

アルミエネルギーサイクル研究会

Ar-H₂ ICP陽極を用いた 熔融アルミナ還元の実現可能性検証

氏名：米倉健志

指導教員：松井 信 教授

2026.3.18 日本エクス・クロン本社

研究背景

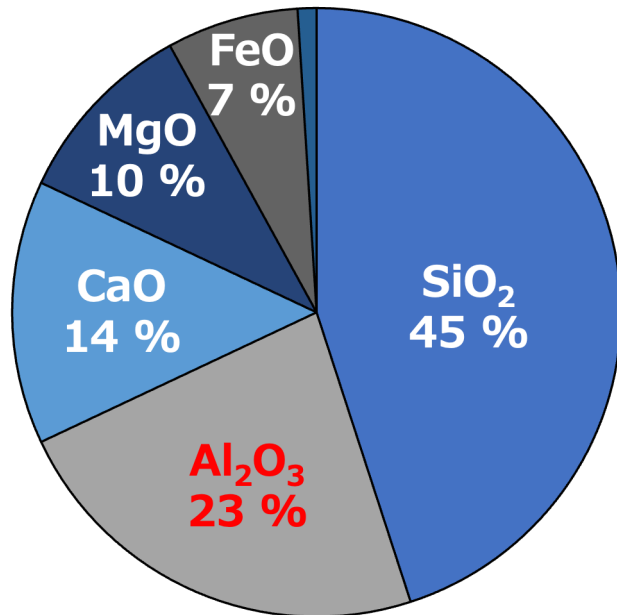
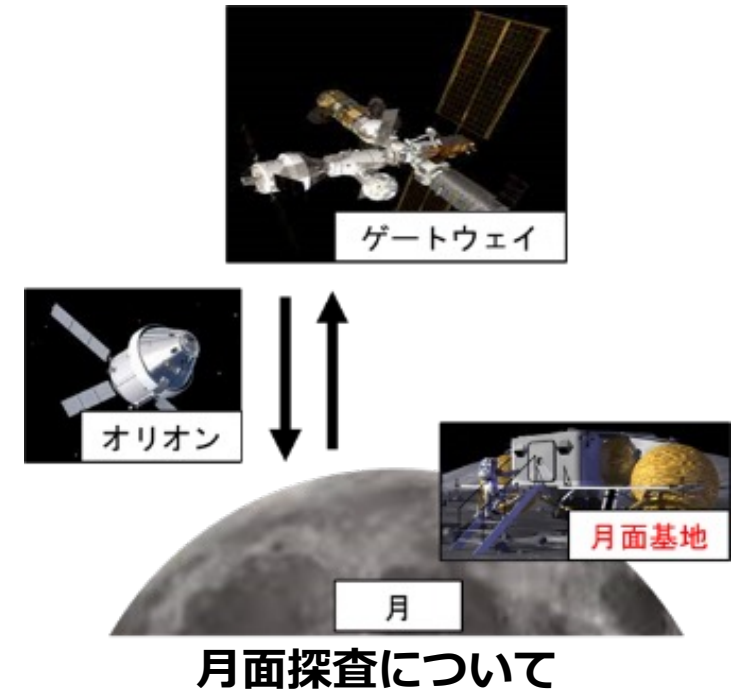
➤ アルテミス計画

Artemis I : Orionを地球から月まで往来 (無人)

Artemis II : Artemis I (有人) (2026年以降)

Artemis III : 有人月面着陸 (南極) (2027年以降)

→ Gatewayを拠点, 構想 : **月面基地**

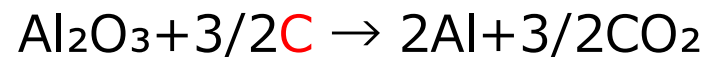
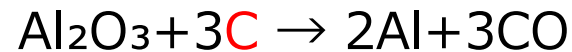


月面レゴリスの構成物質

➤ 月面基地の建設

- ✓ 輸送コストが高い (1 億円/kg)
→ 月面レゴリス中の**Al₂O₃**を還元

- ✓ 従来の還元法 : ホール・エルー法



炭素が不足

➡ **炭素フリー**な還元方法を研究

先行研究

➤ レーザーアブレーション

- ✓ ターゲット表面にレーザーエネルギーを照射

➡ **プラズマ化**して表面の構成物質が放出

➤ レーザーアブレーション還元

- ✓ 高出力レーザーによりアルミニウムと酸素に解離

→ Alを**回収板**で回収

➡ **炭素を使用しない**還元方法

➤ 2種のレーザーによる比較

✓ パルスレーザー（YAGレーザー）

- 回収量：0.56 $\mu\text{g/s}$
- 生成速度：**低**
- **大量生産に適さない**

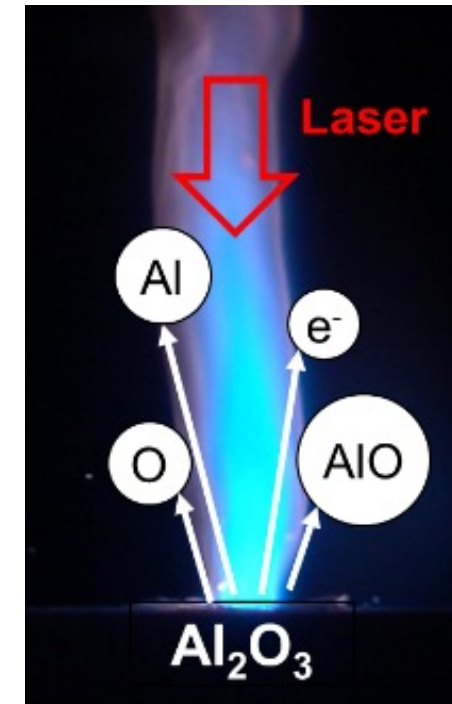


✓ CWレーザー（半導体レーザー）

- 回収量：**微量**
- EDXで確認できる程度
- **水素雰囲気下でも改善せず**

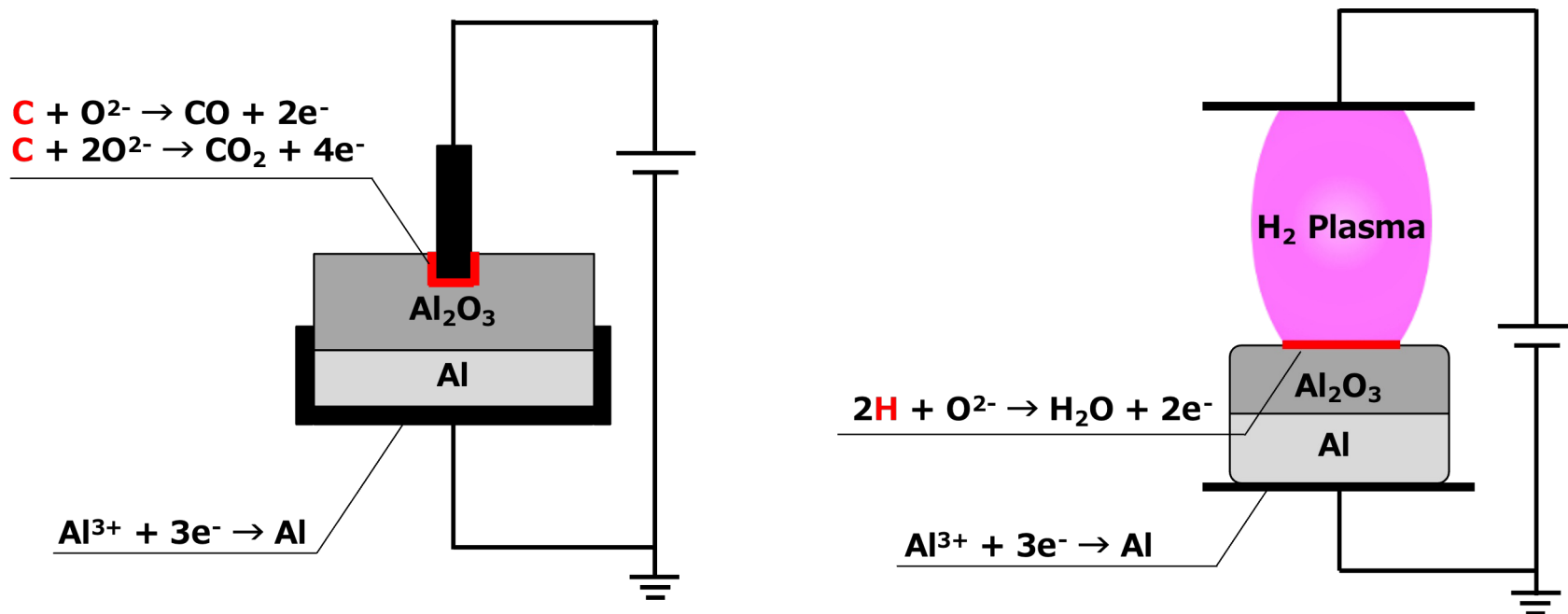


電気分解による分離・回収を検討



レーザーアブレーション還元

プラズマ陽極



還元方法の比較 (左：ホール・エルー法, 右：H₂による電気分解)

➤ H₂を用いた電気分解

✓ ホール・エルー法は炭素を用いるため実施不可能 → 月面で入手可能なH₂を使用

➤ 還元に必要なプロセス

✓ アルミナの溶融 → イオン電導性を獲得

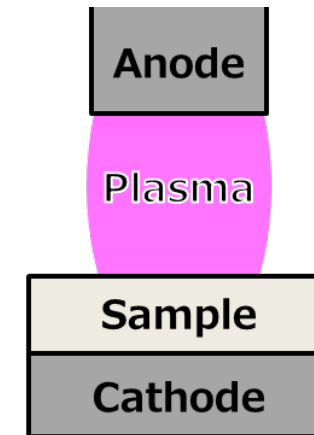
✓ H₂のプラズマ化 → 原子化 + 導電性を獲得

➡ 電気分解における陽極として機能

プラズマ生成と試料溶融

➤ 熱平衡プラズマ：アークプラズマ

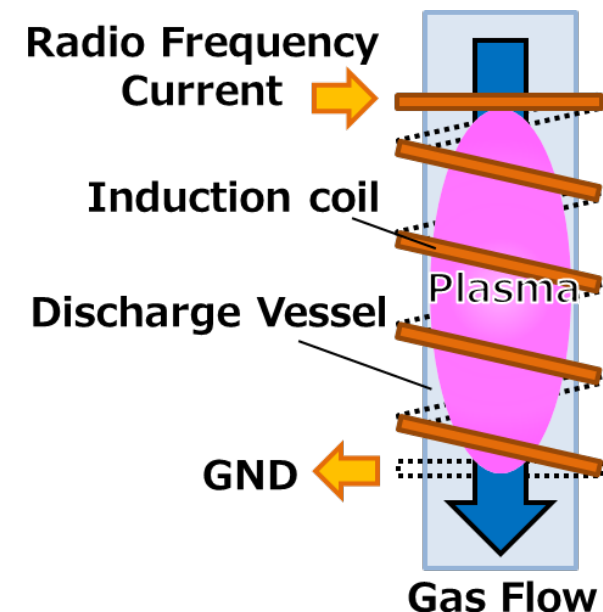
- ✓ 水素原子密度：高
- ✓ 原子化の効率：低
- ✓ 加熱方法：電気炉
 - プラズマの溶融だけでは不十分
 - システムの大規模化



アークプラズマ概略図

➤ 非平衡プラズマ：誘導結合プラズマ(ICP)

- ✓ 水素原子密度：低
- ✓ 原子化の効率：高
 - 電子の供給を促進するためArを追加
- ✓ 加熱方法：レーザー
 - 溶融部分の制御 & 局所化
 - 電気炉よりも高い熱効率



ICP概略図

➡ 実験系に採用

目的

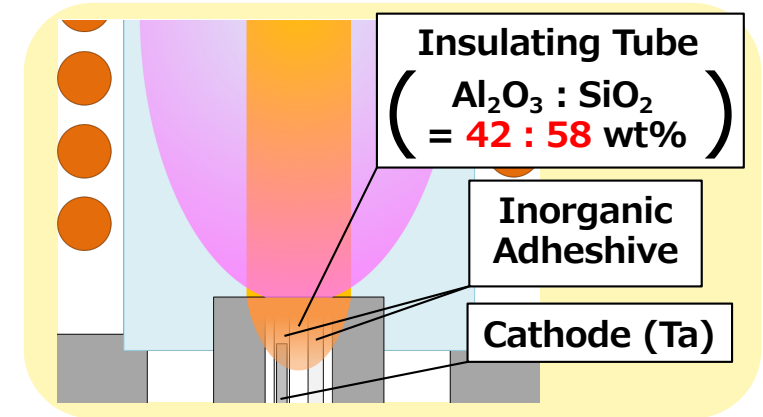
Ar-H₂ ICPを陽極とした 熔融アルミナ電解の実現可能性検討

➤ 実施項目

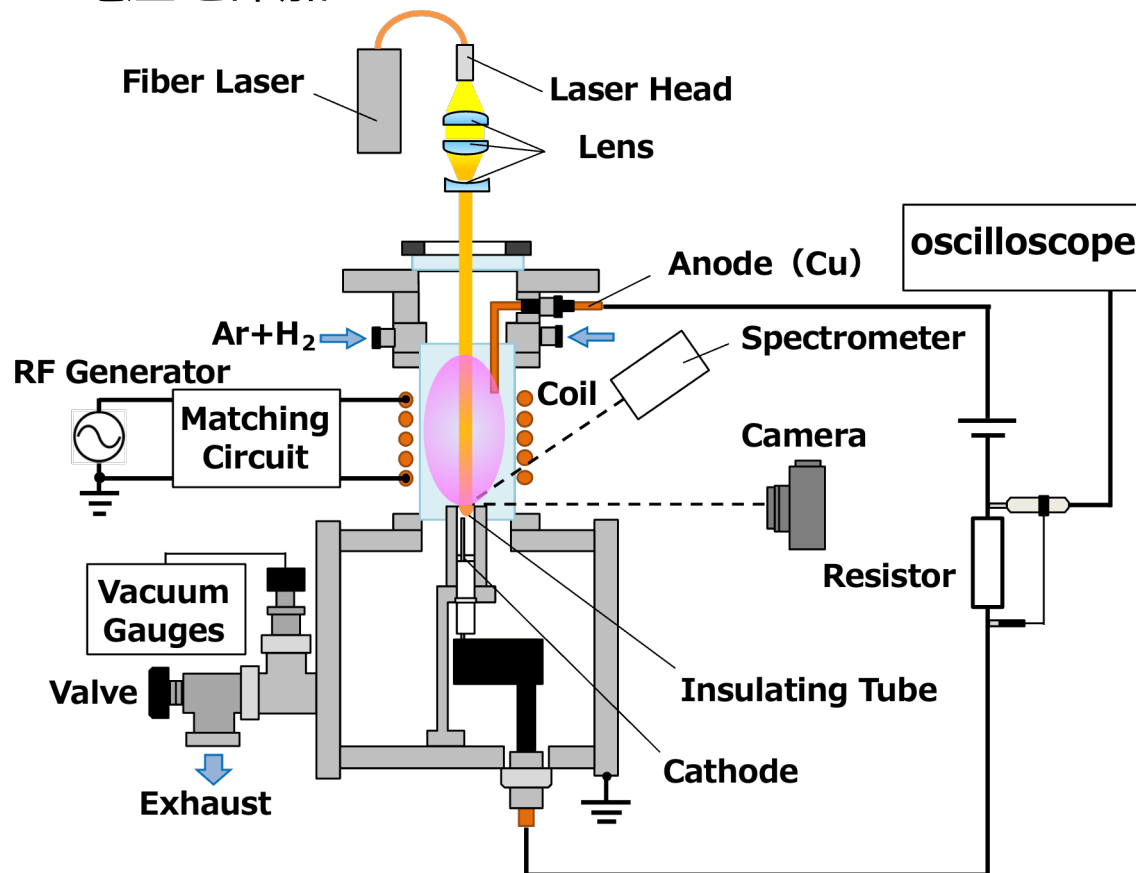
- ✓ Al₂O₃-SiO₂系混合物の還元実験
- ✓ CaO-Al₂O₃-SiO₂系混合物の還元実験

実験条件

- ✓ レーザー出力110Wで試料を加熱
- ✓ 試料溶融後に出力を100Wに変更
→ **融点 (2100 K)** を越えていることを確認
- ✓ 電圧を印加



試料部 (拡大図)

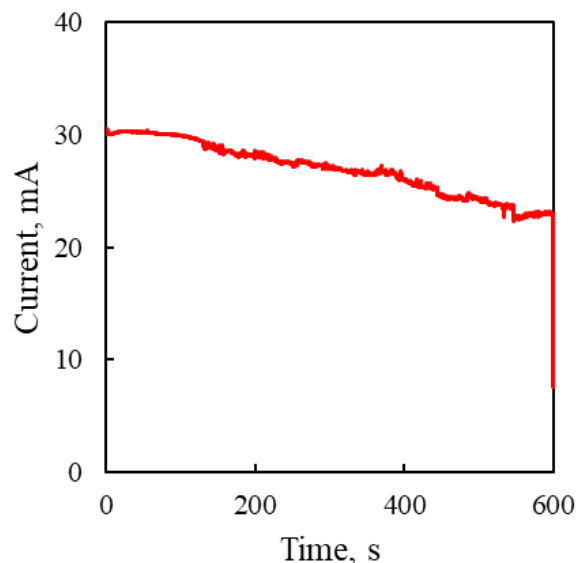


実験系概略図

実験条件

作動ガス	Ar, H ₂
雰囲気圧力	12.6 Pa
ガス流量 (Ar)	19.0 sccm
ガス流量 (H ₂)	1.0 sccm
レーザー出力	110, 100 W
レーザー照射時間	600 s
ビーム径	6 mm
直流電圧	100 V
RF 電力 (13.56 MHz)	150 W

Al₂O₃-SiO₂系混合物の還元



電流値



実験後の試料断面



実験時の様子

- ✓ 試料断面を観察 → カソード周りに**黒色生成物**を確認
- ✓ ファラデーの法則より生成量を予測

$$m_{Al} = \frac{ItM_{Al}}{zF} = 1.5 \text{ [mg]}$$

m_{Al} : 析出したAlの質量 [mg] I : 電流 [mA] t : 時間[s]

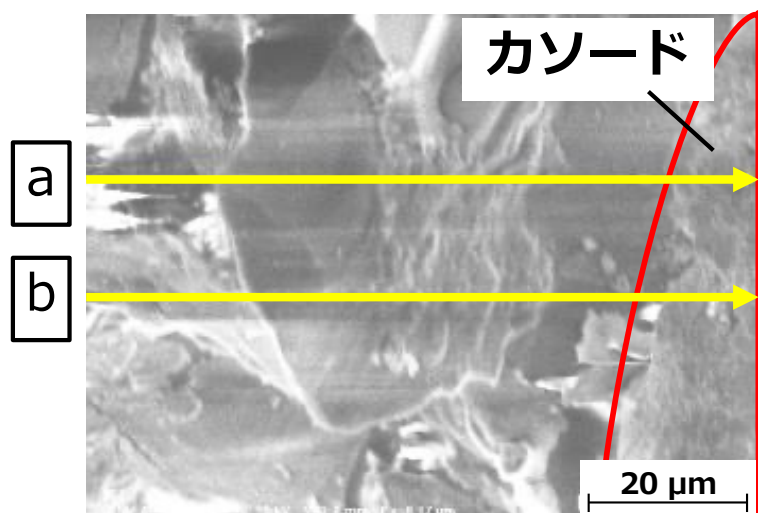
M_{Al} : Alの原子量 26.98 [g/mol] z : イオン価数 3[-]

F : ファラデー定数 96485 [C/mol]

- ✓ 生成量よりカソード周りの膜厚は最大120 μmと予測 → **元素分析を実施**

酸素の元素比率の比較

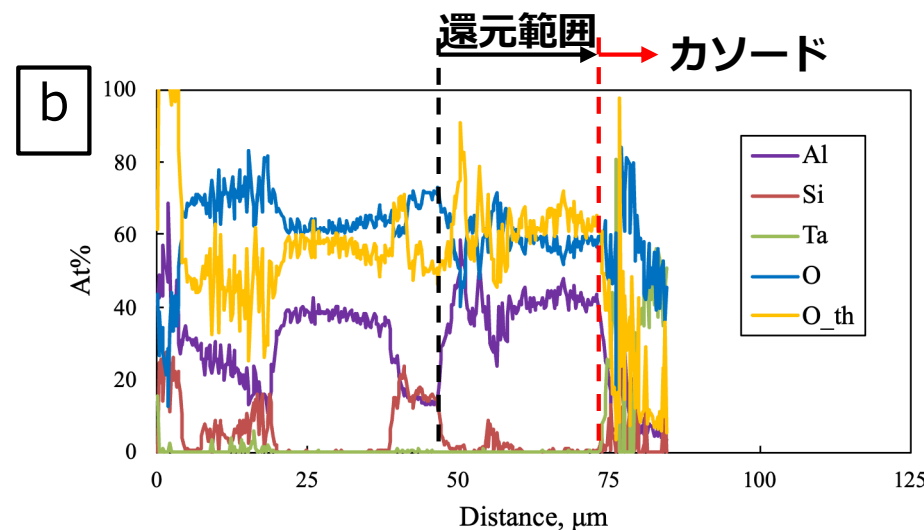
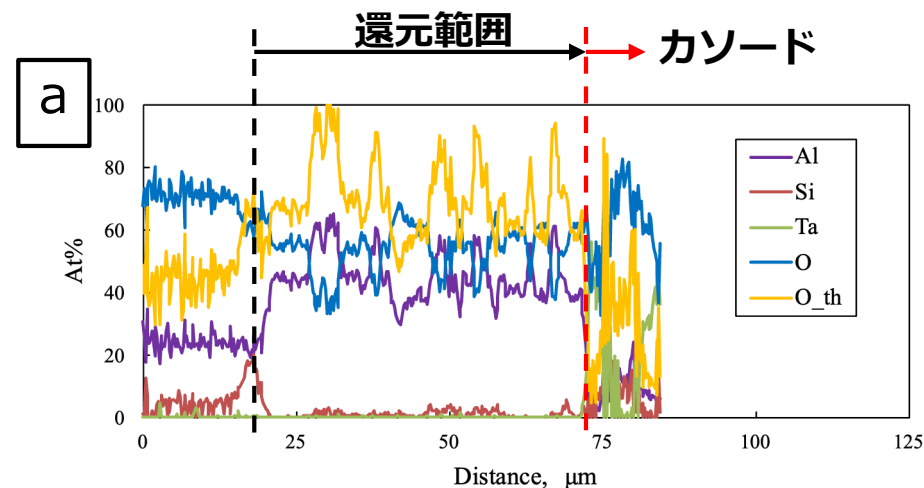
- ✓ エネルギー分散型X線分析法(EDX)により元素分析を実施



SEM画像 (×1.5k) と分析ライン

- ✓ $O/O_{th} < 1$ → 還元が進行していると判断
- ✓ 還元範囲の O/O_{th} a : 0.82 (±0.24)
 b : 0.98 (±0.21)
- ✓ 組成比(a) Al : O = 2 : 2.3 ± 0.7

➡ Alの還元は確認されず



Oの理論値との比較

試料の変更

➤ 変更前試料

- ✓ $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 = 42 : 58$ [wt%]
- ✓ 試料融点： **2100 K** → Alの蒸気圧は**23.7 kPa**
➡ 生成したAlが蒸発（実験系圧力： **12.6 Pa**）

➤ 変更後試料（融点降下によるAl蒸気圧の降下）

- ✓ $\text{CaO} : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 = 38 : 20 : 42$ [wt%]
- ✓ 試料融点： **1540 K** → Alの蒸気圧は**106 Pa**

➤ 理論分解電圧

- ✓ 電気分解に必要な最小電圧

$$E = \frac{\Delta G_r}{nF}$$

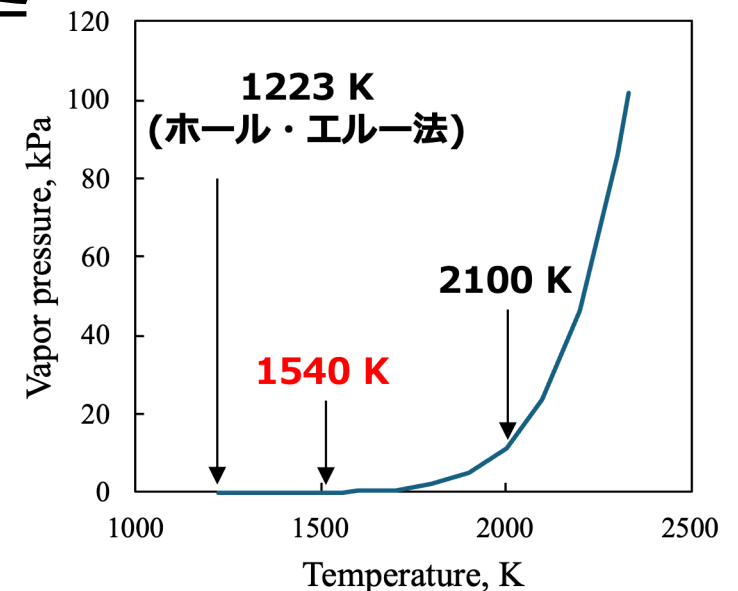
E ：理論分解電圧 [V] F ：ファラデー定数 96485 [C/mol]
 ΔG_r ：ギブズの自由エネルギー変化 [J/mol] n ：反応電子数[-]

- ✓ 還元優先度

$\text{SiO}_2(0.80 \text{ V})$ $\text{Al}_2\text{O}_3(1.14 \text{ V})$ $\text{CaO}(1.38 \text{ V})$

易 ←—————→ 難

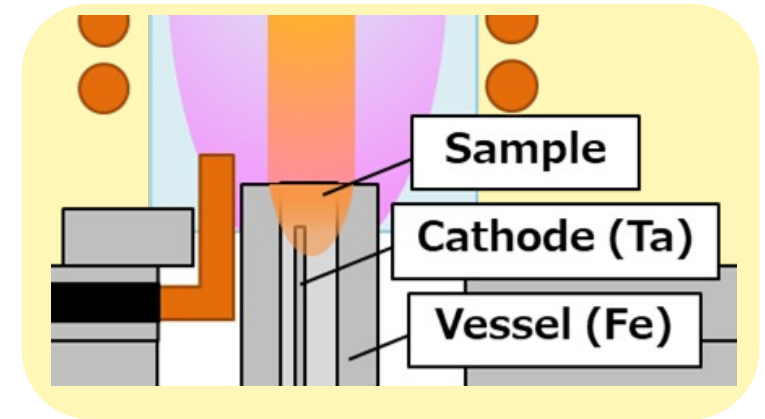
➡ Si析出による電解還元の立証



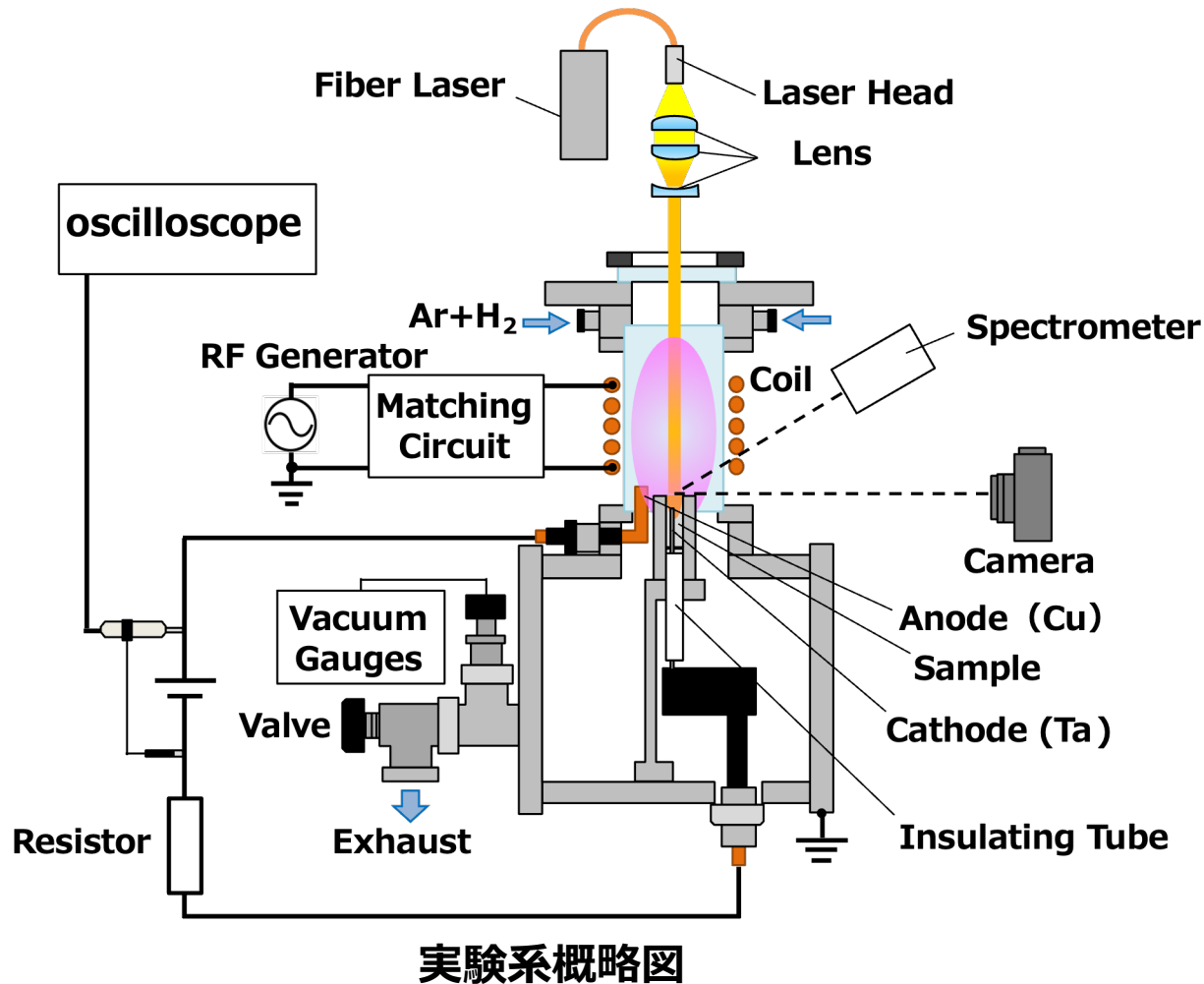
Alの蒸気圧曲線

実験条件

- ✓ 電圧印加の有無で試料を比較
→ 電気分解による効果を確認



試料部 (拡大図)

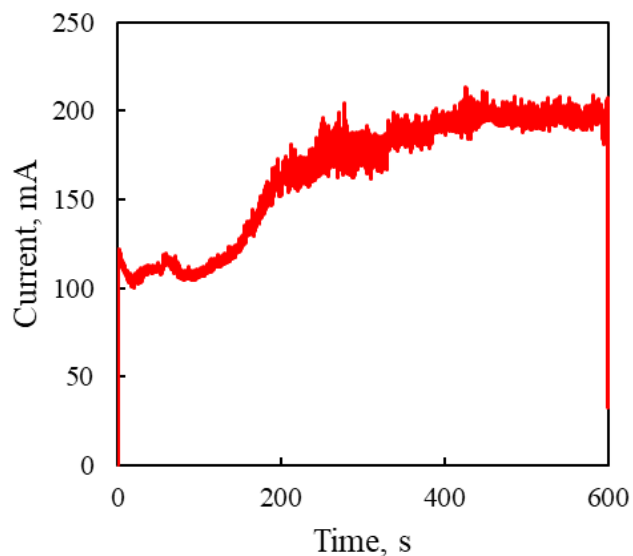


実験系概略図

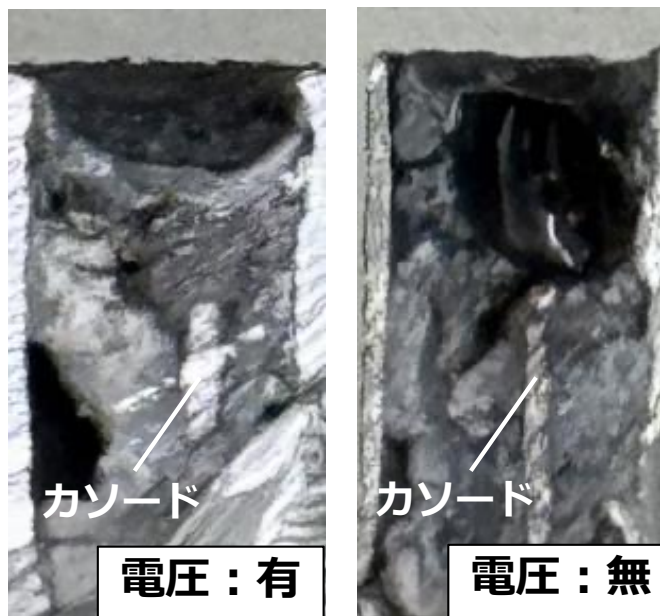
実験条件

作動ガス	Ar, H ₂
雰囲気圧力	200.4 Pa
ガス流量 (Ar)	2000 sccm
ガス流量 (H ₂)	10 sccm
レーザー出力	40 W
レーザー照射時間	600 s
ビーム径	6 mm
直流電圧	100 V
RF 電力 (13.56 MHz)	150 W

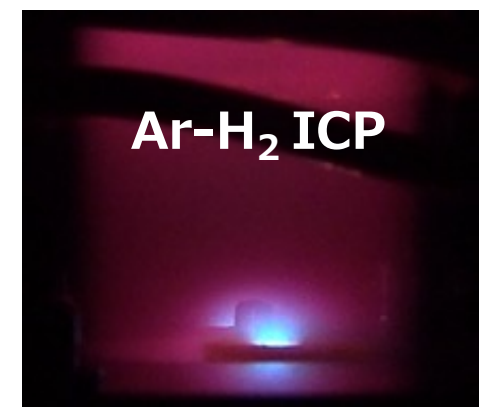
実験結果



取得した電流値



実験後の試料断面

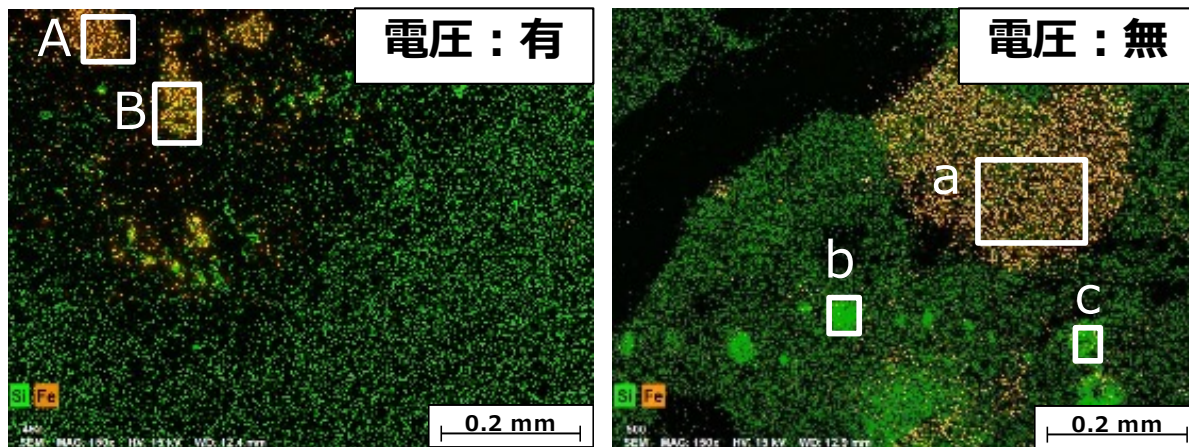


実験時の様子

➤ 電圧印加試料

- ✓ ファラデーの法則より理論生成量7.2 mg
- ✓ 生成量よりカソード周りのSiの膜厚は最大791 μm と予測 → **元素分析を実施**

Siの生成



界面付近のマッピング画像 (Si・Fe) ×150

分析結果

Element	At%				
	A	B	a	b	c
Si	16	24	33	24	45
O	37	30	6	53	35
Ca	21	20	-	18	9
Al	8	4	-	6	3
Fe	18	22	61	-	8

➤ 生成物

- ✓ 両条件で界面付近に**Si**が生成
- ✓ SiO_2 がプラズマとの界面でHと反応： $\text{SiO}_2 + 4\text{H} \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2\text{O}$
→ 電気分解の有無に関わらずSiを生成
- ✓ SiとFeの**合金**を確認 → 容器のFeがSiにより融点降下（共晶点：**約1470 K**）

➤ 還元反応によるSiの生成

- ✓ カソード周りにSiの生成は確認できず
- ✓ 溶融物の密度： $2.71 \text{ g/cm}^3 > \text{Siの密度} : 2.33 \text{ g/cm}^3$

➡ 生成経路（還元反応 vs プラズマ反応）の同定が困難

まとめ

目的

Ar-H₂ ICPを陽極とした 熔融アルミナ電解の実現可能性検討

- Al₂O₃-SiO₂系混合物の還元実験
 - ✓ Al : O = 2 : 2.3 ± 0.7より生成物から酸素が減少したことを確認
 - Alの還元は確認されなかった
- CaO-Al₂O₃-SiO₂系混合物の還元実験
 - ✓ プラズマ中のHとSiO₂が反応しSiが生成することを確認
 - ✓ 還元反応によりSiが生成されているかは同定が困難

今後の展望

- ✓ Siの生成による電解還元の立証は困難
 - 試料をCaOとAl₂O₃の混合物に変更（最低共晶温度：約1670 K）
 - Alの生成により電解還元を立証

