

防波堤利用による波力発電の実用化に関する研究 —波エネルギー利用のケーススタディー—

Case Studies on Wave Energy Utilization Systems

—Development of Wave Power Extracting Caisson Breakwaters—

喜島恭彦*・安西俊直*・小宮俊夫**・堀江俊郎***

Kyohiko Kizima, Toshinao Anzai, Toshio Komiya, Toshirou Horie

近藤信雄****・森田博夫*****・高橋重雄*****

Nobuo Kondou, Hiroo Morita, Shigeo Takahashi

The Japanese Ministry Of Transport has been developing a special caisson breakwater which can convert wave power into electric power. The breakwater has nearly reached the level of practical use after an eight-year field experiment in Sakata Port. It is very important to develop practical systems to exploit the converted energy, in order to promote the use of wave energy by the breakwater. In this report, case studies of several systems which fit the characteristics of water energy are described.

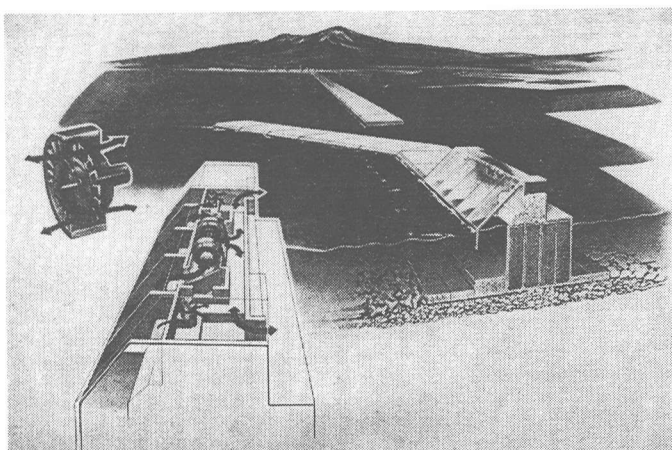
Keywords : wave power, breakwater

1. はじめに

将来のエネルギー不足、環境問題が懸念されるなか、化石燃料によらない太陽光、地熱、風力といった自然のクリーンエネルギー利用が要求されており、各機関においてその研究が実施されている。こうした背景のなか、運輸省では1982年度より波エネルギー利用防波堤の開発を開始し、1989年度より山形県酒田港の第二北防波堤に波力発電防波堤を設置し現地実証実験をおこなっている。本実証実験は運輸省と（財）沿岸開発技術研究センターを中心とする民間企業20社の共同研究として実施され、1991年度までの第Ⅰ期実証実験においては、防波堤としての耐波設計法・「熱力・波動法」に基づく発電システム設計法の妥当性を検証し、防波堤を利用した波力発電システムの有効性を確認している。また、小規模ではあるが将来の利用システムの実験を行っており、陸上観測局に併設されたデモンストレーションハウスにて一般公開もおこなっている。

これらの成果をうけ、1992年度からの第Ⅱ期実証実験では、波力発電電力利用システムのさらなる実用化を図るため、新たに電力9社を加えた共同研究会が設置され、電力利用システムの検証を目的に、海水交換・サブサンドフィルター工法といった動力供給型への利用を想定した「大容量揚水試験」および、波力発電電力を一般商用電力と同品質に変換し、一般商用系統へ接続する「系統連系試験」が実施された。

本報告は上記の実験結果を踏まえ、実用化の可能性を検証するため、経済性・需要・社会情勢・環境問題等を考慮し、防波堤利用による波力発電に最も適した利用方法におけるケーススタディ（試設計・コスト試算）を行ったものである。



図－1 波力発電ケーソン防波堤の概念図

* （財）沿岸開発技術研究センター
（〒102 東京都千代田区準町3-16）

** 三井造船株式会社

*** 若築建設株式会社

**** 株式会社緑星社

***** 正会員 株式会社本間組

***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長

2. 波力電力利用方法の選定

波力発電電力の特質として、波の変動性に伴い出力が増減するため、定常的な電力供給が保証できないこと、発電される電力周波数が時事刻々と変化することがあげられる。前者については、大容量蓄電池の利用、後者については、C.V.C.F方式の電力変換装置の採用等といった既存の技術で解決される。

しかし、波力発電の実用化を促進し低コストで活用するためには、波力発電の変動に合わせた使い方や立地条件の特徴を生かした利用方法を選定することが重要になってくる。今回のケーススタディでは、これまでの研究成果より、利用形態を「動力供給タイプ」「電力供給タイプ」に大別し、表-1に示すように、エネルギーを定常的には必要でない利用方法への適用、ならびに、補助エネルギーとしての利用や他のエネルギーに変換して貯蔵するといった利用方法を選定した。また、利用対象地については、年間の波エネルギー量・有効性・防波堤計画等を勘案し、実現性が高いと考えられる対象港を選定している。

図-2に日本の波パワー分布とケーススタディ対象地を示す。これは、日本全国の波エネルギー分布を示すものであり、日本全国には平均的3,600万kWの波パワーが来襲しており、総量にしてわが国の発電量の1/3に相当する大きな値である。

例えば、伊豆諸島青ヶ島に打ち寄せる波パワーは約11.5kW/mであることを示している。

表-1 ケーススタディ項目一覧

利用方法		利用対象港	経済効果
電力供給	離島用発電	東京都 青ヶ島港 鹿児島県 和泊港	発電コストの低減
	海水淡水化	東京都 青ヶ島港 香川県 高松港	渇水対策、非常用水源 親水性防波堤
	防波堤灯台	宮城県 仙台港	運用コストの低減
動力供給	海水交換	新潟県 新潟西港 茨城県 波崎漁港	水質改善、多次的利用 アメニティ空間・環境の創造
	サフ・サント・フィルタ	新潟県 新潟西港	海浜の侵食制御、景観保持

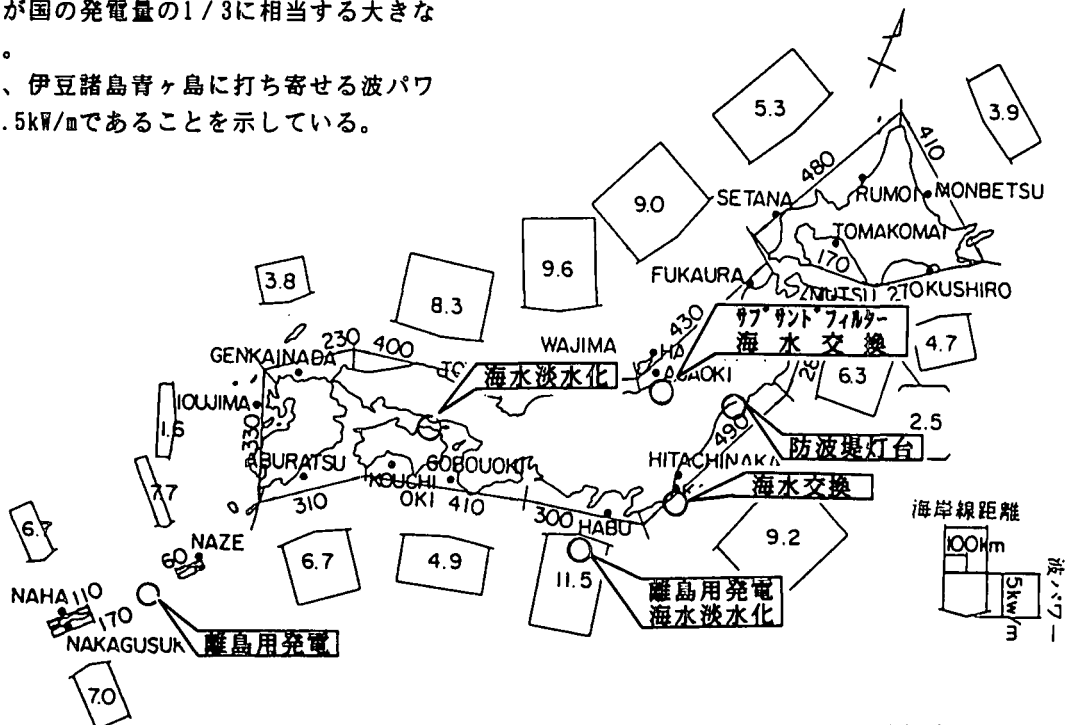


図-2 日本の波パワー分布とケーススタディ対象地

3. ケーススタディ

3.1 離島用発電

従来の離島における電力事情では、内燃機関（ディーゼルおよびガスタービン）による発電にたよらざるを得ない状況であり、発電用燃料輸送の問題等により、結果として本土に対して電力供給コストが高くなっている。

また、四方を海に囲まれた離島では、地理的に外洋性波浪が存在し、大きな波エネルギーが年間を通じて得られる利点があることより、波力を利用した離島用発電は、実現性が最も高い波力発電利用方法の一つである。このような観点からここでは、波力発電による経済効果の確認を目的として検討をおこなった。

(1) 対象港の選定

対象とする離島を選定するには以下の要因を主体に考慮する必要がある。

- ①現状が内燃力発電で発電コストが高い。
- ②波エネルギーが豊富であり、利用が容易である。

③港湾（商港・漁港）の防波堤築造計画があり波力発電ケーソンの建設費が軽減できる。

④波力発電の発電施設（発電ケーソン）以外の施設費（送電線）が軽微なこと。

以上のような条件を考慮し本検討では、東京都伊豆諸島青ヶ島港・鹿児島県沖永良部島和泊港（図－2参照）を選定した。この二地点を選定した理由は波パワーによる発電コストへの影響度合いを見る意味もある。

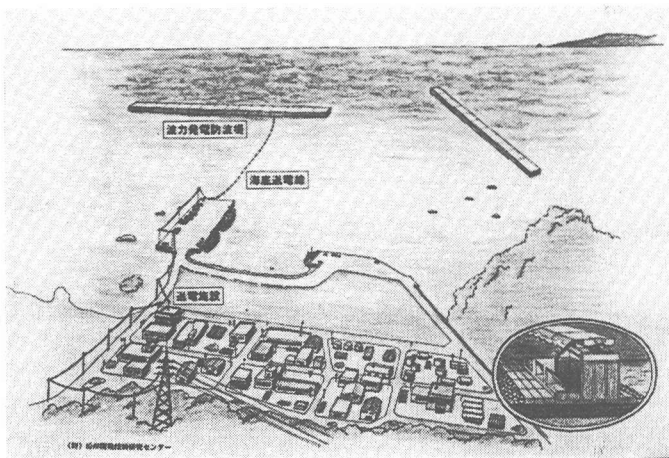
(2) 発電システム

波力発電の規模については、現状での発電状況を表－2に示すが、青ヶ島港では主要電源の利用を目指し最大出力800kW（防波堤延長80m：200kW×4函）で島全体の電力需要を賄える規模として利用する事を考え、和泊港（沖永良部島）では、波力発電での供給可能量から考慮し、従来の内燃機発電の補完的電源としての利用を考え、最大出力1,600kW（防波堤延長160m：200kW×8函）で背後地の市街地への利用を対象とした。図－3に波力発電防波堤の断面図（青ヶ島）を示す。

(3) 利用システム

波力発電を一般電力へ利用することは、第Ⅱ期実証実験での系統連系実験の結果より、十分対応可能であることが明らかとなったため、離島用発電システムも実証実験と同様のシステムを基本とし、一般家庭までの送電を含めたシステム設計（図－5参照）をおこなった。すなわち、波力発電ケーソンは港湾整備に絡めて沖防波堤に設置し、発電電力は海底ケーブルを通し港湾背後に設置された電力変換所へ送られ、ここで商用系統への系統連系を行って一般需要家への送電を行うものである。

図－4に波力発電利用システムの概要図を示す。



図－4 波力発電利用システムの概要図

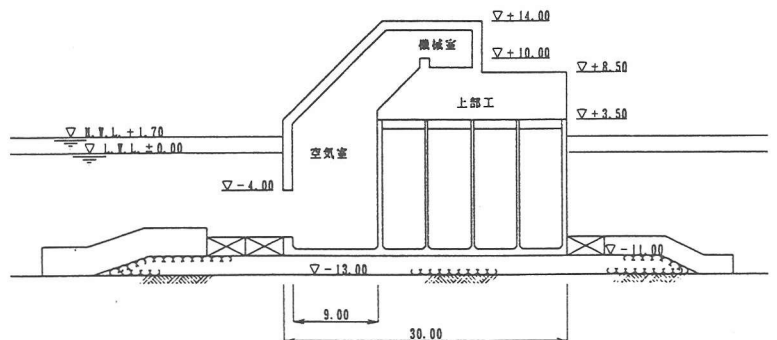
(4) コスト試算

波力発電コストの算出にあたっては、防波堤本体は港湾事業費で建設されることを前提にしている。つまり、発電コストには、建設・設備コスト（発電システム、送受電設備・系統連系設備）および管理・運転コストを考慮し、全体の運用コストには金利を考慮して算出した。算出結果は表－3に示すとおりであり、現在の発電コスト（推定）よりも両ケースとも低減が可能であることが判明した。また、両地点のコストを比較すると、当然のことながら、波

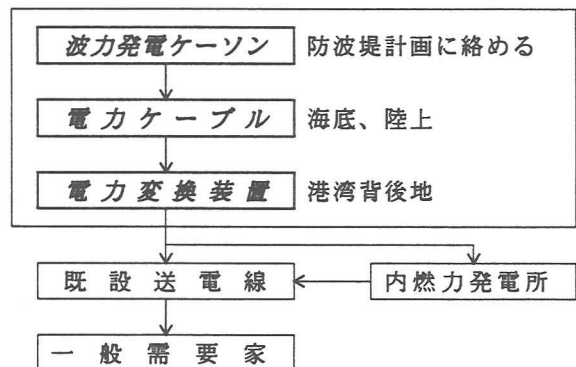
表－2 島内発電状況

島名	面積 (km ²)	発電施設 (kW)	人口 (S60) (人)	過去最大 電力 (kW)	年間電力量 (S59) (MWh)
青ヶ島	5.20	240	211	(199)	(1,134)
沖永良部島	93.60	14,200	15,965	11,550	51,272

注) ()は平成5年度実績



図－3 波力発電防波堤断面図（青ヶ島）



図－5 波力発電利用システムのフロー

表－3 波力発電コストと波パワー

対象港湾	波パワー (波浪データ)	発電規模		発電コスト (円/kWh)
		最大出力	年平均発電量	
青ヶ島港	10.8kW/m (波浮港)	200kW×4台	43.3kW/台	19.5 (31.3)
和泊港	6.4kW/m (中城湾港)	200kW×8台	23.9kW/台	28.3 (48.5)

注) 発電コストの算出は発電量全部を利用できるものとし、上段は金利無視、下段は金利6%を考慮。波浪データは対象地点近隣の波浪観測拠点でのデータを流用
現在の発電コストは青ヶ島100円/kWh、和泊50円/kWh程度と推定

パワーの豊富な離島の方が発電コストは安く、波力発電の利用性が高いものと思われる。したがって、港湾整備の必要な高波浪海域では同時に波力発電コストも低減されることを意味しており、波力発電防波堤の利用の可能性は高波浪海域の離島でより一層すすむものと考えられる。

3.2 海水淡水化

離島では地形条件からダムや貯水池を設けることが困難なため、雨水や地下水を個別に溜めて濾過する方法によって生活用水としての真水を確保している。また、地下水の利用も周囲が海であることから汲み上げてもそのままでは利用できず脱塩の処理が必要な場合もある。このように離島における真水確保は困難を極めており、日々の生活のみならず産業面にも大きな影響を与えているのが現状である。このため波力発電を利用して島の周りの無尽蔵の海水から工業的に真水を確保する海水淡水化システムについて検討した。また、波力発電利用海水淡水化システムは波エネルギーの形を変えた貯蔵法でもある。

(1)対象港の選定

離島用発電のケーススタディーを行った二地点のうち真水の安定確保が難しいと考えられる青ヶ島を選定した。

(2)利用システム

海水淡水化方式には、近年エネルギー消費量が少ないということから注目されている逆浸透法(Reverse Osmosis Process)によるシステムを選定し、波力発電電力を各種ポンプの運転用電源として用いるものとした。また、規模としては、離島用発電のケーススタディーで検討した波力発電能力の範囲内で運転できる500m³/日の造水量とした。

図-6に淡水化システムの概要を示す。

(3)淡水化システム運用コスト

表-4に淡水化システムの運用コストを示す。

波力エネルギー利用において使いやすさとエネルギーの移送という面からは電力変換することが最良である。しかし、エネルギーの蓄積という観点からは電力の場合は高効率なバッテリーの開発が待たれるところである。このような背景において波力発電電力利用の海水淡水化システムでは、エネルギーが得られるときだけ海水を淡水に変えて貯水池やタンクに蓄えておくことができるため、波の時事刻々の変動性についても大きな問題は生じず、エネルギーの蓄積からも合理的な方法であるといえる。

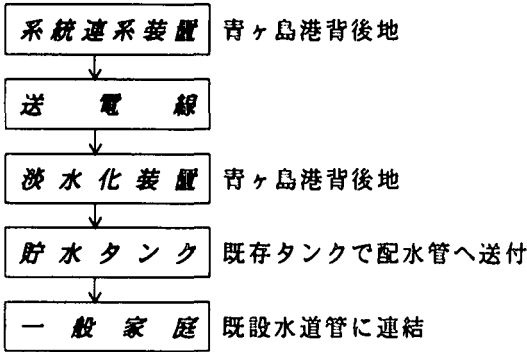


図-6 淡水化システムの概要

表-4 淡水化システム運用コスト

対象港湾	淡水化量	必要電力	真水単価
青ヶ島港	500m ³ /日	162kW	137円/m ³

(試算の条件)
波力発電システムおよび淡水化装置本体は、公共設備として建設されるものとしたためフィルターの交換代と殺菌剤のみとしている

3.3 防波堤灯台

防波堤灯台の電源としては、商用電源を利用しているのが一般的であるが、延長距離の長い防波堤や陸地から離れた離岸堤等に灯台を設置する場合、送電コストがかさむ等の問題がある。

ここでは、仙台港沖防波堤に一日当たり60Ahを消する負荷を有した防波堤灯台の電源として波力発電システムを採用すると想定し、そのシステムについてケーススタディーを行った。

(1)利用システム

防波堤頭部のケーソンの隔室一つを空気室として利用するので、その上に発電機を設置し、発電した電力を灯台に供給するものである。ここでは低波浪においても稼働率が高いシステムを検討した。図-7に波力発電防波堤灯台断面図を示す。

(2)コスト比較

沖防波堤に灯台を設置した場合の電源としての波力発電システムは、技術的にも利用段階に至っており、経済評価も商用電源方式と比較した場合、安価になるという結果が得られた。

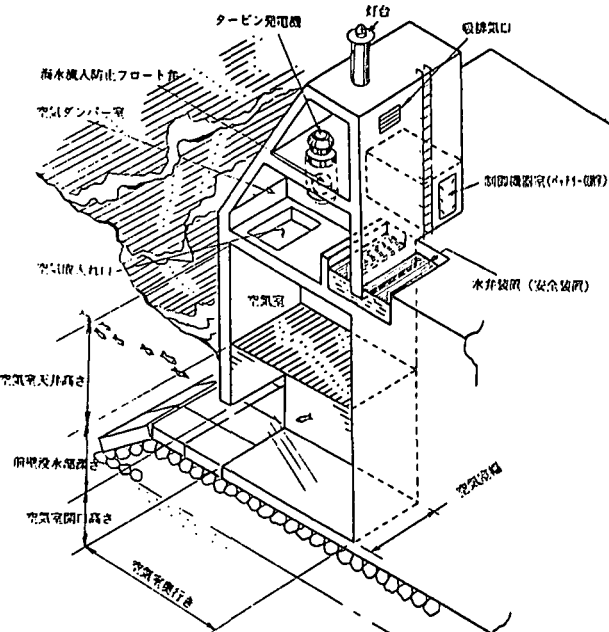


図-7 波力発電防波堤灯台断面図

3.4 海水交換

波エネルギーは時事刻々変化するため、年間を通じて一定の動力を供給できないデメリットがある。しかしながら、港内水質浄化のための新しい海水を港内に供給するためのポンプシステムであれば、一定の動力が供給されず間欠運転となっても十分にその目的を達成する。これは、波力発電防波堤で得られた電力で清浄な外海水を揚水し、これを港湾内奥へ導水し、水質浄化を図るシステムについて茨城県波崎漁港を対象に行ったものである。

そのほか新潟県新潟港においても外海水揚水による海水親水型水路のケーススタディも行い、ここでは系統電力との連系、サブサンドフィルターとの組み合わせなども一部検討した。以下に茨城県波崎漁港のケースを説明する。

(1)対象港の選定

対象港の選定は、波力エネルギーの大きい沿岸で、漁港整備計画（適切な防波堤計画、漁業振興整備計画等）があり、比較的港域の一部が閉鎖的な構造となっている点に着目し選択した。

(2)利用システム

発電規模の決定には導水量の算定が必要で、簡易水質浄化計算により必要導水量を算定した。そのときの波力発電定格を算定した結果を表-5、6に示す。また、システムの構成図を図-8、9に示す。

(3)コスト

波力発電コストには、建設費・設備費、維持管理費とがある。全体運用コストはこれらに金利(6%)を考慮して算出した。建設費は発電システム建設費、利用システム建設費と防波堤建設費からなるが、今回は後者の二つは含まない。また、設備費は発電費、送受電費等からなる。発電コストを表-7に示す。一般電力と比較すると割高感はあるが、防波堤に付可価値を加え、複合利用を図る観点では有効性が認められる。

表-5 必要導水量検討表（波崎漁港）

水質条件	現状	流入	流入量	目標	必要
	COD ppm	COD ppm	m ³ /min	COD ppm	導水量 m ³ /min
港内水質	8	18	2.08	3	30

＊外海水COD濃度を2ppmと設定
(これはすべてケーススタディのために設定したものである。)

表-6 発電定格表（波崎漁港）

合計	波力発電	波力発電
ポンプ動力	必要量	定格
kW	kW	kW
45.5	55	200×2台

＊波力発電ケーソンは2函

表-7 発電コスト（波崎漁港）

	単位	金利6%のケース	金利無しのケース
運用コスト（1年間）	百万円	16.30	11.29
発電出力（1年間）	kWh	343,129	343,129
発電コスト	円/kWh	48	33

注）発電出力（1年間）：39.17kW*365日*24h/日=343,129kWh

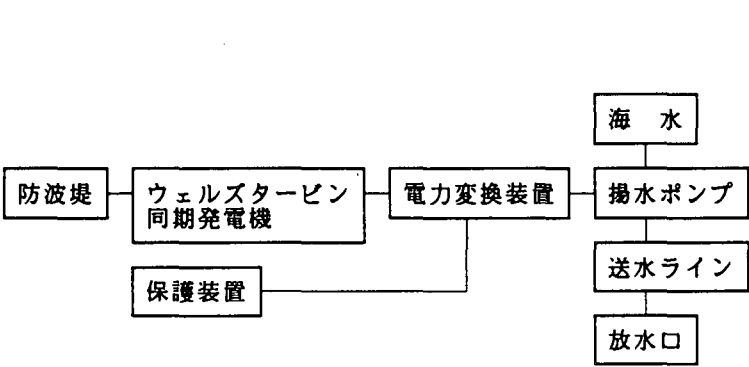


図-8 システムの基本構成

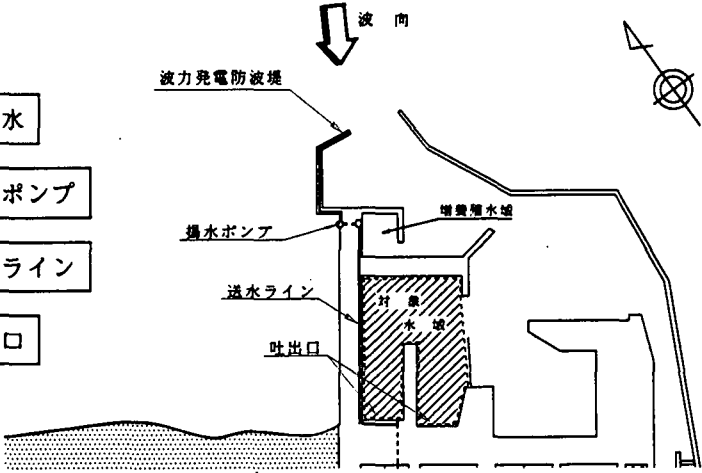


図-9 海水交換システム全体構成図（波崎漁港）

3.5 サブサンドフィルター

サブサンドフィルターは汀線方向に埋設された集水井戸に、浸透する海水をポンプで汲み上げることにより地下水水面を下げ、海浜下の不飽和水層を拡張させる働きにより、この不飽和水層に海水と砂を吸収させる原理に基づいた工法である。汀線方向に水位の低下した帯状の領域（不飽和水域）は、陸から海に向かっての地下水の流れを阻止し、海水を積極的に吸収しながら砂の堆積を促すことにより、砂浜に安定した勾配を作り波の侵食作用を緩和するものである。海岸の侵食制御を目的とするサブサンドフィルターにおいては、海浜地下水の汲み上げに揚水ポンプを使用するため、この動力源となる波浪時の波エネルギー（発電量）が大きい時に、海岸が侵食

されやすい状況を考慮すれば、波エネルギーとサブサンドフィルターは効率的な組み合わせといえる。

(1)対象港の選定

日本の海岸線は延長約34,000Kmにも達し、明治以降から現在までに至るまで約7,000haの国土面積が消失している。対象港の選定に当たっては、これらの中で特に侵食の激しい海岸、波エネルギーの十分な確保が可能な地域、港湾計画の存在等を考慮し、新潟西海岸を選定した。

(2)利用システム

サブサンドフィルターのシステムについては海外での実施例はあるが、その設計手法は確立されていないことから海外の施工実績等を参考に設定しており、 m 当たりの必要揚水量を $Q=0.025m^3/min/m$ とした。また、ポンプの1台当たりの計画揚水量は、地下吸水ラインを $L=500m$ 負担することより、 $Q=12.5m^3/m$ となる。

排水の方法は図-10に示すように、地下水吸収ラインに砂中から浸透した水を排水ピットに導き、大容量揚水ポンプで溜まった水を汲み上げる方式とした。

(3)従来工法とのコスト比較

新潟西海岸においては従来から、沖合い離岸堤・突堤と汀線後背地に設けた高さ5m程度の海岸護岸等により侵食対策を行ってきたが、近年、海岸線の再整備に当り離岸堤等を潜堤に替えた計画が進められており、景観等を重視した事業が展開されて来ている。これらの現状を考慮し、西海岸近辺で施工されている侵食対策事業を参考に建設コスト比較を行った結果を表-11示す。サブサンドフィルターは、システムの主要部分が砂浜に埋設されていることから目に見える部分が少なく、自然の景観を損ねることが少ないという点で今日的なシステムといえる。

4. おわりに

本ケーススタディにおいては、各ケースとも波力発電を利用する有効性が確認されたが、今後、波力発電防波堤を普及させていくためには以下のような課題が考えられる。

- ①自然エネルギー利用に関する補助制度、規制緩和等の政策的な充実。
- ②電力変換装置等の機械設備のさらなるコストダウン。
- ③発電機の適切な並列運転技術の開発。
- ④単独利用ではなく複合利用によるトータルのコストダウン。

第Ⅰ、Ⅱ期にわたる8年間の研究において、実用化へ向けた当面の課題は一応解決されており、今後は波エネルギー防波堤の普及による、波力発電技術の高度化が望まれるところである。また、本研究を終えるにあたり、関係者の方々の努力、「波エネルギー利用防波堤実用化調査委員会」（委員長；合田良實 横浜国立大学 教授）、「防波堤利用による波力発電の実用化に関する研究会」（座長；谷本勝利 埼玉大学 教授）、並びに共同研究会各社の貴重なご助言・ご指導を頂いており、関係者並びに委員各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1)合田良實ほか：波力エネルギーに関する総合調査、第2回波浪エネルギー利用シンポジウム 1987.6
- 2)大根田秀明ほか：波力発電防波堤の電力利用システム、第3回波浪エネルギー利用シンポジウム 1991.1
- 3)合田良實ほか：波力発電ケーソン防波堤の現地実証実験結果、海洋開発論文集 1991.6
- 4)高橋重雄・安達崇：日本周辺の波パワーとその利用に関する一考察、海洋工学論文集、第36巻 1989.7
- 5)運輸省港湾技術研究所：港研資料No.744全国波浪観測20ヶ年統計

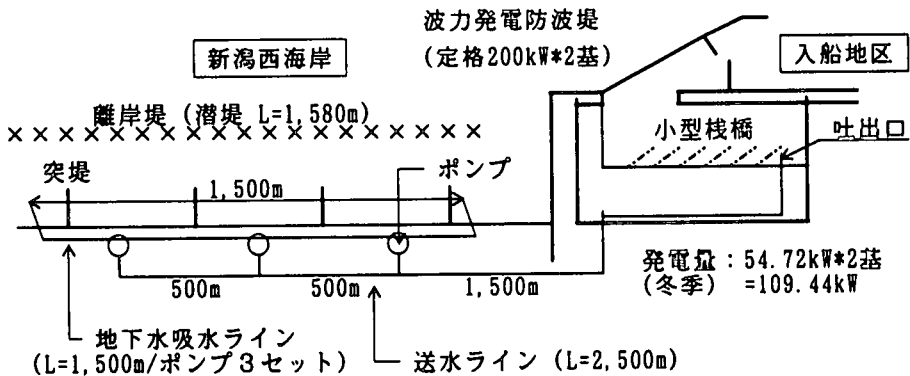


図-10 利用システム及び発電システムの全体構成模式図

表-11 建設コストの比較 (L=1,500mを新設した場合)

工 種	従来方法による建設コスト(推算)	サブサンドフィルターによる建設コスト
離岸堤あるいは潜堤	$1,500m \times 2,750円/m = 4,125万円$	$1,500m \times 2,750円/m = 4,125万円$
海岸護岸	$1,500m \times 2,400円/m = 3,600万円$	—
サブサンドフィルター	—	$1,374万円$ (= 年間運転費×35年)
合 計	$= 7,725万円$	$= 5,778万円$

注) 波力発電の利用によるサブサンドフィルター工法では維持管理・人件費等が運用コストとして発生するため、償却年数の35年分を計上した。