

2. 海洋温度差発電システムの確立について

将来の海洋温度差発電技術の実用化に向けて次の検討を行った。

2.1 海洋深層水及び表層水の取水に係る費用並びに海洋温度差発電の発電に係る費用を低減させる方法

2.1.1 昨年度までの検討概要

昨年度までの検討項目は次の通りである。

(1) 海洋温度差発電の発電コストの概要

NEDO 再生可能エネルギー技術白書等、これまでの検討で示された海洋温度差発電の発電コストについて整理した。

(2) 要素技術の技術的成熟度と費用低減シナリオ

海洋温度差発電プラントを構成する機器や装置、設備、工事等について、それぞれの技術成熟度と費用低減可能性を評価した。また、それぞれの費用低減の方向性について概観した。

(3) 熱交換器の費用低減シナリオ

特に費用低減可能性の大きい熱交換器について、今後の費用低減の見込みを示した。

(4) 開放型取水システムによる陸上設置型プラントのコスト、機能改善

費用比率が非常に大きい深層海水・表層海水取水システムについて、開放型取水システムと閉鎖型システムとの比較を行ない、出力1 MW級のプラントにおける費用低減・機能改善のための開放型取水システムの優位性について概説した。

2.1.2 今年度の検討

前項で述べた検討のうち、技術的な研究開発の進展があった熱交換器の費用低減の見通しについて、次の通り検討をアップデートした。

(1) 設計面での費用低減の見通し

整理方針

熱交換器の製造コストにおいて、直接的な設計費の占める比率は小さい。とりわけ、同型の熱

交換器が多ユニット設置されることとなる出力 1MW 以上の規模の海洋温度差発電設備においては、その比率はますます小さいものとなる。したがって、設計作業自体を容易にする方策では、小さなコスト削減効果しか期待できない。

そこで、本節では熱交換器の製造コストを間接的に削減する、熱交換器のプレート寸法について整理を行なう。プレート上のパターンの変更は技術開発を要するため、ここでは、パターンの変更（また、これを伴うプレート間隔の変更）を行わず、プレートの横および縦の寸法の変更に関して整理する。プレート一枚あたりの面積を大きくすることで、積層作業の削減や、単位面積あたりの溶接の削減が可能となる。一方、寸法の変更は、伝熱性能や海水の圧力損失にも影響を及ぼし、それが熱サイクル、ひいては発電コストの最適点にも影響を及ぼす。そこで、熱サイクルへの影響を定量的に評価しつつ、プレート一枚あたりの寸法の拡大を検討することとする。

評価方法

前節で述べた通り、熱サイクルへの影響を定量的に評価するため、プレートの寸法を変えた際の熱サイクル設計の最適値を次の通り評価する。これにより、その寸法ごとに最適な熱サイクル設計での比較が可能となる。

(a) 目的関数

目的関数は、熱交換器が発電コストに与える影響の指標として、熱サイクルの正味出力を熱交換器伝熱面積で除したものとする。

【目的関数】

$$F = W_{\text{NET}}/A$$

where:

F: 目的関数 [m²/kW]

W_{NET}: 熱サイクル正味出力 [kW] (式 2 - v 参照)

A: 熱交換器伝熱面積 [m²] (添え字 EV は蒸発器、CD は凝縮器を示す。以降同様)

(b) 設計変数

設計変数は、熱交換器プレートの寸法とともに、熱サイクル設計における設計変数も考慮し、次の 4 変数（蒸発器に対して 4、凝縮器に対して 4 で合計 8）とする。なお、熱交換器プレート幅 B および高さ H については、後述する最適化手法での比較のための視認性を考慮して離散変数とする。

【設計変数】

- | | |
|------------------------------------|------------------------|
| ① 熱交換器プレート幅 B [m] | : 離散変数 (0.7, 1.0, 1.5) |
| ② 熱交換器プレート高さ H [m] | : 離散変数 (2.4, 3.0, 3.6) |
| ③ 海水側流速 (プレートバンドル内) V_{SW} [m/s] | : 連続変数 |
| ④ 海水側出入口温度差 ΔT_{SW} [°C] | : 連続変数 |

(c) 制約条件

制約条件として、プレート積層数 N を固定とする。

【制約条件】

プレート積層数 $N = \text{const}$

(d) 使用した関係式

熱交換器の基本式、熱サイクルの計算式およびプレート式熱交換器の性能推定式を用いた。ただし、メーカーノウハウ保護のため、詳細については割愛する。

評価結果

(a) 蒸発器

まず、設計変数：熱交換器プレート高さ H を 2.4m (現在の寸法) に固定した場合について、図 2-1～図 2-4 に、設計変数：蒸発器における表層海水出入口温度差 $\Delta T_{SW_{EV}}$ と目的関数：熱交換器伝熱面積あたり正味出力 F の相関を示す。さらに、目的関数 F が高い条件となる表層海水流速 $V_{SW_{EV}}=0.8\text{m/s}$ および 1.0m/s の 2 ケースについて、 $T_{SW_{EV}}$ と目的関数 F との相関をそれぞれ図 2-5、図 2-6 に示す。

上記のうち、プレート面積拡大に有効と思われた、 $\Delta T_{SW_{EV}}=4^\circ\text{C}$ 、 $B=1.0\text{m}$ のケースについて、プレート高さ H を変動させた結果を図 2-7 に示す。

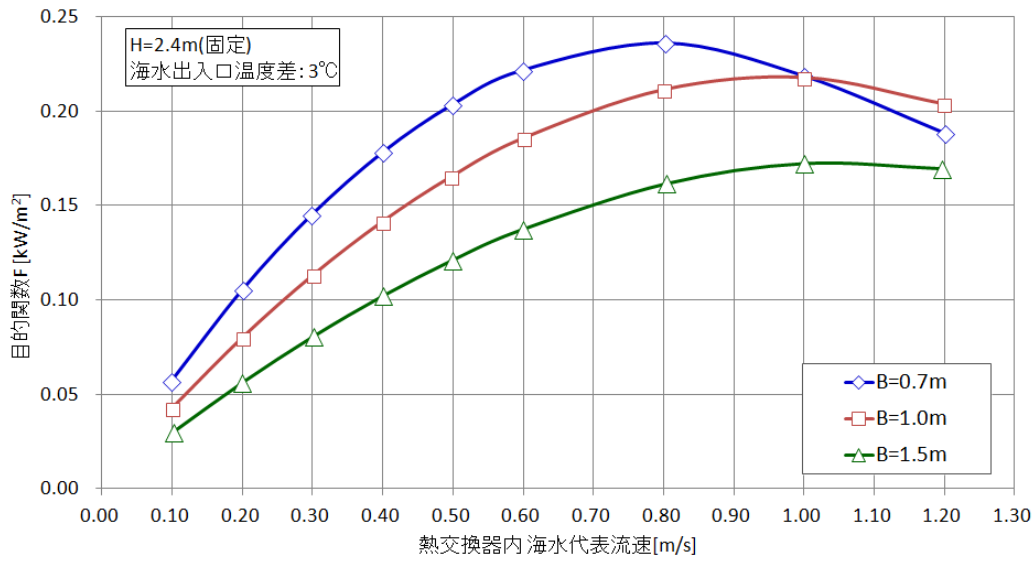


図 2-1 蒸発器における海水代表流速と目的関数との相関(ΔTSW=3.0°C、H=2.4m)

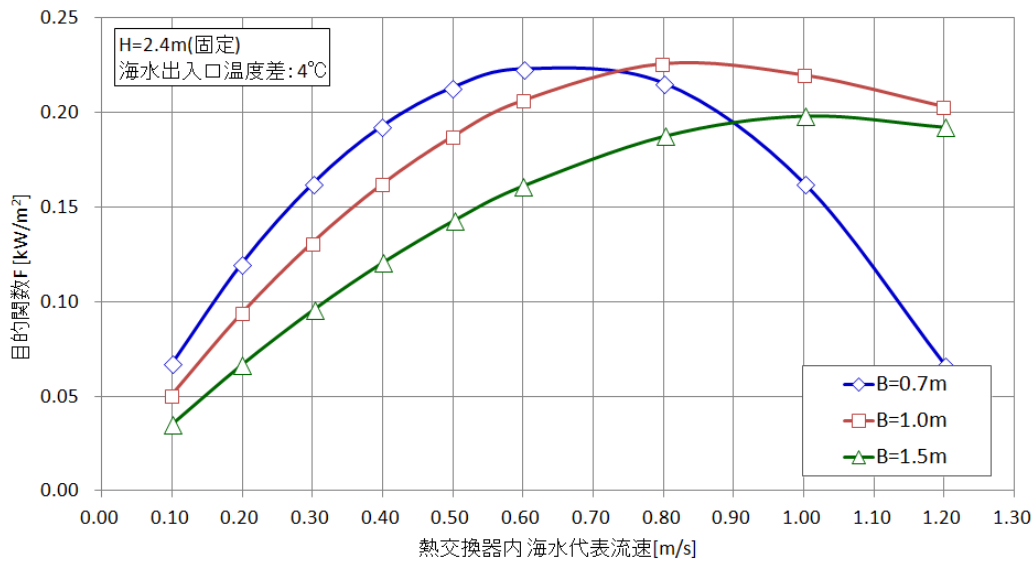


図 2-2 蒸発器における海水代表流速と目的関数との相関(ΔTSW=4.0°C、H=2.4m)

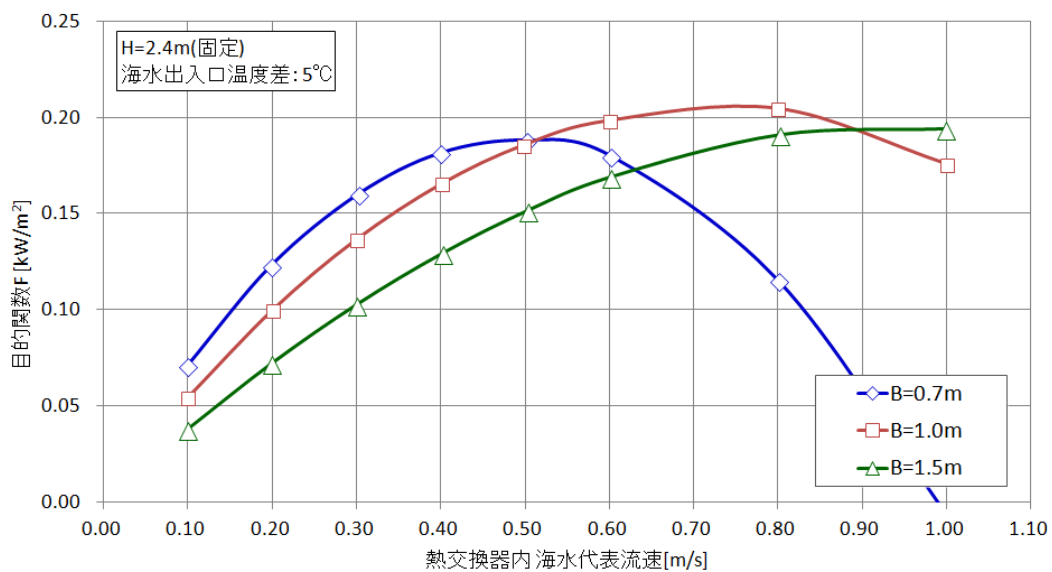


図 2-3 蒸発器における海水代表流速と目的関数との相関(ΔTSW=5.0°C、H=2.4m)

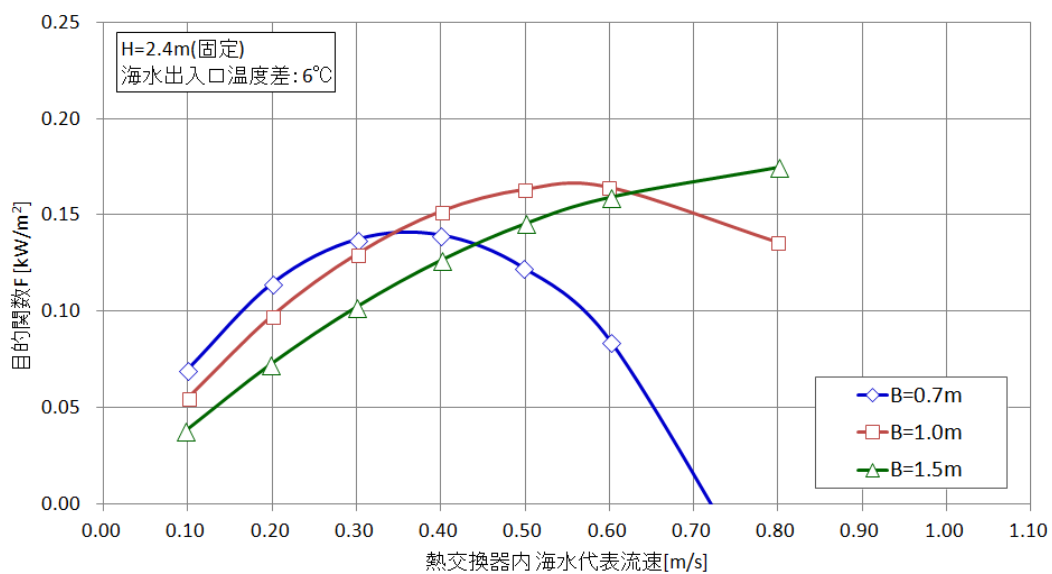


図 2-4 蒸発器における海水代表流速と目的関数との相関(ΔTSW=6.0°C、H=2.4m)

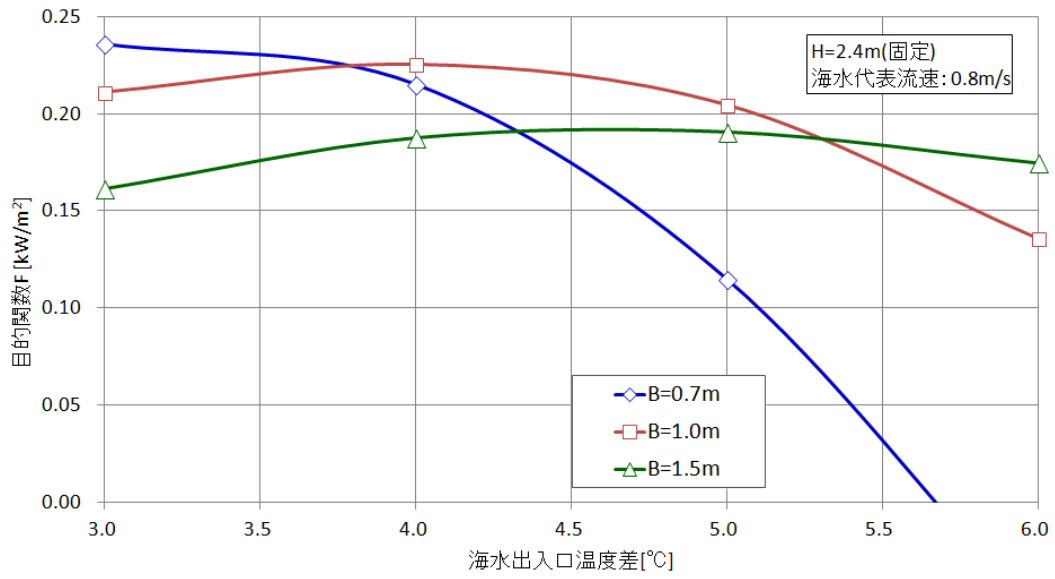


図 2-5 蒸発器における海水出入口温度差と目的関数との相関(ΔVSW=0.8m/s、H=2.4m)

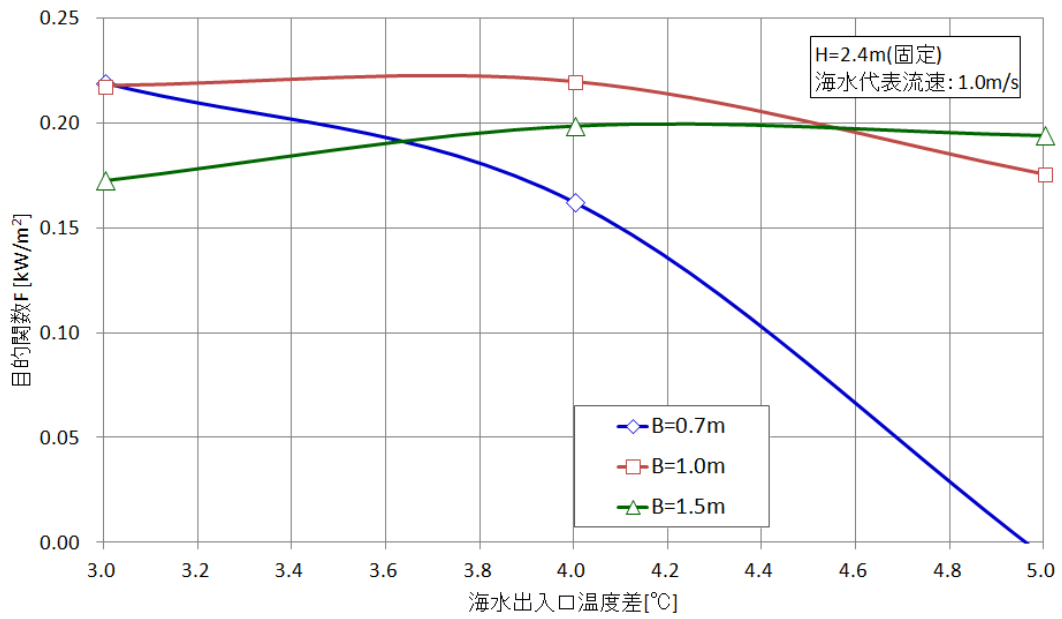


図 2-6 蒸発器における海水出入口温度差と目的関数との相関(ΔVSW=1.0m/s、H=2.4m)

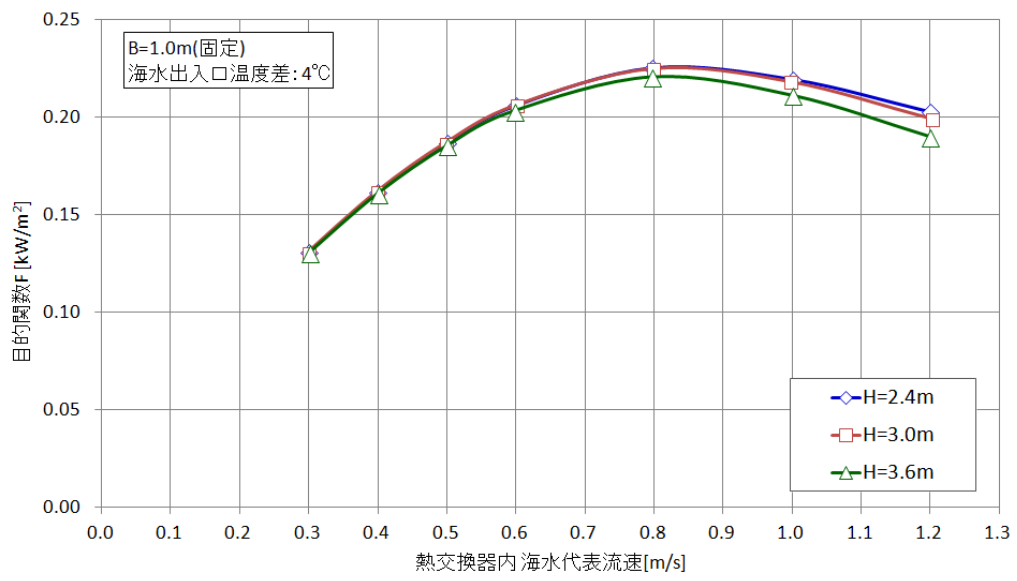


図 2-7 蒸発器における海水代表流速と目的関数との相関(ΔTSW=4.0°C、B=1.0m)

(b) 凝縮器

凝縮器についても同様に、設計変数：熱交換器プレート高さ H を 2.4m（現在の寸法）に固定した場合について、図 2-8～図 2-11 に、設計変数：凝縮器における深層海水出入口温度差 ΔTSW_{CD} と目的関数：熱交換器伝熱面積あたり正味出力 F の相関を示す。さらに、目的関数 F が高い条件となる表層海水流速 $VSW_{CD}=0.8\text{m/s}$ および 1.0m/s の 2 ケースについて、 TSW_{CD} と目的関数 F との相関をそれぞれ図 2-12、図 2-13 に示す。

上記のうち、プレート面積拡大に有効と思われた、 $\Delta TSW_{CD}=4^\circ\text{C}$ 、 $B=1.0\text{m}$ のケースについて、プレート高さ H を変動させた結果を図 2-14 に示す。

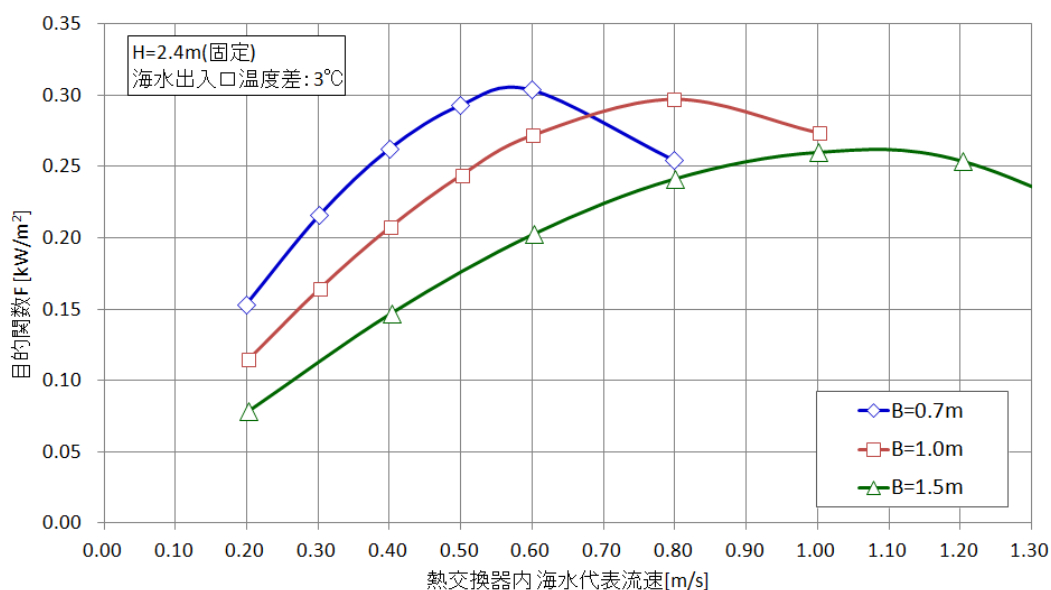


図 2-8 凝縮器における海水代表流速と目的関数との相関 ($\Delta TSW=3.0^\circ\text{C}$ 、 $H=2.4\text{m}$)

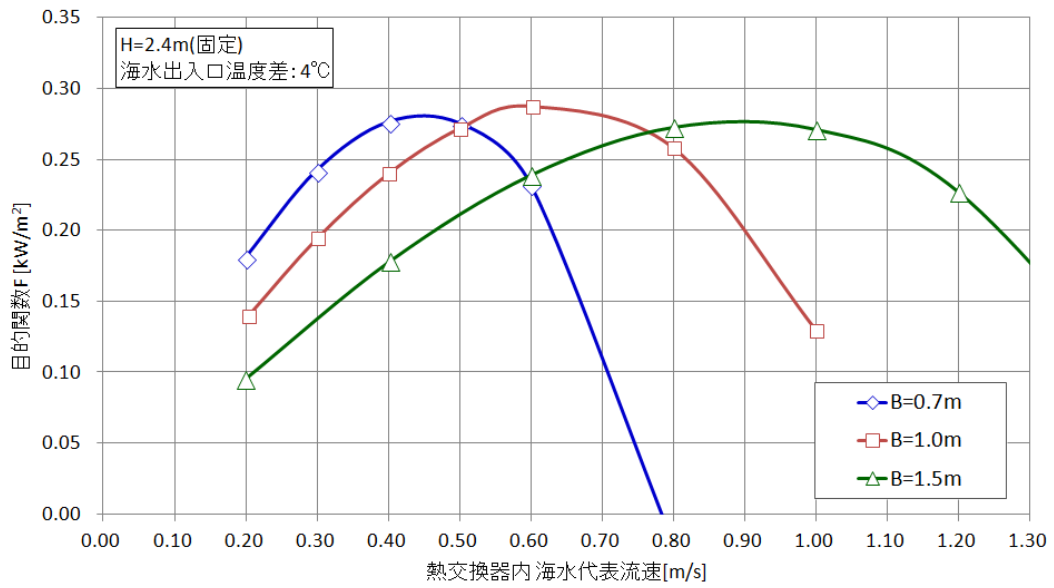


図 2-9 凝縮器における海水代表流速と目的関数との相関(ΔTSW=4.0°C、H=2.4m)

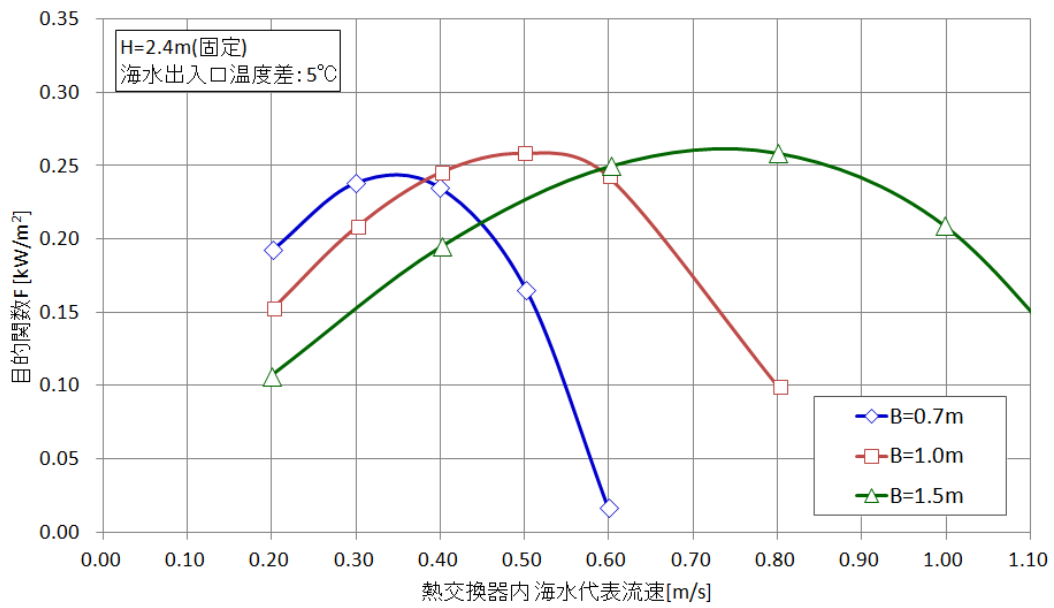


図 2-10 凝縮器における海水代表流速と目的関数との相関(ΔTSW=5.0°C、H=2.4m)

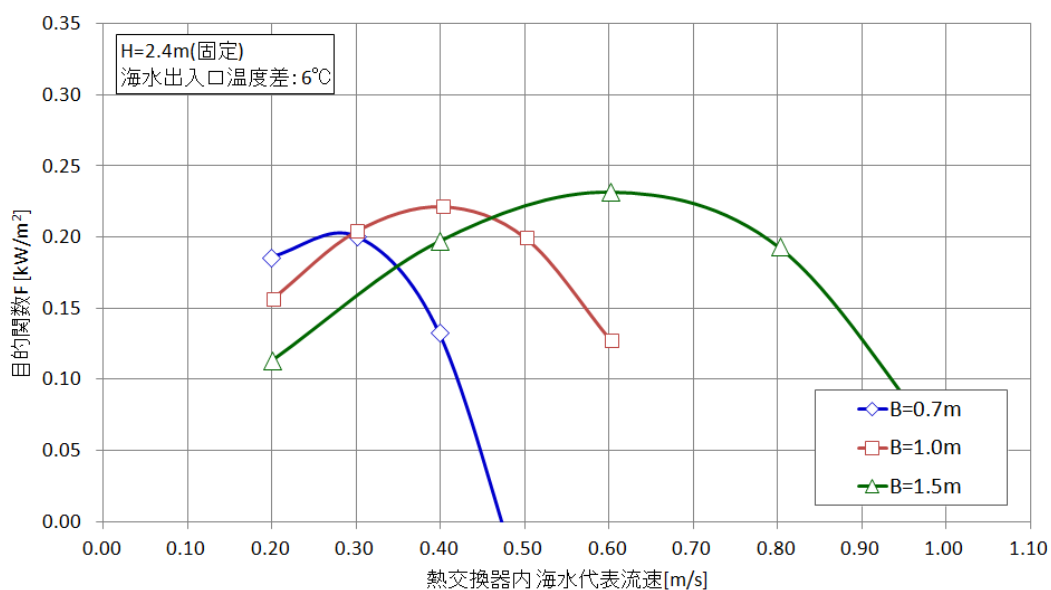


図 2-11 凝縮器における海水代表流速と目的関数との相関 ($\Delta T_{SW}=6.0^{\circ}\text{C}$ 、 $H=2.4\text{m}$)

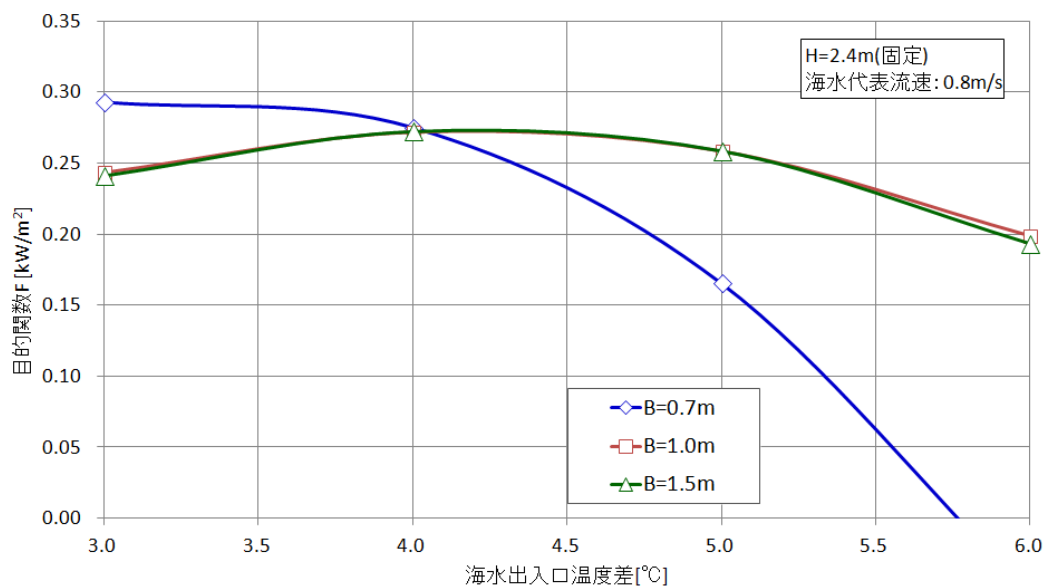


図 2-12 凝縮器における海水出入口温度差と目的関数との相関 ($V_{SW}=0.8\text{m/s}$ 、 $H=2.4\text{m}$)

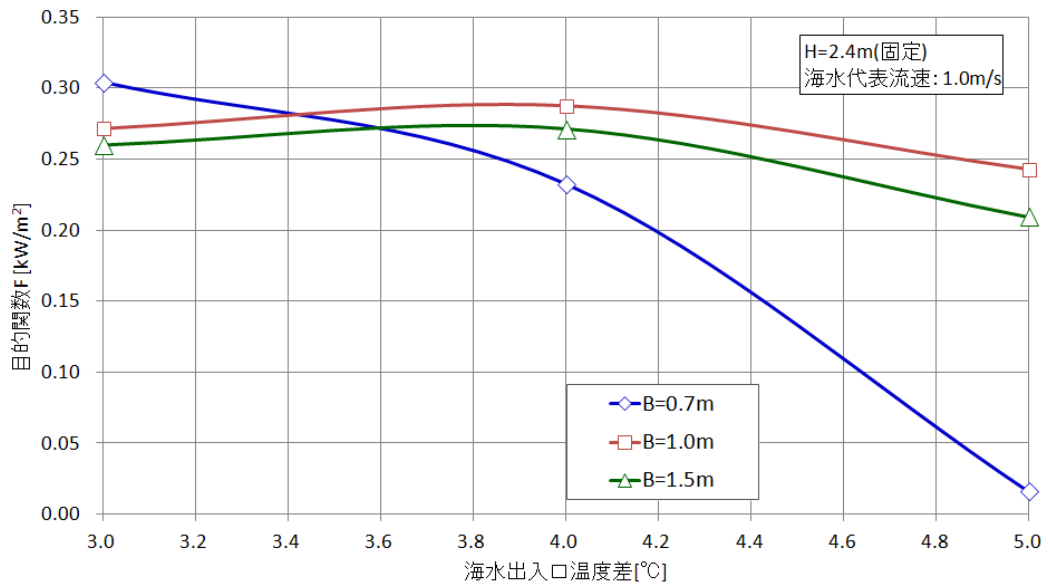


図 2-13 凝縮器における海水出入口温度差と目的関数との相関 (VSW=1.0m/s、H=2.4m)

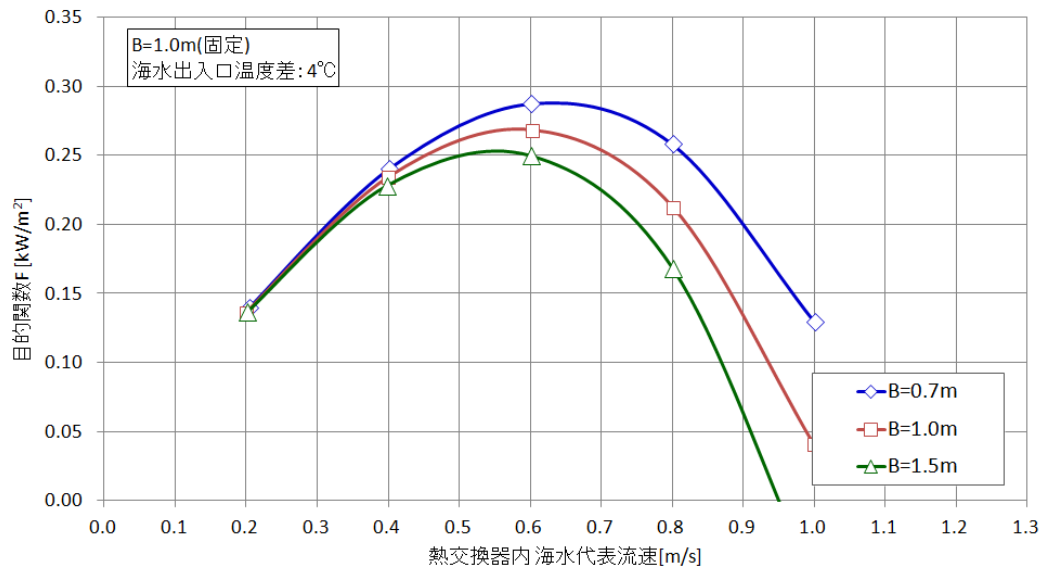


図 2-14 凝縮器における海水代表流速と目的関数との相関 ($\Delta T_{SW}=4.0^{\circ}\text{C}$ 、 $B=1.0\text{m}$)

まとめ（設計面）

蒸発器・凝縮器とも、プレート面積拡大による目的関数 F の低下は 5~10%程度にとどまっており、製造コスト削減効果との相殺により熱交換器のトータルコストを下げる可能性があることが示された。プレート面積により、目的関数 F が最適値をとる条件（海水の出入口温度差や流量など）が異なるため、総合的な発電コストとの相関を考慮しながら開発を進めることが重要である。

(a) 蒸発器

蒸発器に用いるプレート幅を現状の 0.7m から 1.0m に拡大した場合、目的関数 F の最大値は 5% 程度低下する。また 1.5m とした場合は 10% 程度低下する。プレートの拡大による熱交換器の製造コスト削減効果が、上記の目的関数 F の低下による影響よりも大きければ、熱交換器のトータルとしての製造コストを下げる事が出来るため、目的関数 F の低下幅が小さいという結果は、熱交換器の設計面でのコスト削減の可能性を示すものである。

また、プレート高さの拡大についても、目的関数 F を若干低下させるにとどまっている。

ただし、発電プラント全体として見た場合、目的関数 F の低下は、プラントの設置容積を増加させることからコスト増になる恐れもある。一方、プレート面積の増加により熱交換器一基あたりの伝熱面積が増加すれば、熱交換器の搭載ユニット数が減少するため、配管コストの削減につながるメリットも考えられる。発電コスト面の総合的なメリット・デメリットについては、今後さらなる検討が重要である。

プレート面積の拡大により（プレート幅、プレート高さ、いずれの場合も）、目的関数 F が最大値をとる ΔTSW （熱交換器出入口温度差）が大きくなる点も特徴的である。 ΔTSW が大きい場合、海水量が小さくなるため、取水設備のコスト削減につながる可能性もある。

(b) 凝縮器

凝縮器についても、プレート幅拡大による目的関数 F の低下は、プレート幅 $B=1.0m$ のケースで 5%、 $B=1.5m$ のケースで 15%程度と、今後のコスト削減につながる可能性が示されている。一方、プレート高さ H の拡大は、蒸発器に比べて目的関数 F の低下幅が大きいため、今後の検討には注意が必要である。

また、プレート面積の拡大による最適点の移動についても、蒸発器と同様の傾向があることから、取水設備の低減につながる可能性が大きい。

(2) 製造面での費用低減の見通し

現時点の生産技術の延長線上での出力 1MW 級初号機のコスト比率を分析することでチタン材料費以外にも製造費（設備償却費や労務費など）が大きな割合を占めていることが判明している。チタン材料費については、新しい製錬方法や熱交換器の伝熱性能向上の面からこれまでも今後もミルメーカーが中心となって継続的にコスト削減が続けられていくことが見込まれている。

熱交換器の製造工場に関して 1MW の普及時から更には 10MW 級のより大型の量産工場を想定して必要な製造人員、設備規模、工場建屋などを割り出しそのコスト構成を検討した。それらの結果、図 2-15 に各ステージにおける熱交換器の㎡単価の推移、図 2-16 にそのコスト低減のポイントと効果を示す。①1MW 初号機を基準として、OPEC の普及拡大とともに材料費や製造費（労務費や設備償却費）の部分でのコスト低減が進み②1MW 級普及時には 29%減、③10MW 級初号機では 51%減、④10MW 級普及時には 61%減と、低減が進んでいくと考えられる。

OPEC 用熱交換器は、大量のチタンを使用した全溶接型プレート式熱交換器となるが、これまで類似用途を含めてもこの分野では OPEC 規模の市場がなかった。そのため、このタイプの熱交換器は OPEC の進展やスケールアップと同時並行となる形で量産化に向けた設備投資がなされていくという性質がある。このことは OPEC 熱交換器において、自動化等による量産化や定期材料発注などのスケールメリットによるコスト削減効果が得られる余地が十分にあると考えることもできる。

OTEC熱交換器のコスト低減見通し

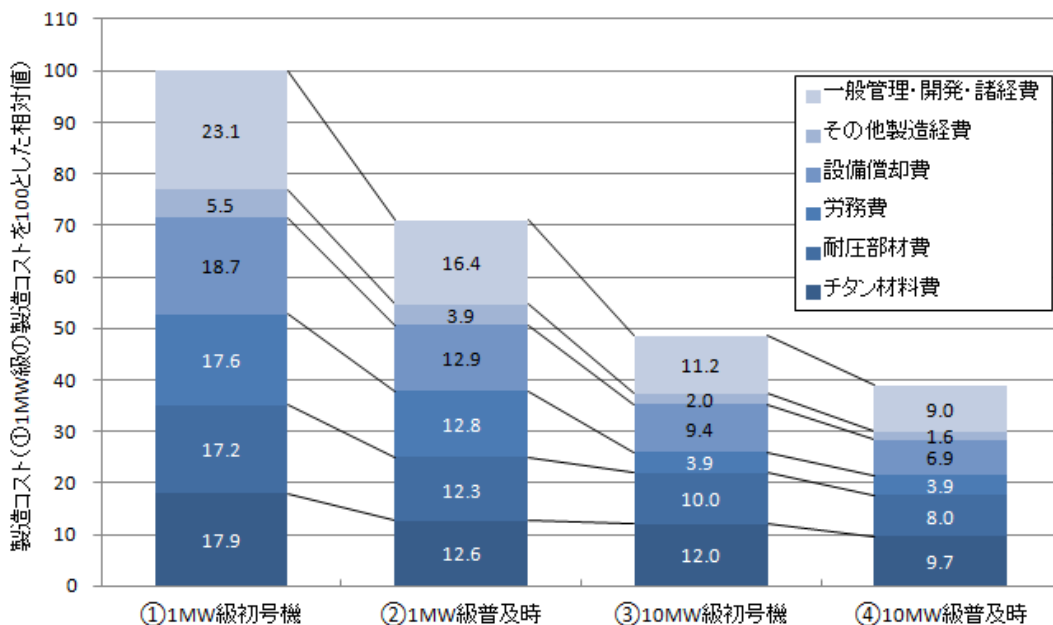


図 2-15 OTEC 熱交換器のコスト低減見通し

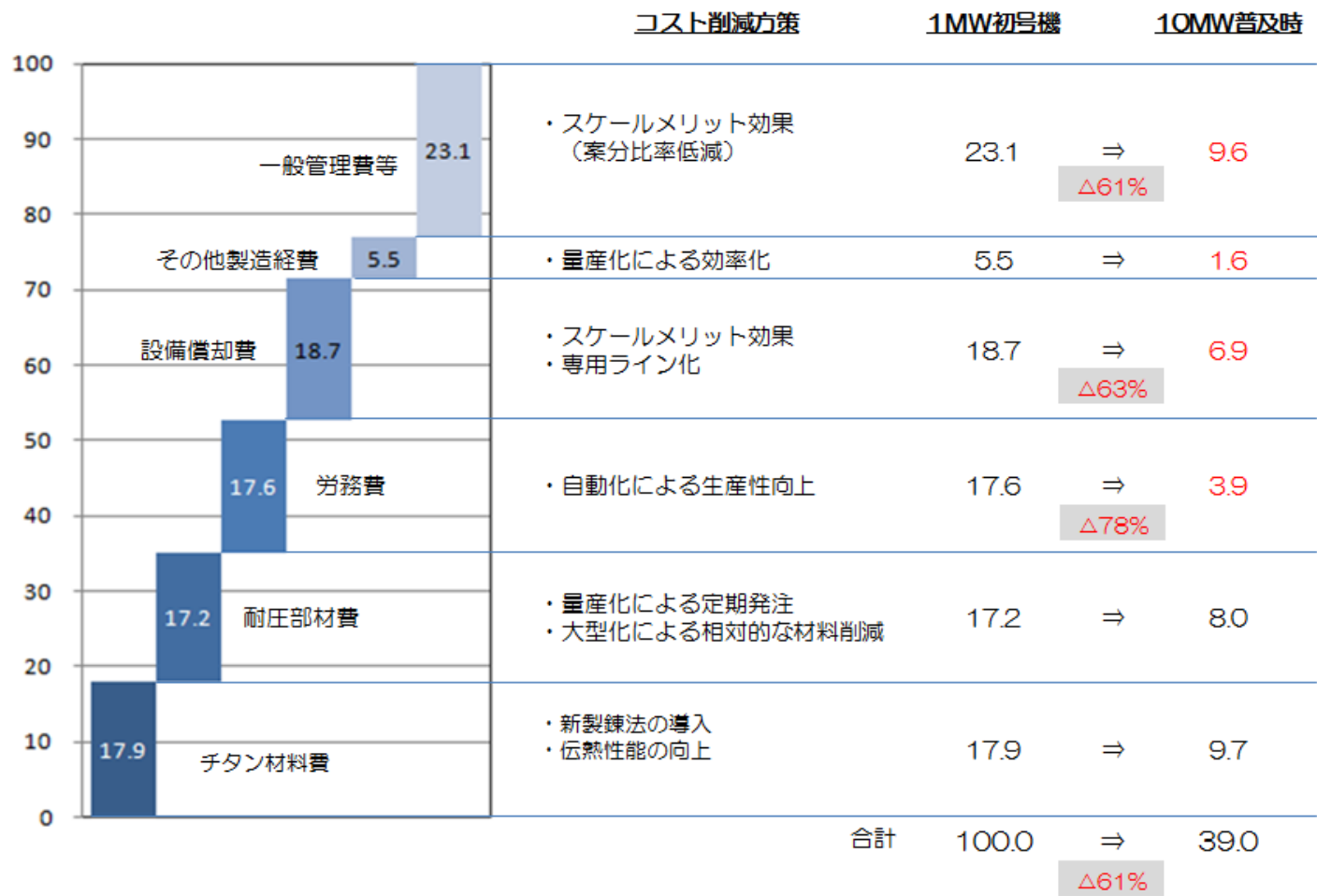


図 2-16 OTEC 熱交換器のコスト低減ロードマップ

2.2 沖縄県の海域における海洋温度差発電設備の設置の可能性と課題

2.2.1 昨年度までの検討概要

昨年度までの検討項目は次の通りである。

(1) 導入ポテンシャルおよび発電ポテンシャル

自然条件および環境影響面から見た導入ポテンシャルは、離岸距離 30km 以内で約 2,800MW、離岸距離の制限なしでは約 50,000MW であることを、各種の資料の比較から示した。なお、需要面では、沖縄県の発電設備容量は 2,000～3,000MW 程度、九州まで含めると 30,000MW 規模となる。

(2) 海底地形面から見た設置場所

久米島の他、石垣島、宮古島、沖縄本島（東岸）も、海底地形面からは前述の離岸距離 30km 以内で大規模プラントが設置可能であることを確認した。

(3) 初号機に関する既存電力系統および供給予備力から見た適正発電プラント規模

沖縄電力(株)の子会社である株式会社沖縄エネテック社に調査を依頼し、適正発電プラントの規模を検討した。沖縄本島では 100MW 規模も可能である。一方、離島では現状の商用系統では 1MW 規模が上限となっており、それ以上の系統連系には大規模な系統コンセプトの変更が必要となることが分かった。

(4) 環境影響評価項目

海洋温度差発電プラントの沖縄での設置に係る環境影響評価法令等の整備状況、周辺環境への影響についての課題の抽出、事前のアセスメント手法の方向性、及び予想される問題解決の難易度について、初期評価を行った。本評価についても、前項と同様に沖縄電力株式会社の子会社である株式会社沖縄エネテックに外注して整理した・

初期評価によれば特に技術的ブレークスルーを必要とする課題は無いが、沿岸に設備する際の富栄養化や生態系への影響には十分に注意を払う必要があることが分かる。

2.2.2 今年度の検討内容

沖縄県海域においては、浮体式プラントに対する台風影響（浮体動揺等）への懸念の声が大きいことから、今年度は浮体式プラントのリスクマネジメントの観点から検討を行なった。

浮体動揺のうち、プラントに影響が大きい動揺は、（１）浮体全体の傾斜（ローリング）、（２）上下の揺動によって生じる加速度の２つであると考えられる。

また、系統としては、（A）海水系統（表層海水と深層海水は同じコンセプトのため、まとめて評

価する)、(B) 作動流体(アンモニア)系統がある。両系統においても、①ポンプの性能(流量)への影響(海水系統の場合は海水取水ポンプ、作動流体(アンモニア)系統の場合は、作動流体ポンプ)および、②流量等の変化や不均衡による熱交換器性能への影響、が考えられる。また、ポンプについては(a)吸込側必要ヘッド(NPSH)への影響、および(b)全揚程(TH: Total Head)への影響の2つがある。

したがって、これらの組合せによる12の影響のリスクについて、リスク可能性(Risk Likelihood)およびリスク影響(Risk Consequence)を評価した。評価にあたっては、リスクへの対策前と対策後の2種類を比較している。

結果の詳細を添付資料②に示す。また、結果の概要を図2-17に示す。

図中に示す通り、リスクは適切な対策を講じることにより概ね許容範囲内に収まるものの、特に対策後リスク可能性評価:1 - リスク影響評価:2 となった以下2件については、定量的な評価に基づいて設計を行なう必要があることが分かる。

(1) 1B①a: 浮体の傾斜による作動流体ポンプのNPSH不足

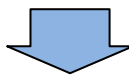
対策: ポンプ入口において、作動流体が十分なNPSHを保持できる過冷度を持つよう、作動流体ドラムの冷却設備を設計する。また、作動流体ドラムが作動流体ポンプに与える静水頭に配慮した配置計画を行なう。

(2) 2B①a: 浮体の動揺による作動流体ポンプのNPSH不足

対策: ポンプ入口において、作動流体が十分なNPSHを保持できる過冷度を持つよう、作動流体ドラムの冷却設備を設計する。

対策前

		リスク可能性 (Risk Likelihood)			
		3	2	1	0
リスク影響 (Risk Consequence)	3				
	2	2B①a	1B①a		1A①a 2A①a
	1	1B②			1A①b 1A② 2A①b
	0	1B①b 2B①b 2B②			2A②



対策後

		リスク可能性 (Risk Likelihood)			
		3	2	1	0
リスク影響 (Risk Consequence)	3				
	2			1B①a 2B①a	1A①a 2A①a
	1				1A①b 1A② 2A①b
	0	1B②	1B①b 2B①b 2B②		2A②

記号凡例

動揺の種類	対象系統	対象機器
(1) 浮体の傾斜	(A) 海水系統	①(a) ポンプ NPSH
		①(b) ポンプ全揚程
(2) 上下方向加速度	(B) 作動流体系統	② 熱交換器

図 2-17 リスク評価表(対策前後比較)

2.3 海洋温度差発電システムのトータルコスト低減を目指すため発電利用後の海洋深層水の利用方法

本年度は、発電利用後の海洋深層水および表層水の利用について、既存の大口ユーザーである久米島海洋深層水開発(株)水産事業部（海ぶどう養殖）および沖縄県車えび漁協 海洋深層水車えび種苗センターに加えて、平成 28 年に第一期拡張工事を予定する(株)ヒューマンウェブ社に、海水の利用方法や利用状況についてヒアリングを行なった。

研究所からパイプラインで海洋深層水および表層水の分水を受ける企業は、毎日の利用量について日誌として記録し、研究所に提出している。正式な検針は 1 ヶ月に一度、研究所により行われている。

各ユーザーの利用方法および利用状況については、それぞれのユーザーのノウハウとなっているため別途まとめることとし、本報告書では利用状況の概要を記す。

(1) 月間使用量

平成 26 年度における海洋深層水の使用量推移を図 2-18 に、表層水の使用量推移を図 2-19 に示す。海洋深層水が夏季に大幅に増加するのに対し、表層水は通年を通して深層水ピーク時並みの需要があるが夏場に最大で 20%ほど使用量が下がる。

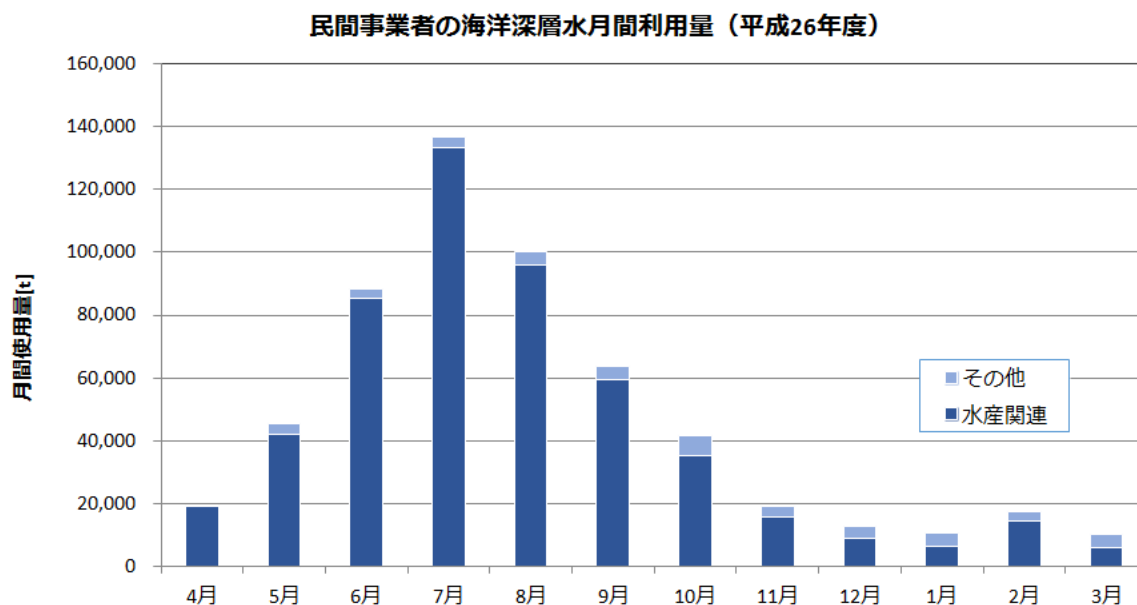


図 2-18 海洋深層水の月間使用量推移(平成 26 年度)

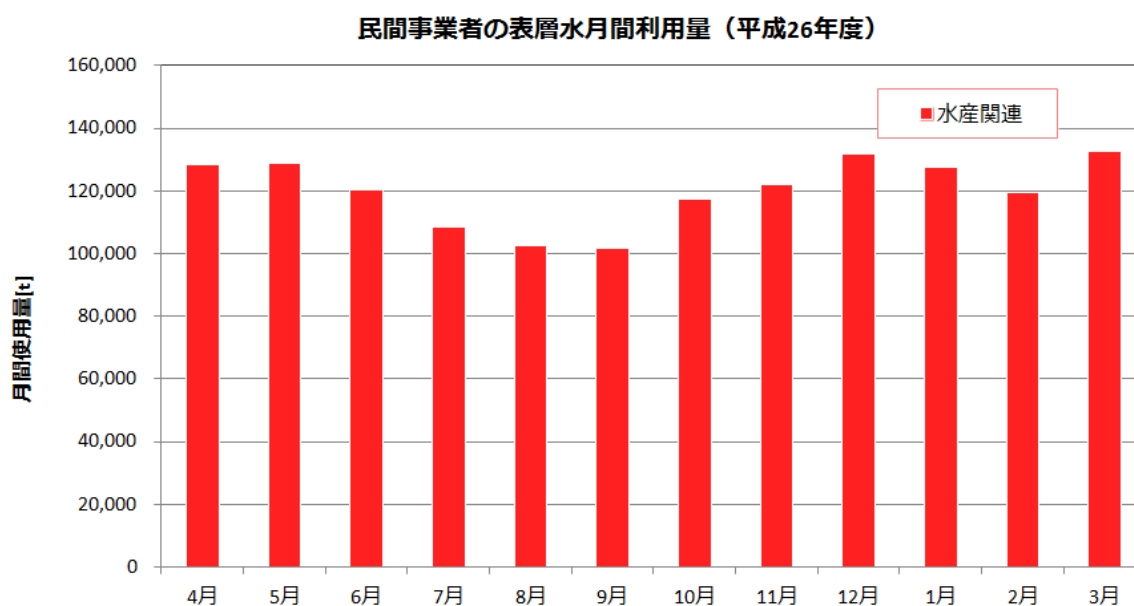


図 2-19 表層水の月間使用量推移(平成 26 年度)

(2) 時間別使用量

前掲のグラフを見ると、海洋深層水の需給は、夏季にもまだ多少の余裕があるように見える。しかし、実際には、ほとんどの需要を占める水産養殖利用について日射の多い昼間に大量の水を使用するため、この時間帯には供給が限界に達している。

時間毎の使用量については、需要先のうち海洋温度差発電実証設備でしか計測を行なっていないため、発電以外の需要について「取水ポンプの定格吐出量から発電使用分を差し引く」という形で、平成 27 年 7 月の代表的な日について時間別使用量の推移を表したものを図 2-20 に示す。

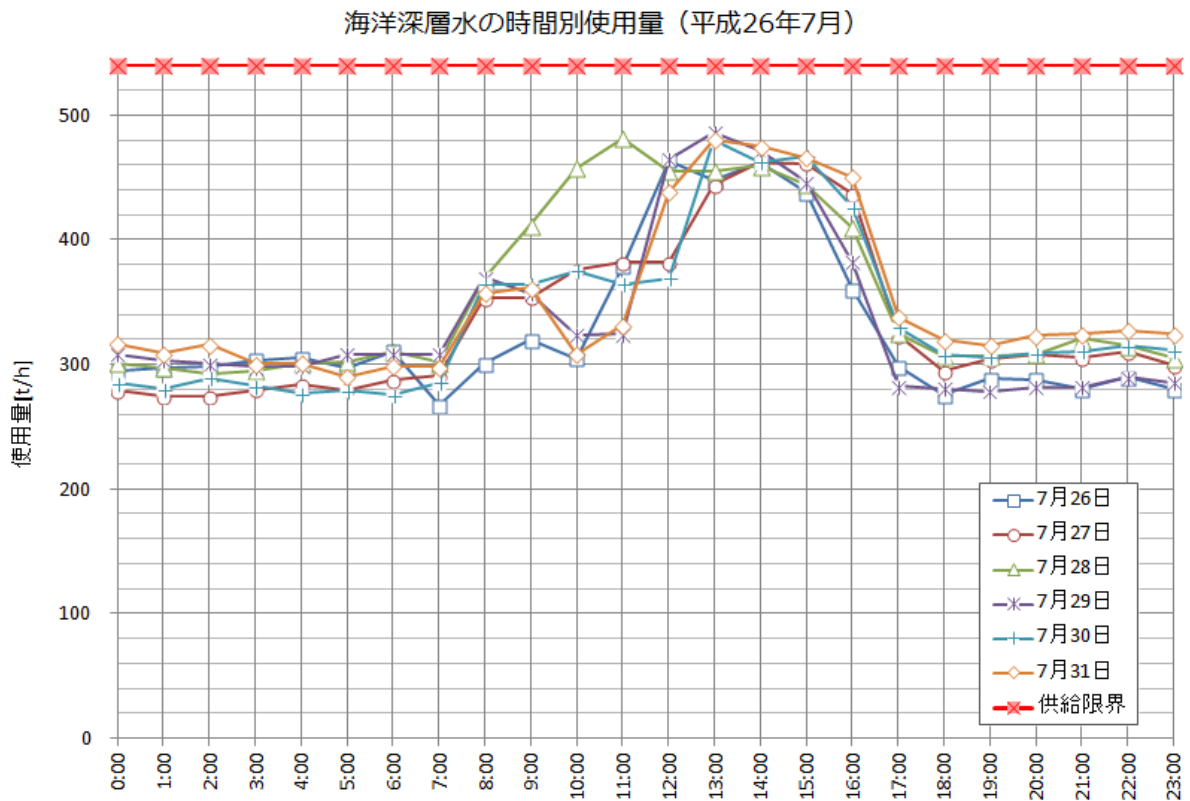


図 2-20 海洋深層水の時間別使用量推移(平成 27 年 7 月)

(3) 気温と深層水使用量

に気温と海洋深層水使用量、に気温と海洋深層水使用量について、年間の推移を示す。海洋深層水利用量については気温との相関は高いものの、完全に対応するものではなく、各ユーザーの作業工程による違い（たとえば、養殖池に注水する作業と、水温をキープしておく作業との違い）により、使用量に変化することが分かる。表層水は、その傾向がより顕著である。

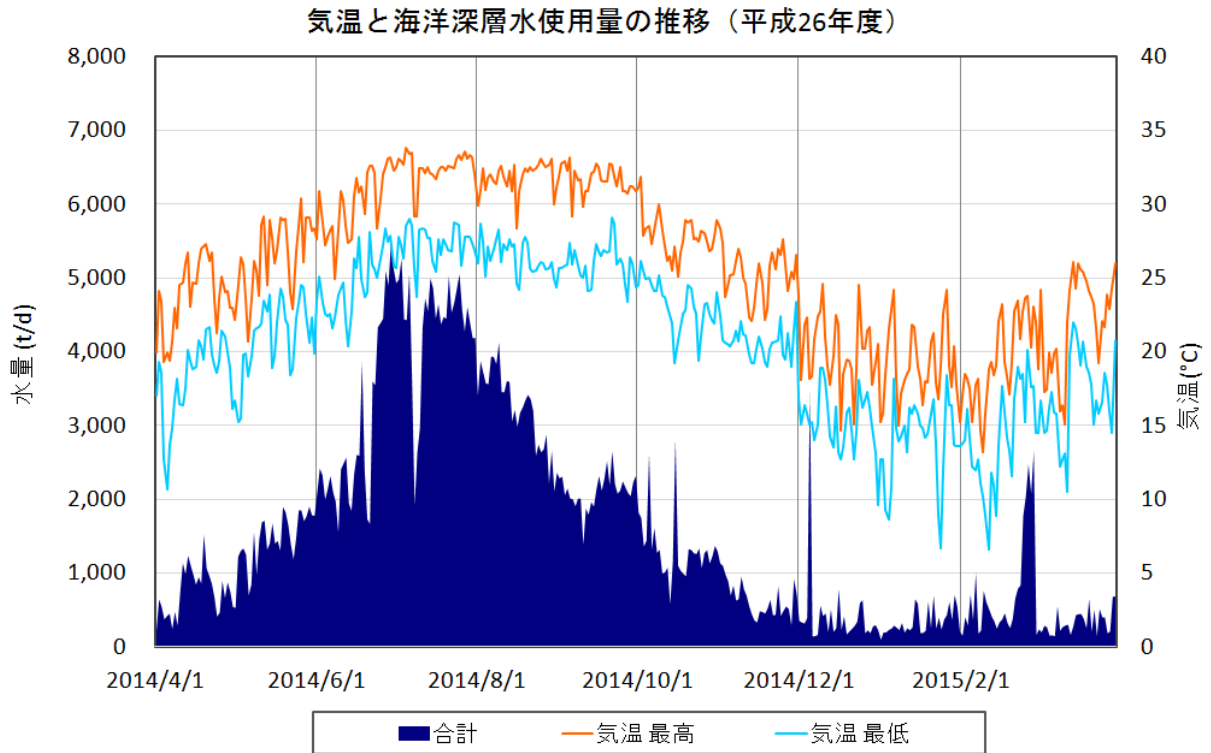


図 2-21 気温と海洋深層水使用量

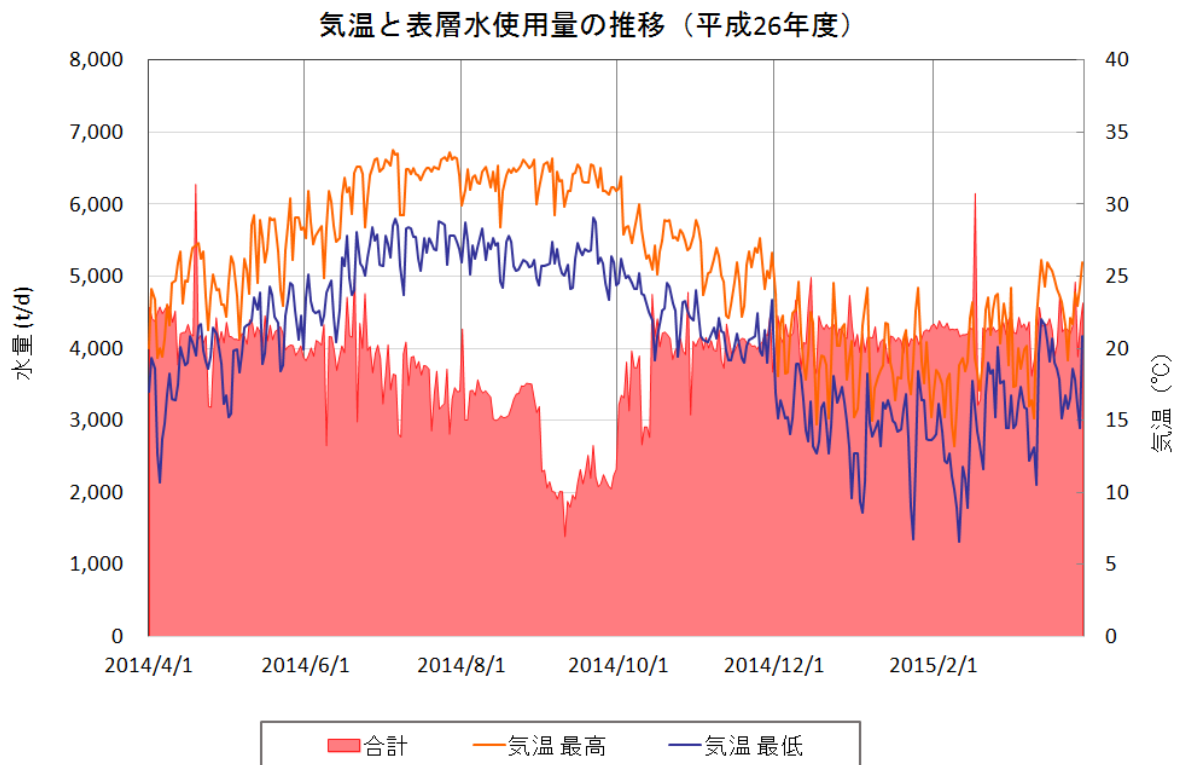


図 2-22 気温と表層水使用量