

終了報告書

S I P (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「CO₂フリー水素利用アンモニア製造・

貯蔵・輸送関連技術の開発」

研究題目「高温高効率集熱管の評価」

研究開発期間：平成30年4月1日～平成31年3月31日

研究担当者：細野 恭生

所属研究機関：千代田化工建設株式会社

目次

1. 本研究の目的	1
1-1. 研究開発期間終了以降から事業化までのシナリオ	
1-2. 研究開発期間内に取り組む課題	
1-2-1. 集熱管の基本構造と機能	
1-2-1-1. 金属管・光学選択膜	
1-2-1-2. ガラス管・反射防止膜	
1-2-1-3. フランジ・ベローズ	
1-2-2. 課題の背景	
1-2-3. 本研究の課題	
1-2-4. 実施内容	
2. 研究開発目標とマイルストーン	8
3. 研究開発実施内容	8
3-1. 集熱管性能評価試験確認	
3-1-1. 太陽光集光集熱試験	
3-1-2. 屋外放熱試験	
3-1-3. 屋内放熱試験	
3-1-4. 屋内集光集熱試験	
3-1-5. ベローズ耐久試験	
3-1-6. ガラス管反射防止膜テーパー摩耗試験	
3-1-7. ガラス管反射防止膜サンドストーム試験	
3-2. 集光集熱シミュレーター検証用データ	
3-2-1. 太陽光集光集熱試験	
3-2-2. 屋外放熱試験	
3-3. 集熱管経済性検討	
3-3-1. 経済性評価用受領データ	
3-3-2. 経済性検討プラント構成	
3-3-3. プラント性能評価結果	
3-3-4. プラントコスト評価	
3-3-5. プラント経済性評価	
3-4. まとめ	
3-5. 今後の課題	
4. 外部発表実績	20
5. 特許出願実績	20
6. 参考文献	20

図表一覧

- 図1. 世界の発電容量の将来予測（発電方法別）
- 図2. 2℃シナリオ達成のためのCO₂排出量削減策
- 図3. 世界の年間直達日射量分布
- 図4. 世界の平均風速分布
- 図5. エネルギーキャリアとしてのアンモニアのチェーン
- 図6. CO₂フリーアンモニアのサプライチェーンと本研究における主な検討課題
- 図7. 集熱管の外観
- 図8. 太陽光集光集熱試験結果
- 図9. 屋外放熱試験結果
- 図10. 経済性検討用受領データ（集熱効率、春分午前8時）
- 図11. 経済性検討用受領データ（集熱効率、春分午前10時）
- 図12. 経済性検討用受領データ（集熱効率、春分正午）
- 図13. 経済性検討用受領データ（夜間放熱量）
- 図14. 集熱特性（春分）
- 図15. 集熱特性（1月－6月）
- 図16. 集熱特性（7月－12月）
- 図17. 直接費内訳
- 表1. 性能評価試験項目
- 表2. シミュレーター検証用データ（太陽光集光集熱試験）
- 表3. シミュレーター検証用データ（屋外放熱試験）
- 表4. 経済性検討プラント構成
- 表5. プラント性能評価結果
- 表6. プラント経済性評価（条件・結果）

1. 本研究の目的

1-1. 研究開発期間終了以降から事業化までのシナリオ

世界のエネルギー消費量は、将来的な人口増加や生活水準の向上により大幅な増大が見込まれている。一次エネルギーとして従来の化石燃料（石油・石炭・天然ガス）への依存が続く場合には、CO₂発生量の増加とそれに伴う地球温暖化、さらにはこれに起因する各種被害の増加が懸念されている。こうした課題を回避するためにはCO₂排出量の削減が急務であり、再生可能エネルギー（太陽光・太陽熱・風力など）やCarbon Dioxide Capture and Storage（CCS）の導入が必要とされている。IEAのレポート（Energy Technology Perspective 2015）によると、地球温暖化による平均気温の上昇を2℃に抑制するシナリオ（2DS）の達成のためには、主要なCO₂排出源の一つである電力の一次エネルギー源として、化石資源の使用を抑制し、風力・太陽・水力・バイオマスなどの再生可能エネルギーを約60%導入する必要があるとされている（図1）。

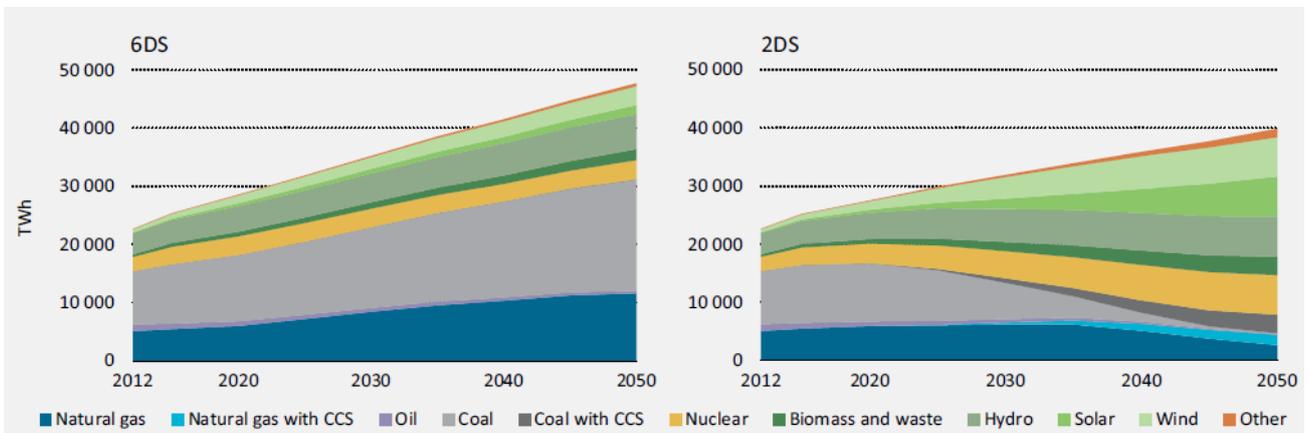


図1. 世界の発電容量の将来予測（発電方法別）¹⁾

また、2DSシナリオ達成のために必要となる、全産業でのCO₂排出量削減の方策の内訳を図2に示す。図2の扇状の上辺が6℃上昇シナリオ（6DS）、下辺が2℃上昇シナリオ（2DS）におけるCO₂排出量である。6DSから2DSへCO₂排出量削減達成の方策として、再生可能エネルギーの導入とCCSの2つでCO₂排出削減量の43%を占めており、これらが地球温暖化抑制に対して重要な方策であることがわかる。

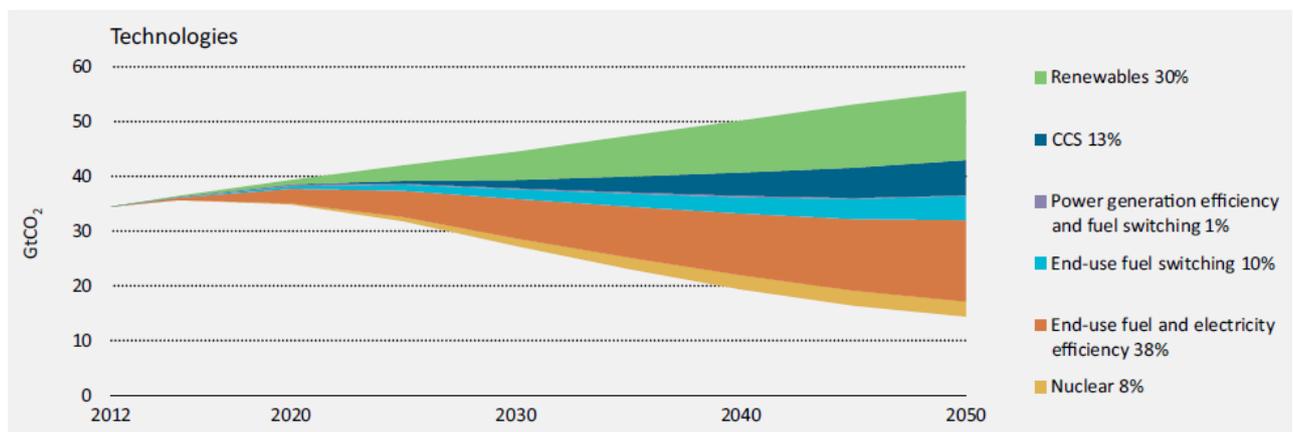


図2. 2℃シナリオ達成のためのCO₂排出量削減策¹⁾

このように、再生可能エネルギーによる発電の導入拡大がCO₂排出量削減策として期待されているが、地域的な偏在が大きな課題の一つである。図3に、太陽の直達日射量の分布を示す。太陽熱は、集熱による発電や熱利用を介して、水素・アンモニア製造のエネルギー源となる。日射量の高い地域（図中の色の薄い地域）は、中東・北アフリカ、オーストラリア、アメリカ西海岸、アジア内陸部に存在しており、日本の直達日射量は低い。同様に、風力発電に適した平均風速の高い地域（図4の赤の地域）は、地上では南米パタゴニア、中央アジアや高地などに限られている。日本国内で風況のよい地域は、北海道・東北に限られている。

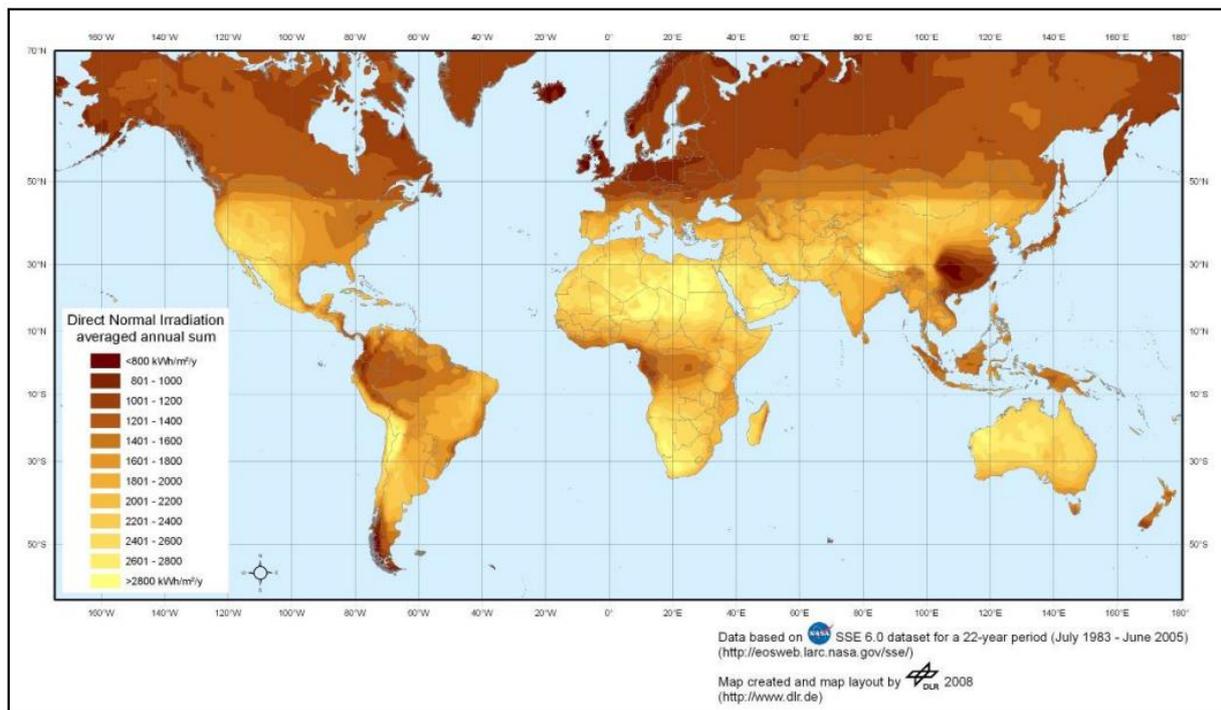


図3. 世界の年間直達日射量分布²⁾

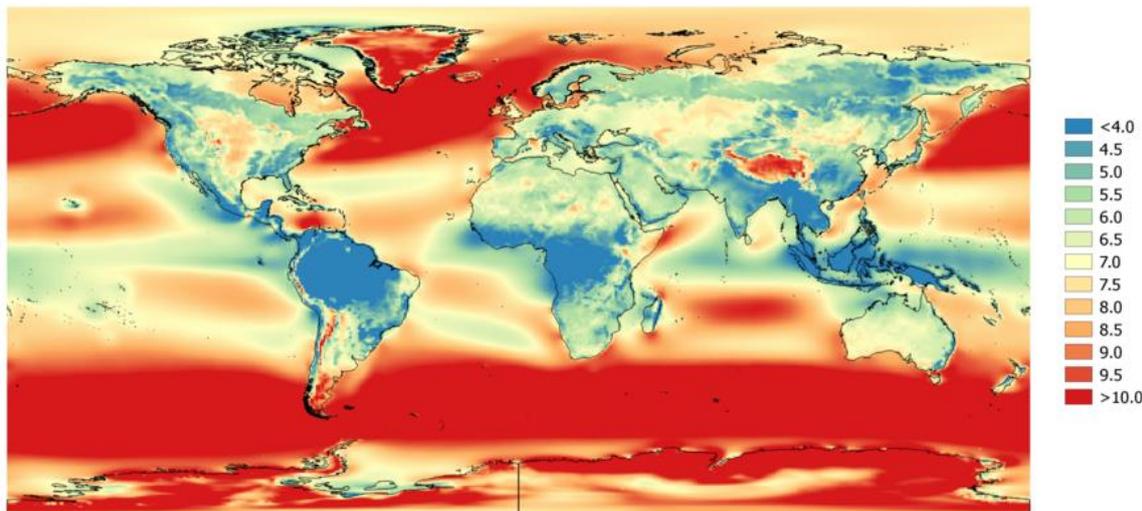


図4. 世界の平均風速分布³⁾

このように、世界的に偏在の大きな再生可能エネルギーを国内で利用するためには、海外の適地で再生可能エネルギーを化学物質に変換し日本に輸送して利用する、「エネルギーキャリア」の導入が必須となる。再生可能エネルギーを水素やアンモニアなどのエネルギーキャリアへ転換することで、電力では困難な長距離輸送と長期貯蔵が可能になる。これにより、地域偏在の克服だけでなく、需給変動に合わせた再生可能エネルギーの供給システムが実現できる。

一方で、再生可能エネルギーからエネルギーキャリアの製造を実現するためには、再生可能エネルギーからの発電コストの削減のみならず、水電解や熱化学法などによる水素転換、さらにはアンモニアや有機ヒドライドといったエネルギーキャリアへの転換のための技術の確立、低コスト化が必須となる。再生可能エネルギーや化石燃料を水素源としたCO₂フリー水素を用いたエネルギーチェーンのイメージを図5に示す。本テーマでは、アンモニアチェーンの中核となる、アンモニア合成プロセスの開発を行ってきた。平成29年度までは、アンモニア製造プロセスより上流側を技術開発対象としていなかったが、平成30年度に、高温太陽熱利用のための集熱管の開発チームおよび水蒸気電解による水素製造技術の開発グループを統合したことにより、再生可能エネルギーの利用を伴う上流側の技術も検討の対象に加わっている。本テーマでカバーされる課題とそれら相互の関連が、図6に示されている。再生可能エネルギーを用いたCO₂フリーアンモニアの製造コスト低減のためには、再生可能エネルギーを用いた安価かつ出力が安定した発電方法、高効率・安価な水電解技術、およびこれらを統合したエネルギーマネジメントが必要になると思われる。

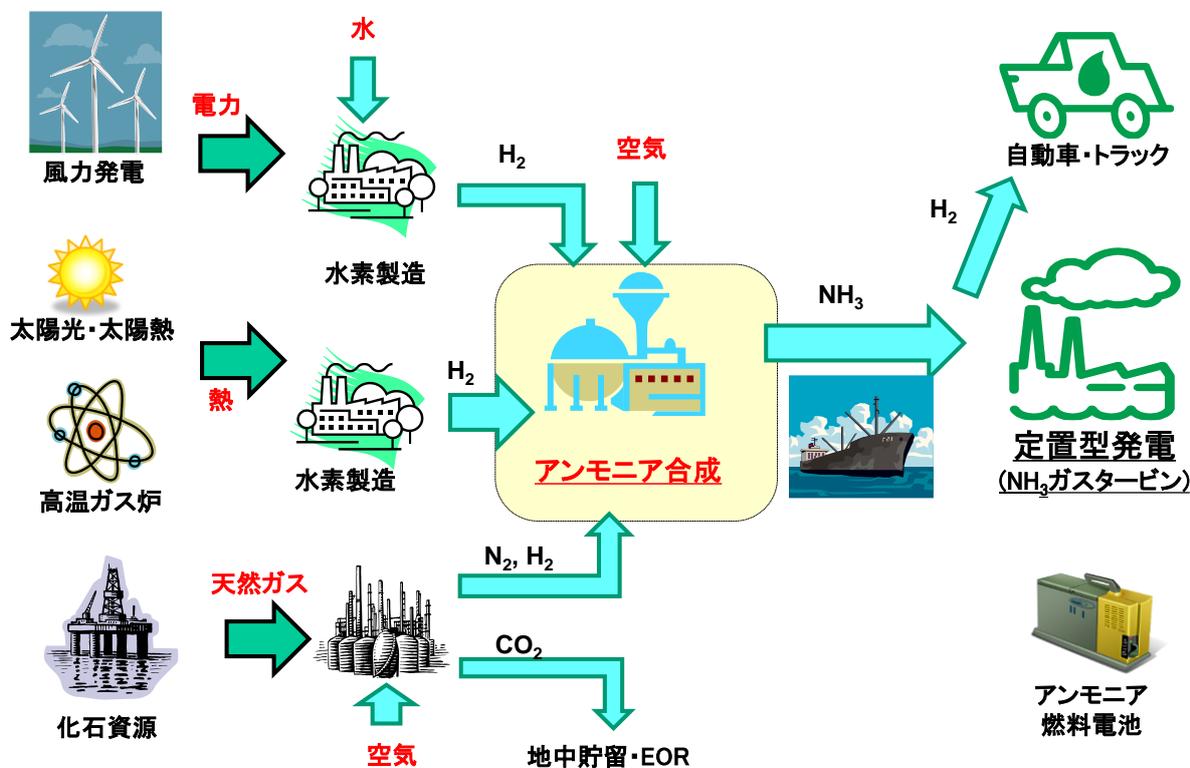


図5. エネルギーキャリアとしてのアンモニアのチェーン

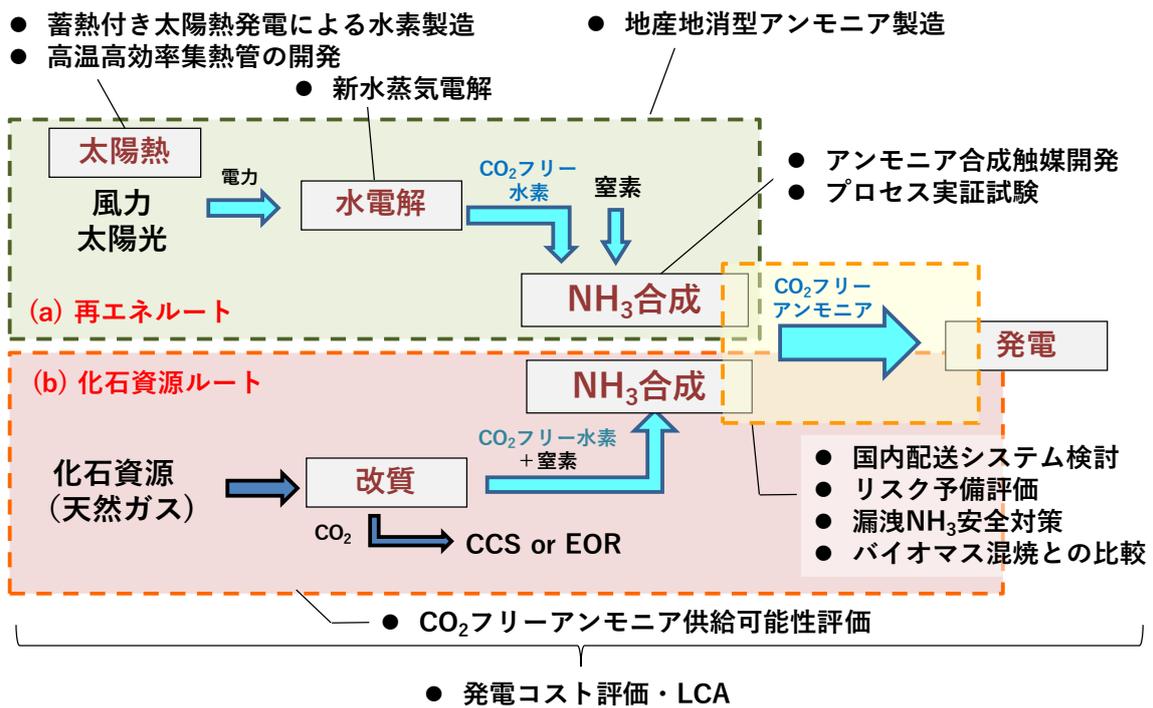


図6. CO₂フリーアンモニアのサプライチェーンと本研究における主な検討課題

1-2. 研究開発期間内に取り組む課題

水素製造の再生可能エネルギー由来の熱源として、高温太陽熱供給に関する開発が昨年度まで「高温太陽熱供給システム」チームで行われてきた。同チームの高温高効率集熱管開発グループは、現行の海外製品と比較して高い熱効率を有する集熱管の開発を進めてきた。最終年度であるH30年度は「CO₂フリー水素利用アンモニア製造・貯蔵・輸送関連技術の開発」チームにおいて、CO₂フリーアンモニア製造に向けた要素技術開発として、集熱管開発を継続する。具体的には、H29年度に開発、試作した集熱管の性能評価を海外のプラント及び評価設備を利用して実施し、世界トップレベルの性能を広く世間にアピールすると共にその経済性についても評価する。

1-2-1. 集熱管の基本構造と機能

本研究で取り組む課題を述べる前に、開発する集熱管の一般的な構造とその機能を説明する。集熱管は、集光集熱ユニットの反射鏡の焦点に位置し、長さ4～5mでガラス管と金属管による真空断熱構造となっている（図7参照）。

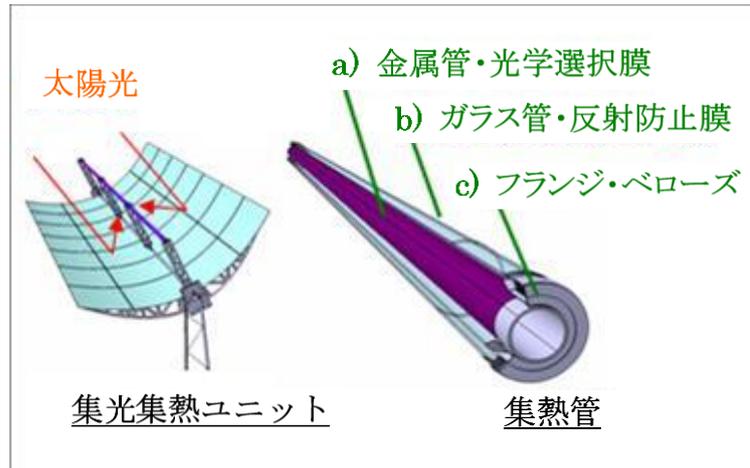


図7. 集熱管の外観

1-2-1-1. 金属管・光学選択膜

金属管は、集光集熱ユニットの持つ反射鏡により集められた太陽光を吸収、熱変換して管の中に流される熱媒体に効率良く伝える機能を有する。そのサイズは一般的には外径が70～90mmφ、肉厚が2～3mm、長さは4～5mである。材質は、耐熱性耐腐食性が必要であることから一般的にはステンレス鋼材が用いられている。又、その外周表面には、光学選択膜が形成される。

光学選択膜は、集熱管の構成においてその性能を決める重要部位である。全体で数百nmという薄膜であるが、その中には異なる機能を持つ3つの層（反射防止層、太陽光吸収層、赤外反射層）で構成されており、それぞれがnmオーダーでの膜厚設計がなされ半導体や液晶ディスプレイの薄膜形成に広く用いられているスパッタリング等の薄膜形成技術により成膜されている。

1-2-1-2. ガラス管・反射防止膜

ガラス管は、真空2重断熱構造を形成する外側の構造体となり外径は120～125mmφ、肉厚3mm、長さ4～5mが一般的である。構造体としての強度に加え、金属管に効率よく光を透過させる機能が求められる。このため、ガラス自身の透過率が高い材料を用いることと、その内外表面での光の反射によるロス（空気とガラスの屈折率差に起因）を最小限に防ぐべく100nm程度の反射防止膜という光学薄膜が形成されており、全体で約96%の透過率が得られる様、設計されている。

又、真空2重管構造を形成するには、内側にある上記金属管との間で気密性を保ち溶接する必要があるためガラス管端部にはコバルト金属（線膨張係数の低い金属）のリングが取り付けられており、さらに組み立て後に内部を高真空にするための排気口となるチップ管が取り付けられている。

1-2-1-3. フランジ・ベローズ

集熱管では前述のごとく太陽光から変換された熱を効率良く熱媒体に伝えるためガラス管と金属管により真空2重断熱構造を形成する必要がある。内側の金属管の温度が高温（約400～650℃）でかつ一日のうち昼夜で変化することから、その長さも材料の線膨張係数に従い変化する。一方、ガラス管は上記の如く高透過性能を有しているため光の

吸収はなくその温度は、数十℃でありその全長はほとんど変化しない。この2つの管の長さ変化を吸収するために設けられるのがベローズである。金属管とガラス管の間にフランジを介して接続される。ベローズ・フランジは気密性を確保しながら、プラントの耐用年数を25年とすると約10000回伸縮しても壊れない耐久性が必要である。フランジ・ベローズの材質・構造についての要素技術開発も金属管／光学選択膜と同様、本研究にて実施している。

1-2-2. 課題の背景

世界の集熱管メーカは、30年以上前に初期の太陽熱発電が行われた当時はイスラエルのソレルというメーカがその草分け的存在であるが、その後、ドイツのガラスメーカであるショットが参入、市場占有率を伸ばし、8割以上でほぼ独占状態となった。一方、ショットの進出により業績不振となったソレルは、2010年にシーメンスに買収されたが2年後にはシーメンスがソーラ関連事業からの撤退・事業売却を表明、その1年後の2013年にスペインのガラスメーカであるリオグラスにより買収され存続している。さらに2016年には、ショットもリオグラスに買収されることとなった。一方イタリアでは国立研究機関であるENEAが2001年より太陽熱利用研究を始め、高温(550℃)の熔融塩を熱媒体とする集光集熱システムを開発した。その技術を受け継ぎ設立されたメーカのアルキメーデ(イタリア)が、イタリアでの実証試験を経て商業規模のプラント向けの生産を始めようとしている。最近では、中国メーカからの関連学会での発表や展示会等での試作品の出展がなされて、中国国内での太陽熱プラントの導入計画とともに400℃レベルの管が採用され始めていると考えられる。高温仕様としては、アルキメーデに続き、ショット(現在のリオグラス)が2013年に550℃仕様の集熱管を発表した。しかし、本研究で取り組むさらなる高温(~650℃)仕様の集熱管の開発については世界でも報告例はない。

本研究では、世界でも開発例のない~650℃の集光集熱システムを日本が先立って早期に開発、海外中小規模実証試験による性能評価を経て商業化するステップを加速するために、その基幹部材である高温(~650℃)対応集熱管の試作体制を確立することも目的としている。

集熱管は、その使用場所が発電プラントに限られ、一般にはその製品の入手は困難(機密保持契約で限られたユーザー以外入手不可)である。よって競合製品(技術)のベンチマークが困難であることに加え、参入メーカが少なく、その製造プロセスに関する技術や装置に関する情報はさらに入手困難な状況にある。装置を導入し、試作する中での問題点を抽出、対策する中で将来の大量生産にも適用できる独自技術を開発する必要がある。

1-2-3. 本研究の課題

本研究にて目標とする600~650℃の熱源を供給する集光集熱システムを構築するためには、高温集光集熱システムの開発で検討する高温対応可能な集光方式による集光度向上だけでなく、集めた光を効率よく熱変換可能な集熱管も必要となる。

今後、取り組むべき課題は、本高温型集光集熱システムを用い400~650℃にて集熱効率70%以上が可能な集熱管を開発し、さらに将来の大量生産を想定した生産プロセス技術を開発し、その試作体制を構築することにある。

1-2-4. 実施内容

千代田化工建設株式会社と一般財団法人エネルギー総合工学研究所は、株式会社豊田自動織機により実施される、開発された高温高効率集熱管の性能評価試験（表1）において、試験実施前には各試験が経済性評価に必要なデータを取得できる試験方法となっていることを確認し、試験実施中には各試験が正しく行われていることを確認し、各試験において各種評価に必要なデータが取得できていることを確認する。さらに、エネルギー総合工学研究所では、試験実施後には測定結果を用いたシミュレーション計算による評価、シミュレーターの検証、経済性評価に必要な集光集熱性能評価計算を実施し、千代田化工建設は性能評価試験結果と集光集熱性能評価計算結果を用いて開発した集熱管の商業プラント規模での経済性評価を実施する。

表1. 性能評価試験項目

試験項目	実施予定機関	概要
太陽光集光集熱試験	ENEA	太陽光集光集熱試験装置を用いて集熱管の集熱特性を評価する。
屋外放熱試験	ENEA	太陽光集光集熱試験装置を用いて集熱管の放熱特性を評価する。
屋内放熱試験	ENEA DLR	屋内放熱試験装置を用いて集熱管の放熱特性を評価する。
屋内集光集熱試験	DLR	屋内擬似太陽光集光集熱試験装置を用いて集熱管の集熱特性を評価する。
ベローズ耐久試験	DLR	ベローズ加速疲労耐久試験装置を用いてベローズの疲労耐久性を評価する。
ガラス管反射防止膜 テーバー摩耗試験	DLR	テーバー摩耗試験によりガラス管の反射防止膜の耐久性を評価する。
ガラス管反射防止膜 サンドストーム試験	DLR	サンドストーム試験機を用いてガラス管の反射防止膜の耐久性を評価する。
屋内放熱試験 (ベローズ部)	DLR	熱流束センサーを使用した屋内放熱試験によりベローズ部と集熱部のそれぞれの放熱特性を評価する。

ENEA：イタリア新技術エネルギー持続可能経済開発庁

DLR：ドイツ航空宇宙センター

2. 研究開発目標とマイルストーン

平成30年度：

豊田自動織機株式会社により実施される、開発された高温高効率集熱管の性能評価試験において、経済性評価に必要なデータを取得できる試験方法となっていることの確認、試験が正しく実施されていることの確認、試験によって経済性評価に必要なデータが取得できていることの確認を行う。

経済性評価に関しては、エネルギー総合工学研究所による年間集光集熱特性、耐久性、集熱管コスト評価等を基にして商業プラント規模での性能の予測および設備コストの試算を行うことで経済性を評価する。

マイルストーン

平成30年度：開発された高温高効率集熱管を用いた商用プラント規模での経済優位性を評価する。

3. 研究実施内容

3-1. 集熱管性能評価試験確認

豊田自動織機が発注し、イタリア新技術エネルギー持続可能経済開発庁（E N E A）およびドイツ航空宇宙センター（D L R）が実施した性能評価試験において、経済性評価に必要なデータを取得できる試験方法となっていることの確認、試験が正しく実施されていることの確認、試験によって取得したデータが3-2項のシミュレーター検証や3-3項の経済性評価への適合していることを確認した。

3-1-1. 太陽光集光集熱試験

実施機関：E N E A

イタリア中部にあるE N E Aの研究所敷地内に設置してある屋外集光設備を用いて太陽光を集熱管に集光し、集熱管内部を流れる熔融塩に集熱する試験。幅約6 m、長さ約50 mの放物面鏡を用いて焦点上に設置された集熱管に集光する。12本の開発した集熱管を直列に取り付けて試験を行う。集熱管の入口と出口の熔融塩の温度差と熔融塩の流量から集熱量が算出される。装置や各種計器（流量計、温度計、日射強度計、風向風速計、気温計、湿度計）の形式選択、設置位置、設置方法、集光性能測定方法などが問題ないことを確認した。

3-1-2. 屋外放熱試験

実施機関：E N E A

太陽光集光集熱試験と同じ装置を用いて、太陽を集光しない状態で集熱管内部を流れる熔融塩の温度低下を計測する。集熱管の入口と出口の熔融塩の温度差と熔融塩の流量から放熱量が算出される。この試験で計測される放熱量は集熱管からだけでなく集熱管サポートや集熱管前後に取り付けられているフレキシブルジョイントからの放熱量も含む。また、設備構成上太陽を集光しない状態であっても太陽からの直射分は入熱している。

3-1-3. 屋内放熱試験

実施機関：D L R、E N E A

集熱管を電力で加熱し温度と放熱量の関係を得ることを目的とした試験。

E N E Aは集熱管に直接電気を流すことで集熱管自体が発熱するため、内部の温度計と集熱管の温度の誤差が小さい特徴がある。また、交流電源を用いているため、誘導電流によるロスが発生し、放熱量の計算に誤差が生じることが懸念されるが、その点も電圧と電流の位相差から補正することが可能である。ただし、集熱管の熱損失は集熱管中央部の電圧降下から算出されるため、評価されるのは集熱管の集光部のみであり、端部のベローズ部の熱損失は反映されない。

D L Rは集熱管内部に電気ヒーターを挿入して集熱管を加熱する方式である。この方式では内部の温度計に放射熱が集中して実際の集熱管温度と誤差が生じるが、予備試験によりこの温度誤差を補正している。また、放熱熱流束の大きいベローズ部には集熱管の温度を均一にするための追加のヒーターが設置されており、集熱管の熱損失はベローズ部の追加ヒーターを含めた全体で評価される。

開発した集熱管と既存の集熱管の比較を行う為には既存の集熱管の熱損失データと比較する必要がある。既存の集熱管のメーカーデータでは熱損失はD L Rによって計測されたとあるため、今回の経済性検討についてもD L Rの熱損失データを採用することとする。

3-1-4. 屋内集光集熱試験

実施機関：D L R

擬似太陽光を楕円面鏡で反射して集熱管に集光し、集熱管内部を流れる常温の水の温度変化から集熱量を計測する。この装置では集熱管に集光する光エネルギー量は直接計測できないため、集光集熱効率はずでに特性が分かっている参照レシーバーと比較することで算出する。この試験は常温で実施されるため、実際の高温下での特性とは若干の差異が生じる可能性があるが、集光量や温度が安定した状態での計測が可能のため集熱管の相対的な特性を知ることができる。

3-1-5. ベローズ耐久試験

実施機関：D L R

金属管内部に設置したヒーターによって加熱した状態で集熱管の金属管部を固定し、ガラス管部を長手方向に振動させることでベローズの耐久性を計測する。振動幅を実際の温度変化による熱伸びと同じになるように設定していること、ベローズ部の配管温度を550℃まで昇温していること、50年以上の使用に相当する2万回の振動回数を実施することなどから実運用に則した試験方法となっていることを確認した。

3-1-6. ガラス管反射防止膜テーバー摩耗試験

実施機関：D L R

T A B E R社の往復摩耗試験機を用いて実施する。サンプルはガラス管を切り出したもので湾曲している。試験前後に透過率測定および顕微鏡により状態を確認する。この試験では集熱管の取り扱い時における接触に対する耐性を評価できる。

3-1-7. ガラス管反射防止膜サンドストーム試験

実施機関：D L R

砂をサンプルに衝突させることでコーティングの耐久性を計測する。試験はD L Rが開発した試験装置を用いて行われ、サンプルはテーバー摩耗試験と同形状である。これまで

D L Rが蓄積した知見により中東・北アフリカ（M E N A）地域での暴露試験との比較評価が可能である。

3-2. 集光集熱シミュレーター検証用データ

エネルギー総合工学研究所が作成した集光集熱シミュレーターの検証を実施するために必要なデータを豊田自動織機から提供された集熱管性能評価試験の結果から算出し、エネルギー総合工学研究所に送付した。

3-2-1. 太陽光集光集熱試験

太陽光集光集熱試験の結果の内、太陽が集光設備に正対する太陽南中時付近のデータから算出した熔融塩温度と集熱管の集熱効率の関係を図8に示す。集熱管効率は熔融塩温度だけでなく他の様々な条件（熔融塩流量、日射強度等）により変化するので、この図だけでは明確な傾向を読み取ることは出来ないが、シミュレーター検証用データとしては問題ないと考えられる。各試験日のデータの安定している時間帯を平均することで作成されたシミュレーター検証用データを表2に示す。

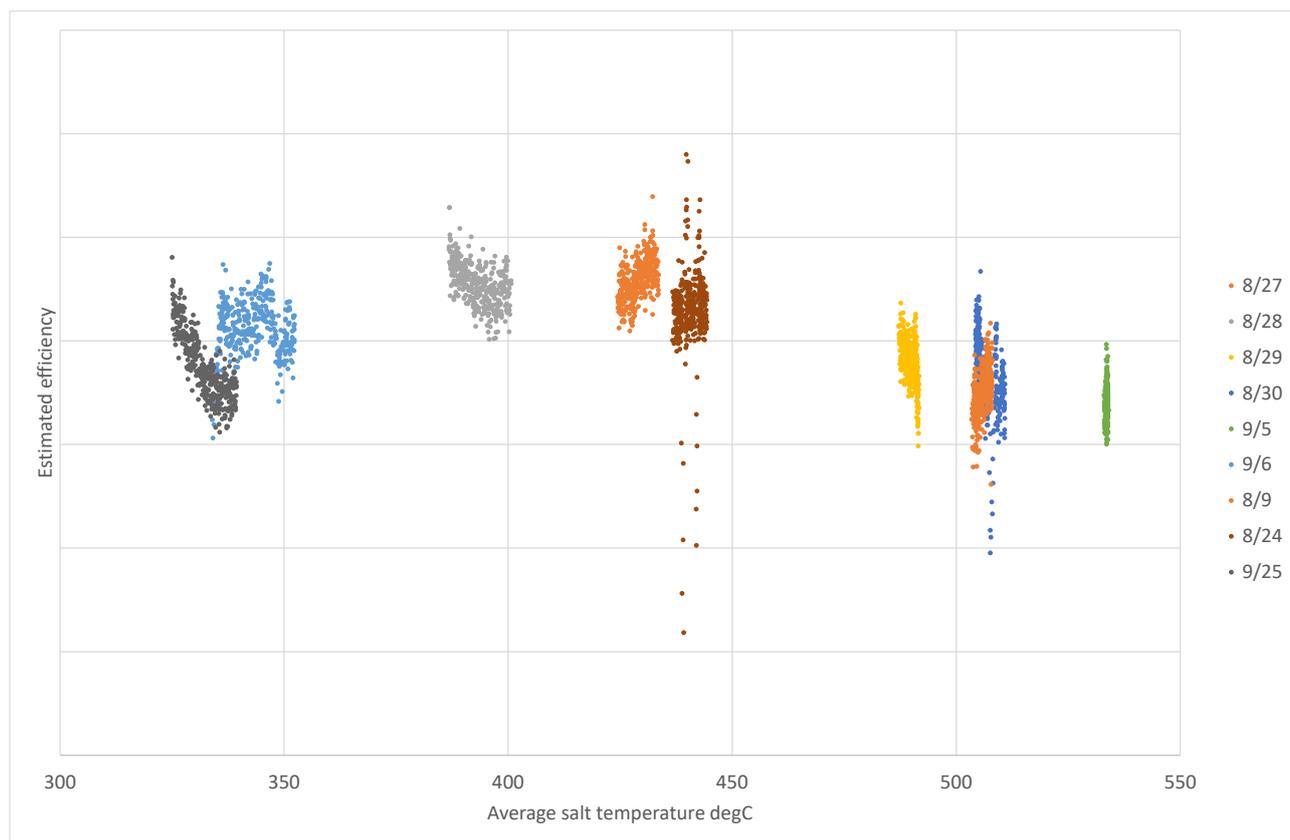


図8. 太陽光集光集熱試験結果

表 2. シミュレーター検証用データ (太陽光集光集熱試験)

番号	日付	入口温度 (°C)	出口温度 (°C)	流量 (kg/sec)	法線面日射強度 (W/m ²)
1	2018/8/9 11:50	499.5	512.1	5.774	749.8
2	2018/8/24 12:15	433.0	447.9	5.979	850.7
3	2018/8/27 12:15	420.8	437.0	6.049	915.2
4	2018/8/28 12:15	385.2	401.7	6.003	920.1
5	2018/8/29 12:15	481.9	497.6	4.986	785.3
6	2018/8/30 12:45	498.6	514.9	4.823	795.9
7	2018/9/5 12:10	524.3	542.8	4.620	889.1
8	2018/9/6 13:41	335.8	349.8	5.195	692.5
9	2018/9/25 13:15	324.4	340.0	5.926	902.6

3-2-2. 屋外放熱試験

屋外放熱試験結果から算出された熔融塩温度と集熱管の放熱量の関係を図 9 に示す。計測は複数日で実施され明確な正の相関が見て取れる。ただし、8/27 は明らかに他と異なる傾向があるため、この日のデータはシミュレーター検証には採用しないこととした。各試験日のデータの内、安定している時間帯を平均することで作成されたシミュレーター検証用データを表 3 に示す。

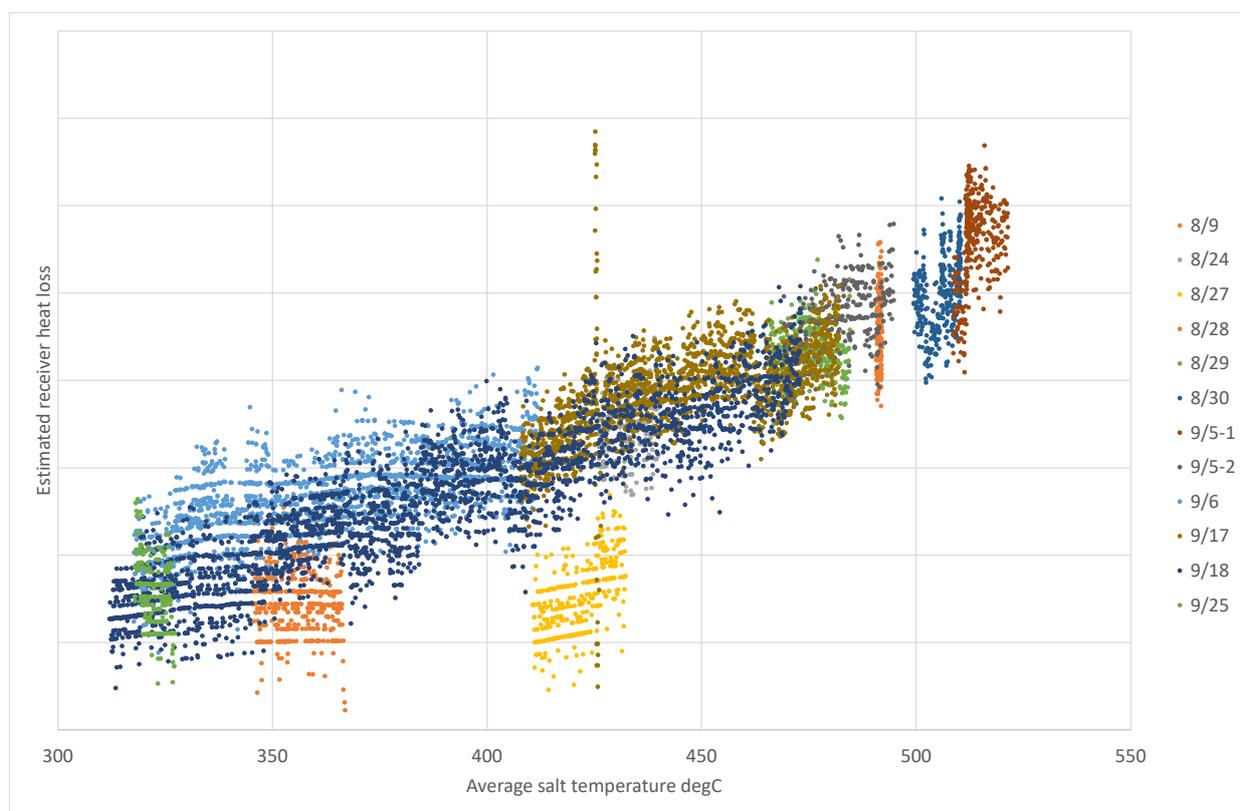


図 9. 屋外放熱試験結果

表3. シミュレーター検証用データ (屋外放熱試験)

番号	日付	入口温度 (°C)	出口温度 (°C)	流量 (kg/sec)	法線面日射強度 (W/m ²)
1	2018/8/9 14:00	492.7	490.2	6.087	392.7
2	2018/8/24 13:20	434.0	432.2	6.014	788.8
3	2018/8/28 9:40	356.2	355.5	6.036	694.4
4	2018/8/29 14:27	475.1	472.2	4.958	628.0
5	2018/8/30 14:25	504.6	501.7	4.886	654.2
6	2018/9/5 14:29	514.7	511.6	6.050	651.3
7	2018/9/5 15:14	479.3	476.8	6.128	524.9
8	2018/9/6 10:44	379.8	378.5	6.441	767.0
9	2018/9/17 13:04	439.5	437.1	5.146	783.7
10	2018/9/18 11:25	437.0	434.9	6.005	72.8
11	2018/9/18 12:40	389.5	387.8	6.010	243.4
12	2018/9/18 14:40	329.1	328.3	6.139	587.0
13	2018/9/25 12:35	323.0	322.4	6.073	947.9

3-3. 集熱管経済性検討

検証されたシミュレーターによってエネルギー総合工学研究所が算出した集熱管経済性検討用データおよび豊田自動織機算出の集熱管コストデータを基に、開発された集熱管を用いた場合と既存の集熱管を用いた場合の商業規模を想定した経済性の比較検討を実施した。

3-3-1. 経済性評価用受領データ

エネルギー総合工学研究所より受領した経済性評価用データを図10～13に示す。図中でTICOは豊田自動織機による開発した集熱管、A社は既存の集熱管を意味する。

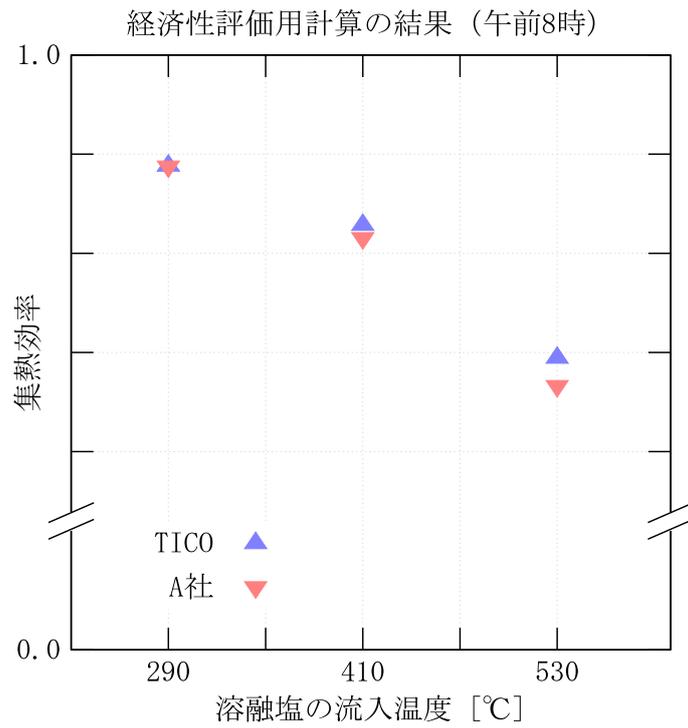


図 1 0 . 経済性検討用受領データ (集熱効率、春分午前 8 時)

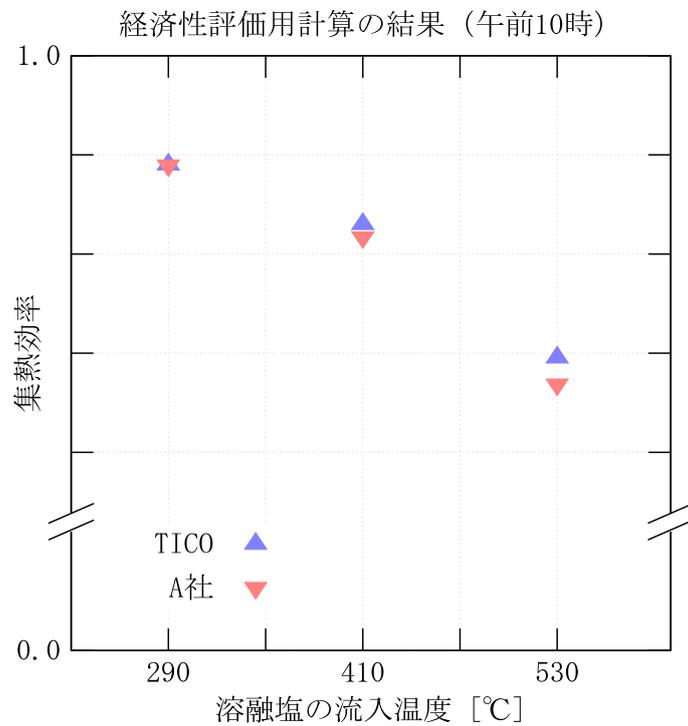


図 1 1 . 経済性検討用受領データ (集熱効率、春分午前 1 0 時)

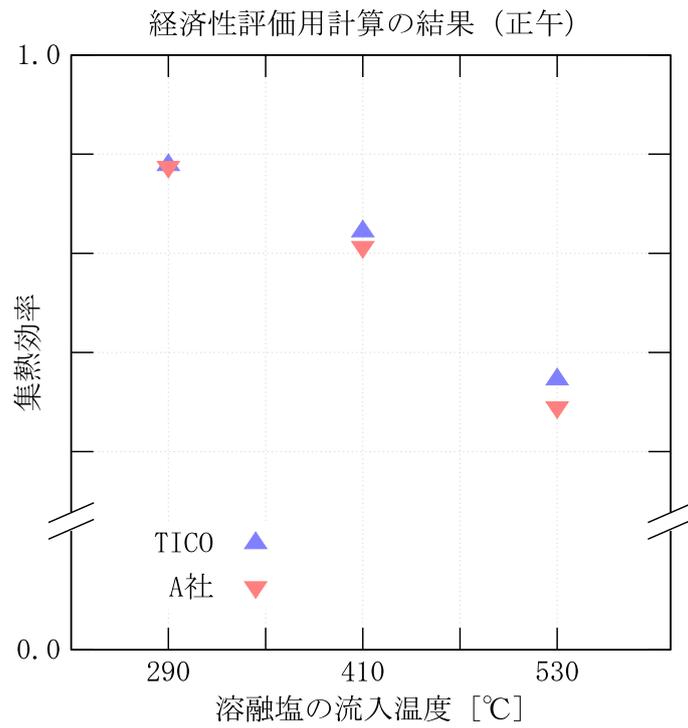


図 1 2. 経済性検討用受領データ（集熱効率、春分正午）

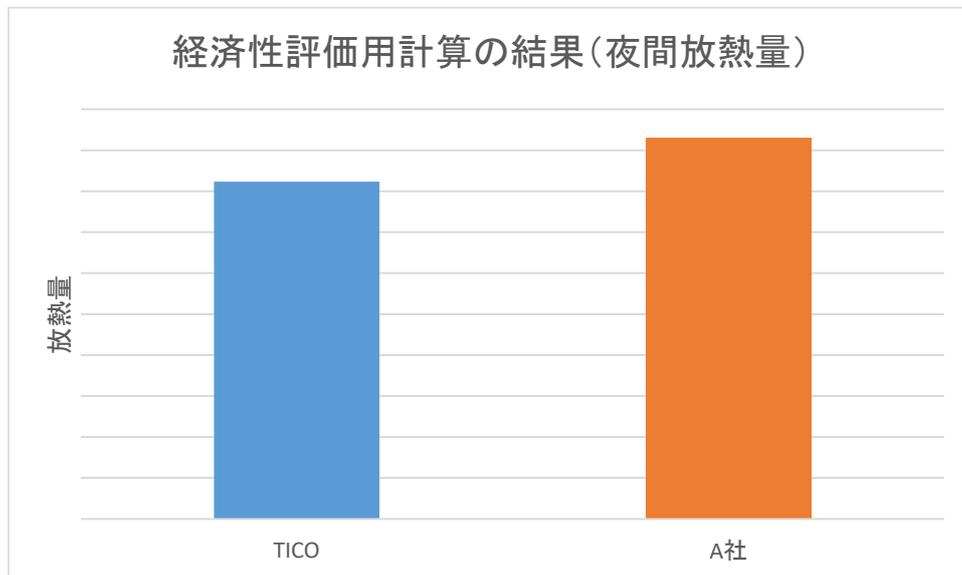


図 1 3. 経済性検討用受領データ（夜間放熱量）

3-3-2. 経済性検討プラント構成

経済性検討では表4に示す商業規模の集光太陽熱発電プラント構成を想定して実施した。

表4. 経済性検討プラント構成

発電出力	100 MW
蓄熱容量	1200 MWh
集光面積	1.6 km ²
集熱ループ数	500
集熱ループ長	600 m
集熱管数	72000 本
発電効率	40.4 %
集熱熱媒	硝酸塩系溶融塩（2成分系） NaNO ₃ 60%, KN ₃ 40%
集熱温度	550°C
熱媒夜間循環温度	290°C
設置場所	米国カリフォルニア州 Barstow-Daggett 空 港（北緯34.85度、西経116.79度）

3-3-3. プラント性能評価結果

先ず、エネルギー総合工学研究所から受領した集熱効率データから、平均集熱効率 μ_{rec} （TICO：80.1%、A社：78.7%）と集光効率特性 μ_{opt} （式1）を求めた。

$$\mu_{opt}(\theta_{IA}) = -5.748 \times 10^{-5} \theta_{IA}^2 - 2.294 \times 10^{-3} \theta_{IA} + 7.134 \times 10^{-1} \quad \text{式1}$$

ここで、 θ_{IA} （Incident Angle）は太陽の方向ベクトルと集光装置の法線ベクトルのなす角を表す。

次に、式2により日中の集熱量 Q_{day} が算出される。

$$Q_{day} = E_{DNI} \cos \theta_{IA} \mu_{opt}(\theta_{IA}) \mu_{rec} S \quad \text{式2}$$

ここで E_{DNI} は直達日射強度、 S は集光面積を表す。

さらに、式3により夜間および曇天時の放熱量 Q_{night} が算出される。

$$Q_{night} = Q_{loss} \times \frac{600m}{50m} \times 500loop \quad \text{式3}$$

ここで Q_{loss} はエネルギー総合工学研究所から受領した夜間放熱量データを表す。

以上の計算から算出されたプラント性能についての評価結果を表5に示す。また、春分の日の集熱特性を図14に、年間の集熱特性を図15、図16に示す。現在普及している2成分系の硝酸塩系溶融塩を用いた場合は固化を防止するため、夜間においても290°C程度で循環させる必要がある。開発された集熱管は日中の集熱量増加も期待できるが、それに加えて放熱損失が既存の集熱管と比べて小さいため、夜間および曇天時の放熱も考慮した年間の集熱量ではより大きな効果が期待される結果となった。

表5. プラント性能評価結果

項目	対既存集熱管比
日中集熱量	+1.8 %
夜間放熱量	-11.5 %
1日集熱量 (春分、晴天)	+3.4 %
年間集熱量 (発電量)	+4.1 %

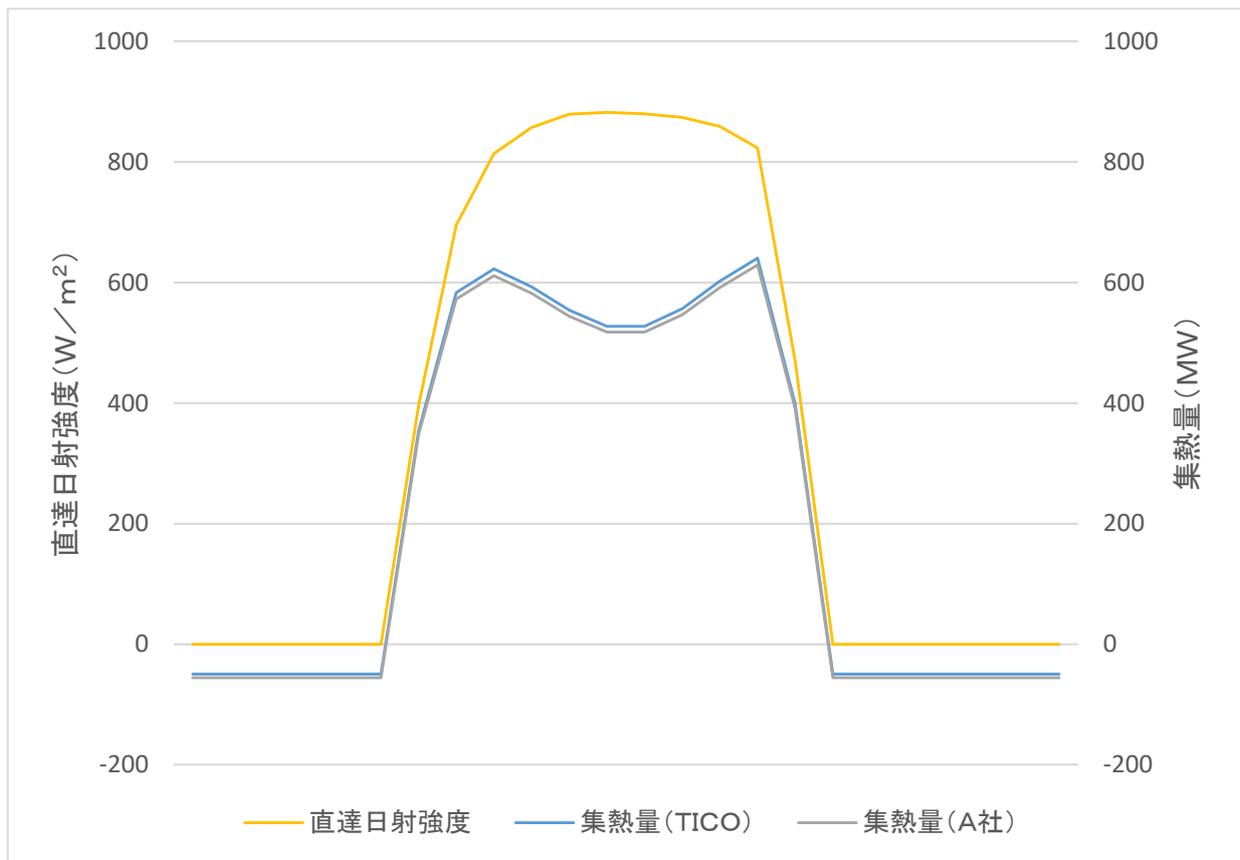


図14. 集熱特性 (春分)

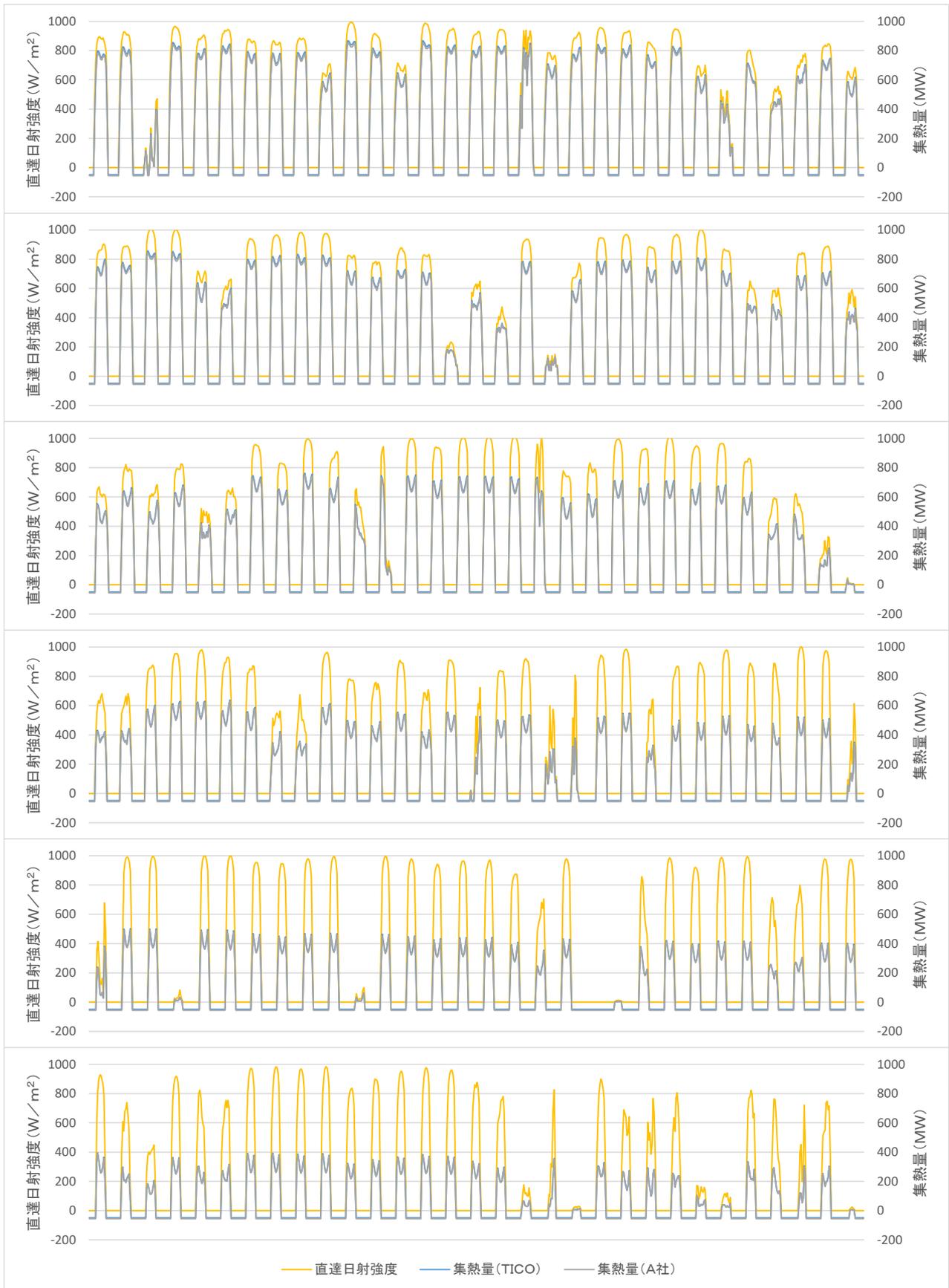


図16. 集熱特性 (7月-12月)

3-3-4. プラントコスト評価

プラントの初期投資コストについての評価を文献1)を参考に実施した。開発された集熱管を用いた場合の直接費の内訳を図17に示す。この中で、開発された集熱管と既存の集熱管のコスト差による集熱管追加コストの直接費全体に占める割合はわずかに0.1%であった。

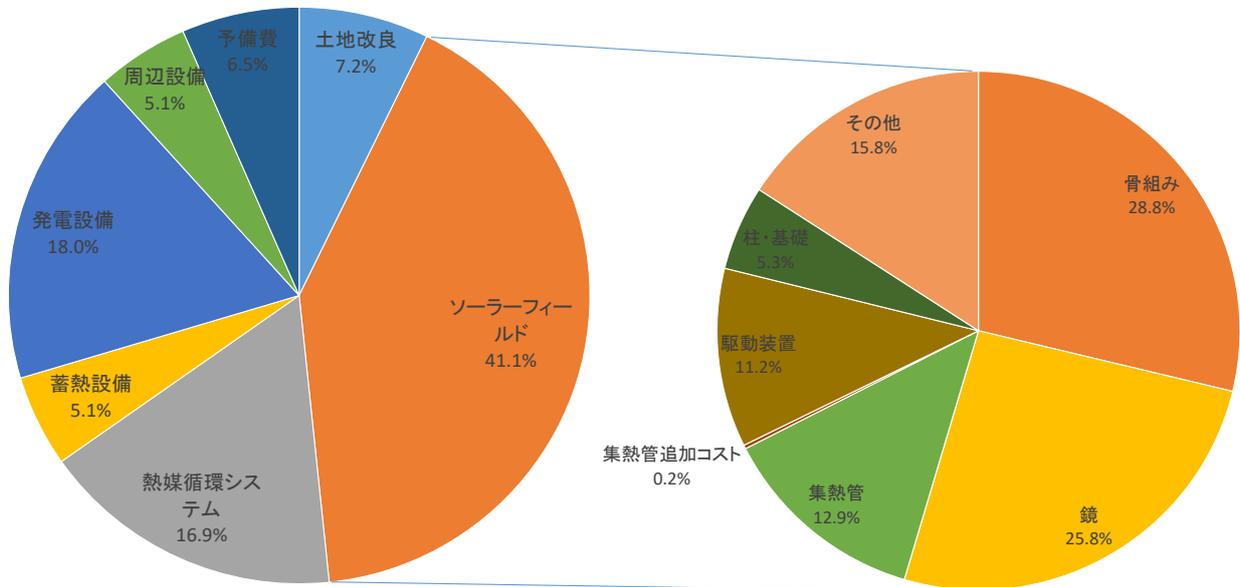


図17. 直接費内訳

3-3-5. プラント経済性評価

プラントの性能評価結果とコスト評価結果から計算されたプラント経済性評価の結果を表6に示す。この計算においてプラントの運転維持費は文献4)を参考にした。開発された集熱管は既存の集熱管と比較して発電単価が3.9%低い結果となった。

なお、ベローズ耐久試験とガラス管反射防止膜サンドストーム試験の結果から開発した集熱管は既存の集熱管よりも経年劣化しにくいと考えられるが、既存の集熱管における確かな情報がないため、本検討においては30年間の集熱管の性能低下による差は考慮せずに実施した。

表6. プラント経済性評価 (条件・結果)

条件	
プラント寿命	30年
割引率	3%
結果	
発電単価(LCOE) 対既存集熱管比	-3.9%

3-4. まとめ

豊田自動織機が開発した集熱管の評価試験の試験方法確認、試験立会、試験結果確認を実施し、集熱管の経済性評価に必要なデータが取得できていることを確認した。

集熱管の評価試験結果を解析し、エネルギー総合工学研究所による集光集熱シミュレーションの検証に必要なデータを提供した。

集熱管経済性検討用データおよび豊田自動織機算出の集熱管コストデータを基に、開発された集熱管を用いた場合と既存の集熱管を用いた場合の商業規模を想定した経済性の比較検討を実施した。

開発された集熱管は既存の集熱管と比較して、プラント性能は4.1%増加、プラントコストは0.1%増加、発電単価は3.9%低下する結果となった。

3-5. 今後の課題

開発された集熱管の評価試験および経済性評価の結果から、十分な競争力があることが確認され、また耐久性に関する試験にも問題がなかったことから、今後は長期間の使用実績の蓄積と生産体制の構築を行うことで、商業化を促進する必要がある。

4. 外部発表実績

(1) 学会、展示会等発表

<ポスター発表> 海外1件

1. Takuhito Tsutsui, Takayuki Homma, Kazuto Noritake, Hiroya Akatsuka, Yoshiki Okuhara, Tomohiro Kuroyama, Kazuo Yoshida, Yasuo Hosono, “Development of the receiver tubes for high solar-thermal conversion efficiency at high temperature”, SolerPACES 2018, 2-5 October 2018, Casablanca, Morocco.

5. 特許出願実績

なし

6. 参考文献

- 1) Energy Technology Perspective 2015, IEA, 2016
- 2) Global Potential of Concentrating Solar Power, SolarPACES 2009
- 3) Global Wind Atlas, <http://globalwindatlas.com/datasets.html>
- 4) Parthiv Kurup and Craig S. Turchi, Parabolic Trough Collector Cost Update for the System Advisor Model (SAM), Technical Report NREL/TP-6A20-65228, November 2015