

令和 5 年度
二国間クレジット取得等のためのインフラ整備調査事業
(モーリシャスにおける海洋温度差発電に係る
GCF／CTCN に関する実現可能性調査) 報告書

2024 年 3 月
株式会社商船三井

目次

1. 業務概要	1
1.1 事業の目的	1
1.2 事業内容	1
2. 実施項目	2
2.1 CTCN へのリクエストフォーム提出に向けた技術支援	2
2.1.1 CTCN 技術協力の通常手続きと Pro-bono 方式の相違点の整理	2
2.1.2 モーリシャス NDE による理解促進の取組支援	3
2.1.3 リクエストフォーム作成にかかる支援	4
2.2 実施計画書・CTCN 事務局への報告文書の作成	5
2.3 海洋深層水取水管の仕様の策定	6
2.3.1 本件における仕様の策定方法	6
2.3.2 設計条件の想定	7
2.3.3 管材の選定	10
2.3.4 取水深度および管径の選定	10
2.3.5 結果のまとめ	34
2.4 候補地における取水管及び取水管設置概略検討	34
2.4.1 概略検討の与条件（海底地形・地質、波浪、潮流、航路等）調査	34
2.4.2 2.4.1 の結果を踏まえた候補地における取水管ルート	68
2.4.3 2.4.1 の結果を踏まえた海洋深層水・表層水の取水口地点の選定	72
2.4.4 取水システムの妥当性の検証	79
2.4.5 放流水（発電利用・二次利用後）の適地選定	93
2.4.6 大口径取水管敷設に関する最新事例の技術動向調査	94
2.4.7 大口径取水管製造メーカーに関する調査	105
2.4.8 現地工事における建設（海洋工事）業者のポテンシャルに関する調査	110
2.5 モーリシャスにおける海洋温度差発電の適用に関する検討	111
2.5.1 OTEC 施設側の要件	111
2.5.2 OTEC 最適化	113
2.5.3 OTEC 基本システム計算	118
2.5.4 計算結果のまとめ	120
2.6 GCF への提案可能性の検討	120
2.6.1 コンセプトノートの作成	120
2.6.2 認証機関（AE）選定の検討	122
3. 添付資料	123

添付資料 1：モーリシャス NDE に提出したリクエストフォーム（案）

添付資料 2：レスポンスプラン（案）

添付資料 3：GCF コンセプトノート（案）

添付資料 4：質問票（スケッチ）

添付資料 5：Makai Ocean Engineering からの受領資料（PDF）

添付資料 6：NELHA Annual Report（2001 年、2002 年）から抜粋

添付資料 7：NELHA 55”Pipeline に関する Web 記事

添付資料 8：Micro Tunnel に関する Web 記事

1. 業務概要

1.1 事業の目的

COP21 で採択されたパリ協定においては、すべての締約国は温室効果ガス(GHG)の削減目標等である「国が決定する貢献（NDC：Nationally Determined Contribution）」の作成が求められている。令和3年10月に改定された日本のNDCにおいては、2030年度6%削減(2013年度比)という目標を掲げており、また、この水準にとどまることなく、エネルギーミックス等とも整合的に、中長期の両面で更なる削減努力を追求するとしている。また気候変動問題は、日本におけるGHGの排出削減だけで解決できる問題ではなく、世界全体で排出削減を行っていくことが必要不可欠である。インフラシステムの海外展開の場面においても、パリ協定の目指すカーボンニュートラルへの貢献が期待されており、日本は世界の脱炭素化を牽引する国際的リーダーシップを発揮する必要がある。

このような背景の中、二国間の枠組みを通じて、日本の優れた環境・エネルギー技術の普及等を進め、地球規模での温室効果ガスの削減に貢献する仕組みとして「二国間クレジット制度」が推進されてきたが、当該制度の普及のためには、産業分野ごとの環境・エネルギー技術に関する詳細なシーズ・ニーズを二国間で把握するのみならず、多国間の枠組みを活用していくことも効果的である。

COP16 では、先進国から途上国への技術移転のためのメカニズムとして、技術執行委員会 (TEC) 及び気候技術センター・ネットワーク (CTCN)が設立された。CTCN を通じて途上国への技術移転が進められているが、これまでの技術移転のためのメカニズムの採択案件に日本企業が参画している案件が少ないのが現状である。気候変動問題の解決に向けては、同メカニズムが途上国における排出削減や気候変動影響への対策に効果的かつ効率的に活用されることが重要である。特に、同メカニズムの活用により、途上国に対して我が国の優れた環境・エネルギー技術の展開が促進されることが期待される。

また、モーリシャスにおいては、2030年までに現地調達型の再生可能エネルギーの利用比率を60%にするとの国家目標を掲げ、脱炭素技術の導入についての検討が進められており、中でも日本が技術的優位性を持つ海洋温度差発電(OTEC)が有力候補として挙げられている。この技術については、深海層からの取水管の設計が事業の実現可能性に大きな影響を与えるため、モーリシャス政府は、CTCNを活用したプレフィージビリティスタディを行うことを希望している。

また、将来において OTEC や取水管を導入するにあたって、総額で数十億～100 億点程度の資金規模が想定されており、コファイナンスを含めた様々な資金源を検討することが必要であるが、技術導入により実現される気候変動緩和や適応、また持続可能な開発目標（SDGs）への貢献の大きさを踏まえると、それらを実現するために設置された緑の気候基金（GCF）との親和性が高いと考えられる。特に、昨今の CTCN 技術協力においては、緩和技術等の導入を実現するためのプレフィージビリティスタディや、フィージビリティスタディを実施する一環で、その後の GCF 活用の検討を進めるコンセプトノートの作成も併せて行う取組が増加している。特に、パリ協定の下で、技術メカニズムと GCF が含まれる資金メカニズムの連携が求められる中で、本事業においてもそのような国際的な議論を踏まえ、GCF を視野に入れた事業化を準備する前段階のステップとして、CTCN によるプレフィージビリティスタディを実施することが、途上国等において日本の優れた脱炭素技術・製品の普及等を促進し、当該国での GHG 排出削減を実現する等、世界全体の GHG 排出削減に重要な取り組みとなると考えられる。

そこで本事業では、CTCN の活用を念頭に、実際に取水管を設置する際の様々な与条件を調査・分析することによる候補地の妥当性検証も含め、モーリシャスにおける OTEC のプレフィージビリティスタディの一環となる調査を実施するとともに、モーリシャス政府による CTCN Pro-bono 方式活用準備の支援、また GCF コンセプトノート案の作成等を実施した。

1.2 事業内容

本事業は CTCN の活用を念頭に置いているが、経済産業省における Pro-bono 案件として取り扱われるため、リクエストフォームに基づく CTCN 事務局による技術支援計画に沿った事業を経済産業省が主導することとなる。そのため、より確実で効果的なモーリシャスへの支援が期待できる。このような状況を踏まえ、本事業における主な実施内容は以下の通りである。

- CTCN へのリクエストフォーム等作成・改訂補助

モーリシャスの CTCN の国家指定機関である環境廃棄物管理気候変動省が、主要関係省庁・機関と協力し CTCN 事務局に提出予定の海洋温度差発電及び海洋深層水関連産業の導入実現可能性調査に係るリクエストフォームの改訂補助、及び当該リクエストフォームの CTCN への提出を受けてモーリシャス政府と経済産業省が共同で提出するレスポンスプラン (Response Plan) の作成・改訂補助を行う。

- 実施計画書・CTCN 事務局への報告文書の作成

業務を円滑に実施し、作業の進捗を関係者間で把握するための実施計画書、及び進捗管理表を英語で作成する。併せて、プロジェクトの影響を評価するためのモニタリング・評価計画 (Monitoring and evaluation plan) 及びインパクトステートメント (Impact Statement) を技術支援の開始時に作成し、CTCN 事務局に提出する。

- 候補地における取水管及び取水管設置概略検討

候補地において、海底地形・地質・波浪・潮流・航路等の与条件を調査し、その結果を踏まえた候補地における取水管ルート of の妥当性検証や表層水・深層水の取水口地点を選定する。加えて、発電並びに二次利用後の放流水の適地選定や、最新の大口徑取水管敷設に関する事例や技術動向、モーリシャスにおける建設業者のポテンシャルを調査する。

- GCF への提案可能性の検討

CTCN 事務局と連携し、事業実施に向けて GCF 資金動員を念頭に置き提出するコンセプトノート案を作成する。加えて、GCF へのファンディングプロポーザル提出、事業実施に向けて、GCF に資金アクセスを行うための認証機関 (AE) の選定について検討を行う。

2. 実施項目

2.1 CTCN へのリクエストフォーム提出に向けた技術支援

2.1.1 CTCN 技術協力の通常手続きと Pro-bono 方式の相違点の整理

本事業での調査では、モーリシャスにおける OTEC 導入を検討するにあたり、システムの一部として必要となる取水管導入にかかる Pre-FS を実施するため CTCN の下での技術協力の活用を行い、その後のスキームとして考えられる GCF での資金獲得を目指すものである。そのため、UNFCCC で設置され、パリ協定の下で技術メカニズムの一つとしても位置付けられる CTCN の手続きを整理すると共に、さらにその応用編である、Pro-bono 方式の特徴を十分に踏まえ、モーリシャス政府が、日本政府（経済産業省）と円滑な連携の下、CTCN 事務局に対してリクエストフォームを提出し、技術協力事業開始に向けた取組を支援することが必須の取組であった。

下図上段の通り、CTCN の技術協力プロジェクトの支援を希望する開発途上国は、フォーカルポイントとなる国家指定組織 (National Designated Entity: NDE) を通じて CTCN 事務局にリクエストフォームを提出し、それを受けた CTCN 事務局は、コンソーシアムメンバーの協力を得て、技術協力の実施計画書であるレスポンスプランを作成する。さらに、そのレスポンスプランを基に、CTCN 事務局は国際調達をかけ、CTCN ネットワークメンバーの中から実施機関を選定し、契約の上、技術協力事業を開始することとなる。モーリシャスにおける NDE は、環境・固形廃棄物管理・気候変動省 (Ministry of Environment, Solid Waste Management, and Climate Change: 現地での呼び方に倣い、Ministry of Environment/環境省の略称を用いる)、2014～2020 年までの間に、アフリカ地域プロジェクト 1 件、モーリシャスのみを対象とした調査を 4 件¹実施している。

¹ Developing circular economy roadmaps for abating GHG emissions from the waste sector(2020 年 5 月終了)、Climate Change Vulnerability and Adaptation Study for the Port of Port Louis (2016 年 2 月終了)、Identification, Characterization and exploitation of Potential Offshore Sand Banks/Deposits (2016 年 1 月終了)、Assessment and identification of technology needs and best practices for reducing the GHG emitting potential of the energy sector in Mauritius (2014 年 11 月)、Green Cooling Africa Initiative (GCAI) (2014 年 8 月終了、ガーナ、ケニア、ナミビアと合わせたバスケットプログラム)

<https://www.ctc-n.org/technical-assistance/data><https://www.ctc-n.org/technical-assistance/data>

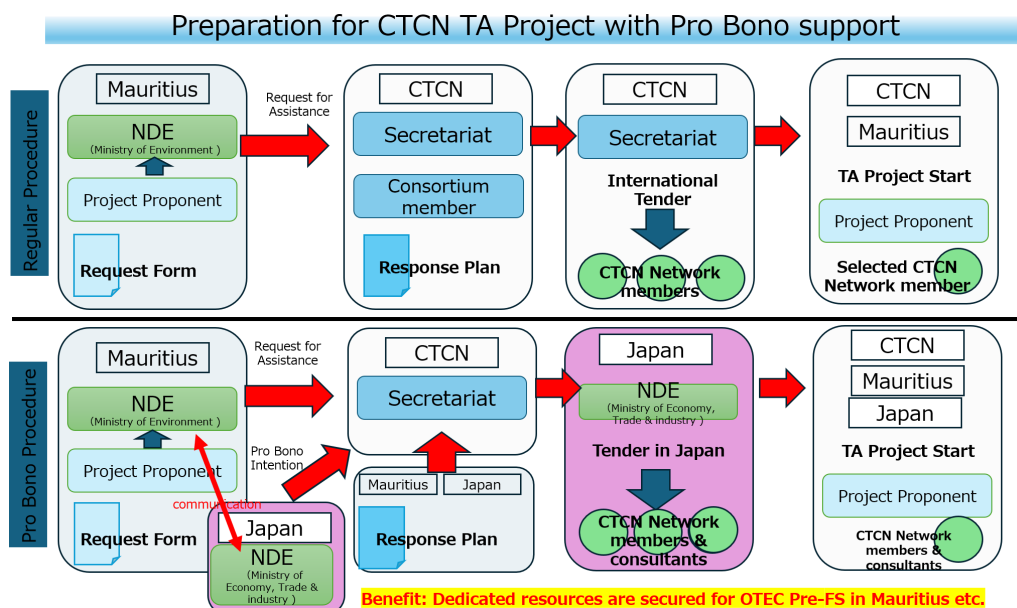


図1 CTCNにおける技術協力要請にかかる通常の手続きと Pro-bono 方式との比較

下段に示される、Pro-bono 方式を活用する場合は、モーリシャス NDE がリクエストフォームを提出するのに合わせ、日本の NDE である経済産業省が CTCN 事務局に、Pro-bono（経済産業省が自ら直接、資源の投入を行う）支援を行うことを表明することによりプロジェクトの形成については、若干異なった手続きを進めることとなる。技術協力を進めるために必要なレスポンスプランについては、モーリシャスと日本両国の NDE が作成を行う。また実施機関の選定については、Pro-bono であることから経済産業省が日本国内の CTCN ネットワークメンバーからこれを選定し、事業の開始に向けた取組を行うこととなる。

上記の pro-bono 方式を採用するメリットとしては、次のような点が挙げられる。すでに数件の CTCN 技術協力支援を受けており、またアフリカ地域では人口当たりの GDP では上位にあるモーリシャスにとっては、他のアフリカ諸国からのニーズの高さを踏まえると、要請の優先順位が下がってしまうとの懸念が表明されていた。そのため、日本政府経済産業省からの Pro-bono 方式による支援を受けることにより、より円滑に技術協力を開始できる可能性が高まると考えられる。また、我が国にとってのメリットとしては、日本が技術的優位性を有する OTEC にかかる調査について、経済産業省が直接事業の監督に関与することにより、より効果的なインプットが可能となるほか、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）国際実証事業(Pre-FS)「モーリシャスにおける海洋温度差発電を核とした海洋深層水複合利用に関する実証要件適合性等調査」との連携が行いやすくなるという優位点が挙げられる。

2.1.2 モーリシャス NDE による理解促進の取組支援

本事業の開始に先行して、経済産業省においては、モーリシャス環境省との非公式な協議を進め、モーリシャス側の pro-bono 方式の活用について、上記の説明を実施してきた。

- 2023 年 8 月 30 日には、モーリシャス環境省課長補佐級職員とオンラインで CTCN 活用準備にかかる情報交換を行った。その結果、原則として前向きに進める希望があるものの、モーリシャス政府内での人事異動の最中であり、NDE が正式に任命されてから手続きの実施を進めたい旨の意見が表明された。
- 2023 年 12 月 8 日にアラブ首長国連邦・ドバイで開催されていた UNFCCC 第 28 回締約国会合（COP28）の場において、翌年 1 月より NDE として着任予定のモーリシャス環境省気候変動課長と経済産業省地球環境問題交渉官らが面会し、モーリシャス政府内での検討状況について情報交換を行った。モーリシャス環境省気候変動課長からは、リクエストフォーム案について内容を承知しているが、プレフィージビリティスタディの内容面については、エネルギー省が所管であるため、所管官庁によるエンドースメントレターを事業者が取得した上でリクエストフォームを行うことが望ましいとのコメントがあった。

- 本事業開始後、モーリシャス環境省のアドバイスに従い、同国エネルギー省の傘下にあるモーリシャス再生エネルギー庁（Mauritius Renewable Energy Agency : MARENA）からのエンドースメントレターを取得し、その後モーリシャス国内で事業の主体となる St. Felix 社を通じモーリシャス環境省に対してリクエストフォームが提出された。
- 2024 年 3 月 7 日にオンラインにて、モーリシャス環境省気候変動課長と経済産業省地球環境問題交渉官らが協議を行った結果、課題となっていた MARENA からのエンドースメントレターが得られたことから、モーリシャス環境省としては、国内での手続きを進めていることが共有された。特に、全省庁やその他関係者を集めたステークホルダー協議を実施し、地域の観光協会等の質問（景観への影響の懸念）やコメントが挙げられたが、今後プレフィージビリティスタディを実施していく中で対応していくことが可能であるとの回答をしたとのことである。改めて、日本側から CTCN Pro-bono 方式によるサポートの手続きについて説明を行った上で、モーリシャス環境省が CTCN 事務局にリクエストフォームを提出する時点で、経済産業省から同事務局に Pro-bono 方式での支援の申し出を行う段取りを確認した。

2.1.3 リクエストフォーム作成にかかる支援

上記、2.1.2 のプロセスを経て、モーリシャス政府に提出されたリクエストフォームについては、CTCN 事務局において求められる要件に基づき、本事業で作成の一部を支援した。以下は、リクエストフォームの主要な項目と、主な記載内容である。

表 1 NDE に提出した CTCN リクエストフォームの概要（一部抜粋）

	記載を求められる項目	記載の内容
1	要請国	モーリシャス
2	要請プロジェクト名	サヴァンヌ地域モデルに向けた海水取水管敷設プロジェクトにかかるプレフィージビリティスタディ
3	要請団体	St. Felix Smart City Ltd.
4	気候変動対策の目的	緩和及び適応の複合対策
5	地理的範囲	国内地域
6	気候変動課題	(1) モーリシャスにおけるエネルギー安全保障・ネットゼロ排出に向け、ベースロード電源確保のニーズ、(2) 水不足の深刻化、(3) 食糧安全保障の課題等
7	過去及び現在進行形の取組	NEDO 実証による OTEC 技術ポテンシャル調査、民間企業による OTEC 及び取水管設置の検討、サヴァンヌ地域開発にかかるモーリシャス政府の取組等
8	個別の技術障壁	取水管設置の経路、管の設計、インフラ全体のコスト算定にかかる知見不足、発電事業及び深層水利用にかかる並行する当時事業にかかる知見不足等
9	関連するセクター	省エネルギー、再エネルギー、沿岸域、インフラ及び都市計画、海洋漁業、水資源、農業等
10	横断的に関連するアプローチ	経済的視点に基づく意思決定、地域に根差した取組等
11	技術協力要請の内容	(1) 目的：GCF 資金活用を見据えて、モーリシャス・サヴァンヌ地域での OTEC 及び海洋深層水取水プロジェクトの技術的可能性を検討すること。具体的には、取水管の設置場所・設計・施工方法等について検討を行うこと。また海洋深層水活用のニーズ（発電に加えて、冷熱利用、農業・養殖利用等）と収入モデルを検討すること。 (2) 活動の内容： ○取水管設置に必要な技術的データの収集 ○取水管設置場所特定に向けた与条件の分析 ○取水管技術にかかる情報収集 ○ステークホルダーの認識向上とキャパシティ・ビルディング

	○GCF プロジェクト申請に向けた準備 (3) 想定される成果品 ○関連する一連のデータ・情報 ○技術評価報告書 ○取水管技術の情報にかかる調査報告書 ○ステークホルダー協議の報告書 ○GCF コンセプトノート
--	---

なお、St. Felix 社がモーリシャス NDE に提出したリクエストフォーム案については、添付資料 1 参照のこと。

2.2 実施計画書・CTCN 事務局への報告文書の作成

CTCN においてはフィージビリティスタディ等の技術協力プロジェクトを開始するにあたり、通常、コンソーシアムメンバーが中心となり、実施計画書を作成する。しかし、上記の通り、本事業においては、Pro-bono 方式が採用されるため、当該レスポンスプランについては、モーリシャス及び日本の NDE から提案を行うこととなる。そのため、今年度事業においては、その案を作成した。

特に重要となるのはレスポンスプランにおける各作業のブレイクダウン項目であるが、概要を以下に示した。

表 2 レスポンスプラン案に記載した各成果と活動の概要（一部抜粋）

プレフィージビリティスタディにおける成果と活動	主な内容
成果 1：実施計画およびコミュニケーション文書の作成	CTCN 実施において求められる各文書等の作成
活動 1.1: (1)全ての活動、引渡し、成果、期限及び責任者・組織の詳細作業計画並びに対応計画の実施のための詳細な予算 (2) 作業計画に基づき、実施の適時性および適切性をモニタリング・評価するために用いられる、具体的且つ測定可能で達成可能で関連性のある期限を定めたモニタリング評価計画。 (3) 技術協力の開始時に作成され、技術支援が完全に終了した後に更新/改訂された CTCN インパクト (4) 技術支援の終了時に完成したしたデータ収集報告書。	※すべての CTCN 事業の成果 1 についてはこの作業が求められるため定型の記載となっている。
活動 1.2: 上記の文書にジェンダーの視点を含めること	上記と同様
成果物 1: 作業計画書、モニタリング及び評価の計画、CTCN のインパクト影響の説明、業務完了報告書	上記と同様
成果 2:取水管設置の場所、経路、設計、設置方法の特定	取水管設置の物理的条件にかかる検討
活動 2.1: 取水管設置場所を特定し、その設計に不可欠なデータおよび情報の収集	概略検討と条件にかかるデータの収集
活動 2.2：収集されたデータおよびシナリオ開発情報の分析	得られたデータを基にした分析
活動 2.3: 設置場所決定、ルーティング、設計、および設置方法の検討	シナリオ分析を基にした具体的な敷設箇所などの検討
成果物 2：技術調査結果に関する報告書	上記の結果を取りまとめた報告書
成果 3:取水管設置コストの見積り及び事業モデルの検討	取水管設置の経済的条件にかかる検討

活動 3.1: OTEC、取水管、その他のコンポーネントのシナリオ検討	OTEC、取水管、その他のコンポーネントの OPEX・CAPEX、コスト回収の元となるシナリオ作成
活動 3.2: 各シナリオの経済分析	3.1 を基にした分析と最も現実的なシナリオの決定
成果物 3: 経済分析に関する報告書	上記の結果を取りまとめた報告書
成果 4、養殖、農業、その他の産業など、潜在的な新しい深層水産業の需要（収益）の分析	エネルギー・深層水利用の下流のコンポーネントでの産業育成を想定した需要予測の検討
活動 4.1: 下流産業の重要予測評価	プロジェクト対象地区で進行中のスマートシティ開発等におけるエネルギー・水需要等の予測（各関係者のビジネスプランを踏まえた検討）
活動 4.2: ビジネスモデル開発	下流産業に対するエネルギー・給水を行う主体や役割、管理体制等を含めたビジネスモデルの検討
活動 4.3: ジェンダー分析	CTCN 技術協力において実施が必須となっているもの
成果物 4: ビジネスモデル調査の結果	上記の結果を取りまとめた報告書
成果 5: GCF コンセプトノート作成	GCF 申請を想定した、コンセプトノートの作成
活動 5.1: GCF コンセプトのドラフト作成	GCF で求められる 6 つの投資基準等に照らした案件提案書の基礎となるもの（後に詳細なファンディングプロポーザルとして作成されるもの）
活動 5.2: ステークホルダーエンゲージメント	GCF コンセプトノート作成の際に推奨されるもの
活動 5.3: ジェンダー分析	GCF 案件形成において必須のもの。
成果物 5: GCF コンセプトノート	上記のプロセスを経て作成されるコンセプトノート

なお、レスポンスプランについては、本報告書の添付資料 2 として巻末に示した。

2.3 海洋深層水取水管の仕様の策定

2.3.1 本件における仕様の策定方法

海洋深層水の取水管については、その選定によって、管材の調達費や敷設費だけでなく、着水槽や取水ポンプの設置高さ、また、取水ポンプの揚程や所要動力、消費電力、周囲水温による管内水温にも影響を及ぼす。さらに、海洋温度差発電（OTEC）を行う場合は、これらが発電端出力や所内電力にも関係する。

本件においては、先行調査によって、取水量や取水深度、また、それに伴う取水水温や取水管延長が設定されているため、これらを与条件として、主に管径を検討する（図 2）。

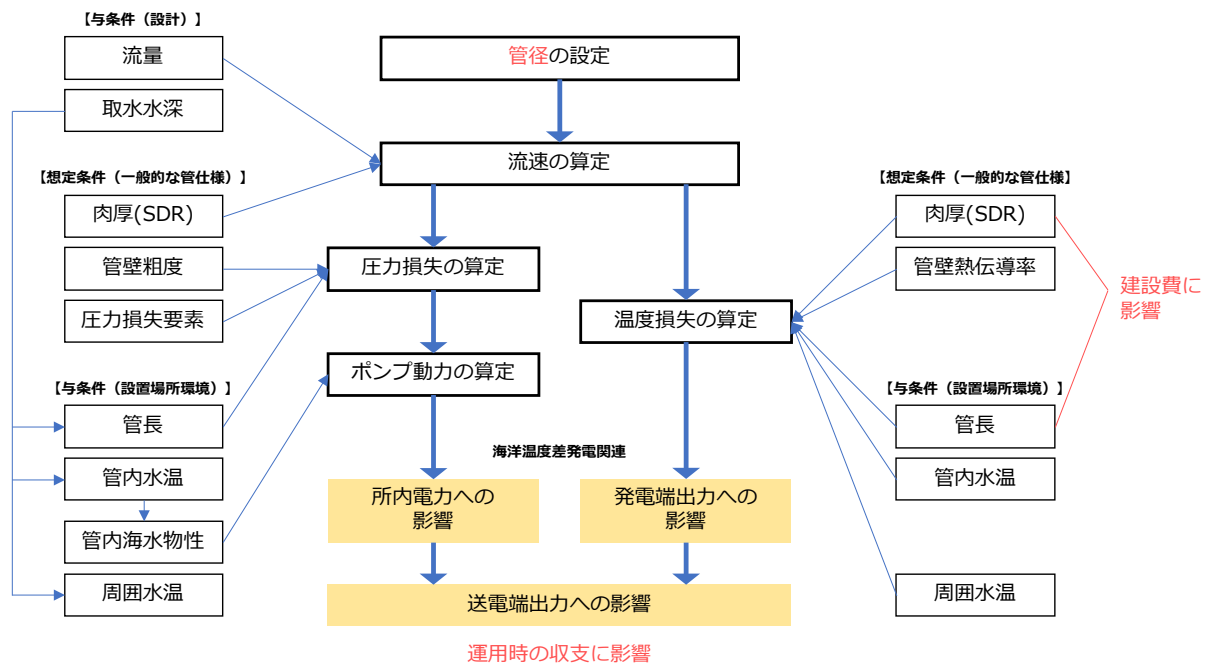


図2 管径による影響

2.3.2 設計条件の想定

2.3.2.1 自然条件

(1) 海水温の鉛直分布

海水温条件については、NEDO 委託事業 2022 年度～2023 年度成果報告書／脱炭素化・エネルギー転換に資する我が国技術の国際実証事業/実証要件適合性等調査/低炭素社会を目指した海洋再生可能エネルギー利活用を実現するための海洋温度差発電を核とした海洋深層水複合利用実証研究（モーリシャス）、2023 年 5 月（以下「適合性等調査 2023」）と同様に、日本海洋データセンターの統計データを使用する（図 3）。ただし 300m 以深についてはモーリシャスが位置する経緯度（南緯 20-21 度、統計 57-58 度）の水温データが少ないため、南緯 20-22 度、統計 56-59 度のデータ数による加重平均を用いた。

水深 [m]	平均水温 [℃]
0	25.79
10	25.74
20	25.69
30	25.65
50	25.25
75	24.39
100	23.17
125	22.21
150	21.42
200	19.38
250	17.66
300	16.08
400	13.51
500	11.99
600	10.73
700	9.39
800	8.01
900	6.67
1000	5.37
1100	4.68
1200	4.15

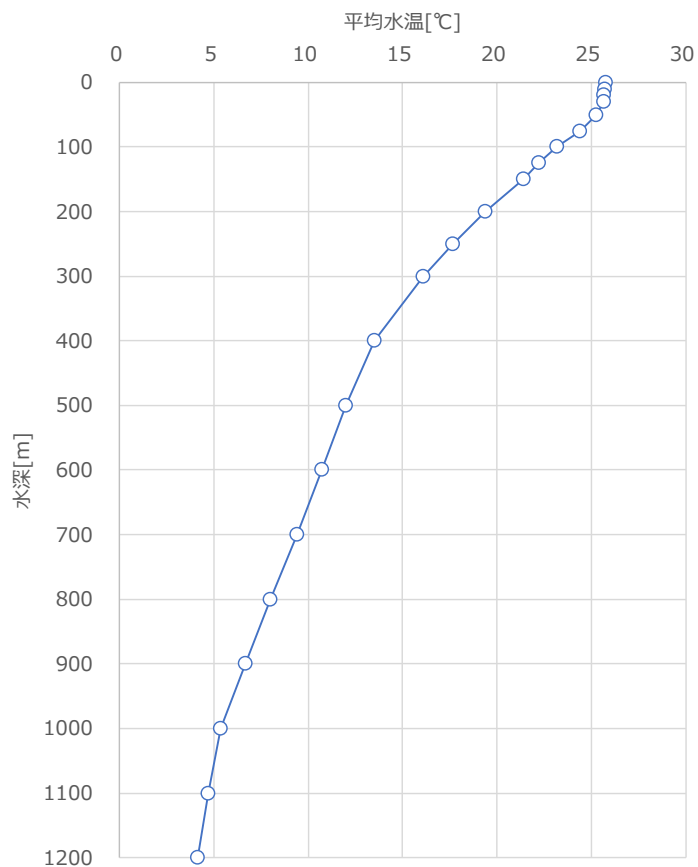


図3 平均水温の鉛直分布

また、取水ポンプ等の設計条件を与える夏季の最高水温（3月）については、特に季節変動が大きいと考えられる水深250m以下の水温データを用いる（図4）

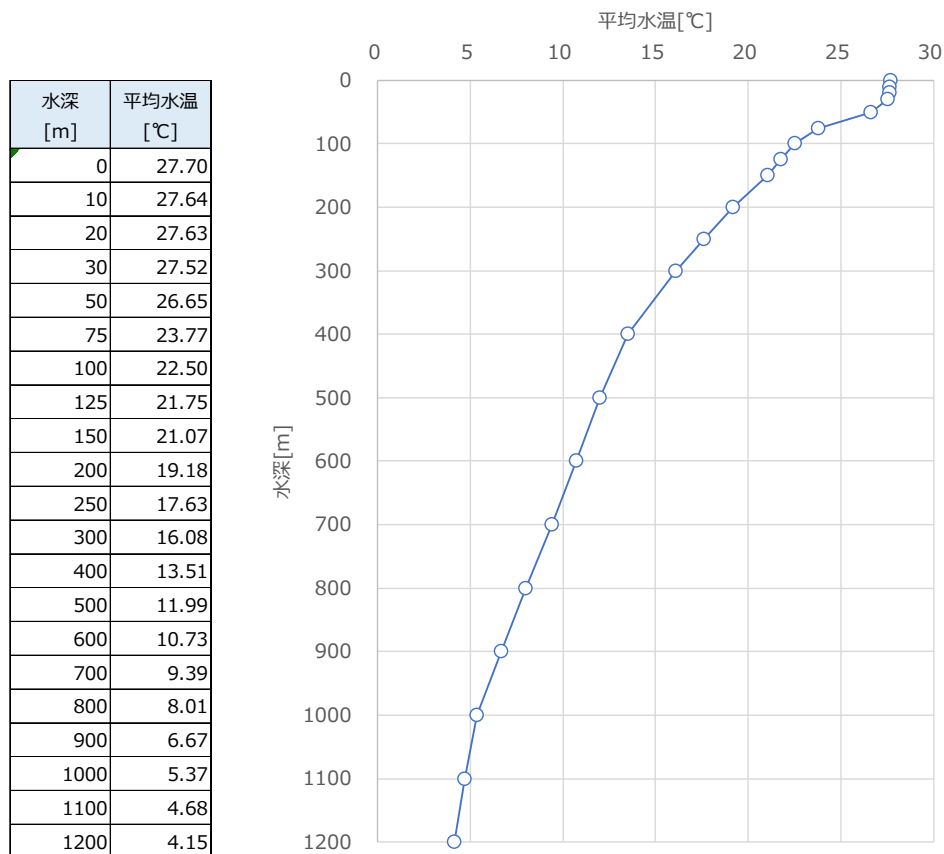


図4 平均水温の鉛直分布（3月）

(2) 表層海水温の季節変動

OTECの発電端出力に影響する表層水温の変動については、適合性等調査2023に示されたデータ（図5）を用いる。

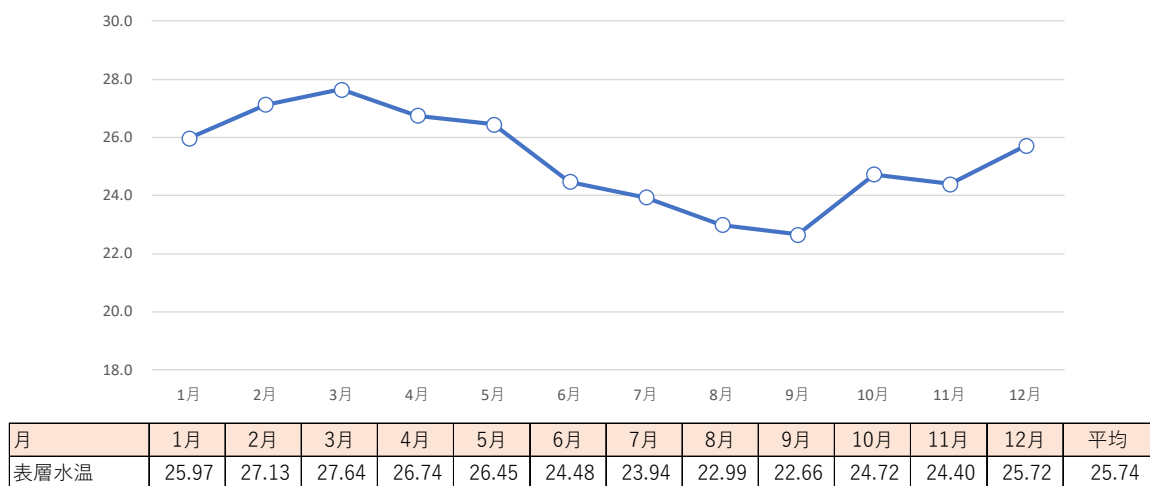


図5 表層海水温の季節変動

(3) 取水ルートと海底地形

取水ルートと海底地形については未詳であるが、適合性等調査2023掲載図（図6）および次節に示すルートにて検討を行う。

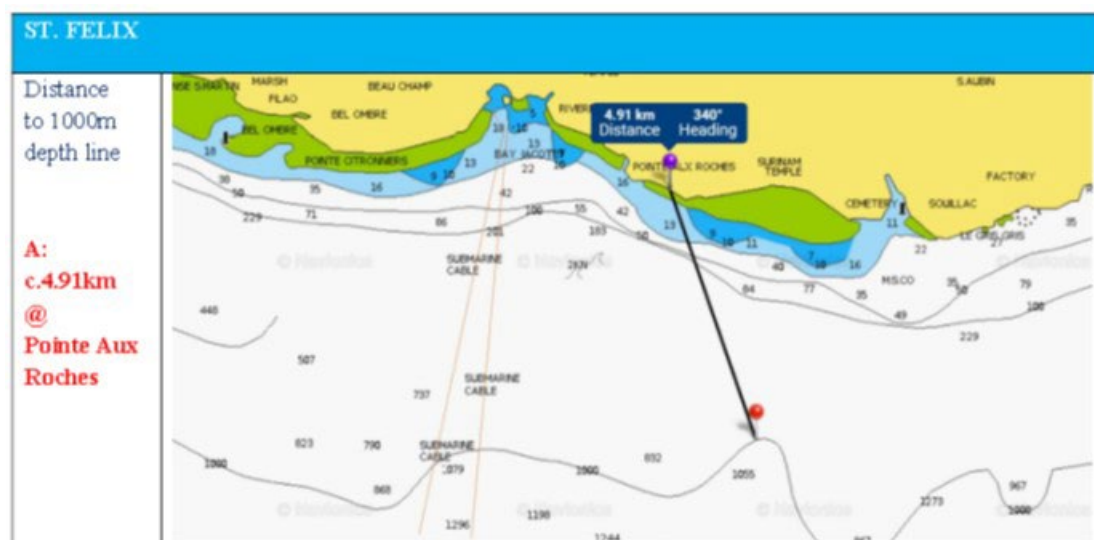


図 6 取水リートと海底地形（適合性調査 2023 より抜粋）

2.3.2.2 海洋深層水需要先による所要流量

海洋深層水の流量に関しては、需要先の所要流量によるため、適合性等調査 2023 に基づき表 3 の通り設定した。取水水深および水温は、表 3 に基づき、それぞれ 1000m、5.37℃とする。管延長は、次節に述べた。

表 3 海洋深層水流量等に関する設計条件

項目	単位	St. Felix		Bel Ombre	
流量	m ³ /h	10,000		7,500	
取水水深	m	800	1,000	800	1,000
取水温度	℃	8.01	5.37	8.01	5.37
取水管延長	m	4,960	6,010	5,920	6,910

2.3.3 管材の選定

取水管の材質については、世界最大の取水管である NELHA（ハワイ州自然エネルギー研究所：Natural Energy Laboratory, Hawaii Authority）と同様の、表 4 の仕様を想定する。

表 4 海洋深層水流量等に関する設計条件

項目	St.Felix・Bel Ombre 共通
材質	硬質ポリエチレン（HDPE）
SDR	17
管壁内面粗度（等価粗さ）	0.005mm

2.3.4 取水深度および管径の選定

2.3.4.1 圧力損失の評価

(1) 算定方法

以下の数式を用いて、圧力損失 ΔP を求めた。

$$\Delta P = v^2/2 \cdot (\lambda_x \cdot \frac{L}{d} + \sum \zeta)$$

v : 管内流速

λ_x : 管摩擦係数（コールブルックの式による）

$$\frac{1}{\lambda_x^{0.5}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re \cdot \lambda^{0.5}} \right)$$

ε : 管の等価粗さ

Re : レイノルズ数

L : 管延長
 d : 管内径
 ζ : 管部材による抵抗係数

なお、取水口やタンクへの接続等の抵抗係数として $\zeta=1.5$ を加算した。

(2) 算定結果

算定結果を表 5～表 8 および図 7 に示す。

表 5 St.Felix Case 海洋深層水取水管 圧力損失計算 (水深 800m 取水)

St. Felix (水深800mからの取水)

海洋深層水取水管

FLUID	VISCOCITY [Pa·s]	SPECIFIC GRAV. [ton/m3]	備考
SEA WATER	0.001421	1.025	(8°C)

TITLE		海洋深層水取水管							
KINEMATIC VISCOSITY		1.39E-06	(m ² /s)						
STATIC HEAD		0.0	(m)						
SPECIFIC GRAVITY		1025	(kg/m ³)						
NO.		A	B	C	D	E	F	G	H
FLUX (m3/h)		10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
(m3/d)		240,000	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000
PIPE MATERIAL		HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE
NOM.DIA. (mm)		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
OUT.DIA. (mm)		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
THICKNESS (mm)		59	71	82	94	106	118	129	141
IN.DIA. (mm)		882	1058	1236	1412	1588	1764	1942	2118
INN AREA (m2)		0.61	0.88	1.20	1.57	1.98	2.44	2.96	3.52
PIPE LENGTH (m)		4960	4960	4960	4960	4960	4960	4960	4960
VELOCITY (m/s)		4.55	3.16	2.32	1.77	1.40	1.14	0.94	0.79
v ² /2g		1.05	0.51	0.27	0.16	0.10	0.07	0.04	0.03
RE(=vd/n)		2.892E+06	2.411E+06	2.064E+06	1.807E+06	1.607E+06	1.446E+06	1.314E+06	1.205E+06
λ		0.0100	0.0103	0.0105	0.0107	0.0109	0.0110	0.0112	0.0113
λ x L/d		56.43	48.08	42.01	37.47	33.89	31.00	28.58	26.56
ACCESSORIES	ζ								
BFV < 150									
200									
250									
> 300									
SWING CHECK V									
TEE BR TO MAIN									
TEE MAIN TO BR									
TEE MAIN TO MAIN									
REDUCER									
ENLARGER									
90 BEND									
45 ELBOW									
90 ELBOW									
SEA CHEST									
STRAINER									
CHECK VALVE									
GATE VALVE									
GLOBE VALVE									
LIFT CHECK V									
BELLMOUTH		1	1	1	1	1	1	1	1
TANK CONNECT.		1	1	1	1	1	1	1	1
Σ ζ		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
λx L/d+Σζ		57.93	49.58	43.51	38.97	35.39	32.50	30.08	28.06
v ² /2g x (λx L/d+Σζ)		61.05	25.24	11.89	6.25	3.55	2.14	1.35	0.89
OTHERS (m)									
HEAD LOSS(m)		61.05	25.24	11.89	6.25	3.55	2.14	1.35	0.89

表6 St.Felix Case 海洋深層水取水管 圧力損失計算 (水深 1000m 取水)

St. Felix (水深1000mからの取水)

海洋深層水取水管

FLUID	VISCOCITY [Pa·s]	SPECIFIC GRAV. [ton/m3]	備考
SEA WATER	0.001557	1.025	(5°C)

TITLE		海洋深層水取水管							
KINEMATIC VISCOSITY		1.52E-06	(m ² /s)						
STATIC HEAD		0.0	(m)						
SPECIFIC GRAVITY		1025	(kg/m ³)						
NO.		A	B	C	D	E	F	G	H
FLUX	(m3/h)	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
	(m3/d)	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000
PIPE MATERIAL		HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE
NOM.DIA.	(mm)	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
OUT.DIA.	(mm)	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
THICKNESS	(mm)	59	71	82	94	106	118	129	141
IN.DIA.	(mm)	882	1058	1236	1412	1588	1764	1942	2118
INN AREA	(m2)	0.61	0.88	1.20	1.57	1.98	2.44	2.96	3.52
PIPE LENGTH	(m)	6010	6010	6010	6010	6010	6010	6010	6010
VELOCITY	(m/s)	4.55	3.16	2.32	1.77	1.40	1.14	0.94	0.79
$v^2/2g$		1.05	0.51	0.27	0.16	0.10	0.07	0.04	0.03
RE(=vd/n)		2.640E+06	2.201E+06	1.884E+06	1.649E+06	1.466E+06	1.320E+06	1.199E+06	1.099E+06
λ		0.0101	0.0103	0.0106	0.0108	0.0110	0.0111	0.0113	0.0115
$\lambda \times L/d$		68.94	58.77	51.37	45.82	41.46	37.92	34.97	32.51
ACCESSORIES	ζ								
BFV < 150									
200									
250									
> 300									
SWING CHECK V									
TEE BR TO MAIN									
TEE MAIN TO BR									
TEE MAIN TO MAIN									
REDUCER									
ENLARGER									
90 BEND									
45 ELBOW									
90 ELBOW									
SEA CHEST									
STRAINER									
CHECK VALVE									
GATE VALVE									
GLOBE VALVE									
LIFT CHECK V									
BELLMOUTH		1	1	1	1	1	1	1	1
TANK CONNECT.		1	1	1	1	1	1	1	1
$\Sigma \zeta$		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
$\lambda \times L/d + \Sigma \zeta$		70.44	60.27	52.87	47.32	42.96	39.42	36.47	34.01
$v^2/2g \times (\lambda \times L/d + \Sigma \zeta)$		74.24	30.68	14.45	7.59	4.31	2.60	1.64	1.08
OTHERS (m)									
HEAD LOSS(m)		74.24	30.68	14.45	7.59	4.31	2.60	1.64	1.08

表 7 Bel Ombre Case 海洋深層水取水管 圧力損失計算 (水深 800m 取水)

Bel Ombre (水深800mからの取水)

海洋深層水取水管

FLUID	VISCOCITY [Pa·s]	SPECIFIC GRAV. [ton/m3]	備考
SEA WATER	0.001421	1.025	(8℃)

TITLE		海洋深層水取水管							
KINEMATIC VISCOSITY		1.39E-06 (m ² /s)							
STATIC HEAD		0.0 (m)							
SPECIFIC GRAVITY		1025 (kg/m ³)							
NO.		A	B	C	D	E	F	G	H
FLUX	(m3/h)	7,500	7,500	7,500	7,500	7,500	7,500	7,500	7,500
	(m3/d)	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000
PIPE MATERIAL		HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE
NOM.DIA.	(mm)	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
OUT.DIA.	(mm)	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
THICKNESS	(mm)	59	71	82	94	106	118	129	141
IN.DIA.	(mm)	882	1058	1236	1412	1588	1764	1942	2118
INN AREA	(m2)	0.61	0.88	1.20	1.57	1.98	2.44	2.96	3.52
PIPE LENGTH	(m)	5920	5920	5920	5920	5920	5920	5920	5920
VELOCITY	(m/s)	3.41	2.37	1.74	1.33	1.05	0.85	0.70	0.59
$v^2/2g$		0.59	0.29	0.15	0.09	0.06	0.04	0.03	0.02
RE(=vd/n)		2.169E+06	1.808E+06	1.548E+06	1.355E+06	1.205E+06	1.085E+06	9.853E+05	9.034E+05
λ		0.0105	0.0107	0.0109	0.0112	0.0114	0.0116	0.0117	0.0119
$\lambda \times L/d$		70.14	59.89	52.41	46.79	42.36	38.77	35.77	33.26
ACCESSORIES	ζ								
BFV < 150									
200									
250									
> 300									
SWING CHECK V									
TEE BR TO MAIN									
TEE MAIN TO BR									
TEE MAIN TO MAIN									
REDUCER									
ENLARGER									
90 BEND									
45 ELBOW									
90 ELBOW									
SEA CHEST									
STRAINER									
CHECK VALVE									
GATE VALVE									
GLOBE VALVE									
LIFT CHECK V									
BELLMOUTH		1	1	1	1	1	1	1	1
TANK CONNECT.		1	1	1	1	1	1	1	1
$\Sigma \zeta$		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
$\lambda \times L/d + \Sigma \zeta$		71.64	61.39	53.91	48.29	43.86	40.27	37.27	34.76
$v^2/2g \times (\lambda \times L/d + \Sigma \zeta)$		42.47	17.58	8.29	4.36	2.47	1.49	0.94	0.62
OTHERS (m)									
HEAD LOSS(m)		42.47	17.58	8.29	4.36	2.47	1.49	0.94	0.62

表 8 Bel Ombre Case 海洋深層水取水管 圧力損失計算 (水深 1000m 取水)

Bel Ombre (水深1000mからの取水)

海洋深層水取水管

FLUID	VISCOCITY [Pa·s]	SPECIFIC GRAV. [ton/m3]	備考
SEA WATER	0.001557	1.025	(5℃)

TITLE		海洋深層水取水管							
KINEMATIC VISCOSITY		1.52E-06 (m ² /s)							
STATIC HEAD		0.0 (m)							
SPECIFIC GRAVITY		1025 (kg/m ³)							
NO.		A	B	C	D	E	F	G	H
FLUX (m3/h)		7,500	7,500	7,500	7,500	7,500	7,500	7,500	7,500
(m3/d)		180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000
PIPE MATERIAL		HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE
NOM.DIA. (mm)		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
OUT.DIA. (mm)		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
THICKNESS (mm)		59	71	82	94	106	118	129	141
IN.DIA. (mm)		882	1058	1236	1412	1588	1764	1942	2118
INN AREA (m2)		0.61	0.88	1.20	1.57	1.98	2.44	2.96	3.52
PIPE LENGTH (m)		6910	6910	6910	6910	6910	6910	6910	6910
VELOCITY (m/s)		3.41	2.37	1.74	1.33	1.05	0.85	0.70	0.59
v ² /2g		0.59	0.29	0.15	0.09	0.06	0.04	0.03	0.02
RE(=vd/n)		1.980E+06	1.651E+06	1.413E+06	1.237E+06	1.100E+06	9.899E+05	8.992E+05	8.245E+05
λ		0.0106	0.0109	0.0111	0.0113	0.0115	0.0117	0.0119	0.0121
λ x L/d		82.97	70.89	62.05	55.42	50.19	45.95	42.39	39.43
ACCESSORIES	ζ								
BFV < 150									
200									
250									
> 300									
SWING CHECK V									
TEE BR TO MAIN									
TEE MAIN TO BR									
TEE MAIN TO MAIN									
REDUCER									
ENLARGER									
90 BEND									
45 ELBOW									
90 ELBOW									
SEA CHEST									
STRAINER									
CHECK VALVE									
GATE VALVE									
GLOBE VALVE									
LIFT CHECK V									
BELLMOUTH		1	1	1	1	1	1	1	1
TANK CONNECT.		1	1	1	1	1	1	1	1
Σ ζ		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
λx L/d+Σζ		84.47	72.39	63.55	56.92	51.69	47.45	43.89	40.93
v ² /2g x (λx L/d+Σζ)		50.08	20.73	9.77	5.14	2.92	1.76	1.11	0.73
OTHERS (m)									
HEAD LOSS(m)		50.08	20.73	9.77	5.14	2.92	1.76	1.11	0.73

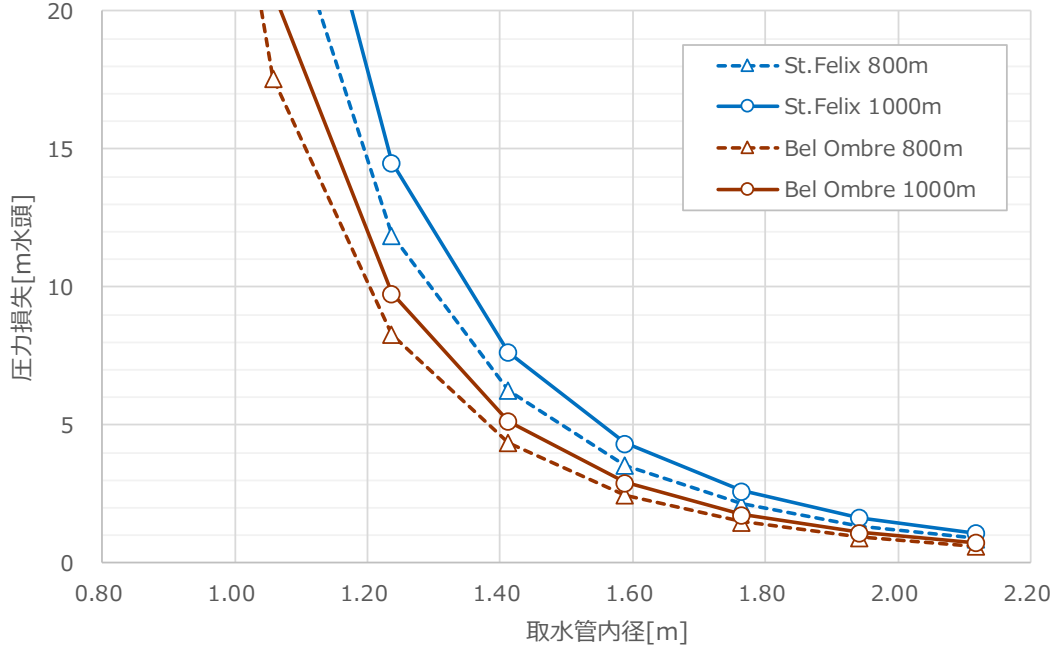


図7 海洋深層水取水管 圧力損失計算まとめ

2.3.4.2 密度差静水頭の評価

(1) 算定方法

海洋深層水取水においては、取水管内外の密度差により、静水頭が生じる。この静水頭は、次の式で計算できる。

$$\Delta H_{ST} = \int \rho(y) dy$$

where:

ΔH_{ST} : 静水頭
 ρ : 海水の密度
 y : 水深

なお、海水の密度 $\rho[\text{kg/m}^3]$ は、UNESCO の海水の状態方程式（1983 年）を用いて、塩分 $S[\text{PSU}]$ 、水温 $T[^\circ\text{C}]$ 、圧力 $p[\text{bar}]$ の関数として次の通り算定できる。

$$\begin{aligned} \rho(S, T, p) &= \rho(S, T, 0) / \{ 1 - p / K(S, T, p) \} \\ \rho(S, T, 0) &= \rho_w + S(0.824493 + (-4.0899 \times 10^{-3})T + (7.6438 \times 10^{-5})T^2 \\ &\quad + (-8.2467 \times 10^{-7})T^3 + (5.3875 \times 10^{-9})T^4) \\ &\quad + S^{1.5}(-5.72466 \times 10^{-3} + (1.0227 \times 10^{-4})T + (-1.6546 \times 10^{-6})T^2) \\ &\quad + S^2(4.8314 \times 10^{-4}) \\ \rho_w &= 999.842594 + (6.793952 \times 10^{-2})T - 9.095290 \times 10^{-3}T^2 \\ &\quad + (1.001685 \times 10^{-4})T^3 - (1.120083 \times 10^{-6})T^4 + (6.536332 \times 10^{-9})T^5 \\ K(S, T, p) &= K(S, T, 0) \\ &\quad + p(3.239908 + (1.43713 \times 10^{-3})T + (1.16092 \times 10^{-4})T^2 + (-5.77905 \times 10^{-7})T^3) \\ &\quad + pS((2.2838 \times 10^{-3}) + (-1.0981 \times 10^{-5})T + (-1.6078 \times 10^{-6})T^2) \\ &\quad + pS^{1.5}(1.91075 \times 10^{-4}) \\ &\quad + p^2((8.50935 \times 10^{-5}) + (-6.12293 \times 10^{-6})T + (5.2787 \times 10^{-8})T^2) \\ &\quad + p^2S((-9.9348 \times 10^{-7}) + (2.0816 \times 10^{-8})T + (9.1697 \times 10^{-10})T^2) \\ K(S, T, 0) &= K_w + S(54.6746 - 0.603459T + (1.09987 \times 10^{-2})T^2 + (-6.1670 \times 10^{-5})T^3) \\ &\quad + S^{1.5}(7.944 \times 10^{-2} + (1.6483 \times 10^{-2})T + (-5.3009 \times 10^{-4})T^2) \\ K_w &= 19652.21 + 148.4206T + (-2.327105)T^2 + (1.360477 \times 10^{-2})T^3 + (-5.155288 \times 10^{-5})T^4 \end{aligned}$$

なお、今回の検討では、管内の海水性状については、取水口での温度・塩分濃度を使用して算定した。

(2) 算定結果

算定結果を表 9～表 13 に示す。

なお、密度差静水頭は、管径や管の水平延長の影響を受けないため、取水水深として 800m と 1000 m、水温として夏季（3 月）と年間平均の 2 ケースずつを算定した。

表 9 St.Felix/Bel Ombre 共通 海洋深層水取水管 密度差静水頭計算(水深 800m 取水・夏季水温)

St.Felix・Bel Ombre共通

深度	管外			管内			計算			
	水温	塩分濃度	密度	水温	塩分濃度	密度	密度差	1mあたり 水頭差	当該区間 鉛直距離	当該区間 水頭差
D	Tout	Cout	pout	Tin	Cin	pin	$\Delta\rho$	$\Delta H1$	ΔD	ΔHd
m	℃	PSU	kg/m3	℃	PSU	kg/m3	kg/m3	mm	m	m
	(*1)	(*1)	(*2)	(*1)	(*1)	(*2)	(*3)	(*4)	(*5)	(*6)
0	27.70	35.18	1023.3	8.01	34.53	1027.1	3.78	3.680	0	0.000
10	27.64	35.16	1023.3	8.01	34.53	1027.1	3.78	3.677	10	0.037
20	27.63	35.17	1023.4	8.01	34.53	1027.1	3.77	3.667	10	0.037
30	27.52	35.17	1023.4	8.01	34.53	1027.1	3.73	3.635	10	0.037
50	26.65	35.19	1023.7	8.01	34.53	1027.1	3.46	3.371	20	0.070
75	23.77	35.22	1024.5	8.01	34.53	1027.1	2.63	2.561	25	0.074
100	22.50	35.28	1024.9	8.01	34.53	1027.1	2.25	2.190	25	0.059
125	21.75	35.35	1025.1	8.01	34.53	1027.1	2.00	1.952	25	0.052
150	21.07	35.44	1025.4	8.01	34.53	1027.1	1.77	1.720	25	0.046
200	19.18	35.54	1025.9	8.01	34.53	1027.1	1.24	1.204	50	0.073
250	17.63	35.58	1026.3	8.01	34.53	1027.1	0.86	0.833	50	0.051
300	16.08	35.53	1026.6	8.01	34.53	1027.1	0.56	0.550	50	0.035
400	13.51	35.31	1026.9	8.01	34.53	1027.1	0.24	0.230	100	0.039
500	11.99	35.09	1027.0	8.01	34.53	1027.1	0.14	0.138	100	0.018
600	10.73	34.87	1027.0	8.01	34.53	1027.1	0.11	0.108	100	0.012
700	9.39	34.66	1027.0	8.01	34.53	1027.1	0.08	0.077	100	0.009
800	8.01	34.53	1027.1	8.01	34.53	1027.1	0.00	0.000	100	0.004
900	6.67	34.55	1027.3							
1000	5.37	34.59	1027.5							
合計									800	0.65

(*1) JODCデータベースより。安全側の設計とするため、以下のデータを用いる。

管外： 最大水温・最小塩分

管内： 最小水温・最大塩分

なお、管内の水温上昇は考慮しない。

(*2) 温度と塩分濃度から算定

(*3) $\Delta\rho = \rho_{in} - \rho_{out}$

(*4) $\Delta H1 = \Delta\rho / \rho_{in} \times 1000$

(*5) 一つ下のデータとの水深差

(*6) $\Delta Hd = \Delta H1 \times \Delta D$

表 10 St.Felix/Bel Ombre 共通 海洋深層水取水管 密度差静水頭計算 (水深 800m 取水・年平均水温)

St.Felix・Bel Ombre共通

深度	管外			管内			計算			
	水温	塩分濃度	密度	水温	塩分濃度	密度	密度差	1mあたり 水頭差	当該区間 鉛直距離	当該区間 水頭差
D	Tout	Cout	pout	Tin	Cin	pin	$\Delta\rho$	$\Delta H1$	ΔD	ΔHd
m	℃	PSU	kg/m3	℃	PSU	kg/m3	kg/m3	mm	m	m
	(*1)	(*1)	(*2)	(*1)	(*1)	(*2)	(*3)	(*4)	(*5)	(*6)
0	25.79	35.18	1023.9	8.01	34.53	1027.1	3.22	3.136	0	0.000
10	25.74	35.16	1023.9	8.01	34.53	1027.1	3.22	3.137	10	0.031
20	25.69	35.17	1023.9	8.01	34.53	1027.1	3.20	3.115	10	0.031
30	25.65	35.17	1023.9	8.01	34.53	1027.1	3.19	3.104	10	0.031
50	25.25	35.19	1024.1	8.01	34.53	1027.1	3.06	2.980	20	0.061
75	24.39	35.22	1024.3	8.01	34.53	1027.1	2.80	2.725	25	0.071
100	23.17	35.28	1024.7	8.01	34.53	1027.1	2.43	2.361	25	0.064
125	22.21	35.35	1025.0	8.01	34.53	1027.1	2.12	2.066	25	0.055
150	21.42	35.44	1025.3	8.01	34.53	1027.1	1.85	1.805	25	0.048
200	19.38	35.54	1025.8	8.01	34.53	1027.1	1.28	1.249	50	0.076
250	17.66	35.58	1026.3	8.01	34.53	1027.1	0.86	0.840	50	0.052
300	16.08	35.53	1026.6	8.01	34.53	1027.1	0.56	0.550	50	0.035
400	13.51	35.31	1026.9	8.01	34.53	1027.1	0.24	0.230	100	0.039
500	11.99	35.09	1027.0	8.01	34.53	1027.1	0.14	0.138	100	0.018
600	10.73	34.87	1027.0	8.01	34.53	1027.1	0.11	0.108	100	0.012
700	9.39	34.66	1027.0	8.01	34.53	1027.1	0.08	0.077	100	0.009
800	8.01	34.53	1027.1	8.01	34.53	1027.1	0.00	0.000	100	0.004
900	6.67	34.55	1027.3							
1000	5.37	34.59	1027.5							
合計									800	0.64

(*1) JODCデータベースより。安全側の設計とするため、以下のデータを用いる。

管外： 最大水温・最小塩分

管内： 最小水温・最大塩分

なお、管内の水温上昇は考慮しない。

(*2) 温度と塩分濃度から算定

(*3) $\Delta\rho = \rho_{in} - \rho_{out}$

(*4) $\Delta H1 = \Delta\rho / \rho_{in} \times 1000$

(*5) 一つ下のデータとの水深差

(*6) $\Delta Hd = \Delta H1 \times \Delta D$

表 11 St.Felix/Bel Ombre 共通 海洋深層水取水管 密度差静水頭計算 (水深 1000m 取水・夏季水温)

St.Felix・Bel Ombre 共通

深度	管外			管内			計算			
	水温	塩分濃度	密度	水温	塩分濃度	密度	密度差	1mあたり 水頭差	当該区間 鉛直距離	当該区間 水頭差
D	Tout	Cout	pout	Tin	Cin	pin	$\Delta\rho$	$\Delta H1$	ΔD	ΔHd
m	°C	PSU	kg/m ³	°C	PSU	kg/m ³	kg/m ³	mm	m	m
	(*1)	(*1)	(*2)	(*1)	(*1)	(*2)	(*3)	(*4)	(*5)	(*6)
0	27.70	35.18	1023.3	5.37	0.00	1027.5	4.11	4.003	0	0.000
10	27.64	35.16	1023.3	5.37	0.00	1027.5	4.11	4.000	10	0.040
20	27.63	35.17	1023.4	5.37	0.00	1027.5	4.10	3.990	10	0.040
30	27.52	35.17	1023.4	5.37	0.00	1027.5	4.07	3.958	10	0.040
50	26.65	35.19	1023.7	5.37	0.00	1027.5	3.80	3.694	20	0.077
75	23.77	35.22	1024.5	5.37	0.00	1027.5	2.96	2.885	25	0.082
100	22.50	35.28	1024.9	5.37	0.00	1027.5	2.58	2.514	25	0.067
125	21.75	35.35	1025.1	5.37	0.00	1027.5	2.34	2.275	25	0.060
150	21.07	35.44	1025.4	5.37	0.00	1027.5	2.10	2.043	25	0.054
200	19.18	35.54	1025.9	5.37	0.00	1027.5	1.57	1.528	50	0.089
250	17.63	35.58	1026.3	5.37	0.00	1027.5	1.19	1.157	50	0.067
300	16.08	35.53	1026.6	5.37	0.00	1027.5	0.90	0.874	50	0.051
400	13.51	35.31	1026.9	5.37	0.00	1027.5	0.57	0.554	100	0.071
500	11.99	35.09	1027.0	5.37	0.00	1027.5	0.48	0.463	100	0.051
600	10.73	34.87	1027.0	5.37	0.00	1027.5	0.44	0.433	100	0.045
700	9.39	34.66	1027.0	5.37	0.00	1027.5	0.41	0.402	100	0.042
800	8.01	34.53	1027.1	5.37	0.00	1027.5	0.33	0.325	100	0.036
900	6.67	34.55	1027.3	5.37	0.00	1027.5	0.16	0.158	100	0.024
1000	5.37	34.59	1027.5	5.37	0.00	1027.5	0.00	0.000	100	0.008
合計									1000	0.94

(*1) JODCデータベースより。安全側の設計とするため、以下のデータを用いる。

管外: 最大水温・最小塩分

管内: 最小水温・最大塩分

なお、管内の水温上昇は考慮しない。

(*2) 温度と塩分濃度から算定

(*3) $\Delta\rho = \rho_{in} - \rho_{out}$

(*4) $\Delta H1 = \Delta\rho / \rho_{in} \times 1000$

(*5) 一つ下のデータとの水深差

(*6) $\Delta Hd = \Delta H1 \times \Delta D$

表 12 St.Felix/Bel Ombre 共通 海洋深層水取水管 密度差静水頭計算 (水深 1000m 取水・年平均水温)

St.Felix・Bel Ombre共通

深度	管外			管内			計算			
	水温	塩分濃度	密度	水温	塩分濃度	密度	密度差	1mあたり 水頭差	当該区間 鉛直距離	当該区間 水頭差
D	Tout	Cout	pout	Tin	Cin	pin	$\Delta\rho$	$\Delta H1$	ΔD	ΔHd
m	℃	PSU	kg/m ³	℃	PSU	kg/m ³	kg/m ³	mm	m	m
	(*1)	(*1)	(*2)	(*1)	(*1)	(*2)	(*3)	(*4)	(*5)	(*6)
0	25.79	35.18	1023.9	5.37	34.59	1027.5	3.55	3.459	0	0.000
10	25.74	35.16	1023.9	5.37	34.59	1027.5	3.55	3.460	10	0.035
20	25.69	35.17	1023.9	5.37	34.59	1027.5	3.53	3.439	10	0.034
30	25.65	35.17	1023.9	5.37	34.59	1027.5	3.52	3.428	10	0.034
50	25.25	35.19	1024.1	5.37	34.59	1027.5	3.39	3.303	20	0.067
75	24.39	35.22	1024.3	5.37	34.59	1027.5	3.13	3.049	25	0.079
100	23.17	35.28	1024.7	5.37	34.59	1027.5	2.76	2.685	25	0.072
125	22.21	35.35	1025.0	5.37	34.59	1027.5	2.46	2.390	25	0.063
150	21.42	35.44	1025.3	5.37	34.59	1027.5	2.19	2.128	25	0.056
200	19.38	35.54	1025.8	5.37	34.59	1027.5	1.62	1.573	50	0.093
250	17.66	35.58	1026.3	5.37	34.59	1027.5	1.20	1.164	50	0.068
300	16.08	35.53	1026.6	5.37	34.59	1027.5	0.90	0.874	50	0.051
400	13.51	35.31	1026.9	5.37	34.59	1027.5	0.57	0.554	100	0.071
500	11.99	35.09	1027.0	5.37	34.59	1027.5	0.48	0.463	100	0.051
600	10.73	34.87	1027.0	5.37	34.59	1027.5	0.44	0.433	100	0.045
700	9.39	34.66	1027.0	5.37	34.59	1027.5	0.41	0.402	100	0.042
800	8.01	34.53	1027.1	5.37	34.59	1027.5	0.33	0.325	100	0.036
900	6.67	34.55	1027.3	5.37	34.59	1027.5	0.16	0.158	100	0.024
1000	5.37	34.59	1027.5	5.37	34.59	1027.5	0.00	0.000	100	0.008
合計									1000	0.93

(*1) JODCデータベースより。安全側の設計とするため、以下のデータを用いる。

管外： 最大水温・最小塩分

管内： 最小水温・最大塩分

なお、管内の水温上昇は考慮しない。

(*2) 温度と塩分濃度から算定

(*3) $\Delta\rho = \rho_{in} - \rho_{out}$

(*4) $\Delta H1 = \Delta\rho / \rho_{in} \times 1000$

(*5) 一つ下のデータとの水深差

(*6) $\Delta Hd = \Delta H1 \times \Delta D$

表 13 密度差静水頭まとめ

項目	単位	数値			
取水水深	m	800		1000	
水温条件	-	夏季	年間平均	夏季	年間平均
密度差静水頭	m	0.65	0.64	0.94	0.93

2.3.4.3 温度損失の評価

(1) 算定方法

海洋深層水は低温であるため、取水管を通して汲み上げられる間に若干の温度上昇がある。微小区間における温度変化は、次の式の通り表される。

$$\Delta T \cdot C_p \cdot W \cdot R = \Delta L \cdot (T_{sur} - T)$$

$$R = R_{sur} + R_p + R_{in}$$

ここで

T : 管内温度 [°C]

ΔT : 管内温度上昇 [°C]

T_{sur} : 周囲海水温度 [°C]

ΔL : 管路の対象区間長 [m]

C_p : 流体の比熱 [J/kgK]

W : 流体の重量流量 [kg/sec]

R : 管の全熱抵抗[mK/W]

R_{sur} : 管外壁の海水の単位長あたり熱抵抗（熱伝達率の逆数） [mK/W]

R_p : 管壁の単位長あたり熱抵抗 [mK/W]

R_{in} : 管内壁の海水の単位長あたり熱抵抗（熱伝達率の逆数） [mK/W]

これにより、温度損失 T_{Loss} は、次の通り計算できる。

$$T_{Loss} = \int \Delta T dL = \int \frac{T_{sur} - T}{C_p \cdot W \cdot R} dL$$

(2) 算定結果

図 8、表 14 に算定例を示す。

同様に算定した結果を、
表 15 に管径ごとに示す。

モーリシャス向け 深層水取水管における配管内温度変化計算

1) 取水管内の温度変化の計算

基本式： $\Delta T \cdot C_p \cdot W \cdot R = \Delta L \cdot (T_{sur} - T)$
 $R = R_{sur} + R_p + R_{in}$

T 管内温度 [°C]
 ΔT 管内温度上昇 [°C]
 T_{sur} 周囲海水温度 [°C]

ΔL 管路の対象区間長 [m]

C_p 流体の比熱 [J/kgK]

W 流体の重量流量 [kg/sec]

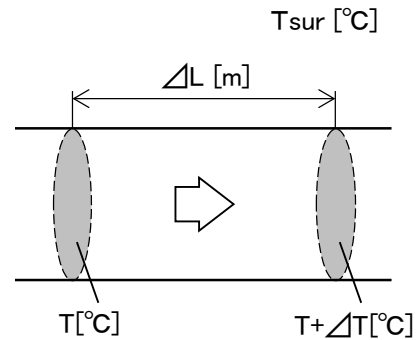
単位換算 [kg/h]

R 管の全熱抵抗[mK/W]

R_{sur} 管外壁の海水の単位長あたり熱抵抗(熱伝達率の逆数) [mK/W]

R_p 管壁の単位長あたり熱抵抗 [mK/W]

R_{in} 管内壁の海水の単位長あたり熱抵抗(熱伝達率の逆数) [mK/W]



C_p	流体の比熱 [J/kgK]	:	4180
W	流体の重量流量 [kg/sec]	:	2847.2
	単位換算 [kg/h]	:	10,250,000
R	管の全熱抵抗[mK/W]	:	0.0383
R_{sur}	管外壁の海水の単位長あたり熱抵抗(熱伝達率の逆数) [mK/W]	:	—(安全側)
R_p	管壁の単位長あたり熱抵抗 [mK/W]	:	0.0383
R_{in}	管内壁の海水の単位長あたり熱抵抗(熱伝達率の逆数) [mK/W]	:	—(安全側)

2) 付帯データ

L	取水管総延長 [m]	:	6010
d_{in}	取水管の内径 [m]	:	1.41
A	取水管の内断面積 [m ²]	:	1.5659
ρ	流体の比重 [kg/m ³]	:	1025
v	管内流速 [m/sec]	:	1.77
T	入口→出口所要時間 [sec]	:	3388

3) 取水管の熱抵抗簡易計算

λ	熱伝導率	高密度ポリエチレン	0.46 W/mK ~ 0.52 W/mK	:	0.52
	[W/m]	鋼鉄	51.6 W/mK		
t_wall	管壁厚さ	[m]		:	0.094
d_out	管外径	[m]		:	1.60
d_in	管内径	[m]		:	1.41
Rp	管壁の単位長あたり熱抵抗	[mK/W]		:	0.038

図 8 温度損失の算定 (例)

表 14 温度損失の算定結果（例）

水深 [m]	海水温度 [m]	累計管長 [m]	区間温度損失 [°C]	管内温度 [°C]
0	25.79	0	0.0276	5.54
10	25.74	620	0.0298	5.51
20	25.69	1290	0.0191	5.48
30	25.65	1720	0.0178	5.46
50	25.25	2120	0.0113	5.44
75	24.39	2380	0.0083	5.43
100	23.17	2580	0.0031	5.42
125	22.21	2660	0.0026	5.42
150	21.42	2730	0.0056	5.42
200	19.38	2890	0.0052	5.41
250	17.66	3060	0.0046	5.41
300	16.08	3230	0.0080	5.40
400	13.51	3570	0.0061	5.39
500	11.99	3910	0.0049	5.39
600	10.73	4250	0.0040	5.38
700	9.39	4590	0.0033	5.38
800	8.01	4960	0.0028	5.37
900	6.67	5440	0.0016	5.37
1000	5.37	6010	0.0000	5.37

表 15 温度損失 算定結果まとめ

単位：°C

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
St. Felix 800m	0.132	0.132	0.133	0.133	0.132	0.132	0.133	0.133
St. Felix 1000m	0.165	0.164	0.166	0.166	0.165	0.165	0.166	0.166
Bel Ombre 800m	0.145	0.145	0.146	0.146	0.145	0.145	0.146	0.146
Bel Ombre 1000m	0.165	0.164	0.166	0.166	0.165	0.165	0.166	0.166

2.3.4.4 取水ポンプの消費電力への影響の評価

(1) 算定方法

前節までの影響のうち、配管の圧力損失および密度差静水頭は取水ポンプの揚程に影響する。さらに揚程は取水ポンプの消費電力に影響する。その算定式は次の通りである。

$$W_p = \frac{\rho \cdot g \cdot Q}{\eta_p \cdot \eta_m}$$

where:

- W_p : 取水ポンプの消費電力
 ρ : 海水の密度（1.025 t/m³を使用）
 Q : 体積流量
 η_p : ポンプ効率（0.80を想定）
 η_m : 電動機効率（0.95を想定）

(2) 算定結果

配管の圧力損失による取水ポンプ消費電力を表 16、密度差静水頭による消費電力を表 17 に示す。

表 16 配管の圧力損失による取水ポンプ消費電力まとめ

単位: kW

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
St. Felix 800m	2,105	870	410	216	122	74	47	31
St. Felix 1000m	2,571	1,063	501	263	149	90	57	37
Bel Ombre 800m	1,098	455	214	113	64	39	24	16
Bel Ombre 1000m	1,295	536	253	133	75	45	29	19

表 17 密度差静水頭による取水ポンプ消費電力まとめ

単位: kW

項目	単位	数値			
取水水深	m	800		1000	
水温条件	-	夏季	年間平均	夏季	年間平均
密度差静水頭	m	0.65	0.64	0.94	0.93
取水ポンプ消費電力	kW	24.0	23.5	34.7	34.2

2.3.4.5 海洋温度差発電の送電端出力への影響評価

(1) 算定方法

正味出力（送電端出力）算定にあたり、前提条件として発電端出力を概算した。計算条件としては、取水深度 800m および 1000m とし、表層水温は前掲の図 5 を使用した。深層水温は取水管温度損失によって影響を受けるため、その有無による発電端出力への損失として算定した。

なお、今回は表層水量については未検討であるため、あくまで本検討は比較用の概算値とする。

(2) 算定結果

取水管温度損失による発電端出力への影響を表 18 に示す。

また、影響度合いの比較として、前項までの取水管圧力損失および密度差静水頭による取水ポンプ消費電力を 表 19 にまとめた。

表 18 取水管温度損失による発電端出力への影響

St.Felix 800m ケース 深層水温(取水管入口) 8.01℃ 深層水取水量 10,000 m³/h 温度損失 0.133℃

月		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
表層水温[℃]		25.97	27.13	27.64	26.74	26.45	24.48	23.94	22.99	22.66	24.72	24.40	25.72	25.74
温度損失 なし	深層水温 [℃]	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01
	水温差 [℃]	17.96	19.12	19.63	18.73	18.44	16.47	15.93	14.98	14.65	16.71	16.39	17.71	17.23
	発電出力推定値 [kW]	1,126	1,292	1,369	1,235	1,193	931	865	755	719	961	921	1,092	1,038
温度損失 あり	深層水温 [℃]	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14
	水温差 [℃]	17.83	18.99	19.50	18.60	18.31	16.34	15.80	14.85	14.52	16.58	16.26	17.58	17.09
	発電出力推定値[kW]	1,108	1,273	1,349	1,216	1,174	914	849	741	705	944	904	1,074	1,021
温度損失による電力損失[kW]		18	19	20	19	19	17	16	14	14	17	17	18	17.3

St.Felix 1000m ケース 深層水温(取水管入口) 5.37℃ 深層水取水量 10,000 m³/h 温度損失 0.166℃

月		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
表層水温[℃]		25.97	27.13	27.64	26.74	26.45	24.48	23.94	22.99	22.66	24.72	24.40	25.72	25.74
温度損失 なし	深層水温 [℃]	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37
	水温差 [℃]	20.60	21.76	22.27	21.37	21.08	19.11	18.57	17.62	17.29	19.35	19.03	20.35	19.87
	発電出力推定値 [kW]	1,523	1,718	1,807	1,651	1,602	1,291	1,212	1,080	1,036	1,327	1,279	1,482	1,417
温度損失 あり	深層水温 [℃]	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54
	水温差 [℃]	20.43	21.59	22.10	21.20	20.91	18.94	18.40	17.45	17.12	19.18	18.86	20.18	19.70
	発電出力推定値[kW]	1,496	1,689	1,778	1,622	1,574	1,266	1,188	1,057	1,014	1,302	1,254	1,456	1,391
温度損失による電力損失[kW]		27	29	29	29	28	25	24	23	22	25	25	26	26.0

Bel Ombre 800m ケース 深層水温(取水管入口) 8.01℃ 深層水取水量 7,500 m³/h 温度損失 0.133℃

月		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
表層水温[℃]		25.97	27.13	27.64	26.74	26.45	24.48	23.94	22.99	22.66	24.72	24.40	25.72	0.00
温度損失 なし	深層水温 [℃]	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01	8.01
	水温差 [℃]	17.96	19.12	19.63	18.73	18.44	16.47	15.93	14.98	14.65	16.71	16.39	17.71	17.23
	発電出力推定値 [kW]	844	969	1,027	926	895	698	649	567	539	721	691	819	779
温度損失 あり	深層水温 [℃]	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14	8.14
	水温差 [℃]	17.83	18.99	19.50	18.60	18.31	16.34	15.80	14.85	14.52	16.58	16.26	17.58	17.09
	発電出力推定値[kW]	831	954	1,012	912	881	686	637	556	529	708	678	805	766
温度損失による電力損失[kW]		13	15	15	14	14	12	12	11	10	13	13	14	13.0

Bel Ombre 1000m ケース 深層水温(取水管入口) 5.37℃ 深層水取水量 7,500 m³/h 温度損失 0.166℃

月		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
表層水温[℃]		25.97	27.13	27.64	26.74	26.45	24.48	23.94	22.99	22.66	24.72	24.40	25.72	25.74
温度損失 なし	深層水温 [℃]	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37
	水温差 [℃]	20.60	21.76	22.27	21.37	21.08	19.11	18.57	17.62	17.29	19.35	19.03	20.35	19.87
	発電出力推定値 [kW]	1,142	1,288	1,356	1,238	1,201	968	909	810	777	995	959	1,112	1,063
温度損失 あり	深層水温 [℃]	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54
	水温差 [℃]	20.43	21.59	22.10	21.20	20.91	18.94	18.40	17.45	17.12	19.18	18.86	20.18	19.70
	発電出力推定値[kW]	1,122	1,267	1,333	1,217	1,181	950	891	793	760	976	941	1,092	1,044
温度損失による電力損失[kW]		20	21	23	21	20	18	18	17	17	19	18	20	19.3

表 19 各種損失の比較

単位：kW

ケース	圧力損失由来	密度差静水頭由来	温度損失由来	【参考】 季節変動	【参考】取水水深による差
St. Felix 800m	31～2105	23.5	17.3	644	370
St. Felix 1000m	37～2571	34.2	26.0	764	
Bel Ombre 800m	76～1098	23.5	13.0	483	278
Bel Ombre 1000m	19～1295	34.2	19.3	573	

2.3.4.6 収支への影響の概算から見た最適管径の評価

(1) 想定条件

管径の選定にあたり、正味出力（送電端出力）が管径に対してどの程度の感度を持っているか、要因ごとに整理すると、次の通りとなる。

- 要因① 圧力損失：影響度合いが大（表 19 参照）
- 要因② 密度差静水頭：理論的に影響なし
- 要因③ 温度損失：影響はほぼ無視できる（表 15 参照）

そこで本項では、配管の圧力損失に対象を絞って、検討を行う。

具体的には、表 16 に示した取水管呼び径ごとの出力損失について、呼び径を変化させたときの追加送電電力量[kWh]あたり追加建設費を、次の通り算定して評価する。

$$UC = \frac{\Delta CC}{(\Delta P_{net} - \Delta P_{net_0}) \cdot 24 \cdot 365 \cdot 0.95 \cdot PL}$$

where:

UC: kWh あたり建設費追加分

ΔCC : 建設費（対照ケースからの差分）

ΔP_{net} : 年間平均正味出力

ΔP_{net_0} : 年間平均正味出力（対照ケース）

PL: 設備寿命（火力発電と同じ 40 年とする）

なお、対照ケースについては、対象ケースよりも管径が 200 mm 小さいケースとした。これにより、上式の UC が、OTEC の売電単価より小さければ、対照ケースより管径を 200 mm 大きくした現ケースの方が採算性が良いと判断できる。

また、建設費（基準ケースからの差分）については、配管建設工事で一般的に用いられる「径×長さ単価」法で概算する。もちろん、海洋深層水取水施設や海洋温度差発電施設には、管径によらないコスト要素があるため、ここではあくまで「径×長さに比例するコスト」に的をしぼって、以下の 4 ケースについて評価を行う。

Case-1	径×長さに比例する海洋深層水取水コストが	5 億円（配管径 1400 mm・5 km 時）
Case-2	〃	10 億円（同上）
Case-3	〃	20 億円（同上）
Case-4	〃	40 億円（同上）

(2) 算定結果

上記の kWh あたり建設費追加分について、表 20～表 23 および図 9～図 12 に示す。

表 20 St.Felix 取水水深 800m Case-1～4 算定結果

St. Felix 800m Case-1 基準建設費（径・長さ比例分） 5 億円 管長 4960 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	354	425	496	567	638	709	779	850
圧力損失による電力損失[kW]	2,105	870	410	216	122	74	47	31
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	71	71	71	71	71	71	71
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	411	153	65	31	16	9	5
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	0.2	0.5	1.1	2.3	4.4	7.9	13.3

St. Felix 800m Case-2 基準建設費（径・長さ比例分） 10 億円 管長 4960 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	709	850	992	1,134	1,275	1,417	1,559	1,701
圧力損失による電力損失[kW]	2,105	870	410	216	122	74	47	31
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	142	142	142	142	142	142	142
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	411	153	65	31	16	9	5
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	0.3	0.9	2.2	4.5	8.9	15.8	26.6

St. Felix 800m Case-3 基準建設費（径・長さ比例分） 20 億円 管長 4960 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	1,417	1,701	1,984	2,267	2,551	2,834	3,118	3,401
圧力損失による電力損失[kW]	2,105	870	410	216	122	74	47	31
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	283	283	283	283	283	283	283
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	411	153	65	31	16	9	5
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	0.7	1.9	4.4	9.1	17.7	31.5	53.2

St. Felix 800m Case-4 基準建設費（径・長さ比例分） 40 億円 管長 4960 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	2,834	3,401	3,968	4,535	5,102	5,669	6,235	6,802
圧力損失による電力損失[kW]	2,105	870	410	216	122	74	47	31
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	567	567	567	567	567	567	567
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	411	153	65	31	16	9	5
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	1.4	3.7	8.8	18.1	35.5	63.1	106.4

表 21 St.Felix 取水水深 1000m Case-1～4 算定結果

St. Felix 1000m Case-1 基準建設費（径・長さ比例分） 5 億円 管長 6010 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	429	515	601	687	773	859	944	1,030
圧力損失による電力損失[kW]	2,571	1,063	501	263	149	90	57	37
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	86	86	86	86	86	86	86
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	502	187	79	38	20	11	7
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	0.2	0.5	1.1	2.3	4.4	7.8	12.9

St. Felix 1000m Case-2 基準建設費（径・長さ比例分） 10 億円 管長 6010 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	859	1,030	1,202	1,374	1,545	1,717	1,889	2,061
圧力損失による電力損失[kW]	2,571	1,063	501	263	149	90	57	37
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	172	172	172	172	172	172	172
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	502	187	79	38	20	11	7
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	0.3	0.9	2.2	4.5	8.7	15.6	25.8

St. Felix 1000m Case-3 基準建設費（径・長さ比例分） 20 億円 管長 6010 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	1,717	2,061	2,404	2,747	3,091	3,434	3,778	4,121
圧力損失による電力損失[kW]	2,571	1,063	501	263	149	90	57	37
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	343	343	343	343	343	343	343
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	502	187	79	38	20	11	7
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	0.7	1.8	4.3	9.0	17.5	31.3	51.6

St. Felix 1000m Case-4 基準建設費（径・長さ比例分） 40 億円 管長 6010 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	3,434	4,121	4,808	5,495	6,182	6,869	7,555	8,242
圧力損失による電力損失[kW]	2,571	1,063	501	263	149	90	57	37
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	687	687	687	687	687	687	687
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	502	187	79	38	20	11	7
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	1.4	3.7	8.7	18.1	35.0	62.5	103.2

表 22 Bel Ombre 取水水深 800m Case-1～4 算定結果

Bel Ombre 800m Case-1 基準建設費（径・長さ比例分） 億円 管長 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	423	507	592	677	761	846	930	1,015
圧力損失による電力損失[kW]	1,098	455	214	113	64	39	24	16
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	85	85	85	85	85	85	85
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	214	80	34	16	8	5	3
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	0.4	1.1	2.5	5.2	10.2	16.9	31.8

Bel Ombre 800m Case-2 基準建設費（径・長さ比例分） 億円 管長 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	846	1,015	1,184	1,353	1,522	1,691	1,861	2,030
圧力損失による電力損失[kW]	1,098	455	214	113	64	39	24	16
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	169	169	169	169	169	169	169
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	214	80	34	16	8	5	3
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	0.8	2.1	5.0	10.4	20.3	33.9	63.5

Bel Ombre 800m Case-3 基準建設費（径・長さ比例分） 億円 管長 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	1,691	2,030	2,368	2,706	3,045	3,383	3,721	4,059
圧力損失による電力損失[kW]	1,098	455	214	113	64	39	24	16
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	338	338	338	338	338	338	338
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	214	80	34	16	8	5	3
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	1.6	4.2	10.1	20.7	40.6	67.7	127.0

Bel Ombre 800m Case-4 基準建設費（径・長さ比例分） 億円 管長 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	3,383	4,059	4,736	5,413	6,089	6,766	7,442	8,119
圧力損失による電力損失[kW]	1,098	455	214	113	64	39	24	16
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	677	677	677	677	677	677	677
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	214	80	34	16	8	5	3
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	3.2	8.4	20.1	41.5	81.3	135.5	254.1

表 23 Bel Ombre 取水水深 1000m Case-1～4 算定結果

Bel Ombre 1000m Case-1 基準建設費（径・長さ比例分） 億円 管長 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	494	592	691	790	888	987	1,086	1,185
圧力損失による電力損失[kW]	1,295	536	253	133	75	45	29	19
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	99	99	99	99	99	99	99
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	253	94	40	19	10	5	3
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	0.4	1.0	2.5	5.1	9.9	18.5	29.7

Bel Ombre 1000m Case-2 基準建設費（径・長さ比例分） 億円 管長 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	987	1,185	1,382	1,579	1,777	1,974	2,172	2,369
圧力損失による電力損失[kW]	1,295	536	253	133	75	45	29	19
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	197	197	197	197	197	197	197
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	253	94	40	19	10	5	3
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	0.8	2.1	4.9	10.2	19.8	37.1	59.3

Bel Ombre 1000m Case-3 基準建設費（径・長さ比例分） 億円 管長 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	1,974	2,369	2,764	3,159	3,554	3,949	4,343	4,738
圧力損失による電力損失[kW]	1,295	536	253	133	75	45	29	19
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	395	395	395	395	395	395	395
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	253	94	40	19	10	5	3
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	1.6	4.2	9.9	20.5	39.5	74.1	118.6

Bel Ombre 1000m Case-4 基準建設費（径・長さ比例分） 億円 管長 m

計算条件	取水管呼び径[mm]							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
径・長比例分建設費[百万円]	3,949	4,738	5,528	6,318	7,107	7,897	8,687	9,477
圧力損失による電力損失[kW]	1,295	536	253	133	75	45	29	19
径・長比例分建設費 差分△CC (左列との差) [百万円]	—	790	790	790	790	790	790	790
電力損失のkWh換算[百万kWh] (左列との差：施設寿命40年分)	—	253	94	40	19	10	5	3
kWhあたりの建設費[円/kWh] (左列に対する追加費用)	—	3.1	8.4	19.8	40.9	79.1	148.3	237.2

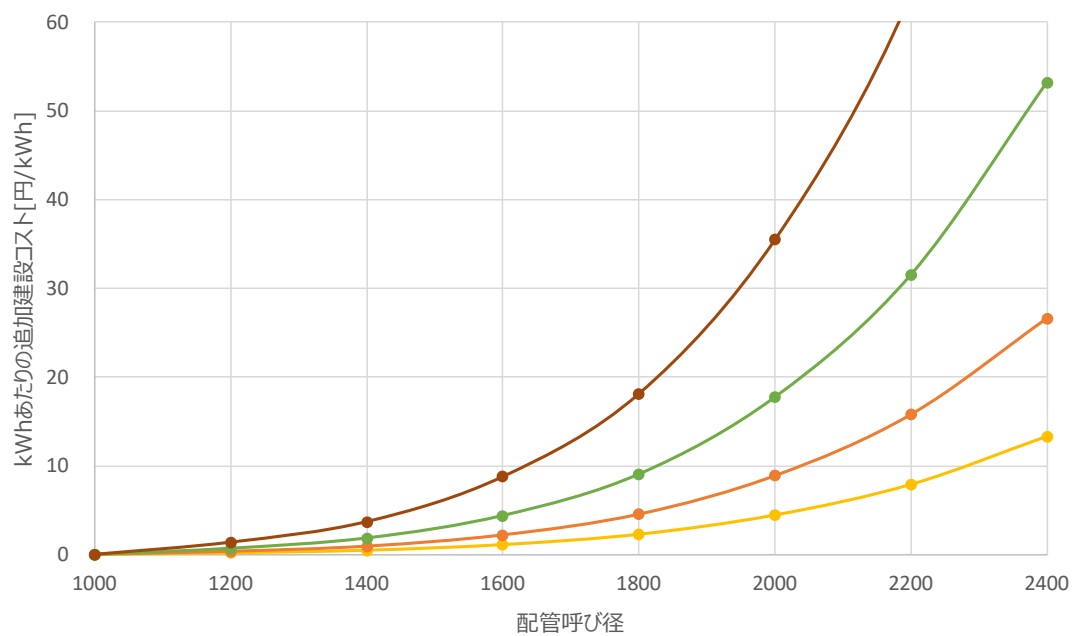


図 9 St.Felix 取水水深 800m Case-1~4 算定結果

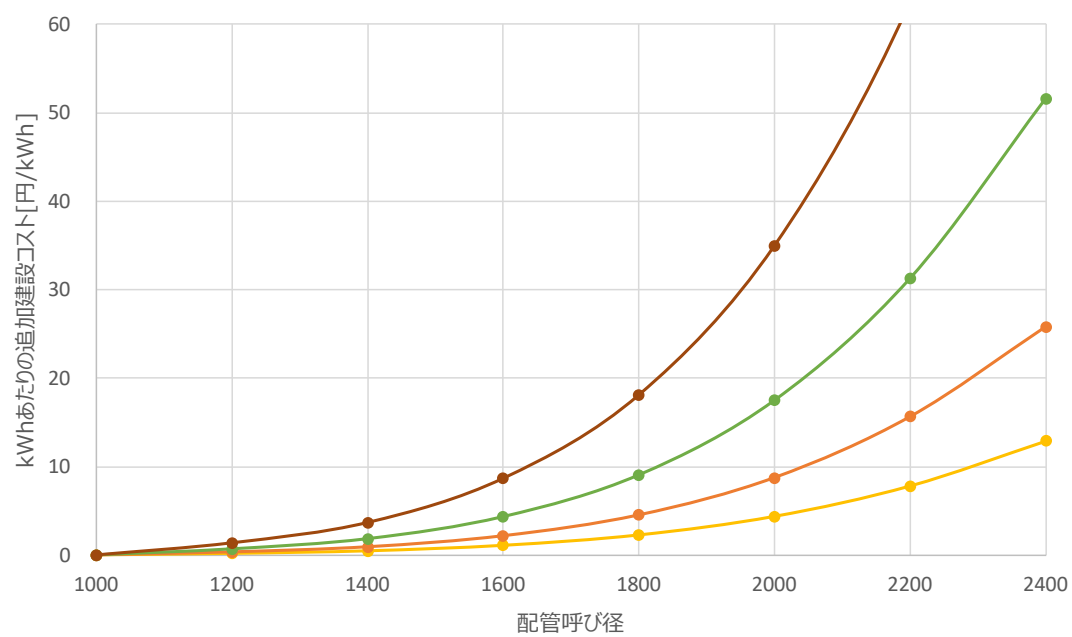


図 10 St.Felix 取水水深 1000m Case-1~4 算定結果

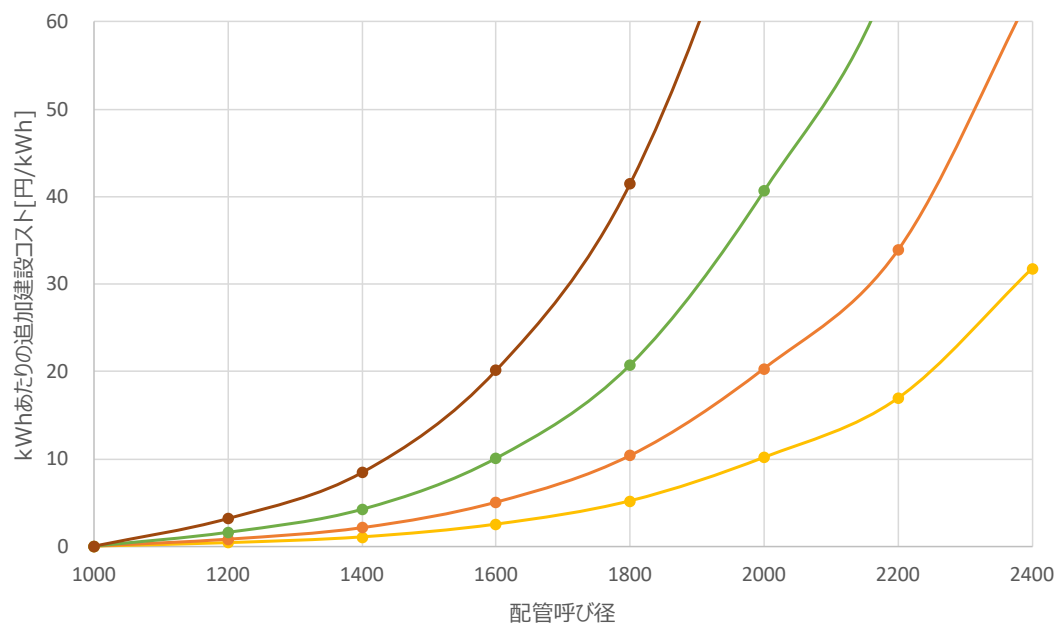


図 11 Bel Ombre 取水水深 800m Case-1～4 算定結果

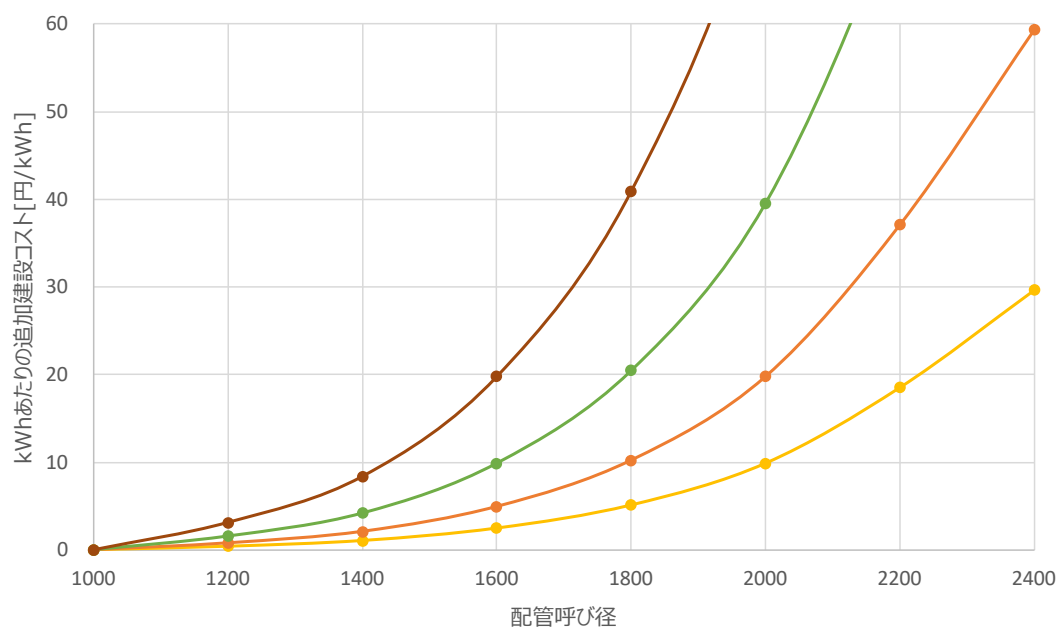


図 12 Bel Ombre 取水水深 1000m Case-1～4 算定結果

2.3.5 結果のまとめ

本節では、海洋深層水取水管について、最適な管径に関する検討を実施した。

取水の運用コスト（取水ポンプの消費電力、OTEC 発電端出力）に影響を及ぼしうる要素として、配管の圧力損失、密度差静水頭、温度損失を算定した結果、密度差静水頭、温度損失に関する管径との相関はほぼ無視してよいことが分かった。

配管の圧力損失については、取水ポンプの消費電力に多大な影響を及ぼすため、注意が必要である。極力管径を大きく取って流速を下げた方が運用費は安価となるが、一方で建設費は大きくなるため、ライフサイクルでの収支に注目する必要がある。

今回の検討では、流量を固定して、取水管径を一回り（200mm）大きくした場合の kWh あたり追加建設費を指標として、最適な管径を検討した。その範囲としては表 24 の通りと考えられる。

表 24 最適な管径範囲の推定結果

ケース	最適な管径の範囲
St. Felix 800m から取水	呼び径 1600mm（内径 1412mm）から 2000mm（内径 1784mm） ※詳細は、建設コスト条件や OTEC からの売電条件により異なる。
St. Felix 1000m から取水	
Bel Ombre 800m から取水	呼び径 1400mm（内径 1236mm）から 1800mm（内径 1588mm） ※詳細は、建設コスト条件や OTEC からの売電条件により異なる。
Bel Ombre 1000m から取水	

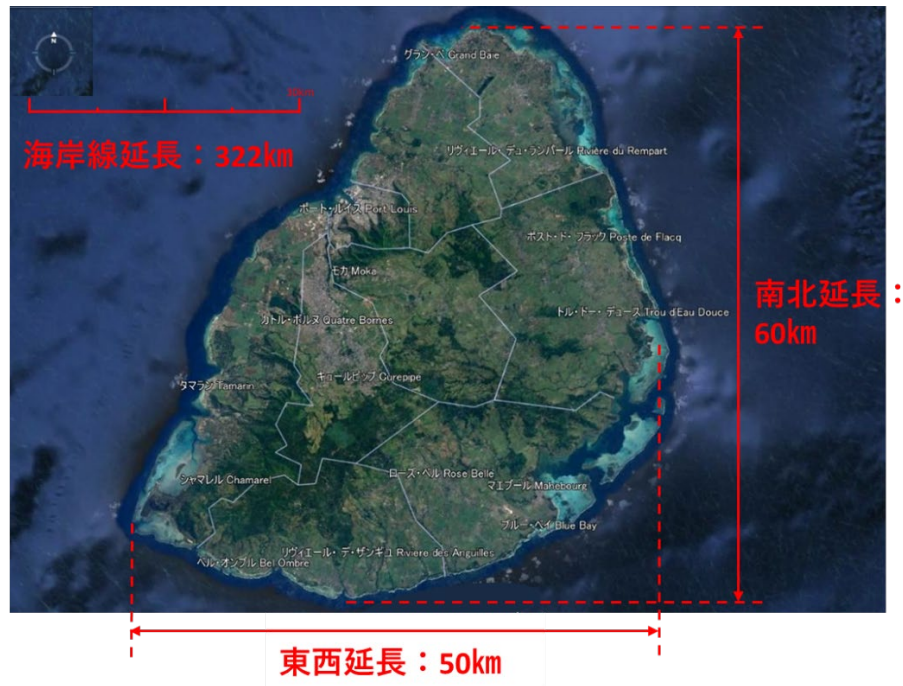
2.4 候補地における取水管及び取水管設置概略検討

2.4.1 概略検討の与条件（海底地形・地質、波浪、潮流、航路等）調査

(1) 自然条件

① 地形

図 13 に示す「モ」国は、南緯 20°、東経 57°に位置するマダガスカルから 800 km 南東にあるインド洋に面した火山島である。島の面積は 1,860 km²、南北延長は 60 km、東西延長は 50 km、最大標高は 817m であり、海岸線から 20 km 沖合までには水深 3,000m を超えるような大陸棚は存在しない。モーリシャス島における海岸線延長は 322 km、離島を含めた海岸線延長は約 496 km であり、ラグーン（リーフで囲まれた沿岸海域）の面積は 243 km²、リーフの延長は 150 km である。島内には約 50 の河川があり、一部の河口域周辺にはマングローブを有しその面積は 14 km²に及ぶ。モーリシャス島における海岸は、砂浜、礫浜、泥浜、湿地、崖、石灰質およびそれらの混合海岸から成っており、非常に多様性に富んだ海岸形態を示している。



出典：Google Earth

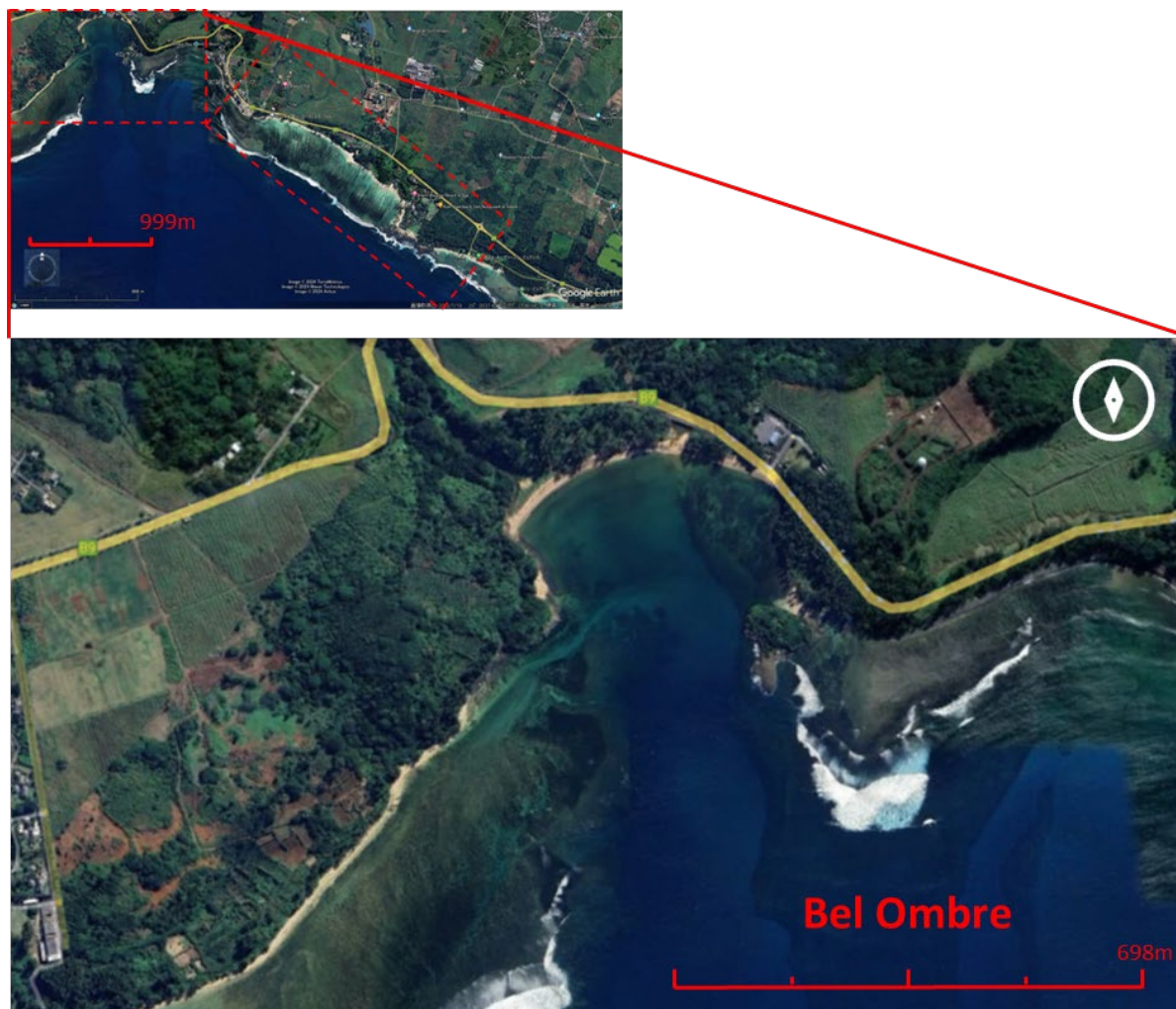
図 13 モーリシャス島

図 14 にモーリシャス島南部沿岸域を、図 15、図 16 に、それぞれモーリシャス島南部沿岸域のうち本調査の対象である Saint Felix と Bel Ombre とを示す。



出典：Google Earth

図 15 Saint Felix

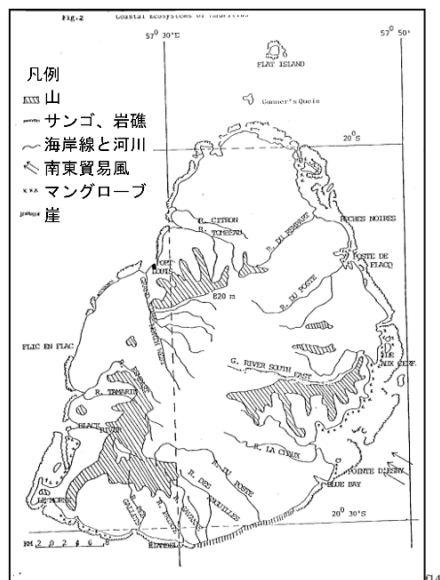


出典：Google Earth

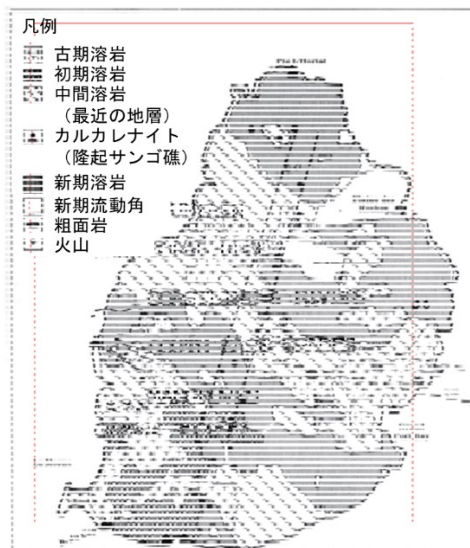
図 16 Bel Ombre

② 地質

「モ」国の地質図を図 17 に示す。「モ」国は 1000 万～600 万年前の火山の活動期後、静穏と活動を繰り返し出来た地形である。南西部沿岸は、700 万年以上前の溶岩質であり、北東部の一部は 2 万年以上前の溶岩質、その他の地域は 10 万年以上前の溶岩質から成る。



海岸地形



地質

出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015 年 6 月）
Original Source : IOC-UNEP-WMO-SAREC, Planning Workshop on An Integrated Approach to Coastal Erosion, Sea Level Changes and Their Impacts

出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015 年 6 月）
Original Source : Mauritius A Geomorphological Analysis

図 17 「モ」国における海岸地形および地質

③ 海岸地形

図 18 は「モ」国の代表地点での海岸写真である。「モ」国は海底火山の隆起によってできた火山島であるが、海岸の大部分はサンゴ起源の堆積物で形成されている。北部および西部のリーフ幅は、一部を除いて 100m～1km 以下である。一方東部の海岸は、北部や西部に比べてリーフ幅が広く 5km を超える海岸もある。そのような海岸では、シルトや腐食土、一部礫で構成されている海岸も見られる。南部では、南西部の一部を除いてサンゴ礁は見られず、岩礁海岸が支配的である。また一部で礫海岸も見られる。



北部 : Pte. Aux Cannoniers



南部: Reviere des Galets



西部: Flie en Flac



東部: Grand Sable

出典 : JICA 「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」 (2015 年 6 月)

図 18 「モ」国の典型的な海岸地形

「モ」国における海岸は、その地質、地形特性から次の 4 種類に分類される。(Saddul, Prem: Mauritius, A Geomorphological Analysis, Mahatma Gandhi Institute, Rev. 2002)

Type A: 狭いリーフの最新地層海岸(Type A1 と Type A2 を含む)

Type B: 広いリーフの最新地層海岸

Type C: リーフの無い最新地層海岸

Type D: 古地層海岸

これらの海岸の配置を図 19 に示す。



出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015年6月）

Original Source : Saddul, Prem: Mauritius, A Geomorphological Analysis, Mahatma Gandhi Institute, Rev. 2002

図 19 海岸分類

「モ」国南部海岸は Type A1 と Type C に属する。Type A1 は、幅 1km 以下のリーフで、波の作用により生産され運搬されたサンゴ砂から成る海岸である。砕波により生じた海浜流により岸沖方向及び沿岸方向に砂が輸送される。Type A1 に該当する南の海岸では自然状態が保たれているが、将来の開発による環境への負荷が懸念される。Type A1 の海岸は海浜砂からの供給により全体として増加する一方、来襲波の季節変化のため、ある海岸の侵食と隣接する他の海岸へ堆積をもたらす。また、サイクロンが沖方向漂砂による侵食をもたらす。Type A1 の海岸では、海岸構造物や砂採取が侵食問題を発生させる可能性がある。Type C の海岸は通常高さ約 30m の崖で、前面に波で削られた平地がありリーフは存在しない。崖上はサトウキビ畑が展開されており、一部の場所では住宅開発が行われている。砂浜海岸と比較してその速度は遅いものの、崖は浸透水による風化と、波による侵食を受けている。

図 20 に「モ」国南部海岸の海図を示す（海図番号：BA711）。Bel Ombre と Saint Felix の沿岸部から取水深度 800m までの距離はそれぞれ約 5.1km、4.4km である。モーリシャス島全周囲においてこの地域は沿岸から取水深度までの距離が比較的短く、南部海岸は深層水取水に適していると言える。

④ 底質特性

JICA 調査によれば、リーフ幅が広いリーフ上の底質は粒径 0.5~1.5mm の砂が占めている。リーフ幅が狭いもしくは無い海岸域では底質（粒径）の調査はされていない。これはつまり、岩礁海岸が支配的（一部は礫海岸）であるためである。図 21 に示す Google Earth の画像からも上記傾向がうかがえる。

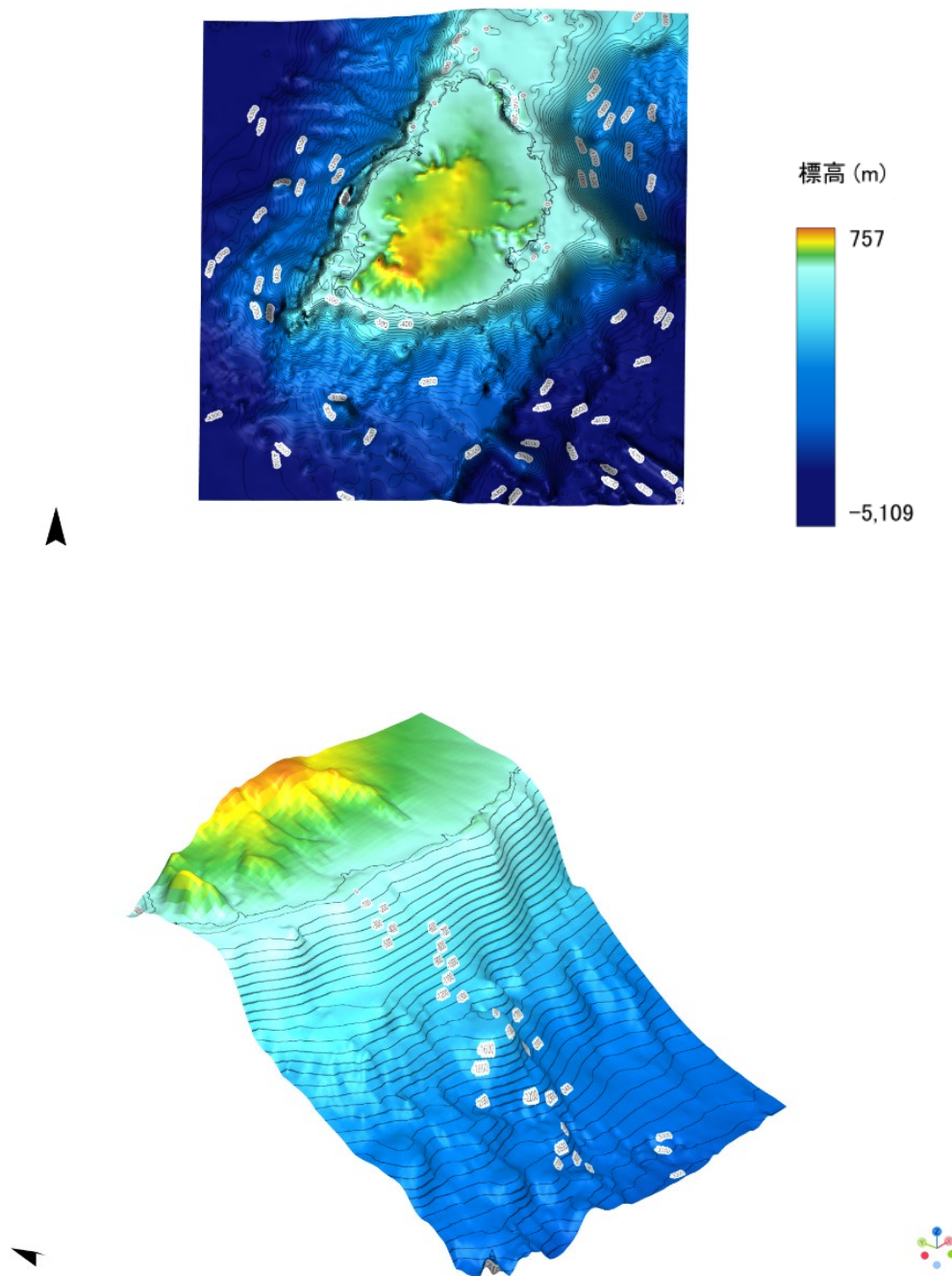


出典：Google Earth ストリートビューより作成

図 21 岩礁海岸

2.3.4.7 3次元地形データ

「モ」国対象地域の3次元地形図を図22に示す。



出典：OpenStreetMap, GEBCO（大洋水深総図）より作成

図22 3次元地形データ

(2) 気象条件

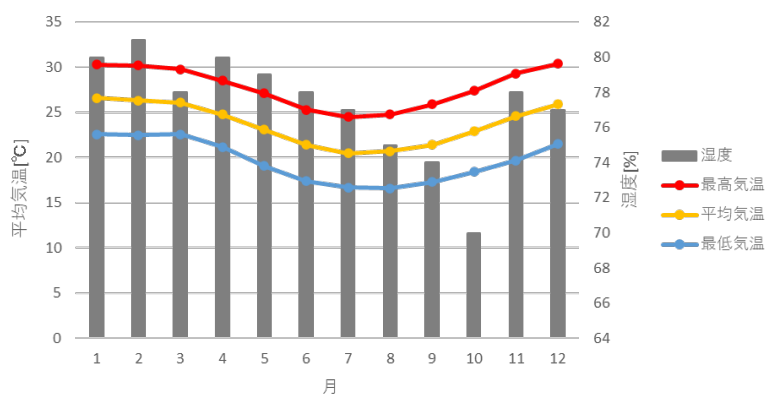
① 全般

「モ」国は南回帰線の近くに位置し、年間を通じて温暖な亜熱帯海洋性気候に属する。季節は二つあり、11月から4月までが暖かく湿った夏であり平均気温は25.7℃である。6月から9月が比較的涼しい乾燥した冬であり平均気温は21.0℃であり、季節間の平均気温の差はわずかに4.7℃である。10月と5月は一般に移行月として知られている。年間降水量は海岸沿いの900mmから中央高原の1500mmの範囲であり、顕著な雨季はないが降雨のほとんどは夏の数か月の間に起こる。さらに中央高原は周囲の沿岸域よりも涼しく、また雨量は沿岸域の二倍になる場所もある。マスカリン高気圧由来の南東貿易風が卓越し、島の東側は他の地域と比べると低温かつ雨になりがちな傾向にある。また、島の両側で気温や降水量が著しく違う場合もある。時折襲来する熱帯低気圧は、一般的には1月から3月の間に発生し、この地域には約3日間程度、多くの雨をもたらす傾向がある。ラグーンの海水温は22℃から27℃の間である。

② 気象

図23に「モ」国の月別平均気温を示す。夏（11月～4月）の気温は海岸部で27℃前後、中央

高原で22℃前後である。冬（6月～9月）の気温は沿岸部で約22℃、中央高原で約19℃である。最も暖かい月は12月、1月、2月であり、日最高気温の平均は30.4℃に達する。一方、最も寒い月は7月と8月で、夜間の最低気温平均は16.6℃まで下がる。



出典：Mauritius Attractions²のデータを加工

図23 「モ」国の月別平均気温

「モ」国の月平均降水量を図24に示す。降雨は暖候期である12～5月に年間雨量の2/3を占める。10月頃が最も降雨量が少なく、3月が最も降雨量が多い。図25は1951～1980年の平均年間降雨量の分布を示したものである。図より、山岳部と沿岸部での年間降雨量は3倍以上異なっていることが分かる。

² The President of the Republic of the Mauritius

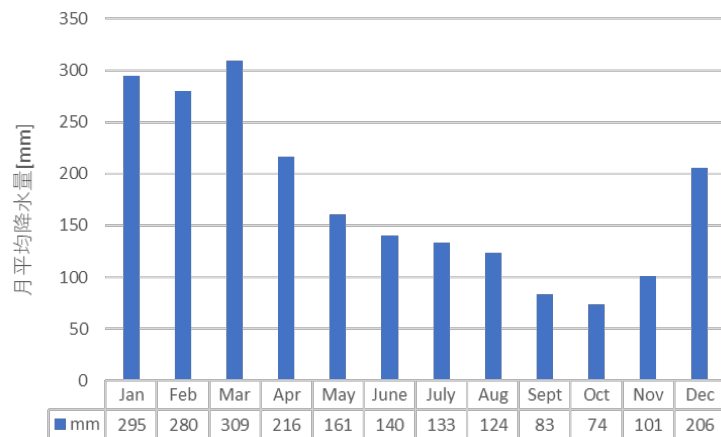
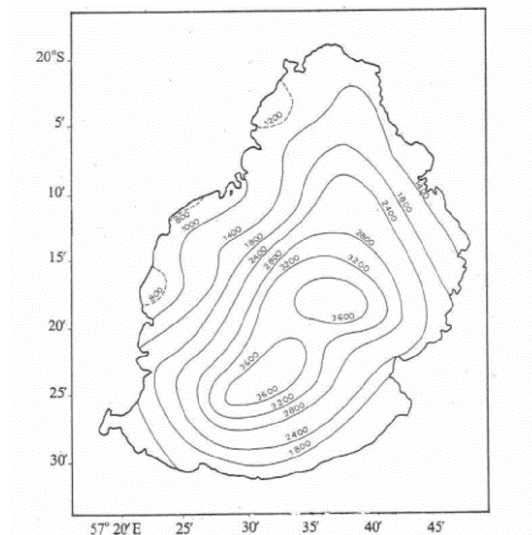


図 24 「モ」国の月平均降水量



出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015年6月）
Original Source：Weather and Climate in Mauritius

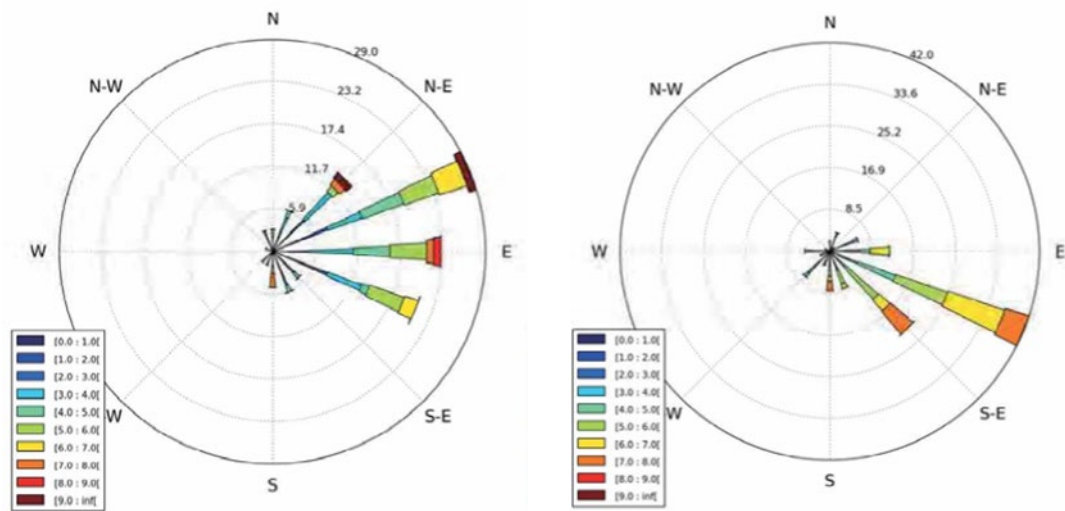
図 25 「モ」国における年間降雨分布

③ 風況

「モ」国は、夏場にサイクロンが頻繁に来襲する地域であり、冬場は南東貿易風が卓越する。図 26 に Plaisance 観測所における 2013 年の風速・風向の頻度分布図を示す。冬場（11～2 月）は ENE～SSE の風が卓越する。特に ENE 寄りから来る風については風速が大きいいため、サイクロンの影響によるものと考えられる。夏場（5～8 月）について SSE の風が卓越する。これは南東貿易風の影響による風である。また、この時期は夏よりも全体的に大きな風速の頻度が多いことがわかる。南東貿易風の影響は「モ」国周辺のインド洋全体で生じている。図 27 に 1980～2010 年の 1 月と 7 月における平均風速分布を、図 28 に 2002 年における同時期の風速分布を示す。これら図より、冬場の平均風速は 10m/s 超えとなり、夏場は 5～6m/s 程度となることがわかる。また、風向についても 6 月は南東貿易風の影響を見受けることができるが、12 月はほとんど見られず風速も小さい。この結果より季節的な変動として以下のことがいえる。

- 5～8 月を中心とした冬場は、南東貿易風が卓越する。特に、風向は東南東寄りが卓越するため、「モ」国南東部の風速が大きくなる。
- 12～2 月を中心とした夏場は、南東貿易風の影響が少なくなり、全体的に風速は小さくなる。

- 但し、上記の時期はサイクロンが来襲する時期であるため、サイクロンの経路によるが「モ」国に
来襲した場合は大きな風速となることがある。



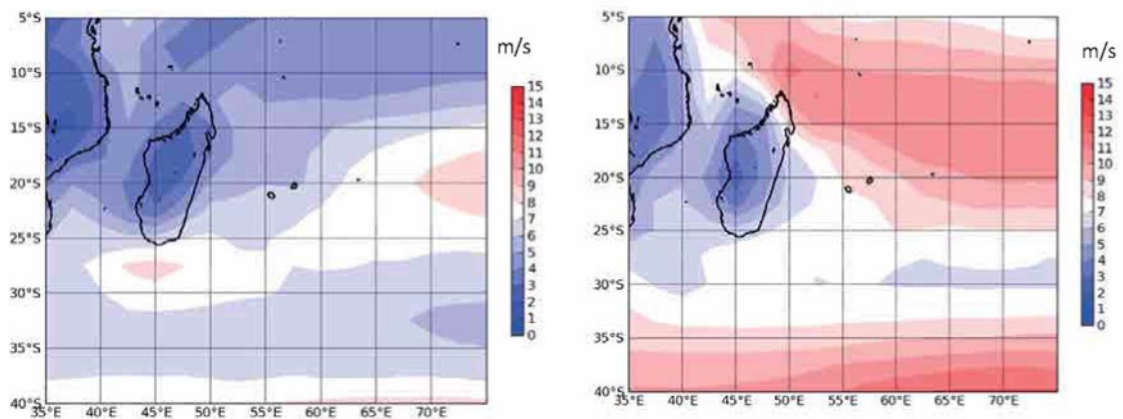
11~2月

5~8月

出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015年6月）

Original Source：Weather Meteorological Service

図26 「モ」国における風向・風速の頻度（風配図）（Plaisance,2013年）



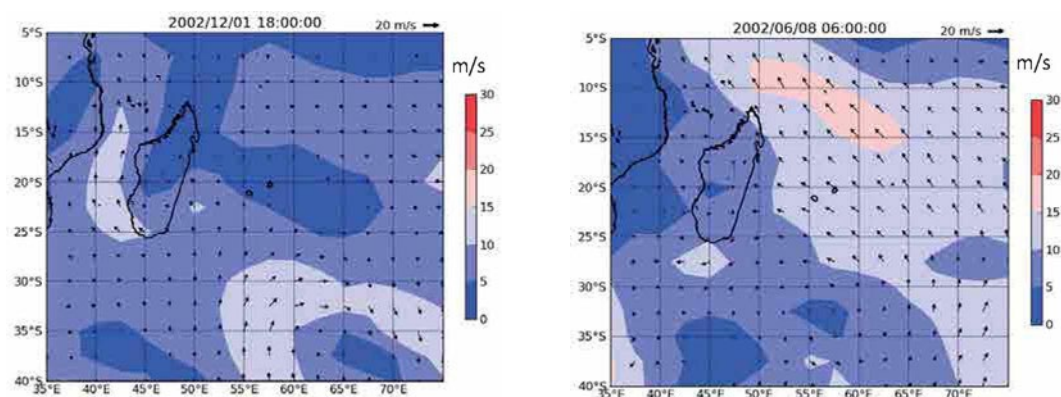
1月

7月

出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015年6月）

Original Source：NCEP/NCAR

図27 1981~2010年における平均風速の分布



12月1日18:00 6月8日18:00
 出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015年6月）
 Original Source：NCEP/NCAR

図 28 2002 年任意期間における風速・風速ベクトルの分布

④ サイクロン（出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015年6月））

「モ」国は南東貿易風の影響下にあり、熱帯性気候に属する。5～11月は冬季（乾季）、11～5月は夏季（雨季）となっている。また、「モ」国に影響を及ぼす熱帯性のサイクロンは、通常緯度 30°S から 60°S の南インド洋の中緯度帯で発生する。「モ」国はサイクロンが通過する地域にあり、これまで多くのサイクロンが来襲して沿岸に被害を与えてきた。特に年間を通して 12～3 月頃はサイクロンが多く来襲する。過去の代表的なサイクロンの来襲時期、最大風速および気圧を表 25 に示す。

表 25 過去の代表的なサイクロン

年	サイクロン	最大有義波高[m]			
		N	S	E	W
1960	Carol	12.51	10.94	14.00	12.61
1989	Krisy	5.07	5.76	6.26	5.44
1994	Hollanda	10.66	12.94	13.51	10.49
1995	Ingrid	6.13	8.68	8.37	6.94
1996	Bonita	5.91	4.08	5.25	4.28
1996	Daniella	7.38	6.02	7.69	10.28
1996	Flossy	3.66	5.42	5.19	4.25
1998	Anacelle	7.45	9.63	9.90	8.11
1999	Davina	7.79	9.49	10.59	11.37
2000	Connie	8.67	12.29	12.94	8.72
2002	Dina	11.78	10.12	11.49	7.41
2002	Guillaume	8.67	12.29	12.94	8.72
2003	Gerry	8.92	8.60	10.44	6.71
2005	Hennie	5.40	5.67	6.17	4.78
2007	Gamede	5.22	3.53	4.53	4.37
2008	Hondo	2.90	2.17	2.86	2.40
2009	Gael	3.12	2.21	2.86	2.95
2010	Gelane	3.32	3.17	3.65	2.15
2012	Giovanna	5.13	3.69	4.84	3.81
2013	Dumile	2.52	2.06	2.37	2.98
2013	Imelda	3.19	2.83	3.31	2.20

また、「モ」国の海岸とその対策を考える上で特に重要な3つのサイクロンについて整理する。

A) Carol (1960)

1960年に発生した Carol は「モ」国へ越波と海岸侵食をもたらし、沿岸の土地利用を考えていく上で契機となったサイクロンである。この後、小規模な護岸が建設されていくこととなる。

B) Hollanda (1994)

1994年に発生した Hollanda は 1960 年以降建設されてきた小規模構造物の被災や、砂浜海岸で浜崖を生じたサイクロンである。これらの対策として 1996 年より政府の海浜事業が実施されることとなり、対策工として蛇籠が導入されている。

C) Dina (2002)

2002 年に発生した Dina も大規模なサイクロンであった。これを受けて、2003 年の Baird の提案に沿って、巨石護岸が「モ」国全域に導入された。また同時期に養浜も導入され、海岸保全対策として柔軟な対策が導入されるようになった。

これら護岸、蛇籠、巨石護岸については (6) ①既存施設の項で述べる。

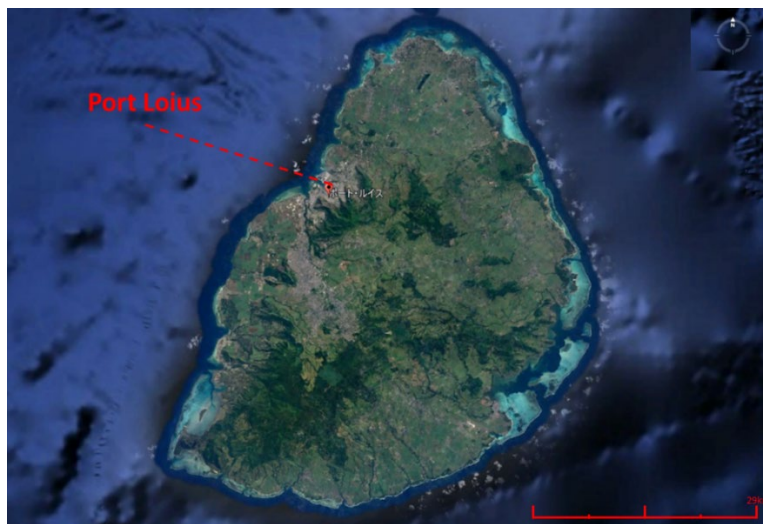
また、上記サイクロン以外にも「モ」国において 2019 年以降毎年サイクロンが観測されており、Ambali (2019)、Habana (2021)、Freddy (2023) はそれぞれ最大風速 250[km/h]、241[km/h]、256[km/h] を記録している。

(3) 海象条件

(1) 潮位

海図 BA771 によれば、図 29 に示す Port Louis における潮位は以下である。

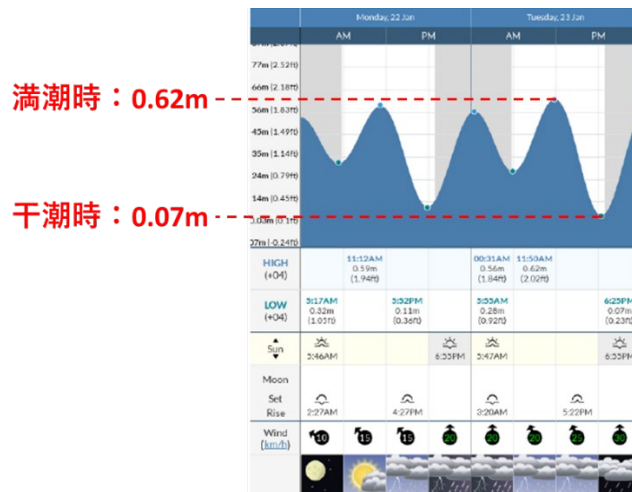
MHWS (Mean High Water Springs, 満潮大潮)	+0.7m
MHWN (Mean High Water Neaps, 満潮通常潮)	+0.5m
MLWN (Mean Low Water Neaps, 干潮通常潮)	+0.4m
MLWS (Mean Low Water Springs, 干潮小潮)	+0.2m
CDL (Chart Datum Level, 基準面)	±0.0m



出典：Google Earth

図 29 Port Louis

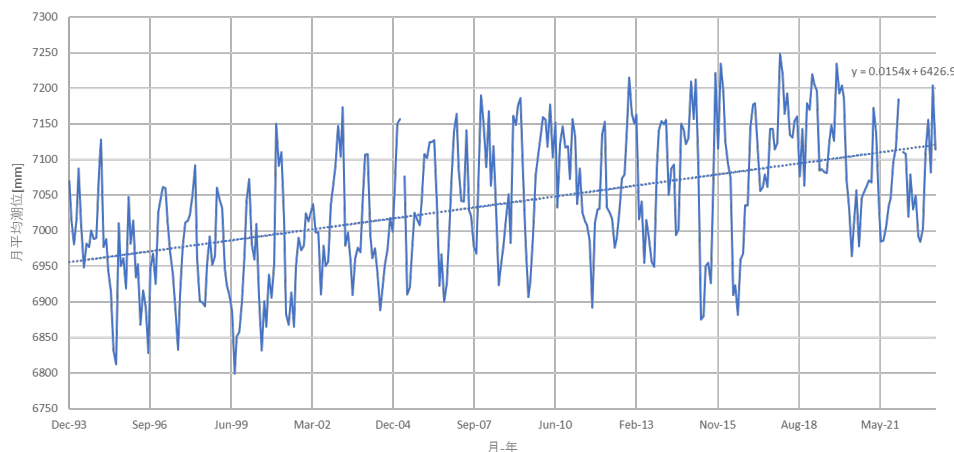
Port Louis ではリアルタイムの潮位データおよび 30 日後までの潮位予測や日の入り・日の出時刻が整理されている。図 30 に 2024 年 1 月 23 日での一例を示す。2024 年 1 月 23 日における満潮時潮位は 0.62m、干潮時潮位は 0.07m であった。一般的に、3 月、9 月に大きな潮位差が観測される。



出典：Tide-Forecast のデータを加工

図 30 Port Louis における潮位のリアルタイムデータ

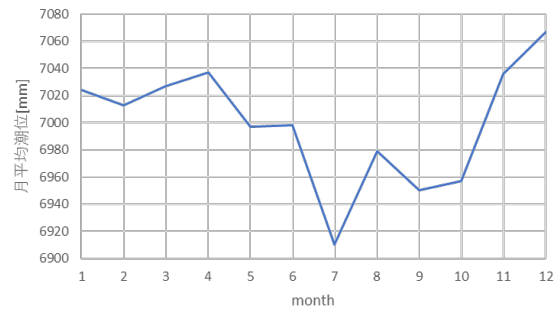
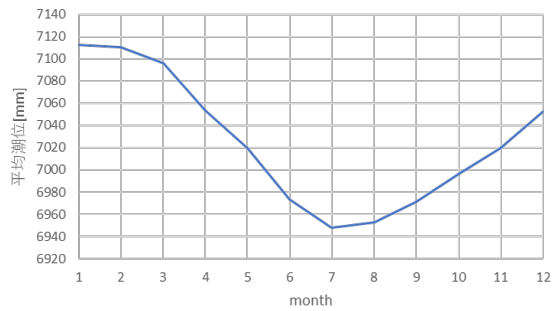
Port Louis では 1942 年～1965 年、及び 1986～2023 年において連続的に海面水位が観測されており、月および年平均の海面水位が整理されている。1993 年 12 月～2023 年 4 月分のデータの月平均値をプロットすると図 31 のようになり、これより「モ」国における海面は上昇傾向にあると言える。Port Louis における潮位は 3.9mm/年上昇しているという報告もある。海面上昇の傾向を踏まえると、「モ」国における設計潮位は前述の潮位よりもやや高い可能性がある。



出典：The Global Sea Level Observing System のデータを加工

図 31 Port Louis における海面水位変動

1986～2023 年の 38 年間の月平均海面水位をプロットした図及びサイクロン Dina が来襲した 2002 年の月平均海面水位を図 32 に示す。1～3 月の平均海面水位は高く、5～10 月は低い。この傾向は、サイクロンが来襲する年とほぼ一致する。

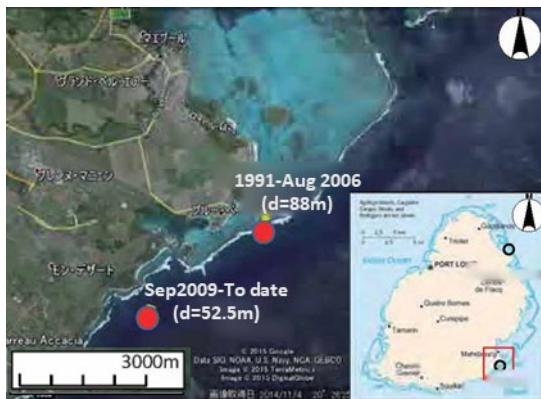


月平均潮位（1986～2023 年）2002 年（Dina 来襲）
出典：The Global Sea Level Observing System のデータを加工

図 32 Port Louis における年間の海面水位変化

(2) 波浪

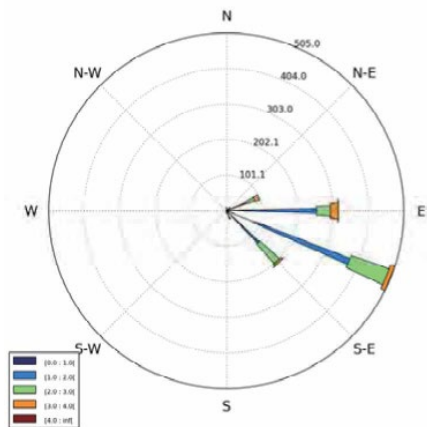
「モ」国では Blue bay にてモーリシャス気象局（MMS）が、また Roches Noires にてモーリシャス海洋研究所（MOI）が沖での波浪観測を行っている。観測位置を図 33 に示す。



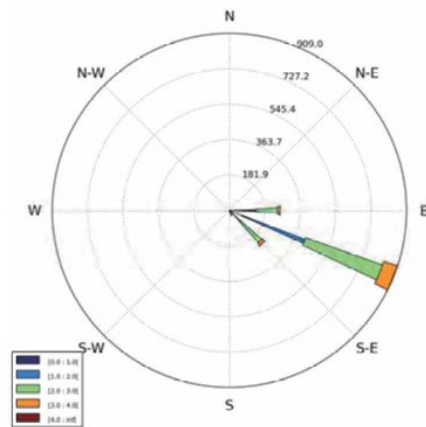
Blue Bay(MMS)Roches Noires(MOI)
出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015 年 6 月）
Original Source：Google Earth

図 33 波浪観測位置図

図 34 に Roches Noires 及び Blue bay における波高・波向の頻度分布（Wave roses）を示す。観測地点における波向は夏季及び冬季とも ESE が卓越する。冬季は 2～3m の波向の頻度が高いのに対して、夏季は 1～2m の頻度が高い。沖波の波高は、冬季は南東貿易風による波浪が卓越し、夏季はそれが弱くなるがサイクロンが来襲した際は波高が 4m 以上になることもある。

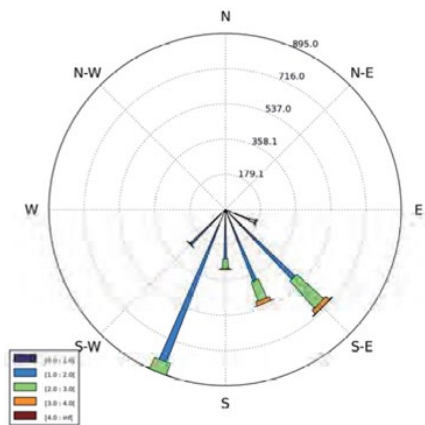


11～2月（夏季）

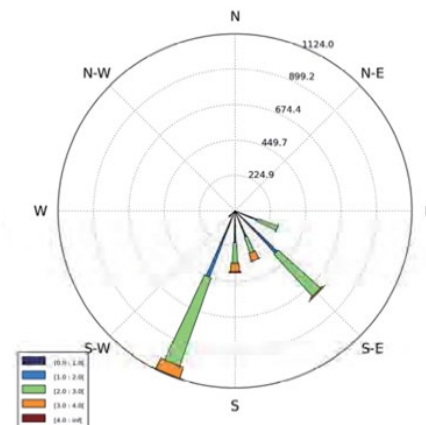


5～8月（冬季）

Roiches Noires



11～2月（夏季）



5～8月（冬季）

Blue Bay

出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015年6月）

図 34 Roiches Noires（MOI）および Blue Bay 観測地点における波高・波向の頻度分布

また、European Copernicus Marine Service（CMEMS）のオープンソースである全球海洋再解析データに基づいて、追加で長期沖合波浪ハインドキャストを行った。図 35 に示すモーリシャス島の沖合である東経 57.4 度、南緯 20.6 度の地点で 1993 年から 2022 年までの 30 年間のデータを抽出した。

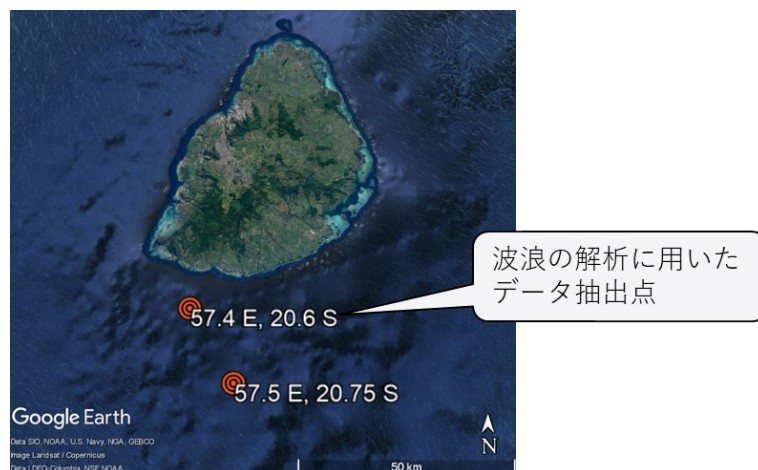
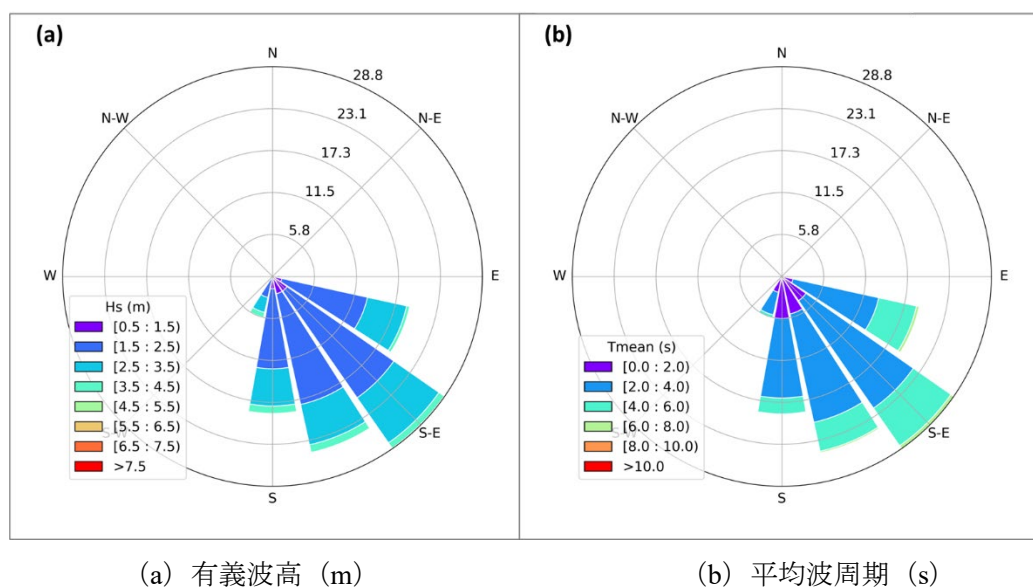


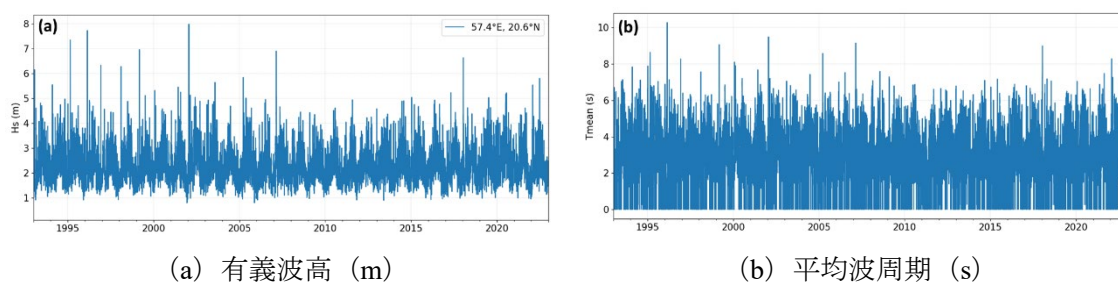
図 35 波浪解析データ抽出点

図 36 に、データ抽出点（水深約 1,500m）における 1993～2022 年の 30 年間の有義波高（Hs）と平均波周期（Tmean）の方向分布を、図 37 に、抽出地点における Hs と Tmean の時系列分析結果を示す。30 年間の Hs と Tmean の最大値はそれぞれ約 8m、10s であった。



出典：CMEMS Global Ocean Waves Reanalysis より作成

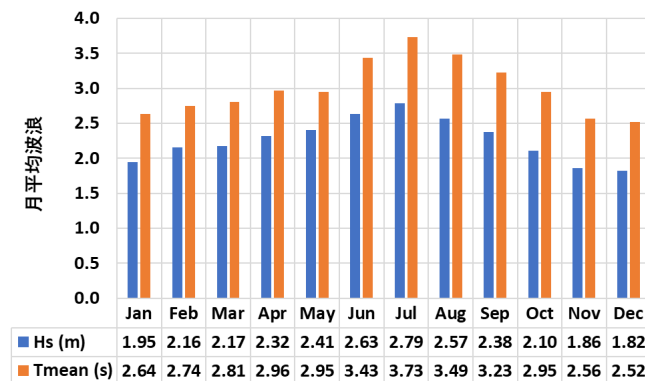
図 36 波の頻度分布（1993 年～2022 年）



出典：CMEMS Global Ocean Waves Reanalysis より作成

図 37 波の時系列分析結果（1993 年～2022 年）

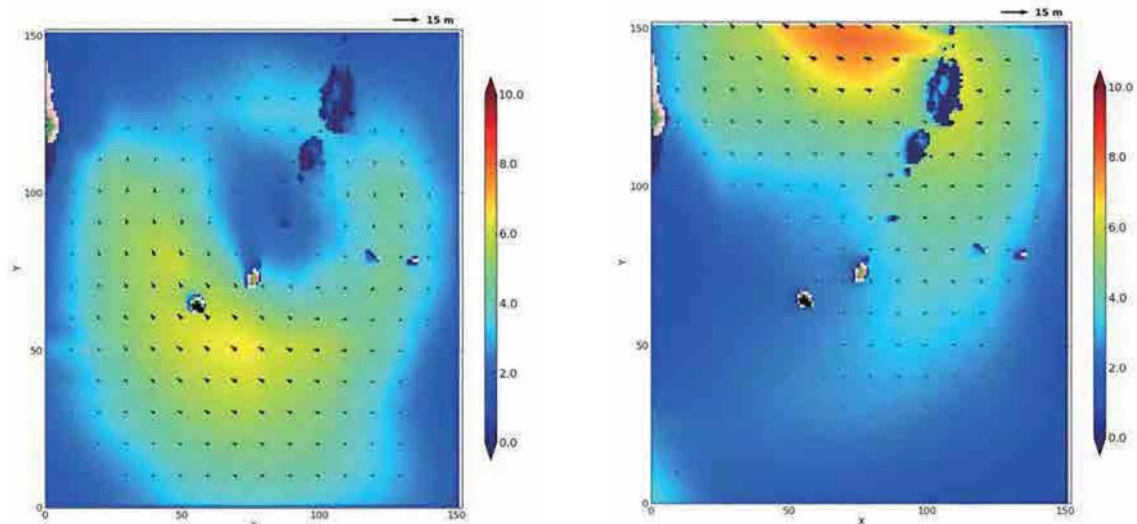
Hs と Tmean の月平均値を図 38 に示す。夏期（11 月～4 月）に比べ、冬期（6 月～9 月）の波高が著しく高いことがわかる。有義波高と平均波周期は 7 月に最大となり、Hs は 2.79m、Tmean は 3.73s であった。



出典：CMEMS Global Ocean Waves Reanalysis より作成

図 38 有義波高と平均波周期の月平均値（1993～2022 年）

また、図 39 に波浪推算による波高分布を示す。



サイクロン Dina 来襲時（2002/1/21） 冬季低気圧来襲時（2002/5/7）
出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015 年 6 月）

図 39 波浪推算による有義波高の分布

以上のことより、「モ」国における年間の波浪の特性は以下となる。

- 東西南北地点とも、5～9 月における有義波高は 2m を頻繁にこえる。特に南・東はその頻度は高く、南東貿易風の影響による波浪が卓越する地点となる。
- 10～4 月は比較的静穏な時期であり、有義波高は 1～1.5m 程度となる。特に北部の波高が他に比べて小さい。
- サイクロンや低気圧は 11～3 月頃に多く来襲する。この影響により大きな波が「モ」国全体に來襲する。サイクロンの経路によりその大きさは異なるが有義波高 5m 以上になると考えられる。

また、リーフ上の波の特性については以下の 3 つの波浪が挙げられる。

- 南から來襲するうねり（SSW～ESE 方向が卓越、有義波高は 2～3m）：冬季は「モ」国南部で強い風が吹くため、うねりが來襲することが考えられる。

- 貿易風による波浪（SSW～ESE 方向が卓越、有義波高は 2～4m）：冬場の南東貿易風の発達による波浪が沿岸で発生すると考えられる。
- サイクロンによる高波（サイクロンの経路に依存するが有義波高 4～10m 程度）：サイクロンは北から南に通過するケースが多く、時計回りの風速分布で発達する波浪により高波が発生する。4m を越える沖での波浪が観測されている。

(3) 潮流

図 40 に示す海図によれば、「モ」国対象地域の潮流は 2knot（およそ 1.02m/s）であることがわかる。

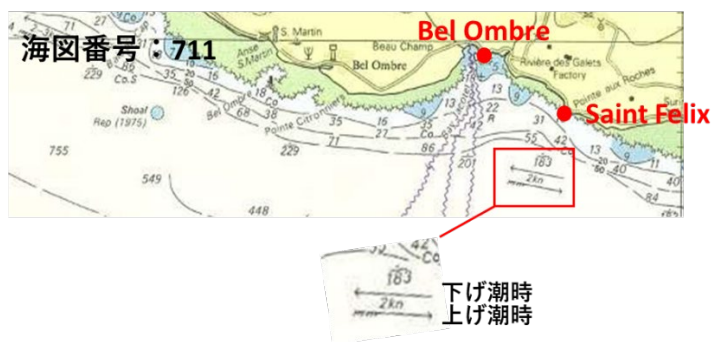


図 40 「モ」国南部の潮流

また、波浪と同様に European Copernicus Marine Service (CMEMS) のオープンソースの全球海洋再解析データに基づいて、長期潮流ハインドキャストを行った。データ抽出点は東経 57.5 度、南緯 20.75 度とし、表層流と深層流の性質の違いを解析するため、水深 0.5m と 950m の 2 地点でのデータを抽出した。

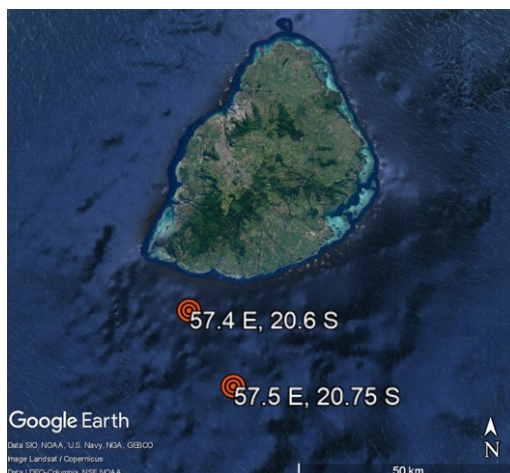
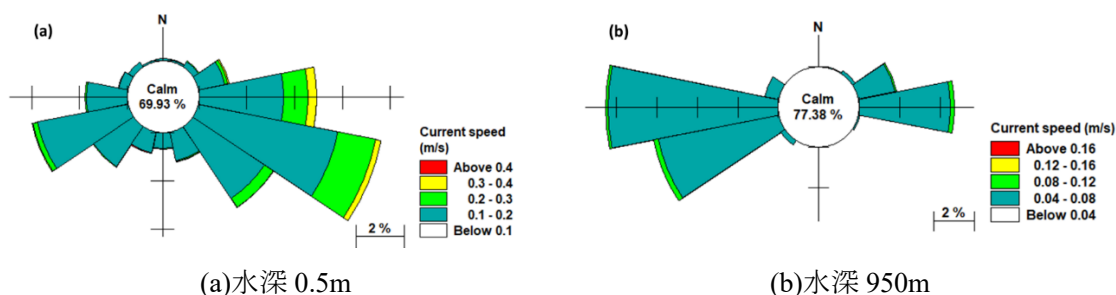


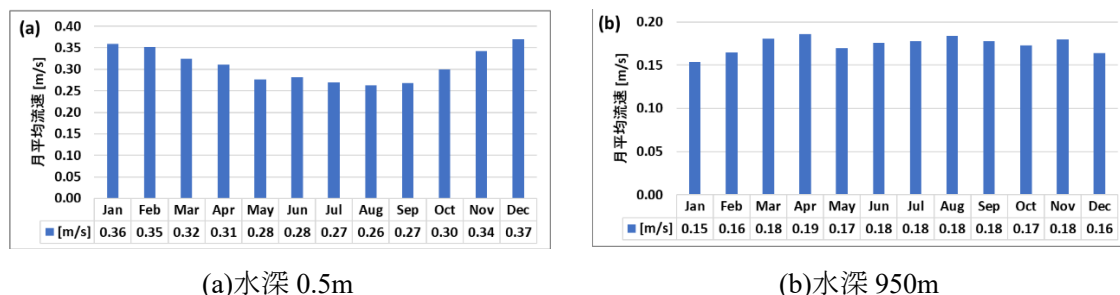
図 41 潮流解析データ抽出点



Source – CMEMS Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis

図 42 東経 57.5 度、南緯 20.75 度の沖合における流速・流向の頻度

一般に、表層流は深層流よりも流速が速い。30年間の表層流（水深 0.5m）の最大流速は約 0.8m/s、深層流（水深 950m）の最大流速は約 0.35m/s であった。図 42 にそれぞれ 2 地点での流向分布を示す。表層流は南東と東方向が卓越し、深層水流は東西方向が卓越していることがわかる。また、波浪とは対照的に、表層流は夏季（11 月～4 月）に強く、冬季（5 月～9 月）に弱いことがわかった。図 43 に 30 年間（1993～2022 年）の月平均流速を示す。表層流の場合、0.26m/s（9 月）～0.36m/s（12 月）であり、深層流の場合、月平均流速に有意な差はなく全月で 0.17m/s 程度であった。



(a)水深 0.5m

(b)水深 950m

Source – CMEMS Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis

図 43 東経 57.4 度、南緯 20.6 度における月平均流速

海図情報と比較し、沖合（東経 57.5 度、南緯 20.75 度）の方が潮流は約 0.9m/s 減速することがわかる。

(4) 環境条件

① モ国のサンゴ環境（出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015 年 6 月））

2012 年 6 月と 10 月、及び 2013 年 2 月に「モ」国周辺のサンゴ礁、50 カ所においてスポット・チェック法（以降 SC 法）によるサンゴ礁の現状調査が行われている。SC 法は日本の環境省の「モニタリング・サイト 1000」プロジェクトでサンゴ礁・サンゴ群集調査に採用されている方法である。50 地点のうち、6 地点は海草で覆われた海草藻場で、サンゴ分布域もしくはかつてのサンゴ分布域と思われた場所は 44 地点であった。調査時点での「モ」国のサンゴ礁は「不良」とされる。今回の対象地である Saint Felix と Bel Ombre の結果を表 26 に示す。

また、アルビオン水産研究所（Albion Fisheries Research Center : AFRC）の長期モニタリングによると、サンゴ礁の平均被度は 2000 年には平均で 51.4%であったが、2010 年にはわずか 19.2%に減少した。また、前述（2012 年 6 月&10 月、2013 年 2 月）の SC 法による被度調査結果では平均被度が 27.2%であった。これらの結果を総合的に判断すると、「モ」国のサンゴ礁は明らかに疲弊しつつあり、健全なサンゴ礁とはいいがたく、更に問題が深刻化することが予想される。

表 26 Saint Felix と Bel Ombre におけるサンゴ環境

Name of Beach	Types of bottoms	Depth(m)	Coverage (%)	Trans- parency(m)	Juvenile corals(/m ²)	Siltation
Saint Felix	Sand	1 – 2	30	5	0	middle
Bel Ombre	Seagrass	1 – 2	0	5	0	low

出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015 年 6 月）

② 「モ」国の環境法規制

「モ」国政府は、Environment Protection Act 2002³を發表し、自然環境保護と環境管理の計画をし、環境問題のための法的枠組みを定めている。この中から本事業に関連する内容を以下に示す。

- サンゴの破碎と加工を必要とする事業は予備環境報告書を必要とする
 - 砕石業、骨材、コンクリートブロック、プレキャストユニット、サンゴ砂、岩砂、玄武岩砂の製造または加工に従事する企業及び敷地に対して、環境保全料として月間売上高の 0.75%が徴収される
 - 以下に関して規則が設けられる可能性がある
 - (1) 河川、河口、パイプライン、流出口など、陸上からの海洋環境汚染の制御と防止
 - (2) 海域における海底活動および人工島、施設、構造物由来、またはそれらに関連して生じる海洋環境の汚染の管理および防止
 - ビーチ、ラグーン、サンゴ礁の再生と保護、管理を目的とする事業は財政支援が受けられる
- 上記から、ビーチやラグーンを掘削したり、埋立する行為は基本的に避けなければならないと理解できる。

(5) 地域開発計画

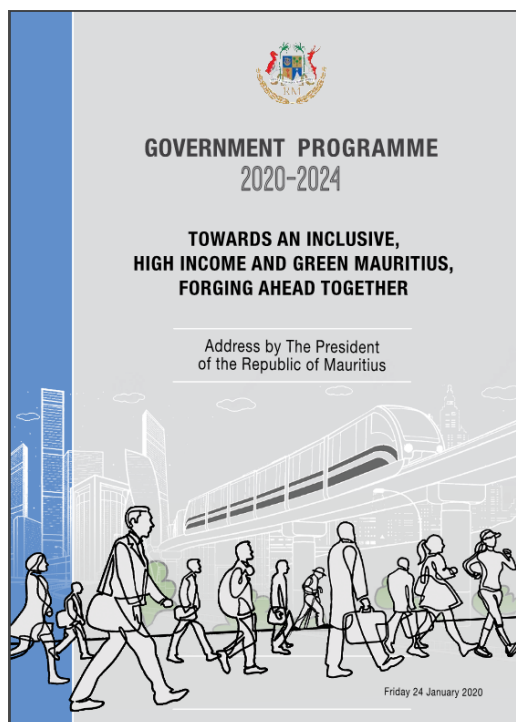
「モ」国は活発な熱帯低気圧の流域に位置し、災害や気候変動リスクにさらされている。「モ」国の気温と海水面は世界平均を上回るペースで上昇しており、海岸浸食やサンゴの白化も加速している。

「モ」国政府は、モーリシャス政府（GoM）の決意として、図 44 に示す Government Programme 2020-2024 を発行し、将来に向けて以下のようなビジョンを發表している。

- エンパワーメント、社会的包括性の強化、機会の平等を通じて国民を主要な資産として重視する国家
- 若者を含む国民の、より高い生活水準、より充実した機会、持続可能な開発に対する願望を満たす国家
- テクノロジーとイノベーションに牽引され、より高いレベルの成長、平等、繁栄を共有することにより高所得国の仲間入りをする経済
- モーリシャスにおける女性の人間的・社会的発展だけでなく、すべてのジェンダーの公平で適切な代表を確保するためにジェンダー平等が推進される社会
- 深く根付いた民主主義の価値と人権をはぐくむ国家

以上を踏まえ、「モ」国政府は包括的、高所得を達成し、かつ「グリーンモーリシャス」をターゲットとし国家計画を構想した。

³ [ENACTED by the Parliament of Mauritius]



TOWARDS AN INCLUSIVE,
HIGH INCOME AND GREEN MAURITIUS
FORGING AHEAD TOGETHER

表紙

CONTENTS	
Introduction	5
Inclusiveness at the Heart of the Nation	9
Education and Skills for the World of Tomorrow	13
Improving the Well-being and Quality of Life of Citizens	17
Building the Economy of the Future	21
Public Infrastructure for an Innovative Mauritius	27
A Peaceful, Safe and Secure Mauritius	33
A Sustainable and Green Society	37
Strengthening Democracy and Governance	43
Transformational Development of Rodrigues and the Outer Islands	47
Diplomacy and Foreign Policy	51
Conclusion	52

目次

出典：Government Programme 2020-2024

図 44 Government Programme 2020-2024

このうち、「イノベーティブ・モーリシャスのための公共インフラ」には以下の事業に投資する旨が記されている。

- 公共交通システムの近代化・電気バスの導入と地方バスターミナルの改修・タクシー免許保有者に対する財政支援・全国の道路網の近代化・高速道路のラウンドアアウトを廃止・フライオーバーとバイパスの増設・空港ターミナルにおける年間旅客数の拡大・港町と貨物村の開発・洪水の影響の最小化・適切な排水設備の整備・土地排水局の設立・水や電気への 24 時間のアクセス・最高裁判所への土地部の新設
- 港に関する事業
 1. Port Louis 港はヨーロッパ、アフリカ、アジアを結ぶ主要な輸送ロジスティクスとハブ港へと生まれ変わる。
 2. 港湾マスタープランの勧告に基づき、造船能力の向上、燃料補給施設と LNG 施設、魚の荷揚げと加工施設の開設
 3. 積み替え能力を向上させダウンタイムを低減するために防波堤とターミナル島の建設に投資する。港の効率と生産性を向上させるため、新しい貨物とスマートポートシステムの導入
- 水インフラの充実を重視することを明記し、水戦略は以下の点に重点を置くと記した。水部門には、関係ステークホルダーとの協議を経て、官民パートナーシップの可能性を模索し、最先端技術と近代的な管理・運営システムが適用される；
 1. 欠陥のある配水管をより早いペースで交換
 2. 新しいインフラ（ダム・貯水池の建設・拡張）を通じて貯水容量の増加
 3. 水供給源の保護を強化
- エネルギーに関する事業
 1. バイオマス政策を策定し、小規模プランターへのインセンティブを通じエネルギー生産を奨励する。新しい再生可能エネルギー技術の研究の促進
 2. 一般家庭、公共施設、中小企業、NGO、協同組合、小規模農家、ブリーダーによるソーラーパネルの設置の促進
 3. 化石エネルギーへの依存を減らし、固形廃棄物のリサイクルを奨励、持続可能な再生可能エネルギーを促進するため、廃棄物エネルギー化プロジェクトの実施を検討
 4. 電力に関する規制を実施するため、公益事業規制庁を支援し、公益事業規制庁の要求に対応できるように中央電力庁の統治構造と運営の見直し
 5. エネルギーの効率的利用を奨励する。LED 技術の利用を促進する国家プログラムを実施し、電気自動車の利用を奨励する枠組みを策定

「持続可能なグリーン社会」では、地球温暖化と気候変動が世界中に影響している中、国土の狭い島国であるモーリシャスが気候変動に対して脆弱であり、政府は環境的に持続可能な政策と責任をとることを記している。そのうえで、以下 4 つの柱に基づく新たな開発政策を記した。

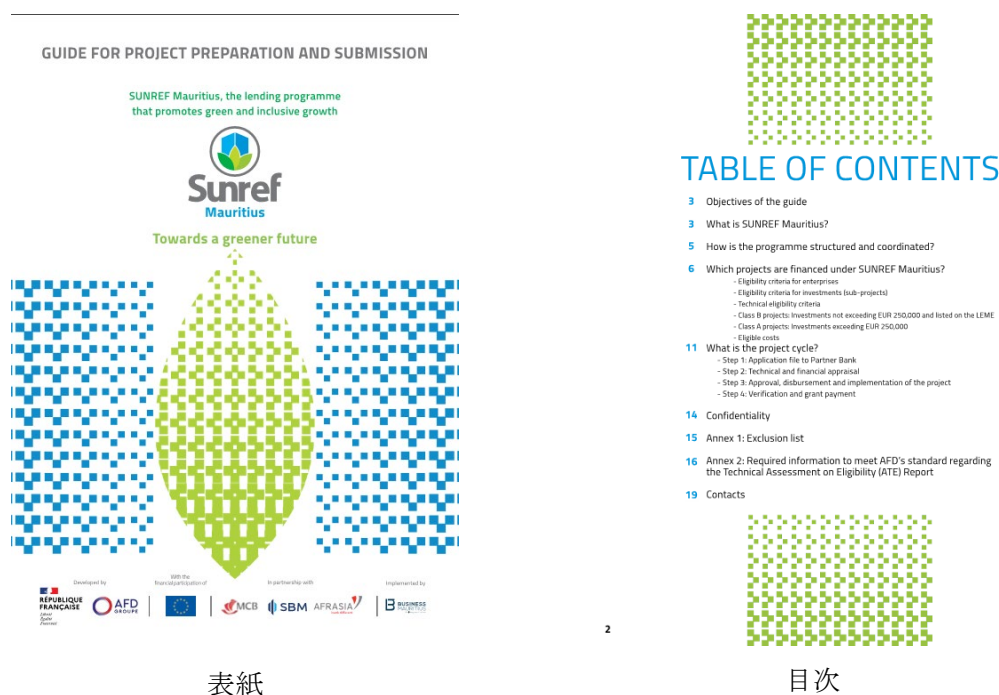
- クリーン・エネルギーへの投資
 1. 政府は、クリーンで再生可能なエネルギーの利用をより広範に推進し、再生可能エネルギー利用が 2025 年に 35%、2030 年に 40%を達成するために脱炭素エネルギー生成を引き続き奨励する。これらの目標を確実に達成するため、財政的インセンティブと予算措置を導入する。政府は、家庭、中小企業、協同組合、NGO、小規模農家、育種家の太陽光発電システムの設置をさらに促進する。電力を大量に消費する企業には、自給自足できるよう太陽光発電所を設置し、生産された余剰電力を保証料金で買い取る。また、政府は、液化天然ガスについて電力生産、国内輸送、家庭用および最終的な燃料補給目的での利用を奨励する。
- よりクリーンで緑豊かなモーリシャスへの転換
 1. 政府は、より清潔で環境に優しい国にするため新しい国家清掃・廃棄物管理プログラムを導入する。これには、計画的な廃棄物の収集、分別、処分による近代的で効率的な廃棄物管理メカニズムが含まれる。プラスチックの使用禁止と使い捨てプラスチック容器の使用を制限し、国家全体に適用する。可能な限り短期間でプラスチックのない国にするよう努める。また、医療・臨床廃棄物の集中焼却プロジェクトも実施し、有毒で有害な製品の管理を改善する。
- 気候変動によるリスクの軽減
 1. 気候変動による混乱を緩和し、将来を守るためのメカニズムを構築する。地球温暖化と気候変動から生じるリスクを特定し、緩和するためにハイレベルの省庁間協議会を設置し新しい気候変動法案を導入する。青少年の意思決定がプロセスに貢献する機会を与えるため、首相府の庇

護の下に全国青少年環境協議会が設立される。新たな 3 つの固有種の森の造成に加え、既存の森を修復しハイキングや自然散策に利用できるようにする。サイクロンや洪水などの自然災害から守るため、建築基準や公共インフラの改善など、環境に配慮した新たな対策を導入する。併せて処理施設の近代化を通じて、廃棄物管理を改善するための措置も講じる。

- 海洋資源の保護

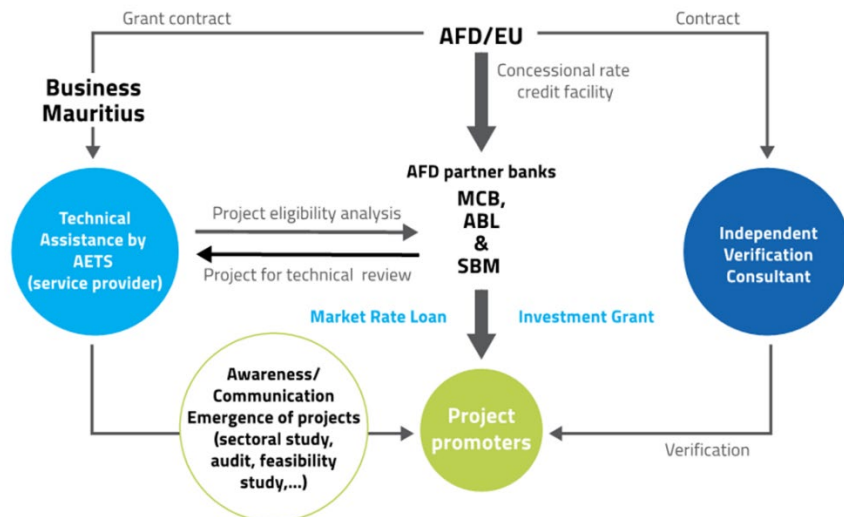
- ① 政府は、海洋資源や海岸を保護するための対策を実施する。国家統合管理計画を通じて海岸を回復させ、サンゴの植え付けや藻類の養殖を通じてラグーンの水中動植物を復活させる。海洋パーマカルチャーのような持続可能な活動のみが許可される海洋保護区を追加で設定し、宣言する。また、河川や湖沼の管理と保護を強化するため、河川湖沼管理法案を提出する。

また、「モ」国は地域開発計画の承認プロセスのガイドブックを発表しており、表紙と目次を図 45 に、承認プロセスを図 46 に示す。



出典：Guide for Project Preparation and Submission

図 45 Guide for Project Preparation and Submission



出典：Guide for Project Preparation and Submission

図 46 SUNREF 事業の承認プロセス

② Saint Felix の Smart City 計画

St. Felix 社は全 75 ページのマスタープランを策定しており、「持続可能性」を念頭に OTEC と海洋深層 水利用による補強と魅力化を方針として計画している。

③ Bel Ombre の開発計画

Rogers 社は Bel Ombre 地域において“AGRIA”というコンセプトを掲げ、再生可能エネルギーとスマート農業による地域づくりを目指している。

(6) インフラ施設

(1) 既存施設

(ア) 護岸（出典：JICA「モ国海岸保全・再生に関する能力向上レポート」（2015 年 6 月））

1960 年代から、小規模な護岸が海岸沿いに建設されるようになった。土地の防護を主眼としており、海岸構造物として設計されておらず、土地所有者によって建設されたものが大半を占める。以下に、「モ」国に建設されている海岸構造物の例として、護岸・突堤・蛇籠・巨石護岸を示す。

- 護岸

1960 年以降建設されている小規模構造物で、粗石材またはコンクリートで作られた直立構造物である。国内のいたるところにみられるが、概ね 2m 程度までの高さで構造物としては大きくなく、老朽化の進行や変形も散見される。図 47 に Riviere des Creoles の例を示す。



図 47 Riviere des Creoles の護岸

- 突堤

1960 年以降に建設されている小規模構造物で、図 48 に示すように Pte.d'Esny に建設されている。構造は練石積形式で、天端幅 1.5m 程度、高さは砂浜部で 3m 程度、他の部分は 1m 未満である。「モ」国の突堤のうち小規模なものは突堤としての役割ではなく、土地境界を明確にするために設置されているが、いくつかは突堤の役割を果たしている。



図 48 Pte.d'Esny の突堤

- 蛇籠

Hollanda (1994) の災害を復旧するにあたり、1996 年に導入されたのが蛇籠である。災害復旧や緊急を要する場所で採用され、侵食された海岸や護岸の復旧に一定の成果を上げた。図 49 に Saint Felix の蛇籠を示す。1994 年に来襲したサイクロンの後、95 年から 96 年にかけて建設された。高いところで 5m 程度の高さがある。



図 49 Saint Felix の蛇籠

- 巨石護岸

巨石護岸とは Dina (2002) の災害を復旧するにあたり、2003 年 Baird の提案により導入された、1 トンを超えるような大きさの石材を材料とする高さ数 m の傾斜型護岸である。近年も東海岸で多く建設されている。図 50 に Pte. aux Sables、図 51 に Grand Sable の巨石護岸を示す。Pte. aux Sables の巨石護岸は高さは 2m を超え砂浜を覆うように建設されており、比較的新しい構造物である。Grand Sable の南側の巨石護岸は、Pte. aux Sables よりも小規模で、天端に遊歩道が設置されている。

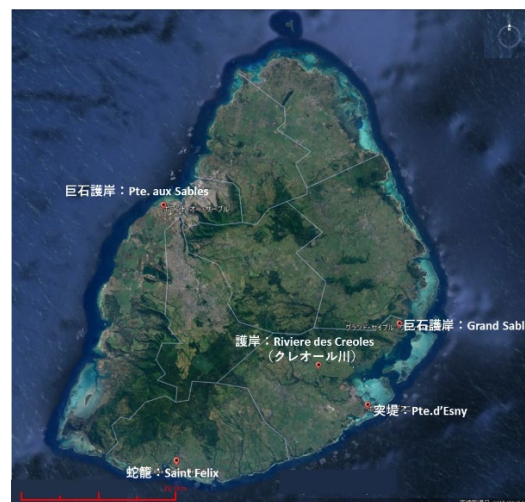


図 50 Pte. aux Sables の巨石護岸



図 51 Grand Sable の巨石護岸

ここまでの例に示した護岸の位置関係を図 52 に示す。南部海岸にある構造物は蛇籠のみであると言える。

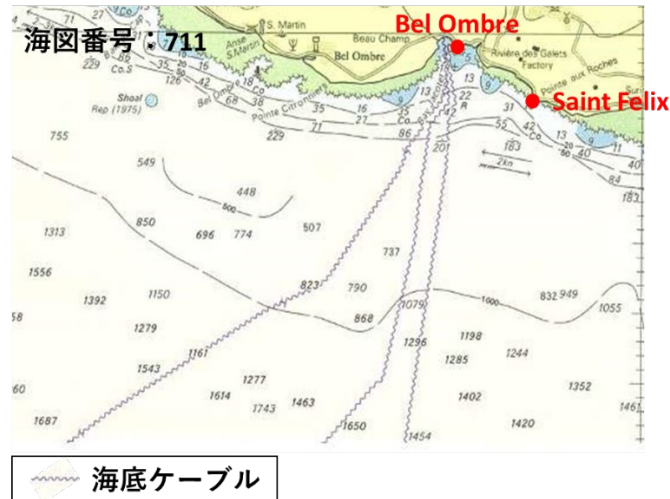


出典：Google Earth より作成

図 52 「モ」国護岸の位置関係

(イ) 海底ケーブル

図 53 の海図より、Bel Ombre の河口付近より通信ケーブルと思われる海底ケーブルが 3 本出ていることがわかる。海底ケーブルの付近で錨を下ろしたり、トロールをしたりしないように海図上にて注意喚起がされている。

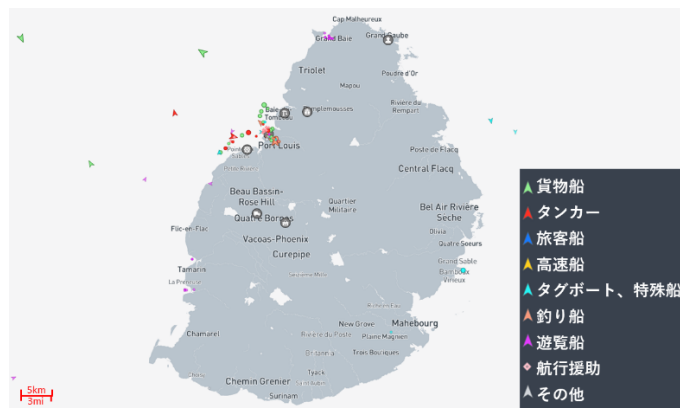


出典：海図より作成

図 53 海底ケーブル

(2) 航路・泊地

図 54 に、船舶の動向状況を配信しているサービス Marine traffic より作成した、「モ」国周辺の船舶航行状況を示す。主要港である Port Louis 周辺に商船と思われる船舶が停泊、係留している様子がわかる。また、深層水取水候補である「モ」国南岸沿岸は船舶航路や停泊位置になっていないことがうかがえる。



出典：Marine traffic より作成

図 54 「モ」国周辺の船舶航行状況

(7) OTEC 施設側の要件

OTEC 施設側の要件として、以下に取水条件、排水条件、陸上施設の候補地、及び OTEC 基本システム案をまとめる。

① 取水条件

表 27 取水条件

		Saint Felix 案	Bel Ombre 案
深層水	取水深度	-800m 以深、目標 -1,000m	-800m 以深、目標 -1,000m
	取水量	10,000 ton/hr (6.6°C) = 240,000 ton/day	7,500 ton/hr (6.6°C) = 180,000 ton/day

表層水	取水深度	-30m	-30m
	取水量	12,500 ton/hr (29.5℃) = 300,000 ton/day	10,500 ton/hr (29.5℃) = 252,000 ton/day

② 排水条件

表 28 排水条件

		Saint Felix 案	Bel Ombre 案
深層水	排水深度	海底条件による	海底条件による
	排水量	10,000 ton/hr (15.5℃) = 240,000 ton/day	6,240 ton/hr (12.6℃ OTEC より) = 150,000 ton/day 1,260 ton/hr (19.2℃ OTEC より) = 30,000 ton/day
表層水	排水深度	海底条件による	海底条件による
	排水量	12,500 ton/hr (26.2℃) = 300,000 ton/day	10,500 ton/hr (25.1℃) = 252,000 ton/day

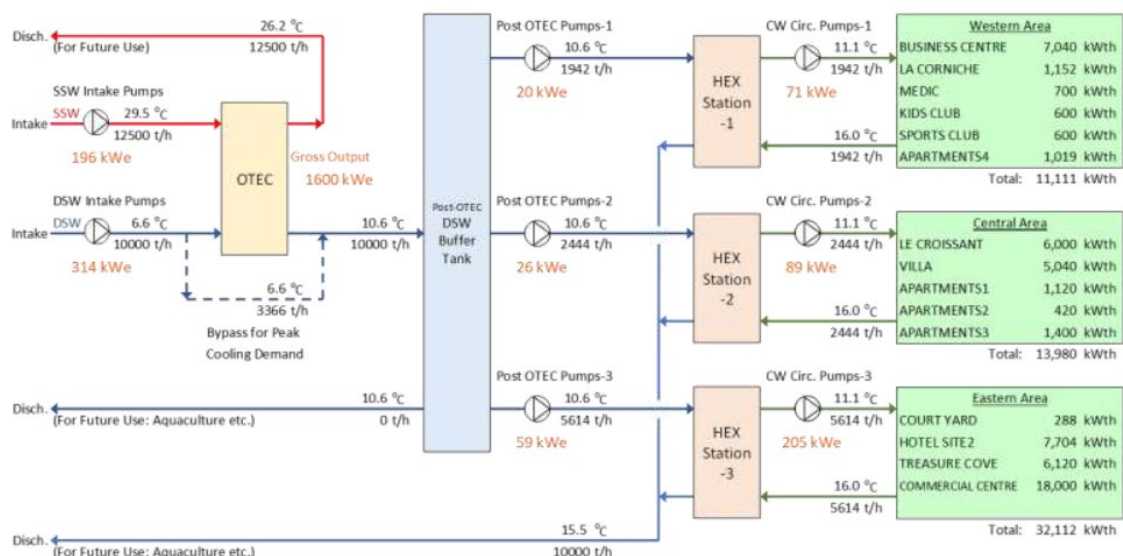
③ 陸上施設の候補地

Saint Felix 案、Bel Ombre 案とも、陸上の OTEC 施設あるいは水産・農業用施設の配置計画は未定であるが、候補地として以下のように初期検討がされている。



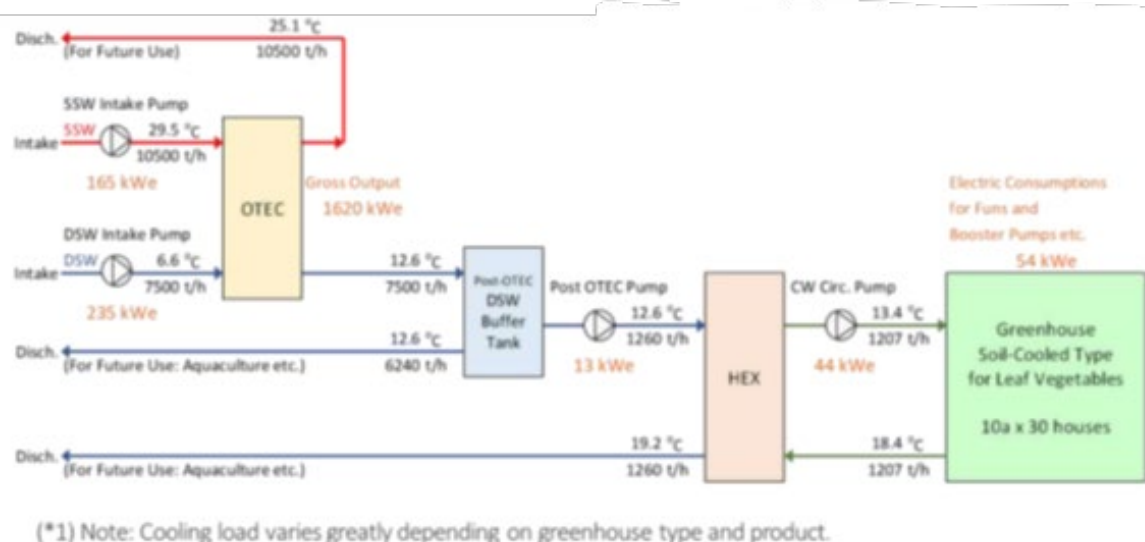
図 55 南部海岸における取水施設候補地案

④ OTEC 基本システム案



出典：海洋深層水利用学会佐渡大会資料（ゼネシス）

図 56 Saint Felix における OTEC 基本システム案



(*1) Note: Cooling load varies greatly depending on greenhouse type and product.

出典：海洋深層水利用学会佐渡大会資料（ゼネシス）

図 57 Bel Ombre における OTEC 基本システム案

(8) 与条件のまとめ

深層水・表層水の取水システムの概略検討に必要な地象・気象・海象条件、環境条件等に関し、公開されている情報や文献等からデスクトップ調査を行った結果を以下にまとめる。

- 施設予定地周辺の地形を正確に示す図面を得ることができず、Google Earth 画像に頼らざるを得なかったため、今後は「モ」国側より正確な地形図を入手することが求められる。同様に海底地形についても、海図及び公開データでは精度が粗く、正確な勾配や等深線を示すデータは得ることができず、今後より正確な取水管ルートを検討するためには、「モ」国側より深浅図を入手するか、深浅測量を実施することが好ましい。
- 予定地の地盤条件は、モーリシャスが火山活動で形成された島であることから、一般的には溶岩性の硬質地盤であることが容易に想定されるが、掘削の硬さの度合いや軟弱地盤の存在を把握するために、「モ」国側より既存のボーリングデータを入手するか、ボーリング調査を実施することが好ましい。

- 気象・海象条件やサンゴ礁の現況については、JICA による過去調査の報告書（一般公開）からほぼ概要が把握できた。波浪は JICA 報告書で細かく推算されているが、潮流速については十分とは言えず「モ」国側より情報を取得する必要がある。
- 環境条件として、施工時に沿岸部や海岸リーフを掘削したり、水流に濁りが発生する恐れがある。「モ」国として、サンゴ礁等への環境影響制約条件にどのようなものがあるかを具体的に把握することが求められるため、「モ」国側より具体的な情報を得る必要がある。
- 施設予定地を開発するためには、地域の開発計画と国家計画の整合性や、許認可の取得プロセス等について認知する必要があるが、机上調査では十分に把握することができなかった。そのため「モ」国側からヒアリングを通じて十分に情報を得ることが求められる。

2.4.2 2.4.1 の結果を踏まえた候補地における取水管ルート

取水管ルートの妥当性を検討するためには、まず取水ルートの起点となる陸上取水施設の候補位置を概略特定する必要がある。そのために自然条件、施設要件、施工要件などを踏まえた適地の選定を行う。

(1) 取水方式の検討

① 取水方式の分類

海洋深層水の取水方法は、大別すると洋上設置型と陸上設置型に分類される。海洋温度差発電を目的としたものは、1980 年頃フランスやアメリカでクローズドサイクル方式の実証施設が作られたが、近年はオープンサイクル方式に着目され、陸上設置型が主流となっている。陸上設置型には、以下のように A.ポンプ揚水方式と、B.自然流下方式がある。

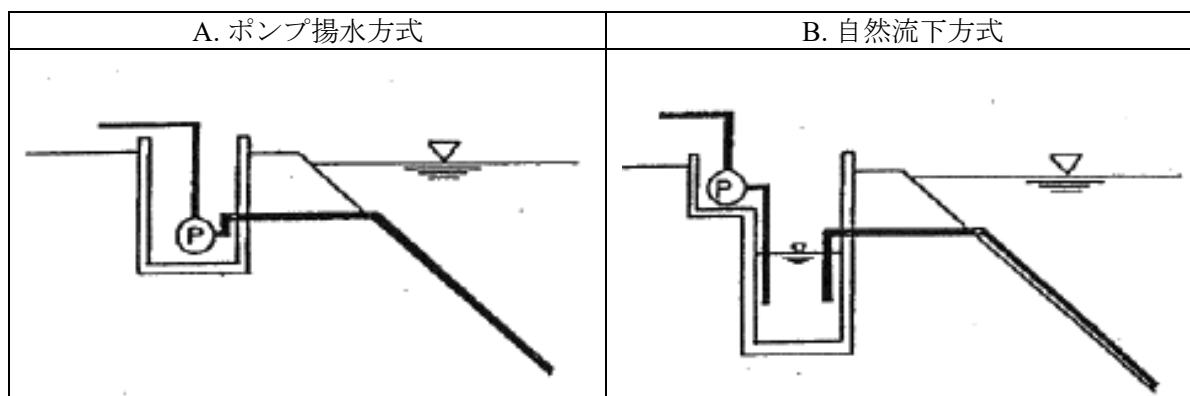


図 58 取水方式の分類

- **A ポンプ揚水方式**：基本的にサイホン原理を利用して海水を流下させるものであるが、取水管とポンプを直接つなぎ、管内に負圧を生じさせる（吸い上げる）ことで、取水効果を高めて揚水するシステムである。ポンプの助けを借りるため、取水ピットの深さを抑えることができ、ピットの規模は比較的小さくて済む。取水ピット内はドライである。ポンプに砂や魚等が混入した場合は予備ポンプで対処するため、ポンプは 2 台必要となりかつメンテナンスが欠かせない。取水した深層水は外気に触れずに直接的に配水側に送れるので、保温性や清浄性が高い。
- **B 自然流下方式**：潮位と取水ピット（着水槽）内の水位差によるサイホン原理を利用し、自然流下させるシステムである。この場合、所定の取水量を確保するために水位差を大きくとる必要があり、ピットの深さをある程度深くしなければならないことから、ピットの規模は大きくなる傾向がある。ただ大口径管の場合には、管路の損失水頭が小さくなるのでサイホン効果は上がり、一度流下すれば安定的に海水を取ることが可能である。砂や魚等が混入しても着水槽が沈砂池の役割を果たすので、槽の清掃は容易である。またポンプは取水管と切り離されているので、ポンプのメンテナンスも容易である。取水した深層水は一旦着水槽に溜めるため、取水温度がやや上昇したりエアが混入する可能性がある。

我が国の深層水取水施設では、全てがポンプ揚水方式であり技術的にも確立され（下図を参照）、関連マニュアルも整備されている。しかしながら、これらの施設で取水する深層水の量は、2,000～3,000ton/日程度、沖縄が 13,000ton/日と少量である。

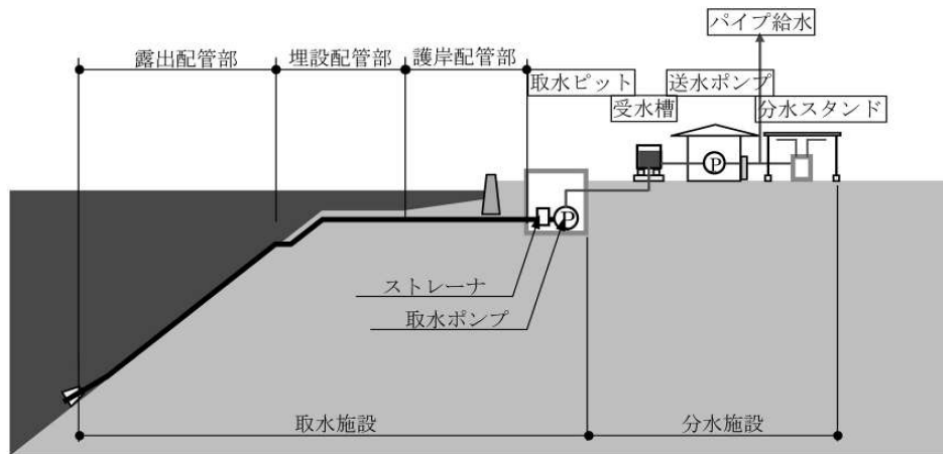


図 59 陸上型取水施設の概念図

② 海洋温度差発電における取水方式

海洋温度差発電においては日量が数十万 ton/日と桁違いに大きく、ポンプ揚水方式では深層水を汲み上げるためには高揚程取水ポンプが求められるが、現有ポンプの能力的に制限を受けることになる。加えて 1 条の取水管に複数台のポンプ（取水ポンプ 2 台、送水ポンプ）を設置することになり、性能低下が免れない。取水ピットを設けずに（サイホンを利用しないで）取水する場合、取水量が少量かつ大深度でなければ取水ポンプのみで汲み上げることは可能であるが、大量かつ大深度の場合は技術的には困難である。

従って大量取水においては、サイホン原理を利用して着水槽に流下させ、斜流ポンプや軸流ポンプ（低揚程となるが大量送水が可能）を用いて送るという自然流下方式が実用的である。ハワイ NELHA の 55”取水システム（日量 22 万 ton）では、ピット内に Canister という FRP 製の三角形のタワーを設置し、取水管と Canister のパイプを直接接続し、このパイプを着水槽と見立て、そこから三方に分流してポンプで取送水するという特殊な方法を採用していることが判明したが、基本は自然流下方式である。

上記の結果、モーリシャスで計画する海洋温度差発電に要する深層水及び表層水の取水方式は、取水ピット（着水槽）を用いた自然流下方式を採用する。そのためには、取水ピットを据付けることが可能な陸上の適地を選定しなければならない。

(2) 取水施設位置の検討

① 取水施設の陸上位置の選定条件

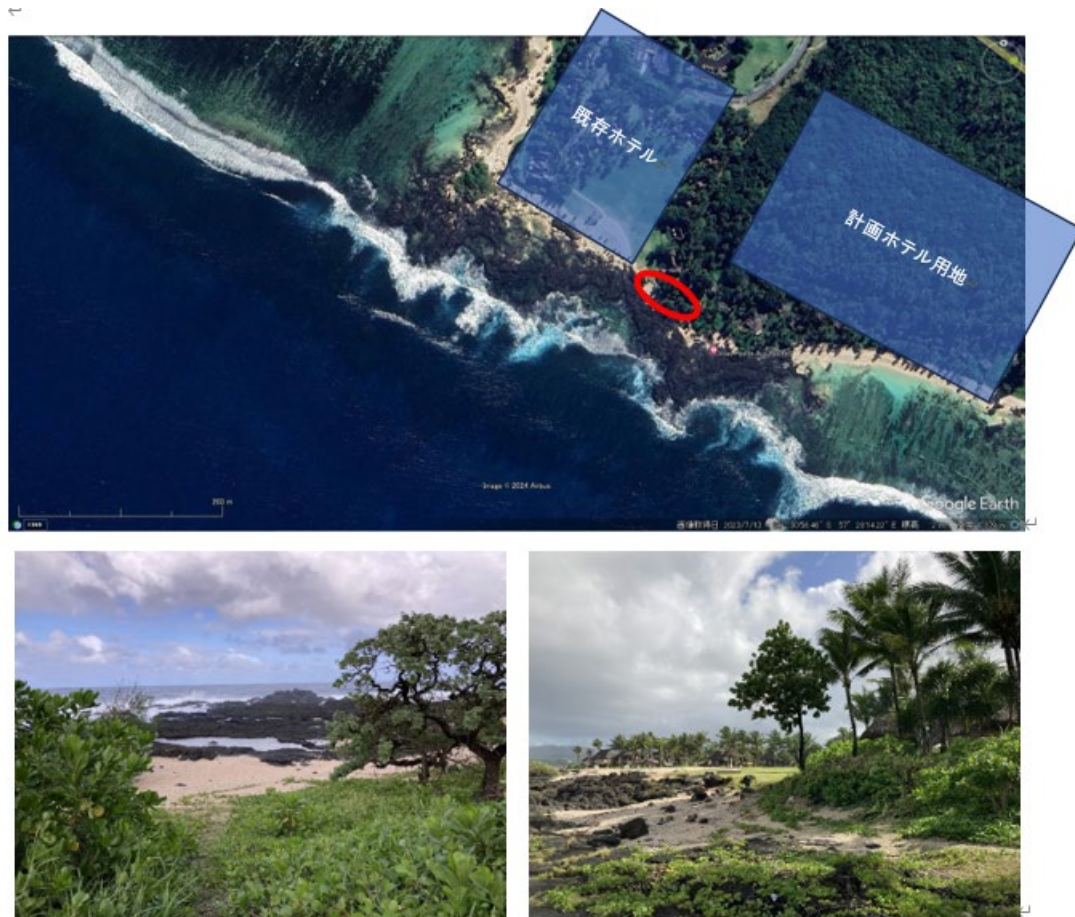
取水ルート起点となる陸上取水施設の位置を選定するに当たり、自然条件、環境条件、土地利用計画等の観点から諸条件を以下のように整理する。

- 深海（水深-800m 以深）までの距離ができる限り短いこと
- 陸上施設の候補地の地盤高さが高過ぎず（掘削して海水面まで達し易い）、低過ぎない（波の影響を受けない）こと、アクセス可能なこと
- サンゴ礁を乱さないこと、リーフの掘削・埋立て行為が伴わないこと、樹木の伐採が最小限に抑えられること
- 地域の土地利用計画に沿っていること
- 既存のインフラ施設（海底ケーブル等）と干渉しないこと、船舶の錨の影響を受けないこと

詳細な測量や地形図がないため、現状では Google Earth 画像や海図、過去に撮影された写真などを頼りに候補地を選定することになる。

② Saint Felix における取水施設位置候補

Saint Felix においては、以下画像からも明らかなように、海岸線の沖合にはリーフがあり、環境上の制約によりこれを掘削することはできないことから、リーフのない岩礁部に着目した。岩礁部であれば海に近い所に取水施設の位置を求められるので、取水ルート選定上も有利となる。またその陸側は Saint Felix のマスタープランが展開されている所であり、既存ホテルや将来計画の用地と干渉せずに陸上取水施設の建設用地を求めることが可能と考える。上記により、下図に示す位置を取水ピット（着水槽）の候補地案とする。



出典：写真は商船三井撮影

図 60 Saint Felix における取水施設候補地案

③ Bel Ombre における取水施設位置候補

Bel Ombre においては、以下の画像からも明らかなように、小さな湾の中央に三角形の礫礁の岬とその左右に小さな窪みがある。西側の山側には Rogers 社による農業開発計画があり、以下に示した湾はその開発エリアの最東端に位置する。湾の東側にも西側にも幅広いリーフや砂浜が伸びているが、湾内の左右の窪みにはリーフはない。左側の窪みには海図に示されているように、海底ケーブルが埋設されている。一方、右側の窪みにはガレ川の河口があり、河口を遠回りするように道路が通っているが、道路の海側は未開発で、陸上取水施設の建設用地を求めることが可能と考える。上記により、下図に示す位置を取水ピット（着水槽）の候補地案とする。



出典：写真は商船三井撮影

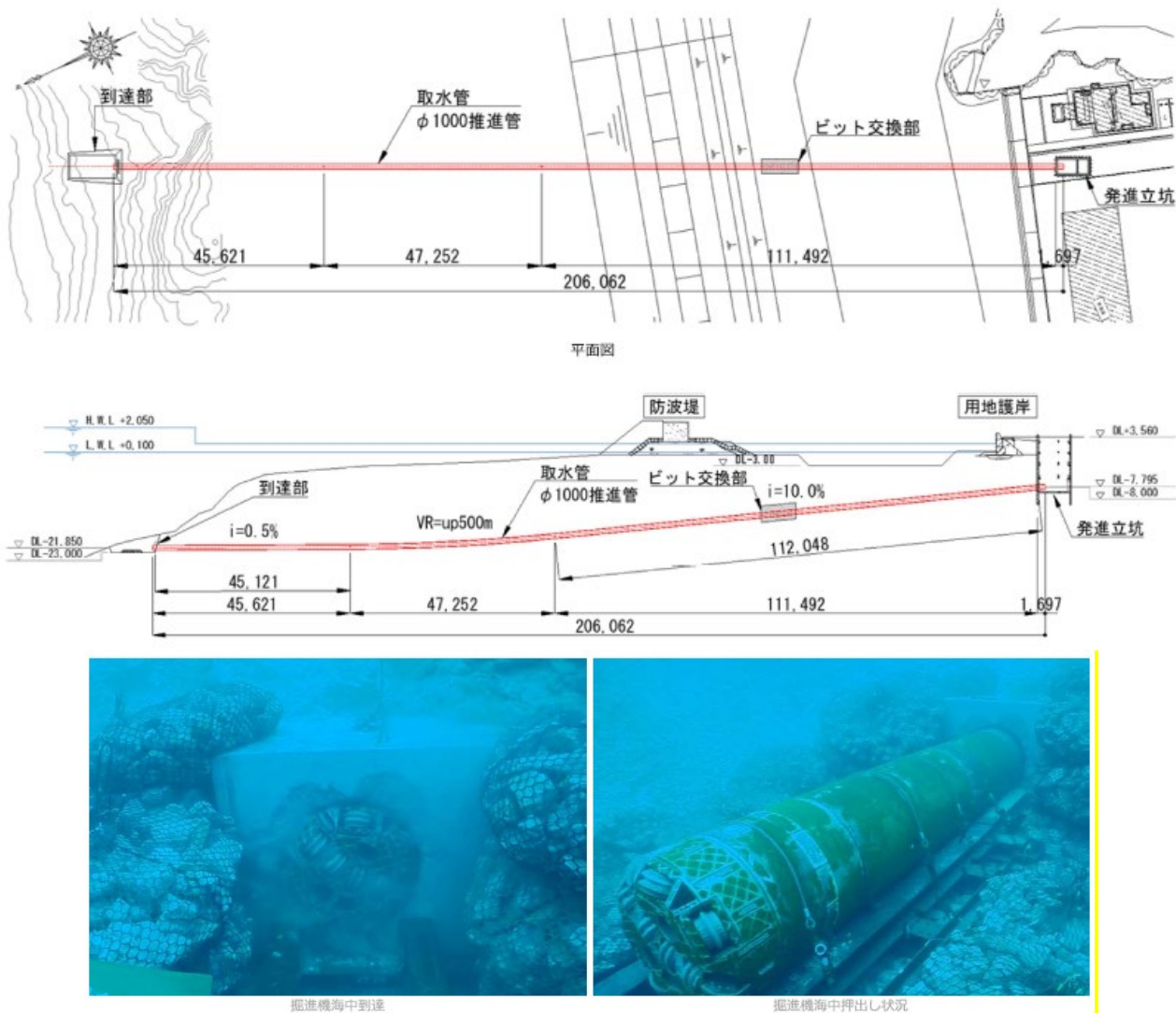
図 61 Bel Ombre における取水施設候補地案

(3) 推進工法の必要性

深層水を取水するためには取水ピット（着水槽）が必要であることは、前述で解説した通りである。取水ピットは海岸淵の陸上に深く掘削して構築するもので、現地盤から 10m～12m の深さまで掘削することになる。一方、沖から到達する取水管は海面下にあり、取水ピットとの接続は当然ながら海面下となる。取水管の深度が浅ければ、陸を開削して（切り開いて）管を設置したあと、埋め戻すという方法が採れるが、深さ的にも環境的にも開削することは避けるべきである。

その場合、リーフや海浜、陸上の護岸等の既存施設を撤去せずに地下にトンネルを掘る方法、即ち「推進工法」が採用される。同工法はアルティメット工法協会により、技術の普及等が行なわれている。沖縄県久米島や高知県室戸の深層水施設でも採用されており、一般的である。ハワイの NELHA では Micro Tunnel と呼ばれ、同様の工法が採用されている。

推進工法の一例（比較的太い径）として、沖縄科学技術大学院大学臨海実験施設で行った工事を以下に掲載する。同工法では海底向けには最大径 3,000mm、延長 1km にも対応可能である。



出典：アルティメット推進工法の Web サイト

図 62 沖縄県でのアルティメット推進工法の事例

以上のように、推進工法は日本でも実績が多く確立された工法であること、NELHA でも採用されており、かつ今回検討対象の Saint Felix の候補地は地形的、土質条件的にも NELHA に類似していることから、同候補地ではこの工法を採用することを前提とする。なお Bel Ombre の候補地については、推進工法が必要かどうかを判断するには現地踏査が必要であるが、浅海部ではトレンチ埋設工法が概ね可能との前提とする。

2.4.3 2.4.1 の結果を踏まえた海洋深層水・表層水の取水口地点の選定

取水口地点は、取水管の敷設ルート of 海底の最先端であり、起点となる陸上取水施設の位置から海底の取水口までを結ぶルートを決めることで選定される。そのために自然条件、土地利用、環境、施工方法等の諸制約条件を踏まえて、最適ルートの選定を行う。

(2) 取水管敷設ルートの選定条件

取水管の敷設ルートを選定するためには、自然条件（主に海底形状）を踏まえ、諸条件を以下のよう整理する。

- 深層水の取水口（水深-800m 以深）までの距離、管長ができる限り短いこと
- 表層水の取水口（水深-30m）までの距離ができる限り短いこと（実際には深層水管と並行することになる）

- 陸上取水施設から取水口まで（海に向かって）一貫して水平もしくは片勾配であること（途中に山ができるとうエア溜りが生じ取水効果の低下を招くため）
- 深層水管と表層水管が交差しないこと
- 急激な窪地や膨らみを避けること、巨石に乗らないこと、また尾根の上にのらないこと（現時点では情報不足なため考慮は難しい）
- 大口径管を使用するためできるだけ直線ルートとすること（若干のカーブは可能だが管の特性に合った曲率であること）、とりわけ敷設の最終工程では、深海部に管のカテナリー長（海底と敷設船の間の管の曲線形状）が長くなるため、約 1500m 程度の直線確保すること
- 計画海域は波浪と潮流の影響を受けるので、取水管の安定上と敷設工事上、できれば真横から影響を受けないように配慮すること
- 敷設工事に適した海域が静穏な時期を選定すること

(2) 取水管の敷設ルートの検討

① Saint Felix における取水管ルート案

海図に表記ある Pointe aux Roches を取水施設の陸上ポイントとし、そこから深層水の取水口（深度-1,000m、深度-800m）及び、表層水（深度-30m）までのルートを下図のように想定した。海図では詳細な等深線が表示されていないので、海底の凸凹や窪み・尾根などが把握できないため、海底勾配はほぼ一定と仮定した。



図 63 Saint Felix における取水管ルート案

下表に深層水（水深-1,000m、-800m）及び表層水（水深-30m）それぞれの水平距離と管長の概算値を示す。管長は海底に沿った長さ（即ち設計長）であるが、測量誤差によるロス、敷設時の位置精度（蛇行）によるロスも考慮する必要があるため、深層水管に対しては一定の余裕を見込む必要がある（即ち製作長）。ロス率は過去の敷設事例をもとにした経験値として、3%と仮定する。

表 29 Saint Felix における取水管の延長概算

	水平距離 (km)	管長 (km)
深層水 -1,000m ■	5.75	6.01
深層水 -800m ■	4.75	4.96
表層水 -30m ■	0.50	0.50

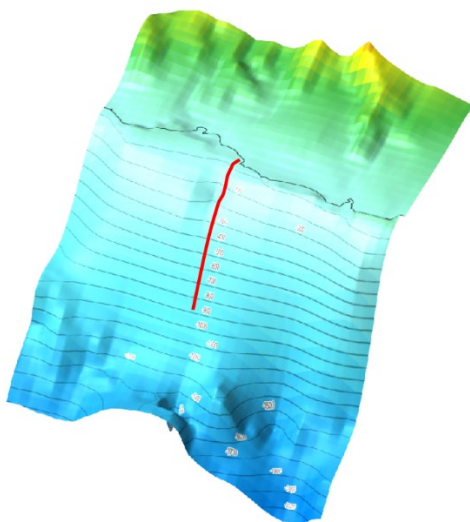


図 64 Saint Felix における取水管ルート案 (3D 図)

② Bel Ombre における取水管ルート案

海図に表記のある Riviere des Galets の河口付近を取水施設の陸上ポイントとし、そこから深層水の取水口（深度-1,000m、深度-800m）及び、表層水（深度-30m）までのルートを下図のように想定した。海底の凸凹や窪み・尾根などは不詳なため、海底勾配はほぼ一定と仮定した。



図 65 Bel Ombre における取水管ルート案

下表に深層水（水深-1,000m、-800m）及び表層水（水深-30m）それぞれの水平距離と管長の概算結果を示す。管長はネット長さに加え、測量誤差、施工誤差によるロスとして+3%を見込んだ。

表 30 Bel Ombre における取水管の延長概算

	水平距離 (km)	管長 (km)
深層水 -1,000m 	6.63	6.91
深層水 -800m 	5.69	5.92
表層水 -30m 	1.25	1.25

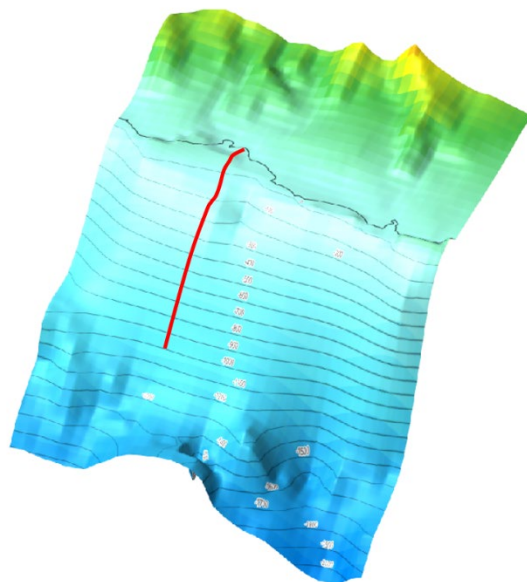


図 66 Bel Ombre における取水管ルート案 (3D 図)

(3) 取水管材料の選定

① 取水管の種類

取水管の材料として一般的に使われるものとしては、以下のものがあり、それぞれの特徴を示す。

- FRP 管：金属並みの強度を持ちながら軽量で、錆びず腐りにくく耐用年数は長い。可撓性がなく曲がりにくい。加工がしやすいことから、車のパーツ、公園の遊具、立体看板などに使われるほか、港湾用の鋼管の防食カバーにも使われる。その製作には手作業が多く手間がかかるため、大量生産には向かない。プラスチックと繊維でできている素材なため、分解処分するには環境に優しくないともいわれる。小口径から大口径にも対応する。
- 塩化ビニール管：強度、耐食性、経済性に優れた配管材料であり、さらに配合技術を駆使し、耐衝撃性や耐熱性といった機能を付加することにより、給排水、上下水道、農業および電力・通信等の幅広い分野で活用されている。最大の特徴は「可塑剤」という薬品を添加することによって、樹脂の硬さを自由に変えられることである。衝撃強度が低く、とくに低温の時は壊れやすいという弱点がある。大口径には向かない。
- ポリエチレン管：軽量で加工が容易であることと、可撓性に優れ屈曲にも追随し、施工性が非常に高いことから、用途は多岐で災害復旧にも多くの実績がある。強靱で耐衝撃に強く、耐震性、耐久性、耐寒性、耐薬品性に強く、どんな用途で使っても腐食しにくい素材である。パイプ管の成分が溶け出して管内部や外の環境を汚染することがないので、健康やエコに配慮する必要のある用途にも最適である。屋外に露出配管された場合、日光（紫外線）により引張伸びが低下・劣化する。小口径から大口径にも対応する。

近年では海洋深層水の取水管としての使用が主流となっており、敷設場所の条件に応じて、鉄線鎧装 PE 管、鋼帯鎧装 PE 管、アラミド繊維補強 PE 管が開発されていて、特に鉄線鎧装 PE 管は日本の深層水取水管として多くの実績がある。ただ鎧装管は製作に高度な技術が必要で、口径 300mm 前後までしか対応できないのが実情である。

- 鋼管：最も強度の高い材質で溶接性にも優れており、様々な分野で使われている。海洋では錆やすいため、鋼管を使った取水ではポリエチレンライニング、エポキシライニング等の防食被覆を施す

のが一般的である。重量が重く取り扱いには重機が必要で、海底管としては油、ガスなどに使われる。可撓性がないため強い曲げ力を受けると破壊することから、曲線配管がしにくい（曲げ管を溶接することになる）。

② 大口径取水管

海洋深層水の取水管の材質としては、上記の内ポリエチレン管を採用する。ポリエチレン管には低密度／中密度／高密度ポリエチレン管があるが、より高分子量を含育し良好な機械的性能を有する高密度ポリエチレン管（High-Density Polyethylene Pipe: HDPE 管）を採用するものとする。ポリエチレンの比重は 0.94～0.96 と軽く海水に浮いてしまうため、管の外周を鉄材またはコンクリートで巻いて補強し、同時にアンカー重量の役目を持たせることが必要である。小口径であれば鉄線鎧装という方法が可能であるが、大口径の場合にはそれができないため、ハワイ NELHA の事例を参考に、コンクリートブロック巻きにすることとする。



出典：NELHA Annual Report 2002

図 67 ハワイ NELHA で使用した HDPE 管 （実測 外径 140cm 厚さ 8cm）

③ 取水口の形状

日本の事例では、深層水と表層水の取水口は鋼材でラッパ形状またはピラミッド形状を組み、その中に取水口を上向きに固定し、沈設している。上向きにするのは、海底砂などの不純物をできるだけ吸い込まないようにするためである。

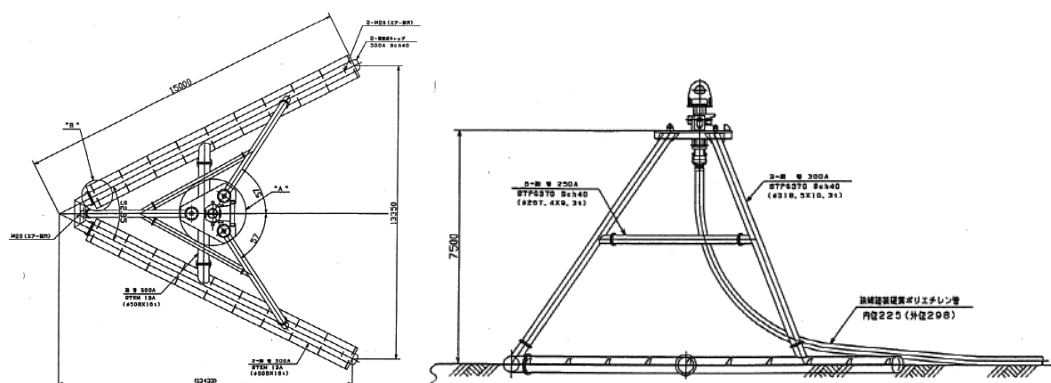


図 68 取水口の事例-1（駿河湾深層水：管径 225mm）

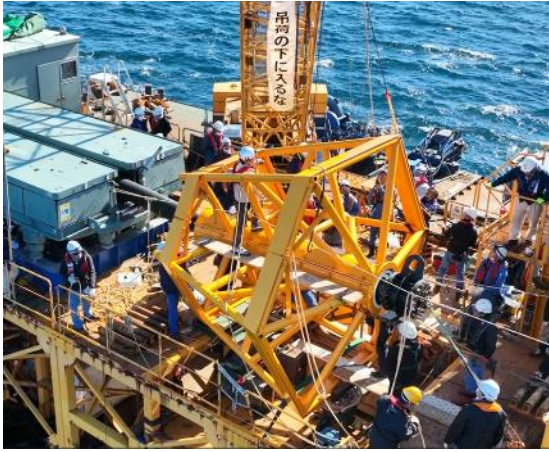


図 69 取水口の事例-2（富山県入善深層水：管径 250mm）

大口径の場合は管の剛性が大きいので、予め工場で製作時に曲げておく必要があるため、取水口の形状は NELHA 事例を参考にし、以下写真のような形状で計画することが妥当である。取水口の最終沈設位置の海底は勾配が険しくないこと、なだらかな海底面であることが望ましく、詳細な深浅測量や ROV 調査などから決定することになる。



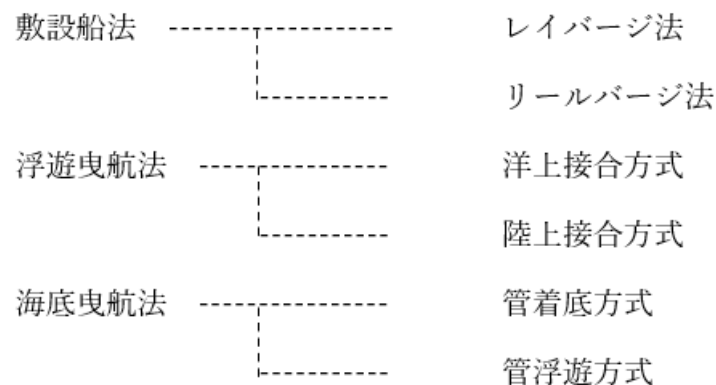
出典：NELHA Annual Report 2002

図 70 取水口の事例（ハワイ NEHLA）

(1) 取水管の敷設工法

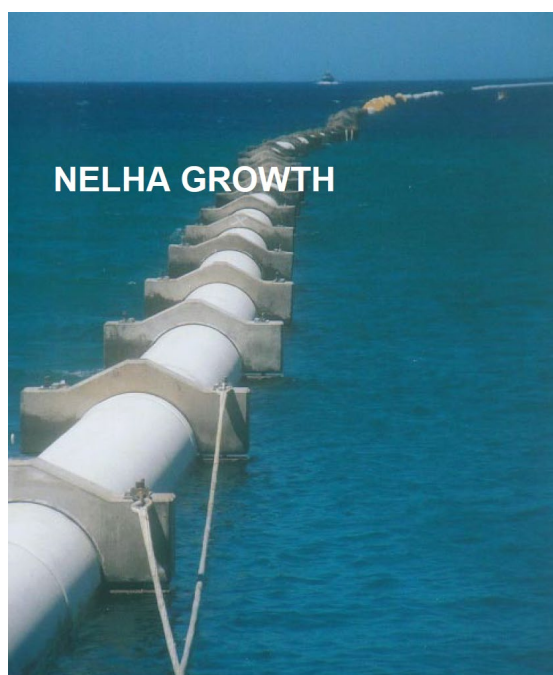
① 各種工法

海洋深層水の取水管の敷設工法には、敷設機構、使用船舶・機械などの違いから、以下のように分類される。



- レイバージ法とは、船上で短管を一本ずつ接続し、その都度敷設船の位置を移動することで、管の送り出しと沈設を同時に行って敷設していく方法である。敷設船の移動は、係留アンカーを用いる場合と曳舟を用いる場合の二通りがある。油、ガスなどに用いられるが、大水深場所では敷設精度がかなり悪くなる。
- リールバージ法とは、工場で所要延長分の管をリール状に巻いて艀装した敷設船を敷設場所まで曳航した後、レイバージ法と同じ要領で敷設船を移動し、リール状の管を巻き出しながら敷設していく方法である。沖縄県、高知県、富山県など我が国の深層水事例の多くに採用されていて、我が国の実績では最も多く、短期間で敷設でき精度も高い。ただ管径は 300mm 前後と細いものを使っていて、大口径には向かない（リールに巻き取れない）。
- 浮遊曳航法とは、陸上または洋上で長管を接続し、フロートを取付けて所要長分を海上に引き出した後、敷設位置を調整してフロートを切り離して沈設する方法である。ハワイの NELHA でもこの方法を使っているが、フロートは使わずに管内に空気を溜めてその浮力で浮かすやり方を取っている。
- 海底曳航法とは、陸上のパイプヤードで長管を接続し、これを沖合に配置したウィンチ台船または曳舟により、海底面上に沿って管を引きずりながら沖合に伸ばしていく方法である。大口径にも対応し、油やガスなどで鋼管を用いる場合が多い。ただ海底を引きずることから、ポリエチレン管は損傷を受けやすくリスクが大きい。

参考までに NELHA の浮遊曳航法の写真を以下に示す。



出典：NELHA Annual Report 2002

図 71 浮遊曳航法による NELHA の 55”HDPE 取水管の敷設

上記の中から、当検討における大口径の取水管敷設に適するのは浮遊曳航法であり、同工法の手法や特徴等を以下に示す。

② 浮遊曳航法の概要

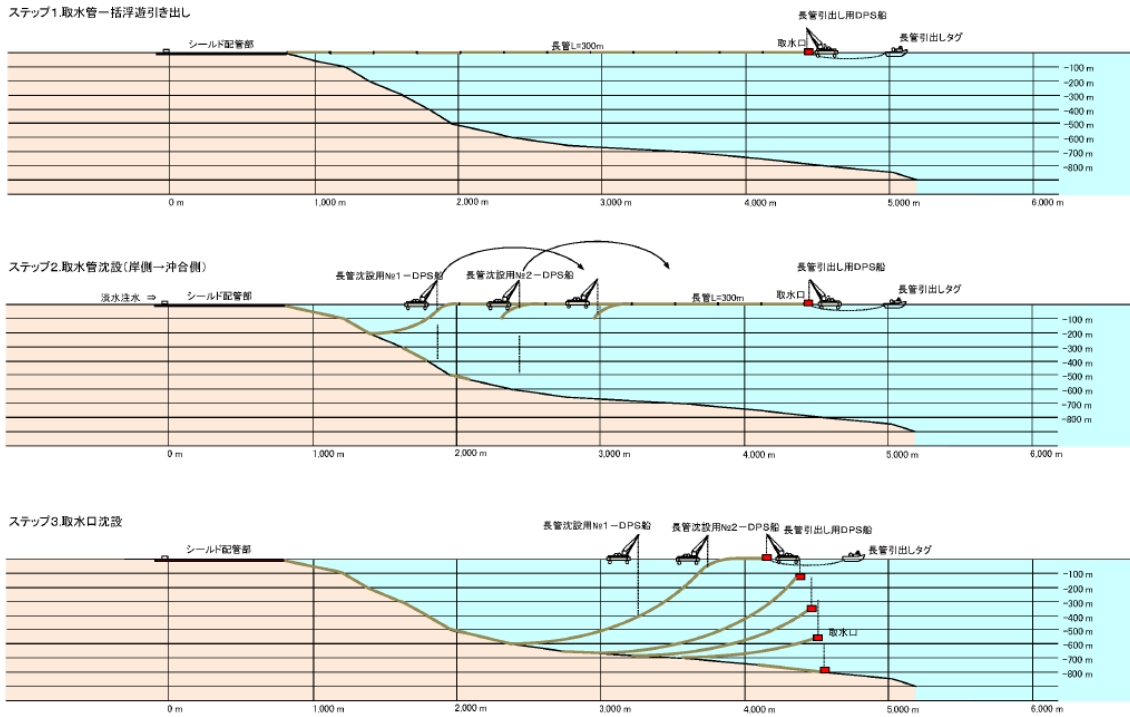


図 72 浮遊曳航法の概要

取水管は工場では短管（約 20m）で製作し、陸上ヤードに持ち込み、長管（約 300m）に溶着接続する。長管は海上に浮かせて引き出し、陸上ヤード水際で次の長管とボルト接続する。これを繰り返して一本の取水管を沖合に浮かせる。管の浮遊は、小口径管の場合は仮のフロートを取付ける方法が一般的だが、大口径管の場合は管内の空気を溜めその浮力で浮かす方法があり、NELHA で取られた方法である。取水管が所定の位置に安定すると、管に海水を注入し徐々に沈設させていき、最後は取水口を海底に着底させ、一連の敷設工程が完了となる。

当検討においても、NELHA の実績を踏まえ、この浮遊曳航法を前提として計画するのが良い。

2.4.4 取水システムの妥当性の検証

本章では、前章で検討した取水の起点となる陸上取水施設の候補位置、海底の敷設ルート、海底の取水口位置の一連を総合し、取水システムの妥当性を検証する。

(1) 取水量の試算

本項では、取水管の概算延長に基づき水理計算を行い、OTEC に求められる取水量を得るために必要となる取水管の口径と引込み高さ（深さ）、取水ピット（着水槽）の深さなどを試算する。

① Saint Felix における取水計算

管の内径を 1,500mm~1,000mm に変化させた時に、所要取水量を得るためにどの高さ（深さ）に取水管を引込むか、また着水槽水位の高さがどれ位深くなるか等についてケーススタディした。通常、取水管の深さが低いと多くの水量が揚がるが、取水ピットは深くなって大型化する。反対に、取水管の深さが高いと取水量は減るが、種類ピットは浅くてコンパクトで済むという効果がある。

Saint Felix における計算結果を以下に示す。ケーススタディでは深層水の取水深度は-1,000m に加え、参考として-800m も含めた。表層水の取水深度は-30m とした。その結果、深層水取水管の口径は 1,500mm、取水管の引込み高さ（深さ）は DL-1.04m 以深、ピット内の着水位は DL-6.50m のケースを選定した。

表層水の場合、取水量的には取水管の口径 1,500mm~1,000mm どれでも取水は可能であったが、管内流速が抑える理由から、口径は 1,400mm、取水管の引込み高さ（深さ）は DL-0.80m 以深、ピット内の着水位は DL-2.47m のケースを選択した。

これらの結果から、深層水管の口径は 1,500mm、表層水管の口径は 1,400mm、取水管の引込み高さ（深さ）はいずれも DL-2.0m、ピット底の深さは DL-8.5m とした。DL-2.0m の仮定は、推進工法を行うための施工上の理由から前後することも考えられる。またピット底の深さは、海水を一定量溜める必要性から仮定したものである。

表 31 Saint Felix における取水にかかる水理計算

(その 1)

条件：着水層方式		Case1:	Case2:	Case3:	Case4:	Case5:	Case6:
St.Felix・-1000m深層水・取水計画量240,000t/day		管径1.5m	管径1.4m	管径1.3m	管径1.2m	管径1.1m	管径1.0m
1. 取水計画	日計画取水量 (ton/day)	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000
	取水管内径D (m)	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
	取水管本数	1	1	1	1	1	1
2. 計画流速	1本あたり流量 (ton/day)	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000
	1本あたり流量 (m3/sec)	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
	取水管内流速V (m/sec)	1.53	1.75	2.03	2.39	2.84	3.44
3. 取水管諸元	取水管番号						
	管延長L (m)	6010	6010	6010	6010	6010	6010
	流速係数C	150	150	150	150	150	150
4. 自然条件	海水の単位体積重量 (t/m3)	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
	潮位 MHWS DL+ (m)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	潮位 MLWS DL+ (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5. 取水管の損失水頭	摩擦損失水頭 hf	5.425	7.591	10.891	16.083	24.569	39.081
	密度差損失水頭 hd	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159
	入口損失係数 fi	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	入口損失水頭 hi	0.062	0.08	0.108	0.15	0.212	0.311
	出口損失係数 fo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	出口損失水頭 ho	0.123	0.161	0.217	0.3	0.424	0.622
	取水管路の損失水頭 Δh	6.769	8.991	12.375	17.692	26.364	41.173
6. 取水管の設置高	限界吸込水頭 hls	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
	キャピテーションに対する余裕 ha	1	1	1	1	1	1
	速度水頭 hv	0.123	0.161	0.217	0.3	0.424	0.622
	取水管路の諸損失 Δho	6.646	8.83	12.158	17.392	25.94	40.551
	取水管の最高レベル Hi	-1.232	-3.389	-6.675	-11.837	-20.256	-34.634
	取水管の最高設置高 DL	-1.04	-3.19	-6.48	-11.64	-20.06	-34.44
	(+の場合) 水面下-1.0mよりDL						
7. 取水時着槽水位	取水管路の損失水頭 Δh	6.769	8.991	12.375	17.692	26.364	41.173
	着槽水位 Hw	-6.691	-8.885	-12.225	-17.468	-26.008	-40.578
	着槽水位高 DL	-6.50	-8.69	-12.03	-17.27	-25.81	-40.38

(その2)

条件：着水層方式							
St.Felix・-800m深層水・取水計画量240,000t/day		Case1: 管径1.5m	Case2: 管径1.4m	Case3: 管径1.3m	Case4: 管径1.2m	Case5: 管径1.1m	Case6: 管径1.0m
1. 取水計画	日計画取水量 (ton/day)	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000
	取水管内径D (m)	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
	取水管本数	1	1	1	1	1	1
2. 計画流速	1本あたり流量 (ton/day)	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000	240,000
	1本あたり流量 (m3/sec)	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
	取水管内流速V (m/sec)	1.53	1.75	2.03	2.39	2.84	3.44
3. 取水管諸元	取水管番号						
	管延長L (m)	4960	4960	4960	4960	4960	4960
	流速係数C	150	150	150	150	150	150
4. 自然条件	海水の単位体積重量 (t/m3)	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
	潮位 MHWS DL+ (m)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	潮位 MLWS DL+ (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5. 取水管の損失水頭	摩擦損失水頭 hf	4.477	6.265	8.988	13.273	20.276	32.253
	密度差損失水頭 hd	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159
	入口損失係数 fi	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	入口損失水頭 hi	0.062	0.08	0.108	0.15	0.212	0.311
	出口損失係数 fo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	出口損失水頭 ho	0.123	0.161	0.217	0.3	0.424	0.622
	取水管路の損失水頭 Δh	5.821	7.665	10.472	14.882	22.071	34.345
6. 取水管の設置高	限界吸込水頭 hls	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
	キャピテーションに対する余裕 ha	1	1	1	1	1	1
	速度水頭 hv	0.123	0.161	0.217	0.3	0.424	0.622
	取水管路の諸損失 Δho	5.698	7.504	10.255	14.582	21.647	33.723
	取水管の最高レベル Hi	-0.312	-2.102	-4.827	-9.109	-16.088	-28.005
	取水管の最高設置高 DL	-0.112	-1.91	-4.63	-8.91	-15.89	-27.81
	(+の場合) 水面下-1.0mよりDL	-0.80					
7. 取水時着槽水位	取水管路の損失水頭 Δh	5.821	7.665	10.472	14.882	22.071	34.345
	着水槽水位 Hw	-5.771	-7.598	-10.378	-14.740	-21.840	-33.949
	着水槽水位高 DL	-5.58	-7.40	-10.18	-14.54	-21.64	-33.75

(その3)

条件：着水層方式							
St.Felix・-30m深層水・取水計画量300,000t/day		Case1: 管径1.5m	Case2: 管径1.4m	Case3: 管径1.3m	Case4: 管径1.2m	Case5: 管径1.1m	Case6: 管径1.0m
1. 取水計画	日計画取水量 (ton/day)	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000
	取水管内径D (m)	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
	取水管本数	1	1	1	1	1	1
2. 計画流速	1本あたり流量 (ton/day)	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000
	1本あたり流量 (m3/sec)	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37
	取水管内流速V (m/sec)	1.91	2.19	2.54	2.98	3.55	4.29
3. 取水管諸元	取水管番号						
	管延長L (m)	500	500	500	500	500	500
	流速係数C	150	150	150	150	150	150
4. 自然条件	海水の単位体積重量 (t/m3)	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
	潮位 MHWS DL+ (m)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	潮位 MLWS DL+ (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5. 取水管の損失水頭	摩擦損失水頭 hf	0.68	0.952	1.365	2.016	3.08	4.9
	密度差損失水頭 hd	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159
	入口損失係数 fi	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	入口損失水頭 hi	0.096	0.126	0.17	0.233	0.331	0.484
	出口損失係数 fo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	出口損失水頭 ho	0.192	0.252	0.339	0.467	0.662	0.967
	取水管路の損失水頭 Δh	2.127	2.489	3.033	3.875	5.232	7.51
6. 取水管の設置高	限界吸込水頭 hls	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
	キャビテーションに対する余裕 ha	1	1	1	1	1	1
	速度水頭 hv	0.192	0.252	0.339	0.467	0.662	0.967
	取水管路の諸損失 Δho	1.935	2.237	2.694	3.408	4.57	6.543
	取水管の最高レベル Hi	3.275	2.923	2.395	1.578	0.260	-1.951
	取水管の最高設置高 DL	3.475	3.123	2.595	1.778	0.460	-1.76
	(+の場合) 水面下-1.0mよりDL	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80	
7. 取水時着槽水位	取水管路の損失水頭 Δh	2.127	2.489	3.033	3.875	5.232	7.510
	着水槽水位 Hw	-2.251	-2.661	-3.274	-4.216	-5.722	-8.230
	着水槽水位高 DL	-2.06	-2.47	-3.08	-4.02	-5.53	-8.04

上記の水力計算は、「海洋深層水施設（陸上設置型）に関する計画、調査、設計から施工まで 平成18年3月 漁港漁場審新技術研究会」に従った。

(ア) 取水管路の損失水頭

海水の取水に伴って生じる取水管路の損失水頭 Δh は以下の式で表される。

$$\Delta h_1 = h_i + h_f + h_o + h_d \quad (\text{着水槽方式：取水口～着水槽})$$

$$\Delta h_2 = h_i + h_f + h_s + h_d \quad (\text{ポンプダイレクト・真空複槽方式：取水口～ポンプ})$$

i. 入口損失水頭 (h_i)

入口損失水頭は以下の式により算出する。なお、取水管の入口損失係数は取水管流入部の形状を考慮し 0.5 とする。式の下に入口損失及び出口損失の係数の表を示す。

$$h_i = f_i \times \frac{V^2}{2g} \times \rho$$

ここに、 f_i : 入口損失係数
 V : 管内流速 (m/sec)
 g : 重力加速度(=9.8m/sec²)
 ρ : 海水の比重 (=1.03)

表 32 損失係数

損失係数	係数値			
流入損失	角端	0.5	ベルマウス	0.01~0.05
	隅切	0.25	突出し	1.0
	丸み付	0.1 (円形)		
		0.2 (方形)		
流出損失		1.0		

ii. 出口損失水頭 (h_o)

出口損失水頭は以下の式により算出する。上記表より出口損失水頭は 1.0 とする。

$$h_{po} = f_{po} \times \frac{V^2}{2g} \times \rho$$

ここに、 f_{po} : 出口損失係数
 V : 出口での流速 (m/sec)
 g : 重力加速度(=9.8m/sec²)
 ρ : 海水の比重 (=1.03)

iii. 管内の摩擦損失水頭 (h_f)

摩擦損失水頭の計算には、Hazen・Williams (ヘーゼン・ウィリアムス) の式により算出する。また、ポリエチレン管の流速係数 C は 150 とした。

$$h_{pf} = 10.666 \times C^{-1.85} \times D^{-4.87} \times Q^{1.85} \times L \times \rho$$

ここに、 C : 流速係数
 D : 送水管内径(m)
 Q : 送水流量(m³/sec)
 L : 送水管延長(m)
 ρ : 海水の比重 (=1.03)

表 33 流速係数 C の値

管（内面の状態）	流速係数		
	最大値	最小値	標準値
鋳鉄管（塗装なし）	150	80	100
鋼管（塗装なし）	150	90	100
タールエポキシ塗装管（鋼）注 1)			
φ 800 以上			130
φ 700～600			120
φ 500～350			110
φ 300 以下			100
モルタルライニング管（鋼・鋳鉄）	150	120	130
遠心力鉄筋コンクリート管	140	120	130
プレストレストコンクリート管	140	120	130
硬質塩化ビニル管	160	140	150
ポリエチレン管	170	130	150
強化プラスチック複合管 注 2)	160	—	150

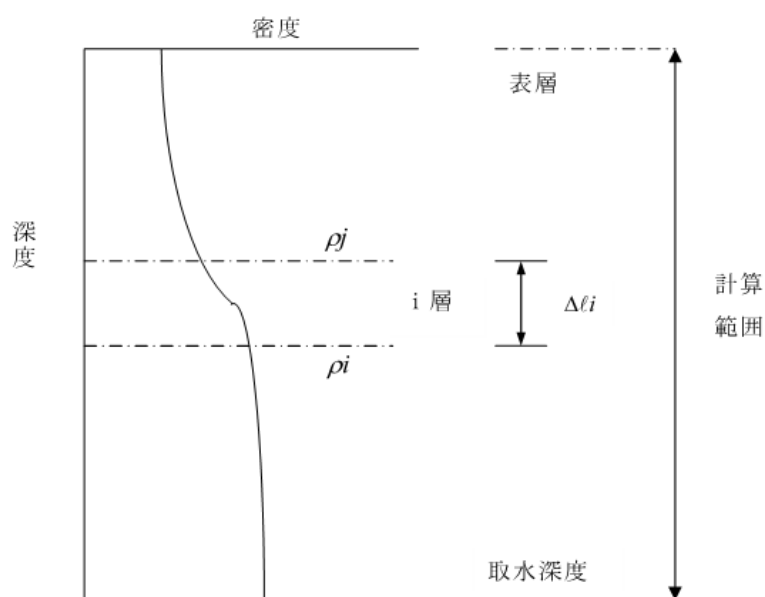
iv. 密度差水頭（hd）

鉛直方向の密度分布を基に、以下のように算出することを基本とする。

$$hd = \sum \left[\frac{(\rho_i - \rho_j)}{\rho_i} \times \Delta \ell_i \right]$$

ここに、 ρ_i : i 層下端における海水密度
 ρ_j : i 層上端における海水密度
 $\Delta \ell_i$: i 層の層厚

過去の計算事例では、概ね $hd=0.5\text{m}$ 程度を考慮している。



一方、今回は海水の密度分布が不明であったので、既存の久米島での検討結果（水深 700m）より、 $hd=1.159\text{m}$ を採用した。

(イ) 着水槽の水位

所定海水量を取水しているときの着水槽内水位は、海面より損失水頭分だけ低くなる。よって、着水槽内の水位は、海面から次に示す式で算定される。

取水時着水槽水位： $H_w = -(h_i + h_f + h_o + h_d + h_v) / \rho$ (海面上は+、下は-とする)

ここに、 h_v : 速度水頭

$$h_v = \frac{V^2}{2g} \times \rho$$

(ウ) 取水管の最高レベル (H_i)

取水管の最高レベルを検討する場合、管内に負圧が作用する場合にも継続した取水を可能とするために、以下の条件を満足することとする。

最高点における取水管内の圧力水頭 $> - (h_{ls} - h_a)$

したがって、取水管の最高レベルは、以下ようになる。なお、取水管の最高レベルは、取水ポンプの停止時に自然水頭で取水管内のエア抜きができるように海面下 1.0m より深くすることが望ましい。

$$H_i = (h_{ls} - h_a - \Delta h_o - h_v) / \rho$$

ここに、 h_{ls} : 限界吸込水頭 (=サイフォン作用が継続するための目安の水頭であり、水温 0~20℃で約 6.5m)

h_a : 深層水取水時のキャビテーションに対する余裕
($\approx 1.0\text{m}$ を考慮する)

Δh_o : 取水管路の諸損失 $\Delta h_o = h_i + h_f + h_d$

② Bel Ombre における取水計算

Bel Ombre における計算結果を以下に示す。ケーススタディでは深層水の取水深度は-1,000m に加え、参考として-800m も含めた。表層水の取水深度は-30m とした。その結果、深層水取水管の口径は 1,500mm、取水ピットに引込む取水管の高さ (深さ) は DL-0.80m 以深、ピット内の着水位は DL-4.64m のケースを選定した。

表層水の場合、取水量的には取水管の口径 1,500mm~1,000mm どれでも取水は可能であったが、管内流速が抑える理由から、口径は 1,400mm、取水ピットに引込む取水管の高さ (深さ) は DL-0.80m 以深、ピット内の着水位は DL-3.03m のケースを選択した。

これらの結果から、深層水管の口径は 1,500mm、表層水管の口径は 1,400mm、ピットに引込む取水管の高さ (深さ) はどちらも DL-2.0m、ピット底の深さは DL-7.0m とした。DL-2.0m の仮定は、推進工法を行うための施工上の理由から前後することも考えられる。またピット底の深さは、海水を一定量溜める必要性から仮定したものである。

表 34 Bel Ombre における取水の水力計算（その 1）

条件：着水層方式							
Bel Ombre・-1000m深層水・取水計画量180,000t/day		Case1: 管径1.5m	Case2: 管径1.4m	Case3: 管径1.3m	Case4: 管径1.2m	Case5: 管径1.1m	Case6: 管径1.0m
1. 取水計画	日計画取水量 (ton/day)	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000
	取水管内径D (m)	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
	取水管本数	1	1	1	1	1	1
2. 計画流速	1本あたり流量 (ton/day)	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000
	1本あたり流量 (m3/sec)	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
	取水管内流速V (m/sec)	1.14	1.31	1.52	1.79	2.13	2.57
3. 取水管諸元	取水管番号						
	管延長L (m)	6910	6910	6910	6910	6910	6910
	流速係数C	150	150	150	150	150	150
4. 自然条件	海水の単位体積重量 (t/m3)	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
	潮位 MHWS DL+ (m)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	潮位 MLWS DL+ (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5. 取水管の損失水頭	摩擦損失水頭 hf	3.647	5.103	7.321	10.81	16.515	26.269
	密度差損失水頭 hd	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159
	入口損失係数 fi	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	入口損失水頭 hi	0.034	0.045	0.061	0.084	0.119	0.174
	出口損失係数 fo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	出口損失水頭 ho	0.068	0.09	0.121	0.168	0.238	0.347
	取水管路の損失水頭 Δh	4.908	6.397	8.662	12.221	18.031	27.949
6. 取水管の設置高	限界吸込水頭 hls	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
	キャピテーションに対する余裕 ha	1	1	1	1	1	1
	速度水頭 hv	0.068	0.09	0.121	0.168	0.238	0.347
	取水管路の諸損失 Δho	4.84	6.307	8.541	12.053	17.793	27.602
	取水管の最高レベル Hi	0.575	-0.871	-3.070	-6.525	-12.166	-21.795
	取水管の最高設置高 DL	0.775	-0.671	-2.87	-6.33	-11.97	-21.60
	(+の場合) 水面下-1.0mよりDL	-0.80	-0.80				
7. 取水時着槽水位	取水管路の損失水頭 Δh	4.908	6.397	8.662	12.221	18.031	27.949
	着水槽水位 Hw	-4.831	-6.298	-8.527	-12.028	-17.737	-27.472
	着水槽水位高 DL	-4.64	-6.10	-8.33	-11.83	-17.54	-27.28

(その2)

条件：着水層方式							
Bel Ombre・-800m深層水・取水計画量180,000t/day		Case1: 管径1.5m	Case2: 管径1.4m	Case3: 管径1.3m	Case4: 管径1.2m	Case5: 管径1.1m	Case6: 管径1.0m
1. 取水計画	日計画取水量 (ton/day)	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000
	取水管内径D (m)	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
	取水管本数	1	1	1	1	1	1
2. 計画流速	1本あたり流量 (ton/day)	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000	180,000
	1本あたり流量 (m3/sec)	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
	取水管内流速V (m/sec)	1.14	1.31	1.52	1.79	2.13	2.57
3. 取水管諸元	取水管番号						
	管延長L (m)	5920	5920	5920	5920	5920	5920
	流速係数C	150	150	150	150	150	150
4. 自然条件	海水の単位体積重量 (t/m3)	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
	潮位 MHWS DL+ (m)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	潮位 MLWS DL+ (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5. 取水管の損失水頭	摩擦損失水頭 hf	3.124	4.372	6.272	9.261	14.148	22.506
	密度差損失水頭 hd	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159
	入口損失係数 fi	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	入口損失水頭 hi	0.034	0.045	0.061	0.084	0.119	0.174
	出口損失係数 fo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	出口損失水頭 ho	0.068	0.09	0.121	0.168	0.238	0.347
	取水管路の損失水頭 Δh	4.385	5.666	7.613	10.672	15.664	24.186
6. 取水管の設置高	限界吸込水頭 hls	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
	キャピテーションに対する余裕 ha	1	1	1	1	1	1
	速度水頭 hv	0.068	0.09	0.121	0.168	0.238	0.347
	取水管路の諸損失 Δho	4.317	5.576	7.492	10.504	15.426	23.839
	取水管の最高レベル Hi	1.083	-0.161	-2.051	-5.021	-9.868	-18.142
	取水管の最高設置高 DL	1.283	0.039	-1.86	-4.83	-9.67	-17.95
	(+の場合) 水面下-1.0mよりDL	-0.80	-0.80				
7. 取水時着槽水位	取水管路の損失水頭 Δh	4.385	5.666	7.613	10.672	15.664	24.186
	着水槽水位 Hw	-4.323	-5.588	-7.509	-10.524	-15.439	-23.818
	着水槽水位高 DL	-4.13	-5.39	-7.31	-10.33	-15.24	-23.62

(その3)

条件：着水層方式							
Bel Ombre・-30m表層水・取水計画量252,000t/day		Case1: 管径1.5m	Case2: 管径1.4m	Case3: 管径1.3m	Case4: 管径1.2m	Case5: 管径1.1m	Case6: 管径1.0m
1. 取水計画	日計画取水量 (ton/day)	252,000	252,000	252,000	252,000	252,000	252,000
	取水管内径D (m)	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
	取水管本数	1	1	1	1	1	1
2. 計画流速	1本あたり流量 (ton/day)	252,000	252,000	252,000	252,000	252,000	252,000
	1本あたり流量 (m3/sec)	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83
	取水管内流速V (m/sec)	1.6	1.84	2.13	2.5	2.98	3.6
3. 取水管諸元	取水管番号						
	管延長L (m)	1250	1250	1250	1250	1250	1250
	流速係数C	150	150	150	150	150	150
4. 自然条件	海水の単位体積重量 (t/m3)	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
	潮位 MHWS DL+ (m)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	潮位 MLWS DL+ (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5. 取水管の損失水頭	摩擦損失水頭 hf	1.231	1.722	2.471	3.649	5.574	8.867
	密度差損失水頭 hd	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159
	入口損失係数 fi	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	入口損失水頭 hi	0.067	0.089	0.119	0.164	0.233	0.341
	出口損失係数 fo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	出口損失水頭 ho	0.135	0.178	0.238	0.328	0.467	0.681
	取水管路の損失水頭 Δh	2.592	3.148	3.987	5.3	7.433	11.048
6. 取水管の設置高	限界吸込水頭 hls	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
	キャビテーションに対する余裕 ha	1	1	1	1	1	1
	速度水頭 hv	0.135	0.178	0.238	0.328	0.467	0.681
	取水管路の諸損失 Δho	2.457	2.97	3.749	4.972	6.966	10.367
	取水管の最高レベル Hi	2.823	2.283	1.469	0.194	-1.877	-5.386
	取水管の最高設置高 DL	3.023	2.483	1.669	0.394	-1.68	-5.19
	(+の場合) 水面下-1.0mよりDL	-0.80	-0.80	-0.80	-0.80		
7. 取水時着槽水位	取水管路の損失水頭 Δh	2.592	3.148	3.987	5.3	7.433	11.048
	着水槽水位 Hw	-2.648	-3.229	-4.102	-5.464	-7.670	-11.387
	着水槽水位高 DL	-2.45	-3.03	-3.91	-5.27	-7.47	-11.19

(2) 候補地の比較検討

Saint Felix と Bel Ombre のそれぞれにつき、これまでの検討結果を整理し、特徴、長・短所を整理すると以下のようなものである。またそれらを比較表にも整理した。

- 取水管のサイズ（口径）は、St. Felix も Bel Ombre も深層水は 1,500mm、表層水は 1,400mm であった。
- 取水管の延長は St. Felix の方が短い、Bel Ombre は長いことに加え、既存の海底ケーブルを避けなければならない、ルート選定上の制約がある。取水ピット（着水槽）は自然流下方式を採るためどちらにも必要であるが、地盤の状況が St. Felix は岩礁で固いこと、Bel Ombre は河口ゆえ砂礫で崩れやすいこと、など異なるため優劣つけ難い。ただピット深さは Bel Ombre がやや浅くて済む。
- 浅海部においては、St. Felix は推進工法（距離は長くない）が求められ、一方 Bel Ombre はトレンチ掘削（1km 以上）が求められるので、こちらも優劣はつけ難い。施工上、環境上は推進工法の方が有利である。
- 土地利用についても現地で確認が取れている点や、背後地の OTEC 用パイプラインの長さが短い点などを鑑みても、やはり Saint Felix 案が有利と言える。
- それらを総じて評価すると、現状では Saint Felix 案が有利と考える。
- ハワイの NELHA 調査で得られた知見（調査結果は後章にて整理）を踏まえ、また NELHA の地形・地盤状況が St. Felix のそれと類似している点も踏まえ、提案の取水管ルートの建設は技術的には可能である。ただ当検討における取水管延長は、NELHA のそれより倍も長いという点は特筆すべきであり、場合によっては水深-800m を選択することも一考の余地はあると思われる。

- また、両案に通ずるが、一般的に取水管として使用する HDPE 管は、海外から船輸送にて輸入することになる。それらの陸揚げ場所（通常ならポートルイス港）だけでなく、保管・長管製作ヤード（短管をつないで長管にする平地）として、長さ約 300m・幅約 100m 程度の土地が必要となる。ヤードは必ずしも取水施設の場所に近くなくてもよいが、こうした土地を求め仮設的に造成しなければならない点を認識しておく必要がある。

表 35 候補地における取水ルート の 妥当性比較

項目	Saint Felix 案		Bel Ombre 案	
	内容	評価	内容	評価
立地の特徴	岩礁にあり地盤は固い。海底勾配は陰しく海水はクリア。		河口にあり地盤の状況は不明。海水は濁っている。	
深層水管の延長 (km) 水深-1,000m	6.01	○	6.91	△
取水管の管径 (mm)	1,500		1,500	
取水管の設置高 (m) DL	-2.0		-2.0	
表層水管の延長 (km) 水深-30m	0.50	○	1.25	△
取水管の設置高 (mm)	1,400		1,400	
取水管の深さ (m) DL	-2.0		-2.0	
着水槽（取水ピット）のサイズ(m)	10 x 20、深 DL-8.5m	△	10 x 20、深 DL-7.0m	△
推進工法の延長 (m)	深層・表層それぞれ 200m 未満ずつ	△	不要	○
トレンチ工法の延長 (m)	不要	○	深層・表層併せ 1,000m 以上	△
土地の Availability	確認済	○	不明	△
建設上のアクセス	良好	○	良好	○
Saint Felix までの距離	短	○	長	△
Bel Ombre までの距離	長	△	短	○
陸上パイプラインの距離	短	○	長	△
既存インフラとの干渉	無	○	通信用海底ケーブル 3 本に留意	△
その他懸念事項	地盤が固いとピット掘削の難易度が上がるが、環境上は有利	○	河口ゆえ表層水の濁り、トレンチ掘削に伴う濁り	△
コストインパクト	取水管延長は短い が、推進工法のコストがかかる	△	推進工法は不要も、 取水管延長が長く、 トレンチ延長が長い	△
本検討における総合評価	推奨	◎		△

(3) 候補地における概略レイアウト案



図 73 Saint Felix における施設レイアウト案

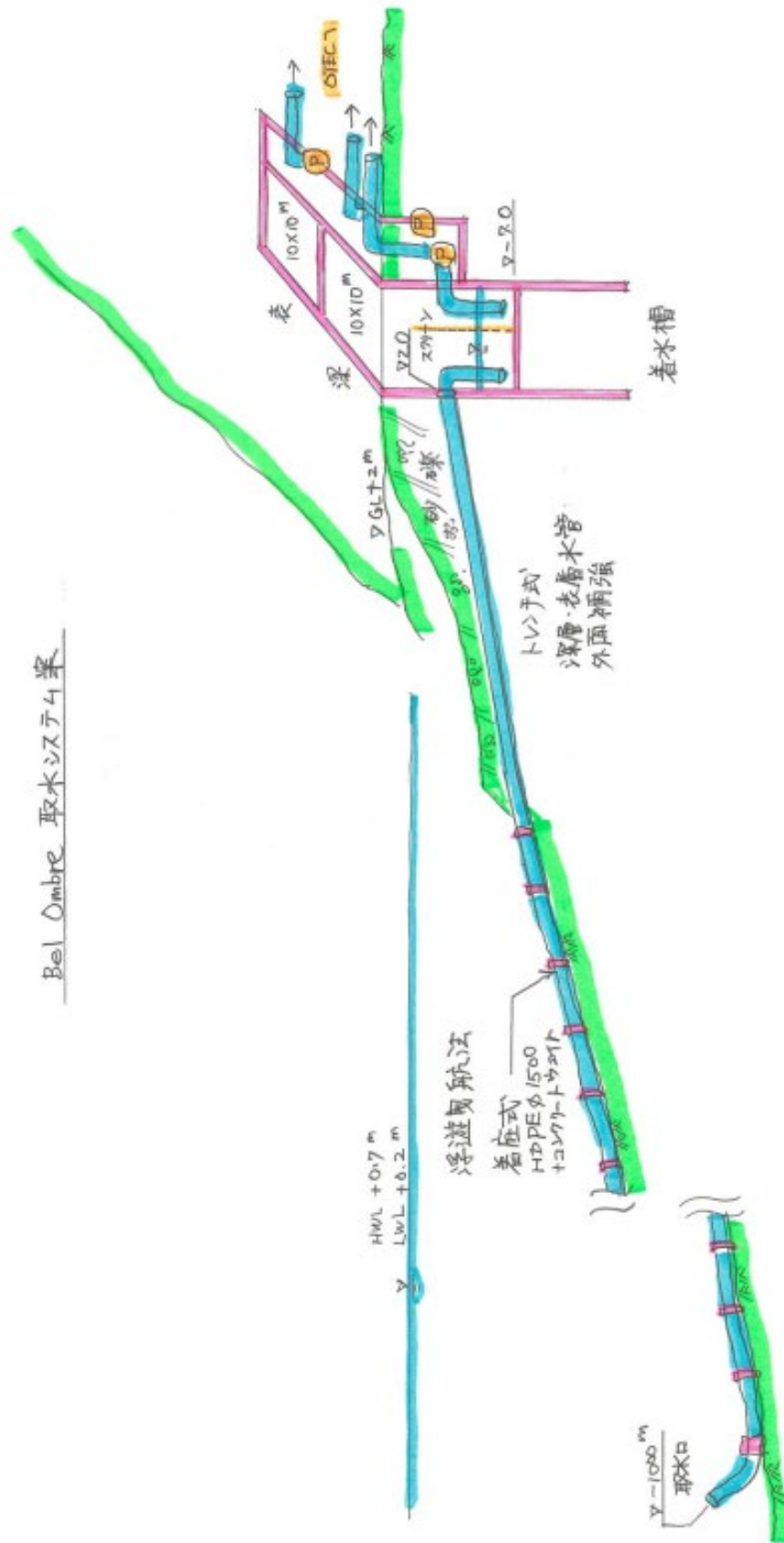


図 74 Bel Ombre における施設レイアウト案

(4) 候補地における取水システム案



図 75 Saint Felix における取水システム案



2.4.5 放流水（発電利用・二次利用後）の適地選定

(1) 放流の考えと事例

我が国では従来より、使用済みの深層水と表層水は、陸上施設内で各所から集約・混合した上で、近場の海岸淵または表層に流している事例が多い。これは排水設備に多額の費用をかけることを避けたためであると考えられる。

しかしサンゴ保全の観点からは、リーフに直接放流するとサンゴの白化を招くリスクがあることが指摘されており、深層水と表層水は分けて別々な位置や深度に放流するよう提唱（深層水は深層に、表層水は表層に）する研究（東京大学）もある。つまり、富栄養な深層水は表層水に放流せずに深層に放流、水温を下げた表層水は表層に放流、というものである。これによりサンゴへの悪影響を低減できる可能性が数値シミュレーションで研究されている。

一方ハワイ NELHA では、環境規制により使用済みの海水を直接海に流すことが禁じられている。そのため NELHA の全てのテナントは、排水は自らの敷地内で地下浸透させることが義務付けられている。地下浸透させた海水は、徐々に浄化され海に戻っていくという発想である。これは地盤が、溶岩流が固まったもので地下浸透の速度が速いという特徴から運用されている手法である。また地下浸透による水質チェックのために、コントロール Well（井戸）を各テナントで作り、定期的なモニターをしている。一つの Well は NELHA が他との比較するためのベースラインに使っている。

(2) モーリシャスにおける放流

モーリシャスにおける環境基準の制約は今後精査を必要とするが、ハワイのような地下浸透の方法がモーリシャスで採用できるかどうか、いささか難しいと言わざるを得ない。また深層水を深層に放流することは上記からも望ましいと言えるが、そのためのコストも必要となってしまうため、当面はサンゴの影響が極小化できるような方策を考えるのが妥当と思われる。

妥当な線と考えられるのは、OTEC で熱交換した深層水と表層水は混合し、むしろ他の使用済みの海水も集約し、表層水の取水深度-30m よりも深い-50m 程度を目途に、リーフの先端の険しい箇所、しかも海水が滞留しない箇所に放流することを提案する。-50m は海洋工事ができるぎりぎりの深度である。深層水と表層水の混合水は、周辺の表層水の水温よりは低いので、放流水は上昇することはなく下降していくので、表層水の取水管で放流水を吸うことはない。

Saint Felix 及び Bel Ombre のそれぞれにおける放流水の位置を下図に示す。なお Saint Felix においては、排水管用の推進工法も一本追加し、排水管を着底式で敷設する必要があるが距離は短い。一方 Bel Ombre においては、トレンチの幅をさらに広げ、約 2km もの掘削・埋戻しを行わなければならない。



図 77 Saint Felix における放流位置案（緑）



図 78 Bel Ombre における放流位置案（緑）

2.4.6 大口径取水管敷設に関する最新事例の技術動向調査

本調査では、大口径取水管敷設に関する調査としてハワイ NELHA を訪問調査した。以下に概要をまとめる。

(1) 実施日

令和 6 年 2 月 19 日～22 日

(2) 出張先

ハワイ：ホノルル及びコナ

(3) 出張者

株式会社オリエンタルコンサルタンツグローバル： 鈴木 雅人、野中 真実

株式会社ゼネシス： ベンジャミン・マーティン

(4) 経緯・目的

我が国にも深層水事業の事例は多く報告されているが、いずれも取水管は口径 200～400mm 程度と細いものに限られている。これは深層水が主に水産目的等で利用されてきたためである。一方 OTEC は大容量の取水が求められ、管の口径は 1,500mm にも及ぶが国内事例はなく、唯一実在するのはハワイの NELHA (Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority：ハワイ州立自然エネルギー研究所 1974 年発足) である。同機関のホームページには年次報告書等が公開されており、多くの深層水実証事業の取り組みが紹介されているが、技術的な知見を高めるには情報量が不十分であったことから、実際に現地を訪問し、パイプラインシステムの概要（深層水管・表層水管の OTEC への経路、取水方法の選定条件、排水方法等）をヒアリング・現地視察して確認し、本事業における成果の質を高めるために実施したものである。

(5) 調査行程

2 月 19 日 — 移動（東京→ホノルル）、Makai Ocean Engineering との打合せ

移動（ホノルル→ハワイ島コナ）、NELHA 旧スタッフとの打合せ

2 月 20 日 — NELHA 関係者との打合せ、55”ポンプ設備視察

移動（コナ→ホノルル）

2月21日　－　移動（ホノルル→東京）

2月22日　－　同上（日付変更）帰国

(6) ヒアリング内容（注：会話された順に記載したもので、カテゴリー的には順序不同）

① Makai Ocean Engineering (Richard Argall: Technical Director)

- マカイは近年多くのパイプライン事業を手がけており、特に中東や米西海岸で多く実施してきた。それらの多くは非常に短期間で行ってきた、例えばバハレーンの事業では、設計に3か月、建設に3か月という突貫で完成させたものだった。
- 最近手がけたサウジアラビアの事業では、8本の脱水管（径0.9m～1.2m）を水深-200mに敷設した。
- マカイの実績分野としては、調査測量、計画、設計、施工管理などがある。特殊な事業なため、設計においても実施段階においても、施主や施工業者による要望等を受けて遅れることがままあった。
- マカイではケーブル敷設船に備える管理ソフトの開発も行っている。米海軍向けのR&Dのほか、環境影響モデル、例えばOTECの排水が既存海水とどのように交わるのか、そして海水温や栄養分が環境にどう影響を及ぼすのかなどのシミュレーションも手がけている。
- マカイの会社実績をまとめたプレゼン資料の説明を受けた。
- マカイはまた、大口径HDPE管を浮遊曳航法で敷設する特殊なノウハウも有している。これは管内に空気を溜め、陸側から徐々に海水を注水して管を沈設していくという敷設法である。
- NELHAには11本の取水管があるが、大半は使用していない。使われなくなった古い取水管の撤去に関する検討が、現在進められている。
- NELHAの取水ピットは、当初ドライで計画していたが最終形は当初から変更されたとのこと（これについては後述する）。ポンプには渦巻式を採用している。
- NELHAの55"取水管のピット内の高さは、海面下約-10mである。
- 取水管の敷設に際しては、施工業者との密接な調整が不可欠である。つまり業者の能力や作業船に応じた敷設管理モデルを準備するのが重要なためである。
- NELHAの55"取水管に巻いたコンクリートウェイトの重量は即答できないが、管の浮力の75～85%だとすれば一個当たりおよそ10トンと想定する。
- アメリカの規則では、取水管の流速を規定している（魚等が吸い込まれないように）。発電所では相当な大口径管を置くが、0.15m/sのようである。
- ロスアンゼルスのパイプ事業では、マカイは設計時の見積額を半分に節約したことがある。
- NELHAの55"取水管は、保管時に紫外線から守るため全長に亘って上半分だけを白く塗装した。
- NELHAの55"取水管の敷設は、基本的には着底式であるが、一部に急勾配かつ巨石が認められた区間だけは、浮遊方式（浮かせて海底からアンカーを取る）にした。そのほかは全て着底式。浮遊式の場合、取水管の縦断形状は山状のカテナリー状（片勾配ではなく）であった。
- NELHAの海底面は、一部の急勾配区間を除き、深い海域は比較的スムーズであった。
- コンクリートのウェイトは、海底面のざらつき具合に応じて、管が直接海底に触れないように、ウェイトの形状を調整することで管を海底面から離して設置することもできる。海底面に直接置けない場合（急勾配や巨石）には、浮遊式（海底にアンカーを置いて管を引っ張る）も採用。
- ある下水プロジェクトでは、二次管をスリーブにしてアンカーと波浪からの保護の役割にし、その中に主管を挿入したこともある。
- NELHAの推進工法（Micro Tunnel）では、管のケーシングとしてはコンクリート管ではなかったはずである。（その後NELHAヒアリングでFRP管であったことが判明）
- Micro Tunnelにはバルブは設置していない。海底部のHDPEとトンネルとの接続はフランジ接続ではなかったはず。（その後NELHAヒアリングでFRP管と接着したことが判明）
- 海底の巨石や石が取水管に衝突することに対しては、次の2ケースが考えられる、即ち：
 - ・砂や小石が潮流等で管材に当たるリスク： 取水管は海底面に直接触れないよう、ウェイトで若干上方に離しているのと、一般に海底付近の流れは小さく石等が当たる衝撃は小さく、問題にはならない。
 - ・巨石が取水管に当たるリスク： 巨石は潮流よりは波浪によって動くことはあるが、通常海底の等深線に対し直角方向に動くので、真横からの衝突はまずない。コンテナの落下は確率的に小さい。錨や漁網による影響は海域の状況次第である。

- 取水口にスクリーンを設けたかどうかは、最終図面を見ないと不明。20 年以上前の図面はデジタル化していないので。
- NELHA での問題は、設計と実際の利用が必ずしも一致していない点である。
- Decommissioning (退役) 計画はないが、NELHA では検討しようとしている。取水管を撤去することは可能と考える、つまり浮遊曳航法での敷設と逆に空気を入れて浮上させる。そのためには ROV で管の状況を調査し、ROV で取水口を塞ぎ、その上で作業船より管端を吊り上げる。
- 取水管の敷設時には、洋上で HDPE 管が垂れ下がることで曲って変形しないよう制御するために、50ton もの引張力が求められた。
- 施工業者が敷設時に取水管を引張るロープの仕様を間違え、長さが不足（逆に太過ぎ）したため、敷設作業途中に作業ができなくなる事態が発生した。急遽、正規のロープを取り寄せるという緊急対応が余儀なくされた。
- 取水システムに対する定期点検は、ハワイ大学が有する水中機器（ROV）を使って行われていたが、今では行われていない。
- 取水管への牡蠣等の生物付着は、本来着底すべき取水管を浮かせようとする可能性もあることから、懸念されている事象であると認識している。

② NELHA 旧スタッフ (Jan War, Tom Daniel)

- NELHA の推進工法 (Micro Tunnel) は、\$3.7M の一括契約 (Lumpsum) で施工業者 NOVA が請け負った。いくつかの問題に直面、特に岩盤の密度が高いものと低いものが混在したことで、推進機械が横向きに動こうとする力が働き、機械故障を招いた。総コストは\$10M に及ぶも、一括契約の縛りが効いて、州予算に追加負担を強いることはなかった一方、NOVA はあと一步で財務破綻するまで追い込まれた。
- 55"管用の取水ピットは、海岸から 100m 未満位置の溶岩地盤を掘削したもので、内壁や底にはコンクリート打設することはせず、FRP 製の Canister を吊下げ設置した後、ピット内は掘削石で埋め戻したとのことである。
- Micro Tunnel の内部は、コンクリート管またはファイバー管 (FRP) のケーシングを施したはずである。その後のヒアリングでファイバー管であったことが判明。
- 40"取水ピット (ポンプステーション) では水中ポンプを使用しているが、メンテが困難であったことから、55"ピットでは陸上設置の渦巻ポンプを使用した。この渦巻ポンプの羽車は後にカーボン材料の一つであるグラフェン (Graphene) 製と交換した。なお垂直タービンポンプが理想的なのかも知れない。

③ NELHA 事務局との打合せ (Greg Barbour : Executive Director, Jan War, Tom Daniel)

- Host Park の土地は元来空港用地であったが、1990 に NELHA の追加用地として転換された。
- NELHA では昨年 12 月に Matsuyama's というガソリンスタンド兼ストアを開業した。ここでは深層水を使った空調 (SWAC) を装備している。
- 55"ポンプステーションでは、太陽光発電 500kW のマイクログリッド、750kW の発電機、750kWh の蓄電池が運転している。
- 取水方式の選定がコストの大小を左右する重要な要素である。55"ピットで水中ポンプを使うのはコストが大である。
- 55"のポンプは鋳鉄とステンレスで製がある。ステンレス製でも全てが SUS316 材ではなかったが、4 回に亘って低グレード部品を新品に交換した経緯がある。
- 55"パイプの敷設時には、先端の取水口にフランジを取り付け、最終段階に海中で潜士士によってそれを撤去する計画であったが、潮流が速く断念した。結局、取水管に空気を送って再浮上させ、取水口フランジにシャックルを付けた後 (元々フランジにはシャックルが付属していなかった)、取水口を海底に沈設した後、ROV で遠隔でフランジを撤去するという方法を採用した。このためだけに 1 週間を要した。

④ 40"ポンプ設備視察 (Jan War, Tom Daniel)

- 40”ポンプステーションは 1987 年に建設され、ピット内には 2 基の水中ポンプが稼働している。表層水は 28”パイプで、ピット内で 90 度曲り管及びフィルターで揚水させている。ピットはコンクリート壁と底版で構成。トレンチを-10m まで掘り、ビニール被覆のコンクリート管を敷設した。
- 深層水管はトレンチの後、水深-150m から最深部-600m までは浮遊式とし、40 トンブロックでアンカーを取った。ピット内では水中ポンプを設置。

⑤ 北ポンプ制御室 (Jan War, Tom Daniel)

- 北ポンプ制御室は 40”取水ピットの陸側に置かれており、主に標高の低い土地にあるテナントに配水するためのポンプを制御している。配水の流速をコントロールし、パイプライン内の圧力を適正に維持させている。現在は南ポンプ制御室 (55”取水ピット側) とも連携している。
- テナントにとっては配水管の内圧が最も重要である、つまり目的に応じて深層水、表層水、真水等を混ぜるため、一定の圧力を維持することが安定した流量を維持できることになる。
- 元来は 12”パイプ用のポンプだけだったが、配水上様々な問題があったため、早い時期に 40”パイプ用のポンプを稼働させた。
- 40”用ポンプの供用開始直前には、29 匹ものエイが取水管に侵入した。取水を開始した直後に取水管に入り込み、取水をブロックするという事態が発生した。エイは捕獲し海に戻された。スクリーンを置いて通常運転をしたことで、以降は同様の事態は発生していない。
- 40”パイプ用のトレンチは延長約 100m、コンクリートで埋め戻された。アメリカのエネルギー省 (DOE) が OTEC のために予算化したものである。
- 2016 年に浮遊式の取水管のアンカーウェイトに取り付いているロープとシャックルが交換された。元々アンカーの設置場所が浅すぎるなど不適切だったため、ロープがたるむなどした結果的に損傷した。そのため Healy Tibbits 社が ROV により、ロープとクランプを交換した。
- 取水ピットの掘削には、ピット周囲四辺をコアドリルで削孔してから内部を掘削、グラウト材で止水を試みたが上手くいかなかった。そのため大量のコンクリートを打設してピットを止水した。
- 台風による波浪が遡上し NELHA のフェンスを倒壊させた。そのため度々ピットが水没するという事態が発生した。
- ピットのコンクリート蓋は、経年腐食の影響で鉄筋が腐食し多くが損傷した。そのため \$200,000 を投じてファイバー製の鉄筋を使用した。現在コンクリートの被り厚が薄い箇所に若干の鉄筋錆が見受けられた。
- トレンチの掘削工事では発破工法が使われたが、非常に時間がかかった。そのため業者は通常よりも 6~7 倍もの発破量を使ったが、環境的に大きな影響があった。そういったことから 55”では推進工法 (Micro Tunnel) を採用した。

⑥ 55”取水ピット及びポンプ設備視察 (Keith Olson, Jan War, Tom Daniel)

- 最初に、海岸線から近い位置の岩礁に約 10mx10m のピット (立坑) を掘削した。この立坑から片方は沖に向け、もう片方は陸に向け、それぞれ 2 本ずつ (深層水用と表層水用) トンネルを掘進した。
- この立坑の建設費はとても高くついた。当初は周囲をドリルで削孔し、その内側を掘削する計画だったが、硬過ぎたため発破を使用した。現地盤以深 50’ (海面下 1m) まで掘削するものだが、波浪が度々水没させた。
- 矢板とコンクリート底版を打設してから立坑内をドライにし、1997 年に推進作業を終えた。この立坑は役目を終えた後は、掘削土を埋め戻し、さらに表面は周囲の岩礁に馴染むようにコンクリート (溶岩に似せて) を打設した。
- 1 本目の掘進では、レーザーガイドを使い掘進ルートを制御したが、掘進機が出口を貫通しようとした時に吸い込みが起き、レーザーが上手く機能しなかった。このチェックのために潜水士がトンネル内に入ったが、機械の操作手順を取り違えたため、潜水士は吸い込まれ死亡するという痛ましい事故があった。
- トンネルの海側出口は当面の数年間、蓋で閉じた。この後に取水パイプの予算化するための時間が必要であったためである。
- Micro Tunnel 工法及び取水パイプ関連の 2005 年完成には、\$21M かかったとのこと。

- そもそも 1991 年の設計では、流量最大化のため取水管の厚みは薄かったが、管内の負圧で変形したり、潰れる恐れがあったため、設計を変更した。補強リングを取り付けて円形を保つようにしたが、それなりにコストはかかることであった。
- 取水管 55"HDPE は KWH 社が製作、短管 20m が台船で運搬された。パイプの積み降ろし・運搬は大変なので、着船した港付近で管の接続作業を行った。
- 長管を接続して 1 本もの取水管を敷設するに当たり、パイプラインの直線を保つために、海上では 2 隻の引船と、陸上では 2 台のブルドーザーで引っ張った。取水管の総重量は 50,000 トンもあった。
- マイクロトンネルの掘進後はコンクリート管を挿入する予定であったが、FRP 管が良いと判断し、途中で FRP 管に変更した。そのためトンネル面の養生管は、最初だけコンクリートで残りは全て FRP となった。
- トンネルの出口は FRP 管で、そこで HDPE 管と接続している。接続はエポキシ系接着剤で固定した。2006 年の地震で接着部がずれて水漏れを起こしたため、補修している。
- 陸側にも約 10mx20m の取水ピットを建設し、別途建設した海側のピット（立坑）から掘進したトンネルと接続した。ピットの北半分が深層水用、南半分が表層水用の計 2 本のトンネルがピットとリーフ出口で HDPE 取水管と繋がっている。
- ピットには FRP 製の Canister が 2 基、深層水用と表層水用が吊下げられ、ピット内に置かれている。一つの Canister は、3 本のパイプ支柱（目視では約 1.5m 径）とそれらの中心にもう 1 本太めメインパイプ（約 2.0m 径）から構成されている。
- 太めのメインパイプは Micro トンネル管と直接 90 度で潜水土により接続されており、その上のレベルで 3 本のパイプに海水を三方横に分流している。3 本パイプのそれぞれの上にはポンプが置かれている。ポンプ 3 基の内 1 基はバックアップである。3 本パイプにはオーバーフロー管も設置されている。
- メインパイプの上端は開放されているため（マンホールから目視可能）、55"用取水ピットはいわゆる自然流下方式だといえる。
- 陸側の取水ピットの壁面と底版は、特にコンクリートを打設してはいない。Canister が設置され、メインパイプと Micro トンネルが接続された後は、ピット内は掘削土で埋め戻しされている。そのため Canister を見ることはできない。
- ハワイでは環境規制により、使用済みの海水を直接海に流すことが禁じられている。そのため NELHA の全てのテナントは、排水は自らの敷地内で地下浸透させることが義務付けられている。地下浸透させた海水は、徐々に浄化され海に戻っていくという発想である。
- 地下浸透による地下水質チェックのために、計 21 本のコントロール Well（井戸）で定期モニターしている。一つの Well は、3"ケーシング管を様々な深度まで挿入させたものである。それらの内 1 本は空港に隣接する箇所であり、他との比較（ベースライン）に使っている。
- マイクログリッドシステムの総コスト約\$1.2M をローンで調達しているため、これを償還するために核テナントには\$18/kWh で提供している。
- 同システムでは、非常用発電から太陽光発電または蓄電池に切替えるのに、マニュアル操作である。これは自動切替移行スイッチが一つの非常用電気しか扱えず、グリッドから発電機に運転するように設定されていたためである。
- UPS も備えているが 15 分しか電気供給ができない。これは主に吸込みポンプを稼働するためで、バックアップポンプを海水で満たす（空になると動かさないのでもいつでも動かせるように満水状態にしておく必要がある）ことにある。もし吸込みポンプが止まると、空の状態から満水にするまで 30 分は要する。
- 小型の表層水用ポンプは、大型の常用ポンプに交換する予定である。
- 全てのポンプのモーターは 250HP である。これとは別に幾つかのブースターポンプもあり、陸側の幹線道路まで配水している。
- NELHA は温度やセンサー類の設備を試験するのに、最適な所である。
- Monterey Bay Aquarium（テナント）では、深海魚の移動や繁殖の可能性を調査するための水槽を有している。
- Canister のメインパイプの中にはフィルタースクリーン（6cm メッシュで荒め）が置かれているが、これはポンプを保護する目的がある。フィルターや Canister パイプはあまり清掃されていない。

- 取水ピットは建設中、ドライにしない状況で Canister を吊下げたが、海水を満たすのに時間を要した。そのため Canister はしばらくの間沈めておいた。Micro トンネルと Canister メインパイプは潜水士によって接続された（エポキシ接着材）。
- ポンプ送水にはチェックバルブが装備されている（取水側でなく送水側）。チェックバルブは十分な止水性がなく、ポンプ内を満水にすることに支障をきたしている。
- モーターやポンプはしばしば交換した。時には新しいモーターを部品取りのために購入し、古いポンプの補修のために使用した。
- 機械的シールは錆びるため、真水を使った流体シール（スタッフィングボックス、グランドパッキング含む）を採用した。ポンプの動きが落ちた時は、真水を 1~2ft 吸い上げてポンプを満水にする。
- ポンプステーションでは、1 基のポンプが常に稼働している。2 基目は満水状態にしておき、3 基目はオフ状態である。
- 新しいポンプの外装は約\$100,000/個。新しいポンプの完成品は\$150,000/セット。
- ソレノイドバルブ（電磁弁）を夏季に追加し、ポンプの満水維持や止水を制御するようにしている。現在はポンプの満水状態をチェックするための水位センサーが付属されているだけである。
- ポンプを分解し維持するのは容易である。数時間もあれば元通りに戻せる。
- 理想的には垂直タービンが使われるのが良いが、メンテするためにクレーンを持ち込まないといけない。
- ポンプ外装表面に比べ、ポンプ内は錆が進む傾向がある。様々な制御システムが Stepped pulse（段差パルス）を送っている（アナログではなく）ことにより、不規則な流れが起き、ポンプ内のベアリングや他の部品を腐食させている。
- 不規則な流れを除去するために、通常の薄いアース線ではなく、幅広の薄い Conductors の VFD ワイヤを追加する必要がある。深層水用、表層水用のポンプはどちらも似たような腐食傾向である。
- ポンプのバランス取れた運転が大きな課題である。55"は高圧に耐えるので、必要なら遠く北部エリアにも送水できるが、コストはかかる。NELHA では現在、ポンプ 2 基でなく 1 基のみを稼働させている状況。これによりメンテ頻度と運転時間を減らしている。
- 今後はクリーニングポンプを Canister の底部に設置できれば良いと考えている。しかし Canister の取水回転率は高いので（つまり海水が滞留しない）、それほど多くの生物付着はないだろう。

(7) 写真

	
Makai Ocean Engineering オフィス	Makai Ocean Engineering との協議の様子 (2024/2/19)



NELHA 入口



深層水を利用した空調設備 (SWAC)



NELHA 関係者との打ち合わせの様子
(2024/2/20)



40"ポンプ用インバーター



北ポンプステーション 圧力モニター



40"ポンプステーション



40"ピットカバー 鉄筋が腐食している



40"トレンチ掘削後のコンクリート埋め戻し箇所



地下水質モニター (Well)



マイクログリッド太陽光発電



55"ポンプステーション



ブースターポンプ



3つのポンプ (表層水用)



3つのポンプ (深層水用)



深層水用レデューサー



表層水用レデューサー



真空ポンプ用 UPS



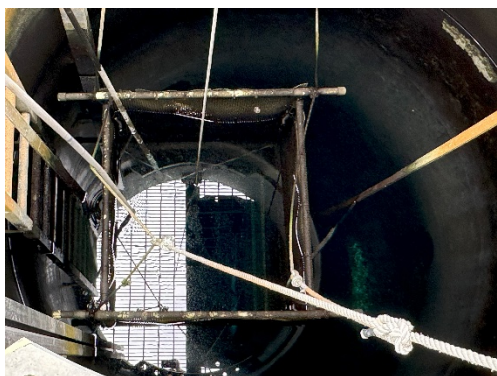
プライミング用真空ポンプ



表層水用インバーター



深層水配水管 流速・圧力モニター



Canister のメインパイプの内部



ポンプ モーター部



ポンプラベル (GOULDS PUMPS 社)



55"中間ピットをコンクリートで埋め戻した様子

	
55"取水管展示（外径 140cm 厚 8cm）	排水プール
	
OTEC 施設（2024 年 2 月時点で故障中）	28"取水管（2024 年 2 月時点で未使用）

(8) まとめ

NELHA の大容量の深層水取水システムは、古いものは 1987 年、新しいものでも 2002 年に整備されたもので、現在の NELHA 職員には当時の建設経緯、技術的知見などを知る人間は不在なことから、本調査では当時のスタッフ OB にヒアリングした。またエンジニアリングを一貫して行ってきた Makai Ocean Engineering 社にも訪問し、設計や施工の技術的なヒアリングも行った。いずれも詳細な図面等が残っていないことから、記憶を頼りの内容であり、数字などは不正確なことは否めないが、それでも NELHA の Annual Reports だけでは理解できなかった多くの点を明らかにすることができた。過去には複数の日本人が NELHA を訪問したが、より深く突っ込んだ調査は今回が初めてと言っても過言ではなく、本調査の当初目的は達成できたと考える。

本項では、ヒアリング結果から特筆すべき点をピックアップし、モーリシャスで計画中の深層水取水施設の妥当性を検討するために取得したかった有用な情報を集約・整理した。

① Micro Tunnelling（推進工法）及びピットについて

- 推進工法は専門性が高くコストもかかるが、取水管の波浪保護等構造面のほか、沿岸部の掘削とりわけ発破を伴う場合等、環境面でも解決策となり、有効な工法だと認識している。
- 55"取水管用の Micro Tunnel の建設は、まず汀線近くの岩礁（標高約+2m）に仮のピット（立坑）を掘り、次に陸側のセステーション側（標高約+3m）にもピット（立坑でもあり取水する場所でもある）を掘った。仮の立坑のサイズは約 10mx10m で、これは掘進作業が可能な必要な面積である。陸側ピットのサイズは約 10mx20m で、これは後に Canister を挿入するためのサイズでもある。
- 汀線近くの立坑からは、一本は陸側ピットを目がけ掘進、もう一本はリーフ端を目がけ掘進した。また陸側のピットからも仮ピットを目がけ掘進しドッキングさせた。いずれも難工事であった、特に硬い溶岩と止水対策が問題だった。
- 汀線近くのピットは掘進機の作業のために一旦ドライにするが、作業を終えたら掘削土で埋め戻している。なお現在の技術水準では、中間の立坑はなくても相応の延長を掘進することは可能である。

- トンネル内は通常、コンクリート製のパイプを挿入してトンネル内面を保護するが、NELHA では FRP 製パイプを採用した。そしてトンネル内には 55”HDPE 管は挿入していない。取水した深層水の品質を保つには、トンネル内にも HDPE 管を挿入した方が望ましいと言える。
- トンネルの出口はリーフの先端で、海底が急激に落ち込む箇所（水深-24m）とし、事前に潜水調査して決定している。トンネル出口の FRP 管と 55”HDPE 管は、水中でエポキシ材にて接着した。
- 陸側の取水ピットは、南半分が表層水用、北半分が深層水用で、それらの間に隔壁はなく、内周にコンクリート壁もない。掘進機の作業のために一旦ドライにしたが、2 基の Canister をピット内に吊り降し、取水管と Canister を FRP 管で接続したら、ピット内部は掘削土で埋めつくした。そのためもはや Canister の姿を見ることはできない。

② 55”HDPE 取水管について

- 55”HDPE 取水管のサイズは、サンプル管を実測した結果、外径 140cm、厚さ 8cm、内径 124cm であった。
- HDPE 管は 20m の短管で米国本土から海上輸送し、陸上ヤードで短管を長管約 300m に溶着接続し、長管をさらにフランジ接続して、約 3km の一本ものの HDPE 管を沖合に浮上させた。取水管は浮遊曳航法によって海底に着底させた。
- 取水管にはコンクリートのバンド（ウェイト）を一定ピッチで巻いた。このバンドは、管の円形形状を保つこととともに、海底に着底した時のウェイトの役割も持つ。管内部に空気を溜めた状態で洋上浮上させるため、ウェイトは重過ぎ軽過ぎずに設計する。コンクリートの形状を臨機に変更することで、重量調整したり、HDPE 管を海底に触れないようにすることも可能である。
- 取水管は海底に着底させておくのが好ましいが、一部水深-150m 付近で急な落ち込みや巨石でごつごつしているルートがあり、そこではウェイトを外して浮遊式とした。そうでないと管はブリッジ状態になり、過度な変形が生じるからである。浮遊させた管は海底のアンカーから引張るような形で繋ぎ、流されないようにした。なお 55”取水管は浅海部であっても、トレンチ埋設式にした箇所はない。
- 取水管は波浪と潮流の影響を受ける。波浪は海底等深線と直角に進むのと、取水管も海底等深線と直角に敷設するので、巨石が取水管の横方向から当たることはまずない。潮流により海底の小石が管に当たる場合があるが、管に巻くバンドの形状を調整して管材が直接海底に触れないよう離しておけばよい。
- 取水口は水深約-920m に設置した。管の先端は上向きに曲げている。取水口の入り口にはフィルターは取り付けしていない、吸い込んでしまったものは陸上ピット側で撤去・回収している。

③ Canister について

- ピットには FRP 製の Canister が 2 基（深層水用と表層水用）吊り降ろされ、ピット内に置かれている。1 基の Canister は 3 本のパイプ支柱（約 1.5m 径）と、それらの中心にもう 1 本太めメインパイプ（約 2.0m 径）から構成されている。
- 太めのメインパイプは Micro トンネル管と 90 度で直接接続されており、その作業は潜水土が行った。その上の高さで 3 本の支柱パイプに海水を三方横に分流している。3 本パイプにはオーバーフロー管も設置されている。3 本パイプのそれぞれの上にはポンプが置かれている（水中ポンプはない）。
- メインパイプの上端は開放されているため、55”取水管による取水方式は自然流下方式である。つまりメインパイプが着水槽の役割を担っている。こうした Canister の機能は、着水槽に多くの海水を溜めずに、揚げた海水はすぐにポンプで吸い上げて送水側に送っているものである。
- メインパイプ側にはスクリーンを置いてあって、潜水土がパイプに入り込み清掃メンテすることができるが、狭くてやりにくそうに十分に清掃されていないようである。
- Canister の発想はなかなか生まれてこないものである。構造的に複雑で、その製作と設置にかかるコストは大きく、先進国のアメリカだからこそ可能だったとも言える。

④ ポンプについて

- ポンプやモーターなどの設備品は、当初設計に拘ることなく積極的に新規品を試みている。ポンプ内の部品も同様にたびたび交換し、常にメンテナンスし能力向上を図っている。そういった Operation の専任も抱えており、NELHA が研究施設だからこそその対応能力だと言える。

- 停電時には速やかにバックアップ電源に切り替えることが重要である。ポンプは停電して止まると内部の水が落ちてしまい、空になった状態でポンプを再起動することはできないため速やかにポンプ内を満水状態に戻さなければならない。満水状態に戻すためには数十分要してしまうため、ポンプ内を常に満水状態に保つことを可能とするバックアップ電源を備えておくことが重要である。

⑤ 排水について

- ハワイでは環境規制により、排水位置や深度に拘わらず、使用済みの海水を直接海に流すことが禁じられている。そのため NELHA の全てのテナントは、排水は自らの敷地内で地下浸透させることが義務付けられている。地下浸透させた海水は、徐々に浄化され海に戻っていくという発想である。
- 地下浸透としているのは、溶岩地盤は固いが隙間があるので浸透速度は速いという背景がある。立地や地盤条件によっては地下浸透ができない場所も多くあるはずで、日本では排水管をトレンチ埋設で敷設し、リーフ端部に深層水・表層水を混ぜて排水しているのが実態である。
- NELHA の 28"取水管、40"取水管で供用している旧エリアでは、各テナントから使用済み海水は排水管ないし排水溝で一か所の排水プールに集め、そこから地下浸透させている。現在は OTEC が非稼働なので水量は少なく、プールの水位も低かった。
- NELHA では地下浸透による地下水質チェックのために、Well（井戸）を各所に設け定期モニターしている。モニターの環境基準やこれまでモニター結果は不詳であるが、計画地の国やローカル基準に準じる必要がある。

⑥ その他

環境の規則では、取水口から魚等を吸い込まないように、管内流速に制限を設けているとのこと、速度制限は 0.15m/s とのこと。実際にはこの速度よりは早いケースもあると思われる。

- 取水管の Decommissioning、つまり退役後の撤去については、州の法的な決まりはないようであるが、現在 NELHA 内では撤去についての議論がなされているとのことである。取水管は浮遊曳航式で敷設されたので、管内空気を送れば浮上させることが理論的に可能である。

⑦ 添付資料（巻末に添付する）

- (1) 当方からの質問票（スケッチ）
- (2) Makai Ocean Engineering からの受領資料（PDF）
- (3) NELHA Annual Report（2001 年、2002 年）から抜粋
- (4) NELHA 55"Pipeline に関する Web 記事
- (5) Micro Tunnel に関する Web 記事

2.4.7 大口径取水管製造メーカーに関する調査

深層水の取水管材は、大水深の海底に敷設し補修の手が届かないことや、浅海部では波浪・潮流の影響を受けるという、極めて特殊な環境下で使用するものである。海洋の取水管としては HDPE（高密度ポリエチレン管）を使うのが主流であるが、材質としては特殊なものではないものの、とりわけ大口径 HDPE 管の製作となると、製造可能なメーカーは限られてくる。そのため本調査では、Web 検索、既存知見を中心に、日本国内外に亘って机上調査を行った。

(1) 日本国内

以下の表に、HDPE 管を製作している会社を示す。日本においては、鳥居化成株式会社、株式会社クボタケミックス、デンカ株式会社がいずれも大口径の HDPE 管を製造可能と謳っているが、深層水の取水管用途では使用しておらず、主に配管や排水用途として製作している。古河電工株式会社、三井金属エンジニアリング株式会社は、過去の深層水取水取水管（鉄線または鉄板外装 HDPE 管）の製造経験があり、日本の深層水管として良く知られているが、いずれも 250mm～300mm 前後と小口径である。以上のことより、日本国内において取水管用の HDPE メーカーはあっても大口径管の製作実績はない。国内調達における残された可能性としては、前出のメーカーが OEM（Original Equipment Manufacturer：メーカーが自社ではないブランドの製品を製造すること）を通じて開発していくことが考えられる。

表 36 日本国内の HDPE 管製造メーカー

会社名	最大呼び径 (mm)	主要使用用途	備考
鳥居化成株式会社 < https://www.toriik.co.jp/ >	1,000-3,000	排水管、農業用水、道路横断管等	
株式会社クボタケミックス < https://www.kubota-chemix.co.jp/ >	1,100	取水管、冷却水配管等	
デンカ株式会社 < https://www.denka.co.jp/#top >	2,000	排水管、下水道配管、道路横断管等	
古河電工株式会社 < https://www.furukawa.co.jp/ >	337	取水管、上下水道配管、農業用水管等	呼び径 250mm にて海水取水管の事例有り
三井金属エンジニアリング株式会社 < https://www.mesco.co.jp/ >	-	取水管、上下水道配管、農業用水管等	呼び径 300mm にて海水取水管の事例有り
積水化学工業株式会社 < https://www.sekisui.co.jp/ >	-	取水管、上下水道配管、農業用水管等	呼び径 315mm にて海水取水管の事例有り

(9) 日本国外

① 全般

日本国外で大口径の HDPE 管を製作している会社は多数ある。一部例を以下の表に示す。Aqualia 及び STR Marketing Ltd.はいずれもモーリシャスの HDPE パイプを製造している会社であるが、呼び径が 200mm、400mm とかなり小さい。その他の会社はイギリス、アメリカ、南アフリカ、スペイン、フィンランド等多岐にわたり、いずれも大口径の HDPE 管が製造可能である。特にスペインの会社である Grupo PPA は、取水管の納入実績、アフリカへの納入実績共に多数ある。また、フィンランドの会社である現 Uponor Infra Ltd.は、NELHA にも 55”パイプを提供した KWH Pipe の合併後の会社であり、主に北ヨーロッパへ多数の取水管納入実績がある。オーストリアの会社である AGRU も大口径取水管納入実績を有している。

表 37 日本国外の HDPE 管製造メーカー

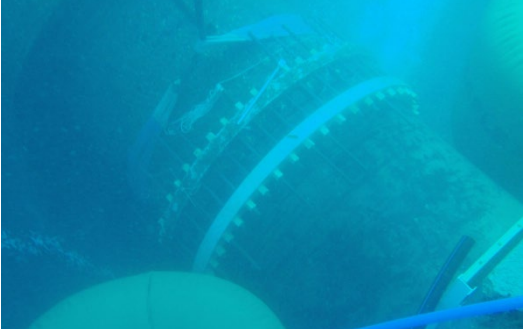
会社名	国	最大呼び径 (mm)	主要使用用途	備考
Aqualia (Taylor Smith Group) < https://aqualia.mu/ >	モーリシャス	200	灌漑配管	
STR Marketing Ltd. < https://www.str.mu/ >	モーリシャス	400	-	
Polypipe < https://www.polypipe.com/ >	イギリス	315	排水管等	
ISCO < https://www.furukawa.co.jp/ >	アメリカ	2,250	排水管等	
Flo-Tek < https://www.flotekafrika.com/ >	南ア	1,000-	鋼業、水道配管、灌漑等	
Grupo PPA < https://grupoppa.es/en/home/ >	スペイン	4,000	取水管・放流管等	取水管実績・アフリカ納入実績多数あり
Uponor Infra Ltd < https://www.uponor.com/en-en >	フィンランド	3,000	取水管・放流管等	合併前の KWH Pipe が NELHA の 55”パイプを手掛

(前 KWH Pipe)				けた
AGRU < https://www.agru.at/en/ >	オーストリア	3,500	取水管・排水管・	取水管実績多数あり

② Grupo PPA 社

前述した通り Grupo PPA はスペインの会社であり、主な事業は、大口径 HDPE パイプ、HDPE および PP タンク、環境脱臭システム、モジュール式脱塩プラント、プロセス機器、産業用プレハブシステム的设计・製造・設置である。大口径 HDPE パイプの中でも取水管パイプの実績も多数あり、下記表に実績例を示す。いずれも中東やアフリカ方面への納入であり、管径も 1200mm~3000mm とかなりの大口径であることがわかる。

表 38 Grupo PPA 社 取水管実績例

	
国：UAE 納入地：Jebel Ali desalination plant 管径：2,000mm	国：サウジアラビア 納入地：Jazan Economic City desalination plant 管径：1,800mm, 1,600mm
	
国：サウジアラビア 納入地：Jazan Economic City 管径：3,000mm	国：アルジェリア 納入地：Cap Djinet desalination plant 管径：1,800mm, 1,200mm
	

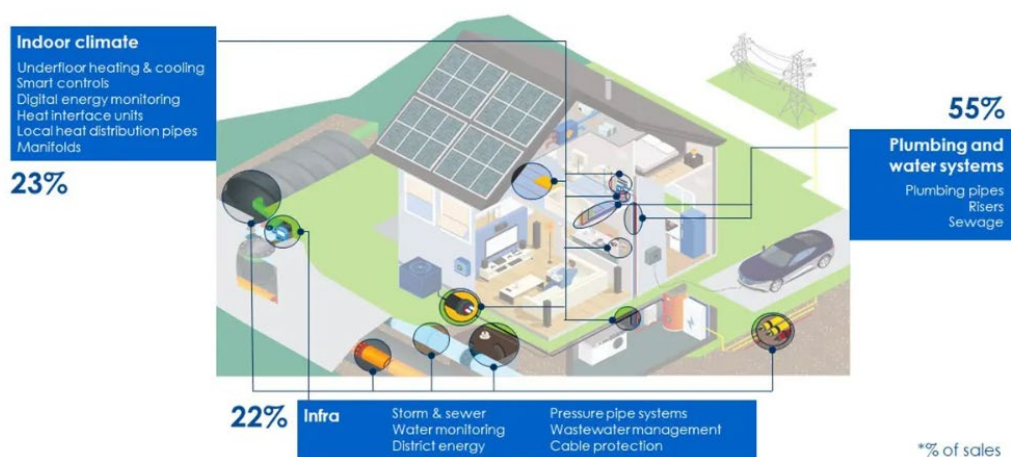
国：アルジェリア 納入地：refrigeration of the fertilizer plant 管径：2,400mm	
---	--

出典：Grupo PPA 社ホームページ

③ Uponor Infra Ltd.社

ハワイの NELHA の 55”管を手掛けた KWH Pipe の合併後のフィンランドの会社である。Uponor Infra Ltd.は、持続可能な水ソリューションの開発を主導するというビジョンをおいた企業であり、事業内容は、配管・水道システムや屋内気候システム、インフラなど、多岐にわたる。下記図に事業内容例を示す。

Our business groups with product examples

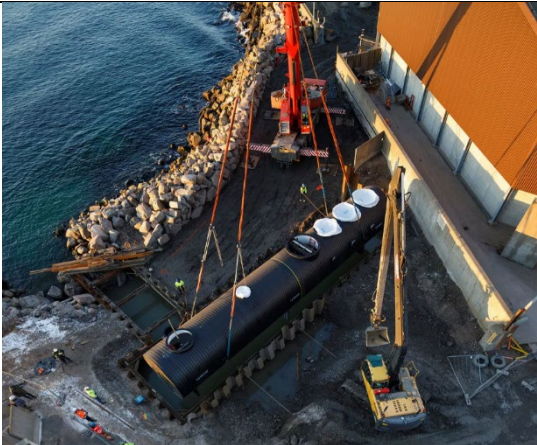


出典：Uponor 社ホームページ

図 79 事業内容例

取水管工事の実績もあり、下記に実績例を示す。

表 39 Uponor Infra Ltd.社 取水管実績例

	
国：デンマーク 納入地：Copenhagen Harbour 管径：3,000mm 完成年：2018	国：スウェーデン 納入地：district cooling station seawater intake in Helsingborg 管径：3,500mm 完成年：2018

出典：Uponor 社ホームページ

④ AGRU 社

AGRU 社は従業員数 1,000 名を超え、複数の大陸に生産工場を保有しているプラスチック会社である。大口径 HDPE 管に関しては、HP 上に納入実績例としてはまとめられていないが、施工中と思われる写真が多数あったため以下に参考として示す。また、一番下の写真はタグボートに牽引されている管の様子である。これらは 1 本あたり外径 2,830mm、長さ 523m であり、このサイズの径・長さの管を牽引することは世界記録であるとの情報もある。

図 80 AGRU 社 HDPE 管 施工写真



出典：AGURU 社ホームページ

(3) まとめ

以上のことより、国内調達の場合は先述の各社に OEM 等を通じて依頼して開発する、もしくは国外調達の場合には Grupo PPA 社及び Uponor Infra Ltd.社、AGRU 社が有力候補である。

2.4.8 現地工事における建設（海洋工事）業者のポテンシャルに関する調査

「モ」国における建設（海洋工事）業者は、Tayler Smith Group とパートナーシップを結んでいる Ocetra Maurice 社のみであった。その他には Chantier Naval De L'Océan Indien 社（CNOI）や、インドに本社がある Coastal Marine Construction & Engineering (Mauritius) Limited 社（COMACOE）の名前が候補として挙げられたが、CNOI は造船会社であり、COMACOE は「モ」国内の住所の情報もあるが公式ホームページが改修中で正確な情報を得ることができなかったことから、本章では Ocetra Maurice 社の情報及びポテンシャルについて記述する。

表 40 に Ocetra Maurice 社の会社概要を、表 41 及び表 42 にそれぞれ保有船舶及び保有作業船を示す。

表 40 Ocetra Maurice 社 会社概要

設立年	2013（「モ」国支社は 2021）
本社	レユニオン島
「モ」国支社 従業員数	10
事業内容	1. 水中作業（パイプ・ケーブル敷設、いかだ基礎作成、杭・矢板切断、溶接作業、海底掘削、シーリング、排水路の設置、潜水作業、消波ブロック等の設置等） 2. 海洋工事（護岸建設、はしけ設置、岸壁補修、浚渫工事、フェンダー設置等） 3. 調査（深浅測量等） 4. 環境関連事業
工事実績	Web には掲載無し

表 41 保有船舶

Moss	Swordfish	Paul
		
船長：13.4m 船幅：4.21m 最大海上滞留可能時間：12 時間 最大乗船可能人数：10 搭載クレーン：GUERRA M652041 吊り上げ荷重：1,095kg 最大油圧延長：5.5m	船長：6.56m 船幅：2.44m 推進力：88kW エンジン：115 HP YAMAHA 最大乗船可能人数：6	船長：7.3m 船幅：1.98m 推進力：150kW エンジン：1×150 HP YAMAHA 最大乗船可能人数：6

表 42 保有作業船

Shomoro	Pearl	Sparrow
		
長さ：23m 幅：17m 高さ：2.4m デッキ面積：398m ² 杭の最大長さ：32m 重量：298.55t	長さ：8m 幅：5m 高さ：1m デッキ面積：40m ² 杭の最大長さ：8m 総トン数：12t 最大乗船可能人数：8	長さ：18.30m 幅：18.30m 高さ：1.5m デッキ面積：298m ² 杭の最大長さ：27m 総トン数：78.8t 稼働制限： デッキ最大許容重量：100t または 15t/m ² 最大自由長：22m クレーン最大許容重量：80t 昇降システム： 持ち上げ速度：15m/h シリンダー長さ：1.5m

Ocetra Maurice 社は 2013 年に設立した会社（「モ」国支社は 2021 年設立）であり、現在創立 10 年ほどの会社である。事業内容は深浅測量やパイプ・ケーブル敷設、溶接作業、地形掘削など多岐にわたっている。保有作業船が港湾の岸壁や防波堤の構造に使われるケーソン製作用の特殊機械であることから、港湾工事の能力はあると考える。本事業実施にも含まれる海岸工事、例えば掘削や築堤なども一定の経験があるものと思われ、本事業の工事実施のポテンシャルはあるといえる。

一方で Web から得られた情報はごく限られている情報であり、ポテンシャルを図る上で重要な工事実績情報等を確認できなかった。本事業の主要な工事業者になりうるのか、外国業者のサブ工事業者になりうるのか、もしくは一部の業務のみを行う下請けの会社となるかは、更なる現地調査・ヒアリング調査が必要となる。

本事業の実施においては、深層水工事が極めて特殊であることから、深層水事業の実績を有する海外業者をメインとして選定し、その JV サブまたはサブコンとして、掘削工事や船舶・作業船の提供など、専門工事を行うローカルサポートとしてのポテンシャルは十分にあるといえる。

COMACOE 社に関しても、モーリシャス支社があるとすれば、本事業においても有力な現地建設（海洋工事）業者の候補になりうるため、支社の存在を含め現地調査で確認する必要がある。

2.5 モーリシャスにおける海洋温度差発電の適用に関する検討

2.5.1 OTEC 施設側の要件

(1) 取水条件

		Saint Felix 案	Bel Ombre 案
深層水	取水深度	-800m 以深、目標 -1,000m	-800m 以深、目標 -1,000m
	取水量	10,000 ton/hr (6.6°C) = 240,000 ton/day	7,500 ton/hr (6.6°C) = 180,000 ton/day
表層水	取水深度	-30m	-30m
	取水量	12,500 ton/hr (29.5°C)	10,500 ton/hr (29.5°C)

		= 300,000 ton/day	= 252,000 ton/day
--	--	-------------------	-------------------

(2) 排水条件

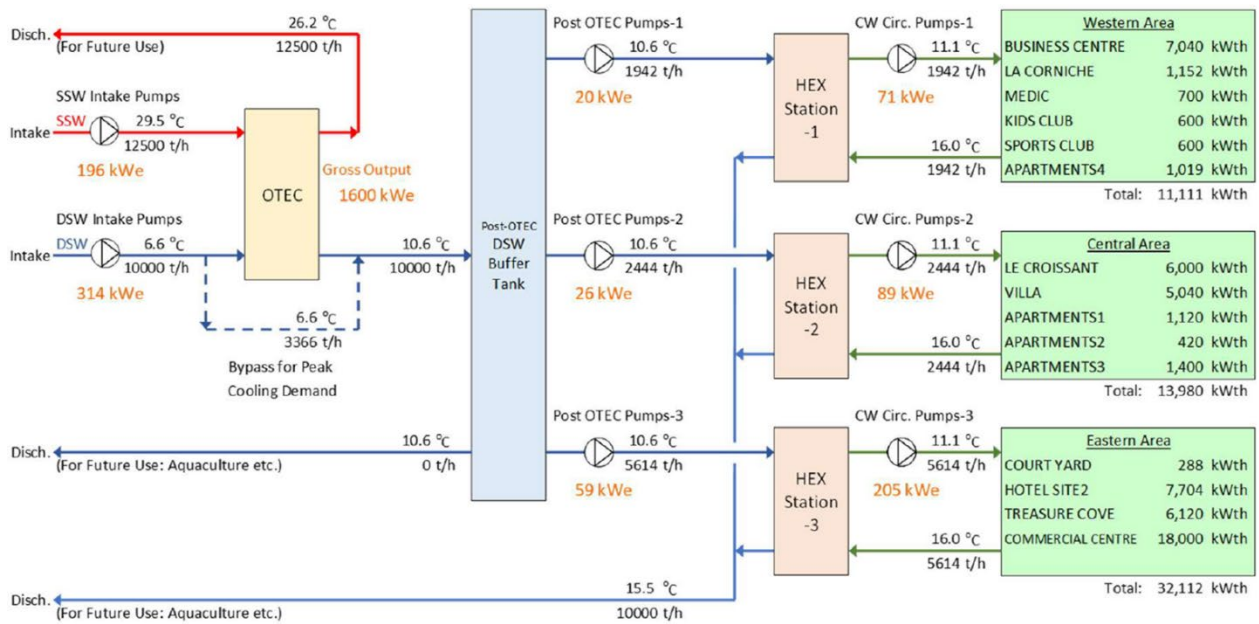
		Saint Felix 案	Bel Ombre 案
深層水	排水深度	海底条件による	海底条件による
	排水量	10,000 ton/hr (15.5℃) = 240,000 ton/day	6,240 ton/hr (12.6℃ OTEC より) = 150,000 ton/day 1,260 ton/hr (19.2℃ OTEC より) = 30,000 ton/day
表層水	排水深度	海底条件による	海底条件による
	排水量	12,500 ton/hr (26.2℃) = 300,000 ton/day	10,500 ton/hr (25.1℃) = 252,000 ton/day

(3) 陸上施設

Saint Felix 案、Bel Ombre 案とも、陸上の OTEC 施設あるいは水産・農業用施設の配置計画は未定であるが、候補地として以下のように初期検討がされている。

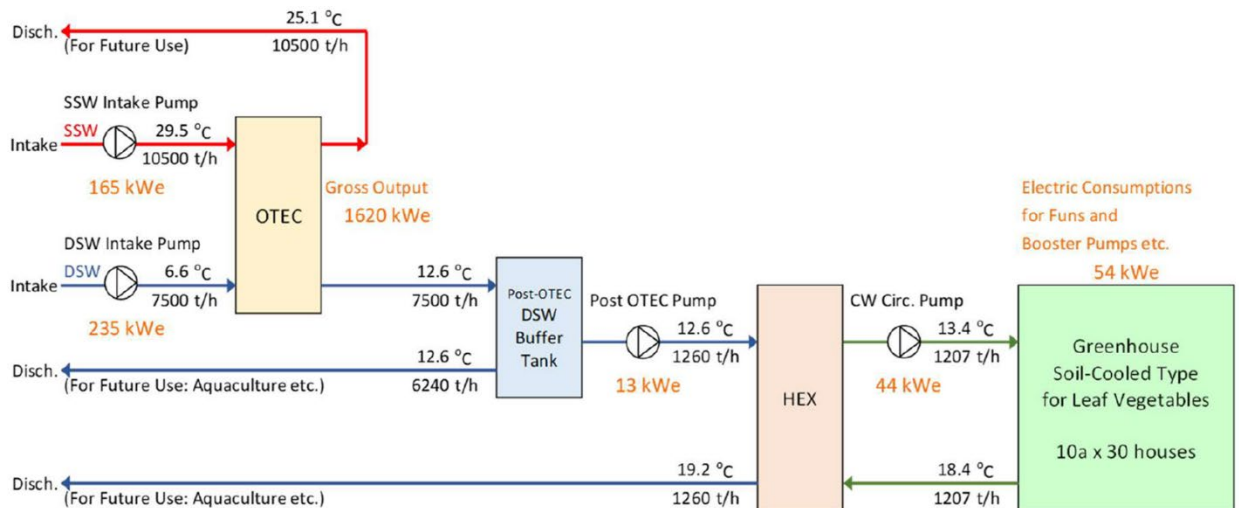


図 81 南部海岸における取水施設候補地案



出典：株式会社ゼネシス

図 82 Saint Felix における OTEC 基本システム案



(*1) Note: Cooling load varies greatly depending on greenhouse type and product.

出典：株式会社ゼネシス

図 83 Bel Ombre における OTEC 基本システム案

2.5.2 OTEC 最適化

(1) 計算条件

Saint Felix 案、Bel Ombre 案の取水条件において評価関数を用い計算を行った。
なお、評価関数は以下のように定義する。

$$\gamma_{mu,1} = \frac{W_{NET} + Q_L}{Q_E A_T}$$

$$\gamma_{mu,2} = \frac{A_T}{W_{NET} + Q_L}$$

ここで、評価関数 $\gamma_{mu,1}$ は、表層海水から得られる熱量 Q_E と熱交換器の総伝熱面積 A_T に対する正味出力 W_{NET} と冷熱利用される熱量 Q_L により定義され、 $\gamma_{mu,1}$ が高い値となる条件で最適設計を行う。

評価関数 $\gamma_{mu,2}$ は、正味出力 W_{NET} と冷熱利用される熱量 Q_L に対する熱交換器の総伝熱面積 A_T により定義され、 $\gamma_{mu,2}$ が高い値となる条件で最適設計を行う。

表 43 計算条件

	Value			Unit
Gross power W_G	1000	1250	1500	kW
Warm source inlet temperature T_{WSI}	29.5			°C
Cold source inlet temperature T_{CSI}	6.6			°C
Environmental temperature T_{ENV}	30.0			°C
Generator efficiency η_G	96.0			%
Warm source mass flow rate m_{WS}	Saint Felix	Bel Ombre	t/h	
	12500	10500		
Cold source mass flow rate m_{CS}	Saint Felix	Bel Ombre	t/h	
	10000	7500		
Overall heat transfer coefficient in evaporator U_E	10.0			kW/(m ² ·K)
Overall heat transfer coefficient in condenser U_C	5.0			kW/(m ² ·K)
$U_C \times (\text{Condenser heat transfer area } A_C)$ / (Working fluid heat exchange in condenser Q_C)	1.0			1/K
Working fluid	Ammonia			
Heat source	Water			

(2) 計算結果

以下の表に Saint Felix 案, Bel Ombre 案において評価関数 $\gamma_{mu,1}$, $\gamma_{mu,2}$ が極値（最適値）となる点の値を示す。

表 44、表 45、表 46 にそれぞれ $W_G=1000$ kW, 1250 kW, 1500 kW の計算結果を示す。

表 44 計算結果

$W_G=1000$ kW	Saint Felix		Bel Ombre	
Evaluation function $\gamma_{mu,1}$ [1/m ²], $\gamma_{mu,2}$ [m ² /kW]	$\gamma_{mu,1,MAX}$	$\gamma_{mu,2,MIN}$	$\gamma_{mu,1,MAX}$	$\gamma_{mu,2,MIN}$
	0.003570	0.01588	0.002466	0.02243
Net power W_{NET} [kW]	1031	1031	1031	1031
Turbine power W_T [kW]	1042	1042	1042	1042
Working fluid pump power $W_{P, WF}$ [kW]	10.68	10.55	10.73	10.61
Evaporator heat transfer area A_E [m ²]	896.5	680.8	955.4	733.5
Condenser heat transfer area A_C [m ²]	3264	3401	3352	3490
$A_T=A_E+A_C$ [m ²]	4160	4082	4308	4223
Working fluid mass flow rate m_{WF} [kg/s]	13.94	14.50	14.32	14.88
Warm source outlet temperature T_{WSO} [°C]	28.31	28.26	28.05	27.99
Cold source outlet temperature T_{CSO} [°C]	7.999	8.058	8.516	8.594
Thermal efficiency η [%]	5.942	5.717	5.794	5.579
Working fluid heat exchange in evaporator Q_E [kW]	17350	18040	17790	18480
Warm source heat exchange in evaporator Q_{WS} [kW]	17350	18040	17790	18480
heat balance in evaporator	1×10^{-5}	2×10^{-6}	4×10^{-6}	6×10^{-6}
Working fluid heat exchange in condenser Q_C [kW]	16320	17010	16760	17450
Cold source heat exchange in condenser Q_{CS} [kW]	16320	17010	16760	17450
heat balance in condenser	1×10^{-5}	8×10^{-6}	1×10^{-5}	7×10^{-6}
Low temperature heat utilization Q_L [kW]	256700	256000	188000	187300
COP (Coefficient of performance)	249.0	248.2	182.3	181.7
$U_E \times A_E / Q_E$ [1/K]	0.5167	0.3774	0.5370	0.3969

表 45 計算結果

$W_G=1250$ kW	Saint Felix		Bel Ombre	
Evaluation function $\gamma_{mu,1}[1/m^2]$, $\gamma_{mu,2}[m^2/kW]$	$\gamma_{mu,1,MAX}$	$\gamma_{mu,2,MIN}$	$\gamma_{mu,1,MAX}$	$\gamma_{mu,2,MIN}$
	0.002129	0.02083	0.001415	0.03019
Net power W_{NET} [kW]	1289	1289	1289	1289
Turbine power W_T [kW]	1302	1302	1302	1302
Working fluid pump power $W_{P,WF}$ [kW]	13.38	13.23	13.46	13.34
Evaporator heat transfer area A_E [m ²]	1179	906.5	1296	1010
Condenser heat transfer area A_C [m ²]	4182	4352	4353	4527
$A_T=A_E+A_C$ [m ²]	5361	5259	5649	5536
Working fluid mass flow rate m_{WF} [kg/s]	17.86	18.55	18.59	19.30
Warm source outlet temperature T_{WSO} [°C]	27.98	27.92	27.62	27.55
Cold source outlet temperature T_{CSO} [°C]	8.392	8.465	9.088	9.187
Thermal efficiency η [%]	5.806	5.591	5.589	5.387
Working fluid heat exchange in evaporator Q_E [kW]	22200	23050	23060	23920
Warm source heat exchange in evaporator Q_{WS} [kW]	22200	23050	23060	23920
heat balance in evaporator	2×10^{-6}	3×10^{-6}	8×10^{-6}	2×10^{-6}
Working fluid heat exchange in condenser Q_C [kW]	20910	21760	21770	22630
Cold source heat exchange in condenser Q_{CS} [kW]	20910	21760	21770	22630
heat balance in condenser	1×10^{-5}	9×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-5}
Low temperature heat utilization Q_L [kW]	252100	251200	183000	182100
COP (Coefficient of performance)	195.6	194.9	142.0	141.3
$U_E \times A_E / Q_E$ [1/K]	0.5312	0.3933	0.5621	0.4222

表 46 計算結果

$W_G=1500$ kW	Saint Felix		Bel Ombre	
Evaluation function $\gamma_{mu,1}[1/m^2]$, $\gamma_{mu,2}[m^2/kW]$	$\gamma_{mu,1,MAX}$	$\gamma_{mu,2,MIN}$	$\gamma_{mu,1,MAX}$	$\gamma_{mu,2,MIN}$
	0.001363	0.02640	0.0008572	0.03970
Net power W_{NET} [kW]	1546	1547	1546	1546
Turbine power W_T [kW]	1563	1563	1563	1563
Working fluid pump power $W_{P,WF}$ [kW]	16.09	15.93	16.23	16.12
Evaporator heat transfer area A_E [m ²]	1505	1169	1720	1372
Condenser heat transfer area A_C [m ²]	5163	5369	5484	5688
$A_T=A_E+A_C$ [m ²]	6669	6538	7204	7060
Working fluid mass flow rate m_{WF} [kg/s]	22.04	22.89	23.41	24.25
Warm source outlet temperature T_{WSO} [°C]	27.62	27.55	27.14	27.05
Cold source outlet temperature T_{CSO} [°C]	8.813	8.901	9.734	9.850
Thermal efficiency η [%]	5.651	5.447	5.338	5.157
Working fluid heat exchange in evaporator Q_E [kW]	27360	28390	28970	29990
Warm source heat exchange in evaporator Q_{WS} [kW]	27360	28390	28970	29990
heat balance in evaporator	3×10^{-6}	9×10^{-6}	1×10^{-6}	6×10^{-6}
Working fluid heat exchange in condenser Q_C [kW]	25820	26850	27420	28440
Cold source heat exchange in condenser Q_{CS} [kW]	25820	26850	27420	28440
heat balance in condenser	7×10^{-6}	4×10^{-6}	1×10^{-5}	7×10^{-6}
Low temperature heat utilization Q_L [kW]	247200	246200	177300	176300
COP (Coefficient of performance)	159.8	159.2	114.7	114.0
$U_E \times A_E / Q_E$ [1/K]	0.5500	0.4117	0.5938	0.4577

以下に $U_E A_E / Q_E$ の変化ごとの評価関数 $\gamma_{mu,1}$, $\gamma_{mu,2}$ に関する値の変化を示す。

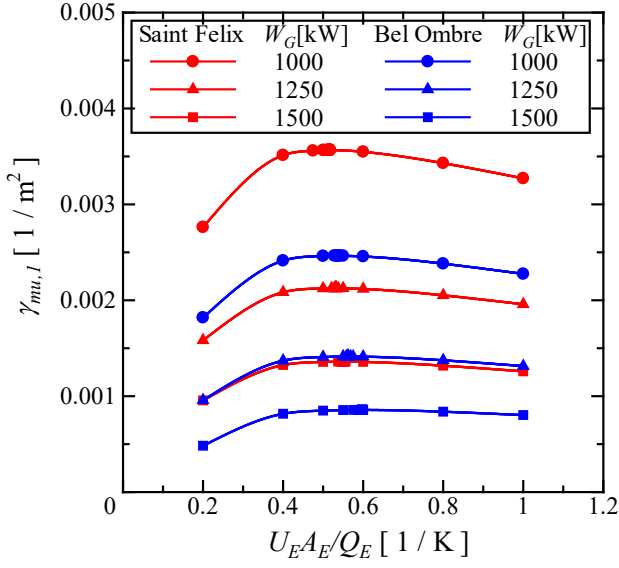


図 84 Relation between $\gamma_{mu,1}$ and $U_E A_E / Q_E$

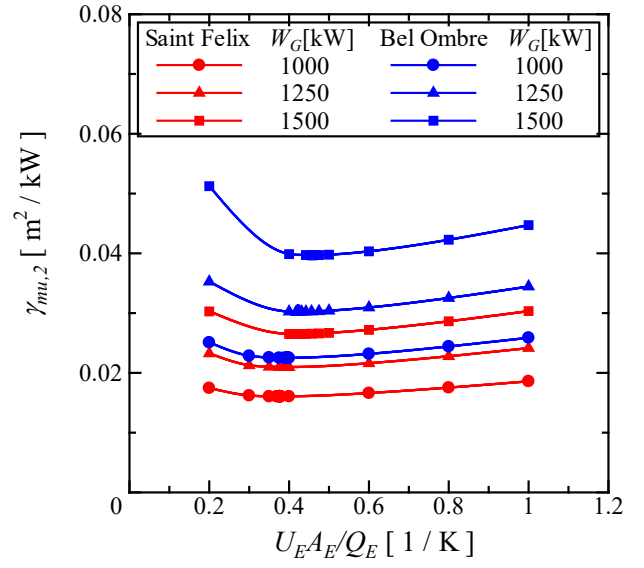


図 85 Relation between $\gamma_{mu,2}$ and $U_E A_E / Q_E$

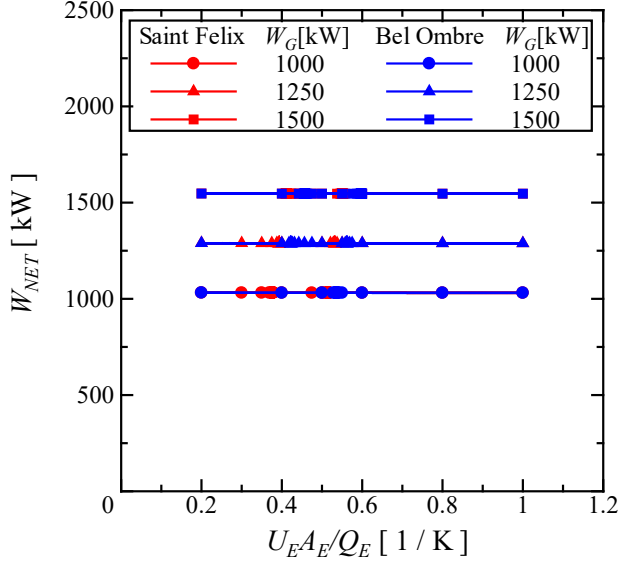


図 86 Relation between W_{NET} and $U_E A_E / Q_E$

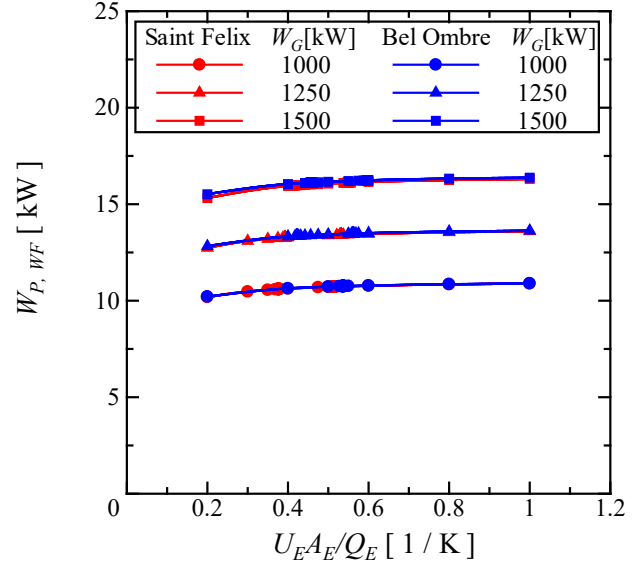


図 87 Relation, between $W_{P,WF}$ and $U_E A_E / Q_E$

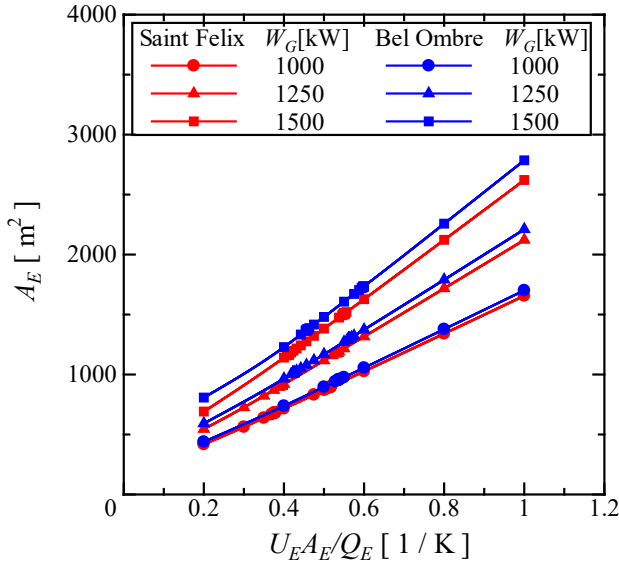


図 88 Relation, between A_E and $U_E A_E / Q_E$

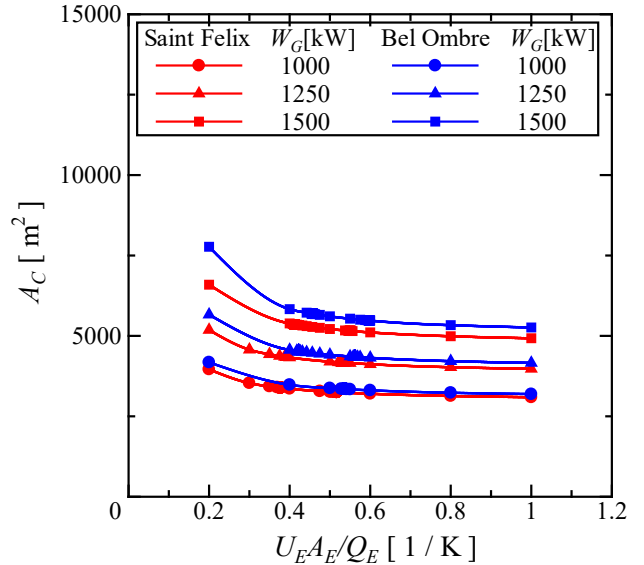


図 89 Relation between A_C and $U_E A_E / Q_E$

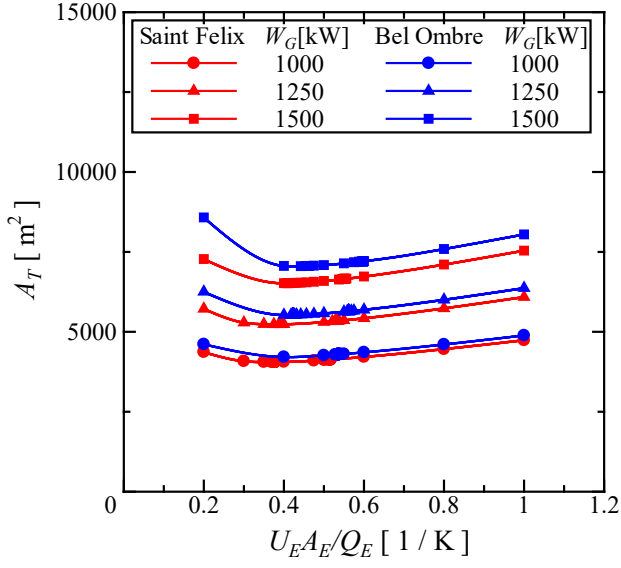


Figure 90 Relation between A_T and $U_E A_E / Q_E$

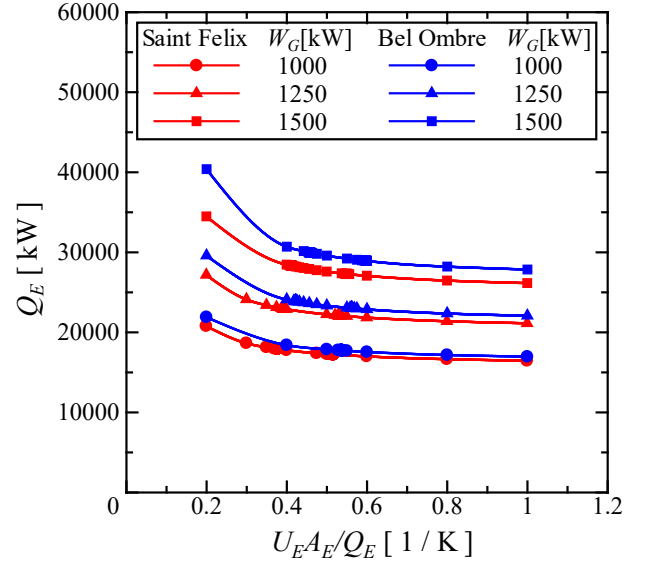


Figure 91 Relation between Q_E and $U_E A_E / Q_E$

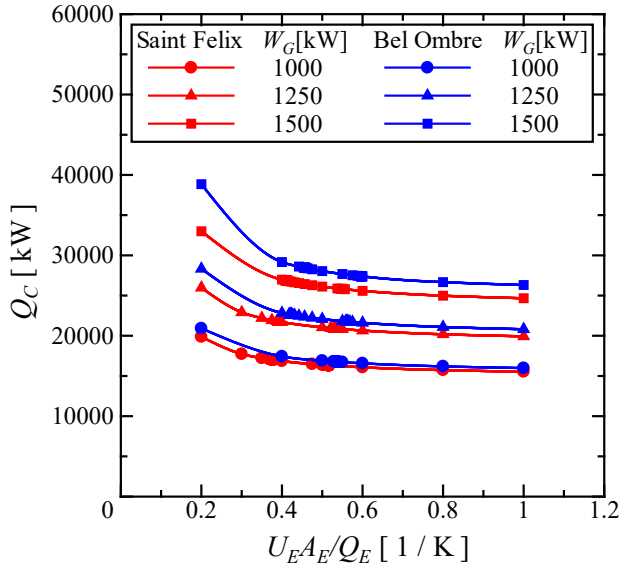


Figure 92 Relation between Q_C and $U_E A_E / Q_E$

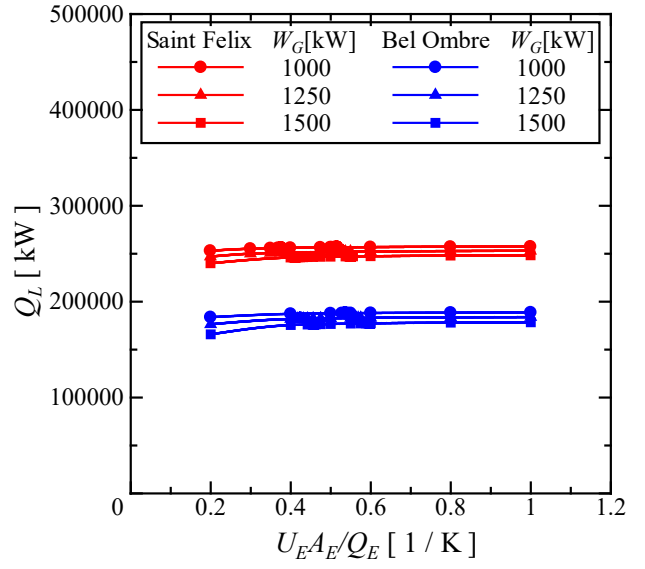


Figure 93 Relation between Q_L and $U_E A_E / Q_E$

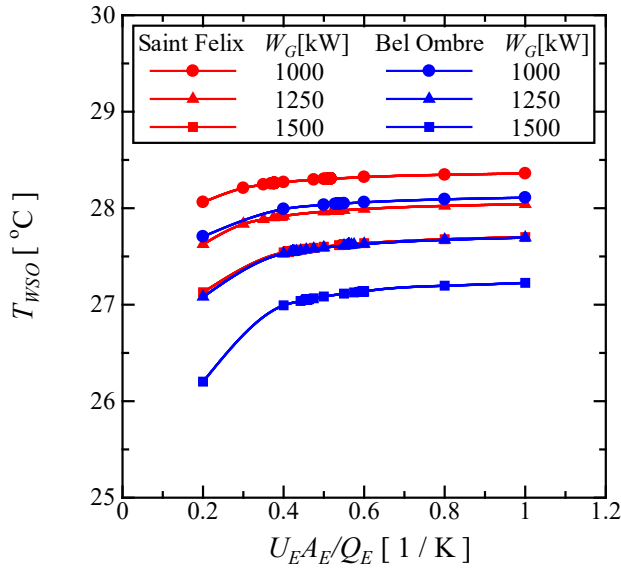


Figure 94 Relation between T_{WSO} and $U_E A_E / Q_E$

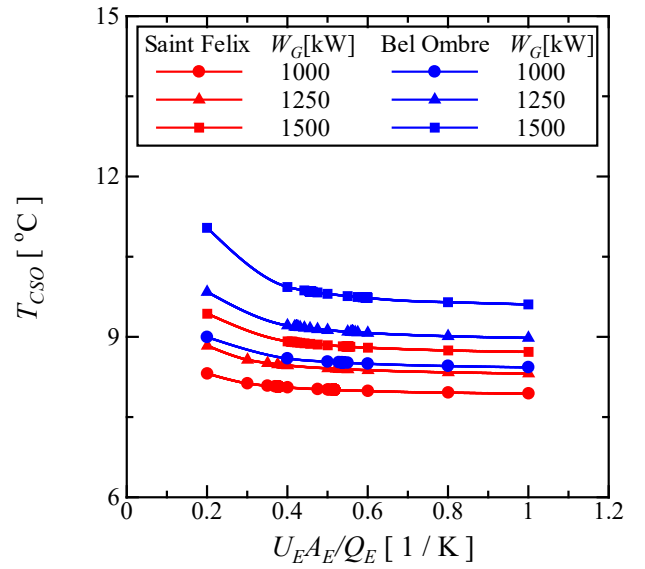


Figure 95 Relation between T_{CSO} and $U_E A_E / Q_E$

以下に T_{CSO} の変化ごとの評価関数 $\gamma_{mu,1}$, $\gamma_{mu,2}$ に関する値の変化を示す。

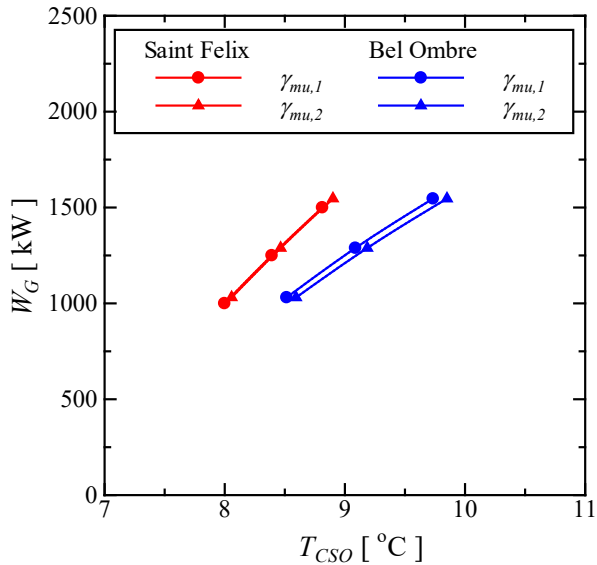


図 96 Relation between W_G and T_{CSO}

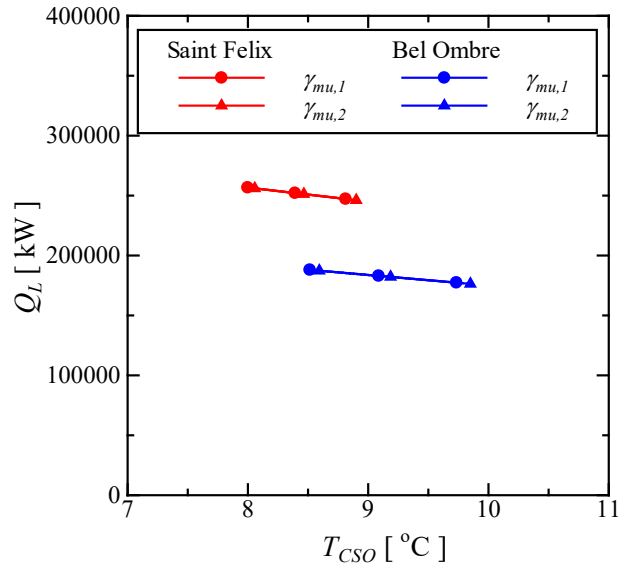


図 97 Relation between Q_L and T_{CSO}

冷海水入口温度 $T_{CSO} = 6.6^\circ\text{C}$ に対して海洋温度差発電での熱利用後の冷海水出口温度 T_{CSO} が増加するとともに、海洋温度差発電で得られる熱量は増加するため、発電出力は増加する（図 96 参照）。このとき、冷海水出口温度 T_{CSO} から環境温度 $T_{ENV} = 30^\circ\text{C}$ まで冷熱利用で使用された場合、冷海水出口温度 T_{CSO} が増加するとともに冷熱利用量 Q_L は低下する（図 97 参照）。このため、発電後海水の冷熱利用に関する要件と調整の上、仕様を決定する必要がある。

2.5.3 OTEC 基本システム計算

(1) 計算条件

Saint Felix 案および Bel Ombre 案の取水条件において、ランキンサイクルを対象とし、作動流体流量を変化させて計算を行う。

計算条件を表 47 に示す。なお、伝熱面積の条件は、評価関数を用いた最適設計から得られた結果を用いた。Saint Felix 案における $\gamma_{mu,1,MAX}$ （最大値）のときの伝熱面積を Case1、 $\gamma_{mu,2,MIN}$ （最小値）のときの伝熱面積を Case2、 $A_E = 1000 \text{ m}^2$ 、 $A_C = 2000 \text{ m}^2$ の時の伝熱面積を Case3 とした。Bel Ombre 案における $\gamma_{mu,1,MAX}$ （最大値）のときの伝熱面積を Case4、 $\gamma_{mu,2,MIN}$ （最小値）のときの伝熱面積を Case5、 $A_E = 1000 \text{ m}^2$ 、 $A_C = 2000 \text{ m}^2$ の時の伝熱面積を Case6 とした。

表 47 計算条件

	Value						Unit
Warm source inlet temperature	29.5						°C
Cold source inlet temperature	6.6						°C
Warm source mass flow rate m_{WS}	Saint Felix			Bel Ombre			t/h
	12500			10500			
Cold source mass flow rate m_{CS}	Saint Felix			Bel Ombre			t/h
	10000			7500			
Overall heat transfer coefficient in evaporator U_E	10.0						kW/(m ² ·K)
Overall heat transfer coefficient in condenser U_C	5.0						kW/(m ² ·K)
Evaporator heat transfer area A_E	Saint Felix			Bel Ombre			m ²
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	
	904.9	695.2	1000	967.9	754.7	1000	
Condenser heat transfer area A_C	Saint Felix			Bel Ombre			m ²
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	
	3260	3388	2000	3347	3472	2000	
Working fluid	Ammonia						

Heat source	Water
-------------	-------

(2) 計算結果

以下の表に Case1~6 において正味出力が最大となる点の値を示す。

表 48 計算結果

	Saint Felix			Bel Ombre		
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
Net power (MAX) $W_{NET, MAX}$ [kW]	1682	1505	1535	1553	1422	1403
Turbine power W_T [kW]	1699	1520	1551	1569	1436	1417
Working fluid pump power $W_{P, WF}$ [kW]	17.04	14.94	16.07	15.97	14.36	14.78
Working fluid mass flow rate m_{WF} [kg/s]	36.70	32.73	33.61	33.91	31.01	30.73
Warm source outlet temperature T_{WSO} [°C]	26.41	26.74	26.68	26.11	26.39	26.43
Cold source outlet temperature T_{CSO} [°C]	10.32	9.922	9.994	11.17	10.79	10.74
Thermal efficiency η [%]	3.732	3.739	3.731	3.735	3.733	3.731
Working fluid heat exchange in evaporator Q_E [kW]	45060	40270	41130	41580	38080	37590
Warm source heat exchange in evaporator Q_{WS} [kW]	45060	40270	41130	41580	38080	37590
heat balance in evaporator	1×10^{-5}	2×10^{-6}	3×10^{-6}	1×10^{-5}	3×10^{-6}	2×10^{-6}
Working fluid heat exchange in condenser Q_C [kW]	43380	38760	39600	40030	36660	36190
Cold source heat exchange in condenser Q_{CS} [kW]	43380	38760	39600	40030	36660	36190
heat balance in condenser	5×10^{-5}	7×10^{-5}	1×10^{-5}	2×10^{-6}	8×10^{-6}	8×10^{-6}

以下に Case1~6 における海洋温度差発電（ランキンサイクル）での計算結果をそれぞれ示す。

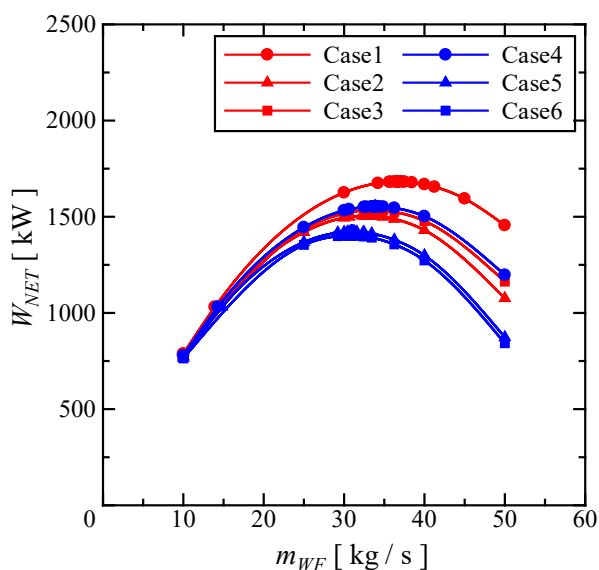


図 98 Relation between m_{WF} and W_{NET}

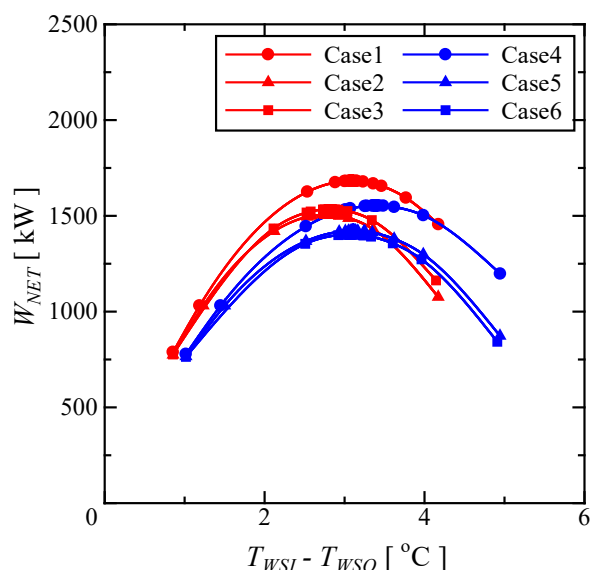


図 99 Relation between $T_{WSI} - T_{WSO}$ and W_{NET}

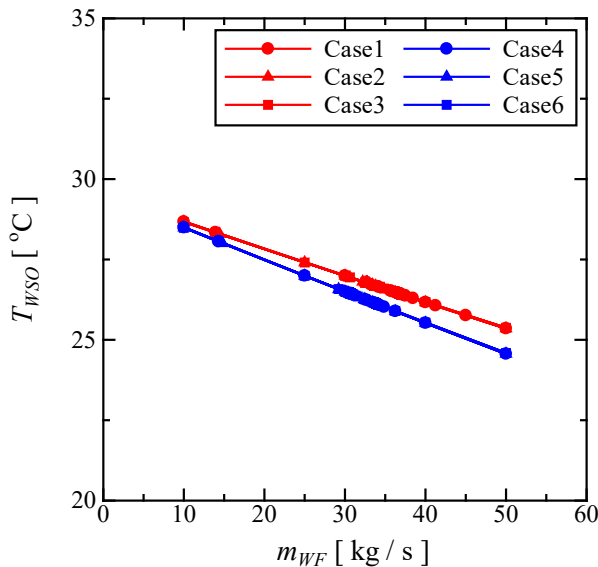


図 100 Relation between m_{WF} and T_{WSO}

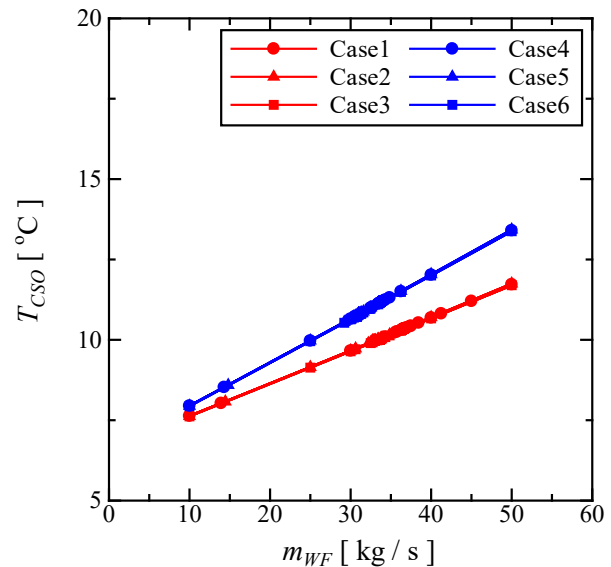


図 101 Relation between m_{WF} and T_{CSO}

Saint Felix 案では Bel Ombre 案に対して利用できる海水流量が多く、海水から得られる熱量が大きいことから、正味出力も大きいことが確認できる (図 98 参照)。Case 1~6 の伝熱面積が大きいほど、海水温度に対する作動流体の有効温度差が増加することから正味出力も増加する (図 99 参照)。このとき、作動流体流量 (それによって決定される海水温度変化量 $T_{WSI} - T_{WSO}$) に対して正味出力は最大値が存在し、Saint Felix 案では Bel Ombre 案に対して正味出力の最大値およびそのときの海水温度変化量は大きいことが確認できる (図 98~図 101 参照)。

2.5.4 計算結果のまとめ

モーリシャスにおける海洋深層水取水管設置の検討にあたり、これまでの成果を踏まえて、本調査に活かすための海洋深層水取水管設置において有効な効果の検討事項を調査し、以下のことが明らかとなった。

- 「OTEC 基本システム計算」での計算結果のとおり、作動流体流量 m_{WF} によって正味出力 W_{NET} およびサイクル熱効率 η_{th} が変化し、正味出力 W_{NET} には最大値が存在する。最適化計算では評価関数を用いて熱交換器伝熱面積 (発電システムの総コストに支配的) と正味出力 W_{NET} 、海水冷熱利用 Q_L との関係から最適値となる条件を求めた。
- 最適化計算では正味出力 W_{NET} が $U_E A_E / Q_E$ や m_{WS} , m_{CS} の変化 (Saint Felix 案, Bel Ombre 案) によらず一定の値をとる。また、基本システムの m_{WF} と W_{NET} の関係をみると W_{NET} が一定の値となるとき、Bel Ombre 案に対して温海水流量 m_{WS} 、冷海水流量 m_{CS} が大きい Saint Felix 案では作動流体流量が m_{WF} は小さいことが確認できる (m_{WF} について $W_{NET, MAX}$ をとる m_{WF} より大きい範囲は考慮しない)。最適化計算結果で一定となった W_{NET} は 1031 kW であり、このときの Case 1 の m_{WF} は 13.93 kg/s、Case 4 の m_{WF} は 14.30 kg/s である。

2.6 GCF への提案可能性の検討

2.6.1 コンセプトノートの作成

GCF プロジェクトの提案は、GCF 理事会から認証を受けた認証機関 (Accredited Entity : AE) を通じて提出されるファンディングプロポーザルが作成されるが、この文書については、数十億~数百億円規模の投資に対する資金要請の提案であり、環境社会影響評価 (Environmental and Social Impact Assessment : ESIA) を終えたのちに提出される詳細設計にあたるものと位置づけられており、プロジェクトの形成当初は、コンセプトノートの形で文書が作成される (GCF プロジェクト提案申請については、下図を参照のこと)。

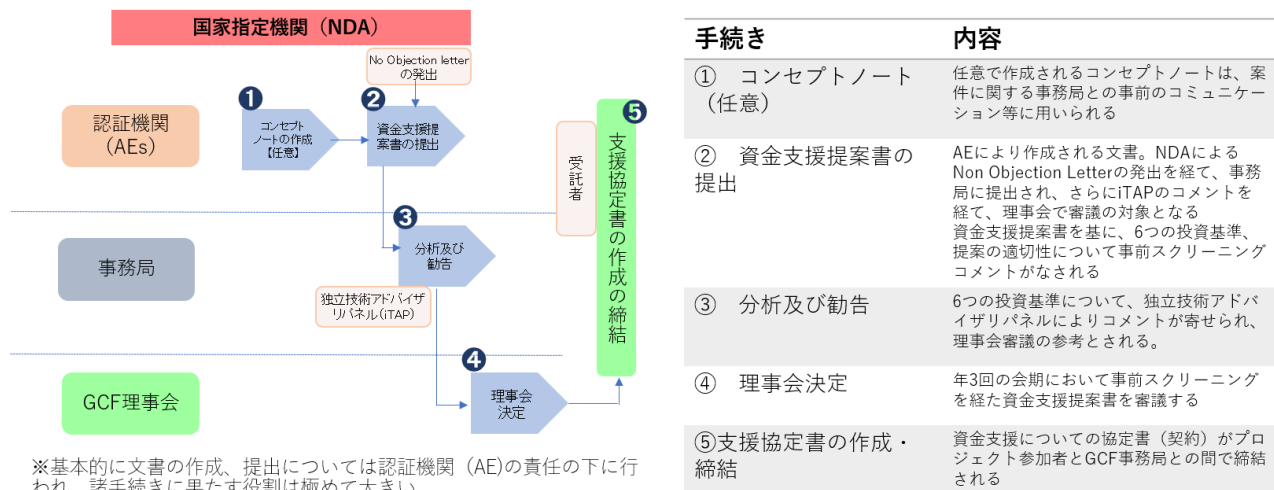


図 102 GCF プロジェクト申請手続きのながれ

コンセプトノートの作成は、GCF の手続き上任意となっているが、プロジェクトが実施される開発途上国政府関係省庁やプロジェクト参加者、その他ステークホルダーとの間で認識を共有するためのツールとして活用されるため、通常は調査の進展や関係者の意見のインプットを踏まえて、数度にわたり更新される。本事業においては、そのようなコンセプトノートの第1案を作成した。

コンセプトノート第1案に記載される事項は以下の通りである。

図 103 GCF コンセプトノート案に記載した提案の概要（一部抜粋）

テンプレートにおいて記載を求められる事項	主な内容
B: プロジェクトの概要	
B.1. プロジェクト提案の文脈	島しょ国であるモーリシャスのエネルギー源は、主として輸入された化石燃料に依存しており、近年のエネルギー価格の高騰が経済に大きな影響を及ぼしている。また、モーリシャスは再生エネルギー開発ロードマップにより 2030 年にはエネルギー構成の 60%を再エネで賄うとしたが、ベースロード電源確保の課題などが大きい。また、プロジェクト実施場所のサヴァンヌ地域においては、リゾートを中心としたスマートシティ開発計画が進行中であり、クリーンで持続可能なエネルギー供給のニーズが高まっている。
B.2. プロジェクト内容にかかる記載	1MW の OTEC を導入し、サヴァンヌ地域におけるスマートシティ開発に対して電力の供給を行う。また合わせて、発電に使用した海洋深層水のカスケード利用により、空調設備に対する冷熱の供給、養殖用の水、また脱塩処理をしたのちの水供給等を行う。
B.3. GCF 投資基準に照らして期待されるプロジェクトの効果	① インパクトポテンシャル： OTEC による供給される電力(1MW)・冷熱等による GHG 排出削減量を記載 ② パラダイムシフト・ポテンシャル： ベースロード電源の性質を併せ持つ再エネの導入により、グリッドの安定化に貢献すること。海洋深層水の活用により新たな産業振興が期待できる。

	③ 持続可能な開発のポテンシャル： ディーゼル燃料等の輸入に頼るモーリシャスのエネルギー安全保障を向上されること、クリーンで安定的なエネルギーへのアクセスが向上すること、持続可能な産業による雇用増加が期待される。 ④ 支援を受ける国のニーズ 自然と調和したモーリシャスの観光・スマートシティ開発に有効な技術導入としてニーズが高い。 ⑤ 支援を受ける国のオーナーシップ CTCN から続くモーリシャス政府の積極的な関与がある。 ⑥ 効率性と実効性 民間による投資のレバレッジを提供すること。また関係機関によるコファイナンスを動員する（調整中）
C. ファイナンスにかかる当面の情報	
C.1. 各コンポーネントに対するファイナンス	グラント・ローン・投資をオプションとしつつ、現時点においては今後の検討課題とした。また、コファイナンスについては、OTEC 部分については NEDO による実証資金も検討の余地が大きい。 コンポーネント 1：OTEC と取水管の建設：公的資金の投入を想定 コンポーネント 2：エネルギー・水供給の下流における産業の育成：主として民間投資を想定

なお、これらについては、プレフィージビリティスタディ、フィージビリティスタディが進捗するに従い、より具体的なプロジェクトの設計を行い、精緻化していく必要がある。GCF コンセプトノートについては、本報告書の添付資料 3 として巻末に示した。

2.6.2 認証機関（AE）選定の検討

図 103 に示す通り、GCF プロジェクトの申請は、AE がプロジェクト実施者を代表して GCF 事務局や理事会とやり取りを行う等、その役割は大きい。また、具体的な資金管理の役割も担うため、GCF プロジェクト形成を行うにあたっては、AE の選定が重要である。

本事業においては、経済産業省担当官との相談の下、国連工業開発機関（UNIDO）ムランガ課長とのオンライン協議を実施し、本事業における OTEC 及び取水管設置にかかるプレフィージビリティスタディにおける検討状況について共有を行った。先方からは、OTEC にかかる技術成熟性について質問が挙げられ、これについては沖縄県久米島や米国ハワイ州等ですでに導入の経験が数十年あることも含め補足的な説明や資料の提供を行い、理解を得た。

また、AE としての UNIDO の関与の可能性については、今後のプロジェクト検討の状況を踏まえてさらに検討を深めていくこととなった。また現状において、UNIDO が GCF により認証され、GCF 事務局と締結した認証包括協定（Accreditation Master Agreement：AMA）によれば、以下の機能を有する。

認証機関の機能	UNIDO が該当するカテゴリー
プロジェクト規模	小規模
環境リスクカテゴリー	カテゴリーB
受託者管理基準（fiduciary standard）	基本事項、プロジェクトマネジメント

出典：<https://www.greenclimate.fund/ae/unido>（2024 年 3 月末日現在）

3. 添付資料

添付資料 1：モーリシャス NDE に提出したリクエストフォーム（案）

添付資料 2: レスポンスプラン（案）

添付資料 3: GCF コンセプトノート（案）

添付資料 4: 質問票（スケッチ）

添付資料 5: Makai Ocean Engineering からの受領資料（PDF）

添付資料 6: NELHA Annual Report（2001 年、2002 年）から抜粋

添付資料 7: NELHA 55”Pipeline に関する Web 記事

添付資料 8: Micro Tunnel に関する Web 記事