

太陽熱利用システムにおける熱媒技術の役割

The role of heat transfer fluid technology in solar thermal utilization system

椿 善太郎¹

Yoshitaro TSUBAKI

要 旨 : 世界的な水不足、化石燃料の枯渇、地球温暖化といった課題を背景に再生可能エネルギーへの期待が高まっている。現在、様々な再生可能エネルギーが存在するなかで太陽熱利用は世界的に注目されつつあるが、日本は1981年の実証実験を境に大きな開発はされず国際的に後塵を拝している。近年、諸外国の太陽熱利用の増大に伴い、日本では新しい集光方法を開発するなど再び活性化しつつある。1932年以来様々な社会ニーズに対応し変革を遂げてきた熱媒体は太陽熱利用システムの高度化ニーズに対応すべく新たな開発が求められており、その動向と熱媒体の役割について報告する。

Abstract : The worldwide water shortages, exhaustion of fossil fuels and global warming have led to the increase of the interest of renewable energy. Among them, solar thermal utilization is said to be worldwide promising, but Japan is slower to develop it, comparing to other countries, since the demonstration experimental in 1981.

But now, Japan have been active to develop technology for the new system .Heat transfer fluid developed in 1932 and changed in various ways accommodating industrial needs, is required to be further developed in needs of solar thermal utilization system. I report trends of solar thermal utilization system and social role of heat transfer fluid.

キーワード : 熱媒体、熔融塩、太陽熱発電、再生可能エネルギー

Keywords : heat transfer fluid, molten salt, concentrating solar power, renewable energy

¹椿 善太郎 綜研テクニクス株式会社 技術統括部 技術開発部 太陽熱システム開発PJ

〒171-8531 東京都豊島区高田 3-29-5 tsubaki@soken-tecnix.co.jp

2011.11.30 受付, 2012.5.15 受理

社会技術革新学会第5回学術総会(2011.9.28)にて発表

1. はじめに

現在、太陽熱利用システムは主に太陽熱発電として日射量が豊富なサンベルト地帯を中心に計画・建設が盛んに進められているが、日本での認知度は低い。再生可能エネルギー利用のなかでの太陽熱利用の必要性、太陽熱発電の市場や集光方法、日本での実証実験等を紹介しながら、太陽熱利用システムにおける熱媒体の役割について報告する。

2. 再生可能エネルギー利用の背景

水不足、化石燃料の枯渇、地球温暖化といった人類の世界的な課題が存在する。地球上で安全な飲料水を継続して利用できない人口は現在約 10 億人存在していると言われている。淡水の水源そのものが不足しているため、灌漑や治水だけでは限界があり、海水淡水化が有力な解決方法とされている。その海水淡水化は主に海水に熱を加え蒸発させる蒸発法と逆浸透膜を利用する膜分離法があるが、仮に後者を利用し 10 億人分を賄うとすれば年間 2 兆 kWh の電力が必要となる。

化石燃料はかつて生存していた植物や微生物が何億年もかけ現在の石油や石炭、天然ガスとなったものである。可採年数は石油が 40 年、石炭が 120 年、天然ガスが 60 年程度である。石油と天然ガスの可採年数はここ数十年安定的に推移しているが、その有限性から枯渇のリスクが消えることはない。

1950 年以降、大気中の二酸化炭素の濃度は 31%、メタン濃度は 150% 増加しており、過去 50 年間に観測された地球温暖化の大部分は人間活動に由来している。年々増え続けている二酸化炭素の排出量を仮に 2008 年の排出量である 29 ギガトンに抑え続けたとしても被害予測の容認限界温度上昇の 2°C まであと 25 年程度と言われている。上記 10 億人分の海水淡水化電力の 2 兆 kWh をすべて化石燃料で賄うとすれば 1 ギガトンもの二酸化炭素が排出されることになる。

水不足、化石燃料の枯渇、地球温暖化は連鎖関係にあり、水不足を解消するためのエネルギー源に化石燃料を利用するとそれは枯渇リスクが増し、同時に二酸化炭素が排出され地球温暖化が進む。温暖化による気候変動により水資源の偏在が大きくなり、さらに水不足が深刻になるという負のスパイラルに陥る。

その根底には世界人口の増加が背景にある。18 世紀に始まった産業革命を境に急激に人口が増加し、現在の人口は約 70 億人程度であるが、2050 年には約 90 億人、2100 年には約 100 億人になると予測されている。100 億人が生活できるエネルギーをいかに確保するかという大きな課題が浮上し、化石燃料価格の見通しやエネルギー安全保障などから再生可能エネルギーへの期待が高まっている。^{1) 2)}

3. 太陽熱利用の位置づけ

太陽熱利用は太陽光発電と同様に再生可能エネルギーの 1 つであるが、そのエネルギー変換の原理は異なる。太陽光発電は太陽の光エネルギーを直接電気に変換するのに対し、太陽熱利用では太陽の光エネルギーを一度熱に変換する。太陽熱利用にはその熱を利用し、発電、海水淡水化や石炭液化など様々な用途がある。

メガワット規模の発電量の太陽光発電、風力発電、水力発電といった再生可能エネルギーの発電コスト及び発電量の安定性を比較すると、発電コストは出典により様々であるが、太陽熱発電は太陽光発電より発電コストが低く、風力発電、水力発電より高い。発電量の安定性については太陽光発電が日射量に応じて変動するのに対し、風力発電は風況に応じて変動、水力発電はおおむね安定であるが渇水時には不足するといった特色がある。太陽熱発電は太陽光発電と同様、発電量は日射量に応じて変動するが蓄熱設備を備えれば安定性を増すことができる。

日射量には大気を透過して直接入射する直達日射量と大気中の水蒸気やエアロゾルなどで散乱し

入射する散乱日射量に分けられる。太陽熱利用はサンベルト地帯とよばれる直達日射量の多い地域（図1赤枠）が適している。図1の青色から赤色になるほど直達日射量が多いことを示しており、一般に1800kWh/m²/y以上（黄色以上）が太陽熱発電に最適とされている。この地域は砂漠地帯や水不足地帯とほぼ重なっているため太陽熱を利用

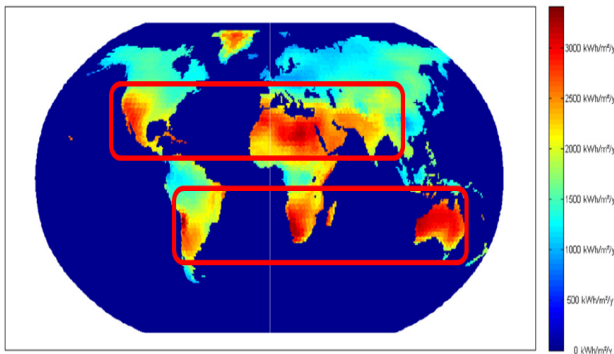


図1 サンベルト地帯

出典：GLOBAL ENERGY SUPPLY POTENTIAL OF CONCENTRATING SOLAR POWER
http://www.trec-uk.org.uk/reports/Breyer_paper_SolarPACES_GlobalEnergySupplyPotentialCSP_final_090630_proc.pdf

した海水淡水化の重要性が拡大すると予想される。2050年には世界の太陽熱発電は太陽光発電と同程度の発電量になると予測されている。特に地中海地域では砂漠地帯からエネルギーを生み出す

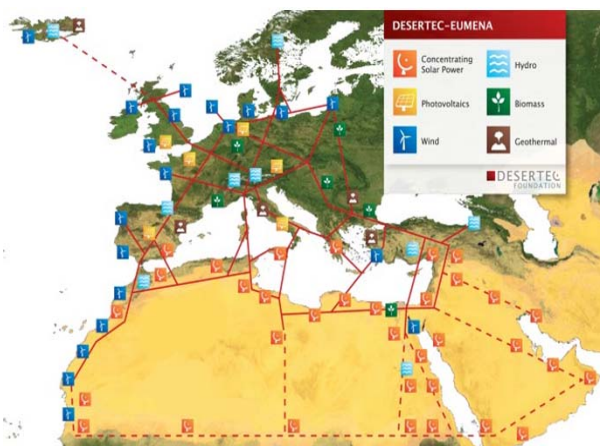


図2 デザートテック構想

出典：<http://www.desertec.org/jp/global-mission/focus-region-greater-east-asia-jp/>

という意味のデザートテック構想（図2）が現実味を帯び、2050年にはこの地域の発電量の半分程度を占めるとも言われている。この計画には風力発電や太陽光発電も含まれるが、主に北アフリカや中東の砂漠地帯で太陽熱により発電しヨーロッパへ送電する壮大なものとなっている。

4. 太陽熱利用システムの種類

太陽熱利用は太陽光を鏡で反射し集光することを特徴とするが、図3に示す通り太陽光を管に集光する線集光（図3上段）と点に集光する点集光（図3下段）がある。また、太陽を追尾する鏡と集光部分が共に動くもの（図3左）と不動（図3右）のものがある。そしてこれらの組合せによって、トラフ型、フレネル型、ディッシュ型、タワー型の4つに分けられる。

現在、太陽熱発電の設置場所はスペインとアメリカが大部分を占めているが、技術的に先行しているトラフ型が8~9割の市場を占有している。スペインでは電力の固定価格の買い取り融資を受けやすくするため技術的に成熟しているトラフ型が多く採用されているが、アメリカでは発電コストを下げる目的で大規模化や技術的には未成熟だが発電効率の高い他の方式の採用が始まっており、今後トラフ型が年々市場占有率を下げると予測されている。

トラフ型は曲面鏡により太陽光が受光管に集光され、熱に変換された約400°Cの熱媒体（合成油）がスチームと熱交換しタービンを回し発電する。蓄熱設備を有していれば昼間発電と平行して溶融塩に蓄熱し、夜間にその熱を利用し発電を行う。設備の設置には広大な敷地が必要とされる。

フレネル型は鏡の上部に置かれた受光管に集光され、熱に変換された250°C程度のスチームを発生させタービンを回し発電する。鏡や受光管の部材は安価で光学的な性能は低い为建设費・運搬費・メンテナンス費は低く抑えられる。

ディッシュ型はパラボラアンテナのような鏡により1点に集光され、スターリングエンジンで発

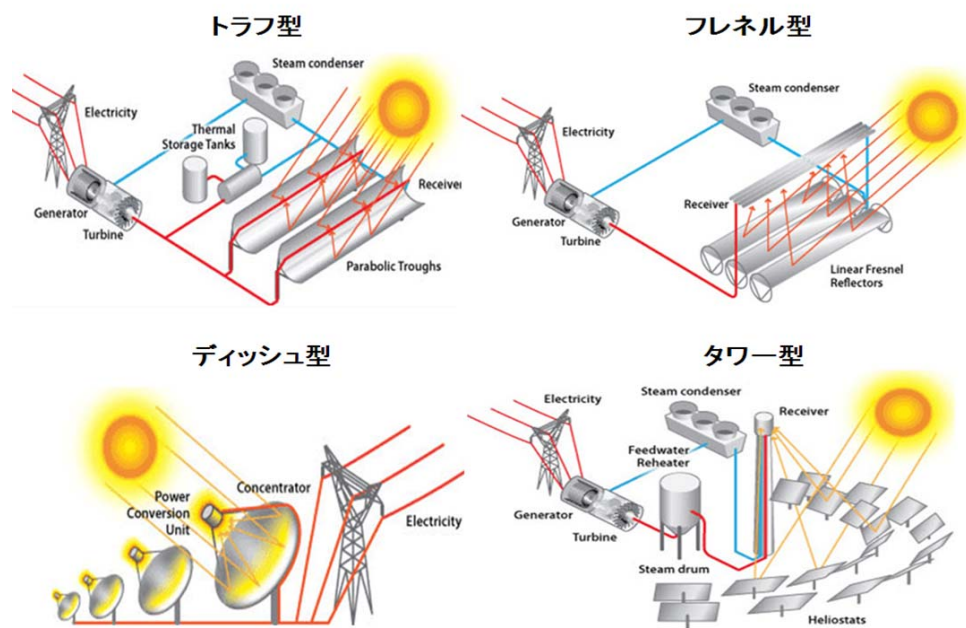


図3 太陽熱利用システムの種類

出典：http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/csp.html

電するため熱媒体は使用されていない。小規模であり分散型の電力供給に適している。

タワー型はギリシャ神話のヘリオスになぞらえ付けられたヘリオスタットと呼ばれる鏡によりタワーのトップに集光し、熱に変換された約550℃の熱媒体（溶融塩）がスチームと熱交換し、タービンを回し発電する。蓄熱設備を有していれば昼間はトラフ型と同様に溶融塩タンクに蓄熱し夜間はその熱を利用し発電する。

たが、1985年に中止となってしまった。その要因として日射量が少ないためと言われているが、実態は効率の低い設備にあったと考える。仁尾町のタワー型ではヘリオスタットが非常に密に配置されているため、互いに干渉し合い十分な集光が難しい。海外では一般的にタワーの高さと鏡の敷地面積の比が1対6~7であるのに対し、この設備は1対1となっていることから干渉し易いことがわかる。

5. 日本の太陽熱利用技術開発

世界の太陽熱発電プラントの建設費による市場規模は2015年には2兆円、2020年には4兆円、2050年には10兆円と予測されている。しかし、日本企業は2009年まではほとんど太陽熱発電市場に参入しておらず、世界から大きく遅れをとっている。その背景には香川県仁尾町での太陽熱発電の実証実験（写真1）の中断が1つの転換点になった。

1973年のオイルショックを契機とするサンシャイン計画の一環として石炭液化や太陽光発電と共に太陽熱発電の開発が進められた。この実証設備は1981年に世界に先駆け1MWの発電に成功し



写真1 仁尾町太陽熱実証実験設備

出典：<http://www.suga-ac.co.jp>

また、海外から高級材料を集め 100 億円程度かかった設備費に対し効果が伴わなかったとも言われているが、直達日射量が少ないことから日本での太陽熱発電は不向きと結論付けられ、その後の太陽熱利用の開発の方向性に大きな影響を与えた。

そこから 30 年程経過した近年、日本はようやく太陽熱利用の開発が活発化し始めてきた。その 1 つに日本が世界に先駆けて開発したタワー型の課題を解決したビームダウン方式（図 4）が挙げられる。

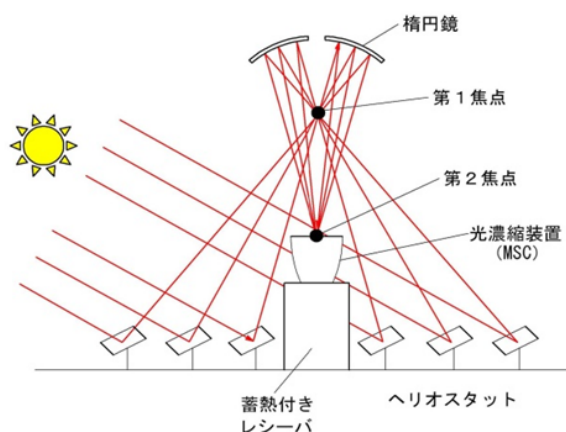


図 4 ビームダウン方式

出典：三鷹光器株式会社

タワー型は 4 つの集光タイプのなかでは効率が高いが、集光部は設備規模にもよるが 100m を超える高いタワーのトップに位置する。そのためタワートップでは風の影響により熱が奪われやすく効率が落ちやすいこと、タワートップまで熱媒体を循環させるため大きな動力が必要なこと、タワートップでのメンテナンスが困難なことによりコストアップになることが課題となっていた。ビームダウン方式ではヘリオスタットで集めた光をさらに上部の鏡で反射させ地上に集光させるため、タワー型の上記 3 つの課題を一挙に解決できる。

このようなビームダウン方式は上部の鏡の形状が異なるなど数種考案され、2009 年に国内では東京都三鷹市で 57kW、海外ではアブダビで 100kW の実証試験が行われ、2012 年には長野県で 250kW の熔融塩を用いた実証試験が計画されている。いずれも海外の太陽熱発電市場への参入を視野に入

れたものだが、特にこの 2012 年長野県での実証試験においては、集光された光エネルギーを熱として熱媒体（熔融塩）に蓄えその熱で発生させた蒸気量を測定する計画であり、効率面で世界的な優位性が実証されると期待されている。この結果によっては仁尾町の実証実験以来、日本国内での太陽熱利用が難しいとされている常識を覆す大きな一歩を踏み出す可能性がある。

6. 太陽熱利用システムにおける熱媒体

熱媒体の選定で重要な要素は使用温度である。使用温度に応じ主に耐熱性、凝固点（融点、流動点）、沸点から総合的に経済性の高い熱媒体が選定される。耐熱性の高い熱媒体は補充量が少なく使用期間も長いいため単年当たりの費用を下げられる。凝固点は低い方、沸点は高い方が設備費を抑えられる。

熱媒体は化学業界を中心に利用されてきた。低圧又は常圧でスチーム加熱以上の高温加熱のニーズの高まりで沸点が 257℃と高い世界初の熱媒体が 1932 年に開発された。しかしその熱媒体は凝固点が 12℃であり冬場固化しないニーズに応えるため凝固点がマイナス 10℃と低い日本初の熱媒体が 1952 年に開発された。その後、気相加熱から液相加熱へのシフト、素材型化学品から加工型化学品・ファインケミカル品への移行に伴いその社会的ニーズに応えるべく耐熱性、凝固点、沸点のバランスが様々な熱媒体が開発されてきた。

現在の主流は高沸点、高耐熱性を有するジベンジルトルエンを主成分とするものである。使用上限温度が 350℃程度で沸点も 390℃程度と高温でありながら、流動点はマイナス 30℃程度と低く、幅広い使用温度範囲をもち、常圧で長期間使用できる。また、劣化した際は再生によりランニングコストが低く抑えられる点も主流である理由の 1 つである。

日本ではそのような熱媒体に対しても化学物質の人や動植物への環境影響を低く抑えるニーズが存在し、それに応える熱媒体の開発が期待されている。

一方、世界的には太陽熱発電の発電コストを下げる目的で耐熱性、凝固点、沸点に加え蓄熱性能をキーワードとした熱媒体のニーズが浮上している。

日本の熱媒メーカーは主に国内のニーズに応えることでその変遷を遂げてきた。現在、太陽熱利用という新たな分野で世界規模のニーズに対し技術革新により応える新たな段階にきている。

トラフ型の使用温度は 400℃である。スチームを熱媒体として使用すれば蒸気タービンに直接利用できるため合成油、熱交換器が不要となる。しかし長年にわたり研究されてきたがその沸点の低さを要因とする設備上の問題で商業化には至っていない。現在では沸点 257℃、凝固点 12℃、耐熱温度 400℃の合成油が主流となっている。タワー型ではスチームは使用されているが、使用温度が低いことと蓄熱性のニーズから耐熱温度が 600℃、融点が 220℃、沸点を持たない（沸騰の前に分解）溶融塩にシフトしつつある。

しかし、それでもなおトラフ型、タワー型共にニーズに十分に答えられてはいない。太陽熱発電は風力発電や水力発電、火力発電などと比べ発電コストが高くそのコストを下げるためのしぎを削っている。蒸気タービンによる発電は上限はあるが蒸気温度が高いほど有利とされている。設備上はトラフ型は 500℃、タワー型は 1000℃まで可能と言われている。現状は熱媒体の耐熱温度がネックとなり低く抑えられ、効率を上げることができていない。発電コストを下げることに繋げるためにはさらなる高耐熱性を有する熱媒体が必要である。同時に使用温度領域を広がることにより熱媒体の使用量を減らし設備の小型化に繋げることも可能となる。

また、トラフ型では耐熱性に蓄熱性能を加えた熱媒体として溶融塩が注目されている。溶融塩は伝熱と蓄熱の両方の機能を兼ね備えられることが大きな特色である。太陽熱利用が他の再生可能エネルギーと大きく異なるのは蓄熱が可能であるがそのコストには大きな開きがあり、蓄熱の方が非常に有

利とされている。溶融塩を使用することにより熱交換器と熱媒体（溶融塩）の使用量が低く抑えられる。溶融塩の融点の高さから商業化には至っていないが、溶融塩の融点を下げる研究が盛んに進められている。

太陽熱発電は広い敷地を必要とし熱媒体の使用数量も多く、一般に合成油で数千トン、蓄熱用の溶融塩で数万トンが使用されている。市場が急激に拡大しているなか、将来すべての太陽熱発電所で同成分の熱媒体が使用されると、世界的に熱媒体の供給が追い付かずいずれ太陽熱発電の市場自体が縮小してしまうことも考えられる。熱媒体の性能だけを追うのではなく、世界的な成分の供給能力とのバランスを考慮にいたした開発が必要と考える。

太陽熱利用で既に稼働・計画されている設備は発電用途がほとんどであるが、集めた熱を電気へ変換せずそのまま利用する海水淡水化用途も計画されている。海水淡水化は先述したが水不足地帯とサンベルト地帯がほぼ重なり、水不足問題が負のスパイラルの要素の1つになっていることから太陽熱利用による海水淡水化に期待がよせられている。海水淡水化は逆浸透膜法と蒸発法に大きく分けられるが、ここでは熱を利用する蒸発法について述べる。蒸発法は海水を加熱し蒸発させその蒸気だけを集め冷却し真水にする。その加熱源に太陽熱を利用する。蒸気を大量に効率よく発生させるためには高温の熱源が必要となり、発電用途と同様に耐熱性の高い熱媒体が求められることが予想される。

熱媒体のニーズに応えることと市場発展のための長期的視点を考慮にいたした技術革新が求められており、それを実現することで冒頭で申し上げた世界的課題の解決に少しでも近づけると考える。

³⁾

7. おわりに

18 世紀の産業革命に伴う石炭の恩恵を受けた経済は、20 世紀には石油へとシフトし、21 世紀には太陽エネルギーへシフトしようとしている。一

部にはシェールガスがその前に来るとも言われているが、いずれその有限性から直接的な太陽熱利用や太陽光発電だけでなく間接的な風力や水力、バイオマスなどを含む太陽エネルギー利用が必要不可欠となる。その1つである太陽熱利用は現在、技術的にまだ発展途上である。トラフ型が今後も主流であり続けるとは限らない。

タワー型の課題を解決したビームダウン方式を日本が世界に先駆けて開発・実証するなど注目を浴びてきている。30年前の実証実験では日本での太陽熱利用は難しいと言われたが、現在の最新技術での実証実験はなされていないのが現状である。電気の多くが熱として利用されている今日、太陽熱利用システムで集光した熱を熱のまま利用できれば、電気を熱として利用するよりも変換ロスの発生がなく無駄が省ける。発電だけではなく様々な温度域での熱利用、蓄熱を加えた地域分散型のスマートエネルギーネットワークの実現にもつながる。特に被災された東日本でこれを進めることにより復興の後押しをし、新たな価値の創造・発信基地として発展する契機ともなりうるかもしれない。

引用文献

- 1) 鳥井弘之“科学技術文明再生論”12 ページ
日本経済新聞社(2007)
- 2) 菊池隆、堀田善治“太陽熱エネルギー革命”
181～183 ページ
日本経済新聞出版社(2011)
- 3) GLOBAL ENERGY SUPPLY POTENTIAL OF
CONCENTRATING SOLAR POWER
[http://www.trec-uk.org.uk/reports/
Breyer_paper_SolarPACES_GlobalEnergySupplyPot
entialCSP_final_090630_proc.pdf](http://www.trec-uk.org.uk/reports/Breyer_paper_SolarPACES_GlobalEnergySupplyPotentialCSP_final_090630_proc.pdf)

参考文献

- 1) 別所信次、椿善太郎
“熱媒加熱システムの変遷と今後の方向性” 社会技
術革新学会 (2009)
- 2) Global Concentrated Solar Power Markets and
Strategies:2010-2025(2010)