

KS-KH25-1

平成25年度 国内立地適合太陽熱発電システムの
開発等補助事業

国内立地適合太陽熱発電システムの開発

平成26年3月

一般財団法人 機械振興協会 技術研究所



RING!RING!
プロジェクト
競輪の補助事業

この報告書は競輪の補助金により作成しました。

<http://ringring-keirin.jp>



国内立地適合太陽熱発電システムの開発

— 目 次 —

1. 緒 言.....	1
参考文献.....	3
2. 研究の概要.....	3
3. 太陽熱発電システムの開発.....	5
3.1 太陽熱発電の調査.....	5
3.1.1 既存の太陽熱発電システムの調査.....	5
1) タワー型.....	5
2) トラフ型.....	6
3) リニア・フレネル型.....	6
4) ディッシュ型.....	6
3.1.2 最新の太陽熱発電システムの現地調査.....	6
1) アブダビ.....	6
2) マスダール・シティ.....	7
3) 太陽熱発電実証プラント.....	7
4) 課題等.....	8
5) 謝 辞.....	8
3.1.3 近年の日本の太陽熱発電研究.....	9
3.2 天候観測システム.....	10
3.2.1 概 要.....	10
3.2.2 観測方法.....	11
3.2.3 観測結果.....	12
3.3 集熱器.....	14
3.3.1 概 要.....	14
3.3.2 単体性能測定.....	16
1) 装置製作・測定方法.....	16
2) 測定結果.....	17
3) 天候と単体性能.....	18
3.4 膨張機.....	20
3.4.1 概 要.....	20
3.4.2 膨張機の調査.....	20
1) 使用する熱媒の選択.....	20
2) 膨張機の選択.....	20
3) 旋回式スクロールと回転式スクロール.....	21
4) 回転実験.....	24
3.4.3 まとめ.....	25
3.5 発電実験.....	25

3.5.1 概 要	25
3.5.2 実験結果	26
3.5.3 まとめ	27
参考文献	28
4. 結 言	29
謝 辞	29

国内立地適合太陽熱発電システムの開発

畠山 実^{*1} 木村 利明^{*2} 川口 聖司^{*1} 粟野 陽一^{*1} 保戸塚 久善^{*2}

Solar Thermal Power Generation System Suitable for Locational Conditions of Japan

Minoru HATAKEYAMA, Toshiaki KIMURA, Satoshi KAWAGUCHI,
Youichi AWANO & Hisayoshi HOTOZUKA

1. 緒言

2011年3月11日に発生した東日本大震災によって発生した津波により、大勢の住民の方々が犠牲となり今もなお、不自由な避難生活を余儀なくされている。心より哀悼の意を表したい。

この震災により福島第一原子力発電所では炉心融解などの事故が発生し、その被害の大きさによる影響から、全国の原子力発電所も点検による停止後の再稼働ができない状況に陥っている。震災をきっかけとした原子力発電に対する不信感の高まりは並々ならぬ感情があるものと思われるが、その一方で、温室効果ガスの排出問題も、時間とともに取り返しのつかない問題となってくることを認識しておかなくてはならない。

日本は1997年12月にわが国にて開催された第3回気候変動枠組条約締約国会議において、2012年までの温室効果ガスの排出削減目標を定め、1990年を基準として6%削減することを約束していた。しかし、原発を代替する火力発電が大幅に増加したため、二酸化炭素排出の削減どころか増加となってしまっており、温室効果ガスの排出量は2011年にに対して4.2%の増加、基準年に対しても8.4%の大幅な増加となってしまった^①。

これに対し、約束した削減目標をクリアするために、森林による二酸化炭素の吸収量を基準年である1990年の森林の吸収量と約束期間との差ではなく、約束期間における純吸収量を削減量として算入する方式を採用して、3.8%の削減換算とし

^②、海外の二酸化炭素削減に貢献するクレジットを利用することにより1.6%の削減換算とするなど、苦しい対応を迫られている。

温室効果ガスの排出を具体的に削減するための方策として、わが国においても2012年7月より再生可能型エネルギーの固定価格買い取り制度(Feed-in Tariff, FIT)が実施されたが、実際には当初設定された高い取引価格の権利を先に確保し、設備が値下がりするのを待つ状態が続いたり、買い取り価格が高く設定された太陽光パネルに偏重した投資が行われたりするなど、思うような再生可能エネルギーの増加につながっていないのが現状である。

ドイツにおいては1991年より再生可能エネルギーの買い取りを実施し、2000年より固定価格化されている^③。当時優位に立っていたドイツ国内の太陽光パネルメーカーの振興策という意味合いもあったが、実際には安価な中国製の太陽光パネルが市場を席巻する事態となり、これがFITの買い取り価格の低下へとつながった。それは同時に、世界最大を誇った自国メーカーにも負担となり、最終的には破たんに至ってしまった。

スペインも早くから再生可能エネルギー振興に力を入れており、2007年には大規模な太陽熱発電設備を稼働させている^④。また、太陽光発電パネルに対する補助だけでなく、太陽熱温水器の取り付けを新築した住宅や建物に義務付けて振興している。また、原子力発電の割合も21%と高めであるが、最近では風力発電の割合が21.1%となり、原子力を抜いて一番割合が高くなっている。

太陽光パネルでは日本製品のブランドイメージ

*1 技術開発センター、*2 企画管理室

が圧倒的に強いわが国においても、ドイツと同様、実際の生産は国外で行われている場合が多く、FITによる太陽光パネル産業の育成という意味合いとするのであれば、わが国が得意とする分野、例えばリチウムイオン電池や気象予測による発電量の事前予測システムとスマート電力計による電力会社との電力管理システムとの連携を考慮した補助政策を施行しない限り、難しいものと考える。

また、わが国においては再生可能エネルギー全体のバランスから見たとき、天候による発電量の変動が大きい太陽光パネルが突出して伸びてきており、電力を安定化させるためのバックアップコストが近年問題となってきた。これは水力発電やバイオマス発電を除くと、再生可能エネルギーのほぼすべてが抱える問題であり、この変動を緩やかにできれば、電力の管理コストの増大を抑制することができる。そのため今後、再生可能エネルギーに対しては、コストだけでなく電力供給の質についても求められて来るものと思われる。

変動が大きい太陽光発電に対し、同じ太陽をエネルギー源とする太陽熱発電では、太陽エネルギーを熱として取り出す過程が入るため、太陽光パネルと比べて発電の変動は緩やかであり、蓄熱技術を使うことにより簡単に安定的な発電を行うことが期待できる。しかし、わが国においては1974年発足のサンシャイン計画の一環として行われた太陽熱発電実験以降、大規模な発電実験は行われておらず、海外で行われている太陽熱発電実験についても、赤道に近い砂漠地帯や降水量の少ない乾燥した地域での実験がほとんどである。

従来の太陽熱発電は反射鏡によって集熱するため、太陽から直接届く直達日射が必要となる。しかし、わが国は四方を海に囲まれており、湿度も比較的高い地域であるため、雲や大気中の湿気による散乱日射の割合が多くなっている。図1.1と図1.2はNEDOによる太陽光の観測データであるが、冬場は比較的太陽の光が直接届く直達日射が多くなっているのに対し、湿気の多い夏場は散乱日射の割合が多くなっていることが分かる。この直達日射と散乱日射の割合は1年を通してみたとき、50.1%と49.9%となり、太陽光の半分は散乱日射となっている。これは、一般的な集光式の太陽熱発

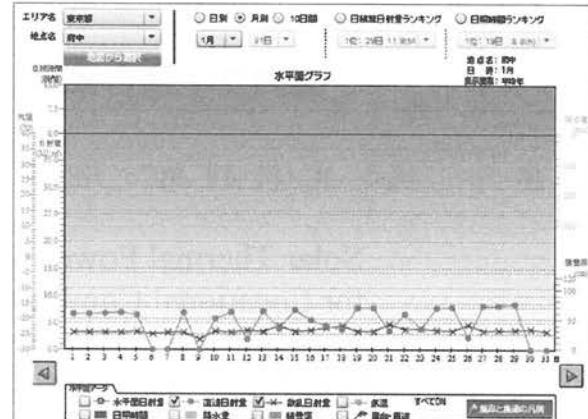


図 1. 1 直達日射量と散乱日射量（1月）

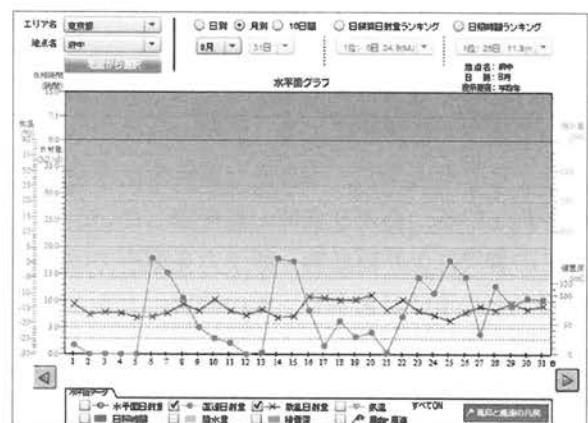


図 1. 2 直達日射量と散乱日射量（8月）

電では、太陽エネルギー全体のうち、半分しか発電に利用できないことを示しており、発電効率や発電の安定化に不利となる。

同じ、太陽熱を利用するシステムとして、太陽熱温水器があるが、これらのシステムのほとんどは集光機構を持たず、曇天でもある程度の温水を作り出すことができている。また、日本と緯度がほぼ同じスペインにおいては、魔法瓶のような構造を持つ真空二重ガラス管とヒートパイプを用いた高性能タイプの太陽熱温水器が広く用いられており、価格も低く抑えられている。

本研究においては再生可能エネルギーの供給を増やすことを目的として、太陽熱温水器によって太陽光から温水を得て、その熱エネルギーをもとにバイナリー発電を行い電力を得るシステムを構築することとした。この方式を採用する利点としては、蓄熱による発電の安定化がし易く、普及が進んだ太陽熱温水器を用いるために、設備コストも低く抑えられる点が考えられる。また、膨張機

として回転式のスクロール膨張機を採用し国内の気候に適した効率の良い太陽熱発電システムを構築することを目的とする。

参考文献

- 1) 「2011年度（平成23年度）温室効果ガス排出量確定値」，2013年4月，環境省
- 2) 「京都メカニズムクレジット取得事業の概要について」，2013年4月，環境省 地球環境局市場メカニズム室
- 3) 「NEDO再生可能エネルギー技術白書（2013年12月12日改定版）」，NEDO

2. 研究の概要

本研究においては、先に述べたわが国が太陽熱発電の立地として不向きとされる理由について気象データに基づいた調査およびその他条件を考慮した考察を行った。さらに既存の太陽熱発電システムの現状を調査し、わが国に設置した場合の長所短所について考察を行うとともに、太陽熱発電に有利とされる赤道地帯における最新の太陽熱発電システムの現地調査を行った。

これらの調査および検討をもとに、本研究では集熱部に着目し、太陽熱発電としては一般的な集光による集熱装置はわが国においては不向きであると考え、図2.1に示すように集光によらない集熱装置を備えた発電システムを構築し、実際に発電実験を行うこととした。

しかし、集光を行わずに太陽熱を集めてそのままでは太陽熱発電を行うには十分な温度を得る

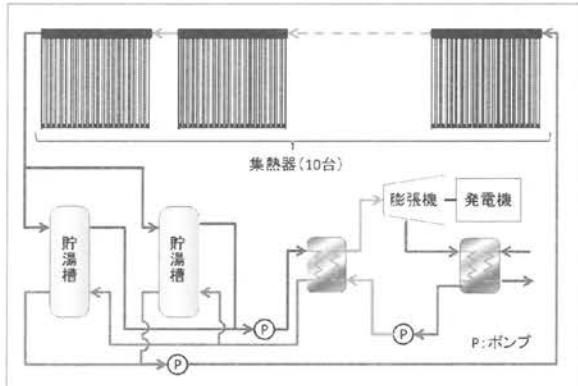


図 2.1 発電システム概略図

ことは難しい。そのため、本研究では集熱部には真空二重ガラスとヒートパイプを用いた高性能な太陽熱温水器を10台直列に接続して70°C~90°Cの比較的高い温度の温水を得ることとした。得られた温水は一度貯湯タンクへ蓄えられた後、蒸発器へと送られる。蒸発器にはもう一方からポンプによって液化したHFC-245fa(沸点15.3°C/大気圧時)が送られ、温水と熱交換することによって熱せられ氣化および圧力を高めたガスを発生させ、回転式スクロール膨張機に送られて膨張機を回転させる。本方式で採用したHFC-245faの大気圧下における沸点は15.3°Cで、低い温度から使用できる熱媒体であり、今回のようにあまり高い温度が得にくいシステムには向いているものと考え採用した。また、不燃性で低圧ガスである点も、シールなどによる摩擦抵抗を少なくすることが可能となるため、有利であると考えている。

また今回、膨張機として採用した回転式スクロールは一般的な旋回式のスクロールとは異なる構造をしており、一般的なスクロールは一方が固定された状態で、もう一方がクラランク機構によって旋回運動を行って動作するのに対し、回転式スクロールは両方のスクロールが同方向に回転して膨張機としての機能を発揮する。そのため、回転式スクロールは、直接回転運動を得られることとなるため、発電機を高速で回転させる用途に向いており、今回はインバーターを介して商用電力(50Hzまたは60Hz)を発生させる仕様としたが、将来的には直接50Hzや60Hzの交流を発生させる場合にも有利であると考えている。スクロール内部には

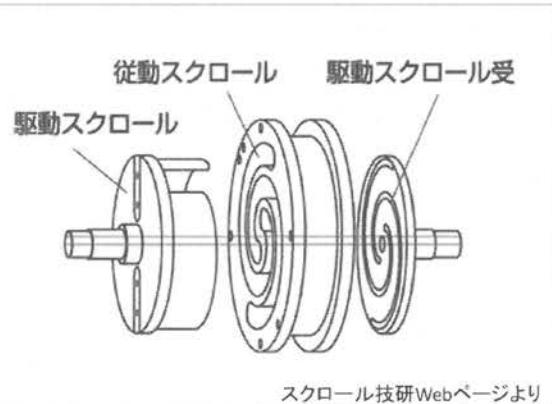


図 2.2 圧力相殺型スクロール機構

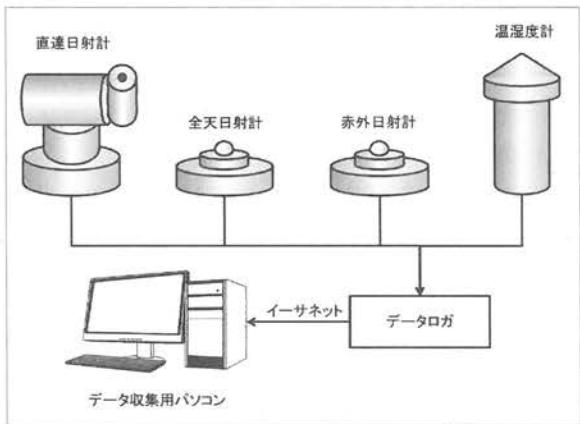


図 2.3 天候観測システム概略図

圧力を高めたガスを送り込むため、回転させる方向以外にも圧力がかかり、摩擦力を発生させるが、本研究で採用した回転式スクロールは一方のスクロールに両側の側壁が取り付けられた構造となっており、もう一方のスクロールには側壁が全くない構造となっている（図 2.2）。この構造により、軸方向の圧力が相殺され、回転部分を支えるベアリングなどの摩擦力が軽減される。

膨張機を回転させた後のガスは再び凝縮器へと送られ、20°C程度の水道水と熱交換を行って液化された後、再びポンプによって蒸発器へと送られ循環利用される。

本研究では、太陽熱発電システムに投入される太陽エネルギーの測定を行うため、集熱器近くに天候観測システムを構築した。本方式は国内立地を目指したものであるため、投入される太陽光の直達日射量と散乱日射量を測定する必要があると考え、直達日射計と全天日射計を用いて、これらを測定することとした。また、熱として太陽光から得られるエネルギーのうち、可視光のみでなく赤外線の影響も考えられることから、赤外測定器についても設置することとした。本天候観測システムは、このほかに気温と湿度データを自動的に収集し、LAN に接続されたパソコンによりデータへと送られ保存される。図 2.3 に気象観測システムの概略図を示す。

また、太陽エネルギーを受ける側の集熱器は、汎用の太陽熱温水器を流用したものであるため本来 50°Cくらいの温水が得られれば十分な性能である。そのため、断熱材が施されてはいるものの、

高温の温水に対する断熱は十分とは言えず、集熱管が太陽光から熱エネルギーを取り出す性能を正確に評価することが難しいと考え、集熱パイプを単体で設置して、断熱を十分施した貯湯タンクを直接取り付け、その温水の温度変化を測定することとした。温水は狭い範囲に限定されて循環等もないため、余計な熱流出を考慮しなくて済み、より正確な熱量測定ができると考える。また、この方式だと、熱媒が水に限定されないため、将来的には油など、より沸点の高い熱媒を用いた実験も行えると考えている。図 2.4 に概略図を示す。

本研究ではこのほかに、すでに製品化されているバイナリー発電システムを接続して、実際に太陽光から発電までシステムとして完結した発電実験も行い、太陽熱発電の実証を試みた。このバイナリー発電システムは、本研究が採用している回転式のスクロール膨張機ではなく、一般的な旋回式のスクロール膨張機を採用しているものの、独自の設計により高性能化を果たしており、非常にコンパクトな筐体でありながら、75~100°Cの温水 (50ℓ/min)、5~30°Cの冷却水 (50ℓ/min) を供給することで 3kW 級の発電が可能な装置である。本研究では 1kW 程度の発電を目的としているため、同発電システムに十分な温水や冷水を供給できないことから、温度や流量を調整し、発電出力の最大化を図った。

以上の実験結果を踏まえ結言においては、総合的な考察を行い、わが国における太陽熱発電の可能性について考察を行った。

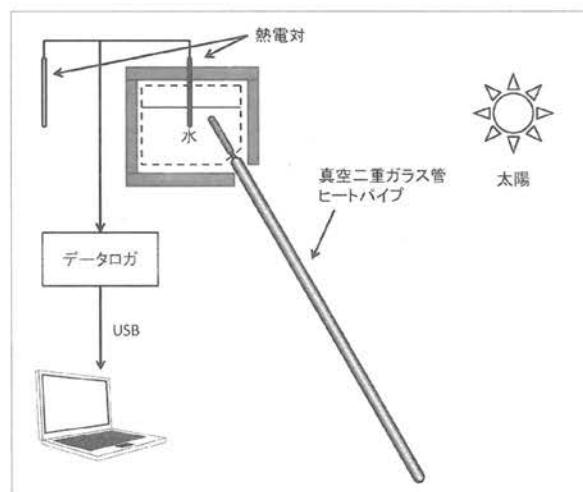


図 2.4 単体性能測定装置

3. 太陽熱発電システムの開発

3.1 太陽熱発電システムの調査

3.1.1 既存の太陽熱発電システムの調査

1973年の第一次オイルショックをきっかけとして、世界的にも代替エネルギーの研究が行われるようになってきた。わが国においても1982年にサンシャイン計画の一環として太陽熱発電システムの発電実験が行われ世界で初めて1,000 kW級の発電に成功¹⁾したものの、集熱式の太陽熱発電に必要な直達日射を安定的に得ることができなかったために、開発を断念している。

海外においては主にサンベルト地帯と呼ばれる赤道付近の大陸で実験が行われることが多いが、太陽熱発電は同時に冷却が必要となるのが一般的で、電力の消費地にも近いことが求められることから、海岸近辺に設置されることが多く、ミラーなどの光学系の洗浄も必要なことから、非常に多くの水を必要とすることも設置条件を難しくしている。サンベルト地帯以外では、日本とほぼ同緯度にあるスペインにおいても、直達日射が多い気候を生かした研究が行われており興味深いが、やはり、発電コストが問題となっている。

太陽熱発電は、太陽の熱を集めた後は一般的な火力発電と同じ技術が使えるため、開発の中心は、主に集熱方法となり、システムの形式も集熱方法によって分類されるのが一般的である。以下に日本の気候条件における各方式の長所・短所をあげる。

1) タワー型 太陽光を図3.1.1に示すような2軸制御のミラー（ヘリオサット）によって集熱ポ

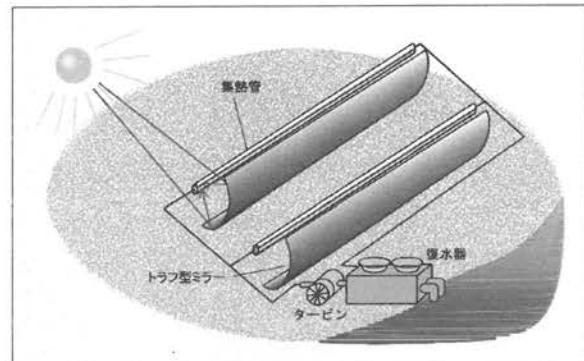


図 3.1.2 トラフ型太陽熱発電システム

ントへ角度を正確に調整し、多数のミラーから集められた光を1点に集光することによって、非常に高い温度を得るシステムである。集熱によって得られた熱量は、油や溶融塩などの熱媒に移され、発電システムへと運ばれる。スケールメリットを得やすく、大規模化により効率の良い発電が期待されている方式である。しかし、ミラーで集めた光を長い距離を経て集光するため、直達日射であることが必須となり、直達日射の少ないわが国においては実用化が非常に難しいシステムである。また、2軸制御のヘリオサットが高価となる上、大型化が難しい。さらに、ヘリオサット同士が相手のミラーに影を落としてしまうと出力が低下してしまうことから、ヘリオサットの間隔を十分広く取る必要があり、地価の高い日本においては土地の確保も問題となる。

また、タワー型の欠点としては、集熱部分が高いタワーの上方となるため、高所に発電システムを作り込むか、非常に高温の熱媒を地上付近まで運ぶ必要が出てきてしまう。

この問題を解決するために、集光した光を上方

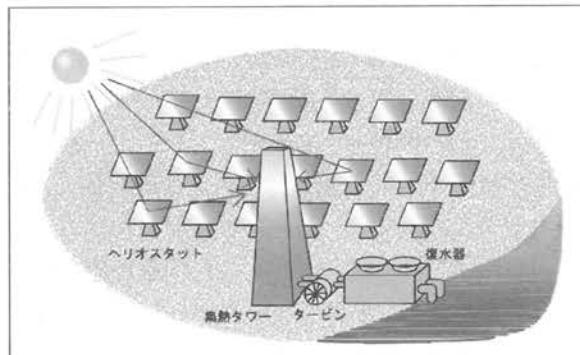


図 3.1.1 タワー型太陽熱発電システム

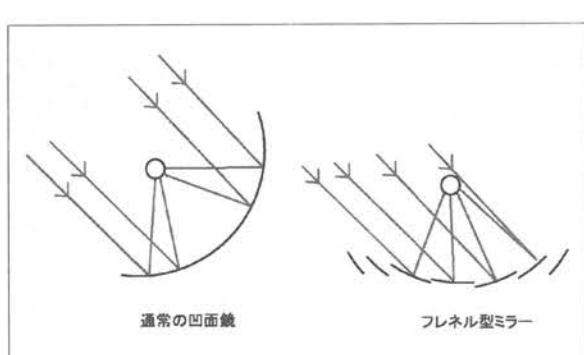


図 3.1.3 フレネル型ミラー



図 3.1.4 ディッシュ型太陽熱発電システム

に設けたミラーで受け、地上に向けて反射し、地上付近に設置した発電システムへと送り込むビームダウン方式の発電システムが開発されている。

2) トラフ型 集熱器として図3.1.2に示す、様々なトラフ(U字溝)型のミラーで、ミラーの中心にあるパイプに集光し、パイプに流れる油などの熱媒によって発電システムへと熱が運ばれる。タワー型と比べると集光率が低くなるために集熱温度が低くなってしまう。そのため、効率は落ちるとしているが、軸制御が1軸で済むことから、制御のためのコストも少なくて済み、ミラーの大規模化が可能である。また、土地の使用効率もタワー型と比べると高く、ミラーの洗浄がし易い点もメリットとしてあげられる。

3) リニア・フレネル型 トラフ型と似たようなシステムで、ミラーにフレネル型ミラー(図3.1.3)を使用している。ミラーが薄型化され、軽量となる利点があるが、集熱効率は低くなってしまう。しかし、土地の使用効率が高いので、わが国が得意とする加工技術等を用いて、フレネルミラーの加工精度を上げたり、集熱管の断熱対策等を施したりすれば、有効な方法と成り得るものと思われる。

4) ディッシュ型 パラボラアンテナ型のミラーの中心に発電システムを置いた方式で、熱の搬送距離が短い点と、1点に光を集中させることができ、高温を得やすいことから、発電効率を上げ易い。また、発電部にスターリングエンジンを用いたコンパクトなシステムも提案されている。しかし、太陽を追尾するため2軸制御を行うパラボ

表 3.1.1 国内立地における太陽熱発電の比較²⁾

	集熱 温度	プラン ト効率	土地利 用効率	備考
タワー型	850~1000°C	20~35%	小	<ul style="list-style-type: none"> ・発電効率が高い ・高温蓄熱が可能 ・火力発電とのハイブリッド化が可能 ・ミラー制御が2軸となり高価で数も必要
トラフ型	約380°C	15%	中	<ul style="list-style-type: none"> ・制御が1軸で済み、安価で大型化し易い ・蓄熱との組み合わせが可能 ・火力発電とのハイブリッド化が可能
フレネル・型	250~500°C	8~10%	大	<ul style="list-style-type: none"> ・ミラーの調達が容易 ・低成本 ・土地利用効率が高い ・集熱効率が低い
ディッシュ型	約750°C	25~30%	—	<ul style="list-style-type: none"> ・発電効率が高い ・冷却水が不要 ・単体での土地利用効率は高いが、複数並べる場合は利用効率が悪くなる

NEDO 再生可能エネルギー技術白書(2010年7月)を元に、国内立地を前提に再構成

ラ型のミラーの焦点に発電システムを置くため、大規模化が難しい上、複数のシステムを並べる場合は、互いの距離を取る必要があるため、大規模化による発電システムのスケールメリットを求めるににくい。

表3.1.1にこれらの発電システムを日本に設置する場合における比較をまとめた。

3.1.2 最新の太陽熱発電システムの現地調査

平成25年9月7日(土)~9月11日(水)の日程で、マスダール・シティ(アラブ首長国連邦(UAE), アブダビ)を訪問し、同地における太陽熱発電システム(定格100kW)の現地調査を実施した。

1) アブダビ アブダビはアラビア半島に位置したUAEを構成する首長国の一であり、アビダビ市はUAEの首都として機能している。一般的に太陽熱発電(CSP)の適正地は、直達日射量(DNI)が2,200 kW/m²/year以上ある場所が有効であるといわれており、アブダビを含む中東地域は、この日射エネルギーが期待できるサンベルト地域として認定され、今後CSPの事業化が有望視されて

いる地域である（ちなみに UAE の降水量は年平均 78 mm³⁾（日本の 20 分の 1 程度）。気候的には、国土の北側がペルシャ湾に面しており、アブダビなどの湾に面した都市は高温・多湿な地域である。なお、今回現地を訪れた際にも気温が 40 °C を優に超えていた。

2) マスダール・シティ マスダール・シティはアブダビ郊外の湾岸地域に位置し、市内の電力供給のすべてを再生可能エネルギーでまかない二酸化炭素排出ゼロを目指す、2006 年から開発が進められている未来志向型の都市である。現在、同市内にはマスダール大学(MIST:MASDAR Institute of Science and Technology) が建設中（一部運営済み）であり、研究施設と研究者および大学院生の居住区や太陽光・太陽熱等の施設の運用が始まっ



図 3.1.5 MIST 外観

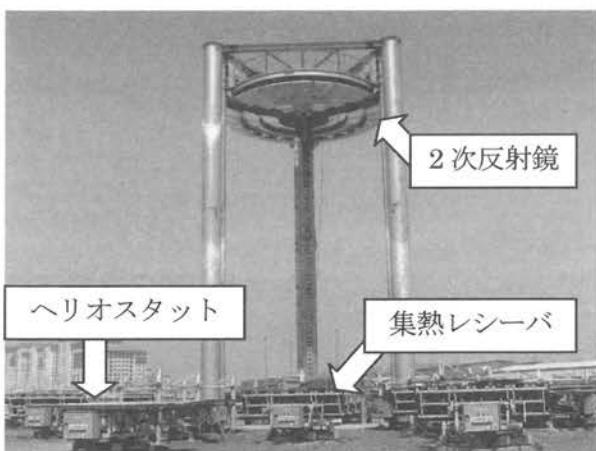


図 3.1.6 太陽熱発電システム外観

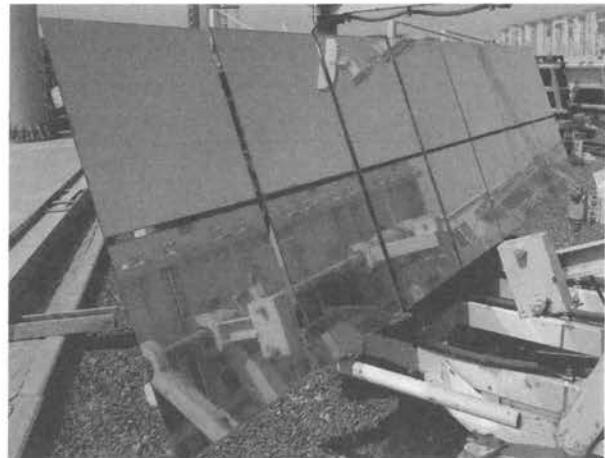


図 3.1.7 ヘリオスター

ている。2025 年頃までに 4~5 万人規模の居住施設・多くの研究施設・商業施設を合わせもつ独立性のある未来都市を目指している。なお、2011 年に国際再生エネルギー機構（IRENA: International Renewable Energy Agency）の本部がアブダビに設置され、同国が再生可能エネルギーの国際拠点としての地位を得ている。

3) 太陽熱発電実証プラント^{4) 5)} マスダール・シティに設置されている太陽熱発電実証プラントは、2009 年に、コスモ石油㈱と MASDAR との共同研究合意に基づき、東京工業大学の監修のもと三井造船㈱が設計建設した施設であり、その後 MIST、コスモ石油㈱、三井造船㈱による CSP に係る共同研究が継続実施してきたものである。太陽熱

表 3.1.2 システムの仕様⁶⁾

① 中央タワー

高さ : 20m

方式 : ビームダウン方式

2 次反射鏡 : 45 枚

② ヘリオスター

方式 : 三井ギヤング方式 (3 段鏡)

寸法 : 3.21m (W) × 3.11m (L) × 1.22m (H)

台数 : 33 基

③ 制御方式

: 集光センサーフィールドバック方式と
太陽位置計算制御 (2 方式併用)

④ 集熱レシーバ

: 1.5m × 1.5m 平置型, 高温油循環式



図 3.1.8 MIST の周辺地域

発電実証プラントの様子ならびに仕様を図 3.1.6, 図 3.1.7 および表 3.1.2 に示す。

本システムは、ビームダウン型の集光型太陽熱発電システム (CSP: Concentrated Solar Power) である。太陽自動追尾機能を持つヘリオスタット（鏡による集光装置）に照射された太陽光はタワーの上部に集光され、上部に設置された二次反射鏡は、さらに地上付近まで反射光を集光させることができ、タワーの直下に設置された集熱レシーバに集光される。集熱レシーバに集光された太陽光は伝送熱媒（例：溶融塩、油）を加熱し、蒸気タービン回すなど、発電エネルギーとして使用することができる。

従来のタワー式 CSP と違い、集光倍率を大きくできるなどの優位点をもち、地上近くに集熱レシーバを設置することが可能となり、従来型より高温の熱媒を得られるなど、高効率な CSP 技術として今後期待されるものであると三井造船㈱の担当者は語っていた。なお、今回の訪問時は集光実験等を実施していなかったが、現時点では本システムによる、各種の集光実験や集熱実証を行い、多くの成果とシミュレーションへの反映データを得たとのことであった。

4) 課題等 今回調査した太陽熱発電システムでは日本とは異なり日照が期待できる地域に設置されている。しかしながらアラブ首長国連邦には砂漠地域が広がっており、筆者が同地を訪問した際には砂漠の砂のためか、空が白くなっているように感じられた。安藤氏によると同地において直達日射量が雲の影響により大きく減衰する⁵⁾ことを確認して



図 3.1.9 Prof. Matteo Chiesa(MIST) の研究
グループとのディスカッション

いるが、筆者は雲だけでなく大気中に存在する砂が日射に大きな影響があるよう感じられた。なお、MIST の Prof. Matteo Chiesa によると、アラブ首長国連邦は湿度が高く空中に浮遊する砂が多いため、ヘリオスタットの反射鏡等に砂が付着し、光学系への性能低下につながる影響が大きいとのことであった。直達日射光だけではなく散乱日射光を如何に活用するのか、また光学系において如何に太陽光を減衰させてしまう要素を除くことができるのか、など自然を相手にする技術の難しさを感じられた。

5) 謝 辞 マスダール・シティにおける太陽熱発電システムの現地調査に関し、施設の見学のご配慮をいただいた江澤一明様および塚田 純様（三井造船㈱ 技術開発本部 技術総括部 再生可能エネルギープロジェクト Gr.）並びに Prof. Matteo Chiesa (MIST) および同研究グループの皆様に深くお礼を申し上げます。

3.1.3 近年の日本の太陽熱発電研究 サンシャイン計画以降、わが国における太陽熱発電は、その晴天率の低さや、日照時間の短さなどにより、立地に向いていないとの評価が下されてしまったようである。しかし、太陽熱発電に必要な条件は、単純に直達日射や日照時間などによるものだけではなく、熱機関として動作させるためには冷却側の条件やシステムのメンテナンス面などの条件を総合的に判断する必要がある。その場合、例えば熱機関に必要となる冷却水や光学系の洗浄に必要な水の供給など、日照に恵まれた地域では逆に不利となる条件も多く、さらに、電力の運搬コストを考慮すると電力の消費地が近くにあるということも重要な条件であり、砂漠地帯の多くはこの条件を満たしてはいない。

このように、わが国は熱機関の高温側の条件においては、不利な立地にあるといえるが、低温側に利用できる水資源に恵まれた国であり、電力の消費地も数多く存在する。そのような中、近年のエネルギー事情を反映して、わが国においても再生可能エネルギーに対する関心が高まっており、太陽熱発電に関する研究も行われるようになってきている。これらの研究の中には、ミラー・レンズなどの集光装置を使った太陽熱発電システムも含まれており、光を熱に変換する段階でのロスが少なく、高温を得ることができるために、高い熱効率が期待できる。しかし、先に述べたようにわが国では晴天率が低いため、集光方式の太陽熱発電は不向きであるから、最終的には海外への設置を

視野に入れているか、熱機関以外の技術を組み合わせて実用化を検討しているものと思われる。

わが国における集光式の太陽熱発電研究としては、先に述べたビームダウン方式の他、光学機器メーカーによる太陽熱発電システムの研究が良く知られている⁷⁾。同社は望遠鏡など天体観測機器を製作しているメーカーで、望遠鏡に使用する反射鏡の製作技術と星などの動きを正確に追尾するための制御技術を生かして、高精度・高反射率のミラーを高精度に制御して、より集光倍率を高めて高い温度を得ている。また、反射鏡を取り付けるヘリオスタート自体に独立した太陽追尾機能を備えているため、沢山のヘリオスタートを連携させて制御する必要がなくなり、システム全体の効率の向上と設備コストを抑制できるとしている。問題は国内に設置する場合は、やはり直達日射量が少ないので、熱機関による発電方式だけではなく、企業や地方自治体と共に太陽光発電を組み合わせた発電や、水素を発生させる方法など、幅広く研究している。

理化学研究所においては、超精密加工技術を生かした大口径のフレネルレンズと、ロータリー熱エンジン用いた膨張機を組み合わせた発電システムの研究(図3.1.10)を行い、10kWの発電を目標とする研究⁸⁾を行っている。作動熱媒体は、HFC-245faを用いたバイナリー発電システムとなっており、40°Cの低温熱源から発電できるとしている。また、フレネルレンズは立方体の3つの面に配置されており、朝日から夕陽まで追尾装置なしに集熱できるシステムとしている。ロータリーエンジンは自動車に用いられたロータリーエンジン技術をベースとしており、自動車のエンジンでは、レシプロエンジンと比べると圧縮比が大きく取れないという点が欠点とされたが、100°Cに満たない低温度領域での熱機関では、それほど大きな圧縮比は求められないと考えられるので、8倍程度の圧縮比が期待できるロータリーエンジンであれば、コンパクトで高効率な発電システムの実現が期待される。この方式の欠点としては、自動車のエンジンの時と同様、高度な設計技術と、加工技術が求められる点で、同研究プロジェクトには自動車のロータリーエンジンの開発に携わつ

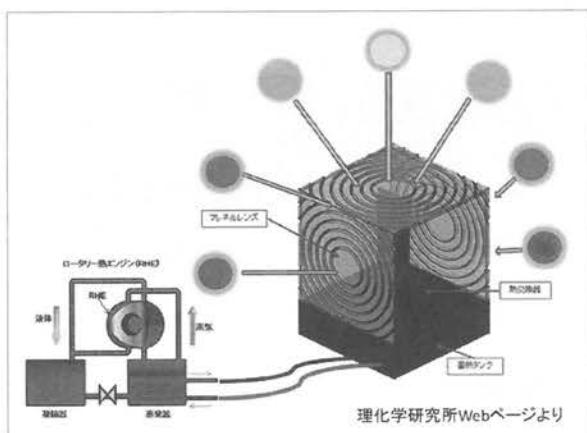


図 3.1.10 フレネルレンズとロータリー熱エンジンを用いた発電システム

ていた技術者が参加しているとのことである⁹⁾.

3.2 天候観測システム

本研究における太陽熱発電システムの集熱パネルに投入される太陽エネルギー評価のため、天候観測実験を行った。

本節では、本天候観測実験の概要、観測方法、観測結果について報告する。

3.2.1 概 要 本天候観測実験では、全天日射量、直達日射量、赤外放射量および温湿度に注目し実験を行った。本天候観測実験の概要として、天候観測システムの構成の概要について示す。

まず、天候観測システムの構成は、図3.2.1に示す通り、4種のセンサ（全天日射計、直達日射計、赤外放射計、通風式温湿度計）およびこれらのセンサを制御し信号を処理するための解析系（データロガー、制御用パソコン）から成る。

表3.2.1にセンサ類の仕様を示す。全天日射計は視野角がセンサ上方の半円球に広がっており、直達日射計と合わせて用いることにより散乱日射量の推定が可能となる。なお、直達日射光は全てが全天日射計の受光部に入るわけではなく、直達日射光の地面に対して垂直方向の光が受光部に入る。

直達日射計は、サンセンサにより太陽位置を追うモード、および、雲などで太陽位置が判別しづらい状況下で太陽位置を計算により推測するモードの併用式となっている。

赤外放射計はシリコンドームにより波長3μm

表3.2.1 センサ類の仕様^{10) 11)}

① 全天日射計 (MS-402 英弘精機(株))

波長範囲	: 285~2800 nm
感度定数	: 7.09 μV/W·m ⁻²
視野角	: 2π (sr)
ISO等級	: First Class

② 直達日射計 (MS-56 英弘精機(株))

波長範囲	: 200~4000 nm
感度定数	: 9.497 μV/W·m ⁻²
ISO等級	: First Class

③ 赤外放射計 (MS-202 英弘精機(株))

波長範囲	: 3~50 μm
感度定数	: 3.74 μV/W·m ⁻²
非直線性	: ±1%
精度	: ±5%

④ 太陽追尾装置 (STR-21G 英弘精機(株))

精度	: <0.01° (太陽高度角0~87°)
分解能	: 0.009°
追尾方式	: 計算およびサンセンサ
計算法	: 海上保安庁水路部 略算式

⑤ 通風式温湿度計 (MH-120 英弘精機(株))

温度(方式)	: Pt100Ωat0°C測温抵抗体
(精度)	: ±0.15°C
湿度(方式)	: 高分子静電容量式
(精度)	: ±5%

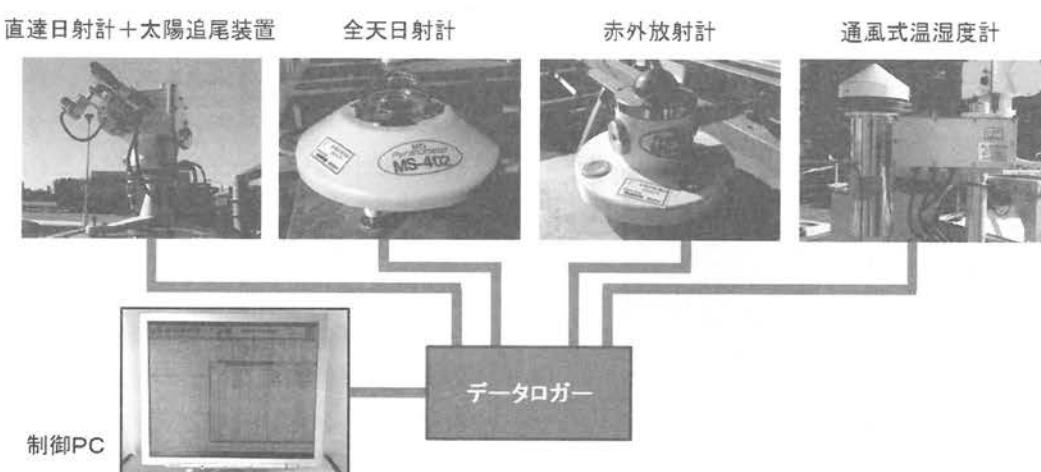


図3.2.1 天候観測システムの構成

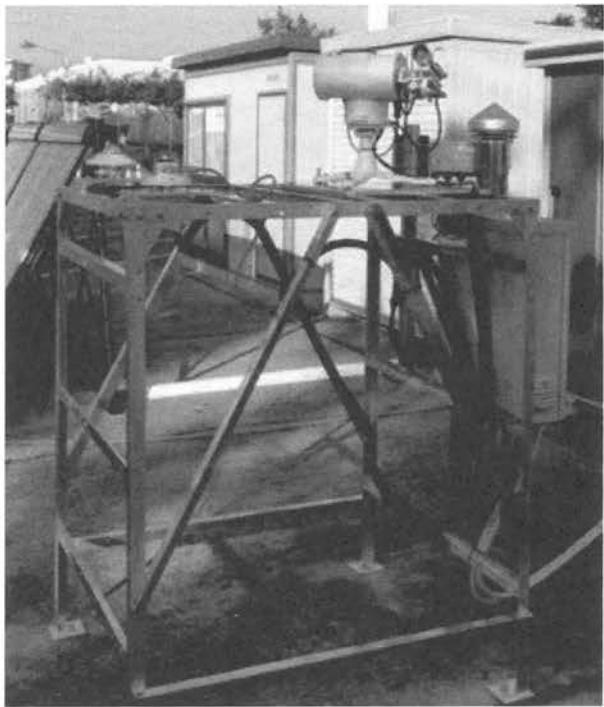


図 3.2.2 天候観測システム

以下の太陽光をカットし、大気放射（雲、水蒸気、二酸化炭素等による放射）および地球放射（地表面からの放射）の測定が可能となっている。

3.2.2 観測方法 当所敷地内（東京都東久留米市八幡町：北緯 35 度 45 分、東経 139 度 30 分）に本天候観測システムを設置した。本天候観測システムの外観を図 3.2.2 に示す。

各センサからの信号は 6 秒ごとにデータロガーを経由して制御用パソコンに取り込まれ、10 分間（100 信号）の平均値（全天日射量、直達日射量、赤外放射量）もしくは積算値（外気温度、外気湿

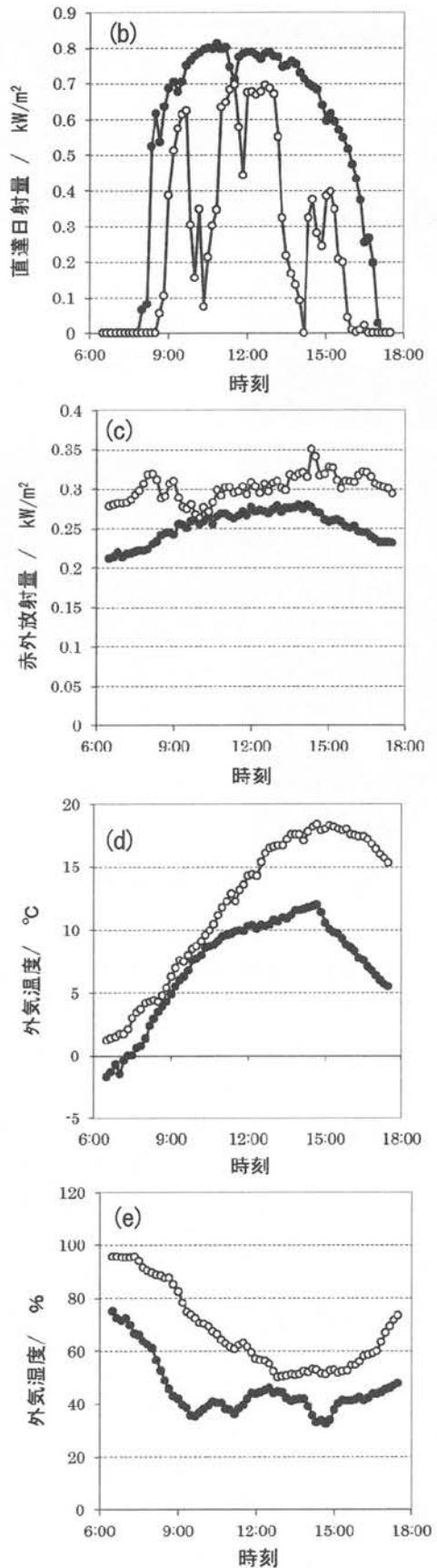


図 3.2.3 天候観測データ (○ : 2月3日, ● : 2月17日)

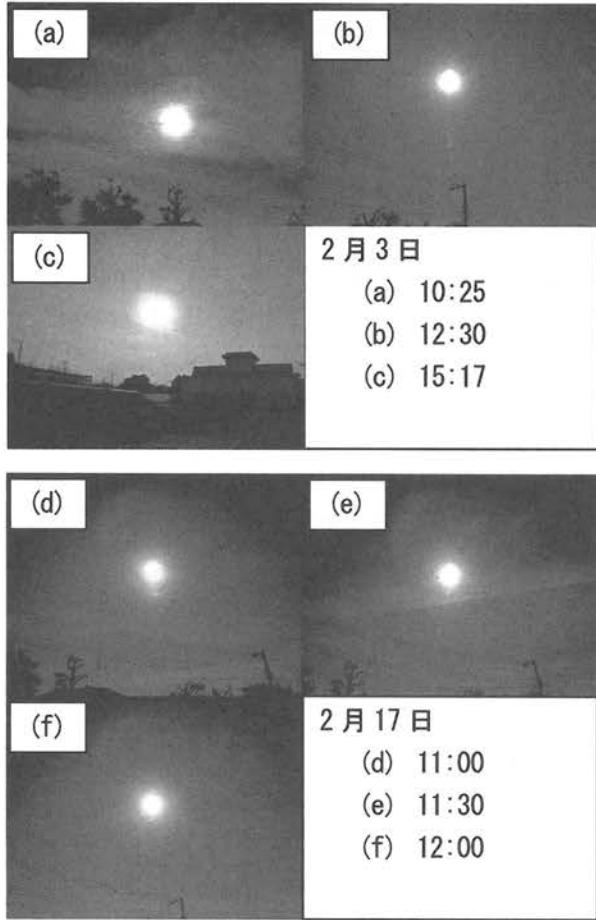


図 3.2.4 太陽付近の画像

度) が計算される。さらにこれらの平均値および積算値はセンサ毎の感度定数で日射量、外気温度、外気湿度に変換し記録される。以上のように観測期間(平成25年11月1日～平成26年2月28日)を実施した。

3.2.3 観測結果 測定期間のうち、2月3日および2月17日(6:30～17:30)の観測結果を一例として図3.2.3に示す。また、これらの観測における太陽付近の画像を図3.2.4に示す。

2月3日と2月17日の全天日射量(図3.2.3(a))および直達日射量(図3.2.3(b))を比較すると、2月3日は日射量の変動が激しい。さらに2月3日の全天日射量および直達日射量を太陽付近の画像と対応させてみると、厚い雲が掛った10時半ごろ(図3.2.4(a))全天日射量および直達日射量が大きく減衰したことに対応している。一方、2月17日は1日を通じて青空が広がる日であったが、薄い雲が太陽を横切った11時半頃(図3.2.4(e))に全天日射量および直達日射量が減少した。以上

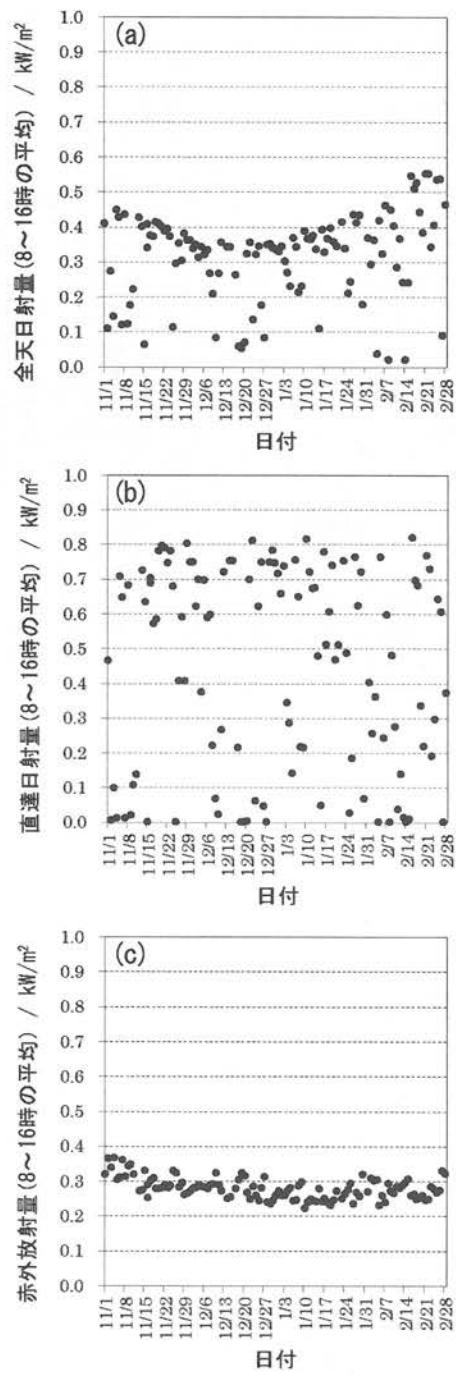


図 3.2.5 各測定日の平均値 ((a) 全天日射量、(b) 直達日射量、(c) 赤外放射量)

の結果は全天日射量および直達日射量は薄い雲であっても影響を受けやすいことを示している。

一方、赤外放射量(図3.2.3(c))は雲の影響を受けてなく0.2～0.4 kW/m²で安定している。

また、外気温度は両日とも15時付近が最大値となっており、外気湿度は朝から下降し、15時あたり

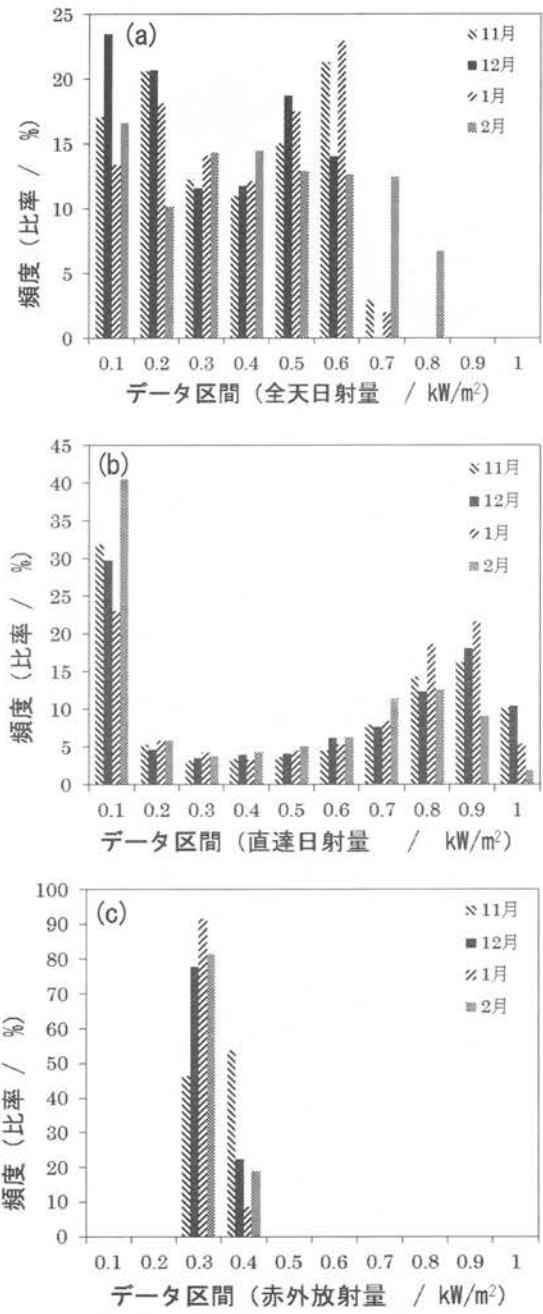


図 3.2.6 10 分毎の測定データのヒストグラム
 ((a) 全天日射量, (b) 直達日射量, (c) 赤外放射量)

りから上昇を始めている。

太陽熱パネルへの投入エネルギーとしての太陽光をさらに評価するために、11月～2月の昼間(8～16時)における全天日射量、直達日射量、赤外放射量の平均値を図3.2.5に示す。なお、データ取込のミスが発生した3日間分は省いた。また、有効な5,756個のデータにおけるヒストグラムを

図3.2.6に示す。

図3.2.5(a)では0.6 kW/m²以下に点がみられているが、0.3～0.6 kW/m²付近に点が比較的集中している。なお、ヒストグラム(図3.2.6(a))では0～0.6 kW/m²にかけての頻度はおよそ同程度であった。前述の2月3日10時半頃(図3.2.4(a))の場合、全天日射量は0.2 kW/m²程度であったので、今回観測した11～2月の期間は図3.2.4(a)よりも雲が少ない状態が多く発生していることを示している。なお、ヒストグラムより今回の観測期間では、8～16時のうち約40%の頻度で0.4 kW/m²以上の全天日射量が期待できるものと読み取ることができる(なお、太陽から地球に降り注ぐエネルギー量(太陽定数)は1.37kW/m²である。しかし、大気、雲、塵などの影響で反射や吸収が起きるため、地表面に届く太陽エネルギーは最大で1 kW/m²程度となる)。

一方、直達日射量(図3.2.5(b))は全天日射量と比較してばらついている。しかし、観測月のヒストグラム(図3.2.6(b))を比較すると、11～2月のパターンは類似していることが分かった。これは月毎の平均的な傾向として11～2月の期間は比較的類似した天候であったことを示唆している。これは太陽からのエネルギー量を予測し、安定的に活用するうえで有益と思われる。なお、今回の観測期間では、8～16時のうち約50%の頻度で0.5 kW/m²以上の直達日射が期待できるものと読み取ることができる。

ところで赤外放射量(図3.2.5(c))は11～2月の間ほぼ一定であり、ヒストグラムも0.2～0.4 kW/m²に集中していた。また、夜でも同程度の赤外放射量が観測されていた(本報告書では省略)。これは、当該の赤外放射は太陽光によるものではなく、主として外界(例:地面、建物、大気)からの放射であることを示唆している。

3.3 集熱器

3.3.1 概要 これまで説明してきたとおり、直達日射の少ないわが国において集光式の太陽熱発電の実用化は大変難しい。しかし、集光によってエネルギー密度を上げる方法は、エネルギーの損失が少なく、効率良く高い温度が得られる方法である。この集光による集熱方式を使わないとすると、何らかの方法で、集熱温度を上げることを考えなくてはならない。熱機関の効率は、熱機関に投入する前の熱媒の温度を T_1 、熱機関から排出される熱媒の温度を T_2 とすると、熱力学第二法則により、その熱機関の最大効率 η_c は次の式で表される。

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \dots \text{(式3.3.1)}$$

最大効率 η_c は 1 より大きくなることはなく、 T_1 が大きければ大きいほど、また T_2 が小さければ小さいほど、効率は高くなる。つまり、投入温度と排出温度の温度差が大きければ大きいほど、熱機関の効率を上げ易いことになる。しかし、熱機関からの熱媒の排出温度は熱機関が置かれている環境温度より下げるには難しいので、熱機関に投入する際の温度をできるだけ上げる必要がある。式 3.3.1 は絶対零度 (-273.15°C) を基準として熱媒が持つ熱エネルギーの総量を基準とした効率を表しており、太陽熱発電においては熱媒は循環利用されるので、太陽光によって投入されたエネル

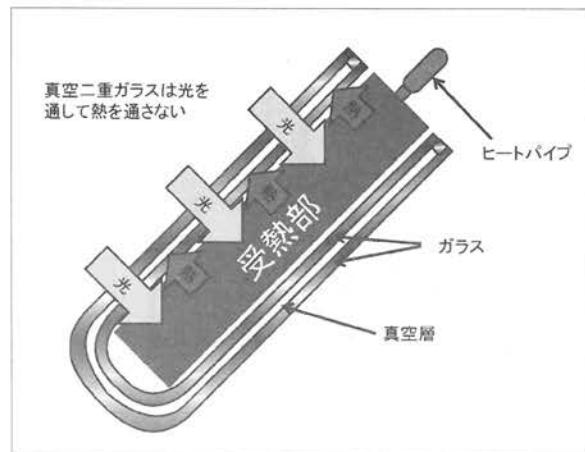


図 3.3.2 真空二重ガラスの効果

ギーは主に熱媒の温度 T_2 を T_1 まで上昇させるために費やされる。よって、投入された太陽光エネルギーに対する効率は式 3.3.1 より高い値となるが、 T_1 の温度は高い方が膨張機から得られるトルクが大きくなり、発電機による電力が取り出し易くなる。そのため、集熱器の性能としてはできるだけ高い集熱温度が得られることが望ましい。

従来型の平板型太陽熱温水器は、受光部分がペイント等で黒く塗られており太陽光を熱に変える機能は備わっているものの、逆に熱の放出の面では何も対策が取られていないかった(図 3.3.1)。しかし、受光部は内部に熱を伝える部分でもあることから、単純に断熱材を入れただけでは、逆に熱を取り込み辛くなってしまい、温水を作れなくなってしまう。そこで、二重ガラスを用いて真空層を間に入れ、外部からの光を通して熱が伝熱や対流によって外部に流出することを防ぐことができる高性能な集熱器が使われるようになってきた(図 3.3.2)。また、さらに温度を上昇させる方法

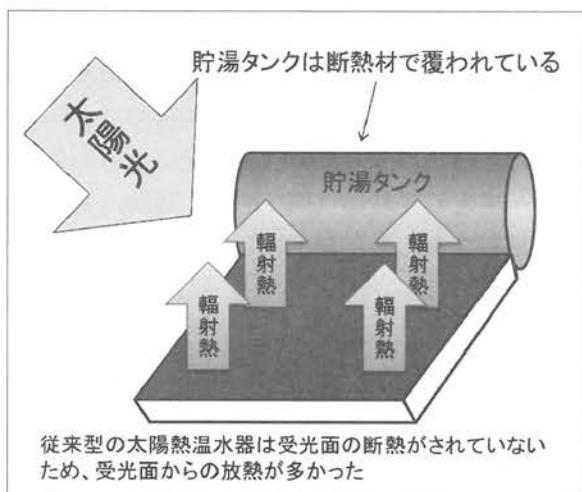


図 3.3.1 従来型の太陽熱温水器



図 3.3.3 三洋電機製(当時)太陽熱温水器

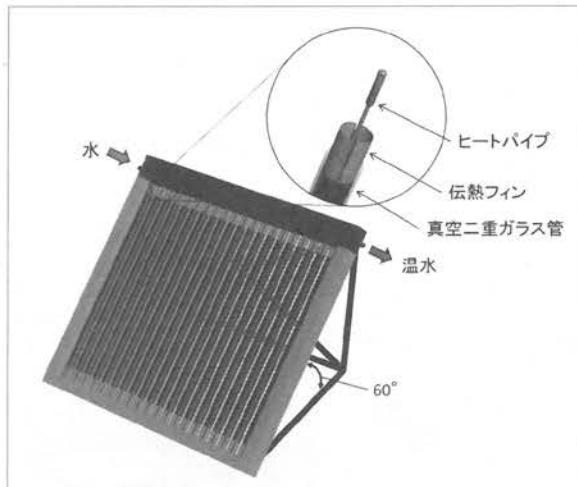


図 3.3.4 本研究で採用した高性能型集熱器

として、ヒートパイプに熱媒を封入し、そのヒートパイプを加熱することによって熱媒を気化させて、ヒートパイプ内の圧力を上昇させると、気化したガスは断熱圧縮により更なる温度上昇が得られることとなる。この方式は20年以上前に日本の電機メーカより販売されていた(図 3.3.3)が、当時は高価だったこともあり、あまり普及しなかつたようである。現在、スペインではこのタイプの太陽熱温水器が普及しており、製造も中国などで行われていることから、比較的安価となっている。

図 3.3.4 に本研究で使用した FUJISOL 社(スペイン) 製の太陽熱温水器の構造を示す。太陽熱温水器は、この図に示すとおり、20 本の真空二重ガラスヒートパイプが地面に対して約 60 度の角度で取り付けられており、ヒートパイプ上部は、さらに太い銅製のヘッダーパイプに埋め込まれる形で接するようになっており、これによってヘッダーパイプに流れる水を温めることができる。真空二重ガラスの最内面には太陽光を熱に変換するために複層コーティングされた受熱層があり、この受熱層で受けた熱は、半円状の伝熱フィンによって中心のヒートパイプへと伝えられる。日本で販売された太陽熱温水器では、ヒートパイプの中にはフロンガスが封入されていたが、同社のものは少量の水が封入されており、やはり断熱圧縮により高温が得られるようになっている。メーカーによると、ヒートパイプをヘッダーパイプに接続しない状態で太陽光に当てるとき、ヒートパイプ上部の温度は 200°C にもなるとのことである。

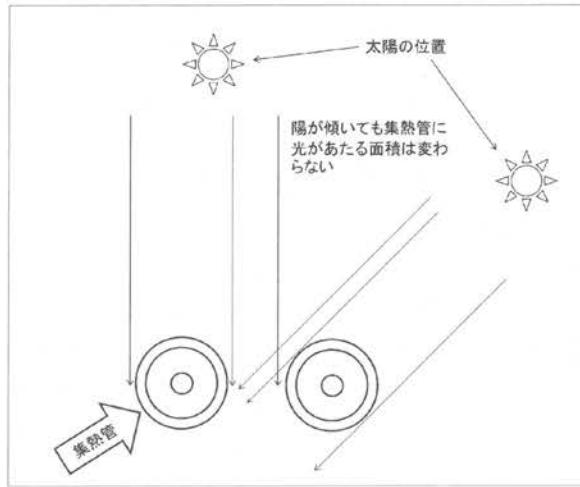


図 3.3.5 集熱管と集熱管の隙間

真空二重ガラス管ヒートパイプ方式はこの他にも、各集熱管が円筒状をしているために強風が吹いてきたときでも浮力が発生し難く、架台の負担や屋根への負担が低く抑えられるなどの利点があり、また円筒形状であることから強度を保ち易く、風などで飛来物が衝突したり、雹などが降ってきたりしたときにも割れにくいとのことである。

真空二重ガラス管ヒートパイプの欠点は、集熱管が円筒形状をしているために、太陽が正面以外にあるときは、隣り合う集熱管の影がもう一方の集熱管にかかるてしまう点で、集熱管をあまり密に並べることができない。そのため、太陽が集熱器の正面から照らす、いわば一番良い条件の時に、集熱管と集熱管との間の隙間が一番大きくなってしまうことになる。しかし、図 3.3.5 に示すとおり、多少陽が傾きかけたときでも集熱管が円筒形状をしているために受光面積が減少せず、性能が低下しにくいことを示している。これは、電力の安定化という面では、長所となる点で、実際に実験を行ってみると、かなり陽が傾いた時間でも水温は上昇していた。

この隙間の問題を解決するためには、平板型の形状で、真空二重ガラス構造とヒートパイプを組み込んだものを作成するか、集熱管の裏側に反射板を用いたタイプを用いる必要がある。しかし、すでに大量に流通している真空二重ガラスヒートパイプ方式に対して、平板型の高性能集熱器はかなり割高となることが予想され、集熱管に反射板を取り付けたタイプも現段階ではコスト的には割

高となっており、前述したとおり陽が多少とも傾いた状態では、隙間の影響は小さくなるので、本研究では、この集熱器を10台直列に並べて集熱を行うこととした。

3.3.2 単体性能測定 開発した国内立地適合太陽熱発電システムにおける太陽熱温水システムの性能評価のため、集熱性能測定を行った。

システム全体では誤差要素が多く、正確な評価が困難なため、真空管ヒートパイプ1本の集熱性能（以下、単体性能）の測定装置を別途開発し測定した。

本節では、単体性能測定のための装置製作、測定方法、測定結果、天候と集熱エネルギーの関係および単体性能について報告する。

1) 装置製作・測定方法^{12) 13) 14)} 今回開発した単体性能測定装置の構成について示す。

測定装置は図3.3.6に示すとおり、1本の真空管ヒートパイプ、ステンレス製の貯湯タンク、温度測定のための熱電対機器から成る。

なお、装置開発に際して、実際の太陽熱温水システムの集熱パネルと同等の状況を再現するために、下記3点を考慮した。

- ① 真空管ヒートパイプの先端に、厚さ0.8mmの銅製パイプを密着させて覆い、図3.3.7に示すように貯湯タンク内に突き出す形で取り付けた。
- ② 真空管ヒートパイプを、太陽熱温水システムの集熱器と同様に、地面に対して60度傾けて取り付けた。
- ③ 太陽熱温水システムの集熱器は、20本の真空管ヒートパイプが並ぶため、集熱器の背面に影ができる。したがって、背面からの反射日射の影響は少ないと考えられる。一方、単体性能測定装置は空間的な隙間が多いため背面に影はできにくく、地表からの反射日射の影響が受け易いと考えられる。そこで反射日射の影響を除くため真空管ヒートパイプの裏面にアルミテープを貼り付けた。

また、貯湯タンクからの放熱の影響を避けるため、貯湯タンクの外部に厚さ60mmの押出法ポリスチレンフォームを貼り付けた。貯湯タンク上部の

蓋から水温測定のためのK型熱電対を挿入した。使用したK型熱電対の仕様を表3.3.1に示す。熱電対は補償電線で延長して、Pico Technology Limited社製サーモカップルデータロガーTC-08

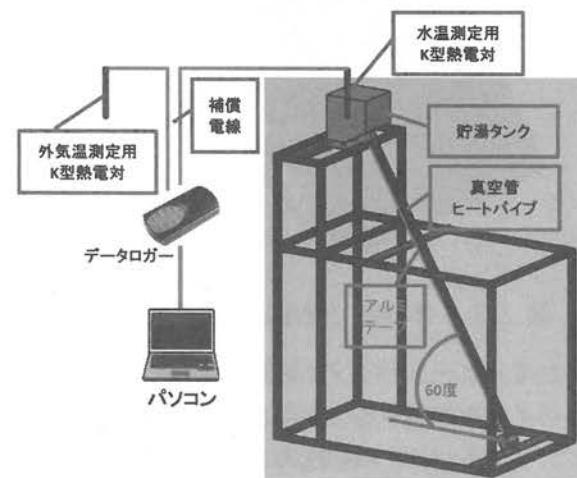


図3.3.6 単体性能測定装置の構成



図3.3.7 貯湯タンク内の構造

に接続した。使用したTC-08の仕様を、表3.3.2に示す。ロガーは更にパソコンに接続され、温度データはパソコンに取り込まれる。

表3.3.1 K型熱電対の仕様

素線種類	Kタイプ (CA)
シーズ材質	SUS316
補償導線	耐熱用ガラス被覆
起電力	JISC1605基準起電力に準拠
許容差	JISクラス2 (K)

表 3.3.2 データロガー TC-08 の仕様

■ 8 チャンネルサーモカップルデータロガー	
測定温度範囲	-270°C ~ 1,820°C
測定分解能	約 20 ビット (ノイズフリー ービット数 : 16.25 ビット)
インターフェース	USB1.1
入力電圧範囲	±70 mV
入力インピーダンス	2 MΩ

つぎに、測定方法について報告する。

貯湯タンクに 10 kg の水を入れて屋外に設置し、真空管ヒートパイプが日射を受けて集熱すると、ヒートパイプ先端を覆った銅製パイプを介して熱交換され、貯湯タンク内の水が加熱される。本単体性能測定装置により、貯湯タンク内の温水の水温と外気温を測定した。参考測定である外気温は、水温測定と同じ K 型熱電対を使用した。熱電対は、外乱を受けないよう、前述の天候観測システムにおける通風式温湿度計の筒のうちに取り付けた。

本単体性能測定装置を、集熱器に隣接する位置に設置した。本単体性能測定装置の外観を、図 3.3.8 に示す。



図 3.3.8 単体性能測定装置の外観

データのサンプリングは 5 分毎として、継続的に記録した。測定結果から、終日にわたって日照があった日を選択し、さらに外気温変動の影響を避けるため、外気温が安定した時間帯のデータを有効と見なして集計した。

また、終日にわたる日照の有無については、気象庁より公開されている 1 日の日照時間に基づいて判断した。気象庁の公開対象地域には、埼玉県所沢市と東京都練馬区がある。本単体性能測定装置の設置場所（東京都東久留米市）を考慮し、両地域の平均値を使用することとした。

なお、気象庁の日照時間の定義は以下のとおりである。

- ・ 日照時間：直射日光が地表を照射した時間
- ・ 日 照：直達日射量が 0.12 kW/m^2 以上

2) 測定結果 本単体性能測定装置を活用し、単体性能測定を実施した。単体性能測定は、2013 年 12 月上旬から 2014 年 2 月下旬の間、継続して実施した。このうち、2014 年 2 月 1 日～2 月 20 日の 20 日間の連続記録データを、図 3.3.9 に示す。

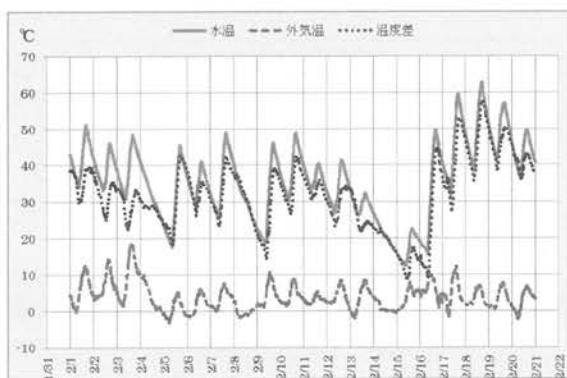


図 3.3.9 連続記録データ (2/1~2/20)

また、日毎に集計した水温の最低値、最高値と気象庁より公開されている日照時間等のデータを突合した結果を、表 3.3.3 および、図 3.3.10 に示す。

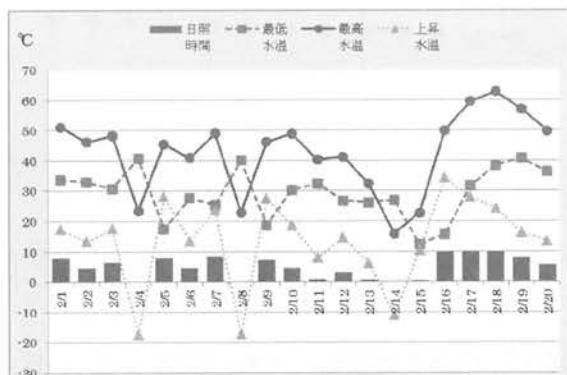


図 3.3.10 連続記録データ (日照時間との突合)

表 3.3.3 連続記録データの集計 (2月1日~20日)

日付	曜日	最低水温						最低気温						最高水温						最高気温						気象庁 過去の天気(所沢・練馬の平均)							
		時刻	最低水温	時刻	最低気温	時刻	最低温度差	時刻	最高水温	時刻	最高気温	時刻	最高気温	時刻	最高水温	時刻	最高気温	時刻	最高温度差	上昇水温	降水量	平均気温	最高気温	最低気温	風向き	風速	日の出	日の入り	日照時間				
2014/2/1	土	8:55	33.78	6:40	-0.13	9:45	29.99	16:00	51.1	15:20	12.4	20:00	39.6	17:32	0	4.85	11.65	-0.3	西北西	11	6:40	17:12	8										
2014/2/2	日	9:30	32.91	0:35	3.09	18:10	24.81	16:45	46.18	15:35	14.33	0:35	38.17	13:27	0	6.55	13.5	2.4	西北西	0.85	6:40	17:13	4.55										
2014/2/3	月	9:00	30.72	6:25	1.32	11:05	22.44	16:00	48.3	15:40	18.63	0:00	33.91	17:58	0	9.2	17.9	2.05	北北西	1.2	6:39	17:14	6.45										
2014/2/4	火	0:00	40.87	23:00	-0.94	23:35	24.14	23:55	29.46	0:05	10.41	0:00	30.55	-17.41	6.75	3.2	9.95	-1.4	北	3.3	6:38	17:15	0										
2014/2/5	水	8:35	17.42	5:20	-3.35	9:05	18.08	16:45	45.45	14:40	5.17	16:55	42.64	28.03	0	-0.25	3.45	-2.55	北	4.6	6:37	17:16	8.1										
2014/2/6	木	9:05	27.59	1:05	-1.64	9:20	26.31	14:25	40.95	13:40	6.21	0:00	38.17	13.36	0	0.95	4.65	-2.5	北	3.9	6:36	17:17	4.55										
2014/2/7	金	8:30	25.32	5:40	-0.1	9:05	23.44	16:15	48.94	14:10	7.59	16:50	42.54	29.62	0	2.55	6.55	-0.95	北	3.25	6:35	17:18	8.5										
2014/2/8	土	0:00	40.13	6:40	-1.75	23:55	21.51	23:55	22.83	0:20	2.69	0:00	37.66	-17.3	35.5	-0.8	2.3	-2.25	北北西	5.1	6:34	17:19	0										
2014/2/9	日	7:55	18.63	2:40	0.99	8:40	14.07	16:55	46.17	13:35	10.83	18:26	39.16	27.54	0.25	3.9	8.25	0.55	北	3.45	6:33	17:20	7.2										
2014/2/10	月	8:40	30.37	7:30	1.15	11:00	26.46	16:15	48.91	14:55	8.88	17:45	42.45	18.54	0	3.7	7.8	0.8	北北西	2.55	6:32	17:21	4.5										
2014/2/11	火	8:25	32.34	7:05	1.66	23:55	30.42	15:35	40.32	14:45	5.3	0:00	36.96	7.98	0	2.2	4.15	0.7	北北東	3.9	6:31	17:22	0.65										
2014/2/12	水	8:25	28.69	23:40	-0.01	8:40	23.33	15:25	41.25	14:20	8.48	20:05	34.31	14.56	0	3.05	6.9	-0.45	北	3.35	6:31	17:22	3										
2014/2/13	木	9:10	26.1	5:25	-1.71	11:15	21.95	15:35	32.23	14:50	8.54	0:15	33.29	6.13	0	2.85	7.3	-1.75	西南西	1.15	6:30	17:23	0.55										
2014/2/14	金	0:00	26.91	23:35	-0.52	23:55	16.27	23:55	15.84	0:00	3.85	0:05	23.07	-11.07	37.75	0.15	3.15	-0.85	北	4.25	6:29	17:24	0										
2014/2/15	土	10:10	12.44	0:00	-0.4	11:05	8.68	16:05	22.7	13:45	7.81	18:30	17.45	10.26	61.5	3.65	6.85	-0.7	北北西	5.35	6:28	17:25	0.35										
2014/2/16	日	8:35	15.57	20:30	0.96	8:55	8.65	16:50	49.85	10:10	10.44	18:20	44.5	34.28	0	6	9	2.35	北	5.05	6:27	17:26	9.75										
2014/2/17	月	8:30	31.61	6:20	-1.74	9:40	27.43	16:45	59.44	14:30	12.26	17:15	52.83	27.83	0	4.9	11.7	-0.25	北	3.75	6:26	17:27	10.05										
2014/2/18	火	8:35	38.43	23:55	0.83	8:40	35.51	16:50	62.73	15:00	7.12	17:05	57.69	24.8	0	2.65	6	0.3	北	5.5	6:25	17:28	9.85										
2014/2/19	水	8:20	40.73	6:10	0.53	9:30	38.14	16:45	56.92	14:40	7.69	17:15	50.58	16.19	0	2.6	6.25	0.05	北	4.65	6:24	17:29	8										
2014/2/20	木	8:45	36.31	6:45	-2.46	9:35	35.66	15:25	49.88	15:05	6.83	0:00	45.62	13.37	0	2.05	5.8	-2.55	北	1.5	6:23	17:30	5.5										

集計の結果、この期間に良好な日照があった日は2月17日であり、気象庁によるこの日の日照時間は、10.05時間であった。この日の測定データを一例として以下に報告する。まず、2月17日の24時間の水温状態を、図3.3.11に示す。9:15~16:15まで安定した水温上昇が確認できた。

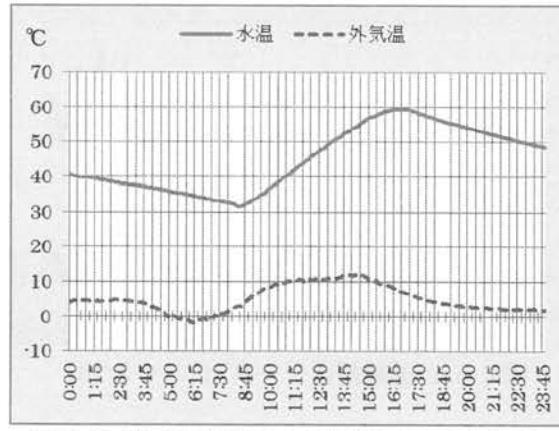


図 3.3.11 24 時間の水温状態 (2月17日)

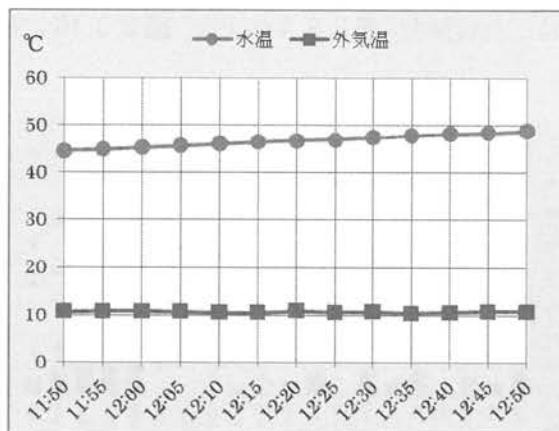


図 3.3.12 外気温安定時の集熱状況 (2月17日)

つぎに、本集熱性能測定において外気温変動の影響を避けるため、外気温が安定した時間帯のデータを有効として扱う必要があるが、この日の11:50~12:50の間が、これに該当すると判断した。外気温安定時の集熱状況を、図3.3.12に示す。

結果として、貯湯タンク内の水が11:50~12:50の1時間で、44.6°Cから48.8°Cと、4.2°C上昇したことが確認できた。したがって、集熱量は172 kJであった(3/14 時点の貯湯タンク内の水は蒸発等の影響により 9.75 kg であったので、9.75 kg を計算に用いた。比熱は4.2J/g·Kとした)。

3)天候と単体性能 天候と単体性能との関係について解析した。図3.3.13に一連の測定期間の内①2月3日、②2月15日、③2月17日の全天日射量および直達日射量を示す。

①2月3日は晴れているが雲もあり(参照 図3.2.4)，日射量が頻繁に変化している。全天日射量が直達日射量の変化に追随しているため、全天日射量の変化は主として雲の影響と考えられる。また、②2月15日は、東京における歴史的な積雪(2月14日)の翌日であり、直達日射量が少ない日である。また③2月17日は雲が少なく(参照 図3.2.4)，太陽が降り注ぐ日であった。

表3.3.5に3日間の日射量、真空管ヒートパイプへの日射量および貯湯タンクの集熱量を示す。

全天日射を受ける部分の面積は、真空管ヒートパイプのアルミテープが貼られていない部分(半円柱)と仮定した。また、直達日射を受ける部分の面積は半円柱、もしくは真空管ヒートパイプの

表 3.3.4 日射と真空管ヒートパイプへの日射量および貯湯タンクの集熱量

	日射量 / 10^3 kJ/m^2		真空管ヒートパイプ 1 本への日射量 / 10^3 kJ			水への集熱量		
	全天 日射	直達 日射	(a) 全天日射 半円柱	(b) 直達日射 半円柱	(c) 直達日射 投影面積	開始 / °C	終了 / °C	(d) 热量 $/ 10^3 \text{ kJ}$
① 2/3	10.4	10.4	1.19	1.20	0.76	31.2	48.3	0.70
② 2/15	7.0	0.3	0.80	0.03	0.02	12.8	22.7	0.41
③ 2/17	14.7	20.1	1.69	2.30	1.47	32.6	58.9	1.08

表 3.3.5 真空管ヒートパイプへの日射量と貯湯タンクの集熱量の比率

	比率 / %		
	全天日射 (e) = (d) / (a)	直達日射 (f) = (d) / (b)	直達日射 (g) = (d) / (c)
① 2/3	59	59	92
② 2/15	51	—(*)	—(*)
③ 2/17	64	47	74

(*) 比率 > 100

長手方向の断面積（投影面積）と仮定した。また貯湯タンクからの熱流出は無視できるものと仮定した。地面に対し傾き 60° で設置された真空管ヒートパイプへの上記 3 日間の直達日射は、太陽高度計算¹⁵⁾より直達日射量（実験値）の 0.95~1.00 倍であったので、計算上無視できるものとした。

解析の結果、表 3.3.4 の 2 月 15 日のデータが示すとおり貯湯タンクの水の温度は上昇しており、直達日射がほとんどない状態（主として散乱日射）であっても集熱されることを示唆している。

表 3.3.4 を元に真空管ヒートパイプの集熱性能（単体性能）試算した（表 3.3.5）。2 月 15 日はほぼ散乱日射がメインとなる日であるが、測定日の差が無視でき、直達日射および散乱日射の熱エネルギーへの変換がほぼ同等と仮定すると、本研究で使用した真空管ヒートパイプは、日射（直達日射、散乱日射）の約 50%以上を熱エネルギーとして取り出しができているものと推察される。

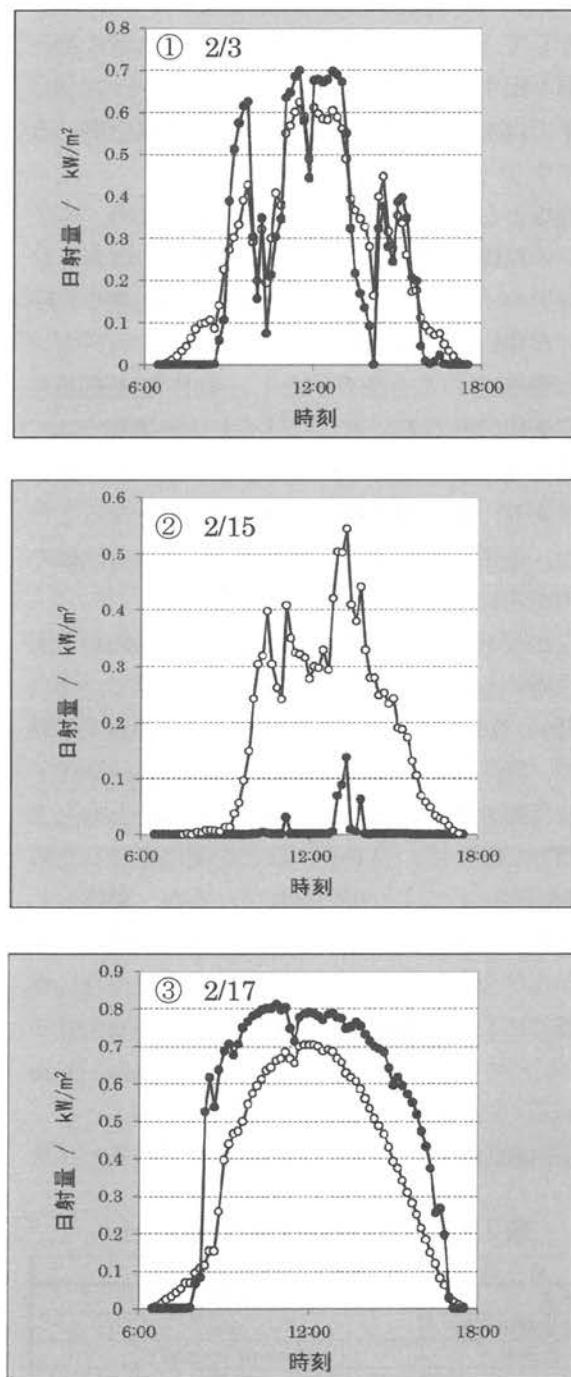


図 3.3.13 全天日射量（○）および直達日射量（●）

3.4 膨張機

3.4.1 概要 热発電に用いられる膨張機は火力発電所で用いられているタービン式のものが一般的であるが、本研究では太陽光を集光せずに集熱を行うこととしているため、タービンを勢いよく回転させるだけの高温高圧の水蒸気やガスを発生させることは難しい。タービン方式で熱媒ガスの流速が少ない場合は、タービンの翼を回転させる仕事を果たさずに、翼の間をすり抜けてしまうガスの割合が多くなってしまう。そのため、熱媒の流量が少ない状態では流速型の膨張機では効率を上げ難くなってしまう。

一方、膨張機の逆の働きをする圧縮機では容積型が良く用いられており、ベーンポンプ（図3.4.1）やスクリューポンプ、スクロールポンプ、ギヤポンプなどさまざまな形式のものが実用化されており、可変容量型ポンプなど用途に応じた機能を持ったものも製品化されている。この圧縮機と膨張機は可逆的な動作である場合がほとんどで、逆の動作をさせることにより、圧縮機となったり膨張機となったりすることができる。車のエンジンなどは、圧縮工程と膨張行程を持つ典型的な例である。しかし、この車の両方の働きをする車のエンジンを除くと、容積型の膨張機はあまり利用されておらず、圧縮機ほど多様な使われ方もされ

ていない。しかし、最近では研究段階のものを含めると、バイナリー発電用の膨張機としてスクロール式やベーン式、スクリュー式、ロータリー熱エンジン式など多様な膨張機が用いられるようになってきている。

3.4.2 膨張機の調査

1) 使用する熱媒の選択 太陽熱温水器の温水など100°Cより低い熱源を利用して発電を行う場合、熱媒として一般的な水では沸点が高く、エネルギーを取り出すことが困難となってしまう。そのため、近年では水よりも低い沸点を持った熱媒を用いるバイナリー発電が注目されている。

熱媒としてはオゾン層の破壊を防ぐため、エアコンの冷媒と同様、代替フロンの一種で塩素を含まないハイドロフルオロカーボン（以降、HFCと呼ぶ）が用いられる場合が多い。しかし、エアコンでは熱を運ぶことを目的とし、動作温度範囲も20°C近辺であるのに対し、バイナリー発電では、容積変化によってエネルギーを取り出すことが目的であり、動作温度範囲も60~200°Cとなることから、使用されるHFCも冷凍機とは異なる仕様のものが用いられているようである。

なかでもHFC-245faは、研究段階のものから実用段階のものまで広く使われている熱媒で、沸点が低い（15.3°C／大気圧時）にもかかわらず不燃性で、低圧ガス（飽和水蒸気圧：約1MPa／90°C）として取り扱い可能なため扱い易い。もともとのHFC-245faは、ウレタンなどを発泡させるための発泡剤としてよく用いられているが、熱媒としての利用は近年のバイナリー発電研究が進んできてからであり、熱媒としての情報がまだ少ない点が難点である。表3.4.1にHFC-245faの安全性データシート（MSDS：Material Safety Data Sheet）に記載された概要を記す。

2) 膨張機の選択 現在、製品化されているバイナ

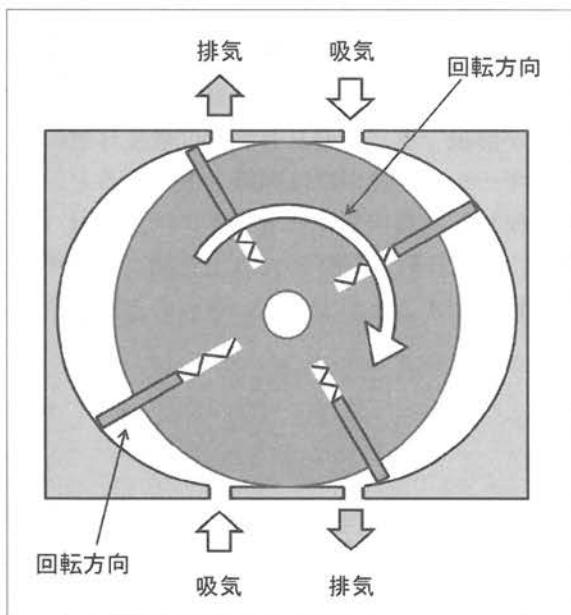


図3.4.1 ベーンポンプ

表3.4.1 HFC-245faの安全性シート

項目	適用
化学式	CF ₃ CH ₂ CF ₂ H
地球温暖化係数	950
ガス伝導率	13.86mW/m·K(50°C)
沸点	15.3°C
燃焼範囲	不燃
化学的安定性	○
その他	低圧冷媒のため、資格者が必要なし

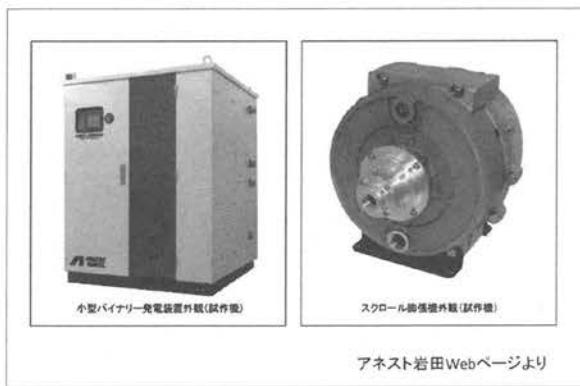


図 3.4.2 スクロールを使用した発電装置の例

リーアー発電システムとしては、容積型膨張機であるスクロール膨張機を使用したもの（図 3.4.2）や流速型の膨張機であるタービン式膨張機を使用したもの（図 3.4.3）があり、容積型はガス化した熱媒を閉じた空間に閉じ込めたまま容積を膨張させて行くため、少ないガスでも確実にエネルギーを取り出せるのに対し、流速型はガスの流量が比較的大きい場合にその性能を発揮する。両者の中間に位置するのが半密閉スクリュータービンを使用したもの（図 3.4.4）で、スクロールのように完全に密閉した空間を作るのではなく、2つのスクリューの噛み合わせ点が高圧側と低圧側を遮り、その噛み合わせ点が低圧側に連続的に移動することを繰り返すことによって、動力を取り出す膨張機である。

それぞれ方式は違うものの熱媒には HFC-245fa を使用し、高温側の温水温度が 70~95°C、低温側の冷水が 10~30°C 近辺となっていて、出力は小さいもので 3kW、大きなものでは 125kW のものが実

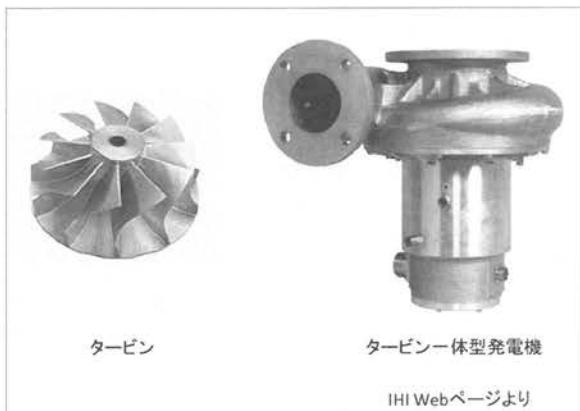


図 3.4.3 タービンを使用した発電装置の例



図 3.4.4 スクリューを使用した膨張機の例

用化されている。

タービン式とスクリュータービンはどちらも形状も複雑で、高度な設計技術と 5 軸加工機を用いた高度な加工技術が要求される。そのため、製造コストが高くなり、比較的大きな出力が出せる仕様でないと価格的な釣り合いが取れなくなってしまう。本研究では 1kW と小規模な発電を対象としているため、設計製作が比較的容易であるにもかかわらず、高性能化がしやすいスクロール膨張機に注目するとともに、一般的な旋回式スクロールと回転式スクロール膨張機に関してその幾何学的機構について検討した。

3) 旋回式スクロールと回転式スクロール
スクロール膨張機に使われる螺旋状の曲線は、図 3.4.5 に示す通り基礎円と呼ばれる円に巻きつけ

$$x = a(\cos\phi + \phi\sin\phi) \cdots \text{(式3.4.1)}$$

$$y = a(\sin\phi - \phi\cos\phi) \cdots \text{(式3.4.2)}$$

た糸を振りほどいて行く時の糸の先端の軌跡で、

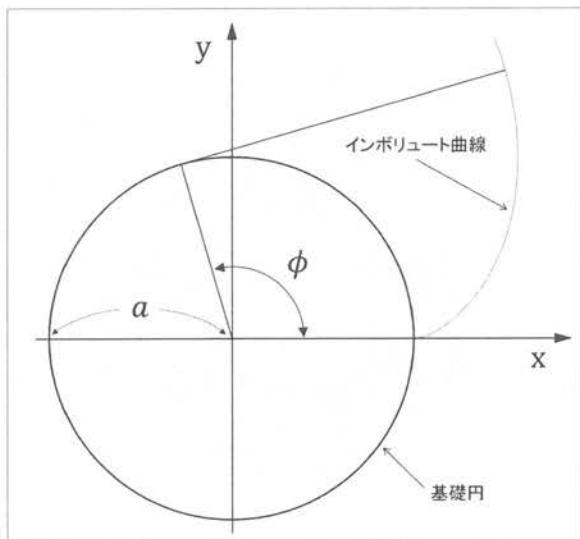


図 3.4.5 インボリュート曲線

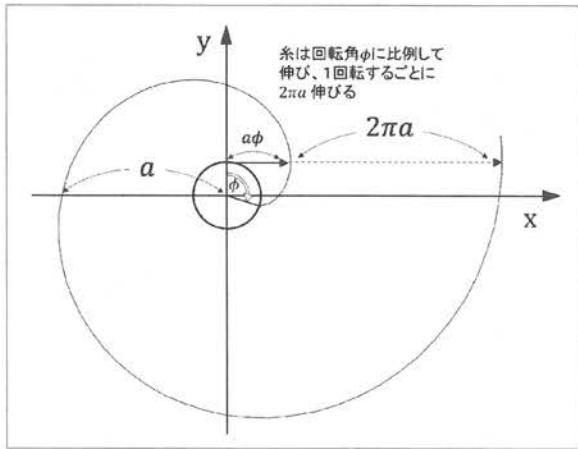


図 3.4.6 糸を水平に伸ばした時の軌跡

インボリュート曲線と呼ばれ、基礎円半径を a 、インボリュート曲線の振りほどき角を ϕ とすると、曲線の式は式 3.4.1 および式 3.4.2 で示される ϕ を媒介変数とする数式で表される。同じ動作を今度は糸を振りほどくのではなく、糸巻きから直線的に糸を伸ばして行くことを考えると、図 3.4.6 に示す通り糸巻きの回転角 ϕ に比例して、糸の先端が伸びて行くことがわかる。つまり糸巻きの接線方向伸ばした直線はインボリュート曲線と糸巻きの 1 回転分の間隔 ($2\pi a$) でインボリュート曲線と交差することになる。スクロール同士をこの 1 ピッチ分ずらして重ね合わせると、必ずこの点で噛み合うこととなり、いくつかの閉じた空間を作り出すこととなる（図 3.4.7）。膨張機と圧縮機とではこの空間の移動方向が違うだけで、幾何学

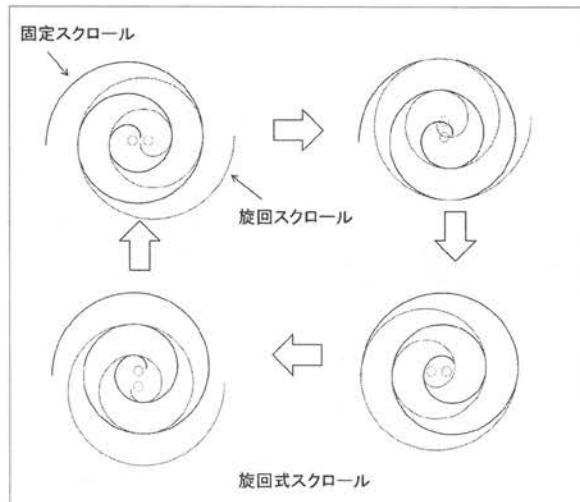


図 3.4.8 旋回式スクロール

的な原理は両者とも同じである。

図 3.4.8 に一般的な旋回式スクロールの動作を示す。旋回式スクロールは固定スクロールと旋回スクロールの二つのスクロールの組み合わせとなり、どちらも同じ形状をしているが、固定スクロールはケースなどに固定されたまま動かず、その固定スクロールの中心を旋回中心として、旋回スクロールが位相を変えずに旋回運動を行う。その時の旋回半径は $a\pi$ で表され、実際の旋回式スクロールではクランク機構によって旋回運動を行う。このとき、旋回スクロールと固定スクロールとの摩擦により、旋回スクロールを自転させる力が発生してしまうため、オルダムカップリングなどを用いて、旋回スクロールが自転するのを防ぐ必要がある。旋回スクロールと固定スクロールによっ

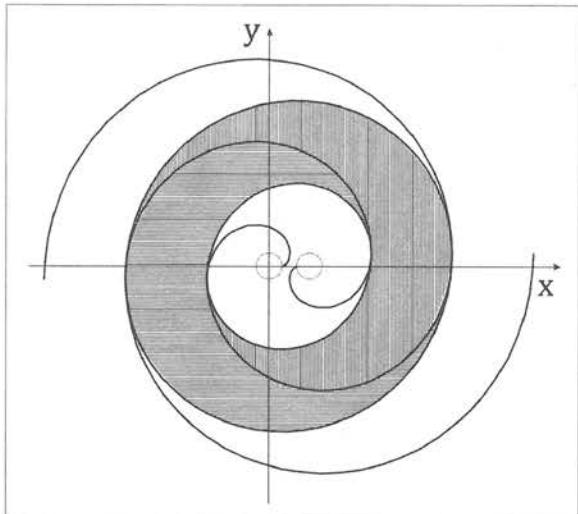


図 3.4.7 スクロールによる閉じ込み空間

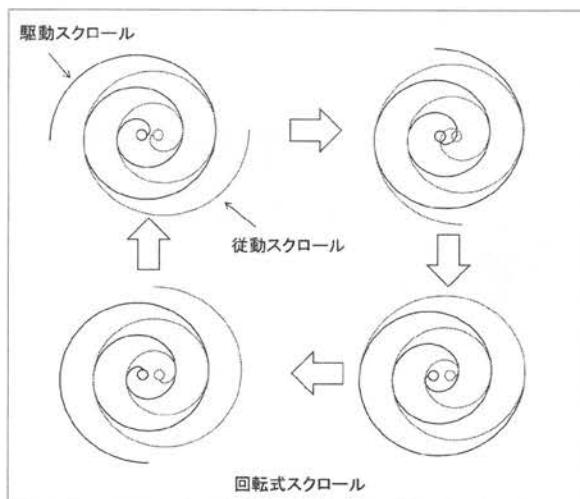


図 3.4.9 回転式スクロール

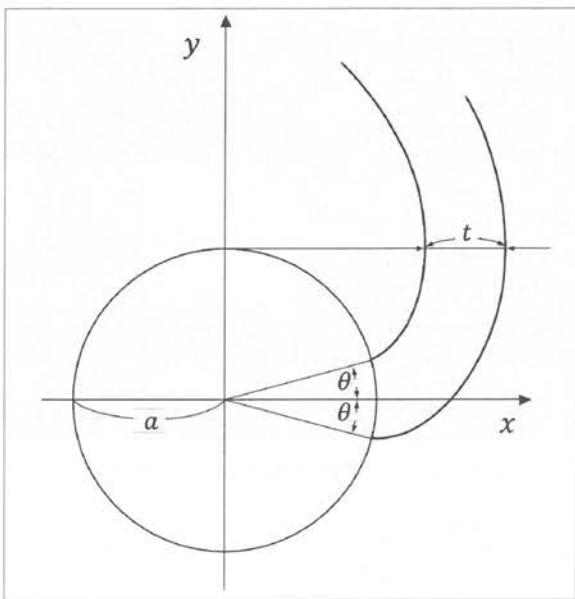


図 3.4.10 厚みのあるインボリュート曲線

て閉じられた空間は、旋回スクロールの旋回運動に合わせて旋回しながら外周へと移動し、その容積を膨張させて行く。この旋回式スクロールは、エアコンのコンプレッサーなどにも良く用いられており、静肅性が高く、効率が良いことで知られている。

このスクロール形状はもともと歯車で良く用いられるインボリュートカーブであるから、歯車と同じような噛み合い回転をさせることも可能で、図 3.4.9 に示す通り、2 つのスクロール形状は噛

み合うように同じ方向へ回転する。その時の噛み合い状態は、内歯車の中で回る小歯車の歯面の関係と同じである。この時、熱媒ガスの膨張によつて駆動させられるスクロールを駆動スクロール、オルダムカップリングなどの同期機構を介して駆動スクロールより駆動力を与えられて熱媒ガスの膨張に逆らうように回転するスクロールを従動スクロールと呼ぶこととする。

2 つのスクロールで形成された閉じ込み空間は、旋回式スクロールと同様、内側から外側へと移動しながら容積を膨張させて行くが、回転式スクロールでは、閉じ込み空間は内から外へ直線的に移動する。そのため吐出するガスに与える運動エネルギーは、半径方向の移動速度に旋回半径速度が加わる旋回式スクロールよりも小さくなるものと考えられ、その分、膨張機の効率が良くなることが期待される。

実際のスクロール膨張機では、インボリュート曲線の部分に厚みを持たせる必要がある。旋回式スクロール圧縮機に関してすでに詳しい解析結果¹⁶⁾があるので、ここでは回転式スクロールの関する数式のみを記述する。

図 3.4.10 に示す通り、基礎円半径を a 、スクロールの壁の厚みを持たせるためのシフト角を θ とし、インボリュート曲線の振りほどき角を ϕ とすると、その時のインボリュート曲線の式は、 ϕ を媒介変数とする式 3.4.3 および式 3.4.4 で表される。ただし、式の中の t は 2 つの曲線を表す。また、その時の壁の厚み t は同じく図 3.4.10 より式 3.4.5 で表される。よって、回転式スクロール

$$t = 2a\theta \dots \text{(式3.4.5)}$$

の駆動スクロールの回転角度を ω とすると、式 3.4.3 と式 3.4.4 に ω の回転行列を掛けた式となるから、式 3.4.6 および式 3.4.7 となる。また、

$$x = a\{\cos(\phi \pm \theta) + \phi \sin(\phi \pm \theta)\} \dots \text{(式3.4.3)}$$

$$y = a[\sin(\phi \pm \theta) - \phi \cos(\phi \pm \theta)] \dots \text{(式3.4.4)}$$

その駆動スクロールと接する従動スクロールは、図 3.4.11 に示す駆動スクロールに接する厚みのあるインボリュート曲線に ω の回転行列を掛けたものであるから、式 3.4.8 および式 3.4.9 となる。

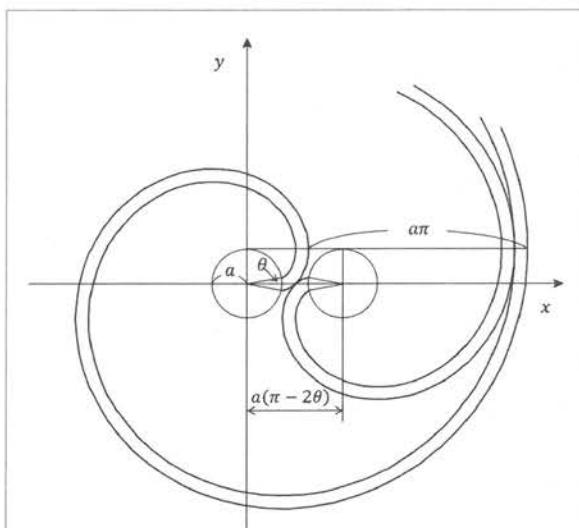


図 3.4.11 駆動スクロールに接する従動スクロール

$$x = a \{ \{ \cos(\phi \pm \theta) + \phi \sin(\phi \pm \theta) \} \cos(\omega) - \{ \sin(\phi \pm \theta) - \phi \cos(\phi \pm \theta) \} \sin(\omega) \} \dots \text{(式3.4.6)}$$

$$y = a \{ \{ \cos(\phi \pm \theta) + \phi \sin(\phi \pm \theta) \} \sin(\omega) + \{ \sin(\phi \pm \theta) - \phi \cos(\phi \pm \theta) \} \cos(\omega) \} \dots \text{(式3.4.7)}$$

今回は一条のスクロール膨張機の計算式を求めたが、二条スクロールやそれ以上のスクロールに

$$x = a \{ \{ \cos(\phi + \theta) + \phi \sin(\phi \pm \theta) \} \cos(\omega + \pi) - \{ \sin(\phi \pm \theta) - \phi \cos(\phi \pm \theta) \} \sin(\omega + \pi) + \pi - 2\theta \} \dots \text{(式3.4.8)}$$

$$y = a \{ \{ \cos(\phi \pm \theta) + \phi \sin(\phi \pm \theta) \} \sin(\omega + \pi) + \{ \sin(\phi \pm \theta) - \phi \cos(\phi \pm \theta) \} \cos(\omega + \pi) \} \dots \text{(式3.4.9)}$$

についても同様に求めることができる。

本実験に使用するスクロール膨張機は、圧力相殺型とするために、二条スクロールタイプを用いている。今回試作した回転式スクロール膨張機の主な仕様を表3.4.1に示す。

圧力を高めた熱媒のガスから効率良く動力を取り出すためには、膨張比を大きく取って、十分ガスを膨張させることができると有効であるが、システム動作開始直後など冷間時には、膨張過程の途中で、熱媒ガスが液化・縮小してしまい、膨張機がうまく回らなくなる可能性が出てくる。そのため、今回は膨張比を2倍と小さめの値を取ることとした。太陽熱発電では日射の状況により、熱媒の温度が大きく変化してしまうので、今後は、冷間時にはクリアランスを大きくするなどして、暖機運転ができるようにする必要があるものと思われる。

4) 回転実験 試作した膨張機を図3.4.12に示

表3.4.1 回転式スクロール概略仕様

	項目	備考
使用温度範囲	20~80°C	
入口圧力	0.3~0.6 MPa	
軸出力	1kW	
回転数	3000~4000rpm	
吸込容積	24 cc/rev	3000rpm時
膨張容積比	約2倍	
使用冷媒	HFC-245fa	要潤滑油

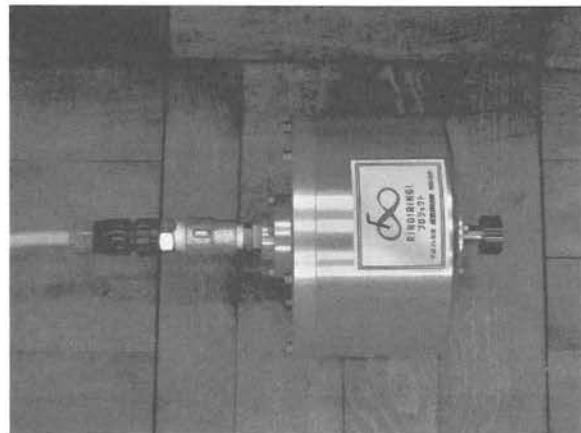


図3.4.12 回転式スクロール膨張機

膨張機の直径は170mmで、厚みは約140mmある。一般的な旋回式スクロールの回転数は、2,000~3,000rpmぐらいの回転数までしか回すことができないが、この回転式スクロール膨張機は定格が3,000~4,000rpmであり、その時の軸出力が1kWとなるように設計されている。実際に4,000rpmで回すことができるか調べるために、まず、圧縮空気によって回転させる実験を試みた。本発電システムで使用するHFC-245faは、90°Cの時の飽和水蒸気圧力がおよそ1MPaとなり、工場でよく使われている圧縮空気の圧力とほぼ同じである。そこで、エアコンプレッサーとスクロール膨張機をつなぎ、デジタル式の回転計を膨張機のスピンドル先端に押し当てた状態で、徐々にコンプレッサーのバルブを開けて、回転の状況を確認した。また、高速で回転させるため潤滑油が必要となるが、今後使用する熱媒であるHFC-245faと親和性が高いことからSL-200S（日本サン石油株）を、膨張機内に少量滴下した後、低速で回転させて潤滑油が十分膨張機内に回るようにした後に実験を行った。

実験の結果、3,000rpmまでは、問題なく回転することができたが、3,000rpm以上になると大きな振動が発生してしまい、しっかりと振動を抑えながらでないと4,000rpmで回すのが難しい状態であった。今回は試作機であり、それぞれのスクロールの動バランスは取っていない状況とはいえ、最近の加工機の加工精度であれば、通常はこのような大きな振動は起きないはずである。旋回式スクロールでは旋回スクロールの自転を防止するため、回転式スクロールでは、駆動スクロールと從

動スクロールの同期を取るために、オルダムカップリングが良く用いられているが、本装置でもオルダムカップリングが用いられており、特に回転式スクロールにおいては、オルダムカップリングの十字型のレールが、駆動スクロールの回転中心と従動スクロールの回転中心の間を往復運動するため、その振動が外部に伝わってくるものと思われる。今後は、オルダムカップリングの軽量化や、オルダムカップリングを用いない同期方法を検討する必要があるものと思われる。

3.4.3 まとめ 本節においては近年普及が進んできたバイナリー発電に用いられている膨張機について調査を行った。その結果、スクロール膨張機は製造が容易なため数 kW 程度の比較的出力が小さな領域において有利であると考えられる。これは、二重ガラス管ヒートパイプ方式の太陽熱温水器で数十台並べて使う場合に相当し、蓄熱などを用いるとなると、さらに数倍の台数が使えることになることから、この方式の太陽熱発電システムには適した膨張機であると考えられる。また、今後さらなる効率化を図るために、膨張機の膨張比を大きくする必要があるが、太陽熱発電は朝夕の出力低下や、曇天時や雨天による出力低下が頻繁に起きるため、熱媒が膨張機内で液化してしまうリスクが高くなってしまう。今後は膨張機のクリアランス調整や、暖機運転の方法などを検討する必要があることが判明した。

実際に行った回転実験では、大きな振動が発生したため、安定した発電を行うためには、オルダ



図 3.5.2 太陽熱温水システム

ムカップリングの軽量化や、振動を生じさせない同期方法の検討が必要である。

3.5 発電実験

開発した国内立地適合太陽熱発電システムの性能評価のため、発電実験を行った。

本発電実験は、アルバック理工(株)の協力を得て、同社の可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft と、本研究で開発した太陽熱温水システムとを接続した構成で行うことにより、太陽熱温水システムの実証を行うことを主眼に行った。

本節では、本発電実験の概要、実験結果、およびまとめについて報告する。

3.5.1 概 要 本発電実験の概要として、実験システムの構成、構成要素である太陽熱温水システムおよびアルバック理工(株)社製可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft の概要について示す。

まず、実験システムの構成は、図 3.5.1 に示す

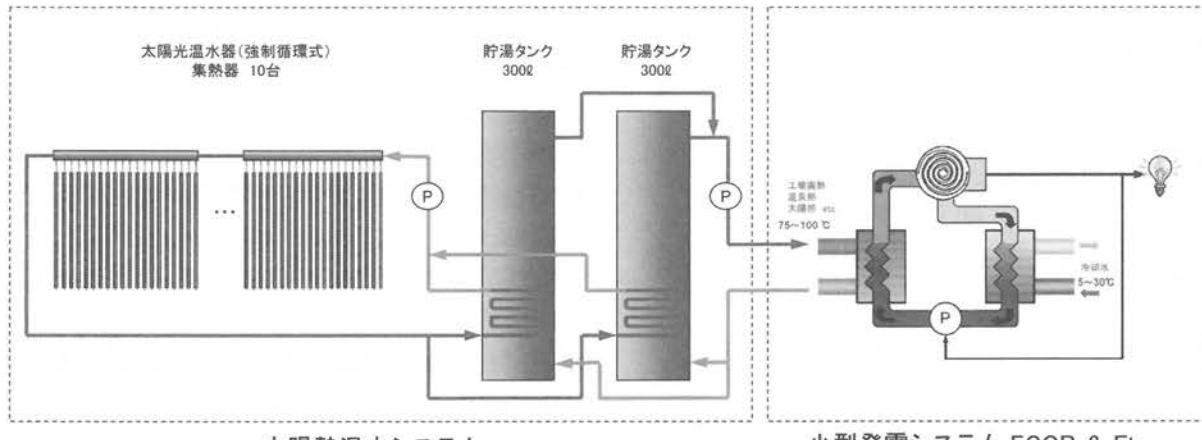


図 3.5.1 実験システムの構成¹⁾



図 3.5.3 可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft

通り、太陽熱温水システムと可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft から成る。

つぎに、構成要素である太陽熱温水システムは、FUJISOL 社製（スペイン）真空管ヒートパイプを 20 本設置した集熱器を 10 台設置し、太陽からの投影方向の集熱面積をカタログ値で合計 20.13 m² 確保した。集熱器で熱せたれた媒体である水は、ポンプによる強制循環により 300ℓ 2 台、合計 600 ℓ の貯湯タンク内で熱交換され、タンク内の水を加熱した後、再び集熱器に戻される。本太陽熱温水システムの外観を図 3.5.2 に示す。

さらに、もう一つの構成要素であるアルバック理工㈱社製可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft は、アルバック理工㈱からの借用によるものである。本システムは、工場廃熱、大型自動車や船舶の廃熱、温泉熱、小型焼却炉の廃熱などを利用する小型の発電機で、75℃～100℃の毎分 50ℓ の温水と、5℃～30℃の毎分 50ℓ の冷却水を供給することで、温水と冷却水の温度差を利用し、温度差 70℃ で最大 3kW 級の発電が可能な装置である。本可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft の主な仕様を、表 3.5.1 に、外観を図 3.5.3 に示す。

太陽熱温水システムと可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft との温水に関する接続は、図 3.5.1 に示す通り、太陽熱温水システムの貯湯タンク上方に設けた温水取出口と可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft の温水入口とを接続して ECOR-3-Ft に給湯し、可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft の温水出口を太陽熱温水システムの貯湯タンク下方に設けた温水戻り口に接続して ECOR-3-Ft からの戻

表 3.5.1 ECOR-3-Ft の仕様¹⁷⁾

温水の温度範囲	75℃～100℃
冷却水の温度範囲	5℃～30℃
出力電圧	AC202V
定格出力	1kW～3kW

り湯を貯湯タンクに戻すことにした。貯湯タンクの温水取出口を貯湯タンク上方に設けた理由としては、より高温の温水を取出可能とするためである。また、循環用には、約 80/l 分の流量が確保可能となるような循環ポンプを設けた。また、可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft の冷却水に関する接続については、水道を可搬型小型発電システムの冷却水入口に接続して水道水を供給することとした。

3.5.2 実験結果 本実験システムを活用し、発電実験を実施した。発電実験は、2013 年 11 月下旬から 2014 年 1 月下旬の間の任意の日に、合計 8 回実施した。その結果、図 3.5.4 に示す通り、約 1.0 kWh～約 1.2 kWh の発電が可能となった。この 8 回の実験結果について、2014 年 1 月 22 日の実験結果を一例とした場合の諸条件の詳細と、合計 8 回の実験結果を俯瞰的に見た場合の諸条件の違いなどについて報告する。

まず、2014 年 1 月 22 日の実験結果を一例とした場合の諸条件の詳細について報告する。図 3.5.5 が同日の実験結果であり、発電電力としては、約 1 時間にわたり、約 1.2 kWh の発電が可能であった。その際の諸条件は以下の通りである。その際の太陽熱温水システムからの給湯温度 (TW1) は、約 90℃ であり、可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft からの戻り湯の温度 (TW2) は約 60℃ で、温度差約 30℃ の条件であった。温水の流量 (FM2) が約 80/l 分であったので、1 時間あたりの熱量は約 60.25 MJ/h となる。また、可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft の冷却水については、給水側 (TW3) が約 7℃、排水側 (TW4) が約 17℃ で、その温度差が約 10℃ であり、流量 (FM3) は約 230/l 分であった。実験を行った約 1 時間の間では、これらの値は安定的であり、その様子を図 3.5.6、3.5.7 に示す。

つぎに、2013 年 11 月下旬から 2014 年 1 月下旬の間に合計 8 回実施した実験結果を俯瞰的に報告

する。合計8回の実験における発電量は、すでに報告した通り、約1.0 kWh～約1.2 kWhであった。これら実験結果における太陽熱温水システムからの給湯温度(TW1)は、図3.5.8の通り、約85～90°Cで、いずれも約8l/minの流量であり比較的安定的な給湯が可能であった。一方、冷却水については、図3.5.9の通り、2013年11月下旬から2014年1月下旬にかけて水温が約13°Cから約7°Cまで低下したもののが図3.5.10の通り流量については安定的に約23l/minで供給した。この冷却水の温度変化は、冷却水として公共水道を直接使用していることによる外気温変化によるものと思われる。図3.5.10は、給湯温度(TW1)と冷却水温度(TW3)の差を示したもので、図3.5.9とをあわせて観察すると、理論上給湯温度(TW1)と冷却水温度(TW3)の差に比例した発電量が得られるはずであるが8回の実験の際の温度差75～85°Cの範囲では顕著な発電量の差異は見受けられず、ばらつきの範囲と示唆する。

3.5.3まとめ

開発した国内立地適合太陽熱発電システムの性能評価のため、アルバック理工㈱製可搬型小型発電システムECOR-3-Ftと、本研究で開発した太陽熱温水システムとを接続した構成による発電実験を行った。

実験は、2013年11月下旬から2014年1月下旬の間に、合計8回行い、約1.0 kWh～約1.2 kWhの発電が可能となった。8回の実験において、本研究で開発した太陽熱温水システムは、約85～90°Cで、いずれも約8l/minの流量の安定した給湯が可能であった。一方、冷却水は水道水を使用したため、約13°Cから約7°Cまでの温度変化があつたが、これによる給湯温度(TW1)と冷却水温度(TW3)の差75～85°Cの範囲では顕著な発電量の差異は見受けられず、比較的安定的な発電が可能となつた。また、実験で使用した発電機が市販予定のアルバック理工㈱製可搬型小型発電システムECOR-3-Ftであることから、同社との連携による研究成果の実活用も期待できる。

ただし、今回の実験は、2013年11月下旬から2014年1月下旬の間の限定的な季節での実験であったため、そのためには今後通年にわたる長期的な発電実験や、給湯側や冷却水側の温度や流量な

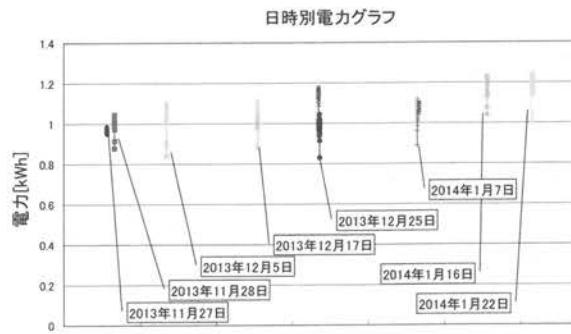


図3.5.4 日時別発電結果



図3.5.5 時刻別発電結果
(2014年1月22日)

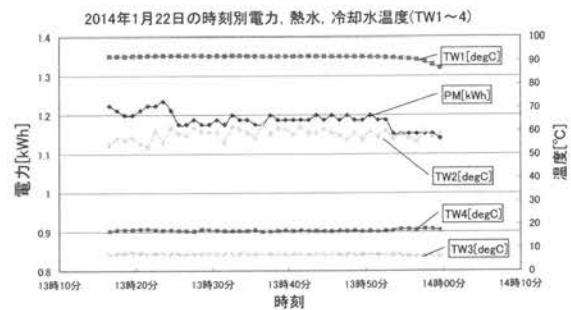


図3.5.6 電力、熱水・冷却水温度の結果
(2014年1月22日)

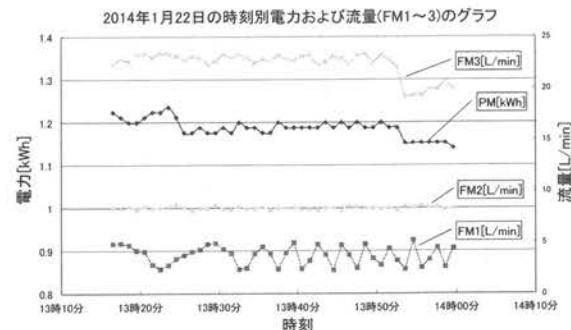


図3.5.7 電力、流量の結果
(2014年1月22日)



図 3.5.8 日時別温水温度の結果

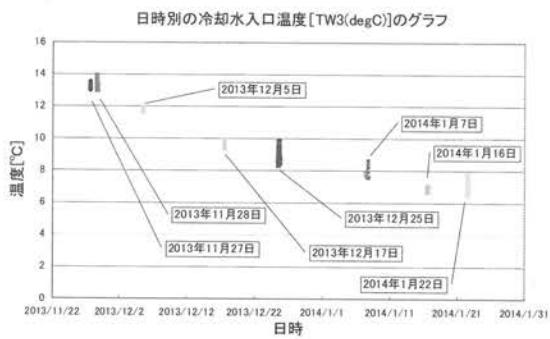


図 3.5.9 日時別冷却水温度の結果

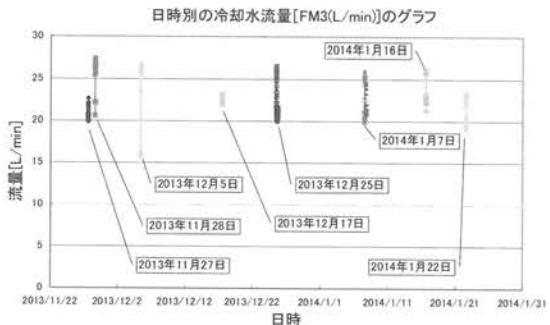


図 3.5.10 日時別冷却水流量の結果

どの諸条件を変えて多角的な視点での検証が必要である。

また、今回の実験で使用した小型発電システム ECOR-3-Ft の他に、さらに回転式スクロールを用いた発電システムによる発電実験も計画中であり、実用化を進める上での選択肢を増やす予定である。

参考文献

- 1) 叡智の飛翔 NEDO20 年史 : 2000 年 9 月, (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- 2) 再生可能エネルギー技術白書 : 2010 年 7 月,
- 3) FAO AQUASTAT
- 4) 塚田 ; 三井造船技報, No. 204 (2011) P27
- 5) 安藤 他 ; 三井造船技報, No. 206 (2012) P7
- 6) 森 他 ; コニカミノルタテクノロジーレポート Vol. 9 (2012) P9
- 7) (株)三鷹光器 Web ページより, 2014 年 3 月時
- 8) RIKEN NEWS No. 381, (独) 理化学研究所, 2013 年 3 月 5 日
- 9) (株)ダ・ビンチ Web ページより, 2014 年 3 月時
- 10) 栄弘精機㈱ ; カタログ
- 11) 栄弘精機㈱ ; 各センサ類の取扱説明書 および校正証明書
- 12) (株)太陽光 集熱器組立説明書
- 13) (株)太陽光 集熱器工事説明書
- 14) (株)太陽光 集熱器説明資料
- 15) 太陽高度の計算 :

<http://homepage3.nifty.com/ueyama/sky2/calc/sunalt.html>
- 16) スクロール圧縮機の幾何理論 : 森下悦生, 杉原正浩, ターボ機械第 13 卷第 4 号, 昭和 59 年 10 月
- 17) アルバック理工(株)製可搬型小型発電システム ECOR-3-Ft カタログ

4. 結 言

国内での立地が難しいとされる太陽熱発電であるが、本研究においては既存の太陽熱発電の調査を行い、その主な原因は太陽熱発電に利用し易い直達日射量が少ない気候にあると考察した。しかし、その一方で、熱利用発電には、冷却側の条件を満たす必要があり、この点において日本は必ずしも不利な気候とはいはず、集熱に必要な光学系の洗浄水の入手性や、電力の消費地が近くにある点も砂漠地帯と比べて有利であると考えられる。

また、実際に太陽熱発電に有利とされるサンベルト地域にある最先端の太陽熱発電施設を訪問し、現状の調査を行った。その結果、降水量の少ない同地においても雲などによる直達日射量への影響は大きく、わずかな雲が発生しただけでも太陽光を減衰させてしまうことが判明した。また、砂漠地帯特有の砂の存在は、ヘリオスタッフなどの光学系に影響を与え性能低下へつながることも明らかとなった。

以上の調査を踏まえ、国内で太陽熱発電を行うためには、今までの太陽熱発電が利用する直達日射だけでなく、年間の日射量の半分を占める散乱日射も利用するシステムが必要と考え、近年、普及が進み安価に入手できるようになった真空二重ガラス管ヒートパイプを用いた太陽熱温水器を集熱部に用いる方法を提案した。この方式で問題となるのは、高性能なこの太陽熱温水器を用いても得られる温水は80°C程度で、一般的な発電システムで用いられる、タービンによる発電を行うには十分な量の温水を確保するのが難しい点で、本研究では、低温のガスからも発電を可能とするため、容積型の膨張機である回転式スクロール膨張機を用いたバイナリー発電システムの利用を提案し、実際にシステムを構築し実験を行った。

集熱器の性能評価においては、天候観測システムを構築して、実験装置が設置されている東京都東久留米の11月～2月の冬期において、約40%の頻度で 0.4kW/m^2 の全天日射があることが確認された。また、同時期の直達日射は約50%の頻度で 0.5kW/m^2 以上であることが確認された。このような条件下で、太陽熱温水器の性能を正確に評価す

るため、太陽熱温水器の集熱管を1本だけ取り出し、断熱を十分に施した容器内の水温を測定することによって、集熱管のエネルギー変換効率を求めた。その結果、この集熱管は直達日射、散乱日射から約50%以上の熱エネルギーを得られると推察できた。

回転式スクロール膨張機に関しては、実際にバイナリー発電に適した熱媒であるHFC-245faに適応した膨張機を試作した。回転式スクロール膨張機は、その機構的な特徴から高速回転に向いていると考えていたが、内部に用いているオルダムカップリングの影響から、3,000rpm以上では大きな振動が発生し、オルダムカップリングの軽量化など今後の改良が必要と考えられた。

本研究では、試作の発電システムの他に既存のバイナリー発電システムを用いて発電実験も行い、本システムの実用性について検証を行った。その結果、本研究の目標としていた1kWhを上回る1.2kWhの発電を約1時間程度行うことができた。

太陽熱発電の今後の展開としては、現在、沖縄の企業や福祉施設より、温水の直接利用と暖房、電力利用と多目的で利用出来ないかとの問い合わせが来ており、装置メーカ等と協力して経済性や実現可能性等の検討を行っている。また、農業関連企業からは、ビニールハウス内の電力供給や暖房に利用したり、热水を利用して農機具を安全に殺菌消毒したりできないかとの問い合わせが来ている。

本方式は、電力だけでなく温水も利用出来る点が利点であると考えているので、今後とも利用できる対象を広げるための検討を行っていきたいと考えている。また、集熱器は実際に温水器として商品化されているものであり、太陽熱発電の集熱器としてもある程度の完成度に達していると考えているが、本研究で試作した膨張機に関しては、まだ改良の余地が大きい部分と考えており、さらなる高性能化を目指して改良を行っていきたいと考えている。

謝 辞 本研究は競輪の補助(25-72)を受けて実施しました。ご協力いただいたJKAに感謝の意を表します。

研究報告書

JKSK-GH25-1

国内立地適合太陽熱発電システムの開発

平成26年3月31日発行

発行所 一般財団法人 機械振興協会 技術研究所
(〒203-0042) 東京都東久留米市八幡町一丁目1番12号
電話 042-475-1155 (代表)

印刷所 株式会社 芳文社
(〒194-0037) 東京都町田市木曾西二丁目3番14号
電話 042-792-3100