

# 落差を利用する揚水装置と波力発電の研究

荒家幸次・吉田豊穂・和田久範

## **A Research on the Head of Water Used Pumping' Device and the Wave Power Plant**

Kozi ARAIE · Toyoho YOSHIDA · Kyuhan WADA

In our country there are so many resources of energy such as the low head of water in the river, ocean current, wave, tidal power and so on which are still undeveloped to energy. If these resources can be developed, clean energy will ran up to a larger proportion in our country.

In this research the methods of converting the low head into the high one and utilizing the ocean wave for energy are intended to be developed. Above all, methods to utilize such energy for the generation of electricity and the irrigation of the field weve studied.

### 1. はじめに

わが国のエネルギー資源は水力発電に始まり、化石エネルギーの時代を経て、今後は原子力の時代になるだろうといわれている。原子力発電は昭和60年には約1460億kWhで、全エネルギーの中に占めるその構成比は約20%であるが、10年後には約4315億kWhとなり、その構成比は2倍になる。しかし、環境汚染が深刻化する中で原子力に依存し過ぎることには問題があり、その代替として自然エネルギー開発の要望が急速に高まりつつあることは衆知の事実である。幸にしてわが国は海洋国であるから、海流、波力、潮力などの豊富な自然エネルギーに恵まれているので、その利用法が開発されれば、クリーンエネルギーとしてわが国の将来に明るい展望が生まれてくるだろう。

さてわが国の海洋エネルギーの開発は、先達といわれる益田善雄氏の発明になる波力発電装置が昭和40年に航路の浮標として実用化されたのが最初であり、国として本格的に取り組んだのは英仏などの先進国より遅れ、海洋科学技術センターが昭和51年に着手した先導的研究が始まりである。その発電船「海明」による実験成果は昭和56年に発表され、浮体式波力発電システムの重要な指針として高く評価されている。他方固定式発電では、石油パニック以来基本的研究を重ねられたエンジニアリング振興協会の成果が実り、実用的な規模において昭和56年から実施されている研究によりさらに大きな前進のあることが報告された。又これらの研究に並行して各研究機関

が独自の方法を開発し、結合的に見ると世界をリードする立場にあるといわれている。

本学における研究の第1号は、産業工学研究所の開発した流速エネルギーによる発電システムであり、これまた長期にわたる基礎研究により、いよいよ実用化を目指すことになった。その成果はすでに報告され大きく評価されている。本研究は本学における研究としては第2号に当り、前者とは異なる原理と本研究において開発したシステムにより、これまで他の研究機関で解決されていなかった諸問題の解決に最大の努力を傾ける。以下にその詳細を述べる。

## 2. 研究の目的

最近におけるわが国の水力発電は、火力、原子力などの低負荷時における余剰電力を受けて揚水し、その位置エネルギーを尖頭負荷時において補給することを目的とする揚水発電方式が多く採択されている。しかし水力発電本来の使命には、クリーンエネルギーの供給という質の問題が含まれていることを考えると、河川になお残されている低落差及び海洋のエネルギーの開発は重要な課題になる。

一般に水力発電は、高落差ではペルトン水車、中落差ではフランシス水車、低落差ではプロペラ水車が用いられるが、プロペラ水車の中で最も低い落差に適用できるのはチューブラ水車であり、その限界は約5mといわれている。従ってそれ以下の落差を利用しようとする、前段において5m以上の落差に変換しておかなければならない。次に波力発電は、波力のエネルギーを空気エネルギーに変換して、空気タービンを回転させることにより発電しているが、この場合空気エネルギーから発電出力への効率は50~60%と高いが、波力エネルギーから空気エネルギーへの変換では変動幅が大きいために、全体の効率を10%以下に低下させるという結果になっている。

本研究ではこれらの問題に対処するため、低落差のエネルギーを高落差のエネルギーに変換する揚水装置を開発し、これによって発電効率を高めるようにする。又この揚水装置を波浪エネルギーに適用することにより、変動するエネルギーを平均化すると共に、稀薄なエネルギーを濃縮する方法についても研究する。以上の目的に対する本研究の計画を次の3年次にわけて実施する。

〔第1年次（昭和59年度）〕

- (1)揚水装置の基礎実験プラント（B-I）の製作
- (2)基礎的な実験と効率、運転に関する研究
- (3)気圧回路による自動制御の研究

〔第2年次（昭和60年度）〕

- (1)揚水装置の実験プラント（A-I）の製作
- (2)河川の低落差による実験（適地の無いときは室内実験）

〔第3年次（昭和61年度）〕

- (1)波浪エネルギー吸収装置の製作
- (2)波浪エネルギー利用の基礎研究

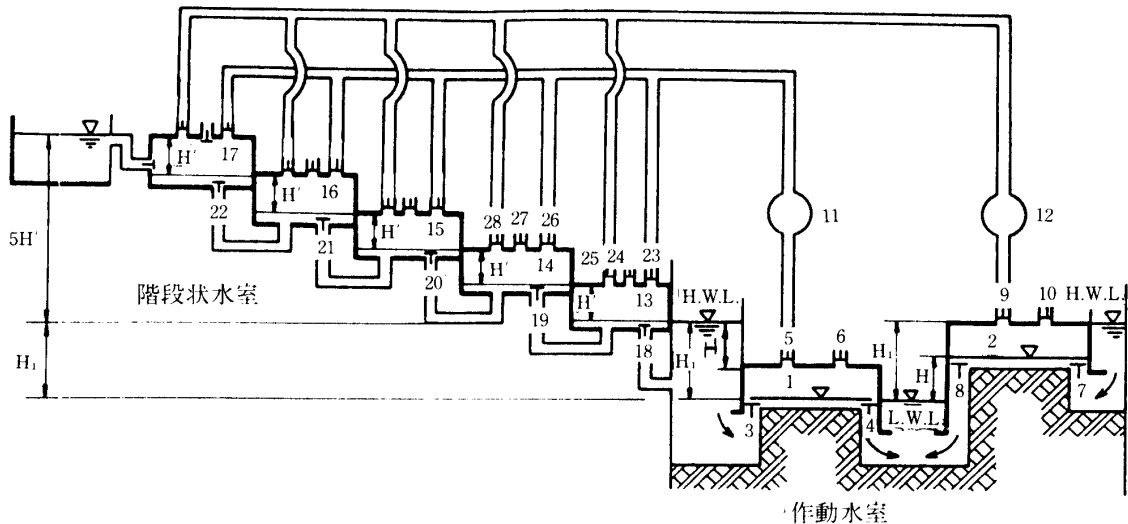
### 3. 落差を利用する揚水装置

#### (1) 揚水装置(A)型, (B)型の構造

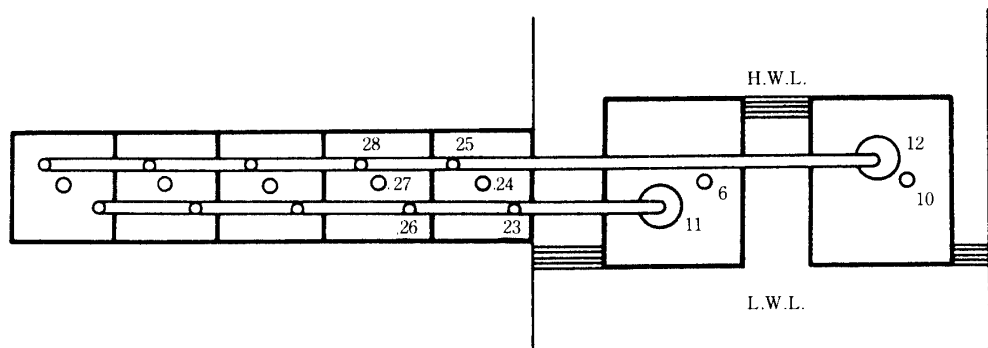
本装置は、低落差のエネルギーを空気エネルギーに変換する作動水室と、揚水回路を形成する階段状水室及び連結回路、作動水室と階段状水室間のエネルギーの伝達と運転を制御する気圧回路により形成される。

##### (a) 作動水室

作動水室は2筒をもって1ユニットとし、各水室において、落差水頭 $H_1$ のエネルギーを水室内で水面の上下するピストン運動とすることによって、気圧エネルギーに変換する役割をもつ。これを図-1により説明すると、水室1をL.W.L.側に配置し、L.W.L.の高さまで水を入れる。次に弁4, 6を閉じ3, 5を開けば、水室内に圧縮作用が働くので、これを11の制御室へ導く。水



(立面)



(平面)

図-1

室2はH.W.L.側に配置し、H.W.L.の高さまで水を入れる。次に弁7, 10を閉し8, 9を開けば水室内に排気作用が働くので、これを12の制御室へ導く。この操作を反復することにより作動水室から(+)圧と(-)圧のエネルギーを階段状水室に供給することができる。この場合(+)圧と(-)圧の利用できる範囲によって1行程の揚程がきまるので、その下限をHとすると、 $\pm(H_1 \sim H)$ が有効水頭(仮称)として階段状水室に供給されることになる。

#### (b)階段状水室

階段状水室は上下の相隣る2筒が1ユニットになって1行程の揚水をする。いま水室13と15が満水し、他は空虚な場合について水室13と14の関係を説明する。先ず弁18, 20, 24, 25, 26, 27を閉じ、弁23, 28を開くと、制御室11より有効水頭の(+)圧が水室13へ作用し、制御室12より有効水頭の(-)圧が水室14へ作用するので、13より14へ揚水作用が行なわれ、その揚程がH'になる。この操作を水室15と16の間でも同時に行なうことにし、これを第1行程とする。第2行程は水室14と15及び水室16と17の間で行なうようにし、さらに第3行程は水室17に(+)圧を作用させて揚水池に送水し、水室13に(-)圧を作用させてH.W.L.より取水する。この操作を反復すると、1ユニットの揚程がH'であるから3行程の揚程は $3H'$ となり、これを発電に利用するときは、L.W.L.までの落差 $H_1 + 3H'$ を用いることができる。

以上が最も簡単な基本型の説明であるが、実際には作動水室は複数ユニット、階段状水室の増加などにより条件に適合させる。又 $H_1$ の小さい場合は、中間に揚水池を置いて、その水位とL.W.L.との落差を利用する第2揚水装置を設けてユニットの揚程を高くするなどの直列接続も可能になる。

図-2は大型プラントの場合で、作動水室の弁を除き、底部の開いた筒をドックに沈設したもので、水の流入、流出は閘門により制御する。階段状水室は立体構造で、水室13をH.W.L.下に置いたのは(+)圧の依存度の高い場合について配慮したものであるが、操作については前述のものを準用する。なおこの装置の適用は大気圧までになるが、次に述べるように $|H|$ が大きいと効率が低下するので6mぐらいが限界である。

#### (2) 揚水効率

揚水効率は階段状水室の揚水量のもつエネルギーに対する作動水室の使用した水量のエネルギーの比をもって計算される。いま階段状水室1ユニットの揚程を $H'$ とするとき、 $H > H'$ でなければならない。そこで $H = H' + \Delta H$ とおけば、Hの取り方によって運転速度を変えることができる。ここに運転速度と効率の何れを重視すべきかという問題が生ずる。さて制御室より供給されるエネルギーは有効水頭 $\pm(H_1 \sim H)$ であり、その揚程が $H'$ に達した時に運転が停止するので、 $\Delta H$ は損失水頭になる。またその時上方水室で $H'$ の揚程を得るために下方水室で $H'$ のエネルギーを失うことになるのでこれも損失になる。次に作動水室は0圧から $\pm H$ に達するまでの空気の圧縮容積と膨張容積に相当する水量を余分に消耗するから損失になる。この分は $|H|$ の大きさに比例することから、本装置の効率は小落差で高く、高落差で低くなる。以上の説明は $\pm(H_1 \sim H)$ の全エネルギーを消費するときの限界の効率である。

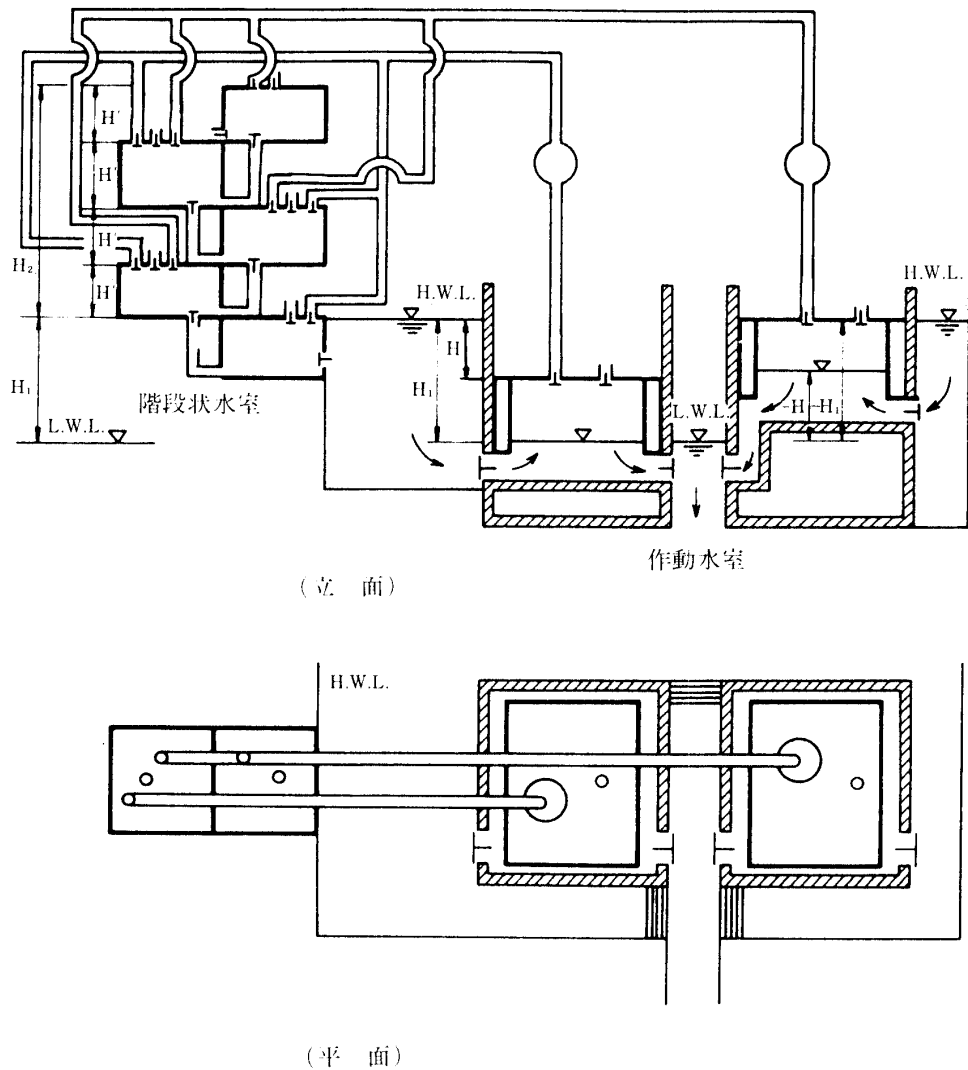


図-2

〔計算例〕

図-1の装置において、 $H_1 = 3\text{m}$ が得られるとき、H.W.L.より7.5mの高さの揚水池へ、毎分 $10\text{m}^3$ を揚水する。

〔解〕

$H_1 = 3\text{m}$   $H = 2\text{m}$   $H' = 1.5\text{m}$   $\Delta H = 0.5\text{m}$ とし、各水室及び弁の寸法を次のように仮定し、装置の運転を3行程とする。

- (a) 作動水室 2 箇  $9.0\text{m(W)} \times 9.0\text{m(D)} \times 1.1\text{m(H)}$
- (b) 階段状水室 5 箇  $4.5\text{m(W)} \times 4.5\text{m(D)} \times 1.6\text{m(H)}$
- (c) 階段状水室間の弁の径 $0.5\text{m}$ (連結管路を含む流量係数 $C = 0.8$ )

各行程に要する時間は後に説明するように1分以内になるので、3行程を3分間と見て全行程の揚水量を $30\text{m}^3$ として計算すると、階段状水室の容積は $4.5\text{m} \times 4.5\text{m} \times 1.5\text{m} = 30.38\text{m}^3$ でよいこ

とになるが、仮定寸法のように水の容積分に若干の余裕を取ることにする。次に作動水室を階段状水室に同調させるものとすれば、第1行程に(+ )圧60m<sup>3</sup>、(- )圧60m<sup>3</sup>を供給する必要がある。この時有効水頭の下限Hに達するまでの空気の圧縮と膨張分を余分に消耗するので、その分を含めたものを第1と第2行程の容量とする。第3行程は(+ )圧、30m<sup>3</sup>(- )圧、30m<sup>3</sup>に対する圧縮と膨張分を余分に消耗するのでその分を含めて計算する。

$$\text{作動水室(+ )圧の容積} = 60\text{m}^3 \times \frac{(10.33+2.0)}{10.33} \doteq 71.6\text{m}^3$$

$$\text{同 (- )圧の容積} = 60\text{m}^3 \times \frac{10.33}{(10.33-2.0)} \doteq 74.4\text{m}^3$$

仮定寸法は有効水頭分±(3m~2m)として9.0m×9.0m×1.0m=81m<sup>3</sup>、さらに水の容積分に余裕を取って9.0m×9.0m×1.1mとした寸法になっている。なお第3行程は½の容量で足りるのでH=±2.5mになる。効率は

$$\eta = \frac{\text{揚水量} \times \text{全揚程}(H_2)}{\text{使用水量} \times \text{落差}(H_1)} = \frac{30 \times 7.5}{365 \times 3.0} \doteq 20.5\%$$

揚水量：30m <sup>3</sup>	使用水量：第1行程=71.6m <sup>3</sup> +74.4m <sup>3</sup>
	第2行程=71.6m <sup>3</sup> +74.4m <sup>3</sup>
	第3行程=35.8m <sup>3</sup> +37.2m <sup>3</sup>
	計 365m <sup>3</sup>

この効率は±(H<sub>1</sub>~H)の全部を消耗した場合である。

(3) 運転速度

階段状水室の第1行程と第2行程について1ユニットを考えると、下方水室に(H<sub>1</sub>~H)の(+ )圧と、上方水室に-(H<sub>1</sub>~H)の(- )圧が作用するから、これらを水柱におきかえると、最初の状態は図-3のように、左室と右室の水位差h<sub>1</sub>=2H<sub>1</sub>としてよいことになる。次に両水室間の水位差が2H'になったとき、左室に+H右室に-Hが作用しているから、これらを両室の水位差h<sub>2</sub>で表わすとh<sub>2</sub>=2H-2H'になる。すなわちこの例ではh<sub>1</sub>=6m、h<sub>2</sub>=4m-3m=1mとし、次のようにして時間を求めればよい。

流入水量と流出水量は等しいから

$$-A_1 dz_1 = A_2 dz_2 \dots (1)$$

dt時間に左室水位の降下をdz<sub>1</sub>、右室水位の上昇をdz<sub>2</sub>とすれば、両室の水位差zの減少dzは

$$-dz = -dz_1 + dz_2 \dots (2)$$

弁の断面積をaとしてもぐりオリフィスの流量式

$$Q = Ca\sqrt{2g(h+h_a)} \dots (3)$$

C：流量係数

h<sub>a</sub>：接近流速水頭

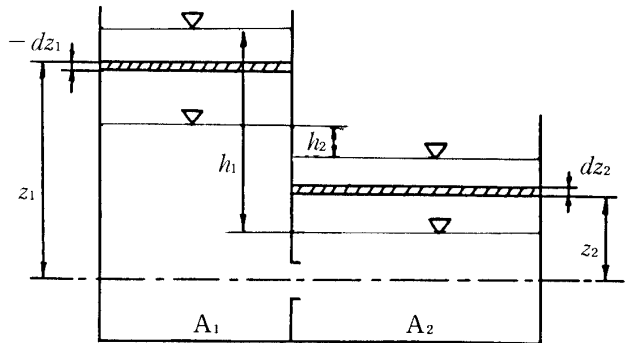


図-3

$$dt\text{時間の流量}Qdt\text{は(1)式に等しいから} \quad -A_1 dz_1 = Q dt \quad dz_1 = \frac{-Q}{A_1} dt$$

$$A_2 dz_2 = Q dt \quad dz_2 = \frac{Q}{A_2} dt$$

$$(2)\text{式より} \quad dz = dz_1 - dz_2 = -\left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}\right) Q dt$$

$$(3)\text{式より} \quad dz = -\left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}\right) C a \sqrt{2g(z+h_a)} dt$$

$$\therefore t = \frac{-1}{C a \sqrt{2g}} \left(\frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}\right) \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{\sqrt{z+h_a}} dz$$

$h_a = 0$  とおけば

$$t = \frac{2}{C a \sqrt{2g}} \left(\frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2}\right) (h_1^{\frac{1}{2}} - h_2^{\frac{1}{2}})$$

$$A_1 = A_2 = A \text{ のとき} \quad t = \frac{A}{C a \sqrt{2g}} (h_1^{\frac{1}{2}} - h_2^{\frac{1}{2}})$$

$$\text{先の計算例では} \quad t = \frac{4.5 \times 4.5}{0.8 \times 0.25^2 \pi \sqrt{2g}} (6^{\frac{1}{2}} - 1^{\frac{1}{2}}) \doteq 42.2 \text{秒}$$

次に第3行程では揚水池への流出は(+)圧のみとなるの

で  $h_1 = H_1 = 3\text{m}$

$$h_2 = H - H' = 2.5\text{m} - 1.5\text{m} = 1.0\text{m}$$

とし図-4による時間の計算をすればよい。

(3)式より  $Q = C a \sqrt{2g(z+h_a)}$  とし,  $dt$ 時間に水面が  $dz$  だけ下降する体積が  $-A dz$  に等しいとすれば

$$Q dt = -A dz \quad \therefore dt = \frac{-A}{Q} dz$$

$$= \frac{-A}{C a \sqrt{2g(z+h_a)}} dz$$

$$t = \frac{-A}{C a \sqrt{2g}} \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{\sqrt{z+h_a}} dz$$

$$h_a = 0 \text{ のとき} \quad t = \frac{2A}{C a \sqrt{2g}} (h_1^{\frac{1}{2}} - h_2^{\frac{1}{2}})$$

$$\text{先の計算例では} \quad t = \frac{2 \times 4.5 \times 4.5}{0.8 \times 0.25^2 \pi \sqrt{2g}} (3^{\frac{1}{2}} - 1.0^{\frac{1}{2}}) \doteq 42.6 \text{秒}$$

又第3行程の最下水室のH.W.L.からの取水時間もこの計算値に等しくなる。すなわち全揚程7.5mに要する時間は  $42.2 \times 2 + 42.6 = 127$ 秒となるのでこれに作動水室の切替3回分を含めて3分間とする。

#### 4. 研究用実験プラント

本研究の実験プラントには先に説明した基本型をモデル化した2種のプラントを用いる。その1つは分散型としての(A)型, その2は集中型としての(B)型である。(A)型は山間部などの地形に合わせて分散して設置するもので, 昭和60年度の計画になる。(B)型は海岸部などの地形的制約のあ

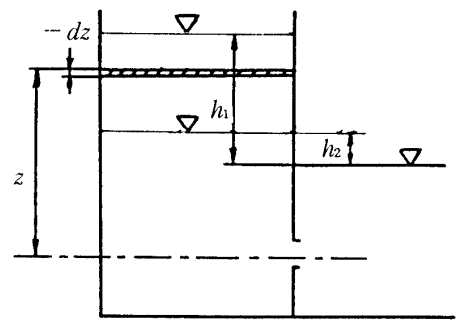


図-4

る場合に立体構造とし、現地に適合できるようにするもので、すでに基礎実験を終えた。

(1) (A)型実験プラント(A-1)

図-5 参照

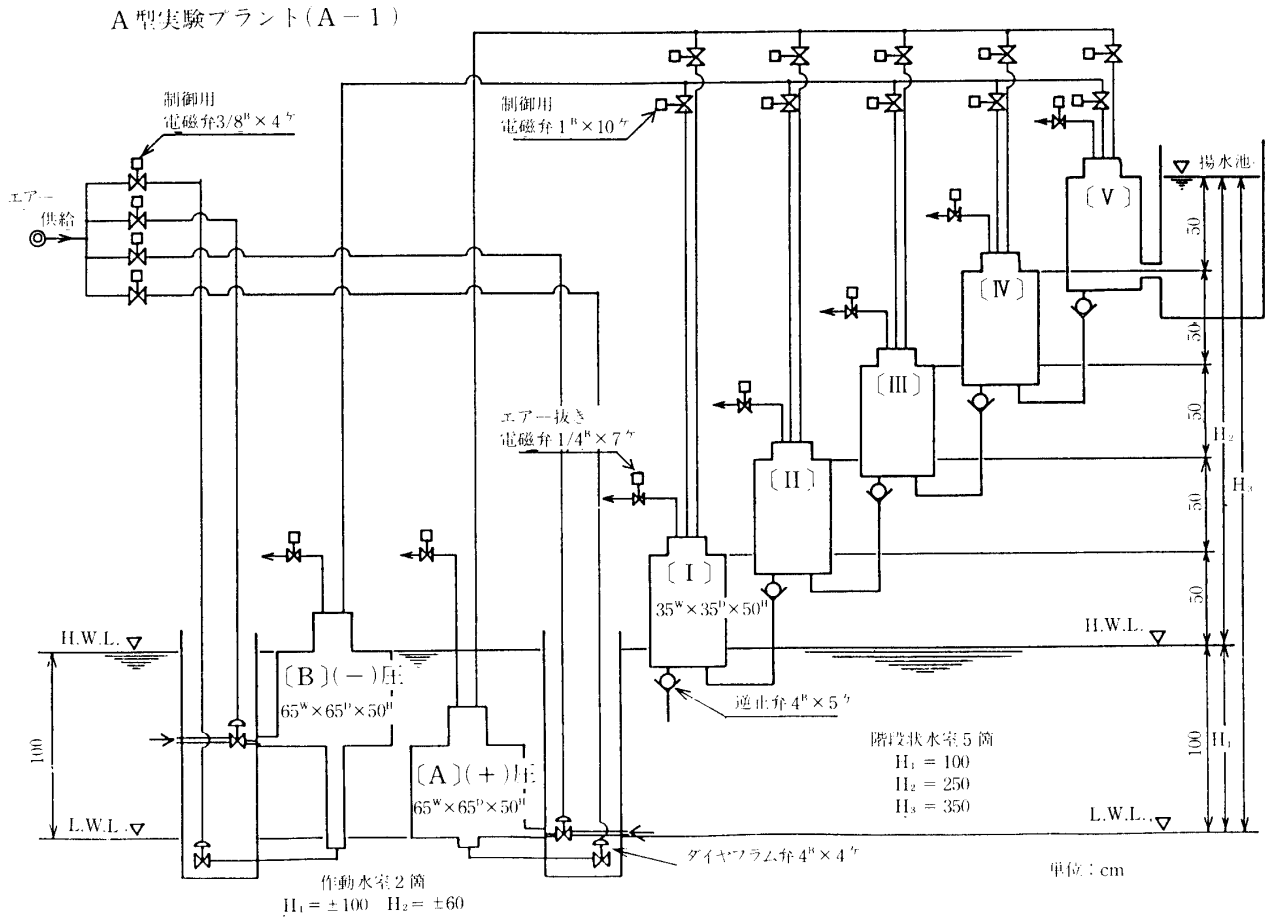


図-5

作動水室 [A](+)圧, 巾65cm 奥行65cm 高さ50cm

(1 ユニット) 有効容積0.169m<sup>3</sup>

[B](-)圧, 同上

階段状水室 5 箇 [I][II][III][IV][V]

各室 巾35cm 奥行35cm 高さ50cm

有効容積0.061m<sup>3</sup>

弁の径 D = 5 cm

流量係数 C = 0.3

(a)適用条件 初落差H<sub>1</sub> = 1.00m

第1 第2 行程のH = ±0.60m, ΔH = ±0.10m

第3 行程のH = ±0.80m, ΔH = ±0.30m

1 ユニットの揚程H' = 0.50m



$$\text{全揚程} H_2 = 2.50\text{m}$$

$$\text{総落差} H_3 = 3.50\text{m}$$

$$3 \text{ 行程の揚水量} Q_2 = 0.061\text{m}^3$$

(b) 効率 作動水室の使用水量

$$\text{第 1 と第 2 行程〔A〕(+ ) 圧} = 0.0645\text{m}^3 \times 4$$

$$\text{〔B〕(- ) 圧} = 0.0648\text{m}^3 \times 4$$

$$\text{第 3 行程〔A〕(+ ) 圧} = 0.0657\text{m}^3 \times 1$$

$$\text{〔B〕(- ) 圧} = 0.0661\text{m}^3 \times 1$$

$$\text{計 } Q_1 = 0.649\text{m}^3$$

$\pm(H_1 \sim H)$  の全部を消耗する時の効率

$$\eta = \frac{Q_2 H_2}{Q_1 H_1} = \frac{0.061 \times 2.5}{0.649 \times 1.0} \doteq 23.5\%$$

(c) 運転速度

第 1 と第 2 行程の運転速度,  $h_1 = 2.0\text{m}$ ,  $h_2 = 0.2\text{m}$

$$t = \frac{A}{C a \sqrt{2g}} (h_1^{\frac{1}{2}} - h_2^{\frac{1}{2}}) = \frac{0.35 \times 0.35}{0.3 \times 0.025^2 \pi \sqrt{2g}} (2^{\frac{1}{2}} - 0.2^{\frac{1}{2}}) \doteq 45.5 \text{ 秒}$$

第 3 行程の運転速度,  $h_1 = 1.0\text{m}$ ,  $h_2 = 0.3\text{m}$

$$t = \frac{2A}{C a \sqrt{2g}} (h_1^{\frac{1}{2}} - h_2^{\frac{1}{2}}) = \frac{2 \times 0.35 \times 0.35}{0.3 \times 0.025^2 \pi \sqrt{2g}} (1^{\frac{1}{2}} - 0.3^{\frac{1}{2}}) \doteq 42.5 \text{ 秒}$$

$$3 \text{ 行程の時間} = 45.5 \times 2 + 42.5 \doteq 133.5 \text{ 秒}$$

(2) (B)型実験プラント(B-1)

図-6, 写真1 参照

作動水室〔A〕(+ ) 圧, 巾64cm 奥行64cm 高さ40cm

(1 ユニット) 有効容積0.143m<sup>3</sup>

〔B〕(- ) 圧, 同上

階段状水室5箇〔I〕〔II〕〔III〕〔IV〕〔V〕

各室円筒径50cm高さ40cmストッパー付特殊構造とする。

有効容積0.06m<sup>3</sup>

弁の径 D=5cm

流量係数 C=0.3

(a) 適用条件 初落差  $H_1 = 0.80\text{m}$

第 1 第 2 行程の  $H = \pm 0.45\text{m}$ ,  $\Delta H = \pm 0.05\text{m}$

第 3 行程の  $H = \pm 0.625\text{m}$ ,  $\Delta H = \pm 0.225\text{m}$

1 ユニットの揚程  $H' = 0.40\text{m}$

全揚程  $H_2 = 2.00\text{m}$

総落差  $H_3 = 2.80\text{m}$

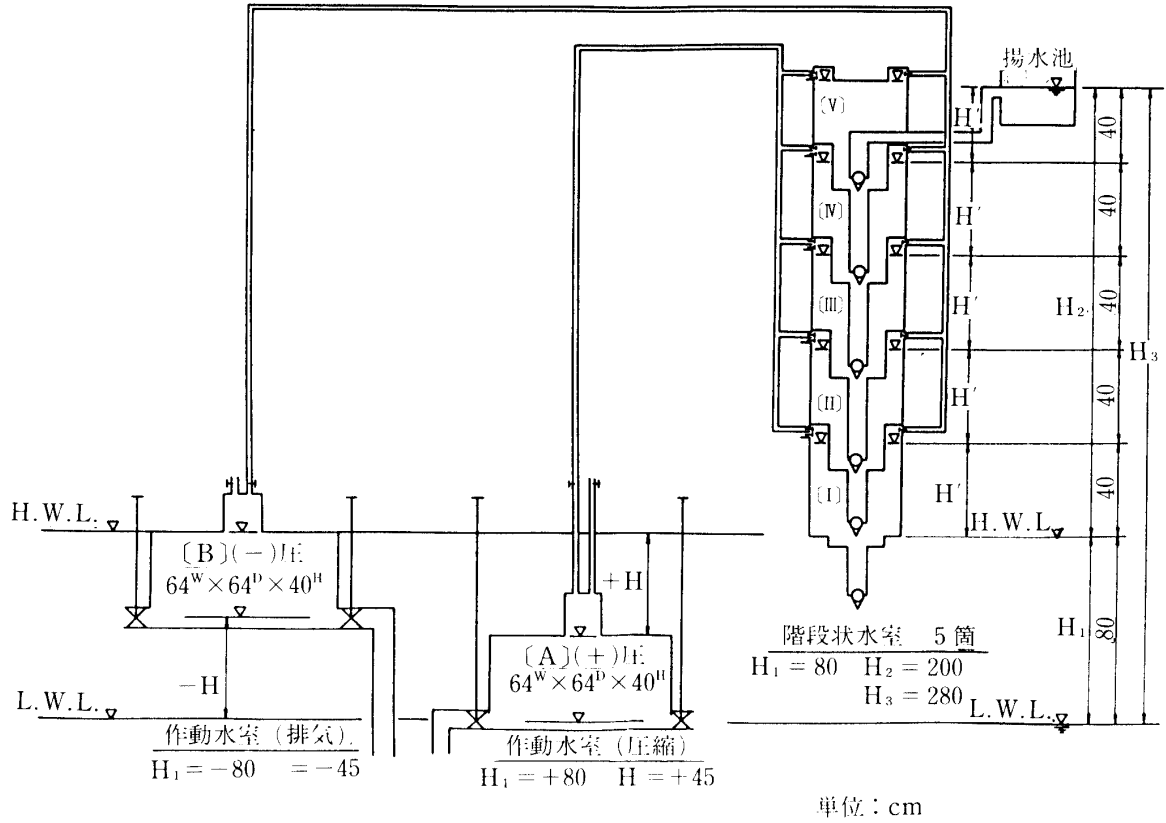


図-6 B型実験プラント (B-1)

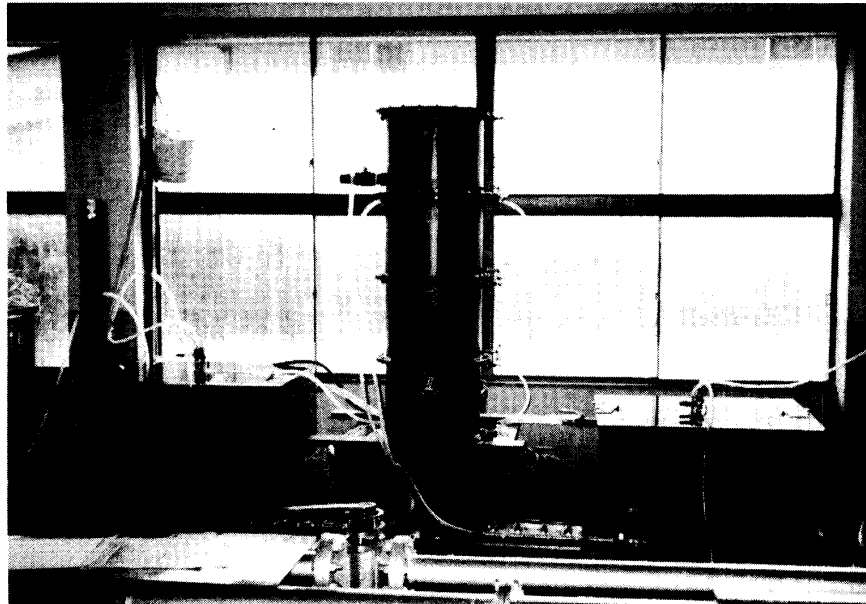


写真-1 実験プラント (B-1)

(左)作動水室(B) (中央)階段状水室5筒 (右)作動水室(A)

3行程の揚水量 $Q_2 = 0.06\text{m}^3$

(b)効率 作動水室の使用水量

$$\text{第1と第2行程[A]}(+)\text{圧} = 0.0626\text{m}^3 \times 4$$

$$\text{[B]}(-)\text{圧} = 0.0627\text{m}^3 \times 4$$

$$\text{第3行程[A]}(+)\text{圧} = 0.0636\text{m}^3 \times 1$$

$$\text{[B]}(-)\text{圧} = 0.0639\text{m}^3 \times 1$$

$$\text{計 } Q_1 = 0.6287\text{m}^3$$

$\pm(H_1 \sim H)$ の全部を消耗する時の効率

$$\eta = \frac{Q_2 H_2}{Q_1 H_1} = \frac{0.06 \times 2.00}{0.6287 \times 0.80} \cong 23.9\%$$

(c)運転速度

第1と第2行程の運転速度  $h_1 = 1.6\text{m}$ ,  $h_2 = 0.1\text{m}$

$$t = \frac{A}{Ca\sqrt{2g}} (h_1^{\frac{1}{2}} - h_2^{\frac{1}{2}}) = \frac{0.25^2 \pi}{0.3 \times 0.025^2 \pi \sqrt{2g}} (1.6^{\frac{1}{2}} - 0.1^{\frac{1}{2}}) \cong 71.5\text{秒}$$

第3行程の運転速度  $h_1 = 0.8\text{m}$ ,  $h_2 = 0.225\text{m}$

$$t = \frac{2A}{Ca\sqrt{2g}} (h_1^{\frac{1}{2}} - h_2^{\frac{1}{2}}) = \frac{2 \times 0.25^2 \pi}{0.3 \times 0.025^2 \pi \sqrt{2g}} (0.8^{\frac{1}{2}} - 0.225^{\frac{1}{2}}) \cong 63.3\text{秒}$$

3行程の時間 =  $71.5 \times 2 + 63.3 = 206.3\text{秒}$

## 5. 実験とその結果

実験プラント (B-1) による実験の目的は、運転速度と効率を測定し、本装置の最適条件を求めることである。運転速度は有効水頭の取り方により変化するので、 $H$ と $t$ の関係を測定し、同時に効率も測定する。次にこの実験は先に述べた計算例のモデルとなるので、計算例の最適条件を推定するデータになる。

(1) 図-7は第1および第2行程における下方水室と上方水室の水頭の時間変化と作動水室の水頭変化を示すもので、1行程の時間は $t = 74\text{秒}$ 。

(2) 図-8は第3行程におけるH.W.L.からの取水と揚水池への送水を示すもので、両者はほぼ等しい時間になる。 $t = 66\text{秒}$ 。

(3) 表-1は作動水室を一定時間に区切って切替えをする場合の全行程の時間と単位時間当りの揚水量及び効率を測定したものである。所要時間には作動水室の切替えに要する待時間が含まれるので、継続時間が短かなくても総時間の短縮にならない。効率は $\pm(H_1 \sim H)$ の全部を消耗しないので23.9%より高くなる。

(a)運転速度の最小

運転速度の最小は継続時間30秒のもので、全行程の所要時間 $t = 201\text{秒}$ で単位時間の揚水量は最大となる。 $q_{\max} = 2.98 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ ,  $\eta = 26\%$

(b)効率の最高

効率の最高は作動水室の切替えをしないもので $\eta_{\max} = 30.0\%$ 、全行程の所要時間 $t = 260$ 秒である。

(c)運転方法

単位時間揚水量を優先すれば(a)が最適、効率を優先すれば(b)が最適条件となる。以上のことより水量に余裕のある場合は(a)の運転方法を取り、余裕のない場合は(b)の運転方法を取るのがよいという結論になる。

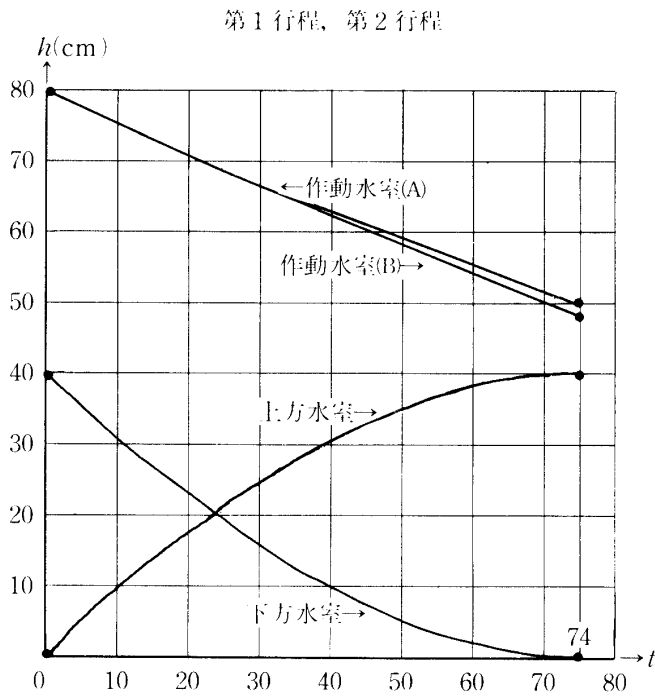


図-7

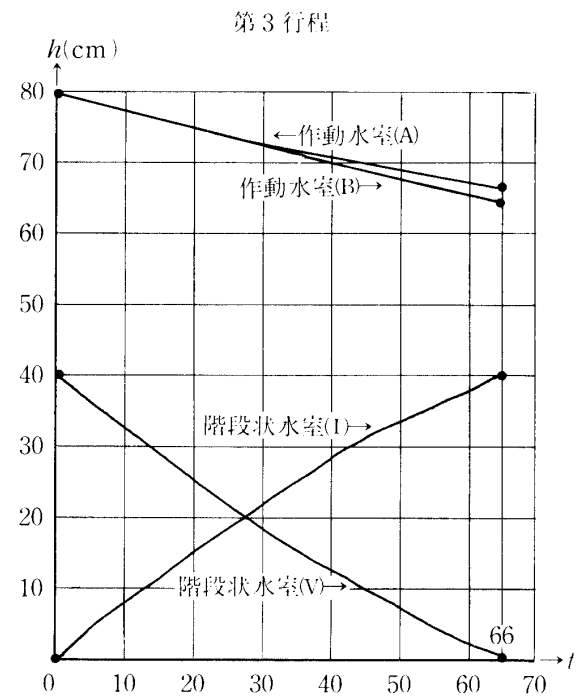


図-8

表-1 運転継続時間別による測定結果

継続時間	切替回数	第3行程からの待時間	第1行程	中待時間	第2行程	中待時間	第3行程	合計時間	単位時間揚水量	効率
10秒	6	10 <sup>(秒)</sup>	66 <sup>(秒)</sup>	3 <sup>(秒)</sup>	66 <sup>(秒)</sup>	3 <sup>(秒)</sup>	61 <sup>(秒)</sup>	209 <sup>(秒)</sup>	$2.87 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	27.1%
20秒	3	10	63	5	63	5	57	203	2.96 "	27.4%
30秒	2	10	61	7	61	7	55	201	2.98 "	26.0%
40秒	1	10	64	9	64	9	58	214	2.80 "	28.0%
50秒	1	10	68	12	68	12	64	234	2.56 "	29.0%
	なし	10	74	18	74	18	66	260	2.31 "	30.0%

- a) 第3行程からの待時間、及び中間待時間は作動水室(A)を空虚にし、(B)を満水するに要する時間。
- b) 各行程の時間には切替回数に相当する待時間が含まれる。
- c) 作動水室にH.W.L.より取水する弁、及び揚水池へ送水する弁の径は $D = 5 \text{ cm}$ 流量係数 $C = 0.6$ である。

## 6. 波浪エネルギーによる揚水

### (1) 波浪エネルギーの解析

波力発電は通常波浪エネルギーをエネルギー吸収装置によって空気エネルギーに変換し、これを定圧化してタービンに送って発電する方式をとっているが、本研究では波浪エネルギー吸収装置によって(+)圧と(-)圧のエネルギーに変換したものを揚水装置に送り、低落差を高落差に変換した後、これを発電に利用する。波浪エネルギー吸収装置によるエネルギーは次式で表わされる。

$$E_1 = \int_0^T \int_{z_1}^{z_2} p \cdot v \cdot dz \cdot dt$$

$$p = \frac{\rho g H}{2} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh k h} \cdot \cos(kx - \omega t) - \rho g z$$

$$v = \frac{g k H}{2 \omega} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh k h} \cdot \cos(kx - \omega t)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad z: \text{開口部の水深}$$

次にエネルギー吸収装置により変換されるエネルギーは次式で表わされる。

$$E_2 = S \cdot \rho g \cdot \int_0^{H_a} z dz = \frac{1}{2} S \cdot W_0 \cdot H_a^2$$

変換効率

$$\eta_1 = \frac{H_a^2 \cdot W_0 \cdot S}{2 \int_0^T \int_{z_1}^{z_2} P \cdot v dz dt}, \quad H_a = \frac{H_p}{\rho g + P_T}$$

S: エネルギー吸収装置断面積,  $W_0$ : 海水の単位体積重量,  $P_T$ : 階段状水室の気圧,  $H_p$ : エネルギー吸収装置内の水位変化

### (2) 波浪エネルギー利用のシステム

本研究では波浪エネルギー利用のシステムを図-9のようにする。Aは越波堤、Bは第1揚水池とする。Cは低下貯水池でDなる管路により海底部に連結される。Eは逆止弁で海面がCの水位より高いときに流入を阻止する。いま波浪により海水がAを越えて流入するとBの水位が上昇するので、その落差Rを利用するためにCが必要になる。Cの水位は海面より高くなるとEを通過して流出するので、BとCの間に $H_1$ なる落差が得られる。そこで $H_1$ を利用する揚水装置Fを設置してBより第2揚水池Gへ揚水し、Cとの落差 $H_2$ により発電する。その場合FはBとCとの落差 $H_1$ のほかに別の波力エネルギー吸収装置から供給されるエネルギーも同

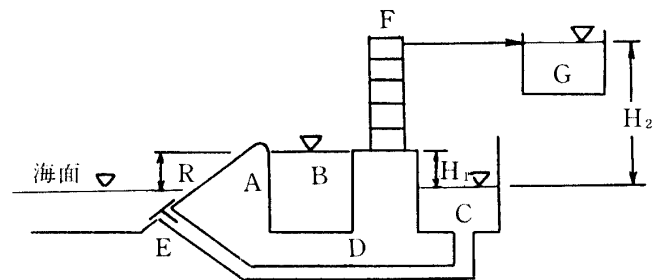


図-9

時に受け入れるようにすることができる(後述)。なおこの方式でAからBへ流入する越波堤方式には金沢大学の研究があり、また室蘭工業大学の振子利用の研究などが参考になるが、本研究では独自の第3方式を開発する。次に波力エネルギー吸収装置には海洋科学技術センターの2枚弁方式、竹中工務店のケーソン型エネルギー吸収装置の成果が報告されているので、これを基本にして独自の第3方式を開発する。

### 7. 第3方式の計画

先に述べたシステムにおいて解決すべき問題は3つある。第1は中央機能に揚水装置(A)型又は(B)型を置くとき、越波堤に代るべき波力揚水装置(C)型を開発すること、次に揚水装置は自力で揚水するが、それに加えて波力エネルギーを別系統から供給できるようにするための波力エネルギー吸収装置(D)型を開発することが第2の課題、さらに以上の装置の連動システムをつくるのが第3の課題になる。

#### (a)波力揚水装置(C)型

図-10において水室Aの開口部に枠のみの振子Bと板状の振子Cを設置する。Bは90°の回転、Cは270°の回転ができる。先ず入射波を後壁によって受け止めると、Aの水位は上昇するので上昇位置において開口部に設けられた遮断扉Dを閉じると、水室の水は流出部に設けられた逆止扉Eを通過して第1揚水池へ流出する。次に流出が停止するとDがBと共に回転して開口部が開かれ、同時にCも回転を開始する。この2箇の振子のエネルギーは、それぞれバネFとGに貯蔵され、次の波の入射時に振子を入射方向に回転させるエネルギーに用いられる。

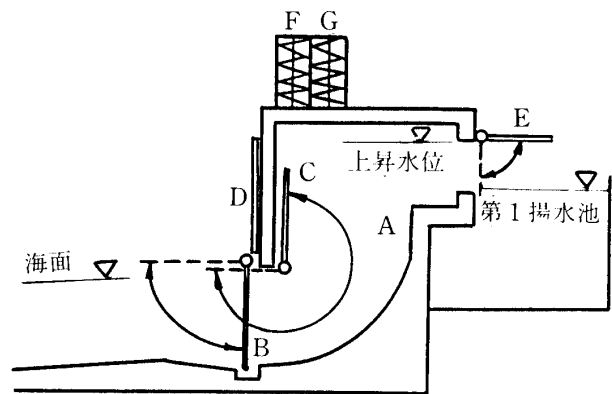


図-10

#### (b)波力エネルギー吸収装置(D)型

図-11及び図-12に示すものは2枚弁方式の最も簡単なエネルギー吸収装置である。本体は沖方向に開口する筒であり、その上部に排気弁Aと吸気弁Bが設けて

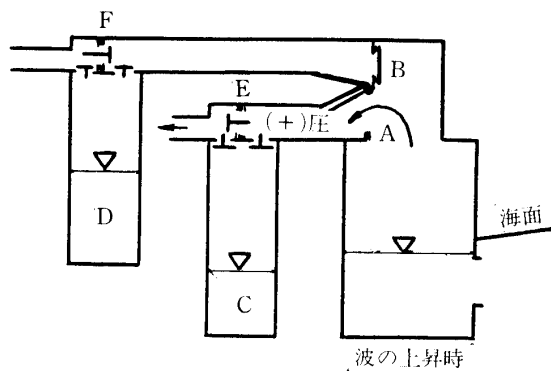


図-11

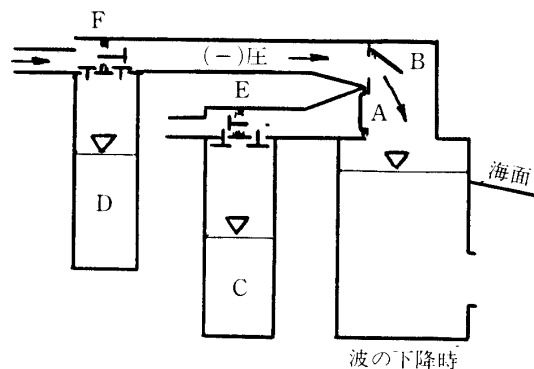


図-12

ある。弁は波の上昇時にはAが開いて(+)圧が供給され、波の下降時にはBが開いて(-)圧が供給される仕組みである。次にこの装置により得られるエネルギーを中枢機能の揚水装置に送る場合、有効水頭Hより大きい(+)圧と(-)圧でなければならないのでこれを主圧といい、Hより小さい圧力を副圧ということにする。主圧が揚水装置に供給されるとき、中央機能の作動水室が供給するエネルギーと同調する。副圧は弁EおよびFにより制御されてエネルギー貯蔵水槽CおよびDに水頭として保存され、補助的エネルギーとして使用されることになる。

(c)第3方式の総合システム

図-13によって説明すると、

- (i)波力揚水装置(C型)により海面より第1揚水池に揚水する。
- (ii)第1揚水池より第2揚水池に揚水する中枢機能として、落差を利用する揚水装置(A型又は(B)型の階段状水室5水室のものを2基設置する。これを中央揚水装置とする。
- (iii)第1揚水池と低下貯水池の落差 $H_1$ を(+)圧と(-)圧に変換するための作動水室1ユニットを設

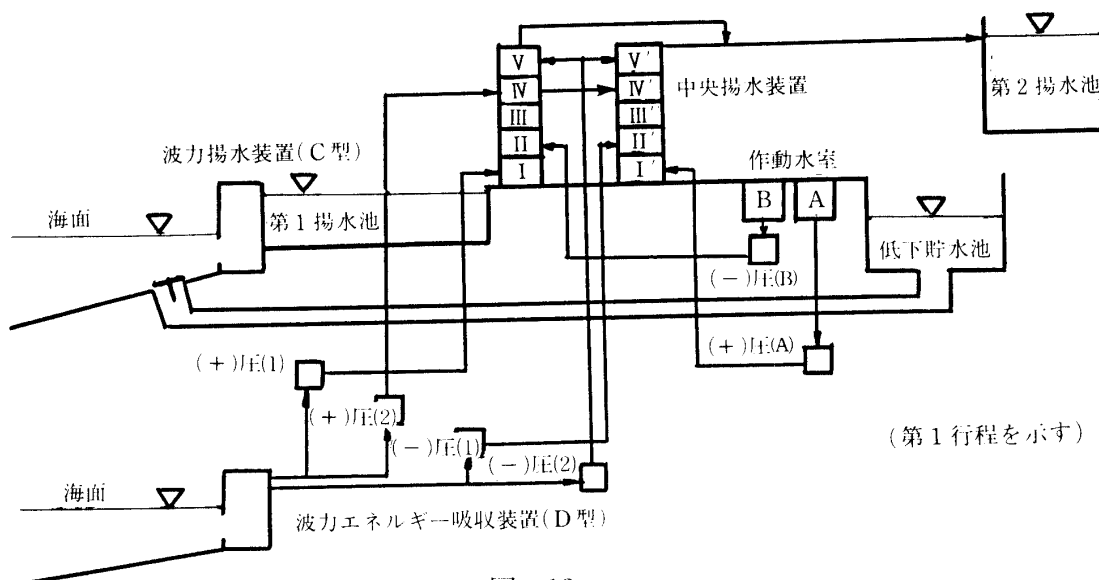


図-13

置し(+)圧Aと(-)圧Bを供給する。

- (iv)波力エネルギー吸収装置(D型)により、主圧として(+)圧(1)と(-)圧(1)、副圧として(+)圧(2)(-)圧(2)を供給する。

(v)(D)型のサイクルに同調するシステムにより運転すると図-14のようになる。このシステムは階段状水室のI, IV, I', IV'の水室が満水し、他の水室が空虚な状態から開始するものとして設定した。以上の行程による階段状水室の揚水順は次のとおりである。(なおこのシステムは条件に適合するよう変更できる。)

第1行程(I)→(II) 第2行程(IV)→(V)

第3行程(II)→(III) 第4行程 { (V)→(第2揚水池)  
(第1揚水池)→(I)

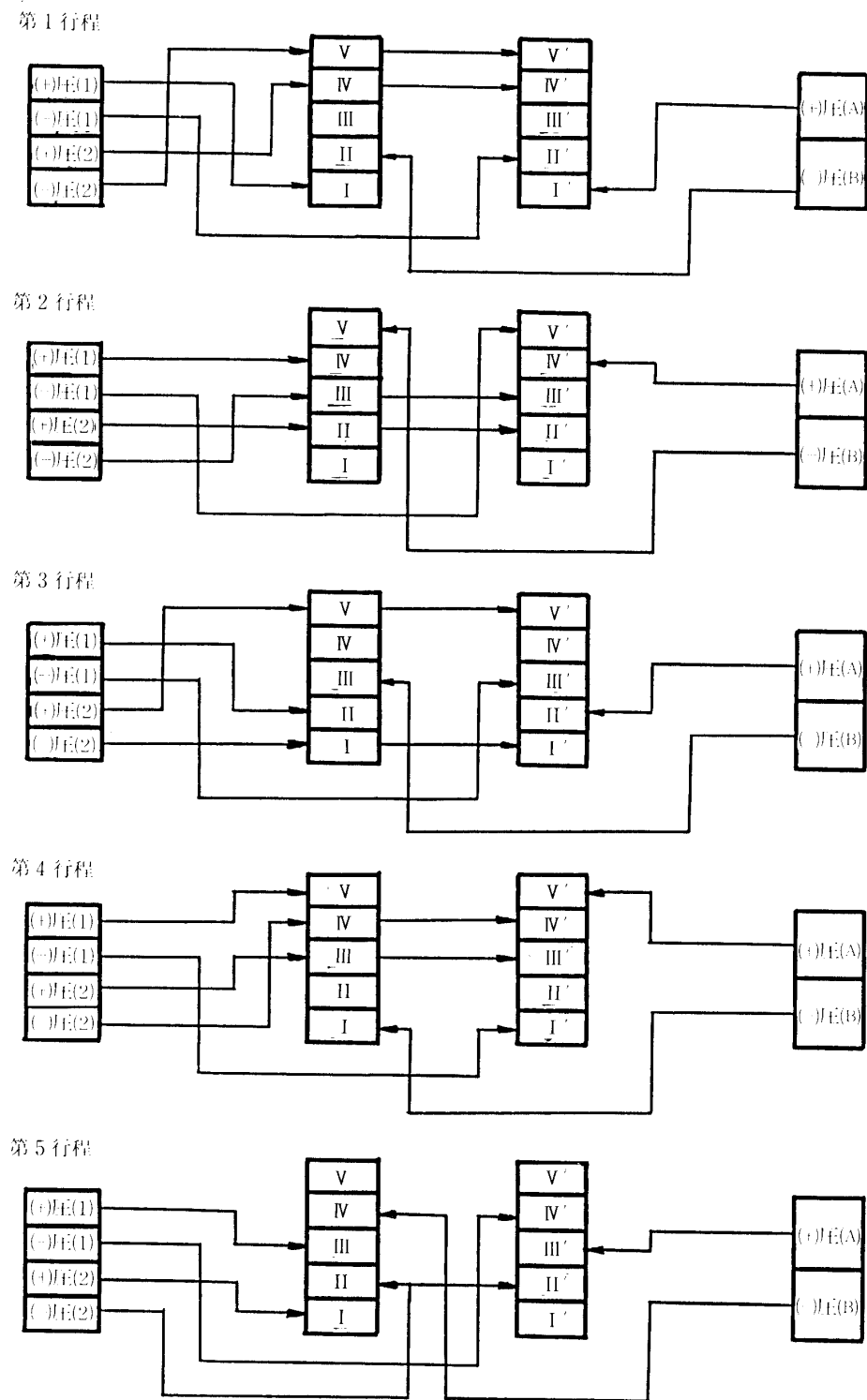


図-14

第5行程(III)→(IV) I' II' III' IV' V' も同じ

(D)型の副圧はエネルギー貯蔵水槽から供給されるので、主圧の作用する前段において、(+)圧は作動水室が大気圧の状態のとき、(-)圧は階段状水室が大気圧の状態のとき作用する。これは主圧が最初に作用するとき0圧の状態にあるのを副圧で補充して効率を高める。



## 8. ま と め

(1) 本研究の第1年次における研究の重点は落差を利用する揚水装置の基礎研究であるが、プラント(B-1)による実験により効率23%が確保された。この落差から発電への効率を50%とすると、全体の効率は10%以上となり、十分実用に供し得るものである。(B-1)は実用規模ではないが、電源のない離島や途上国の小発電又は灌漑などに利用できるものと考えている。

(2) 本研究の第2次計画は実施への適用であるが、先ず河川の低落差における最適化を検討する。波浪エネルギーの研究は最も重要であるが、ひとまずここでは室内における基礎実験に重点をおくものとし、できれば第3方式の直列接続によって実用規模の落差10m以上を得たいと考えている。

以上のように本研究はまだ緒についたばかりであるが、クリーンエネルギーの開発を目指し今後とも努力するつもりである。この研究に対し、特別のご指導を賜りました海洋科学技術センターの益田善雄氏、並びに竹中工務店の篠崎守氏に対しここに改めて敬意と感謝の意を表す。おわりに本研究は金井学園の助成により実施されたものであることを記し謝辞とする次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 波力発電装置「海明」の研究成果報告(57.6), 海洋科学技術センター
- 2) 固定式波力発電システムに関する調査研究報告書(59.3), エンジニアリング振興協会
- 3) 海洋エネルギー読本, オーム社
- 4) 第30回海岸工学講演会(57.11), 土木学会
- 5) 第1回波浪エネルギーシンポジウム(59.11), 海洋科学技術センター