

「熔融塩」の産業利用拡大

—再評価される機能性と新機軸の用途開発—



MITSUI & CO.
GLOBAL STRATEGIC
STUDIES INSTITUTE

三井物産戦略研究所
フォーサイトセンター
阿部 裕

Summary

- 熔融塩は、19世紀の工業化が進展する中で、アルミニウムやリチウム、レアアースなどの金属精錬で使われてきた化学媒体である。21世紀に入り常温熔融塩が創製され、新しい利用分野が開拓されている。
- 熔融塩は、特別な設備や技術を必要とせず扱いやすい化学媒体で、さまざまな物質を溶解することが可能。しかも希ガス以外の元素を電気分解できることから廃棄物処理の新機軸の手法として注目される。
- 欧米や日本など各国政府が推進する脱炭素政策に伴う産業転換が進む中、熔融塩の高い機能性が再認識され、アップサイクルや製鉄、高レベル放射性廃棄物処理などに適用する企業が誕生しており、熔融塩の産業利用を深化させる事業を展開しつつある。

1. 古くて新しい熔融塩

熔融塩（Molten Salt）は古くから産業利用されてきた化学媒体である。1886年に発明されたアルミニウムの電解精錬法では、熔融塩が電解時の溶媒として利用されてきた。より大規模に利用されるようになったのは第二次世界大戦以降である。軽量の航空機材料としてのアルミニウムの大量生産を筆頭に軍需向けの金属生産で多用された他、戦後の経済復興に伴い熔融塩の大規模利用に拍車がかかり、アルミニウムの他、マグネシウム、マンガン、リチウム、レアアースの電解精錬やフッ素ガス製造など化学・鉱業分野を中心に利用されてきた。この熔融塩は、多用途性と高機能性が再認識され、新しい産業利用の模索が行われている。

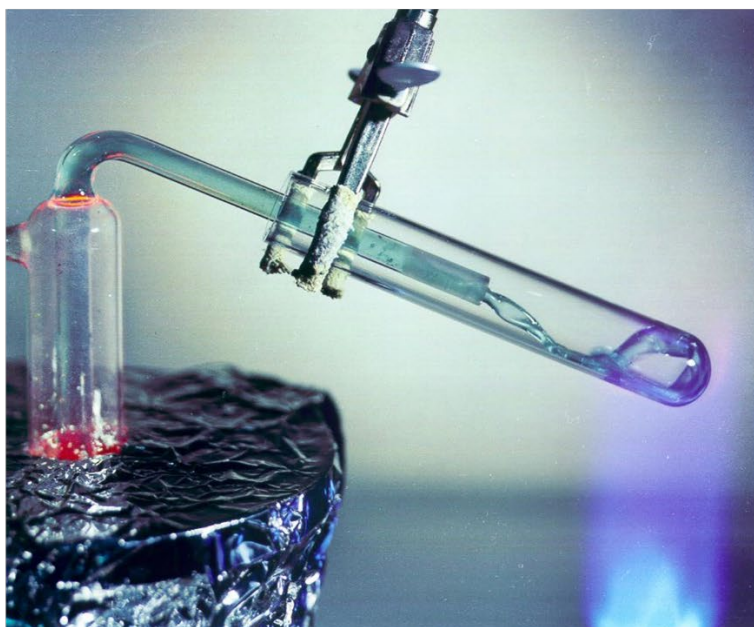
本稿では、熔融塩の概要と新機軸となる熔融塩の活用事例を示す。

1-1. 「熔融塩」とは？

熔融塩は、文字通り「塩（エン）」が溶けた液体である。身近にある「塩」と言えば食塩（塩化ナトリウム）がある。化学の世界における「塩」は、プラス（+）の電気（正電荷）を帯びた「陽イオン」と、マイナス（-）の電気（負電荷）を帯びた「陰イオン」から構成される物質を意味する。食塩の場合は、ナトリウムイオン（+）と塩化イオン（-）が結合して固体となっている。この、常温では固体となっている食塩を融点である801℃以上に熱すると、溶けて透明な液体となる（図表1）。これが「熔融塩」

である。溶融塩には、食塩の他、炭酸塩、硝酸塩などがある。

図表1 溶融塩の主な利用と特性



(1)利用

- ・金属精錬(アルミニウム、レアアースなど)
- ・太陽光熱発電の蓄熱材
- ・溶融塩電池
- ・原子炉の1次冷却材

(2)特性

- ・化学安定度が高い
- ・溶解度が高い
- ・熱伝導性とイオン伝導性が高い
- ・放射線に強い
- ・コスト優位性

(出所)Wikipedia「溶融塩」 <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BA%B6%E8%9E%8D%E5%A1%A9>

1-2. 溶融塩の特徴と注目されるポイント

溶融塩の特徴としては、

- ①化学的安定性が高く常圧（1気圧）で取り扱える化学媒体である。
- ②高温でも液体として安定で、さまざまな物質を溶かし込むことができる（溶解度が高い）。
- ③高い熱伝導性とイオン伝導性を持つ。
- ④高レベルの放射線に対しても耐性が高く変化することがない。
- ⑤特殊な設備や技能が不要で、コスト優位性を発揮しやすい。

このような溶融塩が、2020年代に入って再注目されている。最大のポイントは、希ガス（ヘリウム、アルゴンなど）以外のあらゆる元素を電気分解（電解）できるという稀有な特性にある。大量生産された金属製品やプラスチックなど化学製品の再生・再利用を行うには、既存の物理処理（破壊・分解）や化学処理と共に、溶融塩と電解を組み合わせた「溶解・電解処理」が、条件によっては理想的であるとの認識が広がっている。この溶融塩に着目した開発企業が日本や欧米で登場しており、新たな産業利用と社会実装を目指して事業活動を展開している。

2. 新しい溶融塩の産業利用

本節では、溶融塩の新しい産業利用を示す事例として、①アップサイクル技術、②製鉄技術、③高レベル放射性廃棄物処理技術を取り上げて説明を行う。

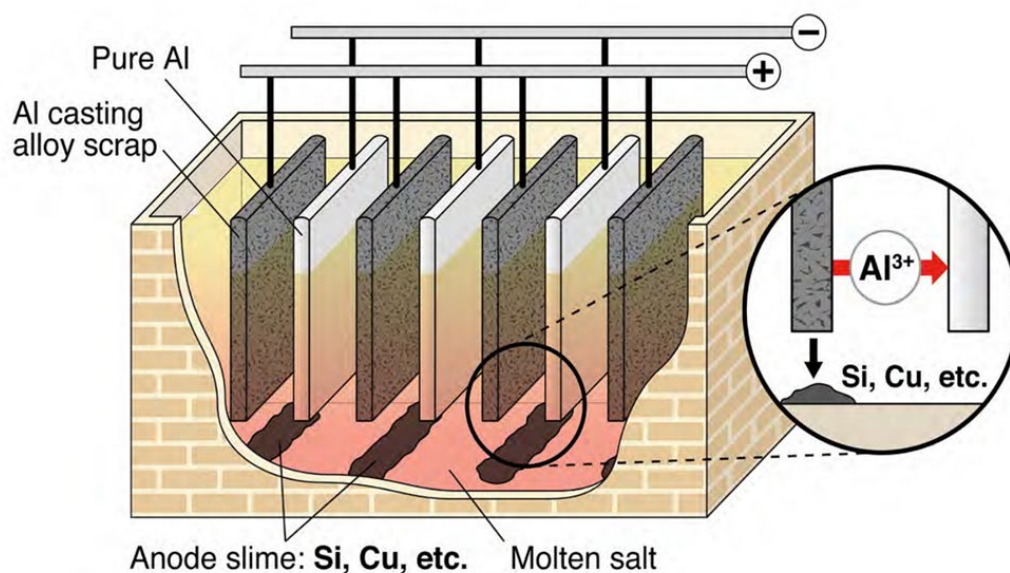
2-1. アップサイクル技術（固体アルミニウム電解法）

最初の事例はアップサイクル技術である。アップサイクル技術とは、廃棄物に一手間かけてリサイクルすることにより、元の製品よりも価値を向上させる再生技術である。アルミニウムのリサイクルでは、アルミスクラップを熔解しアルミニウム合金に再生するものの、どうしてもアルミニウム以外の元素（鉄、銅、シリコンなど）が混じることを防げないため、ダウンサイクルとなっている。リサイクル業界としては、資源循環改善の観点から再生アルミニウムの純度を高めるアップサイクル技術の開発を、産学官連携で行っている。¹

この技術課題に挑戦しているのが東北大学の研究チームである。まだ基礎的研究の段階ではあるが、アルミスクラップを純度99.9%のアルミニウムにアップサイクルすることが可能な「固体アルミニウム電解法」を開発した。²

「固体アルミニウム電解法」は、一度熔解させてから再生するという固定観念を捨てて、回収したアルミスクラップをそのまま陽極（プラス）の電極として熔融塩に漬けて電解する方法を採用している。この方法では、アルミスクラップの陽極（プラス）から、アルミニウム元素だけが分離し、陰極（マイナス）の電極に移動し集積することから、余計な手間をかけずに純粋なアルミニウム元素だけを回収できる仕組みである。アルミスクラップに含まれているアルミニウム以外の元素（シリコン、銅など）は、アルミスクラップ内に残留するか、もしくは陽極の直下に堆積することが実験で確認されている（図表2）。

図表2 固体アルミニウム電解法



(出所)Nature 606, 511–512 (13 April 2022)

¹ 「我が国のアルミニウム産業の現状と課題について」日本アルミニウム協会サーキュラーエコノミー委員会（2025年3月7日）環境省中環審 廃棄物処理制度小委員会資料 <https://www.env.go.jp/council/content/03recycle06/000297020.pdf>

² 東北大学 工学研究科・工学部「アルミニウムのサステナブルリサイクル新技術開発」（2022年4月26日）
<https://www.eng.tohoku.ac.jp/news/detail-, -id, 2180.html>

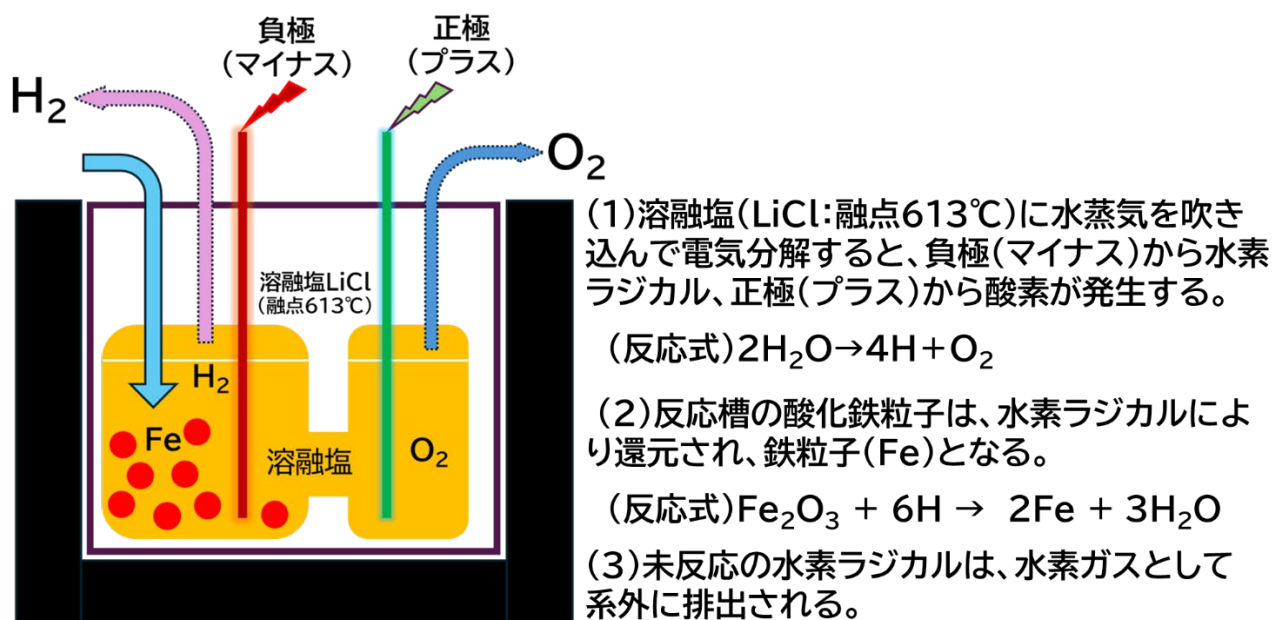
この「**固体アルミニウム電解法**」は、溶融塩を利用したシンプル手法による**アップサイクル技術**として注目を集めている。

2-2. 製鉄技術（溶融塩水電解技術）

次に、溶融塩を製鉄分野へ適用する事例をあげる。欧州や日本では、水素を用いて酸化鉄を分離する技術研究・実証が行われている。この技術には、①水素をあらかじめ生成させて高炉に直接吹き込む「**水素直接還元法**」³と、②酸化鉄を熔解させた「**溶融塩**」に水蒸気（H₂O）を吹き込んで電気分解する「**溶融塩水電解水素還元法**」の2種類がある。本稿では「**溶融塩水電解水素還元法**」を取り上げて概要説明を行う。

「**溶融塩水電解水素還元法**」は、京都大学の伊藤靖彦名誉教授により開発された技術である。この技術の特徴は「溶融塩の中で水を電気分解する」点にある。溶融塩の中で水を電気分解（水電解）すると強い還元力を持つH₂（ラジカル水素）が発生し、溶融塩炉内にある酸化鉄と強力に反応して、酸素を分離することで鉄を取り出すことが可能となる（図表3）。

図表3 溶融塩水電解水素還元法



(出所)株式会社モルテン・ソルト・スチール <https://www.moltensaltsteel.com/technology/>

「**溶融塩水電解水素還元法**」の鉄還元効率（酸化鉄から酸素を取り除く効率）は85%であり、前述の水素直接還元法の還元効率が約12%程度であることを考えると、その技術優位性は高いと言える。

現在、日本のモルテン・ソルト・スチール社が、同アイ・エムセップ社との協業により製鉄プロセスへの適用を目指した事業活動を展開している。

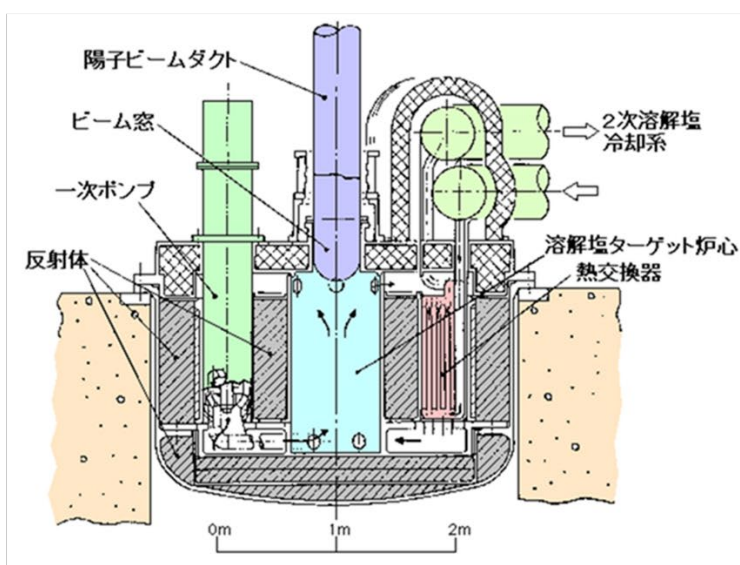
³ 水素直接還元法は独アルセロール・ミッタル社がハンブルクに実証プラントを稼働させている。
<https://corporate.arcelormittal.com/media/cases-studies/hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg>

2-3. 溶融塩炉と高レベル放射性廃棄物処理

最後の事例は、高レベル放射性廃棄物処理への適用である。高レベル放射性廃棄物の中には、長寿命核種と呼ばれる半減期が1万年以上という超ウラン元素⁴が含まれている。将来世代への大きな負の遺産を少しでも軽減するため、①危険な廃棄物の量を減らす減容化、②長寿命核種の有害度低減を行える技術が求められている。このような長寿命核種を短寿命核種に転換する技術を「分離変換技術」と呼び、世界中で研究開発が行われている。

この「分離変換技術」の中でも有望とされているのが溶融塩炉を用いた長寿命核種の短寿命化である。溶融塩炉は、核燃料を液体状にして炉内で核分裂させ発電する原子炉で、現在、商用化に向けて開発が進められている。溶融塩炉の利点は、常圧で利用できる溶融塩と液体核燃料を用いているため、原子炉の運転中に燃料の追加や入れ替えができることである（前述の軽水炉は加圧しており運転中の燃料交換はできない）。この特性を生かして、溶融塩炉を発電用ではなく、高レベル放射性廃棄物を専門的に処理するために用いる「溶融塩核変換処理システム」が研究されている（図表4）。

図表4 溶融塩核変換処理システム



(出所)日本原子力研究所 https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig_pict_07-02-01-03-06.html

溶融塩炉による長寿命核種の変換処理を行うには、溶融塩炉内を、溶融塩のみにした上で、高レベル放射性廃棄物を溶かし込み、炉内で溶融塩と共に流動させながら、核反応をひき起こさない「陽子」⁵を照射する。「陽子」は、超ウラン元素など大きな原子を、小さな原子に破壊することができるので超ウラン元

⁴ 超ウラン元素は、自然界に存在する最大元素であるウラン（U：原子番号92）よりも、大きな人工元素で、ネプツニウム（Np：原子番号93）、アメリシウム（Am：原子番号95）、キュリウム（Cm：原子番号96）などがある。

⁵ 高レベル放射性廃棄物には、核分裂する核種も存在するため、核分裂を誘発する「中性子」ではなく「陽子」を利用する。

素の分離変換が可能とされている。「トイレのないマンション」と揶揄される日本の原子力産業にとって、溶融塩炉による核廃棄物処理は選択肢の一つであろう。

3. 溶融塩利用の課題と将来性

溶融塩の新たな産業利用が模索されている中、最大の課題は技術者不足である。溶融塩技術の骨幹ともいえるアルミニウム電解精錬は1970年代以降、急速に衰退し、溶融塩を取り扱える産業人材は希少である。経済安全保障の観点からもレアメタル・レアアースの再資源化の重要性が高まる中、溶融塩技術者の存在が、非鉄金属の製造とリサイクルに影響を与えるため、早急な対策が必要である。溶融塩の開発企業は少ないながら存在し（図表5）、次世代につなぐ産業人材の育成が重要性を増している。

図表5 溶融塩関連企業

企業名(所在地)	技術概要
アイ'エムセップ株式会社 (京都府京田辺市)	日本で唯一の溶融塩電気化学プロセスの知見に基づいた技術開発を行う。「溶融塩水電解水素還元法」など。
株式会社モルテン・ソルト・スチール (東京都港区)	「溶融塩水電解水素還元法」による新機軸の製鉄プロセスの産業化を目指す。アイ'エムセップとの協業。
株式会社アイ・エレクトロライト (大阪府吹田市)	発火・膨張しない蓄電池「イオン液体(常温溶融塩)電池」を世界に先駆け実用化した関西大学発ベンチャー。
Boston Metal (米国ボストン)	溶融酸化物電解法(Molten Oxide Electrolysis)によるグリーン鉄鋼の生産を試行。
Ambri (米国ボストン)	溶融塩蓄電池の一種である液体金属電池(塩化カルシウム塩電解質、アンチモン電極)の開発・製造。
Core Power Ltd. (英国ロンドン)	海洋原子力・浮体式溶融塩炉の開発・製造・運用。日本の造船会社、商社などが出資。

(出所)各種資料から三井物産戦略研究所作成

溶融塩の産業利用は確実に進展している。中国では、原子燃料の一つであるトリウム⁶を核燃料とする溶融塩炉の開発が進展し、原子炉を運転中に核燃料を追加することに成功している。さまざまな物質を溶解して再利用する溶融塩の本領発揮の良い事例である。このように溶融塩は、アルミニウム精錬を端緒として伝統的な産業として革新を続けてきた歴史を踏まえて、今や産業転換を促進する用途開発の最前線に位置している。古い技術だと思われる溶融塩技術が再評価され、その機能性を最大限に活用することにより、日本が世界に先駆けて、国内資源を完全に循環させた持続可能な産業社会を実現することに期待したい。

⁶ トリウム (Th:原子番号90) は、レアアース精錬の際に残渣として廃棄されているが、中国やインドは、核燃料として再生利用を目指している。

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できるとされる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社および三井物産グループの統一的な見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社および三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。