

2024 年度

焼却プラント爆発を防ぐためのアルミと水の反応抑制に関する研究補助事業

研究報告書



2025 年 3 月 31 日

室蘭工業大学大学院 航空宇宙総合工学ユニット

今井 良二

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 能代ロケット実験場

室蘭工業大学大学院 先端生産システム工学コース

小野寺 英之

室蘭工業大学理工学部 航空宇宙工学コース

菊地 柔行

目 次

1.	緒言	1
2.	研究内容	3
3.	模擬焼却灰を用いた AI 粉末と水の反応抑制の検証実験	4
4.	実焼却灰を用いた AI 粉末と水の反応抑制の検証実験	16
5.	まとめ	20

1. 緒言

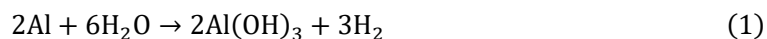
1.1 研究背景

焼却プラントではコンベヤ内,灰押し出し装置付近,灰ピット内で爆発する事例が起きている.これによりコンベヤや灰押し出し装置等の設備が爆発により破損し,焼却プラントの安定的な運転に支障が出ており,焼却プラント内の作業員が負傷する可能性があり,不安全的な状態となっていることが問題視されている.



Fig.1 水素爆発後の灰処理設備の破損⁽¹⁾⁽²⁾

爆発の原因は,灰に含まれる金属アルミニウムが灰の冷却,飛散防止に用いられる水と反応して水素が発生しているためと考えられる.(1)式にアルミニウムと水の化学反応式を示す.



これらの問題を改善するため,水素爆発が起こらない工夫が必要である.

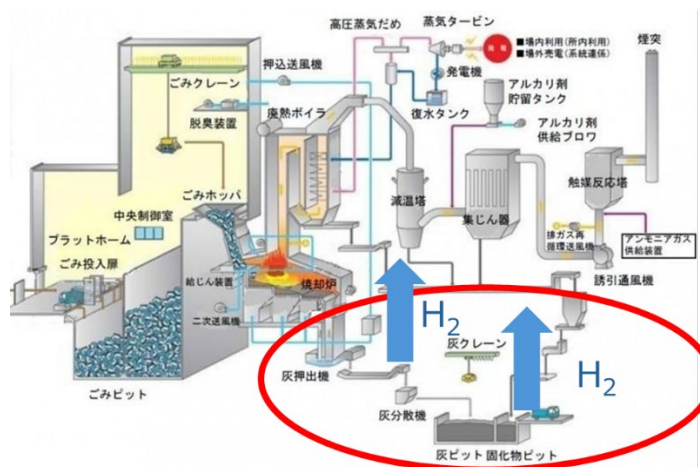


Fig.2 ごみ焼却プラントフロー図⁽³⁾

また, 先行研究において実際の焼却灰と純 Al 粉末を合わせた混合粉末と水による再加熱実験を行った結果, 反応温度が高いほど自然冷却した際の反応制御性が高くなることがわかっているが, Al 合金粉末を使用した場合や自然冷却温度を変更した場合に抑制状況は不明である。

1.2 Al/水反応の概要

水素は燃料電池などに利用可能であるクリーンエネルギーとしても注目を集めている。水素の一般的な製造方法として水蒸気改質法がある。しかし, この製造方法では CO_2 が多量に生成される。今後は, 製造過程において CO_2 が生成されない技術が求められる。

そこで本学では, (1)式で示されるアルミニウム(Al)粉末と水の化学反応から水素の製造・発生抑制を行う研究を行っている。Al/水反応は, Al 粉末を水中で攪拌することで反応が起きる化学反応のことである。

しかし, Al/水反応のメカニズムは解明されていない。Al 粉末を水中で攪拌したときに Al 粉末が互いにぶつかり合うことで Al の酸化皮膜が壊される。この破壊箇所から水と Al の反応がはじまり, 水素が発生していると考えられている。これは仮説であるため, 今後はメカニズムの解明も行っていく必要がある。

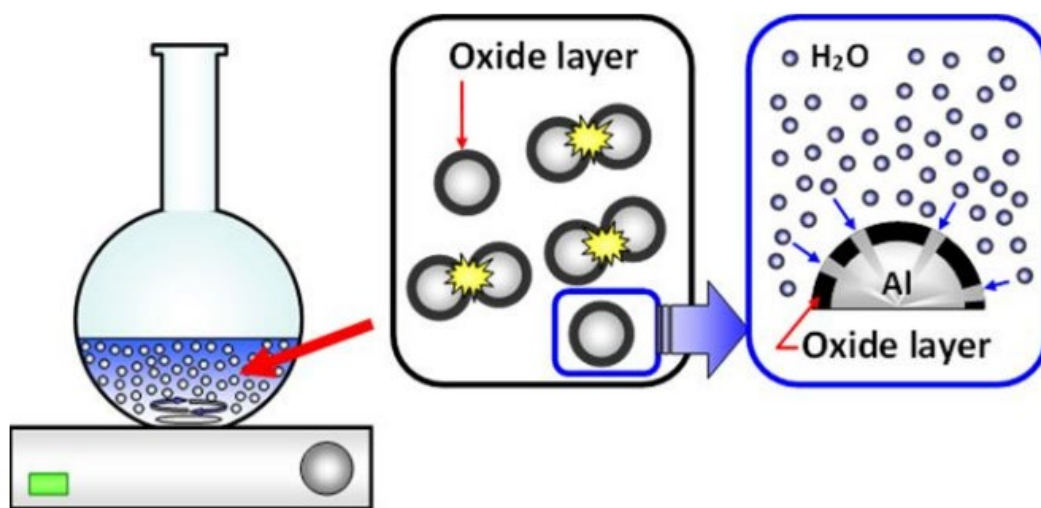


Fig.3 Al/水反応について

2. 研究内容

2. 1 研究目的

本研究では、水素爆発を起こさない安全な焼却プラントの実現を最終目標としている。この最終目標を達成するために以下のような目標を設定した。

- ・焼却プラントでの水素ガス発生防止を目的に、焼却灰に含まれるアルミニウムと冷却水の反応を止める技術を開発する。
- ・焼却プラントでの水素発生予測を目的に、質量保存則とエネルギー保存則により温度を求める式を作成し、節点法を用いた水素ガス発生予測モデルを作成する。

2. 2 実験概要

本研究では以下の実験を実施した。

- ① 模擬焼却灰を用いた Al 粉末と水の反応抑制の検証実験
- ② 実焼却灰を用いた Al 粉末と水の反応抑制の検証実験

3. 模擬焼却灰を用いた Al 粉末と水の反応抑制の検証実験

3. 1 実験装置

図 3-1 に実験装置概要を示す。ヒーターを用いて実験温度まで反応容器を加熱し、アクリル管を用いた水上置換で水素を捕集して水素製造量を測定する。

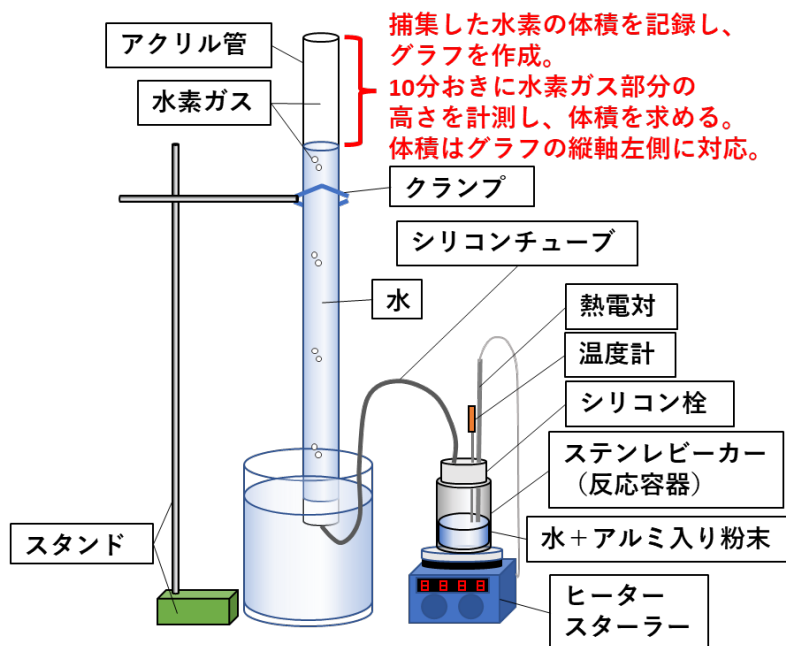


図 3-1 配管系統図

3. 2 実験方法

表 3-1 に実験条件を示す。模擬焼却灰の組成は表に示すとおりである。水のみを反応容器に入れて、加熱温度（30～90℃）まで上昇させる。その後、焼却灰を模擬した混合粉末を反応容器に入れ、水と反応させて水素を発生させる。混合粉末を入れた後、すぐにヒーターを止めて 30℃まで自然冷却させる。温度が 30℃以下まで低下後、再び実験温度まで上昇させる。これを実験時間に達するまで繰り返す。発生した水素は水上置換により捕集管に集め、体積を計測する。

表 3 - 1 実験条件

模擬焼却灰 g	8
純Al g	2
温度 °C	30、40、50、60、70、80、90
粒形 μm	100～0
攪拌速度 rpm	0、100
水量 ml	200
実験時間 min	360
模擬焼却灰組成	Al、Al ₂ O ₃ 、CaO、SiO ₂ 2 gずつ

図 3 - 2 ～図 3 - 7 に加熱温度 90℃、80℃、70℃、60℃、50℃、40℃、冷却温度を 30℃とした場合の発生水素体積の時間変化を示す。

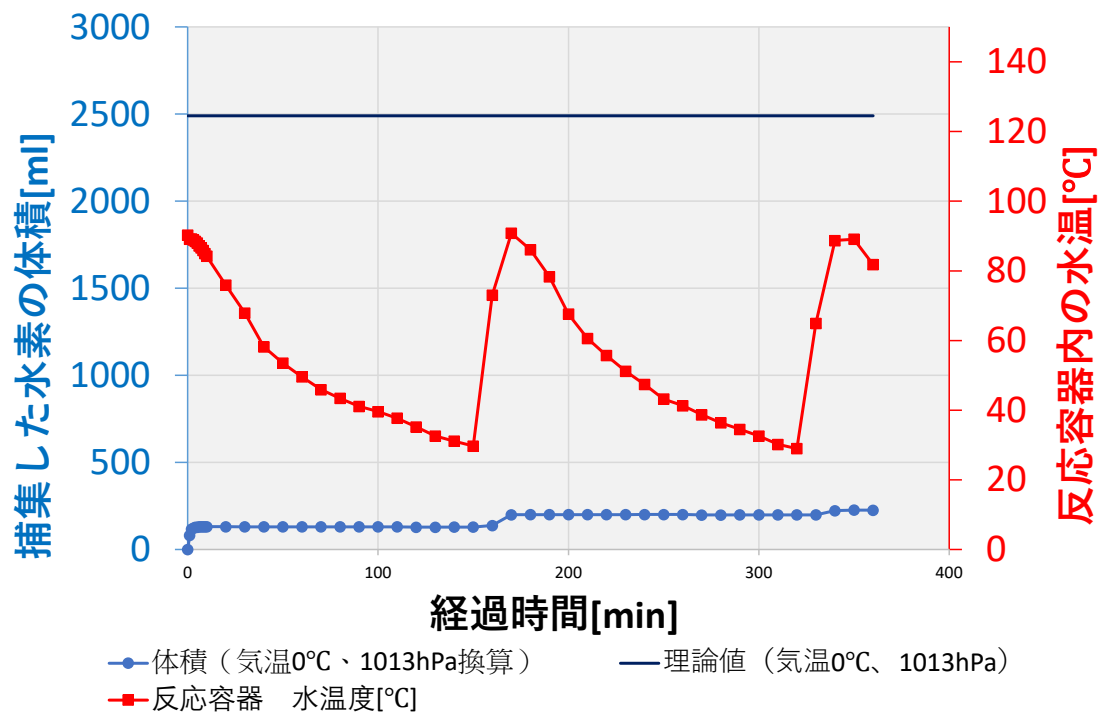


図 3 - 2 加熱温度 90℃、冷却温度 30℃における水素体積の時間変化

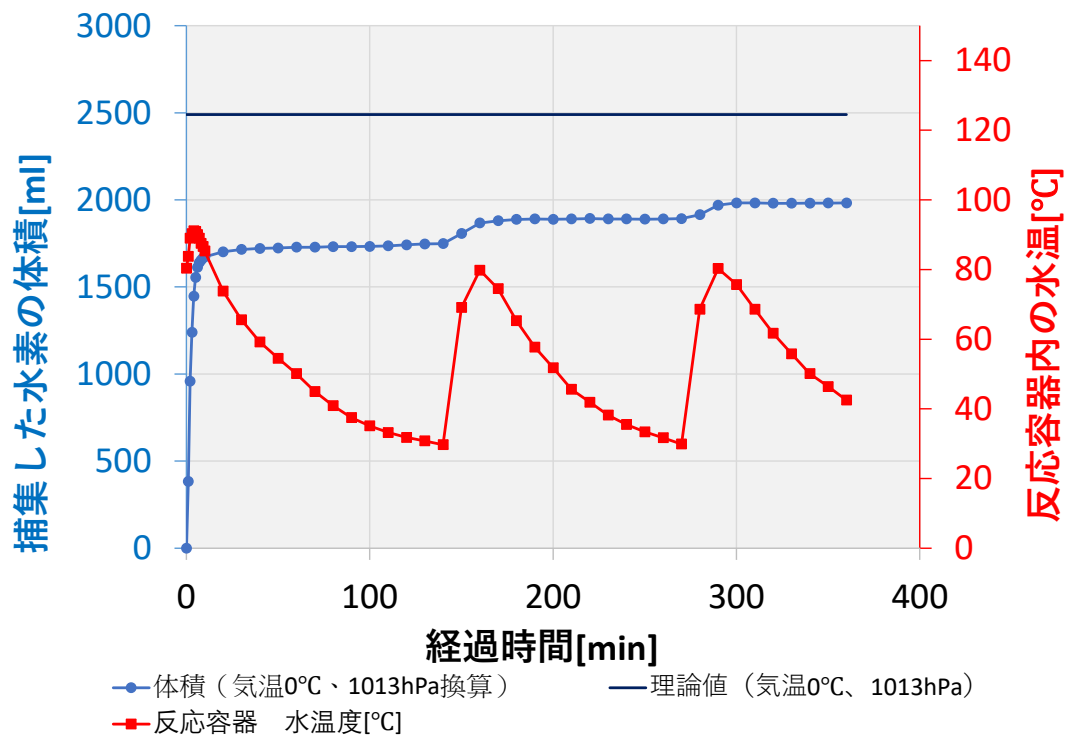


図3-3 加熱温度 80°C，冷却温度 30°Cにおける水素体積の時間変化

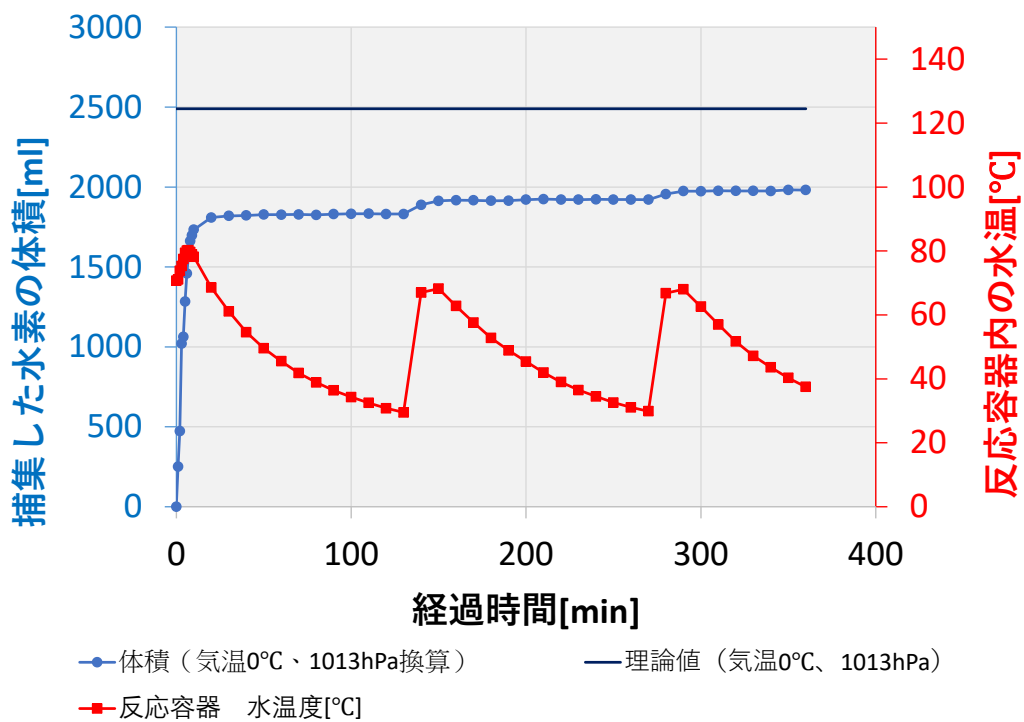


図3-4 加熱温度 70°C，冷却温度 30°Cにおける水素体積の時間変化

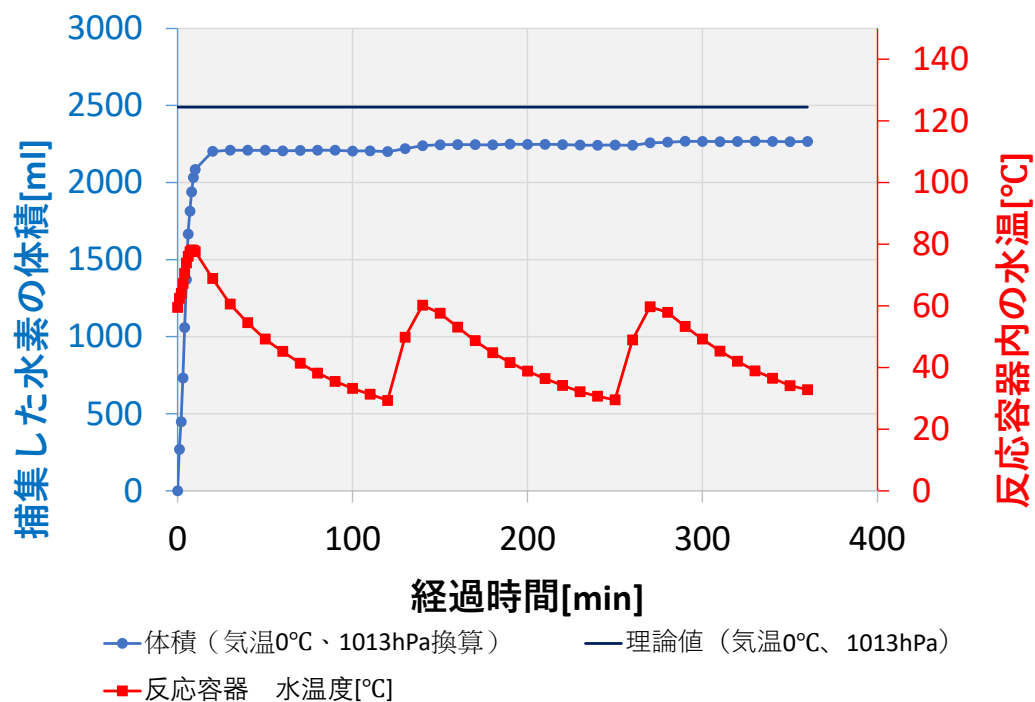


図 3 - 5 加熱温度 60°C，冷却温度 30°Cにおける水素体積の時間変化

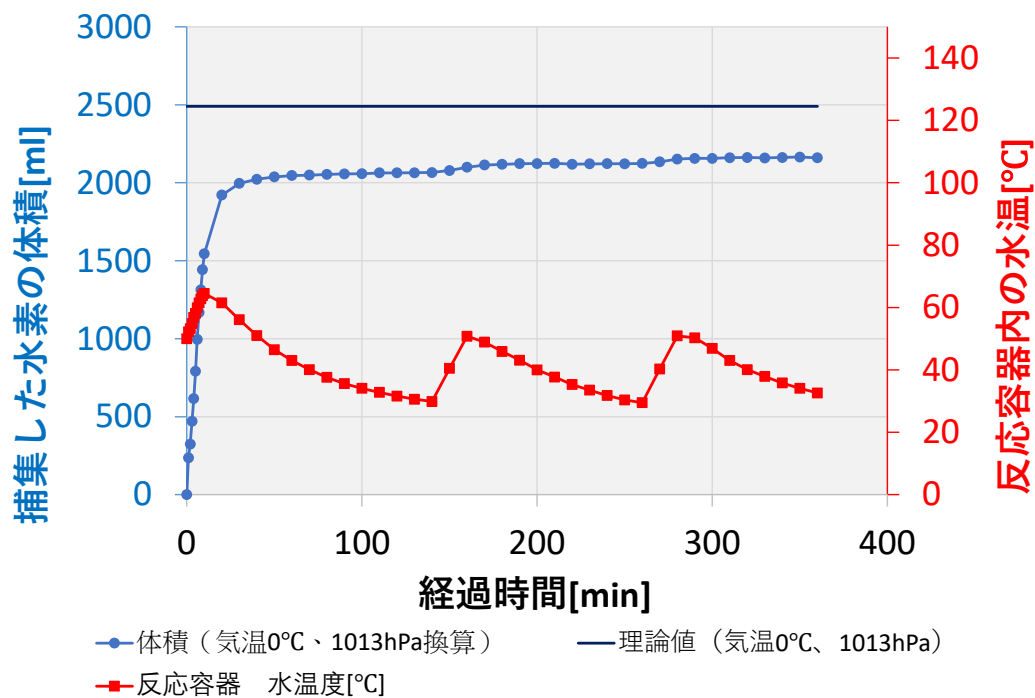


図 3 - 6 加熱温度 50°C，冷却温度 30°Cにおける水素体積の時間変化

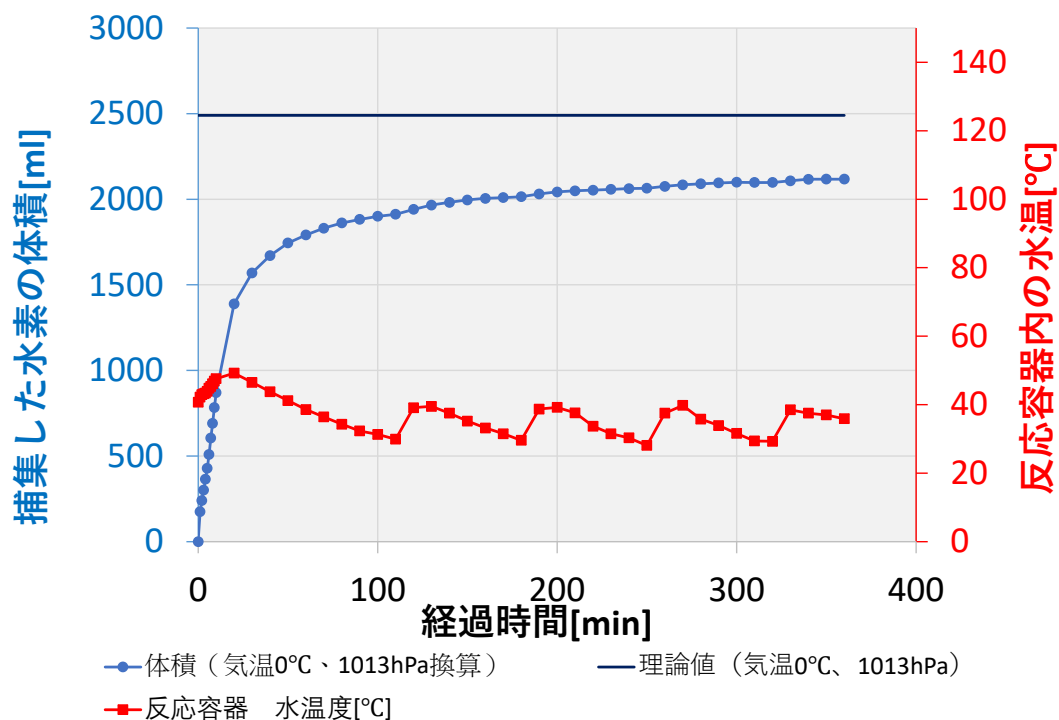


図3-7 加熱温度 50°C，冷却温度 40°Cにおける水素体積の時間変化

図3-2～図3-7より反応温度が高いほど反応制御性が増すことが判明した。40 °Cの場合、冷却しても全く水素発生を制御できないことが判明した。50 °Cの場合、冷却すると水素発生を僅かに抑制できることが判明した。60 °C、70 °C、80 °Cの場合、冷却すると水素発生量が減少した。90 °Cの場合、冷却すると水素発生がほぼ停止すること、カルシウムを含むアルカリ溶液とアルミニウムの反応がほぼ停止することが判明した。

焼却灰を模擬した粉末と水の反応を止められる原因として、アルミニウム粒子表面に不動態被膜が生成され、高温時により生成されやすいためではないかと考えられる。

本実験では実験終了後のサンプルを取り出し、X線回折（XRD）分析を実施した。分析結果を表3-2にまとめる。また各計測で取得されたX線回折パターンを図3-8～図3-13に示す。

表 3 - 2 XRD 分析結果

サンプル 温度	サンプル25 40℃	サンプル26 50℃	サンプル27 60℃	サンプル28 70℃	サンプル29 80℃	サンプル30 90℃
	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂
		Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
		Al	Al	Al	Al	Al
		Al ₂ .849Ca ₃ H ₉ .6O ₁₂	Al ₂ .849Ca ₃ H ₉ .6O ₁₂		Al ₂ .849Ca ₃ H ₉ .6O ₁₂	
			H ₂ O,ICE		H ₂ O,ICE	H ₂ O,ICE
	AlH ₃ O ₃			AlCaSi	AlCaSi	
		Ca ₂ .5H ₀ 9Si ₃			AlH ₃ O ₃	
同定された物質				Al ₂ Ca ₃ H ₁₂ O ₁₂		Ca ₂ .5H ₀ 9Si ₃
	Ca ₈ O ₁₈ Si ₅	AlCa				Al ₂ Ca ₃ H ₁₂ O ₁₂
	CaO ₃ Si	Al ₁ .782Ca ₀ .731H ₆ O				H ₃ .6O ₂₄ Si ₁₁ .04
		13.625Si ₄ .218				
	AlCaH ₀ 5Si	Ca ₆ H ₂ O ₁₃ Si ₃				
	Al ₂ .4O ₄ .8Si ₀ .6	Al ₂ CaH ₂ O ₂₀				
	CA ₂ O ₄ Si					

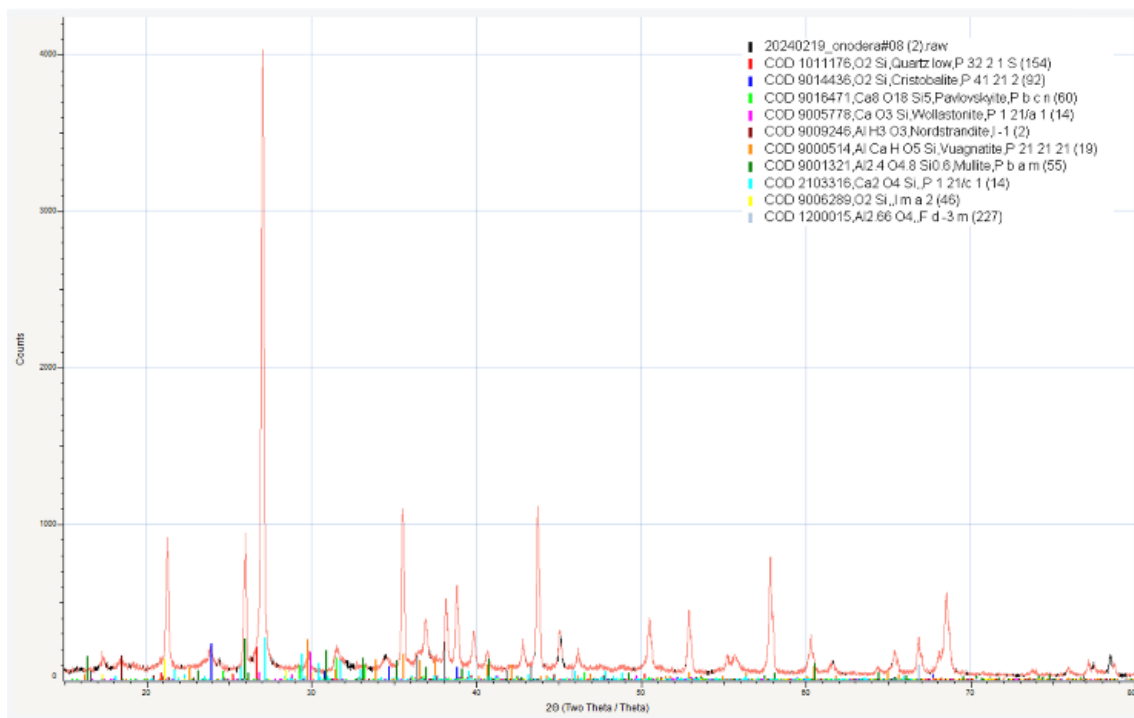


図 3 - 8 X 線回折パターン (加熱温度 40℃)

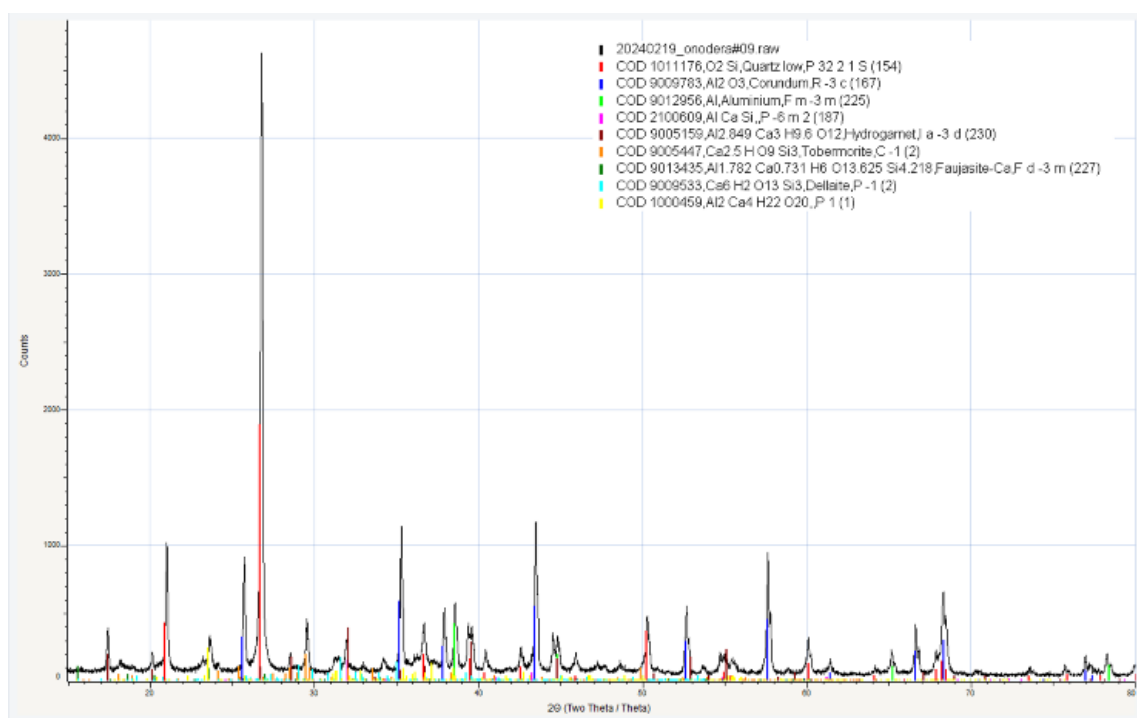


図 3 - 9 X 線回折パターン (加熱温度 50°C)

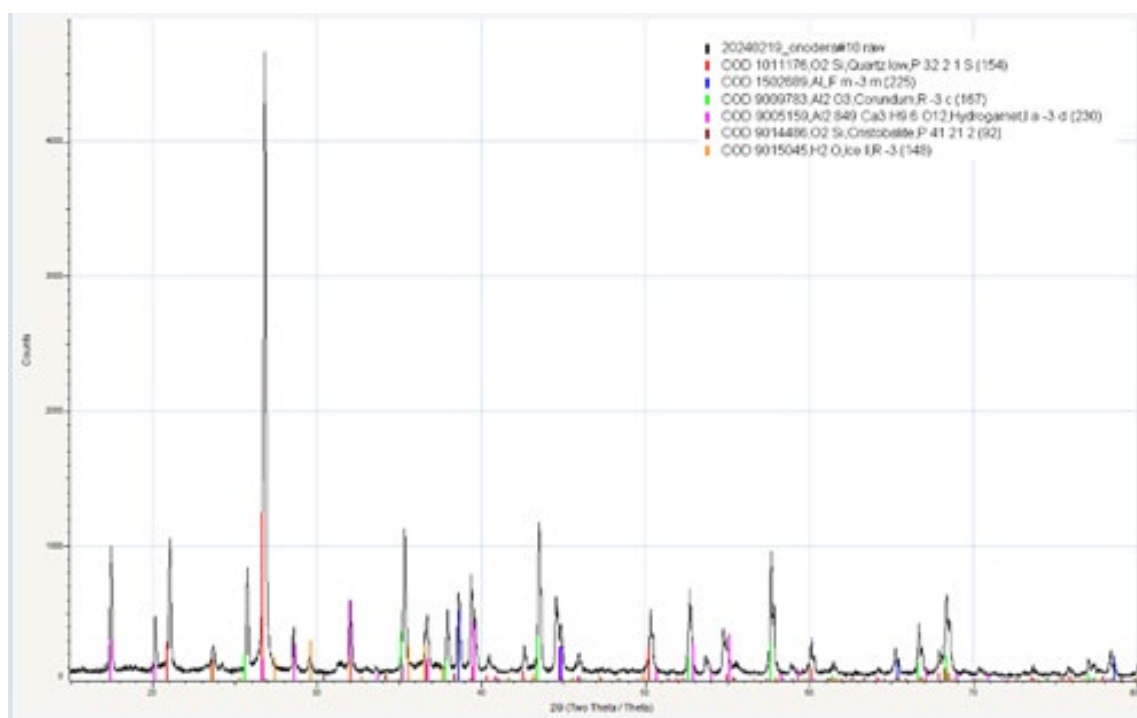


図 3 - 10 X 線回折パターン (加熱温度 60°C)

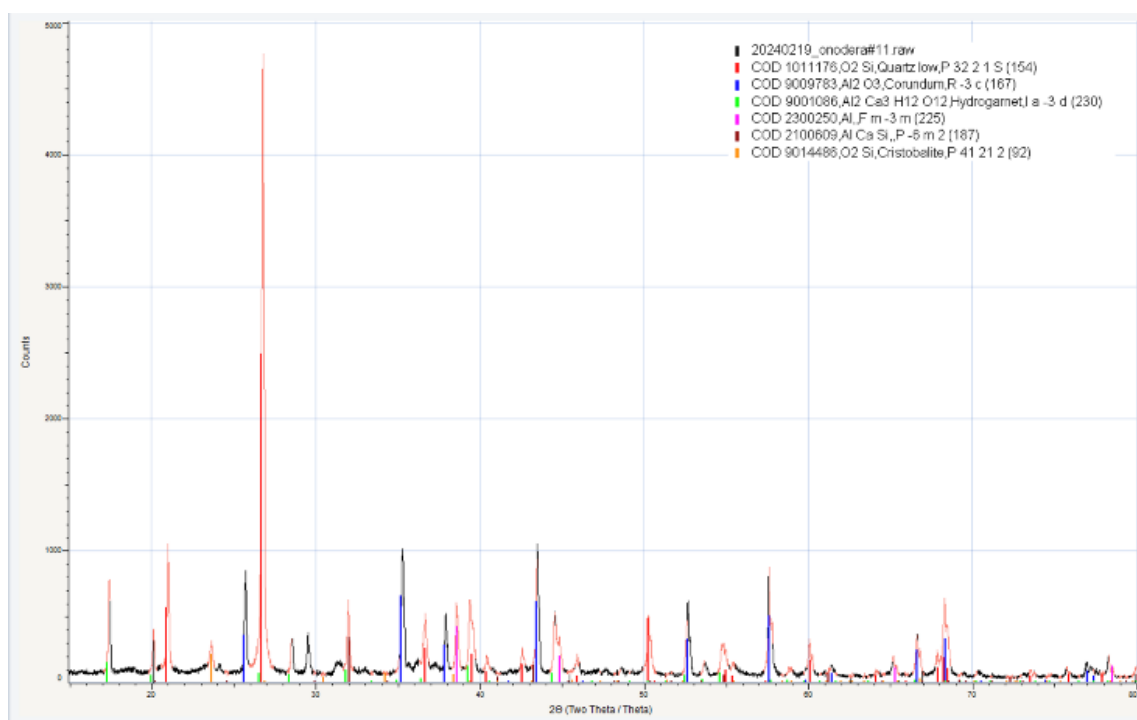


図 3 - 1 2 X 線回折パターン (加熱温度 70℃)

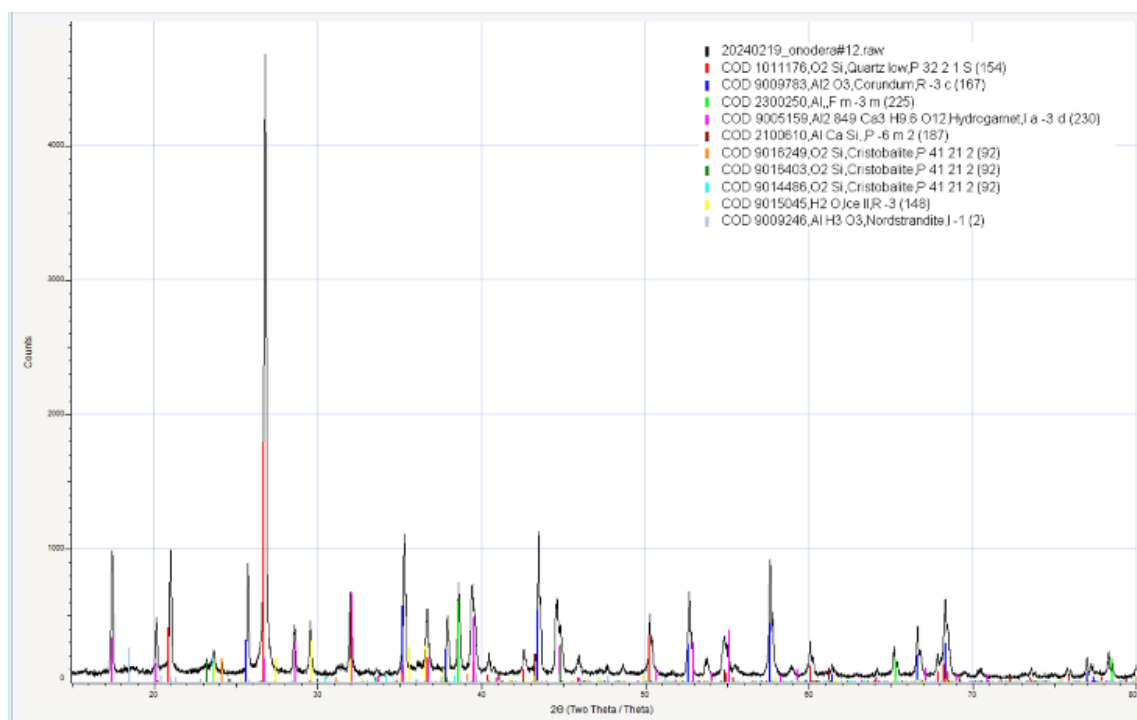


図 3 - 1 2 X 線回折パターン (加熱温度 80℃)

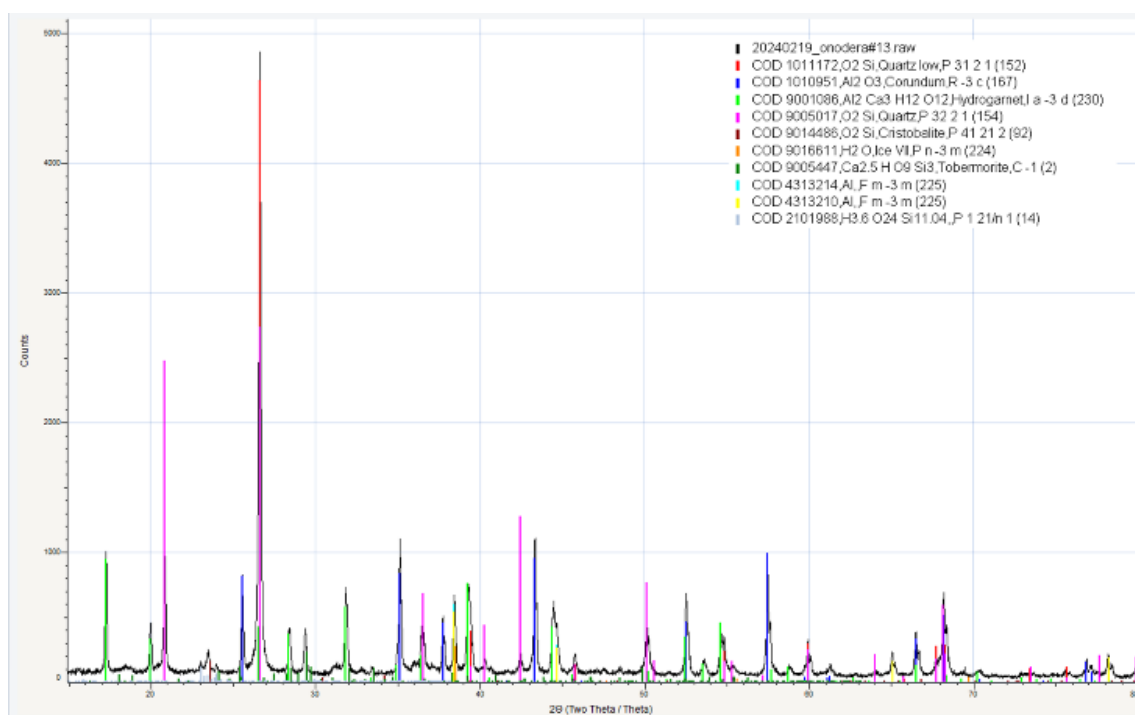


図 3 - 1 3 X 線回折パターン (加熱温度 90℃)

本実験では実験終了後のサンプルを取り出し、走査型電子顕微鏡による試料の観察を行った。各計測で取得された SEM 画像を図 3 - 1 4 ~ 図 3 - 1 9 に示す。

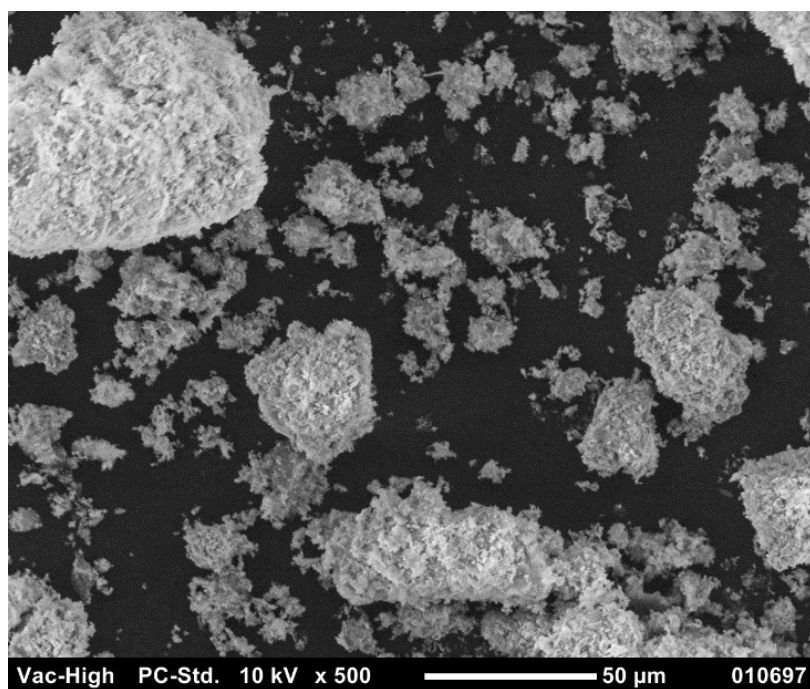


図 3 - 1 4 サンプル 25 40℃ SEM 観察結果

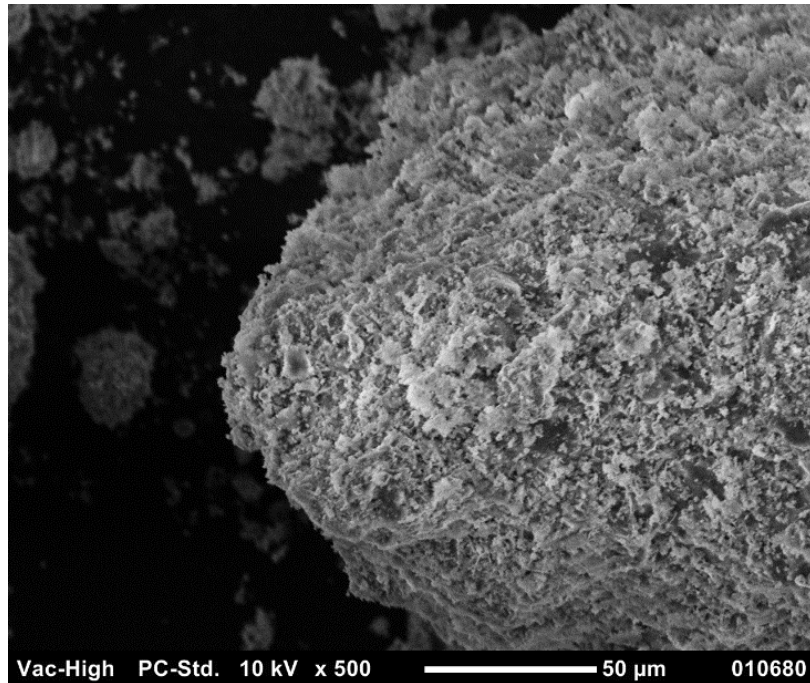


図 3 - 1 5 サンプル 25 50°C SEM 観察結果



図 3 - 1 6 サンプル 27 60°C SEM 観察

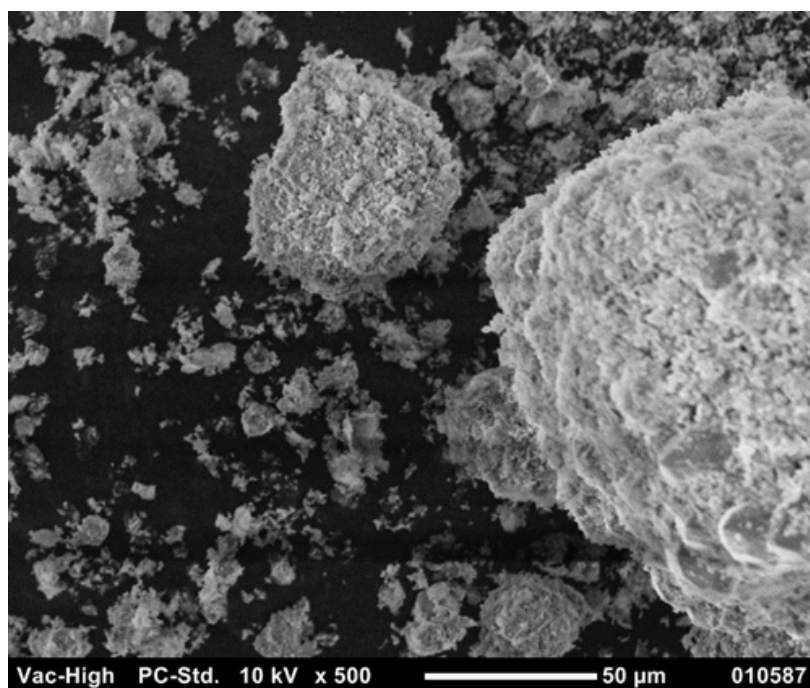


図 3 - 1 7 サンプル 28 70℃ SEM 観察結果

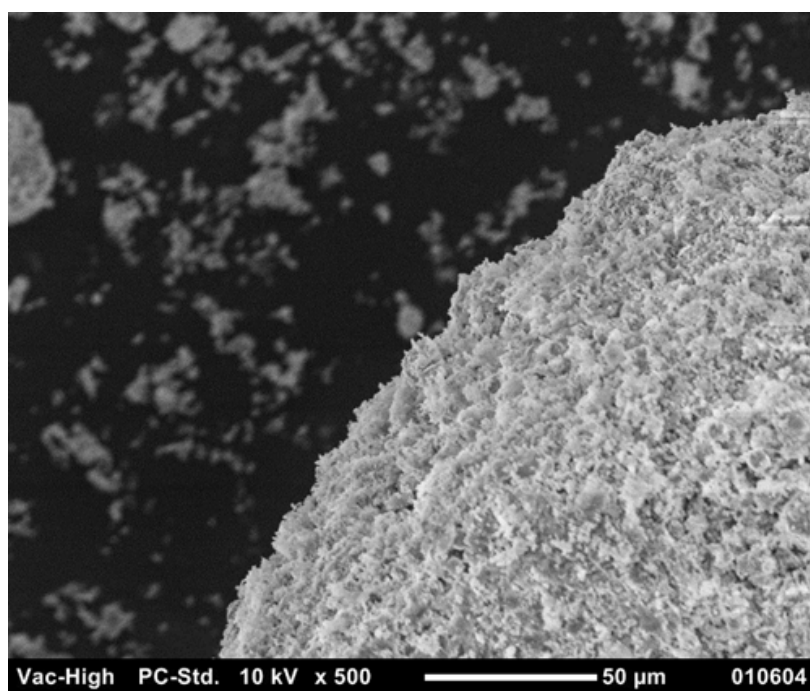


図 3 - 1 8 サンプル 29 80℃ SEM 観察結果

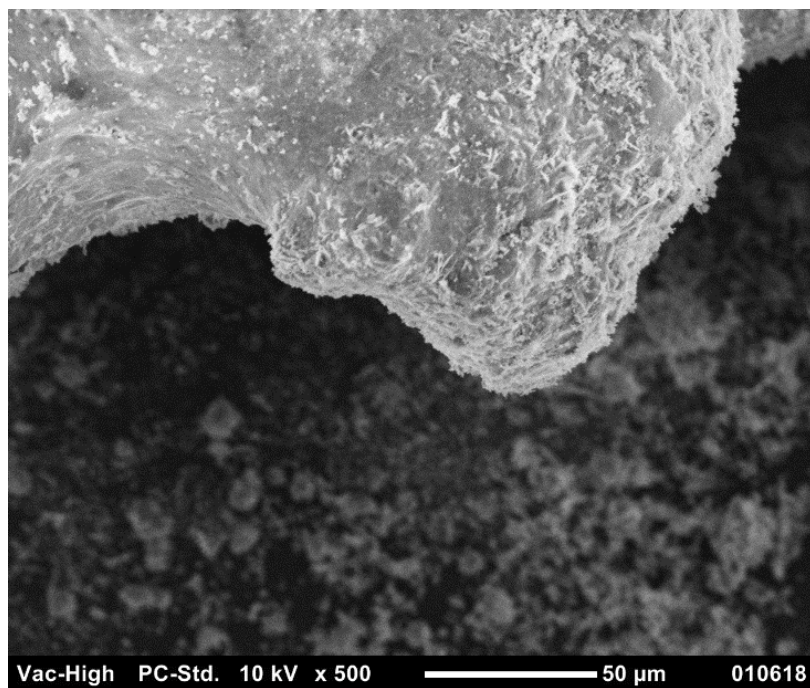


図 3 - 1 9 サンプル 30 90°C SEM 観察

4. 実焼却灰を用いた Al 粉末と水の反応抑制の検証実験

4. 1 実験装置

3 章で述べたものと同一である。

4. 2 実験方法

表 4-1 に実験条件を示す。水のみを反応容器に入れて、実験温度まで上昇させる。その後、実焼却灰と純アルミニウムの混合粉末試料を反応容器に入れ、水と反応させて水素を発生させる。粉末試料を入れた後、すぐにヒーターを止めて 30℃まで自然冷却させる。温度が 30℃以下まで低下後、再び実験温度まで上昇させる。これを実験時間に達するまで繰り返す。発生した水素は水上置換法により捕集管に集め、体積を計測する。

表 4-1 実験条件

粉末試料 g	8		
温度 °C	30、40、50、60、70、80、90		
純Al粒径 μm	250~150		
攪拌速度 rpm	0、100		
水量 ml	200		
実験時間 min	360、21,500(約15日間)		
粉末試料 成分、粒径、 質量	純Al	250~150 μm	2 g
	焼却灰	500 μm 以上	2 g
	焼却灰	500~250 μm	2 g
	焼却灰	250 μm 以下	2 g
	合計		8 g

図4-1に加熱温度90℃、冷却温度を30℃とした場合の発生水素体積の時間変化を示す。
反応温度90℃では、冷却すると水素体積の増加を抑制できることが判明した。

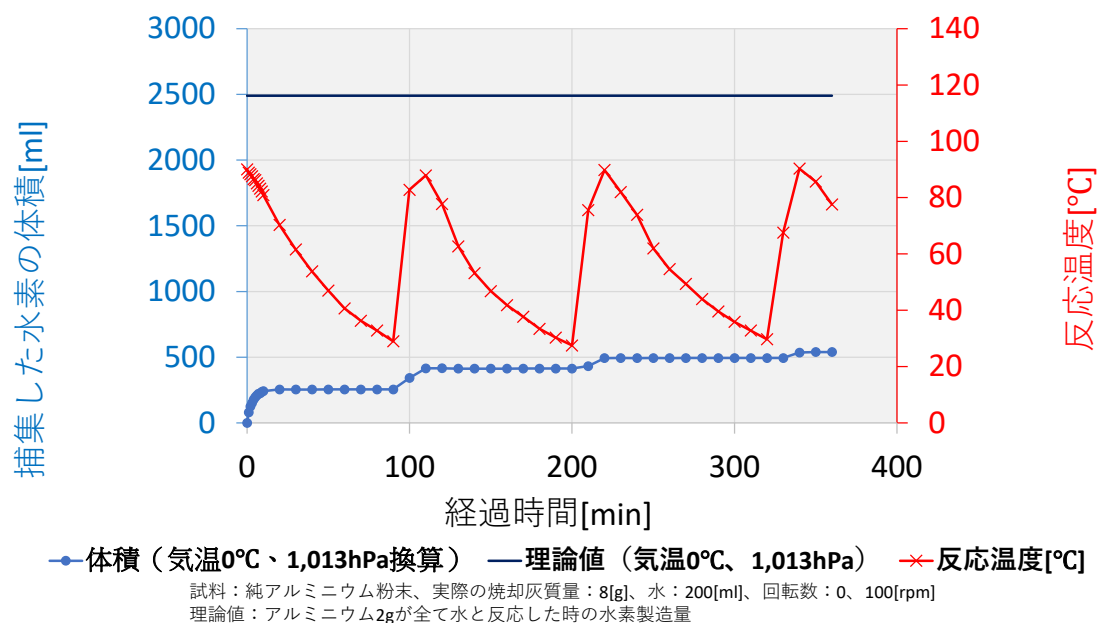


図4-1 加熱温度90℃、冷却温度30℃における水素体積の時間変化

図4-2に加熱温度90℃、その後常温に15日間保持した場合の水素体積の変化を示す。
図より15日経過しても水素発生は見られないことが分かった。

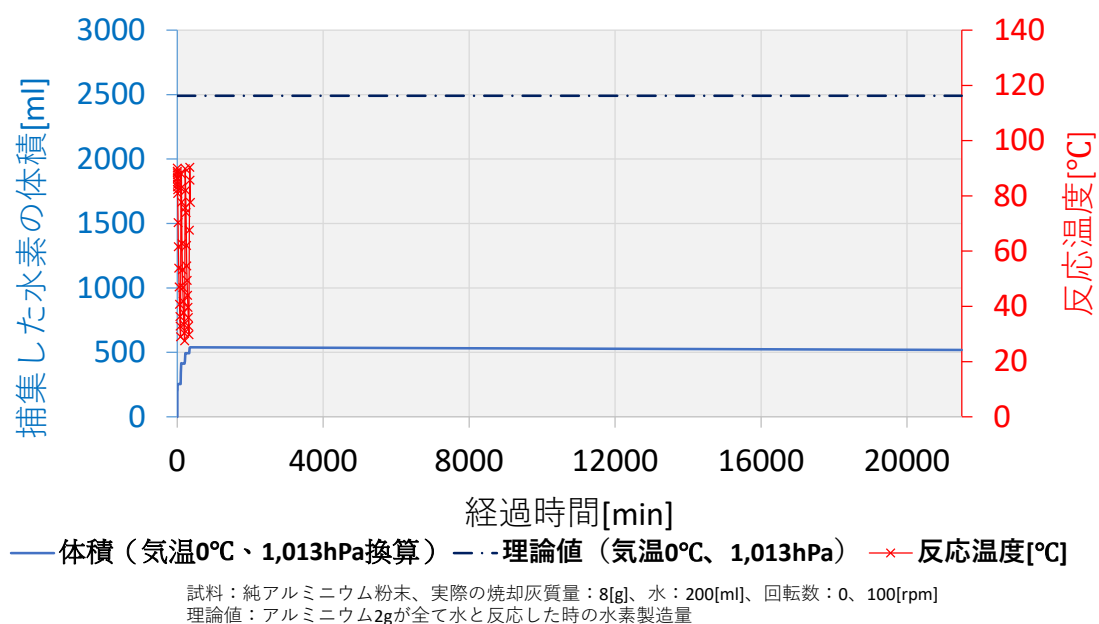


図4-2 加熱温度90℃、15日間常温保持した場合の水素体積の時間変化

図4-3に加熱温度 60℃、冷却温度 30℃とした場合の発生水素体積の時間変化を示す。図より冷却すると水素体積の増加を抑制できることが判明した。なお、加熱温度 70℃、80℃においても同様の傾向が見られた。

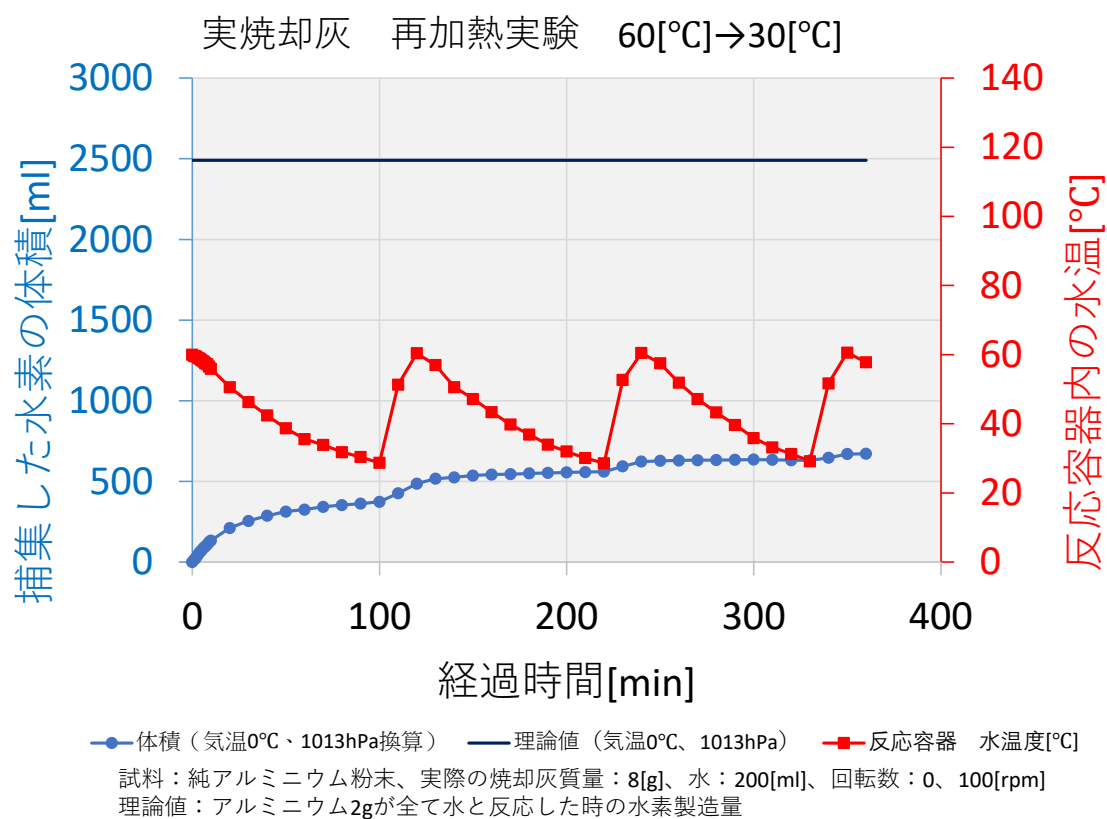


図4-3 加熱温度 60℃、冷却温度 30℃における水素体積の時間変化

図4-4に加熱温度 40～90℃、冷却温度 30℃とした場合の発生水素体積の時間変化をまとめて示す。

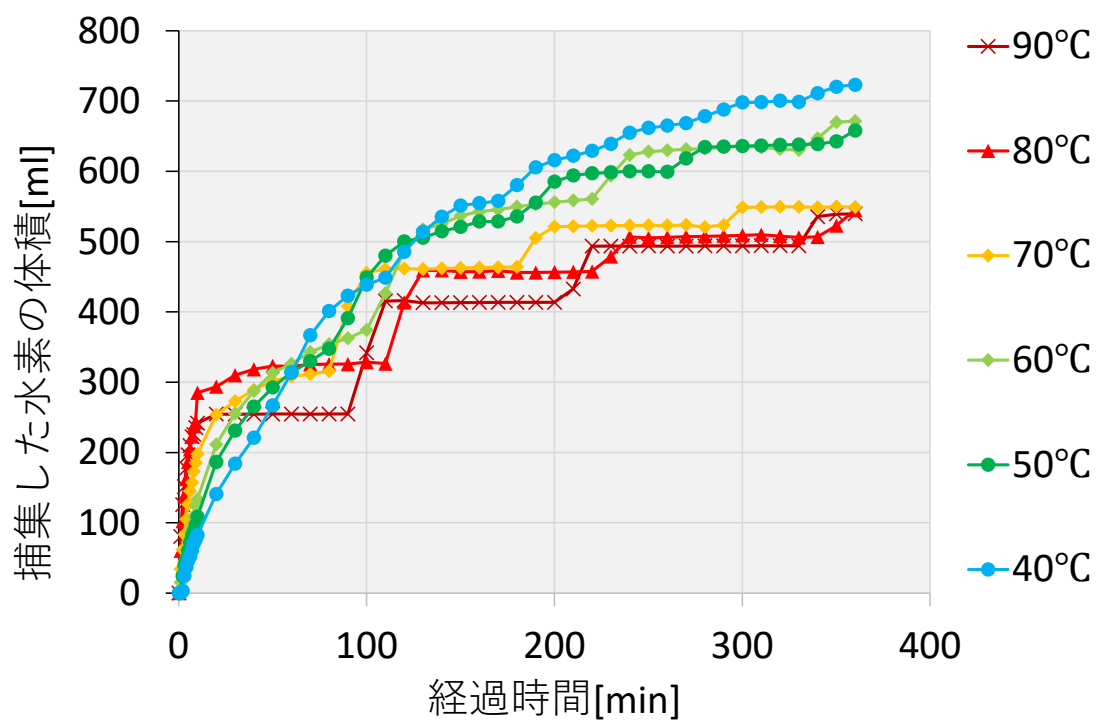


図 4-4 加熱温度 40～90°C，冷却温度 30°Cとした場合の発生水素体積の時間変化

図 4-4 より反応温度が高くなるほど、水素発生を抑制しやすくなることが判明した。

5. まとめ

本研究ではアルミニウムを含んだ模擬焼却灰および実焼却灰と水による水素発生抑制について検討した。その結果、40 °Cの場合は冷却中も水素体積が継続的に増加すること、50 °Cの場合は冷却すると水素体積の増加を僅かに抑制できることが判明した。60 °C、70 °C、80 °Cの場合、冷却すると水素体積の増加を抑制できることが判明した。90 °Cの場合、冷却すると水素体積が増加しないことが判明した。以上から 60 °C以上であれば、水素体積の増加を抑制できることが判明した。