

■ 展望・解説 ■

超電導コイルによるエネルギー貯蔵

増 田 正 美*

Masami Masuda



1. まえがき

超電導コイルを用いてエネルギーを貯蔵することについては、過去に本誌において、「超電導による電力エネルギー貯蔵」として報告させていただいた¹⁾。したがって超電導エネルギー貯蔵(SMES)についての基本的な原理、何故超電導エネルギー貯蔵なのか、他の貯蔵装置と比較した場合の技術的優位、展望などについては、上記論文を参照していただきたい。

ここでは、1982年以後の、特にここ2、3年間における超電導エネルギー貯蔵開発における話題、また本年3月より活発になってきたセラミック系高温超電導の、この分野への応用、世界のこの研究における現況、などについて述べたい。

2. 超電導エネルギー超電導(SMES)とは

しかし、一応超電導エネルギー貯蔵とは、ということから始めたい。

超電導の持つ特性を列記すると、次のようなものになる。

- 1) 電気抵抗がゼロである、
- 2) 大電流を流せる、
- 3) 強磁界を発生できる、
- 4) 永久電流が流せる、
- 5) 量子効果がある。

超電導の応用技術とは、一面従来の電気機器にこのように魅力的な技術を利用して、その性能を上げようとするものがある。現在唯一の、超電導技術の商用的成功としては、医療用診断装置としての核磁気共鳴(MRIあるいはNMR)があるが、これはこのような応用の典型的なものである。つまり従来の電源によって励磁されるマグネットよりも超電導によるものは磁界が高く、しかも永久電流モードで励磁するので安定度が高く、得られる像がシャープである。超電導応用の数多くの技術の大半は、むしろこのような分野に分類

することができる。超電導のエネルギー関係応用技術としての、超電導回転機、加速器、変圧器、マグネットなどが考えられるが、全てこのような分類に入る。

しかし、より魅力的な超電導の応用技術とは、従来の技術では不可能であったものが、超電導によって初めて可能となるものである。電磁推進船、核融合、MHD、ジョセフソン素子、SQUIDなどはそうである。このような応用技術はそれ程数多く検討されたわけではないが、SMESはこの少ない例の中でも代表的なものであろう。

その原理は超電導コイルに永久電流を流して、コイル内の自由空間に電磁エネルギーを貯蔵するものである。したがって、超電導以外の技術では不可能なものである。

2.1. SMESの原理

SMESの原理は、1911年超電導の発見者である、オランダ・ライデン大学のカメリン・オンネス教授によって試みられている。図-1(a)はそれを示したが、ガラス製の魔法瓶の中に液体ヘリウムを充満し、その中に鉛で作られた超電導コイルを漬け、図におけるスイッチ・1を閉じ、次式にしたがって、バッテリー電源から電流を流す。

$$V = L \cdot dI/dt$$

電流は時間と共に直線的に上昇し、この電流値がある所定の値に達すると、スイッチ・2を閉じて液体ヘリウム内で閉回路を作り、これに永久電流を流したものである。スイッチ・2も超電導材料を電極として、それを機械的に接触させるものを製作すれば、この閉回路はすべて超電導となる。この回路に流れる電流は理論的には次式に従って減衰する。

$$I = I_0 \cdot e^{-t/\tau}, \quad \tau = L/R$$

この時常数 τ はコイルのインダクタンスを抵抗で割ったものであり、したがって抵抗値がゼロの回路では時常数が無限となり、したがって電流は無限時間流れることになる。

* 高エネルギー物理学研究所

〒305 茨城県筑波郡大穂町上原1-1

現在のSMESにおけるエネルギー充電、貯蔵、放電（発電）の原理も、これと異なるものではない。図-1 (b)のように現代的なサイリスタ変換器を用いるだけである。このサイリスタ変換器は、大小さまざまなものが実用化されており、最大級のもは電力における直流送電に実施されている。

北海道電力と東北電力は、津軽海峡海底に直流送電線を敷設し、北海道電力は函館にサイリスタ変換所において交流を直流にし、東北電力は下北半島においてこれを受電し、直流を交流に変換して送電線とリンクしている。

図-1 (b)においても、充電時には交流を直流に変換して超電導コイルを励磁し、所定の電流値に達すると超電導スイッチ（これはサイリスタで置き換えることが出来る）を含む閉回路に還流させて貯蔵し、発電時には変換器のサイリスタ点弧の位相角を逆変換モードにして直流を交流にするものである。その動作はエレクトロニクスの故に簡便であり、かつレスポンスも早い。

このレスポンスの早さ、別の言葉では瞬動性は余剰深夜電力を貯蔵して必要時に発電しようとする揚水発電では不可能なものである。

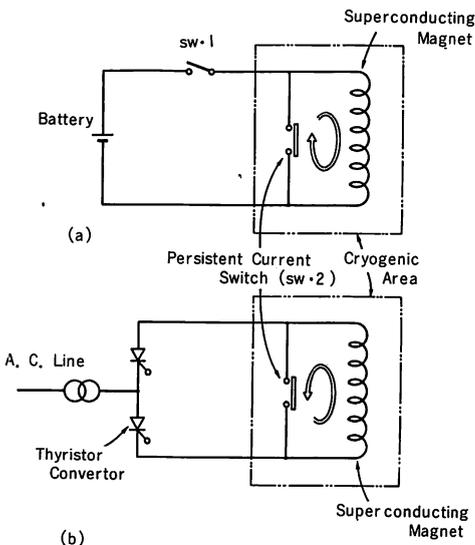


図-1 SMESの原理

- (a) カメリン、オネスの実験装置
(b) 近代的なプラント

2.2. SMESの問題点

小規模の超電導そのものにとっても問題点がないわけではない。しかし、それは1960年代から開発活動によって徐々に解決されてきて、現在商用化にまで到って

いる。したがって、上記の回路系と共に、小型SMESには技術上の問題点はない。ただその応用を妨げているのは、これらのSMESが、他の貯蔵装置と同じ使用目的を想定した場合、経済性が合わないという議論である。しかしこのような小型SMESの経済性について正当な議論をするには、SMESの新しい特性、例えば充電、放電における瞬時制御、特に秒オーダーで全エネルギーを放出し得る特性、また有効、無効電力の同時制御の可能性、メンテナンスの簡便さ、などを新しい価値としてその経済効果を考慮すべきものと思われる。

しかし大型のSMES、1例として基幹電力系統におけるピークシェーピング機能を目的とした揚水発電に代わるようなものについては、その規模の大きさから来る問題点がある。それは、このような大規模超電導コイルの発生する電磁力閉じ込めの問題である。

いかなる保存力の場においても、閉じ込められたエネルギーは最小のポテンシャル状態に落ち着こうとする。それは究極的にはエネルギーを消散させることである。

電磁空間においては、超電導コイルが電磁場を作ってエネルギーを貯蔵するが、この場合においてもコイルは膨張して破壊されようとする。その破壊を止める原始的な方法は、図-2に示すようにステンレス鋼に

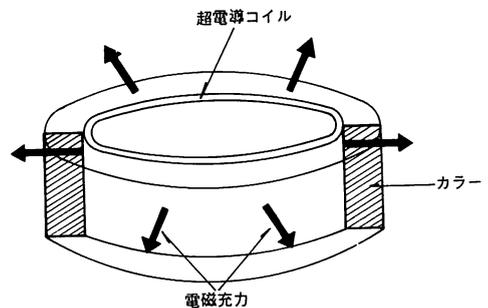


図-2 コイルの外部への膨張を押えるためのステンレス鋼カラー

るカラーであろう。このような構造物の材料強度と比重を仮定して、上記電磁力に対処するためには、ある程度の重量が必要であるが、それは次式によって評価できる。

$$W = k \cdot E \cdot \rho / \sigma$$

この式において、Eなるエネルギーを貯蔵するためには、比重 ρ 、強度 σ なる材料が、重量W必要だと言うことになる。kは形状からくる因子であり、概略的な議論では無視できる。

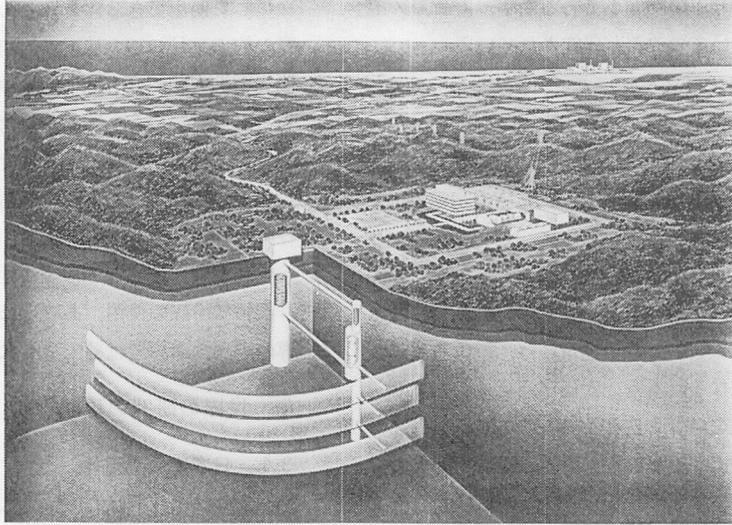


図-3 500万kWhのSMESの俯瞰図

大型SMES, 例えば現存揚水発電と同規模, 500キロワット時を貯蔵するものにおいては, 上式を適用してみるとこのWは100万トンとなり, この構造物材料価格のみで, SMESの経済性を破ることになる. このような問題解決のために, 従来から大型SMESは地下岩盤の中に構築しようとする計画が練られた.

図-3はこのような大型SMESを地下岩盤に設置した想像図である. 地下150mの深さにおいて硬質の花崗岩体に, 高さ約15m, 幅7mのトンネルを掘り, その中にステンレス鋼壁で容器を作り内部を真空にして, いわゆる魔法瓶を作る. その中に液体ヘリウムを溜め, そのヘリウム容器の中に超電導コイルを設置しようとするものである.

2.3 SMESの応用

このように小型から大型における超電導技術を応用したSMESは, 各種の応用が検討されている.

まず最大規模のものは, すでに述べたように揚水発電に代わるピークシェーピング用のSMESである. 表1

表1 各種電力用エネルギー貯蔵装置の比較

方式	運転効率(%)
揚水発電	65~70
鉛蓄電池	75~80
改良型電池	75~80
圧縮空気	~70
地下水力貯蔵	67~72
超電導エネルギー貯蔵	90以上

はこのような目的のために, 電力業界が検討している貯蔵装置の効率を一覧としたものである. 現在実用に稼動しているのは揚水発電のみであるが, 問題はその効率が良くない点にある. 65%の効率とは100の電力を貯蔵しても, 発電すると65しか取らせないということであり, したがって熱効率40%を持つ高効率の発電によって貯蔵し発電したとすると, その発電の総合熱効率は26%にまで下がることになる. これでは小型の火力発電より悪い場合も起こり得る. これに対して90%の効率を持つ貯蔵装置によると, 総合的に36%の熱変換率を持つことになり, 従来形の石油発電より省エネルギー効果が高く, その稼働率を高く運用することができる. 貯蔵装置の効率の高さは, この他に各種の利益を系統運用戦略に持ち込む.

上記のような目的のSMESの貯蔵容量は約500キロワット時であり, その規模は現在の超電導技術のレベルからはかなり遠くにある. しかし, 実現した場合の利点は大きく, この実現のためには開発行為が必要であるが長期にわたろう. ステップ・バイ・ステップで進む開発方法が検討されている. したがって開発途上には中小規模のプラントの建設が想像され, このような中小規模SMESがどのような応用を持つかが問題である.

一般に電力における貯蔵装置は, 上記のような集約的にエネルギーを貯蔵するものと, 消費地近くで分散的に配置して設置する小型のものとの2種が検討されている. この後者の規模は1万ないし2万キロワット時のものである. 現在主にバッテリー貯蔵が検討され

ており、バッテリーの問題点である効率、寿命、メンテナンスについての改善が研究されている。

SMESは一般にはスケールメリットがあり、大型のものの方が建設単価は安い。したがって、このような小型のものに経済性があるかどうかは疑問であるが、最近の高温超電導発見によって、また室温超電導の実現の可能性がでてきたことによって、この種のSMESも経済性が得るのではないかと検討されている。その場合、SMESの持つ優れた特性から、都心部に建設されるインテリジェントビルの地下には、超電導コイルがならぶことになるだろう。安価な深夜電力を購入し、また契約電力量を減少することによって20年で償却されることも可能になるだろう。瞬時停電にも対処し得るSMESは、特にインテリジェントビルには効果的である。

この2キロワット時のユニットは、アメリカではSDI用の軍事目的に使おうとしている。1700機のICBMがアメリカに飛来する。それを撃ち落とすために、アメリカ全土に約50ヶ所の自由電子レーザーステーションが必要だとされている。このステーションには100万キロワットの電力が必要である。100万キロワットとは近代的原子力発電の規模であり、このようなもの50ヶ所を、必ず必要とするかしないかも判明できないような目的に建設することは出来ない。しかし、ミサイルの飛来時間は数分であり、この間に上記の電力を、発電する貯蔵装置の規模は約2万キロワット時である。この場合1機あたり20—30億円で建設可能であり、極めて現実的な案となる。ちなみに、このような短時間で全電力を放出する貯蔵装置は、超電導以外には考えられない。

アメリカは一方ではこのように装置を軍事目的に使おうとしているが、他方商用化も考えている。朝のラッシュ時、またランチタイム直後の急激な電力需要の立ち上がりによってこれを用いて、系統運用を合理化する目的に使用しようとするものである。つまり、負荷急増に応じて発電機を投入するときのステップ状の立ち上がりを、SMESを用いてスムーズにしようとするものである。

さらに小型になって、数100キロワット時の容量のもの使用目的は多岐にわたる。鉄鋼業界におけるミルの駆動、制動、また電鉄における同種の理由から来る電力揺動の制御に用いられようとしている。これは我国におけるよりも、むしろ電力系統の完備されていない開発途上国に対する、上記プラントの輸出とパッ

クにして使用できる。またこのような規模のものは家庭の約1ヶ月の電力使用量に相当し、アモルファス太陽光電池と組み合わせて、家屋の地下に埋め込むことも考慮されている。電力料金は確実に年度と共に上昇するが、他方太陽光電池は年度と共に安価に移行する。いつかはこれがイブンになる時期は想像される。その時に必要になるものである。勿論現在の液体ヘリウム冷却での超電導では経済性は合わない。しかしより安価な冷媒の使用、あるいは室温での非冷却の超電導の実現によっては夢でなくなる。

3. 世界の研究の現状

3.1. 日本での研究

過去には、政府研究機関、大学また企業研究所でそれぞれ独立に基礎研究は行われていたが、これらを集約して昭和56年度から新エネルギー総合開発機構(NEEDO)²⁾の中で、また57年度からエンジニアリング振興協会(ENAA)³⁾の中で、「超電導エネルギー貯蔵システムに関する調査研究」として始められた。目的は上記のSMESとして最大規模である。電力におけるピークシェービング用のものアセスメントをしようとするものである。まず我国でこの目的に沿う貯蔵規模は、ということから研究が始まり、4年間にわたる調査研究の結果、500万キロワット時のものの概念設計とその経済評価が行われた。その詳細は報告書が利用できるの、それを参照にしていきたい。

この研究グループは、政府研究機関、大学および民間企業からなる産官民の合同作業であり、SMESについては、あまり知識も経験もない方も多数参加した。そのため初期には、いきなり500万キロワット時の概念設計よりも、技術者教育を目的としたより小型の1万キロワット時のものが設計され、その技術上のフィージビリティが検討された。図-4にそれを示す。このユニットはしたがってトレーニングとして設計されたものであるが、最近の高温超電導の実現によって、インテリジェントビル用電源とか、SDI用電源として、にわかにクローズアップされて来た。それについては後述する。

500万キロワット時のものはこのような段階を経て研究されたが、地下150mの岩盤の中にトンネルを構築し、その中に魔法瓶(デュアラ)を作り超電導コイルを内蔵するものである。直径400mにも達する大型であるが、その地下構造物の想像図を図-5に示した。発電出力は100万キロワットである。

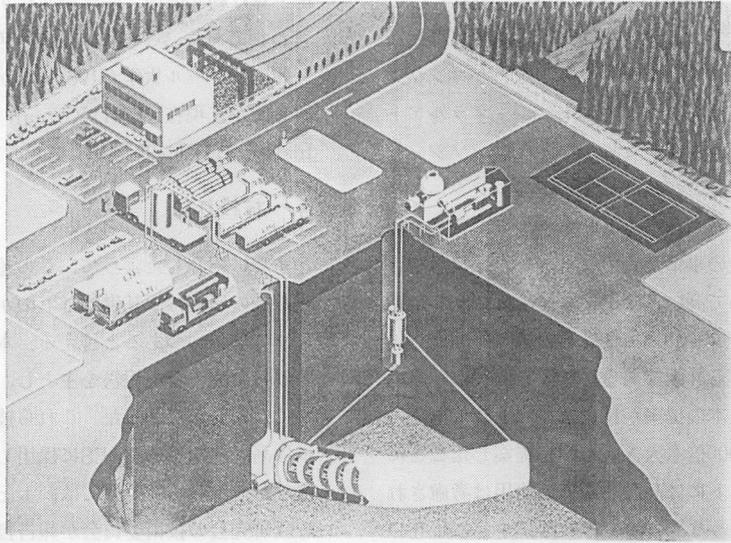


図-4 1万kWh SMESの俯瞰図

アセスメントの結果は、技術的にも経済的にも可能であり、商用化を進めるべきだと言っている。

このような背景で、昭和61年には上記の研究グループと、さらに興味を持つ他企業が加わり、やく40社の加盟によって超電導エネルギー貯蔵研究会（会長向坊

隆）が発足している。現在政府にたいして試験プラントの建設を提案しているが、エネルギー規模が50メガジュール（13キロワット時）である⁴⁾。

3.2. アメリカの研究

日本とほとんど同時にアメリカにおいても同種の研究が行われている。それは1982年から EPRI (Electric Power Research Institute) によって始められた、Conceptual Design and Cost of the Superconducting Magnetic Energy Storageである⁵⁾。EPRIはスポンサーであるが、実際の研究には、全米のこのテーマの研究者が一同に会している。

この研究の対象となったユニットの規模は、偶然にも日本のものと一致しており、550万キロワット時、出力100万キロワットである。しかし、日本の設計とは若干の差がある。エネルギー密度は日本のものと比較して小さく、したがってコイル直径は1.5kmと大きく、また電磁力も比較的小さい設計となっている。地下深部の硬質岩体よりも、地表近くの軟質岩盤にトレンチ（塹壕）をほり、これに構築するものである。日本が総建設費を約2900億円と評価したのに対して、約半値の建設費見積もりしている。

しかし、アメリカは最近急速にこのSMESの研究を進めている。それは本年3月から始まった高温超電導のフィーバーと無縁ではない。本年7月25日、アメリカ政府は外国人オフリミットの超電導商用化促進会議をワシントンで持ち、これにレーガン大統領が法政、行政上の11項目にわたる改善提案をおこなったのは著名である。この中にSMESが提案されている。

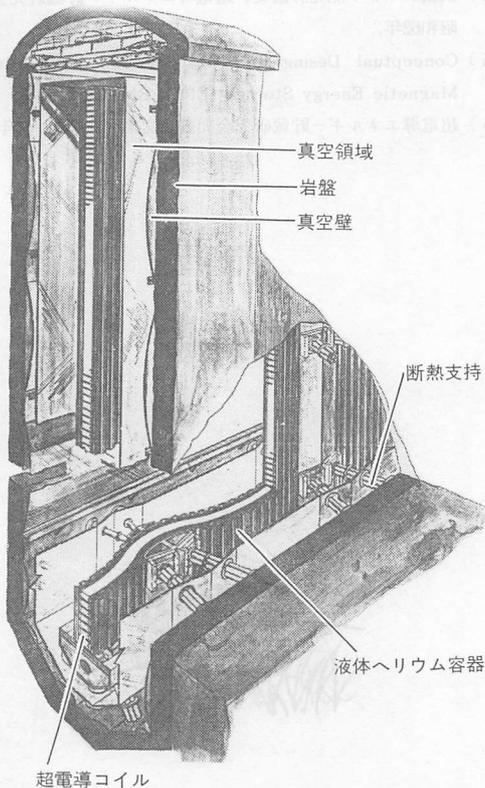


図-5 500万kWh・SMES地下構造

これを受けて、現在エバスコ社を主契約会社として、ウイスコンシン大学、ウイスコンシン電気事業連合会、シカゴ橋梁、ウェスティングハウス、などがコンソシュームをつくり、他方ベクテル社も、ジェネラルアトミック、ジェネラルダイナミックなどとコンソシュームを作り、両グループが政府にSMESのエンジニアリング試験装置、2万キロワット時・SMESの建設を提案している。諸般の事情からのプロジェクトは承認される可能性が極めて高い。フェーズ・1は1988年から開始して2年間、フェーズ・2はその後5年間とし、1995年には完成する計画である。総予算は約100億円である。上記の日本の提案が13キロワット時であるのと比較すると約1000倍も大きいものを提案したことになる。このプラントには高温超電導の使用は考慮されていない。そのようなものができれば、すぐに現在の超電導にとって代わることができるという考え方である。SMESには超電導以外にシステム自体の技術がある。日米のこの分野での技術格差は現在ないのが、このプロジェクトで惹起する可能性もある。

3.3 その他の国の研究

ヨーロッパは地理的に経済が協同体を取りやすい。電力においても協同体勢をとっており、したがって日米のように貯蔵装置に対する必要性が逼迫していない。しかし、フランスは発電における原子力の比率が大きく、したがってこのSMESに対しては興味を持っている。やはりコンソシュームを作り、100キロワット時のものを作るとヨーロッパ協同体(EC)に提案している。

総予算は約40億円、40%をECが出し60%は民活だと言われており、これに企業は難色を示している。

韓国はソウル大学が1984年頃からSMESの研究を開始したが、現在KERI(Korean Electric Reserch Institute)も研究を開始している。

4. おわりに

すでに紹介したように、この超電導によるエネルギー貯蔵の研究は、基礎的なものから産業技術のレベルにまでなりつつあると言える。本文では、特に世界における研究の現況報告を主とし、その技術の詳細については報告しなかった。これら技術的なもの、その中には高温超電導をSMESに採用した場合の問題などを含むが、これらについては、上記の超電導エネルギー貯蔵研究会の技術委員会が報告書⁶⁾を出している。

参考文献

- 1) エネルギー・資源, vol. 13, No 3, 1982.
- 2) 超電導エネルギー貯蔵システムに関する調査研究, NEDO-P-8408, 昭和60年.
- 3) 超電導エネルギー貯蔵システムに関する調査研究報告書, ENAA, 1985-プー3, 昭和61年.
- 4) 試験プラント開発計画案, 超電導エネルギー貯蔵研究会, 昭和62年.
- 5) Conceptual Desing and Cost of Superconducting Magnetic Energy Storage, EPRI, EM-3457, 1984.
- 6) 超電導エネルギー貯蔵研究会発表論文集-1, 昭和61年.

