

令和4年4月26日

報道機関 各位

東北大学大学院工学研究科

アルミニウムのサステナブルリサイクル新技術開発 ～アルミニウムクライシスの克服を目指して～

【発表のポイント】

- ・ 自動車のEVシフトによる脱エンジン化の加速に伴って懸念されているアルミニウム循環構造の破綻の解決法となる新技術
- ・ 不純物元素が混在するアルミニウムスクラップから高純度アルミニウムに再生でき、多様なアルミニウム需要へ対応できる世界オンリーワンの技術を開発
- ・ 従来の「再生＝熔融」という発想を逆転させた固体処理により高純度再生が可能で、かつ簡便・省エネルギー的な技術

【概要】

アルミニウムはよくリサイクルされている金属素材であると一般的に認識されていますが、それは量的な観点の話です。基本的にはリサイクルするたびに品質が下がるため、ダウングレードリサイクルとなります。リサイクルアルミニウムの最終用途は、現在は自動車用エンジンブロック casting 品がほとんどですが、EVシフトが加速するとエンジンの需要は激減し、アルミニウムの循環構造が破綻することが懸念されています。このままでは将来的に、使えないアルミニウム(デッドメタル)が大量に発生することになります。この「アルミニウムクライシス」は先進国共通の課題ですが、精製技術があればこれを回避することができます。

この度、東北大学大学院工学研究科のグループは、不純物元素を大量に含むアルミニウムスクラップを純アルミニウムに再生できる技術を開発しました。しかも、その際にかかるエネルギーがアルミニウム新地金を製造時の半分以下という世界オンリーワンの技術です。この成果は2022年4月14日(日本時間)に英国科学誌Natureに掲載されました。

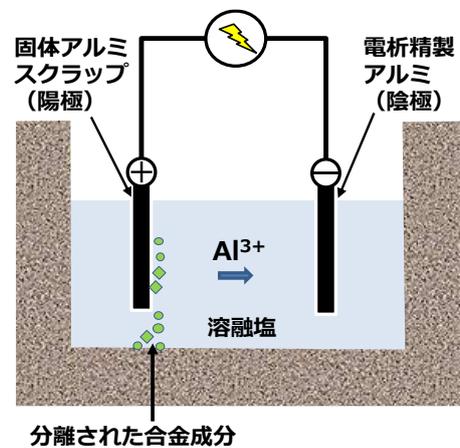


図. 新技術の概念図

【開発の背景】

アルミニウム(AI)は軽く、加工性がよいことから、社会の発展に不可欠な材料として、自動車部品や航空機部品などに多く用いられています。しかし、鉱石からの AI 金属の製錬プロセスは、大量のエネルギーを消費し、環境負荷も高いです。例えば、1 kg のステンレス鋼を製造するには 56 MJ エネルギーを消費しますが、1 kg の AI を製造する場合 162 MJ のエネルギーを消費します。膨大な電力を消費することから、AI は通称「電気の缶詰」と呼ばれています。現在、日本国内では AI の新地金は製造されておらず、新地金はすべて海外から輸入しています。

持続的かつ低エネルギー消費、低環境負荷の AI の供給は世界的にも重要視されており、AI のリサイクルが世界規模で行われています。需給予測によると、今後、廃棄 AI 製品の発生量の増加に伴い、急激にスクラップ由来の AI の供給割合が増加することが見込まれています。しかし、現在の AI のリサイクルは、不純物の除去が避けられず質の劣化を伴うダウングレードリサイクルです。我々が日常的に使用している AI 製品が、純 AI ではなく、シリコン(Si)や銅(Cu)等の合金化元素を含む AI 合金であるからです。AI は活性金属であるため、現在の再溶融プロセスによるリサイクルでは、合金化元素の除去は困難で、リサイクルに伴って合金化元素の混入・蓄積が生じます。そのため、再生 AI の最終用途は、大量の合金化元素含有が許される自動車用エンジンブロック等の casting 製品などに限られています。しかし、電気自動車の急激な普及により、エンジンブロックの需要の大幅な減少が予測されており、ダウングレードリサイクルされた再生 AI の最終用途は失われると懸念されています。そこで、東北大学大学院工学研究科の朱鴻民教授と長坂徹也教授らの研究グループは、AI スクラップから合金化元素を除去する新たなリサイクルプロセスの開発に取り組みました。

【本技術の特長】

不純物を含むスクラップから純 AI を精製する上では、AI は熔融状態で処理することが常識、と今まで考えられてきました。もし、AI イオンのみを通す隔膜(固体電解質)があればスクラップの電解精製が可能です。しかし残念ながら工業的に使える適当な固体電解質は未だ開発されていません。

現行精錬技術の一つに三層電解法があります。これは、AI に銅を添加して密度を大きくし、その上層に AI より重いフッ化バリウム系の熔融塩を配置し、さらにその上に精製 AI が移行する三層サンドイッチ構造を作って AI を精製しています。ここでは全ての層が熔融状態になっています。この方法は 99.5% 程度のアルミ新地金を更に精製するための方法で、スクラップを処理した場合には電解分離したシリコン等の軽い合金化元素が熔融塩中を浮上して再び精製 AI に混じってしまうことが避けられません。

そこで研究グループが考えたのは、熔融塩中で AI スクラップを固体のまま電解すれば、基本的に AI のみが陽極から陰極へ移行し、精製 AI が得られるということです。スクラップ中の合金化元素は陽極に抜け殻のように残留するか、陽極直下に堆積するので、回収して金属資源として再利用できます。銅、鉛、亜鉛等の粗金属から高純度金属が水溶液中での電解によって得られる技術があり、本技術はそこに着想を得ました。

実証実験として、Si を 11 質量%、Cu を 2 質量%、鉄(Fe)を 0.8 質量%含有する Al 合金を固体のまま陽極として電解したところ、陰極において純度 99.9%の Al を 96%の収率で回収することに成功しました。シリコンは陽極の抜け殻の中に残り、Al と効率よく分離できることが分かりました。現行の電解製錬法(ホール=エルー法)を経た新地金の製造にかかるエネルギー消費が約 $162 \text{ MJ} \cdot (\text{kg-Al})^{-1}$ であるのに対して、新技術による Al 再生にかかるエネルギー消費は $58 \sim 80 \text{ MJ} \cdot (\text{kg-Al})^{-1}$ と、半分以下であることが見込まれています。

【今後の展望】

当該グループで開発された固体 Al 電解法は、Al 新地金の製造時の半分以下のエネルギー消費で Cu、Si 等の合金化元素を大量に含む Al スクラップを純 Al に再生できる世界オンリーワンの技術です。この技術は、Al の循環構造の破綻の回避に貢献できると考えています。なお、全ての Al スクラップをこの方法で精製する必要はなく、Al の再生時における質の低下を防ぎ、展伸材に再利用出来る最低限の量を確保するのが経済的観点および省エネルギーの観点から合理的です。

今後は、本学大学院環境科学研究科の研究グループ、株式会社豊栄商会と協力しながら、実用化研究を進め、素材としての Al 循環構造の再構築を目指します。

【論文情報】

タイトル: A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap

著者: Xin Lu, Zhengyang Zhang, Takehito Hiraki, Osamu Takeda, Hongmin Zhu, Kazuyo Matsubae, and Tetsuya Nagasaka

掲載誌: Nature

DOI: 10.1038/s41586-022-04748-4

URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04748-4>

【謝辞】

本開発研究の遂行に当たっては、独立行政法人日本学術振興会(JSPS)および国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成を受けていることを付記して深甚なる謝意を表します。

【問い合わせ先】

〈 研究に関して 〉

東北大学大学院工学研究科 助教 盧 鑫, 准教授 竹田 修
電話 022-795-7311, 7310 Email takeda@material.tohoku.ac.jp

〈 報道に関して 〉

東北大学工学研究科情報広報室 担当 沼澤 みどり
電話 022-795-5898 Email eng-pr@grp.tohoku.ac.jp

アルミニウムのサステナブルリサイクル新技術開発 ～アルミニウムクライシスの克服を目指して～

英科学雑誌 Nature オンライン掲載、2022年4月14日(日本時間)
<https://www.nature.com/articles/s41586-022-04748-4>

nature

[Explore content](#) [About the journal](#) [Publish with us](#)

[nature](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | [Published: 13 April 2022](#)

A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap

[Xin Lu](#), [Zhengyang Zhang](#), [Takehito Hiraki](#), [Osamu Takeda](#), [Hongmin Zhu](#) [✉](#), [Kazuyo Matsubae](#) & [Tetsuya Nagasaka](#) [✉](#)

[Nature](#) (2022) | [Cite this article](#)

3752 Accesses | 6 Altmetric | [Metrics](#)

発表者

東北大学大学院工学研究科

盧 鑫

助教

平木岳人

特任准教授

竹田 修

准教授

朱 鴻民

教授

長坂徹也

副学長・教授

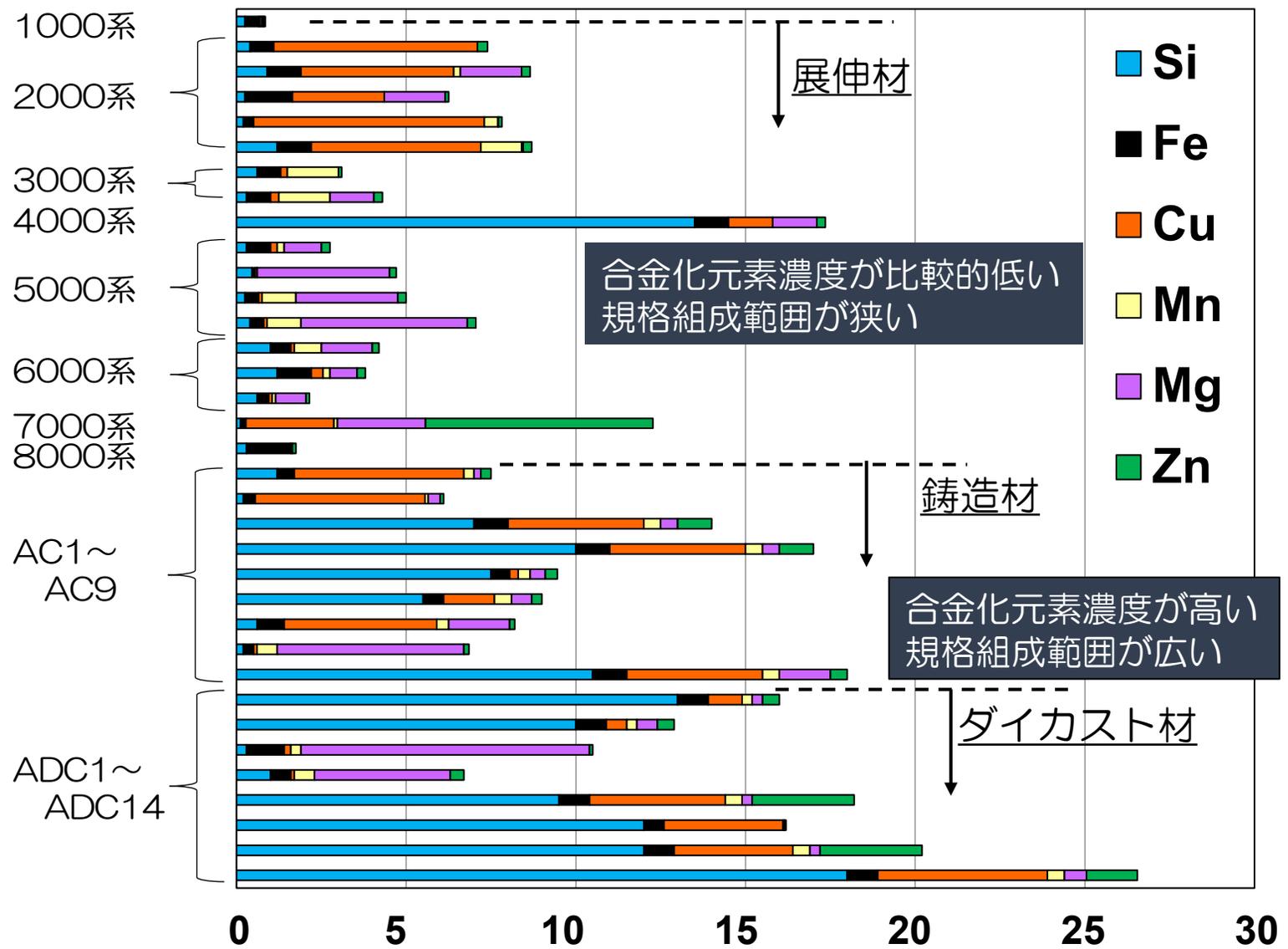


アルミニウムは良くリサイクルされている金属素材であると認識されているが、それは量的な観点であり、質的にはダウングレードリサイクルである。現状で再生アルミニウムの最終用途は、自動車用エンジンブロック等の鋳造・ダイカスト製品がほとんどであるが、電気自動車（EV）シフトが加速するとエンジンの需要が激減し、アルミニウムの循環構造が破綻することが懸念されている。このままでは、やがて使えないアルミニウム（デッドメタル）が大量に発生することになる。この「アルミニウムクライシス」は先進国共通の課題である。しかし精製技術があれば、このアルミニウムクライシスを回避できる。

東北大学工学研究科のグループが開発した固体アルミニウム溶融塩電解技術（**Solid-state electrolysis, SSE**）は、アルミニウム新地金の製造時の**半分以下**のエネルギー消費でCu、Si等の合金化元素を大量に含むアルミニウムスクラップを**純アルミニウムに再生**できる世界オンリーワンの技術である。

汎用アルミニウム合金の組成

JIS規格



合金化元素濃度が比較的低い
規格組成範囲が狭い

合金化元素濃度が高い
規格組成範囲が広い

各アルミニウム製品中の合金化元素濃度 (質量%)



現状のアルミニウムリサイクル概観

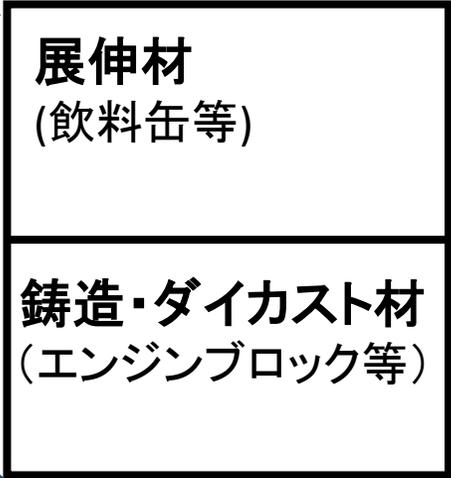
新地金



合金化元素

アルミニウム合金

社会ストック



- 自動車
- 鉄道車両
- 飛行機
- 建築
- ...

再生アルミニウム



合金化元素

アルミニウムスクラップ

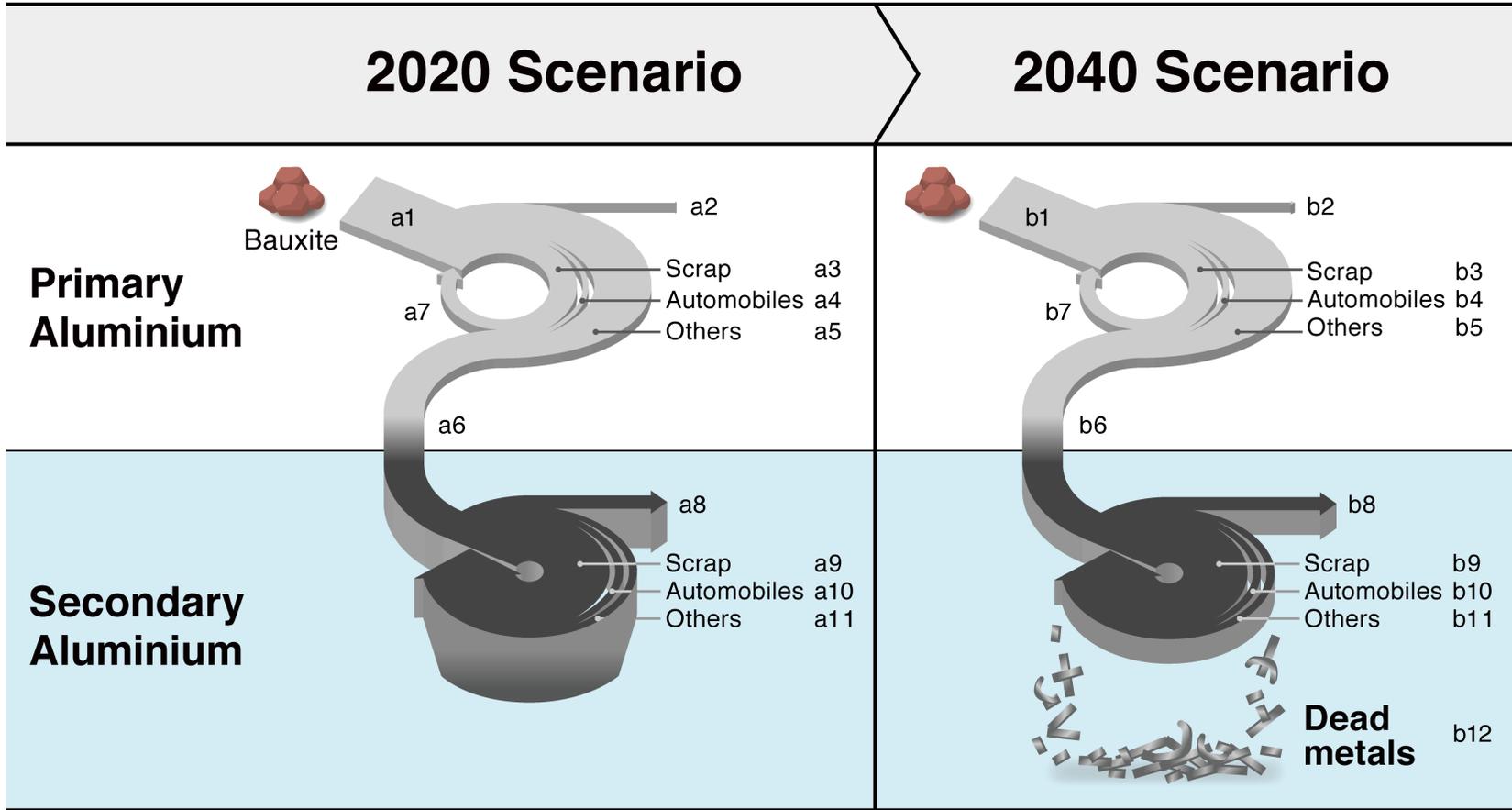
再溶解



ダウングレード
リサイクル

合金化元素の分離はできず、再生アルミニウムに濃縮する。

世界のアルミニウム需給フォアキャスト



本研究計算結果：

**2040年 360万トン
デッドメタル（使えないアルミニウム）
が発生する**

Xin Lu, et al. Nature, 2022,
<https://www.nature.com/articles/s41586-022-04748-4>

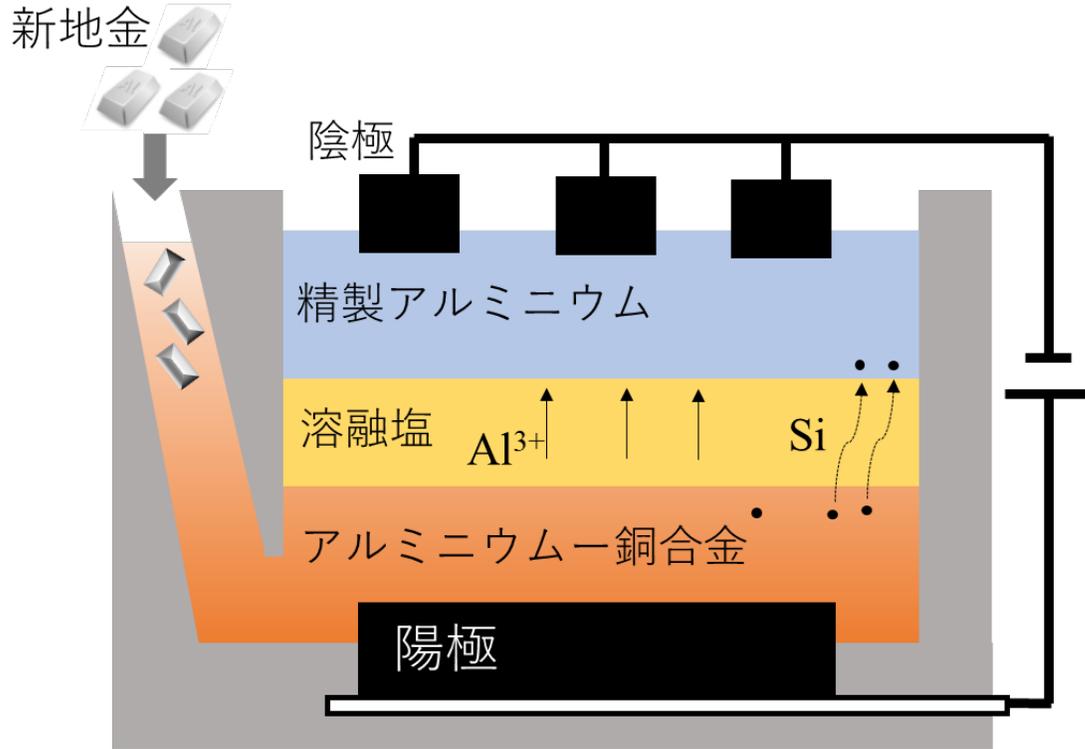
アルミニウム需給現状及びフォアキャスト

電気自動車の発展に伴って、再生アルミニウムの需要は減少する。⇒⇒⇒

従来のダウングレードリサイクルが破綻し、「**アルミニウムクライシス**」が発生する恐れがある。

不純物を分離するアルミニウムスクラップ精製技術が必要

従来のアルミニウム精製技術



密度:

アルミニウム-銅合金 ($3.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

> 熔融塩 ($BaF_2\text{-NaF-AlF}_3$) ($2.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

> 精製アルミニウム ($2.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

原料: Al新地金 (99.5~99.7%)

製品: 精製アルミニウム (>99.99%)

三層電解精製技術の概略図

しかし、アルミニウムスクラップリサイクルに使用できない。

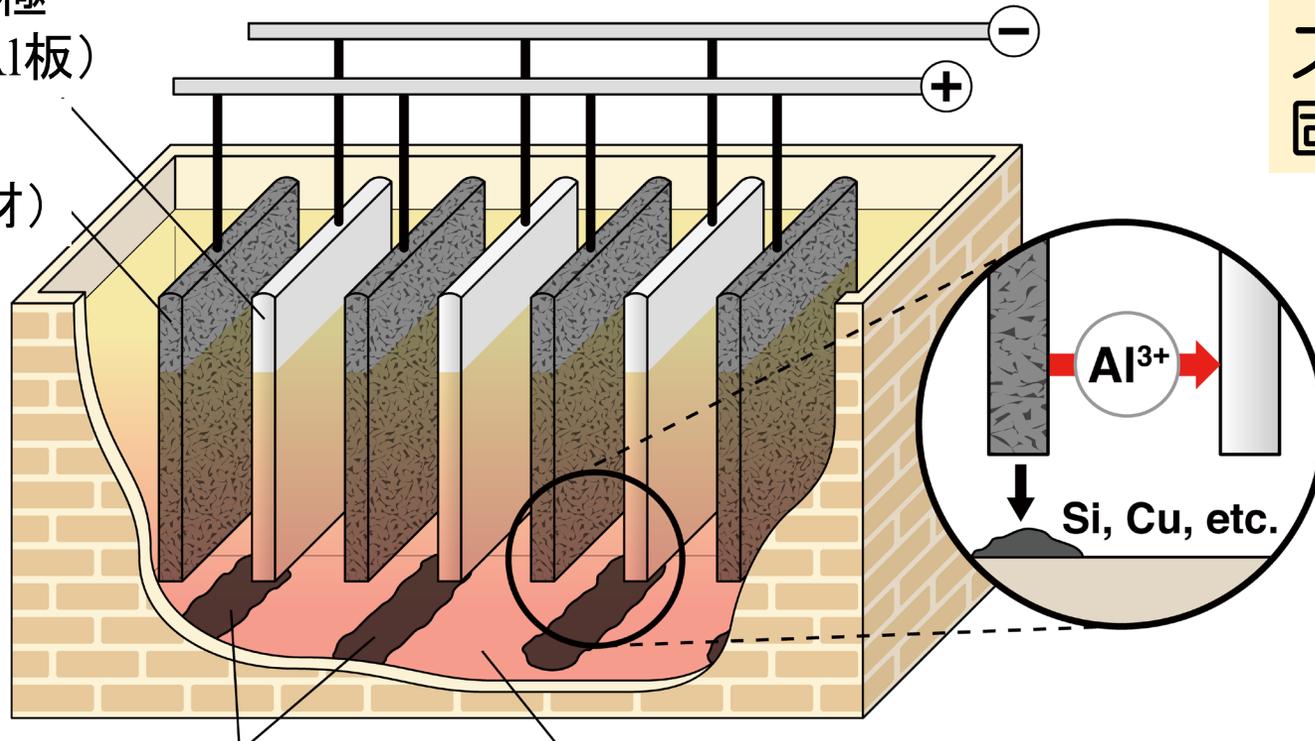
- アルミニウムスクラップ中の不純物濃度 (6~27%) が高すぎる
——> 陽極組成は維持できない
- 典型合金化元素シリコンの密度 ($2.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) はアルミニウムと近く、
使用した熔融塩より軽い
——> シリコンの分離は困難である

アルミニウムの固体電解精製技術



陰極
(純Al板)

陽極
(Al casting material)



スクラップを溶融させず、
固体のままで電解することがミソ

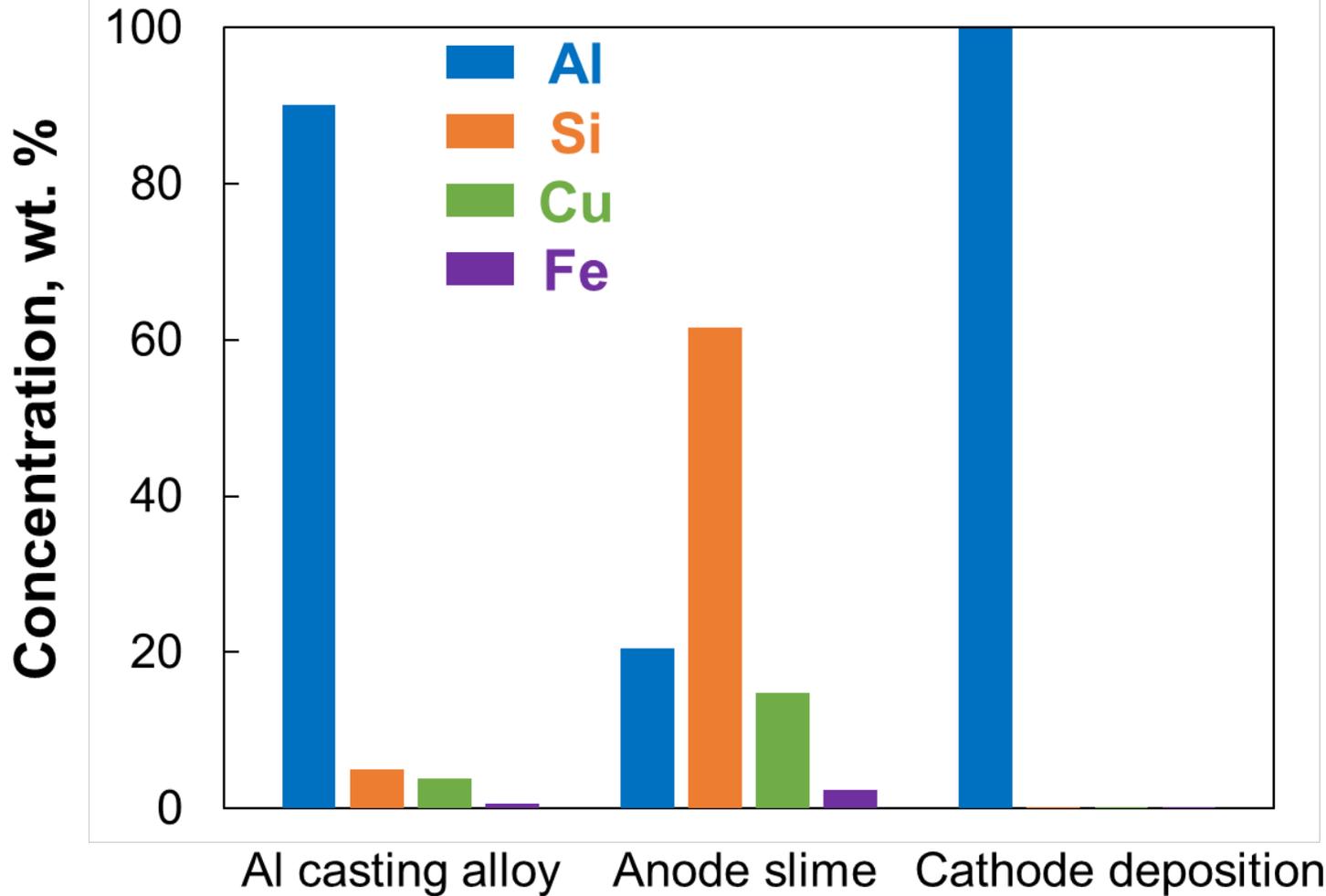
固体電解 (Solid-state electrolysis: SSE) 概略図

Xin Lu, et al. Nature, 2022,
<https://www.nature.com/articles/s41586-022-04748-4>

陽極泥 (電解残留物): Si, Cu等 溶融塩 (アルカリ塩化物等)

縦式の固体電解をすることによって

- アルミニウムスクラップ中の不純物が陽極泥として分離できる。
- 典型合金化元素のシリコンは溶解しないため、分離できる。
- 電解温度が低く、エネルギー消費低減につながる。



アルミニウムのアップグレード
リサイクルが実現できた。

電解後: Al純度99.9%



電解前: Al純度90.2%

アルミニウム合金、陽極泥及びアルミニウム電解析出物の組成

まとめ

アルミニウムは、現状では全体的にダウングレードの方向ではあるものの、一定の循環構造は構築されている。しかしながら、EVシフトが加速すると循環構造が破綻する恐れがある。この「アルミニウムクライシス」は先進国共通の課題である。

東北大学で開発された固体アルミニウム電解法は、**アルミニウム新地金の製造時の半分以下のエネルギー消費**でCu、Si等の合金化元素を大量に含むアルミニウムスクラップを**純アルミニウム**に再生できる世界オンリーワンの技術であり、**アルミニウムクライシス回避**に貢献できる可能性について説明した。本プロセスによって全てのアルミニウムスクラップを精製する必要はなく、アルミニウムの再生時における質の低下を防ぎ、展伸材に再利用出来る最低限の処理量で十分である。



太陽光発電の余剰電力の有効活用にも期待

メガソーラー



本研究の遂行にあたって、下記の共同研究者にご協力を頂いたことを感謝申し上げます。

東北大学

山口一良	大学院工学研究科 学術研究員
松八重一代	大学院環境科学研究科 教授
張 政陽	大学院環境科学研究科 助教

株式会社豊栄商会	(2次アルミニウムサプライヤー)
樹神康之	代表取締役社長
水野 等	開発研究室部長

また、本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 2021年度「アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業」およびJSPS科研費20H02492, 20K15069, 21H04610, 21K17918の支援を受けた。記して深甚なる謝意を表す。