

【課題名】 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(平塚波力発電所)の海域実証 (委託)

【代表者】 東京大学生産技術研究所 教授 林 昌奎

【実施年度】平成30年度～令和2年度

(1)技術開発・実証の概要

①【課題の概要・目的】

海外では、温暖化対策として波力発電の実用化に向けた開発が活発である。本課題では日本初となる系統接続をした久慈波力発電所(文科省・東北復興委託事業)に続き、新技術を導入した新型波力発電所(反射板の活用、波の過大な作用力を軽減する油圧シリンダの鉛直配置等)を平塚漁港の防波堤前面に設置し、2種類(アルミ製、鋼製)の大型ラダーによる発電試験を行い、発電設計目標との比較検討を行う。実証機の製作・運転・撤去・廃棄のLCA分析により、排出係数を算出する。本事業後、波力発電を全国3,000ヶ所の漁港、1,000ヶ所の港湾へ普及させ、商用電力をグリーン電力に置換えることで大幅なCO₂排出削減に貢献する。

②【技術開発・実証の内容と成果】

○重要な開発要素

A1.【新しい油圧発電システムの設計・製作】

油圧シリンダ鉛直配置により波作用力を低減し、ジャケット構造物を軽量化することで、耐久性が向上した。軽量のゴム板を下部に取付けた2種類(アルミ製、鋼製)の大型ラダーを比較した結果、発電性能には差がなく、高強度で低コストの鋼製が有利と判断した。遠隔監視装置(LTE通信)を開発し、発電状況をリアルタイムでモニターし、油圧発電装置を適宜、調整した。

A2.【海洋ジャケット構造物の製作、系統連系と発電記録】

平塚地点は岩盤の久慈と異なり、砂地盤のため、4本の支持杭で支える新しいジャケット構造物を設計して構造解析を行い、経産大臣の認可を得た。海域据付後、既設の送電線に系統連系した。実証試験中、遠隔監視装置により1年間の毎日の発電データを記録・保管した。

A3.【発電出力の最大化制御法(MPPT)の開発と定期点検】

1/5ラダー模型を用いた水槽実験を行い、ラダーの最大振幅の推定式を導いた。ラダーの下部に軽量のゴム板を取付けた複合ラダーは、過剰なエネルギーを逃すことができ、有効と判断した。波高をパラメータとする発電量の最大化制御法(MPPT)を開発した。推定式、ゴム板、MPPTプログラムを実証機に応用した。実証試験中、保安規定を遵守し、安全点検を行った。現地テストの結果、発電機の回転数をパラメータとする回転数制御が波高制御より安定して発電できることが分かった。

発電データと設計発電目標を比較検討した(結果は右の④に記載)。

C. 海域実証

開発要素をシステム統合した実証機を平塚漁港の防波堤前面に据付けた。支持杭の沈下量を測定し、発電装置のレベル調整を行った。海域実証後、平塚波力発電所の支持杭、送電線等を撤去し、原状回復した。これにより、撤去・解体の貴重なノウハウが蓄積できた。

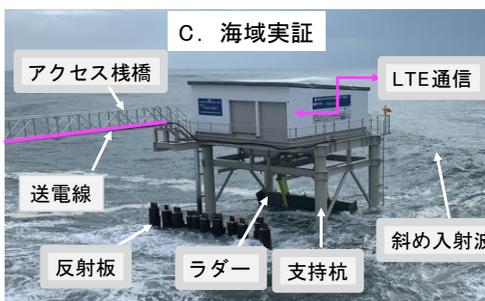
実用化レベルに達する時期

A1.～A3.の要素技術の開発は計画通りに進捗した。得られた成果により、20件の特許(中国、韓国、米国等の海外特許も含む)を取得した。設計目標の2項目はほぼ達成できたが、設備利用率は設計目標に達しなかった。原因は、波力発電装置の設置位置(防波堤前面)が適切でなく、波が想定よりもラダーに斜めに入射したため、波エネルギーが減少したこと、ラダーおよび反射板の上端(天端)を低く設計したため、高潮位るとき水没し、波エネルギーがオーバーフローして発電量が低下したため、と分析した。

今後、東京大学生産技術研究所と全国の企業16社による共同研究により技術課題を解決し、2025年頃には実用化レベルに到達する見込である。

③【システム構成】

要素技術A3.発電制御方法(MPPT)を海上の制御盤に実装



④【開発・実証成果のまとめ】

○開発・実証の目標及び達成状況:

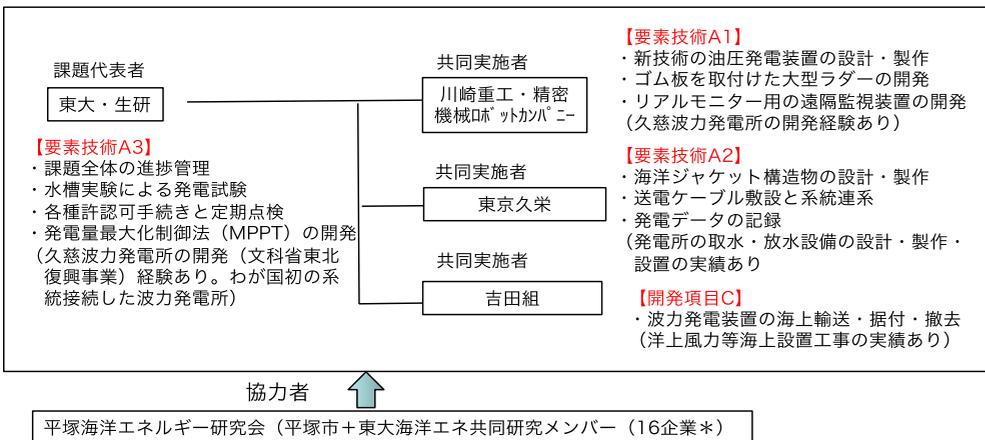
- ・最大出力時の発電効率 50%以上→設計目標(50%)を達成した。
 - ・最大出力 40.5kW →設計目標(45kW)の90%を達成した。
 - ・設備利用率 10.0～15.2%→設計目標(35%)の30～43%を達成した。
- また、製造、運搬、建設、廃棄のLCA分析を行い、排出係数0.033kg-CO₂/kWhを得た。

○想定ユーザの利用価値:

改正温対法(令和4年4月)施行により、2030年までに46%のCO₂削減が全国で求められるようになった。未利用の再エネである波力発電の想定ユーザは、発電事業者、大手電力会社、地方自治体等である。太陽光発電は、夜間に発電できないが、波力発電は夜間や暴風雨時でも発電可能であり、太陽光発電と波力発電を組合わせた複合発電にすることで、グリーン電力の供給安定性が向上し、ユーザーへの利用価値が高まると期待される。

(2) 技術開発・実証の実施内容

①【実施体制】



②【実施スケジュール】 環境省の了解を得て、海域実証を2年間に延長した。

	2018年度	2019年度	2020年度
要素技術A1			
新しい油圧発電システムの設計・製作	85,996千円	57,718千円	25,058千円
要素技術A2			
海洋ジャケット構造物の製作、系統連系と発電記録	27,559千円	79,087千円	2,800千円
要素技術A3			
発電出力の最大化制御法 (MPPT) の開発と定期点検	8,470千円	14,836千円	10,440千円
C. 海域実証			
発電装置の据付と撤去	6,958千円	80,522千円	27,272千円
その他経費	15,017千円	19,337千円	5,930千円
合計	144,000千円	251,500千円	71,500千円

③【成果発表状況】 平塚市と協力して以下を実施した。

- ・見学者対応合計545名 (令和2~3年度)
- ・笹川平和財団海洋政策研究所 Ocean Newsletter (令和2年2月22日)
- ・テレビ朝日週間ニュースリーダー (令和3年5月8日放映)
- ・テレビ東京モーニングサテライト 大浜見聞録 (令和3年10月21日放映)
- ・IEA-OES OES Annual Report 2020年、等

(3) CO2削減効果の評価

【提案時当初計画】 ※実施期間中における分科会等で計画変更が認められた場合等はその設定値

開発品 (波力発電装置出力200kW) 1台当たりの単年度CO ₂ 削減量 (t-CO ₂ /台・年)			
開発品 (装置/システム) の耐用年数			20年
年度	2025	2030	
単年度CO ₂ 削減量 (万t-CO ₂ /年)	14.4	28.8	
累積CO ₂ 削減量 (万t-CO ₂)	36.0	144.0	
CO ₂ 削減コスト (円/t-CO ₂)	1,297	324	

【本資料作成時点見込み】

- ・2025年に固定価格買取価格 (FIT) が設定され、以後、全国3,000ヶ所、1,000ヶ所の港湾に毎年1MW (1,000kW) の波力発電装置を5ヶ所に設置すると想定した。
- ・製作・運転・廃棄のLCA評価により波力発電装置 (200kW/台) の排出係数を0.033kg-CO₂/kWhとした。
- ・商用電力の排出係数は環境省ガイドブックの表より0.579kg-CO₂/kWhとした。
- ・資本費 (設備費、工事費、維持費) は、2030年までは100万円/kWを想定し、2030~2050年の20年間で、着床式風力発電の50万円/kW (現在) 以下へ低下するとした。
- ・設備利用率は35%とし、耐用年数20年として、発電量 (kWh) を計算した。
- ・耐用年数20年以降は更新、増設はしないものとする。

本表の年次は固定

開発品 (波力発電装置・出力200kW) 1台当たりの単年度CO ₂ 削減量 (t-CO ₂ /台・年)			
			334.8
開発品 (装置/システム) の耐用年数			20年
年度	2025年実用化 (FITを想定)	2030	2050
単年度CO ₂ 削減量 (万t-CO ₂ /年)	0.837	4.2	20.9
累積CO ₂ 削減量 (万t-CO ₂)	0.837	12.6	272.0
CO ₂ 削減コスト (円/t-CO ₂)	29,870	29,870	22,401 以下

(4)事業化について

【事業化計画】

- ・実用化に向けた技術開発を継続するため、東京大学生産技術研究所(東大・生研)と全国16企業との共同研究を実施中(2021-2023年度)。
- ・実用化に向けた事業候補として、環境省委託事業「脱炭素・資源循環「まち・暮らし創生」FS委託業務一浪江町清戸漁港における波力発電FS調査(2020-2021年度)を実施し、事業性成立性を検討した。
- ・新産業創出、人材育成のため、平塚市と東大生研が連携協定を締結(2019年3月)し、第2期平塚波力発電計画(発電ファーム)について検討中。
- ・Yahooの平塚市への企業版ふるさと納税の資金により、第2期平塚波力発電計画の新技術について研究開発を実施中。
- ・他の波力発電開発者と協力して政府に陳情し、2025年に波力発電の固定価格FIT設定を期待し、それ以後に発電事業者による波力発電事業の開始を想定。

○事業化の体制

- ・本事業(2018~2021年度)の期間中、波力発電を全国に普及するため、企画・設計・許認可手続き等を行うコンサルタント会社「e-ウェーブR&D」を平塚市に設立した(2021年9月1日)。設立者は、機械設計「ワイテック」、海洋設備施工・環境調査「東京久栄」、海洋施設の構造解析「サンユウシビルエンジニアリング」および平塚市である。
- ・波力発電装置(ジャケット構造物に油圧発電部品を擬装する形式)の製作は、久慈波力発電、平塚波力発電の製作実績のある3社(川田工業、川崎重工業・精密機械ロボットカンパニー、東洋電機製造)が分担する予定である。

○事業展開における普及の見込み

全国には波力発電所設置の適地である3,000ヶ所の漁港、1,000ヶ所の港湾が存在し、ここには既設の送電線が海の近くまで伸びていること、沿岸部に設置するため海底ケーブルが必要ないことから送電線敷設のコストが小さく有利である。波力発電装置は、沿岸部の水深3~4mの浅瀬に設置するため、漁業の邪魔にならず、波力発電装置は漁礁効果をもち、多種類の魚が集まることから、漁業関係者の理解が得やすい。今後、波エネルギーの大きい全国各地への普及が期待される。

○年度別販売見込み

【提案時当初計画】 ※実施期間中における分科会等で計画変更が認められた場合等はその設定値

年度	2025	2030
目標単年度販売台数(台)	1.43万kW	1.43万kW
目標累積販売台数(台)	7.15万kW	14.3万kW
目標販売価格(円/台)	150万円/kW	100万円/kW

【本資料作成時点見込み】

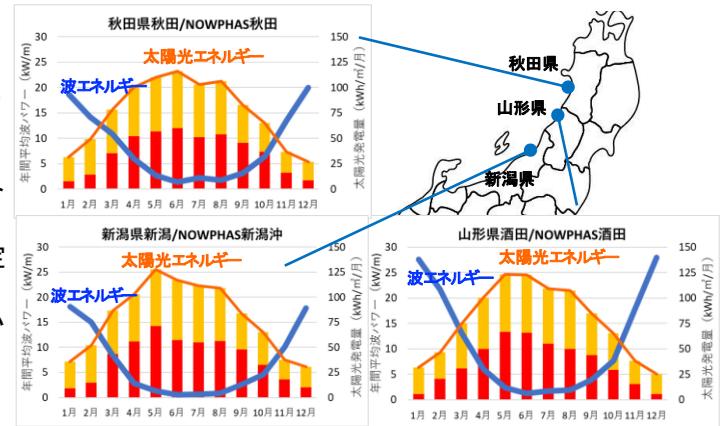
本表の年次は固定

年度	2025 (販売開始年度を記載)	2030	2050
目標単年度販売台数(台)	1MW×5台	1MW×5台	1MW×10台
目標累積販売台数(台)	1MW×5台	1MW×25台	1MW×125台
目標販売価格(円/台)	10億円/台	10億円/台	5億円/台

○量産化・販売計画

- ・2025年までに、次の2項目の実用化を推進する。また、発電事業者を募り、波力発電の水平展開を開始する。
- ・日産自動車との共同研究により、発電機にEV用モータを使用し、EVの革新技術に適宜取り入れ、大幅なコストダウンと量産化を目指して技術開発を実施中である。

・日本海側の地域は、太陽光エネルギーが冬季に大幅に減少するが、反対に波エネルギーは冬季に増加するので、両者を合わせた太陽光・波力の複合発電が適しており(右図)、年間を通じて安定した発電が見込める。また、夏季には波が小さいので、海域工事も容易で低コスト化で期待できる。



- ・2030年を目処として、SEP船を導入し、波力発電装置の低コスト化と設置範囲の拡大を推進する。

○事業拡大シナリオ

年度	2022	2025	2030	2050 (最終目標)
技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・EV用モータの発電機への転用による量産化と低コスト化 ・複合発電のEMS開発、発電効率の最適化 	<ul style="list-style-type: none"> ・発電装置のユニット化等による製造・設置の低コスト化の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・SEP船による発電装置の設置・維持管理法の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・発電装置の設置・維持管理・撤去・更新までの一連のスキームを開発
事業展開	<ul style="list-style-type: none"> ・全国の漁港・港湾の波力発電導入の適地調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・日本海側を中心に複合発電を展開 ・FIT価格の設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・SEP船導入による国内設置海域の拡大 	<ul style="list-style-type: none"> ・日本全国の漁港・港湾へ波力発電を展開

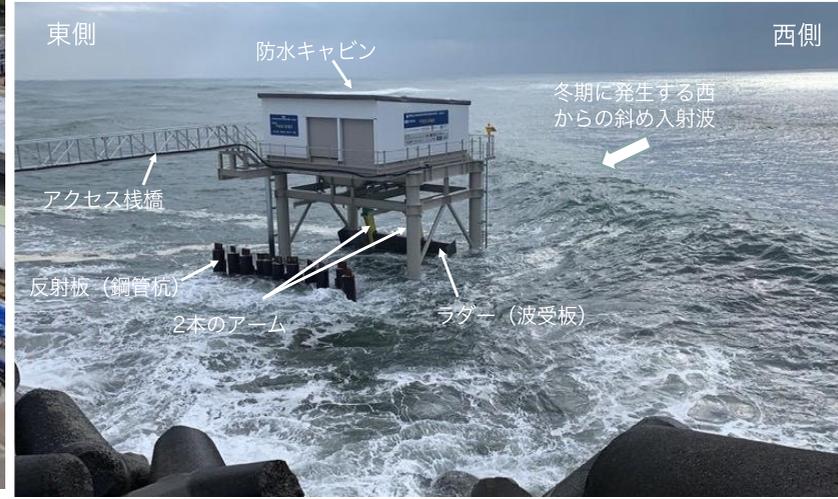
○事業化におけるリスク(課題・障害)とその対策

- ・太陽光発電や風力発電では、電気事業法の大幅な規制緩和が実施されている。
- ・一方、波力発電はわが国における事例が少ないため、電気事業法では原子力発電と同様に、工事計画認可申請書を作成し、厳密な審査を受けて、設置工事前に、経産大臣の認可を得る必要がある。事業開始前に、多くの時間と費用を必要とし発電事業者の負担が大きい。このため、風力発電と同様の規制緩和が必要である。
- ・波力発電は波エネルギーが大きい場所が適地であるが、現状のクレーン船では波高1m以下が作業可能であり、波の大きい太平洋岸(例えば、福島県、茨城県など)では設置工事がほとんど不可能である。洋上風力発電のように、波力発電専用のSEP(自己昇降式作業台船)を随時使用できる体制が不可欠である。

工場での波力発電装置の製作状況



平塚波力発電所 (45kW) (Wave Rudder式) の構造と発電状況



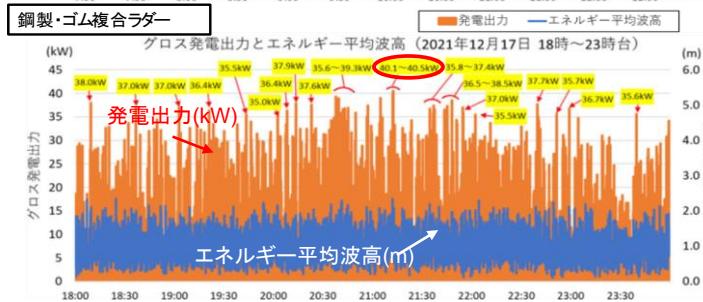
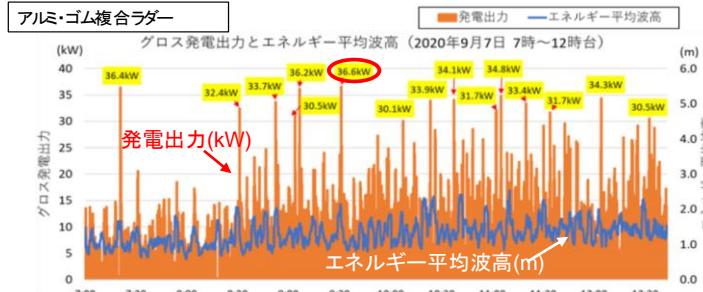
平塚波力発電所の撤去 (2022年2月)



2種類のラダーによる発電データ

環境省委託事業：令和2年度CO2排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業（2018年度～2021年度、4年間）
「反射板を活用した油圧シリンダ鉛直配置式波力発電装置（平塚波力発電所）の海域実証」

最大出力36.6kW（アルミ）、40.5kW（鋼製）を記録（設計目標45kW）



平塚波力発電所の漁礁効果
(平塚漁業協同組合の調査による)

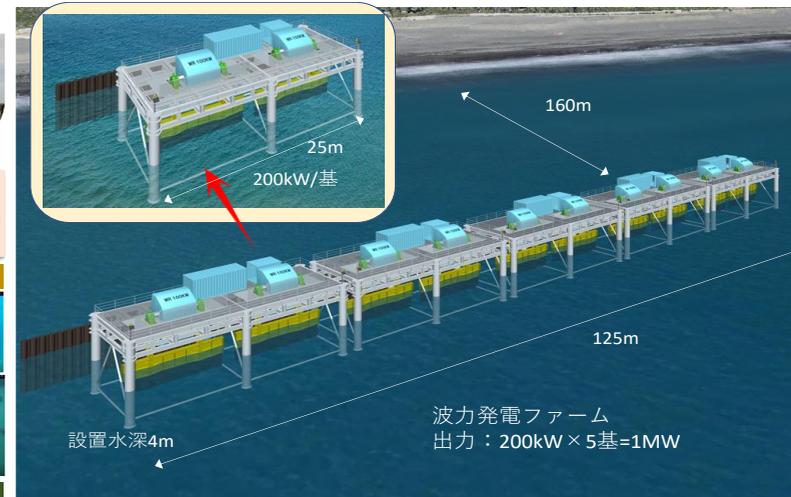
ラダーの動きが魚を呼び寄せる…?!
波力発電所の漁礁効果

令和2年8月下旬から令和4年1月末日まで、千葉県産漁業協同組合に集まる魚類について、ボートの先に設置した水中ビデオカメラを使用して計17箇所の調査を行い、16科20種の魚を確認しました。

魚種	確認された場所
ラダー周辺	ラダー周辺
インドイ	インドイ
ジャケット構造物の支柱	ジャケット構造物の支柱
カタクリイワシ	カタクリイワシ
スズキ、ヒラスズキの群れ	スズキ、ヒラスズキの群れ
インドイ、タカハシイワシ	インドイ、タカハシイワシ
ヤガラ鰯ヒクサフグ	ヤガラ鰯ヒクサフグ
オヤビツヤ	オヤビツヤ
瀬波ブロック等	瀬波ブロック等

発電施設に寄り添って泳ぐ魚たちの行動が多々見られ、特に揺れ動くラダー(波受板)を怖がる様子は見られませんでした。波受板の動きによって生じる水流が魚類の集積効果を高めている可能性が考えられます。

2025年以降の実用化構想：波力発電ファーム (1MW)



事後評価結果

評価点 5.0点（10点満点中。（10点：特に優れている、8点：優れている、6点：問題ない、4点：多少問題がある、2点：大きな問題がある））

評価コメント

[評価される点]

- ・ ゴムとアルミの複合ラダーや油圧調整方法などに関する複数の特許の取得/申請を行っていること、事業コンサルタント会社を設立し事業展開に着手していること、及び積極的な広報活動を行っていることは評価できる。

[今後の課題]

- ・ 実証期間中の台風による破損事故の原因及び対策を定量的なデータとともに公表するとともに、提案するシステムの耐久性・安全性を検証することが望まれる。
- ・ 想定した設備利用率が達成できなかった。その原因として、波のラダーへの斜め入射や、高潮位時におけるラダーと反射板の水没を挙げているが、波力発電機の設計の改善と適切な設置位置の決定によって、設備利用率目標を達成できることを実証すべきである。

[その他特記事項]

- ・ 波力発電装置には魚礁効果があるとの報告であったが、漁業組合の自主的な調査に委ねるのではなく設置者として戦略的に実施し、昼夜や季節を通じ因果関係の究明に適うデータを取得することが望まれる。

[事業化に向けたコメント]

- ・ 洋上風力などと比較したときに事業化の初期段階では高コストとなることは当然であるが、提案する発電システムの普及のためには、設備利用率を向上させるとともに防波堤利用や洋上風力との組み合わせなどの検討が望まれる。
- ・ 今回取得されたデータを踏まえて発電システム設置位置と方法についての基準を明確にすべきである。また、発電システムの市場ポテンシャルを示すために、設備利用率、設置・運転コストと発電単価の関係を日本全国の候補地で調査することが望まれる。