

海水を利用するエネルギー貯蔵

Energy Storage by Sea Water

堀 井 憲 爾*・宮 地 巖**

Kenji Horii

Iwao Miyachi

1. ま え が き

電力は最も貯蔵が困難なエネルギーであり、鉛蓄電池やフライホイール式回転機として小規模な貯蔵装置はあるものの、大規模には揚水発電が現在の唯一の貯蔵装置である。新型蓄電池の開発が進み、更に将来は超電導コイルが電力貯蔵の本命とみられるものの、当分は揚水発電が主役の座を続けるであろう。山と水の豊かなわが国ではあるが、揚水ダムの開発にあたって環境問題はますます厳しさを増しており、新規開発は次第に困難さを増すと考えられる。

周囲を海に囲まれたわが国の特徴を生かして、海水を利用する揚水発電の構想があるが、海水による環境問題のためにその開発には慎重でなければならない。ここで提案する方式は、地下空洞と海との間の揚水発電であり、海水を利用する際の環境問題に対する一つの解決策といえる。⁽¹⁾

揚水の代りに圧縮空気を利用するエネルギー貯蔵方式は、西ドイツにおいて地下空洞を利用して実用化されている。最近のガスタービン複合発電方式の実用化によって、圧縮空気をタービンの燃焼に利用する道が開けたため、圧縮空気貯蔵の実用化にはずみがつくものと予想される。しかし、欧米のような天然の岩塩層内の空洞がないわが国としては、海水圧を利用して、地下トンネルや海底のタンクに空気を圧縮貯蔵することが考えられる。⁽²⁾

すでに筆者らは、昭和56年に、海水利用エネルギー貯蔵発電方式研究会（代表者宮地、幹事堀井）を設立し、地下空洞利用の海水揚水方式と海水圧利用の空気圧縮方式のエネルギー貯蔵に関する調査研究を行いその成果を報告書として発表した⁽³⁾が、以下にその内容を紹介する。⁽⁴⁾

2. 地下海水揚水発電

2.1 海水揚水発電の位置付けと将来

平坦地が多い欧米に比べてわが国は、山多く、河川の流水も豊富であり、特に自然流水を必要としない純揚水発電は、上池地点の選択がかなり自由となるため適地は多い。しかしながら将来は、補償問題など用地交渉の困難さが増すと共に、需要地から遠隔の奥地を開発することが必要となり、工事費の上昇、送電設備費の増加、および上池・下池間の長距離化による水路損失の増大などに起因する効率の低下など、経済性の悪化をもたらす要素が多くある。

下池として海を用いる海水揚水発電は、フランスのランス潮力発電所にて一部利用されたが、海に山が迫っている地形の多いわが国の立地を利用した優れた方式といえる。ポンプ・導水管などの海水腐蝕の問題は、火力・原子力発電における復水器冷却装置としてすでに解決済みであり問題はないが、貯水池からの塩水の浸透、塩風などの環境対策が課題として残る。

これに対し、海岸あるいは海底の地下空洞を下池とし、海を上池とする地下海水揚水発電は、上記の地上海水揚水の環境問題を解決する方式と考えられる。地下海水揚水はまた、離島のエネルギー貯蔵装置としての可能性をもっている。これによって本土との海底ケーブルの負荷率を改善し、電力容量の増大をはかることができる一方、離島の太陽・風力・波力・海水温度差などの自然エネルギーを貯蔵し、これを有効に利用することも可能となる。

わが国の優れた土木技術をもってすれば、地下に100万 m^3 を越える空洞を掘ることは可能である。強固な岩盤地帯であれば、コンクリート補強なしの素掘りで、地下水圧や地震に耐えるトンネルを造ることができる。ただし、500m程度の深部掘削には、地下空洞の他に工事用の長大な斜抗トンネルを何本も必要とするなど巨大な土木工事となるが、これも現在技術の延

* 名古屋大学工学部電気学科教授

〒464 名古屋市千種区不老町

** 愛知工業大学工学部電気学科教授

長線上にある。

これまでの巨大地下空洞工事の例としては、新高瀬川発電所の21万 m^3 、青函トンネルの300万 m^3 などがある。地下石油備蓄タンクの例としては、わが国では菊間の2.5万 m^3 （地下70m）があるが、欧米では100万 m^3 級の地下タンクの実用例もあり、今後この種のものが増えるものと予想される。

地下に強固な岩盤が得難い地点では海岸を掘削し、地下100m程度にコンクリート空洞を作り、低落差で発電する。この場合、貯蔵できるエネルギー容量は深部空洞方式より小となるが、適地はわが国の海岸部に多くあり、またその地上部は種々の有効な土地利用も可能となる。またこの場合は、需要地に接近して配置できるので、電力系統全体の経済的運用や信頼性などの面で有利となる。

2.2 地下海水揚水発電所の概念設計

地下海水揚水発電所の概念設計を、高落差形および低落差形の2つの設計方式について以下に述べる。それぞれの方式について、第1案は現在の技術水準を考慮したものであり、第2案は将来の電力系統の中で十分な機能を発揮できる規模を考慮したものである。これらの地下揚水発電所の具体化に際しては、土木工事、地下発電機器、および取水・放水方法などについて、さらに詳細に検討する必要がある。特に、発電所設置場所の地盤調査を実施し、堅固な地盤地帯を選び、漏水の少ない場所に設置する必要がある。

(1) 地下掘削高落差方式

a. 第1案

貯蔵電力：300MW×3台，12hr
 地下貯水地：落差500m，断面40×60 cm^2 （卵形トンネル），長さ600m，9個平行，容積1,040万 m^3 （容積利用率90%）

b. 第2案（概念設計図：図-1参照）

貯蔵電力：300MW×6台，12hr
 地下貯水池：落差500m，断面50×70 m^2 （卵形トンネル），長さ620m，12個星形，容積2,080万 m^3 （容積利用率90%）

(2) 海岸線埋設低落差方式

a. 第1案

貯蔵電力：150MW×2台，12hr
 地下貯水池：落差100m，幅115×2m，高さ50m，長さ1,600m，容積1,840万 m^3 （耐力壁，仕切柱が存在するため容積利用率85%）

b. 第2案（概念設計図：図-2参照）

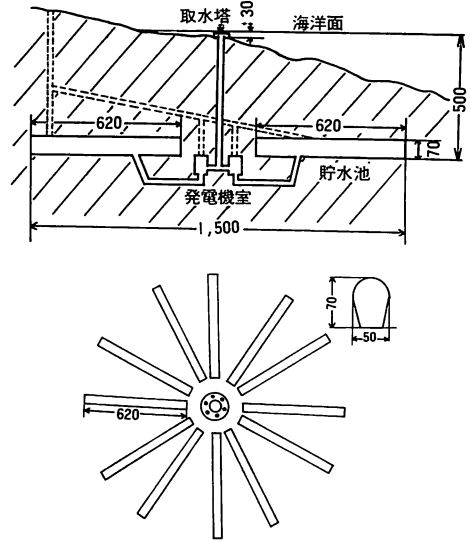


図-1 地下掘削高落差方式海水揚水発電所の概念設計（単位m）

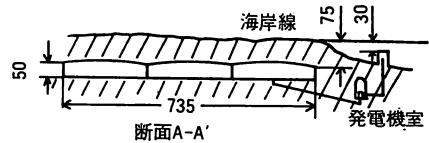


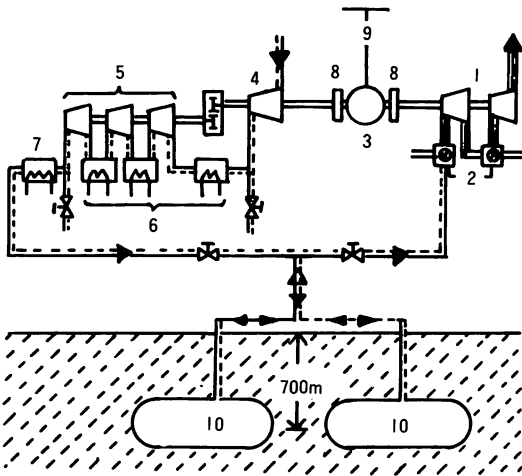
図-2 海岸線埋設低落差方式海水揚水発電所の概念設計（単位m）

貯蔵電力：150MW×6台，12hr
 地下貯水池：落差100m，幅245×3m，高さ50m，長さ1,500m，容積5,490万 m^3 （耐力壁，仕切柱が存在するため容積利用率85%）

3. 海水圧利用圧縮空気貯蔵発電

3.1 圧縮空気貯蔵発電の位置付けと将来

山地の少ない平坦な地形の欧米では、揚水発電の代わりに、地下の岩塩層空洞に圧縮空気を貯蔵する方式



- 1. ガス・タービン
- 2. 燃焼室
- 3. 発電機及び電動機
- 4. 低圧圧縮機
- 5. 高圧圧縮機
- 6. 中間冷却器
- 7. 冷却器
- 8. クラッチ
- 9. 送電線
- 10. 定容積空洞 (各15万 m^3)

図-3 フントルフ圧縮空気貯蔵ガスタービン発電所の概要

が研究開発されている。⁽⁴⁾ 岩塩は強固な気密層を形成し、しかもこの中心にパイプを打込み、中心部から水で溶解掘削により、割安に巨大な地下空洞が得られる。

西ドイツのフントルフ発電所では、この方法で地下700mに約30万 m^3 の空洞を作り、最高70気圧の空気を圧縮貯蔵する。この空気を更に LNG バーナーで加熱し、290MW のガスタービン発電を2時間行うことができる。ガスタービン方式では、従来は空気圧縮と発電機の駆動とを同時に行っていたのを切り離して、電動機により空気を圧縮貯蔵し、発電時には圧縮機を切り離してタービンで発電だけを行う。通常は、空気圧縮にタービン出力の約2/3が使われるので、圧縮機の切り離しにより同じタービン出力に対し発電力は3倍になる。図-3に発電機の概要を示す。

わが国では地下に岩塩空洞や天然空洞は得難いが、前節で述べたように地下に人工空洞を造ることは可能である。岩塩空洞は圧縮空気を詰めるだけであるが、人工空洞では図-4に示すように、空洞に地上の上池から水を通して、落差に相当する一定の水圧をかけることができる。この場合は定圧力の圧縮空気を得られるのでタービンに定圧力の空気を供給でき、また空洞容積全部に相当する空気を利用できる。定容積の圧縮空

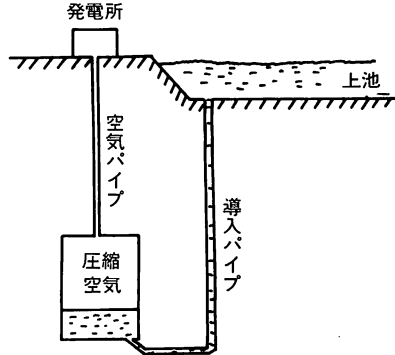


図-4 地下空洞圧縮空気貯蔵発電所 (静水圧方式)

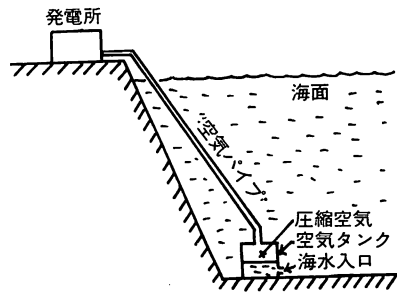


図-5 海底空気圧タンクの圧縮空気貯蔵発電所

気の場合は、最大圧力からその約70%に減圧するまでの圧力を利用するので、空洞容積当りのエネルギー貯蔵量は静水圧圧縮方式の方が数倍大きい。また地下揚水に比べても、水の落差によるエネルギーに圧縮空気のもつ内部エネルギーが加わるので、空洞容積当りのエネルギー貯蔵量は約2~3倍となる。また地下揚水では発電所を地下に設置する必要があるが、圧縮空気方式では地上に設置できる。

静水圧をかけるための上池として海を利用することは、わが国の立地に適した方法であり、この場合は前節の地下海水揚水発電の場合と極めて類似した土木工事となる。ただし、揚水ポンプ水車は必要なく、代わりに圧縮空気の圧力で揚水することが異なる。

図-5に示すように空気タンクを海底に設置すれば、直接海水の圧力を利用できる。空気タンクの底に孔をあけて、圧縮空気の圧力を海底の水圧と平衡させるならば、容器自身は耐圧構造を必要とせず、浮力に打克つ重しをつけて海底に沈下させればよい。海岸から急に深くなる海底地形の個所はわが国に多くあり、一例を上げれば相模湾の富士市海岸では、沖合1 kmほどで水深100m、2 kmほどで300mに達している。

タンクおよび接続パイプの沈下工法は未経験のことが

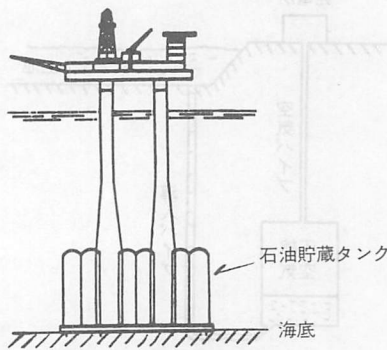


図-6 海底石油掘削基地の例

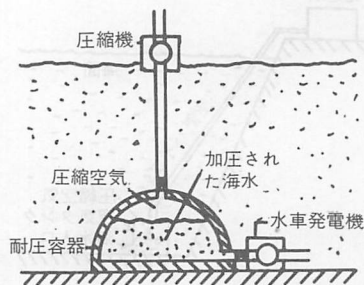


図-7 加圧水貯蔵方式海底発電所

多く、波浪や海流の影響など未知の分野が多い。しかし類似の技術として、図-6に示すような海底石油掘削基地があり、16万 m^3 の石油貯蔵コンクリートタンクを海底に設置した例などからみて、海底空気タンクは現在技術の延長線上にあるとみられる。

圧縮機や発電機などを含む発電ユニットの設置場所として、陸上・海上の他に海中も考えられる。海中方式として図-7に示す加圧水貯蔵方式も提案されている⁵⁾。この方式では、海底水圧より高い圧縮空気をタンクの上部に貯える。発電時には弁を開いてタンク内の加圧海水を海中へ噴出させ、これにより水車発電機を駆動して発電する。海水を全部排出し終わったらタンク内を大気圧に戻して海水をタンク内へ逆流させ、このときにも発電を行うものである。

海上・海中方式に比べて陸上方式が最も技術的に可能性が高いと考えられるので、次節では陸上方式について概念設計を述べる。

圧縮空気貯蔵方式の最大の欠点は、圧縮に伴う発熱があることで、圧縮機の効率を高めるために、また空洞の保守のために、空気を冷却する必要がある。この熱は他に熱源として利用すればよいが、冷却水で捨て

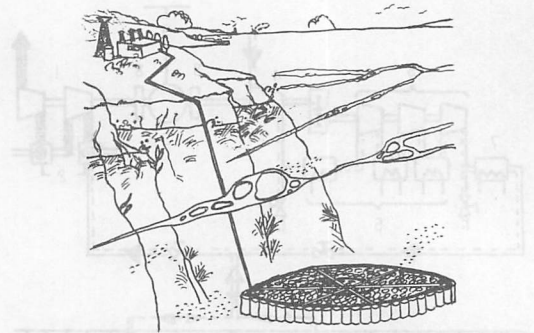


図-8 海底タンク方式圧縮空気貯蔵発電所

られる場合は貯蔵の際の損失となり、このため貯蔵効率は50~60%に低下してしまう。発電の際は燃料の追い炊きでエネルギーを補給するので、貯蔵時の消費エネルギー以上の発電出力が得られるが、全体として貯蔵効率の低下は発電原価を高めることになる。

これを改善するには、圧縮時の発熱を蓄熱して発電時の空気の加熱（予熱）に利用することである。これによれば貯蔵効率を70~80%に高めることができる。大規模な蓄熱装置は、火力・原子力発電および太陽発電の付属設備として開発が進められているので、将来は利用可能となろう。

3.2 圧縮空気貯蔵発電所の概念設計

(1) 海底タンク方式

水深300mの海底で、コンクリート製タンクを用いて30気圧定圧貯蔵を行う。発電はフントルフ発電所と同様に助燃方式で、これにタービン排ガスによる空気予熱を加える。実用プラントの鳥瞰図を図-8に示す。

貯蔵電力：300MW×6台、12hr

タンク：高さ10m、内径10m、個数9,400個、容積740万 m^3 、海底占有面積1×1 km^2

(2) 地下空洞方式

前節で述べた地下海水揚水発電方式と同じ地下空洞を使用する。ただし海水圧を利用した定圧貯蔵とし、地下300mに30気圧貯蔵を行う。空洞は2.2 (1)の第1案と同じ卵形断面のトンネルとする。

貯蔵電力：300MW×6台、12hr

空洞：断面40×60 m^2 （卵形トンネル）、長さ3,850m、容積740万 m^3

4. むすび

発電所と需要地共に海岸部に多く位置するわが国にとって、海水を利用するエネルギー貯蔵は極めて魅力

ある方式である。従来から考えられているような、海を下池とする海水揚水発電に代わり、環境問題の少ない地下空洞から海面への地下海水揚水発電は、開発済みの海水ポンプ・水車技術や海水耐蝕技術などにより、十分に開発の可能性はある。問題は、地下土木工事であるが、地下トンネルや地下発電所の建設で優れた実績のあるわが国は、十分に開発技術をもっており、これに適した地下岩盤の調査により、将来の100万KW級の大容量揚水発電方式として期待できる。ただし、工期10年以上、建設費約7,000億円に及ぶ巨大プロジェクトになるものと予想される。

地下圧縮空気貯蔵発電は、平坦地形の地下に岩塩空洞が得られる欧米では研究開発が進んでいるが、わが国としては、海水圧を利用した定圧圧縮空気貯蔵方式が適切である。地下の空気タンクとしては、地下岩盤内の人工空洞を利用するか、海底へ沈下布設したタンクを利用する。地下空洞工事は、地下海水揚水の場合と同様であるが、海底へのタンク沈下方式は一部、海底石油掘削基地に類似技術はあるものの、新しい海中土木工事として、今後の研究開発を必要とする。しかし工法によっては、地下空洞に代わる経済的方式となるものと期待できる。

これらの海水利用エネルギー貯蔵装置は、太陽・風

力・波力・海水温度差などの自然エネルギーの利用を推進する上で、それらの出力の不安定性を補う装置としても、ますますその有効性が認識されるであろう。

最後に、報告書をまとめるに当り御協力いただいた研究会の武藤三郎(名工大, 現, 中部大), 中村光一(名工大), 小崎正光(豊橋技科大), 梶川武信(電子総研), 田中祀捷(電力中研), 犬飼英吉(中部電力, 現, JFCC), 鈴木克洋(運輸省), 森脇敏雄(同左), 依田正之(愛知工大), 青水教之(名大)の各氏及び、貴重な資料を提供いただいた(株)東芝, 前田建設(株), 五洋建設(株), (株)栗本鉄工所, 昭和コンクリート(株)に謝意を表します。

文 献

- (1) 宮地; 新エネルギーの問題点, 電気学会, 新・省エネルギー研究会資料, ESC-80-39 (1980)
- (2) 堀井; 清水; 海底の圧縮空気タンクを用いるエネルギー貯蔵発電装置, 電気学会, 新・省エネルギー研究会資料, ESC-80-44 (1980)
- (3) 宮地, 他; 海水を利用するエネルギー貯蔵発電方式の調査研究 (昭56)
- (4) H.Hoffeins, et al; Commissioning the First Air-Strage Gas Turbin Set, Brown Boveri Rev.8-80 P,465 (1980)
- (5) 梶川; 公開特許公報, 昭和54-11517

協賛行事

第5回触媒燃焼に関するシンポジウムについて

来る5月27日(金)下記の通り標記のシンポジウムが開催されますのでご案内いたします。

<主 催> 触媒学会, 触媒燃焼研究会

<協 賛> 日本化学会, 石油学会, 日本セラミックス協会, 燃料協会, 日本燃焼研究会, エネルギー・資源研究会

<日 時> 昭和63年5月27日(金)13時~17時

<会 場> 東京大学工学部

(文京区本郷7-3-1)

<プログラム>

- | | | |
|--------------------------|---------|-------|
| 1. 耐熱繊維とその応用 | (ニチアス) | 柴田研一氏 |
| 2. 自動車排ガス用触媒担体について | (日本ガイシ) | 色川秀男氏 |
| 3. 複合酸化物を用いた高温燃焼用触媒の材料設計 | (九大総理工) | 荒井弘通氏 |

<参加費 (資料代を含む)> 当日会場で申し受けます。

会員 5,000円, 学生 1,000円, 非会員 7,000円

<世話人> 御園生誠(東大), 乾 智行(京大), 荒井弘通(九大), 福沢 久(電力中研), 山下寿生(日立日立研)

<連絡先> 〒113 文京区本郷7-3-1

東京大学工学部工業化学科 御園生 誠 Tel 03-812-2111 内線 7272