

エネルギー貯蔵

(I) エネルギー貯蔵の必要性和
各種のエネルギー貯蔵技術

小 沢 丈 夫*

Energy Storage
(I) Necessity of Energy Storage and
Various Energy Storage Schemes

1. はじめに

昨年(1981)の8月7日の各紙の朝刊は、四国の仁尾町における1000 kWの太陽熱発電実験プラントでの発電実験の成功を報じた。この中で太陽の日射の間欠性を補うために、スチームアキュムレータによる蓄熱が行われていたことと、蓄熱が重要であることが解説されていた。続いて、翌日の各紙の朝刊にも、総理大臣決定の「エネルギー研究開発基本計画」が改定され、エネルギー貯蔵システムの重要性が総論内で新たに強調され、政府プロジェクトに「新型電池電力貯蔵システム」が追加されたことを伝えている。このように、エネルギー貯蔵技術の研究開発が、漸く注目されるようになってきた。

この小文では、まず、エネルギー貯蔵を必要とするいくつかの局面を示し、ついで、エネルギー貯蔵装置に要求される性能を列挙する。一方、貯蔵エネルギーの形態の観点から、エネルギー貯蔵技術を分類、整理し、その個々のエネルギー貯蔵技術の概要を簡単に解説する。この小文の読者は、熱エネルギーに大きな関心を持っていると思われるから、次号で、熱エネルギーの貯蔵技術につき、材料を中心に、やや詳しく述べることにする。

2. エネルギー貯蔵の必要

エネルギーの発生、生産と消費の間に、時間的なずれがある場合には、その調整のために、何らかのエネルギー貯蔵手段を必要とする。エネルギーの貯蔵は、何らかの変換を伴って行われるから、エネルギーの損失を伴い、その意味では望ましくないが、それにもかかわらず、いくつかの場合にエネルギーの貯蔵が必要となる。以下、

その事例を整理して示そう^{1,2)}。

最も典型的なエネルギー貯蔵の例は、上に述べた太陽エネルギーの利用にみられる。太陽熱温水器などは身近な例である。また、風力、波力、潮汐力のような自然エネルギーは、いずれも間欠的であり、不規則に発生するから、その利用にはエネルギー貯蔵が必要となる。廃熱も、一般に需要と無関係に発生するから、その有効利用には貯蔵手段を必要とする。電車や自動車などの制動時のエネルギー回収、すなわち、回生制動も一般にエネルギー貯蔵手段を設ける方が効率的である。

さらに、エネルギーの生産、輸送側の制約からエネルギー貯蔵が必要となる場合がある。その最も典型的な例が、電力貯蔵であり、しかも、電力貯蔵は現実に行われている最も大規模なエネルギー貯蔵であるから、やや詳しく解説しよう。電力の大きな特徴は、生産と消費が同時であることである。このきびしい制約の中で、一定の電圧と周波数という質の高い電力を、高い供給信頼度で送らなければならない。このため、電力の消費に即応して発電が行われている。

一方、第三次産業のような産業構造の高度化とクーラーの普及にみられるような生活水準の向上とを反映して、電力需要(発電側から見れば負荷)の変動が激しくなり、昭和40年代後半からは、夏の昼間に最大の電力消費がみられるようになった。たとえば、東京電力(株)の場合、気温の1℃の上昇は、冷房のために80万kWの電力需要をもたらす、その2/3は業務用、1/3は家庭用である。最大電力需要の約30%は空調の需要である。これらの要因から、Fig. 1に見られるように、電力需要が変動する。東京電力(株)会社では、最大電力需要に対し夜間電力需要は、約40%に落ち込み、東京支社では約30%、銀座支店では約15%となる^{2~6)}。

一方、国際エネルギー機関(IEA)の決定により、石

* 電子技術総合研究所：茨城県桜村梅園 1-1-4 〒305
Takeo Ozawa: Electrotechnical Laboratory,
1-1-4 Umezono, Sakuramura, Ibaraki, 305 Japan

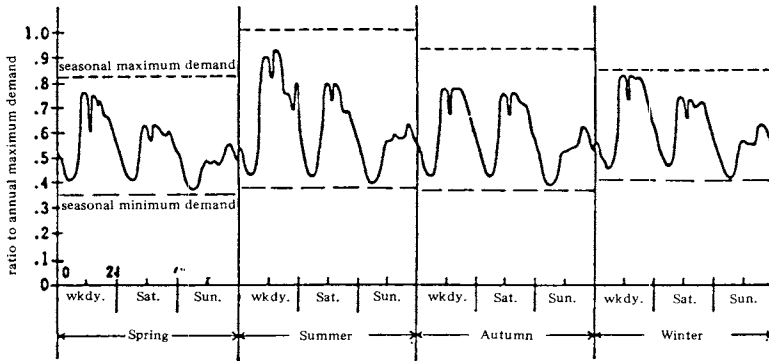


Fig. 1. Variation of electric demand in Japan (FY 1975).³⁾

油火力発電の増設は認められず、原子力発電や大規模石炭火力発電の割合が増していくが、これらの発電機は負荷の変動に応じて出力を変えにくく、定格出力で定常的に発電を行うのに適しており、その方が効率も高い。Fig. 1 にみられるような負荷の変動は、ダム式水力発電や中小規模の火力発電によって追従しており、さらに、夜間の余剰電力を山間部の揚水発電所に送り、下のダムから上のダムへ水を汲み上げる動力として使い、昼間の電力需要増大時に逆に水を流して発電し、その電力を都市部へ送電している(これを負荷平均化という)^{4), 5)}。

このような特性の異なる発電機の使い分けは、経済性の観点からも妥当である。つまり、固定費が高く、可変費の安い原子力発電や大規模火力発電は、長時間運用するのに適し、逆に、固定費が安く、可変費の高いガス・タービン発電や中小規模火力発電や水力発電は、負荷変動のためやむを得ず行う短時間運転に適している。こうして、経済的負荷配分が行われ、Fig. 2 にモデル的に示したような電源運用が行われている^{2), 4), 5)}(Fig. 6 参照)。

しかし、揚水発電の立地に制約があり、しかも、次第に遠隔地に移る傾向を示している。このため、さまざま

な電力貯蔵技術が検討されている⁶⁾。その中には、海水揚水発電、地下揚水発電を始め、圧縮空気、蓄熱、フライホイール、二次電池、超伝導磁石、水素が含まれている。日本より電力系統網が小さく、類似の電力需要事情にある米国でも、後述のように、同様な検討が行われている^{7), 8)}。これに対し、欧州では、電力系統網が大きく、空調電力需要が少なく、山間部の揚水立地が多いので、あまり必要が感じられていない。むしろ、夜間電力料金を政策的に安くし、夜間電力需要を喚起することにより、電力需要変動を小さくしようとしている(負荷管理と呼ばれる)。その一例が、Fig. 3 であり、夜間余剰電力は蓄熱により吸収されたという⁸⁾。

エネルギー輸送上の制約から、エネルギー貯蔵が必要となる場合もある。都心地区での電力需要変動が著しいことは、前述の例からも明らかであろう。しかも、電力需要の伸びに応じて送配電の流通設備を新設することは困難である場合が多い²⁾。二次電池による電力貯蔵は、環境安全性がよく、規模の制約がないから、都心地区へも立地可能である。このような電力貯蔵設備を、たとえば、ビルの地下などに設置すれば、夜間も電力を送り、これに貯え、昼間の電力需要にあてることにより、送配電線増設の必要を、先に繰り延べできる。

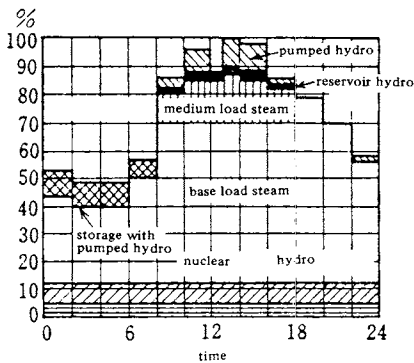


Fig. 2. A model of electric demand variation and load dispatch (1975).⁵⁾

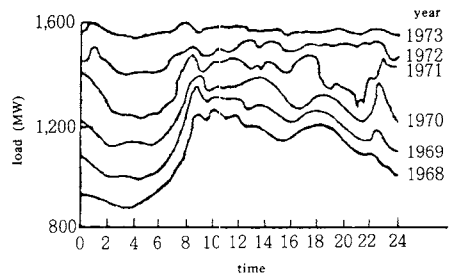


Fig. 3. Change of electric demand by load management (Hamburg).⁸⁾

電気鉄道においても、類似の事情により電力貯蔵設備の設置が計画されている^{9,10)}。住宅団地の建設に伴い、線路延長が計画された。新しい終点駅近くに変電所を設けるか、これを鉛蓄電池による電力貯蔵設備とし、架線の直流電力を、ラッシュ時以外に貯え、朝夕のラッシュ時の電力需要増大にあてるかの2案が検討された。その結果、経済的にも有利な後者が採られたという。このような電力貯蔵設備は、電車の回生制動の電力回収にも使われるので、その検討例もあり、後述のように、同様な目的ではフライホイールの実用例もある。

需要側が間欠的パルスである場合にも、エネルギー貯蔵は重要である。瞬時に大電力を放出する放電実験などで、コンデンサに電気エネルギーを貯え、コンデンサの短い時定数を利用して放電を行わせるのが、その一例と言えよう。工業的にも、加熱のためスチームをパルスのように利用する場合が多くみられ、ボイラーを定常運転し、予剰スチームをスチームアキュムレータに貯えて、パルスの需要に応ずることにより、省エネルギーを達成している例がある¹¹⁾。

3. エネルギー貯蔵の方式

すでに実用されているエネルギー貯蔵方式と、実用化が有望視されているエネルギー貯蔵方式とを、入出力エネルギーの形態の観点から分けると、次のようになる。かつて内は、貯蔵されているエネルギーの形態である。まず、力学エネルギーでは、

- ① 従来型揚水発電(位置エネルギー)
- ② 地下貯水式揚水発電(位置エネルギー)
- ③ 海水揚水発電(位置エネルギー)
- ④ 圧縮空気貯蔵(圧力エネルギー)
- ⑤ フライホイール(運動エネルギー)

があり、電気エネルギーを直接入出力させるものに、

- ⑥ コンデンサ(静電エネルギー)
- ⑦ 超伝導磁石(磁気エネルギー)
- ⑧ 二次電池(化学エネルギー)

が含まれる。

熱エネルギーを貯蔵、放出させるものは、次の4種である。

- ⑨ 顕熱蓄熱(熱エネルギー)
- ⑩ 潜熱蓄熱(熱エネルギー)
- ⑪ 化学蓄熱(化学エネルギー)(吸着利用を含む)
- ⑫ 濃度差蓄熱(化学エネルギー)

水素によるエネルギーの貯蔵は、これらに対し、やや特殊である。貯蔵エネルギーの形態は、化学エネルギーであるが、水素製造法に水の電気分解法と熱化学法とがあり、前者では電気エネルギーが水素のもつ化学エネルギー

に変換されるが、後者ではいくつかの化学反応を組み合わせて循環させ、熱エネルギーを水素の形に変換している。利用の面でも、燃料電池による発電、燃焼による熱利用、水素エンジンによる動力への応用がある。また、太陽光のノルボルナジエンの光異性化反応による貯蔵がよく知られているが、触媒反応による発熱をもっぱら利用しているから、熱エネルギー貯蔵の一方式として位置づけることができよう¹²⁾。

従来型揚水発電は、実用化されている大規模エネルギー貯蔵方式であり、よく知られているから、これ以上触れないが¹³⁾、他の新しいエネルギー貯蔵方式を開発するときの目標として、従来型揚水発電の性能、とくに効率と経済性が参考となる。従来型揚水発電と直接競合する二次電池の場合、たとえば、わが国の開発計画、すなわち、通商産業省工業技術院のムーンライト計画の大型省エネルギー技術開発として行われている新型電池電力貯蔵システムの開発プロジェクトでは、従来型の揚水発電と同等以上の経済性をもつことが目標とされ、交流電力を貯蔵し、交流電力として放出するまでの効率は、揚水発電と対比して、70%以上を開発目標としている^{4,14)}。そこで、参考として、最近のわが国の揚水発電の建設費の推移を、Fig. 4 に示した。また、落差 500 m とすると、そのエネルギー密度は、 0.68 kWh/m^3 となる。

地下貯水式揚水発電は、天然の空洞や廃坑などを利用して下のダムとし、地上にダムを建設して揚水発電を行うものである。このような適当な立地があれば、従来型揚水発電と同様、技術的にも経済的にも実用化しやすい。米国、西欧では立地があると言われるが、日本には適当

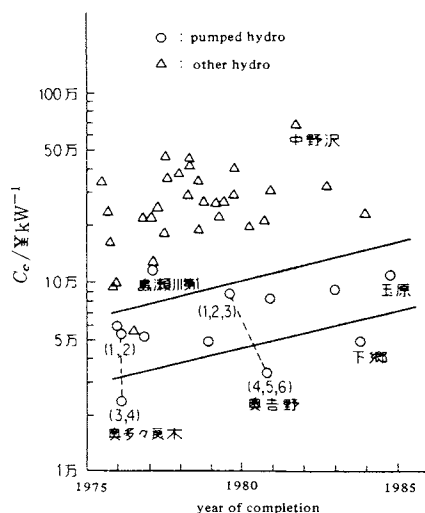


Fig. 4. Construction cost of pumped hydro-electric systems.⁵⁾

な立地が少ない。圧縮空気も同様に岩塩坑跡や天然の空洞を圧力容器とし、これに圧縮空気を蓄え、これを用いて空気タービンまたは内燃タービンを回すもので、地下貯水式揚水発電と同様、適当な立地がある場合だけ有望な方法である。西独の岩塩坑跡を利用した実用例があり¹⁵⁾、米国でも立地調査が行われている¹⁶⁾。わが国でも鉱山の廃坑を使った小規模の実用例があるが、あまり一般的でない。

コンデンサによる電気エネルギー貯蔵は、前述のように、たとえば放電実験などでは、すぐれた貯蔵手段であり、通常のコンデンサで 10^3 J/m^3 程度のエネルギー密度があり、耐電圧の高いセラミックコンデンサでは 10^6 J/m^3 程度まで可能であるが、上述のような特殊用途以外は、経済性の点で使えない。水素エネルギーシステムは、もともと化石燃料資源の枯渇する来世紀中頃以降の実用化を想定して構想されたシステムである。やや早すぎる研究開発が展開されており、熱化学法では効率の点で見通しがついておらず、高温高圧水電解は、効率の点ではかなりの見通しがついているものの、燃料電池の効率が悪いので、電力貯蔵方式としては、二次電池に太刀打できない。水素燃料としても、経済性の点で実用化の見通しは悪く、むしろ、石油からの水素製造に代る化学工業用原料としての見通しが立てられている段階である。

これまで述べてきた揚水発電、圧縮空気貯蔵、コンデンサ、水素については、これ以上触れず、フライホイール、超伝導磁石、二次電池について以後にやや詳しく述べ、ついで、熱エネルギー貯蔵の四方式につき次号で解説する。

4. エネルギー貯蔵装置の性能と評価

各種のエネルギー貯蔵装置につき、個別的に解説する前に、一般的にエネルギー貯蔵装置に要求される性能ないし評価項目を示すこととする^{1,3)}。

①効 率

出力エネルギーと入力エネルギーの比であり、装置の動作条件により変化することが多い。入出力エネルギーが熱エネルギーの場合は、その質、すなわち、温度が高く、あまり変わらないことが望ましいから、エクセルギー効率、つまり、出力のエクセルギーと入力エクセルギーの比も考慮する必要がある。

②負荷応答特性

③部分負荷特性

先に、電力貯蔵の例で説明したように、需要が変動する場合、その変動に即応して出力の大きさを変えられることが必要である。たとえば、装置の定格出力の1/2から定格出力まで、出力を変化させるに要する時間などが

問題となる(負荷応答特性)。さらに、定格出力以下の部分負荷において、効率が低下しない方が望ましい(部分負荷特性)。

④貯蔵エネルギー密度

⑤出力密度

装置の単位重量あたり、あるいは、単位体積あたりの貯蔵エネルギー量および出力の大きさを意味している。都市内設置などを想定する場合は、用地費の高い日本では、用地単位面積あたりの量も、重量な評価項目となる。

⑥寿命および信頼性

⑦保守管理の容易さ

⑧操作性

経済性の観点から、少なくとも5年以上保証した性能を維持することが要請される。また、実用時の平均故障率や保守管理、操作の容易さが重要である。一般家庭用エネルギー機器では、この点がとくに重要となる。

⑨環境保全性

⑩安全性

運転時ばかりでなく、製造時における有害排出物についても考慮を払う必要がある。

⑪トータルシステムへの適応性、柔軟性

⑫建設期間およびリードタイム

トータルシステムへの適応性や柔軟性は、それぞれの具体的事情により、さまざまなことが考えられる。たとえば、二次電池の電力貯蔵システムは、揚水発電のように単機容量の大きいポンプと発電機を用いず、電池を小規模のモジュールとして組み、同一規格のモジュールを多数個集めて構成する。このため、全定格容量をモジュール単位で容易に増設できるという融通性がある。このモジュール構成は、モジュールの工場流れ生産を可能にし、建設期間を著しく短縮する。その結果、電力系統内のどこかで需要増大が急に計画されたときにも、適応しやすい。

⑬利用資源量

⑭エネルギー償却期間

使用されている材料が、稀少なあるいは偏在する戦略的資源を利用していることは、望ましくないから、この観点からの考慮も必要である。また、一般にエネルギー変換装置では、少なくともその装置の生産のために投入されるエネルギー量に比べ、その装置が寿命に達し、使えなくなるまでに産出するエネルギー量が、大きくなければならない。換言すれば、投入エネルギーに等しい量のエネルギーを産出するに要する期間、エネルギー償却期間と寿命との対比が問題となる¹⁷⁾。エネルギー貯蔵装置は、それ自身がエネルギーを変換、生産するものではないから、変換装置に対するこのようなエネルギー分析

的な考え方を、そのまま適用することはできない。また、現在のところ、定式化した評価方法もないが、トータルシステムとしての省エネルギー効果や必要性の観点から、貯蔵装置導入の効果をエネルギー分析の立場で考慮する必要がある。

エネルギー技術やエネルギー機器においては、経済性が、効率、信頼性、環境保全性と並んできわめて重要な評価項目である。電子技術や情報処理技術のように、新しく創造された技術や機器が、新しい質、新しい機能を創出するだけでなく、新しく開発されたエネルギーの技術や機器は、既存のものと代替していくだけである。この相互代替性は、エネルギー技術の研究開発において十分考慮しておく必要があり、しかも、相互代替は通常経済性を介してなされる。その意味でも、研究の事前評価において、経済性に関する一応の見通しを立てておくべきであろう。以下でも、二、三、その実例を示す。

経済性の評価は、建設費と運転保守費とから行われる。建設費、 C_c は、出力に関するコスト、 C_p と貯蔵容量に関連するコスト、 C_s とに分けられる。そこで、

$$C_c = C_p + C_s \cdot \tau \quad (1)$$

となり、 τ は持続時間である。電力貯蔵についてなされた経済性評価の一例を、Fig. 5 に示す⁶⁾。建設費の年償却費と運転保守費との和を、年間稼働時間、 θ の関数として求めることにより、年間総経費、 C_T とエネルギー原価 C_E とが求められる。すなわち、

$$C_T = C_f + C_v \theta \quad (2)$$

$$C_E = C_f / \theta + C_v \quad (3)$$

ここで、 C_f は固定費、 C_v は可変費であり、年償却率を α とすれば、

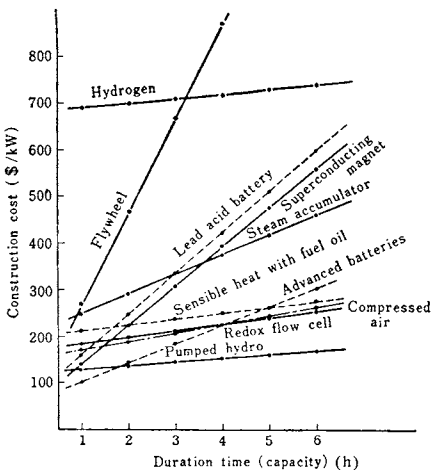


Fig. 5. Relation between construction cost and duration time of various electric energy storage systems.⁶⁾

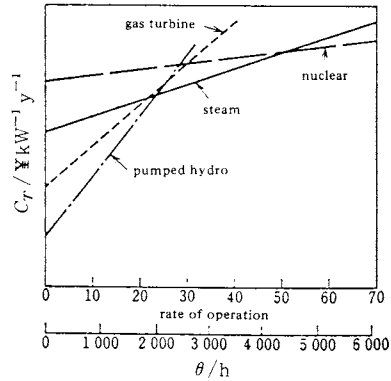


Fig. 6. Relation of annual total cost with operating time and rate of operation for various electric power plants.⁴⁾

$$C_f = \alpha C_c \quad (4)$$

の関係がある (Fig. 6 参照)。

5. 二次電池による電力貯蔵

現在、エネルギー貯蔵技術の中で最も大規模な研究開発が行われているのは、二次電池による電力貯蔵であり、日米で盛んな研究開発が行われている。日本のムーンライト計画では、11年間約170億円の規模の開発研究と実証実験が予定されている^{4,14)}。そのアロー図を示したのが、Fig. 7である。開発される電池は、ナトリウム・硫黄電池、亜鉛・塩素電池、亜鉛・臭素電池、レドックス・フロー電池の4種である。このうち、1ないし2種が中間評価により選択され、実際の電力系統内で1MW級の規模で実証試験される。これに先立ち、改良型鉛蓄電池を用い、これに交直変換器、直流遮断器などをつけた1MW級の電力貯蔵システムをつくり、電力系統においてシステム試験が行われる。また、電力系統への適用に関するソフトウェアの研究も平行して行われる。

米国でも、前記4種の電池の他、リチウム・硫化鉄電池の研究開発が行われている。さらに、MW級電池の試験を行うBEST計画 (Battery Energy Storage Test) が立案され、その施設がニュージャージー州の電力会社内につくられた。さらに、1983年に始まるこの10倍の実規模の電力貯蔵設備をミシガン州につくる計画、SBEED計画 (Storage Battery Electric Energy Demonstration) があり、これには改良型鉛蓄電池が使われる。しかし、最近のレーガン政権の政策により、実現の見通しが得られなくなった。わが国では、実規模の1/10ないし1/20規模で実証試験が可能と考えているのに対し、米国では、このように、実規模での実証により初めて電力会社を納得させられると考えている。フランスも、原

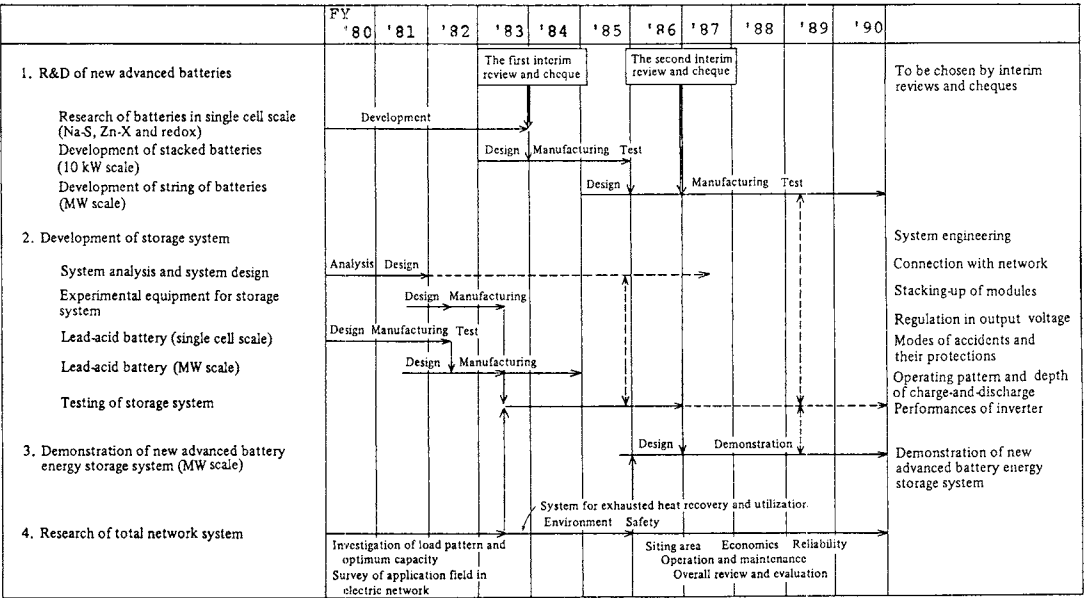


Fig. 7. R, D&D schedule of advanced battery energy storage system.

子力発電を進めているので、このような電力貯蔵に関心を示し始めた。

わが国における新型電池電力貯蔵システムの開発プロジェクトは、次のような開発目標で進められている。

- 効 率 70%以上
- (交流入力より交流出力まで)
- 基準充放電時間 8時間充電，8時間放電
- 寿 命(充放電サイクル) 1500回以上
- (耐用年数約10年)
- 環境保全性 すべての環境基準(法令)を満足する。

また、将来の実用システムでは、

- 経済性 揚水発電と同等以上
- 設置場所 都市内または都市近傍
- 設置可能
- 設置面積 変電所用地と同等であること

とされている。

次に開発されている4種の電池につき、簡単に解説しよう^{4,5,8)}。ナトリウム・硫黄電池は¹⁸⁾、1960年代半ばにフォード社において研究が始められ、電気自動車用として開発されてきたが、大規模な電力貯蔵用としても有望である。その基本的な原理と構造は、Fig. 8に示すようなものである。電池は約350℃で作動し、放電時には、内筒内の融解した金属ナトリウムから外部回路へ電子が奪われ、生成したナトリウムイオンが内筒を形成するβ

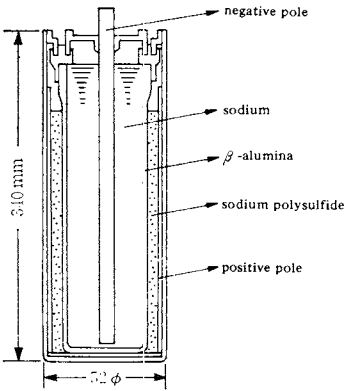
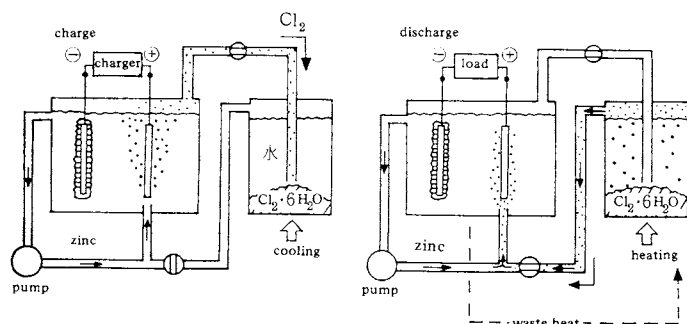


Fig. 8. Sodium sulfur battery.²²⁾

アルミナ(あるいはβ^{*}アルミナ)電解質を通して、内筒外に達する。ここで、外部回路を通り仕事をしてきた電子と融解硫黄とナトリウムイオンが反応し、多硫化ナトリウムが生ずる。充電はこの逆反応である。

βアルミナは、αアルミナと異なり、ナトリウムイオン導電性をもつ固体電解質である。正極の硫黄および多硫化ナトリウムは、導電性をもたないから、集電体として炭素のフェルトが充てんされている。このように電池を形成する基本的材料は、資源的にも豊富で安価なものであり、100%近い電流効率をもち、起電力も高く(約2V)、電圧効率も良効であるから、原理的にはきわめてすぐれた電池といえよう。しかし、多硫化ナトリウムが

Fig. 9. Zinc chlorine battery.²²⁾

きわめて腐食性に富み、外側の金属容器材料や β アルミナを腐食すること、 γ - β アルミナ管が割れ、ナトリウムと硫黄が反応すれば、危険であることなど、多くの開発課題がある。

亜鉛・塩素電池は¹⁹⁾、塩化亜鉛水溶液を電解質とする常温作動の電池である。放電時は、負極の亜鉛が電子を放出して亜鉛イオンとなって電解質水溶液内に入り、正極で塩素ガスと電子とから塩素イオンができ、全体で塩化亜鉛が生ずる。充電はこの逆の過程である。その原理はFig. 9 に示した。塩素は水和物($\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 包接化合物)として貯蔵されており、加熱により塩素ガスが発生する。逆に、充電で発生した塩素ガスは冷水に吹き込み、水和物とする。

起電力が約2Vと高く、充放電に伴う電圧の変化も少ないのが、この電池の特徴である。充電時の亜鉛の電着は、樹枝状結晶を生成し、対極と短絡する恐れがあり、電解質水溶液への防止剤の添加や電解質水溶液の循環などの対策が講じられている。また、塩素極の賦活や劣化防止、小型循環ポンプの信頼性向上など開発課題も多い。塩素ガス洩れの防止対策も重要であり、このため、10

kW程度の規模でモジュール化し、モジュールごとに塩素を水和物で貯蔵している。

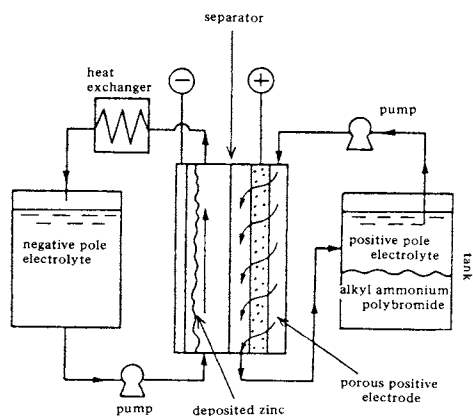
亜鉛・臭素電池も²⁰⁾、亜鉛・塩素電池と類似の機構により作動する。その機構を模式的に示したのが、Fig. 10 である。塩素と異なり、臭素は蒸気圧が低く、水によく溶ける。しかし、電解質水溶液中の臭素の濃度を低く抑え、臭素による腐食などを防止する目的もあって、テトラアルキルアンモニウム多臭化物の形で臭素が貯蔵される。こ

の多臭化物は、水より比重が重い褐色の油状物質で、ここから臭素が電解質水溶液へ供給される。

起電力が1.8Vとやや低いほかは、特徴および開発課題は、亜鉛・塩素電池と類似である。塩素の場合と異なり、臭素が電解質水溶液に溶解しているので、自己放電を防止し、効率をあげるため、隔膜が使われ、その材料開発が、臭素錯化剤の開発と共に重要である。これらの亜鉛・ハロゲン電池は、初めのナトリウム・硫黄電池や従来の電池と異なり、電解質水溶液循環のためのポンプやタンクのようなプラント系が加わっている点も特徴的である。

化学プラントの要素がさらに大きな割合を占める電力貯蔵用電池に、レドックス・フロー型電池がある²¹⁾。これは従来の静的な電池の概念と異なり、むしろ、化学プラントに近い。その原理を示したのが、Fig. 11 である。酸化、還元により原子価が変化するイオン、すなわち、レドックスイオンを含む水溶液をタンクに貯蔵し、これを流通型電解槽内で酸化、還元することにより充放電を行うものである。図の例では、負極液としてクロムイオンが使われ、充電状態の Cr^{++} イオンが流通型電解槽の電極で電子を失い、酸化されて Cr^{+++} イオンとなり、正極側では充電状態の Fe^{+++} イオンが外部回路を通ってきた電子を受取り、還元されて Fe^{++} イオンとなる。充電は、この逆過程である。

用いられるレドックスイオンには、Ti, Mn, V, Snなども可能であり、お互いの酸化還元電位の差が大きく、溶解度が大きいほど、タンクの単位容量あたりの貯蔵可能電力量が増す。しかし、経済性や安定性なども考慮する必要がある。この電池の開発は、日本の電総研と米国のNASAで行われているが、いずれも、Fig. 11 のイオンを塩酸酸性溶液で用いている。エネルギー貯蔵量はタンクの大きさで決まり、出力の大きさは流通型電解槽で定まるから、この電池はまた、貯蔵と変換の機能が分離されている点でも他の電池と異なる(学問的には、燃料

Fig. 10. Zinc bromine battery.⁴⁾

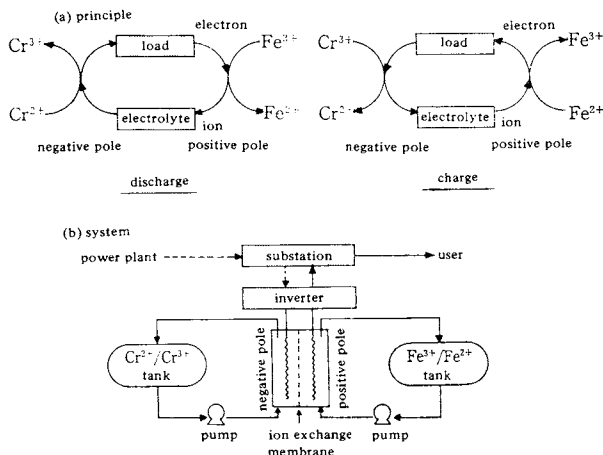


Fig. 11. Principle of redox flow cells and system.²²⁾

電池に分類される)。したがって、夜間余剰電力ばかりでなく、週末の余剰電力を貯えるのにも適し、さらに、太陽電池を独立電源として使うときにも有利である。

レドックスイオンとその共存物質の選択が、初めの大きな開発課題であったが、現在では上記のように方向がおおよそ定められている。電極は炭素の布もしくはフェルトが使われ、その種類、性状により性能が大幅に異なり、金、銀、銅、鉛などの触媒担持が必要な場合もある。正極液と負極液との混合は自己放電を意味するから、これを防止し、かつ、電流をイオンの形で通すために、隔膜、とくにイオン交換膜の開発が重要課題である。タンク、ポンプなどの化学プラント要素には、あまり開発要素はないが、全システムの最適化設計が必要となる。電総研でなされた実用規模の2万kWの電力貯蔵システムの概念設計において想定されたシステムは、Fig. 12のようなものであり、これが都市内の6.6kVの配電用変電所に併置されることとなろう。このように、スケール効果の大きいタンクを含むシステムであるから、他の3種の電

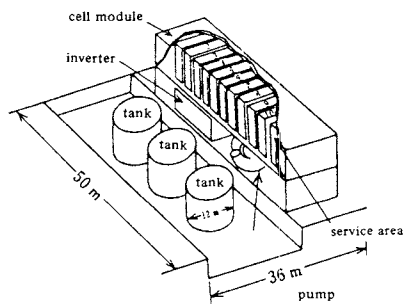


Fig. 12. Conceptual design of redox flow cells electric energy storage system. (20 MW, 100MWh)⁴⁾

池のように電気自動車用として使うことはできない。

最後に、エネルギー装置としての電池の特異な性格を簡単に解説しよう^{4, 22)}。電池におけるエネルギー変換は、酸化還元電極反応であるが、電極面積に比例した出力が得られ、規模の効果が無い。そこで、1対の正負極と電解質より成る単電池をつくり、これを直並列に接続した組立単位としての集合電池をつくり、さらに、それを合わせて保守管理のための群電池(モジュール)とする。群電池を必要数集積すれば、発電所がつけられる。

このような階層的構成をとることに加え、カルノーサイクルの制約をうけない直接発電装置であり、環境安全性もよいことから、比較的小規模で都市内に分散配置できるほか、保守管理が容易で、建設期間が短く、逐次増設が容易であるなど、数多くの利点が生まれ、これまででない形態で、電力系統に導入できる。

6. 超伝導磁石

1911年Kamerlinch Onnesにより、極低温での水銀の超伝導現象が発見されたが、その実用的な応用は最近十数年間に漸く実現するようになり、高磁場発生のための超伝導磁石を始め、超伝導素子や超伝導磁気浮上や超伝導による電気標準計測の研究が行われるようになった。超伝導の永久電流をエネルギー貯蔵に利用する考えも、1960年代前半に発表され、1970年代から具体的研究が始まっている²³⁾。その特徴は、貯蔵効率がきわめて高いことであり、また、急速な充放電も可能である。磁束密度を B (T)とすると、磁場のエネルギーは約 $0.1 B^2$ (kWh/m³)となる。もし、 B を5Tとすると、エネルギー密度は2.5 kWh/m³となり、落差約1,000 mの揚水発電に相当し、エネルギー密度も大きい²³⁾。

超伝導磁石による電力貯蔵システムは^{23, 24)}、Fig. 13のように、磁伝導コイル、SCRによる交直変換器、ヘリウム液化器より成る。二次電池による電力貯蔵システム同様、夜間余剰電力を貯蔵し、昼間の電力需要増大時に

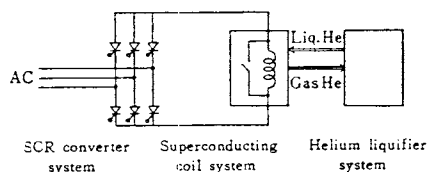


Fig. 13. Block diagram of superconducting electric energy storage system.²³⁾

放出する負荷平均化の用途の他、スチームアキュムレータを例に説明したようなパルスの電力負荷を調整するためにも使われよう。

負荷平均化用に数十万kW出力、100ないし1,000万kWhの貯蔵容量のシステムを想定すると、5Tの均一磁場として、直径100m、高さ50mから直径200m、高さ150mの巨大なコイルとなり、約100気圧の磁気圧が加わる。この電磁力の支持が問題となる。これをステンレス鋼で支えようとする、材料費だけで約42円/kWh(発電原価)といわれ、コスト的に現実的でない。このように支持材のコスト高を解決する方法として、Fig.14のような地中の岩盤支持方式が提案されている。

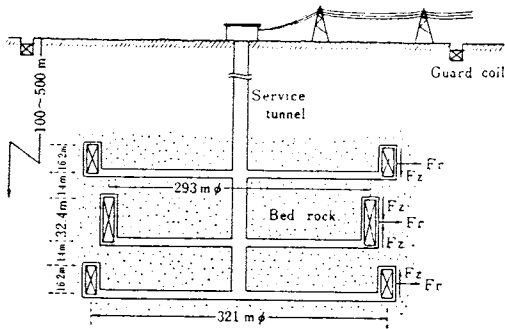


Fig. 14. Bed-rock-supported 10,000 MWh superconducting electric energy storage system.²³⁾

このように、負荷平均化のための電力貯蔵用装置としては巨大なものであるから、その実現は二次電池による電力貯蔵より遅れるものと考えられており、むしろ、当面パルスの負荷調整用としての開発が進められると予測されている。

7. フライホイール

足踏みミシンや手回しろくろのはずみ車でなじみ深いフライホイールの使用は、数千年前のウルの時代にさかのぼると言われる²⁶⁾。特殊用途には、現在でもよく使われている。最近、各種のエネルギー貯蔵の必要から、盛んに研究されるようになった^{26~28)}。回転体に貯えられる慣性エネルギーを E_i 、慣性モーメントを I 、回転角速度を ω とすれば、

$$E_i = \frac{1}{2} I \omega^2$$

となる。回転体に使用する材料の引張り強さを σ 、その密度を ρ とすると、回転体が遠心力により破壊されずに貯蔵できる理論エネルギー密度 E_w は、次式で与えられる。

$$E_w = K_s \sigma / \rho$$

ここで、 K_s は回転体の形状で定まる定数であり、その値は1.0~0.3である。安全性を考慮すれば、実際の E_w は、比強度 σ/ρ の約1/4となる。

通常の炭素鋼では比強度は $(0.2\sim0.3) \times 10^6$ cm程度であるから、理論エネルギー密度は数Wh/kg程度となる。高張力鋼やガラス繊維強化プラスチックでは、比強度が $(1\sim2) \times 10^6$ cm程度となるから、数十Wh/kg程度の理論エネルギー密度が期待でき、鉛蓄電池と同程度となる。いずれにせよ、このような強度比の大きい材料の開発や回転体の製造技術の開発が重要となる。実用化のためのシステム開発と平行して、このような材料と製造技術の基礎的研究も進められている。また、Fig.5にみられるように、長い持続時間の用途への応用のためには、経済性の向上も重要な課題である。

フライホイールは、機械的エネルギーや電気エネルギーを急速に出し入れするのに適しており、上の式にみられるように、規模の制約もなく、環境保全性もよいから、適当な規模で分散配置するのに適している。とくに、パルスのエネルギーの貯蔵放出に適している。このため、Fig.15に示したような電車の回生制動で生じた余剰回生電力の吸収では、試験的に実用されている²⁹⁾。同様に、自動車や電車の回生制動とその回生エネルギーの発進加速への利用のため、車載用フライホイールの開発が進められ、一部実用化している。また、核融合実験のため、一度に多量のエネルギーを必要とするが、ここでもフライホイールの利用が試みられている。電力の負荷平均化に応用する構想もあるが、経済性の点でまだ揚水発電や二次電池に及ばない。

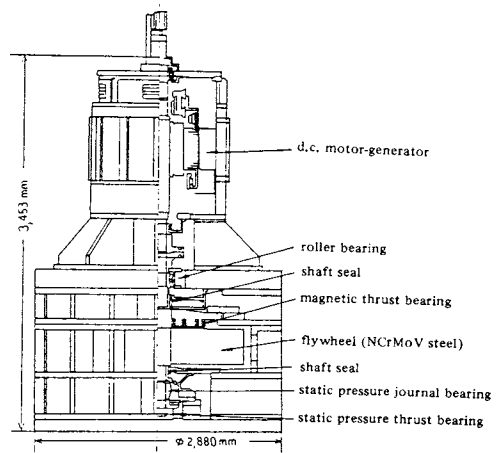


Fig. 15. Flywheel energy storage system for electric railway (capacity 15 kWh).²⁶⁾

参考文献

- 1) 小沢丈夫, 応用物理 **50**, 439 (1981)
- 2) 上之蘭博, 電気学会雑誌 **101**, 507 (1981)
- 3) 蓄エネルギーシステムのテクノロジーアセスメント委員会, “蓄エネルギーシステムのテクノロジー・アセスメント(工業技術院委託調査)”, 未来工学研究所, 東京(1977)
- 4) 小沢丈夫, 野崎 健, “燃料電池とその応用”, オーム社, 東京(1981)
- 5) 野崎 健, 金子浩子, 小沢丈夫, “二次電池による電力貯蔵技術の可能性”, 電総研調査報告第201号, 電総研, 筑波(1979)
- 6) 中央電力協議会技術開発専門委員会電気エネルギー貯蔵ワーキンググループ, “電気エネルギー貯蔵に関する報告書”, 中央電力協議会, 東京(1978)
- 7) J. R. Birk, Engineering Foundation Conf. on Energy Storage: User Needs and Technology Application (Pacific Grove, Calif., 1976); D. L. Douglas, J. R. Birk “Annual Review of Energy” (J. M. Hollander, M. K. Simons, D. O. Wood ed.) vol. 5, 61, Annual Review, Palo Alto (1980)
- 8) N. P. Yao (高橋武彦訳), 電気学会雑誌 **97**, 780 (1977)
- 9) 野々口正雄, 電気と管理 **22**, [4] 29 (1981)
- 10) 野々口正雄, 電気学会新・省エネルギー研究会資料, ESC-81-32, 電気学会(1981)
- 11) 前田利春, “省エネルギーのためのアキュムレータ”, ビジネスオーム社, 東京(1980)
- 12) J. R. Bolton, D. O. Hall “Annual Review of Energy” (J. M. Hollander, M. K. Simmons, D. O. Wood ed.) vol. 4, 353, Annual Review, Palo Alto (1979)
- 13) 日高稔康, 高橋昭吉, 電気学会雑誌 **95**, 519 (1975)
- 14) 電気学会化学・電気エネルギー変換常置専門委員会電力貯蔵用二次電池適用調査ワーキンググループ, “電力系統への二次電池の適用”, 電気学会技術報告(Ⅱ部)第103号(1980)
- 15) P. Z. Baden, H. Hoffheins, *Brown Boveri Rev.* **64**, 34 (Jan. 1977)
- 16) J. Bush, Jr.ほか, Proc. 11th Intersoc. Energy Conv. Eng. Conf. 769099 (1976)
- 17) 茅 陽一編著, “エネルギーアナリシス”, 電力新報社, 東京(1980)
- 18) 木村修造, 岩淵純允, 電気学会新・省エネルギー研究会資料, ESC-81-33, 電気学会(1981)
- 19) 藤井康次, 藤原邦彦, 清水俊二, 渡壁雄一, 飯本俊昭, 芦沢公一, 電気学会新・省エネルギー研究会資料, ESC-81-34, 電気学会(1981)
- 20) 広瀬 尚, 藤井利宣, 金指元憲, 電気学会新・省エネルギー研究会資料, ESC-81-35, 電気学会(1981)
- 21) 野崎 健, 金子浩子, 小沢丈夫, 電気学会新・省エネルギー研究会資料, ESC-81-36, 電気学会(1981)
- 22) 小沢丈夫, 化学教育 **29**, 211 (1981)
- 23) 小山健一, 応用物理 **50**, 449 (1981)
- 24) 小山健一, 藤野治之, 電気学会雑誌 **101**, 525 (1981)
- 25) 今井寛之, 電子技術総合研究所彙報 **40**, 853, 930 (1976)
- 26) 松野健一, 河村寿三, 電気学会雑誌 **101**, 521 (1981)
- 27) 松野健一, 応用物理 **50**, 445 (1981)
- 28) 菊池英一, 栗山洋四, 矢田恒二, 大滝英征, 吉田茂美, 西郷宗玄, 機械技術研究所資料第65号(1976)
- 29) 木村好男, 河村寿三, 星野吉信, 浅越泰男, 丸山信昭, 計測と制御 **20**, 374 (1981)

★Proceedings of the Third National Symposium on Thermal Analysis (インド)について

1981年11月23日～25日にインドの Trivandrum にある Vikram Sarabhai Space Centre において, 同センターとインド熱分析学会 (ITAS) の共催により, 第3回熱分析国内シンポジウムが開催された。特別講演4件のほか, 一般講演は (I) Kinetics of solid state reaction,

(II) Phase equilibria and phase transformations, (III) Synthesis and thermal characterization of materials の三つのセッションで74件の発表があり, プロシーディングスが編集者の1人である Bhabha Atomic Research Centre の Dr. A. K. Sundaram から学会に寄贈された。ご覧になりたい方は学会事務局にご連絡下さい。
(東工大工材研 斎藤安俊)