

# 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「高温熱媒体の開発」

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：新井 一喜

所属研究機関：東ソー株式会社

## 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	4
3. 研究開発実施内容	5
3-1. 材料探索指針	5
3-2. Li系塩化物熱媒体	6
3-3. Na系塩化物熱媒体	13
3-4. 候補熱媒体の物性評価	15
3-5. まとめ	20
3-6. 今後の課題	20
4. 外部発表実績	20
5. 特許出願実績	20
6. 参考文献	20

## 図表一覧

図1. 太陽熱を利用した水素およびエネルギーキャリア製造システム
図2. LiCl-KBr-CaCl <sub>2</sub> 三元系溶融塩の凝固温度
図3. Li系塩化物溶融塩の凝固温度に対する Br/(Br+Cl)比率の影響
図4. Li系塩化物溶融塩中での各種鋼材の腐食速度に対する臭化物の影響
図5. Li系塩化物溶融塩中での Inconel600 の腐食試験後の表面近傍の断面写真
図6. Li系塩化物溶融塩中での各種鋼材の腐食速度に対する浸漬温度の影響
図7. Li系塩化物溶融塩中での SUS310S の腐食速度に対する Mg 添加量の影響
図8. 腐食試験後の SUS310S 鋼材表面近傍の断面観察 (Mg 添加無し)
図9. 腐食試験後の SUS310S 鋼材表面近傍の断面観察 (Mg=6mol%)
図10. 熱力学データベースによる状態図の計算例
図11. ZnCl <sub>2</sub> 添加による凝固温度の変化 (計算値)
図12. Na系塩化物熱媒の ZnCl <sub>2</sub> 添加量と凝固温度の関係
図13. Li系塩化物熱媒体の Br/(Br+Cl)比と粘性率の関係
図14. Li系塩化物熱媒体の Br/(Br+Cl)比と 400℃における粘性率の関係
図15. Li系塩化物熱媒体の Br/(Br+Cl)比と 350℃における粘性率の関係
図16. Na系塩化物熱媒体および Li系塩化物熱媒体の粘性率
図17. Na系塩化物熱媒体および Li系塩化物熱媒体の比熱

- 表 1. 混合塩化物の凝固温度（共晶点）
- 表 2. 腐食評価に使用した鋼材・合金
- 表 3. 候補熱媒の物性評価結果

## 1. 本研究の目的

化石燃料の枯渇リスクや地球温暖化に対する懸念から、再生可能エネルギーを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。一方で、太陽光をはじめとする再生可能エネルギーは、エネルギー密度が低い上に自然を相手にするため、時間的な変動が大きく扱いにくいといった課題を有している。

この課題に対する一つの解決策として、太陽熱の利用が挙げられる。太陽熱はレンズや反射鏡等を用いて太陽光を集光することで、エネルギー密度の低い太陽エネルギーを高効率に利用できる長所を持つ。さらには、太陽熱をそのまま熱として貯留する事により、昼夜問わず 24 時間の大規模・安定操業が可能であると言った点が挙げられる。このような、熱による蓄エネルギー技術は、高コストな蓄電池を必要としない為、経済的にも優位な変動型再生可能エネルギーの平準化手段であると考えられる。

次に、再生可能エネルギーを長期間貯蔵したり長距離の輸送を行う際には、液化水素などのエネルギーキャリアに変換する技術が重要となる（なお、本プロジェクトでは、更にエネルギー密度が高く、既存の貯蔵・輸送技術やインフラを転用可能なエネルギーキャリアとして、アンモニアについても検討を行っている）。

しかしながら、水素の製造には現在、化石燃料が利用されており、CO<sub>2</sub> の発生を伴っている。従って、これを太陽熱や風力等の再生可能エネルギー由来の水素に転換し、CO<sub>2</sub> の発生しないクリーンなシステムの構築が必要である。

本研究開発の課題は、エネルギーキャリアとして利用するために必要な水素の製造を、膨大かつ悠久の一次エネルギー源である太陽熱エネルギーで実現することである（図 1）。

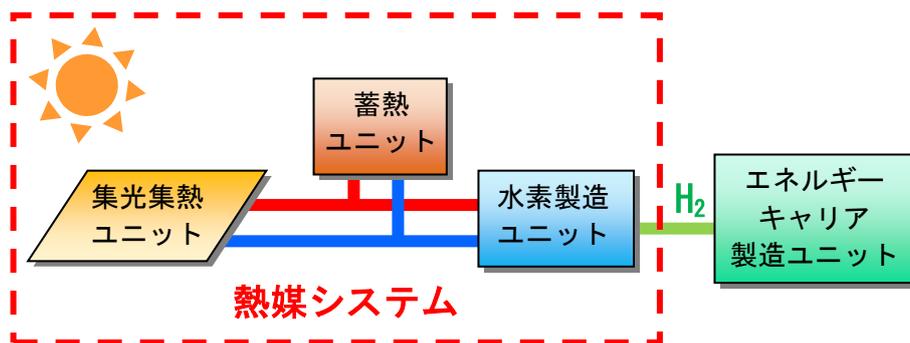


図 1. 太陽熱を利用した水素およびエネルギーキャリア製造システム

水素製造には当面の間は、太陽熱を蒸気タービン等で一旦電気に換え、その電力を利用して水の電気分解を行う事を想定している。しかし、将来、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による水素製造が可能になった際には、これらのプロセスに太陽熱を直接投入する製造方法に切り替えることも可能である。

本課題では、従来よりも稼働温度を上げた高効率な太陽熱発電により、24時間安定した電力供給により水素製造を行う。現在の太陽熱発電プラントで硝酸塩系溶融塩を熱媒体とした場合の温度条件は約 550℃である。これを、より高温に適したレシーバと新規高温用溶融塩の開発により、現在の最新技術よりもさらに高効率での発電が可能な 650℃の発電を目指す。

現行の太陽熱システムで利用可能な最高温度は 550℃集熱であるが、発電効率の向上、温度差を大きく取ることによる蓄熱設備をはじめとする全体システムのコンパクト化・低コスト化を考慮すると、さらなる高温化が望ましい。本研究では、早期の実現可能性を考慮し、構造材料を汎用材料の使用を前提とする。ステンレス鋼の使用上限 650℃を想定し、本研究では 650℃集熱システムの構築を目指す。

また、将来実用化が期待される熱利用水素製造プロセス(新 IS 法に代表される熱化学法、新水蒸気電解等)においては 650℃以上の熱供給の必要性が想定される。650℃の高温システム化は現行に対して発電効率の上昇及び熱媒体単位量当たりの熱輸送・蓄熱量が増大する。よって全体システムのコスト低減、熱媒体関連装置の小型化による装置費、材料費の低減の可能性がある。

上述研究課題に対して、当研究機関に於いては、高温での利用が可能な新規熱媒体の開発に取り組んだ。本研究に於ける熱媒体とは、太陽光集光集熱ユニットから受け取った熱を、蓄熱ユニット、若しくは水素製造ユニットに移送する為の流動材料であり、ポンプ動力や熱交換効率の観点からは、なるべく低粘度である事が望ましい。

また、特に蓄熱材として併用する場合は比熱が大きい事も重要な指標となる。蓄熱材として利用される場合、その使用量が多くプラントの初期コストに占める熱媒費用が大きい為、低コストの熱媒を開発する事も重要である。

現在、工業プラントなどでは比較的高温用の熱媒として硝酸塩系の溶融塩が用いられているが、熱分解により最高使用温度が 580℃程度に制限されているため、本研究の目的温度 650℃では使用することができない。そこで、現行硝酸塩系溶融塩に比べ熱安定性が高く、高耐熱化が期待できる塩化物系溶融塩による新規熱媒体の開発に取り組んだ。

熱媒体に求められる特性として、凝固温度が出来るだけ低い事が重要である。凝固温度を低くすることで、熱媒として使用した際に高温側と低温側の温度差を大きく取ることが出来る為、より多くの熱量を移送・貯蔵する事が可能であり、また、低温時の凝固防止用の予熱電力等を軽減する事が可能になる等のメリットがある。しかしながら、塩化物は一般的に凝固温度が高い物質が多い為、多成分混合による共晶現象等を利用することで、より凝固温度の低い熱媒体の開発を目指した。

また、将来的に広く熱媒体が利用される様になる場合を想定して、熱媒に使用される物質は資源制約が少なく、人体や環境への負荷もなるべく少ないものが好ましい。更に経済性に優れるエネルギーキャリアを製造する為には、熱媒コストが低い事も重要な課題である。本研究ではこれらの点にも留意して、材料探索を行った。

また、高温の熔融塩による、設備配管や計装類の腐食も問題となる事が予想されたため、本研究では、他研究機関と連携し、電気化学的手法や雰囲気制御、金属材料の選定等の各種防食技術の検討を行った。また、実際の太陽熱プラントにおける集熱管中の熱媒の流れを模した、高流速下での動的腐食評価にも取り組んだ。

## 2. 研究開発目標とマイルストーン

650°Cの高温熱に耐えられる熱媒体を開発する。650°Cの粘度が 15mPa・s 以下、350°Cの粘度が 100mPa・s 以下であり、コストが硝酸塩と同等の熱媒体を開発する。肉厚 3mmの集熱管を 10 年間保持可能な部材・防食技術を構築する。

### <マイルストーン>

H26 年度：600°Cの熱輸送が可能であり、粘度が 40mPa・s 以下の熱媒体を開発する。高温熱物性の測定法の確立を進める。また、腐食評価体制を構築し、熔融塩腐食機構を検討する。

H27 年度：650°Cの熱輸送が可能であり、粘度が 40mPa・s 以下の熱媒体を開発する。開発品の腐食評価を行う。

H28 年度：650°Cの熱輸送が可能であり、腐食速度 1mm/年以下、粘度が 20mPa・s 以下の熱媒体を開発する。熔融塩の高温熱物性を測定する。熱媒体の耐食性、添加剤効果を検討する。

H29 年度：熱媒体の改良を行い、400°C～650°Cで利用可能、650°Cの粘度が 20mPa・s 以下、400°Cの粘度が 100mPa・s 以下、コストが硝酸塩比 2 倍以下の熱媒体を開発する。肉厚 3mm の集熱管を 5 年間保持可能（無垢鋼材に対する腐食速度が 0.2mm/年以下）である部材・防食技術を構築する。

H30 年度：熱媒体の更なる改良を行い、350°C～650°Cで利用可能、650°Cの粘度が 15mPa・s 以下、350°Cの粘度が 100mPa・s 以下、コストが硝酸塩と同等の熱媒体を開発する。肉厚 3mm の集熱管を 10 年間保持可能（無垢鋼材に対する腐食速度：0.1mm/年以下）である部材・防食技術を構築する。

### 3. 研究実施内容

#### 3-1. 材料探索指針

低い凝固温度を有し、かつ資源制約が少なく、人体・環境負荷も比較的少ない組成系を抽出する為、以下の探索指針を設定し、候補材料の選定を行った。凝固温度については、熱力学データから或る程度予想する事が可能であるが、定性的には深い共晶を発現する組成系に於いて凝固温度の低温化が期待できる。この様な組成系として、①イオン半径比が異なる元素の組合せや、②価数や電気陰性度の異なる元素の組合せ、③同じ陽イオン種で比べた場合は陰イオン半径が大きいものなど、が候補として考えられる。

つぎに、資源制約の少ない元素としては、地殻中の存在度が高い、アルカリ金属元素やアルカリ土類金属元素として Ca、Na、K、Mg などが挙げられる。これらの元素は存在度が高いだけでなく塩化物としての有害性も低い為、材料探索の中心となる元素であると言える。Li は資源的な制約はあるものの、比較的有害性が低く凝固温度の低減効果が高いと予想される事から検討に加えた。Be, Ba に関しては塩化物の毒性が高い為、今回の検討からは除外した。Al は塩化物の昇華性が高く、本研究の目的である高耐熱性熱媒としては不適と考え、今回の検討からは除外した。重金属元素に関しては塩化物が毒性を有するものが多いが、比較的有害性の低い Zn については検討を行った。

#### <材料探索指針>

##### 1) 深い共晶点を有する組成系の探索

- ・イオン半径が異なる元素の組合せほど低凝固温度化の傾向（表1）。
- ・価数や電気陰性度の異なる元素の組合せ
- ・陰イオン半径が大きいほど低凝固温度化の傾向

例) NaF(990)>NaCl(800)>NaBr(748)>NaI(661)

⇒多成分系熔融塩、複合陰イオン (Cl-Br)、など

##### 2) 資源的制約が比較的少ない元素の利用

- ・アルカリ金属、アルカリ土類金属、など

##### 3) 有害性の高い化合物は使用しない

- ・BeCl<sub>2</sub>、BaCl<sub>2</sub>、一部の重金属化合物等は不可

表1. 混合塩化物の凝固温度（共晶点）[°C]

	Na	K	Rb	Cs
Li	554	353	313	326
Na		657	550	486
K			720	616
Rb				640

(FactSage™ データベースより抽出)

## 3-2. Li 系塩化物熱媒体

### 3-2-1. 組成の最適化

#### (1) 実験方法

上述探索指針を基に、金属元素（陽イオン）として、Li, K, Ca（イオン半径や価数が異なる元素）を選択し、ハロゲン元素（陰イオン）として Cl, Br（複合陰イオン）を選択した。使用する塩については、コストを考慮して、LiCl, KBr, CaCl<sub>2</sub> を基本とした。

原料としてハロゲン化物（LiCl, KBr, CaCl<sub>2</sub> 等）粉末を用い、各原料粉末を所望の組成となるように秤量し、乳鉢で混合したものを磁製のつぼに投入、大気中 600°C-1hr 加熱溶解後に、乳鉢で粉砕したものを評価用サンプルとした。

凝固温度は、示差熱分析（DTA）装置を用いて、冷却過程（-10°C/m）における熱出力のピークの高温側外挿温度とした。

#### (2) 実験結果

##### <三元系溶融塩>

熱分析装置により計測した凝固温度を図 2 に示す。図中、50LiCl-40KBr-10CaCl<sub>2</sub> [mol%] の組成比に於いて、最も低い凝固温度 311°C を示したことから、この組成物を Li 系溶融塩熱媒体の候補材料とした。

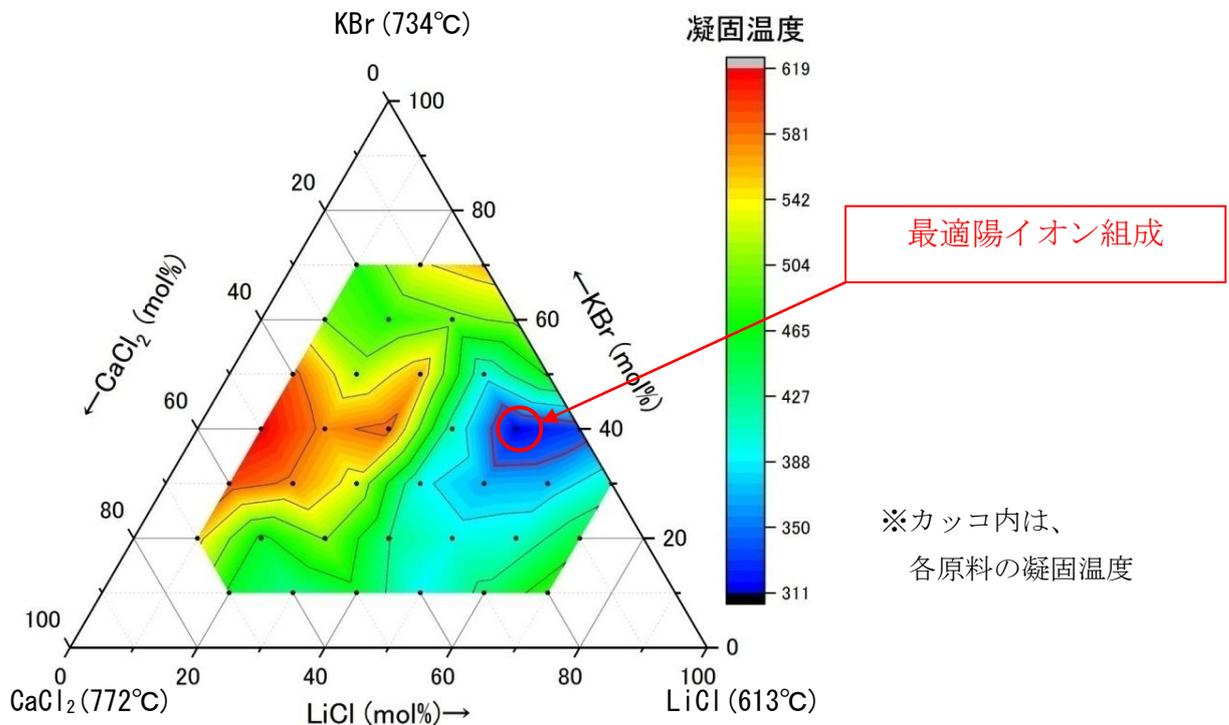


図 2. LiCl-KBr-CaCl<sub>2</sub> 三元系溶融塩の凝固温度

<陰イオンの比率の影響>

次に、上述の最適陽イオン組成に於いて、陰イオンの比率を変えたときの、凝固温度に対する影響を検討した。臭化物イオン ( $\text{Br}^-$ ) の比率の増加と共に凝固温度が低下し、 $\text{Br}/(\text{Br}+\text{Cl})=80\%$ 付近で極小値 (凝固温度= $270^\circ\text{C}$ ) を示した (図3)。

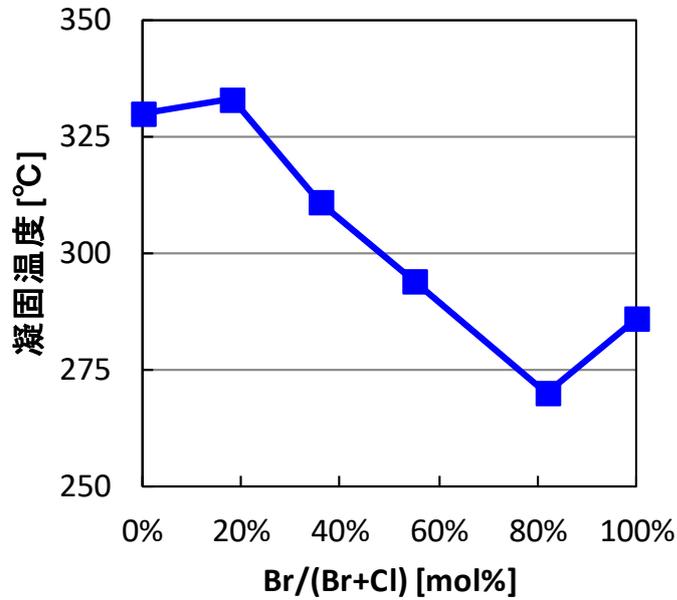


図3. Li系塩化物溶融塩の凝固温度に対する  $\text{Br}/(\text{Br}+\text{Cl})$  比率の影響

### 3-2-2. 腐食評価

一般に熔融塩化物は金属に対する腐食性が非常に高い事が知られており、腐食を抑える事が塩化物を熱媒体として利用する上で非常に重要となる。Li 系塩化物熱媒体について、熔融塩の種類、鋼材の種類、腐食温度、金属 Mg による腐食低減などを検討した。

#### (1)実験方法

磁製るつぼに充填した熱媒粉末に、予め重量を計測した金属試験片（鋼材・合金）を埋設し、大気雰囲気中で所定の温度・時間で熔融し浸漬腐食試験を行った。冷却後に試験片を熱媒から取出し、表面に付着した熱媒やスケールを除去した後に重量を測定し、浸漬試験前後の重量変化から腐食速度を算出した。

#### (2)実験結果

##### <熔融塩、鋼材種類の影響>

熔融塩として 50LiCl-40KCl-10CaCl<sub>2</sub> と 50LiCl-40KBr-10CaCl<sub>2</sub> (何れも mol%) を使用し、各種鋼材に対する腐食速度を計測した（使用した各鋼材・合金の組成を表 2 に示す）。

結果を図 4 に示す。何れの鋼材においても塩化物単体の熔融塩に比べ、塩化物-臭化物複合熔融塩に於いて小さい腐食速度を示した。また、50LiCl-40KBr-10CaCl<sub>2</sub> 熔融塩中の各鋼材の腐食速度は、AH-4~SUS310S > Incoloy800HT > Inconel600 の順であり、Inconel600 については、目標値である腐食速度 0.1mm/年以下を達成した。ただし、表面近傍での粒界腐食が確認されており、応力割れ等の発生が懸念される（図 5）。

表 2. 腐食評価に使用した鋼材・合金

種別	組成 [%]
NSSMC-NAR-AH-4	23Cr-12Ni-1Mn-RE
SUS310S	25Cr-20Ni-2Mn
Incoloy800HT	21Cr-33Ni
Inconel600	16Cr-72Ni

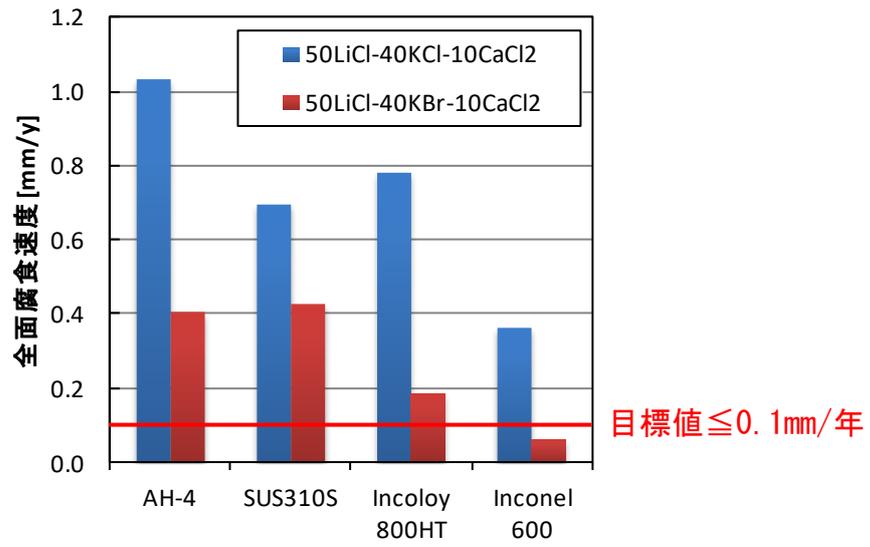


図 4. Li 系塩化物熔融塩中での各種鋼材の腐食速度に対する臭化物の影響  
(腐食条件：大気中-650°C-24h)

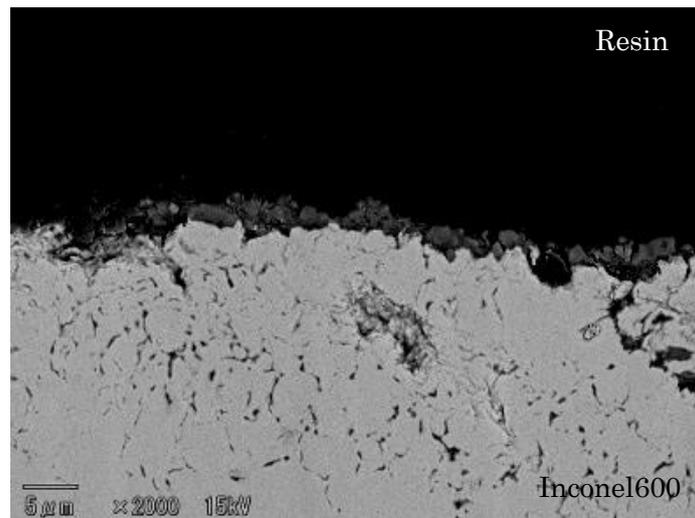


図 5. Li 系塩化物熔融塩中での Inconel600 の腐食試験後の表面近傍の断面写真  
(腐食条件：大気中-650°C-24h)

<腐食温度の影響>

つぎに、50LiCl-40KBr-10CaCl<sub>2</sub> 溶融塩中に於ける、各鋼材の腐食速度に対する浸漬温度の影響を図に示す。腐食速度は高温になるほど大きくなり、何れの鋼材に於いても 400℃ 以下であれば実質的に腐食は発生しない事が判った (図 6)。

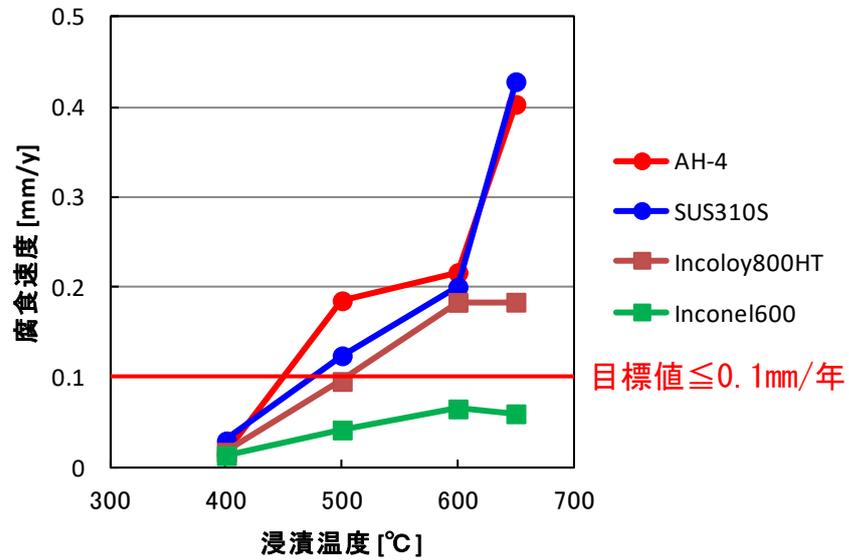


図 6. Li 系塩化物溶融塩中での各種鋼材の腐食速度に対する浸漬温度の影響 (腐食条件：大気中-24h)

### <金属 Mg 添加効果>

MgCl<sub>2</sub>-KCl 熔融塩に対し Mg を添加する事で、Ni 基合金である Haynes 230 の耐食性が大幅に改善する事が報告されている<sup>2)</sup>。本熔融塩に対する Mg の効果を検証する為、金属 Mg を添加して腐食試験を行った。なお、本実験に於いては熔融塩の脱水の為、大気中 200℃ で 12 時間加熱を行ったのち、試験温度である 650℃ に昇温した。

結果を図 7 に示す。金属 Mg の添加により SUS310S 鋼材の腐食速度が大幅に低減し、Mg を 6mol% 以上添加する事で目標値である腐食速度 0.1mm/年以下を達成した。さらに、分析 SEM を用いて腐食試験後の SUS310S 鋼材の表面近傍の断面観察を行った。

Mg を添加しない場合は、SUS310S 鋼材の表面近傍で Cr の溶出が確認されたのに対して (図 8)、Mg を 6mol% 添加した試料については表面近傍での Cr の溶出や粒界腐食等は確認されなかった (図 9)。

塩化物による腐食は熔融塩中の水分等の存在により促進される事が知られている<sup>3)</sup>。金属 Mg の添加により水分を除去する事で、腐食が抑えられたものと推定される。

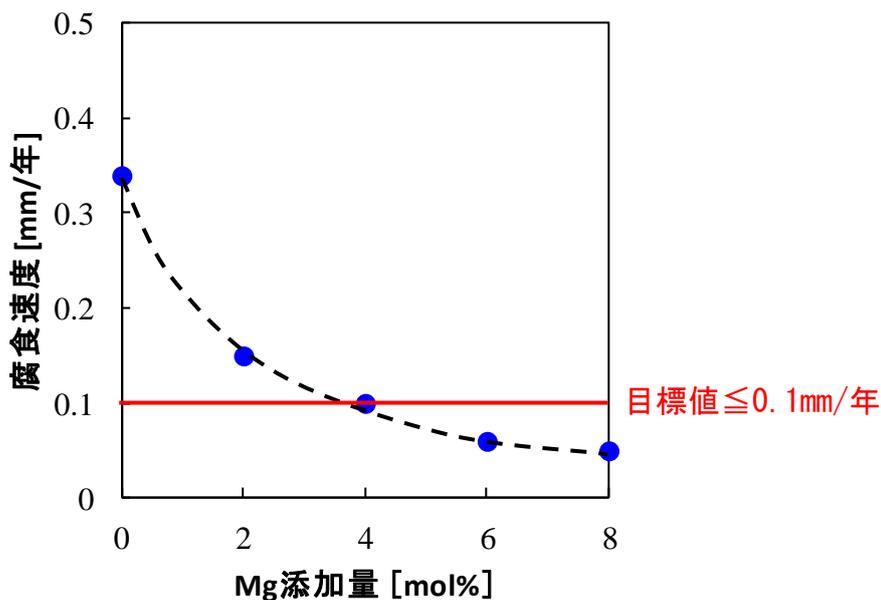


図 7. Li 系塩化物熔融塩中での SUS310S の腐食速度に対する Mg 添加量の影響  
(腐食条件：大気中・200℃・12h⇒650℃・24h)

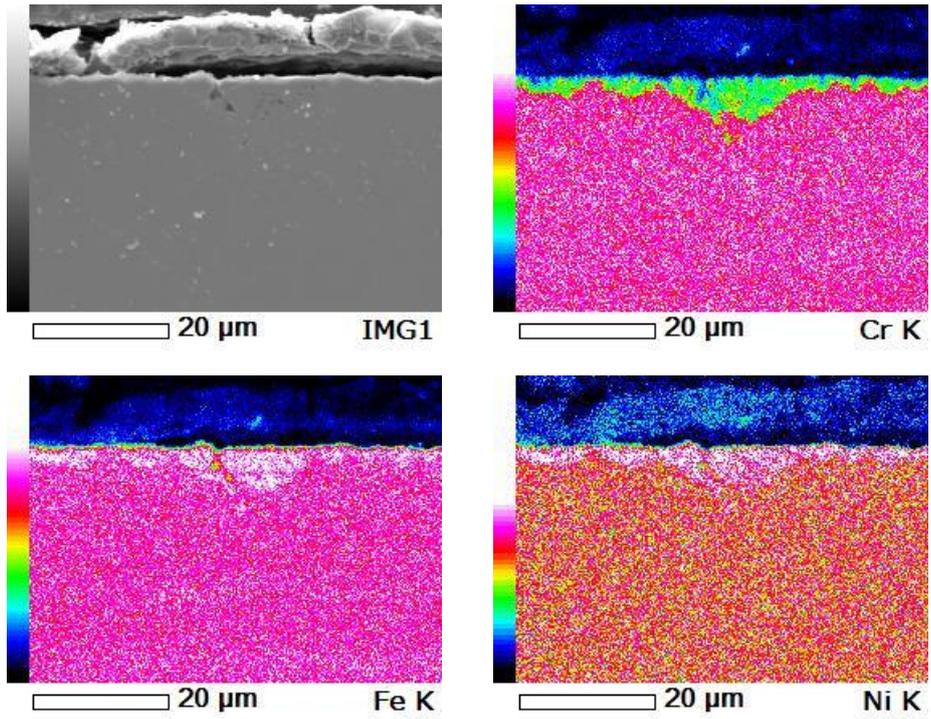


図 8. 腐食試験後の SUS310S 鋼材表面近傍の断面観察 (Mg 添加無し)  
 (腐食条件 : 大気中-200°C-12h⇒650°C-24h)

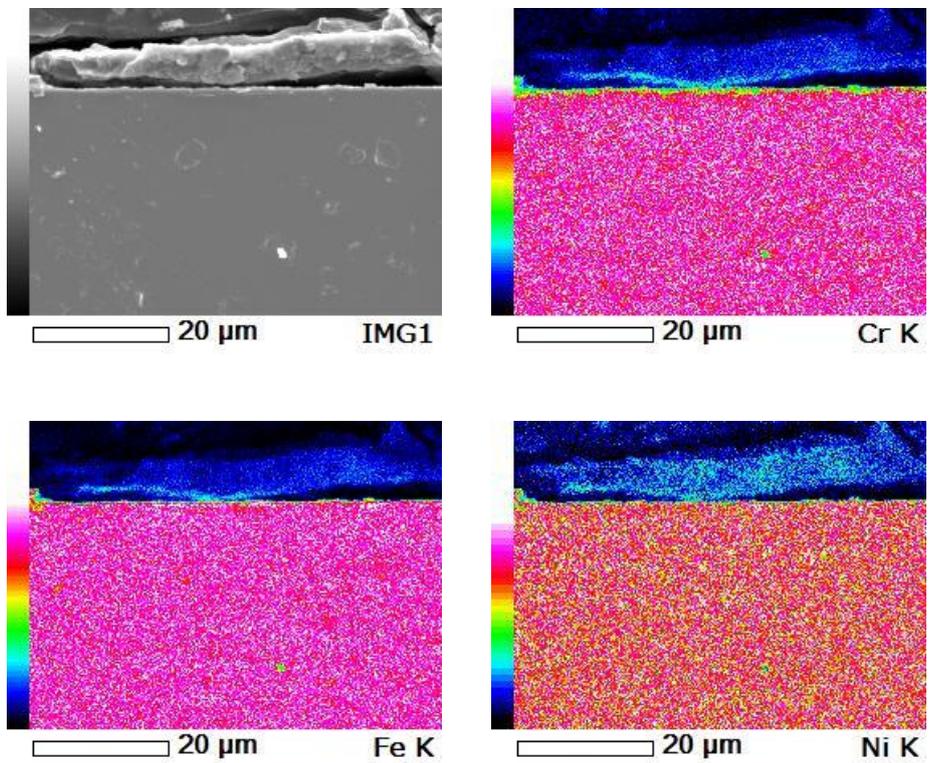


図 9. 腐食試験後の SUS310S 鋼材表面近傍の断面観察 (Mg=6mol%)  
 (腐食条件 : 大気中-200°C-12h⇒650°C-24h)

### 3-3. Na系塩化物熱媒体

上述、Li系塩化物熱媒体は、高価なLiを多量に含有する為、熱媒コストが高くなってしまおうという課題があった。そこで、Liを含まない組成系についても、改めて熱媒の探索を行った。熱媒に使用する候補物質としては、比較的lowコストで入手可能、かつ凝固温度の低減効果が期待できる、NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub>を選択した。

#### 3-3-1. 熱力学データベース

本組成系は4成分の熱媒体となるため、全ての組合せを網羅した組成の最適化には、多大な時間を要する。そこで、熱力学データベース FactSage™ を用いて、事前にある程度組成を絞り込んだ後に、実際にサンプルを作製し凝固温度を計測した。図10に FactSage™ を用いて計算した、NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>三元系状態図および ZnCl<sub>2</sub>を添加した際の凝固温度の変化を示す。

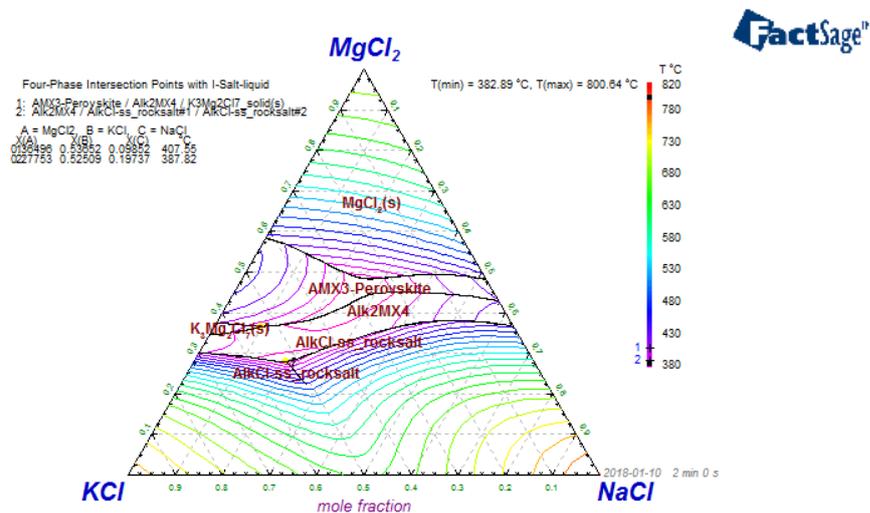


図10. 熱力学データベースによる状態図の計算例

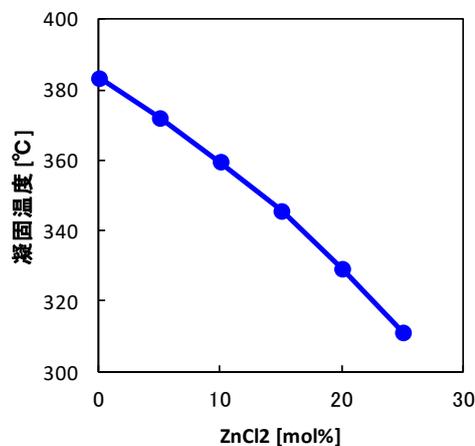


図11. ZnCl<sub>2</sub>添加による凝固温度の変化 (計算値)

### 3-3-2. 最適組成の探索

次に計算結果を基に、凝固温度が低くなると予想された NaCl:KCl:MgCl<sub>2</sub> 比の 8 組成 (A ~H) を選定し、実験により ZnCl<sub>2</sub> 添加量と凝固温度の関係を調査した。結果を図 1 2 に示す。何れの組成に於いても、ZnCl<sub>2</sub> の添加により凝固温度が低下し、特に組成 E については ZnCl<sub>2</sub> 量 25mol% で凝固温度約 300°C、また組成 D については凝固温度 250°C 以下を示した。

今回、E 組成の ZnCl<sub>2</sub>25% 添加品を Na 系塩化物の候補熱媒とした。

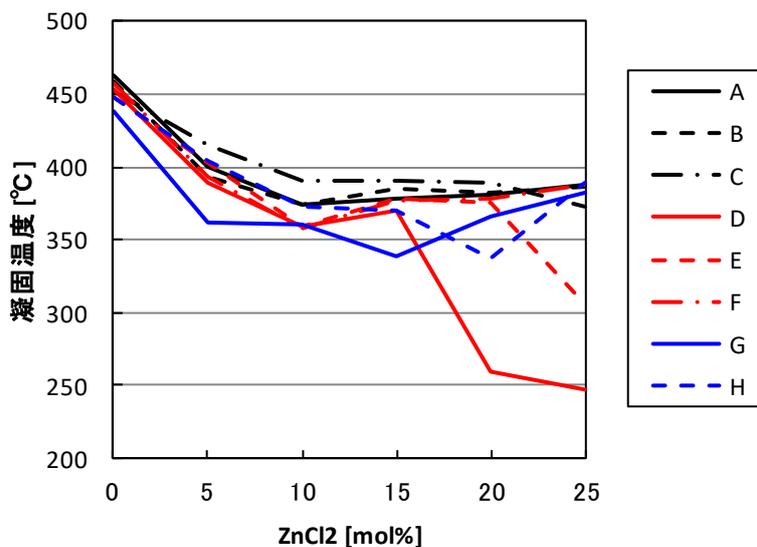


図 1 2. Na 系塩化物熱媒の ZnCl<sub>2</sub> 添加量と凝固温度の関係

### 3-4. 候補熱媒体の物性評価

開発品の物性評価に関しては、SIP 参画の各研究機関と連携して測定を実施した。

#### 3-4-1. 粘性率

開発品を熱媒として利用する上で重要な物性の一つである、熔融時の流動特性を把握する為、回転式粘度計による粘性率の測定を行った。なお、粘性率測定は新潟大学戸田研究室にて実施した。

##### (1)測定方法

- ・使用装置： アントンパール社製レオメーターMCR502（高温ユニット付）
- ・使用治具： 測定カップ：内径 26mm／シリンダー：外径 24mm（全て Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 製）
- ・測定温度： 350～ 600 °C
- ・雰囲気： 窒素フロー
- ・せん断速度：100/s

##### (2)測定結果

図 1 3 に、Li 系塩化物熱媒体について、Br/(Br+Cl)比による粘性率の変化を示す。Br/(Br+Cl)比が高い組成の試料については、温度に対して粘性率が単調に変化する傾向を示した。一方、Br/(Br+Cl)比が低い組成の試料については、低温側で微結晶析出と見られる粘性率の急激な上昇が観測された。粘性率が急激に上昇する温度は、Br/(Br+Cl)比の増加と共に低下し、Br/(Br+Cl)比が 36.4%以上において、SIP 最終年度目標である 350°Cにおける粘性率 100mPa・s 以下を達成する事を確認した。

参考として、図 1 4、1 5 に、各々 400°C と 350°C における、Br/(BrCl)比と粘性率の関係をプロットした。

図 1 6 に、Na 系塩化物熱媒体および Li 系塩化物熱媒体の粘性率を示す。何れの熱媒体においても SIP 最終目標（H30 年度）である、350°C で 100mPa・s 以下および 650°C で 15mPa・s 以下を達成（Na 系塩化物熱媒体の 650°C に関しては外挿値）。

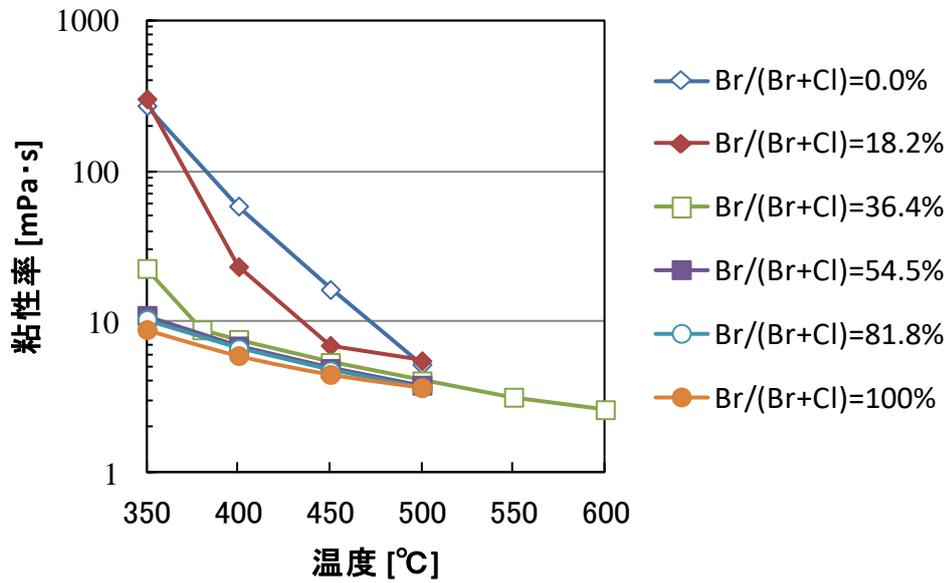


図 1.3. Li 系塩化物熱媒体の Br/(Br+Cl)比と粘性率の関係

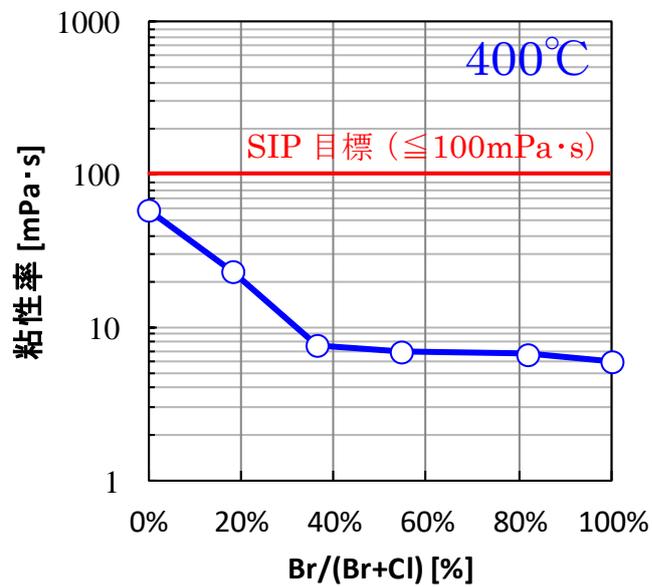


図 1.4. Li 系塩化物熱媒体の Br/(Br+Cl)比と 400°Cにおける粘性率の関係

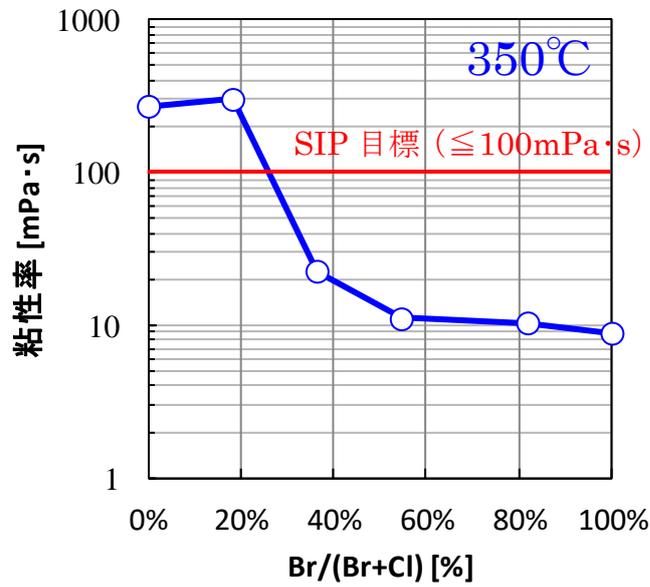


図 1 5 . Li 系塩化物熱媒体の Br/(Br+Cl)比と 350°Cにおける粘性率の関係

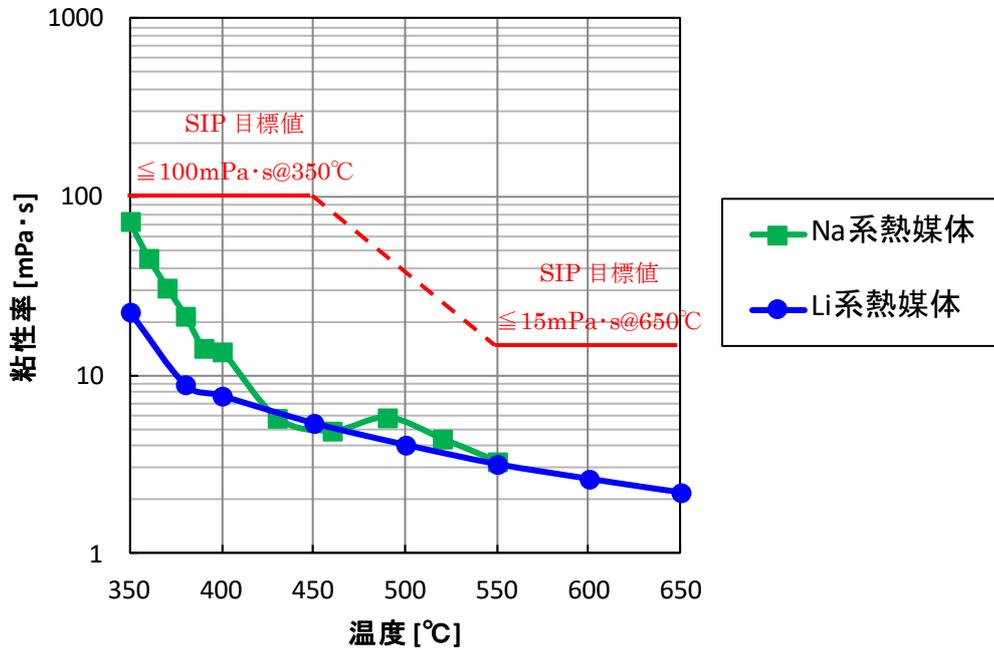


図 1 6 . Na 系塩化物熱媒体および Li 系塩化物熱媒体の粘性率

### 3-4-2. 比熱

熔融塩を蓄熱媒体として利用する際に重要な物性である比熱について、示差走査熱量計による測定を行った。なお、比熱測定は新潟大学戸田研究室にて実施した。

#### (1)測定方法

- ・使用装置： リガク製 DSC 装置 (Thermo plus EVO 2 シリーズ DSC8231)
- ・方法： 比熱を求めようとする温度を挟んで前後 200°C程度の範囲で測定  
前後の一定温度領域は 15 分間保持
- ・昇温速度： 10 °C/min
- ・雰囲気： N<sub>2</sub>フロー, 50 mL/min
- ・比較標準試料： α-アルミナ
- ・使用試料量：20~30 mg 程度
- ・使用パンの材質：ステンレス製密閉容器

#### (2)測定結果

図 1 7 に Na 系塩化物熱媒体および Li 系塩化物熱媒体の比熱を示す。Li 系熱媒体が 0.9 ~1.0 J/(g·K)程度であるのに対して、Na 系塩化物熱媒体は 1.2 J/(g·K)程度と比較的大きな値を示した。

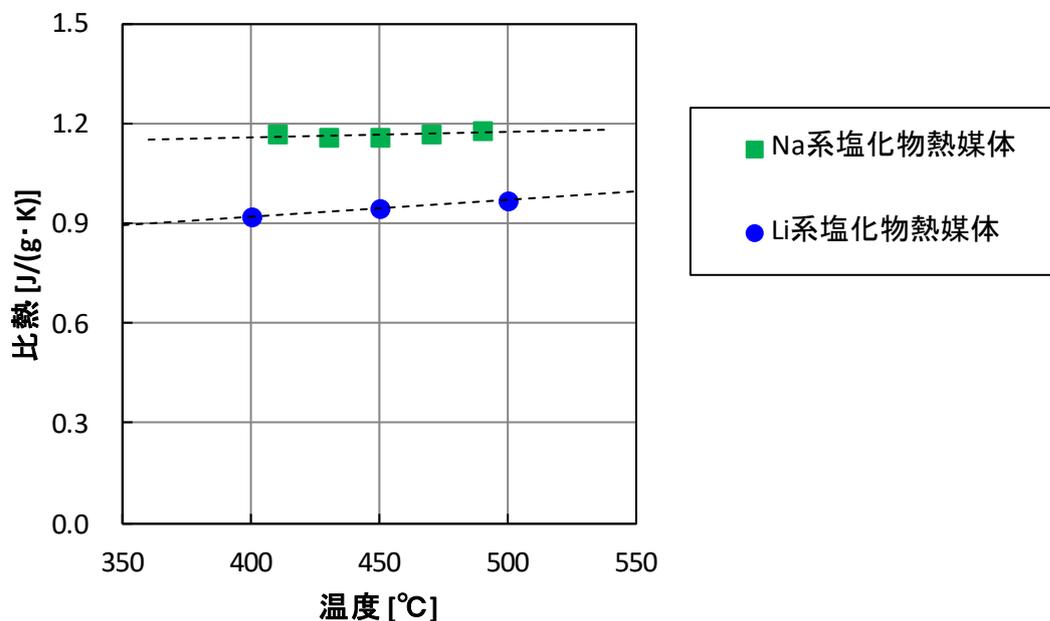


図 1 7. Na 系塩化物熱媒体および Li 系塩化物熱媒体の比熱

### 3-4-3. まとめ

その他の物性も含め、候補熱媒の評価結果を表3にまとめる。

表3. 候補熱媒の物性評価結果

項目	目標値	Li系塩化物	Na系塩化物	測定
粘性率	20mPa・s(H29) 15mPa・s(H30) @650°C	2.2 mPa・s @650°C	3.3 mPa・s @550°C	①
	100mPa・s @400°C(H29) @350°C(H30)	23 mPa・s @350°C	73 mPa・s @350°C	①
耐熱性	650°C	800°Cまで 分解無し	800°Cまで 分解無し	①
静的腐食速度	0.2mm/年(H29) 0.1mm/年(H29)	0.075 mm/年 (SUS316L)	0.196 mm/年 (SUS310S) 0.062 mm/年 (Ni)	①、②
動的腐食速度		0.09 mm/年 (SUS310S)	—	③
比熱	—	0.97 J/(g・K) @500°C	1.18 J/(g・K) @490°C	①
密度	—	1.94 g/cm <sup>3</sup> @650°C 2.10 g/cm <sup>3</sup> @350°C (外挿値)	1.96 g/cm <sup>3</sup> @650°C 2.16 g/cm <sup>3</sup> @350°C (外挿値)	①

(測定実施機関：①新潟大学、②東京工業大学、③京都大学)

### 3-5. まとめ

- ・太陽熱用高温熱媒体として Li 系塩化物熱媒体を開発し、耐熱性、粘性率、腐食の H30 年度目標を前倒しで達成した。
- ・さらに低コスト化が期待できる Na 系塩化物熱媒体を開発し、耐熱性、粘性率、腐食（静的腐食）の H30 年目標を前倒しで達成した。原料価格を基に比較した熱媒コストも、硝酸塩同等以下を達成した。

### 3-6. 今後の課題

- ・熱媒ループ設置によるエンジニアリングデータ取得、計装類等の開発。
- ・Na 系塩化物熱媒体の腐食対策。

## 4. 外部発表実績

(1) 論文発表 なし

(2) 学会、展示会等発表 なし

(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

	出願番号	発明の名称	出願年月日	出願人
1	特願 2014-148306	ガラス組成物及び熱媒体	2014.7.18	京都大学、綜研テクニックス、東ソー
2	特願 2017-016768	組成物、製造方法およびその用途	2017.2.1	東ソー
3	特願 2018-037070	組成物、製造方法およびその用途	2018.3.2	東ソー

## 6. 参考文献

- 1) 地殻中の元素の存在度 : <https://ja.wikipedia.org/>
- 2) B.L.G-Diaz, L.Olson, M.M-Rodriguez, R.Fuentes, H.C-Mercado and J.Gray, High Temperature Electrochemical Engineering and Clean Energy Systems, Journal of the South Carolina Academy of Science, 14(1), (2016) p11-14
- 3) 伊藤靖彦 編著「熔融塩の科学」(2005)P364 ほか