

日本マクロエンジニアリング学会 講演会・懇談会  
マクロエンジニアリングのケーススタディ

於：東京大学第16回ホームカミングディ  
日時：2017年10月21日(土) 13:00～15:00  
場所：東京大学法学政治学系総合教育棟(ガラス棟)2階 203教室

はじめに(背景と目的)

科学技術予測センターが調べた資料で、引用されることの多いトップ 1%の文献を分野別に調べたものがあります。

目的外使用になりますが、“コストエンジニアリング(Costengineering)”、“最適化(Optimization, Computer aided Design)”が含まれる文献を検索しましたら、欧米では10%強に達するのに対し、日本では皆無でした。

折角の素晴らしい理論・技術も、事業化され社会に役に立ってこそ、真価を発揮できると考えますが、事業化に際しては、“コストエンジニアリング”、“最適化”は欠かせません。

この意味で、欧米では事業化を念頭においた研究開発が進んでいるように感じられます。

日本でも民間は営利に関わりますから、“最適化プログラム”は浸透しつつありますが、公的なプロジェクトは評価の指標化が難しいのか、積極的ではないように見えます。

地球規模に及ぶような、従来にはない課題を対象にする場合、或いは従来の技術分野の枠にとらわれない解決策が求められ、多分野に及ぶ技術の融合が必要になるとき、マクロエンジニアリングの手法が効果を発揮します。

きょう  
今日は諸先輩を前で恐縮ですが、先ずマクロエンジニアリングのプリミティブなところから、ケーススタディを通しマクロエンジニアリングの流れ、“コストエンジニアリング”、“最適化”の効果をご評価頂きたいと存じます。

経済合理性が確認されたとしても、理論や設計だけでは事業は進みません。皆様のご支援、ご指導の程、宜しく願い申し上げます。

日本マクロエンジニアリング学会  
文明システムズ・地球環境・プロジェクト研究会

発表者 小島 紀徳(成蹊大理工学部, B-S50, M-S52, D-S55) 迹目 英正((株)デザインウォーター)

# Cool Tokyo (冷熱で東京湾沿岸の火力発電所の効率を上げる事業、余剰としてヒートアイランドの解消)

## (1)背景

①燃料価格の乱高下、電気料金の高騰

②ヒートアイランドの深刻化

原因  
 ・太陽黒点活動  
 ・熱源(発電所、冷房、工場、車)の都心への集中  
 ⇒膨大な温排水が東京湾へ  
 ⇒東京湾の水温上昇 +1.6°C

③首都圏は海洋深層水に恵まれている

④シールド(推進トンネル)工法の進化

⑤水を運ぶのはコストがかかる

水を運ぶエネルギーは流量の3乗に比例  
 大口径で大量に運べば、  
 ・送水コストは従来イメージの1/100~1/10,000

⑥技術屋の常識で「冷熱は運べない」  
 一般的にはφ300程度の管を断熱材で覆い、  
 2~3km運ぶと経済性がなくなる。

・大口径(地下鉄の断面)なら水温上昇は小さい

(2)提案⇒図-1 Cool Tokyo 全体図  
 海洋深層水冷熱(3°C~4°C)の活用  
 東京湾沿岸の発電所に冷水を届ける  
 ⇒発電効率の改善  
 ⇒ヒートアイランドの解消  
 海洋深層水温排水の活用  
 ⇒新産業の創出

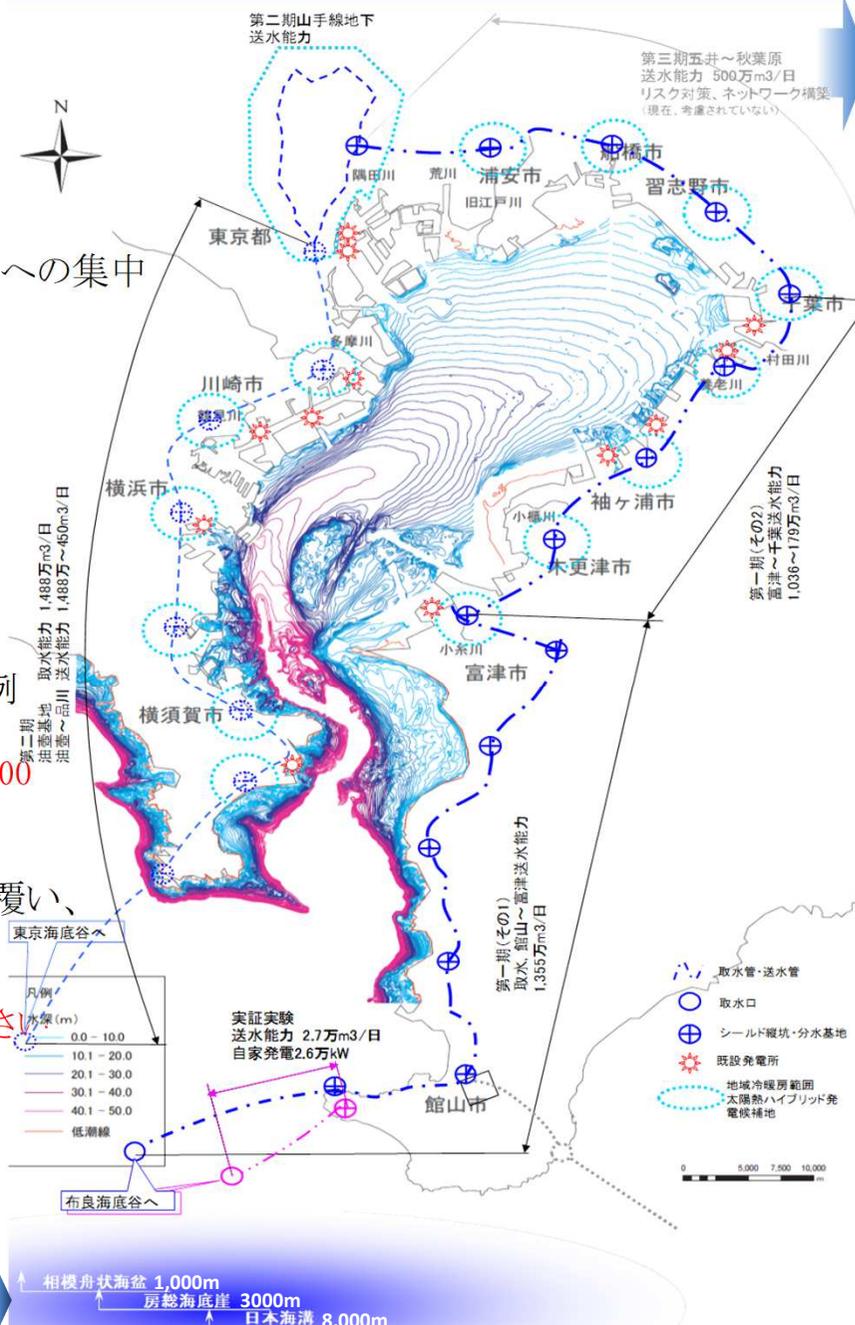
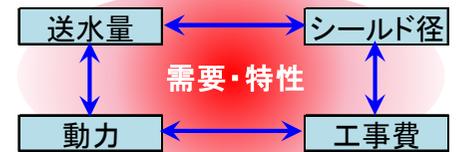


図-1 Cool Tokyo 全体図

## (3)マクロエンジニアリングの出番



コストエンジニアリング、最適化  
 取・送水量 2,400 万m<sup>3</sup>/日  
 総事業費 3,000 億円

## (4)成果

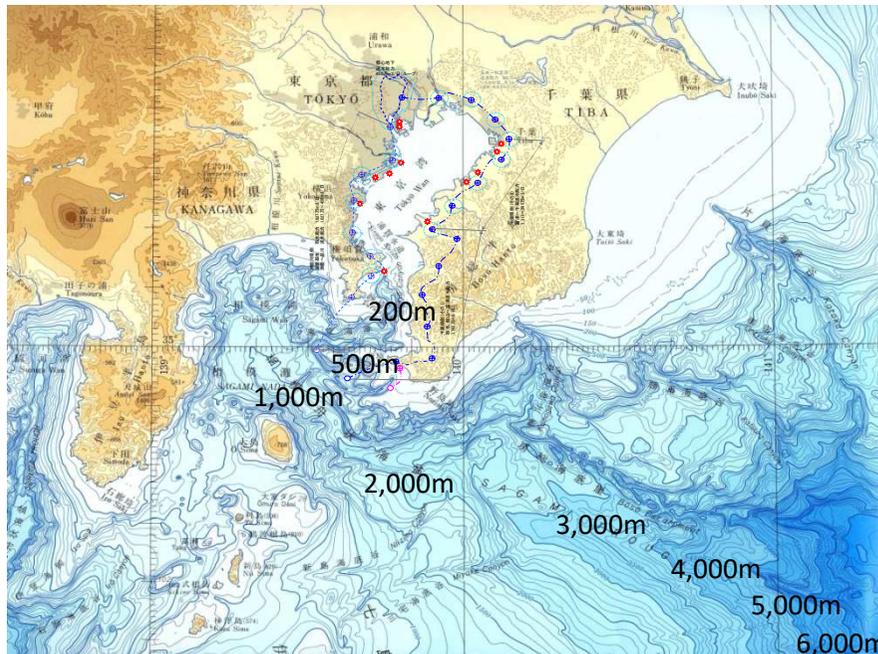
- ①発電効率の改善 現状の15%  
 ⇒燃料の節約  
 ⇒半分を冷熱購入費へ  
 これだけで**総資本利益率24%**
- ②海洋深層水温排水の多段利用  
 ⇒新産業の創出⇒【参考3】
- ③ ⇒東京湾の水温を△1.6°C  
 (膨大な廃熱を中和、自然状態へ)  
 ⇒東京湾海洋環境保全  
 ⇒ヒートアイランドの解消  
 ⇒①、②、③を含めた最適化へ

## (5)事業化への課題

資源、技術、事業性、環境…全てOK  
 事業主体がない?!  
 東京電力原発事故以来・・・  
 東京ガス 全出力の1/10未満  
 1社で無理なら  
 メリットのある人…東京都及び沿岸  
 自治体、住民、電気・燃料を使う企業

皆様のご理解、ご支援

# 【参考1】海洋深層水、冷熱はリーズナブルに運べる！！



← 図-2 館山沖、油壺沖は相模湾舟状海盆、房総海底崖、日本海溝への繋がり、そこには無尽蔵の海洋深層水があります。館山、或いは油壺から都心に送水しても水温上昇は小さく、冷熱源として使えます。

↓ 図-3 送水コスト、水温上昇について  
 “水を運ぶエネルギー(コスト)は流量の3乗に比例する(管径、延長など一定)”は流体力学の一般的言い方ですが、別の見方をすると、流量の3乗に比例して安くなる、流量が1/10ならエネルギーは1/1,000になります。シールド技術の進歩は大口径、深さ、延長、掘削速度などで著しく、コストも安くなって来ました。計画流量に対し、シールド径、工事費、送水に要するエネルギーの最適化を図ることができます。図-3は最適化の結果です。

⇒世界のエネルギー・水問題に貢献できます！

◆ 館山～千葉 93kmの輸送コスト  
 1万m<sup>3</sup>/日規模で 72.3円/m<sup>3</sup>  
 10万m<sup>3</sup>/日規模で 42.1円/m<sup>3</sup>  
 100万m<sup>3</sup>/日規模で 28.4円/m<sup>3</sup>  
 1,000万m<sup>3</sup>/日規模で 19.6円/m<sup>3</sup>  
 2,000万m<sup>3</sup>/日規模で 17.7円/m<sup>3</sup> } 首都圏の需要

冷熱の付加価値は約50円/m<sup>3</sup>>>18.7円/m<sup>3</sup>  
 運べる！！

◆ 館山～富津～千葉～都心到着時の水温  
 取水口(水深1,000r 3.20℃  
 館山基地 3.46℃  
 富津 3.50℃  
 千葉 3.57℃  
 都心 3.70℃  
 水温の上昇は0.5℃と小さい！！

冷熱は運べる！！

図-2 首都圏は海洋深層水に恵まれている

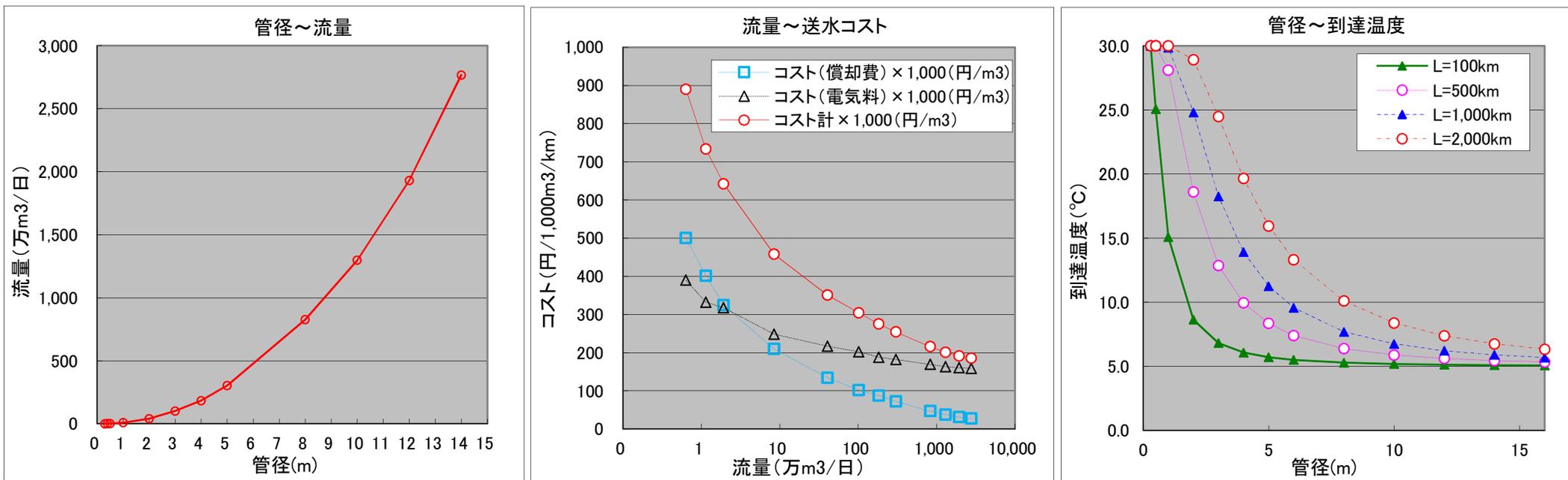


図-3 流量～送水管管径、送水コスト、到達温度(初期温度5℃、管外側温度30℃(熱帯)、流量に対し管径と流速は最適化)

# 再生可能エネルギーの、基幹電源としての普及

## (1) 背景

普及には基幹電源としての特性を持つこと  
(低コスト、安全性、安定性、拡張性、環境保全など)  
再生可能エネルギーによるものは発電コストが高く、  
特性も含め、基幹電源に足る方式はない。

## (2) 着目

その中で、海洋温度差発電は熱源は無尽蔵、  
発電コストを安くできれば、基幹電源になる。  
現状は取水装置が割高、全体の最適化が不十分

## (3) 試算

取水工法を改良し、諸設定を最適化した  
が、発電コストの低減は不十分であった。  
(原因: 高温側・低温側熱源の温度差が小さい)  
(カルノーの定理より、発電効率は上限で2~3%)  
(日本エネルギー学会に投稿)

## (4) 課題と開発

OTECの改良⇒高温側側熱源補助装置の開発  
(非集光型太陽熱温度差発電の提案)

- 非集光型太陽熱集熱装置… 材料は既往技術、  
形態は初めて
- 海洋深層水取水装置 … 既往技術
- 発電装置 … 既往技術

基本的には、既往技術の組み合わせであるが、  
全体としての設計、施工、運用は初めての試み

## (5) マクロエンジニアリングの出番

広範な技術領域の間で、コストエンジニアリング、  
およびサブシステムと全体の最適化を実施

## (6) 成果

発電コストは石炭火力以下  
基幹電源としての特性を満足  
(日本エネルギー学会に投稿中)

## (7) 事業化への課題

実証、良好なサイトを得る(国際協力)  
段階的拡張⇒海洋深層水のカスケード利用  
低品位熱源を用いる発電方式の普遍的手法

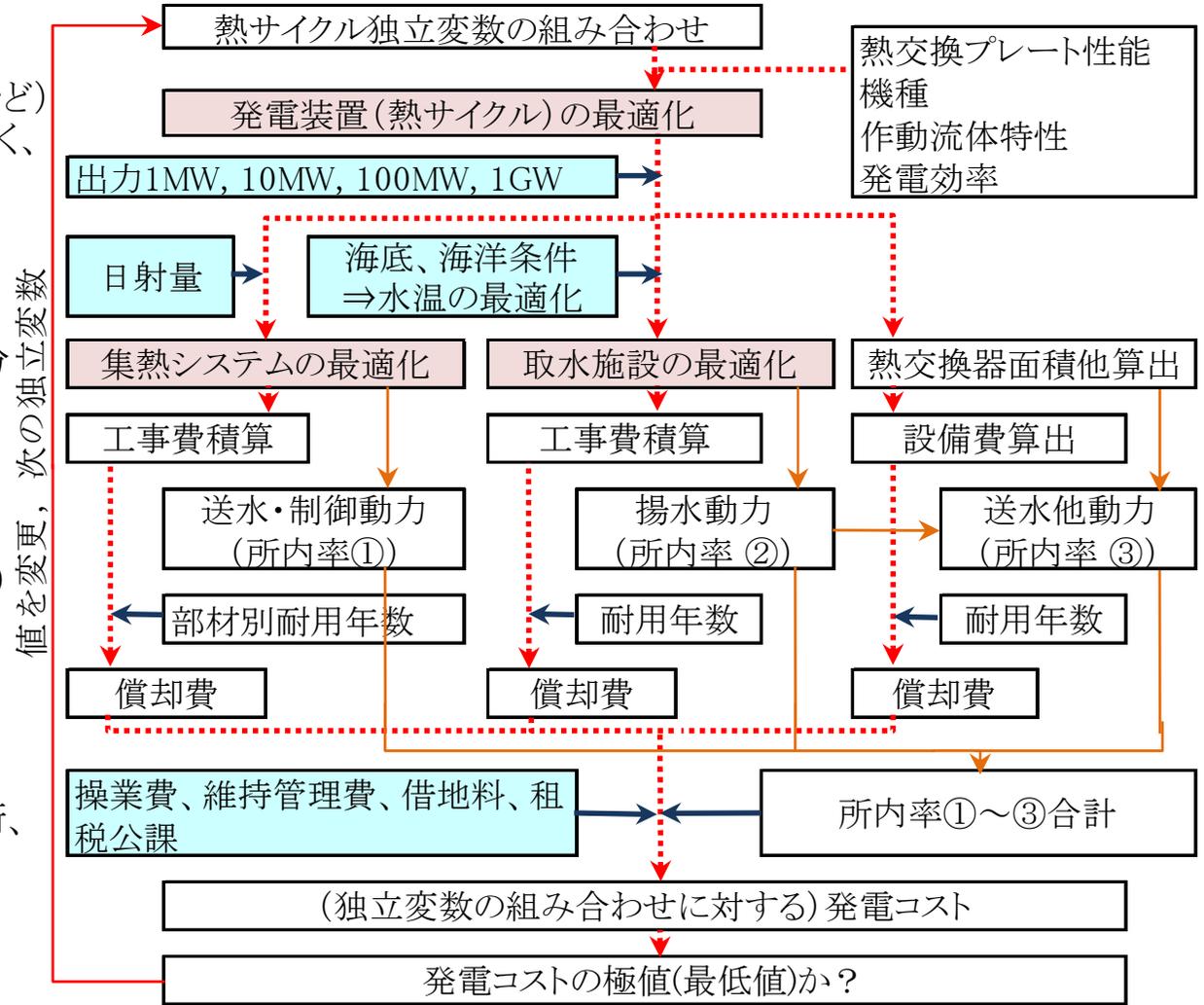


図-4 非集光型太陽熱温度差発電の最適化フロー

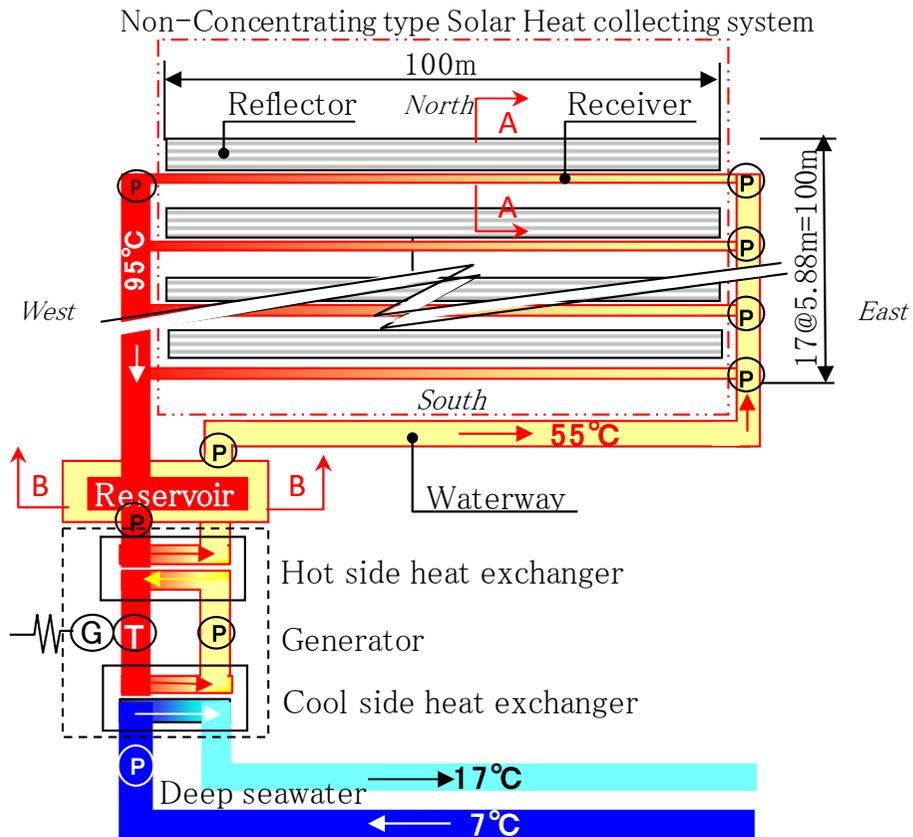


Fig. 5 Schematics of Non-concentrating type Solar Thermal Energy Conversion system (NC-STEC)

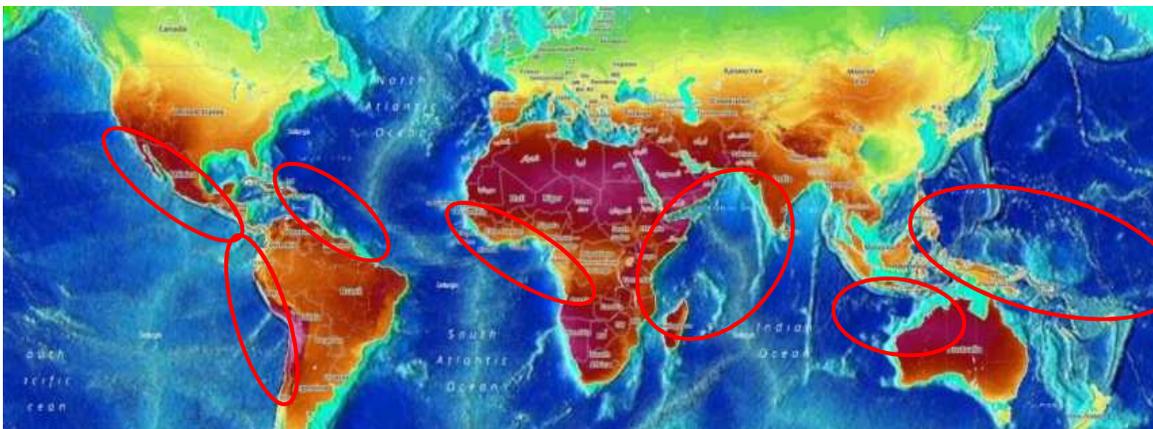


Fig. 7 Sites suitable for NC-STEC in the world

表-1 海洋温度差発電と非集光型太陽熱温度差発電の比較

| 項目     |      |     | 単位                | OTEC     | NC-STEC | 差・比     | 備考             |
|--------|------|-----|-------------------|----------|---------|---------|----------------|
| 熱サイクル  | 高温側  | 入温度 | °C                | 25.7     | 95.0    | 69.3    | 最適化による         |
|        |      | 出温度 | "                 | 18.3     | 55.0    | 36.7    | "              |
|        | 低温側  | 入温度 | "                 | 7.0      | 7.0     | 0.0     | 海洋環境を踏まえた最適化   |
|        |      | 出温度 | "                 | 11.9     | 17.0    | 5.1     | 最適化による         |
|        | 温度差  |     | "                 | 13.8     | 78.0    | 64.2    | 高温入-低温出        |
|        | 発電効率 |     | "                 | 2.2%     | 18.6%   | 1 : 9   | 設定温度における最適発電装置 |
| 表層水取水量 |      |     | m <sup>3</sup> /日 | 128.0    | 2.8     | 46 : 1  | 出力1万kW         |
| 深層水取水量 |      |     | "                 | 189.1    | 9.1     | 21 : 1  | "              |
| 熱交換面積  |      |     | 比                 | 21,839.7 | 689.6   | 32 : 1  | "              |
| 所内率    |      |     | %                 | 28.1%    | 3.4%    | 8.4 : 1 | "              |
| 工事費    |      |     | 億円                | 347.1    | 150.4   | 2.3 : 1 | "              |

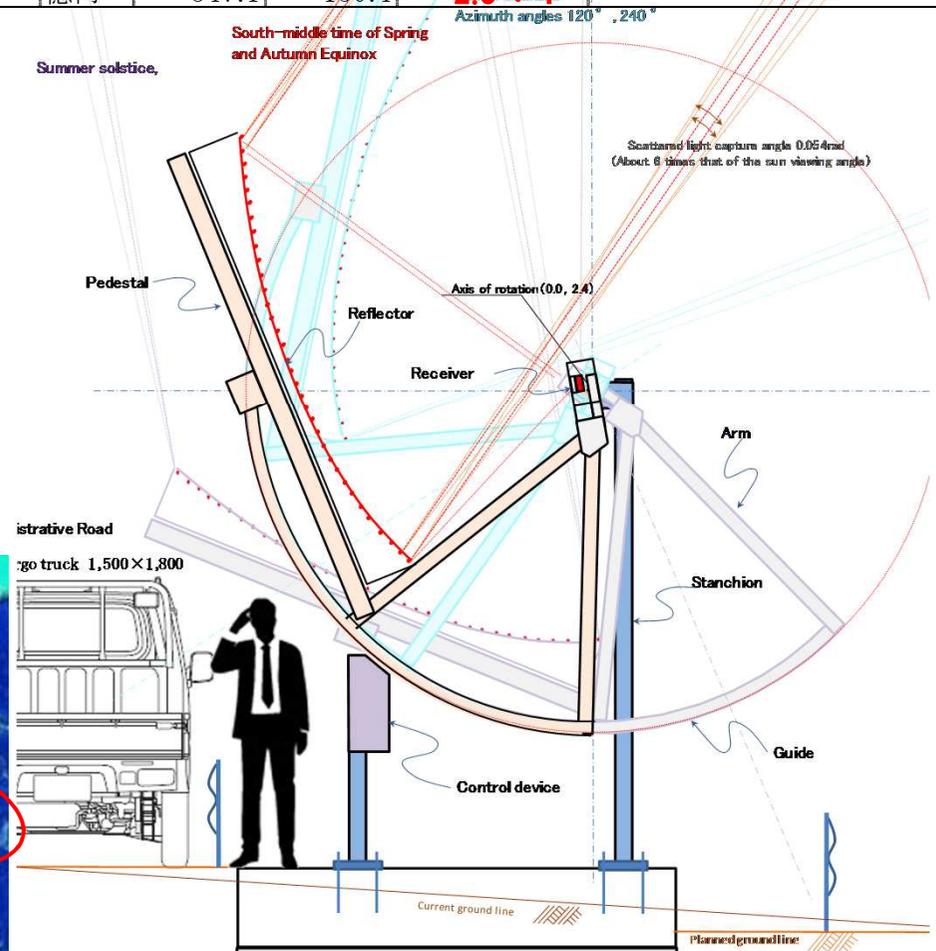


Fig. 6 Cross-sectional view of NCSTH  
(Plan with reduced movement and manual position control)

## 海水分離(製塩+海水淡水化)

Former US President John F. Kennedy said, “If we can get fresh water cheaply from sea water, it will bring human wealth for a long time, and the performance of any other science is small before that It will only be visible to things.” (1961)

### (1)分離技術と特徴

- ①TC缶 気圧～沸点(状態図)  
使用エネルギーを大幅に低減(ただし、それでも高い)
- ②電気透析(ED)  $\text{Na}^+$ イオン、 $\text{Cl}^-$ イオンを電氣的に誘引  
塩分濃度10%に濃縮、TC缶でも蒸発に要するコストは大きい
- ③RO膜 分子レベルの濾過  
汚れに弱い⇒圧力(動力)、逆洗、耐久性  
表層水の場合、塩分濃度で5%(汚れが邪魔)  
深層水の場合、15%～24%(NaClの溶解度)  
深層水の有機物は表層水の1/200で、コスト低減  
実験 高知県(淡水化)、富山県(濃縮)、高知工科大(分離)
- ④NaClの純度を高める技術 塩事業センターの特許など

### (2)着眼点、マクロエンジニアリングの出番

これらを俯瞰し、使用エネルギー最小化で使い分け(最適化)  
低コストで、淡水とかん水に分離できる。

3%→24% RO膜(海洋深層水の清浄性を利用)  
24%→99% 蒸発缶

### (3)成果

淡水コスト 16 円/ $\text{m}^3$  (天候によらない無尽蔵で低コストの水源)  
製塩コスト 1,600 円/トン (vs. 国内塩原価10,000円/トン, 輸入CIF4,500円/トン)  
(副産物、栄養塩、にがり(その他金属の混合))

### (4)事業化への課題

実証(膜の選定、操業条件の最適化、コスト)  
NaCl精製工程、濾過層再生工程などの改良  
海洋深層水の取水、温めること(水温と分離速度)

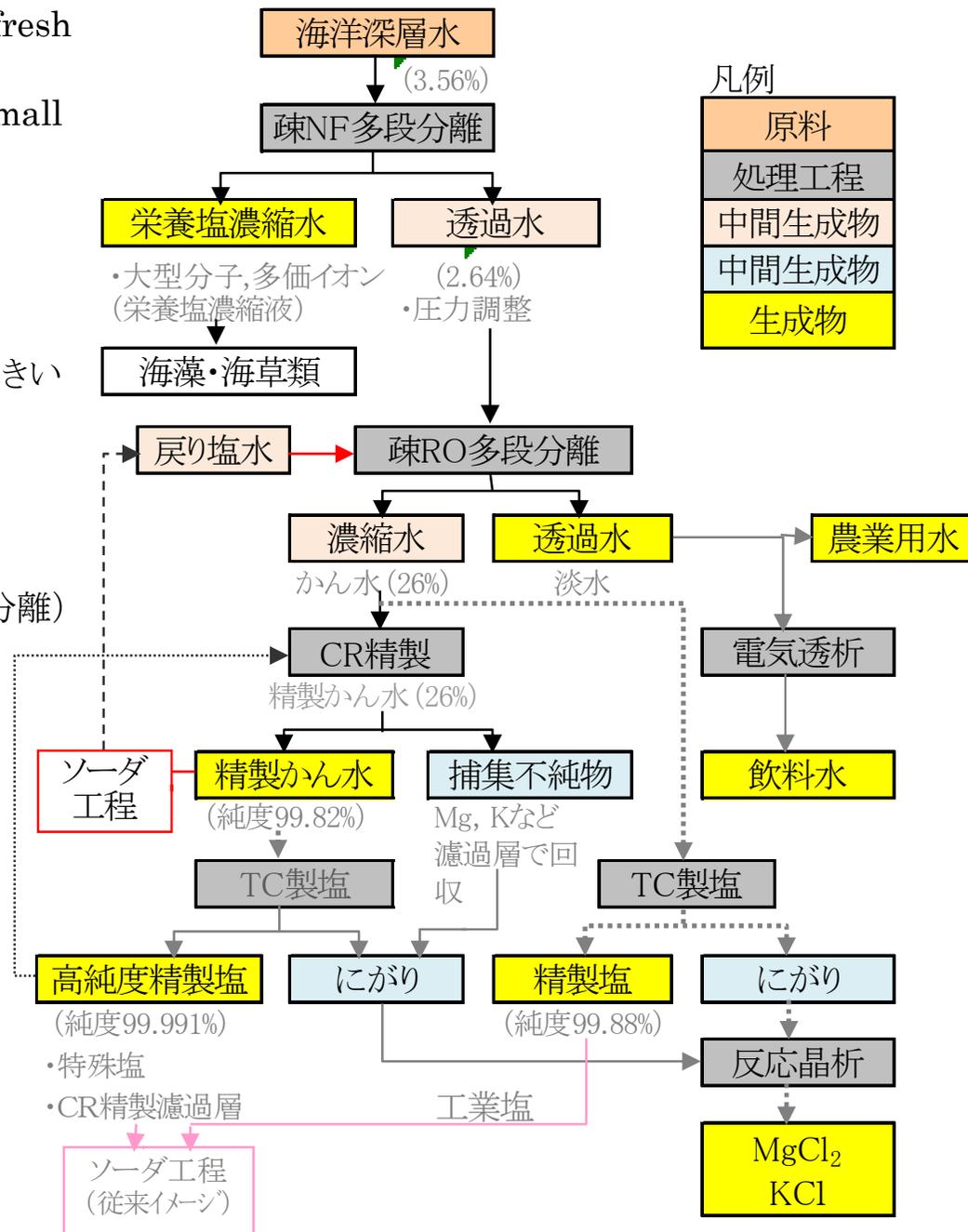


図-8 海水分離フロー

【参考2】表-2 マクロエンジニアリングの流れ、提案3題の俯瞰

| 題   | Cool Tokyo  | 非集光型太陽熱温度差発電  | 海水分離(製塩+淡水化)  |   |
|---|---|---|---|---|
| ①二ーズ<br>⇒課題・目標  | 発電効率の向上(発電コストの低減、燃料節約)、ヒートアイランドの緩和、および新産業の創生  | 化石燃料に頼らない自然エネルギー発電で低コスト、安全性、安定性、拡張性を適える基幹電源を実現  | 海水から淡水と溶存成分(水・栄養塩・ミネラル)を低コストで分離   |   |
| ②シーズ<br>⇒環境・技術, 要素技術は既往最先端。必要に応じて実証実験                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・首都圏への集中(3000万人、発電4,000万kW)</li> <li>・シールド(推進トンネル)工法</li> <li>・低コスト海洋深層水取水工法(コストパフォーマンスの向上)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・低コスト海洋深層水取水工法</li> <li>・太陽熱集熱装置の要素技術の進展(反射、透過、断熱材)</li> <li>・低温熱源用カーリーナサイクル機(熱交換機のパフォーマンス向上)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・海洋深層水の清浄性(有機物は表層水の1/200)</li> <li>・RO(逆浸透)膜(コストパフォーマンスの向上)</li> </ul>                                   |   |
| <b>③全体計画、形態を想定し</b> ↔ <b>④コストエンジニアリング、最適化を進め</b> ↔ <b>①目標に合うか</b> |   |   |   |   |
| マクロエンジニアリングの効果<br>(コロンブスの卵)                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・総事業費(大口径) 3,000億円</li> <li>・利益(税引後) 720億円/年</li> <li>・ROA 24%</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>・発電コスト(太陽熱集熱装置の効果) 20.4円/kWh (1,000kW×久米島)</li> <li>3.6円/kWh (100万kW×伊豆半島)</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・淡水コスト 16円/m<sup>3</sup></li> <li>・製塩コスト 1,600円/トン</li> <li>・副産物…栄養塩, にがり</li> </ul>                     |   |
| ⑤事業化に向けて  | 実機建設費   | 館山～千葉～都心 1,480億円<br>油壺～横浜～都心 1,520億円  | 143億円(久米島, 1万kWで、集熱92億円、取水17億円、発電34億円)  | 2.1億円(淡水1,000m <sup>3</sup> /日、製塩1.0万トン/年)  |
|   | 残された課題・問題点  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・設備投資が高額になる。</li> <li>・事業主体が継続的に顧客を確保できる新規ビジネスモデルの構築が必要(既存の業界では商社やエンジニアリングに近い)</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>・非集光型太陽熱集熱装置の実証</li> <li>・全体システムのコストエンジニアリング及び最適化</li> <li>・実用化に向けたスケールアップ実験がやや高額(数千万円程度)になる。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・海洋深層水の取水</li> <li>小規模の場合、取水コストが高く、海水分離だけでは事業化は難しい。</li> </ul> |
|   | 事業化(案)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・投資家、事業主体、顧客企業からなるエコシステムを創造・育成</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・実証実験(1,000kW規模、事業費30億円)に向けベンチャー投資を呼び込む</li> </ul>   | 左2題の実証～実用に便乗で、小規模から事業化が可能   |

【参考3】 図-9 海洋深層水のカスケード利用（新しい産業の創出）

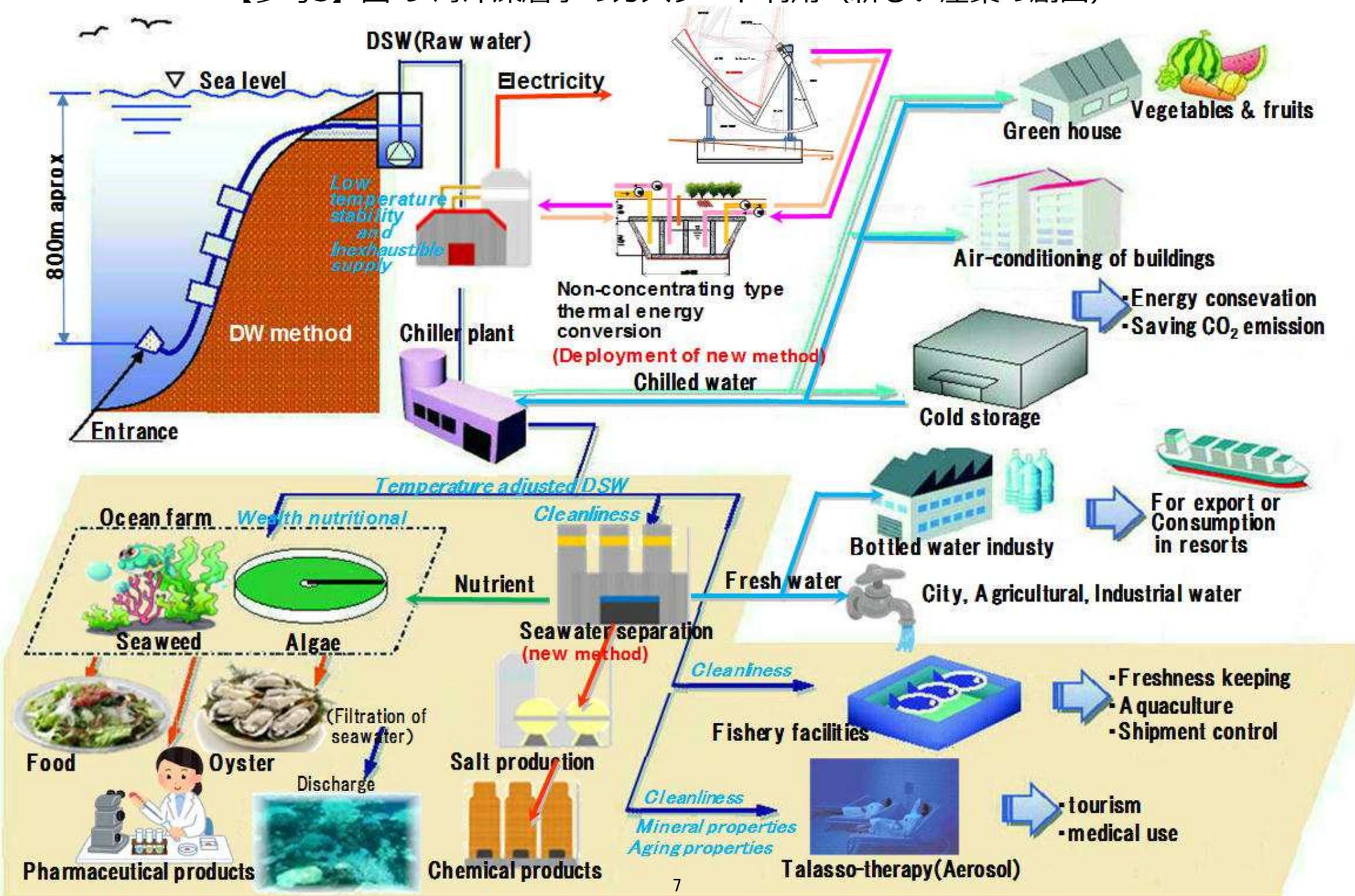


表-3 海洋深層水の経済的価値

| 分野   | 従来の問題点                                       | 提案   | 効果  |  |
|------|--|--|---|--|
| 取水   | 日本では実績主義で技術開発はなかった。取水コスト 100円/m <sup>3</sup> | 低コスト取水工法   | 揚水原理、取水管材料、接続工法、敷設工法、取水ピット、取水管防護など、従来と一式更新<br>取水コスト 1.0円/m <sup>3</sup> 売価…ここではNCSH-OTEC事業に含む。  |  |
| 多段利用 | 深層水の個別利用が先行すると、後から多段利用の組込は難しい。               | 多段利用計画 (特性の利用)   | 当初から多段的に組み合わせれば、資源利用が効果的に進み利用コストの大幅軽減が可能<br>事業種と規模の選定、全体のバランス、優先順位が重要となる。   |  |
| 冷熱利用 | 海洋温度差発電 (OTEC)                               | OTECは発電コストが高く実用化に至らず<br>1.25MW:120円/kWh(久米島)<br>NCSH-OTEC (OTECにおける高温側熱源の改良<br>→非集光型太陽熱集熱システム, 低コスト海洋深層水取水工法, カリーナサイクル機) | 再生可能エネルギーに基づき、環境にやさしく無尽蔵、24時間・365日連続運転、低コストな基幹電源となる。<br>発電コストは右図のように日射量、出力規模に依存する。図中■は館山実証プラント、事業展開は日射量に恵まれた海外が良い(発電コストには取水を含み、温排水売価を含まない)<br>NCSH-OTECの採算性が確保されることで、海洋深層水多段利用の全体を牽引することができる。         |  |
|      | 火力発電   | 発電所の冷却水、ガスタービンの吸気冷却<br>取水コストが高く、未利用  | 冷却水の供給<br>低温による5~20%の発電効率増加<br>冷却水取水量と冷却系設備の1/3~1/4削減<br>取水管と冷却装置の生物付着解消で、発電単価の大幅低減   |  |
|      | 空調、冷凍・冷蔵庫                                    | 取水コストが高く、未利用<br>魚介類の養殖・蓄養・鮮度保持<br>魚介類の鮮度保持用の清浄氷製造  | 冷却水の供給<br>熱交換器を通して、冷却水として利用すると、70%~90%の節電効果<br>40%前後の節電効果<br>清浄で融解点(-1.8℃)が低く、塩分調整(1~2%)で温度調節可能(シャーベット製氷機)  |  |
|      | 農業   | 深層水冷熱は未利用、実験段階(ハワイ、久米島、農業試験所)  | 根域冷却農法  | 高温障害の解消、高付加価値化、生産量の増加(熱帯でも温帯野菜の栽培が可能)  |
|      | 養殖・蓄養  | 一部で実用化、実験段階(ハワイ、久米島など取水箇所)   | 冷却水の供給  | 表層水と深層水の混合で海水温度を調節し生産性の向上、高付加価値化<br>出荷時期調整、高付加価値化  |
|      | 原水利用   | 未利用(冷熱利用の排水がない)<br>温度調整されるので、原水をそのまま使うより処理コストが低減する。  | 牡蠣の養殖<br>海藻類の培養(排水の洗浄)<br>観光等   | 牡蠣は深層水で培養した植物プランクトンを餌とし、深層水の冷熱で温度調節し、陸上養殖<br>海水分離後の濃縮栄養塩を利用して藻類(海藻・植物プランクトン)を培養、直接の食用、貝類養殖用の餌料、化学物質抽出、あるいは農業用肥料として利用<br>海洋療法、ホテルなどのSPA(温浴)施設として利用し、付加価値を高める。 |
| 海水分離 | 淡水   | 淡水コストは100~300円/m <sup>3</sup><br>コストから用途は飲料水不足に限定される   | 海水分離工法<br>コスト 売価 ROA<br>淡水 灌漑用水 淡水 16円/m <sup>3</sup> 35円/m <sup>3</sup> 35% 食糧問題に寄与<br>飲料水 飲料水 30円/m <sup>3</sup> 80円/m <sup>3</sup> 35% 水・健康・文化に寄与  |  |
|      | 栄養塩  | 未利用  | 栄養塩濃縮水 栄養塩濃縮水 25円/m <sup>3</sup> 35円/m <sup>3</sup> 33% 植物プランクトンの生産、肥料問題に寄与   |  |
|      | NaCl他  | 製塩は伝統技術、コストは固定   | ミネラル類濃縮水 ミネラル濃縮水 -円/m <sup>3</sup> -円/m <sup>3</sup> 21% 製塩工程へ(内部取引)  |  |
|      | ミネラル類含有物                                     | 日本の製塩コスト 約10,000円/トン<br>海外の製塩コスト 約 2,000円/トン<br>副産物のMg,Kは肥料  | 製塩、精製方法 海水分離により低価格で高品質の塩が製造可能。TC、CRにより精製(NaCl 99.88%~99.99%)<br>製塩コスト 1,600円/トン 売価 2,200円/トン ROA 21% 工業塩平均99.66%<br>Mg, Kの精製方法 経済的なMg, Kの分離精製、資源回収、MgCl <sub>2</sub> コスト 17,000円/トン、KClコスト 17,000円/トン |  |

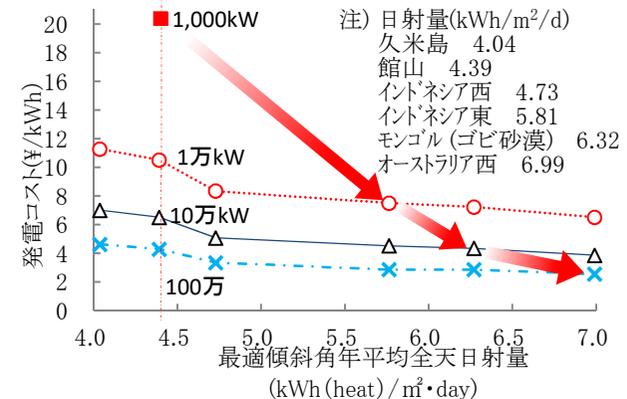


図-10 日射量 × 出力 ~ 発電コスト

注)数値は概略設計に基づくもので誤差を含みます