

海流発電実証試験の概要と信頼性評価・事業性評価

Demonstration Test of Ocean Current Turbine System for Reliability and Economic Performance Evaluation

百 々 泰 技術開発本部技術基盤センターシステムエンジニアリンググループ
 越 智 文 俊 技術開発本部技術企画部計画管理グループ

日本近海を流れる黒潮は世界でも有数の強い海流であり、変動が少なく安定した再生可能エネルギー源として期 待されている. IHI は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業として、この黒 潮からエネルギーを得て発電する水中浮遊式海流発電システムを開発している. そして 2017 年までに、この水中 浮遊式海流発電システムの基本コンセプトの実現可能性を実証した.本稿では、2019 年から 2021 年に実際の黒潮海 域において実施した実海域実証試験を中心に紹介し、さらに、本システムを離島の電力源として利用した場合の経 済性についても述べる.

The Kuroshio current flowing near Japan is one of the strongest ocean currents in the world and expected to be a stable power source of renewable energy. Supported by NEDO, IHI is developing a floating-type ocean current turbine system to utilize the Kuroshio current for power generation. We had demonstrated basic concepts of the floating type ocean current turbine system by 2017. In this paper, we will introduce the new demonstration test from 2019 to 2021 towards practical use and implementation of the system. Power generation stability, which is important in practical use, was confirmed in actual Kuroshio current. Based on the acquired data during the test, we analyze the life cycle cost of the system for commercial use in the future.

1. 緒 言

海流は昼夜や季節による流れの速さ,向きの変動が比較 的少なく,長期的かつ連続的に安定したエネルギーを得る ことができる海洋資源である.特に日本近海を流れる黒潮 は世界でも有数の強い海流であり,将来日本のエネルギー の一翼を担うことが期待される有望な再生可能エネルギー 源である.

IHI は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開 発機構(NEDO)の助成事業として,第1図に示すよう な海流からエネルギーを得て発電する水中浮遊式海流発電 システムの開発を進めてきた.2017年までに新たに設計 した実証試験機「かいりゅう」によって黒潮から実際に



第1図水中浮遊式海流発電システムの概念図 Fig.1 Concept of floating type ocean current turbine system

エネルギーを取り出す世界初の実海域実証試験を成功させた^{(1)~(3)}. **第2図**に「かいりゅう」の外観を示す.

今回はそれに続く新たな実証試験として、より実用レベルの発電を安定的に行うための発電安定性確認試験と、実際の黒潮海域において一定時間連続した発電を行って特性を評価する黒潮ホバリング試験を実施した.その成果について、本稿と本号の別論文とで併せて紹介する.

2. 新たな実証試験の概要

本試験は第3図に示すように、鹿児島県谷山港を基地 港として、内閣府総合海洋政策推進事務局から実証フィー ルドに選定された鹿児島県十島村口之島海域周辺と、屋久 島北側海域、および鹿児島湾内にて実施した、期間は



第2図 実証試験機「かいりゅう」の外観 Fig.2 Demonstration machine "KAIRYU"



(注) 色の違いは流速の速さを示す.

第3図 実証試験海域 Fig.3 Sea area of demonstration tests

2021 年 7 月初旬から 9 月末までの約 3 か月間に及び, その間台風からの退避やメンテナンスのための帰港を挟み ながら断続的に試験を行った.

発電安定性確認試験は、さまざまな流速において安定し て効率良く発電を行うための制御方法を調整する目的の試 験である.この試験では流速を自由に変化させて行う必要 があるが、自然海流の中では任意の流速を自由に得ること ができない、したがって、流速が安定した海域で実証試験 機を曳航し、その速度を変化させることで海流を模擬して 試験することにした.

また黒潮ホバリング試験は、時々刻々変化する自然海流 の中で安定して発電を行い、実際に事業化した際にどれほ どのエネルギーを得ることができるかを推定する目的の試 験である.したがって、実際に黒潮が流れている海域に実 証試験機を定点保持し、潮汐によって海流の流速が変化す る一定期間,発電の様子や試験機の安定性などを観測する ことにした.

3. 新たな実証試験の目標と試験結果の評価

今回の実証試験は以下の五つの目標を立てて実施した. (1) システムの構造,機能部品の長期信頼性確認

2017年の実証試験結果を基に実証試験機を改造 し,水中浮遊時の安定性を確認するとともに,実海 域での内蔵機器の消費電力を推定し,試験後の開放 点検と合わせて各機能部品の長期信頼性を確認する.

(2) 設備利用率の推定

この技術を事業化した場合の経済性評価の指標と

なる設備利用率を推定する.設備利用率とは,所定 の期間中,実際に発電した電力量を,同じ期間中定 格で運転した場合の発電量で除した値のことである. 本試験では,実測する実証試験機のパワーカーブ (海流の流速と発電量の関係)と,別途年間をつう じて計測する実証試験海域の流速を掛け合わせ,(1) で推定した消費電力を差し引いて推定する.

- (3) 設置および運用、メンテナンス工事の経済性確認 海洋機器では、設置やメンテナンス工事に関する 工法の確立が重要な課題となる。特にコスト低減の 観点から、気象影響を最小限にする工法の確立が必 要不可欠であるため、本試験で用いたさまざまな工 法を比較評価する。
- (4) 離島環境での電力系統への接続検討

電力供給源をディーゼル発電に頼る離島環境においては特に,海流発電のような再生可能エネルギー は将来有望な資源として期待されている.そこで, 海流発電システムを離島の電力系統に接続する場合 の課題や問題点を明確にし,実際に系統連系する際 のシステムの詳細構成を検討し評価する.

(5) 事業化した際の経済性評価

上記の目標(1)~(4)から得た知見を基に,海流 発電システムを事業化した際の経済性について評価 する.

本稿ではこれらの目標のなかでも特に(1)システムの構造,機能部品の長期信頼性確認と,(5)事業化した際の経済性評価について述べる.ほかの項目については,本号の別論文「海流発電実証試験の発電性能評価」で紹介する.

4. 実証試験機

実証試験機「かいりゅう」の概要を第4図に示す.こ の「かいりゅう」は2017年の実海域実証試験用に開発し た機体で,海流発電のコンセプトを実証するために設計・ 製作した.このため長期運用性や効率よりも試験データを 確実に取得することを優先しており,冗長化させた制御装 置を搭載するだけでなく幾重にも安全対策が講じられてい る.

またタービン翼を除いた船体(浮体)には潜航するた めに海水を吸い込む浮力調整装置や、3か所に配したタン クの作動油を移動させることで重心位置を変化させ水中で の姿勢を安定させる姿勢制御装置を備えている.この 「かいりゅう」の主要仕様を以下にまとめる.



実証試験機「かいりゅう」の主要な仕様

定格出力	: 100 kW
定格流速	: 1.5 m/s
浮体全長全幅	:約 20×20 m
重量	:約 330 t
タービン翼直径	:約 11 m (事業化時の 1/3 程度を想
	定)

本試験では実用化に向けて,長期信頼性の確保,省エネ 化,長期連続運用のための保全性といった,さまざまな データを取得する必要がある.しかし,自然海流の中で 10 m を超えるような大径タービン翼を回転し,長期にわ たって安定的にエネルギーを得ようとする機械装置は前例 がなく,その設計には細心の注意を払う必要があった.

そこで次のような三つの観点から設計を見直し改造を 行った.

設計見直しの観点

- ・発電プラントとしての機械装置
- ・海洋構造物としての機械装置
- ・運用開始後は容易にメンテナンスできない機械装置

つまり本実証試験機「かいりゅう」を発電プラントと して見たときに、必要になる保全性や異常時の対応機能な どをもたせるべく、実際に再生可能エネルギーの発電プラ ントを視察したり、プラントの保全担当者を招いてメンテ ナンスのポイントを指摘してもらったりした.

また海洋構造物としての視点を得るためにジャパンマ リンユナイテッド株式会社の協力を得て設計レビューをや り直した.さらに,運用を開始したら容易にメンテナンス できない機械装置として株式会社 IHI エアロスペースの イプシロンロケットの担当者の協力を得て,事前の機能検 証や故障に対するリスク評価と対応策の検討を実施した. その結果,実海域現場でのさまざまな困難を排して実証試 験を行い所定のデータを得ることに成功した.実際の実証 試験の様子を**第5**図に示す.

5. 曳航試験船団の構成

本試験では、さまざまな流速での姿勢安定性確認や発電 特性の計測を行う必要がある.また、黒潮流域の複数箇所 で流速特性を観測するため短期間で試験場所を移動しなけ ればならない.そのような事情から、本システムは本来海 底に係留して発電するコンセプトであるが、本試験では**第** 6 図のように台船から水深約 100 m に^{許22}



第5図 実証試験の様子 Fig.5 Photo of actual demonstration test



第6図 実証試験の曳航船団構成 **Fig.6** Constitution of the fleet for demonstration test

に実証試験機を係留し、これら全体を曳航することで海流 の流れの中に「かいりゅう」が浮遊する状態を模擬した.

実証試験機の制御は台船上に設置した制御室から行い, 発電した電力は係留索に沿わせた送電ケーブルから台船上 に回収して計測した.また台船の位置や速度は前方の曳船 が制御し,黒潮ホバリング試験のときにはこの台船を GPS で監視して黒潮海流上で定点保持するように試験を 行った.

6. 機能部品の長期信頼性確認

本試験では実際の黒潮海流でのパワーカーブのほか,さ まざまな成果が得られたが,本稿では特に機能部品の長期 信頼性確認のために行った浮体構造に対する強度評価につ いて説明する.

実証試験機の浮体には設計時の強度評価を検証するため、さまざまな場所にひずみセンサを取り付けた.特に タービン翼が取り付けられている浮体後部には、上下左右 にひずみセンサを設置してタービン翼から浮体後部に作用 する曲げ荷重や引張り荷重を計測した⁽⁴⁾.このひずみセ ンサを設置した浮体内部の構造を**第7図**に示す.

第8図は、浮体右ポッドのひずみセンサ設置区間に取り付けられたひずみセンサの値から計算した周方向応力の時間変化を示す. 横軸の時間範囲は強度評価上,最大応力が発生するクレーンによる吊上げ時から、海中に下ろして完全に没水するまでである.

この計測は試験の都合上, 第9図で示すように吊り上 げた状態で計測を開始しているので, どの応力値も0か ら始まっていない.しかし下側の応力だけは顕著にマイナ ス側に大きい値となっている.これは吊上げ用のスリング による周方向の圧縮応力の可能性もあるが,ひずみセンサ の設置日と計測日では気温や環境の差もあるため,ポッド



第7凶 浮体内部構造 Fig. 7 Internal structure of the pod aft part







Fig.9 実証試験機の市上にの成于 **Fig.9** Lifted demonstration machine

自体の温度変化に伴うひずみを検出しているとも考えられる.

また、着水後すぐに下側の圧縮応力が増すことが分かる. 最大深度到達時までの変化量は約 4.2 MPa で、これはポッ ド下側の到達水深 5.7 m 時の外圧から単純計算したフープ 応力値(薄肉円筒容器が受ける周方向の応力値)である 4.47 MPa と近い値となっている.また、左側と右側の応力 も同じように圧縮方向へ変化するが、変化し始めのグラフ の傾斜、すなわち応力の時間変化率は左側と右側でかなり 異なっている.これは吊上げ用のスリングが右ポッドの左 上方に斜めにかけられている影響で、着水後の荷重の抜け 方に差があるためと思われる.しかし最大水深までの変化 量は計算値が 3.29 MPa なのに対して約 3.0 MPa と想定に 近い値となっている.

次に,上側の応力値については,ほかのグラフと異なり 着水後 A 点までは僅かに引張り側に変化している.これ も同様に吊上げ用のスリングによる締め付けが着水によっ て緩和されるためと考えられるが,上側のひずみセンサ は、ほかのひずみセンサとは異なり、水に覆われるまでに 時間がかかるためこのような現象になったと考えている.

このほかにも設計時に想定したさまざまな荷重ケースに ついて検証したが、いずれの場合でも想定した応力を十分 に下回る値となっており、設計手法に問題がなかったもの と考えている.

7. 事業化した際の経済性評価

海流発電システムを離島への電力供給に利用した場合を 想定し、コスト試算を行った、コスト試算の条件は下記の とおりとした.

コスト試算の条件

·電力供給先 :種子島

・発電規模 : 10 MW(2 MW/機×5機)

・事業期間 : 20 年

海流発電システムの設置を想定するエリアの選定に当た り, 第10 図に示すように海流シミュレーションによる海 流流速の分布図を作成し,平均速度の速い,すなわち海流 の強いエリアを選定した.選定したエリアの流速の時刻歴 に対して,試験データから得られたパワーカーブを用いて 発電量の推定を行ったところ設備利用率 43% (定期検査 の停止期間込み)の見通しを得た.

この発電量に対して, CAPEX (Capital Expenditure : 設備投資のための支出)と OPEX (Operating Expense : 運営のための支出)を 20 年の事業期間で推定し, 発電コ ストを試算したところ,約 56.5 円/kWh の見通しを得 た.設備規模当たりの発電コストは**第 11 図**に示すように





第11図 海流発電コスト見通し



約 300 万円/kW の見通しとなった.

この発電コストは太陽光などのほかの再生可能エネル ギーの発電コストに比べると高い見通しである.内訳は OPEX が約 25%, CAPEX が約 75%を占めている.海流 発電システムの製造コストは 50%程度であり,40%程度 は海上工事・海底ケーブル設置に関連する費用である.海 上工事・海底ケーブル設置に関しては現在設置計画が進ん でいる洋上風力発電の技術と共通する部分が多いため,今 後コストダウンが進んでいくことが見込まれる.

8. 今後の課題

8.1 海流シミュレーション精度の向上と実測データの 充実

海洋シミュレーション技術による海流の推定精度は,さ まざまな改良によって向上しているが,海流発電の事業性 を確実に予測するためには,さらなる精度の向上が必要で ある.

例えば、海洋学で用いられる海流シミュレーションの空間分解能や時間スケールに関しては、海流発電事業における設置地点の検討のために必要な空間分解能(0.1 ~ 0.2 km)で、短期(数日)・中期(~数か月)・長期(年~事業期間)の海流流況を予測できる手法の構築が求められる。

推定精度向上に向けては、シミュレーションモデルの妥

当性検証や実測データを用いたモデル改良に加え,さまざ まな海域の海流特性データの蓄積を進めるために,海流流 速や海底地形・地質などの実測海洋データの充実が有効か つ重要である.

このようなデータを取得できるツールや計測手法を用い て、海流発電の事業性の高い(流速が大きく、時間・空 間的に変動の少ない、離岸距離・水深が小さい)海域を 探索し、海洋エネルギー源としての海流特性の理解を促進 することが海流発電の実用化に近づくために重要である.

8.2 長期的な発電量の変動特性

海流は一定方向に流れているものの,その流速は季節を とおして変動する. 第12図に流速とその海流中に設置し た海流発電装置の発電量の5年間の推測値と,そのなか から5年間,1年間,1か月間の一例を抽出して示す.青 色が海流流速,黄色が設備利用率の推測値である.設備利 用率は,発電量に相当し,100%は常に海流発電装置の発 電能力いっぱいに発電することを指す.

この図から,流れの速い期間と遅い期間があり,流れの 速い期間では設備利用率がほぼ 100%の1 週間がある一 方で,ほぼ 0%になる場合もあることが分かる.これらを 通算した結果として,年間当たりの設備利用率では 40% 超になる.

発電量の変動はトカラ海峡付近を黒潮が流れる際の流量 や流軸の変化によって生じていると考えられる.この変動 を短期・中期・長期的に高い精度で予測し,発電計画につ なげることが海洋発電の事業化に重要である.

このように変動する流速の予測を用いて設備利用率を月 別に算出したものを第1表に示す.最高で92.3%という



 Fig. 12
 Ocean current and electric power outage time trend (Simulation)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10 月	11 月	12 月	平 均
2016 年											48.8	70.7	59.9
2017 年	49.2	92.3	63.0	48.6	65.6	53.0	26.7	22.3	36.8	56.7	48.8	26.2	48.8
2018 年	78.3	47.7	49.4	52.9	64.6	50.6	41.5	57.9	32.4	45.4	20.4	38.0	48.4
2019 年	28.8	44.3	59.0	79.8	60.7	48.7	57.8	45.2	67.5	59.4	12.8	31.4	49.6
2020 年	33.2	38.1	55.6	44.4	75.0	25.9	13.1	60.0	28.6	49.5	26.1	58.9	42.5
2021 年	48.9	18.3	47.0	47.5	47.6	50.0	47.6	45.8	30.1	55.7			44.1
平 均	47.7	48.1	54.8	54.6	62.7	45.7	37.3	46.2	39.1	53.4	31.4	45.0	47.2

第1表 D3 地点における月間設備利用率(シミュレーション)(単位:%) Table 1 Monthly capacity factor at point D3 (unit:%)

非常に高い利用率が得られる月から,最低では 12.8%と いう月もあることが分かる.今回の予測では、3~5月の 春先の時期は設備利用率が高く、11~12月の時期は利用 率が低い傾向が得られた.この予測はシミュレーションを 用いている.そのため、推定精度の向上が発電の運用見通 しの確からしさにつながるため、今後、さらなる精度向上 が望まれる.

8.3 海上工事の技術開発

水中浮遊式海流発電システムを実用化する際には,黒潮 流域の海上で設置工事やメンテナンスを容易とするため, 係留索・ダイナミックケーブル・アンカーなどから成る係 留システムの高機能化や,水中で脱着可能なコネクタなど の水中送電機器の導入が必須である.

黒潮流域の海上で設置工事やメンテナンスを容易とする ためには、係留システム以外にも**第13図**に示すような海 上工事の高度化が必要である.具体的には、機器の大型化 対応や海上作業工程の安全性を向上させることが求められ る.これによって海象が静穏なとき以外の条件でも作業が 可能になることで、海上作業の稼働率(作業可能な日数 の比率)を高めることができ、事業性の向上に寄与する.

海上作業の高度化の目標は,有義波高 1.5 m 以上での 作業が可能になることである. 有義波高とは,波を連続し て観測したとき,波高の高い方から順に全体の 1/3 の個数の波を選び,これらの波高を平均したものである. 有義波高 1.5 m はかなり荒れた海象であるが,この目標を達成することによって海上工事の稼働率を 6 割以上とすることが見込まれる. また,係留システムの設置や浮体と係留システムの接続・切り離しといった海上での作業工程の日程確保がしやすくなることにつながる.

また、浮体の接続・切り離し作業として1日での海上 施工を実現する技術として、ダイナミックポジショニング (DP)や多関節クレーン機能の付いた作業船や、係留点脱 着マニピュレータ、遠隔操作型の無人潜水機(ROV)など の導入による海上作業の機械化を進めることによって、機 材大型化への対応を実現する.あわせて、ダイバーレス化 により海上作業の安全性向上や海象による稼働率低下の抑 制につながる技術の構築が必要である.

9. まとめ

海流発電実証試験と試験結果に基づいた事業性評価について、その概要を報告した.さまざまな課題はあるものの本システムを用いて海流のもつエネルギーから発電することが十分に実現可能であるとの見通しを得た.また、本号の別論文で述べているように、設備利用率や離島電力系統



ダイバーによる係留点脱着などの 作業は,静穏な海象が必要



第 13 図 海上工事の高度化の例Fig. 13 Advanced marine operation for floating type ocean current turbine installation

に接続した場合の電力変動についても評価し,将来的に十 分実用化できるものと考える.ただし,実用化のためには 海上工事作業など,設置や運用にかかる発電コストを削減 する必要がある.洋上風力発電などの事業が国内において 進められていく過程でこれらのコスト削減の推移を注視し て,海流発電の実現性について引き続き検討していく.

— 謝 辞 —

本実証試験は NEDO の助成事業として実施したもので あり,多大なるご協力をいただいた.特に研究評価委員会 の横浜国立大学名誉教授亀本喬司委員長には多大なご指導 をたまわり感謝申し上げます.

参考文献

(1) Y. Dodo et.al. : Development and design of a floating type ocean current turbine system, Practical

Design of Ships and Other Floating Structures, (2019), pp. 732 -755

- (2) 株式会社 IHI:世界最大級の海流発電システムを世界で初めて実証,IHI 技報, Vol. 57, No. 4, 2017 年 12月, pp. 10 - 13
- (3) M. Shimizu, S. Nagaya, T. Ueno, H. Saito, S. Murata and A. Ito : Development and Demonstration test for Floating Type Ocean Current Turbine System conducted in KUROSHIO CURRENT, Grand Renewable Energy 2018, Japan council for Renewable Energy, (2018), p. 239
- (4) 百々 泰,岡田哲男,長屋茂樹,石黒泰大:実海 域実証試験における海流発電ポッドの応力計測と評
 価,日本船舶海洋工学会講演会論文集,第34号, 2022年, pp.563 - 565