

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：橋崎 克雄

所属研究機関：一般財団法人エネルギー総合工学研究所

目次

1. 本研究の目的	1
2. 研究開発目標とマイルストーン	7
3. 研究開発実施内容	8
3-1. 計算の方法	8
3-2. 実証試験結果との比較	11
3-3. 経済性評価のための計算	15
3-4. まとめ	17
3-5. 今後の課題	18
4. 外部発表実績	18
5. 特許出願実績	18
6. 参考文献	18

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°Cシナリオ達成のための CO ₂ 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. CO ₂ 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. ENEA の溶融塩トラフの集光計算用モデル
図 9. 集熱管の熱計算用モデルの形状
図 10. 計算で使用される物理モデル
図 11. 熱輻射のスペクトル
図 12. 屋内放熱試験に対応する計算の結果
図 13. 集熱管の実効的な放熱量（熱輻射分）
図 14. 集熱管の逐次計算の手順
図 15. 金属管表面の熱流束密度分布（太陽にほぼ正対している場合）
図 16. 屋外集光集熱試験に対応する計算の結果
図 17. 評価に使われるソーラーベクトル
図 18. 評価に使われる直達日射量
図 19. 金属管に吸収される熱量の比較
図 20. 経済性評価用の熱計算の結果
表 1. 性能評価試験項目

1. 本研究の目的

(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°C 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)。

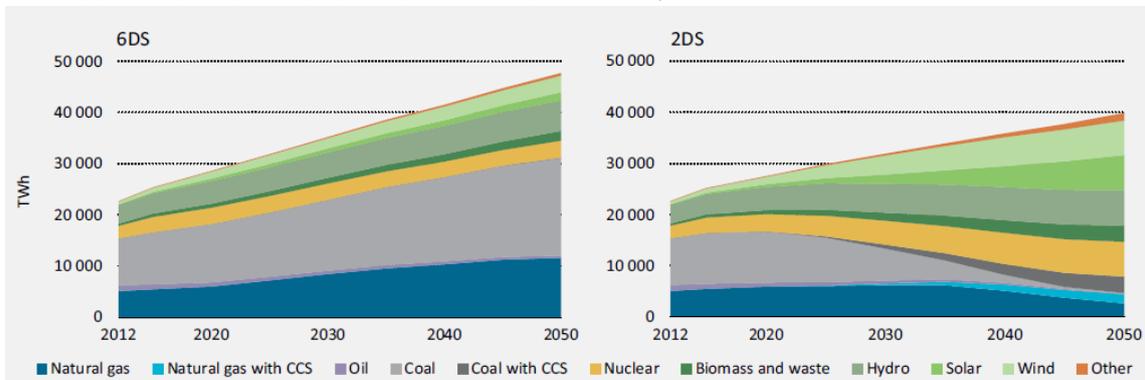


図 1: 世界の発電容量の将来予測 (発電方法別)¹⁾

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°C 上昇シナリオ(6DS)、下辺が 2°C 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。

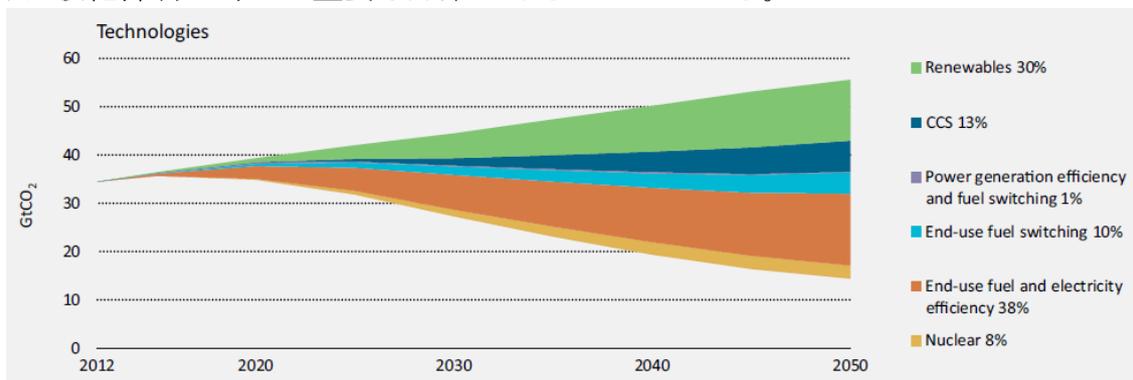


図 2: 2°Cシナリオ達成のための CO₂ 排出量削減策¹⁾

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。

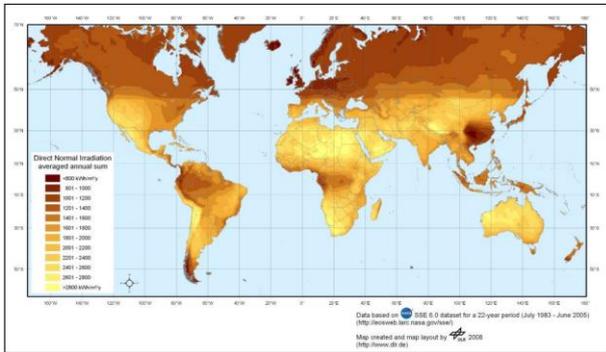


図 3: 世界の年間直達日射量分布²⁾

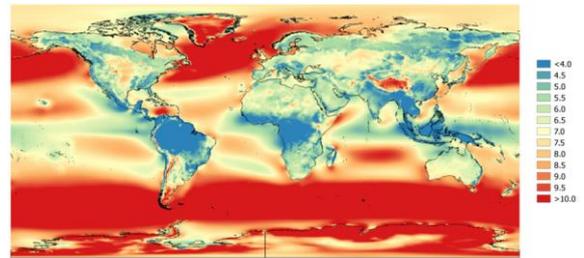


図 4: 世界の平均風速分布³⁾

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はなく、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ハイドライドといったエネルギーキャリアへの転換のため

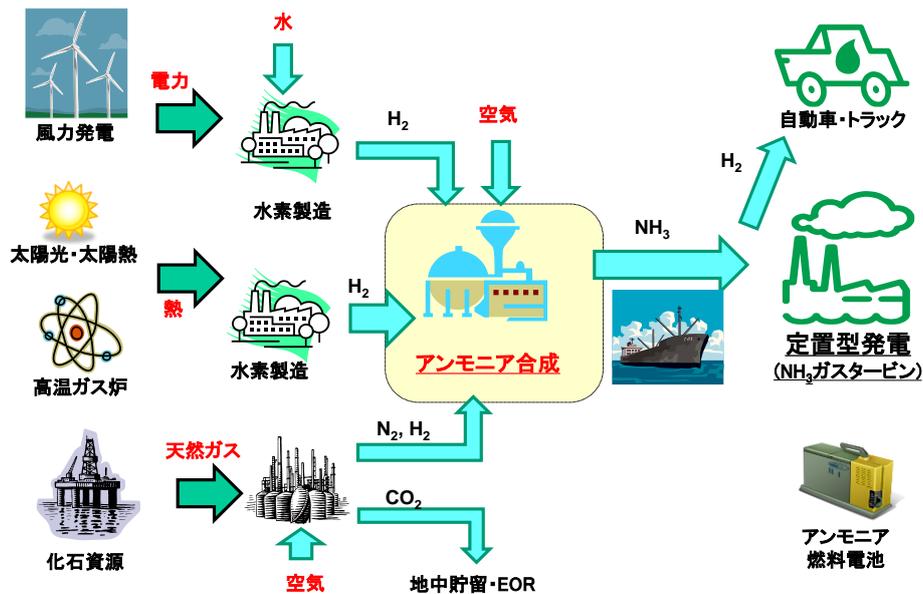


図 5: エネルギーキャリアとしてのアンモニアのチェーン

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、

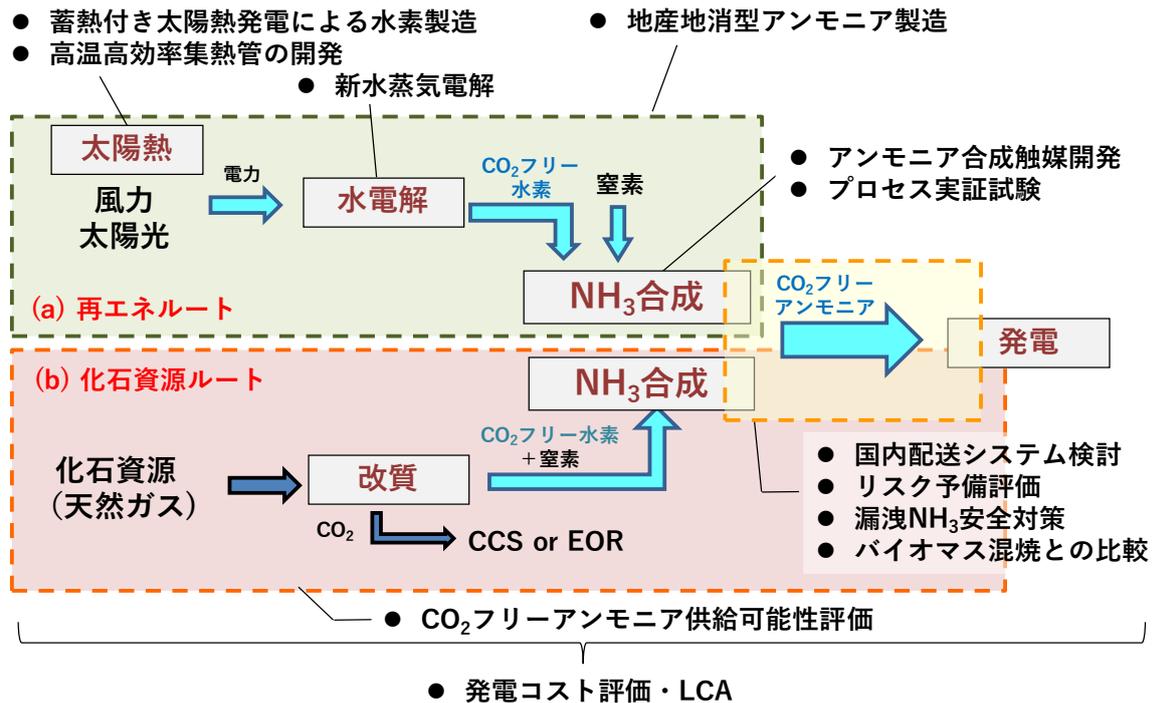


図6: CO₂フリーアンモニアのサプライチェーンと本研究における主な検討課題

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。

(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。

(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 4～5 m 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)。

a) 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 70～90 mm φ、肉厚が 2～3 mm、長さは 4～5 m 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。

b) 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 120～125 mm φ、肉厚 3 mm、長さ 4～5 m 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 100 nm 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

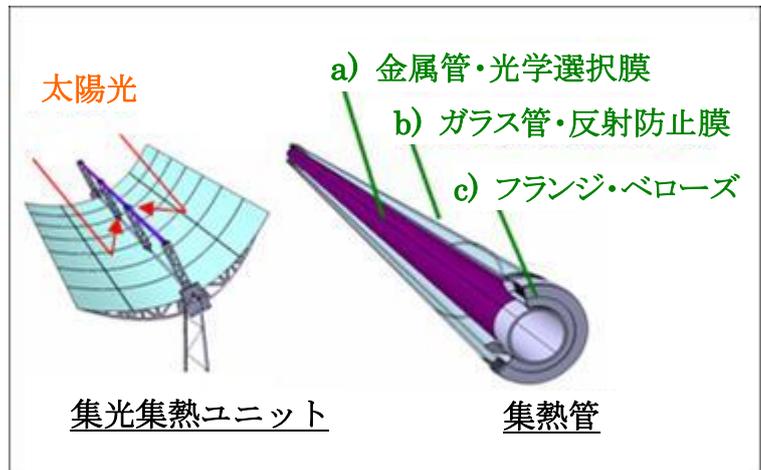


図 7: 集熱管の外観

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。

c) 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、SIPの特定研究分野にて現在実施中である。

(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(脚注1)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が必要と考えられる。

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

(脚注1) “Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development” (イタリア語で Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile)

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。

(2) - 3) 本研究の課題

本開発にて目標とする 600~650°C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°C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。

(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（以下 TICO）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を行う。

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(脚注2)	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。

(脚注2) “German Aerospace Center” (ドイツ語で “Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt”)

2. 研究開発目標とマイルストーン

【研究開発期間終了時の研究開発目標】

開発された高温高効率集熱管を用いた屋外、屋内実証試験に立ち会い、測定結果の妥当性を評価する。また、屋外の集光設備に集熱管を取り付けて実施する屋外実証試験の結果については、シミュレーションによる評価を実施し、集熱管の性能を実証する。

【研究開発計画】

平成30年度：TICOによって行われる集熱管の性能評価試験において、評価に必要なデータを確実に取得するため、試験内容の検討やその実施等に関して適切な支援を行う。評価試験の結果に基づいてシミュレーション計算を行い、集熱管の性能の優越性を示す。シミュレーション計算においてはTICOの集熱管及びそれを取り付けて実証するイタリアのENEAのトラフ式コレクターについて、それぞれの設計をできるだけ正確に反映した集光集熱計算を行う。実証試験で用いられるTICOの集熱管での計算結果と実測データとの比較によって、計算モデルの妥当性を確認した上で、それら集熱管やコレクターを使用するシステムの経済性評価に際して必要となる、集光集熱性能の評価計算を実施する。

【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屋外実証試験のシミュレーション計算を実施し、TICOの集熱管の様々な条件下における性能評価を可能にする。また、実証試験及びそのシミュレーション計算により開発した集熱管の高性能を明確にする。

3. 研究開発実施内容

経済性の評価に必要な基礎データの一つを提供するため、開発した TICO の集熱管を用いたトラフ型コレクターの集光集熱効率を計算した。集光性能については光線追跡用の計算コードを、集熱管の熱効率については汎用の連続体解析ソフト STAR-CCM+® (脚注3) をそれぞれ用いている。第3-1章に、集光の計算および熱伝達の計算に用いられるコード・ソフトウェアと、基本的な計算モデルの概要を記述する。次の第3-2章では、DLR および ENEA で行われた各種の実験と、それに対応する計算の内容、および実験と計算の比較についてまとめ、それらを踏まえて行われた経済性評価用の計算とその結果を、第3-3章で報告する。

3-1. 計算の方法

(1) 光線追跡法と集光計算

光線追跡法とは、考察の対象とする光の全体を光線の束に置き換えて表し、その束に含まれる光線の経路を一本一本追跡することで、光の全体的な振る舞いを計算する方法である。この方法に基づいて、CSP システムの評価専用開発されたコードを、今回の集光性能評価のために使用した。コードの開発は、平成 24~26 年度に行なわれた経産省委託事業『新エネルギー等共通基盤整備促進事業 中高温太陽熱利用調査及び各種システム評価法開発』の中で、エネ総研によって行われたものであり、SIP の高温太陽熱供給システムチームにおいて、昨年度まで使われていたものである。太陽の方向を表すソーラーベクトルを計算し、コレクターをそちらの方向に向けるトラッキング動作をシミュレートしたのちに、入射太陽光が反射や屈折によってレシーバに集められる様子を計算することができる。太陽光と入射面とのなす角度に依存した入射エネルギー量の増減（コサイン効果）や、構造物による光の遮蔽（シャドウイング、ブロッキング）などが、正確に扱われている。

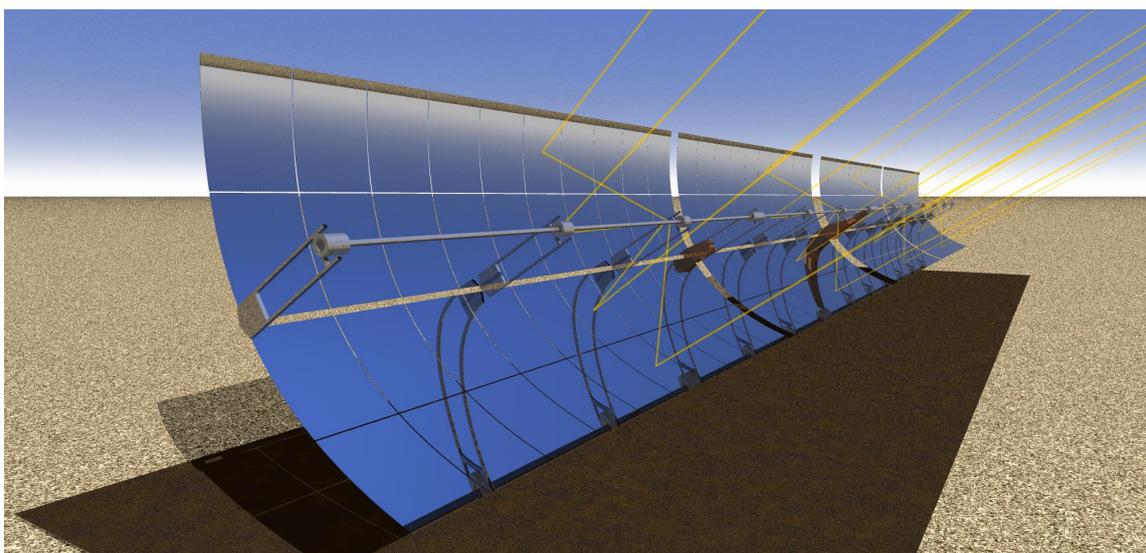


図 8: ENEA の溶融塩トラフの集光計算用モデル

(脚注3) STAR-CCM+ は、Siemens PLM Software Inc. の登録商標です。

今回は ENEA の実験用溶融塩トラフに関する計算を行うので、そのための計算用データを作成した。図 8 は光線追跡の計算に際して実際に使われるジオメトリデータを表示したものである。公開されている写真や、現地訪問時に得られた寸法の情報などに基づいて作成されている。反射鏡と集熱管の他に、鏡の上に突き出た構造物は、光を遮る可能性があるため、できるだけ正確に取り扱うようになっている。

(2) 熱伝達の計算

開発された TICO の集熱管の形状と構成が図 9 に示されている。熱媒体（溶融塩）が中を流れる金属管（ステンレス管）がガラス管の中に収まっており、金属管とガラス管に挟まれた領域は真空に保たれている。この領域の両端は、真空を維持するために金属の板によってふさがれるが、ガラス管と金属管の熱膨張の違いを吸収するため、ある程度の伸縮ができる蛇腹構造を備えるようになっている。このような系で発生する主な物理現象は、(a) 熱媒体や周辺大気の流動とそれに伴う熱輸送、(b) 金属管壁での熱伝導、(c) 金属管の表面から真空領域を通過して出て行く熱輻射、の三つである。これらを扱う機能を供えた汎用の連続体解析ソフトの中から STAR-CCM+ を選び、集熱管における熱輸送のシミュレーションを行った。

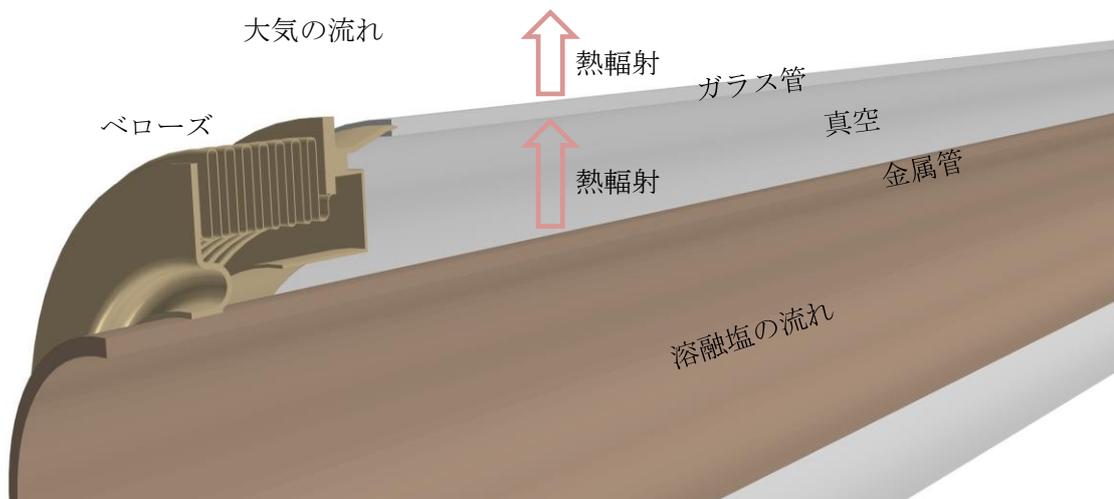


図 9: 集熱管の熱計算用モデルの形状

この計算は、異なる連続体によって満たされた、境を接する複数の領域を同時に扱うものであり、共役熱伝達解析と呼ばれているものである。領域が接するインターフェースにおける熱の出入りを考慮しながら、それぞれの領域の中で、物質とエネルギー輸送の支配方程式が解かれることになる。各領域を囲むインターフェース以外の境界面では、実際の状況をできるだけ反映した境界条件を設定した。それぞれの領域の内部で使用される計算用の物理モデルについては、図 10 にまとめられている。

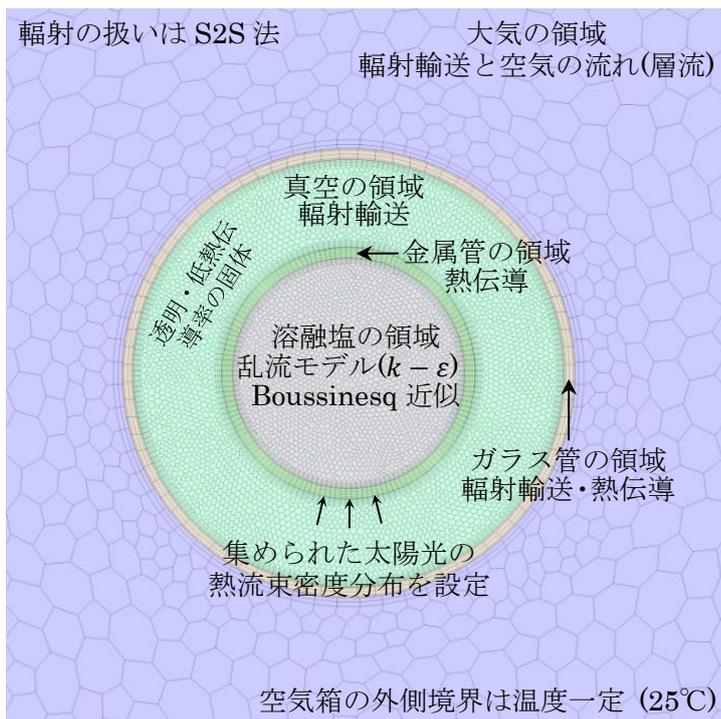


図 10: 計算で使用する物理モデル

S2S 法を選択した。さらに、輻射に関わる各面でキルヒホッフの法則が成り立つ、すなわち輻射率と吸収率は等しいと仮定し、反射率と透過率と吸収率の和が常に1であるとした。

金属管の表面から発生する熱輻射の波長は、主として赤外線領域にあるが、この波長域ではガラス管は透明ではなく、大部分を吸収することが知られている。かといってすべてを吸収するわけではなく、無視できない割合で透過も発生している。すなわち0でもなく1でもない透過率・吸収率を、ガラス板に対して設定する必要がある。S2S 法を選ぶ場合、ガラス板に対するこの設定の方法は、必ずしも自明ではない。今回の計算では、ガラス板を二つの薄い層に分割した上で、二層が接するインターフェースに0と1の間の透過率・吸収率を設定し、それ以外の面では完全透過を仮定した。これにより、ガラス板の中での厚み方向温度分布は正確に計算されなくなるが、ガラス板全体の熱収支としては、近似的に正しい値が得られると思われる。ガラスの透過率の値は、一般財団法人ファインセラミックスセンター（以下 JFCC）において波長ごとに測定された結果から、理論的な熱輻射のスペクトル（図 11）による重みつき平均値を計算して使った。

金属管の表面から発する熱輻射の取り扱いについては、向かい合った面から面へ、間に挟まれた連続体を無視して輻射が伝播するという仮定に基く、Surface to Surface Method (略して S2S 法) を選択した。この方法の適用範囲は、輻射の通り道にある連続体の内部において、散乱や吸収を無視して良い場合に限定されているが、計算効率の点からは、最もすぐれた輻射の計算方法の一つである。今回の計算で扱われる集熱管の場合、輻射が通る領域は、真空・ガラス管・大気・溶融塩であるが、いずれにおいても、領域の内部における散乱や吸収の正確な取り扱いを重要視する理由は無いと思われたので、

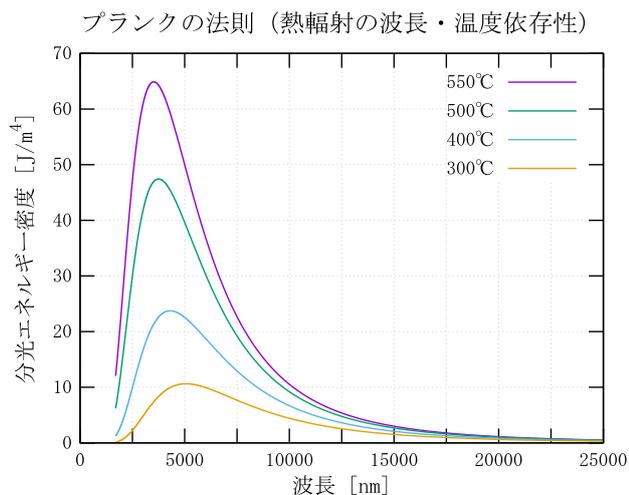


図 11: 熱輻射のスペクトル

3-2. 実証試験結果との比較

(1) 屋内放熱試験(DLR)との比較

金属表面の輻射率は、面のなめらかさや色、酸化や汚れの状態などに依存して大きく変化することがあるが、輻射率を変化させる要因について、事前にその全てを定量的に把握してシミュレーションに反映することは現実的に難しい。そこで、輻射が支配的な放熱要因になっていると思われる屋内放熱試験の結果を利用して、測定された放熱量が計算の上で再現するように、金属管表面の実効的な輻射率を決めることにした。

DLR による屋内放熱試験では、熱媒体を流していない金属管の中にヒーターを入れ、それによって金属管の内壁が一様な温度になるまで熱する。集熱管全体が温まって定常状態に達した時、ヒーターの消費電力が集熱管の放熱量に等しくなるので、後者が前者として測定されたことになる。この実験の方法を反映した計算モデルを作成した。図 9 に示される、ベローズを正確に扱った形状モデルを使い、金属管内周面の温度が一様一定であるという境界条件の下で計算を行った。内周面の温度として 300℃、400℃、500℃、550℃の四種類、それぞれの温度について輻射率の値を三つから四つ選んで放熱量を求めた。

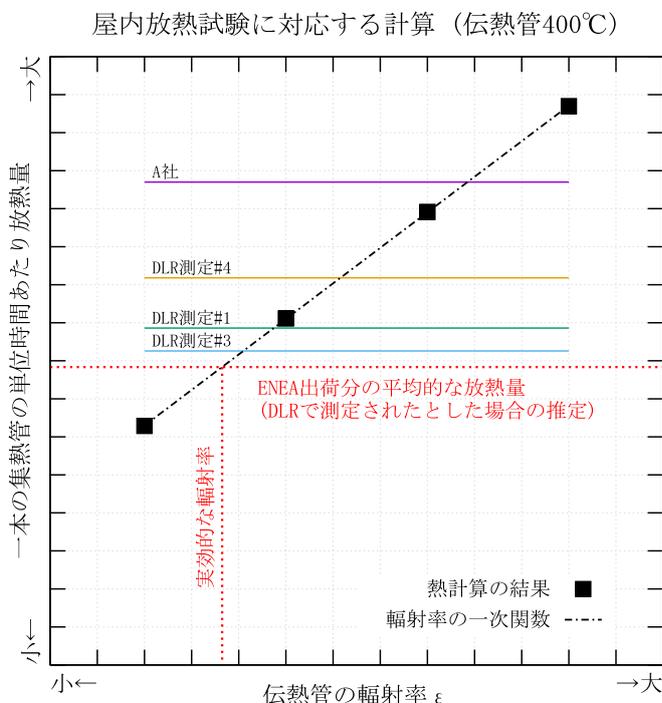


図 12: 屋内放熱試験に対応する計算の結果

ベローズを正確に扱った形状モデルを使い、金属管内周面の温度が一様一定であるという境界条件の下で計算を行った。内周面の温度として 300℃、400℃、500℃、550℃の四種類、それぞれの温度について輻射率の値を三つから四つ選んで放熱量を求めた。

図 12 に 400℃ の場合の計算結果が示されているが、放熱量が輻射率の一次関数でよく表されることが分かる。この一次関数で表される熱量が、その温度における放熱量の測定値と一致するように、実効的な輻射率 ϵ を決定した。すなわち、放熱量の計算値が $a + b\epsilon$ で、測定値が q であるならば、 $\epsilon = (q - a)/b$ とした。ただし、測定値と比較する際に、DLR での測定結果そのものと単純に比較するのでは

はなく、DLR 出荷分と ENEA 出荷分の性能差を考慮し、ENE A 出荷分の集熱管が、DLR で測定されたとした場合に、放熱量がどうなるかを推定した上で、その推定値と計算結果とを比較した。具体的には、DLR において測定された放熱量の平均値に、

ENE A 出荷分集熱管の JFCC における放熱量測定結果の平均値

DLR 出荷分集熱管の JFCC における放熱量測定結果の平均値

という係数を掛けたものを、ENE A 出荷分の放熱量の DLR における測定値とみなし、その値と一致するように実効的な輻射率を定めた。これは、次章以降に予定される計算が、ENE A における実験結果との比較になっており、ENE A 出荷分の集熱管の性能を、より正確に知っておく必要があるためである。他の温度 (300℃、500℃、550℃) についても、

放熱量は輻射率の一次関数として振る舞うという計算結果が得られ、400℃の場合と同様の手順によって、各温度の実効的な輻射率が決定された。

比較対象となる A 社の集熱管については、カタログ値を通るように推定された輻射率の式を使うことにした。実効的な輻射率から計算される輻射熱量の温度依存性が、図 13 に示されている。300℃から 550℃まで、TICO 製の方が A 社製より放熱量が少なく、かつその違いが高温になるほど大きくなっている。

ここで得られた新旧二種類の集熱管の実効的な輻射率は、どちらも DLR での測定値あるいはその推定に基づいたものになっているが、このようにした理由は、測定の方法を揃えることにより、性能の比較をできるだけ公平なものにするためである。

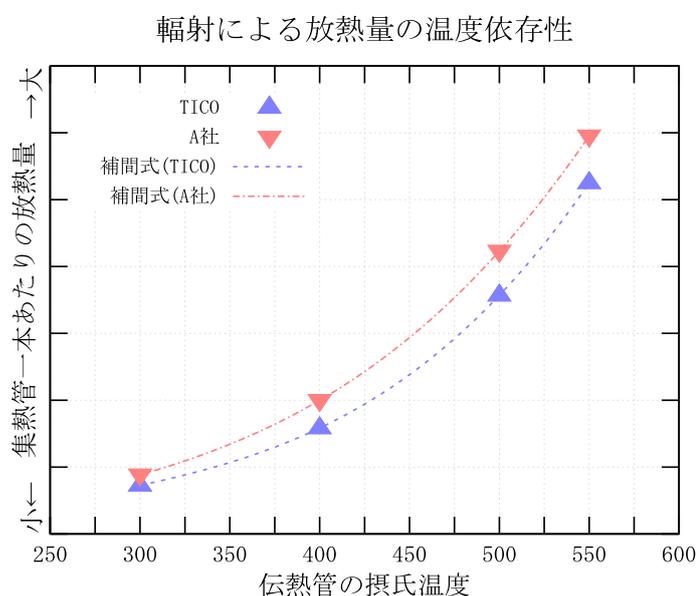


図 13: 集熱管の実効的な放熱量 (熱輻射分)

(2) 屋外放熱試験(ENEAT)との比較

ENEATに出荷された集熱管の内の十二本が、実験用のトラフ型コレクターにインストールされ、熔融塩 (Solar Salt) を流した状態での各種測定が行われた。集光している場合と、集光していない場合の両方について測定が行われたが、それぞれについて対応するシミュレーションを行い、実験データと計算結果とを比較することにした。本章では集光していない場合の計算についてまとめる。

ベローズがついた十二本分の集熱管を、まとめて正確に計算しようとする、たくさんのメモリーと計算時間が必要になり、結果を得るのが難しくなる。そこで、ベローズが省略された単純な真空二重管を形状モデルとして使用するとともに、十二本分を一回の計算で一括処理するのではなく、上流側から順番に十二回に分けて一本ずつ計算することにした。すなわち、図 14 に示されるように、集熱管一本分のメッシュを使って計算を行い、それが終わったら、その出口における熱媒体の流れの状態を、後続の集熱管の入口に境界条件として貼り付けた上で計算を行う、という手順を繰り返すようにした。集熱管の出口から後続の集熱管の入口に伝達される物理量は、熔融塩の流速、温度、乱流エネルギーとその散逸率の四つである。

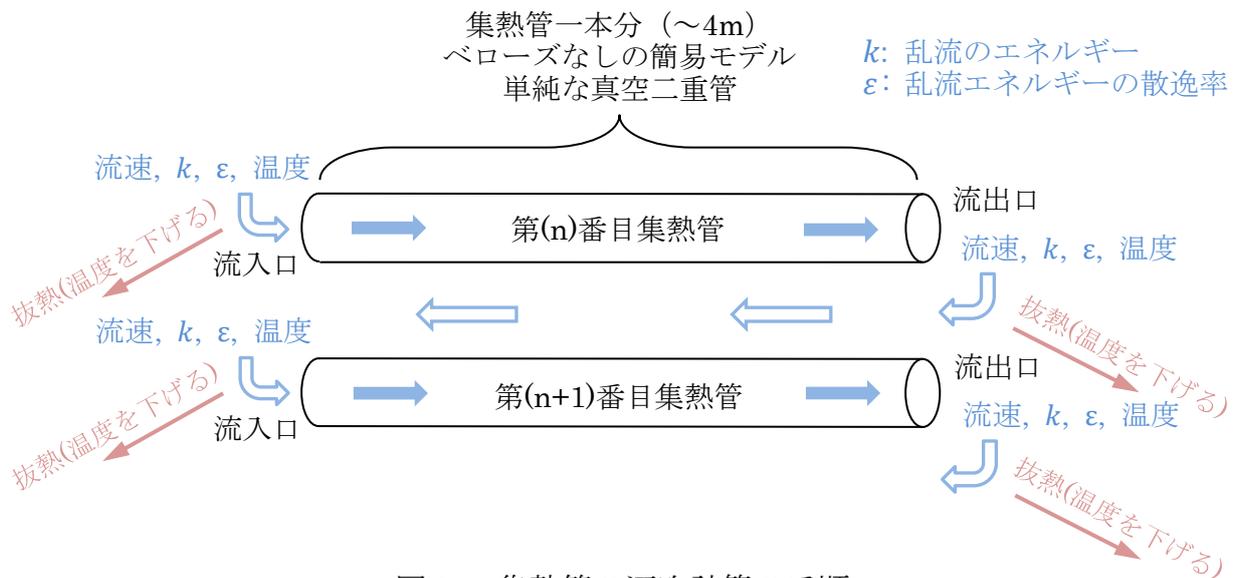


図 14: 集熱管の逐次計算の手順

ENEА の熔融塩トラフを用いて行われた屋外放熱試験では、太陽の追尾をしていないので集光は行われませんが、太陽から反射鏡を経由しないで金属管に直接到達する日射は存在する。金属管表面に直接あたる日射の強度分布を光線追跡計算で求めた上で、それを集熱管への入熱条件としてシミュレーションを行った。また、十二本の集熱管の下流側に接続されるフレキシブルホースからの放熱については、その量を表す温度の多項式（ENEА 提供）を利用して、十二本目の集熱管の後で、熔融塩の温度を一様に下げることによって、その分の熱量を取り除くようにした。

この計算では、集熱管が単純な真空二重管で代用されているために、ベローズからの放熱が無視されており、その分だけ放熱量の測定値（＝熔融塩の出入口温度の測定値から得られる値）が計算値よりも大きくなる。そこで放熱量の測定値と計算結果との差分を温度の多項式として表し、それをベローズからの放熱量と見なすことにした（正確には、放熱量の差分の二十四分の一を、ベローズ一個分の放熱量と見なすことにした）。この多項式を決める際には、測定データから流入温度の異なる十数例を抽出し、対応する数値計算を行った上で、差分をとって放熱量の温度依存性を調べた。

次章以降の計算では、一本の集熱管の出口における流れの状態を、後続の管の入り口に貼り付けるとき、熔融塩の温度を一様に下げることによって、ベローズからの放熱量に等しい量の熱が、熔融塩から取り除かれるようにする。フレキシブルホースからの放熱の取り扱いは、次章以降も本章と同様である。

（3）屋外集光集熱試験(ENEА)との比較

ENEА の実験用トラフで行われた集光集熱試験では、全長約 50m、幅約 6m の反射鏡で、12 本の集熱管へ太陽光を集めることによって、その中を流れる熔融塩が加熱される。そして出入口の熔融塩温度の測定値から、熔融塩に伝達された熱量が分かり、それに基づいてコレクターの熱効率が評価される。

この試験に対応する計算では、まず金属管の表面に到達する光の強度分布が、光線追跡

法によって計算される。太陽から入射した光は、鏡で反射されたあと、集熱管外側のガラス管を透過して金属管の表面に到達し、そこで熱として吸収されるので、それぞれの反射率、透過率、吸収率を、ENECA および JFCC において得られた、可視光に対する測定データなどから推定して用いるようにした。入射太陽光と鏡の面とがなす角度の影響（コサイン効果）や、光が構造物で遮られることによる集光量の減少（シャドウイング、ブロッキング）はもちろん考慮されている。

これら以外に集光量を減少させる要因として、鏡のゆがみや組付位置のずれ、トラッキングの誤差などがある。これらの誤差があると、理想的な場合と比較して反射光の方向がずれることになり、反射光のある部分は、金属管に当たらずに逸れて行ってしまうことになる。このような誤差要因を個別に定量的に把握し、それに由来する損失の量を、光線追跡計算によって正確に求めることは難しいので、簡略化された扱いをすることにした。すなわち、誤差が存在する現実的な場合に、反射光の全体量の何%が金属管に到達するかを表す係数を用いることにする。この係数の値としては、ENECA において測定され、開示された値（トラフが太陽に正対している場合の値）をそのまま使用した。各種誤差による反射光の方向のズレが、全体としてランダムに発生しているならば、それを、誤差がない理想的なコレクターに到達する入射光の方向が、ランダムにずれているとみなすことが、近似的には可能と思われる。すなわち、見かけ上の大きさ（=視直径）がより大きな太陽から、光が来ているとみなしても良いと思われる。そこで、金属管への到達率が ENECA の開示値と一致するように、太陽の視直径をより大きくした上で、光線追跡計算を行った。計算結果の一例が、図 15 に示されている。

十二本の金属管外周面上の熱流束密度分布（下側半分の展開図）

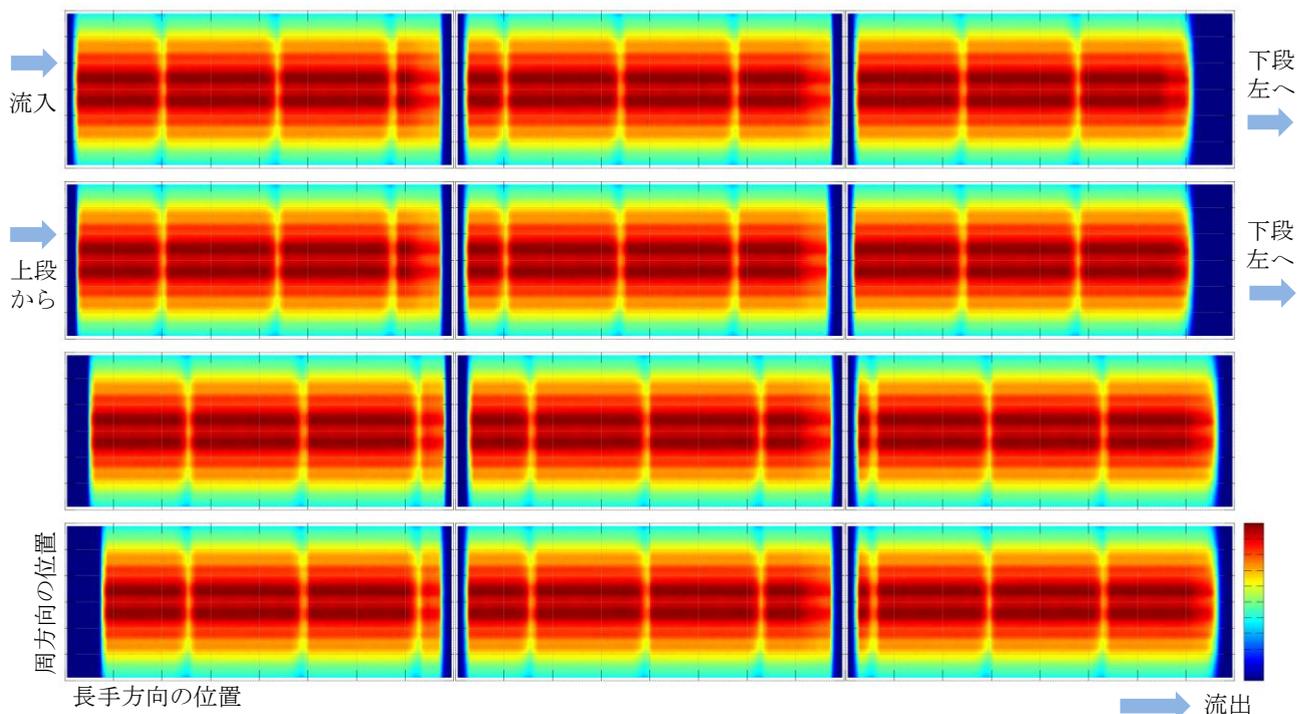


図 15: 金属管表面の熱流束密度分布（太陽にほぼ正対している場合）

このようにして得られた金属管表面における光の強度分布、すなわち熱流束密度の分布を入熱条件として、集熱管の熱効率の計算を行った。計算の手順は基本的に前章の屋外放熱試験と同じであり、金属管外周の入熱条件が量的に異なるのみである。図 16 に熔融塩へ伝達された熱量の実測値と計算結果が示されている。個別にややずれているケースはあるが、平均的にはよく一致していると思われる。測定値を計算値で割った値の平均は $f = 1.011$ であった。この係数 f は、次章の計算で集光量の補正に用いることにした。すなわち、ここで決定された集光量の補正係数 f の値を、集光計算で得られた金属管表面の熱流束密度にかけ算した上で、熱計算の入熱条件として使うようにした。その他、実効的な輻射率やベローズ・フレキシブルホースからの放熱量についても、本章までに求められた係数や相関式が用いられる。

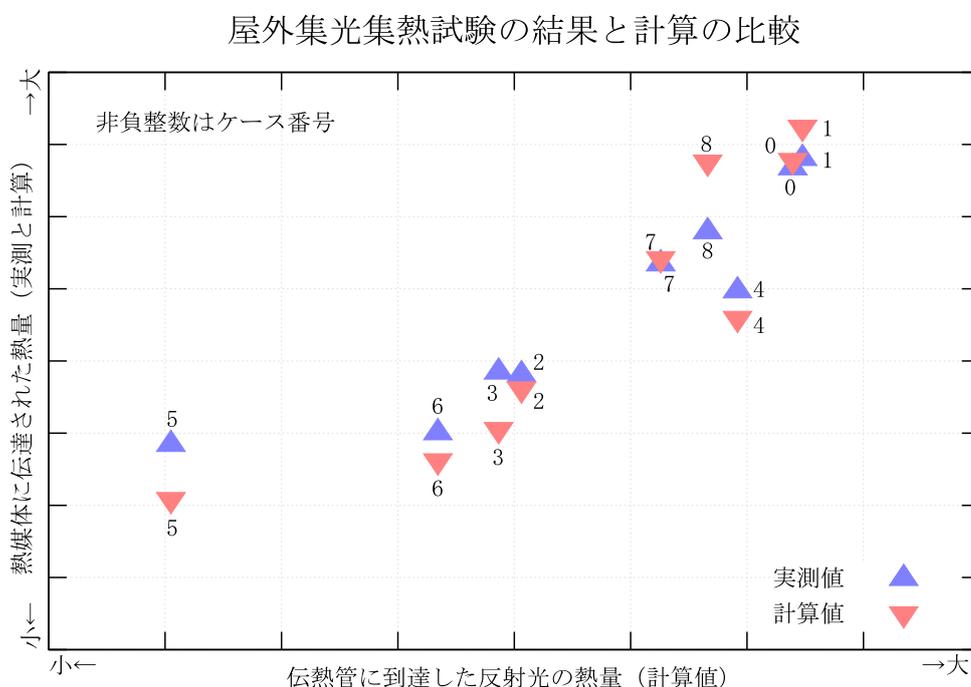


図 16: 屋外集光集熱試験に対応する計算の結果

3-3. 経済性評価のための計算

前章までに記述された計算モデルを用いて、集熱管の経済性を評価するための計算を行った。計算の条件としては、SIP の高温太陽熱供給システムチームにおいて、昨年度まで用いられてきたものを踏襲した。すなわち、CSP プラントの設置場所を、米国カリフォルニア州の Barstow—Daggett 空港 (北緯 34.85 度、西経 116.79 度) とし、一つのユニットが約 600m (集熱管 150 本相当) のトラフ型コレクターを、必要なだけ並べて使用することにする。ENEА のトラフと同じ形状のものを用いるが、実用的なトラフの通常置き方にならって、回転軸が東西方向ではなく南北方向を向くようにする。このようなコレクターに熔融塩を流しこんで加熱するものとし、出入口の温度差が 250 度となるように熔融塩の流量を決めた。

集熱管 150 本分に対応する 600m のトラフを、全て計算することは時間的に難しいため、ユニットの入口付近、中央部、出口付近の三か所から、それぞれ 12 本分（トラフ型コレクター約 50m 分）を切り出して評価することにした。切り出されたそれぞれの部分における熔融塩の流入温度は、290℃、410℃、530℃である。評価時刻は、春分の日午前 8 時、10 時、12 時の三点とし、ソーラーベクトルおよび直達日射量としては、昨年度までと同じデータを使用する（図 17、図 18）。

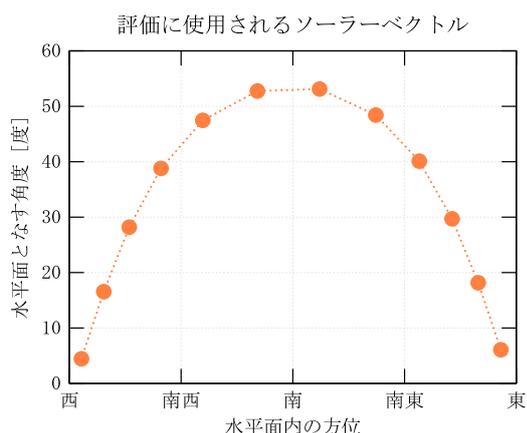


図 17: 評価に使われるソーラーベクトル

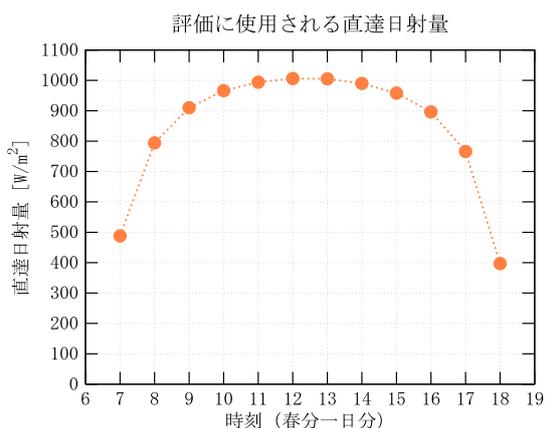


図 18: 評価に使われる直達日射量⁴⁾

このような計算を、開発された TICO 製集熱管と、A 社製集熱管の両方について行い、得られた集熱効率を経済性の比較評価に利用する。A 社の集熱管について公表されているデータは、可視光域における金属管表面の吸収率と、赤外域における輻射率のみなので、これら以外の条件は全て同一にして、集熱管の性能を計算・比較することにする。

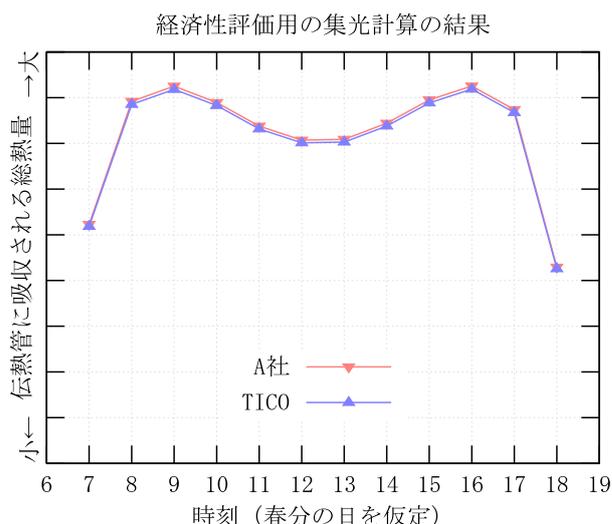


図 19: 金属管に吸収される熱量の比較

図 19 に集光計算の結果、すなわち金属管に吸収された反射光の総エネルギーが示されている。可視光吸収率に関しては、TICO のものより A 社の方がわずかに高いので、この段階では、A 社による収量がすこしだけ多くなっている。

図 20 に熱計算の結果がまとめられている。TICO 製集熱管と A 社製集熱管の集熱効率がプロットされている。ここでの集熱効率の定義は、熔融塩に伝達された熱量を、金属管表面に到達した反

射光のエネルギーで割ったもの、となっている。図に示されるコレクターの最終的な集熱効率では、290℃、410℃、530℃のいずれの温度においても、TICO 製の方が A 社製より

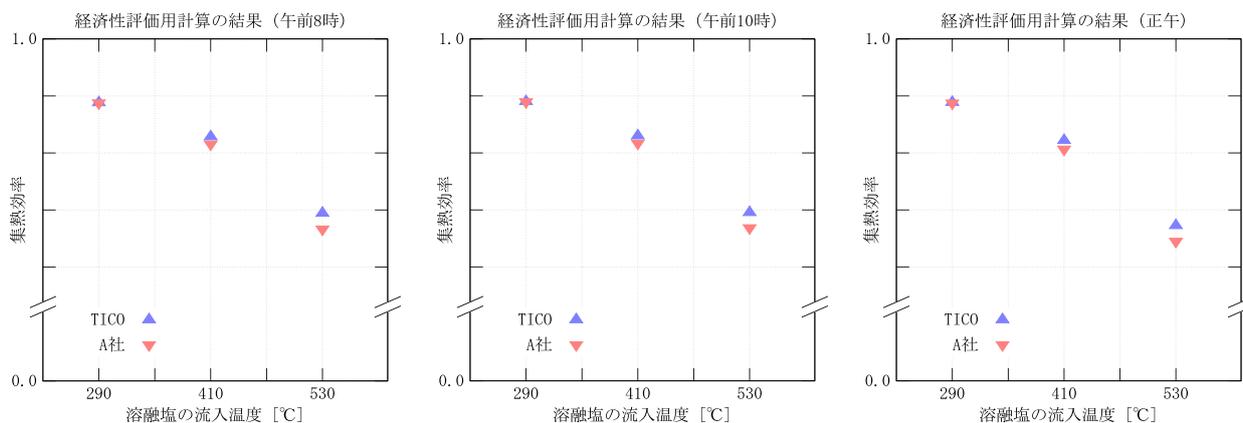


図 20: 経済性評価用の熱計算の結果

もすぐれており、とくに高温になるほどその差が拡大している。効率の差は、図 13 に示される金属管表面からの輻射熱量の違いによるものであるが、輻射熱量の差が高温側 (550°C 付近) で大きくなるので、集熱効率にもより大きな差がつくようになっている。また、集熱効率の評価時刻依存性は顕著ではないが、これは図 18 に示されるように日射の条件が良く、トラフによる集光量が大きく変化していないためと思われる (図 19)。

上記の結果は、集光している間すなわち昼間のものであるが、熔融塩を循環させるシステムの場合、夜間に温度が下がって熔融塩が固化してしまうのを防止するため、ある程度高温に保たれた熔融塩を、夜間も流し続ける必要がある。その状態での放熱ロスも評価するため、金属管に入射する光が無いとした場合の放熱量の計算も行った。熔融塩の流入温度は 290°C としている。昼間の場合と同じように、TICO 製の集熱管の方が効率が良い、すなわち熱損失が少ないという結果になっている。これもまた金属管表面の輻射率が、A 社製と比べて小さくなっているためである。

3-4. まとめ

開発した集熱管を用いたコレクターの集光集熱効率を計算した。集光性能については光線追跡法が実装されたコードを、集熱効率については連続体解析ソフト STAR-CCM+ をそれぞれ用いている。これらの計算において正確なモデル化が難しい要因、例えばベローズからの放熱や、鏡のゆがみによる反射光の散逸などについては、DLR、ENEA、JFCC、TICO で行われた各種測定の実験データなどから、大きさを表す係数や工学的な相関式を求め、それを計算モデルに組み入れるようにした。これにより、計算上の理想的な効率ではなく、現実にかかなり近い値が得られるようになっている。このような効率の計算を、開発した集熱管だけでなく従来のものについても同じように行い、比較可能な集熱効率のデータを得た。新しい集熱管は、既存の最も優れたものと比較しても、特に高温側 (550°C 付近) の集熱効率が改良しているという計算結果が得られた。

3-5. 今後の課題

今回のシミュレーションでは、光の波長への依存性を簡略化して扱っている部分が多い。光線追跡で扱われる太陽光と反射光は、単色の可視光と仮定され、熱計算に際しては、金属管から発する熱輻射が、同じく単色の赤外光と仮定されている。反射のみからなる系の振る舞いは、波長にあまり依存しないことが多いが、透過・屈折や熱輻射がある場合には、波長依存性がしばしば現れる。それを扱うために必要となる計算時間から考えて、今回はやむをえない簡略化だったと思われるが、光のスペクトルを考慮した方が、定量的により正確な結果が得られると期待される。

また、集熱管における熱の輸送と損失に関わるもっとも重要な物理現象、すなわち、(a) 溶融塩の流れとそこにおける熱輸送、(b) 金属管での熱伝導、(c) 金属管表面から発する熱輻射、の三つの過程については、基礎的な物理法則に基づいた計算が行われているが、それ以外の部分、たとえば金属管表面の実効的な輻射率の値や、ベローズ・フレキシブルホースからの放熱量などについては、それらを表す相関式を実験データから求めて使っている。これらについても、できるだけ基礎法則に基づいた計算によって、実験と一致する結果が得られるようになることが望ましいと思われる。

4. 外部発表実績

【学会ポスター発表】 海外 1 件

T. Tsutui, T. Homma, K. Noritake, H. Akatsuka, Y. Okuhara, T. Kuroyama, K. Yoshida, Y. Hosono, “Development of receiver tubes for high solar-thermal conversion efficiency at high temperature,” SolarPACES 2018, October 2-5, 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 Conference Berlin, September 2009
- 3) “Global Wind Atlas,” <http://globalwindatlas.com/datasets.html>
- 4) S. Wilcox and W. Marion, “Users Manual for TMY3 Data Sets,” Technical Report NREL/TP-581-43156, National Renewable Energy Laboratory, May 2008.