



# LDを用いたレーザーアブレーション によるアルミナ還元のパループ計測

指導教員: 松井信 准教授

学部3年: 大石僚平

# 研究背景

## 月面基地の建設

- 資材の不足
- 地球からの輸送が困難

月面上における資材の確保

レゴリスを利用する資源の確保が検討されている

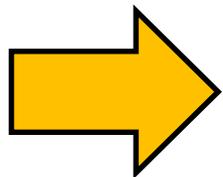
- 月レゴリスには $\text{Al}_2\text{O}_3$ が23%含まれている.
- 地上の現在の手法: 炭素を用いた還元



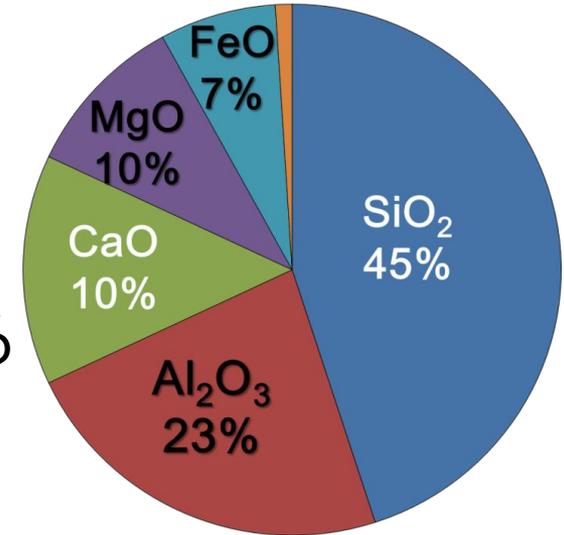
問題点: 炭素の供給源

炭素の輸送に巨額の費用

→ 炭素を必要としない還元方法

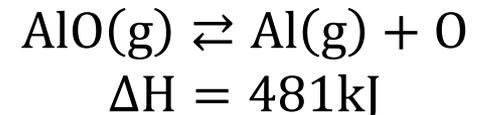
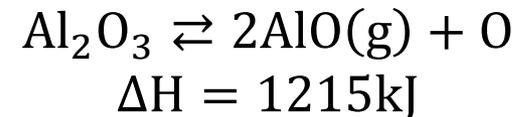


レーザーアブレーション  
による還元



月面レゴリスの組成比

実験における解離反応



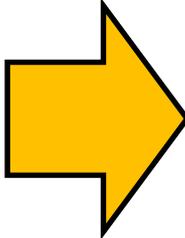
# 目的

東大においてCWCO<sub>2</sub>レーザーアブレーションによるアルミナ還元

高出力レーザーの各特性

変換効率の向上  
月面環境での使用  
→レーザーの省エネ化、小型化  
→LD(Laser Diode)による  
アブレーションの提案

Laser source	CO <sub>2</sub>	Fiber	LD
Maximum power	20kW	100kW	>100kW
Energy efficiency	10%	25%	50%
BPP* (5 kW)	6	2.5	100
Flour area (5 kW)	3m <sup>2</sup>	1m <sup>2</sup>	0.1m <sup>2</sup> <sub>1</sub>
Wavelength	10.6μm	1.07μm	940nm

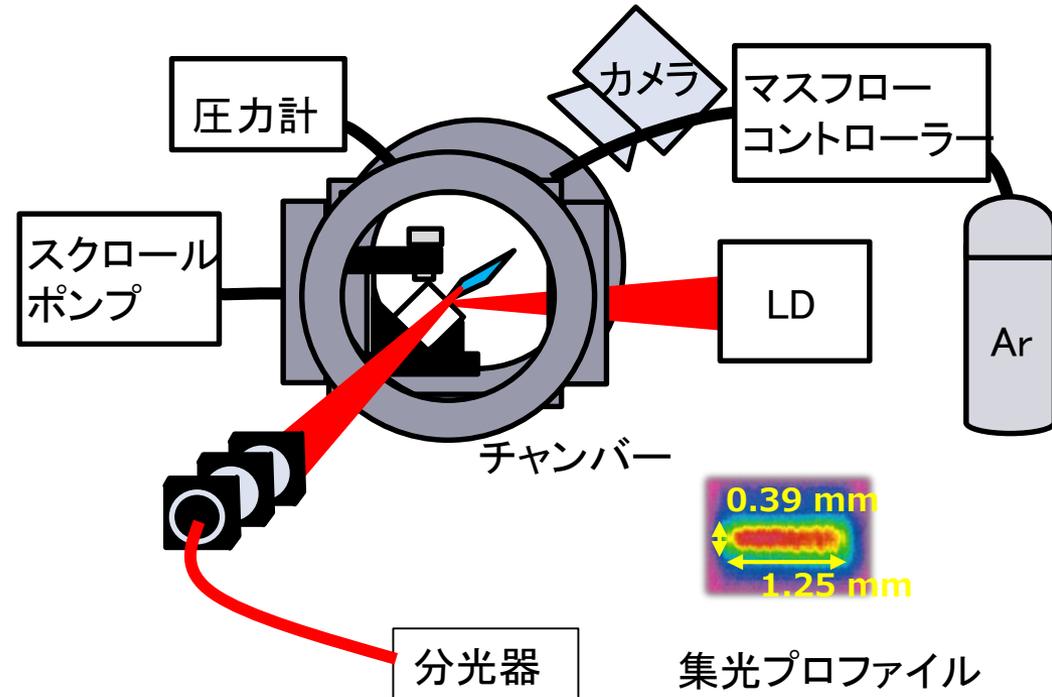
- 
- アブレーションプルームの観測によるプルーム拡張速度の測定
  - スペクトル取得によるプルーム内平衡温度の推定
  - CO<sub>2</sub>レーザーを用いた場合とのプルーム内数密度の比較
  - アブレーション速度の比較

1 S.Tanaka et al. (2019) Alumina reduction by laser ablation using a continuous-wave CO<sub>2</sub> laser toward luar resource utilization ,Vaccum, 167 495-499

# 実験条件・実験系

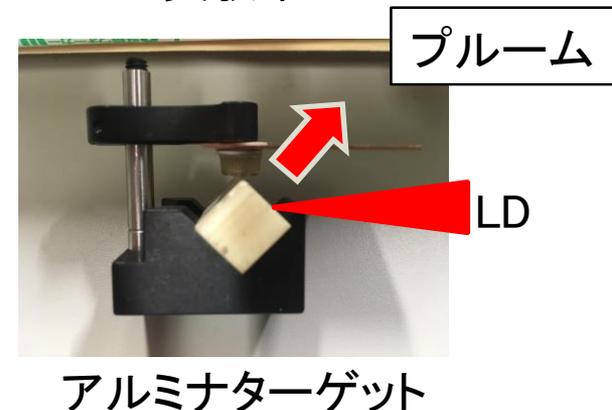
## 実験条件

レーザー波長, nm	940
チャンバー内雰囲気気圧, kPa	0,7,12,40,65,100
レーザー強度, $\text{GW}/\text{m}^2$	0.48~2.10
照射時間, s	1
測定波長範囲, nm	200-1050
光学分解能 (FWHM), nm	0.75



## 実験系

カメラ: プルーム寸法取得  
 分光器: プルームのスペクトル取得  
 アルミナ表面から $45^\circ$  にレーザーを照射



# アブレーション速度の導出

アブレーションプルームの数密度

$$n = \frac{P}{kT}$$

$$\dot{m}_{ab} = \frac{M_{ave} u}{N_A} \cdot n$$

$P$ :チャンバー内雰囲気気圧,  $k$ :ボルツマン定数  
 $T$ :プルーム内平衡温度

$\dot{m}_{ab}$ :アブレーション速度 [ $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ]  
 $N_A$ :アボカドロ数,  $M_{ave}$ :アブレーション内平均分子量  
 $A$ :プルーム断面積,  $u$ :プルーム拡張速度

数密度増加→プルーム内のAIまたはAIOの増加, プルームの発光強度増加

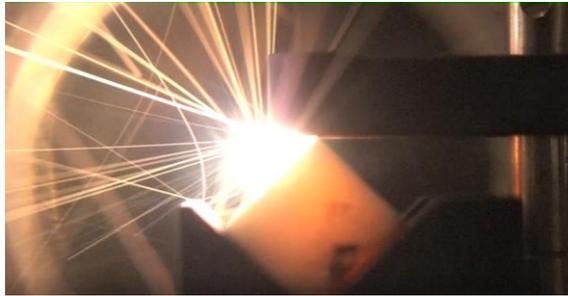
断面積 $A$ , 拡張速度 $u$ の取得→カメラ撮影画像の画像処理

プルーム内平衡温度 $T$ の取得→取得スペクトルをプランクの黒体放射の式でフィッティング  
→アブレーション速度 $\dot{m}_{ab}$ の導出

$$I(\nu, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

$I$ :発光強度  $h$ :プランク定数  
 $c$ :光の速度  $\lambda$ :光の波長:

# 取得画像



レーザー強度 $0.48\text{GW}/\text{m}^2$   
チャンバー内雰囲気気圧 $0\text{kPa}$



レーザー強度 $2.10\text{GW}/\text{m}^2$   
チャンバー内雰囲気気圧 $0\text{kPa}$

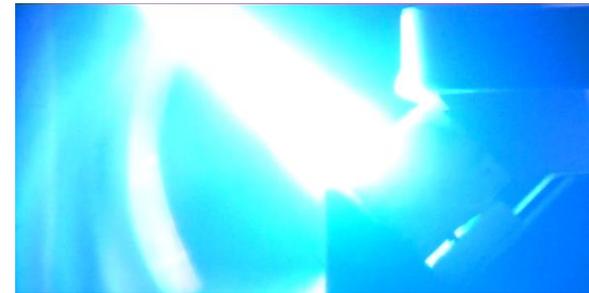
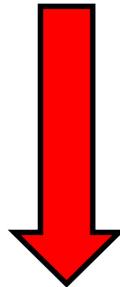
- チャンバー内雰囲気気圧 $0\text{ kPa}$
- プルーム発生: 基本無し
  - 数密度が非常に小さいため

圧力増加



レーザー強度  $0.48\text{GW}/\text{m}^2$   
チャンバー内雰囲気気圧 $65\text{kPa}$

出力増加



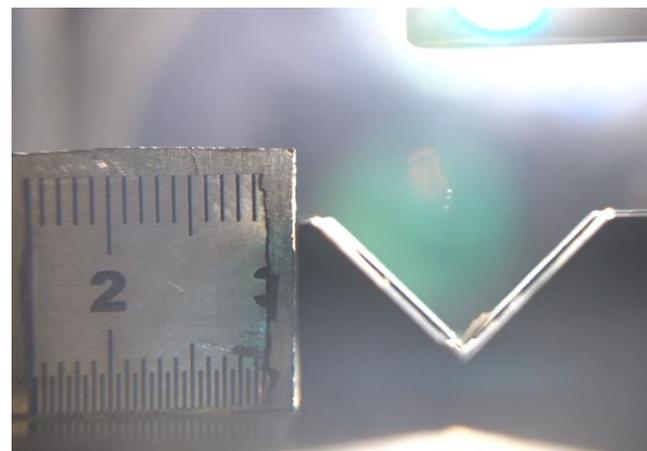
レーザー強度  $2.10\text{GW}/\text{m}^2$   
チャンバー内雰囲気気圧 $65\text{kPa}$

出力増加→発光強度増加

# プルーム計測方法

プルームの寸法計測→ImageJ

- カメラでチャンバー内の定規撮影
- ImageJで校正
- プルームの画像の2値化処理
  - 1 グレースケール化
  - 2 アルミナ板の中心の輝度を閾値に設定
  - 3 2値化処理
- プルームの中央の幅, 長さを計測



校正の様子



プルーム計測の例

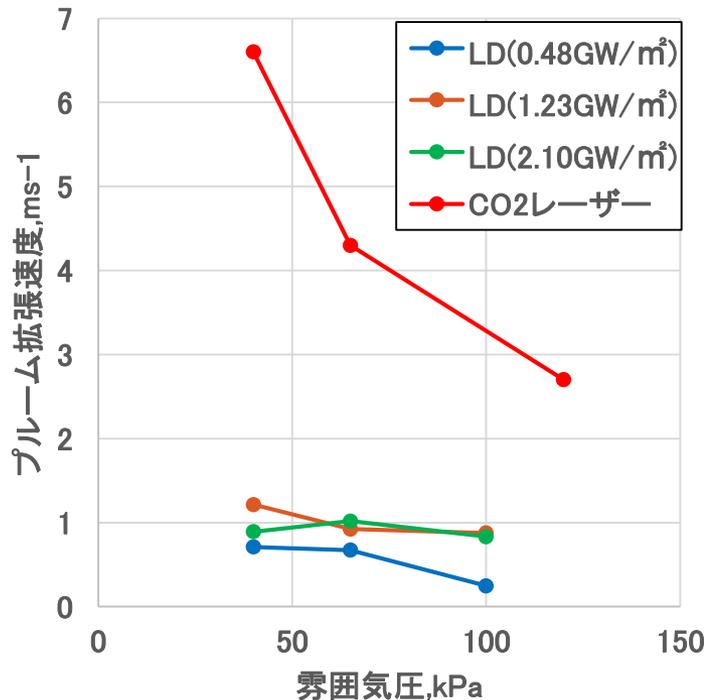
# プルーム計測

プルーム長さ

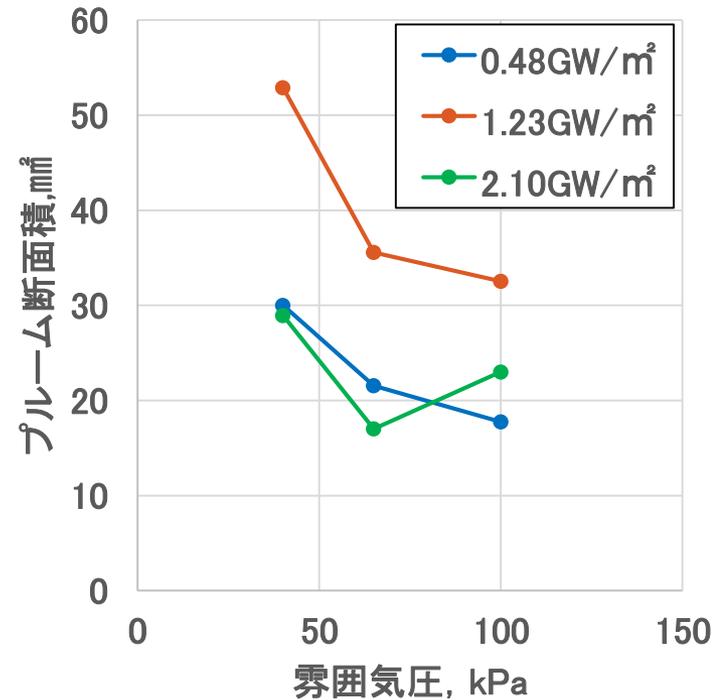
$$u = \frac{\text{プルーム長さ}}{\text{プルーム発生から発達するまでの時間}}$$

雰囲気気圧増: プルーム拡張速度減少  
 先行研究と比較しカメラのfpsが小さい  
 (CO<sub>2</sub>: 1200fps, LD: 30fps)  
 → 発達の様子を確認できない

出力, 雰囲気気圧増: プルーム幅変化  
 圧力最大で幅最小  
 → プルーム断面積減少  
 → 数密度増加

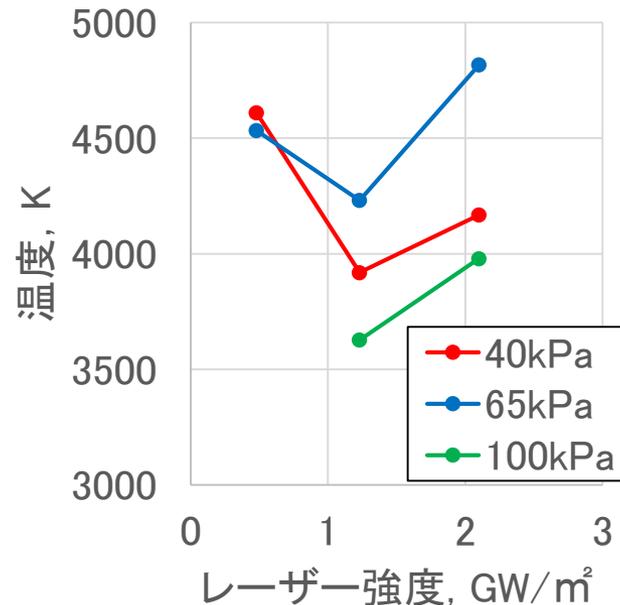
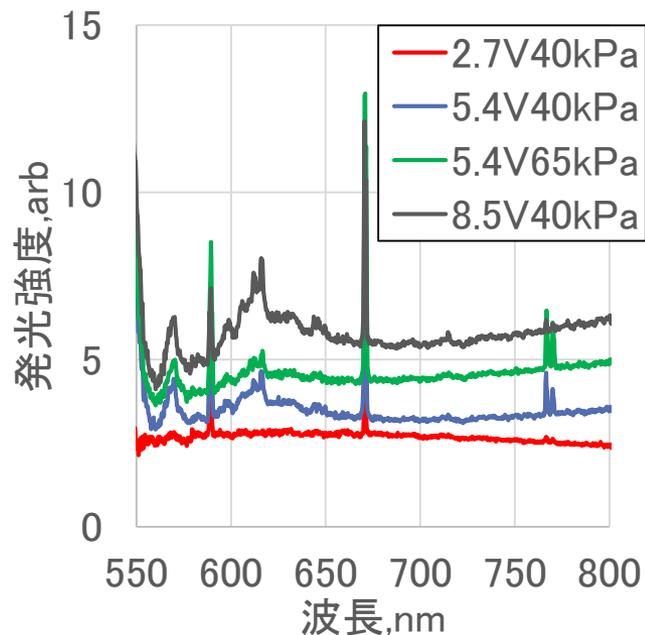


雰囲気気圧vsプルーム拡張速度



雰囲気気圧vsプルーム断面積

# ブルーム分光計測



レーザーアブレーション時の発光スペクトル

雰囲気気圧, 出力増: 発光強度増加  
Arの線スペクトル成分確認

レーザー強度vsブルーム内平衡温度

アルミナの1気圧における沸点: 3250K  
温度3500~4700Kよりアルミナの  
アブレーションの確認

# ブルーム内粒子数密度

$n = \frac{P}{kT}$ より数密度を計算

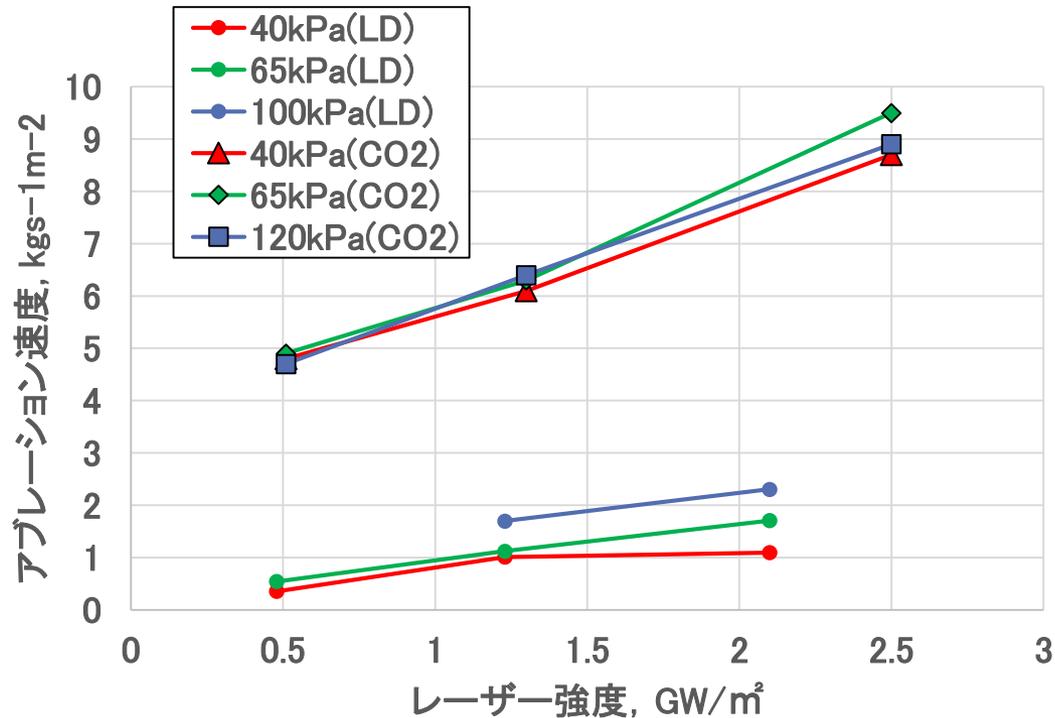
1

## 数密度の比較

LD		CO2レーザー	
雰囲気気圧, kPa	数密度, $10^{24}\text{m}^{-3}$	雰囲気気圧, kPa	数密度, $10^{24}\text{m}^{-3}$
100	2.00	120	2.6
65	1.11	65	1.5
40	0.74	40	0.97

雰囲気気圧増加に対して数密度は減少:CO2レーザーを用いた場合と同様の傾向  
雰囲気気圧を大きくすることで還元反応量を増加させることが可能  
→エネルギー変換効率の向上

# アブレーション速度



アブレーションレートはレーザー強度に対して増加傾向

→CO2レーザーと同様の傾向

アブレーション速度に大きな差が存在

→プルームの拡張速度の測定による差(カメラのフレームレートが小さい)

# まとめ

- ✓ アブレーションプルームの画像よりプルーム拡張速度を計測したところ雰囲気気圧増加に対して減少傾向にある,
- ✓ スペクトル取得により得られたプルーム内平衡温度はアルミナの沸点以上であった. 平衡温度から計算された粒子数密度はCO<sub>2</sub>レーザーにおけるアブレーションと同様に雰囲気気圧増加により増加傾向にあった
- ✓ LDでのアルミナのアブレーション速度がCO<sub>2</sub>レーザーと比べると小さかった  
これはカメラのフレームレートによる可能性がある.

## 今後の展望

- ✓ カメラを変更してプルーム拡張速度の測定
- ✓ 実験後のアルミナターゲットに白銀の付着物  
→XPSによる実験後のアルミナターゲットの  
元素分析
- ✓ 粉体での実験  
→最終的にレゴリスでのアルミナ還元を行うため



実験後のアルミナターゲット

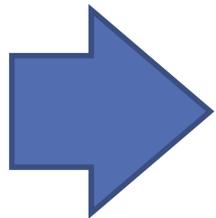
# 研究背景

## 月面基地の建設

- 資材の不足
- 地球からの輸送が困難



月レゴリス



月面上における資材の確保  
レゴリスを利用する資源の確保が検討されている

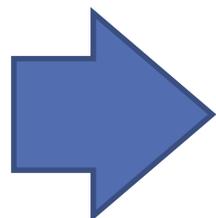
# 研究背景

## 月面基地の建設

- 資材の不足
- 地球からの輸送が困難



月レゴリス

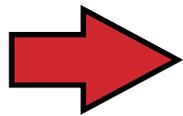


月面上における資材の確保  
レゴリスを利用する資源の確保が検討されている

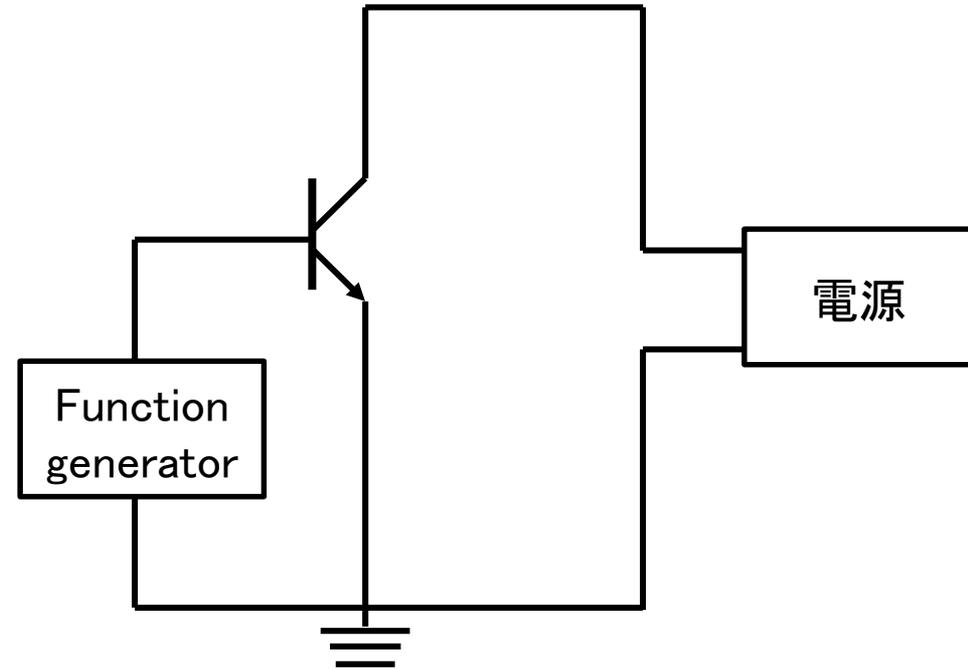
# LDの時間制御回路

ファンクションジェネレーターにより矩形波出力  
→照射時間を決定

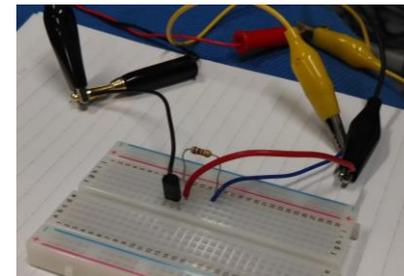
LD照射時間の制御  
→トランジスタのスイッチング回路実装



正確なLDの時間制御



トランジスタによるスイッチング回路



実装回路

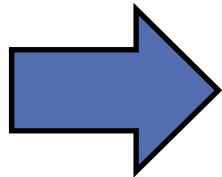
# 研究背景

- 月レゴリスには $\text{Al}_2\text{O}_3$ が23%含まれている.
- 地上の現在の手法では炭素を用いて還元を行っている.



問題点: 炭素の供給源 炭素の輸送に巨額の費用

→炭素を必要としない還元方法

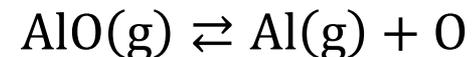


レーザーアブレーション  
による還元

実験における解離反応

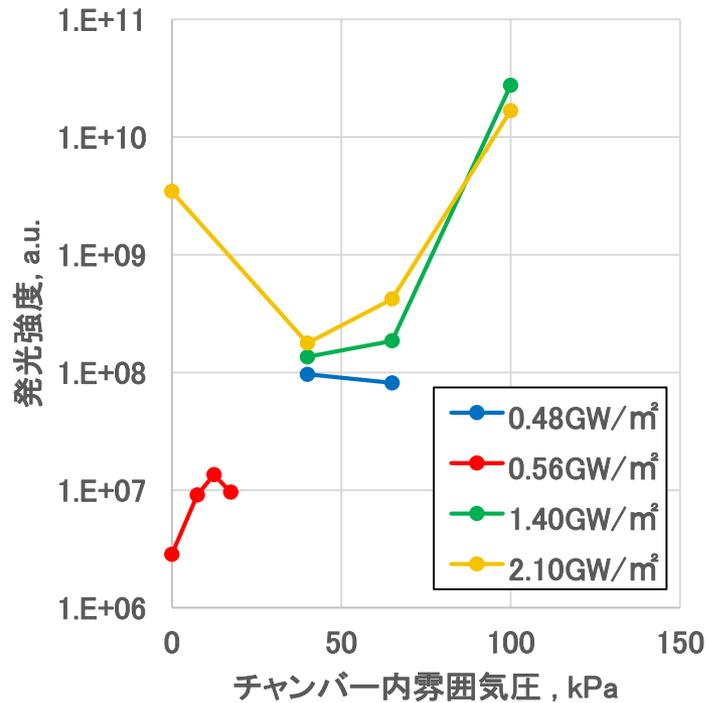


$$\Delta H = 1215\text{kJ}$$

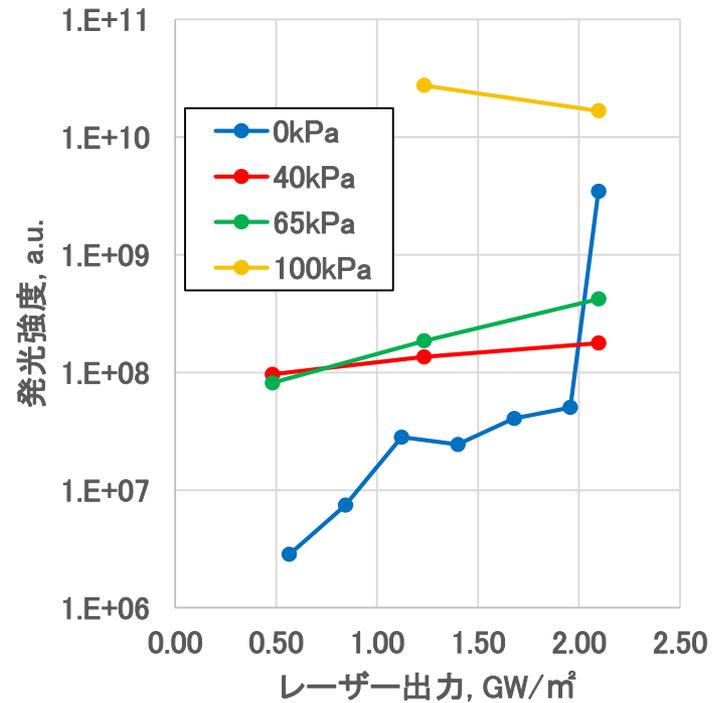


$$\Delta H = 481\text{kJ}$$

# 分光計測



チャンパー内雰囲気気圧vs全範囲の発光強度



レーザー出力vs全範囲の発光強度

全範囲の発光強度を積分

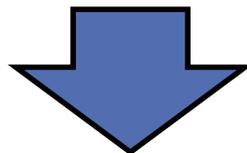
雰囲気気圧増: 強度変化

出力増: 発光強度増

→ 出力増加により温度上昇 → 連続スペクトル成分増加

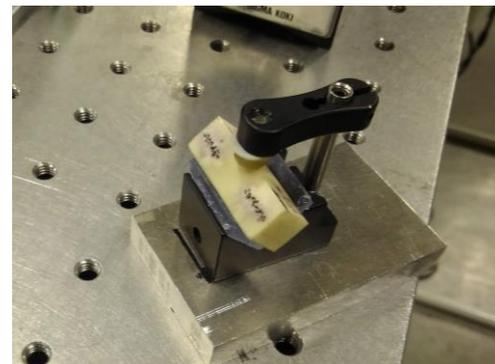
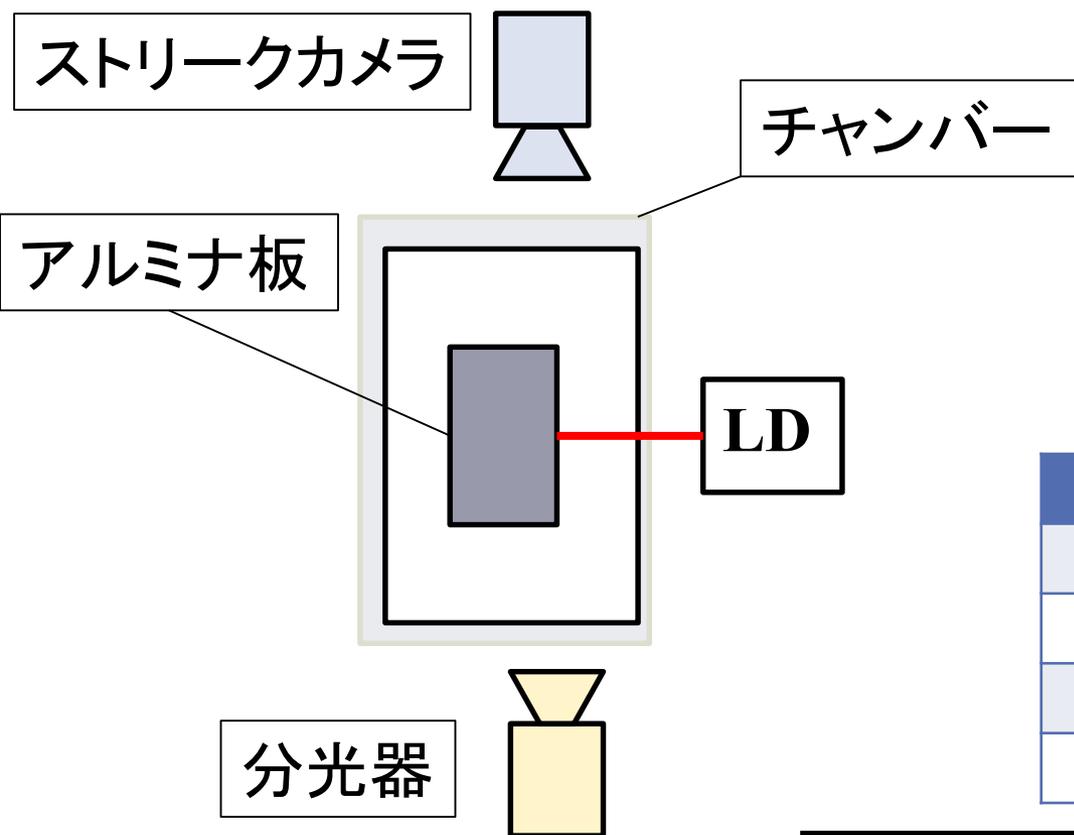
# 目的

現在までにCWレーザーアブレーションによるアルミナ還元が行われている



- LDアブレーションを用いてのアルミナ還元
- 発光スペクトルの取得によるAl原子の確認

# 実験系

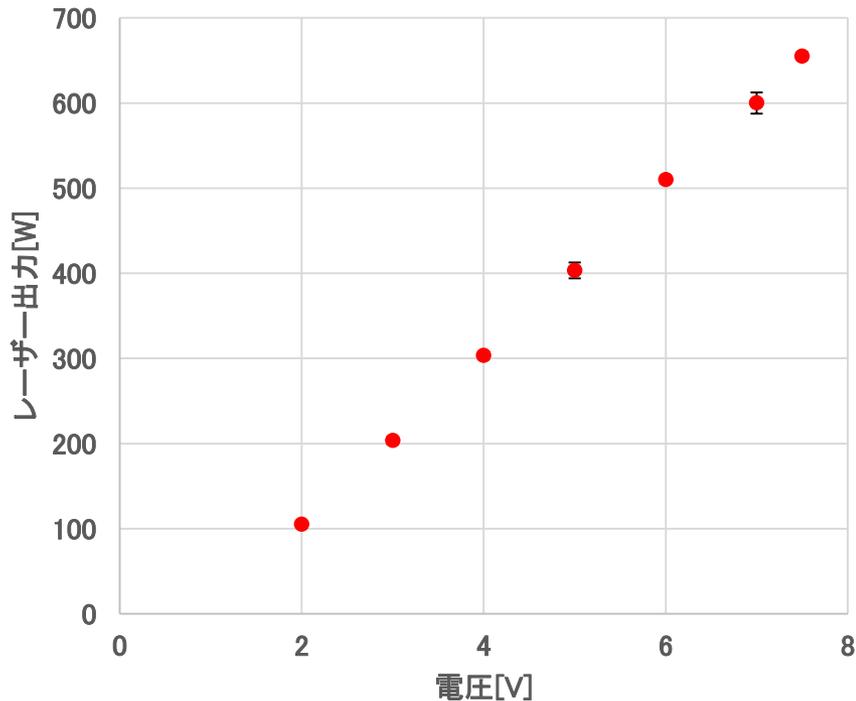


アルミナターゲット

実験条件	
レーザー波長	940nm
Ar流量	10slm
アルミナ板の角度	45°
Al スペクトル	396nm,394nm,309nm

- チャンバー内を真空引き, Arを流す
- ストリークカメラにてプルームの観測
- 出力に対するアルミナターゲットの質量減少測定

# パワーメーターによるレーザー出力測定

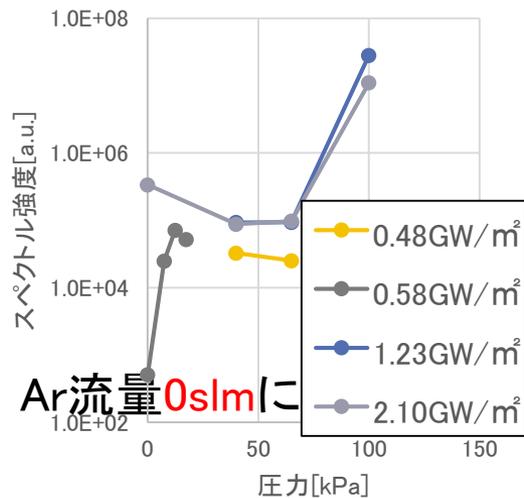


- チャンバー装置を取り除いてパワーメーターを設置
- LDレーザーの出力を3回測定
- 出力-電圧特性図より線形性が得られる.

# 今後の予定

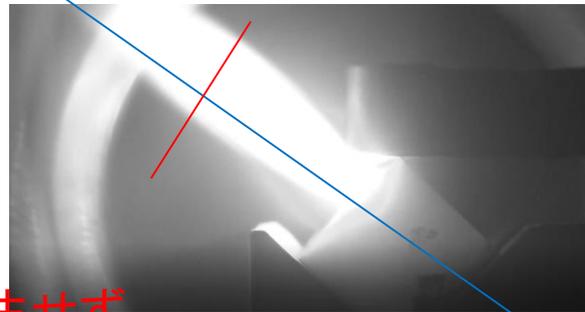
- 実験装置の治具製作
- LDを用いたアルミナ還元
- 分光法によるAlスペクトルの観測

# プルーム計測方法

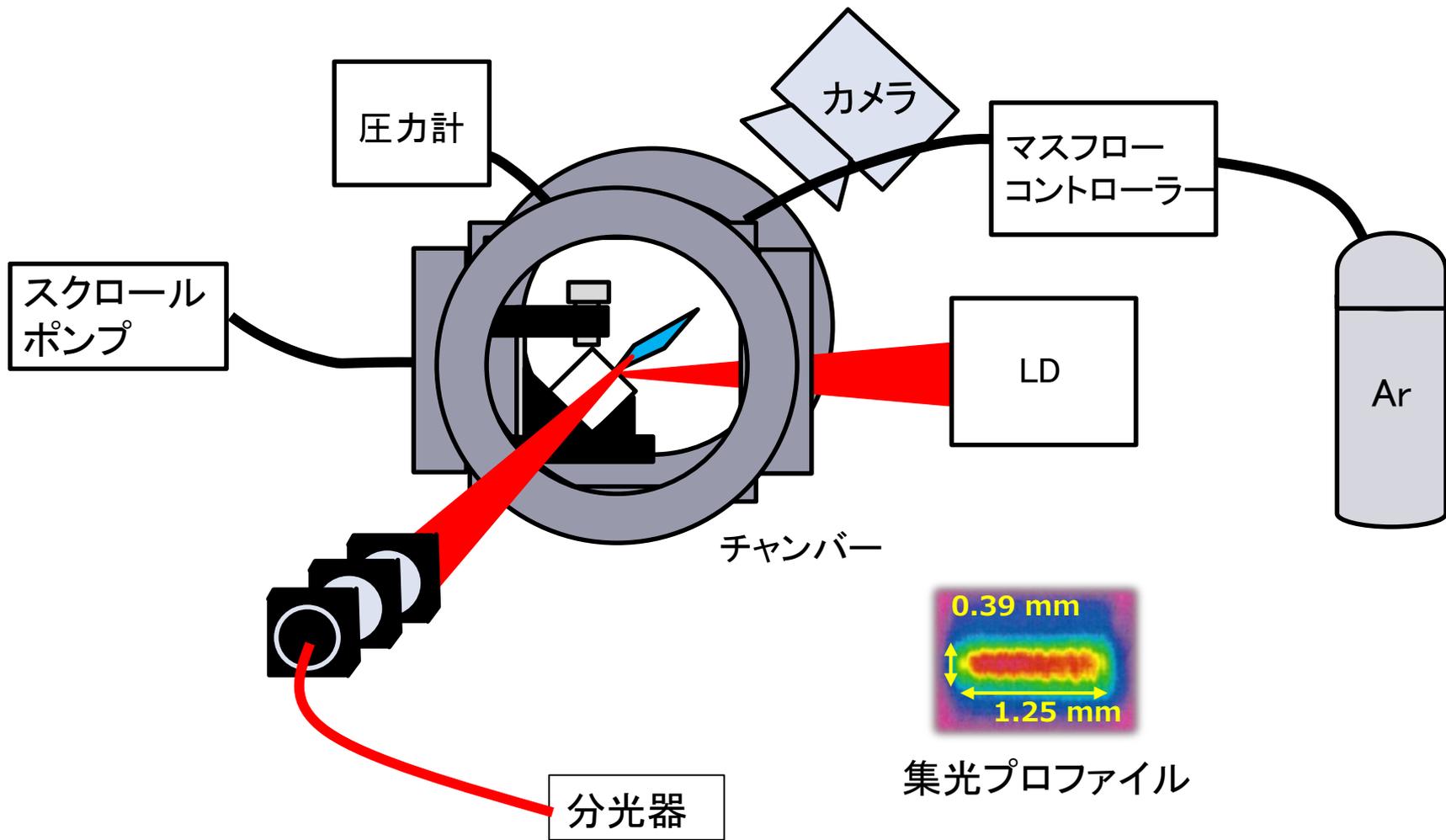


- Ar流量 0slm に プルーム発生せず

レーザー密度 0.56MW/m<sup>2</sup>, Ar流量 0slm,  
照射時間 1sec におけるアルミナ



レーザー密度 0.56MW/m<sup>2</sup>, Ar流量 3slm,



# 今後の予定

- 条件を変えてAIスペクトルの取得
- ラボワーク発表資料作成