

海洋深層水大規模取水—分配システムの フィージビリティスタディ（第1報）—経済性評価—

Feasibility Study of a Large-scale Deep Ocean Water Distribution System (1st report) -Economic Analysis-

松本 吉倫¹・大塚 耕司¹

Yoshitsugu MATSUMOTO and Koji OTSUKA

Abstract

Deep ocean water (DOW) has attracted special interest as one of the renewable resources with great potential. The purpose of this study is to evaluate feasibility of a large scale DOW pumping-up/distribution, on the assumption that the demand of the DOW significantly increases in the near future. In this paper, economics for two types of the DOW pumping-up systems, floating-type and land-based systems, are investigated as the first step of this study. The results of the economic analysis show that the break-even point price of DOW for floating-type is lower than that for land-based one, and the price of the desalinated drinking water becomes comparable to present public service water when the capital share rate is higher than 50%.

Key Words: Deep ocean water, Distribution system, Multiple DOW application systems, Feasibility study, Economic analysis

1. 緒 言

海洋深層水 (Deep Ocean Water, DOW) は, 1881 年に D'Arsonval によって温度差発電 (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC) の冷熱源として資源価値が見出されて以来, その特性 (低温安定性, 富栄養性, 清浄性等) を活かした様々な利用方法が提案されており, 現在では多目的, 多段階利用を行うことのできる再生型資源として広い分野で注目されるに至っている。最近では, 国内において深層水取水施設や利用・研究施設が増え, 冷熱利用や水産分野での利用の枠を超えて, 数々の食品や化粧品などが商品化されており, 東京や大阪などの大消費地でも深層水製品が手に入るようになった。

深層水の多方面での利用が進展している一方, 大規模取水の実証研究も行われるようになっている。インドでは, 佐賀大学の研究グループと共同で

1 MW クラスの OTEC 実証実験が進行中である¹⁾。また, 日本では日量 100 万トンの取水を想定した深層水利用システムに関する大型研究プロジェクトが平成 11 年度よりスタートしている²⁾。CO₂ 排出規制の実施により自然エネルギー利用の促進が各国で重要課題となっている事や, 食糧危機の観点から外洋での一次生産量アップに関する議論が行われていることも考え合わせると, 深層水の需要が今後ますます増大するであろうことは想像に難くない。しかし国内の現状に関して, 稼動あるいは計画されている取水施設は小規模な陸上施設がほとんどであり, 目的も基礎研究, 地域振興の段階に留まっている。今後の需要拡大への対応といった面では若干の不安は否めない。

一方, 陸水系水道水の安定供給と安全性の問題が国内においても具現化しつつある。例えば, 水源汚染により発生するクリプトスピリジウムに代表され

¹大阪府立大学大学院工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1)

るような塩素消毒が効果をもたない新たな病原性微生物の問題や、給水過程の管路での鉛汚染、河川での内分泌搅乱化学物質（環境ホルモン）の検出など³⁾が挙げられており、清浄な海洋深層水を用いた海水系水道インフラの必要性が今後議論されるようになると考えられる。このような新しい大規模な利用形態、水源保全と安定供給を基本に据えたインフラとしての水道事業を考えた場合、低価格での大量の深層水を大消費地へ供給するシステムの開発が不可欠となる。そこで本研究では、海水系水道インフラへの展開を考慮した海洋深層水大規模利用システムを提案するとともに、その基幹部分である海洋深層水の大規模取水一分配システムについて、経済面、環境面からその実現可能性について考察することを目的とした。本論文は第1報として経済性評価について述べる。

2. システムの概要

2.1 トータルシステム

トータルシステムとしては、Fig. 1 に示すように取水対象海域または沿岸部に大規模取水施設を設置し、大消費地である都市部の備蓄基地にシャトルタンカーやパイプラインで深層水を供給、利用するというシステムを考えた。

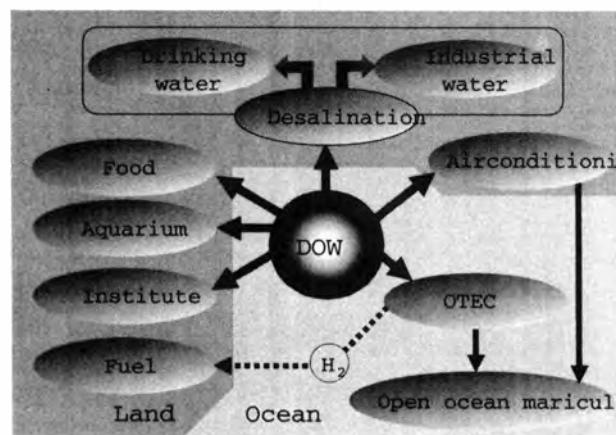


Fig. 1 Conceptual diagram of integrated DOW utilization systems

本システムでは需要が大きいと考えられる都市部に大量の深層水を供給する。深層水の有する複数の特性から多段階・多目的の利用を考え、次のような利用を行うことを想定した。

① OTEC および海域肥沃化

深層水の低温性を利用して温度差発電を行い、洋上施設内での必要な電力を生産する。余剰電力に関しては、水素に変換して燃料として陸上に供給する。また、洋上型施設は海域肥沃化を比較的容易と考えられるので、利用後の海水に関しては海域へ放流して肥沃化を図る。

② 冷熱利用

消費地へ供給する深層水の大部分は低温性を活かし、エアコンなどの冷熱利用に利用する。特にベイエリアの商業施設などその需要は大きい。冷熱利用後の深層水に関しても、回収して海域肥沃化に再利用する。

③ 淡水の利用

深層水の清浄性を生かした淡水化により、インフラとしての飲料水や工業用水としての利用を図る。特に飲料水に関しては、陸水系の水道水の安全性、安定供給などが問題となりつつあり、深層水を用いた海水系の飲料水の利用が水質の安全性、安定供給の面から期待される。工業用水に関しては、精密部品などの業種がその主たる消費業種となる。製品の製造過程において水道水を更に精製した純水による洗浄などを行っていることから、清浄な深層水の利用が期待できる。また、現状ではそれら工場は清浄な水源を求め輸送に便利な沿岸部から離れることも少なくないことから、ベイエリアの遊休地の活用および港湾機能の有効利用といった意味でも利用の可能性は高い。

④ 深層水そのものの供給

深層水をそのまま利用する食品生産企業や水産基地、研究施設、水族館やタラソテラピーなどへは精製せずにそのままの海水を供給する。

2.2 メインシステム

ここで、取水施設、供給システム、備蓄施設で構成される取水一分配システムをメインシステムと呼ぶこととする。著者ら⁴⁾は、1個所大量取水一分散利用の形態があるものとして、Fig. 2 に示すように、洋上型取水施設による取水を行い、シャトルタンカーで陸上の備蓄施設に供給するという取水一分配シス

テム、洋上一陸上ハイブリッドシステムを提案している。

中心となる洋上型取水施設は建設、設置コストの大部分を占める深層水取水管（Cold water pipe, CWP）の短縮分だけ、経済的に有利であるという報告がされている⁵⁾。また、取水管の短縮は冷熱保存の点でも有利である。

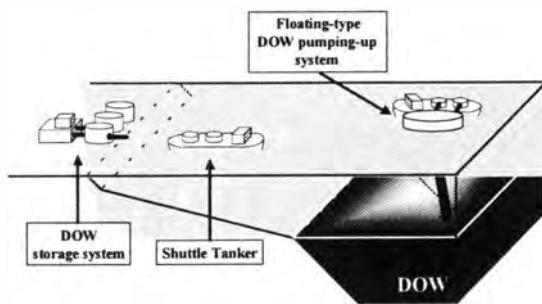


Fig. 2 Conceptual diagram of floating type/land-based hybrid DOW distribution system

大量取水一分配を、Fig. 3 に示すような陸上型取水施設とパイプライン、複数の備蓄施設からなる供給システムで行った場合を比較対象として考える。パイプラインについては、都市部まで高速道路など主要幹線道路に沿って建設し、建設コスト、CO₂排出などをできるだけ抑えることを考えた。

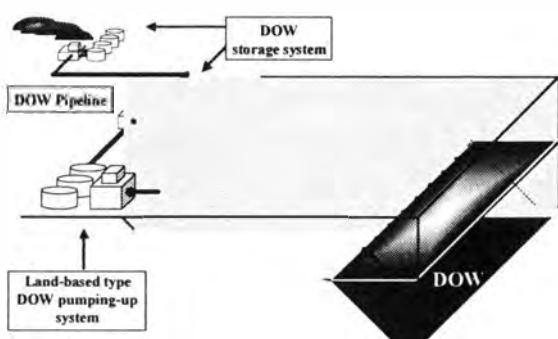


Fig. 3 Conceptual diagram of land-based DOW distribution system

3. 経済性評価

このような資源供給事業を考える際には、経済成り立と環境影響のバランスを考える事が重要である。事業推進の過程で資源の採集・分配コストが高くなると、経済的推進力が失われるといったことや、地

域間の不平等（先進国だけが利益を上げるようになるなど）に繋がるといったことも考えられる。そのため、ここでは都市部における飲料水としての供給を考えた際に、その採算分岐価格を一つの指標として経済性評価を行った。

3.1 洋上型取水施設

深層水取水量 Q (T/day) と資本回収年数 y_{BEP} (year) を系統的に変化させた時の深層水および飲料水の損益分岐価格 P_{DOW} , P_w (¥/T) を求める手順を以下に述べる。

3.1.1 初期投資コスト (Capital Cost)

著者ら⁴⁾は、Table 1 に示すように、いくつかの OTEC 施設の初期投資コストについてのデータを整理している。このデータを用いて最小近似することによって、次式のように洋上型取水施設の初期投資コスト CC_F (M¥, Million¥), および都市部に設置する陸上備蓄施設の初期投資コスト CC_L (M¥) を深層水の備蓄量 Q_S (T/day) の関数として算出した。なお、1 MW の OTEC には 260,000 T/day の深層水が必要であると仮定している。

$$CC_F = 0.4123Q^{0.6184} \quad (1)$$

$$CC_L = 0.1761Q_S^{0.6564} \quad (2)$$

(1), (2) 式に示される近似曲線と初期投資コストのデータを Fig. 4, Fig. 5 に示す。

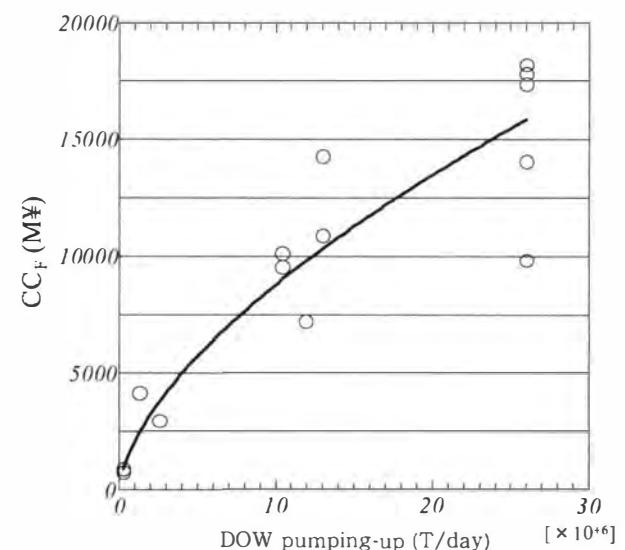


Fig. 4 Capital cost data and approximate value of floating type DOW pumping-up system

Table 1 Estimated capital costs of various OTEC plants⁴⁾

Type	Name	OTEC size (MW)	pumping-up size (T/day)	Structure & pump cost (M\$)	CWP cost (M\$)	Total cost (M\$)	Location
Land-based	Vega 1	1	260,000	4.4	12.3	16.7	Hawaii
	Nihous	1	260,000	6.0	9.9	15.9	Hawaii
	French	5	1,300,000	33.6	20.5	54.1	Tahiti
	Vega 2	10	2,600,000	15.0	60.0	75.0	Hawaii
	OTC	40	10,400,000	69.9	84.7	154.6	Hawaii
	Vega 3	50	13,000,000	75.0	120.0	195.0	Hawaii
Floating	SOLARAMCO	40	10,400,000	77.2	15.1	92.3	Hawaii
	George	46	11,960,000	54.8	10.9	65.7	Puerto Rico
	Vega 4	50	13,000,000	90.0	40.0	130.0	Hawaii
	Andersons	100	26,000,000	82.5	6.9	89.4	Toyama bay, Okinawa, Oosumi islands, et al
	TRW	100	26,000,000	116.4	41.5	157.9	
	EUROCEAN	100	26,000,000	118.4	9.5	127.9	
	CMU	100	26,000,000	153.6	8.4	162.0	
	Japanese	100	26,000,000	116.0	48.4	165.4	

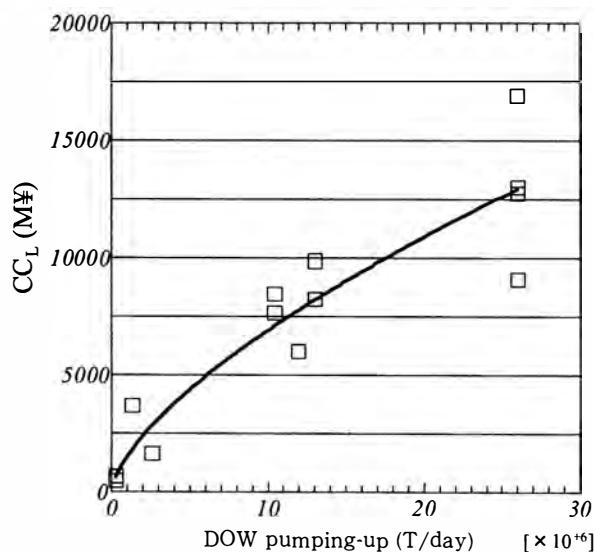


Fig. 5 Capital cost data and approximate value of land-based type DOW storage system

ここで、陸上型で見積られた CWP コストは洋上型に換算するため 20%となると仮定し、陸上備蓄施設のコストは CWP コストを差し引いたデータを用いて近似した。また \$1 は ¥110 で換算した。

長塚⁶⁾によると、既存のオイルタンカーの船価(98 年度)と積載量 DW (T) の関係は Table 2 のようになる。

このデータを用いて最小近似する事により、シャトルタンカーの船価 CC_S (M¥) を DW の関数として以下の近似式より求めた。

Table 2 Capital costs of various oil tankers⁶⁾

Deadweight (T)	Capital cost (M¥)
40,000	3,000
95,000	3,800
130,000	5,000
280,000	8,000

$$CC_S = n_{ship} \times 12.52 DW^{0.5099} \quad (3)$$

ここで、 n_{ship} はタンカーの隻数を表す。また、(3) 式で示される近似曲線と船価データを Fig. 6 に示す。

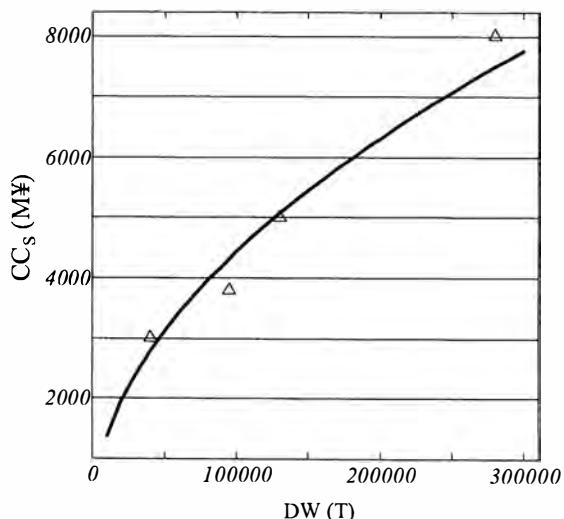


Fig. 6 Capital cost data and approximate value of Shuttle tankers

3.1.2 維持・管理コスト (Operation & Maintenance Cost)

洋上型取水施設の維持・管理コスト OMC_F (M¥/year) および陸上型備蓄施設の維持・管理コスト OMC_L (M¥/year) は、いずれも 1 施設に対する雇用人数が h_{Fup} , h_{Lup} 人で、一人当たり 40 万円/月の入件費がかかり⁷⁾、その他の年間費用が初期コストの 5 %かかるとして以下の計算式で算出した。

$$OMC_F = h_{Fup} \times 0.4 \times 12 + 0.05CC_F \quad (4)$$

$$OMC_L = n_{Lst} \times (h_{Lup} \times 0.4 \times 12) + 0.05CC_L \quad (5)$$

ここで、 n_{Lst} は用いる備蓄施設数である。

シャトルタンカーの維持・管理コスト OMC_S (M¥/year) は、1 隻あたりの乗員数が h_{ship} 人で、一人当たり 40 万円/月の入件費がかかり⁷⁾、燃料費を含めたコストが 50 万円/日であるとして⁶⁾以下のように式で算出した。

$$OMC_S = h_{ship} \times (h_{ship} \times 0.4 \times 12 + 0.5 \times 292) \quad (6)$$

ただし、年間稼働日数を 292 日（稼働率 80%）としている。

3.1.3 深層水の損益分岐価格

取水一分配された供給量 Q_S (T) の深層水が全て売れるとして、トンあたりの採算分岐価格 P_{DOW} (¥/T) は次式で計算できる。

$$P_{DOW} = \frac{CC \times CRF + OMC}{292Q_S} \quad (7a)$$

$$CC = CC_F + CC_L + CC_S \quad (7b)$$

$$OMC = OMC_F + OMC_L + OMC_S \quad (7c)$$

ただし、資本回収係数 CRF は(8) 式で与え、

$$CRF = mr(1+mr)^{y_{BEP}} / \left[(1+mr)^{y_{BEP}} - mr \right] \quad (8)$$

mr は金利で 5 %とした。

3.1.4 飲料水の損益分岐価格

この深層水を淡水化し、飲料水として供給する場合の価格の計算式を (9) 式に示す。飲料水の損益分岐価格 P_W (¥/T) は、深層水の価格に淡水化施設の

初期投資、ランニングコストをペイできる価格を上乗せする事で求められる。

$$P_W = P_{DOW} + \frac{(CC_W \times CRF + OMC_W) \times (1-\alpha/100)}{292Q_W} \quad (9)$$

淡水化施設の初期投資コスト CC_W (M¥) は、300T/day の処理能力を持つ淡水化装置が 5000 万円と仮定し、飲料水の供給量に合わせ必要個数設置するものとする。淡水化施設のランニングコスト OMC_W (M¥/year) は RO 膜の交換を初期投資の 15 %とし、雇用人員は n_W 人で、一人当たり 40 万円/月の入件費がかかり、燃料費を含めたコストが 50 万円/日であるとして計算を行った。 Q_W (T/day) は飲料水の供給量である。

$$CC_W = n_W \times 50 \quad (10)$$

ここで、 n_W は必要な淡水化プラントの個数を示す。

$$OMC_W = CC_W \times 0.15 + n_W \times [h_W \times 0.4 \times 12 + 0.5 \times 292] \quad (11)$$

ここで、メインシステムの資本負担率 α を導入する。概念図を Fig. 7 に示す。メインシステムのトータルのコストが淡水化施設のトータルコストに比べて大きいこと、またその扱う水の量が多いことから、メインシステムの方に淡水化施設の何 %かを

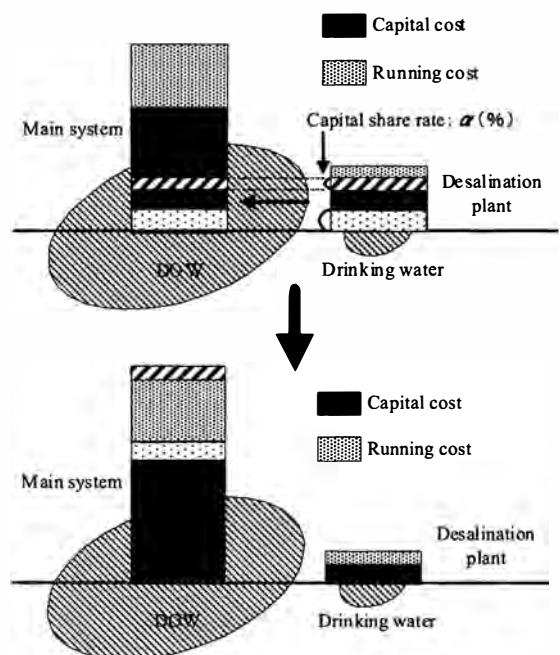


Fig. 7 Conceptual diagram of capital share rate α (%)

負担させることを考え、インフラとしての飲料水の供給価格を抑える事を目的としたものである。

3.2 陸上型取水施設

陸上取水施設の初期投資コスト CC_{Lup} (M¥) は、Table 1 のデータを用いて最小近似することにより深層水の取水量 Q (T/day) の関数として次式のように算出した。 (12) 式に示される近似曲線と初期投資コストのデータを Fig. 8 に示す。

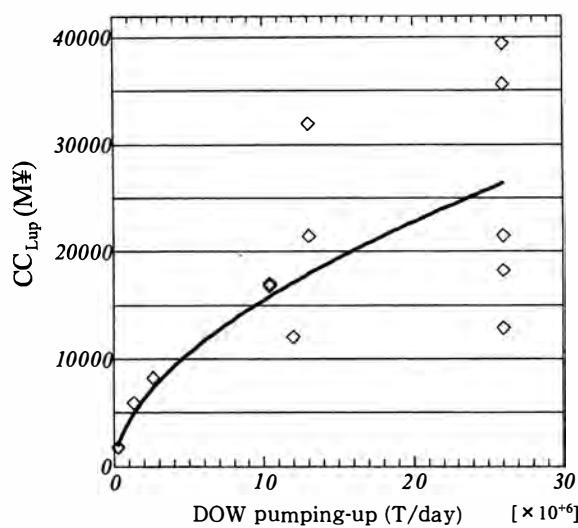


Fig. 8 Capital cost data and approximate value of Land-based type DOW pumping-up system

$$CC_{Lup} = 1.9662Q^{0.5552} \quad (12)$$

ここで、陸上型の CWP コストは洋上型で見積もられたコストの 5 倍となると仮定した。また、陸上備蓄施設は (2) 式の CC_L (M¥) を用いて計算を行った。

パイプラインについては、飲料水としての供給を考え品質保持の点から、ポリエチレン製のパイプを敷設する。また、このパイプラインは温度管理を考え、発泡スチロールを用いている。初期投資コスト CC_P (M¥) は Table 3 に示すデータを基にスケールアップして見積もり、素材コストの 2 割を建設工事費用として考えた。

維持・管理コストに関しては、陸上備蓄施設は (5) 式で表される OMC_L を用いて計算した。陸上取水施設に関しては、施設に対する雇用人数が h_{Lup} 人で、一人当たり 40 万円/月の人物費がかかり、その他の年間費用が初期コストの 5 %かかるとして (13) 式で計算を行う。

$$OMC_{Lup} = h_{Lup} \times 0.4 \times 12 + 0.05CC_L \quad (13)$$

パイプラインについては、雇用人数が h_P 人、一人当たり 40 万円/月の人物費がかかりで、その他の年間費用が初期コストの 10 %かかるとして (14) 式で計算を行う。

$$OMC_P = h_P \times 0.4 \times 12 + 0.1CC_P \quad (14)$$

4. ケーススタディ

ここでは、ケーススタディとして相模湾で深層水を大量取水し、大消費地である東京・横浜・浦安の 3 つの都市に分配するシステムを考えた。取水量は日量 1,000,000T を考え、大部分の 700,000T を取水施設で利用し、残りの 300,000T を三ヶ所の備蓄施設にそれぞれ 100,000T ずつ供給する。Table 4 に示すように、3 都市の世帯数から一世帯あたり 5l/day の飲料水を供給するとして、各都市への供給量を見積り、供給量はそれぞれ 10,000T/day で十分であると判断した。また工業用水については、最新の半導体工場で 1 工場あたり 100T/hr の洗浄水を利用している現状を踏まえ、20 時間運転を行う工場を備蓄施設近辺に 10 誘致すると仮定して、約 20,000T/day 必要とした。

なお各施設の雇用人員は Table 4 のように仮定した。

4.1 システムの諸条件

Fig. 9 に示すように相模湾に洋上型大規模取水施

Table 3 CWP cost of 1MW OTEC plant in India

Materials	Outer Diameter	Inner Diameter	Length	Cost
HDPE	1.1 (m)	0.9 (m)	1100 (m)	82.8 (M¥)

Table 4 Amount of DOW supply for subsystems, number of household, amount of drinking water around DOW storage system and employment DOW distribution system

DOW pumping-up size (T/day)			1,000,000	
Desalination		OTEC	Airconditioning	Institute, food, aquarium
Drinking water	Industrial water	Open ocean mariculture		
30,000	60,000	700,000	150,000	60,000
Storage system		Number of household		Drinking water supply (T/day)
Tokyo		183.5×10^4		9200
Yokohama		145.5×10^4		7300
Urayasu		113.5×10^4		5800
			Number of employment	
DOW pumping-up system			20	
DOW storage system			20	
Shuttle tanker			20	
Pipeline			20	

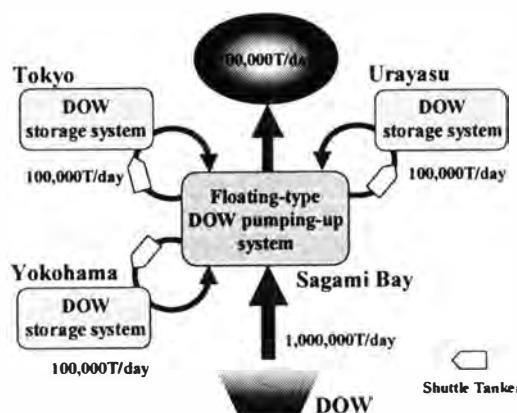


Fig. 9 Conceptual diagram of DOW distribution system with floating type pumping-up system in Sagami bay

設を設置し（取水深度 500 m），東京・横浜・浦安の備蓄基地にシャトルタンカーで深層水を供給するというシステムを考え，都市に設置した備蓄基地の貯蔵可能量は 7 日分とし，シャトルタンカーの行程は各備蓄施設共に輸送・給排水を含めて 1 日とした。シャトルタンカーで輸送中の深層水の水質については，光を遮断することで藻類・細菌類の繁殖を防ぐ事が可能であると仮定した。

このシステムの洋上取水施設は，ポンツーン型で 2.5MW の OTEC が可能であるとし，CWP はポリエチレン製で，外径 3.00 m，内径 2.86 m，全長 500 m とした。陸上備蓄施設に関しては，構造物と貯水タンクおよびポンプのみで見積もっており，備

蓄タンクの貯蔵可能量は深層水供給量の 7 日分，すなわち 700,000T とした。またシャトルタンカーの DW は 100,000T であり，3 隻を用いて備蓄施設に供給する。シャトルタンカーの航行データおよび燃料消費量を Table 5 に示す。

Table 5 Data of ship operation and fuel consumption

Distance (km)		Fuel (T/day)
To Yokohama	50	29.5
To Tokyo	75	44.3
To Urayasu	75	44.3
Total		118.1

4.1 陸上型メインシステム

Fig. 10 に示すように，茅ヶ崎市沿岸部に陸上型大規模取水施設を設置し，東京・横浜・浦安の備蓄基地にパイプラインで深層水を供給するというシステムを考えた。取水深度，取水量，備蓄基地の貯蔵可能量等は洋上型の場合と同様である。

パイプラインに関しては，水質，温度管理を考慮して，Fig. 11 に示すポリエチレン製のパイプを行い，高速道路など主要幹線道路に沿って建設することとした，この場合総延長は 76.1 km となった。

4.2 経済性評価結果

以上の仮定の下，算出した深層水の損益分岐価格

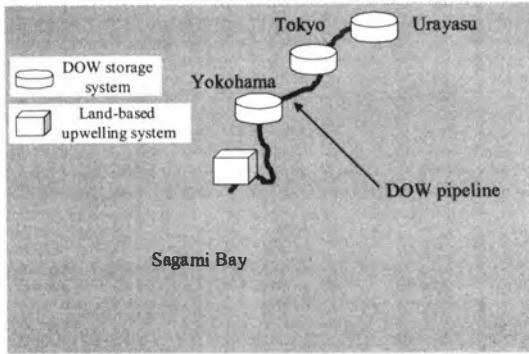


Fig. 10 Conceptual diagram of DOW distribution system with land-based type upwelling system in Sagami bay

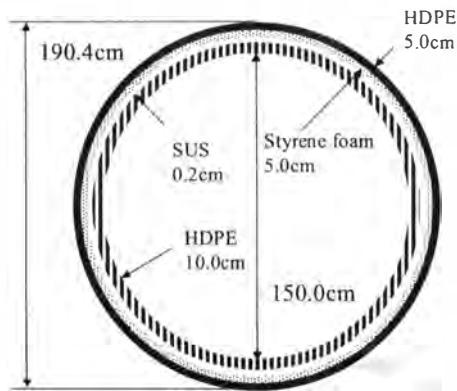


Fig. 11 Cross section of PE pipe for DOW pipeline

を Fig. 12 に淡水化処理を行った後の飲料水（工業用水も同じ）の損益分岐価格を Fig. 13 にそれぞれ示す。なお、洋上型に関しては飲料水の資本負担率 α を変化させている。

事業採算性を論じる場合、資本回収年数としては

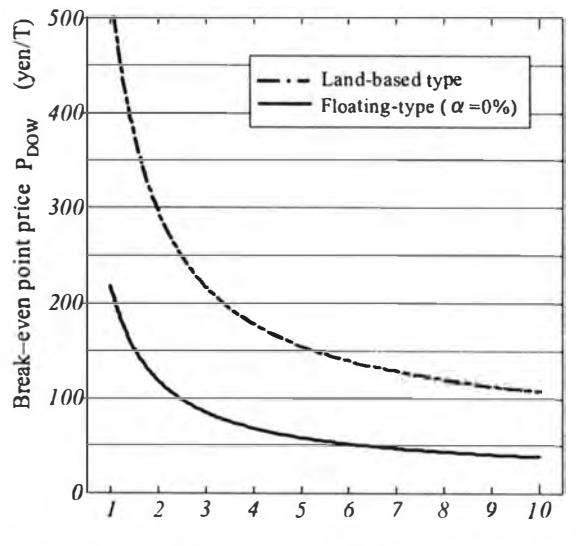


Fig. 12 Break-even point price of DOW

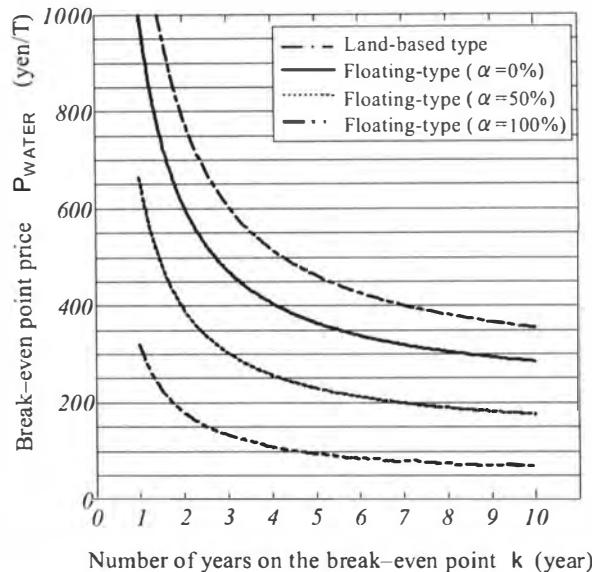


Fig. 13 Break-even point price of drinking water

一般に 7 年程度と言われているので、その年数での比較を行うと、陸上型の場合の損益分岐価格は ¥125/T 程度、洋上型は ¥50/T となる。また、飲料水の損益分岐価格は陸上型の場合 ¥400/T 程度、洋上型 ($\alpha=0\%$) は ¥320/T となる。

Table 6 にそれぞれのコストの内訳を示す。これを見るとコストに占めるシャトルタンカーあるいは

Table 6 Capital cost and operation cost of main systems

	pumping-up/storage system	
	Capital cost (M¥)	O&M cost (M¥)
Floating type	5758	576
	Shuttle tanker	Number of tankers 3
	Capital cost (M¥)	O&M cost (M¥)
	13290	726
pumping-up/storage system		
Land-based type	Capital cost (M¥)	O&M cost (M¥)
	7937	780
	Pipeline	Pipeline
Desalination plant	Capital cost (M¥)	Capital cost (M¥)
	32129	32129
	Capital cost (M¥)	O&M cost (M¥)
	5000	1276

はパイプラインの割合が非常に高く、洋上型と陸上型の価格差は供給方式、すなわちシャトルタンカーとパイプラインの初期コストが原因であることがわかる。比較対象として東京都の水道料金（¥170/T）を考えると、洋上型の場合、2倍程度となるが、水道水の現状を考えると安全で健康面でのプラス要素もあり、飲料水として安定した供給が期待できるということで、水道水と十分競合できる価格帯であると言える。また資本の負担率を上げてやると、50%強で現行の水道水と同価格帯になり、コストの面での問題は少ないように思われる。

5. 結 言

洋上型取水施設を中心とした深層水大規模利用システムを提案し、経済性の面から評価した結果以下の結論を得た。

1. 洋上型取水施設を中心とした深層水大規模利用システムでは、比較的安価での飲料水の供給が可能であり、陸上型施設で大規模利用を行った場合よりも経済的な面で有利である。

2. 全体のコストに占める割合は洋上型の場合シャトルタンカーのコスト、陸上型の場合、パイプラインのコストが非常に高く、コストダウンをはかるに

はこれらのコストの削減が重要となる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、淡水化処理に関するデータをご提供頂いた日本ポール（株）富元 誠様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Ravindran, M.: The Indian 1MW floating OTEC plant—an overview, *Proc. of Int. OTEC/DOWA Conf.* '99, pp. 2-9, 1999.
- 2) 源波修一郎、川口博靖、黒川明：平成11年度エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発全体概要について、海洋深層水'99 佐賀大会講演要旨集, pp. 20-21, 1999.
- 3) 有田一彦：あぶない水道水 袋小路の水道パラダイム、土木学会誌, pp. 5-8, 2001.
- 4) 大塚耕司、板東晃功、井上久嗣：洋上型深層水取水システムの検討、海洋深層水利用研究会ニュース、第3巻、第2号、pp. 9-12, 1998.
- 5) Vega, L. A.: Economics of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC), Ocean Energy Recovery—The State of the Art—, Chapter 9, ASCE, 1992.
- 6) 長塚誠治：21世紀の海運と造船—世界と日本の動向—、成山堂書店, 1988.
- 7) 運輸省年間統計、船員労働統計調査, 6, 1988.

(2001. 12. 19 受付, 2002. 3. 11 受理)