

2024年度カーボンリサイクル実証研究拠点事業成果報告会



# CO<sub>2</sub>を炭素源とした産廃由来 炭化ケイ素合成の研究開発

東北大学 福島潤

# 社会課題：カーボンリサイクルとシリコンアップサイクル



- CO<sub>2</sub>は化学的に安定：  
資源としての利用が**困難**

- シリコンスラッジ（産業廃棄物）  
の**リサイクルコストが大きい**

カーボンリサイクルとシリコンアップサイクルの**同時達成**が望ましい

<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20220114/k10013430051000.html>

「CO<sub>2</sub>が安定=資源化にエネルギーが大量に必要」を覆す

## CO<sub>2</sub>を活性化するという発想から離れる

### カーボンリサイクル技術

➤ 基幹物質

- ・ CO、H<sub>2</sub>の合成ガス
- ・ メタノールなど

➤ 化成品・燃料

➤ 鉱物化

### ★ 鉱物化

アルカリ土類金属の炭酸塩化

**発熱**反応だからエネルギー消費少ない



コンクリート、セメントへの応用

# 発熱反応を利用した風化・炭酸塩化

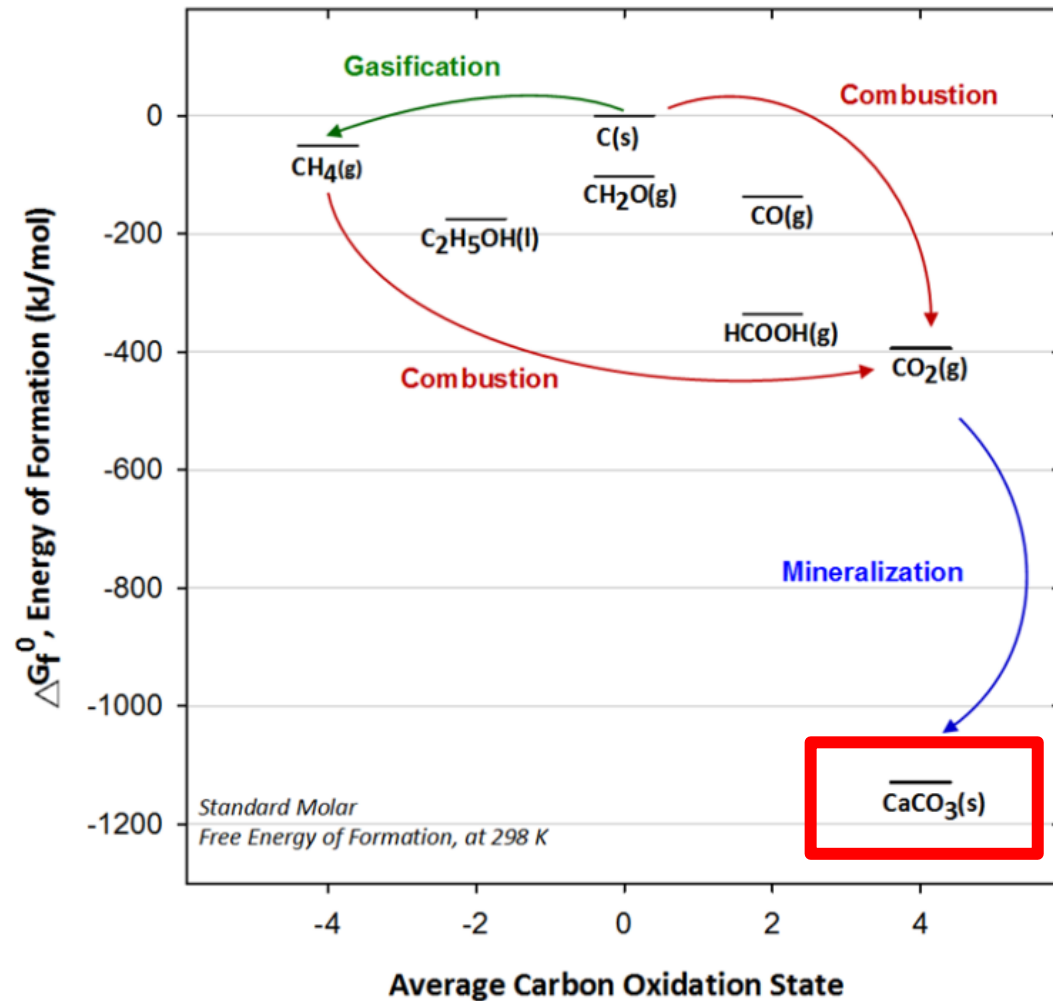


Fig. 1. Standard molar free energy of formation for several carbon-related substance at 298 K.

炭酸塩：  
形成自由エネルギーが**負**

$CO_2$ がアルカリ土類金属酸化物  
( $CaO$ や $MgO$ など)と反応し、  
水環境の存在下で**炭酸塩に変換、  
固定化**できる

Pan, S. Y. *et al.* An innovative approach to integrated carbon mineralization and waste utilization: A review. *Aerosol Air Qual. Res.* 15, 1072–1091 (2015).

※逆に、燃料に戻そうとするとエネルギーが必要

# CO<sub>2</sub>リサイクルにおける鉱物化：炭化物合成

## カーボンリサイクル技術

### ➤ 基幹物質

- ・ CO、H<sub>2</sub>の合成ガス
- ・ メタノールなど

### ➤ 化成品・燃料

### ➤ 鉱物化

◎炭化物：炭化シリコン (SiC)、炭化タングステン (WC) など

カーボンリサイクル技術の中に、キーワードとして存在

ほとんど天然には存在しないため付加価値は高いものの、CO<sub>2</sub>を炭素源にした研究例は**皆無**

**固体-CO<sub>2</sub>の反応に着眼し、エネルギー消費の少ない形でのCO<sub>2</sub>資源化-炭化ケイ素合成手法を開拓**

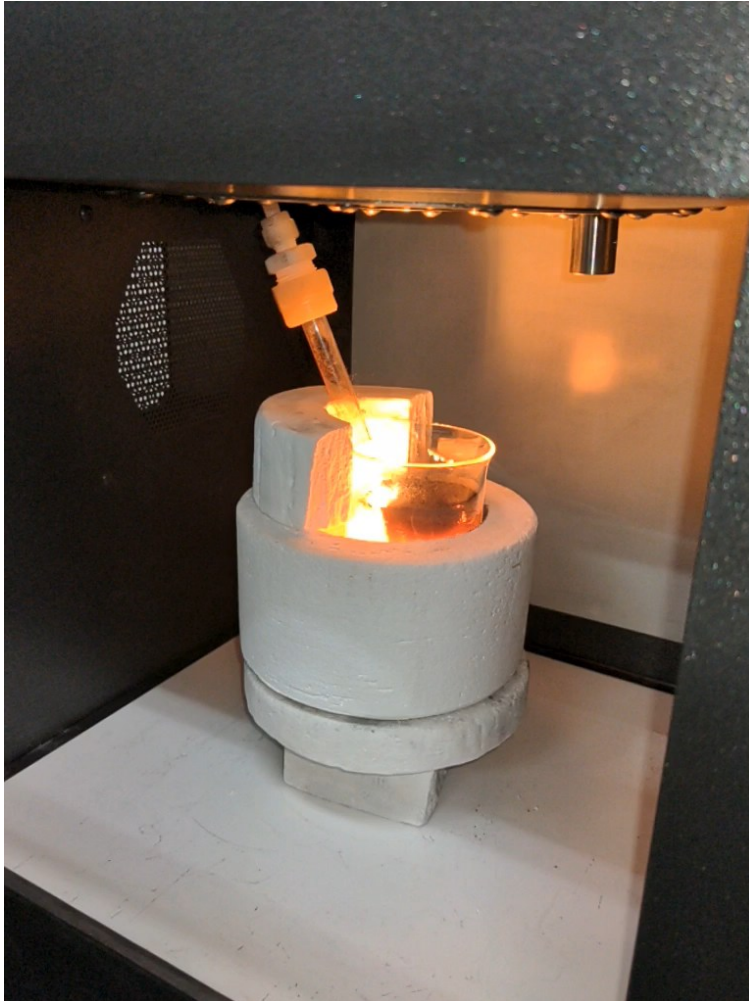
# 一気にリサイクルできる 世界初の技術を発明



2022年5月11日 14:00 | プレスリリース

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2022/05/press20220511-01-recycle.html>

# エネルギー消費の少ないCO<sub>2</sub>資源化手法



- ・小容量実験（家庭用電子レンジ並）

★発熱後、マイクロ波OFF  
→発熱部分が伝播する

最初の反応さえ起こせば、  
自発的に反応が進むため、  
反応エネルギー供給が少なく済む

# カーボンリサイクル実証研究拠点での技術実証

## 技術の特徴

- カーボンリサイクル型**炭化ケイ素粉末**の合成が可能
- 省エネルギー・クリーンかつ産業廃棄物の化学ポテンシャルを活かした「マイクロ波燃焼合成」により、**合成時のエネルギー消費を大きく低減**
- CO<sub>2</sub>の**半永久的な固定化**が可能
- カーボンリサイクルとマテリアルリサイクルを同時達成し、**高度循環型社会構築**に貢献



## NEDOプロジェクト 技術実証・社会実装へ

NEDO, カーボンリサイクル実証研究拠点、基礎研究エリアで研究開発に着手  
—火力発電所から排出されたCO<sub>2</sub>を活用し、カーボンリサイクル技術の早期実用化を図る—



# 研究開発の目的と研究項目

カーボンリサイクルロードマップの中における鉱物化技術の中でも世界的に研究例の少ないカーボンリサイクル型炭化物合成に係る研究開発を推進し、CO<sub>2</sub>を炭素源とした産廃由来炭化ケイ素合成の実用化・事業化を最終目標に、そのコア技術確立のためのベンチスケール試験を行い、プロセスの最適化とコスト評価を行うことを目的とする。

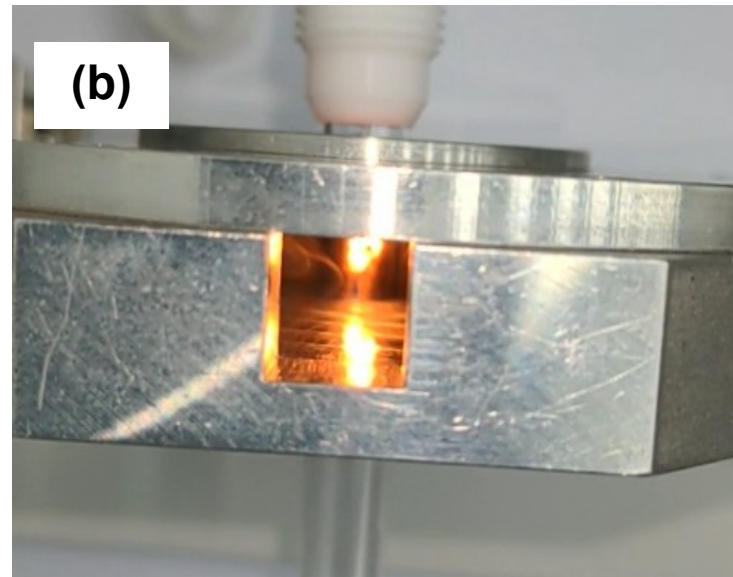
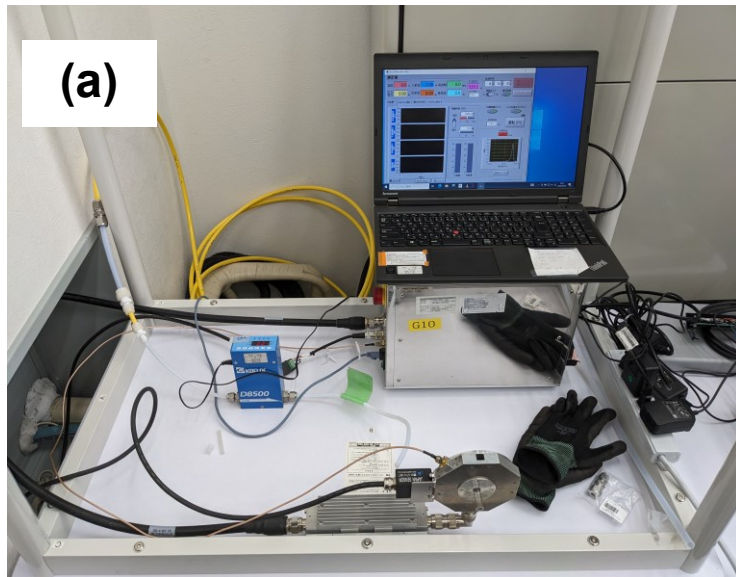
研究開発項目①：火力発電所から分離・回収したCO<sub>2</sub>を用いたバッチプロセス試験

研究開発項目②：CO<sub>2</sub>を資源としたSiC 合成プロセスのエネルギー供給方式決定と連続炉開発

研究開発項目③：SiC-SiO<sub>2</sub>-Si 試料からのアルカリ洗浄工程の大容量化

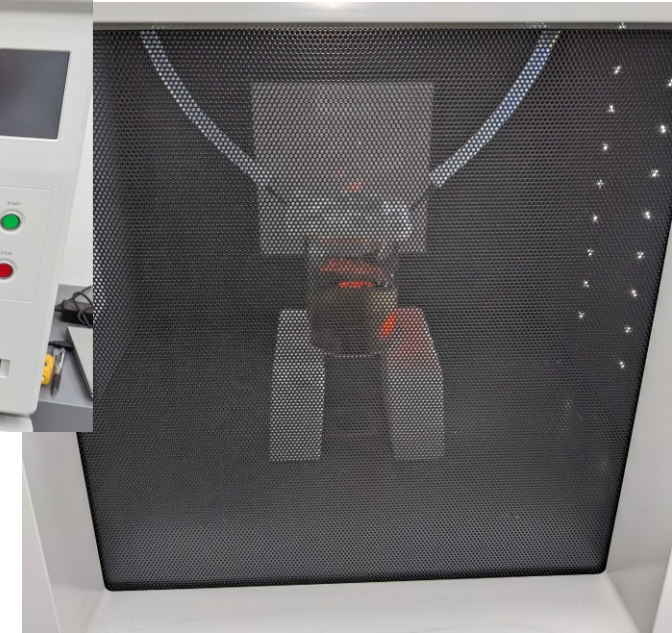
研究開発項目④：事業化の検討

# 大崎クールジェンからのCO<sub>2</sub>を使用した バッチプロセス検討



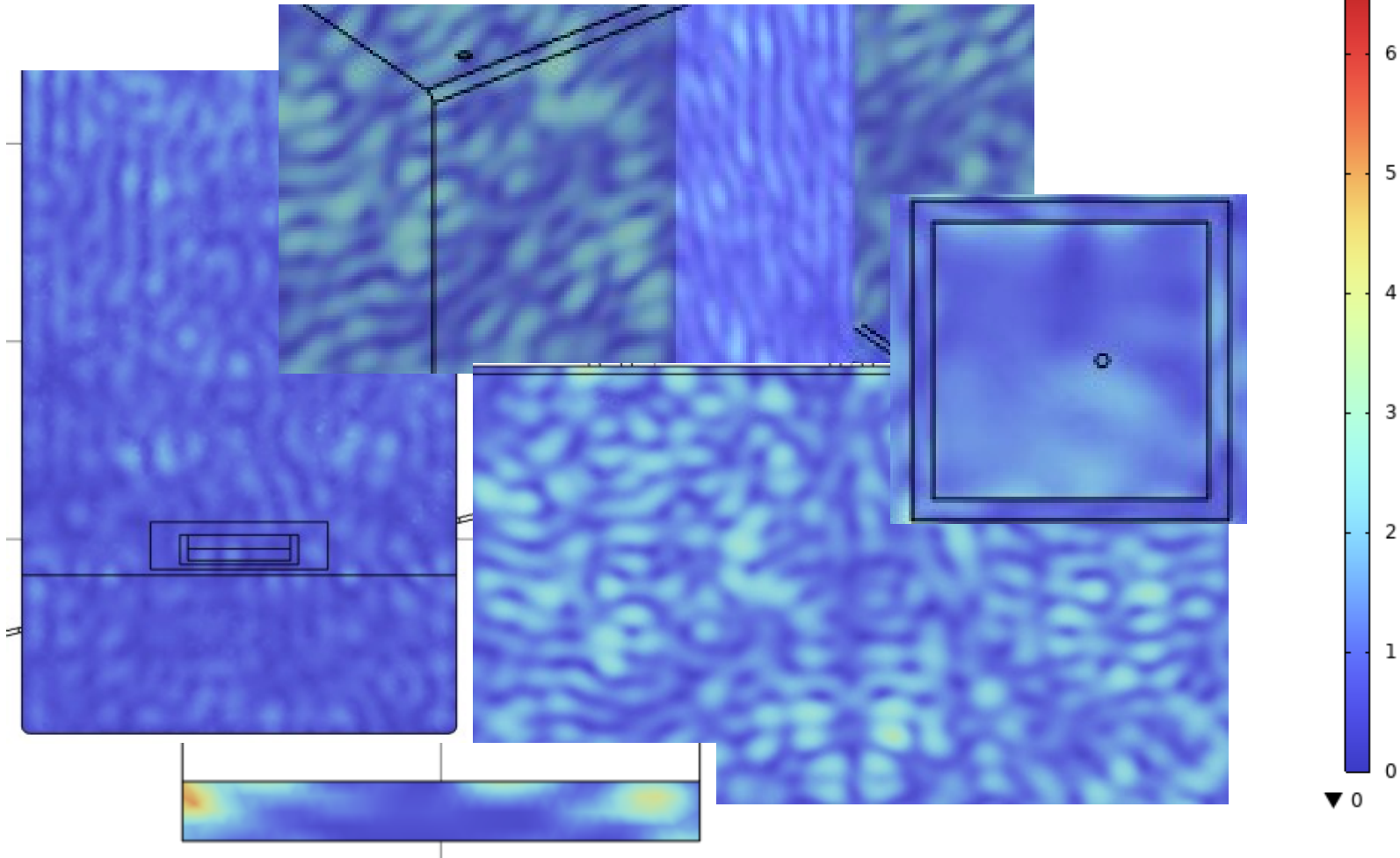
(a)ラボレベル試験装置写真(b)反応時のキャビティ内の様子(c)反応後試料  
未反応スラッジ、SiCおよびSiO<sub>2</sub>のみを含んだ反応後試料を得ることができた

# 中容量試験による基礎データ取得



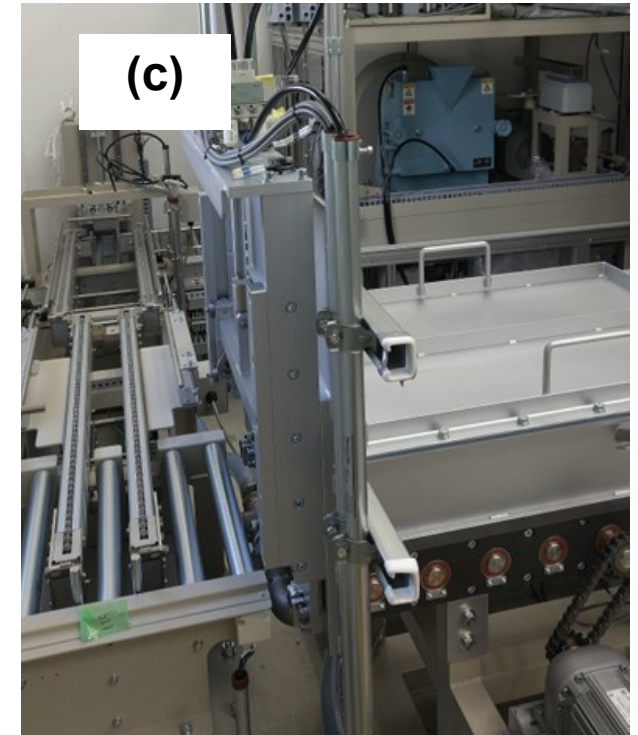
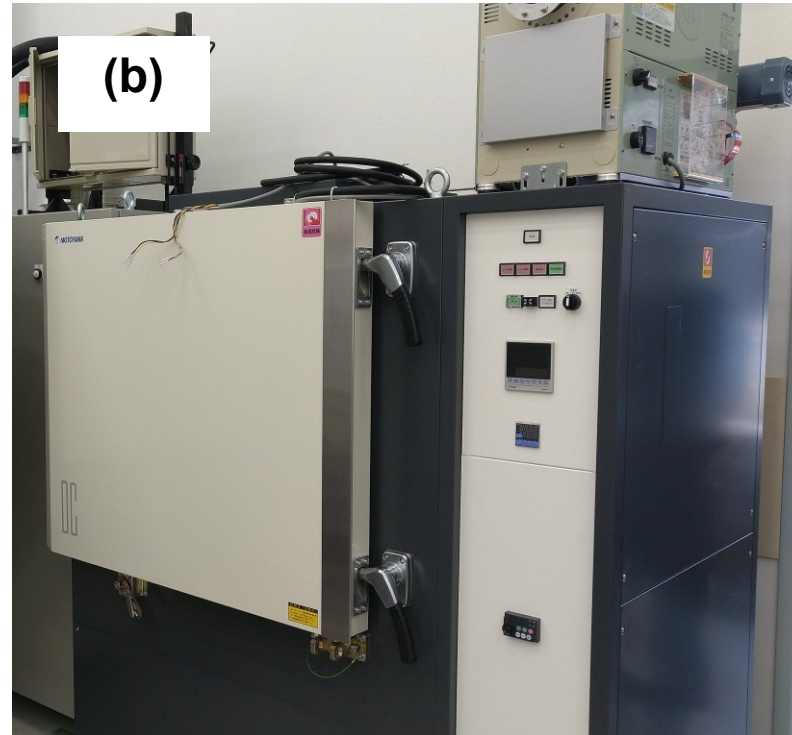
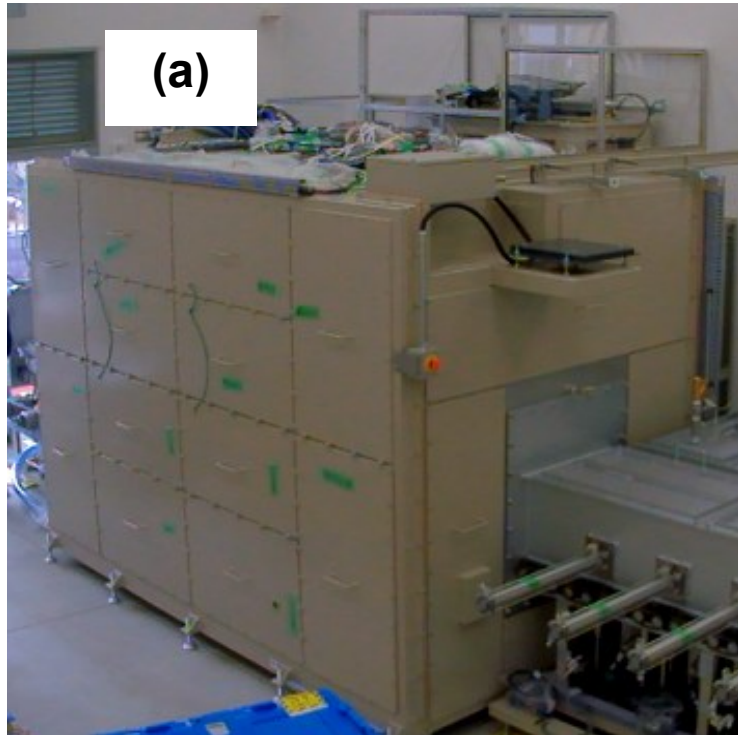
昇温に必要なエネルギーと被加熱物質の熱力学的データなどから容積などを算定

# 電磁界解析、装置設計



中用量実験でのデータなどから、電磁界解析と装置設計を行う  
(中部大・檜村准教授への再委託)

# マイクロ波式連続炉の導入

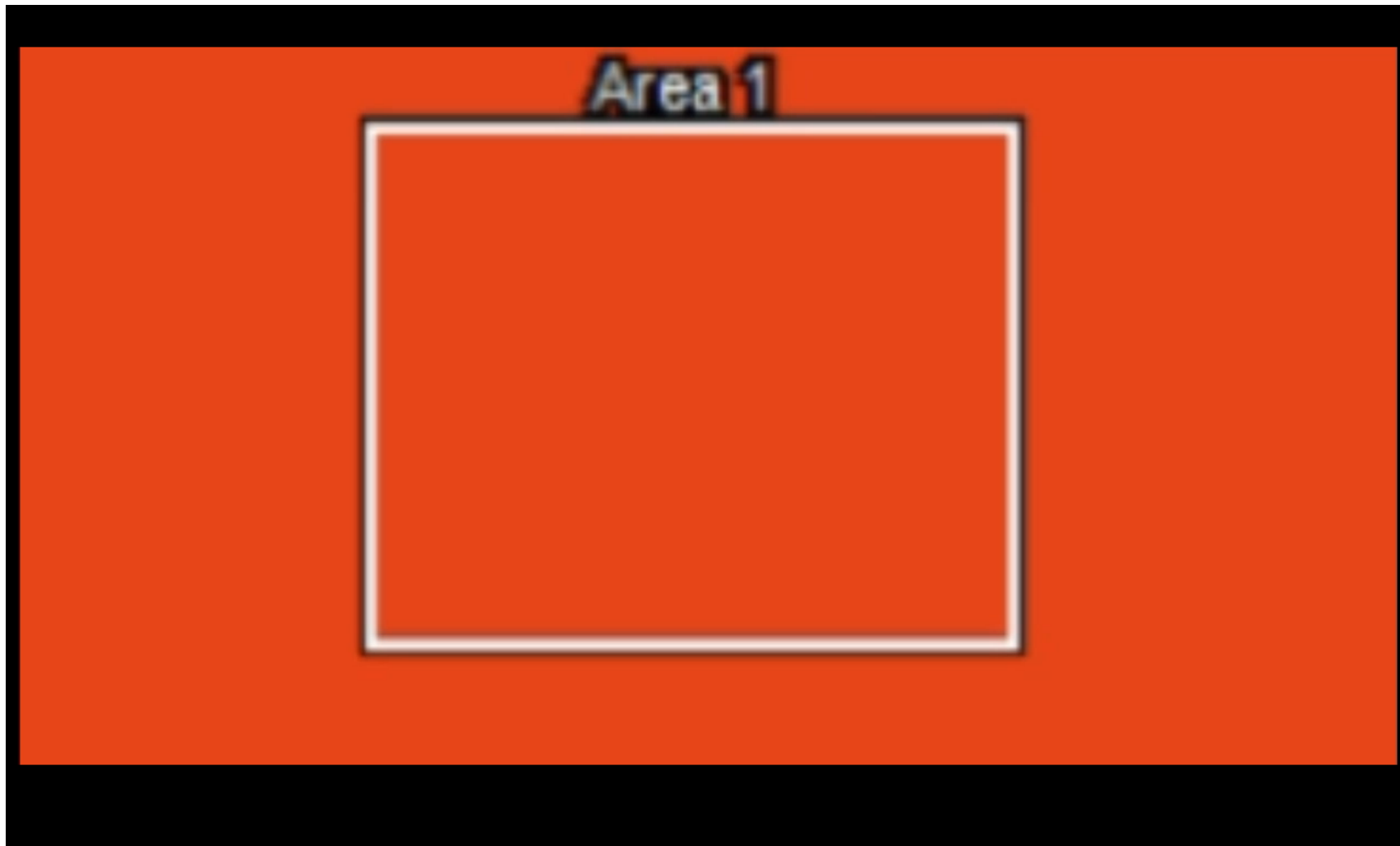


(a)反応炉搬入時の様子 (b)脱脂炉および排ガス処理システム  
(c)前段ローラーおよび雰囲気置換炉部分

# 連続炉による炭化ケイ素合成反応



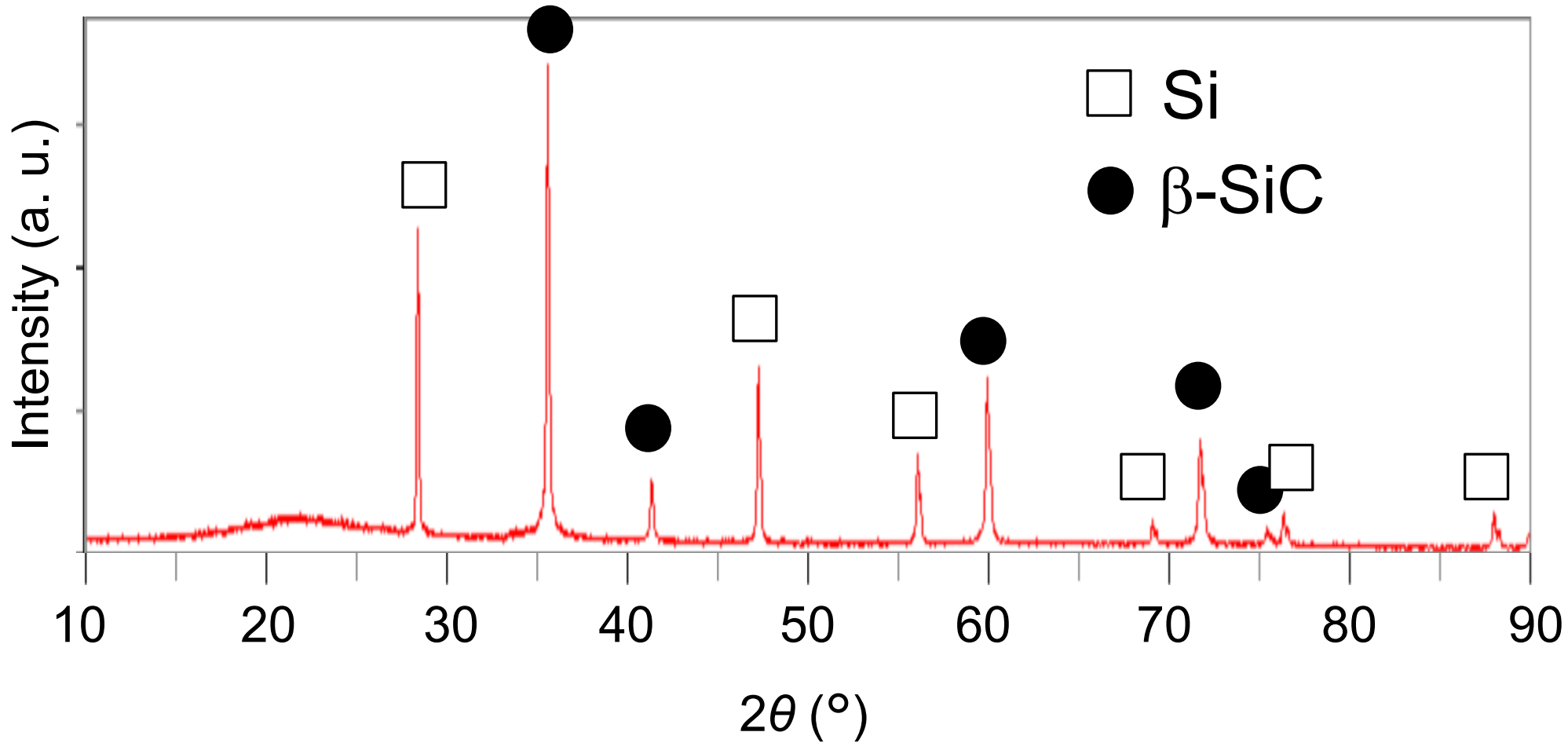
TOHOKU  
UNIVERSITY



2倍速

- 画面下部分から着火
- 別部分からも着火し、反応部分が全体的に広がる様子がわかる
- 最大36 kWの連続においても想定取りの反応が見られ、設計通りに大容量化

# 合成後試料のXRD結果



- ラボレベル、中容量試験と同等の試料が合成された



# アルカリ洗浄工程の改善

## 研究開始当初

	反応混合物 (g)	NaOH 水溶液濃度 (質量%)	NaOH (g)	水 (mL)	洗浄温度 (°C)	洗浄時間 (分)	Si (質量%)	SiC (質量%)
実施例1 (洗浄1)	4.00	10.0	4	36	140	60	3.7	96.3
実施例2 (洗浄2)	7.29	15.0	6	34	140	120	0	100
実施例3 (洗浄3)	6.08	12.5	5	35	140	120	1.3	98.7



- NaOHの沸点以下でシリカ相の除去が可能に
- 洗浄炉の耐圧化必要なし

No.	NaOH 水溶液濃度 (N)	NaOH 水溶液使用量 (mL)	洗浄温度 (°C)	洗浄時間 (分)	Si (質量%)	SiC (質量%)	SiO <sub>2</sub>
1	6	21.1	110	300	0.0	100.0	無
2	8	15.8	110	300	0.1	99.9	無
3	6	21.1	105	300	0.1	99.9	無
4	8	15.8	105	300	0.1	99.9	無
5	6	21.1	110	180	0.1	99.9	
6	8	15.8	110	180	0.1	99.9	無
7	6	21.1	105	180	0.1	99.9	
8	8	15.8	110	180	0.1	99.9	無
9	6	15.5	105	180	0.1	99.9	無
10	8	11.6	105	180	0.0	100.0	無
11	6	21.1	115	60	0.2	99.8	
12	8	15.8	115	60	0.2	99.8	
13	6	15.5	115	60	0.3	99.7	
14	8	11.6	115	60	0.2	99.8	
15	6	15.5	115	180	0.2	99.8	無
16	8	11.6	115	180	0.0	100.0	無
17	6	15.5	110	300	0.0	100.0	無

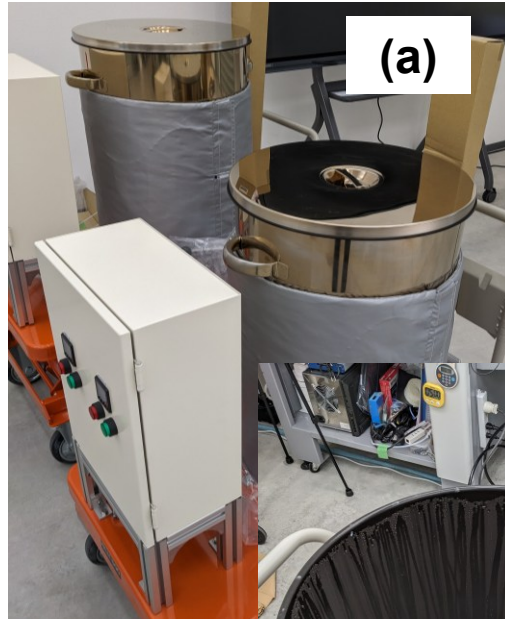
特願2023-019345



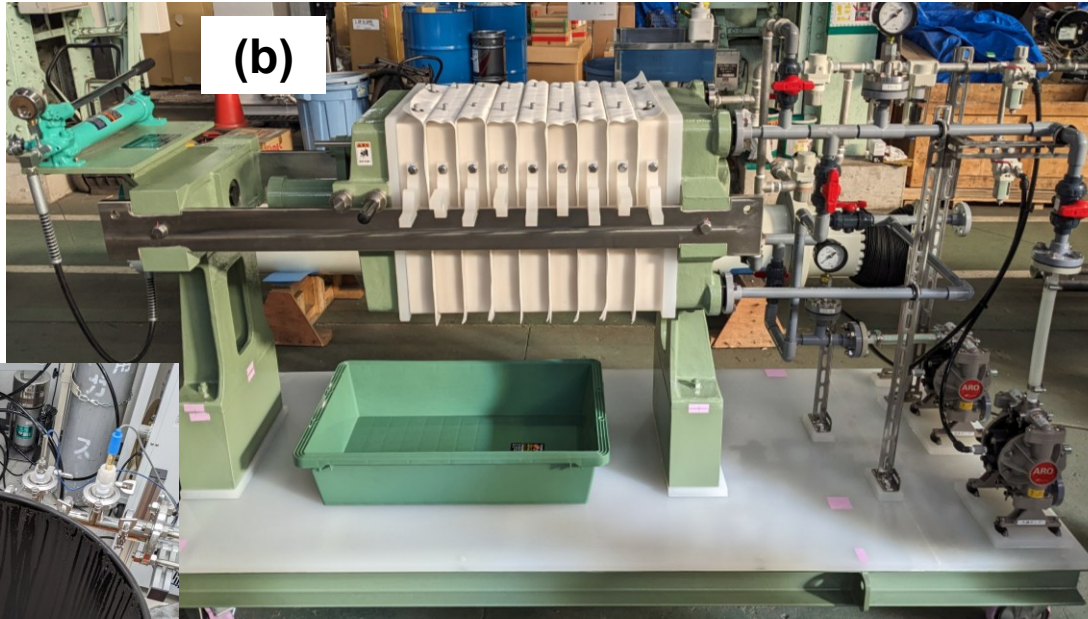


TOHOKU  
UNIVERSITY

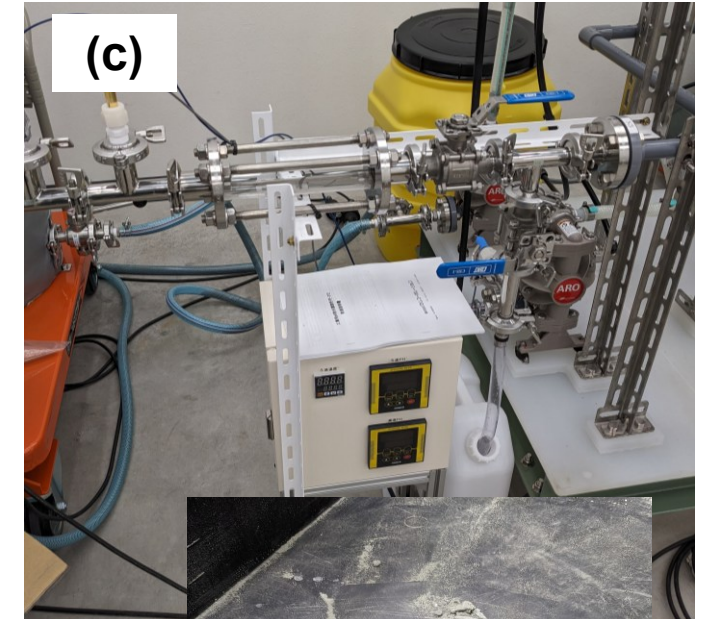
# アルカリ洗浄工程の大容量化



(a)



(b)



(c)

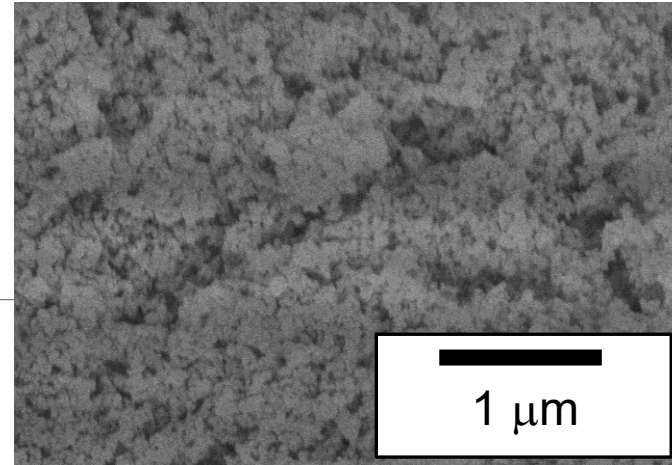


(a)アルカリ洗浄炉 (b)フィルタープレス  
(c)廃液pH・示色分析部

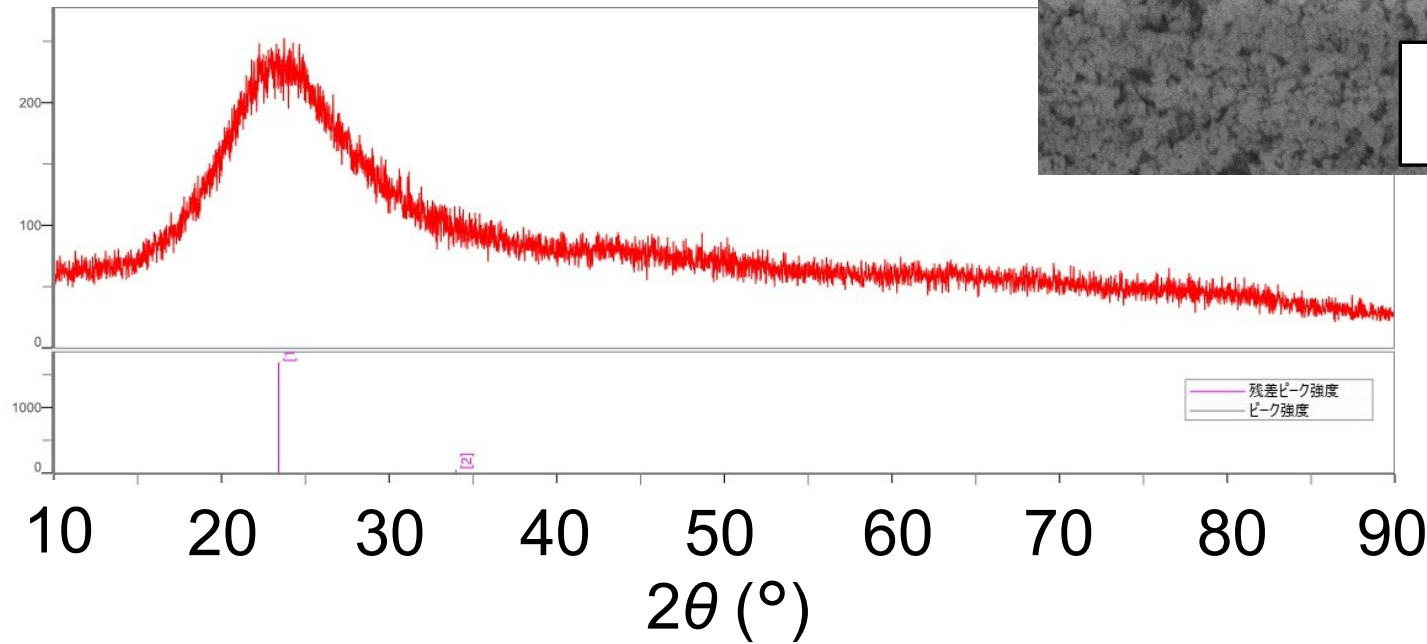


# CO<sub>2</sub>を原料としたシリカ粒子合成

水ガラスへの硫酸滴下による  
湿式シリカ合成



XRD結果



☆ CO<sub>2</sub>を原料としたアモルファスシリカが得られる  
ホワイトカーボンとして低燃費  
タイヤなどへの応用が期待できる

# まとめ

- 鋳物化技術の中でも世界的に研究例の少ない、カーボンリサイクル型炭化ケイ素（CR-SiC）合成に係る研究開発を推進した
- 大崎クールジェンからのCO<sub>2</sub>を使用したバッチプロセス検討により、本ガス純度においてラボ実験と同等の試料を得ることができた
- 中容量試験による基礎データ取得し電磁界解析を行うことで装置を設計し、36 kWマイクロ波式連続炉を建造した
- 連続炉による炭化ケイ素合成反応をその場測定し、着火反応と燃焼合成を確認した。連続炉で合成した試料は、ラボ・中容量炉と同等であった
- ラボにおける高純度化検証から、SiC純度は99.96%に達した
- アルカリ洗浄工程の改善によりNaOHの沸点以下でシリカ相の除去が可能になり、耐圧が必要なくなったことから大容量化も容易になり、実際に大容量化できた
- 得られた水ガラスからCO<sub>2</sub>を原料としたホワイトカーボンを合成した
- 洗浄プロセス、着火プロセスに関する特許申請を進め、連続処理炉のCAPEX、OPEX把握やSiC販売価格調査などから事業化の検討を進めた

# ご清聴ありがとうございました

## CO<sub>2</sub> を炭素源とした産廃由来炭化ケイ素合成の研究開発

問い合わせ先  
東北大学工学研究科応用化学専攻  
福島潤

[jun.fukushima.d5@tohoku.ac.jp](mailto:jun.fukushima.d5@tohoku.ac.jp)

本研究は、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)の委託事業「JPNP16002」の支援を受けて行われました