

## 4. 海洋深層水の利用の高度化

### 4.1 海洋深層水のより高度な利用の可能性及び方法

#### 4.1.1 海洋深層水の複合的利用システムの概要

海洋深層水は、①単一物質であるが複数の資源価値をもち、②それぞれの資源密度は低い、といった特徴がある。このため、深層水の利用は多岐に亘り、発電や冷房等のエネルギー利用から、農業、水産業、あるいは成分を利用した食品・飲料・化粧品等への工業利用なども行われている。主な利用先を表 4-1 に示す。

表 4-1 海洋深層水の利用先

特性	利用先
冷温性	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 海洋温度差発電、火力発電への給気冷却・復水器利用</li><li>・ 建物・地域冷房（直接およびヒートポンプ利用）</li><li>・ 周年農業、冷室農業、植物工場</li><li>・ 水産養殖</li><li>・ 海水淡水化（フラッシュ蒸発法）</li></ul>
清浄性	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 海水淡水化（RO 膜）</li><li>・ 水素製造、次亜塩素酸製造</li><li>・ 化粧品等高水質要求産業への利用</li><li>・ タラソセラピー</li></ul>
肥沃性	<ul style="list-style-type: none"><li>・ ミネラル回収、資源回収（リチウム、マグネシウム、ウラン等）</li><li>・ 藻類培養（有価物利用、藻類バイオマス利用）</li><li>・ 食品、サプリメントへの利用</li><li>・ 飲料への利用</li><li>・ 海域肥沃化・漁場創生</li></ul>

（注）特性を複合的に利用する分野もあるが、ここでは主に利用される特性別に整理した。

一方、海洋深層水は海面下数百mの深さから汲み上げるために、揚水施設の建設と揚水のための費用負担が大きく、そのためにも深層水の資源を徹底的に利用するのが経済的である。深層水の資源を多段的に利用することを考えたのは、おそらくオスマーとロエル（Othmar and Roel）が最初であると言われる。その後、ハワイ自然エネルギー研究所や、日本においても、各種の深層水多段（カスケード）利用システムが提案されている。<sup>1</sup>

本事業が実施される沖縄県久米島町においても、平成 22 年度に行われた「久米島海洋深層水

<sup>1</sup> 「海洋深層水利用学 ―基礎から応用・実践まで―」、成山堂書店、藤田大介・高橋正征 編著、平成 18 年 11 月 18 日

複合利用基本調査」において、出力 1MW 級の海洋温度差発電設備を含む深層水カスケード利用に関する具体的な実施可能性評価を行なっている。同調査においては、多段階利用を構成する、発電、水産養殖業、農業（高度施設園芸）等について、個々の事業的成立性の初期評価と、そのための海水系統を提案した（図 4-1）。この中で、多段利用のメリットについては次の 4 点が挙げられている。<sup>2</sup>

- ① 負荷のピークシフトによる平準化と利用率の向上
- ② カスケード利用の熱力学的意義
- ③ 発電での利用熱量調整による熱・電バランス調整
- ④ 取水費用の分担と経済性向上

---

<sup>2</sup> 「久米島海洋深層水複合利用基本調査報告書」、久米島町、平成 23 年 3 月

# 久米島深層水複合利用フロー(案) 取水水深700m

冷熱需要ピークケース：夏季の風間／晴天時

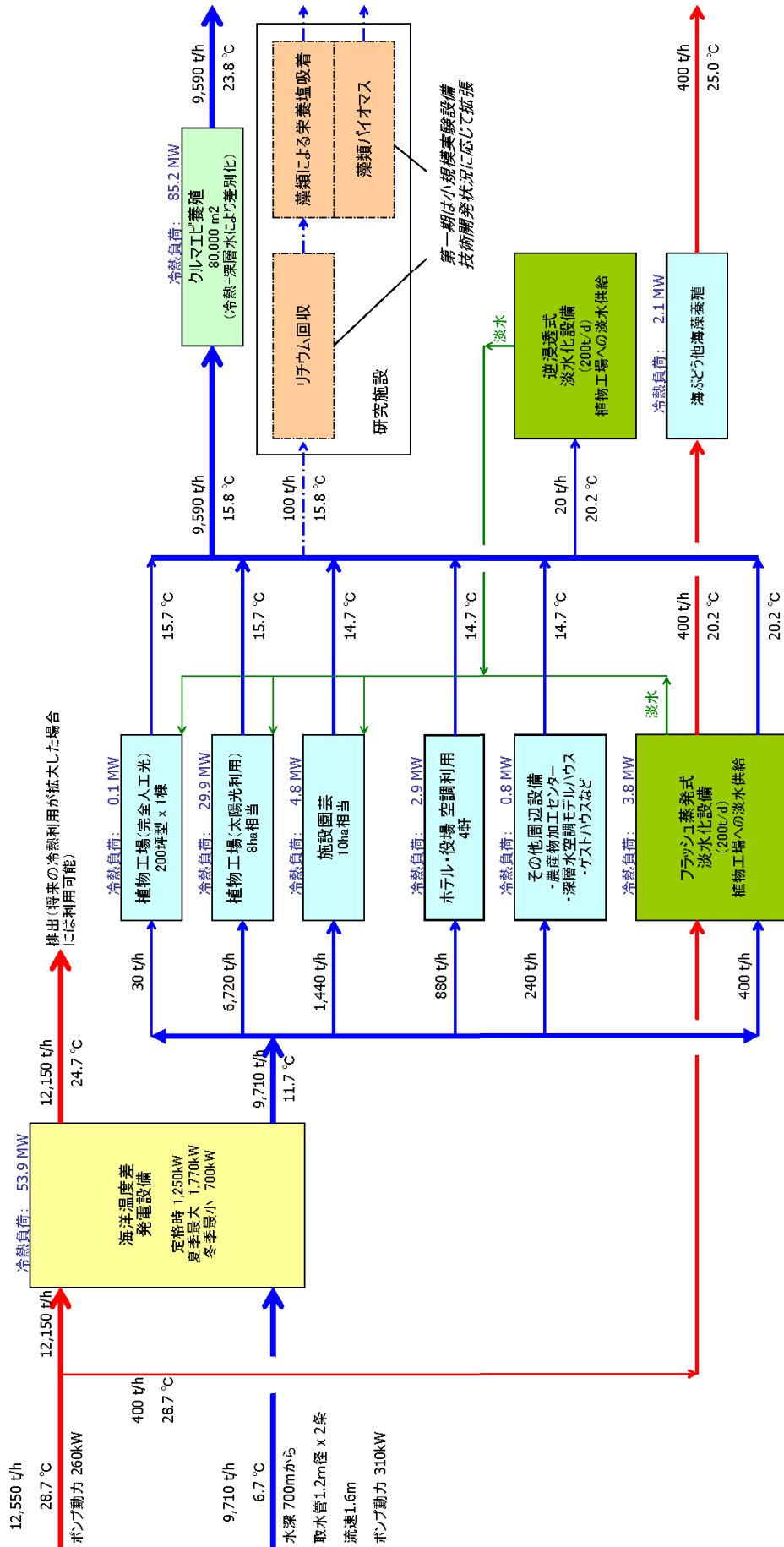


図 4-1 深層水多段階利用における海水フロー（久米島海洋深層水複合利用基本調査）

#### 4.1.2 中温利用（混合利用）におけるカスケード利用

現在、沖縄県海洋深層水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および）となっている。温度調整および換水のために、他の需要先と比較して水産利用が大量の深層水を必要とすることは、取水規模が拡大しても変わらないと考えられる。

ここで、現在の久米島における水産養殖における深層水冷熱利用では、深層水は冷たすぎるため直接養殖池に投入されていない。養殖池の水温を部分的に下げないよう、表層水と混ぜて温度調整して 20℃程度の中温にした上で投入されている。

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・表層水を用いた多段利用方式の 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

冷熱需要の大きい夏期における使用を想定し、次の比較を行う。

Case-1： 多段利用無しで、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 4-2）

Case-2： 海洋温度差発電後の海水を利用し、Case-1 と同様の供給を行なうケース（図 4-3）  
深層水温度は 9℃（現状の沖縄県海洋深層水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 4-2、表 4-3 に示す。

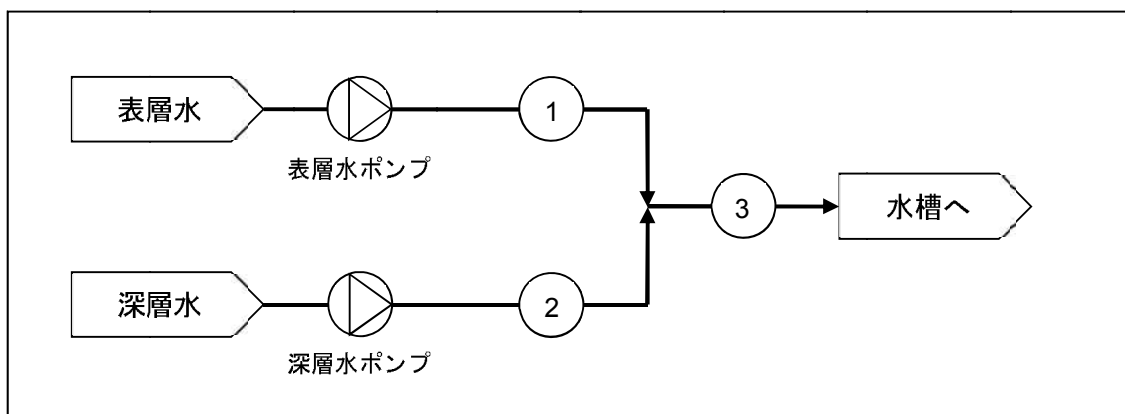


図 4-2 Case-1 多段利用なしのフロー

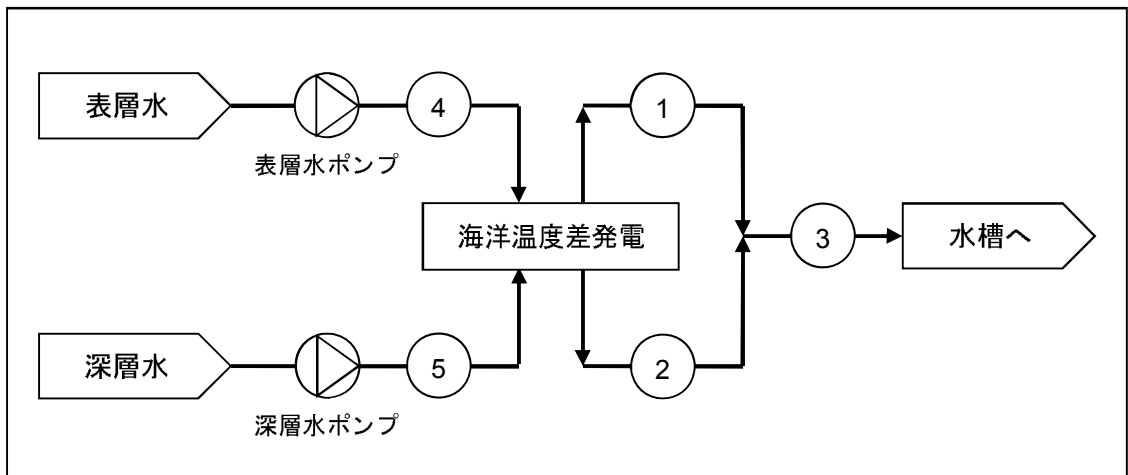


図 4-3 Case-2 多段利用ありのフロー

表 4-2 温度・流量(深層水温度=9°Cケース)

No.	温度 [°C]		流量 [t/h]	
	Case-1	Case-2	Case-1	Case-2
①	29.0	同左	220	222
②	9.0	同左	180	178
③	20.0	同左	400	同左
④	—	24.3	—	222
⑤	—	14.6	—	178

表 4-3 温度・流量(深層水温度=6°Cケース)

No.	温度 [°C]		流量 [t/h]	
	Case-1	Case-2	Case-1	Case-2
①	29.0	同左	243	245
②	6.0	同左	157	155
③	20.0	同左	400	同左
④	—	24.8	—	245
⑤	—	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なう。

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なう。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なう。算定結果を表 4-4、表 4-5 に示す。

表 4-4 エネルギー収支(深層水温度=9°Cケース)

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

(注)ポンプ消費電力は下記の通り計算した(添え字略)。

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

ただし、 $\eta_P$ : ポンプ効率=0.8、 $\eta_E$ : 電動機効率=0.95 とする。

表 4-5 エネルギー収支(深層水温度=6°C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 4-4 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 4-4 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°C 上昇分の場合
性能係数 COP	kW	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なう。

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  $\epsilon\rho\gamma\omicron\nu$ （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。<sup>3</sup>

本項で評価する熱の多段利用は、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なう。

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よび電気の持つエネルギーであるため、その計算式を下記に示す。

<sup>3</sup>小出昭一郎『基礎物理学2 熱力学』東京大学出版会、1980年

(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。

$$W = E_c, \text{ ただし、} E_c: \text{電力}$$



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、の通りとなる。

表 4-6 エクセルギー収支(深層水温度=9°C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	Δ 3.8	Δ 5.4	電力消費: 前項参照
深層水ポンプ	Δ 4.7	Δ 5.9	電力消費: 前項参照
汲み上げによる熱	95.6	94.8	25°C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°C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	Δ 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°C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	Δ 76.7	Δ 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	Δ 76.7	Δ 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 4-7 エクセルギー収支(深層水温度=6°C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	Δ 4.3	Δ 6.0	電力消費: 前項参照
深層水ポンプ	Δ 4.1	Δ 5.2	電力消費: 前項参照
汲み上げによる熱	117.2	116.3	25°C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°C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	Δ 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°C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	Δ 98.3	Δ 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	Δ 98.3	Δ 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、深層水の流量も多段利用前後でほとんど変わらない。ただし、深層水温度が6°C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。

#### 4.1.3 低温利用（深層水単独利用）におけるカスケード利用

現在、沖縄県海洋深層水研究所本館は、深層水によって冷却された清水を用いて冷房を行な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、深層水利用として最もポピュラーな方法である。

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・表層水を用いた多段利用方式の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、沖縄県海洋深層水研究所本館の冷房設備にて検討を行なう。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 4-8 に示す。

表 4-8 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°C, WB°C	27.9, 21.6
出口空気温度	DB°C, WB°C	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	°C	12.0
出口温度	°C	15.6
送風機		
風量	m <sup>3</sup> /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 として多段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する。

それぞれのフローを、およびに示す。

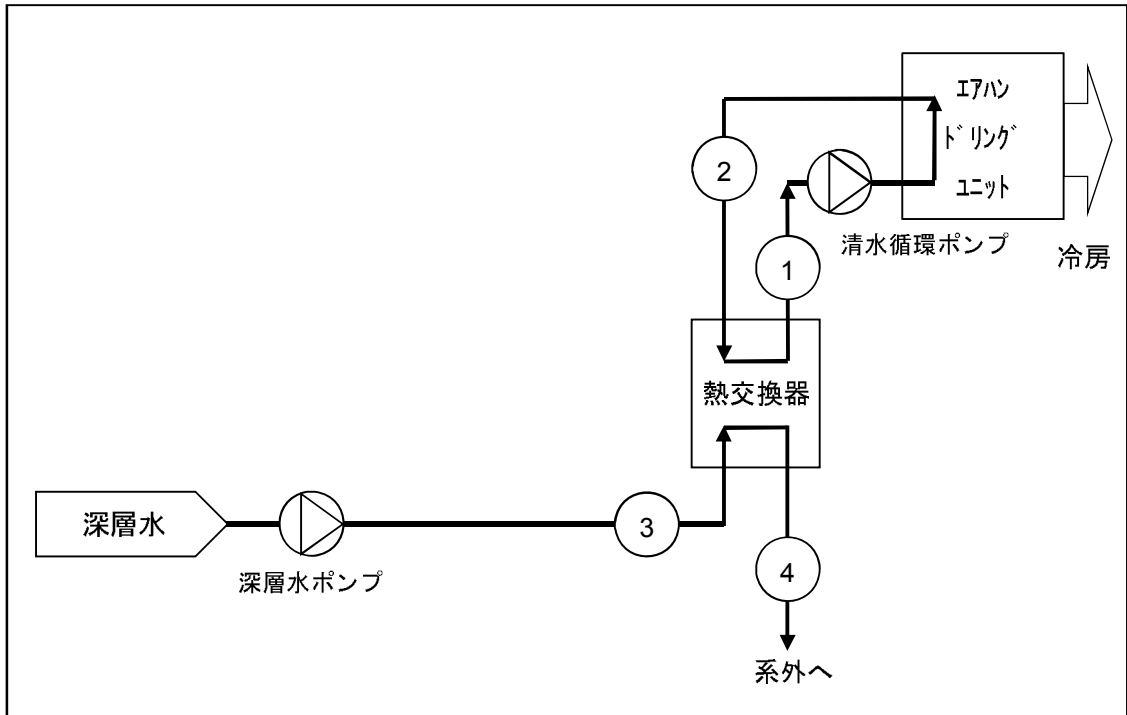


図 4-4 Case-1 多段利用なしのフロー

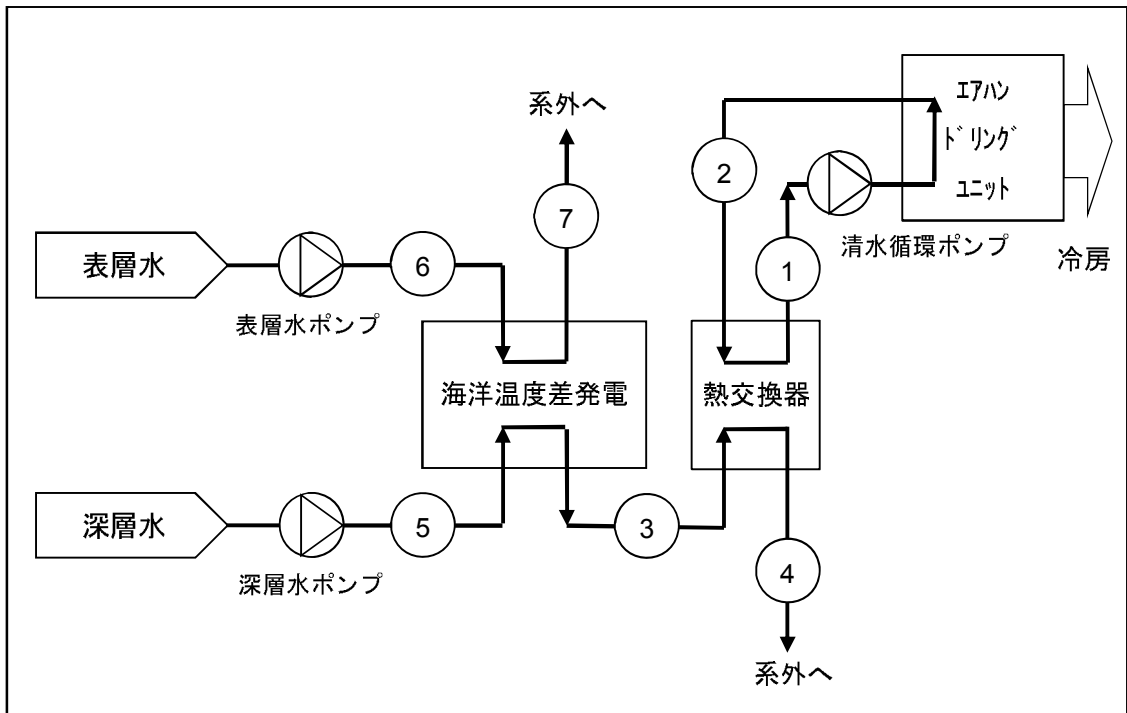


図 4-5 Case-2 多段利用ありのフロー

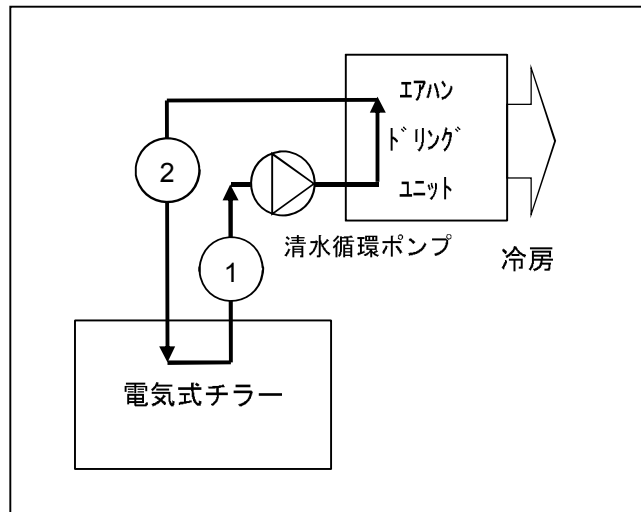


図 4-6 Case-3 電気式チラーを用いた場合のフロー

表 4-9 温度・流量(深層水温度=9°Cケース)

No.	温度 [°C]			流量 [t/h]		
	Case-1	Case-2	Case-3	Case-1	Case-2	Case-3
①	12.0	同左	同左	21.0	同左	同左
②	15.6	同左	同左	21.0	同左	同左
③	9.0	10.4	—	15.8	21.9	—
④	14.0	同左	—	15.8	21.9	—
⑤	—	9.0	—	—	21.9	—
⑥	—	29.0	—	—	4.4	—
⑦	—	22.0	—	—	4.4	—

表 4-10 温度・流量(深層水温度=6°Cケース)

No.	温度 [°C]			流量 [t/h]		
	Case-1	Case-2	Case-3	Case-1	Case-2	Case-3
①	12.0	同左	同左	21.0	同左	同左
②	15.6	同左	同左	21.0	同左	同左
③	6.0	10.4	—	9.9	21.9	—
④	14.0	同左	—	9.9	21.9	—
⑤	—	6.0	—	—	21.9	—
⑥	—	29.0	—	—	13.8	—
⑦	—	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なう。評価は前項と同様に、深層水温度が 9°C の場合、および 6°C の場合の 2 ケースについて行った。算定結果を表 4-11、表 4-12 に示す。

表 4-11 エネルギー収支(深層水温度=9°C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 4-12 エネルギー収支(深層水温度=6°C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 4-13 および表 4-14 の通りとなる。

表 4-13 エクセルギー収支(深層水温度=9°C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	-	Δ 0.08	-	
深層水ポンプ	Δ 0.41	Δ 0.73	-	
汲み上げによる冷熱	0.77	2.92	-	14°C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°C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	Δ 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	Δ 0.66	Δ 0.66	Δ 0.66	
電気式チラー	-	-	Δ 14.53	
エクセルギー収支小計	Δ 1.37	Δ 1.16	Δ 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	Δ 1.01	0.07	Δ 15.13	
汲み上げ後エクセルギー収支	Δ 1.37	Δ 2.05	Δ 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 4-14 エクセルギー収支(深層水温度=6°C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	-	Δ 0.24	-	
深層水ポンプ	Δ 0.26	Δ 0.73	-	
汲み上げによる冷熱	1.25	8.57	-	14°C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°C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	Δ 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	Δ 0.66	Δ 0.66	Δ 0.66	
電気式チラー	-	-	Δ 14.53	
エクセルギー収支小計	Δ 1.85	Δ 1.16	Δ 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	Δ 0.86	3.27	Δ 15.13	
汲み上げ後エクセルギー収支	Δ 1.85	Δ 4.33	Δ 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多段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°C の場合、既存の電気式チラーと比較した場合の省エネ効果より遥かに小さいため、経済性の面で成立し難い恐れもある。

系外に出る深層水温度は 14°C と低く、表層水も発電後は 22°C 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。

#### 4.1.4 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、商用化段階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少し、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現象等)を、実証設備の運転結果を基に検証する。

昨年度は、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通りについて、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)

世界的には、カナダ・トロントの湖水利用地域冷房や、仏領ポリネシア ボラボラ島のリゾートホテルやハワイ州自然エネルギー研究所における建物空調利用など、空調利用が先行している。冷房空調に用いる場合、必要とする冷水は低温(7℃～12℃程度)である。

一方、現在、沖縄県海洋深層水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ため次節にて検討し、ここ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)について述べる。

## (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 1-1 節で検討した1MW 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ない、発電出力をそれ以上上げないケースについて、表 4-15 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・°C]

$T_o$  : 発電に利用した場合の深層水温度[°C]

$T_i$  : 発電に利用する前の深層水温度[°C]

表 4-15 発電前分岐を行なった場合の電力・冷熱量得失

表層水 温度	オリジナル			発電前 分岐	差		年間日数
	発電端 出力	自己消費 電力	送電端 出力		発電 出力	冷熱 利用量	
°C	kW	kW	kW	kW	kW	GJ/h	日
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

前項の通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 2090kW、このときの初期費用 YA を 30 億円と仮定すれば、発電前分岐を行なう場合の発電プラント (最大発電出力 CB = 1910kW) 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評価する。

##### 発電減少による収入減

第(1)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(1)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て余りある。

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。

## 4.2 海洋温度差発電のために利用した後の海洋深層水の利用の可能性および方法

海洋温度差発電のために利用した後の海洋深層水の利用の可能性を検討するため、本年度は実証設備に、発電利用後の海水の温度を連続的に測定・記録する計測機器等を設備し、次年度以降、実運転データに基づいて本件を検討できるよう準備した。

### (1) 実証設備における海水温度計測センサー配置

実証設備に設置した海水温度計測センサーを、**図 4-7**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 4-8**に示す。

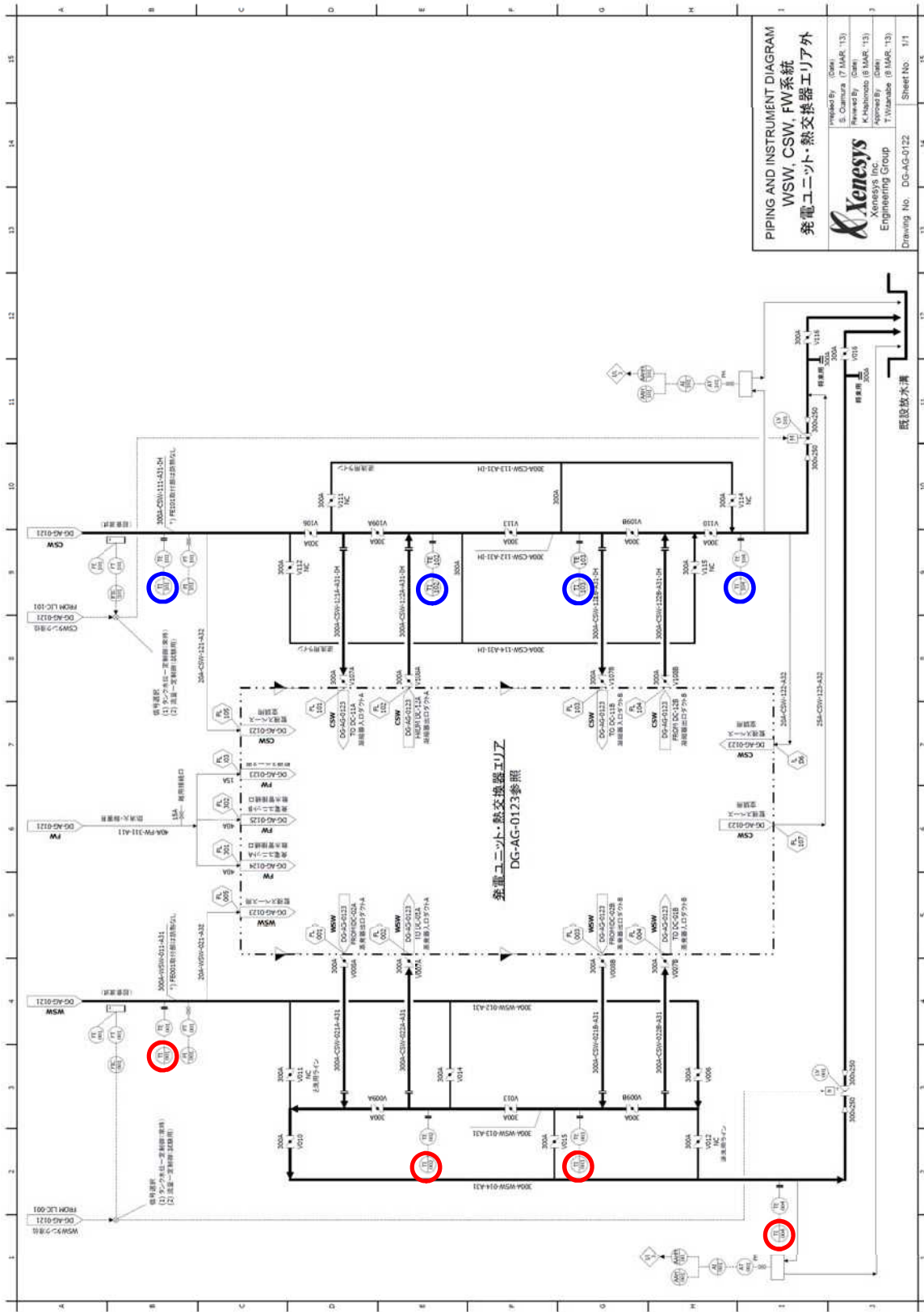


図 4-7 実証設備の海水系統における海水温度センサー位置

		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 <sup>3</sup> /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 4-8 海水温度記録例

#### 4.2.2 実証試験における発電利用後の深層海水・表層海水温度変化

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、表層海水および深層海水の入口温度、出口温度について、グラフにしたものを図 4-9 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、特に表層海水と深層海水の流量比によって将来計画とは大きくずれる。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、XXX に示す理論設計値を用いることとする。

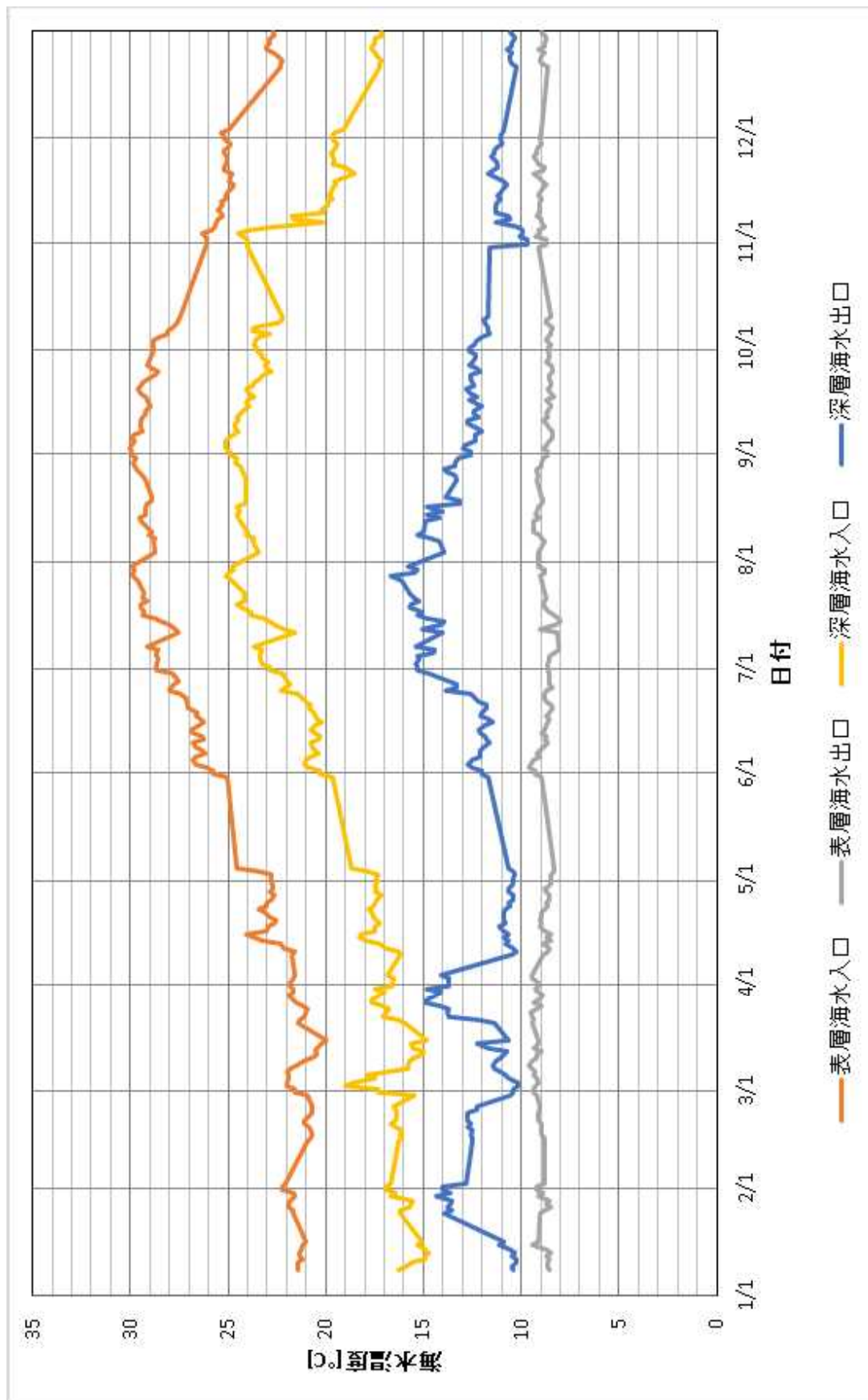


図 4-9 海水の入口・出口温度 (2014 年)



表 4-16 表層海水温別 発電利用後の温度

入口温度 °C	表層海水			深層海水			参考 2014 年度 頻度(%)
	中間温度(*1) °C	出口温度 °C	入口温度 °C	中間温度(*1) °C	出口温度 °C		
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) 表層海水量 / 深層海水量 = 1.25

#### 4.2.3 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、沖縄県海洋深層水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ない、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mp、モデルケースとして、表4-17の通り設定する。

表 4-17 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 <sup>3</sup> /日	流量は現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 <sup>3</sup> /日	流量は現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4-17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4-18及び図4-10、発電利用後の温度の場合の混合比を表4-19及び図4-11にそれぞれ示す。

表4-18 利用水温による混合比(発電利用前温度ケース)

利用水温	℃	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0
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

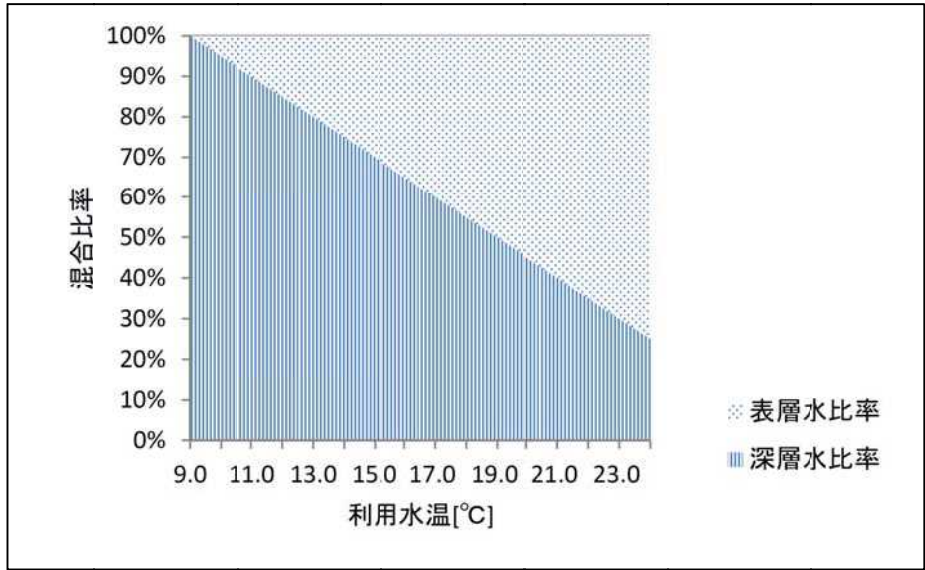


図 4-10 利用水温による混合比(発電利用前温度ケース)

表4-19 利用水温による混合比(発電利用後温度ケース)

利用水温	℃	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	℃	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

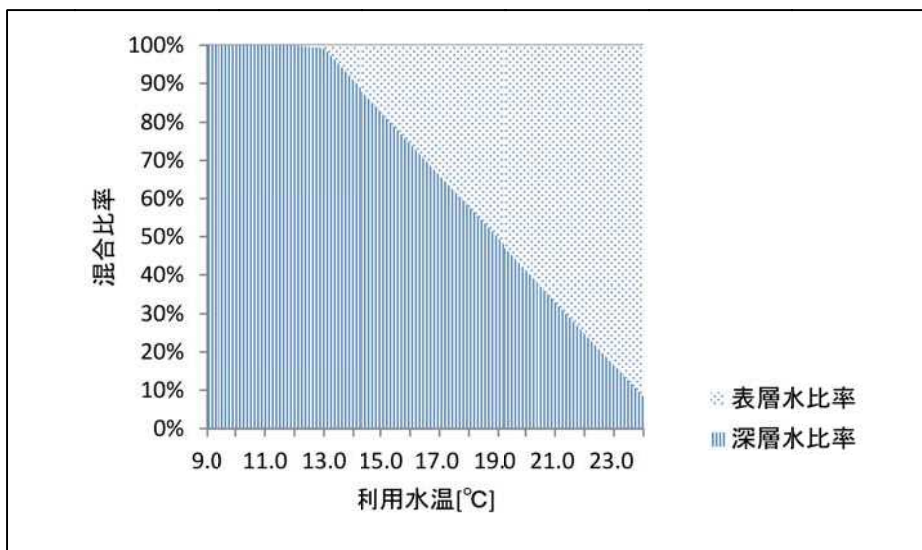


図 4-11 利用水温による混合比(発電利用後温度ケース)

### (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(13,000m<sup>3</sup>/h)を考慮すると、利用水温別の冷海水利用可能量は、表 4-20 及び図 4-12 の通りとなる。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をほぼ変わらない。

表4-20 利用水温別冷海水利用可能量の比較

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 <sup>3</sup> /h	13,000	13,684	14,444	15,294	16,250	17,333	18,571	20,000
発電利用後	m <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /h	21,667	23,636	26,000	23,636	21,667	20,000	18,571	17,333
発電利用後	m <sup>3</sup> /h	19,663	22,471	25,787	22,155	19,420	17,286	15,574	14,171

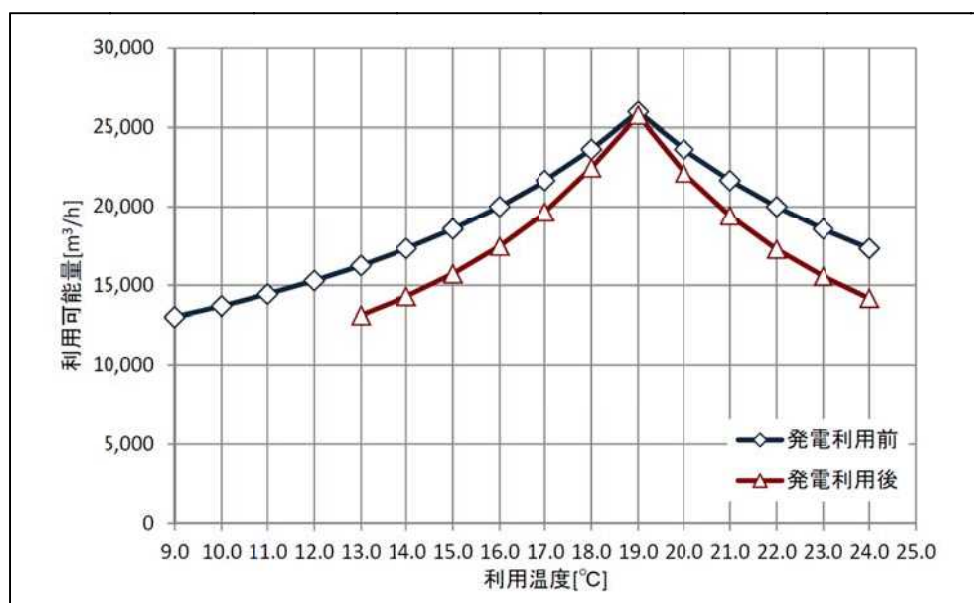


図 4-12 利用水温別冷海水利用可能量の比較

### (4) 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出来る。

### 4.3 より高度な複合利用のシステム例

#### (1) 検討モデル

平成 26 年 7 月 21 日 久米島町長を委員長として、大学、官公庁、深層水利用民間企業等の団体により「国際海洋資源・エネルギー利活用推進コンソーシアム」が発足した。同コンソーシアムでは、4.1.1 項で述べた「久米島モデル」を世界に向けて提唱していくことを目的に、「久米島モデル」の具体的実現方法を詳細化し、ロードマップを確立する活動を行っている。平成 26 年度中は、車エビの成エビ養殖への深層水利用拡大、海ブドウ養殖場拡大、貝類養殖の展開(餌料含む)、冷熱利用農業についての具体化が進んだ。

そこで本節では、久米島モデルでの深層水需要に、上記で具体化した情報を考慮して、検討モデルとする。検討モデルの深層水需要を表 4-21 に示す。

表4-21 検討モデルの深層水需要

用途	使用水量 (m <sup>3</sup> /日)	所要温度 (°C)	備考
車エビ成エビ養殖	28,000	11.0	夏期のみ
海ブドウ養殖場	12,000	20.0	夏期のみ、表層水が好ましい
貝類(餌料含)陸上養殖	50,000	18.0	通年(栄養塩利用)
貝類(餌料含)港内養殖	あるだけ	15.0°C以下	通年(栄養塩・水温利用)
冷熱利用農業	30,000	11.0	夏期のみ
空調利用	20,000	11.0	
海水淡水化設備(蒸発式)	10,000	なるべく低	深層海水、表層海水とも
海水淡水化設備(RO式)	500	なるべく高	

#### (2) 海水取配水コンセプト

海水系統は、第3章で述べた開放型取水ピットの利点を生かし、複数の温度帯のピットを設備して、利用の柔軟性を向上させる(図4-13)。

#### (3) 複合利用システム例

4.1節、4.2節の検討および上記(1)(2)に基づいて複合利用システムを検討した。図4-14(夏期)および図4-15(冬期)に、システムのフローを示す。

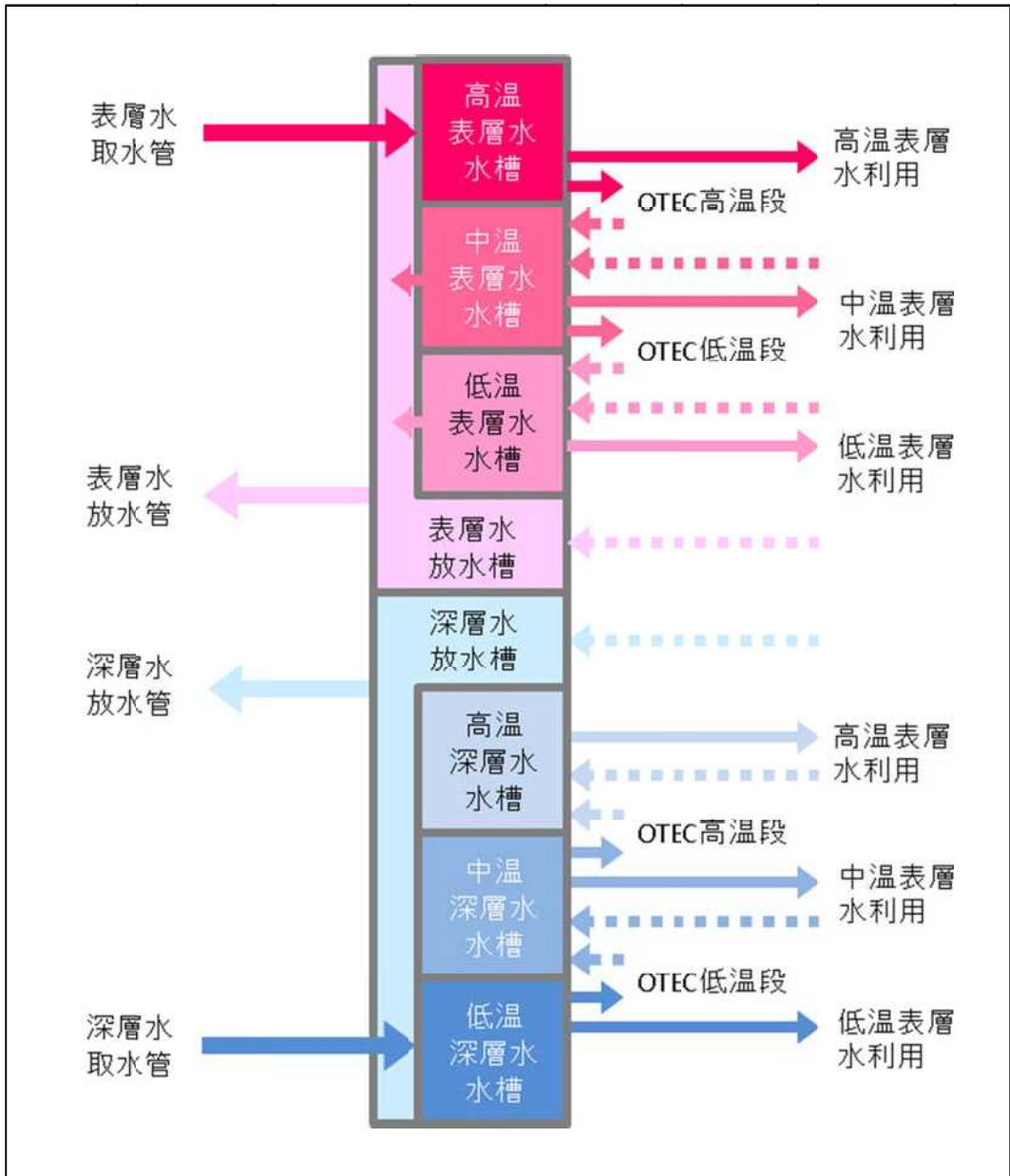


图 4-13 海水取配水コンセプト

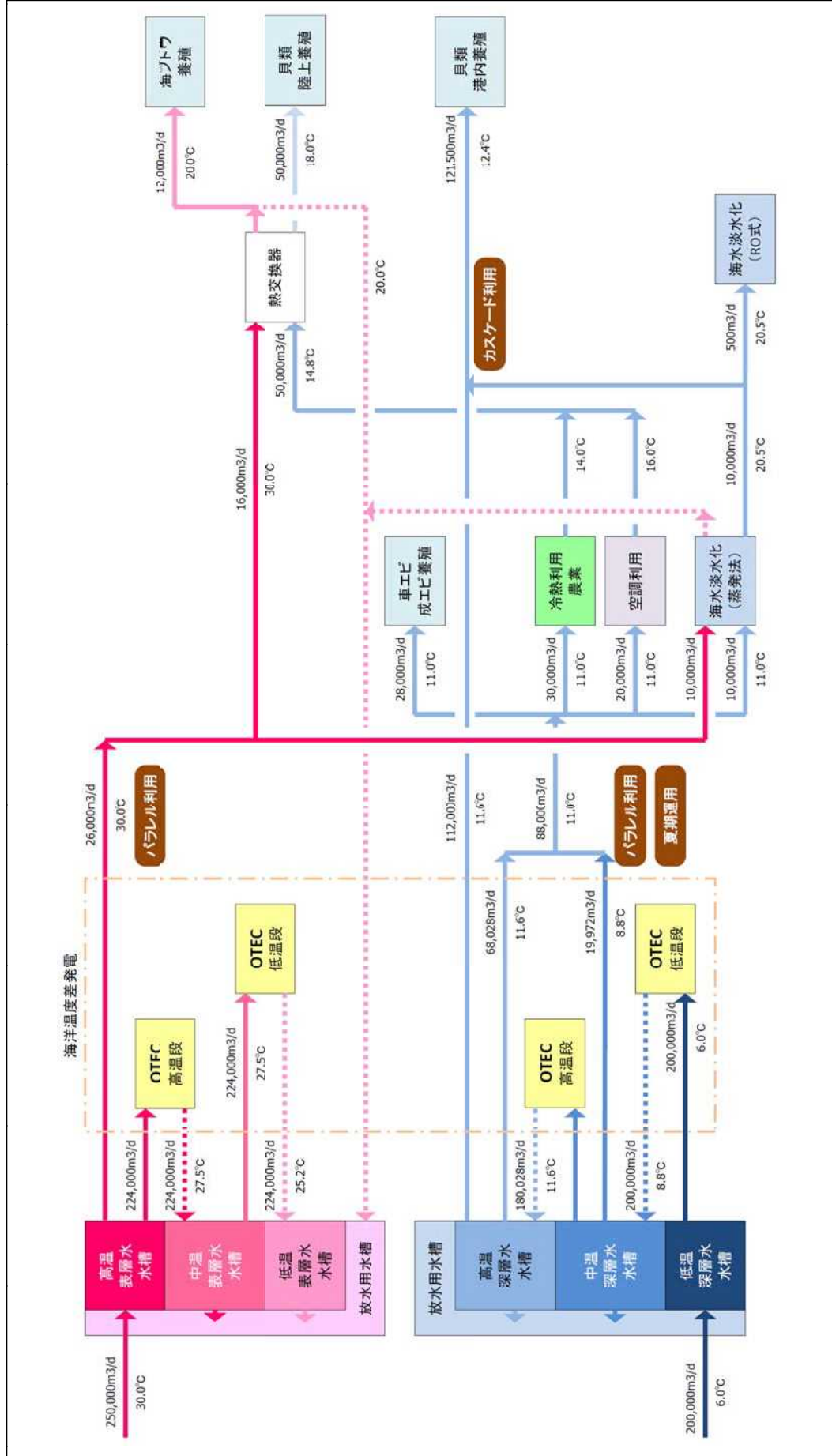


図 4-14 高度な複合利用(例)：夏期ピーク時

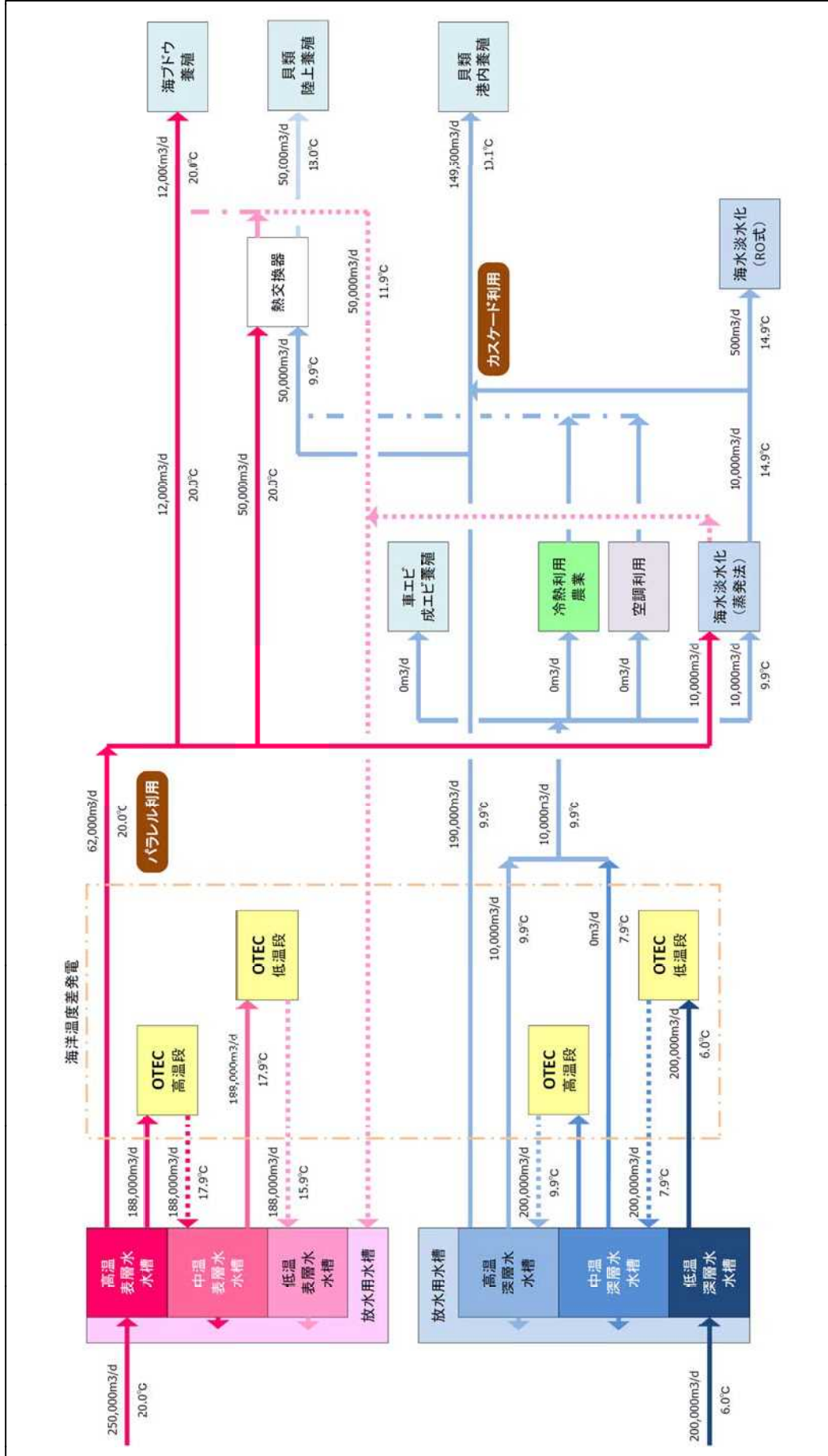


図 4-15 高度な複合利用(例): 冬期



## 5. 検討委員会

本事業の実施状況の報告と実施のあり方を検討するため、検討委員会を開催した。委員会メンバーは、琉球大学、佐賀大学、沖縄県商工労働部、沖縄県海洋深層水研究所、久米島町役場プロジェクト推進室、受託企業とした。

表 5-1 に開催日時と概要を示す。また、別添資料③および④に、議事概要と報告資料を示す。

表 5-1 検討委員会開催日時と概要

日時	場所	内容
H26.5.19	沖縄船員会館	平成 25 年度の運転内容の報告および平成 26 年度の運転・解析に関する検討
H26.10.29	イーブ情報プラザ	平成 26 年度上半期の運転内容の報告および今後の運転に関する検討
(H27.4 月予定)	(未定)	平成 25-26 年度の運転内容の報告

平成 26 年 5 月の検討委員会では、受託者より平成 25 年度の運転および解析結果について報告を行なった。特に、他地域に比べて際立って汚れが少なかった蒸発器の評価と対策について、議論が行われた。

平成 26 年 10 月の検討委員会では、5 月に起こった落雷による故障、7 月に起こった台風によるケーブル破断等、自然災害について、受託者より報告があった。また、熱交換器の汚れについても、性能低下が小さいために却って評価がしづらい程であることが報告された。