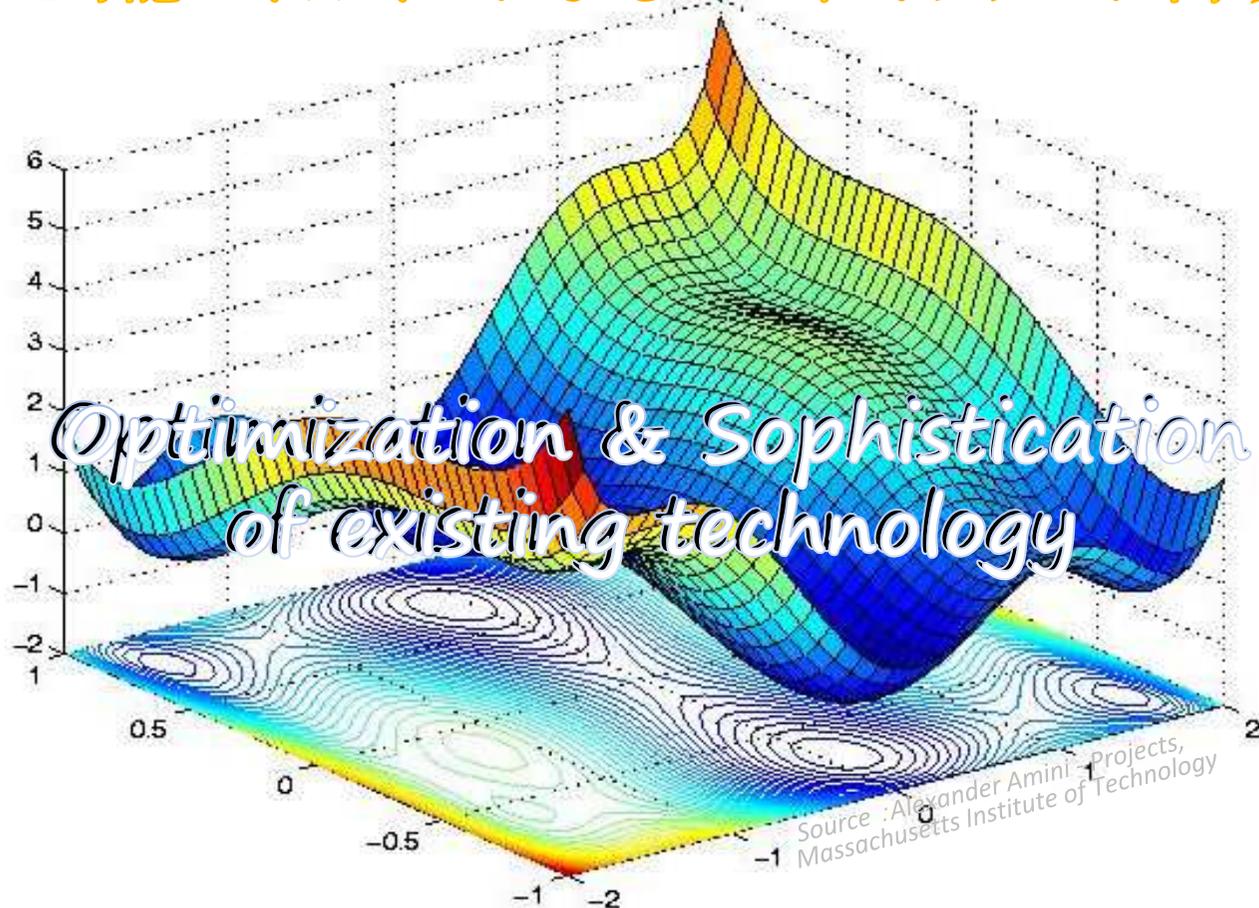


非集光型太陽熱温度差発電 (NC-STEC) の開発

～再生可能エネルギーによるベストミックスに向けて～



(株) デザインウォーター
成蹊大学

NPOマクロエンジニアリング研究機構

1. 背景 (再生可能エネルギーの新たな課題)

(1) 電力需要

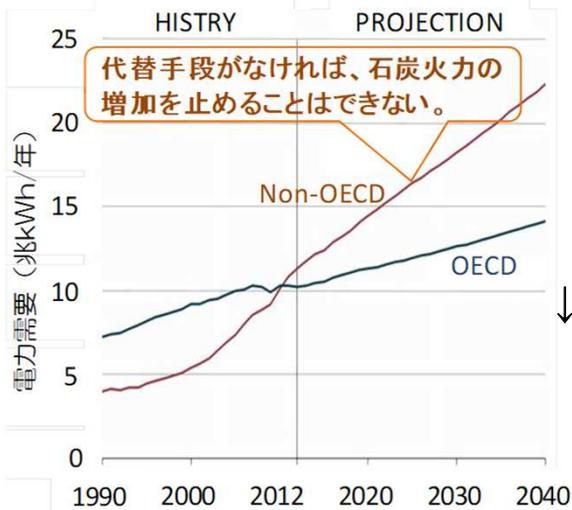


図-1 世界の電力需要
(出典：米国エネルギー情報局)

←電力需要は2040年で現状の1.7倍が予測されています。再生可能エネルギー(以下再エネ)の普及が望まれますが...

↓稼働率に制約のある再エネは火力発電(ミドル電源)による補完が必要。再エネ比は20~40%で限界?

⇒再エネの拡張には
ミドル電源に適う
再エネに拠る
新しい発電方式が必要

(3) ミドル電源として質の要求

表-1 再エネに依る主な発電方式の特徴

	安全性	安定性	負荷追随性	資源量	発電コスト	評価
太陽光発電	◎	×	×	◎	△	ピーク電源
風力発電	◎	×	×	◎	○	ピーク電源
地熱発電	◎	◎	△	×	△	補完的位置づけ
バイオマス発電	◎	◎	◎	×	△	補完的位置づけ
海洋温度差発電	◎	◎	○	◎	×	コスト的に不可
火力発電	◎	◎	◎	◎	◎	ミドル電源の要求

再エネに依る発電はそれぞれの原理に由来する本質的な限界を有している。この中で海洋温度差発電(Ocean Thermal Energy Conversion, 以下OTEC)は安全性、安定性、資源量に恵まれ、期待されているが、発電コストが高く実用化に至っていない。

(2) 需給バランス

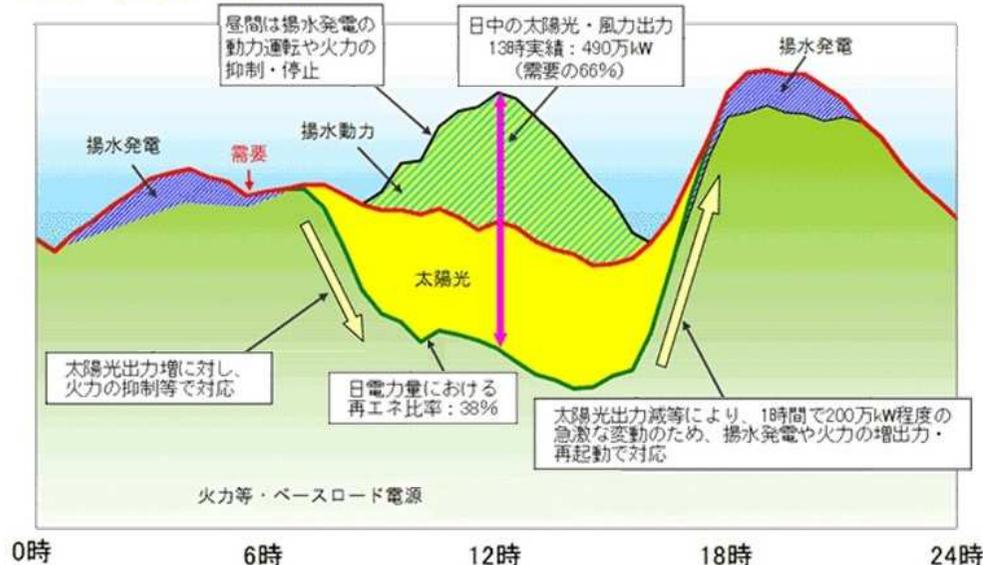


図-2 九電における需給バランス

(4) 非集光型太陽熱温度差発電の開発

提案者らは工法、諸元之最適化により、OTECの発電コスト低減を試みたが、高温側・低温側熱源の温度差が小さく、取水量が大きくなり、原理的に難しいことが分かった*1

そこで、高温側熱源を太陽熱で補完する方法(非集光型太陽熱温度差発電)の開発にチャレンジした*2

注)*1 迹目英正, 小島紀徳, 伊藤拓哉, 鈴木誠一, 取水等設備を含む個別最適化による海洋温度差発電コストの低減と評価, 日エネ誌, 95, 653-662 (2016)

*2 迹目英正, 小島紀徳, 伊藤拓哉, 鈴木誠一, 非集光型太陽熱温度差発電の開発, 日エネ誌, 97, 53-63 (2018)

(3) 非集光型太陽熱集熱装置

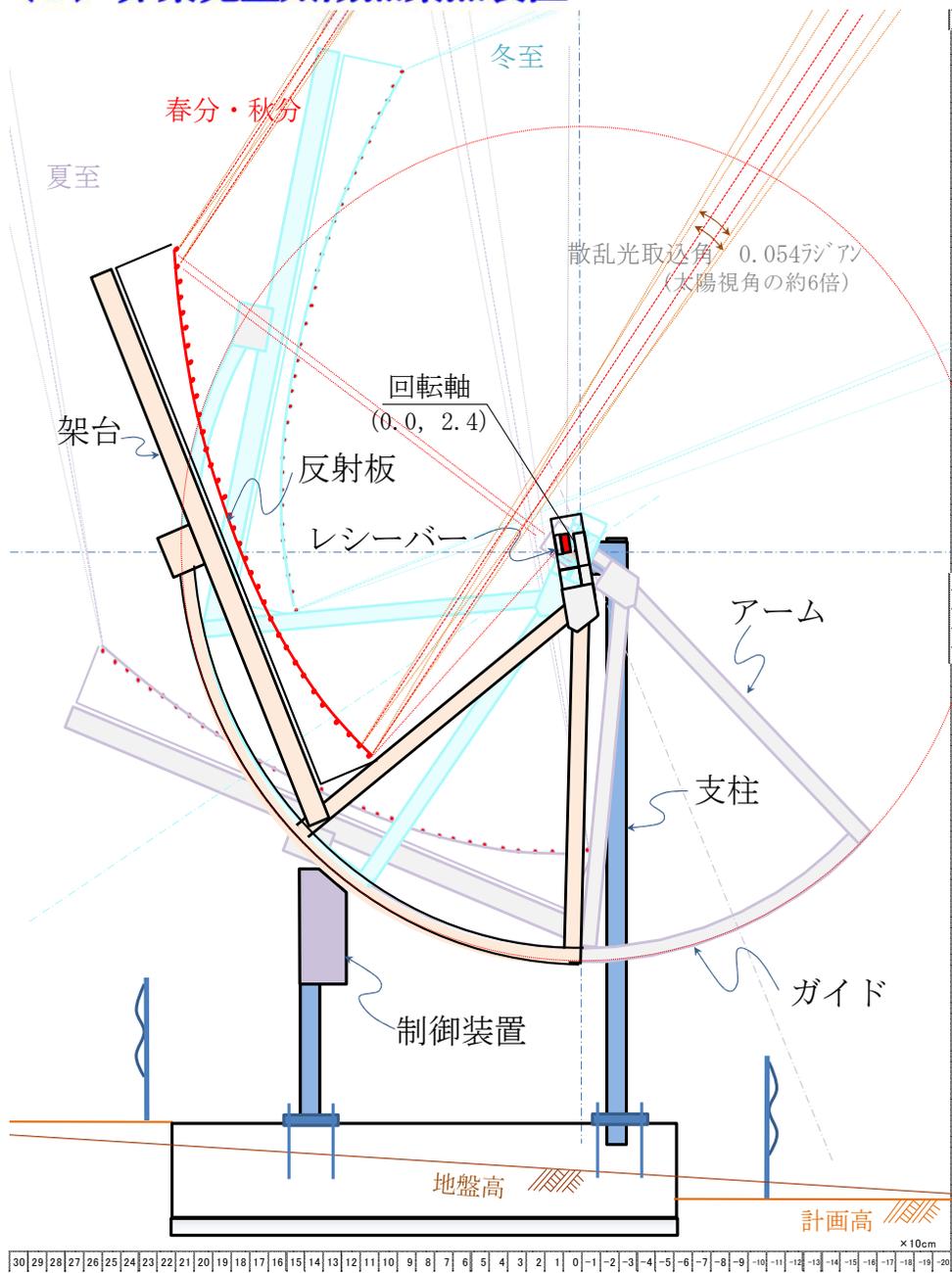


図-5 非集光型太陽熱集熱装置
(新規開発, 要素技術はすべて既往)

(4) 貯水 (蓄熱) 池

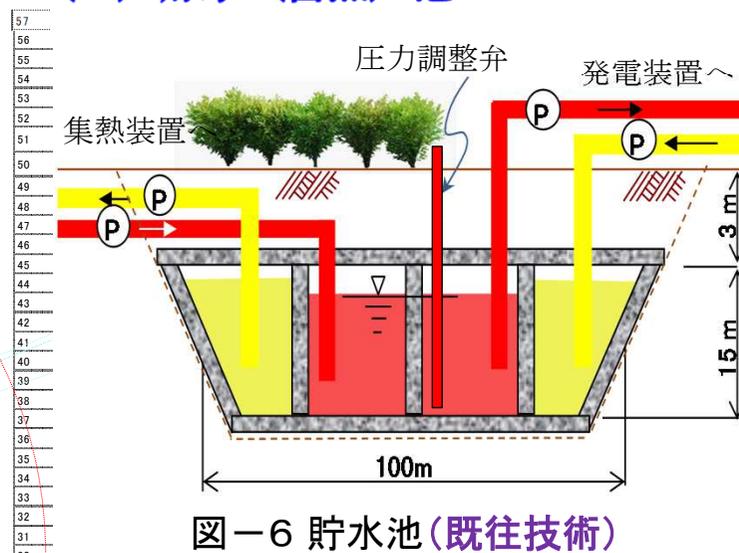


図-6 貯水池 (既往技術)

注目

左のマス構造で、95℃の熱水の、3日後の水温低下は0.24℃、熱効率で99.4%となる。これは実用的に蓄熱 (蓄電) できることを示し、太陽熱に依りながら、天候に拘わらず、24時間×365日連続運転可能

(5) 海洋深層水取水装置 (DW工法)

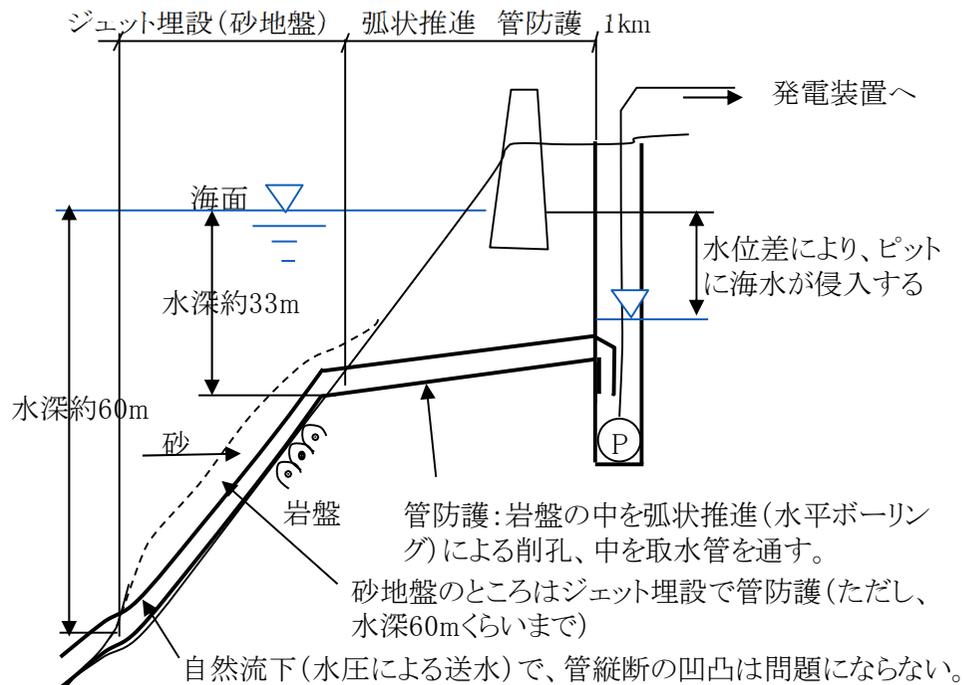


図-7 海洋深層水取水装置 (既往技術)

(6) 最適化手法

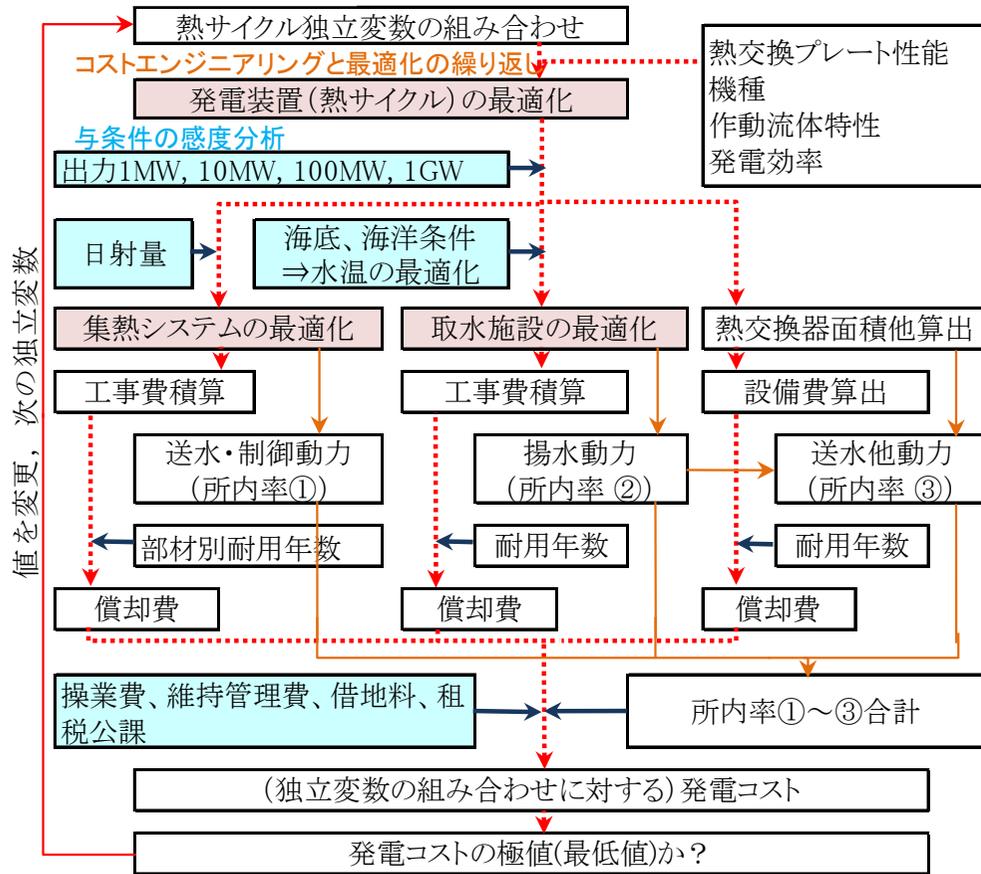


図-8 計算(最適化)全体フロー

図-8に最適化手順を示す。熱サイクルにおける独立変数(高温側流量、入・出温度、低温側流量、入・出温度)を一つずつ変化させながら、サブシステムの個別最適化を経た上で発電コストを算出し、その独立変数に対する最小値を求め、同様に全ての独立変数で発電コストが最小になる諸設定の組み合わせと発電コストが得られる。

凡例

- 部は最適化のため、設定値を変え計算を繰り返す。
- 部は与条件の感度分析および最適化のため、設定値を変え計算を繰り返す。

(7) 高温熱源温度, 出力, 発電装置と発電コスト

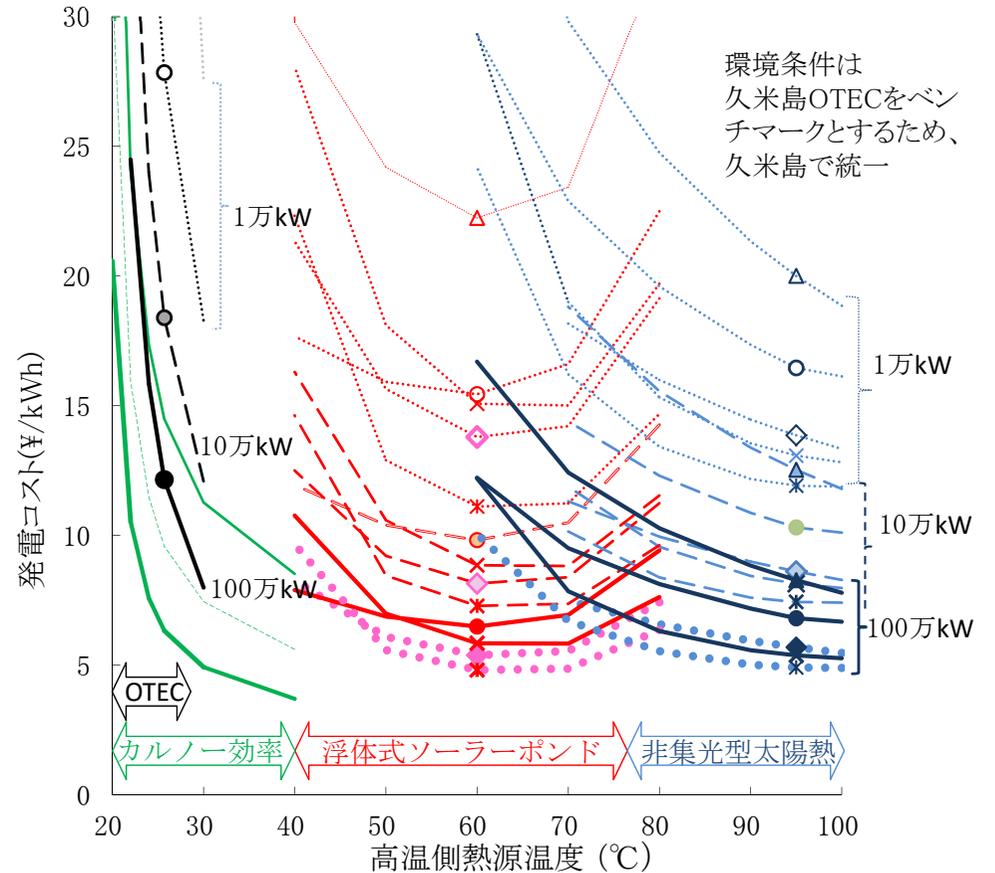


図-9 発電装置、高温側熱源温度と発電コスト

凡例

発電装置	出力	1万kW	10万kW	100万kW
一般的ORC		△	△	△
高性能ORC ^{*2}		○	○	○
一般的カーリーナ		×	×	×
高性能カーリーナ ^{*3}		*	*	*
スターリングエンジン ^{*4}		◇	◇	◇
カルノー効率		—	—	—

注) 高性能ORC(久米島OTEC)、一般的カーリーナ機(地熱発電)、高性能カーリーナ機(未販売)、スターリングエンジン(大規模は未販売)の発電効率、価格は既往資料からの想定で±20~30%の誤差が考えられる。

(8) 発電装置の選択

OTECの発電装置は温度帯から高性能ORC機に限定されたが、NC-STECHでは高温側熱源温度帯が高くなり、高性能ORC機、カーリーナサイクル機、スターリングエンジン(図-10, 11)が選択の対象となる。(全て既往技術、または開発中)

ここでは、本発電システムに適応し、扱い易いことから採用した。ただし図-9に示したように、カーリーナサイクル機、スターリングエンジンの差は誤差範囲にあり、それぞれの開発を注視する必要がある。



テクニカルデータ
 作業媒体: **空気**
 内圧: **大気圧**
 直径: 1300 mm
 高さ: 1300 mm
 フライホイールの直径: 1000mm
 フライホイール付き全高: 1140mm
 180°Cで軸動力: 600W
 電気出力: **0.5kW(e)**
 ポンプパワー: 400 W
 高温側熱源:
 太陽光コレクタによって150°C以上
 に生成されるか、200°Cに加熱された植物油
 によって生成されるか、他の集光光学系も
 可能である。
 低温側冷却: 一体型ポンプによる水冷
 推定寿命: **20年以上**
 電気効率: **12%**
 コージェネレーションとしての効率: **90%**
 価格: **4,000 € (53万円)**

↑ 構造
 シンプル
 (ただし、熱交換器は隠れている)

← 外観
 コンパクト

● Sunpulse 500

図-10 Sunpulse500

【参考】 Sunpulseシリーズの適用性 (推定)

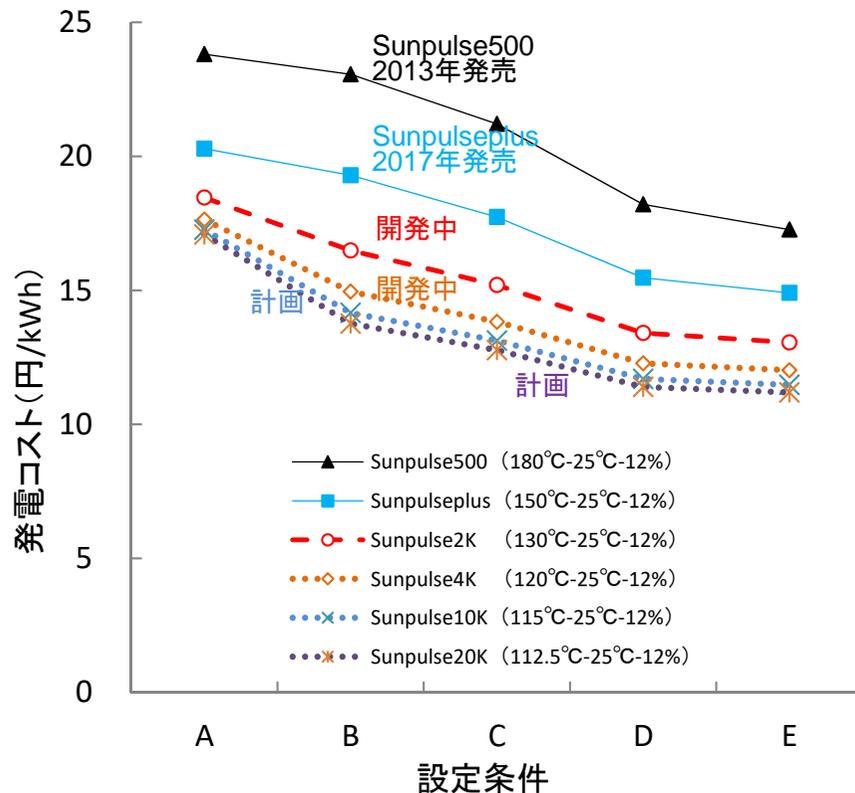


図-11 Sunpulseシリーズの性能 (推定)

設定条件

- A -- 標準設定 (95°C集熱→ヒートポンプ使用160°C)
- B -- 高温側温度95°C
- C -- B+熱交換性能改良
- D -- C+深層水冷熱(7°C)利用 ←
- E -- C+深層水冷熱(3.5°C)利用 ←

注) Sun Orbit社標準設定 (A: 地表水25°C) より、高温側熱源に集熱装置が必要な場合は低温側熱源は海洋深層水冷熱(7°C)を用いる方(D, E)が有利となる。検証にはSun pulse plus (1.0kW, 1万US\$)、現地実証にはSun pulse 2Kとした(協議中)。

3. 他発電方式との比較

太陽エネルギーを用いることで類似するOTEC、太陽熱発電、太陽光発電と比較する。NC-STECは既往技術の組み合わせ(あるいはハイブリッド)であるが、従来の弱点を補完し新しい形態を生み、発電コストの低減に繋がる。

(1) OTECとの違い(表-2)

高温側熱源温度がOTECの25.7℃に対し、NC-STECは95℃と高いことにより、発電効率は8.5倍、深層水取水量は1/21、熱交換面積は1/32、所内率は1/8.4、工事費は1/2.3と、全く異なる形態になる。

(2) 太陽熱発電との違い(表-3)

NC-STECは太陽熱発電に比べ集熱温度が低く(約400℃→95℃)、発電効率が劣るが、集熱・熱媒体輸送・蓄熱過程のエネルギーロスが小さく、総合的な熱効率で逆転する。

また、NC-STECの熱媒体量(水)は大きく、装置の部材は太く、厚く、制御が簡単なことに比べ、CSPでは要求が厳密で、製作費、制御費は高くなり、部材が小さく耐用年数は20年、減価償却費も大きくなる。

(3) 太陽光発電との違い(表-4)

太陽光発電の稼働率12%に対し、NC-STECは88.5%を確保できることから、売上(発電量)に対する投資(出力, 設備量)の違いが大きい。また、希薄な太陽エネルギーを集約する上で、太陽光発電は低圧直流の集約過程でロス(NEDOマニュアル, 所内率で控除)が生ずる。NC-STECでは低温の熱媒体を比較的大きい断面の水路で集めることで動力(所内率で控除)を小さくでき、原理的な差がある。

表-2 OTECとの違い

項目	単位	OTEC	NC-STEC	差・比	備考	
熱サイクル	高温側 入温度	℃	25.7	95.0	69.3	与条件または最適化による
	高温側 出温度	℃	18.3	55.0	36.7	熱サイクルを踏まえた最適化
	低温側 入温度	℃	7.0	7.0	0.0	海洋条件を踏まえた最適化
	低温側 出温度	℃	11.9	17.0	5.1	熱サイクルを踏まえた最適化
	温度差	℃	13.8	78.0	64.2	高温入-低温出
	発電効率	%	2.2%	18.6%	1 : 8.5	設定温度における最適発電装置
表層水取水量	m ³ /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	〃	

表-3 太陽熱発電との違い

項目	単位	太陽熱発電(CSP) SEGS LS-4	非集光型太陽熱 温度差発電(NC)	備考	
仕様	出力	kW	17,679	10,000	発電量7,750万kWh/年で逆算
	所内率	%	8.0%	3.4%	CSP:SEGS LS-4, NC:概略設計
	送電量	万kWh/年	7,124	7,492	
	集熱温度	℃	400	95	CSP:SEGS LS-4, NC:概略設計
	低温側	〃	20~30(空冷)	7.0(深層水)	〃
日射量 (反射板面積当たり)	直達	kWh(h)/m ² 日	5.99	5.62	非集光型は日射と反射板は75°
	散乱	〃	-	0.48	CSP:SEGS LS-4, NC:概略設計
	計	〃	5.99	6.11	
熱効率	集熱	%	64.0%	82.3%	反射板・レシーパー・制御含む
	運搬	〃	90.0%	99.3%	CSP:SEGS LS-4, NC:概略設計
	蓄熱	〃	90.0%	99.3%	〃
	合計	〃	51.8%	81.2%	
	発電効率	%	26.4%	18.6%	
敷地面積	ha	51.7	50.2	熱効率と反射板配置による	
事業費	億円	118.86	105.57	CSP:SEGS LS-4, NC:積算	
原価	償却費	億円/年	5.94	3.18	CSP:20年, NC:26.5年
	操業費	〃	2.62	2.44	CSP:SEGS LS-4, NC:積算
	計	〃	8.56	5.62	
	発電コスト	円/kWh	12.0	7.5	
ROA	%	3.3%	7.1%	売価17.5円/kWh(1万kW規模)	

表-4 太陽光発電との違い

項目	単位	太陽光発電 (PV)	非集光型太陽熱 温度差発電(NC)	備考	
出力	kW	67,009	10,000	発電量7,750万kWh/年で逆算	
熱源	対象日射量	-	年間最適傾斜 角全日射量	最適角直達 +散乱日射量	PV:固定式 NC:可動式(刻々最適角に制御)
	集熱量	kWh(h)/m ² ・日	4.04	3.14	久米島の条件
	有効率	〃	95.0%	81.2%	PV:汚れによる低減
	有効エネルギー	〃	3.83	2.55	集熱板面積当たり
発電効率	%	11.0%	18.6%	PV:モジュラー効率	
所内率	〃	18.0%	3.4%	PV:NEDOの手引書(2011), 直流交流変換含む	
送電量	万kWh/年	6,357	7,492		
事業費	億円	137.92	150.42	PV:実績平均, NC:概略設計	
原価	償却集熱装置	億円/年	6.90	3.48	耐用年数 PV:20年, NC:26.5年
	却発電機他	〃	-	1.38	耐用年数 NC:30年
	運転維持費	〃	0.81	1.75	PV:実績平均, NC:文献
	借地料	〃	0.90	0.98	単価100円/m ³
	租税公課	〃	0.78	0.85	税率0.565%
計	〃	9.38	8.44		
発電コスト	円/kWh	14.7	11.27		
ROA	%	-2.2%	-0.6%	売価17.5円/kWh(出力1万kW規模)	

4. NC-STECの適地と期待される効果

(1) 日射量、出力規模～発電コスト

図-12 に太陽熱発電(CSP)、太陽光発電(PV)、NC-STECの、日射量、出力規模と発電コストの関係を示した。

日射量に恵まれるモロタイ島(インドネシア東部)では、NC-STECの発電コストは以下が期待できる。

- 出力 1万kWで8.6円/kWh (±20%~30%)
- // 10万kWで5.2円/kWh (±20%~30%)
- // 100万kWで3.3円/kWh (±20%~30%)

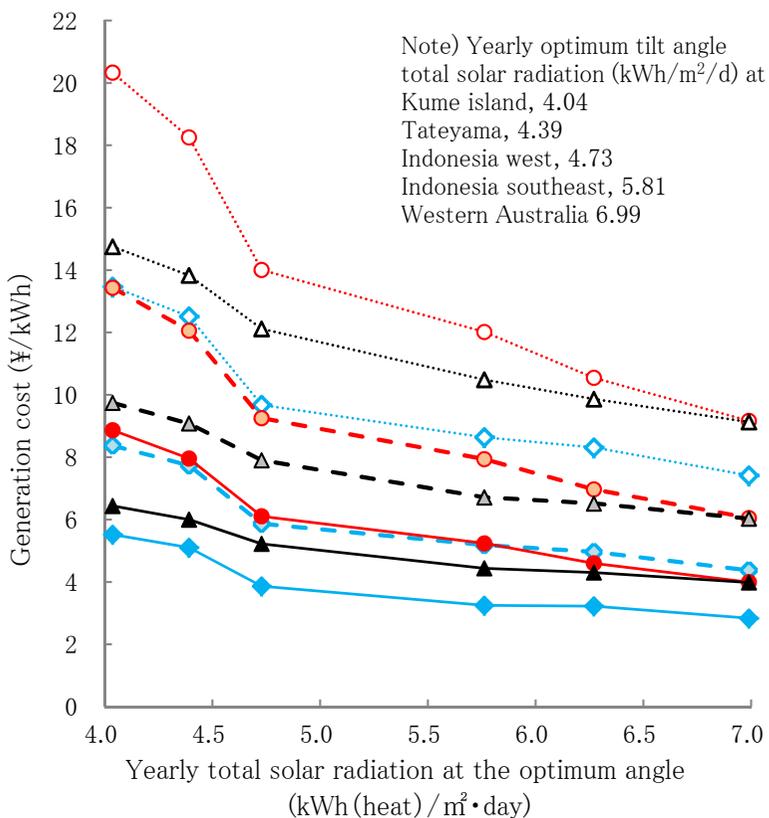


図-12 日射量、出力～発電コスト

(2) 世界の適地

図-13 は世界の海底地形、年平均全天日射量を重ね合わせたものである。良好な海洋深層水の取水サイトで、赤枠で示す日射量に恵まれる箇所は多い。



図-13 NC-STEC世界の適地

海洋深層水、太陽熱は実用的に無尽蔵で、NC-STECは化石燃料を代替し、地域の条件に応じた再生可能エネルギーとベストミックスが可能となる。

(3) 海洋深層水のカスケード利用

発電に使用後の、温度調整された海洋深層水は海水分離コストを大幅に下げる。淡水コスト16円/m³、製塩コスト1,600円/トンをはじめ、海洋深層水カスケード利用の流れを図-14に示す。また、海洋深層水の付加価値の例を表-6に示した。海洋深層水のカスケード利用は地域に新たな産業をもたらすと

ともに、NC-STECが小規模でスケールメリットを享受できない場合でも、海洋深層水のコストアロケーションにより、事業性は互いに大幅に改善する。

凡例	1万kW	10万kW	100万kW
CSP○.....	- - ○ - -	●
PV△.....	- - △ - -	▲
NC-STEC◇.....	- - ◇ - -	◆

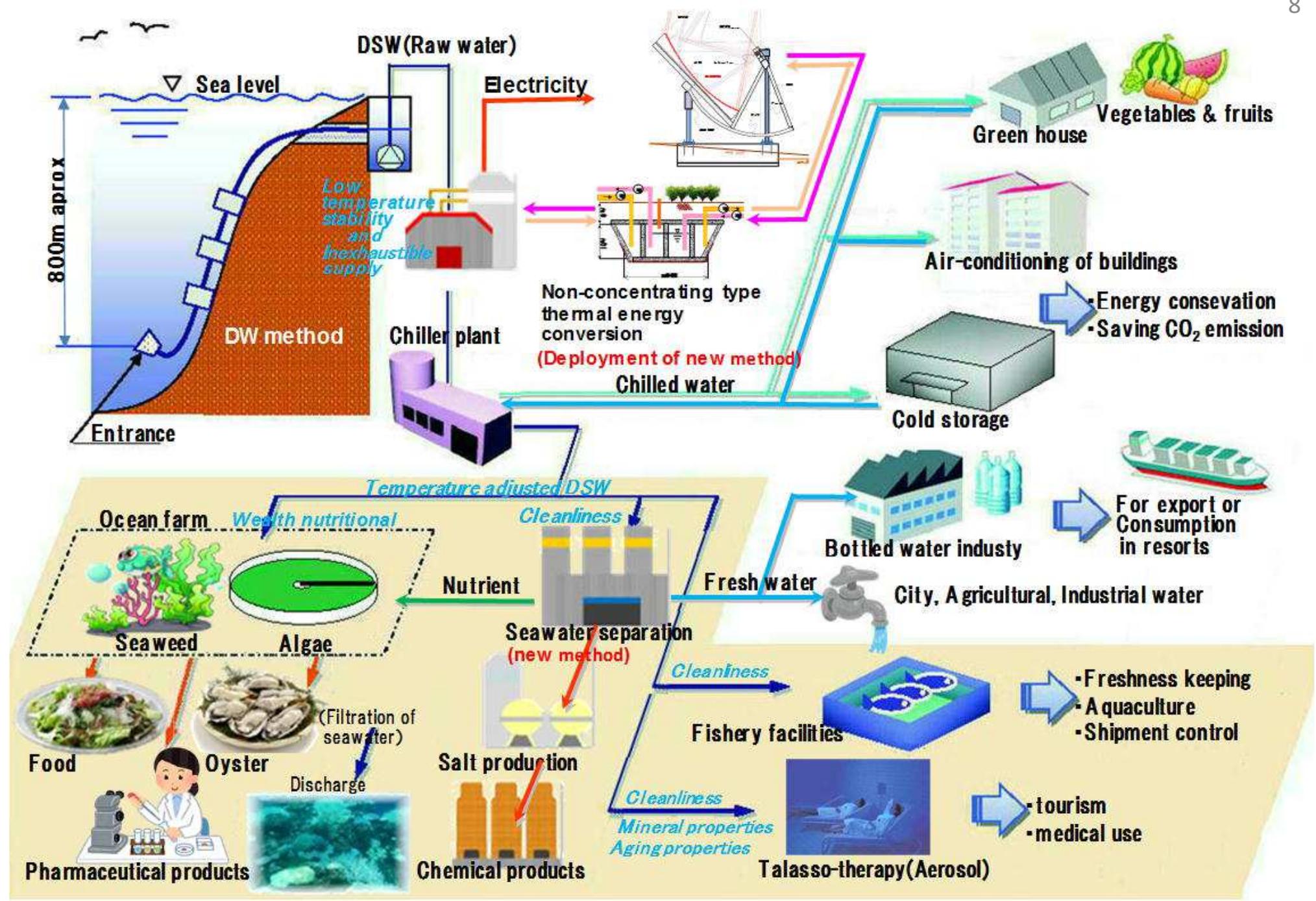


図-14 海洋深層水のカスケード利用

表-5 海洋深層水のコストと付加価値 **世界のエネルギー・水・食糧・資源・環境問題に寄与します!** 9

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 ³	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 取水コスト 1.0円/m ³ 売価…ここではNC-STEC事業を含む。	
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 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は発電コストが高く実用化に至らず 1.25MW:120円/kWh(久米島)	非集光型太陽熱温度差発電 (NC-STEC) (OTECにおける高温側熱源の改良→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、高性能カーリーナサイクル機)	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。 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) NC-STEC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 取水コストが高く、未利用	冷却水の供給 低温による5~20%の発電効率増加 冷却水取水量と冷却系設備の1/3~1/4削減 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 魚介類の養殖・蓄養・鮮度保持 魚介類の鮮度保持用の清浄水製造	冷却水の供給 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 40%前後の節電効果 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 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) 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 海藻類の培養(排水の洗浄) 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 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 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	淡水コストは100~300円/m ³ 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	コスト 売価 ROA コストは深層水取水量10万m ³ /日規模
海水分離	栄養塩 未利用	栄養塩濃縮水	25円/m ³ 35円/m ³ 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 ³ -円/m ³ 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 海外の製塩コスト約2,000円/トン	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%) 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%	
	副産物のMg, Kは肥料	Mg, Kの精製方法	経済的なMg, Kの分離精製、資源回収、MgCl ₂ コスト17,000円/トン、KClコスト17,000円/トン	

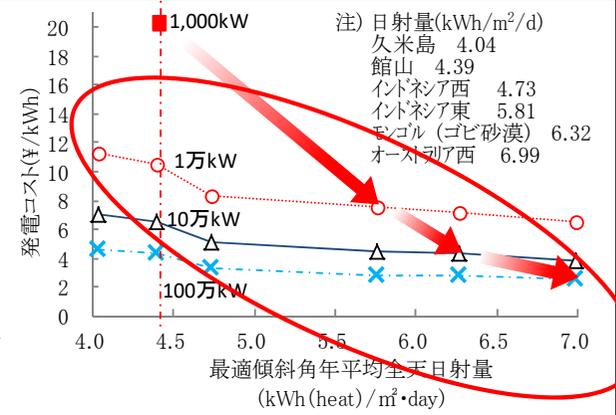


図-10 日射量×出力～発電コスト

(注)数値は概略設計に基づくもので誤差を含む

5. 事業化に向けて

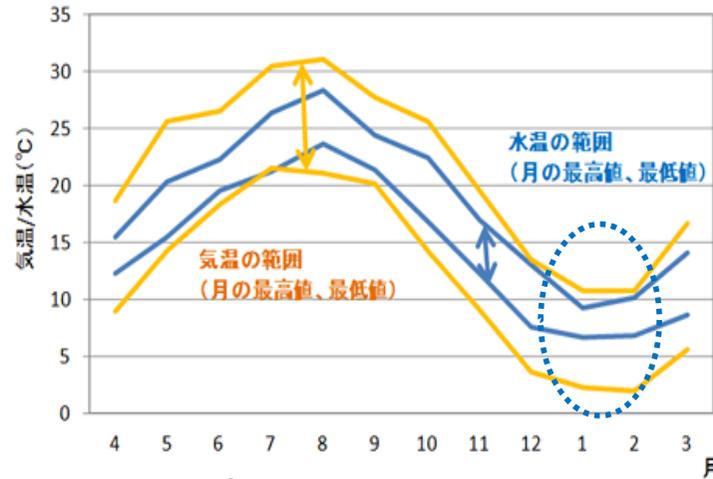
NC-STECSは既往技術の組み合わせと最適化、高度化で成り立ち、

- ① 新規開発で、特に試作を要するのは“非集光型太陽熱集熱装置”に絞られ、
- ② 低温側熱源、発電装置の諸設定を含めた、全体の最適化、各変数の感度分析が重要となり、
- ③ 更に発電システムとして現地での実証、改善、実績を重ね、
- ④ 世界的最適地において段階的拡張でスケールメリットを享受できるようにする必要がある。

以下、段階ごとの概要を示す。

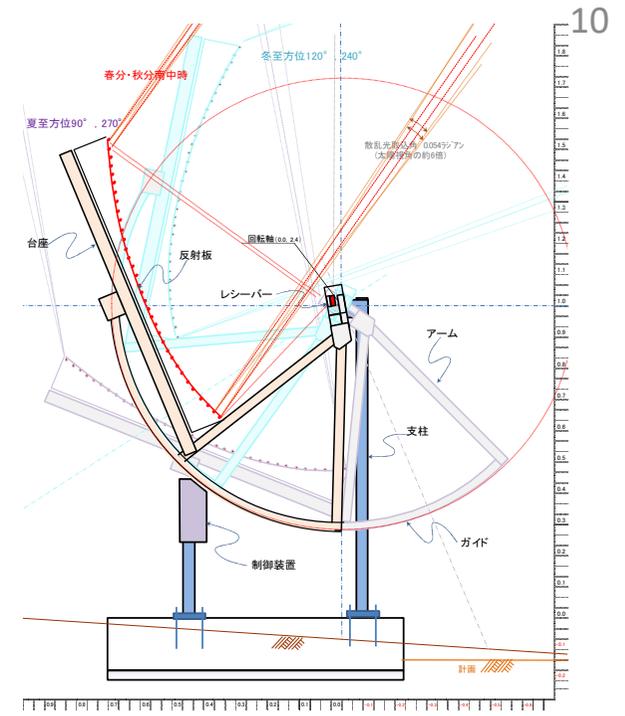
(1) プロトタイプによる性能確認

小規模なプロトタイプ模型で実証、および開発の方向性を確認することとしている(図-15)。高温側熱源には非集光型太陽熱集熱装置(1/3縮小モデル)、低温側熱源には水道水、発電装置にはSunpulseplus(1.0kW)を用い、設定条件に制約はあるものの、個々の性能を確認し、課題を抽出することができる。

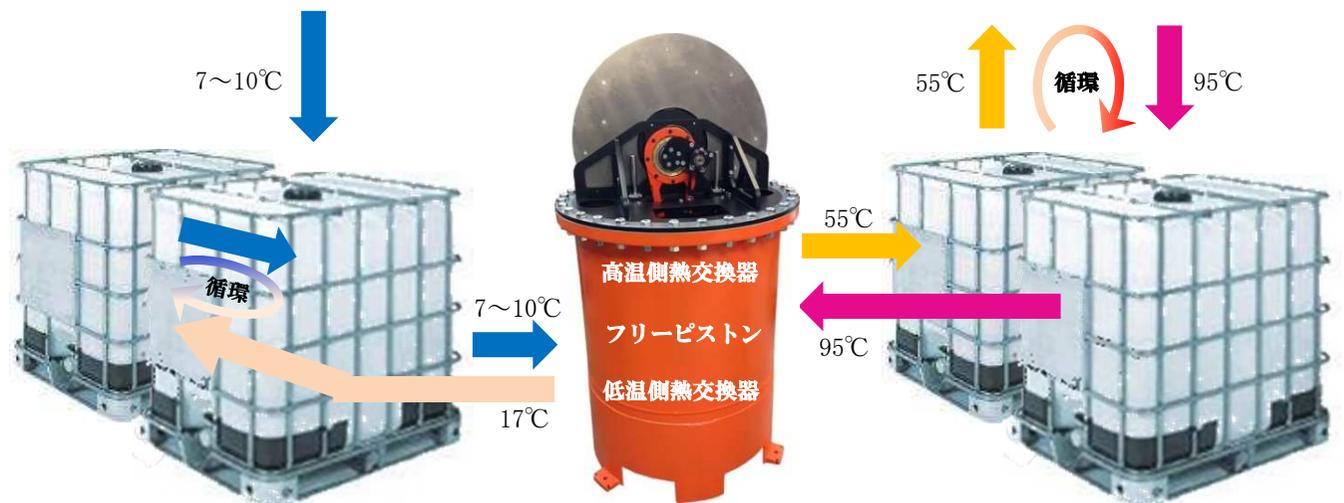


③ 水道水の水温変化

(水道水は1~2月は7~10°Cになり、海洋深層水の3.5°C年間一定には及ばないものの、温度帯を変化させ、最適化の感度など、必要なデータを採取できる。)



① 非集光型太陽熱集熱装置 (試作品1/3模型)



④ 高温側貯水槽 (出・入) (既製品を購入)

⑤ Sunpulseplus (既製品の購入, カスタマイズ委託)

② 高温側貯水槽 (出・入) (既製品を購入)

図-15 小規模プロトタイプ実証

(2) 実証プラント、段階的拡張および工程

図-16 に実証プラント(館山市伊戸, 1000kW)、図-17 に段階的拡張計画(モロタイ島, 1万, 10万, 100万kW)、表-6 に工程表を示す。

順調に進めても実証・拡張過程に10年を要し、本格的な整備は2030年代からになるが、頑張れば図-1にあった2040年の需要に応えることができるかもしれない(否、応えねばならない)。

事業化に向け、皆様のご指導、ご参画、ご支援をお願いしたい。

表-6 工程表

			年次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
プロトタイプによる試験				■										
実地試験、改良、事業性照査				■										
館山 実証 プラント	出力 1,000kW	実施設計												
		建設				着工								
		試験運用												
		商業運転												
段階的 事業 展開 (イン ドネシ ア モロタイ島)	小規模 実証 1万kW	事業計画				事業計画								
		調査設計												
	建設													
	試験運用													
	操業													
	商業運転													
中規模 実証 10万 kW	調査計画													
	建設													
	試験運用													
	操業													
大規模 実証 100万 kW	調査計画													
	建設													
		試験運用												
		操業												
本格的展開														
海洋 深層水 カスケード 利用 実証 (館山)	原水 冷熱利用	基本計画												
		調査設計												
		建設												
		操業												
		商業運転												
海水分離 実証 (館山)	海水分離	最適化検証												
		室内実験												
		実証												
		商業運転												

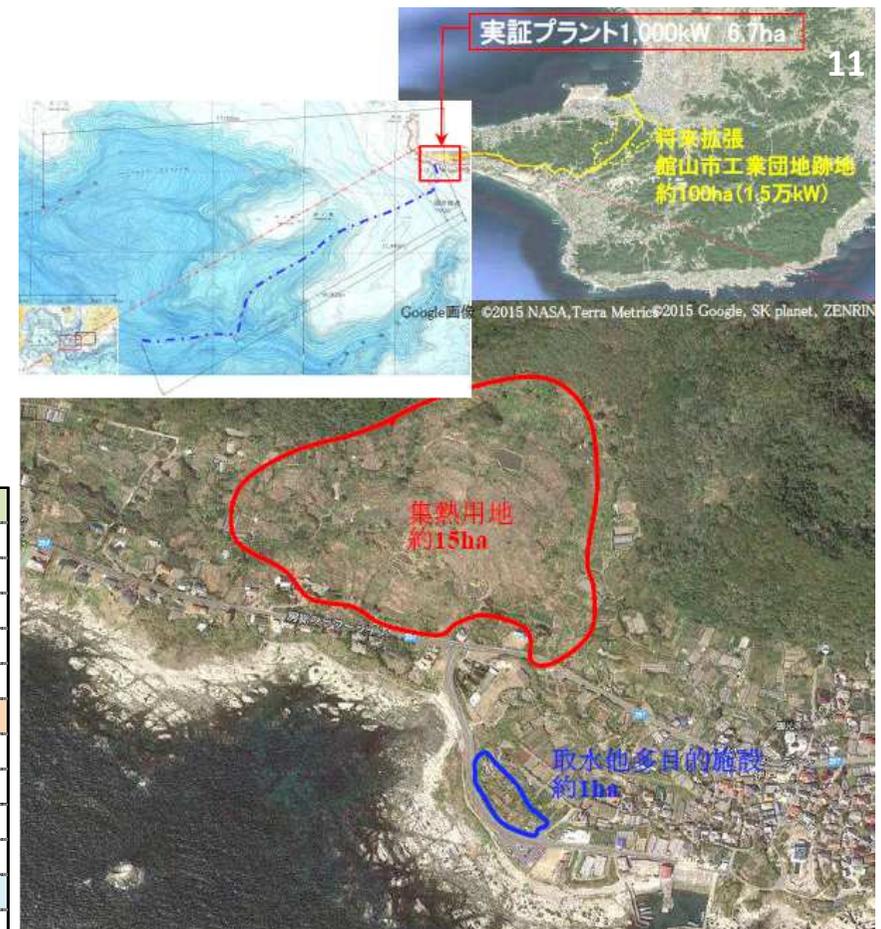


図-16 実証プラント計画(館山市伊戸)



図-17 段階的拡張計画(インドネシアモロタイ島)