

(別紙1)

事業の実施内容及び成果に関する報告書

1 事業名

2025年度 木質系バイオマスの革新的CO₂ガス化プロセス 補助事業

2 事業の実施経過

① CO₂電離効率に関する研究

2025年 4月 1日 基礎実験開始

② ガス化反応の制御に関する実証実験

2025年 7月 1日 基礎実験開始

3 実施内容及び成果

(1) 実施内容

① CO₂電離効率に関する研究

本項では、従来法によるプラズマ形成法と新しい手法によるプラズマ形成法のCO₂電離効率の比較を行うため、バイオマスがないCO₂のみの条件で実験を実施した。また、本法の最適化を行うとともに、分光器を駆使して本法の反応メカニズムについて考察を行った。

② ガス化反応の制御に関する実証実験

本項では、①の研究成果をベースに、マイクロ波プラズマを用いたバイオマスの100%CO₂ガス化を行った。バイオマス充填層とバイオマス流動床の比較を行いながら、本法の反応特性を明らかにするとともに、最適な方法について検討を行った。

(2) 成果

① CO₂電離効率に関する研究

本項では、バイオマス充填無し条件で実験を実施した。図1に、マイクロ波出力1 kW、投入CO₂流量0.5 L/min、ストレート石英管（内径50 mm）において、圧力（1-4 kPa）が生成ガス組成およびCO₂変換率（生成CO量／投入CO₂量）に及ぼす影響を、図2に、同様の条件で投入CO₂流量1.0 L/minの結果を示す。実験前の予想では、マイクロ波プラズマは圧力が低いほど効果が高くなることから、圧力が低いほどCOが多く生成さ

(別紙1)

れ、CO₂変換率が高くなると考えていた。しかしながら、投入CO₂流量0.5 L/minおよび1.0 L/minのいずれにおいても、圧力1.0 kPaでCO濃度およびCO₂分解率はピーク値を示さず、それよりも大きな圧力においてピークを示した。CO₂はマイクロ波プラズマにより、COとOラジカルに電離（反応式(1)）される。生成したOラジカルは、他のOラジカルと反応にしてO₂になり（反応式(2)）、このときCOはそのまま安定化する（反応式(3)）。また、生成したOラジカルはCOと反応し、再びCO₂に戻るものもある（反応式(4)）。

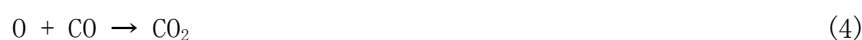


図3に発光スペクトルの圧力依存性を示す。図3において、300 nm付近のピークはCOの発光を表し、圧力が低いほどピークが高く、圧力の増加に伴い減少する。圧力が低いとき、COのピークが高いことからCOは活性な状態、すなわち反応しやすい状態にあることから、反応式(4)により再びCO₂が生成される反応が優勢になると考えられる。一方、圧力が高くなると、COのピークが低下することから、COの活性も低下し、反応式(2)、(3)の反応によりO₂の生成およびCOの安定化が優勢になると考えられる。以上のことから、本手法では、CO₂の分解とCOの安定化がバランスよく起こる圧力で最もCO₂変換率が高くなると考えられる。投入CO₂流量0.5 L/minでは、圧力に2.0 kPaにおいて、投入CO₂流量1.0 L/minでは圧力3.0 kPaにおいて最もバランスが良

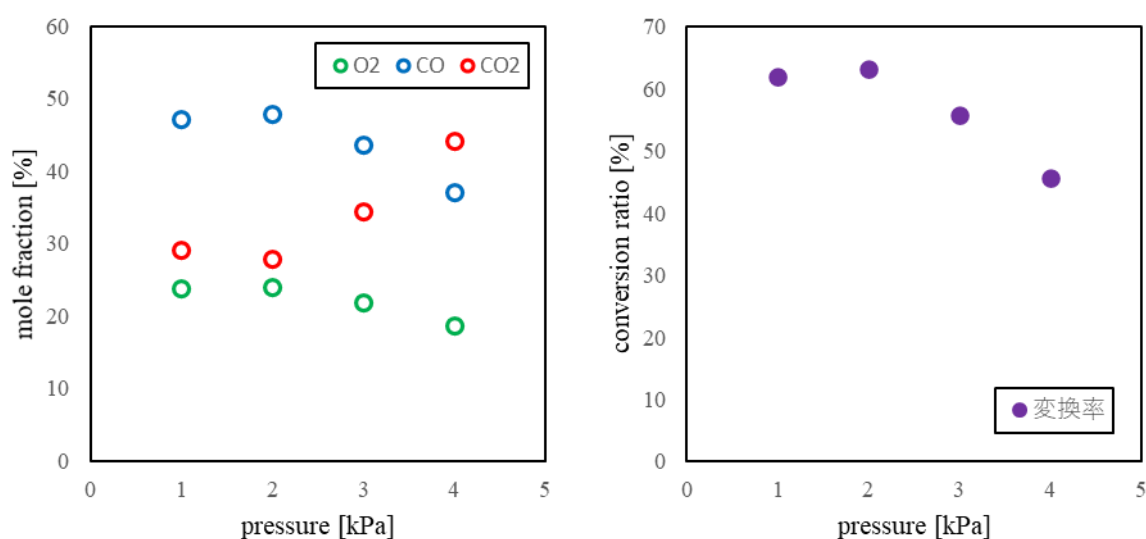


図1 投入CO₂流量0.5 L/minにおける生成ガス組成およびCO₂変換率

(別紙1)

く、CO₂変換率が高くなった。また、投入CO₂流量0.5 L/minと1.0 L/minを比較すると、流量増加とともに、CO₂変換率のピーク圧力が高い方へシフトしている。活性が高く反応しやすいCOは、流量が多いほど他のラジカルとの接触確率が上昇し、CO₂に戻るものが多くなったためと考えられる。

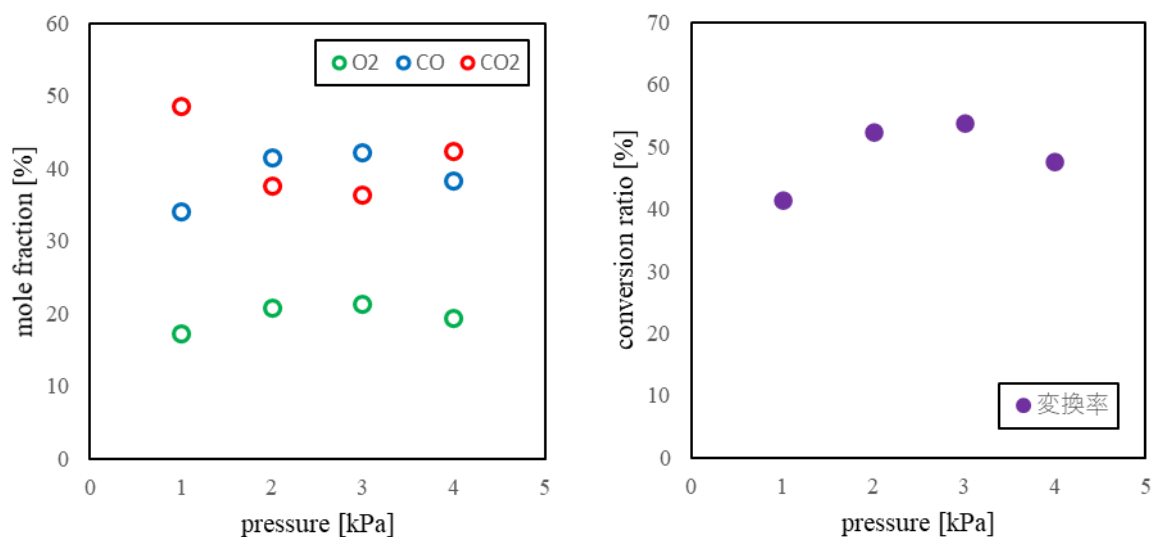


図2 投入CO₂流量1.0 L/minにおける生成ガス組成およびCO₂変換率

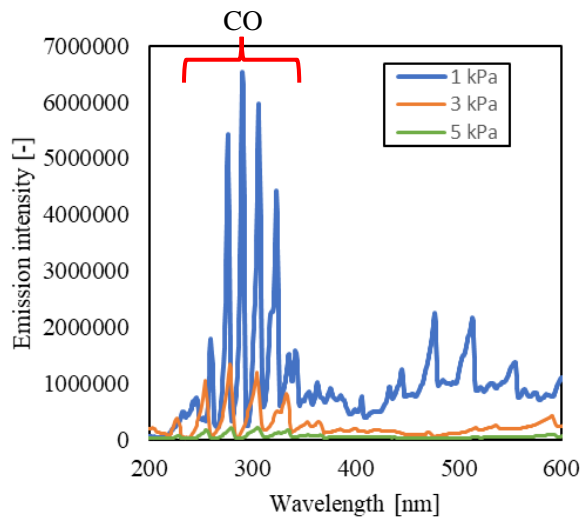


図3 発光スペクトルに及ぼす圧力の影響

次に、投入CO₂流量0.5 L/minにおいて、最もCO₂変換率が高くなった結果と新手法の結果を表1に示す。従来法は、石英管の横側から入射したマイクロ波がガスにエネルギーを受け渡し減衰しながら進むため、プラズマはマイクロ波の入口側で強くなる。この空間的不均一性を解消するために開発したのが新手法であり、均一なプラ

ズマ流の形成に成功した。均一なプラズマ流を形成することで、生成ガスのCO濃度が7%、CO₂変換率が12.6%上昇したが、これは反応場全体で均一に電離が進んだことが要因である。また、このことに加え、新手法ではプラズマ化したガスが分散されたため、COとOラジカルの再結合が抑制されたことも要因の一つと考えられる。

表1 生成ガス組成および変換率における従来法と新手法の比較

	CO濃度%	O ₂ 濃度%	CO ₂ 濃度%	CO ₂ 変換率%
従来法	47.9	24.0	27.9	63.2
新手法	54.9	27.4	17.5	75.8

② ガス化反応の制御に関する実証実験

本項では、バイオマス(木屑)のガス化実験を実施するが、今回の報告では、マイクロ波出力1000 Wの条件下で、バイオマス充填層を適用した結果を示す。図4に本装置における反応の写真を示す。青い部分がマイクロ波導波管で、マイクロ波が照射されてプラズマが形成されている。その下流にバイオマス充填層があり、赤熱しながら反応している。このとき、マイクロ波プラズマの形成にはエネルギーを使用しているが、バイオマスの反応はO+Cの酸化反応であり、エネルギーを使用することなく自己発熱により反応が進んでいる。



図4 反応の様子

表2および3に、投入CO₂流量0.5 L/minおよび1.0 L/minにおける、生成ガスの性状および生成CO量/投入CO₂量比を示す。CO₂ 0.5 L/minのとき、CO₂から生成したOラジカルがバイオマスと反応し、生成ガス中のCO濃度63.3%、生成CO量/投入CO₂量比1.04となり、投入CO₂よりも多くのCOが製造された。しかし、CO₂ 1.0 L/minでは、CO濃度48.9%、生成CO量/投入CO₂量比0.68と大幅にCO製造性能が低下した。充填層は層全体で反応するわけではなく、プラズマガスの入口側から順に断面で反応するため、Oラジカルの量とバイオマスカーボンの反応表面積の関係が重要となる。CO₂量0.5 L/minではこのバランスがよく、CO製造反応が促進されたが、CO₂量1.0 L/minでは生成したOラジカルが多く、COと余剰のOラジカルが反応してCO₂になるものが増加したと考えられる。

(別紙1)

表3 投入CO₂量0.5 L/minにおける充填層を用いた生成ガスの性状

投入CO ₂ L/min	濃度 [%]			生成量 [L/min]			生成CO
	CO	O ₂	CO ₂	CO	O ₂	CO ₂	投入CO ₂
0.5	63.3	1.6	34.8	0.52	0.013	0.28	1.04

表4 投入CO₂量1.0 L/minにおける充填層を用いた生成ガスの性状

投入CO ₂ L/min	濃度 [%]			生成量 [L/min]			生成CO
	CO	O ₂	CO ₂	CO	O ₂	CO ₂	投入CO ₂
1.0	48.9	2.3	48.7	0.68	0.032	0.68	0.68

次に、反応表面積が非常に大きいバイオマスカーボン流動床を導入した(図5)。投入CO₂量0.5 L/min, 1.0 L/minにおける結果をそれぞれ表5および6に示す。CO₂量0.5 L/minのとき、CO濃度72.8%、生成CO量/投入CO₂量比1.16となり、充填層の場合よりもCO製造性能がアップした。CO₂量1.0 L/minでは、CO濃度66.5%、生成CO量/投入CO₂量比1.10となり、充填層の場合よりも大幅にCO製造性能がアップした。これらのことから、流動床を適用した本技術は、同じマイクロ波出力でも投入CO₂量1.0 L/minまではCO製造効率がほとんど低下しないことが示された。同じマイクロ波出力において投入CO₂量を倍増し、生成CO量が倍増されていることから、エネルギー効率も同様に倍増している。なお、この初期型、投入CO₂量1.0 L/minにおけるエネルギー効率は25%である。



図5 流動床

表5 投入CO₂量0.5 L/minにおける流動床を用いた生成ガスの性状

投入CO ₂ L/min	濃度 [%]			生成量 [L/min]			生成CO
	CO	O ₂	CO ₂	CO	O ₂	CO ₂	投入CO ₂
0.5	72.8	0.1	27.1	0.58	0.001	0.22	1.16

(別紙1)

表 6 投入 CO₂ 量 1.0 L/min における流動床を用いた生成ガスの性状

投入 CO ₂ L/min	濃度 [%]			生成量 [L/min]			生成 CO
	CO	O ₂	CO ₂	CO	O ₂	CO ₂	投入 CO ₂
1.0	66.5	0.2	33.3	1.10	0.004	0.55	1.10

(3) 成果を公表している研究室ホームページ上の URL

(<https://chem-eng.kyushu-u.ac.jp/yamamotoweb/JKA.pdf>)

(4) JKA 補助事業バナーを表示している研究室ホームページ上の URL

(<https://chem-eng.kyushu-u.ac.jp/yamamotoweb/index.html>)

(5) 特許権、実用新案権等を申請又は取得したときはその内容

特にありません。

4 今後予想される効果

① CO₂電離効率に関する研究

本研究により、プラズマ形成方法が変わることで CO₂ 変換率が変化することが示された。このことから、少ないエネルギーで効率的に CO₂ プラズマを形成するとともに、CO₂ からより多くの CO を生成する手法の開発を目指す。またこの成果を他の研究にも応用することで、各研究において適切なプラズマ形成法を開発し、より効率的な反応プロセスの開発につなげていきたい。

② ガス化反応の制御に関する実証実験

効率的なバイオマスの 100% CO₂ ガス化手法を開発し、投入 CO₂ よりも多くの CO を生成することに成功した。より効率的なバイオマスガス化手法の研究を引き続き行い、スケールアップ可能、かつ実用化可能なバイオマス 100% CO₂ ガス化プロセスの開発につなげていきたい。

5 その他

特にありません。