

波力発電ケーソン防波堤の実証試験

－堤体・発電装置の設計製作及び実証試験の計画－

横浜国立大学工学部建設学科教授	正会員	合田 良実
運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所	同上	神田 勝己
同	同上	千山 善幸
運輸省第一港湾建設局酒田港工事事務所	同上	大根田秀明
運輸省港湾技術研究所耐波研究室	同上	高橋 重雄
(財)沿岸開発技術研究センター調査研究部	同上	鈴木 博史
同	同上	高木 栄一

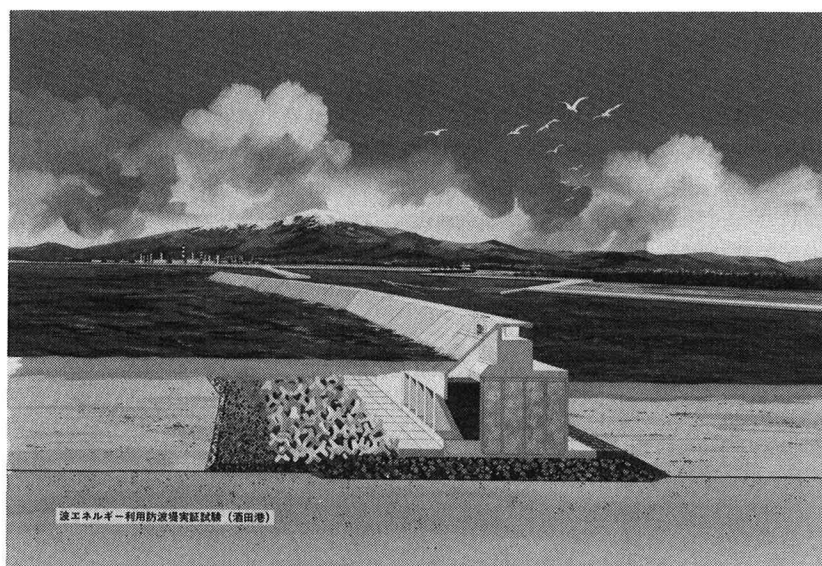
1. まえがき

運輸省では、水柱振動型の波エネルギー変換機能を有する波力発電ケーソンを開発している。このケーソンは、防波堤や護岸のケーソンとしてもちいることができ、防波や土留機能と同時に、波のエネルギーを利用することができるものである。

図－1は、波力発電ケーソン防波堤の概念図である。波力発電ケーソンは、空気室と呼ぶ中空の箱の部分とそれを支持する通常のケーソンからなっている。空気室の前壁は、カーテンウォールとなっており、波が空気室に侵入できるように開口部を有する。波の侵入によって空気室の水位が上下し、空気室内の空気を圧縮・膨張させ、ノズル内に空気流を発生させ、波のパワーを空気のパワーに変換する。こうした波エネルギーの吸収により低反射型の防波機能を発揮する。また、この空気流をタービンにより回転力に換え発電機を回転させることによって電力を得ることができる。

このケーソン防波堤の開発は、運輸本省の指導のもとに、港湾技術研究所、第一港湾建設局及び沿岸開発技術研究センターが協力し、実施している。運輸省港湾技術研究所では、昭和57年から5ヵ年にわたり基礎的な研究を行ってきた。また、沿岸開発技術研究センターでは、波エネルギー利用システムのフィージビリティ調査を含む具体的調査研究を、昭和60年度と61年度に民間企業20社との共同研究で行った。運輸省第一港湾建設局では、波力発電ケーソンの実用化を図るため、酒田港において波力発電ケーソンを用いた防波堤の現地実証試験を実施しており、平成元年秋には波力発電が開始される予定になっている。

本報告では、波力発電ケーソン開発の経緯についてふるとともに、現地実証試験における防波堤や発電装置の設計製作及び計測の計画等について述べる。



図－1 波力発電ケーソン防波堤の概念図

2. 基礎的研究

港湾技術研究所における研究は、おおよそ以下のように分けられる。

①波力発電ケーソンの耐波設計法に関する研究

波力発電ケーソンは、波エネルギー変換装置であるとともに防波堤でもある。模型実験を行い、波力発電ケーソンの防波堤としての機能や耐波安定性について調べた。実験結果によると、波力発電ケーソン防波堤による反射率は30～60％であり、通常の直立消波ケーソン防波堤による反射率とほぼ同じか、やや高い程度である。また、越波量も少なく、作用する波力も直立消波ケーソン防波堤と同程度である。模型実験結果に基づき、空気室の壁面の設計を含め、波力発電ケーソンの耐波設計法を提案している。

②波力発電ケーソンのエネルギー変換機能に関する研究

i) 空気出力に関する研究

波のパワーは、空気室によって空気のパワーに変換される。この過程を表す理論、「熱力・波動法」が提案され実験的に検証された。また、この理論は、実際の海の波のように不規則でしかも方向分散性をもつ波にも適用できるよう拡張された。空気室の最適な諸元は、この理論に基づいて決定できる。おおよかにいえば、空気室の幅は波長の10～20％程度で、空気ノズルの開口率が1/100～1/250程度がよい。こうした条件であれば、空気パワーへの変換効率は70％以上となる。

ii) タービンに関する研究

空気のパワーは、タービンによってタービンパワーに変換される。「熱力・波動法」をタービンを含むものとし、実験的に検証した結果、タービンの出力予測ができるようになり、またタービンの設計が可能となった。

iii) 大型模型による発電実験

発電機を含む総合的な検討を行うために、現地の1/3程度の模型を製作し発電実験を行った。この実験により、波力発電装置としての設計法を検証するとともに、異常波浪時の保護対策装置についても検証を行った。

3. 利用システムに関する調査

沿岸開発技術研究センターは、波力発電ケーソン防波堤による波エネルギーの利用技術の確立に向けて、その設計施工法の具体的検討、及び得られたエネルギーの利用システムの検討等の総合調査を行った。調査の成果の概略を以下に説明する。

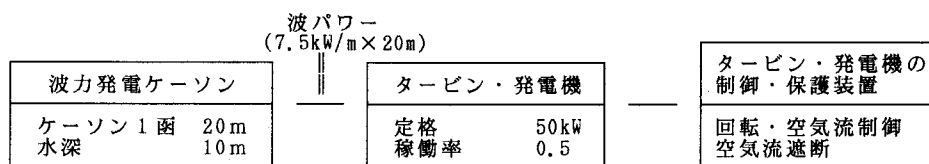
①波力発電ケーソン防波堤の建設コスト

水深が10mの地点に波力発電ケーソン防波堤を設置するとして試設計を行い、各構造形式防波堤との建設コストを比較した。この結果、波力発電ケーソン防波堤は、直立消波ケーソン防波堤とほぼ同程度の建設コストとなり、消波ブロック被覆ケーソン堤より条件によっては小さくなることもあることが分かった。

②波力発電ケーソンによる発電コストの試算

波力発電ケーソンによる発電コストについて検討を行った。図－2は、波力発電システムの一例を示すものである。波力発電ケーソンに平均7.5kW/mの波パワー（外海に面した地点での平均波パワー）が入射したとすれば、ケーソン一函20mに150kWの波パワーが入射する。ただしこれはあくまで平均値であり、実際には時々刻々波パワーは変化していることに留意すべきである。こうした変動性を考慮した上で発電機の定格（最大出力）を設定しなければならない。ここでは定格を50kWとし、平均発電量が25kWとする。この場合発電機の稼働率は、0.5である。発電機は、各ケーソンに一台ずつ設けられる。

一応の目安を得るために、一定の仮定のもとにコストの試算を行った。その結果、建設コストは、100万円/kW、発電コストは、19.3円/kWhとなった。この結果、在来型発電施設のコスト（13～21円/kWh）に対し、十分対抗できる可能性があることがわかった。ただし、タービンの価格を2,500万円/台、発電機の価格を500万円/台、制御・保護装置の価格を1,200万円/台、金利6％、耐用年数35年、残存価格10％とした。なお、発電ケーソン製作時の価格及び電力の平滑・貯蔵装置等については考慮していない。



図－2 波力発電システムの実例

③具体的なケーススタディ

波エネルギーは変動が大きく、利用側のシステムについても十分考慮した上で、実現の可能性を総合的に考える必要がある。このため、本調査ではさらに地形条件、気象条件や利用システムの技術の熟度等を考慮して、波

力発電ケーソン防波堤及び利用システムの試設計を行い、システムの建設費、発電コスト等について具体的な検討を行った。この結果、離島用発電、灯台用電力、電着用電力、融雪、暖房・温水、栽培漁業、空気防波堤、海水交換（導水）、海水の淡水化の9項目について、波力発電利用の可能性が高いことがわかった。さらに本調査では、表-1に示す4項目について、実在する地点を対象により具体的な検討を行った。

表-1 波エネルギー利用システムの例

利 用 項 目	シ ス テ ム 例
離島用発電	延長約300mの波力発電ケーソン防波堤（水深-12m、総発電量1000kW）を設け得られた電力を島の電力系統に接続する。発電コストは23.9円/kWhである。離島用の補完電源とする。
燈台用電力	ケーソンの一部（5m）を空気室にしている。発電機の定格は375Wであり（防波堤燈台の必要電力は200W）、蓄電池の容量は小さくてすむ。島式防波堤など、送電ケーブルにコストがかかる場合には、有力となる。
道路融雪	防波堤の1000mの区間に波力発電ケーソン防波堤を設け、定格200kWの発電機を合計50台（合計10,000kW）設ける。電力を市の中心部まで運び、50,000㎡の歩道を融雪する。発電コストは、30円/kWhである。（システムの作動期間が4ヶ月と短く、若干割高となっている。）
海水交換（導水）	波力のエネルギーで海水を揚水し、港奥にこれを流して港内の海水の水質向上を図る。延長120mの波力発電護岸の場合、導水量4m ³ /sで、5ppmの港内の海水を3ppmにすることができると想定した。

4. 現地実証試験

①概要

現地実証試験は、図-3に示す酒田港において行う。酒田港は、日本海に面する大規模港湾であり、本港地区と北港地区の二つからなる。現在、北港地区に第二北防波堤が建設中であり、この防波堤のケーソン一函を波力発電ケーソンとし、タービン・発電機を搭載して波力発電を行うとともに各種の計測を行う。第二北防波堤付近は、水深20mと深く、設計有義波高は、10.2m（Hmax=15.3m）、有義波周期は14.5sであり、ケーソンは大規模なものとなる。また、冬期には波浪が大きく20kw/m程度の波パワーが来襲する地点である。

この実験の発電部分については、沿岸開発技術研究センター内に設置された民間20社等からなる「防波堤利用の波力発電に関する研究会」が担当する。また、本実証試験全体の円滑な実施と十分な成果を得るため、有識者による委員会（委員長：合田良実横浜国大教授）を設け、適切な助言を得ることとしている。

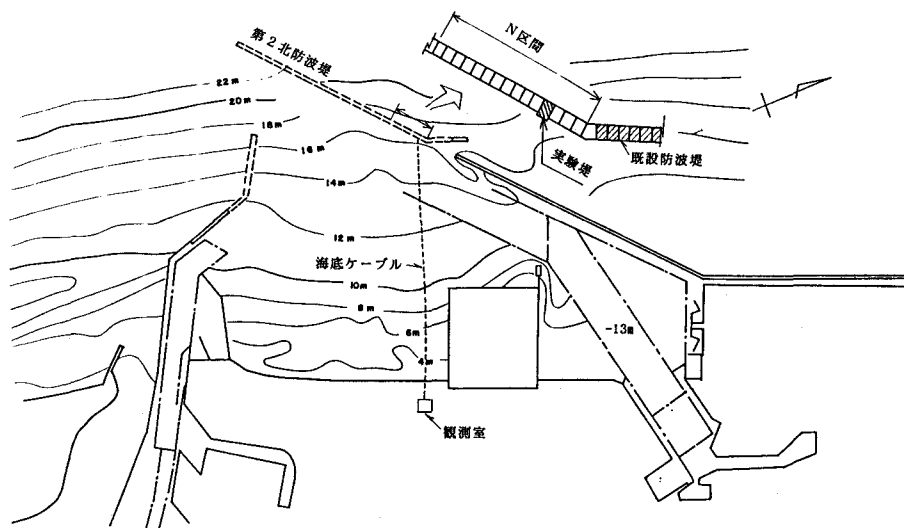


図-3 現地実証試験位置図（酒田港）

②試験の目的

この試験の目的を以下に示す。

- a) 防波堤としての耐波設計法の検証
- b) 波エネルギー変換装置としての空気室の設計法の検証
- c) タービン・発電機の設計法の検証
- d) 入射波パワーの変動に対するシステムの運転・制御法の検討
- e) 保護対策装置の挙動の検証
- f) 堤体の施工法の検討
- g) 電力利用法の検討

③試験の工程

試験は、5か年に渡って行われ、1989年秋口から波力発電が開始される予定となっている。発電・計測は、1989～1990年の2か年にかけて行われ、1991年には最終報告書を取りまとめる。全体の工程を図-4に示す。

	1987年度	1988	1989	1990	1991
設 計	堤体の設計	機械室の設計			
堤体の施工		堤体下部製作	上部製作		
機械室の施工			掘付 機械室の施工		
タービン・発電機			タービン・発電機の製作	設置	発電
計 測	計測システムの検討	機器の製作、購入	機器の設置	観測	観測
解 析				解 析	報告書作成

図-4 実証試験の全体工程

④実証試験防波堤の設計

i) 堤体の基本形状

図-5は、実証試験防波堤の断面図である。ケーソンの幅は24.5m、空気室の幅は7mであり、ケーソンの天端高は12.5mである。空気室の幅は、空気出力効率（空気エネルギー／波エネルギー）を左右する要因となるが、室内実験及び理論上の解析から、波長に対する空気室の奥行き幅の比を0.1～0.2程度の範囲内とすることにより、ほぼ上限に近い空気出力効率が得られることが確認されている。本実証試験堤の発電対象波高としては、 $H1/3=2\text{m}$ 程度を考えており、空気室の幅（7m）はこの波の波長（6s）の13%に相当している。ケーソンの天端高さは、ほぼ設計有義波高に等しく、空気室と機械室間のノズルの高さは、大波浪時の海水侵入を極力抑えるため、室内実験結果に基づき提案されている $H.W.L+0.5H_{max}(=+8\text{m})$ を確保した。また、空気室は4m幅で5室に分けられているが、隔壁に開けられた通気口により5室が一体となっている。

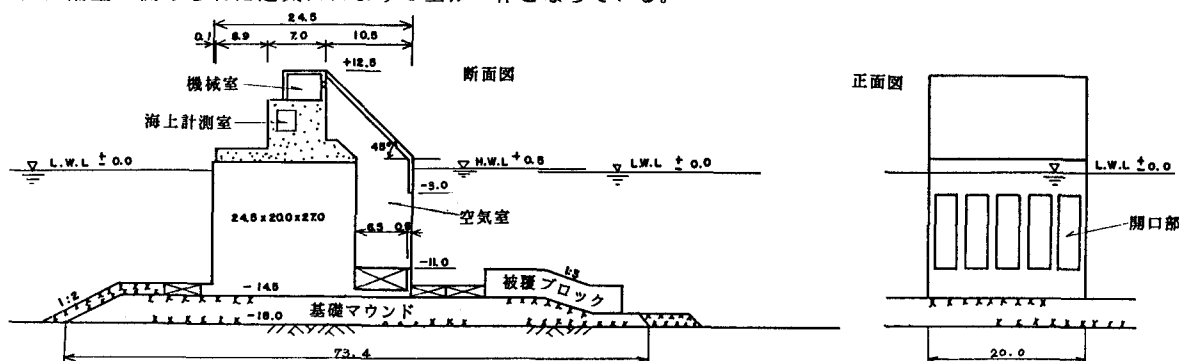


図-5 実験防波堤の断面図

ii) 堤体の耐波設計

本実験堤は、上部斜面堤でもあり、波圧の水平成分が減少し、波圧の鉛直成分によってケーソンの耐波安定性が増加する構造である。また、越波を通常のケーソンと同程度とするため、天端が高く、タービンのノズルの位置を高くできる。堤体の安定計算に用いる波圧は、拡張された合田式によることとし、室内実験結果に基づく、本ケーソンの消波効果を考慮した波圧の補正係数 $\lambda_1=1.0$ 、 $\lambda_2=0$ を用いた。波圧分布図を図-6に示す。また、空気室の部材設計に用いる空気室内の設計波圧としては、室内実験に基づき提案された値（図-7）を用いた。

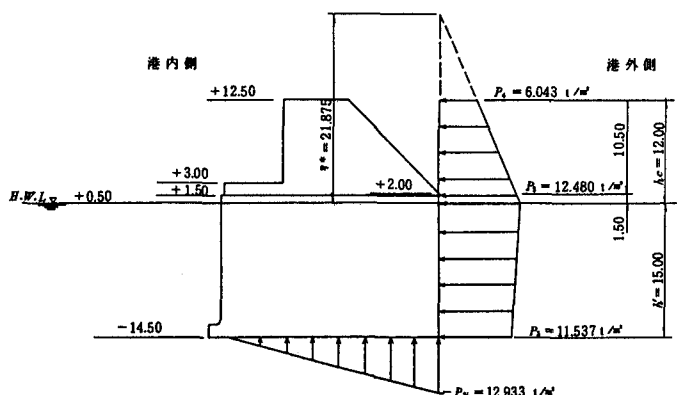
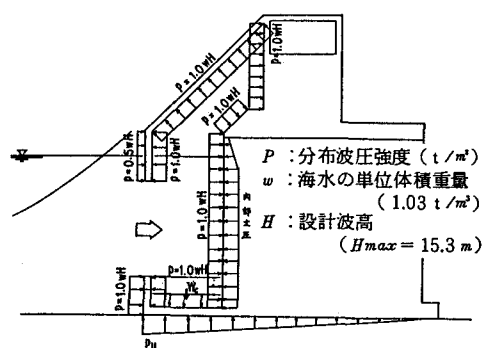


図-6 堤体の設計波圧



(引き波時は $P=0.5\omega_0 H$ の負圧)

図-7 空気室内の設計波圧（押し波時）

⑥発電装置の設計

図-8は、タービン・発電機が設置される機械室付近の平面図である。中央にあるのがタービン・発電機であり、ここに向かう空気流を調整する空気流調整弁も設けられている。また、空気圧を低減する圧抜き弁も設けられている。タービンは、直径1.3mのウェルズタービンであり、これを2台、タンデム型にしたものを用いる。発電機の最大出力は、60kwである。大波浪時には、発電は停止されるが、この場合の空気室の開口比（ノズル断面積の空気室断面積に対する割合）として、1/70程度が確保されるよう、空気流調整弁の大気開放側の形状及び圧抜き弁の形状を設定している。

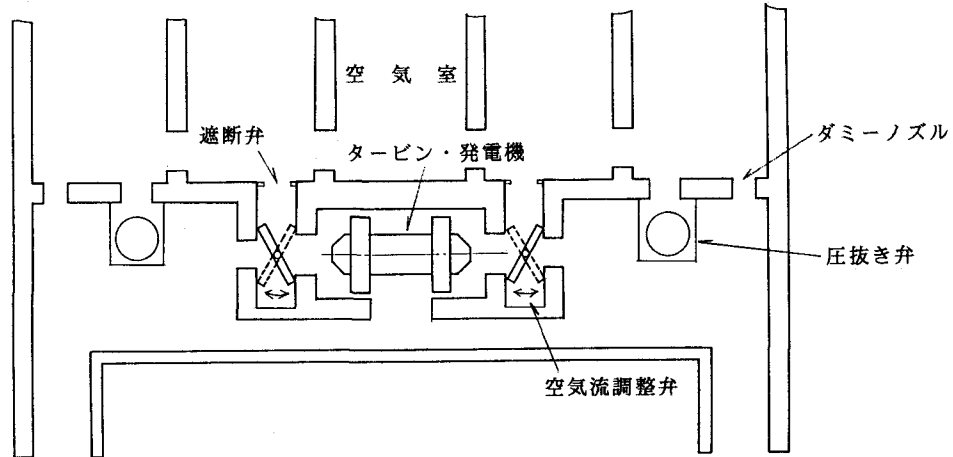


図-8 実験防波堤機械室平面図

⑥施工法

波力発電ケーソンは、通常の防波堤のケーソンに比べ、特殊な形状をしている。特に空気室の前壁が斜面となっているため、施工が難しい。しかも斜面壁には、大きな波力が作用すると考えられ、その施工には十分な精度が必要となる。酒田港では、こうした大型のケーソンは、ケーソンの下部をフローティングドックで製作し、上部を港内の静穏な場所で海上打ち継ぎをする。波力発電ケーソンについても、上部の斜面壁まで海上打ち継ぎで製作されるが、十分な施工管理が必要となる。

斜面部まで完成したケーソンは、海上を曳航され基礎マウンド上に据付けられる。タービン・発電機を設置する機械室等は、据付け後施工される。図-9は、波力発電ケーソンの施工手順を示すものである。

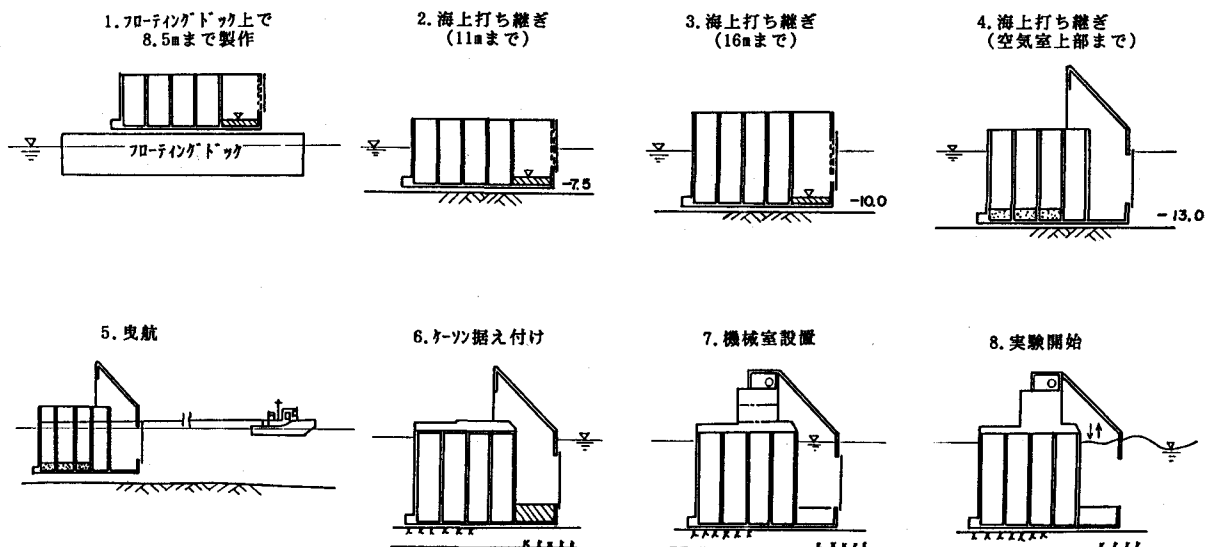


図-9 波力発電ケーソンの施工手順（酒田港）

⑦計測

実験では、各種のセンサー等をケーソンや発電装置などに設置し、計測を行う。図-10に堤体に設置されるセンサーの位置図を示す。得られたデータは、ケーソンの機械室において増幅され、光信号に変換された後、光ファイバーケーブルで陸上の観測室に送られる。データは観測室で同時解析されるとともに、データレコーダ等に記録される。実験では、以下の項目について計測を行う。

1) 波浪状況の把握

ケーソン設置位置周辺の波浪状況を把握し、外力の推定資料とする。波高については超音波波高計により、波向については3個の水圧計及び超音波式波高計でアレー観測を行う。

2) 堤体の安定性の検証

波力による堤体の滑動及び転倒に対する安定性を検証する。計測項目は、波圧、揚圧力である。

3) 部材の安全性の検証

堤体に作用する波圧、空気圧に対する部材の安全性を検証する。計測項目は、鉄筋応力である。

4) 空気出力効率及び発電効率の検証

空気室内水位、タービン回転数、発電量を測定することにより、空気出力効率及び発電効率の検証を行う。

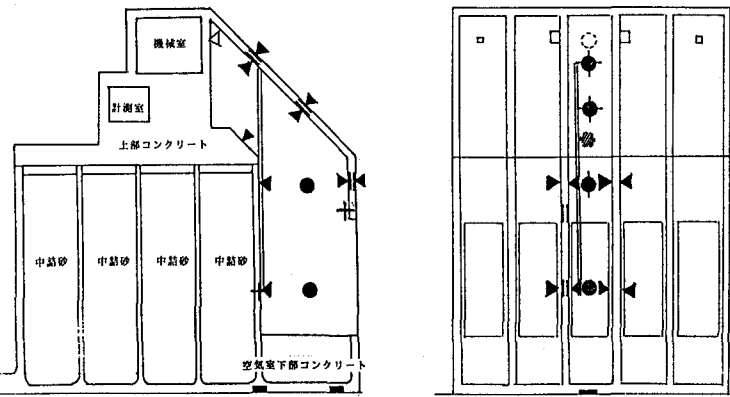


図10 センサーの位置図

計測項目	センサー	
空気室内圧力	波圧計	○▷
空気室内波圧	波圧計	●▷
前面作用波圧	波圧計	
揚圧力	波圧計	—
斜面壁応力	鉄筋計	—
隔壁応力	鉄筋計	
空気室内水位	ステップ式波高計	
前面入射波高、波向	超音波式波高計、波圧計3	堤体延長方向320mの地点

この他、タービン回転数計、タービン入出力空気圧差圧計、電力・電圧計が機械室内に設置される

⑧発電運転及び電力の利用

発電運転は、基本的には自動的に行われ、波の条件に対応した電力が得られる。大波浪時には、空気流調整弁や圧抜き弁が働き、出力を60kw以下に抑える。さらに危険な激波時には、弁を閉じ、発電を停止する。得られた電力は、ケーブルにより陸上の観測局まで運ばれる。陸上観測局内には負荷抵抗器が設置されておりこれによって電力を消費するとともに、発電システムに影響を与えないような方法で、発電電力を分岐するシステムも兼ね備えている。これは、変動する発電電力から、平滑化された安定した電力を得るシステムを考える場合には、重要な要素となる。また、この分岐された電力を利用して、各種の模型装置により電力利用のデモンストレーションが行われる。表-2に、その概要を示す。

表-2 電力利用のデモンストレーションの概要

利用項目	概要	電力量
1. 観測室内ライト	室内の照明を兼ねて点灯	11 KVA
2. 水槽利用のデモ	①海水魚の飼育(海水循環、エアレーション)	0.25
	②熱帯魚の飼育(循環ポンプ、エアレーション)	0.6
	③電着のデモ(海水循環)	0.1
3. 給湯	電気湯沸器による給湯(90リットルのタンク)	1.3 KVA
4. 床暖房	入口のロートヒータリング	1.0
5. 海水循環装置	海岸～計測室間の導水(海水汲み上げポンプ)	2.0
6. ケーソン上デモライト	ケーソン上から陸上に向けて光を放つ	1.5

参考文献

- 1) 高橋重雄、安達崇、田中智；改良型波力発電ケーソン防波堤の特性、波エネルギーに関する研究第7報、港湾技術研究所報告、第27巻第2号1988、PP. 23～57
- 2) (財)沿岸開発技術研究センター；波エネルギーの利用に関する総合調査報告書、1987年3月