

新型電池による電力貯蔵システム

Advanced Battery Electric Energy Storage System

小 沢 丈 夫*

Takeo Ozawa

1. はじめに

エネルギーの貯蔵は、必ず損失を伴い、費用も要するから、必要がなければ行わない方がよい。揚水発電による電力貯蔵においても、効率はおよそ70%とされているから、約30%の損失があり、発電所の建設費もkWあたり10ないし15万円と言われている。それにも拘らず揚水発電が行われるのは、次のような事情による。

電力の大きな特徴は、生産と消費が同時であることであり、消費に即応して発電が行われることにより、停電がなく、高い供給信頼度で、一定の電圧と周波数の質の高い電力が供給されている。発電側の原子力発電や大規模火力発電は、一定の出力で発電するのに適しており、稼動時間が長い程、他の発電より経済的に有利になる。これに対し、中小規模の火力発電（とくに、ガス・タービン発電など）は、上記の事情で、やむを得ず行う短時間の発電を行うのに適している。しかし、国民生活水準の向上（とくに、冷房需要の増大）や産業構造の高度化により、電力消費の変動は著しくなっている。一方、本年4月に発表された長期見通しにもあるように、今後原子力発電の割合が増していく。

こうして、揚水発電の必要が増すが、その経済的な立地に限りがあり、これに代る手段が求められている。電池による電力貯蔵は、技術的成熟度も高く、経済的にも有利と評価され、揚水発電に代るものとして開発されるようになった。同じような電力需給の事情があり、揚水立地の少ない米国でも開発が進められているが、需給事情が異なり、揚水立地もある欧州ではあまり開発されていない。むしろ、電気自動車の石油代替

効果に注目して、政策的必要から、電気自動車用電池の開発が進められている。電気自動車用電池の開発は米国でも盛んである。

2. 原理、種類および特徴

化学電池の原理を、量もシンプルな形で利用しているのが、レドックス・フロー型電池であるから、これを例として原理を説明しよう。図-1の左のタンクに貯えられた充電状態の Cr^{2+} イオンの塩酸水溶液が、ポンプで中央の流通型電解槽に送られ、負極の炭素布中を浸透しながら、電子を電極に放出して、自身は Cr^{3+} イオンに酸化される。一方、右のタンクの Fe^{3+} イオンの塩酸水溶液は、ポンプで正極へ送られ、同じく炭素布を浸透しながら、外部回路を通ってきた電子を受取り、 Fe^{2+} にイオン還元される。この過程で塩素イオンが正極側で過剰になり、負極側で不足するので、イオン交換膜を通して正極側から負極側へ塩素イオンが移動する。（逆向きに水素イオンが移動してもよい。）イオン交換膜は、また、2つの水溶液の混合（自己放電）を防ぐ役割も果たしている。充電はこの逆過程である。

このように、電子の授受である1対の酸化と還元を別々の電極で行わせることにより、電子を外部回路を通して授受させ、反応のギブス自由エネルギー変化を電気エネルギーに変えるのが、化学電池の一般的原理であり、この過程での効率は、原理的には100%である。ここで述べる電池はいずれも逆過程による充電が可能なものであり、原理的には100%の効率で電力貯蔵を行う。

わが国で、電力貯蔵の目的で開発されているのは、レドックス・フロー型電池の他、ナトリウム・硫黄電池、亜鉛・塩素電池、亜鉛・臭素電池の4種の新型電池である。また、鉛蓄電池も検討の対象となっている。これらの電池の特性を比較したのが、表1である。鉛

* 電子技術総合研究所 エネルギーシステム部
エネルギー貯蔵研究室長
〒305 茨城県新治郡桜村梅園1-1-4

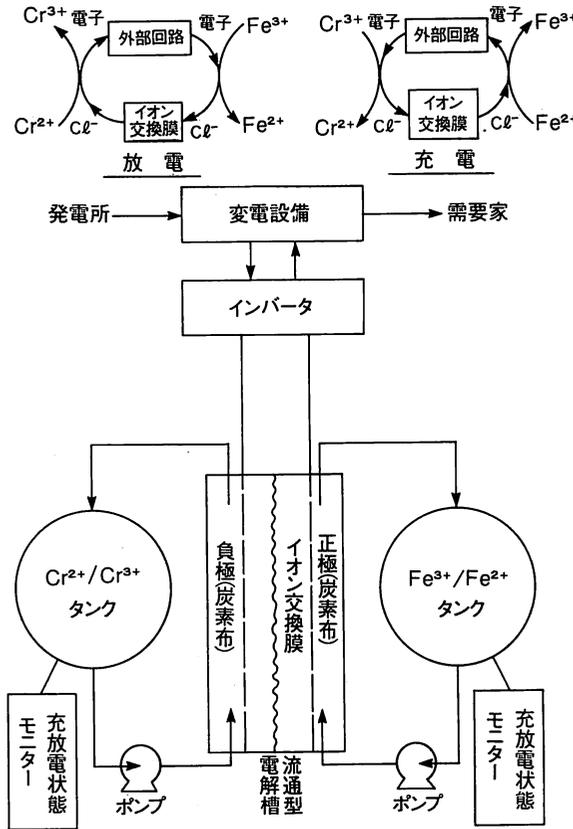


図-1 レドックス・フロー型電池の原理と構成

表1 新型電池と鉛蓄電池の特性比較

項目	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・フロー型電池	鉛蓄電池
起電反応	$\text{Na} + \text{S} \rightleftharpoons \text{Na}_2\text{S}_x$	$\text{Zn} + \text{Cl}_2 \rightleftharpoons \text{ZnCl}_2$	$\text{Zn} + \text{Br}_2 \rightleftharpoons \text{ZnBr}_2$	$\text{Cr}^{2+} + \text{Fe}^{3+} \rightleftharpoons \text{Cr}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$	$\text{Pb} + \text{PbO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons \text{PbSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$
理論エネルギー密度 (Wh/kg)	780	828	428	103	167
開路電圧 (V)	2.1	2.1	1.8	1.1	2.1
反応物質 (負極/正極)	Na (液)/S (液)	Zn (固)/Cl ₂ (気)	Zn (固)/Br ₂ (液)	Cr ²⁺ (液)/Fe ³⁺ (液)	Pb (固)/PbO ₂ (固)
反応物質利用率	85%	100%	100%	80~90%	30%
電解質	固体電解質 (β-アルミナ)	ZnCl ₂ 水溶液	ZnBr ₂ 水溶液 (KCl添加)	HCl水溶液	H ₂ SO ₄ 水溶液
作動温度	300~350℃	20~50℃ (水和槽温度5~15℃)	20~50℃	60~80℃	5~50℃
資源、価格面その他	— ・温度制御・熱管理 ・金属ナトリウムなどの安全対策 ・完全密閉型	— ・電解液循環系 (塩素水和物貯蔵系を含む), 温度制御 (水和物), 塩素の安全対策 ・電圧特性良	— ・電解液循環系 (臭素錯化合物貯蔵系を含む), 臭素の安全対策 ・セパレータの開発	電極触媒 ・レドックス水溶液循環系, クロム, 塩酸の環境対策 ・週間電力貯蔵用にも適する。	鉛 ・100年以上の歴史を有し, 最も安定した性能を有している。

蓄電池は、特性の上ではきわめてすぐれた電池であるが、経済性で前記の揚水発電との競合が難しく、用地面積も広い。これに対し、新型電池は資源の問題も少なく、材料等の点からもすぐれた経済性が期待されている。また、ナトリウム・硫黄電池における固体電解質、亜鉛・臭素電池における隔膜、レドックス・フロー型電池における炭素布電極やイオン交換膜などや高分子材料のような新材料の開発によって可能になったものである。レドックス・フロー型電池の場合は、原理的には簡単なものであるが、据置用長時間大容量電池という新しいニーズによって、初めて開発対象となったものである。

個々の電池の開発課題などは後にふれるが、電力貯蔵システムとしての電池の一般的な特徴、利点を、次

に述べよう。電池は、直流低電圧電源である。また、電極の面積には比例する出力が得られ、特性などに規模の制約がない。このため、製作し易い大きさの電極の電池をつくり、組立し易い数を集めて集合電池とし、これをさらに集めて保守・交換単位の群電池（モジュール）をつくる。群電池を直列に接続して実用上の電圧（たとえば、1000 V）を発生させる列電池とする。列電池を並列に接続して、システムが構成される。このような階層構成をとり、多数個集積されている点が電池の特徴である（表2参照）。とくにモジュール構成による特徴・利点は、モジュラリティと呼ばれる。

製造、建設上のモジュラリティとして挙げられることは、このシステムが工場生産によるプレハブ形の発電所であり、量産効果が大きく、また、品質管理、工

表2 2万kW電力貯蔵システムの電池システム構成例

電池	集合電池	群電池	列電池	5 MWユニット	2万kWシステム	単電池（セル） 総数
鉛蓄電池	—	—	500単電池(セル)直列	8列並列	4ユニット並列	1万6000
ナトリウム-硫黄	36セル直列	20集合電池直列	28群電池直列	9列並列	4ユニット並列	72万5760
亜鉛-臭素	10セル直列 あるいは並列	10集合電池直列	62群電池直列	10列並列	4ユニット並列	24万8000
亜鉛-塩素	10セル直列	6集合電池並列	56群電池直列	6列並列	5ユニット並列	1万6800
レドックス	500セル直列	2集合電池並列	2群電池直列	5列並列	4ユニット並列	4万

単電池(セル)は、1対の電極と電解質から構成される電池の基本構成単位

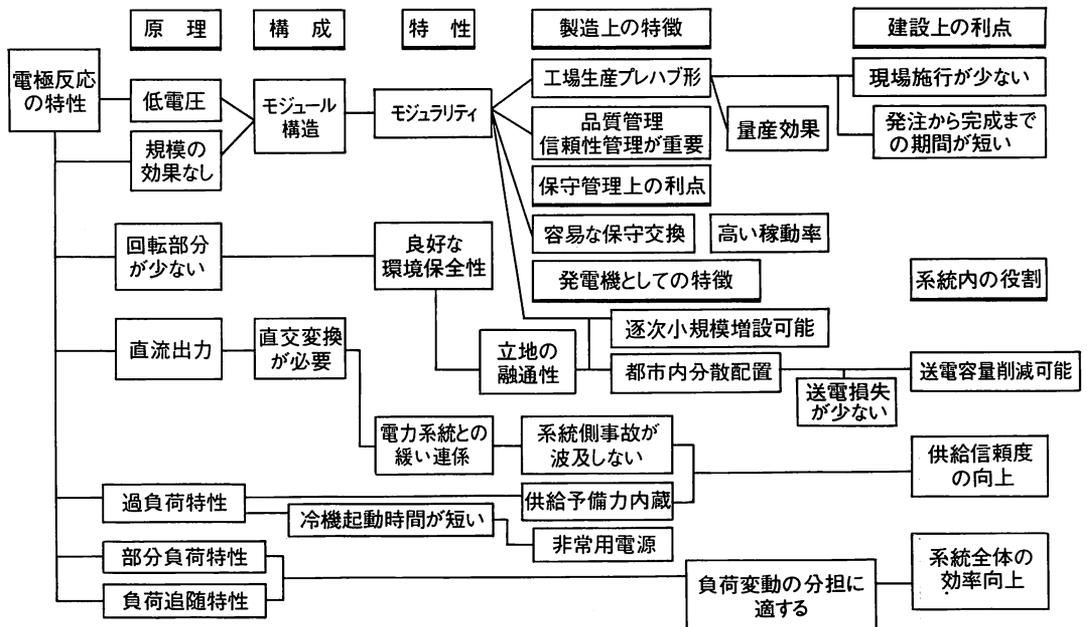


図-2 新型電池電力貯蔵システムの利点と特徴

程管理、信頼性管理が重要であることである。さらに、現場施行が比較的少なく、発注から完成までの期間が短いことが挙げられる。保守管理、すなわち、モジュールの交換が容易であるから、稼働率が高く、高度の熟練技術者を必要としない。騒音も少なく、保安設備を完備すれば、環境保全性もよいので、立地上の融通性が大きく、モジュラリティと相まって、都市内分散配置ができ、発電容量の逐次小規模増設が可能である。

電池の一般の特徴として、負荷の変動に追従でき、定格以下の出力で効率が低下せず（良好な部分負荷特性）、定格の設定によっては過負荷にも耐えられる。これらの特性から、電力消費の変動による負荷変動を分担するのに適しており、系統内の他の発電機の高効率定格運転を可能にし、系統全体の効率向上をもたらす。直流電源であるから、インバータを必要とするが、このため、電力系統との関係が緩く、系統内の事故が電池側へ波及せず、過負荷特性と共に、供給信頼度の向上につながる。

さらに、都市内分散配置が可能のために、揚水発電所への送電に伴う送電損失がなくなり、電力消費の少ない夜間にも都市への送電が可能になるから、送電容量の削減が可能であり、送電線増設を繰延べでき、流通設備の問題を緩和できる。これらは、いずれも原理と特徴から論理的に推論される可能性であるが、実用化においても十分配慮すべきものであろう。それらの論理的つながりを図-2に示した。

3. 開発計画

わが国では、昭和55年度より通産省工業技術院の省エネルギー技術開発計画（ムーンライト計画）の中の大型省エネルギー技術開発の一環として、新型電池電力貯蔵システムの研究開発が始められた。昭和65年度までの11年計画、予算約170億円の規模として計画さ

れている。そのスケジュールは、図-3に示すようなものであり、前記の4種の新型電池が取り上げられている。別に、鉛蓄電池をサンプル電池としてインバータ、直流遮断器等を加えた1,000kWの電力貯蔵システムをつくり、電力系統内で試験を行うシステム試験が計画されている。また、このシステムの設置、運用に伴う諸問題が、トータル・システムの研究として行われている。

4種の新型電池は、現在、1kW級電池の試作段階にあり、今秋、1kW級電池の第一次中間評価試験を行う予定である。昭和59年度から10kW級の電池の開発段階に進む。昭和61年度の第二次中間評価において、この中の1ないし2種が選ばれ、1,000kW規模の製作が行われる。昭和63年中頃より昭和65年中頃までの2年間、この電池による電力貯蔵システムの実証試験が電力系統内で行われる予定である。したがって、実用化は、早くても、昭和67、8年頃と想定されるが、この時点でのわが国の電源開発計画によれば、年間約100万kWの電力貯蔵設備がつくれる予定であり、この一部が、電池による貯蔵設備となろう。

揚水発電の代替として計画されているものであるから、その開発目標も、揚水発電との対比において設定された。それは、表3のようなものである。効率は70%以上とされているが、インバータにおける損失があ

表3 新型電池電力貯蔵システム開発目標

出力	1,000kW
基準充放電時間	8時間充電, 8時間放電
効率(交流⇄交流)	70%以上
寿命(充放電サイクル)	1,500サイクル以上(約10年)
環境保全性	すべての環境基準を満足すること
(実用段階において)	
経済性	揚水発電所と同等以上
立地	都市内または都市近郊
用地面積	変電所用地以下

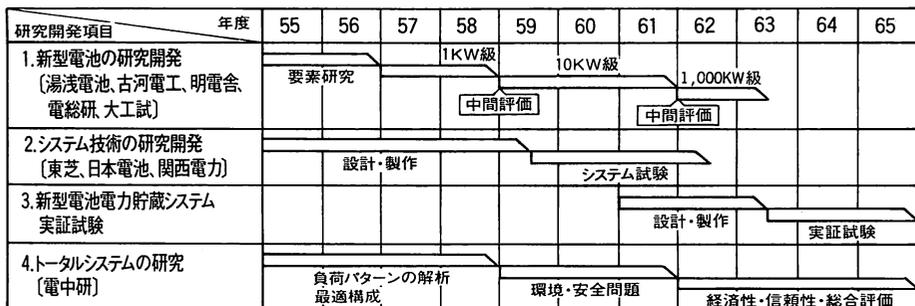


図-3 新型電池電力貯蔵システム開発スケジュール

るので、電池本体では80%以上の充放電効率、すなわち、充電から放電までの損失を20%以下（片道10%以下）とすることが、努力目標とされている。都市内分散配置を予定しているため、用地面積の目標もきびしい。一方、経済性については、揚水発電のような送電設備を伴わないため、供給信頼度の向上や送電線増設の繰延べ効果も考慮に入れば、ある程度ゆるやかなものとなる。

米国における開発計画は、このような系統的統一的なものではない。BEST計画（Battery Energy Storage Test）によって、わが国の実証試験と同規模の試験が行われるが、中間評価に相当するものがなく、開発側で試験が適当と判断されるまで開発が進んだ電池が、順次、BESTの試験設備で試験される。どの電池が適当であるかは、使用者である個々の電力会社の判断にまかされている。BESTにおける試験規模は、実証試験には小さいと考えられ、別に、鉛蓄電池による10倍規模のSBEED計画（Storage Battery Electric Energy Demonstration）が立案されていたが、レーガン政権の政策により、中断された。

4. 開発の現状と課題

前述のように、わが国における4種の新型電池の開発は、いずれも1kW級電池の試作の段階にあるが、個々の電池の開発課題は、それぞれに異なる。順次、それらを見てみよう。初めに、ナトリウム・硫黄電池は、図-4のようなもので約350°Cで作動し、二重円筒

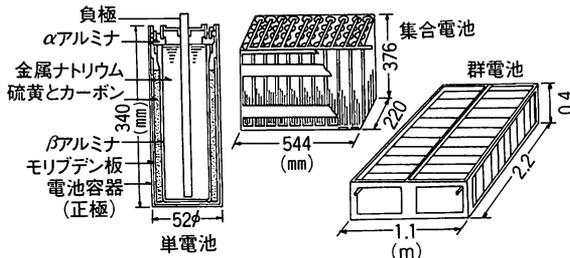


図-4 ナトリウム・硫黄電池の構成

の内側に収められた熔融金属ナトリウムが、電子を放出して、ナトリウム・イオンとなり、円筒状のβアルミナ（あるいはβ"アルミナ）の固体電解質管中を外側に移動する。外側にある熔融硫黄とナトリウム・イオンと外部回路を通ってきた電子とで、多硫化ナトリウムが生成する。充電はこの逆過程である。硫黄も多硫化ナトリウムも、絶縁物であるから、集電体として炭素繊維のフェルトが入れられている。

反応物も生成物も、反応性、腐食性に富む物質であることから、容器材料の耐食性、固体電解質管の耐久性やクラック発生防止、安全対策、密閉技術などが開発課題である。充放電によるエネルギー損失は、廃熱となるが、作動温度が高いから、断熱技術も重要となる。正極の電池容器は、モリブデンで内張りした容器が使われていたが、これに代る各種の耐食性鉄鋼材料が検討されている。また、密閉もメカニカルシールや密閉用ガラス材料などが研究された。

10kW級電池の開発段階に移行すると、これらの要素技術の他に、製造技術の研究開発が重要な課題として浮び上がってくる。たとえば、表2にもあるように、今後多数個の同一規格の部品、材料の高信頼性生産が課題となるから、固体電解質管のように、同種の材料、部品の大量生産の基盤がない場合には、とくに重要である。また、1,000kWの実証試験用のシステムや将来の実用システムの構成を想定した集合電池や群電池の構成、設計が課題となり、サブシステムの検討も必要となってこよう。

亜鉛・塩素電池の構成と原理を、模式的に図-5に示した。塩素は6°C以下に冷却した水中に吹き込んで水

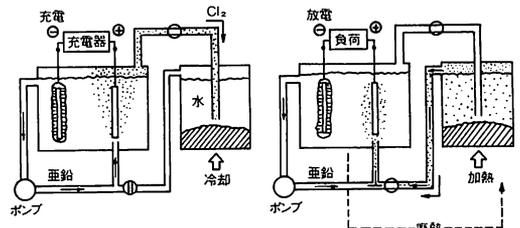


図-5 亜鉛・塩素電池の原理と構成

和物を形成させることにより貯蔵される。放電時には、電池本体でのエネルギー損失による廃熱で、塩素貯蔵槽が加熱され、塩素が発生する。放電反応は、負極において亜鉛金属が電子を放出して亜鉛イオンになる酸化反応と、正極において多孔質グラファイト電極で塩素ガスが電子を受取って塩素イオンとなる還元反応とを組み合わせたものである。充電はこの逆過程である。

塩素の安全対策上、数10kW程度のモジュールを構成し、モジュールごとに塩素貯蔵槽を設け、充電時の塩素貯蔵のための冷媒だけが、外部の大型冷凍機から供給されるようになっている。したがって、システムは、このようなモジュールを多数個並べて構成される。充電時に亜鉛が電極に析出するが、樹枝状の結晶が成長し、短絡をまねく恐れがある他、亜鉛の電極からの脱

落は自己放電となる。電極間距離を大きくすれば、電池の内部抵抗の増大となり、効率を低下させる。このため、時々完全放電を行うなどの対策も考えられるが、樹枝状晶析出防止が大きな課題である。

塩素極側においても、効率を向上させるため、塩素の電極反応に伴う電池の内部抵抗を減少させる必要がある。グラファイト多孔質電極の硝酸等による活性化処理が、もう一つの重要な課題である。その他、図-5で明らかのように、数10kWのモジュールごとに、小型ポンプによる循環システムが付けられるが、高い効率が、開発努力目標とされているから、小型ポンプの効率向上も、その信頼性向上と共に、開発課題となろう。

亜鉛・臭素電池は、上記の亜鉛・塩素電池の塩素を同じハロゲン元素の臭素に代えたものであるから、共通の要素も多いが、臭素と塩素の性質の違いにより、かなり異なる電池となっている。臭素は水に溶け易く、蒸気圧も低い。その貯蔵方法も、テトラアルキルアンモニウム多臭化物の形をとる。この物質は、油状臭素とも呼ばれ、水より重い油状液体で、臭素と反応して多臭化物を形成することにより、臭素を吸収、放出する。臭素は水に溶け易いから、亜鉛との直接反応による自己放電を防止するため、隔膜（イオン交換膜または多孔質膜）を必要とする。また、グラファイトと反応して層間化合物を形成するから、電極材料にグラファイトは用いられない。

その電池構成は、図-6のようなものであり、正、負極液の循環が行われる。正極液側の臭素濃度は、前記

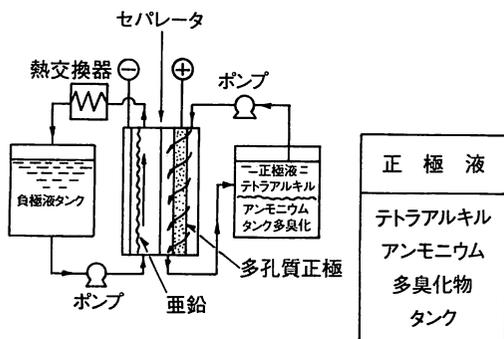


図-6 亜鉛・臭素電池の原理と構成

多臭化物により抑制、制御されていて、臭素による腐食を防ぐ役割も果している。電極にはカーボンプラスチック複合シートが使われている。このシートは同時に、その裏面が隣の電池の電極となっていて、この形で直列接続がなされる（パイプラー構造）。この電池においても、亜鉛の樹枝状結晶生成防止が重要な課

題である。電解液の導電性を向上させることにより、電極間距離を長く設計できるようにする試みもなされている。隔膜にイオン交換膜を用いれば、その臭素への耐久性が課題となり、微細多孔質膜を用いれば、直接反応による自己放電の防止が課題となる。

レドックス・フロー型電池の原理は、初めに解説した。鉄とクロムは、電位差と溶解度が大きく、反応性にとむなどの観点から選択されたが、充電時の Cr^{3+} イオンの還元は、水素発生を伴い、これがエネルギー損失となる。水素発生を抑え、クロムイオンの還元を優先的に進行させると共に、放電反応も小さな抵抗で進行するような炭素繊維材料が求められた。現在までに網羅的な探索により有望な材料が見出されているが、均質な材料を大量に入手できる状態にない。イオン交換膜も、ポリスチレンスルホン酸の均質膜がすぐれているが、水素イオンのみを透過させ、鉄イオンとクロムイオンを透過させにくいような選択性をもつものが望ましい。これらの材料の実用時における耐久性も、今後の課題である。

炭素布（またはフェルト）が電極として用いられるが、その厚さは約1mmである。実用される電池では、一辺が数10cmないし1mになるので、このような大きさの均質な材料が必要であると共に、この炭素電極中を均一にレドックス液が流れ、偏流が起らないようにしなければならない。その他、タンク容量を一層小さくし、用地面積を減少させることや、鉄イオンとクロムイオンを分離するサブシステムなどを開発する必要があり、化学工学的開発課題がある。

5. おわりに

わが国における新型電池の開発は、10kW級電池開発の段階に移行しつつあるが、表2に示したように、実証試験や実用の段階では、このような多数個の材料、部品を必要とする。10kW級の段階でも、このことが新たな開発課題となろう。1kW級でも、すでに材料等の受入れ検査や組立てた部品の品質検査の初歩的なことは行われており、今後はこのような生産技術の確立が大きな割合を占めることと考えられる。この意味でも、新しい段階に達したと言える。

さらに、10kWの開発が行われれば、ナトリウム・硫黄電池、亜鉛・ハロゲン電池では、電気自動車に利用できる規模であり、亜鉛・臭素電池やレドックス・フロー型電池では、太陽光発電を初めとする自然エネルギー利用の貯蔵用として実用できる大きさである。

したがって、これらの波及効果も検討できる段階に達している。太陽電池の場合と同様、大量の部品を組立てる大容量電力貯蔵システムが実用化される前に、このような中間期需要によって生産ラインが立ち上がり、信頼性データなどが積み重ねられることは、信頼性が重要で、量産効果の大きいこの種のシステムでは、重要なことと思われる。この点からも、波及効果の検討は、単に波及効果のみに止まるものではない。

米国においては、レーガン政権の政策により、この種の電池開発への予算は伸びなやみの状況にあるが、わが国では困難な財政状況の中でも必要な予算措置がとられてきた。国内石油資源がなく、しかも、米国同様の電力消費変動を示すわが国では、電力貯蔵の必要が一層大きい。その意味でも、昭和61年度の第二次中間評価に向って、わが国独自の技術開発が続けられ、電力貯蔵用大容量電池はもちろん、波及効果において

も欧米の水準を抜く成果があげられることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 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2次電池—その可能性と開発状況—電気学会技術報告，Ⅱ，第60号（1977）
- 2) 同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，第103号（1980）
- 3) 小沢丈夫，野崎健；燃料電池とその応用（オーム社，1981）
- 4) 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，電子技術総合研究所調査報告，第201号（1979）
- 5) 新しい電池の技術開発と用途展望（CMC テクニカル・リポート No.19）（シーエムシー，1982）
- 6) 電気学会新・省エネルギー研究会資料，ESC-80-22～26（1980）；ESC-81-32～36（1981）；ESC-82-46～50（1982）

話 の 泉

海水温度差発電における2,3の気がかりなこと

海水温度差発電はムーンライト計画の一部としてすでに予備実験も終わり、基礎データも確立しkwオーダーの実用装置までの運転実績も完了している。

海水の表面は気温によって或温度に加熱されており、気温の高い程海水の表面温度は高く、特に赤道付近においては25°C前後の比較的高温水が得られ易い。一方海底の水温は気温に関係なく、数百m以下になれば3～5°Cで常に一定の温度を保っているといわれている。

この自然界の中で大洋における比較的近距离にありかつ無限といえる20°C前後の温度差を有効に利用し、アンモニア、フロンガスなどの蒸気流によって発電する計画が海水温度差発電である。

その方法の詳細はすでに数編の報文（例えば本研究学会，第1回講習会資料No.6，38(1982)）によって紹介されており、当初の計画通りの実績を挙げ、将来の新エネルギー源として有望視されている。

ここにおいて一つの問題としては、表面海水と深海水の温度差によって発電した電力の大部分を数百m海底からの海水の汲上げその他に消費するから、その残りの電力が有効に外部に取出せるわけで、そのバランスシートが問題となる。報告書その他の情報によれば発電量の75～80%を汲上げ用に自家消費すれば、残りの20%ばかりが実際に出力として利用されることになり、効率としては良いとはいえない。さらに次に述べるような理由によってこの効率はさらに低下する可能性が考えられる。

その一つは海底からの汲上げ用のパイプは大体比重が海水に近いプラスチックになると思われるが、

数百m通過する間のパイプの断熱性(保冷性)が不十分な場合には海面上に汲上げた時には海底の温度がどの程度保持できているだろうか。汲上げ用パイプはその材質は勿論であるが、容量にもより直径は数mにも及ぶだろう。パイプの壁の厚さ及び円周がそのまま断熱厚、断熱面となるから保冷効果は直径の大きくなる程効果的と思われる。

次の気がかりの点は冷水汲上げ用パイプの材質で、長期間使用中に貝類、藻類、その他の微生物の付着である。これがパイプの外面の場合は一先問題ないとしても、もし内面に付着した場合にはパイプの有効径は大幅に縮小し、通水抵抗を増加することはないだろうか。これまで合成繊維で作られた漁網への貝類の付着に悩まされたこと、一方冬季ののりひびに合成繊維が使われていることから貝類の付着が気がかりである。貝類の幼虫、孢子などは海の表面近くに生育し深海には存在しないことが確認されれば問題はないと思われるが、海の中(特に深海)にはその他多くの不可解なことが残されているらしい。

前にも触れたが汲上げ用パイプが数百m或はそれ以上となれば比重の軽い場合には重錘で浮力を抑え、海流に流されないように海底に固定しなければならぬ。もし重い場合にはその重量をパイプ自体が、或いは海岸または海底で保持固定する工事が大変だろう。パイプの重量を海底の傾斜で負担する場合にはそれだけ傾斜はゆるやかになり、パイプの全長は必然的に良くなり、結果として通水抵抗は増大する。

(F)