

吸熱反応を除熱に併用する 新メタネーション法

2021年第4回(7月)エネルギー研究会

注)本発表内容は平衡論とそれに基づく熱収支のみによる検討内容であり、反応速度論による検討は、速度データがなく、未検討である。

- 吸熱材の反応は分(min)のオーダーであるが、メタネーション(秒)より遅いのではないか
吸熱と発熱の反応速度が対応しなければ、成り立たない
- 再生処理プロセスの速度論的検討は未だ

この構想が、革新的発想へのヒントになれば幸いと願っている。

メタネーション法の歴史と課題

サバティエ反応 (Sabatier reaction) [Wikipediaより](#)

- 水素と二酸化炭素を高温高压状態に置き、ニッケルを触媒としてメタンと水を生成する化学反応。さらに効果的な触媒として、酸化アルミニウム上にルテニウムを担持させた触媒も使える。この化学反応は次の式で表される。



- フランスの化学者ポール・サバティエが発見した。
- この反応は発熱反応であり、反応器の触媒に300°C近くの大きな温度勾配が生じる、
- また300°C近くの低温では十分な反応速度が確保できないのに注意する必要がある。
- 一方、この反応は、580°C付近で、 ΔG がゼロとなり、それ以上では、逆反応(水蒸気改質反応)が優勢となる。
- 反応温度約200°Cくらいで、反応転化率は98%程度に到達する。

ジレンマ

- 反応転化率を上げるためには、反応温度は下げたい。反応温度を下げると、反応速度が低下する。
 - 反応速度が上がると、除熱が追いつかず、触媒表面温度が上がり、逆反応が起こる。
- このジレンマを如何に解決するか？

現在開発の主要課題は、

- 低温で高活性の触媒開発(論文によれば、開発されているが、寿命は?)
- 効率的除熱法(プロセス開発) (NEDO+日立造船)、EU

メタネーション法開発の現状

- 日本
 - 次頁以降に紹介
- 海外

表1：欧州におけるメタネーションに関する実証

国	実施主体	CO2調達先	主な電力源
スイス	Store & Goプロジェクト	下水処理場	太陽光・水力発電（アルプス地域）
イタリア		大気中のCO2を吸収（Direct Air Capture）	風力・太陽光発電（地中海沿岸地域）
ドイツ		バイオエタノールプラント	風力発電
	Audi	バイオガスプラント	風力・太陽光発電

再エネ水素とCO2回収プロセスの結合 カーボンリサイクル

メタネーション: [株式会社日立総合計画研究所 \(hitachi-hri.com\)](http://hitachi-hri.com)

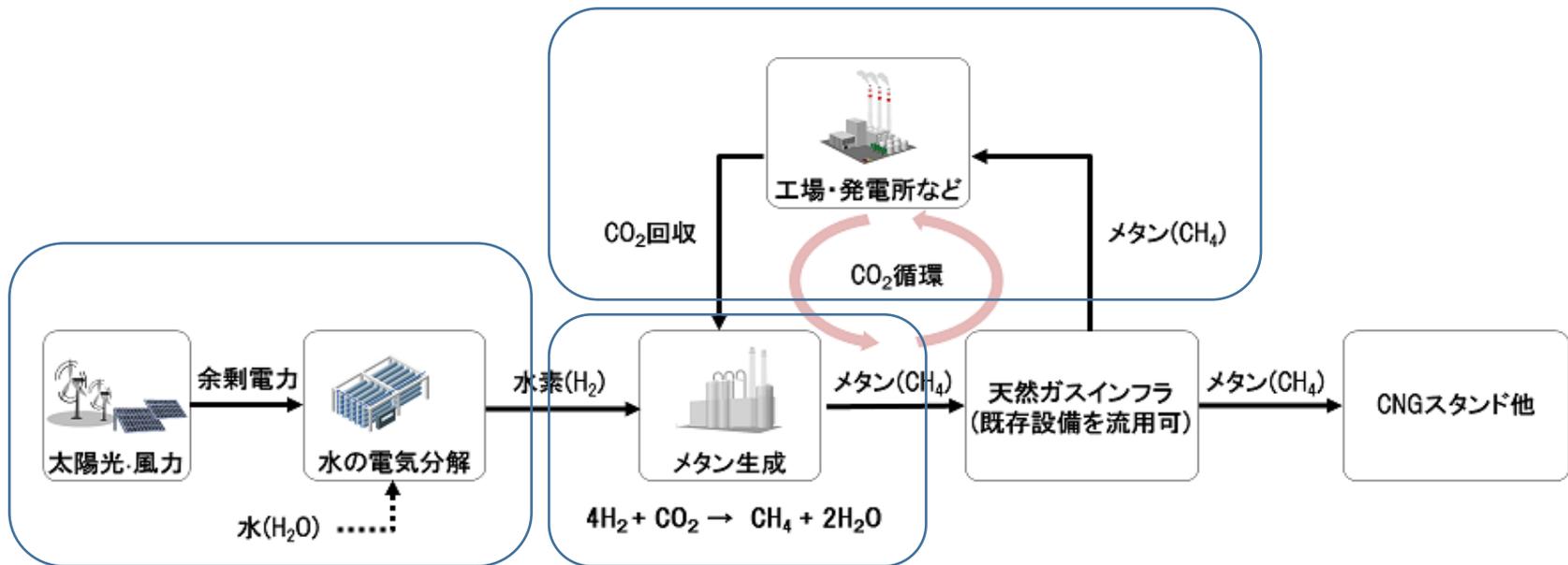


図1：メタネーションの仕組み



NEDO(日立造船)の資料

今日、NEDO、日立造船^{4,5)} (Hitz)、日立製作所⁷⁾、などがこのプロセス開発に取り組んでいる。

いずれも、CO₂の分離回収技術はアミンによる吸収法であり、除熱は、高圧水の沸騰伝熱による方法である。

<https://www.mlit.go.jp/common/001302971.pdf>



Differential reactor

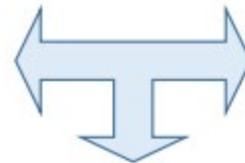
Differential flow reactors are used for the determination of the kinetics of catalytic reactions.

Integral reactor

Integral flow reactors are used for the determination of reactor design



Actual data



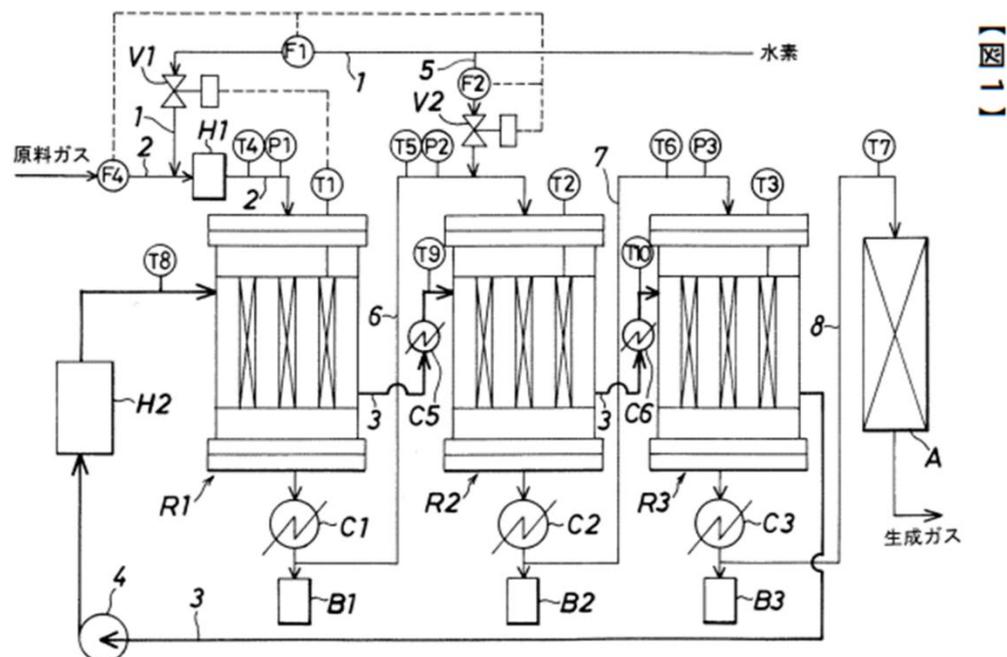
CFD Analysis

Reactor Design

ペレット状をハニカムに充填



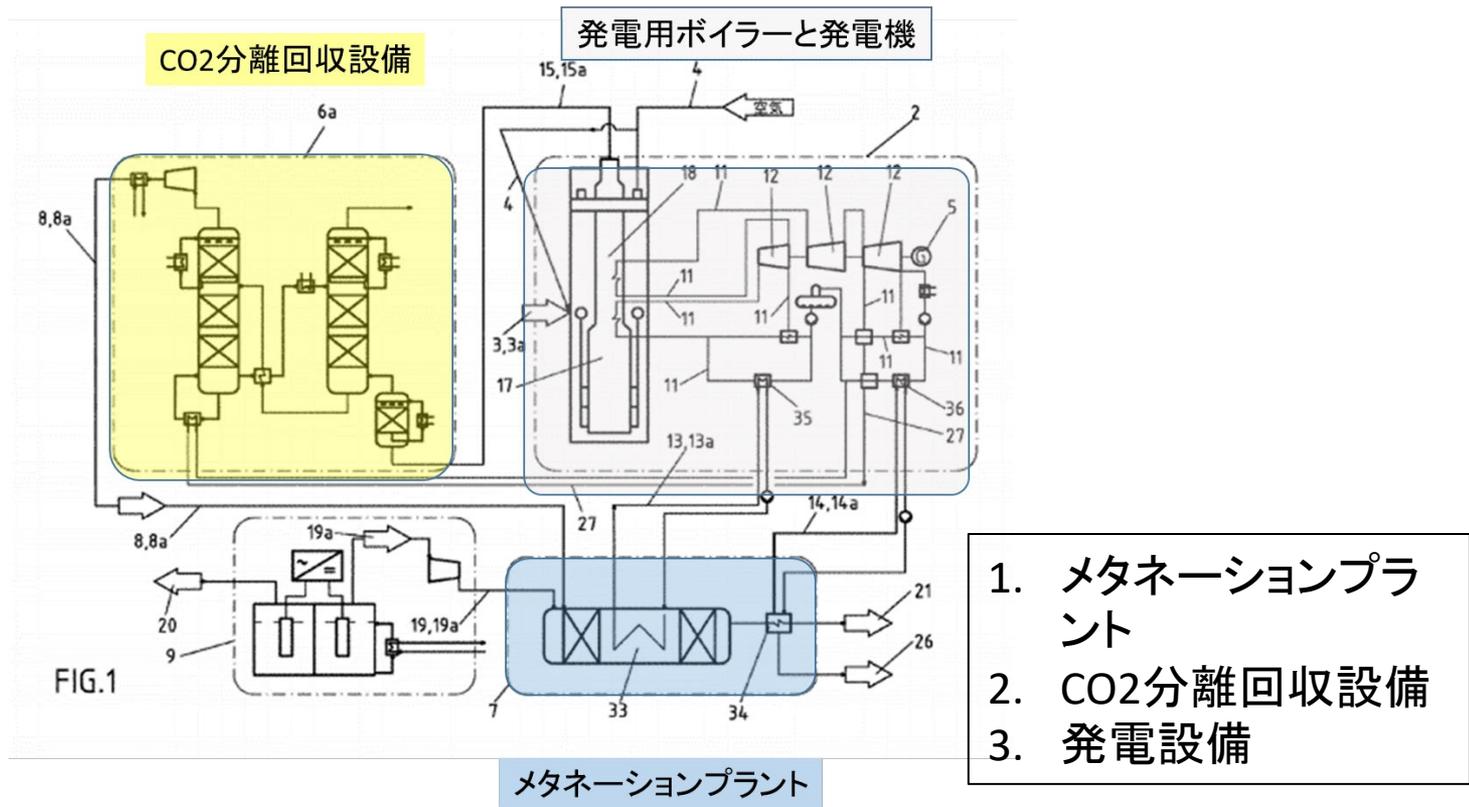
除熱法の工夫(日立造船特許)



反応器は3段直列

1段目の反応量(発熱量)を抑制するため、供給水素を分割し、1段目の供給量を減らし、2段目に投入している。

ドイツのMitsubishi Hitachi Power Systems Europeが日本に出願したプロセス特許(JP 2016 531973)



Mitsubishi Hitachi Power Systems GMBHが出願したプロセス概念図

メタネーション法開発の主な課題

1. 触媒(高活性、安価、寿命)

- 転化率を高めるには低温で高活性な触媒

従来触媒(TiO₂,Ni系:300~400°C)より、反応温度を200°C以上低温化できるRu担持TiO₂(Ru/TiO₂)触媒を見出されている

1. 富山大学研究推進機構水素同位体科学研究センター
2. 宇宙航空研究開発機構(2016)

2. 除熱対策(触媒寿命にも影響する)

- 伝熱管による除熱
- 反応は触媒表面で起きる→触媒温度が上昇
- →反応転化率は低下、もしくは反応停止

除熱面積を増やす。=低活性で安価な触媒を大量に用いる。

メタネーション反応による発熱と、同じ温度域で反応し吸熱する反応を同じ反応空間で同時に行わせる。

- 有機物は、それ自身が熱分解し再利用できないため不可
- 無機物の中で、この温度域で分解する反応を探す

触媒反応器の一般的除熱法と 新たな方法

1. 間接冷却

- a. 固体触媒が粒子であり、ハニカムに充填されている。(詳細不明)
- b. 固体触媒が粒子に添着されている(充填層、流動層方式)
 - 固体触媒粒子を充填層もしくは流動層に充填し、ここに反応ガスを通気する。
 - 除熱はこれら層内に設置する冷却用伝熱管にて行う。

2. 直接冷却

- a. 固体触粒子に伝熱媒体として砂等の流動化する粒子を加えてこれらを反応ガスで流動化させ、伝熱係数を高める。

3. 直接冷却法で用いる流動(伝熱)媒体として除熱剤(同じ温度域で吸熱(分解)反応)を用いる

- 反応温度、吸熱量、そして吸熱材が、再生可能である事が望ましい
- 吸熱した反応熱は、再生時に利用できることが望ましい

メタネーション反応と同じ温度域で反応する吸熱剤

反応温度200～550°C



発
熱

吸熱反応となれば、主には分解反応

200～550°Cの反応温度域となれば、有機物はNG、無機物

この温度域では、次の反応が候補となる。



76[MJ/kmol] @ 300～450°C

吸



114[MJ/kmol] @ 400～500°C

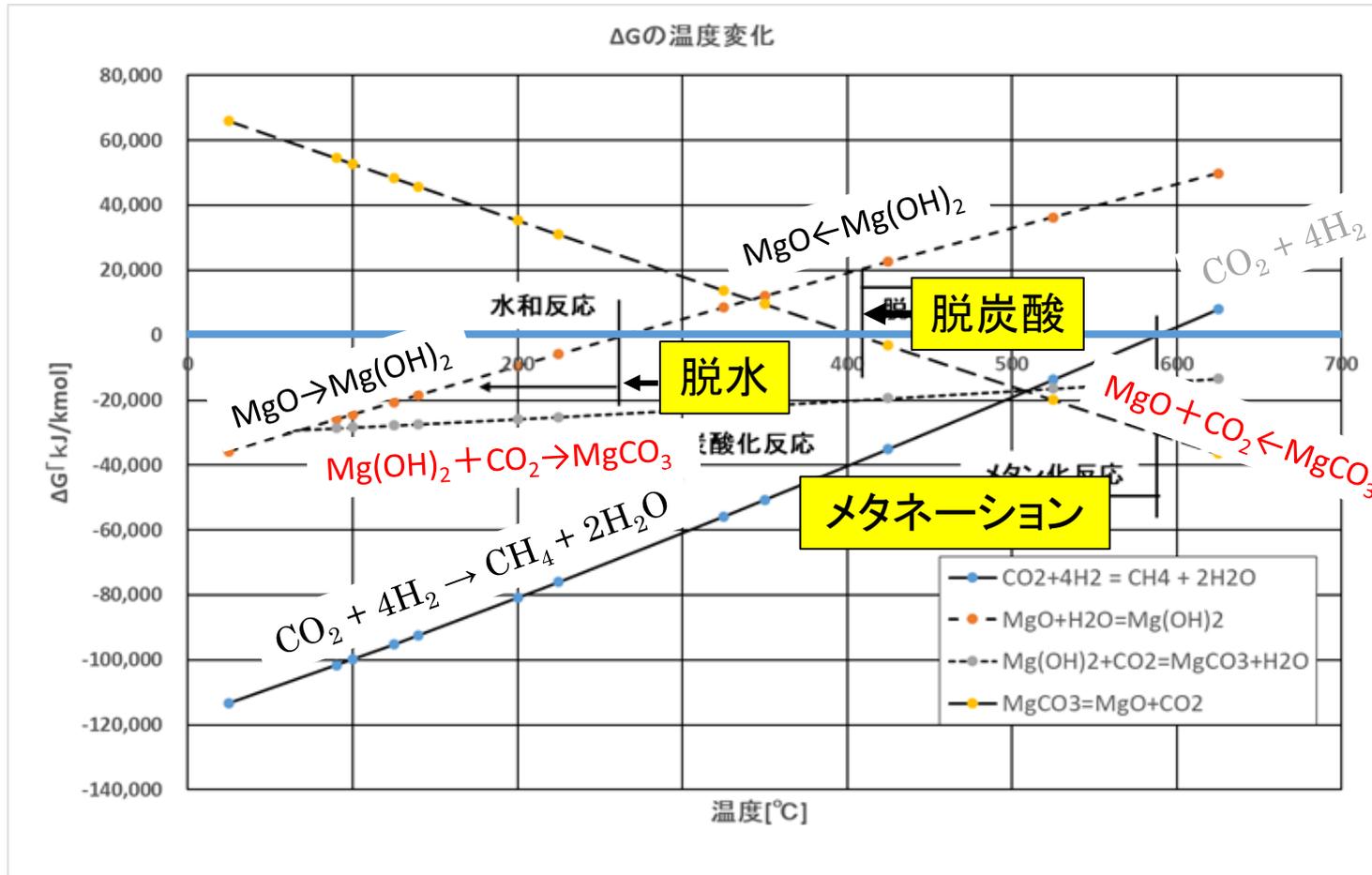
熱

ここで、Mg系に着目した理由は、

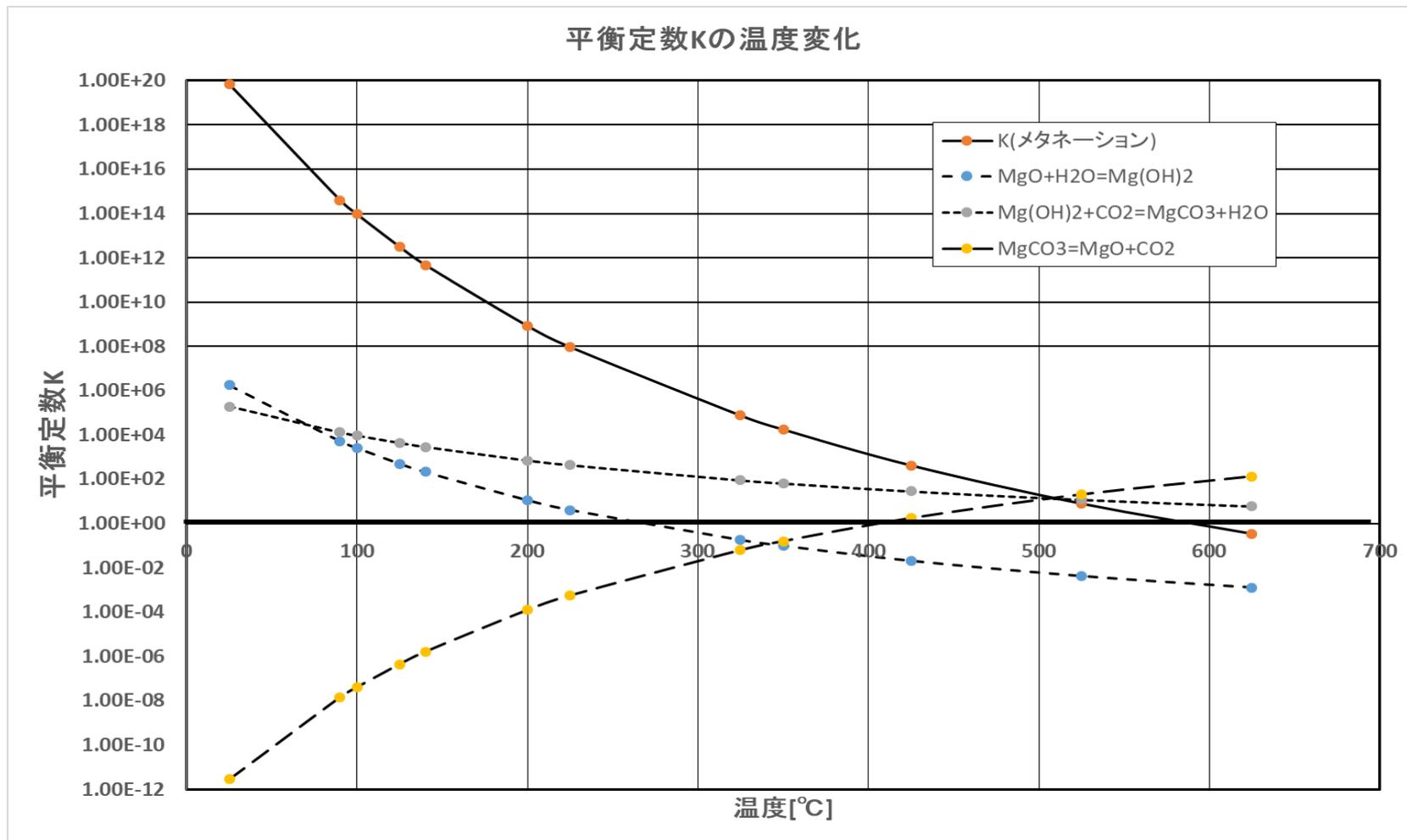
1. 分解温度レベル
2. 安価、入手が容易、
3. 環境への負荷が無い、

メタネーションの発熱を利用して、煙道ガスからMg(OH)₂を用いてCO₂を吸収させたMgCO₃の再生に利用できないか(即ち、CCSとの組み合わせ)

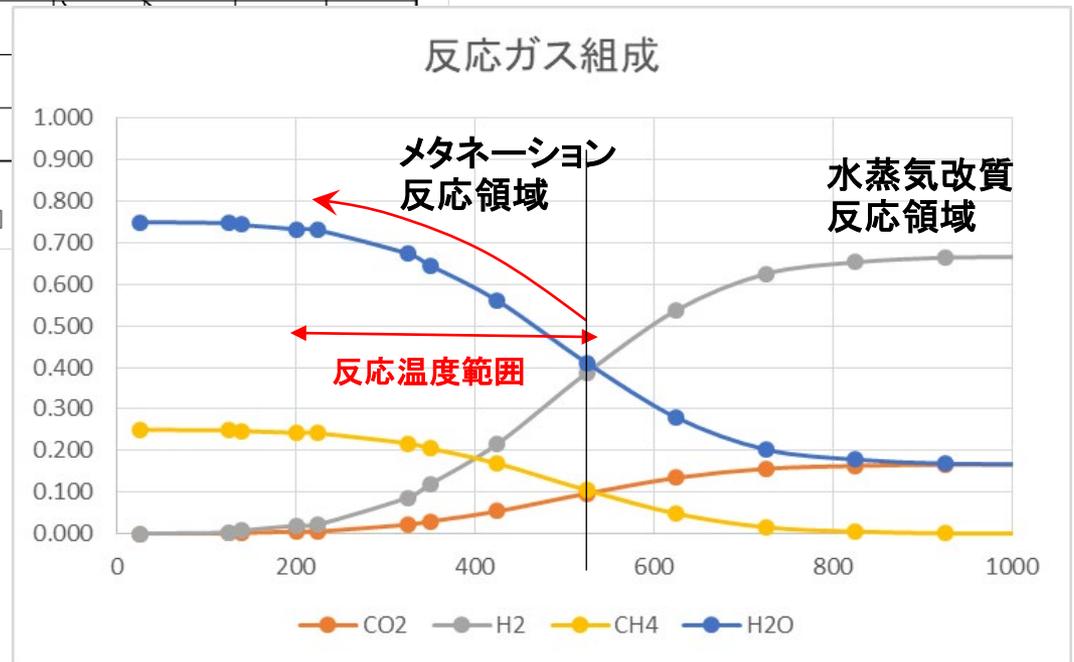
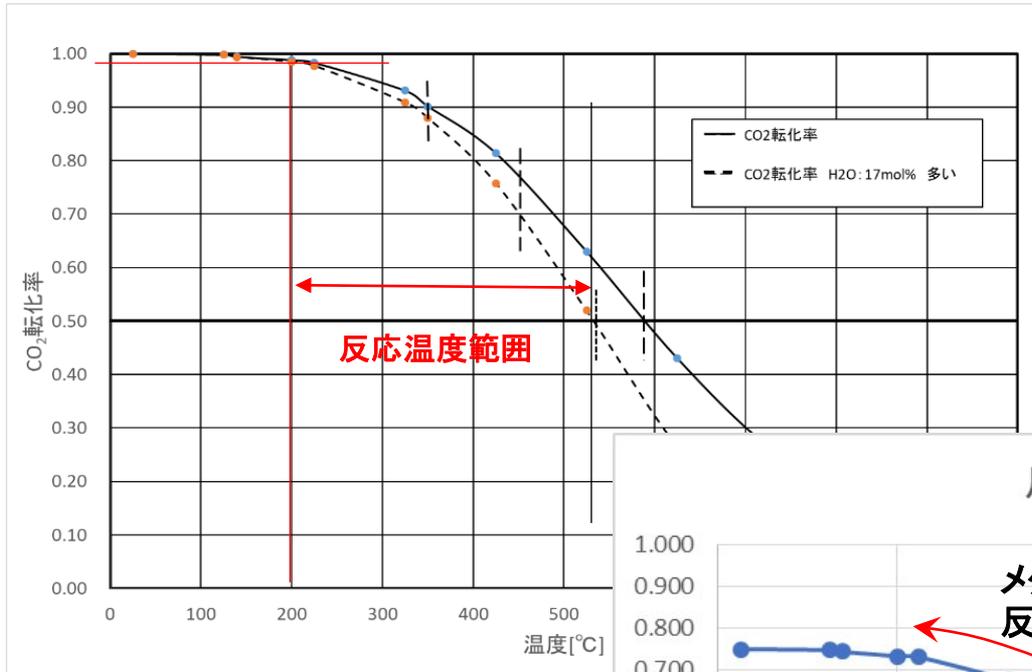
メタネーション ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) $\text{MgO} \rightleftharpoons \text{Mg}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{MgCO}_3$ の熱力学 ΔG



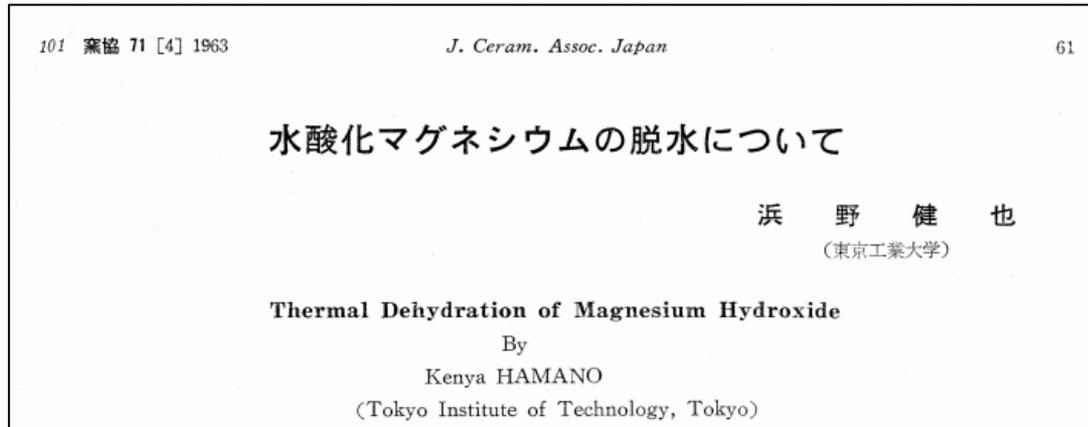
各反応の平衡定数K



メタネーション反応(転化率、組成vs温度)



MgO \rightleftharpoons Mg(OH)₂ \rightleftharpoons MgCO₃の実際 Mg(OH)₂の脱水反応



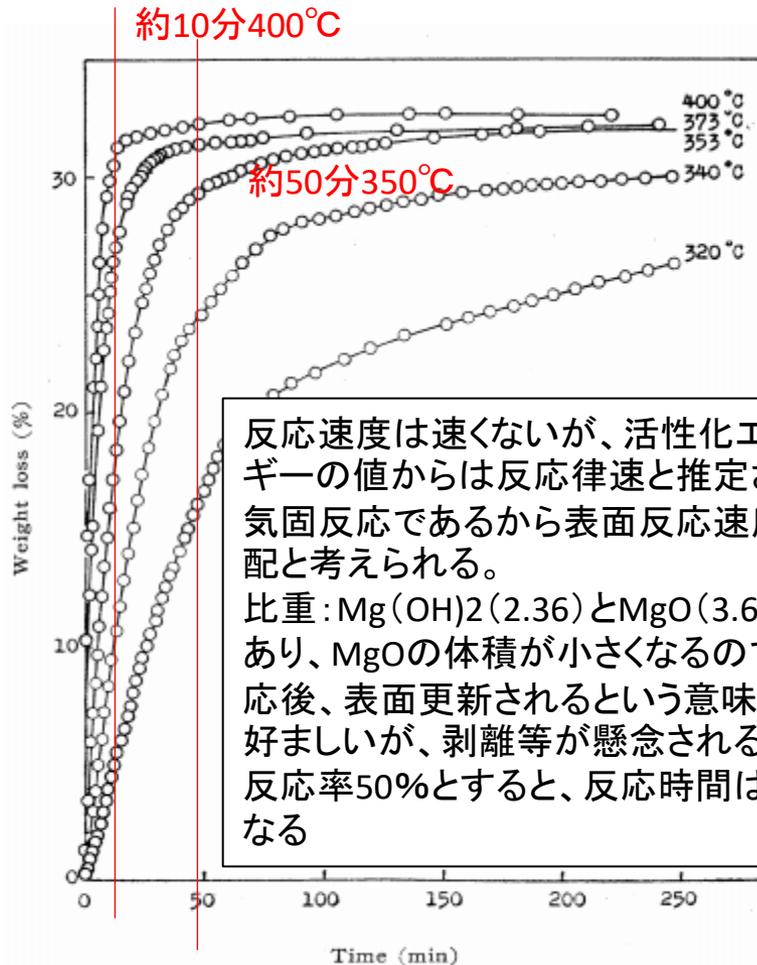
実験に使用した水酸化マグネシウムは関東化学株式会社製，鹿印特級化学試薬

- 偏光顕微鏡下ではその大部分が負の伸長方向を有する繊維状結晶で、繊維の太さは0.5～1 μ 、長さは図-2に示すように、そのほとんどすべてが3～10 μ の範囲にある比較的大きさのそろったものである。
- しかしこの繊維状のMg(OH)のほかに、少量ではあるが1 μ 以下の微粒子状のものも含まれている。



内径25mmの管状炉で、また試料容器は7×7×8mm³の角形白金坩堝である。試料は常に深さ5mmまで軽く装填し、測定重量と充填度をできる限り一定に保つようにした。

約5分450°C 脱水反応速度はそれ程早くない



反応速度は速くないが、活性化エネルギーの値からは反応律速と推定される気固反応であるから表面反応速度支配と考えられる。
 比重: Mg(OH)₂ (2.36) と MgO (3.65) であり、MgOの体積が小さくなるので、反応後、表面更新されるとい意味では好ましいが、剥離等が懸念される。
 反応率50%とすると、反応時間は短くなる

Fig. 6. Isothermal dehydration curves of Mg(OH)₂.

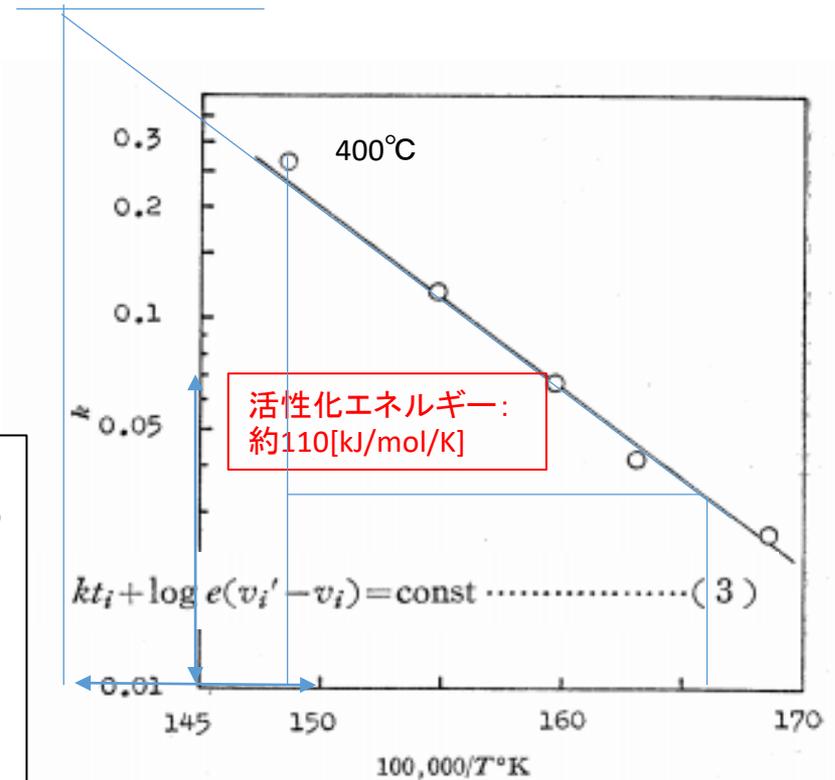


Fig. 8. Arrhenius relation plot of the dehydration reaction of Mg(OH)₂.

MgO \rightleftharpoons Mg(OH)₂ \rightleftharpoons MgCO₃の実際 MgCO₃の脱炭酸反応

日化, 1979, No.1

沢田・植松・水谷・加藤：塩基性炭酸マグネシウムの熱分解

57

(日本化学会誌, 1979, (1), p.57~64)

塩基性炭酸マグネシウムの熱分解

(1978年4月19日受理)

沢田 豊・植松 敬三・水谷 惟恭・加藤 誠航*

脱炭酸反応 $MgCO_3 \Rightarrow MgO + CO_2$

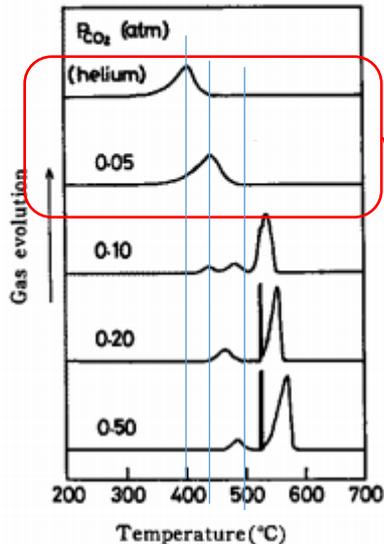


Fig. 4 DTGA for thermal decomposition of hydromagnesite at various P_{CO_2}

Type 1 : in helium, $P_{CO_2} = 0.20$ atm

Type 2 : $P_{CO_2} = 0.10$ atm

Type 3 : $P_{CO_2} = 0.20$ atm, $P_{CO_2} = 0.50$ atm

Specimen : Hydromagnesite (Merck) 15 mg,

Reactor gas : Mixture of helium and carbon dioxide,

Total pressure : 1.0 atm, Flow rate : 30 ml/min,

Heating rate : 9°C/min

Water vapor evolved from specimens was removed with P_2O_5 trap.

塩基性炭酸マグネシウム (ヒドロマグネサイト $4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 4H_2O$ とネスキオナイト $Mg \cdot CO_3 \cdot 3H_2O$) の熱分解を種々の二酸化炭素分圧 (P_{CO_2}) の雰囲気中で研究した。脱二酸化炭素分解は P_{CO_2} によって大きく影響される。ヘリウム雰囲気ではただ一つの二酸化炭素放出ピークが観察される。 P_{CO_2}

タイプ 1 : 二酸化炭素分圧が低い場合には、ただ一つの二酸化炭素放出ピークが見られ、DTAによるとこれは吸熱反応である。

水酸化マグネシウムからの炭酸マグネシウム生成物は、生成条件によって、塩基性炭酸マグネシウム、或いは、結晶水を有するネスキオサイトである。

CO_2 分圧が5mol%以下であれば、 $480^\circ C$ 以下で完全に脱炭酸する。

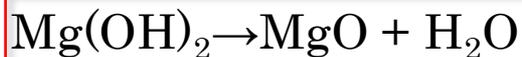
しかし、反応速度は不明

⇒ 脱炭酸する CO_2 をすぐに反応させれば、脱炭酸機構は変わらず、脱炭酸反応温度は $380 \sim 480^\circ C$

メタネーション反応、Mg系粉体の反応熱



発熱



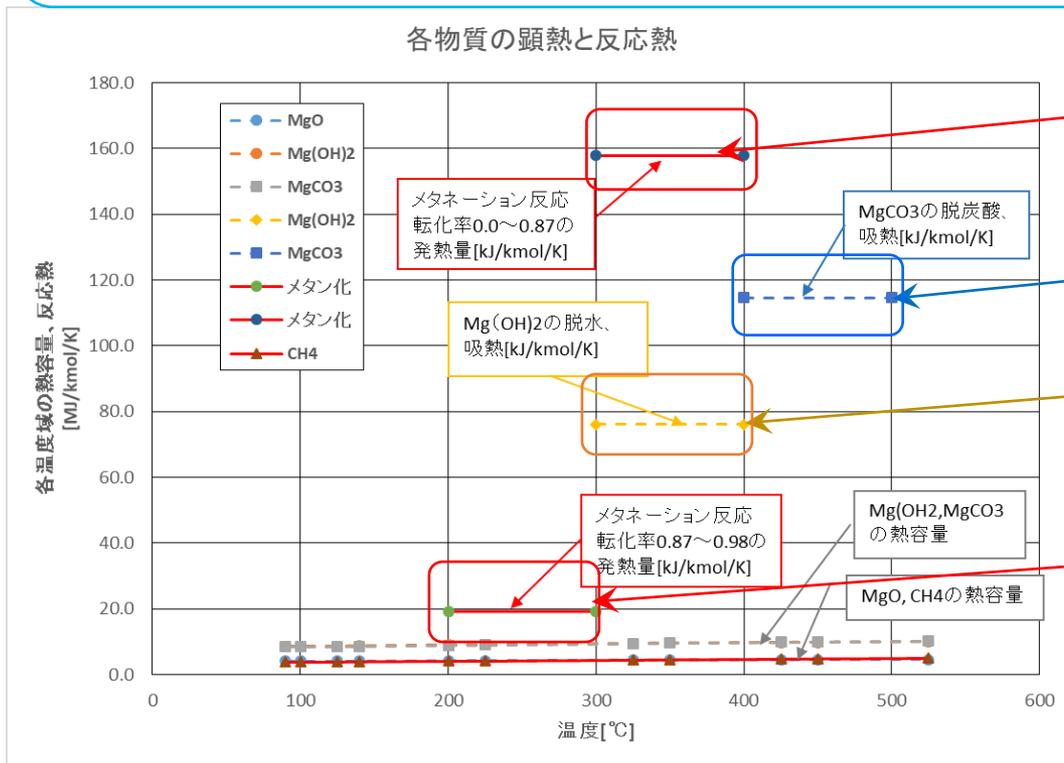
76[MJ/kmol] @ 300~400°C

吸



114[MJ/kmol] @ 400~500°C

熱



この温度域では反応量(0.8)が多いので発熱量も多い

脱炭酸反応の吸熱量

脱水反応の吸熱量

この温度域では反応量が(0.2)と少ないので発熱量は小さい

除熱剤のみで各反応温度域で発熱量と吸熱量のバランスが取り得るか？

メタネーション反応を3つの温度域(500~400°C、400~300°C、300~200°C)に分割して、それぞれの温度域で熱バランスが成り立つかを検証する。



500→400°C

- 脱炭酸反応:[114kJ/mol]
- 脱水反応:76[kJ/mol]
- MgO,MgCO₃の昇温顕熱

• 400→300°C

- 脱水反応:76[kJ/mol]
- MgO,Mg(OH)₂,MgCO₃の昇温顕熱

• 300→200°C

- MgO,Mg(OH)₂,MgCO₃の昇温顕熱

メタン化反応:Q=-173[kJ/mol]

• 500→400°C

- -173 × (0.8)

• 400→300°C

- -173[kJ/mol] × (0.95-0.80)

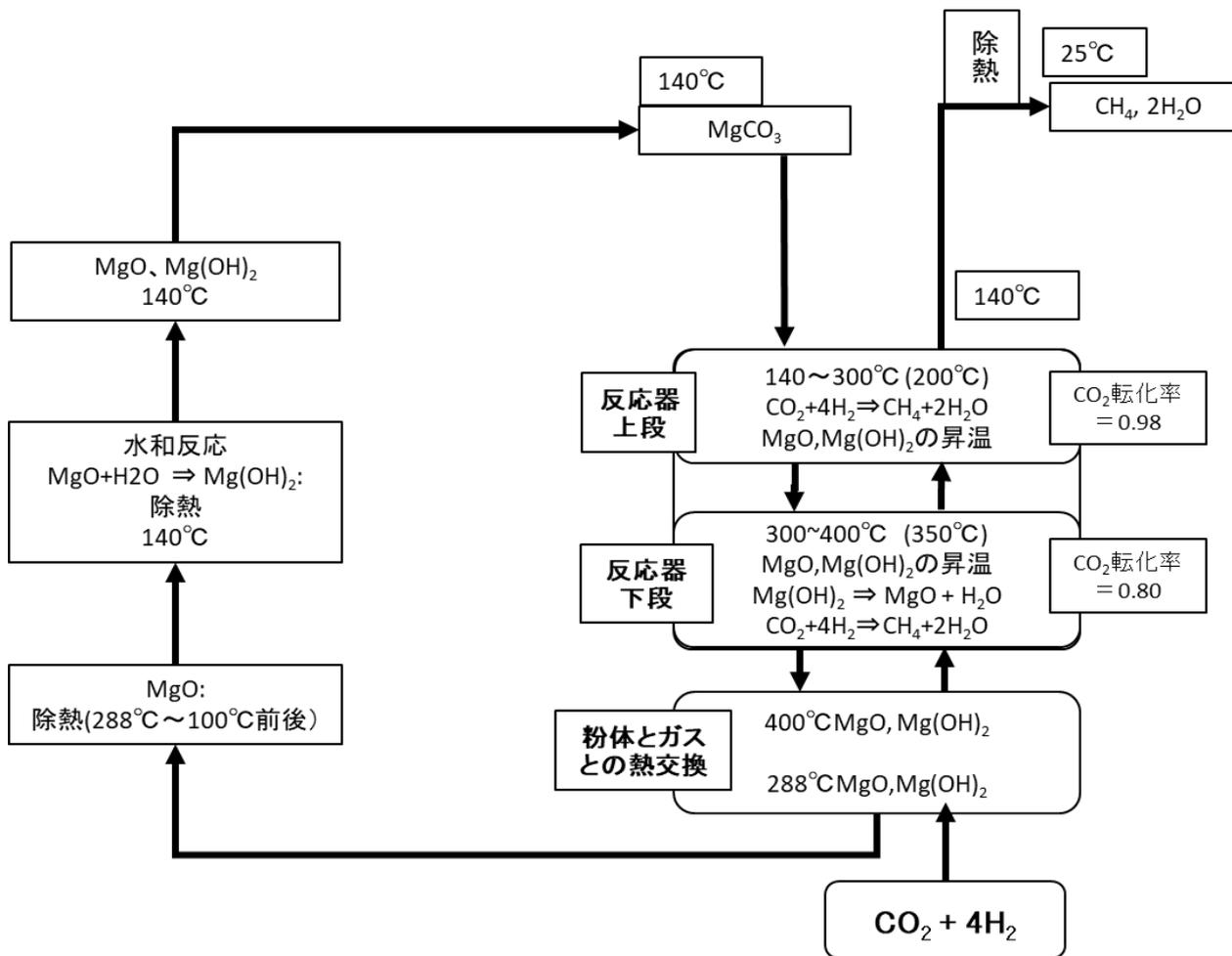
• 300→200°C

- -173[kJ/mol] × (0.98-0.95)

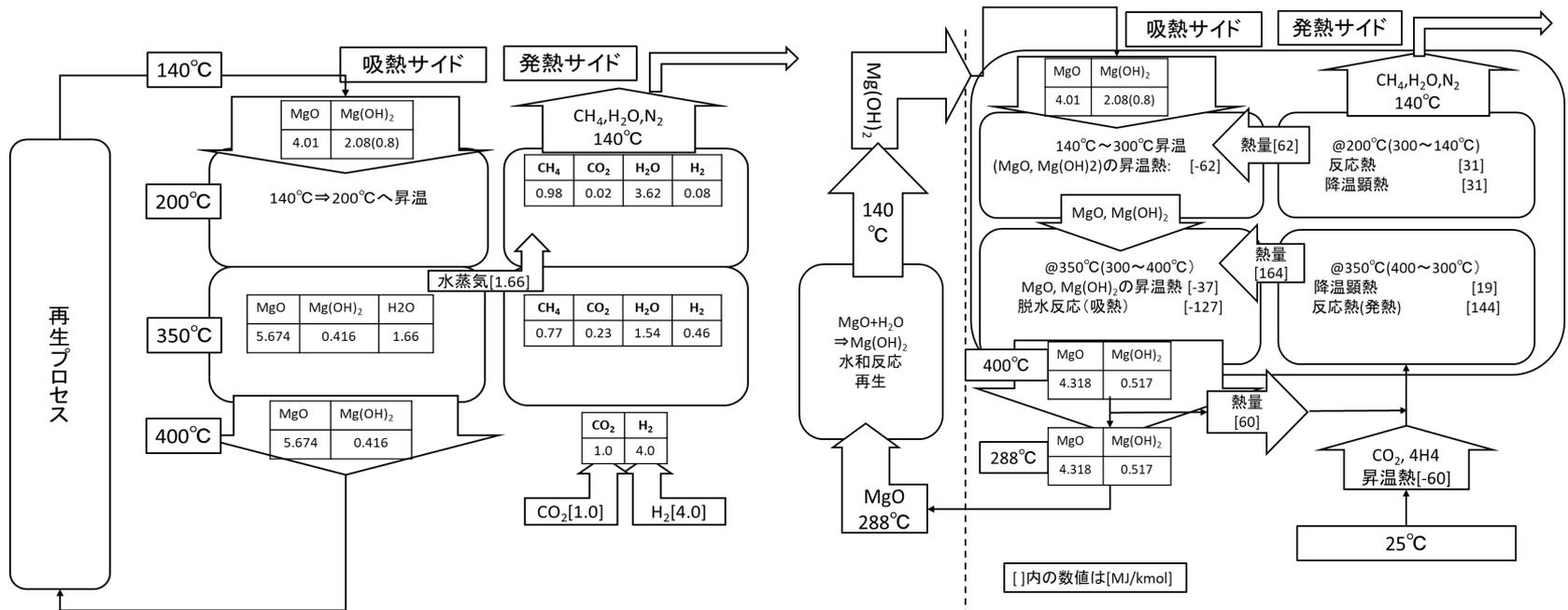
除熱剤の反応速度が遅く、除熱不十分となる場合 (流動層＋伝熱管)で除熱する装置のイメージ

- 流動層内に伝熱管を設置するのは、既存技術
 - 粒子が微粉でも流動層伝熱係数は、ガスの伝熱係数に比べて高い
- 装置は移動層的であるのが望ましいので、多段流動層とする。
 - 触媒粒子径は、吸熱剤粒子径より大きくし、分散板直上に滞留させる。
 - 触媒は、流動層内に留まるが、吸熱材は、流動化させる
 - 吸熱材(粉体)は順次、上方から投入され、装置下部から排出される。
 - 内部の吸熱剤量は常に一定量、一定の反応割合を維持できるようにする。

物質収支 (MB)、熱バランス (HB) はとれるか？



各温度域における メタネーションによる発熱量と MgO, Mg(OH)₂による吸熱量とのMB,HB (机上計算)

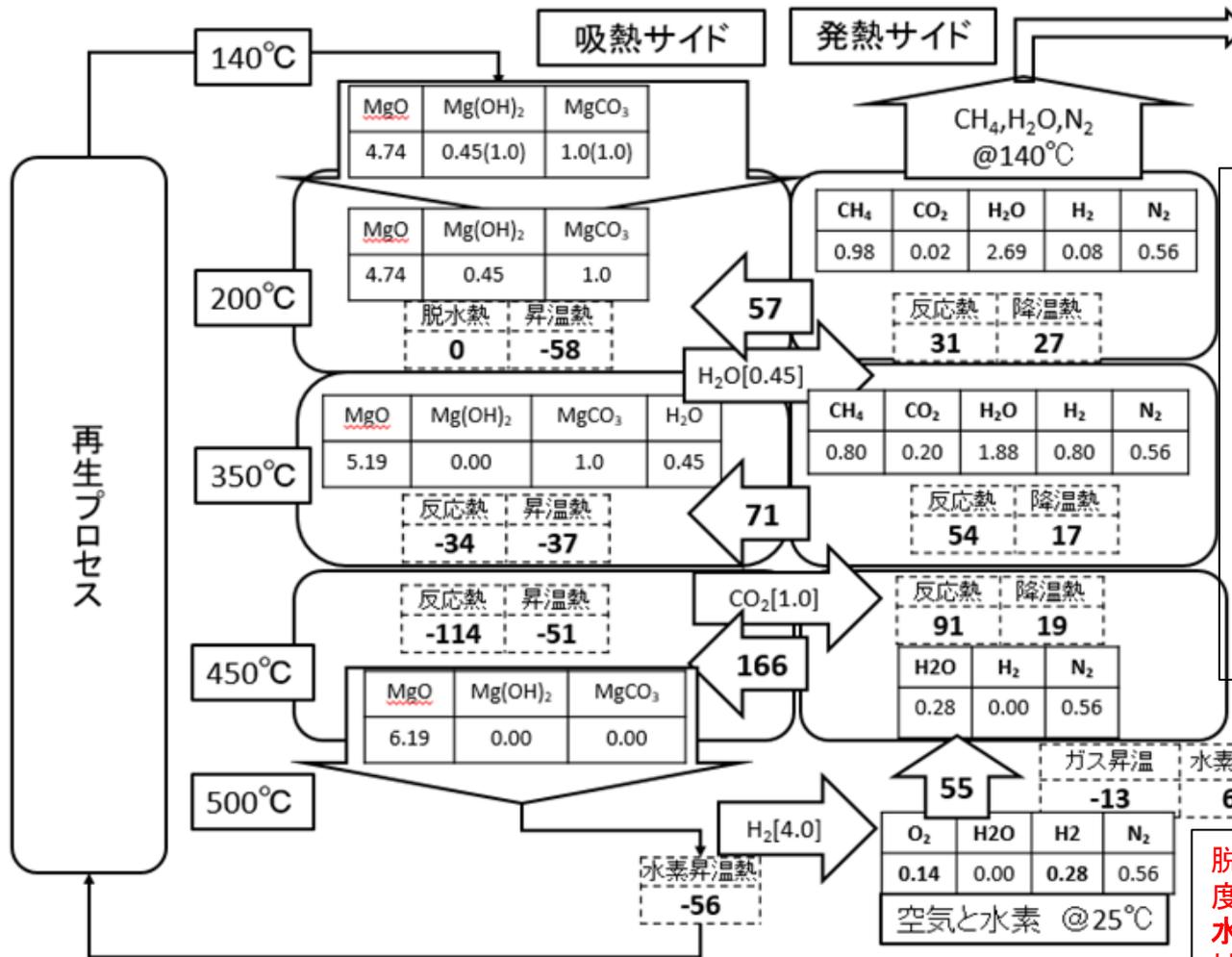


各温度域における組成変化

1. メタネーション反応の転化率は平衡転化率に達すると想定
2. Mg系の反応も同様

各温度域における組成変化量に対応する発熱量と吸熱量のバランス

MgCO₃、Mg(OH)₂、MgO を用いるプロセスのMB,HB(机上計算)

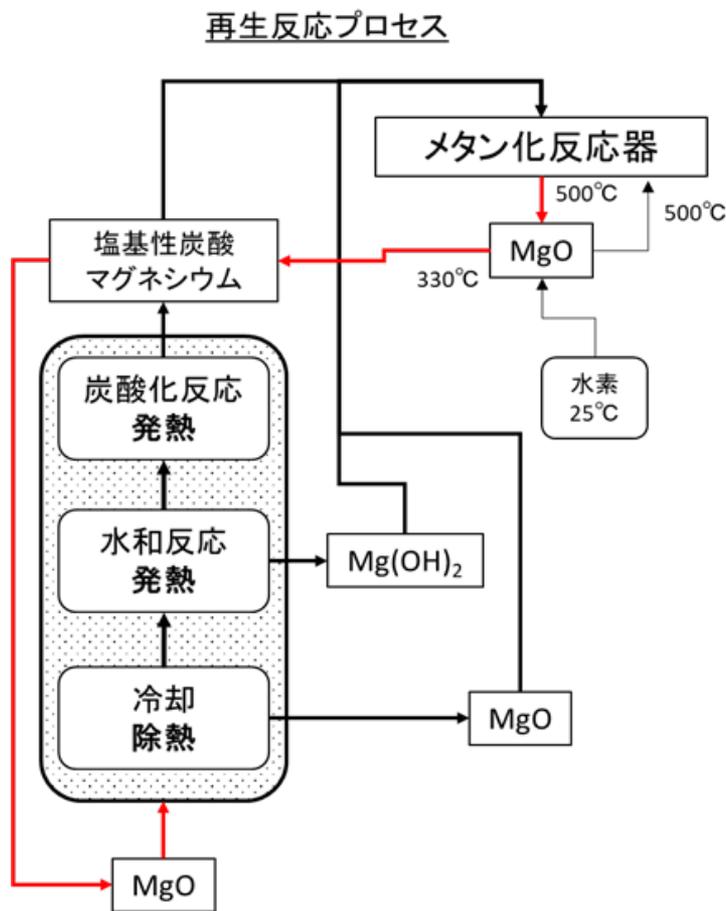


計算の基準はCO₂: 1mol、H₂:4molの反応

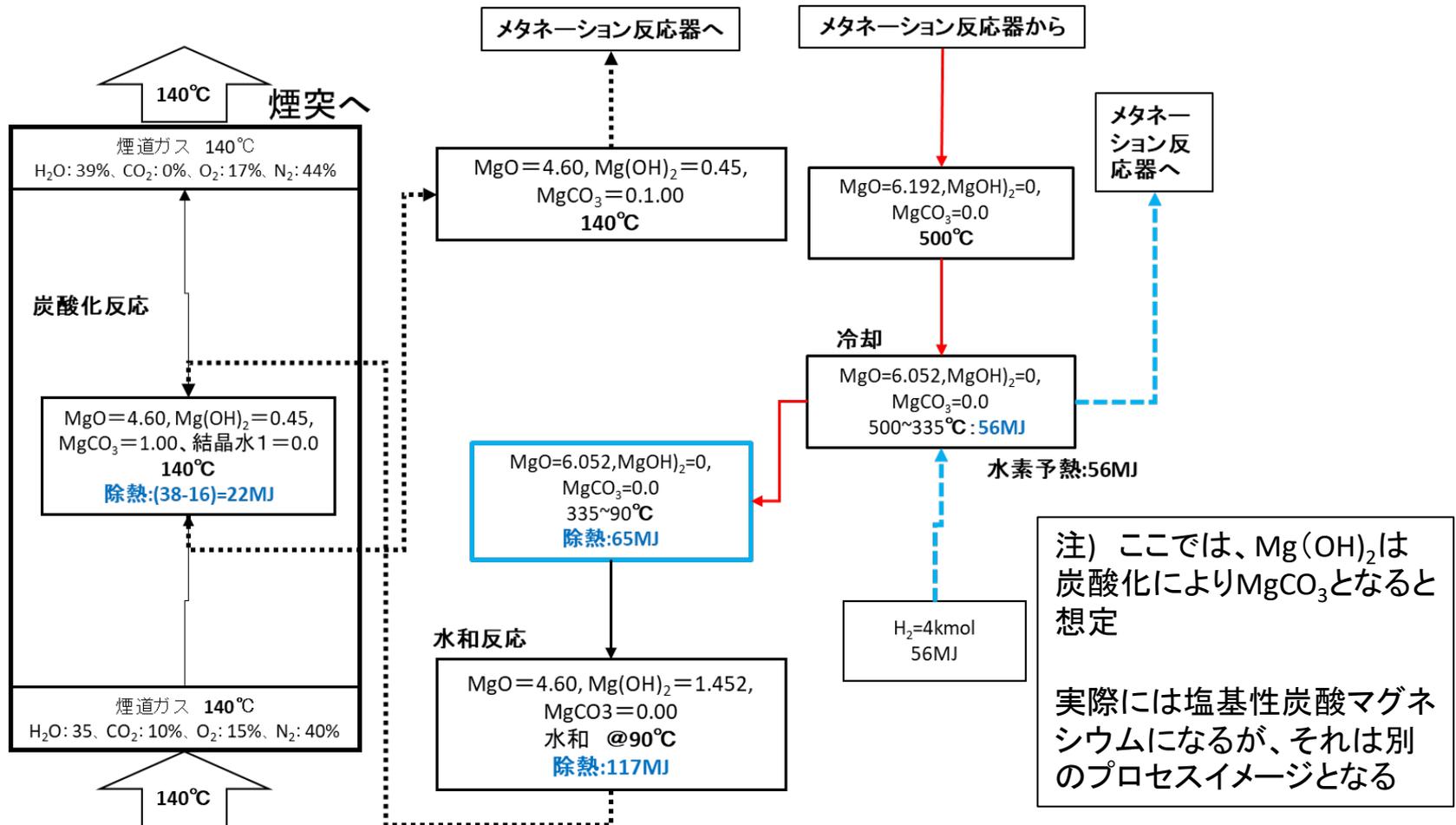
- 各成分の数値はモル数
- ()内の数字は反応割合
- 太字は熱量 [kJ/mol]

脱炭酸反応させるには、温度と熱量が足りない。そこで、水素を(7%)一部を燃焼させ補う

Mg系物質の再生プロセスイメージ



再生プロセスのイメージ (MB, HB)



MB,HBは成り立つ (反応速度に替えて反応率を設定)

吸熱材の吸熱量を各温度域のメタネーション発熱量に合わせられる理由
吸熱材に、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ と MgCO_3 に加えて、**MgOをHBの調製代として用いる。**
各反応温度域の吸熱&発熱量:

$$Q_{\text{en}} = [W_{\text{MgO}} \text{昇温顕熱}(C_p \Delta T) + W_{\text{Mg}(\text{OH})_2} x (C_p \Delta T + \text{反応熱}) + W_{\text{MgCO}_3} y (C_p \Delta T + \text{反応熱})]_n$$

$$Q_{\text{ex}} = z \Sigma [M_{\text{CO}_2} (\text{降温顕熱} C_p \Delta T + \text{反応熱}) + (M_{\text{H}_2} (\text{降温顕熱} C_p \Delta T + \text{反応熱}) + (M_{\text{H}_2\text{O}} (\text{降温顕熱} C_p \Delta T + \text{反応熱}) + (M_{\text{CH}_4} (\text{降温顕熱} C_p \Delta T + \text{反応熱})))]_n$$

ここで、 $W_{\text{MgO}}, W_{\text{Mg}(\text{OH})_2}, W_{\text{MgCO}_3}$ 、 $M_{\text{CO}_2}, M_{\text{H}_2}, M_{\text{H}_2\text{O}}, M_{\text{CH}_4}$ はそれぞれのモル量、

x, y, z は各温度域における反応率

$M_{\text{CO}_2}, M_{\text{H}_2}$ を1.0、4.0とし、各温度域における y を設定すると、それと balanすが取れる吸熱材量

$W_{\text{MgO}}, W_{\text{Mg}(\text{OH})_2}, W_{\text{MgCO}_3}$ を求める事ができる。(Try & Error法)

この時、反応器内の滞留時間で、反応率が100%に達しない場合を想定して、 x, y を与える。

試算では、 $x=0.5, 1.0$ $y=0.8, 1.0$ で成り立つことを確認した。この時不足する熱量はMgO量を増やして調整した。この調整は伝熱管による除熱とすることもできる。

各反応速度の調整

1. メタネーション反応速度

- a. 反応速度は触媒能(活性)と触媒量に支配される
- b. 触媒能 = 活性サイトの活性の強さ × 活性サイトの数
 - 活性サイトの触媒活性の強さ: 触媒種で決まる
 - 活性サイトの数: 触媒粒子を、微細なナノ粒子とする

開発は進んでいるが、触媒寿命は、使用条件にもよるので、評価は不明

2. 無機粉体の反応速度

- a. 固体表面の反応性が支配しているはずだが
- b. 反応の律速過程は？
 - a. 律速過程は？ 反応律速 or 移動律速
- c. 比表面積
 - 粒径が小さく、細孔が発達するほど、反応面積は大きくなる
- d. 固体粒子内の移動速度も重要であるはず
 - 細孔構造: 固体内の分子移動速度は拡散距離の2乗に反比例するので、粒径が小さく、細孔の発達には速度を速めるはず。

脱水反応速度の報告は反応律速と考えられる。しかし、粒径、細孔の効果については不明

新プロセスの課題、懸念点

1. メタネーション & Mg系プロセス

1. 反応速度データがない(要確認)
2. 粉体の性状変化(焼結、崩壊等)に対応できるか(要確認)

2. メタネーションプロセス:

1. 微粉体中の触媒を添着した粒子の動きと反応性は?(要確認)
2. メタネーションの反応熱を吸熱剤(Mg系粉体)が効率よく受け取れるか?(要確認)

3. 用いる粉体は反応性を考慮すると微粉である方が好ましい

微粉をハンドリングする為の反応装置は?

1. 振動流動層、振動多段流動層

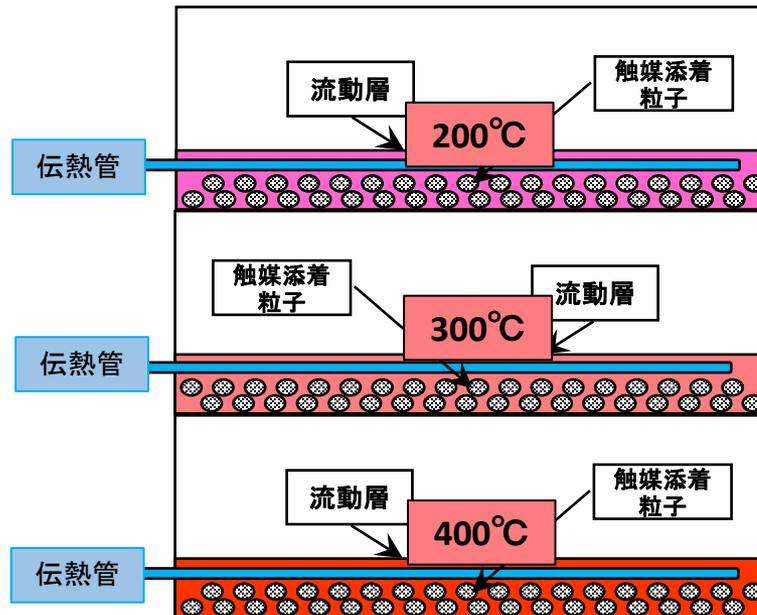
振動は壁あるいは内部に設置する振動板から伝播するが、微粉の場合、伝播距離、振動周波数、振幅など最適条件を探す必要がある。装置全体を振動させる方式は、大型化に限界がある。

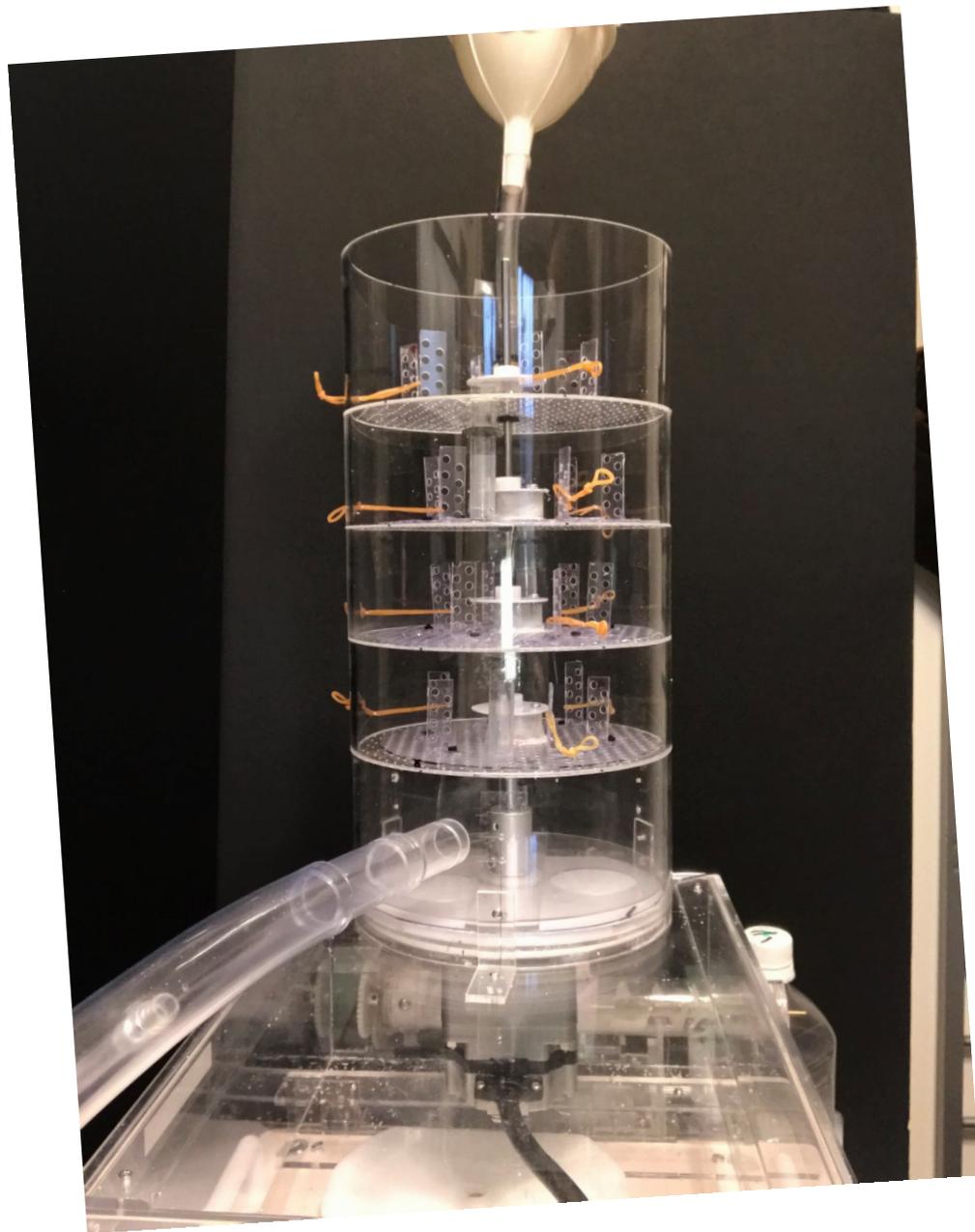
2. 揺動式移動層、揺動式多段流動層

揺動方式は、実用例がなく、適するか? 要検討である

除熱剤の反応速度がメタネーション反応より遅い場合

1. 無機粉体の反応速度を高める。(細孔構造等)
2. 伝熱管を導入し、除熱能力を補う。
3. 微粉をハンドリングできる流動層は、**振動流動層**、もしくは**揺動流動層**
4. 多段流動層として、移動層的に用いるのが良い



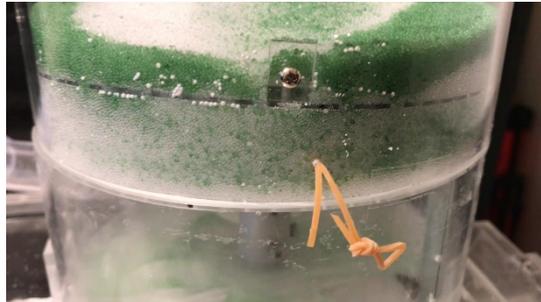


揺動機構を組み込んだ
多段流動層

以下は、
紫垣の観察実験装置による挙動観察結果

1. 揺動式移動層
2. 揺動式多段流動層

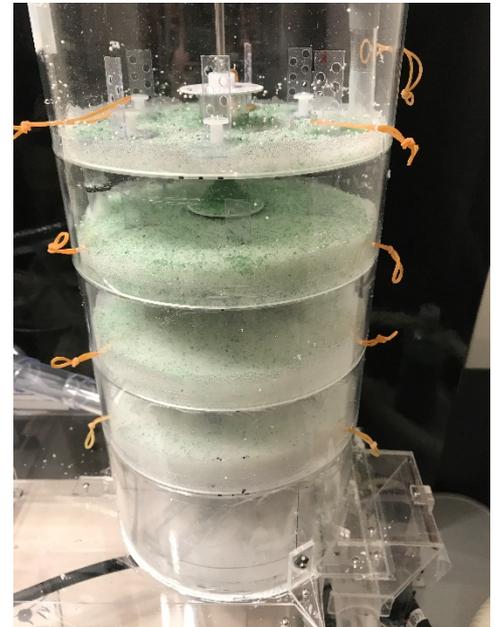
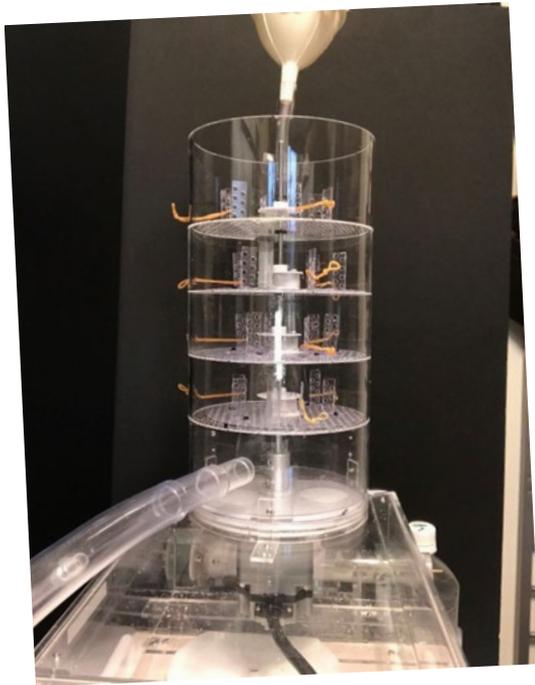
揺動移動層の混合特性観察実験



全体としては、プラグフロー的に流下するが、

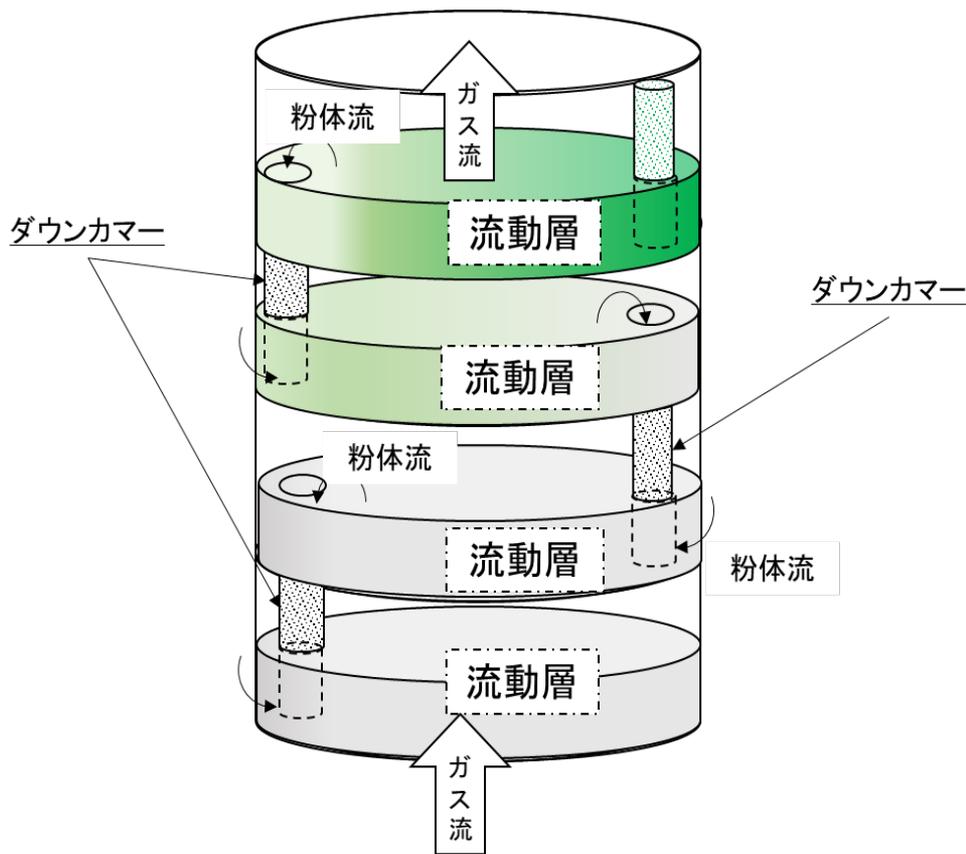
- 揺動板の揺動運動で、粉体が、僅かに壁に押し付けられるので、緩い、循環流が発生
- 従って、若干の逆混合があるとして用いることになる。

Mg系粉体の処理プロセス (揺動機構を組み込んだ多段流動層)

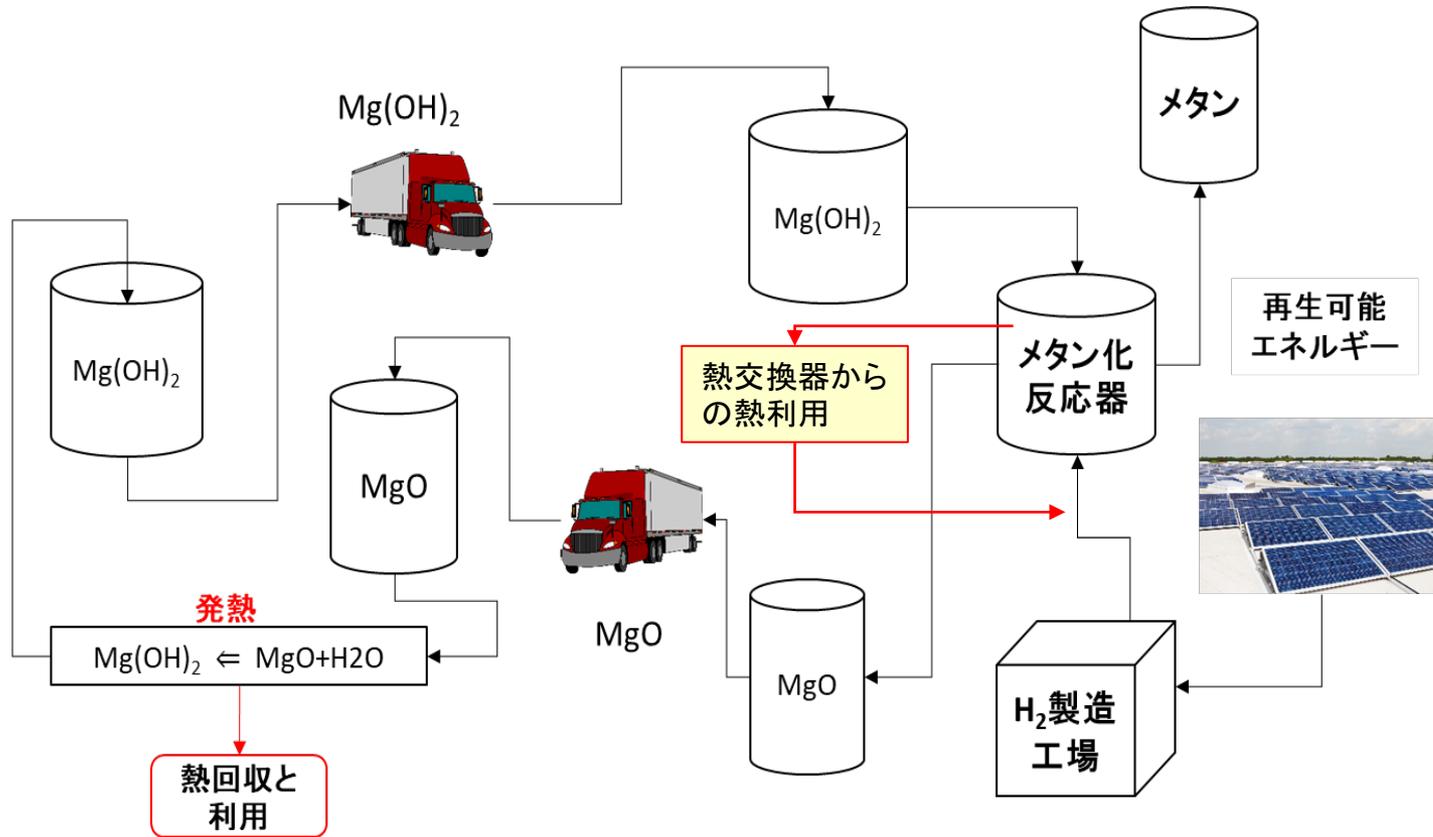


流動化し易い粒子を用いる場合には、その混合特性は、期待通り、移動層的に挙動する。
微粉を用いる場合も同様だが、若干の工夫が必要であった。

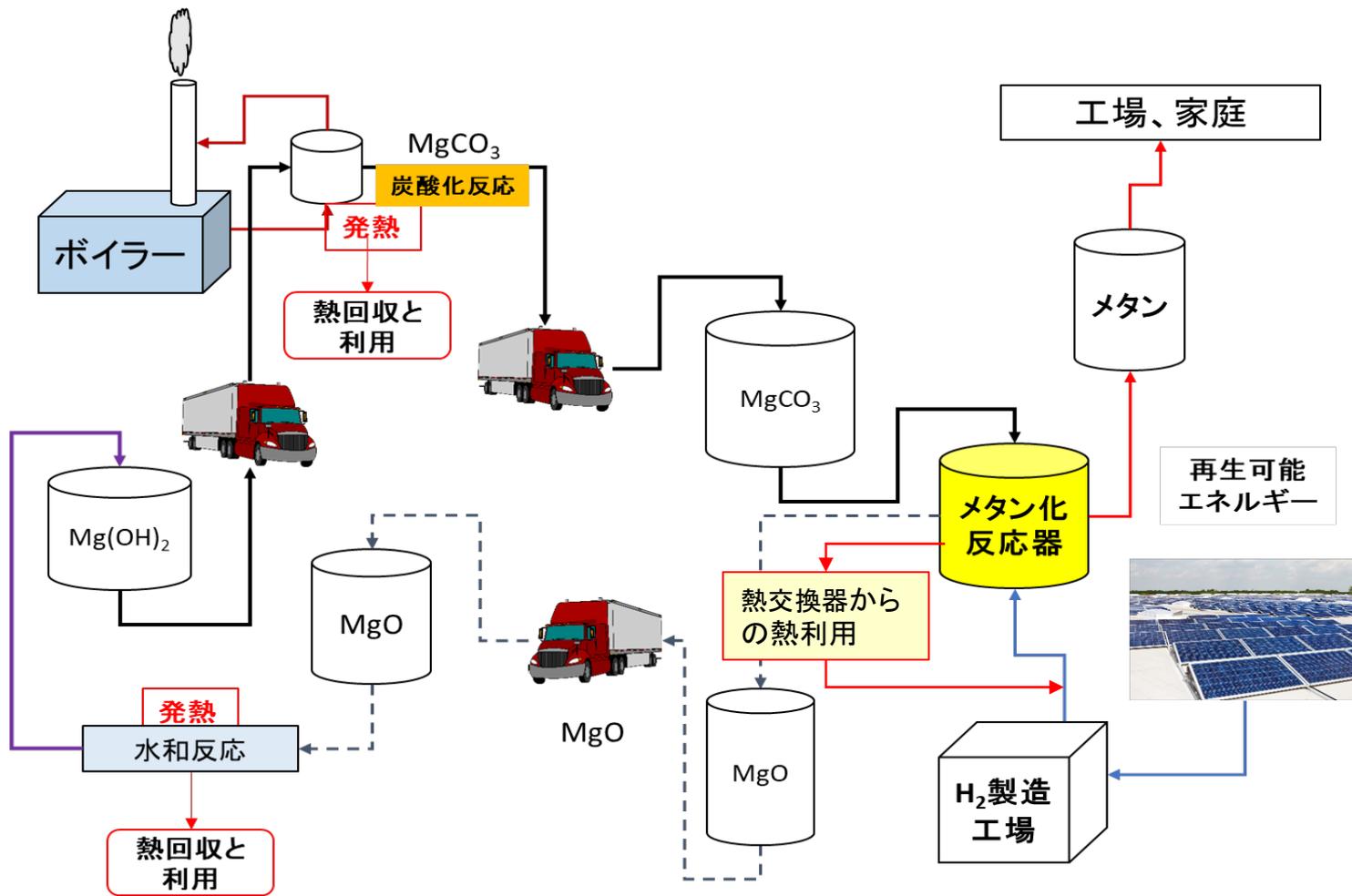
多段流動層の移動(混合)特性 観察結果のイメージ



新プロセスのイメージ メタネーション反応プロセス



CO₂回収プロセスとのリンク



新メタネーションプロセスのポイント

- 吸熱材の反応は分(min)のオーダーであるが、メタネーション(秒)より遅いのではないか。吸熱と発熱の反応速度が対応しなければ、このプロセスは成り立たない
1. 吸熱剤(Mg系粉体)と反応ガスは向流接触とする。従って、粉体処理プロセスは移動層である事。
 2. **反応速度のマッチング**:メタネーション反応は触媒表面で起こる。この熱を速やかに、周囲の吸熱剤で除熱する。吸熱材は微粉とし、これを流動化させ、流動層内の伝熱管への伝熱媒体として除熱を援ける。
 3. 反応器内の各温度域におけるメタネーション反応の反応量(反応速度×滞留時間)は、この区間の体積と触媒量とで調整する。
 4. 移動層内の各位置で、メタネーション発熱量と吸熱量は上記、触媒量、層体積、吸熱反応量、伝熱管除熱量でバランスさせる。

確認すべき課題

1. プロセスイメージは構築できたが、**反応性の確認は不十分**
2. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の**脱水反応速度**は、論文によれば、**それほど早くない**。
 - 緻密な結晶なので、表面反応支配と思われる。
 - 比表面積依存性は？**細孔を発達させると反応速度は上がるか？**
3. 反応に伴う粉体性状の変化と対応策：
 - 反応に伴い、粒子の崩壊、或いは焼結は？
 - 粉体性状変化に伴う反応性の変化は？
4. 微粉にまみれた触媒の反応性：
 - 触媒粒子に微粉が付着しても、触媒粒子は、揺動板によって常に転がされると、ガス分子の移動障害にならないと思うが、要確認
 - メタネーション反応の速度は触媒濃度依存性有と考えるが、どのくらいの触媒量となるか
 - 触媒反応器のSVと無機粉体の反応速度の一致は望めない。伝熱管を併用することになるが、微粉流動層の伝熱係数(特性)は？
5. 触媒添着粒子の製法は？
6. その他

以上

以下は参考資料

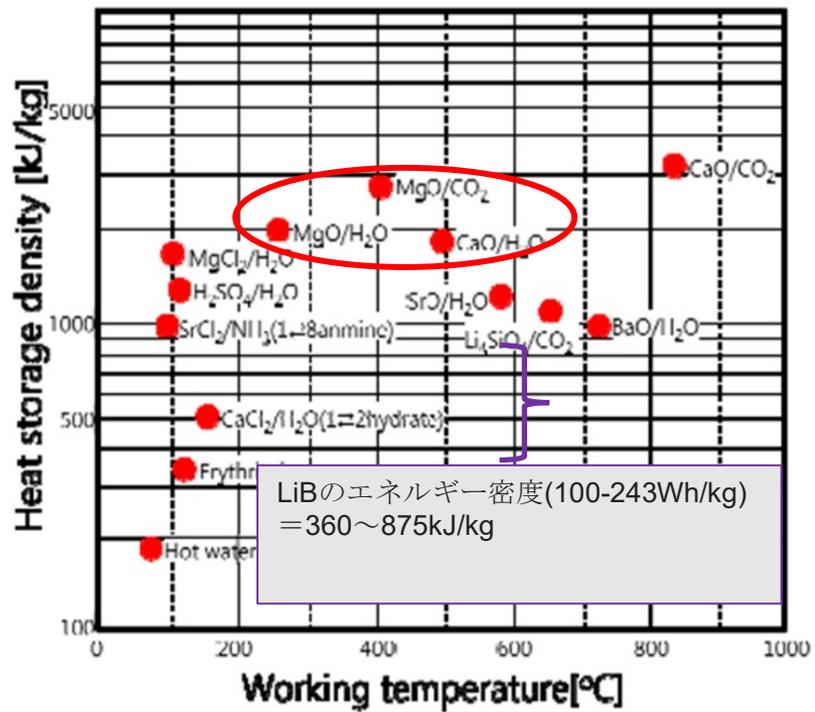


図5 蓄熱材料の作動温度と理論蓄熱密度

		現在の方法		
メタネーション		方法/設備・条件	エネルギー(消費 or 回収)	
	反応熱の除熱方式	高圧沸騰伝熱	回収(利用可能)	
	除熱システム	熱交換器		
高圧水の循環		消費(ポンプ動力):少ない		
触媒		Ni系触媒、 Ru担持TiO ₂		
		新プロセス		
メタネーション	反応熱の除熱方式	Mg(OH) ₂ の吸熱反応		要装置開発 粉体中の反応性を 要確認
	除熱システム	不要		
	装置様式	揺動式多段流動層	反応熱量不足分を酸水素燃焼で 補う	
触媒		Ni系触媒、 Ru担持TiO ₂		粉体中の反応性を 要確認

共通技術

● CO₂分離回収技術の説明

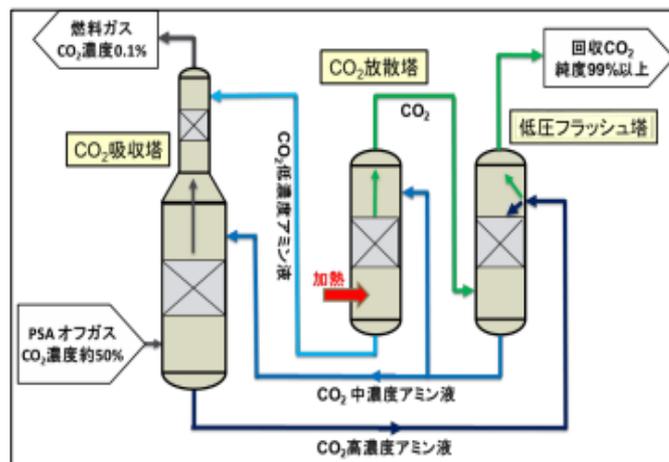
分離回収技術	技術概要	適用先
化学吸収法	・CO ₂ と液体との化学反応を利用して分離回収する方法。	火力・セメント・鉄鋼・石油精製・化学工業・天然ガス採取
物理吸収法	・CO ₂ を液体中に溶解させて分離回収する方法。 ・吸収能は液体に対するCO ₂ の溶解度に依存する。	火力(高圧)・石油精製・化学工業・天然ガス採取
固体吸収法	・固体吸収材によるCO ₂ 分離回収技術。 ・アミン等を含浸させた多孔質材(低温分離用)や、CO ₂ 吸収能のある固体剤(高温分離用)に吸収させる方法等がある。	火力・セメント・石油精製・化学工業
物理吸着法	・ゼオライトなどの多孔質固体への昇圧・降圧(圧カスイング)や昇温・降温(温度スイング)などによる吸着・再生操作	火力・鉄鋼・セメント・石油精製・化学工業
膜分離法	・分離機能を持つ薄膜を利用し、その透過選択性を利用して混合ガスの中から対象ガス(CO ₂)を分離する方法。	火力(高圧)・石油精製・化学工業・天然ガス採取

CO₂分離・回収の結果

- 分離・回収／圧入設備の実証において、①所定の回収量、回収率、純度、分離・回収エネルギーを達成、②分離・回収に必要なアミン溶液の組成・性能は安定、③CO₂圧縮機制御システムの完全自動化（異なるタイプの貯留層への同時圧入）、④設備の安全操業、設備の耐震設計、緊急時の地震対策の面で安全対策の健全性の実証を達成。
- 分離回収プロセスには、活性アミンを使用した2段吸収法を採用。分離・回収エネルギー（消費量）について、目標値である1.22GJ/t-CO₂以下を達成。海外CCSプロジェクト（Quest）の1段吸収法での実績（2.79GJ/t-CO₂^{（注1）}）よりも56%の削減となっており、2段吸収法が有効なプロセスであると評価。

（注1） Questの公表データ（リボイラー熱量2.27GJ/t-CO₂）から推定した電気消費量も含めた分離・回収エネルギー値

省エネ型CO₂分離・回収フロー（二段吸収法）



分離・回収エネルギー（消費量）の試験結果

		2016年度	2017年度	2019年度	設計値
CO ₂ 回収量	t/h	25.3	24.3	26.4	25.3
リボイラー熱量	GJ/t	0.923	0.882	0.915 ^{*1}	0.862~0.949 ^{*2}
ポンプ電気量	kWh/t	19.8	21.0	18.8	19.2 (期待値)
分離・回収エネルギー^{*3}	GJ/t-CO₂	1.20	1.16	1.18^{*1}	目標値: 1.22^{*2}

*1:補正值、*2:熱損失含む、*3 分離・回収エネルギー= 熱量/ボイラー効率+電気量×熱換算係数/発電効率
 計算例(2016年度): 0.923/0.9+19.8x0.0036/0.42 = 1.20GJ/t-CO₂

CCSコスト：海外との比較

海外に比べ輸送と圧入コストが高い

ケース	現状	IPCC SRCCS		
	円/t-CO ₂	US\$/t-CO ₂		
	新設石炭火力 ～帯水層貯留	新設石炭火力 ～帯水層貯留	新設NGCC ～帯水層貯留	新設石炭火力 ～EOR
分離回収～ 昇圧	4, 200	29-51	37-74	29-51
<u>輸送</u>	80^ 100万t/y・20km	1-8 500,000万t/y ; 250km		
<u>圧入</u>	2, 300 10万t/年・well, ERD	0. 5~8		△10~16
トータル	7, 300 100万t/y・20km- ERD	30-70	40-90	9-44



CO2吸収法	アミンによる吸収法		新規考案プロセス			
	方法/ 設備・条件	エネルギー (消費 or 回収)	方法	設備・条件	エネルギー (消費 or 回収)	要確認項目
アミン系吸収液 による吸収法	アミン吸収液		Mg(OH)2粉体 の炭酸化反応			
吸収温度	20~60℃	要冷却		常温~200℃		実験により要確認
吸収法	吸収塔	消費(吸収液循環)	煙道ガスとMg(OH)2 粉体の直接接触	揺動式移動層	発熱を回収利用可	実験により要確認 要装置開発
CO2回収	放散塔	消費(吸収液循環)				
CO2回収温度	120℃	消費(要加熱)			回収(発熱量を熱回 収して利用可)	実験により要確認
CO2保存法	圧縮後冷却	消費 (要圧縮&冷却)				
CO2利用法			反応器内にて メタンへ変換	反応器内で メタン化反応へ	発熱を吸収	実験により要確認
CO2保存容器	ポンベもしくは 高压タンク			粉体貯蔵容器 (サイロなど,常圧)		
CO2輸送法	配管による輸送	圧力差			空気輸送用 ブロー動力	
	高压ポンベ による輸送	トラック燃量		粉体コンテナ による輸送	輸送トラック燃量	