

プラズマを使った 低コスト・低温メタネーション技術

東京科学大学 工学院機械系
教授 野崎智洋

2026年6月25日

従来技術とその問題点

オンサイトで水電解
⇒ 輸送・貯蔵コスト低減

- グリーン水素（電解水素）のコストが高い。
- CO₂分離・回収のコストが高い。
- 平衡では低温ほどCH₄合成に有利 → 低温では反応速度が遅い。
- 触媒層にホットスポットが形成される → 反応速度的に有利だが平衡的に不利。
- 起動停止，負荷答性が高くない。
- 技術開発は大規模集中型が中心で，小型分散に対応したメタネーション技術の開発は遅れている。

バイオガス・メタネーション
⇒ 後半で技術紹介

新技術の特徴・従来技術との比較

触媒に非平衡プラズマを作用させる

⇒ 平衡に有利な低温でメタネーション反応を加速する。

- 非熱的な反応を利用することで、反応速度と平衡の相反する制約を受けにくい反応系を構築した。
- 安価な汎用触媒（Ni/Al₂O₃）を使い、熱反応では対応できない200℃でも高いCH₄収率を達成できる。
- 外部からエネルギー供給を一切必要としない自立運転（オートサーマル・メタネーション）を実現できる（エネルギー効率78%達成）。
- プラズマ以外のエネルギーを必要としない省エネプロセスを実現できる（プロセスの消費エネルギーを概ね1/10に低減）。

想定される用途

- 小規模分散型の二酸化炭素回収利用設備
- 未利用バイオガス資源の利用拡大
- 非常用・遠隔地での燃料合成（急速立上げ，負荷変動対応）
- 国産ガスエンジンを使ったバイオガス発電。

（副次的な効果）

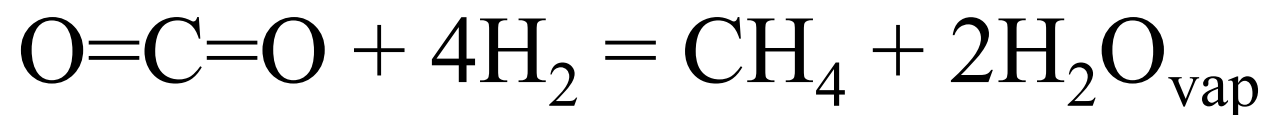
- 発酵槽の容量低減（40%削減）
- 貴金属触媒を使わない。新規触媒開発は不要。
- $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 改質などにも適用できる → 合成ガス
→ メタノール, SAFなど

企業への貢献、PRポイント

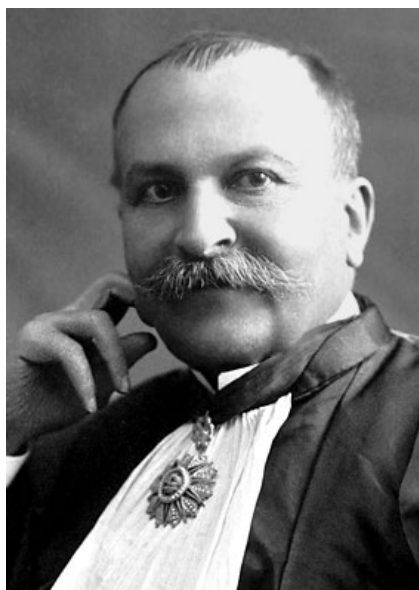
- 基礎研究 → 終了（反応機構解明）。
- 総ガス流量 (CO_2/H_2 混合ガス) $0.2\text{-}0.3 \text{ Nm}^3/\text{h}$ を処理するプラズマ反応装置の開発 → 終了。
- ベンチ装置 ($5 \text{ Nm}^3/\text{h}$) の基本設計 → 終了。
 $5 \text{ Nm}^3/\text{h} \Rightarrow \text{CH}_4$ に換算して $1 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2$)
低位発熱量なら 約 $10 \text{ kW} \Rightarrow$ プラズマの消費電力は 300 W 。
- 簡単なプラズマ反応装置を追加するだけで、大掛かりな装置の導入や既存設備の変更は不要（水素に対する安全性などは配慮が必要）。
- CO_2 全量を対象にするのではなく、局所導入可能。
- 非常用、遠隔地、起動停止が頻繁に要求される応用。

実例紹介

メタネーション反応とは



$$\Delta H^\circ = -165 \text{ kJ}$$



Paul Sabatier
1912年ノーベル化学賞受賞
from wiki

C=O結合を解離

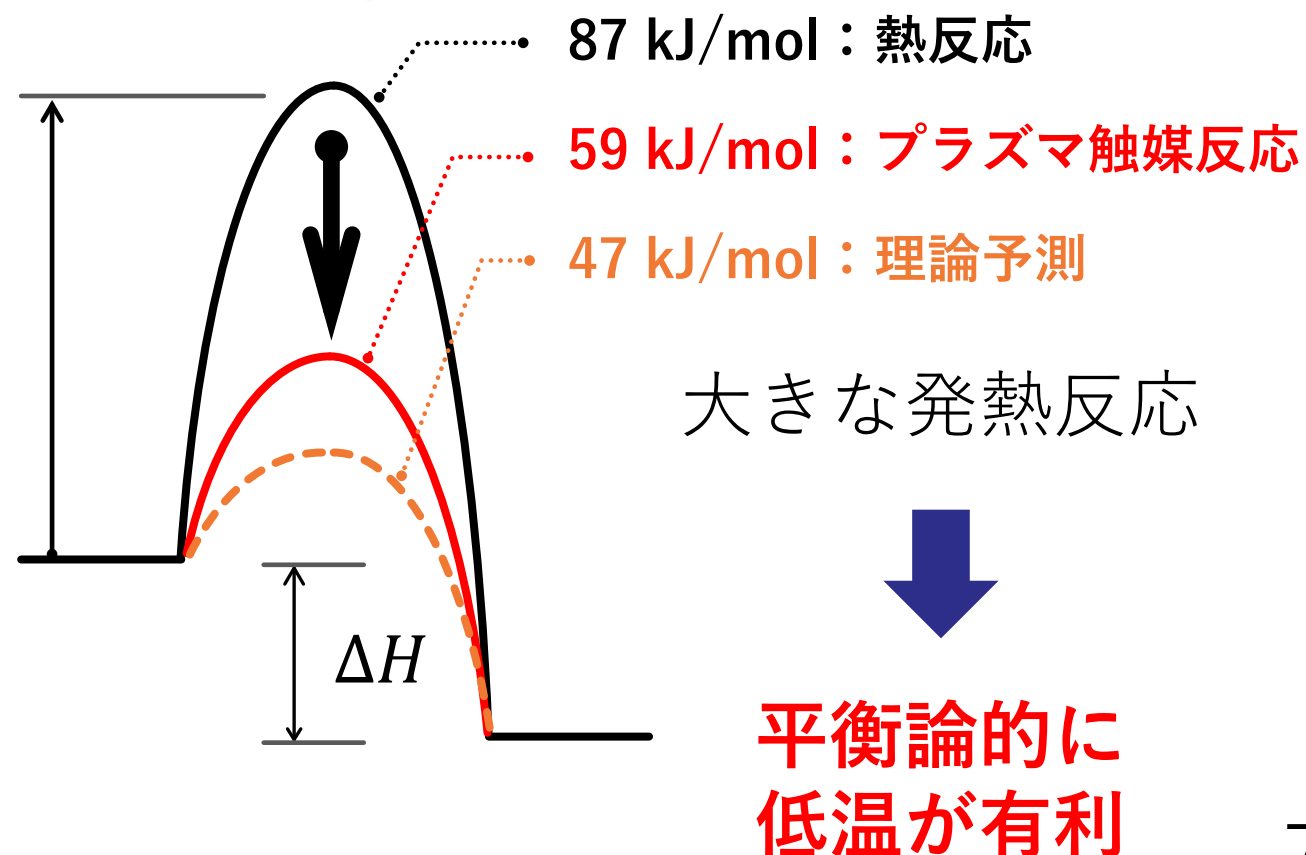


大きな活性化
エネルギー



速度論的に
高温が必要

- プラズマによって活性化エネルギーを下げる。
- 平衡に有利な低温で高CH₄収率を実現



メタネーション反応の特徴(課題)

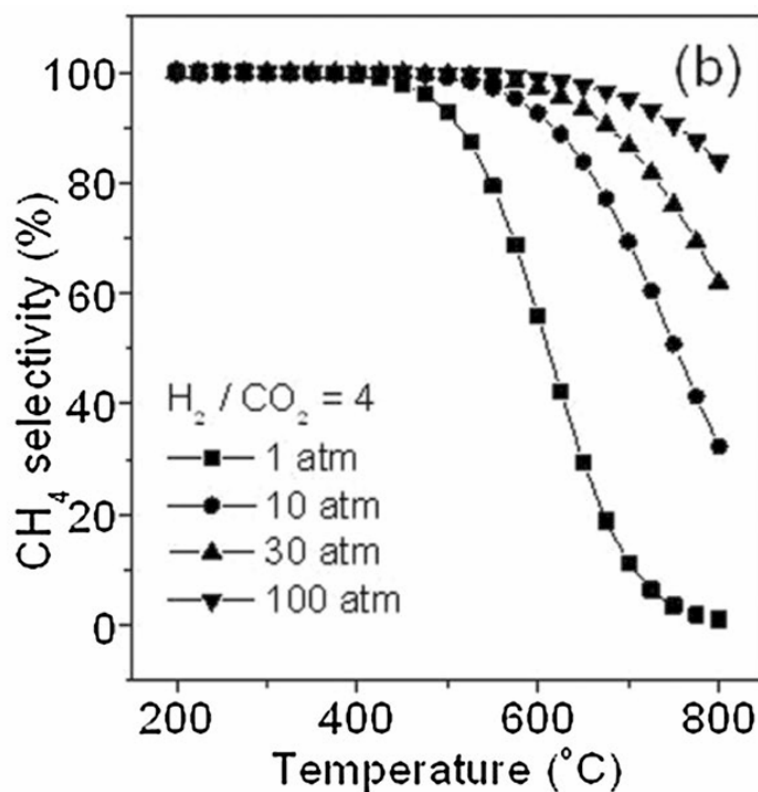
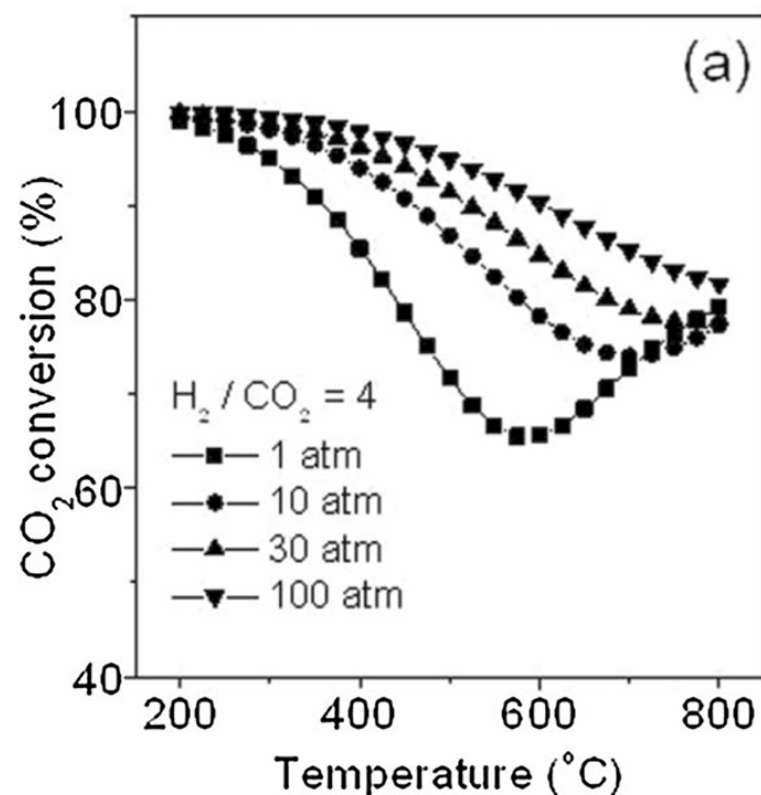
アクセル

ブレーキ

$$\frac{dp_{CH_4}}{dt} = r_{net}(T) = r(T) \times \left(1 - \frac{Q_p}{K_e(T)}\right)$$

$$r(T) = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

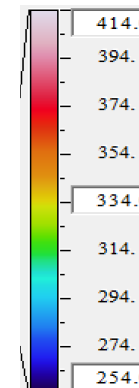
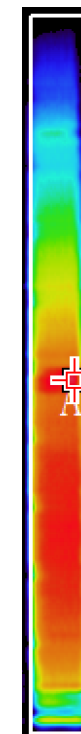
$$Q_p = \frac{p_{CH_4} p_{H_2O}^2}{p_{CO_2} p_{H_2}^4} \rightarrow Q_p \approx K_e$$



出口



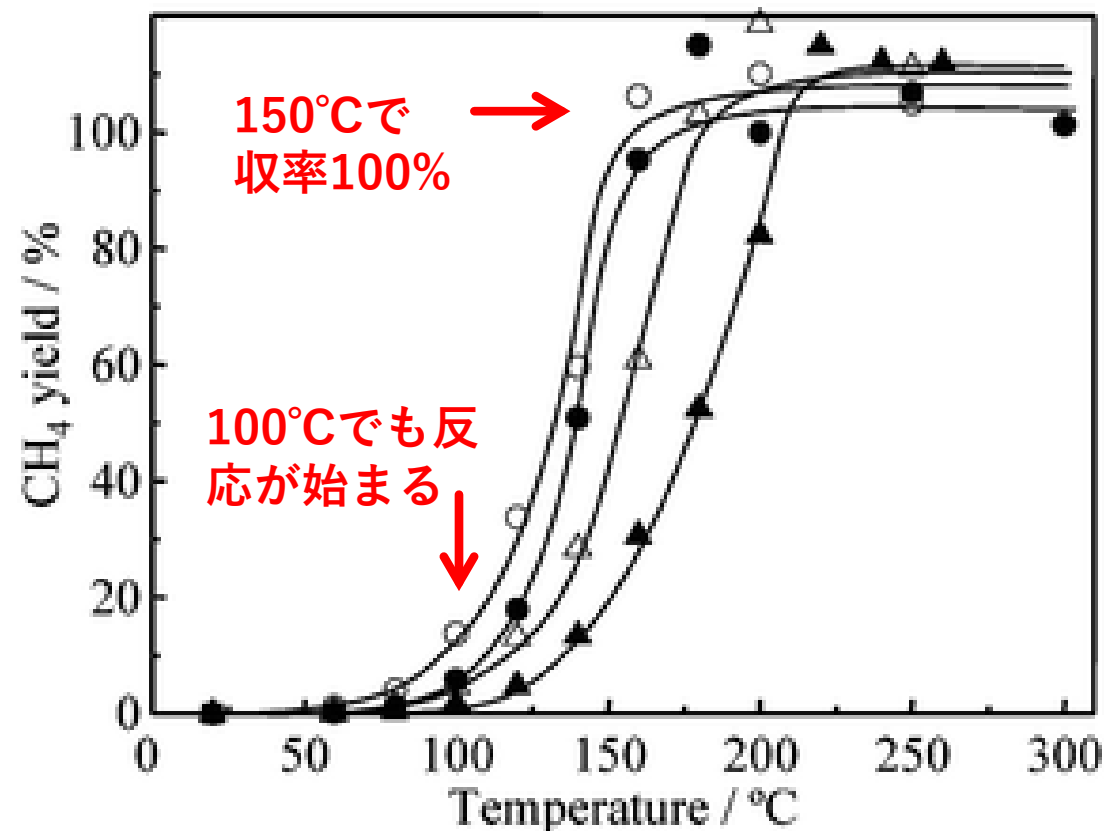
入口



反応器の入口で
高温領域（ホット
スポット）
が形成される。

触媒開発の課題

触媒の活性が高くてもダメ、
低くてもダメ...



低温で高い活性を示す触媒の例：**Ru/TiO₂**
100°Cで反応が始まり150°Cで収率100%に到達。



- 実際の反応場では高温のホットスポットが形成される。
- 活性が高い触媒ほど、ホットスポットが形成されやすい：触媒温度を200°Cに保てない。
- 高温では貴金属触媒を用いる必然性がなくなる。
- 汎用触媒では低温活性が低い
(高温でなければ反応が生起しない)。

高温反応と低温反応の相反する反応条件 触媒開発だけでは解決が困難



研究動向: ヒートマネジメントによるメタネーション反応の高度化

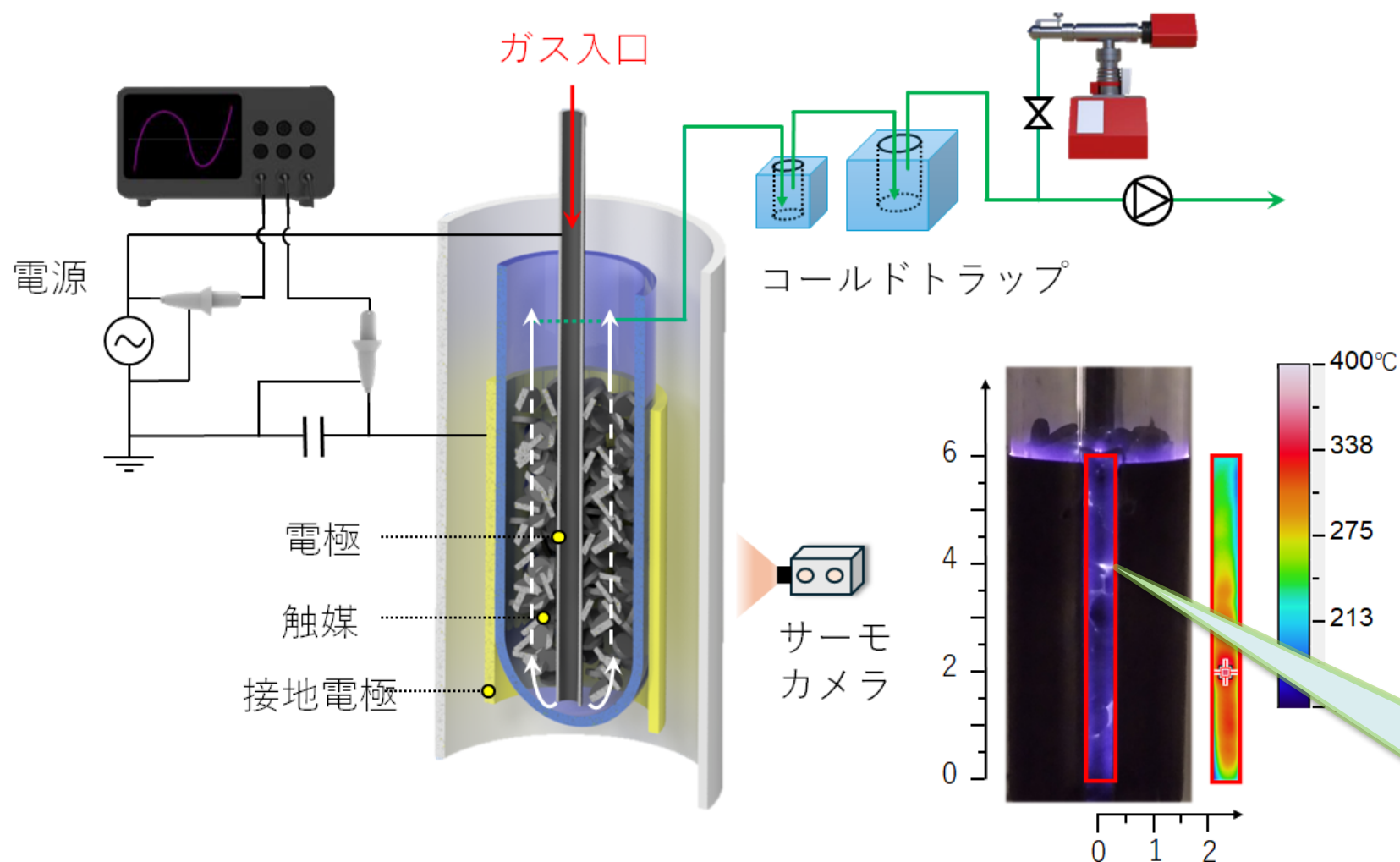
	国内	海外	本提案	一般的手法
特徴	反応器 <u>内部</u> でエネルギーを加える			反応器 <u>外部</u> から熱を加える
熱供給	水素の部分燃焼による熱供給	マイクロ波による触媒の直接加熱	プラズマの発熱作用	プロセス排熱など
ラジカル供給	× (なし)	× (なし)	○ (あり)	× (なし)
コメント	燃焼排ガスに含まれる酸素を利用。部分燃焼が不要になっても水素を消費し続ける。構造体触媒による伝熱促進。	再生可能電力を利用。伝熱効率が高い（伝熱促進）がラジカルは生成されない。	再生可能電力を利用。ラジカルを用いることで低温活性が高い。貴金属触媒を使わなくても反応促進できる。	プロセス排熱利用。熱抵抗が大きく伝熱律速。

CO₂/H₂(= 4/1)のメタネーション紹介

※バイオガスメタネーションは後述

(CH₄/CO₂/H₂ = 1.5/1/4)

実験装置の概略



誘電体バリア放電*)を活用。

CO₂レーザー，オゾン合成，空気清浄機など，広く産業応用されている信頼性の高いプラズマ技術。

【反応器の大きさ】

直径30mm × 高さ60mm

6wt%Ni/Al₂O₃ (20グラム)

3,000 mL/minのガス进行处理

触媒充填層の中でDBDを形成している様子。

*) DBD : Dielectric Barrier Discharge

プラズマによる低温活性化の検証

6 wt%-Ni/Al₂O₃, 500 mL/min
(バイオガス)

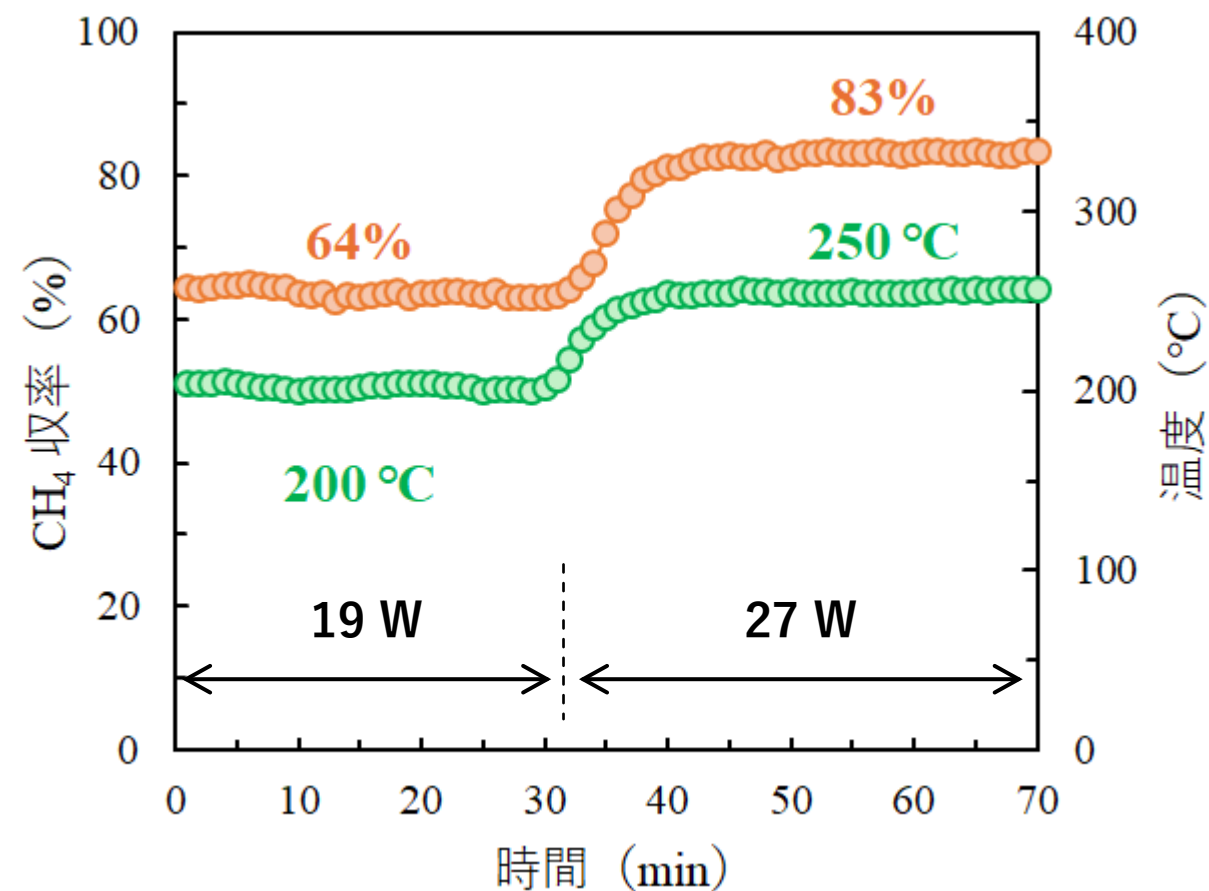
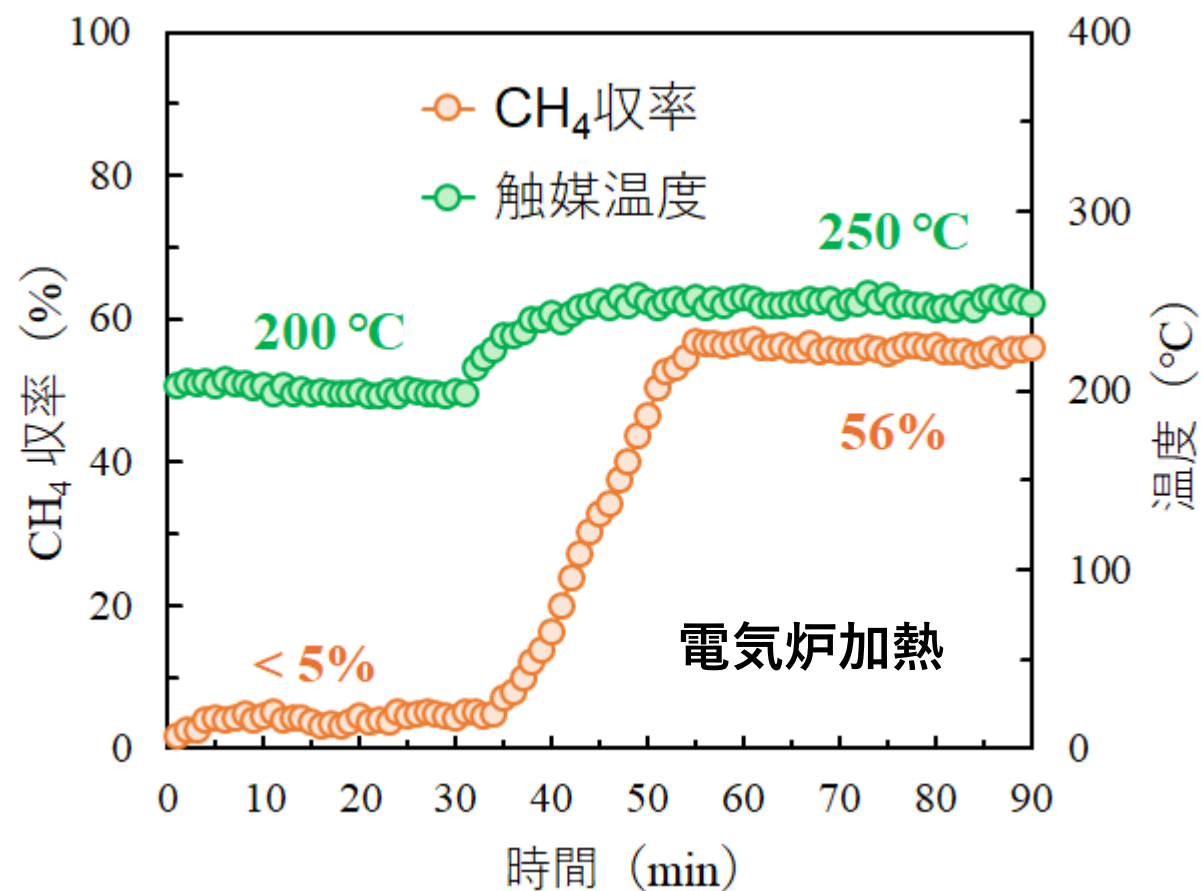
同じ汎用触媒でも，プラズマによって低温活性・CH₄収率が大幅に改善する。

熱反応

200°C：反応しない。
250°C：64%

プラズマ反応

200°C：CH₄収率64%
250°C：83%

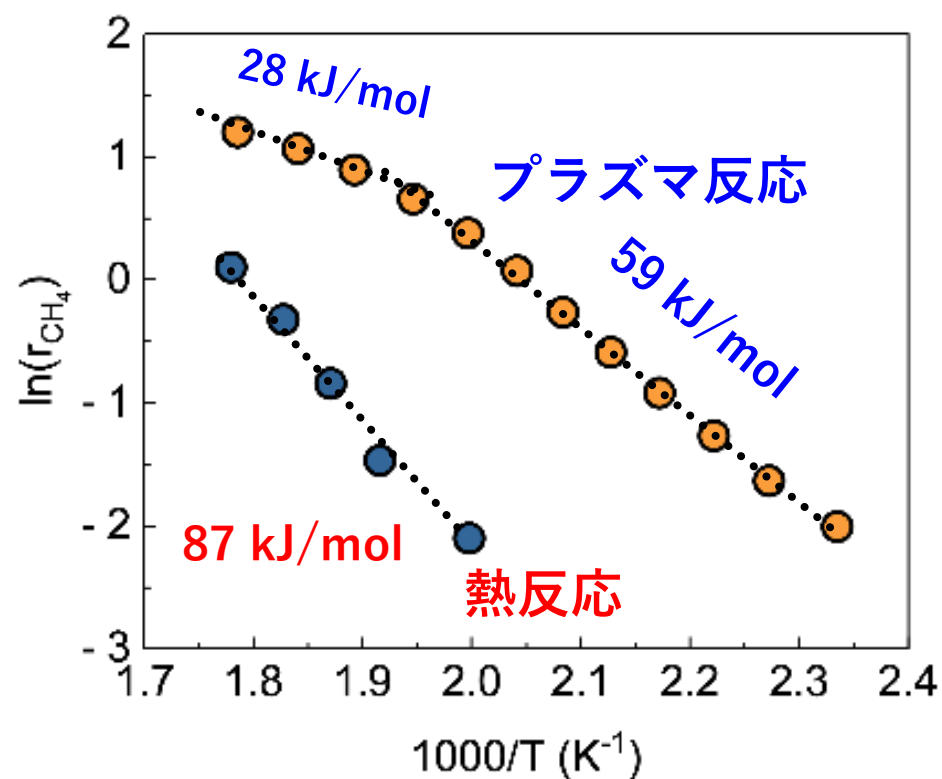
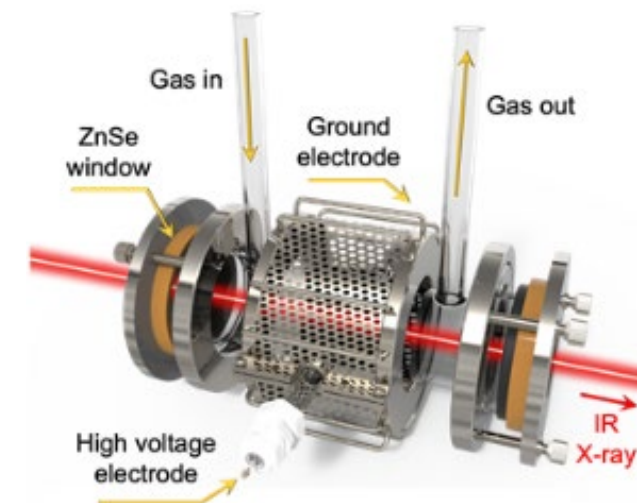
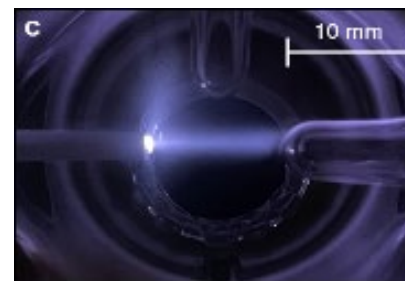


反応機構の解明

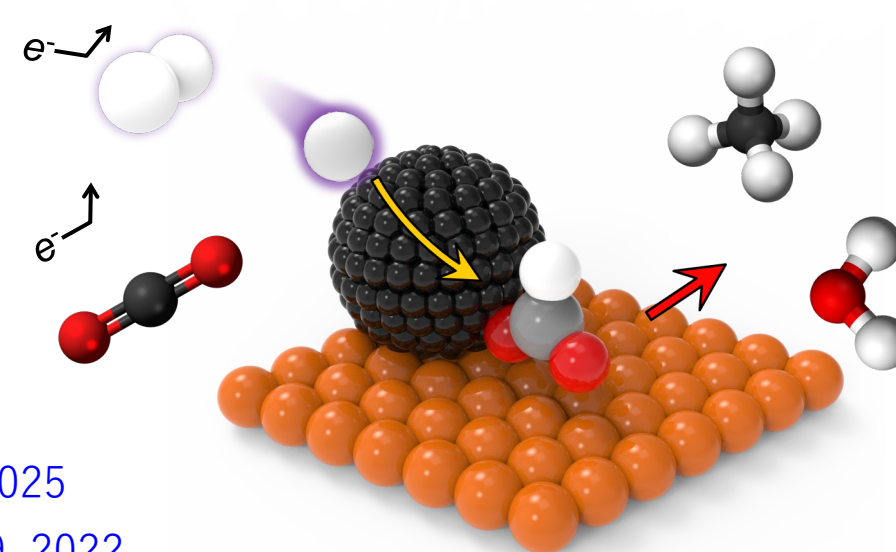
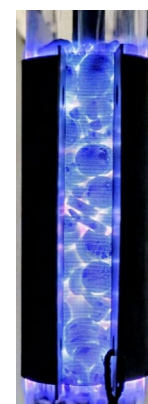
プラズマ触媒反応の”その場観察”
謝辞：JST CREST(JPMJCR19R3)

プラズマにより活性化エネルギーが大幅に低下

活性化エネルギーは、**87kJ/mol** から **59 kJ/mol** へ低下した。量子化学計算では、**47 kJ/mol** まで低減できる可能性が示された。



“振動励起されたCO₂”と“水素原子”の協奏効果によって、低温でCH₄生成が促進されることを明らかにした。



JACS Au, **5**, 169–177, 2025
JACS, **144**, 14140–14149, 2022.

オートサーマル・メタネーション

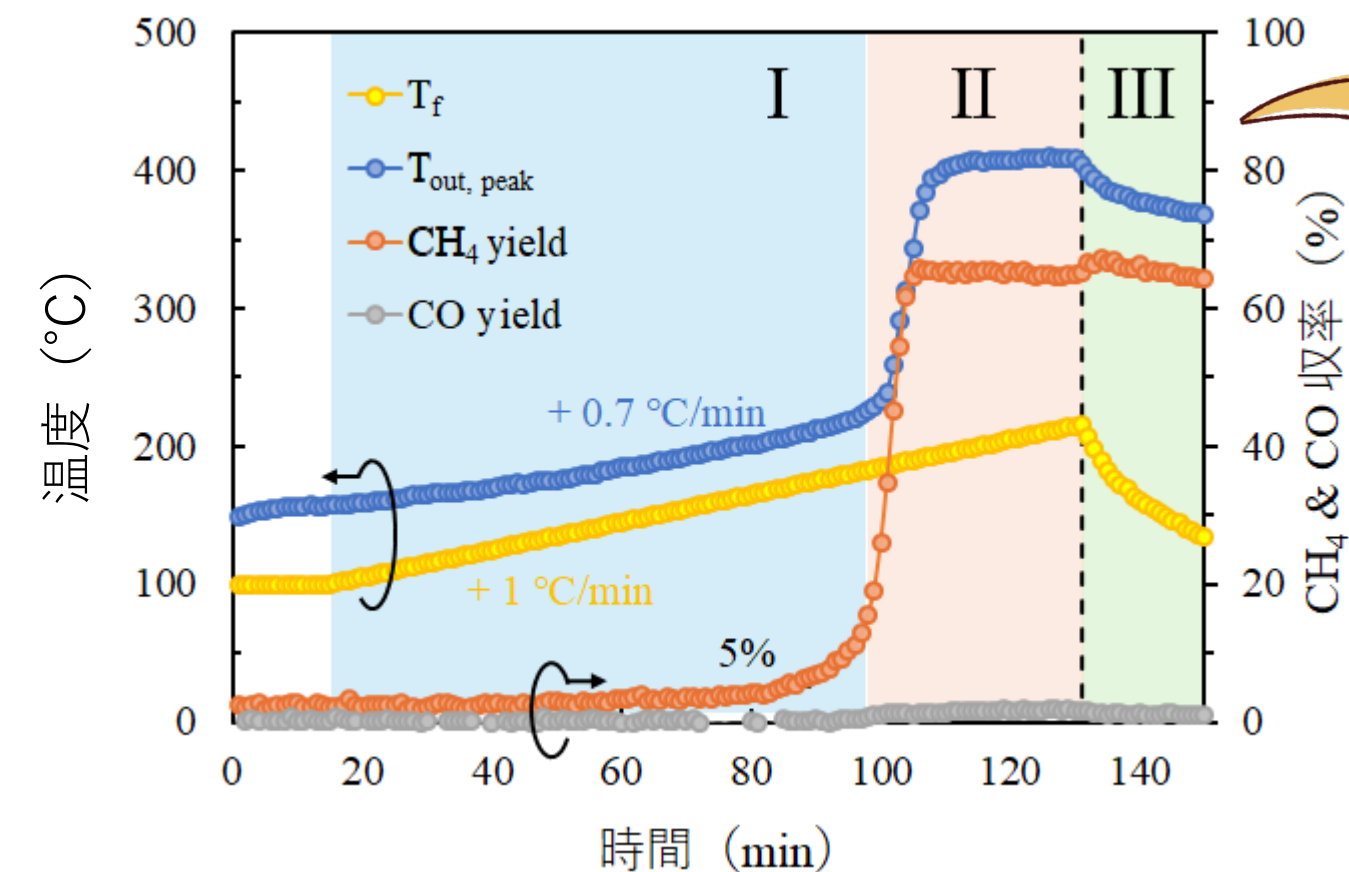
J Energy Chem, **115**, 858-867, 2026.

Chem Eng J, **512**, 162520, 2025.

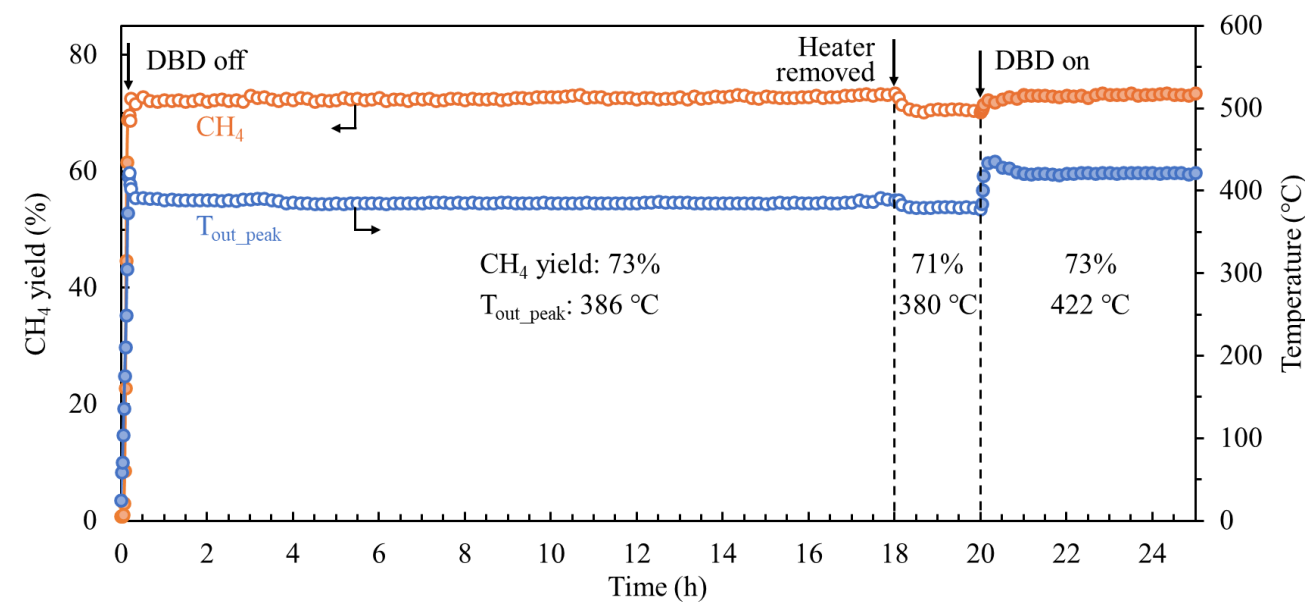
外部から一切のエネルギー供給を必要としない。
反応熱だけでメタネーション反応を自立させる
⇒ エネルギー効率が理論値上限（78%）になる。

常温（25℃）でプラズマを発生させる。

- I. プラズマによる熱で徐々に触媒が加熱される。
ラジカルが供給されるため、熱反応より低い温度でCH₄が生成される。
- II. 反応熱によって急激に触媒温度が上がる。
- III. プラズマをOFFにしてもメタネーションが自立。

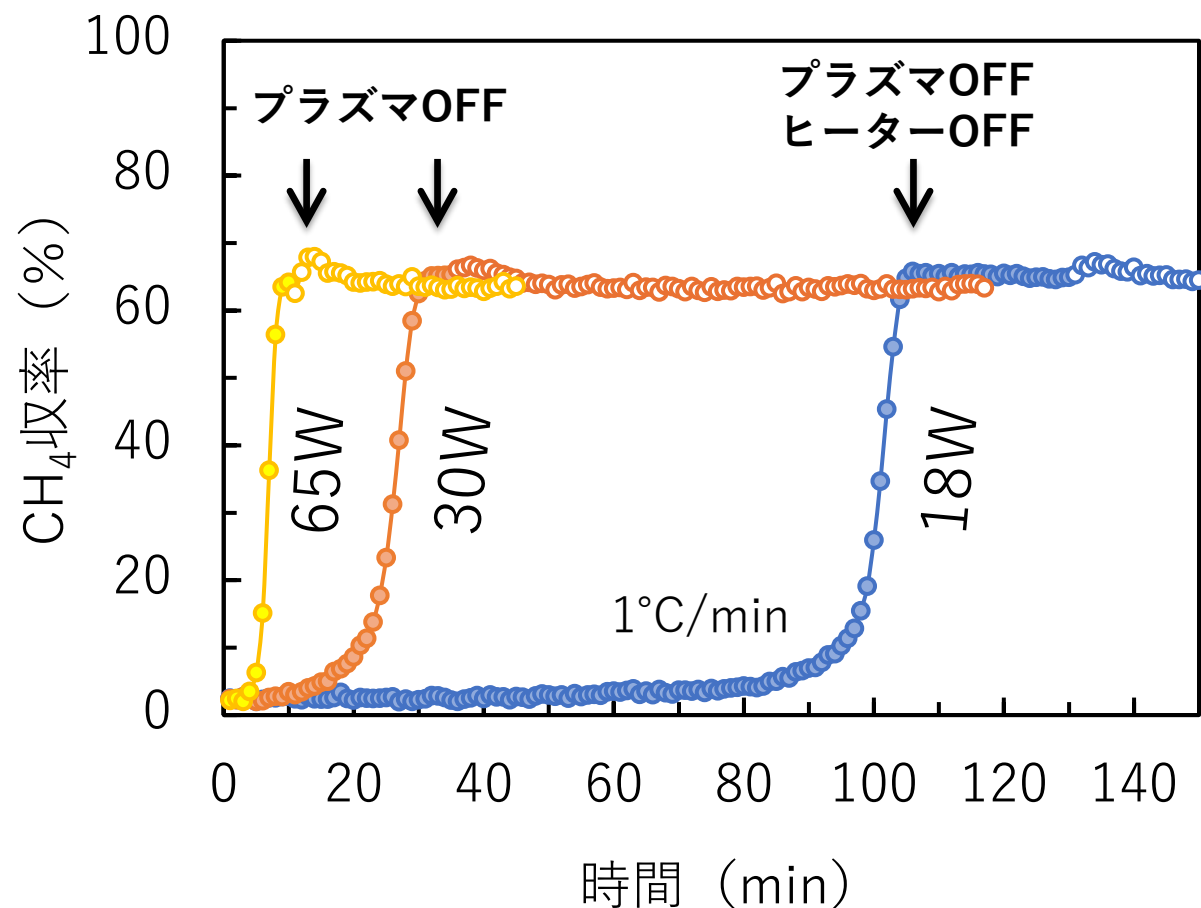


25時間、オートサーマル・メタネーション
反応を持続できることを確認



起動性の改善 電力を大きくするほど省エネ効果が高くなる。

常温からメタネーション反応を起動する。



熱反応：伝熱抵抗が大きい ⇒ 起動が遅い。

プラズマ：温度勾配による伝熱制御と根本的に異なる ⇒ 起動が速い。

- 起動時間を1/9に短縮
- 消費エネルギーを1/2.5に低減

消費電力	立上げ時間	消費エネルギー
18 W	108 min	117 kJ
30 W	30 min	54 kJ
65 W	12 min	47 kJ

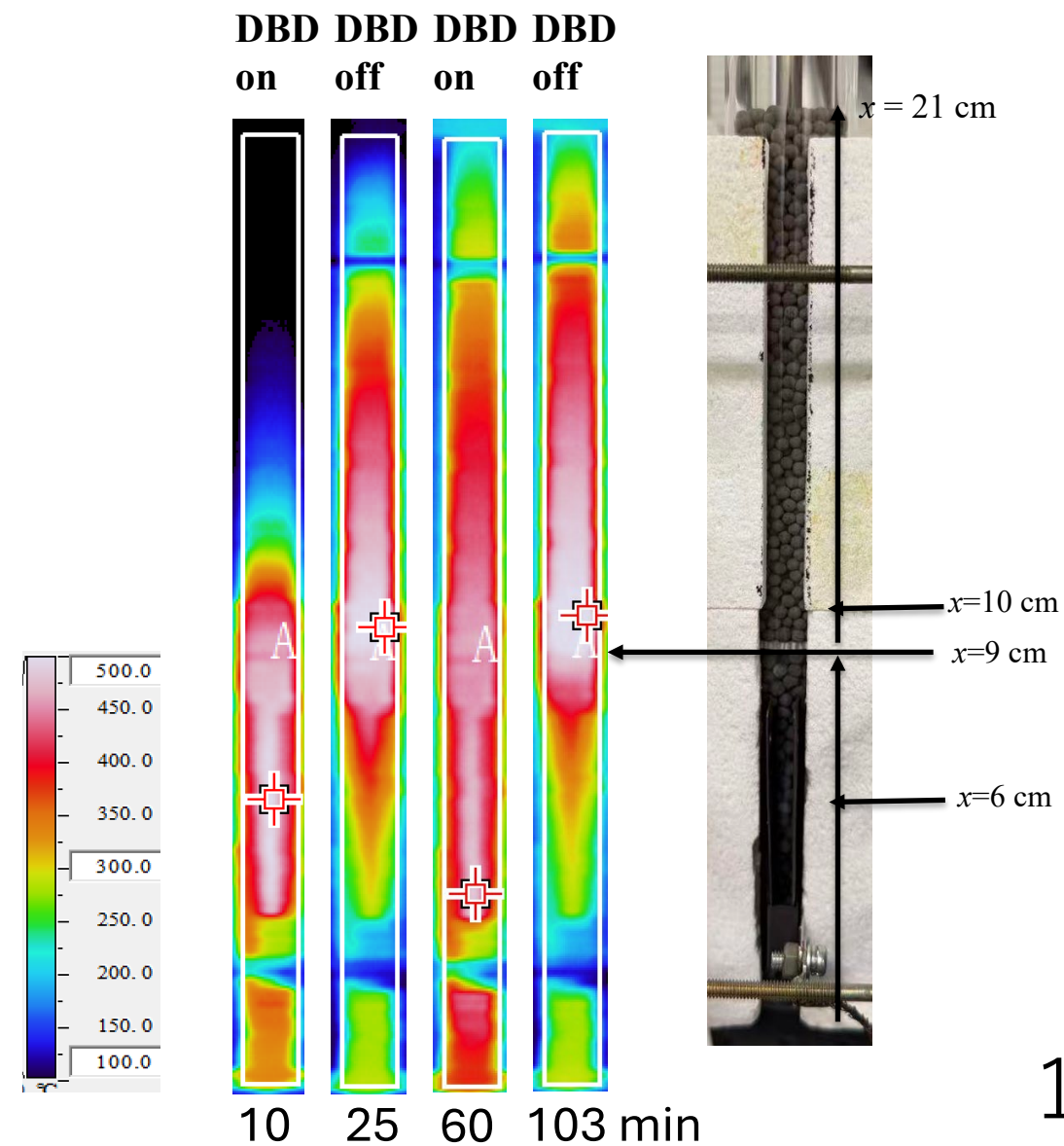
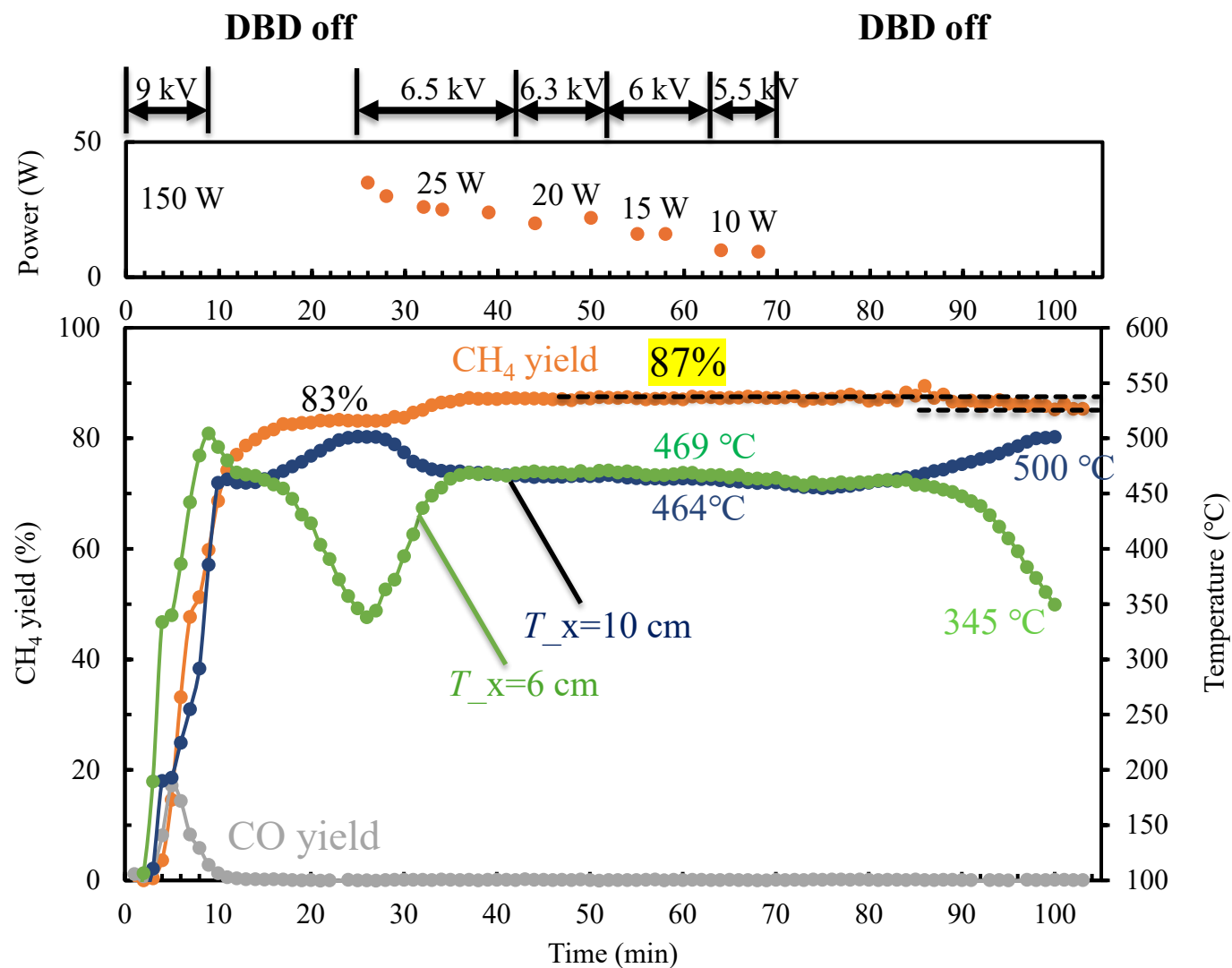
1/9

1/2.5

スケールアップの検討

0.3 Nm³/h (5,000 mL/min)

- 10分で立上げ。メタン収率87%
- ホットスポットを回避して均一な温度分布。
- プラズマがなければホットスポットが形成。



バイオガスのメタネーション

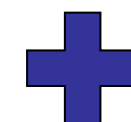
ガス源	CO ₂ 濃度	備考
都市ガスボイラ排ガス	8–10%	空気燃焼（N ₂ 主成分）
ガスタービン排ガス	3–5%	空気過剰率高い（N ₂ 主成分）
石炭火力排ガス	12–15%	比較的高い（N ₂ 主成分）
セメント炉排ガス	15–25%	プロセスCO ₂ 含む
バイオガス	35–50%	CH₄とCO₂の混合 分離工程が必要ない重要なCO₂資源。
埋立地ガス	40–60%	埋立地ガス

未利用バイオガス資源の利用拡大



発酵槽
小型化

× 0.6



プラズマ反応器

- パイプライン：CO₂分離が必要。
- 直接利用：ガスエンジンは外国産。

- グリーン水素はSOECなど新しい技術でオンサイトで電解することで、輸送、貯蔵コストを低減。
- 太陽光発電などが小型分散であることから、バイオガス、プラズマ技術は接続性が高い。

- プラズマ反応器は外付け。
- CO₂を分離せずに直接メタン化。
- 発酵槽容量が0.6倍に縮小（低コスト）。
- 国産ガスエンジンの需要拡大。
- エンドユーザーが燃焼利用してもCO₂回収は不要。

バイオガス・メタネーションの特徴

特徴

- ⇒ (CH_4 が希釈剤) ホットスポットの温度が上がりにくい。
- ⇒ 実プロセスでは生成ガスの再循環が主流：純粋な CO_2/H_2 混合ガスを原料にすることは少ない。

課題

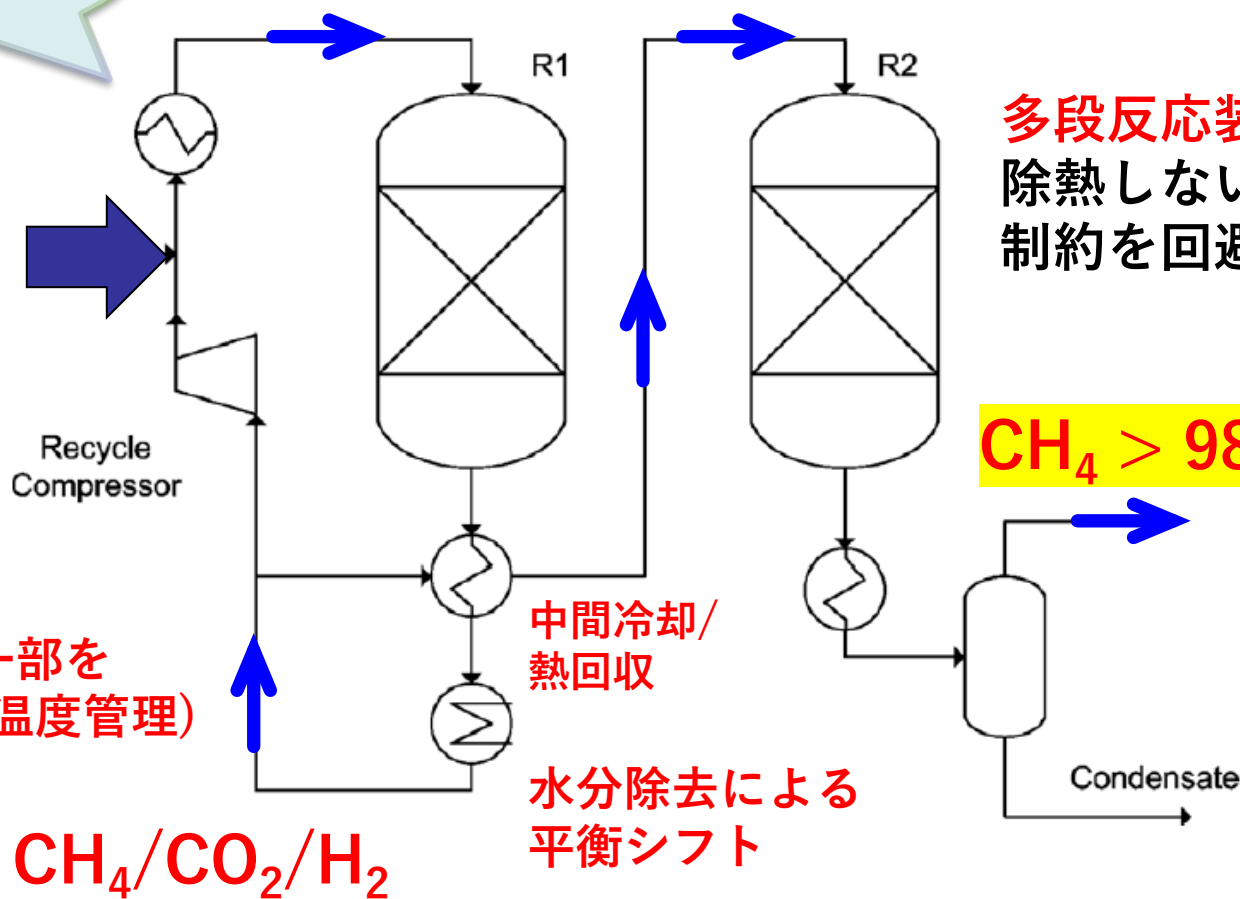
- 原料に CH_4 が含まれている。
- ⇒ CH_4 が希釈剤として作用するため、メタン化反応が遅い。
 - ⇒ 平衡的に反応が進みにくくなる。

メタネーションの実例

生成ガスの再循環と反応器の多段化

純粋に CO_2/H_2 だけを反応させる系は少ない。

CO_2/H_2

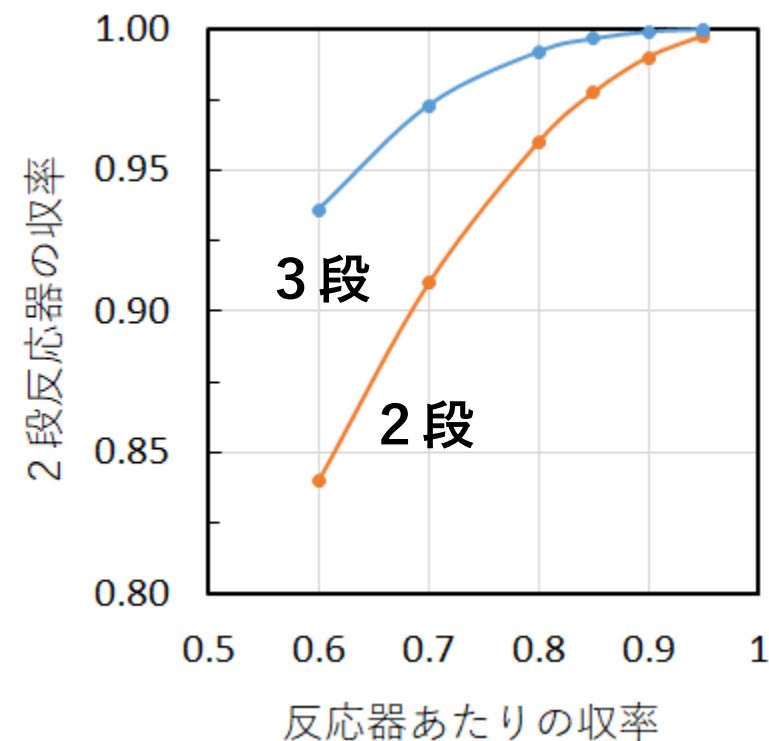


多段反応装置
除熱しないと平衡の制約を回避できない

$\text{CH}_4 > 98\%$

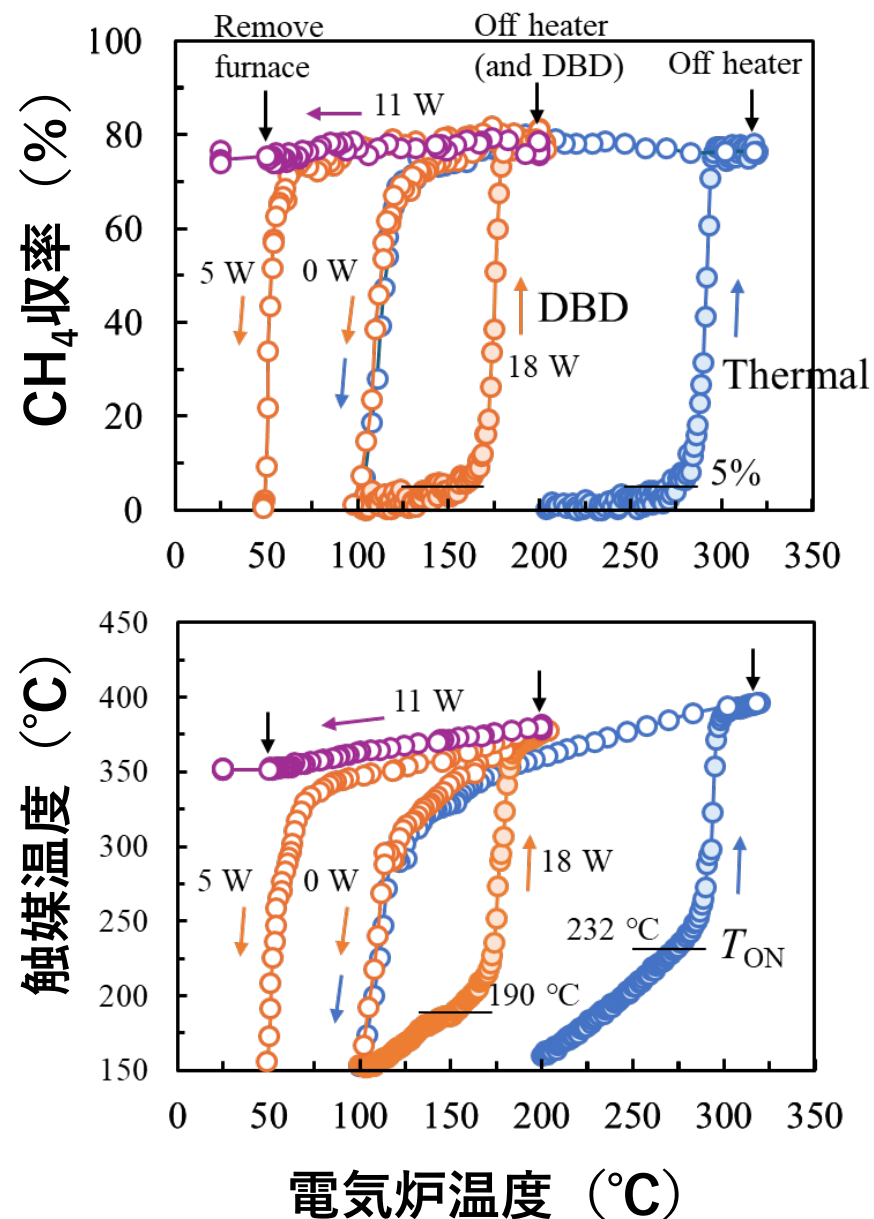
1 段85% → 2 段98%

パイプライングレードに匹敵する CH_4 収率



多段断熱固定床型メタネーション反応器

準オートサーマル・メタネーションの実現



青い線：熱反応

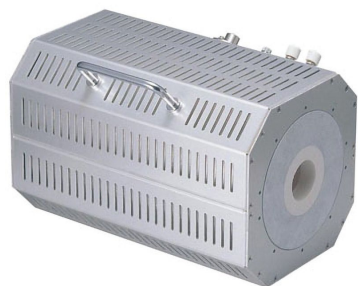
橙線：プラズマ反応

6 wt%-Ni/Al₂O₃, total 3000 mL/min
CH₄/CO₂ = 60/40, CO₂/H₂ = 1/4

- CH₄の希釈効果で自立運転（オートサーマル・メタネーション）できない。
- プラズマによって発熱量の1/4程度の電力を投入すれば、メタネーションを維持できる ⇒ **準オートサーマル・メタネーション**。
- プラズマ反応では電気炉温度が150°C以上低く、エネルギー負荷が小さい。
- 平衡の制約を受けるためCH₄収率は80%にとどまるが、プラズマによってメタネーション反応を維持できる（**平衡の制約を緩和**）。

電気炉との比較(断熱反応器の効果)

反応器の種類		消費電力	消費エネルギー	立上げ時間	消費電力
		スタートアップ (過渡応答)			準オートサーマル (定常状態)
プラズマ	断熱材あり	120-180 W	36 Wh	16 min	35 W 断熱効果 大 80 W 210 W エネルギー多消費 6倍
	断熱材なし		60 Wh	25 min	
電気炉 プラズマ無し	断熱材なし	340 W	289 Wh	60 min	



- ・ 起動は大電力が省エネ。
- ・ 定常状態では低電力でオートサーマル反応を維持する。
- ・ 電気ヒーターはエネルギー多消費 (伝熱抵抗が大きい)

負荷追従性

$$r_{net}(T) = r(T) \times \left(1 - \frac{1}{K_e(T)} \frac{p_{CO} p_{H_2O}^2}{p_{CH_4} p_{H_2}^4}\right)$$

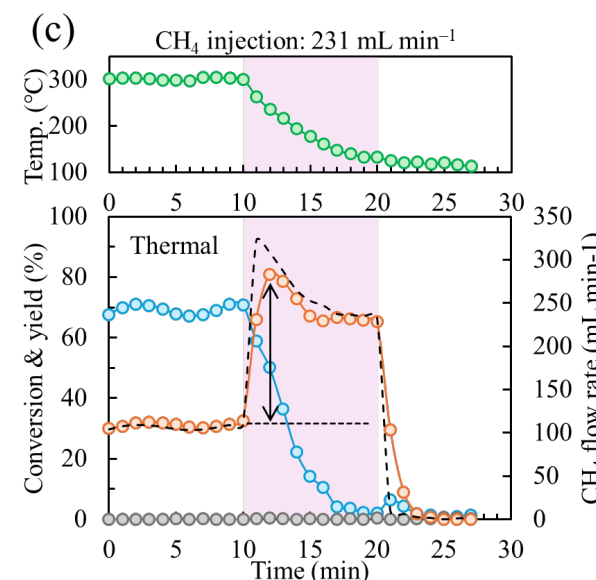
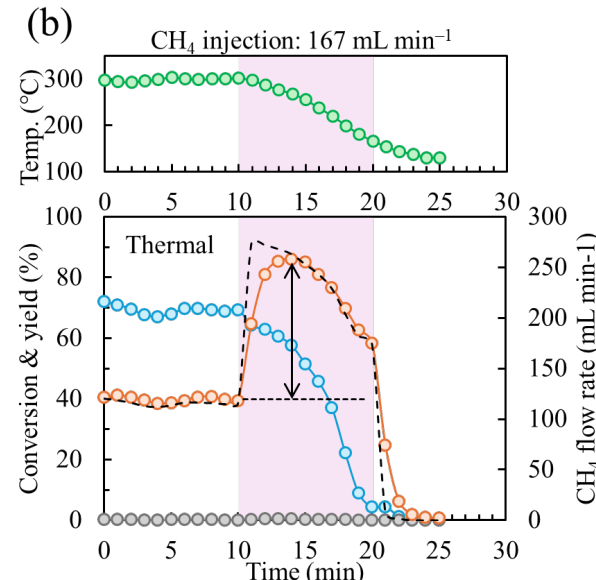
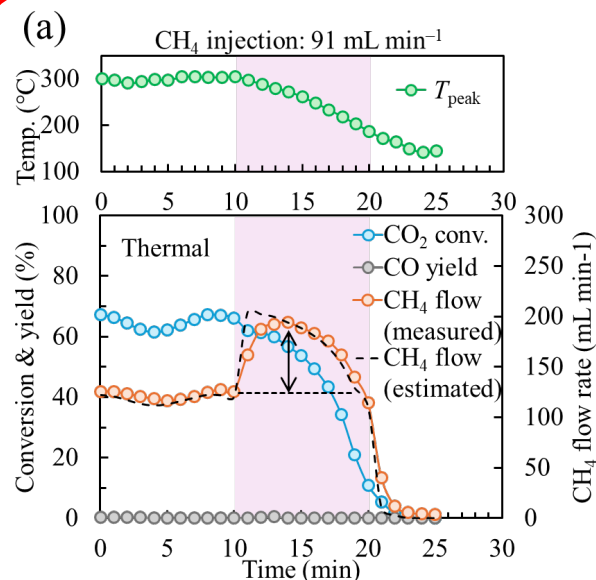
プラズマ
アクセル>>ブレーキ

総ガス流量：1,000 mL/min.

CH₄/CO₂ = 1/2

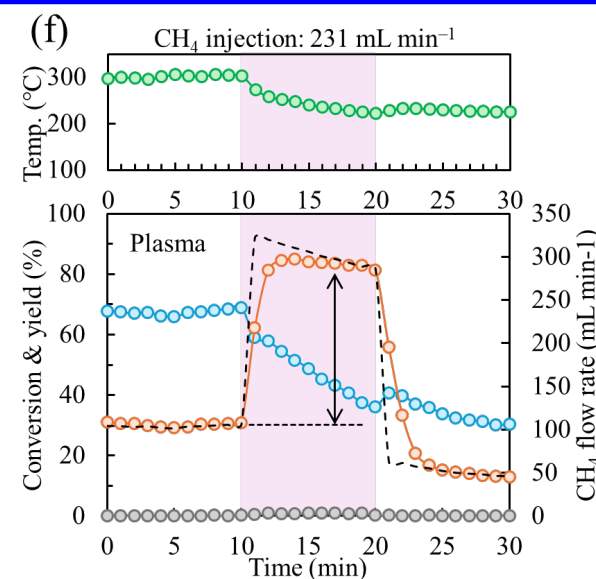
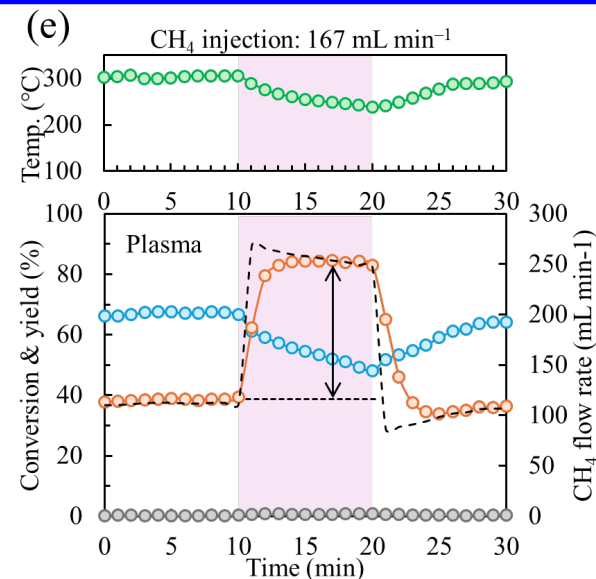
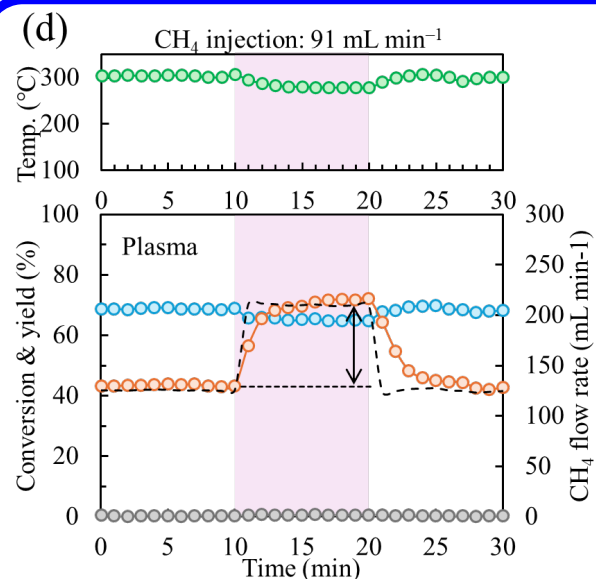
CH₄/CO₂ = 1/1

CH₄/CO₂ = 3/2



熱反応

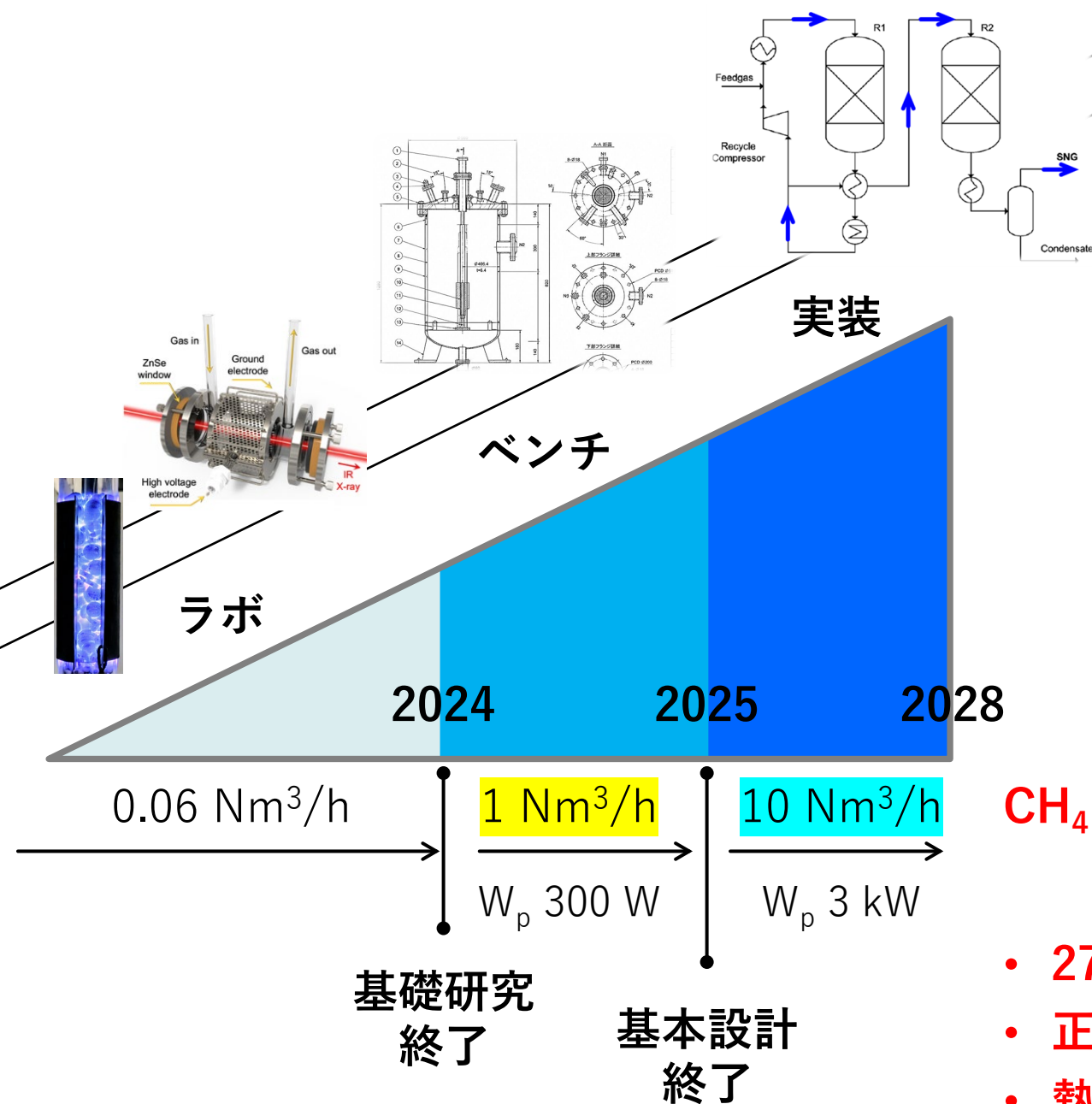
- CH₄をパルス状に供給する。温度低下 → 反応速度低下 → 温度低下 → メタネーションが停止する。
- 反応速度，平衡，温度が強練成して制御性を著しく低下させる。



プラズマ反応

- 成分が変動してもメタネーション反応を維持。
- プラズマは連成パラメーターの相互依存性を解消して，反応の制御性を向上させる。

実用化に向けた課題と社会実装への道筋



ベンチスケールシステムの検証 (メタン製造量 1 Nm³/h)

- 触媒安定性, 長時間運転
- 負荷変動など基本特性評価
- CO₂削減効果の評価



技術実装 (10 Nm³/h ~ 90 kW)

- 低コスト電源の新規開発。
- オンラインモニタリング技術。
- 汎用触媒の調達。

CH₄ : 90 kW (LHV)



- 27 kWe : 発電効率30%
- 正味 24 kWe : プラズマの消費電力を考慮。
- 熱需用も考慮して総合効率80%想定。

企業への期待

- 基礎からベンチスケールまで研究は終了しており，本技術の実装先を探している段階。
- 実ガスを対象にプラズマ反応システムの，1.メタネーション特性，
2.省エネ効果，などを実証する企業との共同研究を希望。
- スケールアップ対応の反応装置は，過去に実施した共同開発企業（1社）との共同開発も可能。
- 触媒の新規開発は不要（既存の汎用触媒で対応可能）。ただし，実装に向けて必要な量の触媒を調達できること。
- 安価なプラズマ発生用電源の開発。汎用電源は高くなりがち。メタネーションに特化した高インピーダンス電源の開発。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : メタン製造方法及びメタン製造装置
- 出願番号 : 特願2023-213961
PCT/JP2024/044787
- 出願人 : 東京科学大学、大阪大学
- 発明者 : 野崎 智洋、キム デヨン、古川 森也

お問い合わせ先

東京科学大学 (Science Tokyo)
産学共創機構技術プロモーション室

T E L 03－5734－3817
e-mail consult@cim.isct.ac.jp