

水中浮遊式海流発電システム

長 屋 茂 樹

持続可能なエネルギー供給や温室効果ガスの排出削減のために、黒潮に代表される海流を海洋再生可能エネルギーとして有効に利用することを目指して開発している、水中浮遊式海流発電システムの特長について紹介する。

キーワード：海洋再生可能エネルギー、黒潮、海洋構造物、タービン、浮体

1. はじめに

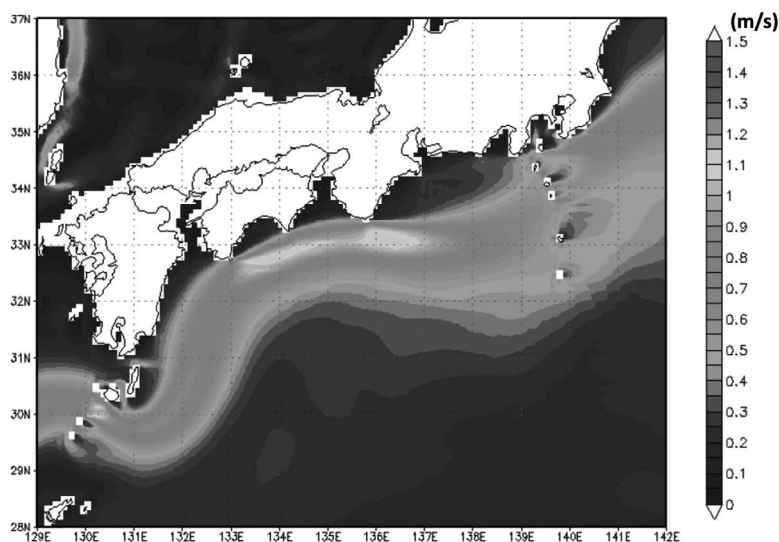
我が国が有する排他的経済水域(Exclusive Economic Zone, 以下 EEZ という)と領海は世界第6位の広さを誇り、この海域における海洋再生可能エネルギーの利用は、温室効果ガスの排出抑制や、エネルギー安全保障の面からも積極的な推進が求められている¹⁾。海洋再生可能エネルギーを利用した主な発電方法としては、①風力発電を沿岸や沖合で行う洋上風力発電、②波の上下に伴う運動エネルギーや位置エネルギーを電力に変換する波力発電、③潮の満ち引きによる流れが海峡などで速い流れとなるのを利用する潮流発電、④大洋を一定方向に流れる暖流や寒流の流れを利用する海流発電、⑤低緯度海域表層の温水を利用して沸点の低い媒体を気化させた蒸気でタービンを回して発電し、深層の冷水で蒸気を液化して再利用する海洋温度

差発電、⑥潮位差による位置エネルギーを電力に変換する潮汐発電等がある。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下 NEDO という)の調査では、日本の領海・EEZ には膨大な海洋再生可能エネルギーが賦存しており、そこから大きな電力の抽出が見込まれることが報告されている²⁾。一方、欧米や韓国、中国、豪州などでも、主として波力や潮流から発電する大型のデバイスの開発が盛んであり、実用化に近づいている¹⁾。

これを受け、NEDO による2011年度からの5ヵ年プロジェクトとして、海洋再生可能エネルギーからの発電デバイスの開発を推進する「海洋エネルギー技術研究開発」公募事業が実施されており、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電、海流発電を対象としてさまざまな形式の発電デバイスの開発が行われている。

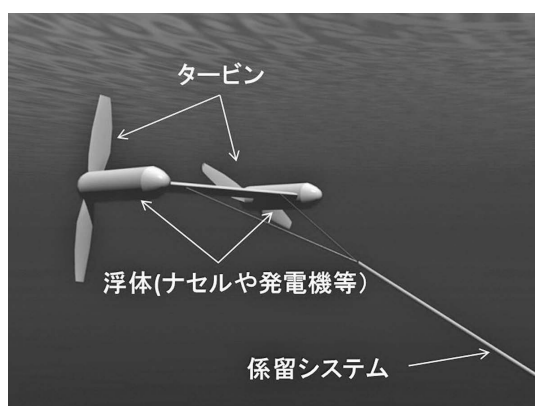
これらの海洋再生可能エネルギーの中でも、日本の



図一 黒潮流速予測例 (1992～2008年の平均, JCOPE2による再解析³⁾)

南岸を流れる黒潮（図—1）に代表される海流は、年間を通じて安定して流れているため、この巨大なエネルギーを利用することにより、我が国の自然エネルギーを利用したクリーンな安定電源を新たに構築することができる」と期待される。

筆者らは、この海流エネルギーを有効かつ経済的に利用するべく、水中浮遊方式の海流発電システム（図—2）の要素技術を開発することを目指として、前述のNEDOプロジェクトの委託先として、(株)IHI、(株)東芝、東京大学新領域創成科学研究科、(株)三井物産戦略研究所と共同研究コンソーシアムを組んで研究開発を実施している。本稿では、その技術的特徴について紹介する。

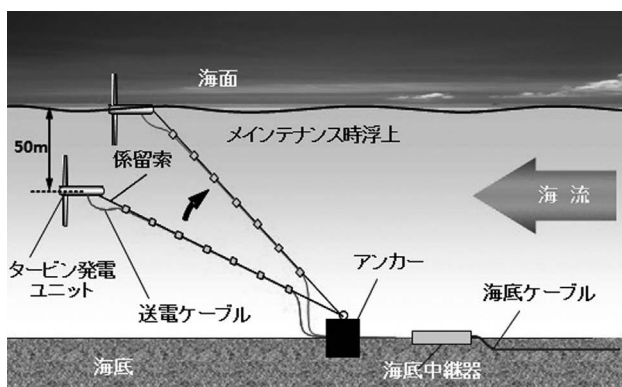


図—2 水中浮遊式海流発電装置

2. 水中浮遊式海流発電システムの特徴

本システムは以下の優れた特徴を有する³⁾。

- ①昼夜や季節による流れの速さ・向きの変動が少ない安定した海流エネルギーを、長期かつ連続的に利用することから、高い設備利用率での発電が可能で、ベース電源として大きな発電電力量が期待できる。
- ②発電装置を海底から係留し、海中に浮遊させることで（図—3）、黒潮が流れるような水深200～1000mにおよぶ外洋の大水深域での設置にも対応



図—3 水中浮遊式海流発電システム 概念図

できるため、設置可能海域を広く取ることができ、多数の発電装置を設置する大規模発電ファームの展開が可能である。このことは陸域への送電に伴うコストを相対的に低下させることに有効である。

また、すべて海中にあるため波浪の影響を受けずに安定した水深での運用が可能となり、船舶の航行にも支障を及ぼさない。さらに簡便な係留が可能となることから設置が容易であることも、コスト低減に寄与する。

- ③互いに逆回転する水中タービンを連結することでタービンの回転に伴う回転トルクを相殺でき、海中で安定した姿勢を保持して効率的な発電が可能である。

- ④保守整備時には、タービンの向きと浮力を調整することで、必要に応じて海上に浮上させることができるため、メンテナンスや修理が容易である。

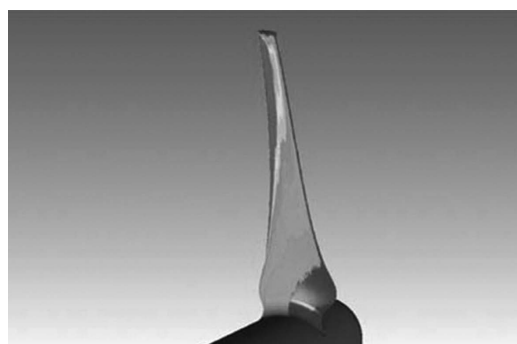
これらの特徴を生かして、本公募事業の設定目標である、他の発電方式とも発電コストで比肩し得る発電単価20円/kWhを達成可能な発電システムの実現を目指している。

以下にこの発電システムの実現のために必要な要素技術について述べる。

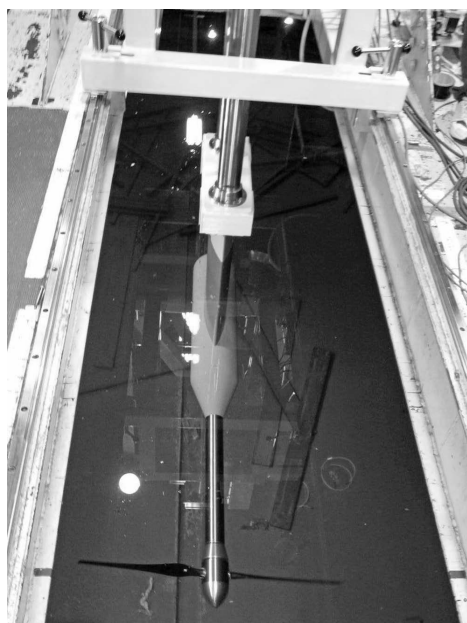
(1) タービンの開発

黒潮の流れは速い箇所でも平均流速が約1.5 m/sであり、このような比較的ゆっくりとした流速から大きな電力を生み出すには、大口径かつできるだけ高速に回転する水中タービンの開発が必要である。本システムでは、大型風力発電のような水平軸揚力型タービンを用い、大型化により発電コスト低減がなされるように定格出力1 MWの大型タービンを想定しており、その直径は約40 mに達する。

タービンが発電を開始する低い流速から、最大流速までの幅広い運転状態において発電効率の高い水中タービンの開発には、タービン翼が発生するトルクや反力等の流体性能を正確に把握する必要がある、



図—4 タービン翼に作用する圧力分布解析例



図—5 曳航水槽でのタービン性能試験

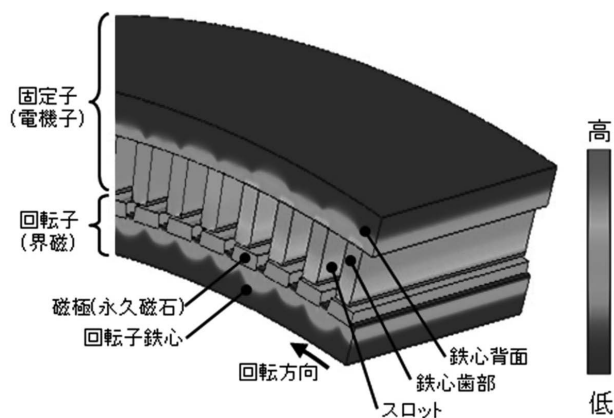
CFD（数値流体力学）による解析（図—4）と模型翼を用いた水槽試験（図—5）によって検証している⁴⁾。

また、直径約 40 m に達する水中タービン翼の実現には、翼に作用する荷重を精度よく推定し、それに耐えうる構造・材料の選定が重要となる。現在、変動荷重の設定と疲労強度評価、海水腐食環境下での耐久性を確保した高信頼性・低コストの大型翼構造・製造プロセス技術の開発と設計基準の作成を行っている。

(2) 発電機の開発

海流発電システムは、水面下約 50 m の海水中に発電機を設置することを想定している。発電単価低減のためにはメンテナンスの回数を抑制し運転コストを低減する必要があるが、風力発電システムで用いられているタービンと発電機の間に増速ギアを入れる方式では、定期的なメンテナンスが必要であり、また、潤滑油による海洋汚染のリスクもあるため、海流発電システムではダイレクトドライブ方式の永久磁石発電機の開発を進めている⁵⁾。

しかし、海流の流速は遅く、一般的な風力発電機の約半分の定格回転数となり、発電機の大型化や重量増加が課題となる。また、発電機の高効率化には、低速回転の永久磁石式発電機では電氣的損失の大半を占める固定子コイルで発生する銅損の低減が必要となるが、固定子コイルの断面積を増加し銅損を低減すると、固定子鉄心の磁束密度が高くなり鉄損が増加するなど、損失の低減は容易ではない。このような課題に対して、電磁界解析により回転子径や鉄心軸長等の基本寸法と磁極数、固定子スロット数、固定子コイル寸



図—6 発電機磁束密度分布

法などを最適化して、発電機の小型化と効率向上を達成した⁶⁾（図—6）。

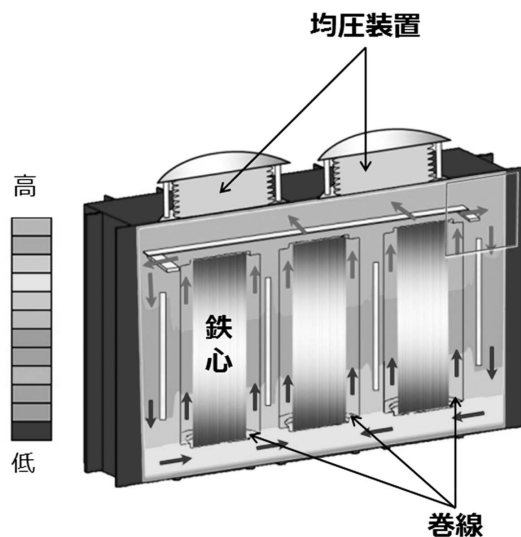
今後、製造性を含めた発電機構造の設計検討を進めるとともに、更なる小型化と高効率化を目指した設計検討を進めていく予定である。

(3) 送変電システムの開発

海流発電システムではナセル内で発電した電力を係留索に沿わせた電力ケーブルにて海底（200～1000 m）に送り、そこから陸上まで送電する。送電距離が長い場合には、変電所にて電圧を上げることで効率よく電力を送電することができるが、洋上風力のように海上に変電所を設置すると、海底から海上まで往復するケーブルで送電ロスが発生し、送電効率が悪化する。

そこで、海流発電システムでは変電所を海底に設置する海底変電所の開発を進めている。海底に変電所を設置することにより海底から海上への送電ロスがなくなるとともに、海上に変電所を設置するためのプラットフォーム建設も不要となるためトータル建設コストの削減が期待できる。

しかし、海底変電所は、高い水圧下に設置するためメンテナンスを頻繁に行うことが困難となる等、陸上設置の送変電機器と大きく構造が異なってくる。海底設置型の変圧器を考えた場合、ファンの停止による冷却不全などのリスク低減のための自然循環型冷却方式の採用が求められるが、筐体内外に冷却フィンを採用することにより所定の油温に保つ冷却性能を確保して、自然循環型冷却方式の成立性を確認している（図—7）。また、比較的容易に高水圧に対応するため、絶縁油と海水間の圧力を均圧する均圧装置を設置し、均圧装置の容積変化により圧力変化に追従することで、変圧器を陸上設置型と同様の筐体構成にすることが可能となった。今後は均圧装置や海中でケーブルと



図一七 海底設置型変圧器内の温度分布解析事例

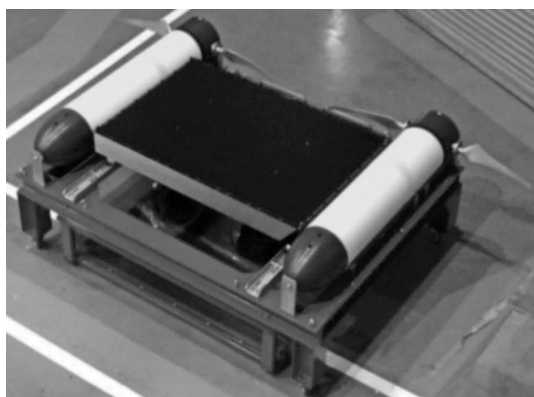
タンク間を接続する水中コネクタ，海底設置型の開閉器等の検討を進めていく予定である。

(4) 浮体・係留システムの開発

水中浮遊式海流発電システムは，黒潮が流れる大水深域でも設置が可能となるように，海底から係留索を伸ばし，その先にタービン発電装置を取り付けて，あたかも海中で風のように浮遊させて運用することを特徴とする。

本システムの運用時には，海面→水中に潜行→浮遊・発電→停止→浮上という状態変化が発生するが，どの状態にあっても安定性を確保する必要がある。そのためには，浮体安定性への影響を考慮した搭載機器の最適配置・形状の選定や，タービン翼の揚力などの下流方向への流体力，係留索の張力と浮力も含めたバランスの制御が非常に重要となる。

これらの要素が浮体運動へ及ぼす影響を評価するための浮体運動シミュレーションや模型水槽試験（図一8）によって，深度および姿勢安定性の確保のための



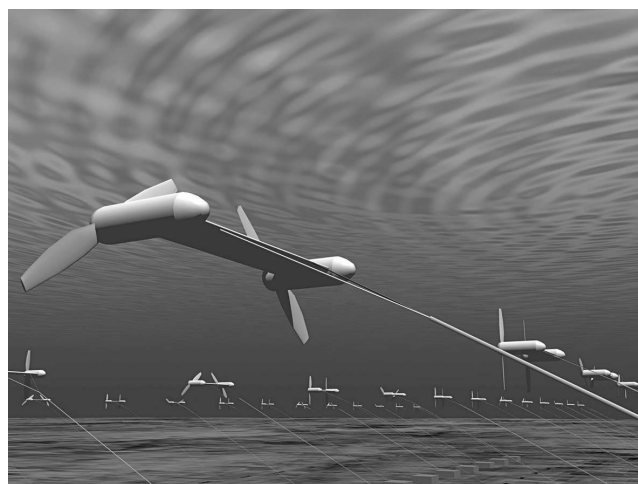
図一八 1/25 スケール実験機

制御性検討や，スケールの異なる渦が海域を通過することによる浮体安定性への影響評価，故障発生等の非常時における安全性確保などの検討を行っている⁷⁾。

また，水深の変化に対応可能な耐圧構造の検討や，大きな張力に耐える高強度係留索，海底に設置するアンカー（錨）についても，本システムに適したものの選定が重要である。

(5) 海流の特性把握と事業性評価の実施

本システムの開発では，初期段階から海流発電による事業の成立性を考慮して技術開発を行っている。海流発電の事業性は，エネルギー源となる海流の流れの特性に大きく左右されるため，流れの把握が非常に重要となる。流れの特性把握は，海流の数値予測や ADCP（超音波ドップラー式流速分布計測計）等を用いた海流実測によって実施している。これらの情報から発電量や浮体安定性を推定し，それに基づいて発電装置の設計仕様やコスト試算を行うことで事業性の評価を行っている。水中浮遊式海流発電システムは，その特徴を生かして大規模発電ファーム（図一9）を展開することで，目標発電単価を十分に達成可能と試算している。



図一九 大規模海流発電ファーム イメージ

3. おわりに

四方を海に囲まれた我が国にとって，海洋は資源やエネルギーが非常に豊富な，今後も挑みつづけるべきフロンティアである。その中で海洋再生可能エネルギーの利用は，将来の国産エネルギー源の選択肢の一つとして有望であるとの認識が高まってきている。しかしながら，技術開発は世界的にも端緒についたばかりであり，まだ成熟していない。海洋再生可能エネルギーが他の電源と比べても経済性の面でも遜色の無い

選択肢となるためには、大出力で効率の高い機器装置の開発だけでなく、海洋環境下での長期信頼性・耐久性・安全性の確保や、設置・メンテナンスのコスト低減など、克服しなくてはならない課題はまだ多いのが現状である。

その中で水中浮遊式海流発電システムは、1) 設置海域を選ばない低コストの浮体係留方法、2) 高い設備利用率をもたらす海流エネルギーと高効率の水中タービン発電装置によって、基幹電源の役割を担うことが可能な新しい発電技術である。今後は2015年までに本稿に挙げた要素技術の開発を行った後、実証機による発電実証実験を目指している。

謝 辞

本稿はNEDOから受託したプロジェクト「風力等自然エネルギー技術研究開発／海洋エネルギー技術研究開発／次世代海洋エネルギー発電技術研究開発（水中浮遊式海流発電）」の成果に基づいてまとめたものである。関係各位に感謝する。

J C M A

《参考文献》

- 1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：“NEDO 再生可能エネルギー技術白書 ―新たなエネルギー社会の実現に向けて―”，(2010)
- 2) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：“風力等自然エネルギー技術研究開発／洋上風力発電等技術研究開発／海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務報告書”，(2011)
- 3) K. Takagi, T. Waseda, S. Nagaya, Y. Niizeki and Y. Oda: “Development of a Floating Current Turbine”, Proc. of OCEANS MTS/IEEE 2012, Hampton Roads, Virginia, USA, (2012)
- 4) 久保, 中村一, 中村高, 長屋：“海流発電用タービン翼の開発”，第69回ターボ機械協会総会講演会論文集，(2013)
- 5) 加幡, 久保, 上田, 「海流エネルギーを利用した水中浮遊式発電システム」, 東芝レビュー, Vol.68, No.6 (2013), pp36-39.
- 6) 長屋, 加幡「海流発電の最新動向」, 電気学会誌, Vol.134, No.6 (2014), pp346-349.
- 7) T. Gonoji, K. Takagi and K. Takeda: “Motion of Twin type Ocean Current Turbine at the time of startup and accident”, Proc. of OCEANS MTS/IEEE 2013, San Diego, California, USA, (2013)

【筆者紹介】

長屋 茂樹（ながや しげき）

(株) IHI

技術開発本部 総合開発センター 機械技術開発部
課長

