

はじめに

平成 24 年度に設置された「沖縄県海洋温度差発電実証設備」は、今年度末で運転開始から満 5 年を迎える。本設備は、日本において海洋エネルギー初の商用系統への連系を行った再生可能エネルギー発電所であるとともに、実海水の温度差のみで駆動する温度差発電設備としても稼働開始当時世界唯一であった¹。また、5 年間におよびる運転は、1970 年代のオイルショックを契機とした世界の再生可能エネルギー開発ブーム期を含めても、海洋温度差発電史上最長である。

このような取り組みは、本事業が事業名称として掲げる「海洋深層水の利用高度化」と併せて、同技術が有効な熱帯・亜熱帯の島嶼・沿岸地域からの注目を集め、運転開始からこれまでの 5 年間で 61 の国々から視察・見学者が訪れている。また国内においても、海洋深層水の高度複合利用による地域活性化の観点での注目されており、日経 BP による「全国自治体・視察件数ランキング 2017 人口規模別ランキング（人口 10 万人未満）」²においても久米島の「海洋深層水複合利用プロジェクト」が約 1450 の市町村中 19 位（沖縄県内では 2 位）に入っている。

本報告書で今年度実施内容について報告するに先立ち、海洋温度差発電に関する最新動向³および実証運転のねらい等について、概要を述べる。また、昨年度までの実証内容および今年度の実施状況の概要についても概観する。

1) 海洋温度差発電(OTEC)に関する国内外の動向の概観

海洋温度差発電(OTEC)が、1970 年代のオイルショック期以来の第 2 期開発ブーム⁴と呼ばれていることは、本事業の平成 26 年度報告書で述べた。

2008 年に米国ロッキード・マーティン社が開発を再開⁵、それに続いて 2009 年には仏 DCNS 社（現 NAVAL グループ）も仏勢として 1980 年代以来の開発を再開している。その後、ロッキード・マーティン社は中国系投資企業(2013 年)と、NAVAL グループは石油関連大手のインドネシアプルタミナ社(2015 年)やフィリピン国営石油会社(2015 年)と MoU を締結し、出力 10MW 級（本事業の 100 倍規模）の OTEC 建造を目指しているが、まだ実現に至っていない。

このような中、活発化しているのは、出力 10MW 以上の大規模プラントの建造の前段階として、

¹ 2015 年にハワイ州立自然エネルギー研究所（NELHA）において、105kW 級 OTEC 試験設備が稼働を開始したため、現在は世界唯一ではない。また、外部熱源を併用した OTEC 研究開発用施設としては、佐賀大学をはじめ、韓国 KIOST、蘭 デルフト大学、仏 Naval Energies 社研究所等がある。

² 日経 BP 新・公民連携最前線 「全国自治体・視察件数ランキング 2017」

³ 海洋温度差発電の概要については、本事業の平成 26 年度業務報告書 1 章に概説した。本章では、主に情報の更新分について述べる。

⁴ 日本技術貿易株式会社、平成 25 年 9 月 25 日、「特許出願から見た海洋温度差発電」、http://www.ngb.co.jp/ip_articles/detail/994.html（平成 30 年 3 月 14 日閲覧）

⁵ ロッキード社は 1978 年にハワイ沖で「Mini-OTEC」と呼ばれる船上 OTEC プラントの建設・試験を行っているため、同社ウェブサイト等で「再開」という表現を用いている。

出力 1MW 級の OTEC と深層水後利用を組み合わせたプロジェクトを実現する動きである。当初ロッキード・マーティン社や DCNS 社は発電単独でも島嶼地域であれば採算性が見込める浮体式の 10MW 級 OTEC プラントの建造を目指してきたが、一方で現状その百分の一規模のプラント（沖縄およびハワイの実証試験プラント）しか稼働していない状況では、初期投資を集めることができないのではないかと懸念されていた⁶。これを踏まえた形で、10MW 級へのステップとなりうる数百 kW～1MW 級の OTEC と深層水後利用（特に SWAC(Sea Water Air Conditioning: 海水冷熱利用空調)等の冷熱利用）を組み合わせて、総合的に経済性を確保するプロジェクト計画が以下の通り増加している（詳細は本報告書 2.2 節参照）。

- キュラソー（カリブ海の蘭領）500kW OTEC + SWAC 《蘭 Bluerise 社》
- モンテゴベイ（ジャマイカ）500kW OTEC + SWAC 《蘭 Bluerise 社》
- モルディブ 1～2MW OTEC 《仏 Bardot 社》
- キリバス 1MW OTEC + 深層水複合利用 《韓 KRISO》
- マレーシア 規模不明 《仏 Naval Energies+マレーシア UTM》
- マルティニーク（カリブ海の仏領）1MW OTEC + SWAC 《仏 Naval Energies》
- 久米島（沖縄） 1MW OTEC + 深層水複合利用

海洋温度差発電に関する特許出願数の推移（主要国）

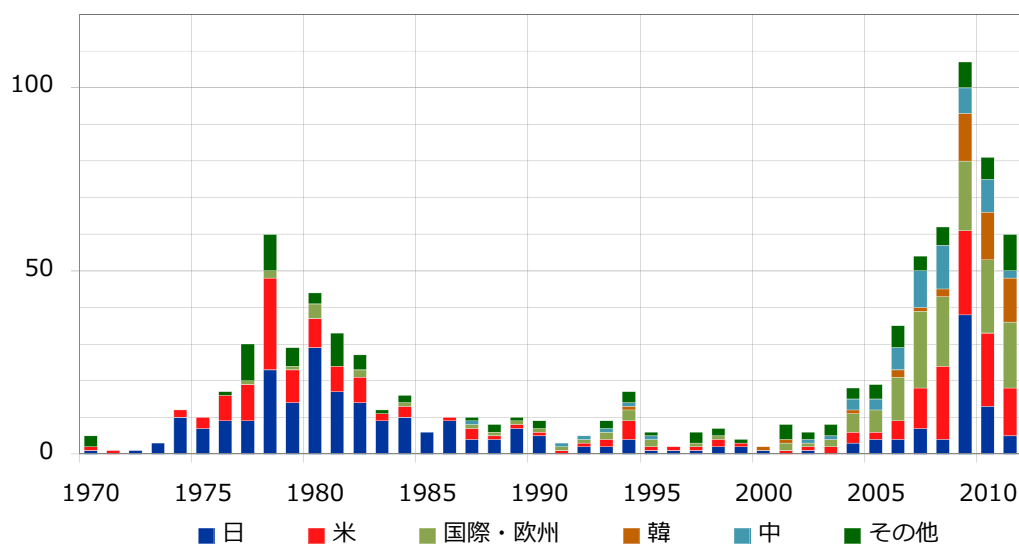


図1 海洋温度差発電の特許出願数推移⁷

⁶ 沖縄ハワイクリーンエネルギー協力/海洋エネルギーWS（2010年～）や国際 OTEC シンポジウム（2013年～）等における議論による。

⁷ 日本技術貿易株式会社，平成 25 年 9 月 25 日，「特許出願から見た海洋温度差発電」掲載データからグラフ化

2) 本事業における実証試験のねらい

2012年に本事業で設置された OTEC 実証設備は、沖縄県海洋深層水研究所（2000年開所）の表層水・深層水取水管を共用し、同研究所の敷地内に設置することで、初期コストの小さい実証試験を可能とした。もとより、風力発電と同様にスケールメリットによって発電コストが下がる OTEC では、出力 100kW 未満の小規模プラントで採算性を得ることはほぼ不可能であることが判明している（図 2）。このため、既存の海水取水管を共用することによって、たとえ発電出力に制約を受けても、長期連続運転のデモンストレーションと技術的信頼性の確立、および商用規模（前節で述べた 1MW 級や 10MW 級）の性能・発電コスト検討に活用できるデータの取得を最小限のコストで行うことを優先した実証計画コンセプトとなっている。

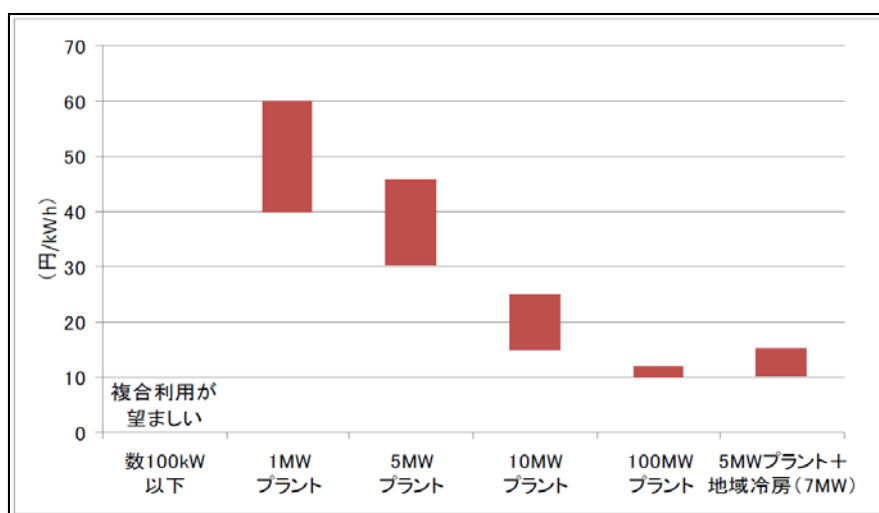


図 2 【参考】海洋温度差発電の発電コスト

(出典：NEDO 再生可能エネルギー技術白書(2010年7月))

これに基づき、次の実証運転および運転データを活用した検討を実施してきた。

- (1) 発電利用実証試験《技術的信頼性の確立》
 - (a) 発電サイクルが低温度差でも連続運転することのデモンストレーション
 - (b) 実証設備において、設計通りの性能が得られることの確認
- (2) 海洋温度差発電システムの確立《商用規模プラントに向けた運転データの活用》
 - (a) 本実証結果を用いた、商用機 1MW, 10MW 級の性能の信頼性向上
 - (b) 他、商用化に必要な、発電コスト（初期費用、維持管理費用）の低減検討、系統連系性検討 等
- (3) 海洋深層水の複合的利用システムの確立

以下に、検証・検討方法に関する特記事項を述べる。

(1) 本実証設備の性能の評価： 海水流量変動が起こる中での検証

既存の海水取水管を共用していることから、本実証設備に使用する海水流量は常時変動している（本報告書 第1章参照）。すなわち、通常の OTEC と異なり、季節変動のある海水温だけでなく、海水流量についても設計点と異なる値で運転することとなる。

そこで本実証試験では、海水温と海水流量、機器性能を入力としたシミュレーションソフトを作成し、シミュレーションによる出力と実際の運転データとの比較によって性能を検証している（図3）。

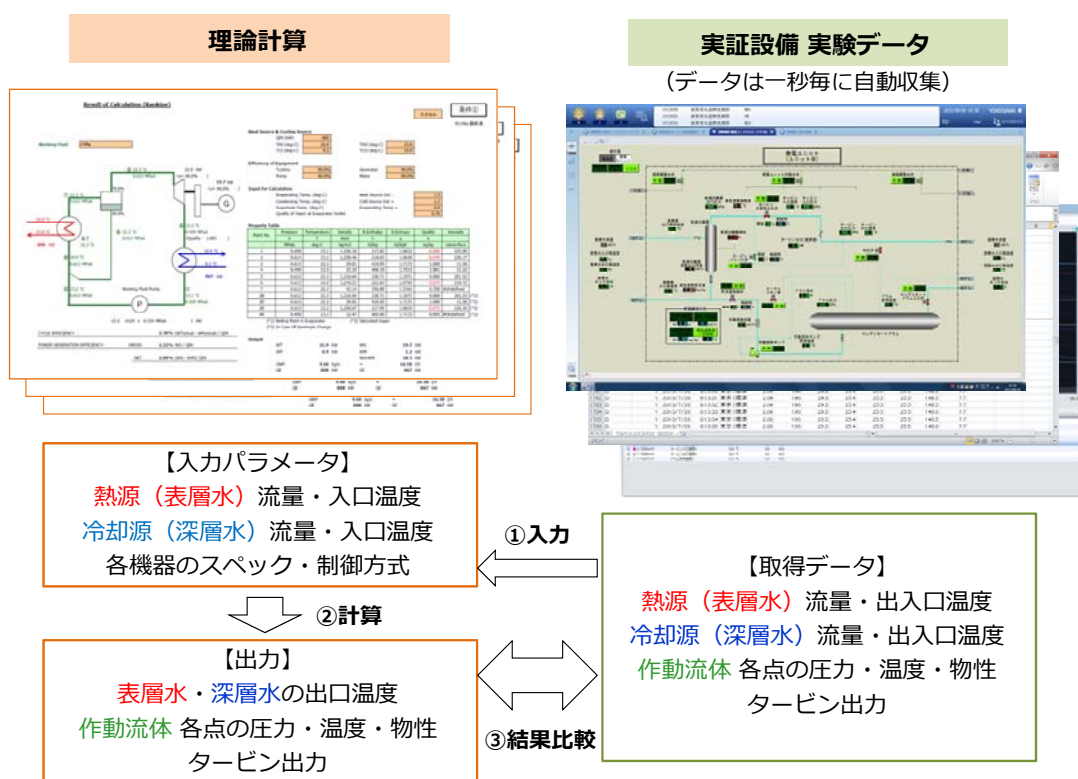


図3 本実証設備の性能検証

(2) 商用規模プラントに向けた実証運転データの活用

商用規模プラントと本実証設備の規模とでは、仕様面・性能面・コスト面で必然的に異なる点が複数ある。代表的な例を表1に示す。

そこで、実証運転データの活用にあたっては、各データのスケラビリティに応じて4つに分類し、図4のフローチャートで商用規模プラントの性能シミュレーションに活用している。

表1 本実証設備と商用規模プラントとの主要な相違点

項目	本実証設備	商用規模プラント	備考
深層水取水深度	612m (水温8~9℃)	800~1000m (水温4~6℃)	発電効率、自己消費電力に影響する
深層水取水管径	280mm	1MW級で直径1m強 10MW級で直径3~4m	細い管は同じ流速でも圧力損失面で不利となる
機器の性能	小規模ゆえの特殊仕様・海水流量面でのオフデザイン運転となっている。	1MW級、10MW級は、より商用化された機器を、設計点付近で運転可能。	機器の単体性能の相違 発電端出力、自己消費電力に影響する。

表2 運転データの分類

分類	データ種別	対象データ ◎印を付した項目が、本実証試験において取得可能なデータ。
分類①	今回の 実証設備のデータが正確なスケラビリティを持っており 、商用規模のプラントにそのまま、あるいは比例等簡単な換算で適用できるデータ	●◎熱交換器性能（ただし、作動流体が異なるため、「NEDO次世代研究開発」にて実施した無水NH ₃ での性能試験結果を用いた換算が必要である）
分類②	実験データはそのまま使用できないが、汎用の設計式があり 、性能推定手法が成熟している場合、その設計式をもちいて性能推定を行なう。実験データは、可能な限り、この汎用設計式と結果が合致しているかを評価する。	●◎熱サイクル設計 ●取水管損失水頭 ●取水管温度損失 ●配管圧損各種
分類③	実験データをそのまま使用できず、汎用の設計式がない場合 、メーカーに情報を求める。特に、既に商用化された機器を用いる場合、精度のよい予測性能をメーカーから得る。	●タービン発電機 ●作動流体ポンプ ●海水取水ポンプ ●その他機器類
分類④	①~③どれにも当てはまらないもの	●（10MW級浮体式発電設備の場合の取水管（浮体の動揺への応答面）

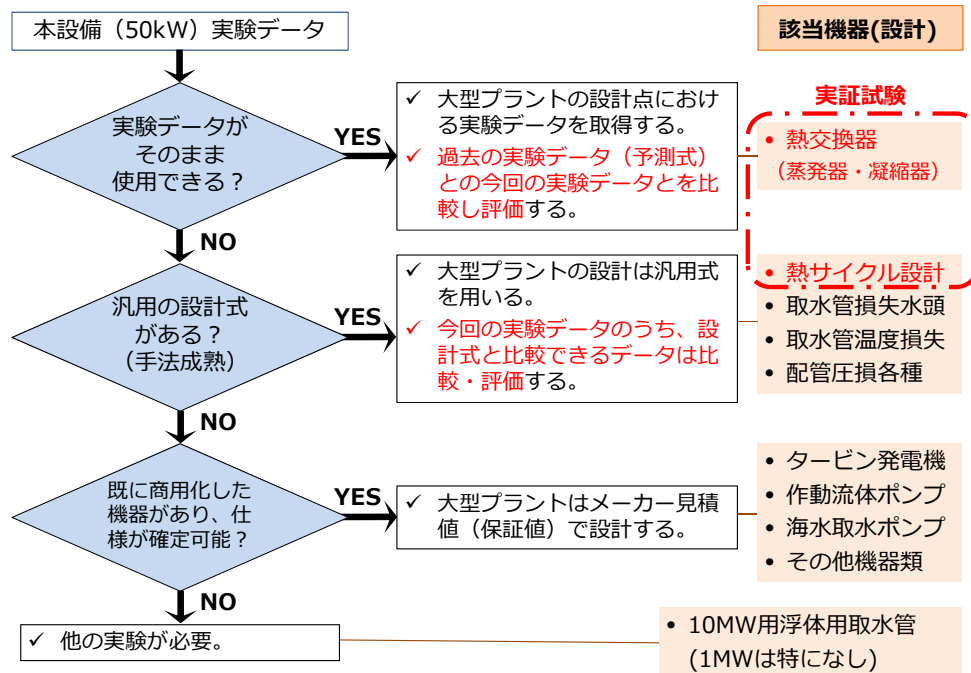


図4 データ活用のフローチャート

3) 昨年度までの実施内容

昨年度までの実施内容について、概要を述べる（詳細については各年度報告書参照）。

(1) 発電利用実証試験《技術的信頼性の確立》

(a) 発電サイクルが低温度差でも連続運転することのデモンストレーション

運転開始初年度は、平成 25 年度は連続運転（無人自動運転）に向けた初期調整を主として行い、平成 26 年度 4 月から本格的な連続運転を実施している。平成 28 年 10 月に、久米島で観測史上最大風速を記録した台風 18 号による電気・計装設備の故障に伴い 2 ヶ月の停止を余儀なくされたものの、その他の期間においては安定した無人自動運転を続けている。

(b) 実証設備において、設計通りの性能が得られることの確認

前節(1)で述べたシミュレーション-実運転データの比較を行い、シミュレーション値より若干上回る性能が実際に得られていることを確認した。なお、実運転データがシミュレーション値を上回ってる理由は、海水（表層水）由来の汚れによる熱交換器の性能低下度合いが、実際は設計時（シミュレーション内の設定値）より小さかったことに由来すると考えられる。

(2) 海洋温度差発電システムの確立《商用規模プラントに向けた運転データの活用》

(a) 本実証結果を用いた、商用機 1MW, 10MW 級の性能の信頼性向上

1MW, 10MW 級の OTEC プラントの設計については、NEDO の研究開発事業⁸において佐賀大学、(株)神戸製鋼所、IHI プラント建設(株)、横河電機(株)、ジャパンマリンユナイテッド(株)等のコンソーシアムが詳細な検討を実施していた。そこで、本事業では同プラントの性能推定データを対象として、本実証試験の運転データを用いて前節(2)で述べた手法による検証を行った。検証結果の概要は、次の通りである。

- 1MW, 10MW 級の OTEC プラントの熱交換器の性能や熱サイクルは、実証試験の運転データと比較しても無理のない仕様で設計されている。→設計面で技術的な問題点は無い。
- 実証試験で得られた実際の表層水温の頻度分布を用いて年間発電量の推定を行うと、1MW、10MW いずれのプラントにおいても、年間平均出力は計画値を約 10%上回る。→発電コスト面では NEDO 研究開発事業での算定値よりさらに低減できる可能性がある。

(b) 他、商用化に必要な、発電コスト（初期費用、維持管理費用）の低減検討、系統連系性検討 等商用化に向けた検討として、次の検討を実施した（本報告書 2.1.1 項参照）

- OTEC の発電コスト算定に関する整理
- プラント構成要素の技術的成熟度のマッピングと費用低減シナリオの整理
- 熱交換器の費用低減見直し調査
- 開放型取水システムによる陸上設置型プラントのコスト、機能改善検討
- 費用効率を最大化するプラントの最大出力検討
- 沖縄本島、宮古島、石垣島、久米島における系統接続に関する予備検討

(3) 海洋深層水の複合的利用システムの確立

発電使用後の深層水は、水産養殖用途に対しては十分低温であり、水質も使用前後で変化しない。加えて水産養殖においては、発電後の冷えた表層水の需要も存在することが判明した。

そこで本事業では、発電後の海水を利用することによるエネルギー効率と経済性向上について検討を行った。OTEC の商用化の観点からも、海水取水コスト（取水管の初期費用や汲み上げに関する運転費用）を他の海洋深層水利用産業（久米島においては、水産養殖を中心に、冷熱利用農業、飲料水製造、化粧品製造）とシェアすることにより、発電コストを下げる事が可能となる。

本複合利用システムについては、本事業での検討を受けて平成 28 年度より沖縄県「海洋温度差発電における発電後海水の高度複合利用実証事業」として、実際に発電後の海水を水産養殖に用いる実証事業が実施されている。

⁸ 平成 23～26 年度、NEDO 委託事業「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発（海洋温度差発電）」、(株)神戸製鋼所、国立大学法人佐賀大学

4) 今年度の実施状況の概要

(1) 実証設備運転状況（本報告書 第1章）

今年度4～6月には、本設備の一部を利用してNEDO実海域実証研究⁹の実証試験が実施された。これは、平成26年7月に内閣府総合海洋政策本部により本設備周辺も選定された「海洋再生可能エネルギー実証フィールド（海洋温度差発電）」の利用の一環である。この実証試験では、コスト低減と伝熱性能向上が図られた新開発の熱交換器および高効率2段ランキンサイクルの試験が行われた。

7月以降は順調な連続運転を行った。プラント性能についても昨年度までに引き続き、シミュレーション通りの性能が得られている。

また、昨年度までに引き続き、タービン発電機に焦点を当てた性能向上検討も実施している。

(2) 商用化に向けた検討（本報告書 第2章）

今年度は、これまでの5年間の運用実績をふまえて、運転費、維持管理費に関する要因分析を実施し、長期的な視点で見た発電コストの中で大きな割合を占める運転費、維持管理費の低減策を検討した。

前掲のNEDO研究開発事業における発電コスト算定においては、1MW級OTECプラントの運転費、維持管理費について6.3万円/kW/年が見込まれている。これは、太陽光発電（10kW以上）や風力発電の0.6万円/kW/年はもちろん、地熱発電の3.2万円/kW/年¹⁰と比較しても非常に高い。

そこで、本実証設備での実績データを基に1MW級プラントの運転費、維持管理費を推定したところ「1.9万円/kW/年」を得た。これを発電コストに換算すると、39.7円/kWhから29.3円/kWhへと約25%もの発電コスト削減ポテンシャルがあるという、商用化に向けて有用な結果が得られた。

⁹ 平成26～29年度, NEDO共同研究事業「海洋エネルギー発電システム実証研究（海洋温度差発電）」, ジャパンマリンユナイテッド(株)、国立大学法人佐賀大学

¹⁰平成27年5月, 資源エネルギー庁 発電コスト検証ワーキンググループ, 「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告 参考資料1」