

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026

プログラムNo. B2-1-11

カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／CO₂有効利用拠点
における技術開発／研究拠点におけるCO₂有効利用技術開発・実証事
業／

アンモニアおよびプラズマを利用する先導的カーボンリサ イクルシステムの研究開発

発表：2026年7月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 神原 信志

団体名 (国) 東海国立大学機構 岐阜大学, 川田工業 (株)

問い合わせ先 東海国立大学機構 岐阜大学 E-mail: kambara.shinji.g3@f.gifu-u.ac.jp

1. 概要

事業内容

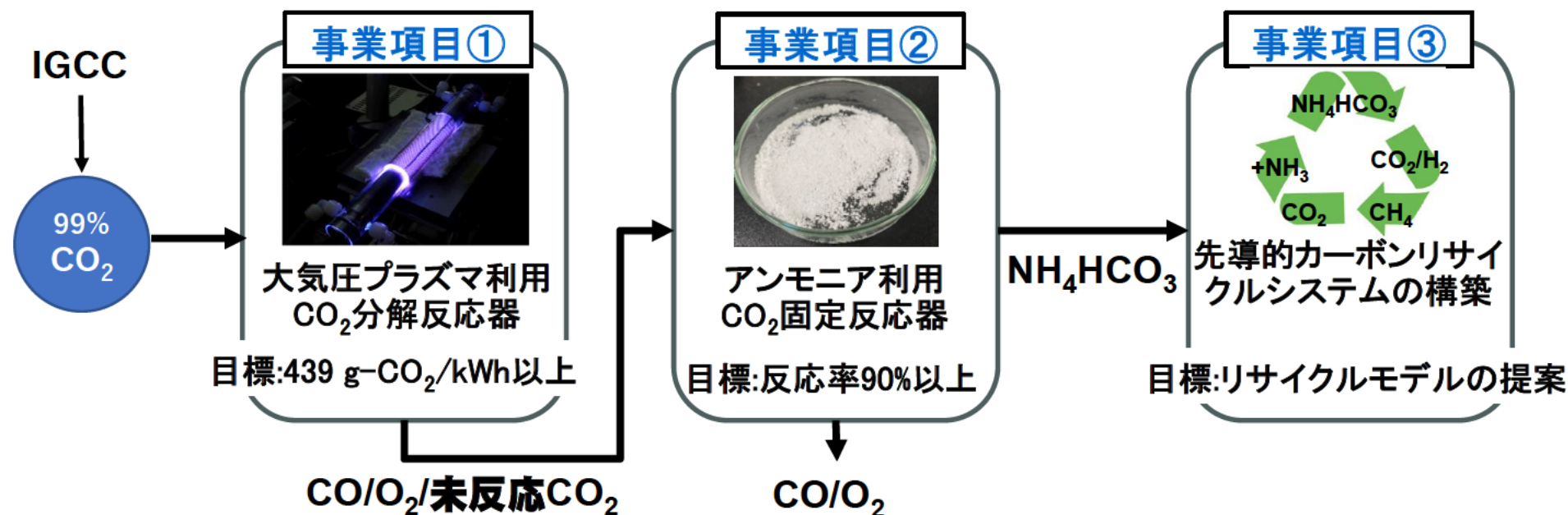
<事業概要>

CO₂から一酸化炭素(CO)および炭酸水素アンモニウムを製造するための反応器を開発し、先導的カーボンリサイクルシステムを確立する。

事業項目① 大気圧プラズマ利用CO₂分解反応器のスケールアップおよび高効率化

事業項目② アンモニア利用CO₂固定反応器の開発

事業項目③ 炭酸水素アンモニウムのリサイクルシステムの構築と経済性評価



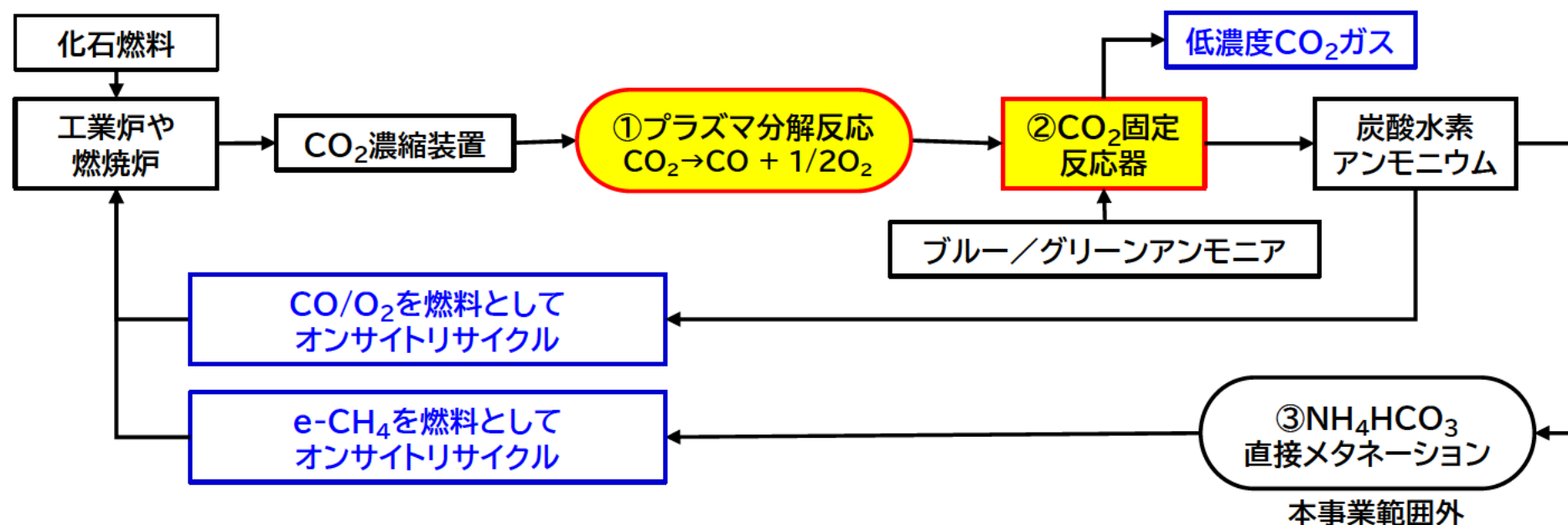
実施期間

2025.4～2027.3

2. 先導的カーボンリサイクルシステムとは

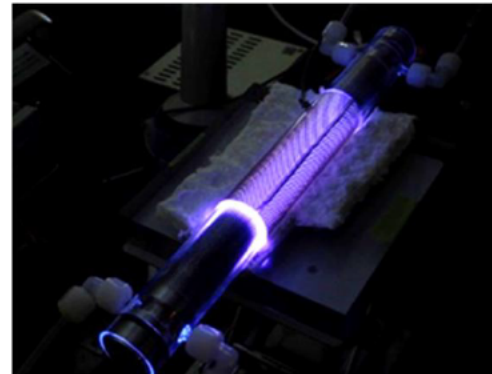
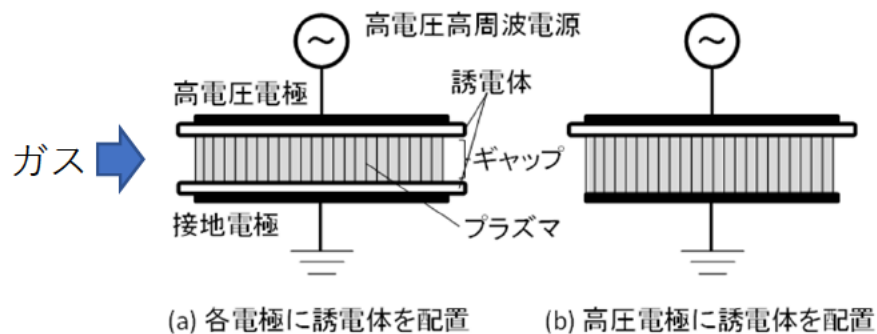
- ① CO_2 をプラズマで分解し, CO/O_2 を製造し, 燃料としてリサイクル
- ② アンモニア利用 CO_2 固定反応器で炭酸水素アンモニウムを合成
- ③ 炭酸水素アンモニウムを直接メタネーションして合成メタンを製造
- ④ e-CH_4 を燃料としてリサイクル

化石燃料使用量を5～7割削減でき, その分の CO_2 発生量を削減できる。

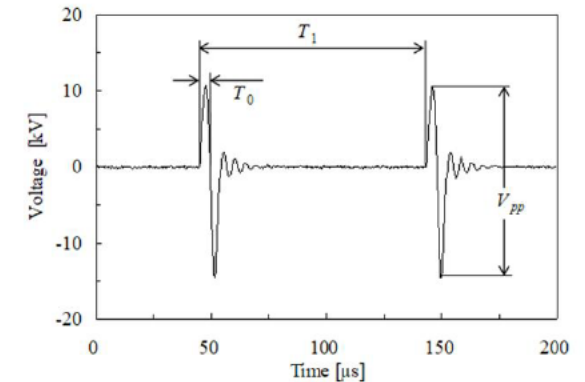


3. 大気圧プラズマの基礎

■ 誘電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge: DBD) 低温プラズマ, 無声放電ともいう

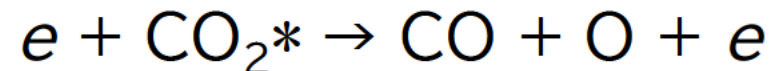
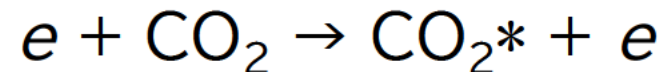
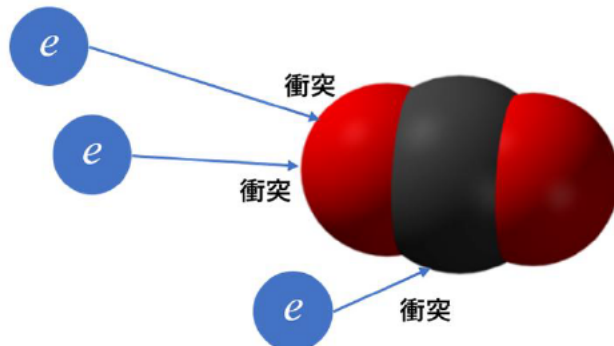


大気圧プラズマの例



高電圧パルス電源の波形例

■ プラズマ気相反応



大気圧プラズマでは、温度や圧力をかけることなく、分子を電離(分解)したり、活性種(ラジカル)を生成したり、化学反応を起こすことができる

大気圧プラズマで発生した電子エネルギー e が、分子に次々と衝突する現象が起こる。

4. 大気圧プラズマによるCO₂分解

様々な長さでギャップ長の大気圧プラズマリアクターを製作した。
流量と印加電圧を変えて実験(ガス滞留時間, 入力エネルギーが変化)。

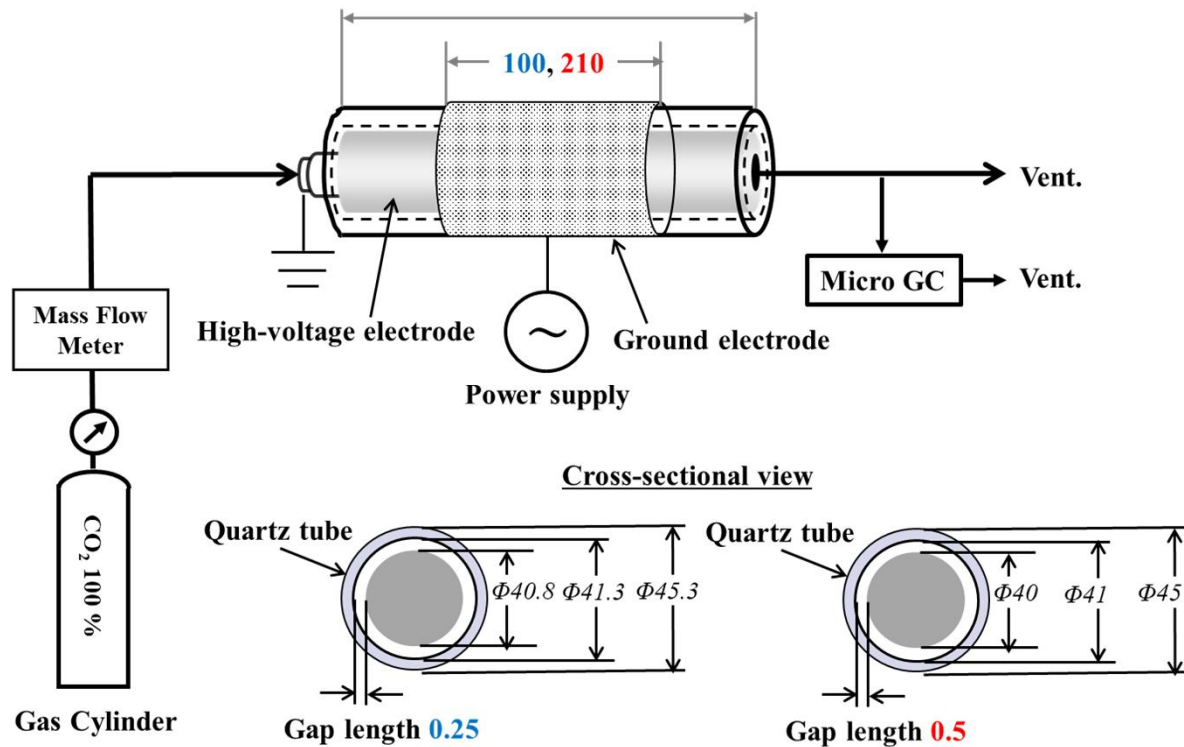


図1 CO₂プラズマ分解実験装置

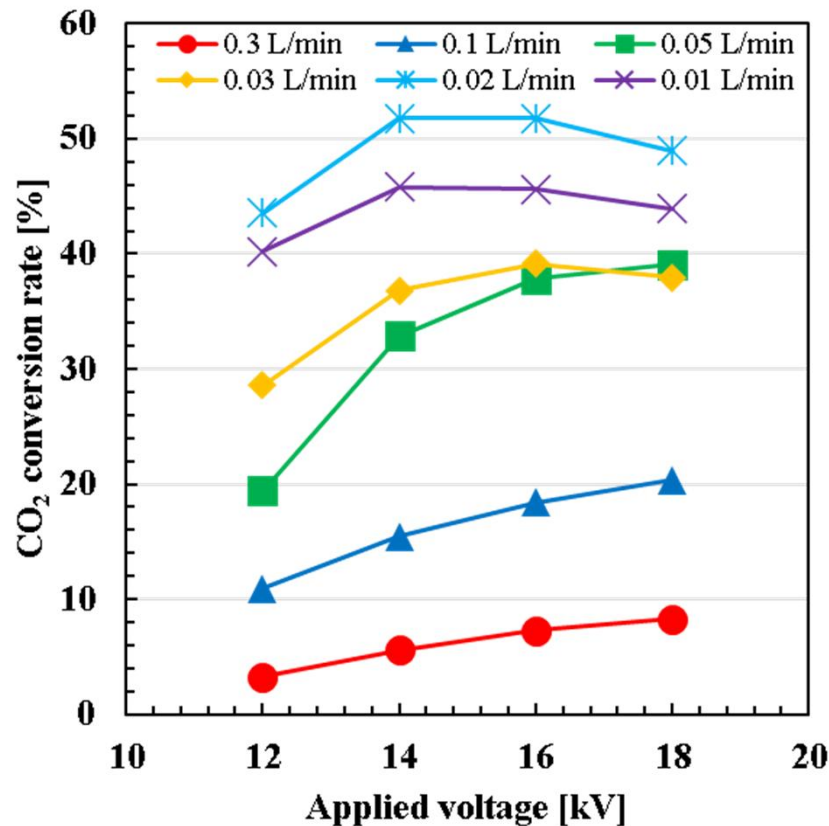


図2 CO₂プラズマ分解実験装置

表1 CO₂プラズマ分解実験条件

Supply gas	[—]	CO ₂
Gas flow rate	[L/min]	0.01—1.0
Gap length	[mm]	0.5, 0.25
Repetition rate	[kHz]	10
Applied voltage	[kV]	12—18

実験結果(1)印加電圧の影響



・CO₂供給流量 0.02 L/min, 印加電圧14 kVのとき、最大転換率 **51.8 %**を達成(世界最高レベル)

・印加電圧が高いところで、転換率が減少するケースがある。

図3 印加電圧・流量変化に対するCO₂分解率の変化(ギャップ長=0.25 mm)

実験結果(2)プラズマリアクター出口ガス組成

- 分解率が高くなればなるほど、CO%は量論よりも低くなった。
これは、プラズマ内で生成COがOと反応し、CO₂を再生成していることを示す。 $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$

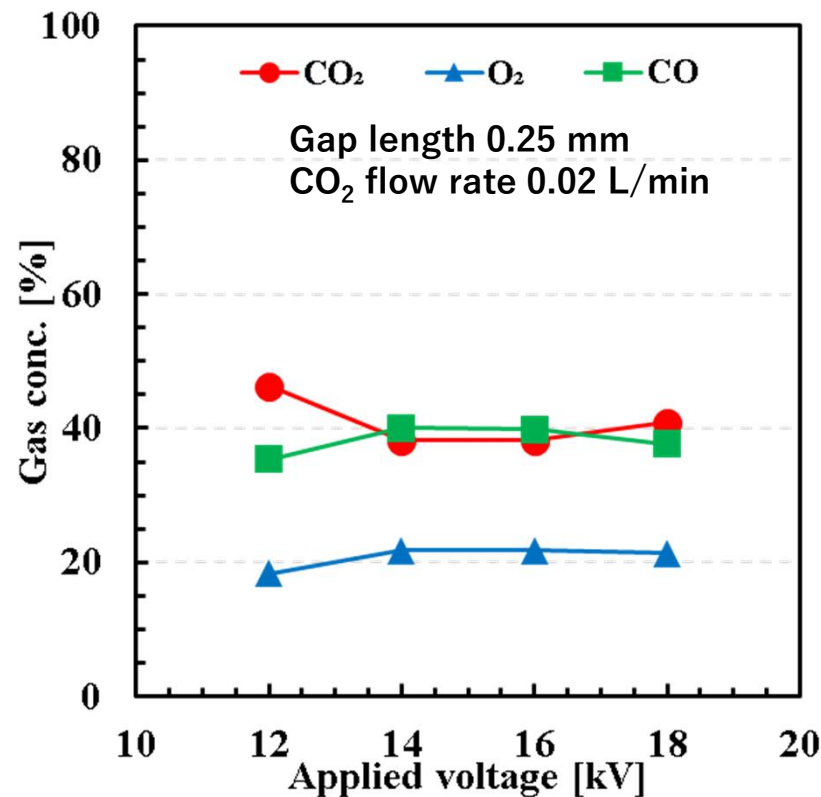


図4 プラズマリアクター出口ガス組成

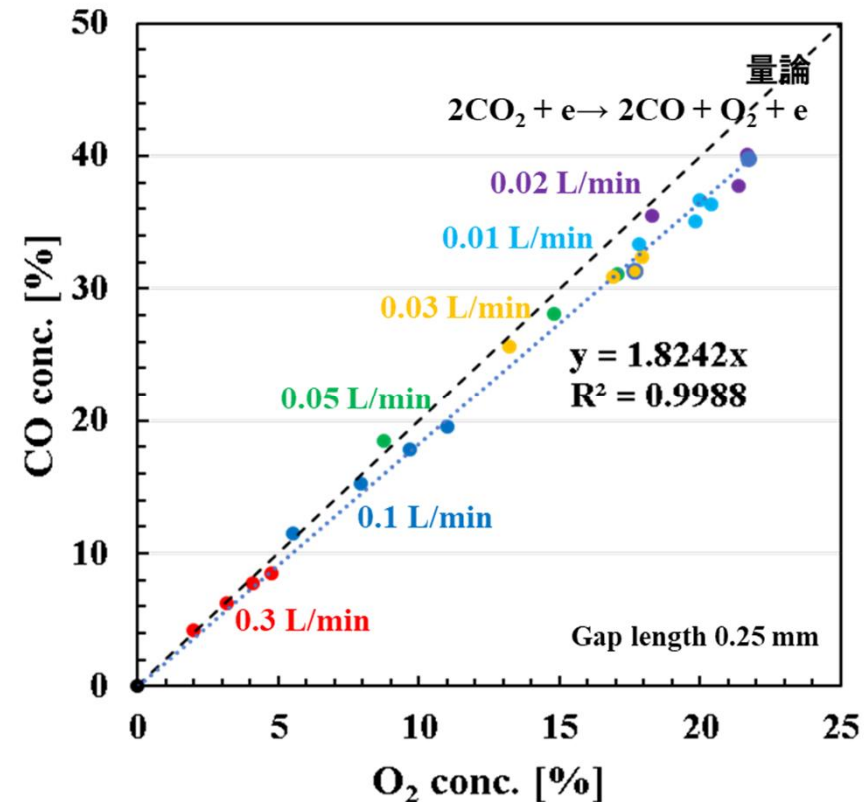


図5 量論からみたプラズマリアクター出口ガス組成

(3)類似研究との比較

ギャップ長と流量の制御により, プラズマ分解法で世界最高レベルの成果を得た

Reactor type	Maximum CO ₂ conversion			Maximum energy efficiency			Ref.
	SEI	CO ₂ conversion	Energy efficiency	SEI	CO ₂ conversion	Energy efficiency	
	[kJ/L]	[%]	[%]	[kJ/L]	[%]	[%]	
DBD	154.74	51.42	4.15	25.26	19.08	9.43	this study
DBD	120	27.2	2.8	24	20.0	10.4	mei2017
DBD	229	35	2	25	3.1	8	aert2015
DBD	60	18	1.7	20.6	9.6	3.8	duan2015
DBD	602.01	53.70	1.11	156.25	33.30	2.66	uytdenhouden2018
ZrO ₂ Packed-bed DBD	240	42	4.7	36	10	9.6	vanlaer2015
ZrO ₂ -CeO ₂ Packed-bed DBD	330	64.38	2.44	18	12.62	8.76	li2020

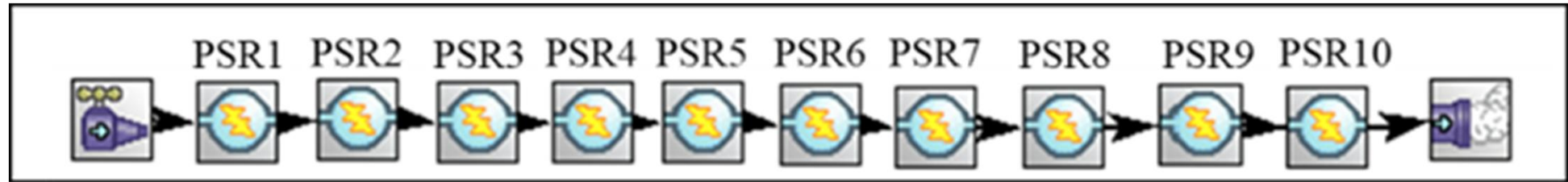
(4)ほかのCO製造プロセスとの比較

日本の全電源平均CO₂排出係数は受電端で 439 g-CO₂/kWh。
すなわち、プラズマ分解で 439 g-CO₂/kWh以上であれば、一般電源を使用してもCO₂を減じることになる。

技 術	特 長	備 考
逆水性ガス化反応	900℃前後の温度を必要とし、その熱は化石燃料の燃焼により得るため、 CO ₂ が発生	工業プロセスとして実用化 エネルギー効率
CO ₂ 電気分解	平均エネルギー効率 303 g-CO ₂ /kWh	内閣府研究会資料より
プラズマ分解	エネルギー効率(現状) 340 g-CO ₂ /kWh 目標:439 g-CO ₂ /kWh	全電源平均CO ₂ 排出係数は受電端で 439 g-CO ₂ /kWh

5. プラズマ素反応シミュレーション (1)素反応シミュレーション

- プラズマリアクターのネットワークモデルを作成 (ANSYS Chemkin)



- 文献により素反応と速度パラメータを調査

Modified Arrhenius equation

$$k = A T_e^\beta \exp\left(-\frac{E}{k_B T_e}\right)$$

k : Reaction rate constant

A : Pre-exponential factor

β : Temperature exponent [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]

E : Activation energy [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]

R : Gas constant [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

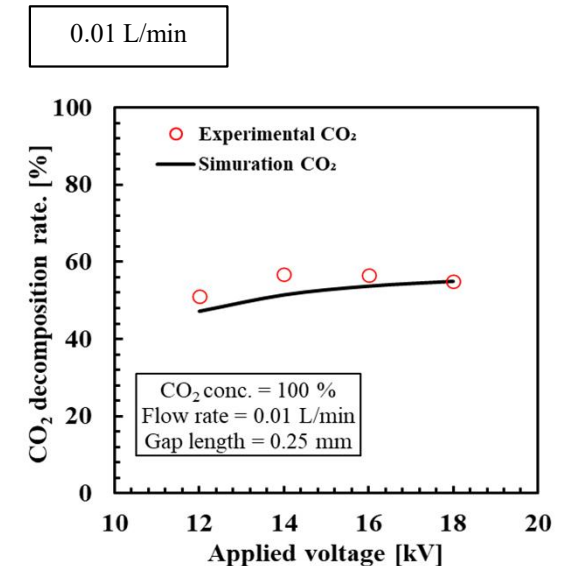
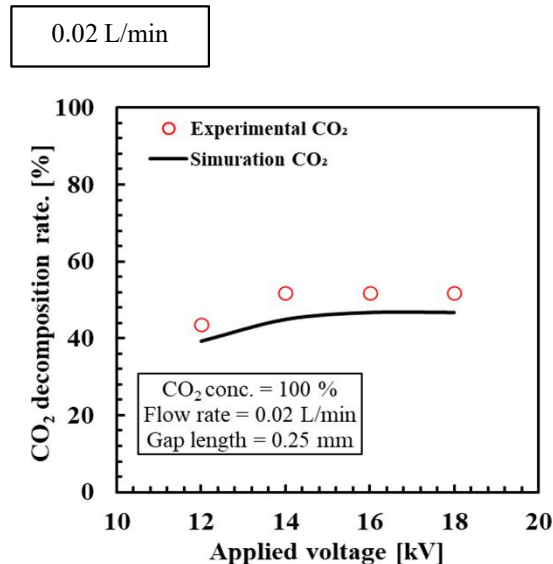
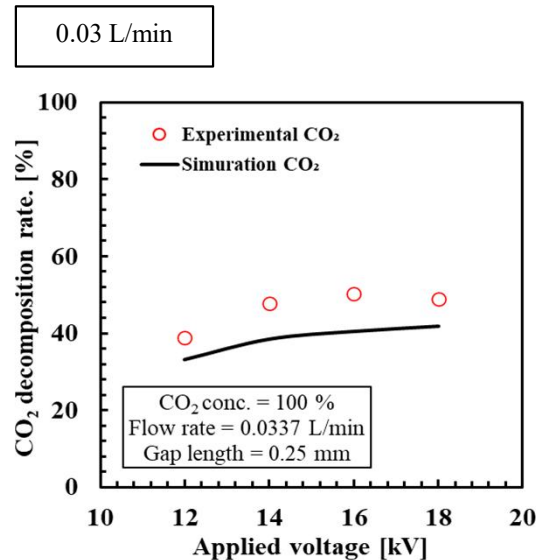
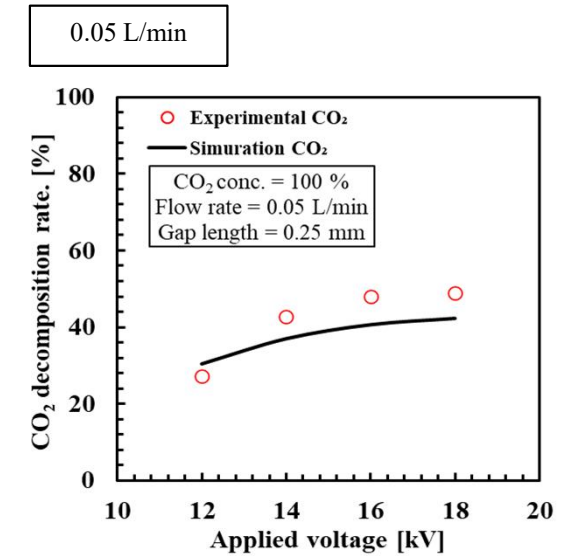
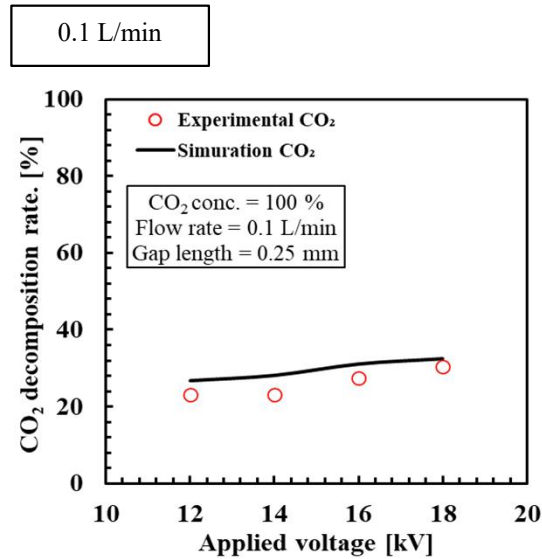
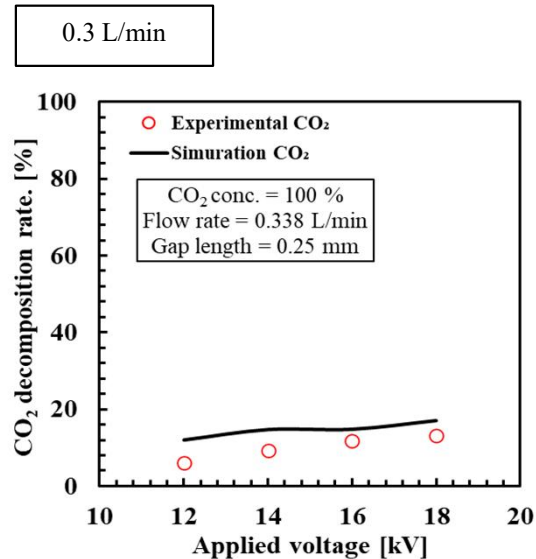
T_e : Electron temperature [K]

k_B : Boltzmann's constant [J/K]

	支配的な反応	A	β	E
R1	$e + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O} + e$	5.0E+1	2.75	1000
R2	$\text{CO} + \text{O} (+\text{M}) \rightleftharpoons \text{CO}_2 (+\text{M})$	1.8E+10	0.0	2380

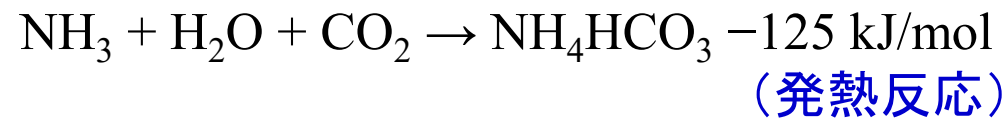
(2)CO₂分解シミュレーション結果

実験結果とシミュレーション結果は概ね一致。これより, CO₂分解率に影響するパラメータを特定



6. CO₂反応分離剤としてのアンモニア

NH₃ が大量に供給可能なら, NH₃を燃料として使用するのではなく, CO₂反応分離剤として使い, 生成物(炭酸水素アンモニウム)を燃料としてリサイクルしては？



- 常温で反応するため, アミン吸収法に比較して低エネルギー
- ドライブプロセスのため廃水処理は不要
- 炭酸水素アンモニウム(固体)は特に規制なく貯蔵・輸送可能
- 炭酸水素アンモニウムは60～120℃程度で, NH₃とCO₂に分解するので, H₂キャリアおよびCO₂キャリアとして機能する
- 生成物は, e-CH₄等, カーボンリサイクルに資する

CO₂反応分離実験装置

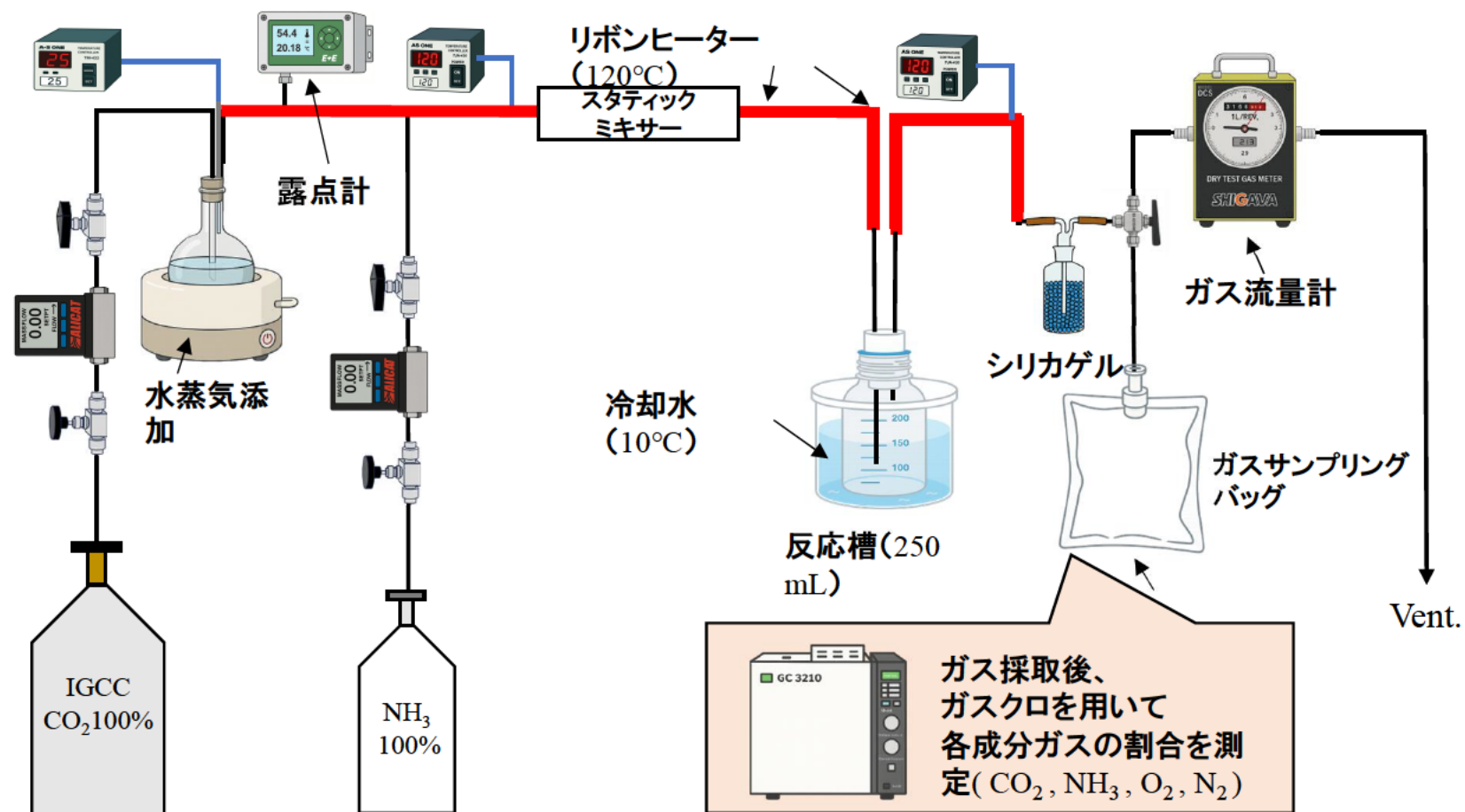
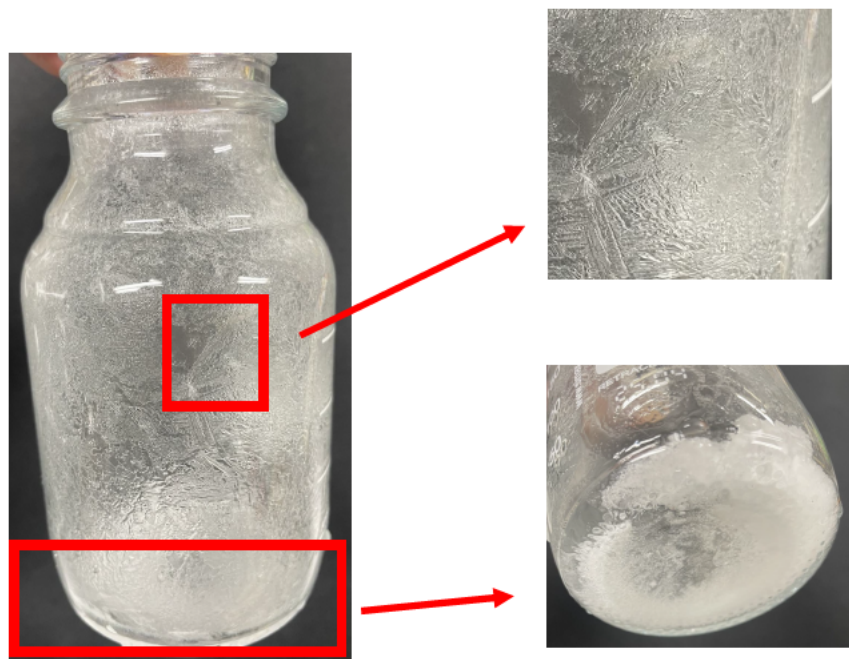


図 排ガス中CO₂固定(炭酸水素アンモニウム合成)の実験装置

■実験結果(1)炭酸水素アンモニウムの生成挙動

【反応器壁面】



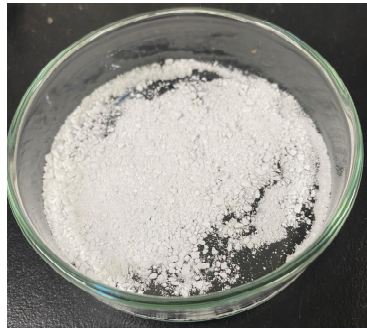
- ✓ 壁面と底に生成物が付着した(冷却面で生成)
- ✓ 底(ガス入口付近)に特に多く生成していた
- ✓ 元素分析から炭酸水素アンモニウム純度を算出

【生成物の分析】

	C(wt%)	H(wt%)	N(wt%)	N/C	純度%
NH ₄ HCO ₃ 試薬	15.19	6.33	17.72	1.166	100
生成物(底)	14.61	6.15	17.56	1.201	97.1
生成物(壁)	14.42	6.06	17.29	1.199	97.4
NH ₂ COONH ₄ 試薬	15.38	7.69	35.9	2.334	0.116

■実験結果(2)CO₂反応分離率

CO₂とH₂OとNH₃を室温で混合すると白い粉が生成する



約120℃で完全分解し、NH₃とCO₂とH₂Oを生成する。

加熱すると……

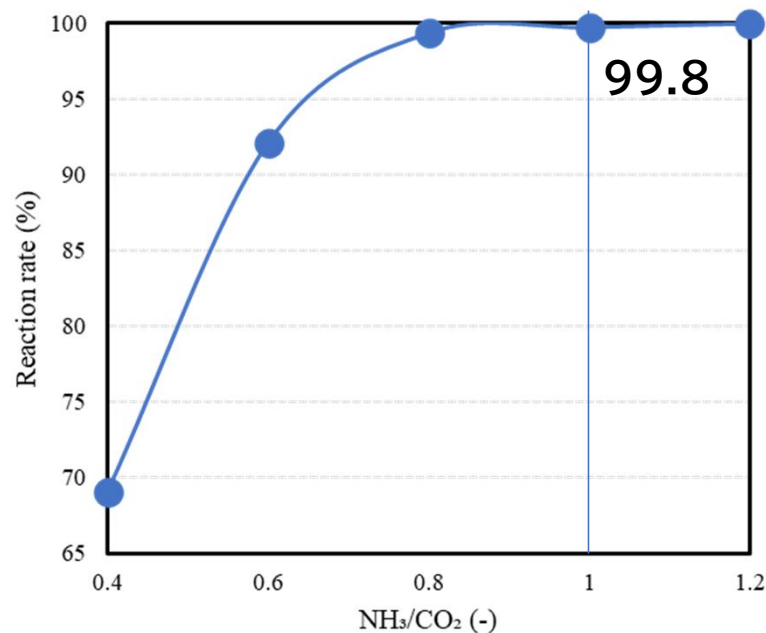


図 NH₃/CO₂モル比とCO₂反応率

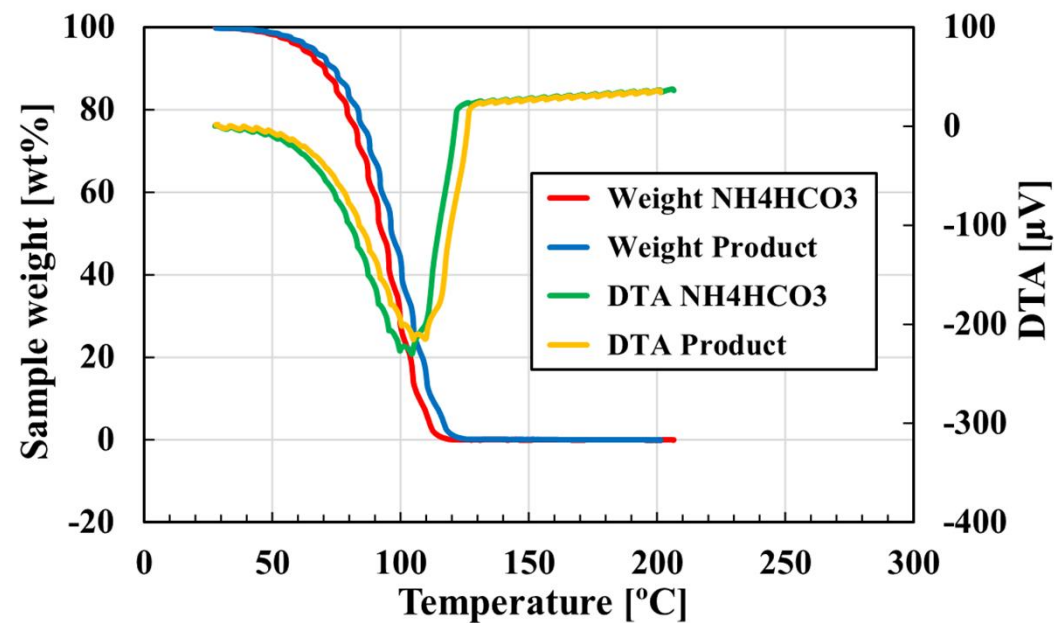


図 反応生成物と試薬(NH₄HCO₃)のTG-DTA結果

7. まとめ

- (1) CO₂プラズマ分解リアクターを開発中。世界最高レベルの分解率51.4%を達成できた。現在, スケールアップ装置(CO₂ガス量2.0 Nm³/h)を製作中。
- (2) リアクターの短ギャップ化と温度制御(冷却)等, エネルギー効率に関係するパラメーターをシミュレーションから抽出。
- (3) CO₂をアンモニアで反応分離することに成功。反応率99.8%を得た。
- (4) CO₂プラズマ分解リアクターと)CO₂固定リアクターを統合し, 燃料としてリサイクルする先導的カーボンリサイクルを提案。