

# 高温空気タービンを利用した太陽熱発電システムの開発

Development of Concentrated Solar Power Generation System with Hot Air Turbine



長田 俊幸<sup>\*1</sup>  
Toshiyuki Osada

中谷 浩己<sup>\*2</sup>  
Hiromi Nakatani

小林 一太<sup>\*3</sup>  
Kazuta Kobayashi

渡部 正治<sup>\*4</sup>  
Masaharu Watabe

田川 雅士<sup>\*5</sup>  
Masashi Tagawa

太陽熱エネルギーの有効利用の一環として、サンベルト地帯での適用が期待されている太陽熱発電に関して、当社が世界に先駆けて開発を進めている高温空気タービン式発電システムは、ヘリオスタットで集光・集熱し 850℃の高温空気を生成することでタービンを駆動して発電する方式であり、変換効率が高く、冷却水が不要となるなど、優れた特徴を有するものである。本報では本システムのキーコンポーネントとなる受熱器の CSIRO との共同開発状況のほか、システムの性能を左右する高温タービンやソーラーフィールド設計などのポイントについて説明する。

## 1. はじめに

環境対策の必要性に加え、代替エネルギー源の開発ニーズが増大している中、その解決策のひとつとして太陽エネルギーの有効利用の重要性はますます高まっている。

光を直接電気に変える太陽光発電は有効波長が限定されるが、散乱光も利用できるため、直達日射量の多くない日本のような気候でも設置が進んでいる。

一方、直達光しか利用できないが、変換効率が高く、高温でも効率低下しない、また蓄熱により夜間の発電や熱の有効利用が可能である太陽熱発電はいわゆるサンベルト地域で今後市場が拡大すると予想されている。

現在、トラフ型という既に商品化されている技術があるが、線集光で集光度が低く、効率/コスト面で更なる改善は難しいとされているため、点集光により集光度・効率を向上させ、建設コストが下げられるタワー型に注目が集まっている。本報ではタワー型の中でも、空気を熱媒体とするブレイトンサイクルを採用した冷却水不要の太陽熱発電システムの開発状況を紹介する。

## 2. 太陽熱発電の市場と技術動向

晴天が少なく日射強度が比較的弱い地域では、直達日射でしか発電できない太陽熱発電に比べ、散乱光でも発電できる太陽光発電が適するが、直達日射が強く天候の安定した地域においては、太陽熱発電の方が高い効率を得ることができ有利となる。図1に太陽熱発電に適した地域を示す。直達日射の豊富な乾燥したサンベルト地帯が適地と考えられ、米国・南欧・豪州・アフリカ・中東・インドなど広範囲に及ぶ。

市場規模は、図2に示すとおり、2020年には世界の設備容量が25～40GWに達すると予想され、年間の建設容量は2～5GWにも相当する。各国の太陽エネルギー導入計画に加えて、デザ

\*1 エンジニアリング本部電力プロジェクト総括部電力計画部主幹技師 技術士(機械部門)

\*2 原動機事業本部新エネルギー事業推進部主席プロジェクト統括 \*3 原動機事業本部水・エネルギー部 技術士(機械部門)

\*4 エンジニアリング本部エネルギー・環境事業戦略室次長 工博 \*5 原動機事業本部技師長

ーテックプロジェクト<sup>(1)</sup>(北アフリカで発電した電気を、地中海の海底ケーブルで送電し、欧州消費電力の15%程度を賄う)のように、国際協力による壮大な計画も進められており、実現すれば上記予想を上回る規模に市場が拡大する可能性もある。

太陽熱発電方式の比較を図3に示す。現在は、集光・集熱したエネルギーを利用し、蒸気タービンを回して発電する方式が主流となっている。特に①トラフ型は集熱器が標準化されて普及しているが集熱温度は400℃レベルである。また、近年プラントの効率向上を目的に集熱温度を更に高める方法として、集光密度の高い②タワー型も作られるようになってきた<sup>(3)</sup>。両者とも蒸気タービン式(Rankine cycle)である。

一方、蒸気タービン方式よりも高温の条件でタービンが駆動できるため、更なる効率向上が期待できる③高温空気タービン式(タワー型, Brayton cycle)も新しいコンセプトの太陽熱発電システムとして開発が進められている。このシステムは水を使わずに発電できるため、太陽熱発電に適する乾燥地域への適用にもマッチするとして注目を集めている。

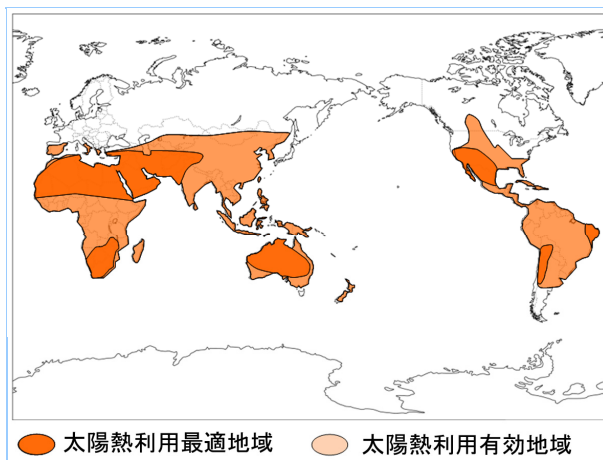


図1 日射量分布

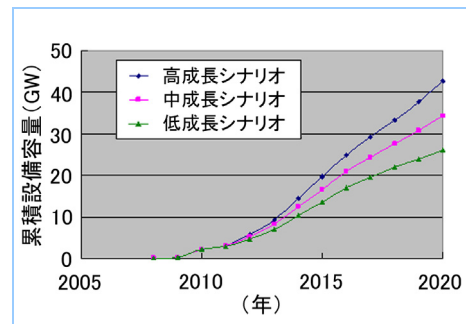


図2 太陽熱発電の市場規模予測<sup>(2)</sup>

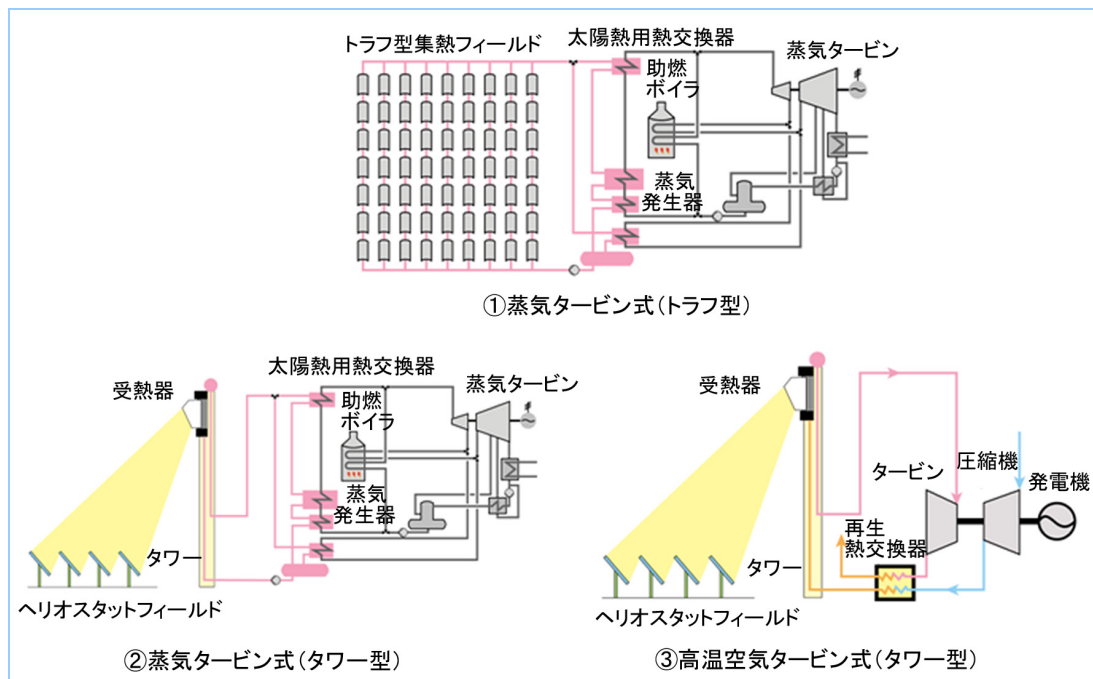


図3 太陽熱発電方式の比較

### 3. 新しい太陽熱発電システムの開発

#### 3.1 システムの特長

当社は、ガスタービン、ボイラ/熱交換器などにおいてこれまで蓄積した技術を活用して世界に実用化の例がない“集光・集熱型の高温空気タービン式発電システム”(図3③)を開発中で

ある。大気から吸気・圧縮した空気を集光・集熱した受熱器で加熱し、高温の空気を生成しタービンを駆動して発電する。タービンの排気は再生熱交換器を介して熱回収し、大気に放出するオープンサイクルを形成する。作動媒体である空気の高温度化により高い排気温度を利用した再生サイクル化や、低压条件でも高温設計がしやすいことから、従来の蒸気タービン式より高いプラント効率を達成することができる。また、復水器、給水ポンプなどの補機がなくシンプルな機器構成となるため、メンテナンス性も容易となる。さらに、発電サイクル内に水を使わないため、太陽熱利用に適する乾燥地域での取扱いに優れたシステムであるといえる。

### 3.2 受熱器

高温空気タービン発電システムのキーコンポーネントのひとつである受熱器は、多数のヘリオスタットで集光・集熱された太陽エネルギーを、熱エネルギーに変換する熱交換器である。太陽エネルギーは受熱器の開口部を通過した後、受熱器内部のチューブへ到達し、チューブ内部を通過する空気を加熱し<sup>(4)</sup>、効率的に 850℃の高温空気が生成され、タービンを駆動する。熱交換器の金属部は 900℃を超える高温となるため、耐熱性の高い Ni 合金を使用する。熱疲労、クリープ強度などを考慮した高温設計を行いチューブの長さ・径・厚さ・ピッチを最適化している。作動温度が高温となるため、放射損失が性能低下に及ぼす影響が大きいことから、太陽光の入光部にのみ開口を設けたキャビティタイプを採用している。これにより、高温時ケーシング内に発生する熱放射を作動空気の昇温に有効利用するとともに、開口部からの放射損失は最小限に抑える設計としている。開口部の位置はヘリオスタット反射光の焦点に設置し、開口部サイズの最小化を図っている。

設計の妥当性を確認するため、汎用熱流体解析ソフトウェアを用いて三次元熱放射及び管内流体伝熱の同時一体解析を行った。境界条件には流入空気量・空気温度を与えると同時に、別途実施した太陽入射熱の強度分布を受熱面に与えた。解析結果の例として図4に空気温度の分布を示す。受熱器入り口から流入した低温空気は、太陽入射を受けるチューブを通過する過程で温度上昇し、受熱器出口では高温(850℃)に到達してタービンに流入する。

以上の検討に基づき設計した受熱器の性能を確認するため、200kWe 級の受熱器試作機を製作し、2011 年5月、オーストラリア/連邦科学産業研究機構(CSIRO<sup>\*(5)</sup>)と共同で検証試験を行った(図5)。その結果、受熱器出口空気を太陽熱のみで目標の 850℃に昇温できることを確認した。これは放射解析で予測した結果とよく一致し、今後の設計・検討においても同様の検討・解析手法が適用できるものと考えている。

\* CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

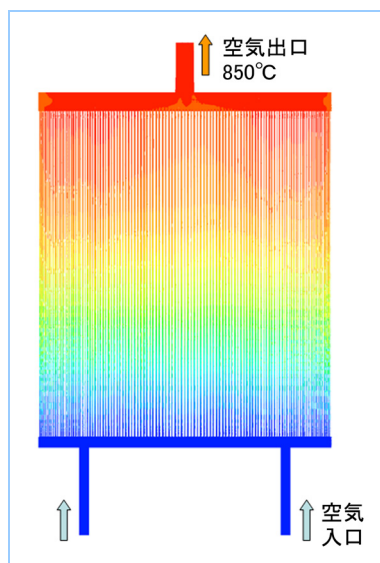


図4 3D 放射解析結果  
(空気温度分布図)



図5 CSIRO での受熱器単体試験風景

### 3.3 高温空気タービン

当社では本システムに適用する高温空気タービンを開発中である。タービンの熱源はヘリオスタットにより集光される太陽日射であるため、高温空気タービンの高効率化は重要であり、同一出力を得るために要するヘリオスタット数の低減が、システム全体の低コスト化につながる。高温空気タービンのベース技術であるガスタービンから見れば比較的低温となるが、受熱器からの出口空気温度 850℃条件においても高効率とすべく、圧縮機部・タービン部を高周速設計とし、各要素技術には当社最新鋭の高効率 J 形ガスタービンにも適用した先進技術を用いている。

### 3.4 ソーラーフィールド

#### (1) ヘリオスタット

ヘリオスタットとは、鏡を2軸制御して太陽の日周運動に連動させ、反射光を常に受熱器へと向ける装置である。太陽熱プラントに特有な機器といえ、多くのメーカーが様々な鏡サイズ、駆動方式で開発を進めている。2軸の設定方法にもいくつか方式があり、垂直に立てられた旋回軸とその周りに回転する傾倒軸で構成される経緯台式、又は地軸に平行な赤経軸とそれに垂直に交わる赤緯軸とで構成される赤道儀式が採用されることが多い(図6)。鏡サイズとしては100m<sup>2</sup>を超える大型機から1m<sup>2</sup>にも満たない小型機まで、様々な大きさで開発が進んでいる。ヘリオスタットは数量が膨大となるためプラント全体に占めるコストインパクトも大きく、低コスト・高精度のヘリオスタット開発が必要となる。

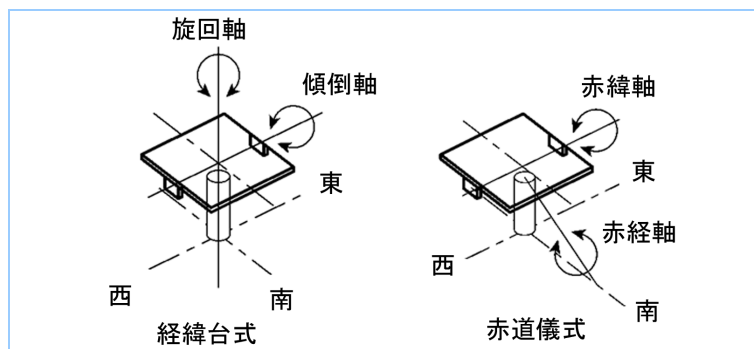


図6 ヘリオスタットの構造例

#### (2) 光路計算

光路計算とは、ヘリオスタットによって反射された光の経路を計算するものであり、各ヘリオスタットの目標角度、受熱器への入熱などの計算に使用される。また、ヘリオスタットの配置やタワー高さの計画を含めてプラントの設計にも欠かせず、太陽熱プラント専用の独自光路計算ソフトウェアを開発しているメーカー、研究機関も多く存在する。

図7はヘリオスタットをタワー周囲に配置した場合の各位置における春分南中時における効率（入射が鏡に対して垂直とならないために鏡の実効面積が狭くなるコサインロス、ほかのヘリオスタットによって光が遮られるブロック・シャドーロスを考慮したもの）を示している。同じヘリオスタット台数であっても、配置によって得られるエネルギーは大きく変わるため、効率と合わせた配置の検討は非常に重要となる。図8にヘリオスタット配置の例を示す。

ヘリオスタットによる反射光は、受熱器の開口部で焦点となるように計画されているが、実際には理想的な点とはならず、太陽の大きさと反射精度に基づき一定の大きさをもつ。そのため受熱器の開口はある程度の大きさが必要になるが、開口を大きくすると、受熱器内部が高温となっているため放射や対流による損失も増大する。逆に開口を小さくすると、開口で遮られてしまう熱量（開口ブロックロス）が増加する。開口部の形状・寸法については、以上を考慮して最適な角度や大きさを決定している。これらの光路計算によって受熱器内部の受熱面における入射熱の強度分布を計算し、受熱器の熱解析に用いている。

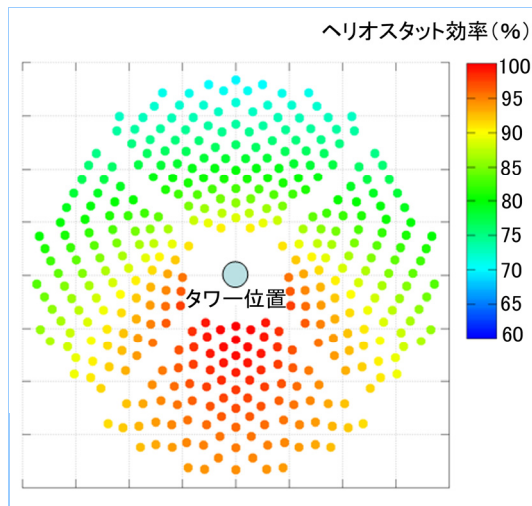


図7 ヘリオスタット効率評価の例

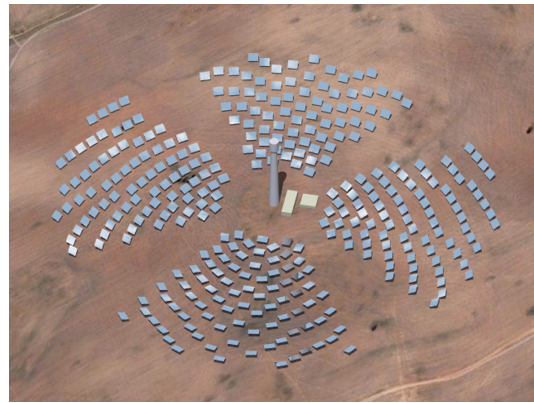


図8 プラントイメージ

#### 4. まとめ

再生可能エネルギーを社会に普及させるためには発電単価の安い、すなわち建設費、メンテナンス費を抑えた発電システムが望まれている。本稿で紹介した系統構成がシンプルな高温空気タービンを利用した太陽熱発電は、その市場ニーズに対応したシステムとして既に各国から早期実用化を要望されている。

今後、オーストラリア／CSIROと共同で200kWe級の発電試験を実施し、その後実証プロジェクトを経て、商用機へ展開していく計画である。地球環境に優しい再生可能エネルギー発電の一つとして太陽熱発電の普及・利用拡大を推進していきたい。

#### 参考文献

- (1) G. Knies, “DESERTEC -Clean Power from Deserts for a World of 10 Billion People”, Advanced Energy Systems for Sustainability (AES) 6-7 Oct, 2009, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan
- (2) New Energy Finance 社レポート“Solar Levelised Cost of Energy and Solar Thermal Electricity Generation Market Analysis” 2009年8月31日
- (3) Greenpeace International, SolarPACES and ESTELA, “Concentrating Solar Power Global Outlook 2009”, pp17-19.
- (4) H. Nakatani, M. Tagawa and T. Osada, “Development of Concentrated Solar Brayton Power Generation System”, Renewable Energy 2010, 27 June-2 July, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan
- (5) W. Stein et al, “DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 200kWe TOWER BRAYTON CYCLE PILOT PLANT”, SolarPACES 2010, 21 Sep.-24 Sep. Perpignan, France