

ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト
革新的ガス化技術に関する基盤研究事業

CO₂回収型次世代IGCC技術開発
の成果について
詳細説明資料 (公開)

2010年8月19日

(財)電力中央研究所

エネルギー技術研究所



九州大学

先導物質化学研究所



KYUSHU UNIVERSITY

I . 事業概要

事業の概要と目標

事業概要

石炭ガス化システムから回収したCO₂を酸化剤の一部として用いることにより、石炭ガス化システムの効率を大幅に向上することのできるCO₂回収型高効率IGCCシステムの実用基盤技術を開発、および環太平洋地域に賦存する多様な石炭に対する適応性の検討

開発の必要性

既存の発電システムはCO₂回収により発電効率が2割以上低下し、IGCCの場合約40%→約32%(送電端HHV)となるが、本システムはCO₂回収後も40%以上が期待できるため、革新的将来オプションの一つとして基盤技術の開発は価値が高い。

達成目標

[中間目標(平成22年度)]

- ・送電端効率向上(42%:HHV基準、CO₂回収後)のための主要構成技術の目途を得る

[最終目標(平成24年度)]

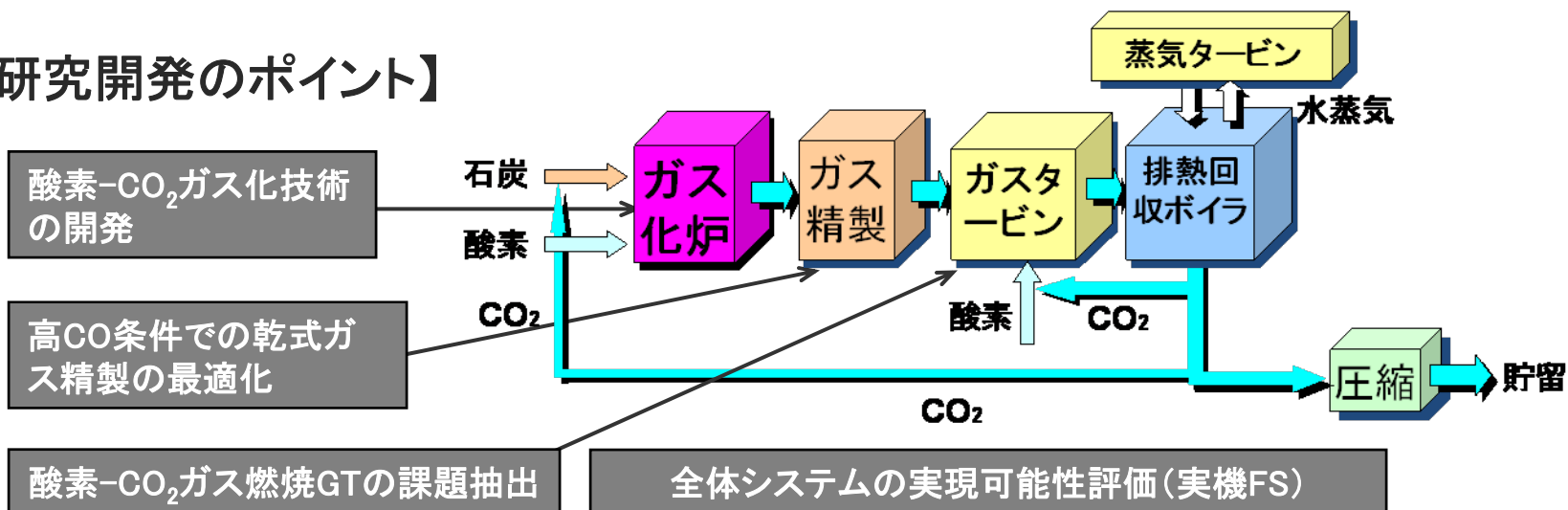
- ・性状の異なる環太平洋地域の3種類以上の石炭を用い、CO₂回収後において、送電端効率42%(HHV基準)を実現させる基盤技術の確立

新しいCO₂回収型高効率IGCCシステムの概念

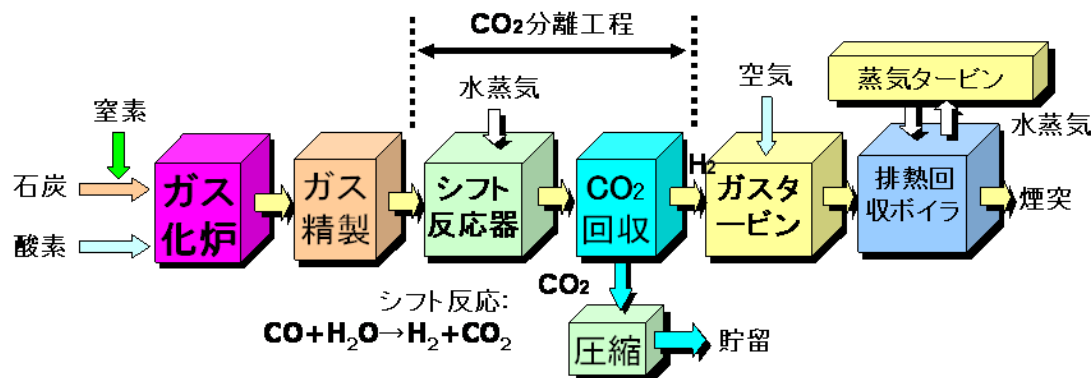
新システムの特徴

1. 「酸素-CO₂吹きガス化」と「酸素-CO₂ガス燃焼クローズド・ガスタービン」の採用により、発電端効率の大幅な向上
2. CO₂排ガスの循環によりCO₂分離回収装置が不要となり、効率向上とシステムの簡素化が可能

【研究開発のポイント】



従来検討されているCO₂回収型IGCC



研究開発目標達成に向けた役割分担

電中研

共同

九州大学等

● 小型ガス化炉の改造と運転

● プロセス開発に貢献する基盤研究

1. 酸素- CO₂ガス化技術の開発

基本ガス化反応の解析・評価

・CO₂ガス化反応速度の取得
・ガス化反応モデルの開発

数値解析によるガス化炉最適化検討

※1700トン/日級シミュレーターの開発

小型ガス化炉による基本性能実証

1. 石炭およびチャーの構造とガス化反応性

2. 石炭中の鉱物の分析と挙動、ガス化への効果

3. ガス化において生成する灰の物性・構造・挙動の解析

4. ガス化炉内流動解析

200トン/日ベースシミュレーターの採用

5. COリッチ生成ガスの操作性 (GT 燃焼性)

6. 石炭の前処理

適合炭の選択、適用性向上の実現

2. 高CO条件における乾式ガス精製の最適化

3. 実機フィージビリティ・スタディ (FS)

4. アジア地域の多様な石炭への適用基盤技術開発

開発目標と達成状況

開発項目	中間目標	達成状況	
事業全体	送電端効率向上(42%:HHV基準、CO ₂ 回収後)のための主要構成技術の目途を得る	送電端効率42%を達成するための技術課題を明らかにする等、概ね目標を達成	○
1. 酸素-CO ₂ ガス化技術の開発 ・基本ガス化反応の解析・評価	高温加圧下での高濃度CO ₂ に対するガス化反応速度の解明と基準炭(中国炭等)の反応速度取得、灰分の溶融性把握	中国炭、インドネシア炭の2炭種の反応速度データを取得。酸素とCO ₂ が共存する雰囲気下でのチャーガス化特性、熱分解、気相反応挙動、炭種の影響および灰分の溶融流動性を解明	○
・数値解析によるガス化炉最適化検討	試験炉成果を用いて高精度実機ガス化炉シミュレータの開発、実機ガス化性能の予測・評価	3トン小型炉から200トン/日、1700トン/日の実機へ適用可能なシミュレータの開発を完了。最適CO ₂ 濃度等の実機性能予測を年度内に完成見込み	○
・小型ガス化炉による基本性能実証	小型ガス化炉による基本性能実証と課題抽出	小型ガス化炉を用いたCO ₂ 投入ガス化試験を行い、操作性および運転条件等の最適化実験が可能になった。基本性能に及ぼすCO ₂ 濃度の影響などを解明すると共に、技術課題を抽出	○
2. 高CO条件での乾式ガス精製の最適化	実機適用に向けた乾式脱硫等の性能評価とシステム最適化、課題の抽出、実ガスによる基本性能実証	温度と水蒸気濃度に着目し、脱硫性能と炭素析出抑制を両立させる運転条件を解明。実ガス試験で脱硫性能を実証、長期寿命を目指す	○
3. 実機フィージビリティ・スタディ(FS)	実機メーカーFSによるプラント性能、諸効率、概略コストの評価および技術課題の抽出	主要機器の実機適用性を考慮し、システム効率、プラントレイアウト評価等を行い、42%達成への技術課題を抽出	○
4. アジア地域の多様な石炭への適用基盤技術開発	アジア地域の低品位炭に対する利用技術の開発と課題抽出	溶剤による褐炭の前処理技術、高灰分高融点炭の脱灰の効果を確認、経済性の評価を行う	○

目標の達成可能性

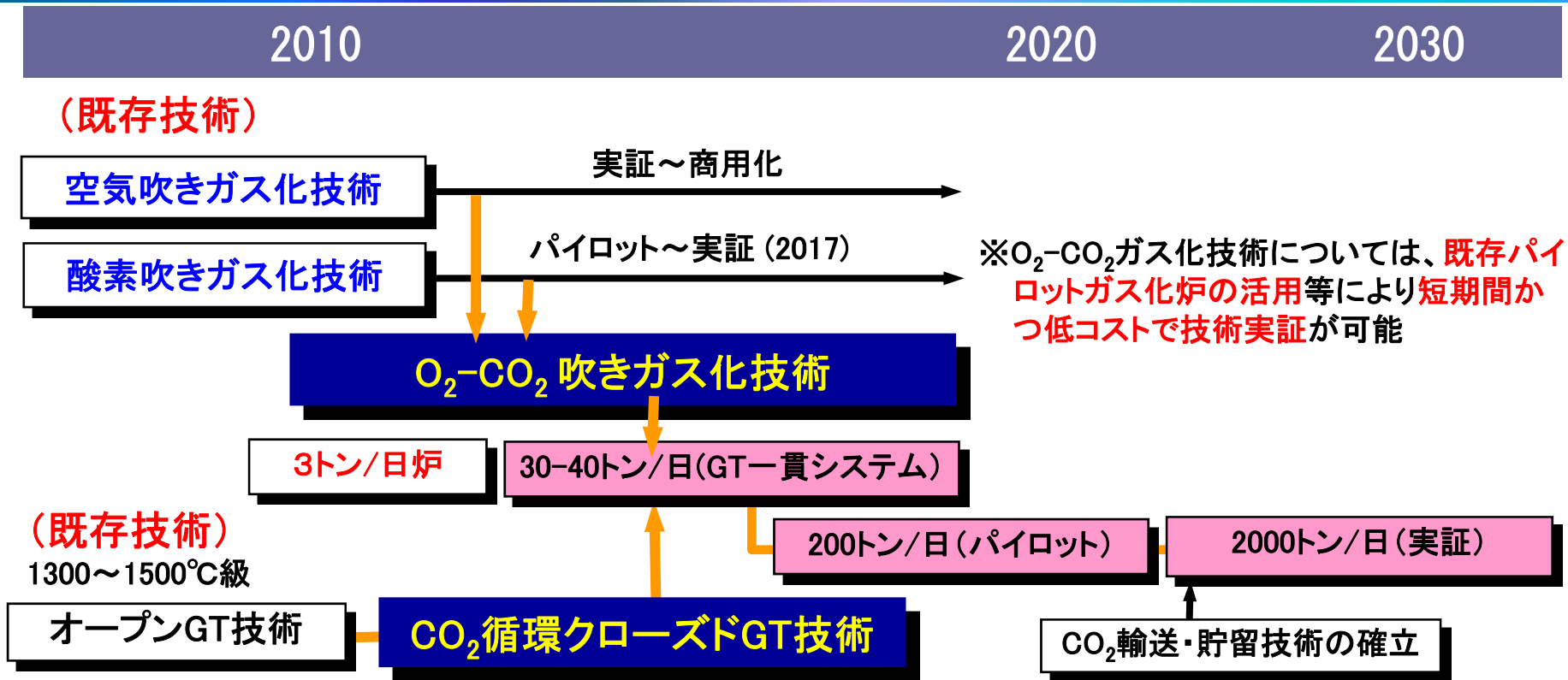
[最終目標]

石炭ガス化システムから回収したCO₂を酸化剤の一部として用いることにより、システム効率を大幅に向上できるCO₂回収型高効率IGCCシステムに関し、CO₂回収後に送電端効率42%(HHV基準)を実現させる基盤技術を確立する。また、アジア地域の多様な石炭への適用基盤技術を開発する。

[後期2年半の研究開発によって]

- 将来の実用化を見据え、次期ステップである数十トン/日級ガス化炉とクローズドGT一貫システムの開発に向け、その中核となるO₂-CO₂ガス化技術について、ガス化反応性評価技術の確立、小型ガス化炉の実験による実証および数値シミュレータ技術の開発に引き続き取り組み、予定通りH24年度までに目標を達成できる見込みである。
- 特に、ガス化炉温度、酸素比、酸素濃度など運転条件の最適化、バーナ構造・配置の最適化等によるガス化炉の性能向上、ガスタービンシステムの最適化によるさらなる性能向上、再生熱交換器およびASUの技術調査・最適化検討を進めることで、目標効率の達成を確実なものにできる見込みである。
- ガス化炉チャー系や再生熱交換器などの簡素化検討を進め、低コスト化に向けた検討を着実に進め、課題を明らかにする。
- アジア地域の低品位な石炭のO₂-CO₂ガス化への適用性さらに効率の大幅な向上技術の開発を着実に進める。

成果実用化の見通し



- 既存ガス化技術の知見、3トン/日炉、ベンチプラント(GT一貫システム)による成立性の確認、さらにシミュレーション技術の活用により、2020-30年頃の実用化に向けたスムーズな展開が可能
- CO₂循環クローズドGT技術や再生熱交換器の開発は、WENETやAHAT、1700℃級GT開発での知見を有効活用することにより、効率的な開発が可能
- 電中研・大学一体化による開発体制により、高度な基盤技術に裏付けられた確度の高い着実な研究開発が可能

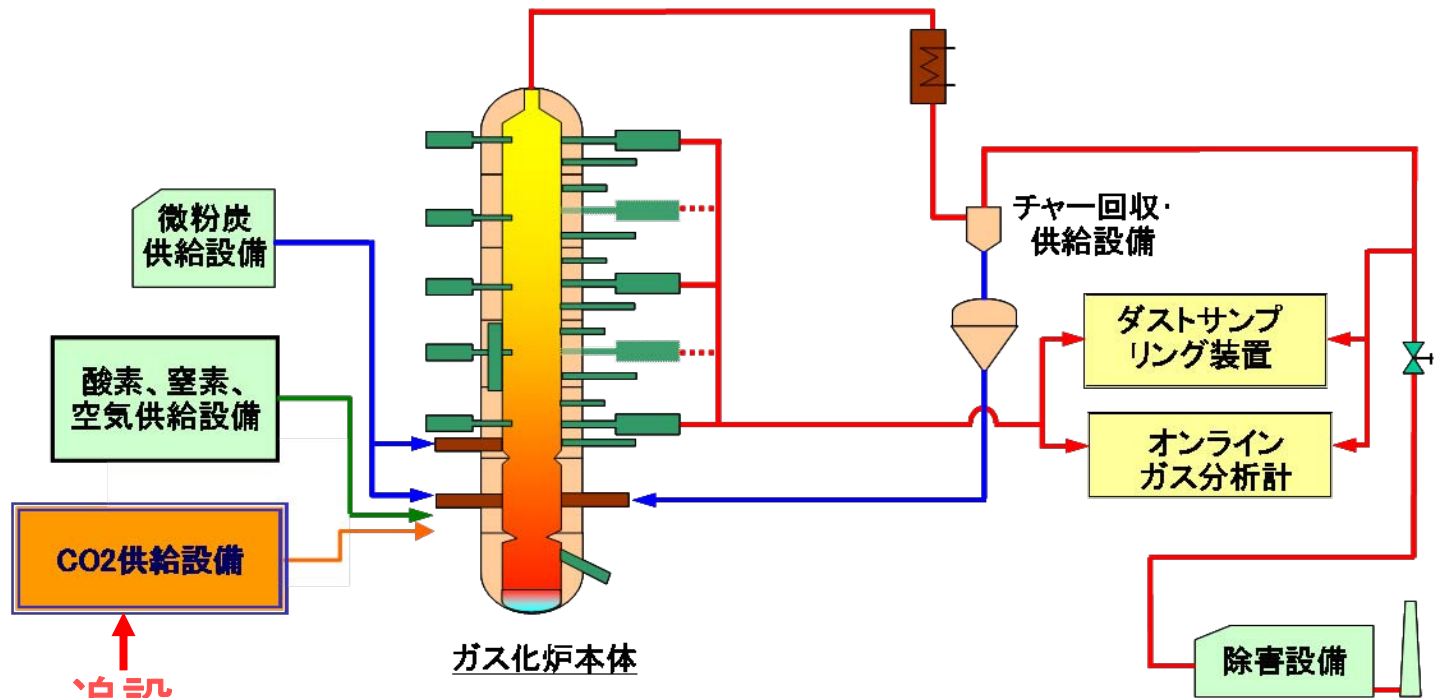
Ⅱ. 研究開発内容と成果

1. 酸素-CO₂ガス化小型炉による基本性能実証

目的と概要

酸素-CO₂ガス化の基本性能実証のため、既設3トン/日石炭ガス化研究炉にCO₂供給設備を追設し、ガス化剤中CO₂濃度を变化させたガス化試験を行い、運転技術を確立。また、酸素比、CO₂濃度などガス化炉運転条件がガス化性能に及ぼす影響を評価。

空気吹き二室二段噴流床のガス化条件をベースに、CO₂濃度を増加



3トン/日石炭ガス化研究炉の概要

CO₂供給設備の概要

1. CO₂製造設備

- ・液化CO₂を気化させることによりCO₂ガスを製造するCE(コールドエバポレーター)設備であり、液化CO₂貯槽、貯槽内圧力調整用の加圧蒸発器、CO₂ガス製造用の空温式蒸発器により構成。

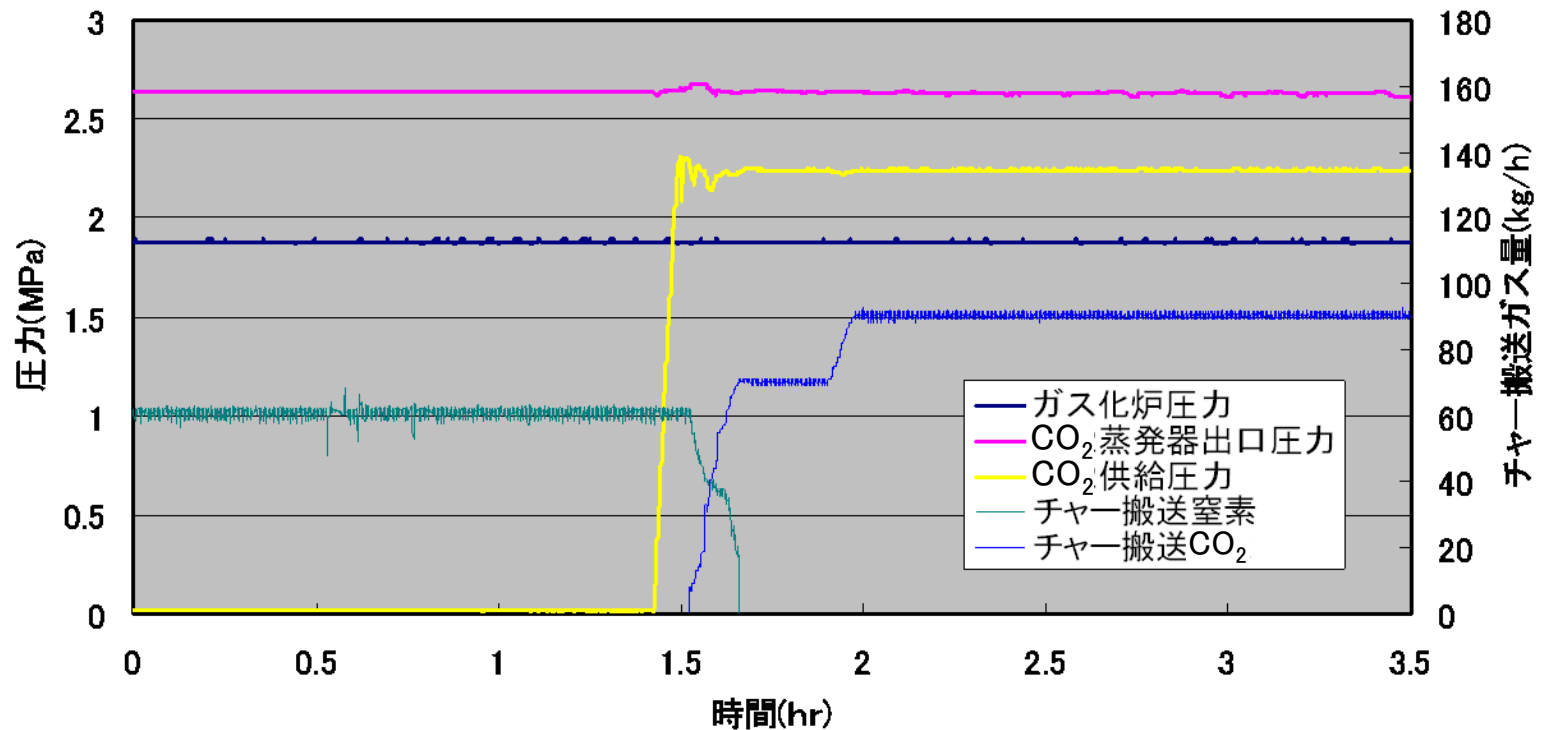
2. CO₂供給系統

- ・CO₂製造設備で製造したCO₂ガスを、所定の供給圧力に制御し、2次空気系統、コンバスタ石炭搬送ガス系統、コンバスタチャー搬送ガス系統、リダクタ石炭搬送ガス系統に供給。



CO₂供給運転特性の確認(チャー搬送ガス切替時)

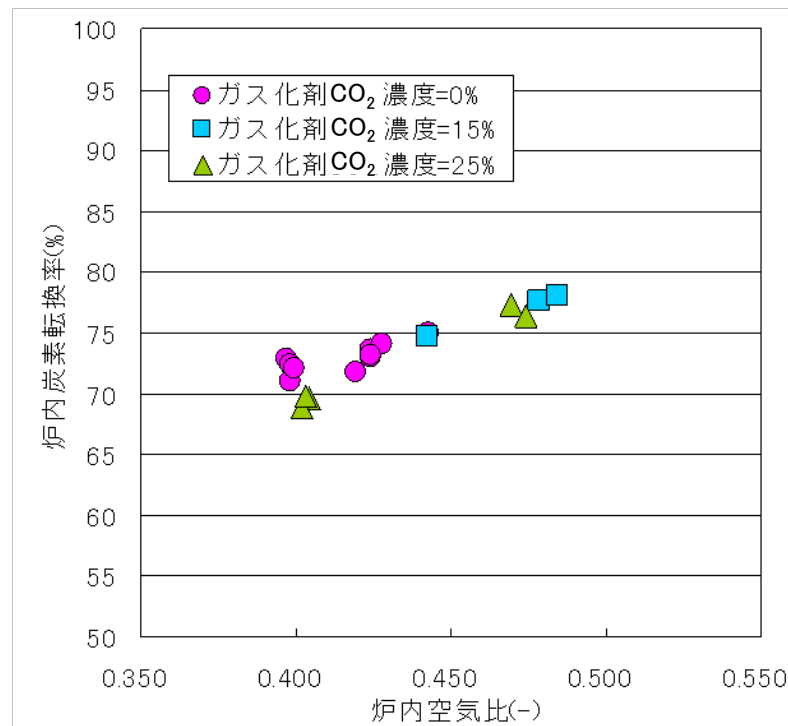
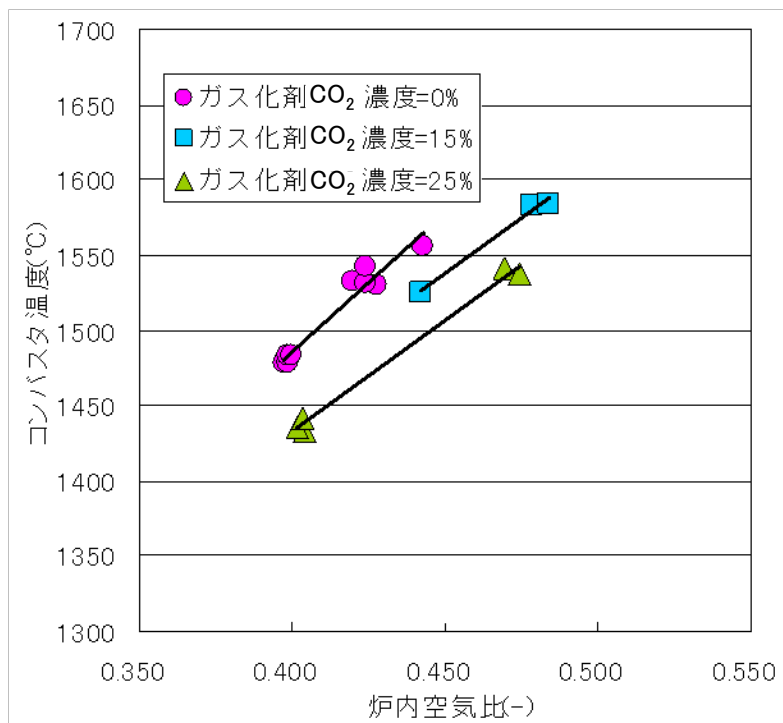
- ・チャー搬送を窒素60kg/hの状態から、徐々にCO₂へ切り替えていき、窒素を0kg/h、CO₂を70kg/hに設定し、その後、CO₂を90kg/hに増加。
- ・CO₂投入開始時に、CO₂蒸発器出口圧力やCO₂供給圧力がやや変動したものの、**ガス化炉圧力は安定**しており、切り替え操作には特に支障はなし。切り替え終了後は、CO₂量増加時も含め、各部圧力は安定しており、**問題なくCO₂供給運転が可能であることを確認**。



マリノウ2試験結果速報

(投入ガス中酸素濃度=25%一定、CO₂濃度0~25%、他はN₂)

- ・CO₂濃度の上昇に伴い、コンバスタ温度が低下する傾向が認められる。
- ・コンバスタ温度低下の主な要因として、窒素とCO₂の比熱の違い(CO₂の比熱は、窒素の約1.6倍)が考えられる。
- ・今回の実験範囲では、炉内空気比に対する炉内炭素転換率や生成ガスHHVに、CO₂濃度の顕著な影響はなかった。



まとめ(現状と今後の予定)

- CO₂供給設備を設置し、3トン/日小型ガス化炉によるCO₂投入ガス化運転技術を確立した。
 - ガス化剤酸素濃度一定で、CO₂濃度を増加させると、窒素とCO₂の比熱の違いなどにより炉内温度が低下する。
 - 炉内炭素転換率に対するCO₂濃度の影響が顕著に認められない。これは、前記のCO₂濃度増加に伴う炉内温度の低下の影響を受けているものと考えられる。
 - これまでの実験では、酸素濃度＝一定としていたため、炉内温度が低下したが、今年度下期にガス化剤酸素濃度の増加や給炭量比変化などのパラメータ変化試験を実施し、ガス化炉温度を維持する最適運転条件の検討により、CO₂供給によるガス化性能向上効果の確認を進める予定である。
 - ✓ 酸素濃度=25%(現状)→30%(目標)
 - ✓ O₂:CO₂(:N₂)=25:25(:50)(現状)→30:25(:45)(目標)
- ※空気吹き二段噴流床による実験装置の制約から、N₂を大幅に減らすことが困難
→H23年度にガス化炉構造等の最適化を実施予定

2. 酸素- CO_2 ガス化技術基本ガス化反応 の解析・評価

【 O_2/CO_2 ガス化反応の基盤】

- (1) 試料石炭
- (2) O_2/CO_2 吹き石炭ガス化反応
 - (a) 概要
 - (b) 石炭の熱分解
 - (c) チャーのガス化
 - (d) まとめ
- (3) ガス化炉における灰の挙動

(1) 基準炭の性状

	炭種		大同炭(DT)	マリノウ炭(MN)	アダロ炭(AD)
	発熱量 (HHV)	kJ/kg db	29900	30800	28300
		kcal/kg db	7160	7370	6770
工業分析	水分	% ad	3.9	4.7	11.3*
	灰分	% db	11.2	8.4	3.2
	揮発分	% db	27.3	40.7	48.8
	固定炭素	% db	61.5	51.0	48.0
	燃料比	—	2.26	1.25	0.98
元素分析	C	% daf	83.2	81.1	73.2
	H	% daf	4.3	5.7	5.2
	O	% daf	11.5	11.0	20.5
	N	% daf	0.3	2.0	1.1
	S (燃烧性)	% daf	0.7	0.2	0.0
	全硫黄	% db	0.6	0.2	0.1
	HGI	-	56	49	未測定
	灰流動温度(還元)	°C	1470	1330	1230
灰組成	SiO ₂	%	58.2	50.0	39.5
	Al ₂ O ₃	%	20.8	22.8	15.3
	Fe ₂ O ₃	%	8.9	11.1	13.5
	CaO	%	1.9	2.6	14.4

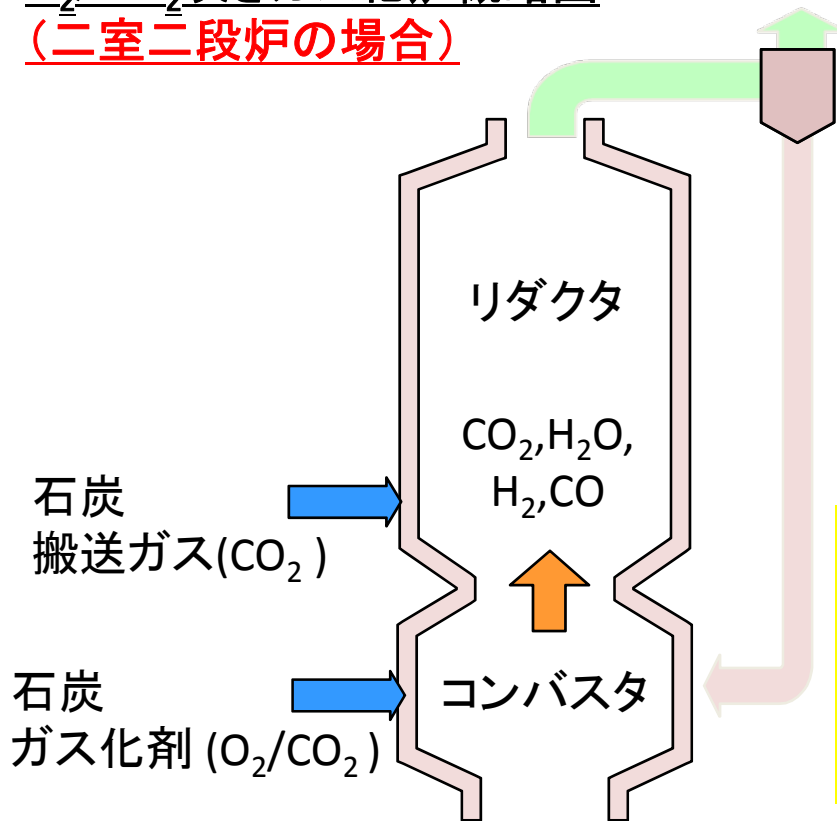
* 到着ベース

中国炭およびインドネシア炭を基準炭として設定し、石炭やチャーのサンプルを共有化。

(2) O₂/CO₂吹き石炭ガス化反応

(a)概要

O₂/CO₂吹きガス化炉概略図 (二室二段炉の場合)



O₂/CO₂吹きガス化炉の特徴

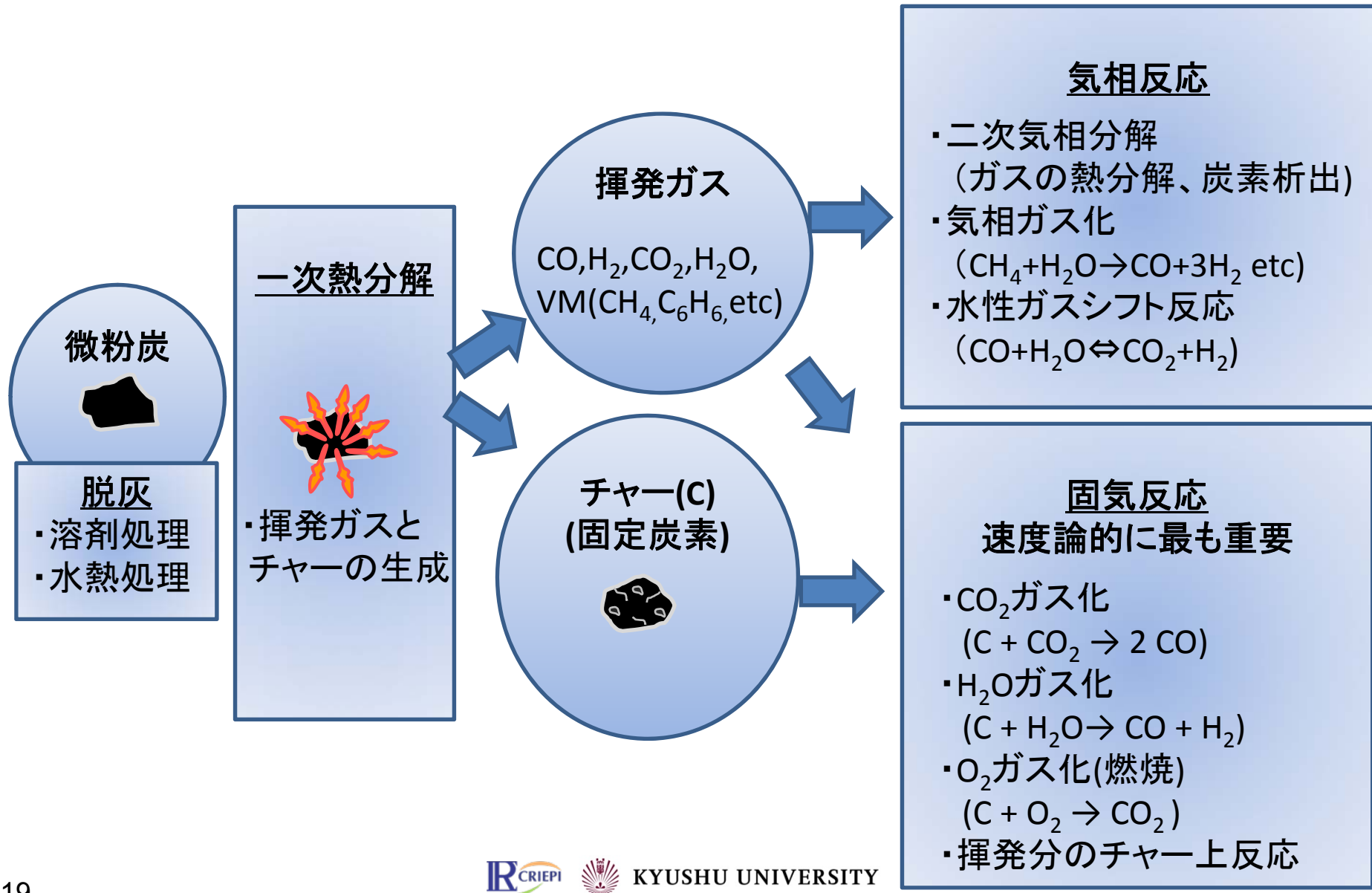
CO₂分圧(濃度)が高い

- ・チャーガス化反応速度の向上
- ・N₂以外のガス濃度の増加
- ・モル比熱の増加

要検討項目

- ・石炭の熱分解、タールの改質
- ・チャーガス化反応速度の定量的評価
- ・各種反応への効果の把握
- ・スラグ排出性および灰付着性への影響評価

石炭ガス化反応の概要



O₂/CO₂ガス化における検討のポイント

●コンバスタ

- ✓ 装入石炭と循環チャーの部分酸化の進行状況解析と促進
- ✓ スラグの円滑溶出

●リダクタ

- ✓ 装入石炭のガス化状況解析と促進
 - ・ 熱分解揮発分の形成、改質
 - ・ 熱分解チャーのガス化 (O₂, H₂O, CO₂)
 - ・ チャー(灰分)の壁付着防止

●石炭熱分解の解明

- DTF(常圧、加圧)
 - TGA(常圧、加圧)
 - 実機
- ⇔ 霧囲気、温度・・・リダクタに近似、滞在時間
⇔ リダクタ内高さ方向での変化を注視
- ・ 急速反応であることに留意
- 反応器による差異にも留意

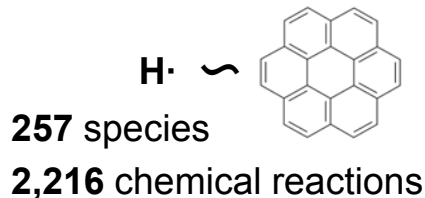
熱分解物とその反応
チャーの形成 = 条件依存の解明

(b) 石炭の熱分解 1

リダクタにおける揮発成分の改質特性解明

現状 リダクタにおける初期反応＝迅速熱分解によって発生した揮発成分の転換特性、反応機構には不明な点が多く、明確な根拠に基づく反応シミュレータへの組み込みは困難。

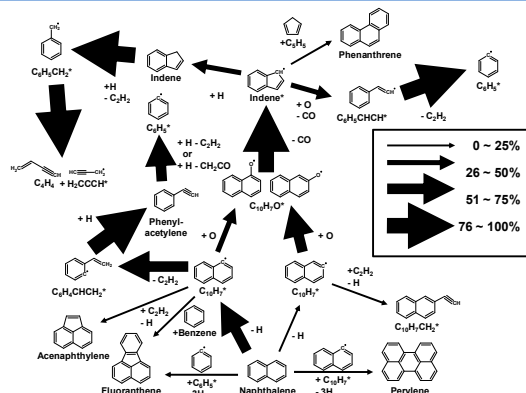
詳細化学反応モデル構築



適用・検証 ← 改良

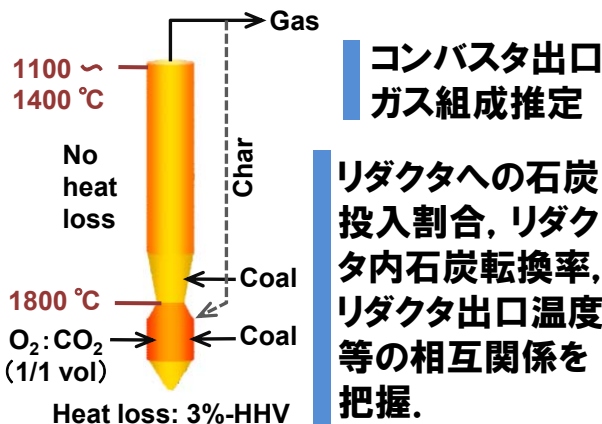
モデル反応系シミュレーション

①炭化水素熱分解②ナフタレン水蒸気改質③COG部分燃焼改質



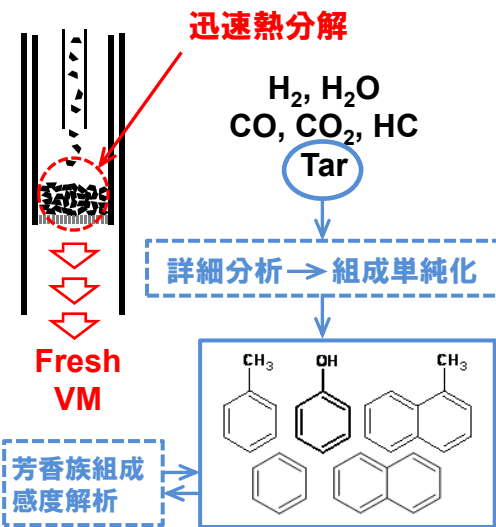
芳香族分解の主要素反応を見出した
(スス生成経路組込は今後の課題)

二室二段噴流床ガス化物質・熱収支検討(大同炭)



迅速熱分解(大同炭)

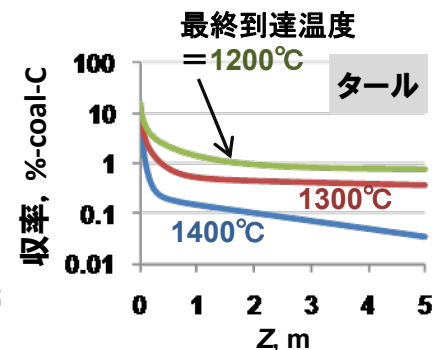
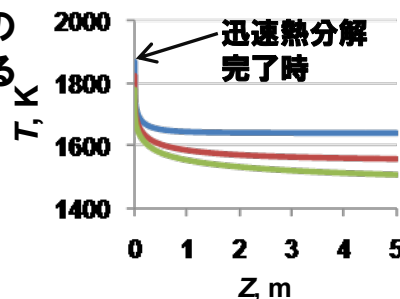
ドロップチューブ・固定床反応器



揮発成分改質反応シミュレーション

1~2環芳香族由来のPAHが中間体となる改質機構

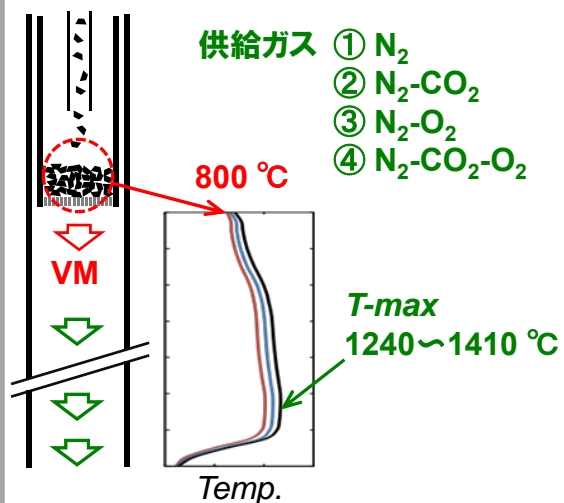
最終温度 < 1300°C ではPAH残留. スス生成の可能性大.



(b) 石炭の熱分解 2

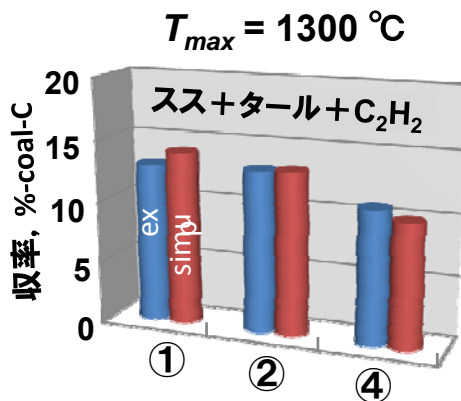
スス生成とチャー表面におけるタール分解

気相反応による揮発成分 *in-situ* 転換特性



ドロップチューブ・固定床／管型二段反応器

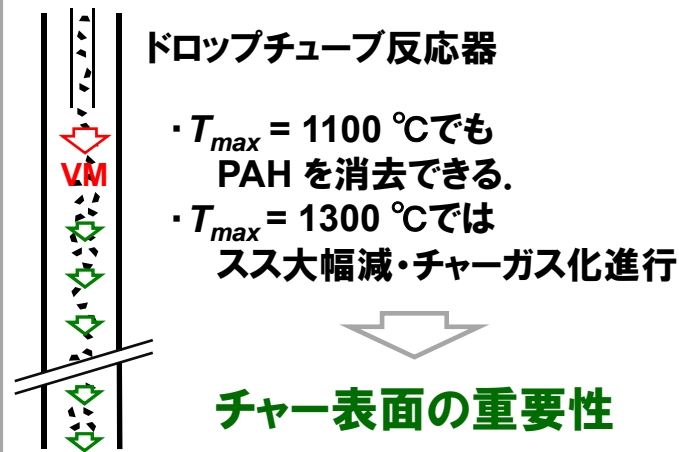
タール・炭化水素の大部分がススに転換



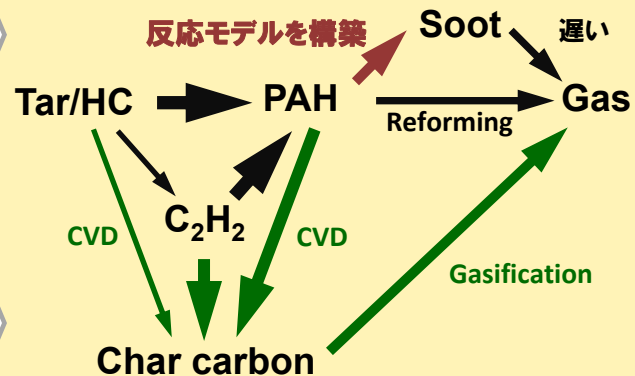
$T_{max} \leq 1300\text{ °C}$

- ・スス生成が支配的
- ・芳香族改質は遅い
- ・CO₂の効果小

チャー粒子存在下の揮発成分 *in-situ* 転換特性

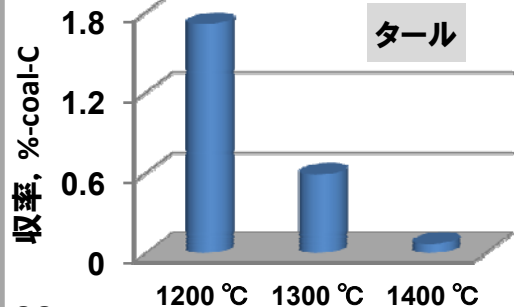


タール・炭化水素転換経路



スス生成抑制とチャー表面における揮発成分迅速分解が、ガス化迅速化・低温化の鍵

タール収率の温度依存性



$T_{max} \leq 1400\text{ °C}$

- ・ベンゼン・ナフタレン: 消失
- ・PAH: 残留 (シミュレーションと定性的に一致)

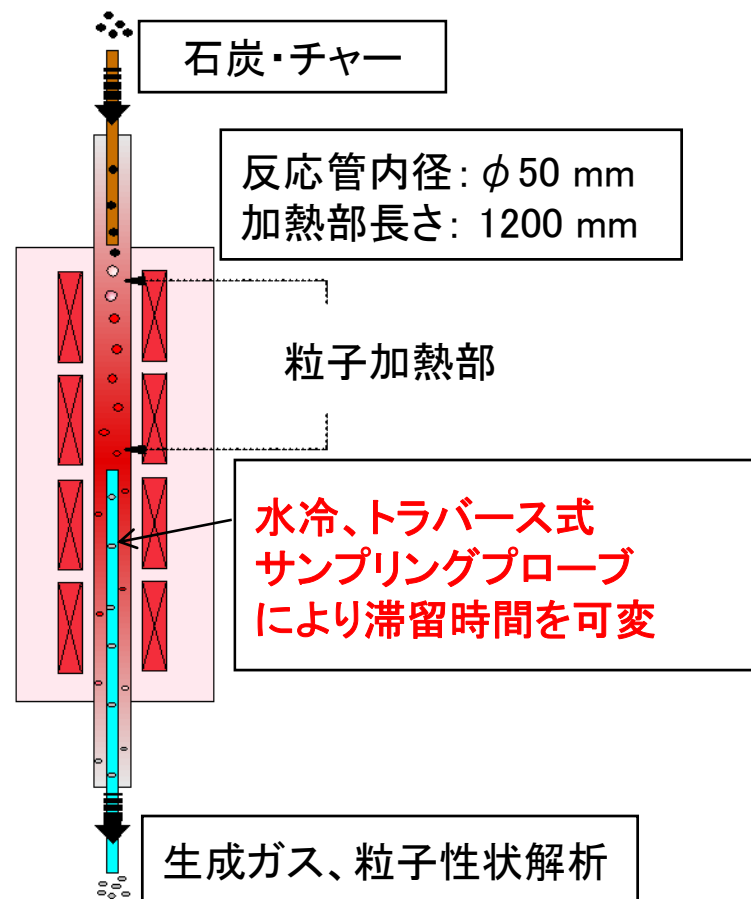
(C) チャーのガス化 ガス化反応速度モデルの開発

目的

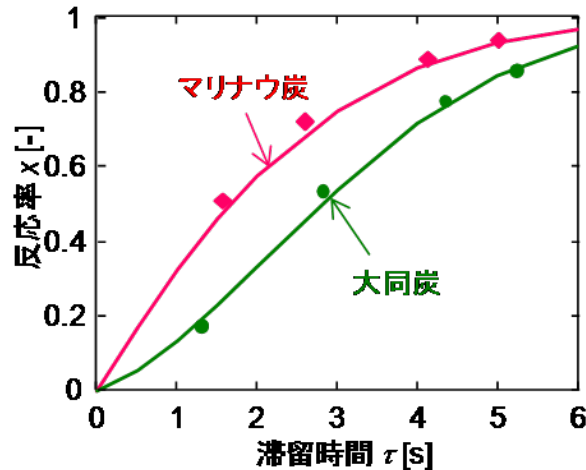
基準炭を対象として、加圧型ドロップチューブファーンレス(PDTF)などを活用し、高温加圧下での高濃度CO₂に対するチャーのガス化反応速度を解明する。

実施内容

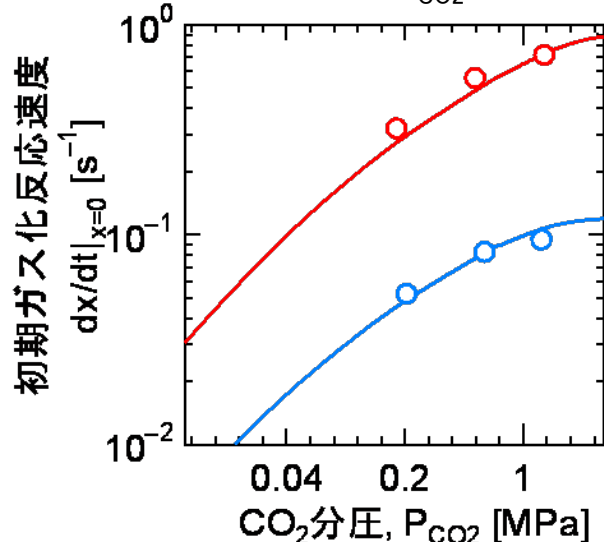
- ・大同炭(DT)およびマリナウ(MN)炭の高温熱分解チャーの調製(基準チャー)
- ・各チャーのCO₂ガス化および水蒸気ガス化における高温加圧ガス化実験
- ・高温加圧下での高濃度CO₂によるガス化に適用可能なチャーガス化反応速度モデルの検討と各パラメータの決定



ガス化反応速度およびCO₂分圧の影響

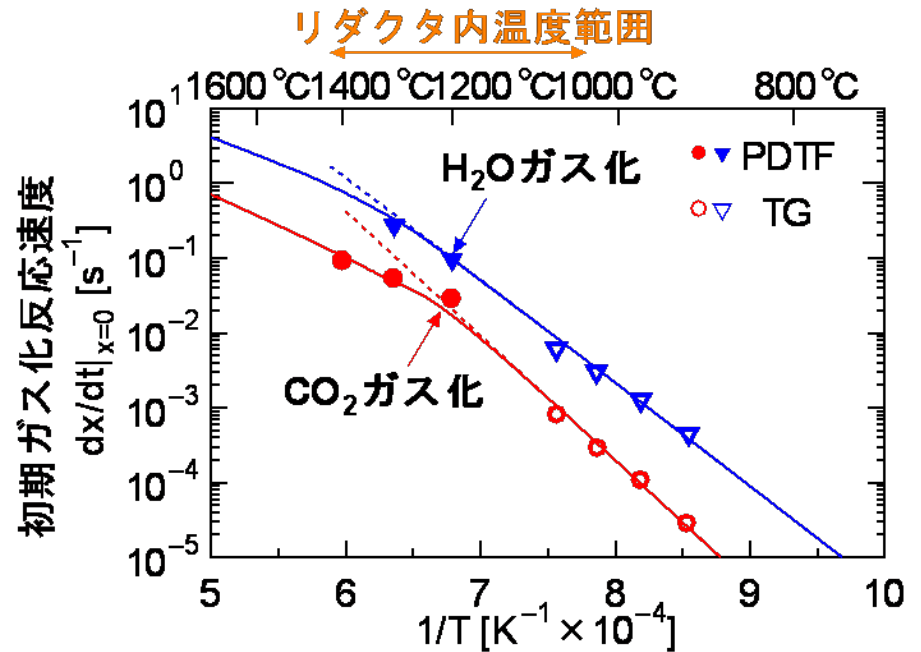


PDTFによるチャーのCO₂高温ガス化
(1300°C, 全圧:1.0MPa, P_{CO2}:0.2MPa)



CO₂分圧の影響

(全圧:1.0-2.0MPa, MN炭:1330°C, DT炭1300°C)

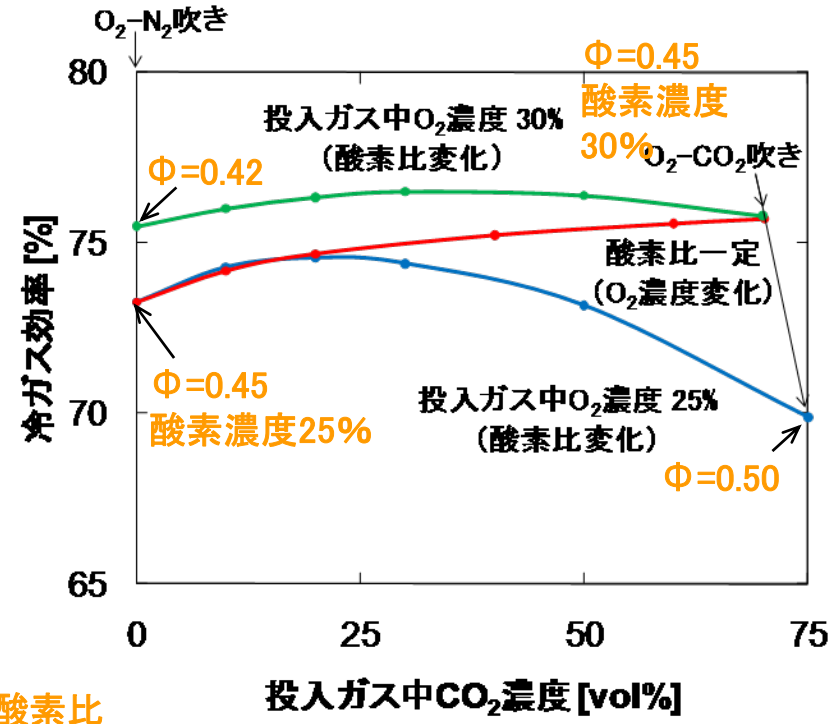
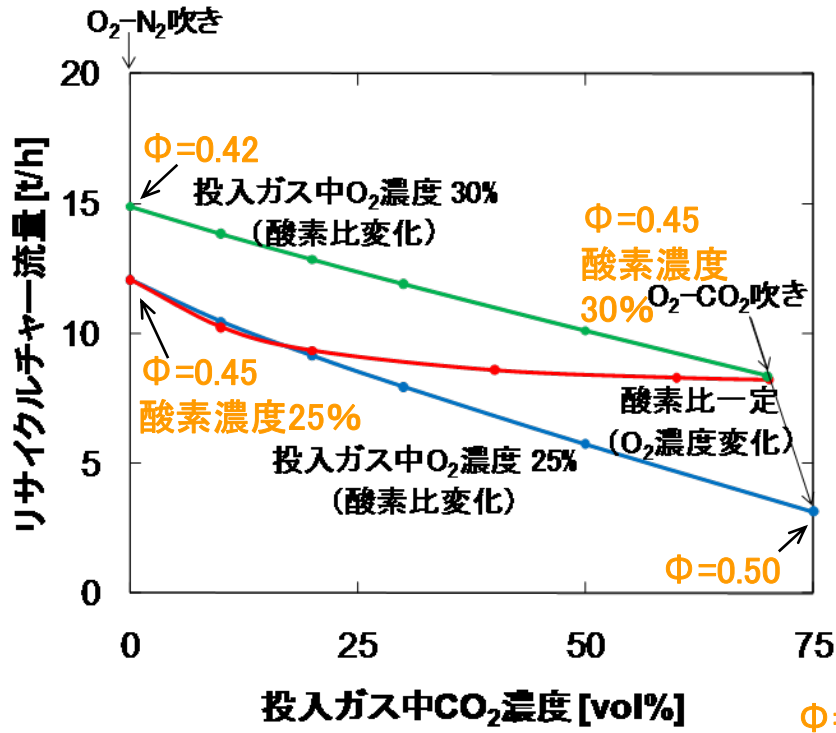


大同炭チャーのガス化反応速度
(P_{CO2} = 0.2 MPa, P_{H2O} = 0.2 MPa換算バランス:N₂)

チャーのガス化反応速度: MN炭 > DT炭
高CO₂分圧における反応速度の
分圧依存性は、MN炭の方が大きい。

ガス化反応速度式⇒シミュレータへ導入

ガス化炉性能の一次解析結果



実験から構築したマリノウ炭のガス化反応速度モデルを用いて、二段噴流床ガス化炉の一次元解析を行った。コンバスタ温度を1800℃一定となるように酸素比または酸素濃度を変化させ、最適化した。今後、三次元解析や研究炉試験結果と合わせ、精度を高めた検討を行う。

酸素比一定で酸素濃度を増加することで、ガス化炉温度を維持し、CO₂投入量の増加とともにガス化炉性能の向上が可能であることを明らかにした。

→今年度下期に3トン/日小型炉で実験検証予定

チャーの詳細な把握について

●ガス化するチャーの構造・反応性

- ・リダクタ装入部での熱分解
- ・雰囲気による変化
- ・炭種による変化(石炭化度、鉱物、水分)

●チャーの比較、生成雰囲気、温度、昇温速度

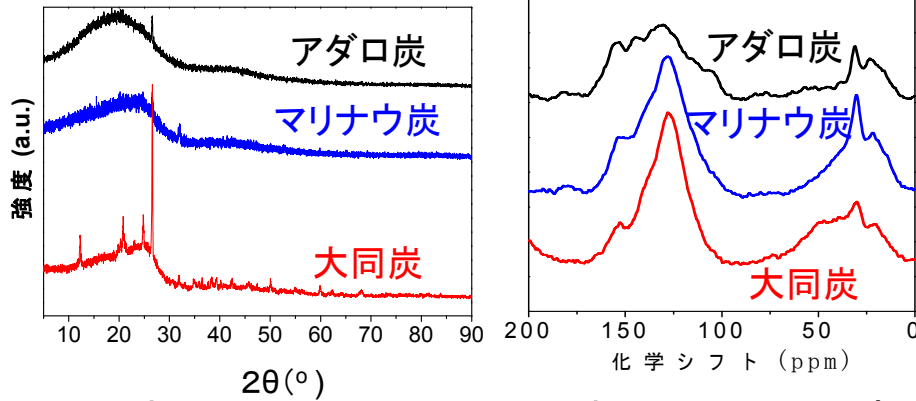
窒素 vs CO_2 、 H_2O 、 O_2

●チャーの比較、構造、反応性

- ・DTF窒素中
- ・DTF $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ (温度)
- ・2ton炉、20ton炉、200ton炉の循環チャーの比較

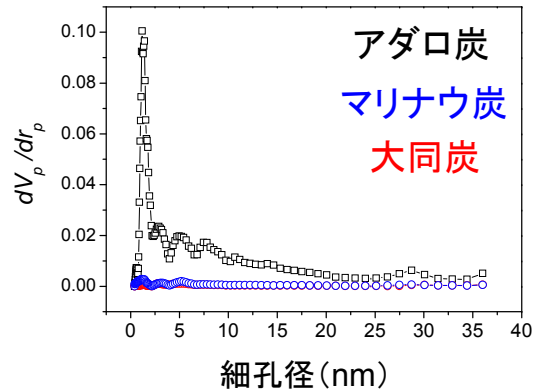
石炭構造や灰分が反応性へ及ぼす影響の解明

ガス化用石炭およびそのチャーの構造と反応性



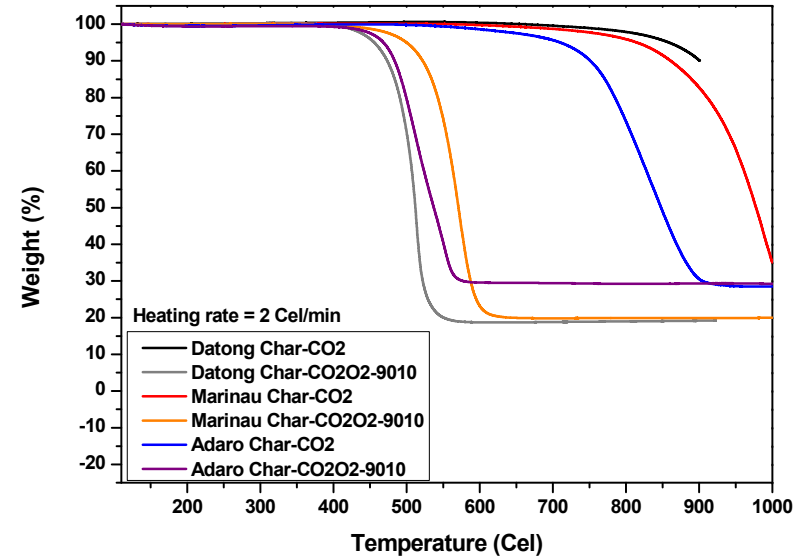
石炭のXRD分析

石炭の ^{13}C -NMR分析



チャーの細孔径分布

- 大同炭は、酸素の含有量(特に芳香族酸素含有量)、アルキルが少なく、また、黒鉛化性と積層性が高い。
- 大同チャーとマリナウチャーは細孔性を示さず、アダロチャーはメソ細孔性を示した。



TGによるチャーのガス化反応性

純CO₂ および CO₂ 90%-O₂ 10%

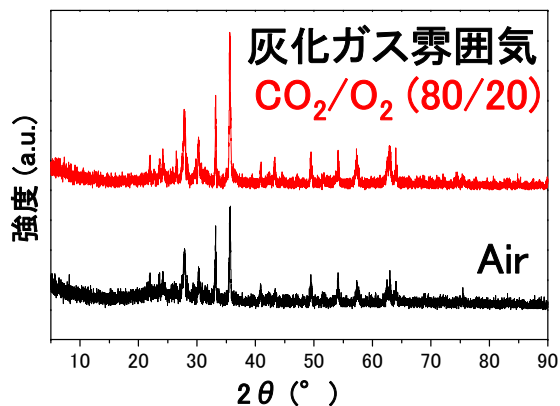
大同、マリナウ炭の違いが明らか

⇒実験、大型パイロット、ベンチ、
ガス化炉で生成するチャーの解析

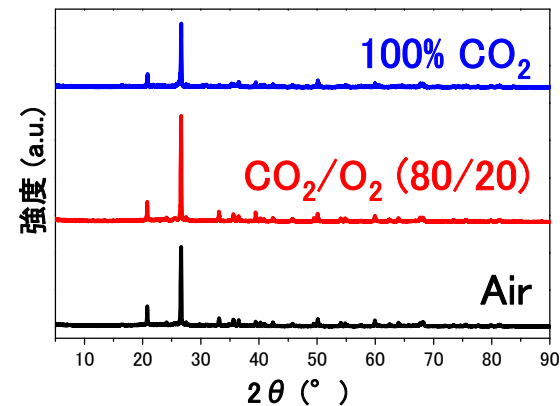
(3) ガス化炉における灰の挙動

灰化ガス雰囲気気石炭灰構造に与える影響

マリノウ炭1200°C灰化灰

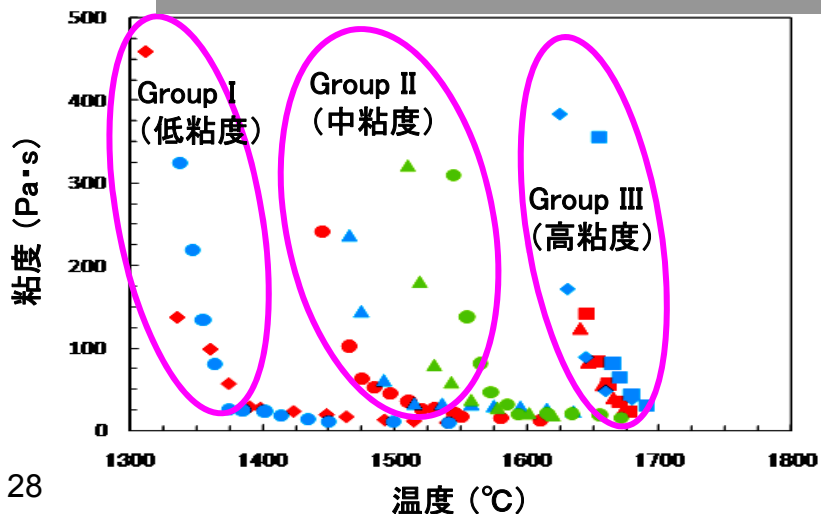


大同炭1000°C灰化灰



CO₂リッチ雰囲気でも
灰の構造および組成に
大きな違いは見られなかった。

B/A比からの基準炭の粘度特性の予想

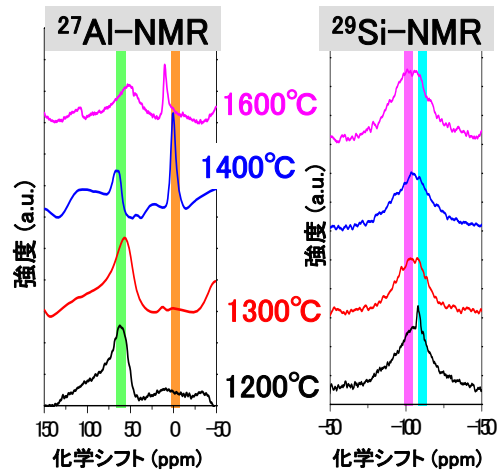
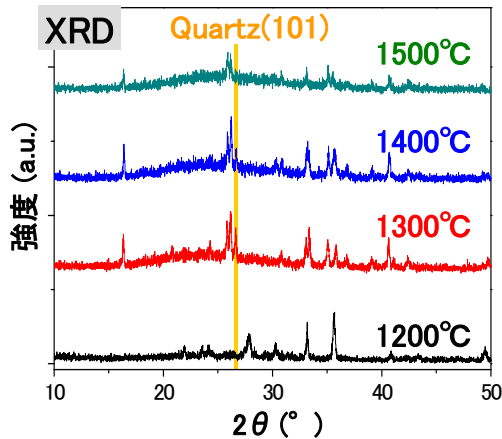


- ・石炭灰の温度-粘度特性の文献値をプロットすると大きく3グループに分類できた。
- ・灰アルカリ率(B/A比)からは、
 - マリノウ炭はGroup I(低粘度)
 - 大同炭はGroup II(中粘度)に属すると予想された。

ガス化用石炭中の灰・スラグ粘性と構造

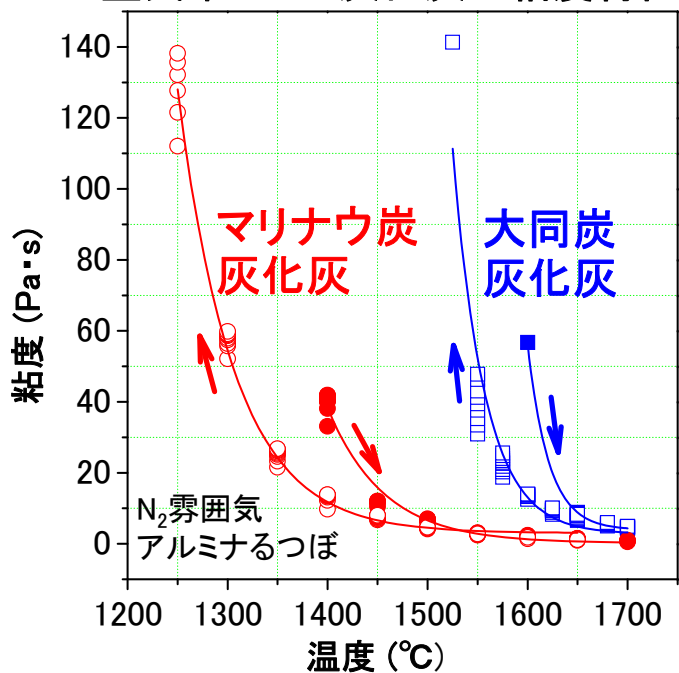
マリノウ炭灰化灰

1300°C付近で変化



- ・XRD、NMRにおける灰の構造と粘度の変化温度に相関あり
- ・HTC法での均一融体温度とも相関

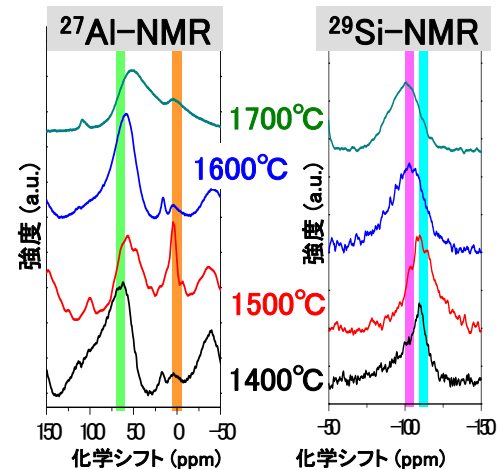
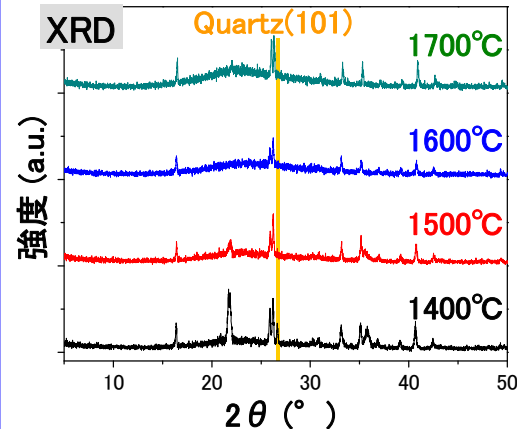
空气中815°C灰化灰の粘度特性



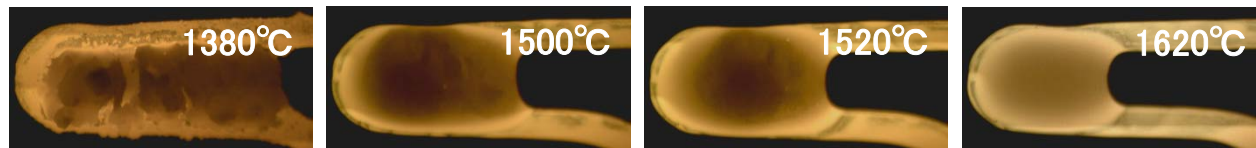
⇒繊維状スラグ形成シミュレーション
⇒セルフコート形成シミュレーション

大同炭灰化灰

1600°C付近で変化



ホットサーモカップル(HTC)法による大同炭灰の溶融挙動観察 (850°C, 5h, 大気中で灰化)

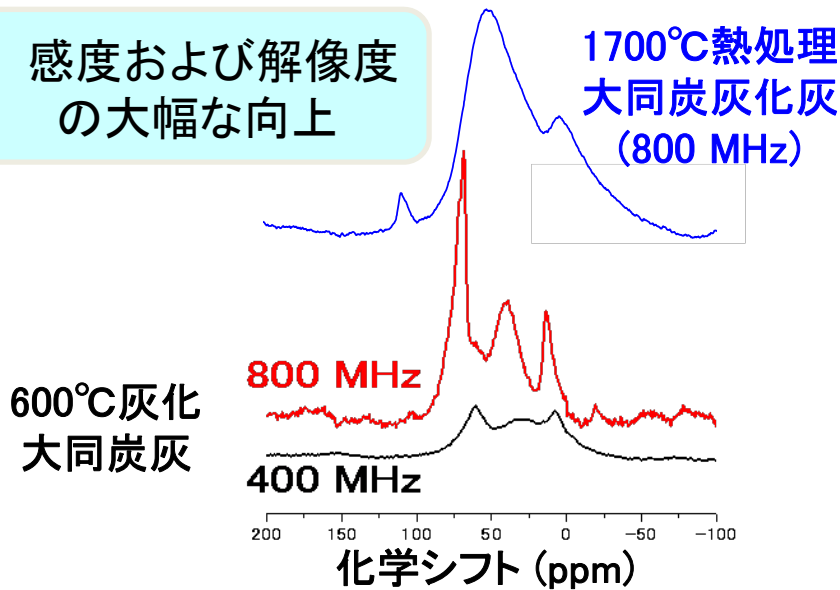


	マリノウ炭	大同炭
均一融体形成温度	1500°C	1620°C

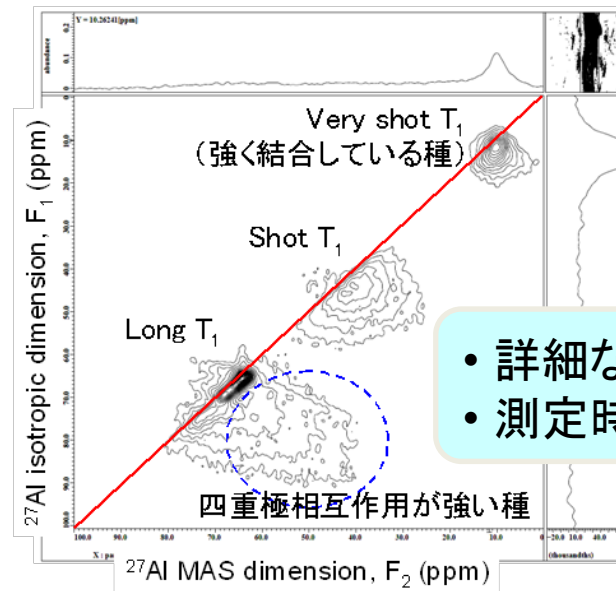
800 MHz固体NMRによる灰・スラグの構造分析結果

一次元²⁷Al-固体NMRスペクトル

感度および解像度の大幅な向上



二次元²⁷Al-固体NMRスペクトル



- 詳細な局所構造情報
- 測定時間の大幅な短縮

【これまでの成果】 スラグ中の鋳物定量同定に向けた装置調整を進め、解像度の大幅向上を確認し、詳細な局所構造情報の取得に目処

今後の研究のポイント

- 800 MHz固体NMR、高温DSC、高温ラマン、高温XRD、ホットサーモカップル法を駆使し、多角的、多面的に石炭灰の構造と熔融・流動・固化特性との相関を解析する。
- 実測粘度データをシミュレーションに反映し、流動挙動を推測する。これらの結果を、炭種適合性評価および操業条件評価に資する。

基本ガス化反応に関する成果のまとめ

気相反応

リダクタにおける揮発分の改質特性の解明

成果

・揮発分の気相改質反応における素反応を考慮した**詳細化学反応モデルを構築し、妥当性を評価した。**

今後の予定

・スス生成モデルを検討し、リダクタ部でのガス化特性予測モデルを構築する。

固気反応（チャーガス化反応）

ガス化反応速度モデルの開発

成果

・基準炭チャーの高分圧CO₂による高温ガス化実験を行い、**ガス化速度式と速度パラメータを決定し、数値解析へ導入した。**

今後の予定

・水蒸気ガス化速度や障害反応速度の未確定分を決定する。

各種ガス化剤の相互作用の解明

成果

・O₂とCO₂が共存する雰囲気において、チャーのO₂ガス化反応はCO₂ガス化反応を促進する可能性を見出した。

今後の予定

・反応促進挙動の詳細や、炭種依存性について検討する。

石炭構造や灰分が反応性へ及ぼす影響の解明

成果

・基準炭を含め**各種石炭を分析し、石炭構造と反応性の相関を見出した。**

今後の予定

・チャーの組成と構造の面から、ガス化反応を促進する方法を検討する。

灰物性

ガス化炉における灰の物性・挙動の解明

成果

・基準炭の灰化灰を各種雰囲気で調製し、**構造分析とスラッグ粘度特性の測定を行った。**

今後の予定

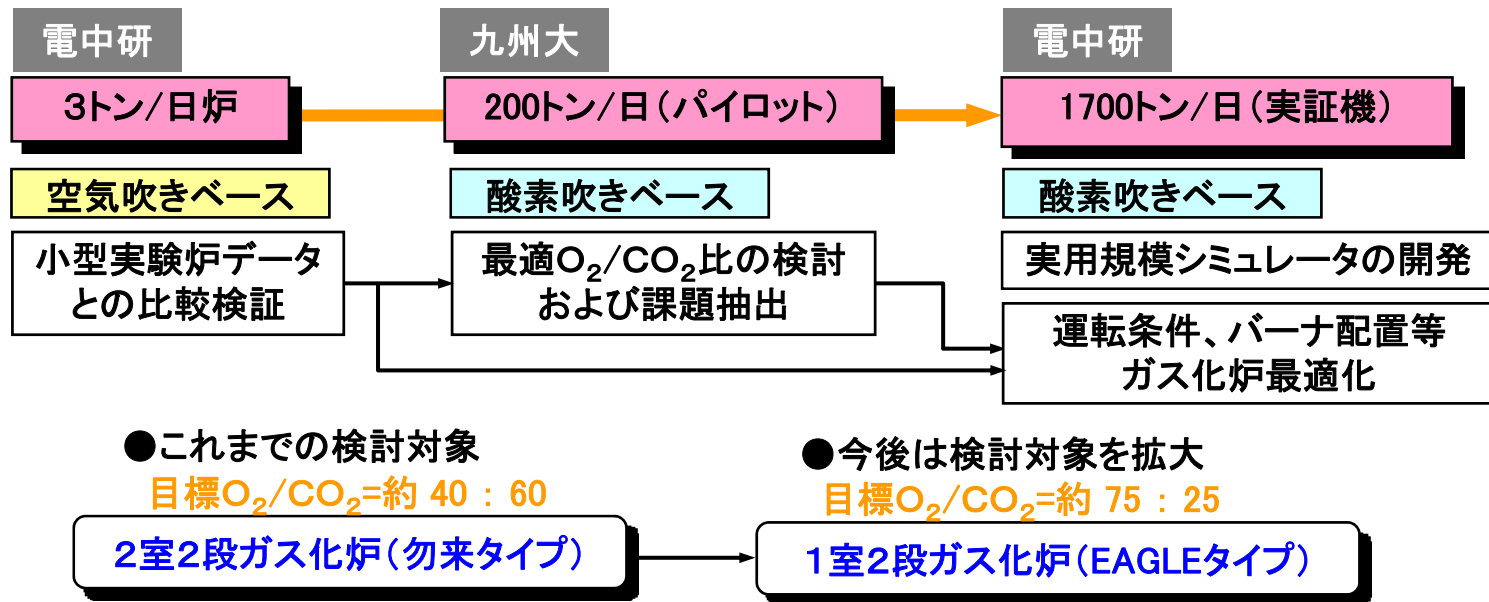
・データをさらに蓄積し、スラッグ粘度を精度よく予測する推算式を構築する。

数値解析によるガス化炉最適化検討

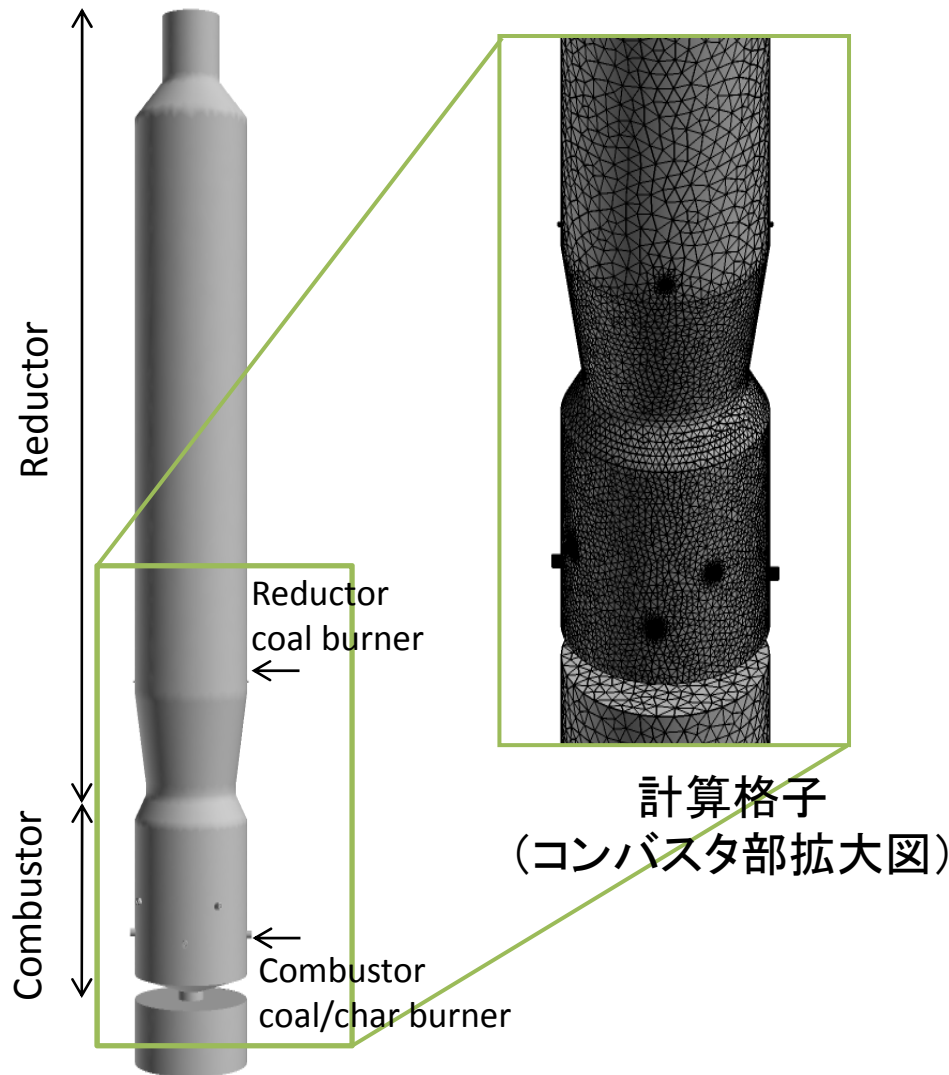
空気吹きガス化炉開発、スケールアップの歴史に学ぶ

- ・2トン炉におけるシミュレーター開発と取得データの装入(電中研)
- ・200トン炉の空気吹きシミュレーターを O_2/CO_2 吹きに変換(九州大学)
⇒2トン炉における取得データを共用してスケールアップ精度の確認
⇒プロセス性能の改善、障害抽出・改善の方向性、
感度分析、2トン炉運用フィードバック
- ・大規模計算用ガス化シミュレーションの開発(電中研)

数値シミュレーション技術の開発フロー



解析対象



計算領域

2段噴流床ガス炉
O₂-CO₂吹きケース
(N₂投入なし)の検討

実機規模石炭ガス化炉

ガス化炉形式	2室2段噴流床
全高 / コンバスタ内径	6.74

供試炭(大同炭)性状

固有水分	3.9 wt%
灰分	10.7 wt%
揮発分	26.2 wt%
固定炭素	59.2 wt%
発熱量	28.5 MJ/kg

解析条件 (圧力:3MPa、石炭投入量:1680 t/d)

酸素比一定で、O₂/CO₂比を変化

項目	単位	case1	case2	case3	case4	case5
酸素比	-	0.45				
搬送ガス流量	t/h	11.2				
CO ₂ 濃度	vol%	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0
N ₂ 濃度	vol%	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ガス化剤流量	t/h	270.5	270.5	387.2	197.2	154.0
O ₂ 濃度	t/h	77.7	77.7	77.7	77.7	77.7
CO ₂ 濃度	t/h	0.0	192.8	309.5	119.5	76.3
N ₂ 濃度	t/h	192.8	0.0	0.0	0.0	0.0
全投入ガス流量	t/h	281.7	281.7	398.4	208.4	165.2
O ₂ 濃度	vol%	25.0	34.4	25.0	45.0	55.0
CO ₂ 濃度	vol%	0.0	65.6	75.0	55.0	45.0
N ₂ 濃度	vol%	75.0	0.0	0.0	0.0	0.0
備考		空気吹き (ベース)	Case1の N ₂ →CO ₂	O ₂ 一定 CO ₂ 増	O ₂ 一定 CO ₂ 減	O ₂ 一定 CO ₂ 減

炉内流動状況

case1

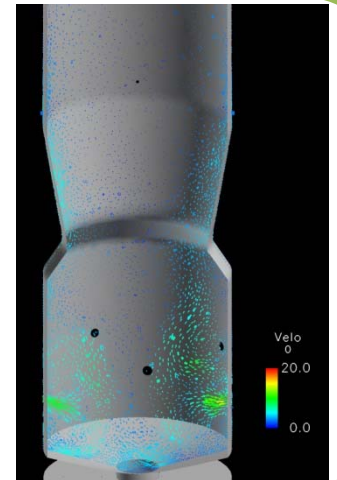
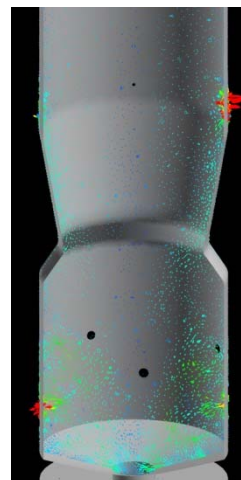
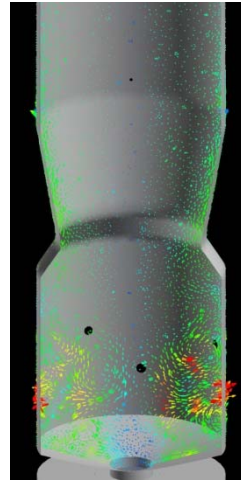
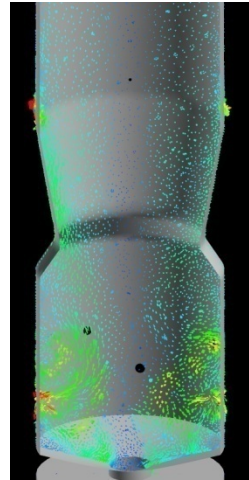
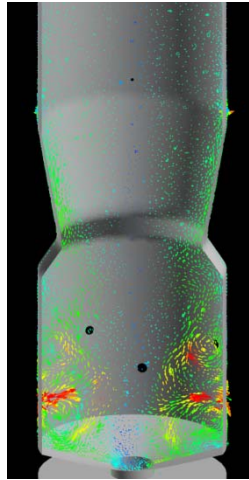
case2

Case3

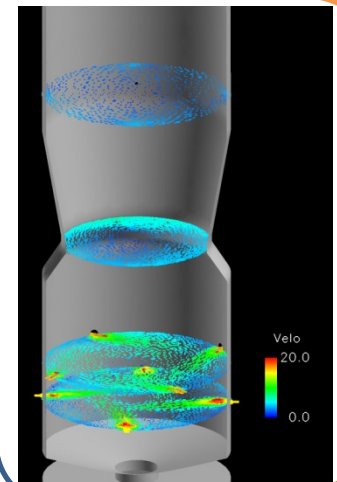
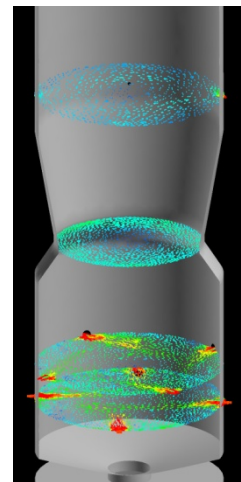
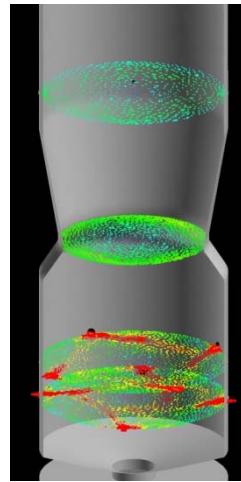
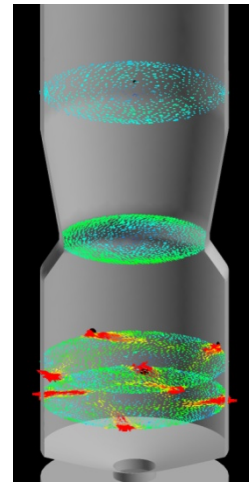
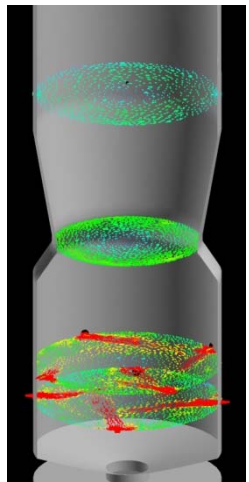
case4

case5

垂直断面

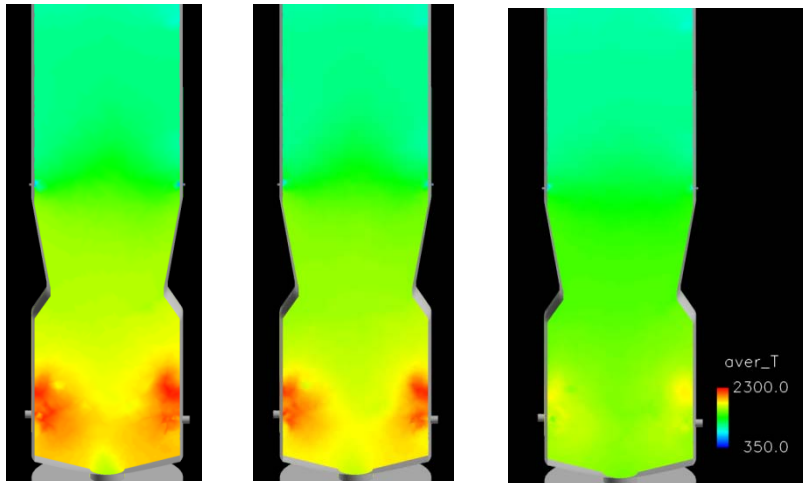


水平断面



投入ガス量の少ないcase4、5では旋回流が弱くなる。

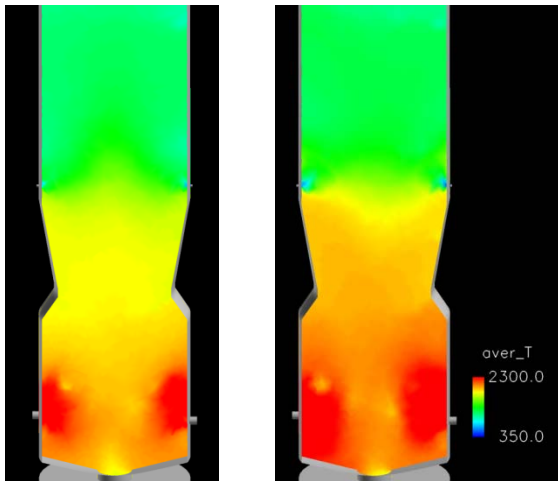
炉内温度分布



case1

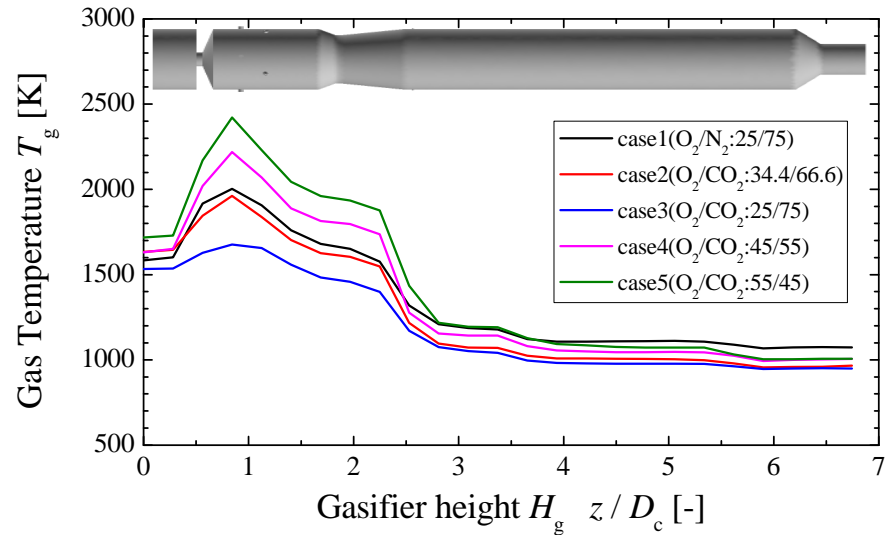
case2

case3



case4

case5



CO₂ 投入量により、コンバスタ部ガス温度が大きく変化する。

→酸素比の低減等により、コンバスタガス温度や炉内流動の最適化を図り、ガス化性能を評価する(今年度下期完了予定)

O₂/CO₂ガス化において～操作改善の方向

●コンバスタ

- O₂/CO₂組成の最適化(ガス温度の維持)
- 飛出チャーの削減(反応促進と炉内流動の最適化)

●リダクタ

- コンバスタからのガス温度と組成
- 炉壁からの放熱と石炭の熱分解、改質、
ガス化で温度、組成変化
- 石炭の熱分解、揮発分改質の進行
- チャーのガス化の進行促進
- 冷ガス効率の向上

●総合

- 2室2段炉、1室2段炉の比較・検討

3. 高CO生成ガスの脱硫・燃焼

①高CO条件における乾式ガス精製の最適化

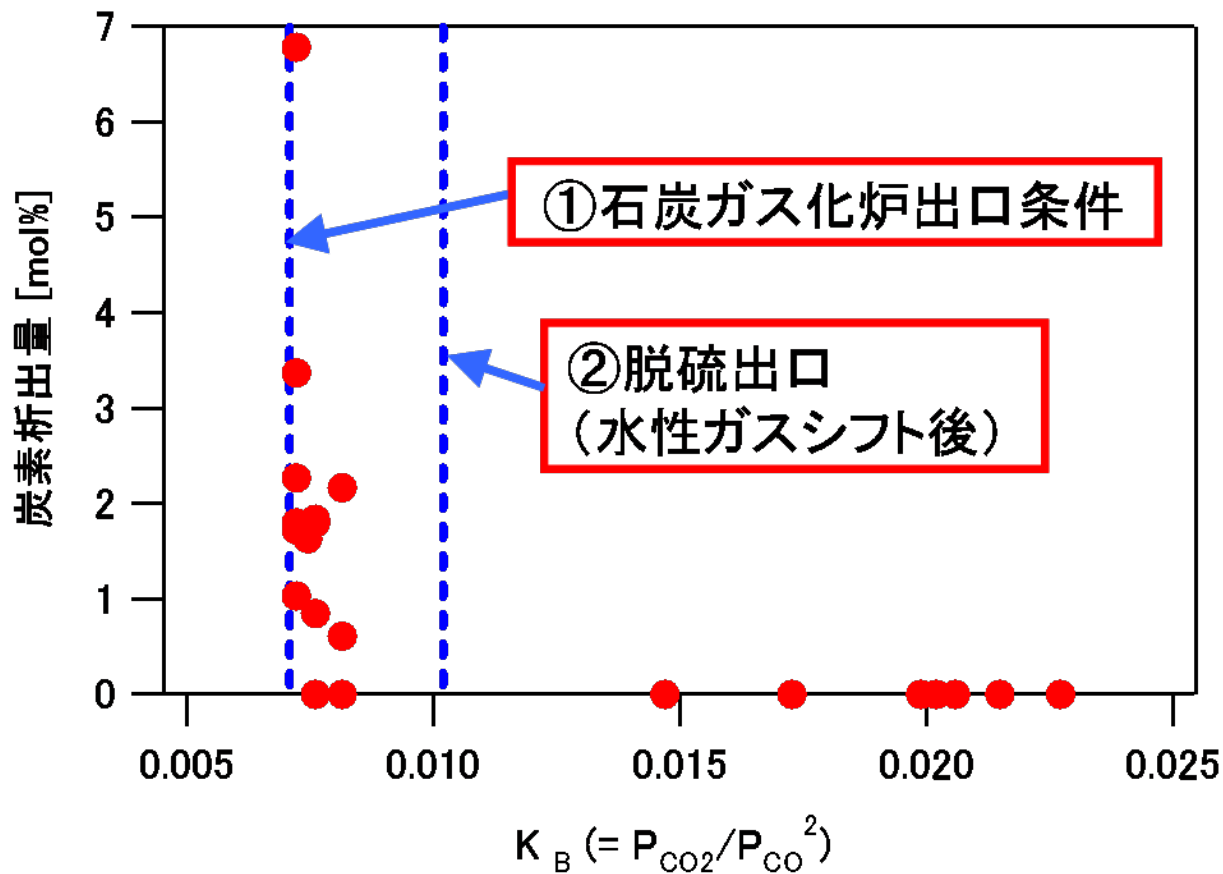
•目的:

高分圧CO条件における乾式ガス精製システムの最適化を目指し、高分圧のCO条件下で脱硫性能および炭素析出抑制を両立させる適切な反応条件を検討すると共に、小型ガス化炉から発生する実ガスを用いて、ガス精製装置の基本性能を実証する。

炭素析出、および並行する可能性がある化学反応

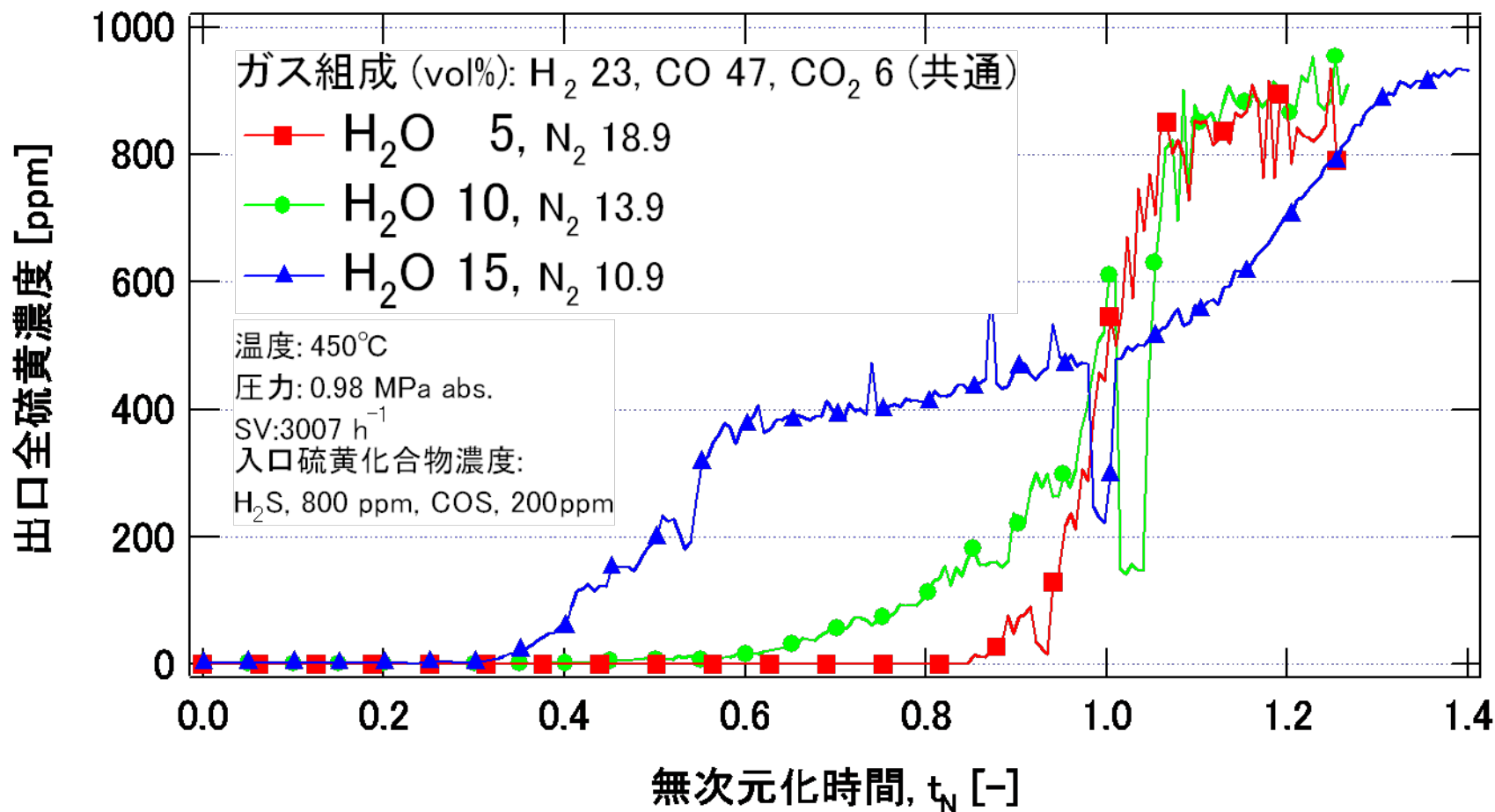
- Boudouard反応: 炭素析出の主反応と考えられる。
 - $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ $K_B = P_{\text{CO}_2}/P_{\text{CO}}^2$
 - 水性ガスシフト反応(WGS)
 - $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
 - メタン生成(メタネーション):
 - $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$
 - メタンの改質:
 - $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
- Boudouard反応に関与するCOとCO₂の分圧比、K_Bに着目して条件設定した。

試験結果：分圧比と炭素析出量の関係（400～450℃）



水蒸気濃度の脱硫性能への影響: 450°C, 0.98MPa abs

いずれも炭素析出は発生していない

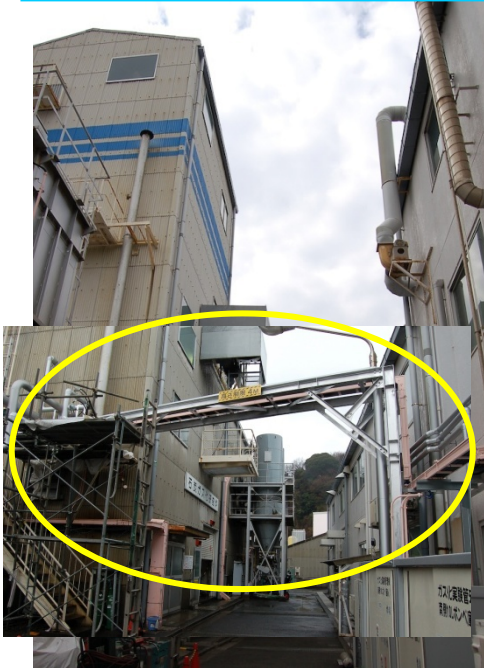


□ 水蒸気濃度が増えると脱硫性能を低下させる。

ハニカム脱硫剤の実ガス性能評価

石炭ガス化研究炉
生成ガス供給設備

高CO濃度条件脱硫剤評価装置

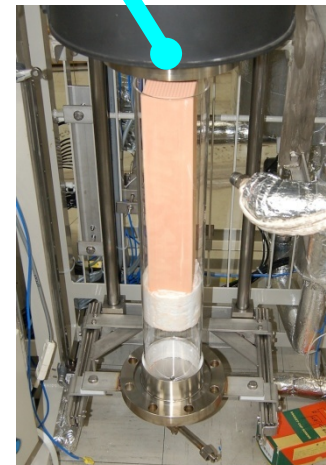


実ガス供給



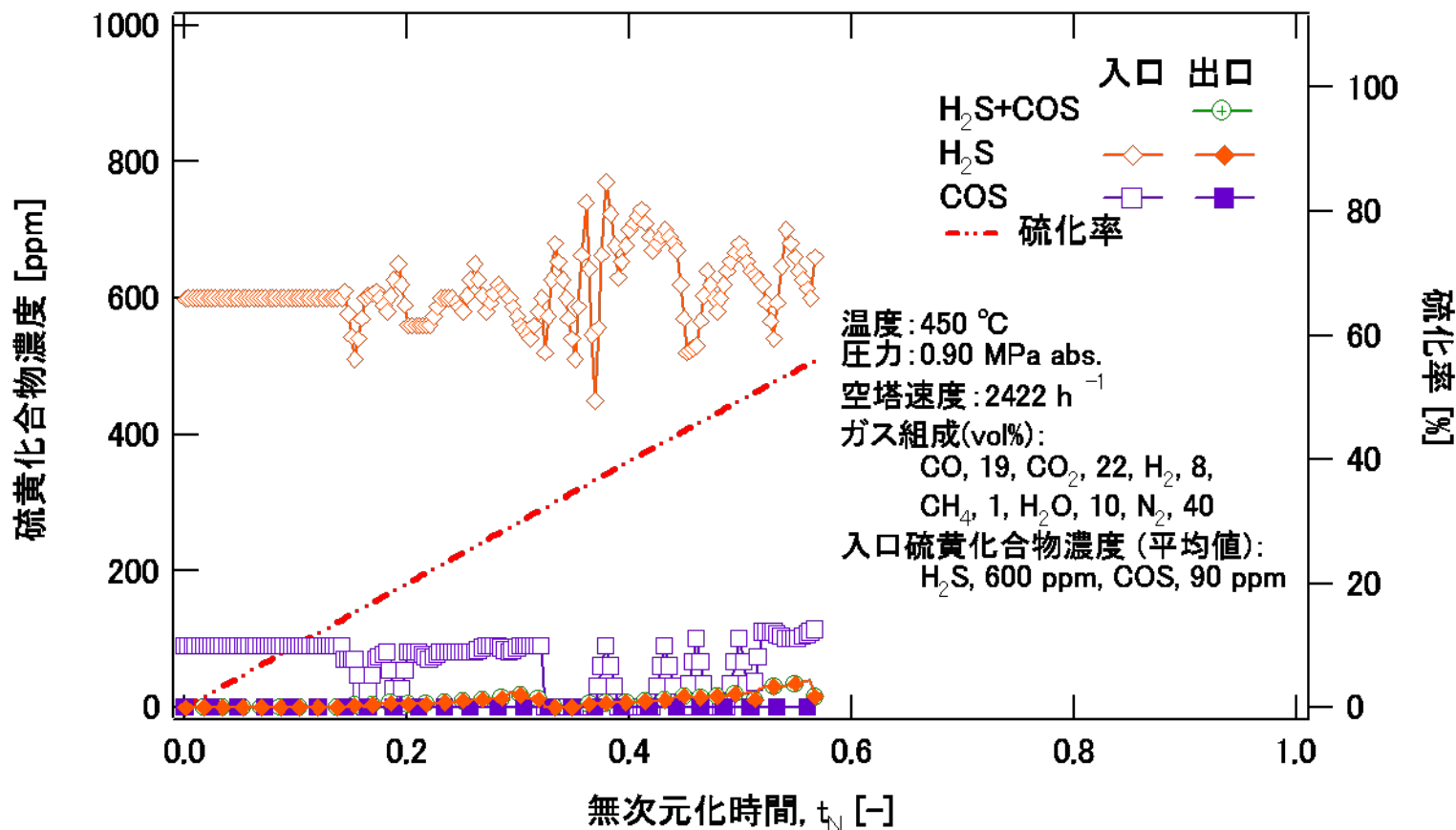
充填

ハニカム脱硫剤
性能データ



ハニカム脱硫剤

実ガスによるハニカム脱硫剤の性能試験



- 流入する $H_2S \doteq 700$ ppmと $COS \doteq 100$ ppm
- 脱硫剤出口の硫黄化合物濃度を1 ppm以下に低減可能

乾式ガス精製 まとめ

- 水蒸気濃度と温度をパラメーターに評価したところ、450°C、0.98MPa absでは、Boudouard反応の分圧比(K_B)が0.01以下になると顕著な炭素析出が起こり脱硫性能低下を招くことが明らかになった。
- 水蒸気濃度の増加により、 K_B を炭素析出が回避できる0.015程度まで増大させ、脱硫性能との両立を図れる炭素析出抑制の運転条件を見出すことができた。今後は、水蒸気添加量と反応温度をシステム全体の効率を考慮して最適化する必要がある。
- O_2 - CO_2 ガス化の実ガスによるハニカム脱硫剤の性能試験を実施し、所期の性能が得られることを確認した。

②ガスタービン燃焼などに関わる基礎検討

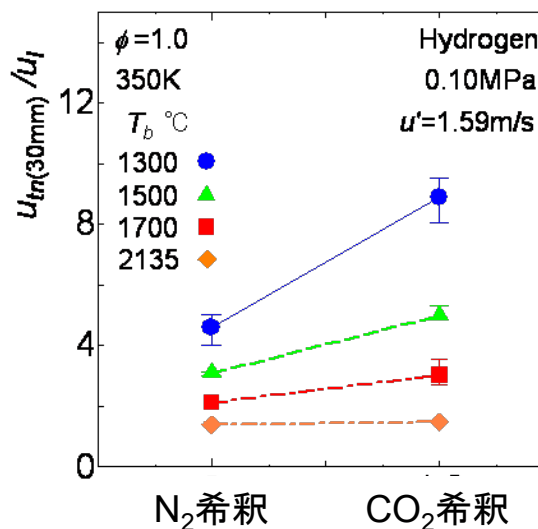
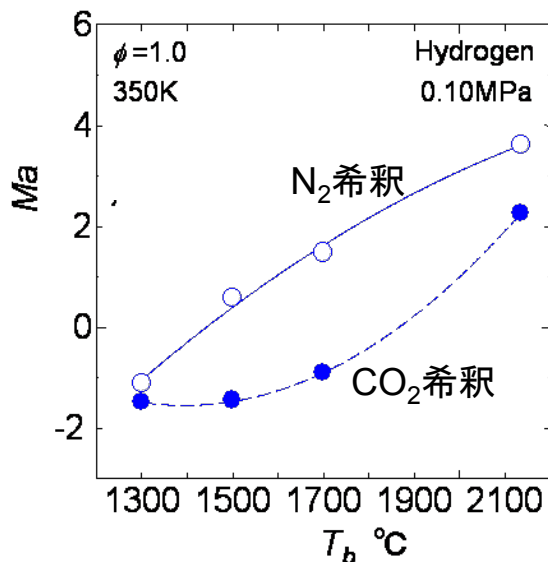
(i) COリッチ生成ガスの燃焼性と燃焼器

ガスタービン燃焼器での石炭ガス化ガスの燃焼

高濃度CO₂雰囲気下での燃焼

消炎(失火), 燃焼振動などの問題

燃焼安定性を向上には, 高濃度CO₂雰囲気下での火炎の特性・挙動の把握が必要



N₂希釈との比較によるCO₂希釈時の熱拡散効果
[同一燃焼温度(タービン入口温度)条件]

N₂希釈との比較によるCO₂希釈時の燃焼性検討
[同一燃焼温度(タービン入口温度)条件]

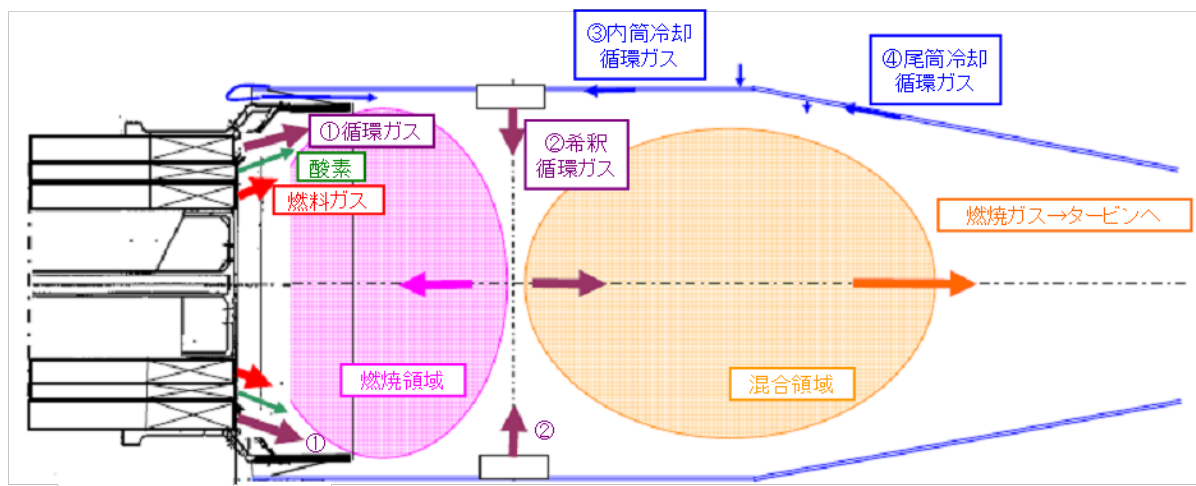
CO₂希釈により, Markstein数 Ma は小さくなる.

CO₂希釈により, 乱流時と層流時の燃焼速度の比は大きくなる.

以上より, 高濃度CO₂雰囲気下での燃焼安定性向上には, 燃焼器内乱流強度の強化が効果的と考えられる.

(ii) ガスタービン燃焼器に関する検討

- ①燃焼方式については、ガスタービンの運用性、逆火、燃焼振動などの観点から、拡散燃焼方式が望ましい。
- ②燃焼器の冷却は、1300℃級の場合、循環排ガスによる冷却が可能と考えられる。
- ③燃焼排ガスの残存O₂濃度は、2%程度が現実的な値と考えられ、ガス化炉石炭搬送等に用いるためには、別途O₂濃度低減方策(0.5%以下)が必要となる。
- ④ガスタービン排ガス温度は、翼冷却技術等の観点から、約700℃が実用化の上
限と考えられる。



ガスタービン燃焼器の概略図

③循環CO₂中の微量酸素の除去

- COと触媒燃焼: Pt/TiO₂で1 MPaCO₂中の0.5 %のO₂を同量のCOで60-100°C除去できる見込み
- 1 MPaCO₂中0.5 %O₂を室温石炭吸着固定を検討する

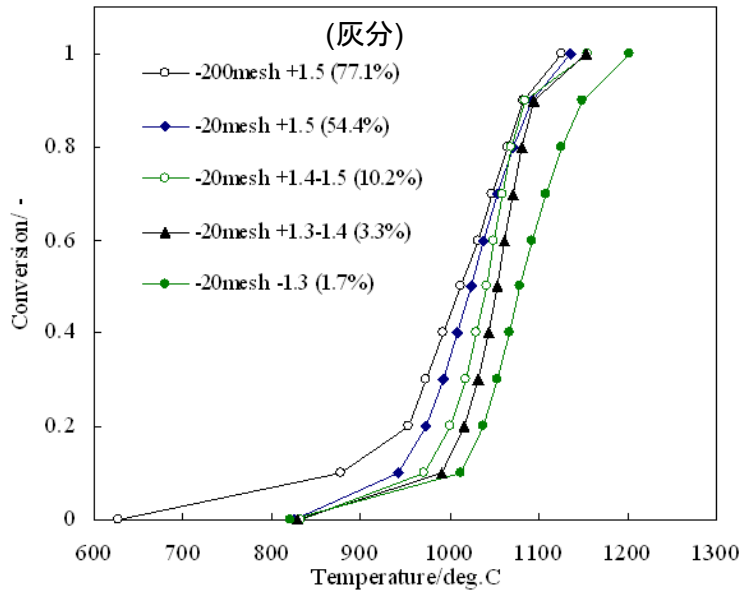
④CO₂循環ガス化におけるCO₂の貯留純度確保

- 酸素中の窒素がCO₂循環により、濃縮CO₂貯留純度を低下させる可能性がある
- OxyFuel に習って、深冷分離によるCO₂の純度向上の必要性を検証

4. アジア地域の多様な石炭への適用基盤技術

- 高灰分高融点灰分を**比重分離選炭**により除去し、噴流層ガス化原料とするフィジビリティ試験
- 褐炭の改質による O_2/CO_2 ガス化反応速度の増強

ガス化反応性に及ぼす灰分の影響



比重分離した大同炭のCO₂ガス化反応性をTGで測定した。

- 重い比重区分ほどイナーチニットが多く、反応性が高い。KやFeが濃縮されており、その触媒作用と考えられる。
- PyriteやQuartzは高比重フラクションに濃縮されている。比重1.5以下の低比重フラクションの石炭質収率94.8%、灰分含有量5.3%で、灰分組成から、低融点が期待できる。

大同炭に含有する元素の触媒作用に関する知見が得られた。

各比重区分のガス化反応性(大同炭)

各比重区分の灰組成 (単位: %)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Ash content
-200mesh +1.50	60.6	21.8	14.2	2.1	1.2	77.1
-20mesh +1.5	51.9	32.3	12.1	2.5	1.2	54.4
-20mesh +1.4-1.5	41.8	49.9	5.7	1.5	1.1	10.2
-20mesh +1.3-1.4	46.8	44.1	5.0	1.0	3.1	3.3
-20mesh -1.3	54.5	37.4	4.0	1.8	2.4	1.7

Recovery of coal % (daf)
94.8%

5.3
(average)

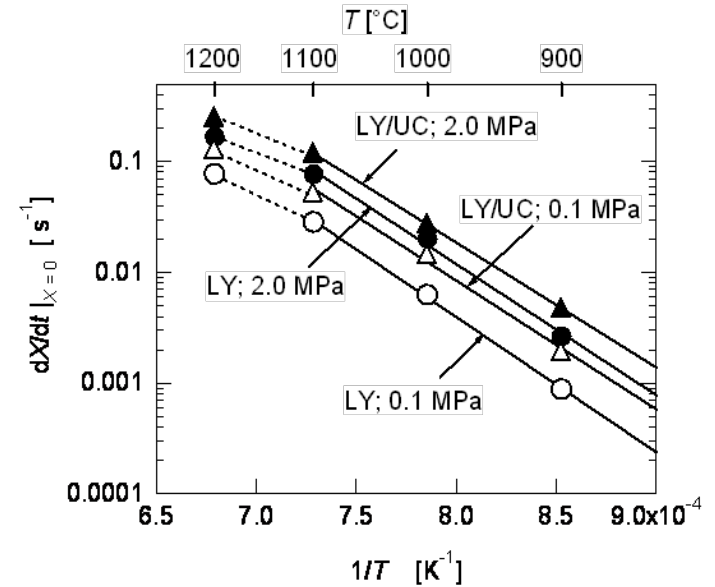
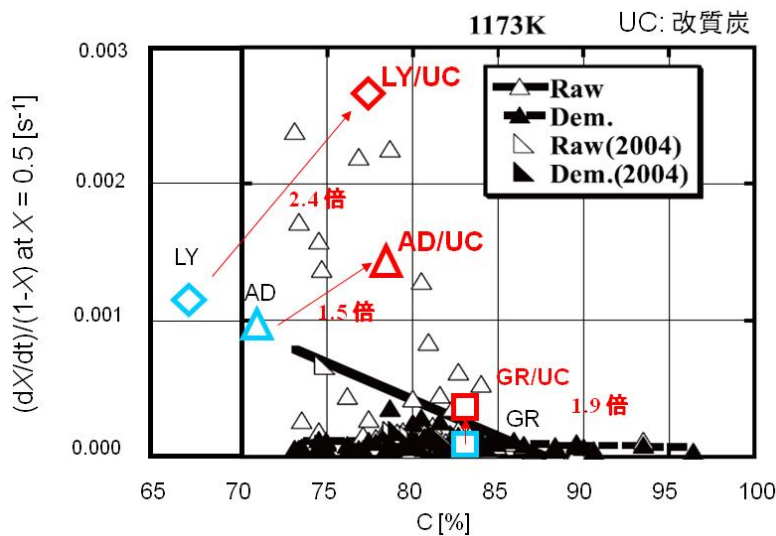
各比重区分のマセラル分析結果

Maceral

	Vitrinite	Exinite	Inertinite
-20mesh +1.5	21	0	79
-20mesh +1.4-1.5	32	0	68
-20mesh +1.3-1.4	12	1	87
-20mesh -1.3	90	2	8

褐炭の改質によるO₂/CO₂ガス化速度の大幅促進

高温溶剤抽出を利用し、褐炭のガス化反応性を向上する方法を開発



CO₂ ガス化反応速度に及ぼす脱灰と改質の影響

ベースデータ出典: (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構
平成16年度石炭生産・利用技術振興費補助金
「石炭利用基盤技術開発」成果報告書 p.143 山田ら

初期反応速度のアレニウスプロット

- 触媒を用いることなくガス化反応速度を向上させることに成功。
- 改質LY炭のガス化反応速度は他の100種の石炭に比べても速い

改質LY炭のガス化速度:
0.1 MPaでLY炭の約2.2倍
2.0 MPaでLY炭の約1.8倍

5. 実機フィージビリティ・スタディ(FS)

目的:

システムの詳細な検討、実現性の評価を行うため、プラントメーカーによる実用規模プラントのFSを実施し、主要構成機器の実機適用性を考慮することで、プラント性能、運用性、経済性等について、総合的に従来システムとの比較評価を行う。

実施項目:

1. 従来のCO₂分離回収技術を用いたIGCCに関する検討
 - ・空気吹きIGCCシステムを対象: CO₂回収無し、CO₂回収率約90%
 - ・CO₂分離回収方式: 物理吸収方式
 - ・負荷100%時のプラント性能について検討
2. CO₂回収型高効率IGCCシステムに関する検討
 - (1) ガスタービンに関する検討
 - ・冷却方法、燃焼器排ガス性状等
 - (2) 発電システムとしての検討
 - ・主要構成機器の技術開発状況及び機器仕様
 - ・各要素技術の課題調査・整理
 - (3) プラントレイアウトの検討
 - ・参考プラントの調査と本システムの概略配置の検討
 - (4) 概略コストの検討
 - ・類似プラントのコストデータに基づく概略コストの検討

発電システムとしての検討－主要構成機器の技術開発状況－

機器	開発状況	備考
O ₂ -CO ₂ 吹きガス化炉	PDU(3トン/日ガス化炉)	酸素吹きガス化炉は実証・商用段階
Syngas利用石炭粉碎・乾燥	商用段階	環境対策設備の検討
乾式脱硫	基礎研究段階(Zn-Fe系)	Fe系は20トン/日の実績有り
GT	机上検討	燃焼方式、循環ガス量、残存O ₂ の検討
再生熱交換器	小型実証段階	大型化、HRSGとの組み合わせ/配置の検討
ST	商用段階	主蒸気温度/再熱蒸気温度の検討
HRSG	商用段階	酸露点の管理、構成の検討
給水加熱器(酸露点対策)	テフロンコーティング伝熱管等	調査・検討が必要
排ガス水洗塔	商用段階	所要冷却水量の検討
CO ₂ 圧縮機	商用段階	
空気分離設備(ASU)	商用段階	所要動力、信頼度の検討
ガス化炉用CO ₂ からの脱O ₂	机上検討	類似技術として、H ₂ を燃料とする触媒燃焼システムの実績有り

基本システムに対し、追加検討が必要な項目

- ①石炭粉碎・乾燥用熱源
- ②石炭ガス化炉用CO₂からの残存酸素除去
- ③GT排ガスの酸露点(約85~110°C)の考慮
- ④再生熱交換器とHRSGの組み合わせ/配置

: 設備簡素化、低コスト化、効率向上の観点から、特に重要

: 研究開発課題

各要素技術の課題調査・整理

①ASUについて、公開文献¹⁾に基づき、低圧型/高圧型、ガス酸素圧縮方式/液体酸素圧縮方式、の概略動力原単位を相対的に比較評価。

→低圧型/液体酸素圧縮が低動力で高信頼度の可能性有り→ 0.4kWh/kg-O₂を採用

②火力発電プラントにおける主蒸気温度/再熱蒸気温度の調査を行い、本システムにおける蒸気タービンについて検討を実施。

→主蒸気温度/再熱蒸気温度差の見直し

③酸露点対策となるテフロンコーティング伝熱管について調査を行い²⁾、本システムへ適用する場合の問題点等の検討を実施。

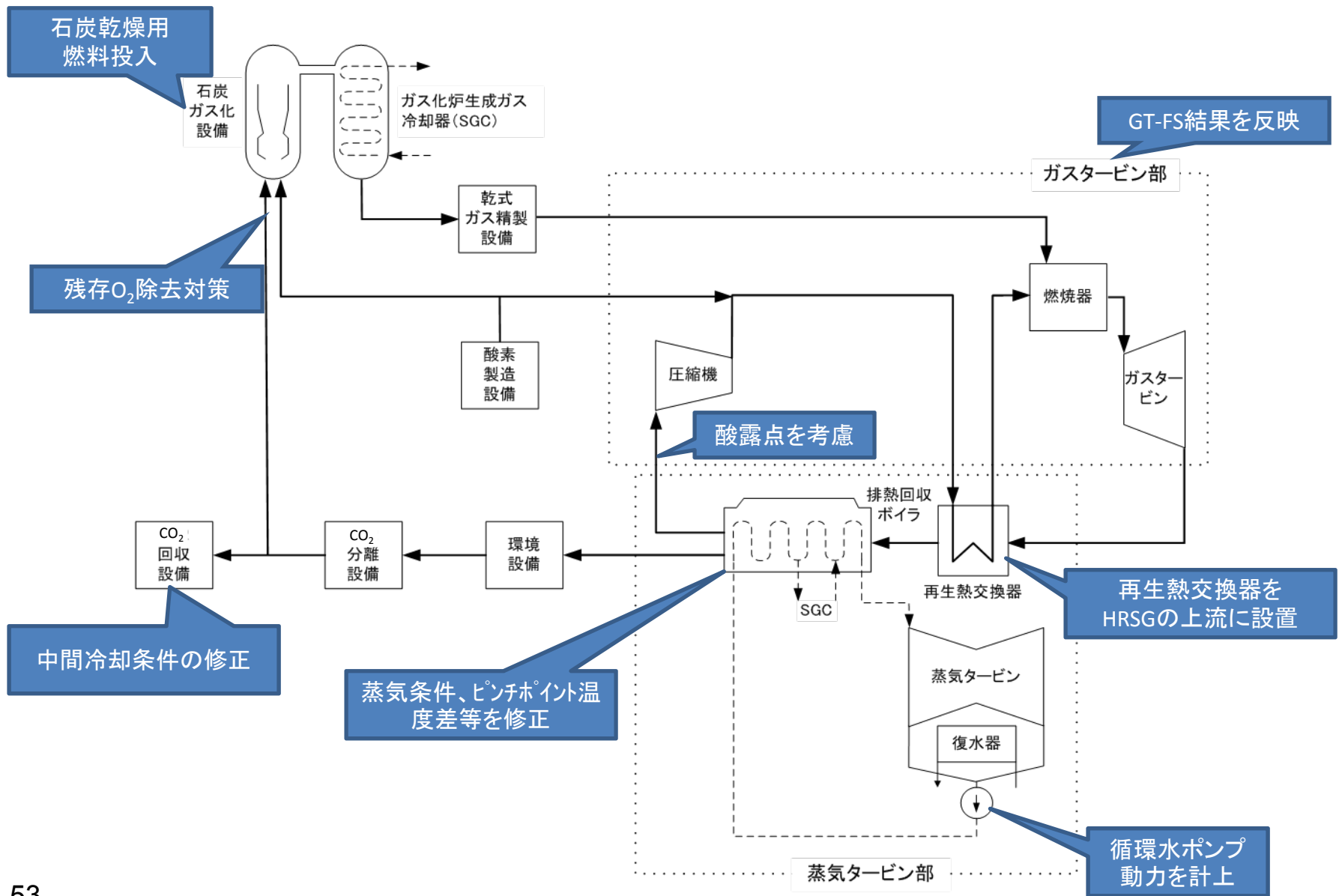
(GT排ガスの酸露点:約105°C→HRSG出口温度の見直し)

④排ガス冷却に関し、冷却過程での主要排水量や所要冷却水量について概略検討を実施。

1) NEDO平成19年度成果報告書、石炭ガス化における大型酸素製造技術に関する調査 等

2) テフロンコーティング伝熱管を用いた熱交換器は、欧州等でごみ焼却炉及びバイオマスプラント用として実績あり

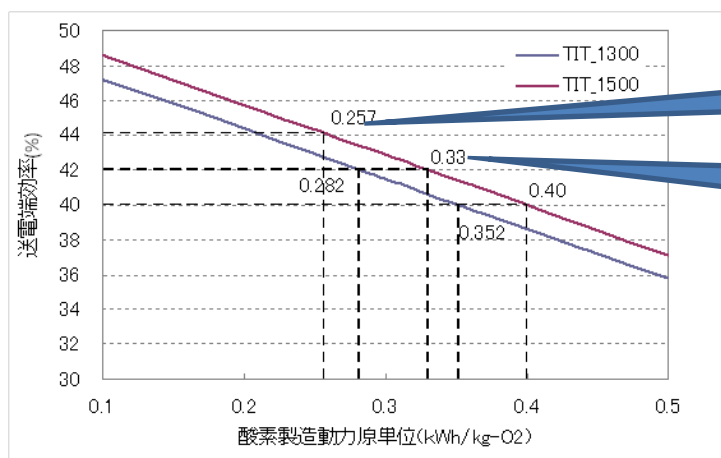
FS結果の反映によるシステムの見直し



FS結果の反映によるプラント効率への影響

検討条件	送電端効率(HHV)	備考
1. 主要機器の実機適用性を考慮した実現可能なシステム (FS結果の反映後)	約39%	1300°C級GT+再生熱交換器採用による効果;約4.4pt%、乾式ガス精製採用による効果;約0.5pt%を含む
2. 上記に加え 1,500°C級GTを採用したシステム	約40%	
3. さらにASU最適化技術 ⁽¹⁾ の進展を考慮したシステム	約42%	酸素製造動力原単位が0.40→0.33 kWh/kg-O ₂ に改善

(1) NEDO「二酸化炭素回収対応クローズド型ガスタービン技術—第I期研究開発—」(H12年度)



酸素製造動力低減効果

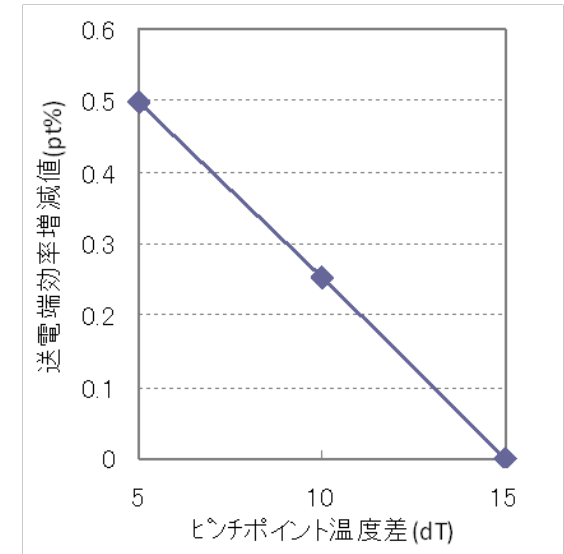
自己熱再生による将来技術を採用すると、送電端効率44.1%HHVが得られる⁽²⁾

1,500°C級では、酸素製造動力原単位が0.33kWh/kg-O₂まで低減⁽¹⁾すると、送電端効率42%HHVが得られる

(2) 堤ら、日本エネルギー学会大会(18)、352-353, 2009-07-30

効率向上にむけた将来課題と効果

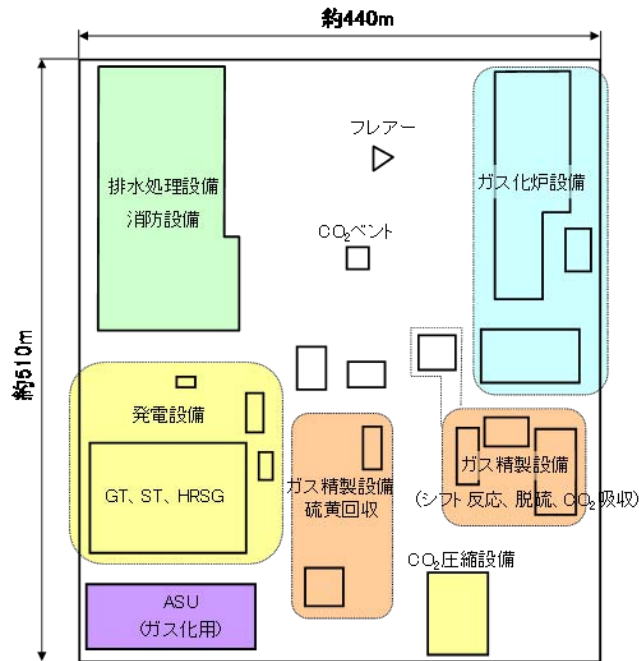
効率向上に向けた課題	送電端熱効率向上 予想値 (絶対値、39%基準)
ガス化炉冷ガス効率を1pt%向上 (現状: 78-80%)	0.6-0.7pt%
高圧蒸気タービン断熱効率を1pt%向上	0.03pt%
低圧蒸気タービン断熱効率を1pt%向上	0.19pt%
HRSG熱交換器性能の向上 (左図参照) (ピンチポイント温度差15°C→5°C)	0.5pt%
GT圧縮機断熱効率を1pt%向上	0.14pt%
回収CO ₂ 圧力を10MPa→3.6MPa ^(注)	0.75pt%



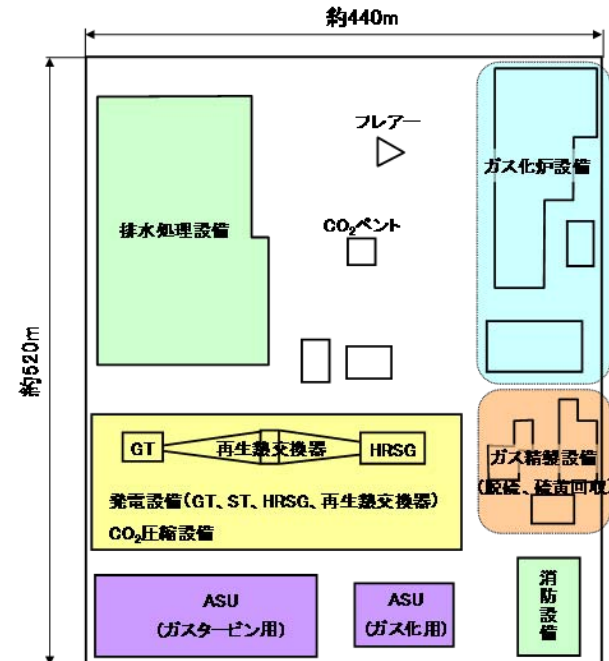
HRSG熱交換器性能向上効果

(注) 輸送方式により異なるが、パイプラインの場合は設計要件「0°CでCO₂が液化しない圧力」として3.6MPaが採用される場合がある

概略プラントレイアウトの検討



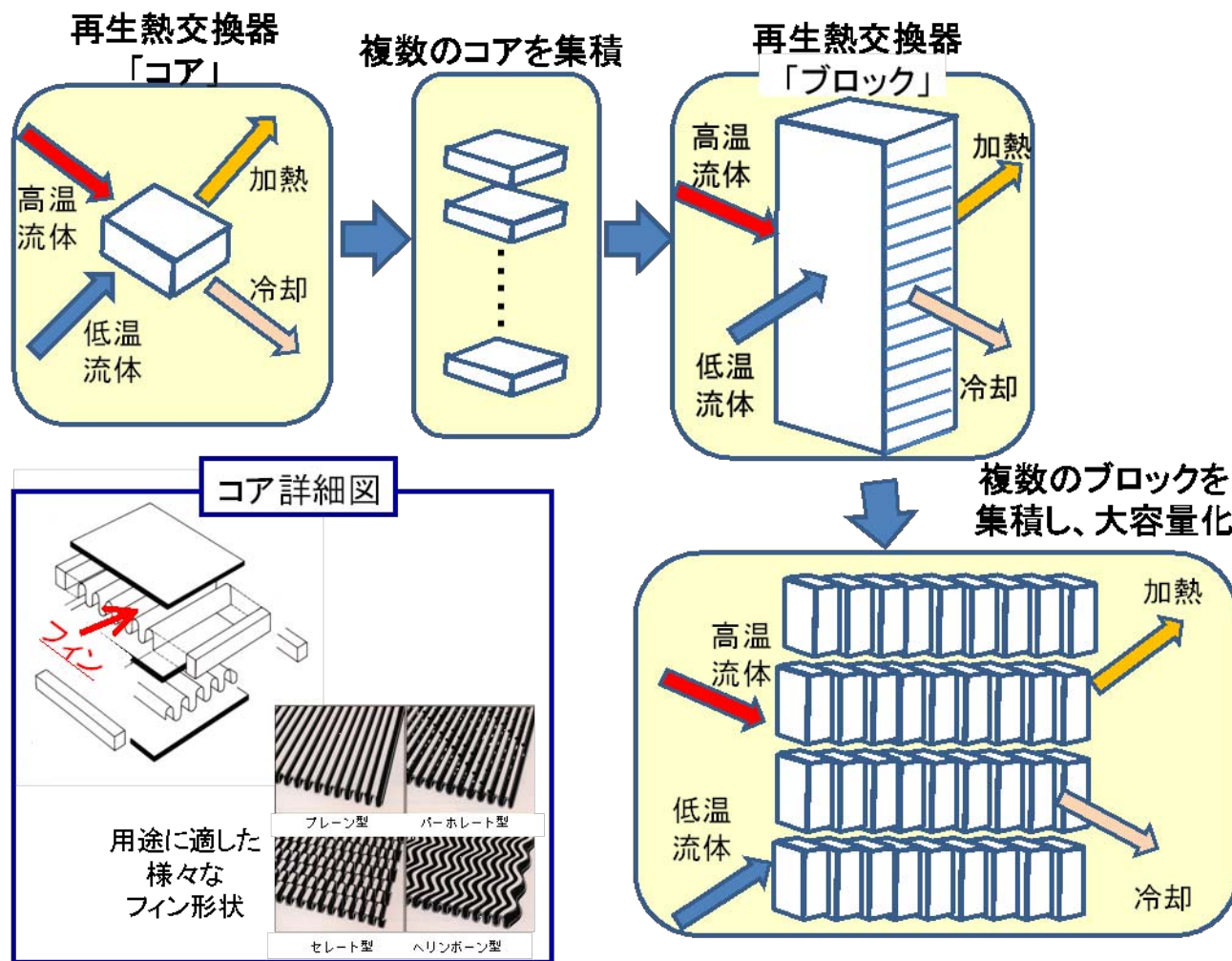
従来のCO₂回収型酸素吹きIGCC



CO₂回収型高効率IGCC

対象		従来のCO ₂ 回収 酸素吹きIGCC	CO ₂ 回収型高効率 IGCC(送端効率42%)	HECAプロジェクト
発電端出力	MW	394	587	394
送電端出力(=A)	MW	251	416	251
主要設備敷地寸法	m	510×440	520×440	510×440
主要設備敷地面積	m ²	224,400	228,800	224,400
主要設備所要面積(=B) (除くフレアシステム)	m ²	73,800 (ベース)	113,300 (ベース)×約1.5	—
送電端出力当りの 主要設備所要面積(=B/A)	m ² /MW -net	294 (ベース)	272 (ベース)×約0.95	—

再生熱交換器の検討



- H22年度中に、ブロックの大型化、配管長の低減なども考慮し、一層の設置面積低減方策を検討

実機フィージビリティ・スタディ(FS) まとめ

- 当初の基本システムに対し、FS結果の反映による見直しの結果、**主要機器の実機適用性を考慮した実現可能なシステムの送電端効率(HHV)は約39%となった**
- 上記システムに関し、ガス化炉冷ガス効率向上、1500°C級GTの採用、およびASU最適化による酸素製造動力原単位の改善などにより、**送電端効率約42%は達成可能**と考えられる
- 今後、ガス化炉運転条件の最適化による冷ガス効率の向上など、効率向上方策の検討と**プラント全体効率への効果をさらに詳細に検討し、目標達成を確実なものとする**
- 本システムの実現に向けては、設備簡素化、低コスト化、効率向上の観点から、**特に再生熱交換器と空気分離装置(ASU)が重要**である
- 再生熱交換器については、現時点では大型プラントへの適用実績がなく、小型ブロックを集積せざるを得ないため、コストおよびプラント面積の面で課題がある。今後はブロックの大型化、集積方法の最適化を検討
- 本システムでは、従来型IGCCに比べ多くの酸素を使用するため、空気分離装置(ASU)の性能改善およびコスト低減が極めて効果的である

6. 成果の意義

- 内外でCCS技術開発が活発化する一方で、現状のCO₂回収型火力発電には「高コスト」、「送電端効率の低下」などの課題が山積しており、これを解決する革新技術の開発が望まれている。
- 本提案システムは、「O₂-CO₂吹きガス化」と「O₂-CO₂ガス燃焼クローズド・ガスタービン」の採用により、発電端効率の大幅な向上が期待できる、**世界でも例のない独自のシステム**である。CO₂回収後に送電端効率42%(HHV)を達成できれば、地球環境問題の解決に向けた画期的な将来オプションの一つを提供できる可能性があり、次世代の革新的IGCCとして、アジア地域への展開を含め、大きな技術的・経済的インパクトを与えるものである。
- メーカーの協力を得た実機FSにおいては、主要機器の実機適用性を考慮した**実現可能なシステムを明らかにし**、ガス化炉冷ガス効率向上、1500°C級GTの採用、およびASU最適化による酸素製造動力原単位の改善などにより、**将来送電端効率約42%が達成できる見通しを得ると共に**、実用化に向けた**技術課題を抽出した**。
これらの成果は、**電中研と大学が一体となることで得られたものであり**、次ステップであるベンチプラントの開発に向けて、大きな意義を持つものである。

これまで約2年の研究で

- 小型ガス化炉の改造、運転を開始し、ガス化特性の把握と課題抽出を行った。
- ガス化反応の基盤化学として、供試炭のキャラクタリゼーション、熱分解、チャーのガス化、ガス化における O_2/CO_2 相互作用、スラグの熔融粘度とXRDとNMRの構造相関、これらのモデル化と数値シミュレーション開発、空気吹き炉の開発に学び、3ton→200ton→2000ton炉のシミュレータースケールアップを実施した。
- O_2/CO_2 ガス化炉で生成するガス化ガスの精製、タービン燃焼、およびタービン燃焼後ガス中の O_2 削減、 N_2 増加に対する対策を実証、検証した。
- アジアの多様な石炭の噴流層ガス化への適用のため、高灰分高融度灰炭に対する浮沈選鉱の適用、褐炭の抽出によるガス化反応性向上を実証した。
- これまでに、従来にない「 O_2-CO_2 吹きガス化技術」に関し、ガス化反応特性の解明とモデル化、数値シミュレータの開発、小型ガス化炉実験によるガス化特性の把握と課題抽出、乾式ガス精製装置の性能実証など、目標達成に向けた基盤技術の開発を着実に進めることができた。

今後2年間の実施計画

- 本システムの中核となる O_2 - CO_2 ガス化技術について、H22年度までの成果から**最適ガス化炉構造の検討を行い、小型ガス化炉の改造、 O_2 - CO_2 ガス化実験による性能実証**を行う。
- O_2 - CO_2 吹き石炭ガス技術の基盤となる、**石炭の熱分解特性、チャーのガス化特性、灰の挙動などの解明**を引き続き実施し、ガス化炉最適化技術の確立に反映させる。
- 数値シミュレータを活用し、ガス化炉温度、酸素比、酸素濃度など運転条件の最適化、バーナ構造・配置の最適化等によるガス化炉の性能向上を進める。**
- ガス化性能の向上、ガスタービンシステムの最適化等による性能向上、再生熱交換器およびASUの技術調査・最適化検討を進めることで、**目標効率の達成を確実なものにする。**
- プラント概略コストを明らかにすると共に、ガス化炉チャー系や再生熱交換器の簡素化等による、低コスト化に向けた検討**を着実に進め、課題を明らかにする。
- アジア地域の低品位な石炭の O_2 - CO_2 ガス化への適用性、大幅な効率向上を目指した技術開発**を着実に進める。
- 将来の実用化を見据え、次期ステップである数十トン/日級ガス化炉とクローズドGT一貫ベンチプラントシステムの**概念設計**を行う。

成果の発表

	H20年度	H21年度	H22年度	合計
特許	-	1件(出願済)	-	1件
研究発表	0件	35件	4件	39件
論文投稿	0件	21件	0件	21件
研究報告書等	0件	2件	0件	2件

波及効果

- 現状のCO₂回収型火力発電における「高コスト」、「送電端効率の低下」などの課題を解決できれば、CO₂を大幅に低減する画期的な将来オプションの一つを提供できる可能性があり、次世代の革新的IGCCとして、アジア地域への展開を含め、大きな技術的・経済的インパクトを与えられとされる。具体的な効果例を以下に示す。
- 本システム採用による石炭燃料の削減効果：
従来検討されているIGCC+CO₂回収方式と比べ、石炭量24%の削減、約35億円/年の削減(出力100万kW、石炭価格6100円/トン、利用率70%)
- 本システム採用によるCO₂削減効果：
従来検討されているIGCC(回収無し)に比べ、484万t-CO₂/年の削減(出力100万kW、利用率70%)