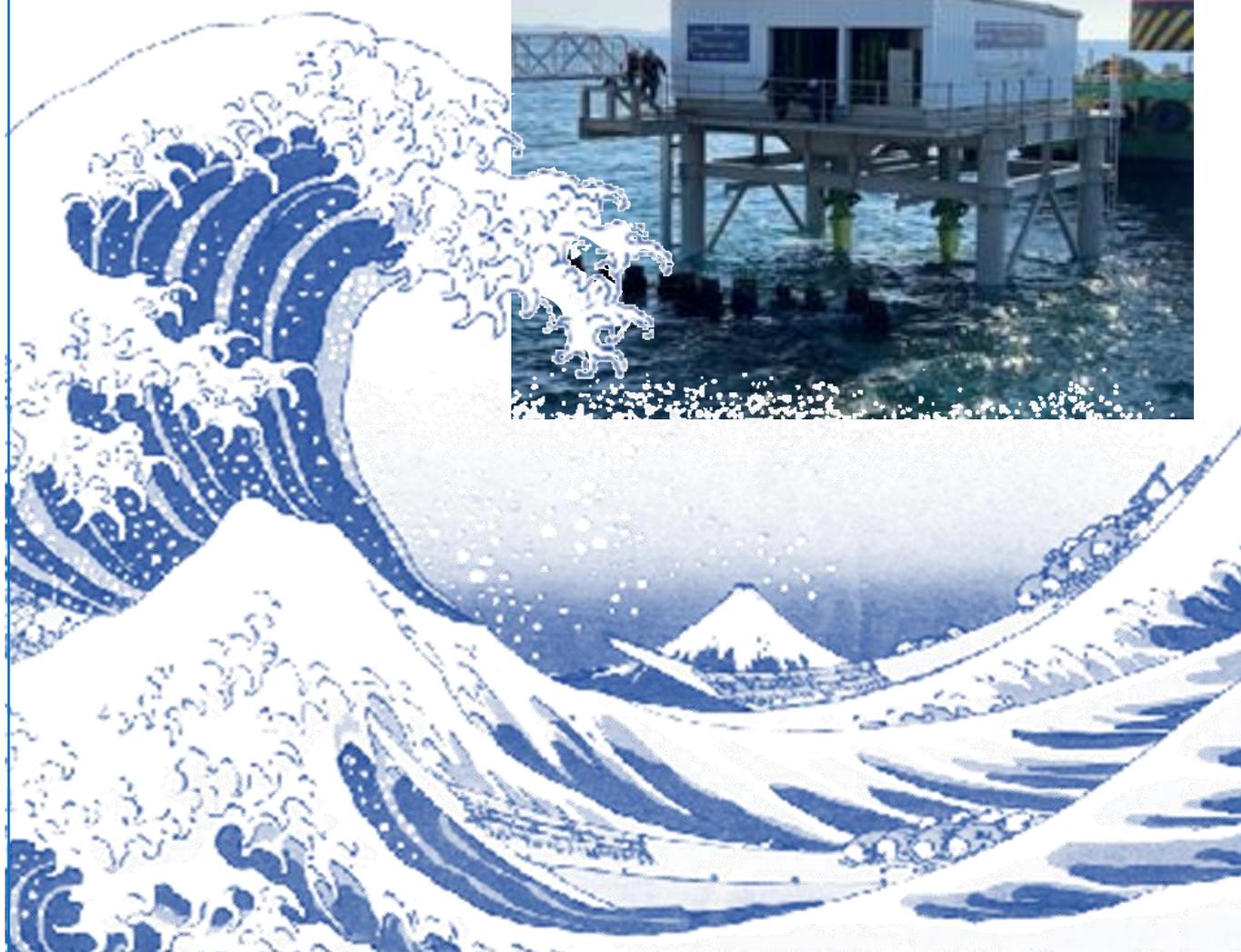


平塚波力発電所

環境省 CO2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業

反射波を活用した油圧シリンダ鉛直配置式
波力発電所（平塚波力発電所）海域実証



平塚海洋エネルギー研究会

事業概要

■ 実施期間： 2018 年度(10月)～2020 年度

■ 研究体制：

○ 課題代表者：東京大学生産技術研究所

○ 共同実施者：川崎重工業(株)、(株)東京久栄、(株)吉田組

○ 実施コンソーシアム(東大共同研究参加者)：

東洋電機製造(株)、(株)サンユウシビルエンジニアリング、川田工業(株)、
横浜ゴム(株)、中部電力(株)、(株)九電工、中国塗料(株)、(株)渋谷潜水工業、
若築建設(株)、電源開発(株)、(株)エイブル

○ 協力：平塚市、(株)淀川製鋼所、平塚市地域水産業再生委員会

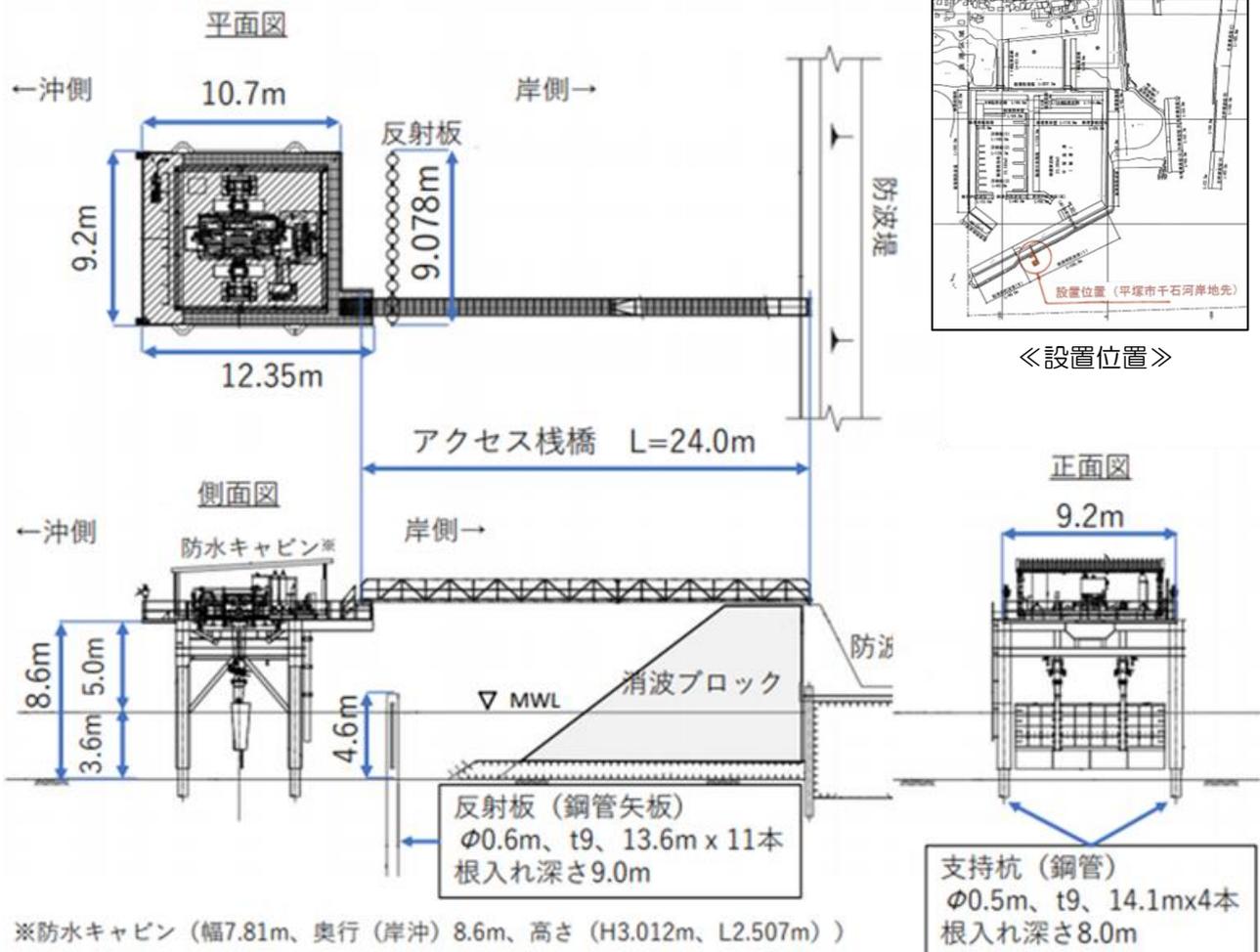
■ 実証場所：ひらつかタマ三郎漁港（平塚漁港）南防波堤前面海域

■ 発電装置の特性

○ 定格出力：45kW（波高1.5m） ○ エネルギー変換効率：50%



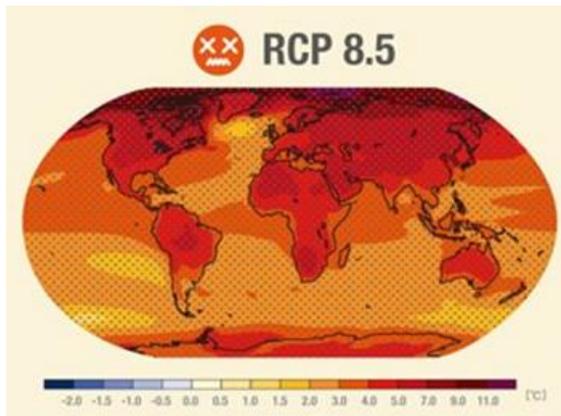
《動画》



《平塚波力発電所の海洋構造物と反射板（三面図）》

1. はじめに

2014年に国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）がまとめた「第5次評価報告書」における最も厳しい想定（RCP8.5シナリオ）では、このまま地球温暖化が進むと、21世紀末の地球の平均気温は21世紀初頭に比べ2.6～4.8℃上昇すると予測しています。



「21世紀末における地上気温の変化」

出典)IPCC 第5次評価報告書
全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト
(<https://www.jccca.org/>)より

このまま地球温暖化が進むと、海水の熱膨張や極地の氷河の融解による海面上昇、洪水、干ばつ、

さらに熱帯性伝染病の拡大や病害虫の増加等、人間の生活や自然の生態系にさまざまな影響を与えます。既に南極の氷が融け始めていることが観測されており、日本でも大型台風や集中豪雨、真夏日の記録更新等、様々な異常気象による深刻な被害が頻発しています。

この地球温暖化の進行を緩和するためには、その大きな要因とされている二酸化炭素（CO₂）の排出を大幅に削減することが重要です。そのため、排出源となる石油・ガス・石炭といった化石燃料由来のエネルギー使用を抑制し、代わりに風力や太陽光等の「再生可能エネルギー」の利用拡大へと転換していく必要があります。

四方を海で囲まれた日本では、洋上風力をはじめ、波力、潮流・海流等の海洋再生可能エネルギーのポテンシャルが国際的に見ても高いと言われています。平塚波力発電所は、この豊富な波の力を利用した波力発電を実用化し、日本から世界の海に普及させることにより、地球温暖化対策に貢献しようとするものです。

2. 波力発電とは

波力発電は、文字通り波のエネルギーを利用して発電します。発電方法は、①発電装置内の空気室に流れ込んだ海水の上下運動によって押し出された空気タービンを回す「振動水柱型」、②波を受けた物体が振り子のように動いて発電する「可動物体型」、③防波堤の内側に作った貯留池に防波堤を超えた波を溜めて出来る水面の高低差を利用する「越波型」、④高速回転するコマが波に揺られて傾いたときに元に戻ろうとする力を利用した「ジャイロ式」の大きく4タイプがあり、平塚波力発電所は「可動式（振り子式）」に属します。現在、世界各国で様々なタイプの波力発電装置の開発・研究が進められており、ヨーロッパやアメリカが先行しています。

再生可能エネルギーである海の波は、枯渇する心配がなく、空気よりはるかに重いため、面積当りの

エネルギーは、風力などの自然エネルギーよりも優れています。また、風が吹かなかったり、雨の日や夜には発電できない風力発電や太陽光発電と比較して、安定して発電できることも特徴です。



「益田式航路標識用ブイ」

★日本は、1965年に世界で初めて波力発電を実用化しました。海上保安庁が航路標識ブイの電源として最大出力30W～60Wの浮体式振動水柱型装置を採用した益田式航路標識用ブイを開発。現在でも国内外で数千台が稼働中です。

一方、海に設置する波力発電所は、台風や津波災害に対する安全性の確保、海上作業による設置コストや腐食・付着生物に対する維持コストの増加、漁業との調整などが実用化を進める上での課題となっています。

3. 平塚波力発電所の特徴

(1) コンセプト

平塚波力発電所は、波力による高効率・低コストの分散電源を開発し、再生可能エネルギーの地産地消を目指すことをコンセプトとしています。

このため、次の3つの課題にチャレンジし、様々な工夫を講じています。

- 台風の荒波にも耐えられる頑丈な装置だけでなく、小さな波でも効率良く発電できること
- 設置や維持管理が容易なコンパクトな構造だけど、必要な発電量が確保できること
- 国内外へ普及させるため、安心・安全な装置だけど、価格は低く抑えること

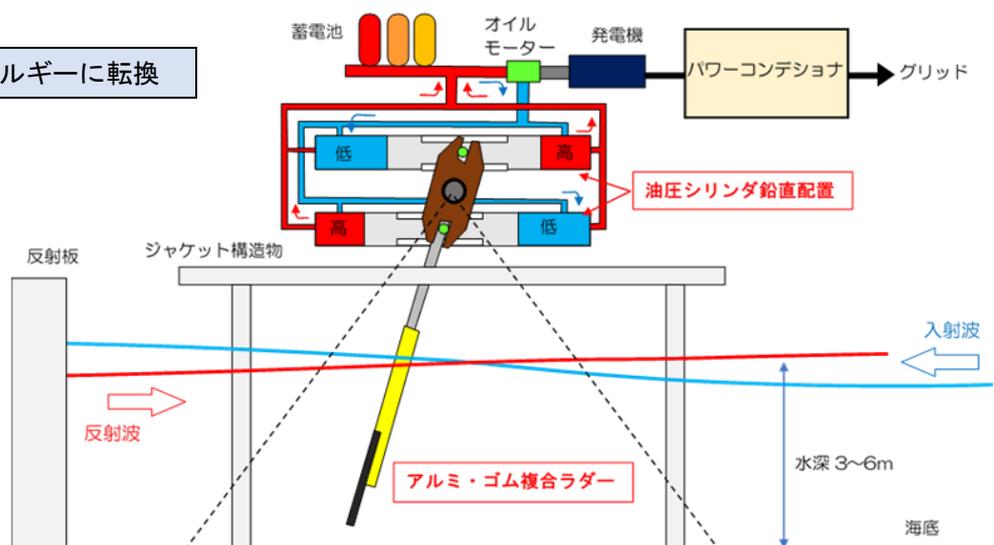
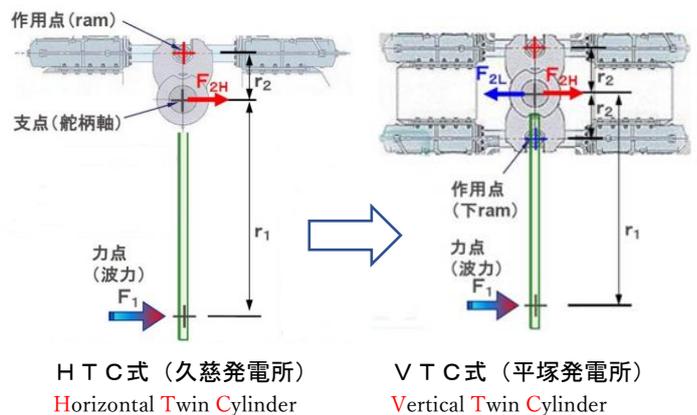
(2) 仕組み

発電法は、船の操舵機とは逆のエネルギーの流れで発電する「Wave Rudder 式」です。

押し寄せる波のエネルギーを受けたラダー（波受板）が前後に揺動することで油圧シリンダが往復運動を行い、これにより発生したオイルエネルギー（圧力・流量）をオイルモータに誘導して永久磁石発電機を動かして効率よく電気エネルギーに轉換します。

その際、押し寄せる波だけでなく、背後の構造物で跳ね返された反射波も活用して発電効率を高めるとともに、ラダーにかかる水平力を軽減することで軸の軽量化を実現するため、通常は水平方向に配置する油圧シリンダを鉛直方向に配置したことで、「反射波を活用した油圧シリンダ鉛直配置式波力発電装置」と命名されました。

平塚波力発電所のエネルギーの流れ

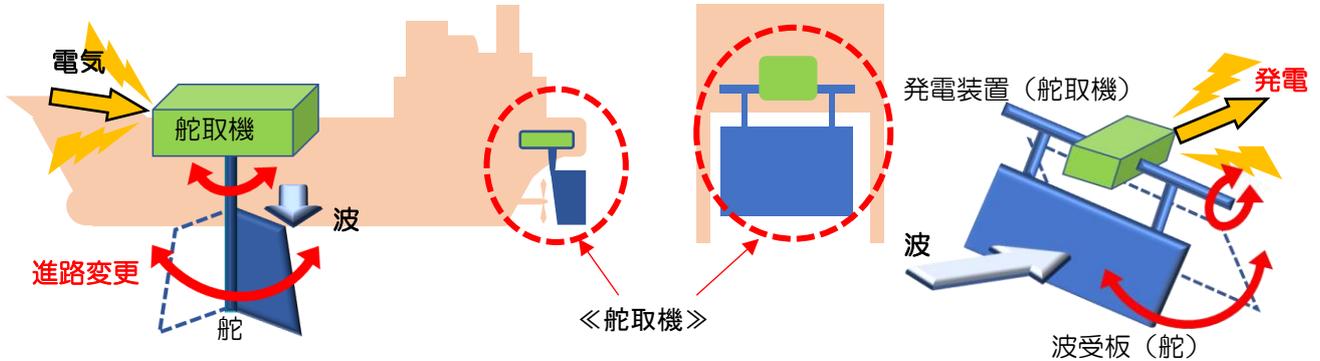


《波力発電の作動原理》

① 世界初!! 発電装置のコア部分は船の操舵装置

発電装置のコアとなる油圧シリンダは、大型船の操舵装置（舵取機）を導入し、船の進路を変えるエネルギーの流れとは全く逆の流れで発電します。

実際の船で使われている装置であるため、性能や安全性、耐久性は保証済みです。



② 小さい波はしっかりキャッチ、大きい波は受け流すアルミ・ゴム複合ラダー

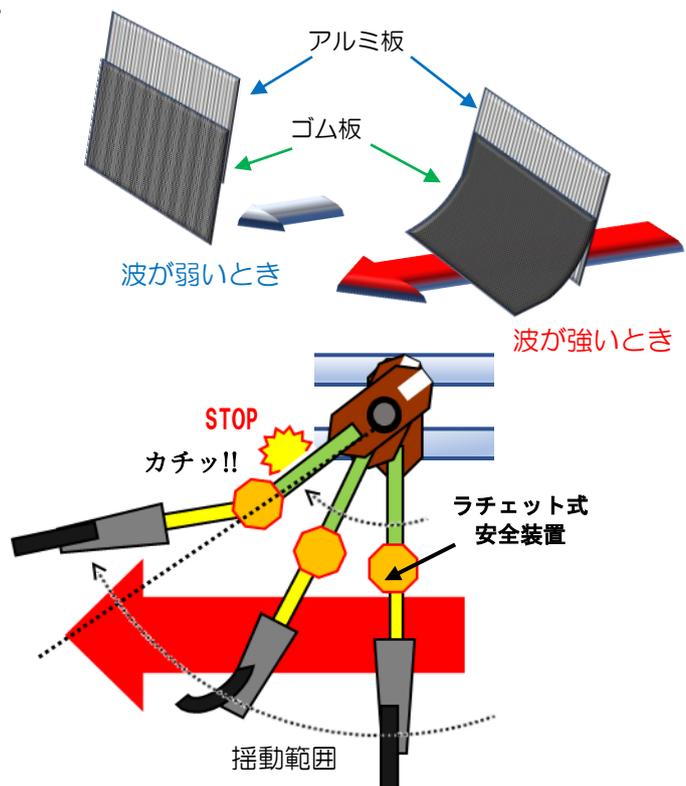
波受板として使用しているラダーは、船体にも使用される軽くて強いアルミニウム合金の板と、世界各地の鉱山のコンベヤベルト等として使われている特殊なゴム板を組合わせて新開発しました。

さらに強い波によりラダーの揺動範囲を超える状況になると、自動的にラチェット式安全装置が働き、ストッパーがそれ以上のラダーアームの振れを止めるとともに、ラダーは、ラダーアームと切り離されてフリーになり、過剰な波のエネルギーを逃します。

小さな波のエネルギーを効率的に受けるとともに、大きな波の時は、ゴムの部分が柔らかくしてエネルギーの一部を逃がす工夫がされています。



《ラダー全景》
川田工業(株)多度津工場にて



《ラチェット式安全装置のイメージ》

③ 通常発生する波で驚きの発電効率を実現

波力発電の発電効率は、他の再生可能エネルギーと比較して非常に優れていますが、台風に耐えられるような頑丈な装置では、普通の波では動かさないというジレンマがありました。

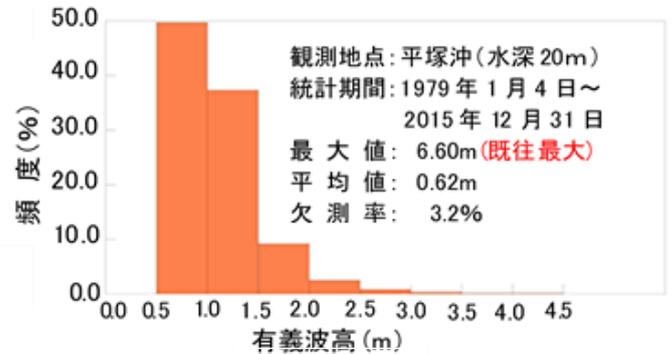
相模湾中央部の比較的波の小さい海域に設置した平塚波力発電所は、装置の軽量化や大波で壊れな

■ 再生可能エネルギーの発電効率

発電方法	太陽光	風力	水力	地熱	平塚波力
発電効率	20%	20~40%	80%	10~20%	50%

出典)LOOP CLUB ウェブサイト ※平塚波力は除く
(<https://loop.club/editorials/detail/90>)より

いたための様々な工夫により、常時出現する波高1.5mの普通の波で定格出力45kWを発電できるよう設計しています。これにより、通常出現する波で50%の発電効率を達成しました。



《平塚沖の有義波高の出現頻度》
平塚沖総合実験タワー観測データより

④ コンパクトだけど発電量はお好み次第

平塚波力発電所のおよその大きさは、海洋ジャケット構造物と防水キャビンを含わせて幅10m×奥行11m×海底からの高さ12mとコンパクトな仕上がりとなっています。このため、工場で製作・組立てまで完了してから、船で運搬して設置場所に据付けることができるため、離島でも設置が可能です。

また、発電装置のコアとなる舵取機は、船の限られたスペースに搭載するため、高い耐久性と信頼性をもち、様々な大きさのものが商品化されているため、発電能力も選択できます。

平塚波力発電所は、定格出力45kWに対応した機種を使用していますが、経験を積みながら段階的に大型化していくことで、将来的には1ユニットあたりの発電能力を100kW~200kWに増大する予定です。さらに、このユニットを水平連結することにより、地域の発電需要に対応した発電量の確保を可能とします。



《波力発電所を水平連結したイメージ》

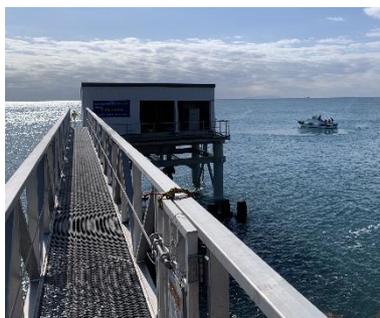
⑤ メンテナンスに配慮

《海水に濡れない》

発電所へは、防波堤から海面上に設置したアクセス栈橋により自由に往来することができます。

また、発電装置は、波による損傷や塩害を避けるため、全て海洋ジャケット構造物上の防水キャビン

内に配置しており、海中には発電部品を設置していません。さらに、防水キャビンには、沖からの高波の侵入防止機能も設けています。



《アクセス栈橋と
防水キャビンの内部》



《海底ケーブルを使用しない》

送電は、高額な海底ケーブルは使用せず、発電所からアクセス桟橋を介して防波堤に渡し、防波堤のパラペット側面を架設して陸上施設のキュービクルまで、送電ケーブルにより接続しています。このため、メンテナンスは非常に容易です。



《防波堤に架設した送電ケーブル》

★ひらつかタマ三郎漁港では、花火大会が行われるため、落下した打ち上げ花火の燃えカスが附着してケーブルを燃やさないように、ケーブルと防波堤の間に空間を設けています。

《離れた場所で監視》

遠隔監視システムを導入しているため、遠隔地でも発電（運転）状況やエラー情報をはじめ、現地データの取得や発電機のトルク設定など、パラメータ調整を行うことができます。



《パソコンの遠隔操作画面》

《貝やフジツボが付きにくい》

海洋ジャケット構造物の付着生物対策としては、海洋生物が脱落しやすい難接着性を示す防汚塗料の性能を調査しています。

《軽くて脱着が容易なラダー》

海中部にあるラダーのアルミ部分は、軽量化とともに、強度・剛性、耐腐食性を考慮したアルミニウム合金を採用しました。これにより、ラダーを取付け・取外しする場合は、起重機船は必要なく、チェーンブロックを使った潜水士による人力作業により簡単に行うことが可能です。



★ラダーは、バルーンで海中に吊るして小型船で輸送が可能。



《ラダー改良時における再装着作業の状況》

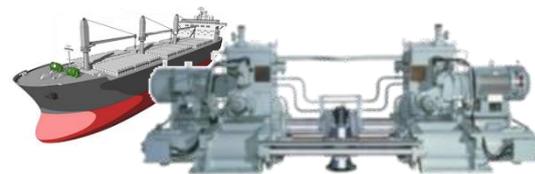
⑥ 市販品の活用でスムーズな実用化・商業化へ

波力発電が、実証試験の段階を経て実用化・商業化の段階に進んでいくためには、高品質の材料や部品の安定的な確保から、製造・組立や販売、アフターサービスまで一貫したサプライチェーンを構築するとともに、発電コストそのものを下げることが重要です。

平塚発電所では、既に世界各地で使われ実績のある市販品を部品や装置そのものとして使用しているため、品質や機能は保証されており、かつ特注品と比較して低価格です。また、各商品のラインアップも豊富にあるため、装置の性能向上も容易です。

《主な使用商品》

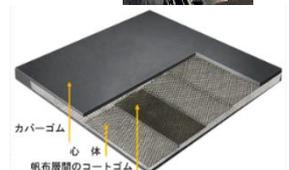
使用部品・装置	使用商品	メーカー	用途
油圧シリンダ	川崎電動油圧舵取機	川崎重工業(株)	大型船の舵取機
発電機	東洋 ED モータ (分散電源用発電装置)、パワーコンディショナ	東洋電機製造(株)	風力・小水力用発電機
ラダー (ゴム部)	多層帆布コンベヤベルト	横浜ゴム(株)	コンベヤベルト、橋梁用ゴム支承
防水キャビン	ヨド倉庫	(株)淀川製鋼所 (ヨドコウ)	倉庫
構造物の塗装	船底防汚塗料	中国塗料(株)	船舶用



■ 舵取機 (川崎重工業(株))



■ 分散電源用発電装置 (東洋電機製造(株))



■ 多層帆布コンベヤベルト (横浜ゴム(株))

4. これまでの取組み経過

東京大学生産技術研究所は、平成 21 年度に平塚沖総合実験タワーを所管して以降、平塚市と連携して、波力発電とエネルギー地産地消漁港モデルの検討を進め、東日本大震災後には、文部科学省の東北復興プロジェクト（平成 24 年度～平成 28 年度）に参加し、津波被害を受けた岩手県久慈市に波力発電所（43kW、Wave Rudder 式 1 号機）を設置しました。発電した電気は東北電力の既設送電線に系統接続した国内初の事例となります。



《久慈波力発電所》
（1号機）

この成果を活かし、平塚で改良型 2 号機の実証試験を行うため、平成 28 年 6 月に、平塚市と東京大学生産技術研究所が協力して産学公による「平塚海洋エネルギー研究会」を発足しました。

研究会では、国の地方創生関連交付金を活用し、久慈波力発電所の改良型となる 2 号機の実証事業の実現に向け、調査研究等の事業を進めてきました。

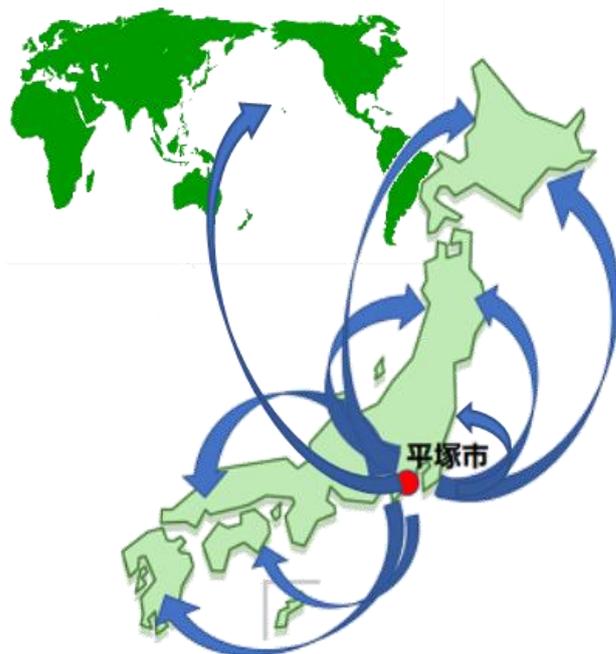
平成 30 年 10 月、東京大学生産技術研究所林研究室を代表とするグループが、環境省の「平成 30 年度 CO2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業（二次公募）」に採択され、平塚波力発電所の実証事業が始まりました。平塚波力発電所は、令和 2 年 2 月 5 日にひらつかタマ三郎漁港（平塚漁港）南防波堤の前面海域に設置し、運用を開始しました。

5. 今後の展望

海外における波力発電の開発・研究では、いきなり波の大きい現地で大規模な試作モデルを使った試験を急ぎすぎて失敗する事例が生じています。

東京大学生産技術研究所を中心とした研究開発グループでは、過去に開発されたものの成功しなかった「振り子式＝可動物体型」の発電方式について、改めて水槽実験により再検討し、波が小さい内湾において、プロトタイプ 1 号機（久慈市）での海域試験を行った後、改良型 2 号機（平塚市）での実証へと着実に成果を出しながら開発を進めています。

次の段階では、波の強い外洋において、発電能力を向上させたプレコマーシャルタイプでのフルテストを行い、10 年以内の商業化を、さらに 2050 年頃までには、波力発電装置を全国展開し、総発電能力 1GW 程度の実現を目指しています。



《平塚波力発電所》（2号機）

6. 漁業との調整

(1) 漁業にやさしい波力発電

潮流発電を設置する海域は、潮通しの良い海域であるため、多くの漁船が往来する豊かな漁場と重複してしまいがちですが、波力発電は、漁業にとって厄介な波が立ちやすい海域に設置するため、漁業操業への影響が少ないというメリットがあります。

また、波力発電所のラダーは、無理やり海中を掻

き回すのではなく、むしろ流れ藻のように波と同調して動くものであるため、そこに生息する魚類を脅かすことは無く、むしろ構造物の魚礁効果によって、魚類の蛸集を高めることが期待されます。

久慈発電所での調査では、ラダー及びその周辺に蛸集する魚類を多く確認しています。



■ 久慈波力発電所の魚類の蛸集状況

(2018年10月3日：水中カメラ調査)

左・中央：ラダー周辺、右：支柱基部

平塚波力発電所は、オイラの名前のついた「ひらつかたま三郎漁港(平塚漁港)」で実施していますよ～。



平塚市漁業協同組合 PR キャラクター「ひらつかたま三郎」

(2) 地元漁業協同組合との関係

平塚市漁業協同組合(正組合員39人、大型定置網・しらす船曳網・刺し網・一本釣り漁業)は、平塚沖総合実験タワーへの通船「さがみ」の運航や調査・実験時の海上作業等の補助業務をはじめ、漁具の高機能化や海中観測機器の開発研究、漁場環境の保全や獲物のブランド化等の取組み等、東京大学生産技術研究所等と様々な事業連携・協力を実施しています。

平塚波力発電所に関しても、事前に十分なコミュニケーションを図り、漁船の航行や漁業操業に配慮した位置選定をしたことで、漁業補償等も無くスムーズ実証事業に着手することができました。

また、実証事業に対する漁業者や地元住民との協議・調整の場として水産庁の「浜の活力再生プラン」の策定と進行管理を行う「平塚地域水産業再生委員会(平塚市漁協、平塚市、平塚商工会議所、平塚市観光協会、地元自治会で構成)」が担うとともに、設置海域の測量・調査船や作業船の提供、実証

事業に伴う作業ヤード等の漁業・漁港関連施設等の利用調整にも協力しています。

平塚市漁業協同組合では、将来、波力発電を活用したスマート漁業の導入や漁業コストの削減に意欲的であり、また、漁業協調の試みとして、反射板の設置により防波堤との間に生じた波の緩衝エリアを活用した藻場造成等にも取り組んでいます。

■ 平塚沖総合実験タワー

昭和40年に平塚市の沖合1km(水深20m)の地点に、科学技術庁防災科学技術研究所により建設され、平成21年に陸上の実験場施設とともに東京大学海洋アライアンス機構に移管されました。

海面からの高さは約20m、全国でも希少な海洋研究・教育施設として、気象・海況関係の測定のほか、広く海洋開発・観測機器の研究開発、試験施設として利用され、民間にも開放されています。



7. 平塚海洋エネルギー研究会

平塚市内には、東京大学の平塚沖総合実験タワーがあり、また、県内有数の工業集積地として、自動車関連企業をはじめ、様々な技術やノウハウを持った企業が集積しています。さらに、企業研究所の立地も多くあり、市内で様々な研究が進められ、人材や技術、知的財産等が集積しています。

これらの地域資源と、久慈波力発電所の成果を活かし、波力発電関連分野での新産業創出と地域活性化を図るため、平塚市と東京大学生産技術研究所が協力し、さまざまな企業が参画する産学公の「平塚海洋エネルギー研究会」を平成28年6月9日に発足しました。

平成29年度から、平塚海洋エネルギー研究会は2部構成でスタートし、第1部会（共同研究部会）では、東京大学との共同研究とすることで、知的財産に関する秘密保持の契約を締結し、非公開で研究を進めるとともに、第2部会（新産業創出部会）では、第1部会のメンバーに加え、平塚

市内の企業や団体、テーマにご協力いただける市外の企業等で構成し、波力発電に関連する分野での新産業創出について研究を進めています。

さらに平成31年3月19日、東京大学生産技術研究所と平塚市が連携協力協定を締結し、海洋再生可能エネルギーをはじめ海洋活用技術の研究開発を推進するとともに、新産業創出及び人材育成等に寄与する事業を協力して行うこととしています。



■ 平塚海洋エネルギー研究会

構成：平塚市、東京大学生産技術研究所林研究室、波力発電等に興味のある企業・団体（発足時）
[市内企業10社、市外企業12社、平塚商工会議所、平塚市漁業協同組合、平塚市電設協会]

～事業実施体制～

-代表者-

東京大学生産技術研究所

-共同実施者-

川崎重工業(株)、(株)東京久栄、(株)吉田組

-実施コンソーシアム(東大共同研究参加者)-

東洋電機製造(株)、(株)サンユウシビルエンジニアリング、川田工業(株)、横浜ゴム(株)、中部電力(株)、(株)九電工、中国塗料(株)、渋谷潜水工業(株)、若築建設(株)、電源開発(株)、(株)エイブル

-協 力-

平塚市、(株)淀川製鋼所、平塚市地域水産業再生委員会（平塚市漁業協同組合、平塚市千石河岸自治会、平塚商工会議所、平塚市観光協会、平塚市）

-協力（平塚海洋エネルギー研究会）-

(株)山川機械製作所、(株)ベリングハム・ハーバーマネジメント、関西設計(株)、(株)ワイテック、平塚市電設業協会、平塚市漁業協同組合、荏原環境プラント(株)、青葉電子(株)、(株)岡崎電気工事、(有)鈴木精機、平塚商工会議所、平塚市観光協会、神奈川県（オブザーバー）

-平塚波力発電海域実証検討委員会（委員所属機関）-

日本大学、京都大学、港湾空港技術研究所、日本経済大学、(一社)漁港漁場新技術研究会、平塚市漁業協同組合、平塚市、環境省、CO2排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業プログラムオフィサー