

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「高温太陽熱供給システム」

研究題目

平成 26～28 年度 「高温集光集熱システムの開発」

平成 29 年度 「高温太陽熱の用途探索」

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： 平成 26～27 年度 豊島 光伸

平成 28～29 年度 勝間 寛

所属研究機関： 東洋エンジニアリング株式会社

目次

1. 本研究の目的	6
1-1 高温集光集熱システムの開発	6
1-2 高温太陽熱の用途探索	6
2. 研究開発目標とマイルストーン	6
2-1 高温集光集熱システムの開発	6
2-2 高温太陽熱の用途探索	7
3. 研究実施内容	8
3-1 高温対応システム構築	8
3-1-1 熱媒選定によるケース設定	8
3-1-2 ベースケース（空気熱媒）での集光集熱系の検討	9
3-1-3 ベースケース（空気熱媒）での配置計画	11
3-1-4 ベースケース（空気熱媒）での配管サイジング	12
3-1-5 ベースケース（空気熱媒）での熱供給とフロー構築	12
3-1-6 ベースケース（空気熱媒）での蓄熱系	13
3-1-7 比較ケース（熔融塩熱媒）での集光集熱系の検討	14
3-1-8 比較ケース（熔融塩熱媒）での配置計画	16
3-1-9 比較ケース（熔融塩熱媒）での配管サイジング	17
3-1-10 比較ケース（熔融塩熱媒）での熱供給とフロー構築	17
3-1-11 比較ケース（熔融塩熱媒）での蓄熱系	18
3-1-12 ベース・比較ケースの仕様	19
3-2 高温対応システム経済性の評価と向上	20
3-2-1 経済性に影響が大きい主要コスト	20
3-2-2 経済性の向上の検討	20
3-2-3 集光式太陽熱の経済性状況	25
3-3 他グループとの統合	27
3-3-1 水素製造側との統合	27
3-3-2 集熱管との統合	27
3-3-3 蓄熱剤・熱媒体との統合	27
3-4 高温（650℃）の用途候補抽出	28
3-4-1 熱機関	30
3-4-2 熱利用設備	32
3-4-3 水素製造	40

3-4-4	石炭・天然ガス活用型 二酸化炭素回収・利用技術の開発	49
3-4-5	高温(650℃)用途候補のまとめ	51
3-5	高温用途での太陽熱の長所・制約の検討.....	51
3-5-1	化石資源の供給困難地域へのエネルギー供給.....	52
3-5-2	地球温暖化対策への貢献.....	52
3-5-3	有害物質の排出削減.....	52
3-5-4	エネルギーの不均一性	52
3-5-5	広大な必要面積	52
3-6	高温用途での熔融塩の長所・制約の検討.....	52
3-6-1	蓄エネルギー	53
3-6-2	低圧性.....	53
3-6-3	凝結性.....	53
3-6-4	腐食性.....	53
3-6-5	非燃焼性	53
3-7	高温用途でのシステム化対象について	54
3-7-1	熱機関への蒸気供給	54
3-7-2	熱利用設備.....	54
3-7-3	水素製造	56
3-7-4	高温供給のシステム化検討対象.....	57
3-8	まとめ	59
3-8-1	高温集光集熱システムの開発のまとめ.....	59
3-8-2	高温太陽熱の用途探索のまとめ.....	60
3-9	今後の課題	62
3-9-1	高温集光集熱システムの開発	62
3-9-2	高温太陽熱の用途探索	62
4.	外部発表実績	62
5.	特許出願実績	63
6.	参考文献等.....	63

図表一覧

図 3.1	ベースケース集光集熱系配列—Cell (40 Unit、160 Line)	10
図 3.2	空気熱媒 2000t/日 NH ₃ の H ₂ Plant を中心の集光集熱系配置	11
図 3.3	比較ケース集光集熱系配列—Cell (30 Unit、120 Line)	15
図 3.4	熔融塩熱媒 2000t/日 NH ₃ の H ₂ Plant を中心の集光集熱系配置	17
図 3.5	高温(650°C)候補探索	28
図 3.6	金属・合金の融点	32
図 3.7	CATOFIN (脱水素) -C 3 のフロー	34
図 3.8	トルエンの脱アルキルのフロー	36
図 3.9	キシレン類の平衡組成	38
図 3.10	石炭の高温高压反応	41
図 3.11	プロセスフローの一例	42
図 3.12	水の相関連図	44
図 3.13	木質チップガス化による水素製造	46
図 3.14	水電解での分解電圧・熱的平衡電圧の温度依存性	47
図 3.15	水蒸気電解	48
図 3.16	プロトン伝導体を用いた水蒸気電解の原理	48
図 3.17	石炭・天然ガス活用型 二酸化炭素回収・利用技術	50
表 3.1	各ケースの具体的なシステム構成	9
表 3.2	ベースケース (空気熱媒) での集光集熱系の用語定義	9
表 3.3	空気熱媒での集光集熱特性	10
表 3.4	ベースケースの集光集熱系 配置計画での検討値	11
表 3.5	比較ケース (熔融塩熱媒) での集光集熱系配置の用語定義	14
表 3.6	熔融塩熱媒での集光集熱特性	15
表 3.7	比較ケースの集光集熱系 配置計画での検討値	16
表 3.8	2000t/日 NH ₃ の経済性検討の仕様	19
表 3.9	経済性に影響が大きい主要コストの想定値	20
表 3.10	経済性向上の可能性考慮	24
表 3.11	CSP Cost Analysis with System Advisor Model version 2010-11-09	25
表 3.12	Goals Established by DOE for Various Components of CSP Plants	26
表 3.13	火力発電での 650°C への上昇による効果	30
表 3.14	火力発電での温度上昇に係る主要材質	31
表 3.15	低炭化水素の標準生成エンタルピー ΔH°_f (kJ/mol)	33
表 3.16	キシレンの生成エンタルピー他	37

表 3.17 不均化対象芳香族の生成エンタルピー他.....	39
表 3.18 水の分解に係る生成エネルギー等.....	46
表 3.19 高温(650°C)用途候補.....	51
表 3.20 システム化検討.....	59

1. 本研究の目的

研究題目は、平成 26～28 年度一集光集熱システムの開発、平成 29 年度 -高温太陽熱の用途探索の研究であり、これらの目的は次の通りである。

1-1 高温集光集熱システムの開発

エネルギーキャリアとしてのアンモニア製造の中では、水素製造が非常に重要である。本研究の目的は、この水素製造に必要な高温の熱を 24 時間供給できる「高温集光集熱システムの開発」である。

この技術開発の目的が達成されることにより、太陽熱を中心とした再生可能エネルギーにて、現在の化石資源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/日を生産できるようになる。

1-2 高温太陽熱の用途探索

水素製造として、当面の間は水の電気分解を想定しているが、新しい熱利用水素製造の技術開発が進行中である。熱供給側では、我が国の<集光集熱法> + <集熱管> + <熔融塩> の先端技術にて、水素製造側の要求を満たすべく、高効率水素製造が可能となる 650℃の高温集光集熱システムの構築を進めている。システム高温化は直接に発電効率上昇となるため、集光式太陽熱の分野でも高温化への競争が行われている。

低炭素社会、環境保全、持続性向上のためには、高温太陽熱供給システムの実装・普及は重要である。「技術開発中の高温太陽熱の用途探索」を行い、高温太陽熱供給システムの実証・普及に貢献する。

2. 研究開発目標とマイルストーン

平成 26～28 年度一集光集熱システムの開発、平成 29 年度 -高温太陽熱の用途探索それぞれの研究開発目標とマイルストーンは次の通りである。

2-1 高温集光集熱システムの開発

H26 年度:

新集光法であるクロスリニア (CL) にて、水素製造に要求される温度 (650℃以下) 供給が可能な集光集熱システムを目指す検討を行う。

(マイルストーン:600℃の集光集熱システムの構築)

H27 年度:

新集光法であるクロスリニア (CL) で、650℃で集熱し水素製造の加熱源として必要な熱量を集熱可能な高温高効率集熱システムを構築する。なお、インドでの実証化テストの成果の活用に加え、経済的な評価を行う。

(マイルストーン:商業規模の 650℃の集光集熱システムの構築-技術的評価・経済的見込み)

H28 年度:

水素製造の熱・電気需要に合わせた高温高効率集熱の最適化フローを構築する。各集熱タイプでの高温化・蓄熱技術検討を経た後、検討の集熱システムが大量・安価な水素製造に適しているかの評価・検討を商業規模で行う。このため、経済性の評価を踏まえて、必要なコストダウンを行う。

(マイルストーン: 商業規模の 650°C の集光集熱システムの比較評価-経済的評価)

2-2 高温太陽熱の用途探索**H29 年度:**

高温使用の用途を調査し 650°C への適合性を考慮して、候補を抽出する。

太陽熱の長所・制約の確認を行い、高温 (650°C) 候補での長所・制約を検討する。

熔融塩の長所・制約の確認を行い、高温 (650°C) 候補での長所・制約を検討する。

開発中の熔融塩について、チーム内の情報を基に、従来の熔融塩との差異の確認・検討する。

(マイルストーン: 650°C の用途の候補抽出。太陽熱、熔融塩の長所・制約の整理)

<参考>**H30 年度:**

高温の候補へ高温 (650°C) 供給をするためのシステム化を検討する。

開発中の熔融塩について、チーム内の情報を最新化して反映する。

(マイルストーン: 高温の候補へ高温 (650°C) 供給するためのシステム化の整理)

H29 年度で終了となり、「高温太陽熱供給システム」の中でのシステム化検討は実施しない。

3. 研究実施内容

平成 26～28 年度研究課題－集光集熱システムの開発については、

- ☆3-1 高温対応システム構築、
- ☆3-2 高温対応システム経済性の評価と向上
- ☆3-3 他グループとの統合

平成 29 年度研究課題-高温太陽熱の用途探索については、

- ☆3-4 高温（650℃）の用途候補抽出
- ☆3-5 高温用途での太陽熱の長所・制約の検討
- ☆3-6 高温用途での熔融塩の長所・制約の検討
- ☆3-7 高温用途でのシステム化対象

である。

3-1 高温対応システム構築

平成 26 年度の 600℃、平成 27 年度の 650℃のシステム構築の成果を踏まえ、比較評価・経済的評価を実施するための商業規模の 650℃の集光集熱システムについて、サイトは実証化テストと同一で構築した。

3-1-1 熱媒選定によるケース設定

蓄熱を考慮した集光式太陽熱での熱媒には、熔融塩が選定されることが多い。但し、目指している 650℃の高温熱供給で使用できる適当な熔融塩はなく、チーム内で技術開発中である。

熱媒としての空気は高温で分解、低温で固化などの問題がなく、広範囲の温度での使用が可能である。熱媒費用は不要であり、熱媒が漏えい等した場合の環境への負荷も殆どない。さらに、高温空気は、鉛直方向で温度が急激に変化するサーモクライン型の小石蓄熱との相性が良い。小石は、蓄熱材として、熔融塩に比べて格段に安価であり、ローカルでの供給可能性が高い。

このように、空気熱媒は、技術開発上、環境負荷上、熱媒コストの点で、大変魅力的であるが、熱移動性は熔融塩や水-蒸気に比べて低い。液体に比べて密度が非常に小さく、配管等のサイズが大きくなる。これらは、経済性への大きな課題である。

高圧化により、空気の密度を大きくすることはできる。高圧でクロード化すれば、空気輸送の動力は系内の差圧分として対処可能である。但し、空気熱媒で注目している小石での蓄熱は、蓄熱器の構造上から加圧にすることが難しい。

熔融塩は熱移動性や密度の点では優れているが解決が必要な課題がある。

異なる特性がある、空気・熔融塩の二つの熱媒のケースで、技術的、経済的な評価をし、その課題への対応可能性を検討した。

ベースケース(空気熱媒)は、実証テスト結果を活用でき、比較ケース(熔融塩熱媒)は、「高温太陽熱供給システムチーム」内で技術開発中の高温対応の熔融塩や集熱管を活用できる。

CL 法は集光部の鏡を南北、集熱側のレシーバを東西方向として、直交(Cross)配置するものである。集熱側のレシーバ構造には柔軟性があり、空気熱媒を使用することも、熔融塩熱媒・集熱管を使用することも可能である。

空気熱媒、熔融塩熱媒でのシステム構成を次のようにして、経済性を中心として検討した。

表 3.1 各ケースの具体的なシステム構成

ベースケース 空気熱媒	集熱器はステンレス裸管を複数並列設置したキャビティ・レシーバー 蓄熱は小石を充填する半地下設置タンク方式
比較ケース 熔融塩熱媒	集熱器は真空二重管式の断続管 蓄熱は高・低温二タンク方式

3-1-2 ベースケース（空気熱媒）での集光集熱系の検討

2000t NH₃/日では、Heliostats の数は非常に多く、複雑となる。単純化のため、ベースケース（空気熱媒）では、次のように用語を定義した。集光集熱計算は 1MW-熱(=24MWh-熱/日)を基本とし、この結果を基に 2000t NH₃/日を検討した。

(1) 用語定義

集光集熱系の用語定義は次の通りである。

表 3.2 ベースケース（空気熱媒）での集光集熱系の用語定義

用語	意味
Line	Heliostat を南北に並べたもの
Unit	4 Line を東西に並べたもの 1Unit で 650°Cまで昇温
Cell	約 1MW-熱(=24MWh/d)に対応 ^注 40 Unit を東西 10×南北 4 に並べたもの
Group	空気熱媒の輸送のプロウ1基を設置する単位 40 Cell を東西 5×南北 8 に並べたもの 1600 Unit を東西 50×南北 32 に並べたもの

注: 太陽の状況等により、1 MW-熱から若干増減有

Cell は、検討の基本である 1MW-熱(=24MWh-熱/日)にほぼなるように、Unit を 40 並べたもの。Cell の配置を「図 3.1 ベースケース集光集熱系配列ーCell (40 Unit、160 Line)」に示す。

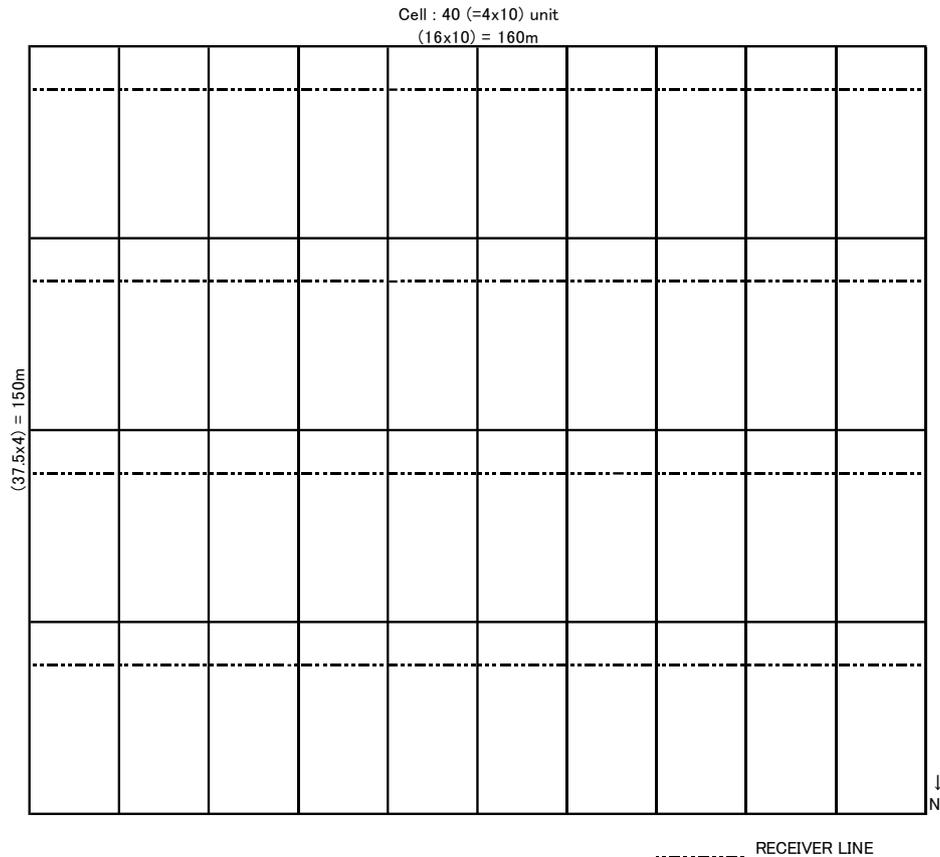


図 3.1 ベースケース集光集熱系配列－Cell (40 Unit、160 Line)

(2) 太陽のデータ

太陽のデータは、実証設備を建設しているところで検討した。

(3) 集光集熱計算

集光集熱計算は 1MW-熱(=24MWh-熱/日)で行い、この結果を基に 1500 倍である 2000t/日-NH₃を検討した。

夏至、冬至を含めた集光集熱計算の結果は、「表 3.3 空気熱媒での集光集熱特性」の通りである。

表 3.3 空気熱媒での集光集熱特性

	春分	夏至	冬至
集光熱量(Wh/m ² d)	4,931	5,532	3,706
Line 集光熱量(Wh/Line/d)	144,982	162,640	108,954
必要 Line 数 @1MW(24MWh/d)	166	148	221
必要 Unit 数 @1MW	42	37	56
設備容量(kW) @1MW	2,883	2,407	3,541
必要 Line 数 @2000t/日-NH ₃	249,000	222,000	331,500
必要 Unit 数 @2000t/日-NH ₃	63,000	55,500	84,000
設備容量(MW) @2000t/日-NH ₃	4,324.5	6,526.5	5,311.5

3-1-3 ベースケース（空気熱媒）での配置計画

(1) 集光集熱系の規模

集光集熱計算の結果である、上記「表 3.3 空気熱媒での集光集熱特性」を基に、2000t/日 NH₃ 製造ベースは、Group 数が整数となるように、「表 3.4 ベースケースの集光集熱系 配置計画での検討値」とした。

表 3.4 ベースケースの集光集熱系 配置計画での検討値

	計算値	検討値	備考
Line	252,000	256,000	約 1.6% 過剰
Unit	63,000	64,000	
Cell	1,575	1,600	
Group	39.375	40	
Heliostat 基数	3,780,000	3,840,000	
Mirror 面積 (m ²)	7,408,800	7,526,400	

(2) 集光集熱系の配置計画

配置を計画するに際し、全体からの視点、個々の Heliostats 等からの視点と両方向からの検討をした。

a. 全体計画

「図 3.2」に示すように、検討値である 40Group を 10Group 毎の 4 つに分け、H₂ Plant を中心に配置した。

Receiver と H₂ Plant 間の配管は、できるだけ等しい方が全体の配管量が少なく、据付工事も効率が良いと考えて計画した。対称化により、配管量の計算も容易となる。

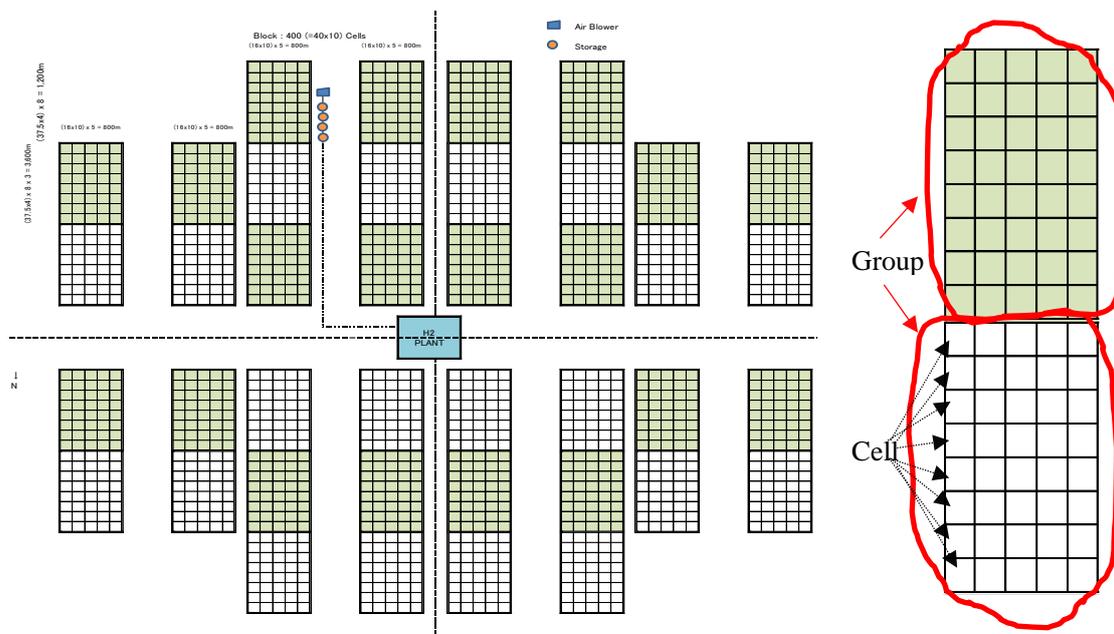


図 3.2 空気熱媒 2000t/日 NH₃ の H₂ Plant を中心の集光集熱系配置

図 3.2 左側は 10Group を東西南北に4分割して、40Group の配置計画をしたもの、図 3.2 右側は Group 内の $5 \times 8 = 40$ Cell を示したものである。

ブロワ、蓄熱は図 3.2 では1Group のみに記載しているが、実際には各 40Group に設置する。

b. Group の空気熱媒 Header 計画

Group は $5 \times 8 = 40$ Cell、Cell は 400Unit で構成している。1 Group は 1600Unit であり、南北 $32\text{Unit} \times$ 東西 50Unit で計画した。Unit 毎に、 250°C の低温空気を Receiver に供給し、Receiver で 650°C に昇温した高温空気を戻す計画である。

c. Header と Unit の配管計画

Header と Unit の配管の接続形状は、所謂アイソメ図を作成して計画した。

3-1-4 ベースケース（空気熱媒）での配管サイジング

配管計画を基に、流速・圧損などから配管サイズを決定し、空気蓄熱タンク、ブロワへの配管を含めて、配管サイズ毎の配管長さを求め、配管量を算出した。

3-1-5 ベースケース（空気熱媒）での熱供給とフロー構築

熱の需要側である水素製造プロセスへの熱供給・蒸気発生等のシステム構築をした。水素製造側のプロセス流体には、腐食性の考慮が必須であり、水素製造側での実績等を考慮して材料を選定することになる。

ベースケースの熱媒である空気は、凍結の問題や腐食性の特別な考慮が不要である。材料は水素製造側流体への対応を主として選定することになる。

需要側温度レベルに基づき、フローを構築した。

熱供給側の太陽エネルギーは、季節・時間によって異なるが、需要側は定常フローである。個々の流量・エネルギーの収支等はプロセスシミュレータを使用して求めた。

エネルギー収支上、空気熱媒のフローでは、プラント内動力として、空気ブロワの動力が可也大きく、空気熱媒での大きな課題である。

(1) 空気輸送機の仕様・選定

ベースケースの空気熱媒では、空気輸送量が大きく、空気輸送機の仕様・選定は重要な要素となる。

空気量は、総重量流量 $9,892\text{kg/s}$ 、総体積流量 $27,519,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、基当り(総 40 基)では、 $688,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

ヘッド 40kPa 、軸馬力 $13,100 \text{ kW}$

(2) 熱交換器の設計

NH₃ 2,000t/日の水素製造プロセスの必要熱量を基に、熱量はその数値、熱交換器のアプローチ温度を考慮して、水素製造側のプロセス温度を決定した。

蒸気発生に関するものは、プロセスシミュレータを使用して設計した。

熱媒空気の輸送動力、タービン排気蒸気の凝縮器動力などを考慮する必要があり、試行錯誤の計算となる。

3-1-6 ベースケース（空気熱媒）での蓄熱系

高温空気の活用ができる小石のサーモクライン型とした。

(1) 春分の各時間のバランス

a. 1MW(24MWh/d)での検討

春分での 1MW (24MWh/d) の鏡面積に対応する各時間のバランスを求めた。

マイナスになる時間は蓄熱よりの熱供給が必要である。

14,000kWh/日を蓄熱量のベースとする。

b. 2000t/日-NH₃ のベース

必要な蓄熱量は、1MW(14,000kWh/日)の 1500 倍で、**21GWh/日**とする。

(2) 蓄熱系の設計ベース

ここでは春分での値を設計ベースとした。需要側の状況によっては、日射時間等が一番少ない冬至を設計ベースにすることもある。

基本ユニットの 1MW での検討をし、この結果から、NH₃ 2000t/日を設計する。

集熱量: 2883.3kW

需要側供給: 1,000kW (=1MW)

蓄熱系供給: 1883.3kW

(3) 蓄熱設備の概要

形状は截頭錐体(せつとうすいたい)が蓄熱上好ましいという報告が多い。高温の部分が大きく、低温の部分が小さい形である。上部最大径には、製作上の制限がある。

< 充填物 >

小石

密度= 2,700kg/m³、比熱= 600J/kg/K、空隙率= 0.30

充填量= 48,292t

< 運転条件 >

蓄熱時間=9.5 時間、放熱時間=14.5 時間

蓄熱温度=高 650°C、低 250°C

蓄熱温度傾斜効率(高温と低温の温度差の内、蓄熱として使用できる割合)=0.7

<蓄熱系>

蓄熱器は 10 基必要

蓄熱器間の距離を 5m とすると、必要面積= 5,063m² である。

(4) 蓄熱設備の配置計画による見直し

配置計画より、蓄熱タンクを Group 毎に設置し、基数は Group 数と同一の 40 基と、上記 10 基の 4 倍に見直したので、これに従って、蓄熱タンクのサイジングを見直した。

3-1-7 比較ケース（熔融塩熱媒）での集光集熱系の検討

ベースケース(空気熱媒)と同様に、単純化のため、次のように用語を定義し、集光集熱計算は 1MW-熱(=24MWh-熱/日)を基本とし、この結果を基に 2000t NH₃/日を検討した。

(1) 用語定義

集光集熱系の用語定義は次の通りである。可能なものはベースケース(空気熱媒)と同一にして、比較が容易になるようにした。

表 3.5 比較ケース（熔融塩熱媒）での集光集熱系配置の用語定義

用語	意味
Line	Heliostat を南北に並べたもの
Unit	4 Line を東西に並べたもの
Cell	約 1MW-熱(=24MWh/d)に対応 ^注 30 Unit を東西 15×南北 2 に並べたもの Cell で 650°C に昇温
Group	76 Cell を南北 38×東西 2(南北軸に線対称)に並べたもの 東西 2 の間に、共通の熱媒の低温と高温ヘッダーを配置。 Group 毎に熔融塩ポンプ、タンクを持つ
Group 群	5Group を東西に並べたもの

注: 太陽の状況等により、1MW-熱から若干増減有

1 Line に対し、1 真空二重管式集熱管のレシーバが対応する。チーム内で研究開発中の高温対応の真空二重管式集熱管を断続管として使用する。

ベースケースと異なり、比較ケースでは 1 Cell で 650°C までの昇温をし、Cell で検討の基本である 1MW-熱(=24MWh-熱)にほぼなるように、この Unit を 30 並べた。

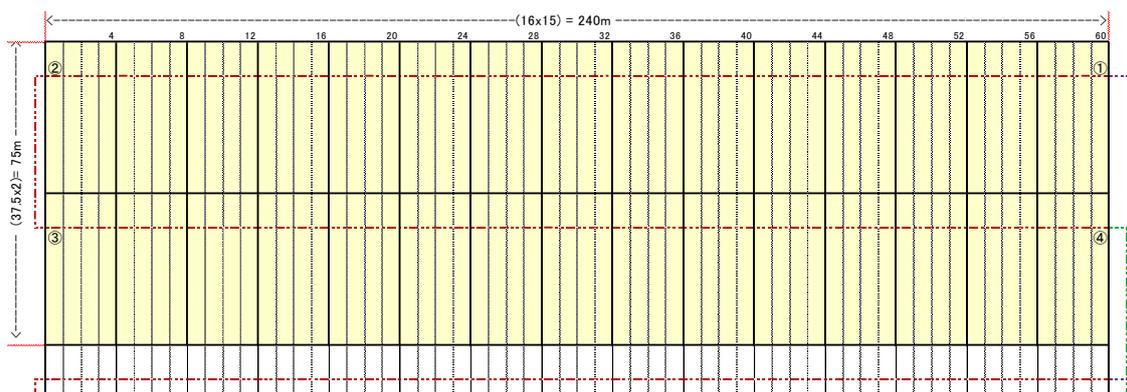


図 3.3 比較ケース集光集熱系配列—Cell (30 Unit、120 Line)

(2) 太陽のデータ

ベースケースの「3-1-2(2) 太陽のデータ」と同一。

(3) 集光集熱計算

太陽のデータを基に集光集熱計算した。ベースケースと異なり、比較ケースでは 650℃に昇温するためにレシーバを長くする計画にした。用語は、「表 3.5 比較ケース(熔融塩熱媒)での集光集熱系配置の用語定義」の通りである。

ベースケースと同様に、集光集熱計算は 1MW-熱(=24MWh-熱/日)で行い、この結果を基に1500倍である 2000t/日-NH₃を検討した。

集熱管にて、入口温度・出口温度、熔融塩の流量と必要な集光系鏡の段数を求めるシミュレータを開発し、集熱管への熱媒の入口温度を 350℃、出口温度を 650℃にした。

NH₃ 2000t/日は 1MW の 1500 倍である。

表 3.6 熔融塩熱媒での集光集熱特性

	1MW (24MWh/日)	NH ₃ 2000t/日 36,000MWh/日
Line 数	120	180,000
最大流量	26,550kg/h (7.38kg/s)	39,825t/h (11,070kg/s)

3-1-8 比較ケース（溶融塩熱媒）での配置計画

(1) 集光集熱系の規模

集光集熱計算の結果である、上記「表 3.6 溶融塩熱媒での集光集熱特性」を基に、2000t/日 NH₃ 製造ベースは、Group 数が整数となるように、「表 3.7 比較ケースの集光集熱系 配置計画での検討値」とした。

表 3.7 比較ケースの集光集熱系 配置計画での検討値

	計算値	検討値	参) ベースケース
Line	180,000	182,400	256,000
Unit	45,000	45,600	64,000
Cell	1,500	1,520	(1,600) ^注
Group	19.737	20	(40) ^注
Group 群		4	(4) ^注
Mirror 面積 (m ²)	5,292,000	5,362,560	7,526,400

注: ベースケースの Cell、Group の定義は比較ケースと異なる。Group 群は未定義だが同一思想。

溶融塩熱媒は低温・高温二タンク蓄熱方式、低温・高温ポンプおよびそれに関連する配管と機器で構成する。

(2) 集光集熱系の配置計画

配置を計画するに際し、全体からの視点、個々の Heliostats 等からの視点と両方向からの検討をした。

a. 全体計画

「図 3.4」に示すように、検討値である 4Group 群(=20Group)を H₂ Plant を中心に配置した。

ベースケースと同様に、Receiver と H₂ Plant 間の配管は、できるだけ等しい方が全体の配管量が少なく、据付工事の効率が良くなると考えて計画した。対称化により、配管量の計算も容易となる。

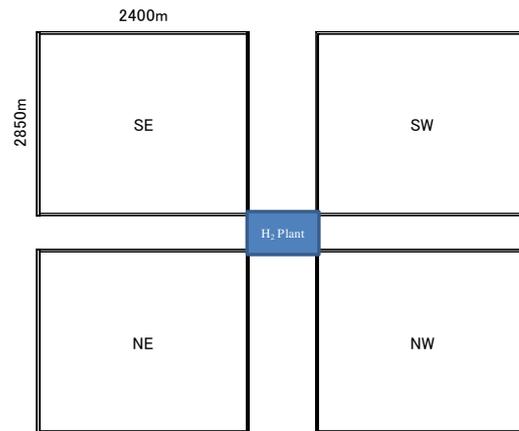


図 3.4 溶融塩熱媒 2000t/日 NH₃ の H₂ Plant を中心の集光集熱系配置

b. Group の溶融塩熱媒 Header 計画

Group は $38 \times 2 = 76$ Cell で構成している。Group 配置は、高温溶融塩(HTS)Header、低温 HTS Header を中央に計画した。

c. Group 群計画

Group は $38 \times 2 = 76$ Cell で構成し、この Group を東西に 5 並べ、溶融塩熱媒の輸送、蓄熱を含めて Group 群とする。

Group 数は 20 で、この Group 毎に、溶融塩のポンプとタンクを設置する。ポンプは 20 基、タンクは低温溶融塩と高温溶融塩の 2 タンク システムで各 20 基設置する。

d. Header と Unit の配管計画

Header と Unit の配管の接続形状は、ベースケースと同様に、アイソメ図を作成して計画した。

3-1-9 比較ケース（溶融塩熱媒）での配管サイジング

配管計画を基に、流速・圧損などから配管サイズを決定し、低温溶融塩タンクからポンプ、集光集熱系を経由して高温溶融塩タンクまでの配管サイズ毎の配管長さを求め、配管量を算出した。溶融塩の配管はステンレス鋼で計画している。溶融塩量の算出のため、配管容量も求めた。

3-1-10 比較ケース（溶融塩熱媒）での熱供給とフロー構築

溶融塩の温度適応性を考慮して、熱の需要側である水素製造プロセスの温度レベルに基づきフローを構築した。水素製造のプロセス流体には、腐食性の考慮が必須であり、実績等を考慮して材料を選定することになる。

ベースケースと異なり比較ケースでは、熱媒である熔融塩の腐食性の検討・材料選定がさらに必要である。

与熱側・受熱側の双方の腐食性を考慮した経済性あるシステム構築が必要であり、可也難しい材料選定となり、現時点での想定は難しい。

熱供給側の太陽エネルギーは、季節、時間によって異なるが、需要側は定常フローである。

このフローでは、温度適応性の範囲を考慮して、高温熔融塩、熔融塩の二つに分けている。個々の流量は、プロセスシミュレータで求めた。

開発中の熔融塩の物性・コストなどにより、二つに分けずに、一つでの実施の可能性がある。

(1) 熱媒輸送機の仕様・選定

比較ケースの熔融塩熱媒での輸送機器のポンプは、材料、凝固対策、高粘度での高ヘッドが必要である。技術的解決に加えて、経済的な課題の解決が必要となる。

想定される容量・ヘッドは次の通りである。

総重量流量 39,825t/h、基当り(総 20 基)では、830 kg/h

ヘッド 4MPa、軸馬力 1,700 kW

(2) 熱交換器の設計

NH₃ 2,000t/日の水素製造プロセスの必要熱量を基に、熱量はその数値、プロセス側の入口・出口温度は、熱交換器のアプローチ温度を考慮して決定した。

3-1-11 比較ケース（熔融塩熱媒）での蓄熱系

空気熱媒でのようなサーモクライン型についての蓄熱の技術開発例もあるが、ここでは、基本的な単純二槽型で検討した。

(1) 春分の各時間のバランス

a. 1MW(24MWh/日)－120 列での検討

春分での各時間のコサインファクタ・集光集熱効率を含んでの集光熱量(W/m²)で、120 列のものについて各時間のバランスを求めた。マイナスの時間は蓄熱よりの熱供給が必要である。

必要な蓄熱量は、1MW(17,297kWh)の 1500 倍で、**26GWh/日**とする。

(2) 蓄熱系の設計ベース

熔融塩の蓄熱タンクは、高温側、低温側と単純な二槽のシステムとした。タンクの形状は、設置面積を小さくするためには、高さを大きくすることになるが、土建上での制約があり、熔融塩の性状(特に腐食性等、低温での固化への対応)により、ポンプ形式、固化対策が、タンクの高さ・径への影響を与える。

例えば、ポンプをタンク内に設置する壜型では、タンク高さを大きくするとポンプの軸が長くな

る等の影響がある。タンク内の溶融塩が固化した場合の溶融化ヒータ、攪拌機の検討も必要となる。

(3) 蓄熱設備の概要

タンク形状は溶融塩の性状に従った検討が必要であるが、ここでは、高温・低温のそれぞれを 30 基、径 22m、高さ 13.5m、有効体積 4,105m³とした。このための面積は、36,015m²となる。

(4) 蓄熱設備の配置計画による見直し

配置計画より、蓄熱タンクを Group 毎に設置し、基数は、Group 数と同一の 20 基を高温側、低温側で設置し、上記各々 30 基から見直したので、これに従って、蓄熱タンクのサイジングを見直した。

<形状>

ドーム型、内径 26m、高さ 14m。

体積は、7,400 m³/基。(有効体積は 6,388m³/基)

3-1-12 ベース・比較ケースの仕様

ベース・比較両ケースの 2000t/日 NH₃ の経済性検討のための仕様は次の通りである。

表 3.8 2000t/日 NH₃ の経済性検討の仕様

熱媒	空気	溶融塩	備考
流量－最大	9,892 kg/s	11,070kg/s	
輸送機基数	40 基	20 基×2	
輸送機容量/基	247.3 kg/s	553.5 kg/s	
集光集熱系			
鏡面積	7,526,400m ²	5,362,560m ²	
蓄熱系			
蓄熱材	小石	溶融塩	
充填量	482,920 t	207,600 t	
蓄熱槽形状	178,860 m ³	120,700 m ³	3-1-6(4)、 3-1-11(2)
体積/基	截頭錐体	ドーム屋根	
タンク基数	6,400m ³	7,400m ³	
蓄熱容量	40 基	20 基×2	
	21GWh	26GWh	

3-2 高温対応システム経済性の評価と向上

構築したシステムは、研究開発中のため、仕様を規定することが出来ないものがあり、全体の建設費等を算出することは難しい。このため、経済性に影響が大きい主要コストを想定し、経済性の評価、経済性向上について検討した。

3-2-1 経済性に影響が大きい主要コスト

構築したシステムについて、主要コストの想定値は次の通りとなった。

表 3.9 経済性に影響が大きい主要コストの想定値

構成の各要素	ベースケース-空気 百万円	比較ケース-熔融塩 百万円	備考
集光集熱			
ヘリオスタット	215,000	153,200	
レーザーバ	12,100	6,800	
蓄熱	(蓄熱量 21GWh)	(蓄熱量 26GWh)	
タンク	6,600	25,400	ベース:戴頭錐体 比較:耐腐食タンク
輸送機	3,200	3,900	熔融塩: 特殊-開発中
発電			
発電設備	10,800	4,200	
配管	390,100	55,700	
熱媒	—	51,200	@熔融塩 200 JPY/kg
小計	637,800	300,400	
総計 目安・目標	150,000 213,700	@100MJPY/MW-平均 @50MJPY/MW-最大	平均 1500MW、 最大 4274MW

表 3.9 小計は、仕様の決定が難しい熱交換器、計装費、設計費等を含んでいない。最下列に、総計としての目標・目安として、米国の NREL や DOE を基にしたの値であり、比較のために記載した。

以下、各要素について、経済性を向上させるための検討をした。

3-2-2 経済性の向上の検討

ベースケースと比較ケースの経済性向上の可能性等を検討する。

(1) 集光集熱系

集光集熱系の費用割合は、ベースケース・比較ケースともに非常に高い。

構成の各要素	ベースケース-空気 百万円	比較ケース-熔融塩 百万円	備考
集光集熱			
ヘリオスタット	215,040	153,216	
レーザーバ	12,065	6,840	
小計	637,800	300,400	
総計 目安・目標	150,000 213,700	@100MJPY/MW-平均 @50MJPY/MW-最大	平均 1500MW、 最大 4274MW

a. ヘリオスタット

<物量>

ベースケースと比較ケースでのヘリオスタット個数の違いは、受熱側であるレシーバの受熱効率の違いによる。

比較ケースの受熱効率は高く、研究開発により完成が待たれる。ベースケースの受熱効率は、改良余地がある。

経済性向上として、ベースケースのレシーバ受熱効率 85%とした。

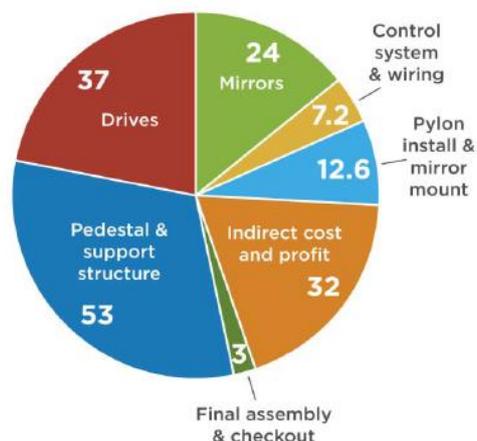
<単価>

ヘリオスタットのコストは、多量化によるコストダウンを考慮して、28.6kJPY/m²-鏡とした。

参考として、右図は、"On the path to SUNSHOT, May 2016, NREL/TP-5500-65688" からであり、168USD/m²(@2013)である。これにより、現時点でも

$(168\text{USD})(100\text{JPY}/\text{USD})/(28.6\text{kJPY})=0.587$ 程度、単価削減の可能性がある。さらに、DOE の Beyond SunShot で 75USD/m²、Goals で 50USD/m²と設定して

いる。従って、経済性向上として、Heliostats の単価は 7.56kJPY/m²とした。



Cost breakout (\$/m²) for the LH-2.2 heliostat used to update NREL's molten-salt power tower model

b. レシーバ

<物量>

ベースケースと比較ケースの違いは、ヘリオスタットでの比較と同様に、受熱側であるレシーバの受熱効率の差異が、CL 法での対応するレシーバ列数の差異となっている。

経済性向上として、ベースケースでのレシーバの受熱効率を 85%とした。

CL 法では、トラフや線形フレネルの単軸集光に比べて、集光度が高く、鏡面積に対してのレシーバ面積は小さい。レシーバの物量はほぼ集光度の逆数で小さくなるので、レシーバの単価が高い場合には、CL 法の高集光度による優位性の効果が出てくる。

<単価>

ベースケースは、実証での試作のものを学習効果・多量化によるコストダウンを見込んだ。

比較ケースは、研究開発中の線形集光用の情報を基にした。集熱管は長くすることが技術的に難しい。CL 法は二軸集光・高集光であるので、集光部の長さは短くでき、製作は簡単になる。このためコストダウンが期待でき、1/2 にした。

ベースケースのレシーバは、開発中で技術集積の高い集熱管より、安価に製作可能である。

DOE の Goals として、150USD/kW 熱が示されている。これを本ベースの平均容量 1500MW、最大容量 4274MW に引直すと、平均容量で 22,500 百万円、最大容量で 64,110 百万円と、何れも想定値より高い。

CL 法の高集光度により、物量が大幅に少なくなった効果と考えられる。CL 法では、レシーバコストは、ヘリオスタットに比べると可也小さいが、現在の想定値の半額程度となる可能性は十分あると思われる。

ベースケースのレシーバは、比較ケースより安価にできると考えられるので、経済性向上として、比較ケースと同様なコスト削減が可能と思われる。

(2) 蓄熱系

蓄熱系のコストは、集光集熱系に比べると比較的小さい。

構成の各要素	ベースケース-空気 百万円	比較ケース-熔融塩 百万円	備考
蓄熱	(蓄熱量 21GWh)	(蓄熱量 26GWh)	
タンク	6,600	25,400	ベース:戴頭錐体 比較:耐腐食タンク
輸送機	3,200	3,900	熔融塩:特殊-開発中
小計	637,800	300,400	
総計	150,000 213,700	@100MJPY/MW-平均 @50MJPY/MW-最大	平均 1500MW、 最大 4274MW

a. 蓄熱系-タンク

ベースケースは、コンクリート製、大気圧、小石充填で、耐食性の考慮は不要で安価である。

比較ケースは、高温熱媒用で低圧(空気流入は防ぐ)、耐食性の考慮が必要である。

DOE Sun Shot Vision Study (DOE 2012) では、二軸追尾の Tower Road Map では、30USD/kWh 熱であり、ベースケースで 6,300 百万円、比較ケースで 7,800 百万円となる。

これと比べると、ベースケースでのコンクリート製タンク、小石の蓄熱剤は、比較的安価であり、既にほぼ同レベルである。

DOE の Goals には、この半分の 15USD/kWh 熱が示され、ベースケースで 3,150 百万円、比較ケースで 3,890 百万円となる。今後の技術開発進展等により、経済性の向上として、比較ケースでは半額へのコスト削減の可能性が期待できる。

b. 蓄熱系-輸送機

ベースケースの輸送機は空気用ブロワであり、容量は大きい技術上の問題はない。システムのクロード化・高圧化により、輸送体積を減じて、輸送機のコストを下げる事が可能であるが、蓄熱が必要な場合、蓄熱タンクの加圧が難しく、輸送体積減少は難しい。集光集熱系の効率上昇により、受熱ラインの短縮により、ある程度の圧損を低下することができるが、これによる効果は

あまり大きくない。

比較ケースは、高粘度、凝結対策、腐食性考慮など、技術的に解決する課題があり、ポンプの費用算出は難しいが、熔融塩の技術開発の進展により、費用削減の可能性はある。

(3) 発電

発電設備は一般的なものであり、完成された技術である。

構成の各要素	ベースケース-空気 百万円	比較ケース-熔融塩 百万円	備考
発電 発電設備	10,800	4,200	
小計	637,800	300,400	
総計 目安・目標	150,000 213,700	@100MJPY/MW-平均 @50MJPY/MW-最大	平均 1500MW、 最大 4274MW

コスト削減には、発電設備容量を下げるのが基本である。ベースケースは空気ブロウの動力が大きく、これにより、発電容量が大きくなっている。加圧・クローズド化による輸送機の体積流量の減少ができないと、空気ブロウの動力削減は難しい。

(4) 配管

配管のコストは、材質と物量で決まる。

構成の各要素	ベースケース-空気 百万円	比較ケース-熔融塩 百万円	備考
配管	383,000	74,400	
小計	637,800	300,400	
総計 目安・目標	150,000 213,700	@100MJPY/MW-平均 @50MJPY/MW-最大	平均 1500MW、 最大 4274MW

ベースケースの配管量は非常に多く、このためコストは小計の637,800百万円の半額以上となり、配管のみで総計・目安の目標を超え、経済性での大きな課題となっている。

空気熱媒に適した安価な小石蓄熱のタンクが、構造上高圧にすることができないため、圧力を上げることができない。圧力を上げることができれば、体積流量が下がり、熱移動特性は良くなる。この場合、系のクローズド化をして、熱媒空気の輸送機は系の差圧分相当とすることができる。クローズド化しないで、常圧から加圧への昇圧は、動力が非常に大きく、エネルギーバランス的に問題になる。

非常に大きな配管量による経済性の問題は、空気熱媒系の加圧・クローズド化ができれば解決することが難しく、2000t NH₃/日での経済性向上の障害となっている。

トラフ型ではあるが、Air Light 社が空気熱媒+小石蓄熱の実証を進めているので、この状況を注視したい。空気熱媒のシステムの応用系として、炭酸塩等の化学蓄熱の進展によっては、

空気の代わりに二酸化炭素の熱媒にての画期的なシステム構築ができる可能性がある。

比較ケースは熱媒が液体であり、配管量はベースケースのように多くはない。材質は、ベースケースの空気と同じような高温部はステンレス鋼。低温部は炭素鋼では難しいと想定し、全てをステンレス鋼で想定している。溶融塩の腐食性による対策、凝結への対策等のコスト上昇の要素はある。

(5) 熱媒

ベースケースは空気であり、技術的な課題、コスト的な問題はない。

構成の各要素	ベースケース-空気 百万円	比較ケース-溶融塩 百万円	備考
熱媒	—	51,173	溶融塩 200 JPY/kg
小計	637,800	300,400	
総計 目安・目標	150,000 213,700	@100MJPY/MW-平均 @50MJPY/MW-最大	平均 1500MW、 最大 4274MW

比較ケースでの高温対応の溶融塩は、チーム内で技術開発中であり、技術的に優れたものに加え、経済性でも優れた我が国独自の溶融塩の完成が待たれる。物量は蓄熱量に大きく影響される。

DOE の Goals としては、熱安定性は 800℃以上、融点が 250℃以下、コストが1USD/kg とされている。将来的には、安価で性能の良い溶融塩開発の可能性あり、その効果は非常に大きく、熱媒コストとして 100JPY/kg は可能とした。

(6) 経済性向上の可能性

上述の経済性向上の可能性を考慮してまとめたものが表 3.10 である。

表 3.10 経済性向上の可能性考慮

構成の各要素	ベースケース-空気 百万円	比較ケース-溶融塩 百万円	備考
集光集熱			
ヘリオスタット	47,400	41,000	
レシーバ	4,200	3,600	
蓄熱	(蓄熱量 21GWh)	(蓄熱量 25.945GWh)	
タンク	6,600	12,700	
輸送機	3,200	3,900	
発電			
発電設備	10,800	4,200	
配管	383,000	74,400	
熱媒	—	25,600	
小計	455,200	165,400	
総計 目安・目標	150,000 213,700	@100MJPY/MW-平均 @50MJPY/MW-最大	平均 1500MW、 最大 4274MW

ベースケースは、配管が非常に高く、これのみで目安・目標を超え、高圧化・グロースド化をしなければ、このコストの削減は難しい。さらに、熱媒空気のプロウの所要エネルギーが大きく、経済的なシステム構築は非常に難しいと思われる。空気の高温度対応範囲、環境対応、熱媒費用、二酸化炭素溶媒への発展などの魅力は多く、高圧化・クローズド化の可能性を注視していくことが重要である。

比較ケースは、目安・目標のコストとできる可能性がある。但し、技術的に解決しなければならぬ課題があり、熔融塩を中心とした技術開発の成果が待たれる。

3-2-3 集光式太陽熱の経済性状況

集光式太陽熱の経済性については、本 SIP のような高温を目標としていないものが多いが、各種の指標的なものがある。開発中のものについての経済性評価をするため、これらを調査・整理し、本 SIP での結果との比較検討を行った。

(1) 米国 NREL の現在・将来の集光式太陽熱のコスト

米国 NREL (National Renewable Energy Laboratory) は、SAM (System Advisor Model) を使用した、現在・将来の集光式太陽熱の各モデルのコストを次のように紹介している。

表 3.11 CSP Cost Analysis with System Advisor Model version 2010-11-09

Case	2010 Trough	2015 Trough Roadmap	2015 Tower Roadmap	2020 Trough Roadmap	2020 Tower Roadmap	2020 SunShot Target
Design Assumptions						
Technology	Oil-HTF Trough	Oil-HTF Trough	Salt Tower	Salt-HTF Trough	Salt Tower	s-CO2 CC Tower
Solar Multiple	1.3	2.0	1.8	2.8	2.8	2.7
TES (hours)	–	6	6	12	14	14
Plant Capacity (MW, net)	100	250	100	250	150	200
Power-Cycle Gross Efficiency	0.377	0.356	0.416	0.397	0.470	0.550
Cooling Method	wet	dry	dry	dry	dry	dry
Cost Assumptions						
Site Preparation (\$/m ²)	20	20	20	20	20	10
Solar Field (\$/m ²)	295	245	165	190	120	75
Power Plant (\$/kW)	940	875	1,140	875	1,050	880
HTF System or Tower/ Receiver (\$/m ² or \$/kWth)	90	90	180	50	170	110
Thermal Storage (\$/kWth)	–	80	30	25	20	15
Contingency (%)	10	10	10	10	10	10
Indirect (% of Direct Costs + Contingency)	24.7	24.7	24.7	24.7	24.7	19.7
O&M (\$/kW-y)	70	60	65	50	50	40
Performance and Cost						
Capacity Factor (%)	25.3	42.2	43.1	59.1	66.4	66.6
Total Installed Cost (\$/kW)	4,500	7,870	5,940	6,530	6,430	3,770
LCOE (¢/kWh, real) [SunShot financial assumptions]	20.4	19.4	14.4	11.6	9.8	6.0

出典:SunShot Vision Study (DOE 2012)

(2) 米国 DOE の情報

米国 DOE (Department of Energy)は、集光式太陽熱の主構成物の目標コストを目標仕様と共に、次のように定めている。熱媒体のレシーバ出口温度が 720°C以上、熱媒体の Thermal stability が 800°C以上、Melting Point が 250°C以下など、高い目標値となっている。

表 3.12 Goals Established by DOE for Various Components of CSP Plants

Solar Field	Receiver	Heat Transfer Fluid	Thermal Storage	Power Block
Cost ≤ \$75/m ² , (Beyond SunShot: ≤ \$50/m ²)	Cost ≤ \$150/kWh	Cost ≤ \$1/kg	Cost ≤ \$15/kWh	Cost ≤ \$900/kWe
-Optical error (calm) ≤ 3.0 mrad -Optical error (windy) ≤ 4.0 mrad -Max operational wind speed ≥ 35 mph -Max survivable wind speed ≥ 85 mph -Lifetime ≥ 30 yrs	-Thermal efficiency ≥ 90% -HTF fluid exit temp ≥ 720 °C -Lifetime ≥ 10,000 cycles	-Thermal stability ≥ 800°C -Melting point ≤ 250°C	-Power-cycle inlet temp ≥ 720°C -Exergetic efficiency ≥ 95%	-Net thermal-to-electric cycle efficiency ≥ 50% -Dry-cooled at 40 °C ambient temp

出典: p.16 of “ON THE PATH TO SUNSHOT, May 2016, NREL/TP-5500-65688

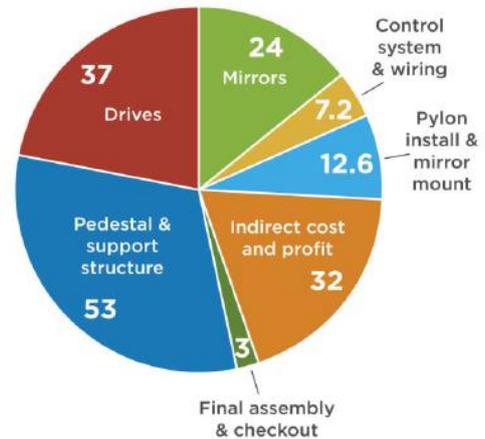
(3) Heliostats

左図は、LH-2.2 heliostat を update NREL’s molten-salt power-tower model を使用してのコストブレイクであり、推算設置費用は\$168/m² @2013。

出典: p.30 of “ON THE PATH TO SUNSHOT, May 2016, NREL/TP-5500-65688

なお、参照として、トラフのコストについて、NREL は Sky Trough を選定し、費用は\$170/m²と推算した。

(注: “In 2015, NREL undertook a similar bottom-up cost estimate for two parabolic trough collectors: SkyFuel’s SkyTrough and Flabeg’s Ultimate Trough (see Table 5). The SkyTrough was eventually selected as the new baseline trough within SAM, with an estimated installed cost of \$170/m²”との記載有。)



Property	Sky Trough	Ultimate Trough
Manufacturer	Sky Fuel (USA)	Flabeg (Germany)
Reflector type	Reflectech polymer film	4-mm glass
Aperture width (m)	6.0	7.51
Module length (m)	13.9	24.5
Solar collector assembly (SCA) length (m)	115	247
Modules per SCA	8	10
SCA aperture area(m ²)	656	1,689
Frame design	Aluminum space frame	Steel torque box

出典: Kurup and Turchi 2015

3-3 他グループとの統合

全体システムの最適化のためには、他グループとの統合は非常に重要である。高温太陽熱供給システムチーム内は、チームリーダーのリーダーシップにより、研究会も多に行われ、集熱管の状況、蓄熱剤・熱媒体の状況は共有化し、経済性評価で活用した。但し、研究開発中であり、具体的に統合する上で、システムとしての大きな効果・変更は生じていない。

3-3-1 水素製造側との統合

水素製造側は色々の製造方法も鋭意研究開発中であるが、高温集光集熱システム側での変更を考慮する情報は得られていない。

3-3-2 集熱管との統合

集熱管については、開示された集熱特性値を基に、比較ケースとして、出願済み集熱管での集光集熱計算を実施した。ベースケースの空気熱媒よりも集熱特性が良いので、集光系を小さくしてシステム構築をした。

3-3-3 蓄熱剤・熱媒体との統合

比較ケースとして、熱媒の凝固性を考慮してフローを構築し、配管はステンレス鋼にて経済性を評価した。但し、技術開発中であり、詳細な材質選定はできていない。

3-4 高温（650℃）の用途候補抽出

高温の用途候補抽出として、熱が必要な装置・設備について、その熱の全てに、あるいは部分的に、太陽熱での置き換えの可能性を検討した。

ここで、現状で必要な熱は 650℃より高温であるが、必要な温度の低下ができる可能性のあるもの、予熱等の部分的な置換でも効果が見込まれるもの、さらには、開発中であるが、用途にできる場合の効果の大きい技術への適用可能性も検討した。

熱が必要な装置・設備は多様であるので、全体を見渡せるように、熱が必要な装置・設備を次のように分類した。

☆熱機関(ボイラ、蒸気原動機、内燃機関、ガスタービン)

☆熱利用設備として、

- 工業炉－製鉄、製鋼・圧延、自動車・機械等、鋳鉄・鋳鋼、窯業、

化学工業(含む石油精製)、環境設備

- 熱に係る単位操作の機器－熱交換、冷凍・空調、蒸留、蒸発、濃縮、乾燥、乾留・ガス化について、太陽熱からの高温に適したもの、適していないものについて検討した。

さらに、エネルギーキャリアとして重要な「☆水素製造」での用途に焦点をあてて検討した。

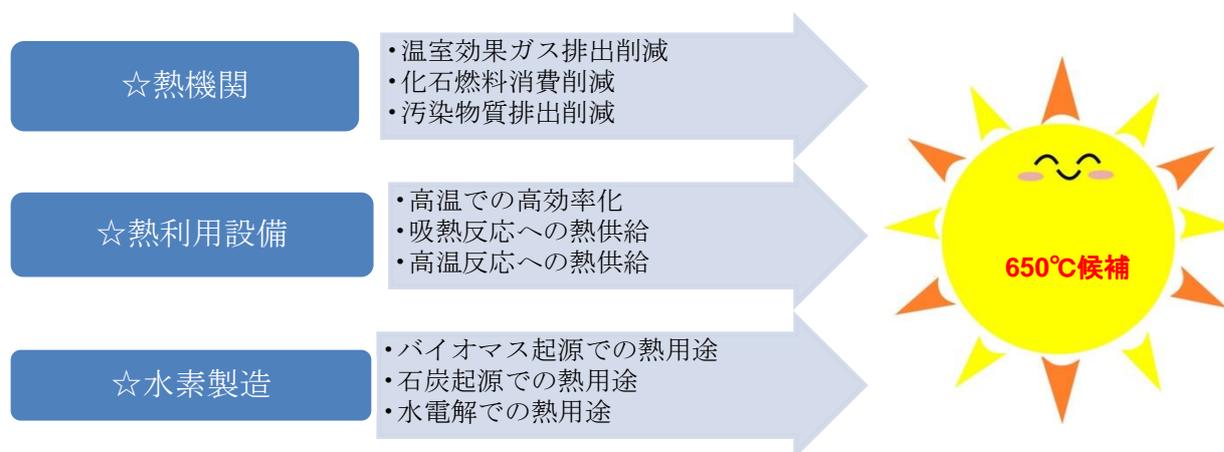


図 3.5 高温(650℃)候補探索

<熱機関>

熱機関は、T-s 線図(T:絶対温度、s:エントロピー)、P-v 線図(P:圧力、v:容積)で表現するサイクル名で分類している。

- ☆ 理想的であるカルノーサイクル(実用上問題の可逆過程を含む)
- ☆ 蒸気原動機の基本であるランキンサイクル
- ☆ 不流動過程のガソリン機関であるオットーサイクル
- ☆ 不流動過程のディーゼル機関であるディーゼルサイクル
- ☆ ガスタービンの基本サイクルであるブレイトンサイクル

<熱利用設備>

工業的に熱が必要な工業炉、熱や必要な操作のための装置として分類している。

ア. 工業炉

工業炉は広範であり、次のような分類ができる。

- ☆ 製鉄での高炉、熱風炉、焼却炉、ペレタイジング炉、コークス炉
- ☆ 製鋼・圧延での転炉、アーク炉、平炉、灼熱炉、加熱炉、鍛造炉
- ☆ 自動車・機械での焼なまし炉、蠟付炉、浸炭炉、窯化炉、焼結炉、めっき炉、雰囲気ガス発生機
- ☆ 鋳鉄・鋳鋼でのキュボラ、誘導溶解炉、熱処理炉
- ☆ 非鉄金属での精錬炉、溶解炉、灼熱炉、加熱炉、熱処理炉(焼なまし、ろう付け、焼結)、焙焼炉
- ☆ 窯業での溶解炉(ガラス、耐火物、ゆう薬)、仮焼炉(窯業炉)、焼成炉(セメント、耐火物、石灰、カーボン、陶磁器、タイル、と石、ほうろう)
- ☆ 化学工業でのコークス炉、ガス発生炉、石油加熱炉、改質炉
- ☆ 環境設備での産業廃棄物焼却炉、排ガス焼却炉

イ. 熱が必要な単位操作に係る装置類

熱が必要な単位操作をする装置としては次のようなものが考えられる。

- ☆ 蒸留装置
- ☆ 蒸発装置
- ☆ 濃縮・晶析装置(食塩、蔗糖、果汁、硫酸などの希薄水溶液の濃縮、さらに濃縮での溶質の晶析)
- ☆ 乾燥装置
- ☆ 乾留・ガス化装置

3-4-1 熱機関

熱機関はカルノーサイクル、ランキンサイクル、オットーサイクル、ディーゼルサイクル、ブレイトンサイクルがある。この中で、理想的で実用上問題の過程を含むカルノーサイクル、集光式太陽熱を活用するのに難しい不流動過程のオットーサイクル・ディーゼルサイクルを除外した。

太陽熱により蒸気を供給するランキンサイクルは有力候補である。太陽熱によって気体(空気、二酸化炭素が主候補)を昇温して活用するブレイトンサイクルも可能性ある候補である。

(1) ランキンサイクルー高温蒸気の供給

集光式太陽熱発電(CSP)の殆どは水蒸気を発生して、タービンで発電しているので、高温蒸気の供給は一般的な用途である。

水蒸気タービンを使用する火力発電では、発電効率が直接的に向上する蒸気温度の上昇を競い、650℃の超々臨界圧の USC (Ultra Super Critical)から、700℃超級の次世代超々臨界圧の A-USC(Advanced Ultra Super Critical)の技術開発を進めている。

高温(650℃)の用途の対象となるのは USC であり、既存石炭火力発電レベルの 538℃を 650℃へ上げると、効率が 8.0%向上するとのことである。効率向上は、発電当たりの二酸化炭素排出量を直接的に削減することになり、集光式太陽熱からの 650℃の高温蒸気を石炭火力へ供給すれば、効率向上している USC の石炭火力での石炭消費量・二酸化炭素排出量を更に削減できる。

表 3.13 火力発電での 650℃への上昇による効果

		現状	目標-1	目標-2
蒸気 圧力 温度	kg/cm2G	246	320	350
	℃	538/538	595/595/595	650/595/595
設計発電端効率	%	41.5	44.0	44.8
年平均発電端効率	%	39.8	42.2	43.0
効率向上	%	Base	6.0	8.0
年間石炭節約量	t	Base	約 130,000	約 170,000

注：表示の蒸気温度の現状-主蒸気/再熱蒸気、目標-主蒸気/一次再熱蒸気/二次再熱蒸気。

発電量 1000MW×1Unit での計算値

出典：超高温高圧火力発電プラント (USC) の開発

高効率となる高温を実現するためには、高温対応の材質にする必要がある。温度上昇に係る主要金属材質は次の通りである。

表 3.14 火力発電での温度上昇に係る主要材質

		現状	目標-1			目標-2	
蒸気	圧力 Kg/cm ² g	246	320	320	320	320	350
	温度 ℃	538/566 or 538/552/566	566/566/566	595/566/566	595/595/595	620/595/595	650/595/595
ボイラ 主要 部材 材料	過熱器管	Cr Mo、 9Cr 系	オーステナイト系 (or Mod 9Cr)			高強度オーステナイト系	
	管寄せ・主 蒸気管	2%Cr Mo	9Cr 系			オーステナイト系	
	高温高压ハ ルブ	2%Cr Mo	9Cr 系			オーステナイト系	
ター ビン 主要 部材 材料	高温ロータ	Cr Mo V	12Cr 系改良材			オーステナイト系	
	内車室	Cr Mo	9~12Cr 系			オーステナイト系	
	蒸気弁	Cr Mo	9~12Cr 系			オーステナイト系	
	低压ロータ	Ni Cr Mo V			焼戻し変化の無い材料		

出典: 超高温高压火力発電プラント(USC)の開発

(2) ガスタービンサイクルー気体サイクル

集光式太陽熱で直接空気を高温にして発電する方法である。

M 社は、「世界に先駆けて開発を進めている高温空気タービン式発電システムとして、ヘリオスタットで集光・集熱し 850℃の高温空気を生成することでタービンを駆動して発電する方式」として進めている。

タービン駆動するためには 650℃より高温が望ましい。熱媒は熔融塩ではなく、直接空気を高温にして使用することになる。

空気の代わりに二酸化炭素を熱媒に使用する可能性も考えられる。炭酸塩の化学蓄熱や顕熱蓄熱を発電システムに組み込む場合、集光式太陽熱で高温となった熱媒の二酸化炭素は、炭酸塩の化学蓄熱や顕熱蓄熱媒体との直接接触での熱交換が可能となり、蓄熱の効率向上と装置費の削減が期待できる。

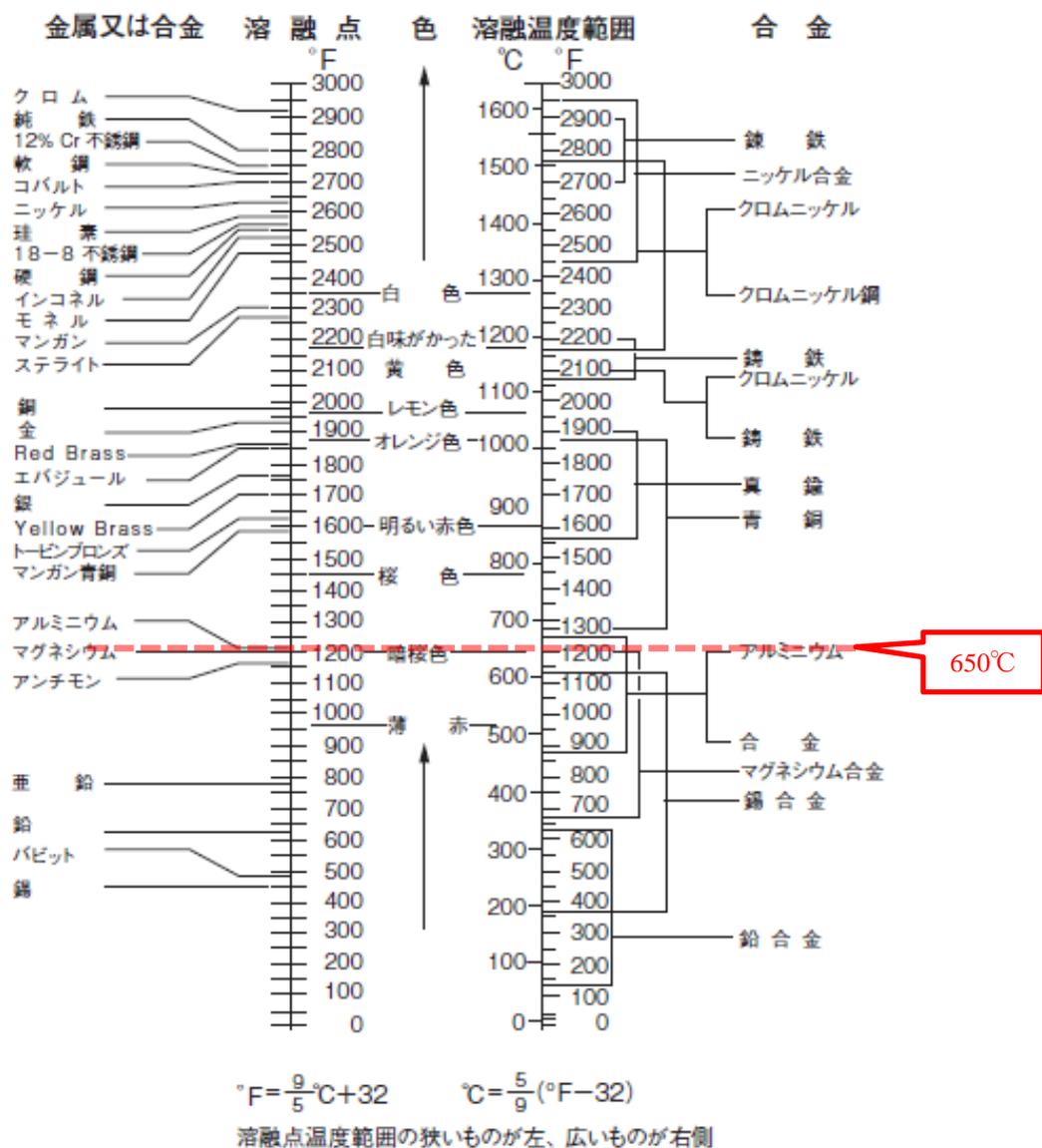
開発中の熱媒、集熱管を使用する高温太陽熱のシステム構成からは変更が必要であるが、今後の技術開発の進展によっては、高温太陽熱(650℃)の候補になる可能性はある。

3-4-2 熱利用設備

(1) 鉄・非鉄・窯業等での精錬・加工や焼却炉の工業炉

工業炉には、「3-4 高温 (650℃) の用途候補抽出」で記載のようなものがあり、この中で、鉄・非鉄・窯業等での精錬・加工や焼却炉の温度は高く、1000℃以上のものが多い。

金属・合金の溶融点を「図 3.6 金属・合金の溶融点」に示す。アルミニウム系は比較的溫度が低く、熱間加工は 500℃程度で実施しているが、多くのものは可也高温であり、650℃での対応は容易ではないと思われる。アルミニウム系での電気と組合せた用途、予熱での用途を含め、規模や地域によっては適した用途の可能性はある。



出典:ニツコー熔材工業株式会社 HP

図 3.6 金属・合金の溶融点

(2) 石油工業・化学工業での工業炉

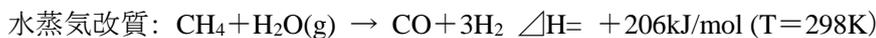
石油工業・化学工業では各種の加熱炉が使われ、必要な温度は、反応条件を含めた単位操作などから決まるので多様であり、650°Cの用途に適したものがある可能性が高い。高温の用途として、吸熱反応、反応を進めるのに高温が必要なものを検討した。

a. 吸熱反応

吸熱反応は反応の持続のために熱が必要である。吸熱反応として代表的なものには、メタンの改質、石炭の改質、脱水素が挙げられる。なお、これらの改質や脱水素では、反応で水素が生成される。

メタン（天然ガス）の改質

メタン改質には、水蒸気と二酸化炭素による改質があり、反応は次の通りである。



これらの反応は通常 **1200K (927°C)前後** であり、650°Cに比べて高温が必要である。従って、太陽熱での 650°Cの用途候補にするには、予熱での利用になる。

石炭の改質

石炭の水蒸気による改質について、石炭を「C」としての反応は次の通りである。



これらの反応は通常 **1200K (927°C)前後** であり、650°Cに比べて高温が必要である。従って、太陽熱での 650°Cの用途候補にするには、予熱での利用になる。

脱水素によるパラフィンからのオレフィン製造

パラフィンであるプロパン、ブタン等を脱水素により、プロピレン、ブテン、ブタジエン等を製造する反応である。

プロパン脱水素での単純化した反応式は次のようになる。

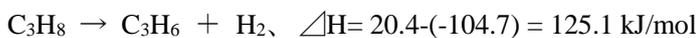


表 3.15 低炭化水素の標準生成エンタルピー ΔH°_f (kJ/mol)

	パラフィン	オレフィン	差	備考
C2	-84.0	52.4	136.4	
C3	-104.7	20.41	125.1	
C4	-125.6	-0.63	125.0	
ブタジエン		108.8	234.4	

出典: NIST Chemistry Web Book

パラフィン脱水素で製造するものは、C3、C4(プロピレン、ブタン、ブタジエン)が多い。

「表 3.15」のように、C3 と C4 でのオレフィンとパラフィンの標準生成エンタルピー差は約 125kJ/mol である。これは、パラフィンの単結合がオレフィンの二重結合になると、125kJ/mol エネルギーが高くなり、この分が吸熱となる。

オレフィン、パラフィンより生成エネルギーが高く、反応性が高い。

C2 の脱水素は、 $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2 + \text{H}_2$ 、 $\Delta H^\circ_f=136 \text{ kJ}$ の吸熱反応である。

パラフィンの C2 と C3 の差 (104.7-84.0=20.7)、C3 と C4 の差 (125.6-104.7=20.9) は約 21kJ/mol であり、これは単結合エネルギーに対応している。

<パラフィン脱水素での加熱の方法>

「図 3.7 CATOFIN (脱水素)-C3 のフロー」に示すように、吸熱反応である脱水素の熱供与は反応器内の「Reheat」と記してあるように、反応器内の触媒上に残留する炭素類を空気で燃焼し再加熱して供給する。原料のパラフィンの Charge Heater、空気の Air Heater と予熱用に二つの加熱炉がある。これら加熱炉での温度レベルは高温(650℃)での対応が可能であり、高温太陽熱の用途の候補になる。脱水素の反応温度は、C3 よりは C4 が低い。

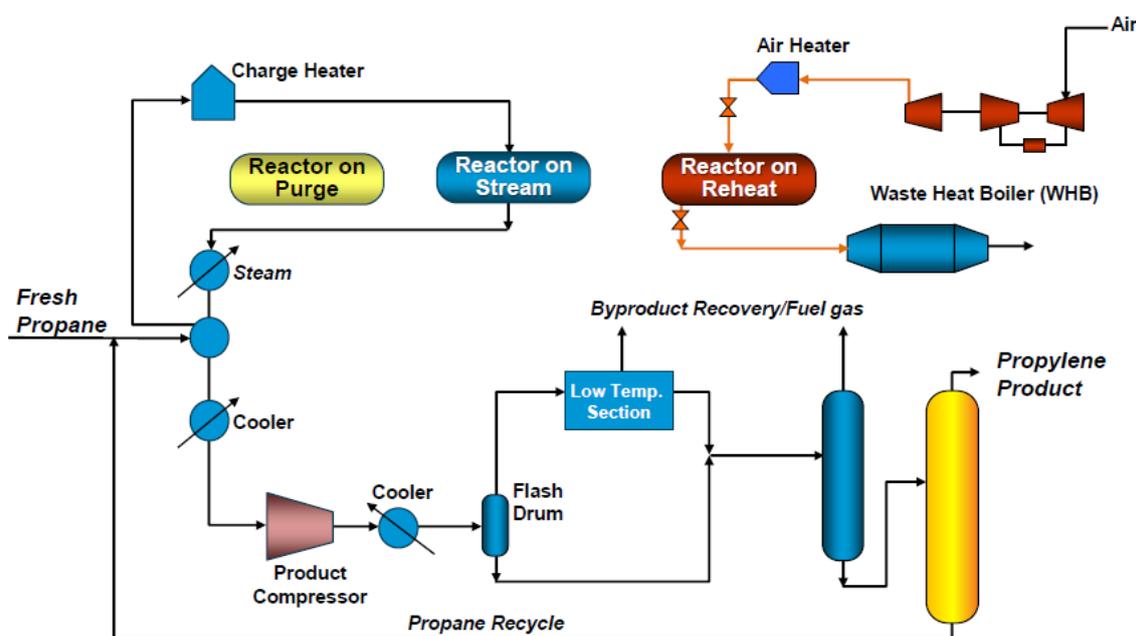
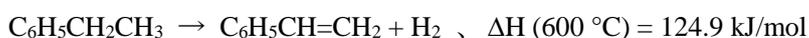


図 3.7 CATOFIN (脱水素) -C3 のフロー

出典：CBI 「On-purpose Olefins through CATOFIN®-CATADIENE® Technologies」

エチルベンゼン脱水素によるスチレン製造

エチルベンゼンからスチレン製造は、脱水素反応であり、下記のように吸熱反応である。



エチルベンゼンからのスチレン製造では、断熱脱水素反応と等温脱水素反応がある。

<断熱脱水素>

運転されているものの多くは、充填型反応器を多重や直列にした多段の断熱脱水素である。必要な反応熱は各段での予熱と過熱蒸気の挿入あるいは間接加熱で与える。

原料のエチルベンゼンは、循環のエチルベンゼンと混合して気化する。希釈蒸気はエチルベンゼンが炭化するのを防ぐ。この蒸気は熱交換器でさらに過熱し、反応温度(約 640℃)になるように加え、一段目の反応器の触媒を通過させる。

断熱の吸熱反応であり、温度が下がるので、出口の蒸気は二段目の反応器の前で再過熱する。エチルベンゼンの転嫁率はシステムによって異なるが、一段目で 35%程度、全体で 65%程度である。反応器の運転は低圧であり、プロセスによっては、負圧もあるが、低い正圧が多い。

反応器へ供給する蒸気とエチルベンゼンの割合は、用役費用と収率が全体として最適となるように決めるが、等温脱水素に比べて大きい。エネルギー消費量を最小にするため、反応生成物は効率的な熱回収システムで、凝縮し、ベントガス、粗スチレン、蒸気凝縮水に分離される。粗スチレンは蒸留システムに送る。凝縮水は水蒸気でガスをストリッピング処理して再利用する。炭化水素と二酸化炭素が主成分のベントガスは、芳香族は回収後、燃料あるいは水素生成用として活用する。

このように、断熱脱水素では、反応温度になるように過熱蒸気を加えていて、この過熱として、より高温が望ましいが、高温太陽熱(650℃)の用途候補の可能性がある。

<等温脱水素>

等温脱水素は BASF が開発し、長年利用されている。反応器はシェル/チューブの熱交換器の形状で、チューブ側には触媒を充填して蒸気を流す。シェル側に高温ガスを流して、吸熱反応分の熱を与える。このプロセスの長所は、蒸気・エチルベンゼンの重量比を約 1.1 まで下げられ、蒸気温度は断熱プロセスより低い。短所は、反応器が熱交換型のため、大きくすることが難しく、1系列で約 150 千 t/年であり、大容量化による設備費削減効果が小さい。

Lurgi は等温反応にするための吸熱分を Na、Li、K の炭酸塩の熔融塩で与える方法を採用している。主な多管式反応器は約 600℃、負圧下で、蒸気・エチルベンゼン比は 0.6-0.9、転換率・選択率が高いとの報告をしている。

等温脱水素は実験的にも行われている。反応器は垂直な 1.5m の高さであり、30mm チューブで内側に触媒を充填している。反応器は電気炉で加熱している。

等温脱水素は、反応器での吸熱分の加熱は、少し温度が高い方が良いが、高温太陽熱(650℃)用途候補の可能性がある。

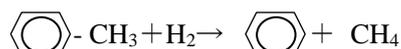
b. 吸熱反応ではない高温反応

化学工業では、吸熱反応ではないが、反応を進めるために高温が必要であり、加熱炉を設置することが多い。

これらは高温の用途の候補となるので、その加熱形態について検討した。

脱アルキル反応

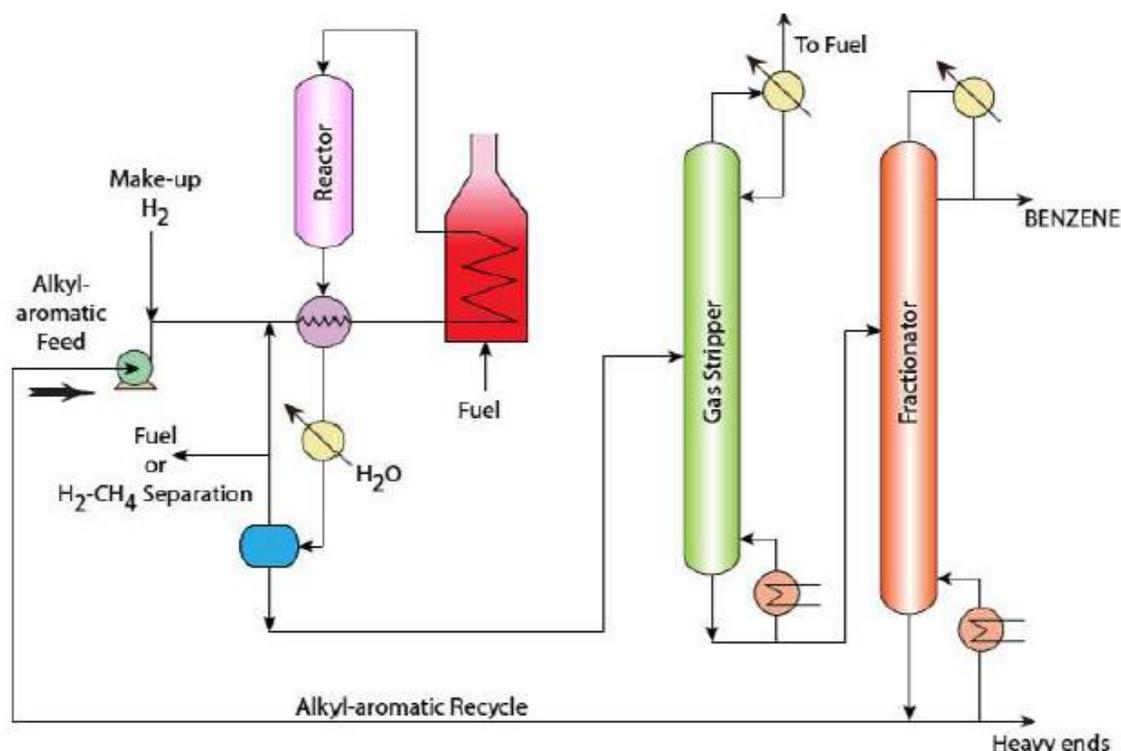
トルエンの水素による脱アルキルによりベンゼンを製造する。



$\Delta H = (49.0 + 31.7) + (-74.9) - (12.0 + 33.5) = -39.7 \text{ kJ/mol}$ にて発熱反応。

水素化脱アルキルは、トルエンを選択的にベンゼンに変換する反応である。触媒を使用しない非接触プロセスと触媒を使用する接触プロセスがあるが、1970年代に接触プロセスから非接触への転換が進んだ。高温水素の存在下で脱アルキルする非接触プロセスへの転換理由は、触媒再生が不要で機器保守が容易なためである。

プロセスの構成は、加熱・反応・分離リサイクルの各工程である。加熱工程は、トルエンを水素と混合し、加熱炉で反応温度まで加熱する。反応工程は、トルエンを水素存在・加圧下で熱的に脱アルキル化する。分離リサイクル工程は、反応によって得られたベンゼンを分離精製し、未反応水素、未反応トルエンなどをリサイクルする。



出典: National Programming on Technology Enhanced Learning (NPTEL)
 図 3.8 トルエンの脱アルキルのフロー

<数値例>

装置能力: 174 千 t/y

反応器の温度：650°C。温度範囲 593~703°C。42Bar-G。

加熱炉：7,918 kW

この加熱炉の約8MWは、少し温度が高い方が良いが、高温太陽熱(650°C)の用途候補の可能性はある。

異性化反応

プロセスの構成は、C8 アロマのキシレン混合物から、テレフタル酸の原料となるパラキシレン分離装置とC8 アロマの異性化装置の組合せである。パラキシレン分離装置はC8 アロマのキシレン混合物から、パラキシレンを分離する。C8 アロマ異性化装置はパラキシレン分離装置でパラキシレン含有量が小さくなったC8 アロマを接触異性化し、平衡組成のキシレン混合物に戻すもので、再びパラキシレン分離装置へ送る。

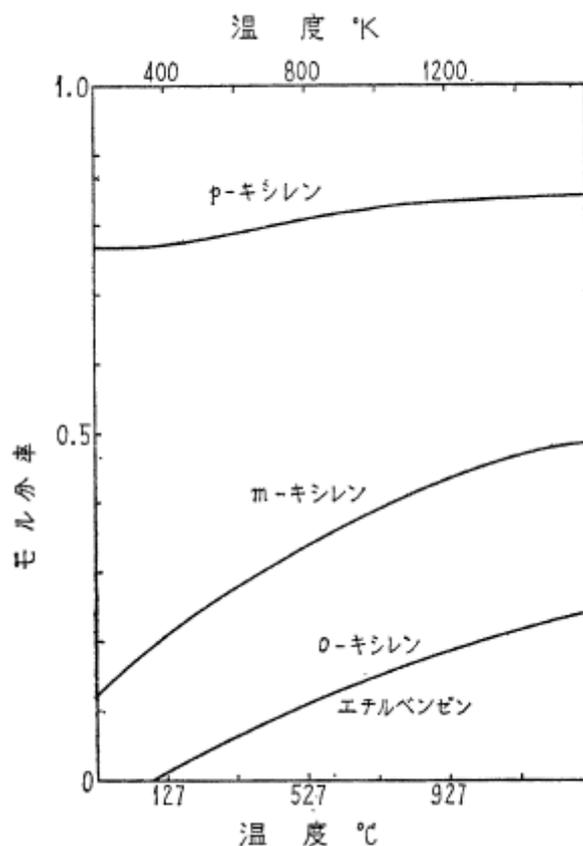
キシレンの標準生成エンタルピー等の値は「表 3.16 キシレンの生成エンタルピー他」の通りで、異性体間での差異は小さい。

表 3.16 キシレンの生成エンタルピー他

物質	状態	$\Delta_f H^\circ$ kJmol ⁻¹	$\Delta_f G^\circ$ kJmol ⁻¹	S° JK ⁻¹ mol ⁻¹	備考
オルト	L	-24.4	110.5	244.3	
メタ	L	-25.4	107.7	252.2	
パラ	L	-24.4	110.0	247.7	

出典：NIST Chemistry Web Book

平衡組成は「図 3.9 キシレン類の平衡組成」のように温度依存する。目標キシレンの割合が大きく、且つ平衡反応速度を考慮して、反応温度を設計する。この反応温度になるように反応器上流に加熱炉を設置し、この加熱炉が高温太陽熱(650°C)用途の候補となる。



出典: 炭化水素の異性化とその工業的応用、有機合成化学第 20 巻第 8 号(1962)

図 3.9 キシレン類の平衡組成

<数値例>

装置能力: 472t/y (製品パラキシレン 1,000 千 t/y 相当)

反応器の温度: **442°C**。温度範囲 417~466°C。17Bar-G。

加熱炉: 20,200 kW (燃料 34,300kW)

この加熱炉の約 20.2MW が、少し温度が低いですが、高温太陽熱(650°C)用途の候補となる。

芳香族不均化

用途が余り多くないトルエンを用途の多いベンゼンとキシレンに不均化する反応である。トルエンの生成エネルギーはベンゼンとキシレンの間であり、この不均化自体のエネルギー変化は小さく、吸熱反応のための熱供給ではなく、不均化反応を進めるための昇温である。

プロセスフローは「図 3.8 トルエンの脱アルキルのフロー」の反応系と同様で、原料トルエンは水素ガスと混合後、熱交換で反応器エフルーメントにより予熱、加熱炉で必要反応温度まで加熱して不均化反応器に導入する。この加熱炉が高温太陽熱(650°C)用途の候補である。

表 3.17 不均化対象芳香族の生成エンタルピー他

物質	状態	$\Delta_f H^\circ$ kJmol ⁻¹	$\Delta_f G^\circ$ kJmol ⁻¹	S° JK ⁻¹ mol ⁻¹	備考
ベンゼン	L	49.0	124.4	173.3	
トルエン	L	12.0	113.8	221.0	
オルト-キシレン	L	-24.4	110.5	244.3	
メタ-キシレン	L	-25.4	107.7	252.2	
パラ-キシレン	L	-24.4	110.0	247.7	

出典: NIST Chemistry Web Book

<数値例>

装置能力: 228t/y (原料処理量 1,680 千 t/y 相当)

反応器の温度: **444°C**。温度範囲 418~470°C。圧力 25BarG。

加熱炉: 5,200 kW (燃料 11,800kW)

この加熱炉の約 5.2MW は、少し温度が低いが高温暖太陽熱(650°C)の用途の候補である。

(3) 環境設備での工業炉

環境設備では、産業廃棄物焼却炉、排ガス焼却炉が主な熱利用設備であるが、これらはダイオキシンの規制により、焼却炉は 850°C以上が必要であり、高温暖太陽熱(650°C)よりは高温が必要なものが多い。

(4) 熱が必要な単位操作に係る装置類

熱が必要な単位操作に係る装置としては、次のようなものがあり、高温暖太陽熱(650°C)の用途となる可能性は大きい。

a. 蒸留装置

石油工業・化学工業については、反応系の温度は主として、工業炉として検討した。

蒸留操作は分離操作として、石油工業・化学工業で使用されることが多い。分離操作としては、650°Cは高温であり、分離するものが変質することが多く、もう少し低温での操作となることが多いが、エネルギー多消費の操作であり、高温暖太陽熱(650°C)の用途になる可能性はある。特定は難しく、次段階として、具体例がある場合にはシステム化検討をする。

b. 蒸発装置、濃縮・晶析装置

蒸発装置、濃縮・晶析装置は化学工業で使用されることが多く、水溶液に対して使用することが多いので、650°Cより低温での操作となることが多いが、蒸留と同様にエネルギー多消費の操作であり、高温暖太陽熱(650°C)の用途がある可能性は大きい。特定は難しく、次段階として、具体例がある場合にはシステム化検討をする。

c. 乾燥装置

化学工業をはじめ食品工業等広範な用途があり、エネルギー多消費操作であるので、高温太陽熱(650°C)の用途がある可能性は大きい。特定は難しく、次段階として、具体例がある場合にはシステム化検討をする。

d. 乾留・ガス化装置

石炭の乾留は、空気を遮断して、加熱・熱分解してガス、タール、コークスを生産する。この乾留には 1000°C以上の高温乾留と 600°C程度の低温乾留がある。低温乾留は高温太陽熱(650°C)の用途がある可能性は大きい。次段階として、太陽熱の適正地域に低温乾留が実施されていた場合にはシステム化検討をする。

3-4-3 水素製造

ここでは、高温が使われている所の探索とは少し異なる方向として、エネルギーキャリアに直結する水素製造での高温の用途探索の可能性を検討した。

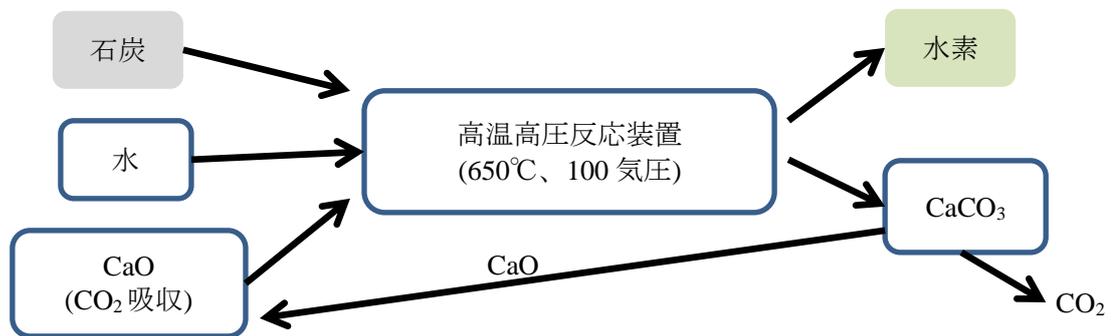
(1) 石炭からの水素生成

石炭は他の化石燃料に比べ埋蔵量が多く、地域への偏在が少ないのが長所であるが、二酸化炭素排出量が多いのが大きな短所である。このため、石炭の二酸化炭素排出量を少なくして活用することは非常に重要であり、この取り組みがされている。

石炭による二酸化炭素の排出量を少なくする取り組みの中に、水素製造と太陽エネルギーを組合せることが出来れば、二酸化炭素の排出量を少なくする効果は更に増すことができるので、高温太陽熱(650°C)の用途としての可能性が高くなる。

石炭からの水素製造は、ページ 33 で記した「石炭の改質」が商業ベースで実施されている。ここでは、JCOAL(一般財団法人 石炭エネルギーセンター)などが提案している、**高温高圧水(650°C、100 気圧)**を石炭と反応させ、反応により副生される二酸化炭素(CO₂)は生石灰(CaO)で吸収してCaCO₃とする方法について、高温太陽熱の用途の可能性を検討した。

この提案されている水素生成は、石炭を効率よく、環境に調和して活用する方法として、技術開発が進められているもので、CO₂は容易に分離回収が可能とのことである。



出典：JCOAL HP 他

図 3.10 石炭の高温高压反応

○炭素と水の反応 $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ 、 $\Delta H^\circ 298 = 131.6 \text{ kJ}$

○シフト反応 $H_2O + CO \rightarrow CO_2 + H_2$ 、 $\Delta H^\circ 298 = -41.5 \text{ kJ}$

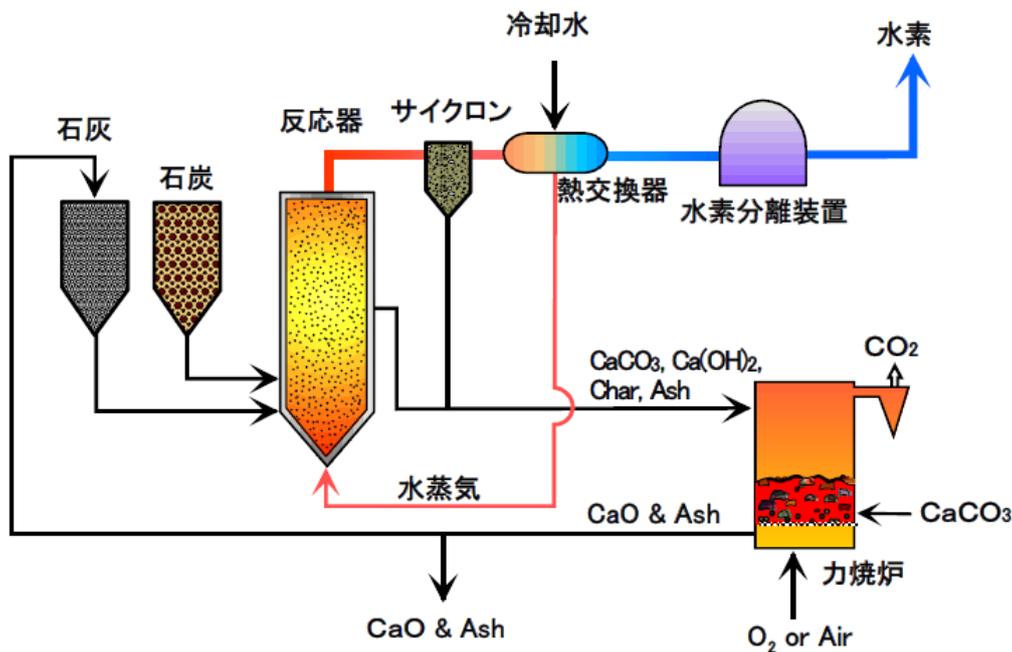
○CO₂ 吸収反応 $CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$ 、 $\Delta H^\circ 298 = -178.1 \text{ kJ}$

○総括反応 $C + 2H_2O + CaO \rightarrow CaCO_3 + 2H_2$ 、 $\Delta H^\circ 298 = -88.0 \text{ kJ}$

温度レベルは、650°Cであるが、酸化カルシウムの二酸化炭素吸収反応は大きな発熱反応であるので、他の吸熱反応を含めても、総括反応は発熱反応である。従って、この部分を高温の用途にするのは難しいようである。

一方、炭酸カルシウムを酸化カルシウムにするためには大きな加熱が必要であり、この反応はカ焼炉で実施されている。

これを高温の用途にすることを検討すると、二酸化炭素の解離圧が大気圧に達するのは898°Cと高く、カ焼炉での炭酸カルシウムの酸化カルシウムと二酸化炭素への分解は、通常**848°C**以上と高温で実施されている。予熱で利用することを除いては高温太陽熱(650°C)の用途にすることは難しいようであるが、石炭の有効利用として水素製造する新しい方法であり、技術の動向には注目したい。



出典：JCOAL HP

図 3.11 プロセスフローの一例

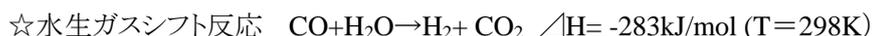
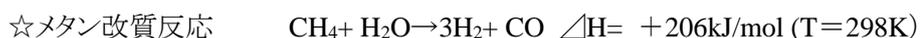
(2) バイオマスからの水素製造

バイオマスは、再生可能エネルギーとして、低炭素化社会のために活用が拡大されているが、利用上での制約が少なくない。このため、バイオマスの制約を緩和・解決するための技術開発が非常に多く実施されている。この技術の中で、エネルギーキャリアに直結する、水素製造に係るものに注目し、高温太陽熱(650℃)用途の可能性を検討した。

バイオマスからの水素製造は、基本的には、①バイオマスをガス化、②ガス化したガスの改質、の構成になると思われる。

バイオマスのガス化ガスの主成分は、ガス化方法により違いはあるが、水素・メタン・一酸化炭素等であり、二酸化炭素が含まれることが多い。

このガスからの水素製造は、メタンは改質反応で水素と一酸化炭素にできる。さらに、一酸化炭素は水性ガスシフト反応で、水素と二酸化炭素にできる。



これらのメタン改質反応・水生ガスシフト反応技術は「ページ 33 メタン(天然ガス)の改質」のように、商業化されている技術で、高温太陽熱(650℃)の用途の可能性を検討した。メタン改質反応は **1200K(927℃)**の高温であり、水生ガスシフト反応は**発熱反応**であり、650℃の用途候補にすることはメタン改質での予熱のために利用することになると思われる。

バイオマスガス化は、色々と課題があり、その課題解決のため、技術開発が進められている。

a. 高温ガス化

バイオマスは有機物を主成分としているので、熱分解すると有機物は低分子化して可燃性ガスとなる。但し、バイオマスの熱分解反応では固体残渣(炭)・液体生成物(タール)等が副生する。これらの副生を最小化し、目的物を高収率化するため、ガス化の温度、圧力、処理時間、処理雰囲気等を制御している。

反応は吸熱であり、熱供給には、部分酸化、間接加熱の二方法がある。

<部分酸化>

ガス化の原料の一部を燃焼・酸化して熱を供給する方法であり、外部からの熱供給はない。酸素源は、空気か酸素である。空気は安価であるが、空気中の窒素が生成ガスに残り、生成ガスの発熱量が低くなる。

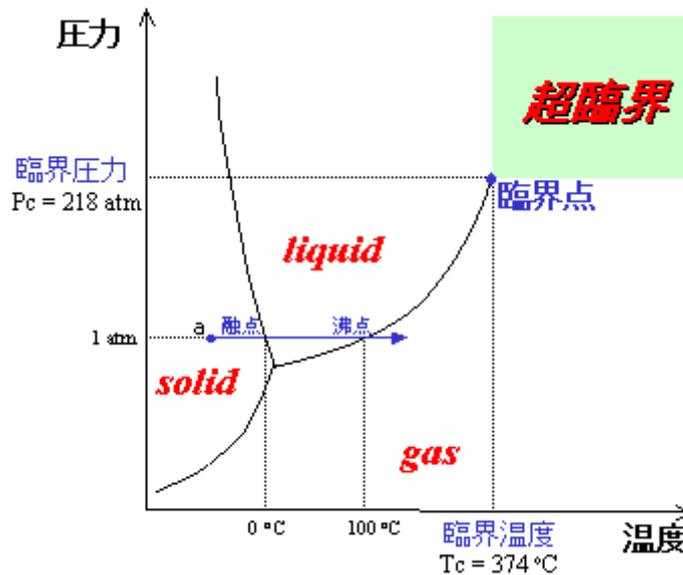
<間接加熱>

熱供給を反応器外部から間接的に行う方法である。部分酸化法と異なり、発熱量を低くする二酸化炭素、酸化剤が空気の場合の窒素は、生成ガスに含まれない。

高温ガス化反応は、圧力は数気圧・温度は **800~1000℃**で行い、650℃より可也高温であり、部分酸化、間接加熱の何れでも、高温太陽熱(650℃)の用途候補にするためには、予熱での利用を除いては難しいようである。

b. 超臨界水でのガス化

水の臨界点(647K, 22.1MPa)以上の高温高圧中で、バイオマスを熱分解反応と加水分解反応をして、低分子の可燃性ガスに効率よく変換する方法である。超臨界よりは穏和な亜臨界条件で金属触媒を用いてガス化する例もある。



出典：文部科学省 超臨界水

図 3.12 水の相関連図

これらガス化の反応は、加水分解しながら熱分解する基礎反応、水溶性の有機物がタールを生成する重合反応、並行してガスを生成する分解反応、脱水してフルフラール生成後にベンゼン環化を進行させてチャーを生成する反応などである。

生成ガスの主成分は二酸化炭素、水素、メタンである。超臨界水や亜臨界水の中での反応は、水が過剰な環境のため、水性ガスシフト反応 ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$) は、水が反応する側に偏るので、十分に触媒と接触する条件では一酸化炭素は殆ど生成しない。

ベンチスケールの超臨界ガス化で、低温ではメタン生成が促進、高温では水素生成が促進し、反応平衡に近い組成のガスが得られること、濃度が低く、温度が高いほどガス化率が高くなること、圧力の影響は小さいことが確認されているとのこと。

超臨界水でのガス化の課題は、触媒劣化の解決、バイオマス原料の連続供給、反応器の閉塞防止である。超臨界水ガス化は今後の実証事例の積み重ねが必要のようである。

超臨界水でのガス化は、反応温度上は高温 (650°C) 太陽熱の用途候補となるが、「3-4-3(1)石炭からの水素生成」のように、技術開発中であり、現時点で具体的な用途候補決定は難しい。用途探索のために、今後の技術開発の状況に注目したい。

c. メタン発酵

バイオマスの主成分である有機物を嫌気性微生物で発酵し、メタンと二酸化炭素が主成分のガスにする。このメタン発酵は、沼地などで自然に進行するため、古くから知られていた。生ゴミの埋立地では、メタン発酵により可燃性ガスが発生する。このガスは埋立地ガスと呼ばれ、回収して利用されている。

メタンは容易に水素にできるので、メタン発酵後に、改質反応、二酸化炭素除去を含めるプロセスにすれば水素生成が可能である。

メタン発酵での一番の課題は、嫌気性微生物による発酵に必要な長時間(2週間～1ヶ月)である。このため、処理量あたりでの大きな反応器が必要となる。

バイオマスのメタン発酵では、前処理等を含めて、高温太陽熱(650℃)の用途候補の可能性はあるが、現状での特定は難しかった。今後の技術開発状況を注目したい。

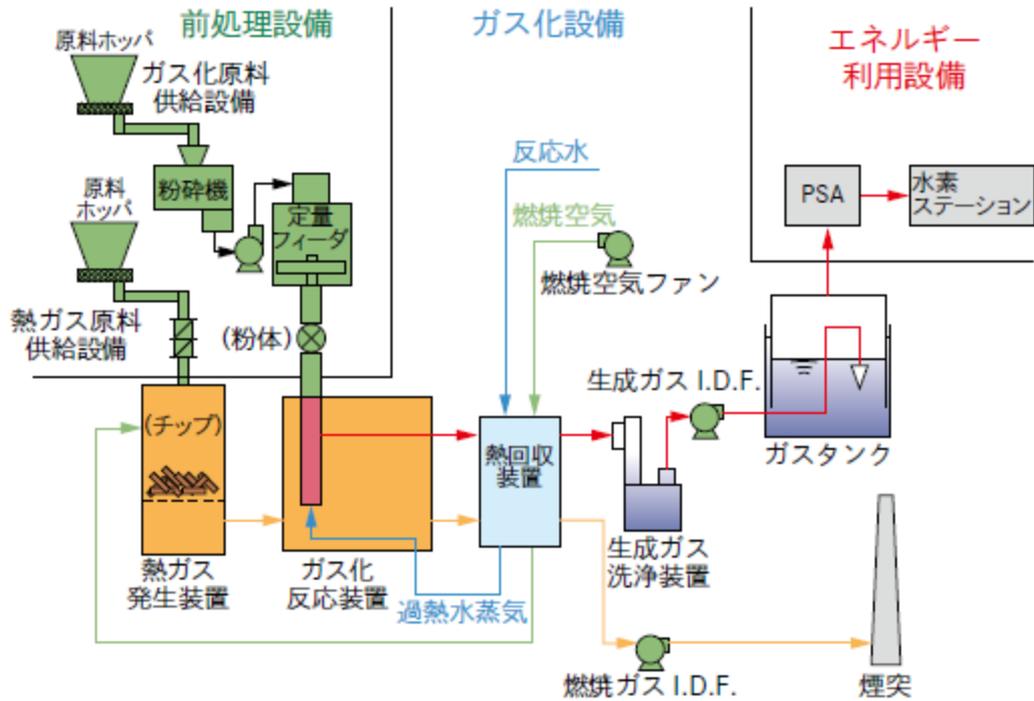
d. 水素発酵

バイオマスを嫌気性発酵するとメタンと二酸化炭素を主成分とするガスが得られるが、この発酵条件を調整して、水素と二酸化炭素が主成分となる水素発酵が研究されている。但し、水素発酵では、同時に有機酸が生成することが多く、この処理が必要となる。

このため、水素発酵をメタン発酵の前処理にする、水素発酵・メタン発酵の二段での発酵が検討されている。水素・メタン二段階発酵を含め、水素発酵での高温太陽熱(650℃)の用途の候補の可能性はあるが、現状での特定はできなかつた。今後の技術開発状況を注目したい。

e. バイオマスからの水素製造の例

バイオマスからの水素製造の例は、NEDO 事業として、鳥栖水素ステーション(佐賀県鳥栖市)での木材チップを用いた水素製造プラントである。「図 3.13 木質チップガス化による水素製造」中の左側が熱の供給のための装置である。実設備のガス化の温度は約 850℃であり、この部分について、高温太陽熱(650℃)の用途は、予熱以外では難しい。



出典：NEDO 水素エネルギー白書

図 3.13 木質チップガス化による水素製造

(3) 水の電気分解

水の電気分解は、水素製造の基本的な方法の一つである。水の電気分解での高温太陽熱(650℃)の用途候補の可能性について検討した。

水の分解は次の反応式で吸熱反応である。



表 3.18 水の分解に係る生成エネルギー等

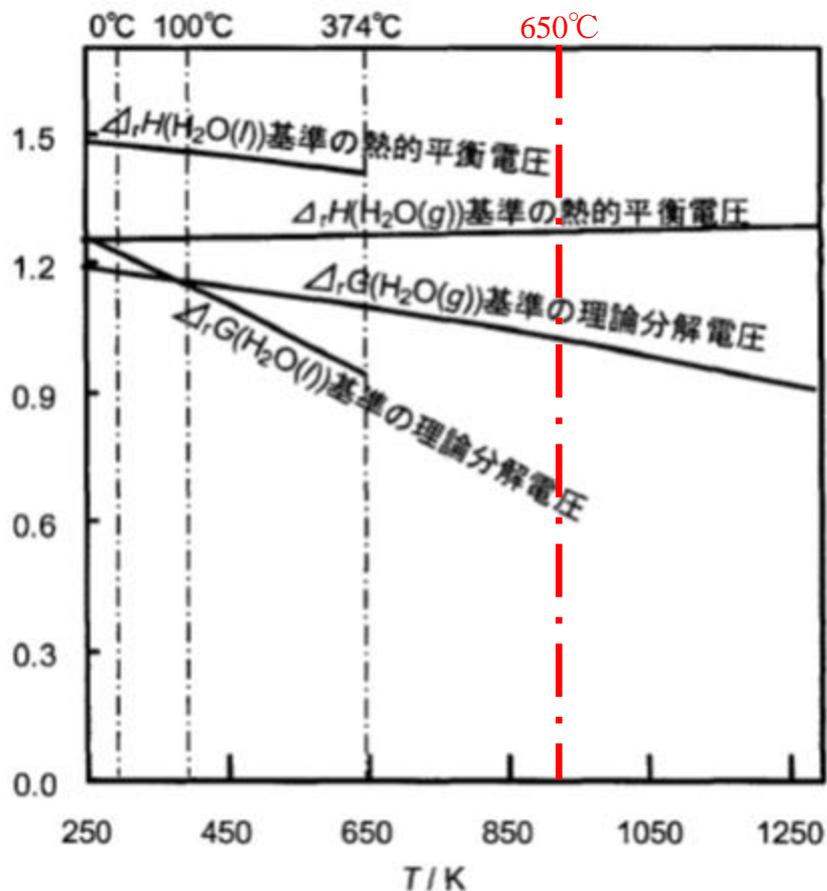
物質	状態	$\Delta_f H^\circ$ kJmol ⁻¹	$\Delta_f G^\circ$ kJmol ⁻¹	S° JK ⁻¹ mol ⁻¹	備考
水素	Gs			130.575	
酸素	Gs			205.029	
水	G	-241.826	-228.6	188.723	
	L	-285.83	-237.178	69.91	

出典：化学便覧

標準生成エネルギー変化 $\Delta_f H^\circ = 285.8 \text{ kJ/mol} (=1.481 \text{ V})$ であり、電気エネルギーであることが必要なギブズの自由エネルギー変化 $\Delta_f G^\circ = 237.2 \text{ kJ/mol} (=1.229 \text{ V})$ である。

「図 3.14」は、水(l-液体)・水蒸気(g-気体)の標準生成エネルギー変化、ギブズの自由エネルギー変化(電圧)についての温度依存性(融点=0℃、沸点=100℃、臨界点=374℃)を示している。高温になるに従い、理論分解電圧は下がり、理論分解電圧－熱的平衡電圧の差は大きくなる。

即ち、温度が上昇すると、反応速度が上昇することに加え、所要電力が小さくなる。これは、電気分解は温度上昇した方が有利になることを示している。

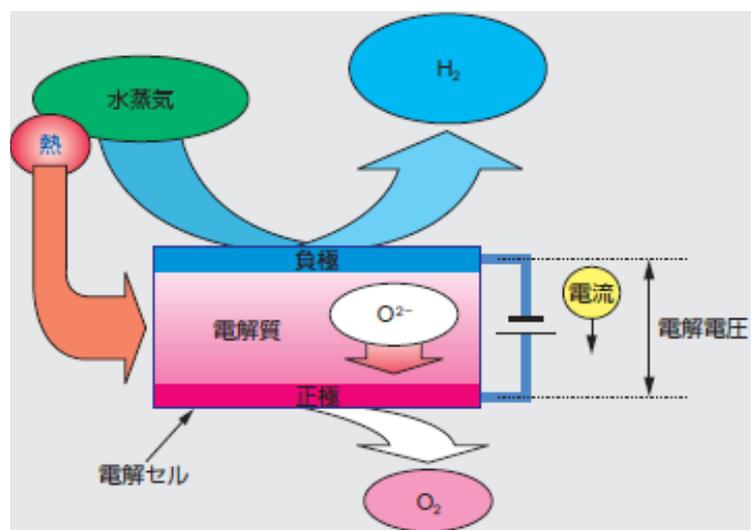


出典：水電解技術の現状と課題、水素エネルギーシステム Vol.36, NO.1 (2011)

図 3.14 水電解での分解電圧・熱的平衡電圧の温度依存性

低温動作の水電解に比べ、高温による高効率を期待できるものとして、高温(700~800°C)水蒸気を電気分解するものが**高温水蒸気電解**である。

固体酸化物形燃料電池とほぼ同じ材料が検討されている。電解質には酸化物イオン伝導体であるイットリウムで安定化した酸化ジルコニウム(YSZ)、アノードにはランタンストロンチウムマンガン酸化物等の導電性酸化物、カソードにはニッケルと YSZ の複合体であるニッケルサーメット等が用いられる。



出典： 東芝レビューVol. 64 (2006)

図 3.15 水蒸気電解

電解電圧は 1.29～1.32V、電解電流密度は 0.6 A/cm² 程度が試験データとして報告されている。エネルギー効率は、高温ガス化炉などの外部から高温熱を利用する場合には 95.7%、外部からの熱なしで、自立運転する場合には 93.2%が期待できるとのことである。

a. 水蒸気電解での作動温度の低温化

九州大学は、水蒸気電解で比較的温度が低いものをNEDO技術開発機構の産業技術研究助成事業の一環として、高効率の水蒸気電解水素製造装置を実現するためのプロトン伝導性電解質および高活性電極材料を開発している。

(参考：<http://venturewatch.jp/nedo/20081111tn.html>)

装置全体に負荷の掛からない 600℃程度の作動温度で稼働し、電解効率 90%以上の高効率水素製造が可能とのこと。

更に、開発中の電解質の薄膜化技術と組み合わせ、高効率の水蒸気電解水素製造装置(電解効率 93%以上)の実現を目指している。

イオン伝導性が高いプロトン伝導性酸化物を用いた水素製造であり、電解装置全体に負荷の掛からない中温度域(600℃以下の作動温度)で電解効率 90%以上(電解電圧 1.2V 以上)を達成できる電極の探索試験を行い。以下の開発に成功しているとのこと。

(1) 導電率 $5 \times 10^{-3} \text{S/cm}^{-1}$ の化学的に安定したプロトン伝導体開発。

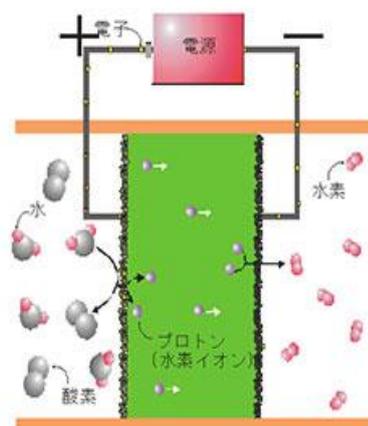


図 3.16 プロトン伝導体を用いた水蒸気電解の原理

(S: ジーメンズ A/V、 $\text{kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{S}^3 \text{A}^2$)

(2) 電極過電圧が 0.3V の電極(電流密度 $0.2\text{A}/\text{cm}^2$ におけるアノードとカソードの合計)開発。

更に、開発している電解質の薄膜化技術を応用し、厚さ約 10 ミクロンの薄膜電解質を組み入れることで電解効率 93%以上(電解電圧 1.4V 以上)の水素製造を目指している。

水電解の中では、水蒸気電解が有望であり、現状は高温であるが、 600°C での作動の技術開発が進められている。

本 SIP エネルギーキャリアの「熱利用水素製造」の中でも、熱と電気で水蒸気を分解して水素を製造する技術(新水蒸気電解)として、技術開発中であり、重要な高温太陽熱(650°C)の用途となる可能性が大きい。

3-4-4 石炭・天然ガス活用型 二酸化炭素回収・利用技術の開発

太陽エネルギーを活用して、二酸化炭素と水蒸気を石炭、天然ガスと反応させることにより得られたガスをメタノールに高効率に変換することを目的に、平成12年度～5年間の計画で、(財)エネルギー総合工学研究所を中心に行われた NEDO の委託事業である。

二酸化炭素の排出削減と石炭利用、天然ガス及び水蒸気の反応が吸熱反応であることに着目し、太陽熱を利用した石炭ガス化太陽炉と天然ガス改質太陽炉を開発し、これら太陽炉で生成されたガスからメタノールを合成するものである。

集光式太陽熱の温度レベルは、熔融塩炉及びその供給システムとしての石炭ガス化、天然ガス水蒸気改質における原料の予熱に最適な温度レベルの **500 から 550°C** の高温熔融塩を 24 時間連続的に供給する。

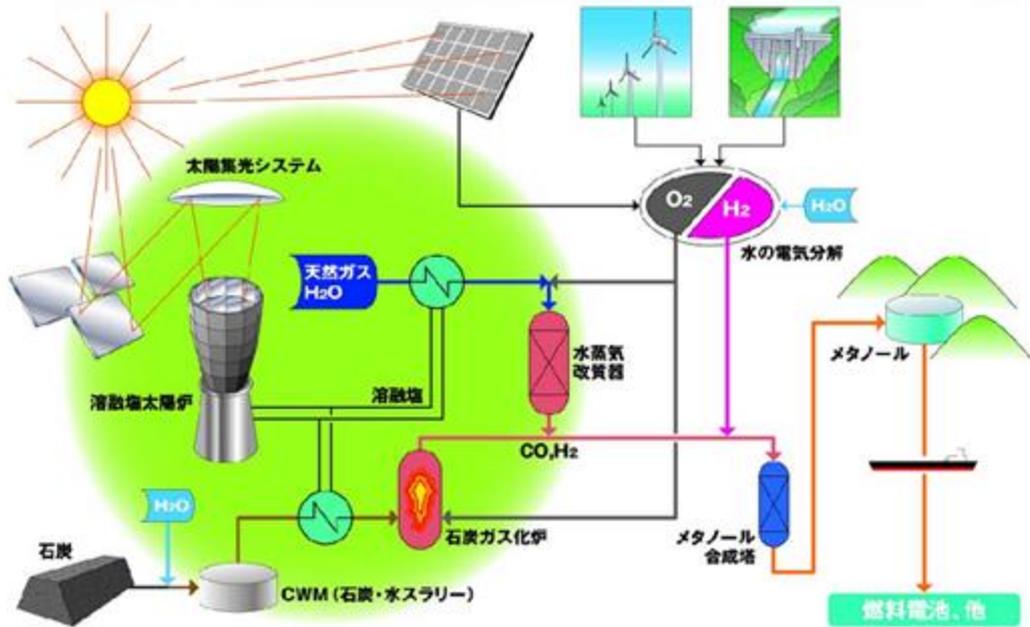
ここでは、集光式太陽熱からの温度は $500\sim 550^\circ\text{C}$ であり、石炭ガス化と天然ガス水蒸気改質の予熱として使用する。予熱効果は、平成 14 年度の評価時に次の様に示されている。

<CWM (Coal Water Mixture) 予熱式石炭ガス化炉の開発>

石炭処理量 $1\sim 2\text{kg}/\text{h}$ の小型実験装置にて、擬似石炭水スラリーとしてエチレングリコール/水系の予熱ガス化を実施し、酸素消費量を予熱無しに比べて10%以上削減し、冷ガス効率は約 10%の向上を確認。

<天然ガスの内熱式水蒸気改質法の開発>

常圧下で 500°C 程度に予熱された天然ガスと水蒸気に若干の酸素を吹き込み、水蒸気改質反応器内で反応開始温度の 1000°C に上昇させることに成功。触媒層では通常の改質反応が起きることを確認。



出典：NEDO 評価資料、エネルギー総合工学研究所作成
 図 3.16 石炭・天然ガス活用型 二酸化炭素回収・利用技術

ここでは、高温が必要な改質反応の予熱に使用するものであるが、予熱での使用の効果が大きければ、高温(650℃)用途としての可能性は大きい。

3-4-5 高温(650℃)用途候補のまとめ

高温(650℃)の用途候補について検討し、650℃の使用が可能-○、使用の可能性有-△、使用が難しい-×と分類した。

表 3.19 高温(650℃)用途候補

用途	内容	状況	候補
1. 熱機関			
ランキン	太陽熱発電として蒸気供給	完成技術で対応可	○
	石炭火力への蒸気供給	完成技術で対応可	○
ガスタービン	ガスタービンへの高温ガス供給	650℃より高温が望ましい	×
2. 熱利用設備			
鉄・非鉄・窯業等	炉へ熱供給(主は 650℃以上)	アルミニウム系? 予熱用途?	×
石油工業・化学工業			
吸熱反応	改質反応(メタン、石炭)	900℃以上、予熱用途-可	○
	脱水素 -オレフィン製造	温度-可	○
	-スチレン製造(断熱)	温度-可	○
	-スチレン製造(等温)	温度-可	○
高温必要反応	脱アルキル、異性化、不均化	温度-可	○
環境設備	焼却設備 (850℃以上)	650℃以上主。予熱用途?	×
熱が必要な単位操作			
蒸留	エネルギー多消費で可能性有	具体例あれば、次段階での検討	△
蒸発、濃縮晶析	エネルギー多消費で可能性有	具体例あれば、次段階での検討	△
乾燥	エネルギー多消費で可能性有	具体例あれば、次段階での検討	△
乾留・ガス化	低温乾留は可能性有	具体例あれば、次段階での検討	△
3. 水素製造			
石炭利用	石炭改質	900℃以上、予熱用途-可	○
	高温高压水活用	温度-可、用途不明、状況注視	△
バイオマス利用			
改質	ガス化後の改質	900℃以上、予熱用途-可	○
ガス化	高温ガス化	900℃以上、予熱用途-可	○
	超臨界水でのガス化	温度-可、開発状況注視	○
発酵	メタン発酵	用途不明	△
	水素発酵	用途不明	△
その他	その他の水素生産	用途不明	×
電気分解	アルカリ水	用途不明、熱より電気	×
	固定高分子膜	用途不明。	△
	高温水・水蒸気電解	低温化を期待	○
熱分解	I Sプロセス	低温化の開発中	○

これを基に、集光式太陽熱の長所、制約を考慮して探索を続ける。

3-5 高温用途での太陽熱の長所・制約の検討

候補の可能性を「表 3.19 高温(650℃)用途候補」を 650℃の温度レベルを中心に分類した。

ここで、再生可能エネルギーで、温室効果ガス排出の削減となり、低炭素社会の形成に寄与することに注目して、次の項目が重要と考えた。

☆再生可能エネルギーとして使用(発電、熱供給)

☆化石エネルギー消費を削減

☆化石エネルギーに起因する環境負荷を向上

☆低炭素化社会、水素社会への貢献

これらを踏まえ、且つ、太陽熱の長所・制約を考慮しての探索をした。

3-5-1 化石資源の供給困難地域へのエネルギー供給

太陽熱の再生可能エネルギーの面を重視し、化石エネルギー源を得ることが難しい地域でのエネルギー使用を可能とする。

他の再生可能エネルギーとの組合せは有効な方法である。予熱的な用途では、他の化石資源の要否等の注意が必要である。

3-5-2 地球温暖化対策への貢献

太陽エネルギーは主要な再生可能エネルギーであり、太陽熱を化石エネルギーの代替で使用して、予熱用途であっても、温室効果ガスを削減する。

二酸化炭素排出原単位が大きい石炭と結びつけ、二酸化炭素排出原単位を下げ、石炭の弱点を和らげる。低炭素化社会への一つのステップとする。

3-5-3 有害物質の排出削減

化石燃料の燃焼を削減し、硫黄酸化物、窒素酸化物、粒子状物質等の有害物質の排出を削減とし、有害物質の環境値が高い地域での環境改良をする。

3-5-4 エネルギーの不均一性

日射量に影響されるため、発生太陽熱は不均一であり、非日射時での生成はない。再生可能エネルギーの殆どは、不安定性がある。このためには蓄エネルギーが必要であるが、他のエネルギーに比べて、熱エネルギーでの蓄えは、容易且つ安価にできる。但し、蓄熱をすることにより、発生温度よりも供給温度が低下することは避けられない。

化学プラントのように年間・昼夜での生産量を一定にすることが求められる用途では、夏季と冬季での集熱量差が生じる等、不利になることがある。

3-5-5 広大な必要面積

太陽の日射量が約 $1\text{kW}/\text{m}^2$ であるので、 1MW は 1000m^2 ($\approx 32\text{m} \times 32\text{m}$) となり、これに、効率・不均一性を考慮すると、広大な集光面積が必要になる。

3-6 高温用途での溶融塩の長所・制約の検討

溶融塩は太陽光から受熱する熱媒としての役割に加え、蓄熱材としての役割も可能であり、

集光式太陽熱の熱供給・蓄熱システム構築で非常に重要である。

一方、温度が下がると凝結する問題があり、熔融塩の形で熱供給する場合には制限が生じることがあり、扱いに注意が必要になる。

3-6-1 蓄エネルギー

熔融塩熱媒は、そのまま蓄熱材として使用すると、熱媒と蓄熱材との熱交換が不要で、集光式太陽熱の不均一性、非日射時への対応に有利である。

3-6-2 低圧性

水-蒸気での高温供給は高圧であるが、熔融塩は比較的低压で高温を扱える。熱需要側での高圧化に問題が生じる場合は、熔融塩使用の効果が非常に大きい。

酸化プロセスなどの除熱・熱回収の目的で、熔融塩は広く使用されている。

3-6-3 凝結性

熔融塩の短所であり、温度が下がると凝結する。熔融塩を高温対応にすると、凝結温度も上がる。熔融塩での熱供給では、需要側でも凝結対策が必要になる。

3-6-4 腐食性

一般的には熔融塩の腐食性は高くない。600℃まででは、金属への腐食は殆ど見られない熔融塩がある。これに対して、高温対応の熔融塩では、腐食性が高くなり、腐食対策が進められている。熔融塩での熱供給では、熱需要側でも腐食対策の考慮が必要となる可能性が高い。

3-6-5 非燃焼性

油性熱媒と異なり、熔融塩は非燃焼性であり、非危険物である。

3-7 高温用途でのシステム化対象について

「3-4 高温(650℃)の用途候補抽出」について分類してシステム化対象にするものについて検討した。

3-7-1 熱機関への蒸気供給

集光式太陽熱で蒸気を発生して、蒸気タービンを回して発電することは、もっとも一般的な集光式太陽熱発電-CSPである。

(1) 集光式太陽熱発電としての蒸気供給

集光式太陽熱で使用されている熱媒は、硝酸塩の Solar Salt であり、650℃よりは低温ではあるが、完成技術である。開発中の熔融塩で蒸気を発生して、蒸気での供給であれば、特別なシステム化検討は不要である。

新熔融塩での腐食対策、蓄熱システム、蒸気発生システムがシステム化での重要点となる。

(2) 石炭火力への蒸気供給

インドで実証化をしている CL 法での 30kW-熱の重要な目的の一つが石炭火力への蒸気供給である。これにより、石炭火力での石炭消費量を減らし、エネルギーの保全に加えて、大気環境の改善、温室効果ガス排出削減につながる。

集光式太陽熱側で発生した蒸気を石炭火力の蒸気タービンに供給するという点では、完成技術であるが、石炭火力側の状況を踏まえて、蓄熱の要否などにより、集光式太陽熱側のシステムについては、直接蒸気発生を選択肢もあり、検討が必要な項目は多い。

集光式太陽熱に適した場所となる可能性については、インド実証のようにあり、重要な用途候補でもあり、システム化検討の対象にする。

3-7-2 熱利用設備

熱利用設備については、「3-4-2 熱利用設備」での検討のように範囲が広い。

(1) 鉄・非鉄・窯業等の工業炉

温度レベルが 650℃より高いこと、650℃熱による予熱の効果の検討が必要であり、用途となる可能性はあるが、実装化は他のシステムでの実績後になると思われ、現時点でのシステム化検討の対象にはしない。

(2) 化学工業

化学工業は温度レベルが広く、650℃高温の用途の候補は多く、次のような検討を行った。

a. 吸熱反応

吸熱反応として、改質反応、脱水素反応に注目した。

改質反応

メタン改質、石炭改質ともに、温度レベルは 900℃以上であり、650℃よりは可也高温であり、用途としては予熱での使用となる。

この予熱については、「3-4-4 石炭・天然ガス活用型 二酸化炭素回収・利用技術の開発」で紹介したように、効果が報告されている。

メタン、あるいは石炭の改質にて水素を生成する必要性は増すとみられ、可能性の高い用途が多く、集光式太陽熱に適した場所となる可能性は十分ある。予熱の用途が主となり、予熱方法を含めてのシステム化検討の対象にする。

脱水素

脱水素反応は、オレフィンプラントでのエタン炉が増えるにつれ、C3、C4 脱水素の需要が増えてくることが期待される。C3、C4 の脱水素での必要な温度レベルも 650℃の需要としては適当である。

但し、これらの化学プラントは年間 24 時間・生産量一定での運転が求められることが多いこと、化学設備の心臓部での変更が生じる可能性が高いこと、化学設備の側に広大な集光式の太陽熱の敷地を確保することが難しいこと等があり、実装の点では個々の検討が必要であり、他設備で実績後になると思われ、当面のシステム化検討からは除くことにする。

b. 高温必要な反応

脱アルキル、異性化、不均化等で、650℃の高温に適当なプロセスは少なくない。但し、これも上記の「脱水素」と同様な理由で、実装の点では他設備での実績後になると思われ、当面のシステム化検討からは除くことにする。

(3) 環境設備での工業炉

焼却炉への熱供給となるが、焼却炉温度は高温(850℃以上)であり、高温太陽熱(650℃)でのシステム化は難しい。

(4) 熱が必要な単位操作に係る装置類

熱が必要な単位操作に係る装置は、温度範囲が広く、エネルギー多消費であり、高温太陽熱(650℃)の用途となる可能性は大きい。

一方、これらの単位操作を行うシステムの状況によって熱供給の方法は異なるので、総括的に用途を特定することは難しく、当面のシステム化検討の対象ではなく、次の段階で具体例がある場合にシステム化検討をする。

3-7-3 水素製造

水素製造はエネキヤリの主要であり、集光式太陽熱との組合せは魅力的である。

(1) 石炭利用

石炭利用の水素製造としては石炭改質と高温高压水活用を検討した。

a. 石炭改質

石炭改質は、上述の「改質反応」で記したように、改質反応の温度は高いが、予熱の用途としての可能性は十分ある。システム化については、「3-4-2(2)a 吸熱反応での石炭の改質」と重なる部分があるが、水素製造の面を重視して、システム化検討の対象にする。

b. 高温高压水活用

高温高压水反応の温度レベルは 650°C に適合しているが、発熱反応であり、反応器を高温保持のために熱供給が必要な可能性はあるが、高温熱の需要については、不明。

実験装置での圧力は 30~1000 気圧とのことで、臨界圧 (218 気圧) 以下での反応もある。炭酸カルシウムを酸化カルシウムにするためには過熱が必要であるが、800°C 以上の高温であり、予熱での可能性はあるが難しいと思われる。

高温高压水あるいは超臨界水での反応は今後の注目すべき技術であり、システム構築のための用途の目途が立たないが、情報への注視が必要である。

当面のシステム化検討からは除く。用途の可能性については引き続き検討する。

(2) バイオマス利用

バイオマス利用の水素製造としては、ガス化と改質、発酵、その他の構成になると思われる。

再生可能エネルギーであるバイオマスと集光式太陽熱を組合せて、水素を製造することは非常に魅力的である。

改質反応としてのシステム化検討は「石炭改質」での成果を利用する。超臨界水活用やバイオマスからの水素製造そのものについては、用途の可能性について引き続き検討する。

a. ガス化と改質

石炭利用と同様に、バイオマスの高温ガス化、超臨界水利用でのガス化とガス化の改質があり、改質については石炭改質と同様なプロセスになると思われるので、バイオマス利用としては、当面のシステム化検討からは除く。

b. 発酵

高温用途が特定できず、当面のシステム化検討からは除く。バイオマス利用の水素製造自体が、色々な課題解決に取り組んでいる状況であり、これらの進展、新しい情報に基づいてシステム化検討することになる。

c. その他の水素製造

バイオマスからの水素へのエネルギー源あるいは、その処理に高温が必要となる可能性はあるが、高温用途が特定できず、当面のシステム化検討からは除く。システム化の検討の実施は今後の情報を基に決定することになる。

(3) 電気分解

電気分解については、高温水・水蒸気電解での温度低下が可能になれば、650°Cの重要な用途となる。高温水・水蒸気電解の状況が明確となれば、それをベースにシステム化の検討することになる。当面のシステム化検討からは除く。状況については引き続き注目する。

(4) 熱分解

熱分解である IS プロセス側を 650°Cまで下げる技術開発が本 SIP 開始時のベースであり、IS 側の技術開発の成果に合わせて、650°C高温の重要な用途となる。

当面のシステム化検討からは除く。詳細な IS 側の状況が確定できてから、高温供給のシステム化検討を行う。

3-7-4 高温供給のシステム化検討対象

高温太陽熱の用途候補として、「3-7-1 熱機関への蒸気供給」、「3-7-2 熱利用設備」、「3-7-3 水素製造」で検討した。

この結果、次ステップとしてのシステム化検討実施対象を次のようにした。

(1) 石炭火力への蒸気供給

高温(650°C)の蒸気は、既存の石炭火力への供給として適し、実装から普及が見込まれる用途である。石炭火力へ再生可能エネルギーからの蒸気を供給することにより、

☆石炭消費量の削減

☆温室効果ガスである二酸化炭素の排出量削減

☆石炭火力よりの環境負荷の軽減

が期待できる。

石炭火力を想定して、システム化検討を行う。この場合、蓄熱の要否、直接蒸気発生との比

較等が実装から普及への重要な用途になると思われる。

(2) 改質反応への熱供給

改質反応は広く実施され、水素の製造とも関連が強く、バイオマスの有効利用にも重要な反応であることが多く、高温太陽熱の用途として実装から普及への可能性が高いものである。一方、改質反応は、650℃より高温で実施され、650℃では予熱の用途になる。太陽熱をこの予熱として使用することは、「3-4-4 石炭・天然ガス活用型 二酸化炭素回収・利用技術の開発」のような報告がある。

予熱としてのシステム構築を行い、予熱としての効果を含めての検討を行う。合わせて、改質反応の低温化を含めての高温太陽熱(650℃)の用途について検討する。

(3) 水素製造への熱供給

水素製造としては、石炭利用、バイオマス利用、電気分解、熱分解について検討した。

石炭利用、バイオマス利用については、改質反応を使用することが多く、650℃より高温で実施されている。従って、ここでのシステム化検討は行わず、改質反応への予熱としての熱供給の成果を活用することにする。

電気分解(特に、水蒸気電解)、熱分解については、温度低下への技術開発中であり、高温太陽熱の重要な用途にするために、これらの動向に注目する。また、石炭利用、バイオマス利用での水素製造に利用できる可能性の高い、超臨界水の状況についても注目する。

(4) システム化検討の対象用途

各用途の状況を検討し、システム化検討の用途は次のようにした。

表 3.20 システム化検討

用途	システム化検討	備考
1.熱機関	石炭火力への蒸気供給	システム化での留意点
		☆蓄熱の要否
		☆直接蒸気発生との比較
2.熱利用設備	改質反応(メタン、石炭)	用途は予熱
		改質反応低温化は引き続き調査
3.水素製造 石炭利用	(石炭改質)	改質反応成果を活用
	(高温高圧水活用)	高温用途の可能性は引き続き調査
バイオマス利用	(ガス化、発酵、その他)	改質反応成果を活用
		高温用途の可能性は引き続き注目
電気分解	(水蒸気電解)	水蒸気電解の低温化は引き続き調査
熱分解	(ISプロセス)	熱分解の低温化は引き続き調査

注：システム化検討の対象は、「石炭火力への蒸気供給」、「改質反応（メタン、石炭）」

3-8 まとめ

「高温集光集熱システムの開発」、「高温太陽熱の用途探索」については次の通りである。実装化のためには、「システムの開発」、「用途探索」は共に非常に重要である。

3-8-1 高温集光集熱システムの開発のまとめ

実証設備を建設しているところをサイトとして、高温対応システムを構築し、経済性の評価、経済性の向上の検討をした。

検討での高温対応の熱媒については、

☆ベースケース(空気熱媒)ー技術的問題はなく、実証テストの結果を活用

☆比較ケース(熔融塩熱媒)ーチーム内で技術開発中の熔融塩・集熱管を使用

の両ケースで、フロー構築・配置計画・機器仕様決定・配管計画と物量算出をした。水素製造側、熔融塩は技術開発中のため、材質・機器仕様の決定ができないものがあるので、経済性に影響が大きい主要コストを想定して検討した。

並行して、集光式太陽熱の経済性状況として、米国の状況(NREL、DOE)を中心に、集光式太陽熱の現時点・目標コストをまとめ、想定した主要コストと比較し、さらに経済性向上として、想定した主要コストの削減の可能性について検討した。

これらの結果から、ベースケース(空気熱媒)は、空気の広温度範囲の適応性、非腐食性、技術的には完成されているなどの長所があるが、配管物量が非常に大きく、目標コストにすることは難しい。熱媒空気の加圧・クローズ化ができれば、この課題は解決できるが、熱媒空気に適当な小石蓄熱方式の加圧化が難しい。空気熱媒の長所は多く、状況の注視は必要である。

比較ケース(溶融塩熱媒)は、目標コストにできる可能性がある。但し、解決必要な課題があり、技術開発の成果を期待する。

3-8-2 高温太陽熱の用途探索のまとめ

高温太陽熱の用途探索として、全体を見通せるように、熱が必要な装置・設備を次のように分類して検討した。

☆熱機関(ボイラ、蒸気原動機、内燃機関、ガスタービン)

☆熱利用設備として、工業炉(製鉄、製鋼・圧延、自動車・機械等、鋳鉄・鋳鋼、窯業、化学工業、環境設備)。熱に係る単位操作(熱交換、冷凍・空調、蒸留、蒸発、濃縮、乾燥、乾留、ガス化)

さらに、エネルギーキャリアとして重要な「☆水素製造」に焦点をあてて検討した。

検討したものについて、高温(650℃)の使用が可能-○、使用の可能性有-△、使用が難しい-×と分類した。

再掲 表 3.19 高温(650℃)用途候補 (p. 51)

用途	内容	状況	候補
1. 熱機関			
ランキン	太陽熱発電として蒸気供給	完成技術で対応可	○
	石炭火力への蒸気供給	完成技術で対応可	○
ガスタービン	ガスタービンへの高温ガス供給	650℃より高温が望ましい	×
1. 熱利用設備			
鉄・非鉄・窯業等	炉へ熱供給(主は 650℃以上)	アルミニウム系? 予熱用途?	×
石油工業・化学工業			
吸熱反応	改質反応(メタン、石炭)	900℃以上、予熱用途-可	○
	脱水素 -オレフィン製造	温度-可	○
	-スチレン製造(断熱)	温度-可	○
	-スチレン製造(等温)	温度-可	○
高温必要反応	脱アルキル、異性化、不均化	温度-可	○
環境設備	焼却設備 (850℃以上)	650℃以上主。予熱用途?	×
熱が必要な単位操作			
蒸留	エネルギー多消費で可能性有	具体例あれば、次段階での検討	△
蒸発、濃縮晶析	エネルギー多消費で可能性有	具体例あれば、次段階での検討	△
乾燥	エネルギー多消費で可能性有	具体例あれば、次段階での検討	△
乾留・ガス化	低温乾留は可能性有	具体例あれば、次段階での検討	△
4. 水素製造			
石炭利用	石炭改質	900℃以上、予熱用途-可	○
	高温高压水活用	温度-可、用途不明、状況注視	△
バイオマス利用			
改質	ガス化後の改質	900℃以上、予熱用途-可	○
ガス化	高温ガス化	900℃以上、予熱用途-可	○

	超臨界水でのガス化	温度-可、開発状況注視	○
発酵	メタン発酵	用途不明	△
	水素発酵	用途不明	△
その他	その他の水素生産	用途不明	×
電気分解	アルカリ水	用途不明、熱より電気	×
	固定高分子膜	用途不明。	△
	高温水・水蒸気電解	低温化を期待	○
熱分解	I Sプロセス	低温化の開発中	○

この用途候補を基に、集光式太陽熱の長所、制約を考慮して候補を絞った。この結果、システム化検討は実装化・普及が期待できる、「3-8-2(1)石炭火力への蒸気供給」、「3-8-2(2)改質反応への熱供給」にした。

(1) 石炭火力への蒸気供給

高温(650°C)の蒸気は、既存の石炭火力への供給として適し、実装から普及が見込まれる用途である。石炭火力へ再生可能エネルギーからの蒸気を供給することにより、☆石炭消費量の削減、☆温室効果ガスである二酸化炭素の排出量削減、☆石炭火力よりの環境負荷の軽減、等が期待できる。

(2) 改質反応への熱供給

改質反応は広く実施され、水素の製造とも関連が強く、バイオマスの有効利用にも重要な反応であることが多く、高温太陽熱の用途として実装から普及への可能性の高いものである。一方、改質反応は、650°Cより高温で実施され、650°Cでは予熱の用途となる。予熱としてのシステム構築を行い、予熱としての効果を含めての検討を行う。合わせて、改質反応の低温化を含めての高温太陽熱(650°C)の用途について検討する。

再掲 表 3.20 システム化検討 (P. 59)

用途	システム化検討	備考
1.熱機関	石炭火力への蒸気供給	システム化での留意点
		☆蓄熱の要否
		☆直接蒸気発生との比較
2.熱利用設備	改質反応(メタン、石炭)	用途は予熱
		改質反応低温化は引続き調査
3.水素製造 石炭利用	(石炭改質)	改質反応成果を活用
	(高温高压水活用)	高温用途の可能性は引続き調査
バイオマス利用	(ガス化、発酵、その他)	改質反応成果を活用
		高温用途の可能性は引続き注目
電気分解	(水蒸気電解)	水蒸気電解の低温化は引続き調査
熱分解	(I Sプロセス)	熱分解の低温化は引続き調査

注： システム化検討の対象は、「石炭火力への蒸気供給」、「改質反応（メタン、石炭）」

3-9 今後の課題

高温集光集熱システムの開発、高温太陽熱の用途探索での課題は次の通りである。

3-9-1 高温集光集熱システムの開発

ベースケース(空気熱媒)は、空気の広温度範囲の適応性、非腐食性、技術的には完成されているなどの長所があるが、配管物量が非常に大きく、目標コストにすることは難しい。熱媒空気の加圧・クローズ化ができれば、この課題は解決できるが、熱媒空気に適当な小石蓄熱方式の加圧化が難しい。空気熱媒の長所は多いので、状況を注視して、経済的な用途探索・確立することが課題である。

比較ケース(溶融塩熱媒)は、目標コストにできる可能性がある。但し、集熱管や熱媒での解決必要な課題があり、技術開発の成果に期待する。

3-9-2 高温太陽熱の用途探索

開発中の熱媒の情報をタイムリーに実装化、普及のためのシステム化検討での反映をすること。システム化検討の対象とはできなかった、水素製造に関する情報収集と用途の候補化とすることが今後の課題である。

4. 外部発表実績

なし。

5. 特許出願実績

	出願番号	発明の名称	出願年月日	出願人
1	特願 2014-153498	太陽熱集熱装置	平成 26 年 7 月 29 日	東洋エンジニアリング 株式会社
2	特願 2015-099166	太陽熱集熱装置	平成 27 年 5 月 14 日	東洋エンジニアリング 株式会社

6. 参考文献等

- ☆ Concentrating Solar Thermal Power / Manuel Romero-Alvarez and Eduardo Zarza
- ☆ NASA Surface meteorology and Solar Energy
- ☆ API 530 Calculation of Heater Tube Thickness in Petroleum Refineries
- ☆ Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts, NREL/SR-550-34440 October 2003
- ☆ Manuel Romero-Alvarez and Eduardo Zarza Plataforma Solar de Almeria-CIEMAT
- ☆ IRENA Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series
- ☆ MNA Local Manufacturing Report 4-14-11
- ☆ Solar Energy Fundamentals Course No. M04-018
- ☆ Solar Energy Engineering, SOTERIS A. KALOGIROU
- ☆ HIGH-TEMPERATURE THERMAL ENERGY STORAGE FOR CONCENTRATED SOLAR POWER WITH AIR AS HEAT TRANSFER FLUID, A dissertation submitted to ETH ZURICH for the degree of Doctor of Sciences presented by GIW ZANGANEH MSc ETH ME g
- ☆ Packed-bed thermal storage for concentrated solar power - Pilot-scale demonstration and industrial-scale design, G. Zanganeh, A. Pedretti, Zavattorni, M. Barbato, A. Steinfeld
- ☆ 伝熱工学資料 (第四版)
- ☆ 化学工学便覧 (改訂四版)
- ☆ 理科年表 平成 27 年/第 88 冊
- ☆ 理科年表 平成 28 年/第 89 冊
- ☆ 天文計算入門 長谷川一郎著
- ☆ 化学便覧、日本化学会
- ☆ 理科年表、国立天文台
- ☆ 超臨界水、文部科学省
- ☆ 超高温高压火力発電プラント(USC)の開発、日本鉄鋼協会
- ☆ 超臨界流体 - 独立行政法人 工業所有権情報・研修館
- ☆ National Programming on Technology Enhanced Learning (NPTEL)

- ☆ NIST Chemistry Web Book
- ☆ 水素エネルギー白書、NEDO
- ☆ NEDO 評価資料
- ☆ 水素エネルギーシステム、水素エネルギー協会
- ☆ 炭化水素の異性化とその工業的応用、有機合成化学
- ☆ ダイオキシン類発生抑制対策のための産業廃棄物焼却指針、全国産業廃棄物連合会
- ☆ エネルギー管理士試験講座、省エネルギーセンター
- ☆ ニツコー熔材工業株式会社 HP
- ☆ 東芝レビュー
- ☆ JCOAL HP
- ☆ CBI HP