

海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業 及び  
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  
委託業務実績報告書

## 第 I 部

### はじめに

## 1. 背景

### 1.1 海洋深層水とその利活用

海洋深層水（英語では Deep Ocean Water, DOW, あるいは Deep Seawater, DSW）は、光合成による有機物生産よりも有機物分解が卓越し、かつ鉛直混合や人為の影響が少ない、補償深度（主に水深 200m）以深の資源性の高い海洋水と定義され<sup>1</sup>、安定した低温性、富栄養性、清浄性、水質の安定性など、表層水に比べて多くの有用な特徴を持っている。

海洋深層水は、大元をたどれば表層の一般的な海水である。高緯度地域で冷やされ比重が大きくなった表層の海水は、200m 以深の深海に沈降する。深海では光が十分には差し込まないために、光合成による有機物生産が進まない一方、マリンスノーと呼ばれる表層から沈降した有機物は微生物の働きにより無機物の状態まで分解される。その結果、有機物の分解産物である無機栄養塩類は海洋深層水中に高濃度で蓄積される。

海の深層では、急激な温度変化がないため水温は低温で安定する。植物によって有機物が生産されないために動物にとっての餌がなく、したがって生物の密度は表層より著しく低く、清浄性が高い。そして上記のとおり無機栄養塩類に富む。この 低温安定性、清浄性、富栄養性の 3 つの資源価値を利用して、国内外で各種の産業や研究開発が営まれている。

#### 1.1.1 海洋深層水の利活用の現状

##### (1) 概観

海洋深層水は単一物質であるが前述のとおり複数の資源価値をもち、それぞれの資源密度は低い、といった特徴がある。このため、深層水の利用は多岐にわたり、発電や冷房等のエネルギー利用から、農業、水産業、あるいは成分を利用した食品・飲料・化粧品等への工業利用なども行われている。主な用途を表 1-1 に示す。

また、これらの用途は、海洋深層水の持つ資源価値の一部のみを利用するものがほとんどであるため、ある用途で利用した海洋深層水を、別の資源価値が必要な用途で多段階に利用して経済性を高める「カスケード利用」方式が、ハワイ自然エネルギー研究所（NELHA: Natural Energy Laboratory, Hawai'i Authority）や日本の複数の取水地においても提案されている<sup>2</sup>。

<sup>1</sup> 中島利光, 「21 世紀の循環型資源 海洋深層水の利用」(2002)

<sup>2</sup> 藤田大介・高橋正征 編著, 「海洋深層水利用学 基礎から応用・実践まで」, 成山堂書店 (2006.11)

表 1-1 海洋深層水の利用分野

特性	利用分野
冷温性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 海洋温度差発電、火力発電への給気冷却・復水器利用</li> <li>・ 建物・地域冷房（直接およびヒートポンプ利用）</li> <li>・ 周年農業、冷室農業、植物工場</li> <li>・ 水産養殖</li> <li>・ 海水淡水化（フラッシュ蒸発法）</li> </ul>
清浄性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 海水淡水化（RO膜）</li> <li>・ 水素製造、次亜塩素酸製造</li> <li>・ 化粧品等高水質要求産業への利用</li> <li>・ タラソセラピー</li> </ul>
肥沃性 （富栄養性）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ミネラル回収、資源回収（リチウム、マグネシウム、ウラン等）</li> <li>・ 藻類培養（有価物利用、藻類バイオマス利用）</li> <li>・ 食品、サプリメントへの利用</li> <li>・ 飲料への利用</li> <li>・ 海域肥沃化・漁場創生</li> </ul>

（注）特性を複合的に利用する分野もあるが、ここでは主に利用される特性別に整理した。

## ② 国内外における海洋深層水利用

日本では 1985 年のアクアマリン計画以降、全国各地に取水施設が設置され、現在では国内 15 か所が稼働している（図 1-1）。この数は、世界随一である。海外では、世界最大の取水規模を持つハワイ（前出の NELHA）や大規模リゾートホテルの空調に利用されている仏領ポリネシア（タヒチ）、成分利用が多い台湾、韓国等、十数か所での取水と利用が行われている。



図 1-1 国内の海洋深層水取水地

出典：内閣府沖縄総合事務局経済産業部、「離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査」調査報告書 (2017.9)

### (3) 沖縄県における海洋深層水利用および関連調査

沖縄県における海洋深層水の利活用の検討は、1986年に県が実施した「沖縄県海洋科学技術基本構想調査」の中で、沿岸から離れたサンゴ礁のラグーンに海洋深層水を汲み上げて利用する「特殊ラグーン域生産型の利用」が提案されたのが始まりとなる。

その後、県は1994年度に「研究拠点立地条件等調査」、1995年度に「沖縄型海洋深層水総合利用システム開発調査」を実施、その結果を踏まえて1996年度に海洋深層水総合利用の基本方針を定めた。そして1997年度に実施計画を作成、1998年度から島尻郡仲里村(現久米島町)において研究施設の整備を開始し、2000年度に沖縄県海洋深層水研究所の開所に至った。同研究所の取水量：日量13,000トン、現在でも日本最大である。また、1997年には世界初の洋上設置型海洋深層水試験取水装置「海ヤカラ1号」が沖縄県海洋深層水開発協同組合により系

満市の喜屋武岬沖 30km の海域に沖縄県海洋深層水開発協同組合によって設置され、海洋深層水を利用した医療及び食品の研究開発が進められた（現在は廃止）<sup>3</sup>。

沖縄県海洋深層水研究所（沖縄県農林水産部所管）では、水産および農業への利活用の研究開発を実施するとともに、民間企業・団体への技術移転と海洋深層水および表層海水の分水（有償）も行っており、研究所が立地する沖縄県久米島町における海洋深層水利用産業の規模は年間生産額 24.8 億円に達している、同町の主要産業となっていると報告されている<sup>4</sup>。同時に、沖縄県の特産である海ぶどうについては夏季の高水温障害回避による安定供給（久米島海洋深層水開発(株)）、沖縄県が全国の 3 割のシェアを持つ車えびについても県内全域への種苗供給（沖縄県車えび漁協）など、県内主要水産業の下支えとしての役割も併せ持つとされている<sup>5</sup>。

なお沖縄県「沖縄 21 世紀ビジョン基本計画【改定計画】（沖縄振興計画 平成 24 年度～平成 33 年度）」（2017.5）においては、海洋深層水関連について、次のとおり記載されている。

---

第3章 基本施策 / 3 希望と活力にあふれる豊かな島を目指して / (7) 亜熱帯性気候等を生かした農林水産業の振興 / 【施策展開】キ フロンティア型農林水産業の振興

「亜熱帯の豊富な自然エネルギー等を活用した革新的な生産基盤施設や（中略）海洋深層水等を利用した養殖施設などの導入に取り組みます。」

---



---

第5章 圏域別展開 / 3 圏域別展開の基本方向 / (3) 南部圏域 / 【展開の基本方向】イ 圏域の特色を生かした産業の振興 / (ア) 観光リゾート産業の振興

「離島地域においては、座間味島や渡嘉敷島などにおけるダイビングやホエールウォッチングに代表されるエコツーリズム、久米島の海洋深層水を活用した保養・療養型観光、渡名喜島の古民家を活用した交流拠点づくりや離島留学など、島々に特有の自然・景観、伝統・文化等の魅力を生かした交流人口の拡大及び農林水産業等地場産業との連携による地域活性化に向けた取組を積極的に推進し、離島ならではの体験・滞在型観光を促進します。」

---

また、県以外の機関においても、久米島町による「久米島海洋深層水複合利用基本調査」（2010年度）や、内閣府沖縄総合事務局による「離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査」（2017年度）など、沖縄県における海洋深層水利活用拡大に向けた調査・検討も実施されている（別添資料 -1 参照）。

<sup>3</sup> 久米島町、緑の分権改革推進事業「久米島海洋深層水複合利用基本調査」調査報告書(2011.3)

<sup>4</sup> 内閣府沖縄総合事務局経済産業部、「離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査」調査報告書(2017.9)

<sup>5</sup> 沖縄県海洋深層水研究所 説明パネル

## 1.1.2 エネルギー資源としての海洋深層水

海洋深層水は、エネルギー資源としての性格も併せ持っている。

低温安定性という特質については、省エネ型冷房への利用や、農業における土壌冷却、水産養殖の水温調整などの用途に、一般的な電気式冷熱供給よりもはるかに小さいエネルギー（電力）消費で冷熱を供給できることから、直接的に省エネルギーに活用できる。沖縄県海洋深層水研究所の取水設備を冷熱供給機器として評価すると COP は 33 と算定され、一般的な電気式冷熱供給機器（COP = 4～5 程度）の 7～8 倍程度の効率が達成される（図 1-2）。また、本事業で実証を行った海洋温度差発電（OTEC）や、佐賀大学が同研究所内で実証を行う水温差を駆動源とした海水淡水化など、冷熱を電力や真水に変換することで間接的にエネルギーを創出する、または低エネルギー消費での生産活動を行う技術も存在する。

また、清浄性については利用時の前処理にかかるエネルギーの削減、富栄養性については植物に対する肥料を生産するエネルギーの削減に、それぞれつながる。これにより、エネルギー効率の高い産業の創出に寄与出来る可能性がある。

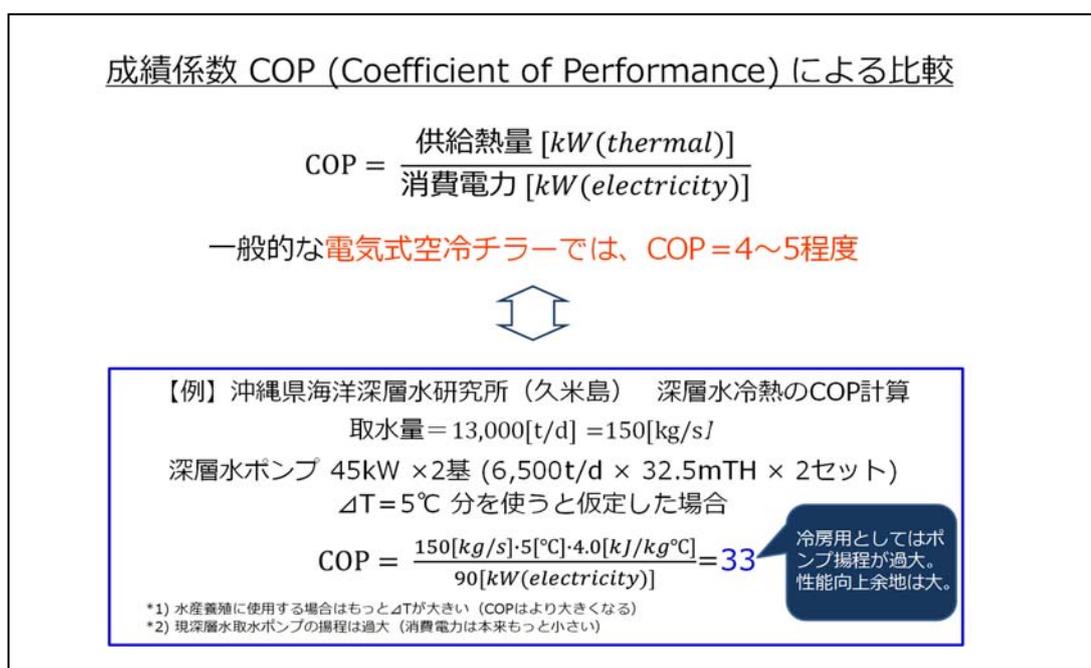


図 1-2 深層水冷熱のエネルギー効率の試算

（本事業で作成の説明パネルより）

## 1.2 海洋深層水を用いた発電技術：海洋温度差発電

### 1.2.1 海洋温度差発電の概要

#### (1) 海洋に蓄えられた熱エネルギー

海洋温度差発電（Ocean Thermal Energy Conversion: 以下「OTEC」）は、表層の温海水と深層の冷海水（海洋深層水）との温度差エネルギーを電気エネルギーに変換する発電技術である。

海表面における太陽光の反射率(アルベド)は、太陽の高度が大きいときには非常に小さく、その値は 0.1 以下である。このため、海洋の表層には、太陽光の持つエネルギーの大部分が吸収され、表層混合層に熱エネルギーとして蓄えられる。このため低緯度地域では、表層混合層の温度はほぼ年間を通じて 26～30 程度に保たれている。

海洋温度差エネルギーは、比熱の大きい海洋に蓄えられた熱エネルギーであるため、他の自然エネルギーと比較して発電出力が安定しているという大きな特長を有する。また、季節変動（表層水温度の変動）が予測可能であるため、計画的な発電が可能となり得る。

図 1-3 に熱帯および亜熱帯地域の海水の垂直温度分布を、図 1-4 に世界の海の表層と深層 1,000m との温度差分布を示す。

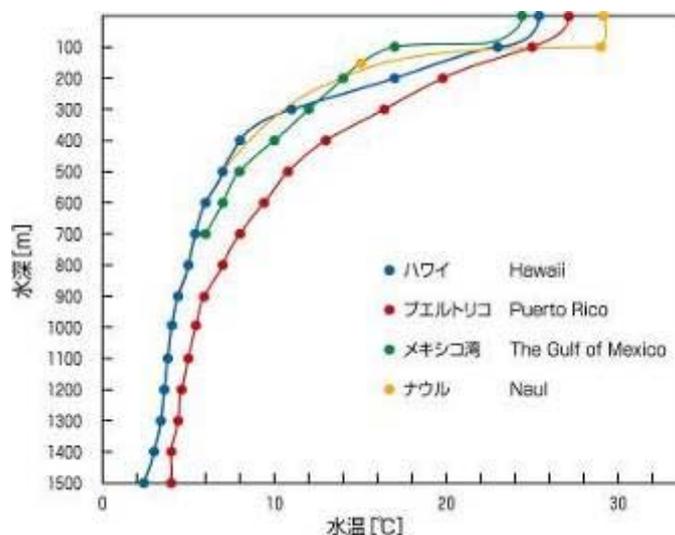


図 1-3 代表的な南洋嶼国の温度差分布

出典: 佐賀大学海洋エネルギー研究センターホームページ  
[http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about\\_otec.html](http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about_otec.html)

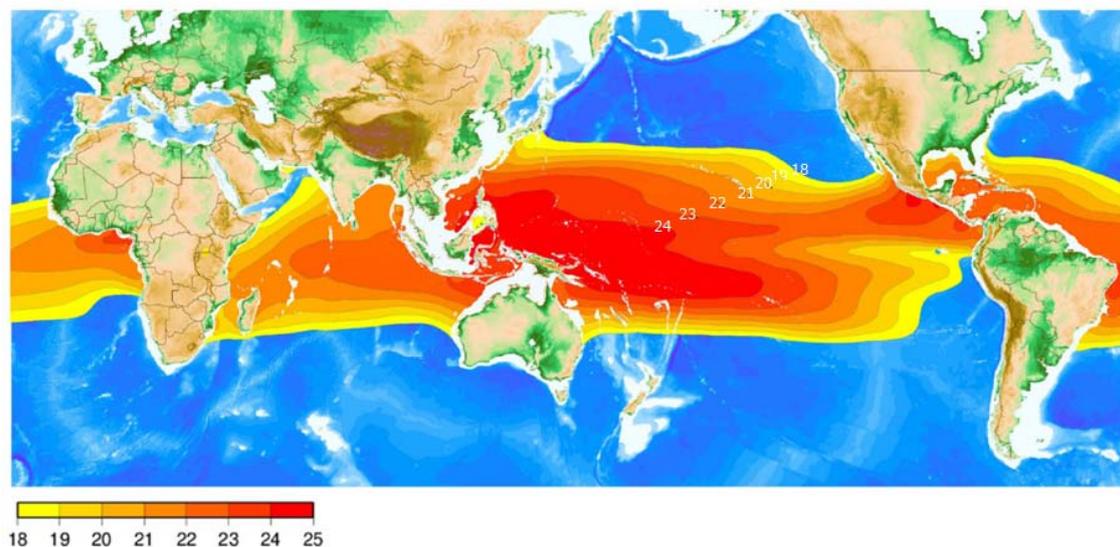


図 1-4 南洋の表層と深層(水深 1000m)の温度差分布  
(佐賀大学海洋エネルギー研究センター・(株)ゼネシス作成)

## (2) 発電原理

比較的小さい温度差から電力を取り出す技術としては、低沸点媒体を用いたタービン発電、スターリングエンジンを用いた発電、ゼーベック効果を用いた熱電素子による発電が挙げられる。このうち、20 程度という非常に小さい温度差を扱う OTEC では、タービン発電方式が最も現実的であるとされ、研究開発が進められている。そこで、以降はタービン発電方式による OTEC について述べる

タービン発電方式は、図 1-5 のとおりオープンサイクルおよびクローズドサイクルに大別されるが、本紙では大規模に適しているとされ、本事業の発電設備でも採用したクローズドサイクルについて取り上げる。

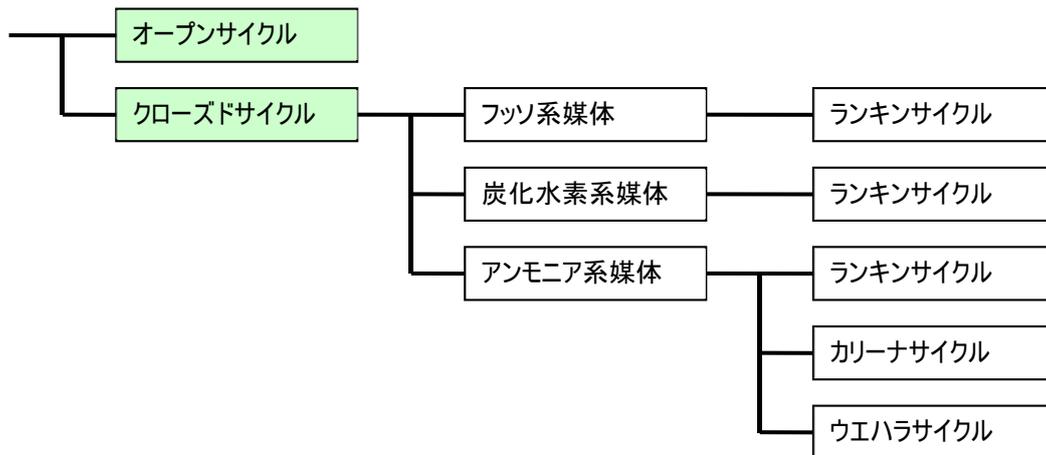


図 1-5 海洋温度差発電(OTEC) タービン発電方式の分類

### クローズドサイクル

図 1-6 にクローズドサイクルのフローを示す。

系内に封入された低沸点媒体は、作動流体ポンプにより蒸発器に送られる。蒸発器内で表層水により熱せられた作動媒体は蒸発し、タービン発電機を駆動する。タービン駆動後の作動媒体蒸気は、凝縮器内で海洋深層水により冷却され、凝縮する。

クローズドサイクルに用いる低沸点作動媒体としては、アンモニア系媒体、HFC（ハイドロフルオロカーボン）系媒体、炭化水素系媒体の 3 つが提案され、比較・検討されてきた。現在では、プラントに用いられる材料との適合性、環境性（ODP(オゾン破壊係数)および GWP(地球温暖化係数)）、熱力学的特性、輸送物性等の総合的評価により、大型化した際はアンモニア系媒体が適していると言われている。

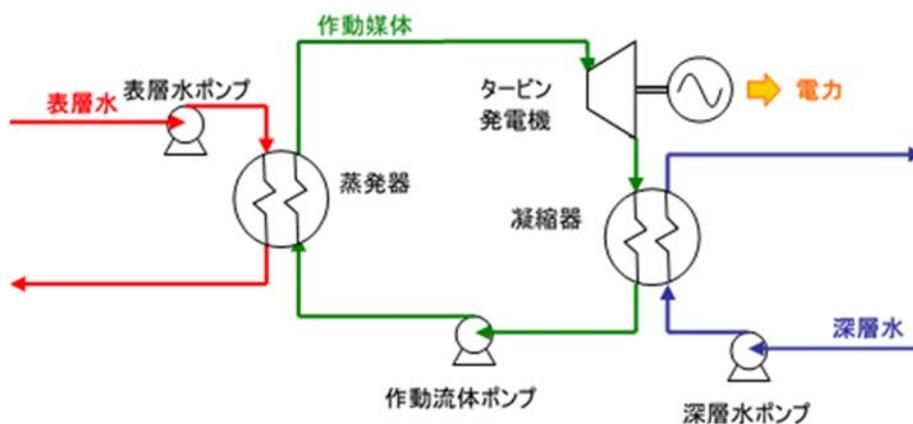


図 1-6 クローズドサイクルの概略フロー(ランキンサイクル)

### (3) 環境性

OTEC は、燃料を使用せずに発電するため、運転時に化石燃料を消費せず、二酸化炭素を排出しない環境配慮型の発電方式である。また、設備建設時から廃棄まで考慮したライフサイクル評価においても、1995年時点でエネルギーペイバックタイム<sup>6</sup>はプラント寿命に比べ遥かに短い6年以下(図1-7)、二酸化炭素排出量原単位<sup>7</sup>は火力発電に比べて小さい $0.132\text{kg}\cdot\text{CO}_2/\text{kWh}$ (図1-8)と、高い環境性が示されており、技術開発によりさらなる向上が見込まれる。

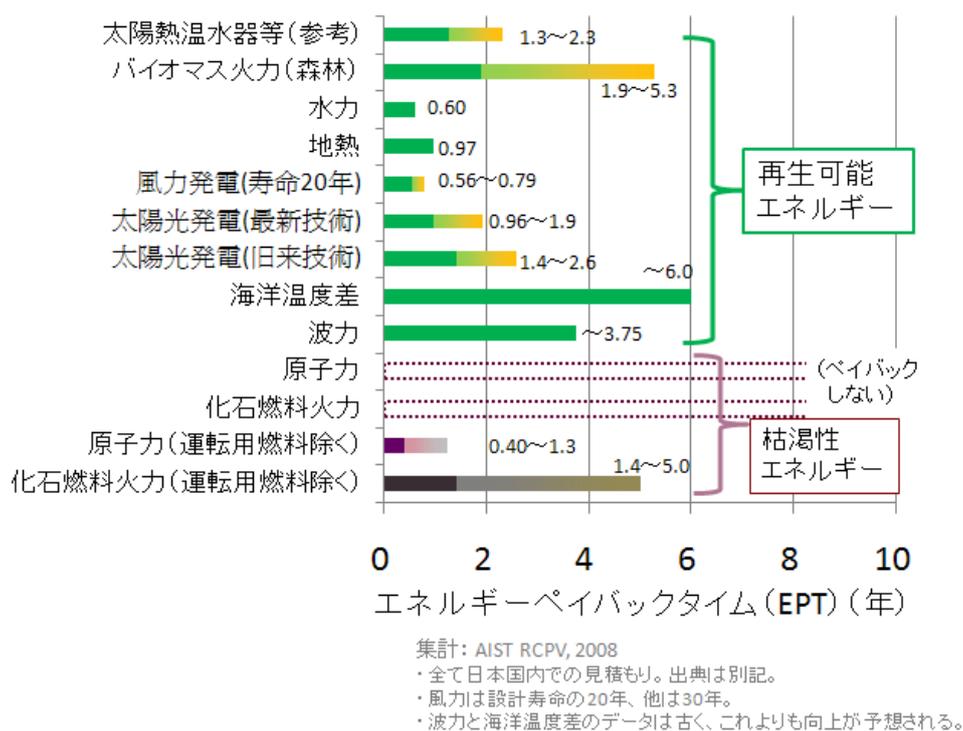


図 1-7 発電方式別 エネルギーペイバックタイム

出典: 独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ  
[http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/e\\_source/RE-energypayback.html](http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/e_source/RE-energypayback.html)

<sup>6</sup> エネルギーペイバックタイム: ライフサイクル中に投入されるのと同じだけのエネルギーを、発電によって節約できるまでに必要な稼働期間を表す。

<sup>7</sup> (ライフサイクル評価における) 二酸化炭素排出量原単位: ライフサイクル中の CO<sub>2</sub> 排出量を、同総発電量で除した数値。

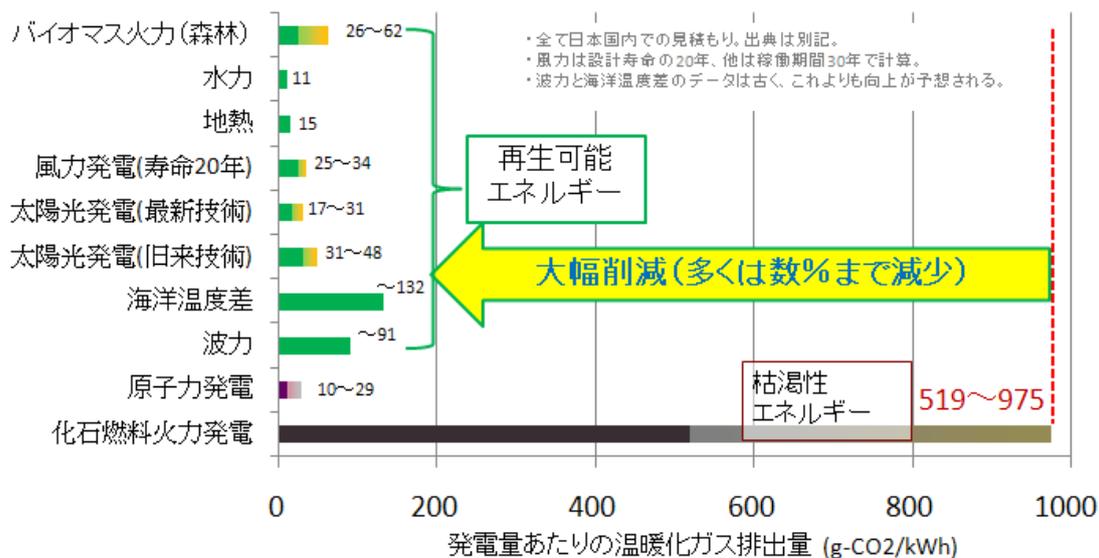


図 1-8 発電方式別 二酸化炭素排出量原単位(ライフタイム)

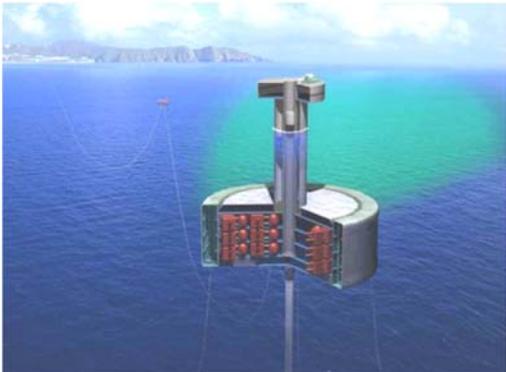
出典: 独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ  
 ([http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/e\\_source/RE-energypayback.html](http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/e_source/RE-energypayback.html))

なお、本事業においても、ライフサイクルアセスメント (LCA) 手法による OTEC のエネルギー消費量および二酸化炭素排出量原単位の精査を実施した (第 部 3.3 節参照)。

## (4) 発電プラント種別

発電プラントの規模や設置目的により、沿岸設置式と洋上浮体式の2つの形式に大別される。それぞれの特徴を表 1-2 に示す。

表 1-2 海洋温度差発電(OTEC)の形式

項目	陸上設置型 OTEC	洋上浮体型 OTEC
外観		
商用プラントの規模	ユニットあたり発電出力 1 ~ 10 MW 級	ユニットあたり発電出力 10~100 MW 級
設置の目的	発電 + 深層水複合利用	発電 ( + 発電した電力を他形態へ転換・輸送 )
適用可能な複合利用技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 建物空調 / 地域冷房</li> <li>- 海水淡水化</li> <li>- 養殖漁業への利用</li> <li>- 農業利用 ( 冷室農業 )</li> <li>- 食料品/飲料/保養施設など.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 電力から他形態への転換: 水素、液体燃料、EV 用バッテリー充電等</li> </ul>
普及対象	南洋の離島あるいは沿岸地域 ( 電力供給と、深層水複合利用による産業振興 )	熱帯・亜熱帯地域での大規模エネルギー供給基地



1980 年前後の日米を中心とした第一次開発ブームから 30 年もの年月を経て、再び脚光を浴びている理由としては、以下のような OTEC 特有の要因が大きい。

### 低温の熱源を利用した発電設備の商用化

工場の低温排熱や地熱水等の、これまで利用されてこなかった低温の未利用熱を用いたバイナリー発電が、1980 年台以降商用化されている。日本では 1999 年に運転を開始した新日鐵住金鹿島製鐵所の転炉排熱回収(98℃ 温水)による 3,450kW の発電設備を皮切りとして実用化が進んだ。2006 年には九州電力 八丁原地熱発電所に出力 2,000kW、2007 年には富士石油 袖ヶ浦製油所に出力 3,450kW のバイナリー発電所が建設されている(表 2-3)。OTEC(現在主流のクローズドサイクル)の原理は、このバイナリー発電と同一である。

表 2-3 国内の大型バイナリー発電施設

	住友金属 鹿島製鐵所	九州電力 八丁原地熱発電所	富士石油 袖ヶ浦製油所
外観			
出力	3,450kW	2,000kW	4,000kW
熱源	98℃ 循環冷却水	低温蒸気	116℃ 石油ガス
冷却源	海水	空冷	冷却塔循環水
稼働年	1999年	2006年	2007年
媒体	アンモニア-水	ペンタン	アンモニア-水
メーカー	荏原製作所	ORMAT(米)	千代田化工建設

写真出典：各社ホームページ、公開資料など

さらに 2012 年 7 月に日本においても再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度が開始され、地熱をエネルギー源としたバイナリー発電が地熱発電の一種として同制度の対象となると、バイナリー発電は商用化が急速に進んだ。また、2012 年 4 月に施行された小型バイナリー発電設備の規制見直しにより建設コスト及び運用コストが低減されたこともあって、全国の温泉地で検討が進み、メーカー側も日本では神戸製鋼所、川崎重工、三井造船、富士電機等が次々に小型バイナリー発電機市場に参入した。これまで日本における地熱バイナリー発電は実質的に八丁原地熱バイナリー発電所(2000kW)1ヶ所(実証用の小規模のものを除く)であったが、

2012 年 12 月開所の新潟県松之山温泉バイナリー発電所 (87kW) 開所以降、鹿児島県山川地熱発電所内 (2013 年 2 月稼働開始)、長崎県小浜温泉 (210kW: 2013 年 4 月稼働開始) 等、次々と小型の地熱バイナリー発電所が誕生した。

なお、日本におけるバイナリー発電所の最大出力は 5MW 級 (2015 年 6 月稼働開始の菅原バイナリー発電所 (5,000kW, 九電みらいエネルギー株式会社) および 2017 年 5 月稼働開始の滝上バイナリー発電所 (5,050kW, 出光大分地熱株式会社) ) であるが、海外では 10MW を超える発電所も稼働している<sup>9</sup>。

### 海洋構造物に関する技術信頼性の向上

OTEC の発電プラントは、大規模商用化時において洋上浮体式の形式をとるとされている。一方、この 30 年で海底油田掘削及び関連設備は大水深化が進み、1000m 以上の海底から油田を掘削する海洋構造物も一般的になっている (図 1-10)。この技術は、商用の OTEC プラントにも適用が可能である。

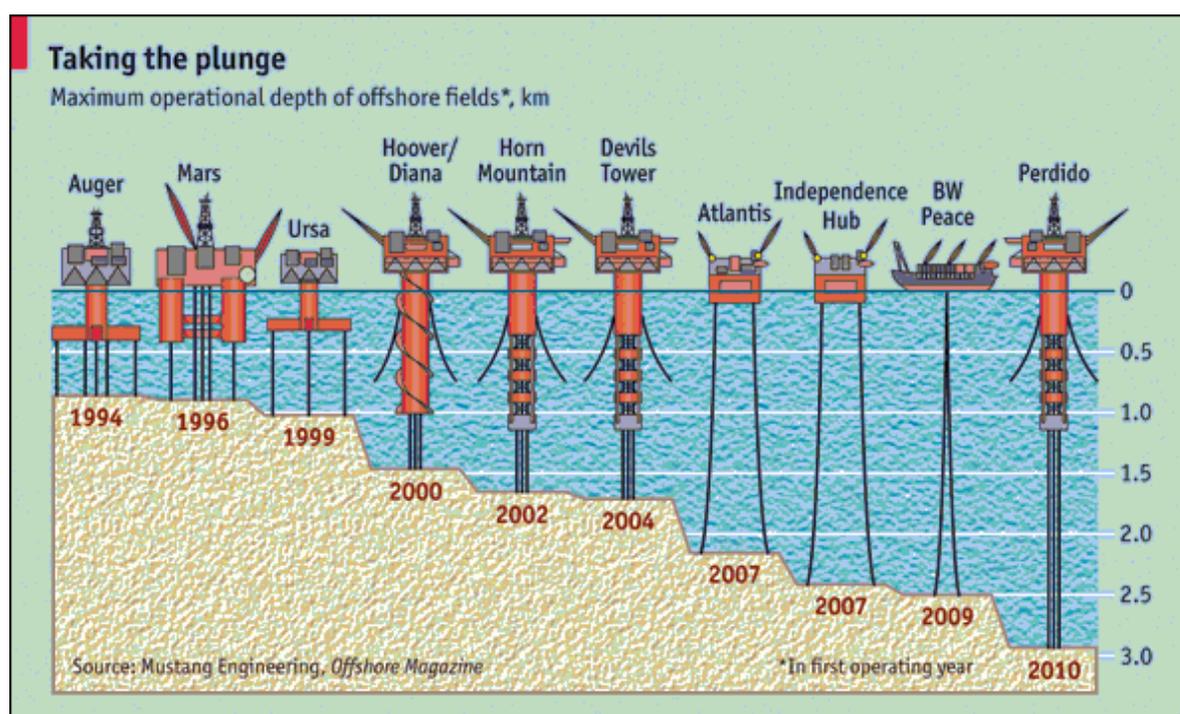


図 1-10 (参考) 海洋構造物の大水深化

出典: The Economist "Plumbing the depths" <http://www.economist.com/node/15582301>

<sup>9</sup> inhabitat, "The World's Largest Binary Geothermal Power Plant Opens in New Zealand", <https://inhabitat.com/the-worlds-largest-binary-geothermal-power-plant-opens-in-new-zealand/?variation=d> (2019 年 3 月閲覧)

### 上記の技術成熟による発電コストの信頼性向上

上記 及び は、OTEC の技術信頼性を高めただけでなく、同技術の延長上で OTEC プラントを計画、基本設計が可能であることから、その建設コストや運用時の発電コストの見積精度が大きく向上した。

### 発電ポテンシャルと市場の大きさ

2010 年度、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）は海洋再生可能エネルギーのポテンシャル調査を実施した。この調査において、日本における OTEC の導入ポテンシャルは、沖縄及び小笠原諸島を中心に、離岸距離 30km 以内・表層と深層の水温差 20 以上の海域で 5,952MW、離岸距離制限なし・水温差 20 以上の海域では 173,569MW と算定された<sup>10</sup>。

日本は沖縄や小笠原を除くほとんどの海域では、表層水温が低いことから「水温差 20 以上」の条件を満たさない。一方、南～東南アジアの沿岸国、南太平洋島嶼国の海域は、より大きな水温差が得られることから、より大きなポテンシャルが得られる。また、これらの地域に存在する国々は今後も経済成長が期待されるインドネシア、マレーシア等の新興国も多く含まれている。

表 2-4 海洋温度差発電(OTEC)の導入ポテンシャル(国内)

単位：メガワット（MW）

電力管区	シナリオ 1		シナリオ 2a		シナリオ 2b	
	15 以上	20 以上	15 以上	20 以上	15 以上	20 以上
北海道電力	11	0	31	0	44	0
東北電力	609	0	1,692	0	8,072	0
東京電力	2,450	880	6,806	2,444	139,625	83,294
北陸電力	232	0	644	0	4,475	0
中部電力	239	0	664	0	4,475	644
関西電力	178	30	494	83	8,558	1,139
中国電力	203	0	564	0	7,981	0
四国電力	215	23	597	64	6,583	1,928
九州電力	1,351	203	3,753	564	26,225	15,572
沖縄電力	1,628	1,007	4,522	2,797	74,453	70,992
合計	7,116	2,143	19,767	5,952	280,491	173,569

出典：NEDO 「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」 表 4-3-2-1(107 頁), 平成 23 年 3 月

シナリオ 1 : 沿岸固定、離岸距離 30km 以内

シナリオ 2a : 沖合浮体、離岸距離 30km 以内

シナリオ 2b : 沖合浮体、離岸距離制限なし

<sup>10</sup> NEDO, 2011 年 3 月, 「海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務」, 107 頁 表 4-3-2-1

## (1) 国内の状況

このような中、日本では関連技術も含めて次のような展開がなされている。

### 次世代海洋エネルギー発電技術研究開発 (NEDO)

2011 年度にスタートした NEDO「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」では OTEC の研究開発プロジェクトも採択され、2011 年度から 2014 年度にかけて研究開発が実施された。受託者は佐賀大学と株式会社神戸製鋼所で、OTEC に用いられる熱サイクルと熱交換器の高効率化の技術開発が行われた（別添資料 -1 参照）。

### 海洋エネルギー発電システム実証研究 (NEDO)

2014 年 7 月、NEDO「海洋エネルギー発電システム実証研究」にも OTEC の実証研究が採択された。共同研究先はジャパン マリンユナイテッド株式会社、国立大学法人佐賀大学で、2014 年度から 2017 年度にかけて、次の実証研究が行われた（別添資料 -1 参照）。

- ・実海域実証研究のための FS(実施可能性調査)
- ・先導的な OTEC システム技術の実海域実証試験
- ・海洋環境への影響調査
- ・大型発電設備の概念設計

### 海洋再生可能エネルギー実証フィールドの選定

海洋再生可能エネルギーの実証実験のための海域を提供する「実証フィールド」について、内閣官房総合海洋政策本部が都道府県を対象に公募を行なった。これに応じて 2014 年 2 月末の公募締切までに、岩手県、新潟県、和歌山県、長崎県、佐賀県、鹿児島県、沖縄県の 7 県が応募した。2014 年 7 月には洋上風力、波力、海流、潮流、海洋温度差の 5 種に対し、それぞれ実証フィールドが選定され、2017 年の追加選定も含めて、現在は 5 県 7 海域が実証フィールドとなっている（表 2-5）<sup>11</sup>。

このうち、OTEC は沖縄県久米島のみ設置されている。

<sup>11</sup> 海洋再生可能エネルギー実証フィールドの選定結果について（総合海洋政策本部事務局）  
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/energy/201407/testfield20140715.html>

表 2-5 海洋再生可能エネルギー実証フィールド選定先

都道府県	海域	エネルギーの種類
新潟県	粟島浦村沖	海流（潮流）、波力、浮体式洋上風力
佐賀県	唐津市 加部島沖	潮流、浮体式洋上風力
長崎県	五島市 久賀島沖	潮流
	五島市 椛島沖	浮体式洋上風力
	西海市 江島・平島沖	潮流
鹿児島県 <sup>(*)</sup>	十島村 口之島・中之島周辺	海流
沖縄県	久米島町	海洋温度差

(\*) 鹿児島県のみ 2017 年 6 月追加で選定された。他は 2014 年 7 月選定。

### 第 3 期 海洋基本計画における位置づけ

2018 年 5 月に閣議決定された第 3 期海洋基本計画では、海洋エネルギーや海洋深層水利用について、次のとおり位置づけられている。

#### (海洋エネルギー関連 抜粋)

#### 第 2 部 2 . 海洋の産業利用の促進

##### (1) 海洋資源の開発及び利用の促進

##### エ 海洋由来の再生可能エネルギー 波力・潮流・海流等の海洋エネルギー

- 電力供給コストが高い離島において、長期連続運転に係る性能や信頼性、コストデータ等の検証等を行うための実証研究に取り組みつつ、離島振興策との連携を図る。(内閣府、経済産業省、環境省)
- これまでの研究開発の成果を踏まえて、実用化の見通しが高い技術を見極めながら、引き続き、経済性の改善、信頼性の向上等の技術開発、実証試験及び環境整備に取り組む。(経済産業省、環境省)

#### (海洋深層水利用関連 抜粋)

#### 第 2 部 2 . 海洋の産業利用の促進

##### (2) 海洋産業の振興および国際競争力の強化

##### イ 海洋の産業利用の拡大

- 離島における海洋深層水等の地域資源を活用した産業の振興を通じて、海洋産業の振興を図るとともに、再生可能エネルギーの利用の促進を図る。(内閣府、経済産業省、環境省)

### ジャパン マリンユナイテッド社による AIP (概念承認) 取得

2013 年 9 月、ジャパン マリンユナイテッド社は、世界で初めて浮体式の没水型 OTEC プラントで日本海事協会 (NK) より AIP (概念承認) を佐賀大学と共同で取得したと発表した (図 1-11)。

同社は、上記発電プラントと類似の形式となる、福島沖浮体式洋上風力発電設備のための浮体式洋上変電所 (2013 年 11 月稼働開始) を建造しており、浮体構造の面で技術信頼性が大きく向上した。

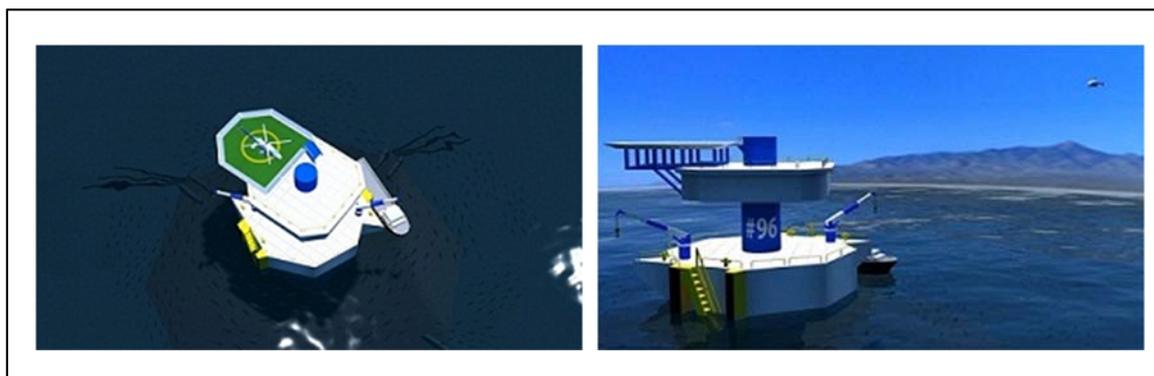


図 1-11 没水型海洋温度差発電(OTEC)イメージ図

(出典:同社プレスリリース)

## (2) 海外の状況

2013年9月9-10日、“Asia Pacific Clean Energy Summit and Expo”において、“International OTEC Symposium”が開催された。このシンポジウムは、米国 NOAA ( National Oceanic and Atmospheric Administration Office of Ocean and Coastal Resource Management (OCRM) OTEC Team と KIOST (Korean Institute of Ocean Science and Technology) Deep Ocean Water Application Research Center (DOWARC) OTEC Team の共同ホストにより開催され、米国、韓国、欧州(英国、フランス、オランダ)、日本、マレーシア、フィリピン等の民間企業を中心に発表があった。その後、毎年会場を変え、2017年には第5回大会が仏領レユニオン島で、2018年には第6回大会が沖縄(沖縄科学技術大学院大学)で開催された。

本項では、このシンポジウムにおける各国の発表内容等から、それぞれの開発動向について概観する。なお、本項の出典資料は本項末にまとめて記す。

### 韓国

韓国の OTEC 開発は、韓国船舶・海洋工学研究院 (KRISO) が政府の資金提供を受けて実施している。2013年、20kW の実験装置開発からスタートし、その後、200kW 規模の実験装置を開発している。この実験において、韓国周辺海域では、十分な温度差が得られないため、加温した水を表層水として使用している。この研究成果は小規模洋上型 OTEC の設計に活用され、2016年に AIP(Approval in Principal: 概念承認)を取得している [Bureau Veritas 2016]。



図 1-12 韓国 20kW 実証実験装置



図 1-13 韓国 洋上型 OTEC 設計 [Bureau Veriatas 2016]

当初、KRISO は洋上型の小規模 OTEC 設備を開発し、キリバス タワラ島に一号機を置くことを計画していたが、海洋深層水の複合利用も行いたいとのステークホルダーの要請を受け、現在はキリバスでの陸上設置型 OTEC 建設を目指しているとされる。

第 6 回シンポジウム（2018 年 9 月）時点で、KRISO の OTEC チームは、発電端出力 1MW（送電端出力 600kW）の OTEC 発電所用のタービン、凝縮器、蒸発器の調達を 2018 年中に完了することを発表した。2019 年には、取水管やその他の必要資材の調達を完了、バージ上に設置して韓国周辺海上にてシステムの試験を行う予定である。2020 年には、この OTEC システムをタラワ島へと牽引し設置する予定となっている [Kim 2018]。

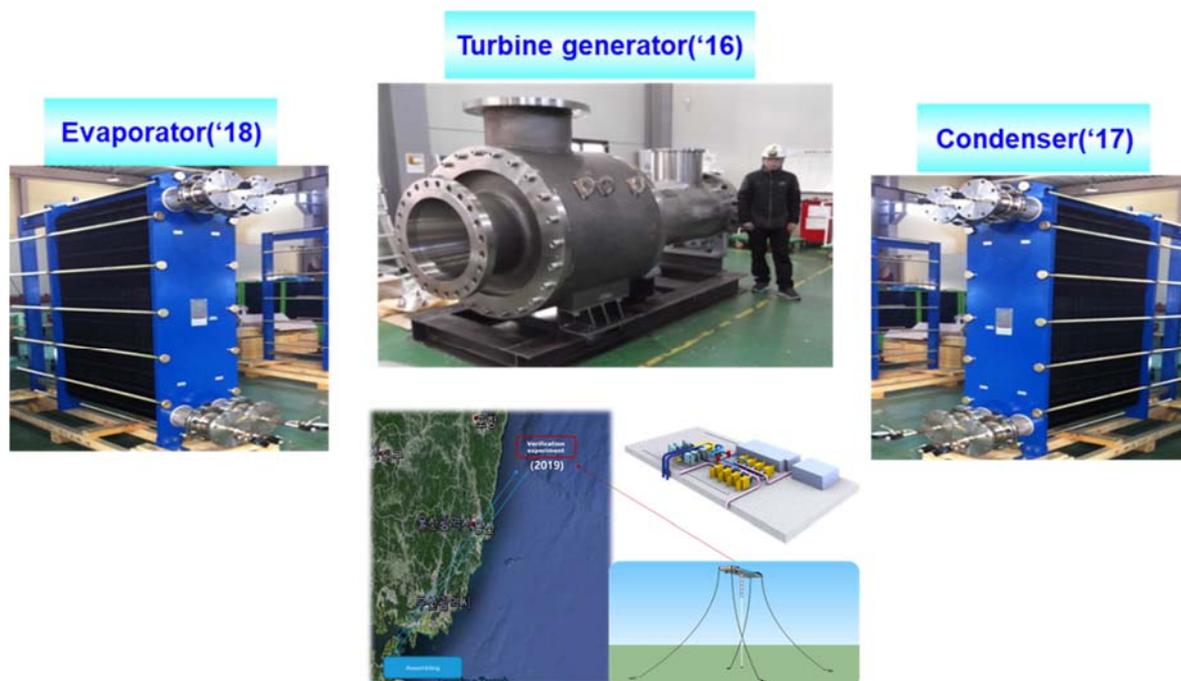


図 1-14 韓国 2018 年に完成した 1MW OTEC 設備の構成機器類 [Kim 2018]

韓国の政府機関や民間企業は同国内の数カ所で海洋深層水取水管を運用しており、その中には、取水量日量 30,000m<sup>3</sup> の世界第 2 位の大きさの取水管も含まれている。

## フランス

フランスの Naval Energies (旧 DCNS Energies) は、潮流発電、洋上風力発電、OTEC の開発を行ってきた(ただし、2018 年、Naval Energies は潮流発電から撤退し、洋上風力と OTEC の 2 つの開発に注力している [NavalEnergies 2018])。同社の親会社である Naval Group はフランス政府が 62.25% の株を保有しており [Naval Group 2019]、軍需産業、政府調達対応を主業務としている。Naval Group は、軍需産業用の熱交換技術の開発に活用することも視野に OTEC の開発に取り組んでいるとされる。再編成として、マルティニーク島の 10MW プロジェクトの様な大規模洋上 OTEC の開発から、海洋深層水の複合利用を伴う小規模 (1MW 程度) の陸上型 OTEC の開発に、ここ 1 年でシフトしている模様である。

なお、同社は 2012 年からインド洋のレユニオン島で、小規模の実験装置を運転している。ここでは、熱交換器の試験の他、フランス政府の資金提供を受けて海中の生物付着に関する様々な試験を行っている [DCNS 2013]。



図 1-15 NAVAL ENERGIES の OTEC 研究室(レユニオン島)

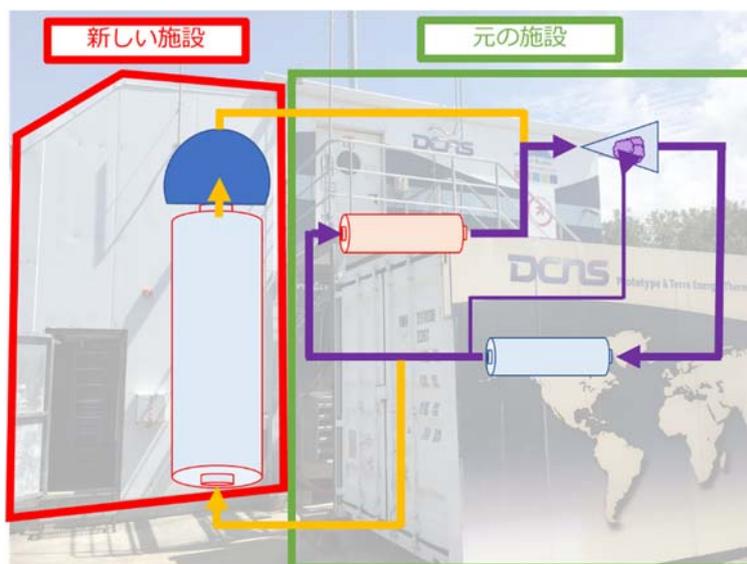


図 1-16 OTEC 研究室内のイメージ

また、海底原油開発企業として成長を遂げたフランスのエンジニアリング企業、Bardot は、リゾート地向けの小規模 OTEC と洋上石油産業の開発をしてきた。また、フランス内に基盤技術を開発するための小規模実験装置を設け、モルディブや海外でのプロジェクトを開発してきた [Guerin 2018]。



図 1-17 Bardot OTEC 実験装置 [Bardot Ocean 2019]

なお、フランス領ポリネシアのインターコンチネンタルホテルでは、海洋深層水の冷熱を利用した空調システム（SWAC:Sea Water Air Conditioning System）を数年来商用利用している [Pacific Beachcomber 2015]。



図 1-18 ボラボラ インターコンチネンタルリゾート [Pacific Beachcomber 2015]

### オランダ

デルフト工科大学発のベンチャー企業である Bluerise は、キュラソー、ジャマイカ、コロンビア、スリランカでの海洋深層水の複合利用を伴ったスモールスケールの OTEC のプロジェクト開発をしている [Bluerise 2019]。同社は、小規模の OTEC 実験装置をデルフト工科大学内で運転しており、さらに、海外のプロジェクト開発チームを拡大するためのクラウドファンディング活用に成功している [Marine Energy 2017]。Bluerise は、短期間で OTEC 技術と市場を開発するために、OTEC で作り出した電気を用いた深層水冷熱利用空調システム (SWAC) の開発に重きを置いている。

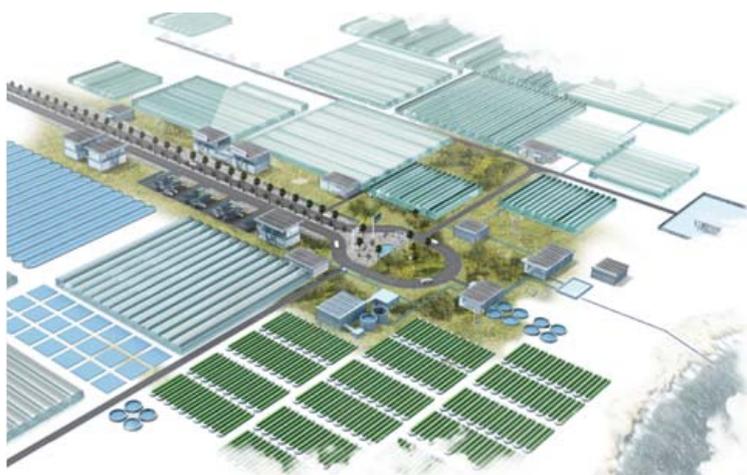


図 1-19 Bluerise キュラソープロジェクトのイメージ [Bluerise 2019]

## 米国

ハワイ州立自然エネルギー研究所 ( Natural Energy Laboratory, Hawai'i Authority: NELHA ) の海洋深層水取水取水管の設計を担当したマカイ海洋開発 ( Makai Ocean Engineering ) は、2011 年に OTEC 用の熱交換器試験設備を建設し、その運用を手掛けている。この試験設備は、ロッキードマーティン社による 10MW 洋上プロジェクト開発の際に、同社製熱交換器の試験にも用いられた。2014 年、マカイ海洋開発は、NELHA の 105kW OTEC 実証設備を実現させるために同試験設備にタービン発電機を追設し、2015 年に運転を開始した。

また、NELHA は 2014 年および 2017 年に、同所敷地内に設置する 1MW 規模の OTEC 設備の提案公募を実施した ( Request for Interest: RFI ) 。



図 1-20 マカイ OTEC 実証設備 (提供:マカイ海洋開発)

その他、米国では OTEC International (米国に拠点を置く会社で、ケイマン諸島で小規模 OTEC プロジェクト開発を実施 [OTEC International 2014])、OTEC Corporation (米国領ヴァージン諸島に OTEC をエネルギー源とするエコ・ヴィレッジのプロジェクト開発を実施 [OTEC Corporation 2019])、Excipio Energy (OTEC を実証を含めた洋上海洋エネルギーを統合するビジネスをテキサスで実施 [Excipio Energy 2019]) 等、数社が OTEC に関する活動を行っている。

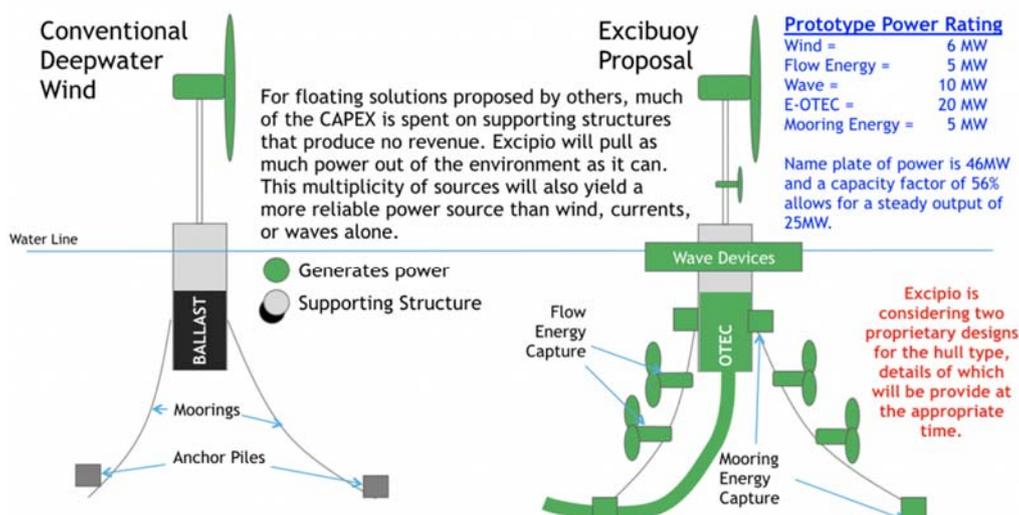


図 1-21 Excipio Excibuooy Proposal [Excipio Energy 2019]

### メキシコ

メキシコ政府は、メキシコ海上における海洋エネルギー資源を評価するための 5 年プロジェクトを 2018 年に立ち上げた。プロジェクトの一環として、メキシコ国内の複数の大学で、OTEC 開発の適地調査や小規模な実験装置の開発をスタートさせている [Romero 2018]。



図 1-22 メキシコ OTEC 実験装置 (製作中) [Romero 2018]

### インド

インドは、約 20 年前から日本と共同で OTEC 開発を行っている [Ravindran 1999]。また、最近で、インド海軍基地のための OTEC 開発も実施している。OTEC の適地調査も実施済み。

開発段階は不明だが、ラクシャディープ諸島が OTEC と深層水冷熱空調システムが結合した初の設備建設地となる見込みである [Chaitanya 2018]。

## マレーシア

マレーシア工科大学は、自国での OTEC 開発を目指して OTEC 研究センターを設立し、日本やその他の国や企業と共同研究を行ってきた。OTEC の適地は多数確認されたが、自国でプロジェクト開発をするには資金が不足している。政府は、長期戦略計画の中の終盤に OTEC を盛り込んでおり、SATREPS<sup>12</sup>プロジェクトによる日本との共同開発を開始した。



図 1-23 Malaysia 2050 Plan [Thirugnana 2018]

## 国際機関

国際エネルギー機関 International Energy Agency (IEA) は、2001 年から政府間協議会である The Ocean Energy Systems Technology Collaboration Programme (OES) を設立し、海洋エネルギーに関する情報収集を実施している。図 1-24 に、OES が公開している OTEC に関する現在のプロジェクトを示す。

国際電気標準会議 International Electrotechnical Commission (IEA) では、波力発電や潮流発電の標準化を担当してきた TC114 “Marine energy - Wave, tidal and other water current converters”において、OTEC に関する標準化の議論が行われている。

<sup>12</sup> 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development : 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 並びに国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) と独立行政法人国際協力機構 (JICA) が共同で実施している、開発途上国の研究者が共同で研究を行う 3~5 年間の研究プログラム <https://www.jst.go.jp/global/> (2019.3 参照)

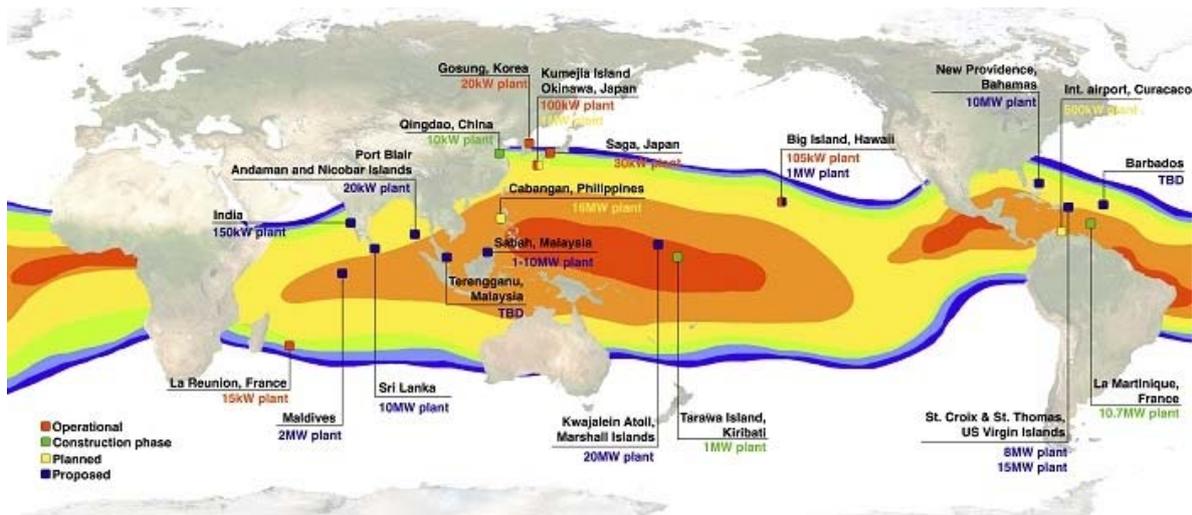


図 1-24 IEA OES による世界の OTEC プロジェクトマップ [OES 2018]

### 参考文献（海外動向）

- Bardot Ocean. Test your OTEC Project Feasibility at Bardot OTEC Lab. (2019.1.28)  
<https://www.bardotocean.com/products/test-your-otec-project-feasibility-at-bardot-otec-lab>.
- Bluerise. Applications. (2019.1.29) <http://www.bluerise.nl/applications/>.
- Bluerise Facebook Page. (2019.1.20).  
<https://www.facebook.com/bluerise.nl/posts/2042312699138304>
- Bureau Veritas. BUREAU VERITAS APPROVES OCEAN THERMAL ENERGY CONVERTER. (2016.1.29). <https://group.bureauveritas.com/bureau-veritas-approves-ocean-thermal-energy-converter>.
- ChaitanyaKrishnaSV. World's First self-powered desalination plant by NIOT coming up in Lakshadweep. (2018.10.23).  
<http://www.newindianexpress.com/nation/2018/oct/23/worlds-first-self-powered-desalination-plant-by-niot-coming-up-in-lakshadweep-1888841.html>.
- DCNS. “Marlin.” ADEME. (2013.11).  
[https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/marlin\\_veng.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/marlin_veng.pdf).
- Excipio Energy. ORE Technology. 2019. <https://excipioenergy.com/>.
- GuerinPierre. “OTEC Combined to Industrial Site.” 2018 International OTEC Symposium Proceedings. Onna: 2018 International OTEC Symposium Executive Committee, 2018.
- KimHyeon-Ju. “Proceedings of the 2018 International OTEC Symposium.” 2018 International OTEC Symposium. Onna, Okinawa: 2018 International OTEC

- Symposium Executive Committee, 2018.
- Marine Energy. Bluerise beats OTEC crowdfunding target. (2017.10.26).  
<https://marineenergy.biz/2017/10/26/bluerise-beats-otec-crowdfunding-target/>.
- Naval Group. Governance. (2019.1.21). <https://www.naval-group.com/en/group/en-profil/en-gouvernance/>.
- NavalEnergies, Benjamin MartinOkamuraShin によるインタビュー. Naval Energies Future Plans (2018.12.12)
- Ocean Thermal Energy Conversion. 2019. <https://www.makai.com/ocean-thermal-energy-conversion/>.
- OES. Status of OTEC and Its Resource Assessment. 2018. <https://www.ocean-energy-systems.org/oes-projects/task-11-status-of-otec-and-its-resource-assessment/#tab-results>.
- OTEC Corporation. EcoVillage. 2019. <http://otececovillages.com/>.
- OTEC International. FAQ - Cayman Islands. 2014. <http://www.oteci.com/faq/cayman-islands/>.
- Pacific Beachcomber. SWAC. 2015. <http://www.pacificbeachcomber.com/sustainability/swac/>.
- RavindranM. The Indian 1MW Floating OTEC Plant. 1999.  
<http://www.clubdesargonautes.org/otec/vol/vol11-2-1.htm>.
- RomeroVictor. “ Advances in the Design and Simulation of the Components of a 1KWe OTEC Plant for the Mexican Caribbean Sea. ” 2018 International OTEC Symposium. Onna Village: 2018 International OTEC Symposium Executive Committee, 2018.
- ThirugnanaT.Sathiabama. “ Hybrid OTEC System - The First Experimental Test Rig in Malaysia. ” 2018 International OTEC Symposium . Onna Village: 2018 International OTEC Symposium Executive Committee, 2018.

## 2. 事業目的

2012 年度に開始された「海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業」において、同事業の目的は、事業計画書に次のとおり掲げられている<sup>13</sup>。

沖縄県は、島しょ地域であるため化石燃料への依存割合が非常に高いことから、化石燃料の代替エネルギーとして、それぞれの離島の地域特性に即した風力発電、太陽光発電等の再生可能エネルギーの導入拡大に取り組んでいる。

この度、再生可能エネルギーのうち、沖縄県内で実現可能性が高いとされている海洋深層水及び表層水を利用する海洋温度差発電について、久米島町にある沖縄県海洋深層水研究所(以下「研究所」)において実証事業を実施する。

研究所が取水する海洋深層水は、周辺の民間企業に分水され、養殖並びに化粧品、食料品及び飲料水の製造など地域の産業振興に寄与しており、本事業は、海洋深層水の複合的利用の一環として実施する。

また、これに続いて2016年度に開始された「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」においては次の趣旨が掲げられている<sup>14</sup>。

沖縄県は、島しょ地域であるため化石燃料への依存割合が非常に高いことから、化石燃料の代替エネルギーとして、それぞれの離島の地域特性に即した風力発電、太陽光発電等の再生可能エネルギーの導入拡大に取り組んでいる。

特に久米島にある沖縄県海洋深層水研究所の敷地内においては、平成 24 年度事業において海洋温度差発電実証試験設備を設置し、「海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業」を実施してきたところである。

当事業においては海洋温度差発電技術の安定的な発電と、その信頼性や安全性を確認するとともに、発電利用した後の海水を農林水産業等において複合的に利用することにより、発電及び複合利用も含めた海水利用システム全体として経済性を確立することが可能であること等、多くの成果を得ることができた。

これら成果を踏まえ、本事業においては、設備の規模拡大を想定し、実際に農林水産業を営む民間事業者等の協力を得て、発電後海水の複合利用の実証試験を行い、その有効性や実現性及び課題等について評価・検討を行うものである。

<sup>13</sup> 沖縄県「海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業」事業計画(2012)

<sup>14</sup> 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」企画提案募集要項(2016)

そこで「発電利用実証事業」においては、沖縄県海洋深層水研究所内に海洋温度差発電実証設備を設置して実際の表層海水および海洋深層水を用いて運転を行い技術的信頼性を確認するとともに、これを沖縄県における「再生可能エネルギーの導入拡大」につなげるために、得られた実証データを商用レベルの発電プランに活用する目的も含めて、本事業を実施した。

また、「高度複合利用実証事業」においては、上記海洋温度差発電実証設備の発電後海水を用いた実証試験を行い、評価・検討対象として掲げられた「有効性」「実現性」「課題」について出来る限り定量的に示し、今後民間企業等による商用化が検討される際に有用な知見を提供することを本事業の目的とした。

この目的に基づく具体的実施内容については、それぞれ、第 部および第 部にて述べる。

### 3. 事業の構成と実施体制

#### 3.1 事業構成

本事業では、まず 2012 年度に「海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業」が開始、その中で基本的な検討が行われた海洋深層水の複合的利用システムについての実証事業として 2016 年度から「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」が開始された。両事業は 2017 年度まで別事業として実施されたが、2018 年度に統合されて本事業となった（図 3-1）。

なお、両事業とも 2018 年度が最終年度であることから、本報告書では 2012 年度からの内容を含めて、総合的に報告する。

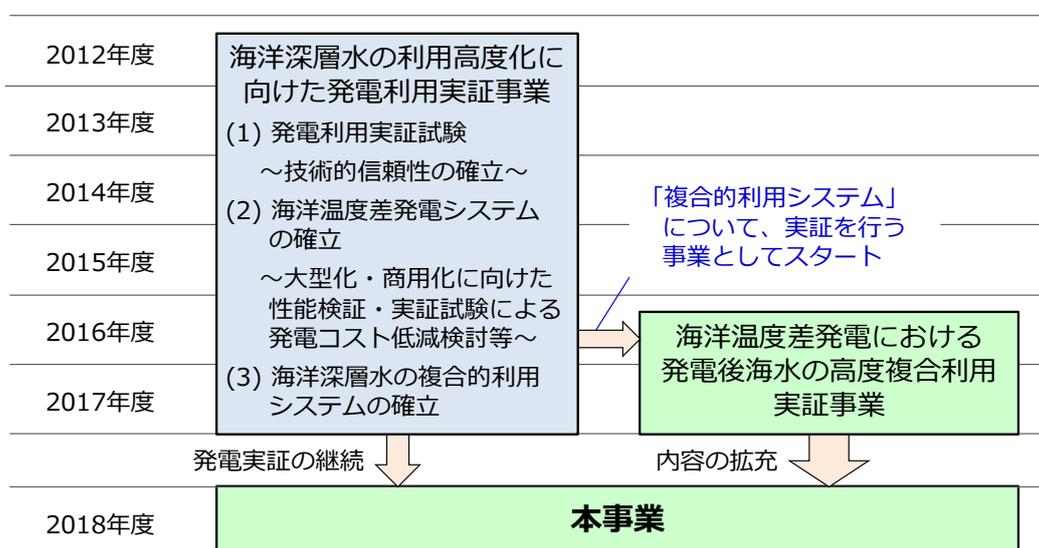


図 3-1 本事業の構成と経緯

## 3.2 実施体制

「海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業」は、IHI プラント建設株式会社、株式会社ゼネシス、横河電機株式会社の共同企業体により受託、実施された(2012～2014年度)。その後、2015年度から3年間は株式会社ゼネシスの単独受託となる。また、2018年度を含めて、国立大学法人 佐賀大学 海洋エネルギー研究センター( IOES )が沖縄県に対するアドバイザーとなっている。

「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」は、株式会社ゼネシス、一般社団法人国際海洋資源エネルギー利活用推進コンソーシアム(GOSEA)、株式会社ジーオー・ファームからなる「久米島海洋深層水高度複合利用実証共同事業体」により受託、実施された。また、ライフサイクルに関する評価を沖縄エネテック株式会社と公立大学法人大阪府立大学とに再委託している(2016, 2017年度)。

2018年度に両事業が統合された際、前者の事業も併せて「久米島海洋深層水高度複合利用実証共同事業体」が実施することとなった(図3-2～図3-4)。

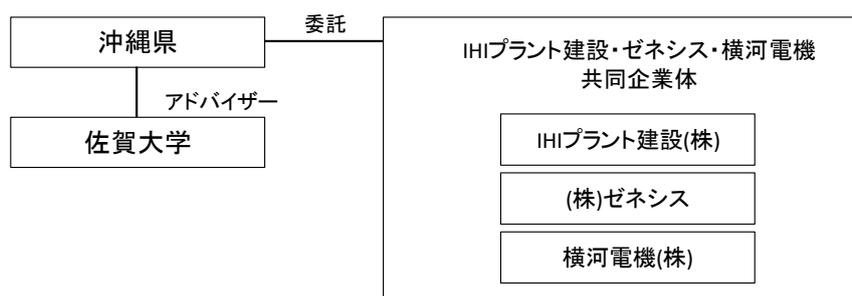


図 3-2 「海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業」実施体制 2012～2014 年度

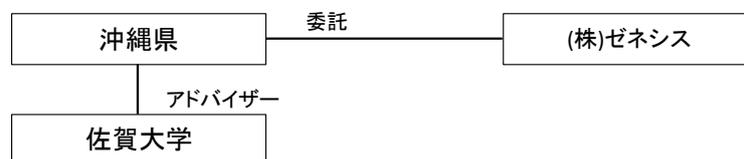


図 3-3 「海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業」実施体制 2015 年度以降

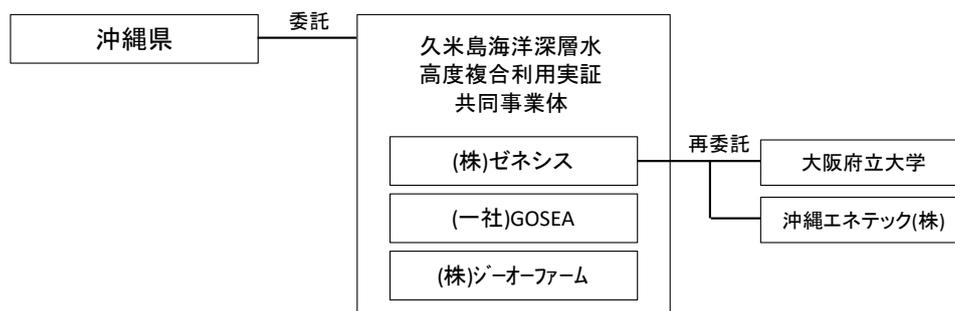


図 3-4 「海洋温度差発電における発電後海水の高度複合利用実証事業」実施体制

また、事業実施にあたっては検討評価委員会を組織し、有識者の知見の取り込みと意見の反映を図った。

表 3-1 に最終年度(2018 年度)の委員構成を示す。

表 3-1 検討評価委員会 委員名簿 (最終年度)

(50 音順)

	氏名	所属 (2019 年 3 月時点)
1	池上 康之	佐賀大学 海洋エネルギー研究センター 副センター長
2	大塚 耕司 (委員長)	大阪府立大学 人間社会システム科学研究科 教授 海洋深層水利用学会 理事
3	久保 弘文	沖縄県 海洋深層水研究所 所長
4	關 哲夫	元東北区水産研究所 所長 一般社団法人 全国水産技術者協会 理事
5	瀬名波 出	琉球大学 工学部 機械システム工学科 教授
6	田原 聖隆	産総研 安全科学研究部門 IDEA ラボ長[連携主幹]
7	中村 幸雄	久米島町 プロジェクト推進課 課長