

低温太陽熱温度差発電の開発



辻目 英正

1. 新たな発電方式の必要性

(1) 既往発電方式の比較、新たな発電方式の必要性

Table 1 既往発電方式の比較、適用性

選択肢	安全性	安定性	負荷追従性	コスト	拡張性	環境保全	適用性
原子力発電	△	○	△	△	○	△	ベース
火力発電	○	○	○	△	△	×	ミドル
バイオマス発電	○	○	○	△	△	△	ピーク
地熱発電	○	○	△	△	△	△	ベース
排熱発電	○	△	×	△	×	○	ピーク
太陽熱発電	○	△	△	△	○	△	ピーク
太陽光発電	○	△	×	△	○	△	ピーク

電力需要は時間的/季節的変動が大きく、電力の安定供給に向け、発電方式には、**安全性/安定性/負荷追従性/低コスト/拡張性/環境保全**などが求められる。

Table 1 は既往発電方式において、これら要件と適用性を示したものである。発電の要件すべてを満足する発電方式は存在しないため、それぞれベース電源/ミドル電源、あるいはピーク電源として互いに補完している (**エネルギーミックス&バランス**)。

再生可能エネルギーが注目されているが、ピーク電源を一定量以上に増やすことは、ブラックアウトの危惧、発電の安定性のしわ寄せによる電気料金の高騰など、電力賦課金以上に弊害が多い。

新たな電力需要に対しては、発電の要件を全て満たす、新たな発電方式が求められる。

Table 2 高温側熱源の比較

選択肢	温度	安全性	安定性	負荷追従性	コスト	拡張性	環境保全	総合評価
原子力	500℃	×	○	△	△	○	△	△
化石燃料	~1,500	○	○	○	△	△	×	△
バイオマス	500℃	○	○	○	△	△	○	△
地熱	~300	○	○	△	△	△	△	△
排熱	~200	○	△	×	△	×	○	△
太陽熱(高温)	~1,500	○	×	×	△	○	○	△
低温太陽熱	~100	○	○	○	○	○	○	○

Table 3 低温側熱源の比較

選択肢	温度	安定性	負荷追従性	コスト	拡張性	環境保全	総合評価
陸水	△ (10~30℃)	△	×	○	×	×	△
空冷	× (45~55℃)	○	△	○	○	△	△
表層海水	△ (15~30℃)	○	△	○	○	△	△
海洋深層水	○ (5℃一定)	○	△	△	○	○	○

発電システムは高温側熱源(**Table2**)、低温側熱源(**Table3**)、発電(エネルギー変換)装置(**Table4**)からなる。

高温側熱源では安全性/安定性/負荷追従性/低コスト/拡張性/環境保全など発電の要件を全て満たすものはないが**太陽熱を低温で集熱**する合理性は注目できる。

低温側熱源では**海洋深層水の低温安定性**に注目される。

(3) 発電装置、および組み合わせ比較評価

Table 4 低温熱源対象の発電装置の主な機種と性能、価格

熱サイクル	メーカー	名称 (型式)	定格出力時の 温水、冷却水水温, 水量	発電端出力	発電効率	価格	
						千円	比
ORC	(株)神戸製鋼所	マイクロバイナリー発電システム (MB-70H)	温水95°C、1,250ℓ/min	72kW	2.10%	28,000	1.1
			冷却15~20°C、2,000ℓ/min				
カーナサイクル (KCS)	地熱技術開発(株)	カーナサイクル発電システム (KCS-34g-50)	温水98°C、388ℓ/min	87kW	8.00%	87,000	3.2
			冷却14°C、1,200ℓ/min				
高性能ORC	(株)ゼネシス	久米島OTEC用	温水95°C、3,600ℓ/min 冷却7°C、21,000ℓ/min	1,250kW	12.40%	7,400,000	1.9
低温スターリングエンジン	DW社	低温スターリングエンジン LSE-3K, -10K	温水60~100°C (95°C)	3kW	17.50%	3,200	1
			冷却5~25°C (5°C)	10kW	17.80%	8,500	1

Table 5 高温側熱源、低温側熱源、発電装置の組み合わせと比較

	高温側熱源	低温側熱源	発電装置	安全性	安定性	負荷追随性	コスト	拡張性	環境保全	適用性
排熱発電	排熱	空冷, 陸水	ORC機	○	×	×	△	×	○	△
海洋温度差発電	表層海水	海洋深層水	高性能ORC機	○	△	△	×	△	○	△
地熱発電	地熱	空冷	カーナサイクル機	○	○	△	△	△	△	△
低温太陽熱温度差発電	太陽熱	海洋深層水	低温スターリングエンジン	○	○	○	○	○	○	○

低温スターリングエンジンが実用化できれば（発電効率を上げる技術はある）、**太陽熱の低温集熱、海洋深層水の低温安定性**が生かされ、安全性/安定性/負荷追随性/低コスト/拡張性/環境保全など**発電の要件全てが満たされる。**

(1) システムの構成

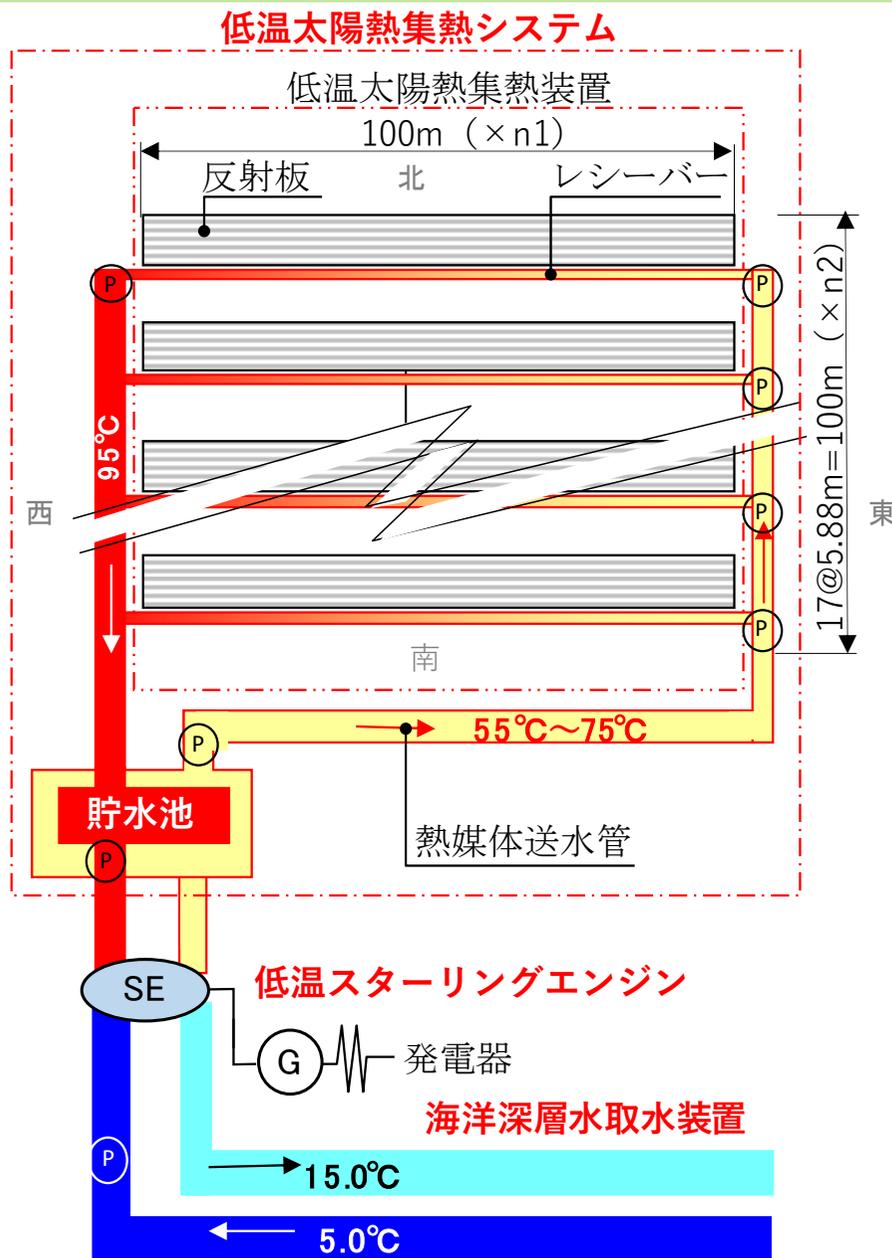


Fig.1 LSTEC全体図

Table 6 LSTEC発電所仕様 (於：久米島)

項目	単位	数量	
出力	kW	10,000	
日射量 (集熱板直達+散乱)	kWh (熱) / m ² / d	3.14	
集熱板敷地面積	ha	90	
雨天, 曇天時発電継続日数	日	3	
貯水池容量	m ³	150,000	
海洋深層水	水温	°C	5
	取水量	m ³ / d	93,000
低温スターリング	面積	m ²	1,333
エンジン発電所	基数 (10kW)	基	1,000

出力1万kWのLSTEC発電所について、**Fig.1** に全体図、**Table 6** に発電所仕様を示す。

出力1万kW(**24時間 × 365日**)に必要な敷地面積は
 集熱用地として 90ha (900m × 1,000m)
 貯水池用地として 1ha (100m × 100m)
 発電所敷地として 12a (30m × 40m)
 合計は91.12haとなる。

PVの最大出力表示とは違う!

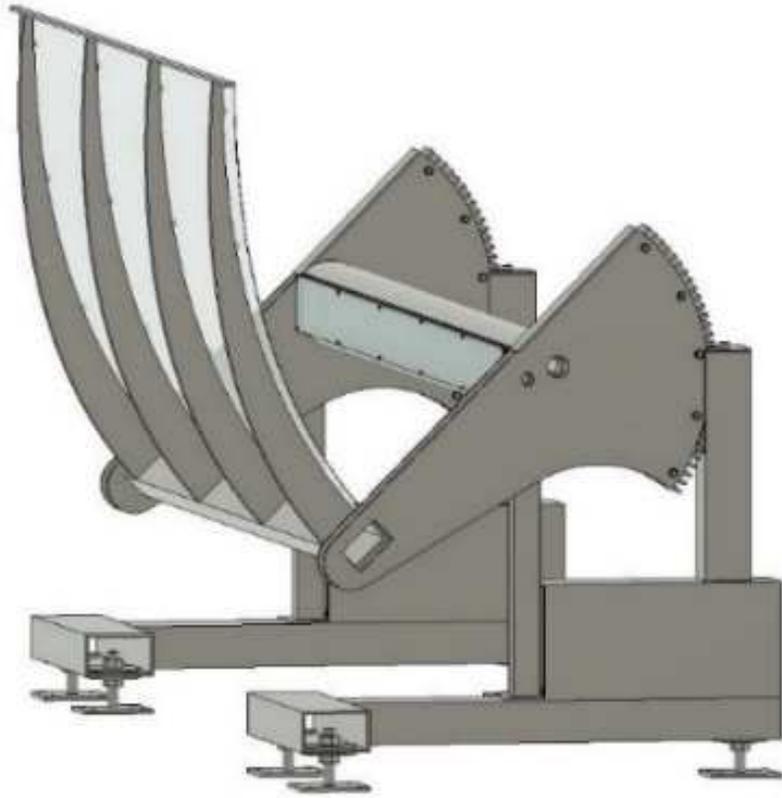


Fig.2 低温太陽熱集熱装置

Table 7 低温太陽熱集熱装置のエネルギーロス

項目	細目	有効率	備考
反射板	汚れの影響	98.0%±0.1%	メーカー値
	低高度除外	97.9%±0.1%	図解法
	反射率	92.5%±0.1%	メーカー値
	誤差	99.8%±0.1%	形態から算出
レーザー	透過率	94.5%±0.1%	メーカー値
	熱変換率	99.0%±0.1%	〃
	断熱	97.3%±0.1%	〃
	誤差	99.9%±0.1%	形態から算出
水路	熱伝導ロス	99.4%±0.1%	〃
貯水池	熱伝導ロス	99.8%±0.1%	〃
有効率		80.0%±1.0%	一般70~90%

Fig.2に低温太陽熱集熱装置の外観、Table 7に集光/運搬/貯水のエネルギーロスを示す。低温太陽熱集熱装置は、太陽光の行程（反射板の受光/反射、レーザーの透過/吸収）で**エネルギーロスを最小化**するように配慮したもので、以下の特徴を有する。

- ①集熱温度を下げることで、エネルギーロスを低減し、製作精度/検査/設置に余裕ができることに加え、**作動媒体は水を常圧で使用**でき、**製作コストを低減**できる。
- ②制御を単純化、使用エネルギーを最小化し、**維持管理コストも低減**できる。
- ③反射材/反射防止剤/日射吸収材/断熱材などは**最先端技術**を用いることができる。
- ④理論的/技術的に**難しいところはなく、設計/施工/積算**できる。

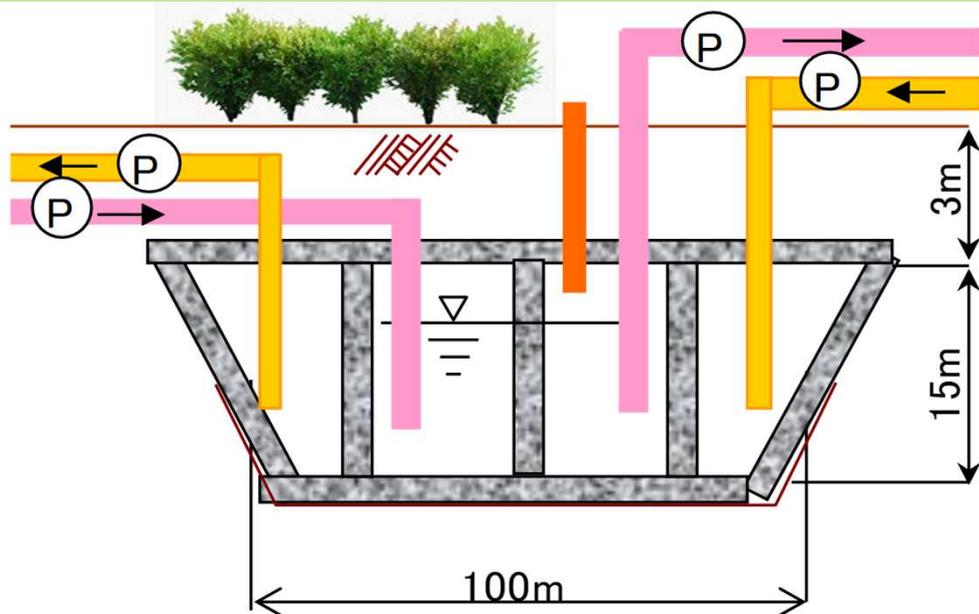


Fig.3 貯水池断面図



Photo 1 貯水池のイメージ

Table 8 貯水池諸元

項目	細目	単位	数量
容量	熱水	m ³	75,000
	温水	m ³	75,000
	蒸気圧	気圧	1.3
構造	形式		RC地下貯水池
	縦	m	100
	横	m	100
	深さ	m	15
3日後水温低下		℃	0.3

集熱装置で暖められた作動媒体（淡水）は送水管を通じ貯水池で貯水（蓄熱）される。**Fig.3** に貯水池の断面、**Table 8** に諸元を示す。

3日間の雨天/曇天でも定格出力で連続運転（24時間×365日）できるようにした場合、貯水量は出力1万kWで150,000m³となる。容量が大きく水温が低いため、3日後の水温低下は0.3℃（フーリエの式を積分）と小さく、**実用的な蓄電**に相当する。

(4) 海洋深層水取水装置

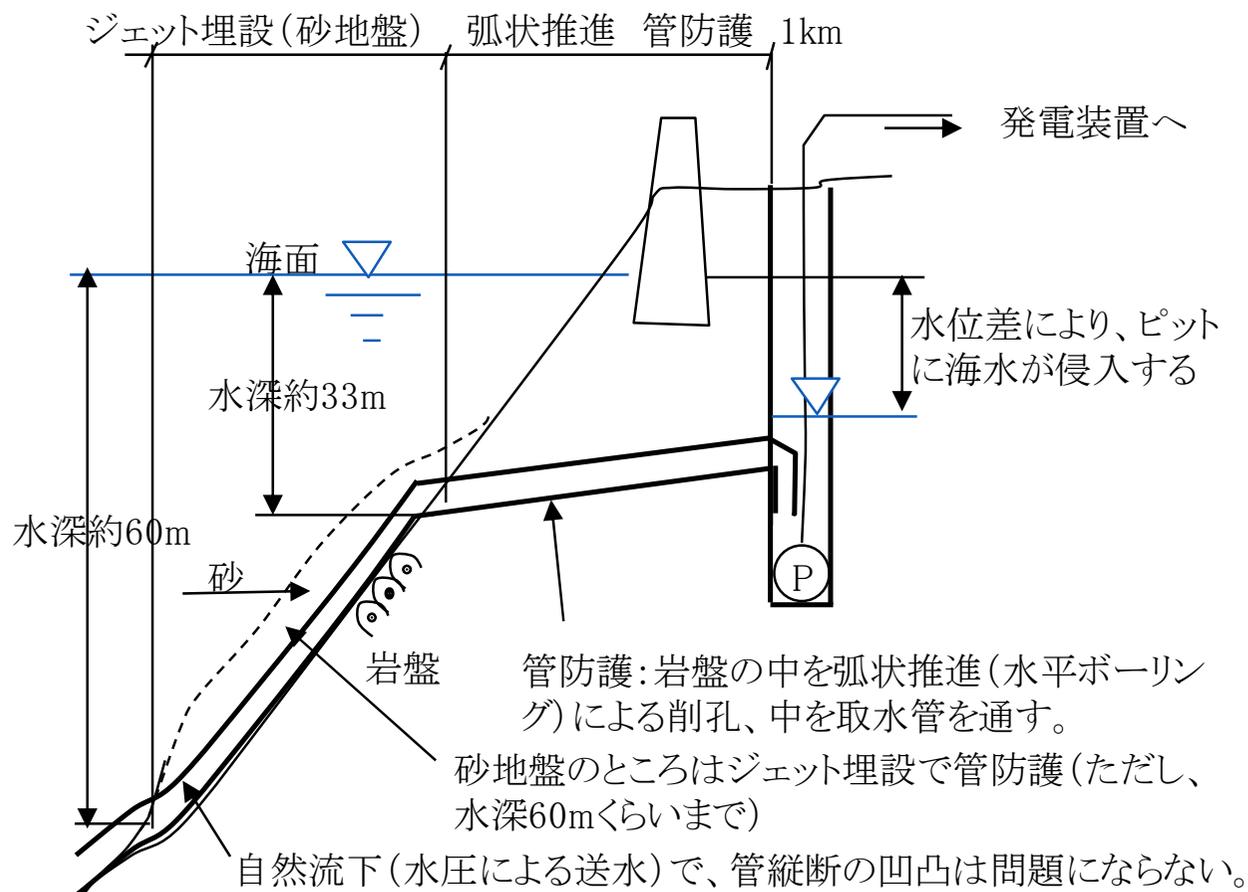


Fig.4 海洋深層水取水装置側断面図

Table 9 取水施設諸元

項目	単位	数量
取水量	m ³ /d	90,000
水温	°C	5
水深	m	850
取水管延長	km	3.7
水頭	m	1.4
管径	mm	φ 1,350
流速	m/s	0.73
工事費	億円	21.7
取水コスト	円/m ³	4.5

Fig.4 に海洋深層水取水施設の側断面図、**Table 9** に諸元を示す。

取水管敷設工法は従来の小規模なものには使えない。

Fig.4 はDW工法によるもので、建設/操業時に要するエネルギー（≒取水コスト）を最小化するよう意図されている。

従来工法とは異なるが、要素技術は既往で新たな技術開発を伴わない。

なお、取水条件/取水コストはサイトにより大きく異なる。ここでは他発電方式との比較のため、久米島の海洋条件/海底地形とした。

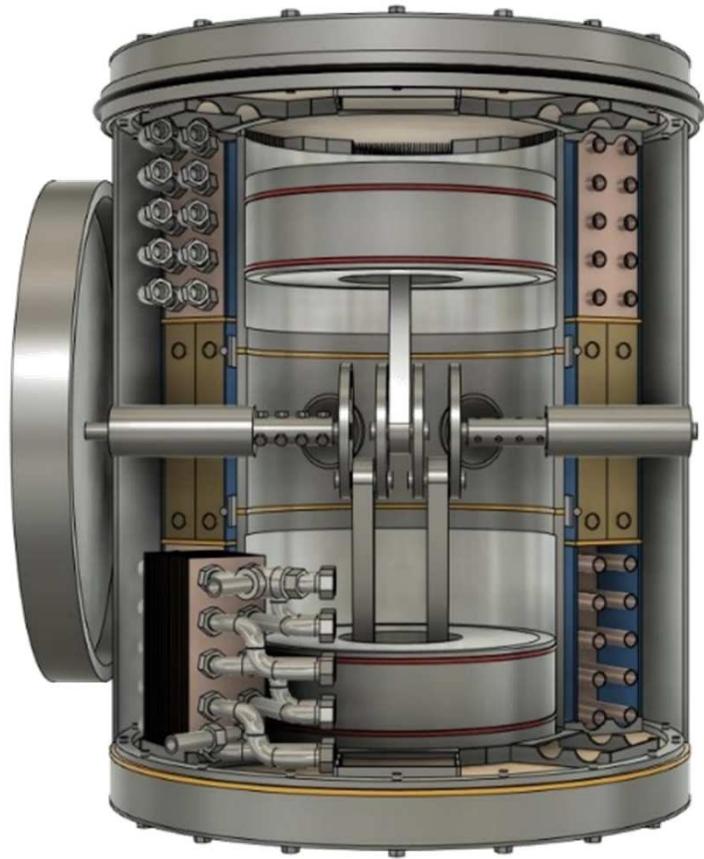


Fig.5 低温スターリングエンジン概観

Table 10 低温スターリングエンジン諸元

項目	細目	仕様
外観	外径	φ 2,000mm
	高さ	H 2,000mm
高温側	作動媒体	淡水
熱源	温度	95℃
低温側	作動媒体	海洋深層水
熱源	温度	5℃
作動気体	種類	ヘリウム
	圧力	3.73気圧
出力	単体	3kW~10kW
	並列	任意 (万kW)
効率	発電効率	17.80%
	機械効率	72.90%

Fig.5 に概観を、Table 10 に仕様を、Table 11 に特徴を示す。

低温スターリングエンジンはエクセルギーの小さい熱源（温度が低く従来は使えず、熱汚染やヒートアイランドの原因になっていた）を経済的に利用できる。

なお、仕様は実験機からの想定であるが、発電効率/エネルギーロスの変因から最先端技術の活用により実現できる。

Table 11 低温スターリングエンジンの特徴

- ①熱源は排熱/地熱/太陽熱などの種類/温度/量を選ばない。
- ②小規模（3kW~10kW）でも合理的で、独立/分散型に適する。
- ③熱源をつなぐだけで並列でき、大規模出力に対応できる。
- ④熱効率に優れる（カルノー効率に近い）
- ⑤排ガスがない。
- ⑥静粛、⑦長寿命（20~60年）、⑧構造が単純、メンテナンスが容易、⑨可逆サイクル（熱⇔動力）

(1) 日射量の発電コストへの感度

Table 12 発電コストおよび日射量の感度（その1：原単位）

	単位	久米島	館山	ペルー	備考
集熱板幅	m		2.70		A 構造寸法からの設定値
日射量	kWh(熱)/m ² /d(集熱板)	3.1	3.5	9.3	B 散乱光の一部を含む
	kWh(熱)/m/d(集熱板)	8.5	9.6	25.1	C =A × B
エネルギーロス（有効率）	—		0.800		D 構造形態からの計算値
集熱日射量	kWh(熱)/d/m(集熱板)	6.8	7.6	20.1	E =C × D
発電効率	—		0.178		F 95°C-5°C、ヘリウム3.7atm
発電量	kWh(熱)/d/m(集熱板)	1.21	1.36	3.58	G =E × F
稼働時間(24時間 × 稼働率)	h		21.2		H =24*I
貯水池有効率(気象変動含む)	—		0.885		I 年日射量に対する有効率
集熱版面積当たり出力	kW/m(集熱板)	0.0569	0.0642	0.1686	J =G/H/I
↓1kW当たり原単位					○○○ 低温太陽熱集熱装置の性能
集熱装置延長	m	17.6	15.6	5.9	L =J/K
敷地面積	m ²	103.4	91.6	34.9	M 集熱板延長 × 幅
集熱板面積	〃	47.5	42.1	16.0	N 集熱板延長 × 幅2.2m

Table 12 発電コストおよび日射量の感度（その2：出力1万kW）

		単位	久米島	館山	ペルー	備考		
敷地面積		ha	103.4	91.6	34.9	P	=M×100	
集熱板面積		〃	47.5	42.1	16.0	Q	=N×100	
事業費	集熱器, 貯水池	億円	97.6	86.5	32.9	AA	=Q×集熱板面積当たり	
	発電機	〃	24.5			AB	低温スターリングエンジン	
	関連施設(送電含まず)	〃	7.2			AC	久米島の条件で統一	
	深層水設備	〃	21.7			AD	〃	
	その他	〃	7.4			AE	〃	
	計	〃	158.4	147.3	93.7	AF	Σ	
原価	償却費	集熱システム	億円/年	3.69	3.27	1.24	AG	=AA/26.5
		発電機その他	〃	1.30			AH	=(AB+AC+AE)/30
	運転維持費	〃	1.19			AI	久米島の条件で統一	
	深層水費	〃	0.72			AJ	〃（耐用年数30年）	
	借地料	〃	1.03	0.92	0.07	AK	=P×20/10,000	
	租税公課	〃	0.89	0.83	0.53	AL	=AF×0.565%	
	計	〃	8.83	8.23	5.06	AM	Σ	
発電コスト	95°C⇒75°C	円/kWh	11.8	11.0	6.8	AN	=AM/7,492目標：10円/kWh	
(原価)	95°C⇒55°C	〃	19.3	17.6	8.9	AO	発電効率8.64%で試算	

信じられない！
違ふとすれば、
どの仮定が間違いか？
になる。

(2) 低温熱源による発電効率、発電コストの違い

Table 13 LSTECにおける、低温熱源による発電効率、発電コストの違い（概算）

	単位	海洋深層水	陸水	表層海水	空冷
熱源温度	℃	5 (5⇒10)	15 (15⇒20)	25 (25⇒30)	30 (30⇒45)
発電効率	%	17.80%	15.20%	12.50%	10.00%
発電コスト	円/kWh	11.8	12.9	14.8	17.3
深層水利用時比	%	100	110	125	147

海洋深層水に恵まれない場合は、低温側熱源として陸水/表層海水/あるいは空冷を用いることになる。

Table 13 に示すように、発電効率は海洋深層水の17.8%に比べ、それぞれ15.2%、12.5%、10.0%と低減し、発電コストは11.8円/kWhに比べ、12.9円/kWh、14.8円/kWh、17.3円/kWhと増加する。

海洋深層水に比べ、陸水/表層海水/空冷では割高になるが、それでも市販価格より安価になり、**海洋深層水は必須の条件ではない。**

Table 14 高温側熱源温度と諸変数の関係

発電コスト = 経費 / 発電量

経費 = 設備減価償却費 + 操業費

設備減価償却費 = f_1 (熱源温度)

操業費 = 固定費 + 熱源コスト

熱源コスト = f_2 (熱源温度)

発電量 = 使用可能エネルギー × 発電効率

使用可能エネルギー

= 集熱効率 × エクセルギー率

集熱効率 = f_3 (熱源温度)

エクセルギー率 = f_4 (熱源温度)

発電効率 = f_5 (熱源温度)

従来、発電システムでは、熱源温度を上げることに注力されてきたが、太陽熱の利用では集熱温度を上げると集熱コストも上昇し、発電コストの低減につながらない。

Table 14に高温側熱源温度と諸変数の関係を、それぞれに実際の値を代入しFig.6を得る。

設計/施工の力量にもよるが、

発電コストは集熱温度が高い方がよい訳ではない。

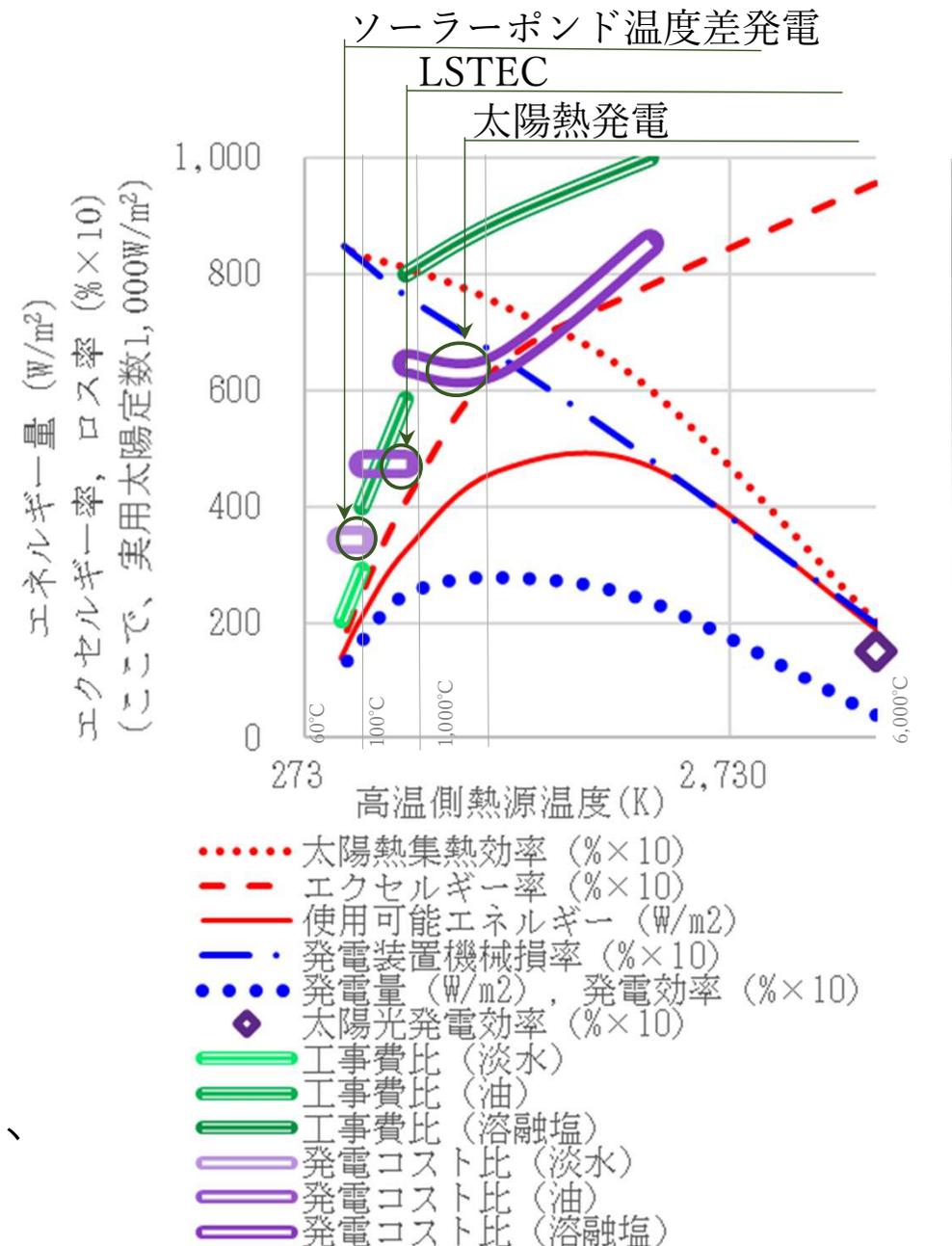


Fig.6 太陽熱集熱温度とエネルギー変換量、工事費比、発電コスト比のイメージ