

3. 実証試験データの解析・評価・検討

前章で述べた実証試験により得られたデータを用いて、解析・評価・検討を実施した。

実施にあたっては、本事業の趣旨として掲げられた「本事業においては、設備の規模拡大を想定し、実際に農林水産業を営む民間事業者等の協力を得て、発電後海水の複合利用の実証試験を行い、その有効性や実現性及び課題等について評価・検討を行うものである。」¹⁾に沿って、図 3-1 に示す解析・評価・検討を実施した。実施スキームを図 3-2 に示す。

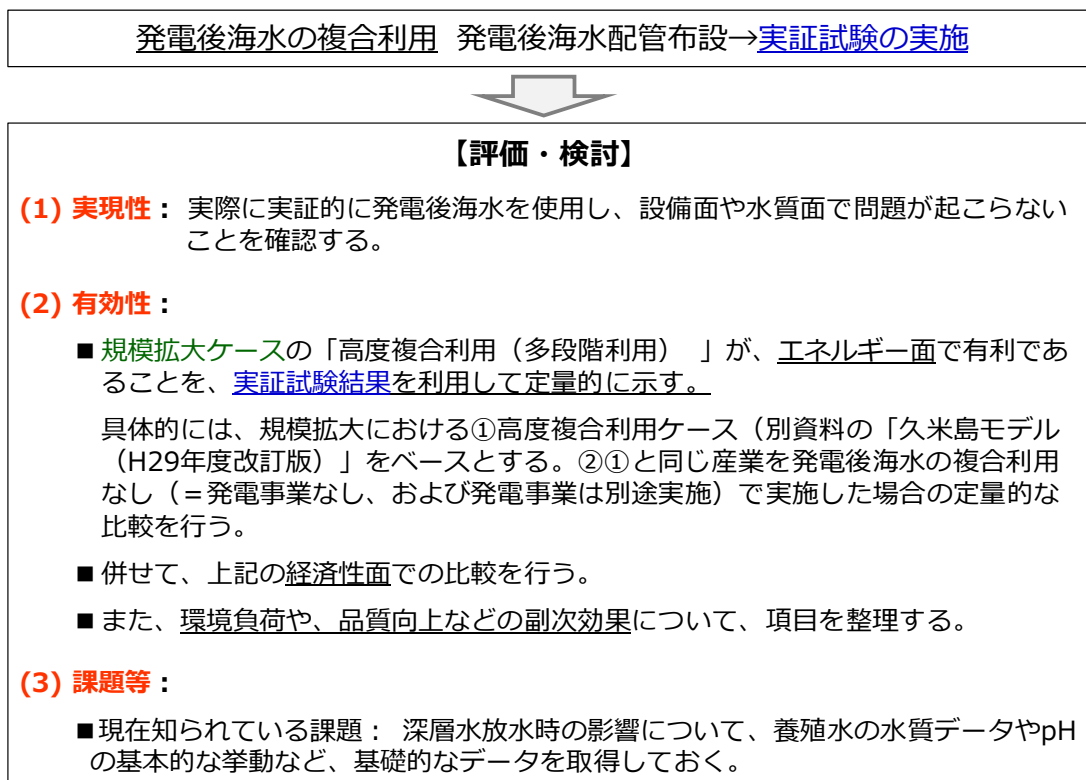


図 3-1 解析・評価・検討内容

¹⁾本事業の企画提案募集要項（H28年6月）「本事業の趣旨」より

凡例：XE：ゼンネス、GOF：ジューオーファーム、OET：沖縄エテック、OPU：大阪府立大学

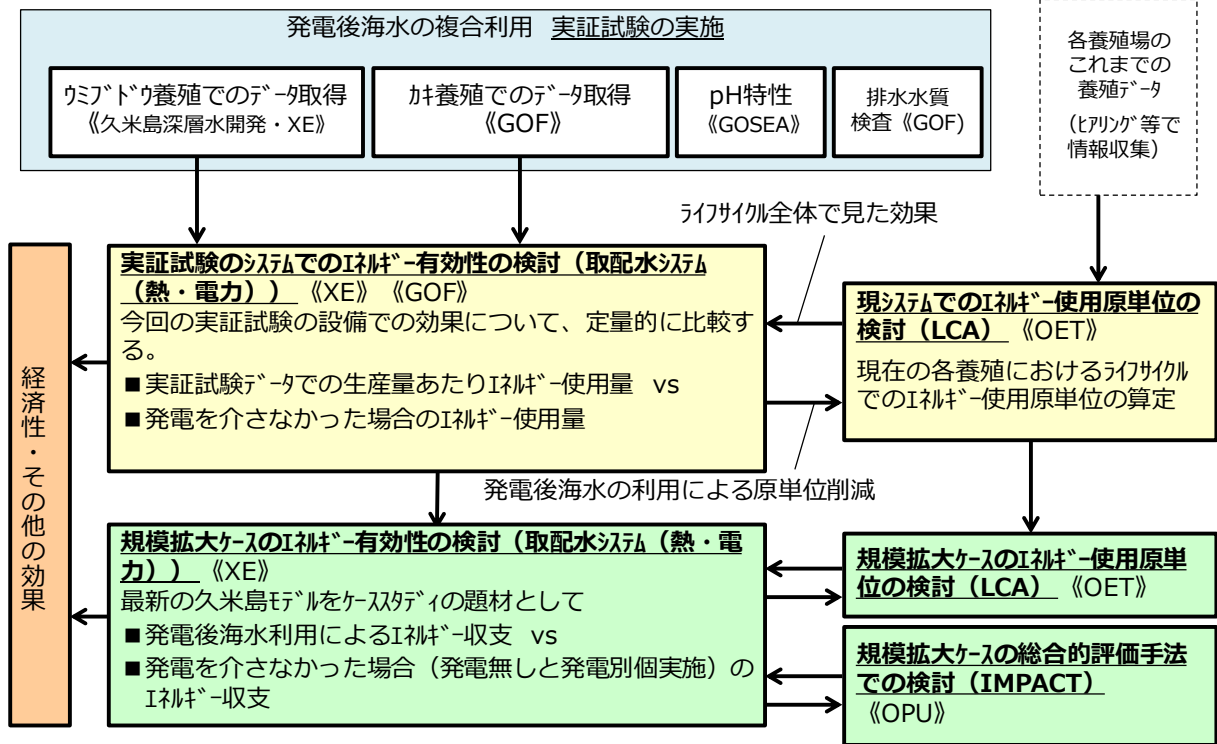


図 3-2 解析・評価・検討実施スキーム

3.1 海ぶどう養殖場における実証試験

3.1.1 試験実施状況

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

本実証試験では、水温が低く海ぶどうの生育に適した水質の発電後海水（発電後表層水）を利用することにより、深層水使用量不足を補うとともに、品質に影響を与えないことを検証した（図 3-3、図 3-4）。

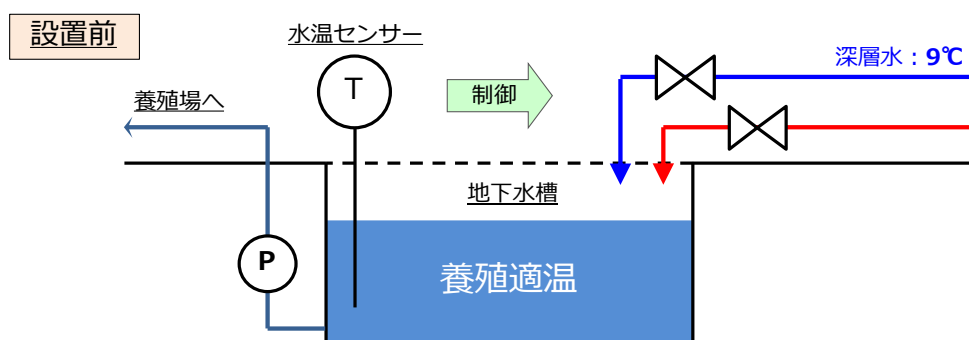


図 3-3 本実証前の海ぶどう養殖場での海水利用方法

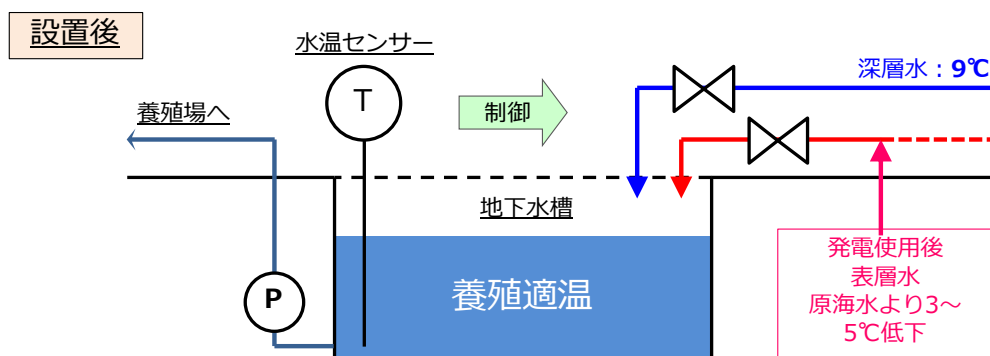


図 3-4 本実証試験における海ぶどう養殖場での海水利用方法

試験実施スケジュールを表 3-1 に示す。

表 3-1 試験実施スケジュール(海ぶどう養殖場)

日付	内容	備考
7月13日	構内工事完了・通水開始	発電後表層水の約90%を利用
9月7日	水温計補修	同上
9月28日	発電後表層水が100%海ぶどう養殖場に流れるようにバルブ調整	以降、発電後表層水の約100%を利用
11月6日	水温低下に伴い海ぶどう養殖場での利用量減 →再び発電後表層水の一部のみの使用	

3.1.2 発電使用後海水の利用によるエネルギー消費量低減効果の算定

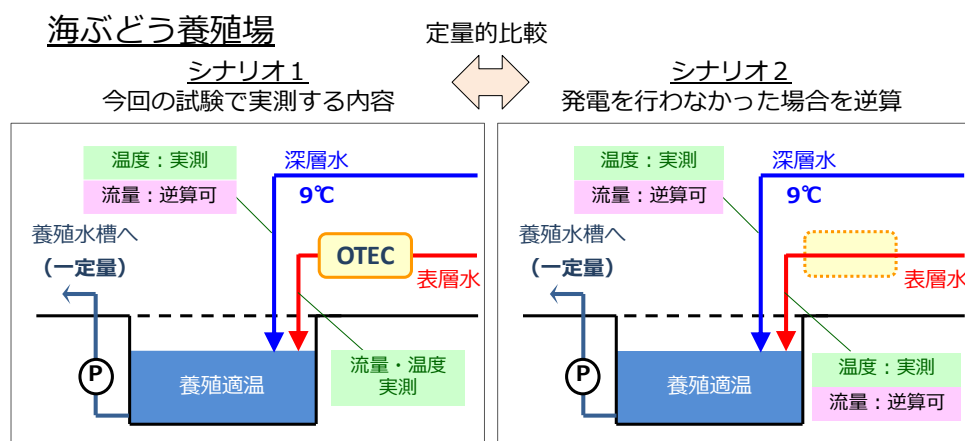
エネルギー消費量低減効果算定の方法として、次の 2 つのシナリオのエネルギー収支を算定、比較することとした（図 3-5、図 3-6）。

■シナリオ1: 実証試験ケース(海ぶどう養殖前に発電に使用するケース)

■シナリオ2: 発電を行わないケース(シナリオ1における温度・流量条件から逆算)

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

また、表層水および深層水の流量がシナリオ 1、2 で同じであれば、供給できる冷熱エネルギーもほぼ同じとなる点が海洋温度差発電の特徴となっている（正確には、発電により海水系外にエネルギーを放出するため、使用できる冷熱量は 2～4%増加する）。



シナリオ1の得失

得 OTEC発電量増、深層水流量小（ポンプ消費電力減）

※深層水流量が減ることにより、雑藻発生リスクも減

失 OTEC部の表層水圧力損失増（ポンプ消費電力増）

図 3-5 比較シナリオ

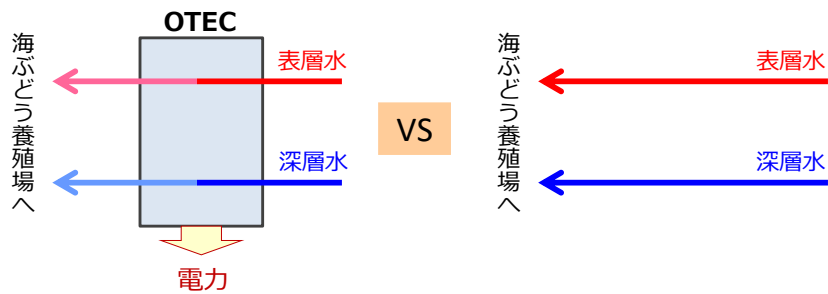


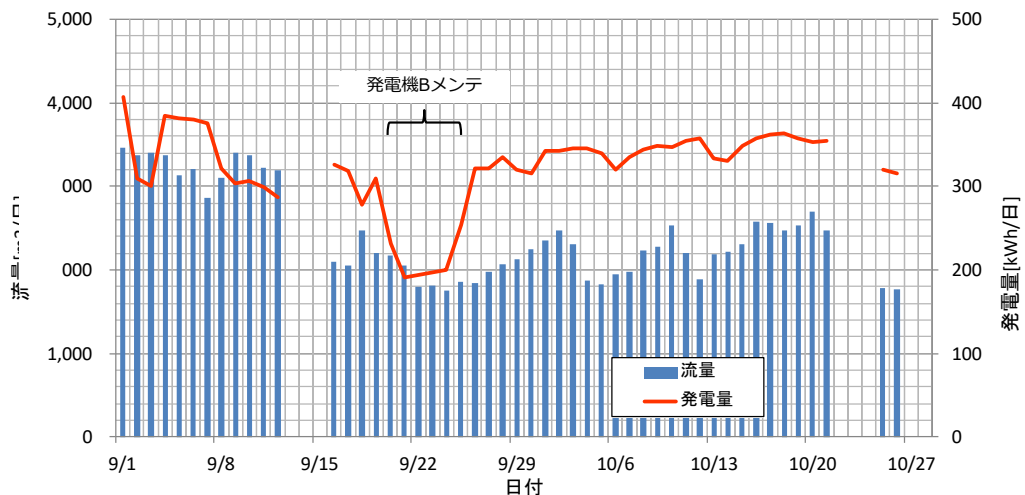
図 3-6 発電への利用有無によるエネルギー収支の差

「比較 1」では、直接的に OTEC の発電量の有無による差異を、エネルギー収支（電力収支）の差として算定した（図 3-7）。その結果、エネルギー消費量低減効果は 320kWh/日となった。

「比較 2」では、OTEC 有無による海ぶどう養殖への表層水供給温度の差異に注目して、エネルギーの差を「深層水利用量の節減量」に換算した（図 3-8）。ただし新棟用貯水槽への既設深層水ラインからの深層水供給量は計測されていない（他の貯水槽への流量と区別できていない）ため、算定にあたっては図 3-9 の方法を用いた。その結果、深層水利用量の節減量効果は 1 日あたり平均 240 トン（全取水量の約 2%）と算定された。

【比較1】 発電への利用有無によるエネルギー収支の差

9-10月の発電出力推移（実績）



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

図 3-7 比較 1:エネルギー収支の差

【比較2】 深層水使用量の節減効果

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

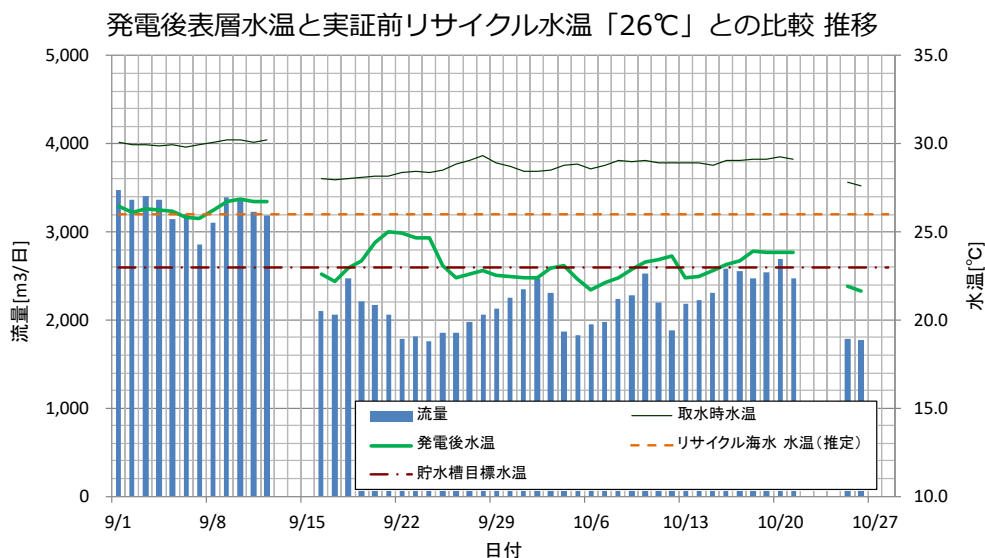


図 3-8 比較 2 深層水使用量の節減効果

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

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

➡ 1日あたり平均240トン（全取水量の約2%）の節減効果が得られている。

図 3-9 比較 2 深層水使用量の節減効果の算定方法と結果

3.1.3 経済性向上効果の算定

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

加えて、前述のエネルギー、経済性、後述の環境効果/不可を統合的に評価することができるLCA手法やIMPACT手法を用いた検討を、専門機関(LCA手法:(株)沖縄エネテック、IMPACT手法:公立大学法人 大阪府立大学)に再委託して実施した。これらの検討結果については3.4節に、規模拡大時の検討と併せて示す。

3.2 カキ養殖場における実証試験

前年度は、発電後海水を多段利用する目的で、近隣の水産施設、海ブドウ養殖場と車エビ養殖場の養殖水からカキの餌料となる藻類を培養する実験を計画した。海ブドウや車エビの養殖水は栄養塩が非常に豊富であるため、オーバーフロー分の養殖水を、カキの餌料培養への利用することの可否を検討するため2017年2月に発電後海水や水産施設の排水の水質調査を行った(図3-10)。この調査結果に関し、本年度第一回検討委員会における審議の結果、同養殖水の水質はカキの餌料用藻類を培養するための栄養塩濃度は少なく、これを用いた実証試験は困難であると判断された。このため、今年度はカキの飼育実験を通じて省エネ効果・経済性向上効果のデータを取得し、発電後海水の有効性について検証する方向で実施計画を変更した。

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

藻類を培養するうえで最低限必要

図 3-10 養殖海水の水質検査結果評価

本カキ養殖の狙いである「あたらないカキ」を生産するためには、清浄性のある深層水の利用が前提となる。深層水は年間を通し、温度が低温で一定という特性を持つ。一方、カキを良好に

成育させるためには高い水温での飼育（20℃～25℃）が好ましい時期がある。このため、カキの良好な成育を得るためには深層水を加温する必要が出てくるが、それには大きなコストが掛かるという課題があった。そこで深層水よりも水温が高い発電後海水を利用することで、消費エネルギー削減効果と経済的効果を算定し実証データを取得していくことを検討した（図 3-11）。

発電後海水を利用したカキの成長比較試験

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

↓

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

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

図 3-11 カキ養殖における今年度実証試験（当初計画から変更）

3.2.1 試験実施状況

(1) 第一回比較試験

半屋外のハウス内で 20L 容器を 9 つ用意し、1 つの容器にカキの稚貝を 10 個体ずつ（計 90 個体）収容した。①～③深層水、④～⑥（発電後深層水と同じ水温に）加温した深層水、⑦～⑨発電後深層水の実験区に分類し、海水はかけ流しの状態で、飼育水温の違いによるカキの成長差の比較検証を実施した（図 3-12）。



図 3-12 カキ成長差の比較検証

予め実施した実験結果をもとに餌料を給餌し、一定時間止水。これを1日2回行い、殻高、殻長、殻幅の計測を行った（図 3-13）。



図 3-13 殻高、殻長、殻幅の計測

10月中旬からから12月中旬にかけて実験を行った結果、深層水と発電後深層水で飼育したカキの成長率に有意差は確認できなかった。この原因については、発電後深層水の水温を安定維持できなかったことが理由としてあげられるのではないかと分析した（図 3-14）。

冬季における発電後深層水の水温変化 2017.10 ~ 2018.2

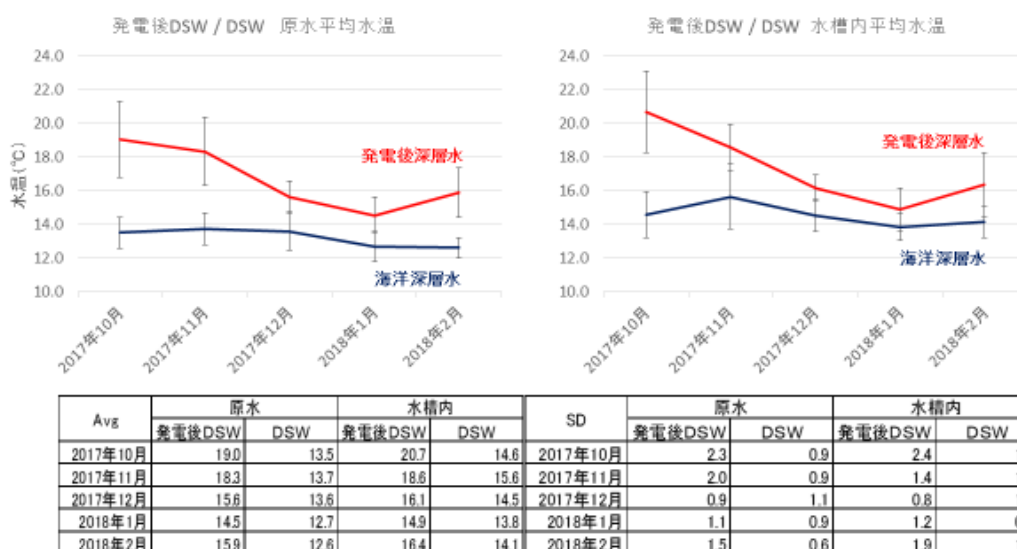


図 3-14 発電後深層水の水温変化

(2) 第2回比較試験

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

内での実施を検討した。

室内実験の内容については、1 L ビーカーに 3 個体ずつカキを収容し、水温 13℃と 25℃に調整した餌料を給餌し、8 時間後に餌料を入れ替え、1 日 2 回給餌を行った（図 3-15）。

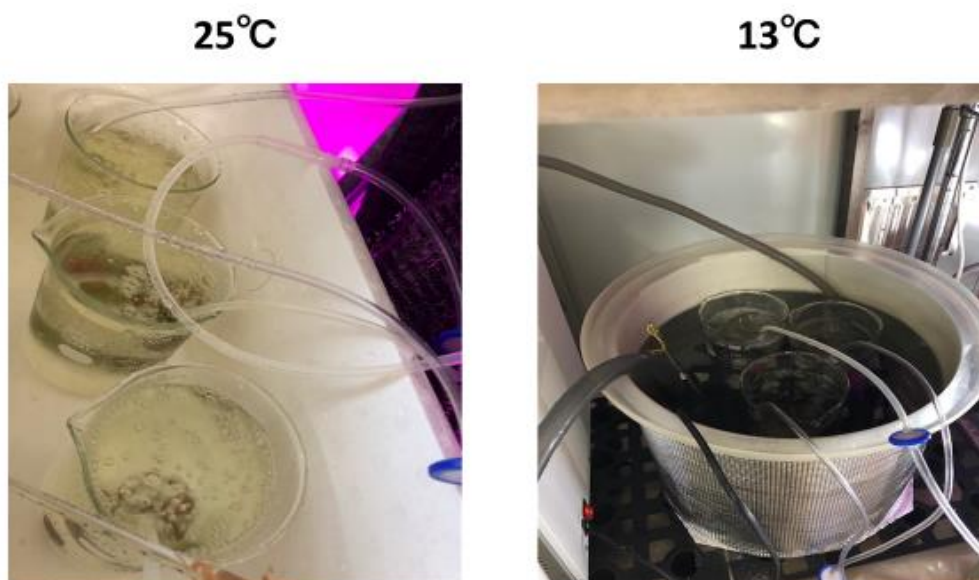


図 3-15 第 2 回比較試験

実験開始から 7 日目で体積の計測を行ったところ、成長差はまだ見られなかった。

しかし、摂餌率を計測したところ、高水温と低水温で飼育したカキの摂餌率は約 5 倍の差が現れた。高水温海水はカキの摂餌量を増大させており、低水温海水以上の成長に反されすると考えられる。本実験はまだ継続中ではあるが、摂餌率の結果からこのまま継続することで成長差がみられると見込んでいる。



図 3-16 第 2 回比較試験における給餌
 (左が給餌直後の様子。餌を全部食べ切ると、左のように無色透明な元の海水の色に戻る)

3.2.2 発電使用後海水の利用によるエネルギー消費量低減効果の算定

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

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

発電後海水の温度特性とカキ養殖に必要な温度条件

<夏季> 深層海水 発電後深層海水	供給温度	必要温度
	14～16℃ (19～22℃)	20～22℃ (23～25℃)
<冬季> 深層海水 発電後深層海水	12～13℃	(18～20℃)
	13～16℃	(10～14℃)

図 3-17 カキ養殖に必要な温度条件

(4) 消費エネルギー量比較

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

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

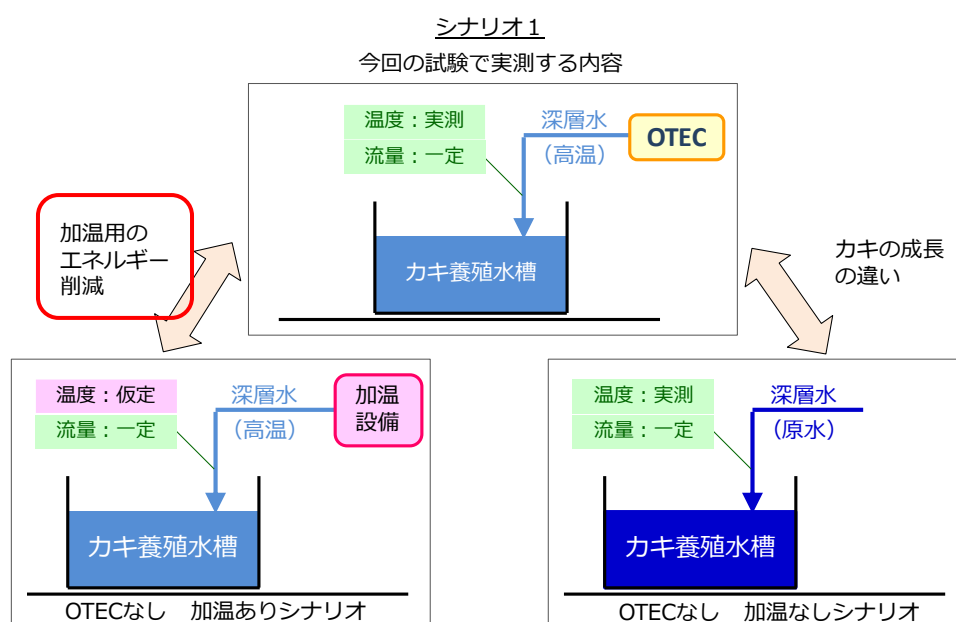


図 3-18 比較検討対象：加温用のエネルギー削減効果

流量 100L/h の深層水を電熱ヒーターを使って 15℃から 20℃に上昇させる実験を試みた。

200L 水槽の中に海水を貯め、200L 水槽への入水量と水槽からの出水量をおおよそ 100L/h となるように設定したことから加温時間を 2時間と想定すると、569W の電力が必要となる(図 3-19)。

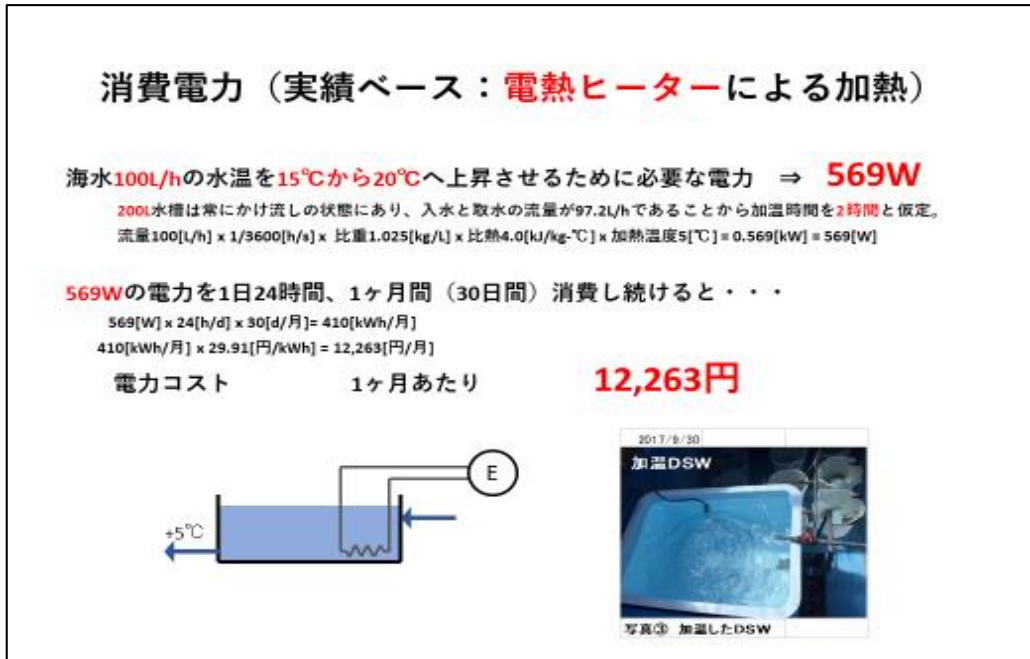


図 3-19 加温用のエネルギー量

3.2.3 経済性向上効果の算定

前項で得られたエネルギー消費量低減効果：569W を1日24時間、1ヶ月間稼働させた場合の電力コストに換算すると12,263円となる。

また、年間を通して発電後深層水と深層水の水温を20℃以上で維持しようとした場合、発電後深層水は冬季の間のみ、深層水は年間、加温する必要が想定される。電力コストを比較すると、発電後深層水を利用した場合と、深層水を利用した場合とでは約3倍もの差があると算定された（図3-20）。

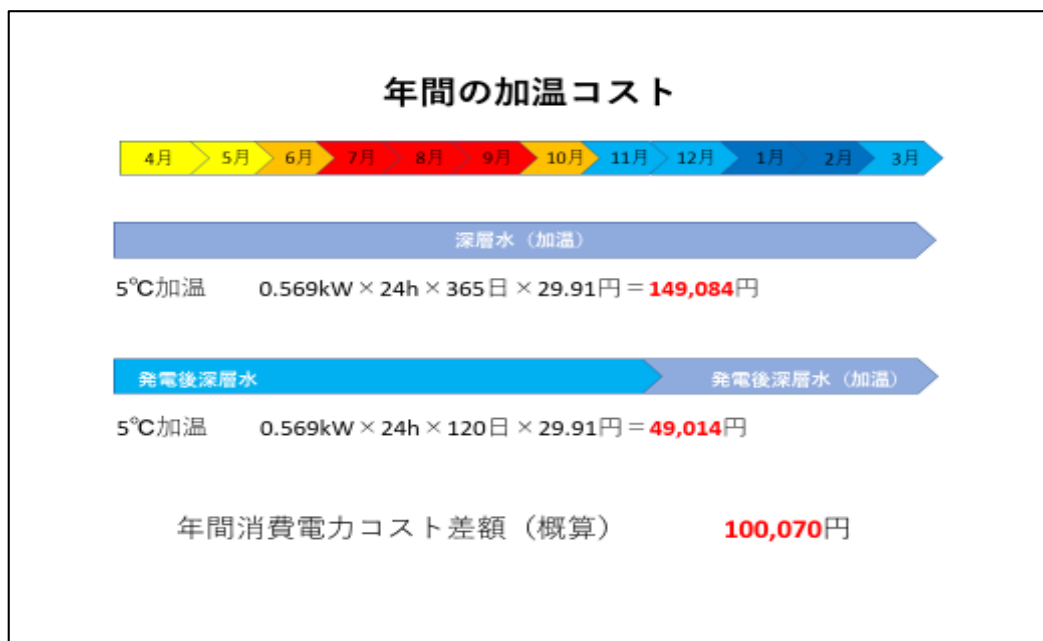


図 3-20 年間消費電力コストの差

深層水よりも水温の高い発電後深層水はカキの良好な成育に有効であり、年間を通じた加温処理においても深層水より省エネ効果、経済的効果が期待できると考えられる。

冬季の水温を上昇させる必要があるための消費エネルギー量・電力コストを如何に抑えていけるかが今後の課題であり、ヒートポンプや熱交換器を用いた検証を検討している(図 3-21、図 3-22)。

消費電力(ヒートポンプによる加熱を想定した場合)

海水100L/hの水温を15℃から20℃へ上昇させるために必要な電力 ⇒ **142W**

200L水槽は常にかけ流しの状態にあり、入水と取水の流量が97.2L/hであることから加温時間を2時間と仮定。
ヒートポンプの成績係数(COP)を4.0と仮定する。

流量100[L/h] × 1/3600[h/s] × 比重1.025[kg/L] × 比熱4.0[kJ/kg・℃] × 加熱温度5[℃] / COP 4.0 = 0.142[kW] = 142[W]

142Wの電力を1日24時間、1ヶ月間(30日間)消費し続けると・・・

142[W] × 24[h/d] × 30[d/月] = 102.2[kWh/月]

102.2[kWh/月] × 25[円/kWh] = 2,556[円/月]

電力コスト 1ヶ月あたり **2,556円**

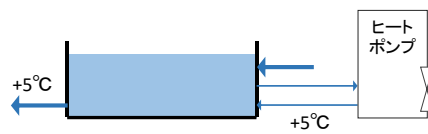


図 3-21 今後の検討課題:ヒートポンプによる加温検討

消費電力(表層水との熱交換による加温を想定した場合)

海水100L/hの水温を15℃から20℃へ上昇させるために必要な電力および表層水量

⇒ 電力 **4.2W** + 表層水 **100L/h**

深層水100L/hを、表層水(冬季で22~23℃)100L/hで熱交換して加温するために必要な電力(ポンプ用)

熱交換器を含む配管系統における表層水、深層水の圧力損失を30kPa(≒3m水頭)とすると

流量100[L/h] × 1/3600[h/s] × 圧力損失30[kPa] / ポンプ効率0.8 × 2[基] = 0.0042[kW] = 4.2[W]

4.2Wの電力を1日24時間、1ヶ月間(30日間)消費し続けると・・・

4.2[W] × 24[h/d] × 30[d/月] = 3.0[kWh/月]

3.0[kWh/月] × 25[円/kWh] = 75[円/月]

電力コスト 1ヶ月あたり **75円**

100L/hの表層水を1日24時間、1ヶ月間(30日間)消費し続けると・・・

100[L/h] × 24[h/d] × 30[d/月] = 72[m³/月]

72[m³/月] × 表層水6[円/m³](現在の販売価格と同じとする) = 432[円/月]

表層水コスト 1ヶ月あたり **432円**

合計コスト 1ヶ月あたり **507円**

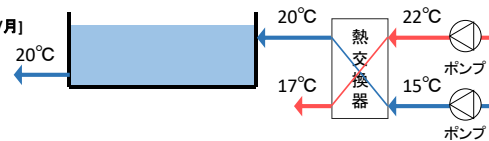


図 3-22 今後の検討課題:表層水との熱交換による加温検討

3.3 放水による環境負荷低減効果の評価

3.3.1 水量および水温

(1) 海ぶどう陸上養殖場

海ぶどう陸上養殖場では、換水率を一定とするために、養殖水槽への流量を極力一定としている。このため、深層水と表層水の合計流量も、発電の有無にかかわらず基本的に一定となる。すなわち、図 3-5（以下に再掲）のシナリオ 1 と 2 の間で、深層水と表層水の合計流量の差（結果的に放水量の差と一致）は無い。

水温についても 3.1.1 項で述べた通り、深層水と表層水とを混合した場合の冷熱エネルギーの差、つまり水温の差も無視できる程度の差しか無い。

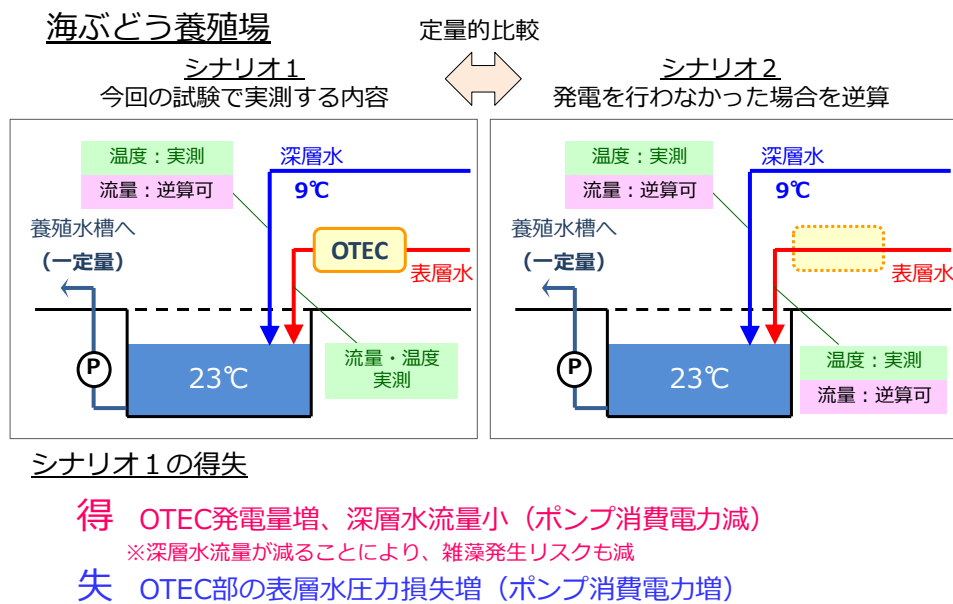


図 3-5 【再掲】比較シナリオ(海ぶどう養殖場)

(2) カキ陸上養殖場

カキ陸上養殖場においても、発電の有無にかかわらず、深層水合計流量は同じでなる。すなわち、図 3-18（以下に再掲）の OTEC ありシナリオと OTEC なしシナリオとの間で、深層水流量の差（結果的に放水量の差と一致）は無い。

水温についても、OTEC なしの場合は深層水を加温して用いることになるため、両者に差は無い。

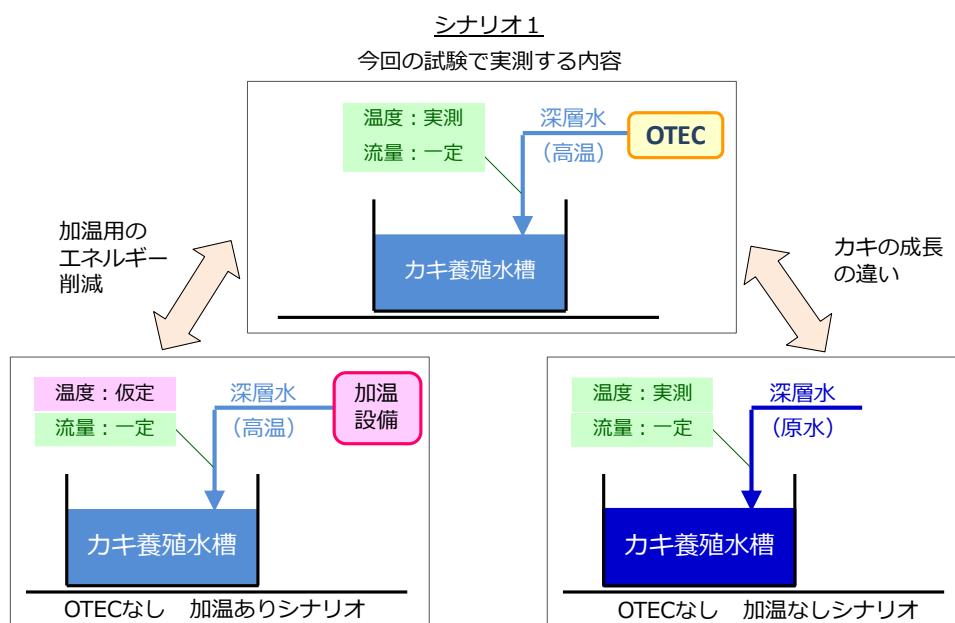


図 3-18 【再掲】比較シナリオ(カキ養殖場)

以上により、水量および水温の面では、発電の追加による環境負荷の増減は無いと言える。

3.3.2 水質

(1) 放水中の栄養塩

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

そこで、まず現状の各需要先の利用前後の海水中の栄養塩濃度等水質を測定するとともに、養殖による水質変化について定量的な試験評価を行った（平成 28 年度に 2 回実施）。

今年度は、環境負荷となりうる水産養殖における残餌等の処理について、水産養殖後の海水をさらに他の養殖に用いて環境負荷を低減させる「水産→水産のカスケード利用」の可否について、海ぶどう養殖→カキ養殖のカスケード利用を例に検討を行ったが、昨年度末に実施した養殖水水質検査を基に検討を実施したところ、カキ養殖に適した植物プランクトンが得られないことが判明したため、検討委員会に諮り実証試験は実施しないこととした。ただし、冬季と夏季によって水質が変化することも考えられるので、11月に再度、水質検査を実施した。

検査結果から、餌料用藻類培養するには栄養塩が少なすぎる事が再確認された。このため実験内容の見直しに伴い、水質検査の検査項目を精査、再度選定を行った。また、検討委員会（第4章参照）における議論に基づき、検査結果の整合性を図るため、検査機関を(株)沖縄環境分析センターに加えて一般財団法人宮城県公衆衛生協にも並行して依頼した。

(2) 深層水の pH 特性の把握

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

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

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

これに関して、深層水と同様に pH の低い海水を使用している沖電開発(株)サンゴ養殖場を訪問し、情報交換を行った。概要を以下に記す。

経緯

沖電開発のサンゴ養殖施設では地下浸透海水を用いている。地下浸透海水は汲み上げ時に低い pH を示すものの、使用後すぐに pH は上昇するとの発表をしていたとの情報があり、詳細を沖電開発から聴取した。

水産養殖研究センターの一般情報

- サンゴの養殖場関係者は全部で 5 名。サンゴ養殖が 1 名、水槽の管理などが 4 名。
- 年間 1 万本ほどのサンゴを育成しており、無事に成長した 5000 本ほどを海に植え付けている。
- サンゴ以外には、シャコガイ、小型のサメ(体長 2m ほど)やウミガメの飼育などを行っている(主に水族館向け)。また、アクアリウムに使用する水槽の販売・レンタルや、水槽の管理なども行っている。
- サンゴ養殖場には昨年 3,000 人ほどが見学を訪れており、サンゴの植え付けなどを体験してもらっている。(一昨年は 1,600 人程度、その前は 1,000 人程度だったが、修学旅行関係の来場者が増えているとのこと)。

サンゴ養殖設備の概要

- サンゴ養殖には浸透地下海水を使用している。(以前は表層水も使用していたが、現在はポンプが停止しているため浸透地下海水のみ)
- 浸透地下海水は地下 29m と 25m の深さから汲んでいる。
- サンゴ水槽の海水は基本的に循環させつつ、一部(1 日 20t ほど)を入れ替えている。(水槽の体積は 20m³であるため、換水率は 1 回/日)
- サンゴは土台となるブロックに接着剤か、針金を用いて取り付ける。(土台はサンゴの成長に悪影響を与えない。)
- サンゴの成長を阻害する藻は、シラヒゲウニを同じ水槽に入れて食べさせることで繁殖を防いでいる。
- サンゴの養殖水槽は、日中は LED 光を当てている。(サンゴには種類によって好む光の波長がある。)
- サンゴの苗木は、成長したサンゴから切り取ったものを使用している。
- 現在、サンゴの産卵方法について模索しており、今後は人工光を用いて産卵の誘発に挑戦していく。

研究センター写真



(研究センター入口)



(養殖場内部、上の黒い網部分に LED ライトを設置)



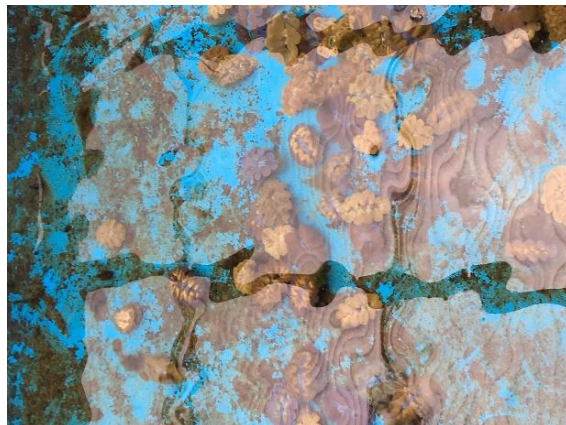
(シラヒゲウニ)



(サンゴの苗木)



(サンゴの苗木、白い部分は土台)



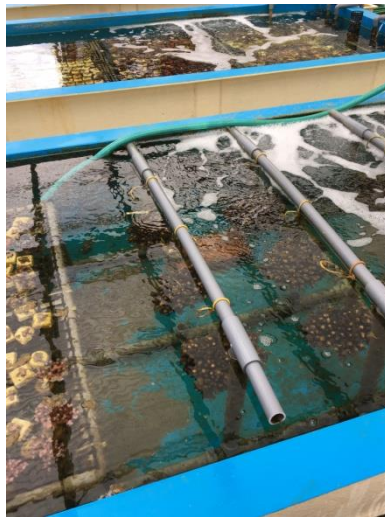
(シヤコガイの養殖)



(養殖場横で飼育されているウミガメ)



(屋外に設置された水槽で飼育されているサンゴの苗木)



(苗木の基となるサンゴ(写真中央塩ビパイプの下))

(浸透地下海水の特徴)

- 浸透地下海水は、泥岩層や石灰岩の砂礫層を通して、不純物が取り除かれている。
- pH が低く(約 7.4)、溶存酸素はほぼゼロである。また、海水と比較して $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ が高い。
- 表層水と比較すると、温度が季節によらずほぼ一定であり、清浄性が高い
(表層水の温度は真夏で 32-33°C、冬は 10°C 程度)
- 干潮、満潮の影響で栄養性に影響が出る。
- 空気で強曝気することで pH と溶存酸素を増加させている。(曝気すると pH は 7.4→7.8 程度に上昇する。)
- 温度は冬場でも 23°C を切らず、夏場には 27°C 以上にならない。(サンゴの養殖では 20°C を切ると危険で、30°C 以上はサンゴにストレスを与える。また、硝酸や亜硝酸、窒素、リンなどが天敵。)
- pH は 7.8 と低いが、サンゴの成長に顕著な悪影響は出ていない。ただし、対照試験で確認したわけではなく、感覚的な話。
- pH の測定に使用している機器の精度は ±0.1。
- 全炭酸量の測定などは行っていない。

3.4 取水量を増大させた際の効果に関する予測

3.4.1 検討の前提

(1)検討対象（シミュレーション対象）

前節までの検討を基に、取水量を増大させた際の効果をシミュレーションにより算定する。シミュレーション対象として、発電後海水の複合利用について定量的な検討を行うため、具体的な海水需要（所要流量と温度）の想定が明らかとなっている「久米島モデル」を用いた。

久米島モデルとは、海洋深層水をエネルギー・食糧・水供給へ複合利用することにより地域の自立を目指す、久米島町立案のモデル地域計画である。沖縄総合事務局経済産業部「平成29年度離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査」報告書（以下「H29 沖総局調査」）から久米島モデルにおける深層水産業分野と売上規模の見込みを表3-2に、配置図を図3-2に参考として示す。

表 3-2 【参考】久米島モデルにおける深層水産業分野、需要量、利用形態等
出典:「平成29年度離島地域における海洋深層水を活用した地域活性化可能性調査」報告書

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

(*1) 既存企業は、現在の利用量及び売上高を含む。

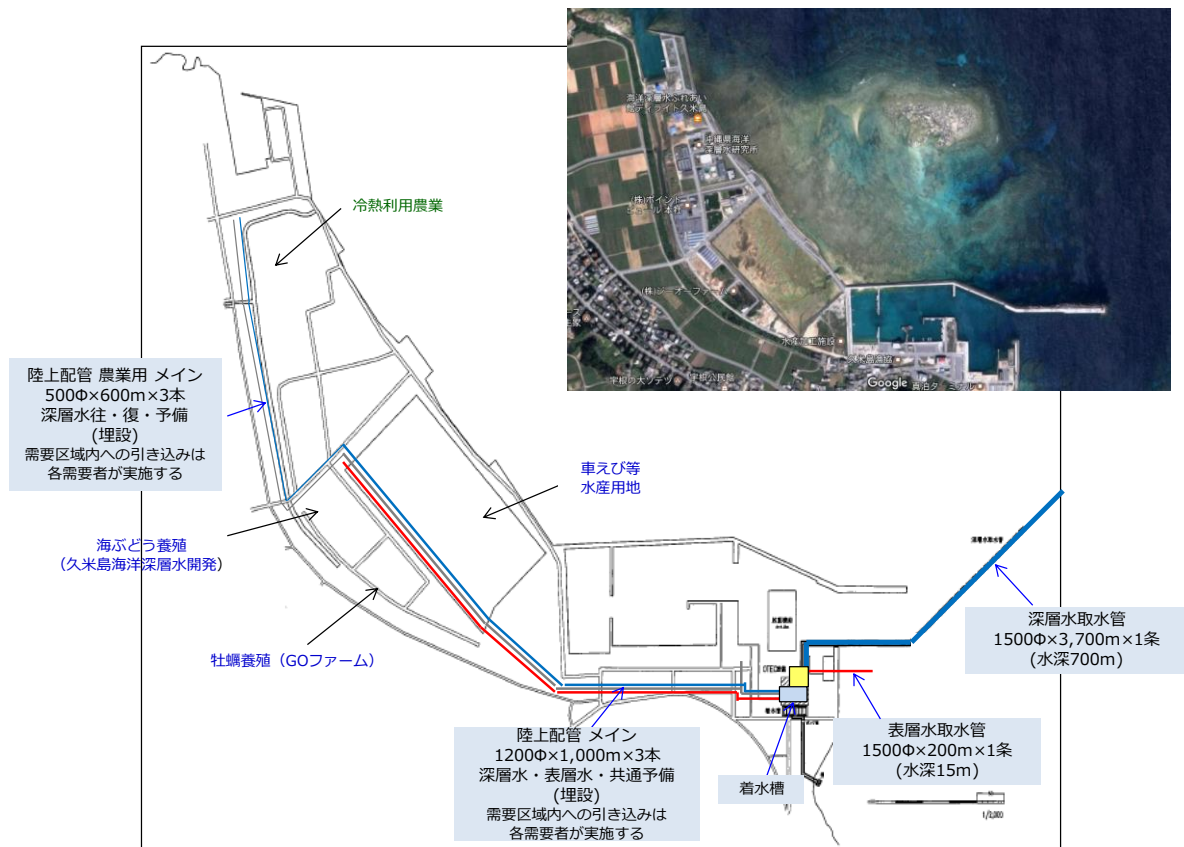


図 3-23 【参考】久米島モデルの配管配置図

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

ただし、表 3-2 の大規模需要のうち、前節までの実証および関係者ヒアリングによって表層水・深層水需要の見通しの詳細が明らかになっている需要と、概略の見通しのみ得られている需要が存在する。前者は海ぶどうの陸上養殖および車えびの夏季における養殖、および発電が相当する。これは、海ぶどうの陸上養殖が既存産業の拡張であること、車えびの夏季における養殖（深層水利用）が沖縄県海洋深層水研究所で実証済みであること、発電も沖縄県実証設備で 5 年間実証運転を続けていることから、実績に基づくデータがあり詳細の見通しが立てられるためである。そこで予備検討として、久米島モデルの需要の中から海ぶどう、車えび、発電の 3 者のみに絞ったモデルで、詳細な検討を行った。次に、久米島モデルの全需要を対象に、概算であるものの包括的な検討を行った。

(2) シミュレーション比較ケース

発電後海水の高度利用の効果を算定するために、次の 3 つのケースを比較した。

- ① 久米島モデルケース: 発電を最上流とし、発電後海水の利用を行う多段利用システム
- ② 発電なし多段ケース: 発電は行わないが、冷熱利用→水産養殖の多段利用を行うシステム

③多段なしケース: 多段利用を行わず、全需要に平行的に海水を供給するシステム

②③については、低温の深層水をそのまま使うことになるため、冷熱の総量のみを考えれば所要流量が減るメリットがある(図3-24)。

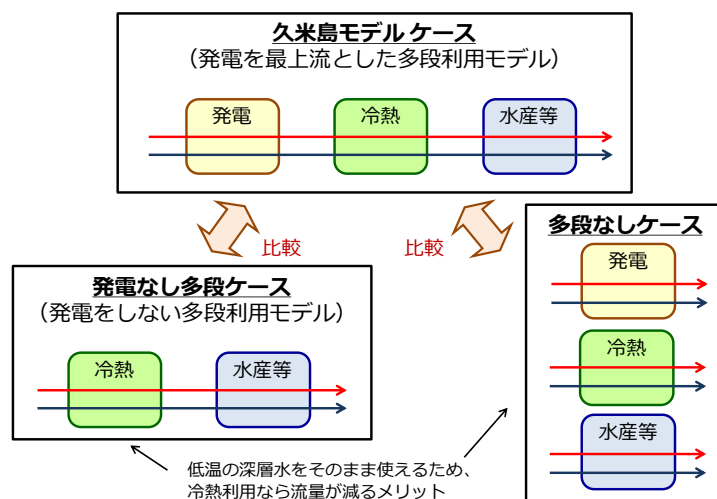


図 3-24 【参考】久米島モデルの配管配置図

3.4.2 取水量を増大させた場合の海水配管コンセプト

前項で掲げた 3 ケースについて、多段利用の有効性算定のための海水配管コンセプトを述べる。まず、最も単純な「多段なしケース」について、各ケースに共通するコンセプトとともに示し、次に発電なし多段ケース、久米島モデルケースの順で示す。

(1) 多段なしケース

表層水および深層水は、まず表層水原水貯水槽、深層水原水貯水槽にいったん貯留され、それぞれの需要に応じて水槽からポンプで圧送されるコンセプトとした(各ケース共通)(図 3-25)。

表層水および深層水は、自然流入により貯水槽に導かれる。このため、貯水槽の水位は、配管抵抗による圧力損失(最大流量時で 23kPa)および取水管内外の密度の違いにより生じる静水頭(12kPa)の和の分だけ、海面より低くなる。この貯水槽から配水ポンプ(原水)により、各需要先に送水を行う。この際、複数の需要先に独立配管を行うのは非効率であるため、配水主管を設けて主管-枝管方式で各需要への排水を行う。配水主管には、最低限の圧力を常に与えておくものとし、本検討ではその圧力を 30kPa(海面基準)とした。各需要先での使用の際に主管の圧力で不足する場合は、それぞれの需要先でブースターポンプを用いる。なお、配水主管の圧力は常時モニタリングされ、その圧力に応じて配水ポンプの運転台数制御および回転数制御(一部)を行う。本制御方式は、ハワイ州自然エネルギー研究所(Natural Energy Laboratory, Hawaii)

Authority: NELHA) において行われているものと同等である (図 3-26)。

多段なしケース

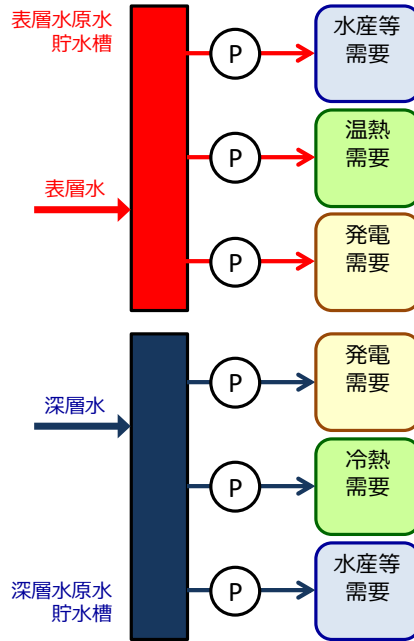
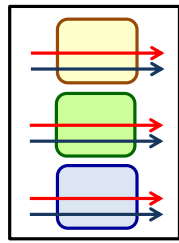


図 3-25 海水配管コンセプト(多段なしケース)

多段なしケース

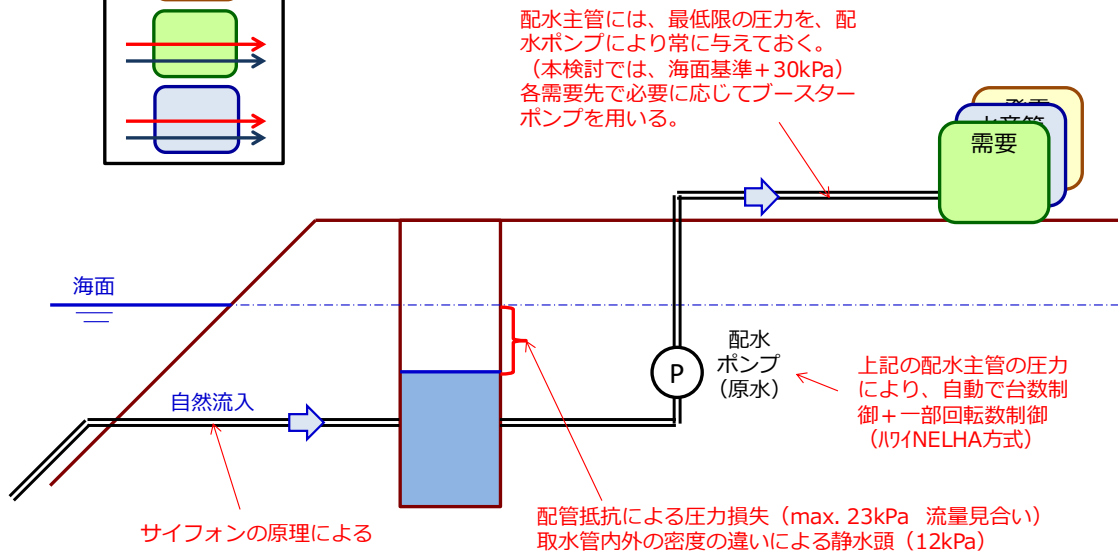
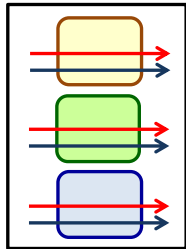


図 3-26 海水配管フロー(多段なしケース)

(2) 発電なし多段ケース

発電なし多段ケースにおいても、表層水および深層水は、自然流入により貯水槽に導かれ、配水ポンプにより、各需要先に送水される。基本となるフローは、図 3-27 の中央部に示す、原水貯水槽→配水ポンプ→温／冷熱需要→中間貯水槽→配水ポンプ→水産等の需要（多段利用における 2 段目以降）、となる。中間貯水槽は、原水貯水槽と同じ開放型とするが、後述のオーバーフローを考慮して水位は 1m と設定する。

配水主管の圧力制御は多段なしケースと同様であるが、本ケースでは 1 段目需要（温／冷熱需要）と 2 段目需要（水産等需要）とで所要流量が必ずしも一致しないため、その対応も必要となる。本検討における対策を表 3-3 に示す。

表 3-3 流量のアンバランス対策

ケース	対策
1段目需要 > 2段目需要	このケースでは、送水管の圧力制御のみでは中間貯水槽（図3-28参照）がオーバーフローすることとなる。そこで、あらかじめオーバーフロー管を設け、中間水槽の水位の一定レベル（水位：海面上1m）を超えないようにする。
1段目需要 < 2段目需要	このケースでは、送水管の圧力制御のみでは中間貯水槽（図3-28参照）の水位が下がり続け、2段目需要への供給に支障をきたすこととなる。そこで、原水配管からの直接供給配管および制御弁を設け、中間貯水槽の水位が一定レベル（水位：海面下1m）を下回らないようにする。

発電なし多段ケース
(発電をしない多段利用モデル)

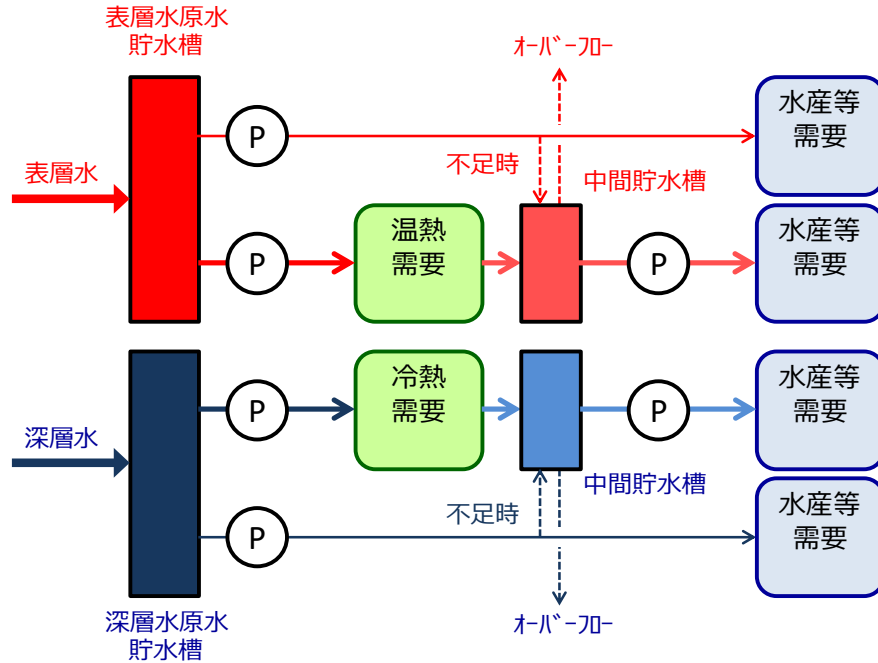
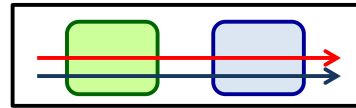


図 3-27 海水配管コンセプト(発電なし多段ケース)

発電なし多段ケース
(発電をしない多段利用モデル)

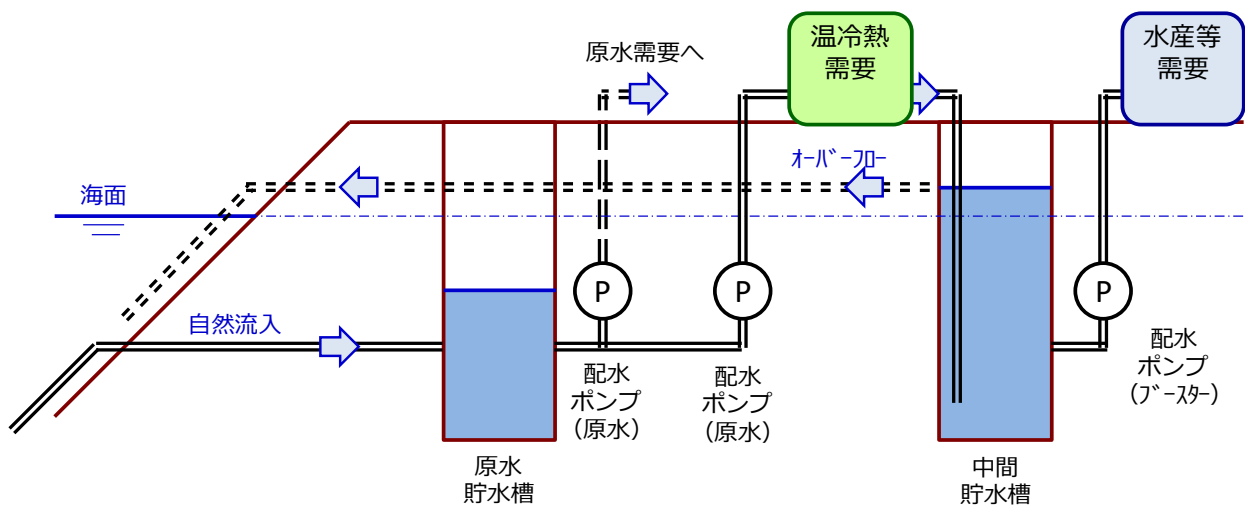
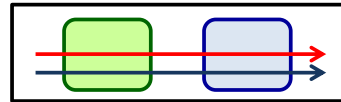


図 3-28 海水配管フロー(発電なし多段ケース)

(3) 久米島モデルケース

久米島モデルケースにおいても、他のケースと同様に表層水および深層水は自然流入により貯水槽に導かれ、配水ポンプにより各需要先に送水される。基本となるフローは、図 3-29 の中央部に示す、原水貯水槽→配水ポンプ→発電需要→中間貯水槽→配水ポンプ→温／冷熱需要→中間貯水槽→配水ポンプ→水産等の需要（多段利用における 3 段目以降）、となる。

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

なお、発電需要（OTEC）については、原水貯水槽から OTEC 施設に海水を汲み上げ、中間貯水槽に戻すまでの配水ポンプを所内動力の一部と見なす（図 3-30）。

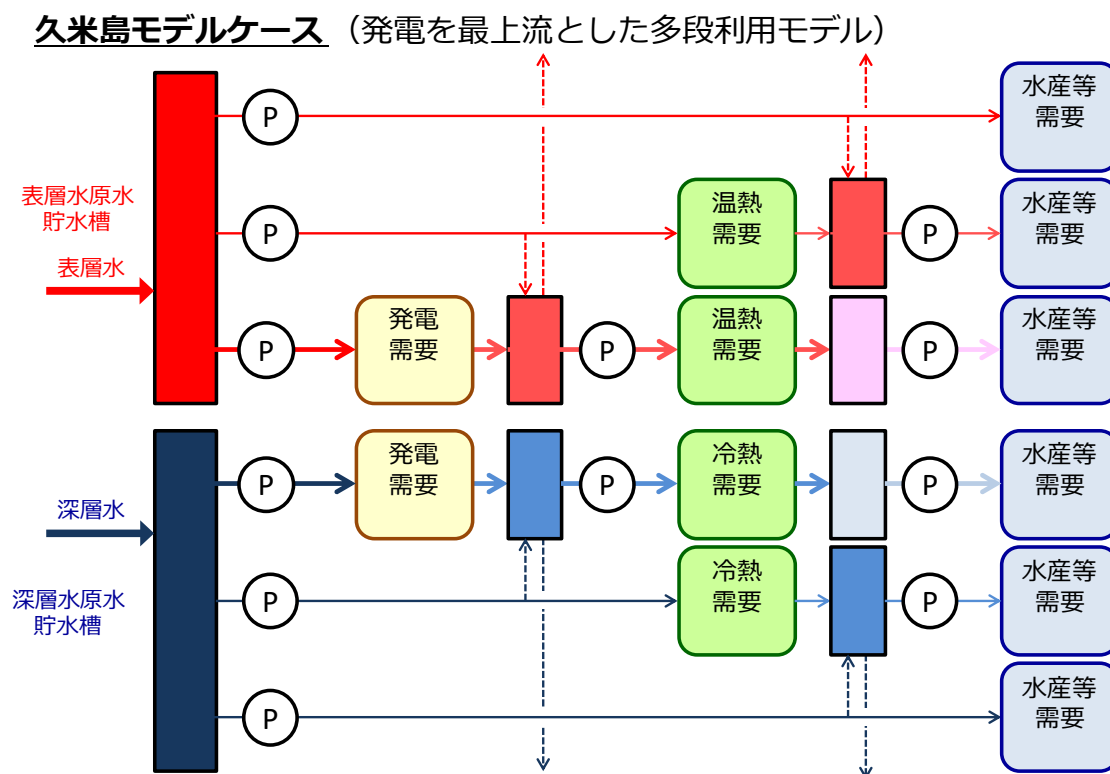


図 3-29 海水配管コンセプト(久米島モデルケース)

久米島モデルケース（発電を最上流とした多段利用モデル）

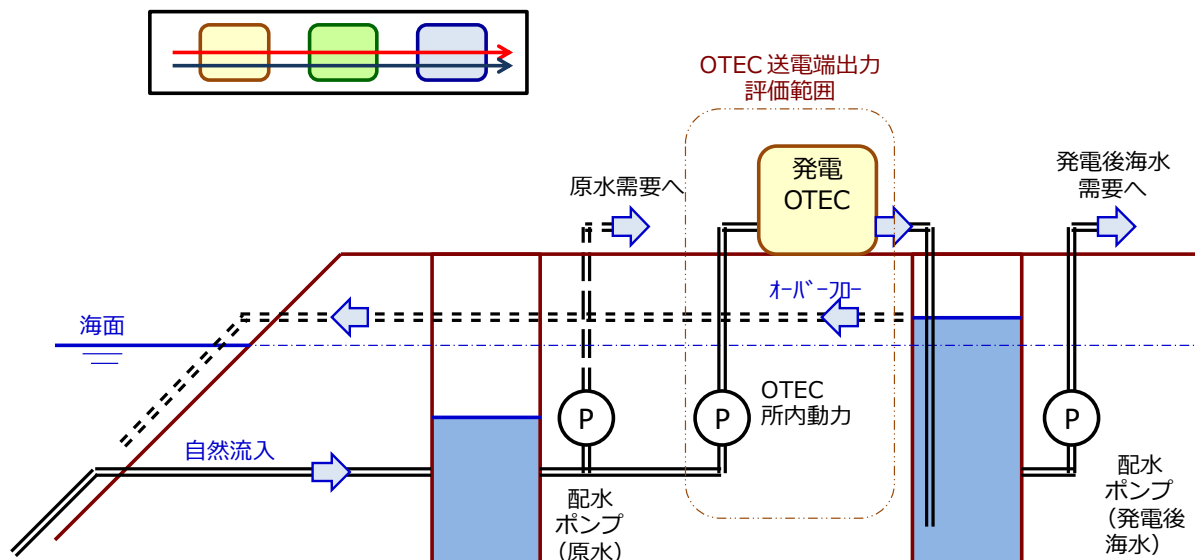


図 3-30 海水配管フロー（久米島モデルケース）

3.4.3 予備検討

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

(1) 発電需要（海洋温度差発電）

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

上記流量における月別の平均発電出力、前項に基づく所内電力、送電端出力を表 3-4 に示す。また、この発電出力計算の前提となる表層水および深層水温度、および発電出力計算の出力となる発電後の表層水および深層水温度について、表 3-5 に示す。

表 3-4 海洋温度差発電の出力

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

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

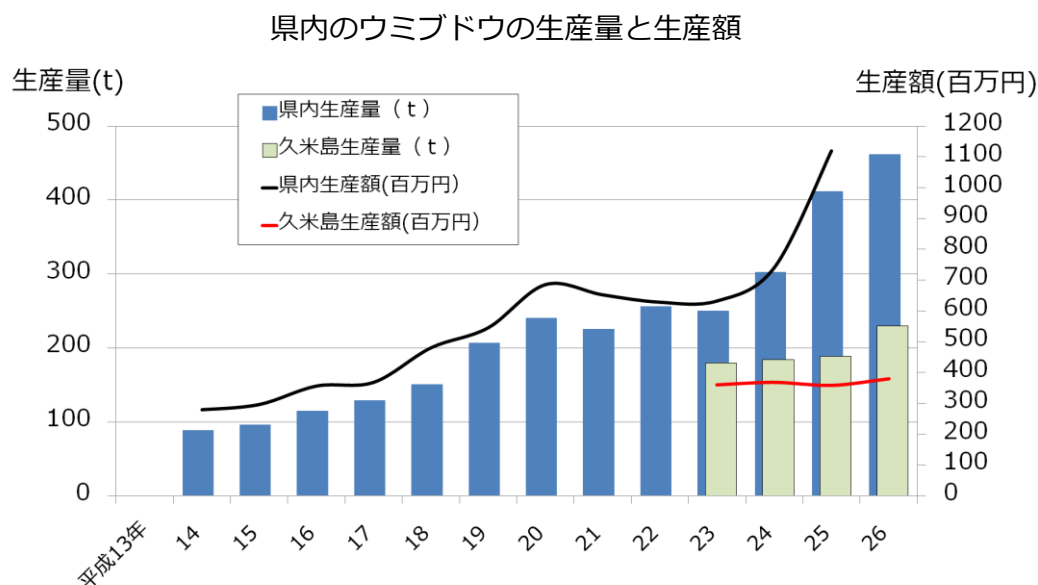
(平均送電端出力:624 kW, 227,891 kWh)

表 3-5 海洋温度差発電における使用前後の海水温

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

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

(2)海ぶどう養殖



データ出典： 「沖縄の農林水産業」, 沖縄県農林水産部編, H27年3月 「産業の概況」, 久米島町編

沖縄特産品として市場が飽和していない。深層水利用による品質確保が重要

図 3-31 海ぶどうの県内市況

【現状】

深層水と表層水を混合した 20～24℃程度の海水を地下タンクに貯留し、養殖槽に注入している。
養殖槽内の適温は 25℃程度である。

【利用目的】

水温調整

【制約】

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

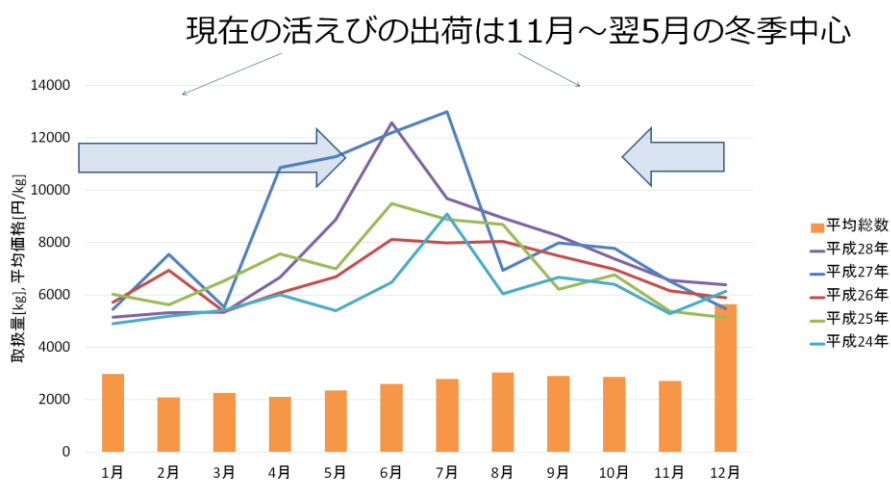
【本検討の計算条件】

- 地下タンクのため、日射負荷はほぼ無いので、無視する。
- 多段階利用ケースでは、発電後の表層水を最優先で使い、夏季に温度が下がりにくい場合は、発電後深層水を混合する。
- 冬季は、表層水原水を用いて水温を確保する。

(3)車えび養殖

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

成えび養殖段階では、5月中旬～11月初旬までは養殖池の水温が高くなりすぎるため、養殖が不可能となる。この段階でも深層水による水温コントロールを行えば養殖は可能であるが、大量の深層水が必要となるため、現在の取水・配水設備容量ではその量をまかなうことが出来ない。夏季の販売単価は高価であるので、久米島モデルで取水・配水設備を増強すれば、より利益率の高い養殖となる（図 3-32）。



データ出典：東京都中央卸売市場 市場統計情報(月報・年報)

東京都中央卸売市場の平均取引価格(2012～2016年の5年間)

夏季(6～9月)平均: **8,641円/kg** ⇔ それ以外の月の平均: **6,418円/kg**

深層水冷熱の成えび養殖への利用で取引価格の高い夏エビ出荷

図 3-32 車えび(活エビ)の県内市況

【現状】

クルマエビ種苗生産用に深層水を使用する他、試験的に成エビへの利用も行っている。成エビの場合、夏季は養殖池に 11℃の深層水をそのまま注入している。

【利用目的】

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

【制約】クルマエビの生育適温は 22～23℃

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

【本検討の計算条件】

- 計 7ha の養殖池を想定。養殖期間は 5 月～11 月とする(5,11 月は 50%負荷)
- 日射負荷は、NEDO データベース²による
- 換水率: 1/4±20%の範囲で水温コントロール(特に日射の熱負荷除熱)が出来るよう深層水(原水・発電後)、表層水(原水・発電後)を供給する。発電後海水を優先して使用する。

(4)検討結果

検討においては表 3-6 の式を用いた。

各ケースにおける、海ぶどう養殖、車えび養殖への海水流量を表 3-7 に示す。ただし、予備検討では発電以外の需要がいずれも水産養殖であり、純粋な温冷熱需要(水質に変化を及ぼさない需要)がないため、3 段利用は行わない。

また、表 3-7 の海ぶどう養殖、車えび養殖をグラフ化したものを、それぞれ図 3-33、図 3-34 に示す。各月において、左側のバーが発電後海水を利用するケース(久米島モデルケース)、右側のバーが発電後海水を利用しないケース(並列利用ケース)である。

表 3-6 本検討に用いた計算式

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

² 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO 「日射に関するデータベース」
<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>, 平成 30 年 3 月閲覧

表 3-7 各ケースにおける、海ぶどう養殖、車えび養殖への海水流量

■発電後海水利用ケースの海水使用量

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
(1) 海ぶどう 海水 使用量 [m3/d]	表層水	原水	5,000	5,000	5,000	3,888	1,829	0	0	0	399	1,864	3,793
	表層水	OTEC後	0	0	0	1,112	3,171	4,987	4,656	4,587	4,727	4,601	3,136
	深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	13	344	413	273	0	0
	深層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	供給水量合計(m3/d)		5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
(2) 車えび 海水 使用量 [m3/d]	表層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	表層水	OTEC後	0	0	0	0	1,917	0	0	0	4,880	7,572	0
	深層水	OTEC後	0	0	0	0	12,083	29,674	37,615	35,428	30,531	23,120	6,428
	深層水	原水	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	供給水量合計(m3/d)		0	0	0	0	14,000	29,674	37,615	35,428	30,531	28,000	14,000

(3) 発電出力 (深層水: 180,000m3/d, 表層水225,000m3/dから、上記の原水使用分を差し引き)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
平均出力 [kW]	発電端	655	614	689	788	962	1171	1286	1312	1260	1120	969	795	
	自己消費	作動流体P	16	15	17	20	25	32	36	37	35	30	26	20
		表層水P	117	117	117	118	119	120	120	120	120	120	119	118
		深層水P	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169
		補機等	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
小計		333	332	334	337	344	351	355	356	354	349	345	337	
送電端		322	282	355	451	618	820	931	956	906	771	624	458	

年間送電端出力

表 3-7 各ケースにおける、海ぶどう養殖、車えび養殖への海水流量 (Cont' d)

■発電後海水不使用(並列利用)ケースの海水使用量

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
(1) 海ぶどう 海水 使用量 (発電なし)	表層水	原水	5,000	5,000	5,000	4,769	4,351	3,987	3,812	3,775	3,850	4,071	4,358	4,749
	表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	深層水	原水	0	0	0	231	649	1,013	1,188	1,225	1,150	929	642	251
	供給水量合計 (m3/d)		5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
(2) 車えび 海水 使用量 (発電なし)	表層水	原水	0	0	0	4,522	5,900	1,755	2,930	5,440	9,556	7,618	0	
	表層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	深層水	OTEC後	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	深層水	原水	0	0	0	0	9,478	22,100	26,245	25,070	22,560	18,444	6,382	0
	供給水量合計 (m3/d)		0	0	0	0	14,000	28,000	28,000	28,000	28,000	28,000	14,000	0

(3) 発電出力 (深層水: 180,000m3/d, 表層水225,000m3/dから、上記の原水使用分を差し引き)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
平均出力 [kW]	発電端	648	607	681	779	916	1070	1172	1197	1151	1026	924	786	
	自己消費	作動流体P	16	15	17	20	24	29	33	34	32	27	25	20
		表層水P	115	115	115	116	114	115	117	117	115	113	113	116
		深層水P	169	169	169	169	160	148	144	145	147	151	163	169
		補機等	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
小計		330	329	331	334	328	322	324	325	324	321	330	335	
送電端		318	278	350	445	588	748	849	872	827	705	594	452	

年間送電端出力

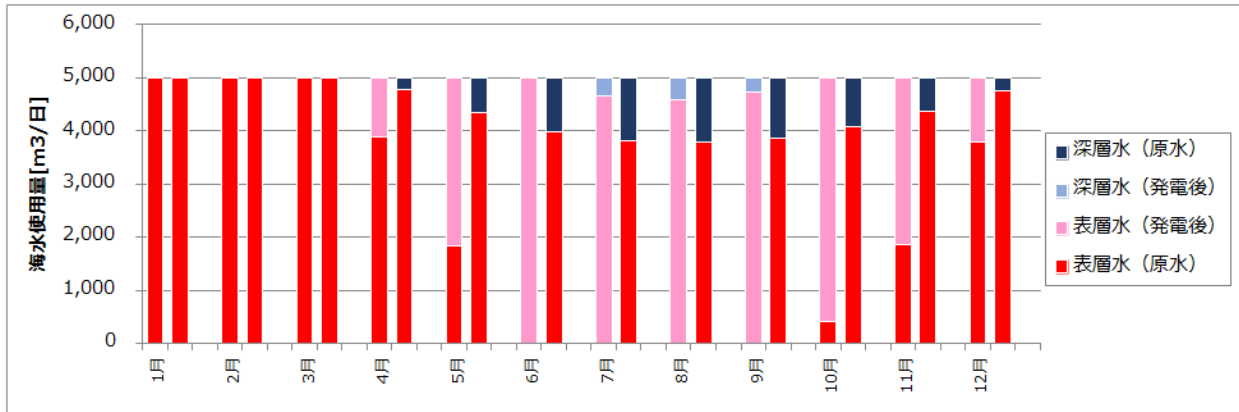


図 3-33 海ぶどう養殖における海水使用量推定結果

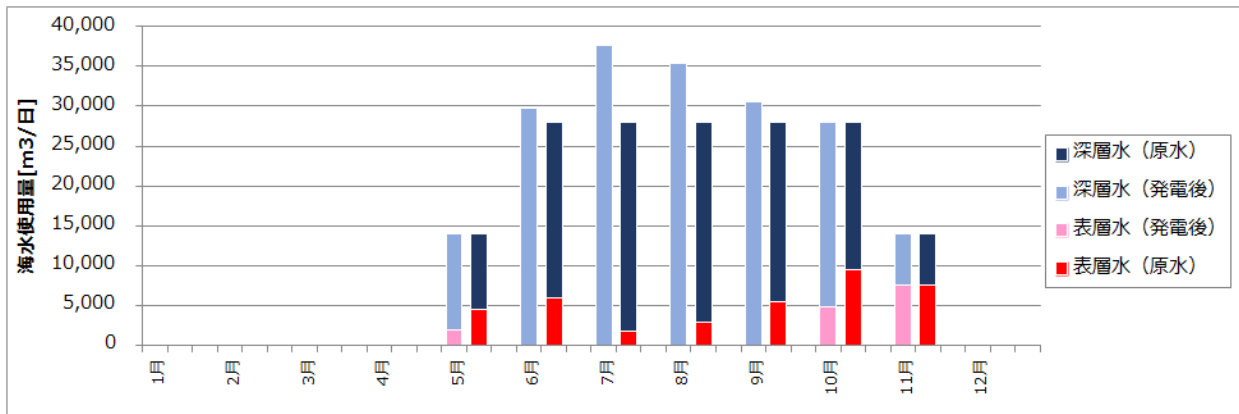


図 3-34 車えび(夏えび)養殖における海水使用量推定結果

これらの流量に基づいて、エネルギー収支を算定し、比較した結果を表 3-8 および図 3-35 に示す。

表 3-8 エネルギー収支の比較まとめ(予備検討)

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

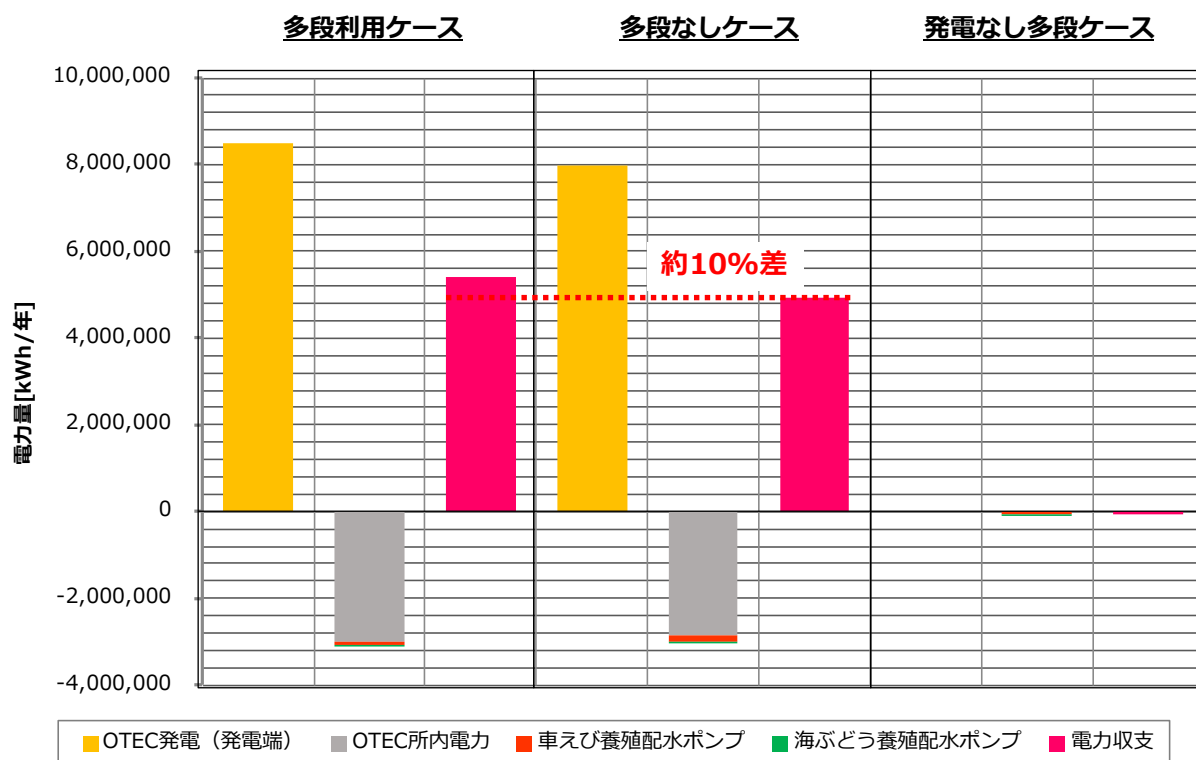


図 3-35 各シナリオのエネルギー収支比較(予備検討)

多段利用ケースに比べ、多段なしケースでは 455,650[kWh/年]の電力損失、発電なし多段ありケースでは 5,479,239[kWh/年]の電力損失となる。

電力単価を 20 円/kWh として金額換算すると、多段利用ケースに対して多段なしケースでは年間 9,113 千円の損失、発電なし多段ありケースでは年間 109,585 千円の損失となる。

3.4.4 全需要を対象とした概算

前項と同様の手法を用いて、エネルギー収支を概算した。結果を表 3-9 および図 3-36 に示す。

表 3-9 エネルギー収支の比較まとめ(全需要)

項目	単位	多段利用ケース	多段なしケース	発電なし多段ケース
発電分				
OTEC発電(発電端)	kWh/年	8,483,000	5,999,000	0
電力消費分				
OTEC所内電力	kWh/年	▲ 3,014,000	▲ 2,153,000	0
産業利用合計	kWh/年	▲ 348,000	▲ 917,000	▲ 397,000
電力収支	kWh/年	5,121,000	2,929,000	▲ 397,000
多段利用ケースとの差	kWh/年	—	▲ 2,192,000	▲ 5,518,000

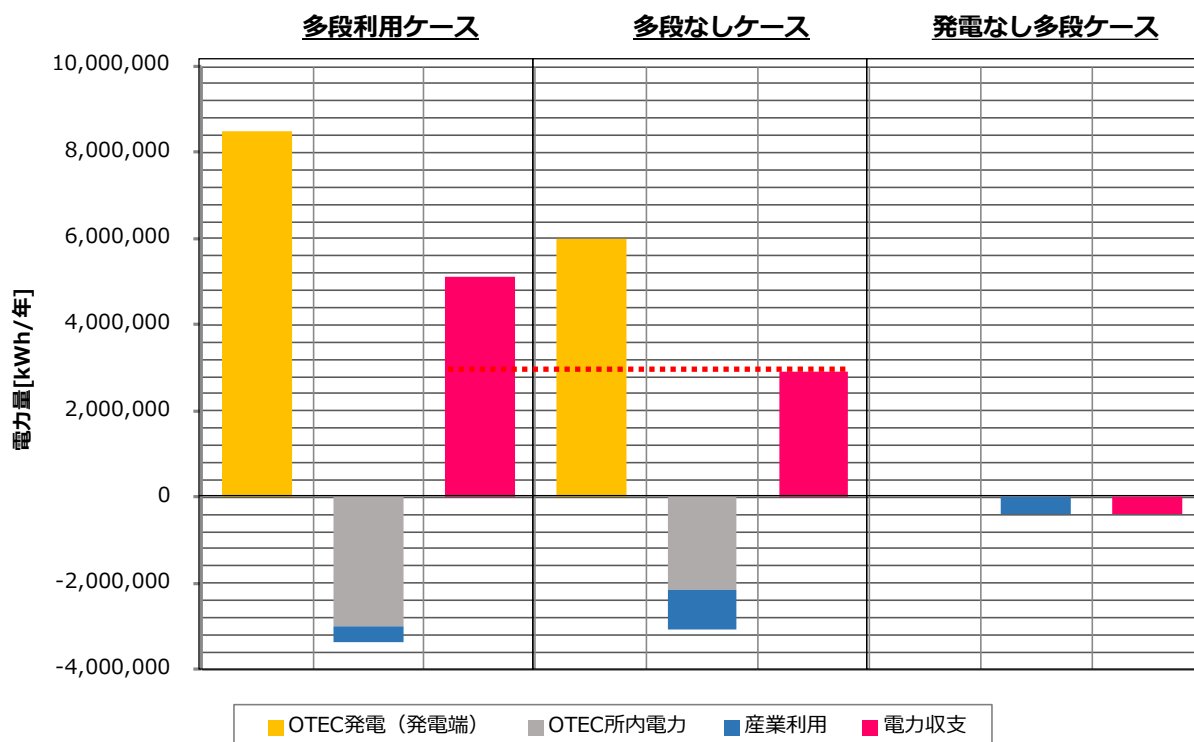


図 3-36 各シナリオのエネルギー収支比較(全需要対象)

多段利用ケースに比べ、多段なしケースでは 2,192,000[kWh/年]の電力損失、発電なし多段ありケースでは 5,518,000[kWh/年]と、前節の予備検討よりも大きい電力損失となる。

電力単価を 20 円/kWh として金額換算すると、多段利用ケースに対して多段なしケースでは年間 43,840 千円の損失、発電なし多段ありケースでは年間 110,360 千円の損失となる。

3.4.5 ライフサイクルアセスメント（LCA）手法を用いた評価

ライフサイクルアセスメント（LCA）手法に基づき、以下の内容を実施した。通常、LCAでは「目的と調査範囲の設定」「インベントリ分析」「影響評価」「解釈」の4つのフェーズが実施されるが、ここではエネルギー消費量のみが算定対象となっているため、影響評価は行っておらず、インベントリ分析とその解釈までを実施内容とする。

1) エネルギー消費に関する基礎データ収集

本事業における測定、事業者等への聞き取り調査、既存資料の取り纏め等により以下のデータを収集した。表 3-10 に対象事業と事業者を示す。

- ① 事業プロセスの整理：生産の方法、フロー
- ② 事業データの収集：生産に必要な資機材、材料等の把握
- ③ 取水量増大時の事業データ：増設される設備、生産規模の増加分など

表 3-10 調査対象事業と聞き取り調査協力事業者

聞き取り調査協力事業者	事業内容
久米島海洋深層水開発（株）水産事業部	海ぶどうの養殖
沖縄県車海老漁業共同組合 海洋深層水種苗供給センター	車エビ（種苗生産、成エビ生産）の養殖
（株）ジーオーファーム	カキの養殖
（株）ゼネシス	海洋温度差発電設備及び海水取水設備

2) エネルギー消費量の算定

1)で収集したデータに基づき、各事業におけるエネルギー消費量を算定した。算定は、収集した項目ごとのデータ量に、原単位データベースに掲載されている消費エネルギー量（化石燃料資源の消費量から換算したエネルギー量）を乗じることにより求めた。用いた原単位データベースは、主として産業技術総合研究所・産業環境管理協会「IDEAv2.2」（単年度公共事業用標準ライセンス）より引用した他、国土技術政策総合研究所の社会資本 LCA 用投入産出表に基づく環境負荷原単位一覧表を引用した。なお、発電にかかるエネルギー原単位については、久米島の電力系統を勘案し、久米島における電力のエネルギー原単位を算定した。

3) 取水量増大時のエネルギー消費量低減効果の予測

前項 2)における算定結果に基づき、取水量を増大させた場合のエネルギー消費量低減効果について、以下の2つのシナリオについて予測を行った。

- シナリオ1：発電使用後海水を利用したシナリオ
- シナリオ2：発電使用後海水を利用せず、発電と並列で利用したシナリオ

1) エネルギー消費に関する基礎データ収集

事業者への
聞き取り調査

既存文献等の
整理

- ・ 事業プロセスの整理：生産の方法、フロー
- ・ 事業データの収集：生産に必要な資機材、材料等の把握
- ・ その他、評価に必要なデータ：生産量、歩留まり等

2) エネルギー消費量の算定

個別のエネルギー
量を積算していく

[原料 1]

製造に利用する量 × 1 単位あたりのエネルギー量
(収集データ) (原単位データベースから引用)

[原料 2]

製造に利用する量 × 1 単位あたりのエネルギー量
(収集データ) (原単位データベースから引用)

⋮

現状における
消費エネルギー量

エネルギー量の合計 ÷ 生産量
= 単位生産量あたりの消費エネルギー量

3) 取水増大時のエネルギー消費量低減効果の予測

2) のデータを
基にした計算

- ・ 取水量が増大した場合の設備規模、原料増加等を計算
- ・ 取水量が増大した場合の生産規模の増加量を計算
 - ・ 発電後海水の利用の有無で比較

発電後海水の利用の有無によるエネルギー消費量低減効果の評価

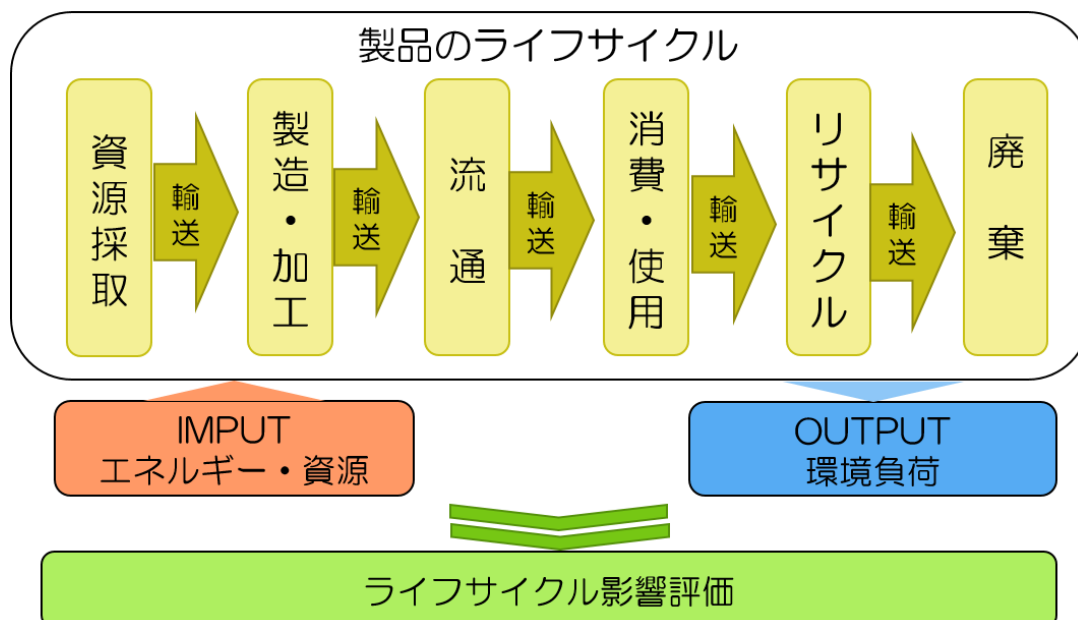
図 3-37 業務実施フロー

ライフサイクルアセスメント（LCA）

ライフサイクルアセスメントとは

ライフサイクルアセスメントとは、製品の原材料調達から、生産、流通、使用、廃棄に至るまでのライフサイクルにおける投入資源、環境負荷及びそれらによる地球や生態系への潜在的な環境影響を定量的に評価する手法である。これにより、実際に見えている製品やサービスの使用段階での環境影響だけでなく、設備の製造過程や廃棄に至るまで目に見えない部分での環境影響を考慮に入れることが特徴である。LCAは環境負荷を低減するための判断材料を提供する意思決定支援ツールとして、様々な場面で活用されている。

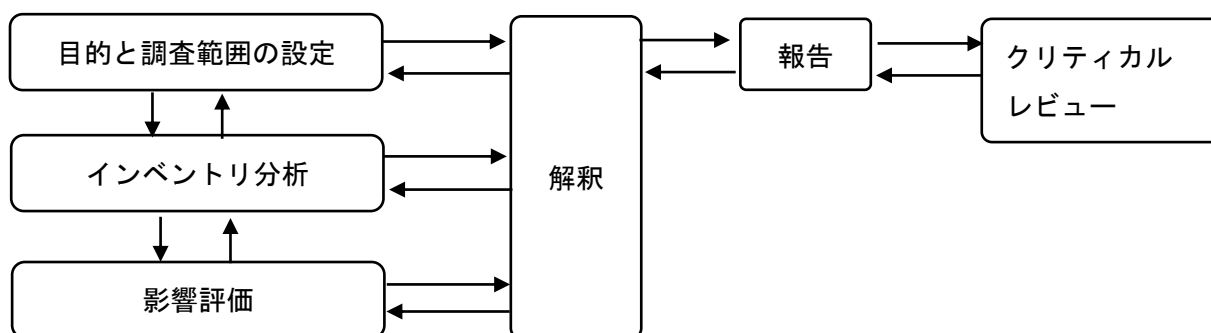
【LCAのイメージ図】



LCAの実施手順

LCAは通常「目的と調査範囲の設定」「インベントリ分析」「影響評価」「解釈」の4つのフェーズが実施される。

【LCAの手順のイメージ】



各フェーズの概要

(1) 目的と調査範囲の設定

LCA の目的の設定では、意図する用途、実施する理由、結果を伝える相手を明確にする必要がある。また、調査範囲については以下の内容を設定し、調査を進める。

- ① 調査対象範囲(システム境界): 調査の対象とする生産物製造のプロセスを明確にする必要がある。
- ② 機能単位: 対象とする生産物の機能を踏まえて評価する単位を定める。
- ③ 配分方法: 一つのプロセスから二つ以上の生産物が製造される場合に投入される物質やエネルギーをそれぞれの生産物に振り分ける必要がある。本業務では取水量増大のケースで実施する。

(2) インベントリ分析

LCA 対象となる製品やサービスに関して、投入される資源やエネルギー(インプット)、及び生産または排出される製品、排出量(アウトプット)のデータを収集し、環境負荷項目に関する入出力の明細票を作成することである。

(3) 影響評価

影響評価は主として以下の手順で行う。

- ① 影響領域、影響領域の指標及び特性化モデルの選択: どの環境問題(影響領域、例えば地球温暖化や酸性化など)を扱うかを決め、その評価方法を決定する。
- ② 分類化: インベントリデータを、関連する影響領域に振り分ける。
- ③ 特性化: 影響領域ごとに設定された特性化係数を利用し、影響評価を行う。
- ④ 正規化: 製品が及ぼす環境影響の相対的な強度を分析する。
- ⑤ グルーピング: 特性化や正規化の結果は項目数が多いので、ある一定の条件化で類型化したり、ランク付けする。
- ⑥ 統合化: 影響領域間の重み付けを行って単一指標化を行う。

(4) 解釈

インベントリ分析及び影響評価によって得られる結果を客観的に判断できる意図が、解釈には含まれる。解釈では、目的および調査範囲の設定に従って、インベントリ分析、環境影響評価の結果を、要約説明し、インベントリ分析や環境影響評価の結果が、意志決定者などに分かりやすい形で、信頼性を与えるためのプロセスである。

(典拠: 伊坪、田原、成田「LCA 概論」より)

調査結果

1) エネルギー消費に関する基礎データ収集

(1) 発電事業 (OTEC)

① 事業プロセスの整理と調査範囲

a. プロセスフロー

OTEC は、作動流体（アンモニア）を表層水によって気化し、気化した気体によって発電タービンを回転させ電力を製造、気化した媒体を深層水によって液化し、再度蒸発器へと送るシステムとなっている。システムの概略を

図 3-38 に示す。本調査では、取水量増大時の 1MW 級 OTEC について算定を行った。現状の設備については、試験プラントであることから算定対象としていない。

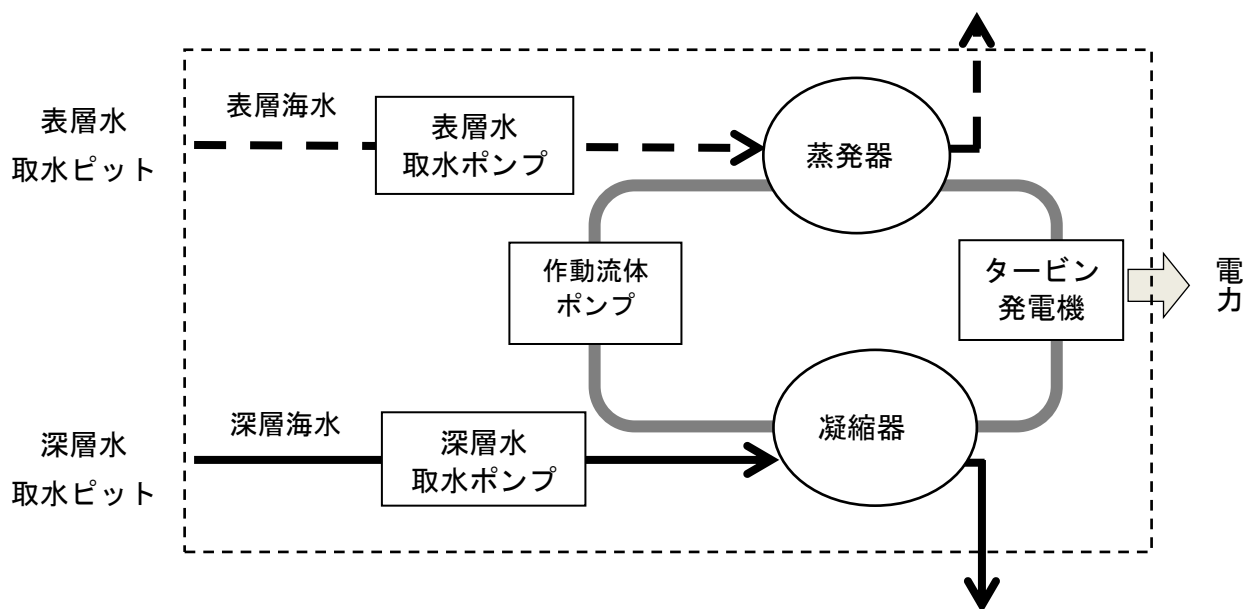


図 3-38 OTEC のシステム概要

b. 調査範囲

本調査における調査範囲（システム境界）を図 3-39 に示す。発電設備・機器製造、材料製造、輸送、製造工程における設備、その他の廃棄を含む。ただし、電力の送電設備については含まない。

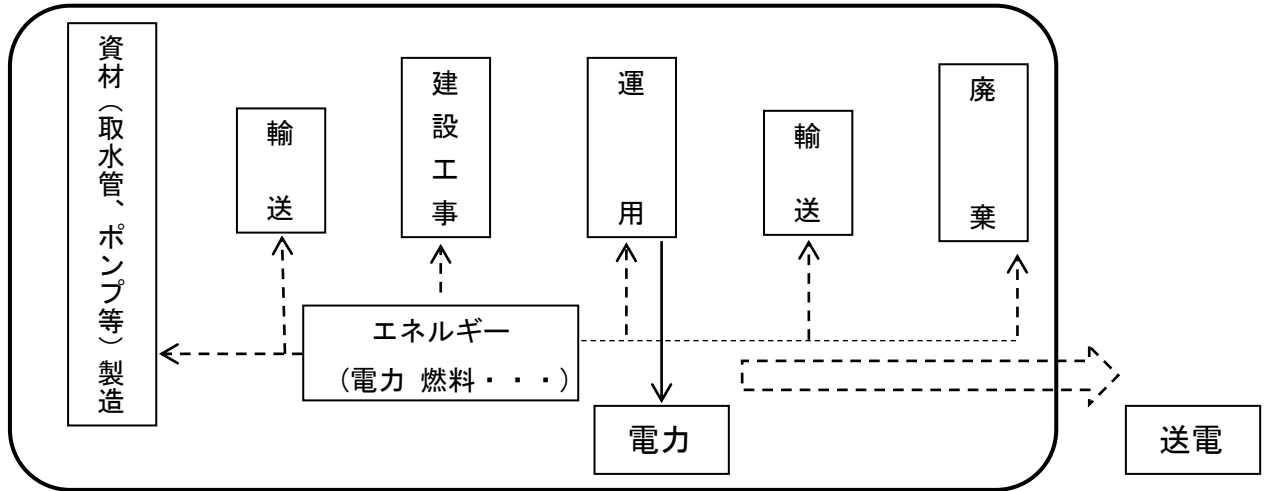


図 3-39 調査対象範囲(システム境界)

② 事業データの収集

ここでは、取水量増大時の 1 MW 級発電設備を算定対象として、当該設備の設計データをもとに収集した。1 MW 級 OTEC については、日本 LCA 学会における先行研究をベースに、当該設備の重量比 70%（熱交換器）～80%（その他の設備）のスケールの設備を想定して、事業データを算定した。

データ項目を表 3-11 に示す。設備、建造物等については 30 年間で除却するものと考え、使用年数を設定した。輸送については、建設資材、機器類や材料等、沖縄本島で製造されていないと考えられるものについては一律関東（東京）からの輸送と仮定した。海水利用量及び発電電力量は月ごとの集計とし、発電後海水の利用の有無についてそれぞれ算定された結果を用いた。

表 3-11 OTEC の事業データ

【入力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考	
設備製造	熱交換器	熱交換プレート(蒸発器)	チタン鋼板	t	16.3	
		熱交換プレート(凝縮器)	チタン鋼板	t	17.8	
		耐圧殻(蒸発器)	普通鋼板	t	33.3	
		耐圧殻(凝縮器)	普通鋼板	t	33.3	
		フレーム(蒸発器)	鋼板	t	46.9	
		フレーム(凝縮器)	鋼板	t	47.5	全体重量からチタンプレートと耐圧殻を除いた重量
		製造エネルギー	熱交換器製造に係るエネルギー	式	1	エネルギー消費量計算時にデータベースをもとに計算
	作動流体(アンモニア)	作動流体	アンモニアの製造	t	2.7	タンク容量分と想定
	作動流体ポンプ	アンモニアポンプ	ポンプ製造	t	0.5	
	作動流体タンク(サブタンク)	ステンレスタンク	ステンレス鋼板	t	2.2	
	海水ポンプ	表層水ポンプ	ポンプ製造	t		
		深層水ポンプ	ポンプ製造	t		
	気液分離器	鋼管	炭素鋼	t	17.0	
	コンデンセータドラム	炭素鋼材タンク	炭素鋼	t	16.3	
	ダクト	蒸発器入口ダクト	SGP	t	8.6	
		蒸発器出口ダクト	SGP	t	8.6	
		凝縮器入口ダクト	SGP	t	8.2	
		凝縮器出口ダクト	SGP	t	8.2	
	清水循環ポンプ	清水ポンプ	ポンプ製造	t	0.1	
	清水冷却器	清水冷却器	チタン鋼板	t	0.1	
		製造エネルギー	冷却器製造に係るエネルギー	式	1	エネルギー消費量計算時にデータベースをもとに計算
	タービン発電機	タービン	タービン製造	t	1.1	
		発電機	発電機製造	t	1.1	
窒素発生装置	窒素発生装置		t	1.9		
	コンプレッサー+エアドライヤー		t	0.8		
建設	発電所建屋	鉄筋コンクリート建屋	m2	500	鉄筋コンクリート製建屋を想定	
輸送	コンテナ輸送	発電システム全体の輸送	コンテナ船による輸送	tkm	451462.9	久米島⇄東京(1656km)を輸送すると仮定
		廃棄物の輸送	コンテナ船による輸送	tkm	27262.3	久米島⇄那覇(100km)を輸送すると仮定
廃棄	発電システム全体	発電設備	発電設備一式	t	272.6	沖縄本島で処理すると仮定
エネルギー	電力	所内電力	kWh	—	3. 取水量増大時の予測で後述する	
用水	海水利用	表層海水	t	—	3. 取水量増大時の予測で後述する	
		深層海水	t	—		

【出力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考
生産物	発電	電力	kWh	—	3. 取水量増大時の予測で後述する

(2) 取水管

① 事業プロセスの整理と調査範囲

a. プロセスフロー

現在の取水管は、深層水は沖合の水深 612m から、表層水は沿岸の水深 15m から取水されており、地上のタンクにポンプで汲み上げられた後に各利用事業者へ配水されている。深層水取水管は 2 条、表層水は 1 条設置されている (図 3-40)。

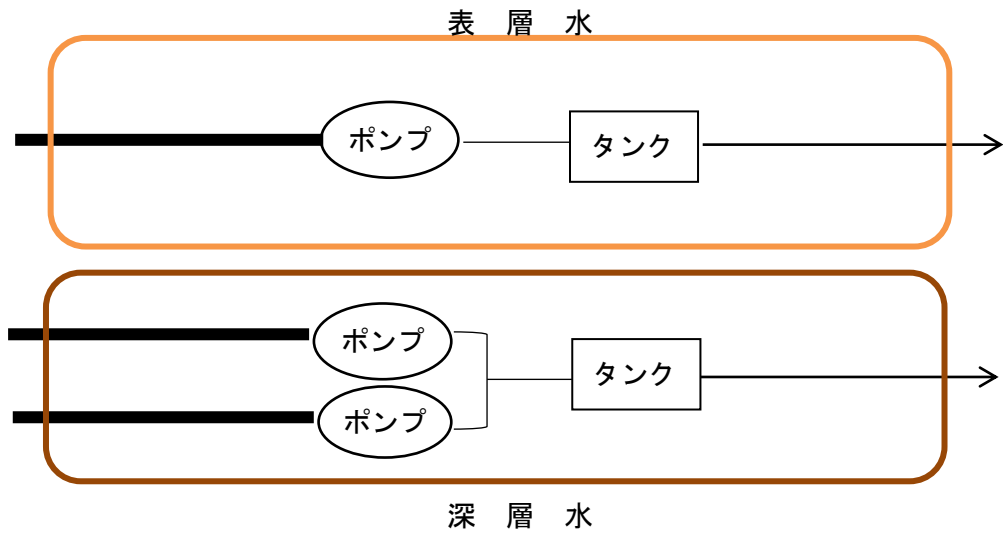


図 3-40 取水設備の配置概略

b.調査範囲

取水設備に係る調査範囲は、取水管及び付帯設備の製造、建設、運用、廃棄までを含むものとする（図 3-41）。なお設備は 30 年間運用し、リサイクルはせずに本島に輸送し、廃棄するものとした。

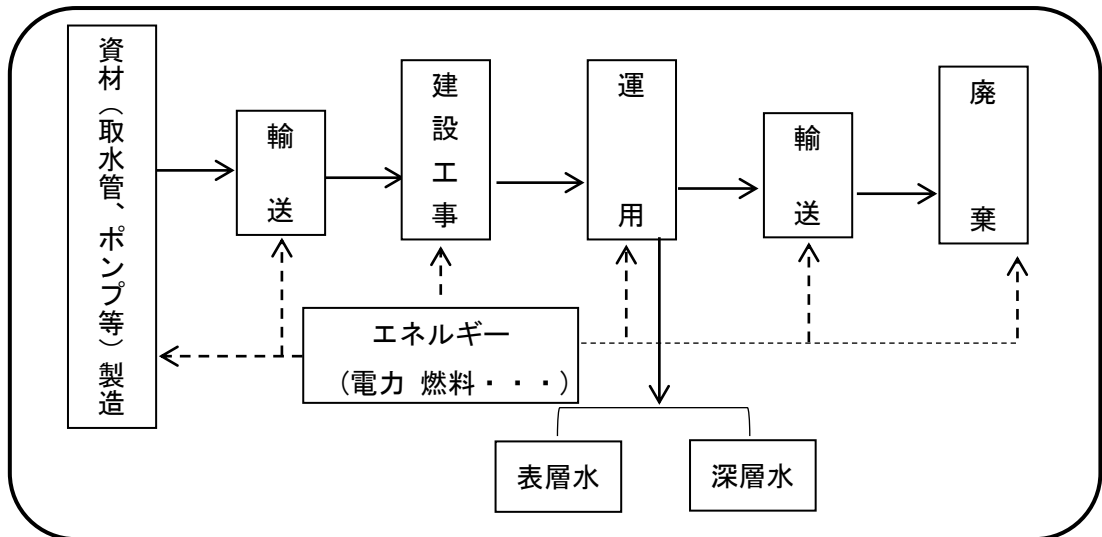


図 3-41 取水事業に係る調査範囲(システム境界)

② 事業データの収集

表層水及び深層水取水管とその運用データについては、沖縄県海洋深層水研究所ホームページ³に掲載されているデータを引用したほか、聞き取り調査により情報を収集した。

³ 沖縄県海洋深層水研究所 HP : <http://www.pref.okinawa.jp/odrc/welcom2odrc.html>

データ項目とその数量を表 3-12 および表 3-13 に示す。建屋設備に関しては表層水と深層水で面積の 1/2 を配分するものとした。また、設備に関しては 30 年間使用後に除却することを想定した。

表 3-12 表層水取水管の事業データ

【入力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考
設備製造	取水管(表層水)製造	硬質ポリエチレン管製造	kg	27512.9	管内径506mm: 44.7 [※] kg/m × 総延長615.5m
	ポンプ製造	表層水ポンプ製造	基	1	271m ³ /h × 75kW × 1基
		予備ポンプ製造	基	1	271m ³ /h × 75kW × 1基
タンク製造	表層水タンク	槽		2	表層水タンク(120t)1槽 表層水ろ過タンク(100t)1槽
建設工事	取水管敷設工事	掘削工事	m ³	3000	(250m × 3m × 3m) + (250m × 1 × 3)
		埋め戻し工事	t	3000	
	取水施設建設	鉄筋コンクリート造建屋	m ²	123.5	鉄筋コンクリート造、地下3階 247m ²
輸送	管の輸送	貨物船による輸送	tkm	45561.3	東京→久米島1656kmを輸送すると仮定
	ポンプ・タンクの輸送	貨物船	tkm	6624	
	廃棄物の輸送	貨物船	tkm	3151.3	
廃棄	管廃棄	廃プラスチック処分	kg	27512.9	沖縄本島で処分すると仮定
	金属類(ポンプ・タンク等)廃棄	金属の廃棄処分(埋立)	t	4	
運用	ポンプ動力	消費電力	kWh	0.144	ポンプ消費電力

※古河電工深層取水管の重量データより引用: http://www.furukawa.co.jp/aqx/product/seadeep_pro.htm 鉄線外装あり

【出力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考
海水取水	表層水取水		t/日	11520	

表 3-13 深層水取水管の事業データ

【入力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考
設備製造	取水管(深層水)製造	硬質ポリエチレン管製造	kg	297864.0	内径380mm: 54.0kg/m [※] × 沿岸部550m × 2条 内径280mm: 62.1kg/m [※] × 沖合部1920m × 2条
	ポンプ製造	深層水ポンプ製造	基	2	271m ³ /h × 45kW × 2基
	タンク製造	深層水タンク	槽		3
建設工事	取水管敷設工事	掘削工事	m ³	3000	(250m × 3m × 3m) + (250m × 1 × 3)
		埋め戻し工事	t	3000	
	取水施設建設	鉄筋コンクリート造建屋	m ²	123.5	鉄筋コンクリート造、地下3階 247m ²
輸送	管の輸送	貨物船による輸送	tkm	493262.8	東京→久米島1656kmを輸送すると仮定
	ポンプ・タンクの輸送	貨物船	tkm	8280	
	廃棄物の輸送	貨物船	tkm	30286.4	
廃棄	管廃棄	廃プラスチック処分	kg	297864.0	沖縄本島で処分すると仮定
	金属類(ポンプ・タンク等)廃棄	金属の廃棄処分(埋立)	t	5	
運用	ポンプ動力	消費電力	kWh	0.152	ポンプ消費電力

※古河電工深層取水管の重量データより引用: http://www.furukawa.co.jp/aqx/product/seadeep_pro.htm 鉄線外装あり

【出力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考
海水取水	深層水取水		t/日	12960	

③ 取水量増大時の事業データ

取水量は表層水が現状の 19.5 倍(225,000t/日)、深層水が現状の 13.9 倍(180,000t/日)の取水量となる想定である。取水量の増大に伴い、表層水取水管は重量比で現状の 2.2 倍、深層水取水管は現状の 3.8 倍となる。一方、取水に伴うポンプ動力は 1t あたりの電力消費量が、表層水ポンプで現状の 14.3%、深層水ポンプで現状の 19.9%となり、現状よりも減少する。

(3) 海ぶどう養殖事業

①事業プロセスの整理と調査範囲

a. プロセスフロー

久米島における海ぶどう（クビレヅタ）養殖は、完全陸上養殖であり、ビニールハウスあるいはトタンのハウス内に設置されたコンクリートタンクあるいはグラスファイバータンク内で飼育されている。

b. 調査範囲

本調査における調査範囲（システム境界）を図 3-42 に示す。養殖事業の当初における天然母藻の採取は含まず、養殖事業の設備・機器製造、材料製造、輸送、製造工程における設備、その他の廃棄を含む。ただし、生産物発送後の消費、廃棄については含まない。また、他養殖場へ出荷した場合、出荷先におけるエネルギー負荷等も算定対象外とする。

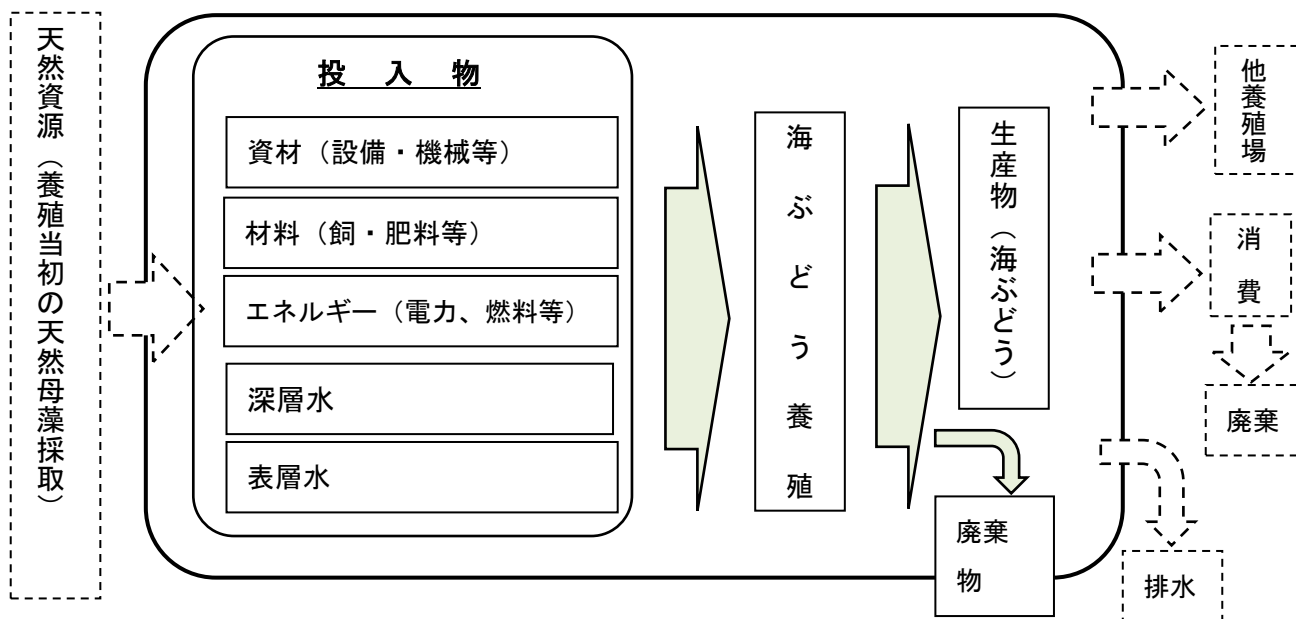


図 3-42 海ぶどう養殖事業にかかる調査範囲(システム境界)

② 事業データの収集

海ぶどう養殖事業者の聞き取り調査により情報を収集した。

データ項目を表 3-14 に示す。数量データについては事業内容になるため、ここでは非表示とした。設備、建造物等については各機材の平均的な耐用年数あるいは法定耐用年数で除却するものと考え、使用年数を設定した。輸送については、建設資材、機器類や材料等、沖縄本島で製造されていないと考えられるものについては一律関東（東京）からの輸送と仮定した。

③ 取水量増大時の事業データ

表 3-14 海ぶどう養殖の事業データ

【入力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考
設備製造	タンク	コンクリートタンク	個	事業データのため非表示	鉄筋コンクリート製
		グラスファイバータンク	個		強化プラスチックグラスファイバー樹脂使用
	ポンプ	台	ポンプ出力:5.5kW		
	コンプレッサー	台			
	遮光材	m2	ポリエチレン製		
	植えつけ用資材	枚	トリカルネット		
	容器	個			
	滅菌器	個			
建設	養殖施設	ビニールハウス	m2	鉄筋躯体と壁面素材(ビニール、波トタン)を別途計算している。	
		波トタン	m2		
	躯体鉄骨	kg			
	事務所	m2			
倉庫	RC平屋	m2			
	RC平屋	m2			
材料	肥料	飼料	kg	マダイ、ヤイトハタの飼料を使用	
	CO ₂ ガス	CO ₂ ガス	kg		
	消毒剤	次亜塩素酸	kg	消毒用	
	梱包材	10kg箱(発泡スチロール製)	個	發送用資材	
		個包装箱(発泡スチロール製・小)	個		
輸送 (設備)	貨物船輸送	グラスファイバータンク	tkm	久米島⇄東京(1656km)を輸送すると仮定	
		ポンプ・コンプレッサー	tkm		
		遮光材	tkm		
		プラスチック類	tkm		
(建造物)	コンテナ船輸送	養殖施設一式	tkm		
(材料)	貨物船輸送	肥料輸送	tkm		
		CO ₂ ガス輸送	tkm		
		梱包材輸送	tkm		
		コンクリートタンク	tkm		
(廃棄物)	廃棄物処分場への輸送	その他の埋立て処分品	tkm		久米島⇄那覇(100km)を輸送すると仮定
		軽量鉄骨	tkm		
		産業廃棄物	t		
廃棄	設備	産業廃棄物	kg	沖縄本島で処理すると仮定	
		廃プラスチック	kg		
		ポンプ・コンプレッサー	kg		
		その他機材	kg		
		産業廃棄物(埋立て処理)	kg		
	建造物	養殖施設	kg	久米島内で処理すると仮定	
		廃ビニール	kg		
		廃プラスチック	kg		
		躯体鉄骨	kg		
		その他	kg		
エネルギー	電力	養殖施設	kWh	島内輸送用	
		事務所	kWh		
	燃料	ガソリン	L		
		軽油	L		
		プロパンガス	m3		
用水	上水利用	水道水	m3		
		表層水	m3		
	海水利用	表層水	m3		
		深層水	m3		

【出力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考
生産物	海ぶどう	A品	kg		
		B品	kg		

(4) 車えび養殖事業

① 事業プロセスの整理と調査範囲

a. プロセスフロー

車えび養殖は、種苗生産工程と市場出荷サイズまでの育成（以下、成エビ生産と呼ぶ）工程に大別される。いずれも完全陸上養殖であり、海面養殖は行わない。稚エビ以上のサイズのエビはコンクリート製の池に収容され、飼育される。成エビ生産について、通常、成エビは冬季が出荷の最盛期であるが、取水量増大時には単価の高くなる夏季での成エビの出荷を検討している。ここでは種苗供給センターで試験的に夏季に出荷している成エビ飼育の事業データを取得し、夏季出荷を想定して計算を行った。

b.調査範囲

本調査における調査範囲（システム境界）を図 3-43 に示す。養殖事業の当初における天然種苗（母エビ）の採取は含まず、養殖事業の設備・機器製造、材料製造、輸送、製造工程における設備、その他の廃棄を含む。ただし、生産物発送後の消費、廃棄については含まない。また、他養殖場へ出荷した場合、出荷先におけるエネルギー負荷等も算定対象外とする。

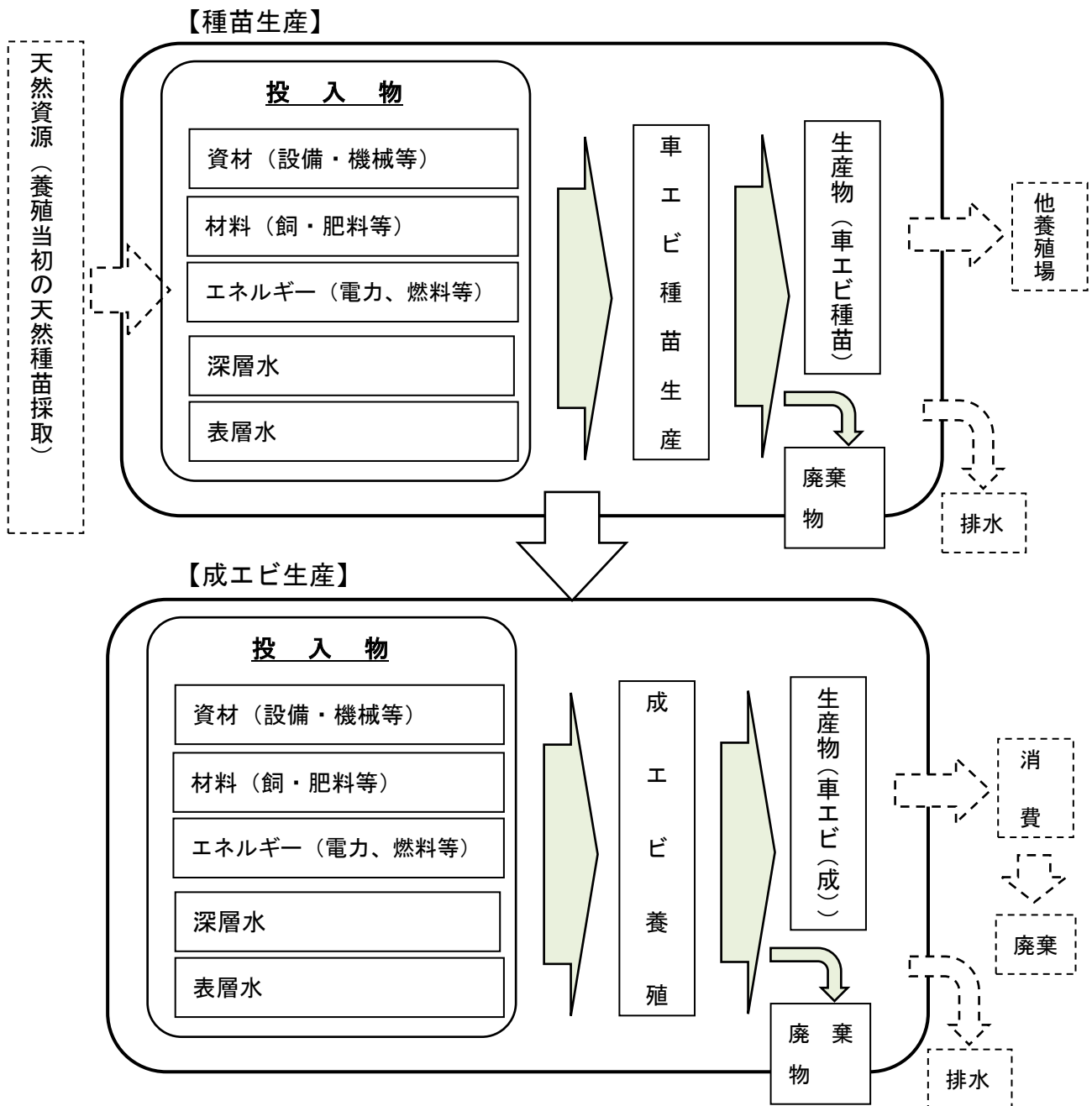


図 3-43 調査範囲(システム境界)

② 事業データの収集

車えび養殖事業者の聞き取り調査により情報を収集した。

データ項目を表 3-15 (種苗生産)、表 3-16 (成エビ生産)に示す。データは設計図面によるものも含む。数量データ及び飼料の種類等については事業内容になるため、ここでは非表示とした。設備、建造物等については各機材の平均的な耐用年数あるいは法定耐用年数で除却するものと考え、使用年数を設定した。輸送については、建設資材、機器類や材料等、沖縄本島で製造されていないと考えられるものについては一律関東（東京）からの輸送と仮定した。電力、海水利用量等は設備全体の合計値であることから、電力については主要機材の消費電力量から計算し、海水利用量は養殖池及び水槽の体積比及び季節的な生産工程の変動に合わせて配分した。生産物は孵化幼生および稚エビとなるが、孵化幼生から稚エビ成長段階における歩留まりを 65%として、合計生産尾数を稚エビの尾数として算定した。

なお、一部未取得のデータがあり、これらについては本調査の計算には含めていない(データ未取得と表示)。

③ 取水量増大時の事業データ

取水量増大に伴い、新たに養殖池 7 ha が新たに増設される想定とする。種苗生産設備には変化はなく、新たな取水設備から海水が供給されるものと想定する。本調査では、現在の成エビ養殖設備に対し、面積比で約 12.7 倍となることから、現状の成エビ生産の各項目を 12.7 倍して、取水量増大時の事業データとした。

発電後海水利用の有無については、海水利用の内訳のみ変化するものとし、発電後海水利用の効果による生産量の変化はないものと仮定した。

表 3-15 車えび養殖(種苗生産)の事業データ

【入力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考	
設備製造	養殖池	養殖池(親エビ用)	m3	事業データのため非表示	鉄筋コンクリート製	
		養殖池(稚エビ用)	m3			
	水槽	産卵用水槽	m3			鉄筋コンクリート製
		孵化幼生用水槽				※データ未取得
	ポンプ	海水用ポンプ	台			ポンプ消費電力:7.5kW
		温水 5.5kWポンプ	台			ポンプ消費電力:5.5kW
	ブロー	ブロー	台			ブロー消費電力:7.5kW
	クーラー	事務所内冷却用	台			4kWのエアコン1台を仮定
	水車	循環用水車	台			
	冷凍庫	冷凍庫	台			7kWの冷凍機1台を仮定
冷却タンク	タンク(3000L)	個				
建設	養殖施設	種エビ養殖施設(躯体鉄骨)	kg	鉄筋コンクリート製		
	産卵施設	m2				
事務所	プレハブ	m2	プレハブ施設			
	飼料(種苗用)	飼料A	g	飼料は種類ごとに数量データを取得 飼料の種類は事業データのため非表示		
飼料(親エビ用)	飼料B	g				
	飼料C	g				
	飼料D	g				
	飼料E	g				
	飼料F	g				
	飼料G	kg				
消毒剤	飼料H	kg	各種消毒用			
	飼料I	kg				
	飼料J	kg				
	飼料K	kg				
	次亜塩素酸	kg				
	イソジン	L				
梱包材	さらし粉	kg	発送用資材			
	顆粒塩素	kg				
	段ボール(大)	個				
	段ボール(小)	個				
	蓄冷材75g	個				
	蓄冷材200g	個				
輸送(設備)	貨物船輸送	ピニール袋	枚	久米島⇄東京(1656km)を輸送すると仮定		
		ピニール袋(小)	枚			
		発泡ボード(種苗用)	枚			
		リードペーパー	個			
		ポンプ	tkm			
		ブロー	tkm			
		クーラー	tkm			
		水車	tkm			
		冷凍庫	tkm			
		冷却タンク	tkm			
(建造物)	コンテナ船輸送	養殖施設一式	tkm	久米島⇄那覇(100km)を輸送すると仮定		
(材料)	貨物船輸送	飼料輸送	tkm			
		消毒剤輸送	tkm			
		梱包材輸送	tkm			
(廃棄物)	廃棄物処分場への輸送	コンクリートタンク	tkm			
		養殖施設	tkm			
		その他の埋立て処分品	tkm			
		産業廃棄物(埋立て処理)	kg			
廃棄	設備	産業廃棄物(埋立て処理)	kg		沖縄本島で処理すると仮定	
		ポンプ	kg			
		ブロー	kg			
		クーラー	kg			
		水車	kg			
		冷凍機材	kg			
		冷却タンク	kg			
	建造物	養殖施設	kg	※データ未取得		
		養殖施設	kg			
		事業ゴミ	kg			
エネルギー	電力	粗大ゴミ	kg	事務所での電力使用を含む		
		廃プラスチック	kg			
		養殖施設	kWh			
用水	上水利用	水道水	m3			
		表層水	m3			
		深層水	m3			

【出力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考
生産物	車エビ種苗	孵化幼生A	尾		孵化幼生は歩留まり65%として稚エビ生産尾数に換算し、計算した。
		孵化幼生B	尾		
		稚エビA	尾		
		稚エビB	尾		

表 3-16 車えび養殖(成エビ生産)の事業データ

【入力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考		
設備製造	養殖池	養殖池(成エビ用)	m3	事業データのため非表示	鉄筋コンクリート製		
	水車	循環用水車	台				
材料	飼料(成エビ用)	飼料A	kg		飼料は種類ごとに数量データを取得 飼料の種類は事業データのため非表示		
		飼料B	kg				
		飼料C	kg				
		飼料D	kg				
		飼料E	kg				
		飼料F	kg				
		飼料G	kg				
		飼料H	kg				
		飼料I	kg				
		飼料J	kg				
		飼料K	kg				
		飼料L	kg				
			消毒剤			さらし粉	kg
		梱包材				段ボール(10kg箱)	個
段ボール(8kg箱)	個						
段ボール(6kg箱)	個						
段ボール(1kg箱)	個						
段ボールプレート(1kg箱)	個						
蓄冷材75g	個						
蓄冷材200g	個						
蓄冷材500g	個						
ビニール袋	枚						
ビニール袋(小)	枚						
発泡ボード(種苗用)	枚						
		リードペーパー	個				
輸送(設備)	貨物船輸送	水車	tkm				
(材料)	貨物船輸送	飼料輸送	tkm	久米島⇄東京(1656km)を輸送すると仮定			
		消毒剤輸送	tkm				
		梱包材輸送	tkm				
(廃棄物)	廃棄物処分場への輸送	養殖施設、設備一式	tkm	久米島⇄那覇(100km)を輸送すると仮定			
廃棄	設備	養殖池	産業廃棄物(埋立て処理)	kg	沖縄本島で処理すると仮定		
		その他処分品	産業廃棄物(埋立て処理)	kg			
	廃棄物	事業ゴミ	可燃ゴミ	kg	※データ未取得		
			粗大ゴミ	kg			
		廃プラスチック	kg				
エネルギー	電力	養殖施設	kWh	事務所での電力使用を含む 養殖池保守管理のためのダイバーが使用			
	ガス	給湯用	m3				
用水	上水利用	水道水	m3				
	海水利用	表層水	m3				
		深層水	m3				

【出力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考
生産物	車エビ(成エビ)	市場出荷用	尾		
		親エビ(産卵後)	尾		

(5) カキ養殖事業

①事業プロセスの整理と調査範囲

a. プロセスフロー

カキ養殖も車えび養殖同様、種苗生産工程と市場出荷サイズまでの育成（以下、成カキ生産と呼ぶ）工程に大別される。いずれも完全陸上養殖であり、海面養殖は行わない。本調査では、具体的な事業計画が策定されている種苗生産段階を算定対象とし、成カキ生産段階は算定しない。なお、現状の設備については試験段階であることから算定対象としない。

稚貝までは屋内の水槽で飼育される。また、餌となる藻類培養も種苗生産施設内とした。

b.調査範囲

本調査における調査範囲（システム境界）を図 3-44 に示す。養殖事業の当初における天然種苗（母貝）の採取は含まず、養殖事業の設備・機器製造、材料製造、輸送、製造工程における設備、その他の廃棄を含む。ただし、生産物発送後の消費、廃棄については含まない。また、他養殖場へ出荷した場合、出荷先におけるエネルギー負荷等も算定対象外とする。また、成カキ生産も本調査では算定対象外とする。

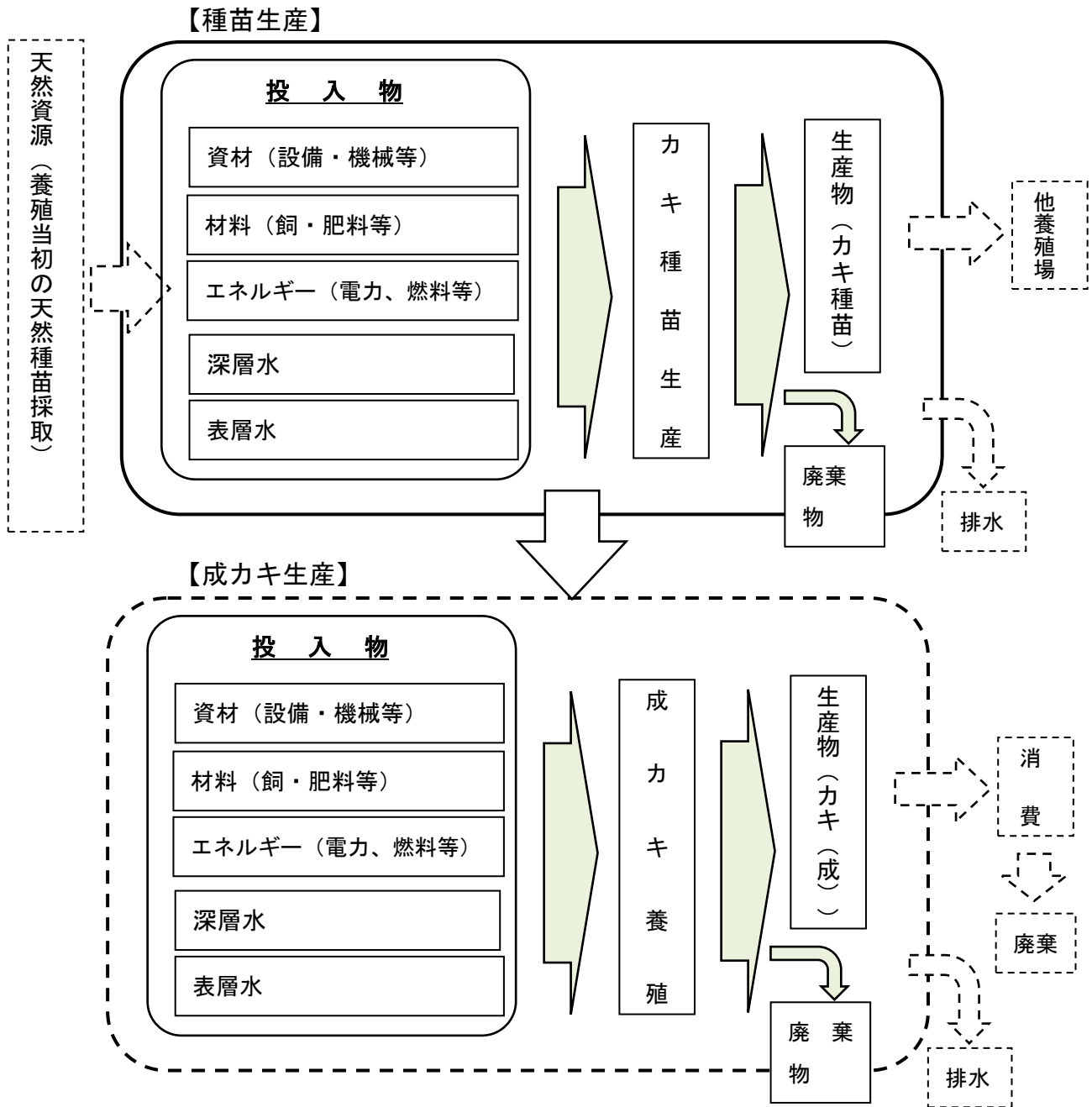


図 3-44 調査範囲(システム境界)

②事業データの収集

カキ養殖事業者の聞き取り調査により情報を収集した。

データ項目を表 3-17 に示す。データは設計段階のものであり、数量データについては事業内容になるため、ここでは非表示とした。設備、建造物等については各機材の平均的な耐用年数あるいは法定耐用年数で除却するものと考え、使用年数を設定した。輸送については、建設資材、機器類や材料等、沖縄本島で製造されていないと考えられるものについては一律関東（東京）からの輸送と仮定した。

なお、設計・検討段階であるため確定していないデータについては、本調査の計算には含めていない(データ未取得と表示)。

③取水量増大時の事業データ

本調査では取水量増大時については算定対象としない。

表 3-17 カキ養殖(種苗生産)の事業データ

【入力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考	
設備製造	飼育水槽	母貝飼育水貯水槽(海水用高架水槽)	個		ポリエチレン樹脂製円筒形タンクを想定	
		浮遊幼生飼育水高架水槽(海水用高架水槽)	個			
		初期稚貝飼育水高架水槽①(海水用受水槽)	個			
		pH調整タンク	個			
		貯水タンクA(海水用受水槽)	個			
		貯水タンクB(海水用受水槽)	個			
		着底幼生飼育水高架水槽(海水用高架水槽)	個			
		初期稚貝飼育水高架水槽②(海水用高架水槽)	個			
		藻類培養水槽	個			
		ろ過装置	ろ過装置(カートリッジ式海水仕様)	個		
		ろ過装置(バッグ式海水仕様)	個			
	ポンプ	一次冷水ポンプ(SUSライン製)	台			
		二次海水ポンプ(プラスチック製自吸型)	台			
		ダイヤフラムポンプ(炭酸ナトリウム混合槽)	台			
		ダイヤフラムポンプ(栄養塩供給装置)	台			
		海水用ポンプ(プラスチック製自吸型)	台			
	熱交換器	排水水中ポンプ(海水用、非自動型)	台			
		プレート式チタン製(12.0KW)	台			
	ヒートポンプ	プレート式チタン製(21.3KW)	台			
		プレート式チタン製(27.6KW)	台			
		空冷ヒートポンプチャラー C-CR1	台			
	タンク	空冷ヒートポンプチャラー H-CR1	台			
		空冷ヒートポンプチャラー H-CR2、CR3	台			
	殺菌器	密閉式膨張水槽	基		外面エポキシ塗装	
		クッションタンク(密閉型、鋼板製)	基			
	二酸化炭素注入装置	PVCタンク(炭酸ナトリウム混合槽)	基		硬質塩ビ製	
		PVCタンク(栄養塩供給装置)	基			
	配管	チタン製連続殺菌機	台			
	バルブ(継ぎ手)	水用紫外線殺菌灯ユニット	式			
		CO2ボンベユニット	式			
		VP管	m			
		HVP管	m			
		GV(PVC)	個			
		CV(PVC)	個			
		Yスト(PVC)	個			
		パタ弁	個			
		逃し弁	個			
		テフロンフレキ	個			
	空調設備(設備)	ビル用マルチ(室外機)	台		各項目とも大きさ等の規格ごとに数量を算出し、計算	
		ビル用マルチ(外気処理天井埋込型室内機)	台			
		ビル用マルチ(室外機)	台			
		ビル用マルチ(4方向カセット型室内機)	台			
		空冷ヒートポンプエアコン(天井型)	台			
	空調設備(ダクト)	中温用セパレートエアコン(天井露出型)	台			
		中温用セパレートエアコン(天井ダクト型)	台			
空調設備(換気設備)	冷媒管(被覆銅管)	m				
	ドレン VP管	m				
	スパイラルダクト(ガルバニウム)	m				
照明設備	塩ビ丸ダクト	m				
	全熱交換器(天井埋込型)	台				
	全熱交換器(天井カセット型)	台				
	ストレートシロココファン(消音型)	台				
	天井扇(低騒音型)	台				
	殺菌灯	個				
	LED照明	個				
建設	蛍光灯(LEDダウンライト18.2WF)	個				
	LEDブラケット照明	個				
材料	建屋	養殖場建屋	m2		鉄筋コンクリート建屋を想定	
輸送(設備)	飼料(種苗用)	植物プランクトン用添加剤?	g		※データ未取得	
	消毒剤	次亜塩素酸?	kg			
	貨物船輸送	空調設備(設備)		tkm		
		空調設備(ダクト)		tkm		
		空調設備(換気設備)		tkm		
		飼育水槽		tkm		
		ろ過装置		tkm		
		ポンプ		tkm		
		熱交換器		tkm		
		ヒートポンプ		tkm		
		タンク		tkm		
		殺菌灯		tkm		
		二酸化炭素注入装置		tkm		
		配管		tkm		
		バルブ		tkm		
植物プランクトン用添加剤?			g			
次亜塩素酸?		kg				
(材料)	貨物船輸送	植物プランクトン用添加剤?	g		※データ未取得	
		次亜塩素酸?	kg			
(廃棄物)	廃棄物処分場への輸送	養殖施設、設備一式	tkm		久米島⇄那覇(100km)を輸送すると仮定	
廃棄	設備	養殖池	産業廃棄物(埋立て処理)	kg	沖縄本島で処理すると仮定	
		その他処分品	産業廃棄物(埋立て処理)	kg		
	廃棄物	事業ゴミ	可燃ゴミ	kg	※データ未取得	
			粗大ゴミ	kg		
エネルギー	電力	養殖施設	kWh		事務所での使用を含む	
	ガス(LPG)	養殖施設	m3			事務所での使用を含む
用水	上水利用	水道水	m3			
	海水利用	表層水	m3			
		深層水	m3			

事業データのため非表示

【出力項目】

プロセス	項目	内容	単位	数量	備考
生産物	牡蠣種苗		個		

2) エネルギー消費量の算定

エネルギー消費量は、前項で収集した事業データ項目について、各項目に該当する（もしくは、同等と考えられる）エネルギー消費原単位をデータベースから選定し、数量を乗じることで算定した。エネルギー消費量は、取水量増大時との比較を行うため、各事業における基準単位（機能単位）あたりの量に換算して算定した。図 3-45 にエネルギー消費量算定のフローを示す。まず、各事業で使用される電力、表層海水、深層海水に係るエネルギー消費原単位を算定し、これらを基に各事業における単位量あたりのエネルギー消費量を算定した。

本調査では、久米島の系統電力における電力のエネルギー消費原単位については、別途算定した。久米島の電力系統は、本島と接続しておらず、独立した系統となっている。久米島の電力は主に、沖縄電力（株）の久米島電業所においてディーゼル発電機によって供給されており、公表値を基にして久米島系統電力のエネルギー消費原単位を算定した（電力事業者に対する情報収集は実施していない）。

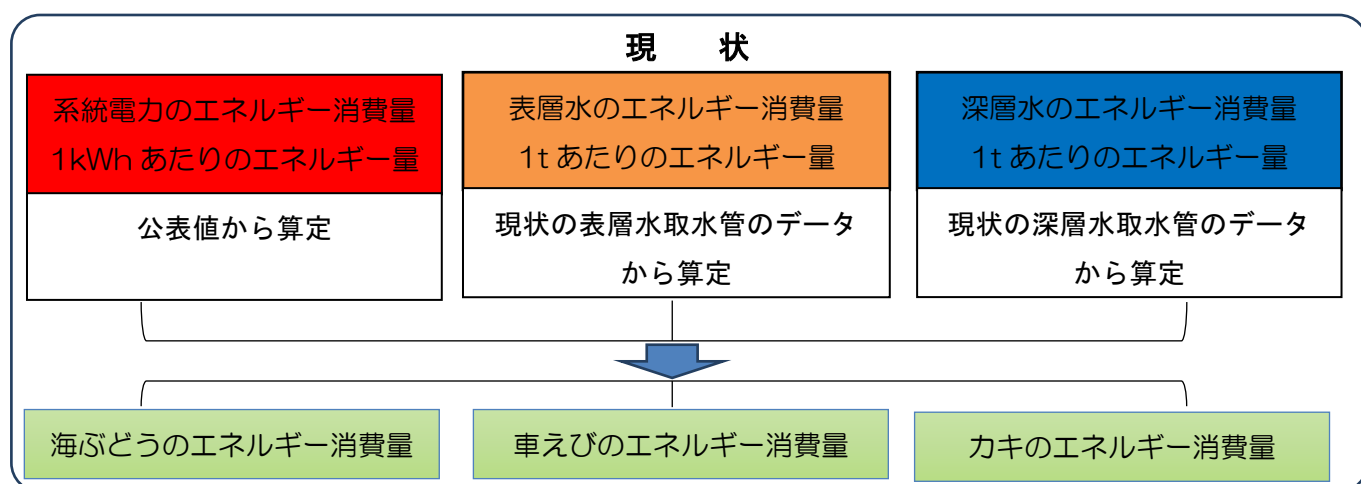


図 3-45 エネルギー消費量算定のフロー

(1) 電力（系統電力）

a.機能と機能単位

機能は電力の供給で、機能単位は電力 1kWh の電力供給とする。

b.諸条件

エネルギー消費量計算にかかる諸条件を表 3-18 に示す。諸条件を基に、ディーゼル発電所で
の電力生産を想定し、エネルギー消費量を算定した。

表 3-18 久米島系統電力のエネルギー消費量算定に係る諸条件

久米島電力需要	54,362 MWh/年 (平成 23 年度)	沖縄電力 HP 公開資料 ⁴
燃料	C 重油を想定	沖縄電力資料 ⁵
燃料消費率	0.23kg/kWh	一般的なディーゼルの燃料消費率 ⁶
ディーゼル発電機基数	8 基	沖縄電力 HP ⁷
最大出力	18.5MWh	沖縄電力 HP
耐用年数	40 年	本調査での想定

c.エネルギー消費量

久米島系統電力における電力のエネルギー消費原単位は以下の通り算定された。参考として、
省エネ法に基づく全電源平均(全日)の 1kWh の一次エネルギー換算値(受電端)が 9.76 MJ/kWh
である。

1kWh あたりの消費エネルギー量 : 11.2 MJ/kWh

※本調査における想定値であり、実質的な 1kWh あたりのエネルギー消費量と異なる可能性がある。

⁴ 「久米島における再生可能エネルギー発電設備の連系に関する説明会」
http://www.okiden.co.jp/shared/pdf/whats_new/2014/140529_03.pdf

⁵ 「燃料費（離島供給に係るものに限る）」平成 27 年 10 月 8 日
http://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_electricity/pdf/005_07_01.pdf

⁶ (一社) 日本内燃力発電設備協会編, “自家用発電設備専門技術者講習テキスト”, (一社) 日本内燃力発電設備協会, 東京, (2013), p.3-17.

⁷ 沖縄電力 HP : <https://www.okiden.co.jp/company/guide/power-equipment/>

(2) 取水

①表層海水

a.機能と機能単位

機能は表層海水の供給で、機能単位は表層海水 1t の海水供給とする。

b.エネルギー消費量

表層水取水に係る項目別のエネルギー消費量を表 3-19 に、内訳のグラフを図 3-46 に示す。
これによれば、表層水取水に係るエネルギーの 98%が電力（ポンプ動力）によるものである。

表 3-19 表層水取水に係る項目別のエネルギー消費量

		エネルギー消費量 (MJ/t)
設備	管製造	0.02
	その他の設備	0.01
エネルギー	電力	1.61
輸送	輸送	<0.01
廃棄	廃棄	<0.01
1tあたりのエネルギー消費量		1.64

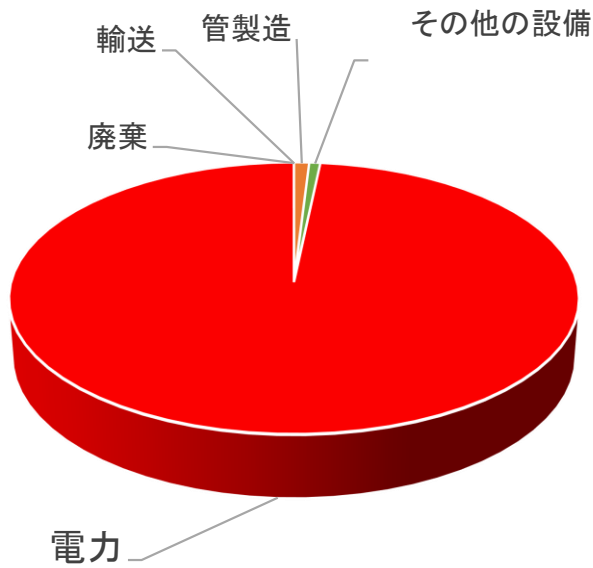


図 3-46 表層水取水に係るエネルギー量の内訳

1t あたりの消費エネルギー量 : 1.64 MJ/t

②深層海水

a.機能と機能単位

機能は深層海水の供給で、機能単位は深層海水 1t の海水供給とする。

b.エネルギー消費量

深層水取水に係る項目別のエネルギー消費量を表 3-20 に、内訳のグラフを図 3-47 に示す。表層水に比べ、管製造に係るエネルギー量が増えており、全体的なエネルギー消費量は増加している。表層水同様、消費エネルギーの大半が電力（ポンプ動力）によるものである。

表 3-20 深層水取水に係る項目別のエネルギー消費量

		エネルギー消費量 (MJ/t)
設備	管製造	0.15
	その他の設備	0.01
エネルギー	電力	1.70
輸送	輸送	<0.01
廃棄	廃棄	<0.01
1tあたりのエネルギー消費量		1.87

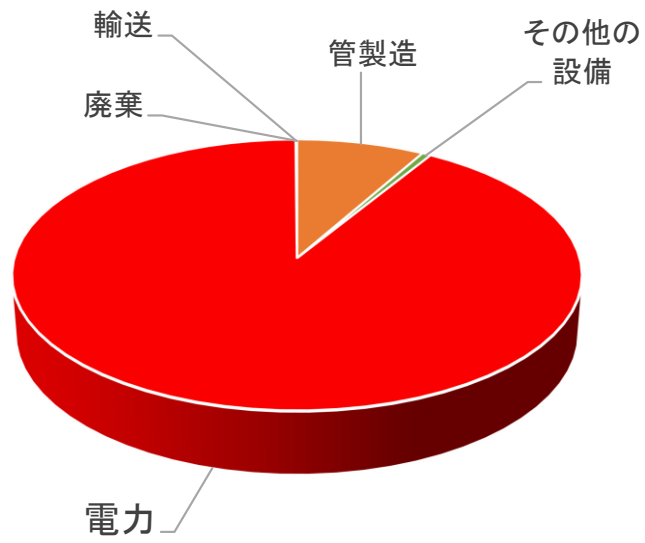


図 3-47 深層水取水に係るエネルギー量の内訳

1t あたりの消費エネルギー量 : 1.87 MJ/t

(3) 海ぶどう養殖

a.機能と機能単位

機能は海ぶどうの生産であり、機能単位は 1kg の海ぶどう生産とする。

b.エネルギー消費量

海ぶどう養殖に係る項目別のエネルギー消費量の内訳のグラフを図 3-48 に示す。消費エネルギーの大半が電力（養殖施設での消費）によるものであり、全体の約 60% を占めている。次いで表層水利用の消費エネルギーが高くなっており、深層水と併せて海水利用にかかるエネルギー消費量は全体の約 22% となっている。

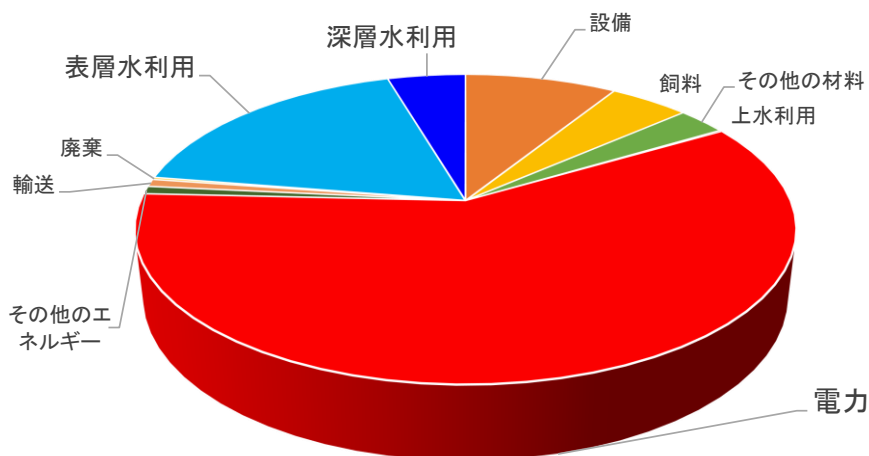


図 3-48 海ぶどう養殖に係るエネルギー量の内訳

(4) 車えび養殖

① 種苗生産

a.機能と機能単位

機能は車エビ種苗の生産であり、機能単位は出荷サイズの稚エビ 1 尾の生産とする。

b.エネルギー消費量

車えび養殖（種苗生産）に係る項目別のエネルギー消費量の内訳のグラフを図 3-49 に示す。海ぶどう養殖と同じく消費エネルギーの約 55% が電力（養殖施設での消費）によるものであり、次いで設備に係る消費エネルギーが高くなっている。表層水と併せて海水利用にかかるエネルギー消費量は全体の約 13% となっている。

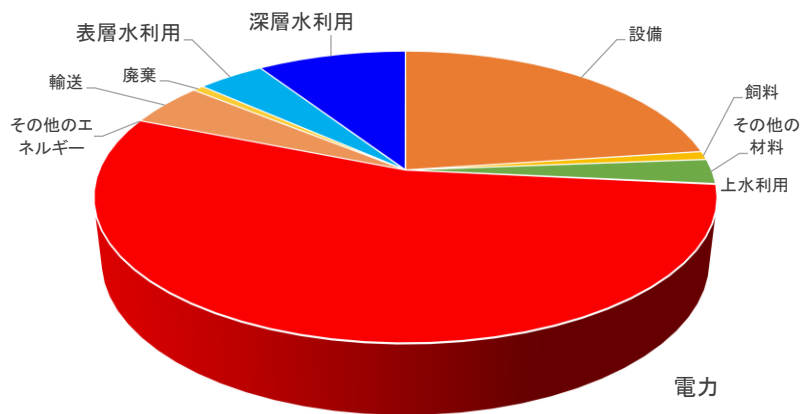


図 3-49 車えび養殖(種苗生産)に係るエネルギー量の内訳

② 成エビ生産

a.機能と機能単位

機能は市場出荷サイズの車エビの生産であり、機能単位は出荷サイズの成エビ 1kg の生産とする。

b.エネルギー消費量

車えび養殖(成エビ生産)に係る項目別のエネルギー消費量の内訳のグラフを図3-50に示す。種苗生産時よりも電力の消費エネルギーの割合は低くなっている(約45%)が設備及び海水利用に係る消費エネルギーがやや高くなっている(設備:約29%、海水利用約15%)。

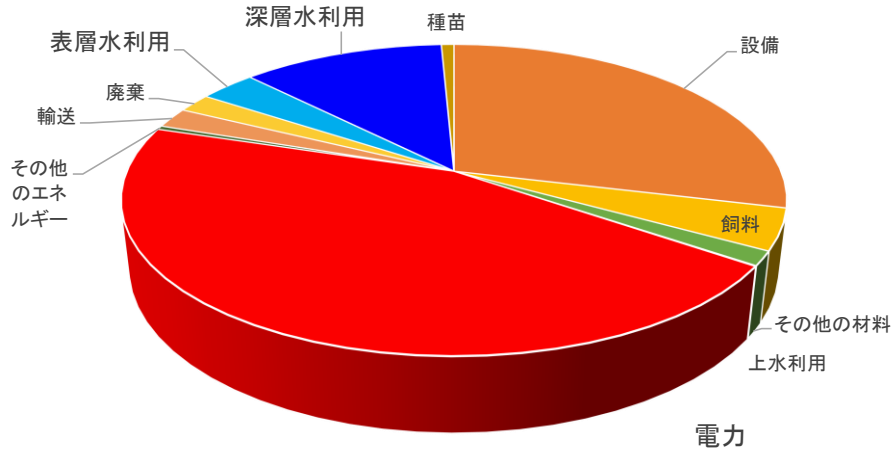


図3-50 車えび養殖(成エビ生産)に係るエネルギー量の内訳

(5) カキ養殖(種苗生産)

a.機能と機能単位

機能はカキ種苗(稚貝)の生産であり、機能単位は出荷サイズの稚貝1個の生産とする。

b.エネルギー消費量

カキ養殖(種苗生産)に係る項目別のエネルギー消費量の内訳のグラフを図3-51に示す。消費エネルギーの大半が電力(養殖施設での消費)によるものであり、全体の約84%を占めている。次いで深層水利用の消費エネルギーが高いが、表層水と併せて海水利用にかかるエネルギー消費量は全体の約5%程度となっている。

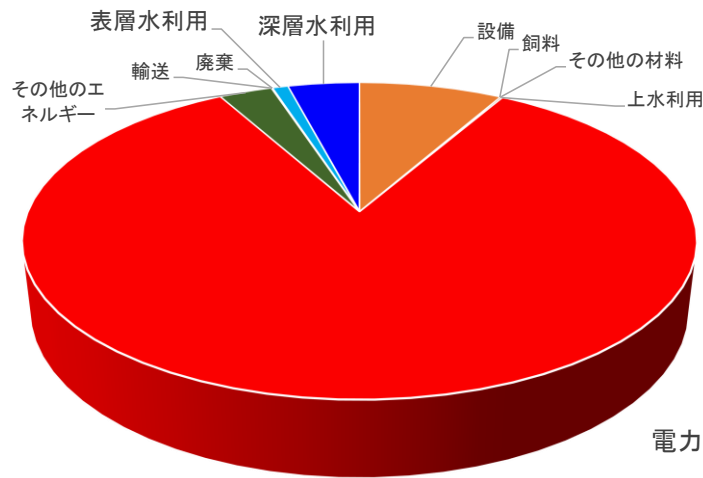


図 3-51 カキ養殖(種苗生産)に係るエネルギー量の内訳

3) 取水量増大時のエネルギー消費量低減効果の予測

取水量増大時のエネルギー消費量は、前項で収集した事業データ項目の数量を取水量増大時の数量に変換してエネルギー消費原単位を乗じ、各事業における基準単位（機能単位）あたりの量を算定した。図 3-52 に取水量増大時のエネルギー消費量算定のフローを示す。なお、本業務では取水量増大時の海水利用事業者として、海ぶどう養殖と車えび養殖（成エビ養殖）のみを想定している。

現状と大きく異なる点は、表層海水、深層海水が大規模取水管による取水になるため、海水利用にかかるエネルギー消費量が変わることと、電力のエネルギー消費原単位が OTEC による原単位になることである。さらに、OTEC による発電後海水利用の有無によって、各種条件が変化する。特に、OTEC における海水利用可能量が増加するため、発電電力量が異なり、それに伴って OTEC による電力のエネルギー消費原単位が変化する。このため、その後に利用する海ぶどう及び車えびの各養殖事業におけるエネルギー消費量も変化する事となる。加えて、同じ海水を異なる事業で 2 度利用するという事で、海水利用に係るエネルギー消費負荷の配分を実施する必要がある。詳細は次項に後述する。

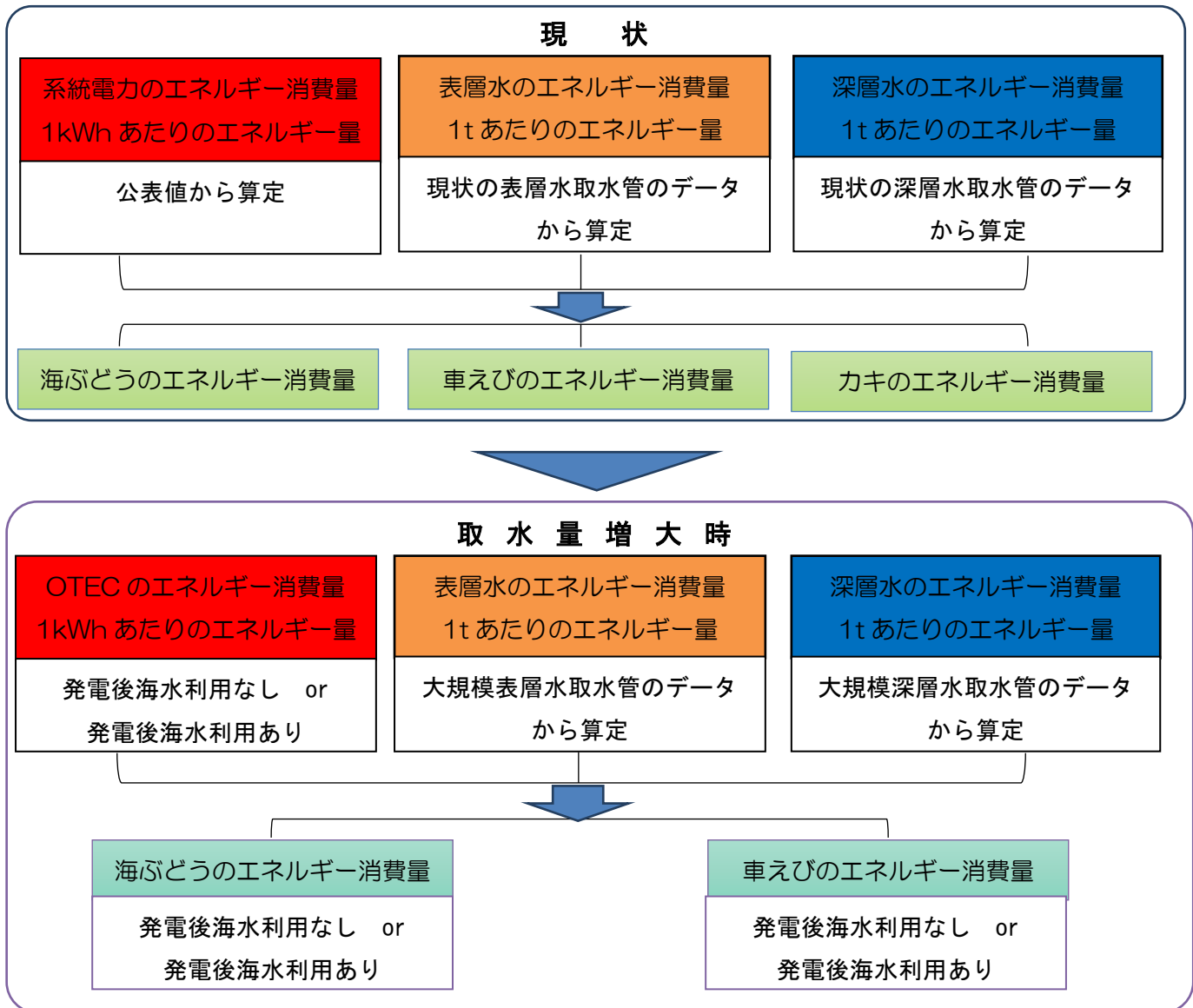
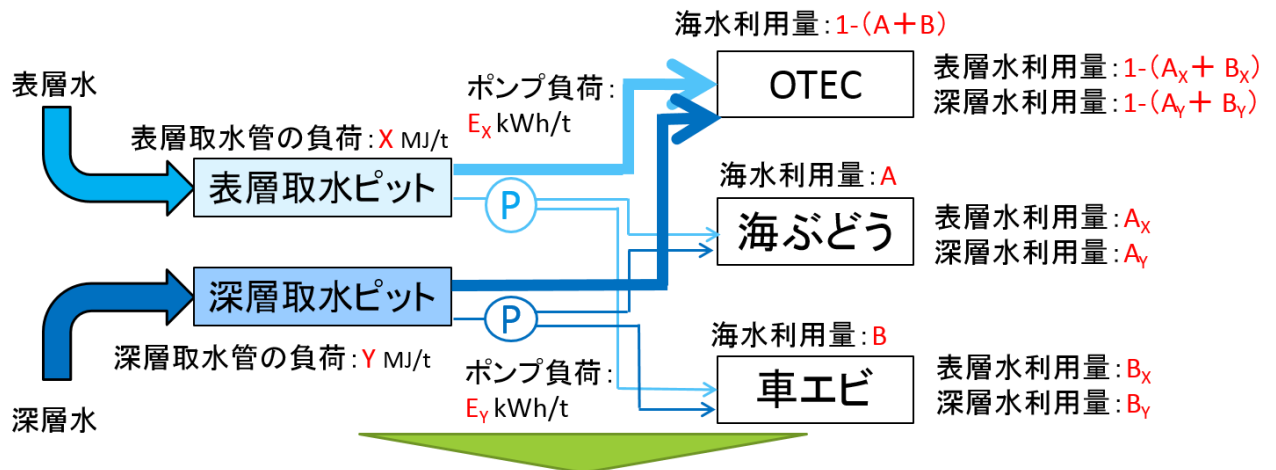


図 3-52 取水量増大時のエネルギー消費量算定のフロー

(1) 発電後海水利用による負荷の配分

OTEC による発電後の海水を利用する場合、同じエネルギー消費負荷によって汲み上げられた海水が、異なる事業者間で複数回（本想定では 2 回）利用されることになる。このことから、海水の取水にかかるエネルギー負荷は、同一の海水を利用する事業者間で配分される必要がある。一般的に、配分の基準は質量やモル、発熱量などの物理的な基準に基づいて配分されるケース、価格などの経済的価値にもとづいて配分されるケースなどがある。本ケースでは、発電量と水産物という異なる 2 種類の生産物ができるため、物理量による配分は難しい。また、経済的価値による配分については、各生産物の経済的価値をどのように評価するかという議論が必要となる。配分方法については、様々な方法が想定され、いずれについても専門知識を交えた多角的な検討

を要するものである。ここでは、単純に 2 回使うことで負荷が 1/2 になると考え、同一の海水を利用した分については、負荷を按分することとした。発電後海水の利用の有無による負荷の配分と負荷量の変化を図 3-53、図 3-54 に示す。



	表層水利用負荷	深層水利用負荷	ポンプ利用負荷
海ぶどう	$X \cdot A_x$	$Y \cdot A_y$	$E_x \cdot A_x + E_y \cdot A_y$
車エビ	$X \cdot B_x$	$Y \cdot B_y$	$E_x \cdot B_x + E_y \cdot B_y$
OTEC	$X \cdot \{1 - (A_x + B_x)\}$	$Y \cdot \{1 - (A_y + B_y)\}$	

図 3-53 発電後海水利用なしの場合の負荷配分

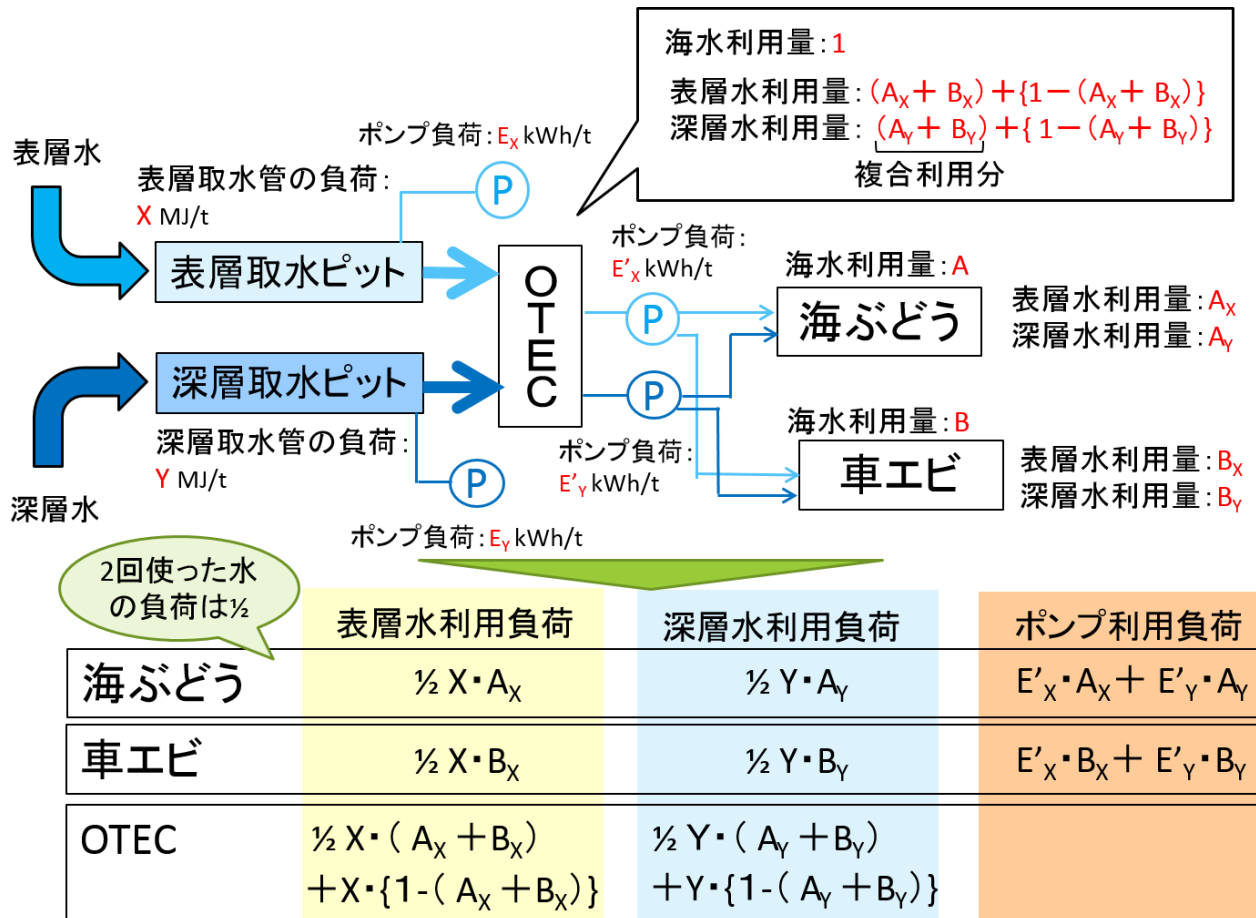


図 3-54 発電後海水利用ありの場合の負荷配分

(2) 取水にかかるエネルギー消費量の変化

取水量増大を想定した場合、取水管の製造や敷設等の設備に係るエネルギーは表層水が約 3.6 倍、深層水が約 4.1 倍となる。しかしながら、取水量は表層水が現状の 19.5 倍(225,000t/日)、深層水が現状の 13.9 倍(180,000t/日)となるため、1t あたりの負荷は、表層水が現状の約 18%、深層水が現状の約 30%程度に減少する計算となる（表 3-21, 図 3-55）。

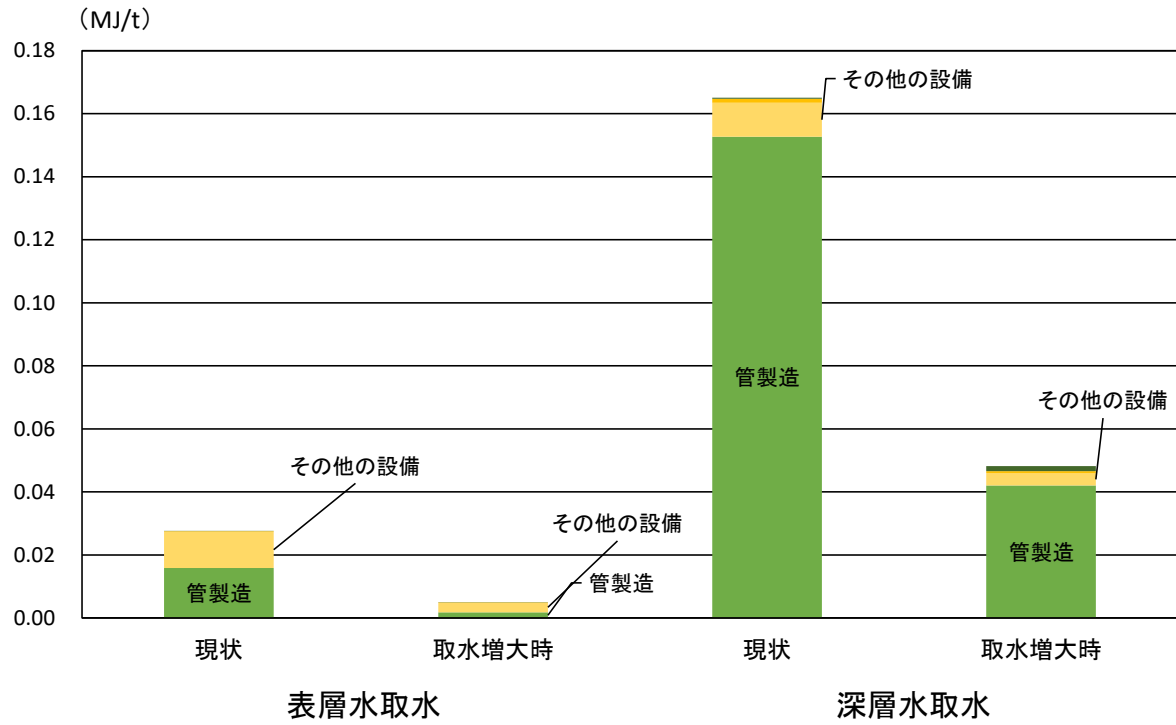
一方、ポンプについては発電後海水を利用しない場合は各事業者へ配水するポンプ、発電後海水を利用する場合は OTEC の所内ポンプによる汲み上げとなり、発電後海水の利用の有無で異なるポンプを利用することとなる。このことから、ここでは OTEC 後海水を利用しない場合に各事業者へ配水するポンプ動力を想定して比較する。ポンプ動力も表層水ポンプで現状の 14.3%、深層水ポンプで現状の 19.9%となり、現状よりも減少し、取水にかかる消費エネルギー量は、表層水、深層水とも取水量増大時には減少する結果となった。

表 3-21 取水量増大時の取水に係る消費エネルギー量の変化

		表層水取水の消費エネルギー [MJ/t]		深層水取水の消費エネルギー [MJ/t]	
		現状	取水増大時	現状	取水増大時
設備	管製造	0.02	<0.01	0.15	0.04
	その他の設備	0.01	<0.01	0.01	<0.01
輸送	輸送	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
廃棄	廃棄	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

		表層水取水の消費エネルギー [MJ/t]		深層水取水の消費エネルギー [MJ/t]	
		現状	取水増大時	現状	取水増大時
エネルギー	電力	1.61	0.23	1.70	0.34

【取水設備】



【ポンプ動力】

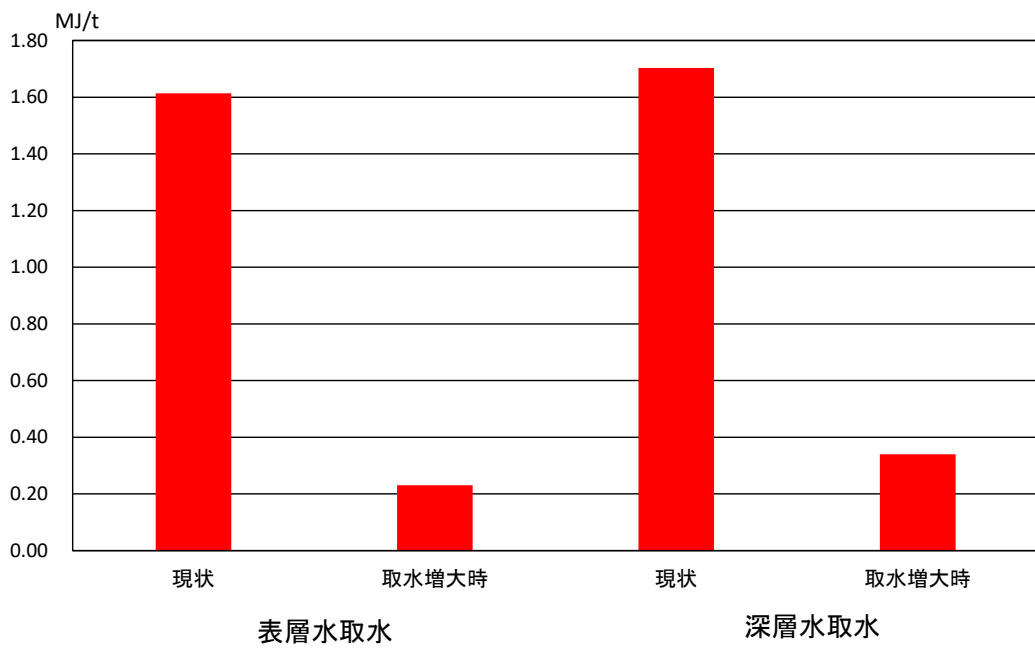


図 3-55 取水量増大時の取水に係る消費エネルギー量の比較

(3) 発電にかかるエネルギー消費量

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

発電後利用の有無による発電量（送電端）の変化および海水利用量の変化を表 3-22 エラー! 参照元が見つかりません。に示す。ここで、前述の配分方法により、発電後海水利用がある場合、所内ポンプ電力分は複合利用した割合分だけその後の利用者に配分される。発電量はこの配分量を加味した仮想的な送電端出力となっている。また、発電後海水利用がある場合、複合利用分の海水については取水にかかるエネルギー負荷が半分になっている（表 3-23, 図 3-56）。

これらの結果から、OTEC の発電にかかるエネルギー消費量を算定し、発電後海水の利用の有無で比較した。本業務における想定では、複合利用分が少なく、発電量もほとんど差がないため、大きな変化はみられないが、発電後海水利用がある場合には、ない場合と比較してエネルギー消費量が少なくなる結果が得られている。

表 3-22 発電後海水利用の有無による発電量及び海水利用量の変化

	発電後海水利用なし	発電後海水利用あり
発電量(送電端)	4,418 MWh/年	4,833 MWh/年
表層水利用量	79,372,166 t/年	81,315,770 t/年
深層水利用量	61,489,834 t/年	65,700,000 t/年

表 3-23 取水量増大時の発電に係る消費エネルギー量(発電後海水利用の有無による比較)

		発電によるエネルギー消費量 [MJ/kWh]	
		発電後利用なし	発電後利用あり
設備	設備製造	0.16	0.15
海水利用	表層水利用	0.09	0.08
	深層水利用	0.67	0.63
環境効率(1tあたりの負荷量)		0.92	0.86

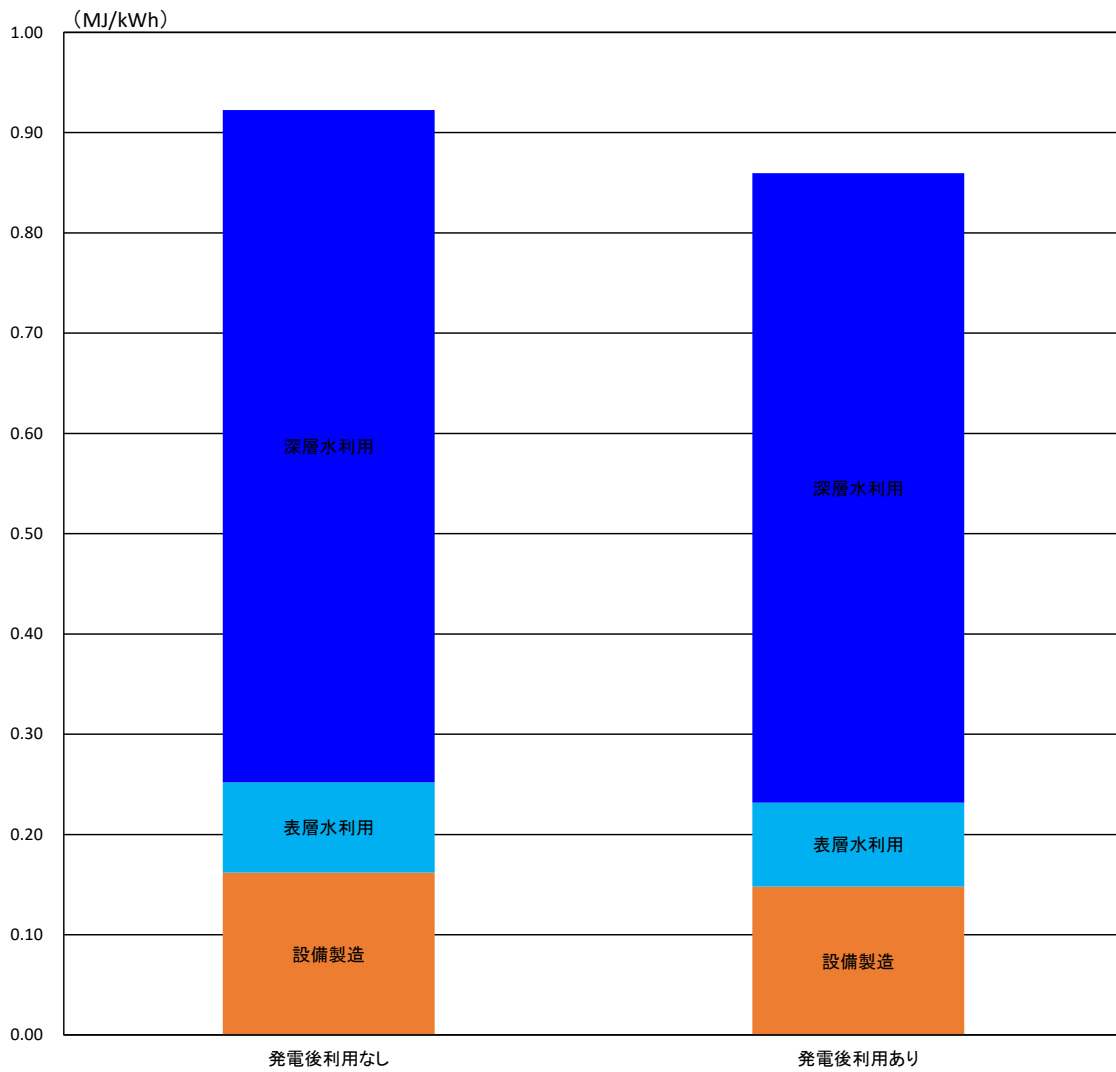


図 3-56 取水量増大時の発電に係る消費エネルギー量の比較

(4) 海ぶどう養殖にかかるエネルギー消費量

海ぶどう養殖における取水量増大時のエネルギー消費量の変化を図 3-57、図 3-58 に示す。ここでは、取水管のスケールアップによる効果の参考として、取水量増大ケースで電力に系統電力を利用したと仮定したケースを併記した。ただし、海水の配分は OTEC 導入ケースと同様とする。

取水量増大で系統電力を利用したケースでは、現状における取水にかかるエネルギー量が大きく減少した。これは主にポンプに係る電力量が減少したことによる。さらに OTEC 導入により養殖に利用する電力にかかるエネルギー量が大幅に減少した。

発電後海水利用の有無による差をみると、本業務における想定では僅差ではあるが、複合利用した海水に係る負荷の配分及びその配分によって電力のエネルギー消費原単位が下がった効果により、発電後海水の利用がある場合の方がエネルギー消費量が少ない結果となった。

本業務では、発電後海水利用者が限定的であること、発電後海水を利用することによる副次的な効果（深層水を利用しないことにより珪藻類繁茂が抑制され収量が上がる、等）は考慮されていないことなどから、今後の想定によっては差が大きくなる可能性も考えられる。

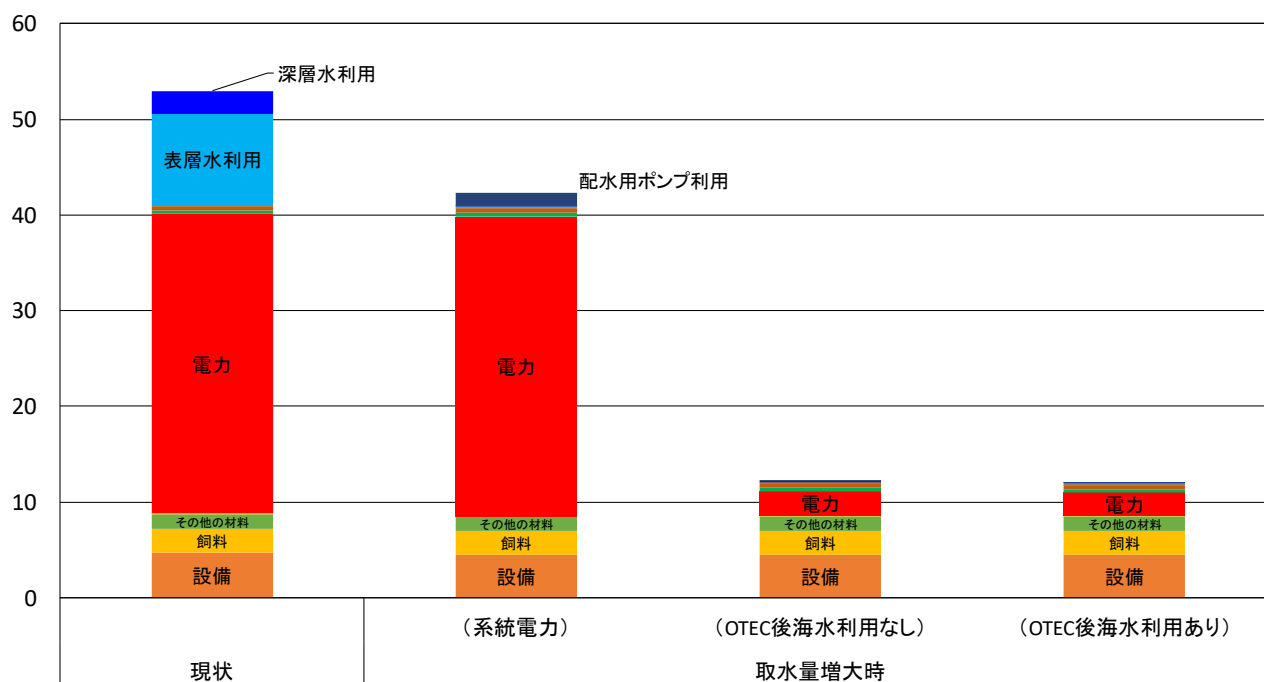


図 3-57 取水量増大時の海ぶどう養殖に係る消費エネルギー量の比較

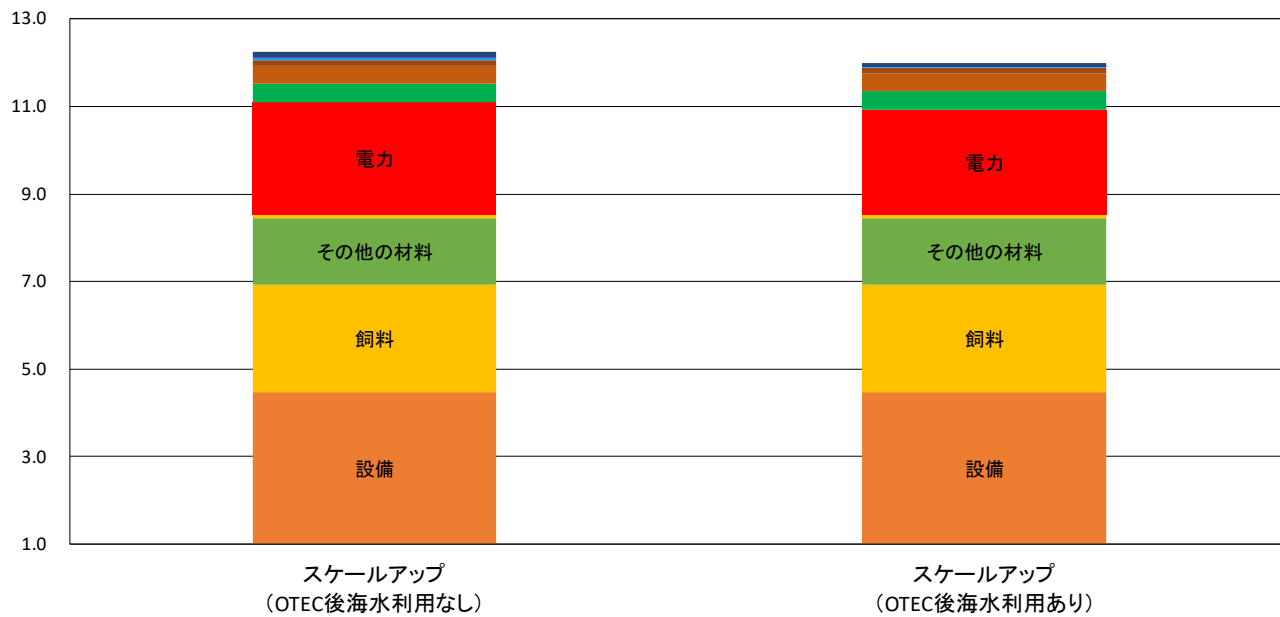


図 3-58 発電後海水利用の有無による海ぶどう養殖に係るエネルギー消費量の比較

(5) 車えび養殖にかかるエネルギー消費量

車えび養殖（種苗生産）における取水量増大時のエネルギー消費量の変化を図 3-59 に示す。種苗生産については、現段階で OTEC からの電力供給の可能性が不確実であることから、取水量増大時のケースのみ示す。大規模取水管が導入されることにより、取水にかかる負荷は減少する。

車えび養殖（成エビ生産）における取水量増大時のエネルギー消費量の変化を図 3-60 に示す。海ぶどう養殖同様、取水管のスケールアップによる効果の参考として、取水量増大ケースで電力に系統電力を利用したと仮定したケースを併記した。ただし、海水の配分は OTEC 導入ケースと同様とする。

結果は海ぶどう養殖と同様の傾向となっており、取水量増大で系統電力を利用したケースでは、現状における取水にかかるエネルギー量が大きく減少し、さらに OTEC 導入により養殖に利用する電力にかかるエネルギー量が大幅に減少した。

発電後海水利用の有無による差をみると、本業務における想定では僅差ではあるが、発電後海水の利用がある場合の方が、エネルギー消費量が少ない結果となった。

本業務では、発電後海水利用者が限定的であること、発電後海水を利用することによる副次的な効果は考慮されていないことなどから、今後の想定によっては差が大きくなる可能性も考えられる。

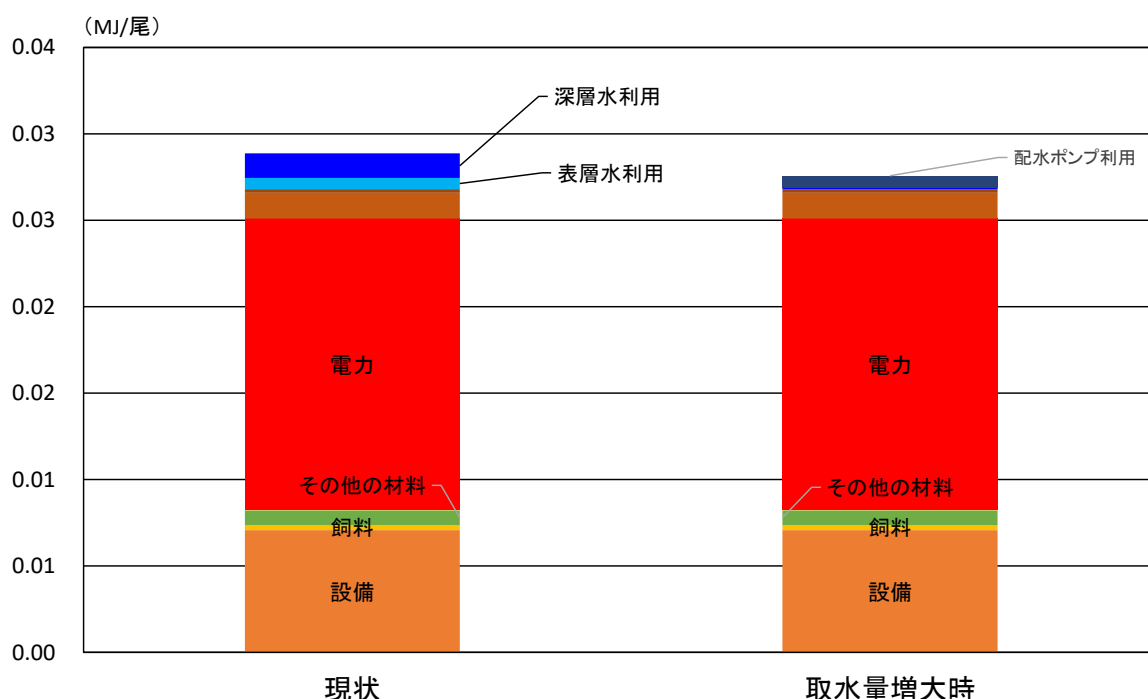


図 3-59 取水量増大時における種苗生産にかかるエネルギー量

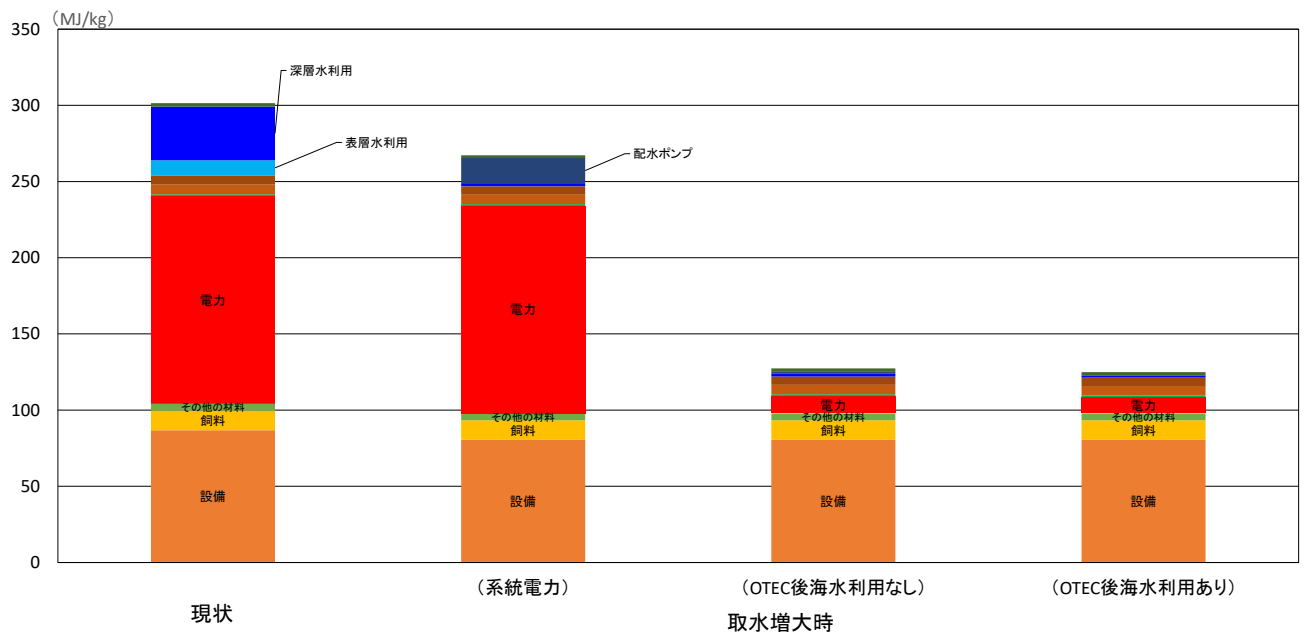


図 3-60 取水量増大時の車えび養殖に係るエネルギー量の比較

4) 考察

(1) 現状におけるエネルギー消費量

現状のエネルギー消費量をみると、いずれの事業においても電力に係るエネルギーが大きな割合を占めていた。特に今回の評価対象モデルとした久米島のような本島の系統に接続していない離島では、重油を燃料としたディーゼル発電機による発電になり、効率も悪いことから電力利用に係る負荷が大きくなる。このことからいずれの事業においても電力消費に伴うエネルギー消費量を下げることが効果的であることを示唆している。

さらにこうした状況は、離島における深層水そのものの効果も示している。仮に、現状の設備で深層水による温度調整が出来なかった場合を考えると、同じ事業を実施する場合のエネルギー量は膨大なものになると考えられる。目安として、本業務の LCA の中で参考として算定した各事業の CO₂ 排出量を見ると、海ぶどう養殖が生産額 100 万円あたり 1470 kg-CO₂eq、車えび養殖(成エビ生産)が 3907 kg-CO₂eq であった。各生産物が持つ機能が異なるため単純比較によって優劣を示せるものではないが、IDEA における海面養殖業の平均的な CO₂ 排出量が 100 万円あたり 4448kg-CO₂eq となっていることから、久米島における深層水利用養殖事業の CO₂ 排出量は、国内の養殖業における一般的な水準にあると考えられる。仮に海水冷却に深層水が使えなかった場合は、膨大な量の海水冷却を電力や燃料を用いて行う必要があり、CO₂ 排出量はこの水準よりもはるかに高い値になることが予想される。CO₂ 排出において化石燃料由来が卓越していることを考えると、エネルギーにおいても同様の傾向があると考えられる。このことから、離島における養殖事業において深層水を利用することが、エネルギー及び地球温暖化の環境側面からみても効果的であると推測される。

(2) 取水量増大時の予測

取水量を増大することに伴い、①取水管の規模拡大の効果、②OTEC 導入の効果、③発電後海水利用による効果の 3 つの効果によって、各事業におけるエネルギー消費量は低減する結果となった。

① 取水量増大時の効果

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

② OTEC 導入の効果

前述のとおり、現状の事業におけるエネルギー消費量の大部分は電力由来であり、化石燃料消費に伴うものである。OTEC 導入によって再生可能エネルギーを電力源とすることで、化石燃料消費量が削減され、すべての事業で大幅にエネルギー消費量が低減される結果となった。これは特に、久米島という単独系統の離島では効果が顕著に現れていると考えられる。離島における産業振興は、電力需要拡大によるエネルギー面でのデメリットが考えられるが、こうした課題を解決し、効果的な産業振興につなげられることが期待される。

③ 発電後海水利用による効果

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

本調査結果においても発電後海水利用があることにより、各事業においてエネルギー消費量が低減される結果となった。

ただし、本業務における想定では、OTEC 以外に海ぶどう養殖、車えび養殖のみでの利用を想定しており、二次的な利用量は取水量に対して少なかった。このことから、発電後海水利用がない場合とある場合で発電量が大きく変わらず発電におけるエネルギー消費原単位が大きく変わらなかったこと、資源採取の負荷配分をする対象が少なく配分率が低かったことが要因となり、本調査結果では発電後海水利用の有無でエネルギー消費量の低減効果は僅かであった。しかしながら、今後、利用者が増えることによって、この差は広がると考えられる。即ち、取水量が限定される状況で利用者が増え、発電後海水を利用しないと考えた場合には OTEC に利用される海水量が減り、発電量が減ることによって 1kWh あたりのエネルギー消費量が大きくなる。これを原単位として各事業のエネルギー消費量が計算されるため、電力利用量が変わらなくてもエネルギー消費量は増える計算となる。一方、発電後海水を利用すると考えると、最大量の発電が出来ることに加え、取水にかかるエネルギーを利用者で配分することとなり、各事業におけるエネルギー消費量は低減していく計算となる（図 3-61）。

こうしたことから発電後海水の利用は、資源を効率的に利用し、エネルギー消費量を低減するのに有効であると考えられる。

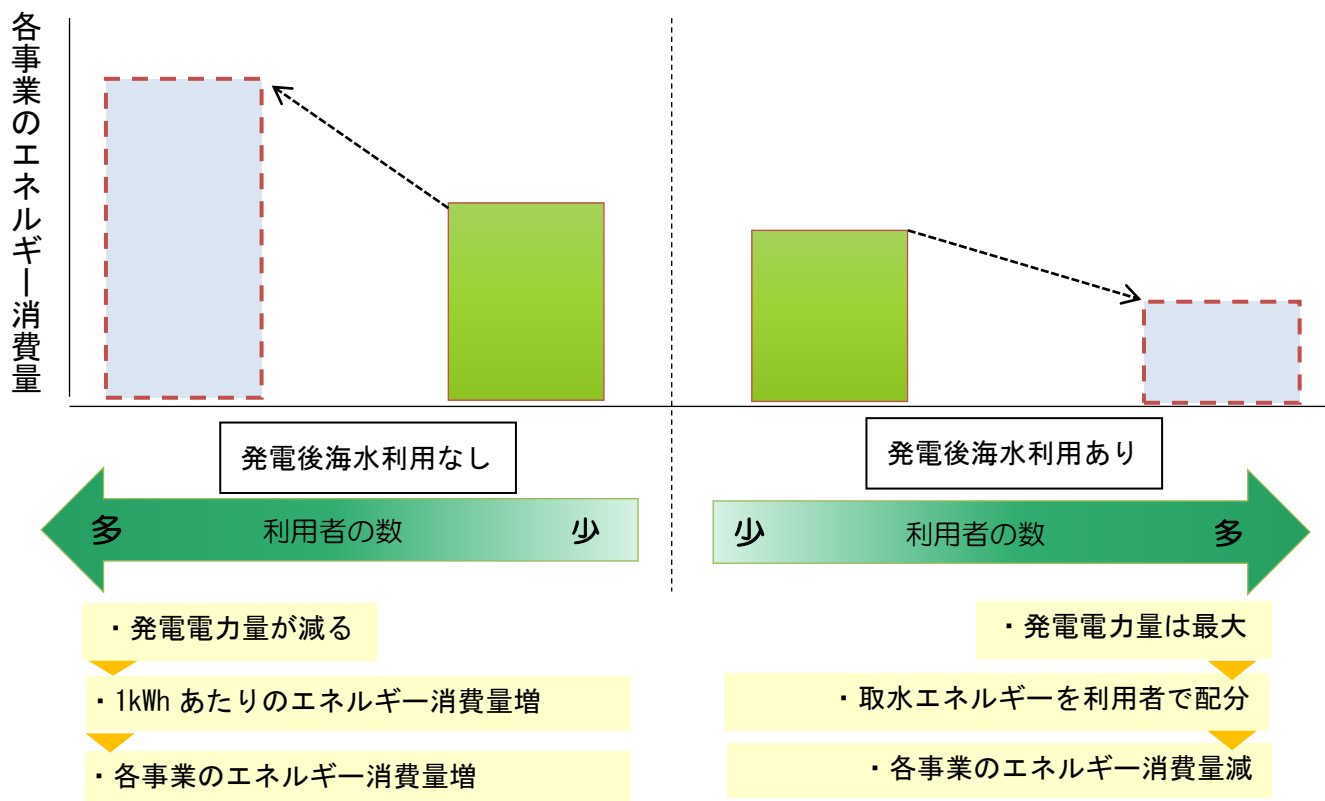


図 3-61 深層水利用者の増加による発電後海水利用効果の変化

5) LCA に関する今後へ向けた課題

本事業対象以外の深層水利用産業における LCA 評価

久米島における深層水利用産業としては、本事業で対象とした事業以外にも農業や化粧品、淡水製造など様々な産業があり、取水量が増大した場合には新たな産業の参入も見込まれる。また、本業務での対象事業についても計画熟度の進行に伴って事業データが更新されていくと考えられる。これらのデータを逐次収集し、産業ごとの単位当たり消費エネルギー量を把握しておくことで、今回評価対象とした久米島モデルの具体的な評価に繋がるのはもちろん、深層水高度複合利用プロジェクト一般に対する計画段階におけるシミュレーションも可能となる。本調査結果の通り、発電後海水の利用を前提とした久米島モデルでは、利用者の変化に伴ってエネルギー消費量は変化する。産業ごとに計算のベースを整えておくことで、久米島のみならず、他地域において久米島モデルのような深層水高度複合利用設備を導入するといったケースでも迅速な評価シミュレーションが可能となると考えられる。

負荷配分方法の検討

発電後海水利用による負荷配分は、本事業の中では単純に利用回数に応じて按分した。しかしながら、深層水の資源価値を考えた場合、価値に見合った配分方法を検討する必要がある。現状

では、深層水は温度利用がメインとなっており、利用する熱量ベースでの配分なども検討できると考えられる。利用者のコンセンサスを取りながら、適切な方法を模索していくことが重要である。

経済性評価との連携

深層水利用産業の持続可能性を検討する上では、経済性の評価が必須である。LCA 同様に導入から廃棄まで一連のプロセスに従ってかかるコストを算定するライフサイクルコストイングという手法やその他の経済的手法を用いることによって、経済性を同時に算定し、環境効率（製品が与える負荷を提供する価値と比較する）として評価することも可能になると考えられる。

多角的な影響評価

LCA では特定の環境影響のみではなく、様々な環境領域に対する影響評価を実施し、統合的な評価を行うことが可能である。例えば、本業務では養殖事業におけるエネルギー消費量を算定したが、深層水利用産業はいずれも完全陸上養殖であり、設備におけるエネルギー消費量が相対的に大きくなる傾向がある。しかしながら陸上養殖で種苗生産から行うことによって、水産物の天然資源に対する漁獲圧低下や海面養殖で問題となる沿岸海域への汚染影響などを低減できている可能性も考えられる。様々な影響を考慮していくことで、エネルギーや環境だけでなく社会影響など深層水高度複合利用モデルの総合的な影響評価へつなげられる。

3.4.6 IMPACT 手法を用いた予測

海洋温度差発電の発電後海水を用いた高度複合利用モデルを実現することの有効性について、「久米島モデル」プロジェクトを例として、包括的環境影響評価指標 Triple I の簡易版である Triple I light を用いて定量的に評価した。

1) 包括的環境影響評価指標

(1) エコロジカルフットプリント (EF)

EFは、ある期間（通常1年間）の経済活動による資源やエネルギーの消費、廃棄物の処理に必要な生態系の生産（処理）能力を、生物生産力のある（耕作地、牧草地、森林地、生産性のある海域、生産力阻害地に区分される）の面積に換算した値で表される。これらの土地区分ごとに単位面積当たりの生産力が異なるため、土地面積を合計する際には、表3-24に示すような等価係数（Equivalence Factor）を乗ずることによって世界平均の生物生産力を基準にした値に標準化する必要がある。この標準化した土地面積の単位には global hectares (gha) が用いられる。実際の地球上に存在する土地や水域の生産（処理）力も同じ等価係数を用いて標準化した土地面積として表すことができ、その値はバイオキャパシティ（BC）と呼ばれる。

EFの計算方法には、Compound 法と Component 法の2つの方法がある。Compound 法は、各国の EF 消費や BC 存在量を計算する際に用いられ、各国の生物資源消費を国内生産量、輸入量、輸出量などの統計データから計算する。また、エネルギー消費については、国内エネルギー生産に輸入品に内在する消費エネルギーを加えることによって計算する。一方、Component 法は、個々の生産活動や経済活動による EF 消費を計算する際に用いられる。個々の生産活動による EF 消費の大部分は、二酸化炭素排出に伴う森林の消費（排出した二酸化炭素を全て吸収するために必要な森林面積と考える）で換算されるため、従来から行われている二酸化炭素排出量を指標とする Life Cycle Assessment (LCA) の手法が応用できる。

EFは土地面積という非常に単純で分かりやすい指標となっているため、ヨーロッパ連合をはじめ、多くの国・自治体で現在急速に普及しつつある。しかしながら、EFは基本的に現時点での統計データを基礎として計算されるため、将来的な価値や寿命、技術革新などが反映されていないという批判もあり、意思（政策）決定に用いる際には、長期的な観点からの比較評価をどう取り入れるかが課題となっている（Nicky Chambers 2000⁸; 日本船舶海洋工学会 IMPACT 研究委員会 2012）。

⁸ Nicky Chambers, Craig Simmons, Mathis Wackernagel, 2000, SHARING NATURE'S INTEREST: ROUTLEDGE CHAPMAN HALL(=2005, 五頭美知『エコロジカルフットプリントの活用』合同出版)。

表 3-24 EF の計算で必要となる等価係数

土地区分	等価係数 (gha/ha)
耕作地	2.52
牧草地	0.43
森林地	1.28
生産性のある海域	0.35
生産力阻害地	2.52

(Global Footprint Network の公開データを基に作成)

(2) 環境リスク

環境リスクによる評価手法は、1990 年代に東京大学の中西準子教授により提案されたものであり、化学物質による人体への影響や地球温暖化などの広域的、長期的環境問題を評価するのに有効な手法とされている。

この手法では、環境影響として現在および未来の経済損失、人の健康への影響、生態系への影響が、資源消費として現在および未来のコストが、ベネフィットとして現在および未来のが、それぞれ環境影響評価の際考慮すべき項目として挙げられている。これらは、コスト (C)、人の健康リスク (HR)、生態リスク (ER) に集約され、最終的にベネフィット (B) とリスクの比 (AB/AR =見返りとしてもたらされるベネフィット/受忍するリスクの大きさ) で一元的に評価される。なお、 HR 、 ER のコストへ換算係数は、それぞれ VH (Value of human life)、 VE (Value of ecology) と定義されているが、 VE の算定には課題が多いことが指摘されている (中西 1995⁹; 日本船舶海洋工学会 IMPACT 研究委員会 2012)。

(3) Inclusive Impact Index (Triple I)

先述の通り、 EF には基本的に現時点での統計データを基礎として計算されるため、将来的な価値や寿命、技術革新などが評価できないという問題がある。しかし、将来も含めた長期的な評価ができる環境リスクを取り入れることで、 EF の問題が解決できるとされる。(社)日本船舶海洋工学会、海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価研究委員会 (通称: IMPACT 研究委員会) は、包括的環境影響評価指標 Triple I (Inclusive Impact Index) を開発した。リスクを含めた将来的な生態系の価値を生物生産量の価値として考えれば、 ER は EF に統合することが可能となる。一方、環境リスク論において HR は C に統合される。したがって、 ER と統合した EF と、 HR を統合した C を統合するための換算係数を導入することで包括的指標を作ることができる。Triple I (III) は、式 (1) のように表される。

⁹ 中西準子, 1995, 『環境リスク論』岩波書店.

$$III = [(EF - BC) + \alpha ER] + \gamma [(C - B) + \beta HR] \quad (1)$$

ここで、 α は ER の EF への換算係数、 β は HR の C への換算係数である。そして、 γ は経済価値（\$、¥など）を EF に変換する換算係数であり、対象とする技術を適用する国あるいは地域の EF と GDP の比 EF_{region}/GDP_{region} 、あるいは世界の総 EF と総 GDP の比 $\Sigma EF_{region}/\Sigma GDP_{region}$ などが用いられる。なお、環境リスク論では HR は人間の健康へのリスク（Health Risk）として定義されており、災害による経済損失などの社会リスクとは別に扱われているが、Triple Iでは、 HR は健康リスクと社会リスクを含む人間リスク（Human Risk）として定義している。

右辺第1項は環境面の持続可能性を評価する部分で、右辺第2項は経済面の持続可能性を評価する部分となる。この指標では、環境への負荷やコストが正の値で、環境容量の増加や利益が負の値で計算されるため、 $III > 0$ であれば対象技術は持続不可能、 $III \leq 0$ であれば持続可能と判断することができる。

Triple Iの計算式中には、 EF や BC 、 C や B のように、積み上げ式で計算できる項と、 ER や HR のように、確率論的に計算する必要のある項が含まれている。特に ER は理論そのものが研究段階あり、他の項と同精度で評価するのが難しい現状である。そこで、IMPACT委員会では、 ER や HR の計算が困難な場合にも評価できる簡易指標として、式(2)に示す Triple I light (III_{light})も開発した（日本船舶海洋工学会 IMPACT 研究委員会 2012）。

$$III_{light} = (EF - BC) + \gamma (C - B) \quad (2)$$

本検討では、Triple I light を用いて評価することとした。本検討で用いられる Triple I light は式 (3) で表される。

$$\Delta III_{light} = \Delta (EF - BC) + \gamma \Delta (C - B) \quad (3)$$

ここで、 EF はエコロジカルフットプリント（単位：gha）、 BC はバイオキャパシティ（単位：gha）、 γ は世界の総 EF と総 GDP の比 $\Sigma EF_{region}/\Sigma GDP_{region}$ である。また、 C 、 B は金銭的なコスト、ベネフィット（yen）である。 Δ は、久米島モデルを実現する場合から現状を維持した場合を引いた差を表す。なお、 BC は十分なデータが揃っていないため省略する。環境面の評価は ΔEF 、経済面の評価は $\Delta(C - B)$ 、環境面と経済面を包括した評価は ΔIII_{light} で行う。 ΔIII_{light} が負であれば、久米島モデルの実施は有効であると判断できる。

現状を維持した場合を BaU（Business-as-usual）ケース、久米島モデルを実現する場合を OTEC ケースとし、評価を行う。なお、評価期間は、日量 18 万 m³ 取水施設からの深層水の供給開始時の 2023 年以降の 30 年間とした。

2) 久米島モデルの評価方法

(1) 評価対象

(a) 深層水取水施設

BaU ケースでは現在稼働している日量 1.3 万 m^3 取水施設、OTEC ケースでは日量 18 万 m^3 取水施設を評価対象とした。現行の深層水譲渡料金単価は、水産養殖関連が 6 円/ m^3 、深層水温浴施設が 40 円/ m^3 、クルマエビ出荷前冷却処理が 110 円/ m^3 、工業利用が 400 円/ m^3 である。ただし、表層水の譲渡料金単価は一律 6 円/ m^3 である。久米島モデルが実施された場合について、取水後にまず OTEC が全量利用することから、現在、譲渡料金単価をどのようにするかとの議論が行われている。そのため、本検討では、OTEC ケースにおいても、現行の需要形態ごとの譲渡料金単価を用いた。なお、取水施設の機器の稼働年数は 30 年とした。

(b) 発電施設

評価対象となる発電施設は久米島発電所と OTEC 施設である。

久米島発電所では、ディーゼル発電機（以下、DEG と略す）を用いて電力の供給を行っている。また、燃料に C 重油を用いており、現在、8 機のディーゼル発電設備が運転している。8 機のディーゼル発電設備の詳細は表 3-25 のとおりである。8 機の合計出力は 18,500kW であり、近年の久米島の電力需要量は年間 $5.0 \times 10^7 \text{kWh}$ 程度である。沖縄電力株式会社が公表している平成 23 年度の電力需要量は $5.43 \times 10^7 \text{kWh}$ であり、本検討では、平成 23 年度の電力需要量を参考に、BaU ケースでは DEG で年間 $5.4 \times 10^7 \text{kWh}$ を発電すると仮定した。

また、OTEC ケースにおける DEG の年間発電量は、OTEC より年間 $7.49 \times 10^6 \text{kWh}$ を発電することができることから、BaU ケースで仮定した久米島の総発電量 $5.4 \times 10^7 \text{kWh/y}$ から OTEC による発電量 $7.49 \times 10^6 \text{kWh/y}$ を差し引いた $4.65 \times 10^7 \text{kWh/y}$ とした。

なお、8 機の DEG の稼働時期、出力規模はそれぞれ異なるため、機器の稼働年数も相違することが考えられるが、機器の稼働年数は 30 年で統一することとした。

久米島モデルでは、取水された表層海水と深層水は全量一度 OTEC に使用される。OTEC で使用された後、深層水関連産業で多段階利用される。一度 OTEC で使用されるため、熱交換により、表層海水は温度が下がり、深層水は温度が上がる。現在、水温コントロールのために深層水を利用している産業は、一度 OTEC で使用することによる深層水の温度上昇で現状より換水率が上がるという問題が挙げられる。しかし、日量 18 万 m^3 取水施設における取水深度は現状の水深 612m より 88m 深い水深 700m であるため、より水温の低い深層水を得られ、OTEC による熱交換後も低い温度を保つことができ、換水率の上昇は抑えることができる。なお、前述のとおり、評価するにあたっての OTEC の発電量は $7.49 \times 10^6 \text{kWh/y}$ とした。

表 3-25 ディーゼル発電設備の詳細

ユニット	出力	運転開始日
5号	500kW	1974/07/04
7号	1,000kW	1977/05/12
8号	2,000kW	1979/07/12
9号	2,000kW	1982/05/27
10号	2,000kW	1988/05/24
11号	3,000kW	1993/05/28
12号	4,000kW	2003/07/28
13号	4,000kW	2003/07/28

(沖縄電力株式会社の公開データを基に作成)

表 3-26 年度別生産額

年度別	生産量 (kg)	平均単価 (円/kg)	生産額 (円)
平成 23 年度	180,000	2,000	360,000,000
平成 24 年度	184,000	2,000	368,000,000
平成 25 年度	188,600	1,900	358,340,000
平成 26 年度	230,000	1,650	379,500,000
平成 27 年度	240,000	1,850	444,000,000

(沖縄県久米島町 (2016) の公開データを基に作成)

(c) 海ぶどう養殖

久米島海洋深層水開発㈱が行っている海ぶどう養殖を評価対象とした。久米島で海ぶどう養殖を行っているのは1社のみであり、近年の海ぶどうの生産額は、表 3-26 に示すように年々増加傾向にある。海ぶどうの養殖では、表層海水を主として利用しており、夏場の高水温を下げるために深層水が利用されている。深層水を利用することで、一般の海ぶどう養殖場よりも長い期間、養殖を行うことができる。その一方で、第 3 章で述べたように、深層水にはケイ酸態ケイ素が多く含まれているため、養殖水槽内で付着珪藻が繁茂する。そして、これらの付着珪藻は海ぶどうを覆うため、海ぶどうの成長阻害要因として問題視されている(鈴木ほか)。久米島モデルが実現された場合、取水された表層海水は OTEC の熱交換により、低い水温となるため、そのまま海ぶどう養殖に利用できるに加え、付着珪藻の問題も解消されると考えられる。

BaU ケースは 2017 年 7 月 21 日(金)に実施した現地ヒアリング調査によって得られた 2016 年度のデータをもとに EF、C、B を算定した。また、OTEC ケースでは、2017 年 12 月 11 日(月)に実施したヒアリング調査より施設規模が BaU ケースより 1.5 施設増加すると仮定して

それぞれの値を算定した。

(d) クルマエビ養殖

久米島海洋深層水種苗供給センターが行っているクルマエビ養殖を評価対象とした。クルマエビ養殖も水温コントロールのために深層水を利用しており、クルマエビ養殖と同様に、深層水を利用することで一般のクルマエビ養殖よりも長い期間、養殖を行うことができる。

BaU ケースは 2017 年 7 月 21 日 (金) に実施した現地ヒアリング調査によって得られた 2015 年度のデータをもとに EF 、 C 、 B を算定した。また、OTEC ケースでは、2017 年 12 月 11 日 (月) に実施したヒアリング調査より、施設規模は成エビの養殖地が 7ha になると仮定してそれぞれの値を算定した。

(2) 評価方法

(a) エコロジカルフットプリント (EF)

EF の算定方法は Component 法であり、取水施設、DEG、OTEC、水産養殖業のそれぞれの素材製造から廃棄までに至る Life Cycle の CO_2 排出量を積み上げ式で計算し、推定された総 CO_2 排出量を全て吸収するために必要な森林面積に換算した。ここで、年間に単位 CO_2 (t) を吸収する森林面積が $A_{forest} = 0.2$ (ha/t- CO_2)、森林地の等価係数が $f_{forest} = 1.28$ (gha/ha) で与えられるので、それぞれの機器の稼働年数を n_1 (y) とすると、式 (4) で EF (gha/y) が算定できる。

$$EF = f_{forest} A_{forest} \left(\frac{E_{RM} + E_B + E_S}{n_1} + E_{O\&M} \right) \quad (4)$$

ここで E_{RM} (t- CO_2)、 E_B (t- CO_2)、 E_S (t- CO_2)、 $E_{O\&M}$ (t- CO_2 /y) は、それぞれ素材製造、建造 (素材輸送、設置を含む)、廃棄、運用・運転管理における CO_2 排出量である。ただし、現時点で稼働している施設については E_{RM} 、 E_B は求めないこととした。 EF を算定するにあたって、(株) 沖縄エネテックが現地で実施した LCA 調査の結果を用いた。

(b) コスト (C)

コスト算定項目は、BaU ケースは日量 1.3 万 m^3 取水施設、DEG、水産養殖業であり、OTEC ケースは日量 18 万 m^3 取水施設、DEG、OTEC、水産養殖業である。

コストはそれぞれの機器の稼働年数を n_2 (y) とすると、式 (5) で算定できる。

$$C = \frac{C_{RM} + C_B}{n_2} + C_{O\&M} + C_L \quad (5)$$

ここで C_{RM} (yen) 、 C_B (yen) 、 $C_{O\&M}$ (yen/y) 、 C_L (yen/y) は、それぞれ素材製造費、建設費、運用・メンテナンス費その他、人件費である。 EF 同様、現時点で稼働している施設については C_{RM} 、 C_B は求めないこととした。以下、各施設のコスト算定方法について述べる。

DEG

稼働している DEG の中には近いうちに建て直しが予想されるものもあるが、式 (3) における定義通り、現地点で稼働している施設の C_{RM} 、 C_B は算定しないこととした。NEDO が公表した離島ディーゼル発電の発電コストを参考に、発電コストを 40 円/kWh として DEG のコストを算定した。その結果、BaU ケースにおける DEG のコストは、 2.08×10^8 yen/y となった。

一方、OTEC ケースでは、OTEC が 7.49×10^6 kWh/y を発電するため、その分の削減できる C 重油の消費コスト (沖縄電力 2015) ¹⁰を差し引き、 1.98×10^8 yen/y となった。

取水施設

BaU ケースにおける日量 1.3 万 m³ 取水施設のコストは、取水規模別コストの算定の日量 1.0 万 m³ 取水施設 (迹目ほか 2004) ¹¹を参考に算定した結果、メンテナンス費が 1.51×10^7 yen/y、運転費 (人件費を含む) が 2.41×10^7 yen/y、合計で 3.92×10^7 yen/y となった。

一方、OTEC ケースにおける日量 18 万 m³ 取水施設のコストは、H29 沖総局調査報告書を参考に算定した結果、 4.19×10^8 yen/y となった。取水施設の素材製造費と建設費の合計コストは 8.33×10^9 yen であり、稼働年数を 30 年として 2.78×10^8 yen/y となる。また、供給開始後のコストは需要量拡大が完了するまで段階的に増加し、10 年目以降は一定のコストとなる。需要量拡大完了時 (10 年目以降) の支出内訳は表 3-27 のとおりである。

表 3-27 需要量拡大完了時(10 年目以降)の支出内訳

種別	金額
人件費 (6 名)	45 百万円/年
維持管理費	10 百万円/年
地代・家賃	1 百万円/年
修繕費・災害復旧等積立金	78 百万円/年
租税 (法人税、法人住民税等)	49 百万円/年
広報費	7 百万円/年
諸費	9 百万円/年
合計	193 百万円/年

(H29 沖総局調査の公開データを基に作成)

¹⁰沖縄電力株式会社, 2015, 燃料費 (離島供給に係るものに限る).

¹¹迹目英正, 吉原進, 2004, 海洋深層水取水コストの低減と事業化の研究.

OTEC

OTEC の素材製造費と建設費の合計コストは $3.30 \times 10^9 \text{yen}$ であり、稼働年数を 30 年として $1.10 \times 10^8 \text{yen/y}$ となる。また、維持管理費は $1.00 \times 10^7 \text{yen/y}$ である。なお、OTEC は自動運転であるため、人件費はかからないものとする（北小路 2016）¹²。

水産養殖業（海ぶどう養殖、クルマエビ養殖）

BaU ケースにおけるコストについて、海ぶどう養殖は㈱沖縄エネテックが現地で実施した LCA 調査の結果（2016 年度のデータ）と市場価格をもとに算定した。なお、メンテナンス費その他は建設費の 1%、人件費は久米島町の地方公務員の平均年収にそれぞれの従業員数を乗じた値とした。クルマエビ養殖は 2017 年 12 月 11 日（月）に実施したヒアリング調査で得られたコストを用いた。

OTEC ケースにおけるコストは、海ぶどう養殖、クルマエビ養殖それぞれの養殖施設拡大による建設費を稼働年数で割った 1 年あたりのコストと、養殖施設拡大後の 1 年あたりの生産費を合計したものとなる。

(c) ベネフィット (B)

DEG、OTEC のベネフィットは、電力販売価格を 20yen/kWh として算定した。BaU ケース、OTEC ケースともに総発電量は $5.4 \times 10^7 \text{kWh/y}$ であるため、発電におけるベネフィットはどちらも $1.08 \times 10^9 \text{yen/y}$ となる。

BaU ケースにおける日量 1.3万 m^3 取水施設および OTEC ケースにおける日量 18万 m^3 取水施設のベネフィットは、H29 沖総局調査報告書を参考に算定した。その結果、BaU ケースで $3.98 \times 10^7 \text{yen/y}$ 、OTEC ケースで $2.44 \times 10^8 \text{yen/y}$ となった。

水産養殖業のベネフィットについて、BaU ケースは、海ぶどう養殖における 2016 年度の各生産量に各製品単価を乗じた値、クルマエビ養殖における 2015 年度の各生産量に各製品単価を乗じた値の合計値がベネフィットとなる。一方、OTEC ケースは、海ぶどう養殖、クルマエビ養殖のそれぞれ想定される各生産量に各製品単価を乗じた値の合計値がベネフィットとなる。

3) 久米島モデルの評価結果

(1) 環境評価

BaU ケース、OTEC ケースそれぞれの *EF* の内訳を図 3-62 に、環境評価の算定結果を表 3-28 にそれぞれ示す。図 3-62 から、両ケースともに DEG による環境負荷が非常に大きいことが分かる。BaU ケースと OTEC ケースの *EF* を比較した時、OTEC ケースの方が小さい。このことから、OTEC で久米島の電力供給の一部を賄うことが環境負荷の低減に大きく貢献していることがわかる。

¹²北小路結花, 2016, 「風力等自然エネルギー技術開発/海洋エネルギー技術研究開発」海洋エネルギー発電システム実証研究/海洋温度差発電.

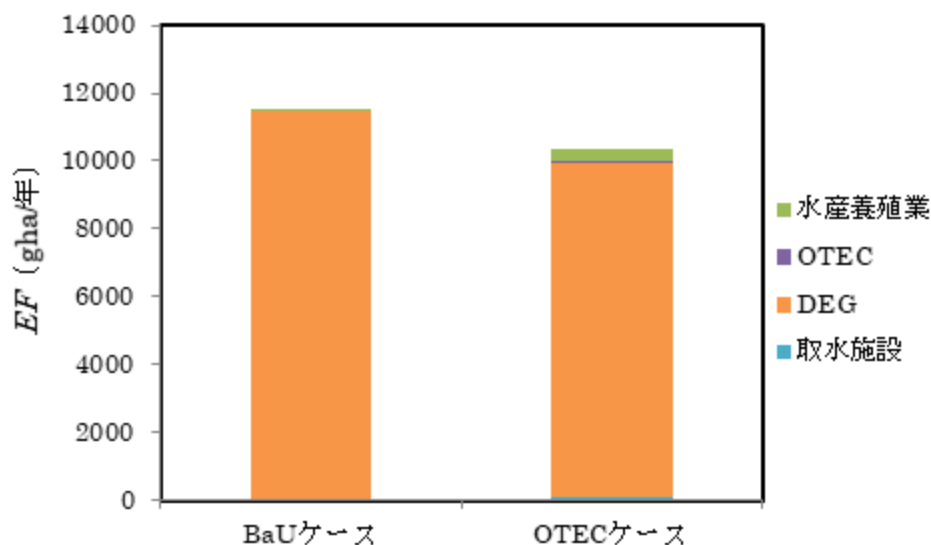


図 3-62 EFの内訳

表 3-28 に示す通り、OTEC ケースを実施した場合、年間 $1.19 \times 10^3 \text{gha/y}$ の削減が期待でき、これは年間 10.3%の削減にあたる。環境面での評価では、OTEC ケースの実施に有効性があるという結果となった。

表 3-28 環境評価の算定結果

	BaU ケース	OTEC ケース
EF (gha/y)	1.15×10^4	1.03×10^4
ΔEF (gha/y)	1.19×10^3	

(2) 経済評価

BaU ケースおよび OTEC ケースにおける総コスト、総ベネフィットを図 3-63、図 3-64 に示す。コストについて、BaU ケースと OTEC ケースを比較したとき、OTEC ケースの方が大きい、日量 18 万 m^3 取水施設の導入と水産養殖業の施設拡大にかかるコストが大きいためである。その一方で、ベネフィットについても、日量 18 万 m^3 取水施設の導入と水産養殖業の施設拡大により、増加がみられる。

そこで、コスト・ベネフィット評価を行う。経済評価の算定結果を表 3-29 に示す。 $C-B$ について、BaU ケース、OTEC ケースともに正の値をとる。共通する原因として、DEG の発電コストが高いということである。DEG が主となる久米島を含む離島地域では、輸送コストが高い、石炭と比較して単価が高い C 重油が主な燃料であるなどの理由から、ベネフィットよりもコストの方が高くなる。この原因に加え、OTEC ケースでは、日量 18 万 m^3 取水施設の建設にかかるコス

トが大きな影響を与えている。なお、水産養殖業及び OTEC については、コストよりもベネフィットの方が高い。

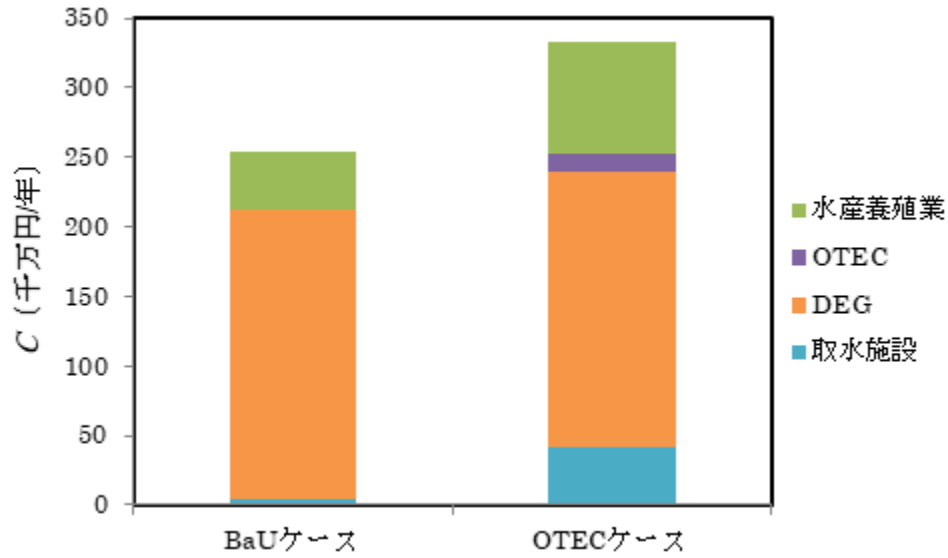


図 3-63 BaU ケースと OTEC ケースのコスト

$\Delta(C-B)$ に着目した時、負の値をとった。OTEC ケースにおいて各事業の新施設の建設にコストがかかり、その中でも、日量 18 万 m^3 取水施設の建設費 $8.33 \times 10^9 \text{yen}$ の影響は非常に大きい。しかし、経済面での評価では、OTEC ケースにおいて建設コストがかかるが、OTEC ケースの方が BaU ケースより費用対効果が高い結果となった。

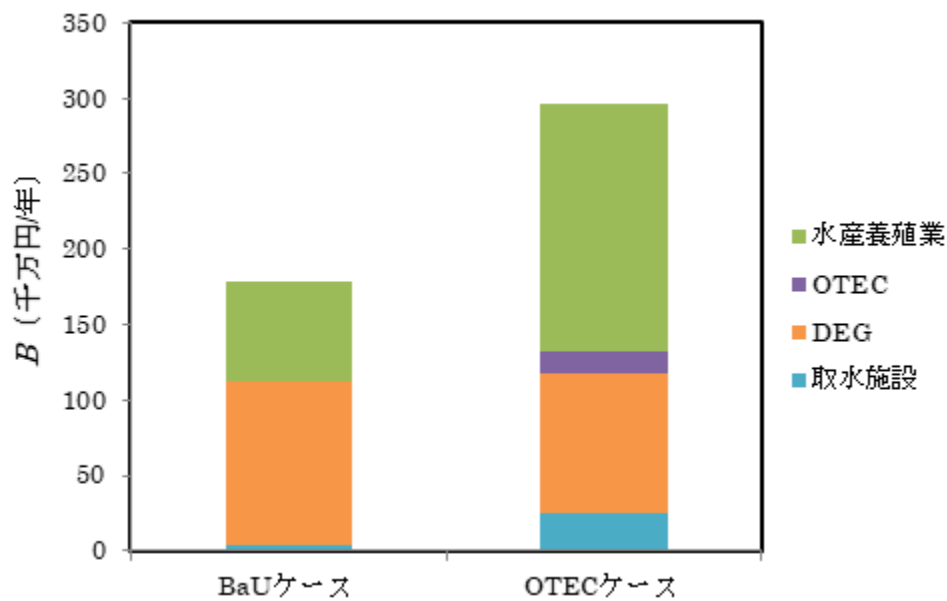


図 3-64 BaU ケースと OTEC ケースのベネフィット

表 3-29 経済評価の算定結果

	BaU ケース	OTEC ケース
$C-B$ (yen/y)	7.54×10^8	3.66×10^8
$\Delta(C-B)$ (yen/y)	-3.89×10^8	

(3) 包括的環境影響評価

以上から、環境面での評価、経済面での評価を統合した Triple I light を求めると、表 3-30 のようになる。ここで γ は、2013 年の世界全体の EF (Global Footprint Network 2013) と GDP (世界経済のネタ帳 2013) の比とし $2.74 \times 10^{-6} \text{gha/yen}$ である。 ΔIII_{light} を図示したものが図 3-65 である。 ΔIII_{light} の値が負になっていることから、統合評価として対象モデルは有効な取り組みであると判断ができる。このモデルを実現することで、年間 $2.26 \times 10^3 \text{gha}$ の削減が期待でき、現状を維持した場合と比較すると、年間 16.6% の削減にあたる。また、本検討で評価対象とした OTEC、水産養殖業の他にも、取水された表層水と深層水は農業や観光産業などに多目的・多段階利用される計画となっているため、更なる削減が見込めると考えられる。

表 3-30 Triple I light の算定結果

	yen/y	gha/y
ΔEF	—	-1.19×10^3
$\Delta(C-B)$	-3.89×10^8	—
$\gamma \Delta(C-B)$	—	-1.06×10^3
ΔIII_{light}	—	-2.26×10^3

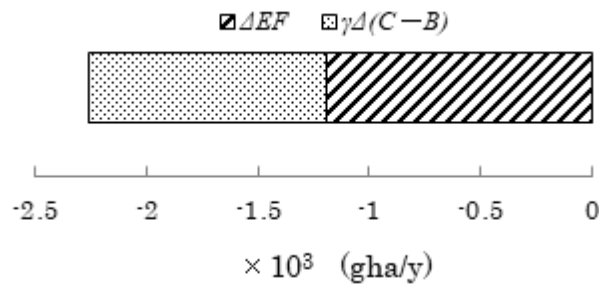


図 3-65 ΔIII_{light} の内訳

4) まとめ

久米島モデルを例として、海洋温度差発電における発電後海水の高度複合利用プロジェクトの環境面および経済面の評価、ならびにそれらの統合評価を行った結果、以下の結論を得た。

Triple I light の算定結果が負であることから、同モデルを実現することは、環境負荷の小さい産業構造構築の点で有効であると判断できる。また、同モデルを実現することで、年間 $2.26 \times 10^3 \text{gha}$ のエコロジカル・フットプリントの削減が期待でき、現状を維持した場合と比較すると、年間 16.6%の削減にあたる。

本検討で評価対象とした OTEC、水産養殖業の他にも、取水された表層水と深層水は農業や観光産業などに多目的・多段階利用される計画となっている。評価対象を増やすことでさらに $\Delta(C-B)$ の値は減少すると考えられる。結果、 ΔIII_{light} の値も減少すると考えられるため、本検討の評価結果より更なる削減が見込めると推察される。

海ぶどう養殖において、本評価では考慮しなかったが、現状の深層水を利用するよりも OTEC 後の表層海水を用いる方が、生産効率が上がる可能性がある。この点においても本検討の評価結果よりさらなる削減が見込めると考えられる。

今回の包括的環境影響評価指標を用いた評価結果からディーゼル発電を主とする離島地域では、久米島モデルのような海洋温度差発電における発電後海水の高度複合利用プロジェクトの形成を行うことに、上記のような有効性があると考えられる。

3.4.7 効果予測のまとめ

本節では、規模拡大時の具体的シミュレーション対象として久米島モデルを用いて、次の3つの視点から検討を行った。

- ①エネルギー収支と経済性（エネルギーコスト） [3.4.3 項および 3.4.4 項]
- ②ライフサイクルアセスメント(LCA) [3.4.5 項]
- ③IMPACT 手法 [3.4.6 項]

①のエネルギー収支面では、発電後海水を多段利用したケースでは、多段利用しないケースに比べて 2,192,000[kWh/年]の電力収支向上、また、発電を行わずに多段利用するケースでは 5,518,000[kWh/年]の電力収支向上となった。電力単価を 20 円/kWh としてこれを金額換算すると、前者では年間 43,840 千円の差、後者では年間 110,360 千円の差となると算定された。

②の LCA 評価は、製品の原材料調達から、生産、流通、使用、廃棄に至るまでのライフサイクルにおける投入資源や環境負荷を包括的・定量的に評価する手法である。本評価では、車えび養殖や海ぶどう養殖といった発電後海水の利用の核となる事業についてそれぞれ生産品単位重量あたりの消費エネルギー原単位を算定した上で、それを基にした規模拡大時の評価を実施した。

その結果、取水量を増大することに伴い、(1)取水管の規模拡大の効果、(2)OTEC 導入の効果、(3)発電後海水利用による効果の3つの効果によって、各事業におけるエネルギー消費量が低減することが明らかとなった。また、発電後海水の利用者が多くなるほど、LCA 評価面でも発電後の海水を多段利用することの優位性が大きくなると予想される。

③の IMPACT 手法による評価では、エネルギー消費量や環境負荷に加えて、経済性も考慮した包括的な評価指標を用いる。人間の経済活動にはエネルギー消費や環境負荷を必ず伴う。IMPACT 評価は、それを現実としてふまえて「現状の経済活動よりも、環境負荷が少なく、持続可能な社会の形成に資する事業なのかどうか」を判断する指標を提供していると言える。

本評価の結果、IMPACT 評価指標は負（単位経済指標あたりの環境負荷を、現状に比べて減少させる方向）であることから、発電後海水の高度複合利用事業を実現することは、経済活動としても持続可能な社会形成にとって有効であると判断された。また同事業の実現によって、年間 $2.26 \times 10^3 \text{gha}$ のエコロジカル・フットプリントの削減（現状維持に比べて年間 16.6%の削減）が期待できる。

以上3つの視点での検討結果では、いずれも規模拡大時における発電後海水の高度複合利用の有効性が示された。