

## 期待高まる「海洋温度差発電」、農水産業と共存共栄

久米島で 100kW プラントが連続稼働 10 年、世界が注目

金子憲治＝日経 BP 総研 クリーンテックラボ

2022/09/19 05:00

### 世界 68 カ国から視察団

沖縄県の久米島は、那覇市から西方 100km の東シナ海に浮かぶ離島。63.65km<sup>2</sup> の面積に約 8000 人が暮らしている。サトウキビやサトイモなどの農業が盛んで、黒潮による豊かな漁場にも恵まれるが、最近ではクルマエビなどの養殖も発展している。

世界に先駆け、同島に「海洋温度差発電 (OTEC: Ocean Thermal Energy Conversion)」が稼働を始めたのは 2012 年 6 月。沖縄県が佐賀大学の協力を得て設置した出力 100kW の実証設備で、実際の海水を使って発電に成功した世界初のケースという。稼働して 9 年目になるが、順調に運用を続けている(図 1)。



図 1・沖縄県の久米島で稼働する海洋温度差発電の実証設備

(出所: 日経 BP)

「OTEC」とは、表層海水と深層海水の温度差を使って発電する。海深くに潜っていくと水深 200m 程度で太陽の光はほとんど届かなくなり、約 1000m の深海では年間を通じて海水温は 4～5℃と冷たく保たれている。一方、太陽が照り付ける海面は、沖縄近海で約 26 度、ハワイなど赤道近くでは年間平均で約 30℃と温かい。

久米島の OTEC 実証設備では、沖合 2.3km の水深 612m の海底から汲み上げた 8～9℃の深層水と、約 26℃の表層水との温度差を利用する。低沸点の作動流体を表層水で気化させ、その膨張する力でタービンを回

して発電し、その気体を 5℃の深層水で冷やして再び液体に戻し、それをまた表層水で気化させる—というサイクルになる(図 2)。

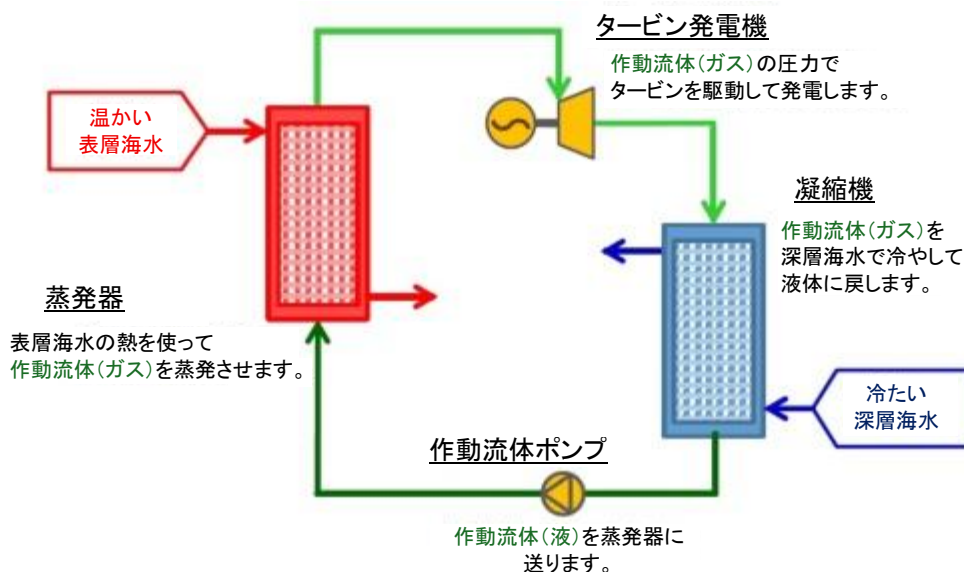


図 2・海洋温度差発電(OTEC)の原理

(出所: 沖縄県/海洋温度差発電実証設備のパフレット)

次世代の再生可能エネルギーとして、OTEC への期待が高まっている中、久米島の実証設備は、その実用性を実際の海水で示したとして注目され、運転開始以来、これまでに世界 68 カ国から 1 万 2000 人以上の視察を受け入れている。

OTEC は、革命的な要素技術によって実現したわけではない。蒸発器→媒体蒸気→(タービン回転)→凝縮器という循環は、一般的な蒸気タービンによる火力発電と同じだ。これを「ランキンサイクル」という。ランキンサイクルは、化石燃料を燃やして数百℃という高温高压の蒸気を使えば、環境温度との差が大きく、相対的に効率よく発電できる。だが、20℃程度の温度差では、効率が低く実用にならない。

実際に、海水による温度差で一般的なランキンサイクルの設備を回しても、生み出した電力は深層水を汲み上げるポンプ動力に使われてしまい、正味の電力は得られない。OTEC の原理自体は、1880 年代にフランスの物理学者が提唱したものの、実用に至らなかったのは、こうした背景があった。

### 佐賀大の研究者が「ウエハラサイクル」

そうしたなか、1980 年代にロシアのカリーナ博士が、作動流体にアンモニアと水の混合媒体を使い、タービンを回した後の気体を作動流体の余熱に使う再生サイクルを加える「カリーナサイクル」を発案し、小さい温度差での発電を可能にした。

1990年代には佐賀大学元学長の故・上原春男氏が、カリナサイクルを改良し、タービンを2つにして再生サイクルを増やした「ウエハラサイクル」を開発し、もう一段の効率アップに成功した。同氏は、熱交換器の高性能化にも取り組み、チタン製のプレート式タイプを応用して発電設備に採用することで、海水との熱交換効率を上げることに成功した。

佐賀大学では、2003年に佐賀県伊万里市に海洋エネルギー研究所・伊万里サテライトを設置し、出力30kWのOTEC装置を開発し、正味の電力を得られることを実証した。さらに、発電コストの低下に有利な「多段ランキンサイクル」を開発し、国際特許を取得した。多段ランキンサイクルは、作動流体に混合媒体を使わない代わりに、単一媒体のサイクルを複数、組み合わせた。2012年に稼働した久米島の実証設備は、これら佐賀大の知見を実海水に応用したもので、作動流体には代替フロンを採用している(図3)。



図3●佐賀大学海洋エネルギー研究所・伊万里サテライトにある OTEC 実証設備

(出所: 日経 BP)

こうした佐賀大学の成果に早くから目を付け、同大と連携して OTEC の実用化に取り組んでいるのがゼネシス(東京都江東区)で、伊万里サテライトや久米島の実証プロジェクトにも佐賀大とともに参加している。さらに2022年4月には、久米島の OTEC 事業の運営に商船三井が加わった。設備の製造や建設でなく、発電事業自体に民間企業が参画したのは、商船三井が初めてとなる。

久米島の実証設備では、タービン発電機の出力した電力のうち、約4割は、作動流体の循環や、海水を汲み上げるためのポンプ動力に消費されるが、残りの約6割は、「正味出力」として、取り出すことが出来ている。

久米島の実証設備は海岸沿いにあり、全体で3階建ての OTEC プラントに白色のパイプと黒色のパイプが引き込まれている。白いパイプには、約600m下の海底から汲み上げられた8~9℃の深層海水、黒いパイプには26℃の表層海水が流れている。白いパイプの一部には、温度センサーを取り付けるために断熱材がない箇所

があり、そこに素手で触るとひんやりと冷たく、表面はうっすらと結露している(図 4)。



図 4●白いパイプには 8～9℃の深層海水、黒いパイプには 26℃の表層海水が流れている

(出所: 日経 BP)

発電プラントの 2 階にチタン製のプレート式熱交換器、3 階にタービン発電機がある。実証施設ということもあり、プラント全体を建屋で覆っていない。このため稼働して 10 年近く経ち、海風による腐食が所々に目立っているが、運用には影響ないという(図 5)(図 6)。



図 5●青い 2 つの板状の装置内にプレート式熱交換器がある

(出所: 日経 BP)





図 6●伊万里サテライトに展示されている熱交換用のプレート部材

(出所: 日経 BP)

## ハワイでも実証設備が稼働

佐賀大学・海洋エネルギー研究所の所長を務める池上康之教授は、「ここにきて OTEC の研究開発が世界的に活発化しているが、この状況は第 2 次ブームとも言える。最近の OTEC ブームでは、久米島サイトの成功も火付け役の 1 つになった」と言う。

OTEC は 1970 年代の石油ショック後、欧米や日本で盛んに研究されたが、石油価格の下落とともに 90 年代には「技術的には可能だが経済性がない」とされ、日本を除き研究が停滞した。だが、2000 年代後半から再び研究が活発化している。その背景には、「温暖化問題の深刻化で再エネの大量導入が始まるなか、太陽光・風力という変動性再エネのほか、安定して発電できる再エネの価値が高まったことがある」と池上教授は言う。

加えて、工場排熱や温泉熱の有効利用など、低沸点媒体を使ったバイナリー発電が普及段階に入り、小さな温度差で発電するための要素技術が進歩したことも大きい。久米島の実証で、こうした最先端の技術を集大成し、実際の海水で継続的に発電できたことで、OTEC 分野の多くの研究者が勇気づけられたという。

2015 年 8 月には、久米島に続き、米国ハワイ州ハワイ島に世界で 2 基目となる出力 105kW の実証設備が稼働した。同州を拠点する海洋関連の建設会社、マカイ・オーシャン・エンジニアリング (Makai Ocean Engineering) が設置した。2045 年に電力の再エネ 100%を目指すハワイ州では、OTEC への期待が大きい (図 7)。



図 7●ハワイ島で完成した OTEC 実証設備

(出所: Makai Ocean Engineering のホームページ)

OTEC が再び盛り上がるなか、2020 年に国際海洋温度差発電協会 (Ocean Thermal Energy Association) が設立された。38 か国以上の国と地域から研究者や企業、政府機関などが参加し、OTEC に関する情報共有と情報発信に取り組んでいる。会長は日本が務める。同協会では毎年開催する国際シンポジウムで、OTEC の研究開発で功績のあった研究者に対して「ウエハラ・プライズ」という賞を授与している。OTEC の発展に尽力した故・上原春男氏を記念したものだ。

再生可能エネルギー分野では、先端研究や技術開発、機器・設備製造などで日本や日本企業の存在感が年々、低下している。そうしたなかで、OTEC は日本が世界をリードしている数少ない再エネ技術とも言える。

## 将来は 10～100MW に大規模化

OTEC への期待が高まる一方で、実用化に向けては、依然として発電コストの高さが大きな壁になっているのも事実だ。

池上教授は、「OTEC では、海洋深層水を汲み上げるための取水管の製造・設置コストが大きく、経済性を高めるには規模のメリットを追求することが不可欠」と強調する。商用化には最低でも出力 1MW 以上が前提で、現時点の試算では、10MW クラスで 20～25 円/kWh、ベース電源として 10 円/kWh 以下の発電コストを目指すには、100MW クラスで 50 億円以上の投資が前提になるという。

大規模化への動きでは海外が先行している。2013 年 4 月に米ロッキード・マーティンは、中国の投資会社と共

同で、10MW の浮体式による OTEC プロジェクトを中国海域に建設すると発表した。同社のロードマップでは、将来的に 100MW にスケールアップし、浮体上で水素かアンモニアを製造して船で需要地に運搬するという構想を掲げている。

一方、ハワイで OTEC 実証に取り組むマカイ・オーシャン・エンジニアリングは、商用向けに 100MW 規模の浮体式プラントを構想しつつも、熱交換器の進歩により 10MW 規模の設備でも利益を上げられる、との試算を公表している(図 8)。



図 8●ハワイで構想されている浮体式の OTEC

(出所: Makai Ocean Engineering のホームページ)

## 海洋深層水で養殖業が発展

スケールメリットによる発電コストの低減を志向しつつも、別のアプローチで経済性を高めようとの動きもある。池上教授は、「海洋深層水は、発電以外にも利用できるため、複数用途を前提に取水管の敷設コストを分担していけば、コストは大幅に下がる」と話す。

実は、久米島の OTEC プロジェクトも、そうした発想からスタートした。久米島では、OTEC 設備が稼働する 10 年以上前から日量 1 万 3000t もの海洋深層水を汲み上げ、海ブドウやクルマエビの養殖に活用していた。

OTEC の設備は、沖縄県の運営する「海洋深層水研究所」に隣接しており、発電設備に海水を引き込んでいるパイプは、同研究所にある海洋深層水の貯水タンクからつながっている。海底 600m から汲み上げられた深層水はまずこのタンクに貯められ、養殖場や OTEC 設備に供給されている。

200m 以深の海洋深層水は、年間を通じて温度が低いことのほか、植物プランクトンが生息できないため、無機塩類(窒素、リン、ケイ素)など栄養分が多く、雑菌がほとんどいないなど清浄性が高い。こうした特性は、陸上

養殖や食品・化粧品製造に向いている。

海洋深層水研究所の周辺には、クルマエビや海ブドウの養殖場が集積しており、これら久米島の「深層水産業」は、約 25 億円の生産規模まで成長している(図 9)。



図 9●久米島では海洋深層水を使った海ブドウの養殖が盛ん

(出所: photoAC)

### 藻の栽培やカキの陸上養殖も

こうした深層水産業と OTEC では、深層水を奪い合うことはなく、温度帯によって多段利用できる。養殖や食品製造には、OTEC に使用した後の 11℃程度の深層水も使用できる。実際、久米島の実証設備では、発電に利用した後の深層水を養殖場などに送って再利用している。

久米島では、深層水の用途をさらに拡大すべく、海洋深層水研究所の周辺に複数の企業が研究施設を設けている。ロート製薬は、深層水の冷熱を生かして栽培する「野菜工場」と、清浄性と富栄養性を生かした「藻類の培養」に取り組んでいる。暑さに弱い葉物野菜の中には、沖縄など南国では栽培が難しいものも多いが、海洋深層水で温度を下げることで栽培できる。また微細藻類は、食品原料のほか、色素や機能性素材、養殖魚の種苗生産時の餌料や家畜飼料など応用範囲は広いという。(図 10)(図 11)。





図 10●ロート製薬が久米島で運用する藻の培養設備

(出所: 日経 BP)



図 11●ロート製薬が久米島で運用する、深層水の冷熱を使った野菜工場

(出所: 日経 BP)

また、牡蠣(カキ)料理のチェーンレストラン「オイスターバー」を全国的に展開するゼネラル・オイスター(東京都中央区)は、世界初となるカキの陸上養殖に挑戦している。清浄性の高い深層水を活用することでより安全なカキを陸上で安定的に生産できる可能性がある(図 12)。



図 12●ゼネラル・オイスターが久米島で取り組むカキの陸上養殖

(出所: 日経 BP)

さらに、佐賀大・伊万里サテライトでは、OTEC に利用した後の約 11℃の深層水を再利用して海水を淡水化するシステムに取り組んでいる。減圧した密閉空間で海水を蒸発させる海水淡水化装置と OTEC を組み合わせる「ハイブリッド OTEC サイクル」で、温度差をすべて電気に変えるのに比べ、発電量は減るが、その分、淡水が得られる。

久米島の OTEC 設備を運営・管理を担当しているゼネシスの岡村 盡 OTEC エンジニアリング部部長は、「久米島は地下水が豊かで淡水のニーズはほとんどないが、離島によっては電気より水の方が貴重というケースもあり、深層水の利用方法は、地域によって異なる」と話す。「久米島では、海洋深層水を新事業に生かそうという意欲的な複数の企業が研究拠点を設けており、互いに刺激し合いながらノウハウを蓄積している。深層水をエネルギーとして利用しつつ、今後、さらに幅広い産業が集積していく方向が見えてきた」と言う。

## OTEC をメガ規模に増設

久米島の久米島町では、2050 年までに温室効果ガスの排出をなくす「ゼロカーボンシティ宣言」を、2021 年 1 月に公表した。同町のエネルギービジョンでは、2040 年までに島内で消費されるエネルギーをすべて再エネに転換することを掲げている。そのための柱が OTEC、そして太陽光発電だ。

同町では今後、OTEC 設備をスケールアップし、2025 年に 1MW、2035 年には 6MW 規模に増強することを目指している。OTEC がベース電源を担い、昼の需要増分を太陽光発電で賄うイメージだ(図 13)(図 14)。

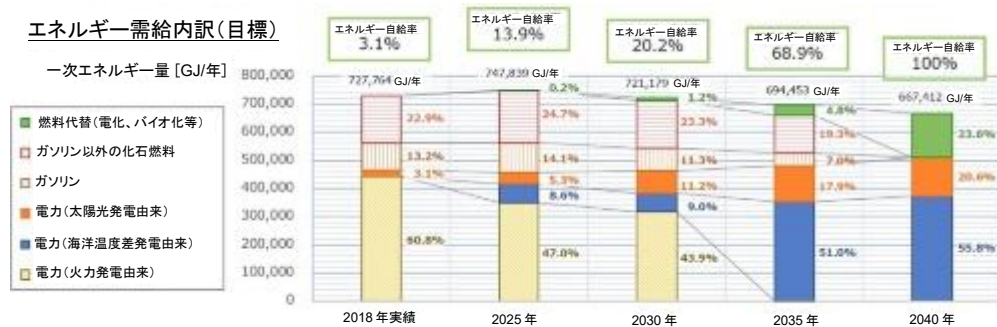


図 13●久米島町における再エネ 100%への電源構成シナリオ

(出所: 久米島町エネルギービジョン 2020)



図 14●2035 年における日間の電力需給バランスシミュレーション

(出所: 久米島町エネルギービジョン 2020)

同島では 2016 年、貯水池に面して 389kW の太陽光発電設備を町が設置した。さらに昨年 2 月には、地域資本で久米島未来エネルギー(久米島町)が設立され、オンサイト型 PPA(電力購入契約)モデルによって、住宅に太陽光と蓄電池を初期投資ゼロで導入できるサービスを提供し始めた(図 15)。





図 15●久米島で稼働する大規模な太陽光発電所

(出所: 日経 BP)

一方 OTEC を現在の 100kW から 6MW まで増設するには、深層水をさらに多く取水することが不可欠になる。現在の取水量は日量 1 万 3000t で、全国的にも最大の取水量になるが、それでも、養殖産業などの拡大で、すでに使い切っている。

そこで、町では、深層水の取水量を 10 倍に増やすことを目指している。これが実現すれば、OTEC 設備も 1MW、そして 6MW への増強が可能になる。

久米島町の中村幸雄副町長は、「海洋深層水を、OTEC と養殖事業などで多段階に利用することで、温室効果ガスが減るとともに、町の産業が発展する。町と企業がウィン・ウィンになって島全体が活性化できる」と期待している。