

無人化および ICT 技術を用いた潮流発電機設置工事

東洋建設株式会社 ○久富 真悟
九電みらいエナジー株式会社 平安山 勝弘
東洋建設株式会社 正会員 古畑 亜佑美

1. はじめに

我が国においては、2050 年カーボンニュートラル社会の実現に向け、再生可能エネルギーの導入拡大は喫緊の課題となっている。海洋に囲まれた日本において、潮流発電は安定性や予測性の高さに加え、離島地域のエネルギー自立にも寄与しうる新たな選択肢として注目を集めている¹⁾。しかし、潮流発電機の建設は、国内に事例が無く、外洋の潮流や波浪の影響に耐え、適切な作業能力を備えた船舶が必要となる。一方、近年は海洋作業の安全性向上および効率化、品質管理の高度化を目的として ICT や無人化技術が急速に発展しつつある。本稿では、長崎県五島市奈留瀬戸にて実施した 1.1MW 潮流発電機の設置工事（および 0.5MW 発電機の回収工事）において、安全性の担保を目的とした作業船の船体シミュレーションと実海域実験等を実施し、DPS（Dynamic Positioning System）の現地適用性の検討を行い一定の成果が得られたので報告する。加えて、施工効率と安全性向上のため、無人化技術（遠隔玉掛装置，ROV）および ICT（クレーン作業管理システム）を活用した結果、得られた成果について報告する。

2. 潮流発電の概要と原理

潮流発電は、月や太陽による潮汐力に起因する海水の流れ（潮流）を利用し、水中タービンによって電力を得る発電方式である。発電原理は、潮位差によって発生する規則的な潮流の運動エネルギーをタービンで回収し、その機械的回転力を発電機で電力に変換するというものである。潮流は、日間変動（満潮・干潮）と月間変動（大潮・小潮）の 2 つの規則性をもち、たとえば 1 日 2 回の干満を周期的に繰り返す。このため、発電量の高度な予測が可能であり、風力や太陽光と異なり、天候や季節変動の影響が少ない再生可能エネルギーとして評価されている。図-1 に潮流発電の特長を示す。設置適地は、潮流速度や水深などの自然条件を満たす海域が必要であり、五島市奈留瀬戸のような急流海域は理想的な候補地の一つである。タービン形式は欧州を中心に多様なタイプ²⁾（図-2）が研究されており、本事業では英国で最も実績のある水平軸タービン（ピッチ・ヨー可変システム）を採用した。

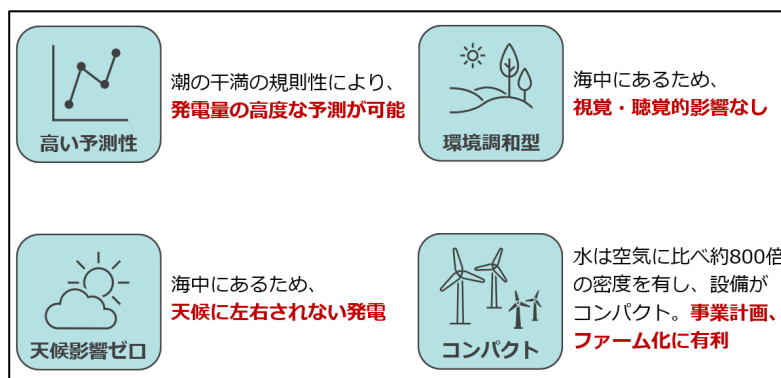


図-1 潮流発電の特長

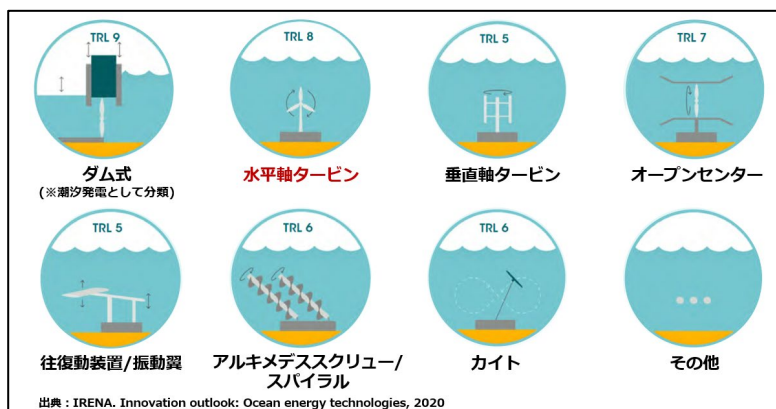


図-2 潮流発電の形式

キーワード 潮流発電, 海洋土木工事, 無人化, ICT, DPS

連絡先 〒101-0051 東京都千代田区神田神保町一丁目 105 番地 東洋建設（株）海洋開発部 TEL03-6361-5462

表-1 事業概要と潮流発電機仕様

		Phase1 2014～2021 年度	Phase2 2022～2025 年度
概要		世界初の商用潮流発電事業で実績を有する潮流発電機で国内実証を実施	我が国に適した潮流発電の実用化に向けた取り組みを実施
発電機の諸元	定格出力	500kW	1,100kW
	定格流速	3.1m/s	2.7m/s
	ロータ径	17.2m	18.4m
	最大高さ	22.4m	23.0m
	回転数	7rpm	14rpm
	ヨー制御	×（下げ潮のみ対応）	○（上げ潮・下げ潮に対応）
	ピッチ制御	×（翼角固定）	○（翼角変動）
発電電力の扱い		熱変換し消費	系統設備と連系し送電

表-2 これまでの実績と予定

Phase1		
	2014 年 6 月	潮流発電技術実用化推進事業 開始
	2021 年 1 月	500kW 潮流発電機設置完了・発電開始 ～11 か月間の実証運転（非連系）～
	2021 年 12 月	発電終了
	2022 年 3 月	潮流発電技術実用化推進事業 完了
Phase2		
	2022 年 4 月	潮流発電による地域の脱炭素化モデル構築事業 開始
	2023 年 12 月	既設 500kW 潮流発電機引き揚げ
	2025 年 1 月	国内にて 1,100kW 潮流発電機に改造
	2025 年 2 月	1,100kW 潮流発電機設置
	2025 年 5 月	経済産業省による使用前検査合格, および五島市の電力系統に接続し、送電開始
	2026 年 3 月	潮流発電による地域の脱炭素化モデル構築事業 完了予定

3. 潮流発電実証事業の紹介

本事業は、環境省による委託事業として 2014～21 年度において「潮流発電技術実用化推進事業」、2022～25 年度において「潮流発電による地域の脱炭素化モデル構築事業」と段階的に実施・計画されており、国内初の大規模・商用規模の潮流発電システムの設置・運転をはじめとした事業化に向けた取り組みが進められている。表-1 に事業概要と潮流発電機仕様、表-2 に事業の実績・予定を示す。

(1) 施工海域と自然条件

奈留瀬戸(図-3)は満潮・干潮の潮位差が大きく、最大で潮流速度は 6 ノット（約 3m/s）にも達する急流海域である。設置場所は水深約 40m で、周辺に多数の島嶼が点在しているため、複雑な海象条件を有している。



地図データ ©2025 TMap Mobility, Google

図-3 潮流発電実証事業の実施場所

表-3 工事概要

工事内容	施工時期	主な施工内容	規模/数量	備考
既設発電機回収	2023年12月	0.5MW発電機回収	本体重量:115t ブレード直径:17m ジャンパーケーブル長:100m	英国PROTEUS社製
発電機設置	2025年2月	1.1MW発電機設置	本体重量:155t ブレード直径:18m ジャンパーケーブル長:115m	英国PROTEUS社製

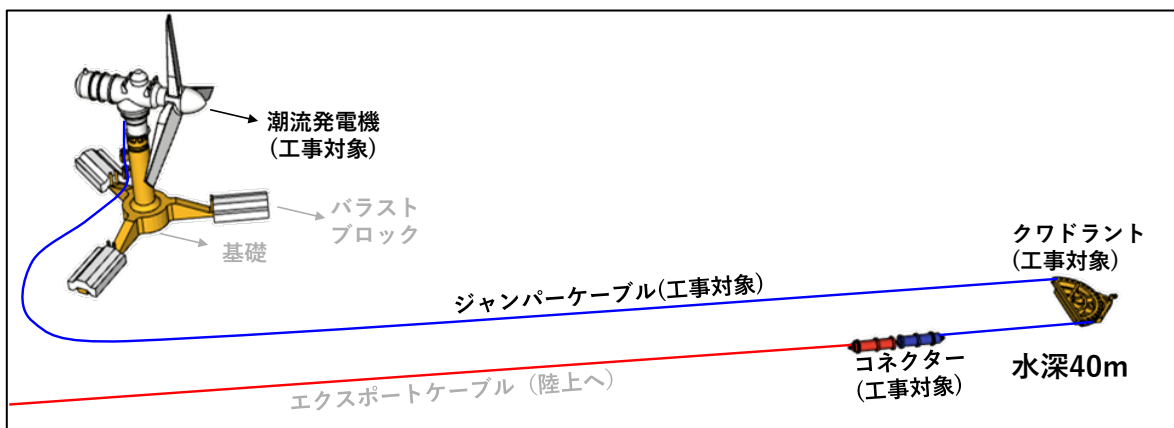


図-4 工事概要図

(2) 実証事業の経緯

Phase1（2014～2021年度）では500kW潮流発電実証機を設置・運転し、約11か月間の発電データを取得するなど基礎的検証を行った。Phase2（2022～2025年度）では、既設500kW機の引き揚げとヨー・ピッチ制御等の機能付加を伴う1.1MW級潮流発電機への改造・再設置、および運転・送電実証を行っている。

4. 潮流発電機回収・設置工事概要

本工事の施工概要を表-3に示す。また、工事概要図（図-4）においては、黒文字が今回の工事対象範囲を示し、グレー文字は対象外部分を示している。

5. 作業船の定点保持に関する検討

(1) DPS搭載自航式多目的船の導入

従来の海洋工事では作業船は、アンカー係留（錨泊）により施工地点を保持する手法が一般的である。しかし今回の奈留瀬戸は潮流が非常に速く、また錨泊に適した安定地形が少ないことから、DPS（Dynamic Positioning System: 定点保持機能）を搭載した自航式多目的船（AUGUST EXPLORER）を適用した。AUGUST EXPLORERはスラスター5基を備え、自律的に自己位置を保持可能であり、アンカーや補助船なしで定点保持ができる。表-4にAUGUST EXPLORERの主な仕様を示す。

(2) 船舶の信頼性の獲得

潮流発電設置のような大規模・重量物の海中施工において、“船舶の定点保持性能”は工事全体の品質と安全性の根幹となる。本事業では英国の発電機製造元のDPSに対する要求水準がかなり高かった。AUGUST EXPLORERのDPSはNK（日本海事協会）のClass2認証を受けており、5基のスラスターのうち1基が損傷し

表-4 AUGUST EXPLORERの主な仕様

長さ	89.90m	深さ	5.00m	最大吊荷重	500t
幅	27.00m	喫水	3.95m	スラスター数	5基
高さ	30.17m	総トン数	4,831t	DPS認証	Class2

外観



でも定点保持を維持できる能力を持っているが、発電機製造元の要求は 2 基のスラスタが損傷しても定点保持を維持できるものであった。また、AUGUST EXPLORER は潮流が速い海域での施工実績が無いことから、作業中の位置精度、耐流速性能等に大きな懸念を抱いていた。このため発電機製造元からは、下記の試験による船舶の信頼性の担保が求められた。

- ・潮流および風条件を変数としたシミュレーション
- ・現地海域の高流速下での定点保持試験

a) 潮流・風条件を変数としたシミュレーション

本工事においては、潮流発電機設置に用いる DPS 自航船の定点保持性能を評価・検証する重要な課題として、潮流・風条件を変数としたシミュレーションを実施した。具体的には、施工時に想定される潮流速度 (3knot)、強風 (15m/s)、そして作業中にスラスタ損傷が生じた場合 (5 基中 1~2 基停止) の各条件を設定し、DPS による定点保持の船体安定性のシミュレーションを行った。図-5 にスラスタの配置を示し、図-6 には流速 3knot 時の DPS シミュレーション結果を示す。ここでスラスタ最大負荷率は、各スラスタの実出力値を最大出力値で除した比率であり、負荷率が 100% を超えると船体の定点保持性能が損なわれ、不安定となる懸念が生じる。シミュレーション結果によると、スラスタが 1 基損傷した場合でも、風速 15m/s 時において十分な定点保持が可能であった。しかし、スラスタが 2 基損傷し、かつ風速が 15m/s となった場合には、最大負荷率が 100% に達し、船体が不安定となることが確認された。

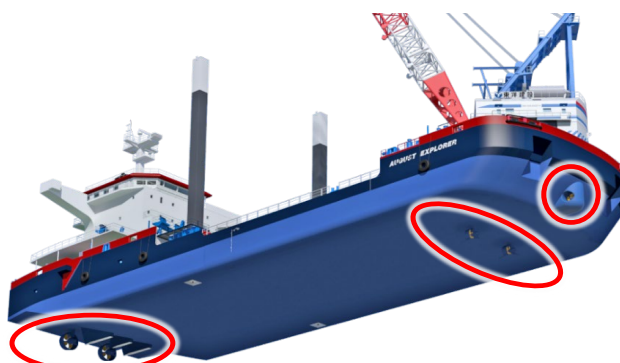


図-5 スラスタの配置

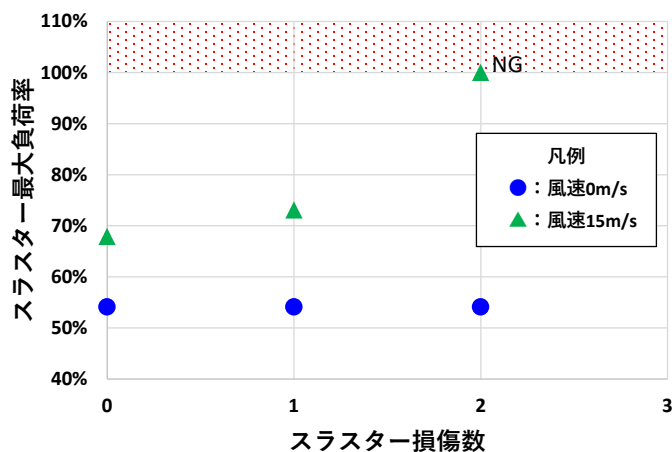


図-6 流速 3knot 時の DPS シミュレーション結果

b) 現地海域の高流速下での定点保持試験

本工事では、施工対象海域である奈留瀬戸において、AUGUST EXPLORER による潮流発電機の回収・設置作業に際し、シミュレーション評価のみならず、現場での実際の潮流条件下における定点保持性能の実証試験を実施した。本試験では、施工予定位置付近に AUGUST EXPLORER を投入し、DPS を作動させて指定座標上で作業船を長時間保持した。干満による流速・風速の変化への対応に加えて、スラスタの損傷も想定し、意図的に一部のスラスタを停止させて船体の安定性や定点保持性能に及ぼす影響について評価した。まず、搭載されている 5 基のスラスタのうち、1 基または 2 基が停止した場合の DPS 定点保持性能を検証した。試験結果を図-7 に示す。発電機製造元

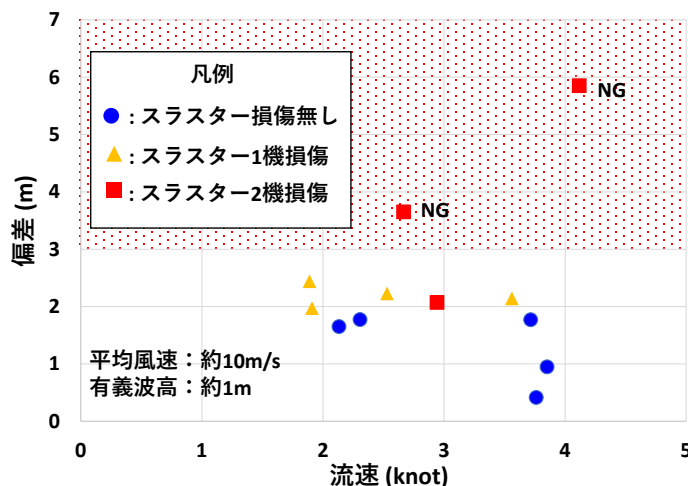


図-7 現地海域での定点保持試験結果

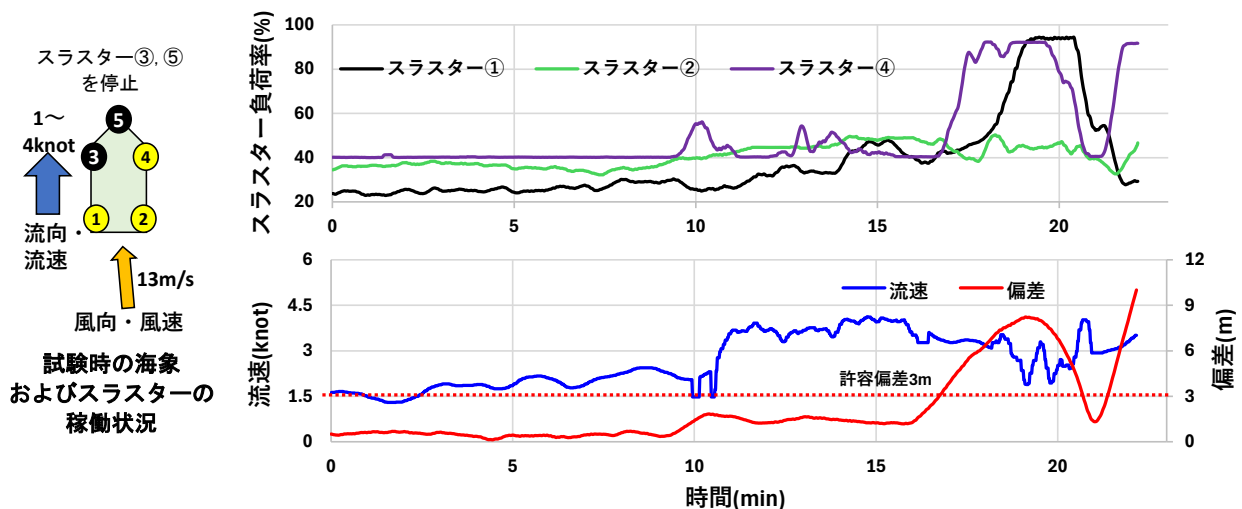


図-8 スラスタを2基停止させた場合の定点保持試験結果

との事前協議により、甲板上でジャンパーケーブルの接続等に約 6 時間を要する作業時の船体位置の許容偏差（ズレ）は半径 3m 以内と定めた。試験時は平均風速約 10m/s、有義波高約 1m の条件下で実施した。結果として、スラスタが 1 基損傷した場合には約 4knot まで安定して定点保持が可能であり、2 基損傷した場合には約 2.5knot で許容偏差を超え、不安定となることが確認された。次に 2 基のスラスタを停止させた状態で定点保持を行い、潮汐による流速が 1knot から 4knot まで変化した場合のスラスタの負荷率および船体位置偏差を計測した。なお、試験時の平均風速は約 13m/s、有義波高は 1m であった。試験開始から約 10 分間で流速が約 4knot まで上昇し、その後 15 分を過ぎた頃から船体の偏差が大きくなり始めた。これに伴い、スラスタの負荷率も急激に増加する傾向が確認された。最終的には船体位置偏差が許容値である半径 3m を超え、DPS による定点保持が困難となり制御不能に陥った。図-8 にスラスタを 2 基停止させた場合の定点保持試験結果を示す。上記 2 つの試験結果を踏まえ、発電機製造元との協議を実施した。その結果、スラスタの損傷や高風速条件下においても安全性を最優先とするため、流速が 2knot 以下の環境下であれば AUGUST EXPLORER による定点保持が十分可能であるとの結論に至った。この結論は、潮流発電機の回収・設置作業におけるリスク低減の根拠となった。

c) 施工時の定点保持状況

本工事では、図-4 に示す潮流発電機を設置（回収）するために、ジャンパーケーブルおよびエクスポートケーブルの一部を船上へ引揚げ、コネクタの接続（接続解除）を行った。接続（接続解除）かかる時間は最長 6 時間とされ、船体が潮流で流されるとケーブルに負荷がかかる恐れがあることから、その間の船体の定点保持が重要であった。

図-9 は設置工事におけるコネクタ接続作業中の船体の軌跡である。接続作業は予想よりも早く 4 時間半で終了し、船体は赤丸で示す偏差 3m 以内に 95%以上の時間で収まっていた。一部偏差 3m を超えることがあったが、これは当時 2～3.3knot 程度の強い潮流が発生していたことに加え、ケーブルを保持していることで、船体と海底とが繋がっている状態であったことから、DPS の自動制御に影響を及ぼした可能性がある。

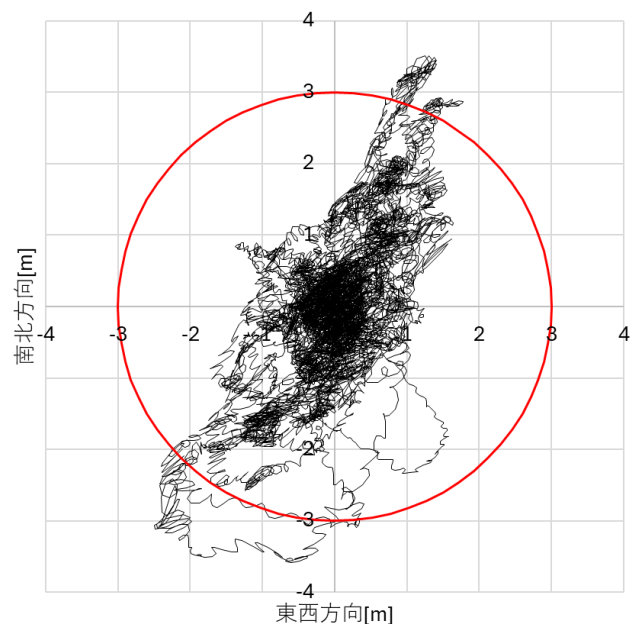


図-9 コネクタ接続作業時の船体軌跡

6. 無人化技術・ICTの導入

近年、洋上風力・潮流発電など海洋インフラの分野では人力依存作業から無人化・自動化への急速な進展が見られる。本工事においては、油圧式の遠隔玉掛け・玉外し装置を導入し、従来は潜水士が担っていた玉掛け・玉外し作業を船上から安全かつ迅速に行えるようにした。さらに、ROV（水中無人潜水機）により水中での作業状況をリアルタイムで監視した。ICT 施工管理では、トランスポンダ（水中音響測位）を用いた施工管理システムを活用。クレーン位置、水中の吊荷の水深、座標をリアルタイムでクレーンオペレーターがモニタリングし、設置位置精度や船体姿勢を即座に把握できた。これら技術によって、工程の短縮、安全面の大幅な向上が実現した。

(1) 無人化技術の導入

a) 遠隔玉掛け・玉外し装置の活用

従来、海中設置や吊り作業には潜水士作業が不可避であった。しかし水深 40m・強潮流下での作業は潜水士作業では短時間しか施工できず、また減圧時間も長いため、安全や工期の面でリスクがあった。一案としてベルバウンス潜水（図-10）も検討したが、発電機製造元との協議の結果、安全面や限られた時間のなかで作業が完了しない可能性から、完全無人化（遠隔化）が最適とされ、最終的に発電機製造元が開発した油圧式の遠隔玉掛け・玉外し装置（図-11）を用い、発電機の玉外し・取付けも全て船上から遠隔操作することとなった。これにより潜水作業ゼロの完全無人施工を実現した。

b) ROV（遠隔操作型無人探査機）の活用

ROV（Remotely Operated Vehicle）を活用し、吊り荷や設置位置、玉掛け・玉外し状況や海中ケーブル配置等を船上のモニター画面でリアルタイムに確認した（図-12）。従来、潜水士でないと目視確認できない海中作業や発電機と基礎の嵌合状況の確認を、船上からカメラで精密にモニタリングすることが可能となった。

(2) ICTの導入

a) 水中音響測位システムの活用

本工事では、施工精度の確保と効率化のため、ICT 技術として水中音響測位システムを導入した。このシステムは遠隔玉掛け・玉外し装置にトランスポンダを取り付け、船底に設置したトランスデューサと連携して、船体に対する吊荷の相対位置を取得するものである。衛星測位により取得した船体位置と組み合わせることにより、船体およびクレーン、吊荷の位置情報を高精度でリアルタイムに取得するものである（図-13）。

b) クレーン作業管理システムの活用

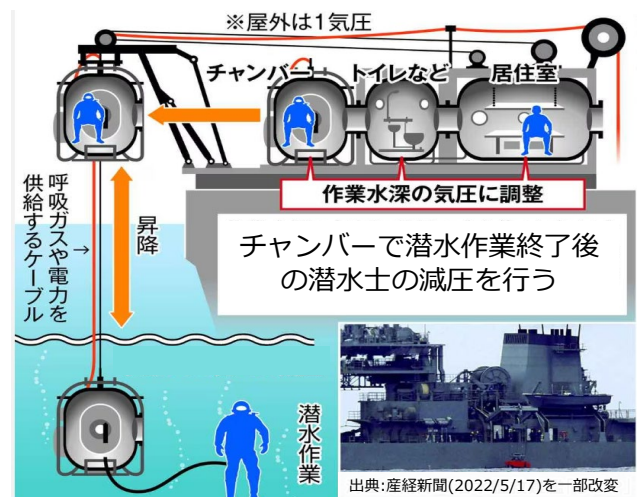


図-10 ベルバウンス潜水³⁾



図-11 油圧式遠隔玉掛け・玉外し装置

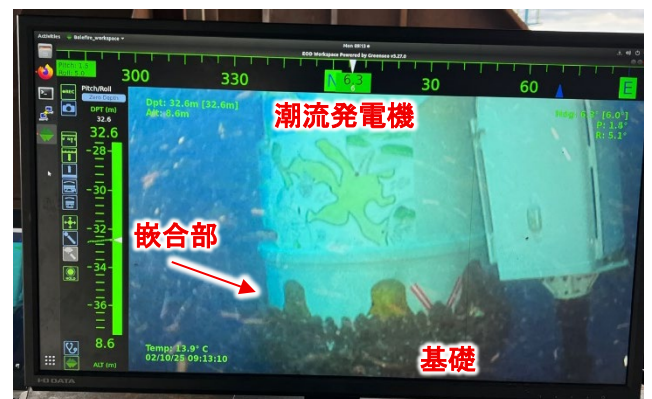


図-12 ROVによる水中モニタリング

前項 a)により取得した位置情報を用いて、船体、クレーン、吊荷の現在位置および据付目標位置を統括管理し、モニターへ表示するクレーン作業管理システムを導入した(図-14)。操船者やクレーンオペレーターは、モニターで確認しながら、船体の誘導と発電機の据付を行った。従来、海中の大型構造物設置では目視や間接測量に頼る部分が多かったため、精度や再現性に課題があったが、本システムは、設置位置の誤差を数十 cm～数 m 単位で管理することが可能である。クレーンによる吊り込みや設置作業時に、目標座標とのずれや吊荷深度の変化を継続的に監視することで、船上の作業や現場管理者が即座に設置精度を把握しながら施工を進めることが可能となった。本システムは、取得データを発電機製造元や行政と共有することができ、品質保証や第三者検証、さらには今後の施工技術標準化に寄与することが期待できる。

7. まとめ

- ・潮流発電機の設置および回収工事にて、DPS 搭載自航式多目的船と無人化・ICT 技術を活用した施工を実施した。

- ・DPS 搭載自航式多目的船の使用にあたり、シミュレーションと現地海域実験により潮流 2knot 以下であれば十分な定点保持性能があることを確認し、実施工においても概ね船体位置偏差の許容値である半径 3m を満たした。

- ・潜水作業をなくし、無人化技術を導入することで、工程短縮および安全性向上に取り組んだ。油圧式の遠隔玉掛け・玉外し装置を導入し、発電機の玉掛け・玉外し作業の遠隔操作を行った。また、ROV を用いて海中モニタリングも船上から実施した。

- ・ICT を活用することで、クレーン作業における船体、クレーン、吊荷の位置情報取得と目標への誘導状況を数値的に把握することで、施工精度向上に取り組んだ。

8. 参考文献

- 1) 九電みらいエナジー株式会社：令和元年度大規模洗剤エネルギー源を活用した低炭素技術実用化推進事業のうち潮流発電技術実用化推進事業（長崎県五島市沖における潮流発電技術を実用化するための実証事業）成果報告書，環境省，2022。
- 2) IRENA：Innovation outlook：Ocean energy technologies, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020。
- 3) 任務中は「大気圧 1.3 倍」のタンク内で生活…「飽和潜水」の過酷な実態，産経新聞，2022 年 5 月 17 日。

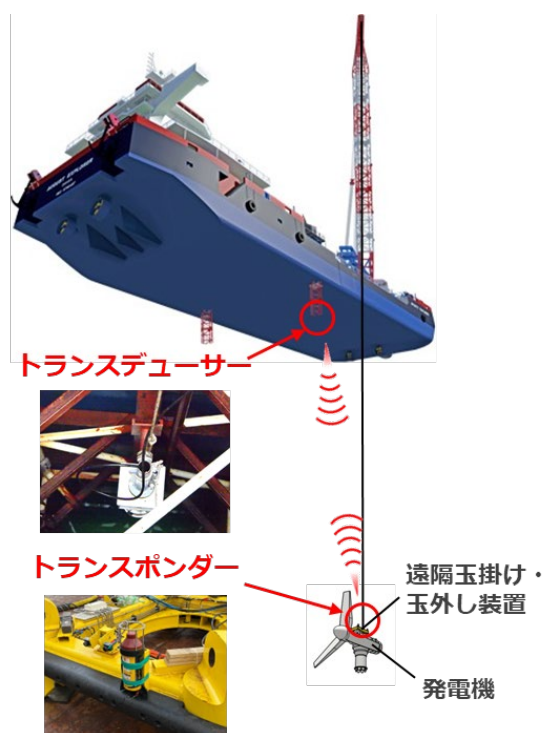


図-13 水中音響測位システムの概要

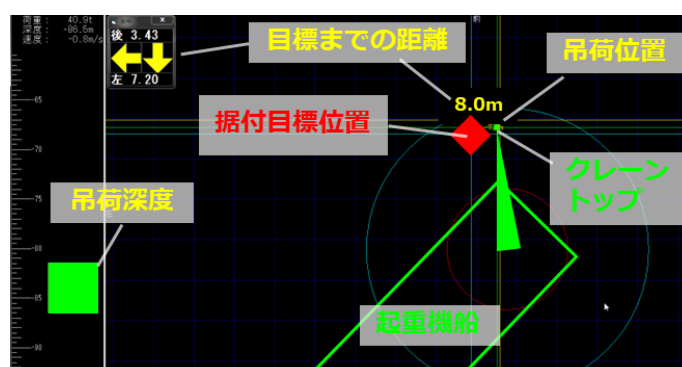


図-14 クレーン作業管理システムの表示イメージ