

■ 論 説 ■

超電導電力機器の開発

Development of Superconducting Electric Power Apparatus

岡 田 隆 夫*

Takao Okada



1. ま え が き

オランダのオネス教授が、1911年に水銀を用いて電気抵抗が零になる超電導現象を発見してから、1961年にアメリカのクツラー氏が超電導マグネットを製作し、6テスラを越える磁界の発生に成功して、超電導応用が可能になるまで半世紀が必要であった。

初期に発見された超電導材料は、Pb, Sn, Nbなどの単体金属が多く、これらの材料は超電導状態を保持するための、温度、磁界、電流の臨界値が低く、超電導応用に適していなかった。一方、超電導現象を説明するための理論は未発達であった。1950年代になって、超電導材料には第1種と第2種の区別があることが判明し、1957年にはBCS理論が発表され、超電導現象が量子力学的に解明された。理論の進展と共に、1950年代の後半から、Nb-Zr, Nb₃Sn, Nb-Tiなどが相次いで発見され、超電導応用の道は拓かれていった。

超電導の応用はマグネットから始まったが、短い超電導線における臨界電流値を著しく下回る電流でマグネットが常電導に転移するという現象に悩まされた。このため、超電導線の安定化の技術が開発され、銅やアルミの母材に超電導線をうめ込むとか、超電導線を細線化し、これにねじれを与えて、不安定の要因(磁気跳躍)を取り除き、かつ交流損失を減少させる線材が作られた。このような線材の出現により、超電導マグネットの製作技術が進歩し、強磁界や変動磁界に対しても応用範囲が広がってきた。

1986年暮れから1987年の夏にかけて、セラミックス超電導ブームを迎えたが、原理的には魅力の大きい材料であるが、実用化に向けての技術的な課題が大きく、地道な努力が相当必要となりそうなのが判明して来ている。

しかしながら、超電導マグネット技術は、核融合の

研究開発、高エネルギー物理研究機器への応用、電気機器への応用などに関連して、着実に進歩を続けており、その将来は明るい。

2. 超電導のエネルギー技術への応用

超電導の特異な性質としては、(1)電気抵抗が零である、(2)完全反磁性の性質がある、(3)ジョセフソン効果がある、の3つであるが、このうちエネルギー技術への応用は第1番目の性質を用いるものである。電力の消費なしに大電流を流したり、強磁界を発生したり、超電導線路の回路を閉じると永久電流を流すことができるなどである。これらの技術を活用する各種の応用を図-1に示す。

エネルギー機器の多くは高磁界発生技術を利用するものであるから、超電導マグネット技術の現状について簡単に考察する。超電導マグネットを製作するにあたっては、(1)不安定性、(2)臨界電流密度、(3)励磁損失、

超電導技術	高磁界	新エネルギー技術	核融合炉用超電導マグネット
		発電技術	超電導発電機 M H D 発電
	発生	運輸技術	船舶電気推進 磁気浮上式リニアモータ列車
		生産技術	超電導モータ 超電導エネルギー貯蔵
	大技術	送電システム技術	超電導調相機・変圧器
			超電導送電

図-1 超電導のエネルギー技術分野への応用

* 京都大学工学部電気工学科教授

〒606 京都市左京区吉田本町

の3つの条件が重要となる。

通電中の超電導線が常電導転移し、それがマグネット全体に及ぶと超電導マグネットはその機能が失われる。常電導転移による不安定性の発生は、マグネットが大きくなるほどその危険度は急激に増大する。従って、小形マグネットでは安定材の少ない電流密度の高い超電導線が使用できるが、大形マグネットでは多くの安定化材を用いた、かつ多心化した完全安定化導体を使用しなくてはならない。従って、マグネットが大容量になると、マグネットのサイズは相対的に大きくなる。

磁界が強くなるにつれて、超電導線の臨界電流密度は低くなるので、使用する線材によっては高磁界を発生するマグネットには使用できない。例えば、Nb-Ti合金線では数テスラ程度のマグネットは十分に実用になるが、それ以上の高磁界では使用できず、Nb₃Snのような超電導体を用いなければならない。

また超電導体に流れる電流が変化すると、超電導線には損失が発生するので、超電導マグネットをパルス的に励磁するような場合には、励磁損失を少なくするために、超電導線の細線化と高抵抗バリアを配置した極細多心ツイスト導体を使用する。

以上のように、現在までに開発されている超電導線とマグネット安定化の技術のもとでは、マグネットの

大きさ、磁界の強さ、励磁の速さについては、それぞれ限界が存在する。

エネルギー機器に使用される超電導マグネットを発生磁界とマグネットに貯えられるエネルギーで整理すると図-2のようになる³⁾。また技術の現状を示すために、製作された代表的なマグネットを同図に記入した。この図より、単に超電導マグネットを製作するという面からみると、磁気浮上列車、船舶推進、回転機などの基礎技術は達成されていると考えてよい。

本稿では、エネルギー機器の内、電力系統で使用される電力機器の開発の現状と展望について述べる。

3. 超電導電力機器の開発^{1),2)}

電力系統において使用される電力機器、すなわち発電機、変圧器、送電線路、調相装置、しゃ断器などに関する技術は、電力系統の発達と共に進歩した改良されて、現在では一応確立された技術となっている。しかし、電気抵抗が零になる超電導の特質を利用すれば、より優れた電力機器に脱皮する可能性をもっている。従って、超電導の応用研究が開始されたかなり早い時期から、研究対象として開発が進められてきた。ここでは、発電機、送電ケーブル、エネルギー貯蔵装置、変圧器について述べる。

3.1 超電導発電機⁴⁾⁻⁶⁾

超電導回転機の開発研究は、大容量機の製作限度の拡大を目標にして超電導同期機の開発にしばられ、世界各国で研究開発が活発に行われてきた。しかし近年、度重なる石油ショックの後、研究の方向は大容量化を指向するのではなく、超電導機のもつ優秀な性能、省エネルギー性、経済性などを技術開発の目標として研究開発が進められてきた。

現在実用化されている超電導線は、交流磁界中では損失を発生するため、直流磁界を作る界磁巻線を超電導巻線とし、交流磁界を発生する電機子巻線（出力巻線）には、通常の巻線を使用するのが、超電導同期機の一般的な構成である。図-3に超電導同期機の基本的な構造を示す⁴⁾。現在では、いくつかの課題は残されているが、その基本的な構造は大体固まってきている。

回転子は高磁界を発生させる超電導巻線とそれを支持する円筒トルクチューブ、常温ダンプとふく射シールドとヘリウムを給排する冷却システムから構成されている。超電導同期機の回転子は全体として多重円筒体であり、各円筒間に真空槽を設けて断熱を行っている

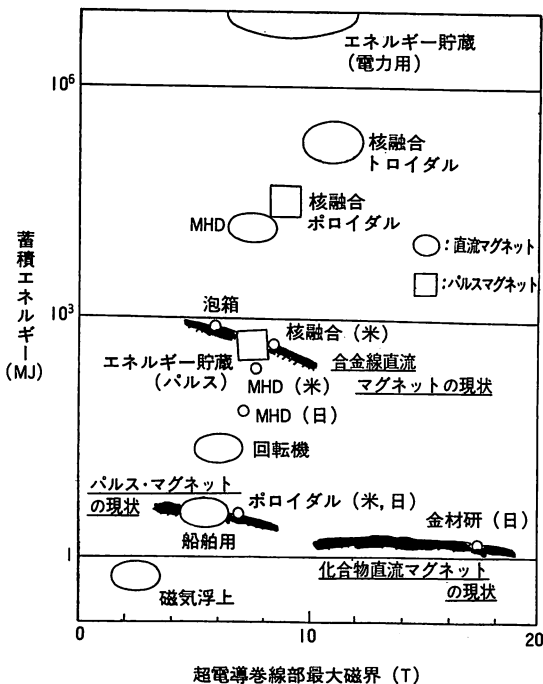


図-2 超電導マグネット技術の現状

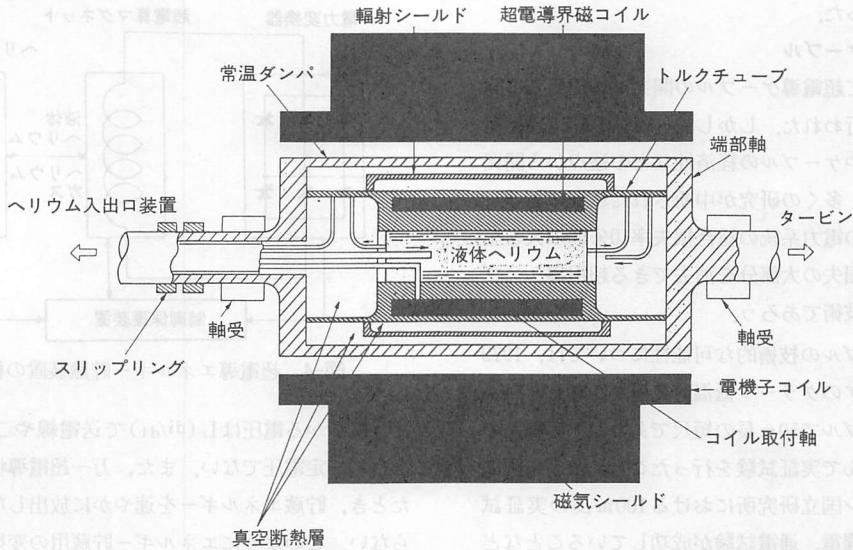


図-3 超電導発電機の基本構造

るので、従来機に比べると構造は複雑である。

固定子は電機子巻線と磁気シールドから成る。電機子巻線は高磁束密度の磁界を受けるため、鉄心を用いない構造が採用される。

超電導同期機は従来形の発電機と比較して、つぎのような特徴をもつ。

(1) 小形軽量化、製作限界の大幅な拡大：従来から、同期発電機では同一体格で出力を増加するためには、主として冷却技術の改良によってきたが、超電導同期機では空隙磁束密度を高くとることができるので、単機当りの製作限界が大幅に拡大することが可能である。逆に、小形化、軽量化が可能である。従来機に比べて大きさが70%、重量で60%程度になる。

(2) 効率の向上：超電導機では励磁損失が殆んど零になり、鉄損、機械損も少なくなる。液体ヘリウム給排装置系統の損失は従来の水冷却装置系統の損失とほぼ同一であり、損失の増加要素とはならない。発電機全体の損失は、従来機の約 $\frac{1}{2}$ で全負荷効率で0.3~1.0%の向上が可能である。

(3) 出力電圧の高圧化：電機子巻線は鉄心のない空隙巻線構造となるので電氣的絶縁距離がとりやすいので、出力電圧を高くとることができる。

(4) 同期機としての特性の改善：超電導機は、同期リアクタンスが従来機の $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{5}$ である低リアクタンス機になるため、(i)電力系統の安定度が向上し、送電線の送電容量が大幅に増大する、(ii)超電導発電機の運転許容範囲は、進相領域では定格容量まで運転可能で

あり、無効電力の供給能力が増大する、など電力系統運用上の長所をもつ。

最近、急速な励磁に耐える超電導線の開発によって、従来の直流用線材を用いた界磁巻線では不可能であった高速応励磁が可能な超電導発電機が検討されており、電力系統の安定度がさらに向上することが期待されている。また交流用の超電導線が開発され、電機子巻線も超電導化した全超電導発電機の開発が行われようとしている。

超電導発電機の技術開発は、1970年代から世界各国で研究が進められてきたが、最近の世界的な経済事情の低迷から、アメリカやフランスの計画は中断または終了の状況にある。ソ連、西ドイツでは30~85万kVA機の製作が進行中である。わが国では、数万kVA機の製造可能性の確認を行ったが、実用性能、実用機の製造技術、最適設計など実用化開発は未着手の状態である。現状において、実用化までに確立すべき技術課題はいくつか残されているが、いずれも明らかに困難と考えられる問題点は見いだされない。

なお、通産省工業技術院では、昭和60、61年度において、ムーンライト計画の一環として、超電導発電機関連機器・材料技術フィージビリティ調査が行われた。その結果をふまえて、昨年10月に超電導発電機関連機器・材料技術研究組合が設立され、8年間で200MW級パイロットプラント機による運転実証研究を行うことを目標に、超電導発電機に関する要素技術開発と、70MW級モデル機の試作運転試験などの研究開発を

行うこととなった。

3.2 超電導ケーブル

世界的にみて超電導ケーブルの開発は1960年代に開始され活発に行われた。しかし、石油ショックの後、電力需要の動向やケーブルの経済性などの観点から開発意欲が衰えて、多くの研究が中断された状況にある。しかし、現在の電力システムの総合損失率10%弱の大半を占める送配電損失の大部分を消去できる超電導ケーブルは革新的な技術であろう。

超電導ケーブルの技術的な可能性については、1979年オーストリアのグラーツ低温研究所が、60kV 1kAの超電導ケーブルで50m長の短尺であるが、実線路の一部に組み込んで実証試験を行ったこと、及び米国のブルックヘブン国立研究所における100m長の実証試験線路による課電、通電試験が成功していることなどで、ほぼ確認されているといえる。

超電導ケーブルは輝かしい将来性をもっているが開発の困難も大きい、海外での開発も遅々たるものであり、わが国でも基礎的段階にとどまっている。その理由はエネルギー低成長時代に入り5～8GW送電のニーズが遠のいたことが最大の原因である。

昨今の高温超電導体の発見で、液体窒素冷却のケーブルの可能性がでてきた。この場合は断熱構造、冷却システムが簡略化され建設費が低減できるので、経済性の成立範囲が拡大される。しかしながら、当分は基礎固めの時代が続くものと予想される。

3.3 超電導エネルギー貯蔵

超電導コイルの端子を完全に短絡すると、コイルの電流は減衰しなくなり、そのときのコイルに蓄えられていたエネルギーが無損失で保存される。従って、超電導コイルを用いると低損失のエネルギー貯蔵が可能になる。貯蔵されるエネルギーの密度は平均磁束密度を5テスラとすると 10^7 J/m^3 で化石燃料($4 \times 10^{10} \text{ J/m}^3$)や電池($5 \sim 10 \times 10^8 \text{ J/m}^3$)に比べては低い、揚水発電よりは1けた高い。

超電導エネルギー貯蔵装置の特徴は、(i)貯蔵効率が高いこと(85～90%)、(ii)電力変換器にサイリスタ変換器を用いるので応答速度が早い、などがあげられ各種の応用が考えられる。電力システムへの応用としては、(i)揚水発電所に代わる電力貯蔵と、(ii)電力システムの安定化に利用する超電導コイルの2つが考えられる。

超電導エネルギー貯蔵システムは図-4に示すように、超電導コイル、交直変換器、制御保護装置、ヘリウム冷凍機から構成されている。この装置では、超電導コ

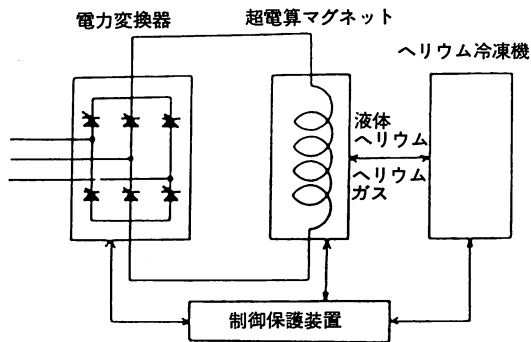


図-4 超電導エネルギー貯蔵装置の構成

イルにかかる電圧は $L (di/dt)$ で送電線や二次電池のように一定電圧でない。また、万一超電導状態が破れたとき、貯蔵エネルギーを速やかに放出しなくてはならない。このようにエネルギー貯蔵用の変換器には固有の問題が存在する。

揚水発電所に代わる電力貯蔵用超電導コイルの規模は現在製作されている実績の4けた以上も大きいので、電力システムにおける運用と貯蔵のあり方をも含めて、超電導コイルによる電力貯蔵の技術を作り上げてゆく必要がある。

電力システムにおいては、大容量長距離送電線で電力を輸送をするとき、重負荷時には電力動揺が発生し、送電に支障をきたす場合がある。アメリカ西海岸の西北部と南部は500kV交流2回線と±400kVの直流送電線で連系されている。この送電線に発生する0.35Hzの持続振動を抑制するため、タコマ変電所に30MJの超電導コイルを設置した。0.1～0.2Hzの電力の入出力試験・系統安定化試験などが行われ、0.35Hzの電力動揺の抑制に効果的であることが実証された。

系統安定化の技術は、従来から各種の手法が実施されている。従って、超電導コイルによる系統安定化はそれらの手法との競合状態にある。

3.4 超電導変圧器

1983年フランスで50/60Hz用の交流超電導線が開発されて以来、交流電力機器の超電導化は現実の課題となった。なかでも、変圧器の超電導化は至近距離にあるとして注目を集めている。

超電導変圧器は現在の油絶縁の代わりに、液体ヘリウム絶縁を使用することとなる。この絶縁組織では油と同程度またはそれ以上の絶縁耐力が望まれる。液体ヘリウムの絶縁耐力については以前より研究があるが、およそ1気圧では絶縁油の70%程度である。しかし、圧力を上げて使用すると絶縁耐力は向上する。

超電導変圧器といえども、その基本構造は現用器と変わらない。超電導だから鉄心は無用という話もできるが、励磁電流が過大となるため、巻数を多くするとリアクタンス電圧降下が大きくなり実用にならない。

フランスのアルストム社では単相50Hz, 220kVA, 660/4,000Vの変圧器を製作し、70kWの通電テストを行い、現在巻線を改造中とのことである。わが国でも、小形モデル超電導変圧器の試作と特性試験結果の報告がある。いずれにしても、超電導変圧器の研究開発はこれからという段階である。

4. むすび

かつての電力需要増大の時代には、電力系統は機器やシステムの大形化によって需要増をまかなうと共に、スケールメリットによる経済性を追求してきた。今日では電力需要は低成長で、電力の質への高度の要求が求められるようになってきた。従って、超電導電力機器の実現の成否は、従来技術に比べて特性や運用性、経済性でどれだけ優位にあるかによってきまる。超電導電力機器はエネルギー貯蔵装置を除いては、その原理、構造などで従来の電力機器と著しい違いはない。これらの超電導電力機器の現在の電力系統への導入は従来機器に少しずつ置き換えてゆくことになるものと

予想される。

一方、電力機器の超電導化は、従来の電力機器とは特性の異なった機器を生み出す可能性も持っている。たとえば、発電機の優れた電気特性、エネルギー貯蔵システムの高速度応性、超電導ケーブルの高電流密度化などがあり、現在の電力系統の機器と置き換えるだけでは十分にその特徴を発揮できないことが考えられる。すでに、全超電導電力システムの構想も語られているが、将来開発される多くの超電導電力機器の特徴を生かせる新しい電力システムの構築が望まれる。

参考文献

- 1) 同期機の超電導化について；電気学会技術報告(II), 第58号(昭52-7)
- 2) 超電導電力機器の開発状況；同上, 第192号(昭60-7)
- 3) 小山；超電導技術一次期世代エネルギー技術を担う；電総研集報, vol. 47, p. 587, July (1983)
- 4) 上田ほか；超電導発電機；三菱電機技報, vol. 57, No. 12, p. 838(1983)
- 5) 岡田；超電導回転機；電学誌, vol. 105, p. 1096(昭60-11)
- 6) 植田, 谷口；超電導発電機, 昭61電気学会全国大会, S 11-2

協賛行事		日中石炭シンポジウム開催要領	
はじめに	来る5月8日(日)~11日(水)、東京理科大学にて中国科学院との協力により、日中石炭シンポジウムを開催いたします。概要は下記の通りであり、シンポジウムを盛り多いたるため、多数の方々のご参加をお待ちいたしております。		
主催	日中学術振興会第148委員会	組織委員長	玉井 康勝
主 日	昭和63年5月8日(日)~11日(水)	場 所	東京理科大学 神楽坂校舎
発表論文	石炭の構造、物性、反応性、石炭のガス化、直接及び間接液化の反応論、触媒化学、技術、石炭のハンドリング技術等に関する論文約90篇(口頭及びポスターによる)		
参加登録料	学振第148委員会委員(会員企業の社員を含む)	20,000円	
	一般	30,000円	
	学 生	5,000円	
問合せ先	東京大学工学部合成化学科 冨永研究室	Tel 03-812-2111	内線 7256
発表論文(日本)より抜粋			
NEDOにおける石炭液化・ガス化技術開発の現状.....新エネルギー総合開発機構 石炭技術開発室			
成形コークス製造プロセスの開発.....新日本製鐵㈱第三技術研究所製鉄研究センター			
200T/日噴流床石炭ガス化パイロットプラントの研究開発.....石炭ガス化複合発電技術研究組合			
ハイブリッドガス化について.....電源開発㈱技術開発部			
加圧流動床石炭ガス化炉の開発.....三菱重工製鋼長崎研究所(財)石炭技術研究所			
(水素製造用噴流床ガス化)			
1 t/dプラントによるNEDOLプロセス確認運転.....住友金属工業株式会社石炭液化開発部			
NEDOにおける嚮背炭液化技術開発.....新エネルギー総合開発機構石炭技術開発室			
NEDOにおける褐炭液化技術開発			
.....新エネルギー総合開発機構, 日本褐炭液化㈱, 三菱化成工業㈱, 神戸製鋼			
合成ガスからの高オクタン価ガソリン製造技術.....コスモ石油㈱中央研究所			
日本COM社におけるCWM品質管理と供給設備.....日本COM社㈱小名浜事業本部石炭スラニー 研究所			