

## 離島インフラ生産のための 海洋深層水複合利用洋上浮体施設

Offshore Complex Float Utilizing DOW as Infra-structure of Isolated Island

大内一之<sup>1</sup>・實原定幸<sup>2</sup>・渡辺敬之<sup>2</sup>

Kazuyuki OUCHI<sup>1</sup>, Sadayuki JITSUHARA<sup>2</sup> and Takayuki WATANABE<sup>2</sup>

### Abstract

DOW (Deep Ocean Water: sea water below 200 m depth) which has three major characteristics of Low Temperature, Rich Nutrient and Very Clean, is expected to emerge as a future renewable ocean resource. Towards the era emphasizing clean environment and low carbon, utilizing renewable ocean resources is absolutely important because the land-based resources are being depleted. In order to use DOW effectively and economically, multi-purpose utilization of DOW is recommended. First, electric power generation by OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) is carried out using the difference of water temperature between the cold DOW (5°C) and the warm surface water (25°C). Second, fresh water generation by desalination of the sea water is carried out using the residual difference of temperature after OTEC operation. Third, DOW released from the heat exchanger of fresh water generators can be scattered into the photosynthetic surface layer of the sea where its nutrients can enhance marine primary production and eventually support rich fishing grounds. Fourth, lithium and some other rare metals can be absorbed from DOW by putting special filters in the continuous large quantity flow of DOW. In this paper, the multi-purpose DOW platform which generates electric power, fresh water, support fisheries and lithium absorption from DOW and surface water is proposed as a viable infra-structure for an isolated island. Technical and economic feasibility study was carried out and suggests that an optimally sized multi-purpose DOW platform is very feasible for the future environmentally sensitive times.

**Key Words:** Deep Ocean Water, Ocean Thermal Energy Conversion, Sea Water Desalination, Ocean Nutrient Enhancer, Floating Structure

### 要 旨

水深 200 m 以深の海洋水は海洋深層水と呼ばれ、今まで人類が利用してきた表層海水に比べて、低温性・富栄養性・清浄性という 3 大特徴を有しており、全海水の 95% を占め、しかも極海や寒帯海域での沈み込みと海洋大循環によって再生されるほぼ無尽蔵な資源である。この海洋深層水を原料として利用し、その低温性から熱エネルギーを取り出し海洋温度差発電 (OTEC) を行う、富栄養性を肥料として光合成を促進し植物プランクトンを増殖させ漁場を造る、清浄性を利用し清浄な淡水を生産する等の、人類の今後の課題を解決する新しい基礎的資源の調達方法が考えられる。ここでは、このような海洋深層水の複合的大規模利用によるエネルギー・食糧・淡水等の基礎的資源生産インフラとしての、「洋上浮体施設」の構想及びその概念設計を行い、その実現性について考察する。

**キーワード:** 海洋深層水, 海洋温度差発電, 海水淡水化, 海洋肥沃化, 浮体構造

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

<sup>2</sup> (株)ゼネシス (〒104-0061 東京都中央区銀座 5-11-14)

## 1. 緒 言

人口増加と生活レベル向上が続く人類の今後の生存を支えるため、食糧・淡水・エネルギー・鉱物資源等の基礎的資源の十分な調達が必要である。これまでは陸域がこれらの資源の生産源となっていたが、耕地、牧草地、河川、地下水、油田、鉱山等もほぼ開発利用され尽くされてきており、地球面積の70%を占める海にその生産源を求めざるを得ない状況に入りつつある。

このような人類の生活基盤を支える原料として、これまで殆ど未利用であった海洋深層水（以下深層水）が注目されている（高橋，1991；高橋・井関，2000；大内，2003）。深層水は一般的には200 m～300 m以深の海水を指し、全海洋水の95%を占める。水温は表層と比較して低温で安定しているため発電、海水淡水化等への利用が可能である。

また、この水深には日光が全く差し込まないので光合成が行われないため窒素・リン等の無機栄養塩を大量に含んでいる。つまり植物の光合成に必要な肥料がほぼ無尽蔵に近い状態で深層に眠っているわけで、深層水を日光のあたる表層に汲み上げれば植物プランクトンを大量に湧かせることが出来るはずである。しかしながら深層水は低温で重いため、表層には簡単には湧き上がってこない。数少ない例外が、南米ペルー沖や西アフリカ沖などであり、これらの海域では風や地形の効果等で深層水が自然に湧昇しており、そのため植物プランクトンが大量に発生しイワシ等の大漁場、所謂、湧昇流漁場が形成されている（Ryther, 1969）。

ここで提案する深層水複合利用型洋上浮体施設は、現在のテクノロジーを使って人工的に深層水を表層に引き上げ、発電、海水淡水化、一次生産増大による漁場造成等、つまり大量のエネルギーと食糧生産の両方を同時に成立させようとするものである（大内ら，2007）。ほぼ無尽蔵で再生可能な資源である深層水のみを利用して、環境に悪影響を与えることなくこれらのインフラが得られることとなれば、南洋離島や無人島等の大いなる活用と生活圈・経済圏の拡大が可能となる。

## 2. 立地概要

本装置への入力には表層及び深層の海水のみ、出力は電力・淡水・植物プランクトン等であり、CO<sub>2</sub>や有害合成物質等を出すこともなく環境に優しい装置である。本装置の利用形態として先ず考えられるのは、基盤的インフラの脆弱な南方の島嶼地域や無人島への適用であり、自然に対して最小限の環境負荷で地球環境に配慮しながら多角的な経済活動が行われるためのインフラとなることが期待される。ここでは、一例として日本の200海里経済水域の根拠となっている海洋離島をイメージして、そこでの経済活動のためのインフラとしての海洋深層水を複合利用する洋上浮体施設（Fig. 1）を考えることとする。

太平洋に浮かぶ島々は、Fig. 1の断面図に示すように水深約4,000 mの大洋底から富士山のようにそり立ち、頭だけを海面に出しているケースが多い。このような島ではOTECに必要な低温水を入手できる水深約1,000 mの海域が島から非常に近く、浮体への動力ケーブル等の敷設距離が短く、アクセスにも便利であり好立地といえる。また、Fig. 1に示すように、海流がある場合には島の潮下側には海水の滞留域ができるので、浮体施設により汲み上げた栄養塩豊富な海洋深層水が滞留し、これによる一次生産の活発化により、植物プランクトン—動物プランクトン—小魚—大魚という食物連鎖の働きで、漁場造成が期待できる。

## 3. プラント要素設計

ここでは、本浮体施設の基本構想・計画を以下に述べる。これらの要素機器ブロックダイアグラムをFig. 2に示す。

### 使用原料

- ・海洋深層水：水深800 m，低温（水温約5℃），富栄養（硝酸塩濃度約40 μmol/L）。
- ・海洋表層水：水深5 m，高温（水温25℃以上）。

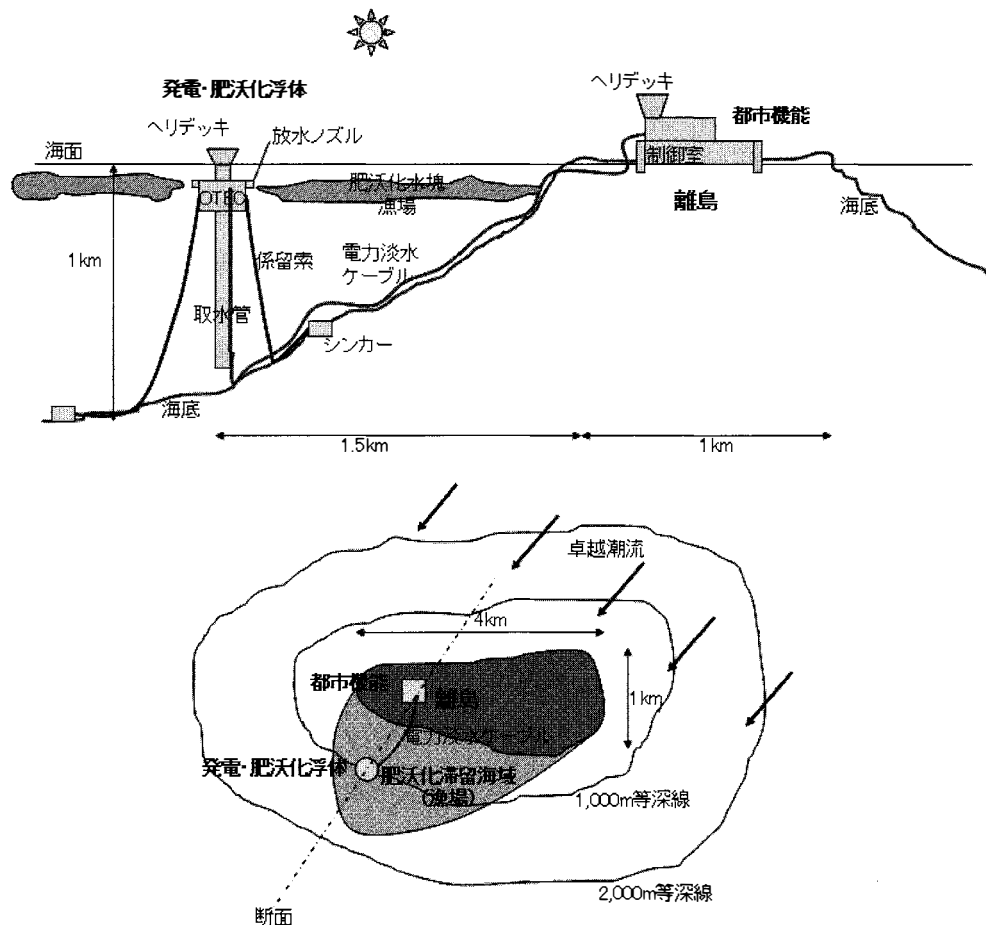


Fig. 1. 離島での深層水利用洋上浮体施設の立地模式図

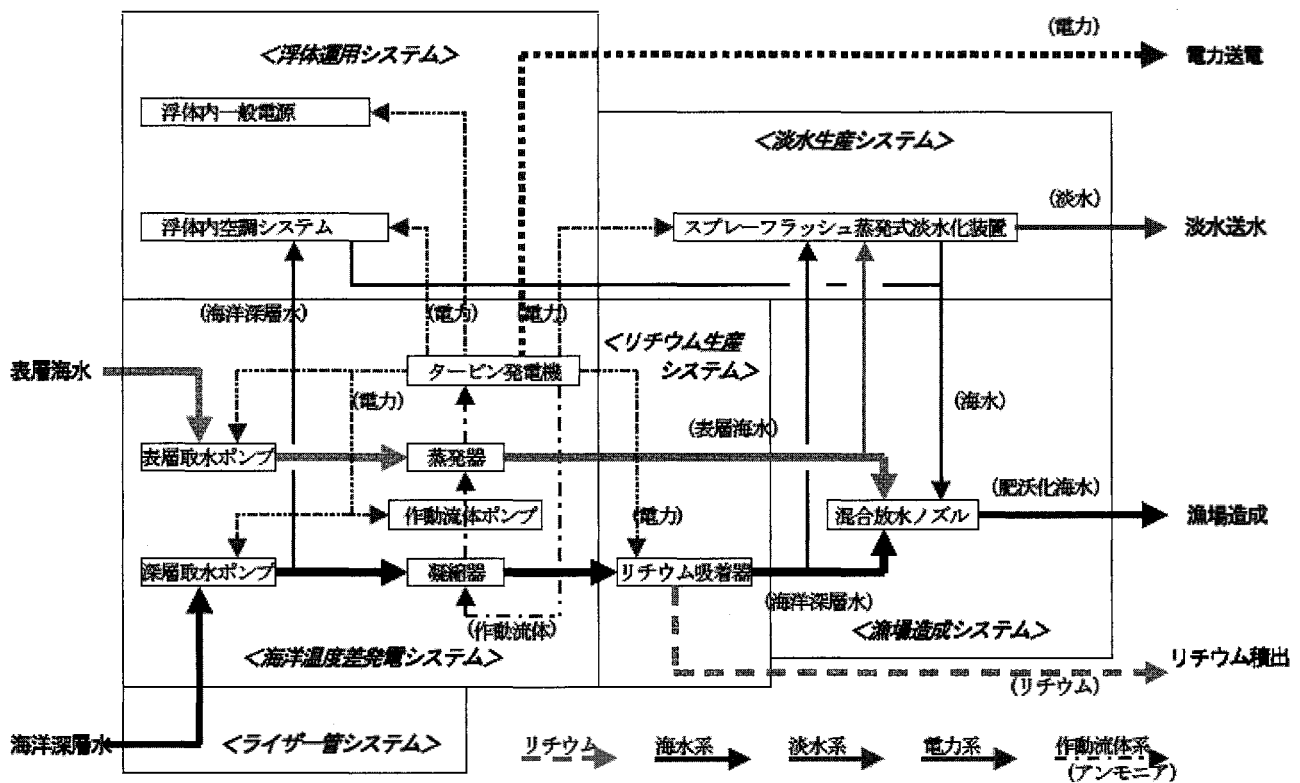


Fig. 2. 深層水利用洋上浮体施設における要素機器ダイアグラム

## 生産物

- ・電力：深層水と表層水の 20℃以上の温度差でアンモニア水を作動流体としたクローズドサイクルの海洋温度差発電を行い、プラント・浮体に必要な電力を差し引いた正味電力を電力ケーブルにて島へ送電する。
- ・漁場：OTEC 冷却水に使用した窒素・リン等の栄養塩濃度の高い海洋深層水を表層水と混合し、有光層に滞留できる密度に調整し放流することにより一次生産を高め漁場を造成する。
- ・淡水：OTEC の副産物として海水温度差により低コストで生産可能。ホース又は水バージにて島へ輸送する。
- ・リチウム：大量の深層水の流れを利用して、海水中から充電型バッテリー等の需要が多いリチウムを採取する。

## 生産手段（要素機器等）

- ・没水体付スパー型浮体構造物：上部構造と下部構造をコラムで結合した縦長で水線面積が小さく揺れの少ないスパー型形状を採用する。
- ・ライザー管及び取水ポンプ：鋼製ライザー管を介して深層水を、浮体上部より表層水を大容量ポンプにより取水し OTEC 用熱交換器へ送水する。
- ・海洋温度差発電（OTEC）装置：深層水と表層水の温度差を利用し、最新の高効率 OTEC 技術であるウエハラサイクルを採用し、発電を行う。
- ・海水淡水化装置：深層水の低温性を更に利用してスプレーフラッシングによる海水淡水化を行う。
- ・リチウム採取装置：大量の深層水の流れの中にリチウム吸着装置を配置し、その分離回収を行う。低温の深層水の方が吸着効率は高い。
- ・海洋肥沃化装置：OTEC に使用した後の深層水・表層水を混合して密度調整し、この肥沃化海水を浮体没水部のリングノズルより放水し、有光層に密度流として水平拡散させ、一次生産力を高め漁場を造成する。
- ・交通設備：上甲板にヘリポート、喫水線付近に通船用乗降口を設け、浮体内は上甲板から浮体底部まで垂直にエレベーターを設備する。
- ・喫水制御設備：浮体およびプラントのメンテナン

ス等のための水バラストの漲排水による喫水調整設備を設ける。

- ・居住設備：上記メンテナンス従事する作業員等のための宿泊居住設備を設ける。

## 運営方法

- ・設置場所：深層・表層の温度差が大きく、光合成に必要な太陽光の強い熱帯・亜熱帯海域の島の近傍に設置する。放水する栄養塩の肥沃化効果を高めるため、島の潮下側の流れの滞留しやすい海域に設置する。
- ・運転及び監視：運転は無人運転として、浮体内からの各種データの受け渡し及びプラント・浮体の制御は光ファイバーにより連結された島内の制御室から行う。
- ・メンテナンス：現場での必要なメンテナンスは、ヘリコプター又は船舶にて作業員が浮体に乗り移ることにより、定期的に行う。

## 4. 浮体の設計

ここでの浮体の設計は、台風を含む荒天を考慮する必要がある。設計条件としては最大風速 50 m/s 以上、有義波高 12 m 以上、波周期 14 s という厳しい設計条件を考慮する必要がある。このような条件では、通常のバージ型浮体では浮体の運動が大き

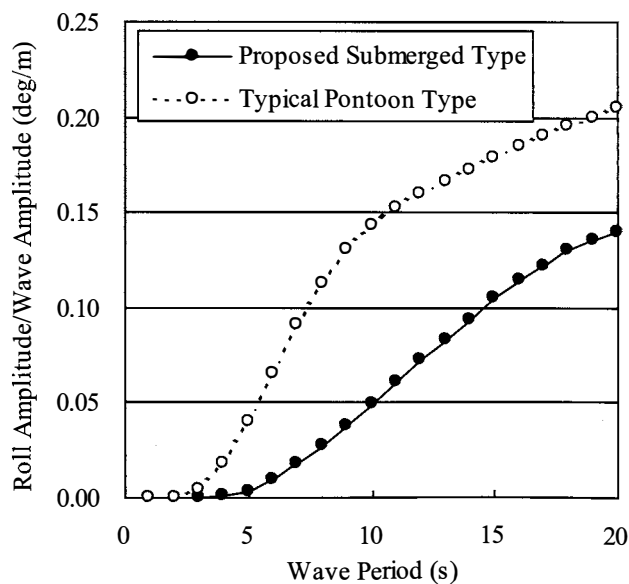


Fig. 3. スパー型とバージ型浮体の運動性能比較（大内, 2002）

いため、特に強度上厳しい条件にさらされるライザー管の設計が困難になり、システムが成り立たなくなる可能性がある。Fig. 3 に、相模湾で稼働中の長さ 200 m 直径 1 m のライザー管を持つ没水浮体付スパー型海洋肥沃化装置「拓海」と従来型バージ船型との不規則波中の横揺れ性能の比較を示す（大内，2002）。拓海のようなスパー型浮体は水線面積がバージ・ポンツーン型浮体に比べて大幅に小さく、波の影響を受けにくいことが知られており、ここでは Fig. 4 に示す拓海型のスパー形状を採用する。

一般配置としては、Fig. 4 に示すようにプラント室の周囲を水バラストタンク及び深層水・表層水・

吐出水のプールで囲みダブルハルとして安全性を高めている。復元性を確保するために浮体底部には固定バラストを積み、水バラストを排水することにより放水口のある没水浮体上部が水面上に浮くことでメンテナンス等を便宜を図っている。

係留については、電力・光・淡水移送ホース等を束ねた複合ケーブルで陸上とつなぐため、振れ回りのない多点係留とする。今回概念設計を行った発電量 5,000 KW、深層水汲み上げ量約 63 万  $\text{m}^3/\text{日}$  のプロトタイプ的一般配置図（Fig. 4）と稼働想像図（Fig. 5）を示す。

また、以下に本浮体施設の主要目等を示す。

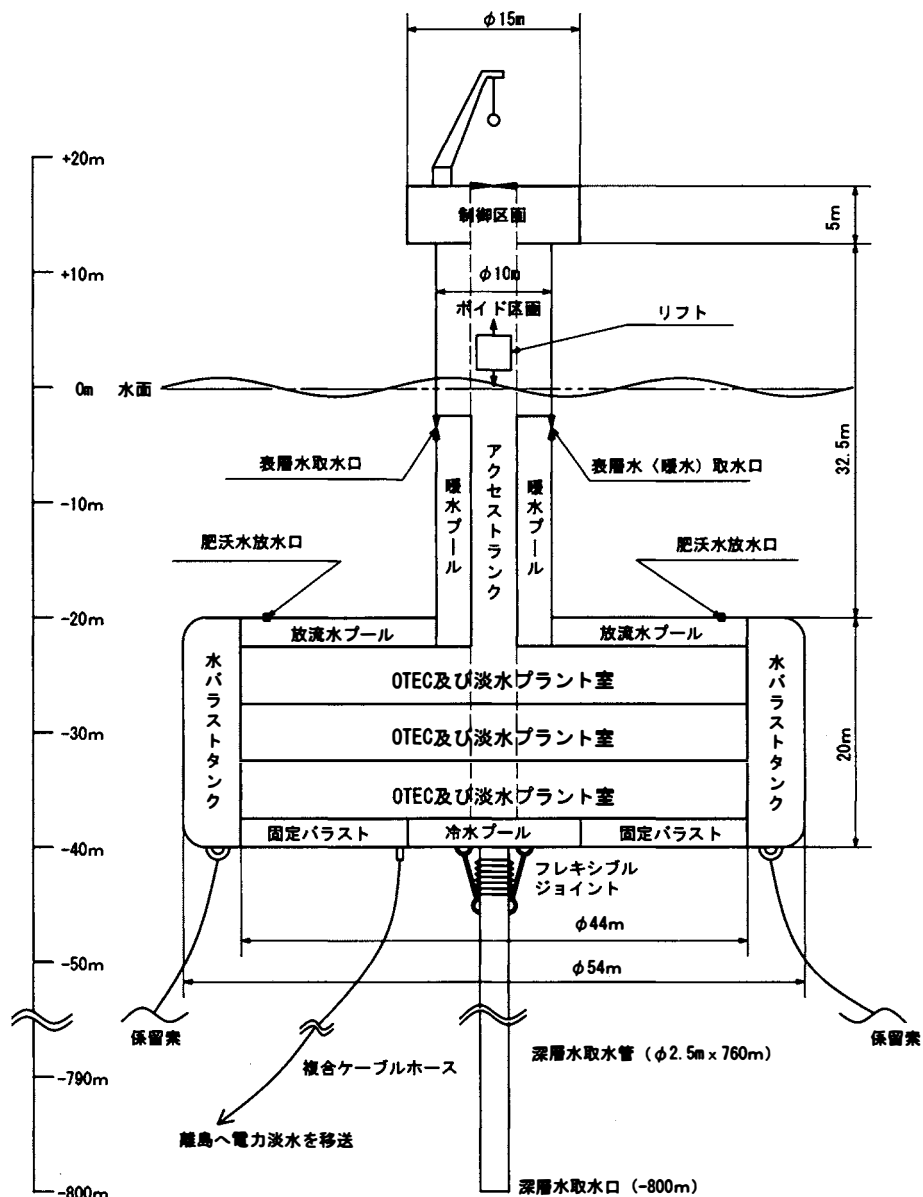


Fig. 4. 深層水利用洋上浮体施設の一般配置図

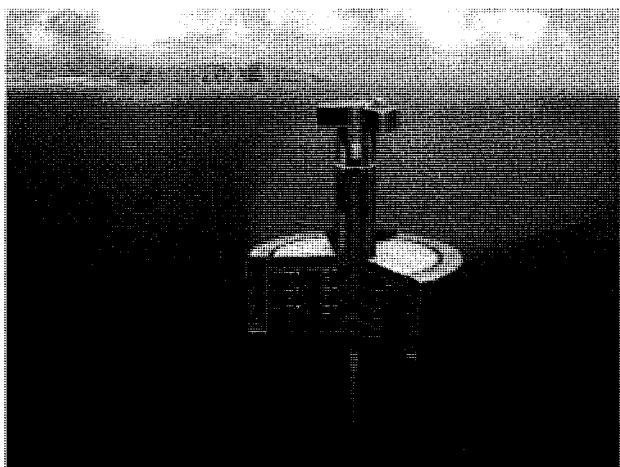


Fig. 5. 深層水利用洋上浮体施設の稼働想像図

浮体方式：	没水浮体付きスパー型
全高（除くライザー管）：	約 65 m
直径：	約 54 m
コラム直径：	約 10 m
喫水（操業時，除くライザー管）：	約 40 m
喫水（浮上時，除くライザー管）：	約 16 m
排水量（操業時）：	約 48,000 ton
OTEC プラント室容積：	約 23,000 m <sup>3</sup>
水バラスト容積：	約 15,000 m <sup>3</sup>
固定バラスト容積：	約 3,400 m <sup>3</sup>
暖水プール容積：	約 1,420 m <sup>3</sup>
冷水プール容積：	約 780 m <sup>3</sup>
放流水プール容積：	約 2,600 m <sup>3</sup>
ライザー管内径×長さ：	約 2.6 m×760 m
深層水取水量×水深：	625,000 m <sup>3</sup> /日×800 m
表層水取水量×水深：	約 1,250,000 m <sup>3</sup> /日×5 m
肥沃化水放水量×水深：	約 1,875,000 m <sup>3</sup> /日×20 m
発電端出力：	約 5,000 KW
正味出力：	約 3,500 KW
係留方法：	アンカー，チェーン，ワイヤーによる カテナリー多点係留。
電力ケーブル：	海底敷設とする。水中部は中間ブ イによる立ち上り方式とし，制御用光ケーブル と淡水移送ホースも含む複合ケーブルとする。

## 5. コストと採算

本システムの経済的実用性を検討するため，先ず生産物の量と売上価格を見積もる。

電力については，最近の佐賀大学における OTEC 研究の進展によりウェハラサイクルを用いて表層水と 20℃水温の低い深層水を 1 時間当たり 1 トン汲み上げることにより 0.19 KW の発電が可能 (Uehara, 1999) で，そのうちの 70% (ポンプ等のプラント用電力が 30%) が正味電力として外部へ供給販売出来ると仮定。これより電力の販売単価を ¥20/KWh とすると売上額は 4.5 億円/年と見積もられる。

淡水については，OTEC に使用した後の残った温度差を更に利用してスプレーフラッシュ式の淡水化装置を用い，汲み上げ量の 0.5% の淡水生産が可能であると仮定。これにより淡水の販売単価を ¥150/トンとすると売上額は 1 億円/年と見積もられる。

漁獲増加量は，硝酸塩濃度の高い深層水を真光層に添加し全てが光合成に使われたと仮定して以下のような見積計算を行った (井関，2000)。

植物プランクトンの生産量は Redfield 比を用いて求めた。炭素と窒素の Redfield 比は重量比で (C/N=41/7.2) となる。ここで，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，魚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 40 μmol/L，深層水の汲み上げ量 (Q) を 62.5 万 m<sup>3</sup>/日とすると，年間魚類生産量 (FP) は，カタクチイワシ換算の湿重量 (トン) で下記となる。

$$\begin{aligned}
 FP &= (C/N) \times D \times W \times (10^{-9}) \times 365 \times Q \times (E^S) \times R \\
 &= (41/7.2) \times 40 \times 14 \times 10^9 \times 365 \times 62.5 \times 10^4 \\
 &\quad \times (0.2)^{1.0} \times 20 \\
 &= 2,910 \text{ (トン/年)}
 \end{aligned}$$

これにより魚価を ¥200/kg，漁獲率 50% とすれば 2.9 億円/年の売上額が見積られる。

一方，費用として本浮体施設の建造・設置・運用コストを現在の材料価格を基に概算で検討した結果，浮体構造 (含むライザー管)：75.2 億円，OTEC 設

Table 1 深層水利用の洋上浮体施設の採算性

	項目	単位	20万m <sup>3</sup> /日	63万m <sup>3</sup> /日	200万m <sup>3</sup> /日	備考
要 目	深層水汲み上げ量	m <sup>3</sup> /h	8,333	26,250	83,333	
	温度差	°C	20	20	20	表層水25°C、深層水5°C
	ライザー管径	m	1.2	2.2	3.8	管内流速2.0m/s
	浮体サイズ(浮体直径)	m	30	54	96	
	(排水量)	ton	4,608	14,514	46,075	
売	総出力	KW	1,583	4,988	15,833	0.19KW/m <sup>3</sup> /h
	正味出力	KW	1,108	3,491	11,083	総出力の70%
	有効電力(含、淡水化電力)	万KWh/年	874	2,753	8,738	稼働率0.9*365日
	販売電力(除、淡水化電力)	万KWh/年	710	2,235	7,096	稼働率0.9*365日
	電力販売金額	億円/年	1.4	4.5	14.2	¥20/KWh
上	淡水生産量(汲上量の0.5%)	ton/年	328,500	1,034,775	3,285,000	稼働率0.9*365日
	淡水化用電力消費	万KWh/年	164	517	1,643	淡水化必要動力5KWh/ton
	淡水販売金額	億円/年	0.3	1.0	3.3	¥150/ton
	基礎生産力増加(炭素換算)	tonC/年	233	733	2,328	硝酸塩濃度40μ Mol/L
	魚類増加(湿重量)	ton/年	931	2,933	9,312	イワシ換算(Iseki, 2000)
経 費	魚類販売金額	億円/年	0.9	2.9	9.3	50%漁獲、¥200/kg
	販売総額(電力+魚+淡水)	億円/年	2.7	8.4	26.8	
	人件費	億円/年	1.0	1.0	1.0	10人*1,000万円
	メンテ費その他	億円/年	0.8	1.6	3.4	建造コスト総額の1%/年
	建造費償却	億円/年	3.1	6.4	13.7	25年定額、金利0として
費	建造費合計	億円	78.0	161.0	343.4	
	肥沃化浮体	億円	35.0	75.2	162.5	浮体排水量の2/3乗に比例
	OTEC設備	億円	25.0	59.1	140.6	汲上量の3/4乗に比例
	淡水化、その他設備	億円	6.0	10.6	19.0	汲上量の1/2乗に比例
	浮体設置、ケーブル工事	億円	12.0	16.0	21.3	浮体排水量の1/4乗に比例
	経費総額(ランニング+償却)	億円/年	4.9	9.0	18.2	
	利益(販売総額-経費総額)	億円/年	-2.2	-0.6	8.6	

備：59.1 億円，淡水化及びその他設備：10.6 億円，設置工事費（含むケーブル敷設）：16 億円，合計：160 億円と見積られた．これらを Table 1 の建造費合計の欄に示す．

実用に向けての採算性を調べるため，電力生産・淡水生産・漁獲増加による販売額合計に対して，浮体・プラントの建造設置費，運営メンテナンス費等の経費を 25 年償却（金利 0）の条件で比較し，概略の採算計算を行った結果を Table 1 に示す．なお，ここではリチウム生産に関わる販売額とその施設経費は除外している．深層水汲み上げ量については，ここで検討した 63 万トン/日を中心に 20 万トン/日，200 万トン/日の 3 ケースについて行った．

この結果から，本システムはスケールメリットが大きく，大規模施設にするほど採算性が高くなり，現状の設定単価・価格水準では，汲み上げ量で 65－

100 万トン/日（総発電量約 5,000－10,000 KW）程度のサイズが損益分岐点であることが判る．

## 6. 結 論

21 世紀の資源といわれる海洋深層水の三大特質である低温性・富栄養性・清浄性を総合的に利用する洋上プラットフォーム「海洋深層水複合利用洋上浮体施設」のコンセプトを提案し，立地については日本の 200 海里の離島振興のためのインフラ供給手段の創成という目的で，概念設計を行った．

電力，淡水，漁場等の生産・造成を行う洋上プラットフォームとして，特に新しいフレックスルーが必要な技術を用いなくても，既存の先端的要素技術を更に深め統合し多角的に利用していくことにより，十分に技術的成立性があることが判り，これらの知

見を基に発電量約 5,000 KW, 深層水汲み上げ量約 65 万 m<sup>3</sup>/日級のプロトタイプの試設計を行った。

また, 本システムのコスト試算及び採算計算を行い, 今後大型化を志向することによりコストパフォーマンスに優れた離島用のインフラ生産システムとして有望技術となり得ることが判った。

今後は更に, コストを含む具体的で詳細な基本設計を展開しながらコストパフォーマンスと共に政治的社会的波及効果も含むフィジビリティの検討をしていく必要がある。

#### 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場構想—。月刊海洋号外, 22, 170-178.
- 大内一之 (2002) 海洋肥沃化装置の研究開発。TECHNO

MARINE 日本造船学会誌, 868, 443-448.

大内一之 (2003) 海洋でのエネルギー・食糧生産。Ship & Ocean Newsletter, 81, 6-7.

大内一之・實原定幸・渡辺敬之 (2007) 電力淡水供給海洋肥沃化装置の概念設計。日本船舶海洋工学会講演会論文集, 4, 205-208.

高橋正征 (1991) 海にねむる資源が人類を救う。あすなろ書房, 東京, 189 pp

Ryther, J. H. (1969) Photosynthesis and fish production in the sea. Science, 166, 72-76.

高橋正征・井関和夫 (2000) 総論: 21 世紀の資源としての海洋深層水。月刊海洋/号外, 22, 5-10.

Uehara, H., Ikegami, Y., Mitsumori, T., Sasaki, K. and Nogami, R. (1999) The experimental research on ocean thermal energy conversion using the Uehara Cycle. Proceedings of International OTEC /DOWA Conference '99, Saga Univ., 132-141.

(2012 年 2 月 27 日受付; 2012 年 5 月 29 日受理)