

集光型太陽熱発電 (CSP) 方式とその現状

Trend of Concentrating Solar Power

岡本硝子株式会社 顧問 工学博士 西村 啓道

Hiromichi Nishimura Ph.D.

Okamoto Glass Co. Ltd., Adviser

1. はじめに

石油エネルギーの枯渇は時間の問題であり、また昨年東日本大震災に起因する原子力発電所の重大事故は原子力発電の安全性に重大な疑念をもたらし、日本に止まらず世界の新エネルギー政策にも大きな影を投げかけた。長期にわたるエネルギー対策の中で再生可能エネルギー利用の重要性を再認識させるに至っている。

前報¹⁾でも述べた通り、太陽光は1平方メートル当たり1KWというエネルギー密度であり、決して高密度とはいえない。しかし地球に降り注ぐ太陽光エネルギーの僅か1時間で人類が年間に使用するエネルギー量に匹敵するということは、太陽エネルギーおよびその派生エネルギーを上手に利用することで、化石エネルギーに替るほぼ永遠の代替エネルギーを手にすることになると期待できる。

太陽熱発電の定義は太陽の光をレンズや反射板を使って太陽炉に集めることで、それを熱源として利用する発電方法のことをいう。太陽光集光発電は集めた光エネルギーを太陽電池により電気エネルギーとして取り出すものであるが、一般的に太陽電池は温度上昇によって発電効率の低下を引き起こすことが知られており、集

光度の制御あるいは発電時の除熱・ヒートシンクが必要となる。

熱発電に於いては太陽光を集光し、その光を吸熱材料に照射し発熱を促し熱媒体を加熱する。この熱媒体により水蒸気を発生させ、それによりタービンを回転させて発電をするという原理である。熱発電の技術そのものは従来からあるものであり、効率を左右するのは太陽光の日射量(直達光照射量)の多さである。また発電所の発電システム、その熱利用効率が優劣を決定する。

地球上で日射量が多いのは赤道を挟んだ地域であり日照を確保できる米国、豪州、中央アジアの砂漠地帯、降雨の少ない地中海沿岸等が発電には適している。これらの地帯をサンベルト地帯と呼んでおり図1に示す。

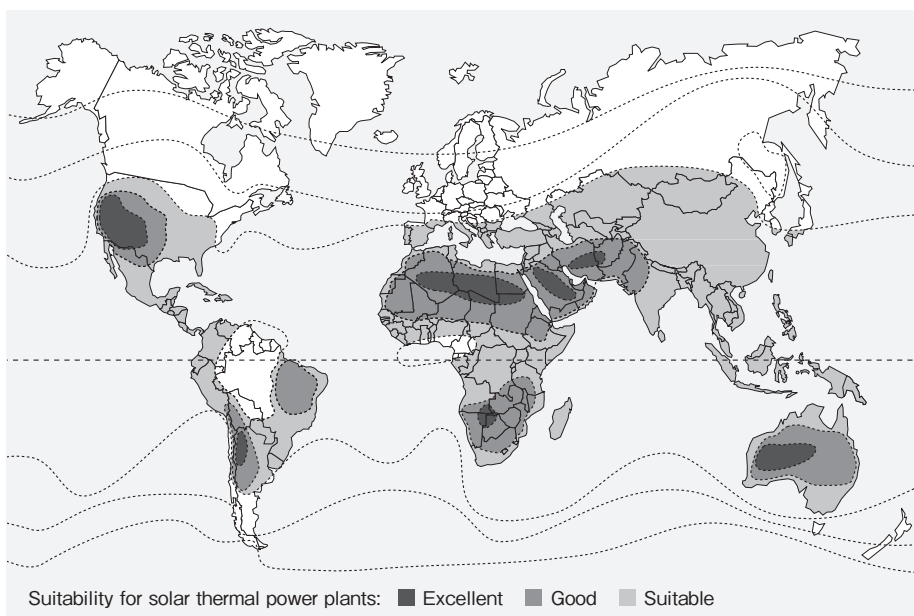


図1 サンベルト地帯の地図

出典: Solar Millenium

太陽が遮られることの少ないサンベルト地帯にある米国南部、豪州、中国西部砂漠地帯、地中海沿岸・サハラ砂漠地帯等に於いては太陽熱発電が急速に立ち上がり、全電力消費量に占める比率の上昇が予測されている。

日本での太陽光発電と言えば屋根やビルの屋上に設置するものが主であり、メガソーラー発電と言った大規模発電はやっと軌道に乗り出したところである。しかし太陽熱発電は全くと言っていい程話題にならなかった。というのは1970年代に入って海外で進み始めた太陽光発電を見て政府は1974年第一次オイルショック後に国家プロジェクト“サンシャイン計画”を発足させ、その中で初めて熱発電を取り上げることになった²⁾。1974年香川県仁尾町(現三豊市)において1MWのパイロットプラントが建設され実証テストが実施された。直達日照時間の短い日本に於いては良好な結果は得られず、それ以降二度と検討が行われることはなかった。しかしながら近年、日本には発電プラントの技術が蓄積されており、主として国外向けの事業展開を睨んで多くの企業が進出の機会を狙って参入が図られるに至っている³⁾。

2. 集光型太陽熱発電方式と特徴

2.1 主な熱発電方式

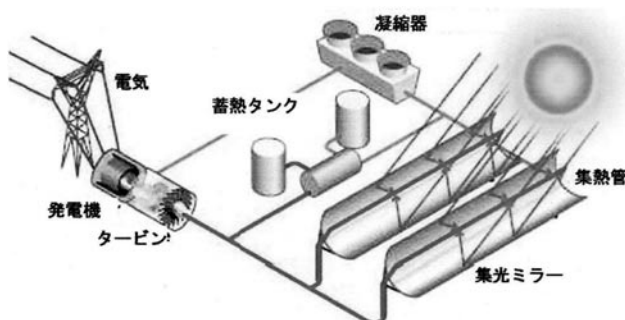
太陽熱利用技術に関して日本でも豊富な実績はある。太陽熱温水器が広く利用されていたことは記憶に新しいが、近年その使用実績が著しく減少していることは大変省エネルギーの観点で残念なことである。

ここで取り上げる熱発電は太陽光の集光によって高温を実現し、その熱で水蒸気を発生、水蒸気タービンを回転させ発電する方式である。

実用化実験は既に記したが日本のサンシャイン計画で取り上げられ、その当時世界最先端の熱発電技術が試されていたのである。サンベルト地帯では日本と異なり直達日照条件が良好なため発電容量0.5～10MWクラスの太陽熱発電所(Concentrating Solar Power: CSP)のパイロットプラント建設が進み、さらに1985年米国で民間商用プラントがカリフォルニア州モハベ砂漠にSEGS名で建設されていたのである。

2.1.1 パラボリックトラフ型熱発電

太陽熱発電システムの実用化は、パラボリックトラフ型から始まったと言われている。図2に放物面鏡の概念、図3⁴⁾と図4⁵⁾には代表的例としてのトラフ型CSP装置の部分図とシステムの例を示す。



出典：DOE ホームページ (<http://www1.eere.energy.gov/solar/>)

図2 パラボリックトラフ型熱発電の概念図



図3 パラボリックトラフ型反射板の写真例⁴⁾

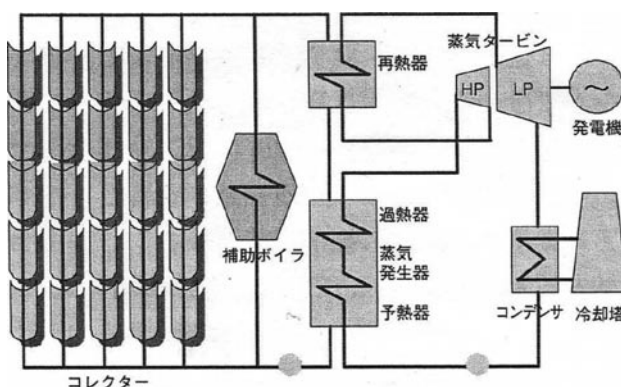


図4 パラボリックトラフ型熱発電システム概念図⁵⁾

パラボリックトラフ型は図2、3に示されるように半円筒状の放物面の集光鏡により平行太陽光を反射し、焦点の線上に設置されている集熱媒体(合成油)を加熱昇温し配管内の熱媒を循環させる。

放物面鏡で反射した光を集熱管でおよそ96%を熱に変換し(コレクターは効率よく光-熱エネルギーに変換する最も重要な要素技術である⁶⁾)集熱管中をおよそ10m単位で直列に繋いだモジュール管の流れながら熱媒体を加熱し続け、蓄熱部に集め400℃程度の熱エネルギーとして蓄積してゆく。最終的には390℃程度の水蒸気を発生し、それでタービンを駆動し発電することになる。蓄熱することで必要な時間に熱媒を廻し夜間でも発電させることができるという利点を有する。一方長いパスを通して熱を集めるために熱損失も大きく、熱-電エネルギー変換効率は高くない。また大規模化を進めてもこの欠点をクリアすることにはならないのが限界である。

既にトラフ型熱発電として1システムで80MWレベルの発電容量での商用発電が実現している。

トラフCSP技術は既に確立された技術であり、今後大幅な技術の進展は望めない、完成した技術と考えられる⁶⁾。

2.1.2 タワー型熱発電

東京ドームが2つ入る広い面積の敷地の中央におよそ50m高さのタワー2基がそびえ、それを囲む2万4000枚の大きな鏡が並びその反射光を集めたタワーは目もくらむ輝きを持つ。頂上の集熱器に水蒸気を流し、より高温の水蒸気とし、その蒸気がタービンを回し発電する⁷⁾。この例は米国のベンチャーe-Solar社のプラントで2009年にカリフォルニア州南部で稼働を始めた実証プラントであり、最大で5MWの能力を有する。

日本の仁尾プラントで試験されたものの一つがこのタワー型であり、世界で初めて実現したものである。しかし直達日照時間不足の日本で試験されたために失敗とされ、2度と振り返られることが無かった。

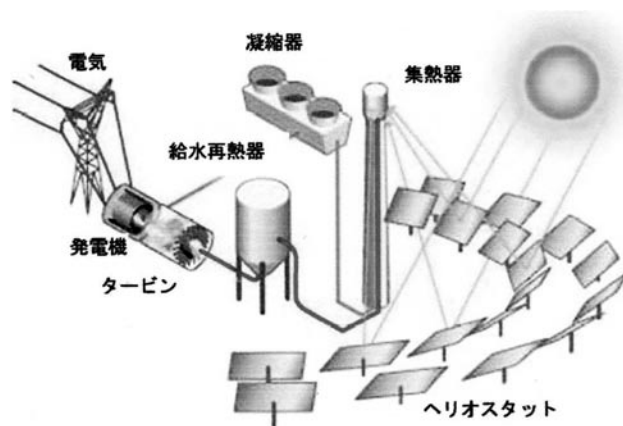
前記トラフ型に始まる熱発電は海外で広がり、次にこのタワー型熱発電が主力になりつつある。未だトラフ型の後塵を拝しているものの、タワー型が主力となることは間違いないとされている⁴⁾。

タワー型発電は多くの鏡(ヘリオスタットと呼ぶ)を並べ、しかも2軸で太陽光を追尾することで600℃の高温

を達成できるため効率良く発電できるので熱発電方式の主流となると考えられている。

このシステムの光電変換効率は20~35%にもなると見られており、一般の太陽光発電よりもはるかに高い効率を発揮することは注目される。図5にタワー型太陽熱発電システム概念図⁸⁾を、また図6にタワー型太陽熱発電プラントの写真の1例を示す⁹⁾。

トラフ型CSPと比較するとより広い面積から狭い面積へ集光することで高温が実現することが利点である。またトラフ型のように長い配管で媒体を流すことによる大きな熱損失を起こすことが避けられることが特徴である。



出典：DOE ホームページ (<http://www1.eere.energy.gov/solar/>)

図5 タワー型太陽熱発電システム概念図



図6 タワー型太陽熱発電プラント写真の一例

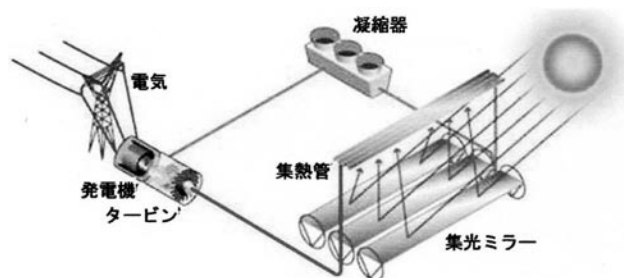
2.1.3 その他

(1) リニアフレネル型熱発電

トラフ型と類似の技術としてリニアフレネル型の集

光型熱発電方式(図7,8)がある¹⁰⁾。これは平面あるいは短径面で僅かに湾曲した短冊状の長いリニアーマーを1軸で太陽を追尾すると同時に、数メートル上方に配置された集熱管に集光して蒸気を直接発生させる方法である¹¹⁾。現状ではトラフ型よりもシステム効率は8~10%と低い、トラフ型の大きなパラボリック曲面ミラーに比較してフレネル長尺ミラーの作成が容易なためコスト的には有利となる。また熱交換器を通さず直接約480℃の高温水蒸気を発生できることからタービン効率向上が可能となること、さらに装置は地上に固定され一軸追尾に必要な駆動動力が小さくて済むこともこのリニアフレネル型の利点である。

現状未だ実証試験の段階で米国や豪州等で運転されている。



出典：DOE ホームページ (<http://www1.eere.energy.gov/solar/>)

図7 リニアフレネル太陽熱発電システム概念図



出典：DESERTEC-UK ホームページ (<http://www.trec-uk.org.uk/>)

図8 リニアフレネル型太陽熱発電実証機（豪）

(2) ディッシュ型熱発電

ディッシュ型太陽熱発電はパラボリック曲面集光ミラーあるいは小型の多数の集光ミラーを配置し太陽を追尾し、その焦点にスターリングエンジンあるいは小型のタービンを配置し発電するものである。

いずれの方式とも図9に示すような形状であり、全体の大きさは10m前後、太陽追尾装置を備えて発電を

行うのでその発電出力は5~50kW程度であり他のシステムと比較して小規模であり、分散型発電に適している。大電力を得るには多くの発電機を並べる必要がある¹²⁾。

熱媒の温度は約750℃まで昇温可能であり、米国では25kWシステムで30%の発電効率を実現している。米国や欧州等を中心に実証試験が進められているが大規模発電にはやや不向きと思われる。



図9 ディッシュ型集光発電装置

(3) 日本の新しい動向

仁尾プラント以来長い間熱発電に関する動きが無かった日本においても再興の兆しが見られる。その要因は大規模太陽光発電がグローバルな事業として熾烈な受託競争時代に突入してきたことにある。熱発電はグローバル競争の中でも太陽光発電に劣らず大切な発電事業となっているにもかかわらず、太陽光発電開発に対する日本政府の厚い開発支援に比べると圧倒的に少ない。しかし開発に新たな政府援助あるいは海外の支援が得られるようになり実商への動きが激しくなってきた。もう一つの理由として基本的な技術は古い既存の技術であり、参入のバリアーが低いことにもある。

新しい技術として東京工業大学玉浦教授らの提案したビームダウニング発電方式¹³⁾等を挙げることができる。この技術はタワー方式の変形であるが多くのヘリオスタットから集光した光を二次反射鏡で下方に集光し、熱媒体の加熱を地上付近で行うことで操作を簡単にする利点があること、また将来的に高熱化学反応を通

してエネルギーの形態変化による蓄積を実現しやすくするというもう一つの利点をもたらされた¹⁴⁾。

またJFEエンジニアリング(株)らが中心となって、三鷹光器(株)の太陽追尾円形ヘリオスタット反射鏡を80基使用して高さ20mのタワー上部にあるレシーバーに集光し蒸気を発生しタービン発電する比較的コンパクトなタワートップ熱発電装置の実証試験が2012年度始まっている¹⁵⁾。図10に太陽熱発電タワートップ方式システム写真を示す。中央のタワーの周りに配置されたヘリオスタットからの光が集まり、光っているのがわかる。



図10 太陽熱発電タワートップ方式システム写真

:JFEエンジニアリング(株)様好意による

2.2 熱発電のまとめ

熱発電方式として上記4方式がある。それぞれの特徴、利点・欠点また発電の特性などを表1にまとめて示す。

各方法一長一短あり、どの方法でなくてはならないとは言えない。事実、開発歴史を見れば先ずトラフ型が先行し2007年スペインでの31MWのタワー型プラント、上記e-Solar 5MWプラント(米国)が稼働している。他にも次々とサンベルト地帯でタワー型商用プラントの計

画が進められている。その見通し(概算値)が表2に示されている¹⁶⁾。また低炭素化の流れ、さらには原子力発電の危険性とフィッション生成物の処理に重大な懸念が明らかになり再生可能エネルギーへの転換にシフトせざるを得ない状態から考えて太陽熱発電量が2050年度には5000TWh以上になると推定されている¹⁷⁾。全使用エネルギーの約11%以上となる見込みである。

表1 太陽熱発電集光タイプと特徴

	パラボリックトラフ型	リニアフレネル型	タワー型	ディッシュ型
現 状	30から80MWp/ ユニット、商業運転中	トラフ型に類似 実証試験～実証に	大型のパワープラント 実証試験中	～30KW規模で 実証試験から実証化
利 点	・いち早く実用化 ・比較的簡単機構 ・貯蓄能力あり	・比較的簡単機構 ・貯蓄能力あり ・駆動コスト低い	・長期的に高性能 ・ハイブリッド可能 ・高温貯蔵可能	・熱効率良好30% ・需要に応じた稼働
欠 点	・運転温度低い ・熱損失大きい	・トラフ型と類似	・初期投資大 ・ヘリオスタット性能改善余地あり	・貯蔵・バックアップに問題あり ・高コスト・分散型
特 徴	放物面鏡を並べ運転 線集光 追尾方式 1軸追尾 焦点距離(m) ～3 集光倍率 30～40 熱媒体 合成油、熔融塩	線状ミラー多数配置 線集光 1軸追尾 ～30 30～40 合成油、蒸気	集光面に平面配置 点状集光 各ミラー2軸追尾 ～数100 ～800 熔融塩、蒸気	集光部に面上配置 点状集光 各ミラー2軸追尾 ～4 ～3000 Heガス

NEDO 資料、日揮資料等から筆者が編集

表2 太陽熱発電の導入実績・見通し(概算値)

	2009年までの導入量[MW]	2009年までの発電量[GWh]	建設・計画中の容量[MW]
トラフ型 (フレネル型)	500 5	>16000 8	>10000 500
タワー型	40	80	3000
ディッシュ型	0.5	3	1000

出典:CSP Global Outlook 2009

3. 熱発電装置における材料・システム技術

以上に述べてきた熱発電装置を開発・販売する上で重要な各種の要素技術についてまとめる。

3.1 要素機器・設備

現在国内外に於いても様々な企業が高効率・高性能の太陽熱発電関連機器・設備の開発を実施している。主なものとして熱媒体、集熱管、集熱板、反射板、集光板、蓄熱設備がある。反射板として最も高性能なのが銀膜であるが単独では耐環境性が劣るために様々な工夫がなされているが未だ絶対的なものは無いのが現状である。またコスト削減要求が強くなり低コスト化が大きく問われている。

集熱性能は熱発電では重要因子であり、より高熱を発生するために耐熱性があり光を熱に変える効率の高いレシーバー材料技術の開発が喫緊事項である。

3.2 新システム

日本が先行している集光システムの中でビームダウン方式の優位性を今後どう活かすか、またどう発展させるかが今後大変重要である¹³⁾。

一方では水を使用しない発電方式も三菱重工業(株)が開発を進めている。水を使用しないで高圧・高温の空気タービンを廻し発電できる技術を提案し、砂漠地帯で優位性を発揮できれば大変優位性を世界に示すことになる^{13)a)}。

また太陽熱発電技術単独ではなくガスタービン発電を複合化する技術開発も重要になると考えられる。

4. まとめ

日本に於いて太陽熱発電は長い時間忘れ去られていたが、近年特にグローバル化対応が重要化するに従い太陽光集光および集光熱発電等大規模発電システムの海外展開が重要課題となり、そのシステム化対応は日本が得意とするインフラ産業輸出の一環としてオール日本での対応が求められつつある。そのことに鑑み、光発電に限ることなく熱発電さらには熱利用技術のさらなる向上は日本にとって再生可能エネルギーの利用化に大変重要な課題であると言えるのではないだろうか。

本レビューを終わるに当たって、写真・図等の使用許可をいただきました、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構様および写真等使用の便宜をおはからいいただいたJFEエンジニアリング(株)家本様には深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 西村啓道. The Chemical Times. 2011, 220, 7-11.
- 2) 田中忠良. 日本エネルギー学会誌. 2011, 90(4), 351-356.
- 3) a) 渋谷英俊, 宮本哲史, 都築寛志. エネルギーと動力. 2011, 61(276), 43-53.
b) 森伸芳. O plus E. 2011, 33(7), 702-709.
c) 中村勝重, 中村雅一, 中村学, 松葉正, 石間実, 中村実, 小野村敏之. 日本エネルギー学会誌. 2010, 89(4), 349-354.
- 4) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 編. “太陽熱発電の技術の現状とロードマップ”. NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 2010, 253-310. <http://www.nedo.go.jp/content/100107273.pdf>
- 5) 沖田信雄, 須山章子, 伊藤義康. エネルギーと動力, 2010, 60(274), 41-49.
- 6) <http://www.solaroaces.org/>
- 7) 金子憲治, 花澤裕二, 半沢智, 瀧本大輔, 山根小雪, 小瀧真理子. “主役に躍り出る太陽熱 米国や中東で進む大計画”, ECO Japan, 2010-7-13, <http://eco.nikkeibp.co.jp/article/special/20100709/104189/>
- 8) NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 2010, p.255.
- 9) <http://www.swissinfo.ch/jpn/detail/content.html?cid=8589986>
- 10) NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 2010, 254-255.
- 11) NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 2010, p.254.
- 12) “Solar thermal energy”, Wikipedia, 2012-7-3, http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_energy
- 13) a) NEDO 再生可能エネルギー技術白書. 2010, p.300.
b) 金子憲治, 花澤裕二, 半沢智, 瀧本大輔, 山根小雪, 小瀧真理子. “主役に躍り出る太陽熱 米国や中東で進む大計画 日本発の新方式が登場”, ECO Japan, 2010-7-13, <http://eco.nikkeibp.co.jp/article/special/20100709/104189/?P=5>
- 14) 玉浦 裕. 太陽エネルギー. 2000, 26(4), 31-40.
- 15) “太陽熱発電構想”. Fole, 2012, (116), p18.
- 16) NEDO 再生可能エネルギー技術白書, 2010, p267.
- 17) International Energy Agency. Technology Roadmap Concentrating Solar Power, 2010, p20.