終 了 報 告 書

SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「高温太陽熱供給システム」

研究題目「フレネル型集光・集熱システムの

シミュレーションシステムの開発」

研究開発期間:平成26年7月1日~平成29年6月20日

研究担当者: 安田俊彦 環境エンジニアリング研究センター長

所属研究機関:日立造船株式会社

目次

	. 本研究の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	. 研究開発目標とマイルストーン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	研究実施内容・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3-1. 反射鏡面曲げ制御方式によるフレネル型集光集熱装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	•••6
	3-2.650℃の熱源供給可能なフレネル型集光・集熱システムの検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	•••9
	3-2-1. 検討条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••10
	3 − 2 − 1 a . 日射条件····································	••10
	3-2-1 b. 外気温および風速条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3-2-1c.水素製造プロセスへの熱供給条件と熱媒体の物性値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••15
	3-2-1 d. 集光集熱装置の条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••17
	3-2-1 e. 集熱管内の熱媒体熱伝達条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••18
	3-2-2. シミュレーション検討結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3-2-2a.集光・集熱装置モジュール・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3-2-2 b. 集光集熱装置アッセンブリ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3-2-2 c. 計算方法······	
	3-2-2 d. 春分の計算結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3-2-2 e. 夏至および冬至の計算結果······	••25
	3-2-2 f. 春分条件の装置レイアウトによる集熱量の計算結果·····	
	3-3.集光集熱設備の実証案(一次)の策定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••29
	3-3-1. 実施場所の特定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3-3-2. 実証試験装置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3-4.炭酸塩系熱媒の集熱管内流れにおける検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••33
	3-4-1. 炭酸塩系熱媒の物性値推算式・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3-4-2. 集熱管内の熱媒流れに基づく検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	3-5. 委託研究の中止・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••39
	3-6. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••39
	3-7. 今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••40
	. 外部発表実績・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
5.	. 特許出願実績·····	••40
6.	. 参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	••41

図表一覧

- 図1-1 アンモニアエコノミーのイメージ図
- 図1-2 太陽熱利用型アンモニア製造システムの構成
- 図3-1 従来のフレネル型集光装置の原理
- 図3-2 反射鏡面曲げ制御方式によるフレネル型集光装置の原理
- 図3-3 集光装置設置高さの比較
- 図3-4 当機関開発の反射鏡面曲げ制御方式によるフレネル型集光装置
- 図3-5 計算対象日(春分,夏至,冬至)のDNI
- 図3-6 熱媒体の物性値
- 図3-7 集光集熱モジュールの横断面図
- 図3-8 集光集熱モジュールの平面図 (2 基接続例)
- 図3-9 アッセンブリ集合体
- 図3-10 ソーラーフィールドのレイアウト例
- 図3-11 集光集熱システムの時刻別熱供給量
- 図3-12 春分,夏至および冬至の集光集熱効率
- 図3-13 PSA (アルメリア太陽光プラットホーム) の所在地
- 図3-14 PSA における集光集熱装置外観
- 図3-15 PSA のテストループの一例
- 図3-16 実証計画案(一次)のフロー
- 図3-17 炭酸塩系熱媒 No.73 の熱物性値
- 図3-18 フレネル式集光装置のアッセンブリ概略
- 図3-19 管内熱伝達と熱媒温度の関係(熱媒流速パラメータ)
- 表1-1 高温太陽熱供給システムチーム:研究開発を行う部分と行わない部分
- 表3-1 シミュレーションで想定したプラント建設サイト
- 表3-2 プラント建設サイトで計算対象に採用した DNI データ
- 表 3 3 計算対象日の DNI (単位 W/m²)
- 表3-4 太陽位置(天頂角と方位角)
- 表3-5 プラント建設サイトの気温および風速
- 表3-6 水素製造プロセスへの熱供給条件
- 表 3 7 集光集熱装置の条件(a)反射鏡および集熱管の寸法, (b)反射鏡および集熱管の設定値
- 表3-8 集光集熱モジュールの仕様
- 表3-9 春分における1アッセンブリあたりの媒体流量と集熱量
- 表3-10 春分条件での反射鏡面積などの計算結果
- 表3-11 夏至における1アッセンブリあたりの媒体流量と集熱量
- 表3-12 冬至における1アッセンブリあたりの媒体流量と集熱量
- 表 3-13 ソーラーフィールドの時刻および日別の熱供給量[kW·hr]

- 表3-14 実証装置主要機器の仕様
- 表 3 1 5 熱物性値推算式
- 表3-16 集光集熱シミュレーションの計算条件
- 表 3-17 圧力損失の計算結果(a) DNI=1000[W/m²]の場合, (b) DNI=1000[W/m²]の場合
- 表3-18 1アッセンブリの計算結果

1. 本研究の目的

化石燃料の枯渇リスク,地球温暖化に対する懸念等の問題を解決するために,二酸化炭素を発生しない再生可能エネルギー(太陽熱・光,地熱,風力等)を高効率的に利用する社会へと移行することが期待されている。再生可能エネルギーは,エネルギー密度が低い上に自然を相手にするため,時間的な変動が大きく扱いにくいといった課題を有しているが,これらの再生可能エネルギーの中で太陽熱や風力を利用した水素製造コストは他の再生可能エネルギーに比べて経済的になることが報告されている

(Jeffrey Ralph Bartels, A feasibility study of implementing an Ammonia Economy,

http://lib.dr.iastate.edu/etd/11132).

再生可能エネルギーの中で、究極の持続可能な一次エネルギー源は無尽蔵な太陽エネルギーである。 地球に吸収される太陽光エネルギーの量は人類が消費している1次エネルギー量の約1万倍も大きい。 (http://www.iae.or.jp/publish/kihou/26-4/05.html)。また,地上で実際に利用可能な量は現在の人類のエネ ルギー消費量の約50倍である(山田興一・小宮山宏「太陽光発電工学」ISBN 4-8222-8148-5)。さらに、 太陽熱はレンズや反射鏡等を用いて太陽光を集光することで高効率に利用できる長所を持つ。具体的に は、この太陽熱を用いた発電は太陽光発電に比べて高コストな太陽電池を使う必要がない、太陽電池よ り反射鏡のほうが製造・保守の面で有利、エネルギー密度が低い自然エネルギーを利用するにも関わら ずエネルギーの集中が可能、蓄熱により昼夜問わず 24 時間の大規模・安定操業が可能であると言った 点が挙げられる。太陽熱発電は環境汚染が生じないクリーンな技術として、現在欧米では多数の建設計 画が進められており、2020年以降、急速にシェアが拡大していくと考えられている。米国カリフォルニ ア州では1GWe(280 MWe の発電所, 4 か所)の太陽熱発電所の建設が進み, 中東(アブダビ)では 100 MWe の太陽熱発電所が完成、稼働している。今後太陽熱発電所の規模はさらに大きくなるものと考え られる。ところが電気を大量に貯蔵・輸送することは困難であるため、エネルギー密度が高く、かつ二 酸化炭素発生の無い地球環境に優しい二次エネルギーが必要となる。この候補として、クリーンで貯 蔵・輸送が可能な二次エネルギーである水素が有望であるが、水素は常温・常圧で気体であり、高密度 化するためには極低温あるいは数十 MPa 以上の高圧を要する。そのため,水素の貯蔵・輸送が容易な 化学物質(エネルギーキャリア)に変換して利用するエネルギーシステムが必要となる。例えばアンモ ニアは、このエネルギーキャリアの一つであるが、質量水素密度が 17.8%、液体の体積水素密度が液体 水素の 1.5 倍(10.7 kgH₂/100L)と高く,室温,1 MPa 以下で液化できるなどの長所を有している。また, 水素発生に要するエネルギーは燃焼エネルギーの 10%程度であり, カーボンフリーな優れたエネルギー キャリアとして利用できる。

アンモニアをエネルギーキャリアとして利用する社会(アンモニアエコノミー,図1-1)を構築するためには、太陽熱からの CO_2 フリーの水素を利用したアンモニア(グリーンアンモニア)の製造技術開発が必要である。太陽光の持つ熱エネルギーを集熱システムによって集熱し、この熱を蓄熱して熱化学法あるいは水蒸気電解法により、水素を 24 時間製造する。水素の製造効率は温度が高いほど向上するものの、集熱システムや水素製造システムの構造材料を汎用材料であるステンレススチールとするために、供給される熱の温度はその耐熱温度(650 °C)が上限となる。実際の水素製造では熱交換によって集熱システムの熱が利用されるため温度は下がり、600 °C 以下で利用されることが想定される。

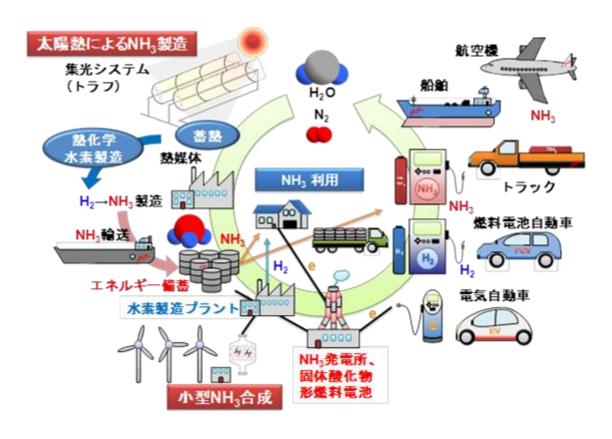


図1-1 アンモニアエコノミーのイメージ図

太陽熱から製造された水素は、アンモニアに変換された後に消費地に輸送される(アンモニアプラントのスケール:2000トン/日)。アンモニアタンカーは一般に冷却船であるが、液体アンモニアの沸点は-33.3 ℃と液化天然ガス(-161 ℃)に比べ高いため、船体構造や材料は液化天然ガス(LNG)船ほど厳しくない。消費地まで運ばれたアンモニアはエネルギーセキュリティーのために一部備蓄される。アンモニアは「水素キャリア」として直接、あるいは水素製造プラントで水素に変換された後、家庭の燃料電池用燃料、燃焼用燃料として供給される。

現在,アンモニア合成に必要な水素の製造は,主に天然ガスや石炭等の化石燃料の水蒸気改質によって行われている。世界のアンモニアの生産量は約 1 億 5000 万トン/年であり,中国,インド,ロシア,アメリカ,トリニダードトバコ等で生産されている。この輸入価格は 30 円~50[円/1 無水アンモニア kg] (2010~2011 年) である。アンモニア 1 kg 中に水素は 2 Nm³ 含まれるため,水素の価格に換算すると 15~25[円/水素 1 Nm³]となる。国内では,水素は主に天然ガスの水蒸気改質により生産されていてその製造コストは 30[円/水素 1 Nm³]である(2010 年の NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010 http://www.nedo.go.jp/content/100086292.pdf)。すなわち,海外の天然ガスの生産地でアンモニアを製造して国内に輸入する方が,天然ガスを国内に輸入してから水素を製造するよりも低コストとなる。また,2012 年の第 20 回次世代エネルギー産業会議において,水素の陸揚配送まで含めた水素の末端コストが60[円/水素 1 Nm³]と報告されている。このように,貯蔵・輸送まで含めるとアンモニアのコストは水素に比べ低く,エネルギーキャリアとして優位であることがわかる。

前述したようにアンモニアの原料である水素の製造には現在化石燃料を使用しており、二酸化炭素の発生を伴っている。従って、これを太陽熱や風力等の再生可能エネルギー由来の水素に転換し、それを用いてアンモニア製造を行う CO₂ の発生しないクリーンなシステムが必要である。

本研究の開発課題は、アンモニアをエネルギーキャリアとして利用するために必要な水素製造を太陽 熱エネルギーで実現することである。水素製造には膜分離新 IS プロセス、新熱化学プロセス、新水蒸気 電解を想定し、これらに 650℃の熱供給を行うための高温太陽熱供給システムの確立を目指す。従来の 太陽熱供給システムの供給温度の上限は 560℃であるため、目標温度に適した新たな集光集熱システム、 集熱管および集熱管プロセス、蓄熱材・熱媒体の研究開発を行う必要がある。

再生可能エネルギーの中で、太陽熱は、蓄熱材料を用いて 24 時間利用可能であり、また集熱による エネルギーの高密度化により大規模システムが比較的容易であるため、集熱・蓄熱技術を確立すれば時 間変動等の制約を受けないエネルギー源としての利用が期待できる。

研究開発の過程で段階的にその規模の拡大、技術の向上をはかる。最終的に 650 °C 以下の太陽熱を利用して水素を生産することにより、現在の化石燃料を原料とするアンモニア製造プラントと同規模である 2000 トン・NH3/日のアンモニア製造プラントの開発に必要な要素技術の確立を目指す。 2000 トン・NH3/日に必要な太陽熱発電システム規模は、実用化されている水蒸気電解を利用した場合は約 800 MWe であり、現状の太陽熱発電システムからすると大規模となるが、本研究では、600 MWe 規模で達成可能なアンモニア製造技術の確立を目標とする。すでに米国で 280 MWe の太陽熱発電プラントが建設中であり、1 GWe クラスの太陽熱発電プラントの計画もあるように、当該技術が普及する際(2030年)にはこの規模が単位となると想定される。なお、国内エネルギー消費量の 25%をアンモニア燃焼火力発電で賄うには、2000 トン・NH3/日のプラントが約 340 か所、国内エネルギー消費量の 80%では約1100 か所必要となる。図1-2に太陽熱アンモニア製造システムを示す。蓄熱機能を備えることで 24時間の安定的なアンモニア製造が可能になる。太陽電池システムでは電力貯蔵が高価であり、大規模化が困難である。これに対し、太陽熱システムは、熱を比較的安価に利用可能であり、また比較的容易にスケールアップができ大量貯蔵が可能であることが利点である。製造したアンモニアは水素より低圧、常温付近で高密度貯蔵が可能であり、輸送効率が良い。その点でこのプラントは海外設置し、アンモニアに変換後輸入するというシステムが規定される。

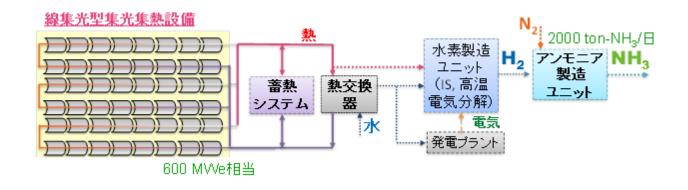


図1-2 太陽熱利用型アンモニア製造システムの構成

2018 年度(H30 年度)までには 650 °C 集熱システムの要素技術を開発し、それらの基本設計を確立する。その後、2030 年頃に集熱、水素製造システム実証機(500 kWe)の製作・設置・実験を行う。実験結果を要素技術、システム改良に反映させながら段階的にその規模の拡大、技術の向上をはかる。2040 年頃には 1 GWe クラスの集熱、水素製造実用プラントの運転を開始し CO_2 フリーのアンモニアを 2000[トン/日]生産する。この太陽熱利用アンモニア製造システムを 2040 年以降、年間 20 基ずつ建設することで、2080 年には日本が消費するエネルギーの 80%以上がアンモニアで供給できることが期待できる。

なお、実証機等の実際のプラント開発に関わる内容については、本研究開発では取り組まない。その他、本チームで研究開発を行う部分、行わない部分を表1-1にまとめて示す。このように太陽熱から製造されたアンモニアは水素よりも低コストであり、燃料電池自動車用水素ステーションの水素キャリア、家庭用燃料電池、火力発電代替用固体酸化物形燃料電池(SOFC)、ガスタービン発電機、エンジンのエネルギーキャリアとして利用できる。また、集光システムで得られた 650℃の高温熱は発電、産業プロセスなどへの利用も期待できる。

表1-1 高温太陽熱供給システムチーム:研究開発を行う部分と行わない部分

研究開発を行う部分

- 1. 高温集光集熱システム
- 2. 集熱管および集熱管プロセス
- 3. 化学蓄熱材開発
- 4. 熱媒体開発
 - (1) 炭酸塩系
 - (2) 塩化物系
- 5. 熱媒体用容器材料

研究開発を行わない部分

- 1. 輸送関連機器(ポンプ, 弁など), 計測機器
- 2. 熱交換器
- 3. 発電プラント
- 4. 水素製造装置
- 5. アンモニア製造装置

2. 研究開発目標とマイルストーン

当機関の研究開発目標は、1章に述べた開発課題のうち、反射鏡で集光し高温エネルギーを得る集光集熱システムに関するものである。各要素技術(熱媒体、蓄熱材、集熱管)の研究開発成果を反映し、アンモニア生産量 2,000[トン/日]規模、24 時間運転にて 650 の熱源供給可能なフレネル型集光・集熱システムを検討・構築する。

▶平成 26 年度

フレネル型集光・集熱システムのシミュレーションシステムを用いて 600℃の熱源供給可能なフレネル型集光・集熱システムの条件を検討する。

・<u>H26 マイルストーン</u>: 600℃の熱源供給可能なフレネル型集光・集熱システムの条件設定

➤平成 27-28 年度

高効率水素製造プロセスからの要望事項に合わせたフレネル型集光・集熱システムの条件を入手し、それに合わせたシミュレーション計算を実施する。具体的には、アンモニア生産量 2,000[トン/日]規模、24 時間運転にて 650 の熱源供給について検討する。

- ・H27 マイルストーン:650℃の熱源供給可能なフレネル型集光・集熱システムの仕様設定
- ・<u>H28 マイルストーン</u>: 高効率水素製造プロセスに合わせた 650℃の熱源供給可能なフレネル型集 光・集熱システムの検討, 集光集熱設備の実証案の策定

3. 研究実施内容

本章では、まず当機関が独自に開発した反射鏡面曲げ制御方式によるフレネル型集光装置の特徴を説明し、つづいて研究実施内容の詳細を述べる。

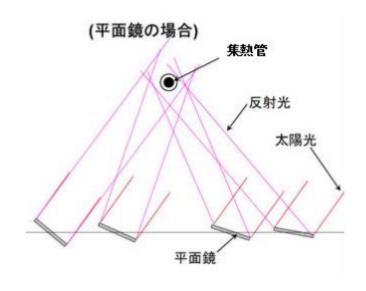
平成 26~27 年度は,600℃および 650℃熱源供給可能なフレネル型集光・集熱システムのシミュレーションによる検討を実施した。いずれの検討も同様の手法で行っていることから,ここでは,650℃熱源供給可能なフレネル型集光・集熱システムのシミュレーションによる検討内容について示す。

平成 28 年度は,27 年度末評価の結果に対応すべく,それまでの研究計画を大幅に修正した。集光集 熱設備の実証案(一次)の策定が,これにあたる。加えて,28 年度中の中間ヒアリングおよび PD(プログラムディレクター)ヒアリングの内容を反映し,650[°]C熱源による蒸気動力サイクル発電を前提とする集熱管内の熱媒流れに基づく検討(圧力損失とポンプ動力の予測)を行った。

本章では実証案策定と集熱管内の熱媒流れに基づく検討について示す。

3-1. 反射鏡面曲げ制御方式によるフレネル型集光集熱装置

図3-1に示すように従来のリニアフレネル型では平面もしくは僅かに凹面の反射鏡が用いられる。この場合、平面反射鏡では太陽光を十分集光できず、曲面反射鏡であっても太陽の高度と反射鏡の位置によって焦点がずれるため、高い集光倍率は期待できない。



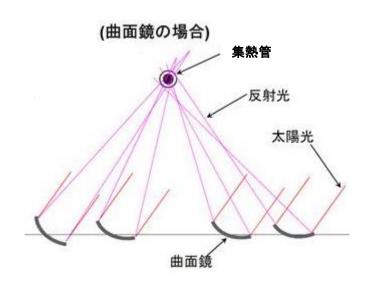


図3-1 従来のフレネル型集光装置の原理

これに対し、当機関が開発した反射鏡面曲げ制御方式(可変曲面反射鏡)のフレネル型集光装置の原理を図3-2に示す。太陽を追尾しながら集点が常に集熱管に合うように、反射鏡の曲率を制御する機構を有している。これによりトラフ型と同等の集光倍率 70 倍以上が可能である。また、集熱管の設置高さを 3.8m と大幅に低く抑えたことで、フレネル型の利点である耐風強度やメンテナンス性を更に向上させることができる。図3-3に一般的な集光装置設置高さの比較図を示す。当機関開発の集光設備が、既存のトラフ型やリニアフレネル型に比べて低設置でコンパクトであることがわかる。図3-4は、反射鏡面曲げ制御方式によるフレネル型集光装置の外観写真である。

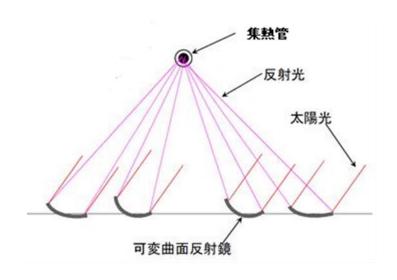


図3-2 反射鏡面曲げ制御方式によるフレネル型集光装置の原理

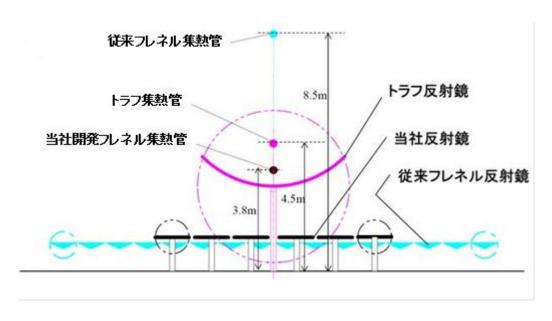


図3-3 集光装置設置高さの比較

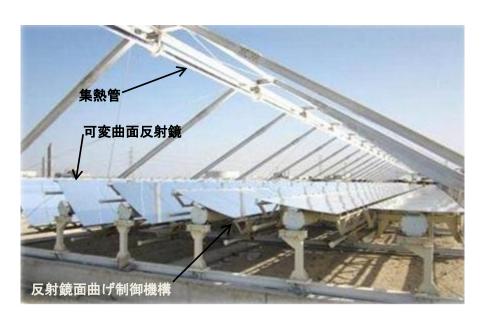


図3-4 当機関開発の反射鏡面曲げ制御方式によるフレネル型集光装置

3-2.650℃の熱源供給可能なフレネル型集光・集熱システムの検討

当機関は、これまでに反射鏡面曲げ制御方式(可変曲面反射鏡)に対応したフレネル型集光集熱装置のシミュレーションツールを開発している。このシミュレーションシステムは、光線追跡法により太陽表面から集熱管に至る太陽光線経路を計算して集熱管表面の熱流束分布を算出する"集光計算"と集熱管熱損失を考慮して熱媒に伝達される正味吸収熱量を算出する"集熱計算"から構成されている。本シミュレーションシステムを用いて650℃熱源を供給するシステムの検討を行った。本節では、その検討結果について述べる。具体的には、集光・集熱システムの反射鏡とソーラーフィールドの各面積および集光集熱量を算定した。

3-2-1. 検討条件

本システムの検討には、日射条件、水素製造プロセスへの熱供給条件、プラント建設サイトの気象 条件および集光集熱装置に関する条件などの設定が必要である。これら条件について順に述べる。

a. 日射条件

集光集熱設備の性能予測を行う場合、米国カリフォルニア州の Barstow-Daggett 空港の日射条件がよく用いられる。本検討でもこれを採用し、プラント建設サイトは Barstow-Daggett 空港を想定した(表 3-1)。 DNI(直達日射量)データは、(一財)エネルギー総合工学研究所殿から提供の「723815TY.csv」を使用した。本データファイルには毎正時における DNI および気温等のデータが納められている。この中から DNI が安定している表 3-2 に示す日付のデータを計算対象日に採用した。これら採用データの DNI を表 3-3 および図 3-5 に示す。

表3-1 シミュレーションで想定したプラント建設サイト

場所	Barstow-Daggett Airport(Daggett ,CA,)
緯度	北緯 34.85°
経度	西経 116.80°

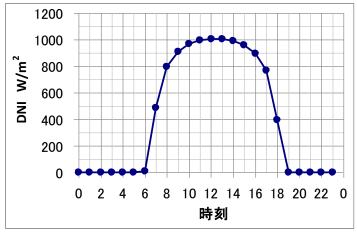
表3-2 プラント建設サイトで計算対象に採用した DNI データ

計算対象日	採用データ
春分	03/16/1996
夏至	06/21/1987
冬至	12/20/2004

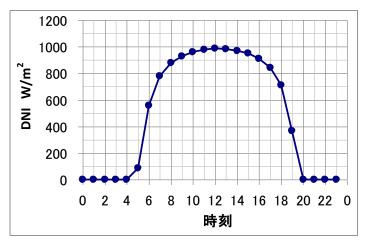
上記 DNI データファイルには太陽位置の情報が含まれていない。そのため別途,各時刻におけるソーラーベクトルを設定する必要がある。これは,天頂角と方位角で定義され,天頂角は,鉛直真上方向と太陽の方向がなす角度を表し,方位角は東を 0° として地平線に沿って測った太陽の方向を表す(北が 90° ,南が -90°)。ソーラーベクトルは,表 3-2 の DNI 測定年月日ではなく 2014 年の同月日として算出する。この作業を文献(1)に基づき日揮株式会社殿が担当し,チーム内各機関で共有された。その計算結果を表 3-4 に示す。DNI と太陽位置の対応について述べる。今回のシミュレーションでは,毎正時 30 分の太陽位置に対して 30 分後の DNI を使用する。すなわち,「 $0\sim1$ 時」の計算データとして 0 時 30 分の太陽位置と 1 時の DNI を採用し,1 時間毎のステップワイズで集熱量を算出し,1 日の集熱量を算定した。

表 3-3 計算対象日の DNI (単位 W/m^2)

時刻	春分(03/16/1996)	夏至(06/21/1987)	冬至(12/20/2004)
00:00	0	0	0
1:00	0	0	0
2:00	0	0	0
3:00	0	0	0
4:00	0	0	0
5:00	0	87	0
6:00	11	558	0
7:00	488	778	0
8:00	794	878	478
9:00	910	929	762
10:00	966	960	807
11:00	994	977	685
12:00	1006	986	882
13:00	1005	983	871
14:00	990	969	824
15:00	958	950	879
16:00	896	909	773
17:00	766	844	204
18:00	397	713	0
19:00	0	367	0
20:00	0	0	0
21:00	0	0	0
22:00	0	0	0
23:00	0	0	0
24:00	0	0	0



春分 (03/16/1996)



夏至 (06/21/1987)



冬至 (12/20/2004)

図3-5 計算対象日(春分,夏至,冬至)のDNI

表3-4 太陽位置(天頂角と方位角)

	春分 夏至		夏	至	冬至	
時刻	天頂角。	方位角 °	天頂角。	方位角 °	天頂角。	方位角°
0:30	145.931	74.654	120.904	79.010	164.908	46.167
1:00	143.655	62.244	119.324	71.268	160.033	29.852
1:30	140.271	51.369	116.977	63.934	154.434	19.444
2:00	136.038	42.074	113.945	57.091	148.510	12.076
2:30	131.189	34.172	110.323	50.781	142.441	6.356
3:00	125.892	27.376	106.195	44.986	136.307	1.574
3:30	120.279	21.434	101.644	39.668	130.156	-2.660
4:00	114.447	16.125	96.741	34.775	124.023	-6.575
4:30	108.461	11.267	91.553	30.247	117.940	-10.320
5:00	102.375	6.716	86.125	26.016	111.925	-14.006
5:30	96.236	2.353	80.502	22.019	106.006	-17.717
6:00	90.076	-1.933	74.725	18.195	100.212	-21.524
6:30	83.931	-6.241	68.820	14.476	94.571	-25.494
7:00	77.839	-10.669	62.815	10.791	89.117	-29.691
7:30	71.836	-15.329	56.735	7.058	83.896	-34.178
8:00	65.973	-20.340	50.608	3.173	78.955	-39.021
8:30	60.306	-25.846	44.455	-1.011	74.355	-44.282
9:00	54.911	-32.022	38.312	-5.711	70.171	-50.011
9:30	49.895	-39.061	32.234	-11.279	66.481	-56.253
10:00	45.393	-47.184	26.283	-18.385	63.368	-63.031
10:30	41.580	-56.582	20.625	-28.303	60.929	-70.306
11:00	38.671	-67.323	15.623	-43.660	59.247	-78.005
11:30	36.886	-79.226	12.142	-68.779	58.389	-85.984
12:00	36.394	-91.783	11.660	-102.536	58.392	-94.060

※方位角は真東が 0° , 真北が 90° , 真南が 90° 。天頂角は鉛直真上の方向となす角を表す。

表 3-4 太陽位置(天頂角と方位角)つづき

	春	春分		至	冬至	
時刻	天頂角。	方位角°	天頂角。	方位角。	天頂角。	方位角 °
12:30	37.247	-104.234	14.480	-130.709	59.255	-102.042
13:00	39.355	-115.863	19.191	-148.254	60.942	-109.736
13:30	42.528	-126.244	24.722	-159.299	63.386	-117.011
14:00	46.546	-135.286	30.612	-166.992	66.500	-123.779
14:30	51.203	-143.101	36.671	-172.898	70.197	-130.024
15:00	56.328	-149.886	42.806	-177.790	74.389	-135.756
15:30	61.803	-155.868	48.956	177.916	78.987	-141.009
16:00	67.530	-161.234	55.093	173.967	83.931	-145.849
16:30	73.428	-166.142	61.186	170.206	89.150	-150.331
17:00	79.454	-170.738	67.211	166.518	94.603	-154.525
17:30	85.559	-175.136	73.146	162.815	100.247	-158.495
18:00	91.700	-179.439	78.962	159.025	106.043	-162.300
18:30	97.850	176.248	84.628	155.083	111.960	-166.009
19:00	103.967	171.826	90.112	150.922	117.975	-169.695
19:30	110.012	167.187	95.372	146.479	124.062	-173.441
20:00	115.946	162.198	100.355	141.692	130.192	-177.355
20:30	121.706	156.710	105.008	136.494	136.346	178.408
21:00	127.214	150.535	109.259	130.830	142.483	173.621
21:30	132.371	143.443	113.029	124.656	148.554	167.894
22:00	137.037	135.166	116.228	117.957	154.477	160.514
22:30	141.017	125.460	118.768	110.745	160.076	150.076
23:00	144.078	114.181	120.561	103.102	164.944	133.711
23:30	145.962	101.500	121.538	95.157	168.118	107.140
24:00	146.467	88.026	121.659	87.078	168.138	73.225

※方位角は真東が 0° , 真北が 90° , 真南が -90° 。天頂角は鉛直真上の方向となす角を表す。

b. 外気温および風速条件

集熱管からの放熱に影響する気温および風速条件を表3-5に示す。

対象日	気温 ℃	風速 m/s			
春分	20.0				
夏至	30.0	0			
冬至	13.0				

表3-5 プラント建設サイトの気温および風速

c. 水素製造プロセスへの熱供給条件と熱媒体の物性値

実際の IS プロセスと集光集熱システム(ソーラーフィールド)の結合は考えず、システムの入出 温度条件と供給熱量(IS 側必要熱量)を設定する。供給熱量はアンモニア製造 2000 ton/day に必要 な熱量(1500 MWth×24 hr)とし、システム入出口の熱媒体温度はそれぞれ 350° Cおよび 650° Cとする。これらの熱供給条件は、新 IS 法に関して千代田化工建設株式会社殿から提供された情報である。 熱媒体の物性値は ALCA(先端的低炭素化技術開発)として委託研究契約中であった 2014 年 1 月に 千代田化工建設殿から提供された硝酸塩のそれを使用した。提示された物性推算式を式(3-1)~(3-4) に示す。また、これらの式による物性値の温度変化を図 3-6 に示す。比熱は一定のため図示していない。

表3-6 水素製造プロセスへの熱供給条件

システム入口熱媒温度	350°C
システム出口熱媒温度	650°C
IS プロセスへの供給熱量	$1500 \mathrm{MWth} \times 24 \mathrm{hr} = 36 \mathrm{GWhr} \cdot \mathrm{th/day}$

粘度 μ

$$\mu[cP] = 94.1729 - 25.5548 \times 10^{-2} T[K] + 23.5270 \times 10^{-5} T^{2}[K] - 72.8022 \times 10^{-9} T^{3}[K]$$
(3-1)

密度 ρ

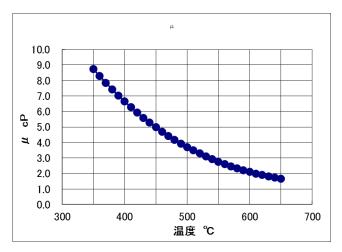
$$\rho[kg/m^3] = (2.0998 - 5.0287 \times 10^{-4}T[K]) \times 1000 \tag{3-2}$$

比熱 Cp

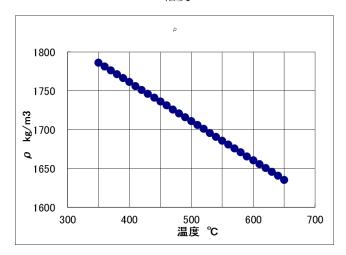
$$Cp[J/kgK] = 976 \tag{3-3}$$

熱伝導率 λ

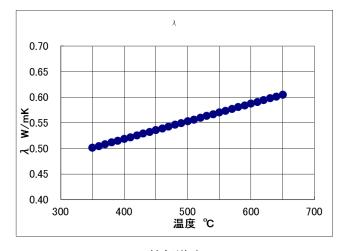
$$\lambda[W/mK] = 0.3804 + 3.452 \times 10^{-4} T[^{\circ}C]$$
(3-4)



粘度



密度



熱伝導率

図3-6 熱媒体の物性値

d. 集光集熱装置の条件

反射鏡および集熱管に関する寸法等の条件を表3-7に示す。反射鏡面は、太陽を追尾しながら放物線形状に近づけるよう鏡面曲げ制御を行う。

表3-7集光集熱装置の条件

(a) 反射鏡および集熱管の寸法

	機能	反射鏡面曲げ制御
反射鏡	長さ	1.0 m
	幅	1.2 m
	長さ	4,060 mm
	ガラス管外径	125 mm
集熱管	ガラス管内径	119 mm
朱然官	金属(SUS)管外径	70 mm
	金属(SUS)管内径	64 mm
	高さ	3.800 mm

(b) 反射鏡および集熱管の設定値

→ 4 1 A→ → 4 1 →	
反射鏡反射率	0.950
金属管吸収率	0.896
	0.036@350℃
	0.037@400℃
	0.039@450℃
金属管放射率 ε m (*)	0.041@500℃
	0.044@550°C
	0.048@600℃
	0.052@650℃
集熱管Active Area率	0.950
ガラス管透過率	0.970
ガラス管放射率 ε g	0.600
集光装置Intercept Factor	0.950

金属管の放射率 ε m は表中の数値から温度の多項式を作成して使用した。多項式を式(3-5)に示す。

$$\varepsilon_m = -2.118 \times 10^{-22} T^3 [K] + 1.286 \times 10^{-7} T^2 [K]$$
$$-7.500 \times 10^{-5} K + 4.650 \times 10^{-2}$$

(3-5)

e. 集熱管内の熱媒体熱伝達条件

金属管内の熱伝達は管内強制対流熱伝達の整理式20を用いて予測した。

(層流)Re < 2000

$$Nu = 4.36$$
 (3-6)

(乱流) Re > 2000

Dittus-Boelter の式

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} (3-7)$$

ここで,

ヌセルト数Nu = $\alpha d/\lambda$, レイノルズ数 Re= ud/ν , プラントル数Pr = ν/a ,

α: 熱伝達係数, λ: 熱媒体熱伝導率, ν: 熱媒体動粘性係数,

a: 熱媒体温度伝導率, d: 管内径, u: 管内流速

上記の整理式中において、レイノルズ数は、慣性力と粘性力の比で表される無次元特性数であり、 主流中の乱れの発生のし易さを示している。ヌセルト数は、熱伝達の大きさを表す無次元特性数で あり、物理的には、壁面における流体の温度こう配と基準の温度こう配(代表長さ d に対する温度 差)の比を表している。プラントル数は、流動と熱移動の相関を表す無次元特性数であり、粘性に よる運動量の輸送性と温度こう配による熱輸送性の比を表している。

3-2-2. シミュレーション検討結果

当機関はサウジアラビアにおいて反射鏡面曲げ制御方式のフレネル型集光装置の実証試験実績を有している。その設備レイアウトを参考に反射鏡を配置し、シミュレーションをおこなった。まず、春分について表3-6の650℃熱源供給条件を満足するシステムの要件(反射鏡面積および必要土地面積)を決定し、時刻毎の集熱量を算出する。続いて、夏至および冬至について、春分ベースで決定したシステム要件を用いてISプロセス側への時刻毎集熱量と供給可能熱量を算出した。

a. 集光・集熱装置モジュール

集光集熱モジュールは反射鏡とその制御機構と集熱管から構成される。複数の反射鏡を一つのフレーム内に納め、それらの曲率半径を一つの制御機構で変化させる。 1 フレームを $1.20 \times 1.0m$ の反射鏡 6 枚で構成し、このフレームを東西方向に平行 6 列、南北方向に 19 配置して 1 モジュールとした。モジュールの東西横断面図を図 3-7 に示す。図 3-8 は、モジュールを 2 基平行に配置して北端の集熱チューブを配管で接続した場合の平面図である。モジュールの仕様を表 3-8 に示す。

フレームのサイズ	1.2m×6.09m(1.20×1.0mの鏡6枚で構成)
東西方向のフレーム数	(平行配置)6
1列あたりのフレーム数	(南北方向)19
モジュールのサイズ	9.80m(幅)×115.7m(長)
反射鏡数	684枚=6枚×(19フレーム×6列)
反射鏡面積	820.8 m ²

表3-8 集光集熱モジュールの仕様

実際のプラントと同様にキャパシティの拡大はこのモジュールを直列に接続していくことで実現する。大規模プラントを計画する場合,モジュール単位では取り扱う数が大きくなり過ぎるので複数のモジュールを接続したアッセンブリを構成単位とするほうが考えやすい。ただし,1アッセンブリで熱媒体を所定温度(350°Cから 650°C)に昇温することを前提とする。

b. 集光集熱装置アッセンブリ

当機関の実証装置の経験と設計標準化を鑑みてアッセンブリのモジュール接続数は 4 と決定した。 1 アッセンブリで熱媒体を所定温度に昇温する(350 \mathbb{C} から 650 \mathbb{C})ものとし, 1 \mathbb{C} プロセス側への供給熱量は,アッセンブリ数の並列配置数の増加で達成する。

c. 計算方法

DNI がゼロでない時刻毎に熱媒体温度を 350℃から 650℃まで昇温できる媒体流量を計算プログラム内で繰り返し計算によって算出する。このとき DNI がゼロでなくとも朝夕において昇温できない時刻がある。集熱量は熱媒体の流量×(熱媒体の比熱)×温度差で算出した。

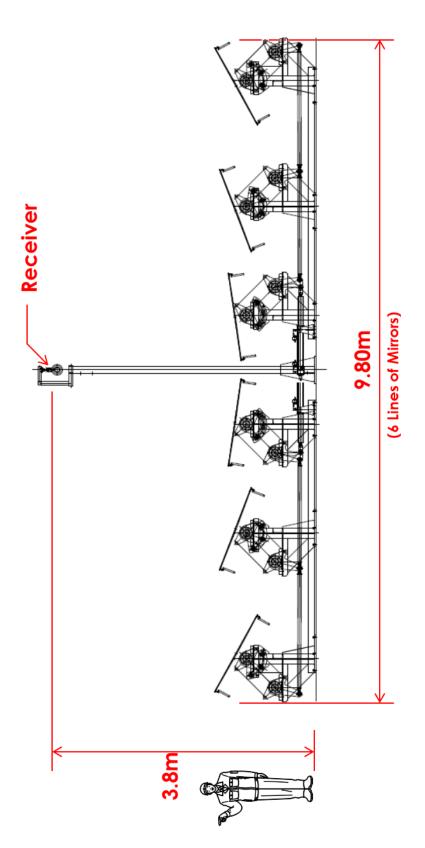
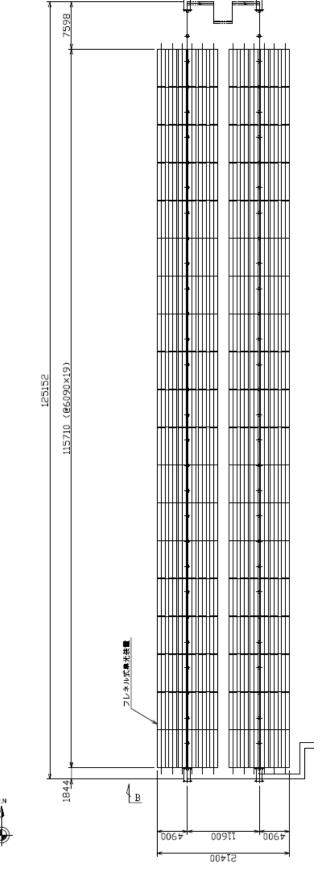


図3-7 集光集熱モジュールの横断面図



集光集熱モジュールの平面図 (2基接続例) × 3 − 8



d. 春分の計算結果

春分を対象に熱媒体を 350℃から 650℃まで昇温できる場合の時刻毎 1 T ッセンブリ当たりの媒体流量と集熱量を表 3-9 に示す。表中には熱媒平均温度を 500℃としたときの管内熱媒流速も示した。 これより熱媒温度 650℃を実現できる時間帯(集熱可能時間帯)は $7:00\sim17:00$ である。これは DNIが,十分でない,太陽高度が低いといった理由による。この集熱可能時間帯の集熱量の合計は, 14,375kWh である。

合計集熱量で IS プロセスへの供給熱量(1500MW×24hr=3.6×10 7 [kW·hr])を除して得られる数値 2,505(=3.6×10 7 /14,375)が春分条件で表 3 - 6 の熱供給条件を満足するアッセンブリ数である。

表3-9 春分における1アッセンブリあたりの媒体流量と集熱量

時刻	DNI	媒体流量	管内流速	集熱量
	$[W/m^2]$	[kg/h]	[m/s]	$[kW \cdot hr]$
5:00	0	_	_	_
6:00	11	_	_	_
7:00	488	1633.1	0.082	132.8
8:00	794	9890.5	0.499	804.4
9:00	910	16606.5	0.838	1350.7
10:00	966	20169.7	1.018	1640.5
11:00	994	20885.0	1.054	1698.6
12:00	1006	21036.6	1.062	1711.0
13:00	1005	21088.8	1.064	1715.2
14:00	990	21141.2	1.067	1719.5
15:00	958	20010.2	1.010	1627.5
16:00	896	15380.7	0.776	1251.0
17:00	766	8904.3	0.449	724.2
18:00	397	_	_	_
19:00	0	_	_	_

ここで、ソーラーフィールドの面積を算出するためにアッセンブリのレイアウトを検討する。まず、アッセンブリのモジュール 4 基接続について述べる。熱媒が、南から北へ一直線に流れるように集熱チューブを接続した 2 基のモジュールを一組として、これを東西に 2 個配置し、両組の集熱チューブ北端同士を接続する。こうしてアッセブリの南側に熱媒の入出部ができるようにした。このアッセンブリの南北および東西の寸法は、配管スペース等を確保して、それぞれ、約 250m および 24m である。次に、ある程度まとまった数のアッセンブリで構成される集合体の形状を決定する。アッセンブ

リを東西にそれぞれ 10 基ずつ並列配置して 1 ブロックとし(中央部分に機器スペースを設ける),4 ブロックの南側と北側を管寄せで接続した(図 3-9)。続いて,この集合体を必要なアッセンブリ数となるように配置する。集合体は $10\times4=40$ アッセンブリを備えているので,さきに示した必要アッセンブリ数 2,505 とするためには,2,505/40=64 の集合体を配置すればよい。南北および東西の両方向に 8 ずつ配置した例を図 3-1 0 に示す。本配置例での全反射鏡面積および土地面積を表 3-1 0 に示す。

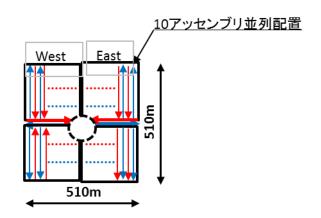


図3-9 アッセンブリ集合体

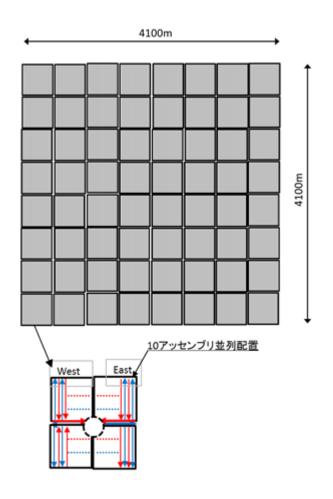


図3-10 ソーラーフィールドのレイアウト例

表3-10 春分条件での反射鏡面積などの計算結果

アッセンブリ数	2, 560
全反射鏡実面積	8, 404, 992 m ²
土地面積	16, 810, 000 m ²
総集熱量	36,800,999 kWh

e. 夏至および冬至の計算結果

春分同様に夏至および冬至を対象に熱媒体を 650℃まで昇温できる時刻毎1アッセンブリ当たりの媒体流量と集熱量を表3-11(夏至)および表3-12(冬至)に示す。

表3-11 夏至における1アッセンブリあたりの媒体流量と集熱量

				1
時刻	DNI	媒体流量	管内流速	集熱量
	$[W/m^2]$	[kg/h]	[m/s]	[kW·hr]
5:00	0	_	_	-
6:00	558	3338.3	0.168	271.5
7:00	778	11031.4	0.557	897.2
8:00	878	17301.1	0.873	1407.2
9:00	929	22079.7	1.114	1795.8
10:00	960	24355.1	1.229	1980.9
11:00	977	24900.2	1.257	2025.2
12:00	986	25733.9	1.299	2093.0
13:00	983	25198.9	1.272	2049.5
14:00	969	24903.7	1.257	2025.5
15:00	950	23610.2	1.192	1920.3
16:00	909	20093.7	1.014	1634.3
17:00	844	15042.7	0.759	1223.5
18:00	713	8425.3	0.425	685.3
19:00	0	_	_	_

表3-12 冬至における1アッセンブリあたりの媒体流量と集熱量

時刻	DNI	媒体流量	管内流速	集熱量
	$[W/m^2]$	[kg/h]	[m/s]	$[kW \cdot hr]$
5:00	0	_	_	-
6:00	0			_
7:00	0			_
8:00	478			
9:00	762	7929.7	0.400	644.9
10:00	807	10763.6	0.543	875.4
11:00	685	9092.9	0.459	739.6
12:00	882	11478.8	0.579	933.6
13:00	871	11555.2	0.583	939.8
14:00	824	11329.6	0.572	921.5
15:00	879	10729.6	0.541	872.7
16:00	773	5985.4	0.302	486.8
17:00	204			_
18:00	0			_
19:00	0	_	_	_

f. 春分条件の装置レイアウトによる集熱量の計算結果

前項 d において表 3-1 0 および図 3-1 0 のように春分条件アッセンブリレイアウトを決定した。このレイアウトを用いるときの計算対象日における時刻毎の集熱量を表 3-1 3 および図 3-1 1 に示す。図 3-1 2 は,春分,夏至および冬至における時刻別の集光集熱効率 η である。ここで, η は, η = 集熱量/(DNI・反射鏡面積)で定義して算出した。

表 3-1 3 ソーラーフィールドの時刻および日別の熱供給量[kW·hr]

時刻	春分	夏至	冬至
6:00	0	695,079	0
7:00	340,033	2,296,885	0
8:00	2,059,334	3,602,320	0
9:00	3,457,695	4,597,288	1,651,069
10:00	4,199,600	5,071,057	2,241,125
11:00	4,348,535	5,184,554	1,893,263
12:00	4,380,101	5,358,141	2,390,039
13:00	4,390,969	5,246,747	2,405,947
14:00	4,401,880	5,185,282	2,358,974
15:00	4,166,390	4,915,958	2,234,046
16:00	3,202,467	4,183,776	1,246,240
17:00	1,853,994	3,132,091	0
18:00	0	1,754,260	0
Total ∃	36,800,999	51,223,437	16,420,703

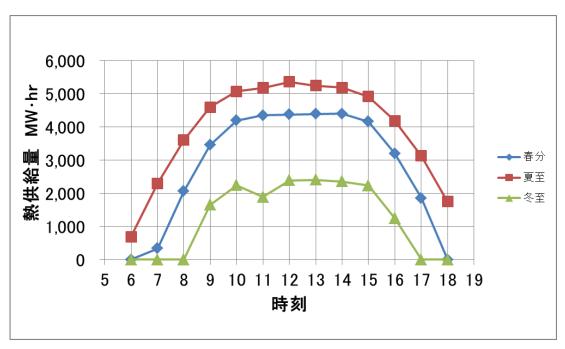


図3-11 集光集熱システムの時刻別熱供給量

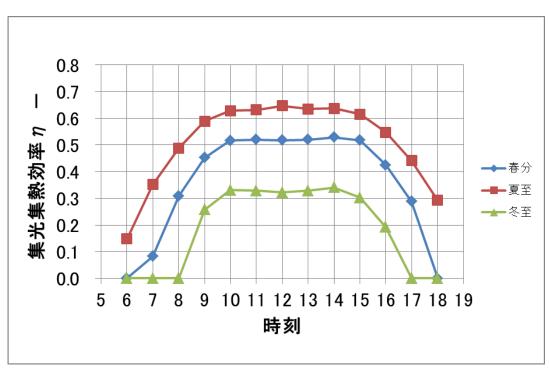


図3-12 春分, 夏至および冬至における集光集熱効率

3-3. 集光集熱設備の実証案(一次)の策定

本実証案の策定は、平成27年度末に評価委員会から研究継続条件として伝達されたものである。この実証計画案を日立造船株式会社と千代田化工建設株式会社が共同で以下の通り策定した。

3-3-1. 実施場所の特定

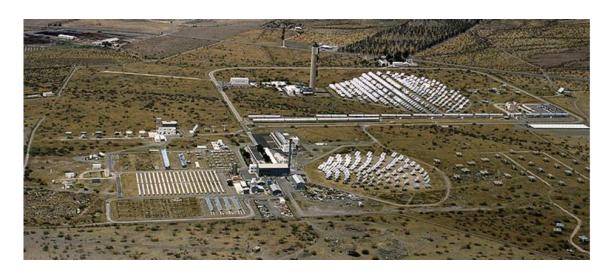
商業プラントへのステップアップを考えれば、実証試験もプラント建設と同じ場所で行うことが好ましい。しかしながら、実証段階では様々なトラブルの発生が予想される。その対応にはインフラ設備が整い、物品の調達が容易であることが重要である。この点に鑑み、候補地の検討を行った。再生可能エネルギーの積極的な導入を進めるスペインは集光型太陽熱発電の研究施設 PSA(アルメリア太陽光プラットホーム Platforma Solar de Almeria)を有している。PSA はスペインのエネルギー部門の国立研究機関 CIEMAT の下部組織であり、多くの共同・依頼研究を実施している。日本からは地理的に遠い(時差・8 時間)がインフラ設備の点からは実証試験に好適である。また、ここには太陽熱発電を研究するドイツ航空宇宙センター(DLR)も実験設備を設置するなど世界の一線級の研究者が集まる地域でもあり、研究者間の協力が得やすいと考えられる。したがって当チームは、実証計画案(一次)の実施場所を以下の通り特定し提案する。

実施場所:スペイン・アルメリア研究施設 PSA (Platforma Solar de Almeria)

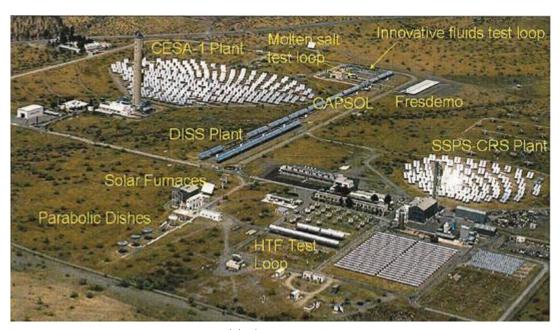


図3-13 PSA(アルメリア太陽光プラットホーム)の所在地

PSA における集光集熱装置の外観を図3-14に示す。図3-15はトラフ式集光装置テストループの一例である。



(a)全景



(b)プラント配置

図3-14 PSAにおける集光集熱装置外観

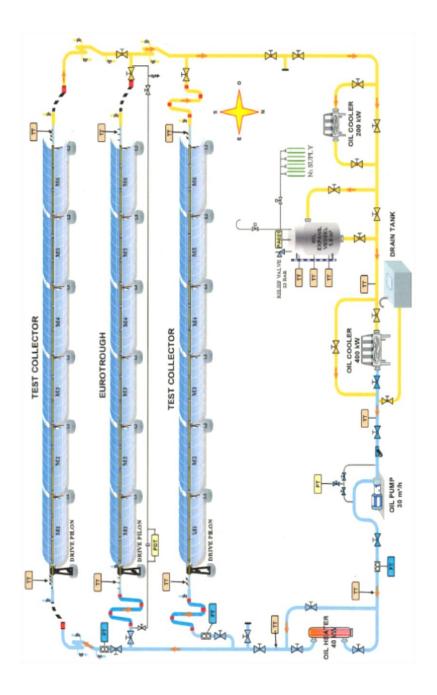
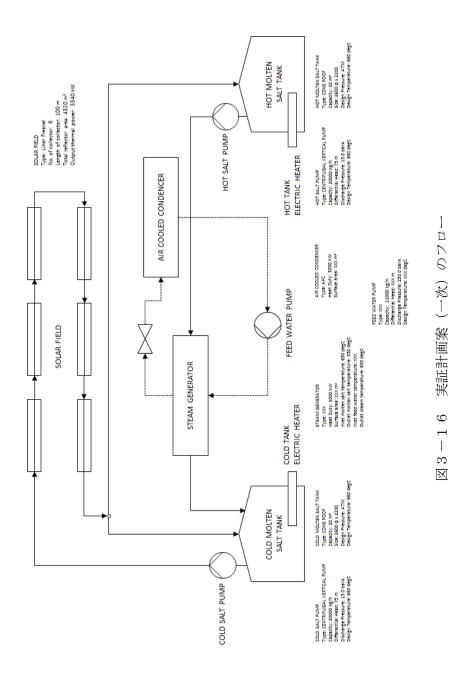


図3-15 PSAのテストループの一例

3-3-2. 実証試験装置

試験装置の概略フローを図3-16に示す。ソーラーフィールドで650℃に加熱した熱媒を蒸気発生器に供給し蒸気は空冷コンデンサで凝縮させた後、ふたたび蒸気発生器に戻す。主要機器の仕様を表3-14に示す。



32

表3-14 実証装置主要機器の仕様

機器	仕様	
集光設備	3.34[MWth] フレネル式	
溶融塩ポンプ	30[t/h]×2	
溶融塩タンク	30m³×2	
蒸気発生器	3.0[MWth]	

3-4. 炭酸塩系熱媒の集熱管内流れにおける検討

チーム内において開発中の熱媒が650℃での粘度20[mPa·s]以下の目標達成の見通しがついていることに鑑み、綜研テクニックス株式会社提供の炭酸塩系熱媒(K, Na, Li, Ba, Ca-CO₃の5成分系)の熱物性値を基に集光集熱システムの検討を行った。

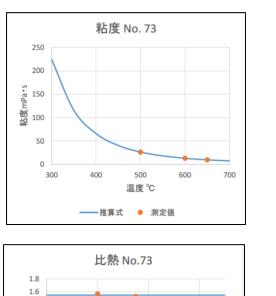
3-4-1. 炭酸塩系熱媒の物性値推算式

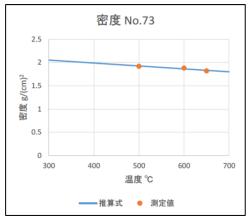
検討に資する物性値の推算式がチーム内で共有された。物性値は粘度 μ 以外に管内熱伝達係数の予測に必要な密度 ρ , 比熱 Cp および熱伝導率 λ を含む。表 3-1 5 にそれらの推算式を示す。図 3-1 7 は推算に用いられたデータと推算式の計算結果である。全体的に測定点数は十分といえず,比熱および熱伝導率は温度に依らず一定とされた。液体の粘度は,ふつう温度の上昇により指数関数的に減少する。この関係は,式(3-8)の形で表される。これは最初実験的に見出され,後に理論的な裏付けがなされたものである (3) 。ここで, μ は粘度 $[mPa\cdot s]$,A,B は物質によって定まる値,T は絶対温度である。推算式もこの関数形が用いられた。この式により粘度を求めるには 2 定数を知る必要があるが,実測値が 2 点以上あれば定数は決定される。密度は適用温度範囲($350\sim650^{\circ}$ C)で温度の一次式で表される。

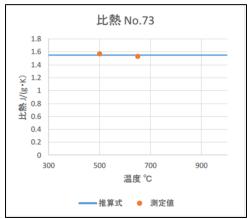
$$\mu = Ae^{B/T} \tag{3-8}$$

表 3-15 熱物性値推算式

物性値	推算式	備考
粘度 μ [mPa·s]	$\mu = 5.7715 \times 10^{-2} e^{4738.4/T}$	T:[K]
密度 ρ [kg/m³]	$\rho = 2400.0 - 0.62857T$	T:[°C]
比熱Cp[J/kg·K]	Cp = 1550.0	温度に依らず一定
熱伝導率λ[W/m·K]	$\lambda = 0.55333$	温度に依らず一定







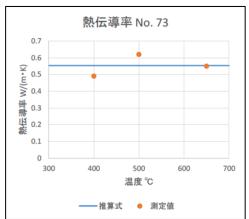


図3-17 炭酸塩系熱媒 No.73 の熱物性値

3-4-2. 集熱管内の熱媒流れに基づく検討

熱媒班提供の炭酸塩系熱媒は、350℃付近の粘度が大きく集熱管内流れの圧力損失増大とレイノルズ数 Re 低下による管内層流化が予想されたので、これらについて検討した。当機関のフレネル式集光集熱装置のモジュール 4 基を直列に接続した 1 アッセンブリ(図 3-1 8)を対象に集光集熱シミュレーションによって管内レイノルズ数と圧力損失を予測した。計算条件を表 3-1 6 に示す。

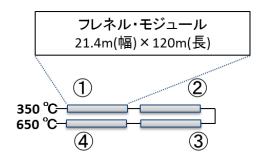


図3-18 フレネル式集光装置のアッセンブリ概略

	心未然・ヘコ・・・ショ・ショチボロ	
太陽位置 鉛直真上(天頂)		
DNI	300, 1000[W/m ²]	
集光モジュール	120m×21m(ミラー面積820.8m²)	
集熱管内外径	64/70mm(豊田自動織機製)	
熱媒入出温度	350∕650℃	

表3-16 集光集熱シミュレーションの計算条件

現有のシミュレーションプログラムについて各モジュールを流れる熱媒の温度および流速の平均値と対応する熱物性値を求め、管摩擦による圧力損失を算出する機能を追加した。レイノルズ数 Re を式(3-9)で定義して管摩擦係数を層流における理論式(3-10)および乱流における Blasius の式(3-11)を使用して求め $^{(4)}$ 、圧力損失 $^{\Delta}$ P は、式(3-12)で算出した。

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \tag{3-9}$$

(層流)
$$\lambda = 64/Re$$
 (3-10)

(乱流)
$$\lambda = 0.3164 Re^{-1/4}$$
 (3-11)

$$\Delta P = \lambda \cdot (L/d) \cdot (\rho V^2/2) \tag{3-12}$$

ここで、d および L は、それぞれ管径[m]および管長[m]、V は熱媒流速[m/s]。 DNI が $1000[W/m^2]$ および $300[W/m^2]$ におけるアッセンブリ各モジュールの圧力損失計算結果を表 3-1 7に示す。

表3-17 圧力損失の計算結果

(a) DNI=1000[W/m²]の場合

モジュール	Re	圧力損失[kPa]
1	1119	49.7
2	2267	40.8
3	4252	35.7
4	7160	32.2
合計	_	158.4

(b) DNI=300[W/m²]の場合

モジュール	Re	圧力損失[kPa]
1	318	11.1
2	709	5.1
3	1254	3.0
4	1898	2.0
合計		21.2

1アッセンブリで熱媒を 350℃から 650℃に昇温する場合の計算結果をまとめると表 3-1 8のようになる。ここで熱出力 $Q_{th}[W]$ およびポンプ動力 P[W]はそれぞれ式(3-13)および(3-14)で求めた。ただし,ポンプ揚程は圧力損失分のみ,ポンプ効率は 0.70 とした。また発電出力算出時の発電効率は 0.40 とする。

表3-18 1アッセンブリの計算結果

DNI [W/m²]	300	1000
質量流量m [kg/s]	1.10	4.38
体積流量@350℃ [m³/s]	$5.45\! imes\!10^{ ext{-}4}$	$2.17{ imes}10^{ ext{-}3}$
熱出力Q _{th} [kW]	511.5	2036.7
圧力損失 [kPa]	21.2	158.4
ポンプ動力P [kW]	0.0165	0.491
発電出力[kW]	204.6	814.7

$$Q_{th} = \dot{m}Cp\Delta T \tag{3-13}$$

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta_p} = \frac{Q \Delta P}{\eta_p} \tag{3-14}$$

ここで、熱出力: $Q_{th}[W]$ 、m:熱媒質量流量[kg/s]、Cp:比熱[J/kgK]、 ΔT :熱媒温度変化 $[\mathbb{C}]$ 、 ρ :熱媒密度 $[kg/m^3]$ 、g:重力加速度 $[m/s^2]$ 、Q:熱媒体積流量 $(350\mathbb{C})[m^3/s]$ 、H:ポンプ揚程[m]、 η_p :ポンプ効率=0.7[-]

上記計算結果から発電出力に対するポンプ動力の比率は最大で 0.06%程度 (DNI= $1000[W/m^2]$ のとき) であり、問題ない。

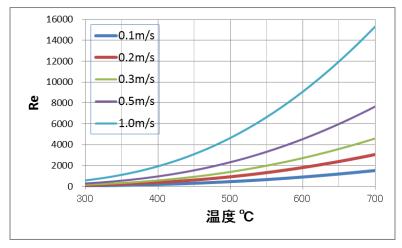
集熱管内の熱媒流れにおいてレイノルズ数 Re が 2000 程度未満を層流とすれば,表 3-1 7 から DNI が 300[W/m²] のときは,全てのモジュールで,管内層流熱伝達となり,DNI が 1000[W/m²] のときは1 基目のモジュールでのみ層流熱伝達である。管内層流熱伝達では,集熱管壁の高温化が懸念される。いずれの DNI においても各モジュールの集熱管内の熱媒流速は 1.0[m/s]以下であることが上記の計算でわかっている。異なる DN I のケース(1000[W/m²]以下)での伝熱係数を把握するため,熱媒流速をパラメータとして熱媒温度と熱伝達係数 α の関係を調べた。ヌセルト数 Nu を式(3-15)で定義し,層流および乱流における管内強制対流熱伝達の具体的な Nu をそれぞれ式(3-16)と(3-17)で算出した(3)。熱媒流速をパラメータとして管内熱伝達と熱媒温度の関係を図 3-19に示す。図中のヌセルト数と熱伝達係数において曲線に跳躍があるのは,Re が 2000 の前後で層流と乱流が切り替わるためである。

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \tag{3-15}$$

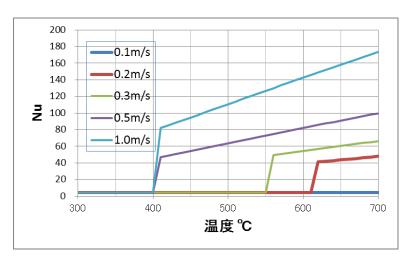
$$Nu = 4.36$$
 (3-16)

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} (3-17)$$

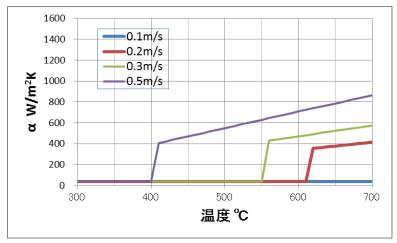
ここで、 α : 熱伝達係数[W/m²K]、d: 管内径[m]、 λ : 熱媒熱伝導率[W/mK]、Pr: プラントル数[-]



(a)レイノルズ数 Re



(b)ヌセルト数 Nu



(c)熱伝達係数 a

図3-19 管内熱伝達と熱媒温度の関係 (熱媒流速パラメータ)

3-5. 委託研究の中止

当機関(日立造船株式会社)は、平成 25 年、サウジアラビアにおいて独自に太陽熱発電用実証プラントの試験を開始し、反射鏡面曲げ制御方式フレネル集光装置の開発を進めてきた。しかしながら、平成 28 年度末から平成 29 年度にかけて、太陽熱発電事業におけるそれまでの事業方針を大幅に見直す判断に至った。このため、SIP エネルギーキャリア研究開発テーマ「高温太陽熱供給システム」での研究継続は、困難となった。当機関は、研究中止の手続きを行い、平成 29 年 6 月 20 日を中止日として申請が受理された。

平成 29 年度のチーム方針は、当機関開発の反射鏡面曲げ制御方式フレネル集光装置を基にして、熱媒の物性および集熱管に合わせた 650℃集光システムの検討を実施するというものであった。しかし、当機関の脱退により方針変更の必要が生じたため、連携して検討することになっていた千代田化工建設株式会社殿、一般財団法人エネルギー総合工学研究所殿と協議を行った。その結果、システム検討は、1 次反射鏡が固定曲率である汎用のフレネル式集光装置(旧 Novatec 社、現 FRENEL 社】製)を基にして実施することを決定した。この判断は、当機関の脱退もさることながら、反射鏡面曲げ制御方式フレネル集光装置の量産実績がないため商用装置としてのコストが不明であって、システムの経済性検討には、コスト的に有利な汎用フレネル式の方が適切である、という理由もある。汎用フレネル式集光装置は商用機であることから検討に必要な設計データは、国内外のベンダーあるいは、メーカーから入手する。また、当機関が担当予定であったソーラーフィールドの初期設計は、上記の両機関が分担するとの了承を得て、引き継ぎとした。

3-6. まとめ

当機関は、事業方針見直しのため、平成 29 年 6 月 20 日付をもって SIP 委託研究を中止することとなった。したがって、研究開発期間は、平成 26 年 7 月 1 日~平成 29 年 6 月 20 日となる。当該期間中の研究実施内容について本報で述べた。すなわち、(1) アンモニア製造 2000[トン/日]規模の水素製造ユニットに必要な熱量を供給する 650 $^{\circ}$ 熱源フレネル型集光集熱システムの検討、(2) 集光集熱設備の実証案(一次)の策定結果および(3)開発の進んだ炭酸塩系熱媒の集熱管内流れにおける検討について、それぞれ 3-2 節から 3-4 節に記した。

これら3項目の実施内容をもって、研究開発期間中のマイルストーンを達成している。

3-7. 今後の課題

反射鏡面曲げ制御方式フレネル集光装置は,集光性能に優れるが,反射鏡の曲率を制御する機構の ため,固定曲率反射鏡のフレネル式よりも製造コストは高くなる。コスト低減には,構造・機構およ び部材のさらなる改良が必要である。

4. 外部発表実績

- (1) 論文発表 該当なし
- (2) 学会,展示会等発表 国内外ともに該当なし
- (3) プレス発表 該当なし
- (4) マスメディア等取材による公表 該当なし
- 5. 特許出願実績 該当なし

6. 参考文献

- (1)長沢工, 天体の位置計算 (増補版), (1985), 地人書館
- (2)日本機械学会編, 伝熱工学資料, 改訂第4版(1986) pp.51-56, 日本機械学会
- (3)大江修造, "物性推算法", (2002) pp.236-237, データブック出版社
- (4)日本機械学会編,機械工学便覧流 A5 流体工学,初版(1986) p.74,日本機械学会