

2022年10月14日 令和4年度 3R先進事例発表会

A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap

固体電解プロセスによる

アルミニウムスクラップのアップサイクリング

(応募報文)

Xin Lu, et al. A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap,
Nature, 606 (2022), 511-515. <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04748-4>

東北大学大学院工学研究科

金属フロンティア工学専攻

盧 鑫 (ルーシン) (グループ代表)

竹田 修 (たけだ おさむ)

朱 鴻民 (しゅ こうみん)

長坂徹也 (ながさか てつや)

アルミニウム：リサイクルの優等生

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	(117) (Uus)	118 Uuo

* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

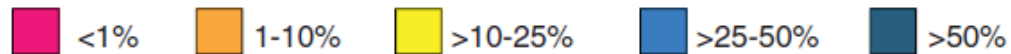


図 世界規模の使用済金属製品のリサイクル率 [1]

※ 国内：リサイクル由来の再生地金の割合：55% [2]

[1] B.K. Reck, T.E. Graedel, Challenges in Metal Recycling, Science, 337 (2012), 690;

[2] 日本アルミニウム協会：https://www.aluminum.or.jp/#gsc.tab=0

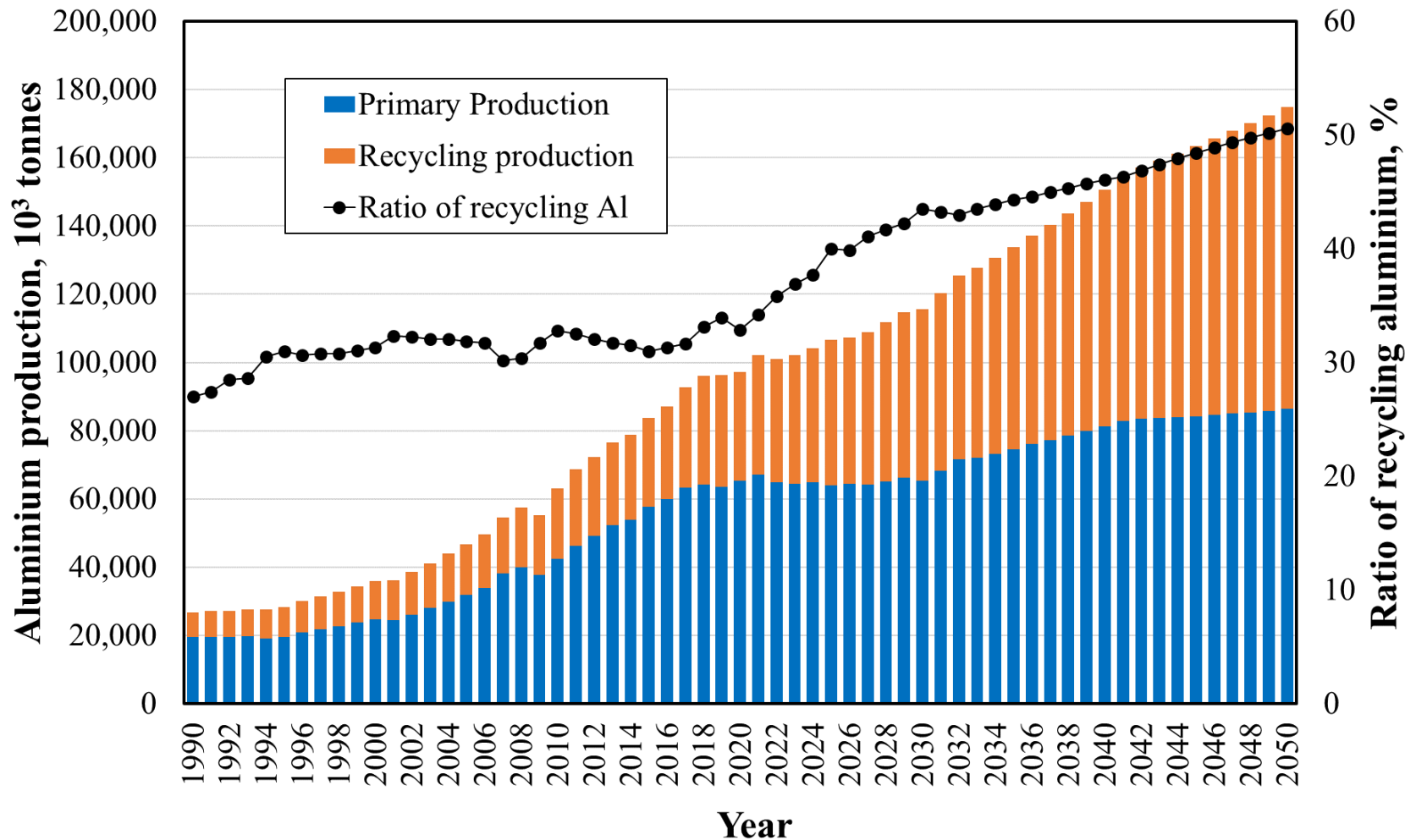


図 アルミニウム新地金及び再生地金の生産量の推移 [1]

急増するアルミニウムのリサイクル量

[1] The International Aluminium Institute (IAI), IAI material flowmodel-2021 update. 2021

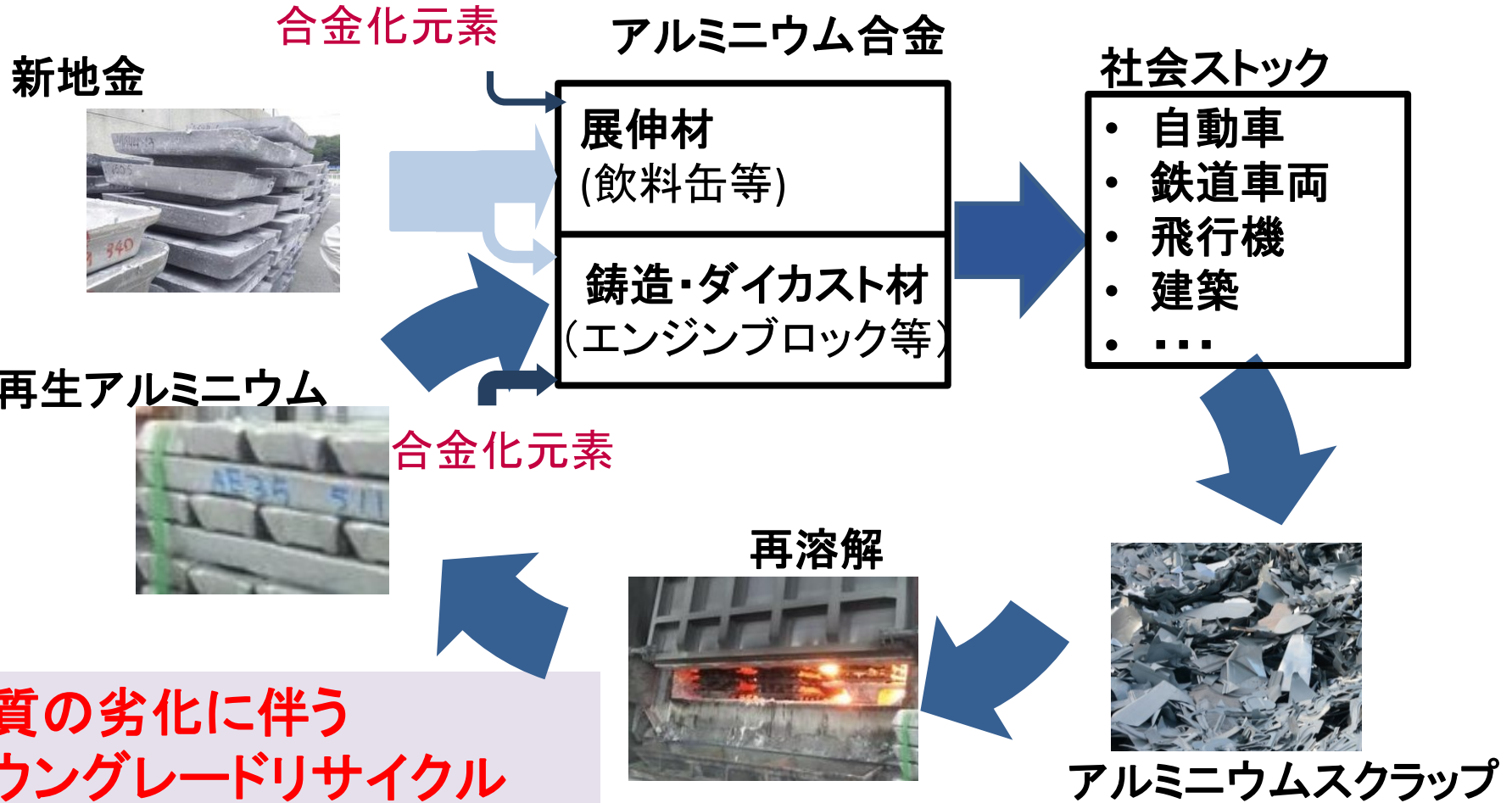


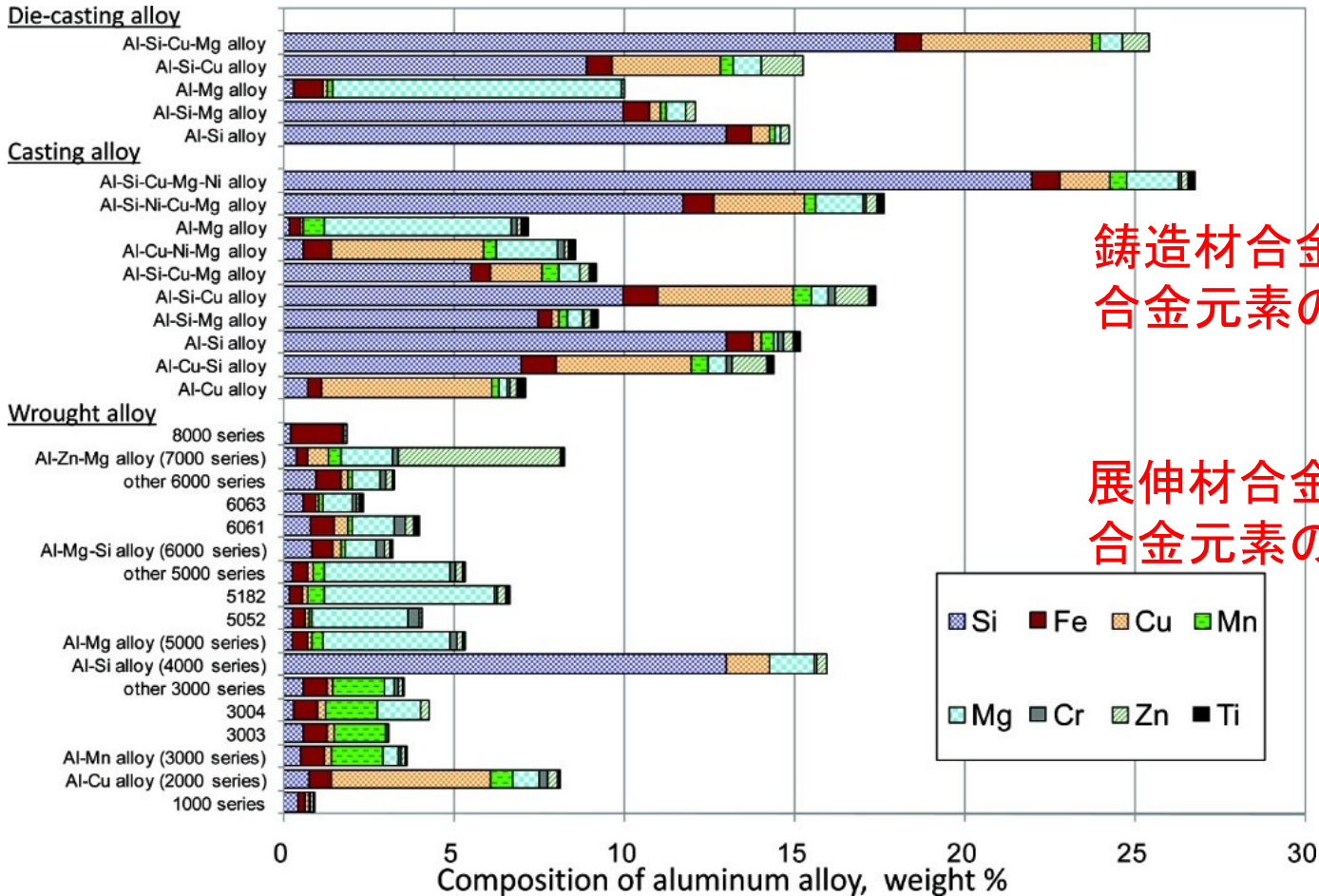
図 現状のアルミニウムリサイクル概観

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。

[1] J. Rankin, Energy use in metal production, High Temperature Process Symposium 2012.7-9

[2] 環境省: <https://www.env.go.jp/index.html>

純Alではなく、合金として使用されている。



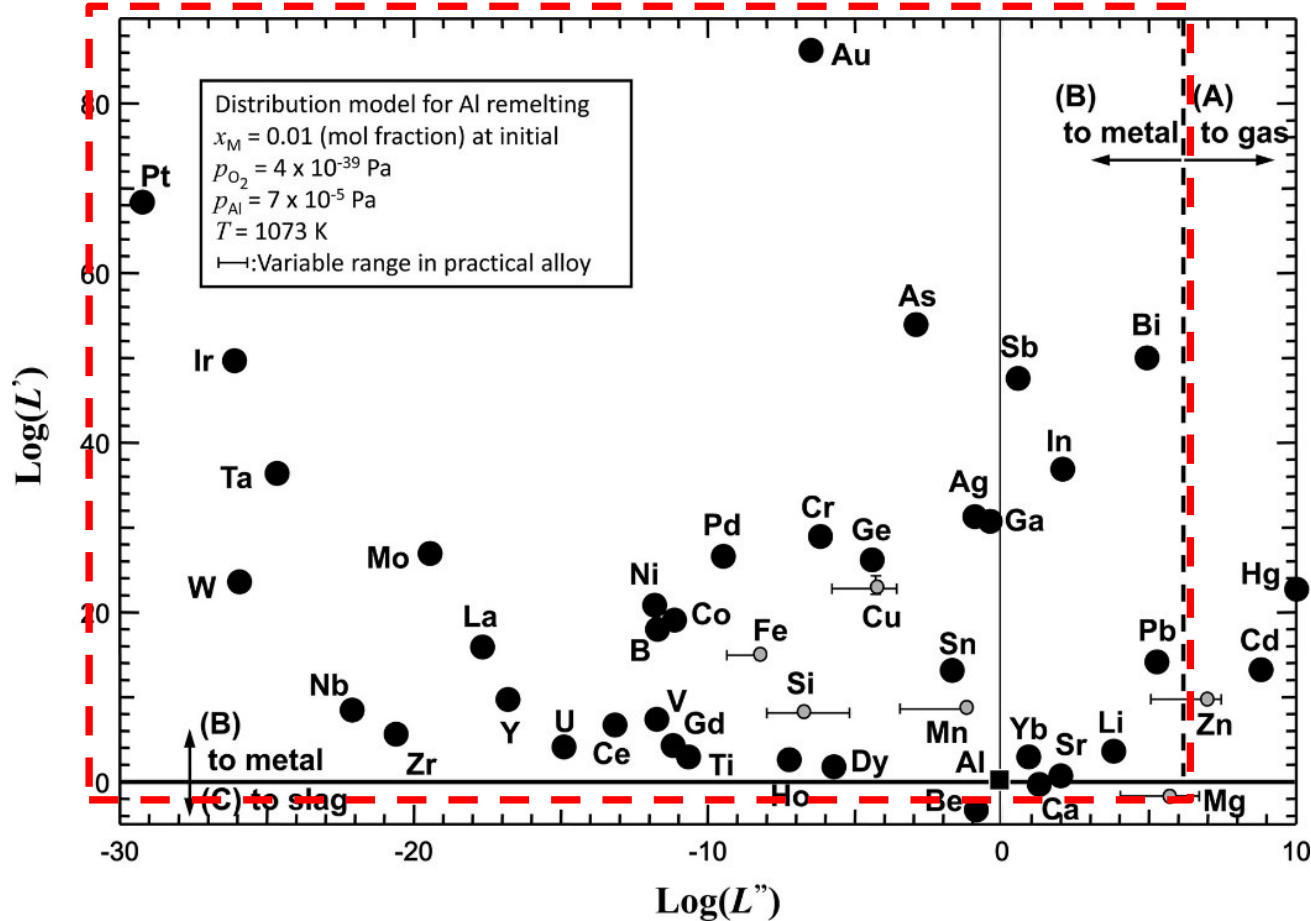
鋳造材合金：
合金元素の許容濃度が高い

展伸材合金：
合金元素の許容濃度が低い

図 各アルミニウム製品中の合金元素濃度 (質量%)[1]

[1] K. Nakajima, et al. Environmental Science & Technology, 2010, 44, 5594-5600.

除去できない元素



現状
(ダウングレード)

展伸材合金

鋳造合金

図 Al再溶融プロセスにおける合金元素の分布[1]

再溶融法において、ほとんどの合金化元素が除去できないため、**ダウングレードリサイクル**になる。

[1] K. Nakajima, et al. Environmental Science & Technology, 2010, 44, 5594-5600.

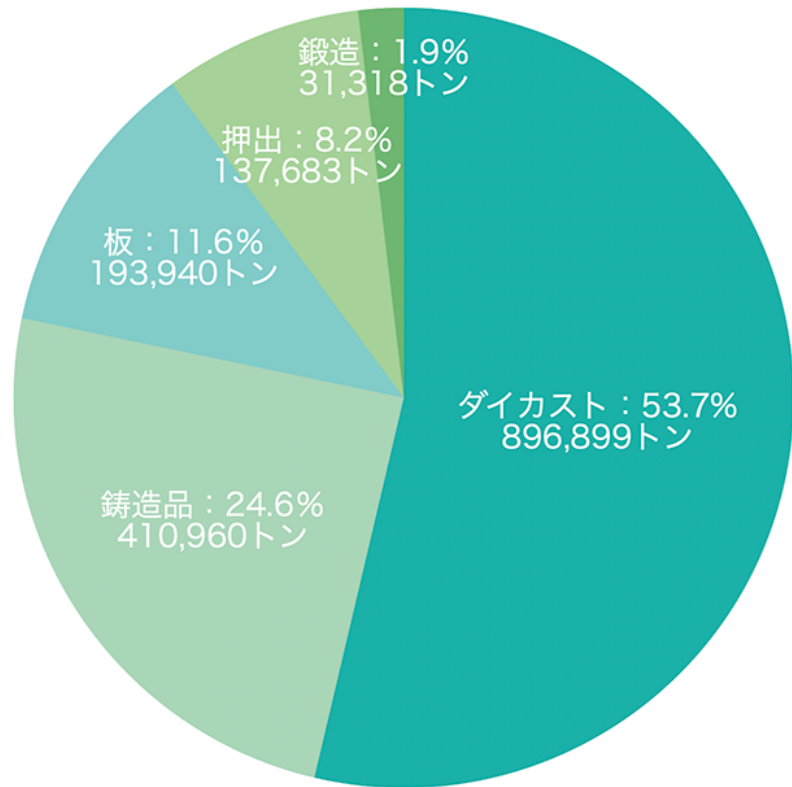


図 2019年自動車向けアルミニウム
素材別需要構成[1]

再生地金の最終的なシンク：
自動車エンジンブロック等のAI鋳造合金

EV(電気自動車)シフトが加速

⇒⇒⇒

自動車エンジンに使用する
AI鋳造合金の需要の大幅な減少

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

[1] 日本アルミニウム協会 : <https://www.aluminum.or.jp/#gsc.tab=0>

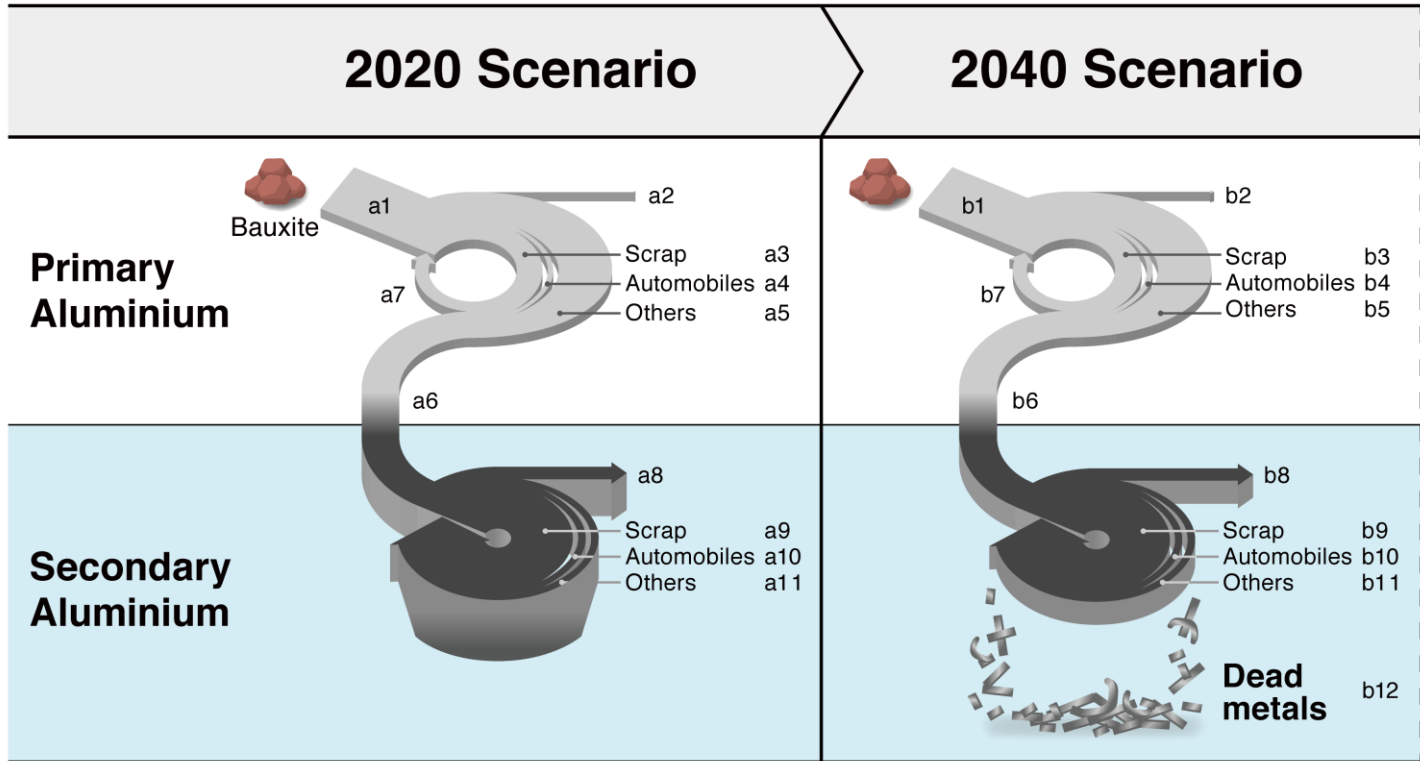


図 アルミニウム需給現状及びフォアキャスト[1]

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

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

三層電解法(Hoopes法)

偏析法

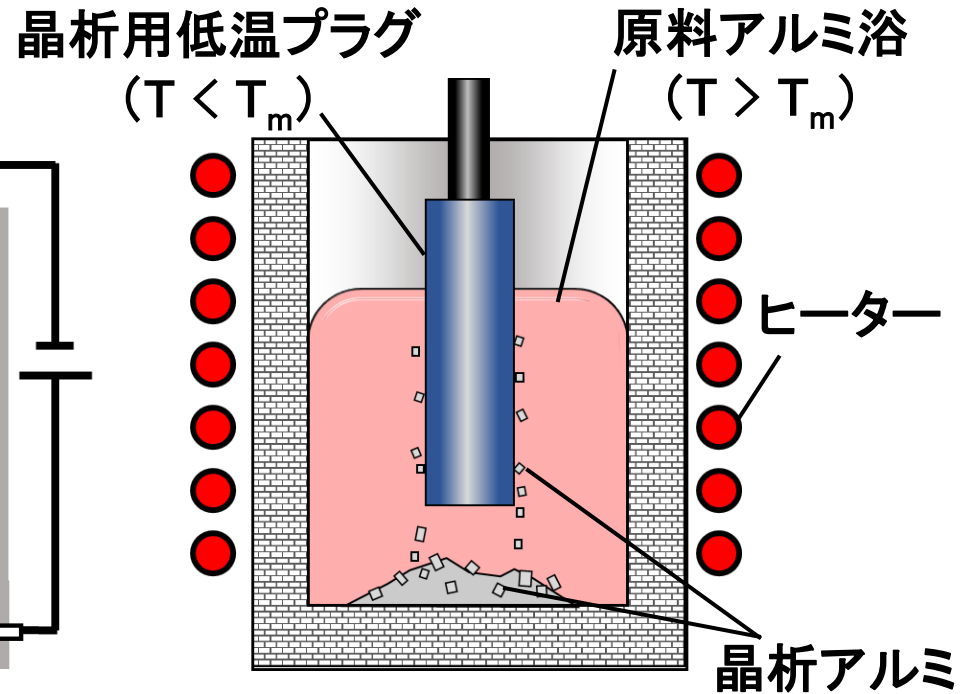
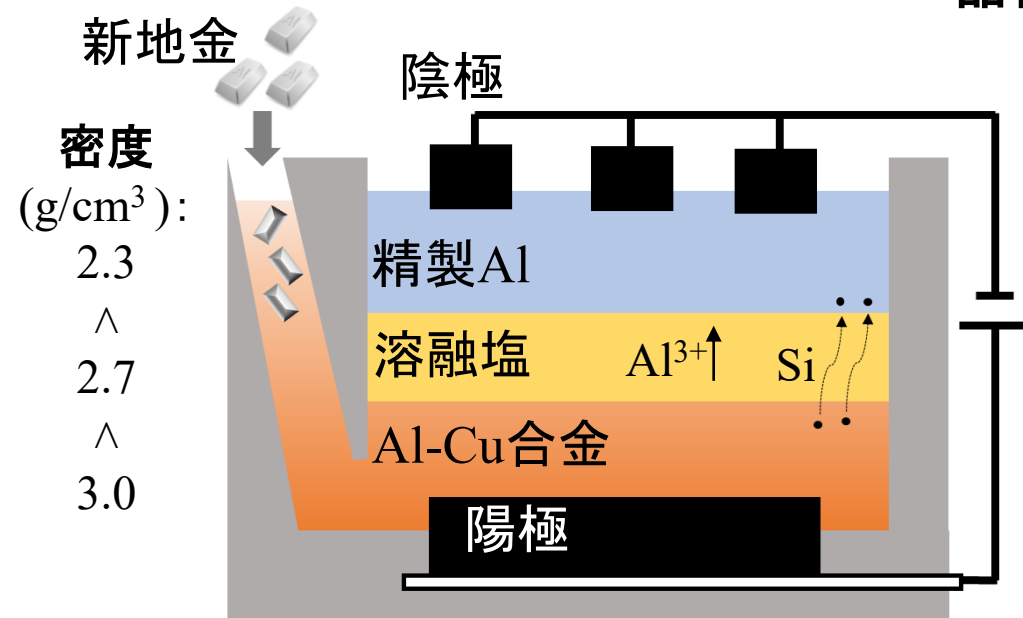


図 三層電解法概略図

図 典型的偏析法概略図

- スクラップ中の不純物濃度が高い
——> **陽極組成は維持できない**
- 典型合金化元素Siの密度はAlに近い
——> **シリコンの分離は困難である**

- スクラップ中の不純物濃度が高い
——> 何度も精製を繰り返す必要があり、かつ、回収の歩留まりが低い

Al新地金(99.5~99.7%)の更なる高純度化には適用できるが、Alスクラップのリサイクルには適用できない。

新規アルミニウムスクラップ精製技術の開発が重要 10

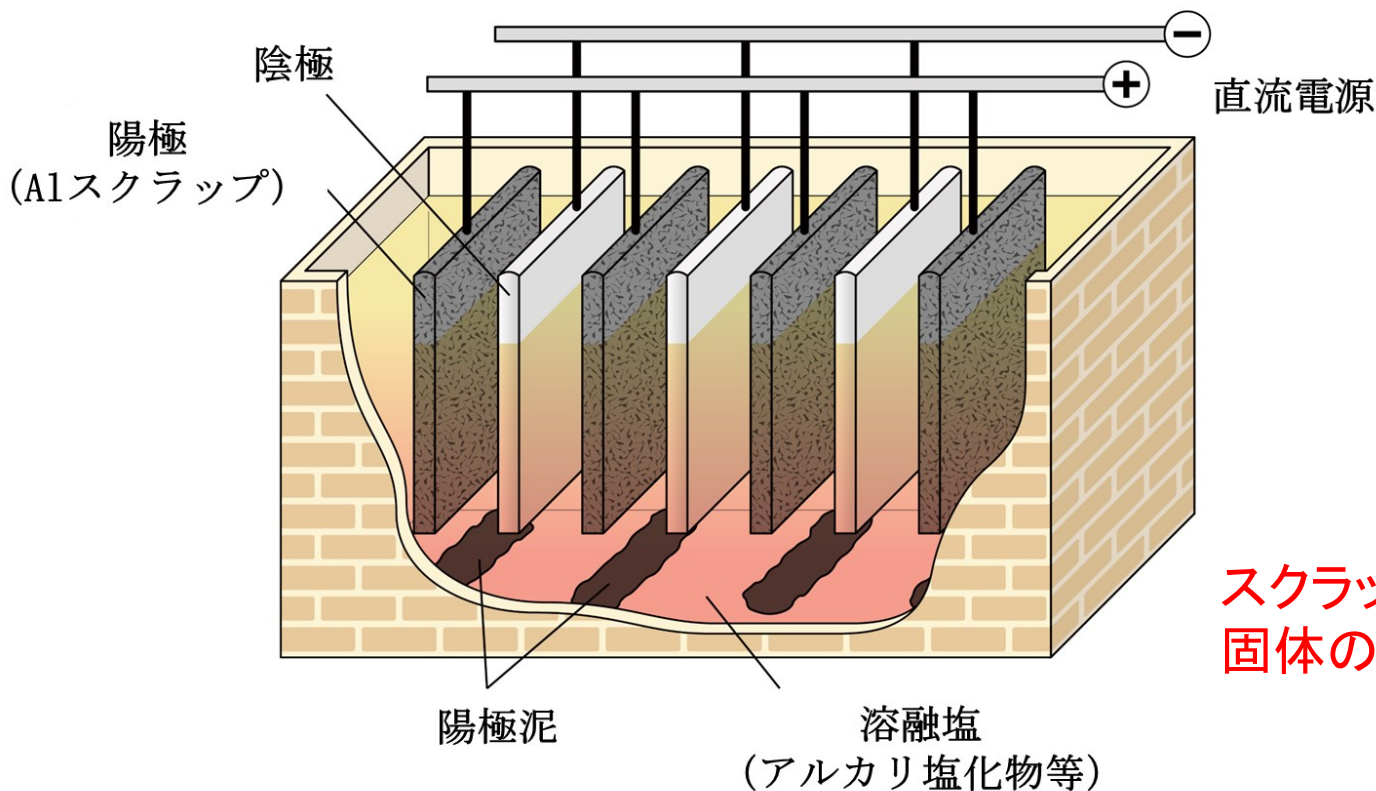
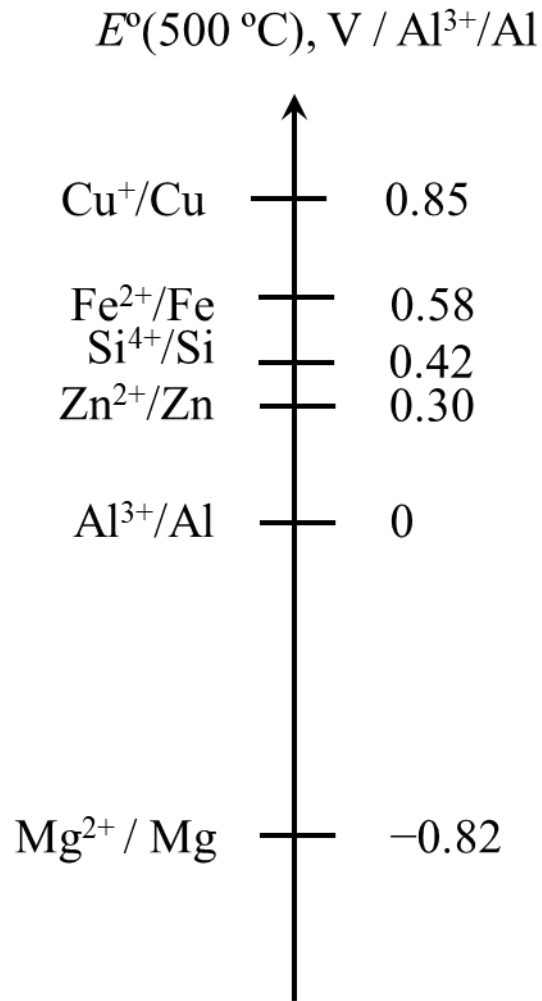


図 熔融塩を利用した固体電極電解 (Solid-state electrolysis: SSE) 概略図 [1]

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。



陽極での精製
(Alが優先的に溶解するため、陽極泥として分離)

陰極での精製
(Alと同様に陽極で溶解するが陰極に析出しない)

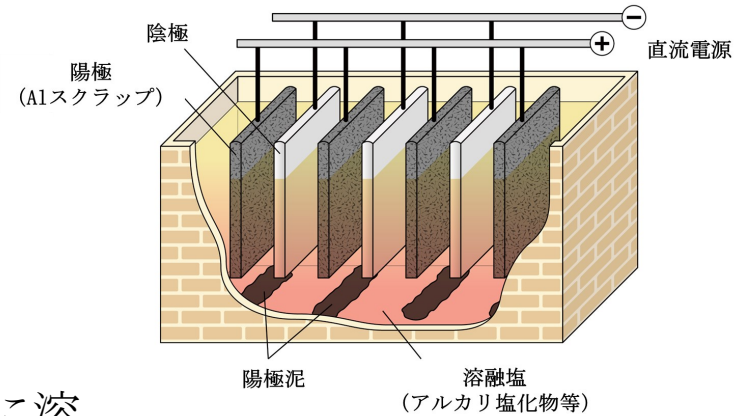


図 500°Cにおいてアルミニウム及び典型合金元素の平衡電極電位

各主成分の溶解挙動

典型的なAl鑄造合金(AC2A)とダイカスト合金(AD12)組成(質量%)

記号	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Al
ADC2	1.5~3.5	9.6~12.0	0.3以下	1.0以下	1.3以下	0.5以下	残部
AC2A	3.0~4.5	4.0~6.0	0.25以下	0.55以下	0.8以下	0.55以下	残部

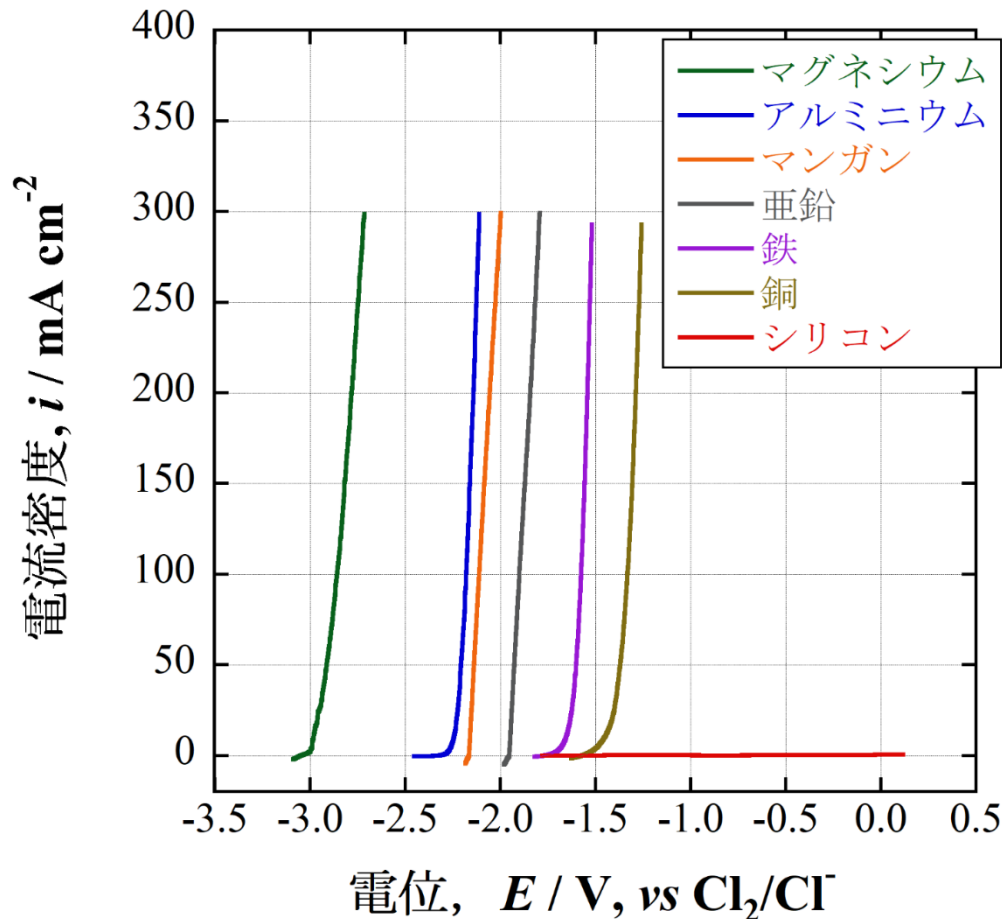


図 アルミニウムス及び典型合金元素の分極曲線 (Molten salt: LiCl-KCl; T=500 °C)

Mg: -2.92 V

Al: - 2.35 V

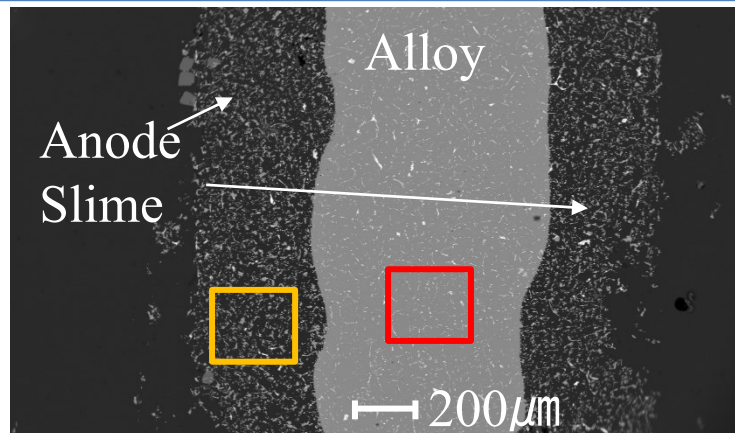
Fe: -1.70 V

Cu: -1.52 V

Si: No dissolve

電位差によって、
Alと合金元素の分離は可能

電解前後のアノードの変化



アノード: AC2A合金

Mg, Al: 溶解

Si, Cu: アノードスライムに蓄積

図 電解後アノード(AC2A)合金の断面図

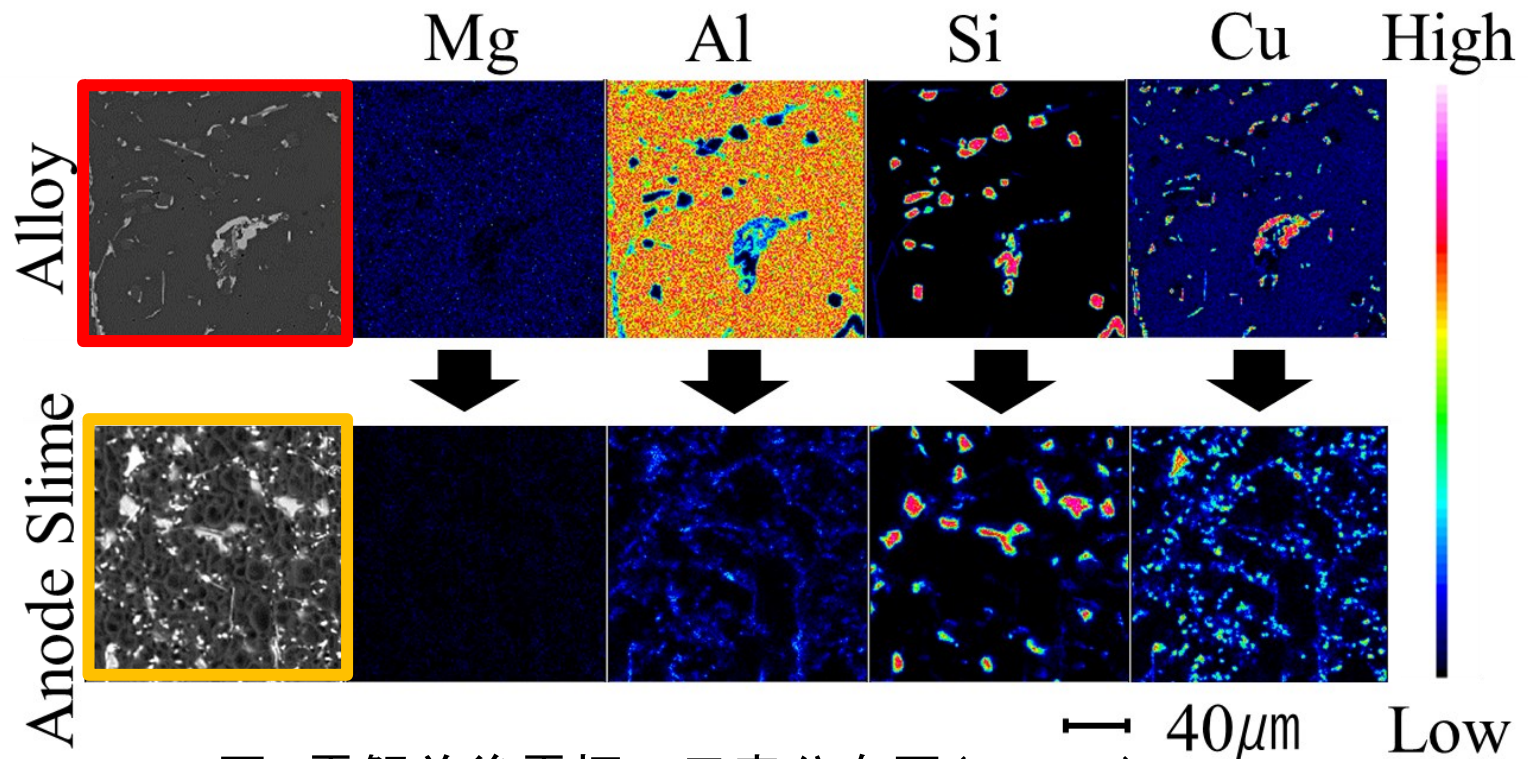


図 電解前後電極の元素分布図(EPMA)

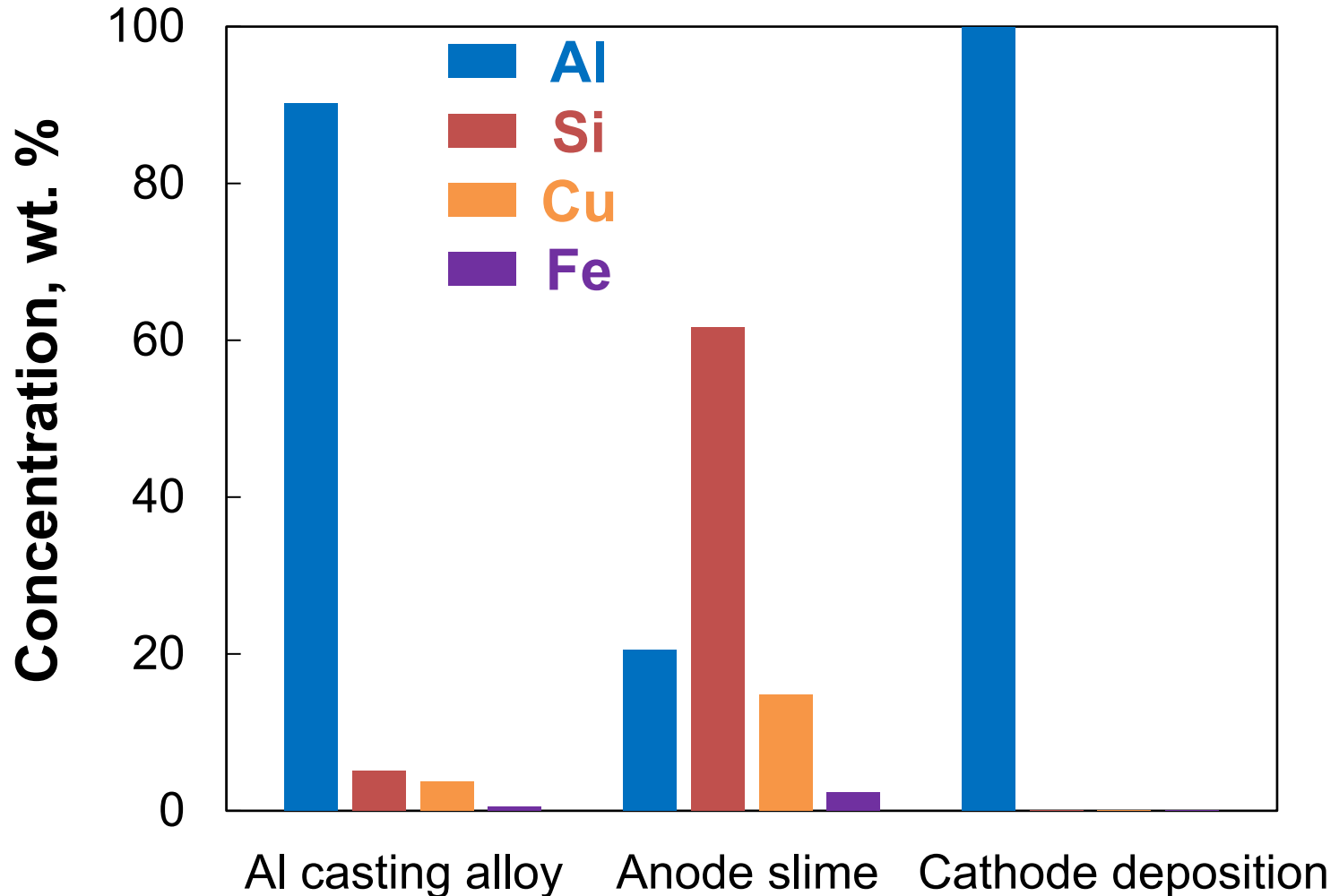
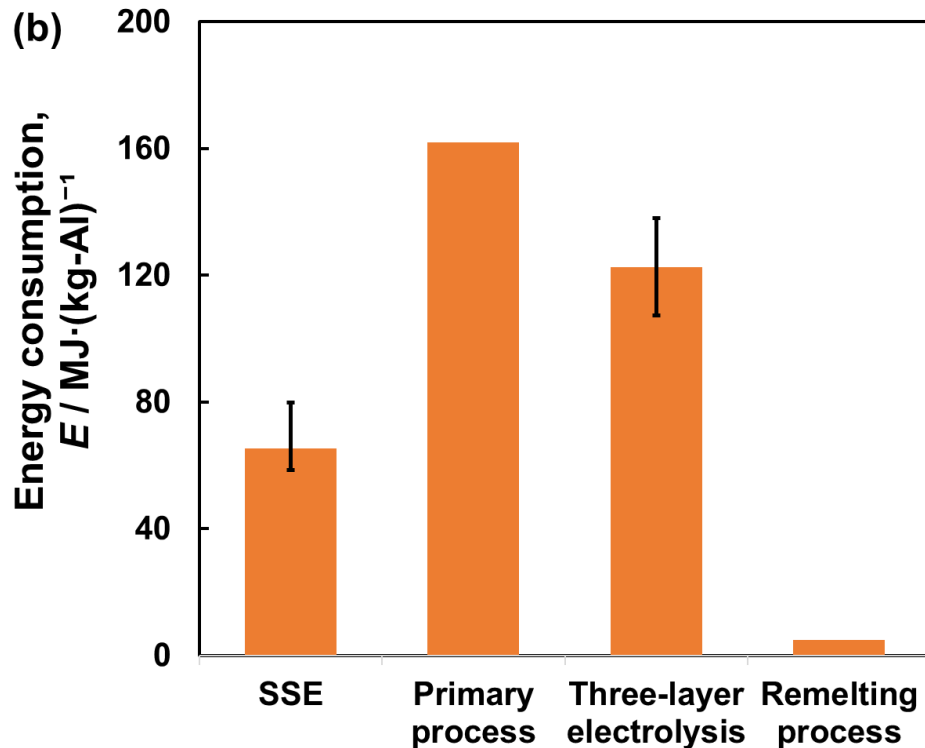


図 電解前(AC2A合金)と電解後アノードスライム(陽極泥)、カソード(陰極)析出物の組成比較

エネルギー消費の試算には

- 工業ホール・エルー電解プロセスを参考し、SSEの槽電圧等を見積もりした。
- スクラップから電極の作成及び析出物の再溶解を考慮した。



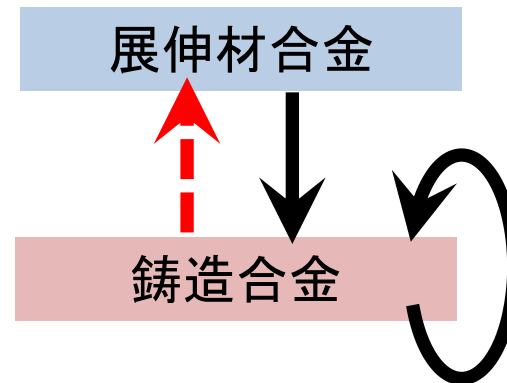
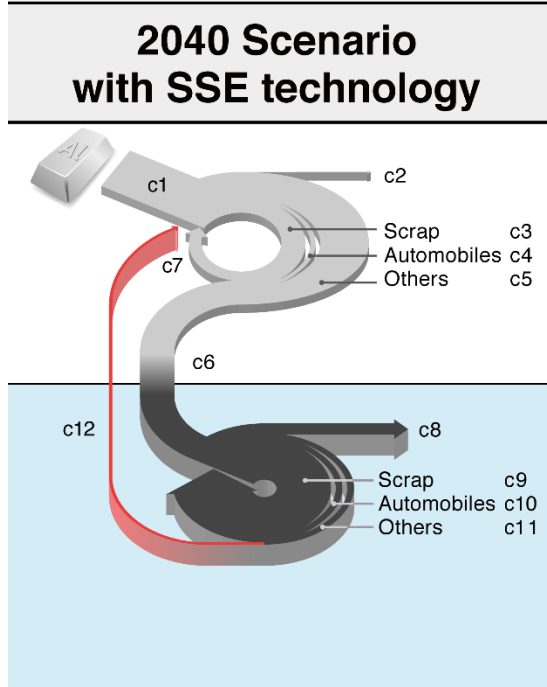
ホール・エルー法との比較

	ホール・エルー法	SSE法
原料	ボーキサイト	Alスクラップ
製品	新地金 (99.5~99.7%)	再生Al (~99.9%)
エネルギー消費	162MJ/kg	65.4 (58.4–79.9) MJ (kg Al) ⁻¹

図 各アルミニウム精錬・精錬、リサイクルプロセスのエネルギー消費比較

熔融塩電解を用いたアップグレードリサイクルの開発

- Alの溶解電位は、主な合金元素であるSi、Cu、Feの溶解電位より低いため、電解の際、優先的に溶解する。
- 定電流電解によるAC2A合金の電解結果、Alと合金元素は効率的に分離でき、新地金と同じ純度のAl製品が得られた。
- 本リサイクルプロセスのエネルギー消費は新地金電解プロセスの半分以下と試算され、将来的な応用が期待される。



スクラップから展伸材までのアップリサイクルを実現し、「AIクライシス」の回避に貢献する