

1. はじめに

2015年8月21日、米国ハワイ州自然エネルギー研究所（NELHA: Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority）で、世界で2基目となる海洋温度差発電設備（以下 OTEC: Ocean Thermal Energy Conversion）が稼働を開始した。出力 105kW の実証を目的とした小規模な設備であるものの、通電セレモニーにはハワイ州知事のデービッド・イグ氏も出席し、“it serves as a stepping stone to larger plants that will provide meaningful amounts of stable, clean power to Hawaii and other locations in Asia Pacific such as Okinawa in the near future.” と今後の大規模商用化に向けた期待を表明した。現在“第2次ブーム”期にあるとされる OTEC は、ハワイでの実証運転の他にも、米国・仏国・韓国による実証および商用プロジェクトの計画が発表され、「日本先行の海洋温度差発電 欧米が猛追」と報道されるほど商用化に向けた動きが過熱している。¹⁾²⁾

さて、海洋温度差発電はその名の通り海洋の表層海水と深層海水との温度差を用いて発電を行う。同じ原理を用いて、小さい温度差を使って発電する技術には、温泉の低圧蒸気や温水を熱源として冷却水との温度差で発電する“地熱バイナリー発電（温泉発電）”や、工場の未利用低温排熱を利用する“排熱発電”がある。特に、電気事業法の規制緩和と再生可能エネルギーの固定価格買取制度での買取対象指定が重なった地熱バイナリー発電は、数年前には全国2か所しか存在しなかった状況が一変、現在は乱立を規制するための条例制定が検討されるほど急速に普及が進んでいる。³⁾

本稿では、OTEC を中心とした低温度差を利用する発電技術について、技術の概要と動向について述べる。

2. 温度差発電のしくみと特徴

2.1 発電のしくみ

現在、「温度差発電」と呼ばれる発電は、前述の

*原稿受付 平成 27 年 10 月 22 日。
**株式会社ゼネシス（東京都中央区銀座5丁目11-14-8F）。

OTEC や地熱バイナリー発電のようにタービン発電機を用いて発電する方式と、異種金属に温度差を与えることによって起電圧を生じさせるゼーベック効果を利用した熱電素子を用いる方法がある。後者は、北海道弟子屈町や静岡県熱海市における温泉熱利用イルミネーションや兵庫県湯村温泉における温泉熱利用携帯充電スタンドといった、ユニークな利用が行われているが、産業規模の大出力を持った発電所はまだ日本では導入されていない。そこで、本稿では前者のタービン発電機を用いる温度差発電について解説する。

図1に、発電の基本的な仕組みを示す。蒸気タービンを用いる一般的な火力発電、例えば原子力発電や石炭火力発電では、媒体に水を使用し、水蒸気で蒸気タービンを駆動する。これに対して低温熱源による温度差発電では、水ではなく低沸点媒体を用いる。媒体ポンプにより蒸発器に圧送された低沸点媒体（液）は、温熱源から熱エネルギーを受け取り蒸発する。発生した媒体蒸気によりタービン発電機を駆動し電力を得る。その後媒体蒸気は凝縮器において冷熱源により冷却されて液体に戻り、再度媒体ポンプにより蒸発器に送られる、いわゆるクロードサイクルである。温熱源と冷熱源を表1に整理する。

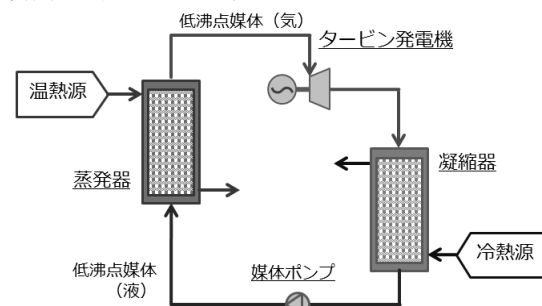


図1 温度差発電の原理

表1 温熱源と冷熱源の整理

発電種別	温熱源	冷熱源	媒体
OTEC	表層海水	深層海水	低沸点媒体
地熱バイナリー	低圧蒸気・熱水	海水、河川水、	媒体
低温排熱	低温排熱	冷却塔循環水等	
(参考)石炭火力	石炭の燃焼熱		水

使用される低沸点媒体については、OTEC では無水アンモニア（大気圧における沸点： -33°C ）が主流となっており、他にアンモニア水、代替フロンの中でも比較的沸点の低い HFC134a（同 -26°C ）や HFO1234yf（同 -30°C ）、プロパン（同 -40°C ）等が提案されている。熱源が温泉や工場排熱の場合は、温度帯が高いため、沸点が高めの HFC245fa（同 15°C ）等の代替フロン、イソペンタン（同 28°C ）、アンモニア水の実績が多い。

熱サイクルは一般的なランキンサイクルの他、アンモニア水の非共沸性を利用して熱効率を向上させたカーリーナサイクルも多く用いられている。また、ランキンサイクルの中でも、代替フロンやイソペンタンを用いるサイクルは、媒体が有機物であるという理由付けで「オーガニック・ランキンサイクル (ORC)」と書かれることもある。

呼称としては、「温度差発電」の他、「バイナリー発電」も総称として一般的である。バイナリー発電の名称は、地熱発電分野で地熱井からの蒸気で直接タービン発電機を回す通常の発電方式に対して、温度差発電では地熱井からの蒸気の流れと低沸点媒体蒸気の流れの「2つの」流れがあることに由来している。これが、排熱発電の分野でも広く使われるようになっていく。

2.2 特徴

温度差発電の特徴としては、他の再生可能エネルギーと比較して出力変動が少ないこと、このため設備利用率が高いことが挙げられる。

また、ポテンシャルの大きさも特徴である。日本における OTEC の導入ポテンシャルは、表層-深層の平均温度差が 20°C 以上ある海域のうち、沿岸からの距離が 30km 以内の領域で $5,952\text{MW}$ 、排他的経済水域内全体では $173,569\text{MW}$ と算定されている。⁴⁾ 地熱バイナリー発電については、国立・国定公園の特別保護地区・特別地域を除く 150°C 以上の源泉が得られる領域で $4,300\text{MW}$ （一般の地熱発電も含む）、同 53°C 以上では $14,000\text{MW}$ とされている。⁵⁾

3. 近年の動向

3.1 海洋温度差発電

3.1.1 第2次ブームの到来

現在、OTEC は「第2次ブーム」と呼ばれている（図2）。¹⁾ 第1次ブームは、1970年代のオイルショックを契機とした再生可能エネルギー全般の開発ブームと同じ時期である。このときは主に日本、米国およびフランスで開発が進み、それぞれの国で数十 kW 級の実証プラントも建設されている。しかし、実用化に至る前に原油価格は元の水準に戻り、開発も下火になっていった。

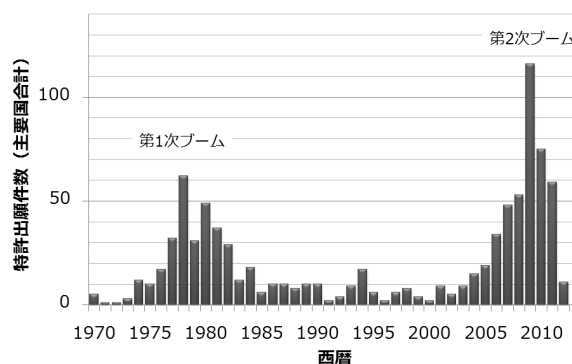


図2 OTEC に関する主要国の特許出願数推移
(出典2 データより著者がグラフ作成)

第2次ブームは2000年代後半から始まる。

2008年に米ロッキード・マーティン社が30年ぶりの開発再開を発表すると、翌2009年には仏版ロッキード社ともいえる DCNS 社（Direction des Constructions Navales Services: 造船役務局）も開発に参入した。日本においても2011年から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)による海洋エネルギー開発がスタートしている。

2013年4月、第2次ブームに入ってから世界初となる OTEC 実証設備が、沖縄県により建設された。日本の海洋再生可能エネルギーの中で最初に商用電力系統への系統連系を果たした同設備は、現在も無人連続運転を続けている（図3）。



図3 沖縄県 OTEC 実証設備
(写真提供：沖縄県)

同じ2013年4月、米ロッキード・マーティン社は、中国の投資会社 Reignwood Group と中国海域での

10,000kW 級浮体式 OTEC プロジェクトの実施に向けた協力協定を締結。2015 年現在、詳細設計を行っている。

2014 年 7 月、DCNS 社と再生可能エネルギー PPS 大手 Akuo Energy 社が計画するカリブ海の仏領海外県マルティニーク向け浮体式 10,000kW 級 OTEC プロジェクトが、EU の再生可能エネルギーおよび CCS (Carbon Capture and Storage) への支援プログラムである NER300 の補助対象に選定された。補助額は 72 百万ユーロ。現在、2019 年の稼働開始に向けて設計が行われている状況である。なお Akuo Energy 社はこの発表後、同じマルティニーク向け 5MW 級陸上式 OTEC 計画の公表、インドネシアの国有の最大手石油・ガス関連会社プラタミナ社およびフィリピン国営石油会社との協力協定締結を矢継ぎ早に実施し、精力的に市場展開を推し進めている。

韓国 KRISO (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering) は 2013 年 9 月に開催された第 1 回 International OTEC Symposium において、2030 年に出力 100MW/基の商用機を稼働することをゴールとした開発ロードマップを発表した。このロードマップにしたがって、2014 年に出力 20kW、2015 年には 200kW の実験機を製作している。ただし、韓国周辺の海域では OTEC に必要な表層-深層間の温度差が得られないため、ウッドチップボイラー等を用いて海水を加温して実験を行っている。また同じ理由で、ターゲットを海外市場に絞っており、次ステップとなる出力 1MW 級の発電プラントはキリバスに建設することを計画している。



図 4 ハワイ州 OTEC 実証設備
(写真提供 : Makai Ocean Engineering Inc.)

2015 年 8 月、表層海水と深層海水のみを用いて発電する OTEC として沖縄県久米島に続いて 2 基目となる出力 105kW の実証設備が、米国ハワイ州ハワイ島で運転を開始した。2045 年に電力の 100%再生可能エネルギー化を目指すハワイ州では、出力安定性に優れた OTEC への期待は大きく、通電セレモニーにはデービッド・イゲ州知事やトゥルシー・ガバード下院議員も出席し、将来電力供給の一翼を担うことへの期待を表明した (図 4,5)。



図 5 ハワイ州 OTEC 実証設備通電セレモニー
(写真提供 : Makai Ocean Engineering Inc.)

3.1.2 商用化ブームの背景

現在、OTEC の商用化に向けたブームが到来している背景には、もちろん、2000 年代から始まった化石燃料価格の高騰・乱高下や、気候変動防止に向けた二酸化炭素排出量削減の必要性の高まり等、再生可能エネルギー共通の社会状況も底流となっている。これに加えて、OTEC 特有の背景として、次の 2 点が大きな要因となっていると考えられる。

a) 低温度差を利用した発電技術の普及

OTEC が第一次ブームを迎えた 1970 年代後半には、OTEC はもちろん温泉水や低温の工場排熱を用いた発電も、まだ一般的な技術ではなかった。日本における本格的な低温度差利用の発電は、住友金属工業 (現新日鉄住金) 鹿島製鉄所に 1999 年設置された出力 3,450kW からスタートしたと言ってよいだろう。この発電プラントは、転炉から発生する排熱を回収した 98°C の熱水を高温側熱源、海水を低温側熱源とした、温度差 70~80°C 程度の発電である。タービンを駆動する媒体としては、アンモニア水を用いている。その後、日本では 2000 年代に製油所排熱を利用した出力 4,000kW (媒体 : アンモニア水)、地熱発電所において蒸気井の圧力が下がったため従来技術で利用できなくなった低圧蒸気を用いた 2,000kW (媒体 : ペンタン) が稼働を開始している。また、国外では出力 10,000kW を超えるプラントも稼働している。

b) 海底油田開発分野における浮体構造の大水深化

OTEC が大規模化した場合、陸上から深層海水取水地点までの大径取水管敷設が技術的・コスト的に困難になるため、発電所自体を浮体構造内に設置して鉛直下方に取水管を懸垂する構造とする。この際、深層海水を水深 800~1000m から取水するのが最も経済性が高いため、浮体構造は水深 1000m 以深の海域で係留等により位置を保持する必要がある。

40 年前の第一次ブーム時には未熟な技術分野であったが、海底油田開発技術が目覚ましい発展を遂げた現在では水深 3000m を超える海底油田を開発する海洋構造物も稼働している。

3.1.3 関連技術の成熟による効果

前項まで述べた関連技術の成熟は、OTEC の技術的信頼性を大きく向上させたことは言うまでもない。さらに重要な点は、建設費や維持管理費、運用費、そして、それらから算出される発電コスト (円/kWh) の見積精度の向上である。

OTEC の発電コスト低減は、大出力化によるスケールメリットの追求を基本的な方針としている。一方、前項で述べた技術がまだ成熟していなかった第 1 次ブームの時期に行われた建設費の見積では、日米の算定額に数倍の開きがあるなど、コストの信頼性が低かった。これに対して、既存技術の延長上での見積が可能となった第 2 次ブーム期では、日、米、仏等の主要プレイヤーが算出した建設費は大きな差異のない数値に落ち着いている。これにより、大出力化によりスケールメリットを生かせば発電コストは既存の発電方式に匹敵するレベルまで下げることができる、ということが関係者の共通認識となった。

図 6 に、日本における発電コストの試算例を示す。

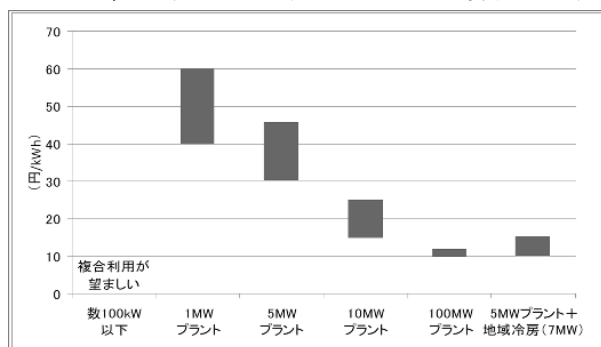


図 6 OTEC の発電コスト⁶⁾

3.1.4 現在の技術開発

a) NEDO 技術研究開発

前項で述べた通り、OTEC は既存技術の組合せで建設が可能であるものの、発電コストについては技術開発によりさらに低減できる余地が残っている。

NEDO が 2011 年度から実施している「海洋エネル

ギー技術研究開発」事業では、神戸製鋼所と佐賀大学が「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」の 1 つとして、媒体を蒸発・凝縮させる熱交換器の性能向上とコスト低減に取り組んだ。熱交換プレートに伝熱促進加工 (図 7) を施すことにより熱伝達効率を向上させてコンパクトを図るとともに、高硬度素材の使用によりチタンの使用量を減らしてコスト削減につなげている。⁷⁾ この技術開発は 2014 年度に完了し、同年からスタートした「海洋エネルギー発電システム実証研究」フェーズ (ジャパンマリンユナイテッド・佐賀大学) でその成果が実海域で実証される予定である。

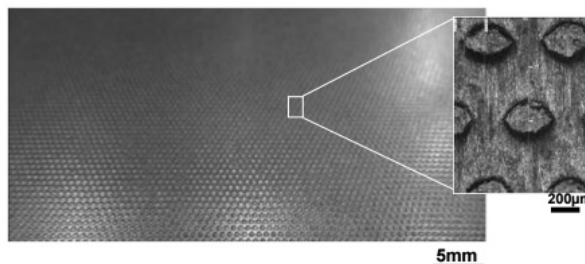


図 7 伝熱促進加工熱交換プレート⁷⁾

なお、この NEDO の研究開発プロジェクトでは、全テーマの共通要件として、「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」フェーズでは「事業化時に発電コスト 20 円/kWh 以下」、「海洋エネルギー発電システム実証研究」フェーズでは「事業化時の試算で発電コスト 40 円/kWh 以下」が掲げられている。これに対して、前述の神戸製鋼所と佐賀大学との研究開発では発電コストについて、出力 1,000kW のプラントでは初号機：36.1~52.5 円/kWh、普及時：31.0~44.5 円/kWh、出力 10,000kW のプラントでは初号機：26.0~33.1 円/kWh、普及時：18.6~23.5 円/kWh と算定している。⁷⁾ なお、いずれも設置場所として沖縄近海を想定した温度差が用いられている。

b) 沖縄県 OTEC 実証設備における実証研究

2013 年 4 月から稼働を開始した沖縄県 OTEC 実証設備 (表 2) では、メンテナンス時を除いて基本的に無人での連続運転を行っている。運転データは自動的に一秒毎に記録され、それを用いて出力や熱交換器性能がシミュレーション値とどの程度一致しているかを確認している。これまでのところ、出力の実測値は、事前シミュレーションよりも平均 5%程度高い。これは、熱交換器 (特に蒸発器) において実際の汚れ係数が設計値よりも小さかったため、総括熱伝達係数が設計値より高くなっているためである。

また、得られた実海水温度の推移や熱交換器性能、熱サイクル効率のデータを、前述の NEDO 技術研究

開発で検討された出力 1,000kW 級および 10,000kW 級の設計値と比較、フィードバックすることにより、将来の沖縄での商用規模プラント導入に向けた技術的信頼性の向上を図っている。

表 2 沖縄県 OTEC 実証設備の主要仕様

項目	仕様
熱サイクル	ランキンサイクル
媒体	HFC134a (各機器は NH ₃ にも対応)
タービン発電機	単段ラジアルタービン 回転数 33,000rpm 一軸一体型発電機 最大出力 50kW (400V) 逆変換装置および系統連系装置付
熱交換器	プレート式全溶接型 伝熱促進加工チタンプレート使用 クロスフロー流路 設計圧 1.4MPaG

3.2 低温未利用熱発電 (温泉, 排熱)

3.2.1 急速な普及とその背景

地熱由来の熱水や低圧蒸気を熱源に用いる地熱バイナリー発電は、2003 年に九州電力は八丁原地熱発電所に出力 2,000kW のバイナリー発電施設が建設されて以降約 10 年間、商用規模プラントの新設は行われてこなかった。しかし、2012 年 4 月の小型バイナリー発電に関する規制緩和、および同年 7 月の再生可能エネルギー固定価格買取制度開始により経済性の確保が容易となると、出力数 kW~300kW 規模の小型バイナリー発電ユニットが次々とリリースされ、普及が急速に拡大している。また、2015 年 8 月には日本最大となる出力 5,000kW の地熱バイナリー発電所が大分県九重町で運転を開始している。この動きに牽引され、排熱発電分野でも小型バイナリー発電の導入が広がっている。

次項から、この背景となった規制緩和および固定価格買取制度について概説する。

3.2.2 規制緩和

2012 年 4 月、資源エネルギー庁電力安全課は、一定の条件を満たす出力 300kW 未満のバイナリー発電設備について、電気事業法上の規制を緩和した。⁹⁾ 対象となる発電設備では、これまで出力規模によらず選任が義務付けられていたボイラー・タービン主任技術者が不要となり、関連手続きも大幅に軽減される。とりわけ小型の地熱バイナリー発電の潜在的な設置者は温泉旅館やホテルが多かったため、有資格者の新規雇用が不要となったことや不慣れな手続きが簡略化され

たことは、設置へのハードルを大きく下げることとなった。なお、本規制見直しは熱源の種類を問わないため、排熱発電はもちろん、OTEC にも適用される。

3.2.3 固定価格買取制度

2012 年 7 月からスタートした再生可能エネルギーの固定価格買取制度において、地熱バイナリー発電は地熱発電の一種として制度の対象となっている。買取価格および期間は、それぞれ、出力 15,000kW 以上で税抜 26 円/kWh・15 年間、出力 15,000 未満で税抜 40 円/kWh・15 年間である。これにより、地熱バイナリー発電の経済性は大きく向上した。なお、同制度は既に商用段階の再生可能エネルギーを対象としているため、再生可能エネルギーの定義に含まれていない工場排熱や、実証段階と位置付けられている OTEC を含む海洋エネルギーは対象から外れている。

4. 今後の展望

4.1 発電コスト低減のために

今後の温度差発電の普及のためには、発電コストの低減が最重要課題の 1 つであることは論を俟たない。OTEC と、地熱・工場排熱を熱源とした温度差発電とは、仕組みは同じでも、発電コスト低減シナリオが大きく異なるため、以下、それぞれの取り組みについて述べる。

海洋の表層に蓄えられた膨大な太陽光由来の熱エネルギーを実質的な熱源とする OTEC では、一基あたりの出力の大きさが熱源の量による制約を受けない。したがって、スケールメリットが有効な規模まで出力を上げることにより発電コスト削減を図るのが基本的な戦略である。最終目標規模の目安として、日本のグループの他、米ロッキード・マーティン社や韓国 KRISO も 100,000kW/基を掲げている。また、火力発電等と異なり熱源が無料なうえ膨大であるため、発電効率向上を追求することの意味は薄く、kW あたり建設費や、維持管理・運用費も含めた発電コスト等、総合的な指標を考慮して技術開発の方向性を定める必要がある。

一方、地熱バイナリー発電や排熱発電では、熱源の量が発電出力を決定するボトルネックとなる。MW クラスの出力に相当する熱源は限られているので、普及のためには、小さい出力でスケールメリットが得られなくとも kW あたり建設費を下げる方策をとる必要があった。小型バイナリー発電装置を開発した各社が、オーダーメイドのシステムではなく、汎用の量産ユニットを指向したのはこのためである。今後はユニットの価格低減だけでなく、建設費の大半を占める配管・電気・据付工事のコスト削減が課題になると考えられ

る。また、熱源の量が限られていることから、発電効率向上も直接的に経済性（売電収入）に影響する重要な開発要素となっている。

4.2 地域産業との協調

温度差発電では、温熱源、冷熱源の熱エネルギーのみを利用し、その水質等には影響を及ぼさない。したがって、発電で使用した後の温熱源、冷熱源を他の地域産業に利用できる。

1,000kW級のOTEC導入を目指す久米島町では、発電に使用した後の深層海水を、水産養殖、冷熱利用農業ハウス、空調等に利用する計画を掲げている(図8)。⁹⁾ 現在でも日本最大の深層海水取水地である同町では、水産養殖を中心とした深層海水関連産業の生産額が年間二十億円に達し、町を支える主要産業の一つとなっている。一方、旺盛な需要に対して深層海水供給能力はひっ迫しており、産業振興のボトルネックとなってしまう。そこで、同町は深層海水取水設備を増強してOTECを導入、再生可能エネルギーによる電力を深層海水とともに周辺産業に供給することを目指している。産業振興のボトルネックを解消するだけでなく、熱帯・亜熱帯の島嶼・沿岸地域に向けた低炭素型・自立型のモデル地域が町の描く将来像である。

利用のポイント：

多段利用による効率化



図8 久米島町の深層水利用計画
(沖縄県久米島町提供)

また、最大出力216kWの地熱バイナリー発電を全国に先駆けて稼働させた長崎県小浜温泉では、同発電所を含む見学ツアーを企画するとともに、発電利用後の温泉水をマンゴー栽培やトラフグ養殖の温熱源として利用する試みを始めている。

このように、地域経済の活性化にも貢献できることは、再生可能エネルギーの中で温度差発電の際立った特長となっている。

5. おわりに

本稿では、ここ数年、急速に動きが激しくなっている温度差発電について概観した。先に触れた久米島の海洋温度差発電設備や小浜温泉の地熱バイナリー発電設備をはじめとして、予約すれば随時見学が可能な設備は多いので、興味を持っていただいた方は是非現地を訪ねそれぞれの地域の「温度」に触れていただきたい。

参考文献

- 1) 日本技術貿易株式会社, 特許出願から見た海洋温度差発電, (平 25-9)
- 2) 日経新聞電子版, 日本先行の海洋温度差発電 欧米が猛追, (平 27-10)
- 3) 朝日新聞, 別府の温泉発電条例案業者に同意取り消しも, (平 27-10)
- 4) NEDO, 海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務, (平 23-3), 107
- 5) エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会, コスト等検証委員会報告書, 資料1 参考資料3, 8-9
- 6) NEDO, 再生可能エネルギー技術白書第2版, (平 26-2), 第6章 海洋エネルギー, 19
- 7) NEDO, 「平成26年度NEDO新エネルギー成果報告会」発表資料, (平 26-9), 海洋エネルギー分野, 142-165
- 8) 原子力安全・保安院 電力安全課, バイナリー発電設備の規制の見直しに伴う電気事業法施行規則等の一部改正等について, (平 23-4)
- 9) 沖縄県久米島町, 久米島海洋深層水複合利用基本調査, (平 23-3), 166-186

著者紹介



岡村 壺

・1972年生。

・株式会社ゼネシス OTEC グループ グループリーダー。

・東京大学大学院工学系研究科 (船舶海洋工学) 修了

・2012年より、沖縄県海洋温度差発電実証設備においてチーフエンジニアを務める。