

公開用

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「H26～28 年度：高温溶融塩環境下での装置材料開発

とそれを組み込んだ高温型集熱システムの構築

H29 年度：高温溶融塩環境下での配管材料腐食性評価」

研究開発期間：平成 26 年 7 月 1 日～平成 30 年 3 月 31 日

研究担当者： 猪俣 誠

所属研究機関： 日揮株式会社

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	1
3. 研究開発実施内容	3
3-1. 650°C集熱のためのタワー型集光集熱システムの構築	
3-2. 高効率水素製造への熱・電力供給システムの検討	
3-3. 線集光型とインテグレーションしたタワー型集光集熱システムの構築	
3-4. 高温溶融塩環境下での配管材料腐食性評価	
3-5. まとめ	
3-6. 今後の課題	
4. 外部発表実績	26
5. 特許出願実績	26
6. 参考文献	26

図表一覧

図 1 太陽熱利用型アンモニア製造システムの構成	1
図 2 集熱器の概要（片方のパスのみ図示）	5
図 3 热媒温度分布（春分・正午条件）	5
図 4 春分(3/16)の集熱器効率と集光・集熱効率の変化	6
図 5 ヘリオスタッフ入射エネルギー基準の集光効率（春分正午条件）	7
図 6 集熱器効率（春分正午条件）	7
図 7 夏至（6/21）の集熱器効率と集光・集熱効率の変化	8
図 8 冬至（12/20）の集熱器効率と集光・集熱効率の変化	8
図 9 タワー型+線集光集熱直列システムと膜分離新ISシステムとの組み合わせ	9
図 10 タワー型+線集光集熱並列システムと新ISシステムとの組み合わせ	10
図 11 タワー型集熱システムと高温水蒸気電解との組み合わせ	11
図 12 タワー型+線集光集熱並列システムと高温水蒸気電解との組み合わせ	11
図 13 热媒温度分布（入口温度 540°Cケース：春分・正午条件）	13
図 14 春分(3/16)の集熱器効率と集光・集熱効率の変化	13
図 15 ヘリオスタッフ入射エネルギー基準の集光効率 （入口温度 540°Cケース：春分正午条件）	14
図 16 集熱器効率（入口温度 540°Cケース：春分正午条件）	14
図 17 夏至（6/21）の集熱器効率と集光・集熱効率の変化 （入口温度 540°Cケース）	15

図 18	冬至（12/20）の集熱器効率と集光・集熱効率の変化 (入口温度 540°C ケース)	15
図 19	ヘリオスタッフ入射エネルギー基準の集光効率 (入口温度 540°C ケース：夏至正午条件)	16
図 20	ヘリオスタッフ入射エネルギー基準の集光効率 (入口温度 540°C ケース：冬至正午条件)	16
図 21	核融合炉における熱取り出しの概念図	17
図 22	核融合プランケットを模擬したループの機器構成	17
図 23	テストセクションの詳細図	18
図 24	てこ式荷重負荷	19
図 25	3 点支持曲げ定歪法	19
図 26	U 字曲げ試験片	20
図 27	U 曲げ試験片の外観	21
図 28	容器内面のカソード防食の概念図	22
図 29	炭酸塩系溶融塩中の各種金属の腐食試験結果	22
図 30	アルミナイズ処理した SUS310S の溶接手順	24
表 1	タワー型集熱プラント一基の概要	4
表 2	タワー型集熱プラント 1 基の検討条件 (入口温度 540°C ケース)	12
表 3	腐食試験結果	23

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。このうち、太陽熱は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とともに、蓄熱により昼夜問わず 24 時間の大規模・安定な出力が可能であるといった利点がある。このため、北アフリカ、中東、北米、南米等では多数の太陽熱発電プラントの建設計画が進められている。

一方で、再生可能エネルギー由来の電力を大量に貯蔵・輸送することは困難であり、クリーンで貯蔵・輸送が可能な二次エネルギーが必要となる。中でもアンモニアは液体の体積水素密度が液体水素の 1.5 倍と高く、室温、1 MPa 以下で液化できることから、カーボンフリーな優れたエネルギーキャリアとして期待されている。

本研究では、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を目的とする。アンモニア合成のための水素製造として膜分離新 IS プロセスのような熱化学法、高温水蒸気電解法などを想定し、これらのプロセスに対して必要な熱を 24 時間定常的に供給するための 650 °C の蓄熱が可能な集光集熱システムを検討する。アンモニア製造プラントの規模として、現状の化石資源原料のアンモニアプラントに相当する 2,000 ton-NH₃/day を想定する（図 1）。

また、650°Cでの集熱・蓄熱のためには新たな熱媒が必要となる。本研究では、別途研究が行われる新規溶融塩熱媒に関して、金属材料の耐食性の観点から評価方法の検討を行う。

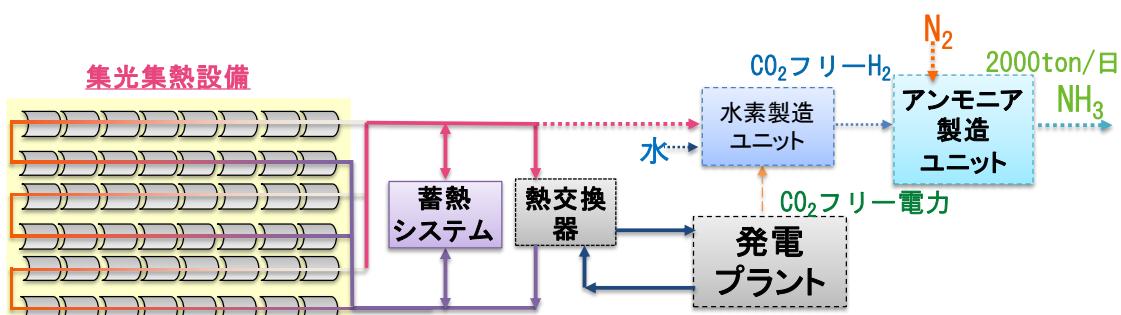


図 1 太陽熱利用型アンモニア製造システムの構成

2. 研究開発目標とマイルストーン

本研究では、集光集熱システムとして、高温の集熱に適した点集光集熱システム（タワー型システム）を中心に検討を行うとともに、線集光集熱システムと点集光集熱システムのインテグレーションの可能性も検討する。水素製造への熱・電力供給を考慮し、650°C での蓄熱、85%以上の集光効率、24 時間運転可能な商業規模（NH₃ 生産量 2,000ton/day）の高温型集光集熱システムを構築する。

マイルストーン： 水素製造のインテグレーションを考慮した商業規模の 650 °C の集光集熱システムの構築

H28 年度までの熱利用水素製造チームの研究開発結果を基に、高効率水素製造に必要な加熱源、発電

の仕様を検討する。

マイルストーン： H28 年度までの熱利用水素製造チームの研究成果（熱・電気需要）を、集熱システム構築に反映

耐腐食性に優れた材料及び使用条件選定を目的に、600～700°Cの高温における材料評価試験を支援する。実際の使用環境に即した材料腐食評価方法あるいは腐食抑制方法の検討を行う。熱媒体、蓄熱体、及び集熱管の研究開発結果を基にして、技術的・経済的にフィージブルな材料を選定する。

マイルストーン： 選定された溶融塩環境で無垢鋼材に対する腐食速度：0.2mm/y、又は厚さ 20 μm のコーティング材料に対する腐食速度：4 $\mu\text{m}/\text{y}$ を達成可能な部材・耐食化技術の構築。

3. 研究実施内容

3-1. 650°C集熱のためのタワー型集光集熱システムの構築

水素製造プロセスに対して 650°Cで 1,500MW の熱を 24 時間定常に供給するためのタワー型集光集熱システムを、シミュレーションにより検討した。平成 26 年度は、まず 600°Cの集光集熱システムの検討を通じて、シミュレーション手法の確立と高温集熱の課題の抽出を実施した。平成 27 年度は、これを改良して 650°Cの集熱システムの検討を実施した。本節では主に平成 27 年度に実施した 650°C集光集熱システムの検討結果を述べる。

(1) 650°C集光集熱システムの構築

a) 検討条件

プラント及び日射の検討条件は、集熱システムの研究を担当する機関で協議の上、共通の条件として、下記の通り設定した。

プラント設置場所

プラント設置場所は、カリフォルニア州の Daggett Barstow-Daggett 空港（西経 116.8° 北緯 34.85°）とした。

温度・容量条件

タワー型高温集熱プラントで集熱し、650°Cの熱媒を供給する。熱利用後の戻りの熱媒温度は、350°Cとする。供給する熱容量は 1,500MW を 24 時間供給するものとする。

熱媒物性は、集熱システムの研究を担当する機関で協議して決定した、仮想熱媒の物性を用いた。

日射条件

春分の日の近傍の 3/16 の日射強度を基準に、650°Cの熱媒を 1,500MW 24 時間供給できる集熱システムの検討を行った。さらに、選定した集熱システムを用いて、6/21 と 12/20 の日射条件における熱供給量についても併せて検討した。

b) 一基当たりのプラント規模

1,500MW を 24 時間定常に供給するためには、複数基のタワー型高温集熱プラントを設置する必要がある。現在世界最大級のタワー型高温集熱プラントであるチリで建設中の Planta Solar Cerro Dominador (Atacama-1)⁽¹⁾を参考として、1 基あたりの集熱量を最大 700MW 規模として検討を行った。

c) 集光・集熱システムの改善検討

平成 26 年度に実施した 600°Cの集光・集熱システム検討では、ヘリオスタッフの配置がフィールドの南側に少なかったために、集熱器のヒートフラックス分布が北側で高くなり、この結果、配管外表面温度は最高 1,200°Cを超える結果となっていた。このため、平成 27 年度の検討では、ヘリオスタッフを南側にも配置するとともに、集熱器の長さを長くすることで縦方向にも集光を分散させることで、集熱器表面の集光分布を均一化させるとともに、ヒートフラックスのピークの低減を図

った。設計条件及びシミュレーションにより得られた集熱システムの概要を表1に示す。

表1 タワー型集熱プラント一基の概要

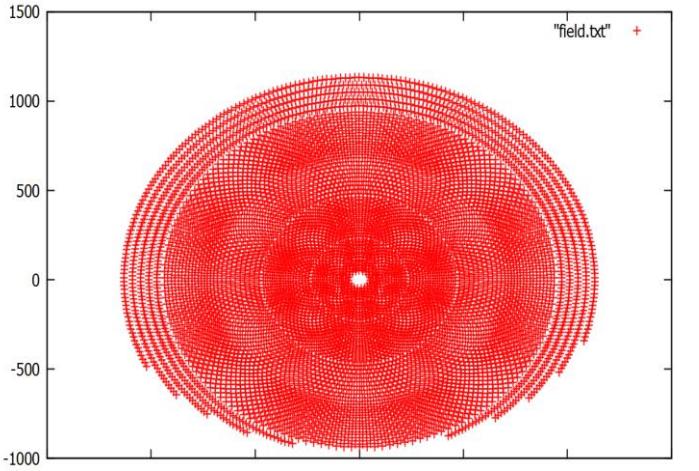
設計 条件	建設場所	カリフォルニア Daggett Barstow-Daggett空港 (西経116.8° 北緯34.85°)
	設計日時	3月16日 正午
	設計日射量	1,006 W/m ²
	ヘリオスタッフミラー反射率	0.95
	集熱器 入口/出口温度	350°C/650°C
	外気条件	春分20°C、夏至30°C、冬至13°C、無風条件
	熱媒物性	仮想熱媒を仮定
主要 仕様	集熱管吸収率	メークー値
	タワー高さ	330 m
	ヘリオスタッフ基数	7250基
	ヘリオスタッフ配置 (xがヘリオスタッフを示す)	
集熱器	16面パネル円筒形 (図2参照)	

図2に集熱器の概要 (2パスのうち、片方のみ) を示す。集熱器は、集熱管が敷き詰められた16枚の吸熱パネルから構成されており、8パネルずつの2つの流路構成となっている。

熱媒は北側の入口から350°Cで集熱器に入り西側へ進み (下図①→④)、集熱器を横断し (下図④→⑤)、東側から南側へ進み650°Cまで加熱されて、集熱器から出る。(下図⑤→⑧)

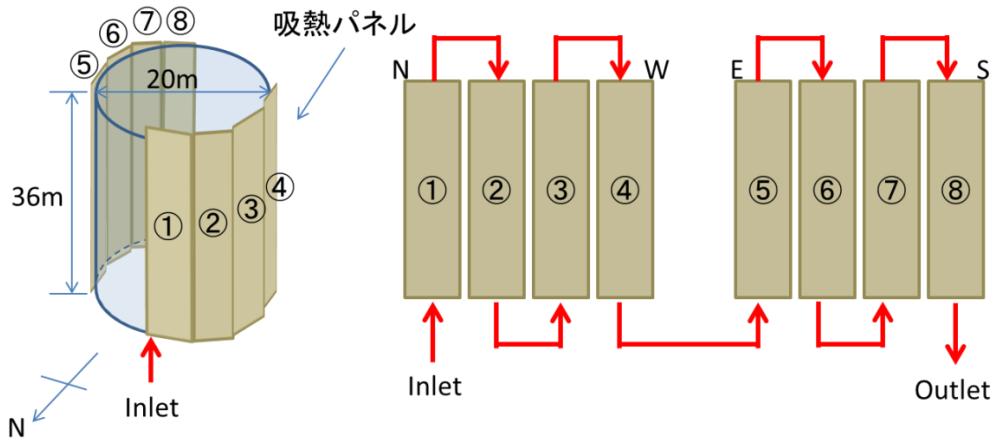


図2 集熱器の概要 (片方のパスのみ図示)

図3に集熱器内の熱媒温度分布を示す。熱媒は350°Cで集熱器に供給され、太陽熱で650°Cまで加熱されていることがわかる。平成27年度の改良で、ヘリオスタッフをフィールド南側にも配置することでヒートフラックスの径方向での偏りが減少し、さらにレシーバー長さを伸ばすことでヒートフラックスの最大値を平成26年度の検討の半分以下まで低減させることができた。またヒートフラックスが全体に均一に分布するように改良され、配管外表面温度及び熱媒境膜温度も出口付近で最大値をとるような分布となった。

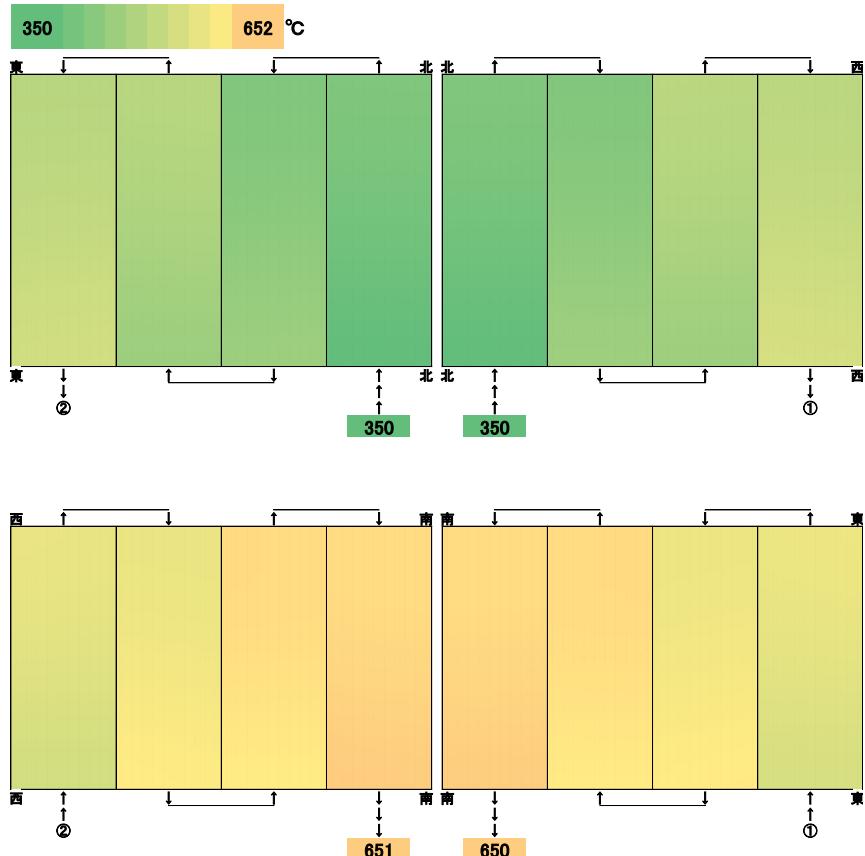


図3 热媒温度分布 (春分・正午条件)

(2) 各種日射条件におけるケーススタディ

a) 春分(3/16)における検討

前項で示したプラント構成を用い、3月16日の日射条件にて1時間毎にシミュレーションを実施し、各時刻での集光量・集熱量・集光効率・集熱効率を計算した。また、各時刻での集熱器効率と集光・集熱効率のグラフを図4に示す。

ここで、各項目の定義は以下の通りである。

- 集熱器効率：(熱媒吸收熱量)/(集熱器集光量)
- 集光・集熱効率(ミラー入射光量基準)：(熱媒吸收熱量)/(ミラー集光量)
- 集光・集熱効率(DNI*ミラ一面積基準)：(熱媒吸收熱量)/(日射量)×(ヘリオスタッフ基数)×(一基当たりのヘリオスタッフミラ一面積)

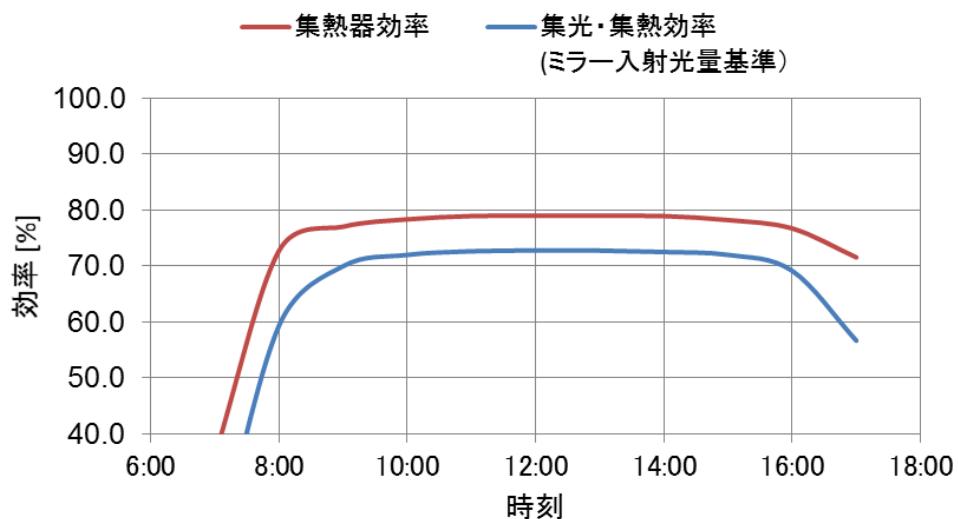


図4 春分(3/16)の集熱器効率と集光・集熱効率の変化

図4に示すように、集光・集熱効率は日中は最大効率近くでフラットな形となっており、太陽位置の影響を受けにくいことがタワー型集光集熱システムの特徴である、春分の日における最高の集光効率は正午前後で92.1%となった。また、集光・集熱効率はミラー入射光量基準では72.8%となり、DNI*総ミラ一面積基準では60.4%となった。

春分の日(3/16)正午における全ヘリオスタッフに入射した光量を100%とした場合の、集光効率とエネルギーの内訳を図5に示す。ヘリオスタッフを適切に配置することで、ヘリオスタッフ間のシャドーイングや集熱器に光が当たらない集光漏れを最小限に抑えることができている。

また、集熱器表面に集光されたエネルギーを100%とした場合の集熱器効率とエネルギーの内訳を図6に示す。タワー型集熱器の場合、高温の集熱管が大気にさらされるため、高温集熱を行う際には放射ロスの増大が課題となる。

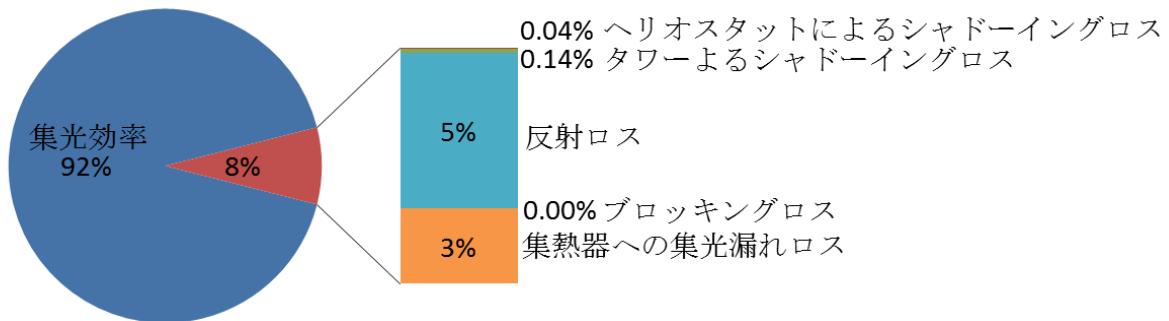


図 5 ヘリオスタッフ入射エネルギー基準の集光効率（春分正午条件）

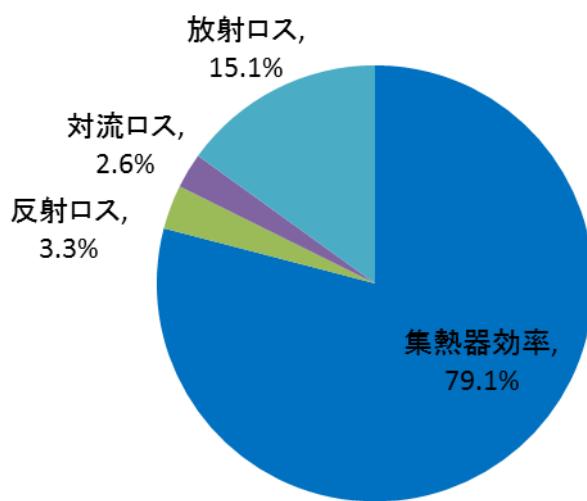


図 6 集熱器効率（春分正午条件）

b) 水素製造への熱供給のための集熱プラント構成

1基の集熱プラントによる1日の熱媒吸収熱量は4,500 MWである。水素製造プロセスのために1,500MWを24時間連続して供給(36,000 MW/day)するためには、このタワー型高温集熱プラントが8基必要となり、敷地面積として5.5km x 7.2kmが必要となる。

日射の無い夜間にも650°Cの熱を水素製造プロセスへ供給するため、650°Cの熱媒を貯蔵する高温熱媒タンクが必要となる。日中の各時刻での余剰分の熱媒量から、1基のタワー型高温集熱プラントあたり約2万m³の熱媒の貯留が必要となる。したがって、タワー型高温集熱プラント8基では、16.5万m³の高温タンクが必要となる。

c) 夏至及び冬至でのケース

夏至(6/21)と冬至(12/20)での各時刻での集熱器効率と集光・集熱効率の経時変化グラフを

図7及び図8に示す。春分ケースと同様に、冬至・夏至条件においても日中の幅広い時間範囲でフラットな集光・集熱効率を実現できており、さまざまな日射条件に対応して性能を発揮できることがわかる。

夏至では1基当たり1日で5,529MWの集熱が可能であるため、8基分では44,232MWとなる。したがって、24時間平均では1時間当たり1,843MWの熱量を供給可能となる。

一方で、冬至では1基当たり1日で2,700MWの集熱となり、8基分では21,600MWとなり、24時間平均では1時間当たり900MWの熱量を供給可能となる。ここで、春分との比較として夏至及び冬至における1日の日射量及び集熱量の比を見てみると、日射量は夏至/春分が1.16、冬至/春分は0.70であり、集熱量は夏至/春分は1.23、冬至/春分は0.60となっており、冬至条件での効率が低いことがわかる。これは太陽高度の違いが影響しており、集光システムは春分を基準に設計されているため、冬至条件ではシャドーイングロスが大きくなることに起因している。

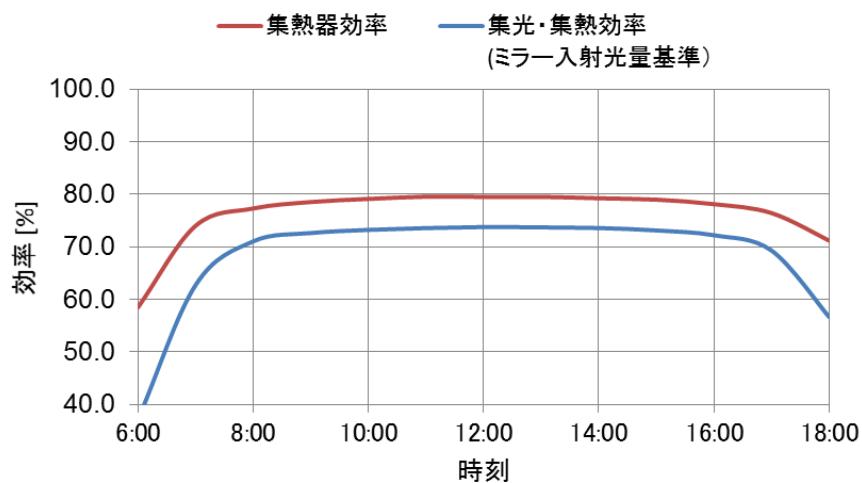


図7 夏至（6/21）の集熱器効率と集光・集熱効率の変化

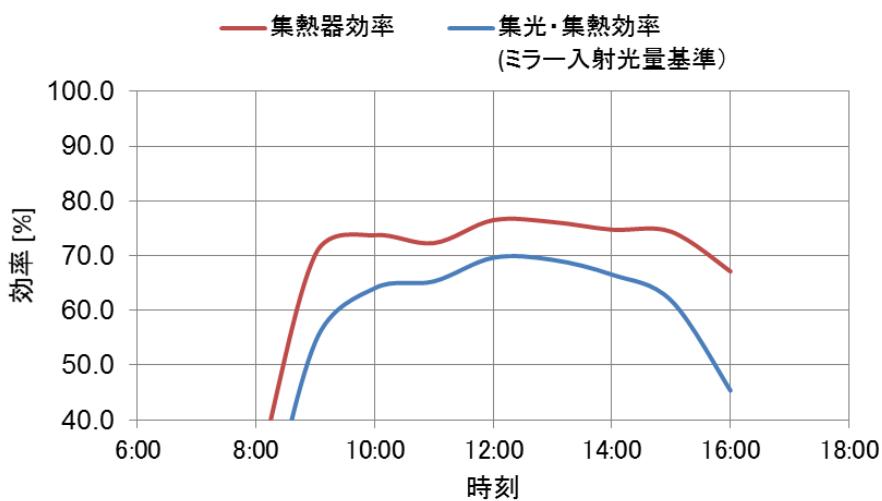


図8 冬至（12/20）の集熱器効率と集光・集熱効率の変化

3. 2. 高効率水素製造への熱・電力供給システムの検討

膜分離新 IS プロセスを用いた水素製造プロセスにおいては、600°C超の熱を必要とする硫酸分解プロセス、400°Cレベルの熱を必要とするヨウ化水素分解プロセス、より高温が望ましい発電向け蒸気発生プロセス等、異なる温度レベルの熱を必要とする。

タワー型集光集熱システムは高温集熱に適するという利点があるが、トラフ型やリニアフレネル型に比べて、土地利用率が低いという欠点が明らかとなっている。このため、高温集熱に適するというタワー型の利点を活かすべく、集熱温度は比較的低温であるが効率の高いトラフ型やフレネル型といった線集光型集光集熱システムを組み合わせたシステムについて検討を行った。

(1) タワー型+線集光直列システム

線集光型集熱システム（トラフ・フレネル型）とタワー型集光集熱システムを直列に設置して、540°Cまでの昇温を線集光型、650°Cまでの昇温をタワー型で実施した場合の全体構成を図9に示す。線集光集熱システムの出口温度を540°Cとすると、タワー型集熱システムの必要容量は578MWであり、3-1節で示した集熱系が3基必要となる。

直列システムの場合は、使用する熱媒を共有できるため、蓄熱を含めた熱媒系を単純化できるメリットは大きいが、運転が複雑になるという課題もある。

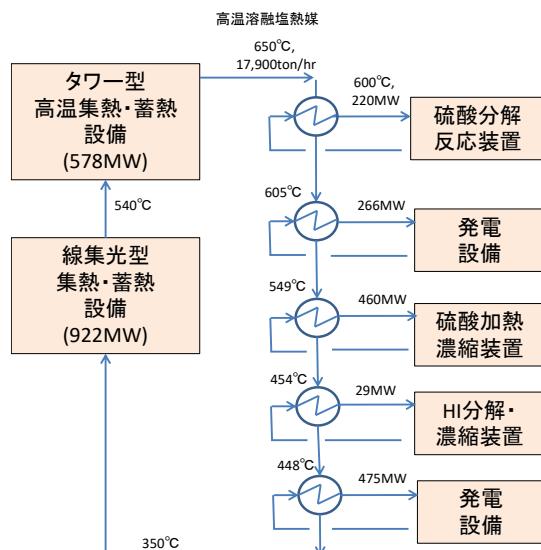


図9 タワー型+線集光集熱直列システムと膜分離新 IS システムとの組み合わせ

(2) タワー型+線集光集熱の並列システム

タワー型集光集熱システムで650°Cの熱を硫酸分解反応装置に供給し、それ以外の発電を含む熱を線集光集熱システム（トラフ・フレネル型）から供給する場合の全体構成を図10に示す。この場合、システムを高温側と低温側で並列とすることで、低温側の線集光集熱システムは既存の線集光型システムと、硝酸塩系溶融塩の熱媒の組み合わせで対応可能となる。高温側のみに、タワー型の

高温集熱システムと高温溶融塩熱媒を使うことで、高温集熱を必要とするシステムを最小限とすることが可能になるという利点を有する。

一方で、高温集熱システムの必要容量は直列ケースと変わらないのに対して、2種類の熱媒と蓄熱システムが必要になることから、並列システムを適用するメリットは小さいと考えられる。

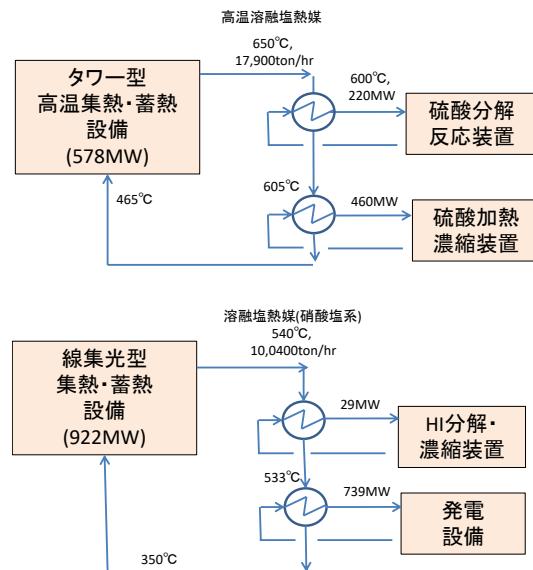


図 10 タワー型+線集光集熱並列システムと新 IS システムとの組み合わせ

(3) 高温水蒸気電解プロセスへの熱供給システム

高温水蒸気電解でアンモニア生産量 2,000ton/day に必要な水素を製造する際の熱・電気需要の検討結果を想定に用いた。高温水蒸気電解の場合は、600°C の過熱水蒸気生成に必要な熱量は 41MW と小さく、水蒸気電解に必要な電力が 2,593MW と非常に大きいことが特徴である。

高温水蒸気電解プロセスへの熱・電気をタワー型集熱システムで供給する場合の全体構成を図 11 に示す。高温水蒸気電解への適用ケースでは、発電の効率が低い（30%を想定）のため、必要集熱量が非常に大きくなり、2,750MW を必要とする。これは、3.1 項に示した集熱システム約 15 基に相当する。

一方で、600°C の過熱蒸気発生部分のみをタワー型集熱システムで供給し、残りを線集光集熱システムで供給する場合（図 12）では、タワー型集熱システムの容量は 41MW ですみ、高温集熱部を非常にコンパクトな装置とすることができます。このため、膜分離新 IS プロセスへの適用の場合とは異なり、高温水蒸気電解の場合は並列システムの方が現実的なシステムと考えられる。

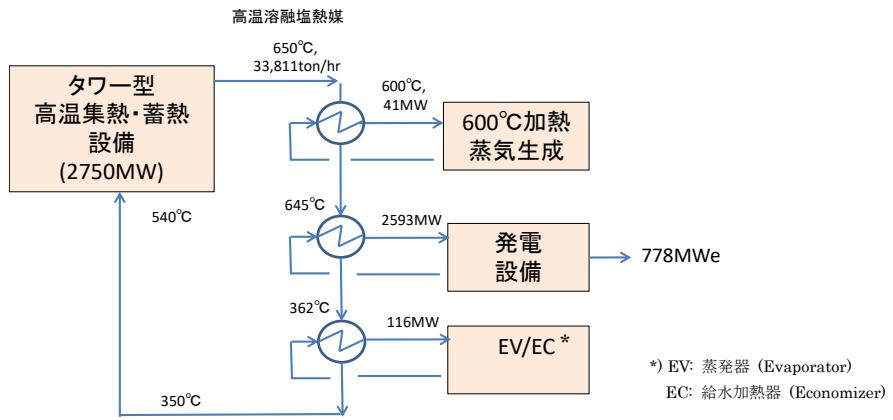


図 11 タワー型集熱システムと高温水蒸気電解との組み合わせ

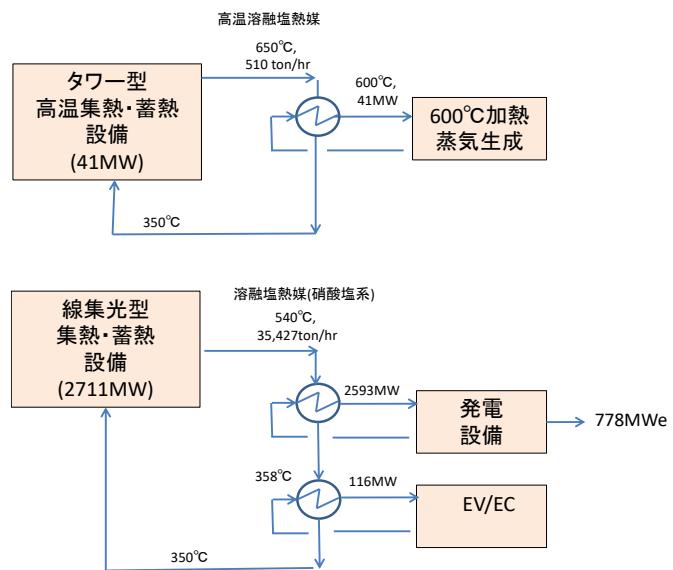


図 12 タワー型+線集光集熱並列システムと高温水蒸気電解との組み合わせ

3-3. 線集光型とインテグレーションしたタワー型集光集熱システムの構築

前項の検討結果より、タワー型集光集熱システムと線集光（トラフ・フレネル）型の2つの集光集熱システムを直列で用いる場合、1種類の高温用熱媒を用いることで蓄熱を含めた熱媒系を単純化できる点でメリットが大きい。このため、平成28年度の検討では、線集光集熱システムで既存の技術で対応できる540°Cまでの昇温を行い、540°Cから650°Cまでの昇温をタワー型集光集熱システムで行うケースの検討を実施した。

(1) 540°Cから650°Cに昇温する集熱システムの構築

a) 検討条件

線集光集熱システムで540°Cまで加熱した熱媒をタワー型高温集熱システムに供給し、650°Cまで加熱する。供給する熱容量は線集光とタワー型プラントの総計で1,500W、タワー型単体で580MWを24時間供給するものとする。その他の検討条件は、3.1節の検討と同様である。

c) 集光・集熱システムの改善検討

平成27年度の検討結果では、よりコンパクトな設備で集熱量を高めるためにタワーの高さの330mと設定したが、本検討では設備容量が小さくなることから、建設の容易さやコスト面で商業機のタワーの最大高さである240mとして集光システムを構築した。

タワー高さを下げたことにより、目標集光量を満足するために必要なヘリオスタッフファーレド面積が大きくなっている。シミュレーションにより得られた集熱システムの概要を表2に示す。

表2 タワー型集熱プラント 1基の検討条件（入口温度540°Cケース）

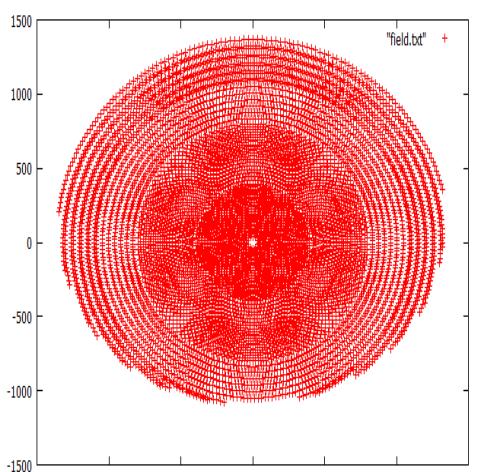
タワー高さ	240 m
ヘリオスタッフ基数	8,004基
主要仕様 ヘリオスタッフ配置	

図 13 に集熱器における熱媒の温度分布を示す。熱媒は、540°Cで供給され、集熱器で 650°Cまで加熱されていることがわかる。また、ヒートフラックスの最大値は 661kW/m²であった。

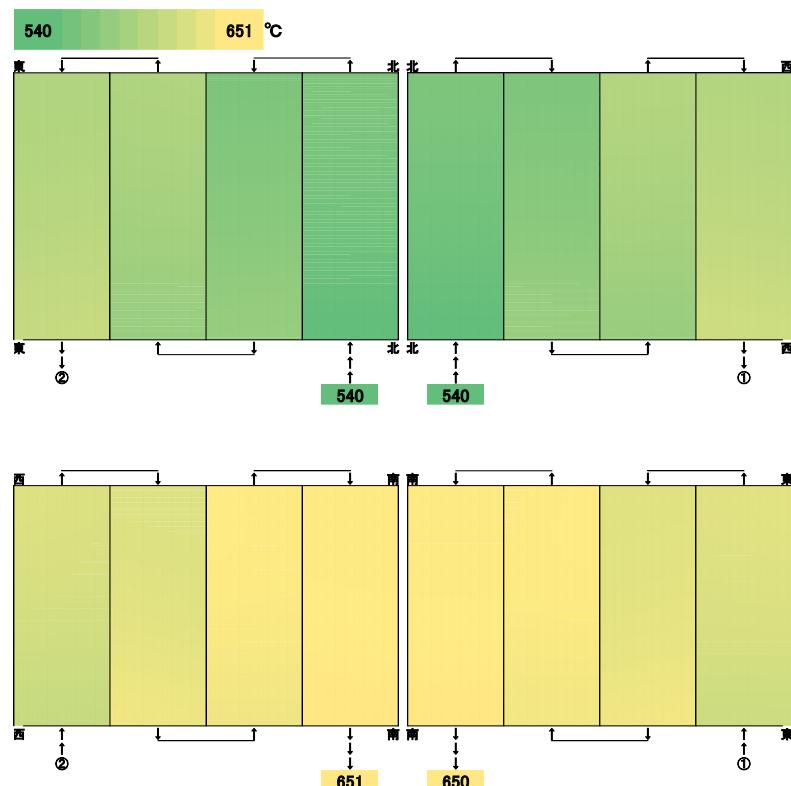


図 13 热媒温度分布（入口温度 540°Cケース：春分・正午条件）

(2) 共通検討条件におけるケーススタディ

a) 春分（3/16）の日射条件における検討

3月 16 日の日射条件にて 1 時間毎にシミュレーションを実施し、各時刻での集光量・集熱量・集光効率・集熱効率を計算した結果を図 14 に示す。

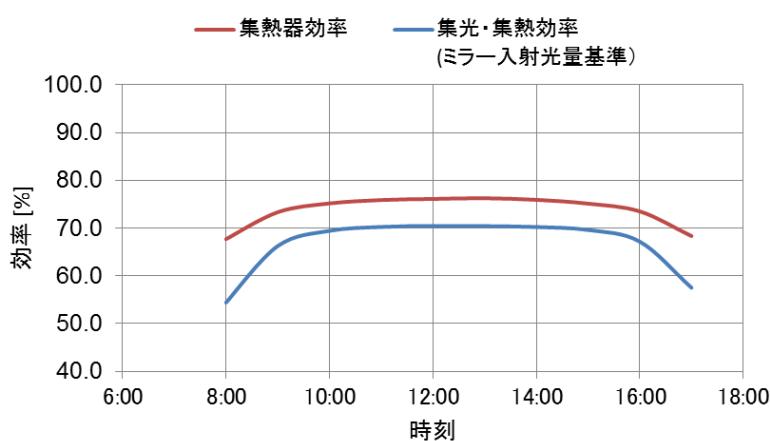


図 14 春分(3/16)の集熱器効率と集光・集熱効率の変化

春分の日(3/16)正午における全ヘリオスタッフに入射した光量を 100%とした場合の、集光効率とエネルギーロスの内訳を図 15 に示す。今年度の検討ではタワーの高さを低く変更したため、ヘリオスタッフによるシャドーイングの増大が懸念されたが、ヘリオスタッフの配置を工夫したことにより、シャドーイング及びブロッキングによるロスは非常に小さくなっていることがわかる。

また、春分の日(3/16)正午における集熱器効率表面に集光されたエネルギーを 100%とした場合の集熱器効率とエネルギーロスを図 16 に示す。集熱器のロスの大半が集熱器表面からの放射ロスであることがわかる。

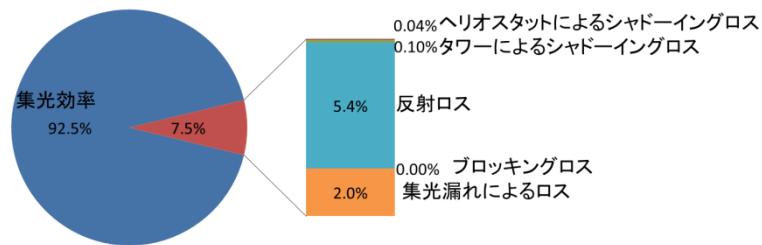


図 15 ヘリオスタッフ入射エネルギー基準の集光効率 (入口温度 540°C ケース : 春分正午条件)

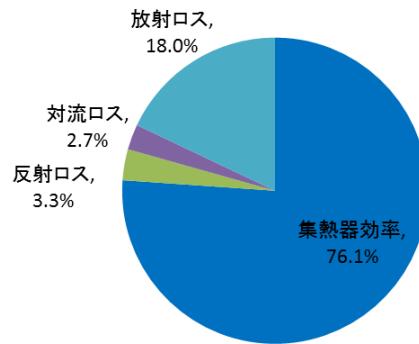


図 16 集熱器効率 (入口温度 540°C ケース : 春分正午条件)

b) 夏至及び冬至の日射条件における検討

夏至 (6/21) 及び冬至 (12/20) の日射条件でシミュレーションを行い、集熱量や効率を検討した。夏至 (6/21) と冬至 (12/20) での各時刻での集熱器効率と集光・集熱効率の経時変化を図 17, 18 に示す。

夏至では 1 基当たり 1 日で 5,691 MW の集熱が可能であるため、3 基分では 17,075 MW となる。したがって、24 時間平均では 1 時間当たり 711 MW の熱量を供給可能となる。

一方で、冬至では 1 基当たり 1 日で 2,796 MW の集熱となり、3 基分では 8,388 MW となり、

24時間平均では1時間当たり350MWの熱量を供給可能となる。

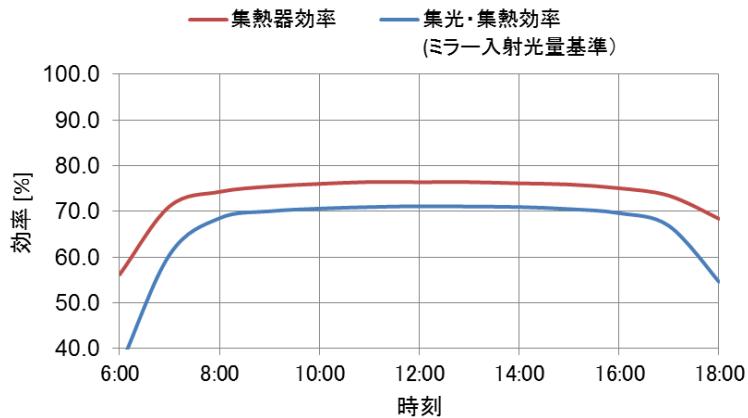


図17 夏至（6/21）の集熱器効率と集光・集熱効率の変化（入口温度540°Cケース）

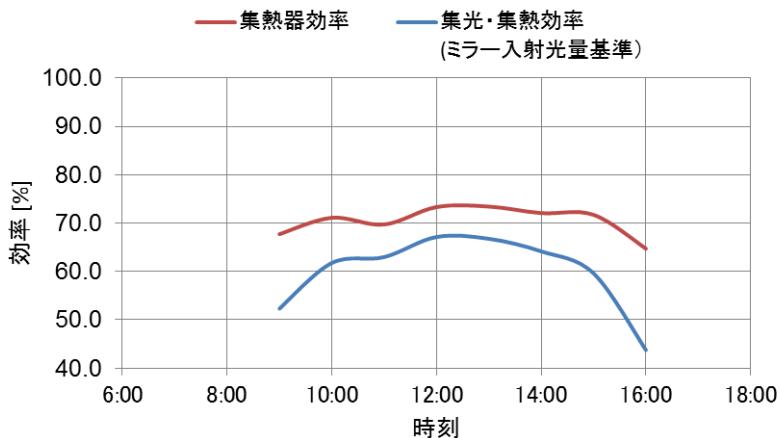


図18 冬至（12/20）の集熱器効率と集光・集熱効率の変化（入口温度540°Cケース）

夏至及び冬至の正午における全ヘリオスタッフに入射した光量を100%とした場合の、集光効率とエネルギーロスの内訳を図19,20に示す。冬至の際の集光効率の低下は、太陽高度が低いことによるヘリオスタッフによるシャドーイングロスの増大によるものである。これは、ヘリオスタッフの設置間隔を広げることで低減可能であるが、設置面積の増大とのトレードオフとなることから、実際には個別の案件での事情を考慮して最適化を図る必要がある。

また、集熱器効率は、夏至と春分条件は約76%と同等であるが、冬至条件では外気温が低いことによる放射ロスの増大により、効率が約73%まで低下した。

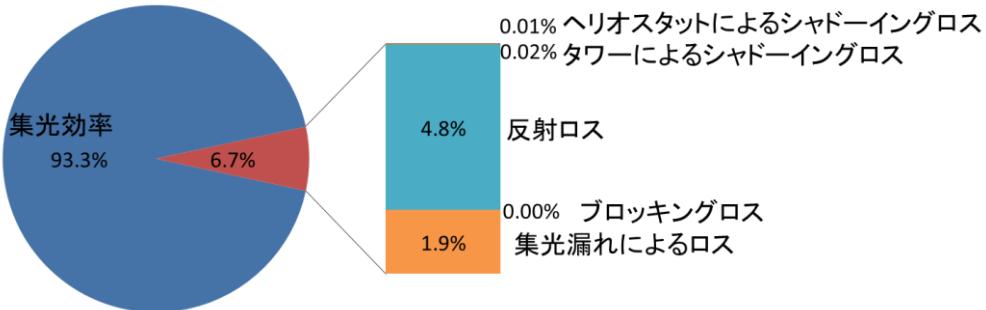


図 19 ヘリオスタッフ入射エネルギー基準の集光効率 (入口温度 540°C ケース : 夏至正午条件)

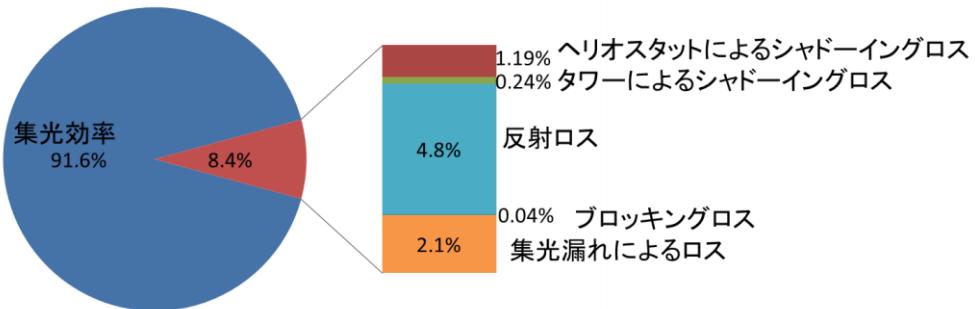


図 20 ヘリオスタッフ入射エネルギー基準の集光効率 (入口温度 540°C ケース : 冬至正午条件)

(3) 線集光と点集光の組み合わせのメリット

エネルギー総合工学研究所の試算によると、春分の正午の日射条件において、土地面積当たりの集光量は、トラフ型で 240W/m^2 、タワー型で 100W/m^2 と見積もられており、タワー型の方がヘリオスタッフを分散して設置せざるを得ないため、土地面積当たりの集光量は小さい。

$1,500\text{MW}$ の集熱を行うケースで概算すると、トラフ型での必要土地面積が 6.3km^2 であるのに対し、タワー型では 15km^2 に増大する。これを図 9 に示すような線集光と点集光の組み合わせにすると必要土地面積は 9.6km^2 となる。組み合わせシステムによる必要土地面積はタワー型単独に比べて 36% の削減が可能となり、効果が大きいことがわかる。

(4) 商業規模の 650°C の集光集熱システムの構築

膜分離新 IS 法による水素製造のためには $1,500\text{MW}$ を 24 時間連続して供給 ($36,000 \text{MWh/day}$) する必要がある。この熱を線集光とタワー型システムの組み合わせで供給する場合、タワー型高温集熱システム単体では 580MW を 24 時間連続して供給するため、 $13,920 \text{MWh/day}$ の集熱量が必要となる。表 2 に示す 1 基の集熱プラントにおいて 1 日で得られる熱量は、熱媒吸収熱量の

総和である 4,640 MWh であり、タワー型集熱プラントが 3 基必要となる。

3-4. 高温溶融塩環境下での配管材料腐食性評価

(1) 流動状態にある溶融塩中での腐食試験の方案検討 (H27 年度成果)

溶融塩中における金属材料の耐食性評価は、1 次スクリーニングでは溶融塩が静止したバッチ試験により腐食速度を求めて候補材を選定する。一方で実機において、溶融塩は流動状態にあるために、耐食性に及ぼす溶融塩の流速の影響を考慮する必要がある。

流動する溶融塩を扱うプロセスとしては、核融合炉の熱を取り出すプランケットと呼ばれる熱輸送システムが知られている。核融合炉における熱の取り出しの概念図を図 21 に示す。炉心プラズマの熱は、1 次系である溶融塩のループによって炉外に熱が取り出される。熱媒としては核融合炉においては、融点がおよそ 500°C の LiF と BeF₂ の混合塩が候補として検討されている。

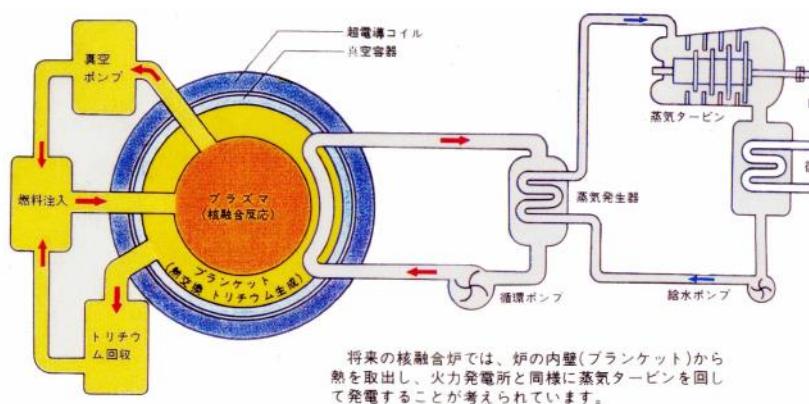


図 21 核融合炉における熱取り出しの概念図

自然科学研究機構 核融合科学研究所では溶融塩のループ試験設備の設計研究を行い課題の抽出作業を実施した。図 22 にループの機器構成を示す。本ループでは、熱交換器でテストセクションのみを加熱している。図 23 にテストセクションの詳細を示す。本装置では断面が 9×10mm の流路の中に 2mm 厚さの腐食試験片がテストセクション内にホルダーで保持される。

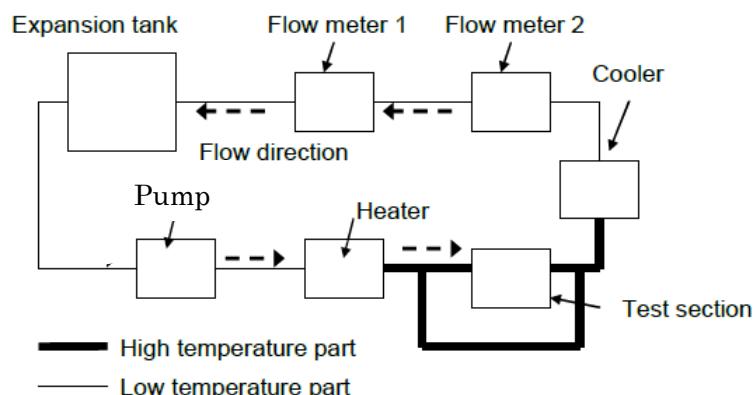


図 22 核融合プランケットを模擬したループの機器構成

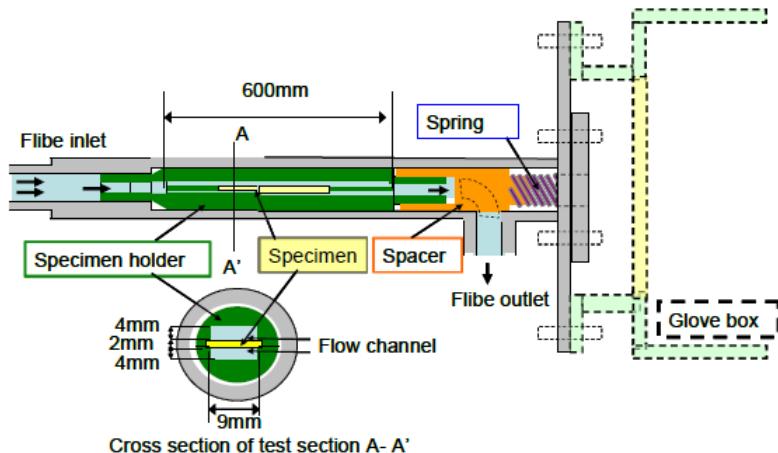


図 23 テストセクションの詳細図

太陽集熱プロセスにおける耐溶融塩材料の選定にあたっても、最終的な耐食性の評価においては溶融塩の流速の影響を考慮したループ試験が必要と考えられる。ループ試験装置の設計に際して、ここに紹介した核融合のプランケットを模擬した試験設備の概念が有用と考えられる。特に検討が必要な項目としては、以下の 3 点が挙げられる。

- (a) 系全体のシール方法の検討及びポンプの選定
 - (b) 温度条件をループ全体同一とするか、テストセクションのみを加熱するか
 - (c) 試験片は挿入型とするか、配管の材質自体を候補材料として内表面を評価するか
- (2) 溶融塩中における応力腐食割れ試験の実施に関する検討（H28 年度成果）

これまでに東工大及び京大において静置と攪拌状態での全面腐食試験を実施して耐食性を評価した。一方でステンレス系の材料は環境と材料の組み合わせで応力腐食割れを生じることがある。溶融塩中で耐応力腐食割れ性を評価した事例はほとんど無く、蓄熱材料として溶融塩を適用する場合は、候補となる装置材料、配管材料の耐応力腐食割れ性の評価は必須と考えられる。

平成28年度は、各種の腐食試験で採用されている試験片に対する応力負荷方法を調査し、溶融塩中の応力腐食割れ試験の実施を前提として、最適な応力腐食割れ試験方法を提案した。

腐食試験片に応力を負荷する方法には、大別すると、試験片にかかる荷重を常に一定にする定荷重法(Constant loading type)、試験片の歪量を常に一定にする定歪法(Constant deflection type)及び一定の歪速度で応力を負荷する動的応力負荷法(Dynamic loading type)がある。

定荷重法(Constant loading type)は、試験開始から試験片が破断するまで一定の荷重を試験片に負荷しておく方法である。一般に応力を負荷するための装置が必要となり、大量の実験を行なうには問題がある。しかし一定の荷重を負荷するため、試験中の応力値を一定に保ちやすい長所がある。負荷する荷重を低減するために、図24に示すとおりで応力を負荷する方が考えられている。

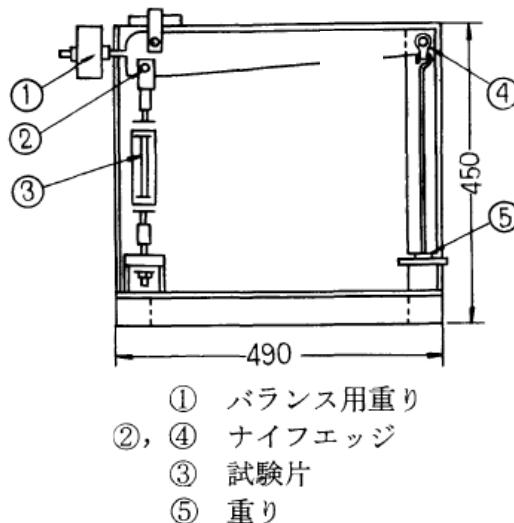


図24 てこ式荷重負荷

定歪法(Constant deflection type)は、試験片に負荷応力に対応する歪を試験開始から割れが発生するまで付与しておく方法である。この方法は比較的簡単なジグを製作することにより試験が実施できるので、大量の試験を同時にに行なうのに適している。定歪法による応力腐食割れ試験では、一般に、あらかじめ試験片の変形量と応力との関係を求めておき、試験応力に対応する歪量を試験片に付与して応力を負荷する。この場合、ストレインゲージなどを用いて、直接試験片に付与された応力を算定することが望ましい。定歪法の例を以下に2つ示す。

(a) 曲げ式

板状試験片を二点あるいは三点で支持し、試験応力を試験片表面に負荷する方式である。図25に三点支持曲げの例を示す。この方式ではジグに試験片をセットした後、全体を腐食液中に置き、試験片表面に割れが発生するまでの時間を求め、その長短により応力腐食割れ感受性を評価する。ジグは変形しにくい非金属で作成するか、金属で作成する場合には、パラフィン塗料などでジグを被覆し、試験片との接触腐食を防止する。JISでも、主として厚さ6mm以下の板材の応力腐食割れ試験法として、三点支持曲げによる定歪法が規定されている。

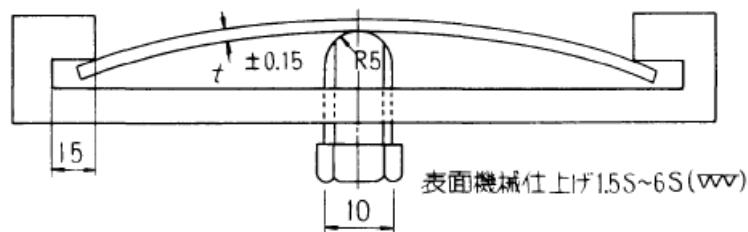


図25 3点支持曲げ定歪法

(b) U字曲げ

この方式は、板状試験片を半径 r で 180° 塑性変形し、ボルト・ナットなどで固定する方法である。図26にU字曲げ試験片を示す。このU字曲げ試験片による試験は最も簡単な方式であり、特にジグも必要としないことから応力腐食割れ感受性の定性的な評価方法として古くから多用されている。しかし、この方式では、試験片が塑性変形を受けていること及び径 r で曲げる時の曲げ工程の違いにより、試験片表面の応力の大きさが異なることから、試験片表面の引張応力の大きさは不確かであり、この方式はあくまでも、応力腐食割れ感受性の定性的な目安を得るための簡便法として用いられている。

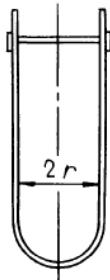


図26 U字曲げ試験片

これまでに紹介した応力負荷方法は、主に水溶液中の腐食試験を前提としている。一方で溶融塩中の腐食試験は温度がおよそ 650°C と高温であること、雰囲気をガスでパージして制御する必要があることから、静置及び攪拌状態での溶融塩中の全面腐食試験は内径が数10mmのタンマン管の中で実施している。これらの制約を考慮すると、大掛かりな応力負荷装置が必要となる定荷重法は現実的で無い。また定歪法においても曲げ法は治具が必要となるため、寸法的に困難と判断される。寸法的な制約が最も少ないのはU字曲げかCリングであり、これらが応力負荷方法の候補となる。Cリングは基本的には実機パイプから採取する試験片で、パイプ寸法が未定の現状では採用に難がある。U字曲げは短冊状の試験片の曲げ加工で簡便に試験片加工が出来ること、JISに試験片の作製方法が規定されることから、溶融塩中の応力腐食割れ試験に適当と判断される。試験片の製作要領案を以下に示す。

① 試験片形状

JIS G0576に準拠したU曲げ試験片 (外観形状は図27参照)

② 試験片寸法

厚さ 1~3mm、幅 10mm 又は 15mm、及び長さ 75mm とする

③ 曲げ加工

内側半径 8mm のポンチを用い、両脚が平行となるようローラ曲げを行う。

④ 応力付加

適切な締付けジグ (例えば試験片と同材のボルトナット) を用いて、スプリングバックで広くなった試験片の両脚が、平行になるまで締め付ける。

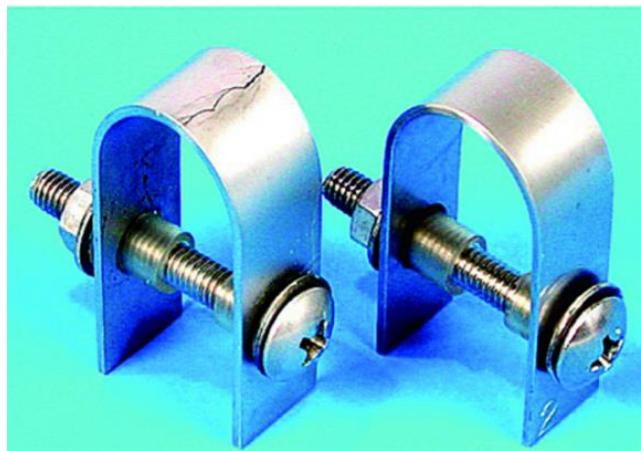


図27 U曲げ試験片の外観

(3) 実環境に即した腐食抑制方法の検討およびフィージブルな材料選定（H29年度成果）

溶融塩を扱うプロセス材料としては、硝酸塩系の蓄熱材を用いた太陽熱発電や溶融炭酸塩型燃料電池においてSUS310Sステンレス鋼(25Cr-20Ni、以下SUS310S)が適用され、耐食材料としての実用化が図られている。一方で、本研究では運転温度650°Cを目標として蓄熱材の開発が進められ、塩化物塩系及び炭酸塩系の溶融塩が候補材として選定された。

一般的に材料に求められる耐食性は、使用する環境下での腐食試験での腐食速度で評価される。プラントもしくは装置の設計寿命を10–20年とした場合、その期間で腐食により損耗するいわゆる「腐食代」を5mm程度で見積もった場合、許容される腐食速度は最大で約0.2mm/yと算出される。溶融塩で耐食性を発揮するSUS310Sを候補材の溶融塩中で腐食試験を行った結果、許容される腐食速度を上回り、耐食性改善のための措置が必要となることが明らかになった。そこで本年度は候補となる溶融塩ごとに腐食抑制方法の検討を行った。

(a) 塩化物塩系溶融塩に対する腐食抑制法の検討

金属材料の防食対策として、樹脂材料のコーティングはよく知られているが、耐熱温度が高々200°C程度にとどまるため、650°Cの運転温度では樹脂材料の適用は困難である。電気防食は温度に関わらず適用が可能で、炭素鋼の貯槽や反応器の内外面の防食方法として実用化されている。ここで適用される電気防食はカソード防食法(陰極防食法)と呼ばれ、被防食体を外部電源のマイナス極に接続し、プラス極は陽極に接続して通電し、防食対象面の電位を腐食反応が停止する不活性域と呼ばれる領域に達するまで引き下げて防食する方法である。装置の構成は、防食対象面にマイナスの電位を与える陽極を防食対象物の内外部に設置して外部電源に接続して電気回路を構成する。印加する電位は、外部電源方式では陰極電位検出電極の出力をモニタリングすることにより、先に述べた不活性域を維持するように制御される。カソード防食はタンク内面のみならず、配管内にも陽極を設置することによりタンクと配管で構成される蓄熱のループシステム全体に対して防食効果がある。容器内面のカソード防食の一例を図28に示す。

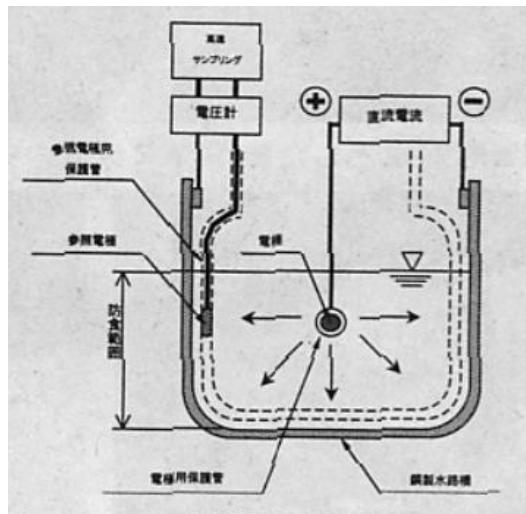


図 28 容器内面のカソード防食の概念図

塩化物系溶融塩中での SUS310S 鋼の腐食速度は表 3 に示すように、腐食速度の目標値である 0.2mm/y を超えることから、工業的にそのままプラント材料として適用することはできない。ここに紹介したカソード防食は塩化物塩系溶融塩においても有効な防食方法と考えられる。

(b) 炭酸塩系溶融塩に対する腐食抑制法の検討

炭酸塩系溶融塩中の腐食は、1980 年代に溶融炭酸塩系燃料電池 (MCFC) のセパレータ材料開発で多くの実験がなされた。その一例を図 29 に示す。本図は各種金属材料の炭酸塩系溶融塩 (650°C) 中での浸漬試験から求められた腐食減量を表している。凡例(5)で示される SUS310S の重量減少量と比較して、(11)、(12)、(13)で示されるアルミナ化物もしくはアルミ添加合金が極めて良好な耐食性を示すことがわかる。アルミナ化物とは溶融アルミメッキ処理であり、亜鉛メッキと同様に板材や管材に広く適用が可能である。一方でアルミ添加合金はアルミの添加量とともに展延性が劣化して板材や管材の加工が困難となる。従って炭酸塩系溶融塩中の耐食性改善としてアルミナ化物が有用な手段と考えられる。

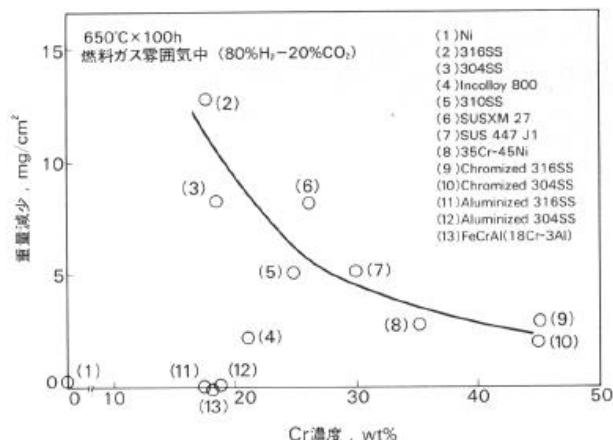


図 29 炭酸塩系溶融塩中の各種金属の腐食試験結果 ⁽²⁾

以上の検討により、腐食抑制の方案として Li 系塩化物塩系の溶融塩に対してはカソード防食、Na 系塩化物塩系の溶融塩に対してはハステロイ C276 の適用、炭酸塩系の溶融塩に対してはアルミナライズ処理が有効であることが明らかになった。各機関で実施した腐食試験の結果を腐食速度の目標値と合わせて表 3 に示す。Li 系塩化物塩、炭酸塩いずれもカソード防食もしくはアルミナライズ処理を実施することによって、無垢の SUS310S に比べて耐食性が大幅に改善された。またマイルストーンとして定めた目標の腐食速度も満足した。また Na 系塩化物塩についてはハステロイ C276 の適用で目標の腐食速度を満足した。

表 3 腐食試験結果

溶融塩の種類		Li 系塩化物塩	Na 系塩化物塩	炭酸塩
目標 (マイルストーン)		0.1mm/y	0.1mm/y	2 μ m/y*
静的腐食試験 結果	SUS310S (無垢材)	0.28mm/y	0.61mm/y	0.48mm/y
	ハステロイ C276 (無垢材)	—	0.05mm/y	—
	SUS310S + カソード防食	0.03 mm/y	—	—
	SUS310S + アルミナライズ α HT**	—	—	1~2 μ m/y*

* : アルミナライズ皮膜としての腐食速度

** : 伸光金属にてアルミナライズ α 処理した後に大気雰囲気で熱処理 (HT)

詳細は京都大学の機関報告書を参照

耐食性改善のための手法として、SUS310S に対するカソード防食及びアルミナライズ処理の有効性を明らかにした。今後解決すべき問題点について検討した。

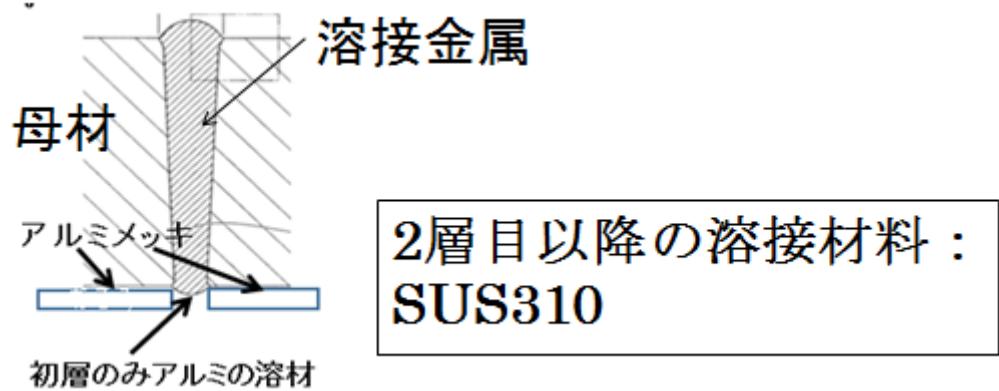
カソード防食は前述のとおり容器、配管の防食方法として既に実用化されている。現状の問題点としては以下の項目が挙げられる。

- ① 電位を常に維持する必要があり、停電や電源装置の故障を想定したバックアップが必要となる。
- ② 対象面積に応じて大電流を供給できる大型の電源装置が必要となる。
- ③ 電気防食を機器、配管の内面全体に確実に作用させるための陽極や検出電極の適切な配置条件を設定する必要がある。

溶融塩腐食対策としてのカソード防食は実用規模では実施例がないことから、上記の項目は今後の検討課題となる。

アルミナライズ処理は、板材、管材を溶融アルミメッキ浴に浸漬する実用化された技術で、母材の処理に問題は生じない。一方で装置、機器、配管を組立て製作するに当たって、溶接による接合作業が必ず生じる。例えばアルミナライズ処理した平板を突合せ溶接した場合、溶接部にアルミメッキ層は存在しないために、溶接部の耐食性劣化は容易に想像される。そこで溶接部にアルミニウム層

を残すための手法を以下のように提案する。母材に SUS310S を選定した場合、通常は溶接材料も同種の材料が選定される。この場合は溶融塩と接液する溶接の初層部にはアルミニウム層が存在しない。そこで、初層のみ溶接材料にアルミニウムを適用して、その後の溶接には SUS310S の溶接材料を適用する。溶接手順のイメージを図 30 に示す。この溶接方法を採用することにより、内面側にアルミニウム層が存在して、かつ機械的強度は SUS310S と同等の性能が確保されることが期待される。



3-5.まとめ

エネルギーキャリアとして期待されているアンモニアを再生可能エネルギーから安価かつ大量に製造する方法の一つとして、太陽熱を用いた熱化学法や高温水蒸気電解による水素製造法が開発されている。本研究では、タワー型集光集熱システムを用いて、650°Cの熱を集熱して蓄熱し、水素製造プラントに必要な熱・電力を供給するシステムを検討した。

タワー型集光集熱システム単独で、溶融塩熱媒を350°Cから650°Cまで昇温できる集熱システムをシミュレーションにより検討した結果、ヘリオスタッフ7,250基を配置し、中央に集熱器を擁する高さ330mのタワーのプラント構成を選定した。このシステムは、1日の集光集熱効率がほぼフラットであり、線集光に比べて安定した性能を発揮できる特徴がある。春分の日における最高の集光効率は正午前後で92.1%となった。春分の日の日射条件における集光効率は92%、集光・集熱効率はミラー入射光量基準では72.8%となり、目標である70%を達成した。2,000ton/dayのアンモニア製造に必要な水素製造に求められる熱を供給するためには、このタワー型集熱プラントが8基必要となり、敷地面積として5.5km x 7.2kmが必要となる。

さらに、熱化学法あるいは高温水電解に必要な熱の温度レベル・電力量を考慮した熱・電力供給システムを検討した結果、すでに技術的に確立されている線集光集熱システムとタワー型集光集熱システムを組み合わせることにより、より安価なシステムとなる可能性が見いだされた。

このため、組み合わせシステムを想定し、540°Cから650°Cまで昇温できるタワー型集熱システムをシミュレーション検討した。このケースでは、プラントコスト低減の観点からタワー高さを240mまで低くしたシステムを構築し、春分の日の日射条件で集光効率92.5%、集光・集熱効率は70.4%と高い効率が得られた。

また、熱媒である高温溶融塩に対する配管材料の腐食性評価手法の調査・検討を実施した。実条件を模擬した流動条件での腐食試験、応力腐食割れの評価試験方法について既往の研究例を調査し、熱媒開発で実施するループ試験の試験方法策定に協力した。さらに実環境に即した腐食抑制方法としてカソード防食、アルミナライズ処理を提案し、熱媒開発担当機関にて腐食試験を実施した。その結果、塩化物塩、炭酸塩いずれもカソード防食もしくはアルミナライズ処理を実施することによって、無垢のSUS310Sに比べて耐食性が改善された。またマイルストーンとして定めた目標の腐食速度も満足した。

3-6.今後の課題

本研究で検討したタワー型集光集熱システムは、高温の熱の集熱・蓄熱に適したシステムであるが、トラフ型などの線集光型システムに比べて商業適用例が少ない。これは、線集光型システムは数基の集熱器を用いたシステムで実証が可能であるのに対し、タワー型システムの場合は、商業規模へのスケールアップに必要なデータを取得するためには数十MWクラスでの実証試験を必要とするため、開発のハードルが高いことが実用化の大きな課題の一つである。このため、タワー型集光集熱技術を有するメーカーも世界的には少なく、高温集熱技術の早期の実用化には先行技術の協力を得ながら商業実証を行うことが求められる。

また、高温集熱の実現のためには、熱媒である高温溶融塩の開発とこれをハンドリングできるポンプ・バルブなどの機器の実用化も求められる。このためには、材料評価手法と腐食低減策の確立が必

要である。本研究でこれらの方向性が明らかになったことから、今後の研究による課題解決が期待される。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> 0 件

<査読なし（総説等含む）> 0 件

(2) 学会、展示会等発表

<招待講演> 国内 0 件、海外 0 件

<口頭発表> 国内 0 件、海外 0 件

<ポスター発表> 国内 0 件、海外 0 件

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> 国内 0 件、海外 0 件

(3) プレス発表

なし

(4) マスメディア等取材による公表

なし

5. 特許出願実績

なし

6. 参考文献

- (1) NREL、http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=3275
- (2) IHI 中川：鉄と鋼 Vol75 (1989)10,1852