

生ごみ, 下水汚泥, 家畜糞尿由来バイオガス からのカーボンフリーH₂製造反応器

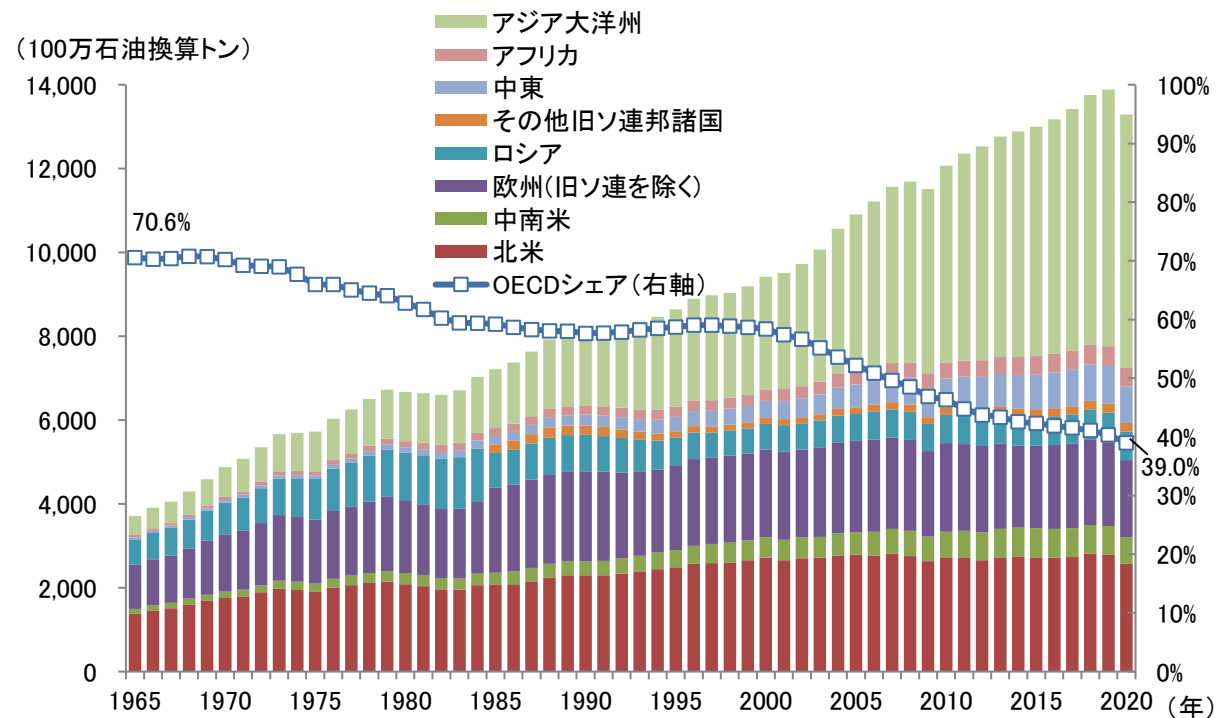
西村 顕*

三重大学大学院工学研究科機械工学専攻

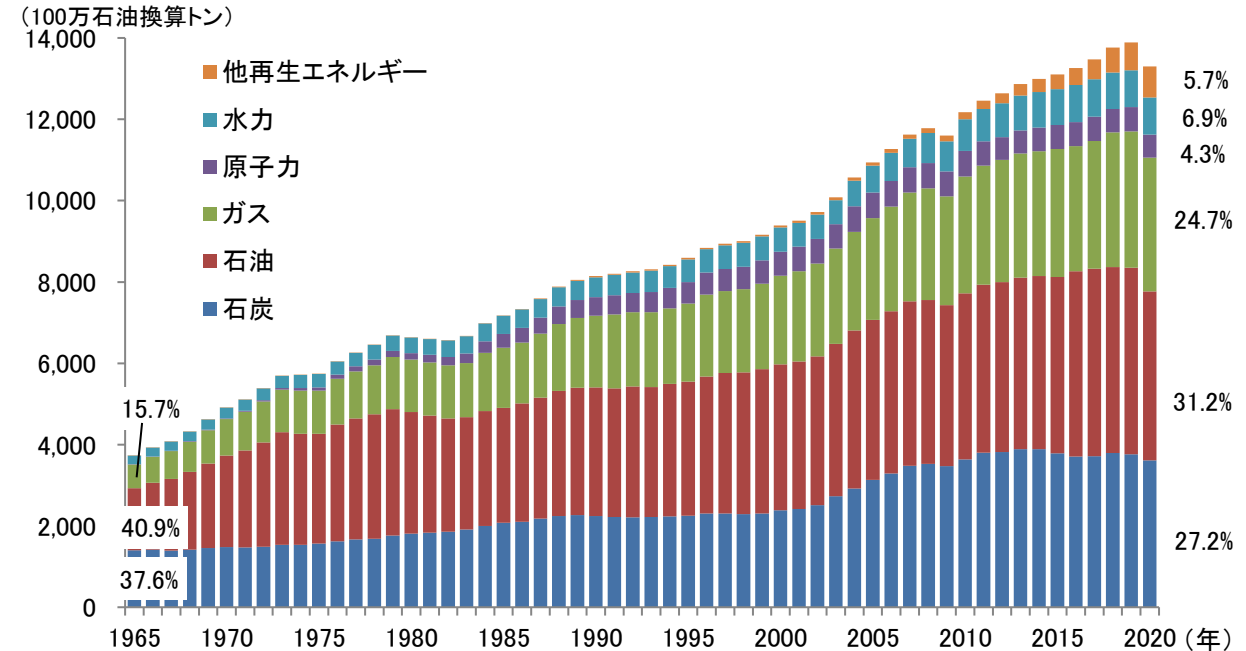
*nisimura@mach.mie-u.ac.jp

1. 背景

世界のエネルギー消費量の推移 (地域別, 一次エネルギー)

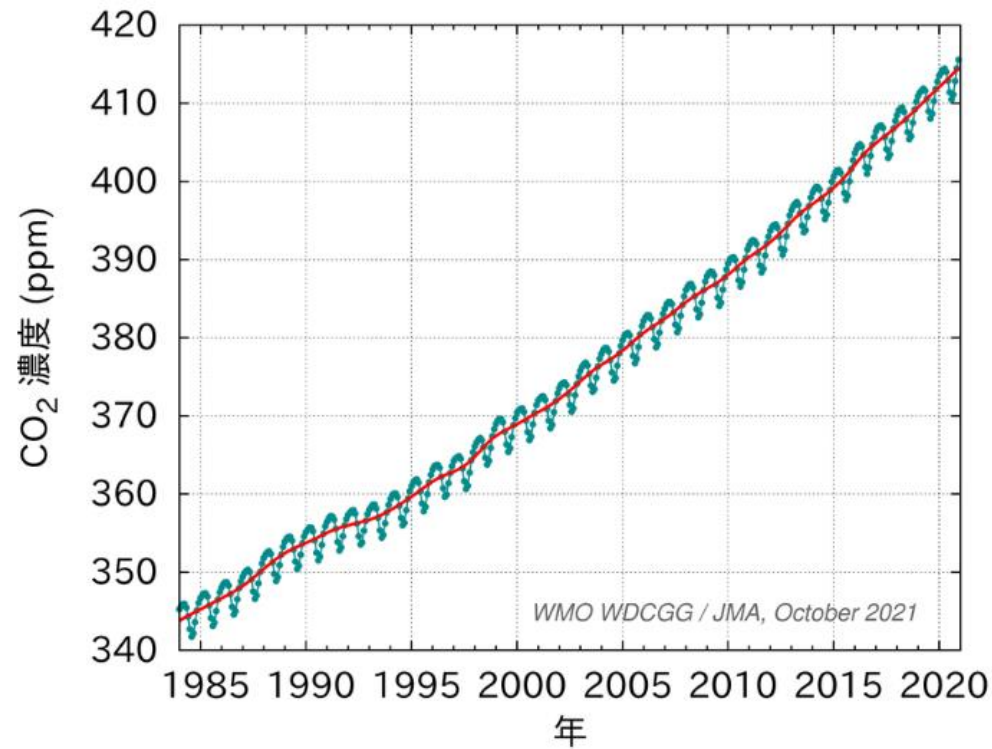


世界のエネルギー消費量の推移 (エネルギー源別, 一次エネルギー消費量)



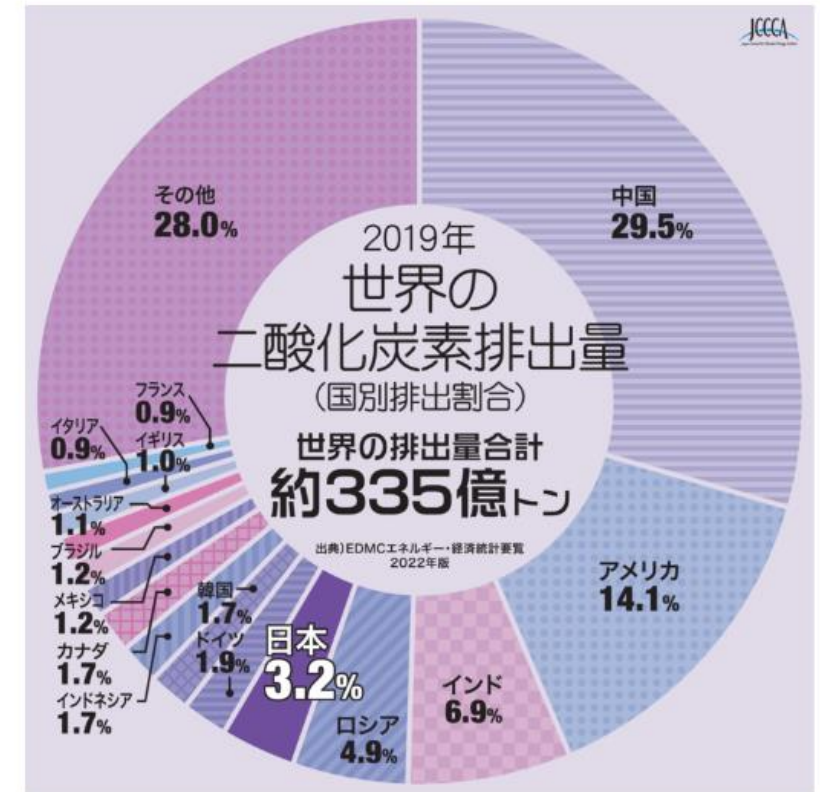
1. 背景

地球全体のCO₂の経年変化



青色は月平均濃度。赤色は季節変動を除去した濃度。

世界のCO₂排出量



出典)EDMC/エネルギー・経済統計要覧2022年版

1. 背景



経済産業省

資料 4

水素を取り巻く国内外情勢と水素政策の現状について

2022年6月23日
資源エネルギー庁

メリット

二次エネルギーであり，多種多様なソースから製造可能

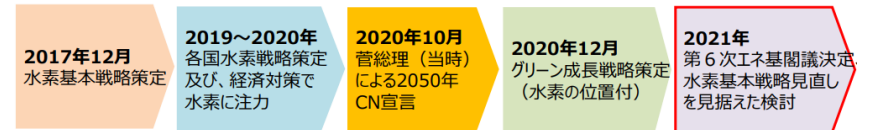
反応後に水しか生成しない

二次電池よりも長時間保存，大容量・長距離輸送に適する

水素分野における戦略等の策定状況・各種目標について

- 日本は世界で初めての水素基本戦略を2017年12月に策定。EU、ドイツ、オランダなど各国も、昨年以降、水素戦略策定の動きが加速化するなど、水素関連の取組を強化。
- 2020年10月の菅総理(当時)のCN宣言を受け、グリーン成長戦略でも重点分野の一つに位置づけ。需給一体での取組により、導入量の拡大と供給コストの低減を目指す。

国内外の情勢変化、戦略策定の状況



グリーン成長戦略における量及びコストの目標

□ 年間導入量*：発電・産業・運輸などの分野で幅広く利用
現在(約200万t) → 2030年(最大300万t) → 2050年(2000万t程度)

*水素以外にも直接燃焼を行うアンモニア等の導入量(水素換算)も含む数字。

□ コスト：長期的には化石燃料と同等程度の水準を実現

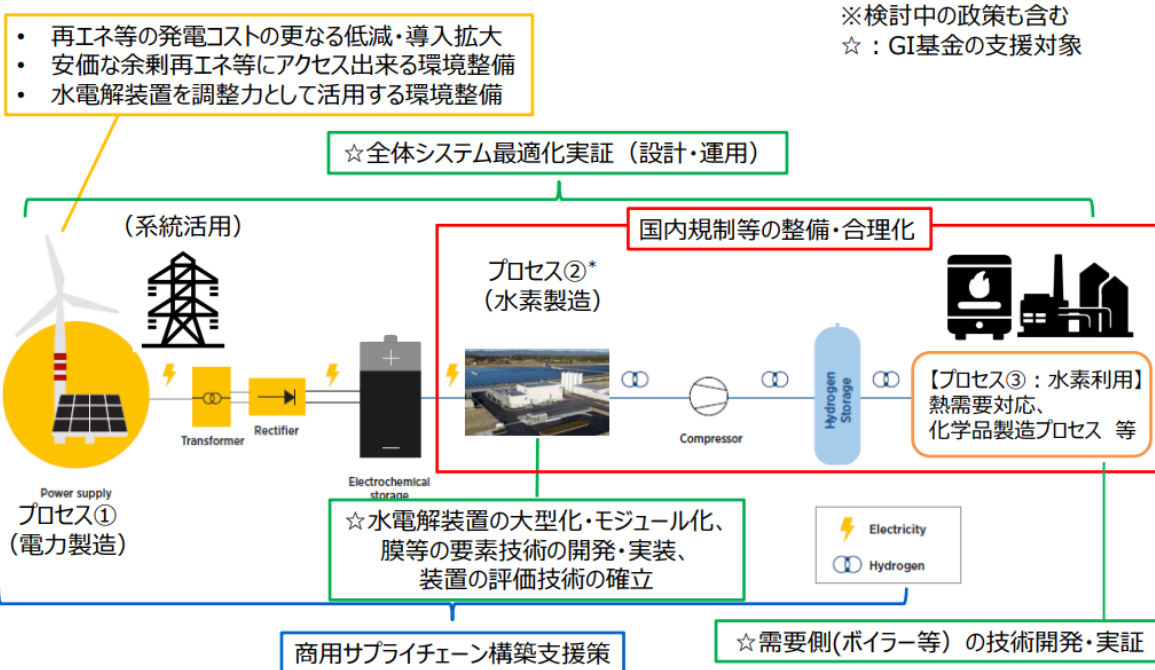
現在(100円/Nm3*) → 2030年(30円/Nm3) → 2050年(20円/Nm3以下)
* 1Nm3=0.0899kg

第6次エネルギー基本計画において設定した新たな定量目標

2030年の電源構成のうち、1%程度を水素・アンモニアとすることを目指す。

1. 背景

(参考) 国内水素サプライチェーン等の商用化に向けた政策措置イメージ



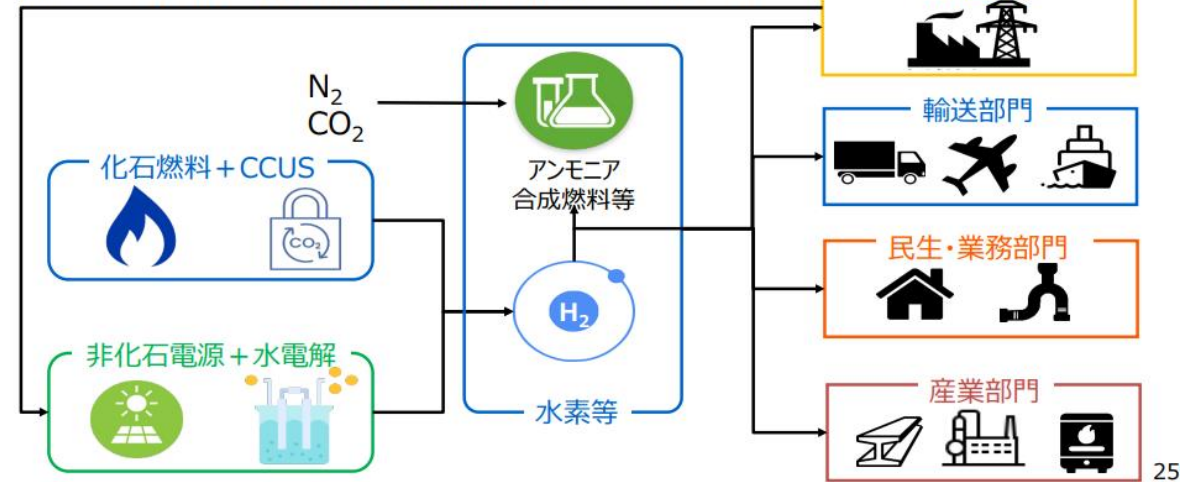
出典：福島水素エネルギー研究フィールド

20

カーボンニュートラルに必要な水素

- 水素は直接的に電力分野の脱炭素化に貢献するだけでなく、余剰電力を水素に変換し、貯蔵・利用することで、再エネ等のゼロエミ電源のポテンシャルを最大限活用することも可能とする。
- 加えて、電化による脱炭素化が困難な産業部門(原料利用、熱需要)等の脱炭素化にも貢献。
- また、化石燃料をクリーンな型で有効活用することも可能とする。
- なお、水素から製造されるアンモニアや合成燃料等も、その特性に合わせた活用が見込まれる。

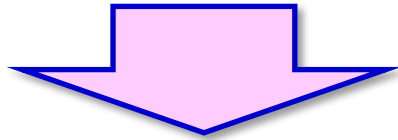
図：グリーン水素及び関連燃料等と供給源及び需要先（イメージ）



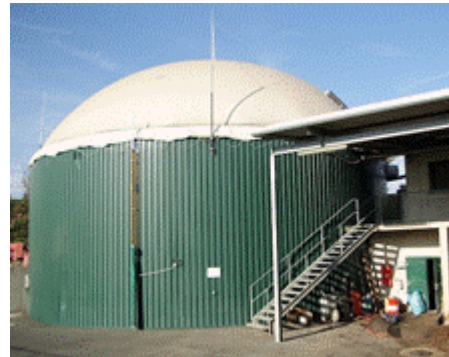
25

1. 背景

本研究ではバイオガス(CH_4 : 55-75 vol%,
 CO_2 : 25-45 vol%)に着目.



生ごみ, 下水汚泥, 家畜糞尿
を原料にして嫌気性発酵に
より生成される



カーボンニュートラル

日本におけるバイオガス原料のポテンシャル

生ごみ: 約2,000万ton/年

家畜糞尿: 約9,400万ton/年

下水汚泥: 約8,600万ton/年

北海道北空知で稼働しているバイオガスプラントでは
生ごみ1tonあたりのバイオガスの発生量は 132m^3
(発熱量では約 21MJ/Nm^3).

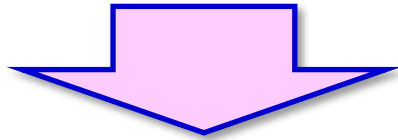


日本の年間生ごみ排出量から得られるバイオガス
発生量は $2.64 \times 10^9 \text{ m}^3$.

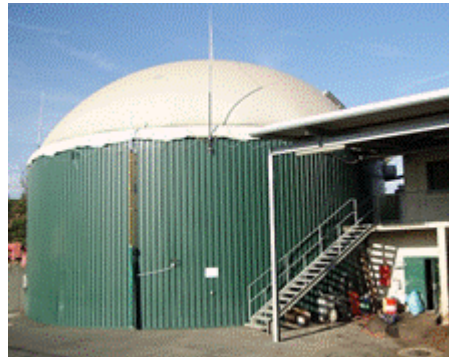
後ほど示す本研究提案リアクターでは 12.7L/min の
バイオガス供給で700W級SOFCの発電に必要な H_2
を製造可能.

1. 背景

本研究ではバイオガス(CH_4 :55-75 vol%,
 CO_2 :25-45 vol%)に着目.

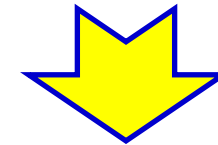


生ごみ, 下水汚泥, 家畜糞尿
を原料にして嫌気性発酵に
より生成される



カーボンニュートラル

本研究提案リアクターと700W級SOFCを組み合わせたシステムで, **年間277 MWhの電力と232 MWhの給湯が得られる**(大阪ガス「エネファーム type S」の定格発電効率:49 %, 定格総合効率:90 %より試算).



約1,120世帯分の年間電力が賄える.

生ごみだけでなく, 下水汚泥, 家畜糞尿も考慮すると, 国内で**年間合計約11,200世帯の消費電力を賄うことが可能.**

2. 目的

バイオガス

通常ガスエンジンやガスタービン燃料に用いられる。

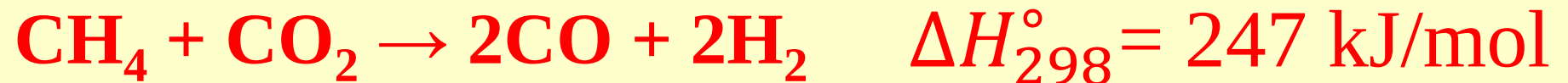
CO₂を40 vol%含むため、カロリーが低く、それによって天然ガスと比べると発電電力量が低くなる。



本研究では

バイオガストライリフォーミングでH₂を製造し、燃料電池の燃料として
利用するシステムに着目

バイオガストライリフォーミング



2. 目的

バイオガストライリフォーミングに関する既往研究はいくつかあり.



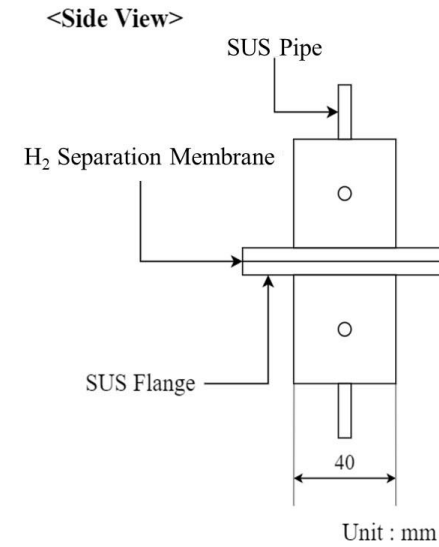
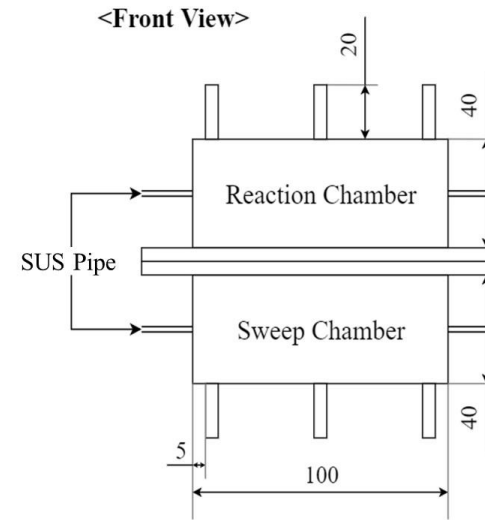
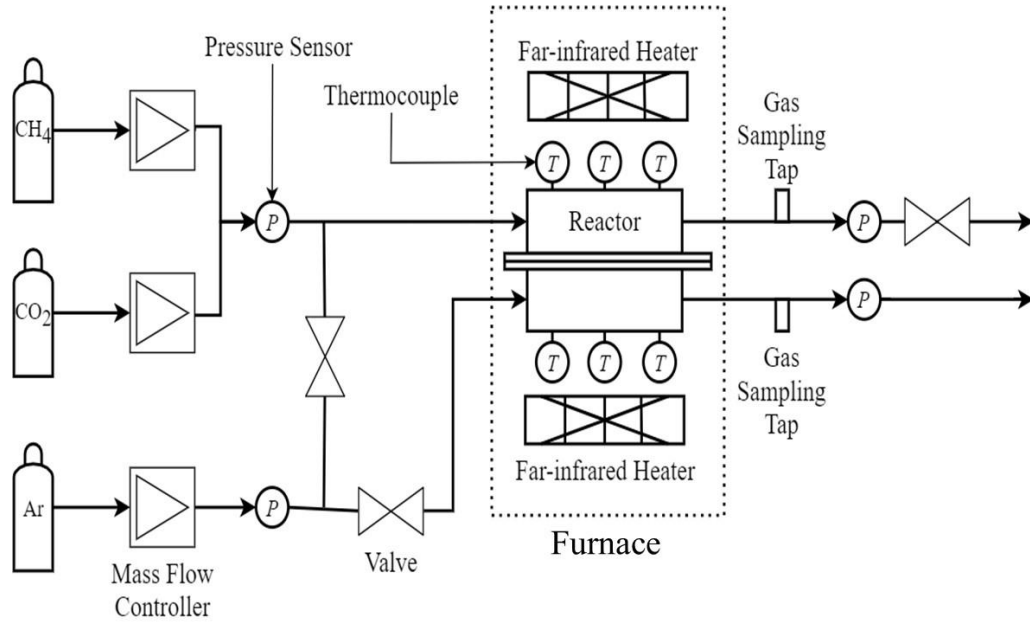
本研究では、バイオガストライリフォーミングにメンブランリアクターを用いることを提案.

しかしながら、掃気ガスと供給ガスの比や、反応圧力、反応温度がバイオガストライリフォーミングの反応特性に及ぼす影響は未解明

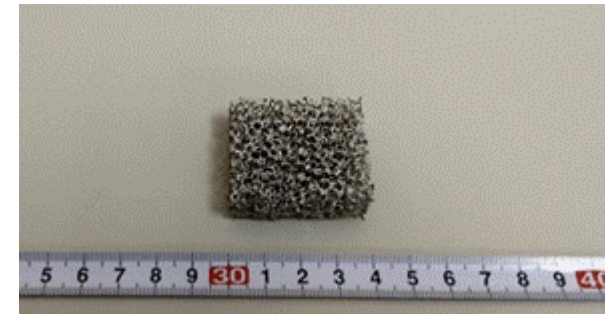
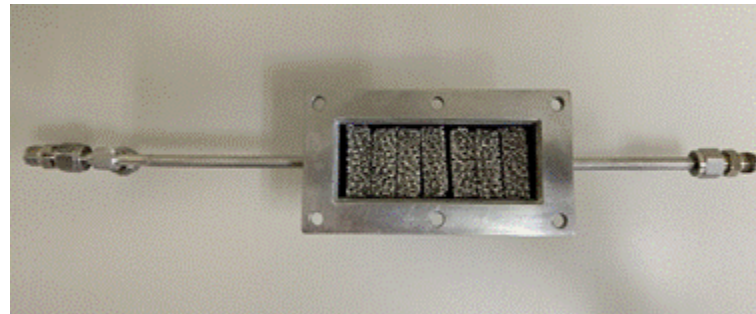
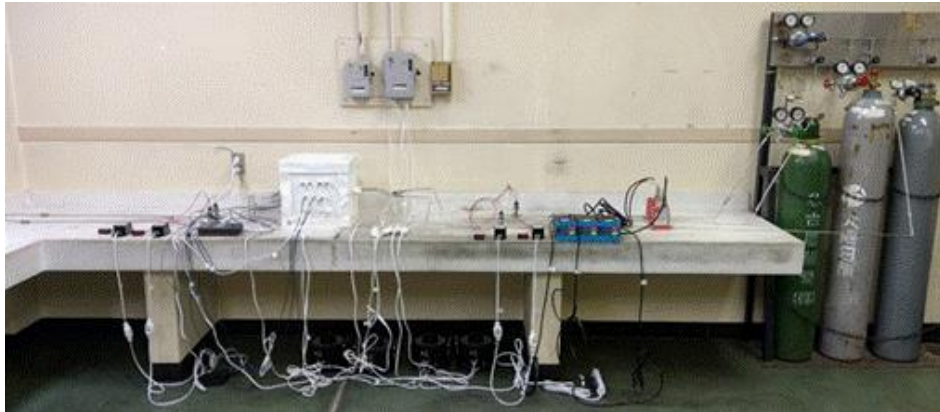
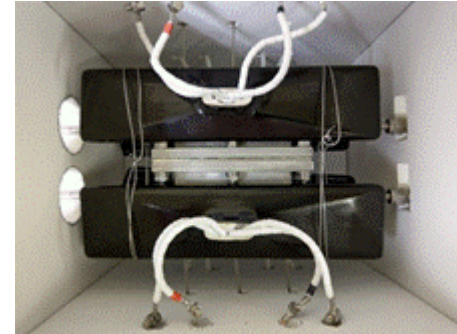
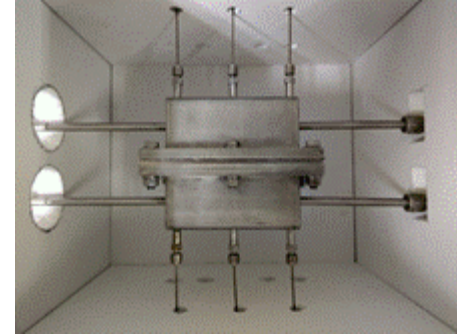
研究目的

掃気ガスと供給ガスの比や反応圧力、反応温度等の運転条件がバイオガストライリフォーミングの反応特性に及ぼす影響を明らかにする

3. 実験



Unit : mm



3. 実験

実験条件

Reaction temperature [°C]	400, 500, 600
Pressure of supply gas [MPa]	0.3
Temperature of supply gas [°C]	25
Molar ratio of supplied CH ₄ : CO ₂ (Flow rate of CH ₄ and CO ₂ [NL/min])	1.5 : 1, 1 : 1, 1 : 1.5 (1.088 : 0.725, 0.725 : 0.725, 0.725 : 1.088)
Feed ratio of sweep gas (Ar) [-]	0.5, 1, 2
State of valve installed at the outlet of reaction chamber	Open, closed

4. 評価方法

H₂選択率

$$S_{\text{H}_2} = C_{\text{H}_2, \text{out}} / (C_{\text{H}_2, \text{out}} + C_{\text{CO}, \text{out}}) \times 100 [\%]$$

CO選択率

$$S_{\text{CO}} = C_{\text{CO}, \text{out}} / (C_{\text{H}_2, \text{out}} + C_{\text{CO}, \text{out}}) \times 100 [\%]$$

熱効率

$$\eta = Q_{\text{H}_2} / (Q_{\text{react}} + Q_{\text{sweep}}) \times 100 [\%]$$

$$Q_{\text{H}_2} = \{(m_{\text{CH}_4} + m_{\text{CO}_2}) / (22.4 \times 60)\} \times (C_{\text{H}_2, \text{out}} / 10^6) \times (H_l \times 22.4 \times 10^3) [\text{W}]$$

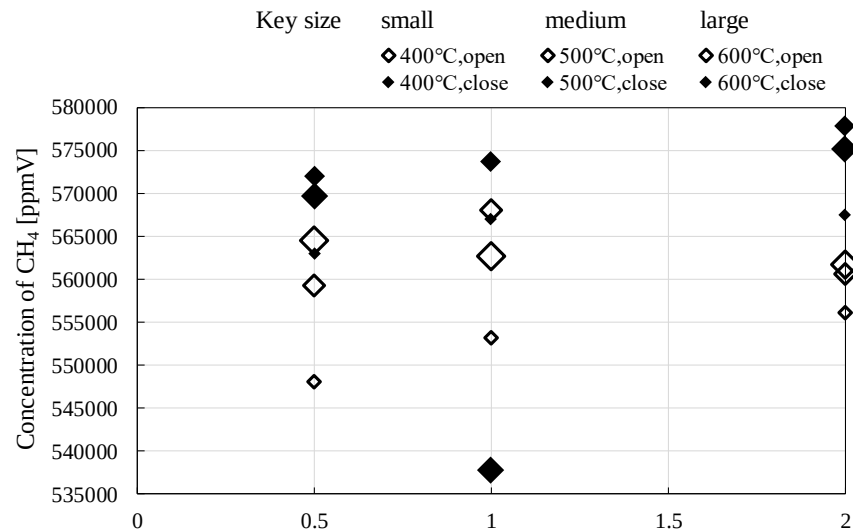
$$Q_{\text{react}} = Q_{\text{CH}_4} + Q_{\text{CO}_2} [\text{W}] \quad Q_{\text{sweep}} = \{m_{\text{Ar}} / (22.4 \times 60)\} \times C_{p, \text{Ar}} \times (T_{\text{react}} - T_{\text{room}}) [\text{W}]$$

$$Q_{\text{CH}_4} = \{m_{\text{CH}_4} / (22.4 \times 60)\} \times C_{p, \text{CH}_4} \times (T_{\text{react}} - T_{\text{room}}) [\text{W}]$$

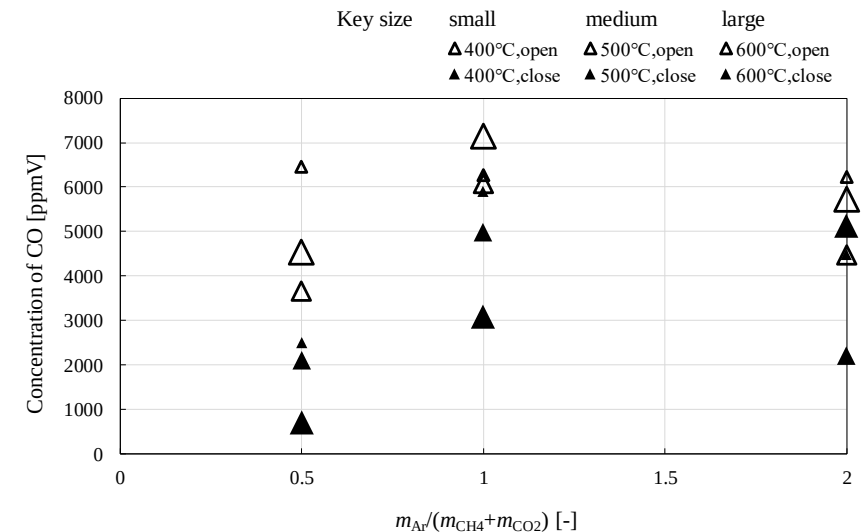
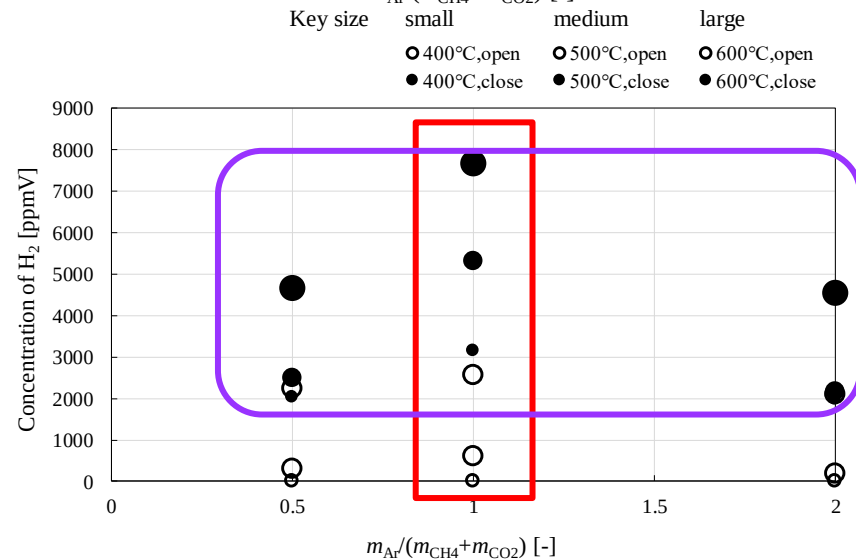
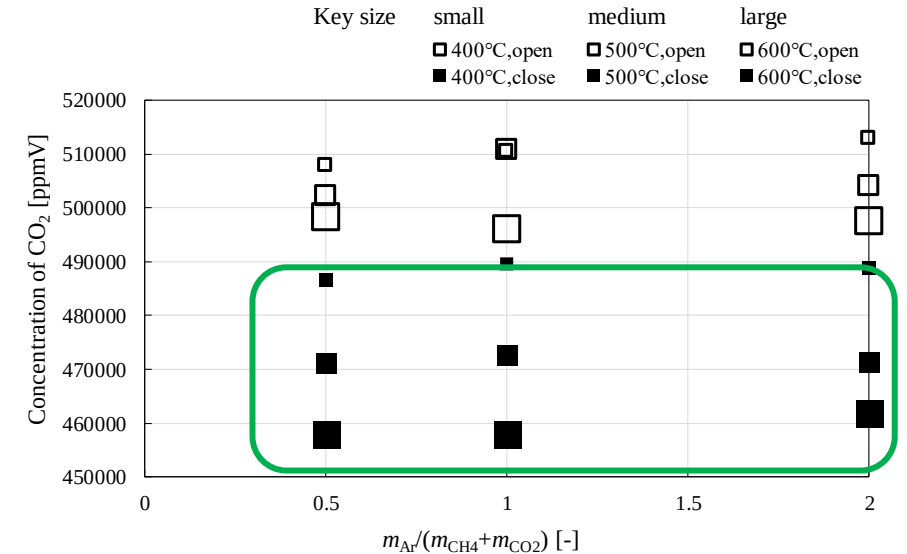
$$Q_{\text{CO}_2} = \{m_{\text{CO}_2} / (22.4 \times 60)\} \times C_{p, \text{CO}_2} \times (T_{\text{react}} - T_{\text{room}}) [\text{W}]$$

5. 結果および考察

掃気ガス供給比, 反応槽内圧力が H_2 製造に及ぼす影響



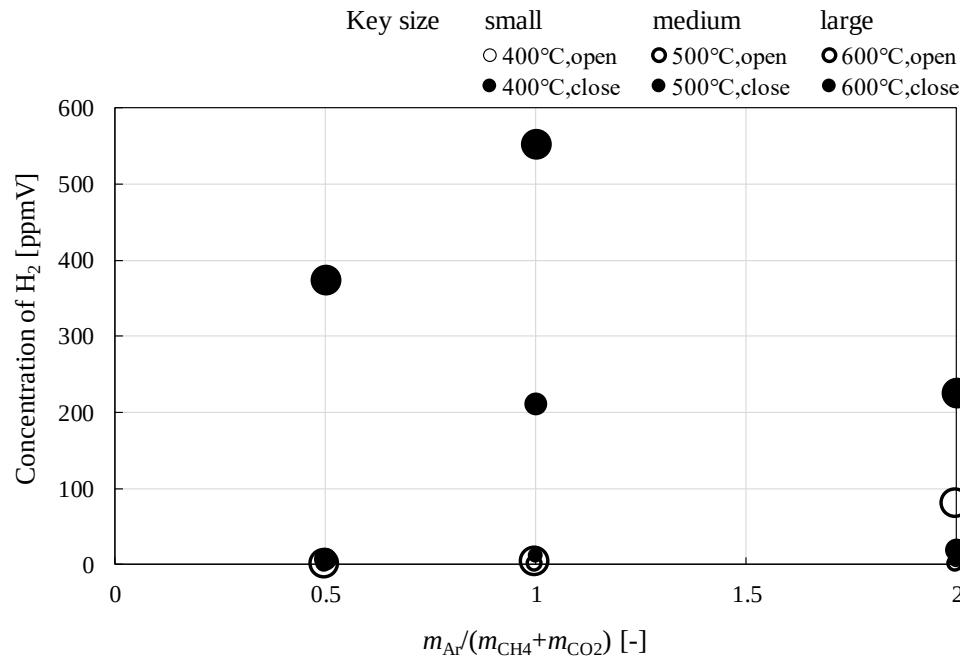
< $CH_4 : CO_2 = 1.5 : 1$;
反応槽>



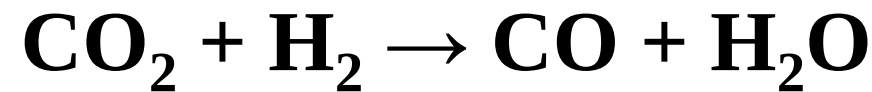
5. 結果および考察

掃気ガス供給比, 反応槽内圧力が H_2 製造に及ぼす影響

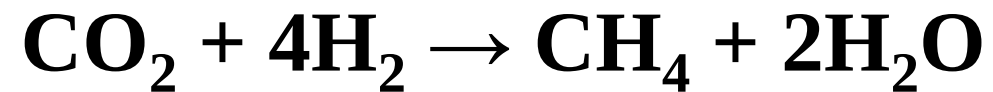
< $CH_4 : CO_2 = 1.5 : 1$; 掃気槽>



逆水性ガスシフト反応



$$\Delta H_{298}^{\circ} = 41.2 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H_{298}^{\circ} = -165.0 \text{ kJ/mol}$$

最高生成 H_2 濃度: $m_{Ar} / (m_{CH_4} + m_{CO_2}) = 1$

CH_4 ドライリフォーミング反応



5. 結果および考察

提案反応器の性能評価

反応槽と掃気槽の圧力差
(反応槽出口バルブ開; 単位: kPa)

$m_{\text{Ar}}/(m_{\text{CH}_4} + m_{\text{CO}_2})$ [-]	CH ₄ : CO ₂								
	1.5 : 1			1 : 1			1 : 1.5		
	400°C	500°C	600°C	400°C	500°C	600°C	400°C	500°C	600°C
0.5	1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

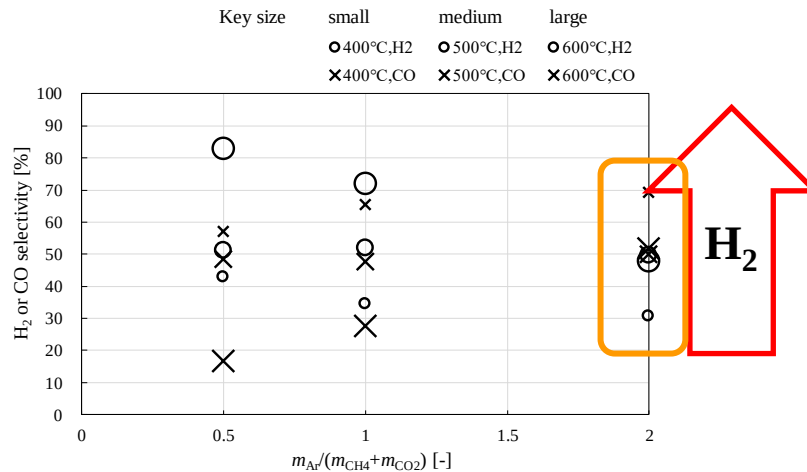
反応槽と掃気槽の圧力差
(反応槽出口バルブ閉; 単位: kPa)

$m_{\text{Ar}}/(m_{\text{CH}_4} + m_{\text{CO}_2})$ [-]	CH ₄ : CO ₂								
	1.5 : 1			1 : 1			1 : 1.5		
	400°C	500°C	600°C	400°C	500°C	600°C	400°C	500°C	600°C
0.5	4	7	8	5	6	7	8	9	10
1	4	7	8	6	6	7	8	9	10
2	4	7	8	5	6	7	8	9	10

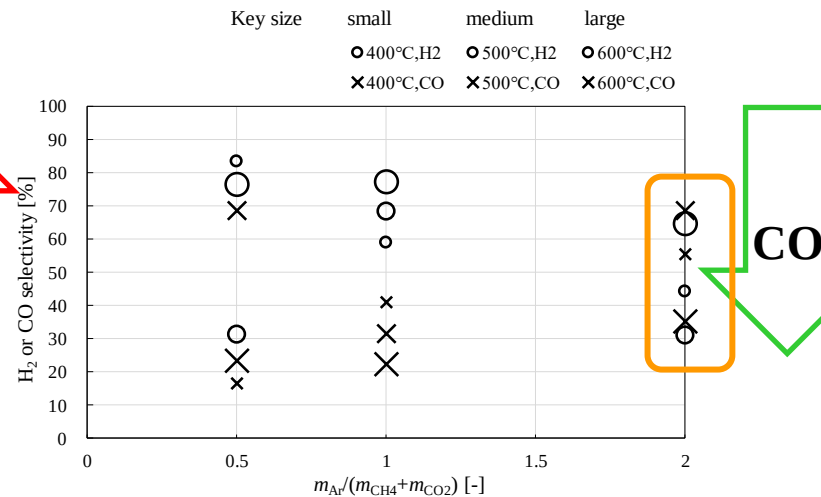
5. 結果および考察

提案反応器の性能評価

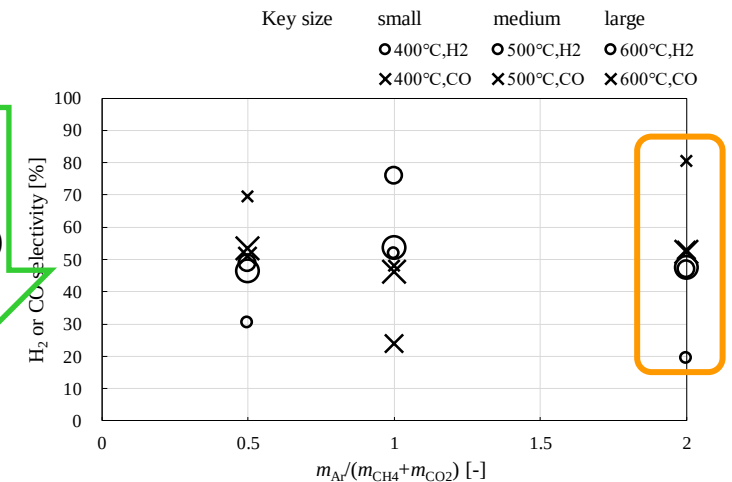
<CH₄ : CO₂ = 1.5 : 1>



<CH₄ : CO₂ = 1 : 1>



<CH₄ : CO₂ = 1 : 1.5>



反応温度上昇と共にH₂ 選択率増加し、CO選択率減少する。



CH₄ドライリフォーミング反応が吸熱反応であるため。

CO選択率はH₂選択率より高い
(@ $m_{Ar}/(m_{CH_4}+m_{CO_2}) = 2$)



反応槽内のCH₄ドライリフォーミング反応には長時間の反応時間が必要。

5. 結果および考察

提案反応器の性能評価

反応槽出口バルブ**開**における異なる運転条件での熱効率の比較(単位: %)

$m_{Ar}/(m_{CH_4} + m_{CO_2})$ [-]	CH ₄ : CO ₂								
	1.5 : 1			1 : 1			1 : 1.5		
	400℃	500℃	600℃	400℃	500℃	600℃	400℃	500℃	600℃
0.5	0	0.3	2.0	0.3	2.2	3.6	0.1	1.2	3.3
1	0	0.6	1.9	1.7	3.8	3.7	0	2.7	3.2
2	0	0.1	1.2	0.1	0.9	1.8	0	0.6	2.1

反応槽出口バルブ**閉**における異なる運転条件での熱効率の比較(単位: %)

$m_{Ar}/(m_{CH_4} + m_{CO_2})$ [-]	CH ₄ : CO ₂								
	1.5 : 1			1 : 1			1 : 1.5		
	400℃	500℃	600℃	400℃	500℃	600℃	400℃	500℃	600℃
0.5	2.8	2.7	4.5	2.1	2.3	5.6	1.6	4.2	3.6
1	3.6	4.9	6.1	4.7	6.1	4.8	4.6	10.4	4.0
2	1.7	1.4	2.6	1.7	1.2	3.0	0.7	1.8	1.9

6. 結論

1. 供給ガスモル比によらず, **反応槽出口閉**の方が反応槽出口開よりも H_2 生成濃度は高くなる.
2. 供給ガスモル比によらず, 最適な掃気ガス供給比は $m_{\text{Ar}}/(m_{\text{CH}_4}+m_{\text{CO}_2})=1$ である.
3. 供給ガスモル比によらず, **反応温度の上昇に伴い H_2 選択率は上昇し, CO選択率は減少する.**
4. 掃気ガス供給比 $m_{\text{Ar}}/(m_{\text{CH}_4}+m_{\text{CO}_2})=2$ においては, CO選択率の方が H_2 選択率より高い.
5. 反応温度, 掃気ガス供給比 $m_{\text{Ar}}/(m_{\text{CH}_4}+m_{\text{CO}_2})$, 供給ガスモル比によらず, **反応槽出口閉**の方が反応槽出口開よりも**熱効率は高い.**
6. **最高 H_2 生成濃度が得られるため, 掃気ガス供給比 $m_{\text{Ar}}/(m_{\text{CH}_4}+m_{\text{CO}_2})=1$ において最大熱効率が得られる.**