

はじめに

人類は石炭や石油などの一次エネルギーを利用しているが、これらの資源はいずれも有限であり、いつかは枯渇してしまう。これに対して、太陽エネルギーは地球外から供給される唯一の一次エネルギー源であり、少なくとも人類のタイムスケールを基準とすると、その寿命は悠久といってよい。

太陽エネルギーの量は莫大であり、1時間ほど地表に照射されるエネルギー量は、全人類が1年間に消費するエネルギー量に相当する。しかし、太陽エネルギーをエネルギー源として利用する場合には、いくつかの問題がある。すなわち、エネルギー密度が高々 1 kW/m^2 と低く、曇りの日や夜は利用できないことなどであるが、これらは工夫によって克服が可能である。地球外から供給される唯一の、クリーンで悠久の太陽エネルギーを積極的に利用することは、地球温暖化のみならず、石油などの有限資源の供給限界に対する懸念から、今後さらに重要になってくると考えられる。

太陽は、生命体にとって欠くことができないエネルギー源であり、人類も直接的・間接的に太陽の恩恵にあずかり、また、積極的にエネルギー源として利用してきた。特に近年は、太陽エネルギーによる発電や燃料製造にまでその分野は拡大している。

日本人は、太陽エネルギーによる発電となると、すぐに太陽光発電（以下、photovoltaic, PV）を思い浮べる。しかし世界的には、PVに加えて集光型太陽熱発電（concentrating solar power, CSP）も重視されている。国際エネルギー機関（IEA）が2008年に発行した出版物で、地球温暖化抑制技術に関して記述した ETP 2008（Energy Technology Perspectives 2008）では、CSPは地球温暖化抑制に重要な17の技術の一つに挙げられている^{1), †}。PVは、半導体に光があたると、その光起電力によって発電するが、CSPは文字どおり太陽光を集光して熱へと変換し発電するものである。子供の頃に虫眼鏡で太陽光を集

† 肩付き番号は巻末の引用・参考文献番号を示す。

光し、焦点付近に置いた紙を燃やした経験があると思うが、CSPの原理はまさにその熱を利用して発電をするものである。PVとCSPにはそれぞれ長所・短所があるが、CSPが優れている点は蓄熱システムが利用できることである。このシステムを使うことで、雲により日差しが遮られた場合でも、日没から夜半までの電力需要が多い時間帯にも、太陽エネルギーで発電した電力を供給することが可能になる。

集光太陽光で得た高温の熱エネルギーの利用は、発電だけにとどまらない。この熱エネルギーを利用した水素などの燃料製造（ソーラフューエル）の研究・開発も盛んに行われている。CSPは世界のすべての地域で利用可能というわけではないが、ソーラフューエルを利用することにより、世界のどこでも新たな太陽エネルギーの恩恵を受けることが可能になる。

本書では、太陽光を集光し、熱へと変換することによって得られる高温の熱エネルギーを用いた発電とソーラフューエルの製造について説明する。

2012年7月

吉田 一雄
児玉 竜也
郷右近 展之

目 次

1 太陽エネルギーの利用と集光型太陽熱発電 (CSP)

1.1 集光型太陽熱発電 (CSP) の概要	1
1.1.1 集光の重要性	1
1.1.2 CSP のシステム概要	4
1.1.3 CSP と PV	8
1.1.4 発 電 コ ス ト	11
1.2 世界の日射量と発電ポテンシャル	13
1.2.1 世界の日射量分布	13
1.2.2 発電ポテンシャル	14
1.2.3 市場と発電量の今後の見通し	16
1.2.4 デザータック計画	18

2 CSP の要素技術

2.1 太 陽 の 追 尾	22
2.1.1 太陽追尾の必要性	22
2.1.2 太陽追尾技術	23
2.2 太陽光の反射と反射鏡	26
2.2.1 太陽光の反射	26
2.2.2 反 射 鏡	28
2.3 レシーバと蓄熱技術	31
2.3.1 太陽エネルギーの吸収と選択吸収膜	31

2.3.2	レシーバのエネルギーバランスと集光の効果	34
2.3.3	蓄熱システム	37

3 CSP の技術

3.1	パラボラ・トラフ型 CSP	44
3.1.1	パラボラ・トラフ型コレクタの構造	44
3.1.2	レシーバ	50
3.1.3	コレクタ性能に及ぼす各種要因	52
3.1.4	CSPにおける発電法	54
3.1.5	パラボラ・トラフ型 CSP の高効率化	57
3.1.6	パラボラ・トラフ型プラントの応用	62
3.1.7	パラボラ・トラフ型 CSP の投資コスト	64
3.2	リニア・フレネル型 CSP	65
3.2.1	リニア・フレネル型コレクタの構造	65
3.2.2	LFC の集光特性	70
3.2.3	PTC との比較による LFC の優位性	72
3.3	タワー型 CSP	76
3.3.1	タワー型 CSP の構成	76
3.3.2	ヘリオスタット	78
3.3.3	ヘリオスタットフィールド	86
3.3.4	熱媒体の種類	92
3.3.5	レシーバ	93
3.3.6	タワー型 CSP の大規模化	98
3.3.7	タワー型 CSP のバリエーション	101
3.3.8	ソーラガスタービン	103
3.3.9	タワー型プラントのコスト	106
3.4	パラボラ・ディッシュ型 CSP	108
3.4.1	パラボラ・ディッシュ型の構造	108
3.4.2	レシーバとエンジン	110

3.4.3 蓄熱システム	111
3.5 CSP の課題	113
3.5.1 発電コストの低下	113
3.5.2 水の課題	116
3.5.3 土壌の影響	117
3.5.4 地形の影響	118

4 太陽熱燃料化

4.1 熱化学転換法による太陽熱燃料化の重要性と原理	120
4.2 燃料化システムの集光系	124
4.3 太陽熱燃料化技術の分類	125
4.4 ソーラ水素製造の経済性評価	127
4.4.1 CO ₂ フリー水素製造コストの比較	127
4.4.2 天然ガスからの水素製造コスト比較	129
4.5 高温太陽熱水分解サイクル	129
4.5.1 二段階水熱分解サイクル	129
4.5.2 Sulfur-Iodine (S-I) サイクル	139
4.5.3 Hybrid-sulfur サイクル	139
4.6 天然ガス・バイオガスのソーラ改質	140
4.6.1 熱交換型（間接加熱型）チューブラ改質器	140
4.6.2 直接照射型チューブラ改質器	141
4.6.3 直接照射型ボルメトリック改質器	142
4.7 炭素資源(石炭・バイオマス・コークスなど)のソーラガス化	144

5 集光型太陽熱発電と太陽熱燃料化の将来性

引用・参考文献	155
---------------	-----

1

太陽エネルギーの利用と 集光型太陽熱発電 (CSP)

本章では、太陽光を集光する必要性と集光型太陽熱発電 (CSP) の概要を説明し、太陽光発電 (PV) との比較を行う。また、世界の CSP の発電ポテンシャルや今後の市場の見通しについても言及する。さらに、北アフリカで CSP を用いて発電し、ヨーロッパ諸国へ送電するデザートテック計画に関する説明も行う。本章だけで CSP の概要が理解できるように記述した。

1.1 集光型太陽熱発電 (CSP) の概要

1.1.1 集光の重要性

太陽エネルギーは、地球外から供給される唯一の一次エネルギー源であり、莫大な量がつねに地球に降り注いでいる。しかし、太陽エネルギーを効率良く利用するには問題点があり、少々工夫が必要である。太陽エネルギーを利用する際の問題点は、エネルギー密度が低いことと、地球から見れば太陽は絶えず移動していることである。また、天候の変化に影響されることも周知である。集光型太陽熱発電 (concentrating solar power, CSP) の場合も、これらの問題点とは切っても切れない関係にある。

エネルギーを効率良く利用するためには、熱力学の第二法則からも明らかのように、一次側で高温が必要である。しかし、地表面では高々約 1 kW/m^2 とエネルギー密度が低い太陽エネルギーから高温を得るためには、集光してエネルギー密度を高める必要がある。子供の頃に虫めがねを使って紙を燃やしたこ

2 1. 太陽エネルギーの利用と集光型太陽熱発電 (CSP)

とがあると思うが、その時の経験からも明らかである。すなわち、夏の強い日差しの下に紙を置いて燃え上がることはないが、レンズの面（アパチャ）に入るわずかな光の量でも、その焦点に紙を置くと一瞬の間に燃え上がる。

光を熱に変換するレシーバに関して集光のメリットを考えると、レシーバの集光面を狭くすることができ、この部分だけ放熱性を下げることにより、熱損失を大幅に低減できることにある。確かに、集光度が高くなると温度は上がり、熱放射は絶対温度の4乗に比例して増加するが、レシーバ表面の放射率を低下させることで放射損失を軽減することができる。また、一般に光を集光する部材よりも、光を熱に変換するレシーバのほうが高コストであるので、ある程度集光度を高め、レシーバ面積を低下させることは低コスト化にもつながる。

ところで、太陽光を「集光」する際には、太陽からまっすぐにくる「直達光」しか集光することができない。これは、ベクトルの向きがほぼそろっている光でないと1点（もしくは直線上）に集光できないためである。空から降り注ぐ太陽光にはもう一つ「散乱光」があるが、これは直達光が大気中を通る間に空気中の水分や塵埃などによって散乱されたものであり、その向きはランダムである。したがって、散乱光は集光できないことになる。日本でよく見られる、晴れていても薄く雲がかかったような状態では散乱光が多い。CSPは集光を伴うものであり、日射のなかで利用できるのは直達光だけで、散乱光は利用できない。

CSPの発電量は、この直達日射量（direct normal irradiation もしくは direct normal insolation, DNI）に比例し、DNIが高いほど発電量が多く、発電コストも低下する。DNIの量的な目安として、CSPを設置し活用するためには、少なくとも年間1800 kWh/m²、CSPの商業運転には、年間2000 kWh/m²以上が望ましいといわれている¹⁾。

集光の程度は集光度で与えられる。集光度の定義は、反射鏡の面積、より正確に言えば、投影断面積であるアパチャ（開口部）の面積と、光から熱へと変換するレシーバ部分の面積の比である。なお、光から熱への変換を行う部材は

アプソーバと呼ばれる場合もあるが、一般に集光を伴う場合にはレシーバと称することが多いようである。また、太陽光を集光し熱へと変換する部分を総称してコレクタと呼ぶ。

（ティータイム）

太陽光の散乱と集光

太陽から放射された電磁波（以下太陽光と称する）は、地球の大気圏外で約 1.37 kW/m^2 のエネルギー密度であり、これを太陽定数（solar constant）と呼んでいる。太陽光は地上に降り注ぐまでにさまざまな要因で減衰し、地上では高々 1 kW/m^2 程度のエネルギー密度となる。太陽光の中の有害な紫外線は、オゾン層で大部分が吸収される。可視光やそれよりも長波長の赤外線も大気中において散乱、雲などによる反射、水分や二酸化炭素（ CO_2 ）などの分子による吸収によって減衰していく。

大気中の散乱の中で、光の波長よりもずっと小さい大気の子による散乱がレイリー散乱であり、その程度は光の波長の4乗に逆比例する。したがって、波長が短い青色の光ほど散乱しやすくなる。空が青く見えるのもこのレイリー散乱によるものである。地上近くになると、大気の子よりもずっと大きい水蒸気やエアロゾルなどが増えてくるが、このような光の波長と同じ程度の粒子による散乱をミー散乱と呼んでいる。ミー散乱は波長依存性が小さく、粒子が大きくなるほど前方散乱性が高くなる。大気中に水分が多い日本の空は白っぽく見えることが多いが、これはミー散乱によるものである。都市部のような大気の汚れが目立つ地域でも、ミー散乱は起こりやすい。

さて、散乱光は直達光が粒子などによって散乱させられ、太陽の方向以外から観測点に向かってくる光であり、その方向はさまざまである。直達光も散乱光も反射の法則に従うが、直達光は向きがほぼ同じであるから、正反射をすれば同じ方向へと反射され、その結果として集光することができる。しかし、散乱光の向きはバラバラであり、それぞれが正反射してもその向きはバラバラで、1か所に集光することは不可能である。したがって、直達光しか集光することはできないことになる。

つまり、反射鏡で太陽光を集光する太陽熱発電は、直達光のみが使用可能である。豊富な直達光を利用するためには、空気中の水分や汚れが少ない地域にプラントを建設することが望ましい。

1.1.2 CSP のシステム概要

〔1〕 システム構造の概略 一般的な CSP のシステム構造の概略を図 1.1 に示す²⁾。CSP は、太陽光を集めて熱へと変換する部分と発電部分とに大別することができる。直達日射はリフレクタ（反射鏡）を用いて集光され、レシーバで光から熱へと変換される。リフレクタとレシーバを合わせてコレクタと呼んでいる。後述するパラボラ・トラフ型のように、コレクタとレシーバとが一体のものはもちろん、タワー型ではヘリオスタットと遠く離れたレシーバを合わせてコレクタと呼ぶ。

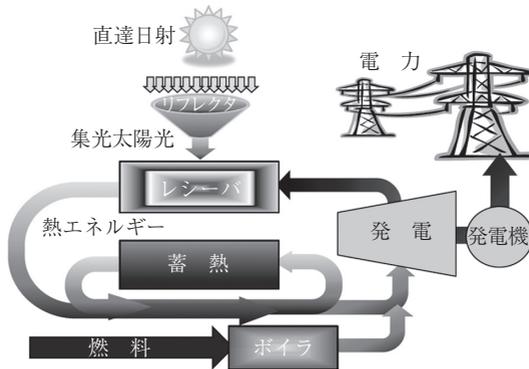


図 1.1 CSP のシステム構造²⁾

レシーバで集められた熱は熱媒体（合成油、溶融塩、水など）によって運ばれ、機械的エネルギーに変換されて発電機を回して発電する。最も一般的な CSP の発電方法は、蒸気発生器で水蒸気を製造し、蒸気タービンを回して発電を行う蒸気ランキンサイクルを使用するものである。熱力学の第二法則によると、サイクルの上限温度と下限温度との差が大きいほど熱効率が向上する。したがって、太陽熱発電においても、より高温の蒸気を製造し、タービンからの戻りの蒸気は復水器（コンデンサ）で十分に冷却することが効率の向上につながる。ただし、太陽熱発電に適する地域は乾燥地帯であり、十分な冷却水が確保されるとは限らない。そのため、復水器は空冷式が用いられる場合もあり、その際には発電効率は水冷式よりも低下することになる。したがって、ラ

ンキンサイクル効率の向上には蒸気温度の上昇が最も効果的である。このほか CSP の発電技術としては、乾燥地帯でも冷却水が不要なガスタービンを採用したもの、スターリングエンジンを使用するものがあるが、それらについては 3 章において説明する。

図 1.1 では、蓄熱システムと化石燃料やバイオマスなどを燃料とするボイラとのハイブリッド化も描かれている。蓄熱は太陽が照っている時間帯に集めた熱を蓄え、曇りの時間帯や夜間にそれを利用して発電する設備である。また、ボイラは太陽エネルギーが不十分で定格出力を得られない場合や、夜間に稼働させて発電する。燃料は一般に天然ガスが用いられることが多いが、バイオマスや太陽エネルギーを利用して製造したソーラフューエルを用いれば、CO₂削減に大きく貢献できる。このように、太陽光をいったん熱へと変換する CSP では蓄熱やボイラを利用することで、電力の需要の変化に合わせた、しかも安定的な電力供給が可能になる。電力需要に合わせた供給が可能なることをディスパッチャビリティ (dispatchability) と呼んでいる。

〔2〕 **集光・集熱技術** CSP ではどのような集光・集熱技術を選択するか、また、それがどれほどの効率を持っているかということは、システム全体の効率やコストに大きく影響する。発電部分は前述のように、蒸気ランキンサイクルを使用する従来技術であるが、これは火力発電や原子力発電と同じであり、十分に成熟した技術といえる。一方、集光・集熱技術はまだ発展途上であり、工夫の余地は多い。現在、代表的な集光・集熱技術には、つぎに示す 4 種類がある。

- (a) パラボラ・トラフ型
- (b) リニア・フレネル型
- (c) パラボラ・ディッシュ型
- (d) タワー型

これら 4 種類のなかで、図 1.2 (a), (b) のパラボラ・トラフ型とリニア・フレネル型が直線状に集光するものであり、線集光型 (line focus type) と呼ばれることがある。また、図 (c), (d) の二つは点集光型 (point focus

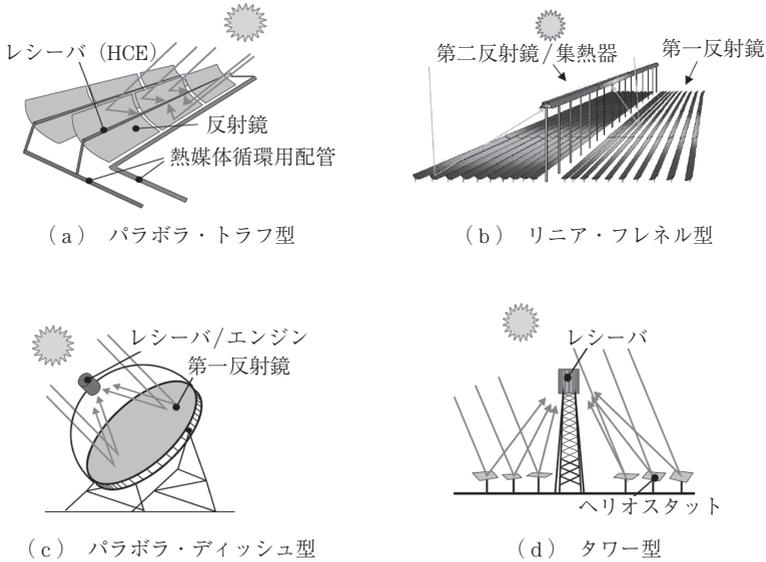


図1.2 太陽集光・集熱システムの種類

type) とも呼ばれる。また、別の分類をすると、図 (a), 図 (d) が放物線 (面) を使用するもので、中心軸に平行に入射する光は焦点に集光される。一方、図 (b), (c) は平面もしくはわずかに凹面とした反射鏡を使用するもので、光は反射鏡の法線に対してある角度を持って入射する。この場合には、後述するコサイン効果により、反射鏡の面積のすべてを有効に使用することはできないが、多くの光を一つのレシーバへと導くことができるという長所もある。

ここでは簡単にそれぞれの特徴を示し、詳細については3章で説明する。

(a) **パラボラ・トラフ型** パラボラ・トラフ (parabolic trough) 型は、断面が放物線形状の反射鏡の焦線上に熱媒体 (high temperature fluid, HTF) を流すチューブを配し、そこで集光した光を熱へと変換させる。加熱された熱媒体は熱交換器で水蒸気を発生し、蒸気タービンにより発電する。パラボラ・トラフ型の集光度は低いが、500～550℃程度までの昇温は可能である。パラボラ・トラフ型 CSP は、1980年代半ばから、カリフォルニアのモハベ砂漠で商業運転が実施されており (solar energy generating system, SEGS)、他の方

— 著者略歴 —

吉田 一雄（よしだ かずお）

- 1979年 東京理科大学工学部機械工学科卒業
- 1981年 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了
（生産機械工学専攻）
- 1981年 日本鉱業株式会社勤務
- 1989年 フランス ELF 社交換研究員
- 1990年 工学博士（東京工業大学）
- 1996年 財団法人日本エネルギー経済研究所出向
- 1999年 財団法人エネルギー総合工学研究所出向
- 2004年 財団法人石油産業活性化センター出向
- 2008年 財団法人エネルギー総合工学研究所出向
- 2012年 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構
技術コンサルタント
- 2012年 財団法人エネルギー総合工学研究所参事
現在に至る

児玉 竜也（こだま たつや）

- 1990年 東京工業大学理学部化学科卒業
- 1992年 東京工業大学大学院理工学研究科博士前期課程修了（化学専攻）
- 1994年 東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程修了（化学専攻）
博士（理学）
- 1995年 新潟大学助手
- 1997年 新潟大学助教授
- 2003年 新潟大学教授
現在に至る

郷右近 展之（ごうこん のぶゆき）

- 1995年 茨城大学工学部物質工学科卒業
- 1997年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士前期課程修了
（材料科学専攻）
- 2000年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了
（材料物理学専攻）
博士（工学）
- 2003年 東京工業大学助手
- 2005年 新潟大学助手
- 2007年 新潟大学助教
- 2009年 新潟大学准教授
現在に至る

太陽熱発電・燃料化技術
— 太陽熱から電力・燃料をつくる —

©一般社団法人 日本エネルギー学会 2012

2012年8月31日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 一般社団法人
日本エネルギー学会
東京都千代田区外神田 6-5-4
偕楽ビル (外神田) 6F
ホームページ <http://www.jie.or.jp>

著 者 吉 田 一 雄
児 玉 竜 也
郷 右 近 展 之

発 行 者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也

印 刷 所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06830-6 (安達) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上の例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします