波力発電システムの実用化に関する研究

Practical Wave Power Generation System

植木圭一・菊地新喜*・吉目木明*

東北電力(株)研究開発センター, 仙台市青葉区中山7丁目2番1号

*東北学院大学, 宮城県多賀城市中央1丁目13番1号

K. Ueki, S. Kikuchi*, and A. Yoshimeki*

Research and Development Center, Tohoku Electric Power Co., Inc.

*Tohoku Gakuin University

We developed a new type of wave power generation system. In this system, water valves without mechanical operation are combined with air chambers. A test plant was installed on the south breakwater at Haramachi thermal power station, and testing for practical use was carried out at the Haramachi site from 1996 until 2000. This paper summarizes the characteristics of the test plant and the practical wave power generation system in view of the results obtained thus far.

Key words: wave power generation system, water valve, air chamber, test plant, testing, thermal power station

1. はじめに

波力発電については、国内外において様々な研究開発や実海域実験が行われてきたが、技術的な課題や発電コストの問題等から本格的な実用化に至っていないのが現状である。近年は地球環境問題や化石燃料枯渇問題が社会的にも重要視されており、太陽光発電・風力発電等の自然エネルギーの有効利用が脚光を浴びている。このような状況と東北地域が波エネルギー賦存量に恵まれていることから、「水弁」という独自開発技術を採用した新しいタイプの波力発電実証実験設備（水弁集約式波力発電システム）を東北電力原町火力発電所の南防波堤に建設し、実海域における様々な実証実験を行ってきた。我々は先に水弁集約式波力発電システムの基礎的な検討や実海域実験における水弁の没水深と発電出力等について報告した¹⁾²⁾。今回、本論文では今までに行った実海域における実証実験結果をもとに得られた知見から本実証実験設備の最終評価を行うとともに将来実用化波力発電システムについて検討した結果を報告するものである。

2. 実験設備の概要

本実験機設備は、沿岸固定式振動水柱型に属するシステムで、防波堤としての機能を有する波力発電ケーソン(ケーソンは水面下で使われる気密されたコンクリート製箱等を言う)に波エネルギーを空気エネルギーに変換する空気室、空気室に取り込んだ往復空気を一方向整流する水弁(水弁室)、水弁により整流された空気流を集約する集合ダクト、集合ダクトからの空気流により発電する空気タービン・発電機とこれらを運転制御する配電盤類等が組み込まれ、原町火力発電所の南防波堤先端に設置されている。

波エネルギーは風力エネルギーよりさらに変動性が大きく、磁気技術をもとに設計・製作されている現在の標準的な発電機を波力発電に単純に採用することは難しいと考えられたため、本システムで採用した誘導発電機は波の状況により極数を変更可能なものとし、高波浪時 130 kW (6 極, 1,000 r/min) 低波浪時 65 kW (12 極, 500 r/min) の運転が切替できるようにしている。また、タービンについては、一般的な蒸気タービンやガスタービンの一方向流れで使用されている高効率な軸流タービンを採用し、このため寄せ波・引き波時の双方向空気流を一方向空気流に整流するための整流装置(整流弁)として、大波浪時に機械式弁のような破損の恐れがない水弁と呼ばれる流体弁を採用している^{1)~4)}。

Fig. 1 に本実験設備の水弁を整流弁として使用した場合の動作原理図を示す。図に示したように、寄せ波時は空気室内空気が波の水面上昇により圧縮され大気圧より高圧となるため、低圧の大気側へ矢印のように流れ、空気タービンを回転させ発電する。これに対して引き波時は、空気室内空気圧が波の水面下降により大気圧より低圧になり、空気は大気側から低圧の空気室側へ流れ、空気タービンを回転させ発電する。なお、寄せ波時の負圧水弁、引き波時の正圧水弁は逆止弁として機能することで水弁が整流弁としての機能を果たし、水弁の使用状態は水弁室内の水位調整によって変更できる。通常の場合、水位上昇側がポンプによる給水、水位下降側が重力による排水によって行いが、

点検作業等で早急に排水したい場合にはバルブの切替によって重力と併用の排水も可能である。

3. 実海域における実験結果

本実験設備による実海域実験は、波力発電に新たに採用した水弁の性能を含めた発電システムの基本性能を実機レベル設備によって検証することを主目的として行われてきた。その結果について、計測データや運転状況から得られた内容について主なものを以下に述べる。

3.1 水弁性能と評価

本実験設備では、整流弁の機能を持つ水弁を採用することによって、ウエルズタービンより高効率な軸流タービンをタンデム配置している。このため、まず実海域実験においては、水弁を整流弁として使用した場合を基本的な運転ケースとして実験を行った。

その結果として、先に水弁の深さ（以下水弁没水深と呼ぶ）を浅くした方が発電システムの平均効率が高くなり、年間発電量を増加させるには適しているが、水弁室からの水の吹き抜けによって水弁自体整流弁の機能を失う現象が見られたことなどについて報告している²⁾。その後、この水弁室からの水の吹き抜け現象がどのように発生するのかを確認するために水弁室内に水中カメラを設置した。

Fig. 2 は、波高が 0.6 m 周期が 8 秒程度と余り高い波高とは言えない状況において水中カメラで撮影された正圧水弁室内写真を示したものである。写真左側が空気室から空気が流入する開口部側で、その開口部から流入する急激な空気流によって水弁室内水面付近の水が跳ね上げられ霧状に近い状況になっているのが窺える。この写真は、比較的に波高が高くない状況で撮影されたものであるが、波高が高い時には跳ね上げられた霧状の水で水弁室内全体が真白になり、開口部からの水の跳ね上げ状況等は確認できないほどの状況であった。水弁室からの水の吹き抜けは、このように霧状となった水が空気流に乗って外部へ流出することで発生していたと考えられる。

Fig. 1 Wave power generation system.

Fig. 2 Splash water in the water valve room.

整流弁としての水弁の機能を確保するには、構造面の見直しや水弁に使用する流体の検討等も考えられるが、現状設備の運用対策によってある程度防止できる。それは、水弁没水深を深くして運転することであるが、水弁没水深を深くすることにより水頭差による圧力損失が大きくなるため、システムの総合効率（平均）は極端に下がることになる。先に報告した結果²⁾では、波力発電ケーソンの運転函数を通常運転時の2函にした場合で、水弁没水深5 cmで13 %の効率を示すものが15 cmと10 cm深くなっただけで6 %と約1/2の値となっている。また、水弁没水深を浅くして運転して整流弁の機能を維持しようと給水ポンプが常時稼動状態となり、波力発電ケーソン2函運転時ポンプ4台が運転すると、定格3.7 kW×4 台で約15.0 kWhの消費電力が発生する。これにより、極端な場合には発電電力よりポンプ消費電力が大きくなる事態も発生する。

次に、整流弁として水弁を使用した場合としない場合で発電電力にどのような違いが生じるかを表したものを Fig. 3 に示す。このデータは実海域実験の結果を踏まえ、タービン・発電機の回転数を500 r/min、波力発電ケーソン運転函数をシステム効率が高く年間発電電力量の増加が見込まれる1函として運転したデータで比較している。

Fig. 3 において、○が整流弁として水弁を使用した場合のデータで、この時は水弁没水深を5 cmと浅くして高効率運転している。また、▲は水弁室内の水を空にして整流弁としての水弁を使用しない状態としたものである。図中に併記してある近似直線は最小2乗法によって求められたもので、切片に相当する-13 kWは本実験設備の発電機を500 r/min 運転した時の励磁損失・軸受損失等の損失分である。また、近似直線の傾きに相当する0.24（水弁使用時）と0.28（水弁不使用時）は、入力波エネルギーに対する出力の関係にあることから効率であり、入出力ともに平均値であるから、この効率は平均効率を示している。

Fig. 3 Difference between use of rectifying valve and non-use of rectifying valve.

この図から、整流弁として水弁を使用した場合としない場合で平均発電出力に大きな差がなく、むしろ近似式から見れば整流弁としての水弁を使用しない方の効率が4 %程度上回っている。この結果から、整流弁（水弁）がなくとも軸流タービンを採用した波力発電システムにおいて十分発電可能であることが明らかである。整流弁（水弁）の機能を維持するには、水弁室水位低下現象からポンプの消費電力、構造面等の課題が多く、整流弁として使用するには難がある。しかしながら、Fig. 1 のところで説明したように寄せ波時の負圧水弁、引き波時の正圧水弁が逆止弁としての機能を有することから、水弁室を満水にすることでタービン・発電機を含めた機械部分に故障が発生した時の空気を遮断する流体弁の安全装置としての使用方法が考えられる。

したがって、水弁に関しては、発電コスト低減・設備信頼性向上等の点を含め総合的に検討した結果、整流弁として使用するより安全装置として使用することが望ましいと考えられる。

3.2 波力発電ケーソン運転函数からの評価

本波力発電の実験設備は、波エネルギーを空気エネルギーに変換するための空気室を4室持っているが、これらが2室ずつ1函の波力発電ケーソンに組込まれた形で設置しており、各波力発電ケーソンどうしは集合ダクト（空気エネルギーを集約しているダクト部分）で連結されている。このダクト連結部を外し処理するか、片側の波力発電ケーソン内の水弁室を満水にすることで容易に単独の波力発電ケーソンの運転が可能な構造となっている。

一般に入射波エネルギー W は、(1)式に示すように有義波高の2乗と周期に比例し、単位長さ当たりで表現されているため⁵⁾、波力発電ケーソンの運転函数を通常運転時の2函運転から1函運転に変更すれば、波エネルギーを取り出す空気室数が変わるとともに空気室で取り出せる波エネルギー量も半になる。また、本実験設備では空気室で取り出した波エネルギーを集合ダクトによって空気エネルギーとして集約していることから、これらの効果を確認するために波力発電ケーソンの運転函数を変えて運転してみた。

波力発電ケーソンの運転函数を変えた時の入射波エネルギーと発電出力の関係をまとめたものを Fig. 4 に示す。

なお、本データは整流弁としての水弁を使用して、発電システムの効率が高くなるように水弁没水深5 cmと浅くしてタービン・発電機回転数を500 r/minで運転したものである。

$$W = \frac{1}{2} H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (\text{kW/m}) \quad (1)$$

ただし、 $H_{1/3}$: 有義波波高 (m)

$T_{1/3}$: 有義波周期 (s)

Fig. 4 Difference between one caisson and two caissons.

Fig. 4 に併記してある近似直線近似式の関係から、波力発電ケーソン 1 函運転の効率は 24 % となり、2 函運転時 13 % の約 2 倍も高効率な値を示している。

この結果について、本来は両者の効率に大きな差は見られず、1 函運転の方が空気室数の減少により取り出せる波エネルギーが小さくなることから、入射波波エネルギーと平均発電電力（発電電力量）も小さな値となるはずであるがそうはなっていない。その原因について空気室空気圧力と空気室水面変化に注目し解析したところ、空気室全体で取り出した空気エネルギー（空気圧力）を集合ダクトで集約しているために空気室間の空気圧力相互干渉によって 2 函運転の方が約 1 函分の波エネルギーしか取り出せていない状況にあることが解った。この状況から、波力発電において波エネルギーを有効利用し、より多くの発電電力量を得るには複数の空気室によって取り出した波エネルギーを空気エネルギーで集約するのではなく、個別の空気室で取り出した空気エネルギーを空気室毎のタービン・発電機により発電する方が望ましいと考えられる。

したがって、今後の実用化波力発電システムを考えた場合、空気室とタービン・発電機および制御盤等の発電設備をユニット単位としたものを安定して発電が行えるように防波堤に点在させて組込んで、発電した電気については電力ケーブルによって電氣的に集約し、発電波形の安定化を考慮し、インバータ・コンバータを使用することで電力系統と連系するのが望ましいと考えられる。

3.3 波力発電システムにおける軸流タービンの有効性

本実験設備のタービンには軸流タービンを採用しているが、軸流タービンを波力発電システムで使用するには寄せ

波・引き波時の双方向の往復空気流を一方に整流する整流装置（整流弁）が必要と考えられていた。このような考え方があったことで、軸流タービンを採用しても機械式弁の整流弁では大波浪時に吹き飛ばされ長期発電不能となる致命的な状態の発生が懸念されたため、波力発電にはタービン効率は低いものの、整流弁が無くとも双方向空気流で一方に回転するウエルズタービンが主流で採用されてきた。

しかしながら、Fig. 5 に示すように軸流タービンの動翼・静翼と空気流の関係について検討したところ、逆方向からの空気流によっても順方向でタービンが回転すると予想された。

Fig. 5 Blade arrangement and velocity diagram of axial-flow turbine.

Fig. 5 における順方向の場合は、軸流タービンの使用方法としては一般的な蒸気タービンやガスタービンと同じ流体流れとなり、絶対速度 c_0 の空気流はタービの軸方向から静翼に流入し、静翼面に沿って流れることで静翼出口では c_1 のように方向が変えられた空気流となる。この絶対速度 c_1 の空気流がタービン動翼に当たり、動翼を回転させている。タービン始動時には、動翼入口における空気流の絶対速度 c_1 と相対速度 w_1 は同じ方向であるが、タービンが周速 u で一定回転している場合には、タービン動翼入口での空気流は相対速度 w_1 で軸方向から流入していることになる。

次に逆方向の場合であるが、一般的に軸流タービンの入口では空気流が軸（軸流）方向から流入するので、タービン動翼へ逆方向から軸方向に絶対速度 c_3 の空気が流れるとすると、周速 u で回転しているタービン動翼には相対速度 w_3 の方向から空気流が流れ、タービン動翼の負圧面（翼面距離が長い方の面）におつかる。この空気流の向きからすると、空気流は翼面に沿って流れず、むしろ翼面への空気流衝突によってタービン回転方向と逆向きの力（ブレーキ力）が作用すると考えられる。しかしながら、タービン動翼始動の空気の流れを考えると、相対速度 w_3 の空気流は絶対速度 c_3 と同じ方向で軸（軸流）方向から流入するため、タービン動翼の正圧面（翼面距離が短い方の面）に沿って w_4 と同じように流れる。このような場合、タービン効率は落ちるものの、順方向から空気流が流れた時と同じ方向で回転することになる。また、タービン動翼側と静翼側の圧力差（差圧）が大きな場合には、タービンの翼形状と回転方向からほとんど流れないと見られる空気も、空気圧力の高い方から低い方へ流れようとして考えられる。この場合についても、タービンの翼理論から空気は動翼の正圧面を動翼角度で決まる相対速度 w_4 のように翼面に沿って流れるため、タービン回転方向はタービン始動時と同じく順方向となる。

このように軸流タービン動翼に逆向きの空気が流れようとする場合には、タービン周速と動翼出入口差圧の大きさによるが、空気流が動翼面に沿って通過する場合には順方向に回転し、通過しない場合についてもブレーキ力として働く逆方向の力が大きな損失とならなければ波力発電において軸流タービンは有効なものとなると考えられた。このため、本実験設備にはタービンとして軸流タービンを採用している。

軸流タービンの有効性を検証する意味においては、水弁は有意義なものであった。それは、水弁自体 Fig. 1 のシステムの構造から明らかなように水弁は水弁室内に水を入れることで弁体として成立しているが、水弁室内の水を空にすることで容易に弁体が無い設備となる。これらの変更は、本実験設備の場合ポンプと重力排水によって容易に可能であるが、機械式弁の場合は弁体自体を撤去する等の作業が

発生するうえ、一旦撤去すれば復旧するのに多大な費用と時間を要することになる。

実海域運転結果から整流弁として水弁を使用しない状態においても、軸流タービンは寄せ波・引き波の双方向空気流に対して常に順方向の回転をした。また、ブレーキ力として働く力は先に示した Fig. 3 の発電出力を見る限り余り悪影響は与えておらず、むしろ総合効率の点から見れば整流弁としての水弁を使用しない方が 4 % 程高効率となった。これは、水弁が整流弁として機能するために維持する水位（水弁没水深）分の水頭が圧力損失として働き、この損失よりも軸流タービンに働くブレーキ力による損失が小さいことを意味している。

波力発電においてはコスト低減も大きな課題の一つである。しかしながら、港湾構築物である波力発電ケーソンはコンクリート製であり、建設コストが材料費や工事費に依存するところが大きく大幅な低減は望めない。また、発電機や制御盤等電気関係機器も単体は熟成されたもので大幅なコスト低減は難しい。したがって、発電コストを低減するにはシステムの効率を向上させ、年間発電電力量を増加させることが現時点でもっとも得策であると考えられる。

波力発電システムを整流弁の無いシステムで考えれば、タービン効率差がシステム総合効率差となるため、ウエルズタービンが 45 % 前後のタービン効率⁹⁾に対し、軸流タービンは 70 % 前後（設計値）と約 1.6 倍高効率であることから、軸流タービンを採用した方が有利であることは明らかである。このことから、今後の波力発電システムを設計する際には、年間発電電力量の増加が見込まれる軸流タービンを採用したもので検討することが望ましいと言える。

3.4 年間発電電力量と発電コスト

波力発電の実用化に際して技術的な課題の他に重要視されている発電コストについて、本実験設備による水弁を整流弁として運転し収集したデータから試算したものを以下に述べる。

発電コスト試算に関して必要な年間発電電力量は、本来ならば実験期間中の発電実績から算出するが、本実験設備設置場所の海象条件（波高・周期）や設備の点検・修理作業等から年間を通じ発電した年が無かったために、単純に発電実績から年間発電電力量を求めると実際の年間発電電力量と大きな差が出てくる。そこで、実験設備の原町火力発電所南防波堤における年間発電電力量は、年間を通じ計測された海象条件（波高・周期）データから試算することとした。

試算方法としては、発電出力が波高・周期や水弁没水深によって変わってくるため、これらを加味し波高に応じた最適な運転条件を決め、実海域実験で得られた 500 r/min 運転時の空気室出力から発電出力までの一連の関係を適用し 1 日当たりの発電電力量を求め、この値に年間発生日数

を乗じて求めている。Table 1 はその計算結果である。

Table 1 において波高の範囲が0.9 ～2.1 mとなっているのは、0.9 m未満では波エネルギーが小さくタービンが回転してもほとんどの場合損失分の-13 kWを超えず、平均発電出力がプラスとならないため、発電システムは運転しないこととし、2.1 mを超える場合については実験期間中に1度も発生していないため試算から除いている。

Table 1 Annual generated energy by trial calculation.

Wave height (m)	Annual occurrence days (days)	Wave period (s)	Water valve depth (m)	Rotational speed (r/min)	Annual generated energy (kWh)
0.9	18.5174	8.5	0.05	500	26,974.48
1.0	12.5513	8.5	0.05	500	23,888.89
1.1	7.1480	8.5	0.05	500	16,960.77
1.2	3.7147	9.5	0.10	500	7,609.49
1.3	1.7448	9.5	0.10	500	4,292.45
1.4	1.1820	9.5	0.10	500	3,413.56
1.5	1.1820	9.5	0.10	500	3,937.63
1.6	0.4503	9.5	0.15	500	1,360.43
1.7	0.6754	9.5	0.15	500	2,329.03
1.8	0.2251	9.5	0.15	500	875.26
1.9	0.1689	10.5	0.15	500	880.12
2.0	0.2251	10.5	0.15	500	1,293.18
2.1	0.2251	10.5	0.15	500	1,416.43
Total					95,231.72

次に、Table 1 の年間発電電力量から設備利用率を求めたものを Table 2 に示す。

設備利用率は、設備定格出力（本システムの場合は発電機定格出力）と年間発電電力量から求められる。この設備定格出力は一般に設備容量を表し、設備容量と設備定格出力は等しい関係にある。この関係から言えば本設備の定格出力は130 kWとなるが、本実験設備の発電機は極数を切り替えることで定格出力を65 kW側に変更できる。実験海域の海象条件は、波高が低く65 kW側（500 r/min）での運転が行える程度で、130 kW側（1,000 r/min）の運転はほとんど行えない状況であった。

このため、Table 2 については65 kW側での設備利用率を求め、130 kW側については一般的な設備利用率の考え方に合わせるために65 kW側で試算したものを単純に定格出力比で計算し参考値として記載している。

なお、発電機自体は滑りの範囲を広くすることで最高効率点での効率は若干低下するものの、500 r/minで130 kWまで出力可能なものが製作可能であることが発電機メーカーの検討により得られている。

Table 2 Capacity factors by trial calculation.

Rated output	Capacity factors	Rotational speed
130 kW	8.36%	500 r/min
65 kW	16.7%	500 r/min

最後に発電コストについてであるが、試算にあたって適用した設備利用率は Table 2 によるもので、建設費については、土地代を除く実験設備にかかった据付け工事費を含んだものとし、運転費についても実態に合わせている。また、年間固定費については設備の原価償却年数を30年、残存価格10%、金利6%で計算している。

その結果については次の通りであるが、近年急速に国内に普及してきた風力発電の発電コストが10円/kWh台であり、電力の自由化により新たに参入してきた電気事業者の今後の目標が10円/kWh台を下回ることとされている社会情勢を考えると、実際に運転してきた定格出力65 kW側でも583円/kWhと非常に高いものとなっている。

- ① 建設費（据付け工事費含む） 1,244,600 千円
- ② 運転費（人件費・修繕費他） 29,700 千円
- ③ 年間固定費（①×0.9×0.0726） 81,300 千円
- ④ 年間経費の合計（②+③） 111,000 千円
- ⑤ 発電コスト（130 kW時） 1,166 円/kWh
- （65 kW時） 583 円/kWh

4. 将来実用化波力発電システムの検討

本実験設備の実海域実験を通じ得られた様々な知見から、実用化の可能性が高い将来の波力発電システムはどのようなべきなのかを検討することとし、以下にその結果と具体例を示すこととする。

将来実用化波力発電システムは、実験設備の実海域実験における問題点と成果として考えられるものを整理し、次のような考え方を基本とした。

- ① 空気流を整流する整流弁は設けず、水弁は安全装置として使用する。
- ② 空気室1室に対して1組のタービン・発電機を搭載する。
- ③ タービンはタンデム型の軸流タービンとする。
- ④ 波エネルギーの変動性に対しては、発電波形・出力の安定化、系統連系、電力の合成を総合的に考え、発電機側での対策ではなくインバータ・コンバータを採用して対策を行う。
- ⑤ 設置海域の海象条件に合わせた仕様のタービン・発電機等の発電機器とする。

- ⑥ 空気室の設計は、年間安定して発電可能なものとするため海象条件の波高・周期発生頻度が最も多い点で設計し、コスト低減の観点から標準化を図る。
- ⑦ 係留系や発生した電力を送電するのに難がある浮体式システムではなく、防波堤に設置する沿岸固定式システムで考え、波力発電の普及促進を図るために既存防波堤に搭載できるシステムとする。
- ⑧ 電源としての位置づけから大出力を得る場合、空気室とタービン・発電機等ユニット単位の発電設備を複数設置して電力ケーブルで連系する分散型とする。
- ⑨ 水弁水位調整のために使用されたポンプ（1台当たりの容量 3.7 kW、吐出量 20 m³/h で2函で計4台）の故障や不具合発生頻度が多かったことから、設備信頼性向上と消費電力軽減を考え、ポンプは稼働率が高い設備上重要な場所には使用しない。なお、これにより設備信頼性が向上するために発電所運転員は常駐とせず、常時遠隔監視制御を行い基本的に無人化を図り運転員の人件費を削減する。

次に、①～⑨の事項を踏まえ検討した将来実用化波力発電システムの例として、水弁を整流弁としてではなく安全装置として使用するタイプの波力発電システムの1ユニット概略構造を Fig. 6 に示す。

Fig. 6 における空気の流れは、将来実用化システム通常運転時の寄せ波における状態を表していて、寄せ波の水面上昇によって空気室からタービン・発電機へ向かって空気が流れ発電を行う。引き波時の空気の流れは寄せ波と逆方向となるが、今回実海域実験を行った実験設備と同様にタンデム型軸流タービンに対して、寄せ波・引き波それぞれの空気が流れ安い方向の開口を設けてやる。また、Fig. 6 における貯水タンクは水弁を安全装置として適用するために設置したもので、常時はポンプで汲み上げた海水によって満水状態にする。空気流調整装置が故障や破損によって機能しなくなった場合、この貯水タンク内の水を排水弁により一気に落水することで、通常運転時空気が流れていた空の下部受水タンクが満水となり空気流を遮断する安全装置としての水弁が構成されるものである。

なお、Fig. 6 に示した将来実用化波力発電システムは、防波堤の新設に合わせ設置する場合には防波堤を含めて設計・施工ができるために特に大きな問題もなく容易に実現可能なシステムであるが、波力発電の普及を図るためには既存防波堤に後付けで設置する必要がある、しかも経済的に有利な方向で考えなければならない。

このことから、今回考案した波力発電システムを既存防波堤に設置する方法として、現状実現可能と考えられる案として Fig. 7 の Case 1～Case 3 に示し、この3案について検討した。

Fig. 6 Cross section of practical wave power generation system.

波力発電の空気室部分を既存防波堤に取り付けると、空気室に入射する波によって発生する揚圧力と呼ばれる空気室を押し上げる力が働く。波エネルギー変換効率を考えれば、空気室の幅（奥行き）と高さの寸法を最も空気室効率が上がるもので設計することが望ましいが、既存の防波堤に後から空気室を取り付ける場合、最も空気室効率が高くなるように設計すると空気室の幅と高さが大きなものになる可能性が高く、空気室が高効率のためにその揚圧力も大きくなり防波堤の安定性を確保するのが難しくなることが考えられる。

Fig. 7 における Case 1 と Case 3 は、空気室の幅と高さの寸法が大きくなり杭やウエイトによる揚圧力に対する対策が必要となった場合の例である。この2案については施工面を考えると、海底部分の作業が発生するために矢板を使用して断水対策処理を行う等の工法をとるために極めて難しく、実際に施工を行うと工事費用もかなり高くなるために現実的ではないと考えられる。

したがって、施工面からすれば Case 2 が最も現実的な案であると言えるが、揚圧力を抑えるために空気室寸法を制約するため空気室の波エネルギー変換効率が低いものになる可能性がある。この点については、自然界の波は変動性が大きな不規則波であり、波エネルギー自体も時々刻々変化するため余り空気室の大きさを波エネルギー変換効率が最大になる設計に拘る必要はなく、むしろ揚圧力を考え可能な限り空気室寸法を大きくすることで実用上は十分だと思われる。

以上のことから、将来実用化波力発電システムを既存防波堤に後付けで設置する方法としては Case 2 で考えることとする。

Case 1

Case 2

Case 3

Fig. 7 Installed plan on existing breakwater.

今まで述べてきた内容は、将来実用化波力発電システム1ユニット単位のものである。波力発電の実用化を考えた場合、その平均発電出力も商用電源としてある程度のもが必要になる。その場合、Fig. 8に示すように防波堤に複数のユニットを点在配置し、発生電力は発電波形・出力の安定化および電力系統への連系まで考えて、Fig. 9に示すようなインバータ・コンバータを使用した電源系統構成とする。なお、波力発電システムのユニット数については任意に増減可能であるが、Fig. 8およびFig. 9は4ユニットで考えてある。

Fig. 8 Layout of wave power generation unit.

Fig. 9 Power source system.

Fig. 9における波力発電システムの運転状況としては、誘導発電機(IG)の励磁電流や低い波高の波が長時間継続してコンバータを使用しても発電が難しい状況が発生した場合には、電力系統から逆潮流インバータを経由して電力を受電し発電機に供給する。逆に波高が高くタービン・発電機の回転数が同期速度を超える場合には、コンバータ→インバータを介して発電した電力を電力系統に供給する。

また、波高がある程度低い場合でもコンバータの周波数を下げることによって、発電機をある程度の時間であれば継続して運転し発電ができるが、余り長い時間継続すると発電機が電動機として働く時間が増えるため、今回の実海域実験を行った実験設備で使用した発電出力監視による自動運転制御を合わせて行うことにする。

運転制御のための制御盤・保護継電器盤や補機関係の消費電力は、波力発電により得られた発電出力あるいは電力系統から供給されるが、この違いは発電出力と発電所内負荷とのバランスによって決まる。なお、このようなインバータ・コンバータを採用したシステムの最大発電出力は、機器保護の観点から定格出力の 1.5 倍としており、インバータの容量もこれに合わせたものとしている。

なお、使用するインバータは、送受電 1 台のインバータで兼用することも可能であるが、複数の発電機を連系する場合、発電機を電力系統に連系する際に流れる始動電流が台数分大きくなりインバータの故障原因となりうる。これを防止するために、今回のシステムではインバータを 2 台設置し、発電機の始動電流を双方のインバータを受電側で機能させ分流させることとしている。また、常時運転中は送電側受電側を 2 台のインバータで分離運転することでインバータ自体の小容量化が図られ、汎用品の適用が可能となる。

今回検討した将来実用化波力発電システムについては、我々が実験設備を使って実海域運転した運転実績や発電出力等の観測データに基づき考案したもので、補機類を含めた設備信頼性も高く、自動運転制御も可能なことから常時遠隔監視制御可能なシステムであると考えられる。このため、発電システムの日常巡視点検も月 1～2 回程度とし、常時遠隔監視制御を図ることで常駐する運転員が削減可能で、現在の一般的な水力発電所や変電所と同等のものが実現可能となる。

発電機に関しては、今回の将来システムは誘導発電機で検討しているが、磁気分野から見れば同期発電機も適用も考えられる。同期発電機とした場合は、発電機の価格が高く励磁装置が必要でその設置スペースも必要となる。また、誘導発電機にみられたモーターリングは現われないが、波エネルギーが小さい場合に発電できない点では同じである。系統連系時にもインバータやコンバータが必要で、両者の費用対効果を考えれば誘導機の方が有利であるために誘導発電機によるシステムとしている。

この将来実用化波力発電システムを我々が波力発電の実験設備で実海域実験を行った福島県原町市の東北電力原町火力発電所南防波堤に設置すると仮定して、4 ユニット構成のシステムで海域の海象条件からタービン・発電機等の主要設備仕様・定格について検討すると概ね Table 3 に示したものとなる。

Table 3 Practical wave power generation system specifications.

Air chamber	Installed on existing breakwater 3.0 ^(W) × 15.0 ^(H) × 20.0 ^(L) m × 4
Turbine	Tandem type axial-flow turbine 40 kW 500 r/min × 4
Generator	Induction generator 400 V 40 kW 500 r/min × 4
Operation method	Inverter and converter automatic Control
Control method	Continuous remote supervisory control

最後に、Table 3 に示した設備仕様・定格で原町火力南防波堤に将来実用化波力発電システムを建設した場合の発電コストについて試算する。

発電コスト試算にあたり必要な設備利用率は、タービン・発電機定格が設置海域の海象条件に合わせ発電日数を増やすために 40 kW としたため、波高が 1.5 m を超えた場合には発電を停止するものとし、Table 1 の年間発電量から求めた値は 24.9 % となるが、インバータ・コンバータ変換効率による効率低下分 0.85 (メーカー計算値) を掛けた 21 % とする。この条件によって、本実験設備の発電コストを試算した場合と同様の原価償却年数、残存価格、金利で計算すると次の通りとなる。

建設費 (据付け工事費含む)	628,500 千円
運転費 (人件費・修繕費他)	8,500 千円
年間固定費	41,100 千円
年間経費の合計	49,600 千円
発電コスト (40 kW)	169 円/kWh

5. 考察およびまとめ

本論文においては、我々が実機レベルの実験設備によって行った実海域実験結果を踏まえ、軸流タービンを採用して整流弁を設けずに水弁を安全装置と使用した将来実用化波力発電システムについての検討を行った。

その検討結果として、設備構成的には信頼性の高いものが実現可能であると思われるが、発電コストは本実験設備によるものが 1,166 円/kWh に対し、検討したシステムでは 169 円/kWh で約 15 % と 85 % も低減できてはいるものの、風力発電の発電コストと比較した場合には、まだまだ高いものになっている。

しかしながら、今回検討した将来実用化システムの発電コストは、原町火力発電所南防波堤の海象条件における試算結果であり設備利用率が低いために高価なものになって

いるが、設置場所が原町火力発電所北防波堤のように外洋に面した海象条件の良いところであれば設備利用率が向上するために発電コストはさらに低減できる。実海域実験の結果によれば、北防波堤設置した場合には波高値から約 4 倍は発電機会が増えると考えられており、単純計算で設備利用率が 4 倍となり発電コストは 1/4 の 42 円/kWh となる。さらに、タービン・発電機の材質の見直しにより建設コストは若干上がるものの、発錆のために実施している補修塗装がほとんど必要なくなり年間経費が更に低減できることから、発電コストとして 30 円/kWh 台は実現可能であると考えられる。

今後の波力発電実用化に関する課題としては、更なるコスト低減が大きな課題であるが、風力発電等のように国の補助金制度が活用できれば、現段階において風力発電レベルまで発電コストを近づけることは可能と考えられる。

また、波力発電の実用化に際しては、技術的な課題やコストの課題とは別に漁業権や規制緩和の問題がある。波力発電システムの技術が熟成されコスト的に実用化レベルとなっても、漁業権における漁業補償を含め発電所建設にともなう漁民の理解がなければ波力発電所の建設は難しい。この問題に関しては、人間意識の問題であり地球環境を考え、波エネルギー（波力発電）が地球にやさしいエネルギーであることに十分な理解を示し、積極的に協力してくれるような土壌にしていかなければならない。

法的規制緩和については風力発電も同様であるが、風力発電の設置地点が以前は山岳地帯が主であったことで、建設時森林伐採による環境破壊が問題とされたことと、風車の大型化による輸送手段確保、乱流の問題などから海への進出が検討されているが、漁業権の行使によって制約を受けている現状である。地球環境問題を考えれば、風力や波力発電のように自然エネルギーを利用した発電所の建設を優先して行えるような法的整備も必要があると思われる。

参 考 文 献

- 1) S. Kikuchi, K. Ishizawa, K. Ueki: J. Magn. Soc. Jpn., 24, p815 (2000).
- 2) K. Ueki, K. Ishizawa, A. Yoshimeki, S. Kikuchi: J. Magn. Soc. Jpn., 25, 995(2001).
- 3) K. Ueki, K. Ishizawa: Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2000), ed. Japan Solar Energy Society and Japan Wind Energy Association, Kanazawa, 2000, p445 - 448(Japan Solar Energy Society, Tokyo, 2000).
- 4) K. Ueki, K. Ishizawa, H. Nakagawa: *Proceedings of the Tenth (2000) International Society of Offshore and Polar Engineers Conference*, ed. Jin S. Chung, Robert MW Frederking, Hiroshi Saeki and Wataru Koterayama,

Seattle, USA, 2000, Vol.1, P399-404 (ISOPE, California, 2000).

5) Japan Society of Civil Engineers: The situation and view of Wave-energy technology, p5 (Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 1990).

6) M. Suzuki, C. Arakawa, T. Tagori: Influences of Some Factors to Performances of Wells Turbine for Wave Power Generator, 2nd Symposium on Wave Energy Utilization in Japan, Japan Marine Science and Technology Center, Tokyo, 1987, p76 (Japan Marine Science and Technology Center, Tokyo, 1987)

2001 年 10 月 3 日受理, 2002 年 1 月 17 日採録