

# 離島における海洋深層水を利用した 温泉水バイナリー発電の研究

Feasibility Study on Binary Cycle Generation Systems by  
Hot Spring Water and Deep Ocean Water at Remote Isolated Islands

井上興治<sup>1</sup>・大内一之<sup>2</sup>・實原定幸<sup>3</sup>

Koji INOUE, Kazuyuki OUCHI and Sadayuki JITSUHARA

## Abstract

A feasibility study on binary cycle generation systems to use hot spring water which was locally produced and consumed renewable energy was conducted. The resource is in many remote isolated islands around the country. Electric generation quantity gained by thermal energy conversion system of high temperature hot spring water and cool deep ocean water, and expense of generation related facilities were estimated. And economical assessment by estimation of generation cost was examined. Furthermore some countermeasures of revitalization for remote isolated islands to pay attention to the multipurpose utilization of deep ocean water were studied.

**Key Words:** Remote isolated island, Hot spring water, Deep ocean water, Binary cycle generation, Revitalization

## 要 旨

温泉資源を有する遠隔離島において、小規模で地産地消型の再生可能エネルギーの一つである温泉水バイナリー発電の可能性を考察する。高温の温泉水と冷却用の周辺海域の海洋深層水を利用して、温泉水の温度と汲み上げ湯量から期待される発電量と発電設備費用から発電コストを算定して経済性を分析評価するとともに、海洋深層水の複合利用の有効性を検討し地域の活性化の可能性を考察する。

**キーワード：** 離島, 温泉水, 海洋深層水, バイナリー発電, 地域活性化

## 1. 緒 言

離島は、我が国の領域、排他的経済水域等の保全等に重要な役割を担っているにもかかわらず、人口、社会経済指標の縮減傾向に歯止めはかかっている状況である。400余の有人離島のうち約1割の離島は2050年までに無人となるとの政府機関報告(国土交通省, 2011)もある。このような状況を背

景に離島振興法が改正され2年経過した。同法第3条において、主務大臣は離島振興基本方針において再生可能エネルギーの利用に関する基本的な事項を定めることとされ、同法第17条において、国、地方公共団体は離島振興対策実施地域において、再生可能エネルギーの利用の促進について適切な配慮をするものとする規定されている。

離島自治体の再生可能エネルギー利用の取り組み

<sup>1</sup> NPO海ロマン21理事 海洋エネルギー研究会主査(〒101-0047 東京都千代田区内神田1-18-11-1011)

<sup>2</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科特任研究員(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

<sup>3</sup> 株式会社ゼネシス代表取締役(〒104-0061 東京都中央区銀座5-11-14)

に関するアンケート調査(海ロマン21, 2011)によると, いくつかの離島では陸上風力, 太陽光, 水力および地熱を利用した発電事業を導入しているほか多くの離島自治体で再生可能エネルギーの利用について検討中または関心があることがわかり, そのことを踏まえて, 海洋温度差エネルギー, 海流, 波力を利用した発電, 淡水製造構想が研究された(海ロマン21, 2011, 2012).

本研究は, 高温の温泉資源を有する離島が全国には数多くあることに着目しその温泉水と周辺海域の海洋深層水を利用したバイナリー発電の可能性をコスト分析して評価するとともに深層水の複合利用による経済性の向上と地域の活性化について評価した.

## 2. 温泉水/海洋深層水バイナリー発電の仕組み

温泉水発電は, 温泉地の源泉や井戸で汲んだ高温のお湯を利用して低沸点の媒体を気化しタービンを回して発電する. 発電能力は小さいが, 占有面積が比較的小規模ですみ, 発電に使用した後のお湯は温泉入浴用に使うことができる. 開発が容易でコストも安く, 小規模の事業者の参入も可能といわれ実用化されている本土の温泉地もある. 図1にバイナリー発電の仕組みを示す. 本研究では空気冷却や地表水冷却方式による媒体の冷却の代わりに, 離島の周辺海域の海洋深層水による冷却方式とした.

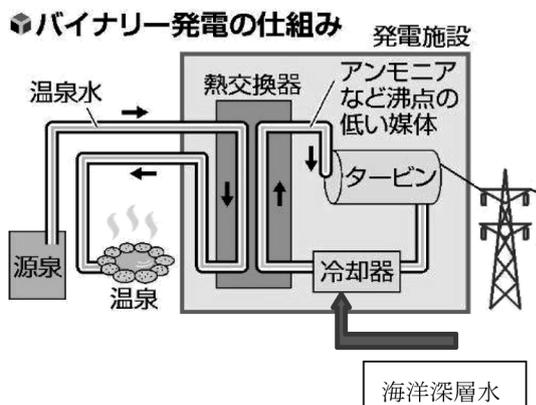


図1 温泉水/海洋深層水バイナリー発電の仕組み (iMartホームページより編集)

## 3. 離島の温泉

我が国には本土・本島から遠く離れた150を超える有人の遠隔離島がある. そのうちの多くの離島では地熱や高温の温泉水といった再生可能エネルギーが存在する. それら離島において現在温泉として利用され, または知られている温泉の湯温, 湧出量を表1に示す.

湧出する湯温が60℃以上の比較的高温の温泉は, 北海道奥尻島, 東京都新島, 式根島, 八丈島, 長崎県壱岐島, 鹿児島県口之島, 中之島などの温泉である. また, 現在の湧出量が200 L/分以上の温泉は, 北海道礼文島, 奥尻島, 東京都大島, 新島, 式根島, 八丈島, 新潟県佐渡島, 長崎県福江島, 壱岐島, 鹿児島県口永良部島などである. 湧出量は温泉の経営計画に基づいて設定されている場合もあり, 潜在的湧出可能性がさらに大きい温泉もあると思われる.

## 4. 温泉水/海洋深層水バイナリー発電の検討

### 4.1 バイナリー発電の検討方法

発電装置の発電出力は, 表1に示した温泉の湯温と湧出量から俯瞰して, 比較的大きな規模として50 kWと, 適用が比較的容易な規模として20 kWの2ケースについて, 温泉水の取水温度を90℃と60℃(出口温度はいずれも50℃)の2ケースを設定し, 温泉水の取水量, 海洋深層水の取水量, 年間発電量, 各設備の整備費用を算定し, 発電コストを算出することとした.

### 4.2 深層水(冷却水)温度と取水場所の設定

深層水の取水深度を200 m, 深層水温度10℃, 冷却による温度上昇10℃, 取水地点を陸から5 km程度以内と設定した. 海水温度の深度による変化の一例を図2に示す. 水深200 mあたりの海水の温度は地域によって異なるが, おおむね3~13℃の範囲にあり, 本検討においては10℃とした.

表1 遠隔離島の主な温泉の湯温・湧出量（海ロマン21, 2013）

都道府県名	市町村名	島名	温泉の名称	湯温(℃)	湧出量(L/分)	備考	
北海道	礼文町	礼文島	うすゆきの湯	50.2	200		
	奥尻町	奥尻島	神威脇温泉	61	285		
東京都	大島町	大島	大津温泉	34.3	260		
		新島村	新島	間々下温泉	61.1	680	
	神津島村	式根島	地鉦温泉	74.1	200		
			足付温泉	38	20		
		神津島	錆崎温泉	41	150		
		三宅村	三宅島	ふるさとの湯	37	不明	
		八丈町	八丈島	檜立向里温泉	58	460	
			尾越温泉	64.3	420		
			末吉かん沢温泉	49.8	500		
			中之郷温泉	50.4	84		
	裏見ヶ滝温泉	64.3	420				
	洞輪沢温泉	40.5	150				
新潟県	佐渡市	佐渡島	新穂湯上温泉	44	200		
			畑野温泉松泉閣	41.8	520		
			ワイドブルーあいかわ	39.4	283		
			金井温泉金北の里	44.1	104		
	粟島浦村	粟島	おとひめの湯	25	60		
島根県	隠岐の島町	島後	隠岐温泉五箇	28	—	揚水量12~16 t/日	
長崎県	五島市	福江島	荒川温泉	42℃以上	全体で350	源泉がいくつかあるため	
		中通島	奈良尾温泉	42	40		
	壱岐市	対馬市	対馬島	マルゲリータ	26.2	130	温泉名不明
			湯ノ本温泉	69	*337.7	湧出量は地区全体	
			対馬海峡漁り火	30.8	188	足湯	
			真珠の湯	34.8	38.4		
			湯多里ランド	28.1	100		
			ホタルの湯	30.1	108		
渚の湯	35.9	152					
鹿児島県	三島村	硫黄島	東温泉	54.1	128		
			西墓道温泉	36.8	57	三島開発総合センター	
			坂本温泉	47.8	3.4		
	十島村	口之島	セラマ温泉	66.2	—		
			さとの湯温泉	29.7	—		
			中之島	西区温泉	73.1	9	
			東区温泉	66.1	13		
			平島	あかひげ温泉	27.8	66	
			悪石島	湯泊温泉	51.1	140	
			小宝島	湯泊温泉露天	45.3	—	
	宝島	友の花温泉	26.2	120			
	薩摩川内市	上甕島	里温泉	26	—	揚水量75 Lt/分	
	中種子町	種子島	温泉保養センター	25	—		
	南種子町		河内温泉	26.5	26		
	屋久島町	屋久島	尾之間温泉	49.5	—		
永良部島		本村温泉	37.8	204			

### 4.3 発電装置設置場所の設定

発電装置は、海岸から内陸に100 m、必要なスペースはL 2.5 m×W 3.5 m×H 3.5 mとし温泉水の取水位置に隣接する。また、温泉水の配管長さは100 m以内と設定する。

### 4.4 出力別温泉水諸元曲線の作成

深層水の温度を10℃と想定した場合の発電出力別の温泉水の湯温と汲み上げ量の関係曲線を図3に表す。発電出力の算出に当たっては、作動流体はフッ素系のR245faを使用し、蒸発器における作動流

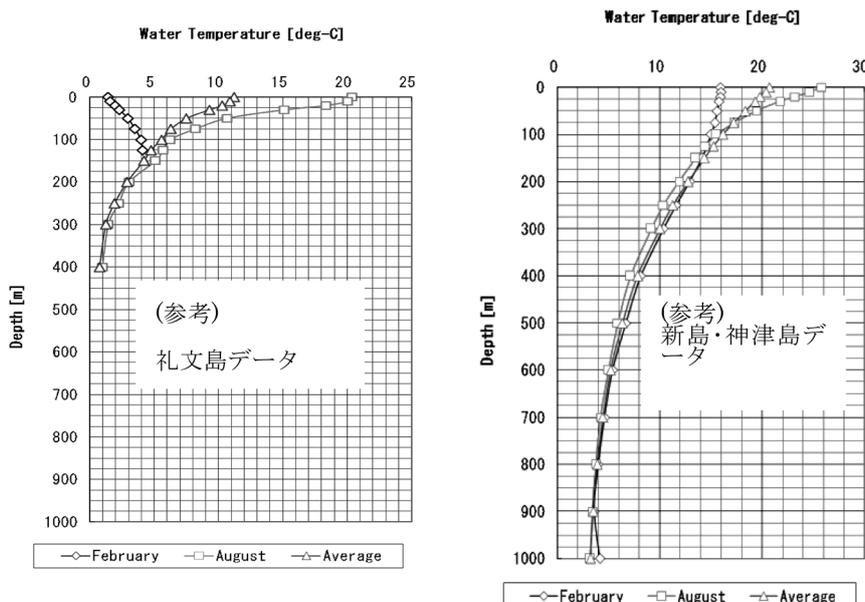


図2 海水の深度別温度変化

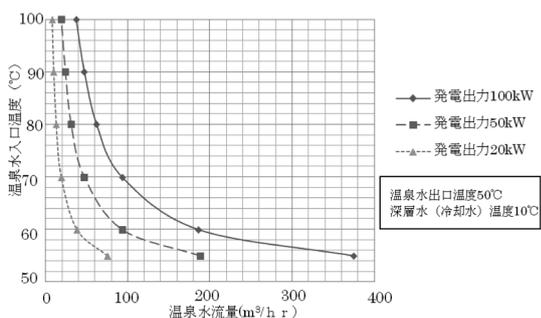


図3 出力別湯温・汲み上げ量曲線

体の蒸発温度と温泉水の蒸発器出口温度の差を2℃，また凝縮器における作動流体の凝縮温度と深層水の出口温度の差も2℃とした。機器の効率については、タービン効率80%，発電機効率90%，ポンプ効率46%で変わらないものとしている。発電出力は温泉水の湯温に大きく影響され，温度が高いほど発電に適していることがわかる。

#### 4.5 発電出力の想定

ケーススタディとして取り上げる出力50 kWおよび20 kWについて図3から温泉水温度90℃と60℃に対応する汲み上げ量および深層水の汲み上げ量，深層水取水管口径の諸元を表2に示す。

#### 4.6 年間発電量の試算

出力50 kWおよび20 kWのケースについて年間発

表2 発電出力別温泉等の諸元

50 kW 湯温90℃	
温泉水温度	90℃ (出口50℃)
温泉水流量	24 m <sup>3</sup> /h (400 L/分)
深層水温度	10℃ (出口20℃)
深層水流量	90 m <sup>3</sup> /h (約2,160トン/日)
深層水取水管口径	φ150 mm
50 kW 湯温60℃	
温泉水温度	60℃ (出口50℃)
温泉水流量	93 m <sup>3</sup> /h (1,550 L/分)
深層水温度	10℃ (出口20℃)
深層水流量	90 m <sup>3</sup> /h (約2,160トン/日)
深層水取水管口径	φ150 mm
20 kW 湯温90℃	
温泉水温度	90℃ (出口50℃)
温泉水流量	10 m <sup>3</sup> /h (170 L/分)
深層水温度	10℃ (出口20℃)
深層水流量	36 m <sup>3</sup> /h (約860トン/日)
深層水取水管口径	φ100 mm
20 kW 湯温60℃	
温泉水温度	60℃ (出口50℃)
温泉水流量	38 m <sup>3</sup> /h (630 L/分)
深層水温度	10℃ (出口20℃)
深層水流量	36 m <sup>3</sup> /h (約860トン/日)
深層水取水管口径	φ100 mm

電量を算出した結果を表3に示す。年間発電量の算出に当たっては，発電装置内部消費電力として深層水ポンプと作動流体ポンプの動力を出力の20%と想定し，実際に利用できる正味の発電出力として，

表3 年間総発電量

発電出力	正味発電出力	年間発電量
50 kW	40 kW	310 MWh
20 kW	15 kW	115 MWh

表4 設備費用等試算

	50 kW	20 kW
設備費 (百万円)		
発電部分 (湯温90℃)	60	50
発電部分 (湯温60℃)	75	58
深層水取水管 (百万円)	153	83
地熱水, 排水他 (百万円)	50	40
小計 (湯温90℃) (百万円)	263	173
小計 (湯温60℃) (百万円)	278	181
メンテナンス費 (百万円/年)	0.6	0.5
オペレーション費 (百万円/年)	2	2
年間経費 (湯温90℃) (百万円)	20.1	14
年間経費 (湯温60℃) (百万円)	21.1	14.6
発電部分に係る年間経費 (湯温90℃) (百万円)	6.6	5.8
発電部分に係る年間経費 (湯温60℃) (百万円)	7.6	6.4

それぞれ40 kWと15 kWとした。また、年間の稼働率を90%と想定した。

よって、50 kWの場合の年間発電量は

$$40 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ 日} \times 0.9 = 315,360 \text{ kWh} \quad (1)$$

20 kWの場合の年間発電量は

$$15 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ 日} \times 0.9 = 118,260 \text{ kWh} \quad (2)$$

となり、1年間に50 kWで約310 MWh, 20 kWで約115 MWhの発電量が得られることになる。これは1世帯当たりの月間電力消費量を300 kWhとすると、これらの発電量は50 kWのケースでは約80世帯, 20 kWのケースでは約30世帯の年間電力消費量に相当し、少数人口の離島, 少数集落の離島においては有効な電源となりうる。

#### 4.7 設備費用・オペレーション等費用の試算

次に、各ケースの発電設備、海洋深層水取水設備、排水設備等の設備費用、設備のメンテナンス費用、発電設備のオペレーション費用および年間必要経費を算出した結果を表4に示す。初期投資規模としては、50 kWのケースでは約2億6,000~2億8,000万円, 20 kWのケースでは約1億7,000~1億8,000万

表5 発電コスト

出力50 kWのケース	(単位 円/kWh)	
	湯温90℃	湯温60℃
対総設備費	65	68
対発電装置費用	21	25
出力20 kWのケース		
	湯温90℃	湯温60℃
対総設備費	122	127
対発電装置費用	50	56

円となった。

また、設備費用は15年の単純償却、メンテナンス費は発電部費の約1%/年、オペレーション費は1人×@2百万円/年として年間ベースの費用を算出した結果、50 kWのケースでは約2,000~2,100万円, 20 kWのケースでは約1,400~1,500万円となった。発電装置に係る部分にのみ着目すると50 kWのケースでは約700~800万円, 20 kWのケースでは約600~700万円となる。

本検討では、現地の海象・地形等の自然条件や資材調達・現場作業等の経済社会条件に関する基礎的な情報に基づいて設備費用を算定したが、実施に向けてのより具体的詳細検討においては変動することがある。

#### 4.8 発電コストの試算

年間発電量および年間経費から各ケースの発電コストは以下の式で求められる。

$$CG = (EC + EM + EO) / QG \quad (3)$$

CG: 発電コスト EC: 施設整備費 EM: メンテナンス費用 EO: オペレーション経費 QG: 発電量

計算結果を表5に示す。50 kWのケースでは湯温90℃の場合65円/kWh, 60℃の場合68円/kWhとなり、20 kWのケースでは湯温90℃の場合122円/kWh, 60℃の場合127円/kWhとなった。なお、発電設備にかかる費用のみを対象として算出すると50 kWでは21~25円/kWh, 20 kWでは50~56円/kWhとなる。

試算の結果、離島における温泉水バイナリー発電

の発電単価は、小規模であること、深層水設備費用が多額であることなどの要因により本土における通常の発電単価に比べるとかなり割高である。ただ、離島における基幹電源であるディーゼル火力発電のコストは本土の既存電源と比較して4倍以上(NEDO, 2013) 高額で60~100円/kWhともいわれており、その意味ではほぼ同程度の範囲にあるといえる。

しかし、その導入検討に当たっては他の再生可能エネルギーの利用コストとの比較考量もまた求められる。そのためにも、更なる発電コストの削減の検討が必要であろう。

#### 4.9 発電コストに占める深層水取水設備費用の分析

発電コストに占める各費用の割合を表6に示す。海洋深層水の取水管の敷設に係る費用が発電コスト全体の4~5割と大宗を占めていることがわかる。この深層水設備にかかる費用の削減方策の検討が温泉水バイナリー発電導入のキーポイントであることは明らかである。

海洋深層水は発電冷却水として使用するだけでなく水産、観光など多様な利用が期待できることから、地域振興の一環として整備することが望ましく、そのことにより温泉水バイナリー発電コストの一層の低減が可能になる。このことについて以下に述べてみたい。

### 5. 海洋深層水の複合利用

#### 5.1 複合利用による経済性の向上

海洋深層水の取水施設に関する費用が総投資額の

表6 温泉水バイナリー発電のコスト要素別年間費用(湯温90℃のケース)

	出力50 kW (%)	出力20 kW (%)
発電設備	19.9	23.6
深層水取水設備	50.7	39.3
地熱水排水設備	16.4	19.2
メンテナンス	3	3.6
オペレーション	10	14.3
合計	100	100

約4~5割を占め、割高な発電コストの要因となっていると同時に我が国の深層水取水施設の整備が近年伸び悩んでいる要因の一つはその整備費用にあると思われる。

離島においては、島民生活に不可欠な電力エネルギーを地産地消型の再生可能エネルギーで確保するという大義があるといえども発電という単一の目的遂行のためにのみ深層水取水施設を整備することは大きな負担になる。しかし、多くの離島の主要産業である漁業、水産業、観光業などの振興にも離島共通の資源である海洋深層水を活用することができる。とすれば発電コストの低減に寄与するのみならず地域の活性化にも貢献することができる。

すでに水産養殖に有効利用して生産増強、雇用機会の創出に役立っている地域もある。深層水の特性を最大限に生かした利用目的に沿って適切な設備費用のアロケーションを図って目的ごとの経済性の向上をはかり、電力供給、水産振興、地域振興のwin-win-winの関係を構築することが可能であり、地域の活性化を促す起爆剤として大きな役割を果たすことができる。仮に、出力50 kWの温泉水発電に係る深層水の整備費用を1/3の費用負担とすると、表5に示した発電単価は65円/kWhから43円/kWhに約34%縮減される。同様の低減効果が深層水の複合利用産業群で期待することができる。

#### 5.2 複合利用方策の提案

深層水の特性を活かして以下のような利用方策が考えられる。

- ・発電
- ・海水の淡水化
- ・冷凍庫・保冷庫の保冷及び深層水氷製造
- ・地域内設備空気調節
- ・食品・医薬品化粧品開発研究
- ・栽培漁業
- ・高付加価値野菜栽培
- ・深層水温浴タラソテラピー
- ・希少金属回収研究
- ・海洋肥沃化
- ・磯焼け改善による自然生態系の修復

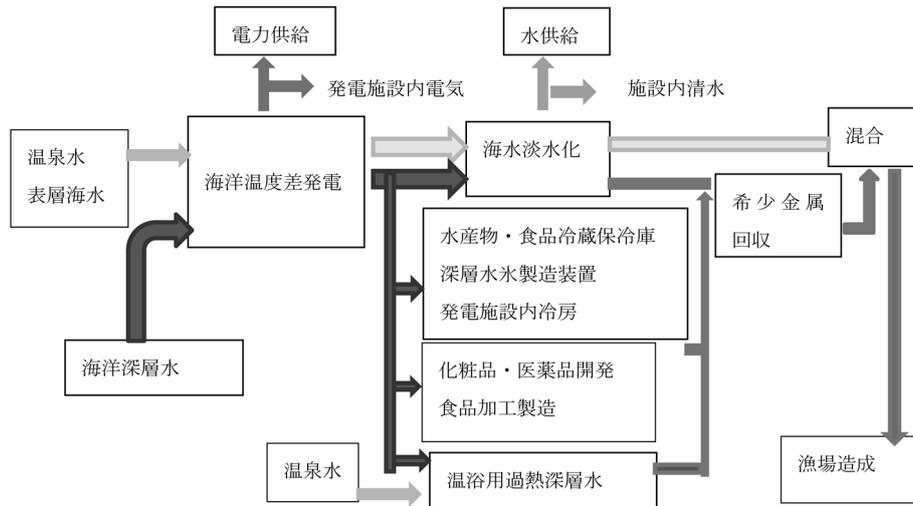


図4 海洋深層水の複合利用の流れ

すでに既存の一部深層水取水施設において深層水の複合的な利用に取り組んでいるように、温泉水バイナリー発電の導入検討に当たっては当該離島の地理的、自然特性を考慮した複合利用方策の検討が重要であると思われる。温泉水の利用を加味して深層水の取水から放出までの過程における複合利用の流れを図4に示した。

## 6. 深層水の放流による一次生産・魚類生産の増加および必要水域面積の試算

深層水の複合的な利用の最終段階である漁場造成効果および必要な水域面積について検討を行った。

### 6.1 漁場生産力増強の試算

深層水を直接海域に戻すのではなく、いったん港湾・漁港の防波堤に遮蔽された内水面に放出し滞留させることにより含まれる豊富な栄養塩から漁場生産力の増強を試算した。

発電後に放出する深層水の硝酸塩（窒素）が全て光合成に使い切られたと仮定し、レッドフィールド比を用いて一次生産および魚類生産を推定する（井関，2004）。ここで、炭素と窒素のRedfield重量比（C/N）を41/7.2、窒素の原子量（W）を14、生態効率（E）を0.2、栄養段階間のステップ数（S）を1.0、藻類・魚類の湿重量の有機炭素重量からの倍率（R）を20倍、深層水の硝酸塩濃度（D）を20 μmol/Lとす

る。深層水の放流量（Q）は50 kW規模の温泉水バイナリー発電において使用される1日2,160トンとする。

年間一次生産量P（湿重量）および年間の海藻捕食者の生産量FP（湿重量）は次式により求められる。

$$P = C/N \cdot D \cdot W \cdot (10^{-9}) \cdot 365 \cdot Q \cdot (E \cdot S) \cdot R \quad (4)$$

で表されるので

$$P = 41/7.2 \times 20 \times 14 \times 10^{-9} \times 365 \times 2160 \times (0.2)^0 \times 20 = 25 \text{ ton/year}$$

$$FP = C/N \cdot D \cdot W \cdot (10^{-9}) \cdot 365 \cdot Q \cdot (E \cdot S) \cdot R \quad (5)$$

で表されるので

$$FP = 41/7.2 \times 20 \times 14 \times 10^{-9} \times 365 \times 2160 \times (0.2)^{1.0} \times 20 = 5 \text{ ton/year} \quad (6)$$

すなわち、海洋深層水2,160トン/日を港内に放流することにより、サザエ、トコブシ、その他貝類などの海藻捕食者が年間約5トン生産されることが期待される。生産物の価格を3,000円/kgと仮定すれば、年間1,500万円の収入になる。

### 6.2 必要水域面積の試算

港湾・漁港の内水面の必要面積については、海面1 m<sup>2</sup>あたりの一次生産量（pu）を最大0.15 kg/日、海底棚の平均水深を1 mと仮定すると、年間25トン

の一次生産量 (P) を担保する海面の広さ (S) は次式により求められる。

$$S = P \cdot 1000 / 365 / pu \quad (7)$$

で表されるので

$$S = 25 \times 1000 / 365 / 0.15 = 456 \quad (8)$$

出力 50 kW 規模の温泉水バイナリー発電に使用した放出深層水の滞留に必要な内水面積は約 500 m<sup>2</sup> となる。

## 結 論

全国に 150 あまりある有人の遠隔離島を念頭において、湧出する高温の温泉水と周辺海域の海洋深層水を利用した地産地消型のバイナリー発電の可能性を分析研究した。いくつかの国内温泉地において実証試験等が開始されているが、離島を対象に温泉水と深層水を利用し、かつ、その深層水の複合的利用を想定した研究は初めての試みであると思う。

発電出力別の湯温と温泉水湧出量の関係図を作成し、深層水取水費用も含めた設備費用を算出して発電コストを試算し、多くの離島への導入の可否の判断に役立てられるようにした。

経済分析の結果、発電コストは出力 50 kW では 60 円/kWh 台、20 kW では 120 円/kWh 台になった。離島における基幹電源であるディーゼル火力発電のコストは 60~100 円/kWh といわれており、ほぼ同程度の範囲にあることがわかった。

具体的な導入の検討に当たっては更なる発電コストの削減が必要であろう。削減の方策の一つとして、コスト内訳の 4~5 割を占める深層水の取水設備費用削減のため深層水の複合的な利用方策を策定し、適切な利用目的別費用アロケーションを図って

目的ごとの経済性の向上に資することが効果的であることを示した。多くの離島にとって貴重な資源である海洋深層水の複合的な利用により、電力供給、水産振興、地域振興の win-win-win の関係が形成され離島の地域活性化を促すことができる。

## 謝 辞

本稿は、平成 25 年度海洋エネルギー研究会研究報告書「離島における海洋エネルギー利用による地域活性化に関する調査研究」(特定非営利活動法人海ロマン 21) から内容を一部修正しまとめたものである。資料提供、報告書作成に協力をいただいた研究会委員各位に感謝します。

遠隔離島の温泉およびそれらの湯温および湧出量に関する資料は公益財団法人日本離島センターから主として情報提供を受けた。また、本調査研究については、公益財団法人日立環境財団の平成 25 年度環境 NPO 助成事業の支援を受けた。両公益財団に感謝します。

## 参考文献

- 井関和夫 (2000) 海洋深層水による洋上肥沃化—持続生産・環境保全型の海洋牧场構想—。月刊海洋号外 No. 22。海洋出版, pp. 170-178.
  - 国土審議会政策部会長期展望委員会 (2011) 国土の長期展望中間とりまとめ, 平成 23 年 2 月。
  - NEDO 白書 (2013) 第 6 章, pp. 97.
  - 海ロマン 21 (2012) 小規模離島における海洋エネルギーの利用による地域活性化に関する調査研究, 平成 24 年度。
  - 海ロマン 21 (2013) 離島における海洋エネルギーの利用による地域活性化に関する調査研究, 平成 25 年度。
- (2014 年 10 月 10 日 受付; 2015 年 9 月 23 日 受理)