

# 高出力波力発電システムの基礎資料

2016年4月21日 海友フォーラム懇談会 浜本剛実

表1 日本の主な波力発電システム

| 名称        | 開発年次 | 型式    | 実施事業者       |
|-----------|------|-------|-------------|
| 益田式航路標識ブイ | 1965 | 振動水柱型 | 緑星社         |
| 海明        | 1978 | 振動水柱型 | 海洋科学技術センター  |
| 振り子式波力発電  | 1981 | 可動物体型 | 室蘭工業大学・日立造船 |
| 海陽        | 1984 | 可動物体型 | 日本造船振興財団    |
| 波力発電防波堤   | 1987 | 振動水柱型 | 運輸省港湾局      |
| マイテイホエール  | 1998 | 振動水柱型 | 海洋科学技術センター  |
| ジャイロ式波力発電 | 2003 | 可動物体型 | 神戸大学        |
| つるべ式波力発電  | 2007 | 可動物体型 | 山口大学        |

益田式航路標識ブイは1965年に緑星社より定額出力100Wの波力発電装置を搭載した航路標識ブイとして実用化し、国の内外で数千台が稼働中である。その後に日本がとり組んだ高出力波力発電技術開発は実用化されていない。1973年の第一次石油ショックを契機に波力発電の研究は本格化し、表1に示す発電システムが提案され、実証実験が実施されたが、その後、石油価格の高騰が沈静化し、研究開発投資も先細りとなり、主なプロジェクトは2003年に終了した。

表2 NEDOに採択された波力発電システムの実証試験

| 名称          | 実施期間      | 型式             | 実施事業者               |
|-------------|-----------|----------------|---------------------|
| 機械式波力発電     | 2013－2015 | 機械式 PB-MES     | 三井造船                |
| 空気タービン式波力発電 | 2013－2015 | 空気タービン式 PW-OWC | 三菱重工鉄鋼エンジニアリング・東亜建設 |
| ジャイロ式波力発電   | 2013－2015 | ジャイロ式          | ジャイロダイナミックス・日立造船    |
| 越波式波力発電     | 2013－2015 | 越波式            | 市川土木・協立電機・いであ       |

2011年3月11日の東日本大震災以降、我が国のエネルギー政策の見直しの中で、再度、再生可能エネルギーの利用促進が求められ、下記の条件を満たす表2に示す波力発電システムの実証試験がNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)に採択された。

- (1) 実用段階に近いシステムで、発電効率が高く、事業化時に発電コストが40円/kWh以下であること。
- (2) 運用・メンテナンスの環境影響評価と荒天時の係留対策が確立していること。
- (3) 実証試験フィールドの確保していること。

波力発電を事業化するためには、波力発電が「新エネルギー」と認知され、電力固定買取制度の対象となることが必須要件である。波力発電はエネルギーを供給するのみならず、波エネルギーをベースとした新産業の育成も期待されている。海洋エネルギー資源利用推進機構は2020年までに51MWの発電規模を想定している。

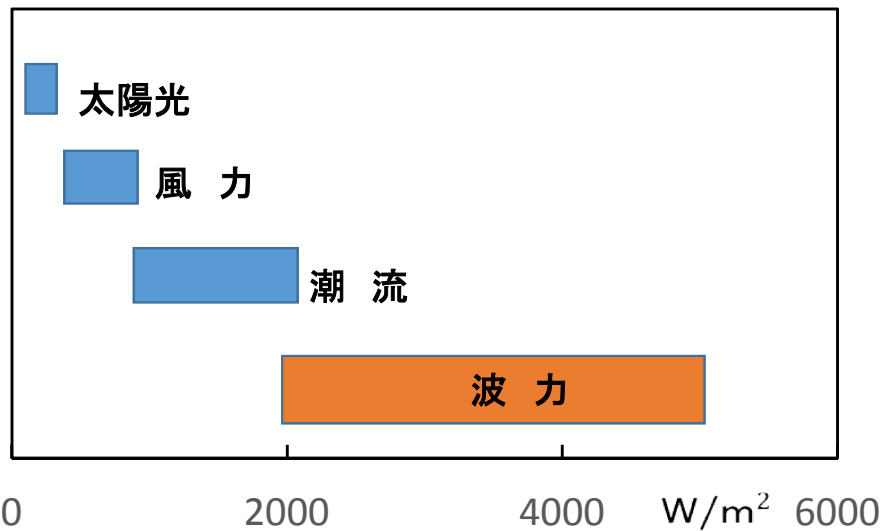


図1 各種再生可能エネルギーの密度比較

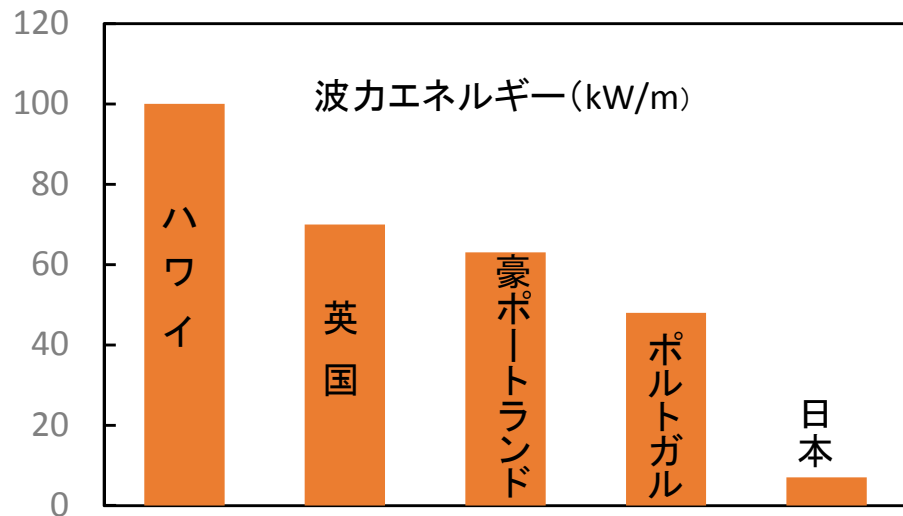


図3 海岸線1 m当たりの波パワー

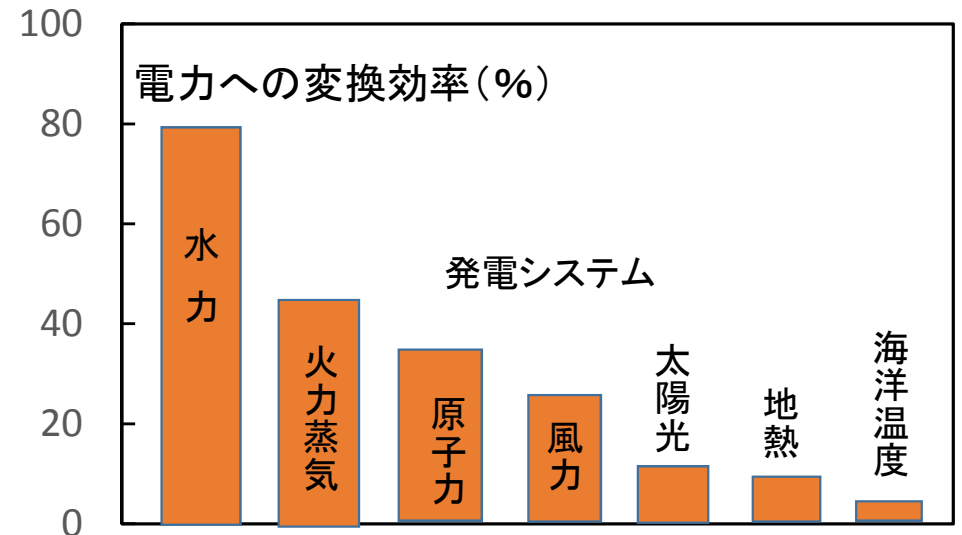


図2 各種発電システムの電気エネルギー変換効率

波スペクトル:

$$S_W(\omega) = 0.258 H_{1/3}^2 \frac{T_{1/3}}{2\pi} \left( \frac{2\pi}{\omega T_{1/3}} \right)^5 \exp \left( -1.03 \frac{2\pi}{\omega T_{1/3}} \right)^4$$

波パワー

$$P_W = \frac{1}{2} \rho g^2 \int_0^\infty \frac{S_W(\omega)}{\omega} d\omega = 0.44 H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad \text{kW/m}$$

変換システムのスペクトル

$$S_R(\omega) = G^2(\omega) S_W(\omega)$$



図4 日本近海の波エネルギー分布(出典:港湾技術研究資料 No654)

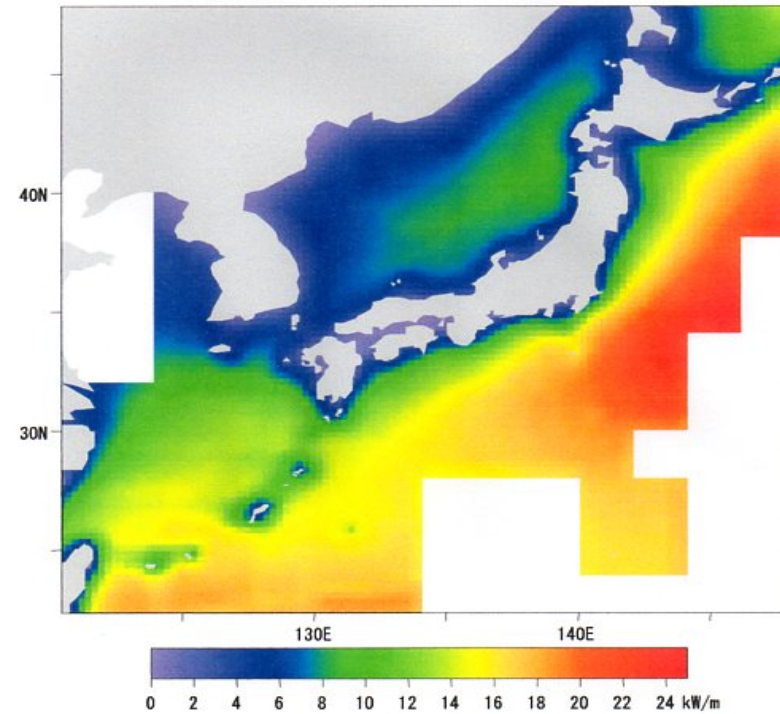


図5 近海の波エネルギー分布  
(出典:海上技術安全研究所)



図6 日本の排他的経済水域(出典:資源エネルギー庁)

水深50m以下  
 $(\text{平均波パワー: } 7\text{kW/m}) \times (\text{総海岸線長: } 5200\text{km}) = 36\text{GW}$

水深50m以上  
 $(\text{平均波パワー: } 15 \text{ kW}) \times (\text{沖合線長: } 10,000\text{km}) = 150\text{GW}$



$$L \sin \alpha - D \cos \alpha > 0$$

1965年に緑星社より海上保安庁向けに商品化された定額出力100Wの振動水柱型波力発電である。

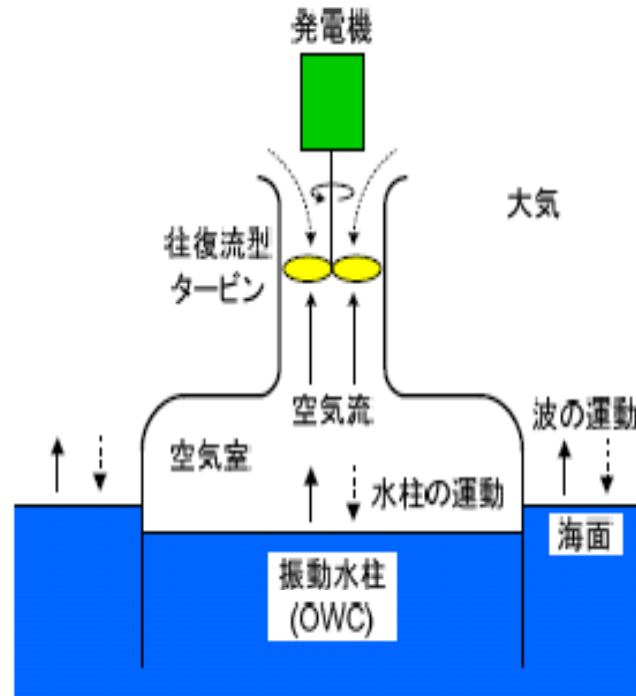


図8 振動水柱型変換装置の作動原理

水面の上下動による往復空気流中で、一定方向に回転するウエルスタービンで発電機を駆動する。

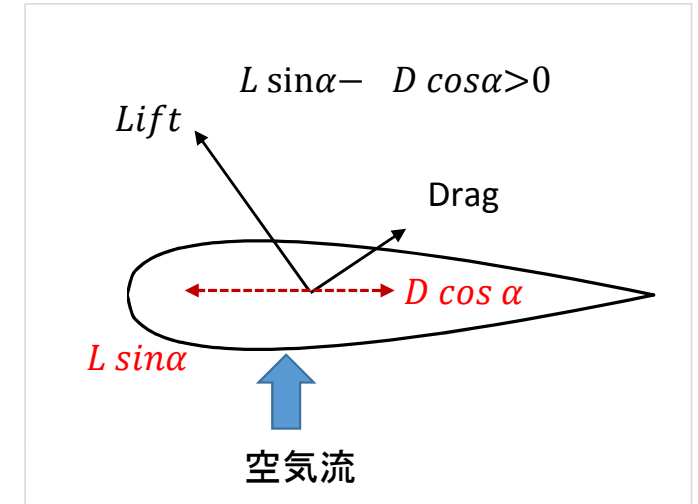


図9 ウェルスタービンの回転条件

1977年に英国のウェルズによって考案されたウェルズタービンはローターの周辺に複数の翼が取り付けられ、空気流に対して直角に置かれ、一定方向に回転する。





図10 海明「波力発電浮体」(出典:海洋科学技術センター)

海明は全長 80m・幅 12m・総重量 800 t の浮体に22個の空気室を設置。

山形県鶴岡市由良の沖合3kmに入射波の進行方向に沿って係留し、1978年から1985年まで3回の海上実験を実施。

第1次実験はIEA(国際エネルギー機関)との共同研究として、英国・米国・カナダ・アイルランドが参加。

第2次実験は東北電力の実系統への送電テスト。

第二次実験後、全長を120mに改造。

第3次実験は英国製のウェルズタービンと米国製のマコーミックタービンの発電出力テストを実施。

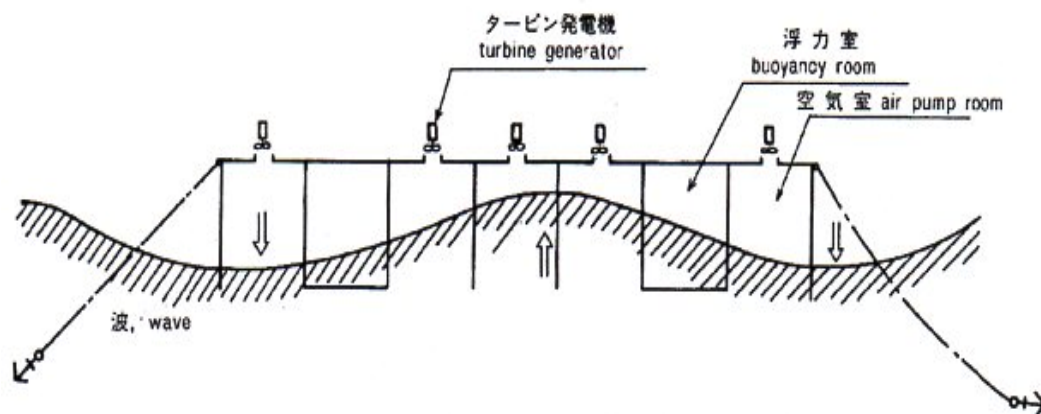


図11 海明の係留方式

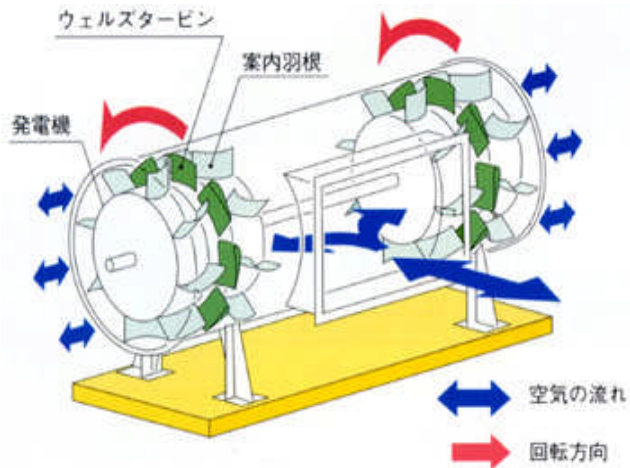


図12 タンデムウエルズタービンの構造  
(出典: 日本財団)

ウエルズタービンは英国クイーンズ大学のウエルズ教授の発明したもので、往復流中で一定方向に回転するタービンである。

翼の揚力による軸力がベアリング軸受破損の原因となるため、二個のウエルズタービンをタンデムに配置し、軸力が互いに相殺する仕組みにしたものがタンデムウエルズタービンで、富士電機が特許を取得している。

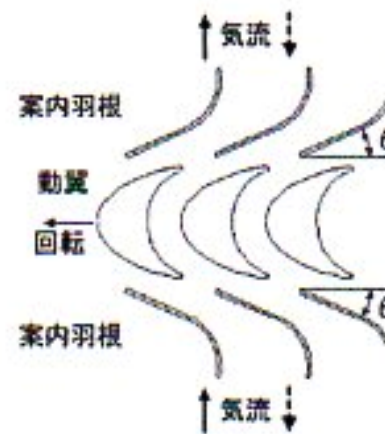
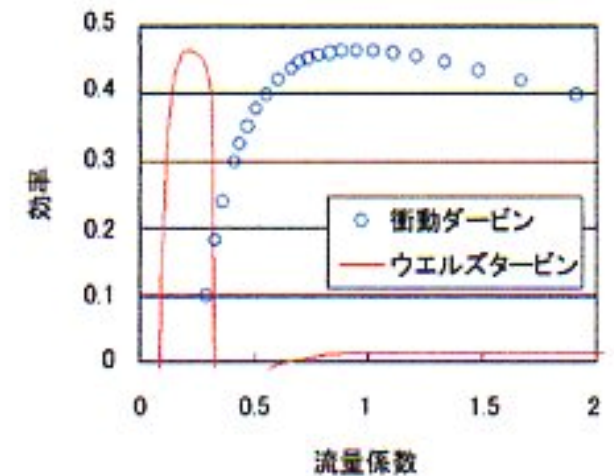
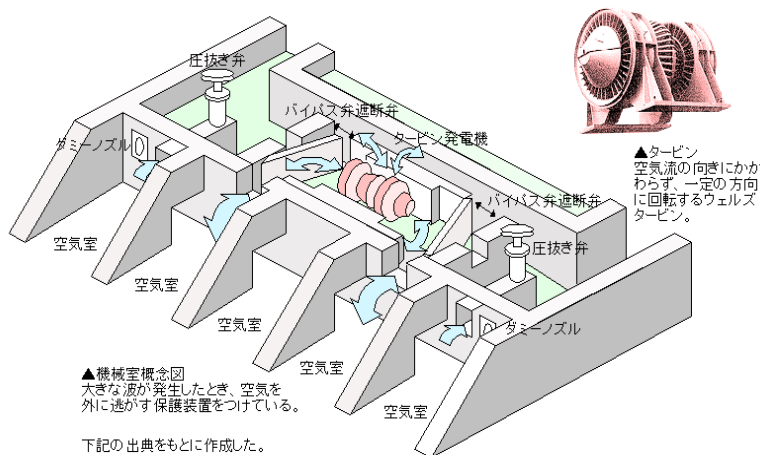
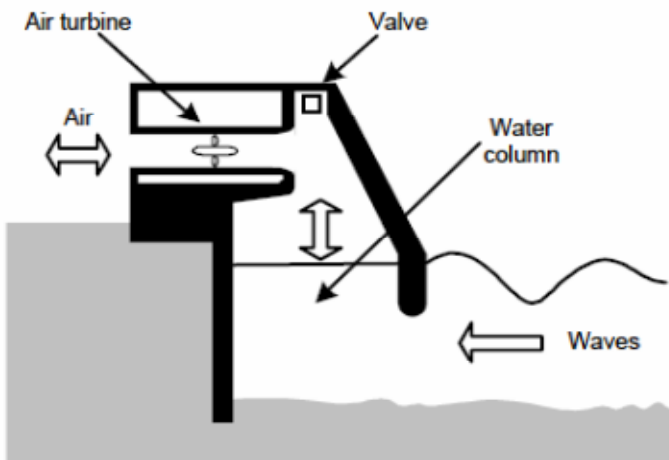


図13 マコーミックタービンの作動原理  
(出典: 三菱技報V01. 49)

マコーミックタービンは米国アナポリスの海軍大学のマコーミック教授の発明したもので、往復流中で一定方向に回転するタービンである。ロータは一段と二段の二種類がある。

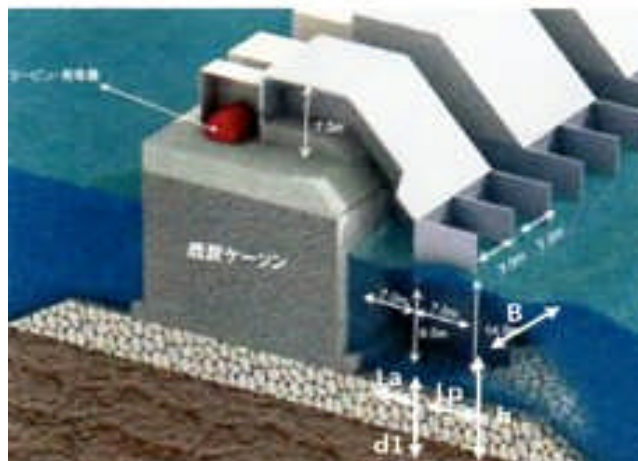
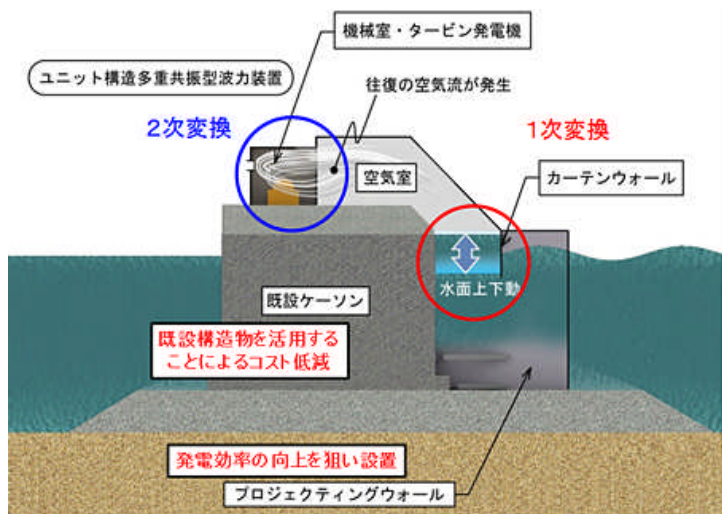
ウエルズタービンが低トルク高速回転であるのに対し、マコーミックタービンは高トルク低速回転である。このタービンは海明の第3次海上試験で作動が確認され、空気タービン式波力発電システムに装備されている。





振動水柱型波力発電システムは空気室内に出入りする波の上下動によって発生する往復空気流でタービンを回転させ、発電機を駆動する方式である。このシステムの実証実験は山形県酒田港で1987年から実施され、有義波高と発電出力の関係より発電効率は12%であった。

図14 振動水柱型波力発電システム(出典:運輸省港湾局)



この方式の発電出力向上のため、プロジェクティングウォールを取り付け、空気室内の定常波の共振による空気パワーの向上とマコーミックタービンを採用し、発電機駆動トルクの向上を図ったものを空気タービン式波力発電システムと呼び、NEDOの実証試験に採択されている。発電効率は24%に向上している。

図15 空気タービン式波力発電システムPW-OWC (出典:NEDO)



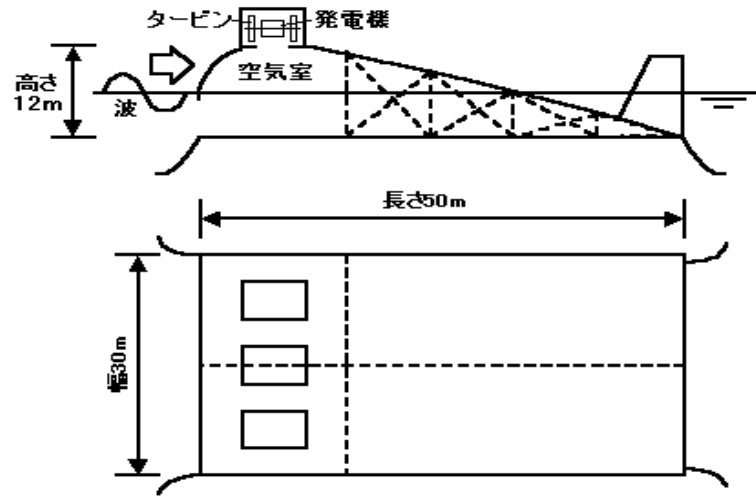


図16 マイティホエール 振動水柱型波力発電浮体(出典:海洋研究開発機構) 図17 海陽 (出典:日本造船振興財団)

マイティホエールは全長50m・幅30m・排水量4380tの浮体で、振動水柱型波力発電システムを搭載し、空気室は波の入射方向に開放され、後方に浮力室とスロープを配置している。

8枚翼のタンデムウエルズタービン発電機120kW(30kW×2、60kW)を搭載し、1998年～2002年まで三重県五ヶ所湾沖に係留され、海洋科学技術センターの実海域実験で発電効率は最大15%、発電コストは123～181円/kWhと試算、開発費は17億円。

海陽は可動物体型波力発電システムで、波による浮体の上下運動と固定構造物との相対運動をリンク機構で、油圧に変換し、油圧モーターを経て交流発電機を駆動するシステムである。

沖縄県八重山郡竹富町サバ崎沖の水深10mに設置し、1984年と1985年に実用試験を実施。

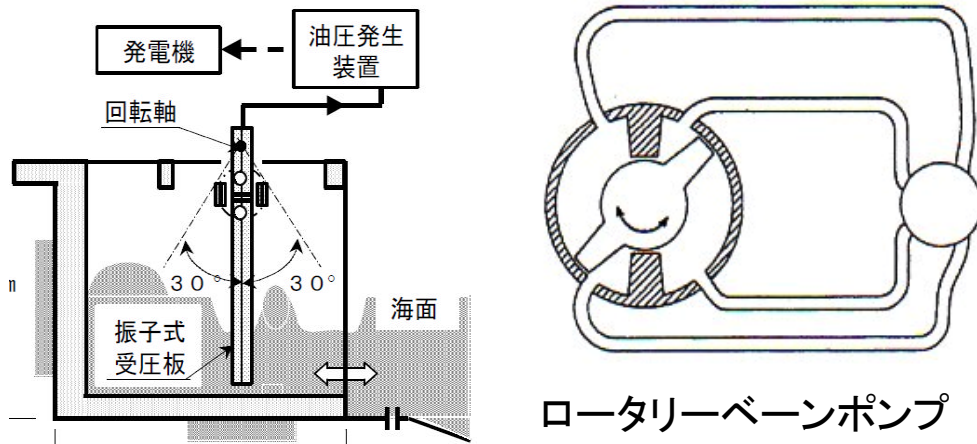


図18 振り子式波力発電(出典:室蘭工大・日立造船)

振り子式波力発電は可動物体型で、造波装置の逆の原理で波エネルギーを電力に変換する発電方式である。往復運動によりロータリーベーンポンプが油圧モーターを一定方向に回転させ、油圧モーターが発電機を駆動する。

室蘭工大と日立造船が開発し、北海道増毛港の堤防に設置して、1981年から1986年にかけて実験が行われ、その後、漁民センターの20kW相当の熱源として利用された。また、下部支持型振り子式と呼ばれる波力発電システムが京都府宮津市の関西電力宮津エネルギー研究所に設置されている。

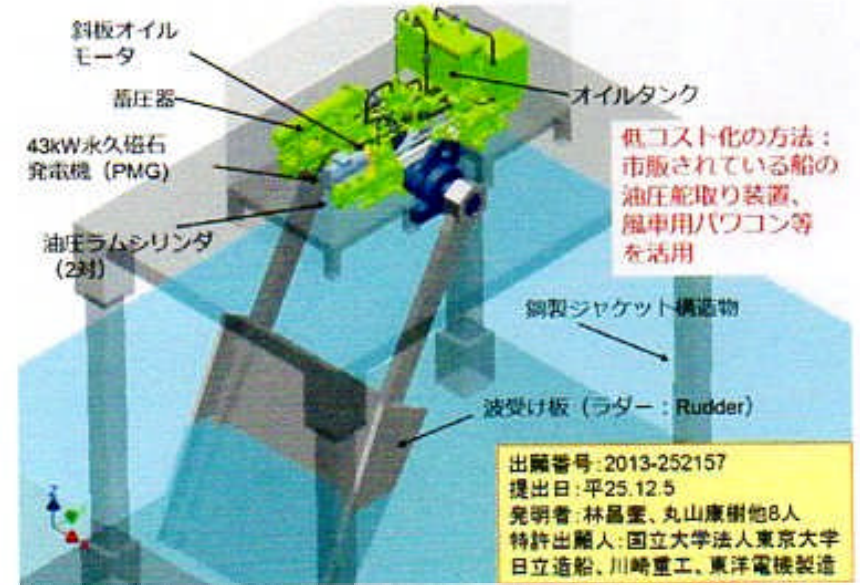


図19 振り子式波力発電(出典:東京大学)

この振り子式波力発電は水室のない振り子式発電装置で、波受け板は幅4m、高さ2mで発電能力は最大43kW、平均10kWで、水深3mの海底に固定する。水中で波受け板が振り子運動すると、上部にある油圧シリンダーを動かし、オイルモーターを駆動して発電する。

この波力発電は文部省が東北の復興に向けて推進するプロジェクトで、東京大学生産技術研究所が岩手県久慈市の漁港で9月から実証実験の予定である。

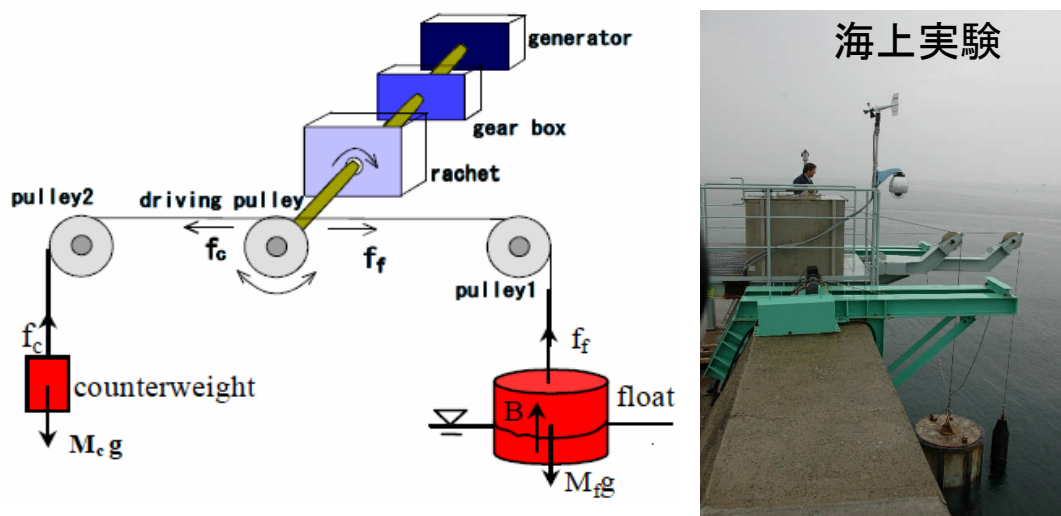


図20 つるべ式波力発電システム(出典:山口大学)

つるべ式波力発電システムは滑車にフロートとカウンターウェイトを取り付け、フロートは海面に浮かべてフロートの上下運動を滑車と回転変換器によって回転運動に変換してタービンを回す可動物体型である。

海上実験は2005年に山口県下関市彦島で実施され、海上実験で用いられたフロートは直径3m・高さ3m・質量21.2t及びカウンターウェイトの8.16tである。

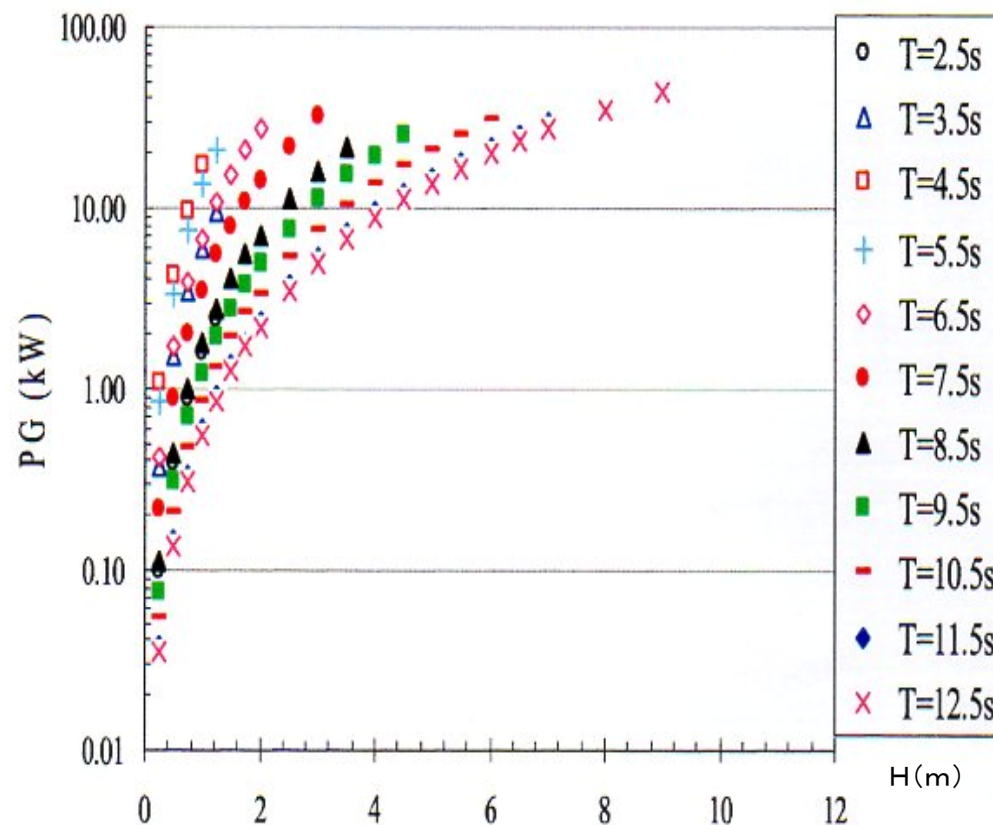


図21 規則波高に対する発電出力

周期をパラメータとし、発電出力を規則波の波高の関数として示している。この発電方式では波周期が長くなると発電出力が小さくなることが分かる。



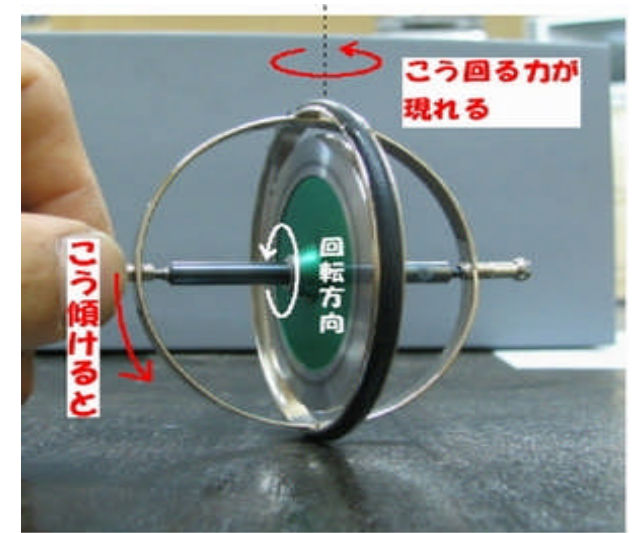


図22 ジャイロ式波力発電システム(出典:神戸大学)

図23 ジャイロモーメント

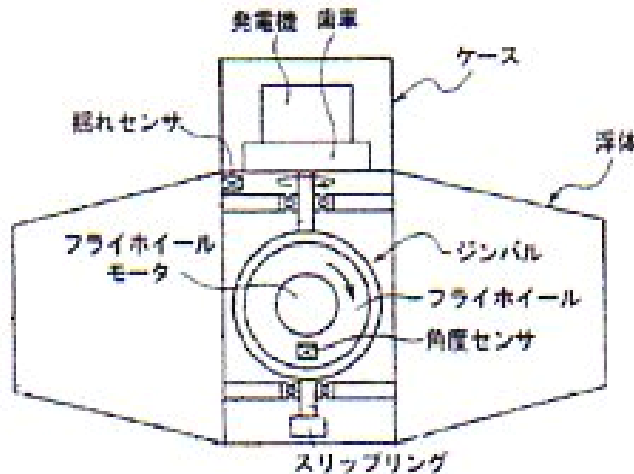


図24 発電システムの断面図

ジャイロ式波力発電は揺れる浮体に搭載したフライホイールのジャイロモーメントで発電機を駆動するもので、従来のエネルギー変換方式とは原理が異なる。

神戸大学は2003年よりプロトタイプの開発・実験を行い、2010年に45kWの海上実験を行った。

2013年にはNEDOの実施する実証研究に採択され、ジャイロダイナミクス社・日立造船が実海域試験を実施している。





図25 機械式波力発電システム

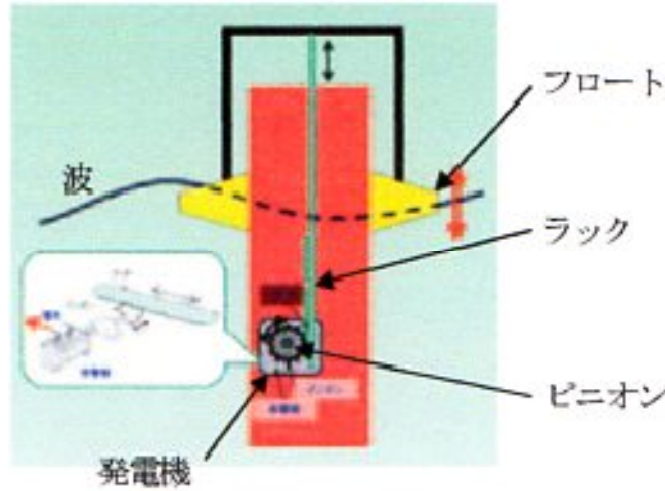


図26 発電機駆動システム

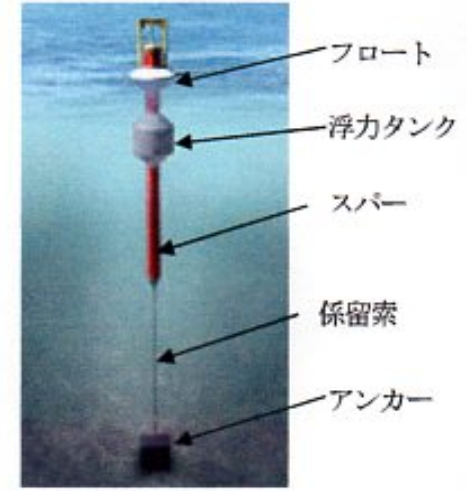


図27 係留システム(出典:三井造船)

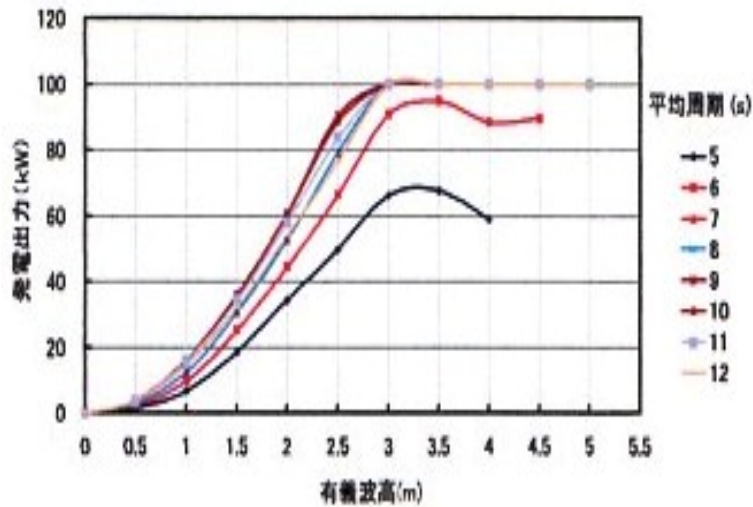


図28 発電出力

機械式波力発電システムは米国のOcean Power Technologies 社によって考案されたPowerBuoyと呼ばれる波力発電システムを三井造船が日本の海域に適した日本型ブイ式発電システムである。

日本近海向けの緊張係留方式及び発電効率向上のための同調制御発電方式を開発し、定格80kWクラスのPB-MESを提案している。PB-MESの主要目は定格出力80kW・全高さ50m・海面上高さ10m・フロート直径10mである。

発電パワー曲線より有義波高2m、平均波周期6sの海洋波の発電パワーは45kW、波パワーは120kWとなるので、発電効率は38%となる。

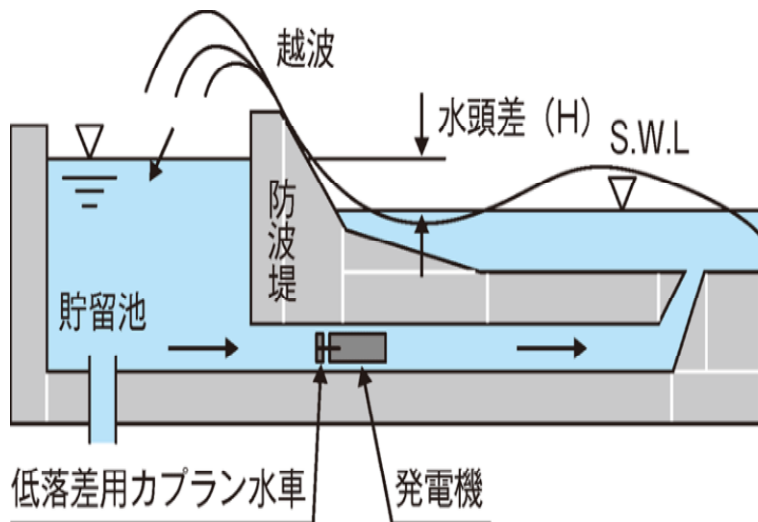


図29 固定式越波型波力発電システム

越波型波力発電システムは固定式と浮体式がある。固定式越波型波力発電システムは波を貯水池に越波させて貯留し、水面と海面との落差を利用して海に排水する際に、導水溝に設置した水車を回し発電する方式である。

このシステムは土木工事を伴うので、高価となるため作られた実績はない。

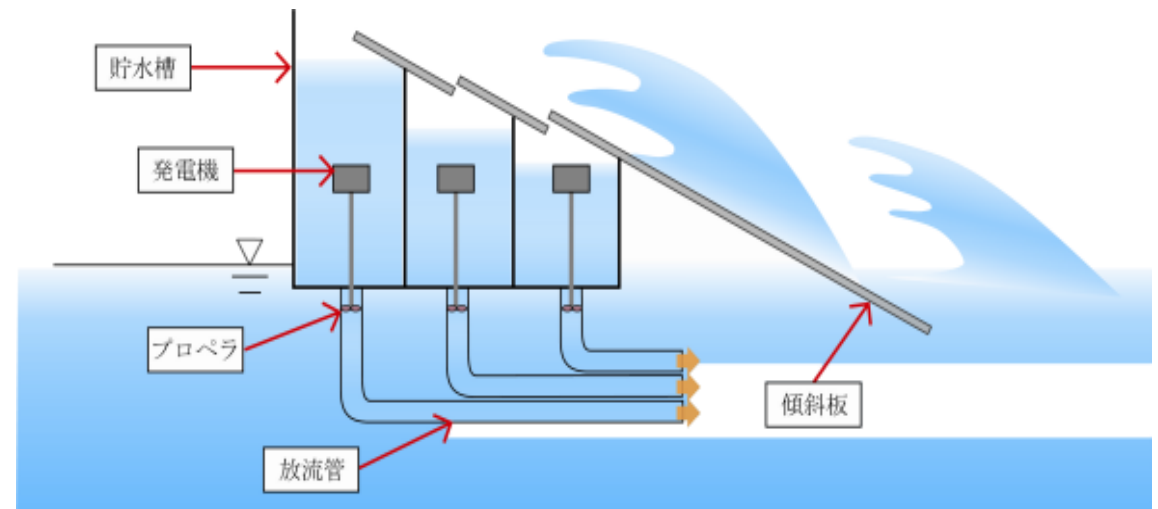
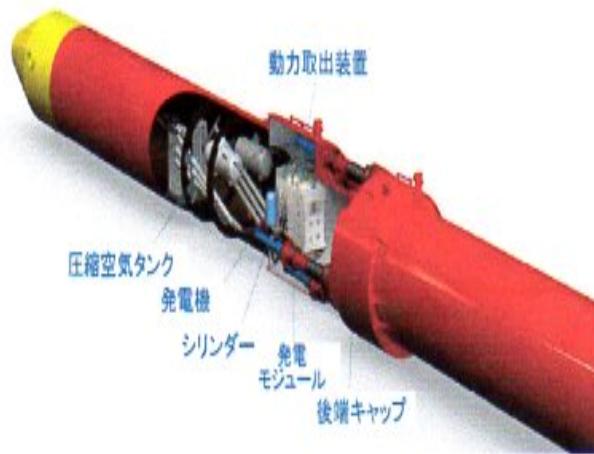


図30 浮体式越波型波力発電システム

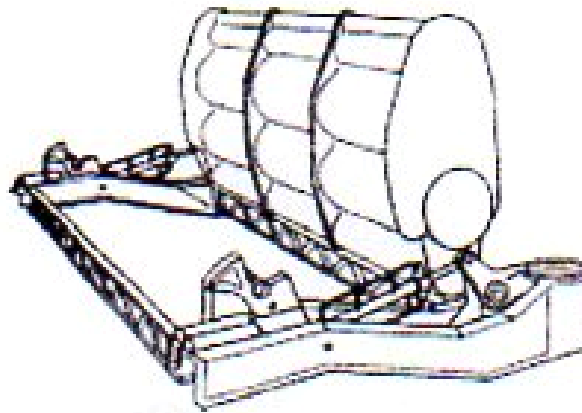
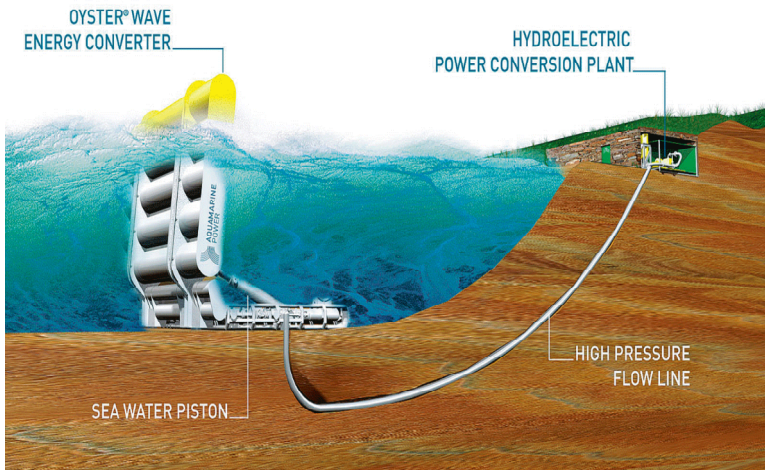
浮体式越波型波力発電システムは傾斜板を乗り越えた波が落下するときの水流を貯水槽に取り込み、底から流出する水流でプロペラを回転させ、発電機を駆動する方式である。越波量を増やす傾斜板の角は $20^{\circ}$ であることが実験的に確認されている。

この方式は東海大学で考案され、NEDOの実証実験に採択され、協立電機・いであ・市川土木が実証実験を実施する。



Pelamisは全長150m・直径3.5m・排水重量700t・発電出力750kWで英国のOcean Power Delivery 社研究開発を行い、ポルトガル沖に750kW×3を設置し、プロジェクトが開始された。発電システムは直径3.5mの円筒浮体4台を縦に連結し、連結部分にシリンダーポンプと油圧変速機を使用して発電機を駆動する。その後、故障が発生して改修が行われている。開発費は2億円。

図31 Pelamis 波力発電システム(出典: Pelamis Wave Power Ltd)



Oysterは海底固定式の波力発電システムで、英国のAquamarine Power社が開発した。沿岸の水深10~15mの比較的浅い海底に据え付け、波浪エネルギーにより、ピン支持の振動板を海水ピストンで駆動し、高圧ホースを通じて陸上に設置した水力発電装置を駆動する仕組みである。定格出力は300~600kWで210年に6000時間の運転実績を示している。

図32 Oyster 波力発電システム(出典: Aquamarine Power Ltd)



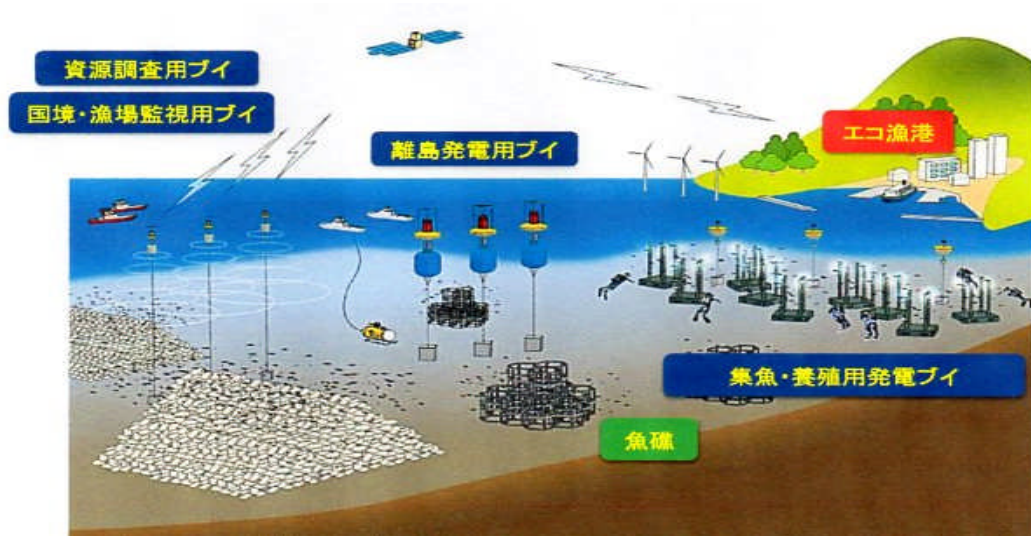


図33 分散型電力の海洋新産業への応用例

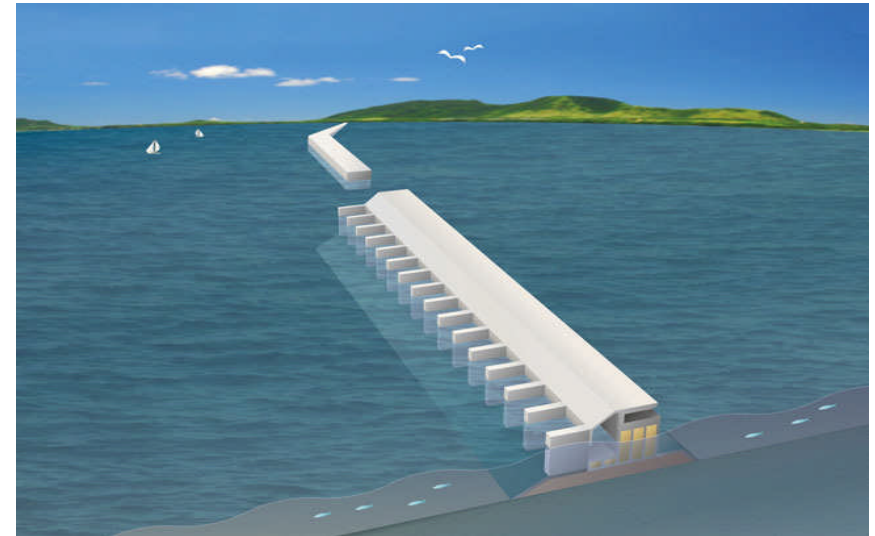


図34 波力発電防波堤

#### 参考文献

- 1) 伊藤義康:分散型エネルギー入門 講談社 2012年5月20日
- 2) 磯崎一郎・鈴木靖:波浪の解析と予報 東海大学出版社 1999年2月5日
- 3) 漆原次郎:次世代エネルギー 洋泉社MOOK 2010年1月19日
- 4) 益田善雄:日本の波力発電 霞出版社 1987年6月25日
- 5) 木原一禎 他:ユニット型多重共振波力発電装置(高効率発電装置)の開発 三菱重工業技報 Vol.49 NO.4(2012)
- 6) NEDO再生可能エネルギー技術白書初版 6章 波力発電の技術の現状とロードマップ 新エネルギー・産 技術総合開 発機構 森北出版株式会社 2010年7月
- 7) NEDO再生可能エネルギー技術白書第2版 6章 海洋エネルギー 新エネルギー・産業技術総合開発機構森北出版株 式会社 2014年2月
- 8) 前村俊彦、中野訓雄、宮島省吾:日本海域に適した波力発電技術の開発 三井造船技報No.210
- 9) 飯島徹 他:振り子式波力発電用エネルギー平滑化ケーソンについて 海洋開発論文集、第18巻、2002年6月
- 10) 福井工業大学紀要:波力発電と漁礁システムの開発 2002年10月
- 11) 東京都環境局波力発電検討委員会:波力発電検討会報告書、平成22年3月
- 12) 柏木正、西松早紀、浜本剛実:回転振り子型波力発電装置における波力エネルギー変換効率に関する基礎的研究 第22回海洋工学シンポジウム 平成23年17,18日 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会