

緑の分権改革推進事業

# 久米島海洋深層水複合利用基本調査

調査報告書

平成 23 年 3 月

調査主体：沖縄県久米島町

## 目 次

<b>第 1 章</b>	<b>調査概要</b> .....	<b>1</b>
1.1	はじめに.....	1
1.2	調査の要目.....	2
1.3	調査実施体制.....	4
<b>第 2 章</b>	<b>地域資源としての海洋深層水</b> .....	<b>5</b>
2.1	島嶼地域における海洋深層水活用の意義.....	5
2.2	沖縄県及び久米島町での海洋深層水利用状況.....	7
2.3	久米島町における海洋深層水利用 10 年間の歩み.....	11
<b>第 3 章</b>	<b>海洋深層水利用の歴史と可能性</b> .....	<b>17</b>
3.1	海洋深層水の概要.....	17
3.2	国内外各地の海洋深層水利用状況.....	21
3.3	エネルギー資源としての海洋深層水.....	27
<b>第 4 章</b>	<b>各種複合利用技術の動向調査</b> .....	<b>30</b>
4.1	各種複合利用システムの概要.....	30
4.2	海洋温度差発電の概要.....	31
4.2.1	技術の概要.....	31
4.2.2	発電ポテンシャル.....	35
4.2.3	発電コスト.....	37
4.2.4	近年の動向.....	38
4.2.5	我が国における推進施策とロードマップ.....	40
4.3	海水淡水化システム.....	42
4.4	冷熱としての利用.....	50
4.4.1	農業・植物工場分野.....	50
4.4.2	水産養殖分野.....	65
4.4.3	地域冷熱利用分野.....	71
4.5	食品・医療品・化粧品分野.....	77
4.6	海水からのレアメタル回収.....	80
4.7	水素製造を中心としたエネルギー形態変換.....	82
4.8	次亜塩素酸ナトリウム製造.....	85
4.9	その他利用技術.....	85
4.9.1	海洋深層水を利用した冷蔵・冷凍倉庫と食品加工工場.....	85
4.9.2	海洋深層水冷房を利用した大型データセンター.....	87
4.9.3	栄養塩による藻類培養.....	88
<b>第 5 章</b>	<b>持続可能な深層水複合利用モデルの提案</b> .....	<b>90</b>
5.1	再生可能な「地域資源」深層水複合利用による自立型コミュニティの形成.....	90
5.2	海洋深層水複合利用手法 ～パラレル利用とカスケード利用～.....	91

5.3	海洋深層水複合利用のメリットの考察 .....	93
5.3.1	負荷のピークシフトによる平準化と利用率の向上 .....	93
5.3.2	カスケード利用の熱力学的意義 .....	94
5.3.3	発電での利用熱量調整による熱-電バランス調整 .....	96
5.3.4	取水費用の分担と経済性向上 .....	97
5.4	深層水複合利用の全体ビジネスモデル .....	99
5.4.1	ビジネスモデルのコンセプト .....	99
5.4.2	.....	101
5.4.3	各種複合利用事業の深層水付加価値と経済収支 .....	102
5.4.4	複合利用ビジネスモデルのまとめ .....	109
<b>第6章</b>	<b>久米島における海洋温度差発電の基本計画 .....</b>	<b>114</b>
6.1	久米島における発電システムの基本設計 .....	114
6.1.1	久米島に適した発電規模の検討 .....	114
6.1.2	発電システムの基本計画 .....	115
6.1.3	建設スケジュール .....	128
6.1.4	環境効果 .....	129
6.1.5	建設及び運転費用の試算 .....	130
6.1.6	経済性の試算 .....	131
6.2	種々の再生可能エネルギーとの特性比較 .....	133
6.3	海洋温度差発電に関わる許認可方法と運営方法の整理 .....	135
6.3.1	海洋発電設備の設置に関わる法体系の整理 .....	135
6.3.2	海洋発電設備の設置に関する行政面の手続き .....	136
6.3.3	電力会社との協議（連系協議） .....	142
<b>第7章</b>	<b>大口径取水管の計画 .....</b>	<b>146</b>
7.1	大口径取水管技術の近年の動向 .....	146
7.2	深層水取水設備の基本計画 .....	148
7.2.1	取水管敷設ルートを選定 .....	148
7.2.2	取水管材質を選定 .....	150
7.2.3	取水管径の検討 .....	150
7.2.4	取水管敷設方法の検討 .....	150
7.2.5	取水ポンプの仕様決定 .....	153
7.2.6	取水ポンプ設置方式の選定 .....	153
7.2.7	取水ピットの外形 .....	155
7.3	表層水取水設備の基本計画 .....	156
7.3.1	取水位置の選定 .....	156
7.3.2	取水方式の選定 .....	156
7.3.3	陸上配管径の検討 .....	156

7.3.4	取水ポンプの仕様決定.....	156
7.4	取水設備全体配置と仕様まとめ.....	157
7.5	取水設備建設スケジュール.....	157
7.6	取水設備建設費用の試算.....	161
7.6.1	深層水取水設備建設費用の試算.....	161
7.6.2	表層水取水設備建設費用の試算.....	162
7.6.3	深層水取水設備建設費用に関する感度分析.....	163
<b>第8章</b>	<b>海洋深層水複合利用『久米島モデル』.....</b>	<b>166</b>
8.1	『久米島モデル』のコンセプト.....	166
8.1.1	『久米島モデル』の意義.....	166
8.1.2	各海洋深層水利用技術のポテンシャルと位置づけ.....	166
8.2	第一フェーズ：実証された技術の商用展開と、将来に向けた取り組み.....	170
8.2.1	設備構成、深層水および表層水のフローと熱物質バランス.....	170
8.2.2	設備配置案.....	170
8.2.3	設備仕様および建設費.....	174
8.3	第二フェーズ：将来のさらなる拡大の可能性.....	179
8.4	『久米島モデル』の環境効果、経済効果および雇用創出効果.....	180
8.4.1	環境効果.....	180
8.4.2	産業連関モデルを用いた経済効果の試算.....	181
8.4.3	雇用創出効果の試算.....	182
8.5	『久米島モデル』実現に向けた課題と対策.....	185
<b>第9章</b>	<b>沖縄県及び我が国に資する効果.....</b>	<b>187</b>
9.1	海洋深層水複合利用による自立型コミュニティの沖縄県および国内への展開.....	187
9.2	海洋深層水複合利用施設の海外市場への展開.....	188
9.3	海洋温度差発電による沖縄県へのグリーン電力大規模供給.....	189
9.4	海洋温度差発電設備の洋上エネルギー生産基地としての展開.....	189

## 第1章 調査概要

### 1.1 はじめに

本報告書は、沖縄県久米島町から緑の分権改革推進事業「海洋深層水複合利用基本調査等業務委託」として委託を受けて実施した調査の結果をまとめたものである。

これからの地域は「地域の持久力と創富力を高める地域主体型社会」への転換が求められている。その中で、久米島町では10年以上にわたり活用を続けてきている地域資源である海洋深層水を活かしてエネルギーの自給率向上を図るとともに地産地消、循環型社会の構築を目指している。

また、周囲を海に囲まれる我が国では、波力、海洋温度差、潮流等、海洋の再生可能エネルギー利用の研究開発が強化されており、実用規模のプラント建設の要望が高まっている。

このような背景のもと、本調査では、海洋温度差発電によるエネルギー確保と海洋深層水複合利用の更なる推進により、環境問題及びエネルギー問題の解決と久米島町における新産業創出及び雇用の増大を図り、地域活性化につながるための調査と検討を行った。同時に、海洋温度差発電によるエネルギー自給を含めた海洋深層水大規模複合利用施設はこれまで全世界で前例がないため、本調査では久米島におけるプロジェクトが、熱帯・亜熱帯の沿岸地域や島嶼地域に対するモデル性を持つことも考慮した。

本調査にご協力頂いた方々に心から感謝申し上げるとともに、本報告が久米島及び沖縄県全域の島嶼部における海洋深層水の複合利用の更なる発展、ひいては久米島を発信地とした熱帯・亜熱帯の国々での低炭素社会構築の推進に向けた一助になれば幸甚である。

## 1.2 調査の要目

本調査は大きく下記の 8 項目から構成される。調査実施に際しては、久米島での海洋深層水利用の現状を踏まえた上で、久米島及び沖縄本島を中心とする現地調査や各種専門知識をもつ専門家を訪ねてのヒアリングを行い、海洋温度差発電を中心とする海洋深層水複合利用技術に関する社内のノウハウを結集し、調査及び検討を行った。

### (1) 地域資源としての海洋深層水

離島地域を始めとする島嶼地域は、概して人口規模も小さく交通・輸送手段が発達しているとはいえ、経済活動を行う上では恵まれている状況とはいえない。そのような島嶼部特有の地理的、経済的背景を整理し、それら課題を解決する手段としての海洋深層水複合利用の有効性を検討した。

久米島町では既に 10 年以上にわたって海洋深層水の取水が行われており、海洋深層水関連企業も多く起業するなど、島に大きな経済的利益をもたらしてきた。これらの久米島での海洋深層水複合利用の成果をまとめるとともに、沖縄県での海洋深層水利用に関するこれまでの経緯を調査することで、今後の久米島における海洋深層水複合利用の方向性を整理した。

### (2) 海洋深層水の歴史と可能性

海洋深層水は、低温性や清浄性、富栄養性など一般の表層水にはない様々な有用な特性を含んでいる。これらの特徴と利用状況について国内外の開示されているデータベースを基に情報収集を行った。また久米島町周辺海域における海洋温度差エネルギーの賦存量については、大阪府立大学大学院工学研究科海洋システム工学分野の大塚耕司教授に海洋深層水利用可能量の評価を依頼し、海流量を考慮した上で、環境に影響を与える恐れのない範囲でのエネルギー利用可能量を評価した。

### (3) 各種複合利用技術の動向調査

海洋深層水の複合利用形態に関して、海洋温度差発電、海水淡水化、冷熱利用分野、食品・医薬品・化粧品分野、海水からのリチウム回収、その他利用技術について最新の技術動向と経済性を評価した。この中で、現時点で十分に久米島の特性にマッチしているものもあれば、長期的な視点からその実証試験を進めることに意義のある技術、また、久米島の地域特性と必ずしもマッチしているとはいえないが沖縄本島などの大規模需要地を控えた地域では有効な技術など、様々な位置づけの技術がある。本章では、経済性の面からの議論だけでなく、幅広くかつ長期的展望からそれぞれの位置づけを整理することに主眼を置いて検討を行った。

### (4) 持続可能な海洋深層水複合利用モデルの提案

海洋深層水複合利用では、海洋深層水を持つ様々な特性を活用することとなるが、それらを最大限に活かすためには、利用する順序やその特性の意義を十分に整理しておく必要がある。ここでは、カスケード利用の熱力学的意義や負荷の平準化、電力利用と冷熱利用のバランスなどのトータルの視点から、海洋深層水複合利用の全体像を俯瞰する。

また、海洋深層水複合利用においては、取水した海洋深層水を多段階利用するため、その取水コストを利用者全体でどのように負担していくかが重要な検討テーマとなる。本調査では、海洋深層水利用によって得られる付加価値を切り口に、海洋深層水複合利用の新たなビジネスモデルを検討、提案した。

#### (5) 久米島における海洋温度差発電の基本計画

海洋深層水の複合利用の主な活用方法の一つが海洋温度差発電である。ここでは、最新の技術情報を活用し、久米島の状況にあった最適な海洋温度差発電システムを選定し、基本計画、設計、建設費見積りを実施し、経済性やエネルギーバランス等を評価した。

また、海洋温度差発電で発生した電力は、本発電所周辺の電力需要や状況により、その電力を単独利用するか、既存の電力供給網に系統連系するかといった利用方式が変わってくる。本調査では、海洋温度差発電の電力特性と周辺施設（海洋深層水複合利用施設を含む）の利用状況を十分検討した上で、系統連系を行う場合に必要な条件の概要を調査した。

#### (6) 大口径取水管の計画

海洋深層水の複合利用にとって、技術的にもまた経済性の面からも重要な要素の一つに海洋深層水の取水管がある。とくに今回検討している複合利用では、国内の陸上型取水施設としては前例のない直径 1m を超える取水管が必要になる。そのような大口径取水管に関して、近年の技術動向を含めて工法、材質、規模、設置コストなどの面から検討を行い、久米島における取水管敷設の基本計画を行った。

#### (7) 海洋深層水複合利用『久米島モデル』

ここまで検討してきた各種複合利用技術の中から特に久米島の特性に合った技術を中心に、その適用性や最適な規模などを計画した。この際、各技術の開発段階や将来性を鑑み、実施時期を二つのフェーズに分けることで、より実現性の高い計画としている。

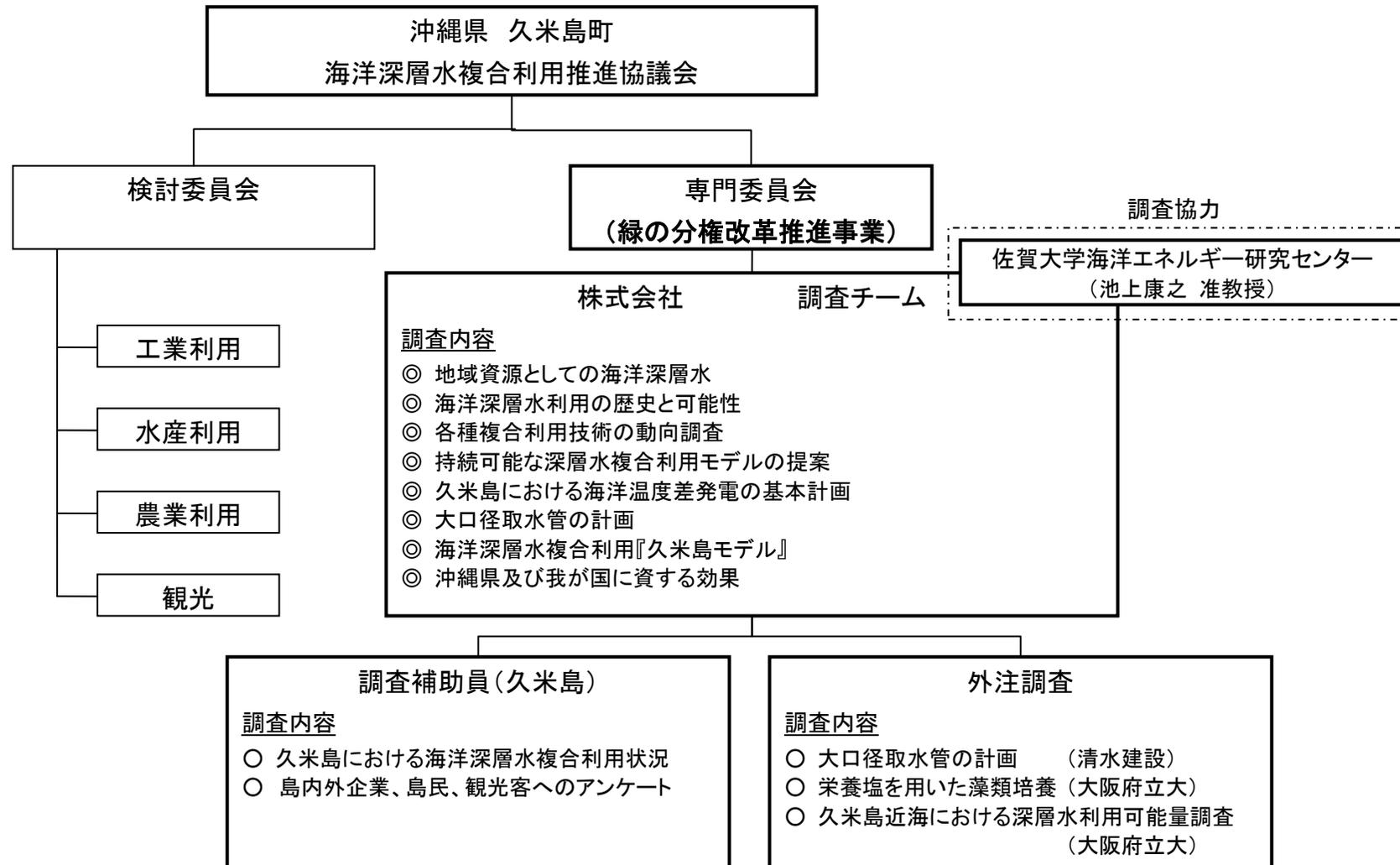
また、それぞれの技術の経済性と地域への経済波及効果、雇用創出効果についても試算を行った。これらを含めて海洋深層水の複合利用の『久米島モデル』という形で提案を行っている。

#### (8) 沖縄県及び我が国全体への波及効果

最後に、海に囲まれた我が国において海という資源を活かした地域づくりが今後更に進んでいくための一助となるよう、これら海洋深層水複合利用技術の沖縄県及び我が国全体への波及効果をまとめた。

### 1.3 調査実施体制

以下に本調査の実施体制及び調査内容を示す。



## 第2章 地域資源としての海洋深層水

### 2.1 島嶼地域における海洋深層水活用の意義

久米島を始めとする沖縄の離島・島嶼地域は、海に囲まれた豊かな自然や古くからの文化や習慣が残されており、それに魅かれて毎年多くの観光客が訪問している。また、地元の人たちのあたたかいホスピタリティや自然に囲まれた環境そのものが本土の生活にはない非日常性を感じさせる要因ともなっており、一度訪れた人がリピーターとなって再訪する割合も多く、それら島々の魅力は大変大きなものであるといえよう。

一方で、島に拠点を持つ住民や企業にとってそれらの魅力は十分に感じているものの、人口規模が小さく、交通・輸送手段がそれほど発達していない環境は、経済活動を行う場としては決して恵まれているとはいえない状況にある。

離島地域における主要な産業はやはり観光に関連するサービス業が一つの柱となり、製造関連産業も一定割合あるものの、農業や水産業を中心とする第一次産業が他の地域に比べて大きな収入源となっている。これらは先述のように地域の豊かな自然という魅力を活かしたものではあるが、島からの出入りの輸送コストも含めるとどうしても限られた範囲での経済活動になってしまう。

また、沖縄地方は台風の通りみちにあたることから一旦荒天が続けば、生鮮食料品の供給が止まるなど自然の影響を非常に受けやすいという弱点も抱えている。加えて、エネルギーセキュリティという面からも離島地域の発電は、基本的に本島から供給される燃料に依存するディーゼル発電が主体となっているため、本土からの燃料輸送が長期間止まることは、生活の基盤を支えるインフラの安定性にとって大きなリスクを抱えている状況ともいえる。

それぞれの島のもつ特徴や抱える課題は、その地理的位置、産業構造、人口規模などによって各々に大きくことなるが、今後に向けた課題解決のアプローチとして共通することは、地域が主体となった取り組みが最も重要な要素であり、総務省の緑の分権改革ではこれからの地域の目指すべき方向性を以下のよう示している。

『これからの地域は地域資源を最大限に活用する仕組みを地域の様々な主体が協働・連携することにより、地産地消、低炭素社会を創り上げ「地域の自給力と創富力を高める地域主権型社会」への転換が求められている。』

久米島ではその地形的特色を活かし、約10年前に陸上取水型としては国内最大規模の海洋深層水の取水管を設置し、実際に取水した海洋深層水を中心とした町の活性化を進めてきている。久米島の海洋深層水はまさに久米島にとっての地域資源であり、利用開始後10年の間に海洋深層水を利用した水産業や食品、化粧品の製造業など多くの会社が創業し利用を続けている。これにより島に経済的利益をもたらすとともに新たな雇用の場を創出してきており、住民生活に根づいた形で利用が進められてきている。

そして、その間にも農業分野や冷熱性を使ったエネルギー分野のような新規分野での活用も研究が続けられており、これら新産業への展開が更なる地域の活性化につながることも期待されている。

その一方、海洋深層水の利用量は取水設備が設置された 10 年前より増えてきてはいるものの、最近では新たに利用したくても取水量が限られていることがネックとなり、実際には新規の産業で大量に利用することは大変難しい状況にある。

海洋深層水の新たな分野での利用が進められることは、新産業による雇用創出効果はもちろんのこと、食料分野だけでなくエネルギー分野での地産地消のモデル地区、環境に配慮した循環型社会のモデル地区、自立した離島経済としてのモデル地区、次世代型海洋深層水複合利用としてのモデル地区など、様々な形での先進的な取り組み「久米島モデル」としての存在感を国内外に示すことにつながると考えられる。

またこの「久米島モデル」は離島地域だけでなく、沖縄本島に対するモデル地区にもなり、ひいては周囲を広大な海に囲まれた日本全体におけるモデルアイランドともなりうるものである。

また、これらの海洋深層水複合利用技術は南太平洋などの熱帯・亜熱帯地域に無数に点在する島々へも応用可能な技術であるため、これら技術群をそれら地域へグリーンインフラとして輸出することで、我が国が今後益々技術立国としての地位を確立していくことに貢献していくことが期待されている。

## 2.2 沖縄県及び久米島町での海洋深層水利活用状況

沖縄県で最初に海洋深層水の利活用が提案されたのは、1986年(昭和61年)に県が実施した「沖縄県海洋科学技術基本構想調査」である。本調査では、亜熱帯環境にある沖縄海域での海洋深層水利用技術開発について、沿岸に取水施設を設置する「陸上生産型の海洋深層水利用技術開発」、浮魚礁と取水施設をドッキングした「沖合浮魚礁型の利用」、沿岸から離れたサンゴ礁のラグーンに海洋深層水を汲み上げて利用する「特殊ラグーン域生産型の利用」の3タイプが提案された(表2-1)。

その後、1993年に、新たに民間主導で海洋深層水複合利用についての調査が行なわれるとともに、県内企業で構成する「沖縄県海洋深層水利用推進協議会」が結成された。また、本協議会のメンバーが中心となって発足した「沖縄県海洋深層水開発協同組合」が、1997年に世界初の洋上設置型海洋深層水試験取水装置「海ヤカラ1号」を糸満市の喜屋武岬沖30kmの海域に設置して共同で取水を始め、海洋深層水を利用した医療及び食品の研究開発が進められた。

このような海洋深層水へ関心の高まりを受け、沖縄県では1994年度に「研究拠点立地条件等調査」を行い、沖縄近海の海洋深層水の特性を確認するとともに、取水・研究施設の適地として県内3箇所を候補地とした。本調査では、当初、沖縄県周辺で25箇所の取水適地が示されていたが、海岸からおおむね3km以内で水深600mに達するとして、沖縄本島の国頭村辺土岬、栗国島、久米島の3箇所が候補地として選定された。

また1995年度には、「沖縄型海洋深層水総合利用システム開発調査」で具体的な利活用方法の検討を行い、水産利用、農業利用、工業利用や観光リゾートへの活用など沖縄県における海洋深層水利用の考え方が示されるとともに、1)水深600mまでの距離が近いこと、2)陸域の勾配がゆるやかなこと、3)農水産利用及び企業等の展開ができる用地があること、4)リゾート産業への利活用が可能であること、5)交通運輸の利便性があること等を勘案して、海洋深層水の取水・研究施設の立地場所に久米島の仲里村美崎地先が選定された。

那覇の西およそ100kmに位置する久米島の海水温は、表層で冬期22℃、夏期28℃と変動するが、200m以深で安定し、600m地点で約9℃となっている。栄養塩類は、ほぼ200から300mまでが貧栄養層となっており、それ以深より増加傾向を示している。また細菌数は、400m以深で極めて少なくなっている。これらの調査結果から、冷熱利用、富栄養性利用のためには、取水深度を600m以深とする必要があることが確認された。

このような経緯を経て、1996年度には、海洋深層水総合利用の基本方針を定め、1997年度に実施計画を作成、1998年度からは研究施設の整備に着手し、2000年度に旧仲里村(現久米島町)において沖縄県海洋深層水研究所が開所した(図2-1)。

現在、久米島の海洋深層水研究所では、島の北東側の東シナ海側、沖合約2.3km、水深612mから海洋深層水の取水を行っており、全国的にみても最適な取水地となっている。また、取水量は日量13,000tと国内最大規模で、これは全国で取水されている海洋深層水の約28%を占めている。取水用パイプラインは内径280mmの特殊ポリエチレン管を2条設置している。また、温度調整のため同量の表層水を取水している。この研究所では、海洋深層水の総合利用施設として、次の3つの目標が掲げられている。ひとつは、亜熱帯地域の島嶼という環境下で、環境と共生する海洋深層水利用技術を開発すること、さらにそれを産業に生かすこと、そして、これらの技術体系を確立し国際協力を果たすことである。

この施設は、研究施設(リサーチエリア:3.3ha)を中核とし、企業用地(ビジネスパーク)が周辺に配置されている。研究施設では水産及び農業分野を中心に一部食品加工関係を配置しており、研究所内にオープンラボを設置し、企業や他の研究機関に提供する他、水産、農業分野についてはインキュベーターを設置し、一定期間生産者等に貸借し産業化を支援している。また、海洋深層水の資源特性を効率よく利用するため、農業による冷熱利用と水産利用を組み合わせた多段利用方式を採用していることも大きな特徴である。応用分野毎の利用方法については、水産・農業分野で利活用のための技術開発を行い、島内・県内の生産者・企業等へ開発された技術を移転し、産業化を図っている。



図 2-1 沖縄県海洋深層水研究所および周辺立地施設

沖縄県内における海洋深層水に対するその他の取り組み状況として、糸満市の取り組みが挙げられる。糸満市では 2003 年度に「糸満市海洋深層水活用地域振興基本計画」を作成し、その中で海洋深層水を再生循環型の環境に優しい資源として、水産業や農業、エネルギー資源、医療・健康増進分野への応用等、多様なテーマによる研究開発や新たな産業の創出を図り、糸満市を含めた沖縄本島南部地域の経済発展と活性化を図ることを目指している。

また、2007、2008 年度には、多目的利用が可能である海洋深層水等の海洋資源と風力、太陽光、天然ガスなどの地域エネルギー資源を効果的に組み合わせることによる地産地消型の自立型地域エネルギー供給システムの構築とその課題を明らかにすることを目的に、「海洋資源を活用した自立型地域エネルギー供給システムに関する調査研究」を実施している。

さらに 2010 年には、内閣官房地域活性化統合事務局が「新成長戦略」に基づき創設を予定している「総合特区制度」の「地域活性化総合特区」に係る提案募集において、糸満市から提案された「海洋資源・再生可能エネルギーを活用する低炭素型雇用創出特区」プロジェクトの中で、海洋深層水等の海洋資源の利活用が述べられている。この提案では、取水した海洋深層水とガスタービンの冷却に利用した海洋深層水がミックスされた適温の水を、冷房や水産養殖、製品生産、観光保養施設等で活用することで、雇用を創出し地域活性化を図ることを目指している。また、地域の課題である水不足を考慮し、海洋深層水の淡水化により一般向けの飲料水や農業用水などへの安定供給も検討されている。

表 2-1 沖縄県における海洋深層水に関する取り組みの経緯

年	項目	内容	実施主体
1986	「沖縄県海洋科学技術基本構想調査」を実施。	沖縄海域での海洋深層水利用技術開発の検討	沖縄県
1993	民間主導で海洋深層水複合利用についての調査を実施。		民間企業
	県内企業で構成する「沖縄県海洋深層水利用推進協議会」が結成。		沖縄県海洋深層水利用推進協議会
	「糸満市海洋深層水活用地域振興基本計画」を作成。		糸満市
1994	「研究拠点立地条件等調査」を行い、沖縄近海の海洋深層水の特性を確認するとともに、取水・研究施設の適地として県内3箇所を候補地とした。	沖縄本島の国頭村辺土岬、粟国島、久米島の3箇所が候補地として選定された。	沖縄県
1995	「沖縄型海洋深層水総合利用システム開発調査」で具体的な利活用方法の検討を実施。	深層水の取水・研究施設の立地場所に久米島の仲里村美崎地先が選定された。	沖縄県
1997	1997年に世界初の洋上設置型海洋深層水試験取水装置「海ヤカラ1号」を糸満市の喜屋武岬沖30kmの海域に設置して共同で取水を開始。		沖縄県海洋深層水開発協同組合
1996	海洋深層水総合利用の基本方針を策定。		沖縄県
1997	海洋深層水総合利用の実施計画を作成。		沖縄県
1998	研究施設の整備に着手。		沖縄県
2000	旧仲里村（現久米島町）において沖縄県海洋深層水研究所が開所。		沖縄県
2003	「糸満市海洋深層水活用地域振興基本計画」を作成。		沖縄県糸満市
2007～ 2008	「海洋資源を活用した自立型地域エネルギー供給システムに関する調査研究」を実施。		沖縄県糸満市
2010	「海洋資源・再生可能エネルギーを活用する低炭素型雇用創出特区」プロジェクトの中で、海洋深層水等の海洋資源の利活用を提案。		沖縄県糸満市
2010	緑の分権改革推進事業「久米島海洋深層水複合利用基本調査」を実施		沖縄県久米島町

### 2.3 久米島町における海洋深層水利用 10 年間の歩み

沖縄県海洋深層水研究所は 2000 年の開所以来 10 年が経過したが、その間水産分野、農業分野において様々な研究開発及び民間企業への技術移転が行なわれてきた。

水産分野の魚介類については、海洋深層水の低水温性を利用した適水温管理による種苗の安定生産技術及び陸上養殖技術の開発が行なわれ、クルマエビに関する研究では、海洋深層水の冷熱性や清浄性を利用した種苗生産技術の高度化に取り組み、ウイルスフリーの母エビの生産に成功した。

沖縄県にはもともとクルマエビは生息していないため、かつては天然の母エビを購入して種苗生産を行っていたが、ウイルスに感染した母エビが出現したことで養殖場内にウイルスが蔓延し、大打撃を受けたことがあった。そのため、ウイルスフリーの母エビを県内で生産するために海洋深層水の冷熱性や清浄性に着目し、当研究所において親エビの産卵飼育水温、期間、最適生育環境等について様々な試験結果を行い、2001 年には種苗生産技術を確立した。その成果を 2003 年に設立された沖縄県車海老漁業協同組合【海洋深層水種苗供給センター】(久米島町)に技術移転し、養殖用クルマエビの種苗供給事業を開始した。

現在沖縄県内において種苗生産を行なっているのは当センターのみで、沖縄県内のクルマエビを生産する事業所の全てに種苗供給を行なっている。沖縄県のクルマエビの生産量は全国の約 35%を占めており、日本一の生産量である。また、久米島町においても島内にあるクルマエビ関連企業 5 社の生産量は県内の生産量の 3 分の 1 を占め、全国の 10%となっており、市町村単位では日本一の生産地となっている。

海藻類については、2000 年度から海洋深層水の低水温性に加え富栄養性やミネラル特性を利用した種苗生産及び陸上養殖技術の開発等の研究に取り組み、夏季の高水温時の安定生産が困難であったクビレヅタ(海ブドウ)が海洋深層水を利用した水温調整によって安定生産が可能となった。また、海洋深層水に含まれる栄養塩を利用した養殖技術について検討を重ね、海洋深層水の配合割合、換水率、適正収容密度、遮光率等が明らかとなり、海洋深層水培養による亜鉛・カロテン等の藻体成分の濃縮についても知見を得た。その結果久米島内の企業が 2004 年から養殖・加工販売を開始し、久米島の特産品として高い評価を得ている。

また、農業分野では、海洋深層水との熱交換で得られる 12℃の冷淡水を利用した、地中冷却栽培による野菜類の高温障害回避技術の確立による周年安定生産技術開発や高騰期生産技術開発等の研究に取り組んできた。その結果、夏場に栽培が困難であるハウレンソウについて、海洋深層水の冷熱を利用した根域冷却栽培において、湛水水耕栽培及び土耕栽培ともに栽培適応品種の選定を行い、年間を通し安定してハウレンソウの生産が可能であることが確認された。2010 年 12 月には農業従事者や農業に関心のある島民を中心に「久米島海洋深層水農業利用研究会」が久米島町及び研究所の呼びかけで発足し、深層水を利用した農業の実用化に向けて動き始めている。深層水の冷熱を利用した農業の進展によって、夏場における農業生産が可能となり、島の経済に貢献することが期待されている。

研究所では、当初予定された研究課題はほぼ全て終了し、現在は新しい対象品目についての研究や、技術の高度化を進めている。表 2-2 に 09 年 6 月までに公開された研究所の成果情報を示す。

表 2-2 沖縄県海洋深層水研究所の研究成果情報 (2009. 6. 25 現在)

分野	研究内容	公開年
水産	海洋深層水を利用したクルマエビ母エビの選抜育種及び養成	2005年
	海洋深層水を利用したオゴノリの陸上養殖研究	2005年
	海洋深層水を利用した温度制御によるヒラメ養殖の実用化試験	2005年
	海洋深層水を利用したクビレヅタの陸上養殖研究	2005年
	母エビ飼育時におけるゴカイの投与効果	2006年
	母エビの雌雄同居飼育による長期間安定産卵	2007年
	雌エビのみと雌雄エビを収容した場合での産卵状況の比較	2008年
	水温制御したヒラメの陸上養殖試験	2008年
	海洋深層水を利用したアワビ類の陸上養殖に関する研究	2008年
	アサクサノリの陸上養殖技術	2008年
農業	根域冷却によるホウレンソウの周年安定栽培技術	2005年
	短日処理及び部分冷却によるイチゴの産期拡大技術(高設養液栽培)	2005年
	地中冷却用送水管の埋設間隔及び埋設深度	2005年
	簡易冷房ハウス及びセルトレイ内の温度制御	2005年
	海洋深層水を利用したホウレンソウの周年安定生産	2007年
	海洋深層水施用及び地中冷却栽培がホウレンソウの内部に及ぼす影響	2008年
	トルコギキョウの高騰期生産に適する品種選定	2008年

これら研究所の成果と、深層水利用企業が自由に参入できるオープンな環境整備によって、久米島町において養殖業の展開、企業の立地・集積が進み、島の経済活性化に大きな役割を果たしてきた。また、特に水産分野において海洋深層水の使用量はこの10年間で増加を続け、限界に達していることから、新たな事業導入は望めないという現状となっているという新たな課題も生まれてきている(図 2-2、図 2-3)。

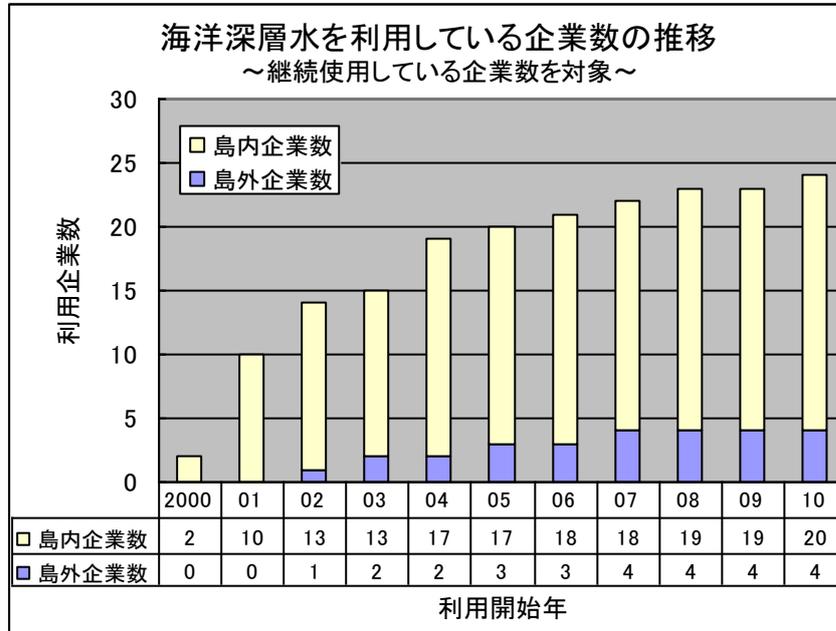


図 2-2 現在海洋深層水を活用している企業数の推移

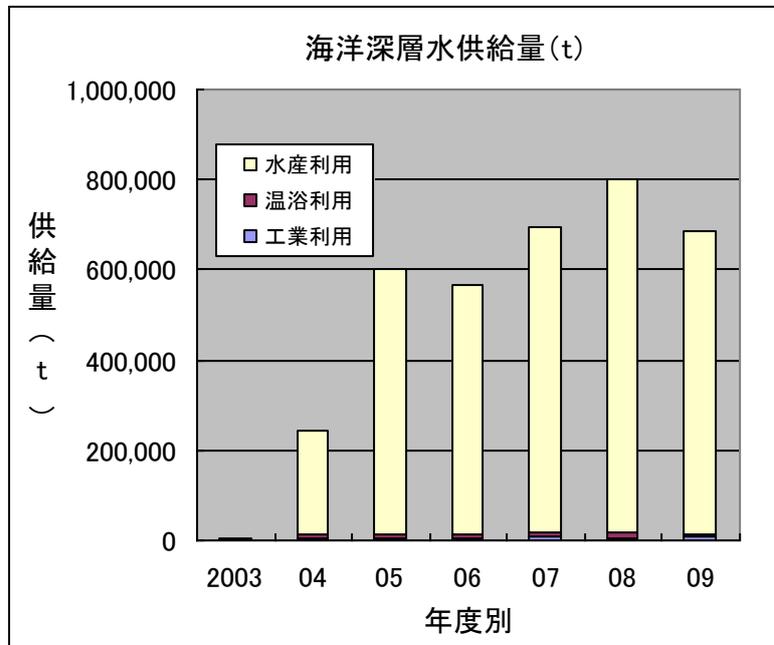


図 2-3 海洋深層水供給量

2010年現在、本研究所で取水した海洋深層水を利用している沖縄県内の企業数は22社で、そのうち18社は久米島町内に事業所がある(図2-4、図2-5、図2-6)。海洋深層水利用企業の従業員数を見ると、全体では3,857人、久米島町では299人である。海洋深層水を利用するために起業された8社に限って見ると、海洋深層水が取水されたことにより139人の新たな雇用が生まれていることになる。



図 2-4 海ブドウ【久米島海洋深層水開発株】



図 2-5 クルマエビ【沖縄県車海老漁業協同組合】



図 2-6 化粧品【株ポイントピュール】

また、海洋深層水関連企業の 2009 年度の売上は、久米島の海洋深層水を利用している 22 社で約 2,035 百万円となっている。海洋深層水を利用している企業は、売上ベースで見ると、水産分野が最も多く全体の約 60%を占めており、次いで化粧品や医療・健康増進関連の 27%、食品関連で 13%となっている(図 2-7)。分野別に見ると、クルマエビ生産が最も多く全体の 45%、次いで化粧品関連で 24%、海藻関連で 9%となっている。

海洋深層水の利用によって、食品関連では飲料水、にがり、塩の他、水産物加工、健康食品、パン、麺類、味噌、豆腐、菓子類等幅広い種類の商品開発が行なわれている。水産分野では、久米島が日本一の生産量を誇るクルマエビの種苗を支えている他、クビレツタ(海ぶどう)、オゴノリが生産され、化粧品では 300 種類を超える商品が生まれている。

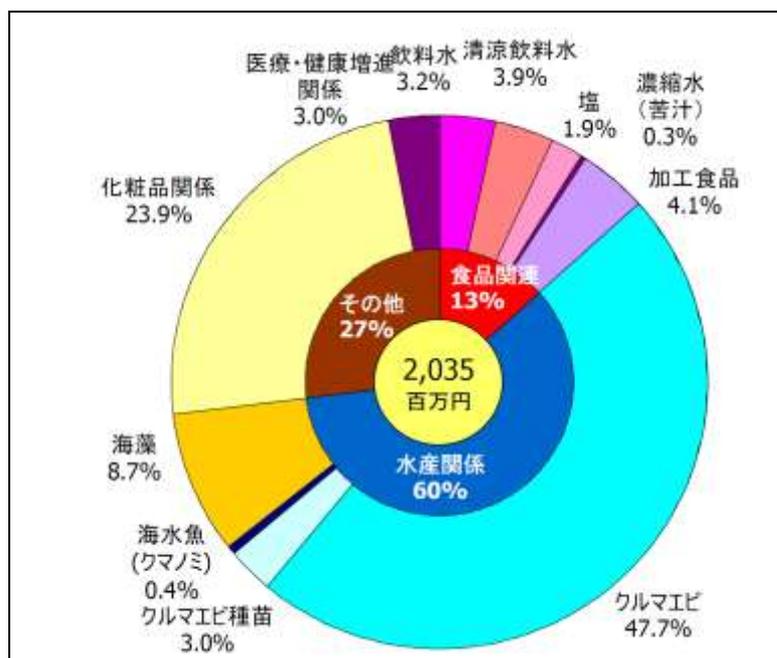


図 2-7 久米島での海洋深層水利用企業の売上

このように、久米島町においては現在多くの企業が海洋深層水を利活用しており、特に水産分野では水温調節に利用しているため、夏場の使用量が取水量限度近くに達しており、今後、大量に海洋深層水を使用しての事業拡大や新たな養殖事業の参入が困難な状況にある。

そこで久米島町では、新たな産業の誘致に向けて、海洋深層水取水量の増加と電気エネルギーの確保及び島嶼型低炭素社会実現のために、再生可能エネルギーとしてポテンシャルの高い海洋温度差発電(OTEC)技術の導入を計画するとともに、海洋深層水冷熱を利用した漁業、農業分野などのこれまでも島の海洋深層水複合利用に貢献してきた分野の更なる展開を図りつつ、次世代技術としての海水からのリチウム回収や再生可能エネルギーから生み出される電力を利用して走る電気自動車の導入などを通して、国内外の島嶼地域の海洋深層水複合利用モデル地域となることを目指している。

## 第3章 海洋深層水利用の歴史と可能性

### 3.1 海洋深層水の概要<sup>1</sup>

#### (1) 海洋深層水とは

海洋深層水(英語では Deep Ocean Water, DOW, あるいは Deep Seawater, DSW)は、光合成による有機物生産よりも有機物分解が卓越し、かつ鉛直混合や人為の影響が少ない、補償深度以深の資源性の高い海洋水と定義され<sup>2</sup>、安定した低温性、富栄養性、清浄性、水質の安定性など、表層水に比べて多くの有用な特徴を持っている。

一方で、全体としての量は莫大であるもののそこに含まれる資源価値としての密度はそれほど高くないため、汲み上げた海洋深層水をその有用性を多段階的になおかつ適切な順番で利用することが、その資源的価値を有効に利用する上で非常に重要になってくる。

#### (2) 海洋深層水利用の歴史

海洋深層水の持つ資源性に最初に着目したのは、1881年のフランスのダルソンバル(J. D'Arsonval)であるといわれている。彼は、熱帯地域の海水の表層水と深層水の20℃以上ある温度差を利用して熱機関を動かして発電することを提案した。これは後に海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion, 略称 OTEC, オテック)と呼ばれるようになった技術である。

この技術アイデアの実現に向けた志しはフランスの科学者でネオンサインの発明家としても名高いクロード(G. Claude)に受け継がれ、1926年には温度差発電の公開室内実験を行っている。クロードはベルギーの製鉄所で予備実験を行った後キューバ、ブラジル、仏領西アフリカなど熱帯の海で海洋温度差発電の実験を繰り返して技術的な問題を解決していった。仏領西アフリカでのチャレンジは「アビジャン計画」と呼ばれ、フランス政府のプロジェクトとして進められたが、折からの石油価格の低下やアフリカ諸国の独立運動の活性化などで、事業化の目処が立たなくなり1955年に中止された。

わが国に海洋深層水の資源利用が紹介されたのは、1957年7月3日の朝日新聞夕刊の科学欄に掲載された佐々木忠義元東京水産大学学長による「無限の海水から電力生産」の記事であるとされる。さらに1960年代には富山湾の深層水を使って地域全体を冷房し、その後に海に戻して栄養添加をするというアイデアが日本海区水産研究所のニュースレターに掲載された。

続いて1970年に「新発電方式総合調査委員会」が組織されて世界中の様々な発電方式が調査され、その中では海洋温度差発電も調査対象の一つとなった。この時期は第一次石油ショックの頃とも重なり、先進国を中心にそれまで化石燃料に偏っていた発電方式の見直しの動きが進み、その中で海洋温度差発電も注目された。日本では当時の通産省が中心になって「サンシャイン計画」を立ち上げ、1974年から5年間にわたって多くの研究者と技術者が参加して海洋温度差発電を含む新しい発電技術の事業化のための取り組みが行われた。

米国ハワイ州政府は1980年にハワイ島のコナに海洋温度差発電の技術開発を目的とした州立ハワイ自然エネルギー研究所を新設した。そこでは海洋深層水の取水管を設置して、海洋深層水の取水を始め

<sup>1</sup> 藤田大介, 高橋正征 編著, 「海洋深層水利用学—基礎から応用・実践まで—」, 成山堂書店, 2006

<sup>2</sup> 中島利光, 「21世紀の循環型資源 海洋深層水の利用」, 2002

恒常的に温度差発電の研究と技術開発が行えるような環境整備が行われた。

一方で、海洋深層水の含んでいる栄養塩類も着目され、1972年には米国のコロンビア大学のローエル(O.A. Roels)教授がカリブ海のセント・クロイ島で海洋深層水の栄養塩類を利用して植物プランクトンを培養し、それを餌としてアサリやカキの養殖を検討し、事業化の可能性を証明した。

わが国においてもローエル教授の実験に着目して、当時の科学技術庁は1985年に始まった「アクアマリン計画」に温度差発電以外の海洋深層水の資源利用の検討を進めるための「海洋深層資源の有効利用技術に関する研究」を1986年に予算化し、その中で海洋深層水の資源利用の検討を始めた。その結果、1989年に日本最初の海洋深層水の取水施設が洋上型として富山湾、陸上型として高知県室戸市三津に設置された。1990年度で科学技術庁のプロジェクトは終了し、室戸市の陸上型海洋深層水揚水施設は高知県海洋深層水研究所として恒久施設となって、研究と技術開発が継続した。1996年には、海洋深層水の地元一般市民への分水サービスが始まり、資源利用のチャレンジが民間や一般市民にまで広がり、飲食物をはじめとした海洋深層水資源の様々な利用が工夫され、その中から海洋深層水関連商品が誕生していった。また、沖縄県久米島においても2001年に日量1万3千トン規模の取水施設が完成し、水産、農業分野での利用研究が進められ、その後の民間への技術移転も含めて多くの成果をあげている。

### (3) 海洋深層水の成り立ちと可能性

海洋深層水の起源は表層水である。表層水が冬の寒さで冷やされて重くなって200mより深く沈んだものが海洋深層水である。沈んだ直後は冷たい表層水であるが、光が十分には差し込まないために、光合成による有機物生産が進まず、水中にある有機物はもっぱら分解していく。その結果、有機物の分解産物である栄養塩類が海洋深層水中に溜まっていく。

海の深層では、急激な温度変化がないため、①低温安定で、有機物が生産されないために餌がなく、したがって生物はほとんど生息できず、②清浄性が高く、有機物の分解産物である栄養塩類が溜まった結果、③富栄養、という性質を海洋深層水はもつことになる。若い海洋深層水ほど温度は低く、清浄性と富栄養性もともに低い。そして時間が経過するほど、温度が上がり、清浄性と富栄養性は高くなる。

海洋深層水の第1の特性である低温安定性から見ていくことにする。海洋深層水の低温性は、海洋温度差発電(OTEC)、建物の冷房、冷蔵・冷凍施設、海水淡水化、冷熱を利用した農業、水産・養殖分野における水温制御の冷熱源などとして幅広い利用が可能である。

利用できる温度帯としては、海洋深層水の上縁である水深200mでは水温はやや高いため、低温性を利用するにはもう少し深い水深から取水する必要がある。例えば、海洋温度差発電に利用する場合は、5~8℃以下の冷たさが必要になり、地域冷房の冷熱源として使う場合には8~16℃以下の温度であることがいいとされている。また、水産・養殖利用の場合は対象となる生物種にもよるが20℃前後の温度帯で利用されていることが多い。

なお、久米島近海で海洋深層水を取水する場合、水深600mで約8~9℃、水深700mで約6~7℃、水深800mで約5~6℃となり、これを適切な温度と適用方法を考慮しながら全体の複合利用システムを

計画していく必要がある。

次に海洋深層水の第2の特性である富栄養性について述べる。外洋水中の主要な栄養塩類は、もともと有機物の分解によって溜まったものであるから、レドフィールド比(C:N:P = 106:16:1、モル比)として知られている有機物の構成比に極めて近い。

海洋深層水中での栄養塩類の濃度は高いといっても、絶対濃度は極めて低い。窒素肥料のほとんどを占めている硝酸態窒素<sup>3</sup>の1,000m以深の濃度は、もっとも高いインド洋で40 μMしかなく、硝酸態窒素としての量は10の海洋深層水に2.5mg程度しか含まれていない。ただし、水温のところでも紹介したように海洋深層水の総量が莫大なために、海洋深層水中の栄養肥料の総量は窒素の重量で500億tにのぼる。世界中で農地にまかされている窒素肥料は窒素重量で、現在、1年間に1億t弱であるから、500年分の窒素肥料が海洋深層水中に眠っていることになる。海洋深層水中のリン肥料の総量はリン重量で約9×10<sup>9</sup>tあり、現在の年間のリン肥料の使用量はリンの重量で約1,000万tなので、900年分のリン肥料が海洋深層水中に存在する。地球上で掘り出せるリン鉱石は向こう30~40年で底をつくといわれており、海洋深層水中のリン肥料の意味は大きい。海洋深層水中の栄養塩類の再生も年間でかなりの割合になると予想される。

海洋深層水中の栄養塩類濃度は植物プランクトンにとっては高濃度で、海洋深層水中で培養すれば海水が着色する程度まで増やすことができる。(しかし、事業的に植物プランクトンを高密度培養するためには、海洋深層水に含まれている栄養塩類濃度では不足で、人工的に窒素、リンなどの不足する多量栄養塩類を加えなければならないともいわれている。)

海洋深層水の第3の特性として挙げられているのが、清浄性である。現在、知られている海洋深層水の清浄性は、一般生物、病害・汚染生物、化学汚染物質、懸濁物質、有機物、重金属、放射性物質などに関するもので、これらの汚染が表層海水や河川・湖沼・地下水など様々な陸水に比べて、全く無いか著しく少ない。

海洋深層水に含まれるミネラルには鉱山資源としての価値も持っている。現在、鉱物は主に地下資源から得ているが、世界中の陸上の鉱山の多くは近い将来掘りつくされるともいわれている。また地下資源は採掘される国や地域が限られており、その偏在性が安全保障の面からも大きな課題とされている。

海底や海底下の鉱物資源の利用としては、マンガン団塊やコバルトクラストなどが知られているが、その前に、海水中からの抽出も大きなポテンシャルを秘めている。地下鉱物資源では膨大な量の廃棄物が生まれるが、海水中からの金属抽出ではそうした廃棄物はほとんど出ないので大きなメリットであるともいわれている。問題は海水中の金属濃度の低さであるが、一部の金属では海水中から抽出しても採算のとれるまでに技術が進歩してきた。

海水の量は膨大なために、海水中に含まれる全金属量は陸上をしのぐものも多いし、リチウムのように海水に大部分が含まれている金属もある。海水から金属を抽出する場合でも、清浄性の高い海洋深層水

<sup>3</sup> 植物にとって硝酸態窒素はアンモニア態窒素に比べ窒素を吸収しやすい。

の方が容易であるともいわれている。

古来より人類は海水から塩を取り出して利用してきた。現在は塩化ナトリウムを抽出して利用しているが、一部では海水中の様々な塩を濃縮抽出して利用することも行われている。食品に利用されるので、海洋深層水の高い清浄性がポイントになる。

また、海水中の塩分やその他の溶存・懸濁物を除けば真水が得られるため、これらはきれいな地下水に恵まれない離島などでは有望な資源となる。このときにも海洋深層水と表層水の温度差を利用すれば蒸発方式の海水淡水化システムを利用することができる。

海洋深層水の資源はどれも資源密度が低いため、20 世紀までの技術では採算のとれる形での利用は難しかった。しかし、20 世紀の終わり頃から徐々に海洋深層水の薄い資源を効率よく利用する技術が開発され、今もなお日進月歩で技術改善が進んでいる。従来型の地下資源は資源密度が濃く、未熟な技術で容易に利用できたが、利用による環境汚染が避けられないという問題は未だに解決していない。従ってできるだけ速やかに、地下資源から海洋深層水など環境汚染をほとんど伴わない資源へと切り替えていくことが重要である。

## 3.2 国内外各地の海洋深層水利用状況<sup>4</sup>

### (1) 海外での海洋深層水利用状況

海洋深層水の本格的な実験と事業利用恒久施設の第1号は米国ハワイ島の州立自然エネルギー研究所である。1973～74年の世界的な石油危機に対応して、石油以外のエネルギー資源が着目されたのをきっかけにハワイ州政府は1974年に海洋温度差発電など海洋エネルギーの資源利用を目指した研究所設立を議会で決定し、1980年にハワイ島コナの Keahole 岬に約130haの土地を確保して、研究所(Natural Energy Laboratory of Hawaii, 通称 NELH)を設立した。

研究所では1981年12月に水深215mから日量6,000tの海洋深層水の揚水管を敷設し、温度差発電などの基礎技術開発研究を始め、海洋深層水の低温性・富栄養性・清浄性などの利用技術を検討した。研究所設立当初から、技術開発は一般に広くチャンスが与えられていて、可能性のあるものから随時事業化が試されていった。その結果、研究所周辺に、冷水性海産魚介類の増養殖、冷水性水産生物の畜養、植物プランクトンを大量培養して有用化学成分を抽出するなど、様々な事業施設が造られていった。

1985年には、州政府は研究所に隣接した約222haの土地を確保して、ハワイ海洋科学技術団地(Hawaii Ocean Science and Technology Park, 通称 HOST Park)を造り、1990年には研究所と産業団地の組織を統一して、ハワイ自然エネルギー研究機構(Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority, 通称 NELHA)として現在に至っている。

ハワイ自然エネルギー研究機構では、現在、水深619m、675m、915mからそれぞれ日量14,000t、73,000t、160,000tの海洋深層水を揚水する能力をもった施設を完備していて、世界最大規模である。海洋深層水の農業利用や淡水製造などの基礎研究の他に、建物の空調、冷水性の水産生物の増養殖や畜養、植物プランクトンの大量培養、などの事業が大規模に展開されている。

海外での海洋深層水の資源利用のもう一つの事例はノルウェーで、フィヨルドでのサケの養殖の際に、水質の悪化を低減するために、フィヨルドの外側の底層水をポンプでフィヨルドに汲み上げて利用した。ベルゲン大学海洋生物学部と国立海洋研究所養殖部が行った実験で、水深65mの底層水を日量18,000t揚水して利用した。ヨーロッパ諸国が面している北海は浅いために、本格的な海洋深層水の資源利用には適さないが、ノルウェー沿岸部の深みの海水を利用することによって、低温と若干の清浄性を利用することができる。実験段階までで、その後の養殖事業の国際状況の変化があつて、事業化には進まなかったようである。

<sup>4</sup> 藤田大介, 高橋正征 編著, 「海洋深層水利用学—基礎から応用・実践まで—」, 成山堂書店, 2006

## (2) 国内での海洋深層水利用状況

日本列島の周りの海を見渡すと、太平洋側には世界的にみても大規模な海溝が位置しており、日本海側には固有の海洋深層水が存在するなど、周辺部に海洋深層水の揚水に適したところが多い。先述のように 1985 年以降、科学技術庁のアクアマリン計画の中で陸上から 200m 水深まで 5km 以内で達することの可能な場所が海底地形地図から検討され、北海道から沖縄まで全国 29 ヶ所(後に北海道羅臼が追加されて 30 ヶ所)が抽出された。そして、1989 年には高知県室戸市三津に日本初の陸上型の海洋深層水取水施設が完成した。その後現在までに建設された陸上型の海洋深層水取水施設は約 20 ヶ所に上る。

また、洋上取水も全国的に行われており、網走(北海道)、秋田、酒田(山形)、宮古(岩手)、石巻(宮城)、鴨川(千葉)、館山(千葉)、小笠原(東京)、相模湾(神奈川)、但馬(兵庫)、与論島(鹿児島)、糸満(沖縄)などである。

これまでの日本の海洋深層水の陸上取水施設は、取水量が日量で 200～13,000t の取水規模であるが、図 3-1 に日本国内の取水施設を示す。また、その取水施設の概略仕様については表 3-1～表 3-3 に合わせて示す。

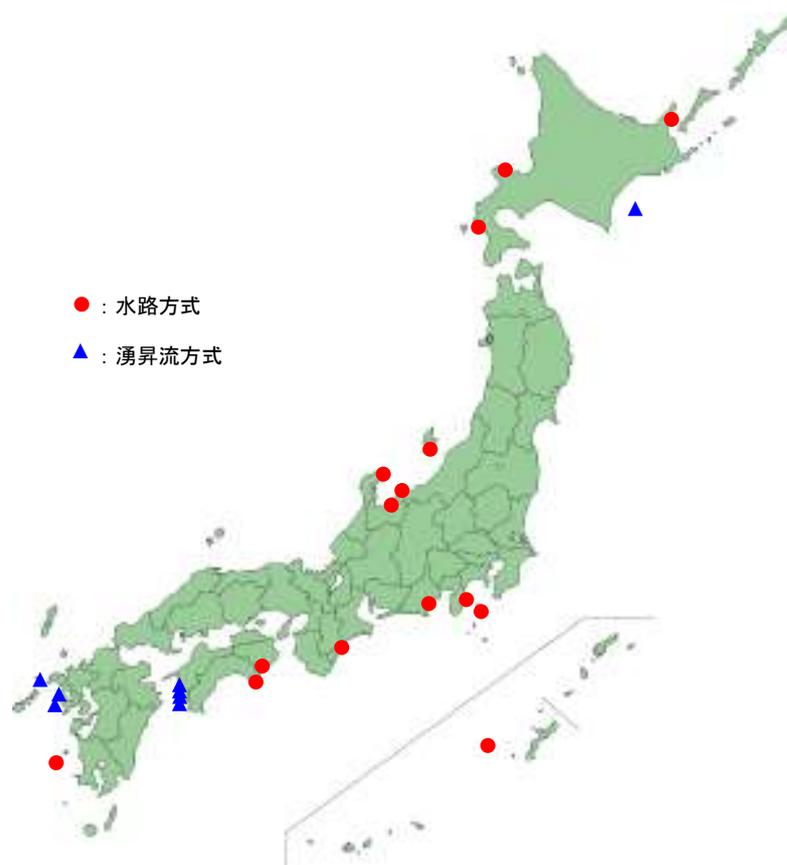


図 3-1 既存取水施設位置図

表 3-1 水路方式（管路）取水施設仕様一覧

出典：海洋深層水利用学—基礎から応用・実践まで— ※一部修正

供用年	揚水形式仕様(水路方式:管路)					利用目的	設置場所
	取水水深	揚水量	管路径	管路延長	利用設置形式		
★1983	370m	12,000m <sup>3</sup> /日	φ 454mm	2,400m	陸上型	海洋温度差発電	鹿児島県徳之島
1989	320m	460m <sup>3</sup> /日	φ 125mm	2,650m	陸上型	基礎研究	高知県室戸市
◇1992	100m	17,280m <sup>3</sup> /日	φ 450mm	1,600m	陸上型	養魚	富山県新湊市
1994	344m	460m <sup>3</sup> /日	φ 125mm	2,650m	陸上型	基礎研究と利活用研究	高知県室戸市
1996	321m	3,000m <sup>3</sup> /日	φ 250mm	2,610m	陸上型	水産活用研究	富山県滑川市
2000	374m	4,000m <sup>3</sup> /日	φ 270mm	3,125m	陸上型	水産と多目的利用	高知県室戸市
★2000	218m	57.6m <sup>3</sup> /日	φ 50mm	1,400m	陸上型	多目的利用	北海道羅臼町
2000	613m 611m	計 13,000m <sup>3</sup> /日	φ 280&380mm *2 条	2,470m	陸上型	研究及び多目的利用	沖縄県久米島
2001	687m 397m	各 2,000m <sup>3</sup> /日	φ 225mm φ 200mm	7,300m 3,300m	陸上型	水産研究と多目的利用	静岡県焼津市
★2001	330m	1,000m <sup>3</sup> /日	φ 148&198mm	5,840m	陸上型	多目的利用(民間事業)	神奈川県三浦市
2002	384m	2,400m <sup>3</sup> /日	φ 250mm	3,308m	陸上型	多目的利用	富山県入善町
2003	343m	3,500m <sup>3</sup> /日	φ 270mm	4,400m	陸上型	多目的利用	北海道熊石町
2004	300m	3,000m <sup>3</sup> /日	φ 28mm	7,769m	陸上型	多目的利用	北海道岩内町
2004	333m	2,000m <sup>3</sup> /日	φ 225mm	2,590m	陸上型	発電利用研究	富山県滑川市
2004	375m	400m <sup>3</sup> /日	φ 130mm	4,000m	陸上型	多目的利用(民間事業)	鹿児島県下甕
2004	332m	1,200m <sup>3</sup> /日	φ 216mm	3,663m	陸上型	水産と多目的利用	新潟県佐渡市
★2004	500m	500m <sup>3</sup> /日	φ 125mm	1,800m	陸上型	多目的利用(民間事業)	東京都大島
2004	320m	100m <sup>3</sup> /日	φ 75mm	3,700m	陸上型	多目的利用(町事業)	石川県能登町
2006	415m	2,885m <sup>3</sup> /日	φ 280mm	12,438m	陸上型	多目的利用(市事業)	三重県尾鷲市
2008	800m	1,000m <sup>3</sup> /日	φ 200mm	4,620m	陸上型	多目的利用(民間事業)	静岡県伊東市
2009	356m	4,560m <sup>3</sup> /日	φ 268mm	2,817m	陸上型	水産と多目的利用	北海道羅臼町
2009	512m	500m <sup>3</sup> /日	φ 100mm	2,070m	陸上型	大学の教育・研究	東京都大島町

◇:水深 200m 未満の取水施設 ★:現在稼働していない海洋深層水取水施設

表 3-2 洋上方式取水施設仕様一覧

出典：海洋深層水利用学—基礎から応用・実践まで—

供用年	揚水形式仕様(洋上方式)					利用目的	設置場所
	取水水深	揚水量	管路径	管路延長	利用設置形式		
★1989	300m	26,000m <sup>3</sup> /日	φ 450mm	250m	洋上型	地域資源改善研究	富山県氷見市
★1997	1,400m 600m	2m <sup>3</sup> /日	φ 50mm	1,400m 760m	洋上型	多目的利用(民間事業)	沖縄県糸満沖
★1999	2,000m 800m	2m <sup>3</sup> /日 0.2m <sup>3</sup> /日	φ 50mm	2,000m 950m	洋上型	多目的利用(民間事業)	沖縄県糸満沖
★2004	205m	10 万 m <sup>3</sup> /日	φ 1,000mm	175m	洋上型	海域肥沃化研究	相模湾

★：現在、稼動していない取水施設

表 3-3 湧昇流方式取水施設使用一覧

出典：海洋深層水利用学—基礎から応用・実践まで—

供用年	揚水形式仕様(湧昇流方式：築堤式、衝立式構造物)					利用目的	設置場所
	設置水深	壁高さ	設置延長	湧昇量	利用設置形式		
◇2000	80m	13～14m	約 130m	30.3 百万 m <sup>3</sup> /日	湧昇拡散型	海域の水産資源増大	長崎県松浦市沖
◇1987	50m	10m	4 基*45m	31.1 百万 m <sup>3</sup> /日	湧昇拡散型	海域の水産資源増大	愛媛県宇和島沖
◇1992	50m	10m	5 基*45m	38.9 百万 m <sup>3</sup> /日	湧昇拡散型	海域の水産資源増大	愛媛県宇和島沖
◇1994	50m	10m	3 基*50m	25.9 百万 m <sup>3</sup> /日	湧昇拡散型	海域の水産資源増大	愛媛県宇和島沖
◇1995	50m	10m	4 基*50m	34.6 百万 m <sup>3</sup> /日	湧昇拡散型	海域の水産資源増大	愛媛県宇和島沖
◇1998	65m	10m	12 基*150m	311.0 百万 m <sup>3</sup> /日	湧昇拡散型	海域の水産資源増大	長崎県五島沖
◇1999	50m	10m	9 基*150m	233.3 百万 m <sup>3</sup> /日	湧昇拡散型	海域の水産資源増大	北海道大樹沖
◇2002	76m	12m	16 基*240m	796.3 百万 m <sup>3</sup> /日	湧昇拡散型	海域の水産資源増大	長崎県壱岐

注)湧昇量を正確に算定することは非常に難しい。ここでは下式で試算した。

想定湧昇量＝堤体の壁高さ×設置延長×流れの流速×1日

(長崎県松浦市沖の場合)＝13.5m×130m×0.2m/s×3600s×24hr≒3000 万 m<sup>3</sup>/日

◇：水深 200 以浅の施設

続いて、各地の海洋深層水利用の概況として、10 年以上にわたる取水実績のある地域や最近の特徴的な施設を対象に、高知県室戸市、富山県、北海道羅臼町、静岡県、伊豆大島の運用状況についてまとめる。

現在稼動をしている陸上型及び洋上型を合わせた取水施設の中で最も長い運用実績をもつのが高知県室戸市の取水施設である。室戸の海洋深層水取水は 1985 年に科学技術庁のアクアマリン計画モデル実証地域として調査が進められ、1989 年には実際の取水を開始し、現在でも水産、医療、食品、エネルギー利用を始めとする様々な分野での活用が進められている。また、1994 年には取水管を増設し、2000 年

には第3の取水施設「アクアファーム」を開設し、ここでは日量4000トンの取水を行っている。

水産分野では、低温安定性や富栄養性、清浄性を活かし、スジアオリなどの海藻の陸上培養に取り組んでいる。また小さな藻類を連続培養して、その海藻類を使つてのカキ、アワビ類の飼育試験も行われている。魚介類を飼育する際の水温調整にも用いられており、通常よりも早い成長、成熟が得られている。

また、漁場の肥沃化について、海洋深層水研究所で利用したあとの海洋深層水は、研究所前の海に戻しているが、そこでの潜水調査の結果、周辺は全体的に磯焼け状態であるのに対し、研究所の利用水が流れる地点周辺は、テングサを始め、様々な海藻が生い茂り、ウニ、カニなどの生物も多く見られ、このことから海洋深層水による沿岸海域の肥沃化の可能性なども確認されている。

医療分野でも、高知医大(現在の高知大医学部)が中心になり、海洋深層水を治療に用いた場合の有効性に関する調査が臨床レベルでも進められており、各種専門学会でも報告されている。

農業分野では茄子栽培に海洋深層水を使用することで通常のものと比較して特有のアクが少なく、まろやかな甘みがある高品質な茄子の生産が行われている。

また、「アクアファーム」の近くには海洋深層水を使った温水プールがあり、地域住民の健康増進だけでなく、遠方からの観光客の集客の役割も果たしている。このように室戸市における海洋深層水利用は地域全体に根づいた形で海洋深層水を使った様々な産業が展開されている。

富山周辺も海洋深層水利用において様々な取り組みを実施している。富山県水産試験場の取水施設(富山県滑川市)は日本海の取水施設としては運用を続けている施設の中では最も古い施設となっている。

このあたりは水深300m付近の比較的浅い海域においても、水温3℃前後の冷たい海洋深層水がとれるのが特徴で、冷水性、深海性の生物の栽培漁業に関する研究を中心に進められてきた。

また、2000年頃からは商業利用を目的とする企業への分水が開始され、これは2003年より滑川海洋深層水分水施設アクアポケットに引き継がれている。このアクアポケットでは原水、脱塩水、ミネラル脱塩水、濃縮水、高濃縮水等、全部で7種類の海洋深層水をニーズによって利用できるのが大きな特徴である。

また、古くから「薬の富山」として知られているだけあり、医療面や健康増進面の取り組みも活発である。富山県衛生研究所や富山医科薬科大学が中心となり、海洋深層水体験施設「タラソピア」において海洋深層水浴の効果が調べられている。これらの研究の結果、海洋深層水浴により皮膚温度や鼓膜温度が上がり、睡眠の質が向上したとのデータが出ており、温熱効果や疲労回復効果も見出されるなど、予防医学的な面からも海洋深層水の利用が進んでいる。

2001年12月には、富山県入善町に「入善海洋深層水施設」が設立され、日量2400トンの取水が始まった。施設には海洋深層水を紹介する展示・体験コーナーや、分水施設が整備されている。分水施設は県民であれば誰でも利用可能で、原水、濃縮海洋深層水、脱塩海洋深層水の3種類を使いみちによって選んで利用することができる。

水産分野では、2002年に全国で始めて、入善漁協が海洋深層水の清浄性、富栄養性、低温安定性を活かしたアワビの養殖を開始し、「海洋深層水あわび」として販売している。また、入善町では大人から子供まで楽しめる「入善海洋深層水ふれあいデー」を開催するなど、PRにも積極的に取り組んでいる。

北海道羅臼町では、1999年12月に道内初の陸上取水型施設が誕生し、道内外における研究機関、企業との共同研究により、水産、食品、農業、健康産業、エネルギーなどの分野を中心に地域振興に役立つ取組みを進めている。

現在は食品分野での利用が盛んで、企業が連携し、飲料水、ラーメン、木綿豆腐、お菓子、焼酎など様々な種類の加工食品の販売を行っている。

静岡県焼津市では、2001年9月に最大取水量約2000t/日の取水供給施設が完成。その後、魚介類の種苗生産研究や、磯焼け対策のための大型藻類育成の研究を行う水産利用施設、市の産業の活性化を目指し脱塩施設が稼動するなど、本格的な取組みが行われている。脱塩施設では給水も行われおり、事業者や一般人は原水を利用することができる。

また、焼津市は海洋深層水に関する情報を一般に発信する「深層水ミュージアム」を設立し、海洋深層水に関する情報の普及・啓発、焼津市のPRを行っている。他にも海洋深層水関連の施設として、タラソテラピーが体験できるリゾート施設「アクアスやいづ」があり、観光分野にも活用されている。

2008年には、静岡県伊東市に化粧品・健康食品販売の株式会社ディーエイチシーが独自に運営する取水施設を設立。水深800mからくみ上げる海洋深層水を、飲料水として販売している。また、海洋深層水を100%利用した海洋深層水プールやエステ施設を完備した「赤沢スパ」の運営も行っている。

近年では2009年に東京大学が東京都大島町に取水施設を取得し、研究・開発や大島町の産業振興のため活用しており、島内の住民や企業、大学関係者であれば無料で利用できるという形態をとっている。

これら海洋深層水利用開始初期の各地の成果が引き金になり、2000年代前半に全国で海洋深層水取水施設が増えていった。他の地域においても、それぞれの特色を出すべく試行錯誤を重ねている。

単純な海洋深層水のイメージだけで商品が売れる状態は過ぎているため、今後は冷熱性を使ったエネルギー・環境分野や医療、健康分野への実用レベルでの応用が期待されている状況である。最近の株式会社ディーエイチシーが民間リゾート施設（静岡県伊東市）として独自に運営をする方法、東京大学による大学の研究施設としての運用などは、海洋深層水利用の今後の方向性を提案してくれているともいえる。そのように複合利用の裾野が広がることで、海洋深層水利用コストの低減につながり、これまでの利用分野にもプラスの効果が現れてくると考えられている。

### 3.3 エネルギー資源としての海洋深層水

#### (1) エネルギー賦存量

地球上の海水の総量は容積にして  $1.37 \times 10^9 \text{km}^3$ 、海の平均水深は 3,795m なので、水深 200m 以深を海洋深層水とすれば、海水のおよそ 95% が海洋深層水に相当し、その量は約  $1.2 \times 10^9 \text{km}^3$  である。仮に  $0^\circ\text{C}$  の海洋深層水の冷たさを利用して  $25^\circ\text{C}$  で海に戻したとすると、 $25^\circ\text{C}$  の温度を利用することになり、その場合に  $1\text{m}^3$  の海洋深層水から得られるエネルギーは約 100MJ である。同量のエネルギーを石油の燃焼で賄うとすると、原油 100ml 程度が必要になる。先に推定した海洋深層水の量と仮定から、海洋深層水の含むエネルギーを推定すると 12,000 兆キロリットルという超巨大な原油量(世界の原油確認埋蔵量(2008年末):2,000 億キロリットル<sup>5</sup>の 6 万倍)に相当する。しかも、海洋深層水の再生源である海洋大循環のスタート地点であるグリーンランド沖とウェッデル海で、低温高塩分水が沈み込んでいる量は毎秒およそ 4000 万トンという膨大な量に上る<sup>6</sup>。

#### (2) 利用可能量

海洋深層水の賦存量あるいは利用可能量については、(社)資源協会が平成 13 年度と 14 年度の 2 年間「海洋深層水の資源量に関する研究」を行っており、日本の EEZ 全域を対象として緯度経度 1 度毎に分割した各エリア内の海面下容積と水平流量鉛直分布から、「賦存量」および「利用可能量」をデータベース化している。このとき、各エリア・各層内の海洋深層水再生産量をその層内に流入する水平流量と定義し、その 1% が利用可能であるとしている。これは中深層海流の自然変動が流量の約 3% であることを根拠としており、環境影響の観点からより安全側である 1% を基準として選んだものである。

ここでは、図 3-2 に示すように、久米島のみが範囲内に含まれる北緯 26 度～27 度、東経 126 度～127 度のエリアを「久米島周辺海域」として設定することとした。この海域の各深度層における水平流量ならびに水温や栄養塩濃度などの水質分布については、前述のデータベースに示されている。表 3-4 はそのデータベースから必要項目を抜粋したものである。表中の深度 500m～1000m の層を海洋深層水取水層とすると、水平流量は年間平均で約  $2.2 \times 10^{14} \text{t/d}$  (日量 2200 億トン) であり、その 1% の約 2.2Gt/d (日量 22 億トン=現在の沖縄県海洋深層水研究所の最大取水量である日量 13,000 トンの約 18 万倍) がこのエリアの海洋深層水利用可能量であると定義できる。なお、この深度と表層との水温差は、夏季  $21.0^\circ\text{C}$ 、冬季  $14.5^\circ\text{C}$ 、年平均  $18.4^\circ\text{C}$  となっている。

<sup>5</sup> 資源エネルギー庁、「エネルギー白書 2010」, 2010

<sup>6</sup> 大塚耕司・板東晃功・松本吉倫、「海洋深層水の使用可能量および価格に関する一考察」, 海洋深層水'99 佐賀大会講演要旨集, pp.18-19, 1999

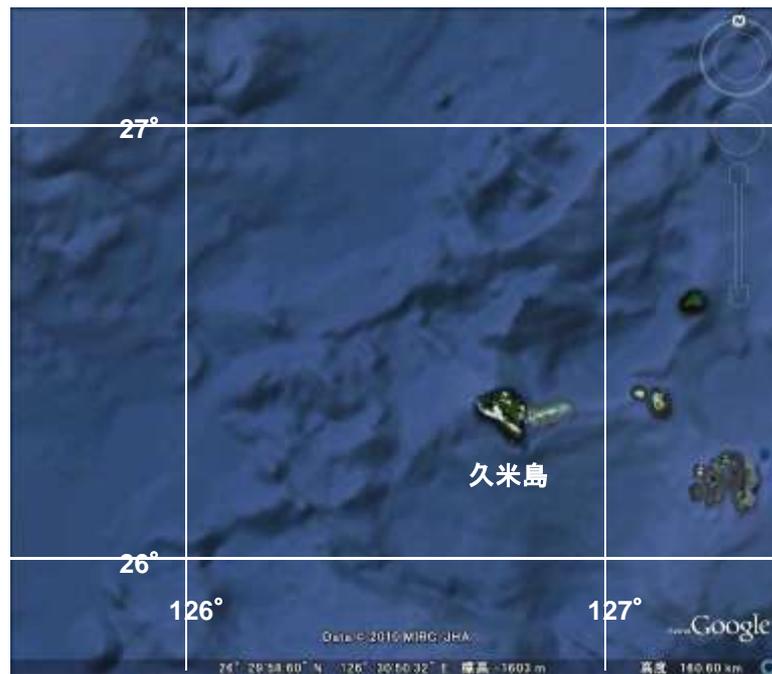


図 3-2 久米島周辺海域の設定エリア

表 3-4 久米島周辺海域内の各深度層内における水平流量および水質データ

緯度範囲(°)	26~27N								
経度範囲(°)	126~127E								
深度範囲(m)	0~50	50~100	100~200	200~300	300~400	400~500	500~1000	1000~2000	
面積(m <sup>2</sup> )	1.098E+10	1.094E+10	1.087E+10	1.076E+10	1.068E+10	1.060E+10	1.046E+10	9.383E+09	
容積(m <sup>3</sup> )	5.480E+11	5.453E+11	1.080E+12	1.071E+12	1.064E+12	1.053E+12	4.977E+12	5.567E+12	
水平流量 (m <sup>3</sup> /d)	夏季	5.314E+10	4.845E+10	9.364E+10	5.975E+10	5.629E+10	4.431E+10	2.225E+11	3.976E+11
	冬季	6.374E+10	5.320E+10	1.022E+11	6.254E+10	5.827E+10	4.314E+10	2.182E+11	4.341E+11
NO <sub>3</sub> -N(mg/l)	0.002	0.020	0.043	0.099	0.159	0.251	0.462	0.570	
PO <sub>4</sub> -P(mg/l)	0.004	0.005	0.009	0.016	0.027	0.043	0.070	0.085	
SiO <sub>3</sub> -Si(mg/l)	0.103	0.090	0.096	0.166	0.263	0.594	1.596	2.544	
DO(mg/l)	6.7	6.7	6.4	6.2	5.9	5.2	3.5	2.6	
塩分(psu)	34.6	34.7	34.8	34.8	34.7	34.5	34.3	34.4	
水温 (°C)	夏季	28.6	26.1	22.1	18.5	15.8	12.9	7.6	4.0
	冬季	22.4	22.2	21.5	18.8	15.9	13.1	7.9	4.0
	平均	26.0	24.6	22.0	18.6	15.8	13.0	7.6	4.1

### (3) エネルギー効率

ここで、海洋深層水を汲み上げて冷熱を利用する場合の、エネルギー効率について試算する。

一般の空調で用いられる冷媒の温度は、7°C(入口)および12°C(出口)である。1m<sup>3</sup>/secの流量の海洋深層水を同様の温度条件で用いた場合、得られる冷熱量は

$$1\text{m}^3/\text{sec} \times 1,025\text{ kg/m}^3 \times 4.0\text{kJ/kg} \times (12^\circ\text{C} - 7^\circ\text{C}) = \underline{20,500\text{ kW}}$$

と算定される。

一方、1m<sup>3</sup>/secの流量の海洋深層水を汲み上げるためのポンプの消費動力は、必要な揚程を10m、ポンプの総合効率を80%と仮定した場合

$$1\text{m}^3/\text{sec} \times 10\text{m} \times 9.8\text{ kg-m/sec}^2 \div 0.8 = \underline{120\text{ kW}}$$

である。

つまり、海洋深層水汲み上げによる冷熱供給のエネルギー効率を、空調機・冷凍機で用いられる成績係数(COP: Coefficient Of Performance)で表せば、その数値は

$$20,500\text{kW} \div 120\text{kW} = \underline{170}$$

となる。

一般的な電気式の空調機・冷凍機のCOPは最高でも7~8程度であるため、海洋深層水汲み上げによる冷熱利用は、既存技術の20倍以上のエネルギー効率を持つこととなる。また、第5章で述べる通り、海洋深層水の冷熱は出口温度として20~25°Cまで利用が可能である。この場合、利用できる熱量は上記計算の約3倍となる。

つまり、海洋深層水汲み上げによる冷熱供給のCOPは170~500程度といえる。

## 第4章 各種複合利用技術の動向調査

### 4.1 各種複合利用システムの概要

海洋深層水は、①低温性、②清浄性、③富栄養性という多面的な特長を持つ。

この特長を生かし、海洋温度差発電の他、海水淡水化、農業・漁業・空調への冷熱利用、食料・医療品・化粧品、海水からのレアメタル回収などへの利用が進められている。しかし、いずれの利用技術も、海洋深層水の3つの特長全てを使いきるわけでは無い。たとえば、海洋温度発電は、海洋深層水の低温性のみを利用し、清浄性や富栄養性は損なわない。このため、海洋温度差発電で利用した後に、別技術で清浄性や富栄養性を利用することが出来る。さらに海洋温度差発電は利用する海洋深層水の温度を5℃前後上昇させるだけであるため、10℃程度の冷熱需要があれば、海洋温度差発電の後段でカスケード的に利用できる。

このように、海洋深層水の複合利用の計画を行なう場合、対象が海洋深層水のどういった特性を、どのレベルで必要とするかを把握する必要がある。また、利用を行なうことにより、海洋深層水を持つ特長のうちの性質がどの程度劣化するのかについても考慮に入れることで、より有効な複合利用が可能となる。

そこで、本章では、上記のような視点に基づき、それぞれの利用技術を俯瞰する。

## 4.2 海洋温度差発電の概要

### 4.2.1 技術の概要

#### (1) 海洋に蓄えられた熱エネルギー

海洋温度差発電は、表層の温海水と深層の冷海水(海洋深層水)との温度差エネルギーを電気エネルギーに変換する発電技術である。

海表面における太陽光の反射率(アルベド)は、太陽の高度が大きいときには非常に小さく、その値は0.1以下である。このため、海洋の表層には、太陽光の持つエネルギーの大部分が吸収され、表層混合層に熱エネルギーとして蓄えられる。低緯度地域では、表層混合層の温度はほぼ年間を通じて 26～30℃程度に保たれている。

海洋温度差エネルギーは、海洋に蓄えられた熱エネルギーであるため、他の自然エネルギーと比較して供給量が安定しているという大きな特長を有する。また、季節変動(表層水温度の変動)が予測可能であるため、計画的な発電が可能となる。

図 4-1 に熱帯および亜熱帯地域の海水の垂直温度分布を、図 4-2 に世界の海の表層と深層 1,000m との温度差分布を示す。

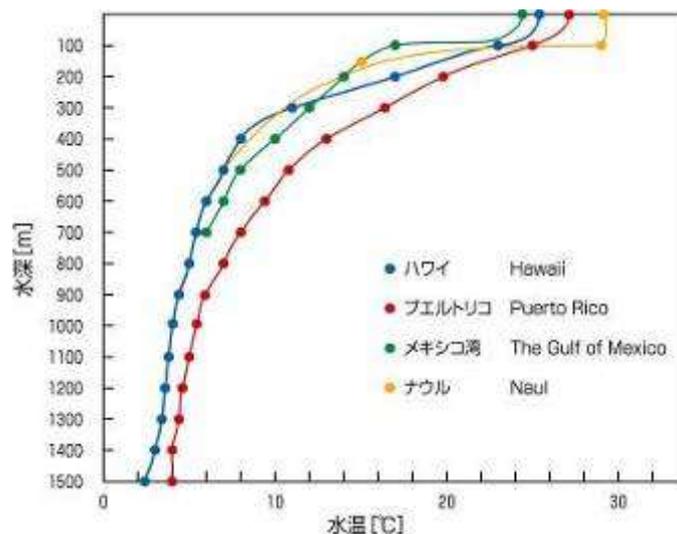


図 4-1 代表的な南洋嶼国の温度差分布

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センターホームページ  
([http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about\\_otec.html](http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about_otec.html))



図 4-2 南洋の表層と深層(水深 1000m)の温度差分布

出典：佐賀大学海洋エネルギー研究センターホームページ  
([http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about\\_otec.html](http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about_otec.html))

(2) 発電原理

比較的小さい温度差から電力を取り出す技術としては、低沸点媒体を用いたタービン発電、スターリングエンジンを用いた発電、ゼーベック効果を用いた熱電素子による発電が挙げられる。このうち、20℃程度という非常に小さい温度差を扱う海洋温度差発電では、タービン発電が最も現実的であるとされ、研究開発が進められている。そこで、以降はタービン発電方式による海洋温度差発電について述べる。タービン発電方式は、図 4-3 の通りオープンサイクルおよびクローズドサイクルに大別される。

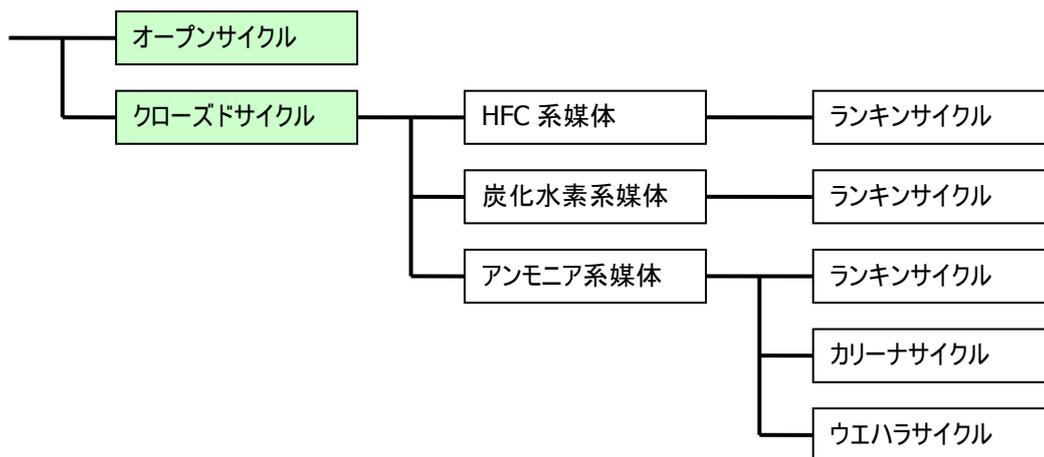


図 4-3 海洋温度差発電 タービン発電方式の分類

オープンサイクル

図 4-4 にオープンサイクルのフローを示す。

表層水は、真空に近い低圧に保たれた蒸発器内に導かれる。低圧下で表層水の沸点は、水温より低くなり、表層水は自己蒸発（フラッシュ蒸発）する。この水蒸気を作動流体としてタービンを駆動して発電する。タービンを出た水蒸気は、海洋深層水によりさらに低温低圧に保たれた凝縮器内で凝縮する。

凝縮器は、低温の海洋深層水を直接水蒸気に混合する接触式と、熱交換器を介して冷却する非接触式とに分類される。非接触式の場合、凝縮した水蒸気は蒸留水となるため、飲料水等に転用できるメリットがある。

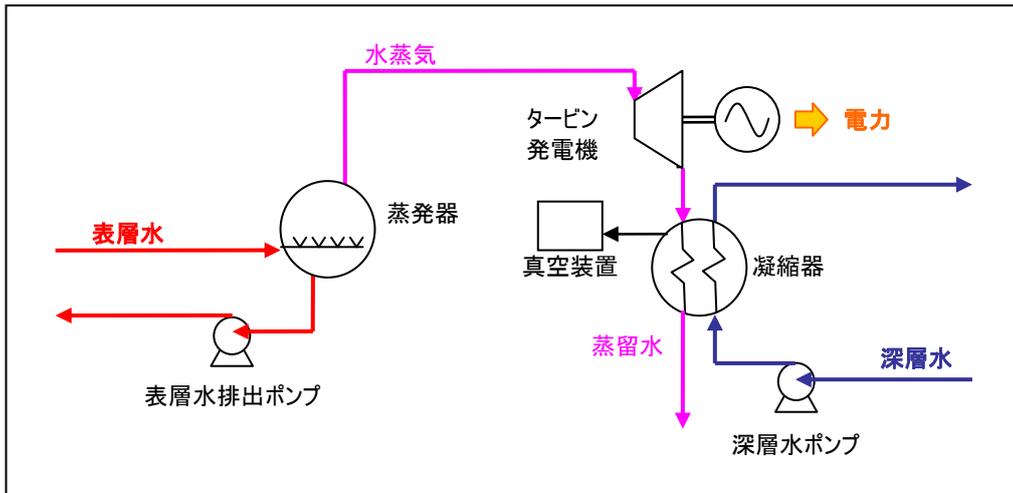


図 4-4 オープンサイクル（非接触型凝縮器）の概略フロー

クローズドサイクル

図 4-5 にクローズドサイクルのフローを示す。

系内に封入された低沸点媒体は、作動流体ポンプにより蒸発器に送られる。蒸発器内で表層水により熱せられた作動媒体は蒸発し、タービン発電機を駆動する。タービン駆動後の作動媒体蒸気は、凝縮器内で海洋深層水により冷却され、凝縮する。

クローズドサイクルに用いる低沸点作動媒体としては、アンモニア系媒体、HFC（ハイドロフルオロカーボン）系媒体、炭化水素系媒体の 3 つが提案され、比較・検討されてきた。現在では、プラントに用いられる材料との適合性、環境性（ODP（オゾン破壊係数）および GWP（地球温暖化係数））、熱力学的特性、輸送物性等の総合的評価により、アンモニア系媒体での研究開発が進んでいる。

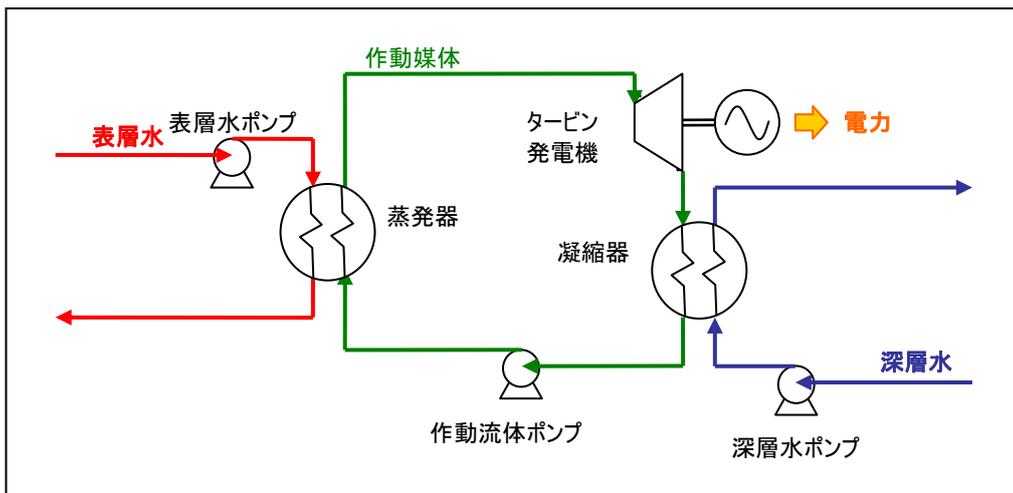


図 4-5 クローズドサイクルの概略フロー（ランキンサイクル）

オープンサイクルでは、比体積の大きい低圧蒸気でタービンを駆動するため、タービンの直径が巨大

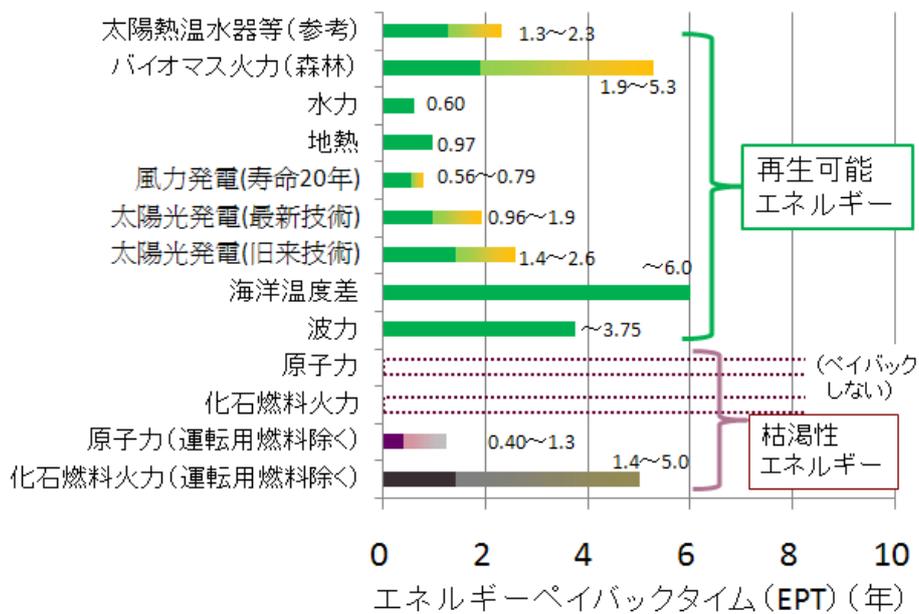
になる欠点がある。このため、出力の大型化を見据えた現在の研究開発は、クローズドサイクルが主流となっている。

また、前述の通り、クローズドサイクルではアンモニア系媒体を用いたシステムが現在の主流である。

そこで、6.1 項における発電システムの検討は、アンモニア系媒体を用いたクローズドサイクルをベースとして実施した。

### (3) 環境性

海洋温度差発電は、燃料を使用せずに発電するため、運転時に化石燃料を消費せず、二酸化炭素を排出しない環境配慮型の発電方式である。また、設備建設時から廃棄まで考慮したライフサイクル評価においても、1995 年時点でエネルギーペイバックタイム<sup>7</sup>はプラント寿命に比べ遥かに短い 6 年以下(図 4-6)、二酸化炭素排出量原単位<sup>8</sup>は火力発電に比べて小さい 0.132kg-CO<sub>2</sub>/kWh(図 4-7)と、高い環境性が示されており、技術開発によりさらなる向上が見込まれる。



集計: AIST RCPV, 2008  
 ・全て日本国内での見積もり。出典は別記。  
 ・風力は設計寿命の20年、他は30年。  
 ・波力と海洋温度差のデータは古く、これよりも向上が予想される。

図 4-6 発電方式別 エネルギーペイバックタイム

出典: 独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ

([http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/e\\_source/RE-energypayback.html](http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/e_source/RE-energypayback.html))

<sup>7</sup> エネルギーペイバックタイム: ライフサイクル中に投入されるのと同じだけのエネルギーを、発電によって節約できるまでに必要な稼働期間を表す。

<sup>8</sup> (ライフサイクル評価における) 二酸化炭素排出量原単位: ライフサイクル中の CO<sub>2</sub> 排出量を、同総発電量で除した数値。

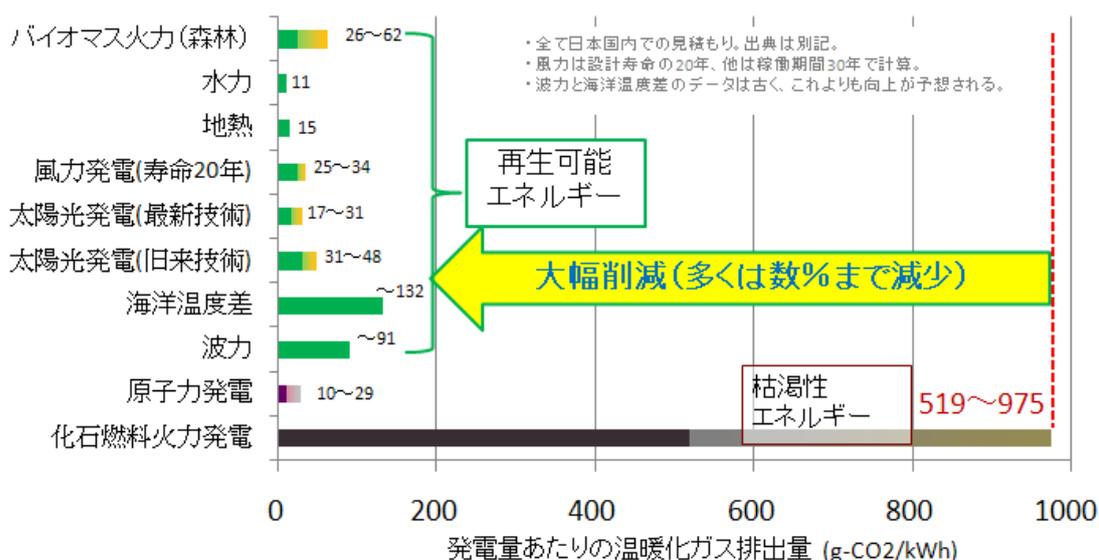


図 4-7 発電方式別 二酸化炭素排出量原単位 (ライフタイム)

出典：独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ

([http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about\\_pv/e\\_source/RE-energypayback.html](http://unit.aist.go.jp/rcpv/ci/about_pv/e_source/RE-energypayback.html))

(4) 利用する海洋深層水の特性および使用後の質の低下

前項で検討したフローから、利用する海洋深層水の特性および使用後の質の低下に関しては、表 4-1 の通り評価できる。

表 4-1 海洋深層水の特性および使用後の質の低下

	低温性	清浄性	富栄養性
利用する特性とそのレベル (*1)	◎ なるべく低温の方が効率がよい。	○ 熱交換器にはほとんど汚れが付かないためメンテナンス	-71
利用後、劣化する特性 (*2)	↓ 使用により温度は上昇する。	→ 非接触型熱交換器を通過するだけのため、全く変化なし	→ 非接触型熱交換器を通過するだけのため、全く変化なし

(\*1) ◎: 深層水利用の主目的、○: 積極的に利用しないがメリットがある、-: 利用しない、×: 逆にデメリットとなる

(\*2) ↓: 劣化する、→: 変化しない

4.2.2 発電ポテンシャル

海洋温度差発電は、海洋表層の温海水と、深層の冷海水を駆動源として利用する発電方式である。温海水側の温熱の供給源は太陽光であり、冷海水の供給源は海洋全体の熱塩大循環において極地で低温となり深層に沈み込む海水である。したがって、海洋温度差発電の発電ポテンシャル算定は、

海水温の鉛直分布から算出したもの、太陽光からの入射エネルギーと海水の蒸発熱とのバランスから表層混合層の熱エネルギー利用限界を基に算出したもの、深層海流の流量から海洋深層水の利用限界を基に算出したものなどに大別される。これまで様々な算定がされており、使用するモデルにより結果に幅があるものの、全世界の発電ポテンシャルは 20 億 kW～600 億 kW のオーダーと算定されている。今後は、海象条件や気象条件を反映した詳細な調査を基にした算定が課題である。

表 4-2 にポテンシャルの算出例を比較のための参考値とともに示す。

表 4-2 海洋温度差発電の発電ポテンシャル算出例

項目	数値
海洋温度差発電の発電ポテンシャル試算例(全世界)	
表層水温が現状より 1℃下がる定常状態での発電量 [Zener,1977]	600 億 kW
海洋大循環に影響を及ぼさない利用限界 [高野,1985]から推定	20 億 kW
海洋の鉛直温度分布への影響が無視できる発電量 [Avery ら,1994]	100 億 kW
鉛直方向一次元モデルによる定常状態 [Nihous,2005]	最大 30 億 kW
海洋温度差発電の発電ポテンシャル(日本)	
日本の経済水域内に蓄えられた温度差エネルギーの 1% [上原,1985]	1 億 2,000 万 kW
参考値	
我が国の総発電設備容量(2010 年 8 月)	2 億 2,800 万 kW
全世界の風力発電設備累積導入量(～2009 年)	1 億 5,850 万 kW
全世界の太陽光発電設備導入量(～2009 年)	2,250 万 kW

[Zener,1977] Zener,C., “The OTEC Answer to OPEC: Solar Sea Power”, Mechanical Engineering (ASME) 99(12), pp26-29, 1977

[Avery ら,1994] William H. Avery, Cih Wu, “Renewable Energy from the Ocean”, Oxford University Press, 1994

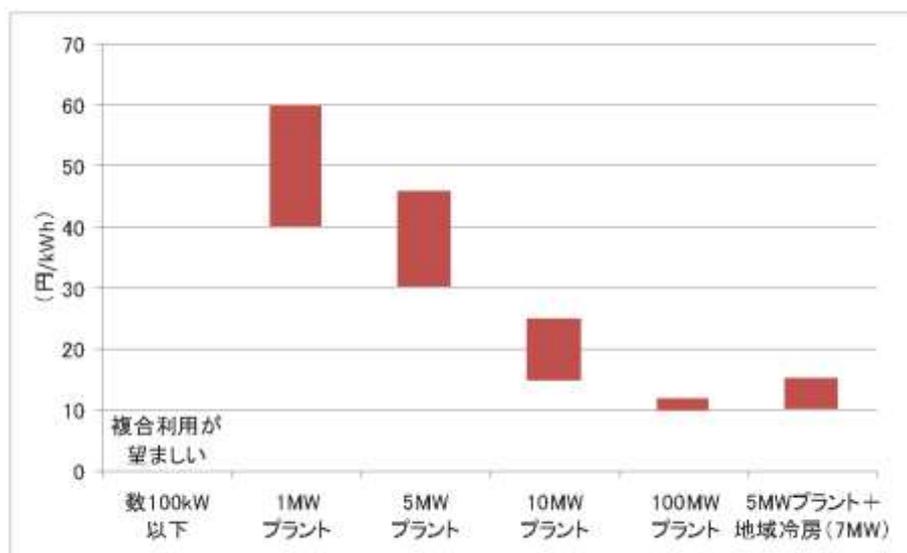
[Nihous,2005] Gerard C. Nihous, “An Order-of-Magnitude of Ocean Thermal Energy Conversion Resources”, Journal of Energy Resources Technology Vol.127, ASME, 2005

[上原, 1985] 上原春男, 「海洋温度差発電読本」, オーム社, 1982

### 4.2.3 発電コスト

海洋温度差発電の発電コストは、得られる温度差や海底地形、設置形式等によって大きく変わるため、一概には算出できない。これを踏まえて、海洋エネルギー資源利用推進機構(OEA-J)は、**図 4-8** の発電コストを算出している。

数百 kW 以下の規模では、発電のみで経済性を成立させることが困難であるため、他の海洋深層水利用と複合させることが推奨されている。一方、スケールメリットが大きい発電設備であることから、100MW 以上の規模では 10 円/kWh 程度の競争力のある発電コストが見込まれている。



プラント規模	コスト	備考
数100kW 以下	未試算	複合利用(海水淡水化、リチウム回収等)が望ましい。海洋温度差発電量のみの評価。
1MW プラント	50 円/kWh 程度 (40~60 円/kWh)	量産によって、40 円/kWh 以下になる可能性あり。
5MW プラント	30.4~45.7 円/kWh	海洋温度差発電量のみの評価。
10MW プラント	20 円/kWh 程度 (15~25 円/kWh)	量産によって、更に経済性が向上する可能性あり。
100MW プラント	10 円/kWh 程度	量産によって、更に経済性が向上する可能性あり。
5MW プラント+ 地域冷房(7MW)	10.3~15.3 円/kWh	海洋温度差発電量+冷熱を電力換算して合わせた評価。

※ 試算値の幅は金利の設定条件(3, 5, 8%)による。

図 4-8 海洋温度差発電の発電コスト試算例

出典：NEDO, 「再生可能エネルギー白書」, OEAJ 海洋温度差発電分科会資料

#### 4.2.4 近年の動向

海洋温度差発電は、1970～80年代のオイルショックの時期に、日本、米国、フランス等を中心に盛んに検討が行われた。しかしその後、化石燃料価格の下落により、日本以外ではほとんど研究開発が行われなくなった。

しかし、近年の化石燃料需給環境の不安定化、および二酸化炭素排出量削減の要求の高まりを受け、各国で検討が再開されている。主な取り組み状況を以下に示す。

##### (1) 米国

2008年、米国エネルギー省の海洋エネルギー推進プロジェクト中に、海洋温度差発電が盛り込まれた。また、米国防衛省も参加のNAVFAC(Naval Facilities Engineering Command)が海洋温度差発電のセミナーを開く等、情報の収集を始めている。

民間では、1970年代に浮体式の海洋温度差発電実証設備「mini-OTEC」を建設したロッキード・マーチン社が取り組みを再開した。2008年にはエネルギー省から120万ドル、2009年には防衛省から812万ドル、さらに2010年にもエネルギー省からの助成金を得て、海洋温度差発電の要素技術開発や市場調査を実施している。

##### (2) フランス

フランスでは、フランス政府造船局(Direction des Constructions Navales, DCN)を前身とするDCNS社が2015年までに実証機を建設する計画を発表した。2009年4月にインド洋の仏領レ・ユニオン島地方政府とR&Dに関する合意を締結し検討を開始するとともに、2010年からはタヒチ島における実施可能性調査も行っている。

##### (3) 日本

日本では、佐賀大学海洋エネルギー研究センターが研究開発の先導的役割を担っている。同センターでは、海洋温度差発電に用いる高効率な熱サイクルおよび熱交換器の研究、さらに温度差を利用した海水淡水化、発生した電力と淡水を用いた水素製造・貯蔵、海水からのリチウム回収などの実証を行っている。図4-9に、同センター内に設置された30kW海洋温度差発電実験設備の写真を示す。



図 4-9 佐賀大学海洋エネルギー研究センター内 30kW 海洋温度差発電実験設備

写真提供：佐賀大学海洋エネルギー研究センター

2010 年、経済産業省は海洋温度差発電や波力発電に代表される海洋エネルギー発電技術について、事業化を見据えた研究開発に着手することを発表した。2011 年度の資源・エネルギー関連概算要求には、「海洋エネルギー（波力、海洋温度差、潮流等）を活用した発電技術やその市場で世界をリードするため、革新的技術研究開発により技術シーズの発掘・育成を行うとともに、発電システムとしての迅速な実用化や海外進出を目指すための実証研究を実施」するための予算として、10 億円が折り込まれている。また、これを基に、2015 年までに各海洋エネルギーの実証設備を建設し、実証実験を行なう方針としている。

また、2009 年 11 月の日米首脳会談において、日米エネルギー協力アクションプランが合意され、その中で同じ島嶼環境を持つ沖縄－ハワイ間でスマートグリッドをはじめとしたクリーンエネルギー技術協力を実施していくことが合意された。また、2010 年 6 月には、日本、米国、ハワイおよび沖縄県の 4 者で沖縄ハワイ協力に係る覚書が調印された。本協力に基づく日米専門家の相互訪問において、再生可能エネルギー分野では海洋エネルギー、とりわけ海洋温度差発電が関心を集めた。これを受け、2010 年 11 月、沖縄－ハワイ間での海洋エネルギーに関するワークショップが沖縄県久米島にて開催され、実用化に向けての取り組みが協議されている。

#### 4.2.5 我が国における推進施策とロードマップ

前項で述べた通り、経済産業省は 2015 年までに海洋エネルギーの実用化を目指す方針を打ち出した。

経済産業省傘下である独立行政法人 NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が 2010 年 7 月に刊行した「再生可能エネルギー白書」では、海洋温度差発電の目指す姿が掲げられている。

- 海洋温度差発電の商用化に向けた技術開発を加速し、海外市場を創出するとともに世界最先端の技術的地位を維持し、国内企業の育成、国際競争力の強化を図る。
- 国内産業の育成、低炭素社会の実現、エネルギーセキュリティ等の観点から、国内での導入促進、新規産業の創出を実現する。

図 4-10 海洋温度差発電の目指す姿

出典：NEDO, 「再生可能エネルギー白書」, 2010 年 7 月

これを受け、同白書では技術開発のロードマップを表 4-3 および図 4-11 の通り設定している。

表 4-3 海洋温度差発電の技術開発目標

項目	2015 年	2020 年	2030 年
国内企業の育成、国際競争力の強化	・1MW プラントの実証試験	・商用プラントの運用開始 ・国内導入の促進	・プラント出力の大型化 ・世界市場シェアの拡大
プラント規模	～1MW	～10MW	～50MW
発電コスト	40～60 円/kWh程度	15～25 円/kWh 程度	8～13 円/kWh 程度

出典：NEDO, 「再生可能エネルギー白書」, 2010 年 7 月

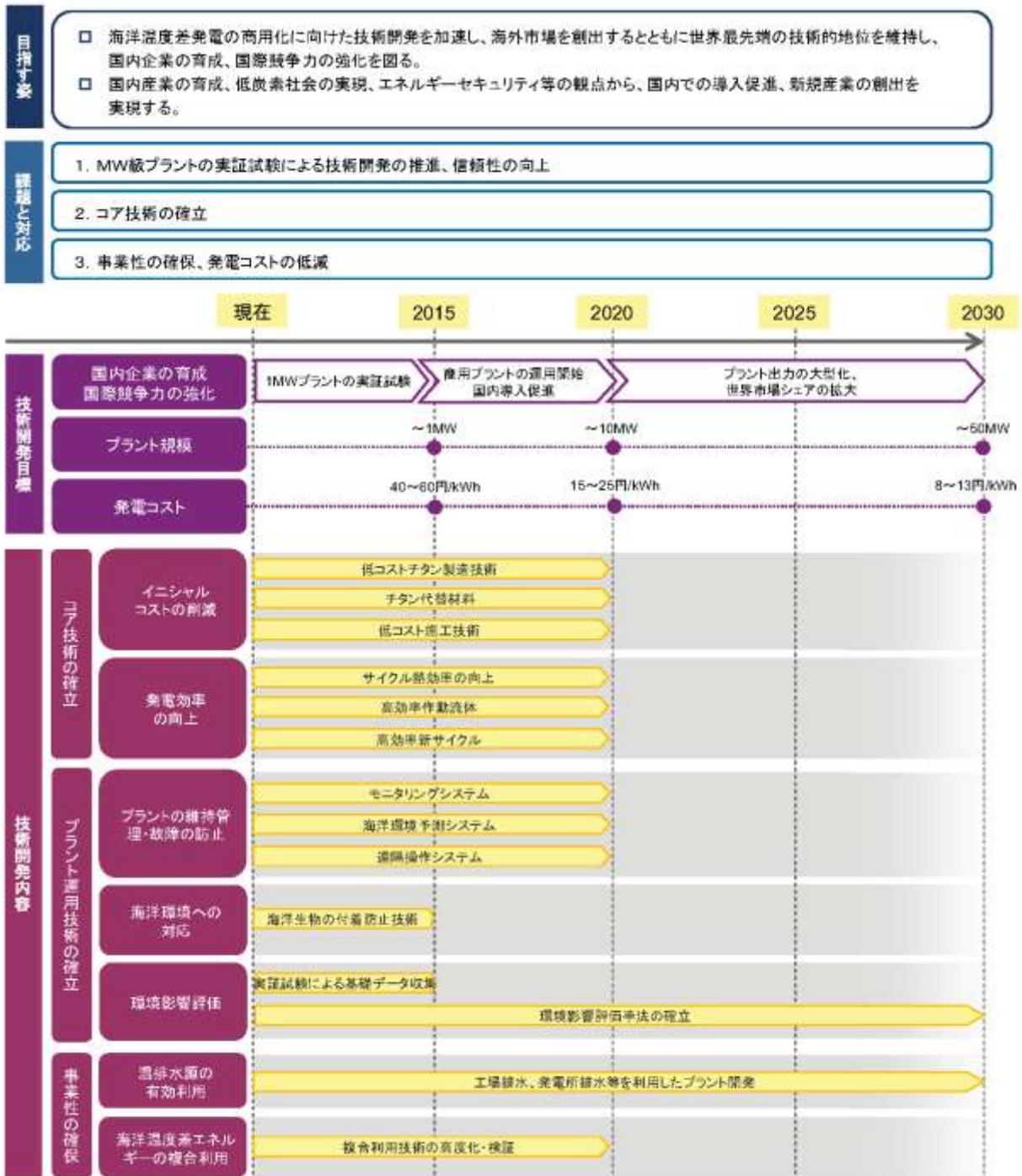


図 4-11 海洋温度差発電の技術ロードマップ

出典：NEDO、「再生可能エネルギー白書」、2010年7月

### 4.3 海水淡水化システム

#### (1) 技術の概要

一般的に海水淡水化技術は、蒸発法と膜法とに分類される(図 4-12)。

現在、世界で設備されている海水淡水化設備のうち、造水量ベースで約半分が蒸発法(主に多段フラッシュ法)、残り半分が膜法(ほぼ逆浸透法)を採用している。

蒸発法は、海水を蒸発させ、その蒸気を冷却・凝縮することにより淡水を得る方式である。この方式を用いた淡水化設備は、その多くが中東産油国に集中している。これは、特に海水の汚染度が高いアラビア湾の海水でも淡水化が可能なタフなシステムであるためとされる。その一方、蒸発のために大量の熱エネルギーを投入するため、この意味でも、エネルギーコストの低い中東に適したシステムである。また、生成される淡水は蒸留水であるため純度が高く、容易に工業用に用いることが容易である。

一方、膜法(逆浸透法)は、高圧にした海水を逆浸透膜と呼ばれる濾過膜の一種を通して塩分を除去する方式である。この方式は中東産油国以外の国々で主流を占めている。その理由は主に、造水量あたりの投入エネルギー量が蒸発法に比べて小さく、また初期投資も比較的小さいためである。反面、逆浸透膜が海水中の微生物やスケール等で目詰まりしないように前処理をする必要があり、このためのメンテナンスに費用がかかる難点がある。

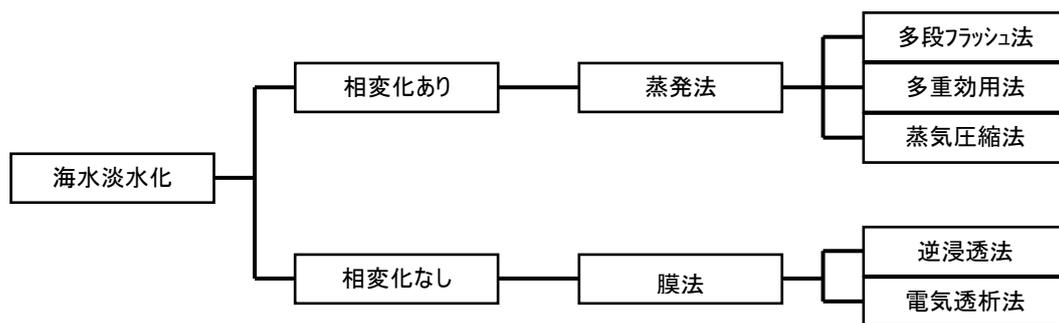


図 4-12 海水淡水化方式の分類

海洋深層水を利用した海水淡水化技術としては、蒸発法、逆浸透法の両方が提案されている(表 4-4)。

蒸発法では、表層水と深層水との温度差を蒸発のための熱エネルギーとして用いることで、従来の蒸発法の欠点であった投入エネルギーの多さを克服するコンセプトとしている。

一方、逆浸透法では、海洋深層水の清浄性を利用し、課題である前処理を簡易化、低リスク化できるメリットがある。また、逆浸透法は回収効率が高いため、排海水の塩分濃度が原海水の 2 倍以上となる場合があり、沿岸環境への影響が懸念されているが、海洋深層水複合利用と組み合わせる場合、排海水に比べて大量の海洋深層水をくみ上げるため、これにより希釈することが可能である。

表 4-4 海洋深層水を利用した海水淡水化のメリット

	従来設備の問題点	深層水利用によるメリット
蒸発法	<ul style="list-style-type: none"> <li>蒸発のために大量の熱エネルギーを投入。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>表層水と深層水との温度差を蒸発のためのエネルギーとして用いるため、熱エネルギーの投入が不要</li> </ul>
膜法（逆浸透法）	<ul style="list-style-type: none"> <li>膜の目詰まりを防ぐための前処理が煩雑。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海洋深層水の清浄性を利用し、前処理を大幅に簡易化</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>排海水の塩分濃度が高く、環境負荷の懸念</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大量の海洋深層水で希釈して排水可能。</li> </ul>

## (2) 技術の動向

## (a) 蒸発法

海洋深層水を利用した蒸発法による海水淡水化は、インド国立海洋技術研究所 (NIOT: National Institute of Ocean Technology) 主導の下、2005 年から 100m<sup>3</sup>/日、2007 年から 1000m<sup>3</sup>/日の実証プラントが稼働している。

両設備は、離島への飲料水供給の目的で建設された。2005 年当時、当該プラントが置かれた Lakhsadweep Islands 地域では、12 基設備された逆浸透法の海水プラントのうち、実に 11 基が膜の目詰まり等のために運転を停止していた背景があり、より運用が簡便な蒸発法プラントの導入が求められていたことが報告されている<sup>9</sup>。

図 4-13 に 100m<sup>3</sup>/日プラントの概要図、図 4-14 に 1000m<sup>3</sup>/日プラントの写真をそれぞれ示す。



図 4-13 NIOT 100m<sup>3</sup>/日 海水淡水化プラントの概要図

出典：NIOT ホームページ



図 4-14 NIOT 1000m<sup>3</sup>/日 海水淡水化プラント写真

写真提供：佐賀大学海洋エネルギー研究センター

<sup>9</sup> Raju Abraham, NIOT, “Experimental studies on a desalination plant using ocean temperature difference”, National Institute of Ocean Technology, International Journal of Nuclear Desalination 2007 - Vol. 2, No.4 pp. 383 – 392, 2007

### (3) 海水淡水化のフロー

#### (a) 蒸発法

図 4-15 に蒸発法のフロー例を示す。

- ① 温海水（表層水）を真空に近い低圧の蒸発室でフラッシュ蒸発させる。これにより蒸発熱を奪われて温度の下がった温海水（表層水）は、ポンプで排出される。
- ② 発生した蒸気は、凝縮器内にて冷海水（深層水）で冷やされ、凝縮して淡水となる。
- ③ 蒸発と共に海水から放出される非凝縮性の気体（主に窒素と酸素）は、真空装置を用いて系外に排出される。

蒸発法による海水淡水化では、深層水ポンプ、表層水排出ポンプ、真空装置、蒸留水ポンプで電力を消費する。消費電力は、淡水 1m<sup>3</sup>あたり 2.5kWh～4.5kWh 程度と算定される。

また、使用温度が低く、また海洋深層水は清浄であることから、一般的な蒸発法で用いられるスケール抑制剤などの薬品の海水への投入は不要である。

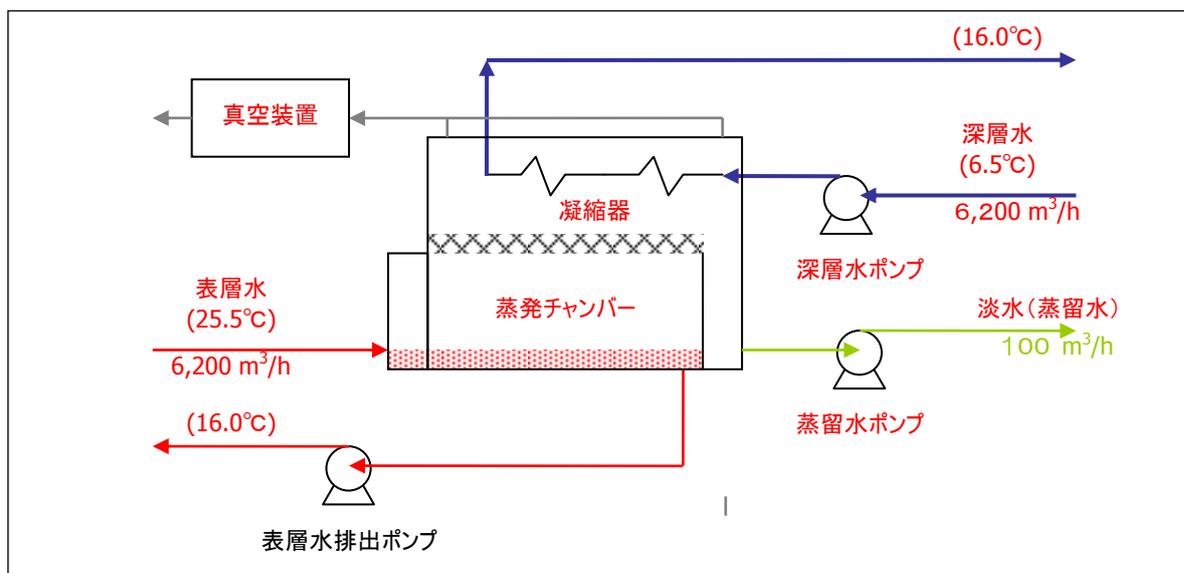


図 4-15 蒸発法のフロー（例）： 淡水 100m<sup>3</sup>/h を生産するケース

#### (b) 逆浸透法

逆浸透法のフロー例として、平成 9 年に沖縄県北谷町に完成した沖縄県海水淡水化センターのフローを図 4-16 に示す。

一次、二次濾過器で前処理された原海水は、高圧ポンプにより加圧され、逆浸透膜により淡水化される。濃縮された排海水はまだ高い圧力を持っているため、動力回収タービンによって原海水の予圧に使用された後、希釈して海中に排出される。回収率（原海水に対する淡水生産量）は、40%である。

海洋深層水を利用する場合、前処理工程および希釈工程の大幅な簡易化が期待される。なお、一般的な逆浸透法の消費電力は、淡水 1m<sup>3</sup>あたり 4～6kWh 程度であり、今後の技術開発により一層の低減が期待されている。

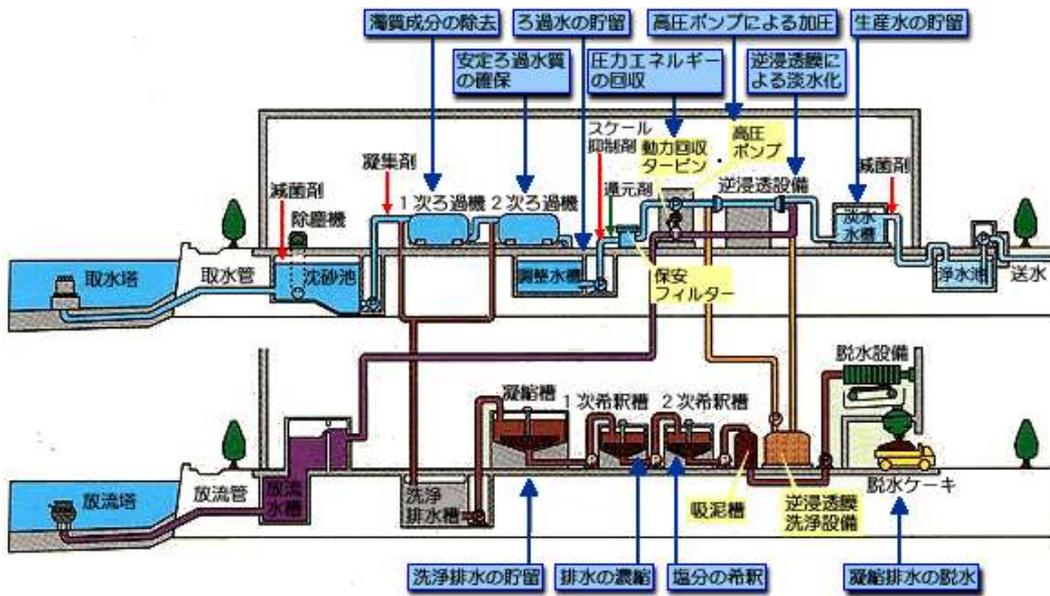


図 4-16 逆浸透法のフロー（例）

出典：沖縄県企業局 海水淡水化センターホームページ

(<http://www.eb.pref.okinawa.jp/sisetu/suigen/kaisui/flow.html>)

(4) 利用する海洋深層水の特長および使用後の質の低下

前項で検討したフローから、利用する海洋深層水の特長および使用後の質の低下に関しては、表 4-5、表 4-6 の通り評価できる。

表 4-5 フラッシュ蒸発方式

	低温性	清浄性	富栄養性
利用する特性とそのレベル (*1)	◎ 表層水-5℃以下。ただし低温の方が効率が良い。	○ 熱交換器にほとんど汚れが付かないためメンテナンス	○ 飲料水とする場合、海洋深層水ミネラルとして後で添加可能
利用後、劣化する特性 (*2)	↓ 表層水温度との平均値に近づく	→ 非接触型熱交換器を通過するだけのため、全く変化なし	→ 非接触型熱交換器を通過するだけのため、全く変化なし

表 4-6 逆浸透方式

	低温性	清浄性	富栄養性
利用する特性 そのレベル (*1)	× 水温が低いと膜通過時の 圧力損失が大きくなる	◎ 膜方式でトラブルが起 こりやすい前処理がほ ぼ不要となる	○ 飲料水とする場合、海 洋深層水ミネラルとして 後で添加可能
利用後、劣化 する特性 (*2)	→ 高圧ポンプを通るた め、若干は昇温する。	↓(若干) プロセス内で回収され るものの、凝集剤の添 加が一般的	→ ただし、約2倍に濃縮 される。

(\*1) ◎:深層水利用の主目的、○:積極的に利用しないがメリットがある、-:利用しない、×:逆にデメリットとなる

(\*2) ↓:劣化する、→:変化しない

#### (5) 経済性

設備規模や電力価格、原海水の水質によるものの、蒸発法、逆浸透法とも、淡水 1m<sup>3</sup>あたりの生産コストは、大型のプラントでおよそ 100 円～150 円とされている。

参考例として、一般的な逆浸透法の淡水生産コストの試算例(三菱重工(株)による)を表 4-7 に示す。

表 4-7 逆浸透法による淡水生産コストの試算例

試算条件		試算結果			
項目	使用数値	項目	コスト (円/m <sup>3</sup> )	割合 (%)	
生産水量	50 000 m <sup>3</sup> /日	運 転 費	電気代	60.0	41.5
回収率	50 %		膜代	4.6	3.2
稼働率	95 %		薬品代	8.8	6.1
原単位	5 kWh/m <sup>3</sup>		補修費	5.8	4.0
電気代	12円/kWh		労務費	9.8	6.8
膜交換率	年10 %		小計	89.0	61.6
建設単価	20万円/(m <sup>3</sup> /日)	設備償却費	55.6	38.4	
耐用年数	15年	合計	144.6	100	
利子率	5 %				

出典：永井正彦, 岩橋英夫, 田中賢次, 「逆浸透 (RO) 法海水淡水化技術の上水道分野への適用」

三菱重工技報 Vol. 39 No. 5 (2002\_9), 2002

同条件にて、蒸発法による淡水生産コストを試算すると、表 4-8 の通りとなる。

表 4-8 蒸発法による淡水生産コストの試算結果

項目	コスト (円/m <sup>3</sup> )	割合 (%)	備考	
運 転 費	電気代	40.0	29	3.5kWh/m <sup>3</sup> (標準値)
	定期交換品代	0.0	0	対象品無し
	薬品代	0.0	0	薬品は不使用
	補修費	4.5	3	ポンプ、真空装置、電気計装
	労務費	9.8	7	逆浸透法と同額とする
	小計	54.3	39	
設備償却費	83.4	61	逆浸透法と同じ 15 年で計算 (実際の耐用年数は、15 年を大きく超えると考えられる)	
合計	137.7	100		

現状、日本における一般的な上水価格は、上記の海水淡水化設備の淡水生産コストより低い。したがって、経済性を成立させる条件としては、次のような項目が挙げられる。

1) 離島あるいは世界の島嶼国では、陸上の淡水資源だけでは需要がまかなえないため、海水淡水化設備を導入する例が多い。沖縄本島の海水淡水化設備においても、陸水の水資源開発だけでは需要のバランスを維持することが困難であると予想の下、建設を決定した経緯がある。

こういった、十分な淡水資源を持たない地域では、本設備が競争力を持ちうる。

2) 淡水生産コストが  $1\text{m}^3$  あたり 100～150 円であるのに対し、清涼飲料水としてボトル詰めされて販売される淡水は、1 リットルで数十～100 円程度という大きな付加価値をつけて販売される。したがって、海洋深層水由来の飲料水として特色をアピールして清涼飲料水として市場で評価されれば、海水淡水化の経済性は大きく向上する。

#### 4.4 冷熱としての利用

##### 4.4.1 農業・植物工場分野

###### (1) 技術の概要

3.3 節で述べた通り、海洋深層水の取水は COP170～500 に匹敵する超高効率の冷熱供給装置という一面を持つ。

一方、わが国の野菜や花き類の栽培において、夏場の高温対策技術の多くは、商用電力を利用したハウス内の冷房や、地中に埋設したパイプで土壌を冷却し作物を栽培する方法が取られている。しかしこういった既存の冷房方式は栽培費用に対する負担が大きく、採算をとるのが困難であるのが現状である。

これを反映して、例えば 10～20℃の冷涼な気候を好むホウレンソウの夏季栽培は、北海道、岩手県、群馬県などの高冷地が中心となっており、全国的に見るとこの時期は高値で取引される(図 4-17)。

同様に、育苗に適した地温が 12～22℃であるトルコギキョウや、花芽分化に昼温 23～25℃、夜温 15～18℃の比較的低温を要求するコショウラン等も、季節により需給バランスと取引単価が大きく変動する(図 4-18、図 4-19)<sup>10</sup>。

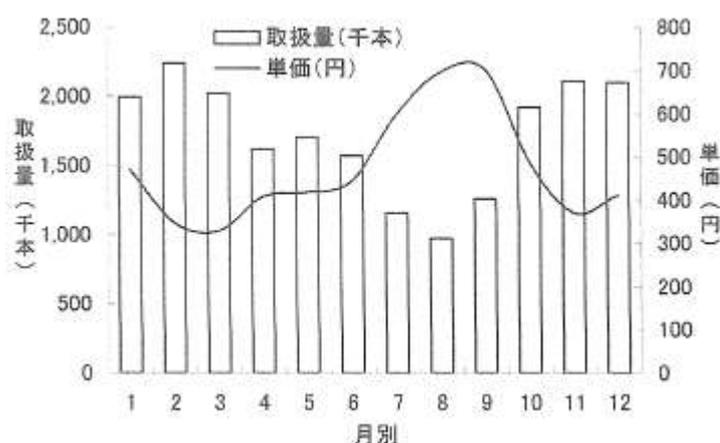


図 4-17 ホウレンソウ月別取扱量と単価（平成 13～17 年平均）（東京都中央卸売市場年報より）

<sup>10</sup> 藤田大介, 高橋 正征 編著, 「海洋深層水利用学」, 成山堂書店, 2006 (図表も)

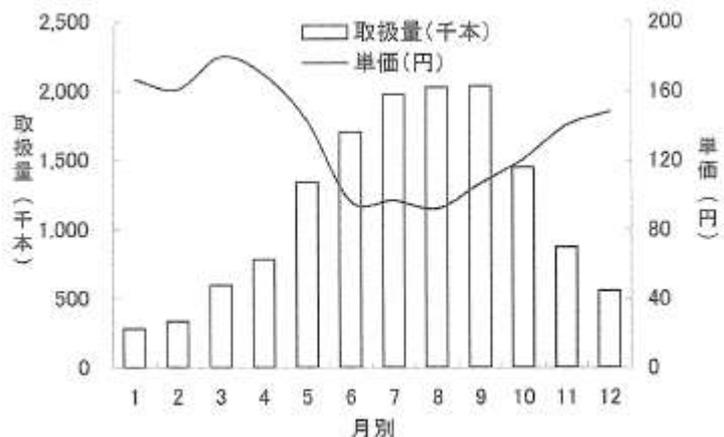


図 4-18 トルコギキョウの月別取扱量と単価（平成 14～17 年平均）  
（東京都中央卸売市場年報より）

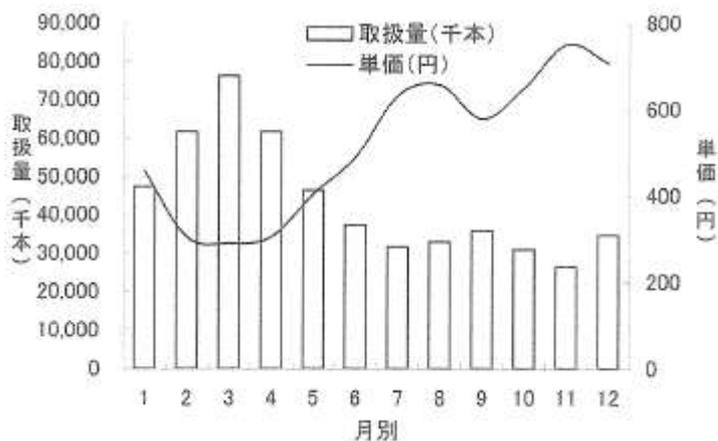


図 4-19 コチョウラン月別取扱量と単価（平成 14～17 年平均）  
（東京都中央卸売市場年報より）

出典：「海洋深層水利用学」（図 4-17～4-19）

こうした背景の下、エネルギー消費の非常に小さい冷熱供給装置である海洋深層水の冷熱を利用する研究が実施されている。特に冷熱利用農業分野では、沖縄県海洋深層水研究所が積極的な研究を行なっている。

(2) 技術動向

沖縄県海洋深層水研究所が実施した研究の中で、最も進展しているのが、海洋深層水の冷熱を利用した夏場のホウレンソウの栽培である。

ホウレンソウは、10～20℃の冷涼な機構を好む野菜で、低温には比較的強いものの高温には弱く、25℃になると生育が抑制され、30℃以上になると障害が発生する。このため夏場の生産は、北海道、岩手県、群馬県などの高冷地が中心となっており、全国的に見るとこの時期は高値での取引となっている。一方、沖縄県では、11～5月までの比較的気温の低い時期での栽培は可能であるが、平均気温が25℃を上回る6～10月の栽培は極めて困難であり、この時期は消費のほとんどを本土からの移入に依存している。図4-20に沖縄県中央卸売市場におけるホウレンソウの取扱量と価格の推移を示す。県内での生産がほとんどない6～10月は品薄になり、この時期の平均単価は738円で、その他の時期の276円に比べると2.7倍の高値で取り扱われている。したがって、海洋深層水の低水温性を利用して夏場ホウレンソウの生産技術が確立できれば、沖縄県の懸案事項である自給率向上の一つの施策となり、生産農家の技術向上にも寄与できると思われる。沖縄県海洋深層水研究所では、12℃の熱交換水を用いて水耕培養液や土壌の根域のみを冷却する方法(図4-21)で、夏場のホウレンソウ生産が可能であることを実証している(図4-22)。さらに、2010年の海洋深層水利用学会全国大会では、卸売市場での競売実績を基に経済性評価も実施し、採算性が成立することを立証している。

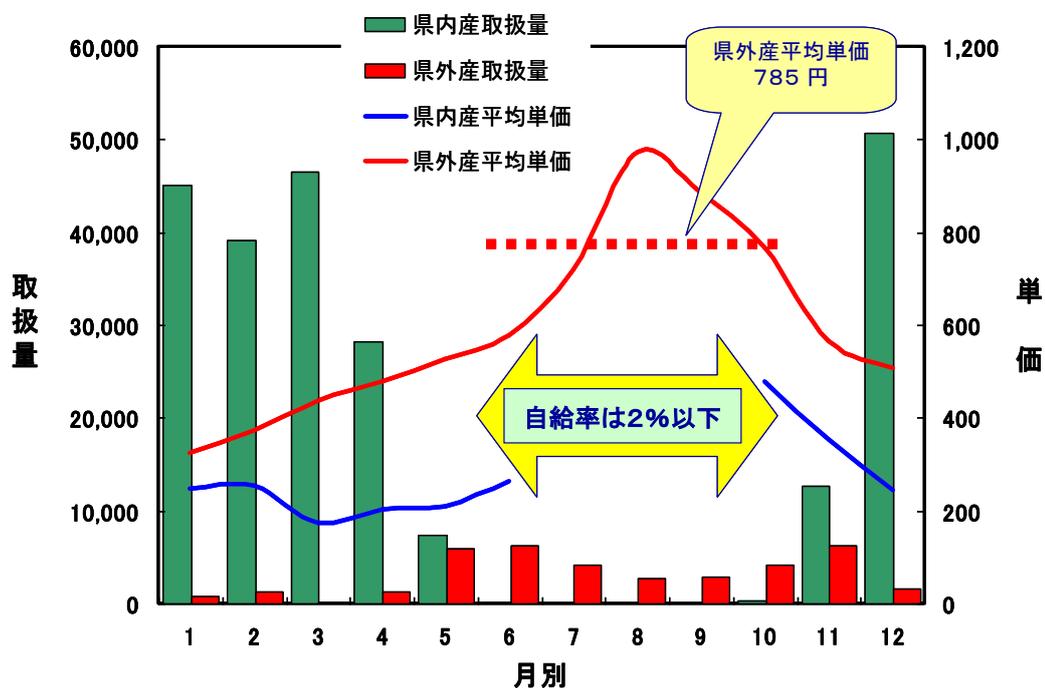


図 4-20 沖縄県中央卸売市場におけるホウレンソウの取扱量と単価

提供：沖縄県海洋深層水研究所



図 4-21 地中に埋設されている塩ビ管  
(12℃の冷水が流れている)  
提供：沖縄県海洋深層水研究所

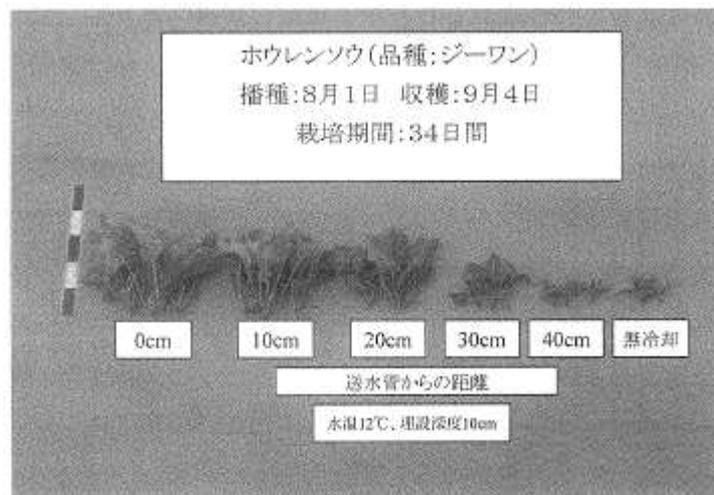


図 4-22 送水管からの距離とハウレンソウの生育状況  
(右側ほど地温が高くなっている)  
提供：沖縄県海洋深層水研究所

### (3) 植物工場への応用

植物工場は、施設内で植物の生育環境(光、温度、湿度、二酸化炭素濃度、養分、水分等)を制御して栽培を行う施設園芸のうち、環境及び生育のモニタリングを基礎として、高度な環境制御と生育予測を行うことにより、野菜等の植物の周年・計画生産が可能な栽培施設である。

植物工場には、

- (1) 閉鎖環境で太陽光を使わずに環境を制御して周年・計画生産を行う「完全人工光型」
- (2) 温室等の半閉鎖環境で太陽光の利用を基本として、雨天・曇天時の補光や夏季の高温抑制技術等により周年・計画生産を行う「太陽光利用型」(太陽光利用型のうち、特に人工光を利用

するものについては「太陽光・人工光併用型」という)の2つがある<sup>11</sup>。

2009年に農林水産省および経済産業省が50ヵ所の植物工場を対象に実施した調査によれば、栽培品目は、リーフレタスやサラダ菜、フリルレタスなどのレタス類が中心で、その他ではハーブ等や野菜苗等がみられる(図 4-23)。

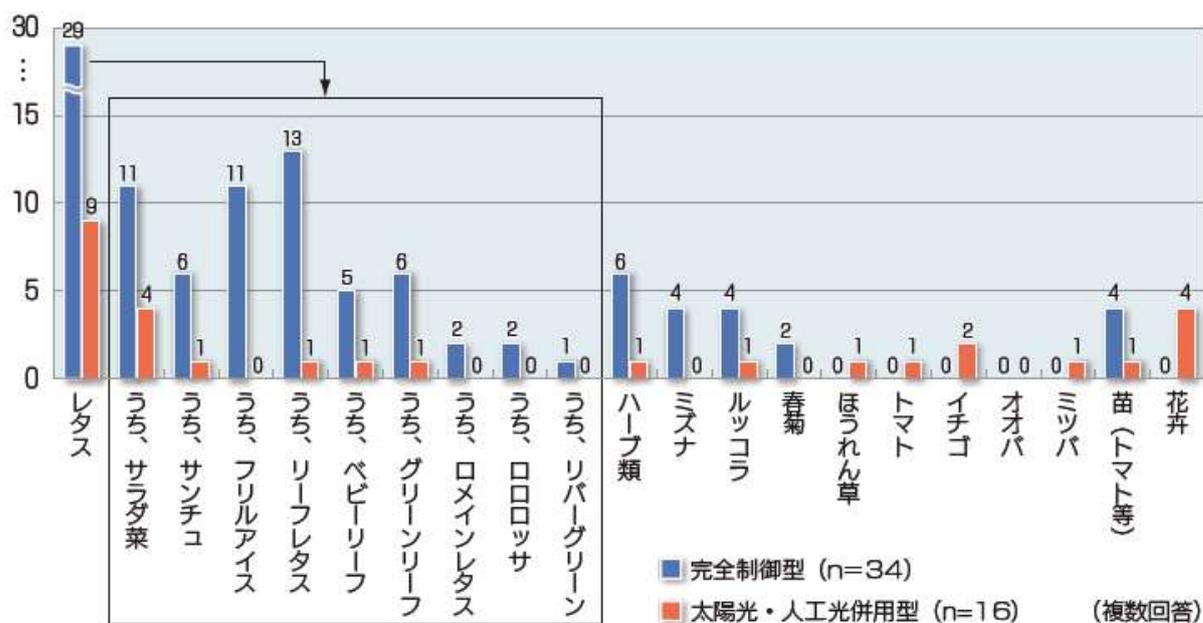


図 4-23 植物工場の栽培品目

出典：農林水産省，経済産業省，「植物工場の事例集」，2009年

完全人工光型の植物工場では、太陽光からの入熱を防ぐために外面が断熱構造となっており、外気からの熱負荷は小さい。一方、生育に必要な光は人工光(蛍光灯や高圧ナトリウムランプ)で供給される上、病虫害防止や二酸化炭素濃度維持のために外気取り入れは制限されることから、この人工光が発する熱量はほぼ全て冷房負荷となる。完全人工光型の植物工場では、一般的に商用電力の電力需要が落ちる夜間を、人工光を点灯させる「明期」とするため、冷房負荷は夜間に大きくなる特徴がある。また、外気の影響が小さいことから、夏冬を問わず冷房需要が発生する。

一方、太陽光利用型の植物工場の冷房負荷は主に太陽光から受けるエネルギーとなる。このため、夏季の昼間がピーク負荷となる。

<sup>11</sup> 農林水産省，経済産業省，「植物工場の事例集」，2009年

(4) 海洋深層水冷熱利用フロー

(a) 空調装置への利用

植物工場や施設園芸で一般的に使用されるパッケージ空調の代わりに、深層水冷熱を利用する際のフローを図 4-24 に示す。

通常の電気式空調では、HFC 系の冷媒の蒸発熱により空気を冷却するのに対し、深層水冷熱利用の場合は、深層水(あるいは深層水により冷却された清水等の冷媒)の顕熱で冷却を行なう。

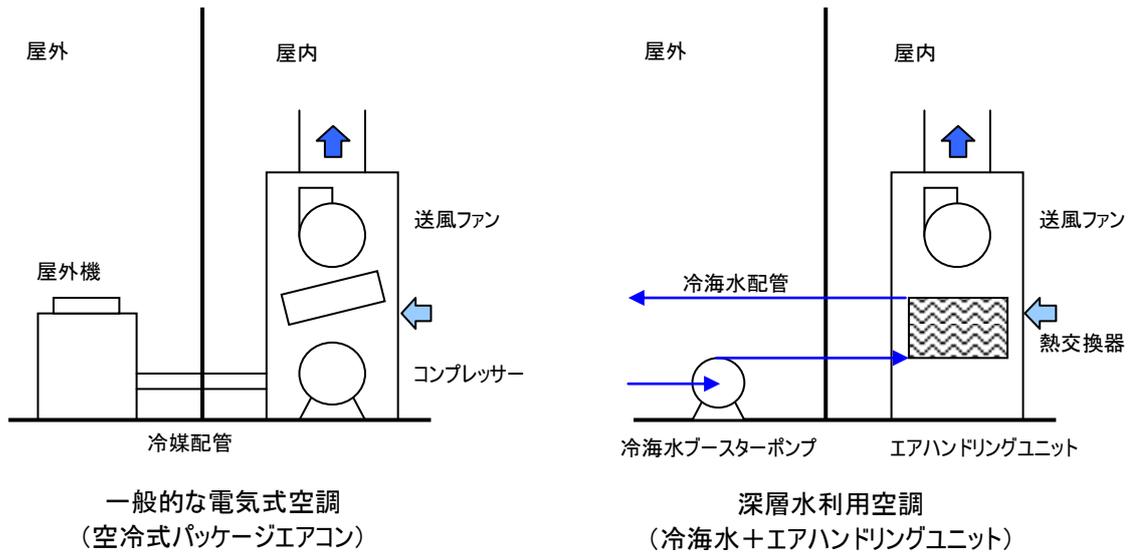


図 4-24 深層水利用空調のフロー

(b) 土壌冷却への利用

土壌の根域のみを冷却する方式では、土中に敷設する冷却管に深層水冷熱が利用できる。

この際、深層水を直接冷却管に流す直接利用方式、および、熱交換器を介して清水(冷媒)を冷却して清水(冷媒)を冷却管に流す間接利用方式が考えられる。

図 4-25 に、それぞれの方式のフローを示す。また、表 4-9 にその得失を述べる。

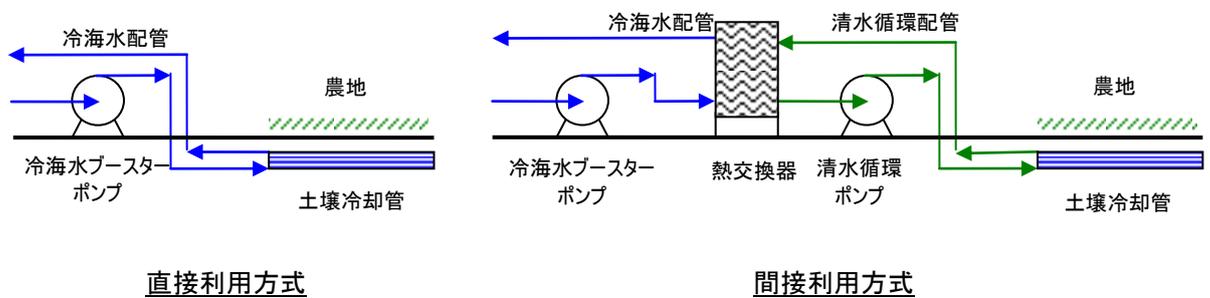


図 4-25 深層水利用土壌冷却のフロー

表 4-9 直接利用方式と間接利用方式との比較

直接利用方式のメリット	間接利用方式のメリット
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 機器数が少なく初期投資が小さい</li> <li>・ 熱交換器での温度損失が無い（間接方式より低い温度で冷却が可能）</li> <li>・ ポンプの電力消費量が小さい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 万が一、土壤冷却管が破損して水が漏れたときに、農作物および土壤への被害がほとんど無い。</li> </ul>

(5) 利用する海洋深層水の特長および使用後の質の低下

前項で検討したフローから、利用する海洋深層水の特長および使用後の質の低下に関しては、表 4-10 の通り評価できる。

表 4-10 海洋深層水の特長および使用後の質の低下

	低温性	清浄性	富栄養性
利用する特長とそのレベル <sup>(*)1</sup>	◎ 品目により異なるが、～16℃程度	○ 熱交換器にほとんど汚れが付かないためメンテナンス	— (本節では冷熱利用について述べる)
利用後、劣化する特長 <sup>(*)2</sup>	↓ 外気温度に近づく	→ 非接触型熱交換器を通過するだけのため、全く変化なし	→ 非接触型熱交換器を通過するだけのため、全く変化なし

(\*)1 ◎: 深層水利用の主目的、○: 積極的に利用しないがメリットがある、—: 利用しない、×: 逆にデメリットとなる

(\*)2 ↓: 劣化する、→: 変化しない

## (6) 冷熱需要の算定

## (a) 完全人工光型植物工場（空調利用）

本調査にて専門メーカーより情報提供を受けた 200 坪型の栽培装置を検討用のモデルとして、冷熱負荷の算定を行なう。

本栽培装置は、サラダ菜やリーフレタス等の葉野菜類を、年間 1,327 千株、重量にして年間 132 トンが収穫できる、棚段式の栽培装置である。以下にその仕様を示す。

- ・生産方式 : 棚段式栽培装置、水耕栽培
- ・室構成 : 栽培室×1、育苗室×1
- ・栽培面積 : 2,851m<sup>2</sup>(延べ)
- ・棚段数 : 12 段(栽培室)×1 + 6 段(育苗室)×1
- ・照明 : 110W 蛍光灯×3,360 本(栽培室)  
110W 蛍光灯×336 本(育苗室)
- ・室温温度 : 明期 25°C(夜間)、暗期 18°C(昼間)  
相対湿度 成り行き

建屋は外部からの入熱対策のために断熱構造とされるため、冷熱負荷のピークはすべての蛍光灯が点灯する明期の夜間となる。

この場合、蛍光灯の消費電力が最終的にほぼ全て熱負荷となるため、冷熱の負荷は次の通り計算される。

$$110\text{W} \times 3,360 \text{ 本(栽培室)} + 110\text{W} \times 360 \text{ 本(育苗室)} = 407\text{kW}$$

また、明期は全蛍光灯が点灯し続け、暗期にはほぼ全て消灯されていることから、日間の冷熱の負荷変動は図 4-26 のようになる。

これに 10%の余裕分を見込み、海洋深層水の所要量を算定すると、次の通りとなる。ただし、冷房に用いる深層水の出入り口温度差は 5°Cとする。

$$407\text{kW} \times 1.1(\text{余裕率}) \times 3600 / 5^\circ\text{C} / 4.0\text{kJ/kg}^\circ\text{C}(\text{海水比熱}) / 1025(\text{海水比重}) = 79\text{m}^3/\text{h}$$

また、上記計算にて深層水の出入り口温度差を変化させた場合の所要量の変化を、図 4-27 に示す。

検討用モデル(200坪型植物工場)の一日の熱負荷パターン例

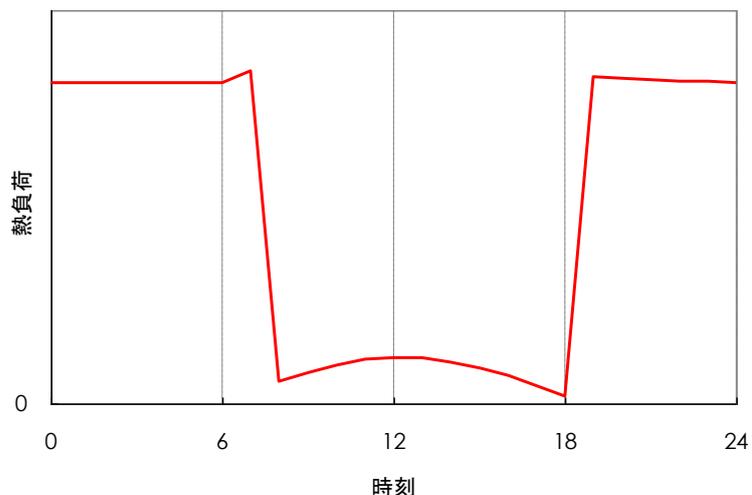


図 4-26 冷熱需要のパターン例 (完全人工光型植物工場)

検討用モデル(200坪型植物工場)の深層水所要量

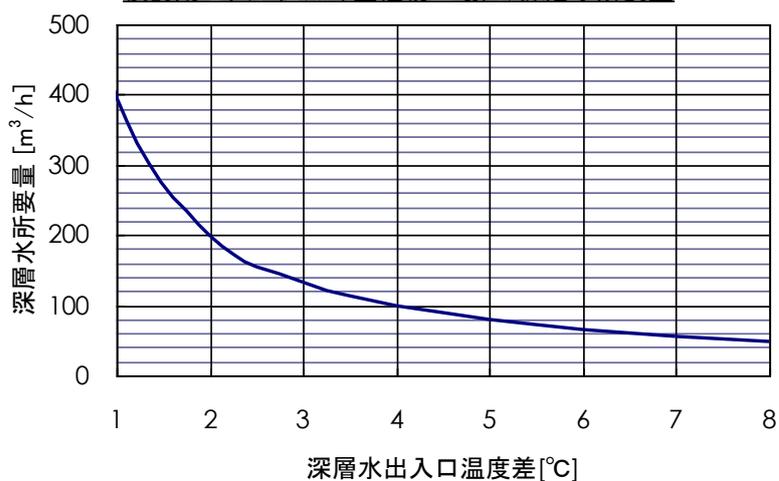


図 4-27 利用温度差と所要水量の関係 (ピーク時)

なお、暗期の室内温度を 18°C にキープするため、深層水出口温度はアプローチ温度 2°C を考慮した 16°C を最大値として設計する。

## (b) 太陽光利用型植物工場（空調利用）

本調査にて専門メーカーより情報提供を受けた 20 アール型栽培装置の冷熱負荷の算定例を示す。

本設備は、ミニトマト（もしくは大玉トマト）を、年間 36 トンを収穫できる平置き型栽培装置である。

最も日差しの厳しい正午前後は遮光カーテンを用いて入熱量の減少を図るものの、最大の負荷は直接日光によるものである。

ピーク時の冷熱負荷は、次の通り算定される。

## (i) 温室形状

合計床面積	$A_s = 2,208 \text{ m}^2$
合計表面積	$A_w = 3,115 \text{ m}^2$
天面積	$A_{w1} = 2,423 \text{ m}^2$
妻・側面積	$A_{w2} = 692 \text{ m}^2$

## (ii) 計算条件

温度条件

$$\text{外気温度 } \theta_{ou} = 30^\circ\text{C}$$

$$\text{設定温度 } \theta_{in} = 18^\circ\text{C}$$

$$\text{地中温度 } \theta_g = 27^\circ\text{C}$$

伝熱係数

$$\text{換気伝熱率 } h_v = 2.9 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

$$\text{被覆の熱貫流率 } h_t = 1.9 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

$$\text{地中伝熱率 } h_g = 2.9 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$$

## (iii) 日射・遮光条件

$$\text{直達日射量 } q(\text{sun}) = 880 \text{ W/m}^2$$

$$\text{遮光率 } C(\text{sun}) = 64\%$$

$$\text{カーテン枚数 } N = 1 \text{ 枚}$$

## (iv) 冷房負荷計算

$$\text{被覆表面損失 } Q_1 = A_w \times (h_t + h_v) \times (\theta_{ou} - \theta_{in})$$

$$= 3115 \times 4.8 \times 12 / 1000 = 179.4 \text{ kW}$$

$$\text{室内床面損失 } Q_2 = A_s \times h_g \times (\theta_g - \theta_{in})$$

$$= 2208 \times 2.9 \times 9 / 1000 = 57.6 \text{ kW}$$

$$\text{直達日光損失 } Q_3 = A_s \times q(\text{sun}) \times (1 - C/100) \times 0.8^{(1+N)} / 1000$$

$$= 2208 \times 880 \times 0.23 / 1000 = 447.7 \text{ kW}$$

合計損失熱量

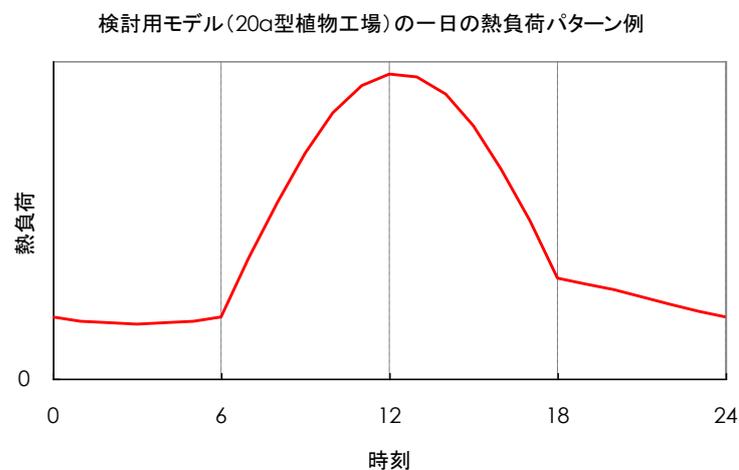
$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 684.7 \text{ kW}$$

また、同式に太陽高度と外気温を考慮して得られる夏季の快晴の一日の冷熱負荷パターンを、**図 4-28** に示す。

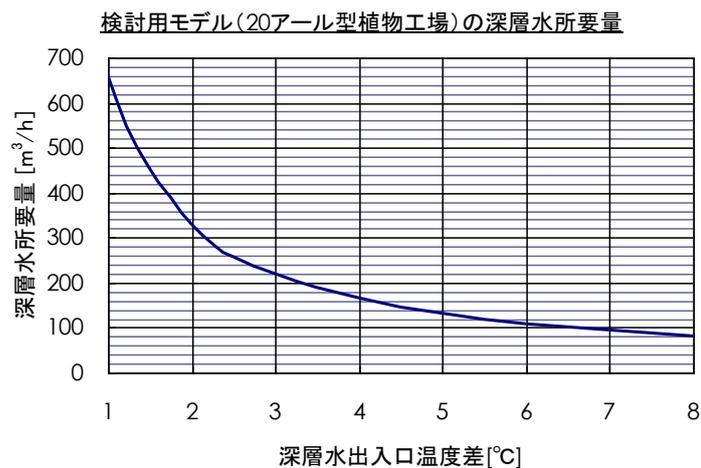
得られたピーク時の損失熱量に 10%の余裕分を見込み、深層水の所要量を算定すると、次の通りとなる。ただし、冷房に用いる深層水の出入り口温度差は 5℃とする。

$$685\text{kW} \times 1.1(\text{余裕率}) \times 3600 / 5^\circ\text{C} / 4.0\text{kJ/kg}^\circ\text{C}(\text{海水比熱}) / 1025(\text{海水比重}) = 132\text{m}^3/\text{h}$$

ここで、深層水の出入り口温度差を変化させた場合の所要量の変化を、**図 4-29** に示す。



**図 4-28** 冷熱需要のパターン例（太陽光利用型）



**図 4-29** 利用温度差と所要水量の関係（ピーク時）

(c) 施設園芸（土壌冷却）

土壌冷却によるハウレンソウの通年栽培は、沖縄県海洋深層水研究所により実証研究が実施され、冷却に必要な温度や流量が明らかとなっている。

この研究結果に基づいた次のデータを用いて、次項以降の検討を実施する。

- 施設面積： 1,000m<sup>2</sup>
- うち、実栽培面積 540m<sup>2</sup>
- 収量2.5kg/m<sup>2</sup>
- 6月～10月(5ヵ月)で5作、11月～翌5月(7ヶ月)で5作
- 年間収量 13.5トン
- 冷水入口温度12℃
- 冷水所要流量14.4m<sup>3</sup>/h（6月～10月に一定流量で使用）
- 栽培棚レイアウト： 図 4-30 に示す。

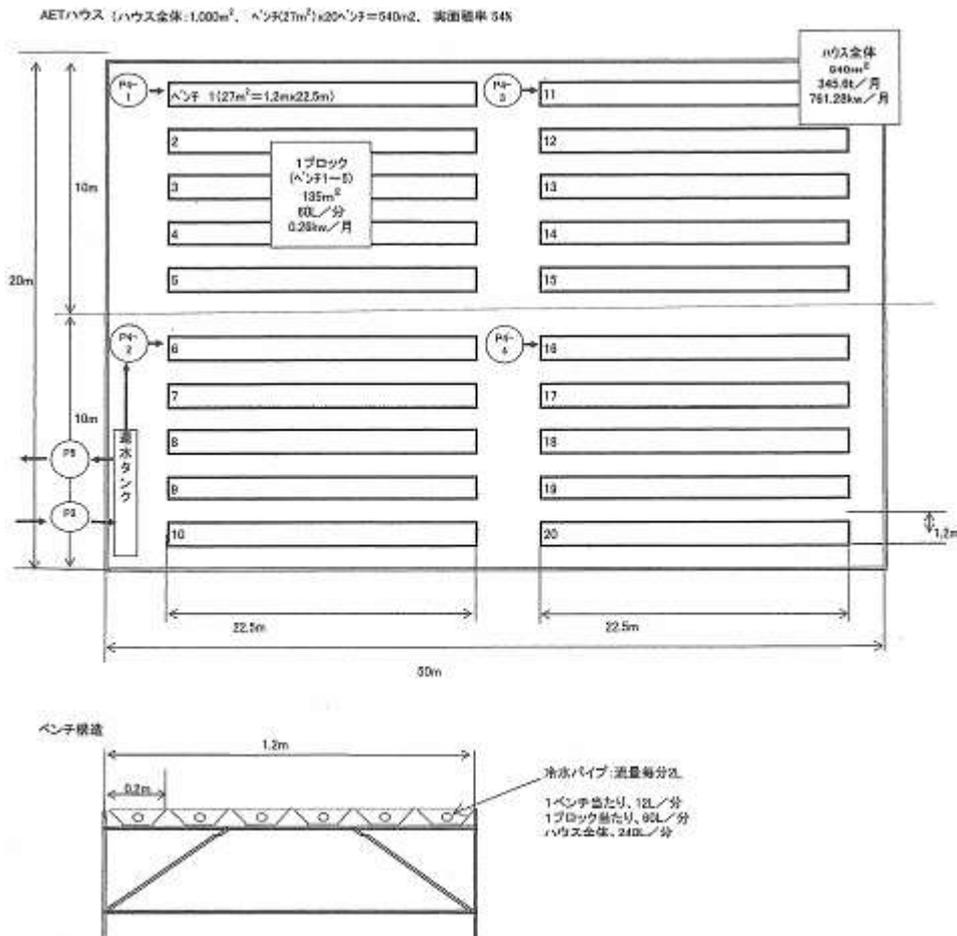


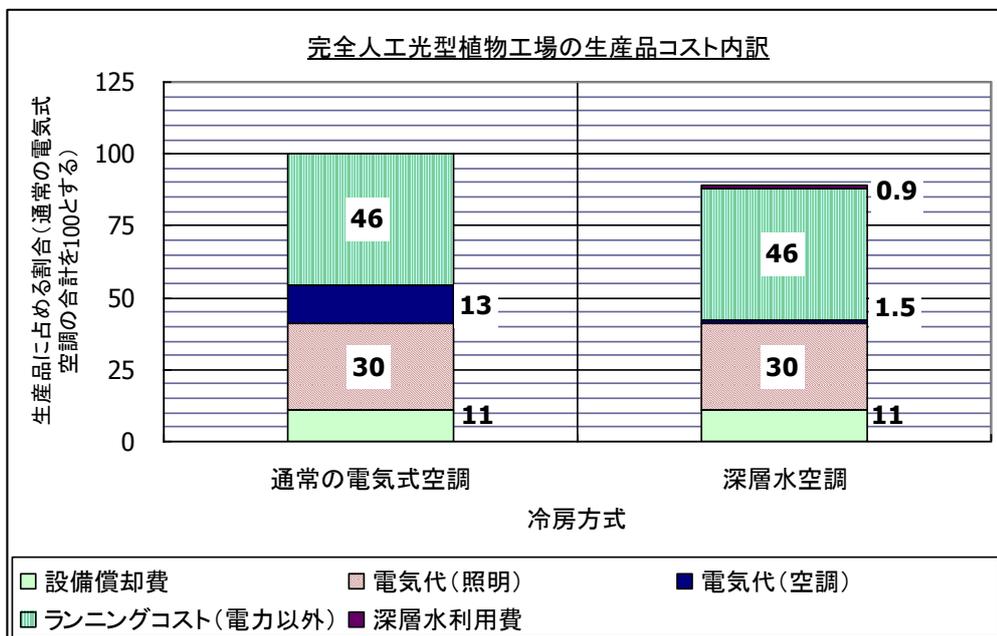
図 4-30 夏季ハウレンソウ栽培における、土壌冷却配管のレイアウト例

出典：沖縄県海洋深層水研究所

(6) 経済性の検討

(a) 完全人工光型植物工場（空調利用）

完全人工光型の植物工場においては、通常のアンドリング機(エアハンドリングユニット)を設備することとなり、両者の設備投資額はほぼ変わらない。そこで、専門メーカーにより試算された生産品コスト内訳のうち、冷房費用を深層水空調で代替した際のコスト低減効果を算定した。なお、深層水流量は前項で検討した 79m<sup>3</sup>/h を用い、深層水利用コストとして沖縄県海洋深層水研究所の現在の頒布価格の 6 円/m<sup>3</sup>を仮定する。試算結果を図 4-31 に示す。また、深層水利用コストを変化させたときの生産品コストへの影響を図 4-32 に示す。深層水利用コスト 6 円/m<sup>3</sup>ではほとんど生産品コストには影響せず、約 70 円/m<sup>3</sup>で電気式空調とほぼ同じとなる事が分かる。



内訳	電気式空調	深層水空調
設備償却費	11	11
電気代(照明)	30	30
電気代(空調)	13	1.5
ランニングコスト(電力以外)	46	46
海洋深層水利用費	-	0.9
合計	100	90

図 4-31 生産品のコスト内訳に関する通常型空調と深層水空調との差異（サラダ菜、レタス類）  
（深層水利用費用を 6 円/m<sup>3</sup>とした場合）

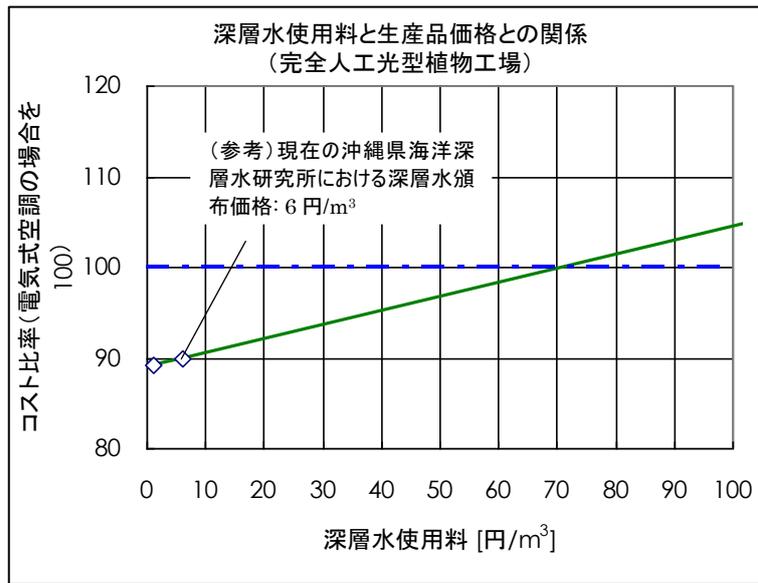


図 4-32 深層水利用費用の生產品コストに対する感度 (完全人工光型植物工場)

(b) 太陽光利用型植物工場 (空調利用)

前項で検討した生産量年間 36トンの 20 アール型ミニトマト栽培設備の深層水利用量は、ピーク時に 132m<sup>3</sup>/h(出入口温度差 5℃時)であった。深層水の年間平均利用率を 20%とすれば、生產品に対する深層水のコストは次の通り算定される。ただし、深層水ポンプおよび送風ファンの動力として 9kW(ピーク時)を見込み、深層水の利用料金を沖縄県海洋深層水研究所の現在の頒布価格 6 円/m<sup>3</sup>、電気代を 20 円/kWhと仮定する。

$$(132\text{m}^3/\text{h} \times 6.0 \text{ 円}/\text{m}^3 + 9\text{kW} \times 20 \text{ 円}/\text{kWh}) \times 24\text{h} \times 365 \text{ 日} \times 0.2 / 36,000\text{kg}/\text{年} = \underline{47 \text{ 円}/\text{kg}}$$

また、深層水利用コストを変化させたときの生產品コストへの影響を図 4-33 に示す。

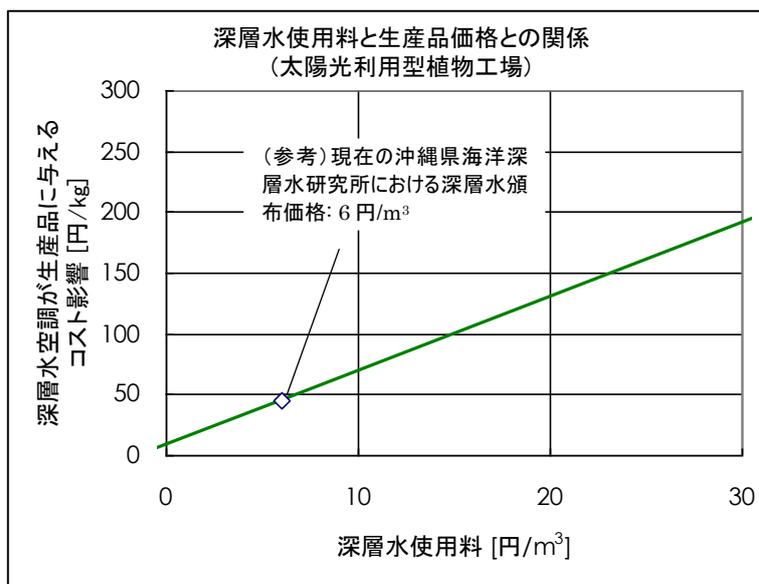


図 4-33 深層水利用費用の生產品コストに対する感度 (太陽光利用型植物工場)

(c) 施設園芸（土壌冷却）

前項で検討した生産量年間 13.5 トンの 1,000m<sup>2</sup> ホウレンソウ栽培設備の深層水利用量は、ピーク時に 14.4m<sup>3</sup>/h であった。深層水の年間平均利用率を 42% (夏場5ヵ月のみ一定流量で使用) とすれば、生産品に対する深層水のコストは次の通り算定される。ただし、深層水ポンプの動力として 1.2kW (ピーク時) を見込み、深層水の利用料金を沖縄県海洋深層水研究所の現在の頒布価格 6 円/m<sup>3</sup>、電気代を 20 円/kWh と仮定する。

$$(14.4\text{m}^3/\text{h} \times 6.0 \text{ 円}/\text{m}^3 + 1.2\text{kW} \times 20 \text{ 円}/\text{kWh}) \times 24\text{h} \times 365 \text{ 日} \times 0.42 / 13,500\text{kg}/\text{年} = \underline{30 \text{ 円}/\text{kg}}$$

一方、図 4-17 や図 4-21 に示した、季節によるホウレンソウの販売単価の変動は、数百円/kg に及ぶため、これと比較すると深層水利用費の 36 円/kg は非常に小さいと言える。

深層水利用コストを変化させたときの生産品コストへの影響を図 4-34 に示す。

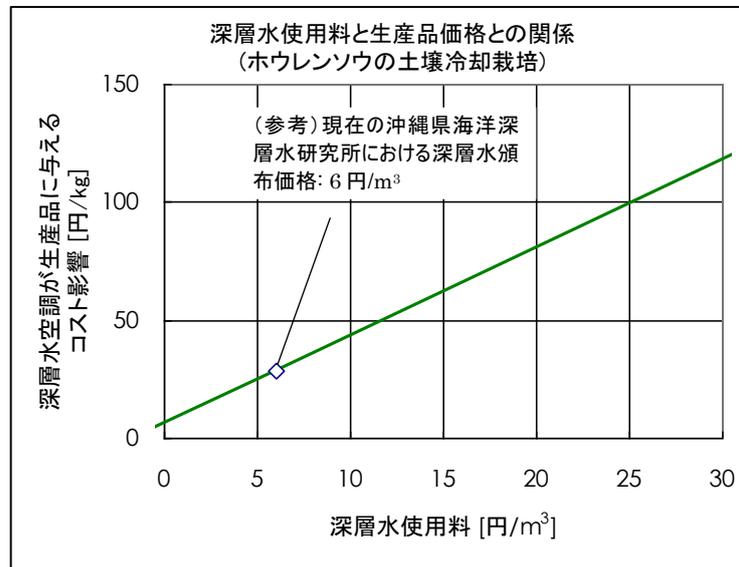


図 4-34 深層水利用費用の生産品コストに対する感度（ホウレンソウ／土壌冷却）

#### 4.4.2 水産養殖分野

##### (1) 技術の概要

深層水の低温性は、その清浄性や富栄養性ととも、養殖漁業、水産業にとって非常に重要な特性となっている。我が国における取水地のうち、とりわけ夏季の海水温が 30℃弱まで上昇する沖縄県海洋深層水研究所においては、深層水の冷熱を利用したクルマエビ、アワビ、トラフグ、ヒラメ、クビレヅタ(海ぶどう)、オゴノリ、アサクサノリ等の養殖研究が盛んに行われている。このうちクルマエビと海ぶどう、オゴノリの養殖は民間に技術移転され、現在では久米島の主要産業へと成長している。

クルマエビの生育適温は 20～25℃と言われ、これ以上の水温では病気の発生と蔓延のリスクが高くなる。このため、現在、夏場にクルマエビの成体の養殖は行われていない。また、海ぶどうは水温 25℃が生育適温であるが、これを超えると奇形の発生率が高くなり品質が低下する。

また、深層水を利用する際の留意点として、クルマエビはある程度濁った海水を好む性質があるため、養殖池内の海水の置換率を上げて海水が清みすぎるとストレスの原因となることが挙げられる。また海ぶどうでは、水温が低すぎると生育スピードが遅くなるため、あまりに温度の低い海水は使用できない。さらに、海洋深層水を用いた場合に雑藻である藍藻類の繁殖と海ぶどうへの付着被害が報告されており<sup>12</sup>、冷熱利用としては深層水よりも冷却された表層水を好む。

##### (2) 深層水冷熱利用フロー

冷熱利用の方式としては、混合(ワンスルー)方式、冷却コイル方式、循環熱交換方式(図 4-35)が考えられる。現在、久米島のクルマエビおよび海ぶどうの養殖においては、混合方式が用いられている。水面に太陽の直射を受ける養殖池においては、冷熱負荷が農業や建物空調より大きくなることが予想される。このため、ポンプの消費電力や、冷却コイルまたは熱交換器の初期費用およびメンテナンスの煩雑さを考慮すると混合方式が最適である。そこで、以降は混合方式での利用について述べる。

---

<sup>12</sup> 鈴木秀和 他、「沖縄県久米島のクビレヅタ(海ぶどう)養殖水槽に出現した付着珪藻」, 第 14 回海洋深層水利用学会全国大会講演要旨集, 2010

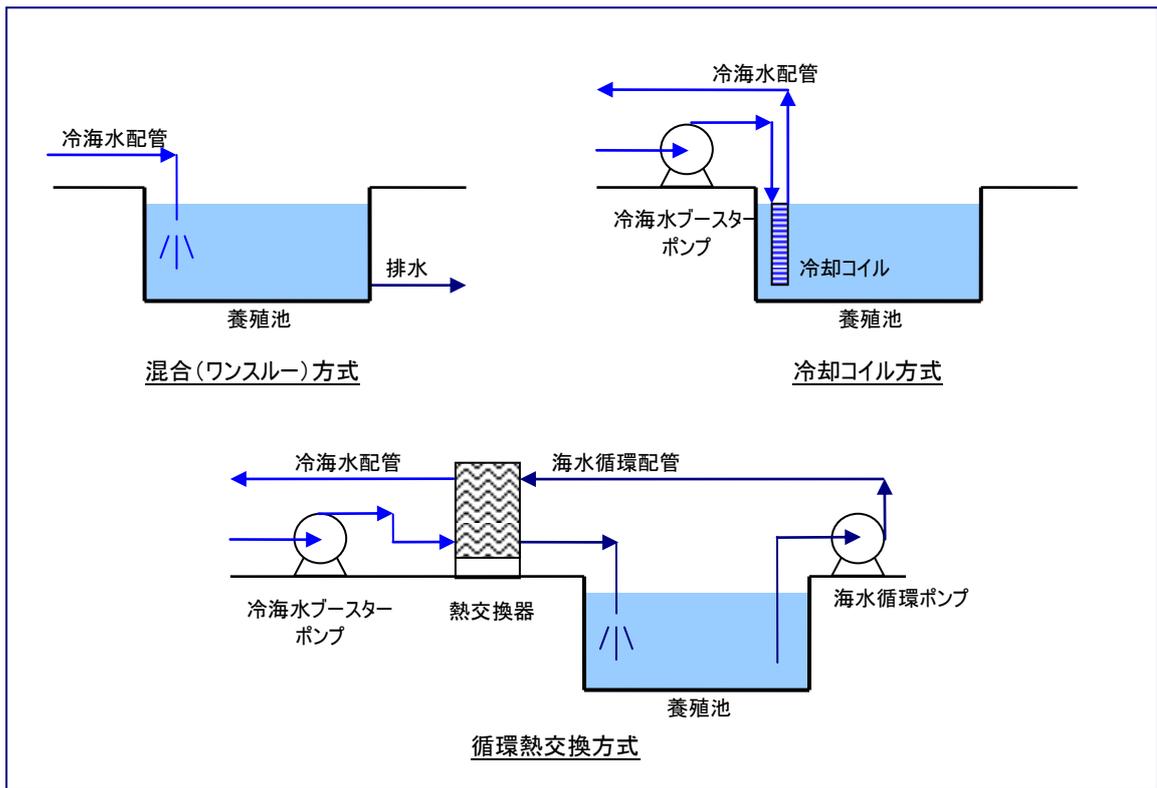


図 4-35 冷熱需要のパターン

(3) 利用する深層水の特長および使用後の質の低下

前項で検討したフローから、利用する深層水の特長および使用後の質の低下に関しては、表 4-11 の通り評価できる。

表 4-11 利用する深層水の特長および使用後の質の低下(水産養殖)

	低温性	清浄性	富栄養性
利用する特長とそのレベル (*1)	◎ 20℃程度 低温すぎても問題がある点に注意。	○ 病気の発生率の低減が図れる。	○～× 雑藻の繁殖というデメリットの可能性もある。
利用後、劣化する特長 (*2)	↓ 外気温度に近づく	↓ (混合方式) 養殖池の海水と混合される。	↓ (混合方式) 養殖池の海水と混合される。

## (4) 冷熱需要の算定

## (a) クルマエビ養殖池

広さ 10,000m<sup>2</sup> の養殖池の熱負荷について推定する。

## (i) 温室形状

水面面積	$A_s = 10,000 \text{ m}^2$
壁面・底面面積	$A_w = 10,200 \text{ m}^2$

## (ii) 計算条件

温度条件	外気温度	$\theta_{ou} = 30^\circ\text{C}$
	設定温度	$\theta_{in} = 25^\circ\text{C}$
	地中温度	$\theta_g = 27^\circ\text{C}$
伝熱係数		
	水面の総括熱伝達係数	$h_t = 10 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$
	地中伝熱率	$h_g = 2.9 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$

## (iii) 日射・遮光条件

直達日射量	$q(\text{sun}) = 880 \text{ W/m}^2$
-------	-------------------------------------

## (iv) 冷房負荷計算

$$\begin{aligned} \text{海水表面損失 } Q_1 &= A_s \times h_t \times (\theta_{ou} - \theta_{in}) \\ &= 10,000 \times 10 \times 5 / 1000 = 500 \text{ kW} \\ \text{土中への損失 } Q_2 &= A_w \times h_g \times (\theta_g - \theta_{in}) \\ &= 10,000 \times 2.9 \times 2 / 1000 = 58 \text{ kW} \\ \text{直達日光損失 } Q_3 &= A_s \times q(\text{sun}) / 1000 \\ &= 10,000 \times 880 / 1000 = 8,800 \text{ kW} \\ \text{合計損失熱量 } Q_{\text{total}} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 = 9,360 \text{ kW} \end{aligned}$$

また、同式に太陽高度と外気温を考慮して得られる夏季の快晴の一日の冷熱負荷パターンを、**図 4-36** に示す。

得られたピーク時の損失熱量に 10%の余裕分を見込み、深層水の所要量を算定すると、次の通りとなる。ただし、冷房に用いる深層水の出入り口温度差は 5°C とする。

$$9,360 \text{ kW} \times 1.1 (\text{余裕率}) \times 3600 / 5^\circ\text{C} / 4.0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} (\text{海水比熱}) / 1,025 (\text{海水比重}) = \underline{1,810 \text{ m}^3/\text{h}}$$

ここで、深層水の出入り口温度差を変化させた場合の所要量の変化を、**図 4-37** に示す。

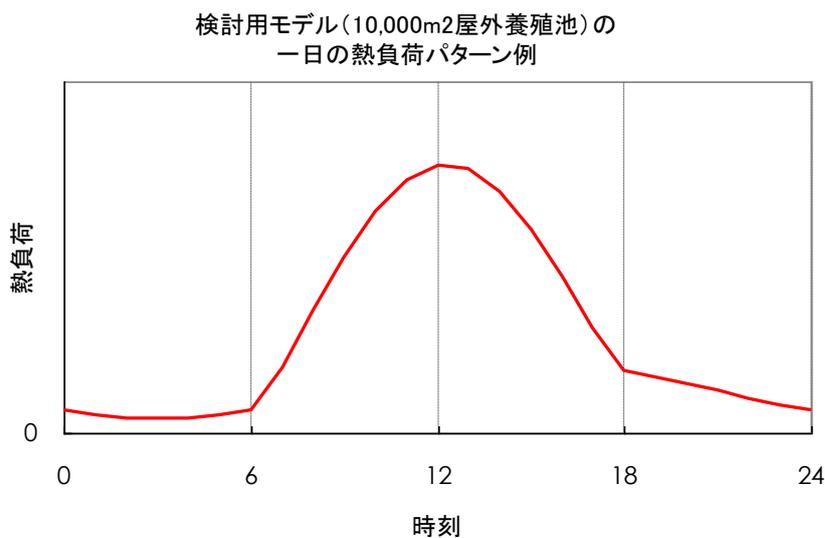


図 4-36 冷熱需要のパターン

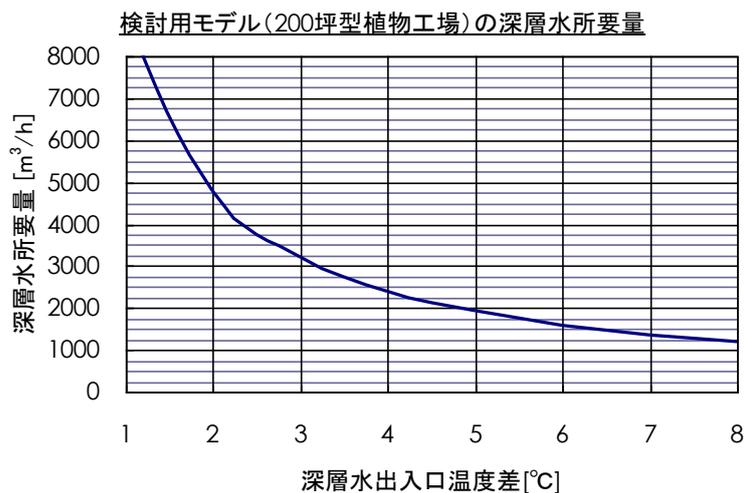


図 4-37 利用温度差と所要水量の関係 (ピーク時)

(b) 海ぶどう

海ぶどうは、既存の養殖設備のピーク時の水量および生産量のデータから、年間100トンの生産量に対しピーク時所要流量は233m<sup>3</sup>/hと推定される(出入口温度差=5°C時)

半遮光した屋内設備での養殖であるため、負荷のパターンは太陽光利用型植物工場(図 4-28)と類似すると思われる。

(5) 経済性の検討

(a) クルマエビ

前項で検討した 10,000m<sup>2</sup> 屋外養殖施設の深層水利用量は、ピーク時に 1,810m<sup>3</sup>/h(出入口温度差 5℃時)であった。深層水の年間平均利用率を 10%とすれば、生製品に対する深層水のコストは次の通り算定される。ただし、深層水の利用料金を沖縄県海洋深層水研究所の現在の頒布価格 6 円/m<sup>3</sup>、10,000m<sup>2</sup>クルマエビ養殖施設の年間収量を 12,000kg と仮定する。

$$(1,810\text{m}^3/\text{h} \times 6.0 \text{ 円}/\text{m}^3) \times 24\text{h} \times 365 \text{ 日} \times 0.1 / 12,000\text{kg}/\text{年} = \underline{793 \text{ 円}/\text{kg}}$$

また、深層水利用コストを変化させたときの生製品コストへの影響を図 4-38 に示す。

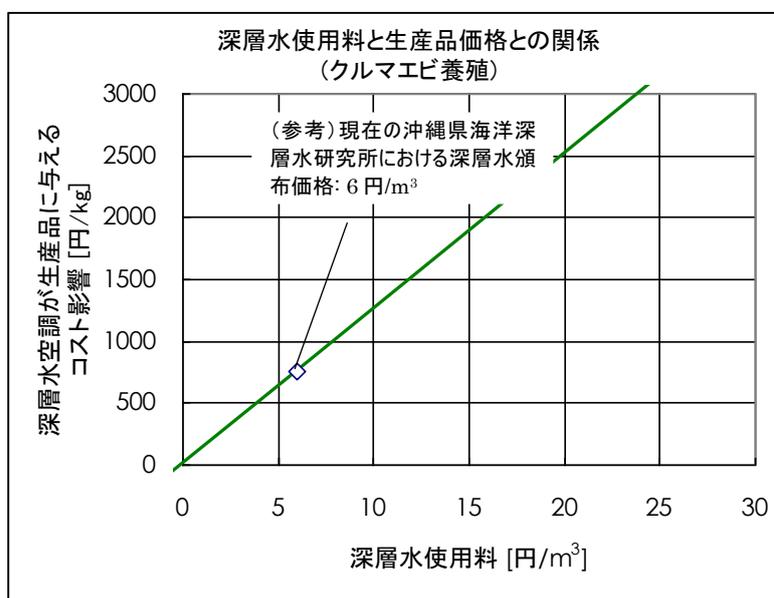


図 4-38 深層水利用価格の生製品コストに対する感度 (屋外養殖施設 (クルマエビ))

一方、クルマエビの販売単価は年間平均で 4~5 千円/kg であるが、品薄となる時期には 1 万円/kg を超えるまでに高騰する。このため、深層水利用費用として約 800 円/kg のコストがかかったとしても、経済性面では十分成立性があると考えられる。さらに、クルマエビの生育適温は 20~25℃程度と深層水の水温に比べて高いため、深層水の出入口温度差を大きくすることで水量を減らして利用コストを下げることも可能である。

(b) 海ぶどう

前項で検討した深層水利用量、生産量100トンあたりピーク時233m<sup>3</sup>/h(出入口温度差5°C時)を用いて、生産品に対する深層水のコストを算定する。なお深層水の年間平均利用率を20%とする。ただし、深層水の利用料金を6円/m<sup>3</sup>と仮定する。

$$(233\text{m}^3/\text{h} \times 6.0 \text{円}/\text{m}^3) \times 24\text{h} \times 365 \text{日} \times 0.2 / 100,000\text{kg}/\text{年} = \underline{24.5 \text{円}/\text{kg}}$$

また、深層水利用コストを変化させたときの生産品コストへの影響をに示す。

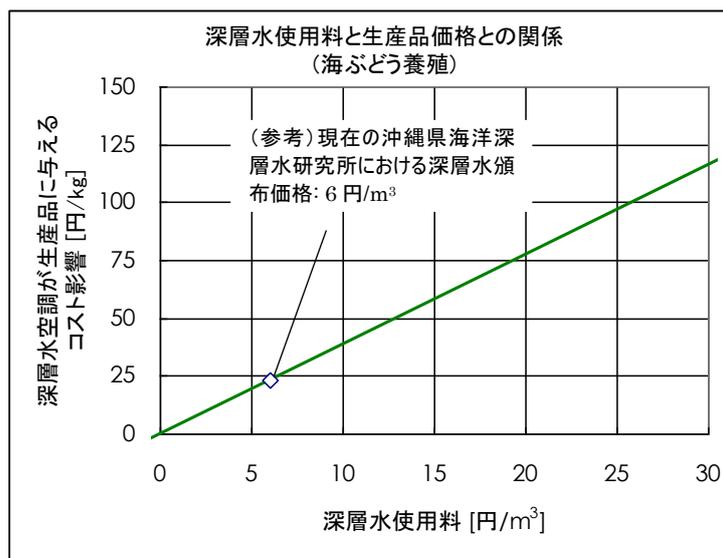


図 4-39 深層水利用価格の生産品コストに対する感度 (屋内養殖施設 (海ぶどう))

一方、海ぶどうの販売単価は年間平均で2~3千円/kgであるため、深層水利用費用が販売単価に占める割合は小さく、経済性面では十分成立性があると考えられる。さらに、海ぶどうの生育適温は25°C程度と深層水の水温に比べて高いため、深層水の出入口温度差を大きくすることで水量を減らして利用コストを下げることも可能である。

#### 4.4.3 地域冷熱利用分野

##### (1) 技術の概要

深層水の低水温特性を利用した冷房は、自然エネルギー活用の一手段として位置付けられ、1980年代半ばにハワイ州立自然エネルギー研究所(現在は NELHA, Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority)で始められた。

NELHAの管理室や研究室では水深 600m から取水した 6°C の深層水を冷房に利用しており、従来使用していた空気熱源圧縮式冷凍機のシステムと比べて電力消費量が 1/10 で、非常にコスト効果が高い利用法であると評価されている。

深層水による冷房は、我が国でも表 4-12 に示すものを代表として既に数例が実用化されている。

深層水は取水する地域や深度によって利用できる水温が異なるため、一言で冷房利用といっても、実際には温度レベルによって空調方式を考慮する必要がある。現状の技術開発状況をベースにすると、表 4-13 に示すように、取水温度が 10°C 程度以下の場合には深層水を直接冷熱源として利用する直接利用方式が採用され、取水温度が十数°C 以上とやや高い場合にはヒートポンプや冷凍機の熱源水や冷却水として利用する間接利用方式が採用される<sup>13</sup>。

---

<sup>13</sup> 藤田大介, 高橋正征 編著, 「海洋深層水利用学—基礎から応用・実践まで—」, 成山堂書店, 2006

表 4-12 日本における海洋深層水による空調の代表的な実施例

場所	深層水温度	空調面積	冷暖房の区別	冷暖房方式
富山県水産試験場 20℃恒温飼育棟	4℃	220 m <sup>2</sup>	冷房のみ 設定温度 20℃	対流式冷房 深層水排水からの熱回収 エアハンドリングユニット方式
室戸市 アクアファーム	11℃	260 m <sup>2</sup>	冷房・暖房 設定温度 冷房 26℃ 暖房 22℃	対流式冷暖房 海水熱源 マルチヒートポンプ方式
沖縄県 海洋深層水研究所	9℃	960 m <sup>2</sup>	冷房のみ 設定温度 26℃	対流式冷房 深層水との熱交換 エアハンドリングユニット方式

表 4-13 海洋深層水の取水温度と空調方式

利用形態	深層水の取水温度	空調方式
直接利用方式	10℃程度以下	熱交換器 → 対流式冷房
	10 数℃～17℃程度以下	熱交換器 → 放射式冷房
間接利用方式	15℃～20℃程度	海水熱源冷凍機 → 対流式冷暖房
		海水熱源ヒートポンプ → 放射式冷暖房

我が国において一般的に冷房空調設備と呼ばれるものは、対流式冷房と考えてよい。冷房では 10℃前後の冷媒に送風ファンで風を送り、室内を対流させることにより室内温度を下げる。

一方、放射式（輻射式）は、天井や壁面を冷却することで、「トンネルに入ったときのような」涼しさを与える空調方式である。送風が無いとため、長時間滞在する場所（ホテルの客室や、病院の病室、会議室等）に用いることで快適性を高めることが出来るとされる。また、対流式と比較して温度の高い 15℃程度の冷媒を用いることが出来るため、省エネルギー性にも優れる。このため欧州では広く普及しているが、夏に湿度が高く天井や壁に結露の問題が生じる日本ではあまり普及していない。

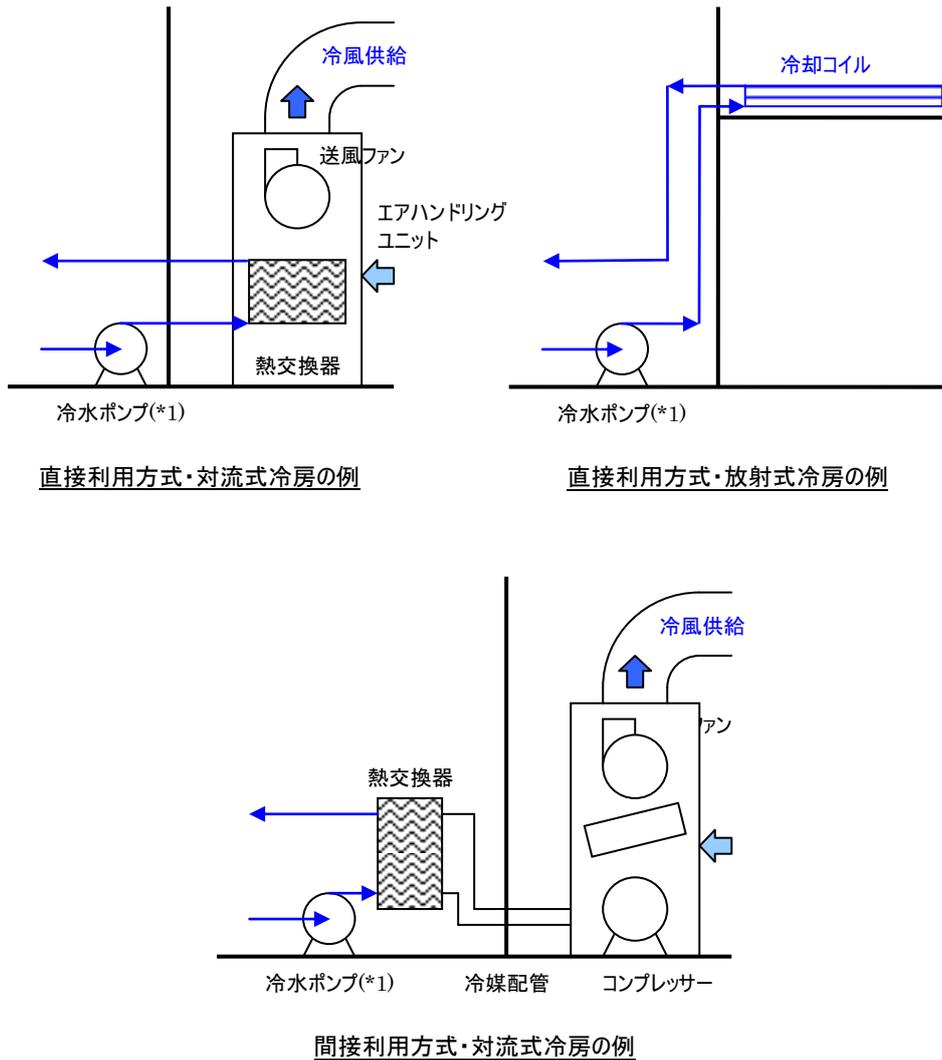
深層水による大規模な冷房システムとしては、2006 年にタヒチのインターコンチネンタルホテルに設備された空調システムが挙げられる。同ホテルでは、空調利用の目的で、水深 850m から 5℃の深層水を毎時 447 トン汲み上げて直接利用方式で冷房に用い、空調費用の 90%を削減、原油換算で年間 2500kL の省エネルギーを達成したとしている<sup>14</sup>。

<sup>14</sup> Makai Ocean Engineering 社 ホームページ [http://www.makai.com/renewable\\_energy/borabora.htm](http://www.makai.com/renewable_energy/borabora.htm) および同ホテルを運営する Pacific Beachcomber SC (PBSC) 社 PR ビデオ <http://www.youtube.com/watch?v=zTGvPrkVAA> より

また、ハワイのホノルルでは、毎時25,000トンの深層水でダウンタウンエリアの大規模地域冷房を行なう計画も検討されている<sup>15</sup>。

(2) 深層水冷熱利用フロー

表 4-13 に掲げたそれぞれの利用方式について、図 4-40 にそのフロー例を記す。ただし、対流式冷房は図 4-40 に掲げる他、冷水を空調対象区画まで導く方式などいくつかバリエーションがある点に注意が必要である。



(\*) いずれの方式においても、冷水としては、深層水を直接用いる方式、もしくは深層水により冷やされた盛衰等を用いる方式がある。

図 4-40 深層水利用空調のフロー

<sup>15</sup> Honolulu Seawater Air Conditioning, LLC ホームページ <http://honoluluswac.com/>より

(3) 利用する深層水の特性および使用後の質の低下

前項で検討したフローから、利用する深層水の特性および使用後の質の低下に関しては、表 4-14 の通り評価できる。

表 4-14 利用する深層水の特性および使用後の質の低下（空調利用）

	低温性	清浄性	富栄養性
利用する特性とそのレベル (*1)	◎ 使用法により異なるが、5℃～15℃程度	○ 熱交換器にほとんど汚れが付かないためレスメンテナンス	—
利用後、劣化する特性 (*2)	↓ 外気温度に近づく	→ 非接触型熱交換器を通過するだけのため、全く変化なし	→ 非接触型熱交換器を通過するだけのため、全く変化なし

(4) 冷熱需要の算定

空調設備の冷熱需要は、建物の用途や使用形態などにより異なるが、ここでは表 4-15 に示す一般的な空調設備容量から、負荷として 100kcal/h-延べ床 m<sup>2</sup>を用いて算定する。

表 4-15 空調設備の用途別熱源容量（冷熱源）

建物用途	冷熱源容量 (kcal/h 延床 m <sup>2</sup> )
ホテル	85.3
病院	105
量販店	100~120
博物館	104

出典：社団法人日本冷凍協会「冷凍空調便覧 新版第5版 III 巻空調和編」より抜粋

仮に延べ床面積 10,000m<sup>2</sup> の建築物を想定した場合、空調設備容量は次の通り算定される。

$$100\text{kcal/h-延べ床 m}^2 \times (4.186 \text{ kJ/kcal}) \times 10,000 \text{ m}^2 = 4,186\text{MJ/h} = 1,163\text{kW}$$

これを用いて深層水の所要量を算定すると、次の通りとなる。ただし、冷房に用いる深層水の出入り口温度差は 5℃とする。

$$4,186,000\text{kJ/h} \div 5^\circ\text{C} \div 4.0\text{kJ/kg}^\circ\text{C}(\text{海水比熱}) \div 1,025(\text{海水比重}) = 204\text{m}^3/\text{h}$$

ここで、深層水の出入り口温度差を変化させた場合の所要量の変化を、図 4-41 に示す。

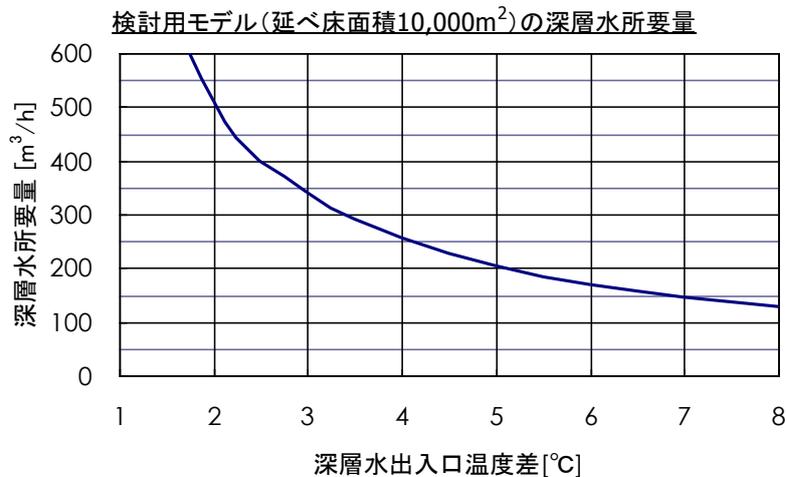


図 4-41 利用温度差と所要水量の関係 (ピーク時)

#### (5) 経済性の検討

冷房の年間平均負荷率を 20%と仮定して、一般的な電気式空調と深層水空調との熱源機としてのコスト比較を行なう。ただし、電力単価は 20 円/kWh と仮定する。また、深層水の使用費用として、深層水移送ポンプ代の他に 6 円/m<sup>3</sup>を見込む。

一般的な電気式空調の熱源機 (COP=4 冷凍機を想定)

$$\text{年間消費電力量 } 1,163\text{kW} / 4 \times 24\text{h} \times 365 \times 20\% = 509,400\text{kWh}$$

$$\text{年間コスト } 509,400\text{kWh} \times 20 \text{ 円/kWh} = \text{年間 } 1,019 \text{ 万円}$$

深層水空調の場合 (深層水移送ポンプとして揚程 20m を運転し、空気と直接熱交換するケース)

$$\text{ポンプ消費電力 } 204\text{m}^3/\text{h} / 3,600 \times 20\text{m} \times 9.8 / 0.8 (\text{ポンプ効率}) = 14\text{kW}$$

$$\text{年間消費電力量 } 14\text{kW} \times 24\text{h} \times 365 \times 20\% = 24,500\text{kWh}$$

$$\text{年間深層水使用量 } 204\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 365 \times 20\% = 357,400\text{m}^3$$

$$\text{年間コスト } 24,500\text{kWh} \times 20 \text{ 円/kWh} + 357,400\text{m}^3 \times 6 \text{ 円/m}^3 = \text{年間 } 301 \text{ 万円}$$

コスト削減は、年間約 700 万円 (削減率およそ 70%)となる。

また、深層水利用費用を変化させたときの深層水空調の年間コストの変化を図 4-42 に示す。縦軸は、電気式空調の年間コストを 100 としたときの相対値とする。

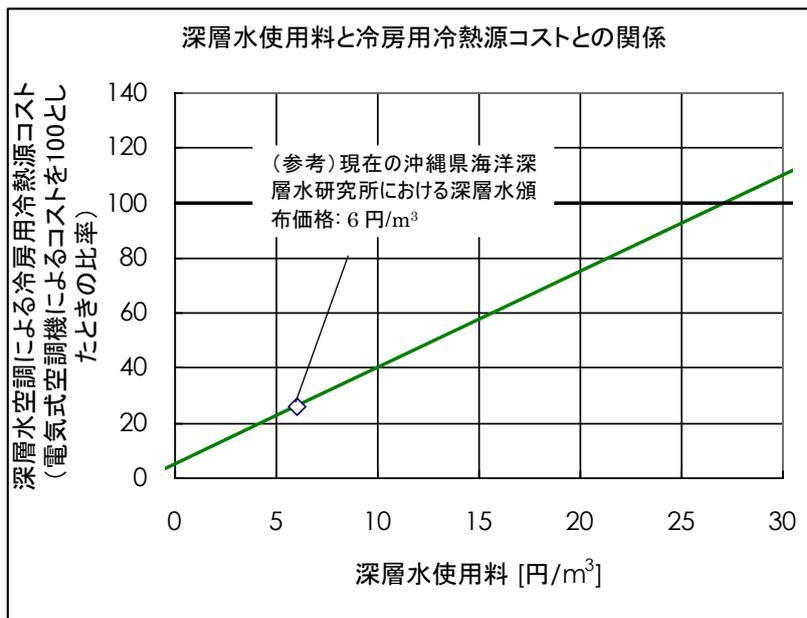


図 4-42 深層水利用費用の空調コストに対する感度

#### 4.5 食品・医療品・化粧品分野

生物のルーツは海であることはよく知られているが、海水には人間が必要とするミネラルが全てバランスよく含まれている。これを言い換えると人間の体の中の細胞は海水が満たされているということもできる。深層水と表層水を比べた場合、主要なミネラルの構成比は両者ほぼ同じであるが、決定的に違うのは微量元素、とりわけ無機栄養塩類の濃さであり、これが深層水の富栄養性といわれる所以である。

また、表層水に比べ深層水は圧倒的に清浄性が高い。細菌類や環境ホルモンなどの人為的な汚染物質は検出されていないか、検出されたとしても人体に影響のない極微量というデータがでてくる。このような特徴から、深層水と人の体に直接接触する分野、例えば医療、食品、化粧品などで、各地で様々な取り組みが進んでいる。

以下では、久米島での深層水を利用した医療、食品、化粧品の各分野での現状と今後の方向性を概観する。

##### (1) 医療分野

医療分野の中心的な利用方法はタラソテラピー（海洋療法）である。これは海水や海藻など海がもたらす恵みによって、身体の内側を活性化させ機能を高めていくという医学的に認められた自然療法である。フランスを中心に古くからヨーロッパの多くの人々に愛されてきており、美容目的だけでなく、老若男女を問わず、健康増進や疾病の予防・改善、さらにリハビリテーションにもとても有効で、予防医学の見地からは、プライマリーケアとしても活用されている。

久米島では、バーデハウス久米島という 100%深層水を使ったプール&スパがある。観光客にとっては、日常から離れた場所での「癒し」を求め、深層水に浸かりながらストレス解消やヒーリング効果を得るためここを訪れる。また、海水浴シーズンや夏場の荒天時でも久米島の海を体験できるというのも大きな魅力である。また、島の人たちにとっては健康増進施設としても広く利用されている。

今回実施したアンケートにおいて、深層水プールとスパ（バーデハウス久米島）の認知度としては、島内においてはほぼ 100%、島外からの観光客の方も 7 割以上の人がその存在を認識している。

一方、あまり利用しない人の意見として、利用料金の高さもあげられている。現時点では深層水を加温するのにかなりのコストがかかっているようで、これは深層水の冷熱性が逆効果となっている部分でもある。今後、深層水の複合利用が進めば、施設としては深層水の温度が上がった状態で利用できることから加温コストも下がるだろう。それによって、利用料金をより頻繁に利用しやすいレベルに設定できれば施設は更に賑わいを見せ、利用者の健康増進、「癒し」の効果が広がっていくと考えられる。

他の地域の参考例としては、静岡県伊東市の㈱ディーエイチシーが運営する施設がある。

ここは、民間企業が取水施設も含めて運営するという新しいスタイルの深層水利用型複合リゾート施設で、宿泊施設や温泉、エステティックサロン、タイ古式マッサージなど、そこに滞在するだけで一度に色々なタイプの「癒し」を体験できる施設が整っているのが特徴である。

久米島では、深層水に加えて、表層水についても「他の地域にはない青さ」という大きな財産もあるため、これらを PR 面でもうまく活用することで、島外の利用者にとっても更に魅力的な深層水の利用形態となっていくであろう。

## (2) 食品分野

久米島での深層水の食品利用分野では、深層水を使った飲料水や塩、味噌など多種多様なものが製品化されており、関連する製品で年間 3 億円近い売上げを得ている。

島民にとって深層水を利用した食品は、日常品としての利用もあれば、久米島の特産ということで贈答用に利用しているという声も多く聞かれる。一方、観光客にとっては体によさそうという漠然としたイメージはあるものの、是非利用したいという積極的な人は全体の 1/4 程度で、多少興味はあるという人が全体の 2/3 と多数を占めている。これらは一時期の深層水ブームが落ち着いた後の深層水業界全体の状況を映したものでもあるといえるが、これらの人たちに単純な深層水ブランドレベルのイメージに留まらず、「久米島深層水ブランド」として認知していってもらう必要がある。

一方、深層水を利用する生産者側の立場としては、うまく活用して商売に生かしている企業やお店もあるものの、まだ使用していない企業にとっては、給水施設までの距離が遠いことや、利用料金が高いことなどが利用のしにくさの原因ともなっているようである。

また、具体的にどのように利用していいかわかりにくいという声が聞かれるのも事実である。

現時点で久米島内の企業によって利用されているものとしては、飲料水や清涼飲料水、味噌、パン、沖縄ソバなどの加工食品、塩などがある。

また、他の深層水を取水している地域では、適用例では干物やシラス干しなどの塩干品、かまぼこなどの練り製品、お酒やビールなどの発酵品、また醤油などにも使われている。

塩干品の場合、通常の製造工程で使用される食塩の代わりに深層水が使われている。

かまぼこなどの練り製品の場合でも、食塩を数%添加し製造しているが、この食塩添加を深層水で代用することとなる。深層水を使うことで食塩を添加するよりも塩分の分散が速いため速くすり上がる。一方、深層水を添加することで加熱前にコンニャクのように固まってしまう現象も起こりやすくなるため製造には注意が必要である。またそれ以外にも深層水を使うことで弾力が増強されたり、塩味をまろやかにしてくれたりという効果もあるようである。

高知県工業技術センターでは、深層水を清酒醸造に使った場合の効果について試験を行ってきた。その結果、深層水を仕込み水に使うことで、清酒の吟醸香(香り)が高くなり、品質的にも優れていることも確認された。これらの原因を詳細に調べた結果、主要成分である塩化ナトリウムによるものではなく、深層水固有の微量ミネラルのバランスの働きによるものであるともいわれている。久米島では以前より泡盛の製造が盛んであるため、この分野でも更なる応用展開

が期待される。

食品分野全般にいえることであるが、既存利用者の使用方法は各企業のノウハウ的な側面もあり、オープンな情報としては存在しにくい。新たな製造方法の開発については、行政側の支援の充実に加え各ユーザーの試行錯誤と努力が必要になる。

一方、マーケティングなどに関する情報は分野を問わず異業種間でも共有できる部分も多い。今後、更に久米島島内での深層水利用が進めば、各社の努力と工夫が久米島全体の財産になっていくと考えられる。

深層水から抽出したにがりには、一滴添加するだけで各種飲みものの風味をまるやかにさせるほどの力(可能性)を秘めているため、様々な食品分野への更なる応用が期待されている。

### (3) 化粧品分野

久米島では、既に深層水を使用した化粧品の製造が盛んであり、これは久米島の深層水利用において先頭を走っている分野の一つとなっている。県内外企業からの OEM<sup>16</sup>製品の製造もあり、島に多くの経済的利益をもたらしている。

また昨今の健康志向の高まりからオーガニック化粧品に対する需要は全国的に高まっている。このようなオーガニック化粧品の魅力は香料が人工的でないことや、敏感肌や乾燥肌、オイリー肌、アトピーやニキビ肌等、様々な肌質に合わせて使用することができることとされている。深層水は、現代の人の多様なニーズにあったベース材料としてのポテンシャルがあることから、化粧品分野は深層水の持つ特性が最大限に発揮される部分であろう。

今回実施したアンケートにおいて、深層水を使った化粧品の認知度としては、島内においては9割以上の人がその存在を認識しており、6割近くの人実際に使用したことがあると答えている。

一方、島外からの観光客に対するアンケートでは、一般的な深層水化粧品を含め8割近くの認知度があるが、それらを実際に利用した経験のある人はそれほど多くない。

今後、深層水アイランド久米島としての地域ブランド力の高まりとともに、島内、県内のみならず全国的にもそのファンが増えていく可能性は十分ある。

今回の調査の中で有望技術の一つとされる深層水から作った海藻培養があるが、海藻類には、ビタミンC、プロビタミンA(カロチン)、有効なミネラルが豊富に含まれており、肌なじみや保湿力が高く、肌乾燥を改善するなどの効果も増大する。このような深層水から作った海藻をエキスとして組み合わせることで、更に深層水を活かした形で付加価値の高い製品を展開していくことも期待される。

### (4) 今後に向けて

観光客へのアンケートからも、深層水を使った製品、施設に対する関心は高く、とくに酒類、化粧品、深層水プールなどを利用してみたいという意見が多く聞かれた。

また、現代はインターネット経由でどこにいても、久米島の製品を購入・利用することができる。むしろ島外の人で久米島に興味を持った人のほとんどは、事前にインターネットや書籍などの媒体を通じて、情報を得ることとなる。

製品品質としての魅力も十分備えた深層水製品や施設であるが、一方で多くのユーザーはロコミやイメージだけで手にする商品を決めるといった厳しい現実もある。

このようなイメージ的な部分は、各利用企業で対応可能なものもあれば、島全体で取り組むべきものもあり、短期的、長期的な様々な努力が必要であるのは間違いない。

このようなイメージの部分は意外と見落とされがちな部分ではあるが、深層水の持つ清潔感といったプラスイメージを最大限に活用することで、これら利用分野の更なる発展が期待される。

<sup>16</sup> Original Equipment Manufacturer の略。 他社ブランドの製品を製造することを指す。

## 4.6 海水からのレアメタル回収

### (1) 概要

海水中には様々な鉱物資源が溶存している。中でも食塩(塩化ナトリウム)やにがり(塩化マグネシウム)、臭素などは古くから工業化されて実際の利用が進んでいる。一方で、ウラン、金、リチウムのようなレアメタルは、海水中への溶存濃度が希薄であるため、海水からの抽出という形では実用化に至っていない。但し、これら海水中のレアメタルの中でもリチウムは、金やウランなどに比べると濃度が高く(平均濃度 0.18ppm)、早い段階での実用化が期待されている技術分野でもある。

このリチウムは、これから急速に普及が進むといわれている電気自動車などの二次電池の材料となるため、今後も需要が増大していくと予測されている。一方、2009年時点での世界のリチウムメタルの生産量は約 10 万トン(以下、いずれも炭酸リチウム換算)、確認可採埋蔵量としては世界トータルで約 5300 万トンのうち、現段階で生産量最大のチリが 4000 万トン、アルゼンチン 420 万トン、ブラジル 100 万トンと南米の 3ヶ国だけで 8割以上を占めているという、極端な偏在性が指摘されている。またこれ以外にも中国には 285 万トン、現在開発が進められているボリビアにも多くのリチウム資源が存在しているといわれている<sup>17</sup>。現時点では、南米を中心とするこれら供給国のカントリーリスクはそれほど高い状況ではないが、広大な海に囲まれたわが国の沿岸海域からリチウムを効率よく回収できれば、この有用な資源の安定供給を考える上で有効な手段となる。(海水中の総含有量は約 2300 億トン)

ちなみに、リチウム・イオン電池の単位容量(1kWh あたり)の炭酸リチウム使用量は 1.5kg 程度であり、トヨタ自動車のハイブリッド自動車(HV)『プリウス』の電池容量が 1.3kWh、同じくプリウスのプラグイン・ハイブリッド自動車(PHEV)では 5.2kWh になり、1 台あたりの炭酸リチウム使用量はそれぞれ 2kg と 8kg となる。

また、次世代自動車として期待が集まっている電気自動車(EV)である日産自動車の『リーフ』の電池容量が 24kWh であり、こちらは 1 台あたりの炭酸リチウム使用量が 36kg となる。

世界の年間自動車生産台数 6000 万台の 10%である 600 万台が電気自動車(EV)となるだけで、自動車用のバッテリーだけで年間 21.6 万トンが必要になり、2009年現在の年間生産量の 2倍以上の需要量となる。今後、今後次世代型自動車の普及を促進させるためにも、国内産の資源として調達できるようになるメリットは非常に大きいといえよう。

### (2) 深層水からのリチウム回収のフロー

海水中からのリチウム回収においては大きく二つの工程からなる。第 1 段階である吸着工程では、吸着材を詰めたカラム内に深層水を連続通水し(約 3 週間)、吸着材にリチウムを吸着させる。続いての回収・蒸発晶析工程では、深層水を止めた後、塩酸を逆方向に流しリチウムを一旦塩酸に溶解させ、カラムから蒸発晶析装置に送り込む。その後、蒸発晶析装置にて加熱濃縮し、結晶化させて回収(所要半日程度)する形となる。

<sup>17</sup> 日本貿易振興機構(JETRO)海外調査部、「リチウムの需給動向とチリのコスト競争力」, 2010年3月

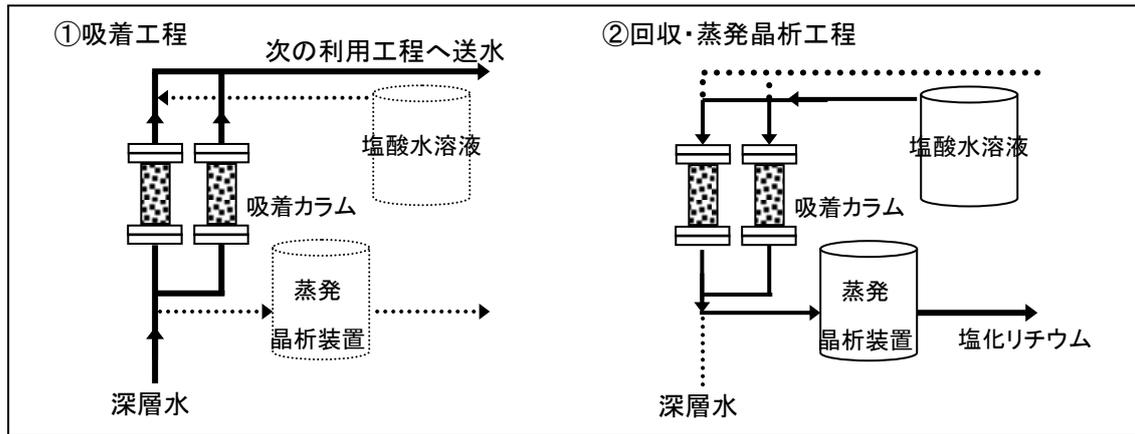


図 4-43 深層水からのリチウム回収フロー



図 4-44 リチウム回収設備の一例

提供：佐賀大学海洋エネルギー研究センター

### (3) 経済性試算および技術的将来性

リチウム回収プロセスに関する経済性を考える上で、主要な項目として海水ポンプにかかる電力コスト(運転コスト)がある。また、炭酸リチウムの市場価格は、現時点では 400 円/kg 程度であるが、これについては今後 700 円/kg 以上になるとの予測もある。

本システムは、リチウムの設計回収量に応じて吸着カラムを多数並べるシステムのため、以下ではカラム 1 本あたりの経済性として評価を行う。まず 1 カラムあたりのリチウム回収量は、海水通水量を 200L/時として回収率を 60%と仮定すると、1 年でちょうど 1kg の炭酸リチウムが回収できる。一方、ポンプの消費動力としては、カラム内の圧力損失水頭を 2m とすると、1 年間の消費動力は約 260 円/kg (=260 円/年)となる。もちろんこれ以外にもカラムに詰める吸着剤のコストなどが必要になるが、現時点では工業製品化されていないため、将来的なコストの予測は難しいが、これが工業製品化されて 1 カラムあたり 3000 円程度の価格になれば、30 年使用したとして炭酸リチウム 1kg を回収するのに 100 円のイニシャルコストがかかるということになる。

これ以外にも設備設置費やメンテナンスコストなどがかかるが、基本的に運転にかかる要員は殆ど不要であるため、このあたりのコスト割合は非常に小さいと考えられる。

### (4) 久米島への適用時の位置づけ

この分野で先進的な取り組みをしているのは北九州市立大学や佐賀大学で、コア技術となる吸着剤において日本の技術に優位性がある分野でもある。また、このような海水からのレアメタル回収において、深層水は表層水に比べ不純物が少ないため効率よく資源回収できるという特徴がある。これまで研究室レベルでの実験は進められているが、今後より大型の実証レベルでの検証を進めていく上でも、大量の深層水を利用できる久米島で実証施設を建設していく意義は非常に大きいといえる。

## 4.7 水素製造を中心としたエネルギー形態変換

### (1) 概要

1970 年代から 80 年代にかけて我が国および米国で海洋温度差発電の技術開発が盛んに行われた。とりわけ米国においては出力 100MW 以上の大規模洋上浮体式の試計画が行われ、その一環として発電した電力を液体燃料(メタノールやアンモニア)に変換して陸上まで輸送する場合の経済性も検討されている。当時の検討結果では、海洋温度差発電で発電した電力から作られたメタノールやアンモニアは、市場価格に対して十分な競争力を持つ結果が報告されている。<sup>18</sup>

近年では、燃料電池への利用のための水素への転換が検討されている。燃料電池技術及び水素技術(水素を製造・輸送・貯蔵・供給する技術)は省エネルギー、環境負荷低減、エネルギー多様化、新規産業創出等に資する水素エネルギー利用社会を構築するための中核となる技術であり、地球温暖化問題の深刻化等によりその重要性が増している。2008 年 3 月 5 日に策定された「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」において当該技術が重要技術に選定される等、政策的な位置付けも高い。<sup>19</sup> 経済産

<sup>18</sup> William H. Avery, Cih Wu, “Renewable Energy from the Ocean”, Oxford University Press, 1994

<sup>19</sup> NEDO 新エネルギー部 燃料電池・水素グループ, 「燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010 策定について」

業省のエネルギーイノベーションプログラムにおいても、水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発は、実用化研究の課題の一つとして位置付けられている。この認識に基づき、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)では、2005年燃料電池・水素技術開発ロードマップを策定、2010年には3回目の改訂版が発表されている。この中で、海洋温度差発電による水素製造は、「オフサイト集中型水素製造技術」の中の「再生可能エネルギー利用(プラント)」の一種と見なすことができる。(図 4-45 参照)。

海洋温度差発電で発電した電力を用いた水素製造の方式は、他の再生可能エネルギーと同様に水電解方式となる。このうち、アルカリ水電解方式は、既に実用化されており、現在は高効率化に向けた開発が行われている。また、固体高分子水電解方式は、将来的にアルカリ水電解方式より高効率となる可能性があることから、研究が続けられている。

## (2) 今後の展開の見通し

前項の通り、水素製造技術のうちアルカリ水電解方式は既に実用化段階である。この技術を太陽光発電や風力発電に適用した場合の課題として、前述のロードマップでは「電圧急変に対応した高耐久セルの開発」「電力平滑化技術の開発」「電力変動対応」を挙げているが、これらは安定した発電出力を特徴とする海洋温度差発電の場合は問題にならない。つまり技術面では、水素製造技術の利用は現在でも十分可能であると言える。

一方、水素の需要は、必ずしも2000年代前半に予想されたほどのスピードでは増加していないことも事実である。とりわけ、エコカー市場の潮流が、水素の主要な需要先の一つとして考えられていた燃料電池車から、水素を介さない電気自動車へと移っていることが、その大きな要因である。

したがって、海洋温度差発電で発電した電力を、水素に変換するか、水素以外の形態に変換するか、あるいは近年開発が急速に進む蓄電池を利用して直接電力で用いるかは、今後のエネルギー需要側の動向を反映して決定すべきであると考えられる。

分類	要素	技術の現状	課題		
			2015	2020	2030
オフサイト集中型 水素製造 技術	水素気 改質  部分酸化	<p>&lt;実用段階技術&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○水蒸気改質反応装置</li> <li>・成熟技術であり、運用者が定量的に効率改善に努力</li> <li>・廃熱利用ならびに各種ガスの精製技術の低コスト・高効率化が進展</li> <li>ex. 25~100万Nm<sup>3</sup>/日、LPG+フタ-オガス、純度99.9%、製造コスト約30円/Nm<sup>3</sup></li> <li>・目的水素製造のために、純度向上のための水素精製設備増強や、輸送のための圧縮設備(20MPa)の増強が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・未利用排熱の活用</li> <li>・高効率低コストガス精製技術開発</li> <li>・水素純度の確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・産業副産物利用による低炭素水素の供給</li> </ul>	<p>水素製造コスト 20~30円/Nm<sup>3</sup></p>
		<p>&lt;実用段階技術&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○重質油・渣プラスチック改質、石炭ガス化装置</li> <li>・国内外で大型プラントが稼働中</li> <li>・多段階に対応したシステム開発を検討</li> </ul> <p>&lt;中長期的技術&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○大規模石炭ガス化水素製造装置(IGCC技術をベース)</li> <li>・米国(FutureGen)や豪州(ZeroGen)で実証中</li> <li>・部分酸化/COシフト反応利用による水素製造の高効率化を検討</li> <li>・酸素分離膜、高度なCO<sub>2</sub>分離・回収技術の最適化の検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多段階対応ガス化技術の開発</li> <li>・高効率、低コストガス精製技術</li> </ul>	<p>実用化研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・各部改良による低コスト化技術の開発</li> <li>・二酸化炭素回収型石炭ガス化技術の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・部分酸化と水素気によるCOシフト反応の組合せによる水素製造ガス化炉としての最適化が必要</li> <li>・酸素分離膜型リアクターによるCO<sub>2</sub>外化、低コスト化</li> <li>・多段階対応技術</li> <li>改質効率: 80%以上(H<sub>2</sub>), 50%以上(LHV)</li> </ul>
	水電解 (プラント)	<p>&lt;実用段階技術&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○固体高分子水電解装置</li> <li>・国内外でシステム販売、高圧917(1MPa未満)商品化進展</li> <li>・低コストセパレーターおよびMEAが開発中</li> <li>ex. 電解効率: 89%(H<sub>2</sub>), 59%(LHV) (2A/cm<sup>2</sup>)</li> <li>・発生水素圧: 0.7MPa</li> <li>・設備費: 140万円/(Nm<sup>3</sup>・h)930~50(Nm<sup>3</sup>/h)</li> <li>ex. 電解効率: 79.3%(H<sub>2</sub>), 67.1%(LHV) (2A/cm<sup>2</sup>)</li> </ul> <p>&lt;次世代技術&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○固体高分子水電解装置</li> <li>・動作温度: 80~120℃, 電解効率: ~75%(H<sub>2</sub>)(H<sub>2</sub>/2A/cm<sup>2</sup>)</li> <li>・高耐熱性高分子膜の開発が進展</li> <li>・高温・高圧下での電解システムの可能性評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低コスト化</li> <li>・大容量化/大容量化</li> <li>・信頼性向上、メンテナンス、長寿命</li> <li>・電力変動耐性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証・検証</li> <li>・低コスト電力変換装置対応技術</li> <li>・再生可能エネルギーとの組合せ技術の開発</li> </ul>	
		<p>&lt;実用段階技術&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○AEM水電解装置</li> <li>・欧米を中心とした実用化、国内外でシステム販売中</li> <li>・水素ステーション用としても日本産で実用あり</li> <li>・コスト低減および高効率化技術(~1A/cm<sup>2</sup>)の開発が中心</li> <li>(電解効率: 82~70%(H<sub>2</sub>)/0.55A/cm<sup>2</sup>)</li> <li>・装置価格: 60万円/(Nm<sup>3</sup>・H<sub>2</sub>・h)650(Nm<sup>3</sup>/h)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低コスト化</li> <li>・高効率化</li> <li>・膜材料の開発</li> <li>・電極の性能向上</li> <li>・部材、構造の見直しによる低コスト化</li> <li>・電解温度の最適化等</li> <li>・設備費40万円/(Nm<sup>3</sup>・H<sub>2</sub>・h)600(Nm<sup>3</sup>/h)</li> <li>・電解効率89%(H<sub>2</sub>)/0.5A/cm<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・導入普及、本格稼働</li> <li>・再生可能エネルギーとの組合せ技術の開発</li> </ul>	<p>設備費25万円/(Nm<sup>3</sup>・H<sub>2</sub>・h)500(Nm<sup>3</sup>/h)</p>
	再生可能 エネルギー 利用 (プラント)	<p>&lt;中長期的技術&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○熱化学的・バイオマスガス化技術</li> <li>・石炭、重質油処理技術に応用した高圧・水蒸気ガス化技術</li> <li>・高効率ガス化と精製・分離技術の開発</li> <li>○水素発酵</li> <li>(水素発生量: 2mol-H<sub>2</sub>/mol glucose、濃度: 動L-H<sub>2</sub>/L培養液・h)</li> <li>・発酵菌(偏性、適性嫌気性細菌)のスクリーニングを実施中</li> <li>○超臨界-バイオマスガス化技術</li> <li>・加圧熱水等による実験室レベルでの研究が進展</li> <li>・高温・高圧下で使用可能な部材材料の知見を蓄積</li> <li>○光合成水素生産</li> <li>・格プロセス(水素発酵等)との組み合わせを検討</li> <li>(現状)・水素発生濃度: 数10ml/(L培養液)/h(緑菌・藍藻)</li> <li>・数百ml/(L培養液)/h(光合成細菌)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小規模で高効率のガス化技術の確立</li> <li>・精製・分離技術の開発</li> <li>・発酵菌のスクリーニング(原料種の拡大)</li> <li>・高効率発酵槽のエンジニアリング、スケールアップの実証</li> <li>・高温高圧等厳しい条件下に耐える反応容器材料の開発</li> <li>・原料の安定供給などの周辺技術の開発も必要</li> <li>・水素発酵など他のプロセスとの組合せによる効率向上の検討</li> </ul>	<p>実用化、初期導入</p>	<p>システム技術開発</p>
		<p>&lt;中長期的技術&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○再生可能エネルギーを用いた水電解技術(系統検証)</li> <li>・太陽光発電、風力発電利用水電解システムで実証データ収集が進行中</li> <li>・変動電力対策が必要</li> <li>○太陽光熱利用水素製造技術</li> <li>・欧米で太陽光熱熱学を開発中(EUでCMV方式開発中)。</li> <li>○光触媒法、光電気化学法</li> <li>・基礎研究を継続</li> <li>・応答遅延の可視光域までの拡大が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電圧急変に対応した高耐久性の開発</li> <li>・電力平滑化技術の開発</li> <li>・電力変動対応</li> <li>・太陽光熱利用 熱化学反応プロセスの実証</li> <li>・新規材料の開発</li> <li>・格子欠陥の少ない光触媒調製法の開発</li> <li>・活性化エネルギーの低い水素生成リサイクルの開発</li> <li>・反応器選定検討</li> </ul>		
		<p>&lt;中長期的技術&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○熱化学法 (ISプロセス/Apricot/Sulfurプロセス)</li> <li>・次世代原子炉の高熱(~900℃)を利用、国内・米産で小規模実験中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・補助を利用を前提とした水素製造プロセスは長期的にマとして専門研究機関において取り組む課題</li> </ul>		

図 4-45 燃料電池・水素技術開発ロードマップ (抜粋)

出典: NEDO, 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010 ロードマップ詳細版 (水素)

#### 4.8 次亜塩素酸ナトリウム製造

次亜塩素酸ナトリウムは、殺菌・消毒用として広く一般的に用いられるアルカリ性の薬品である。特に水溶液はアンチホルミンと呼ばれ、食品添加物としても使われている。

工業的には水酸化ナトリウム水溶液に塩素を通じることにより精製されるが、とりわけ海水を利用する工業プラントや発電プラントにおいては、海水の電気分解によって次亜塩素酸ナトリウムをオンサイトで精製し、主に海水取水口や配管などの生物付着防止に用いているのが一般的である。

このように、用途も広く、また海水からの精製も容易であることから、海洋深層水複合利用プラントにおいても応用が可能であり、他の複合利用施設によって生産された農作物や海藻類の消毒などに用いることによって、さらに循環性・自立性を高めることが可能となる。

#### 4.9 その他利用技術

これまであげた利用方法以外にも、久米島、沖縄本島もしくは他の離島において適用可能性のある複合利用技術である『深層水を利用した冷凍・冷蔵倉庫と食品加工工場』、『深層水冷房を利用した大型データセンター』、『栄養塩による藻類培養』に関して概説する。

##### 4.9.1 海洋深層水を利用した冷蔵・冷凍倉庫と食品加工工場

###### (1) 概要

久米島のような離島に共通する課題の一つに、荒天が続くと生鮮食料品を始めとする供給が不足しがちであり、一時的ではあってもそれら品物が品薄状態になることが問題となっている。野菜や米を一定期間、鮮度を保ったまま備蓄できるような冷凍・冷蔵倉庫があれば、そのような懸念が軽減され、より安定した流通が可能となる。一方で、このような冷凍・冷蔵設備の冷却にかかるコストはとくに温暖な沖縄地方では大きなコスト要因となるとともに、元々の経済規模がそれほど大きくない離島では、そのような設備を設置・運営していくことは容易ではない。このような設備の冷熱源に深層水を活用することができれば、消費電力を大幅に抑えた省エネ型の冷蔵倉庫の運用が可能になる。また、冷凍倉庫に関しても、深層水を冷却源とすることで消費動力を抑えることができる。野菜の生産側の視点からみても生産した野菜を冷凍食品として加工したり、一定期間保管できるような低温貯蔵設備があれば計画的な経営を行う上で有効な手段となる。

また、上記のような冷凍加工の前処理や規格外となってしまった野菜を加工食品とするための食品加工工場を近くに併設することで、より安定した農業経営が可能となる。

###### (2) 経済性試算

以下では食料保管等の低温倉庫(約12℃)をベースに、必要な冷房能力とその冷房を通常の冷凍装置で行った場合と深層水冷房を行った場合の経済的メリットの比較を行う。

###### 低温倉庫の検討仕様

建設面積	: 2,560 m <sup>2</sup> (32m × 80m) × 3 階建て構造
延べ床面積	: 7,680 m <sup>2</sup>

必要冷凍能力(熱量) :  $2,304\text{kW} = 0.3\text{kW}/\text{m}^2 \times 7,680 \text{ m}^2$

① 一般的な冷房システムを利用した場合

冷房負荷(電力) :  $768\text{kWe} = 2,304\text{kW} \times 1/3.0$  (COP 3.0 として計算)

年間冷却電力量 :  $5,382\text{MWh}/\text{年} = 768\text{kWe} \times 24\text{h} \times 365 \text{ 日} \times 0.8$  (稼働率 80%)

年間冷却コスト :  $11,841 \text{ 万円}/\text{年} = 5,382\text{MWh}/\text{年} \times 22 \text{ 円}/\text{kWh}$

② 深層水地域冷房システムを利用した場合

深層水利用量 :  $10,000 \text{ t}/\text{日}$  ( $\Delta T = 5^\circ\text{C}$  として計算)(年間 292 万トン)

年間深層水冷房コスト(年間) :  $8,760 \text{ 万円}/\text{年} = 292 \text{ 万 t} \times 30 \text{ 円}/\text{t}$  (深層水冷房利用料(仮))

上記比較より、一般的な冷房システムに比べ、深層水を利用した冷房システムを使った方が年間約 3100 万円のコスト削減効果が期待される。なお、この場合の深層水利用料は、利用料の中に冷房設備リース料も含んだ利用形態を仮定したものである。

## 4.9.2 海洋深層水冷房を利用した大型データセンター

### (1) 概要

近年、クラウドコンピューティングシステムの普及拡大に向けた動きに伴い、全国で大型データセンターの建設に向けた計画が進められている。これは、コンピュータのインフラをユーザーに貸し出すサービスのことで、ユーザー側はコンピュータの利用料を払うだけで、大型サーバーシステム用のシステムを各ユーザーが自らの資産として持たなくて済むため、今後益々普及していく形態であるといわれている。

このサービスの拠点となる大型データセンターの立地場所を選定に際し、ポイントとなる条件がいくつかあるが、その一つは光ファイバー通信網が整っていることが必要になる。また、IT 特区などに代表される行政からの支援の有無も大きなポイントの一つである。これらポイントに関して沖縄県の場合いくつかの IT 特区があり、また海底ケーブル網が十分発達しているため十分な適性がある。

また、このような大型データセンターが競争力を持つためには、施設の冷却にかかるコストをいかに抑えられるかという点も重要な項目の一つであるといわれている。大型のコンピュータはその性質上、稼動時に大量の熱を放出するため、機器本体に使用する電力と同程度の冷房電力が必要になるといわれている。この施設冷房に深層水冷房を利用すれば、使用する電力量が半減まではいかなくても相当量の電力削減、コスト削減が見込めるため、施設オーナーにとっても、施設を誘致する行政側にとってもお互いに大きなメリットとなるといえよう。

### (2) 経済性試算

大型データセンターの施設内冷房を、従来型の冷房で行った場合と深層水で行った場合とで経済性比較を行う。

#### 大型センター(2 棟)の検討仕様

建設面積	: 3,321 m <sup>2</sup> (41m×81m)×3 階建て構造×2 棟
延べ床面積	: 20,000 m <sup>2</sup>
必要冷凍能力(熱量)	: 6,000kW = 0.3kW/m <sup>2</sup> ×20,000 m <sup>2</sup>

#### ① 一般的な冷房システムを利用した場合

冷房負荷(電力)	: 2,000kWe=6,000kW×1/3.0 (COP 3.0 として計算)
年間冷却電力量	: 17,520MWh/年=2,000kWe×24h×365 日(稼働率 100%)
年間冷却コスト	: 38,544 万円/年=17,520MWh/年×22 円/kWh

#### ② 深層水地域冷房システムを利用した場合

深層水利用量	: 26,000 t/日(ΔT=5°Cとして計算)(年間 946 万トン)
年間深層水冷房コスト(年間)	: 28,380 万円/年=946 万 t×30 円/t (深層水冷房利用料(仮))

上記比較より、一般的な冷房システムに比べ、深層水を利用した冷房システムを使った方が年間約 1 億円のコスト削減効果が期待される。なお、この場合の深層水利用料は、利用料の中に冷房設備リース料も含んだ利用形態を仮定したものである。

### 4.9.3 栄養塩による藻類培養

#### (1) 概要

海洋深層水の複合利用においては、様々な用途にカスケード利用したあとの放流段階でも、まだ豊富な栄養塩が残っていることがある。これを海藻養殖の栄養として用いれば、食用のほか、貝類用飼育餌料としての利用が可能となり、周辺海域へも表層水により近い成分の形で放流が可能となる。このような培養は多くの種類で実用化に向けた取組みが進められている。最も豊富なのがコンブ類で、他にもワカメ、ヒジキ、海苔、テングサ、オゴノリ、アオサ、ウミブドウ、等の多くの海藻が培養されており、これら海藻はミネラル、食物繊維、あるいは種々の機能成分が豊富であるため健康食品として注目されている。

また、微細藻類も海藻とともに水界における重要な基礎生産者で、機能性成分に富み、食用や水産用餌料となる種も多い。微細で、細胞あたりの表面積が大きく、主要密度を高められれば栄養塩を効率よく吸収できる。水産用餌料としては、アワビ、カキ、アサリ、ナマコ、ウニ、エビなどの浮遊幼生や着底後の初期餌料として各地の種苗生産施設でタンク培養が行われているほか、種によっては濃縮液(冷蔵)、冷凍品、粉末などが市販されている。

このような形で、水産用飼育餌料や農業用肥料としての利用範囲が広まれば、深層水の複合利用をより本当の意味での循環型資源として使い切ることとなる。

#### (2) 栄養塩を利用した藻類培養の試算

続いて、放流前の深層水による海藻の収穫量と栄養塩の吸収量の試算結果を示す。この検討は、本分野を専門とする大阪府立大学大学院工学研究科の大塚耕司教授に実施して頂いたものである。以下にその検討の概要を記す。なお詳細は別添資料に記載されている。

本検討では、400m×200mの面積8haの養殖水域(深さ1.25m)を対象に、最終放流前の深層水(日量10万t/日を想定)を使って、3種類の海藻(アオサ、カジメ、マクサ)に栄養塩を吸着させた場合のそれらの収量と栄養塩の低減率を試算した。

対象海藻の増殖量を規定する主要な環境条件の一つである深層水の栄養塩濃度のデータは、沖縄県海洋深層水研究所で過去に計測された値を用いている(表4-16)。

表 4-16 沖縄県海洋深層水研究所で取水された表深層海水の水質データ

採水年月日	平成22年3月3日		平成21年6月16日		平成20年4月3日	
取水深度(m)	612	15	612	15	612	15
水温(°C)	10.8	22.1	10.0	25.9	10.3	22.9
NO <sub>x</sub> -N(mg/l)	0.25	0.03未満	0.30	0.03未満	0.16	0.03未満
NH <sub>4</sub> -N(mg/l)	0.02未満	0.02未満	0.02未満	0.02未満	0.02未満	0.02未満
PO <sub>4</sub> -P(mg/l)	0.057	0.003	0.074	0.004	0.066	0.001未満
SiO <sub>3</sub> -Si(mg/l)	1.25	0.07	1.60	0.10	1.60	0.30

試算結果を表 4-17 に示す。年間積算収穫量は Case1 において、アオサ、カジメ、マクサがそれぞれ約 1700t/y、3600t/y、1600t/y となっている。海藻養殖による排水の栄養塩濃度軽減については、日量 10 万トン取水した海洋深層水が冷熱利用のみでそのまま排水された場合、海洋深層水複合利用の過程で栄養塩が 50%使われる場合、同じく 75%が使われる場合の 3 ケースを設定し、アオサ、カジメ、マクサの 3 種の海藻養殖を想定したシミュレーションを行った。その結果、いずれの場合も窒素軽減率は 60%~70%となり、ほぼ最大限に排水の窒素を回収できることがわかった。

表 4-17 各海藻の各ケースにおける年間積算回収量、窒素軽減率、およびリン軽減率

	アオサ			カジメ			マクサ		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
積算回収量 (t/y)	1,765	931	478	3,695	1,941	995	1,633	816	406
N軽減率 (%)	64	67	69	69	73	74	57	57	56
P軽減率 (%)	16	17	18	31	33	34	13	13	13

このような深層水を使つての藻類培養は、深層水の有効活用の面からも環境面からも非常に有意義であり、技術の将来性も含めて久米島における実証意義の高い利用分野である。

## 第5章 持続可能な深層水複合利用モデルの提案

### 5.1 再生可能な「地域資源」深層水複合利用による自立型コミュニティの形成

これまで、我が国をはじめとした深層水取水地では、食品・飲料品・化粧品等の工業利用、養殖漁業を中心とした水産業分野において深層水の利活用が進んできた。このような深層水利活用は、地域に新たな産業と雇用を創出し、地域の活性化に貢献したものの、その産業のために使用されるユーティリティ(電気・水など)は、外部からの供給に頼る他なかった。つまり、一次エネルギーの消費と二酸化炭素の排出量を増やし、環境への負荷を増大させるというマイナスの側面を持つことも否定できない。

一方、海洋温度差発電技術や、海洋深層水を利用した海水淡水化技術は、電力と水という重要なユーティリティを作り出すことができる。このような再生可能な地域資源に由来するユーティリティを海洋深層水複合利用産業に適用することで、低炭素型の自立したコミュニティが形成される(図 5-1)。

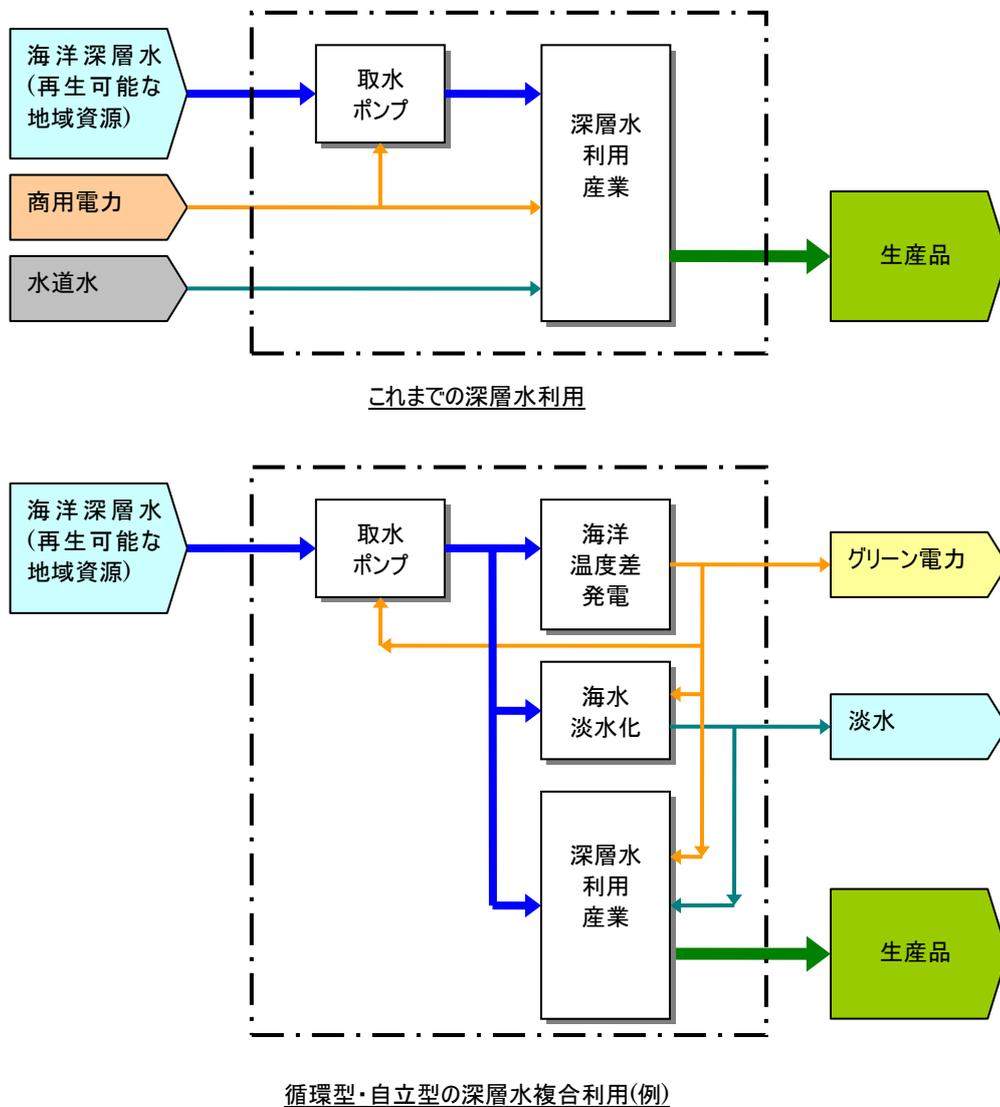


図 5-1 複合利用による循環型自立コミュニティの形成

## 5.2 海洋深層水複合利用手法 ～パラレル利用とカスケード利用～

海洋深層水の複合利用においては、各利用技術が必要とする特性のレベルや、使用後の特性の変化を考慮して深層水を多段階に利用する「カスケード利用」が一般的に提案される。カスケード(Cascade)とは元々、階段状に連続した滝を意味し、ここから派生して主にエネルギー産業において多段階に無駄なく対象の特性を使い切る手法を指すようになった。

例として、図 5-2 のように、海洋温度差発電、淡水化設備(蒸発方式および逆浸透方式)、冷熱(農業)利用、冷熱(水産)利用の組み合わせを考える。ここで、それぞれを図 5-3 のようにパラレル(並列)に組み合わせると、無駄の多いシステムとなることは明らかである。

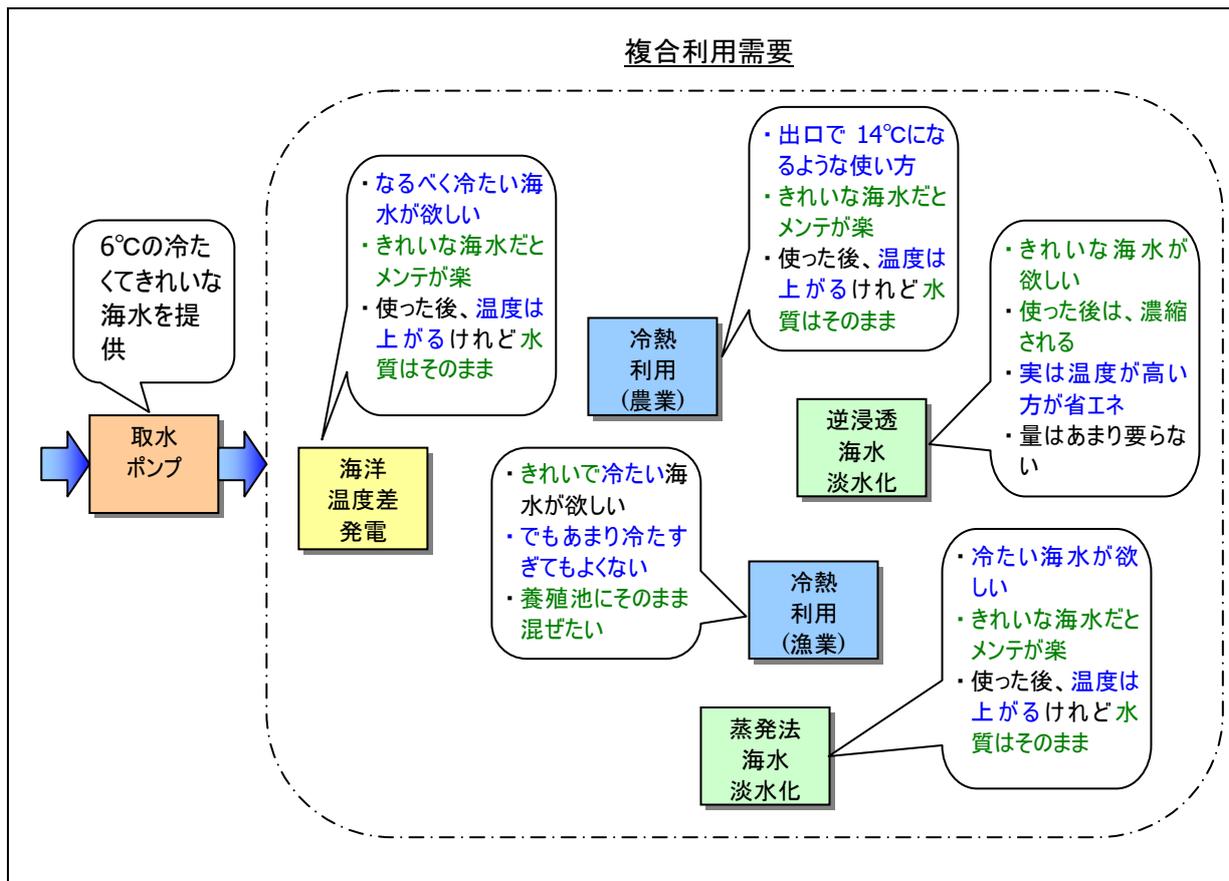


図 5-2 深層水複合利用需要の想定 (例)

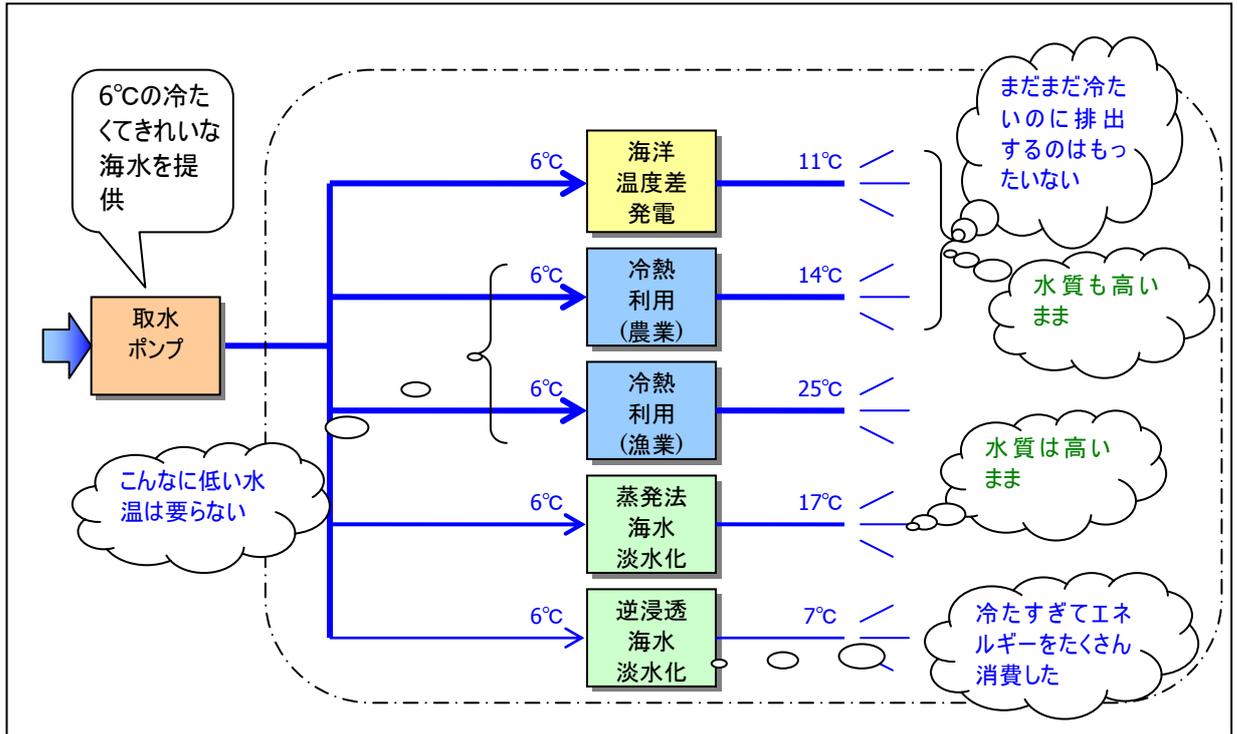


図 5-3 深層水を全て並列に利用する場合（無駄が多い）（例）

そこで図 5-4 のように、それぞれの設備の性質を考慮したカスケード方式とすることで、こういった無駄をなくすことが出来る。第 8 章における「久米島モデル」も、これを考慮し具体的な計画を行っている。

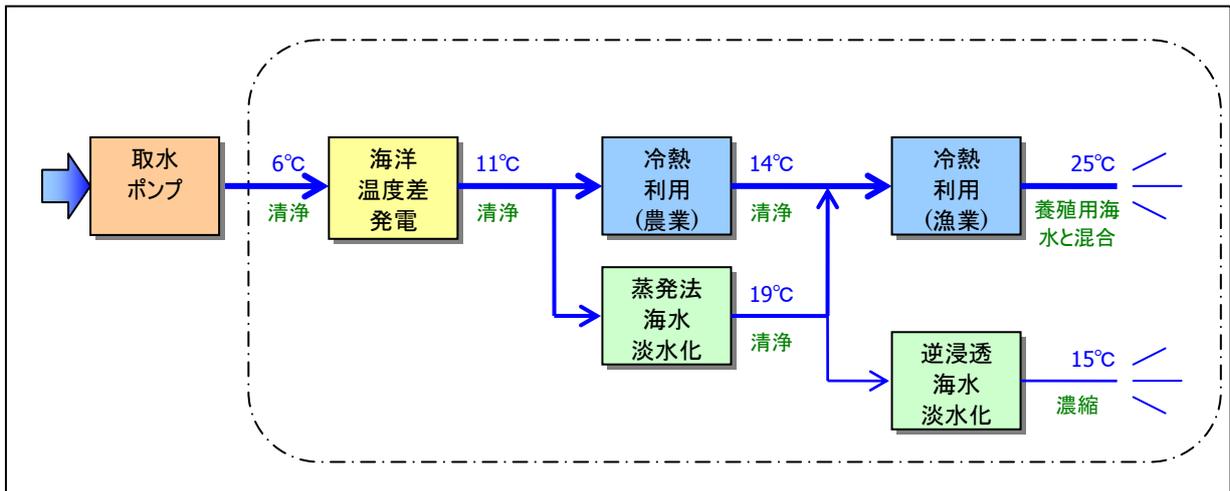


図 5-4 深層水のカスケード利用（無駄の削減）（例）

### 5.3 海洋深層水複合利用のメリットの考察

ここでは、深層水を複合的に利用することが、単独の目的での利用に比べてどのような点でメリットをもたらすかを考察する。

#### 5.3.1 負荷のピークシフトによる平準化と利用率の向上

海洋深層水の冷熱利用は、複合利用の中でも大きなポテンシャルを持つ。

建物の空調や養殖漁業など、日射による熱負荷の割合が大きい冷熱利用形態においては、昼間に負荷が集中し夜間には小さくなるため、平均すると深層水の利用率は小さくなってしまう。

一方、完全人工光型の植物工場のように、日射の影響が小さい負荷も存在する。

そこで、多様な負荷パターンの利用を組み合わせることで、負荷を平準化し利用率を向上させることができる。その一例として図 5-5 に、4.3 節で検討を行なった太陽光利用型植物工場(20 アール型)と完全人工光型植物工場(200 坪型)の組み合わせを示す。

こういった工夫により、複合利用設備全体の経済性を向上させることができる。

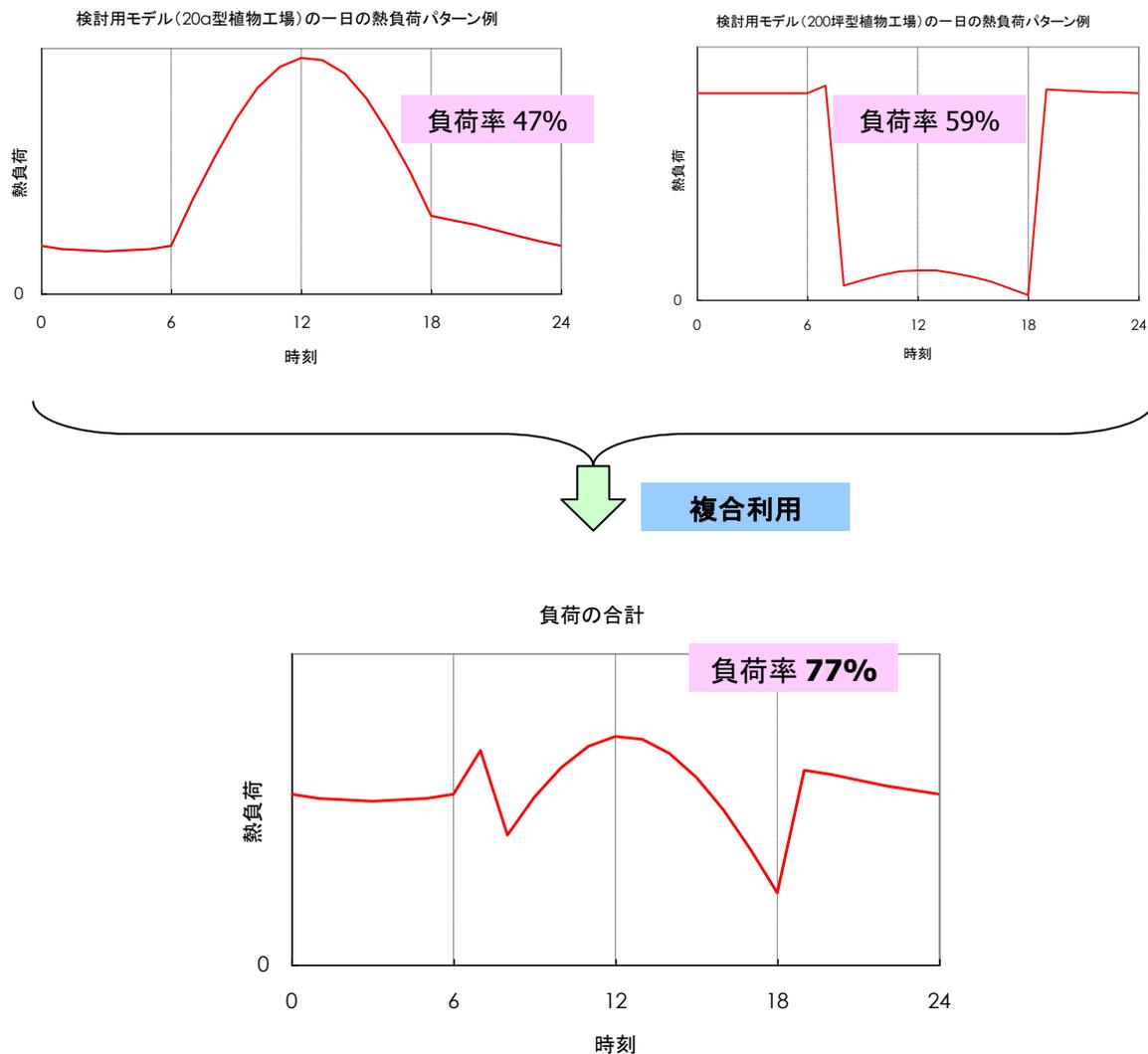


図 5-5 組み合わせによる負荷平準化 (例)

### 5.3.2 カスケード利用の熱力学的意義

図 5-6 のカスケード利用の冷房設備において、100t/時の清水冷媒を、深層水を用いて 16°Cから 12°Cまで冷却している場合を仮定する。この冷却過程において、図 5-6 のように前段に他の負荷を持つカスケード式利用と、直接 6°Cの深層水を用いる方式を比較すると、表 5-1 の通りとなる。熱量の面ではカスケード利用の有無に関わらず違いはない結果となるが、エクセルギー<sup>20</sup>損失の面では約 2 倍の違いとなる。

このように、カスケード利用は熱力学的にエネルギーを有効利用する手法であると言える。

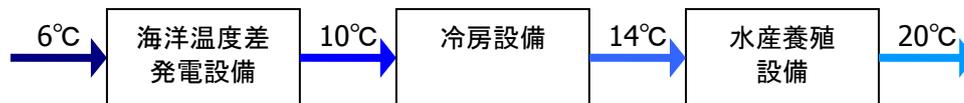


図 5-6 深層水冷熱のカスケード利用の例

<sup>20</sup> エネルギーの質を表す概念で一般的に以下の式で計算される。

$$E = (H - H_0) - T_0 (S - S_0)$$

ただし H: 比エンタルピー、S: 比エントロピー、T: 温度[K]、添字「0」: 周辺環境条件

各種産業プラントにおける熱の有効利用評価の際に、エクセルギー効率の評価が多く用いられている

表 5-1 カスケード利用の熱力学的比較 (例)

項目	カスケード利用 あり	カスケード利用 なし
冷媒側条件		
流量	100 t/h	同左
温度	16°C(入)→12°C(出)	同左
比熱	4.2 kJ/kg・°C	同左
深層水側条件		
流量	105 t/h	52.5 t/h
温度	10°C(入)→14°C(出)	10°C(入)→14°C(出)
比熱	4.0 kJ/kg・°C	同左
温度変化図		
交換熱量	1,680 MJ/h	1,680MJ/h (同左)
エクセルギー評価 (環境温度 30°C)		
熱交換前	119.4 kW	97.4 kW
熱交換後	116.0 kW	90.5 kW
エクセルギー損失	3.4 kW	7.0 kW
エクセルギー効率	97.1%	92.8 %

5.3.3 発電での利用熱量調整による熱-電バランス調整

複合利用では日射や気温により冷熱負荷が変動する。また海洋温度差発電は、表層海水温度により発電効率や出力が変化する。

複合利用では、発電に利用する冷熱量の一部を他の冷熱利用設備に流用することにより、電力供給と冷熱供給とのバランスを調整することが出来る。一例として、前項のカスケード利用で、電力供給を減らして空調に流用する例を、図 5-7 に示す。

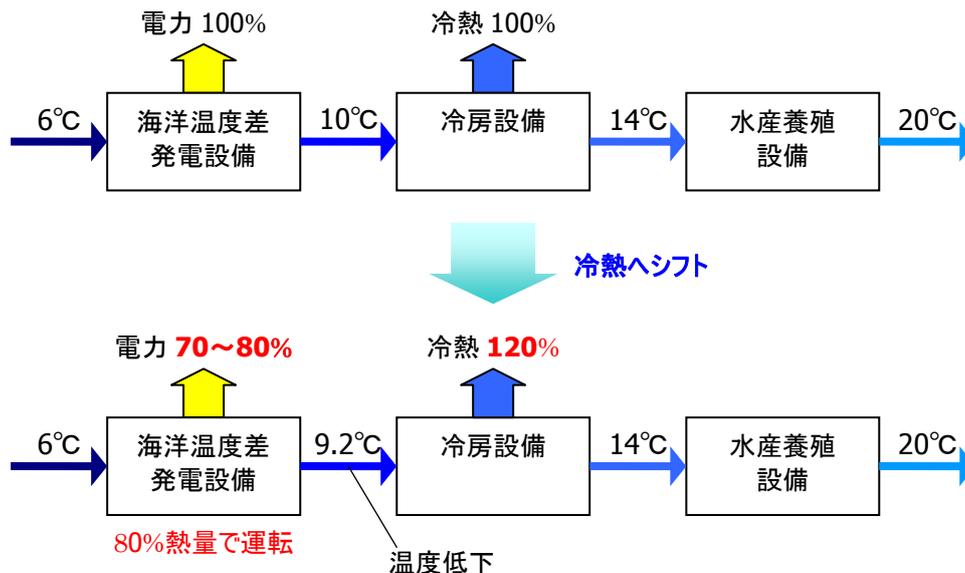


図 5-7 熱-電バランスの調整 (例)

### 5.3.4 取水費用の分担と経済性向上

深層水取水設備の建設費用は各利用設備の建設費用に比べて大きい。たとえば、次章以降で検討する海洋温度差発電の建設費用が約 30 億円であるのに対し、取水設備の敷設費用は 100 億円を上回っている。したがって、この償却費用はそれぞれの利用設備の経済性に大きな影響がある。併せて、取水設備の運用費用（ポンプ用の電力やメンテナンス費用）も課題である。

深層水複合利用では、この取水費用を次の側面で削減できる。

#### (a) カスケード利用による取水設備償却費の按分

カスケード利用では、汲み上げた深層水を複数の利用設備で用いるため、取水設備の償却費用をそれぞれの利用設備で按分することが出来る。図 5-8 に効果のイメージ図を示す。

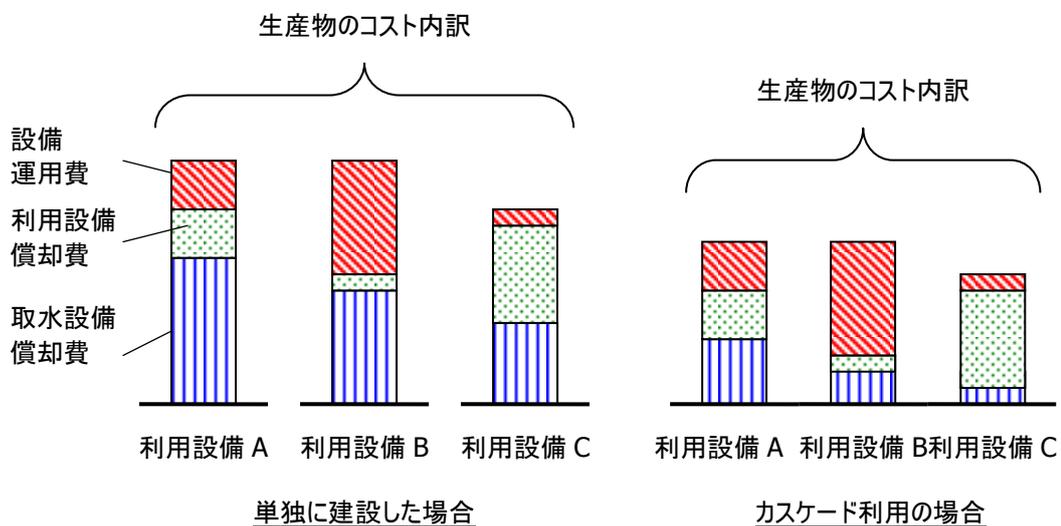


図 5-8 カスケード利用による取水設備償却費の按分効果

#### (b) スケールメリットによる取水設備単価の低減

複合利用のために取水量を増やすことは、取水設備のスケールメリット向上につながるため、カスケード利用を行なわない場合でも経済性向上効果が見込める。後述する 7.6.3 項で検討したスケールメリットによる深層水取水設備建設単価の減少効果を図 5-9 に示す。

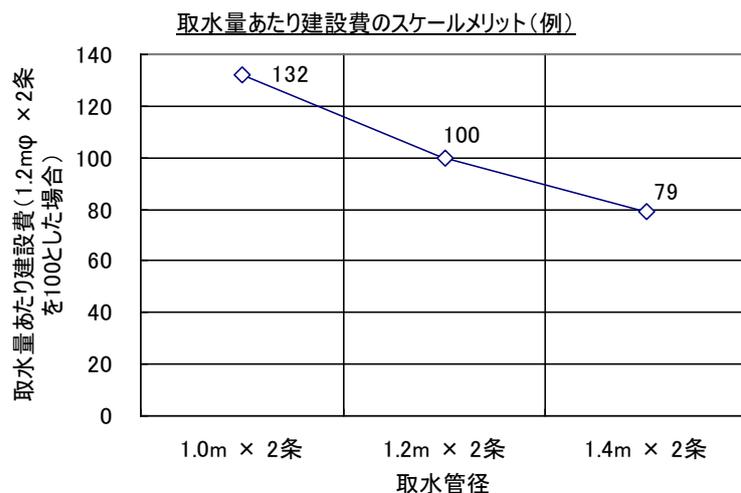


図 5-9 取水量あたりの深層水取水設備建設費のスケールメリット (例)

(c) スケールメリットによる取水ポンプ動力の低減

上記と同様に、取水量が増えて管径が大きくなると、同じ流速に対して管内摩擦による圧力損失が低減する。これにより、流量あたりの取水ポンプ動力も低減される。管内流速を 1.5m/s としたときの、取水量あたりのポンプ動力の低減効果を図 5-10 に示す。なお、管内摩擦による圧力損失の算定はヘーゼン・ウィリアムの式による。

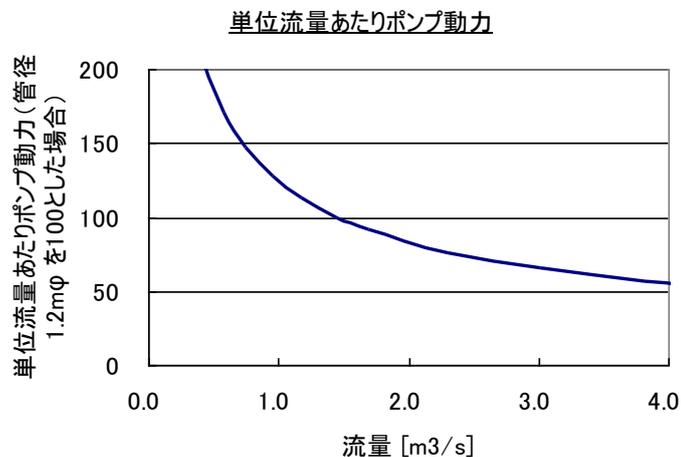


図 5-10 スケールメリットによる取水量あたりのポンプ動力の低減効果

## 5.4 深層水複合利用の全体ビジネスモデル

### 5.4.1 ビジネスモデルのコンセプト

深層水の複合利用では、海洋温度差発電や地域冷熱利用、水産養殖などそれぞれの利用プロセス（各ユーザー）において、汲みあげた深層水の特性的の一部を使いながら多段階的に利用することとなる。その意味では深層水の取水施設は、地域に設置された共通インフラという捉え方ができる。

各ユーザーは深層水を活用することで付加価値のついた製品を生産したり、自然冷熱を低コストで利用できることから、それぞれはいわゆる受益者ということになる。

このような深層水取水から利活用に至るまでの一連の流れは、官民の役割を含めて様々な形でのビジネスモデルが考えられるが、これまでそれら地域の深層水ビジネス全体がトータルで共存できるような総括的な視点で検討されてきたモデルは殆どないといっている。

そこで、本検討ではそれぞれのプロセスを運営する事業者を想定し、各事業者が独立採算することを前提に、取水事業者の立場での取水コストと深層水の販売価格、各種利用事業者の立場での深層水による収入形態（≒付加価値）を整理することとする。

また、深層水の利用料金設定に関しては、それぞれの利用目的によって深層水のどの特性を利用するかがまちまちであるため、まずは利用目的によって得られる付加価値を試算し、それをベースに利用料金を検討していくという方法をとった。計画段階でこのような整理を行うことで、地域の深層水ビジネスが長期的に、より安定した形で発展していくことが可能になると考えられる。

なお、以下の検討における「会社」という名称は必ずしも民間企業に限ったものではなく、第3セクター、行政所管の組織などを含めた概念的なものとする（表 5-2）。

表 5-2 深層水を利用したビジネスモデル

	主な初期投資	初期投資規模	主な運転・維持コスト	主な収入形態
①取水事業者	取水施設建設費	100 億円 規模	取水動力 メンテ費	深層水販売収入
②発電事業会社 (独立発電事業を想定)	発電施設建設費	30 億円 規模	深層水利用料 to① メンテ費	売電収入
③地域冷熱供給会社	冷水供給配管 冷房用個別設備	10 億円 規模	深層水利用料 to① メンテ費 配水ポンプ動力	冷熱販売収入
④冷熱利用農業 例) 植物工場、農業法人	植物工場 土壌冷却施設	0.1～5 億円 規模	深層水利用料 to① 施設運営・メンテ費	野菜等販売収入
⑤冷熱利用水産業 例) 養殖事業者	養殖池等 各種養殖施設	数千万円 規模	深層水利用料 to① 施設運営・メンテ費	水産物販売収入
⑥各冷房需要施設 例) ホテル、役場、学校	建物等	数千～数億円 規模	冷房利用料 to③ 施設運営・メンテ費	施設利用収入 その他
⑦各種深層水利用事業者 例) 化粧品・食品会社	各種生産設備等	数千万円 規模	深層水利用料 to① 冷房利用料 to③ 施設運営・メンテ費	製品販売収入

①の取水事業者は、取水施設の建設コストを負担し、運用開始後は深層水を販売することで収入を得る。このとき運転コストとしては取水ポンプの電気代、設備を継続的に運用していくためのメンテナンス費用、運営にかかる人件費等がある。

この①の取水事業者については、地域の共通インフラ設備という公共性の高いものとなることを考えると、やはり現在の海洋深層水研究所と同じように県などの行政所管の施設とするのが妥当であろう。

発電事業会社②は、海洋温度差発電プラントの運営組織である。一般的にこれまでの海洋温度差発電の経済性を考える上では、①の取水事業者と②の発電事業会社を一体の組織として考えられることが多く、海洋温度差発電で発電した電力収入だけで取水管敷設にかかる初期コストを回収するものと考えられてきた。しかしながら実際には、先述のように取水した深層水の持つ資源価値の恩恵は、その後の段階でも順番に活用していくことを考えると、両者を分けるこの考え方は妥当なものであると考える。

ここでは、②の発電事業会社は①の取水事業者に使用する量に応じた深層水の利用料を支払う形となる。利用料金の設定は、深層水によって産み出される付加価値によって、それ以降の利用者も含めて応分の負担をする料金設定となる。

発電した電力は、一部を所内の動力や周辺の深層水利用施設で利用(独立した会社として考えると電気利用料金を徴収する形)し、余剰電力については沖縄電力に売電する形となる。

②の発電事業会社は、基本的に独立系発電事業(IPP)という位置づけになるが、①の取水事業者と分離して考えた場合、発電端単価は20円/kWh以下に抑えられる可能性も十分にあるため、沖縄電力などの地域の電力会社が、高コストになりがちな離島の安定電源として、ディーゼル発電に代わって選択するというオプションもありうる。

地域冷熱供給会社③では、文字通り冷熱を供給する会社である。事業形態としては、取水事業会社①に深層水利用料を支払い、それによって冷熱や冷水を作り、ホテルや役場、周辺の企業や学校、家庭に冷房というサービスを供給する会社となり、利用者からは利用量に応じて冷房(冷熱)使用料という形で代金を受け取る形となる。

ここで深層水冷房の冷房設備については、小規模な需要家に関しては③の会社が所有して利用収入だけを徴収する形の方がより多くの人が利用できて結果的に裾野が広がりやすい。また、中大規模需要家においても、冷房設備に関してはリース形式をとるなど、一括して管理することでより敷居を低くした形での展開ができるようになる。

深層水やその冷熱(冷房)の利用者である④～⑦は、深層水利用料は①の事業者、冷熱(冷房)利用料は③の会社に支払うことで、各製品を生産、製造、栽培し、それを販売することで収入を得ることとなる。また、これらはそれぞれの役割と費用負担を整理する意味で別の事業体と見立てて検討をしたが、実際にはこれらの複数のプロセスが一つの事業体として、運営されというケースもありうる。

以上のような形で、深層水くみ上げによる費用負担を適切な形で、利用者が負担する形が成り立つ。ビジネスフローの例を図5-11に示す。

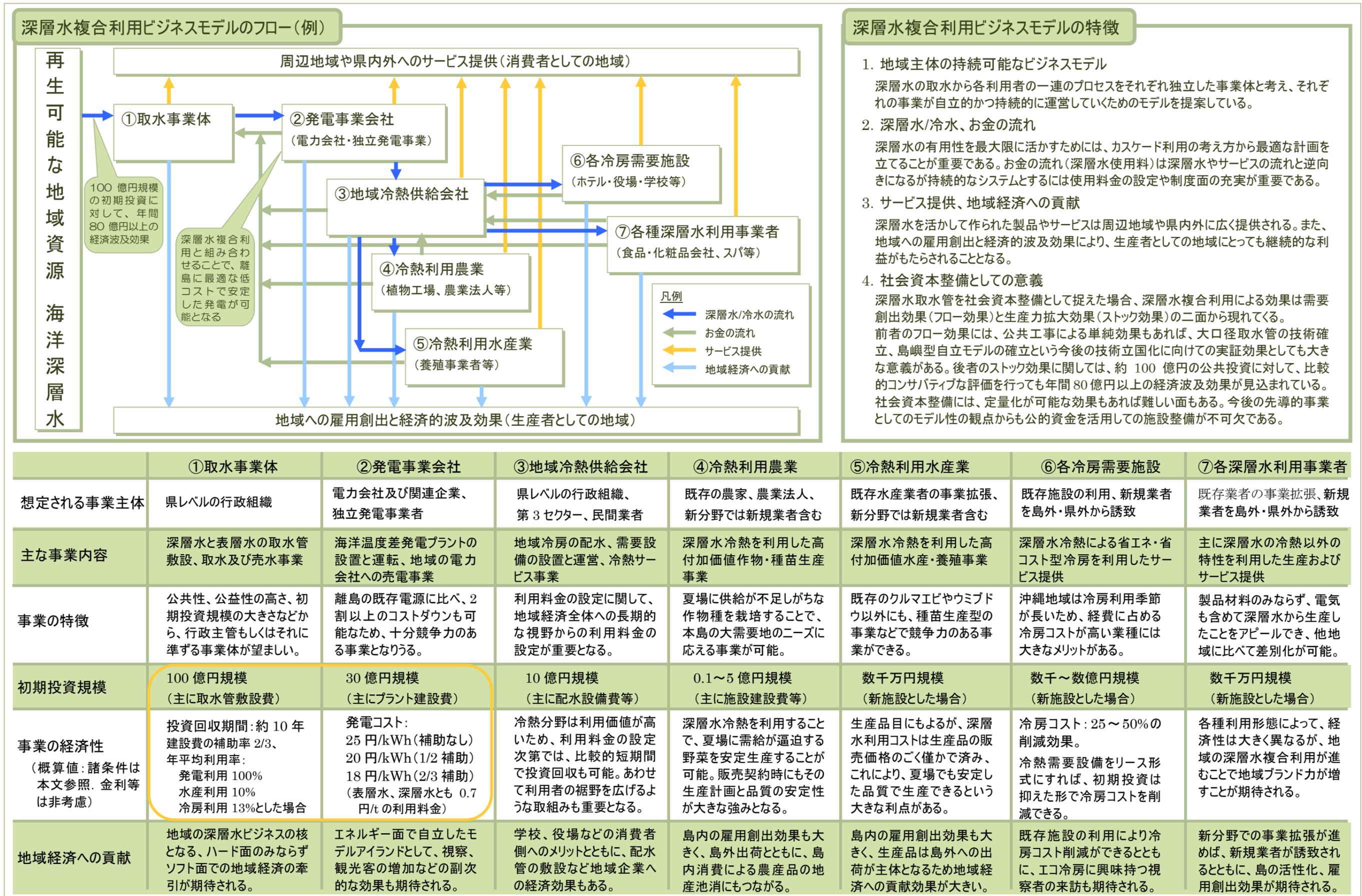


図 5-11 海洋深層水複合利用ビジネスモデルの例

### 5.4.3 各種複合利用事業の深層水付加価値と経済収支

前節では深層水の取水施設と各ユーザーの関係性を整理することで、新たな深層水複合利用のビジネスモデルを提案した。ここでは更に具体的な試算値をもとに、各ユーザー段階での深層水による付加価値とビジネスモデル全体が成り立つための深層水利用料金について概算する。なお、ここでは単純化のため、金利については考慮しておらず、各設備の償却年数は30年で一定としている。

#### (1) 取水事業者の経済収支

取水事業者の経済収支に関して、取水施設建設を全て自己負担で行う場合を表 5-3 に、補助金(補助割合 2/3)の活用が可能となった場合を表 5-4 に示す。

ここで取水事業者に必要な初期投資としては、深層水及び表層水取水設備の建設費ということになる。ここでは深層水の取水深度 700m(深層水取水管延長 L=3700m:管数外径 1.2m×2 条;取水温度 6.7℃)の設置条件に対して深層水取水施設が 80 億円、表層水の取水施設が 20 億円、併せて 100 億円となる。また、年間稼働率としては、冬季の継続運転を前提としているため、基本的には通年取水の年間稼働率 100%を基本ケースとする。

また取水にかかる電力コストはここでは取水ピットにかかる汲みあげ動力のみを考慮するものとし、深層水側で 7m、表層水側で 5m の水頭分とする。なお、各種複合利用施設への配水のコストは別途③の地域冷熱供給会社によって送水加圧されるものとする。

表 5-3 ①取水事業者の経済性検討(補助金無し)

項目	単位	深層水			表層水		
		100%	75%	50%	100%	75%	50%
年間稼働率		100%	75%	50%	100%	75%	50%
取水量(日量)	t/日	240,000			300,000		
年間取水量	万 t/年	8,760	6,570	4,380	10,950	8,213	5,475
取水ポンプ水頭	M	7.0			5.0		
取水ポンプ動力( $\eta = 75\%$ )	kW	259			231		
建設コスト	万円	800,000			200,000		
償却年数	年	30			30		
年間償却コスト	万円/年	26,667			6,667		
年間取水動力コスト	万円/年	4,996	3,747	2,498	4,461	3,346	2,231
年間維持管理コスト	万円/年	4,000			1,000		
年間コスト計	万円/年	35,663	34,414	33,165	12,128	11,013	9,897
償却コスト(取水量あたり)	円/t	3.0	4.1	6.1	0.6	0.8	1.2
電力コスト(取水量あたり)	円/t	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
維持管理コスト(取水量あたり)	円/t	0.5	0.6	0.9	0.1	0.1	0.2
取水コスト計(取水量あたり)	円/t	4.1	5.2	7.6	1.1	1.3	1.8

なお、年間維持管理コストは久米島でのこれまでの取水実績の中で非常に汚れの少ない海水ということがわかっているため、建設コストの0.5%としている。

上記条件における試算の結果、深層水取水に関しては年間約3.6億円、表層水取水に関しては年間約1.2億円と年間約4.8億円の経費がかかる。稼働率が低下した場合は表層水、深層水合わせて約4.5億円/年(稼働率75%)、約4.3億円/年(稼働率50%)となる。

また、取水量あたりのコストで考えた場合、深層水に関しては1トンあたり4.1円、表層水は同じく1トンあたり1.1円ということになる。

また、この建設コストに対して2/3の割合の公的な補助金を活用できた場合の経済性の試算結果を表5-4に示す。この場合、深層水の取水コストは稼働率100%の基本ケースの場合で1トンあたり2.0円、同じく表層水に関しては0.7円ということになる。

①の取水事業者は、これら取水コストに適切な利益やその他経費を加えた形で、深層水と表層水の販売価格が決まってくることとなる。

また、表層水の利用先は現時点では海洋温度差発電プラントが中心となるが、今後その地域での深層水利用が増えていけば、海洋温度差発電で5℃前後冷えた表層水は冷たい海水として新たな資源的価値が生まれるため、その冷たい表層水を水産分野に活用していくことも可能である。その場合も取水コストを負担しあうことで新たな経済的メリットがうまれてくる。

表 5-4 ①取水事業者の経済性検討（建設費補助率2/3）

項目	単位	深層水			表層水		
		100%	75%	50%	100%	75%	50%
年間稼働率		100%	75%	50%	100%	75%	50%
取水量(日量)	t/日	240,000			300,000		
年間取水量	万t/年	8,760	6,570	4,380	10,950	8,213	5,475
取水ポンプ水頭	M	7.0			5.0		
取水ポンプ動力( $\eta = 75\%$ )	kW	259			231		
建設コスト	万円	266,667(自己負担分のみ)			66,667(自己負担分のみ)		
償却年数	年	30			30		
年間償却コスト	万円/年	8,889			2,222		
年間取水動力コスト	万円/年	4,996	3,747	2,498	4,461	3,346	2,231
年間維持管理コスト	万円/年	4,000			1,000		
年間コスト計	万円/年	17,885	16,636	15,387	7,683	6,568	5,453
償却コスト(取水量あたり)	円/t	1.0	1.4	2.0	0.2	0.3	1.4
電力コスト(取水量あたり)	円/t	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
維持管理コスト(取水量あたり)	円/t	0.5	0.6	0.9	0.1	0.1	0.2
取水コスト計(取水量あたり)	円/t	2.0	2.5	3.5	0.7	0.8	1.0

## (2) 発電事業会社の経済収支

発電事業会社の深層水による付加価値

表 5-5 に発電事業会社における深層水の利用料金を考える上で、まず始めに深層水 1 トンあたりで得られる付加価値を計算したものを示す。深層水による付加価値の計算では、深層水を利用した事業によって得られる収入を、深層水の利用量で割ることで得られる値のことと定義する。

ここで得られる収入としては、電力会社との売電契約によって変わってくるものであるが、ここでは、大型風力発電のコストに相当する 15 円/kWh(Case1)、一般家庭の標準的な電気料金に相当する 22 円/kWh(Case2)、離島部における一般的な発電コストに相当する 30 円/kWh(Case3)、また、参考として一般家庭の太陽光発電の余剰売電価格に相当する 48 円/kWh(Case4)の 4 ケースで試算した。

また取水にかかる動力は深層水利用料金という形で負担するため、ここでは Gross の発電端出力として計算している。この Gross 出力は、夏場で約 1400kW 強、冬場で約 800kW 弱となりその通年平均として 1130kW で計算を行っている。

表 5-5 ②発電事業会社における深層水の付加価値

項目	単位	Case1	Case2	Case3	Case4
売電価格	円/kWh	15.0	22.0	30.0	48.0
発電端出力(Gross 平均)	kW	1,130			
年間発電量	MWh/年	9,900			
年間売電収入	万円/年	13,140	19,272	26,280	42,048
深層水利用量	万 t/年	8,760			
深層水付加価値	円/t	1.7	2.5	3.4	5.4

この結果、深層水の付加価値は売電価格によって 1 トンあたり 1.7～5.4 円/t ということとなる。深層水の利用料金としては付加価値の 1/3～1/2 を一つの原価の目安に設定した場合、0.6～2.7 円/t あたりになると考えられる。

### 発電コストの試算

表 5-6 に深層水の利用料金ごとの発電コストを示す。発電事業者にとって初期投資にあたるものは海洋温度差発電プラント本体の建設コストである。この建設コストは、発電端出力で kW あたり 300 万円程度であるため、標準出力 1130kW として、概算 30 億円と設定した。海洋温度差発電の場合、実質的な稼働率が他の自然エネルギーに比べてかなり高くなるため十分コスト競争力のある数字であるといえよう。試算にあたっては、取水事業者の検討と同様、プラント建設を全て自己負担で行う場合と何らかの補助金(補助率 2/3)の活用が可能となった場合をそれぞれ示す。

なお、今回検討しているビジネスモデルにおいては、取水施設自体の初期投資は①取水事業者が別途行っているという点に注意が必要である。

また運転にかかる主なコストとして深層水利用料と維持管理コストがあり、深層水の利用量に応じた利用料金を①の取水事業者を支払う形とする。維持管理コストとしては、プラント建設費の 0.5%に相当する年間 1500 万円とする。なお、①の取水事業者を支払う表層水の利用料金は、0.7 円/t として計算した。

表 5-6 ②発電事業者の経済性検討(発電コスト試算)

項目	単位	補助金なし			補助率 2/3		
		0	0.7	1.4	0	0.7	1.4
深層水利用料金	円/t	0	0.7	1.4	0	0.7	1.4
深層水利用量(日量)	t/日	240,000			240,000		
年間深層水利用量	万 t/年	8,760			8,760		
表層水利用料金	円/t	0.7			0.7		
表層水利用量(日量)	t/日	300,000			300,000		
年間表層水利用量	万 t/年	10,950			10,950		
発電端出力(Gross 平均)	kW	1,130			1,130		
年間発電量	MWh/年	9,900			9,900		
建設コスト	万円	300,000			100,000(自己負担分のみ)		
償却年数	年	30			30		
年間償却コスト	万円/年	10,000			3,333		
年間深層水利用コスト	万円/年	0	6,132	12,264	0	6,132	12,264
年間表層水利用コスト	万円/年	7,665			7,665		
年間維持管理コスト	万円/年	1,500			1,500		
年間コスト計	万円/年	19,165	25,297	31,429	12,498	18,630	24,762
発電端コスト	円/kWh	19.4	25.6	31.8	12.6	18.8	25.0

この結果、プラント建設にかかる補助金がない場合、深層水の利用料金により 1kWh あたりで 19.4 円～31.8 円、プラント建設に対して公的な補助金(補助率 2/3)が適用になった場合、発電端コストは 12.6 円～25.0 円となる。前項で付加価値より検討した深層水利用料金 0.7 円/t とすると、それぞれ 25.6 円/kWh(補助無し)、18.8 円/kWh(補助率 2/3)と離島の発電装置としては十分な経済性を有している。

## (3) 地域冷熱供給コストの試算

地域冷熱供給会社の深層水による付加価値

地域冷熱供給会社における深層水の利用料金についても、深層水 1 トンあたりで得られる付加価値をみていくこととする(表 5-7)。

まず、深層水冷房によって得られる省エネ効果を熱量として評価する。この利用冷熱量は利用温度差をどれくらいで設備設計するかによるため、ここでは利用温度差を 5℃から 8℃まで 1℃刻みで比較をした。その利用する冷熱量はエネルギー効率 COP(Coefficient Of Performance)で割ることで電気エネルギーに換算することができる。ここでは標準的な冷凍装置を想定して COP=3 ということで換算した。

この電力量に相当するエネルギーが深層水冷房を利用することにより削減できる電力量となる。なお、深層水冷房においても送水ポンプの加圧に動力が必要となるが、付加価値計算の段階ではその分はカウントせず、別途深層水冷房の経済性という形で評価することとする。

この深層水冷房を利用する需要家の電力単価を 22 円/kWh とすると、日量 24 万トンの汲みあげた深層水全てを冷房に使用(利用温度差 5~8℃)すると、1 日あたりの省エネ・省コスト額はそれぞれ 975 万円~1561 万円となる。

これを深層水 1 トンあたりでみると、約 41 円/t から 65 円/t となり、これが深層水冷熱利用における付加価値ということになる。③地域冷熱供給会社の①取水事業者に支払う形の深層水の利用料金としては付加価値の半分を一つの原価の目安に設定した場合、20 円/t あたりになると考えられる。

表 5-7 ③地域冷熱供給会社における深層水の付加価値

項目	単位	Case1	Case2	Case3	Case4
利用温度差	℃	5℃	6℃	7℃	8℃
深層水利用量	t/日	240,000			
利用冷熱量	MW	55.4	66.5	77.6	88.7
COP	-	3.0			
換算電力	MW	18.5	22.2	25.9	29.6
換算電力量	kWh/日	443,333	532,000	620,667	709,333
買電価格	円/kWh	22.0			
省エネ効果金額	万円/日	975	1,170	1,366	1,561
深層水付加価値	円/t	40.6	48.8	56.9	65.0

表 5-8 に深層水の利用料金ごとの冷房コストを示す。地域冷熱供給会社にとって初期投資としては地域内への深層水配水配管や送水設備の設置コストである。このコストは地域配管を 10 億円、冷熱需要設備 10 億円の合計 20 億円としている。なお冷熱需要設備に関してはリース形式を想定して試算しており、各需要家は深層水冷熱使用料金と工事費を支払うだけで冷熱が利用できる形となる。また、償却年数はこれまでと同じく 30 年とし、金利等は考慮していない。

送水ポンプについては、送水ヘッドを 30m と 50m の 2 パターンを比較している。また年間維持管理コストは小口需要家への対応も加わるため年間 5000 万円としている。深層水の利用温度差は 5℃としている。

これらトータルの年間コストは、①の取水事業者を支払う深層水使用料金が 20 円/t の場合で 7.1 億円～7.5 億円、同じく 25 円/t の場合で 8.4 億円～8.8 億円、30 円/t の場合で 9.7 億円～10.1 億円ということになる。また、深層水 1 トンあたりでみると深層水利用料金に 6.9 円～8.5 円が追加されており、この部分が深層水冷房利用にかかる設備やその運営、維持管理のコストということになる。

この地域冷熱供給会社では、送水ポンプの負担が増えるとコストアップがあること、また、最終需要家である冷房利用者は、深層水地域冷房は 40.6 円/t 以下にならないと利用価値がないことを考えると、①取水事業者を支払う深層水利用料金、つまり③地域冷熱供給会社としての深層水原価は高くても 20 円/t が限界と考えられる。

また、冷熱需要家への深層水冷房利用単価は深層水 1 トンあたり 30 円程度となる。

表 5-8 地域冷熱供給会社の経済性検討(冷熱コスト試算)

項目	単位	送水ポンプ水頭 30m			送水ポンプ水頭 50m		
		20	25	30	20	25	30
深層水利用料金(③→①)	円/t	20	25	30	20	25	30
深層水利用量(日量)	t/日	240,000			240,000		
年間平均負荷率	%	30			30		
年間深層水利用量	万 t/年	2,628			2,628		
送水ポンプ水頭	M	30			50		
送水ポンプ動力( $\eta = 75\%$ )	kW	1,111			1,852		
買電価格	円/kWh	22			22		
建設コスト	万円	200,000			200,000		
年間償却コスト	万円/年	6,666			6,666		
年間深層水利用コスト	万円/年	52,560	65,700	78,840	52,560	65,700	78,840
年間ポンプ電力コスト	万円/年	6,424			10,707		
年間維持管理コスト	万円/年	5,000			5,000		
年間コスト計	万円/年	70,651	83,791	96,931	74,933	88,073	101,213
冷房コスト(深層水 1 トンあたり)	円/t	26.9	31.9	36.9	28.5	33.5	38.5

#### (4) 冷熱利用農業事業者の経済収支

深層水の冷熱を利用した農業や植物工場については、深層水利用料金を①の取水事業者に支払って深層水冷房設備を自前で準備する場合と深層水冷房利用料金を③の地域冷熱供給会社に深層水冷熱支払って設備自体は③の会社からリースする場合と大きく二つのケースが想定される。

前者のケースは基本的に事業形態としては③と同様の事業形態と考えることができ、冷熱供給設備を自前で持たなくてはならないが、その分深層水冷房の利用料金は割安となる。

後者のケースは、③の会社に 1 トンあたり 30 円程度の深層水冷房利用単価を支払って、冷房というサービスを受けることとなり、これによって通常の電気を使った冷房の場合(深層水付加価値ベースで 41 円/t)との差である約 25%を省エネ・省コスト効果として得ることができる。

#### (5) 冷熱利用水産事業者の経済収支

深層水の冷熱を利用した水産業に関しては、既にクルマエビの養殖やウミブドウの生産に活用されており、島に大きな経済的利益をもたらしている。

水産養殖利用の場合は深層水の使用料もその方法もまちまちであるため、単純に付加価値を厳密に評価することは非常に難しい。また、現状の深層水利用価格である 6 円/t でも製品としてのコスト競争力は限界にきていることを考えると、①の取水事業者を支払う利用料金は現状と同じ 1 トンあたり 6 円ということが現実的であろう。なおこの分野での年間平均利用率は夏場を中心に 20%という値を見込んでいる。

また、この分野では栄養塩の少ない冷海水に対するニーズもあり、「冷たい表層水」の利用価値も高い。そのため、「冷たい表層水」に関しても 1 トンあたり 2~3 円程度の金額で利用できれば、使い途によって使いわけることが可能となるとともに地域内の表層水利用料金の低減にもつながる。

#### (6) 各冷房需要施設（ホテル・役場・学校等）の経済収支

これは、ホテルや役場、学校、個人住宅などが深層水冷房というサービスを利用する形態であり、④冷熱利用農業事業者で述べたうち、後者に相当するものとなる。

③の会社に 1 トンあたり 30 円程度の深層水冷房利用単価を支払って、冷房というサービスを受けることとなり、これによって通常の電気を使った冷房の場合(深層水付加価値ベースで 41 円/t)との差である約 25%を省エネ・省コスト効果として得ることができる。

#### (7) 各種深層水利用事業（食品、化粧品製造等）の経済収支

これは食品、医療品、化粧品などの分野で深層水を利用するもので、量としてはそれほど多量ではないが、全般的に高付加価値の製品が多いのが特徴である。この分野についても現状の深層水の価格 1 トンあたり 400 円が利用料金のベースになるであろう。

#### 5.4.4 複合利用ビジネスモデルのまとめ

本項で述べた持続可能な深層水複合利用モデルの全体像を図 5-12 に示す。

図中の左上欄は取水コストの内訳を示す。取水動力費や維持管理費に比べ、施設償却費に占める割合が大きいのが特徴である。また、施設の性質的にも初期コストとしての敷設費には公的資金の活用が望まれる。併せて、取水管の敷設費の低コスト化も重要なテーマである。また表層水の取水コストは、発電事業会社からの表層水利用料金で賄うこととなる。なお、海洋温度差発電で利用後の冷たい表層水は水産分野でも有用性をもつため、将来的には複数の利用者間で費用負担することも可能である。

続いて、左下欄は深層水による付加価値と使用料金の設定を概説したものである。各四角形<sup>21</sup>が、年間取水量の1%に相当する 87.6 万トン/年あたりの金額を模式的に表している。一つの正方形が 87.6 万円の使用料金を示しており、深層水地域冷房と農業冷熱利用ではその四角が 20 個、つまり 87.6 万トン/年の利用で 1752 万円の使用料金となることを示す。

続いて右上欄は各事業会社からの使用料金の合計で、いかに取水コストを賄うかを模式的に示している。この例では発電部分が利用率 100%、地域冷房と冷熱利用が利用率 13%、水産利用が 10%の使用料金を積算したときに左上欄の取水コストと釣り合う様子を示している。深層水利用の裾野が広がり利用率が拡大すれば、利用料金は更に下がり、利用率の拡大する方向に向かう。

このようなアプローチをすることで、地域全体で持続可能な深層水の複合利用事業が可能となる。

#### 前提条件

##### ・①取水事業者

年間利用率 : 通年取水

深層水取水コスト: 4.1 円/t (補助金なし) 、 2.0 円/t (補助率 2/3)

表層水取水コスト: 1.1 円/t (補助金なし) 、 0.7 円/t (補助率 2/3)

##### ・②発電事業会社

年間利用率 : 通年取水

深層水利用料金: 0.7 円/t (年間利用率 100%)

表層水利用料金: 0.7 円/t (年間利用率 100%)

##### ・③地域冷熱供給会社

年間利用率 : 下記で検討。

深層水利用料金: 20 円/t

##### ・④冷熱利用農業

経済収支としては③に含まれる。

##### ・⑤冷熱利用水産業

年間利用率 : 下記で検討。

深層水利用料金: 6 円/t

##### ・⑥各種冷房需要施設

経済収支としては③に含まれる。

<sup>21</sup> 発電では 1 マスの正方形、水産では 6 マスの長方形、地域冷房では 20 マスの長方形のこと

## ・⑦各種深層水利用事業者

取水総量に対して、利用量がごくわずかであるため計算には含まない。

図 5-13 に以上の前提における、本モデル全体が成り立つための深層水利用率を示す。グラフの横軸は水産分野(利用料金 6 円/t)の利用率を示し、縦軸は各ユーザーから取水事業者が受け取る利用収入を1トンあたりの金額で示す。

各々のデータは地域冷房と農業冷熱利用(利用料金 20 円/t)の年間深層水利用率を示す。

ここで、②発電事業会社は年間通して 0.7 円/t を利用料金として負担するため、その分は既に算入済みのデータとなっている。

このグラフで 2 円/t のラインを超えるような利用率であれば、取水コスト(補助率 2/3)を各社の深層水利用料金でカバーできる状態となる。例えば、地域冷熱利用の利用率 0% の場合、冷熱利用水産業の利用率が約 22% 以上あれば、取水コスト(補助率 2/3)の 2.0 円/t をカバーできるという意味である。

さらに、取水コスト(補助金無し)4.1 円/t のラインを超えれば、補助金なしの敷設コストについてもカバーできるということになる。利用率が高まるほど各社への深層水利用料金単価を下げやすくなるため、より最終需要者である冷熱利用者の裾野が広がっていくことにもつながる。

各事業者の収支がプラスとなるモデル例を図 5-14 に示す。

# 持続可能な深層水複合利用モデルのコンセプト

## 1. 深層水の取水コスト

年間取水コスト（全額自己資金）

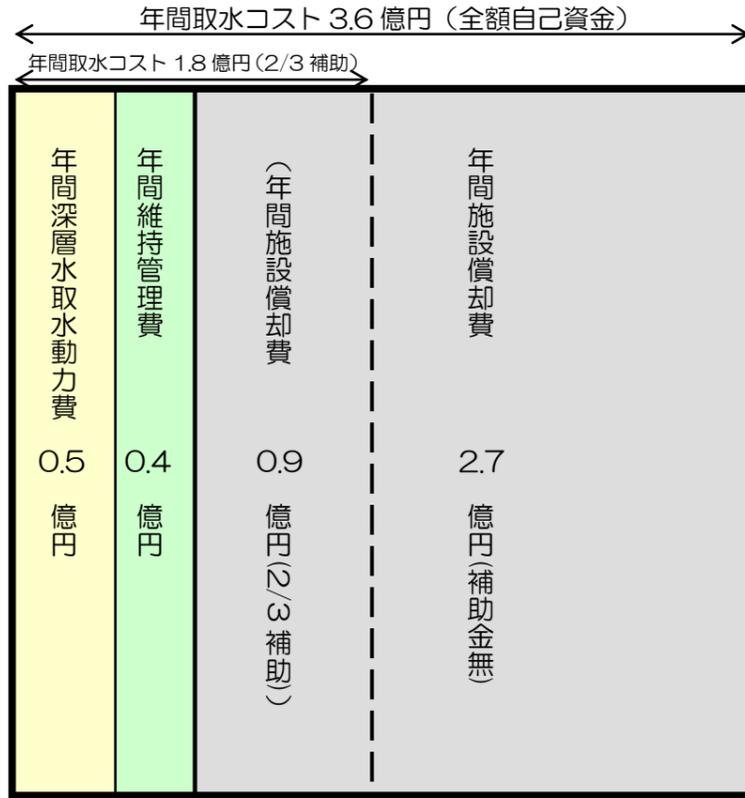
深層水取水管敷設費：80 億円  
 深層水取水動力費⇒0.5 億円/年  
 年間維持管理費 ⇒0.4 億円/年  
 年間施設償却費 ⇒2.7 億円/年  
**年間取水コスト計⇒3.6 億円/年**

年間取水コスト（2/3 補助）

深層水取水管敷設費：27 億円  
 深層水取水動力費⇒0.5 億円/年  
 年間維持管理費 ⇒0.4 億円/年  
 年間施設償却費 ⇒0.9 億円/年  
**年間取水コスト計⇒1.8 億円/年**

償却期間は 30 年として試算。

表層水の取水コストは年間1.2億円（全額自己資金）がかかる。（2/3補助においては0.8億円/年）この取水コストは発電事業会社からの表層水使用料金1.2億円/年で賄うこととなる。



## 2. 深層水による付加価値と深層水使用料金の設定

海洋温度差発電事業の利用

年間を通して一定の需要がある。

- 深層水による付加価値：2.2 円/t（標準家庭の買電価格との比較）
- 4.8 円/t（太陽光発電の売電価格ベース）

使用料金の設定方法  
 各事業の付加価値の半分の金額を目安に設定。（例）

- 深層水の使用料金：1 円/t

水産事業の冷熱利用

- 年間予想利用率：10~40%

夏季に需要が集中する傾向がある。

- 深層水による付加価値：多様な製品があるため一概に定義不可。

使用料金の設定方法  
 現状の利用料金 6 円/t でも商品競争力は限界に近い状況のため同価格に設定。

- 深層水の使用料金：6 円/t

深層水地域冷房と農業冷熱利用

- 年間予想利用率：10~40%

夏季に需要が集中する傾向があるが農業分野では一部通年需要がある。

- 深層水による付加価値：41 円/t

今後、付近の冷熱需要が高まることで、使用料金を下げられる可能性がある。

- 深層水の使用料金：20 円/t

年間使用料金の模式マス  
 長方形の大きさは、利用料金 20 円/t の場合の年間利用率 1%あたりの利用料金 1752 万円を表す。  
 1 マスは使用料金 1 円/t、利用率 1%（87.6 万 t/年）の使用料金 87.6 万円に相当。

## 3. 深層水の使用料金による投資回収

発電事業会社 地域冷房事業会社・農業冷熱 水産冷熱利用  
 の年間使用料 の年間使用料 の年間使用料

総使用料金計算（利用率は一例）

発電利用率 100%：87.6 万円×100=0.9 億円

冷房利用率 13%：1752 万円×13=2.3 億円

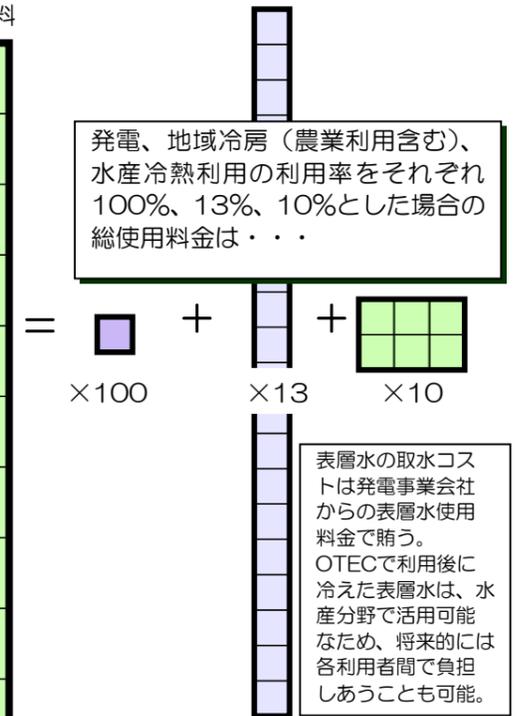
水産利用率 10%：526 万円×10=0.5 億円

⇒総使用料金 3.7 億円となり、取水コスト 3.6 億円を

利用料金でカバーできる状態。これ以上、利用率が多くなれば取水事業に利益が出てくる。

また、利用料金を下げて利用者の裾野を広げるような事業展開も可能となる。

また、取水施設に 2/3 補助が適用された場合、同じ利用率でも各社の使用料金を半分にしても、取水事業には利益がでることになる。



注) 他利用分野の使用料金は割愛。

## 4. 持続可能な深層水複合利用モデルに向けて

### ①適切な取水コストの負担システムの構築

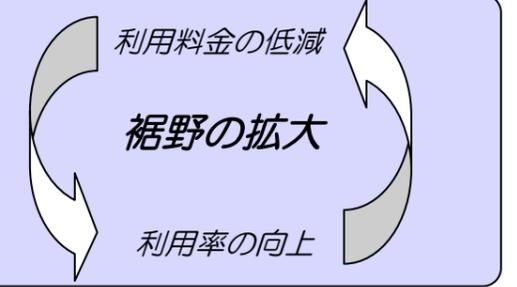
・付加価値の評価

深層水利用による付加価値（1 トンあたりの経済的メリット）を評価することで、適切な課金モデルが構築できる。

・利用意義の評価

計画段階で広い視野から利用意義を評価することで、長期的な発展が可能となる。

### ③地域の深層水利用率の向上



### ②独自の深層水ブランドの確立

- 深層水による循環型社会モデル
- 自立した離島経済モデル
- エネルギーの地産地消モデル
- 環境配慮によるイメージアップ
- 雇用増大による島の活性化

### ④持続的な深層水複合利用の発展

- 取水施設の低コスト化
- 複合利用技術の成熟
- 複合利用形態の多様化
- 日本のエネルギー自給率アップ
- 地域主権社会への転換

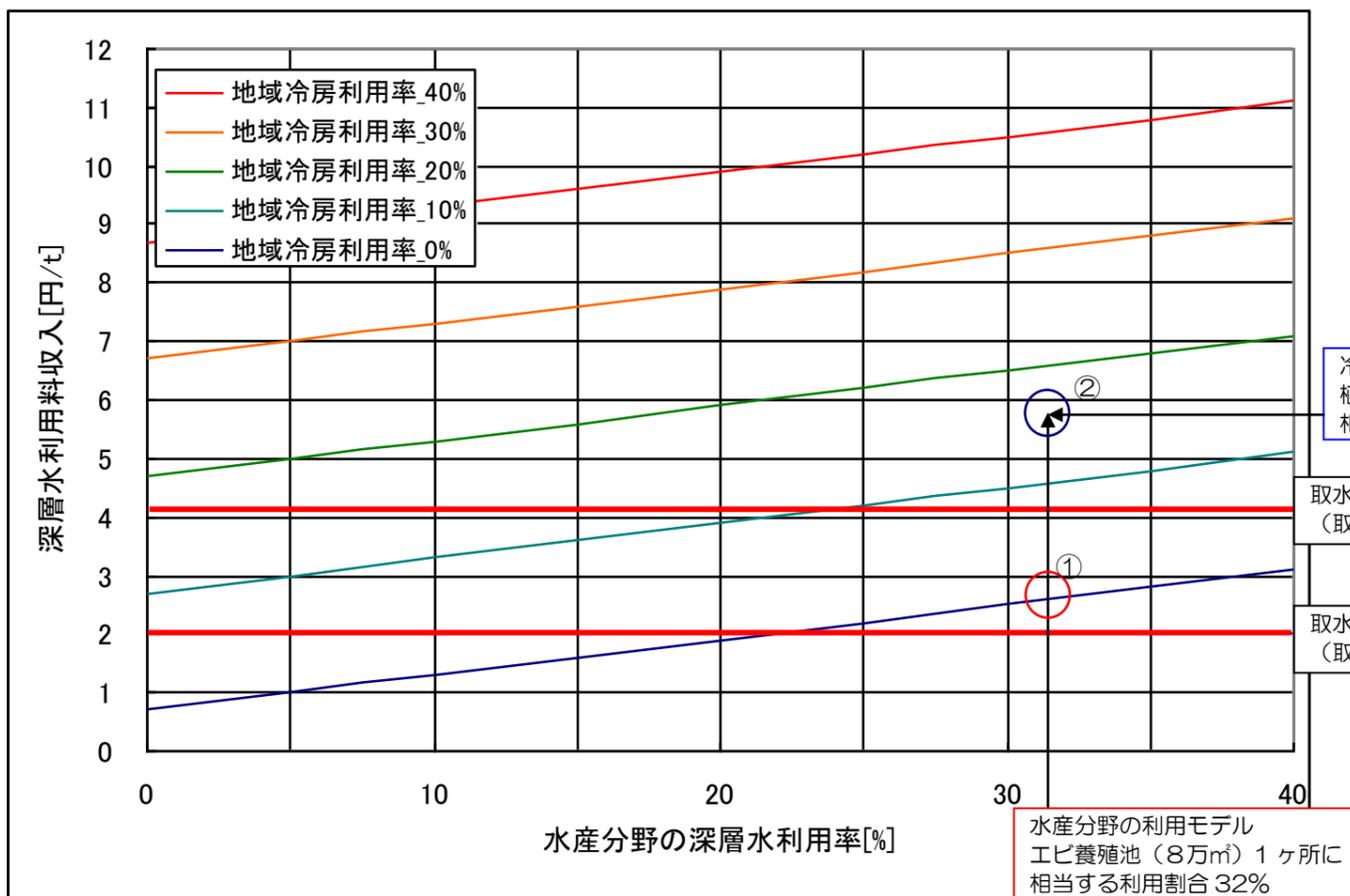
図 5-12 持続可能な深層水複合利用モデルのコンセプト



水産分野の利用モデル  
 エビ養殖池（8万㎡）（赤枠内）  
 日量：23万トン（夏季4ヶ月間）  
 年間使用量：2800万トン/年  
 全取水量に対する割合：32%



冷房（農業）分野の利用モデル（写真は1区画のみ）  
 植物工場（太陽光型）20アール型（青枠内）×20区画  
 日量：8万トン（夏季6ヶ月間）  
 年間使用量：1460万トン/年  
 全取水量に対する割合：16.7%



グラフの見方

>軸の説明

- ・ 横軸に水産分野（利用料金 6 円/t）での年間深層水利用率（全取水量に対する利用割合）を示す。
- ・ 5 色の各々のデータは地域冷房と農業冷熱利用（利用料金 20 円/t）の合計での年間深層水利用率を示す。
- ・ 縦軸は各ユーザーから取水事業者が受け取る利用収入（1 トンあたりで表示）を示す。（但し、発電事業者からの利用量 0.7 円/t は算入済み）

>基準ライン

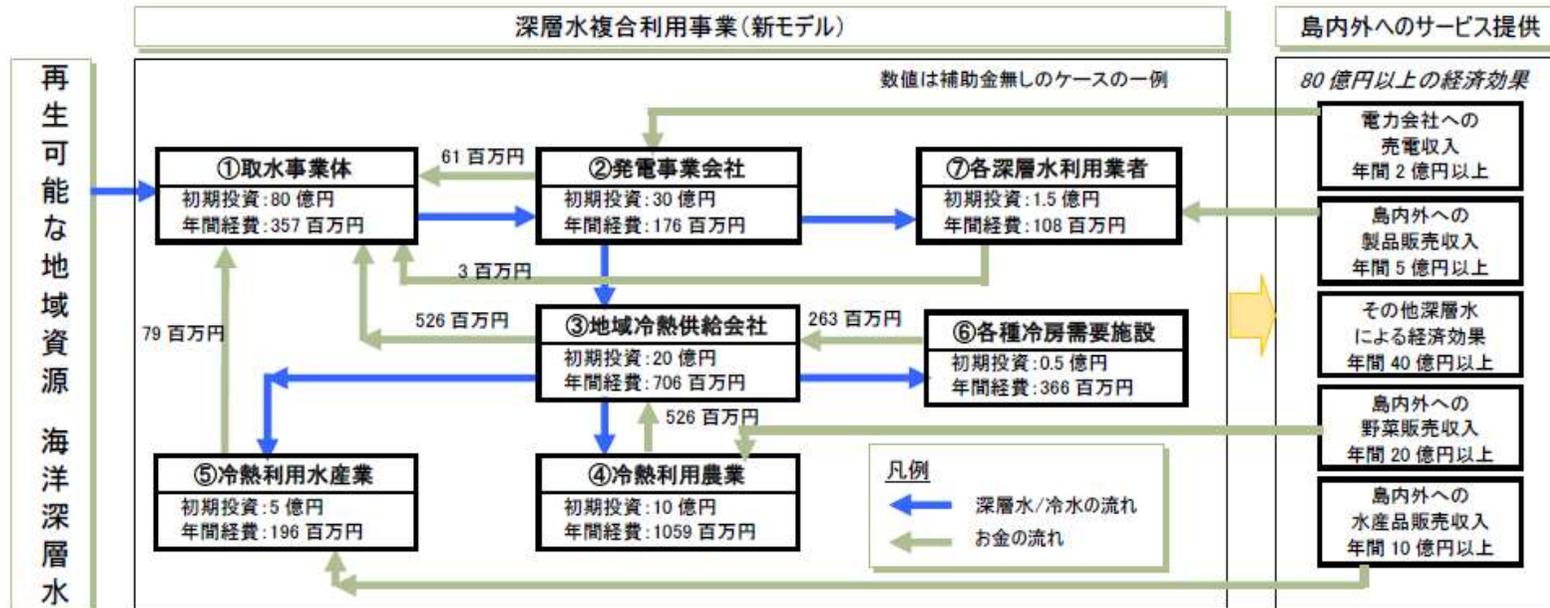
- ・ .20 円/t の線は取水施設に 2/3 補助が適用された場合の取水コスト
- ・ 4.1 円/t の線は取水施設を全額自己資金とした場合の取水コスト

>試算例

- ① 水産分野の利用モデル（エビ養殖池 8 万㎡）のみが運用された場合の取水事業者としての利用収入は約 2.6 円/t となり、2/3 補助的工事のコストは上回る。
- ② 上記水産利用に加え、農業分野の冷熱利用モデルとして、植物工場（太陽光型 20 アール）が 20 区画運用を始めた場合の、総利用収入は 5.8 円/t となり、全額自己資金とした場合の取水コストを上回る。

図 5-13 取水コストを利用料で賄うのに必要な深層水利用率

深層水複合利用ビジネスモデルのフロー(例)



- 島内外へのサービス提供
- 80億円以上の経済効果
- 電力会社への売電収入 年間2億円以上
  - 島内外への製品販売収入 年間5億円以上
  - その他深層水による経済効果 年間40億円以上
  - 島内外への野菜販売収入 年間20億円以上
  - 島内外への水産品販売収入 年間10億円以上

表 各種事業体の経済収支

	億円	①取水事業		②発電事業		③地冷供給		④冷熱農業		⑤冷熱水産		⑥冷房需要		⑦各種利用	
初期投資	80.0	0	2/3	0	2/3	0	2/3	0	2/3	0	2/3	0	2/3	0	2/3
補助率(設置分)	-	0	2/3	0	2/3	0	2/3	0	2/3	0	2/3	0	2/3	0	2/3
深層水利用料金	円/t	-	-	0.7	0.5	20.0	15.0	30.0	25.0	6.0	4.0	30.0	25.0	300	200
利用率	%	100%	100%	100%	100%	30.0%	30.0%	20.0%	20.0%	15.0%	15.0%	10.0%	10.0%	0.01%	0.01%
償却費	百万円/年	267	89	100	33	67	22	33	11	17	6	3	1	5	2
使用料金年額	百万円/年	-	-	61	44	526	394	526	438	79	53	263	219	3	2
維持費+電力代	百万円/年	90	90	15	15	114	114	500	500	100	100	100	100	100	100
年間経費計	百万円/年	357	179	176	92	706	530	1,059	949	196	158	366	320	108	103
年間収入計	百万円/年	668	492	200	200	788	657	2,000	2,000	1,000	1,000	500	500	500	500
年間収支	百万円/年	312	313	24	108	82	127	941	1,051	804	842	134	180	392	397

上のフローは、本ビジネスモデルにおける深層水の流れとお金の流れの一例(補助金なしの一例)を示したもので、左表は深層水使用料金や年間経費を示す。(設置費を全額自己資金で行った場合と補助金(補助率 2/3)が適用された場合)  
 各分野とも夏季を中心とする 30%以下の利用率でも収支がプラスになっており、取水管の敷設費等に補助金の活用できれば、利用料金を下げることができ、各事業者の収益性が更に向上し、地域経済の活性化が加速する。(左表では利用料金低減効果のみを含む)

図 5-14 各事業の収支がプラスとなるビジネスフロー例

## 第6章 久米島における海洋温度差発電の基本計画

### 6.1 久米島における発電システムの基本設計

#### 6.1.1 久米島に適した発電規模の検討

##### (1) 既存電力需要からの制約

現在、久米島の電力供給は主として島内南海岸の儀間地区の株式会社沖縄電力 久米島電業所(内燃力発電所: 出力 19,250kW)によってまかなわれている。

久米島の平均気温は冬季には 20°C以下まで下がり、夏季に電力消費のうち大きな割合を占める空調需要がほぼゼロとなる。つまり、最低電力需要はピーク需要に対して小さく、およそ 2,000~3,000kW と推定される。

一方、海洋温度差発電の特徴は設備利用率の高さにあり、また運転時のコストは非常に小さい。したがって、経済的な運営には、負荷による発電出力調整を行わずに発電できる最大量を供給し続けることが望ましい。したがって、本調査では海洋温度差発電設備の送電端出力の条件として 2,000~3,000kW を上限とすることを仮定した。実際に適用が可能な上限値については、商用電力側との詳細な調整の上決定される。

##### (2) 久米島町「地域新エネルギービジョン」における計画

平成 18 年度に策定された「地域新エネルギービジョン」では、海洋温度差発電システムの将来的な導入が構想されている。この中で、発電出力については次の通り記載されている。

「久米島で想定する発電容量を 1,000kW とする。これは、現在の久米島町の電力需要ピークが 10,000kW 以下であるので、その 1/10 を想定したものである。」

##### (3) 海洋温度差発電技術を取り巻く状況から望まれる出力

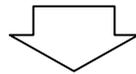
独立行政法人 NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が 2010 年 7 月に刊行した「再生可能エネルギー白書」では、現状望まれる出力について次の通り述べている。「我が国が引き続き、海洋温度差発電の技術開発において指導的立場を維持するためには、当面の技術課題と考えられる MW 級の実証研究を世界に先導して実施することが不可欠である。」(7.2.1 項)。「海洋温度差発電は、他の再生可能エネルギーとは異なり、スケールメリットが極めて大きいという特性を有している。これまで国内外において、100kW 級の実証試験がなされてきたが、この出力レベルでは経済的に成立しないとされている。世界初となる 1MW 級の実証試験を実施し、日本の技術的優位性を維持することが重要である。」(7.2.2 項)。

こういった状況から、海洋温度差発電技術のモデルプラントとしての役割を考慮した場合、発電端出力は 1,000kW 以上が望まれる。

以降の検討では、これらの要件を満たす発電端出力 1,000~2,000kW を想定して検討を行なう(表 6-1)。

表 6-1 発電規模に関する要件

要件	根拠
送電端出力 2,000~3,000kW 以下	久米島の推定ベースライン電力需要
発電出力 1,000kW 規模	「地域新エネルギービジョン」での想定
発電端出力 1,000kW 以上	海洋温度差発電技術の実証プラントとしてのモデル性



発電端出力 1,000~2,000kW が最適

### 6.1.2 発電システムの基本計画

#### (1) 海水利用温度、および発電用熱サイクルに関する検討

久米島周辺の海域では、図 6-1 および図 6-2 に示す通り、冬季に表層海水温度が夏季よりおよそ 6°C 低くなる。20°C 程度の温度差を利用する海洋温度差発電では、6°C の差は発電効率および発電出力に大きな影響を及ぼす。

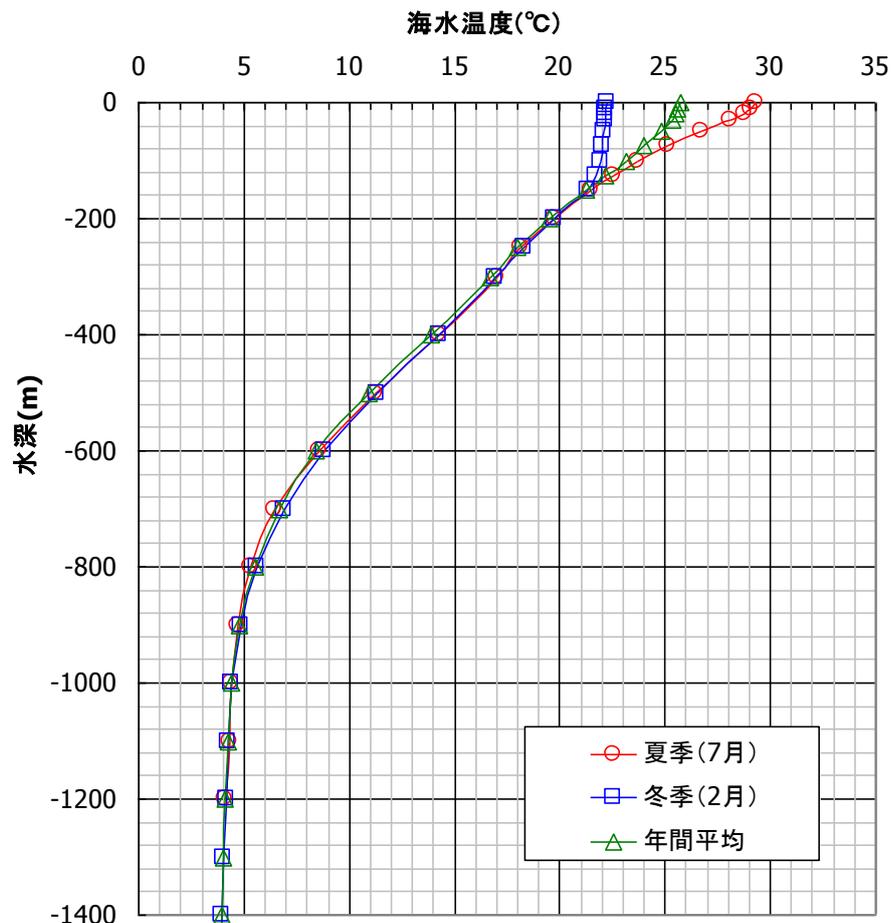


図 6-1 久米島周辺海域の季節別海水温分布

出典：JODC（日本海洋データセンター）海水温度データベースよりグラフ化

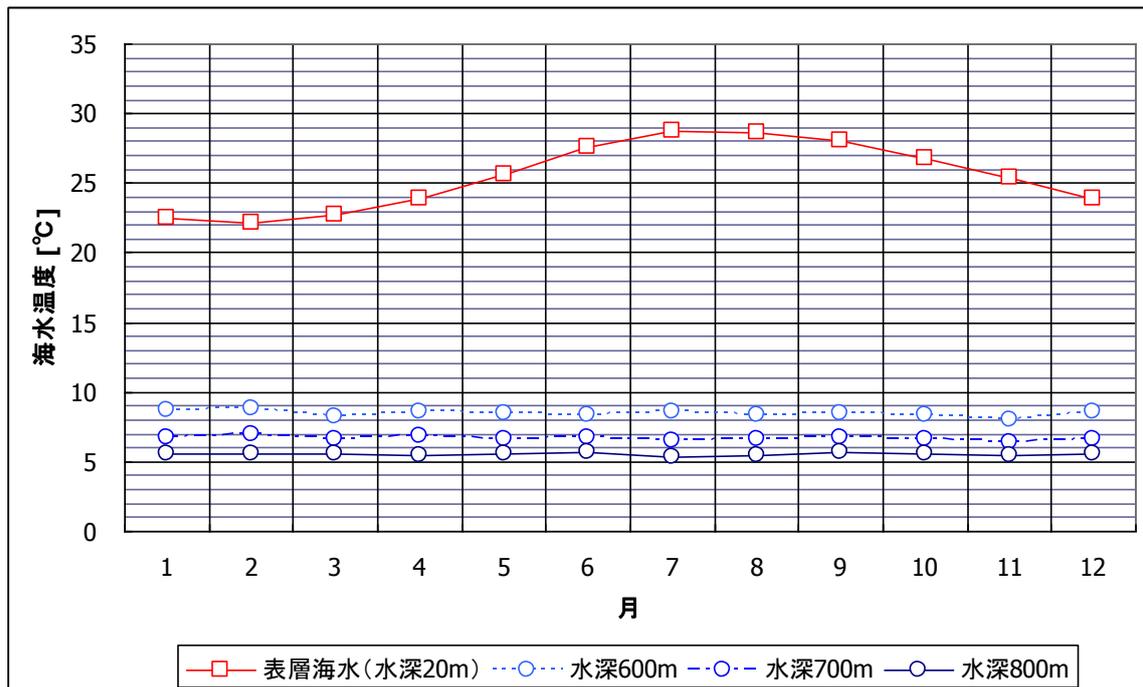


図 6-2 月別 平均海水温度

出典：JODC（日本海洋データセンター）海水温度データベースよりグラフ化

そこで、まず初めに、表 6-2 の通り条件を設定し、仕様のスクリーニングを行なった。その評価結果を表 6-3～表 6-5 に示す。

表 6-2 海洋温度差発電スクリーニング条件

項目	内容
固定条件	
深層水取水管径 (検討のための仮定値)	外径 1,200mm×2 本(仮)
深層水および表層水 取水ポンプ揚程	管内摩擦損失、形状抵抗損失、管内外密度差静水頭(深層水のみ)、プラント内機器および配管損失等、取水口から排水口までを各ケースで計算
スクリーニング対象(設計変数)	
深層水の出入口温度差	4℃～8℃まで、1℃刻み
表層水の出入口温度差	3℃～7℃まで、1℃刻み
発電用熱サイクル	以下 2 候補の比較 <ul style="list-style-type: none"> <li>・アンモニア系媒体を用いた通常のランキンサイクル</li> <li>・アンモニア系媒体を用いた高効率サイクル</li> </ul>
スクリーニング条件	
冬季の継続運転	冬季に温度差が小さくなっても、タービン出入口の圧力落差が小さくなりすぎない。
冬季の複合利用設備自立運転	冬季に発電出力が小さくなった際も、海水取水ポンプおよび複合利用設備の所要電力を供給できる。
使用後の深層水温度	海洋温度差発電に用いた後の海水は、複合利用設備(冷熱利用農業および漁業)に利用される。この際、供給温度が低い方が好ましい。

表 6-3 冬季の継続運転面でのスクリーニング

			表層水出入口温度差および取水深度														
			3℃			4℃			5℃			6℃			7℃		
			600m	700m	800m	600m	700m	800m	600m	700m	800m	600m	700m	800m	600m	700m	800m
深層水出入口温度 および熱サイクル	4℃	ランキン	○	○	◎	△	○	◎	△	○	○	△	△	○	△	△	△
		高効率	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	○	○	◎	△	○	◎
	5℃	ランキン	△	○	◎	△	○	○	△	△	○	△	△	△	△	△	△
		高効率	○	◎	◎	○	◎	◎	○	○	◎	△	○	◎	△	○	○
	6℃	ランキン	△	○	○	△	△	○	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		高効率	○	◎	◎	○	○	◎	△	○	◎	△	○	○	△	△	○
	7℃	ランキン	△	△	○	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		高効率	○	○	◎	△	○	◎	△	○	○	△	△	○	△	△	○
	8℃	ランキン	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		高効率	△	○	◎	△	○	○	△	△	○	△	△	○	△	△	△

評価 ◎:問題なく連続運転可能、○:詳細検討を要する、△:冬季は発電を停止する

表 6-4 冬季の複合利用設備自立運転面でのスクリーニング

			表層水出入口温度差および取水深度														
			3℃			4℃			5℃			6℃			7℃		
			600m	700m	800m	600m	700m	800m	600m	700m	800m	600m	700m	800m	600m	700m	800m
深層水出入口温度 および熱サイクル	4℃	ランキン	△	○	◎	△	○	◎	△	△	○	△	△	△	△	△	△
		高効率	△	◎	◎	△	◎	◎	△	○	◎	△	○	◎	△	△	○
	5℃	ランキン	△	△	◎	△	△	○	△	△	○	△	△	△	△	△	△
		高効率	△	◎	◎	△	◎	◎	△	○	◎	△	○	◎	△	△	○
	6℃	ランキン	△	△	○	△	△	○	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		高効率	△	○	◎	△	○	◎	△	○	◎	△	△	◎	△	△	○
	7℃	ランキン	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		高効率	△	△	○	△	○	◎	△	△	◎	△	△	◎	△	△	○
	8℃	ランキン	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
		高効率	△	△	△	△	△	◎	△	△	○	△	△	○	△	△	△

評価 ◎: 冬季でも複合利用設備への電力をカバーできる、○: 冬季に一部の設備をカバーできない可能性あり、△: 冬季には買電が必要

表 6-5 使用後の深層水温度

			表層水出入口温度差および取水深度														
			3℃			4℃			5℃			6℃			7℃		
			600m	700m	800m	600m	700m	800m	600m	700m	800m	600m	700m	800m	600m	700m	800m
深層水出入口温度 および熱サイクル	4℃	ランキン	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎
		高効率	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎
	5℃	ランキン	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎
		高効率	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎
	6℃	ランキン	△	○	◎	△	○	◎	△	○	◎	△	○	◎	△	○	◎
		高効率	△	○	◎	△	○	◎	△	○	◎	△	○	◎	△	○	◎
	7℃	ランキン	△	○	○	△	○	○	△	○	○	△	○	○	△	○	○
		高効率	△	○	○	△	○	○	△	○	○	△	○	○	△	○	○
	8℃	ランキン	△	△	○	△	△	○	△	△	○	△	△	○	△	△	○
		高効率	△	△	○	△	△	○	△	△	○	△	△	○	△	△	○

評価 ◎：複合利用設備への供給温度が 12℃以下、 ○：同供給温度が 12℃～14℃、 △：同供給温度が 12℃以上

表 6-3～表 6-5 の評価が全て◎となった仕様のうち、第 7 章で検討している取水深度と取水管敷設費用との感度分析結果と、利用可能冷熱量および年間発電量との以降に記す比較から、取水深度として 700m を選定した。

まず、取水深度 600m は表 6-3～表 6-5 の評価において全て◎となる仕様が存在しないことから候補から除外した。次に、取水深度 700m と 800m とを比較すると、深層水取水管敷設費用の比は、100:115 である(図 7-13 参照)。一方、それぞれの利用可能冷熱量を比較すると、その比は下記計算の通り、100:107 となる。つまり取水深度 800m からの取水は、コストが取水深度 700m の場合より 15%多いのに対し、冷熱量は 7%しか増えないこととなる。したがってこの面からは取水深度 700m ケースの方がコストパフォーマンスが良いと判断される。

$$(25^{\circ}\text{C} - 6.7^{\circ}\text{C}) : (25^{\circ}\text{C} - 5.5^{\circ}\text{C}) = 100 : 107$$

ただし、25°C : 深層水複合利用における最終温度として仮定、6.7°C : 水深 700m の年間平均海水温度、5.5°C : 水深 800m の年間平均海水温度

また、年間発電量は、取水深度 700m と 800m とで年間およそ 1,000～2,000MWh の差となる。これを、電力単価 20 円/kWh を用いて金額に換算すると、年間 2,000 万～4,000 万円の差となる。一方、取水深度 700m と 800m との深層水取水管敷設費用の差は、およそ 12 億円程度であることから、電力の販売でこの差を回収するもの長い年数がかかる。したがってこの面からも、取水深度 700m の経済性が高いと考えられる。

選定した取水深度 700m のケースのうち、年間の送電量および冬季の送電端出力<sup>22</sup>について比較し、最適な仕様を選定した。表 6-3～表 6-5 の評価が全て◎となったのは、取水深度 700m のケースでは次の 4 ケースのみである。このうち、④のケースが最も年間の送電量および冬季の送電端出力とも最大であったためこれを選択し、以降の検討を進める。

- ① 深層水出口温度:取水温度+4°C、表層水出口温度:取水温度-3°C、高効率サイクル採用
- ② 深層水出口温度:取水温度+4°C、表層水出口温度:取水温度-4°C、高効率サイクル採用
- ③ 深層水出口温度:取水温度+5°C、表層水出口温度:取水温度-3°C、高効率サイクル採用
- ④ 深層水出口温度:取水温度+5°C、表層水出口温度:取水温度-4°C、高効率サイクル採用

図 6-3 に上記の選定フローを示す。また、選定した仕様を表 6-6 に示す。

<sup>22</sup> ここで送電量および送電端出力は、発電電力からプラント内自己消費電力および深層水ポンプ、表層水ポンプの消費電力を差し引いた電力量および出力を指す。

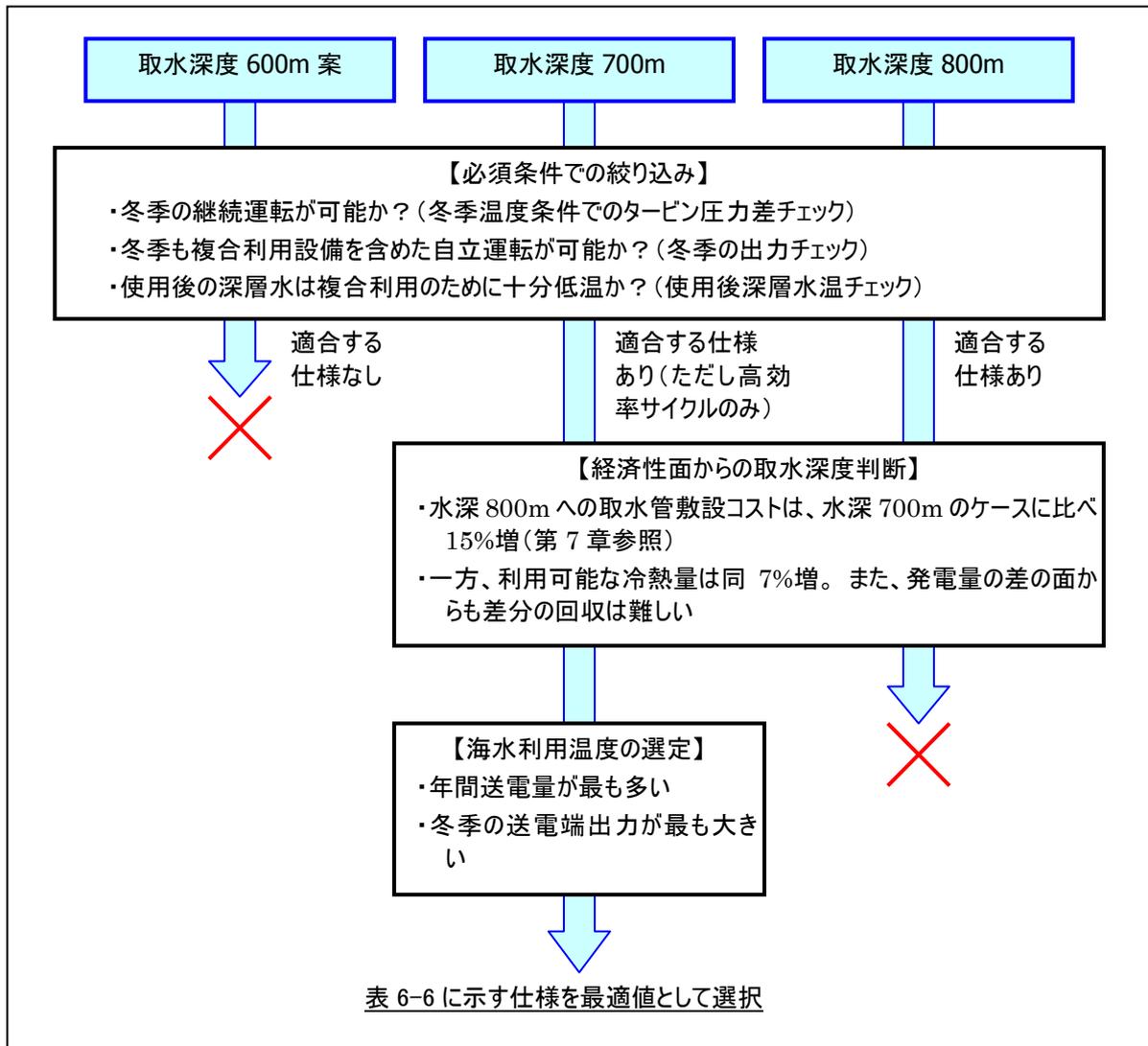


図 6-3 海水利用温度、および発電用熱サイクルに関する検討の流れ

表 6-6 海水利用温度、および発電用熱サイクルに関する検討結果

項目	数値
熱サイクル	アンモニア系媒体を用いた高効率サイクル
取水深度	水深 700m
深層水出口温度	入口温度 + 5°C
表層水出口温度	入口温度 - 4°C

(2) 取水管径・取水量に関する検討

次に、第7章で検討する材質の取水管の規格品に関して、管内流速(流量)に対し、発電端出力、自己消費電力(深層水取水ポンプ、表層水取水ポンプ)、送電端出力の変化を比較検討した。なお深層水取水管の径としては、外径 1.0m(内径 0.92m, SDR=26)×2 条、外径 1.2m(内径 1.11m, SDR=26)×2 条を候補として比較した。それぞれの結果を図 6-4 および図 6-5 に示す。

なお、これらの図における「送電端出力」は、発電機の発電出力から、設備の運転に必要な作動流体ポンプ等の補機類に加え、表層水取水ポンプ、深層水取水ポンプの消費電力も差し引いた出力を指す。

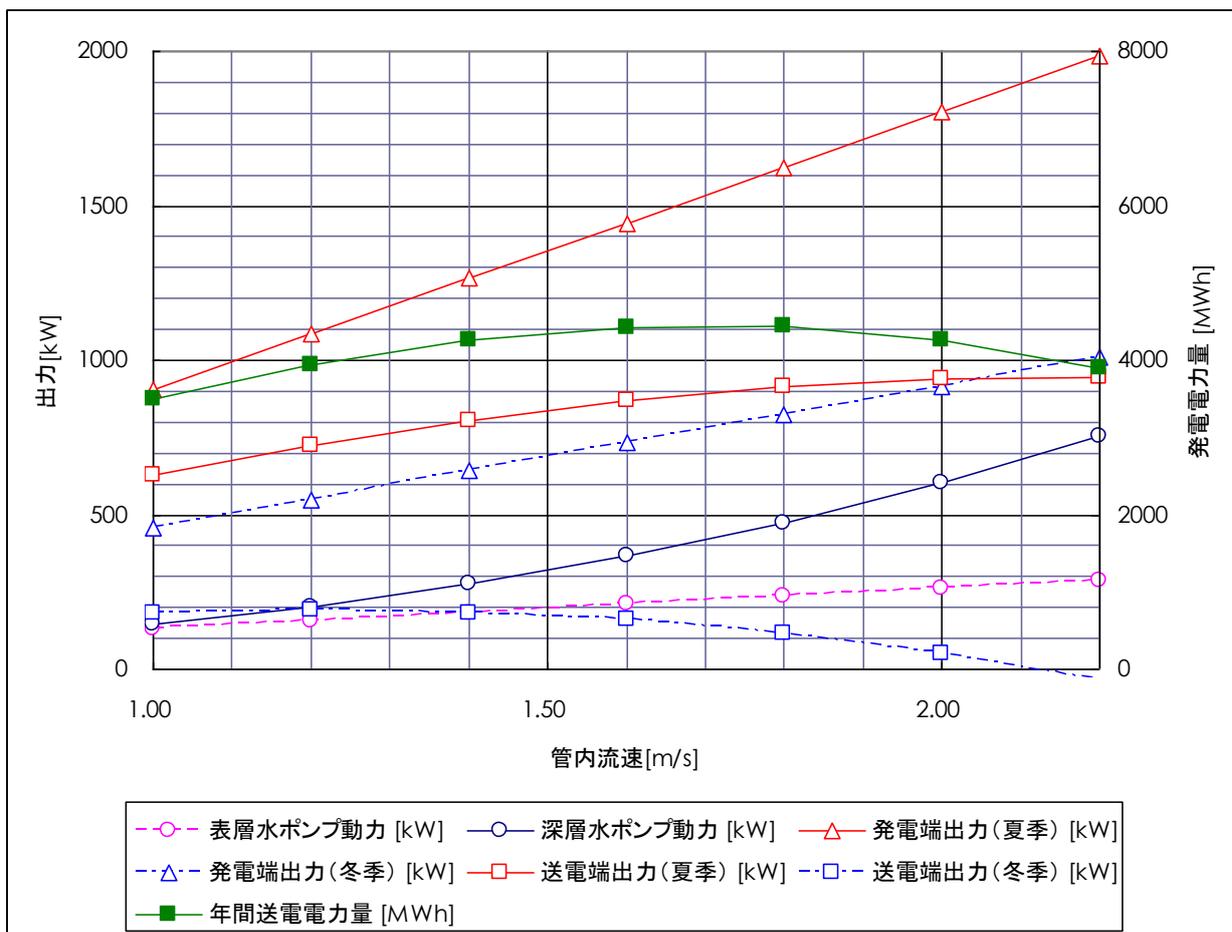


図 6-4 深層水取水管内流速に対する出力等の変化 (深層水取水管：外径 1.0m×2 条ケース)

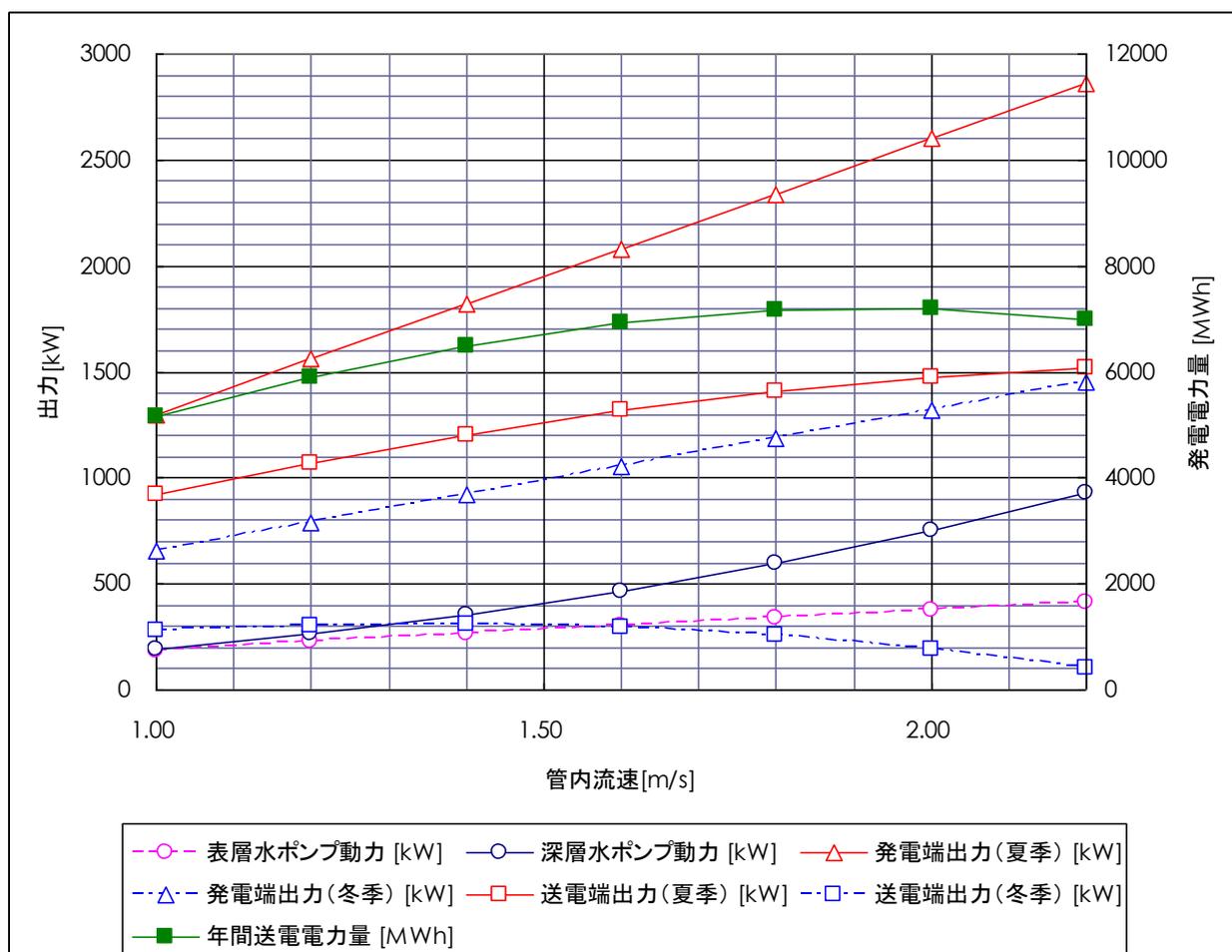


図 6-5 深層水取水管内流速に対する出力等の変化（深層水取水管：外径 1.2m×2 条ケース）

このうち、および第 7 章で検討している取水管敷設費用に関する感度分析、第 8 章で述べる発電後のカスケード複合利用の必要量、6.1.1 項で検討した発電端出力に見合う仕様であること等を考慮に入れ、下記の通り表 6-7 に示す取水量および取水管径を選定した。

外径 1.0m(内径 0.92m, SDR=26)および外径 1.2m(内径 1.11m, SDR=26)の取水管の同一管内流速における流量の比率は、69:100 である。一方、外径 1.0m と外径 1.2m の取水管の敷設費の比率は、91:100 である(図 7-14 参照)。つまり、外径 1.0m の取水管は、外径 1.2m の管に対して、流量が 31% 小さいものの敷設費用は 9%しか低くならない。深層水流量は、発電量だけでなく、複合利用設備の経済効果にもほぼ比例的に影響を及ぼすため、外径 1.2m の管の方がより経済的であると言える。また、あまりに深層水汲み上げ量が多い場合、需要設備側で利用しきれない恐れもあるが、第 8 章での検討の通り外径 1.2m の管 2 条で汲み上げる流量に対応する需要は、取水場所後背地で十分に確保できる。したがって、管径として外径 1.2m(内径 1.11m, SDR=26)×2 条を選定した。

次に、管内流速については、図 6-5 の「年間送電電力量」に示す通り、流速 2.0m/s 付近で極大となる。つまり発電設備としては流速 2.0m/s 付近での経済性が高い。一方、6.1.1 項で検討した発電端出力の目標値は 1,000~2,000kW であり、図 6-5 の「発電端出力(夏季)」から流速約 1.5m/s を超えると夏季の発電端出力が 2,000kW を超えてしまうことが分かる。そこで、本検討では流速として 1.4m/s を選定し、

プロジェクト実現後の運用でさらに発電端出力を増加しても電力系統上問題がなく、また深層水供給が不足した場合には取水ポンプ等を換装して流速を上げ取水量を増やす余地を残す計画とした。

表 6-7 取水管径・取水量に関する検討結果

項目		数値
深層水取水管径		外径 1.2m×2 本
取水量	深層水	9,710 m <sup>3</sup> /h (日量 233,000m <sup>3</sup> ) ※取水管内流速 1.4m/s
	表層水	12,150 m <sup>3</sup> /h

(3) 月別出力および年間発電量

(1)および(2)で検討した仕様での、月別発電端出力を図 6-6 に示す。

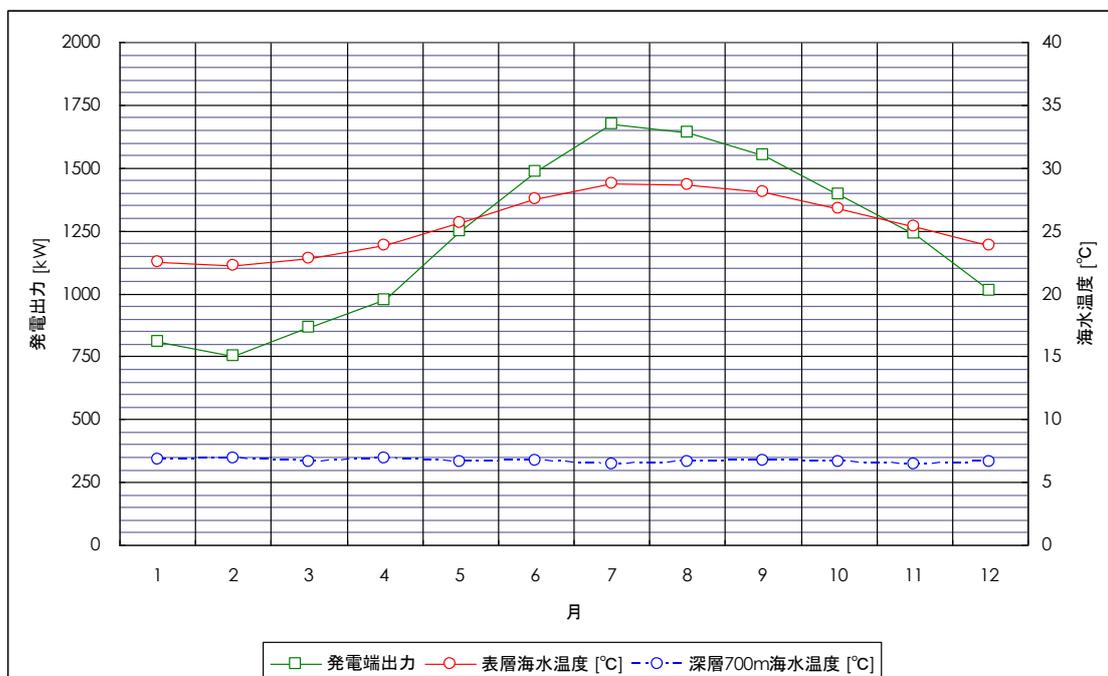


図 6-6 月別発電端出力

## (4) 発電設備主要目まとめ

本計画の発電設備の主要目を表 6-8 にまとめる。

表 6-8 発電設備の主要目

項目		単位	数値	備考
設計条件				
表層水	流量	m <sup>3</sup> /h	12,150	
	温度	℃	年平均（定格）：25.7 夏季最高：30 冬季最低：21	
深層水	流量	m <sup>3</sup> /h	9,710	
	温度	℃	6.7(平均値) ± 0.5	
発電出力				
発電機最大出力, 力率		kVA	1,990, 90%	
発電出力	定格時	kW	1,250	年平均水温での値
	夏季最大	kW	1,770	
	冬季最小	kW	700	
自己消費電力		kW	85	定格時 発電設備内のみを考慮し、取水ポンプの消費動力は考慮しない値。
年間発電量（発電端）		MWh	10,600	
年間自己消費電力		MWh	720	
年間発電量（送電端）		MWh	9,880	

(5) 設置スペース・レイアウト

図 6-7 に本設備のレイアウトを示す。必要な設置スペースは、30m×25mとなる。

なお、表層水ポンプおよび深層水ポンプ用ポンプステーションに関するレイアウト等は、第7章で述べる。

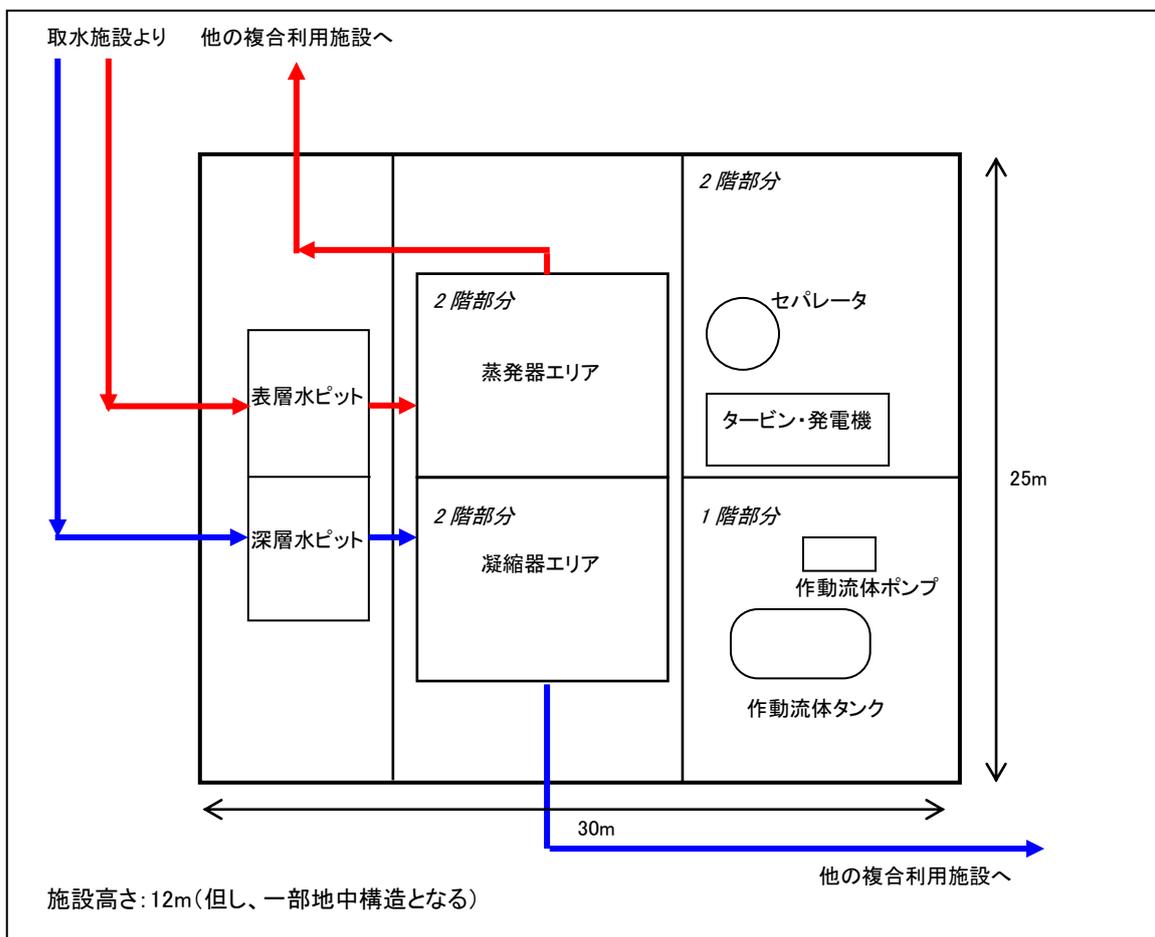


図 6-7 発電設備のレイアウト

(6) 運転・制御コンセプト

本設備の運転は、本設備用に追設された制御室内より行なう。本制御室は通常無人とし、自動運転を基本とする。ただし、設備トラブル時には、複合利用設備も含めた設備管理担当機関に対して遠隔警報を発報する。

6.1.3 建設スケジュール

本設備の建設スケジュールを表 6-9 に示す。試運転調整完了までの工期として 24 ヶ月が見込まれ、これに 3 ヶ月の実証運転期間およびその後の普及活動期間を仮定すると、合計 30 ヶ月の事業期間となる。

表 6-9 建設スケジュール

項目	1 年目						2 年目					
全体計画・詳細調査												
基本設計												
詳細設計・製作・調達												
機器の輸送												
土建工事												
機器の据付工事												
試運転調整												

#### 6.1.4 環境効果

##### (1) 化石燃料消費削減効果

本発電設備は、運転時に化石燃料を消費しない。

したがって、化石燃料消費削減効果は、本発電設備による発電量を一次エネルギー換算することにより算定できる。

我が国の省エネルギー法(エネルギーの使用の合理化に関する法律)による規定値：電力 1kWh = 一次エネルギー投入量 9.83MJ 相当，一次エネルギー投入量 1MJ = 0.0258 L-COE(Crude Oil Equivalent: 原油換算)を用いて算定した削減効果は次の通りである。

$$9,880 \text{ [MWh/年]} \times 9.83 \text{ [MJ/kWh]} \times 0.0258 \text{ [L-COE]} = \underline{\underline{2,500}} \text{ [kL-COE/年]}$$

##### (2) 二酸化炭素排出量削減効果

本発電設備は、運転時に二酸化炭素を排出しない。

したがって、本発電設備による発電量を、既存の発電所により供給した場合に排出される二酸化炭素の量が、本設備の二酸化炭素排出量削減効果となる。

沖縄電力の 2008 年度公表値 0.946kg-CO<sub>2</sub>/kWh を用いて算定した削減効果は次の通りである。

$$9,880 \text{ [MWh/年]} \times 0.946 \text{ kg-CO}_2 \text{ /kWh} = \underline{\underline{9,350}} \text{ [t-CO}_2 \text{ /年]}$$

## 6.1.5 建設及び運転費用の試算

## (1) 建設費

表 6-10 に、本発電設備における設計費、輸送費、現地工事費を含めた事業費用を示す。

表 6-10 事業費用

項目	単位	金額
1. 基本設計・詳細設計	百万円	173
2. 機械装置	百万円	1,574
(うち、回転機械類)	百万円	(493)
(うち、熱交換器)	百万円	(1,021)
(うち、容器類、補機類、その他)	百万円	(60)
3. 配管・電気・計装設備	百万円	282
4. 輸送	百万円	3
5. 土建工事	百万円	109
6. 機器据付・配管・配線工事	百万円	181
7. 試運転	百万円	68
小計 1	百万円	2,390
現場管理費、予備費、保険等	百万円	274
小計 2	百万円	2,664
一般管理費	百万円	266
合計	百万円	2,930
消費税及び地方消費税	百万円	147
総計	百万円	3,077

## (2) 運転・メンテナンス費用

運転費用は、補充用アンモニアや潤滑油などの消耗品費用として年間 5 百万円を見込む。なお人件費は、本設備は自動運転であり、常駐管理の必要がないため、ここでは割愛した。

また、主なメンテナンス費用としては以下の項目が挙げられる。

- ・タービン発電機、作動流体ポンプ等のメーカーによる定期点検(2年毎)
- ・電気事業法に基づくプラントの開放点検(2年毎)
- ・電気品および計装品の年次点検(毎年)

これらの費用は、平均でおよそ年間 10 百万円程度となる。

## 6.1.6 経済性の試算

海洋温度差発電プラントの寿命を30年として、発電単価を検討する。

ただし、表層水および深層水の使用価格については、第5章で述べたビジネスモデルに拠り決定されるが、ここではそれぞれ表層水 0.7 円/m<sup>3</sup>、深層水 0.7 円/m<sup>3</sup>とした場合の発電単価の試算を行なう。算定結果を表 6-11 および図 6-8 に示す。なお検討にあたっては、初期投資に対し公的な補助金がない場合、補助金として補助率 1/2 が適用された場合、同 2/3 が適用された場合を仮定した。

発電単価の中で、表層水および深層水の使用費の占める割合は非常に大きいことが分かる。したがって、深層水を複合利用することにより取配水費用の分散を図ることが発電単価の大幅な削減につながると言える。

表 6-11 発電単価の検討

項目	単位	数値		
初期投資に対する補助率	-	0	1/2	2/3
建設費に対する自己負担	百万円	3,077	1,538	1,026
償却年数	年	30		
運転費用	百万円/年	5		
メンテナンス費用	百万円/年	10		
表層水使用量	m <sup>3</sup> /h	12,150		
深層水使用量	m <sup>3</sup> /h	9,710		
年間発電量	MWh/年	9,880		
発電単価				
設備償却費	円/kWh	10.4	5.2	3.5
運転費	円/kWh	0.5	0.5	0.5
メンテナンス費	円/kWh	1.0	1.0	1.0
表層水使用費	円/kWh	7.3	7.3	7.3
深層水使用費	円/kWh	5.8	5.8	5.8
合計	円/kWh	25.1	19.9	18.1

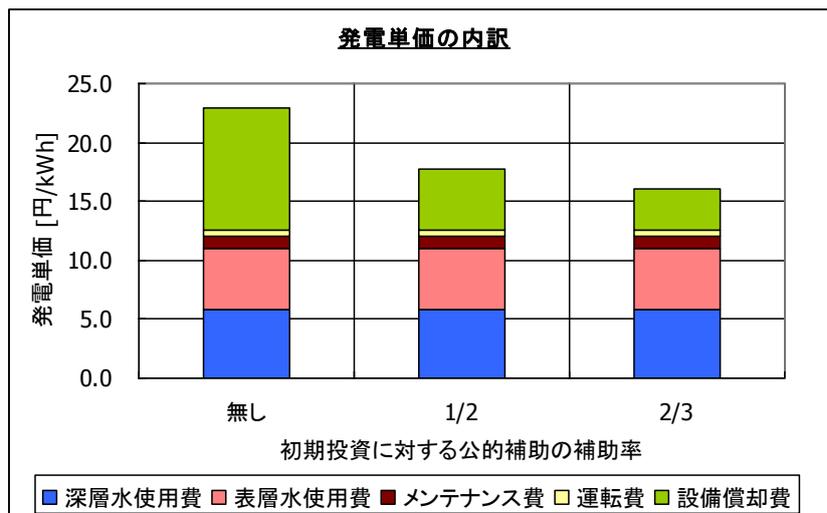


図 6-8 発電単価の内訳

## 6.2 種々の再生可能エネルギーとの特性比較

### (1) 出力の安定性

海洋温度差発電は、太陽光により温められた表層海水と、海洋の熱塩循環により極地で冷やされて深層を移動する深層海水との温度差により発電する再生可能エネルギーである。海洋の熱塩循環も、主に高-低緯度地域の太陽光の日射強度の差により引き起こされているため、海洋温度差発電も他の多くのエネルギー源と同様に、太陽光に由来する再生可能エネルギーである。

一方、太陽光発電や、太陽熱発電などと大きく異なるのは、海洋温度差発電の場合、太陽光のエネルギーを一旦温度差の形で熱容量の大きい海洋に蓄えて利用する点にある。海洋がバッファの役割を担って太陽光強度の変動を吸収するため、秒単位や分単位の温度変動がほとんど無いのはもちろん、昼夜でも表層海水の温度はほとんど変わらない。一例として、沖の鳥島における表層水の日間の温度変化を示す。一日の最高水温と最低水温との差は約 0.8℃であり、これを海洋温度差発電の出力に換算すると 4% 程度の変動にしかならない。

したがって、海洋温度差発電の発電出力も一日を通してほぼ一定となり、急激な出力や電圧、周波数などの変化をもたらすことは無い。この点が、太陽光発電や風力発電、太陽熱発電といった他の再生可能エネルギーに対して大きなメリットとなっている。

特に離島では、既存の商用電力の容量があまり大きくないため、大規模な不安定電源の導入には、大型の蓄電池等の変動吸収設備の導入が必須となる。海洋温度差発電ではこういった問題は発生しない。



図 6-9 沖の鳥島における日間の表層水の温度変化 (2009 年 8 月 1 日)

出典：JAMSTEC 沖の鳥島観測データベースよりグラフ化

(<http://www.jamstec.go.jp/j/database/okitari/index.html>)

## (2) 海洋深層水汲み上げの副次効果

海洋深層水は、低温性だけでなく清浄性、富栄養性といった特長を有しており、我が国における海洋深層水取水地では、こういった特長を生かした産業が展開されている。久米島においては、海洋深層水関連企業の売上が年間 20 億円に達し、島内人口の約 2%にあたる 139 人の新たな雇用が生み出された。このような地元での新産業・雇用創出効果は、他の再生可能エネルギーには見られない特長である。

また、海洋温度差発電に利用された後の深層水の温度は約 10～15℃と低温であり、空調などに副次利用が可能である。海洋温度差発電の適地は熱帯・亜熱帯であるため空調の需要は高く、この面でも低炭素型社会に貢献できる。

## (3) 発電単価

NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が 2010 年 7 月に刊行した「再生可能エネルギー白書」では、2015 年における 1MW 級プラントの発電コストの目標値として、40～60 円/kWh を定めている。一方、本調査で試計画を行なった出力 1,250kW(1.25MW)のプラントの発電単価は 25.1 円/kWh と、上記目標値より安価となっている。これは、深層水取水コストを、他の複合利用設備と案分することにより低減させることが出来たからである。

技術開発目標			
	2015年	2020年	2030年
国内企業の育成、 国際競争力の強化	1MWプラント の実証試験	・商用プラントの運用開始 ・国内導入の促進	・プラント出力の大型化 ・世界市場シェアの拡大
プラント規模	～1MW	～10MW	～50MW
発電コスト	40～60円 /kWh程度	15～25円/kWh程度	8～13円/kWh程度

図 6-10 海洋温度差発電の技術開発目標

出典：NEDO, 「再生可能エネルギー白書」, 2010

一方、代表的な再生可能エネルギーによる発電方式である太陽光発電および風力発電の現在の発電単価はそれぞれ、37～46 円/kWh(住宅用太陽光発電)、9～15 円/kWh(陸上設置風力発電)とされる<sup>23</sup>。本発電プラントの発電単価 25.1 円/kWh は太陽光発電および風力発電の中間に位置し、それぞれが適材適所で活用されて循環型社会の構築を担うことが期待される。

<sup>23</sup> 出典:NEDO, 「再生可能エネルギー白書」, 2010

### 6.3 海洋温度差発電に関わる許認可方法と運営方法の整理

#### 6.3.1 海洋発電設備の設置に関わる法体系の整理

海洋温度差発電のプラントを設置していく上では、いくつかの遵守すべき法律がいくつかある。ここでは発電設備の設置段階に関わる法律について概観する。

海洋温度差発電は発電設備であるため当然のことながら電気関係の法規が大きく関わってくる。このうち電気事業に関する法律としては電気事業法がある。また、電気施設の保安に関する法律としては、電気事業法の他に電気工事士法、電気用品安全法、電気工事業法がある。

なお、この他にも発電用の媒体であるアンモニアの貯蔵や電気火災という面からは消防法、労働者の感電等の事故防止という面から労働安全衛生法、発電所からの公害防止という面からは騒音規制法、建築物という観点からは建築基準法などが関わってくる。

これら関係法令のうち、海洋温度差発電設備の設置者にとって最も関連の深い法律は電気事業法であるといえる。電気事業法自体は法律であるため、具体的な定義や基準などは「電気事業法施工規則」を始めとする関連省令に定められている。以下では電気事業法及び関連する省令を中心に法体系を整理する。

表 6-12 海洋温度差発電設備の設置に関連する法律及び省令等（主要）

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・電気事業法</li> <li>・電気事業法施工規則(通商産業省令第 77 号)</li> <li>・発電用火力設備に関する技術基準を定める省令(通商産業省令第 51号)</li> <li>・電気設備に関する技術基準を定める省令(通商産業省令第 52 号)</li> <li>・高圧ガス保安法</li> </ul> |
|--|

#### 電気工作物の定義

電気事業法および電気事業法施工規則の第 3 章で、電気工作物の定義付けがされている。これによると「電気工作物」は「事業用電気工作物」と「一般用電気工作物」に大別され、「事業用電気工作物」のうちで、電気事業の用に供する電気工作物以外のものを「自家用電気工作物」と定義している。これによると、事業主体にもよるが海洋温度差発電設備は基本的に「自家用電気工作物」に相当することとなる。以下の検討では「自家用電気工作物」として扱う場合の各種手続きに関して整理を行う。なお、海洋温度差発電は、電気事業法の分類上は火力発電で汽力を原動機とするものに分類される。

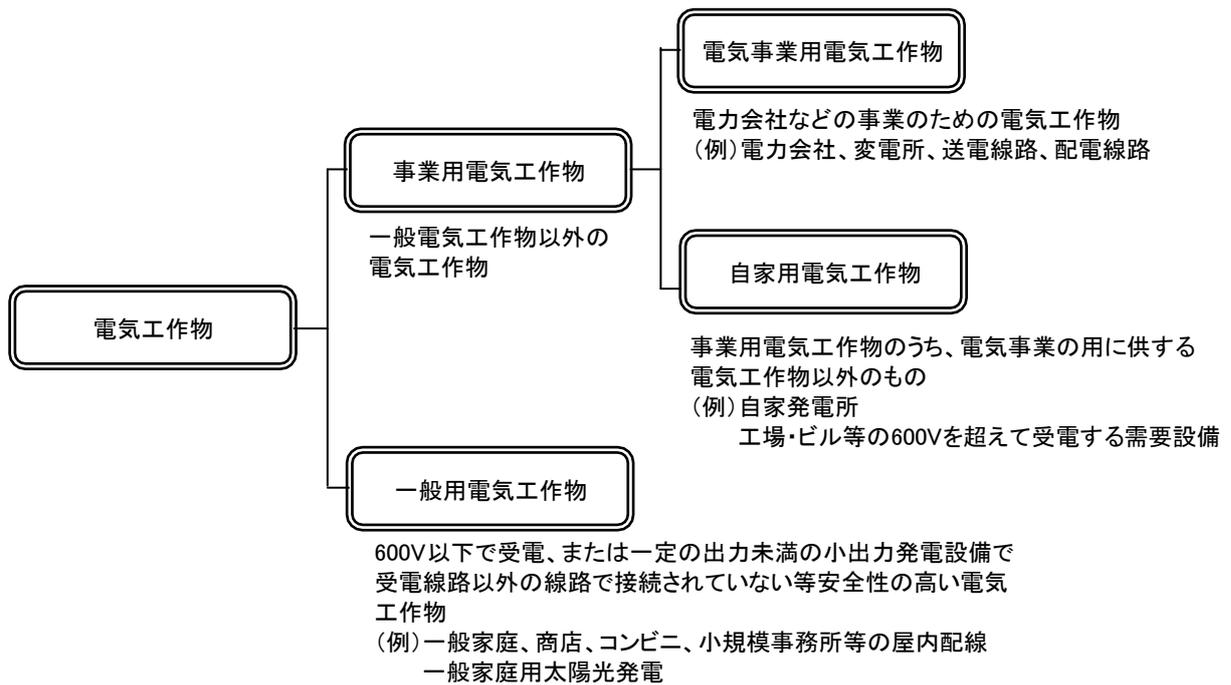


図 6-11 電気工作物の種類

### 電圧の種類と使われ方

電気設備技術基準には、電圧の種別として、「低圧」、「高圧」、「特別高圧」に分類されている。関連法令を理解する際や電力会社との連系協議の際などに必要となる基本事項である。今回想定している1000kW級の海洋温度差発電では基本的に6000V級の高压系統への連系が想定されている。

低 圧:直流は750V以下、交流は600V以下のもの

高 圧:直流は750Vを、交流は600Vを超え、7000V以下のもの

特別高圧:直流は7000Vを超えるもの

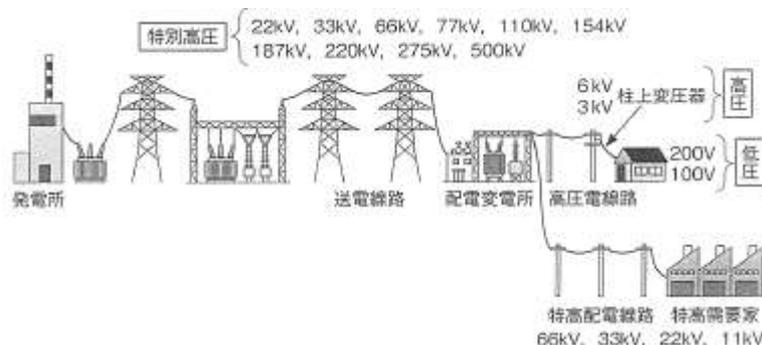


図 6-12 電気工作物の種類

### 6.3.2 海洋発電設備の設置に関する行政面の手続き

海洋温度差発電設備を設置するには、電気事業法を遵守し、同法に基づいて定められている電気

事業法施行規則によって定められている諸手続きを行わなければならない。工事計画、主任技術者の選定、保安規程などの手続きが必要になる。このうち主任技術者に関する事項については、発電機の実出力容量や連系先の系統電圧によって若干異なる。

さらに、発電設備設置者が電力系統に連系を行う際には、これら行政面の手続きの他に、電力会社との系統連系協議を並行して行わなければならない。これら手続きのフローを図 6-13 に示す。

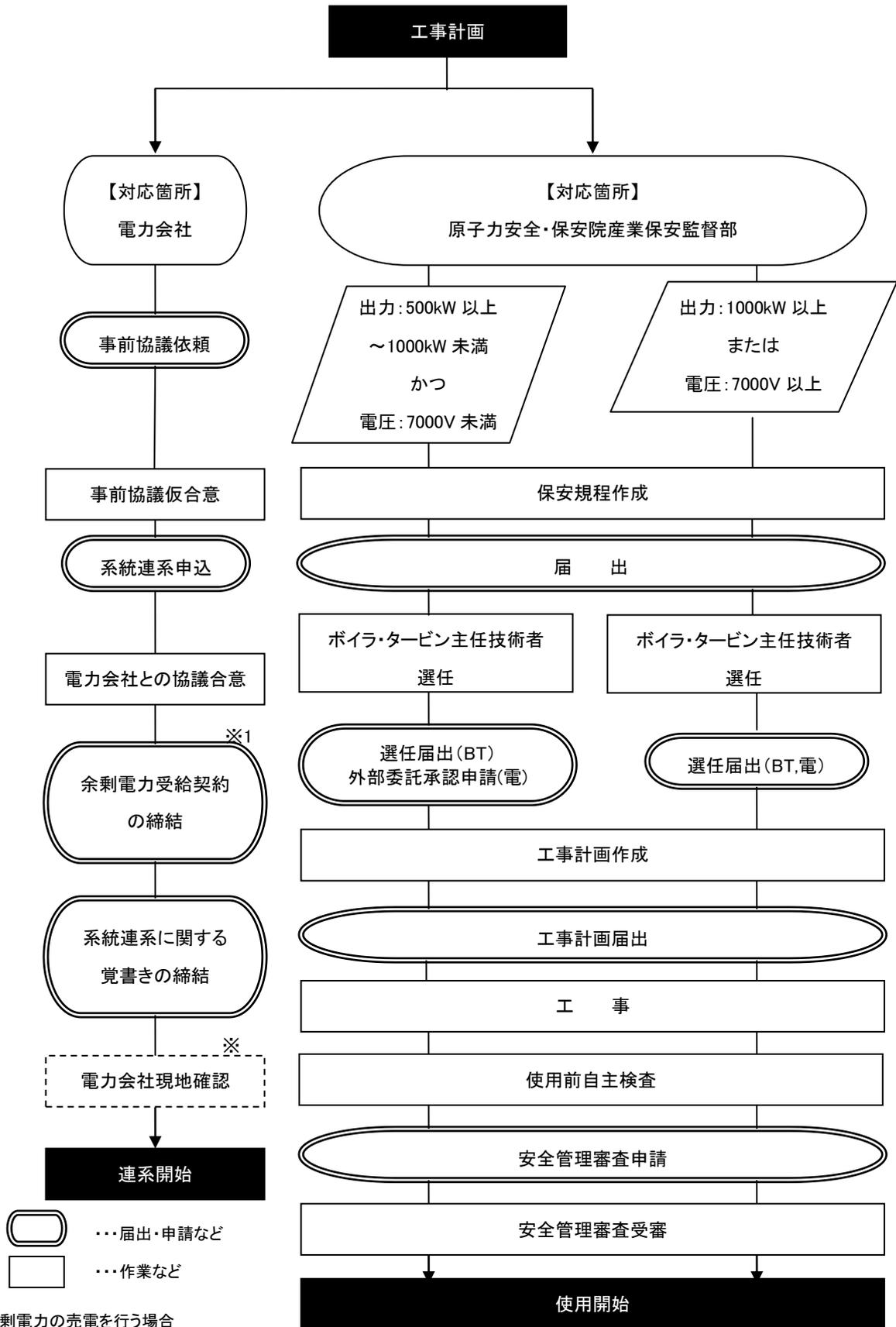


図 6-13 手続きフロー

### 主任技術者の選任

発電設備の工事、維持及び運用に関する保安の監督をさせるために、主任技術者免状の交付を受けている者のうちから主任技術者を選任し、経済産業大臣又は原子力安全・保安院産業保安監督部長に届け出なければならないことが法令に定められている。

選任すべき主任技術者の免状としては、海洋温度差発電では、工事段階、運用段階ともに電気主任技術者とボイラ・タービン主任技術者を選任しなければならない。(運用段階においては発電所に対してはボイラ・タービン主任技術者、電気設備に対しては電気主任技術者がそれぞれ担う。)

ただし、7000V 未満の受電設備または出力 1000kW 未満の発電所については、電気保安協会などの法人等もしくは電気管理技術者の個人事業者に、「保安管理業務」を外部委託する場合は、その所在地を管轄する産業保安監督部長の承認を得れば、電気主任技術者を選任しなくても外部委託でもよいことになっている。

ボイラ・タービン主任技術者の選任については、原則として主任技術者の資格のある者をその任に当てることが基本となるが、場合によっては学歴・経験等一定の要件を満たすものであれば、産業保安監督部長の許可を受けることで、その免状の交付を受けていない者であってもよいことになっている。この制度を許可主任技術者という。(海洋温度差発電では出力 5000kW 未満かつ圧力 1470kPa 未満であることも必要。)

### 保安規程の届出

海洋温度差発電設備のような自家用電気工作物を設置する者は、工事、維持及び運用に関する自主保安体制の整備確立を図るため、自ら保安規程を定め、使用の開始前に産業保安監督部長に届け出なければならない(表 6-13)。既設の自家用電気工作物があって、これに発電設備を増設する場合などには、すでに届出してある保安規程の変更として、改めて手続きを行うことになる(保安規程変更届出書)。

表 6-13 保安規程の内容と必要な添付書類（参考）

保安規程で定めるべき内容 (電気事業法施行規則第 50 条第 1 項)		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工事、維持又は運用に関する業務を管理する者の職務及び組織</li> <li>・ 工事、維持又は運用に従事する者に対する保安教育</li> <li>・ 工事、維持又は運用に関する保安のための巡視、点検及び検査</li> <li>・ 運転又は操作に関すること</li> <li>・ 発電所の運転を相当期間停止する場合における保全</li> <li>・ 災害その他非常の場合にとるべき措置</li> <li>・ 工事、維持又は運用に関する保全についての記録</li> <li>・ 必要な事項</li> </ul>
添付書類	通常(自家用電気工作物)の場合 に必要とされるもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 設備の概要</li> <li>・ 単線結線図</li> <li>・ 命令、連絡体制</li> </ul>
	発電設備を系統連系する場合に 追加で必要となるもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 系統連系技術要件の適合状況表(写しで可)</li> <li>・ 電力会社の承諾を得た旨の承諾書など(写しで可)</li> </ul>

保安規程の届出は、設備の使用開始前に届出すればよいが、実際には施工面の技術基準への適合性や工事に関する保安確保についても適切に評価・判断されなければならない。したがって、工事着手前に作成して届出することが望ましい。また、保安規程の内容には電力会社の系統連系に関する承諾書も必要となるので、連系協議についてもタイミングよく進めておく必要がある。

### 工事計画

海洋温度差発電設備(汽力発電所)の場合には、その所在地を管轄する産業保安監督部長に工事計画を届け出なければならない。また、計画の変更を行う場合にも、届出が必要である。ただし、届出が受理されてから 30 日を経過した後でなければ、工事を開始してはならないので、注意が必要である。

- ① 全体配置平面図に電気使用区域(発電所管理範囲)を明記する。発電設備が複数の敷地(公道を挟むなど)に設置される場合には、別々に工事計画届出書を提出する。
- ② 発電用火力設備に関する技術基準の適合状況についての説明を明記する。
- ③ 電気設備技術基準の適合状況についての説明を明記する。
- ④ 工事の進捗に伴い、工事計画届出と現場に相違が生ずる場合は、その都度変更届を提出する。
- ⑤ また、これらの届出に際して必要な届出書類が電気事業法施工規則の別表第 3 にまとめられている。

### 使用前自主検査

海洋温度差発電設備の場合は発電出力に関わらず使用前自主検査を実施する必要がある。適切な使用前自主検査の方法については、電気事業法施行規則に規定されているが、近年の関係省令の改正に伴い、その都度「技術基準の解釈」が経済産業省原子力安全・保安院より規定され、この中で検査

方法、判定基準が明確化されている。

#### ア) 使用前自主検査要領書

当該発電所が、発電用火力設備に関する技術基準及び電気設備技術基準を満足していることを確認するために、使用前自主検査用要領書を検査開始前に定める(表 6-14)。

表 6-14 使用前自主検査要領書の内容 (例)

項 目	備 考
①検査年月日	検査記録様式を定め、検査年月日を確実に記録できるようにする。
②検査の対象	検査対象は、工事計画届を行った発電設備とし、その他の発電設備の自主検査とは区別する。
③検査の方法	具体的に記載し、判定基準を明確にする。 添付資料、検査方法及び判定基準
④検査の結果	検査記録様式を定め、必要な記録事項を網羅する。
⑤検査を実施する者の管理	検査を実施する者が十分な能力を有することを確認できる基準を明確にする。
⑥検査結果に基づいて処理するときの方法	検査の結果、不具合・不適合等が出た際の処置方法を明確にする。
⑦検査実施に係る組織	主任技術者を頂点にした指揮命令系統を明確にする。
⑧検査実施に係る工程管理	検査を行う適切な時期を明確にする。受電前に実施する自主検査と受電後に実施する自主検査を明確にする。
⑨検査に協力する事業者の管理	検査に協力する事業者の能力の確認基準を明確にする。
⑩検査記録の管理	記録の管理方法・管理場所・保管期限等を明確にする。
⑪検査に係る教育訓練	教育訓練の方法、時期を明確にする。
⑫測定器、試験装置の一覧	使用する測定器、試験装置の校正有効期限を明確にする。

#### イ) 使用前自主検査記録

使用前自主検査記録では、検査要領書で定めた検査項目、検査方法を忠実に実施する。記録を作成する際には、表 6-15 の各項目を主任技術者が確認し、明確にする。

表 6-15 使用前自主検査記録の内容（例）

項 目	備 考
①検査実施者の管理	所定の資格を有しない検査員が参加する場合、経歴書等で実績を確認し、事前に主任技術者の承認を得ること。
②検査実施に係る工程管理	計画工程と実施工程を明記、相違が生じた場合はその理由を明記する。
③検査に係る教育訓練に関する事項	教育内容、受講者氏名の他、教育担当者の氏名及び検査組織上の担当者を明記する。
④検査に使用した測定器、試験装置に関する事項	使用した測定器、試験装置の校正有効期限のトレーサビリティを主任技術者が確認したことを明確にして、校正証明書を添付する。
⑤不具合等に対し処置を講じた場合の対応・処置	検査時の不具合は、その内容、原因、対策を明記し再発防止を講じる。

### 使用前安全管理審査

使用前安全管理審査は使用前自主検査と対になるものである。発電所完成後、届け出た内容通りに工事が行われ、技術基準に適合していることを確認するために十分な方法で検査し、かつ記録が残されているかを国または登録安全管理審査機関が確認するものである。

### 6.3.3 電力会社との協議（連系協議）

商用電力系統への連系については、電気事業法には特段の規定はなく、電力会社と発電設備設置者との協議に委ねられている。この協議に際して技術的な要件を判断するための基準として、「電力品質確保に関する系統連系技術要件ガイドライン」が定められている。電力会社との協議や調整には 1～2ヵ月程度（風力・太陽光発電の場合）を要するといわれているので、設計計画・検討の早い段階で電力会社と調整作業に入ることが望ましい。

連系協議の進展に応じ、電力会社に必要な資料を提出することになるが、それぞれの書式は電力会社によって異なるので、窓口で相談する必要がある。電力会社との協議・手続き内容を表 6-16 に示す（図 6-13 に示す手続きフローも参照）。

本事業の実施に際しても、実仕様に基づく詳細な調整が必要となる。また、今後の再生可能エネルギーに関する法規制の変更などがあった場合、手続きも変更となる可能性がある。

表 6-16 系統連系の協議・手続き

項 目	内 容
事前協議	系統連系紹介による営業的条件、技術的条件の検討を行い、連系方法に関して電力会社と協議する。
系統連系申込	事前協議の仮合意を得たら、電力会社に正式に系統連系を申し込む。電力会社で系統連系の技術検討、協議、必要な事前確認が行われる。
契約の締結	連系協議の合意が得られたら、電力会社と契約書の締結を行う。電力会社は系統連系に必要な工事の施工を行う。 また、必要により余剰電力売買契約もあわせて行う。
竣工検査(現地確認)	施工完了後の自主検査の際に、電力会社が連系協議内容に基づいているか検査を行う。

### 系統連系に関する手続き（風力発電の例）

事前協議は、発電システムの概要、連系する系統、系統連系希望日、単線結線図、機器・保護継電装置の仕様等を電力会社に提出し、これらについて前準備的な協議を行う。これにより合意が得られた場合に、系統連系申込みを行うことが可能となる。

系統連系の申込みの際には、電気使用申込書、高圧受電希望書、高調波流出電流計算書、系統連系申込書等を提出し、「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン」や電力会社の電気供給約款に基づいた本協議に入り、申請内容の照合、電圧・力率・高調波等の検討が行われる。このときに、「系統連系規程(JEAC 9701-2010)」に例示されている資料の提出が必要となる。

発電機の詳細項目に関しては、2003年に(社)日本電機工業会風力発電システム技術専門委員会が「分散型電源系統連系技術指針」および各電力会社の申請フォーマットを調査・検討した記載書式が参考になるので、これの一例を表 6-17 に示す。

なお表 6-17 は一例であり、実際には連系先の電力会社の要求内容、書式に準じて提出することが必要となる。

連系協議の合意に至った後、電力受給契約書、工事負担金契約書、自家用発電設備の並列運転に関する契約書等に調印し、受給契約、系統連系契約、運用申合せの締結を行い、設置工事に移る。これに伴い、受給用電力量計や余剰電力販売用電力量計の取り付けが行われる。系統連系を行うことにより必要になった計算器や安全保護装置の設置、修理、管理費等の費用は、原因者負担の原則に則り一般的に連系申請者が負担することとなる。

表 6-17 電力会社との系統連系協議に必要な資料例

【参考】風力発電の場合の一例

出典：風力発電導入ガイドブック/分散型電源系統連系技術指針

	系統連系協議資料例	主な検討項目
共通	保護装置のガイドラインとの適合性等の説明	同左
	逆潮流の有無に関する説明 <ul style="list-style-type: none"> <li>最大出力値、連系点での最大逆潮流値、最大受電値</li> </ul>	連系の適用区分(逆潮流の有無) 常時電圧変動
	受電設備構成 <ul style="list-style-type: none"> <li>単線結線図による継電器、計器用変成器等の設置図</li> </ul>	解列箇所 保護協調等の確認
発電機	発電機に関する事項 <sup>(1)</sup>	
	逆変換装置を用いて同期発電機を系統連系する場合 (DC リンク方式) <別表参照> <ul style="list-style-type: none"> <li>交流出力に関する定格 定格容量、定格出力、定格電圧、定格力率等</li> <li>逆変換装置 過電流(短絡電流)制御値 逆変換器ゲートブロック電流値 高調波電流(総合、各次) 交流出力側限流リアクトル(有・無)とその仕様</li> <li>自動制御装置(機能) 自動同期投入装置(有・無) 自動力率調整装置(有・無)</li> </ul>	常時電圧変動 保護協調(リレーの整定) 臨時電圧変動 瞬時電圧変動 電力品質 瞬時電圧変動 瞬時電圧変動 常時電圧変動
保護	系統連系用保護継電器に関する事項 <ul style="list-style-type: none"> <li>シーケンス、メーカー、形式、特性、整定範囲等</li> <li>単独運転検出機能(原理、整定値等)</li> </ul>	保護協調 (保護継電器の種類、整定、設置箇所の確認) 保護協調(単独運転防止)

<p style="text-align: center;">機 器</p>	<p>系統連系用保護継電器に関する事項</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 進相コンデンサ(形式、容量等)</li> <li>・ 遮断器(種別、遮断容量、遮断時間等)</li> <li>・ 開閉器(種別、開閉容量)</li> <li>・ 変圧器(種別、容量、パーセントインピーダンス等)</li> <li>・ 中性点接地装置(種別、抵抗値、リアクトル容量)</li> <li>・ 機器定格、型式、制御方法等の基本事項</li> <li>・ 保安通信設備(種別、方式: 低圧連系は除く)</li> <li>・ 計器用変成器(VT、CT: 仕様、使い方)</li> </ul>	<p>力率、常時電圧変動</p> <p>短絡容量</p> <p>開閉容量</p> <p>瞬時電圧変動、常時電圧変動</p> <p>瞬時電圧変動</p> <p>連絡体制</p> <p>保護協調(VT、CT の兼用)</p>
<p style="text-align: center;">そ の 他</p>	<p>その他</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 運転体制、連絡等に関する説明</li> <li>・ 保安規程</li> </ul>	<p>連絡体制定期点検等の確認</p>

(注) (1):「系統連系規程で扱われる発電システムの種類」に示す分類を参照

## 第7章 大口径取水管の計画

### 7.1 大口径取水管技術の近年の動向

大口径の深層水取水管技術は、現在浮体式構造物による取水用として検討が進んでいる。

2004年から5年間に渡り社団法人マリノフォーラム 21 が相模湾で実証実験を実施した浮体式の海洋肥沃化装置「拓海」(図 7-1、図 7-2)では、直径 1.0m、長さ 200m の鋼製取水管を、アペンディクス方式と呼ばれる水中自由落下方式(図 7-3)で敷設することに成功した。

また、米国で海洋温度差発電装置の開発を再開したロッキード・マーチン社は、2008年に米国エネルギー省からの支援を受け、FRP の内外殻に比重の軽いポリマー系素材を挟み込んだサンドイッチ方式の大口径取水管を浮体上で製造すると同時に吊下ろして敷設する方法を開発中である。

一方、陸上の取水設備から取水する取水管については、2002年秋にハワイ州自然エネルギー研究所(NELHA: Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority)に敷設された直径 1.4m $\phi$  (取水水深 915m、管延長 3,124m、高密度ポリエチレン製)の取水管以降、技術的に大きな進展は見られていない。

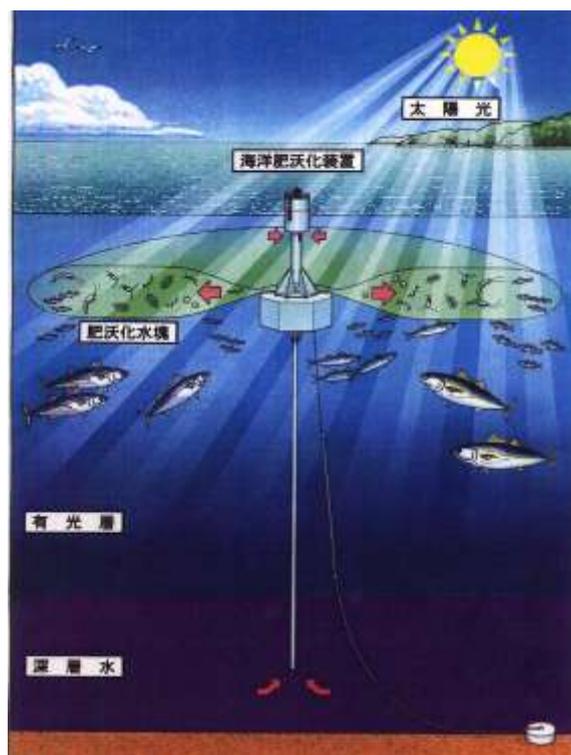


図 7-1 浮体式の海洋肥沃化装置「拓海」コンセプト図

提供：社団法人マリノフォーラム 21



図 7-2 「拓海」のライザー管  
提供：社団法人マリノフォーラム 21

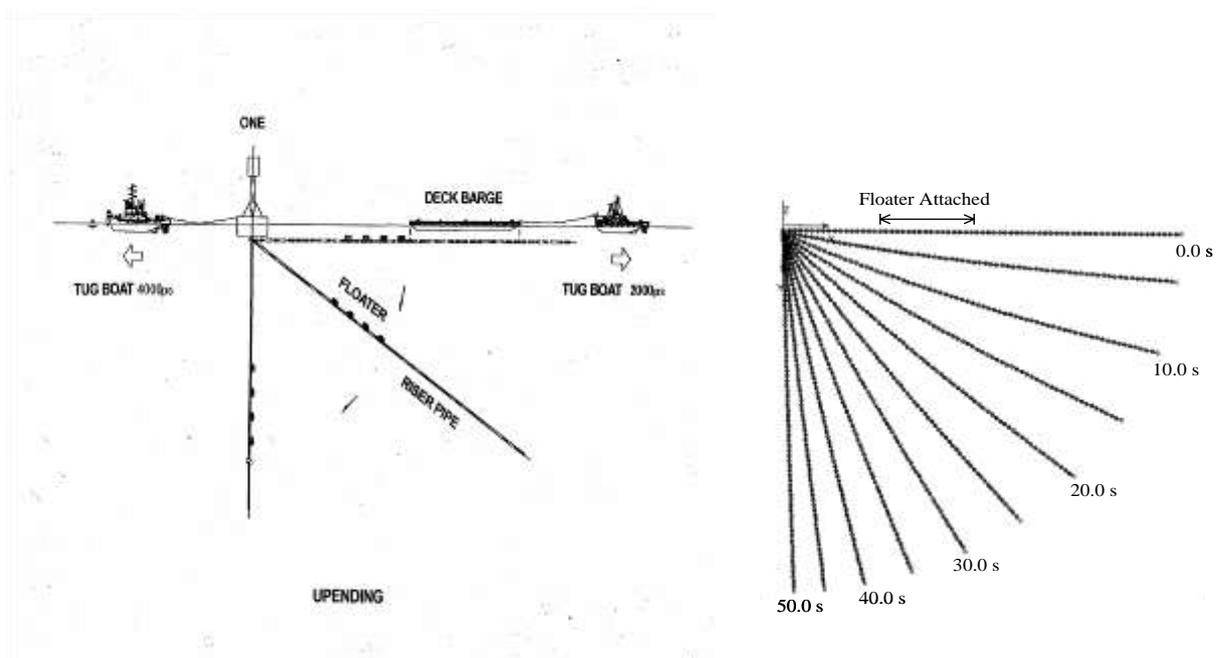


図 7-3 「拓海」で採用されたアペンディクス方式  
提供：社団法人マリノフォーラム 21

## 7.2 深層水取水設備の基本計画

### 7.2.1 取水管敷設ルートを選定

久米島では、2000年の沖縄県海洋深層水研究所建設の際、島周辺の海底地形を調査し、現在の研究所の真謝地区が最適な位置として選定された経緯がある。

したがって、本計画においても、同地区において最適取水位置を選定した。

取水管の埋設が必要となる水深50m未満の浅海域は敷設工費が高くなること、また、取水管をあらかじめ融接するためのパイプヤードとして広い後背地を利用できることが望ましいことから、**図 7-4** に青線で示した敷設ルートで検討を実施した。



### 7.2.2 取水管材質の選定

取水管の材質の候補としては、高密度ポリエチレン(鉄線鎧装あり/無)、FRP 管、鋼管(ポリエチレンライニング)等が挙げられる。

久米島周辺の海底地形は比較的凹凸が多いため、十分な可とう性を持つことが要求される。このため本計画では最も可とう性が高く、また NELHA にて直径 1.4m の管の敷設実績がある高密度ポリエチレンを選択した。なお、費用削減のため鉄線鎧装は用いず、敷設時の張力は管外に高張力ワイヤーを設備することで対応することとした。

### 7.2.3 取水管径の検討

配管径は、第 6 章での検討に従い、外径 1.2m φ × 2 条とする。また、強度上の要求から SDR(Standard Dimension Ratio: 基準外径と最小厚さの比)=26 の肉厚を採用する。

### 7.2.4 取水管敷設方法の検討

取水管の敷設方法は、浮遊曳航法と海底曳航法とに大別される(図 7-5, 図 7-6)。

本計画では、大口径管であることから管の損傷リスクの小さい浮遊曳航法を採用することとした。

まず陸上の長管製作・引出しヤードにて、定尺 10m の短管を 30 本融着し 300m の長管をあらかじめ製作する。その後、長管引き出しタグボートおよび DPS 船により、長管を融着しつつ敷設する。

図 7-7、図 7-8 に、本計画における長管製作・引出しヤードの概要と取水管敷設要領(水深 800m ケース)をそれぞれ示す。

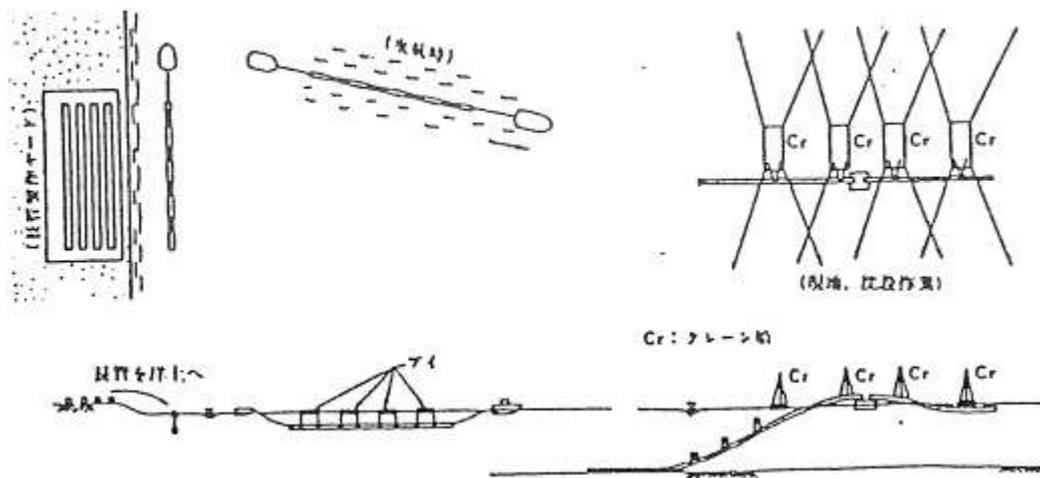


図 7-5 浮遊曳航法概念図

出典：昭和 63 年度研究報告書(冷水取水 WG 資料編)，海洋温度差発電研究会

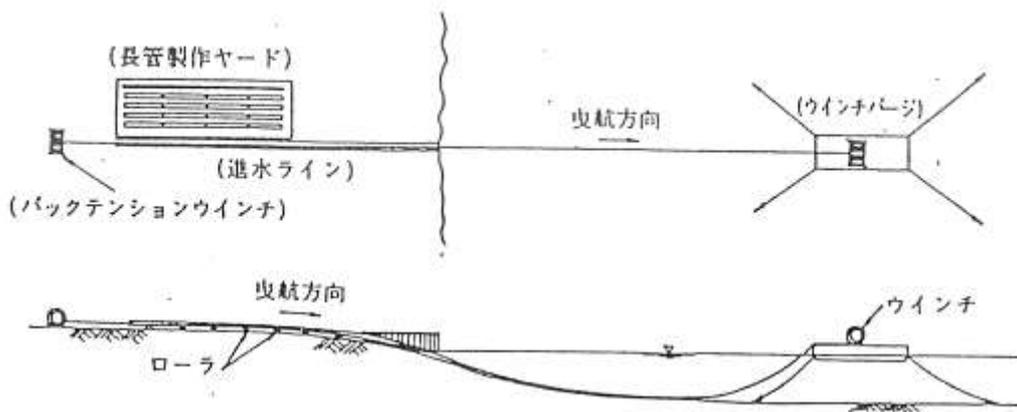
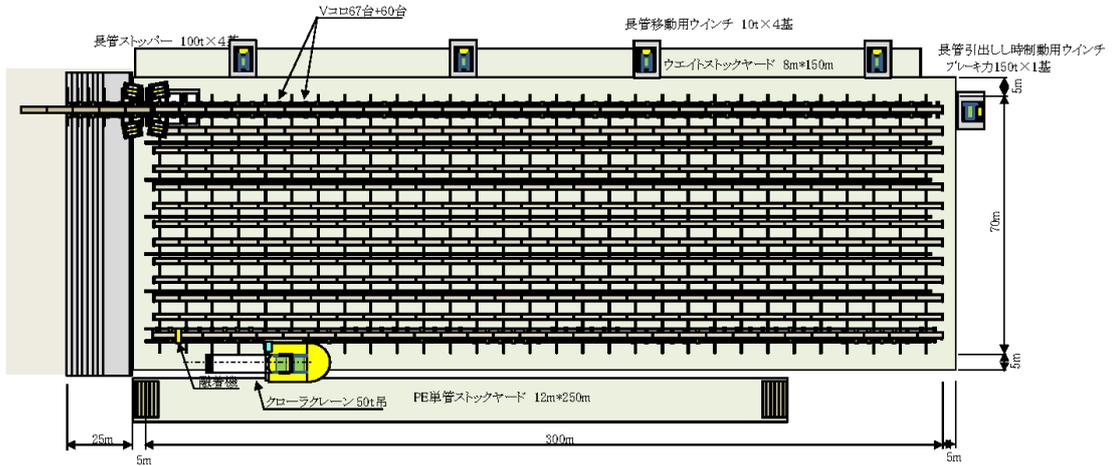


図 7-6 海底曳航法概念図

出典：昭和 63 年度研究報告書（冷水取水 WG 資料編），海洋温度差発電研究会



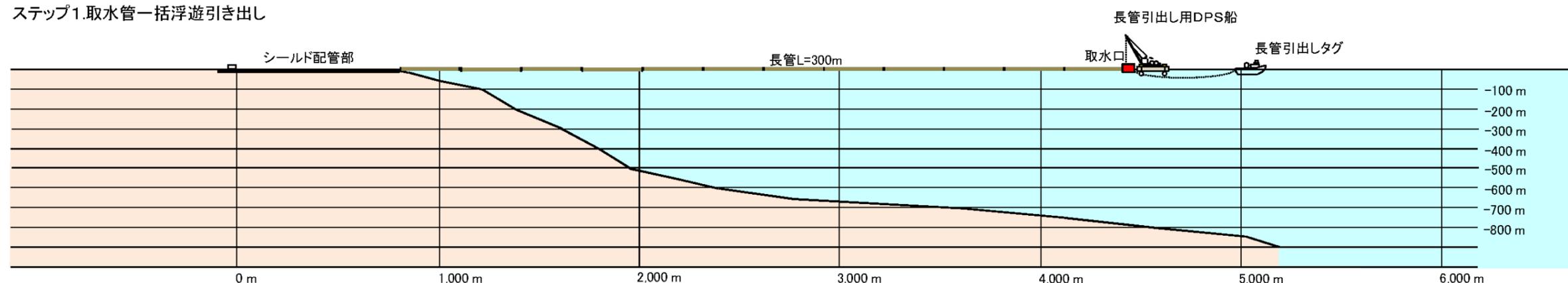
◇1条案/2条案共通		水深:-800m	水深:-700m	水深:-600m
道床敷き均しt=30cm	再生砕石RC-40	9,300.0 m <sup>3</sup>	7,905.0 m <sup>3</sup>	6,045.0 m <sup>3</sup>

フルドーザ<sup>3</sup>15t 敷均し締固め、RC-40(購入品)

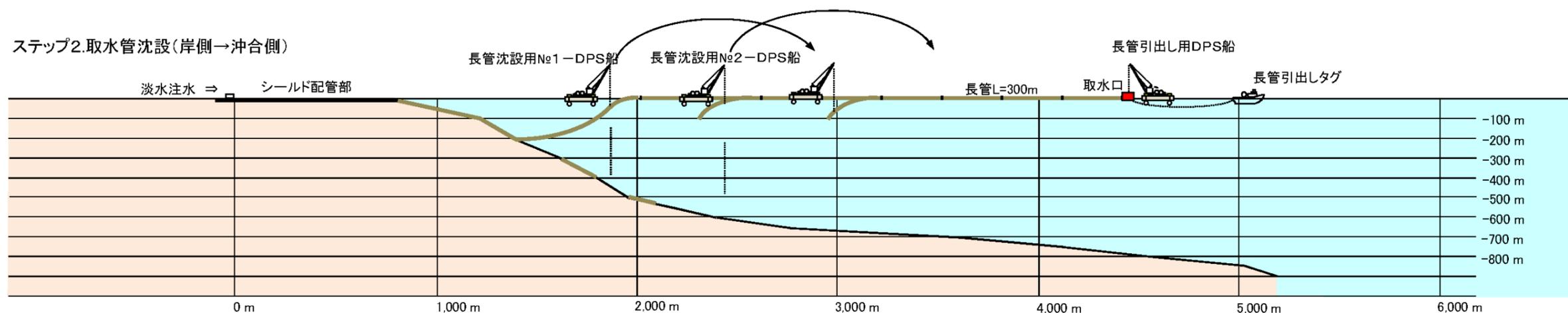
図 7-7 長管製作・引出しヤードの概要

冷水取水管敷設要領(浮遊曳航法:陸側から敷設)

ステップ1.取水管一括浮遊引き出し



ステップ2.取水管沈設(岸側→沖合側)



ステップ3.取水口沈設

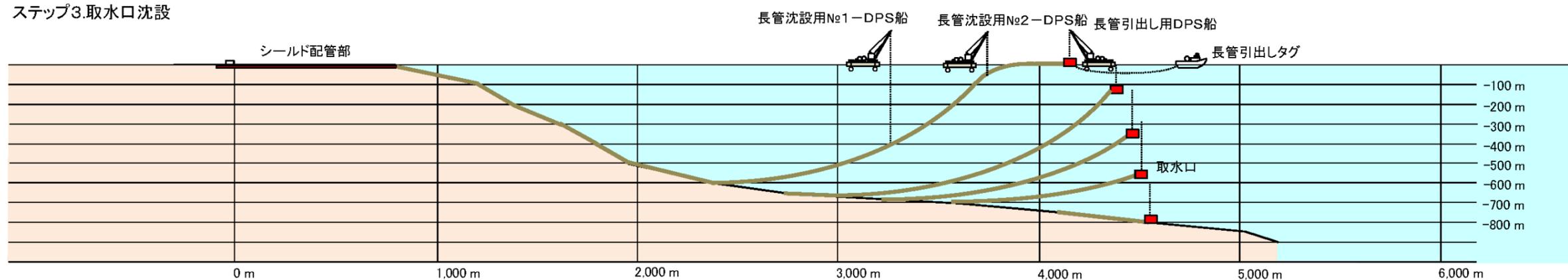


図 7-8 取水管敷設要領 (水深 800m ケース)

### 7.2.5 取水ポンプの仕様決定

取水ポンプは、ポンプメンテナンス時の深層水利用設備の運転継続可否、およびトラブル時に対するリスク軽減(リダンダンシー)を考慮し予備機を設置することとした。さらに 50%×3 台と 100%×2 台の 2 案の概略コスト比較を行ない、より費用の小さい 50%×3 台案を採用した(表 7-1 参照)。

表 7-1 取水ポンプの仕様決定 (深層水)

評価項目		予備機なし		予備機あり	
		100%×1 台案	50%×2 台案	100%×2 台案	50%×3 台案
ポンプ 1 台停止時の影響		深層水供給停止	深層水供給半減	影響なし	影響なし
海洋温度差発電		×停止 非常用発電機 使用	×停止 非常用発電機 使用	○影響なし	○影響なし
冷熱 利用 農業	完全人工光型 植物工場	×栽培不可	△半数栽培不可	○影響なし	○影響なし
	太陽光利用型 植物工場	×栽培不可	△半数栽培不可 (冬季は栽培可)	○影響なし	○影響なし
	土壌冷却利用	△土壌冷却する 7ヶ月は 栽培不可	△土壌冷却する 7ヶ月は 栽培不可	○影響なし	○影響なし
冷熱利用漁業		×夏季なら 全滅の恐れ	△夏季なら 半数被害の恐れ	○影響なし	○影響なし
建物空調		△バックアップ の空調を利用	△バックアップ の空調を利用	○影響なし	○影響なし
海水淡水化設備		×供給停止	△供給量減	○影響なし	○影響なし
その他研究施設等		×供給停止	×供給停止 (農業・漁業等を 優先)	○影響なし	○影響なし
ポンプ初期費用 (関連する 配管、電気計装を含む)		約 2.6 億円	約 3.0 億円	約 4.7 億円	約 4.3 億円
総合評価		×	△	○	◎
備考		初期費用の差に 比べ、想定され る被害が大	初期費用の差に 比べ、想定され る被害が大	効果は 50%×3 台案と同じだ が、初期費用が 高い	停止の影響 なし

### 7.2.6 取水ポンプ設置方式の選定

汲み上げ方式は直接ポンプ汲上方式と取水ピット方式とに大別される(図 7-9)。

本計画では取水管径が 1m 以上と大きく、深海生物が取水管内を遡上する恐れが否定できない。この場合、取水ピット方式では生物は一旦ピット内に開放されるため、直接ポンプ汲上方式よりトラブルの起こるリスクが小さい。したがって、本計画においても取水ピット方式を選定した。

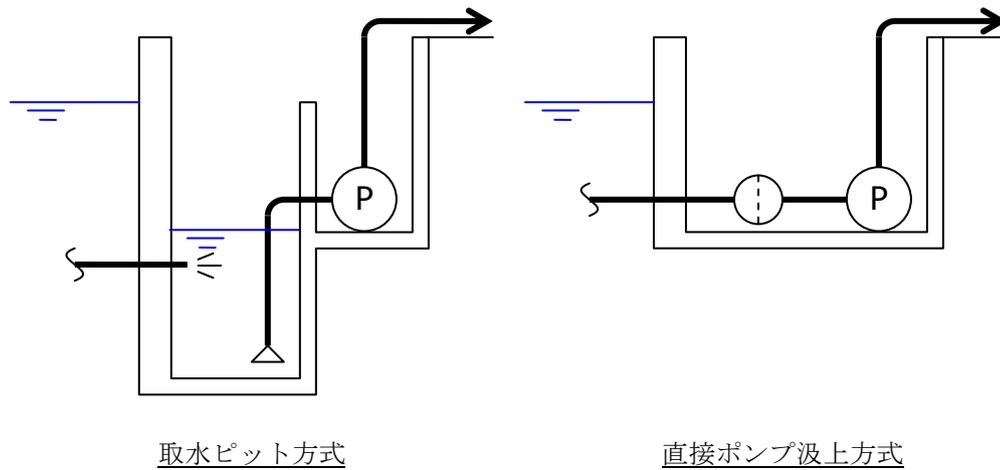


図 7-9 汲み上げ方式

なお、取水ピットの深さは、次の通り決定されている。

(1) 通常運転時のピット内水位（対干潮時海水線）（図 7-10 寸法(a)）

(i) 取水管の摩擦抵抗および出入口形状抵抗による損失水頭 -1.6m

(ii) 取水管内の深層水と周囲の海水との温度差による密度差静水頭 -1.1m

-2.7m ≒ -3.0m で設計

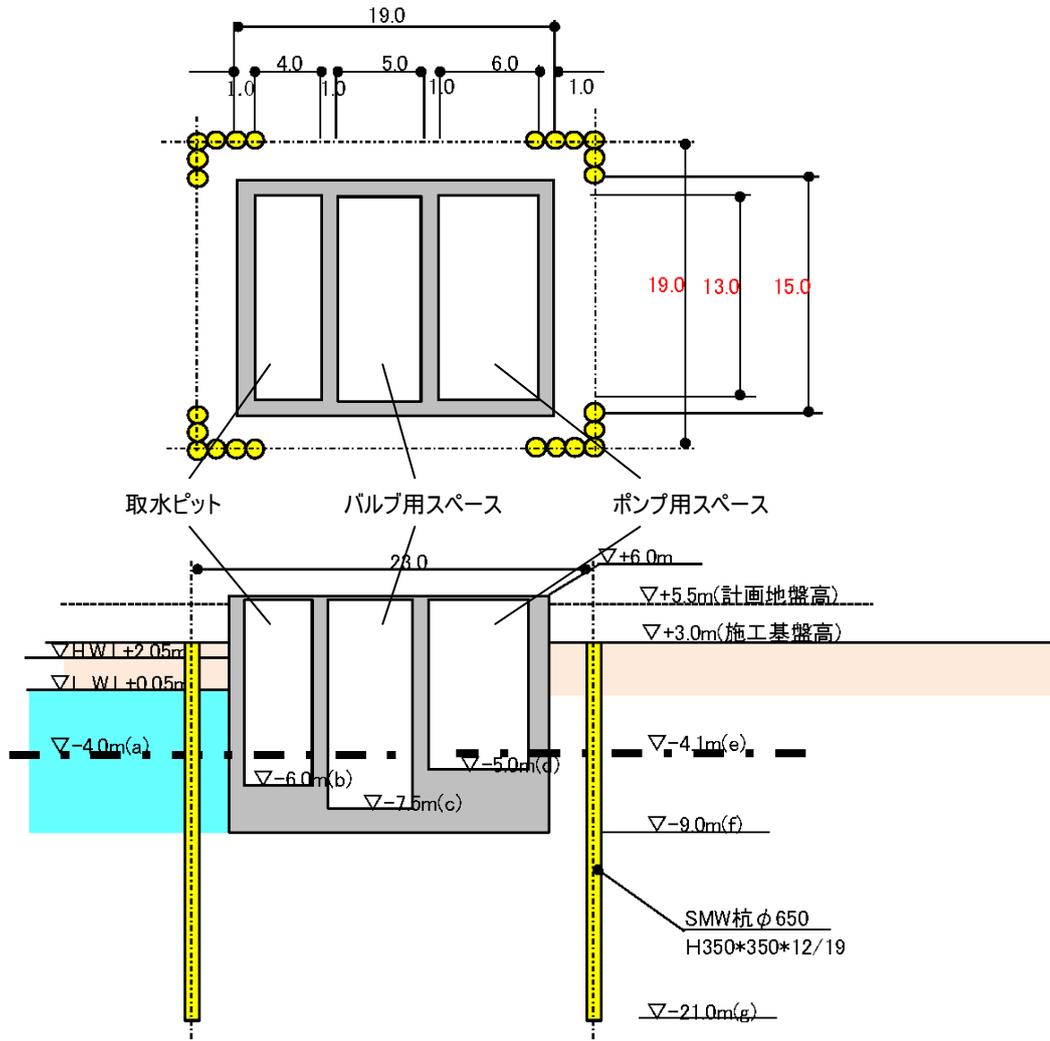
(2) 取水ピット底面レベル（対干潮時海水線）（図 7-10 寸法(b)）

運転開始時の慣性力によるピット内水面低下、および低水面時の渦発生によるポンプへの空気吸込の防止を考慮して、通常時液面より **2.0m** 下とする。

したがって取水ピット底面レベルは、干潮時海水線に対し  $-3.0\text{m} - 2.0\text{m} = \underline{-5.0\text{m}}$  となる。

7.2.7 取水ピットの外形

図 7-10 に取水ピットの外形を示す。



φ (m)	取水深度 (m)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1.6*1条	-600	-2.5	-4.5	-6.0	-3.5	-2.5	-7.5	-18.0
1.6*1条	-700	-3.0	-5.0	-7.0	-4.5	-3.4	-8.5	-20.0
1.6*1条	-800	-4.0	-6.0	-7.5	-5.0	-4.1	-9.0	-21.0
1.2*2条	-600	-2.5	-4.5	-5.5	-3.5	-2.3	-7.0	-17.0
1.2*2条	-700	-3.5	-5.5	-6.5	-4.5	-3.2	-8.0	-19.0
1.2*2条	-800	-4.0	-6.0	-7.0	-5.0	-4.0	-8.5	-20.0

図 7-10 取水ピットの外形 (深層水)

### 7.3 表層水取水設備の基本計画

#### 7.3.1 取水位置の選定

取水位置は、敷設費用を最小化することを考慮し、仲里漁港の一部に海水取り入れ口を設けることとした。

#### 7.3.2 取水方式の選定

取水方式は、深層水と同様に取水ピット方式とし、海水取り入れ口にはスクリーンを設置する。

#### 7.3.3 陸上配管径の検討

表層水の流量は、第6章での検討により12,150m<sup>3</sup>/hとなる。

貝類の付着による管の狭窄化代 50mm を考慮して流速面から陸上配管径を外径 1.4m φ ×2 条とする。

#### 7.3.4 取水ポンプの仕様決定

取水ポンプはポンプメンテナンス時の深層水利用設備の運転継続可否、およびトラブル時に対するリスク軽減(リダンダンシー)を考慮し予備機を設置することとした。さらに 50%×3 台と 100%×2 台の2案の概略コスト比較を行ない、より費用の小さい 50%×3 台案を採用した。(表 7-2)

表 7-2 取水ポンプの仕様決定 (表層水)

評価項目	予備機なし		予備機あり	
	100%×1 台案	50%×2 台案	100%×2 台案	50%×3 台案
ポンプ 1 台停止時の影響	深層水供給停止	深層水供給半減	影響なし	影響なし
海洋温度差発電	× 停止 非常用発電機 使用	× 停止 非常用発電機 使用	○ 影響なし	○ 影響なし
各種複合利用設備	△(*1)	△(*1)	○ 影響なし	○ 影響なし
排出海水の温度と物性	×(*2)	△(*2)	○ 影響なし	○ 影響なし
ポンプ初期費用 (関連する配管、電気計装を含む)	約 3.2 億円	約 3.8 億円	約 6.0 億円	約 5.6 億円
<b>総合評価</b>	×	△	○	◎
備考	初期費用の差に比べ、リスク(*3)が大	初期費用の差に比べ、リスク(*3)が大	効果は 50%×3 台案と同じだが、初期費用が高い	停止の影響なし

(\*1) 第一フェーズ (第8章参照) ではほとんど影響がないが、第二フェーズにおいて温度の低下した表層水を使用する設備がある場合、被害が出る恐れがある。

(\*2) 使用後の深層水は、表層水と混合して温度および物性を表層水に近づけてから排出する計画である。このため、表層水の供給が停止もしくは半減した場合、排出海水の温度および物性は表層水から遠ざかる方向となる。

(\*3) 仮にポンプの修理期間を2週間とした場合、非常用発電機の運転コストは、発電コストを30円/kWhとしても14日間×24時間×1,250kW(出力)×30円/kWh=1,260万円程度である。しかし、排出海水の温

度低下、物性の表層水との差異拡大による環境への影響は予測できずリスクが高いため、本表の評価とした。

#### 7.4 取水設備全体配置と仕様まとめ

前節までで検討した取水設備の全体配置および仕様について、**図 7-11** にまとめる。

#### 7.5 取水設備建設スケジュール

取水設備の建設スケジュールは、**図 7-12** の通り完工まで 21 か月の工期となる。

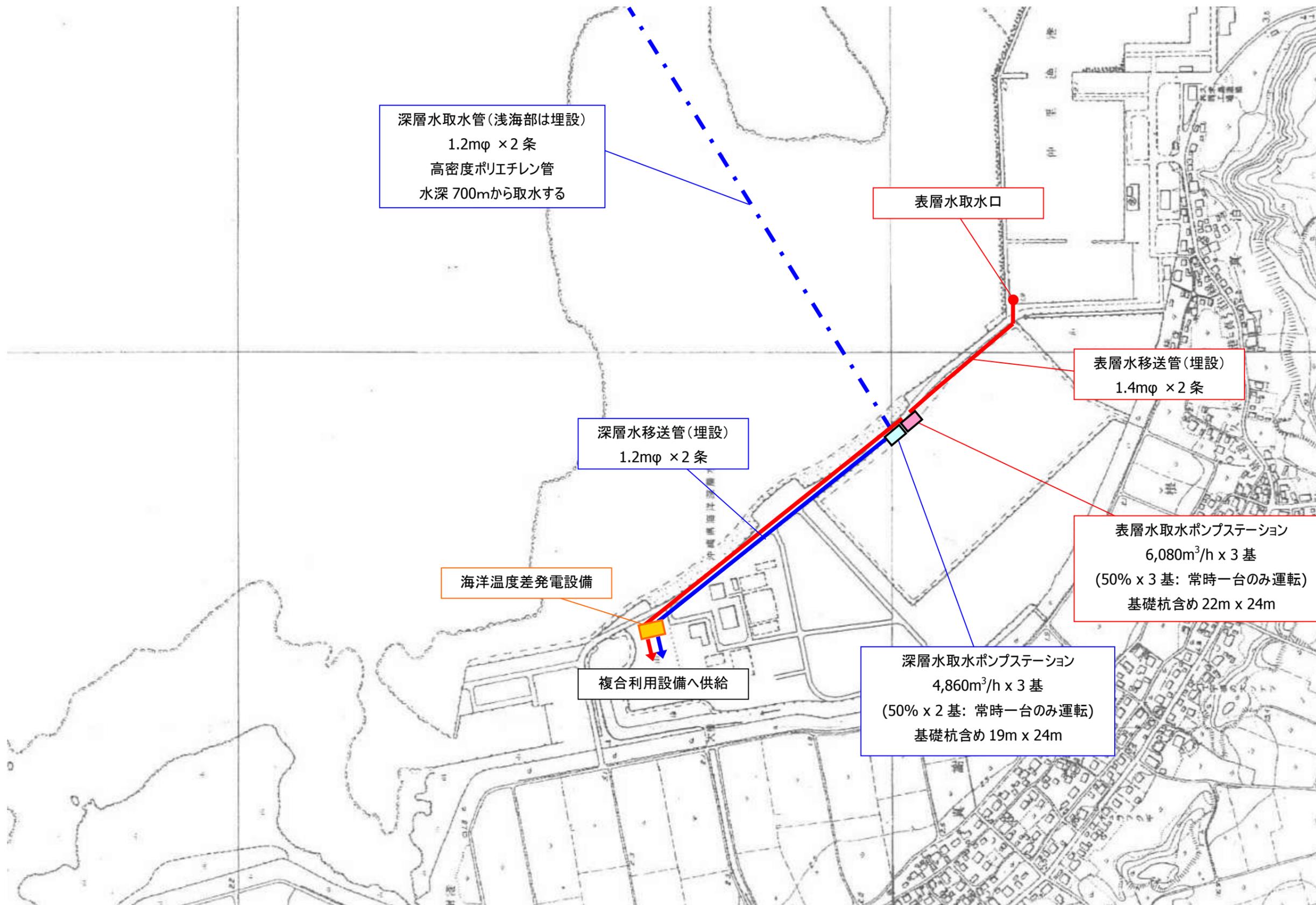


図 7-11 取水設備の全体配置および仕様





## 7.6 取水設備建設費用の試算

## 7.6.1 深層水取水設備建設費用の試算

本計画で試算した深層水取水設備建設費用を表 7-3 に示す。

表 7-3 深層水取水管建設費用の試算

(単位：百万円)

項目	費用
I. 直接工費	
取水管(海中)材料費	2,212
接続・引出・沈設工事	504
着底部・浅海部・接続部保護工事	1,105
リーフ部配管工オープン掘削・配管工事	522
着水槽構築工事	237
取水ポンプ調達・設置工事	428
陸上配管材料および工事	279
小計	5,287
II. 共通仮設費	
長管製作/引出しヤード設備	101
船団艀装/回航/準備	616
管敷設用フロート	101
その他仮設費	169
小計	987
純工事費 (I + II)	6,274
III. 現場管理費	1,156
工事原価 (I + II + III)	7,430
IV. 一般管理費	536
I ~ IV 計	7,967
V. 消費税	398
合計(百万円)	8,365

## 7.6.2 表層水取水設備建設費用の試算

本計画で試算した表層水取水設備建設費用を表 7-4 に示す。

表 7-4 表層水取水管建設費用の試算

(単位：百万円)

項目	費用
I. 直接工費	
取水管(海中)材料費	_(*)
着水槽構築工事	289
取水ポンプ調達・設置工事	563
陸上配管材料および工事	477
小計	1,329
II. 共通仮設費	37
純工事費(I + II)	1,367
III. 現場管理費	252
工事原価(I + II + III)	1,618
IV. 一般管理費	117
I ~ IV計	1,735
V. 消費税	87
合計(百万円)	1,822

(\*) 仲里漁港から直接引き込むため、海中に配管は敷設しない。

7.6.3 深層水取水設備建設費用に関する感度分析

第 6 章および第 8 章の検討において費用対効果の検討を行なうため、上記の試算を基に深層水取水管敷設費用に関する感度分析を実施した。なお、本分析は久米島特有の条件(海底地形や工事単価、作業船の回航距離等)を考慮しているため、普遍的に適用できる分析とはなっていない。

(1) 深層水取水深度

管径を 1.2m φ × 2 条に固定したときの、取水深度と費用との関係を図 7-13 に示す。

なお、取水計画地における取水深度と配管延長との関係は、表 7-5 の通りである。

表 7-5 取水計画地における取水深度と配管延長との関係

取水深度	600m	700m	800m
配管延長	2,500m	3,700m	4,700m

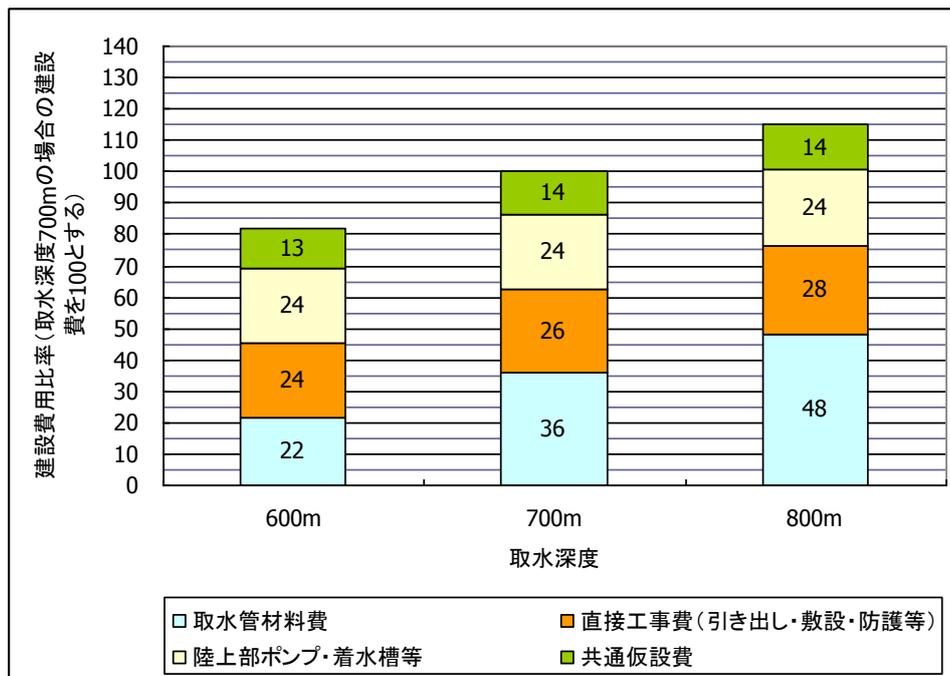


図 7-13 取水深度と建設費用との関係

深度 600m, 700m, 800m の年間平均水温はそれぞれ 8.5℃、6.7℃、5.5℃である。この温度の違いによる効用の差と、敷設費用の差とを比較して最適取水深度を決定する。本計画では、その結果 700m を選定した(表 7-3)。

表 7-4 最適取水深度の選定

取水深度	600m	700m	800m
敷設コスト比 <sup>(*1)</sup>	83	100	114
海洋温度差発電から見た評価 <sup>(*2)</sup>	NG	OK	OK
取水温度	8.5℃	6.7℃	5.5℃
複合利用設備への冷熱供給量 <sup>(*3)</sup>	458 GJ/h (700m ケース比 : 87%)	529 GJ/h	577 GJ/h (700m ケース比 : 109%)
総合評価	△	◎	○
備考	海洋温度差発電に 適さない		700m ケースに対 してコスト 14%増 だが冷熱供給量は 9%増にとどまる。

(\*1) 図 7-13 参照

(\*2) 6.1.2 項参照

(\*3) 海洋温度差発電にて 5℃昇温し、その後複合利用設備で 25℃まで利用することを考えた場合、冷熱量は次の式で計算される。

$$\text{冷熱量} = \text{取水量} (9,710\text{m}^3/\text{h}) \times \text{比重}(1.025) \times \text{比熱}(4.0\text{MJ/t}_\text{t} \text{ } ^\circ\text{C}) \times \text{利用温度差} \{25^\circ\text{C} - (\text{取水温度} + 5^\circ\text{C})\}$$

(2) 管径

次に、取水深度を 700m とするときの、管径 1.0m φ, 1.2m φ, 1.4m φ それぞれ 2 条との差を、図 7-14 に示す。

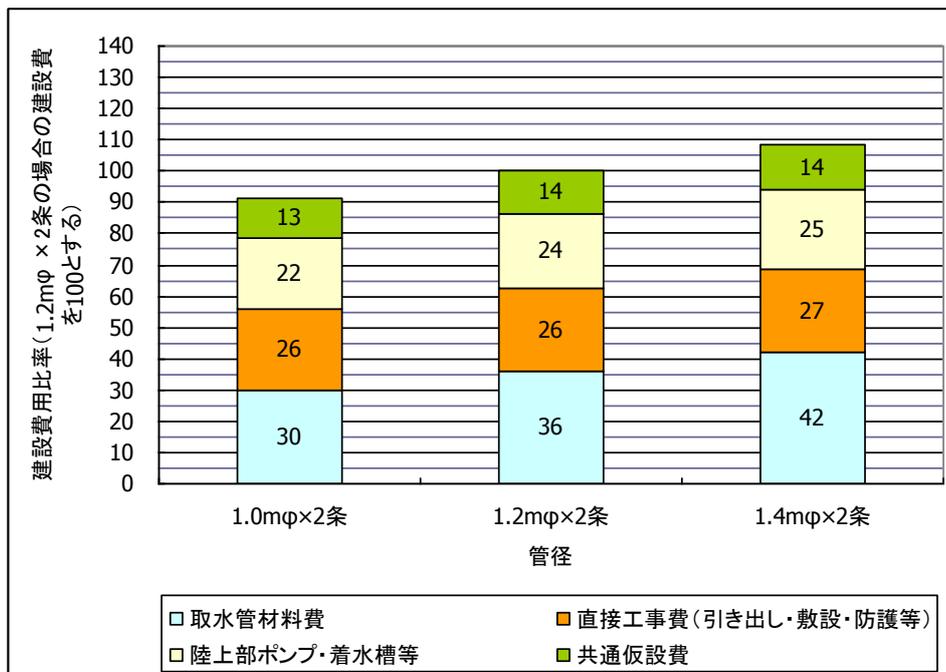


図 7-14 管径と建設費用との関係

管内流速を同じにした場合、管径 1.0m φ、1.2m φ、1.4m φ (いずれも SDR=26) の取水量の比は 69:100:136 (管径 1.2m φ を 100 とした場合) となる。一方、建設費の比は 91:100:108 であるから、単位取水量あたりの取水管建設費用という点で見れば、なるべく太い配管を敷設した方が経済的となる。ただし、需要面での上限も考慮に入れる必要があるため、本計画では 1.2m φ × 2 条としている。

(3) 条数

取水管内の流速を同一とした場合、1.2m φ × 2 条と 1.6m φ × 1 条との流量はほぼ同一となる。そこで、両者の敷設費用を比較した結果を図 7-15 に示す。また、1.6m φ × 2 条の場合も参考として示す。なお、取水深度はいずれも 700m とする。

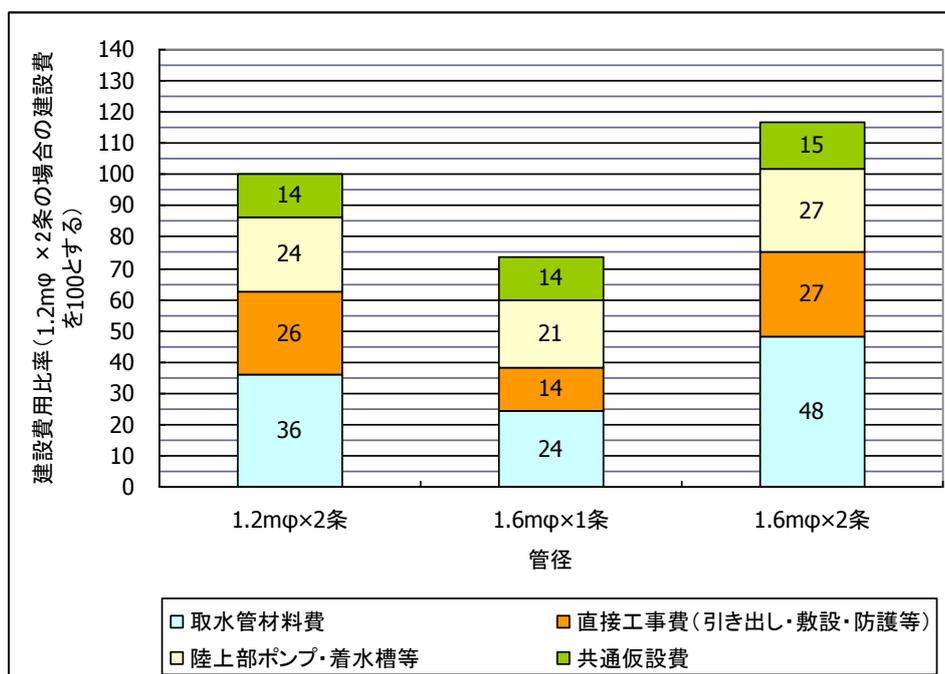


図 7-15 条数と建設費用との関係

本計画では万が一の取水管のトラブルに対するリダンダンシーとして、1.2m φ × 2 条を提案している。その理由は、次章で述べる通り、本計画での深層水の用途が、農業や漁業など一旦冷熱の供給が停止すると代替手段が得難い上に損害が甚大となる分野が中心となっているからである。取水が停止しても代替手段が得られる、もしくは影響が大きくない計画の場合には、2 条に変えて大口径 1 条とすることにより、大きな費用削減効果が得られる。

## 第8章 海洋深層水複合利用『久米島モデル』

### 8.1 『久米島モデル』のコンセプト

#### 8.1.1 『久米島モデル』の意義

久米島モデルは、久米島の地域資源である再生可能な「海洋深層水」を利用して、エネルギーと水を再生可能エネルギーにより自給しながら産業振興と雇用創出を図る、自立型コミュニティのモデルである。海洋深層水を用いたこのような取り組みは世界で例を見ない。このため、本モデルの意義は単に地域経済の活性化のみにとどまらず、久米島と同じように海洋深層水を地域資源として持つ我が国および世界の南洋沿岸・島嶼地域に対して、先導的な位置付けを持つ実証モデルであり、技術ショーケースの役割も持つ。これを考慮して、「久米島モデル」計画内に入れ込む技術を選定する(図 8-1)。

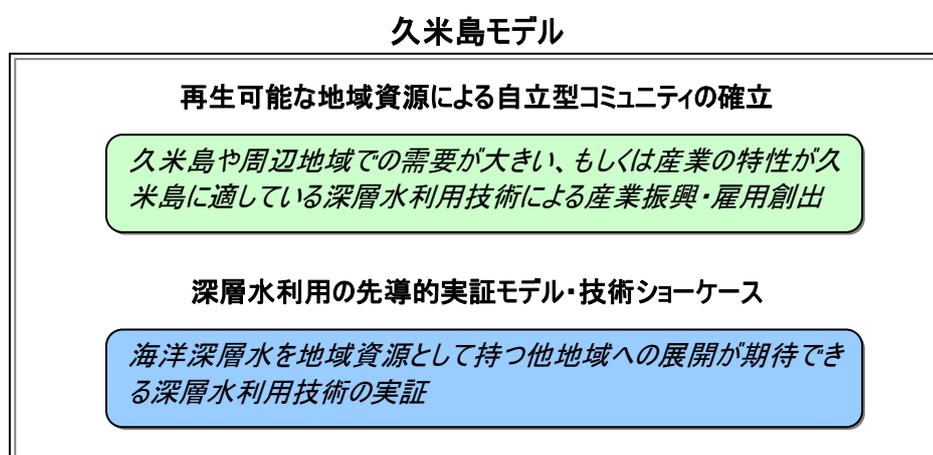


図 8-1 久米島モデルの意義と実施内容

#### 8.1.2 各海洋深層水利用技術のポテンシャルと位置づけ

現状の深層水利用技術には、久米島におけるクルマエビや海ぶどうのように既に商用化されており深層水の水量さえ確保できれば産業の振興が予想できる技術から、実験室段階あるいは小規模実証段階の技術まで、様々な段階の技術がある。

そこで、図 8-1 に示した実証の意義もふまえて、「久米島モデル」を、実証～商用段階の技術の展開による産業振興を目指す「第一フェーズ」と、第一フェーズ実施の間に研究開発した将来技術を商用化して更なる展開を図る「第二フェーズ」の二段階で構成することとした(図 8-2)。

久米島モデルの立案にあたっては、まず第 4 章にて検討を行なった深層水利用技術について、汲み上げた深層水(および表層水)を各技術で全量使用した場合のポテンシャル評価を表 8-1 の通り行なった(需要面での上限は考慮せずに、検討の目安としてシンプルに試算を行なった)。その結果、農業および漁業への利用が、産業振興面では大きなポテンシャルを持つことが分かった。

さらに、本節で述べた観点から、各技術の位置付けを図 8-3 の通りマッピングした。

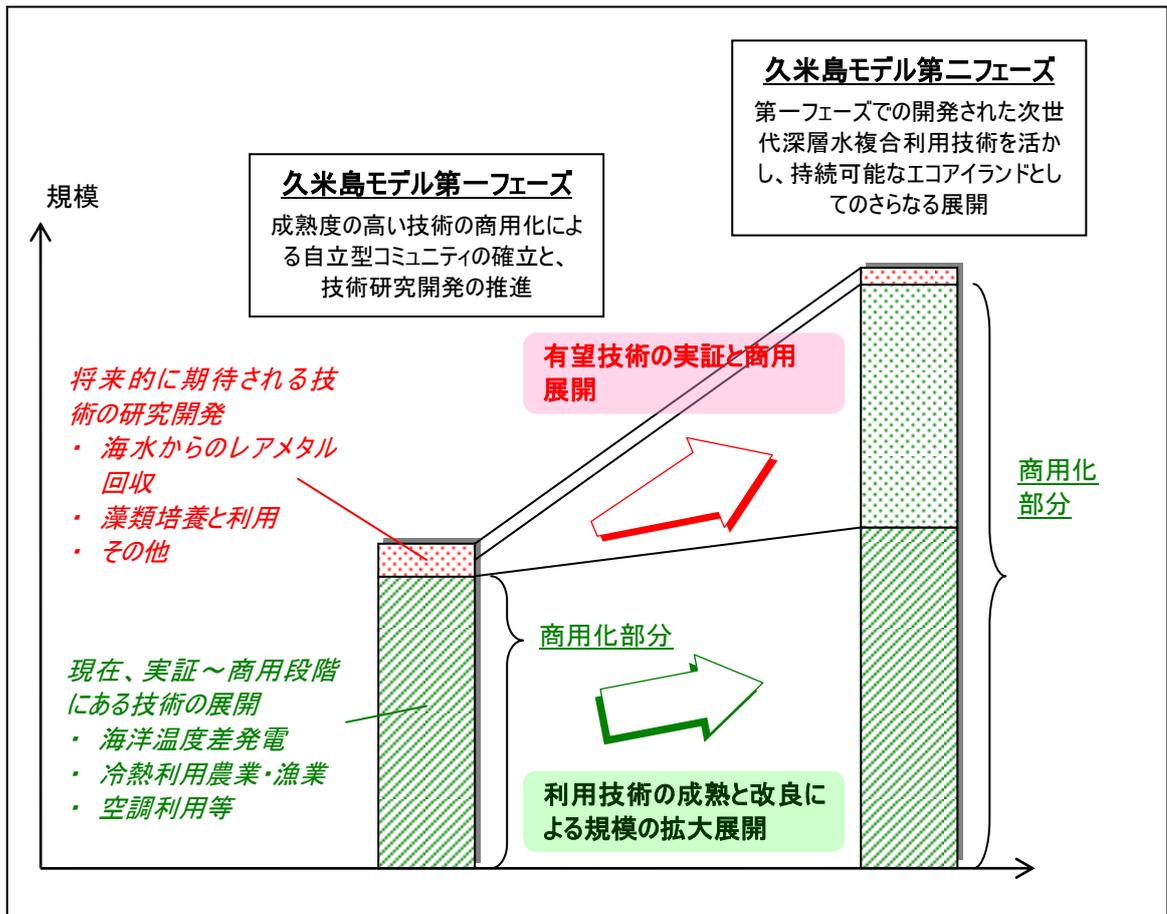


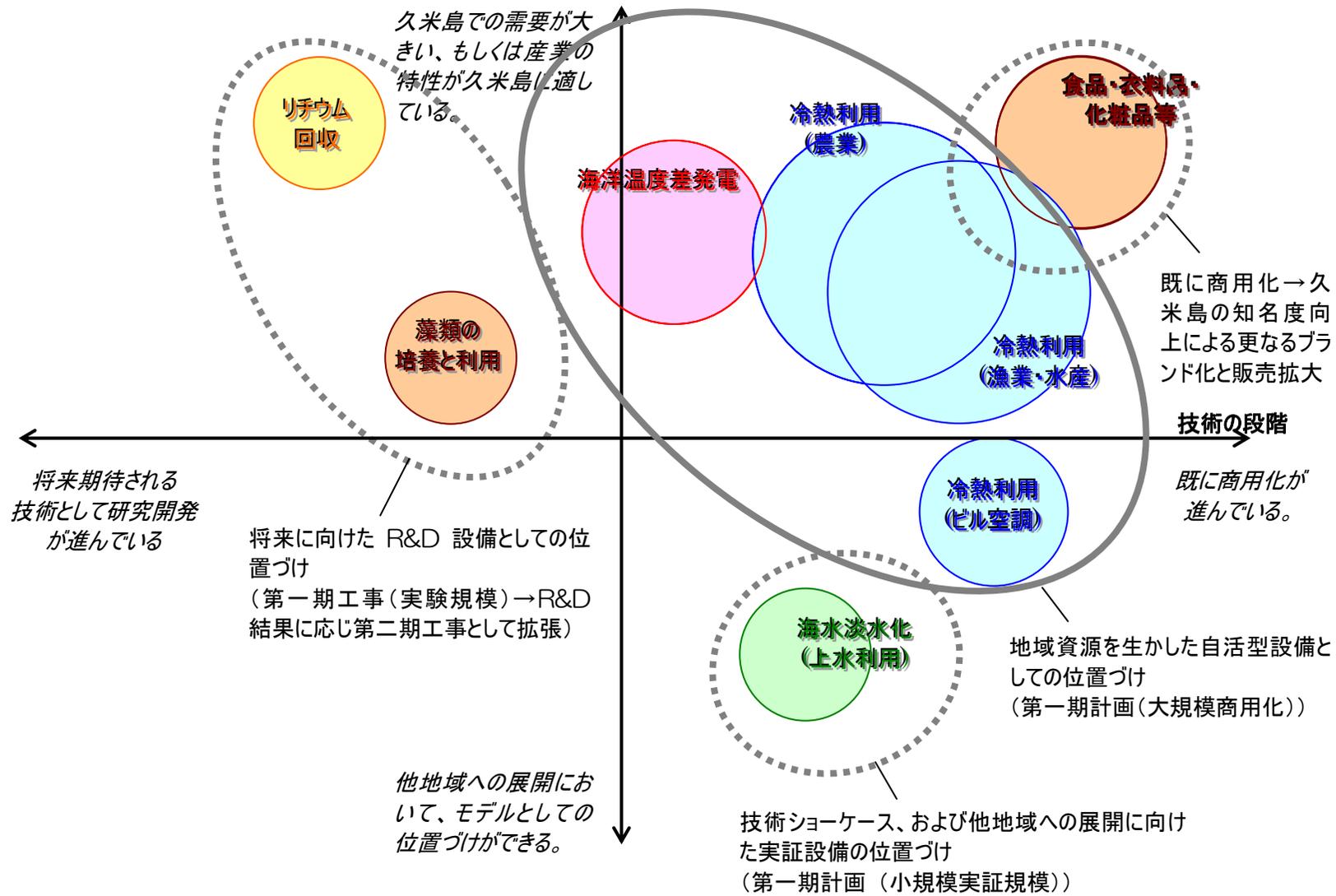
図 8-2 久米島モデルにおけるフェーズ分けイメージ

表 8-1 汲み上げた深層水（および表層水）を全量使用した場合の、各技術のポテンシャル評価  
（需要側の上限を考慮しない）

項目	単位	海洋温度差 発電	海水淡水化（水道水利用）			冷熱利用（農業）			冷熱利用（養殖漁業）		冷熱利用			リチウム回収	
			フラッシュ 蒸発法	逆浸透法		完全人工光 植物工場	太陽光利用 植物工場	土壌冷却	クルマエビ	海ぶどう等 海藻類	建物空調	低温倉庫	大型 データセンター		
利用する深層水の特性	低温性	—	◎	◎	×	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	—
	清浄性	—	○	○	◎	○	○	○	○	—	○	○	○	○	◎
	富栄養性	—	—	—	—	—	—	—	○	×	—	—	—	—	—
利用後の深層水の劣化	低温性	—	↓	↓	→	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	→
	清浄性	—	→	→	↓（濃縮）	→	→	→	↓（混合）	→	→	→	→	→	→
	富栄養性	—	→	→	↓（濃縮）	→	→	→	↓（混合）	→	→	→	→	→	→
検討対象ユニット		—	発電出力 1,250kW (年間平均)	フラッシュ蒸発 式淡水化装 置	逆浸透式 淡水化装置	200 坪型 ×複数軒 (レタス類、サ ラダ菜)	20 アール型 ×複数軒 (ミニトマト)	1,000m <sup>2</sup> 型 AET ハウス ×複数軒 (ホウレンソウ)	養殖池 (既存施設の 拡張)	養殖水槽 (既存施設の 拡張)	床面積 10,000m <sup>2</sup> (中規模ホテル) ×複数軒	食糧保管用 低温倉庫 (設定温度 12℃)	サーバー用 データセンター	回収率 60% 回収設備	
冷熱利用 ケース	出口温度(ピーク時)	℃	11.7	17.1	—	16.0	16.0	(供給 12℃)	25.0	25.0	15.0	10.0	20.0	—	
	ピーク時利用可能冷熱量	MJ/h	199,875	417,517	—	371,768	371,768	(変動)	731,543	731,543	331,793	131,918	531,668	—	
	単位生産量あたり所要量	—	199,875	2,400	—	12.2	75.4	1.07	2,930	2.33	1.0	1.0	1.0	—	
	(単位)	単位	上記ユニット	MJ/m <sup>3</sup> (淡水)	—	(MJ/h)/(万株/ 年)	(MJ/h)/(t/年)	(m <sup>3</sup> /h)/(t/年)	(MJ/h)/(t/年)	(m <sup>3</sup> /h)/(t/年)	(冷熱直接利 用)	(冷熱直接利 用)	(冷熱直接利 用)	—	
対ピーク時年間平均利用率		—	—	83%	97%	60%	20%	42%	10%	20%	20%	80%	100%	97%	
年間供給量・生産量		—	9,880	1,263	41,424	30,448	4,934	12,042	250	4,179	581,300	924,478	4,657,407	100,500	
	(単位)	—	MWh/年(電力)	千 m <sup>3</sup> /年(淡 水)	千 m <sup>3</sup> /年(淡 水)	万株/年	t/年	t/年	t/年	t/年	GJ/年(冷熱)	GJ/年(冷熱)	GJ/年(冷熱)	kg/年(炭酸リ ウム)	
単価		—	20	150	150	150	750	565	4500	4000	1.39	1.39	1.39	500	
	(単位)	—	円/kWh	円/m <sup>3</sup>	円/m <sup>3</sup>	円/株	円/kg	円/kg	円/kg	円/kg	円/MJ	円/MJ	円/MJ	円/kg	
経済効果(単独)		百万円/年	198	189	6,214	45,672	3,700	6,808	1,123	16,714	807	1,284	6,469	49	
経済効果(波及効果考慮)(*2)		百万円/年	<b>303</b>	<b>277</b>	<b>9,082</b>	<b>63,712</b>	<b>5,162</b>	<b>9,498</b>	<b>1,567</b>	<b>23,316</b>	<b>1,237</b>	<b>1,968</b>	<b>9,912</b>	<b>77</b>	
化石燃料削減効果(*3)		kL-COE/年	<b>2,506</b>	—	—	<b>123,891</b>	<b>41,297</b>	<b>86,724</b>	<b>40,631</b>	<b>81,262</b>	<b>10,238</b>	<b>16,282</b>	<b>82,027</b>	—	
二酸化炭素排出量削減効果(*4)		t-CO <sub>2</sub> /年	<b>9,346</b>	—	—	<b>462,123</b>	<b>154,041</b>	<b>323,486</b>	<b>151,557</b>	<b>303,113</b>	<b>27,854</b>	<b>44,298</b>	<b>223,167</b>	—	
備考					回収率は 42%とする。						冷熱販売価 格は電気料金 20 円/kWh 相 当	冷熱販売価 格は電気料金 20 円/kWh 相 当	冷熱販売価 格は電気料金 20 円/kWh 相 当	表層水および 深層水を用い る。	

(\*1) 海洋温度差発電、海水淡水化およびリチウム回収に利用する。  
 (\*2) 2005 年度 沖縄県産業連関表(沖縄独自統合部門表 35 部門表)により、第 1 次間接効果のみを算定する。  
 (\*3) 冷熱利用については通常の空調機もしくは冷凍機(COP=4)に対する削減効果を示す。  
 換算係数は省エネ法による規定値：電力 1kWh = 一次エネルギー投入量 9.83MJ 相当，一次エネルギー投入量 1MJ = 0.0258 L-COE(Crude Oil Equivalent)  
 (\*4) 冷熱利用については通常の空調機もしくは冷凍機の熱源機(COP=4)に対する削減効果を示す。  
 換算係数(電力の二酸化炭素排出量原単位)は沖縄電力の 2008 年度公表値 0.946kg-CO<sub>2</sub>/kWh を用いる。

久米島地域特性との関係



※円の大きさは、推定される経済規模を示す。

図 8-3 深層水利用技術の位置付け

## 8.2 第一フェーズ：実証された技術の商用展開と、将来に向けた取り組み

### 8.2.1 設備構成、深層水および表層水のフローと熱物質バランス

第 5 章で行った検討の結果、深層水複合利用においてボトルネックとなるのは、夏季の昼間に冷熱負荷ピーク時である。したがって、夏季昼間をベースに深層水および表層水の利用フローと利用設備構成を図 8-4 の通り検討した。

### 8.2.2 設備配置案

前項で検討した利用設備群の配置案を図 8-5、イメージ図を図 8-6 に示す。

## 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: 夏季の昼間/晴天時

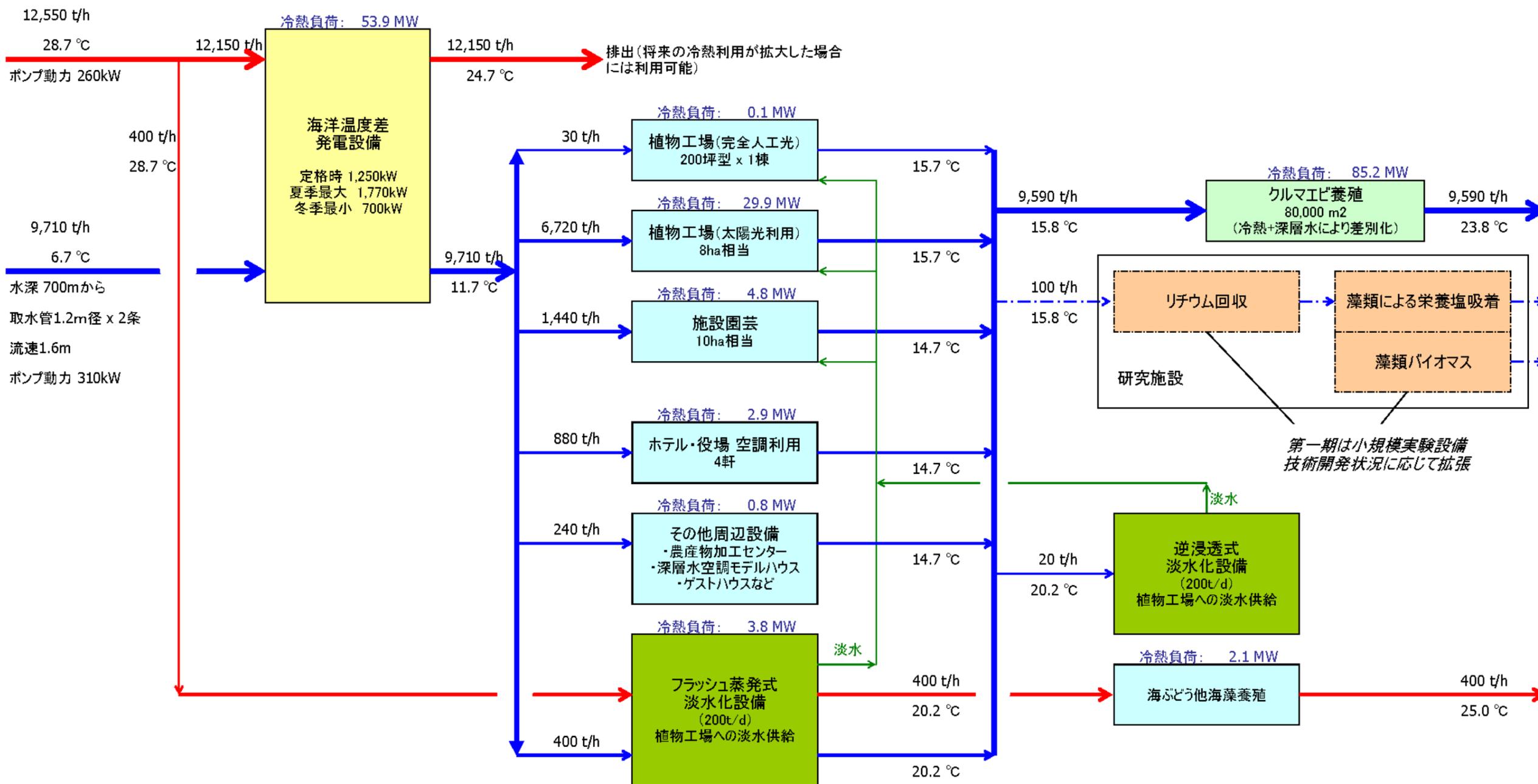


図 8-4 深層水および表層水のフローと熱物質バランス

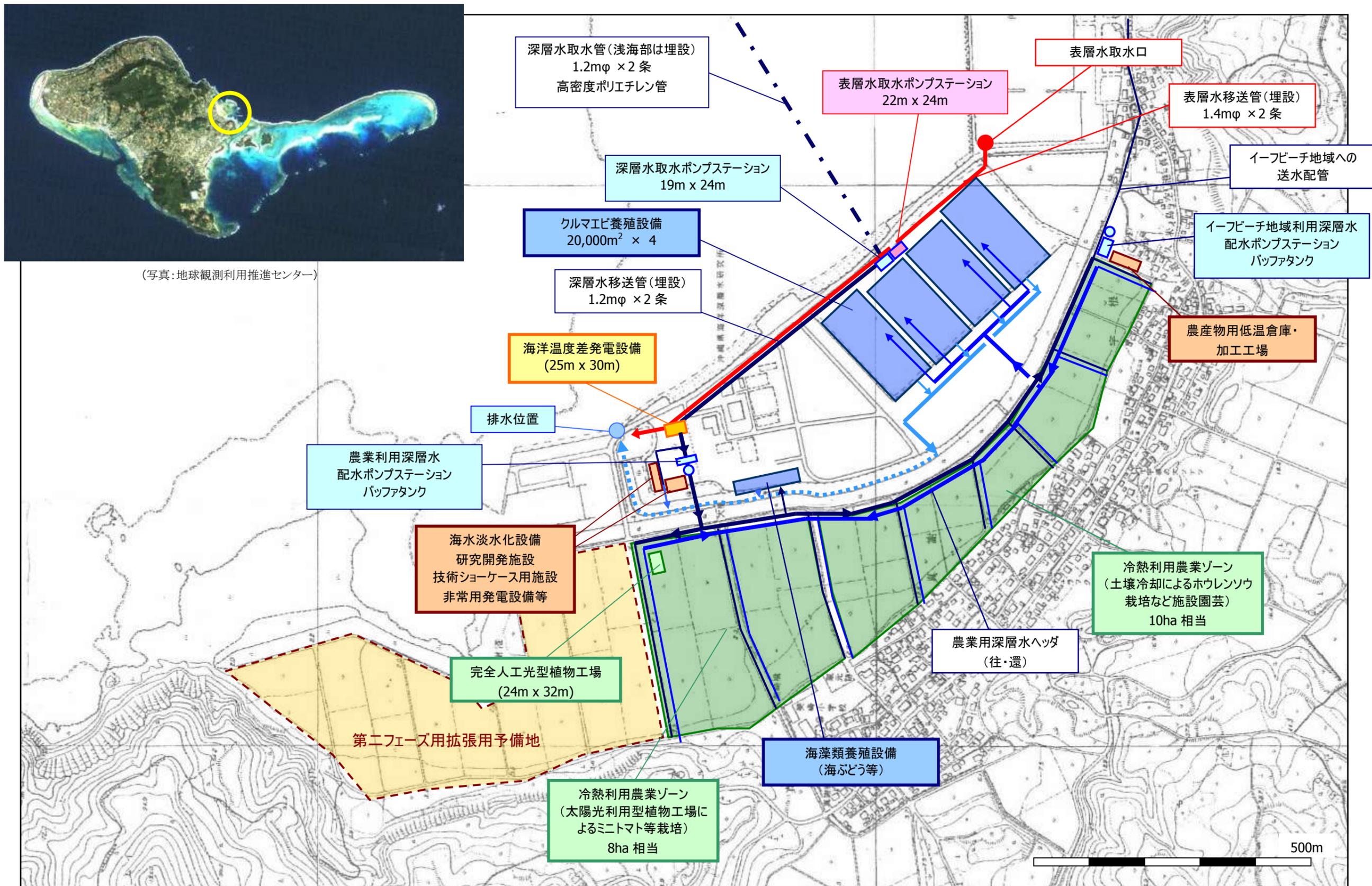


図 8-5 利用設備群の配置案

## 海洋深層水複合利用 久米島モデル ～深層水を活かした自立型コミュニティ～

世界初の海洋温度差発電に始まり、地域の冷房利用、水産養殖・農業利用など、深層水を最大限に活かした複合利用が進むことで、地域が主体となった上での新産業の創出、エネルギー自給自足、環境に配慮した循環型社会など様々な形での国内外のモデルケースとなる。

このような深層水複合利用モデルを『久米島モデル』と定義し、沖縄県全域に広がる島嶼地域の低炭素型かつ自立型コミュニティのモデルアイランドとなることが期待される。



(1) 海洋温度差発電プラント

世界の注目する大規模海洋温度差発電プラント。深層水を使って 2000 世帯分の発電が可能、周辺施設の電力を賅う。昼夜を問わず安定して発電できるため離島に最適な自然エネルギーといわれている。

(A) 沖縄県海洋深層水研究所

2001 年に開所した沖縄県の深層水研究所。10 年以上にわたり、深層水利用の先頭に立ち研究を続け、同時に民間への技術移転を進めてきた。水産分野のみならず農業分野でも成果が現れ始めている。

(2-a) 完全人工光型植物工場

深層水の冷熱性を利用すれば、冷却コストを抑えた生産が可能。1 年を通じて安定して生産できるため、久米島のみならず、沖縄本島に対してもミニトマトやサラダ菜、キノコなど多品種の出荷が可能になる。

(3-a) クルマエビの養殖池  
(3-b) ウミブドウ養殖水槽

久米島を日本一のクルマエビの産地にしたのは深層水の低温性をうまく活かした結果。ウミブドウは夏場でも高品質な製品を県内外に出荷し、久米島ブランドの地位を確立。今の取水量では既に足りない状況。

(5) 深層水地域冷房

海洋温度差発電に利用後の 10℃前後の深層水を使って、コストと消費電力を大幅に抑えた地域冷房。イービーチ地区のホテルや役場（中里庁舎）までの供給も可能。個人住宅を想定したエコモデルハウスも可能。

(7) 農産物低温倉庫・加工工場

島内の野菜を加工したり、深層水冷房を使った低温倉庫を活用すれば、島の既存農家も活用でき、島内外への野菜の安定供給、農業経営の安定化につなげることが可能。低温倉庫は農産物以外の利用も可能。

(8) 取水施設/遠景

直径 1.2m の取水管が 2 本、日量 24 万トン（暫定値）は世界有数の取水規模となる。地域の共通インフラとしての利用が進めば、久米島は国内外の深層水複合利用のモデルアイランドなる。

(2-b) 太陽光利用型植物工場  
(2-c) 深層水利用施設園芸ハウス

太陽の光と深層水の冷房を組み合わせた農業形態。夏場に値上がりするハウレン草やトルコギキョウの栽培など、季節を問わず深層水を活かした生産が可能。これまでに深層水研究所で栽培ノウハウが蓄積されている。

(4) 海水淡水化設備

深層水の低温性や清浄性の特性を使って日量約 400t の淡水を生産。（蒸発式+膜式の合計）植物工場など各種農業施設へ供給予定で、久米島以外の島への展開する際のショーケース的役割も期待される。

(6) 次世代技術実証研究棟 (リチウム回収・藻類培養等)

電気自動車などの普及により期待が高まる海水からのリチウム回収や深層水による海藻培養の実証研究施設。リチウムは輸送コストも小さく、離島の経済特性にマッチした技術。次世代複合利用に向けた各実証研究棟。

(7) EV 車充電ステーション

ハイブリッド車に続く次世代自動車の主役は電気自動車（EV 車）と目されている。久米島は島の規模も EV 車にマッチしており、日常や観光の足として活用すれば、島中の車を EV 車とする将来像も描くことが可能。

(B) 既存の深層水利用企業

この 10 年の間に深層水を使った化粧品、飲料・食料品、プール・スパなど多くの深層水を活用した企業が生まれ、島に新たな雇用を創出してきた。これからも久米島経済の先頭に立って地域の発展に寄与する。

図 8-6 『久米島モデル』のイメージイラスト

### 8.2.3 設備仕様および建設費

検討した主要設備の仕様、続いて建設費(表 8-2)を記す。

ただし建設費については、発電設備および取水設備については今回詳細な調査を行なったものの、他の設備については目安としての参考見積となっているため、今後の詳細な調査は必要である。

#### (1) 1MW 級海洋温度差発電プラント

-設備容量	:	定格条件時出力 1,250kW 夏季最大出力 1,770kW (詳細は第 6 章参照)
-設備方式	:	アンモニア系媒体を用いた高効率タービン発電方式
-深層水入口温度(夏季設計値)	:	6.7℃
-深層水出口温度	:	入口温度+5℃
-深層水所要流量	:	9,710 m <sup>3</sup> /h

#### (2) 冷熱を利用した植物工場・施設園芸施設

##### (a) 完全人工光型植物工場

-設備容量	:	200 坪型×1 軒(レタス類、サラダ菜等) 年間生産量 132 万株
-設備方式	:	深層水直接冷房 送水ポンプ流量制御(回転数制御)による温度調整
-深層水入口温度(夏季設計値)	:	11.7℃
-深層水出口温度	:	入口温度+4℃
-深層水所要流量	:	100 m <sup>3</sup> /h(夜間)

##### (b) 太陽光利用型植物工場

-設備容量	:	20 アール型×40 軒(ミニトマト、大玉トマト等) 年間生産量 36トン/軒
-設備方式	:	深層水直接冷房 送水ポンプ流量制御(回転数制御)による温度調整
-深層水入口温度(夏季設計値)	:	11.7℃
-深層水出口温度	:	入口温度+4℃
-深層水所要流量	:	168 m <sup>3</sup> /h/軒

## (c) 土壌冷却方式施設園芸

-設備容量	:	1,000m <sup>2</sup> 型×100 軒(ハウレンソウ等) 年間生産量 13.5トン/軒
-設備方式	:	土壌冷却管に深層水直接利用
-深層水入口温度(夏季設計値)	:	11.7℃
-深層水出口温度	:	—(規定なし)
-深層水所要流量	:	14.4 m <sup>3</sup> /h/軒

## (3) 深層水を利用した水産養殖の拡大

## (a) クルマエビ養殖池

-設備容量	:	20,000m <sup>2</sup> 養殖池×4 池(クルマエビ) 年間生産量 240トン/池
-設備方式	:	深層水直接混入による冷却方式
-深層水入口温度(夏季設計値)	:	15.8℃
-深層水出口温度	:	養殖池設定温度(夏季ピーク時 23.8℃を想定)
-深層水所要流量	:	9,590 m <sup>3</sup> /h

## (b) 海ぶどう養殖水槽

-設備容量	:	小型水槽 1,500 槽相当(海ぶどう) 年間生産量 165トン
-設備方式	:	深層水直接混入による冷却方式
-深層水入口温度(夏季設計値)	:	20.2℃
-深層水出口温度	:	養殖池設定温度(夏季ピーク時 25.0℃を想定)
-深層水所要流量	:	400 m <sup>3</sup> /h

## (4) 海水淡水化設備

## (a) フラッシュ蒸発式淡水化設備

-設備容量	:	淡水化容量 200t/d
-設備方式	:	温度差を利用したフラッシュ蒸発式
-深層水入口温度(夏季設計値)	:	11.7℃
-深層水出口温度	:	20.2℃
-深層水所要流量	:	400 m <sup>3</sup> /h

## (b) 逆浸透式淡水化設備

-設備容量	:	淡水化容量 200t/d
-設備方式	:	収率 40%の逆浸透式
-深層水入口温度(夏季設計値)	:	20.2℃
-深層水出口温度	:	—(規定なし)
-深層水所要流量	:	20 m <sup>3</sup> /h

## (5) 地域冷房

-設備容量	:	対象設備として、イーフビーチホテル、ホテルマリントラス、久米アイランドホテル、仲里庁舎を想定
-設備方式	:	深層水直接利用・対流式
-深層水入口温度(夏季設計値)	:	11.7℃
-深層水出口温度	:	入口温度+3℃
-深層水所要流量	:	680 m <sup>3</sup> /h(夜間)

## (6) 実証研究棟

-設備容量	:	海水からのリチウム回収 藻類による栄養塩吸収、農業・畜産業飼肥料への適用 深層水による石油微細藻類等藻類バイオマスの培養等
-設備方式	:	清浄性・栄養塩利用
-深層水入口温度(夏季設計値)	:	—(規定なし)
-深層水出口温度	:	—(規定なし)
-深層水所要流量	:	100 m <sup>3</sup> /h

## (7) その他の周辺設備

- 農産物用低温倉庫・加工工場(深層水冷熱利用)
- 深層水空調モデルハウス(深層水冷熱利用)
- 電気自動車充電ステーション
- 非常用ディーゼル発電設備(温度差発電設備バックアップ)
- 他

## (8) 取水設備

-設備容量	:	表層水:12,550 m <sup>3</sup> /h 深層水: 9,710 m <sup>3</sup> /h
-設備方式	:	第七章参照

(9) 配水設備

(a) 農業設備への冷熱供給

- 設備容量 : 送水ポンプ 900m<sup>3</sup>/h × 10 台(例)
- 設備方式 : 送水ヘッドが一定圧となるよう、バッファタンクの液位を制御(送水ポンプ台数制御による)

(b) イーフビーチ地区への冷熱供給

- 設備容量 : 送水ポンプ 136m<sup>3</sup>/h × 5 基(例)
- 設備方式 : 送水ヘッドが一定圧となるよう、バッファタンクの液位を制御(送水ポンプ台数制御による)

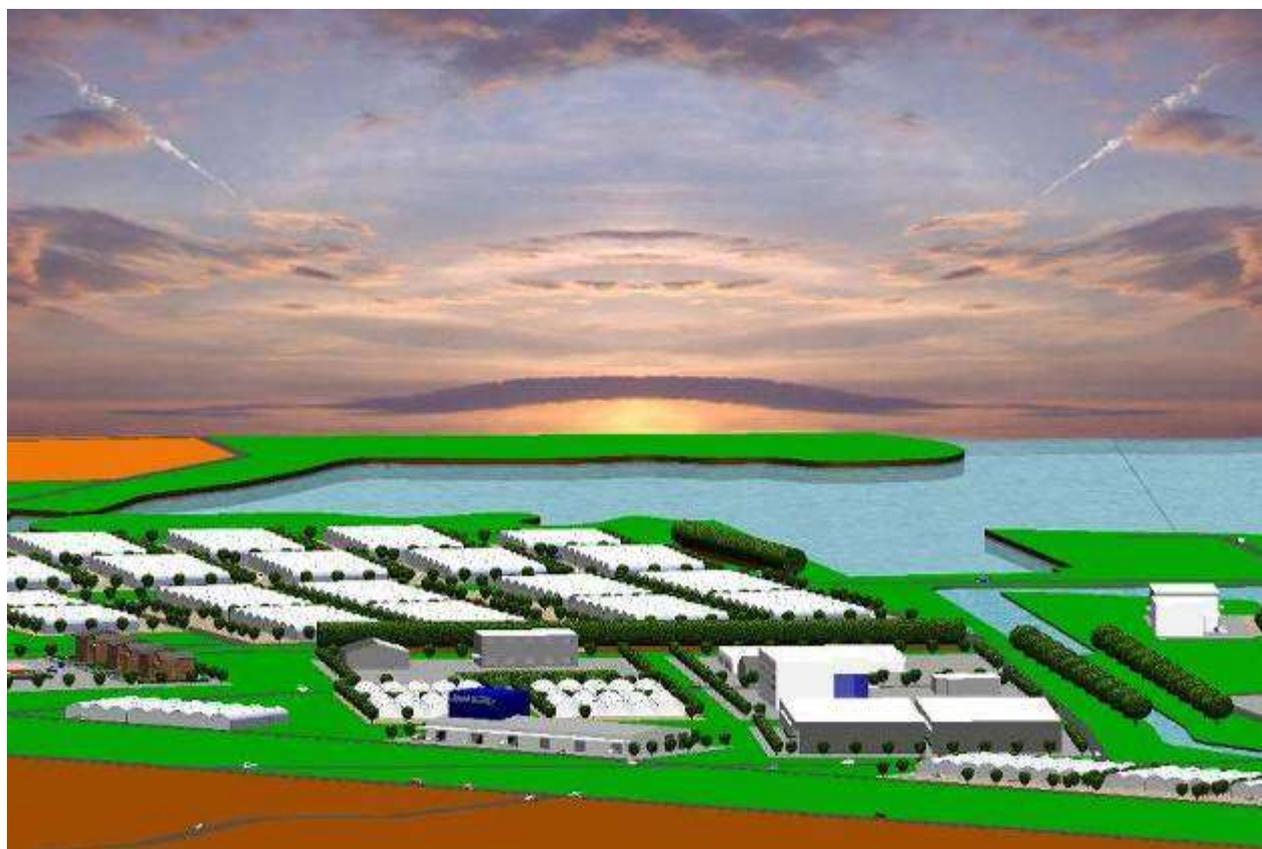


表 8-2 第一フェーズの建設費（参考値）

項目	建設費 (億円)	備考
(1) 1MW 級海洋温度差発電プラント	<b>30.8</b>	第五章参照
(2) 冷熱を利用した植物工場・施設園芸施設		
(a) 完全人工光型植物工場	3.5	メーカー概算見積による
(b) 太陽光利用型植物工場	26.0	メーカー概算見積による
(c) 土壌冷却方式施設園芸	16.0	深層水研究所資料より推定
(2) 小計	<b>45.5</b>	
(3) 深層水を利用した水産養殖の拡大		
(a) クルマエビ養殖池	8.0	面積からの概算
(b) 海ぶどう養殖水槽	3.0	水槽数からの概算
(3) 小計	<b>11.0</b>	
(4) 海水淡水化設備		
(a) 逆浸透式淡水化設備	0.8	
(b) フラッシュ蒸発式淡水化設備	1.6	
(4) 小計	<b>2.4</b>	
(5) 地域冷房	<b>1.0</b>	建築物側の工事として
(6) 実証研究棟	<b>1.5</b>	
(7) その他の周辺設備	<b>4.8</b>	非常用発電設備、低温倉庫等
(8) 取水設備	<b>101.8</b>	
(9) 配水設備		
(a) 農業設備への冷熱供給	18.5	主管のべ 2,200m(往復) (1.6mφ) 枝管のべ 2,400m(往復) (0.6mφ) 配水ポンプ等
(b) イーフビーチ地区への冷熱供給	13.7	主管のべ 4,800m(往復) 配水ポンプ等
(9) 小計	<b>32.2</b>	
合計	<b>231</b>	

### 8.3 第二フェーズ：将来のさらなる拡大の可能性

図 8-5 に示した通り、取水地の後背地にはまだ 100,000m<sup>2</sup> を超える利用可能な土地が残っている。この土地を利用し、以下の有望技術の研究開発段階から実証、商用化への展開や、第一フェーズで計画に入れなかった利用設備の誘致を図ることが出来る。

#### 【将来に向けた有効技術(例)】

- ◆ 海水からのリチウム回収
- ◆ 藻類による栄養塩吸収、農業・畜産業飼肥料への適用
- ◆ 深層水を利用した石油微細藻類等藻類バイオマスの培養

#### 【将来的に誘致が可能な設備(例)】

- ◆ 大型データセンター(深層水空調)
- ◆ ミネラルウォーターおよび飲料水製造設備(海水淡水化+深層水ミネラル)
- ◆ リゾートホテル(深層水空調およびスパ)
- ◆ 水族館(深層水の冷熱と清浄性の利用)

なお、第二フェーズの実施により深層水量が不足する場合、次の方策が考えられる。

#### (1) 取水ポンプの換装による取水量の増加

現在深層水取水管の管内流速は 1.4m/s の計画としているが、取水ポンプを換装して揚程を上げることですらに流速を増して取水量を増加させることが出来る。

#### (2) 電力-冷熱量の調整による深層水利用可能量の増加

5.3.3 項で述べた通り、海洋温度差発電を含む複合利用では、発電電力を減少させる代わりに他の設備での深層水の冷熱利用可能量を増加させることが出来る。第一フェーズでの運転実績に基づき、限界設計が可能となる。

#### 8.4 『久米島モデル』の環境効果、経済効果および雇用創出効果

『久米島モデル』第一フェーズにおける環境効果、経済効果および雇用創出効果を試算する。

##### 8.4.1 環境効果

###### (1) 代替エネルギー源としての化石燃料節減効果

代替エネルギー源としての化石燃料節減効果は、各技術について以下の手法にて算出した。

###### (a) 海洋温度差発電

発電量を、省エネルギー法に基づく換算係数にて原油換算した。

###### (b) 冷熱利用設備（農業利用、水産利用、建物空調設備共通）

供給冷熱量を、電気式空調熱源機の想定成績係数(COP)=4 で除して消費電力量を推定。

これを(a)と同様に原油換算した。

###### (c) 海水淡水化設備

効果算定対象としなかった。

###### (d) その他利用設備

効果算定対象としなかった。

###### (e) 取水設備・配水設備

推定消費電力量に、省エネルギー法に基づく換算係数にて原油換算した（削減ではなく増加側）。

## (2) 二酸化炭素排出量削減効果

## (a) 海洋温度差発電

発電量に、沖縄電力の 2008 年度二酸化炭素排出量原単位 0.946kg-CO<sub>2</sub>/kWh を乗じて二酸化炭素排出量削減効果を算定した。

## (b) 冷熱利用設備(農業利用、水産利用、建物空調設備共通)

供給冷熱量を、電気式空調熱源機の想定成績係数(COP)=4 で除して消費電力量を推定。これを(a)と同様に二酸化炭素排出量削減効果に換算した。

## (c) 海水淡水化設備

効果算定対象としなかった。

## (d) その他利用設備

効果算定対象としなかった。

## (e) 取水設備・配水設備

推定消費電力量に、沖縄電力の 2008 年度二酸化炭素排出量原単位 0.946kg-CO<sub>2</sub>/kWh を乗じて二酸化炭素排出量を算定した(削減ではなく増加側)。

結果は、表 8-4 に、経済効果、雇用創出効果と併せて示す。

ただし、本環境効果は、現状の久米島町における化石燃料消費量や二酸化炭素排出量からの増減を表すものではないことに注意が必要である。比較基準となるベースラインを下記に示す。

比較のベースライン

「久米島モデル」の産業振興を、既存技術の延長上の火力発電と電気式冷凍機・空調器を用いて行った場合の化石燃料消費量・二酸化炭素排出量

## 8.4.2 産業関連モデルを用いた経済効果の試算

## (1) 直接効果の算定

直接効果は、各利用設備の年間生産量に販売単価を乗じたものとした。

## (2) 間接効果の算定

均衡産出高モデル[脚注]により、第一次間接効果を求めた。なお、逆行列係数は久米島のみを対象としたものが得られなかったため、沖縄県全体の統計データ(県統計課が公表している平成 17 年度の数値)を使用した<sup>24</sup>。

第 2 次間接効果以降は、久米島の消費動向や自給率に大きく影響されるものの、久米島に特化したデータが得られなかったため、沖縄県全体の数値を使用して算出している。算出結果の例として冷熱利用農業(太陽光利用型植物工場)分野の算定結果のまとめを、雇用創出効果と併せて表 8-4 に示す。

<sup>24</sup>  $X=B \cdot F$  ただし、 $X$ =生産誘発額、 $B$ =逆行列係数 $(I-\Gamma A)^{-1}$ 、 $F$ =自給率を考慮した最終需要

なお、第2次間接効果に必要な消費性向(所得増に対する消費増の比率)は、同じく県統計課による「平成20年度沖縄県経済の循環」を基に0.85とした。

また、各利用事業の算定結果を、表 8-3 に、環境効果、雇用創出効果と併せて示す。

### (3) その他の波及効果

上記の算定手法において評価できない波及効果として、次の2点が考えられる。

- ・久米島海洋深層水の知名度上昇による、既存深層水産業の売上増
- ・深層水複合利用の先駆的実証モデルとなることによる、視察者や観光客の増加

そこで、これらの波及効果については次の通り算定した。

- ・既存深層水産業の売上増については、今回の調査で明らかになった売上額(水産利用を除く、食料品、化粧品など): 810 百万円が 50% 増となるとして経済効果を算定する。
- ・視察者や観光客の増加については、現在の久米島におけるサービス業の売上額が 25% 増になるとして経済効果を算定する。ただし久米島におけるサービス業の売上総額は明らかになっていないため、「平成22年度 産業の概要」(久米島町役場発行)に記載の従事者数 453 人から、沖縄県が公表する「沖縄県雇用表(35部門)(平成17年度)」の「3400 対個人サービス」の就業係数: 0.18589 を用いて、生産額を逆算して利用する。この結果、現在のサービス業の売上額は  $453 \text{ 人} / 0.18589 = 2,436 \text{ 百万円}$  と推測される。

#### 8.4.3 雇用創出効果の試算

雇用創出効果は、沖縄県全体の雇用表(県統計課が公表している平成17年度の数値)を使用して算定した。

算出結果の例として冷熱利用農業(太陽光利用型植物工場)分野の算定結果のまとめを、雇用創出効果と併せて表 8-4 に示す。

また、各利用事業の算定結果を、表 8-3 に、環境効果、経済効果と併せて示す。

表 8-3 経済波及効果算定例（太陽光利用型植物工場）

コード	部門	直接および第一次間接効果			第二次以降間接効果			合計経済効果				
		生産誘発額	粗付加価値誘発額		生産誘発額	粗付加価値誘発額		生産誘発額	粗付加価値誘発額		就業誘発者数	
			雇用者所得 誘発額			雇用者所得 誘発額			雇用者所得 誘発額		雇用 誘発者数	
0100	農業	1,146.41	566.17	98.68	3.86	1.90	0.33	1,150.27	568.07	99.01	457	61
0200	林業	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.04	0.03	0.01	0	0
0300	漁業	0.24	0.13	0.04	0.21	0.12	0.03	0.44	0.25	0.07	0	0
0400	鉱業	1.74	0.72	0.30	0.51	0.21	0.09	2.25	0.94	0.39	0	0
0500	食料品・たばこ・飲料	89.79	29.22	11.08	9.29	3.02	1.15	99.08	32.24	12.22	6	6
0600	繊維製品	0.35	0.11	0.08	0.05	0.02	0.01	0.40	0.13	0.09	0	0
0700	製材・木製品・家具	0.35	0.12	0.09	0.12	0.04	0.03	0.47	0.17	0.12	0	0
0800	パルプ・紙・紙加工品	4.36	1.43	0.77	0.28	0.09	0.05	4.65	1.52	0.82	0	0
0900	化学製品	2.91	1.15	0.41	0.11	0.04	0.02	3.02	1.19	0.42	0	0
1000	石油製品・石炭製品	27.57	5.77	0.45	6.02	1.26	0.10	33.59	7.03	0.55	0	0
1100	窯業・土石製品	1.73	0.71	0.37	0.77	0.31	0.16	2.50	1.02	0.53	0	0
1200	鉄鋼	0.50	0.11	0.04	0.31	0.07	0.02	0.82	0.17	0.06	0	0
1300	非鉄金属	0.08	0.01	0.01	0.03	0.01	0.00	0.11	0.02	0.01	0	0
1400	金属製品	1.42	0.53	0.33	0.43	0.16	0.10	1.85	0.69	0.43	0	0
1500	一般機械	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0	0
1600	電気機械	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0	0
1700	輸送機械	0.25	0.07	0.03	0.12	0.04	0.02	0.37	0.11	0.05	0	0
1800	精密機械	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0	0
1900	その他の製造工業製品	6.01	2.92	1.78	1.12	0.54	0.33	7.13	3.46	2.11	1	1
2000	建築及び補修	7.39	3.39	2.64	4.86	2.23	1.74	12.25	5.62	4.37	1	1
2100	土木建設	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0
2200	電気・ガス・熱供給	0.00	0.00	0.00	11.25	3.81	1.22	11.25	3.81	1.22	0	0
2300	水道・廃棄物処理	0.00	0.00	0.00	5.25	3.11	1.32	5.25	3.11	1.32	0	0
2400	商業	54.62	36.30	22.37	19.84	13.19	8.12	74.46	49.49	30.49	16	14
2500	金融・保険	43.18	26.97	11.43	28.01	17.50	7.41	71.19	44.47	18.84	3	3
2600	不動産	6.48	5.47	0.28	46.52	39.28	1.98	53.00	44.74	2.26	1	1
2700	運輸	32.60	15.38	10.02	6.81	3.21	2.09	39.42	18.59	12.11	2	2
2800	情報通信	7.18	4.21	1.59	10.04	5.90	2.22	17.22	10.11	3.81	1	1
2900	公務	2.23	1.33	1.27	1.22	0.73	0.69	3.45	2.06	1.97	0	0
3000	教育・研究	2.97	2.47	2.38	5.44	4.52	4.35	8.42	7.00	6.73	1	1
3100	医療・保健・社会保障・介護	0.50	0.30	0.23	13.65	8.04	6.27	14.15	8.34	6.50	1	1
3200	その他の公共サービス	0.42	0.26	0.22	3.42	2.17	1.82	3.84	2.44	2.04	1	1
3300	対事業所サービス	29.28	17.28	9.52	16.25	9.59	5.29	45.53	26.87	14.81	7	6
3400	対個人サービス	0.35	0.19	0.10	22.57	12.26	6.16	22.93	12.45	6.26	4	3
3500	その他	10.63	-1.60	0.20	2.24	-0.34	0.04	12.87	-1.94	0.24	4	3
	列和	1,481.61	721.18	176.69	220.66	133.05	53.17	1,702.27	854.22	229.86	506	105

表 8-4 『久米島モデル』の環境効果、経済効果および雇用創出効果

項目	単位	海洋温度差発電	海水淡水化（水道水利用）		冷熱利用（農業）			冷熱利用（養殖漁業）		冷熱供給（配水）			取水事業者		
			フラッシュ蒸発法	逆浸透法	完全人工光植物工場	太陽光利用植物工場	土壌冷却	クルマエビ	海ぶどう等海藻類	農業用	水産業用	建物空調			
設備仕様	—	発電出力 1,250kW (年間平均)	海水淡水化 容量 200 t/d	海水淡水化 容量 200 t/d	占有面積 200坪型 ×1軒 (レタス類、サ ラダ菜)	8ha 相当 (20アール型 ×40軒) (ミニトマト)	占有面積 10ha 相当 1,000m <sup>2</sup> 型 AETハウス ×100軒 (ハウレンソウ 等)	養殖池 80,000m <sup>2</sup> 相 当 (20,000m <sup>2</sup> ×4 槽)	養殖水槽 1500槽 (海ぶどう 水槽換算)	冷熱農業等へ の冷熱提供 (配送ポンプと 管路の維持)	養殖漁業への 冷熱提供	イービーチ 地域に冷熱供 給 イービーチホテ ル、久米アイラ ンドホテル、ホ テルマリニテラス、 仲里庁舎等	主に OTEC へ の 深層海水供給		
深層水利用 (ピーク時)	入口温度	°C	6.7	11.7	20.2	11.7	11.7	11.7	15.8	20.2	11.7	15.8	11.7	6.7	
	出口温度	°C	11.7	20.2	—	15.7	15.7	14.7	23.8	25.0	11.7	15.8	14.7	6.7	
	流量	m <sup>3</sup> /h	9,710	400	20	98	6,720	1,440	9,590	400	8,258	9,990	880	9,710	
	冷熱量	MJ/h	208,311	14,588	—	1,682	115,333	18,536	329,179	8,238	0	0	11,327	0	
対ピーク時年間平均利用率	—	—	97%	97%	60%	20%	42%	10%	20%	24%	10%	20%	97%		
年間供給量・生産量	—	9,880	71	71	132	1,440	1,350	120	165	17,587	9,102	19,845	85,059,600		
	(単位)	—	MWh/年(電 力)	千 m <sup>3</sup> /年(淡 水)	千 m <sup>3</sup> /年(淡 水)	万株/年	t/年	t/年	t/年	t/年	千 m <sup>3</sup> /年	千 m <sup>3</sup> /年	GJ/年(冷熱)	t/年	
単価	—	20	150	150	150	750	565	4500	3000	20	6	1.04	1.58		
	(単位)	—	円/kWh	円/m <sup>3</sup>	円/m <sup>3</sup>	円/株	円/kg	円/kg	円/kg	円/kg	円/m <sup>3</sup>	円/m <sup>3</sup>	円/MJ	円/t	
売上高	百万円/年	198	11	11	198	1,080	763	540	494	352	55	21	134	3,856	
化石燃料削減効果（増加はマイナス）	kL-COE/年	2,506	—	—	561	12,811	4,324	18,283	915	▲ 317	▲ 136	▲ 42	▲ 1,237	37,668	
9,346	t-CO <sub>2</sub> /年		—	—	2,091	47,788	16,128	68,197	3,413	▲ 1,182	▲ 506	▲ 157	▲ 4,614	140,506	
326	百万円/年		18	18	312	1,702	1,203	839	768	580	90	32	221	6,109	
12	就業者	人		1	1	91	505	359	117	106	43	5	1	13	1,256
	うち雇用者	人	11	1	1	19	105	74	40	34	34	5	1	10	336
備考													冷熱販売価 格は電気式 空調の 75%と した場合	※深層水 0.7 円/t、 表層水 0.7 円/t で販売 する	

項目	単位	「久米島モデル」産業による効果(上表)	既存深層水産業の振興効果	視察・観光客増によるサービス産業振興	合計
売上高	百万円/年	3,856	415	610	4,881
化石燃料削減効果	kL-COE/年	37,668	-	-	37,668
二酸化炭素排出量削減効果	t-CO <sub>2</sub> /年	140,506	-	-	140,506
経済効果(波及効果考慮)	百万円/年	6,109	752	1,162	8,023
雇用創出効果(就業者)	人	1,256	78	166	1,500
備考		上表より	売上 50%増を仮定する	売上 25%増を仮定する	

## 8.5 『久米島モデル』実現に向けた課題と対策

本章では、再生可能な地域資源による自立型コミュニティの確立、および深層水利用の先導的実証モデル・技術ショーケースを目指す『久米島モデル』の試計画を行なった。

その結果、エネルギーと水を自給して、水産業・農業を始めとした深層水利用を行なうことで、年間約 80 億円の経済効果および 1500 人の雇用創出効果を得られる自立したコミュニティを提案することが出来た。

その結果、実現に向けた課題として、次の 3 点が明らかとなった(図 8-6)。

### (1) 深層水取水設備のコスト削減

本計画の建設費用の中で、海水取水設備の費用はおよそ 50%を占める。とりわけ、このうち深層水取水管の材料費および敷設工事費の割合が特に大きい。

一方、直径 1 メートルを超える深層水取水管の敷設は、ハワイ州自然エネルギー研究所 (NELHA: Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority) の直径 1.4m しか実施例が無い。つまり技術的に成熟しておらず、今後の技術開発によるコスト削減しるも十分残っていると考えられる。

本基本調査では深層水取水管について、信頼性を重視し上記 NELHA と同じ高密度ポリエチレン管を用いた浮遊曳航法を選択したが、浮体式の取水設備では FRP 複合材料を用いた新たな手法の検討も進んでいる。陸上からの取水管についても、費用削減のための技術開発を実施することが、本『久米島モデル』を実現するために有効であると考えられる。たとえば現地での長管連続製造による管製造の工期短縮と輸送費の削減は、費用削減にとって有効である。

### (2) 深層水冷熱利用農業の商用規模実証

『久米島モデル』検討において、深層水利用先のポテンシャルとして、水産養殖および冷熱利用農業が大きいことが明らかとなった。

このうち水産養殖については既にクルマエビと海ぶどうが大規模商用化されており、現在は夏季に深層水量が不足するなど、規模拡大についての懸念事項はほとんどないと言ってよい。一方、冷熱利用農業については、沖縄県海洋深層水研究所でハウレンソウ栽培の実証研究がされているものの、まだ商用規模の実証はなされていない。この面で、冷熱利用農業は水産養殖と比較してまだ実施リスクが高いのが現状である。

したがって、『久米島モデル』実現に先駆け、現在久米島で取水している深層水を用いて商用規模の植物工場、施設園芸設備の実証を行なうことが肝要である。

### (3) 海洋温度差発電の高効率発電サイクルの実海域での小規模実証

久米島では冬場に表層水の温度が下がるため、連続運転のためには高効率サイクルの適用が必須となる。一方、久米島への適用に最も適していると考えられる高効率サイクルは、実際の表層水と深層水とを用いた小型実証がされておらず、大型実証プラントへの適用前に実海域実証運転での性能確認および連続運転確認が必要である。とりわけ、商用電力網の容量が小さい久米島においては、系統連系した際に海洋温度差発電の出力変動の影響を受けやすいと考えられるため、温度が自然変動する実海水を用いても出力変動が実際に小さいことを確認することは重要となる。

(4) 取水量大規模化に向けた、深層水利用商品の高付加価値化の追求

これまで久米島では、クルマエビの稚エビを、清浄な海洋深層水で養殖して沖縄県内他地区にも供給を行なうなど、単純な商品ではなくさらに付加価値を高めた商品に適用を図ってきた。取水量が大規模化した場合、こういった高付加価値商品のバリエーションを増やし、前節までで検討した経済性をさらに高めることができると期待される。

とりわけ「久米島モデル」の主要部分を占める漁業・農業における高付加価値化の研究開発は、これまででも沖縄県海洋深層水研究所で実施されてきたが、今後取水量の大規模化に向けてさらに取り組みを強化する必要がある。

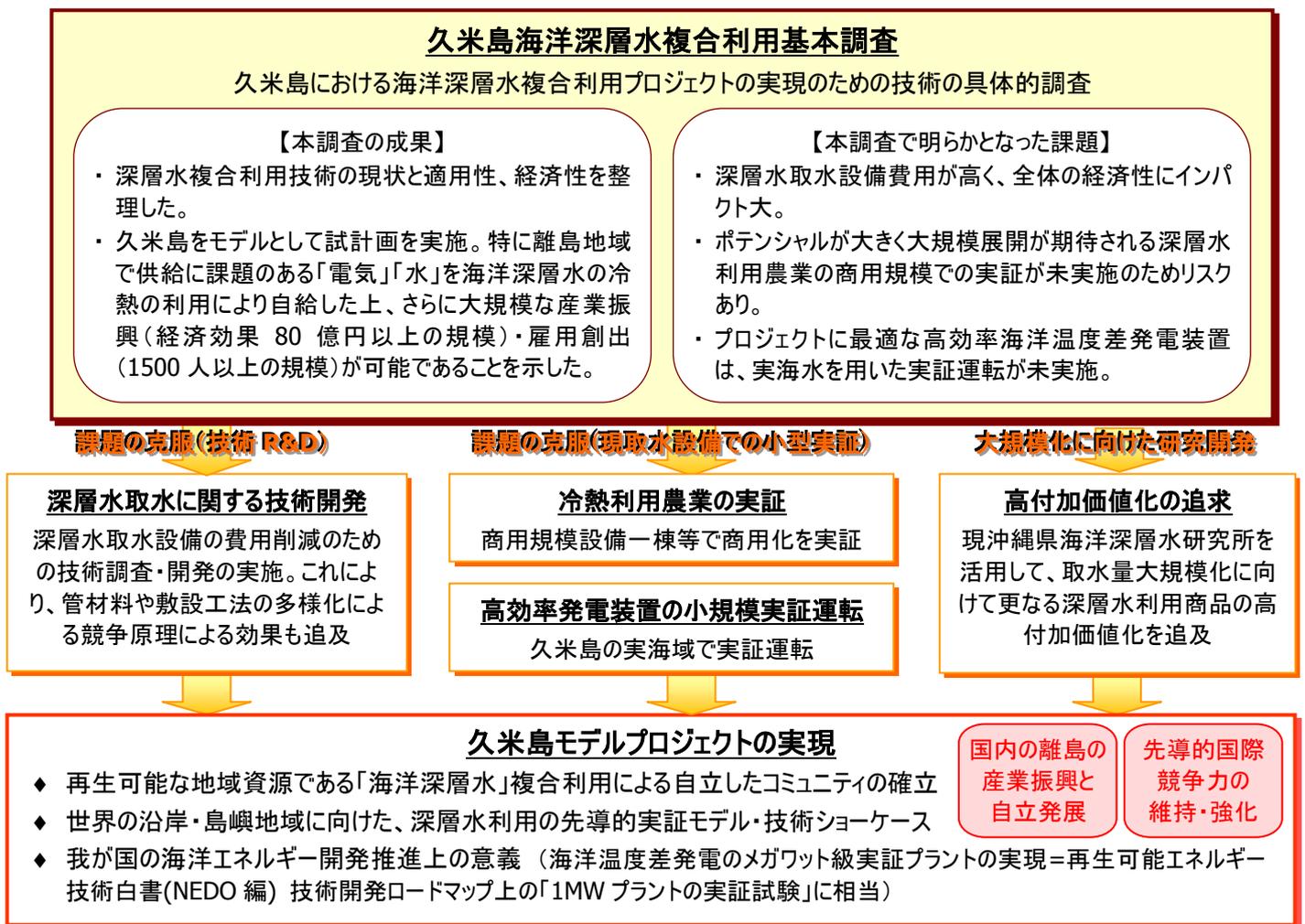


図 8-6 「久米島モデル」実現に向けた課題と対策

## 第9章 沖縄県及び我が国に資する効果

前章で述べた『久米島モデル』は、地域資源を生かした循環型の自立したコミュニティの確立という目的に加え、久米島と同じように海洋深層水へのアクセスが可能である地域への先導的実証モデルとしての役割も持つ。

そこで、本章では後者による将来展開についての基本シナリオに沿って述べる。

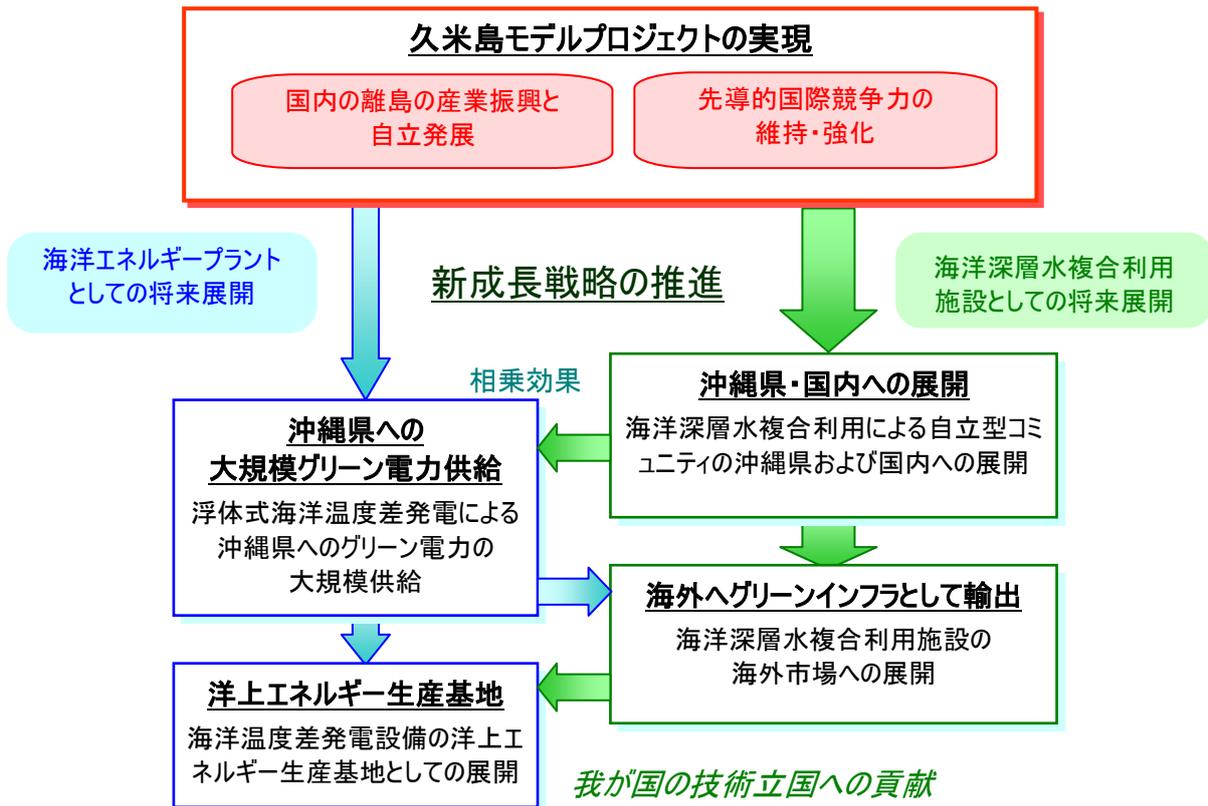


図 9-1 将来展開の基本シナリオ

### 9.1 海洋深層水複合利用による自立型コミュニティの沖縄県および国内への展開

周囲を海に囲まれた沖縄県には、膨大な量の海洋深層水が地球の熱塩循環により流れ込んでいる。

第 6 章で述べた、久米島周辺（北緯 26 度～27 度，東経 126 度～127 度のエリア）の深度 500m～1000m の層だけで、深層水取水可能量は 2.2Gt/d（『久米島モデル』での汲み上げ量の一万倍）に及び、沖縄県全体を考えると海洋深層水の資源量に関する懸念はほぼ無いと言ってよい。

ただし、海洋深層水複合利用は陸上から取水管を敷設するため、沿岸から取水深度までの到達距離が長い地域では建設コスト面および汲み上げに要するエネルギー面で実現が困難となる。沖縄本島は遠浅の海に囲まれており、この意味で海洋深層水複合利用が可能な地域はごく限られる。

このような観点から、沖縄県において海洋深層水複合利用による同様の展開が可能となる有力な候補は、表 9-1 に掲げる地域であると考えられる。

表 9-1 海洋深層水複合利用の沖縄県内の有力な候補地

候補地	備考
糸満市(本島)	本島南端に位置する。 平成 15 年度「糸満市海洋深層水活用地域振興基本構想」を策定。 さらに平成 20 年度に「海洋資源を活用した自立型地域エネルギー供給システムに関する調査研究」を実施する等、積極的な取り組みを行っている。
国頭村(本島)	本島北端に位置する。 本島の中では最も海底地形が深層水取水に適している。
宮古島	人口約 50,000 人。 大規模太陽光発電および風力発電を設置し、スマートグリッドの実証を行うなど、先進的な取り組みが行われている。
石垣島	人口約 45,000 人。
伊良部島	人口約 8,000 人。
渡嘉敷島	人口約 1,000 人。
粟国島	人口約 800 人。急峻な海底地形を持ち、取水ポイントまでの距離が近い。

沖縄県以外では、小笠原諸島父島などへの展開が考えられる。

## 9.2 海洋深層水複合利用施設の海外市場への展開

南太平洋の熱帯・亜熱帯には、数百に上る人口 1,000 人以上の島が存在する。

特に小規模な島嶼地域では、エネルギーはもちろん、淡水資源にも恵まれず、産業もほとんどないケースが多い。こういった地域の需要に合致した海洋深層水複合利用施設は、グリーンインフラの輸出として我が国の産業に貢献できる。

加えて、海洋深層水の利用においては、取水設備の数の面でも、利用研究の面でも、我が国が世界で最も進んでいると言える。この点で、我が国はこの分野において現状でも優位なポジションに立っており、大規模な先導的モデルの実施によりさらに指導的立場を強固なものにできる。

### 9.3 海洋温度差発電による沖縄県へのグリーン電力大規模供給

現在、沖縄県は電力供給のほとんどを化石燃料に依存している。表 9-2 に沖縄電力の主要な発電所を示す。火力発電所の合計設備容量は 1,773MW に上る。

表 9-2 沖縄本島の既存主要発電所

発電所	設備容量	種別／使用燃料
牧港	465 MW	汽力／重油
	163 MW	GT／灯油
石川	250 MW	汽力／重油
	103 MW	GT／灯油
具志川	312 MW	汽力／石炭
金武	440 MW	汽力／石炭
合計	1,733 MW	

一方、海洋温度差発電は、2030 年代には出力 50MW の浮体式発電設備が商用規模となるとされている(表 9-3)。また、出力が安定していて設備利用率が高いことから、ベース電力用の代替設備として期待されている。上記の発電設備容量 1,733MW のうち 20%がベース電力であると仮定するとその出力は約 350MW となり、50MW 海洋温度差発電設備 7 基でカバーされる。

久米島モデル、およびそれに続く海洋深層水複合利用における海洋温度差発電の運転実績の積み重ね・信頼性の向上により、このような沖縄県の電力供給のグリーン化推進への貢献も期待できる。

表 9-3 海洋温度差発電の技術開発目標 (再掲)

項目	2015 年	2020 年	2030 年
国内企業の育成、 国際競争力の強化	1MWプラントの 実証試験	商用プラントの運用開始 国内導入の促進	プラント出力の大型化 ・世界市場シェアの 拡大
プラント規模	～1MW	～10MW	～50MW
発電コスト	40～60 円程度	15～25 円/kWh 程度	8～13 円/kWh 程度

出典：NEDO, 「再生可能エネルギー白書」, 2010 年 7 月

### 9.4 海洋温度差発電設備の洋上エネルギー生産基地としての展開

前節で述べた浮体式海洋温度差発電設備は、沖縄のグリーン化とともに、海外市場への展開も期待される。インドネシアやフィリピンといった我が国から距離が近く人口も多い東南アジアの国々には、海洋温度差発電の適地が多数存在する。

これらの地域にエネルギー生産基地としての海洋温度差発電設備を展開することは、グリーンインフラ

の輸出による我が国産業の活性化に資するだけでなく、再生可能エネルギー利用技術により低炭素型のエネルギー資源を作り出し輸出しているとも見なすことができる。天然資源の乏しい我が国において、科学技術による再生可能エネルギーの生産、輸出は今後ますます重要になると考えられる。