ 6.6kV / 750A	2005年終了	整流型	Bi2223線材
3 日本	応用基盤/東芝/	1Φ 476Ap (短絡電流 1338Ap)	2008年3月終了 (コイルのみ)	抵抗型	YBCO線材/4コイル
4 中国	InnoPower/雲南電力	3Φ 35kV / 1.2kA	2007年運用開始予定	鉄心飽和型	Bi2223線材
5 韓国	/KEPRI/KEPCO	3Φ 22.9kV / 630A	性能試験実施	ハイブリッド型	YBCO薄膜
6 韓国	KEPRI/HYUNDAI/KEPCO	1Φ 14kV / 3kA	コイルテスト済み	抵抗型	YBCO線材
7 米国	DOE/SuperPower/アメリカン電力 Sumitomo Nissan	3Φ 138kV / 1.2kA	従来のDOE プロジェクトの延長	抵抗型	Bi2212バルク マトリクス型
8 米国	DOE/Trithor/南カルフォルニアエジソン Delta Star	3Φ 138kV 級	プロジェクト発足	鉄心飽和型	YBCO線材
9 米国/ドイツ	DOE/AMSC/南カルフォルニアエジソン Siemens Nexans	3Φ 115kV / 1.2kA	プロジェクト発足	抵抗型	YBCO線材
10 ドイツ	CURL10/ACCEL/RWE Nexans	3Φ 10kV / 10MVA	フィールドテスト終了 現エレメント評価	抵抗型	Bi2212バルク
11 イギリス	DTI/ロールスロイス/スコティッシュ電力	125A	デモ器開発	抵抗型	MgB <sub>2</sub> /25K
12 イタリア	CESI	9.5kV / 5MVA (目標)	150-200Aデモ器開発	抵抗型	MgB <sub>2</sub> /27K
13 イタリア	CESI	3.2kV / 1.2MVA	プロトタイプ試験済	-	Bi2223

図4は日本のNEDO/ISTEC/東芝のプロジェクトで開発された抵抗型限流器で、YBCO 導体を用いた限流素子コイルと低温容器に組み込まれた装置の写真です。この限流器は、短絡事故電流が何もしない時には1560 Aであるところを840 Aに限流することが実際の試験により確かめられています。この他、抵抗型限流器の研究開発は多くの国で行われています。米国では実系統導入を目指した本格的な装置が、イタリア、英国では限流素子に低コストのMgB<sub>2</sub>線を用いたものの研究が行われています。また、韓国では従来型の高速度遮断器と組み合わせ、限流素子の負担を軽くし実用性を高めた装置の開発が行われています。図5は中国で開発された鉄心飽和型限流器の写真です。すでに製作は終わり、変電所に設置し実際の電力システムに導入して試験を行っているところです。この他、米国では抵抗型より高い電圧レベルの系統への導入を目指した装置の開発が行われており、イスラエルでは構造に工夫を凝らし、軽量小型化を行い、鉄心飽和型の欠点の克服を目指した装置の開発が行われています。



組み立て終了後の三相限流コイル



冷却容器へ組み込み  
(約70K, 1気圧)

図4 日本で開発された抵抗型限流器 (写真 ISTEK/東芝提供)



図5 中国で開発された鉄心飽和型限流器 (InnoPower 社製 写真: 清华大学: 韓教授提供)



### 3.4 まとめ

叔父：限流器のことなど何も知らなかったが少しその必要性がわかったような気がする。電力システムのことが通り一遍わかっただけでは限流器の重要性はわからないね。

甥：超電導限流器は今までにない機能を持つ装置であり、今のところ電力系統に導入してその機能を使いこなすというところまでは来ていません。したがって、高性能、高信頼性、そして低コストの限流器の開発とともにその利用技術の研究も重要と思います。超電導限流器は単に短絡電流を抑制し機器の損傷を防ぐという役割だけでなく、電力システムの構成の自由度を増し、より合理的なシステムの構成を可能とするという役割も大きいです。また、超電導ケーブルや超電導変圧器など、短絡電流対策のために設計上の制約を受けて、超電導の特長を活かしきれない場合が多々あります。その場合には限流器との組み合わせにより、短絡電流対策の負担を軽くし、より合理的な機器の構成が可能になると考えられます。このように超電導限流器開発はいろいろな面から重要です。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 【隔月連載記事】

### やさしい超電導電力機器のおはなし (その4)

横浜国立大学  
大学院工学研究院  
名誉教授 塚本修巳

某日某所で、大手商社の経営に携わっている役員の叔父さんと、メーカーの研究所で高温超電導機器開発に携わっている甥との間で超電導応用のことが話題になりました。その続きで、超電導電力エネルギー貯蔵が今回のテーマです。

#### 4.1 はじめに

甥：今回は超電導を使った電力エネルギー貯蔵の話をしてしましよう。

叔父：電気を貯めるならいろいろ方法があるだろう。まず電池、ハイブリッド車や、近いうちに市販されるといわれている電気自動車には相当の容量の電池が積まれている。最近では電池のいいものができるから、電池を大規模に使えばかなりの量の電力が貯蔵できるのではないかね。深夜電力を使いヒートポンプで温水を貯めるエコキュート、また、深夜電力を使って冷凍機を運転し、冷水または水をシャーベット状にして冷熱を貯めておいて昼間の空調に使うという方法がある。これなどは、電気の最終利用形態に注目して間接的に電気を貯めるという発想だよね。つまり、電気を貯めるのにわざわざ超電導を持ち出さなくていいのではないか。

甥：なるほど。ところで、どうしてエコキュートなど知っているのですか？

叔父：最近ではビルの CO<sub>2</sub> 排出の削減、さらに空調経費の節減など弊社でもやかましく言っており、そのために、いろいろ調べさせているからだよ。

甥：確かに、給湯や冷熱利用を考えた場合は電気を貯めて使うよりは最終利用形態で貯めたほうが効率はいいです。しかし、電気はいろいろな効用があり、やはり電気として貯める必要は大きいです。電気を貯めるといってもいろいろな状況があって、貯める電気の量が小規模の場合、電池は適しています。最近では優れた性能を持つ充電可能な電池（2次電池）が開発されてきており、その適用できる範囲も広がってきています。しかし、電池は電気エネルギーを化学エネルギーに変換して貯めるもので、一般に、電池は放電のときは問題がないのですが、急速な充電には問題があります。また、充電の管理をきちんとなしないと電池の寿命が損なわれます。さらに、充放電回数が多くなると電池の寿命がなくなり、その場合、電池を廃棄せねばならず廃棄物処理の問題が出てきます。一方、大規模の電力を貯める方法として揚水発電所があります。揚水発電というのは山の上と麓に貯水池を作っておいて、夜に水力発電機をポンプとして運転し、麓の貯水池から山の上の貯水池に水を汲み上げておき、昼間の電気が必要なときに上の貯水池の水を下に流し発電するものです。わが国においては大規模電力貯蔵としてはこの揚水発電しかありません。しかし、揚水発電は効率があまり良くなく、揚水に要した電力の高々70%程度しか発電出力になりません。

叔父：それでは発電というより、電力消費ではないかね。

甥：そうなのです。しかし、他に大規模の電力を貯める方法がないからしょうがないのです。近年もっと効率のよい方法がいろいろと提案されています。これから説明する超電導マグネットを応用した超電導磁気エネルギー貯蔵装置（SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage）もその1つですが、揚水発電の代替になるほどの大きな電力エネルギーを蓄えるものが開発されるのはかなり先です。

現在、実用化されているか、実用化に近い中小規模の主な電力貯蔵装置について、その運用特性を表1に示してあります。参考のため揚水発電の運用特性も示してあります。なお、この表にある数値は目安で、また、2次電池の運用特性は電池の種類により異なってきますので、代表的なものについてのみ示してあります。2次電池方式のほか、キャパシタ方式は、コンデンサー方式とも言いますが、近年非常に大きな貯蔵能力をもつ電気2重層キャパシタが開発され、それを応用した電力貯蔵技術が急速に進んできています。また、SMESや超電導を応用した非接触磁気ベアリングを用いたフライホイール方式のような、超電導技術を応用した貯蔵装置にもかなりの期待が寄せられています。これら2次電池方式以外の方式は、一般に、2次電池方式に比べて充放電サイクル寿命が長く、また、電力貯蔵効率(入れた電力量に対する取り出せる電力量の比)も優れています。キャパシタ方式とSMESおよびフライホイール方式は応用分野でかなり競合すると考えられます。しかし、SMESは一度に大きな電流を流すことができますし、フライホイール型は非接触磁気ベアリングを用いれば、少ない損失でフライホイールを高速回転できますので、蓄積エネルギー密度が大きくなるという利点があります。従って、それぞれの利点を生かせる分野での応用が期待されています。

表1 主な電力貯蔵技術の比較 (数値は目安)

方式	2次電池	キャパシタ	SMES	フライホイール	揚水発電
規模(MWh)	~5	~5	~5	~5	100~10,000
貯蔵時のエネルギー形態	化学エネルギー	電界エネルギー	磁気エネルギー	運動エネルギー	位置エネルギー
エネルギー密度 (kWh/m <sup>3</sup> )	40~400程度	10程度	3程度	約200 (超電導軸軸受け使用)	~3
貯蔵効率	65~80%	85%~	90%~	80%~	70%
最大貯蔵時間	分~日単位	日	日	分・時単位	日・週単位
起動・停止時間	瞬時	瞬時	瞬時	瞬時	数分
信頼性(運転実績)	実績あり	一部実績あり	一部実績あり	一部で実績あり	多くの実績あり
寿命(充放電サイクル数または年)	~3000 (電池種類による, リチウムイオン, NAS電池など)	>100,000 (期待値)	>100,000 (期待値)	20年程度	40年以上

それでは、超電導技術を応用した電力貯蔵装置についてももう少し詳しく説明しましょう。

## 4.2 SMES

**甥：**コイルに電流を流せば磁界が発生し、磁界が発生した空間に磁気エネルギーが蓄えられます。コイルの形状と線の巻き数で決まるインダクタンスという値を  $L$  として、コイルに流す電流を  $I$  とすればコイルに蓄えられる磁気エネルギーの大きさは  $0.5 \cdot LI^2$  で与えられ、 $L$  が大きいほど、 $I$  が大きい

ほどその 2 乗に比例して蓄積エネルギーは大きくなります。L の値はコイルの大きさが大きいほど、線の巻き数が多いほど大きくなります。すなわち、コイルの作る磁界の大きさは電流の大きさと線の巻き数に比例するので、磁界が大きいほどその 2 乗に比例し、コイルの作る磁界空間が大きいほどそれに比例して蓄積エネルギーが大きくなります。コイルを超電導線で作って、電流を流しておいてコイルを超電導的に短絡すれば電気が流れ続け電気エネルギーが蓄えられるのです。銅線でできたコイルでも磁気エネルギーは貯められるのですが、銅線の抵抗によるジュール発熱が大きすぎ、蓄えられたエネルギーは数秒で熱エネルギーとしてなくなってしまいます。ですから、ジュール熱を発生しない超電導線を用いなければ意味がないのです。

昔、アメリカで揚水発電の代替として SMES が提案されていたときは後樂園球場くらいの大きさのコイルが想定されていました。コイルに電流を流すと磁界と電流の相互作用で線に電磁力が加わりますが、大規模の SMES ではこの電磁力が非常に大きくなります。1 テスラ (テスラは磁界の強さの単位で、1 テスラは地磁気の約 1 万倍) あたりほぼ 4 気圧 (1 cm<sup>2</sup> あたり 4 kg の大きさの力) の電磁力が働きます。電磁力は磁界の強さの 2 乗に比例するので 5 テスラの磁界を発生する SMES は 100 気圧の圧力容器に相当すると考えられます。従って、SMES は、この莫大な電磁力に耐えるための機械的補強材料の選定やコイル設計が重要です。後樂園規模のコイルでは機械的補強が大変で、岩盤に穴を掘りそこに SMES コイルをいれ電磁力を岩盤で補強するというものでした。しかし、このような揚水発電所代替規模の SMES は、蓄積エネルギー効率がかなりよくなるとしても、日本では適当な岩盤が存在する場所が限られ、さらに、開発に巨額な資金が必要であることから、具体的な開発については、今は先送りになっています。その一方、SMES に蓄えてある磁気エネルギーは電気エネルギーと同質であるので、瞬時に電力の出し入れが可能であるという特長が着目され、より規模の小さい SMES の応用分野が開けてきました。

叔父：ところで、SMES の電流は直流的であるのに通常の電力として使うのは交流で、しかも SMES に蓄えられているエネルギーの大きさが変われば電流の大きさも変わる。エネルギーの蓄積量によって、電流が変わったり、電圧が変わったりするのでは役に立たないのではないか。

甥：いい質問ですね。図 1 は SMES システムの構成図が示してあります。超電導コイルは超電導状態を保つために低温容器に入れてあります。電力系統と超電導コイルの間には交流直流変換器があり、コイルに流れる直流と電力系統の 3 相交流の変換をするとともに、交流側の電圧、電流の大きさの制御を行っています。SMES システムではこのような交流直流の変換を行い電力系統と連系させる機能は重要で、この部分のスペースはコイルより大きな部分を占めており、コスト的にも冷凍機を含むコイルシステムと同等のレベルになっています。

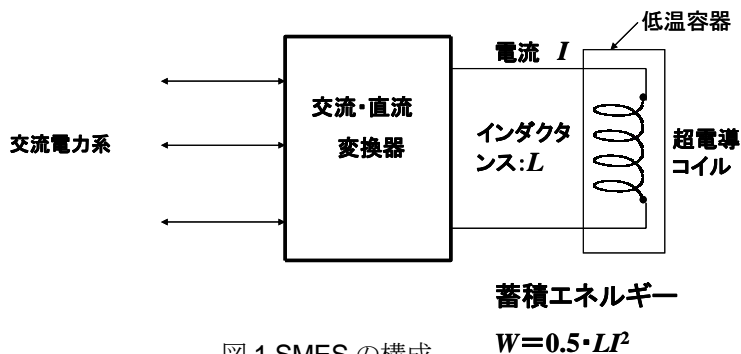


図 1 SMES の構成

図 2 は、3 つの目的機能の異なる中小規模の SMES の導入形態を示したものです。まず、発電所のそばにある系統安定化用 SMES は、SMES により動揺に応じて電力の出し入れを行い系統を安定化させることができます。また、電力系統の上位にある周波数安定化用 SMES は、系統の周波数が

動揺したとき、電力の出し入れを制御して周波数動揺を抑制します。さらに、負荷側にある負荷変動補償用 SMES は、工場内や鉄道での大きな負荷変動を吸収して、電力系統の動揺を抑制するためのものです。

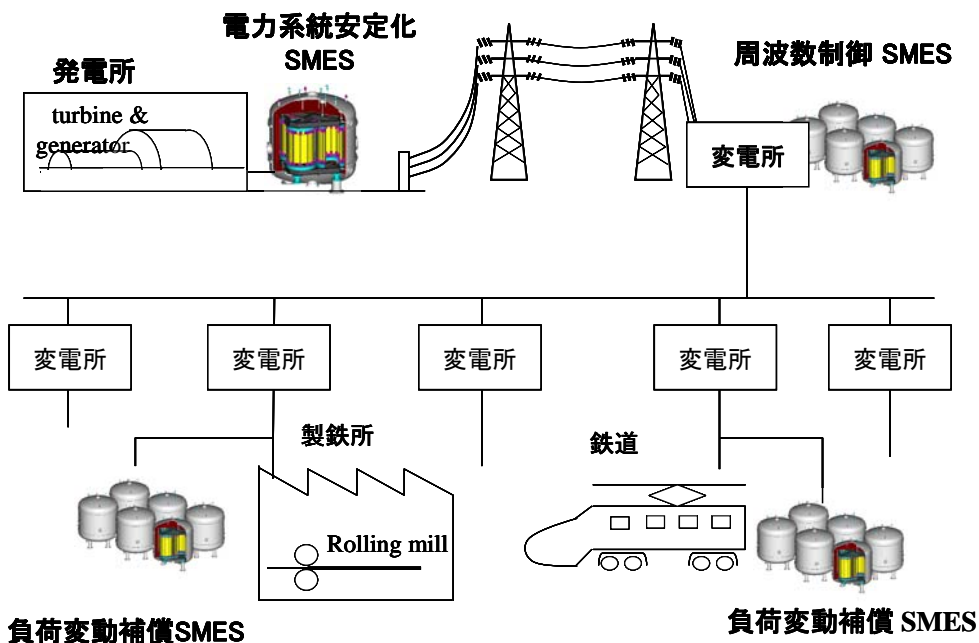


図 2 SMES の導入形態 (中部電力提供)

SMES の開発の現状ですが、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプロジェクトでは SMES を銅製品工場に設置し、工場内の大きな負荷変動を吸収し、系統側の電力変動を抑制するプロジェクトが行われ、その有用性が検証されました。この他に、電圧変動に敏感な工程を持つ工場、たとえばテレビ用の液晶パネルや半導体工場などでは、系統側の落雷などによる瞬時的な電圧低下に対しても製造ラインが停止して大きな損害が発生するので、系統の瞬時的な電圧低下を補償するためにも SMES (これを瞬低用 SMES と呼ぶ) が利用されています。図 3 は NbTi 線を用いた液体ヘリウム冷却 SMES をテレビ用の液晶パネル工場に導入した例を示したものです。すでに落雷による系統側の瞬時電圧低下を補償し、工程の停止を防いだ実績があります。このような半導体工場、液晶パネル工場ではわずかに数サイクルの電圧低下でも工程は停止して、数億円の被害が出る可能性もあり、従って、数回の瞬時電圧低下

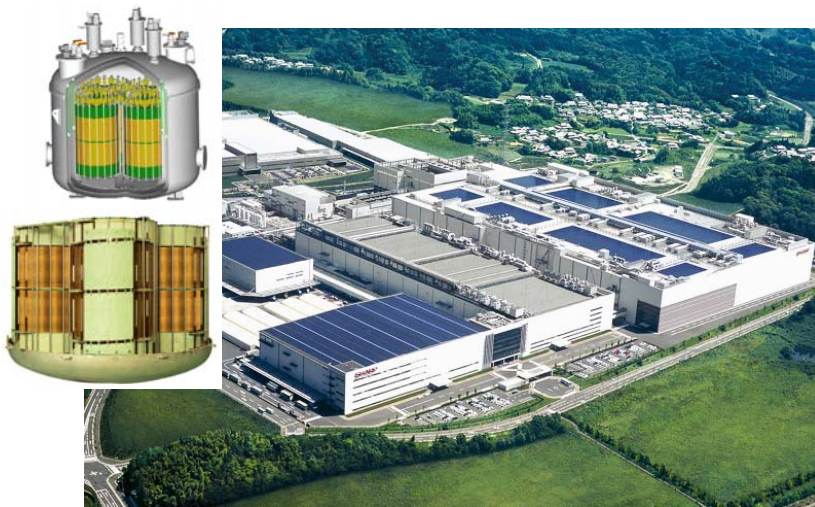


図 3 カラー液晶パネル工場に導入された SMES (シャープ亀山工場, 中部電力)

による被害を防ぐことができれば、十分 SMES 導入費を正当化することができます。また、アメリカではトレーラに小規模の SMES システムを積み込んだ装置も市場に出ています。

以上のような実フィールドで用いられている SMES は皆 NbTi 低温超電導線が用いられており液体ヘリウムにより冷却されています。しかし実際に運用してみると、ヘリウム液化機の運転が大きな負担となっており、本格的な実用化には高温超電導線を用いた SMES の開発に期待が寄せられています。高温超電導を用いることにより、SMES コイルの運転温度を高くできるので冷凍機の負担を軽減し、さらに NbTi 線より高い磁界が発生できるため、同じ蓄積エネルギーでもコイルを大幅に小さくできるなどの大きなメリットがあります。このため、NEDO のプロジェクトとして Y 系線材を用いた SMES の開発プロジェクトが始まっています。このプロジェクトによって本格的な SMES の実用化への道が開かれるものと期待されています。

#### 4.3 フライホイールエネルギー貯蔵装置

**甥：**フライホイールエネルギー貯蔵装置は、フライホイール（はずみ車）に電動発電機（電力を加えればモータとして動作し、回転力を加えれば発電する回転機）をつなぎ、電力を貯めるときはモータ動作でフライホイールの回転速度を増やし、電力を必要とするときはフライホイールの勢いで発電させる装置です。すなわち電力を機械エネルギーとして貯蔵するものです。貯蔵効率を高くするためには、フライホイールの回転エネルギーの減衰を少なくする必要があります。フライホイールと電動発電機を真空中に入れ空気抵抗を無くすとともに、回転部の軸受けの損失を極力少なくする必要があります。軸受けとして機械的な接触部分を持たないものがあれば理想的です。そこで、高温超電導体の塊（バルクといいます）と永久磁石を組み合わせる事により、非接触の軸受けを実現できるので、これを応用することが考えられました。高温超電導体が発見されたときに、盛んにデモンストレーション実験として液体窒素で冷やされたバルクの上に永久磁石が浮いている様子が示されましたし、お相撲さんが乗っても浮いているほど強力な浮上力があることが写真などで示されていました。

**叔父：**それはよく覚えている。ところで、2つの永久磁石のたとえばN極同士を向かい合わせれば反発力が働くけれどそれではだめなのかね？

**甥：**確かに永久磁石同士でも反発力は働くのですが、実際にやってみるとわかりますが、永久磁石同士では安定に浮上する状態は作れません。高温超電導バルクと永久磁石の場合ではバルクに永久磁石を押し付けていくと反発力があるのですが、押し付けた位置で永久磁石を離すと永久磁石はほぼその位置に宙に浮いたまま安定に留まり、そこからずらそうとすると元に戻るような力が働きます。このような状況は永久磁石同士ではできません。この磁気力を応用すると、磁石と回転体が接触しない非接触軸受ができます。電磁石を用いて永久磁石を内蔵した回転体が少し浮き上がった状態（浮き上がった隙間ギャップがないと回転体が電磁石に接触し、莫大な摩擦熱が発生し回転体は止まってしまいます。）が、維持できるように電磁石の電流を制御します。この方式はフライホイールなど能動制御型磁気軸受として既に実用されています。このようにフライホイール全体を浮上した状態に保つには、小型の場合は別として浮上に必要な電力が無視できないくらい大きくなります。従って、ジュール熱を発生しない超電導バルク又は超電導マグネットと永久磁石を用いた軸受けが、高速回転するフライホイール用として適していると考えられています。

図4には NEDO のプロジェクトで開発された高温超電導バルクと永久磁石で構成された軸方向の軸受けを持つフライホイールエネルギー貯蔵装置の構造が示してあります。軸の横ブレを抑えるために銅コイルと鉄心で構成された能動制御型非接触軸受を用い、炭素繊維強化プラスチックでできたフライホイールを1分間に1万数千回転で回し、10 kWh のエネルギー（1 kW の電力を1時間維持できるエネルギー）を蓄積するものです。

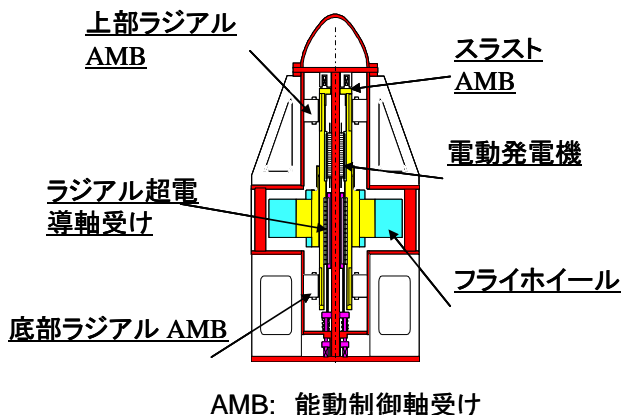


図4 超電導バルク/永久磁石軸受け型フライホイールエネルギー貯蔵装置の構造 (NEDO, ISTE, IHI)

叔父:ところでフライホイールの材料は鉛とか重い材料のほうが大きなエネルギーを貯められると思うのだが、なぜ軽い炭素繊維強化プラスチックがフライホイールに用いられるのかね？

甥:確かに回転数が同じなら重い材料のほうがフライホイールに蓄えられるエネルギーは大きくなります。回転体の蓄積エネルギーは回転数の2乗に比例し、フライホイールの材料の密度に比例します。従って、エネルギーを多く貯めるためには回転数を大きくするほうが有利です。しかし、回転数を増すと遠心力も回転数の2乗に比例して増えますので、回転数を上げると鉛では、鉄でさえもそうですが遠心力でフライホイールがすぐ壊れてしまいます。従って、これらの材料はエネルギー密度の高い高回転フライホイール用としては適しておらず、比強度(材料の密度対する強度の比)が非常に大きい炭素繊維強化プラスチックがよいのです。ただし高価になってしまいます。

フライホイールの回転数が非常に高くなると回転バランスをとるのが難しくなり安定に回転維持するのが難しくなります。そこで、回転数を低く抑えフライホイールの材料もスチール系のものにして、装置のコスト低減を図ったものがやはり NEDO のプロジェクトで最近開発されました。装置の構成図を図5に示してあります。この装置は鉄道の減速時のエネルギー回生及び産業への応用を目指したものです。この装置ではフライホイールの重量が大きくなるため、大きな浮上力が必要で、このために図5に示すような超電導のリングと鉄心で構成された超電導軸受けが用いられました。これは超電導リングの電流によって発生した磁界により、回転子と固定子の鉄心間に働くフライホイール回転軸方向の大き

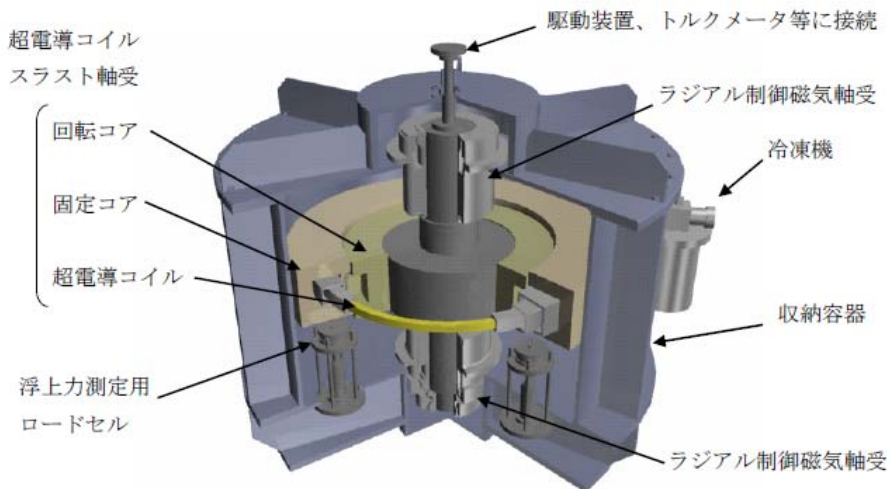


図5 低温超電導軸受けを用いたフライホイールエネルギー貯蔵装置構成図 (NEDO, JR 東海)

な吸引力を利用したものです。この軸受けだけでは安定な非接触回転はできないので、安定化のために能動制御型非接触軸受が用いられます。この装置で、重さ 25 トンのフライホイールを 1 分間に 2 千回転で回し、50 kWh の電力の貯蔵を実証しました。現在は実用化に向けて、引き続き性能評価試験が行われております。

#### 4.4 まとめ

**叔父:** 電力エネルギーの蓄積にも超電導技術が大いに役立つことがわかった。これらの開発成果を生かし早く実用的な装置が市場に出てくることを祈っている。

**甥:** わが国における超電導技術を応用した電力エネルギー蓄積装置の技術は世界的にも高く評価されており、今までの国の支援により開発された成果を踏まえ今後民間の努力により開発が進められ、早い機会に実用機が世に出てくることが望まれます。

[超電導 Web21 トップページ](#)



## 【隔月連載記事】

### やさしい超電導電力機器のおはなし(その5)

横浜国立大学  
大学院工学研究院  
名誉教授 塚本修巳

某日某所で、大手商社の経営に携わっている役員の叔父さんと、メーカーの研究所で高温超電導機器開発に携わっている甥との間で超電導応用のことが話題になりました。その続きで、超電導回転機が今回のテーマです。

#### 図の引用の間違いのお詫び

甥「前回のやさしい超電導電力機器のおはなし(その4)電力エネルギー貯蔵のところ、図の引用に誤りがありました。NEDO/JR 東海のフライホイール開発プロジェクトに関して、原稿の図5は本体の構造図ではなくモデル機のものでした。この間違いに関して関係各位にご迷惑をおかけしたことをお詫びいたします。なお、本体の構造図はNEDOのホームページに本プロジェクト(P04017 超電導電力ネットワーク制御技術開発)の報告書が載っており、そこで見るができます。」

#### 5.1 はじめに

甥：今回は超電導回転機のお話をしたいと思います。

叔父：つまり、超電導モータ、超電導発電機のことだろう。

甥：はい、モータも発電機の原理的な構造はほとんど変わらないので一般に回転機といっています。また、モータでも発電機でもない同期調相機という回転機にも超電導が応用されています。

回転機に超電導を応用する利点は、従来型の銅導体および、磁界を強めるために用いられる鉄心を用いた回転機に比べ、より強い磁界をより広い空間に作るができること、巻線(コイル)の電流密度(単位面積あたりに流せる電流値)を大幅に大きくできることです。これにより、機器の小型・軽量化、高効率化さらに電気的性能の向上が可能になります。

叔父：電気的性能といっても効率以外に何かあるのかね。

甥：回転機の電気的性能というのは少し専門的になりすぎわかりにくいと思いますが、超電導発電機を電力系統に連系することにより、電力系統の安定性を向上させることができます。また、交流回転では、騒音の低減や、電流・電圧波形がきれいな正弦波になるなど、これらも発電機の超電導化の大きなメリットと考えられています。

超電導回転機の開発の歴史は古く、実用的な低温超電導線が開発された1960年代に開発が始まりました。低温超電導では液体ヘリウム温度レベルでの冷却が必要なため、冷却にかかるコストが高く、それを上回るメリットを出す必要から大容量の電力用発電機の開発を目標として、日米欧、旧ソ連など世界各国で開発競争が1990年代まで続けられました。1986年の高温超電導の発見とその後の导体化技術の進展により、高温超電導が回転機にも適用できる見通しがついてきました。高温超電導を用いることにより、超電導巻線の冷却温度を液体ヘリウム温度より大幅に高く、場合によっては液体窒素温度レベルにまで引き上げることができるので、冷却に伴うコストを大幅に低減できます。このため、より小規模の回転機でも超電導化のメリットが活かせるようになり、超電導回転機の応用範囲が大きく広がりました。図1に示すように、超電導回転機の応用範囲は大型風力発電機のような1分間

に十数回転（15 rpm）の超低速回転から、百数十 rpm の船舶のスクリュー駆動モータ、千数百 rpm の産業用のモータ、発電機、さらにガスタービン直接駆動発電機のような一万数千回転の超高速回転まで広い範囲に及びます。低速回転に超電導機が適しているのは、超電導体を適用することによって強い磁界を作ることができるからです。高速回転にも適している理由は、鉄心を用いなくても強い磁界が得られるので、回転子を軽量小型にでき高速回転が可能となるためです。

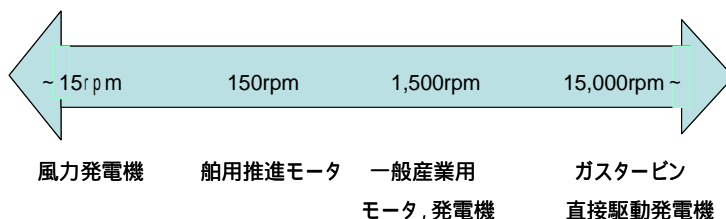


図1 高温超電導回転機の応用分野 (rpm:回転/分)

## 5.2 超電導発電機の構造

甥：超電導回転機の構造としては、超電導線による巻線を用いたものと超電導体の塊（バルク）を用いたものとに大別できます。一般には比較的大型のものには巻線型、小型のものにはバルク型が適していると考えられます。それぞれ種々の構造のものが考えられていますが、インターネットで検索すればいろいろ情報を得ることができます。ここでは最も一般的な巻線型の同期回転機の原理的な構造について、図2に基づいて説明しましょう。

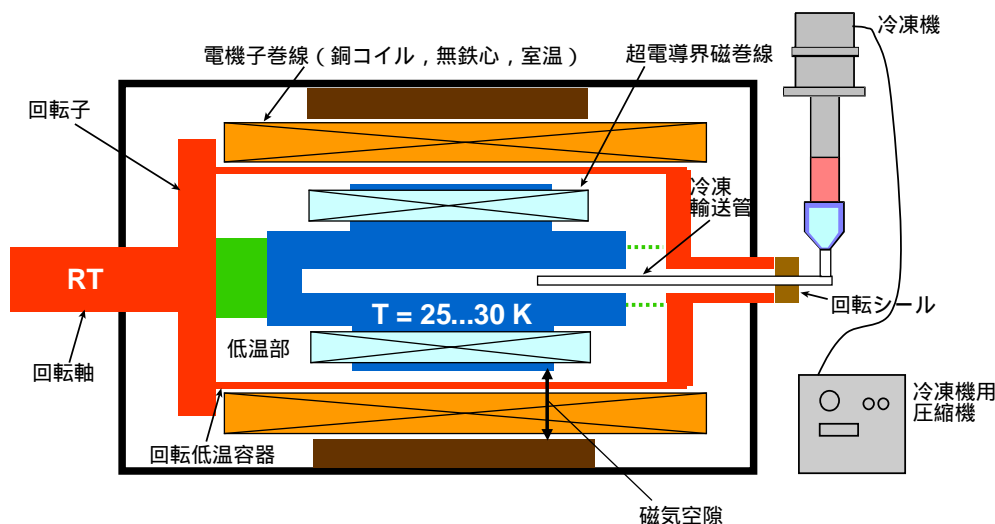


図2 高温超電導回転機の構造（シーメンス社の資料に基づき作成）

回転子は界磁巻線を超電導に保つために真空断熱を施した低温容器でできており、回転軸は室温部から低温部につながって、回転子にかかるトルクを伝えています。回転軸を伝わって熱が低温部に進入するのですが、この進入熱をできるだけ伝わらないように種々の工夫がなされています。超電導界磁巻線は回転軸に固定されており、直流電流を外部の電源から供給します。回転軸の機械的負荷が、つながっている反対側のほうから冷凍機で作られた冷媒が輸送管により低温容器内に供給されます。温まった冷媒は冷媒輸送管に併設される回収管により回収し、冷凍機により再度冷却され回転子に供給されます。回転子の外側には発電機容器に固定された電機子巻線があり、電機子巻線には回転子の回転に伴う回転磁界により交流電圧が誘起されます。この電圧に抗して電流を流し込むようにすればモ

ータとなり、負荷に電流を流すようにすれば発電機となります。電機子には交流電流が流れるので巻線は室温部に置かれた銅コイルになっています。前にお話しましたように電機子巻線も超電導にできたらいのですが、交流になると超電導線材に交流損失が発生してしまい損失が過大となります。そこで、電機子巻線は室温の銅コイルになっています。超電導機では電機子巻線および界巻線の間には鉄心をおく必要がないので、従来機に比べ軽量、小型化が可能です。

### 5.3 各種超電導回転機

甥：各種超電導回転機について説明をしましょう。

#### a. 超電導風力発電機

甥：風力発電装置は太陽光発電装置と並んで重要かつ普及が急速に進んでいる自然エネルギー利用発電装置です。風力発電先進国であるヨーロッパにおいてその大容量化の開発が進められています。現在、銅コイル・鉄心を用いた従来の風力発電発電機で最大のものは5千kWです。風力発電装置はタワーの先端にナセルと呼ばれる発電機およびその周辺装置が入った筐体が設置されており、筐体に入っている発電機に風車がつながっています。5千kW級になると回転翼の直径が120m前後、タワーの高さが100m前後です。このクラスになると、ナセルの重量が回転翼を含め300~500tとなります。図3には従来型の5千kWの風力発電装置の写真が示してありますが、このように巨大となり、5千kW級が従来型の風力発電機の限界と考えられています。一方、今後の更なる風力発電装置の普及には当たって、発電コストの低減のためますますの大容量化が必須であると考えられています。そこで、超電導化による風力発電機の軽量化・コンパクト化のメリットを活かして、1万kWを超える風力発電装置実現への期待が高まっています。

叔父：なるほど、それなら過去に日本をはじめ世界各国で開発が行われた超電導発電機の技術を使えばすぐに風力発電の超電導化は可能になるのではないかね。

甥：確かにそう考えられるのですが、過去に開発が行われた超電導発電機は原子力や火力発電用の電力用のもので、発電機の回転数は千数百~3千数百rpmと大きかったのに対して、風力発電機では、風切り騒音を抑えるため風車の翼端の速度を大きくできず、5千kW級のものでも10rpmと非常に低いです。このため、電力用の発電機に対して、風力発電発電機は出力の割には体格が非常に大きくなり、また、構造が全く異なっています。従って、新たな開発が必要です。

#### b. 超電導電気推進船

叔父：船舶用の超電導電気推進船だが、従来の船舶の低速ディーゼルエンジンは効率が50%を超えるものも有ると聞く。これにスクルーを直結する従来の方式でもかなり効率が良いのではないかな。なぜ電気推進や超電導化が必要なのかね。



図3 5千kW風力発電機（従来型直接駆動発電機方式，ENERCON社製）写真左下に止まっている大型バスと比較してその大きさがわかる。

（平成18年度NEDO報告書：「超電導技術を利用した風力用発電機の実用化可能性調査」より）

甥：確かに一定速度で巡航しているときの効率は良いかもしれませんが、従来の方式ではスクリューやエンジンの配置、船型（特に後部）に制約があり必ずしも造波抵抗、航行抵抗を最小化することができないのです。また、カーゴスペースなどのスペース効率も悪くなります。豪華客船では静粛性が重要視されディーゼルエンジンは好ましくありませんし、客室などでの使用電力が大きく、別途大きな発電装置が必要となります。また、頻りに寄航、出港を繰り返す内航船では巡航区間が短く、効率の良い運行区間があまりありませんし、操船性が劣ります。このような場合には、エンジンで発電機を回し、その電気でスクリューをモータで駆動する電気推進が適しています。発電機およびスクリュー駆動モータを超電導化すれば高効率、軽量・小型のメリットが生かれます。特に、スクリュー駆動モータは低速、大トルクであるため超電導化のメリットが大きいです。図4を見てください。これは超電導モータと従来型のモータの比較を示したのですが、超電導化による軽量・小型化のメリットがわかると思います。スクリュー駆動モータを雨滴状の容器（ポッド）に入れ、船外に設置する方式が電気推進船の方式として優れていると考えられています。このポッド方式では本体の船型の自由度が大きく造波抵抗、航行抵抗を大きく減らすことができます。また、ポッドの向きを変えることにより操船性が大幅に向上するので、内航船には特にメリットが生かせる方式です。ポッド方式ではポッドのサイズを小さくするとともに、ポッド内のモータの発熱の冷却が重要で、モータの超電導化のメリットが大いに生かれます。

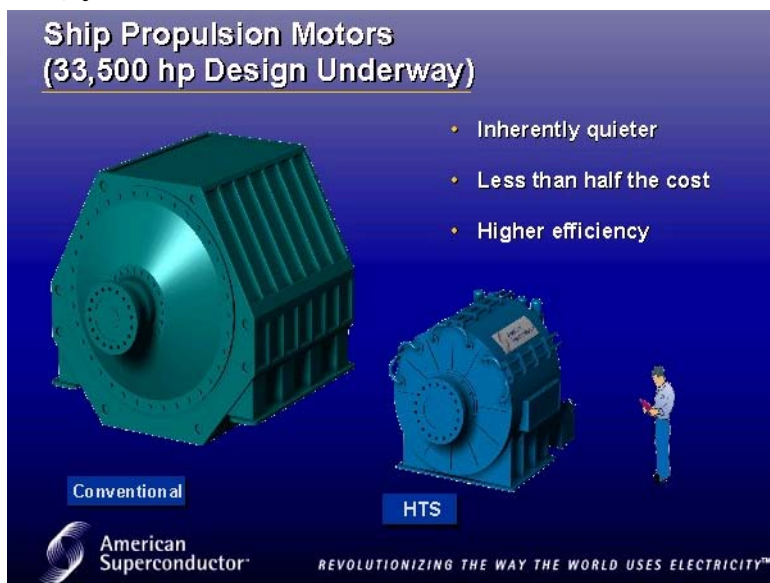


図4 船舶用電動機の従来型と高温超電導型との比較（AMSC社の資料より）

### c. 高速回転機の超電導化

叔父：電力用産業用の千数百から3千数百rpmの領域の電力用や産業用の回転機の超電導化のメリットはまあ解るが、1万rpmを超える高速回転の応用にはどのようなメリットがあるのかね。

甥：ガスタービンはディーゼルエンジンに比べはるかに小型・軽量ですが、回転速度が非常に速く、通常の発電機を用いる場合、減速用のギアが必要です。既にお話しましたように超電導回転機は回転子に鉄心を用いないので回転子の軽量化が可能です。そして高速回転に耐えられる回転子の実現できるので、ガスタービンで直接駆動する発電機が実現できます。応用として電気推進の客船の発電機や、興味あるところでは最近アメリカで開発が始められた電気推進航空機です。ジェットエンジンのタービンで発電をして、その電気でプロペラを駆動するものです。

叔父：ちょっと待ってくれ、プロペラ方式では現在のジェット旅客機より遅くなるなということかね。

ジェット機ではジェット噴射による推進で早い速度が得られているのではないかね。

甥：いいえ、速度は現在のジェット旅客機と同程度です。現在、我々が利用しているジェット機はプロペラ機なのです。すなわち、ガスタービンの回転力でガスタービンに直結しているプロペラを回し推進力を得ています。ターボプロップエンジンといわれています。超音速のコンコルドや、昔あったコメットはジェット噴射で推進力をえるものなので、これらとは違います。ジェット噴射方式は騒音が大きく燃費が悪いです。電気推進方式のメリットは、発電用のガスタービンとプロペラの位置および回転速度を別々にすることができます。したがって、複数のタービン発電機を置いておき、離陸時の高出力が必要なとき及び、巡航時や下降時の出力があまり必要ないときに、出力に応じてタービンの運転台数を加減します。またプロペラの回転数に関係なくタービン回転速度を決められるので、いつもタービンが効率の良い状態で運転できます。これにより大幅な省燃費が可能になります。さらに静粛性が優れるので地上の騒音に基づく航路設定の制約が緩和され、より省燃費につながります。電気推進航空機は言うまでもなく発電機、モータを超電導化して、軽量・小型化をしなければ成り立ちません。

叔父：超電導を応用すればそのようなことができるのだね。いっそのこと超電導自動車はどうなんだ。

甥：テストカーなら既に試作されています。

#### 5.4 各国の超電導回転機の研究開発状況

甥：超電導回転機器の世界の開発状況については、資料の収集の必要もあり次回にしたいと思います。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導電力機器のおはなし (その6)

横浜国立大学  
大学院工学研究院  
名誉教授 塚本修巳

某日某所で、大手商社の経営に携わっている役員の叔父さんと、メーカーの研究所で高温超電導機器開発に携わっている甥との間で超電導応用のことが話題になりました。今回は、いよいよ最終回になりますが、前回の超電導回転機の続き、および変圧器がテーマです。また、最後に超電導技術とCO<sub>2</sub>削減について少しだけ言及します。

前回の回転機の続き

5.4 各国の超電導回転機の研究開発状況

甥：前回は超電導回転機に関して、その種類、特長の話をしました。その続きとして、世界の開発状況について説明します。

甥：容量の大きい HTS 応用回転機の開発は米欧が進んでいます。現在開発進んでいる HTS 回転機で最大の容量のものは米国 AMSC 社が開発した 36.5 MW 機です (図 1)。これは船舶のスクリューを直接駆動する低速回転のモータ (260 回転毎分) で、軍事目的に開発されたものです。すでに、米海軍に納入され評価試験が行われているところです。ところで、米国の軍関係の研究者がある国際会議で、軍事応用を考えた場合、コストにかかわらず性能が最も重要であると発言していました。本船用モータもこれを反映したものでしょう。図 2 は同じく AMSC 社が開発した、HTS 同期調相機で米国の電力会社に納入したものです。HTS 同期調相機というのは同期回転機を電力系統に連系し空回りさせておき、HTS 線材で巻かれた界磁コイルの通電電流の値を調整することにより、同期回転機が連系されている系統の電圧と電流の位相を調整し系統の電圧を調整する機器です。これは、HTS 回転機としては初めて商品化されたものとして注目されています。



図1 組み立て中の36.5 MW船用モータ  
(AMSC社のご好意による)



図2 HTS回転機を用いた同期調相機  
—初めて商品化されたHTS回転機  
(AMSC社のご好意による)

米国について大容量回転機について開発が進んでいるのはドイツです。ドイツのシーメンス社は HTS 回転機の開発を戦略的に進めており、現在、2 極 3,000 回転、4 MVA の発電機を開発を終了し（図 3）、次のステップとしてさらに大型の船用のスクリュー直接駆動用 4 MVA のモータの開発を開始しています。

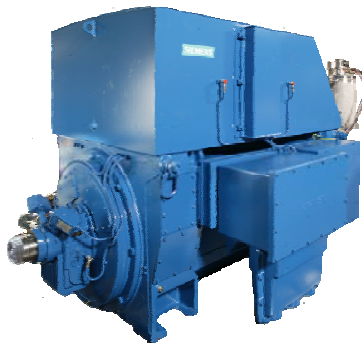


図3 4MW/3600 回転毎分HTS発電機（シーメンス社のご好意による）

叔父：どうして同じ 4 MVA なのにスクリュー直接駆動用モータの方が機器として大型になるのかね？

甥：回転機はその出力が回転数に比例します。従って、回転数が低い場合でも大きな出力を出すためには回転機を大型にしなければなりません。スクリュー直接駆動用モータの回転数は 260 回転毎分と通常の発電機などに比べれば非常に低いので体格が大きくなるのです。

韓国も DAPAS (Dream of Advanced Power System by Applied Superconductivity technologies) という高温超電導導体、機器開発の長期国家プロジェクトの枠組みの中で、2 極、3,600 回転毎分、出力 1 MW の HTS 同期モータが開発され、性能試験が終わっています。これに基づき次のステップとして 4 MW 機の開発を目指しています。

自然エネルギー発電装置への超電導応用の開発が進められています。イギリスの電機メーカーの ConverTeam 社は 8 MW 級の超電導風力発電機を開発を行い、2011 年ころには製造を開始するという計画を発表しており、すでに開発を始めています。さらに、ドイツでは効率向上を目的とした小規模の超電導水力発電機を開発中です。

叔父：日本ではどうなのかね？1990 年代には日本の超電導発電機の技術は世界をリードしているという話があったように思うけれど。

甥：確かに、日本では 1980 年代の終わりから 1990 年代いっぱいにかけて、SuperGM という大型の国家プロジェクトで 70 MW の発電機が開発されました。用いた線材は低温超電導の Nb-Ti で液体ヘリウム冷却でした。このプロジェクトで、超電導発電機の高効率、電力系統に連系した場合の性能の良さは実証されました。この発電機はしっかりと性能検証試験まで行った超電導回転子転機としては世界最大容量です。現在でもこの容量を超えるものはありません。ソ連やドイツでより大容量のもの開発が行われましたが、完成しないうちに開発が中断されました。70 MW 機の開発後、コスト低減のための技術開発などが続けられましたが、電力需要の成長率の低迷など電力システムを取り巻く環境が変化し、低温超電導発電機が目指した発電機の単機大容量化のニーズが無くなってきて開発が中断されることになりました。高温超電導技術の進展により、電力用より容量が小さい産業用の超電導回転機の実用性が世界的にも注目されてきたのですが、日本の産業界では産業用回転機の超電導化のニーズはあまり無いとされてきました。このためもあって、日本における HTS 回転機の開発は諸外国に遅れをとっていたことも事実です。しかし、最近になって、独自の構造を持つ液体窒素冷却の 400 kW 級の船用の低速モータの開発が行われました（図 4）。



図4 400 kW級船舶推進用HTSモータ (250回転毎分)

(IHI、住友電工、中島プロペラ、新潟電機、日立、福井大学、富士電機：写真提供はIHIのご好意による)

今まで説明してきた諸外国の HTS 回転機は皆 Bi 系銀シース線材を用いたものですが、近年の Y 系超電導線材の進展に基づき、日本が世界に先駆けて Y 系線材を用いた回転機の開発をしました。これは、Bi 系線材より優れた Y 系線材の特性を活かし、回転機の性能向上を目指すものです。このように日本も開発努力は続けております。

甥：HTS 回転機の潜在的なマーケットは非常に大きく今後の開発に期待がかかるようです。

さて、話題を超電導変圧器に移したいと思います。

### 6.1 HTS 変圧器の利点

甥：かつては低温超電導線を用いた変圧器の開発も進められていましたが、液体ヘリウム冷却という壁を破ることができなかったことと、HTS 技術が進んだこともあり、現在の超電導変圧器開発は HTS 線を用いたものとなっています。現在、銅導体と鉄心を用いた電力用の変圧器は効率が非常に高く 99 %を超えています。それにもかかわらず、日本を始め世界各国で超電導変圧器の開発が行われています。その理由は、従来型の変圧器に比べ超電導器は次のような利点が期待されているからです。

1. 効率の更なる向上（電力用で 0.1 %、電気機関車や高速鉄道車載用で 3~5 %の向上）
2. 軽量化、設置面積の低減（重量で 40 %程度、設置面積で 30 %程度低減）
3. 火災の危険が無い（従来型は油冷や式で火災の危険がある）
4. 過負荷に対する寿命短縮が無い設計ができる

上記の利点 1.について、電力用で 0.1 %の効率向上は少ないようですが、変圧器は常時稼働しているものですから、運用コストの低減には大きな効果があります。また、鉄道用車載変圧器では効率はある程度犠牲にし、乗客スペースを確保するために軽量、コンパクト化が図られていますので、効率向上の余地が多くあり、上記 2.の利点とあわせ超電導を応用する効果は大きいです。電力用でも 2.は用地上の制限の多い都市部の変電所では変電容量の拡大に大きな利点となります。

叔父：ちょっと待って、超電導は交流で使うと交流損失が出るため交流応用は難しいということではなかったかね。変圧器では超電導線は交流で使われるのだから。

甥：確かにそうですが、一般に超電導変圧器でも鉄心を用いるので、超電導コイルの線には大きな交流磁界はかかりません。このため、交流損失は少なく変圧器の超電導化が可能なのです。しかし、変圧器コイルの交流損失の低減は、変圧器の運用コストの低減、効率向上に直接関係するので重要な開発項目です。鉄心はヒステリシス損失が発生するので室温に、超電導コイルは極低温になるような構造になっています。3.に関して、従来型変圧器は冷却に油を使っており、火災の危険があります。変



圧器の火災は日本では余りありませんが、外国では結構あるようです。図5は米国での変圧器の火災事故の写真です。変圧器が火災を起こすと、復旧に相当の時間がかかるのみならず、市街地で火災が起きると変電所の用地問題は深刻になります。このため、火災対策のために大きなコストをかけています。それに対して超電導変圧器では液体窒素冷却なので火災の心配はありません。米国ではこの利点はかなり強調されています。4.に関して、従来型変圧器では過負荷運転をするとコイルの温度が上がり、電気絶縁材料の性能が劣化し、変圧器の寿命を縮めてしまいます。それに対して、超電導器では導体の電流密度が非常に大きいので、導体の電流容量に余裕を持たせることは比較的容易です。過負荷運転に対して余裕を持たせておけば、超電導がクエンチを起こさない限りコイル部の温度上昇は少なく、絶縁材料の特性が劣化することは無いのです。



図5 従来型変圧器の火災事故  
(アメリカ1999年)

### 6.2 HTS 変圧器の開発状況

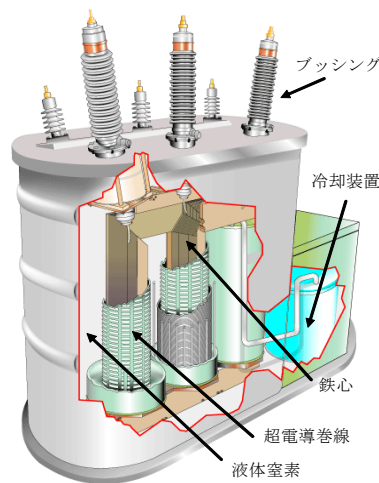
甥: ヨーロッパでは ABB 社がいち早く HTS 変圧器の開発を手がけ、640 kVA のものを開発しました。しかし、損失が思ったほど下がりず開発を断念しています。シーメンス社が高速鉄道車載用の 1 MVA の HTS 変圧器を開発をしました。性能試験も行われましたが導入には至らず、現在開発は行われておりません。米国の変圧器メーカー Waukesha 社が 5/10 MVA 器の開発を行っています。電気絶縁材のトラブルで開発が止まっています。韓国や中国でも数百 kVA レベルの変圧器の開発が行われております。もちろん日本でも 10 MVA の超電導変圧器の開発をめざし、部分モデルが変電所に設置されて性能試験が行われました。

以上紹介した HTS 変圧器は Bi 系の線材を用いていますが、線材の交流損失の低減が十分でなく、冷凍機容量が大きくなり、冷凍機を含む変圧器システムの設置面積は従来方式とあまり変わらなくなる状況です。そこで、我国では Y 系線材を用い更なる交流損失低減を目指した変圧器の開発が行われています。これにより冷凍機も含めて変圧器システムの設置面積が従来器より 30 %程度低減されることが期待されています (図6)。



従来型変圧器

(長さ : 5.0m 幅 : 5.0m 高さ : 5.5m)



超電導変圧器

(長さ : 4.5m 幅 : 3.0m 高さ : 5.5m)

図6 銅コイル鉄心従来型と超電変圧器導との比較

叔父：変圧器の冷凍機の話で思いついたのだが、冷凍機の信頼性と効率は現状の技術で問題ないのかな。冷凍機は変圧器のみならず超電導機器全体にかかわることだけれど。

甥：大変よいところに気づかれました。高信頼、高効率の冷凍機は超電導応用機器システムの要です。しかし、従来の技術ではとても十分とはいえ、超電導機器に適した冷凍機の開発は重要な課題と位置づけられております。平成20年度から我国で新たに始まったY系薄膜線材を用いた超電導ケーブル、SMES および変圧器の機器開発国家プロジェクトの中に、冷凍機開発がテーマに含まれていません。

超電導変圧器の開発の話に戻りますが、何しろ既に高信頼性と高効率を達成している従来型の変圧器に対して、超電導変圧器はそれを上回る性能を発揮しなければなりません。これはかなり厳しく、世界的には超電導変圧器の開発は低調になってきています。そのような状況の中で日本の開発努力の継続は評価されるべきだと思います。

### 全体まとめ—超電導技術のCO<sub>2</sub>削減への貢献について

甥：今まで6回にわたって超電導機器技術の話をしてきました。今回は最後なので超電導がCO<sub>2</sub>削減にどのように貢献できるかについてちょっと触れたいと思います。

叔父：こちらもそのことについて聞きたいと思っていたところだ。2007年のハイリゲンG8サミットではCool Earth 50構想が日本から提案された。2050年までにCO<sub>2</sub>を現状の50%に削減する構想だが、超電導技術はどのような位置づけなのかな？

甥：超電導電気機器技術のCO<sub>2</sub>削減への貢献は2つの観点があります。一つは超電導機器の効率向上です。これについては今までいろいろ説明をしてきましたが、もう一つ忘れてはならない大きな役割は、CO<sub>2</sub>を排出しない風力や太陽光など自然エネルギー発電の電力システムへの導入促進に役立つということです。自然エネルギーの大きな問題は発電量が自然任せで、電力需要の増減にマッチしないことです。このため電力システムの電圧維持制御上の制約により、自然エネルギー発電の導入量に制約が出てきます。超電導電力ケーブルや限流器、またSMESは、電力システムの柔軟な構成を容易にし、システムの負荷変動を抑制します。このため、超電導機器の導入により自然エネルギー発電装置の連系による系統電圧変動の抑制を容易に行うことができます。その分自然エネルギーの導入量を増やすことができます。実際、2005年のグレンイーグルのG8サミットで、自然エネルギーの導入促進として電力システムの柔軟性を図る方策の提案が求められ、IEA（国際エネルギー機構）が案の取りまとめを行っております。その中で超電導技術の応用が位置づけられることになっております。また、Cool Earth 50のロードマップが作られており、その中に超電導ケーブル開発が入っています。

以上のように超電導技術は効率の向上、自然エネルギーの導入促進という観点からCO<sub>2</sub>削減に貢献するというので、我国においても世界においても位置づけられております。このような社会の超電導に対する期待に対し、我々は超電導技術に携わるもの者として期待にこたえるべく頑張るつもりです。

叔父：大いに期待しているよ。最初は高温超電導の話はもう過去のことか思っていたが、君の話を聞いてまったくちがっていたことがわかった。また、新材料の発見からそれが実用化されるまでに多くの努力と時間がかかることを改めて認識した。それとともに開発の苦しみに長期間耐えて生き残るといふことの大事さに改めて気がついた。ありがとう。

甥：叔父さんのように直接超電導に関係していない多くの方々に超電導のことを理解してもらうことが今後の超電導技術の発展に大いに役立つのです。今後ともどうぞよろしく。

長い間超電導の話聞いていただきありがとうございます。

#### 著者あとがき

この原稿はできるだけ平易に書いたつもりですが、文系の方に読んでもらいますとやはり、専門用語がわかりにくいといわれました。盛り込みたい内容と、専門用語の説明との按配がなかなか難しく、中途半端になってしまった感じはいなめませんでした。いずれにしても、本稿が超電導機器技術開発の現状の理解に少しでも役立てば著者として嬉しい次第です。

また、このような機会を与えていただき、また、原稿の編集に関しお世話になりました超電導 Web.21 編集担当の方々にお礼を申し上げます。

[超電導 Web21 トップページ](#)