

海洋温度差発電ポテンシャル評価

森崎 敬史, 安永 健, 池上 康之

Potential Evaluation of Ocean Thermal Energy Conversion

Takafumi MORISAKI, Takeshi YASUNAGA and Yasuyuki IKEGAMI

Institute of Ocean Energy, Saga University
1-48 Hirao, Kubara-aza, Yamashiro-cho, Imari, Saga, 840-4256, Japan

Abstract

The Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) is refocused as available option for securing a sustainable and environment friendly source of energy. OTEC is a system for generating electricity using the temperature difference between the shallow and the deep water of the ocean. The thermal energy of the ocean is more stable and insusceptible to climate than the other natural resources such as the wind and the ocean waves. This makes the OTEC systems as being capable of generating electricity more constantly than the other renewable energy conversion systems and put the system along with the geothermal power systems at the top of the list regarding the stability and constancy of power generation. In addition, the seawater used in the OTEC power plants can also be used for many other purposes such as the seawater desalination, house cooling and aquaculture. This paper presents a review of the OTEC resource evaluation method. OTEC may have the highest potential of the available ocean energy options. In the case of solar power absorbed by the oceans, the OTEC potential is about 1.1PW by Uehara and Vega. On the other hand, Krishnakumar and Nihous show that estimated global annual maximum OTEC net power is about 7TW using the ocean general circulation model MITgcm. Recently, OTEC potential in the waters around Japan is evaluated using the data of temperature difference between warm surface seawater and cold deep seawater for the five years from 2005 to 2010. The OTEC potential is calculated by integrating the energy density of Japan's EEZ and territorial waters. Moreover, estimate conditions include geographical condition, ocean temperature difference, installment density, and utilized capacity. The introductory potential of float type OTEC, the inside of Japan's EEZ and territorial waters, is 174GW when utilized ocean temperature difference is 20°C or more.

Key words : Environmental Effect, Evaluation Method, OTEC Potential, Power Output, Seawater Temperature

1. 緒 言

日本は領土面積としては小国であるが、海洋上にいくつもの島を領有するため、領海と排他的経済水域 (EEZ) を合わせた面積は世界第 6 位の約 447 万 km² と広大である。近年、国連の大陸棚限界委員会に大陸棚の延伸請求を行い(東京大学海洋アライアンス, 2011)、沖ノ鳥島の北方等の政府が太平洋に設定した 4 海域の約 31 万 km² が認定されており、海洋エネルギーの利用が期待されている。

エネルギーおよび環境問題が深刻化する中、再生可能エネルギーの 1 つである海洋温度差発電 (Ocean Thermal Energy Conversion : OTEC) が注目されている。OTEC は表層海水と海洋深層水の温度差を利用するため、その温度差は 20~25 °C 程度と小さいが、膨大なエネルギー源を持つ発電システムであり、発電のみでなく海水淡水化や水素生成、リチウム回収等の複合利用が可能で環境への影響も非常に少ないといわれている。OTEC が提案されて以来、その実用化に向けて多くの検討がなされ、実海域において性能試験が行われている(Avery and Wu, 1999)。日本では、1979 年に島根沖洋上で佐賀大学の研究グループが初めて OTEC の実験を行った(上原, 2007)。1982 年には、九州電力が徳之島において 4500 kW のディーゼル発電所と組み合わせ、その排熱により表層海水を昇温し

た OTEC を設置して実験を行った(上原, 1984). この陸上プラントの発電出力は 50 kW であり, 正味出力 32 kW が得られている(Uehara, et al., 1988). 近年では, 2013 年に横河電機, IHI プラント建設, ゼネシスの共同企業体が 50 kW の発電プラントを久米島に建設し, 運転を行っており, 季節や天候, 海水温の変化に伴う発電量の変動などの検討を行っている(池上, 2014). 米ハワイ州ではマカイ・オーシャン・エンジニアリングが 100 kW の発電を, OTEC インターナショナル社が 1 MW 規模のプラントを建設する計画が発表された. 中国ではロッキード・マーティン社とレインウッド・グループが協力し 10 MW 規模の発電プラントを建設することを発表し, 仏領レ・ユニオン島では 10 MW の実証設備を建設する計画があり, このモデルを試作実験設備で実証した後, 10 MW プラントの設計に援用する予定である(Martins, et al., 2013).

日本における OTEC 導入調査(NEDO, 2011, 山田, 中田, 2013)では, 海洋温度差が 20 °C の海域は 6~11 月に沖縄周辺の緯度(北緯 28 度)より南に広がり, 12~5 月では 16~18 °C まで低下することが確認されている. 1 年を通じて 8 割以上の日数で温度差が 20 °C 以上の海域は, トカラ海峡と石垣島周辺が該当する. なお, その温度差が 15 °C 以上の海域は, 沖縄周辺の他に紀伊半島の沖が該当するが, この海域への OTEC の設置のためにはシステムの更なる高性能化が必要である. 海外では, 海洋の表層と深層との海水温度差の大きい海域は赤道付近に広く分布しており, OTEC プラントの設置に適する場所の選定, それによる海洋温度への影響および経済性について検討が行われている(Lennard, 1995, Faizal and Ahmed, 2011, Nihous, 2007).

OTEC に関する従来の研究では, システムの高効率化とともに OTEC のポテンシャルについても様々な検討が行われている. 本報では, 検討されている様々な OTEC ポテンシャルのレビューを提示する.

2. 海洋温度差発電 (OTEC)

太陽エネルギーの一部は海洋の表層部に熱として蓄えられている. 緯度 20 °以下の低緯度地域では, この表層海水はほぼ年間を通して 26~30 °C 程度に保たれている. 一方, 極地域で冷却された海水は海洋大循環により低緯度地域へ循環しており, 密度が大きいことから深層へ潜り込んでゆく. 低緯度地域では, 海洋の表層部の温海水と深層部の冷海水(海洋深層水)とは 10~25 °C の温度差があり, これを海洋温度差エネルギーと称している.(日本海洋開発建設協会, 2006)

図 1 に海洋温度差発電の概念図を示す. 発電サイクルは, 蒸発器, タービン, 発電機, 凝縮器, 作動流体ポンプ, 表層海水(温海水)ポンプおよび深層海水(冷海水)ポンプによって構成され, これらの機器は連結パイプによって接続される. 内部の作動流体にはアンモニアなどの沸点の低い作動流体が用いられ, 作動流体ポンプにより蒸発器に送られた作動流体は, 温海水と熱交換し蒸気となる. 蒸気はタービンで仕事を行った後, 凝縮器に送られ冷海水と熱交換して液化する. そして, 作動流体は作動流体ポンプによって加圧され, 蒸発器に送られる. これを繰り返すことにより発電を行う. 表層海水と海洋深層水の温度はほぼ安定しているため OTEC は, 太陽光発電や風力発電と比べて安定性が高い.

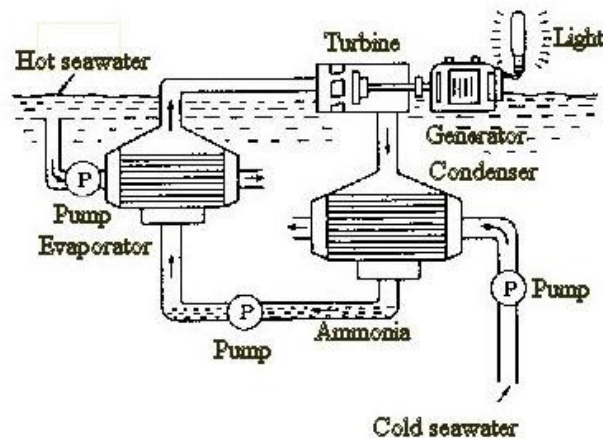


Fig. 1 Concept of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC).

3. OTEC ポテンシャルの試算方法

OTEC ポテンシャルについては様々な検討が行われており、その試算方法によって OTEC ポテンシャルは大きく異なっている。詳細な試算方法が記載されていないものでは、Pelc and Fujita(2002)によって海洋の温度構造が OTEC の影響を受けない場合の OTEC ポテンシャルが試算されており、その総発電量は 10TW と示されている。Soerensen and Weinstein(2008)は、世界の OTEC の理論的な資源量を 10,000 TWh/year と紹介している。Avery and Wu(1994)は、熱帯海洋に設置した OTEC プラントに関して、環境に対してはほぼ影響がない条件では、その正味の出力を最大で約 0.19 MW/km²とした。ここで、熱源温度差 22 °C 以上の OTEC に適する海域は、合わせて約 60×10⁶ km²であり、その OTEC ポテンシャルは 10 TW 以上 (11.4 TW) となる。なお、各々の OTEC プラントが 200 MW の正味出力であるとき、32 km 置きに 1 基設置されることとなる。

OTEC ポテンシャルの試算方法の一例として太陽からの入射熱を用いた手法があり、以下にその内容をまとめる。上原(2007)は、OTEC ポテンシャルについて太陽から地球表面への入射熱と地球の表面積を用いて概算した。太陽からの地球表面への入射光を 83.6×10¹² kW とすると、地球の表面積の 2/3 は海洋であるので、海表面には 55.1×10¹² kW のエネルギーが毎秒到着していることになる。このエネルギーの 2 % を OTEC で利用できるとすると、1.1×10¹² kW (1.1×10³ TW) のエネルギーが取り出せる計算になる。このエネルギー量は、海洋温度差発電で利用できる最大量と考えられるが、海域によって上下方向に温度差の全くない場所も多く、この量より相当少なくなる。Vega(1995)は、海洋への太陽の入射量が 95 W/m²であるとする、全体のエネルギーは 37×10¹² kW となり、世界の電力消費量 9.8×10⁹ kW に対して 4000 倍のエネルギー量を持つことが示されている。ここで、OTEC のエネルギー変換効率(サイクル熱効率)が 3 % であるとき、必要とされるエネルギー量は 海洋の OTEC エネルギー量の 1 % 程度である。

一方、OTEC を利用することにより海水温が変動することが懸念されており、その影響を考慮した手法を以下にまとめる。Zener(1973)は、OTEC の大規模利用による表層海水温度の低下を考慮し、OTEC プラント利用による熱の損失と海水の蒸発による熱の損失が一致する場合を仮定した。このとき、海水温の低下が 1 °C の場合では OTEC の総発電量は 60 TW と試算されている。

Nihous(2005)は、OTEC において一般的に設計条件での総発電電力の約 30 % が運転で消費されること、さらに取水と排水の平衡状態を考慮し、OTEC ポテンシャルを 2.7 TW と試算した。さらに、時間依存モデルを海洋の温度構造に適用して解析を行い、OTEC ポテンシャルが 4.9 TW であることを示した(Nihous, 2007)。このとき、大量に海水を採取すると熱帯の海水が一時的に冷却されて温度分布に乱れが生じ、長期的には深海の水温が上昇することが明らかとなった。この検討内容について、プラント 1 基当たりに必要な海洋面積と海洋深層水の循環流速との関係を考慮し、循環する海洋深層水の層を 0.2 m とすると、その OTEC ポテンシャルは 6.3 TW と見積もられる(Lockheed Martine Mission Systems & Sensors, 2012)。Rajagopalan and Nihous(2013)は地球規模の OTEC ポテンシャルについて、海洋大循環モデル (Ocean general circulation model : OGCM) を用いて評価を行った。シミュレーションでは海洋大循環モデルの数値ツールが用いられ、有限要素法とともに運動量、潜在的な温度および塩分の輸送方程式を離散化することで、広範囲にわたる海洋と大気の間を表現することが可能となっている。解析結果より、海洋深層水の流速を 60 m/year とすると、OTEC の年間正味出力は 30 TW であり、最大となるが、表層海水温度が 1.35 °C 上昇することが懸念された。この海洋深層水の流速を 5 m/year とすると、温度上昇は 0.25 °C に抑えられ、OTEC ポテンシャルは 7 TW と試算された。

近年、日本近海の海域についても OTEC ポテンシャルが報告されており、海洋温度差発電の導入ポテンシャルを求めるために 3 つのシナリオを想定し、設備利用率と年間時間、さらに現状技術と将来技術を仮定した場合のポテンシャルについて算出している(NEDO, 2011, 山田, 中田, 2013)。

4. OTEC ポテンシャルの導出

前章で述べたように OTEC ポテンシャルの試算方法には様々な種類があり、太陽からの入射熱による試算(上原, 2007, Vega, 1995, Zener, 1973)と海洋の温度構造による試算(Nihous, 2005, 2007, Rajagopalan and Nihous, 2013)に大別される。表 1 に OTEC ポテンシャルの比較を示す。太陽からの入射熱による試算では、海洋上への入射熱を OTEC が得られる熱エネルギーと仮定し、その熱エネルギーから得られる仕事について、OTEC のエネルギー変換効率

(サイクル熱効率)を用いて概算している。一方、海洋の温度構造による試算では、OTECの取水と排水の平衡状態を考慮した1次元モデルが用いられた。その後、時間依存モデルが適用され、従来の解析手法よりもOTECポテンシャルが増加することが明らかとなった。さらに、広範囲にわたる海洋と大気の間を表現する海洋大循環モデルが用いられ、海洋温度に対する影響が少ない場合で限定されるOTECポテンシャルが試算されている。

上記のOTECポテンシャルは世界全体の概算であり、日本周辺海域に限定された試算はなく、近年の技術的・地理的条件を踏まえたOTECポテンシャルが試算された(NEDO, 2011, 山田, 中田, 2013)。このとき、過去5年間の表層海水と海洋深層水との温度差の平均値からエネルギー密度を算出し、それを面積分してOTECポテンシャルを算出している。さらに、試算の際に沿岸固定方式と沖合浮体方式に分類し、沖合浮体方式については離岸距離の制限がある場合とない場合のそれぞれを想定した。

Table 1 OTEC potential evaluation method.

Ref.	Method	Potential
Pelc and Fujita (2002)	It is estimated that about 10 TW of OTEC power without affecting the thermal structure of the ocean.	10TW
Avery and Wu (1994)	The power generated of OTEC plant is limited to approximately 0.19 MW/km ² without significant environmental effects.	11.4TW (60×10 ⁶ km ²)
上原(2007)	It is estimated by the solar radiation, the ocean area and the efficiency of OTEC power plant.	1,100 TW (2/3 of land area)
Vega(1995)	It is estimated by the solar radiation, the ocean area and the efficiency of OTEC power plant. OTEC efficiency is 3 %.	1,110 TW
Nihous(2005)	Worldwide power resources that could be extracted from the steady-state operation of OTEC plants are estimated using a simple model.	2.7 TW (100×10 ⁶ km ²)
Nihous(2007)	Worldwide power resources that could be extracted from OTEC plants are estimated with a simple one-dimensional time-domain model of the thermal structure of the ocean.	4.9 TW (100×10 ⁶ km ²)
Rajagopalan and Nihous(2013)	Global Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) resources are assessed with an ocean general circulation model. (less environmental impact)	7 TW (114×10 ⁶ km ²)
NEDO(2011)	It is established by the average temperature difference of seawater for the five years, ΔT , the thermohaline circulation time, Δs and the ocean area, S .	173 GW (Japan's EEZ)

4・1 OTECプラントのエネルギー密度による試算

熱帯海洋に設置したOTECプラントに関して、環境に対してはほぼ影響がない条件では、その正味の出力は最大で0.19 MW/km²である。ここで、熱源温度差22℃以上のOTECに適する海域は、合わせて約60×10⁶ km²であり、そのOTECポテンシャルは11.4 TWとなる。なお、各々のOTECプラントが200 MWの正味出力であるとき、32 km置きに1基設置されることとなる。

$$0.19 \left[\text{MW/km}^2 \right] \times 60 \times 10^6 \left[\text{km}^2 \right] = 11.4 \left[\text{TW} \right] \quad (1)$$

4・2 太陽からの入射熱による試算

太陽からの地球表面への入射光を83.6×10¹² kWとすると、地球の表面積の2/3は海洋であるので、海表面には55.1×10¹² kWのエネルギーが毎秒到着していることになる。このエネルギーの2%を海洋温度差発電で利用でき

るとすると、 1.1×10^{12} kW (1.1×10^3 TW) のエネルギーが取り出せる計算になる。このエネルギー量は、海洋温度差発電で利用できる最大量と考えられるが、海域によって上下方向に温度差の全くない場所も多く、この量より相当少なくなる。

$$83.6 \times 10^{12} [\text{kW}] \times \frac{2}{3} \times 0.02 = 1.1 \times 10^{12} [\text{kW}] = 1.1 \times 10^3 [\text{TW}] \quad (2)$$

4・3 太陽からの入射熱と海洋の熱損失による試算

OTEC の大規模利用により、表層海水の温度が低下することが考えられる。Zener(1973)は、熱帯海洋での太陽エネルギーの吸収と海水の蒸発による熱の損失との釣り合いを考慮し、OTEC プラント利用による熱の損失と海水の蒸発による熱の損失が一致する場合を仮定した。表層の温海水から深層の冷海水への 1 cm^2 当たりの熱の移動量を q とすると、そのときの OTEC プラントの正味出力 p との関係は以下ようになる。

$$q \cong \frac{p}{0.02} \quad (3)$$

海水の蒸発量とその蒸発圧力は比例し、前述の熱の釣り合いから、

$$q \cong \frac{C}{\pi} \cdot \frac{H}{RT} \cdot \frac{\delta T}{T} \quad (4)$$

ここで、 C は太陽定数、 H は蒸発の際のモル比熱、 δT は海水の低下温度である。よって、熱の損失量 q より、正味出力 p [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$] は以下ようになる。

$$p \cong 5 \times 10^{-4} \cdot \delta T \quad (5)$$

緯度 20° 以下の地表の半分が OTEC に適した熱帯海洋であるとする、OTEC プラントの総発電量 P [$\text{kW}/^\circ\text{C}$] は以下ようになる。

$$P \cong 60 \times 10^9 \cdot \delta T \quad (6)$$

δT が 1°C の場合、この総発電量は 60×10^9 kW (60 TW) となる。

4・4 OTEC の取水と排水の平衡状態による試算

Nihous(2005)は、OTEC において一般的に設計条件での総発電電力の約 30 % が運転で消費されること、さらに取水と排水の平衡状態を考慮し、OTEC ポテンシャルを試算した。実ランキンサイクルの最大熱効率 η_{Rankine} は、温海水温度 T および温海水と冷海水との温度差 ΔT より、以下のように求められる。

$$\eta_{\text{Rankine}} = \frac{\Delta T}{2T} \quad (7)$$

OTEC により得られるエネルギー量は、熱交換器の交換熱量と比較して小さいため、単純な熱・質量バランスを無視することができる。このとき、温海水の温度変化 ΔT_{ws} および冷海水の温度変化 ΔT_{cs} はそれぞれ、以下のようになる。

$$\Delta T_{WS} = \frac{3\gamma}{1+\gamma} \cdot \frac{\Delta T}{8} \quad (8)$$

$$\Delta T_{CS} = \frac{3}{1+\gamma} \cdot \frac{\Delta T}{8} \quad (9)$$

ここで, γ は温海水に対する冷海水の流量の比 ($=m_{CS}/m_{WS}$) を示す.

したがって, OTEC の総発電電力 P_g は, 蒸発器での交換熱量と OTEC の変換効率より, 以下のように求められる.

$$P_g = \frac{m_{WS} \rho c_p 3\gamma \varepsilon_{ig}}{16(1+\gamma)T} \Delta T^2 \quad (10)$$

ここで, m_{WS} は温海水流量, ρ は平均海水密度[kg/m³], c_p は海水比熱[J/(kg·K)], ε_{ig} は発電効率を示す.

OTEC では, 一般的に設計条件での総発電電力の約 30% が OTEC の運転で消費されることから, 正味出力 P_{net} は, 設計条件の熱源間温度差 ΔT_{design} より, 以下のように求められる.

$$P_{net} = \frac{m_{WS} \rho c_p 3\gamma \varepsilon_{ig}}{16(1+\gamma)T} (\Delta T^2 - 0.3\Delta T_{design}^2) \quad (11)$$

さらに, 混合層温度 T_0 の定常状態について着目する. 湧昇流の速度 w と温度拡散による下降流とのバランスを考慮した水中における水深 z の温度 $\theta(z)$ とする. 鉛直拡散係数は一定とした. 大規模な OTEC スケールの運転の広範囲にわたる流れの乱れを考慮しない場合, 1 次元モデルにおいて OTEC の取水と排水の平衡状態を考慮し, 排水深度を z_{mix} , 冷海水取水深度を z_{CS} とすると, 生じる湧昇流は $h_m/\tau_m (z_{mix} > z > L)$ となり, 下降流は $\gamma h_m/\tau_m (z_{CS} > z > z_{mix})$ となる. よって, $\theta(z)$ の関係式は次のようになる.

$$\theta(z) = C + (T_0 - C) \exp \left[\left(w + \frac{h_m}{\tau_m} \right) \frac{z - L}{K} \right] \quad (z_{mix} > z > L) \quad (12)$$

$$C = \frac{wT_p + (h_m/\tau_m)T_0}{w + h_m/\tau_m} \quad (13)$$

$$\theta(z) = D + [\theta(z_{mix}) - D] \exp \left[\left(w - \frac{\gamma h_m}{\tau_m} \right) \frac{z - z_{mix}}{K} \right] \quad (z_{CS} > z > z_{mix}) \quad (14)$$

$$D = \frac{wT_p - (\gamma h_m/\tau_m)\theta_{CS}}{w - \gamma h_m/\tau_m} \quad (15)$$

解析では, 海洋温度差が 20 °C 以上の海域 100×10⁶ km² に OTEC を設置した場合を対象とし, 他の条件については表 2 に示す. この解析により, OTEC ポテンシャルは最大で約 3 TW となることが示されている. この試算は海洋温度差に影響しない発電量の上限値を明らかにしており, この範囲内であれば OTEC の大規模発電が維持できると考えられる. 一方, ここで試算されたモデルは単純な一次元モデルであり, 複雑な時間変動や三次元海洋環境が含まれていない.

Table 2 Calculation condition.

Item	Unit	Value
T	°C	25
ΔT	°C	20
ΔT_{design}	°C	20
ε_{ig}		0.85
γ		0.5
ρ	kg/m ³	1,025
c_P	kJ/(kg·K)	4
A_{OTEC}	km ²	100×106
T_0	°C	25
w	m/yr	4
K	m ² /yr	2,300
θ_{CS}	°C	5
L	m	4,000
z_{mix}	m	3,822
z_{CS}	m	3,075

4・5 時間依存モデルと海洋の温度構造による試算

Nihous(2007)は, OTEC の取水と排水の平衡状態を考慮した時間依存モデルを海洋の温度構造に適用して試算した. ここで, 式(9)において消費動力の 18%が設計条件に含まれ, 残りは流量比 γ によって変化する場合は,

$$P_{net} = \frac{m_{WS} \rho c_P 3\gamma \varepsilon_{ig}}{8(1+\gamma)T} \left[\frac{3\gamma}{2(1+\gamma)} \Delta T^2 - 0.18 \Delta T_{design}^2 - 0.12 \left(\frac{\gamma}{2} \right)^{2.75} \Delta T_{design}^2 \right] \quad (16)$$

冷海水取水位置 z_{CS} での流量 m_{CS} とすると混合層での流量は γm_{CS} , 排水位置 z_{mix} での流量は $(1+\gamma)m_{CS}$ である. ここで, z_{CS} から z_{mix} では下降流 $-m_{CS}/A_{OTEC}$, z_{mix} から混合層では上昇流 $\gamma m_{CS}/A_{OTEC}$ となる. ここで, 混合層でのヒートバランスおよび境界条件より,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \approx 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \approx \frac{m_{CS}}{A_{OTEC}} \frac{\partial \theta}{\partial z} \approx \frac{m_{CS} w}{A_{OTEC} K} [\theta(0, z) - T_p] \quad (z_{CS} > z > z_{mix}) \quad (18)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \approx -\frac{\gamma m_{CS}}{A_{OTEC}} \frac{\partial \theta}{\partial z} \approx -\frac{\gamma m_{CS} w}{A_{OTEC} K} [\theta(0, z) - T_p] \quad (z_{mix} > z > L) \quad (19)$$

これらの時間依存モデルを海洋の温度構造に適用し, 解析を行った. そして, 解析により世界の OTEC ポテンシャルが 4.9 TW であることを示した. このとき, 大量に海水を採取すると熱帯の海水が一時的に冷却されて温度分布に乱れが生じ, 長期的には深海の水温が上昇する.

4・6 海洋大循環モデルによる試算

Rajagopalan and Nihous(2013)は、海洋大循環モデル (Ocean general circulation model : OGCM) を用いて評価を行った。シミュレーションではMITgcmの海洋大循環モデルの数値ツールが用いられ、有限要素法とともに運動量、潜在的な温度および塩分の輸送方程式を離散化することで、広範囲にわたる海洋と大気のパラメータを表現することができる。

初期時刻 t_0 と時刻 t との間の全体的な海洋のエンタルピーの累積的な変化 dH は、次のように定義される。

$$dH = \sum_{Cells} mc_p [\theta(t) - \theta(t_0)] \quad (20)$$

ここで、 m は計算要素における海水の質量であり、 θ はその潜在的な温度、 c_p は海水の比熱であり、 $4 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ で一定とした。

OTEC 領域における修正温度場より、OTEC の正味出力 W_{net} は、以下の式で求められる。

$$W_{net} = v_{CS} \frac{3\rho c_p \varepsilon_{tg} \gamma \Delta T^2}{16(1+\gamma) T} - W_{pump} \quad (21)$$

$$W_{pump} = v_{CS} 0.30 \frac{\rho c_p \varepsilon_{tg} \gamma}{4(1+\gamma)} \quad (22)$$

ここで、 T は表層温海水の絶対温度、 ρ は平均海水密度 $1,025 \text{ kg/m}^3$ 、 ε_{tg} は発電機効率である。なお、ポンプ動力は $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ 、 $T = 300 \text{ K}$ におけるグロス出力の 30% とした。さらに、解析では、表層 20 m と深層 1000 m の海洋温度差が 18°C 以上となる海域 $114 \times 10^6 \text{ km}^2$ を対象とした。

解析結果より、海洋深層水の流速を 60 m/year とすると、OTEC の年間正味出力は 30 TW であり、最大となった。しかし、表層海水温度が 1.35°C 上昇することが懸念される。一方で、熱帯地域では、温度が低下すると推定された。この海洋深層水の流速を 5 m/year とすると、温度上昇は 0.25°C に抑えられ、OTEC ポテンシャルは 7 TW となった。

4・7 日本近海における OTEC ポテンシャルの試算

日本近海の海域についても OTEC ポテンシャルが報告されており、海洋温度差発電の導入ポテンシャルを求めするために 3 つのシナリオを想定し、設備利用率と年間時間、さらに現状技術と将来技術を仮定した場合のポテンシャルについて算出している(NEDO, 2011, 山田, 中田, 2013)。その試算条件を表 3 に示す。

独立行政法人海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センターの JCOPE2 データを使用して、表層海水と海洋深層水との温度差の 5 年間平均値を求め、エネルギー密度 p [W/m^2] を算出する。その後、海洋温度差のエネルギーポテンシャル P [W] として、エネルギー密度 \bar{p} [W/m^2] を面積分して算出する。海洋面積を S [m^2] とすると、以下ようになる。

$$\bar{P} = \bar{p}S = \frac{c_p \rho h \Delta T S}{\Delta s} \quad (23)$$

海洋温度差発電の導入ポテンシャルを求めるためのシナリオとして、以下の 3 つのシナリオを想定している。

①シナリオ 1：沿岸固定方式

発電施設を沿岸に設置し、離岸距離 30 km 以内の海域から取水する。発電施設の設置密度として、5 km 四方の海域を利用する形で 1 MW 基を 1 基設置することを想定する。

②シナリオ 2a：沖合浮体方式 (離岸距離制限あり)

沖合部の浮体施設で発電し、陸地へ送電する方式とする。発電施設の設置密度として、30 km 四方の海域に 100 MW 基を 1 基設置することを想定する。電源ケーブルによる送電を想定し、離岸距離は 30 km 以内とする。

③シナリオ 2b：沖合浮体方式（離岸距離制限なし）

シナリオ 2a よりも更に沖合の浮体式発電施設で発電することを想定する。発電後、送電するのではなく、その場で利用もしくは水素やメタノール等への変換するような方式を想定する。離岸距離の制限は設けない。

これらの導入ポテンシャルに設備利用率と年間時間 (365 日×24 時間) を用いて発電ポテンシャルを導出する。なお、設備利用率は、シナリオ 1 では 0.8, シナリオ 2a および 2b では 0.9 とした。

さらに、現状技術と将来技術を仮定した場合のポテンシャルについて算出し、現状技術による算定条件では海洋温度差 ΔT が 20 °C 以上の領域のみ利用した場合、将来技術による算定では海洋温度差 ΔT が 15 °C 以上の領域のみ利用した場合とした。なお、日本周辺の海域の 2005 年 12 月 1 日から 2010 年 11 月 30 日までの 5 年間のデータを用いている。このとき、解析で使用した温度差は、表層海水温度として 0 m, 海洋深層水温度として 1000 m の水温を用い、1000 m よりも浅い海域では、水深の直上 1 m の水温を海洋深層水温度としている。これら解析条件を表 3 に示す。

OTEC ポテンシャルの一例として、海洋温度差 ΔT が 20°C 以上の領域のみ利用した場合の解析結果を表 4 に、15°C 以上の場合を表 5 にそれぞれ示す。海洋温度差が 20°C 以上の条件では、シナリオ 1 において 2 GW, シナリオ 2a において 6 GW, シナリオ 2b において 174 GW と試算された。ここで、将来技術による算定条件（海洋温度差 15°C 以上）では、シナリオ 1 において 7 GW, シナリオ 2a において 20 GW, シナリオ 2b において 280 GW と試算された。沖合浮体方式における OTEC ポテンシャルは比較的大きく、特に離岸距離制限のない条件では他の条件よりも約 14~81 倍と大幅な増加が見込まれることがわかる。

Table 3 Estimate conditions for installable energy and annual energy production of OTEC.

Geographical condition	I. On-land : Less than 30km from the seashore II. Float type-I : Less than 30km from the seashore III. Float type-II : Inside of EEZ and territorial waters
Ocean temperature difference	I. 20°C or more : Present technology II. 15°C or more : Future technology
Power output	I. 1MW : On-land II. 100MW : Float type-I III. 100MW : Float type-II
Installment density	1 plant is installed I. 5km around : On-land II. 30km around : Float type-I III. 30km around : Float type-II
Utilized capacity	I. 80% : On-land II. 90% : Float type-I III. 90% : Float type-II
Introductory potential	I. Geographical condition II. Ocean temperature difference III. Area required for installing OTEC (Power output and Installment density)
Power generation potential	I. Introductory potential II. Utilized capacity

Table 4 OTEC potential (20 °C of warm and cold seawater temperature difference).

		Scenario-1 On-land	Scenario-2a Float (Limited)	Scenario-2b Float
Introductory potential	[MW]	2,143	5,952	173,569
Surface area of ocean	[km ²]	59,456	59,456	1,743,888
Power generation potential	[MWh/year]	15,018,144	46,925,568	1,368,417,996

Table 5 OTEC potential (15 °C of warm and cold seawater temperature difference).

		Scenario-1 On-land	Scenario-2a Float (Limited)	Scenario-2b Float
Introductory potential	[MW]	7,116	19,767	280,491
Surface area of ocean	[km ²]	188,866	188,866	2,741,053
Power generation potential	[MWh/year]	49,868,928	155,843,928	2,211,391,044

5. 結 言

本報は OTEC ポテンシャルに関するレビューを提示した。OTEC は、安定的な出力が得られ、環境に対する影響が小さく、海水淡水化や水素生成、リチウム回収等の複合利用が可能なることからその利用推進が期待されている。近年では、2013 年に 50 kW の OTEC 発電プラントが日本の久米島に設置され、実証試験が行われており、季節や天候、海水温の変化に伴う発電量の変動などが検討されている。

OTEC のポテンシャルに関する研究は従来より行われており、その試算方法によって OTEC ポテンシャルは大きく異なっている。その一つとして太陽からの入射熱を用いた手法があり、少なくとも 60 TW の発電規模を持つことが示されている。一方、海水の取水と排水の平衡状態、時間依存モデルを海洋の温度構造に適用した場合や海洋大循環モデルを用いた検討を行い、海洋温度に影響が少ない条件では最大で 7 TW と試算されている。さらに、日本近海の海域についても過去 5 年間の表層海水と海洋深層水との温度差の平均値からエネルギー密度を算出し、それを面積分して OTEC ポテンシャルを算出している。この試算では沿岸固定方式と沖合浮体方式に分類し、沖合浮体方式については離岸距離の制限がある場合とない場合のそれぞれを想定した。その結果、海洋温度差が 20°C 以上の条件では、沿岸固定方式のとき 2 GW、沖合浮体方式のとき最大で 174 GW と試算された。沖合浮体方式における OTEC ポテンシャルは比較的大きく、特に離岸距離制限のない条件では他の条件よりも約 14～81 倍と大幅な増加が見込まれることがわかる。

文 献

- Avery, H.W. and Wu, C., Renewable Energy from the Ocean. A guide to OTEC, (1994).
 独立行政法人 新エネルギー・産業技術統合開発機構(NEDO), 海洋エネルギーポテンシャルの把握に係る業務 (2011).
 Faizal, M. and Ahmed, M.R., On the ocean heat budget and ocean thermal energy conversion, International Journal of Energy Research, Vol.35, No.13 (2011), pp.1119-1144.

- 池上康之, 沖縄から始まる海洋温度差発電の新しい展開—自然エネルギーにおける安定的ベース電源を目指して—, *Techno-Ocean News*, Vol.52 (2014), pp.1-2.
- 原欽五, 安部次生, 河内大明, 吉田実, 徳之島 OTEC 取水管敷設工事について, *電力土木*, No.188 (1984), pp.78-89.
- Lennard, D., The viability and best locations for ocean thermal energy conversion systems around the world, *Renewable Energy*, Vol.6, No.95 (1995), pp.359-365.
- Lockheed Martine Mission Systems & Sensors, Ocean thermal extractable energy visualization: final technical report (2012).
- Martins, M., Sinama, F. and Lucas, F., Equivalent Gibbs systems for modelling an onshore OTEC experimental plant on Reunion Island, *International Journal of Energy Research*, Vol.37, No.9 (2013), pp.1112-1121.
- 日本海洋開発建設協会, 21 世紀の海洋エネルギー開発技術 (2006).
- Nihous, G.C., An Order-of-Magnitude Estimate of Ocean Thermal Energy Conversion Resources, *Journal of Energy Resource Technology*, Vol.127, No.4 (2005), pp.328-333.
- Nihous, G.C., A Preliminary Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion Resources, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol.129, No.1 (2007), pp.10-17.
- Pelc, R. and Fujita, R.M., Renewable energy from the ocean, *Marine Policy*, Vol.26, No.6 (2002), pp.471-479.
- Rajagopalan, K. and Nihous, G.C., Estimates of global Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) resources using an ocean general circulation model, *Renewable Energy*, Vol.50 (2013), pp.532-540.
- Soerensen, H.C. and Weinstein, A., Ocean energy: position paper for IPCC, Keynote paper presented at the IPCC Scoping Conference on Renewable Energy (2008), pp.1-8.
- 東京大学海洋アライアンス, 海の大国ニッポン (2000).
- Uehara, H., Dilao, C.O. and Nakaoka, T., Conceptual design of ocean thermal energy conversion (OTEC) power plants in the Philippines, *Solar Energy*, Vol.41, No.5 (1988), pp.431-441.
- 上原春男, 海洋温度差発電読本 (復刻版) (2007).
- Vega, L.A., Ocean Thermal Energy Conversion (1995), pp.2014-2119.
- 山田博資, 中田喜三郎, 日本の海洋エネルギーポテンシャルの評価, *海洋理工学会誌*, Vol.19, No.1 (2013), pp.43-47.
- Zener, C., Solar sea power, *Physics Today*, Vol.26, No.1 (1973), pp.48-53.