

落差を利用する揚水装置による発電の研究

福井工大 正会員 の和 田 久 範
同 竺 文 彦

(1) はじめに

海洋エネルギーは無償で得られるエネルギー資源として、わが国にとって貴重な存在である。しかしその密度が小さいことと変動性のために、これを直接発電に用いても効果は得られない。この問題について筆者らはエネルギーを濃縮する技術として、低い落差を高い落差に変換する揚水装置を開発した。この装置によると今まで水力発電に利用できなかった小さい落差を必要な高さに変換できるので有利になると考えている。本装置は小さい落差で効率はよいが、大きくなるに従い効率が低下するので5 m ぐらいが限界である。これに対し落差を利用する水力発電は、4 m～5 m より低い場合は技術的に困難と言われている。しかしこの両者が不利となる限界領域は、2者を組合わせる方式にすれば利用できる落差の範囲が拡大されるので、その具体的方法について研究した。揚水装置に必要なエネルギーの取得については、波エネルギーによる場合と潮汐エネルギーの場合を考えたが、今回は後者について述べる。

(2) 揚水装置の構造

落差を利用する揚水装置は低い落差を高い落差に変換するもので、その構成は低落差のエネルギーを空気エネルギーに変換する作動水室と、揚水回路を形成する階段状水室及び連結回路、さらに作動水室のエネルギーを階段状水室に伝達する気圧回路により構成される。本装置の基本型として(A-1)と(B-1)を製作したが、そのうち(B-1)の実験結果についてはすでに報告した¹⁾。これにより揚水原理は実証されたので、今回は(A-1)についてその概要を述べる。図-1)はその構成を示すもので、作動水室は(B-1)と異なり、ドックの中に設置してある。このドックと階段状水室の最下段の水室を落差地点に設置する。その揚水原理は、先ずドック内の水面を水門の開閉によって上下運動されると水室Aには(+)圧、Bには(-)圧が発生するので、このエネルギーを階段状水室に供給する。階段状水室は相隣る2箇所を以て1ユニットとするときは、上方水室には(-)圧、下方水室には(+)圧を作用させることにより、吸上げポンプと押し上げポンプが同時に適用されたことになるので、上方水室が空虚で、下方水室が満水状態であれば揚水作用が行われる。次に最上の水室に達した水は(+)圧によって揚水池に押し出し、最下段の水室は(-)圧

によって、H.W.L.から吸い上げるものである。いま作動水室で利用できるエネルギーを有効水頭で表わし、初落差 H_1 から下限 H までとする。次に階段状水室に1ユニットの揚程を H' に取れば $|H| > H'$ でなければならないから $|H| = H' + |\Delta H|$ とおけば、 ΔH の取り方により運転速度をかえることができる。次の諸元は $H' = \frac{1}{2} H_1$ として実験をした結果確認された値である。

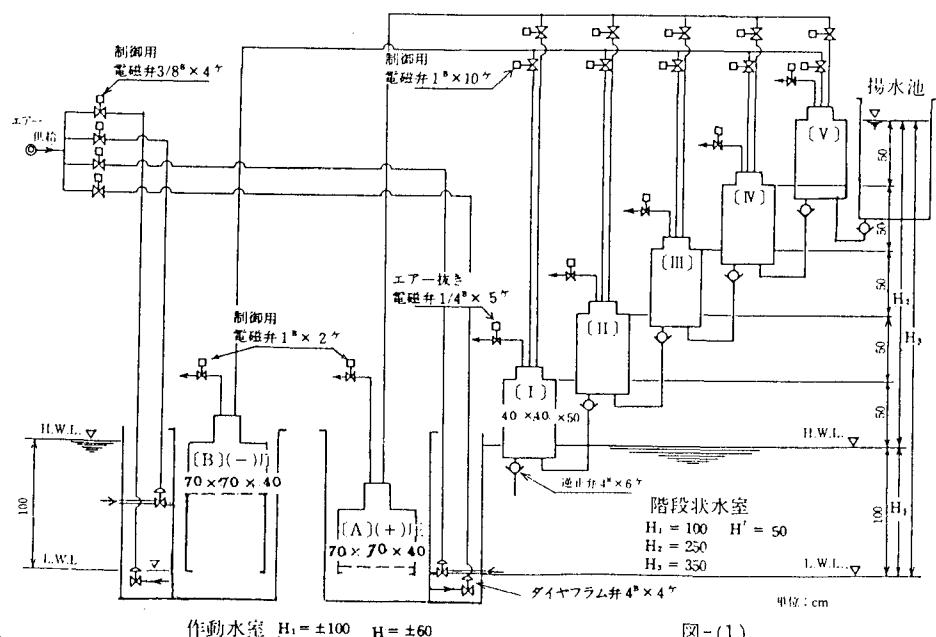
(運転方法)運転は次の3行程とする。

- 第1行程 水室(I) → (II), (III) → (IV) へ揚水
- 第2行程 水室(II) → (III), (IV) → (V) へ揚水
- 第3行程 H.W.L. → (I) へ取水

水室(V) → 揚水池へ送水

[作動水室] 1ユニット

水室A (+)圧の有効容積 $70\text{cm} \times 70\text{cm} \times 40\text{cm} = 0.196\text{m}^3$



水室 B (+) 圧の有効容積 " = 0.196m³ [階段状水室] 5 段
 初落差 H₁ = 1.0m 揚程 H' = 0.5m 各水室の有効容積 40cm × 40cm × 50cm = 0.08m³
 第1, 第2行程の有効水頭の下限 H = ±0.6m ΔH = ±0.1m ボール弁(水封される位置に設置する) 径 8cm

第3行程の有効水頭の下限 H = ±0.8m ΔH = ±0.3m 流量係数 C = 0.9 全揚程 H₂ = 2.5m 総落差 H₃ = 3.5m
 [揚水効率] 作動水室の使用水量を階段状水室 1 ユニットについて見ると、揚水量の 2 倍より多くなる。これは下方水室で揚水量に等しい水量のエネルギーを失うことと、空気部分の容積が (+) 圧によって圧縮される容積及び (-) 圧によって膨張する容積に相当する水量を余分に消耗するからである。その水量を求めると 3 行程で 0.85m³ になる。この他に気圧回路、管路などの損失があるので使用水量は約 0.90m³、これに対する揚水量は 0.08m³ である。揚水効率は揚水した水量が得たエネルギーと、これに使用した水量のエネルギーの比で表わすと効率 η = 22.2% [運転速度] 第1行程 13.7 秒, 第2行程 13.7 秒, 第3行程 12.9 秒, 行程が変わるときの作動水室の準備時間は 3 回分で 30 秒, 合計 70.3 秒になる。この計算値は実験結果とほぼ一致し, (A-1) の精能がよいことが実証された。
 [単位時間揚水量] 単位時間揚水量 Q = 0.00113m³/sec

(A-1) は階段状水室の数を増加することができるので、低落差のエネルギーを位置エネルギーとして貯蔵する場合に有利である。これに対し落差を高くするより処理する流量を多くする目的の場合は、階段状水室の数を減少して高精能で運転する方式がよいと思うので、具体的に潮汐発電に適用して両者の特性を検討する。

(3) 揚水装置を適用する潮汐発電

わが国における潮汐発電の有利な地点は有明海である。その概念設計は新発電方式総合調査委員会により、詳細に調査されて報告された²³⁾。これによると満潮位から 2 m まで、最大 4.56m から 2.5m までの落差が利用されるもので、一方向方式の発電がよいとされている。ダムの貯水量は 14 億 m³ で、これを 3 時間で処理すると、毎秒 13 万 m³ の流量が得られる。発電機は落差 4.5m の時 5000KW, 3.2m で 3200KW, 2.5m で 2200KW と見積られたが、この計画はその後中断されている。さてここで以上の計画に揚水装置を適用するとすれば、落差の変動による発電出力の減少を小さくすることができるので、その方法を述べる。

第 1 案—基本型による方法

基本型と同じ方法で 4.5m ~ 2m の落差を発電に有利な高さに変換するものとし, (A-1) と同じ形式にするが、ドックは用いないで水門を直接作動水室に設置して取水と排水ができるようにする。作動水室 A は水室の上端を有効水頭の下限に一致させると、L.W.L までが有効容積になるので、水門はそれより低い位置に設置する。作動水室 B は水室の上端を H.W.L に一致させると、有効水頭の下限までが有効容積になるので、水門はそれより低い位置に設置する。次に階段状水室も最下段の水室に水門を設置して取水できるようにする。この場合も水門は十分低い位置に取付ける。このようにして作動水室と階段状水室の最下段を落差地点に設置すると水門が水封される。これにより空気の混入が防止できるのでエネルギーの損失が小さくなる。いま本装置に適用する初落差を 2.5m とし、約 150KW の発電をする諸元を求めると次のようになる。

[作動水室] 1 ユニット (水室は分割する)	[揚水効率] 作動水室の使用水量は 3 行程で約 17700m ³ になる。これに水門などの損失を見込み 18000m ³ , 揚水量
水室 A (+) 圧の有効容積 66m × 50m × 1.1m = 3630m ³	1531m ³ , 効率 η = 21.3%
水室 B (-) 圧の有効容積 " = 3630m ³	
(有効水頭の下限は第1, 第2行程 ±1.4m, 第3行程 ±1.9m) [運転速度] 第1行程	98 秒
水門 35m × 2 m 流量係数 C = 0.7	第2行程 98 秒
[階段状水室] 5 段 (水室は分割する)	第3行程 90 秒
各水室の有効容積 35m × 35m × 1.25m = 1531m ³	作動水室の取水時間 48 秒, これに水門操作
連結管路の径 2.6m (数本にわけ) 弁の流量係数 0.9	の時間を加え 60 秒, 3 回で 180 秒
最下段水室の水門 20m × 1.2m, 流量係数 C = 0.7	(階段状水室最下段への流入は揚水速度より早くしてあるので計上しない) 合計 466 秒
初落差 H ₁ = 2.5m 1 ユニットの揚程 H' = 1.25m	
全揚程 H ₂ = 6.25m 総落差 H ₃ = 8.75m	[単位時間揚水量] Q = 3.28m ³ /sec

以上の諸値による発電出力は P = 9.8γQH₃ = 154KW になる。(発電効率 η = 55% とする)

この装置は初落差を 2.5m とするものであるから、それより大きい落差では条件は変わるが、落差が 2.5m より大きくなれば作動水室のエネルギーも大きくなるので、揚水は継続される。ただし効率は低下するので小規模の発電であれば、作動水室の固定された位置を水面の変化に対応させて移動できるようにすればよい。

第 2 案—階段状水室を 1 段の揚水室とする方法

この方法では 4.5m ~ 4.0m の落差は直接発電に利用するものとし, 4.0m ~ 2.5m の落差だけを揚水装置によって 4 m 以上に変換するものである。この場合は基本型の階段状水室を 1 段の揚水室とすれば足りるので、これに第 1 案と同じような水門を取付けた構造にする。本装置では作動水室 1 ユニットのエネルギーを、揚水室 1 箇に集中するのであるから、第 1 案の水室に供給されるエネルギーの数倍になる。このエネルギーによって大量の流量を処理するシステムを考えると、2 行程の単純なものになるので揚水速度は極めて速くなる。このシステムを

図一(2)によって説明する。

(第1行程)作動水室 B は満水しているものとし、まず空気抜き弁と取水水門を閉じる。次に排水水門を開くと水位が下降して(-)圧が生ずる。同時に揚水室は取水水門を開き、揚水水門を閉じた状態で作動水室から(-)圧を作用させると、揚水室の水位が上昇して揚程 H' が得られる。

(第2行程) 作動水室 A は空

虚な状態にあるものとし、まず空気抜き弁を閉じ、取水水門を開くと水位が上昇して(+)圧が生ずる。同時に揚水室は取水水門を閉じ、揚水水門を開いた状態で作動水室から(+)圧を作用させると、揚水室の水位が下降して、揚程と同じ高さの揚水池に送水される。

システムは以上の2行程であ

るが、作動水室 B を満水にする操作は第2行程に並行して行ない、作動水室 A を空虚にする操作は第1行程に並行して行なうことができるので、これによって揚水が速くなる。次にこの装置に第1案と同じ、初落差を2.5mとして約150KWの発電をする諸元を求める。

〔作動水室〕 1 ユニット (水室は分割する)

水室 A (+) 圧の有効容積 $63\text{m} \times 40\text{m} \times 0.9\text{m} = 2268\text{m}^3$

水室 B (-) 圧の有効容積 " = 2268m^3

(有効水頭の下限は $\pm 1.6\text{m}$)

水門 $16\text{m} \times 2\text{m}$ 流量係数 $C = 0.7$

〔揚水室〕 1 段 (水室は分割する)

揚水室の有効容積 $60\text{m} \times 20\text{m} \times 1.5\text{m} = 1800\text{m}^3$

水門 $10\text{m} \times 1.2\text{m}$ 流量係数 $C = 0.7$

初落差 $H_1 = 2.5\text{m}$, 全揚程 $H_2 = 1.5\text{m}$, 総落差 $H_3 = 4\text{m}$ [単位時間揚水量] $Q \approx 9\text{ m}^3/\text{sec}$

以上の諸値による発電出力は $P \approx 9.8\eta Q H_3 = 158\text{KW}$ になる。(発電効率 $\eta = 0.45$ とする)

この装置では取水水門及び排水水門1箇所としたが、出力を増加させるには水門の数を多くし、かつ気圧回路を大きくすれば可能になる。落差の変動に対しては、第1案と同じように効率は低下するが揚水は継続される。次に装置を多数設置する場合は、作動水室と揚水室との対応を1:1とするのではなく複数箇所の対応とするシステムとし、かつ作動水室は同一のものでなく有効水頭を変えた数種のものを組み合わせる方式にする。このようにすると揚水初期に供給するエネルギーを小さく、後期を大きくすることができるので揚程を高めることができる。例えばこの装置1セットでは揚程を1.5mにしたが、数セット用いれば2mぐらいにすることができると思う。このことは第1案についても言えることである。

(4) まとめ

(A-1)の実験結果が計算値とほぼ一致し、その精能が確認されたのでこれを具体的に潮汐発電に適用する方法を提案した。第1案第2案を比較すると、小規模のものであれば第1案によって高い落差に変換する方式でよいが、中規模以上では、第2案のものを多数設置して大量の流量を処理する方式が有利になると思う。また建設費の面から見ると、第1案は高所に揚水池が容易に得られる地点では有利であるが、有明海の立地条件ではむづかしい。これに対し第2案は、揚水池をつくる場合も低い水位でよいから容易であり、また装置を堤体の中に設置できるので経費は軽減できると思う。次に揚水効率については、第1案は約21.3%第2案は約24%となっているが、これはエネルギーの取得率を比較するために H.W.L. を基準にした値であり、両案に大差はない。しかし実際に発電に利用できるエネルギーは L.W.L. までになるので、これによると第1案は約30%、第2案は約64%になり後者の方がはるかによい。以上のことを総合すると第2案は具体化の条件をほぼ満足していると思う。

最後に本研究を遂行するにあたり、福井工業大学岩井重久教授(京都大学名誉教授)の御懇篤なる指導と助言を賜りましたことを記し、ここに深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 和田久範・吉田豊穂: 低落差を高落差に変換する揚水装置と波力発電, 第40回年次学術講演会講演概要集
- 2) 本間琢也・黒木敏郎・梶川武信共著: 海洋エネルギー読本, PP145, 潮汐エネルギー, オーム社
- 3) 本間琢也: 世界における海洋エネルギー利用の動向, 海洋エネルギー(商業化の時期と条件に関する)

シンポジウム, EOOR 日本委員会, 1985, 10