

海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業 及び
海洋温度差発電における発電後海水の高度複合利用実証事業
委託業務実績報告書

第Ⅲ部

海洋温度差発電における 発電後海水の高度複合利用実証

1. 実施内容の構成と結果概要

本事業は、2013年度より稼働中の沖縄県海洋温度差発電実証設備（以下「OTEC実証設備」）に利用された後の海洋深層水（以下「深層水」）および表層水を、水産養殖や農業、空調等に複合利用することにより、エネルギー収支や経済性の向上を図る技術に関する実証事業である。

実施にあたっては、事業の趣旨として掲げられた「本事業においては、設備の規模拡大を想定し、実際に農林水産業を営む民間事業者等の協力を得て、発電後海水の複合利用の実証試験を行い、その有効性及び実現性及び課題等について評価・検討を行うものである。」¹（第 部 2 章参照）に沿って、図 1-1 に示す解析・評価・検討を実施した。

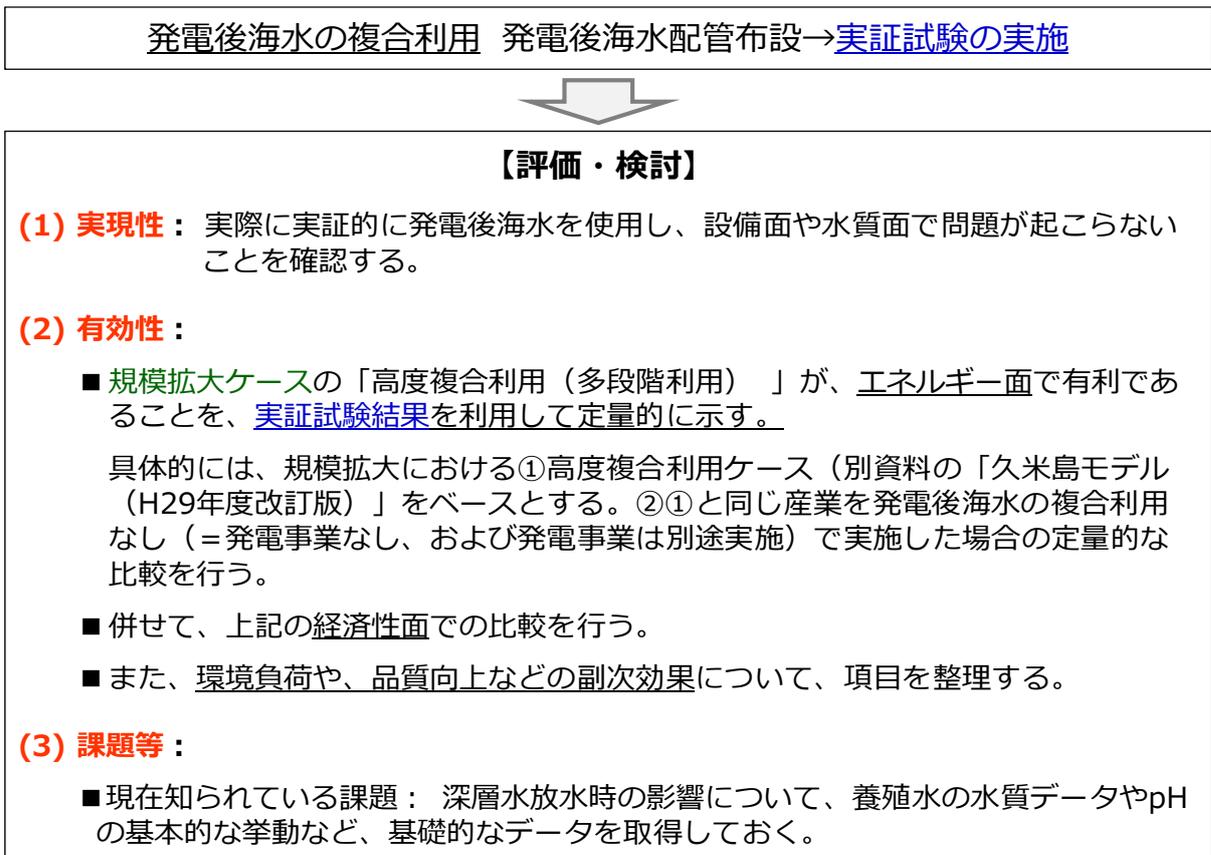


図 1-1 解析・評価・検討内容

前掲の「(1) 実現性」「(2) 有効性」「(3) 課題等」について、本事業での具体的な実施内容と結果の概要は次のとおりである。詳細は該当する各章で述べる。

¹本事業の企画提案募集要項（H28年6月）「本事業の趣旨」より

(1) 実現性

2017年夏から2019年1月末にかけて、発電後海水を実際に次の2つの養殖場で使用し、養殖対象の生育に問題がないことを確認した。

海ぶどう養殖場 (株)久米島海洋深層水開発(本事業の協力企業)

カキ養殖試験施設 (株)ジーオー・ファーム(受託事業者の構成員)

結果の概要

海ぶどう養殖場(詳細は第 部 3.4 節参照)

4棟(A,B,C,S棟)ある養殖場のうち1棟(S棟)において、これまで用いてきた海水の代わりに「発電後海水(表層水)」を用いる試験を行った。

このため、発電後海水を用いていないA,B,C棟を対照区として、発電後海水を使用したS棟の生産量が落ちていないことを定量的に比較・確認できた。なお、比較にあたっては、各棟で養殖水槽の数が異なる上に各年別の日射や水温の影響もあるため、発電後海水がまだ使用されていない2016年度と、使用されている2017年度および2018年度との生産量比を用いた。結果を表1-1に示す。いずれの年も生産量は2016年度比106%と順調であり、A,B,C棟の平均を上回っている。

表 1-1 生産量の比較(海ぶどう養殖場)

比較	対照区：A,B,C棟	発電後海水使用：S棟
2017年度生産量(2016年度比)	94～109%	106%
2018年度生産量(2016年度比)	83～108%	106%

カキ養殖場(詳細は第 部 3.5 節参照)

2017年10月から2018年2月にかけて、深層水原水(本事業前から供給)と発電後深層水(本事業にて供給)を用いたカキの成長度の違いの実験を実施した(3.5.1項の「実験(1)」)。本実験は屋外で行われ、深層水原水を用いた水槽と発電後海水を用いた水槽とはほぼ水温が同じとなる。この条件において、深層水原水と発電後深層水との間で有意な成長差は見られておらず、発電後深層水の使用に問題はないと考えられる。

(2) 有効性

規模拡大時の海洋深層水取配水システムの具体的検討例として、沖縄総合事務局経済産業部による「離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査」で調査対象とされている計画(取水量は最大で日量180,000トンで、現在の沖縄県海洋深層水研究所(以下「研究所」)の約14倍の規模)の一部を用いて、発電後海水を有効利用した取配水システムのエネ

ルギー収支および経済性の向上を定量的に算定・比較評価した。結果の概要は次のとおりである（第 部 4.3.1 および 4.3.2）。

- エネルギー収支は、発電後海水不使用ケースと比較して 10%向上する。
- これにより、取配水費用を年間 1100 万円削減できる。検討ケースでの取配水事業の売り上げは年間 5300 万円であるため、事業の採算性は大きく向上する。

また、上記取配水システムの供給先となる需要面に関しては、ライフサイクルアセスメント手法（生産対象の原材料調達から、生産、流通、使用、廃棄に至るまでのライフサイクルにおける投入資源、環境負荷及びそれらによる地球や生態系への潜在的な環境影響を定量的に評価する手法）を用いた評価を行い、需要先においてもエネルギー消費の削減量を算定した。いずれの需要においても、発電後海水の有効利用によりライフサイクルでのエネルギー消費量が低減されることを示した（第 部 4.3.3）。

これらのエネルギー（環境）効果と経済性を総合的に評価するために IMPACT 手法（海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価として開発された、環境負荷と経済性を統合して指標化する手法²）を導入し、本システム全体が、既存システムと比較して持続可能性に寄与する可能性のあるシステムであることを示した（第 部 4.3.4）。

(3) 課題等

課題については、検討評価委員会において深層水の放水時の環境影響について指摘があった。ただし環境影響については本事業内ですべてを扱うのが困難であるため、発電後海水の利用検討に向けた海洋深層水汲み上げ後の pH の挙動や、養殖水のリサイクル利用のための水質調査（養殖水および周辺海水）等、基礎的なデータの取得を行った（第 部 3.5 節）。

以上の実施スキームを図 1-2 に示す。

²（社）日本船舶海洋工学会 IMPACT 研究委員会 最終報告書「海洋の大規模利用に対する環境影響評価」（2008.3）、https://www.jasnaoe.or.jp/research/dl/report_p-6.pdf（2019.3 閲覧）

凡例：XE：ゼネクス、GOF：ジーオーファーム、OET：沖縄エネック、OPU：大阪府立大学

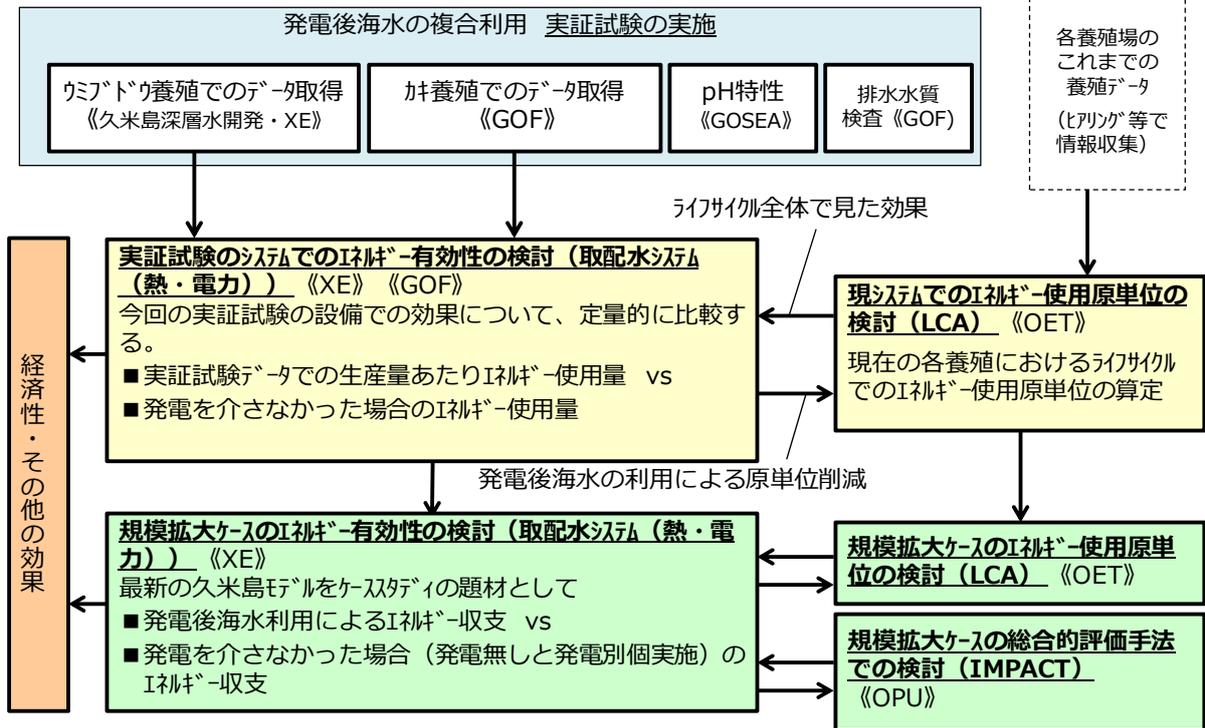


図 1-2 解析・評価・検討実施スキーム

2. 「海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業」における検討

2012年度から実施された「海洋深層水の利用高度化に向けた発電利用実証事業」(第Ⅰ部参照)では、海洋温度差発電の実証運転および商用化に向けた検討とともに、海洋深層水の利用高度化手法の一つとして、発電後の海水の利用に関する理論的検討および予備的検討が行われた。これらの検討結果は2016年度から実施された「海洋温度差発電における発電後海水の高度複合利用実証事業」でも活用されている。そこで本章では、これらの理論的検討および予備的検討について述べる。

2.1 理論的検討

2.1.1 中温利用(混合利用)におけるカスケード利用

現在の研究所から民間企業などへの分水量の9割以上が、水産養殖用(車えび種苗生産および海ぶどう養殖)となっている。水産養殖用の需要は、20℃前後の中温利用が主である。そこで、このような中温利用について、現状の方式と、海洋温度差発電で使用した後の深層水・表層水を用いたカスケード利用方式の2つを、エネルギー有効利用の観点から比較を行った。

(1) 比較するフロー

冷熱需要の大きい夏期における使用を想定し、次の比較を行った。

Case-1: カスケード利用無しで、毎時400トン(日量9,600トン)の中温海水(20℃)を供給するケース(図2-1)

Case-2: 海洋温度差発電後の海水を利用し、Case-1と同様の供給を行うケース(図2-2)

深層水温度は9℃(研究所における深度612mからの取水を想定)、6℃(将来的な深度800m程度からの取水を想定)それぞれの場合の海水流量、温度を表2-1、表2-2に示す。

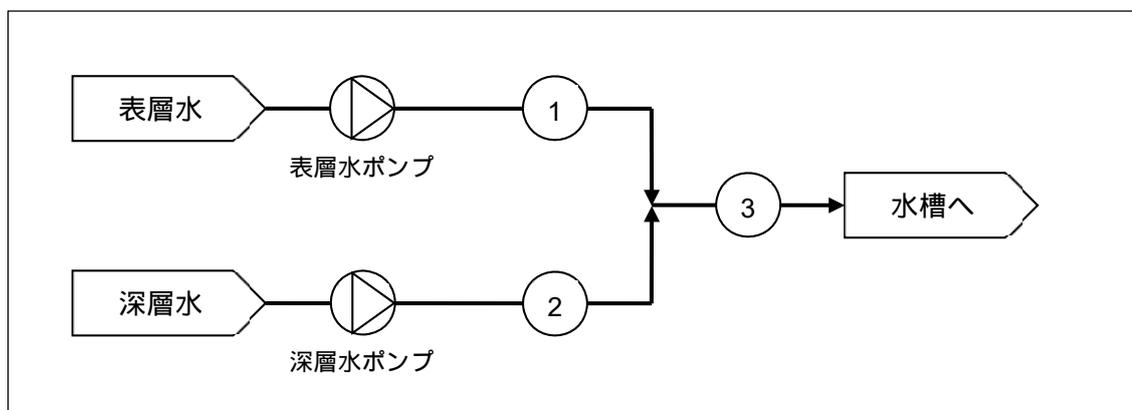


図2-1 Case-1 カスケード利用なしのフロー

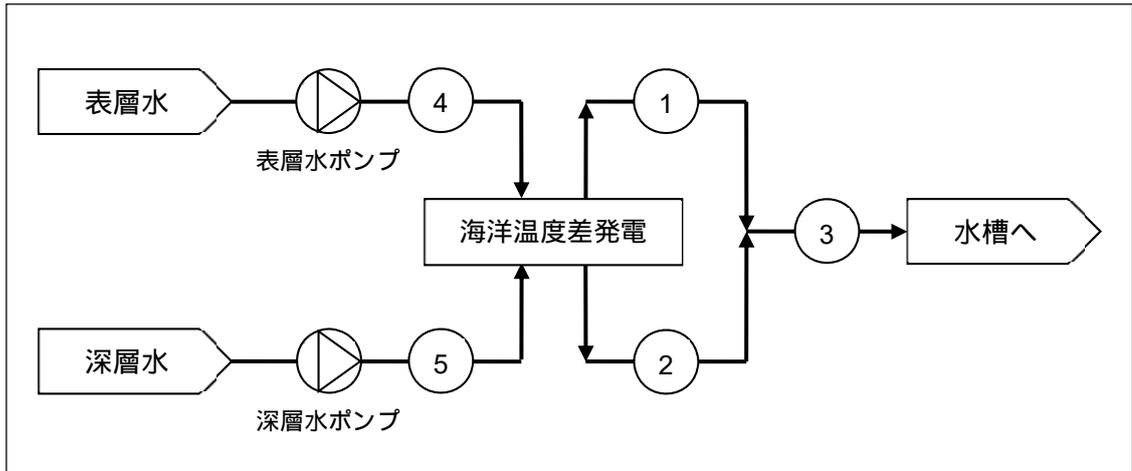


図 2-2 Case-2 カスケード利用ありのフロー

表 2-1 温度・流量(深層水温度 = 9 ケース)

No.	温度 [°C]		流量 [t/h]	
	Case-1	Case-2	Case-1	Case-2
	29.0	同左	220	222
	9.0	同左	180	178
	20.0	同左	400	同左
	-	24.3	-	222
	-	14.6	-	178

表 2-2 温度・流量(深層水温度 = 6 ケース)

No.	温度 [°C]		流量 [t/h]	
	Case-1	Case-2	Case-1	Case-2
	29.0	同左	243	245
	6.0	同左	157	155
	20.0	同左	400	同左
	-	24.8	-	245
	-	12.4	-	155

(2) エネルギー収支

上記の Case-1、Case-2 について、エネルギー収支の評価を行う。

Case-1 では表層水ポンプ、深層水ポンプで電力を消費するのに対し、Case-2 では同じ冷熱を供給しながら発電も行う。ただし、海水が海洋温度差発電設備を通過する際に圧力損失を生じるため、表層水ポンプ、深層水ポンプの揚程が増大することにも留意して算定を行う。算定結果を表 2-3、表 2-4 に示す。

表 2-3 エネルギー収支(深層水温度 = 9 ケース)

項目		Case-1	Case-2	備考
表層水ポンプ				
流量 G_{SW}	t/h	220	222	前項による
揚程 TH_{SW}	m	3.0	4.5	Case-2 は下記 dP_{SW} を加算
消費電力 E_{SW}	kW	8.3	12.5	欄外注記参照
深層水ポンプ				
流量 G_{DW}	t/h	180	178	前項による
揚程 TH_{DW}	m	5.0	6.5	Case-2 は下記 dP_{DW} を加算
消費電力 E_{DW}	kW	11.3	14.6	欄外注記参照
海洋温度差発電				
発電出力 E_{OTEC}	kW	-	26.8	上記データより算定
表層水圧力損失 dP_{SW}	m	-	1.5	標準的数値
深層水圧力損失 dP_{DW}	m	-	1.5	標準的数値
エネルギー収支				
消費電力 E_T	kW	19.6	0.4	$E_T = E_{SW} + E_{DW} - E_{OTEC}$
供給冷熱 Q_{CH}	kW	2,222	2,222	5 上昇分の場合
性能係数 COP	-	113	5965	$COP = Q_{CH} / E_T$

(注)ポンプ消費電力は下記のとおり計算した(添え字略)。

$$E = \frac{G/3600 \cdot TH \cdot g}{\eta_P \cdot \eta_M}$$

ただし、 η_P : ポンプ効率 = 0.8、 η_E : 電動機効率 = 0.95 とする。

表 2-4 エネルギー収支(深層水温度 = 6 ケース)

項目		Case-1	Case-2	備考
表層水ポンプ				
流量 G_{SW}	t/h	243	245	前項による
揚程 TH_{SW}	m	3.0	4.5	Case-2 は下記 dP_{SW} を加算
消費電力 E_{SW}	kW	9.2	13.9	表 2-3 欄外注記参照
深層水ポンプ				
流量 G_{DW}	t/h	157	155	前項による
揚程 TH_{DW}	m	5.0	6.5	Case-2 は下記 dP_{DW} を加算
消費電力 E_{DW}	kW	9.8	12.7	表 2-3 欄外注記参照
海洋温度差発電				
発電出力 E_{OTEC}	kW	-	34.5	上記データより算定
表層水圧力損失 dP_{SW}	m	-	1.5	標準的数値
深層水圧力損失 dP_{DW}	m	-	1.5	標準的数値
エネルギー収支				
消費電力 E_T	kW	19.0	-8.0	$E_T = E_{SW} + E_{DW} - E_{OTEC}$
供給冷熱 Q_{CH}	kW	2,222	2222	5 上昇分の場合
性能係数 COP	-	117	-279	$COP = Q_{CH} / E_T$

(3) エクセルギー収支

上記の Case-1、Case-2 について、エクセルギー収支の評価を行う。

エクセルギーとは、あるエネルギーから動力としての仕事がどれだけ取り出せるかを表す指標であり、エネルギーの質的価値を定量的に評価するのに用いられる。計算方法は JIS Z 9204:1991 「有効エネルギー評価方法通則」等に定義される。

第二次世界大戦後、熱力学第二法則の重要性が認識され、それまでのエンタルピー評価（エネルギーの量的評価）に加えて、質的なエクセルギー評価が盛んになった。「エクセルギー（Exergy）」という用語は、ラテン語由来の接頭辞 ex（外へ）とギリシア語（仕事）の合成語であり、1956年にスロヴェニアの工学者ゾラン・ラントにより作られたとされている。¹

本項で評価する熱のカスケード利用は、熱の質的变化（温度変化）を利用しながら電力を消費（あるいは発電）するものであるため、エネルギーの量的変化だけでは不十分となるため、エクセルギー面での評価も行う。

エクセルギーは様々な分野で用いられるが、本項で評価する対象は、温度の持つエネルギーお

¹小出昭一郎『基礎物理学 2 熱力学』東京大学出版会、1980年

よび電気の持つエネルギーであるため、その計算式は下記のとおりとなる。

(a) 温度

$$W = \int_{T_0}^{T_1} m \cdot C_p \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dT = m \cdot \frac{\int_{T_0}^{T_1} C_p dT}{T_1 - T_0} \cdot \left\{ (T_1 - T_0) - T_0 \cdot \ln \frac{T_1}{T_0} \right\}$$

ただし

T_1 : 初期温度（もしくは高温側温度）

T_0 : 周囲温度（もしくは低温側温度）

m : 質量もしくは質量流量

C_p : 定圧比熱

特に海洋温度差発電では、海水の温度変化が小さく、その間の比熱はほぼ一定と見なして差し支えないため、上式は次のように計算できる。

$$W = m \cdot C_p \cdot \left\{ (T_1 - T_0) - T_0 \cdot \ln \frac{T_1}{T_0} \right\}$$

(b) 電力

電力は、ほぼ 100% 動力に変換されるため、エクセルギー評価では電力 = エクセルギーと計算される。

$$W = E_c$$

ただし

E_c : 電力

上記算定式を用いて、前項の Case-1、Case-2 におけるエクセルギー収支を求めると、表 2-5 および表 2-6 のとおりとなる。

表 2-5 エクセルギー収支(深層水温度 = 9 ケース) (単位 : kW)

項目	Case-1	Case-2	備考
汲み上げにおける収支			
表層水ポンプ	△ 3.8	△ 5.4	電力消費：前項参照
深層水ポンプ	△ 4.7	△ 5.9	電力消費：前項参照
汲み上げによる熱	95.6	94.8	25 まで使用する
エクセルギー収支小計	87.0	83.5	上記の合計
海洋温度差発電における収支			
使用前表層水エクセルギー	-	6.5	25 を基準とする
使用前深層水エクセルギー	-	88.3	同上
使用后表層水エクセルギー	-	0.2	同上
使用后深層水エクセルギー	-	36.8	同上
発電	-	26.8	発電分：前項参照
エクセルギー収支小計	0.0	△ 31.1	
利用時の混合による収支			
混合前表層水エクセルギー	6.5	0.2	25 を基準とする
混合前深層水エクセルギー	89.1	36.8	同上
混合後エクセルギー	18.8	18.8	同上
エクセルギー収支小計	△ 76.7	△ 18.1	混合前後の差
エクセルギー評価			
総合エクセルギー収支	10.3	34.3	
汲み上げ後エクセルギー収支	△ 76.7	△ 49.2	

エクセルギーの増加を正、減少を負として表記する。

表 2-6 エクセルギー収支(深層水温度 = 6 ケース) (単位 : kW)

項目	Case-1	Case-2	備考
汲み上げにおける収支			
表層水ポンプ	△ 4.3	△ 6.0	電力消費：前項参照
深層水ポンプ	△ 4.1	△ 5.2	電力消費：前項参照
汲み上げによる熱	117.2	116.3	25 まで使用する
エクセルギー収支小計	108.8	105.1	上記の合計
海洋温度差発電における収支			
使用前表層水エクセルギー	-	7.2	25 を基準とする
使用前深層水エクセルギー	-	109.0	同上
使用后表層水エクセルギー	-	0.3	同上
使用后深層水エクセルギー	-	39.9	同上
発電	-	34.5	発電分：前項参照
エクセルギー収支小計	0.0	△ 41.6	
利用時の混合による収支			
混合前表層水エクセルギー	7.2	0.3	25 を基準とする
混合前深層水エクセルギー	110.0	39.9	同上
混合後エクセルギー	18.8	18.8	同上
エクセルギー収支小計	△ 98.3	△ 21.4	混合前後の差
エクセルギー評価			
総合エクセルギー収支	10.5	42.2	
汲み上げ後エクセルギー収支	△ 98.3	△ 62.9	

エクセルギーの増加を正、減少を負として表記する。

(4) 考察

海洋温度差発電と中温利用では、深層水温度によらずエネルギー収支、エクセルギー収支の面で効果が大きいことが分かる。また、表層水、深層水の流量もカスケード利用前後でほとんど変わらない。ただし、深層水温度が 6 の場合は、深層水の所要流量は、表層水に比べて小さくなるため、発電としては最適なバランス（ほぼ同量）とはならない。このため、他の温度帯を使う需要先との組合せが、さらに効果を高めると考えられる。

2.1.2 低温利用（深層水単独利用）におけるカスケード利用

現在、研究所本館は、深層水によって冷却された清水を用いて冷房を行うことにより省エネルギーを図っている。深層水を用いた冷房は、トロント市街の大規模冷房（オンタリオ湖の湖水利用）や仏領ポリネシア（インターコンチネンタルホテル）、ハワイ州自然エネルギー研究所等でも行われており、深層水のエネルギー利用として最もポピュラーな方法のひとつである。

そこで、このような低温利用（深層水単独利用）について、現状の方式と、海洋温度差発電で使用した後の深層水・表層水を用いたカスケード利用方式の2つを、エネルギー有効利用の観点から比較する。

(1) 比較するフロー

比較のためのモデルとして、研究所本館の冷房設備にて検討を行う。同冷房設備では、深層水により冷やされた循環清水を用いてエアハンドリングユニットで冷風を作り出している。エアハンドリングユニットの主な仕様を表 2-7 に示す。

表 2-7 エアハンドリングユニットの仕様

項目	単位	仕様
空調性能		
入口空気温度	DB , WB	27.9, 21.6
出口空気温度	DB , WB	14.6, 14.0
冷房能力	kWt	87.2
冷却水		
流量	L/min	350
圧力損失	kPa	57.8
入口温度		12.0
出口温度		15.6
送風機		
風量	m ³ /h	11,000
機外静圧	Pa	304
送風機用電動機		
出力	kW	5.5

Case-1 として現状の利用方式、Case-2 としてカスケード利用を実施した場合、また、Case-3 として参考までに深層水を用いずに COP=6 の電気式空冷チラーで冷水を供給した場合を算定した。それぞれのフローを、図 2-3、図 2-4 および図 2-5、算定結果の比較を表 2-8 および表 2-9 に示す。

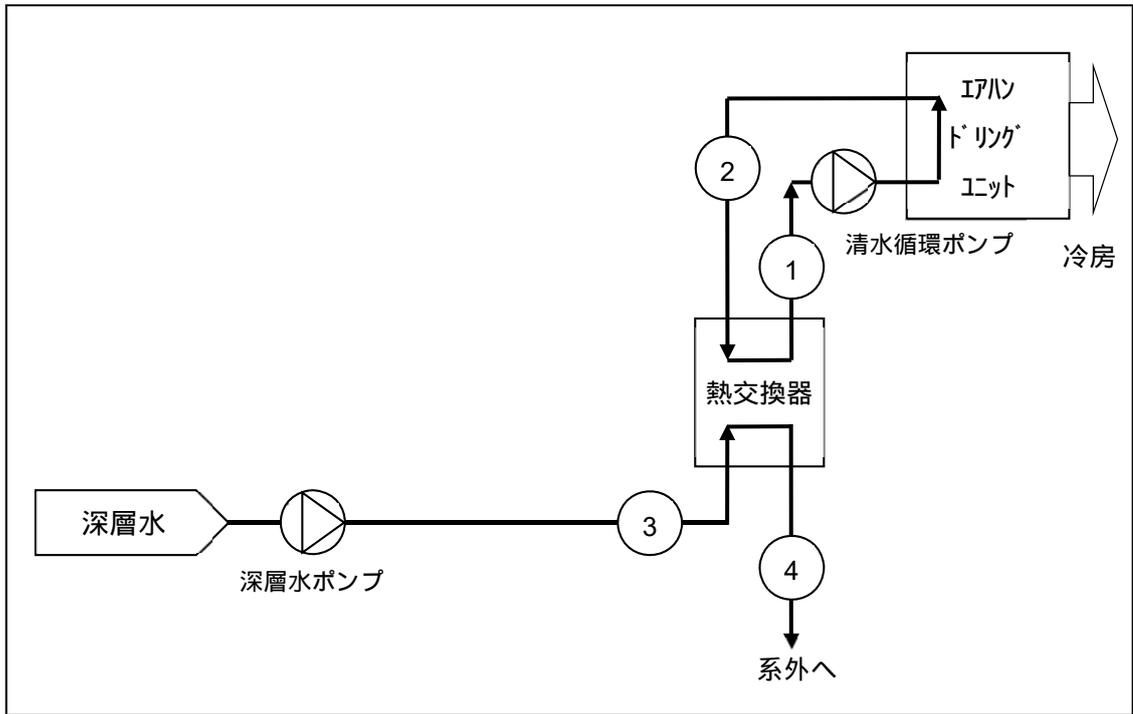


図 2-3 Case-1 カスケード利用なしのフロー

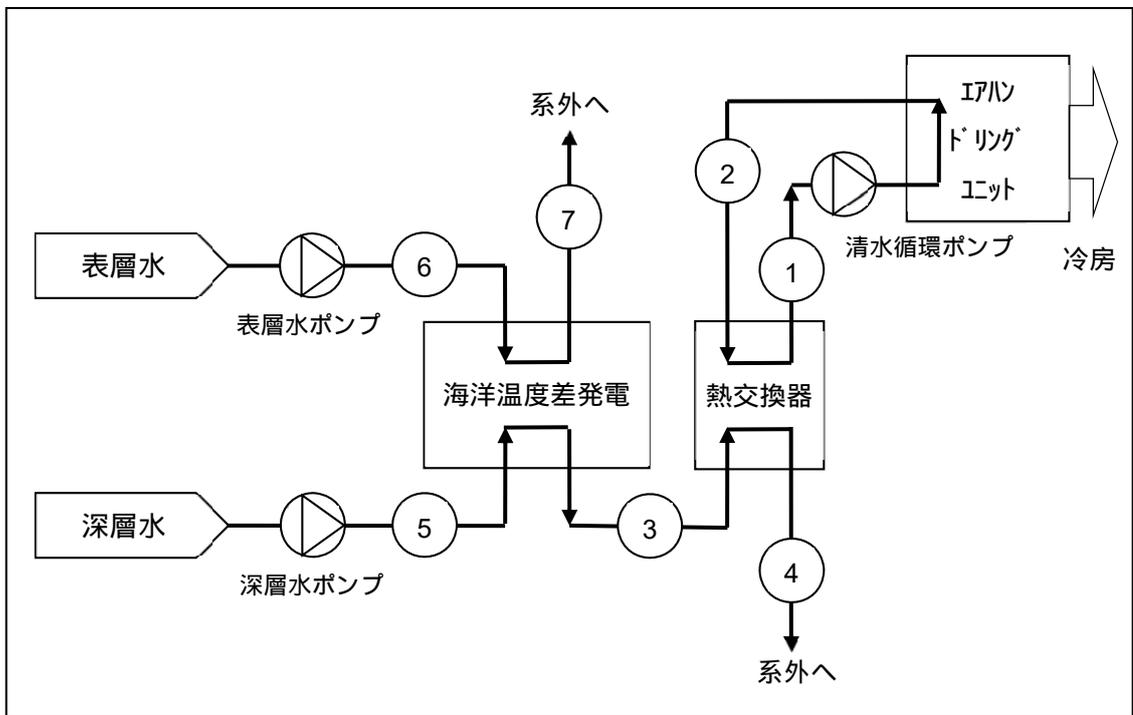


図 2-4 Case-2 カスケード利用ありのフロー

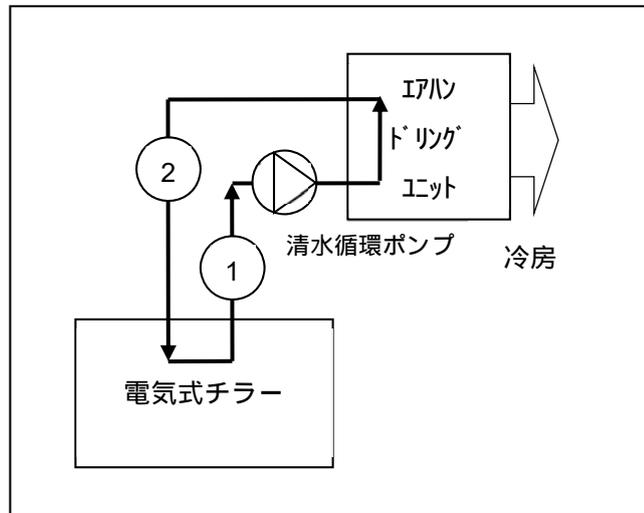


図 2-5 Case-3 電気式チラーを用いた場合のフロー

表 2-8 温度・流量(深層水温度 = 9 ケース)

No.	温度 []			流量 [t/h]		
	Case-1	Case-2	Case-3	Case-1	Case-2	Case-3
	12.0	同左	同左	21.0	同左	同左
	15.6	同左	同左	21.0	同左	同左
	9.0	10.4	-	15.8	21.9	-
	14.0	同左	-	15.8	21.9	-
	-	9.0	-	-	21.9	-
	-	29.0	-	-	4.4	-
	-	22.0	-	-	4.4	-

表 2-9 温度・流量(深層水温度 = 6 ケース)

No.	温度 []			流量 [t/h]		
	Case-1	Case-2	Case-3	Case-1	Case-2	Case-3
	12.0	同左	同左	21.0	同左	同左
	15.6	同左	同左	21.0	同左	同左
	6.0	10.4	-	9.9	21.9	-
	14.0	同左	-	9.9	21.9	-
	-	6.0	-	-	21.9	-
	-	29.0	-	-	13.8	-
	-	22.0	-	-	13.8	-

(2) エネルギー収支

上記の Case-1、Case-2 および Case-3 について、エネルギー収支の評価を行う。評価は前項と同様に、深層水温度が 9 の場合、および 6 の場合の 2 ケースについて行った。算定結果を表 2-10、表 2-11 に示す。

表 2-10 エネルギー収支(深層水温度 = 9 ケース)

項目		Case-1	Case-2	Case-3	備考
表層水ポンプ					
流量 G_{SW}	t/h	-	4.4	-	前項による
揚程 TH_{SW}	m	-	5.0	-	
消費電力 E_{SW}	kW	-	0.08	-	計算式は中温利用と同一
深層水ポンプ					
流量 G_{DW}	t/h	15.8	21.9	-	
揚程 TH_{DW}	m	7.5	9.5	-	Case-2 は下記 dP_{DW} を考慮
消費電力 E_{DW}	kW	0.41	0.73	-	計算式は中温利用と同一
清水循環ポンプ					
流量 G_{CW}	t/h	21.0	21.0	21.0	前項による
揚程 TH_{CW}	m	9.0	9.0	9.0	仮定値
消費電力 E_{CW}	kW	0.66	0.66	0.66	計算式は他のポンプと同一
海洋温度差発電					
発電出力 E_{OTEC}	kW	-	0.94	-	
表層水圧力損失 dP_{SW}	m	-	2.0	-	
深層水圧力損失 dP_{DW}	m	-	2.0	-	
電気式チラー					
冷房能力 Q_C	kW	-	-	87.2	既存空調冷房能力
性能係数 COP	-	-	-	6.0	一般的数値とする
消費電力 E_{CH}	kW	-	-	14.5	$E_{CH} = Q_C / COP$
エネルギー収支					
消費電力 E_T	kW	1.1	0.5	15.2	$E_T = E_{SW} + E_{DW} + E_{CW} + E_{CH} - E_{OTEC}$
供給冷熱 Q_{CH}	kW	87.2	87.2	87.2	冷房能力
性能係数 COP	-	81	166	6	$COP = Q_{CH} / E_T$

表 2-11 エネルギー収支(深層水温度 = 6 ケース)

項目		Case-1	Case-2	Case-3	備考
表層水ポンプ					
流量 G_{SW}	t/h	-	13.8	-	前項による
揚程 TH_{SW}	m	-	5.0	-	
消費電力 E_{SW}	kW	-	0.24	-	計算式は中温利用と同一
深層水ポンプ					
流量 G_{DW}	t/h	9.9	21.9	-	
揚程 TH_{DW}	m	7.5	9.5	-	Case-2 は下記 dP_{DW} を考慮
消費電力 E_{DW}	kW	0.26	0.73	-	計算式は中温利用と同一
清水循環ポンプ					
流量 G_{CW}	t/h	21.0	21.0	21.0	前項による
揚程 TH_{CW}	m	9.0	9.0	9.0	仮定値
消費電力 E_{CW}	kW	0.66	0.66	0.66	計算式は他のポンプと同一
海洋温度差発電					
発電出力 E_{OTEC}	kW	-	3.17	-	
表層水圧力損失 dP_{SW}	m	-	2.0	-	
深層水圧力損失 dP_{DW}	m	-	2.0	-	
電気式チラー					
冷房能力 Q_C	kW	-	-	87.2	既存空調冷房能力
性能係数 COP	-	-	-	6.0	一般的数値とする
消費電力 E_{CH}	kW	-	-	14.5	$E_{CH} = Q_C / COP$
エネルギー収支					
消費電力 E_T	kW	0.9	-1.5	15.2	$E_T = E_{SW} + E_{DW} + E_{CW} + E_{CH} - E_{OTEC}$
供給冷熱 Q_{CH}	kW	87.2	87.2	87.2	冷房能力
性能係数 COP	-	95	-57	6	$COP = Q_{CH} / E_T$

(3) エクセルギー収支

Case-1、Case-2、および Case-3 におけるエクセルギー収支を求めると、表 2-12 および表 2-13 のとおりとなる。

表 2-12 エクセルギー収支(深層水温度 = 9 ケース) (単位 : kW)

項目	Case-1	Case-2	Case-3	備考
汲み上げにおける収支				
表層水ポンプ	-	△ 0.08	-	
深層水ポンプ	△ 0.41	△ 0.73	-	
汲み上げによる冷熱	0.77	2.92	-	14 を基準とする
エクセルギー収支小計	0.36	2.12	0.00	
海洋温度差発電における収支				
使用前表層水エクセルギー	-	1.85	-	14 を基準とする
使用前深層水エクセルギー	-	1.07	-	(以下同上)
使用后表層水エクセルギー	-	0.53	-	
使用后深層水エクセルギー	-	0.55	-	
発電	-	0.94	-	
エクセルギー収支小計	0.00	△ 0.89	0.00	
清水循環系統における収支				
熱交換前深層水エクセルギー	0.77	0.55	-	
熱交換前清水エクセルギー	0.10	0.10	0.10	
熱交換後深層水エクセルギー	0.00	0.00	-	
熱交換後清水エクセルギー	0.16	0.16	0.16	
循環ポンプ	△ 0.66	△ 0.66	△ 0.66	
電気式チラー	-	-	△ 14.53	
エクセルギー収支小計	△ 1.37	△ 1.16	△ 15.13	混合前後の差と電力を考慮
エクセルギー評価				
総合エクセルギー収支	△ 1.01	0.07	△ 15.13	
汲み上げ後エクセルギー収支	△ 1.37	△ 2.05	△ 15.13	

エクセルギーの増加を正、減少を負として表記する。

表 2-13 エクセルギー収支(深層水温度 = 6 ケース) (単位 : kW)

項目	Case-1	Case-2	Case-3	備考
汲み上げにおける収支				
表層水ポンプ	-	△ 0.24	-	
深層水ポンプ	△ 0.26	△ 0.73	-	
汲み上げによる冷熱	1.25	8.57	-	14 を基準とする
エクセルギー収支小計	0.99	7.60	0.00	
海洋温度差発電における収支				
使用前表層水エクセルギー	-	5.80	-	14 を基準とする
使用前深層水エクセルギー	-	2.77	-	(以下同上)
使用后表層水エクセルギー	-	1.68	-	
使用后深層水エクセルギー	-	0.55	-	
発電	-	3.17	-	
エクセルギー収支小計	0.00	△ 3.18	0.00	
清水循環系統における収支				
熱交換前深層水エクセルギー	1.25	0.55	-	
熱交換前清水エクセルギー	0.10	0.10	0.10	
熱交換後深層水エクセルギー	0.00	0.00	-	
熱交換後清水エクセルギー	0.16	0.16	0.16	
循環ポンプ	△ 0.66	△ 0.66	△ 0.66	
電気式チラー	-	-	△ 14.53	
エクセルギー収支小計	△ 1.85	△ 1.16	△ 15.13	混合前後の差と電力を考慮
エクセルギー評価				
総合エクセルギー収支	△ 0.86	3.27	△ 15.13	
汲み上げ後エクセルギー収支	△ 1.85	△ 4.33	△ 15.13	

エクセルギーの増加を正、減少を負として表記する。

(4) 考察

低温利用でも、海洋温度差発電を含むカスケード利用は一定の省エネルギー効果を持つが、中温利用に比べてその効果は小さい。特に深層水温度が 9 の場合、OTEC の有無による差異は、深層水利用と電気式チラーとの差異より相対的に小さいため、経済性の面で成立し難い恐れもあることに注意が必要である。

一方、系外に出る深層水温度は 14 と低く、表層水も発電後は 22 となる。中温利用と補完的な関係もあることから、この 2 つを組みあわせることで、効果を大きく出来ると考えられる。

2.1.3 パラレル利用

現状の研究所から民間企業への深層水分水は、夏場にその使用量が大幅に増加する。この傾向は、規模拡大時の深層水複合利用システムでも同様となると考えられる。

一方、海洋温度差発電の出力も、海水流量が同じ場合、夏場に増大する。

そこで、夏場に海洋温度差発電への深層水流量を減らし、より多くの冷熱を複合利用（水産業、農業）に直接用いることのメリット（水産業、農業の拡大と、発電側の出力抑制による建設費減少等）を、実証設備の運転結果を基に検証した。

前項では、深層水冷熱を中温（20℃）で利用する場合と、低温（12℃）で利用する場合の2とおりについて、カスケード利用（発電後利用）の省電力面及びエクセルギー効率向上面でのメリットを検討した。これに対し、本項の検討はカスケード利用ではなくパラレル利用（発電前利用）のメリットについて述べる。

(1) 検討対象：深層水冷熱利用のうち、低温利用

深層水の冷熱については、次の用途が提案されている。

- ・海洋温度差発電、火力発電への給気冷却・復水器利用
- ・建物・地域冷房（直接及びヒートポンプ利用）
- ・周年農業、冷室農業、植物工場
- ・水産養殖
- ・海水淡水化（フラッシュ蒸発法）

この中では、前述のとおり空調利用が商用化の面で先行している。冷房空調に用いる場合、必要とする冷水は比較的低温（7℃～12℃程度）である。

一方、現在、研究所から民間企業などへの分水量の9割以上が、水産養殖用（クルマエビ種苗生産及び）となっている。この場合、生物へのショックを緩和するために、深層水は表層水と混合し、18～20℃程度の中温にして利用されている。

中温利用についてはカスケード利用に多くのメリットがあるが、前項で触れたとおり低温利用の場合は相対的にメリットが小さくなる。そこで、本項では低温利用の場合のパラレル利用（発電前に分岐して利用）について検討する。

(2) パラレル利用による発電電力量の減少と低温冷熱利用量の増加

ここでは、第 3 章で検討した 1 MW 級発電設備の設計条件及び仕様を用いて検討する。表層水温が高い時期を、深層水の低温冷熱利用需要が高い時期と考え、発電出力が設定値を超えないように深層水を発電前に分岐させて利用することを考える。

代表的な設計点として、表層水の温度が 28 度を超えた場合に、深層水の発電前分岐によるパラレル利用を行い、発電出力をそれ以上上げないケースについて、表 2-14 にまとめた。

なお、パラレル利用の場合の深層水冷熱利用可能量の増加分については、次の式で算定している。

$$Q_{av} = C_P \cdot G_{SW} \cdot (T_o - T_i)$$

- Q_{av} : 深層水冷熱利用可能量の増加分[MJ/h]
- C_P : 海水比熱[kJ/kg⁻¹]
- T_o : 発電に利用した場合の深層水温度[]
- T_i : 発電に利用する前の深層水温度[]

表 2-14 発電前分岐を行った場合の電力・冷熱量得失

表層水温度	オリジナル			発電前分岐 送電端出力 kW	差		年間日数 日
	発電端出力 kW	自己消費電力 kW	送電端出力 kW		発電出力 kW	冷熱利用量 GJ/h	
31.0	1,750	480	1,270	1,160	110	+ 216	0
30.0	1,750	480	1,270	1,160	110	+ 207	4
29.0	1,700	480	1,220	1,160	60	+ 199	42
28.0 以下	1,640	480	1,160	1,160	± 0	± 0	319
年間合計					71,000 kWh	220,500 GJ	

(3) パラレル利用によるプラント建設費用低減効果

前項のとおり発電プラントの最大発電出力は減少するものの、その分発電プラントの建設費用も減少する。ここでは、この建設費用の減少分を、化学プラント等の建設費の概算で広く用いられている「0.7 乗則」を利用して算定する。この法則は同型のプラント A と B の容量をそれぞれ CA, CB、建設費を YA, YB とすると、次の関係が成立するというものである。

$$\frac{C_B}{C_A} = \left(\frac{Y_B}{Y_A} \right)^{0.7}$$

ここで発電前分岐を行わない場合のプラント容量 CA (最大発電出力) は 2,090kW、このときの初期費用 YA を 30 億円と仮定すれば、発電前分岐を行う場合の発電プラント (最大発電出力 CB = 1,910kW) の初期費用は 28.2 億円となる。すなわち、建設費用は 1.8 億円減少する。

(4) パラレル利用の経済性

パラレル利用 (発電前分岐) のメリット、デメリットを経済性の面から予備評価する。

発電減少による収入減

第(2)項の検討結果から、発電量は年間 71,000kWh 減少する。1MW 級の海洋温度差発電プラントの発電単価: 1kWh=40~60 円で換算すれば、収入減は年間 284~426 万円となる。

低温冷熱利用による収入増

第(2)項の検討結果から、低温冷熱利用可能量は年間 220,500GJ 増加する。仮にこの冷熱を全て利用できた場合、1MJ=1.1 円 (電気式冷房熱源機の COP=5, 1kWh=20 円相当) で換算すれば、収入増は年間約 2.4 億円となる。

ただし、中温冷熱の利用可能量は減少することに注意が必要である。

経済性まとめ

建設費低減効果と発電減少分のみに着目すれば、建設費低減 1.8 億円に対して年間の収入減は年間数百万円のオーダーであり、パラレル利用はこの点でも経済的に考え得る選択肢と言える。さらに、低温冷熱利用増のメリットは大きく、利用率が高ければ発電減少分をカバーし得る。このように、夏季の低温冷熱利用増がどの程度見込めるかによって、パラレル利用のアドバンテージは変化する。

2.2 発電後海水の利用の可能性および方法に関する予備検討

ここまで述べた理論的検討の下、現 OTEC 実証設備で使用した後の海水利用の可能性および方法に関して予備的に検討した内容を述べる。

2.2.1 予備検討のためのデータ取得

(1) OTEC 実証設備における海水温度計測センサー配置

OTEC 実証設備に設置された海水温度計測センサーを、図 2-6 に示す。太線で囲んだ TI001～TI004 が表層水用、TI101～104 が深層水用である。それぞれの入口、出口の他、中間点にも温度計を設置し、複合利用の際に表層水もしくは深層水を途中で抜き出すようなオペレーションを考慮した際の基礎データとして活用できるようにしている。

(2) 実証設備における海水温度記録方法

前項で述べた海水温度計測センサーで計測された温度データは、解析を可能にするため、他の計測データとともに 1 秒毎に csv 形式で保存される。保存されたデータの例を図 2-7 に示す。

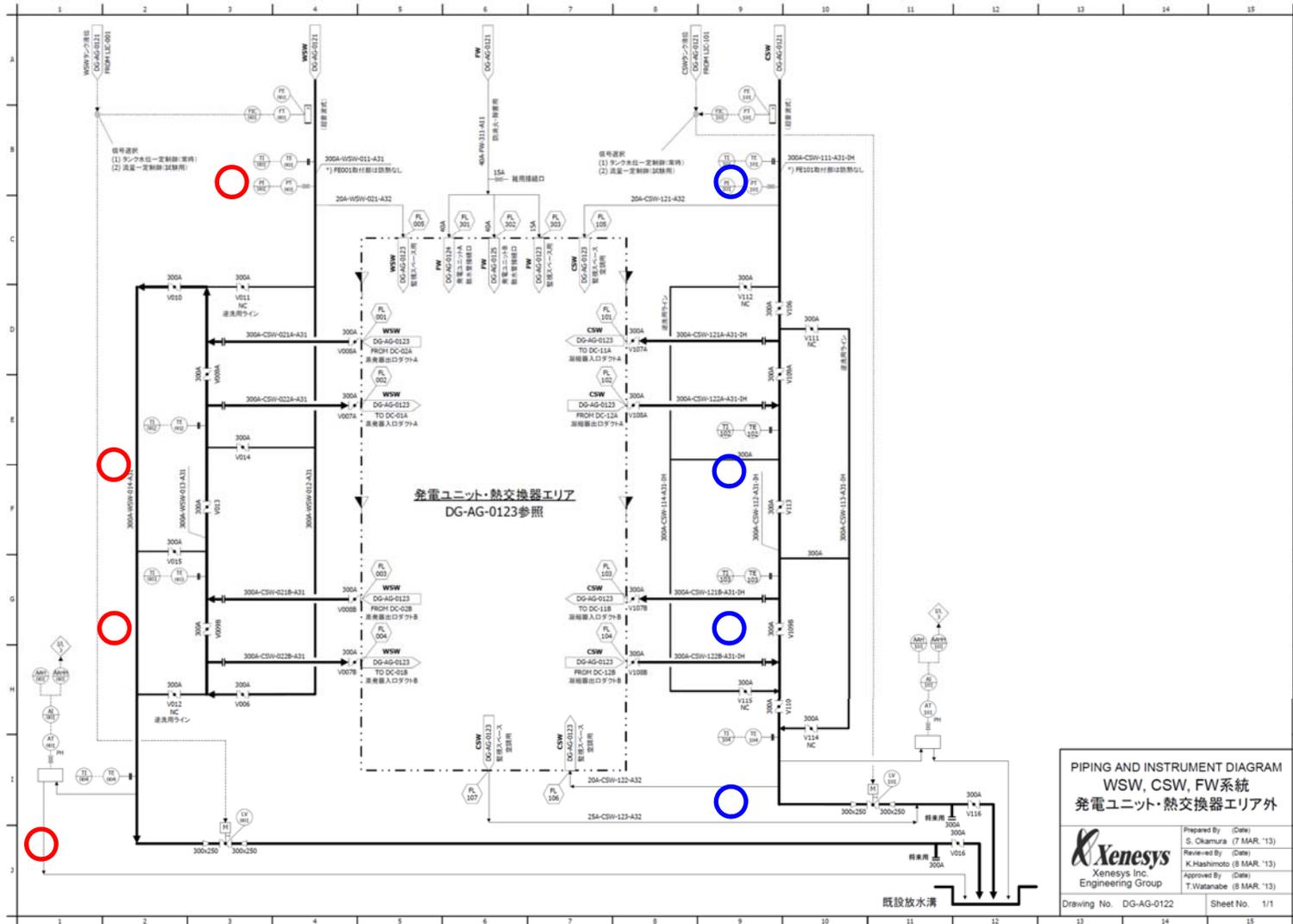


図 2-6 実証設備の海水系統における海水温度センサー位置

		LT001.PV	FT001.PV	TE001.PV	TE002.PV	TE003.PV	TE004.PV	PT001.PV	AT001.PV
		表層水タンク水位	表層水流量	表層水温度(入口)	表層水温度(UnitA入口)	表層水温度(UnitB出口)	表層水温度(出口)	表層水入口圧力	表層水出口pH
		m	m ³ /h	°C	°C	°C	°C	kPa	
2013/3/30	11:12:02	1.61	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:03	1.61	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:04	1.61	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:05	1.61	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:06	1.61	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:07	1.61	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:08	1.61	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:09	1.61	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:10	1.62	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:11	1.62	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:12	1.62	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:13	1.62	103	23.5	23.4	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:14	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:15	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:16	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:17	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:18	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:19	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:20	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:21	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:22	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:23	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:24	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150	7.7
2013/3/30	11:12:25	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.4	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:26	1.62	103	23.5	23.5	23.5	20.3	150	7.7
2013/3/30	11:12:27	1.62	104	23.5	23.5	23.5	20.3	150	7.7
2013/3/30	11:12:28	1.62	104	23.5	23.5	23.5	20.3	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:29	1.62	104	23.5	23.5	23.5	20.3	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:30	1.62	104	23.5	23.5	23.5	20.3	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:31	1.62	104	23.5	23.5	23.5	20.3	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:32	1.62	104	23.5	23.5	23.5	20.3	150	7.7
2013/3/30	11:12:33	1.62	104	23.5	23.5	23.5	20.3	150	7.7
2013/3/30	11:12:34	1.62	104	23.5	23.5	23.5	20.3	150.1	7.7
2013/3/30	11:12:35	1.62	104	23.5	23.5	23.5	20.3	150.2	7.7
2013/3/30	11:12:36	1.62	104	23.5	23.5	23.5	20.3	150.1	7.7

図 2-7 海水温度記録例

2.2.2 実証試験における発電利用後の深層水・表層水温度変化

前項で述べたセンサーおよび記録システムを用いて記録された、表層水および深層水の入口温度、出口温度について、グラフにしたものを図 2-8 に示す。ただし、本実証試験では、季節ごとに利用海水量が異なるため、出入口温度差は、特に表層水と深層水の流量比によって最適設定値との差異が生じる。したがって、本運転データは参考として扱い、次項以降の検討では、表 2-15 に示す理論設計値を用いることとする。

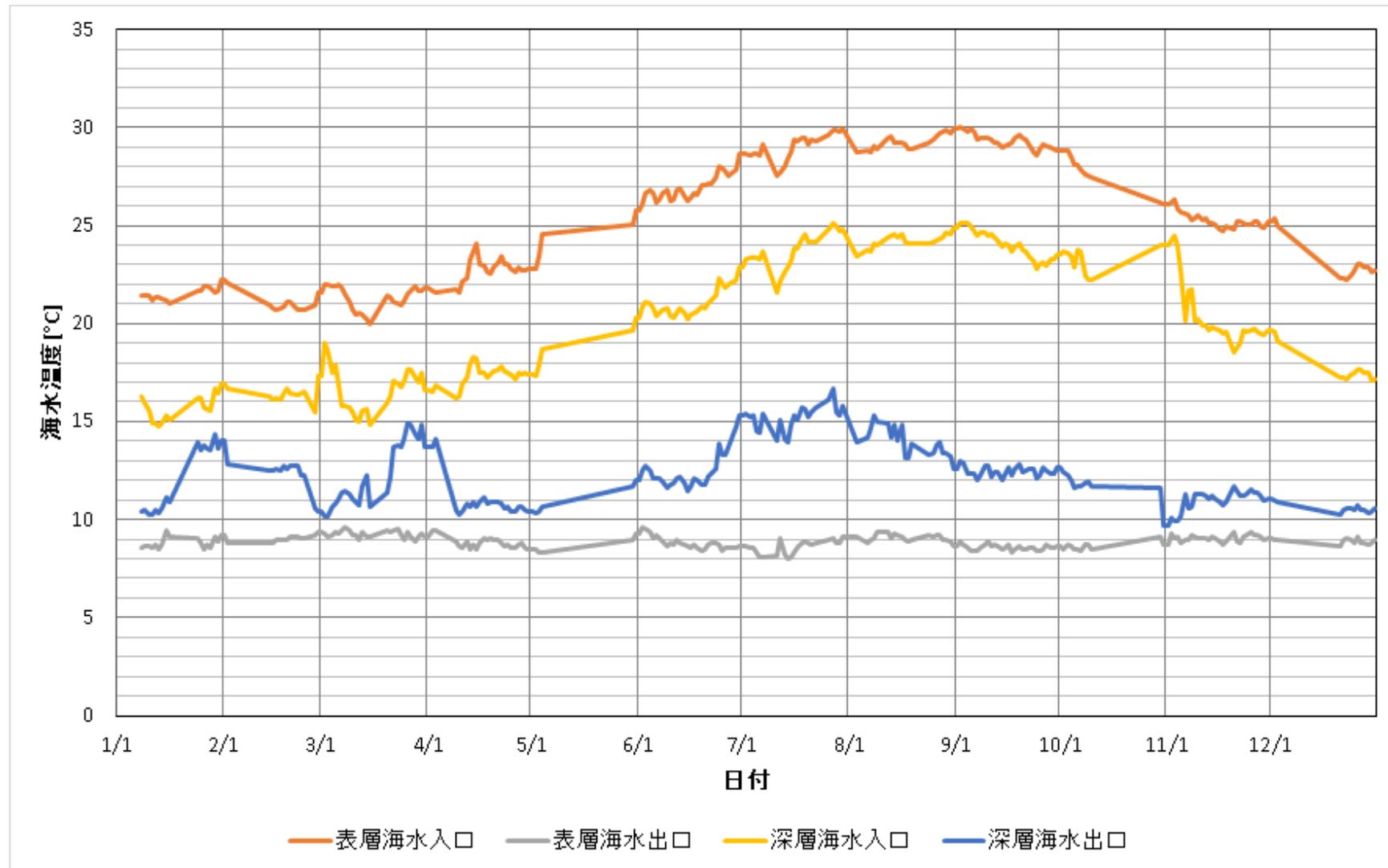


図 2-8 海水の入口・出口温度 (2014 年)

表 2-15 表層水温別 発電利用後の温度

表層水			深層水			参考
入口温度	中間温度(*1)	出口温度	入口温度	中間温度(*1)	出口温度	2014 年度 頻度 (%)
19.00	17.54	16.07	6.00	7.83	9.66	0.0
20.00	18.45	16.90	6.00	7.94	9.88	0.2
21.00	19.37	17.74	6.00	8.04	10.08	6.2
22.00	20.29	18.58	6.00	8.14	10.28	16.9
23.00	21.21	19.43	6.00	8.23	10.47	12.0
24.00	22.14	20.28	6.00	8.33	10.65	3.5
25.00	23.07	21.14	6.00	8.41	10.83	3.8
26.00	24.00	22.00	6.00	8.50	11.00	10.3
27.00	24.93	22.87	6.00	8.58	11.17	8.4
28.00	25.87	23.74	6.00	8.66	11.33	5.7
29.00	26.80	24.61	6.00	8.74	11.49	11.9
30.00	27.74	25.49	6.00	8.82	11.64	19.8
31.00	28.68	26.36	6.00	8.90	11.79	1.2

(*1) 2 段ランキンサイクルの場合の、1 段目の出口温度

(*2) 表層水量 / 深層水量 =

1.25

2.2.3 利用温度による利用可能量の変化

実証設備の発電後の表層水及び深層水温度から、冷熱利用可能量の発電有無による差異を検証する。海洋深層水の冷熱利用では、用途により必要とする温度が異なる。現在、研究所から分水を受ける量の多い水産養殖分野では、急激な低温水の注入による水産物へのダメージを避けるため、深層水と表層水を混合して中温にしてから養殖池に注入している。

そこで本章では、冷熱需要が高まる夏季を対象として、温度差別の海水利用可能量の比較を行い、発電利用後の海洋深層水を利用することのメリットを考察する。なお、夏季の海水流量、温度条件については、モデルケースとして表 2-16 のとおり設定する。

表 2-16 表層水及び深層水の温度、流量（モデルケース）

種別		温度	流量	備考
表層水	発電利用前	29.0℃	13,000m ³ /日	流量は研究所取水量と同量と仮定
	発電利用後	25.0℃		利用後温度は設計値
深層水	発電利用前	9℃	13,000m ³ /日	流量は研究所取水量と同量仮定
	発電利用後	12.9℃		利用後温度は計算値

(1) 利用水温による混合比の違い

表 2-16 の温度、流量の場合の、冷熱利用温度帯別の表層水、深層水の混合比を算定する。発電利用前の温度の場合の混合比を表 2-17 及び図 2-9、発電利用後の温度の場合の混合比を表 2-18 及び図 2-10 にそれぞれ示す。

表 2-17 利用水温による混合比（発電利用前温度ケース）

項目	単位	数値							
		9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0
利用水温	℃								
表層水比率	%	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0
深層水比率	%	100.0	95.0	90.0	85.0	80.0	75.0	70.0	65.0
利用水温	℃	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0
表層水比率	%	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0
深層水比率	%	60.0	55.0	50.0	45.0	40.0	35.0	30.0	25.0

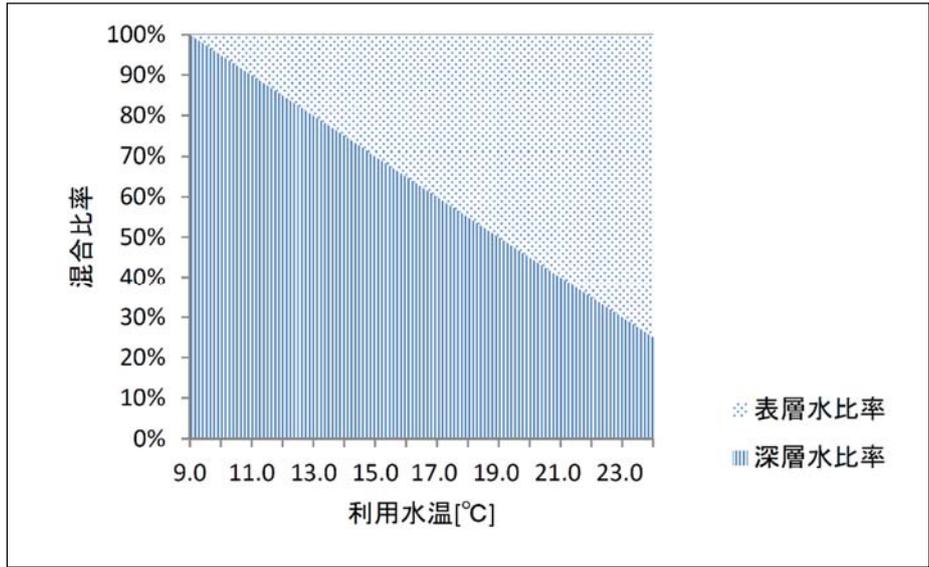


図 2-9 利用水温による混合比（発電利用前温度ケース）

表 2-18 利用水温による混合比（発電利用後温度ケース）

項目	単位	数値								
		9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	
利用水温	°C	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	
表層水比率	%	-	-	-	-	0.8	9.1	17.4	25.6	
深層水比率	%	-	-	-	-	99.2	90.9	82.6	74.4	
利用水温	°C	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	
表層水比率	%	33.9	42.1	50.4	58.7	66.9	75.2	83.5	91.7	
深層水比率	%	66.1	57.9	49.6	41.3	33.1	24.8	16.5	8.3	

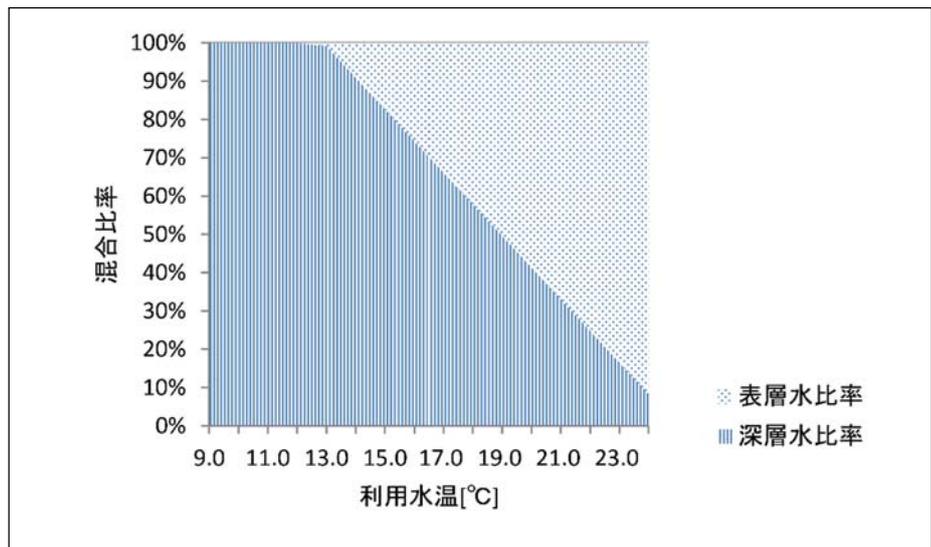


図 2-10 利用水温による混合比（発電利用後温度ケース）

(3) 冷海水利用可能量の発電利用前後による差異

前項で算定した混合比、及び流量上限(13,000m³/h)を考慮すると、利用水温別の冷海水利用可能量は、表 2-19 及び図 2-11 のとおりとなる。特に水産利用で多く用いられる中温利用の場合、発電利用後の海水を用いても冷熱量はほぼ変わらない。

表 2-19 利用水温別冷海水利用可能量の比較

項目	単位	数値								
利用水温	℃	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	
発電利用前	m ³ /h	13,000	13,684	14,444	15,294	16,250	17,333	18,571	20,000	
発電利用後	m ³ /h	-	-	-	-	13,108	14,300	15,730	17,478	
利用水温	℃	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	
発電利用前	m ³ /h	21,667	23,636	26,000	23,636	21,667	20,000	18,571	17,333	
発電利用後	m ³ /h	19,663	22,471	25,787	22,155	19,420	17,286	15,574	14,171	

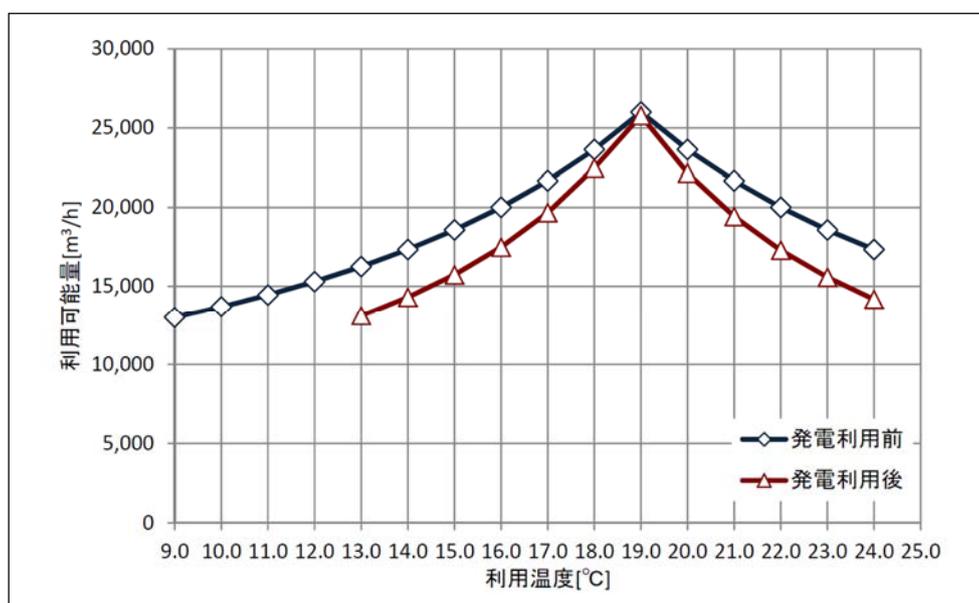


図 2-11 利用水温別冷海水利用可能量の比較

(補遺) 2 段ランキンによる中間分岐の可能性

上記は単段のランキンサイクルについて述べたが、2 段ランキンサイクルの場合はサイクルの途中から分水することにより、前項の 2 つの中間的なメリットを得ることも可能である。

3. 発電後海水の高度複合利用実証試験

前章の予備検討の結果をふまえ、本事業では研究所敷地内で稼働中の OTEC 実証設備で使用した後の深層水および表層水（以下「発電後海水」）を利用するための配管および必要な附属設備を設置し（2016 年度）、周辺企業等で発電後海水を利用することにより経済性向上、エネルギー消費量低減、放水による環境負荷低減等の効果を得る技術に関して、実証試験を行った（2017～2018 年度）。

3.1 実証試験設備の仕様

本事業では 2016 年度に久米島海洋深層水開発（株）が運営する海ぶどう養殖場および(株)ジーオー・ファーム社が運営するカキ陸上養殖研究施設に、発電後海水を導く配管設備等を設置した。2017 年度は協力企業敷地内の配管等を完成し、海ぶどう養殖場については 7 月、カキ養殖試験場については 9 月から後述の使用を開始した。

配管のうち、本委託事業内で設置したものと事業外で設置したものの区分を表 3-1 に示す。

表 3-1 配管設備の設置区分

設備	区分	実施時期
配管および附属設備のうち、研究所管理地域内にあるもの	本委託事業内で設置する	2016年度設置済 (図3-6～図3-8)
配管および附属設備のうち、研究所管理地域外にあり、かつ、協力企業敷地外にあるもの	本委託事業外で、別途設置となる。ただし本件事業の企画提案募集要項2(7)に定める補助金を申請する予定である	2016年度設置済
配管および附属設備のうち、協力企業敷地内にあるもの	本委託事業外で、協力企業が設置する	2017年度第一四半期に設置
流量・圧力・温度センサー等計装類	本委託事業内で設置する	2016年度仮設置 前項配管設置と併せて本設置

また、深層水の利用高度化コンセプト、とりわけカスケード利用については、その有効性について専門家以外の理解を得るのが難しいという課題もあるため、当該配管から枝管を取り出して発電前後の海水に触れて温度を体感できる小規模な温度表示付き小型水槽も、OTEC 実証設備近傍に設置した（2016 年度）。2017～2018 年度はこれを用いて現地視察・見学、および取材等への対応を実施した。

以上の概念図を図 3-1 に示す。また、主要な仕様等について図 3-2～図 3-5 に示す。

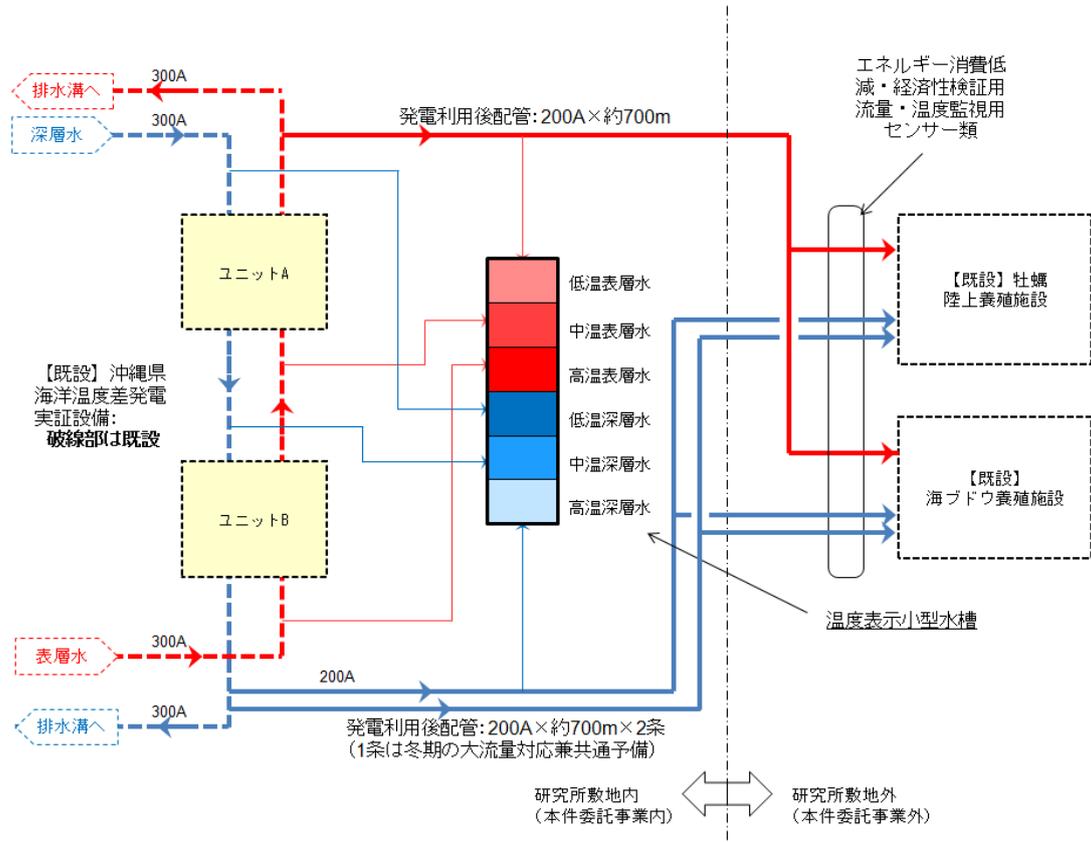


図 3-1 発電後海水利用配管の概念図

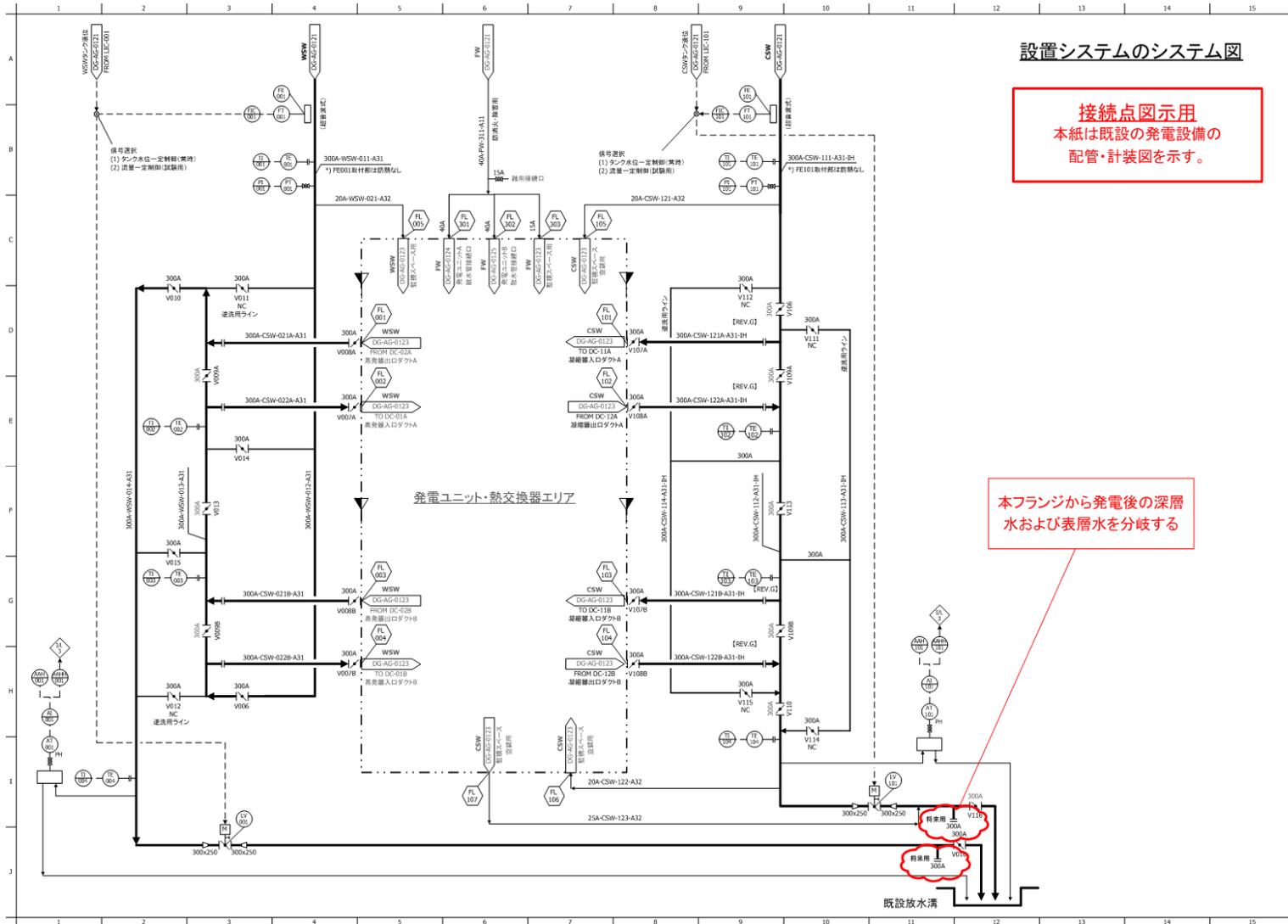


図 3-2 システム図 (2016 年度報告書より再掲)

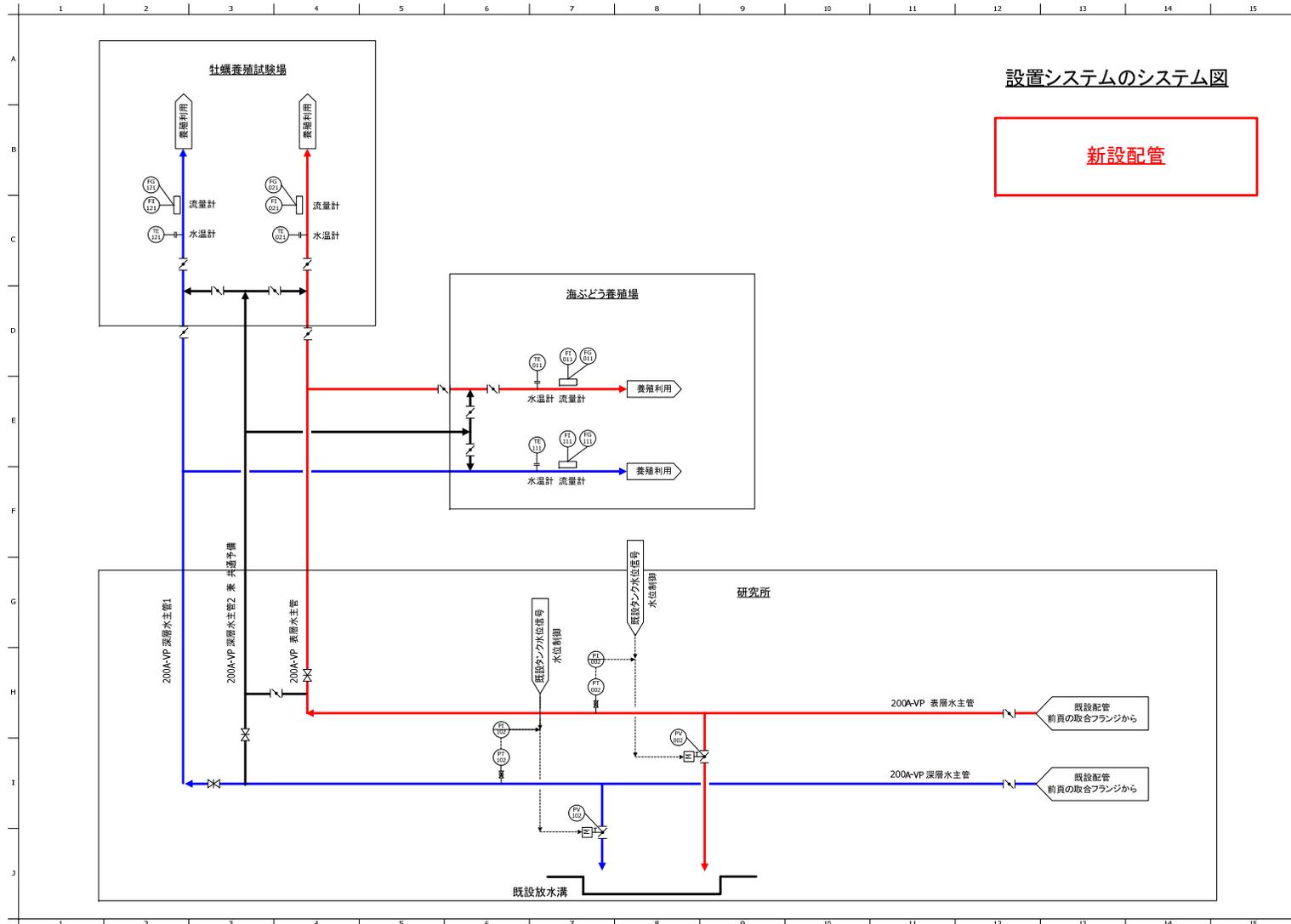


図 3-3 システム図 (2016 年度報告書より再掲)



図 3-4 配管位置図 (本事業対象内) (写真) [google map 利用]



図 3-5 配管位置図 (関連補助事業) (写真) [google map 利用]

3.2 設置工事

本実証試験用の配管システムは、2016 年度に着工し、同年度内に竣工した。主要な竣工時の写真を図 3-6 から図 3-8 に示す。



図 3-6 竣工時写真：発電後海水配管および温度表示小型水槽



図 3-7 竣工時写真：発電後海水配管（研究所敷地境界フェンス部）



図 3-8 竣工時写真：発電後海水配管埋設部（フェンス左側の芝生部に埋設）

3.3 海ぶどう養殖場における実証試験

3.3.1 試験実施状況

本実証試験前における海ぶどう養殖場では、夏季の深層水供給量不足に加え、表層水も不足しており、養殖用海水の温度制御に支障が出るという課題があった。

本実証試験では、水温が低く海ぶどうの生育に適した水質の発電後海水（発電後表層水）を利用することによる OTEC の経済性の向上の可能性の検討、および、生産量や品質に影響を与えないことの確認を行った（図 3-9、図 3-10）。具体的には、4 棟（A,B,C,S 棟）ある養殖場のうち 1 棟（S 棟）において、これまで用いてきた海水の代わりに「発電後海水（表層水）」を用いる試験を行った。

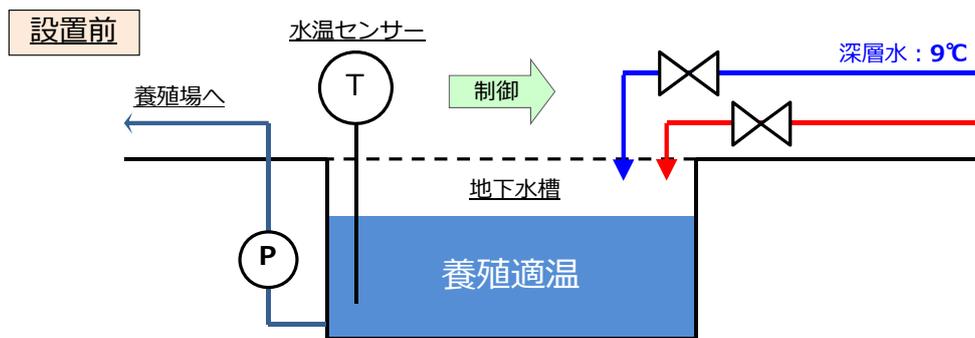


図 3-9 本実証前の海ぶどう養殖場での海水利用方法

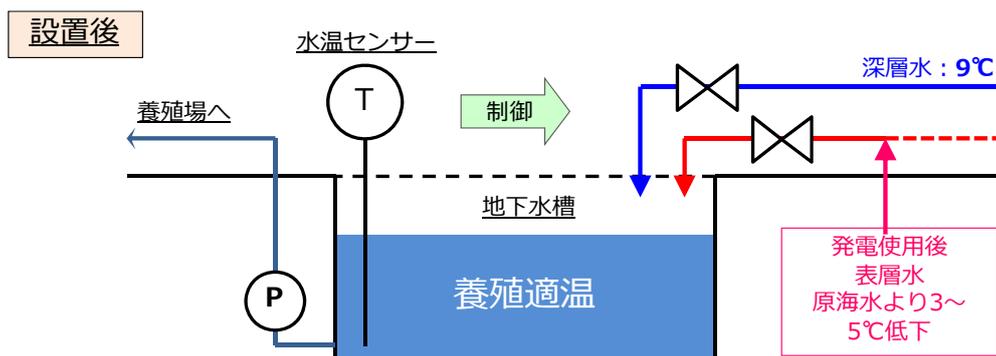


図 3-10 本実証試験における海ぶどう養殖場での海水利用方法

試験実施スケジュールを表 3-2 に示す。

表 3-2 試験実施スケジュール（海ぶどう養殖場）

日付	内容	備考
2017年 7月中旬	構内工事完了・通水開始	発電後表層水の約90%を利用
9月下旬	発電後表層水が100%海ぶどう養殖場に流れるようにバルブ調整	以降、次項まで発電後表層水の約100%を利用
11月上旬	発電後表層水の水温低下に伴い海ぶどう養殖場での利用量減 再び発電後表層水の一部のみの使用	
11月下旬	発電後表層水の水温低下に伴い、使用停止	次項までの期間使用停止
2018年 5月中旬	発電後表層水の水温上昇に伴い、使用再開	
11月上旬	2018年度は、発電後表層水の水温低下を避けるため、発電側を調整（熱主電従の模擬試験）。海ぶどう養殖場での使用を継続	
2019年2 月上旬	発電再開とこれに伴う発電後表層水の水温低下により、使用停止	

生産量について

発電後海水を用いていない A,B,C 棟を対照区として、発電後海水を使用した S 棟の生産量が落ちていないことを定量的に比較・確認した。なお、比較にあたっては、各棟で養殖水槽の数が異なる上に各年別の日射や水温の影響もあるため、発電後海水がまだ使用されていない 2016 年度と、使用されている 2017 年度（9月～11月の3か月使用）および 2018 年度（5月～翌1月の9か月使用）との生産量比を用いた。結果を表 3-3 に示す。いずれの年も生産量は 2016 年度比 106%と順調であり、A,B,C 棟の平均を上回っている。

表 3-3 生産量の比較（海ぶどう養殖場）

比較	対照区：A,B,C 棟	発電後海水使用：S 棟
2017 年度の生産量（2016 年度比）	94～109%	106%
2018 年度の生産量（2016 年度比）	83～108%	106%

3.3.2 発電後海水の利用によるエネルギー消費量低減効果の算定

エネルギー消費量低減効果算定の方法として、次の 2 つのシナリオのエネルギー収支を算定、比較することとした（図 3-11, 図 3-12）。

- シナリオ1: 実証試験ケース(海ぶどう養殖前に発電に使用するケース)
- シナリオ2: 発電を行わないケース(シナリオ1における温度・流量条件から逆算)

なお本検討は、本実証試験特有の条件（例として、発電後海水の水圧が十分にあり、OTEC を介してもその圧力損失分のブースターポンプは不要 等）を含んで効果を算定する。このため今回の実証試験においては、OTEC の有無による海水系統の機器の差異は無いものとしている。別途検討の規模拡大ケースでは、より一般的な条件を用いる。

また、表層水および深層水の流量がシナリオ 1、2 で同じであれば、供給できる冷熱エネルギーもほぼ同じとなる点が、OTEC の発電後海水を海ぶどう養殖に利用する場合の特徴となっている（正確には、発電により海水系外にエネルギーを放出するため、使用できる冷熱量は 2～4%増加する）。

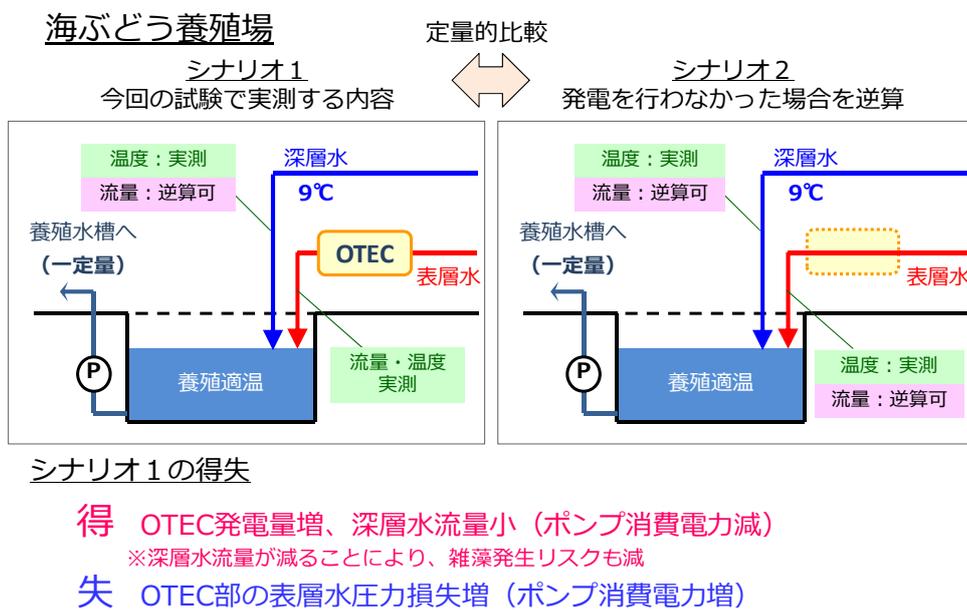


図 3-11 比較シナリオ

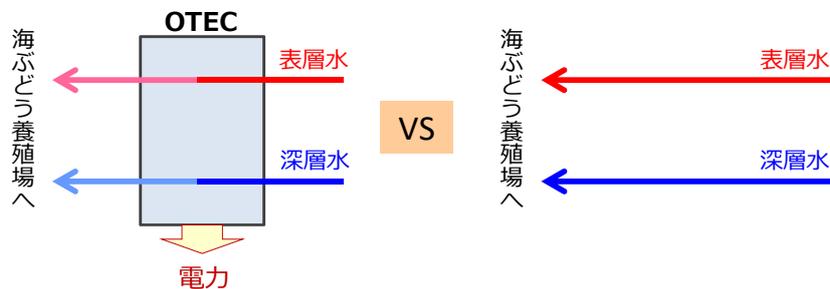


図 3-12 発電への利用有無によるエネルギー収支の差

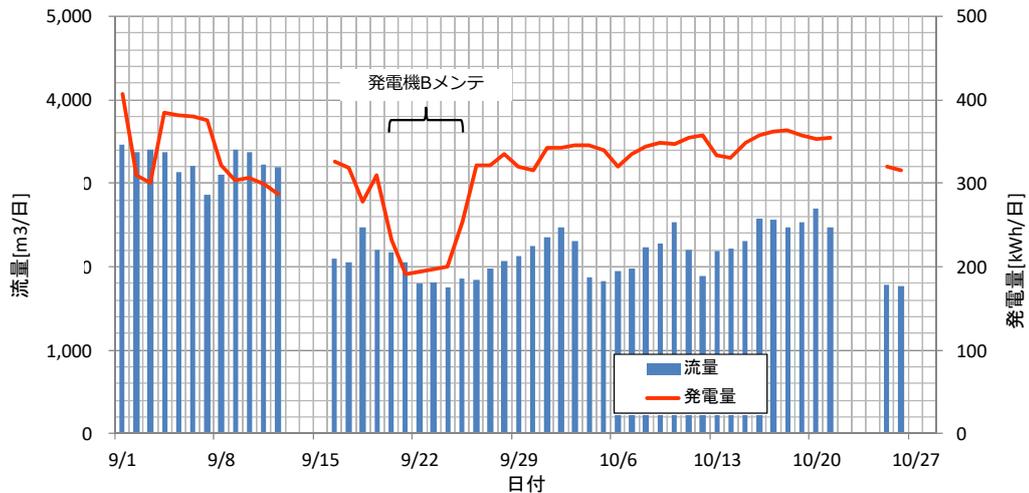
「比較 1」では、直接的に OTEC の発電量の有無による差異を、エネルギー収支（電力収支）の差として算定した（図 3-13）。その結果、エネルギー消費量低減効果は 320kWh/日（一

般家庭の一か月分の電力使用量とほぼ同等)となった。

「比較2」では、OTEC 有無による海ぶどう養殖への表層水供給温度の差異に注目して、エネルギーの差を「深層水利用量の節減量」に換算した(図 3-14)。ただし新棟用貯水槽への既設深層水ラインからの深層水供給量は計測されていない(他の貯水槽への流量と区別できていない)ため、算定にあたっては図 3-15 の方法を用いた。その結果、深層水利用量の節減量効果は1日あたり平均 240 トン(全取水量の約 2%)と算定された。

【比較1】 発電への利用有無によるエネルギー収支の差

9-10月の発電出力推移(実績)



➡ 1日あたり、平均約320kWh (25円/kWhで換算すると8,000円/日)の差となる。

図 3-13 比較 1 : エネルギー収支の差 (2017 年度実施)

【比較2】 深層水使用量の節減効果

発電後海水は、実証開始前のリサイクル水温より低い温度で供給される ⇒ 水温維持（23℃）のための深層水使用量が削減できる。

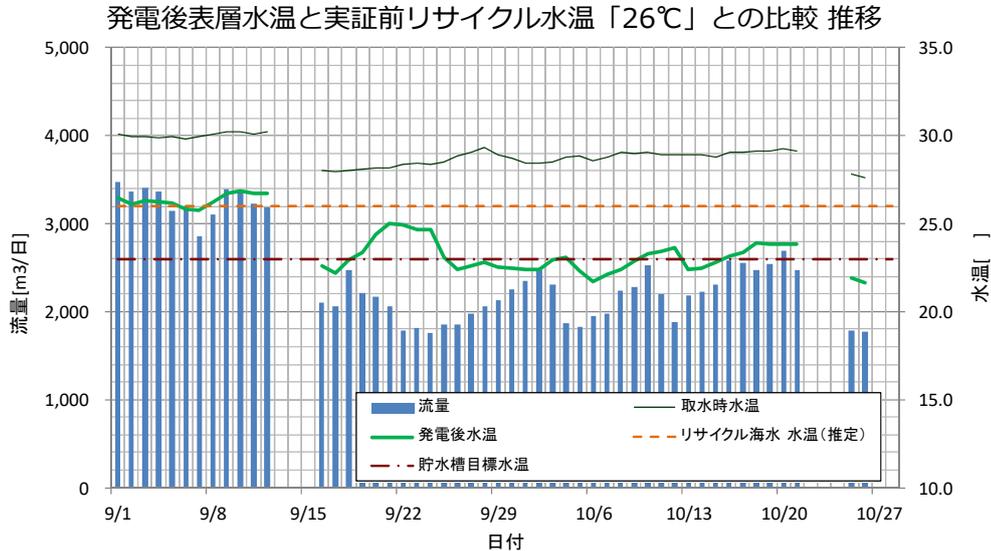


図 3-14 比較 2 深層水使用量の節減効果（2017 年度実施）

新棟用貯水槽への既設深層水ラインからの深層水供給量は計測されていない（他の貯水槽への流量と区別できていない）ため、下記の方法で比較した。

計算内容	計算式
【本実証設備】 深層水使用量実績の推定 発電後表層水の流量と温度推移実績から、 実証試験時 貯水槽を23℃をキープするための 深層水（10℃）所用量を推定	$Q_{DSW_1} = Q_{SSW_A} \times (T_{SSW_A} - 23.0) / (23.0 - 10.0)$ Where Q:流量、T:水温 添え字 DSW_1: 実証時深層水(海ぶどう養殖場内既設系統)、SSW_A: 発電後表層水
【本実証設備】 合計海水使用量実績の推定 上記の発電後表層水と深層水を合計	$Q_{SW_T} = Q_{DSW_1} + Q_{SSW_A}$ Where 添え字 SW_T: 貯水槽への合計使用量
【実証前】 リサイクル海水・深層水流量の推定 上記合計使用量(23℃)から、リサイクル海水 (26℃)と深層水(10℃)の流量を推定	$Q_{DSW_0} = Q_{SW_T} \times (26.0 - 23.0) / (26.0 - 10.0)$ Where 添え字 DSW_0: 実証前の深層水利用量推定値

➡ 1日あたり平均240トン（全取水量の約2%）の節減効果が得られている。

図 3-15 比較 2 深層水使用量の節減効果の算定方法と結果

3.3.3 経済性向上効果の算定

3.1.2項における検討の結果、エネルギー消費量低減効果は320kWh/日(平均的な一般家庭の一か月間の電気使用量と同等)と算定された。また、深層水利用量の節減量効果は1日あたり平均240トン(全取水量の約2%)となる。これを金額換算すると、エネルギー消費量低減効果については電力単価を25円/kWhとすれば一日あたり約8,000円の削減、深層水(売水価格6円/m³)の生産コスト全体に対する原価比率を10%と仮定すれば一日あたり約14,000円の生産額増につながると算定される。

加えて、前述のエネルギー、経済性、後述の環境効果/不可を統合的に評価することができる LCA 手法や IMPACT 手法を用いた検討を、専門機関(LCA 手法：(株)沖縄エネテック、IMPACT 手法：公立大学法人 大阪府立大学)に再委託して実施した。これらの検討結果については 4.5 節および 4.6 節に、規模拡大時の検討と併せて示す。

3.4 カキ養殖試験場における実証試験

カキ養殖試験場においては2016年度に、発電後海水をカスケード利用する目的で、近隣の水産施設である海ブドウ養殖場と車エビ養殖場の養殖水からカキの餌料となる藻類を培養する実験を計画した。栄養塩が非常に豊富である海ブドウや車エビの養殖水のオーバーフロー分を、カキの餌料培養への利用することの可否を検討するため、2017年2月に発電後海水や水産施設の養殖水の水質調査を行った(図3-16)。この調査結果に関する検討委員会(2017年度第1回)における審議の結果、同養殖水の水質はカキの餌料用藻類を培養するためには栄養塩濃度が少なく、これを用いた実証試験は困難であると判断された。このため、2017年度はカキの飼育実験を通じて省エネ効果・経済性向上効果のデータを取得し、発電後海水利用の有効性について検証する方向で実施計画を変更した。

Guillard f/2培地 組成表		2月の検査結果(一部抜粋)		
NaNO ₃	7.5 mg	→	硝酸体窒素 (NO ₃ -N)	0.41 mg/L
NaH ₂ PO ₄ · 2H ₂ O	0.6 mg	→	リン酸態りん (PO ₄ -P)	0.085 mg/L
Vitamin B ₁₂	0.05 μg			
Biotin	0.05 μg			
Thiamine HCl	10 μg			
Na ₂ SiO ₃ · 9H ₂ O	1 mg			
f/2 metals 1)	0.1 mL	→	溶解性鉄 (SF-E)	0.01 mg/L未満
Seawater	99.9 mL			

藻類を培養するうえで最低限必要

図 3-16 養殖海水の水質検査結果評価

本事業の協力企業であるカキ養殖事業者が目指す「あたらないカキ」を生産するためには、清浄性のある深層水の利用が前提となる。深層水は年間を通し、温度が低温で一定という特性を持つ。一方、カキを良好に成育させるためには高い水温での飼育(20 ~ 25)が好ましい時期がある。このため、カキの良好な成育を得るためには深層水を加温する必要が出てくるが、それには大きなコストが掛かるという課題があった。そこで深層水よりも水温が高い発電後海水を利用することで、消費エネルギー削減効果と経済的効果を算定し実証データを取得していくことを検討した(図3-17)。

発電後海水を利用したカキの成長比較試験

- 【背景】①「あたらない」カキを作るには、海洋深層水(深層水)100%で養殖する必要がある。
② 一方、カキの成長促進には、深層水原水よりも高い水温での養殖が望ましい。



課題：深層水原水の加温するには大きなコストがかかる一方、加温せずに使用すればカキの成長が遅くなるというジレンマがある。

【試験目的】

深層水原水と、発電後深層水(原水より高温)を同じ水温に保ち、カキの成長を比較し、発電後深層水利用効果算定のための実証データを取得する。

図 3-17 カキ養殖における成長比較試験内容

3.4.1 試験実施状況

(1) 第一回比較試験

半屋外のハウス内で 20L 容器を 9 つ用意し、1 つの容器にカキの稚貝を 10 個体ずつ(計 90 個体)収容した。 ~ : 深層水、 ~ : 加温した深層水(発電後深層水と同じ水温)、 ~ : 発電後深層水の実験区に分類し、海水はかけ流しの状態で、飼育水温の違いによるカキの成長差の比較検証を実施した(図 3-18)。



図 3-18 カキ成長差の比較検証

あらかじめ実施した予備実験結果をもとに、餌料を給餌し、一定時間止水する。これを 1 日 2 回行い、殻高、殻長、殻幅の計測を行った(図 3-19)。



図 3-19 殻高、殻長、殻幅の計測

10月中旬から12月中旬にかけて実験を行った結果、深層水と発電後深層水で飼育したカキの成長率に有意差は確認できなかった。この原因については、発電後深層水の水温を安定維持できなかったことが要因であると分析した（図 3-20）。

冬季における発電後深層水の水温変化 2017.10 ~ 2018.2

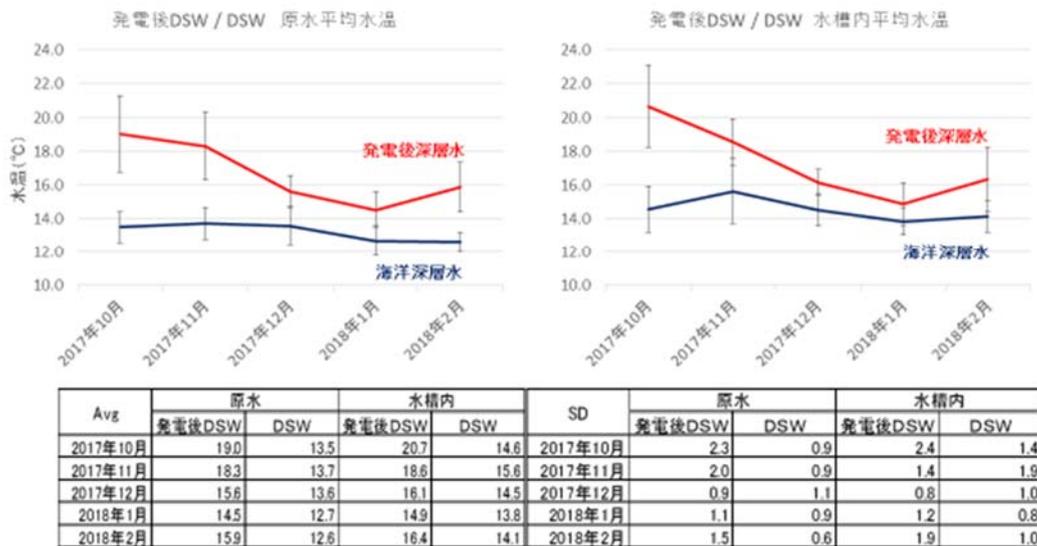


図 3-20 発電後深層水の水温変化

(2) 第 2 回比較試験

上記の水温計測の結果から深層水は比較的安定しているのに対し、発電後深層水は季節により変動する表層水温の影響を受けやすいと考え、水温が安定した状態での飼育実験を行うために屋内での実施を検討した。

室内実験の方法は、1L ビーカーに 3 個体ずつカキを収容し、水温 13 と 25 に調整した

餌料を給餌、8時間後に餌料を入れ替え1日2回給餌を行うこととした(図3-21)。

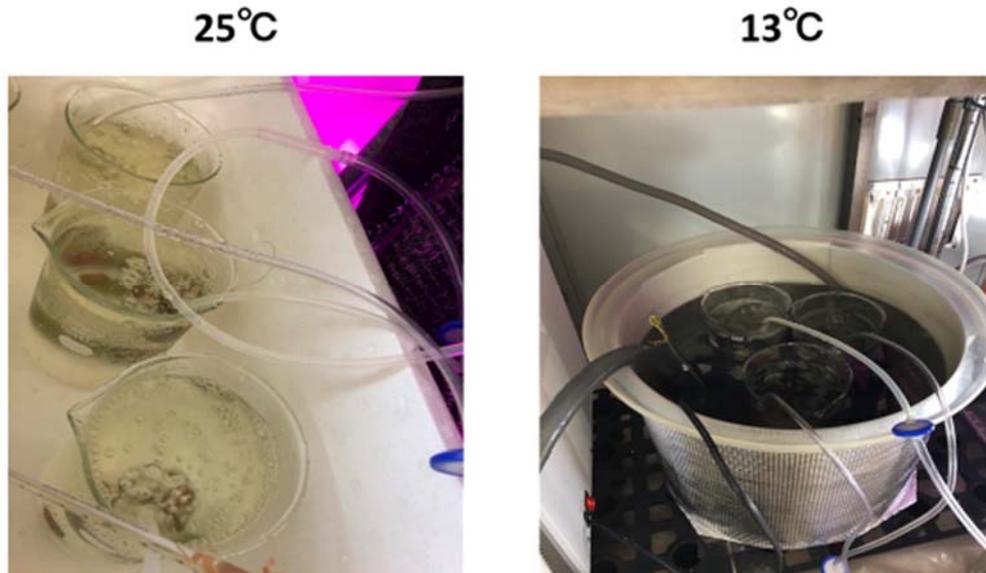


図3-21 第2回比較試験

実験開始から7日目で体積の計測を行ったところ、成長差はまだ見られなかったが、摂餌率を計測したところ、高水温と低水温で飼育したカキの摂餌率は約5倍の差が観察された(図3-22)。



図3-22 第2回比較試験における給餌

(左が給餌直後の様子。餌を全部食べ切ると、左のように無色透明な元の海水の色に戻る)

(3) 第3回比較試験

第2回比較試験では水温を一定温度にコントロールできたことで、摂餌率に顕著な差が表れたが、

成長差は確認できなかった。この原因として、牡蠣の糞や粘液排出による水質の悪化が考えられた。そこで、これまでの実験結果を参考に屋外での比較実験を再度実施した。

稚貝を9個体ずつ20L容器に收容、3セットずつ用意し、1日1回給餌後8時間止水し、その後かけ流しにする。止水中は20L容器内の水温が発電後海水20.0℃、深層水13.0℃に維持するためウォーターバスを使用し、30日間の実験を行った(図3-23)。



図 3-23 第 3 回成長実験

前年度の比較実験の結果から、屋外でも水温が比較的安定するようにウォーターバスを活用した。結果、発電後海水の平均水温は18.6℃、深層水は12.9℃で推移した(図3-24)。

実験を行った水温の変動

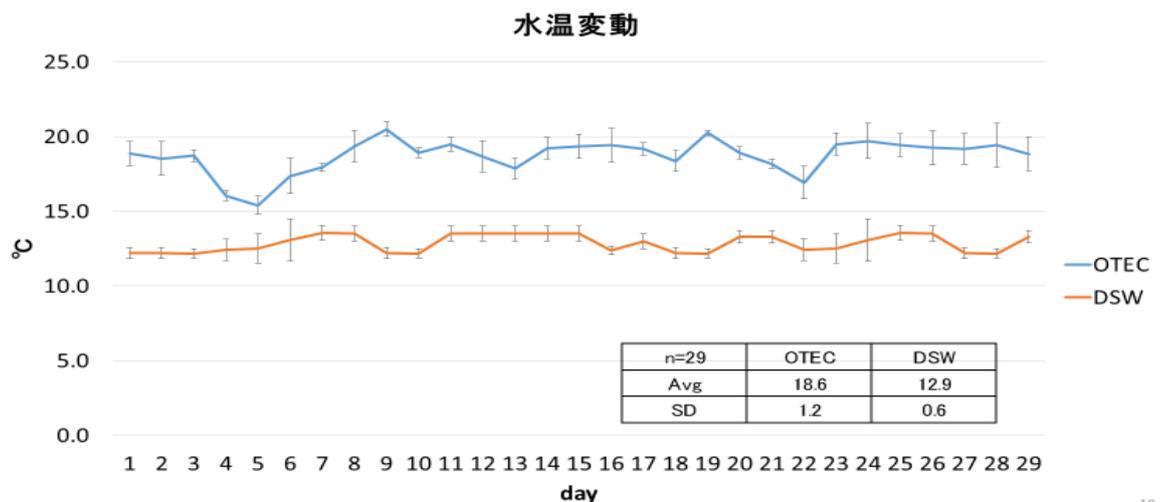
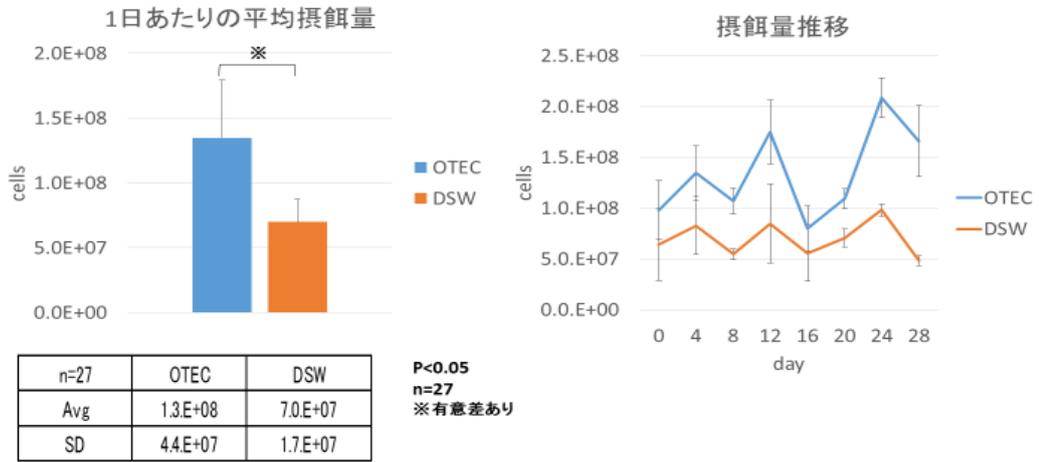


図 3-24 水温変動

摂餌量は第2回比較実験の結果と同様、水温の高い発電後海水で飼育した稚貝の方が、水温の低

い深層水で飼育した稚貝に比べ、摂餌量に約2倍の差が現れた。(図3-25)

【実験結果】摂餌量比較

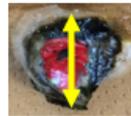


11

図 3-25 摂餌量比較

稚貝の殻を殻高、殻長、殻幅ごとに週一回測定し、成長値、成長速度を比較したところ、殻高で7倍、殻長で5倍の成長差が現れた。つまり、深層水よりも水温の高い発電後海水で飼育した稚貝の方が、より良好な成育を期待できることがわかった。(図3-26～図3-30)

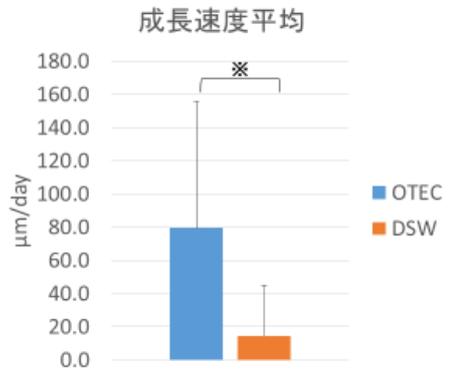
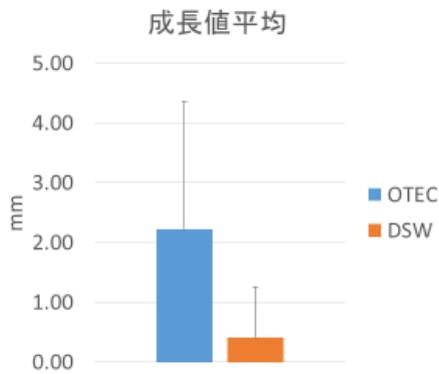
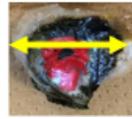
【実験結果】成長差 【殻高】



12

図 3-26 殻高 成長差

【実験結果】成長差【殻長】



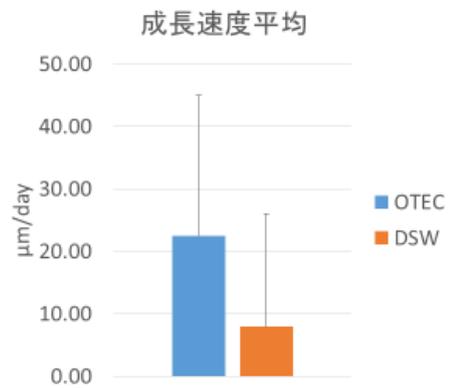
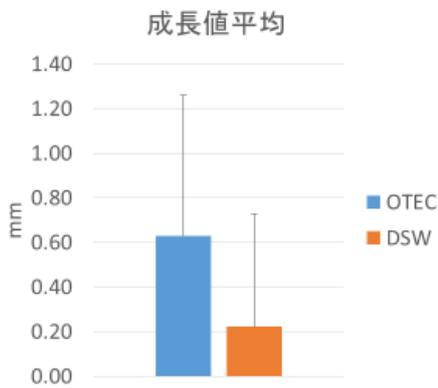
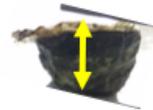
5倍

P<0.05
n=27
※有意差あり

13

図 3-27 殻長 成長差

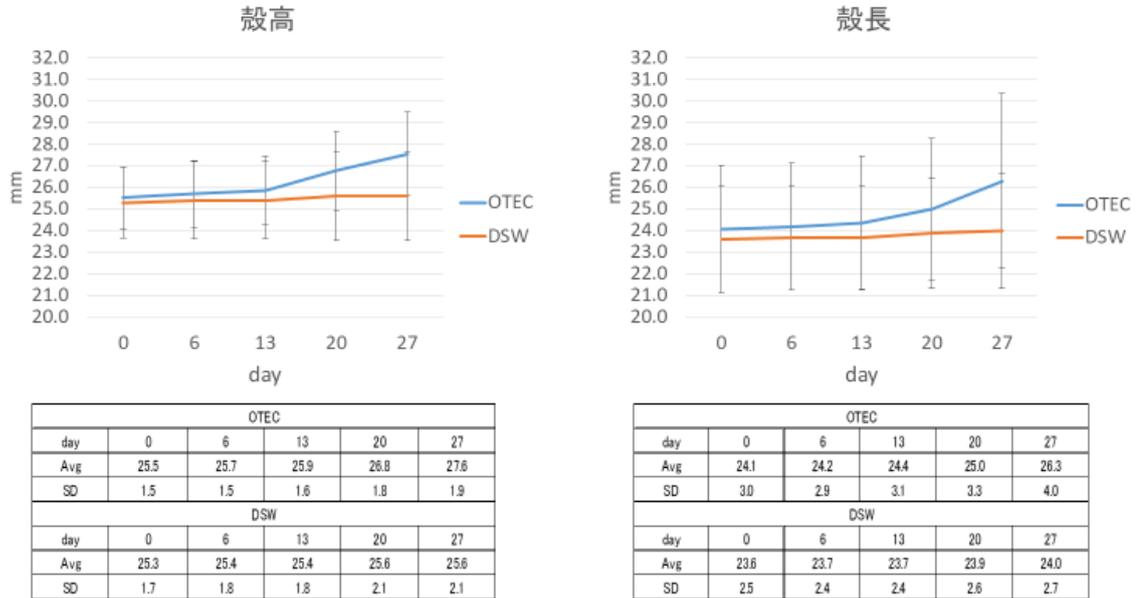
【実験結果】成長差【殻幅】



14

図 3-28 殻幅 成長差

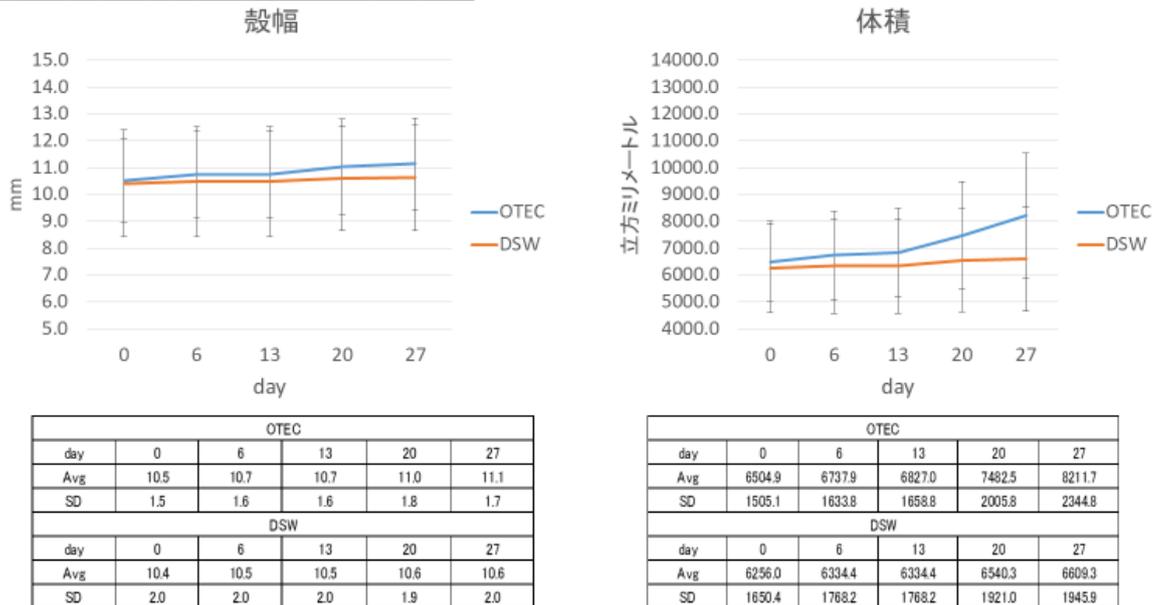
【実験結果】各部位の成長推移



17

図 3-29 殻高・殻長 成長推移

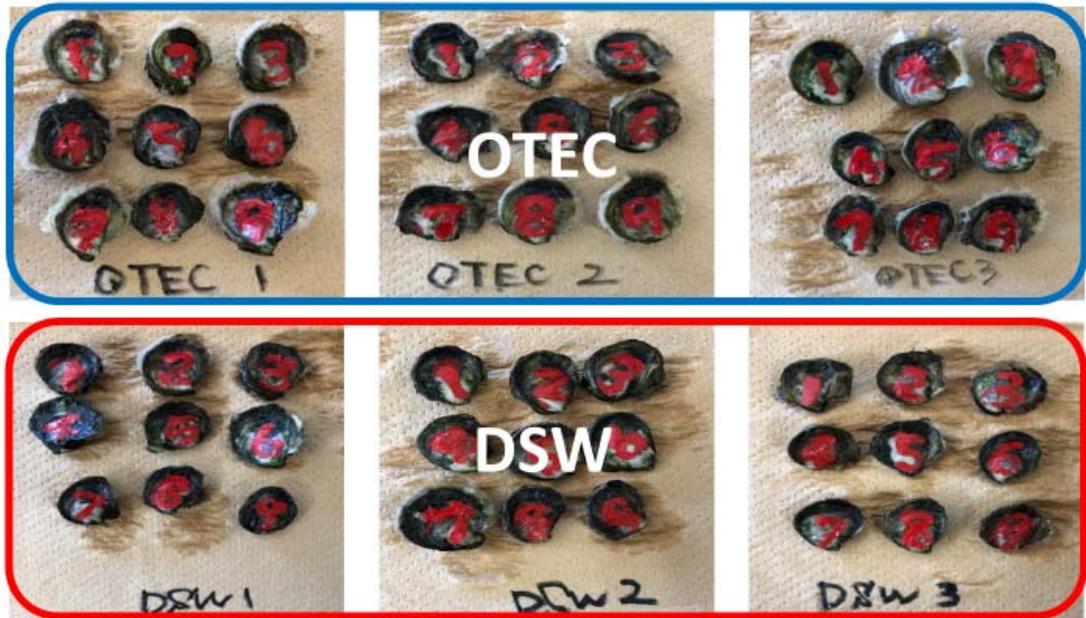
【実験結果】各部位の成長推移



18

図 3-30 殻幅・体積 成長推移

発電後海水で飼育した稚貝は深層水で飼育した稚貝に比べ、全体的に成長している個体数の割合が多い(図3-31)。



16

図 3-31 稚貝比較

3.4.2 発電使用後海水の利用によるエネルギー消費量低減効果の算定

カキを良好に育成するためには 20 ~ 22 の水温が好ましいとされている。ただし、その成長段階においては、親外の卵を成熟させるために 23 ~ 25 の水温を必要とする時期もあれば、生殖腺の発達を抑えグリコーゲンを蓄えさせるために 10 ~ 14 の水温が必要とする時期もある（図 3-32）。

年間を通して発電後深層水はカキの飼育に非常に有効であるが、カキの良好な育成を考えた場合、冬季の水温は育成適温より低いため水温を上げる必要がある。

発電後海水の温度特性とカキ養殖に必要な温度条件

<夏季> 深層海水 発電後深層海水	供給温度 14-16°C (19-22°C)	必要温度 20-22°C (23-25°C)
	<冬季> 深層海水 発電後深層海水	12-13°C 13-16°C

図 3-32 カキ養殖に必要な温度条件

消費エネルギー量比較

本事業の実証実験を通して、10月から2月にかけての各水温の推移を計測した結果、深層水（発電利用前）は比較的安定しているのに対し、発電後深層水は季節により変動する表層水温の影響を受けやすいことが分かった。また、カキの成育に関しては、夏季は良好な成育に必要な水温が確保できるが、冬季は発電後深層水に関しても加温する必要があることが考えられる。

そこで、水温 15 の発電後深層水をカキの成育において必要最低温度である 20 に 5 上昇させるために消費エネルギー量と電力コストを算定し比較した（図 3-33）。

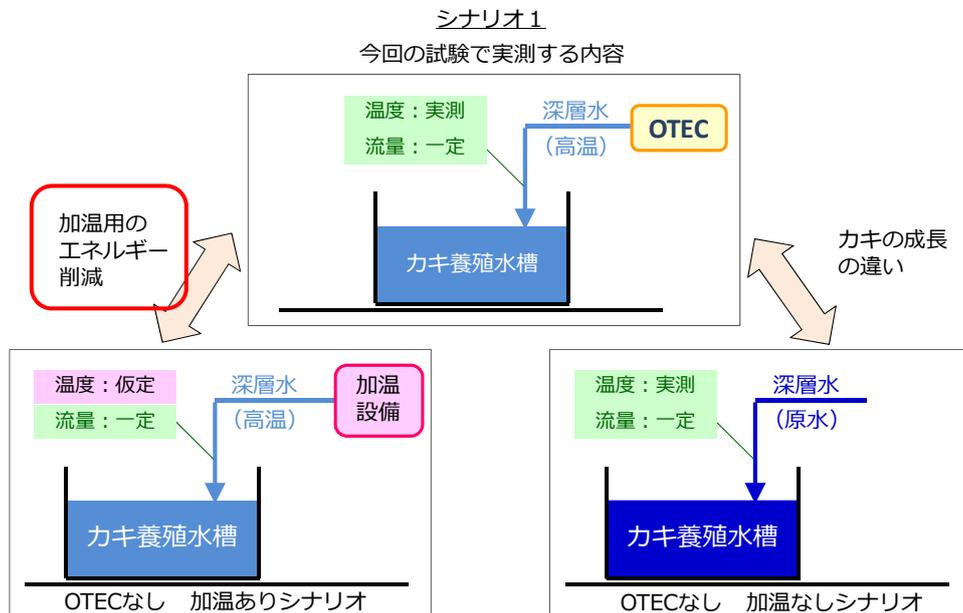


図 3-33 比較検討対象：加温用のエネルギー削減効果

流量 100L/h の深層水を電熱ヒーターを使って 15 から 20 に上昇させる場合の電力費用の算定を行う。200L 水槽の中に海水を貯め、200L 水槽への入水量と水槽からの出水量をおおよそ 100L/h となるように設定したことから加温時間を 2 時間と想定すると、569W の電力が必要となる（図 3-34）。

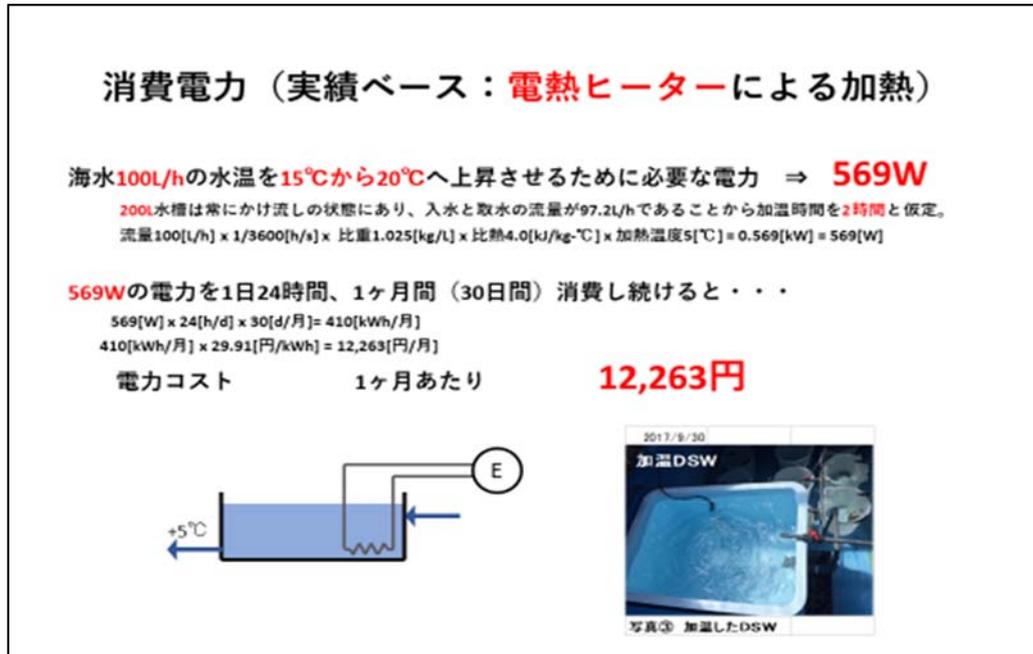


図 3-34 加温用のエネルギー量

3.4.3 経済性向上効果の算定

前項で得られたエネルギー消費量低減効果：569W を 1 日 24 時間、1 ヶ月間稼働させた場合の電力コストに換算すると 12,263 円となる。また、年間を通して発電後深層水と深層水原水の水温を 20 以上で維持しようとした場合、発電後深層水は冬季の間のみ、深層水原水は年間、加温する必要が想定される。電力コストを比較すると、発電後深層水を利用した場合と、深層水原水を利用した場合とでは約 3 倍もの差があると算定された（図 3-35）。



図 3-35 年間消費電力コストの差

深層水よりも水温の高い発電後深層水はカキの良好な成育に有効であり、年間を通した加温処理においても深層水より省エネ効果、経済的効果が期待できると考えられる。冬季の水温を上昇させる必要があるための消費エネルギー量・電力コストを如何に抑えていけるかが今後の課題であり、カキ養殖事業者ではヒートポンプや熱交換器を用いた検証を検討も行っている（図 3-36，図 3-37）¹。なお、商用化時（大規模化時）のエネルギー消費量削減方策については、次章に記す。

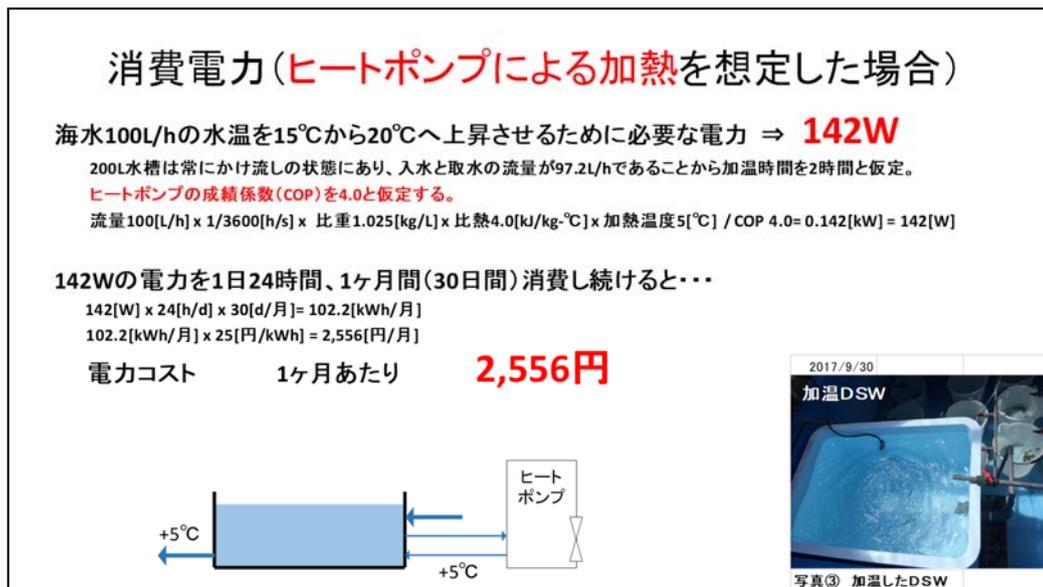


図 3-36 今後の検討課題：ヒートポンプによる加温検討

¹ 現状のカキ養殖試験場は、まだ実証試験用の小規模設備であるため、水温コントロールの容易性と設備コストを優先して、同試験場では電熱ヒーターを用いた加温を継続する。

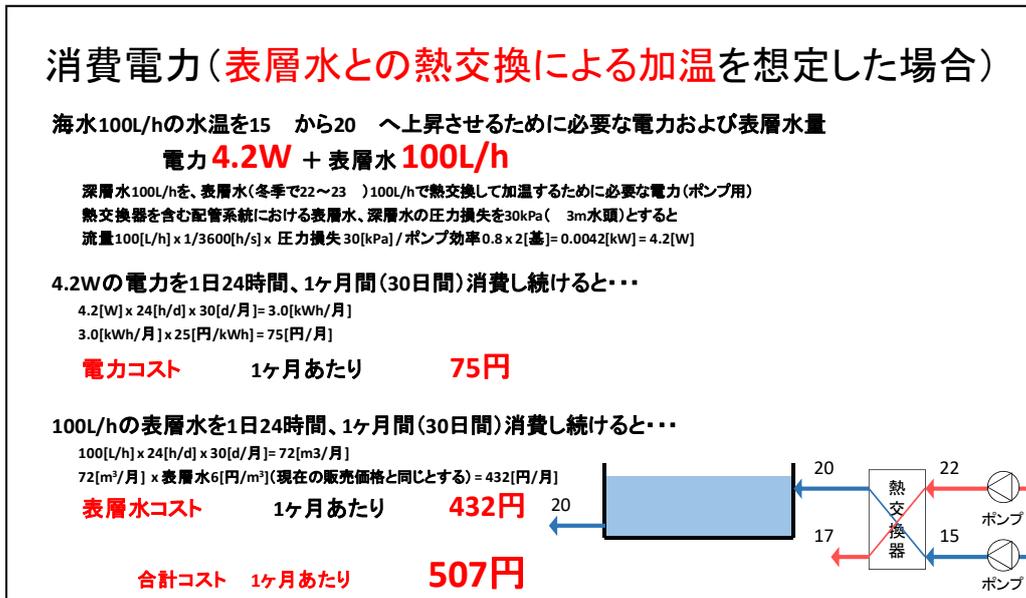


図 3-37 今後の検討課題：表層水との熱交換による加温検討

3.5 放水による環境負荷検討のための基礎的データ取得

本事業での検討項目となっている「実現性」「有効性」「課題等」(第1章参照)のうち、「課題等」については、検討評価委員会において深層水の放水時の環境影響について指摘があった。一方、環境影響については本事業内ですべてを扱うのが困難であるため、発電後海水の利用検討に向けた海洋深層水汲み上げ後の pH の挙動の実験や情報収集、養殖水のリサイクル利用のための水質調査(養殖水および周辺海水)等、基礎的なデータの取得を次のとおり行った。

(1) 深層水の pH 特性の把握

深層水は二酸化炭素を多く含むため、表層海水より pH が低いことが知られている。

一方、近年の気候変動による海洋酸性化の研究により、pH の低さが珊瑚や貝類の成長に悪影響を与える恐れが指摘されている。

一般的に深層水を大気と接した状態で放置した場合、深層水中の二酸化炭素は最終的に大気に抜けていくため、排水による大規模な環境影響は無いと考えられている。ただし、水産利用等の短期的な利用においては、pH が貝類等の成長に影響を及ぼすことも考えられる。これらの懸案に対して、取水後のタンクへの開放、発電利用、混合等による圧力変化や大気との接触等により、pH が水産への利用前にどの程度上昇するかを簡易的な実験により検討した(2017年度)。

また、深層水と同様に pH の低い海水を使用している沖電開発(株)サンゴ養殖場を訪問し、情報収集を行った。

いずれにおいても「pH は大気に接すると急速に回復するため、水産利用への影響はないと予想できる」という結果であったが、あくまで簡易的な実験とヒアリングであるため、大規模化の際には今回の結果をふまえた、より精密な検証が必要であると考えられる。本項目に関する詳細は、別添資料 ②-2 に示す。

(2) 放水中の栄養塩

深層水には海藻の養分となる栄養塩が多く含まれるため、一か所に大量に排出した場合、生態系を変化させる恐れも指摘されている（特に海藻類が優勢になることによる、珊瑚への影響や透明度の低下の恐れ）。したがって、栄養塩をなるべく利用してから排水する方が好ましいとされる。例えば、ハワイ州自然エネルギー研究センター内で事業が行われているアワビ養殖では、アワビの餌となる海藻を、深層水の栄養塩を利用して育てることにより、結果的に栄養塩を吸着している。

そこで、まず現状の各需要先の利用前後の海水中の栄養塩濃度等水質を測定するとともに、養殖による水質変化について定量的な試験評価を行った。結果の詳細は別添 ③-3 に示す。

2017 年度は、環境負荷となりうる水産養殖における残餌等の処理について、水産養殖後の海水をさらに他の養殖に用いて環境負荷を低減させる「水産 水産のカスケード利用」の可否について、海ぶどう養殖 カキ養殖のカスケード利用を例に検討を行ったが、養殖水の水質検査を基に検討を実施したところ、カキ養殖に適した植物プランクトンが得られないことが判明したため、検討委員会に諮り実証試験は実施しないこととした（詳細は前節参照）。

深層水の放水だけでなく養殖水も多くの栄養塩類を含むため、大規模化の際には放水場所の選定やその周辺の栄養塩濃度のシミュレーション（拡散により濃度が十分低下することの確認）、放水前の栄養塩吸着に関する検討等を行い、周辺環境に極力影響を与えない配慮を行うことが重要である。

4. 規模拡大時の効果に関する予測

4.1 検討の前提

4.1.1 検討対象（シミュレーション対象）

前章までの実証試験設備を用いた試験・検討を基に、規模拡大時の効果をシミュレーションにより算定する。シミュレーション対象として、発電後海水の複合利用について定量的な検討を行うため、具体的な海水需要（所要流量と温度）の想定が明らかとなっている久米島モデルのケースを用いた。

久米島モデルとは、海洋深層水をエネルギー・食糧・水供給へ複合利用することにより地域の自立を目指す、久米島町立案のモデル地域計画である。沖縄総合事務局経済産業部「平成29年度離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査」報告書（以下「H29沖総局調査」）から久米島モデルにおける深層水産業分野と売上規模の見込みを表4-1に、配置図を表4-1に参考として示す。

表 4-1 【参考】久米島モデルにおける深層水産業分野、需要量、利用形態等
出典：「平成29年度離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査」報告書

分野	検討対象 企業数	生産品目	深層水利用の概要	深層水 利用量(*1)	売上規模 (*1)	多段階 利用
水産養殖	7 (うち新規3)	車えび(夏季出荷) 海ぶどう 牡蠣 海藻出荷前洗浄 スジアオリ マナマコ シヤコ貝	冷温性を利用した水温調整によりこれまで生産出来なかった時期や品目の養殖が可能となり新しい市場が拓ける。富栄養性利用によるコスト削減や、清浄性利用による付加価値創出効果も大。 (注) シミュレーションに加えなかった生産品目(産業化のポテンシャルは高いが、企業ヒアリングにおいて事業スケジュールが明示されなかったもの)として、エゾアワビ、ワカメ、シラヒゲウニがある。	54 千 m ³ /日	34 億円/年	最終段
冷熱利用 農業	2 (うち新規1)	葉野菜(ホウレンソウ、水菜、クレソン等) 高機能性野菜	冷温を利用して葉野菜類を通年供給。沖縄では夏季は取引価格高。 土壌冷却方式1社、植物工場方式1社	—	3 億円/年	中間段 (冷熱利用のみ)
発電	1 (うち新規1)	電力	世界的に開発競争となっている1MW級発電設備を、実用・半実証プラントとして設置する計画がある。深層水地域のエネルギー自給に貢献する。	—	電力供給実証	最前段 (冷熱利用のみ)
製造業 その他	2 (うち新規1)	化粧品 ミネラルウォーター	産業拡大による、ブランド力強化・輸送コスト削減等による品目を拡大する。安全・安心による海外展開を推進する。	4 千 m ³ /日	31 億円/年	最終段
合計	12 (うち新規6)		多段階利用により効率的に利用できる。	58 千 m ³ /日	68 億円/年	—

(*1) 既存企業は、現在の利用量及び売上高を含む。

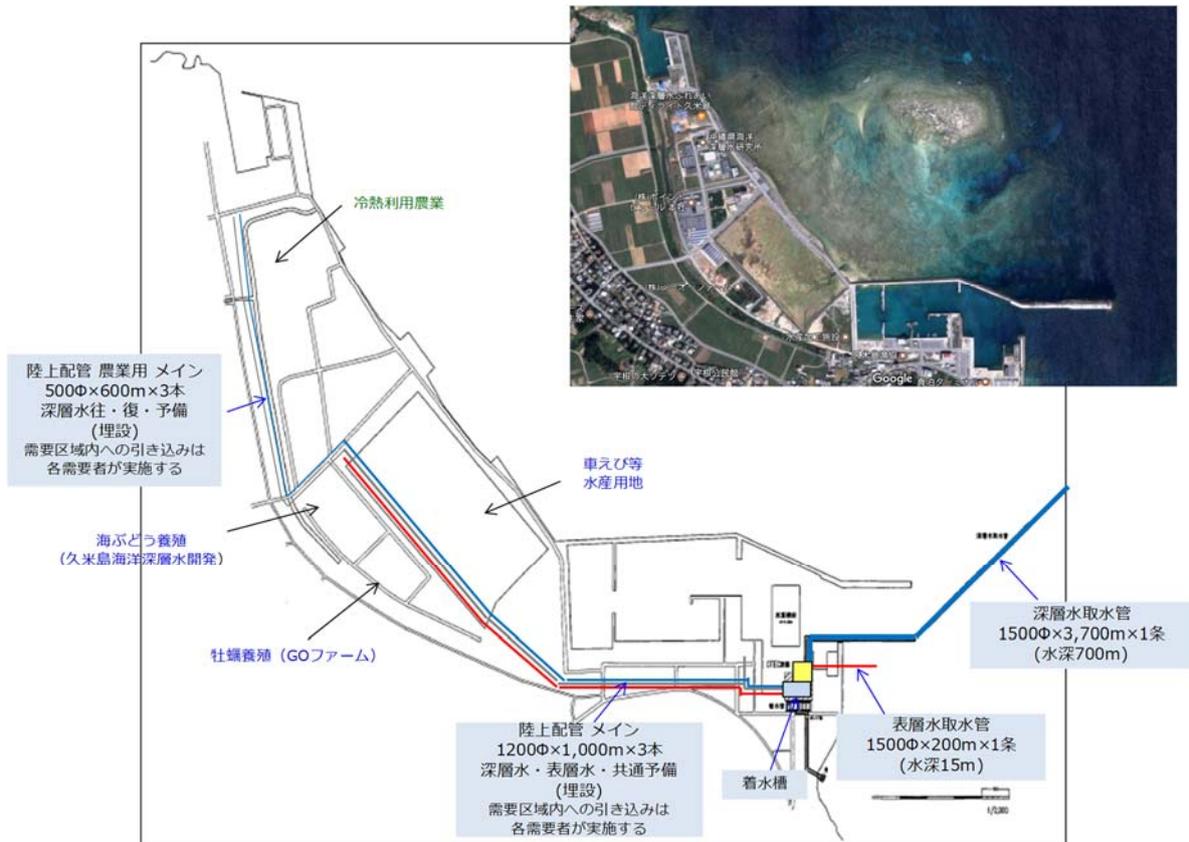


図 4-1 【参考】久米島モデルの配管配置図

出典:「平成 29 年度離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査」報告書

ただし、表 4-1 の大規模需要のうち、前節までの実証および関係者ヒアリングによって表層水・深層水需要の見通しの詳細が明らかになっている需要と、概略の見通しのみ得られている需要が存在する。前者は海ぶどうの陸上養殖および車えびの夏季における養殖、および発電が相当する。これは、海ぶどうの陸上養殖が既存産業の拡張であること、車えびの夏季における養殖（深層水利用）が研究所で実証済みであること、発電も沖縄県実証設備で 5 年間実証運転を続けていることから、実績に基づくデータがあり詳細の見通しが立てられるためである。そこで、まずシミュレーション対象とした久米島モデルの需要の中から海ぶどう、車えび、発電の 3 者のみに絞ったモデルで、詳細な検討を行った。次に、久米島モデルの全需要を対象に、概算であるものの包括的な検討を行った。

4.1.2 シミュレーション比較システム

発電後海水の高度利用の効果を算定するために、次の 3 つのシステムを比較した。

- ① 発電ありカスケードシステム: 発電を最上流とし、発電後海水の利用を行うカスケード利用システム

② 発電なしカスケードシステム: 発電は行わないが、冷熱利用→水産養殖のカスケード利用を行うシステム

③ カスケードなしシステム: カスケード利用を行わず、全需要に平行的に海水を供給するシステム

②③については、低温の深層水をそのまま使うことになるため、冷熱の総量のみを考えれば所要流量が減るメリットがある(図4-2)。

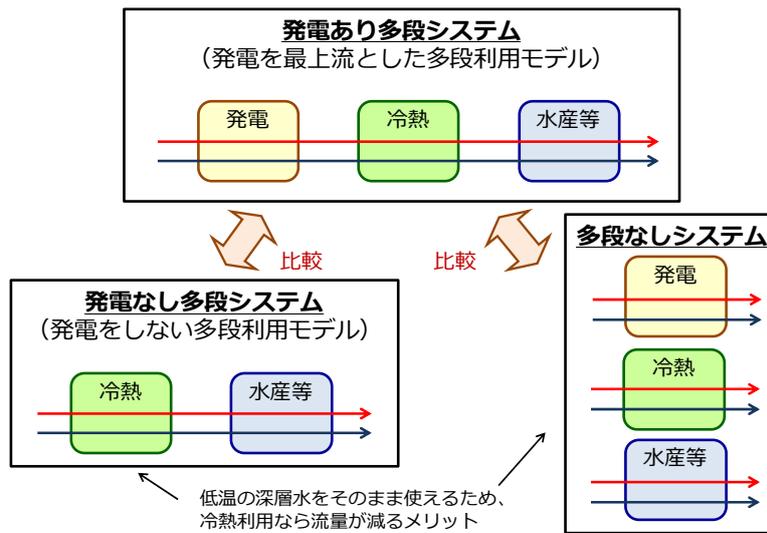


図 4-2 比較コンセプト

4.2 規模拡大時の海水取配水システムのコンセプト

前節で掲げた3システムについて、カスケード利用の有効性算定のための海水配管コンセプトを述べる。まず、最も単純な「カスケードなしシステム」について、各システムに共通するコンセプトとともに示し、次に発電なしカスケードシステム、発電ありカスケードシステムの順で示す。

4.2.1 カスケード利用なしシステム

表層水および深層水は、まず表層水原水貯水槽、深層水原水貯水槽にいったん貯留され、それぞれの需要に応じて水槽からポンプで圧送されるコンセプトとした(各システム共通)(図4-3)。

表層水および深層水は、自然流入により貯水槽に導かれる。このため、貯水槽の水位は、配管抵抗による圧力損失(最大流量時で23kPa)および取水管内外の密度の違いにより生じる静水頭(12kPa)の和の分だけ、海面より低くなる。この貯水槽から配水ポンプ(原水)により、各需要先に送水を行う。この際、複数の需要先に独立配管を行うのは非効率であるため、配水

主管を設けて主管 - 枝管方式で各需要への排水を行う。配水主管には、最低限の圧力を常に与えておくものとし、本検討ではその圧力を 30kPa (海面基準) とした。各需要先での使用の際に主管の圧力で不足する場合は、それぞれの需要先でブースターポンプを用いる。なお、配水主管の圧力は常時モニタリングされ、その圧力に応じて配水ポンプの運転台数制御および回転数制御 (一部) を行う。本制御方式は、ハワイ州自然エネルギー研究所 (Natural Energy Laboratory, Hawai'i Authority: NELHA) において行われているものと同様である (図 4-4)。

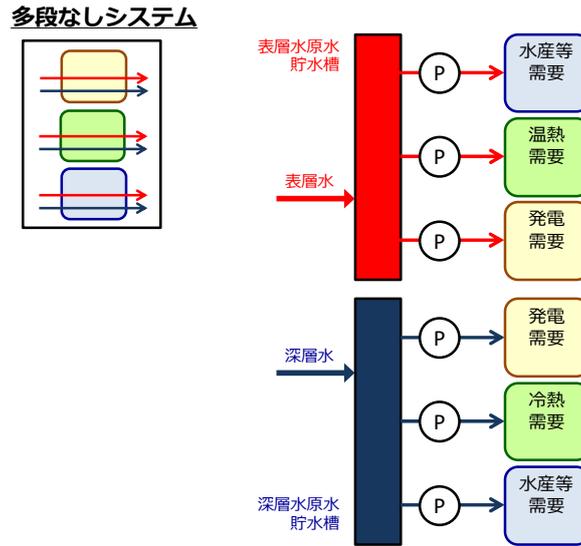


図 4-3 海水配管コンセプト(カスケードなしシステム)

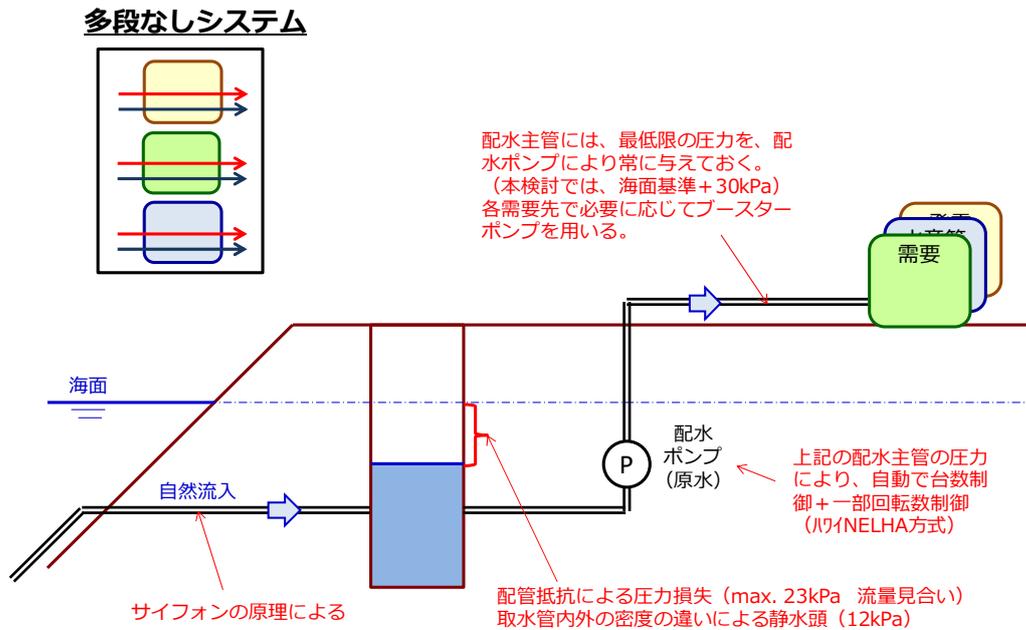


図 4-4 海水配管システム(カスケードなしシステム)

4.2.2 発電なしカスケード利用システム

発電なしカスケードシステムにおいても、表層水および深層水は、自然流入により貯水槽に導かれ、配水ポンプにより、各需要先に送水される。基本となるフローは、図 4-5 の中央部に示す、原水貯水槽 配水ポンプ 温/冷熱需要 中間貯水槽 配水ポンプ 水産等の需要(カスケード利用における2段目以降)、となる。中間貯水槽は、原水貯水槽と同じ開放型とするが、後述のオーバーシステムを考慮して水位は1mと設定する。

配水主管の圧力制御はカスケードなしシステムと同様であるが、本システムでは1段目需要(温/冷熱需要)と2段目需要(水産等需要)とで所要流量が必ずしも一致しないため、その対応も必要となる。本検討における対策を表 4-2 に示す。

表 4-2 流量のアンバランス対策

ケース	対策
1段目需要 > 2段目需要	このケースでは、送水管の圧力制御のみでは中間貯水槽(図4-6参照)がオーバーフローすることとなる。そこで、あらかじめオーバーフロー管を設け、中間水槽の水位の一定レベル(水位:海面上1m)を超えないようにする。
1段目需要 < 2段目需要	このケースでは、送水管の圧力制御のみでは中間貯水槽(図4-6参照)の水位が下がり続け、2段目需要への供給に支障をきたすこととなる。そこで、原水配管からの直接供給配管および制御弁を設け、中間貯水槽の水位が一定レベル(水位:海面下1m)を下回らないようにする。

発電なし多段システム
(発電をしない多段利用モデル)

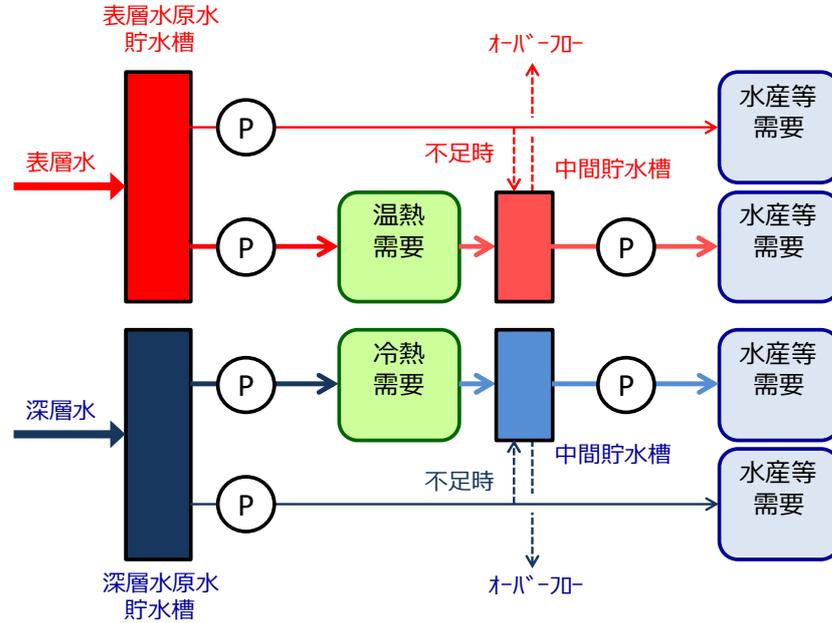
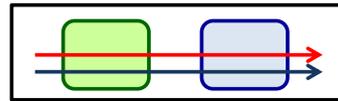


図 4-5 海水配管コンセプト(発電なしカスケードシステム)

発電なし多段システム
(発電をしない多段利用モデル)

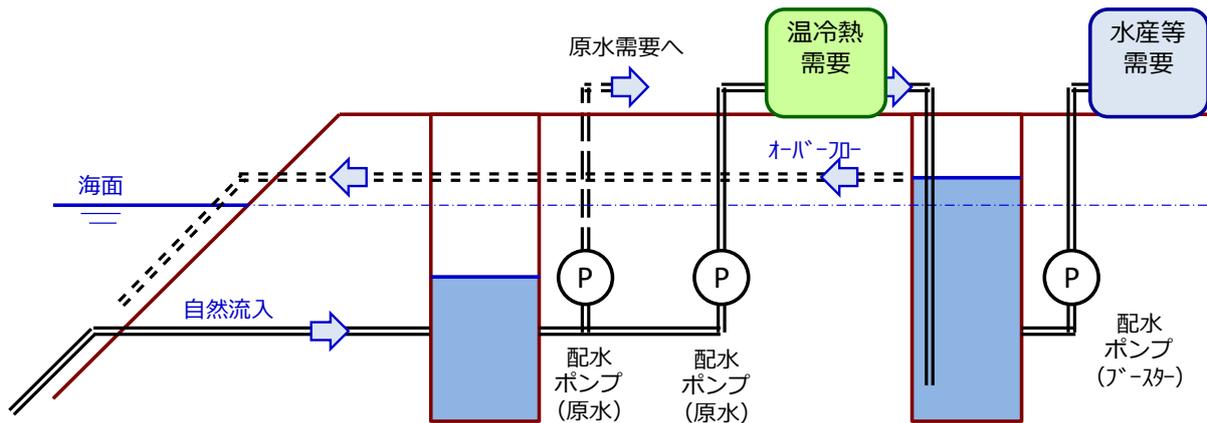
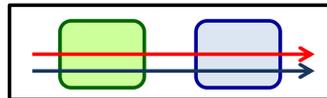


図 4-6 海水配管フロー(発電なしカスケードシステム)

4.2.3 発電ありカスケード利用システム

発電ありカスケード利用システムにおいても、他のシステムと同様に表層水および深層水は自然流入により貯水槽に導かれ、配水ポンプにより各需要先に送水される。基本となるフローは、図 4-7 の中央部に示す、原水貯水槽 配水ポンプ 発電需要 中間貯水槽 配水ポンプ 温/冷熱需要 中間貯水槽 配水ポンプ 水産等の需要（カスケード利用における 3 段目以降）、となる。

発電の需要は他の需要と比べて格段に大きいため、中間貯水槽は基本的にオーバーフローでの運用となるが、予備系統の意味合いも兼ねて、発電無しかスケードシステムと同様の直接供給管も設けておく。

なお、発電需要（OTEC）については、原水貯水槽から OTEC 施設に海水を汲み上げ、中間貯水槽に戻すまでの配水ポンプを所内動力の一部と見なす（図 4-8）。

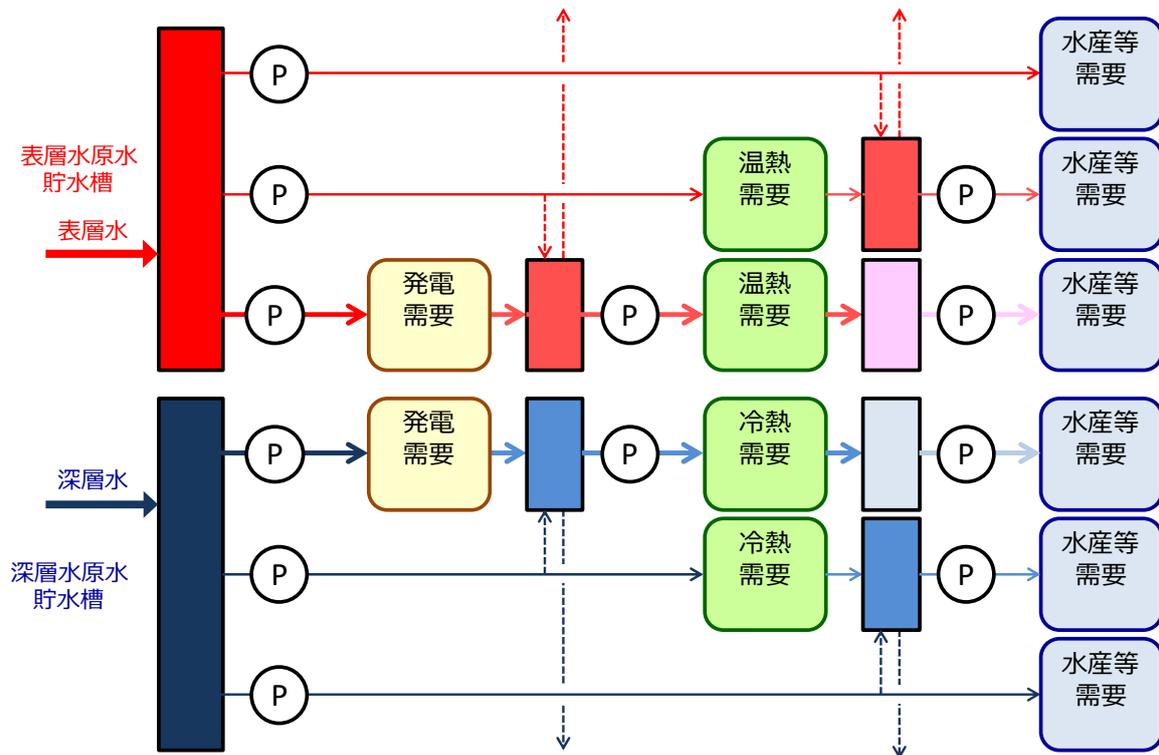


図 4-7 海水配管コンセプト(発電ありカスケードシステム)

発電ありカスケードシステム（発電を最上流とした多段利用モデル）

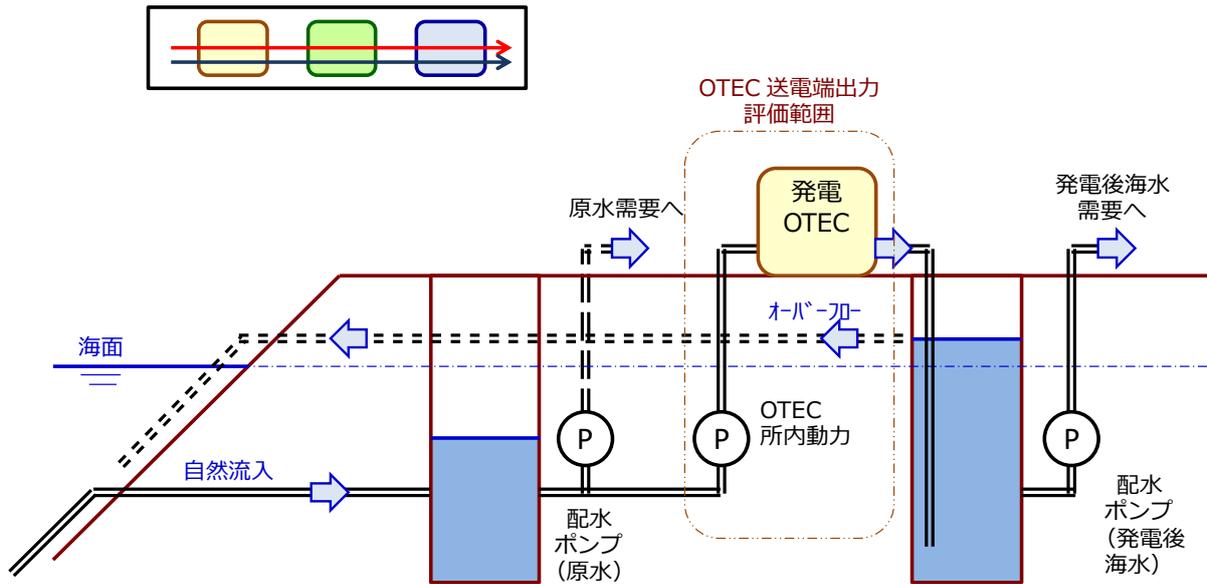


図 4-8 海水配管フロー（発電ありカスケードシステム）

4.3 海水取配水システムのエネルギー収支（発電 + 水産利用ケース）

H29 沖総局調査では、久米島モデルにおいて、実現確度の高い需要（新規および既存の拡張）として、車えび養殖(夏季出荷)、海ぶどう養殖、カキ養殖、海藻出荷前洗浄、スジアオノリ養殖、マナマコ養殖、シャコ貝養殖、葉野菜栽培（ホウレンソウ、水菜、ケルソ等）、高機能性野菜栽培、化粧品製造、ミネラルウォーター製造、海洋温度差発電(OTEC)を挙げている。このうち、下記に述べるとおり表層水および深層水の需要パターンが比較的はっきりしている「海洋温度差発電」「海ぶどう養殖」「車えび（活えびの夏季出荷）」を対象として、第一段階の詳細な検討を行った（2017 年度実施）。

4.3.1 海水需要の想定と海水流量算定

(1) 発電（海洋温度差発電(OTEC)）

深層水については、H29 沖総局調査で想定されている最大取水量である 180,000m³/d を取水し、後段で原水が必要な需要以外は発電に用いることとした。表層水については、OTEC において深層水：表層水の最適流量比の範囲（1:1.25～1:2 程度）のうち、表層水流量が最も少なくなる 1:1.25 を採用し、225,000m³/d を取水する。なお、表層水流量の比率を低く取る理由は、表層水流量比率を高く取ると深層水の出入り口温度差も大きくなり、後段での利用が難しくなるためである。

上記流量における月別の平均発電出力、前項に基づく所内電力、送電端出力を表 4-3 に示す。

また、この発電出力計算の前提となる表層水および深層水温度、および発電出力計算の出力となる発電後の表層水および深層水温度について、表 4-4 に示す。

表 4-3 OTEC の出力

		1月	2月	3月	4月	5月	6月
発電端		655	614	689	788	962	1171
自己消費	作動流体P	16	15	17	20	25	32
	表層水P	117	117	117	118	119	120
	深層水P	169	169	169	169	169	169
	補機等	30	30	30	30	30	30
	小計	333	332	334	337	344	351
送電端		322	282	355	451	618	820

		7月	8月	9月	10月	11月	12月
発電端		1286	1312	1260	1120	969	795
自己消費	作動流体P	36	37	35	30	26	20
	表層水P	120	120	120	120	119	118
	深層水P	169	169	169	169	169	169
	補機等	30	30	30	30	30	30
	小計	355	356	354	349	345	337
送電端		931	956	906	771	624	458

(平均送電端出力:624 kW, 227,891 kWh)

表 4-4 OTEC における使用前後の海水温

		1月	2月	3月	4月	5月	6月
表層水	原水	22.46	22.18	22.71	23.79	25.43	27.14
表層水	OTEC後	19.15	18.92	19.35	20.24	21.60	23.03
深層水	OTEC後	10.72	10.66	10.77	11.01	11.35	11.68
深層水	原水	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70

		7月	8月	9月	10月	11月	12月
表層水	原水	28.08	28.29	27.87	26.72	25.40	23.86
表層水	OTEC後	23.82	24.00	23.64	22.68	21.57	20.30
深層水	OTEC後	11.86	11.90	11.82	11.60	11.34	11.02
深層水	原水	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70

(2)海ぶどう養殖

海ぶどう養殖は、2014年まで市場が拡大し続けてきたが、2015、2016年は不作のため生産量が落ちている。十年前と比較すると生産量は10倍に膨れ上がっているが販売単価は下落しておらず、安定的な市場状況となっている(図4-9)

【現状】

深層水と表層水を混合した20～24℃程度の海水を地下タンクに貯留し、養殖槽に注入している。

養殖槽内の適温は25℃程度である。

【利用目的】

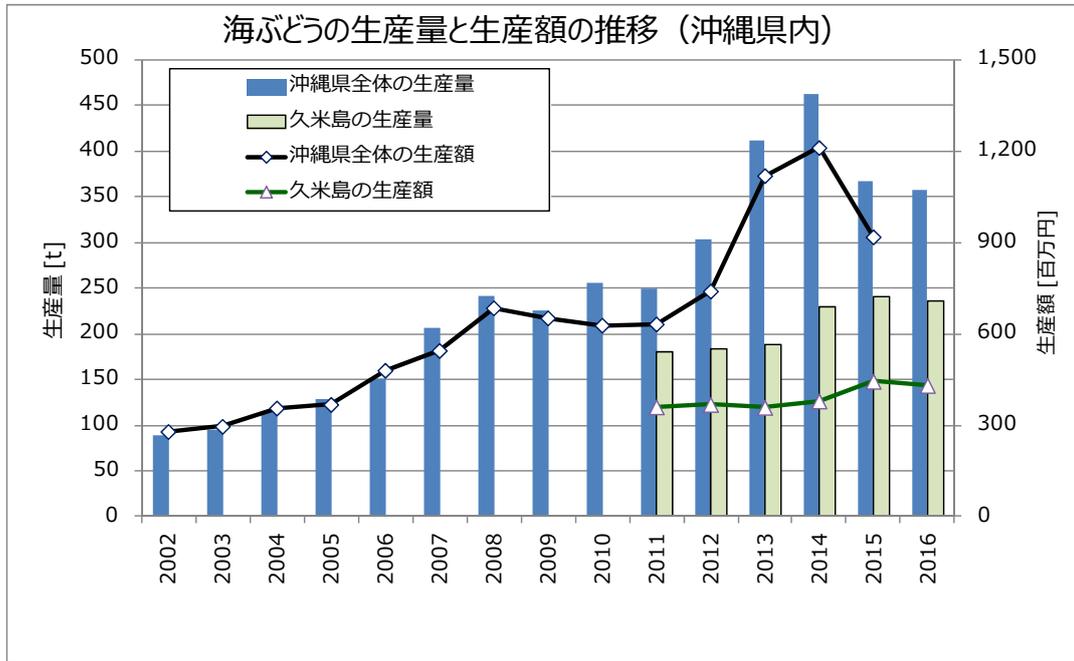
水温調整

【制約】

海ぶどうの生育適温は25℃である。深層水に多く含まれるケイ素分は雑藻である珪藻類繁茂の原因となるため、深層水の比率を増やしたくないという要望がある。

【本検討の計算条件】

- 地下タンクのため、日射負荷はほぼ無いので、無視する。
- 多段階利用システムでは、発電後の表層水を最優先で用い、夏季に温度が下がりきらない場合は、発電後深層水を混合する。
- 冬季は、表層水原水を用いて水温を確保する。



出典：沖縄県全体 : 2018.3 沖縄県農林水産総務課「沖縄の農林水産業」p.54をグラフ化
 久米島町 : 2017.11 久米島町「久米島町 産業の概況」p.25をグラフ化

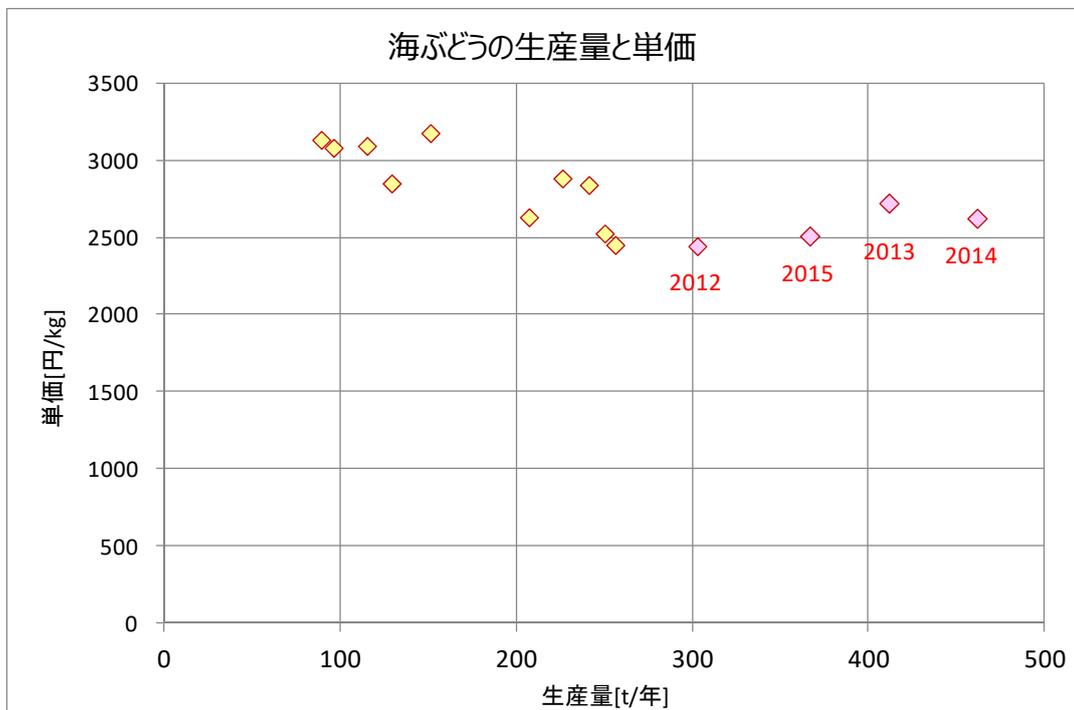


図 4-9 海ぶどうの県内市況（生産量および生産額）

(3)車えび養殖

現在、車えび養殖において深層水を使用しているのは、種苗生産段階（沖縄県車えび漁業組合 海洋深層水車えび種苗センター）においてのみである。深層水の使用により表層水由来のウィルスの混入を防ぐとともに、夏季に水温を下げて種苗生産を可能とすることにより、沖縄県全体の養殖場に車えび種苗を供給している。

成えび養殖段階では、5月中旬～11月初旬まで沖縄では養殖池の水温が高くなりすぎるため、養殖が不可能となる。夏季でも深層水による水温コントロールを行えば養殖は可能であるが、大量の深層水が必要となる。一方夏季の販売単価は高価であるので（図4-10）、本検討でシミュレーション対象とした久米島モデルでは、規模拡大時の深層水需要として、夏えび（活えびの夏季出荷）の養殖を挙げている。

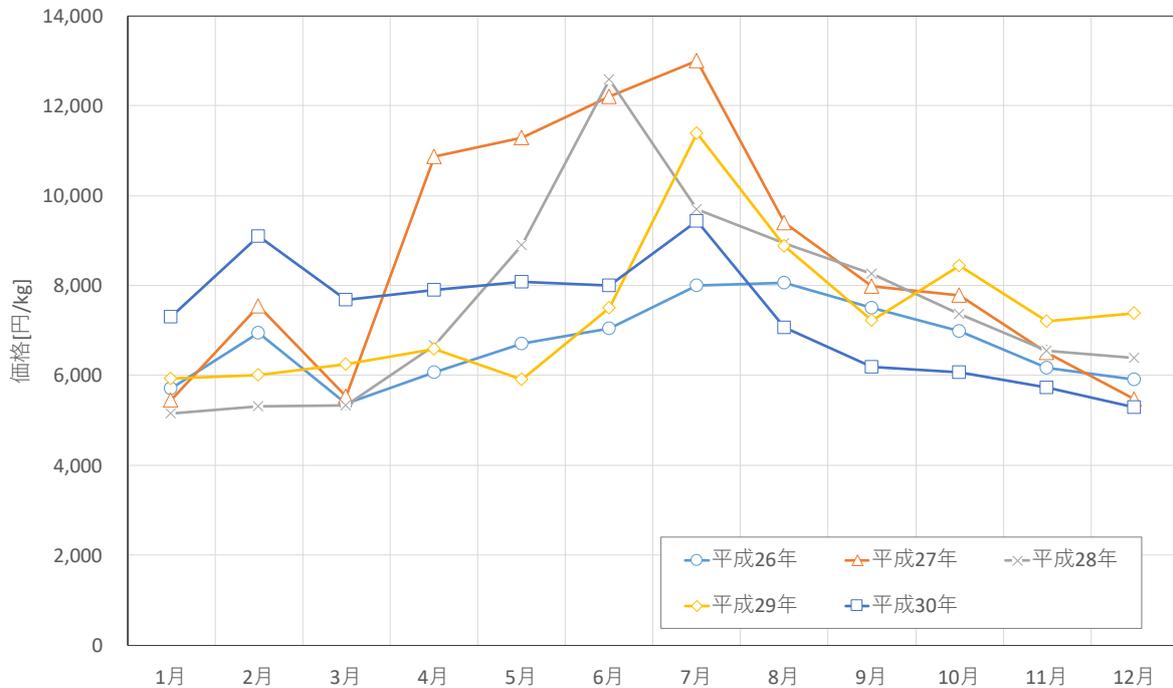


図 4-10 車えび(活えび)の県内市況

【現状】

車えび種苗生産用に深層水を使用する他、試験的に成えびへの利用も行っている。成えびの場合、夏季は養殖池に 11℃の深層水をそのまま注入している。

【利用目的】

水温調整(22～23℃)が主目的である。特に昼間の日射による熱負荷の除熱への使用量が多い。

【制約】車えびの生育適温は 22～23℃

車えびは珪藻類で濁った水を好むため、換水率を上げて水の透明度を上げてはいけない(温度が上がった深層水を大量に注入する方策は不可)。

【本検討の計算条件】

- 計 7ha の養殖池を想定。養殖期間は 5 月～11 月とする(5,11 月は 50% 負荷)
- 日射負荷は、NEDO データベース¹による
- 換水率: 1/4 ± 20% の範囲で水温コントロール(特に日射の熱負荷除熱)が出来るよう深層水(原水・発電後)、表層水(原水・発電後)を供給する。 発電後海水を優先して使用する。

4.3.2 検討結果

(1) 海水フロー

海水流量の算定にあたって、そのベースとなる海水フローを図 4-11 のとおり設定した。海ぶどう養殖および車えび養殖に用いられる海水は、基本的に発電後の海水を用いる。

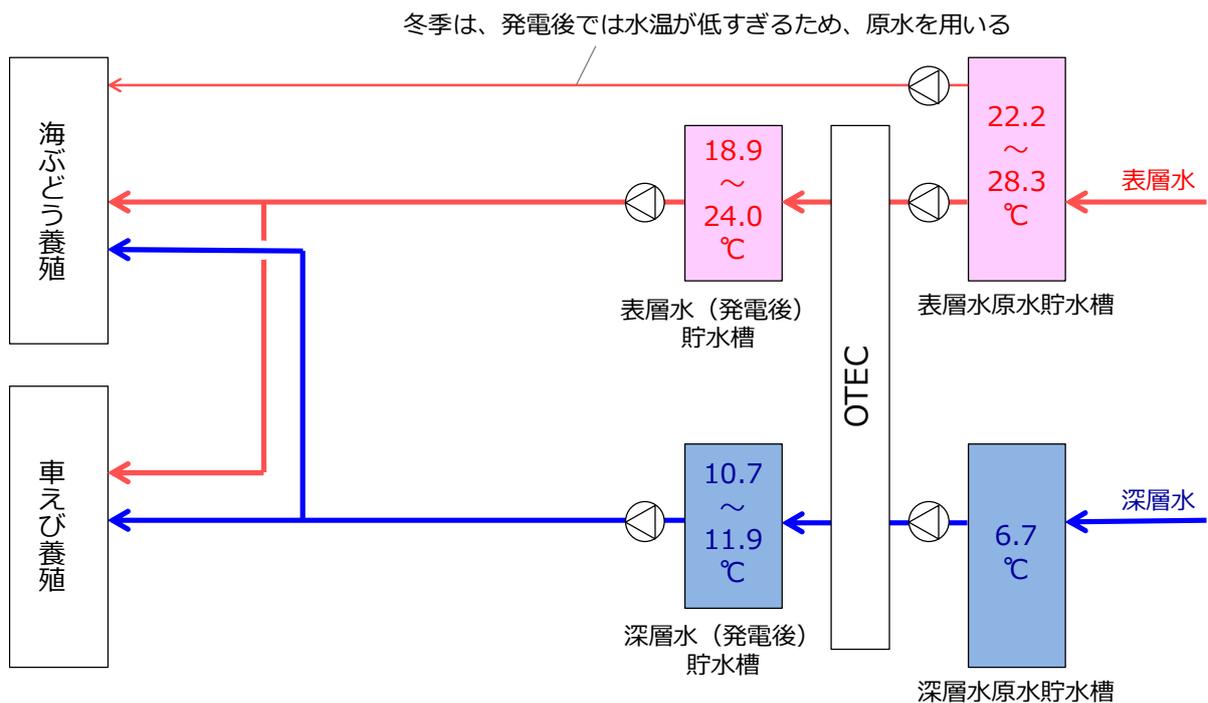


図 4-11 海水フロー(発電+水産養殖)

¹ 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO「日射に関するデータベース」
<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>, 平成 30 年 3 月閲覧

(2) 海水流量の算定

海水使用量の検討においては表 4-5 の式を用いた。

各ケースにおける、海ぶどう養殖、車えび養殖への海水流量を表 4-6 に示す。ただし、本検討では発電以外の需要がいずれも水産養殖であり、純粋な温冷熱需要（水質に変化を及ぼさない需要）がないため、3 段利用は行わない。

また、表 4-6 の海ぶどう養殖、車えび養殖をグラフ化したものを、それぞれ図 4-12、図 4-13 に示す。同グラフ上の各月において、左側のバーが発電後海水を利用しないパラレル利用ケース（以降「ケース 1」）、右側のバーが発電後海水を利用するカスケード利用ケース（以降「ケース 2」）である。

表 4-5 本検討に用いた計算式

計算内容	計算式
<p>【個々の需要への月別の表層水・深層水流量】</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 基本的には各需要の所要温度により混合比を算定 ※ 需要に水質面から表層水or深層水の指定がある場合（牡蠣や化粧品、食料品）は、熱交換を設定 	<p>所要流量 Q_{req}: 既知 所要水温 T_{req}: 既知</p> $Q_{DSW} = Q_{req} \times (T_{SSW} - T_{req}) / (T_{SSW} - T_{DSW})$ $Q_{SSW} = Q_{req} \times (T_{req} - T_{DSW}) / (T_{SSW} - T_{DSW})$ <p>where Q:流量、T:水温 添え字 req: 所要値 SSW: 表層水、DSW: 深層水</p>
<p>【取配水ポンプの消費電力：配管圧力損失】</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 一般的な上下水道や工業プラント設計用の式を用いる 	<ul style="list-style-type: none"> ・円管の圧力損失式：ダルシー・ワイスバツハ式 ・管摩擦係数：コールブルック式
<p>【取配水ポンプの消費電力】</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 上記で計算した圧力損失と流量に、一般的なポンプ効率・電動機効率を考慮に入れて計算する。 	$E_p = Q \times \Delta P / (\eta_p \times \eta_m)$ <p>Where ΔP: 圧力損失、η_p: ポンプ効率、η_m: 電動機効率</p>
<p>【配管での温度損失】</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 一般的な伝熱係数と温度変化計算式を用いて、損失レベルを概算・把握しておく。 	$dT/dt = (T_{out} - T) / (c \times \rho \times V \times R_{th})$ <p>※管内流速と配管長により到達までの経過時間を決定して計算する。</p>

表 4-6 各ケースにおける、海ぶどう養殖、車えび養殖への海水流量：ケース 1 発電後海水利用なしケース

■[ケース1] 発電後海水利用なしケースの海水使用量

(1) 海ぶどう
日間平均
海水使用量

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
表層水	原水	5,000	5,000	5,000	4,769	4,351	3,987	3,812	3,775	3,850	4,071	4,358	4,749	1,603,650
表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	原水	0	0	0	231	649	1,013	1,188	1,225	1,150	929	642	251	221,350
供給水量合計(日間平均)		5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	1,825,000

(2) 車えび
日間平均
海水使用量

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
表層水	原水	0	0	0	0	4,007	6,174	2,868	4,027	5,961	9,203	6,798	0	1,187,463
表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	原水	0	0	0	0	9,993	21,826	25,132	23,973	22,039	18,797	7,202	0	3,922,537
供給水量合計(日間平均)		0	0	0	0	14,000	28,000	28,000	28,000	28,000	28,000	14,000	0	5,110,000

(3) 発電出力

(深層水：180,000日間平均、表層水225,000日間平均から、上記の原水使用分を差し引き)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均年間送電量
発電用	流量	220,000	220,000	220,000	220,231	216,642	214,838	218,320	217,198	215,189	211,726	213,843	220,251	579 kW
	流量比	97.8%	97.8%	97.8%	97.9%	96.3%	95.5%	97.0%	96.5%	95.6%	94.1%	95.0%	97.9%	
発電用	流量	180,000	180,000	180,000	179,769	169,358	157,162	153,680	154,802	156,811	160,274	172,157	179,749	平均年間送電量
	流量比	100.0%	100.0%	100.0%	99.9%	94.1%	87.3%	85.4%	86.0%	87.1%	89.0%	95.6%	99.9%	
発電端		648	607	681	779	916	1070	1172	1197	1151	1026	924	786	
自己消費	作動流体P	16	15	17	20	24	29	32	33	32	28	24	20	
	表層水P	117	117	117	117	116	115	116	116	115	113	114	117	
	深層水P	169	169	169	169	159	148	144	145	147	150	162	169	
	補機等	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	
	小計	332	332	335	339	333	326	329	331	332	330	340	347	
送電端		315	275	346	440	583	744	843	865	819	696	584	439	

表 4-6 各ケースにおける、海ぶどう養殖、車えび養殖への海水流量 (Cont'd): ケース 2 発電後海水利用ありケース

■[ケース2] 発電後海水利用ありケースの海水使用量

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]	
(1) 海ぶどう 日間平均 海水使用量 [m3/d]	表層水	原水	5,000	5,000	5,000	3,888	1,829	0	0	0	399	1,864	3,793	814,363	
	表層水	OTEC後	0	0	0	1,112	3,171	4,987	4,656	4,587	4,727	4,601	3,136	1,207	978,937
	深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	13	344	413	273	0	0	0	31,699
	深層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	供給水量合計(日間平均)		5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	1,825,000
(2) 車えび 日間平均 海水使用量 [m3/d]	表層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	表層水	OTEC後	0	0	0	0	976	0	0	0	4,244	6,075	0	343,556	
	深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	深層水	OTEC後	0	0	0	0	13,024	29,293	36,212	33,818	29,695	23,756	7,925	0	5,284,085
	深層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	供給水量合計(日間平均)		0	0	0	0	14,000	29,293	36,212	33,818	29,695	28,000	14,000	0	5,627,641

(3) 発電出力

(深層水: 180,000日間平均, 表層水225,000日間平均から、上記の原水使用分を差し引き)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均	
発電用	流量	220,000	220,000	220,000	221,112	223,171	225,000	225,000	225,000	225,000	224,601	223,136	221,207		
	流量比	97.8%	97.8%	97.8%	98.3%	99.2%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	99.8%	99.2%	98.3%		
発電用	流量	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000		
	流量比	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%		
平均出力 [kW]	発電端	655	614	689	788	962	1171	1286	1312	1260	1120	969	795		
	自己消費	作動流体P	16	15	17	20	26	32	36	37	35	31	26	20	
		表層水P	117	117	117	118	119	120	120	120	120	120	119	118	
		深層水P	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	
		補機等	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	
		小計	333	332	336	340	348	356	361	363	362	358	354	348	
送電端	322	282	353	448	614	815	925	949	898	762	615	447	619 kW		
													年間送電量	5,423,034 kWh/y	

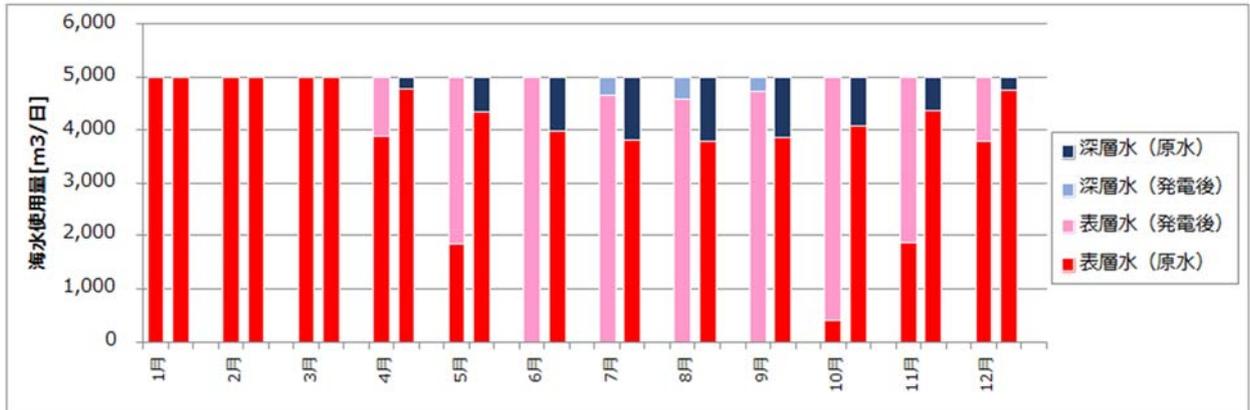


図 4-12 海ぶどう養殖における海水使用量推定結果
 (右:【ケース1】発電後海水利用なし, 左:【ケース2】発電後海水利用あり)

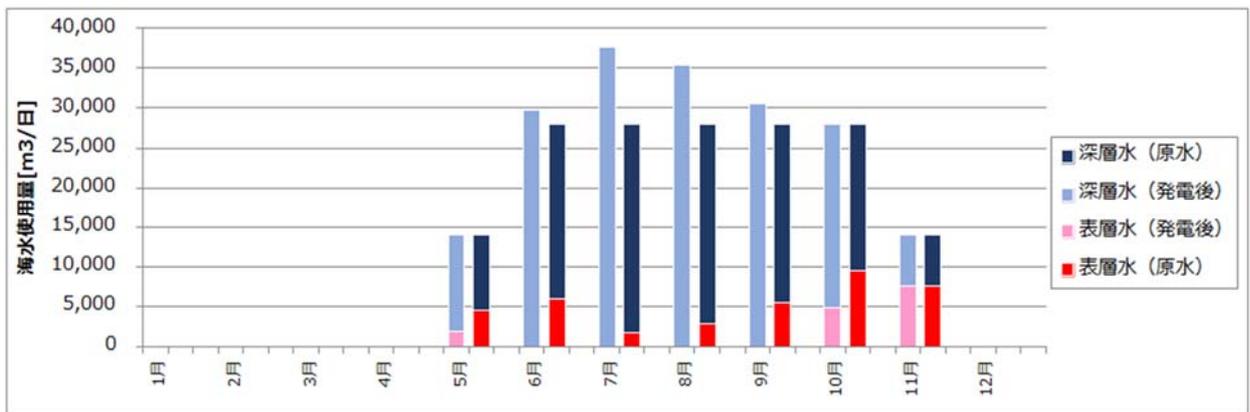


図 4-13 車えび(夏えび)養殖における海水使用量推定結果
 (右:【ケース1】発電後海水利用なし, 左:【ケース2】発電後海水利用あり)

これらの流量に基づいて、エネルギー収支を算定し、比較した結果(ケース2を基準に、ケース1および参考として発電なしケースのエネルギー損失を示したもの)を表 4-7 および図 4-14 に示す。

表 4-7 エネルギー収支の比較まとめ(ケース2 vs ケース1 および参考ケース)

項目	単位	【ケース2】 発電後利用あり	【ケース1】 発電後利用なし	【参考】 発電なし
発電分				
OTEC発電(発電端)	kWh/年	8,483,330	7,998,858	0
電力消費分				
OTEC所内電力	kWh/年	▲ 3,013,953	▲ 2,871,243	0
車えび養殖配水ポンプ	kWh/年	▲ 44,899	▲ 143,704	▲ 67,054
海ぶどう養殖配水ポンプ	kWh/年	▲ 24,659	▲ 39,742	▲ 12,367
電力収支	kWh/年	5,399,819	4,944,169	-79,421
多段利用ケースとの差	kWh/年	-	▲ 455,650	▲ 5,479,239

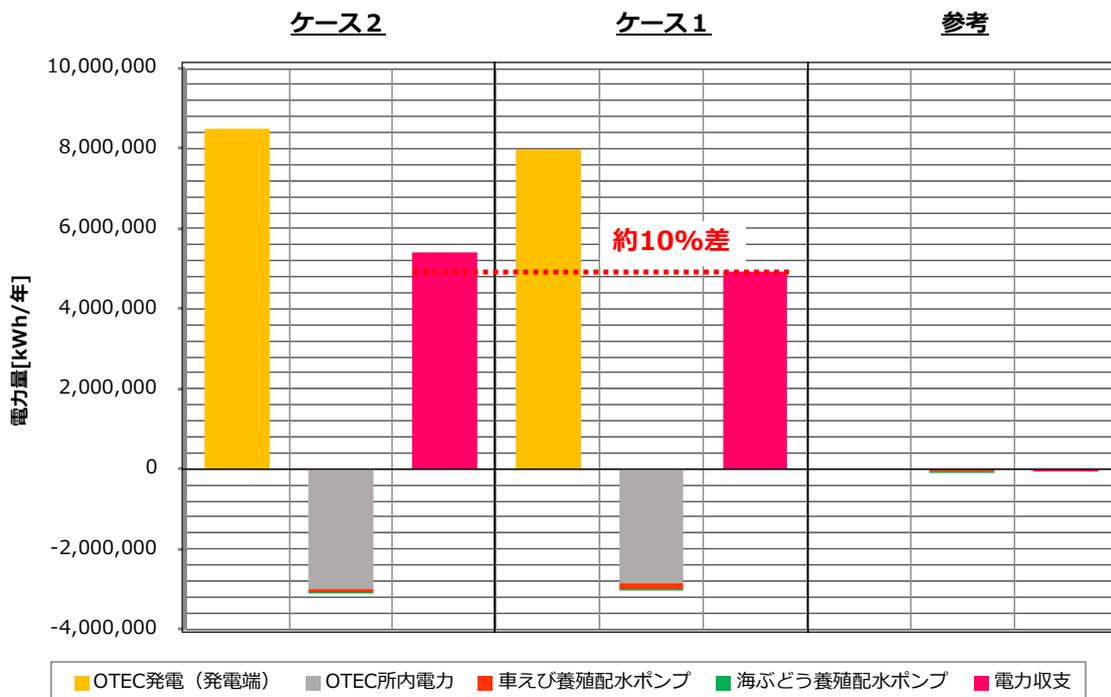


図 4-14 各ケースのエネルギー収支比較 (ケース2 vs ケース1 および参考ケース)

カスケード利用ケースに比べ、カスケードなしケースでは 455,650[kWh/年]の電力損失、発電なしカスケードありケースでは 5,479,239[kWh/年]の電力損失となる。

電力単価を 20 円/kWh として金額換算すると、カスケード利用ケースに対してカスケードなしケースでは年間 9,113 千円の損失、発電なしカスケードありケースでは年間 109,585 千円の損失となる。

4.4 海水取配水システムのエネルギー収支の評価（発電 + 水産利用 + 農業 + 地域冷房ケース）

2017年度の検討（前節）では、水産養殖分野の海水需要（海ぶどう養殖、車えび養殖）を発電後海水利用先に想定したが、2018年度はこれに加えて冷熱のみを利用する需要として「農業（ハウレンソウ生産拡大）」と「空調（地域冷房）」を含めた。両需要は、水産養殖に比べて低い温度帯を利用する点、また、利用によって水質を変えない点が水産養殖の使用法と大きく異なるため、検討評価の範囲が増えることを企図した追加である。

4.4.1 海水需要の想定と海水流量算定

(1) 農業（葉野菜生産）

海洋深層水の冷熱を利用した農業については、現在研究所隣接地において、敷地面積 10 アールの「実用化ハウス」で実証が行われている。栽培品目は、ハウレンソウ、クレソン、水菜等の葉野菜であり、沖縄県内のスーパー等に出荷されている。

そこで、農業需要については、本「実用化ハウス」を 100 棟展開した場合を想定した。各棟への海水配管設備については、現状の実用化ハウスの仕様を基に、図 4-15、図 4-16 および表 4-8 のとおり設定した。

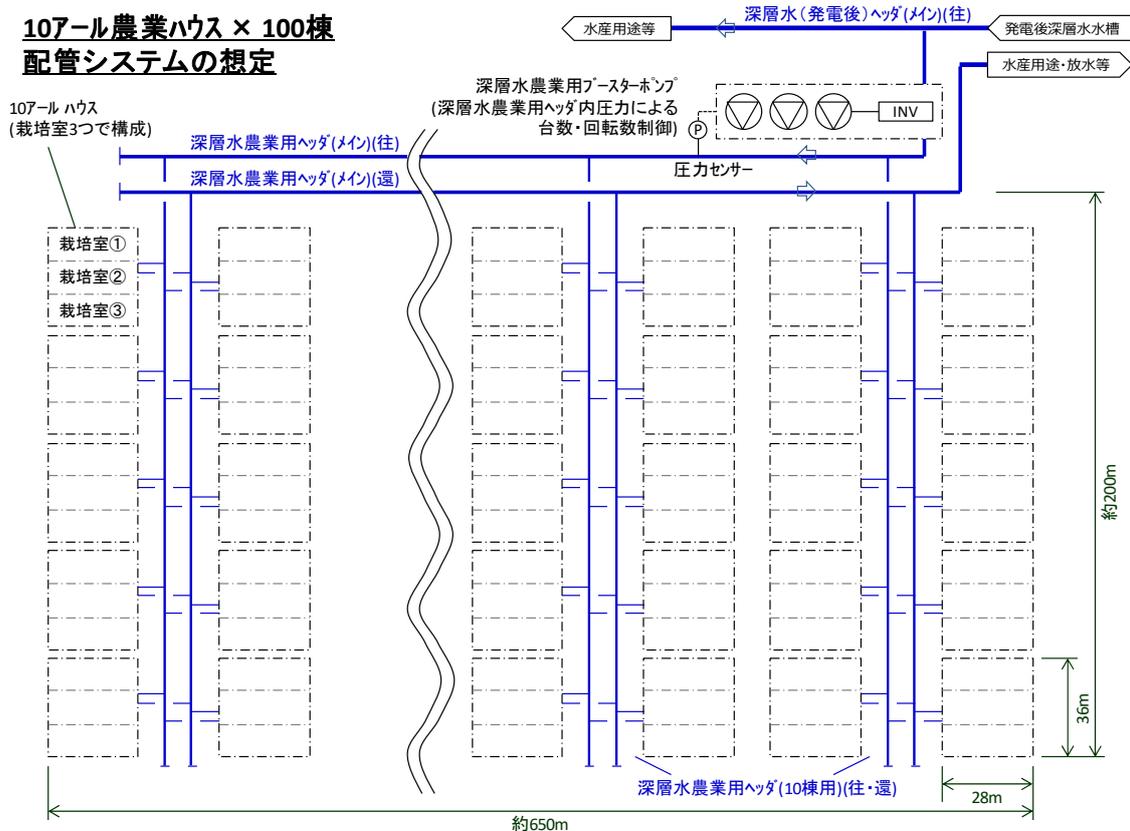


図 4-15 農業ハウス地域への配管の想定

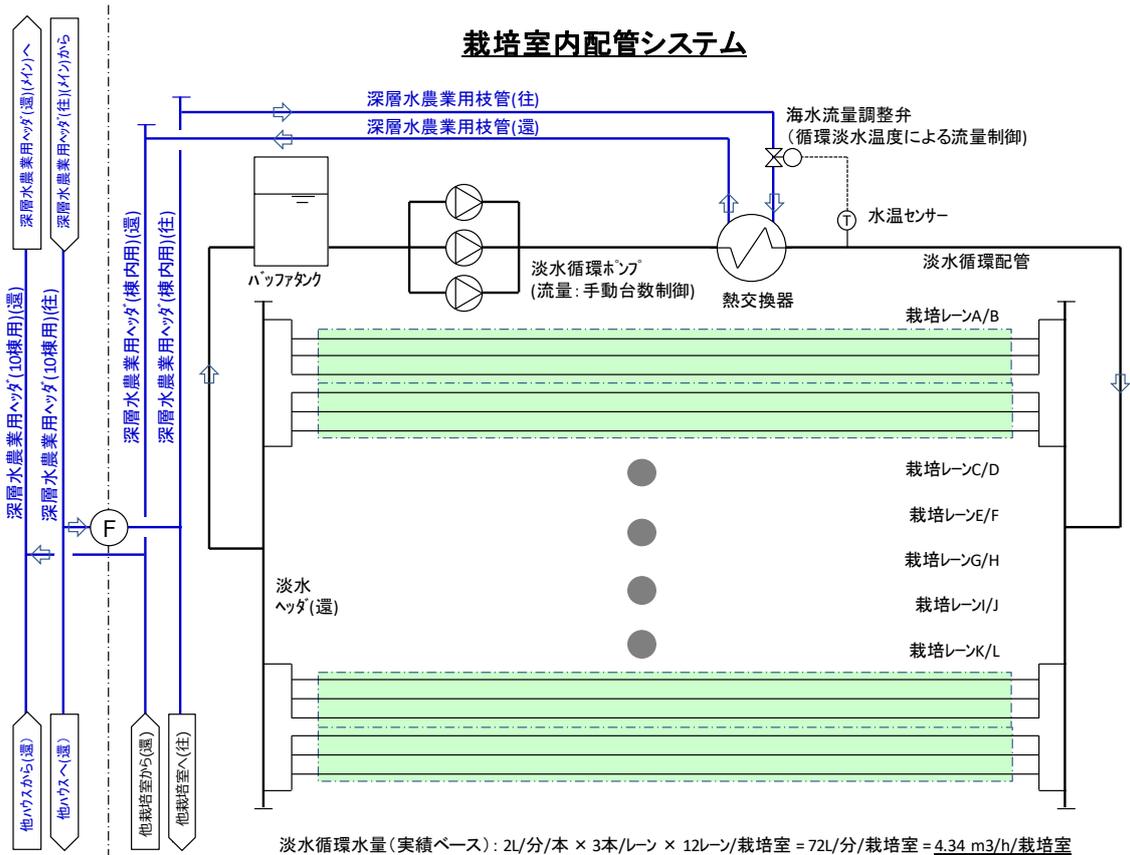


図 4-16 栽培室内配管の想定

表 4-8 配管システムの仕様

配管等の仕様

系統	管仕様			設計値	
	流量 m ³ /h	仕様	呼び径	管長 m	流速 m/s
深層水農業用ヘッダ(メイン)(往・還)	1320	HDPE	600	各700	1.24
深層水農業用ヘッダ(10棟用)(往・還)	132.0	VP	200	各200	1.20
深層水農業用ヘッダ(棟内用)(往・還)	13.20	VP	50	各35	1.71
深層水農業用枝管(往・還)	4.40	VP	40	各5	0.92
清水循環配管	4.32	VP	40	各42	0.92
清水ヘッダ	4.32	VP	50	各12	0.57
清水土中配管	0.12	VE	22	各30	0.12

機器類の仕様

ポンプ	流量 m ³ /h	台数	揚程 m	消費電力 kW/基	備考
深層水農業用フースターポンプ	660	3	11	25.0	50% × 3基
清水循環ポンプ	2.16	3	2.0	0.017	50% × 3基
熱交換器	交換熱量 kW(th)	基数	流量 m ³ /h		備考
			海水側	清水側	
深層水-海水熱交換器	10.0	1	4.40	4.32	6.68 m ³ /基

【利用目的】

土壌冷却用の循環冷水(真水)を深層水で冷却する

【制約】

循環冷水(真水)を 15℃程度まで冷却する必要があるため、深層水の出口温度は 14℃程度と低めに抑える必要がある。

【本検討の計算条件】

- 深層水の出口温度=14℃(発電後海水利用有無にかかわらず)
- 熱負荷は、沖縄の日射量および気温から概算する(日射量:NEDO データベース、気温:気象庁データベースより)
- 循環冷水(真水)の流量は一定とする
- 循環冷水(真水)の温度による深層水の流量制御を行う

(2) 空調(地域冷房)

海洋深層水の冷熱を利用した空調については、現在研究所本館の冷房に利用されている。大規模化の検討の際は、取水場所付近に大きな空調需要が無い場合、ホテル・民宿等が集中しているイーブビーチ地区(取水場所から約 4 km)を想定した。

冷熱需要の推定にあたっては、現在当該地区で営業するホテルおよび民宿の床面積に、冷房負荷の原単位を乗じた(詳細は表 4-9 の注記参照)。また、配管システムについては、前節表 4-5 を用いて設定した。

表 4-9 空調需要の想定

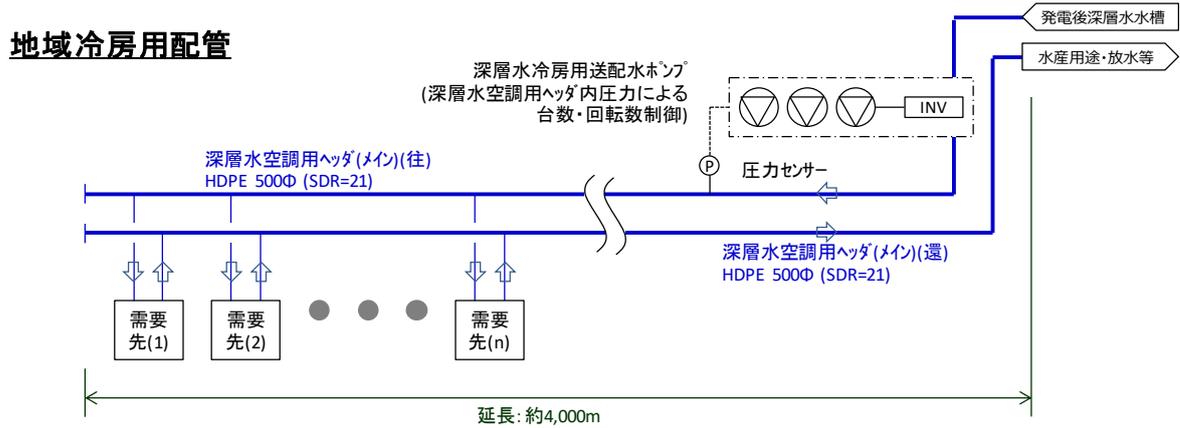
空調需要の推定

対象建築物 (*1)	延床面積 (*1)	床面積あたり最大冷房負荷 (*2)	最大冷房負荷	負荷率 (年間) (*3)
リゾートホテル1	5,375 m ²	83.7 W(th)	450 kW(th)	30%
リゾートホテル2	4,432 m ²		371 kW(th)	
小規模ホテル1	2,099 m ²		176 kW(th)	
小規模ホテル2	912 m ²		76 kW(th)	
その他民宿等	2,000 m ²		167 kW(th)	
合計	14,818 m ²	—	1240 kW(th)	—

(*1) 対象建築物の床面積のうち、ホテル4軒は当該地域のホテルの床面積(公開されている数値)を示した。民宿分は詳細不明のため、部屋数からの推定値とした。

(*2) 床面積あたり最大冷房負荷は、参考文献"2003/12, 空気調和衛生工学会 編「空気調和・衛生設備データブック」"掲載値 48~72 kcal/h/m²(日本全国のホテルの調査値)のうち、沖縄の気候を考慮して最大値を採用して単位変換した。

(*3) 負荷率は上記データブック掲載の全国平均値では、冷房:20% 暖房:29%。沖縄県のみデータは存在しないため、ここでは30%を想定した。



配管等の仕様

系統	管仕様			設計値	
	流量 m ³ /h	仕様	呼び径	管長 m	流速 m/s
深層水空調用ヘッド(メイン)(往・還)	436	HDPE	500	各4,000	0.75

機器類の仕様

ポンプ	流量 m ³ /h	台数	揚程(*1) m	消費電力 kW/基	備考
深層水冷却用送配水ポンプ	218	3	12	9.0	50%×3基

(*1) メインライン(往・還) 7m + 各需要施設内 5m (各マージン込み)

図 4-17 地域冷房用配管および関連機器の想定

【利用目的】

空調用の循環冷水(真水)を深層水で冷却する

【制約】

循環冷水(真水)を 15℃程度まで冷却する必要があるため、深層水の出口温度は 14℃程度と低めに抑える必要がある。

【本検討の計算条件】

- 深層水の出口温度 = 14℃ (発電後海水利用有無にかかわらず)
- 循環冷水(真水)の流量は一定とする
- 循環冷水(真水)の温度による深層水の流量制御を行う

4.4.2 検討結果

(1) 海水フロー

海水流量の算定にあたって、そのベースとなる海水フローを図 4-11 および図 4-18 のとおり設定した。図 4-11 は、発電以外の 4 つの需要（海ぶどう養殖、車えび養殖、農業、空調）のいずれにも発電後海水を用いるケースである。【ケース 3】を発電後海水を用いないケース（パラレル利用ケース）、【ケース 4】を上記のとおり 4 つの需要すべてに発電後海水を用いるケース（カスケード利用ケース）と設定する。ただし、ケース 4 の予備検討において、農業・空調いずれも発電後の海水を用いると所要海水流量が大きくなってしまったことが分かったため（図 4-20）、追加ケース【ケース 5】として「海ぶどう養殖、車えび養殖には発電後海水を利用し、農業と空調には利用しないケース（カスケード・パラレル併用ケース）」も設定した（図 4-19）

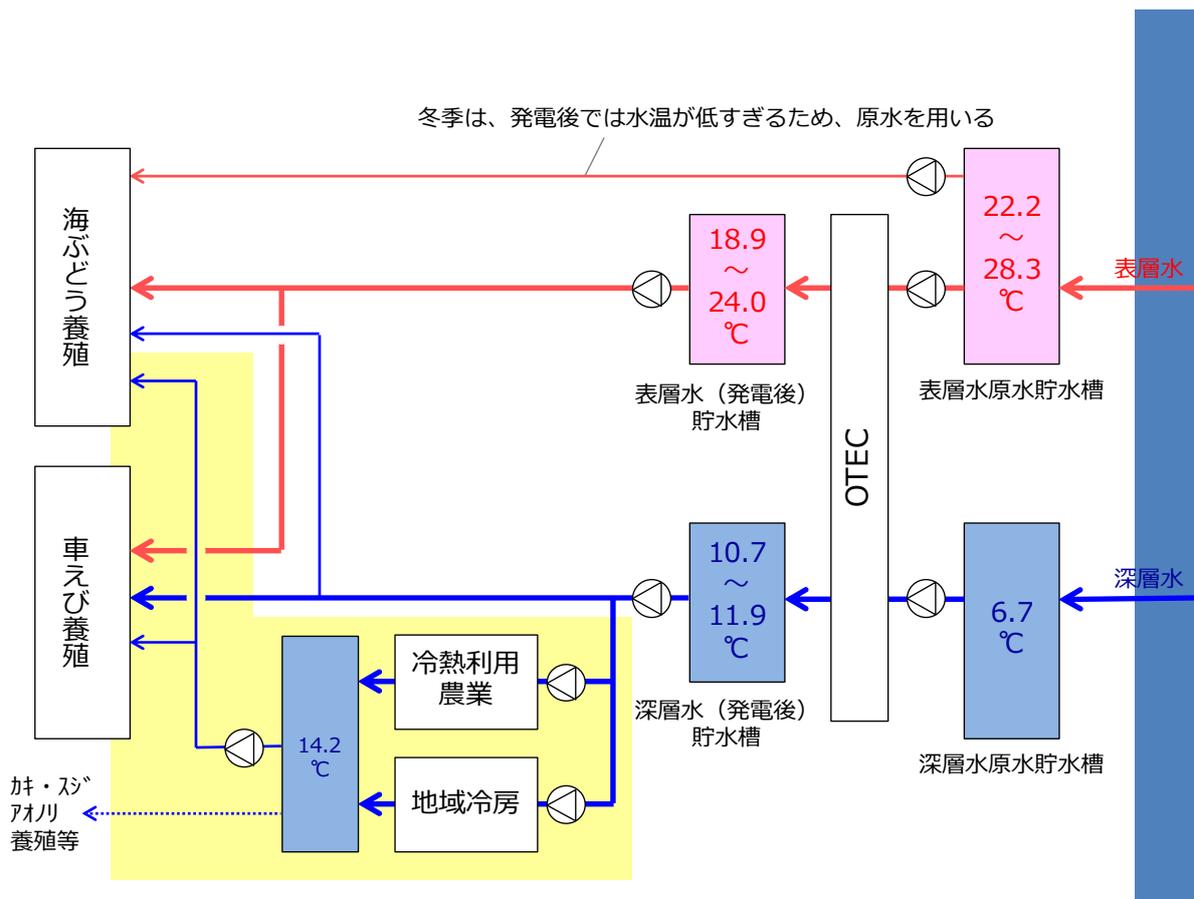


図 4-18 海水フロー(ケース 4)

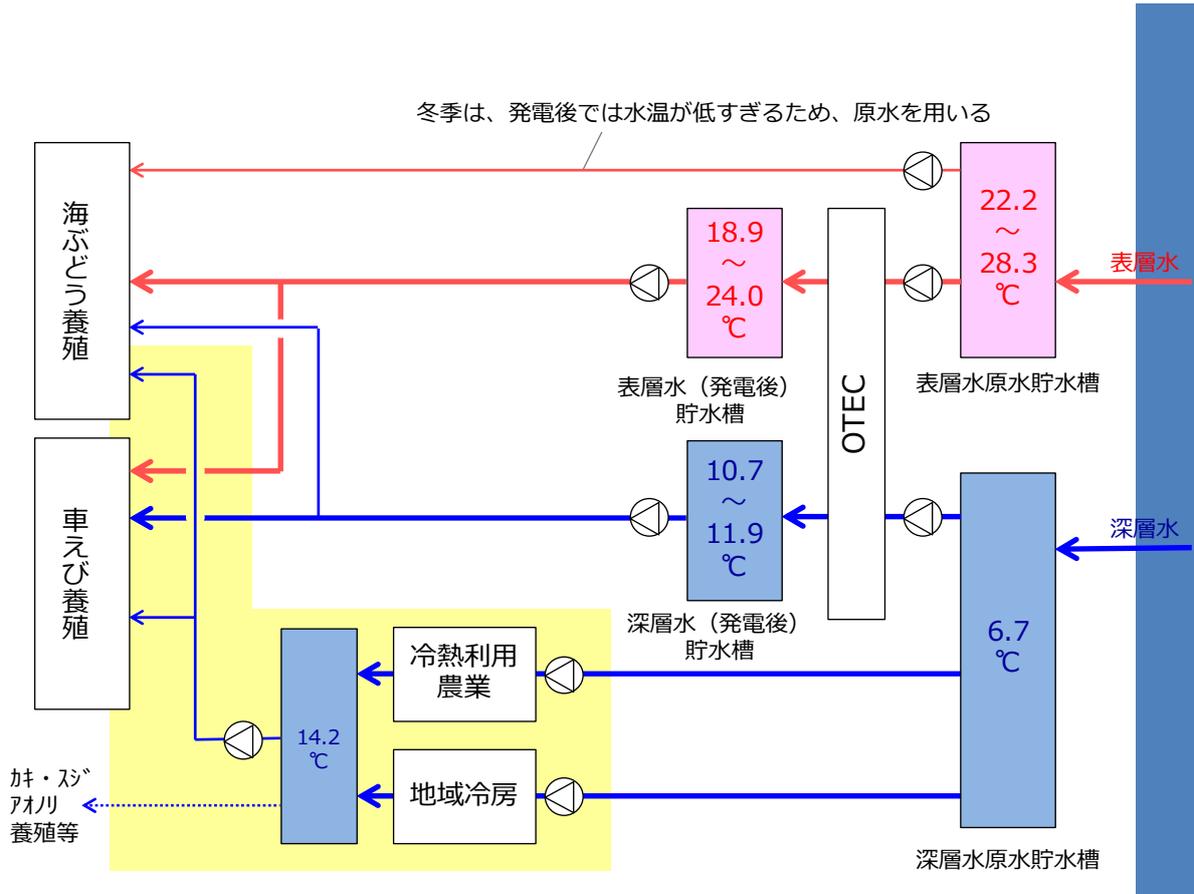


図 4-19 海水フロー(ケース5)

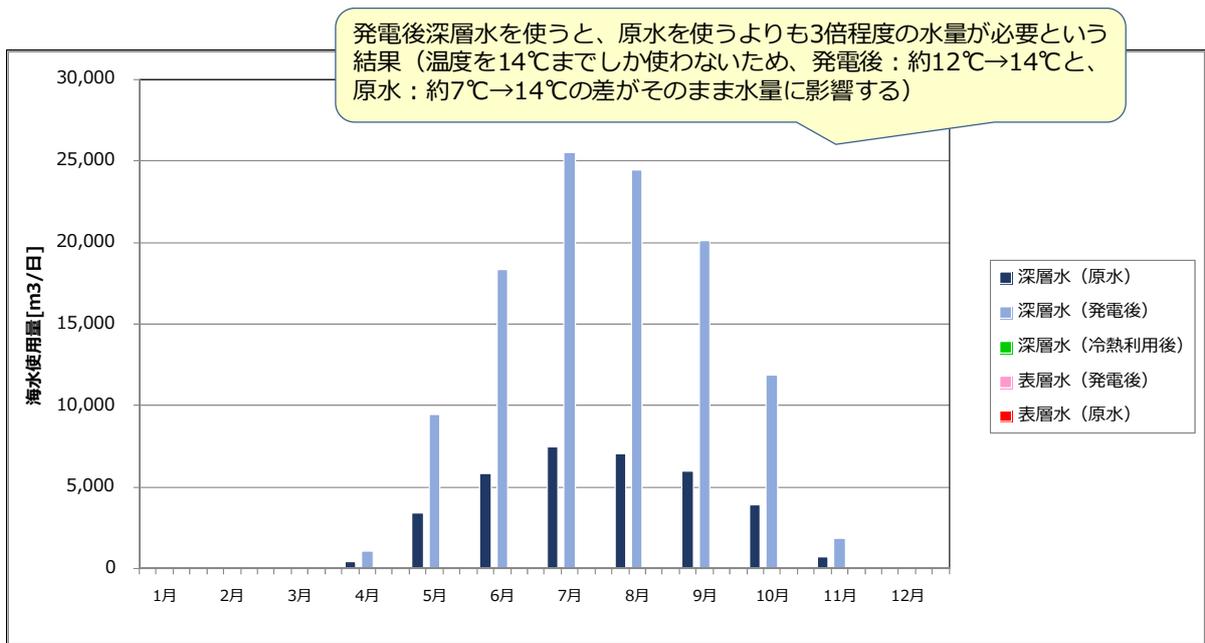


図 4-20 予備検討における海水流量の比較(各月 左:ケース3(平行)、右:ケース4(カスケード))

前節で検討したケース 1,2 も含めた検討ケースを整理すると、表 4-10 のとおりとなる。

表 4-10 検討ケースの整理

項目	ケース1 パラレル	ケース2 カスケード	ケース3 パラレル	ケース4 カスケード	ケース5 パ・カ併用
検討対象需要	OTEC・海ぶどう・車えび		OTEC・海ぶどう・車えび・冷熱利用農業・地域冷房		
利用する海水					
海ぶどう	原水	OTEC後 ※冬季表層水 は原水	原水	OTEC後 ※冬季表層水 は原水	OTEC後 ※冬季表層水 は原水
車えび	原水	OTEC後	原水	OTEC後+ 農業・地冷 後	OTEC後+ 農業・地冷 後
冷熱農業	—	—	原水	OTEC後	原水
地域冷房	—	—	原水	OTEC後	原水

深層水および表層水の取水量は、どのケースも同じとした。

(2) 海水流量の算定

ケース 3,4,5 における、4 つの需要先への海水流量をそれぞれ表 4-11, 表 4-12, 表 4-13 に示す。なお、深層水および表層水の取水量は、どのケースも同じとした。

表 4-11 ケース3 における各需要先への海水流量

■[ケース3]発電後海水利用なしケースの海水使用量【海ぶどう・車えび・農業・空調の4種】

(1) 海ぶどう

日間平均
海水使用量

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
表層水	原水	5,000	5,000	5,000	4,769	4,351	3,987	3,812	3,775	3,850	4,071	4,358	4,749	1,603,650
表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	原水	0	0	0	231	649	1,013	1,188	1,225	1,150	929	642	251	221,350
供給水量合計(日間平均)		5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	1,825,000

(2) 車えび

日間平均
海水使用量

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
表層水	原水	0	0	0	0	4,007	6,174	2,868	4,027	5,961	9,203	6,798	0	1,187,463
表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	原水	0	0	0	0	9,993	21,826	25,132	23,973	22,039	18,797	7,202	0	3,922,537
供給水量合計(日間平均)		0	0	0	0	14,000	28,000	28,000	28,000	28,000	28,000	14,000	0	5,110,000

(3) 農業

日間平均
海水使用量
[m3/d]

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
表層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	原水	0	0	0	433	3,434	5,811	7,462	7,021	6,000	3,895	682	0	1,056,610
供給水量合計(日間平均)		0	0	0	433	3,434	5,811	7,462	7,021	6,000	3,895	682	0	1,056,610

(4) 空調

日間平均
海水使用量
[m3/d]

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
表層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	原水	0	0	0	107	963	1,865	2,596	2,490	2,050	1,207	190	0	348,817
供給水量合計(日間平均)		0	0	0	107	963	1,865	2,596	2,490	2,050	1,207	190	0	348,817

(5) 発電出力

(深層水：180,000日間平均, 表層水225,000日間平均から、上記の原水使用分を差し引き)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均年間送電量
発電用	流量	220,000	220,000	220,000	220,231	216,642	214,838	218,320	217,198	215,189	211,726	213,843	220,251	
	流量比	97.8%	97.8%	97.8%	97.9%	96.3%	95.5%	97.0%	96.5%	95.6%	94.1%	95.0%	97.9%	
表層水	流量	180,000	180,000	180,000	179,229	164,962	149,485	143,622	145,291	148,761	155,172	171,285	179,749	
	流量比	100.0%	100.0%	100.0%	99.6%	91.6%	83.0%	79.8%	80.7%	82.6%	86.2%	95.2%	99.9%	
深層水	流量	40,000	40,000	40,000	41,002	51,680	65,353	74,698	71,907	66,418	56,554	42,558	40,502	
	流量比	18.2%	18.2%	18.2%	18.6%	23.8%	30.4%	34.0%	32.5%	30.9%	27.3%	19.7%	18.3%	
発電端	流量	655	614	689	785	907	1040	1126	1154	1117	1009	925	786	
	流量比	29.8%	27.9%	31.3%	35.2%	41.5%	48.0%	51.6%	53.1%	52.3%	47.0%	43.3%	35.7%	
自己消費	作動流体P	16	15	17	20	24	28	31	32	31	27	25	20	
	表層水P	117	117	117	117	116	115	116	116	115	113	114	117	
	深層水P	169	169	169	168	155	140	135	136	140	146	161	169	
	補機等	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	
小計		333	332	336	339	328	318	318	321	323	325	339	347	
送電端		322	282	353	446	579	722	808	832	794	684	586	439	

平均
年間送電量 **571 kW**
4,998,328 kWh/y

第Ⅲ部 海洋温度差発電における発電後海水の高度複合利用実証事業

表 4-12 ケース4における各需要先への海水流量

■[ケース4]発電後海水利用ありケースの海水使用量【海ぶどう・車えび・農業・空調の4種】

(1) 海ぶどう

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
日間平均 海水使用量 [m3/d]	表層水	原水	5,000	5,000	5,000	3,888	1,829	0	0	0	399	1,864	3,793	814,363
	表層水	OTEC後	0	0	0	1,112	3,171	4,987	4,656	4,587	4,727	4,601	3,136	978,937
	深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	13	344	413	273	0	0	31,699
	深層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	供給水量合計(日間平均)		5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000

(2) 車えび

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
日間平均 海水使用量 [m3/d]	表層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,070	0	93,379
	深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	3,565	0	0	0	18,344	10,930	0	998,871
	深層水	OTEC後	0	0	0	0	10,435	29,293	36,212	33,818	29,695	9,656	0	4,535,402
	深層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	供給水量合計(日間平均)		0	0	0	0	14,000	29,293	36,212	33,818	29,695	28,000	14,000	0

(3) 農業

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]	
日間平均 海水使用量 [m3/d]	表層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	深層水	OTEC後	0	0	0	1,056	9,444	18,314	25,495	24,439	20,124	11,857	1,871	0	3,424,910
	深層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	供給水量合計(日間平均)		0	0	0	1,056	9,444	18,314	25,495	24,439	20,124	11,857	1,871	0	3,424,910

(4) 空調

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]	
日間平均 海水使用量 [m3/d]	表層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	深層水	OTEC後	0	0	0	228	2,257	4,848	7,161	6,961	5,579	3,058	445	0	928,831
	深層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	供給水量合計(日間平均)		0	0	0	228	2,257	4,848	7,161	6,961	5,579	3,058	445	0	928,831

(5) 発電出力

(深層水: 180,000日間平均, 表層水225,000日間平均から、上記の原水使用分を差し引き)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計
平均出力 [kW]	発電用	流量	220,000	220,000	220,000	221,112	223,171	225,000	225,000	225,000	224,601	223,136	221,207	
	表層水	流量比	97.8%	97.8%	97.8%	98.3%	99.2%	100.0%	100.0%	100.0%	99.8%	99.2%	98.3%	
	発電用	流量	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	
	深層水	流量比	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	
自己消費	発電端		655	614	689	788	962	1171	1286	1312	1260	1120	969	795
	作動流体P		16	15	17	20	26	32	36	37	35	31	26	20
		表層水P	117	117	117	118	119	120	120	120	120	120	119	118
		深層水P	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169
		補機等	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
	小計	333	332	336	340	348	356	361	363	362	358	354	348	
送電端		322	282	353	448	614	815	925	949	898	762	615	447	平均 年間送電量

平均
年間送電量 **619 kW**
5,423,034 kWh/y

第Ⅲ部 海洋温度差発電における発電後海水の高度複合利用実証事業

表 4-13 ケース5 における各需要先への海水流量

■[ケース5] 発電後海水一部使用(多段・並列併用)ケースの海水使用量【多段:海ぶどう・車えび、並列:農業・空調の4種】

(1) 海ぶどう

日間平均
海水使用量

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
表層水	原水	5,000	5,000	5,000	3,888	1,829	0	0	0	0	399	1,864	3,793	814,363
表層水	OTEC後	0	0	0	1,112	3,171	4,987	4,656	4,587	4,727	4,601	3,136	1,207	978,937
深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	13	344	413	273	0	0	0	31,699
深層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
供給水量合計(日間平均)		5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	1,825,000

(2) 車えび

日間平均
海水使用量

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
表層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,063	5,835	0	270,667
深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	3,565	0	0	0	0	5,102	872	0	290,147
深層水	OTEC後	0	0	0	0	10,435	29,293	36,212	33,818	29,695	19,835	7,293	0	5,066,828
深層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
供給水量合計(日間平均)		0	0	0	0	14,000	29,293	36,212	33,818	29,695	28,000	14,000	0	5,627,641

(3) 農業

日間平均
海水使用量
[m3/d]

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
表層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	原水	0	0	0	433	3,434	5,811	7,462	7,021	6,000	3,895	682	0	1,056,610
供給水量合計(日間平均)		0	0	0	433	3,434	5,811	7,462	7,021	6,000	3,895	682	0	1,056,610

(4) 空調

日間平均
海水使用量
[m3/d]

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計[m3/y]
表層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	冷熱利用後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
深層水	原水	0	0	0	107	963	1,865	2,596	2,490	2,050	1,207	190	0	348,817
供給水量合計(日間平均)		0	0	0	107	963	1,865	2,596	2,490	2,050	1,207	190	0	348,817

(5) 発電出力

(深層水: 180,000日間平均, 表層水225,000日間平均から、上記の原水使用分を差し引き)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計
発電用	流量	220,000	220,000	220,000	221,112	223,171	225,000	225,000	225,000	225,000	224,601	223,136	221,207	
	流量比	97.8%	97.8%	97.8%	98.3%	99.2%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	99.8%	99.2%	98.3%	
平均出力 [kW]	発電用	180,000	180,000	180,000	179,460	175,604	172,323	169,941	170,489	171,950	174,898	179,128	180,000	
	深層水	100.0%	100.0%	100.0%	99.7%	97.6%	95.7%	94.4%	94.7%	95.5%	97.2%	99.5%	100.0%	
自己消費	発電端	655	614	689	787	950	1145	1249	1276	1231	1104	967	786	
	作動流体P	16	15	17	20	25	32	35	36	34	30	26	20	
	表層水P	117	117	117	118	119	120	120	120	120	120	119	118	
	深層水P	169	169	169	168	165	162	160	160	161	164	168	169	
	補機等	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	
小計		333	332	336	340	343	348	350	353	354	353	353	348	
送電端		322	282	353	447	607	797	899	924	877	751	614	438	平均 年間送電量

609 kW
5,336,506 kWh/y

これらの流量に基づいて、次の方針の下、エネルギー収支を算定し比較検討した。

- 取配水システム（各送水ポンプ）と OTEC（発電端出力－自己消費電力）トータルでの、電力得失を評価する。
（各利用事業者内の消費電力は評価しないが、3 ケースで同じ数値になると考えられる）

本産業地域全体としての電力得失比較結果となるようにした。

- 深層水および表層水の取水量は、どのケースも同じとした。

原水を OTEC 以外で使用する場合、その分 OTEC の発電出力が減る計算となっている。

- 各送水ポンプの消費電力は、配管システム検討およびポンプ仕様想定で得た単位水量あたり消費電力（定格時）に、使用水量をかけることで算定した。単位水量あたり消費電力の数値は表 4-14 のとおりである。

結果を図 4-21 に示す。

表 4-14 各送水ポンプの単位水量あたり消費電力（定格時）

	表層水原水	表層水OTEC後	深層水原水	深層水OTEC後
海ぶどう・車えび	0.0206	0.0078	0.0303	0.0078
冷熱農業	－	－	0.0983	0.0758
地域冷房	－	－	0.1051	0.0826

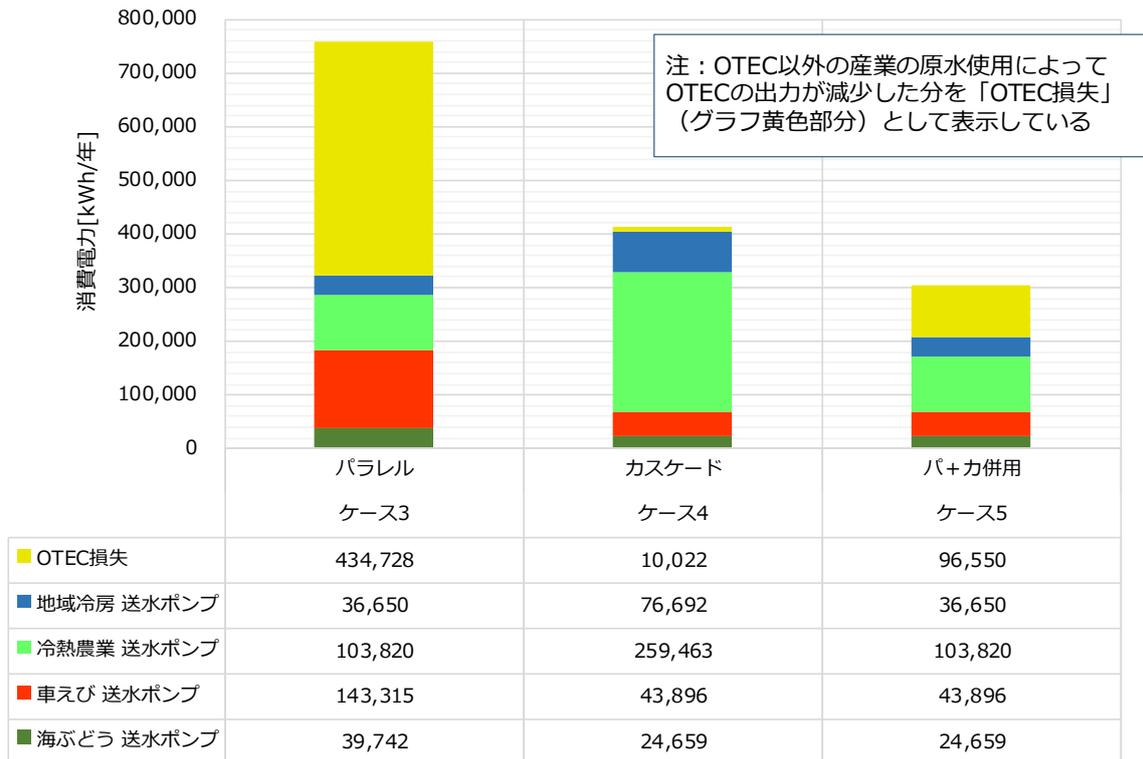


図 4-21 エネルギー収支(損失)算定結果

この結果への評価は、次のとおりである。

- 電力消費（損失）量は、最大ケース（ケース 3: 758[MWh/年]）と最小ケース（ケース 5: 306[MWh/年]）で 452[MWh/年]の差となった。
この電力量の差を金額に換算すると、年間 11,300,000 円となる（電力単価を 25 円/kWh とした場合）。
- 比較対象として、ケース 5 における売水収入規模を概算すると、年間 53,100,000 円（OTEC 以外の海水使用量に、現状の水産業への供給単価 6 円/ton を乗じて算定）であるため、上記の差は取配水事業の収益性に大きな影響を持つ。
- また、OTEC 発電事業を見ても、ケース 3 の場合 8%の送電端出力の減少は、収益性にかかわる数値である。

4.5 ライフサイクルアセスメント（LCA）による各需要先におけるエネルギー検討評価

ライフサイクルアセスメント（LCA）評価は、製品の原材料調達から、生産、流通、使用、廃棄に至るまでのライフサイクルにおける投入資源や環境負荷を包括的・定量的に評価する手法である。本評価では、車えび養殖や海ぶどう養殖といった発電後海水の利用の核となる事業についてそれぞれ生産品単位重量あたりの消費エネルギー原単位を算定した上で、それを基にした規模拡大時の海水需要先ごとの評価を実施した。なお、本検討評価は株式会社沖縄エネテック 環境グループへの再委託により行っている。

本紙では、規模拡大時の各需要先における検討評価結果の概要のみを引用して示す。

4.5.1 取水にかかるエネルギー消費量の変化

取水量増大を想定した場合、取水管の製造や敷設等の設備に係るエネルギーは表層水が約 3.6 倍、深層水が約 4.1 倍となる。しかしながら、取水量は表層水が現状の 19.5 倍(225,000t/日)、深層水が現状の 13.9 倍(180,000t/日)となるため、取水管にかかるエネルギー消費量の 1t あたりの負荷は、表層水が現状の約 18%、深層水が現状の約 30%程度に減少する計算となる。

一方、ポンプについては発電後海水を利用しない場合は各事業者へ配水するポンプ、発電後海水を利用する場合は OTEC の所内ポンプによる汲み上げとなり、発電後海水の利用の有無で異なるポンプを利用することとなる。このことから、ここでは発電後海水を利用しない場合に各事業者へ配水するポンプ動力を想定して比較する。ポンプ動力の消費電力量は表層水ポンプで現状の 14.3%、深層水ポンプで現状の 19.9%となり、現状よりも減少する（図 4-22）。

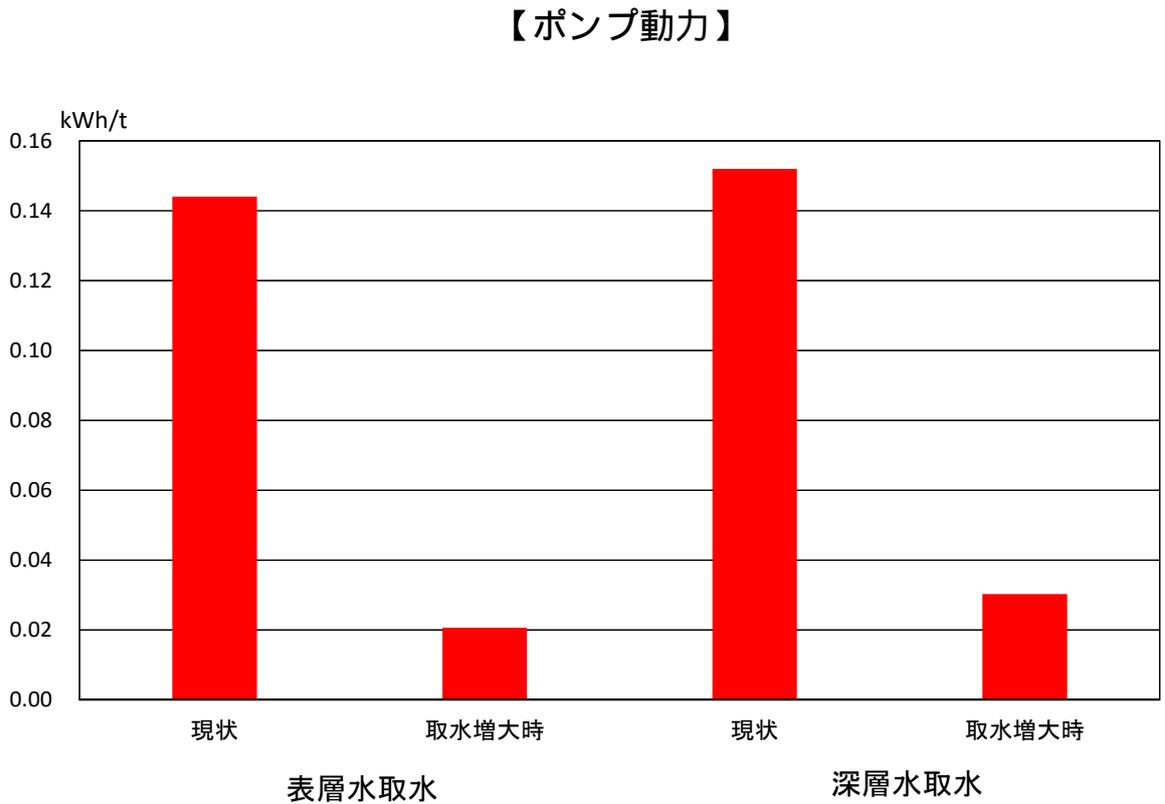
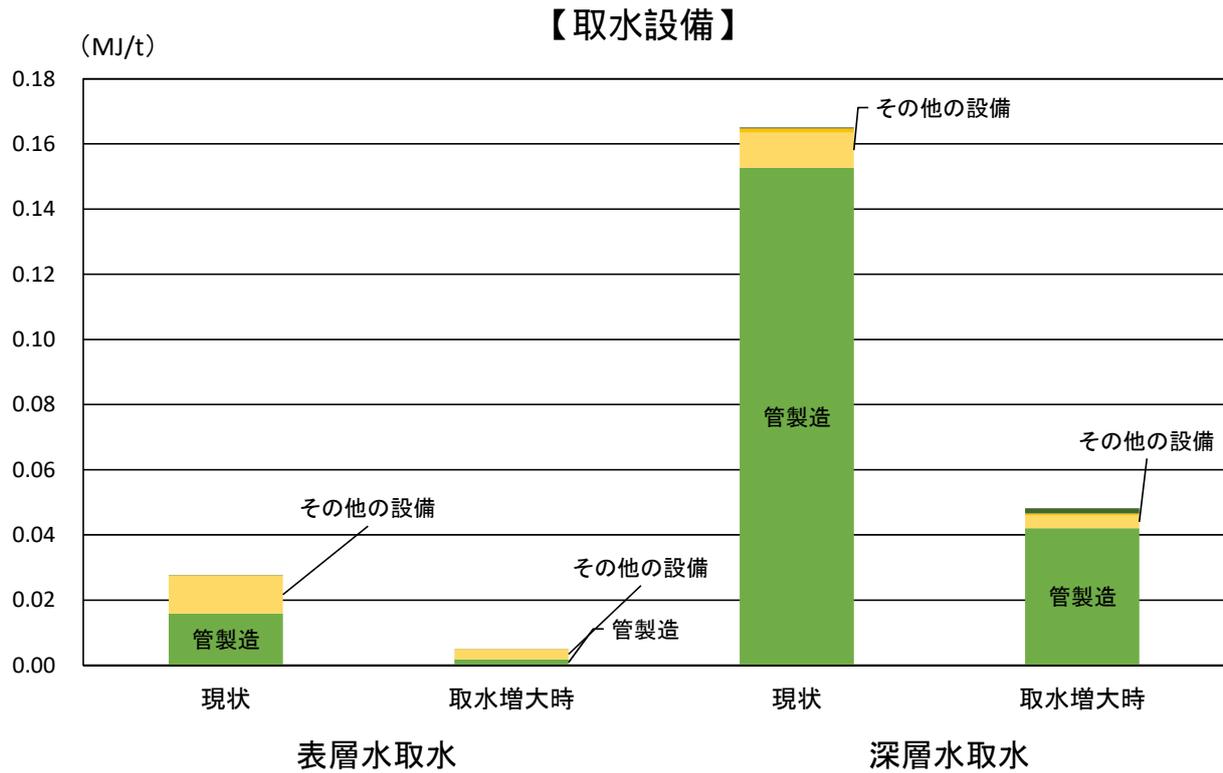


図 4-22 取水量増大時の取水に係る消費エネルギー量及び消費電力の比較(取水管)

4.5.2 各需要先におけるエネルギー消費量の変化

(1) 発電

取水量増大時に OTEC が導入された場合、各事業において久米島の系統電力の原単位に変わり、OTEC の発電によるエネルギー消費原単位が適用されることとなる。ただし、発電後海水の利用の有無によって発電量が変わるため、エネルギー消費原単位も変わることとなる（図 4-23、図 4-24）。

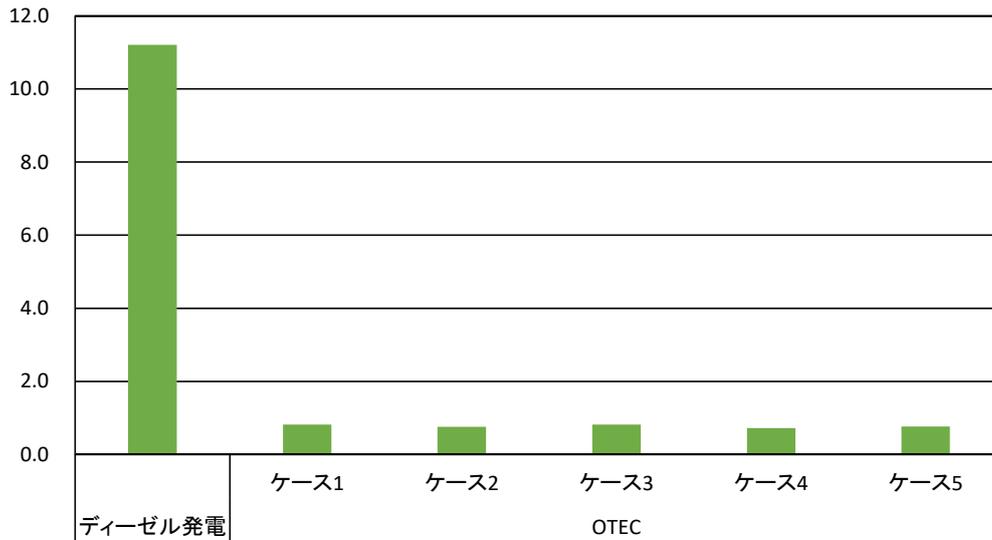


図 4-23 デーゼル発電と OTEC の消費エネルギー量の比較

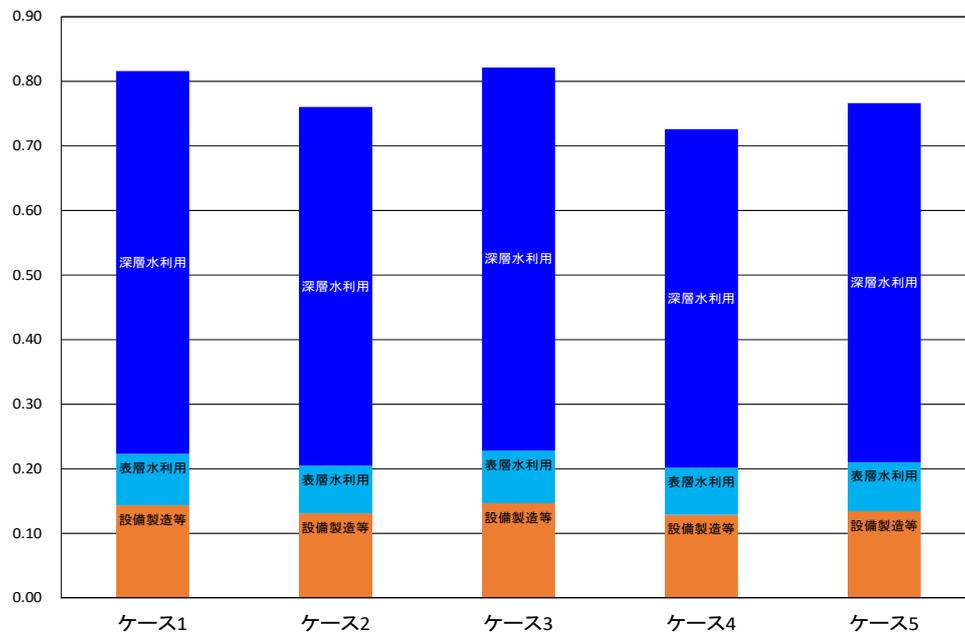


図 4-24 取水量増大時の発電に係る消費エネルギー量の比較

(2) 海ぶどう養殖

海ぶどう養殖における取水量増大時のエネルギー消費量の変化を図 4-25 に示す。本検討では海水利用の変化による収量変化はないと仮定した。

海ぶどう養殖で生産量 1kg あたりのエネルギー消費量が最も大きかったのはケース 3 (4 事業者で発電後海水利用無し)であり、最も小さかったのはケース 4 (4 事業者で発電後海水利用有り)であった。このことから、発電後海水利用による海ぶどう生産におけるエネルギー消費量の削減効果が認められた。

発電後海水を利用することにより事業者間で取水に係る負荷が按分されるため、ケース 2、4、5 ではそれぞれ表層水、深層水のエネルギー消費量が低減される。海水ポンプの利用をみると、ケース 2、4、5 では OTEC による海水汲み上げ分が加算されるが、いずれも原水利用よりもエネルギー消費量は少なくなっている。

今後、発電後海水を利用することによる副次的な効果 (深層水を利用しないことにより珪藻類繁茂が抑制され収量が上がる、等)があった場合、海ぶどう 1kg あたりのエネルギー消費量はさらに変化すると考えられる。

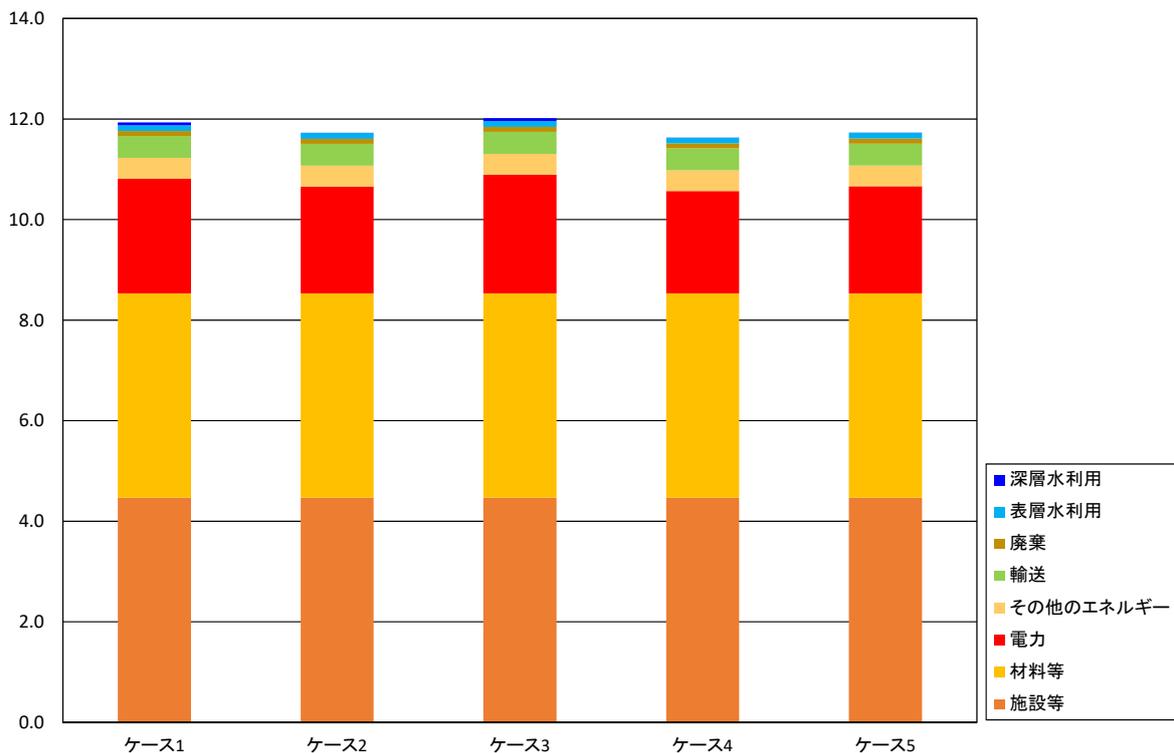


図 4-25 取水量増大時の海ぶどう養殖に係る消費エネルギー量の比較

(3) 車えび養殖

車えび養殖における取水量増大時のエネルギー消費量の変化を図 4-26 に示す。車えび養殖において生産量 1kg あたりのエネルギー消費量が最も大きかったのは、ケース 3 (4 事業者で発電後海水利用無し) であり、最も小さかったのはケース 4 (4 事業者で発電後海水利用有り) であった。このことから、発電後海水利用による車えび生産におけるエネルギー消費量の削減効果が認められた。

発電後海水を利用することにより事業者間で取水に係る負荷が按分されるため、ケース 2、4、5 ではそれぞれ表層水、深層水のエネルギー消費量が低減されている。一方海水ポンプの利用をみると、ケース 2、4、5 では OTEC による海水汲み上げ分が加算され、いずれも原水利用よりもエネルギー消費量は多くなっている。これは発電後海水を利用することにより、利用する海水量が増加したためである。

車えび養殖では、養殖にかかるエネルギーに対して施設等の設置に係るエネルギー量が顕著に大きくなっている。このことから、海水利用の変化に伴うエネルギー消費量削減効果の割合は全体に対して少なくなる。したがって、車えび 1kg の生産に係るエネルギー消費量は、生産量の変化や価格の差などによって大きく変化すると考えられ、深層水や表層水利用による品質面への効果の検証も求められるのではないかと考えられる。

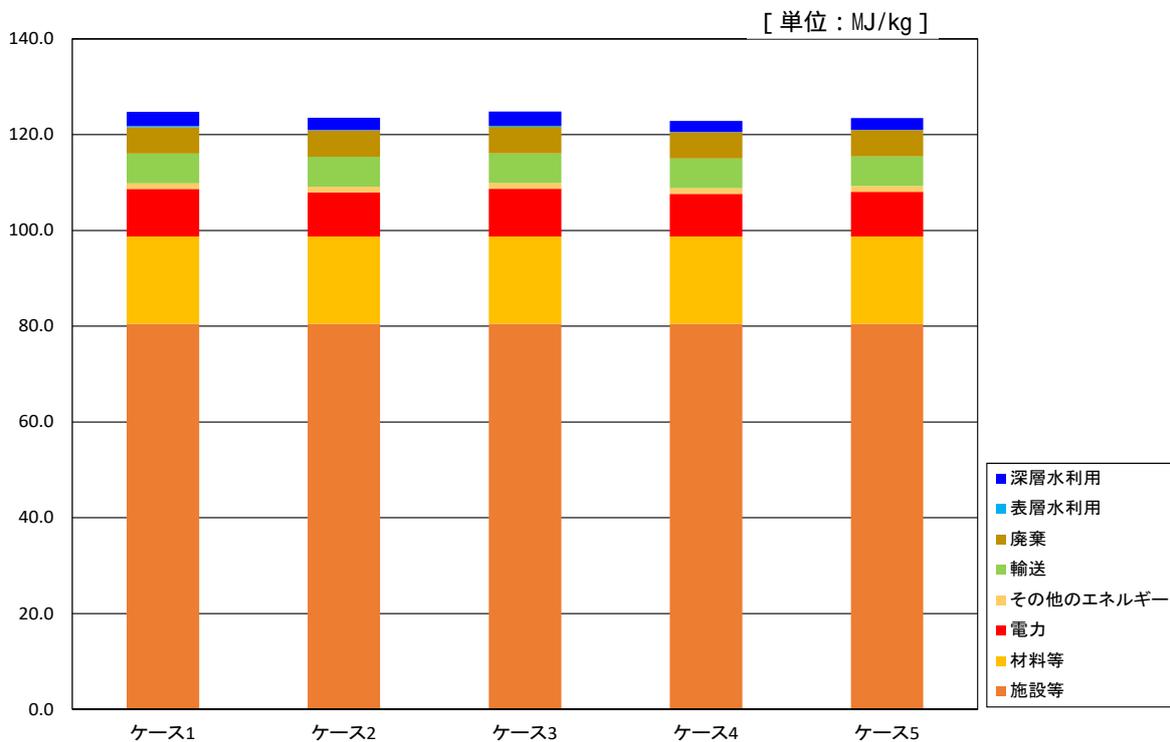


図 4-26 取水量増大時の車えび養殖に係る消費エネルギー量の比較

(4) 農業（ハウレンソウ生産）

農業における取水量増大時のエネルギー消費量の変化を図 4-27 に示す。取水量増大時には、農業エリアへの送水は一括して行われ、各ハウスで清水と熱交換されて土壌冷却が行われる想定となっている。このため、送水設備及び送水ポンプ動力に係る負荷を計上している。

農業において生産量 1kg あたりのエネルギー消費量が最も大きかったのは、ケース 4（4 事業者で発電後海水利用有り）であり、最も小さかったのはケース 5（4 事業者で発電後海水利用有り、ただし農業と空調は発電後海水利用無し）であった。

海ぶどう養殖、車えび養殖と異なり、海水利用、海水ポンプ利用ともにケース 4 で最も消費エネルギー量が多くなっている。これは発電後海水を利用することにより、利用する海水量が増加したためである。ケース 3、ケース 5 では同じように深層水の原水を利用しているが、ケース 5 で若干エネルギー消費量が低減されている。これは、他所で複合利用されていることで OTEC の排出原単位が変わること、農業後の冷熱を利用していることで海水利用に係る負荷が按分されていることによる効果である。

農業では、車えびと同様に生産にかかるエネルギーに対して施設等の設置に係るエネルギー量が顕著に大きくなっている。このことから、海水利用の変化に伴うエネルギー消費量削減効果の割合は全体に対して少なくなっている。また、すべてにおいて発電後海水を利用することが必ずしもエネルギー消費量低減につながらないという結果を得た。本研究ではハウレンソウ栽培のみを想定しているため、栽培する作物の要求する温度等によって最適な海水利用方法を検討する必要がある。

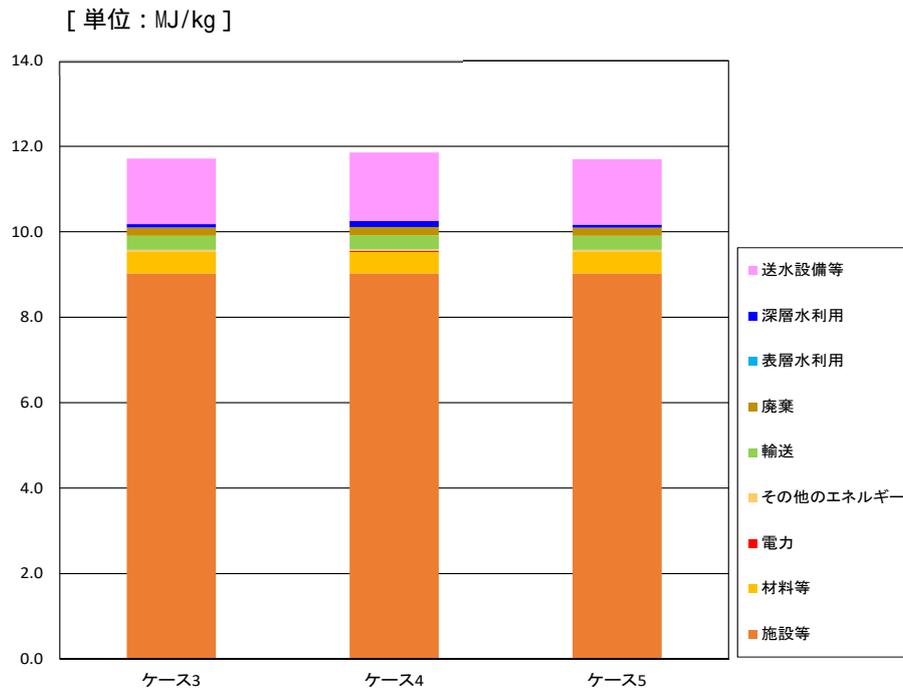


図 4-27 取水量増大時のハウレンソウ生産に係る消費エネルギー量の比較

(5) 地域冷房におけるエネルギー消費量の変化

取水量増大時に導入すると仮定した地域冷房（リゾートホテル 2 件、小規模ホテル 2 件）のエネルギー消費量の変化を図 4-28 に示す。民宿等については件数や個々の面積が不明なため算定を行っていない。地域冷房では導入地域の床面積・1 時間あたりのエネルギー量(kcal/m²・h)とし、稼働時間は深層水の利用がある 4 月～11 月（ただし、4 月と 11 月は半月分）として計算した。深層水による水冷式の冷房導入エリアへの送水は一括して行われ、各施設で清水と熱交換されて冷房が行われる想定となっている。このため、送水設備と送水ポンプ動力に係る負荷を計上している。なお、各施設における冷房設備としては、一律ホテル等で導入されているファンコイルユニットを想定し、客室数または床面積から個数を推定した。

地域冷房の導入においてエネルギー消費量が最も大きかったのは、ケース 4（4 事業者で発電後海水利用有り）であり、最も小さかったのはケース 5（4 事業者で発電後海水利用有り、ただし農業と空調は発電後海水利用無し）であった。

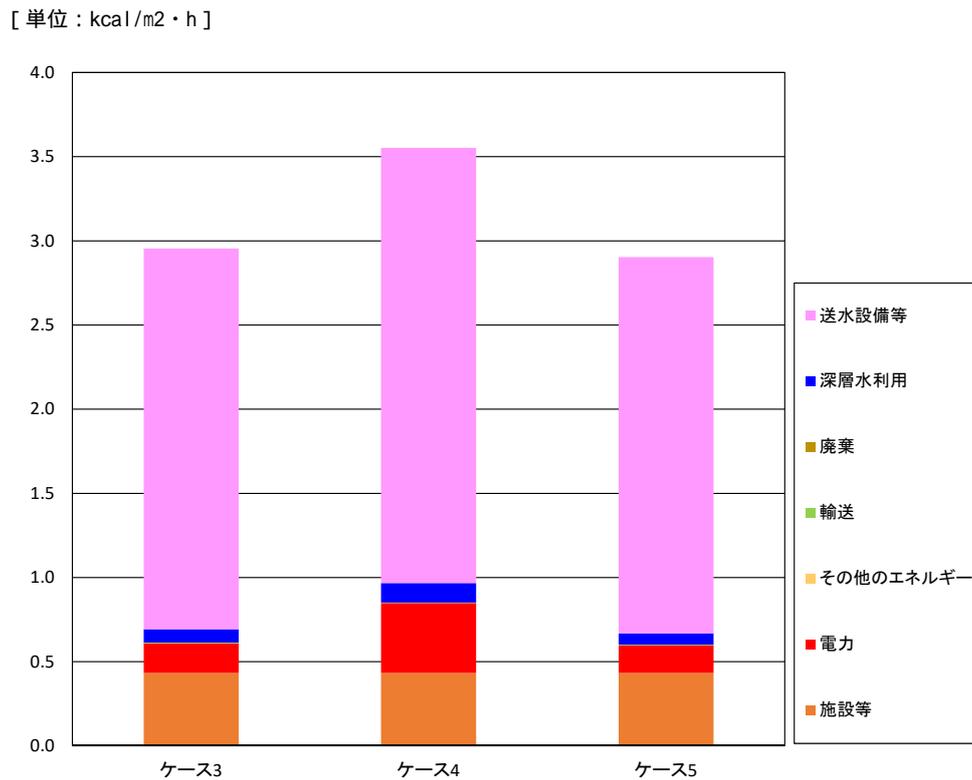


図 4-28 取水量増大時の地域冷房に係る消費エネルギー量の比較 (リゾートホテル 1)

農業と同様、海水利用、海水ポンプ利用ともにケース 4 で最も消費エネルギー量が多くなっている。これは発電後海水を利用することにより、利用する海水量が増加したためである。ケース

3、ケース 5 では同量だけ深層水の原水を利用しているが、ケース 5 で若干エネルギー消費量が低減されている。これは、他所で複合利用されていることで OTEC の原単位が変わること、冷房後の冷熱を利用していることで海水利用に係る負荷が按分されていることによる効果である。

地域冷房では、送水設備等に係るエネルギー量が全体に対して大きな割合を占めている。このことから、海水利用の変化に伴うエネルギー消費量削減効果の割合は全体に対して少なくなっている。また、農業同様、すべてにおいて発電後海水を利用することが必ずしもエネルギー消費量低減につながらないという結果を得ており、最適な海水利用の検討が必要である。

4.5.3 LCA 評価から見た考察

(1) 現状におけるエネルギー消費量

現状のエネルギー消費量をみると、いずれの事業においても電力に係るエネルギーが大きな割合を占めていた。久米島のように単独系統で重油を燃料としたディーゼル発電機による発電が基幹電源となる離島では、電力利用に係る環境負荷が大きくなる。このことからいずれの事業においても電力消費に伴うエネルギー消費量を下げることが効果的であることを示唆している。このことから、海洋深層水の冷熱利用によるエネルギー消費量削減は、特に離島においては効果が高くなると考えられる。

仮に、現状の生産設備において海洋深層水による温度調整が出来なかった場合を考えると、冷熱を得るためには電力に依存することとなり、同等の生産物を得る場合のエネルギー量は膨大なものになると考えられる。目安として、本業務の LCA の中で参考として算出した各事業の CO₂ 排出量を見ると、海ぶどう養殖が生産額 100 万円あたり 1470 kg-CO₂eq、車えび養殖（成えび生産）が 3619 kg-CO₂eq であった。各生産物が持つ機能が異なるため単純比較によって優劣を示せるものではないが、IDEA における海面養殖業の平均的な CO₂ 排出量が 100 万円あたり 4448kg-CO₂eq となっていることから、久米島における深層水利用養殖事業の CO₂ 排出量は、国内の養殖業における一般的な水準にあると考えられる。仮に海水冷却に深層水が使えなかった場合は、膨大な量の海水冷却を電力や燃料を用いて行う必要があり、CO₂ 排出量はこの水準よりもはるかに高い値になることが予想される。CO₂ 排出において化石燃料由来が卓越していることを考えると、エネルギーにおいても同様の傾向があると考えられる。このことから、離島における養殖事業において海洋深層水を利用することが、エネルギー及び地球温暖化の環境側面からみても効果的であると言えるだろう。

(2) 規模拡大時の予測

設備の規模拡大に伴い、取水管の規模拡大の効果、OTEC 導入の効果、発電後海水利用による効果の 3 つの効果によって、各事業におけるエネルギー消費量は低減する結果となった。

設備の規模拡大に伴う効果

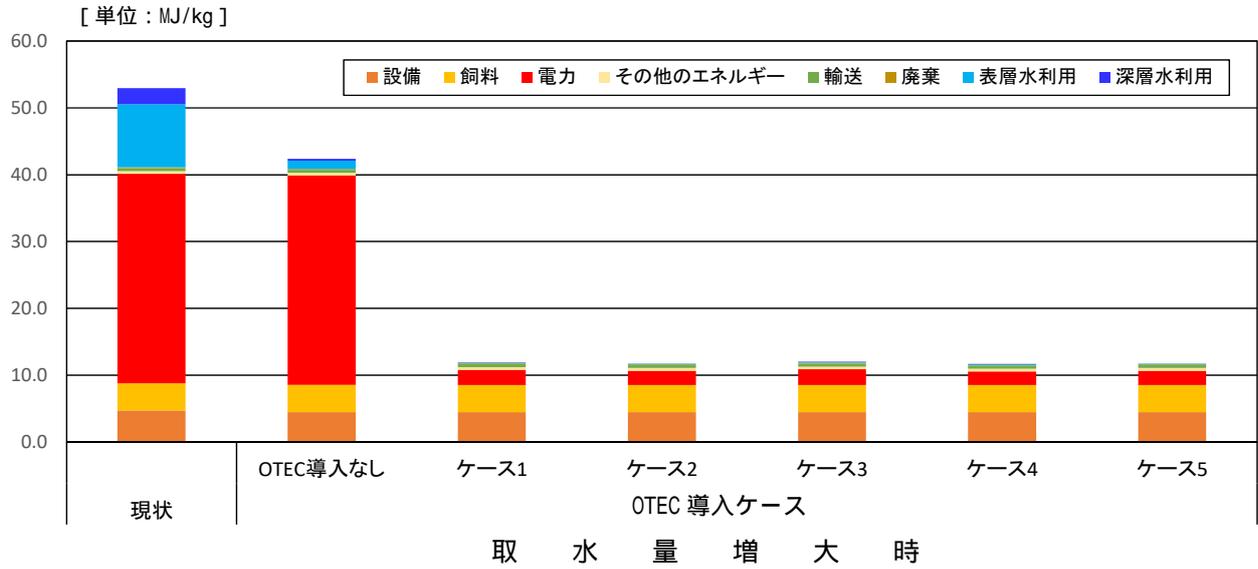
設備の規模拡大に伴い、設備製造や建設にかかるエネルギー量が増加するものの、取水量がそれを大きく上回る規模になること、管径が広がることによる管摩擦損失の低下やポンプの配置変更に伴ってポンプ消費電力が減少することなどから、海水 1t の取水にかかるエネルギー消費量は低減することとなった。このことから、各事業において現状と同様に海水を利用した場合でも、エネルギー消費量が低減される結果となった。このことは、単純にスケールアップをただけでも、エネルギー効率としては一定の効果があげられることを示唆している。

さらに前述のとおり、現状の事業におけるエネルギー消費量の大部分は電力由来であり、化石燃料消費に伴うものである。OTEC 導入によって再生可能エネルギーを電力源とすることで、化石燃料消費量が削減され、すべての事業で大幅にエネルギー消費量が低減される結果となった。

図 4-29 に海ぶどう養殖と車えび養殖における現状、取水量増大時（OTEC 導入しない場合）、取水量増大時（OTEC 導入と発電後海水利用の各ケース）に関する比較を示す。取水量を増大させることで、現状の海水利用に係る負荷が低減され、さらに OTEC が導入されることで電力にかかる負荷が大幅に低減されている。なお、農業および空調（地域冷房）については、取水量増大時に想定する条件が現状と大きく変わることからここでは比較を行っていない。

久米島のような単独系統の離島では、産業振興による電力需要拡大が化石燃料燃焼の増加につながり、エネルギー面や環境面での課題が多い。深層水のエネルギーを利用することでこうした課題を解決し、効果的な産業振興につなげられる可能性が考えられる。

【海ぶどう養殖】



【車えび養殖】

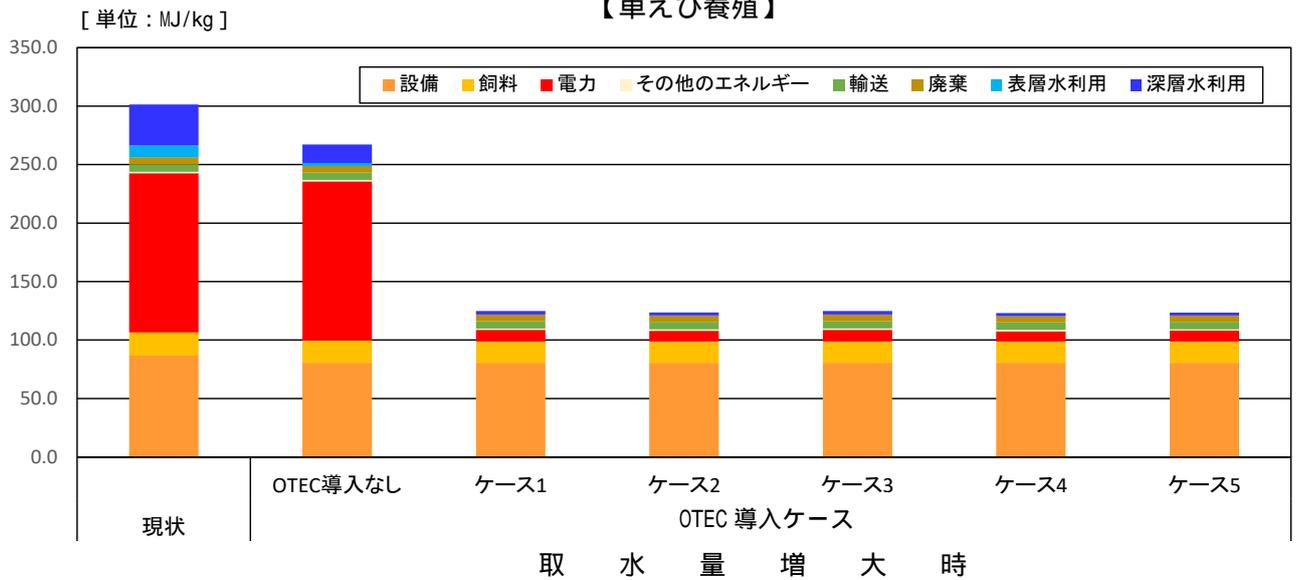


図 4-29 取水規模拡大及び OTEC 導入の効果(海ぶどう養殖・車えび養殖)

発電後海水利用による効果

発電後海水を利用することの意義は、海洋深層水が持つ温度エネルギー資源を効率的に利用することである。資源利用の観点からみると、資源の利用者が増えることにより、資源を採取するエネルギーを分担する主体が増え、各者単体による資源利用にかかるエネルギー消費量の低減が図られることとなる。

OTEC 以外に海ぶどう養殖、車えび養殖のみでの利用を想定した場合では、二次的な利用量が取水量に対して少なかったため、発電後海水利用がない場合とある場合で発電量が大きく変わらず発電におけるエネルギー消費原単位が大きく変わらなかったこと、資源採取の負荷配分をする対象が少なく配分率が低かったことで、発電後海水利用の有無でエネルギー消費量の低減効果は僅かであった（ケース 2）。

OTEC 以外に海ぶどう養殖、車えび養殖、農業、地域冷房（空調）での利用を想定した場合は、海ぶどう養殖、車えび養殖で 2 事業での利用を想定した場合と比較して、発電後海水利用することでエネルギー消費量の低減効果が大きくなる結果を得た。これは OTEC の発電量の変化による発電のエネルギー消費原単位が変わったこと、取水にかかるエネルギーを利用者で配分したことによる効果大きい。しかしながら農業、地域冷房（空調）では、発電後海水利用をしたケースで発電後海水利用をしないケース（ケース 3）よりもエネルギー消費量が大きくなる結果となった。これは、発電後海水を利用することで利用する海水量が増加したためである（ケース 4）。最もエネルギー消費量が少なかったのは農業、地域冷房で深層水原水を利用し、海ぶどう養殖、車えび養殖で 2 次、3 次利用を行うケースであった（ケース 5）。

このことから発電後海水を利用するケースでは、産業ごとに要求される温度等を考慮したうえで、様々な利用形態、利用量での検討を行う必要がある。また、本調査では考慮に入れていないが水質の変化によって生産物の収量等が異なる場合にもエネルギー消費効率は変化する。こうした条件ごとの検討をシステム全体でシミュレーションすることで、深層水資源の最適な配分につながるものと考えられる。

4.6 IMPACT 解析によるシステム全体における環境性・経済性の包括的評価

IMPACT 解析手法による評価では、エネルギー消費量や環境負荷に加えて、経済性も考慮した包括的な評価指標を用いる。人間の経済活動にはエネルギー消費や環境負荷を必ず伴う。IMPACT 評価は、それを現実としてふまえて「現状の経済活動よりも、環境負荷が少なく、持続可能な社会の形成に資する事業なのかどうか」を判断する指標を提供していると言える。本評価は、専門機関である大阪府立大学に委託して実施した。本紙には、検討結果の抜粋のみを示す。詳細は別添Ⅲ-4 2018 年度 受託研究報告書「海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価 (IMPACT) 手法を用いた高度複合利用に関する検討・評価」(大阪府立大学)を参照のこと。

評価結果の概要

今回、規模拡大時の検討において、久米島モデルを対象として、環境面及び経済面の評価、ならびにそれらの統合評価を行った。その結果、環境面では 2,383gha/y のエコロジカル・フットプリント(EF)を削減することができ、この値は現状の 77%に上ることがわかった。要因として、DEG の発電で排出される CO₂ 量が多く、冷房の消費電力が大きいことが挙げられる。経済面ではそれぞれ C-B をみると、規模拡大のプロジェクト実施時の方が約 15%値が小さく、有効であるという結果となった。よって、環境面・経済面いずれにおいても有効性があるといえる。包括的環境影響評価指標 Triple I light の評価では、現状と比較して 2,767gha、約 50.3%もの Triple I light の削減が期待できる(図 4-30)。

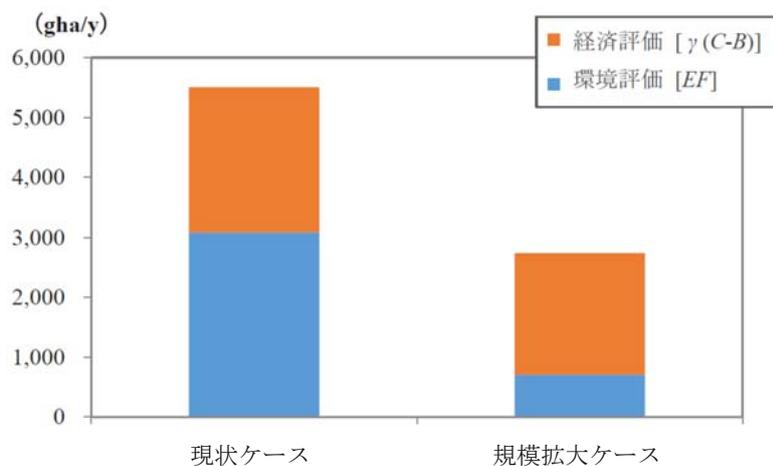


図 4-30 指標“Triple I light”評価結果(現状ケースと規模拡大ケースの比較)

また、生産物の価格変動に注目した場合、車えび、海ぶどう、ハウレンソウの中で最も影響を与えやすいのは単価の最も高い車えびであると考えられる。しかし、車えびの供給量が需要量を上回り値崩れを起こしたとしても、規模拡大ケースの指標“Triple I light”は現状を維持した場合よりも小さくなるため、生産物の価格変動に因らず規模拡大ケースは有効である可能性が高いという結論を得た(図 4-31)。

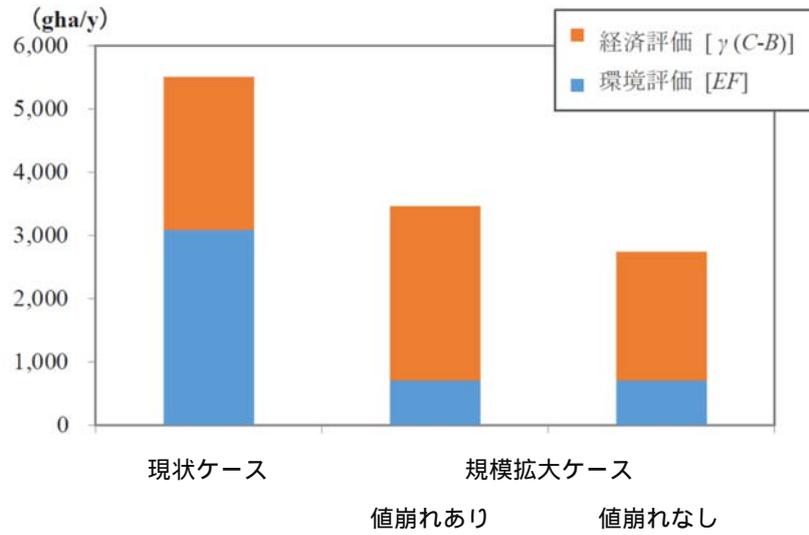


図 4-31 指標"Triple I light"評価結果(値崩れケースの考察)

規模拡大ケースにおいて、より多くの産業で発電後海水が利活用された場合、評価対象が増加し、評価はさらに良くなる可能性がある。

4.7 検討評価に関する考察とまとめ

4.3 節、4.4 節における取配水システムのエネルギー収支検討、4.5 節における各需要先の LCA 評価、4.6 節における IMPACT 解析のいずれにおいても、規模拡大と OTEC 導入が有効であることを示す結果となった。とりわけ、海水のカスケード利用だけでなく、需要によってはパラレル利用も併用した方が効果が大きいという結果は興味深い。以下に考察とまとめを述べる。

(1) 需要の種類(特に所要水温)によっては、パラレル利用を一部併用したハイブリッド方式の方が、取配水のエネルギー面・経済性面で有利となる場合がある。

(2) 検討対象として追加した 2 つの需要：冷熱農業および地域冷房は、次の点でいずれもパラレル利用(発電後海水を利用しないケース)が特に有利となりやすい需要であったと考えられる。

必要水温が低い(出口で 14 程度) 発電後の水温が上がった海水では、所要水量が大幅に増える。

需要側に比較的大きい圧力損失要因(今回の場合、真水との熱交換器と長い送水管)があり、送水ポンプの所要電力が大きい により水量が増えたときの消費電力の上昇幅が大きい。

(3) 検討対象とした久米島モデルでは、今後の海水需要見込みとして、今回検討した 4 つの需要の他では、水産養殖(牡蠣、スジアオノリ、シャコ貝、マナマコ)およびミネラルウォーター製造が挙げられている(添付 参考ページ参照)。

これらは農業や空調のような需要ではないことから、久米島モデルではカスケード利用(発電後海水を利用するケース)が中心になると考えられる。

OTEC にとっては、パラレル利用先が増えると発電出力が減るため、経済性が悪化するようと思われるが、2016 年度の発電利用実証事業での検討(第 部 3.4 節参照)においては、夏季のピーク時の最大発電出力を抑えることで経済性(kWh あたり建設費)を上げる可能性が検討されている(図 4-32)。数パーセント程度の発電量低下(夏季の出力を下げる)であれば、OTEC 側の経済性にほとんど影響がない可能性が高い。

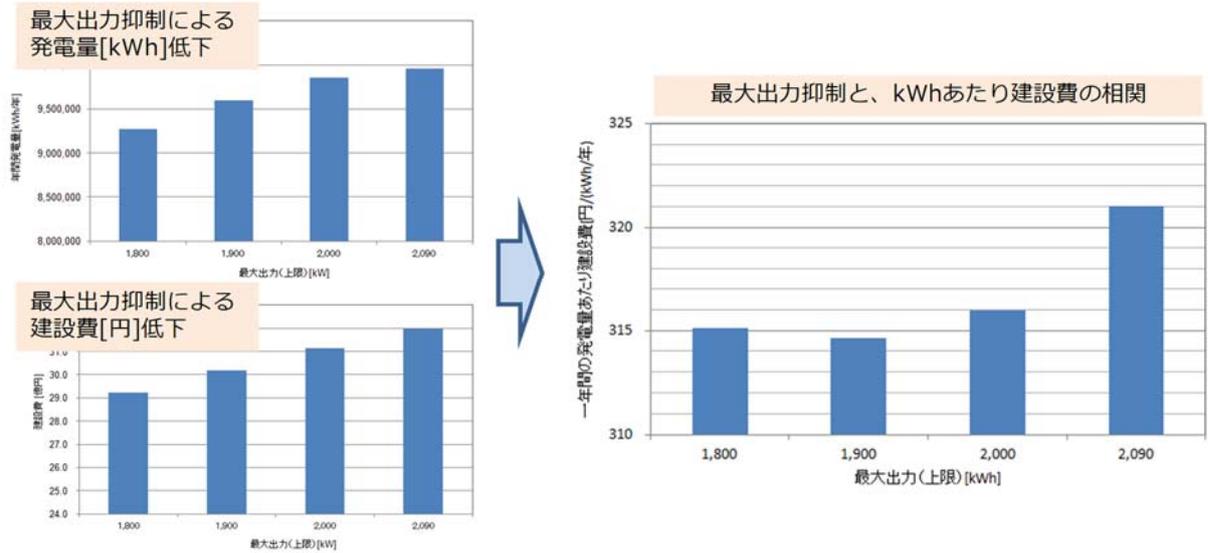


図 4-32 最大出力抑制と kWh あたり建設費の相関

以上の結果および考察を規模拡大時の各ケースの特徴比較として整理すると、表 4-15 のとおりとなる。

表 4-15 規模拡大時の各ケースの特徴まとめ

主な効果	パラレル	カスケードのみ	ハイブリッド (パ+カ)
OTEC導入により、エネルギーを生みだしながら取配水が可能（持続可能性への貢献） 周辺産業にも電力を供給すれば、低炭素型の産業地帯となる	◎	◎	◎
取水管建設コストのスケールメリット （取水量が10倍になっても、建設コストは3倍程度）→単位水量あたり建設コスト負担減	◎	◎	◎
取水ポンプ電力コストのスケールメリット （配管径が大→単位水量あたりの配管抵抗減により、消費電力も減）	◎	◎	◎
使用可能水量の増加による産業振興ポテンシャル拡大 海水を2回・3回と利用することで、「のべ」使用可能水量が増大	—	◎	○
発電後海水の利用高度化によるエネルギー効率向上・経済性向上・取配水事業性向上	—	○	◎
海洋深層水の「加温」需要・表層水の「冷却」需要への対応 カキ養殖や車えびブランド化、RO方式海水淡水化の省エネ等	—	◎	◎
OTEC出力の季節変動の平準化 パラレル利用でもケースにより経済性に影響しない可能性	△	○	○