

<エネルギーイノベーションプログラム>

「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト
ゼロエミッション石炭火力基盤技術開発
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」
(事後評価)

(2008年度～2014年度 7年間)

プロジェクトの詳細(公開)

電力中央研究所

九州大学

2014年11月26日



事業の概要と目標

I. 研究の背景、目的および目標

II. 開発システムの特徴と本フェイズにおける開発課題

III. 実施項目の詳細および成果

IV. 今後の展開



事業の概要と目標

I. 研究の背景、目的および目標

II. 開発システムの特徴と本フェイズにおける開発課題

III. 実施項目の詳細および成果

IV. 今後の展開

I 研究の背景、目的および目標

背景

■ 地球温暖化対策の必要性

- ・火力発電分野におけるCO₂排出削減が求められている。

■ 解決策

- ・日本の電気事業は発電効率の向上やバイオマス混焼などにより、CO₂排出量削減に努めている(化石燃料使用量低減と両立可能)。
- ・欧米を中心に火力発電所からのCO₂回収が検討されているが、CO₂回収動力が大きく、IGCCの場合でも発電効率が30%前半まで低下すると試算されており、化石燃料の枯渇に拍車をかけてしまう可能性もある。

目的

- CO₂回収後もIGCCの特徴である高い送電端効率が維持できる革新的なIGCCシステムを開発する。

目標

- 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を確立する。



事業の概要と目標

I. 研究の背景、目的および目標

II. 開発システムの特徴と本フェイズにおける開発課題

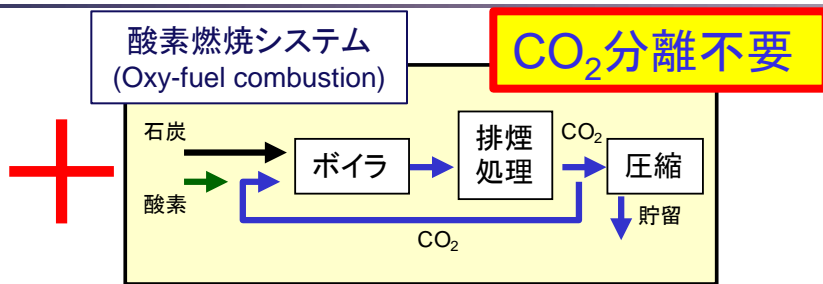
III. 実施項目の詳細および成果

IV. 今後の展開

II 開発システムの特徴

高効率

IGCC

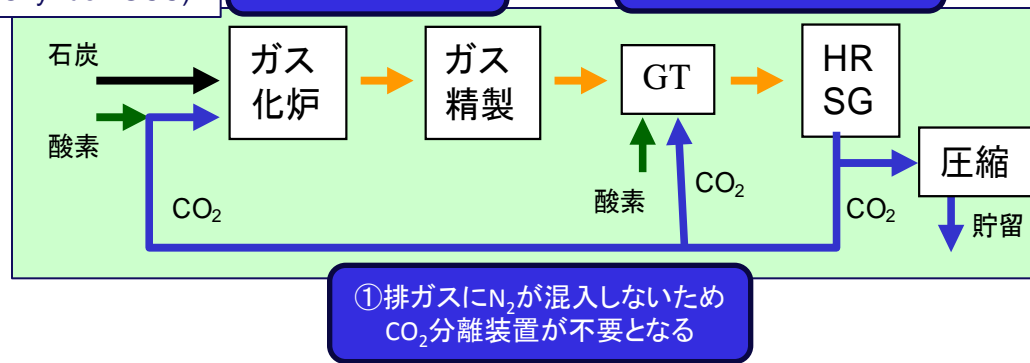


CO₂回収型高効率IGCC
(High efficiency Oxy-fuel IGCC)

②再循環CO₂による
ガス化反応促進

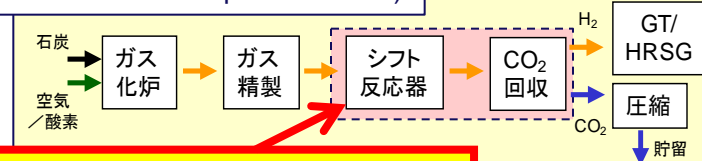
③セミクローズド型GT
の採用による高効率化

=



酸素燃焼のコンセプトをIGCCに応用したシステムで、シフト反応器などが不要となり、CO₂回収後も、Pre-combustion IGCC以上の高い送電端効率が期待できる。

<参考>従来型CO₂回収IGCC
(Pre-combustion Capture型 IGCC)



この部分が不要となる

本受託の目標と成果

目 標

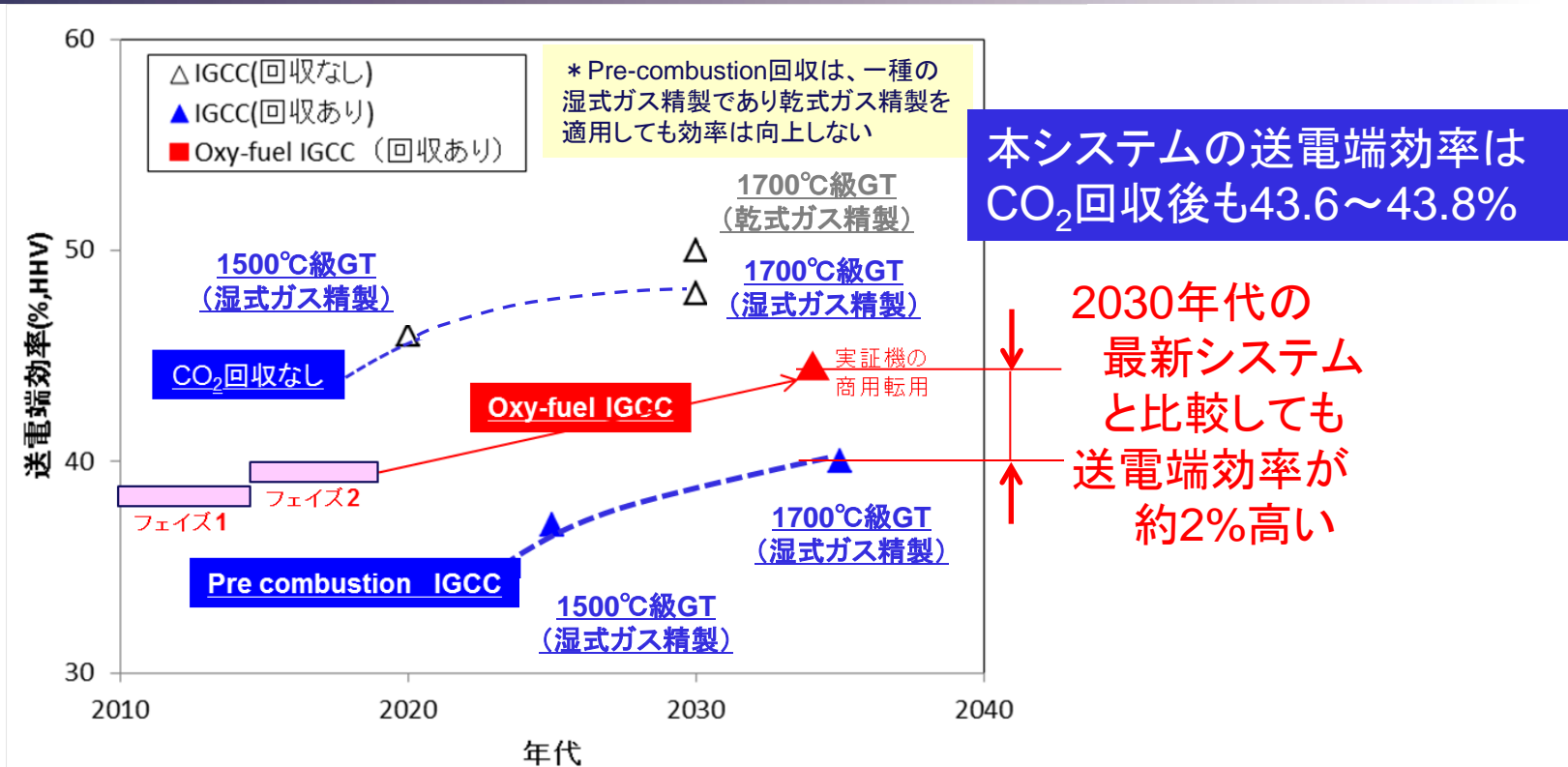
■性状の異なる環太平洋地域の**3種類以上の石炭**を用い、CO₂回収後において**送電端効率42%**(HHV基準)を実現させる基盤技術を確立する。

炭種	DD炭	MN炭	MO炭
	中国	インドネシア	豪州
発熱量(kJ/kg, 気乾)	28.8	29.4	30.0
固有水分(% , 気乾)	3.9	4.7	3.6
灰分(% , 無水)	10.8	8.4	9.6
燃料比(- , 無水)	2.26	1.25	1.86
酸素比(-)	0.38	0.38	0.38
送電端効率 (%、HHV)	43.8	43.6	43.6

3炭種で、送電端効率42%以上を達成する目処を得た

システム効率計算条件: 1,500°C級GT想定、ガス精製炭素析出対策考慮
(MO炭は、本システムの第1報、電中研報告M07003で評価した炭種)

本システム開発の意義



システム効率解析において、本システムの送電端効率はCO₂回収後も43.6~43.8%との結果が得られており、2030年台半ば*1の最新システム*2と比べても、十分な優位性が期待される。
 (*1: 本システムの商用化ターゲット)
 (*2: 1700°C級GTをベースとしたPre-Combustion回収IGCC、送電端効率が41%台との試算もある)

海外でも様々なCCSプロジェクトが推進、検討されているが、現時点で海外では、CO₂回収後の送電端効率が40%を上回る技術は見あたらない。
 DOE NETL: 2nd Generation CCS火力の目標送電端効率でさえ、36~39%(実用化も2025年以降)

高効率達成の要因

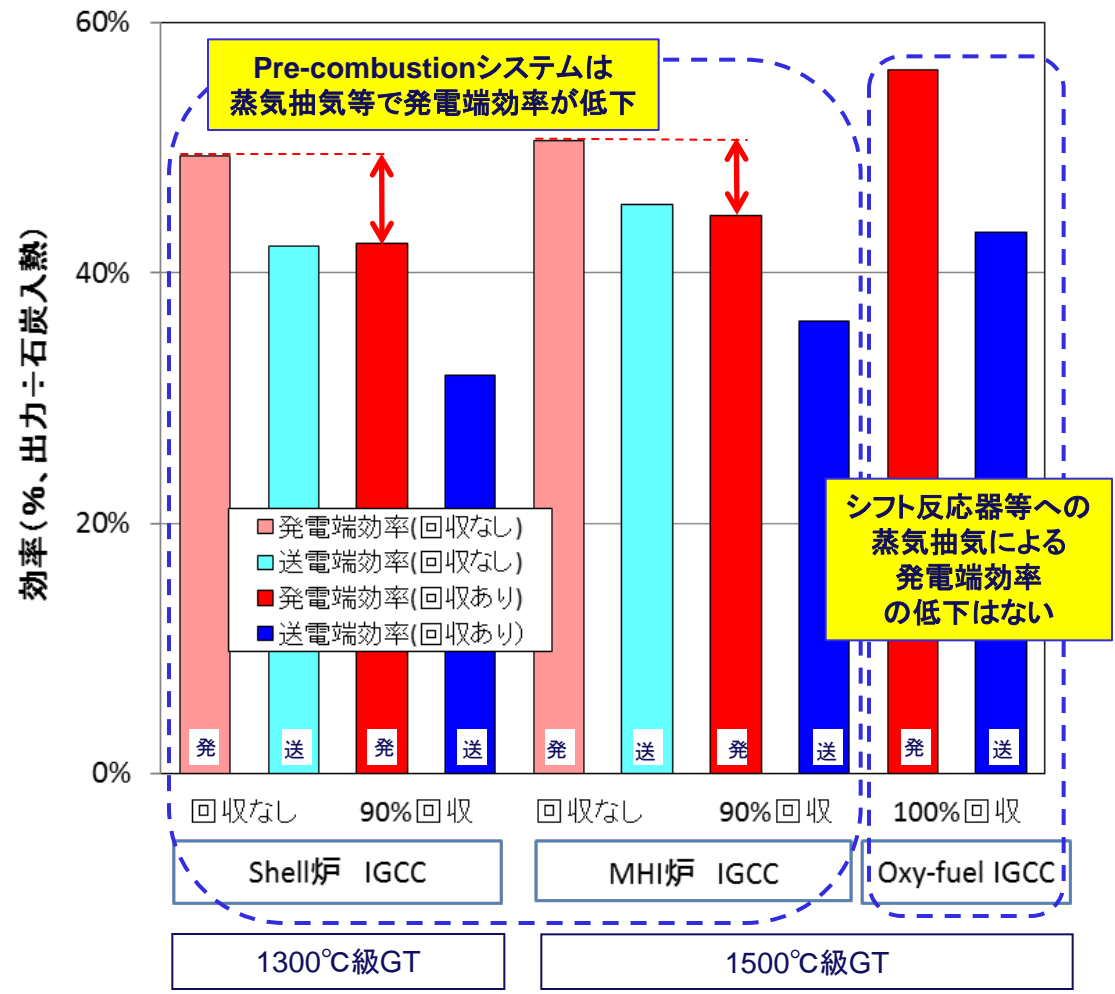
①CO₂分離用のための蒸気抽気による発電端効率の低下がない

②セミクロードGTシステムの導入により発電端出力が増加

→ p10参照

③本システムの特徴を考慮した空気分離装置(ASU)のカスタマイズにより、酸素製造動力が低減

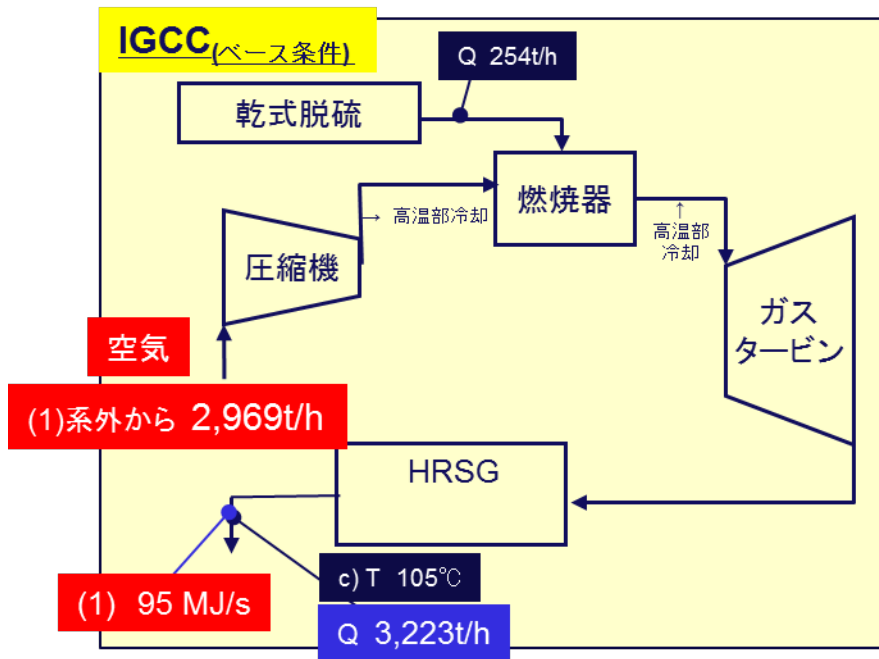
→ p34参照



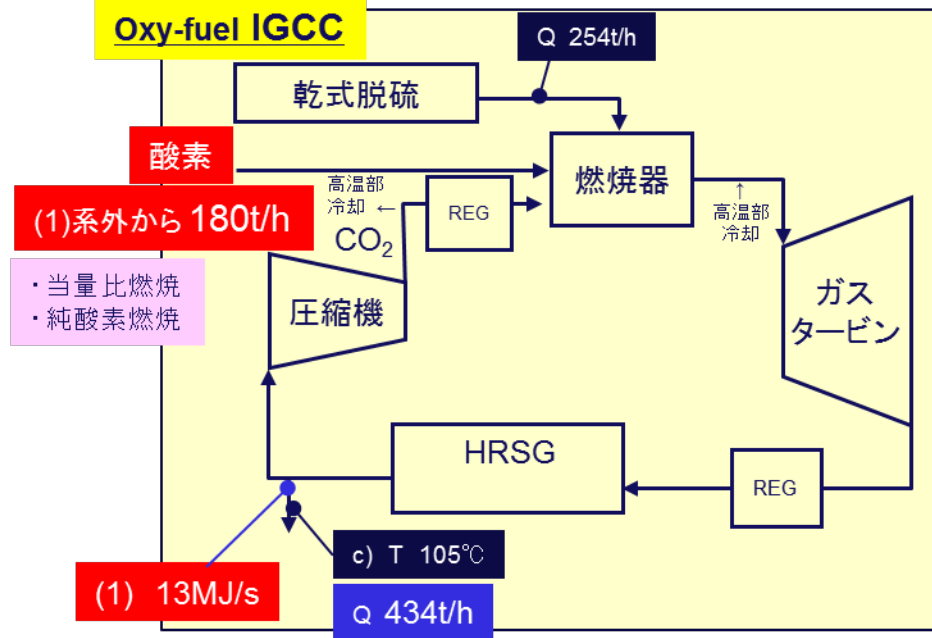
* 1: "Cost and performance baseline for fossil energy plants Vol1.rev2 Nov,2010"

* 2: 1,500°C 級 IGCC/Pre-Combustion IGCC のデータは本事業の委託調査結果。技術開発に伴うペナルティの改善も考慮。

排熱に関する簡易試算



(1)従来のPre-combustionシステム



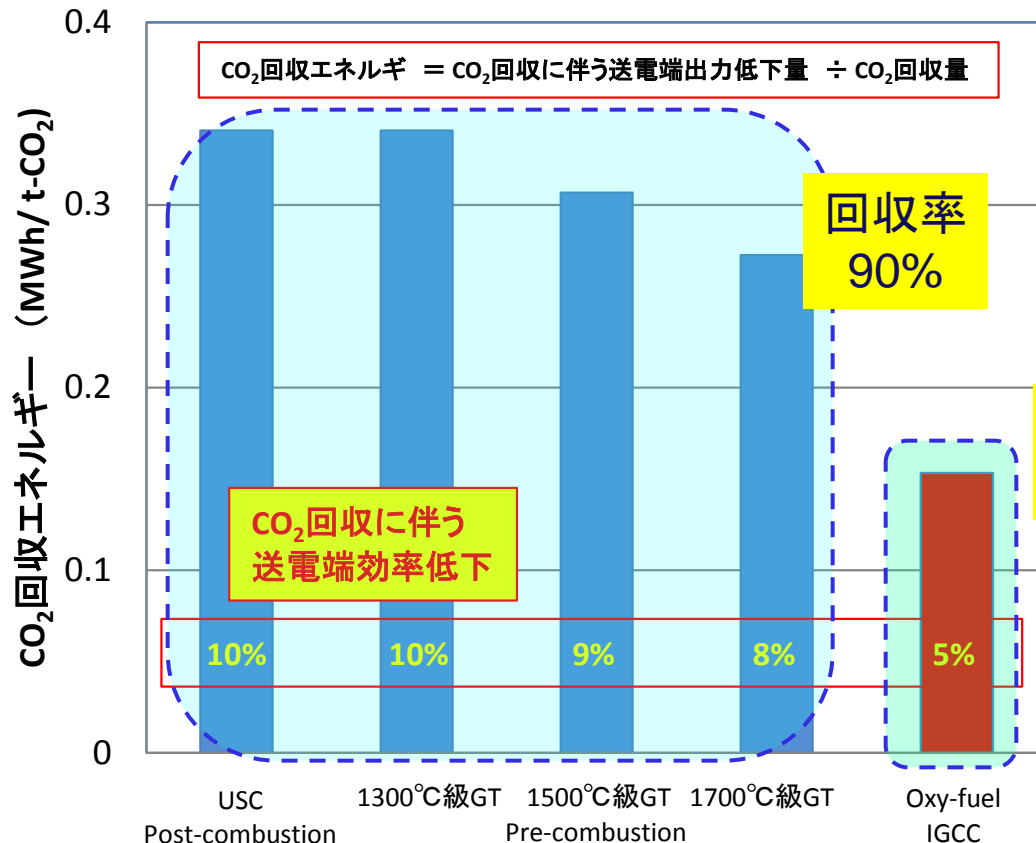
(2)本システム
(セミクローズドGTシステム)

従来システムは105°Cの排ガスを3,223t/h排出するが、本システムが排出する排ガス(105°C)量は434t/hと少ない

セミクローズドGTシステムを導入すれば排熱損失が削減され送電端効率が向上する

高効率のメリット

本システムはCO₂回収に要するエネルギーが他技術より大幅に低い



① 本システムはCO₂回収に伴う送電端効率の低下が小さくCO₂回収エネルギーが小さい

② 本システムはCO₂回収率100%であり、回収率90%のPre-Combustionシステムより回収エネルギーが小さくなる

- ・ベースシステム(CO₂回収なし)との送電端出力の差をCO₂回収に要するエネルギーとして試算(石炭入熱は一定)。
- ・石炭性状は、コスト等検証委員会を参考に設定。
- ・1,300°C級GTのIGCCは、DOE文献のShell炉IGCCデータを参照(“Cost and performance baseline for fossil energy plants Vol1.rev2 Nov,2010”)
- ・1,500°C級GTを採用したIGCC/Pre-Combustion IGCCのデータは本事業の委託調査結果。技術開発に伴うペナルティの改善も考慮。
- ・Oxy-IGCCのベースは、同じ1500°C級GTを使うIGCCの中で最高効率と考えられる酸素富化空気吹きMHI炉乾式ガス精製システムを比較対象とした。









Ⅱ. 本フェイズにおける開発課題

1.基本コンセプトの確認	(1)本システムの特徴の確認
	(2)小型ガス化炉を用いた反応促進効果の確認
	(3)基礎試験による反応促進効果の確認
2.基盤技術の開発	(1)実機規模ガス化炉数値解析手法の構築と O ₂ /CO ₂ ガス化特性の評価
	(2)高CO条件における炭素析出対策の構築
	(3)小型ガス化炉によるCO ₂ 富化試験法の開発と 炭種によるガス化特性の評価
	(4)ガス化実ガスによる脱硫剤評価法の開発と 設計データの取得
3.全体システム成立性の検討	(1)メーカーFSによる課題抽出とシステム改良
	(2)空気分離装置/再生熱交換器メーカーによる検討
	(3)送電端効率/敷地面積/発電コストの検討
4.次フェイズの検討	(1)試験基本計画策定および試験設備試設計
5.本技術の普及に向けた検討	(1)炭種適合性評価のための基盤技術開発
	(2)適合炭種拡大に向けた基盤技術開発

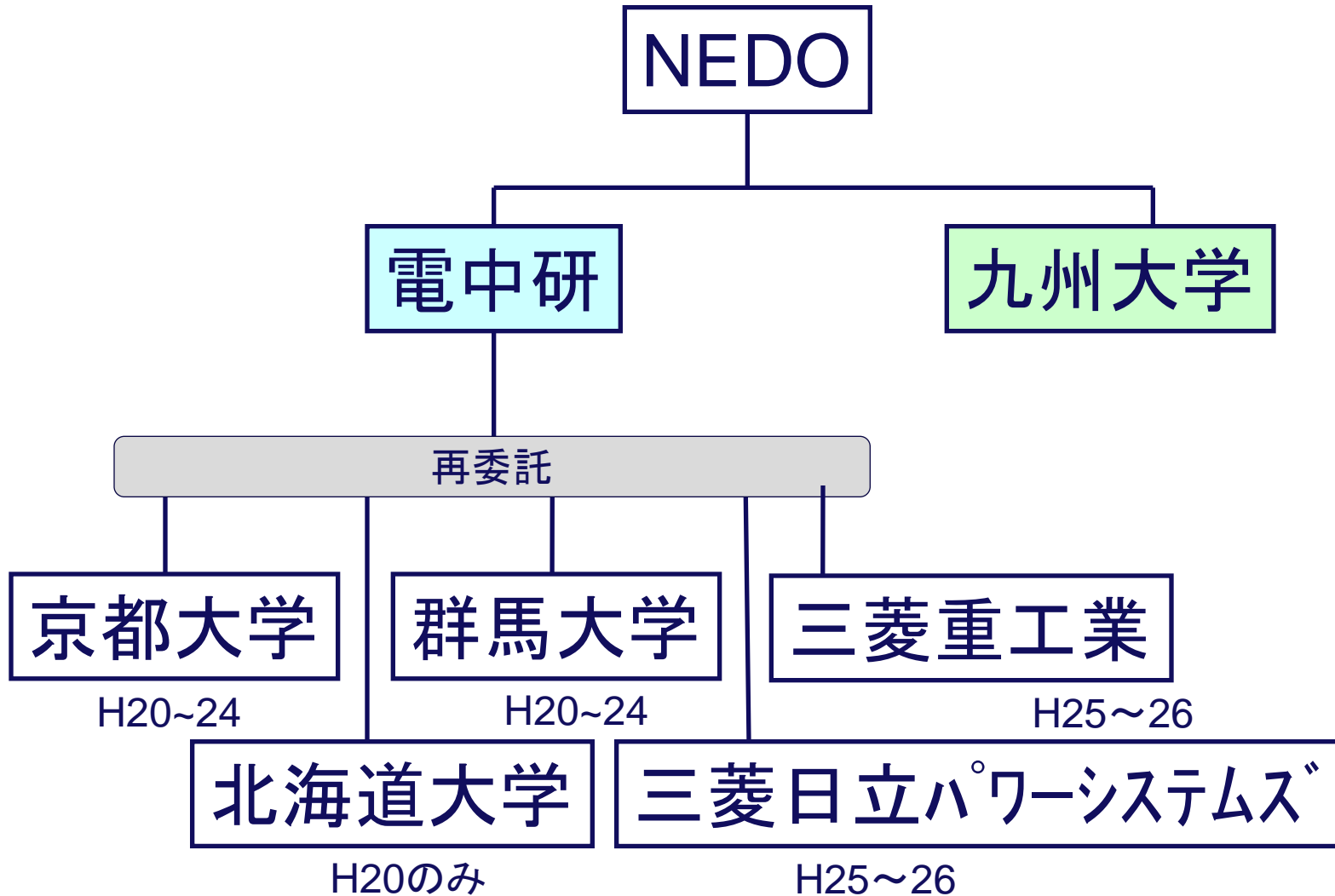
研究工程の詳細(1)

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
1. 基本コンセプトの確認							
(1) 本システムの特徴の確認		[Yellow bar]					
(2) 小型ガス化炉を用いた反応促進効果の確認		[Yellow bar]					
(3) 基礎試験による反応促進効果の確認	[Yellow bar]						
2. 基盤技術の開発							
(1) 実機規模ガス化炉数値解析手法の構築と O ₂ /CO ₂ ガス化特性の評価	[Yellow bar]			解析法の構築▲ 空気吹き相当O ₂ 濃度 2室2段炉解析▲	高O ₂ 濃度2室2段炉解析▲ 1室2段炉解析▲		
(2) 高CO条件における炭素析出対策の構築	[Yellow bar]						
(3) 小型ガス化炉によるCO ₂ 富化試験法の開発と 炭種によるガス化特性の評価			炭素析出対策の構築▲		[Yellow bar]		
(4) ガス化実ガスによる脱硫剤評価法の開発と 設計データの取得	[Yellow bar]					抽気ガス化試験による脱硫設計データ取得▲	
3. 全体システム成立性の検討							
(1) プラントメーカーFSによる課題抽出とシステム改良	[Yellow bar]					課題抽出と全体システムの改良▲ セミクローズドGTの課題抽出▲	
(2) 空気分離装置/再生熱交換器メーカーによる検討		再生熱交試設計▲ ASUのカスタマイズ▲					
(3) 送電端効率/敷地面積/発電コストの検討	[Yellow bar]					システム改良を反映▲ 最新データ反映▲ ASU等の改良を反映▲	

研究工程の詳細(2)

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
4.次フェイズの検討							
(1)試験基本計画策定および試験設備試設計				 次フェイズ試験設備試設計▲  次フェイズ計画の検討 ▲  セミクロースドGTのCFD予備検討  GT燃焼の基礎データ取得  乾式ガス精製における硫黄以外の不純物対策検討			
5.本技術の普及に向けた検討							
(1)炭種適合性評価のための基盤技術開発							
a)ガス化反応モデルの高精度化	 ▲CO ₂ /O ₂ ガス化用反応モデル構築 CO ₂ ガス化時に特有の反応挙動抽出▲ 詳細化学反応モデルを用いた現象解明▲						
b)スラグ排出性評価技術の開発	 スラグ排出現象の実験/数値解析 による評価法の開発▲ NMRを活用した熔融スラグの類型化 ▲ スラグ排出現象の類型化▲						
(2)適合炭種拡大に向けた基盤技術開発	 石炭前処理に関する検討▲ ▲褐炭改質法の開発						

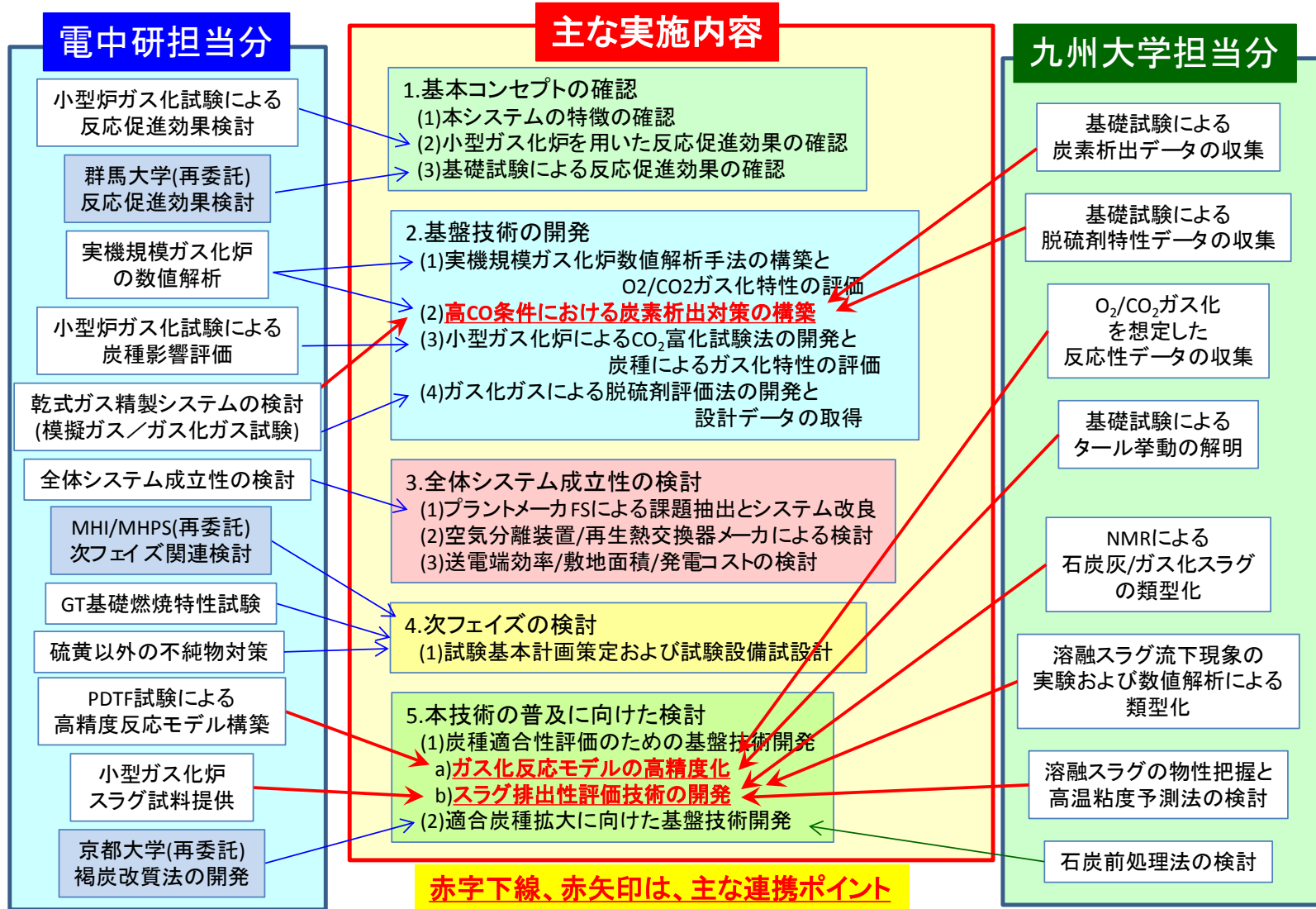
研究体制



本研究の開発課題の分担と主な成果

	内容	電中研	九州大	成果
1. 基本コンセプトの確認	(1)本システムの特徴の確認	◎	—	本システムが高効率となる要因を整理。
	(2)小型ガス化炉を用いた反応促進効果の確認	◎	—	小型ガス化炉にCO ₂ 供給設備などを追設し、CO ₂ 富化による反応促進効果を確認。
	(3)基礎試験による反応促進効果の確認	◎ (群馬大)	—	熱天秤基礎試験などを行い、CO ₂ 富化による反応促進効果を確認。
2. 基盤技術の開発	(1)実機規模ガス化炉数値解析手法の構築とO ₂ /CO ₂ ガス化特性の評価	◎	—	O ₂ /CO ₂ ガス化に適用可能なチャー反応モデルを構築し、それを組み込んだ実機規模数値解析ツールにより、O ₂ /CO ₂ ガス化特性を予測、評価。
	(2)高CO条件における炭素析出対策の構築	◎	○	生成ガス中CO ₂ 濃度の高い本システムで懸念された炭素析出現象を抑制する手法を構築。
	(3)小型ガス化炉によるCO ₂ 富化試験法の開発と炭種によるガス化特性の評価	◎	—	小型ガス化炉によるCO ₂ 富化試験法を開発し、5炭種でCO ₂ 富化による反応促進効果を確認。これらの炭種で高効率運転が期待できる。
	(4)ガス化実ガスによる脱硫剤評価法の開発と設計データの取得	◎	—	小型ガス化炉のガス化実ガスによる脱硫剤評価法を開発し、実用化に向けた脱硫剤設計の基礎データを取得。
3. 全体システム成立性の検討	(1)メーカーFSIによる課題抽出とシステム改良	◎	○	プラントメーカーのFSI結果を元に本システムの課題を抽出し、実現性の高いシステムを構築した。
	(2)空気分離装置/再生熱交換器メーカーによる検討	◎	—	重要構成機器を対象に、専門メーカーによる試設計を行い、動力低減や小型化の見通しを得た。
	(3)送電端効率/敷地面積/発電コストの検討	◎	—	メーカーFSI結果を反映した改良システムを対象として、送電端効率などを検討し、初期の目標をクリアすることなどを示した。
4. 次フェーズの検討	(1)試験基本計画策定および試験設備試設計	◎ (MHPS) (MHI)	○	ベンチ炉等の次フェーズ試験設備を設計すると共に試験計画を策定した。また、次フェーズ以降をにらんで、硫黄分以外の除去方策に関する予備検討を行い、対策候補を見出すと共に、セミクローズドGT燃焼器の開発に必要な燃焼特性基礎データを取得した。
5. 本技術の普及に向けた検討	(1)炭種適合性評価のための基盤技術開発	◎	◎	O ₂ /CO ₂ ガス化時のスート生成挙動の実験的検討や芳香族混合物の分解・改質試験を通じて開発した初期熱分解モデルと詳細反応モデルを用いてスート生成挙動を解明した。また、スラグ排出性の観点からIGCCへの炭種適合性を評価するためにスラグ排出現象や炭種の類型化を可能とする基盤技術を開発した。
	(2)適合炭種拡大に向けた基盤技術開発	◎ (京都大)	○	炭種拡大に向けた種々の検討の中で、触媒を使用することなく、低品位炭のガス化速度を促進する改質方法として、溶剤改質法を提案し、その有効性を確認した。

実施者間の協力体制



事業の概要と目標

I. 研究の背景、目的および目標

II. 開発システムの特徴と本フェイズにおける開発課題

III. 実施項目の詳細および成果

1. 基本コンセプトの確認

2. 基盤技術の開発

3. 全体システム成立性の検討

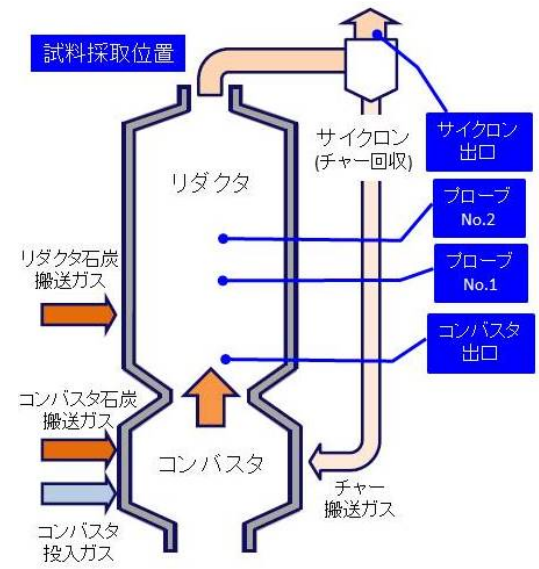
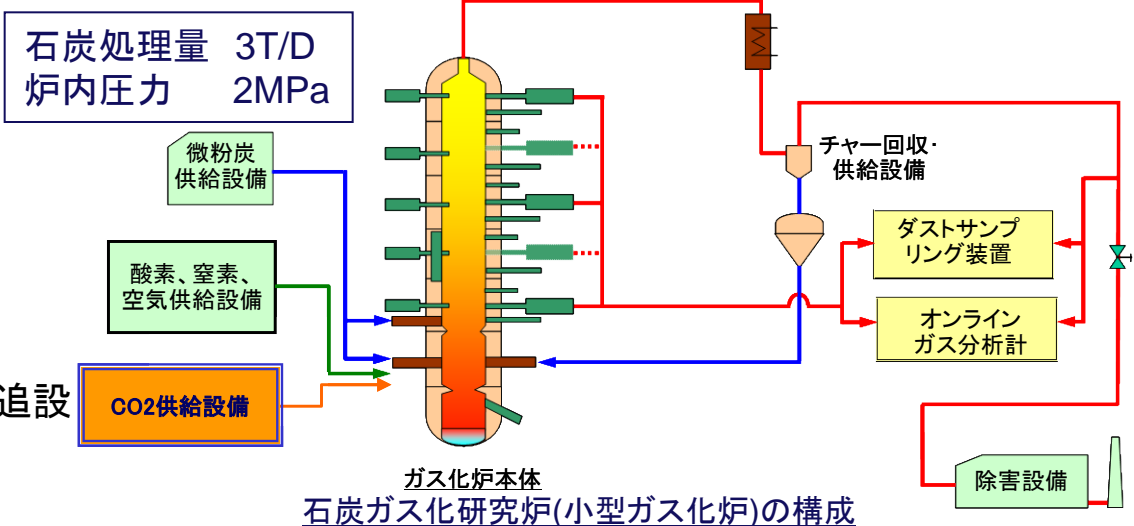
4. 次フェイズの検討

5. 本技術の普及に向けた検討

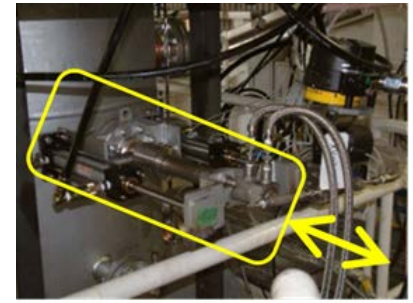
IV. 今後の展開

小型ガス化炉を用いた反応促進効果の確認

【目的】ガス化炉投入CO₂による反応促進効果の確認



受託研究で追設したCO₂供給設備



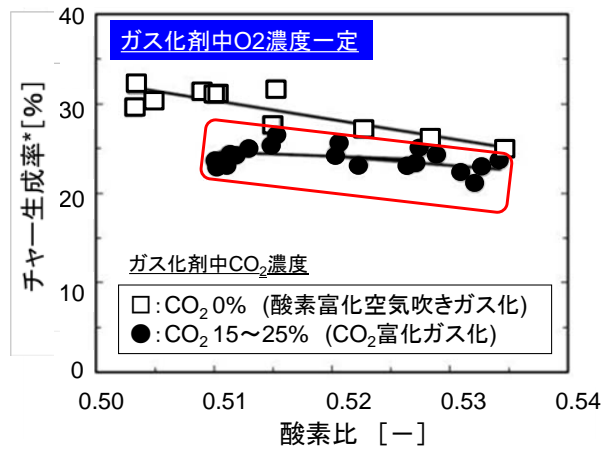
炉内サンプリングプローブ

小型ガス化炉を用いた反応促進効果の確認

【目的】ガス化炉投入CO₂による反応促進効果の確認

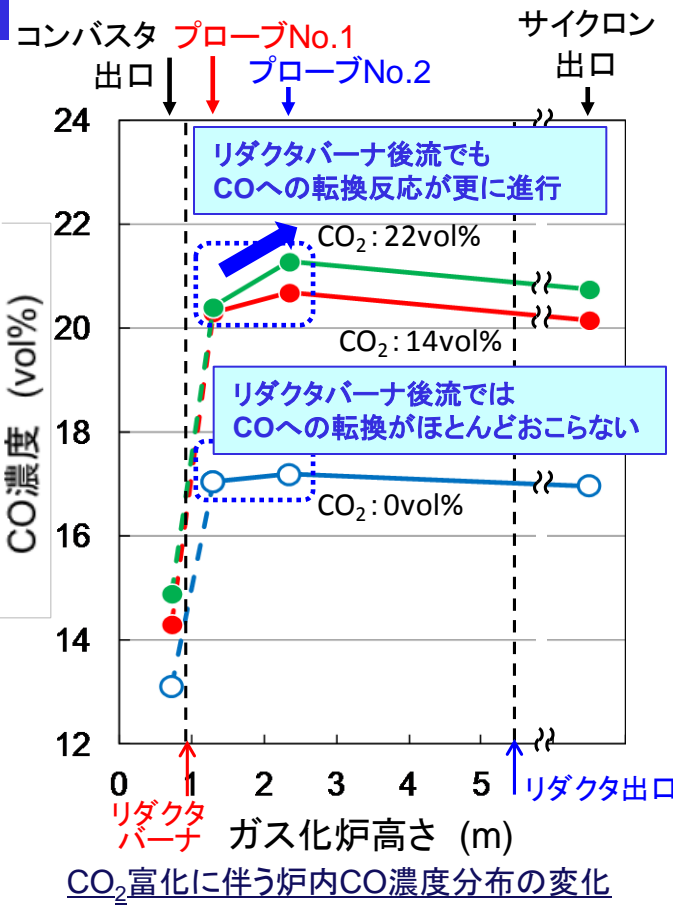
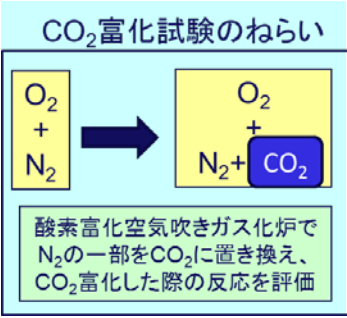
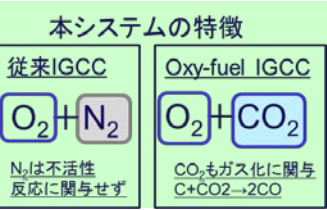
試験条件の一例

試験条件 (vol%)	O ₂ 濃度	25	25	25
	CO ₂ 濃度	0	15	25
	N ₂ 濃度	75	60	50
ガス化剤の内訳	コンバスタ石炭搬送ガス	空気	空気	空気
	リダクタ石炭搬送ガス	空気	空気	CO ₂
	チャー搬送ガス	窒素	CO ₂	CO ₂
	コンバスタ投入ガス	酸素	酸素	酸素



*: チャージ生成率 = (チャー中炭素量) ÷ (石炭中炭素量)

CO₂富化による反応促進効果*の確認 (*: チャージ生成量の低減)



【成果】小型ガス化炉でCO₂富化時の反応促進によるチャー生成量低減効果を確認

【活用】チャー生成量低減効果のデータは、設備コンパクト化の検討指針となる



基礎試験による反応促進効果の確認

【目的】ガス化炉投入CO₂による反応促進効果の確認

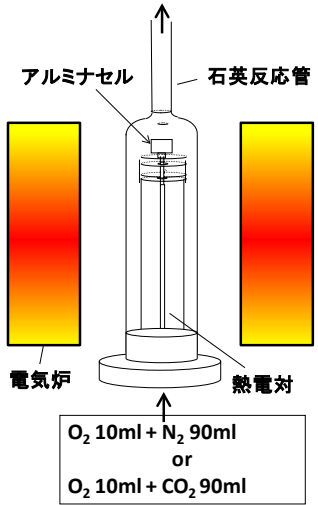
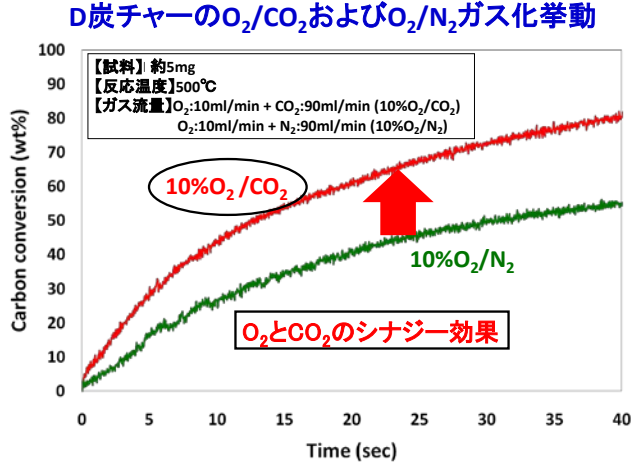
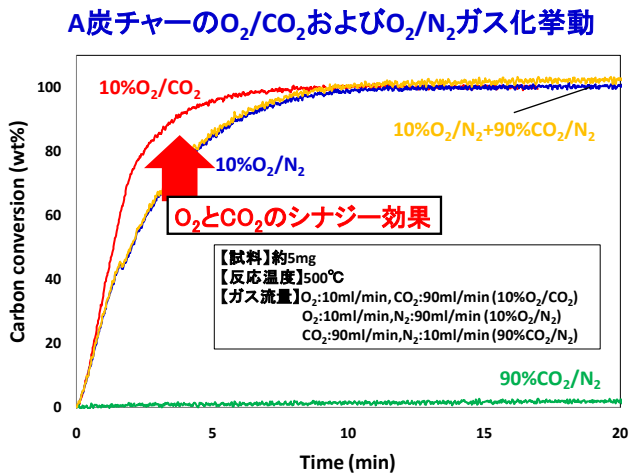


Fig. TG(ULVAC社 HPC-9300)



熱天秤により、O₂/CO₂ガス化とO₂/N₂ガス化のチャーガス化反応速度を比較、評価

		A炭 チャー	B炭 チャー	C炭 チャー	D炭 チャー
ガス化 速度定数 × 10 ⁻¹ (min ⁻¹)	10%O ₂ /N ₂	3.89	0.24	0.093	0.31
	10%O ₂ /CO ₂	6.65	0.35	0.245	0.58
比率		1.71	1.46	2.63	1.87

【成果】基礎試験により、O₂/CO₂ガス化時のガス化反応促進を確認

【活用】O₂とCO₂のシナジー効果はさらなる効率向上に向けたベースデータとなる



事業の概要と目標

I. 研究の背景、目的および目標

II. 開発システムの特徴と本フェイズにおける開発課題

III. 実施項目の詳細および成果

1. 基本コンセプトの確認

2. 基盤技術の開発

3. 全体システム成立性の検討

4. 次フェイズの検討

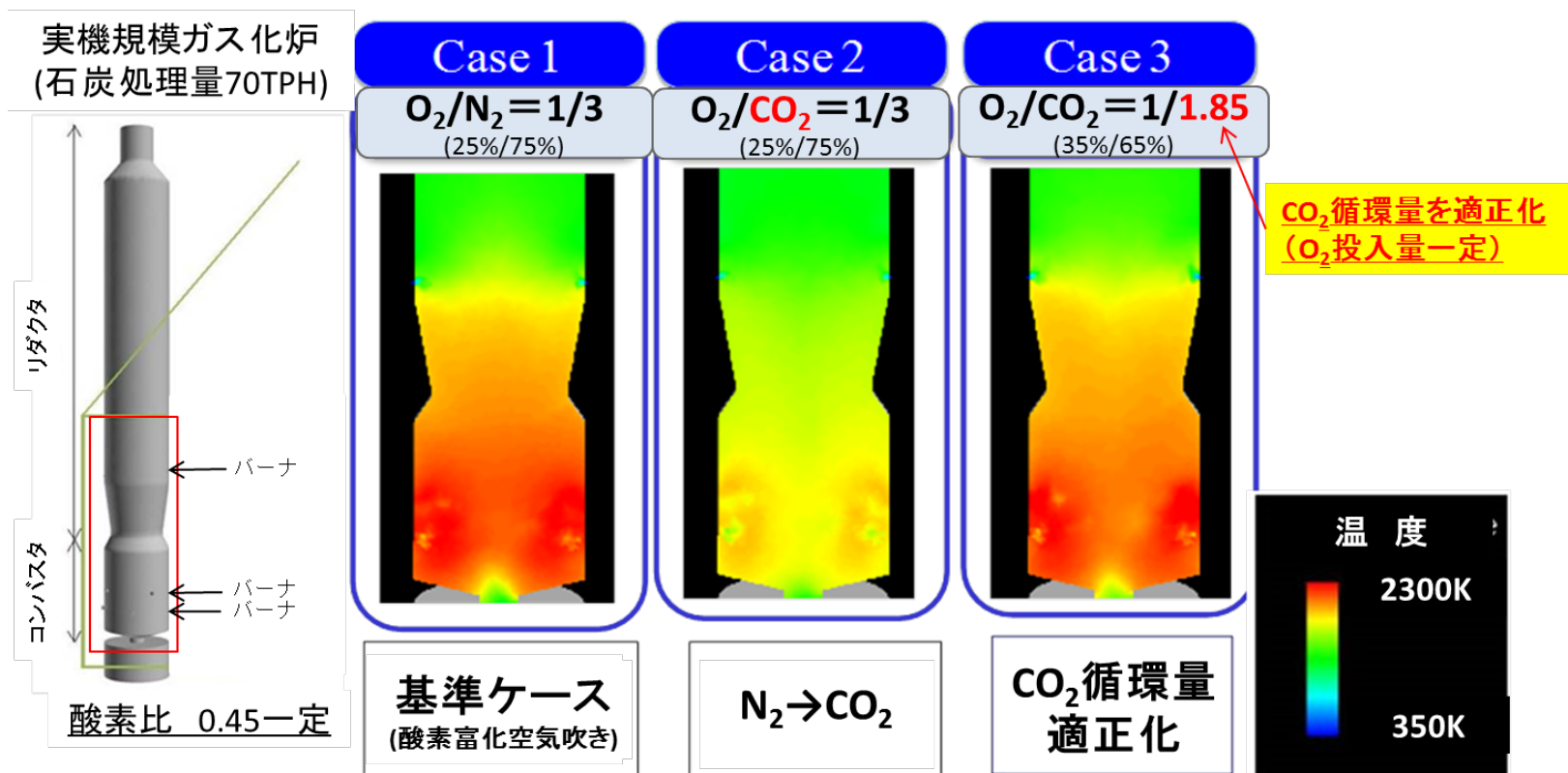
5. 本技術の普及に向けた検討

IV. 今後の展開

実機規模ガス化炉数値解析手法の構築 とCO₂投入時の影響検討



【目的】数値解析手法の構築とCO₂投入時の適正運転条件把握(炉内温度低下対策)



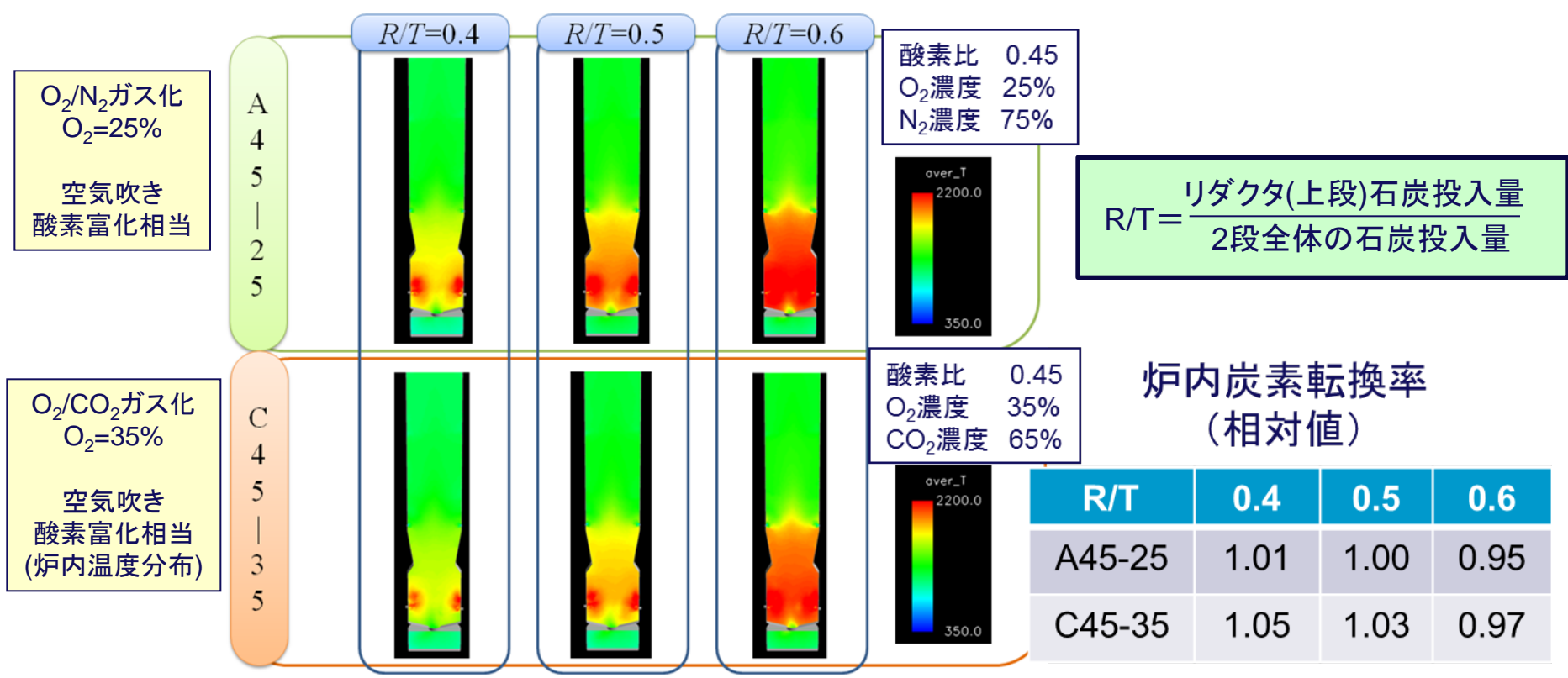
【成果】解析法を構築し、CO₂循環量の調整により炉内温度が維持可能と確認

【活用】実機規模ガス化炉の運転条件検討の手法とベース条件として活用



実機規模ガス化炉数値解析によるO₂/CO₂ガス化特性評価

【目的】O₂/CO₂ガス化炉の運転特性*の把握(*:主要運転指標の影響評価)



【成果】2室2段炉の主要運転指標であるR/Tの効果を確認

【活用】2室2段炉の高O₂濃度条件検討のためのベースデータが得られた



実機規模ガス化炉数値解析によるO₂/CO₂ガス化特性評価

【目的】O₂/CO₂ガス化炉の運転特性の把握

O₂/CO₂ガス化: O₂=80%
酸素吹き相当(O₂濃度)

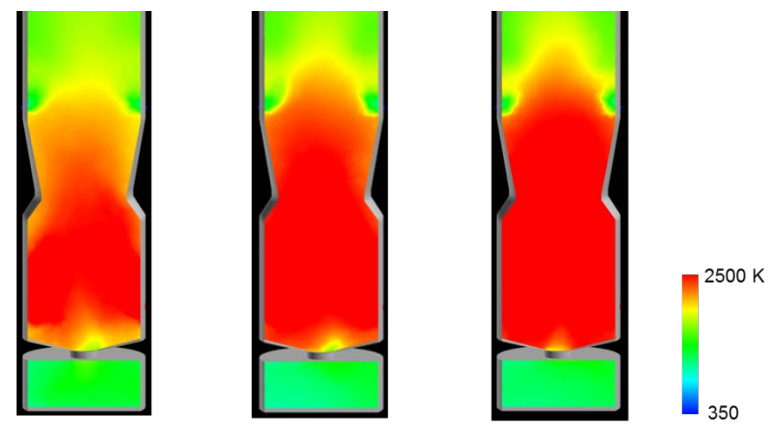
酸素比の影響

・高酸素濃度条件において、酸素比 λ がガス化炉内の温度分布に与える影響を明らかとした。

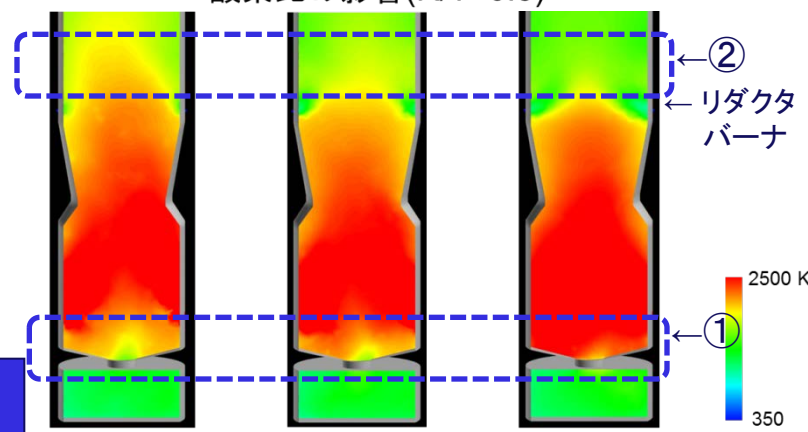
温度分布

R/Tの影響

・高酸素濃度条件において、R/Tがガス化炉内の温度分布に与える影響を明らかとした。
・R/Tが大きくなるとコンバスタ下部①などのガス温度が高くなる。
・R/T=0.1まで低下すると、リダクタ石炭によるケミカルクエンチ効果が低下し、リダクタバーナ後流②のガス温度上昇が顕著となる。



$\lambda=0.37$ $\lambda=0.39$ $\lambda=0.41$
酸素比の影響(R/T=0.3)



R/T=0.1 R/T=0.3 R/T=0.5
R/Tの影響($\lambda=0.37$)

【成果】 高O₂濃度条件において、2室2段炉の主要運転指標であるR/Tなどの影響を評価した。

【活用】パイロット、実機の設計や運転条件検討のベースデータとなる

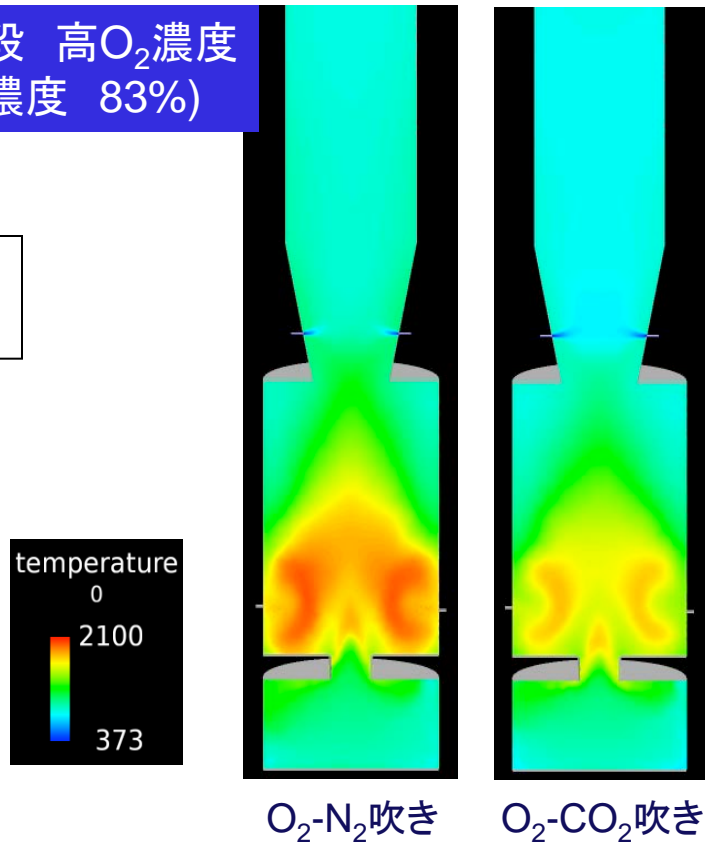


実機規模一室二段ガス化炉数値解析ツールの構築

【目的】O₂/CO₂ガス化コンセプトの適用範囲拡大を検討

一室二段 高O₂濃度
(O₂濃度 83%)

実機規模ガス化炉
(石炭処理量70TPH)



中間評価での
指摘を受けて実施

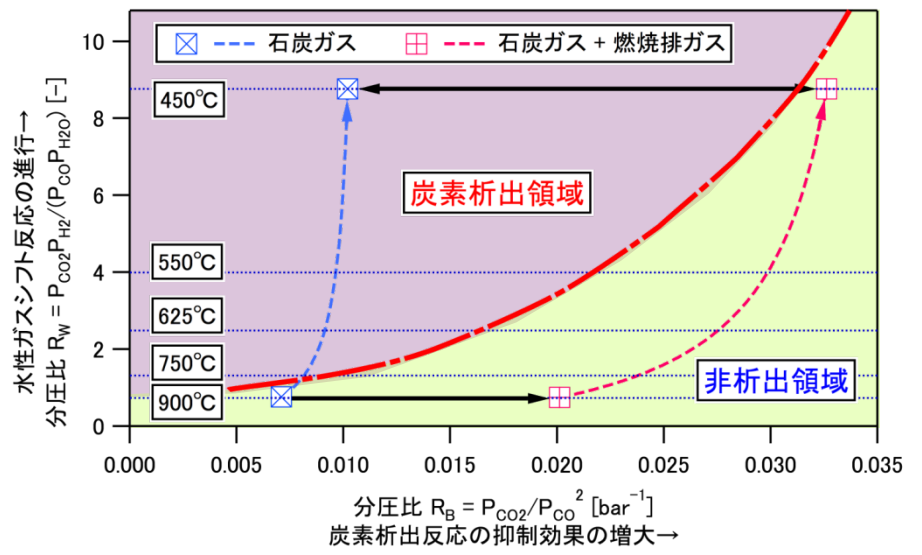
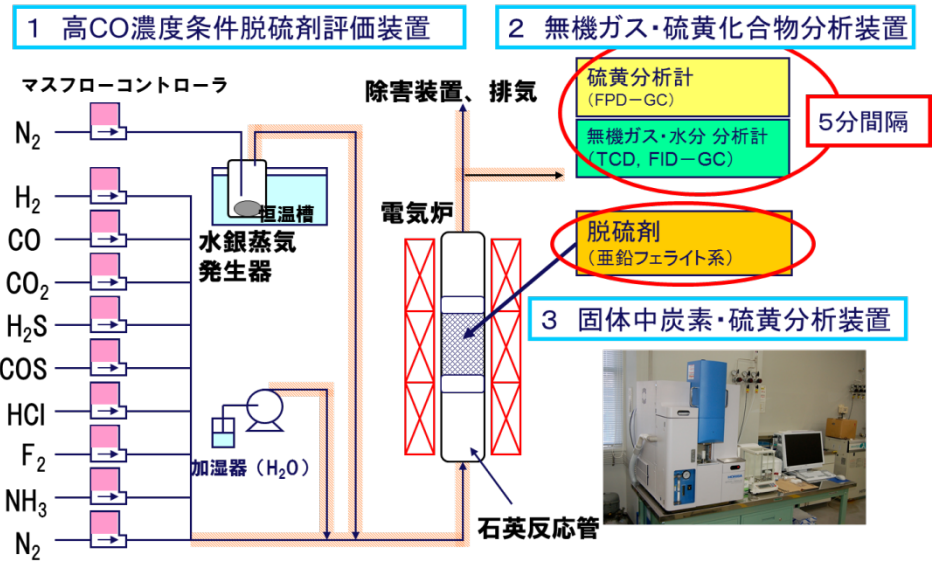
【成果】実機規模1室2段炉解析ツールを構築

【活用】次フェイズ以降、1室2段炉のO₂/CO₂ガス化への適合性検討に活用できる



高CO条件における炭素非析出条件の解明

【目的】高CO濃度ガスによる炭素析出対策の構築



添加ガスによる亜鉛フェライト脱硫剤の炭素析出抑制が可能な条件ならびに、その時の脱硫性能データを得た。

亜鉛フェライト脱硫剤の炭素析出抑制条件の把握

【成果】炭素析出させずに脱硫性能を発揮できる実機条件を明らかにした。

【活用】実機における乾式脱硫プロセスの運転条件を明確化できた。

高CO条件における炭素析出対策の構築

【目的】高CO濃度ガスによる炭素析出対策の構築

対策案

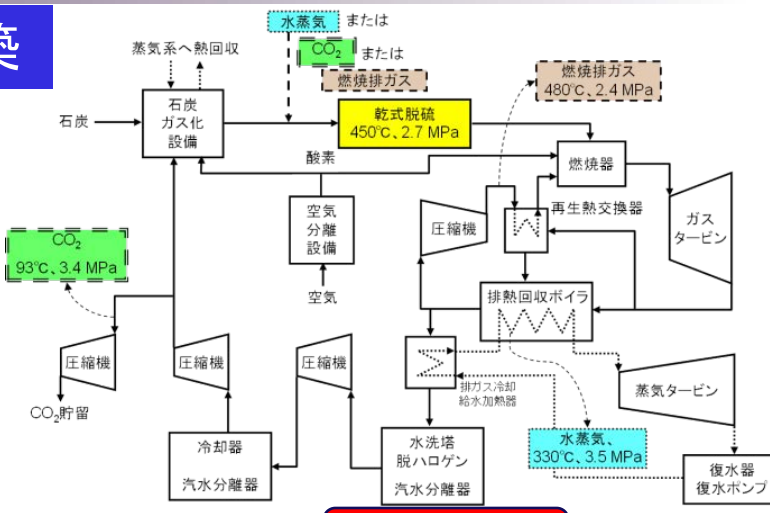
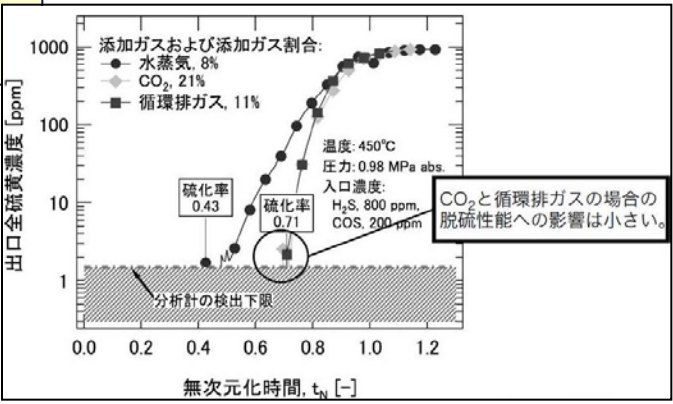
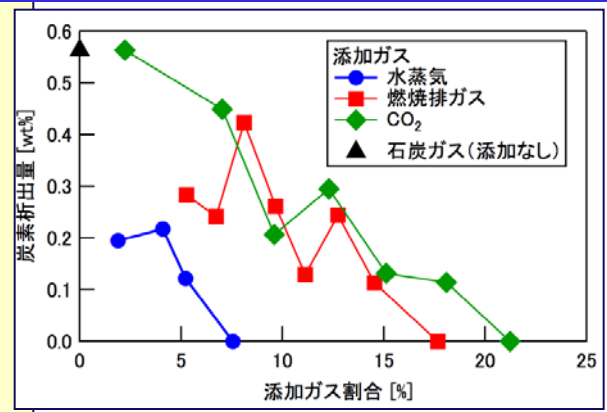
- ① 回収CO₂の添加**
 - ・Boudouard反応(炭素析出の主反応)

$$2CO \rightarrow CO_2 + C$$

$$K_B = PCO_2 / PCO^2$$
 ↑
 CO₂を添加して分圧比K_Bを増大させる。
- ② 水蒸気の添加**
 - ・水性ガスシフト反応(反応が進めばK_B増大)

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

$$K_W = PCO_2 PH_2 / (PCO PH_2O)$$
 ↑
 水蒸気を添加して反応を促進させる。
- ③ 燃焼排ガスの添加**
 - ・燃焼排ガスを添加し抑制。
(*: 燃焼排ガスはCO₂と水蒸気の混合ガス)



推奨対策

添加ガス	①回収CO ₂	②水蒸気	③燃焼排ガス
炭素析出抑制効果	○ 中	◎ 大	○ 中
必要ガス量	▲ 多	◎ 少	○ 中
添加ガス量比*1[-]	3.1	基準: 1.0	2.3
熱損失・必要動力	○ 中	▲ 大	◎ 小
消費熱量比*2[-]	0.7	基準: 1.0	0.2
脱硫性能への影響	◎ 小	▲ 大	◎ 小
総合評価	○	▲	◎

*1: 水蒸気を基準とする添加ガス量割合の比。
 *2: 消費水蒸気の熱量を基準とするCO₂加熱消費熱量および燃焼排ガス昇圧動力の比

【成果】十分な炭素析出抑制効果があり、熱効率低下の少ない(0.2%未満)対策を見出した。

【活用】プラント内で循環する排ガスを利用する実用的な対策である。
 (ベンチ炉で実条件における検証と大型化に向けて設備を検討)



小型ガス化炉によるCO₂富化試験法開発とガス化特性評価

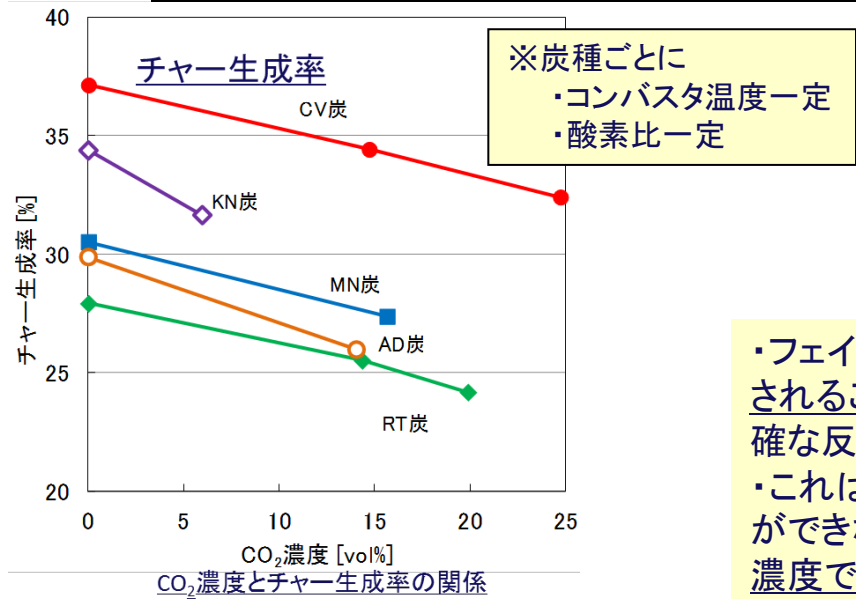
【目的】3炭種以上で高効率でガス化炉を運転できることを検証する

供試炭性状

炭種	RT炭	AD炭	SK炭	CV炭	DD炭	MN炭	KN炭
	インドネシア	インドネシア	中国	カナダ	中国	インドネシア	ロシア
発熱量(kJ/kg,気乾)	22.5	24.5	25.4	26.4	28.8	29.4	30.3
固有水分(%、気乾)	18.2	14.6	5.3	6.2	3.9	4.7	4.1
灰分(%、無水)	4.0	3.7	18.4	11.0	11.2	8.4	7.4
燃料比(-、無水)	0.93	0.98	1.70	1.42	2.26	1.25	1.35
N分(%、無水)	1.04	0.99	0.86	1.07	0.27	1.85	2.46
全硫黄(%、無水)	0.13	0.16	0.28	0.27	0.61	0.22	0.32
灰溶流点(°C、還元)	1240	1240	1400	1380	1470	1330	1310

亜瀝青炭から瀝青炭に渡る環太平洋地域の幅広い石炭を評価

- ・発熱量 22~30 kJ/kg
- ・燃料比 0.9~2.2
- ・水分 3.9~18.2%
- ・窒素分 0.3~2.5%
- ・硫黄分 0.2~0.6%
- ・灰溶流点 1240~1470°C



・フェイズ I の目標である3炭種以上でCO₂富化による反応が促進されることが確認されたが、灰溶流点 1400°C以上の2炭種では明確な反応促進効果を確認できなかった。

・これは小型炉固有の制約(O₂濃度28%以下)により十分な条件設定ができなかったことによる。次フェイズでは小型炉を改造し高いO₂濃度で高灰融点炭についても評価したいと考えている。

【成果】7炭種いずれもガス化運転可能、5炭種でCO₂富化による反応促進を確認

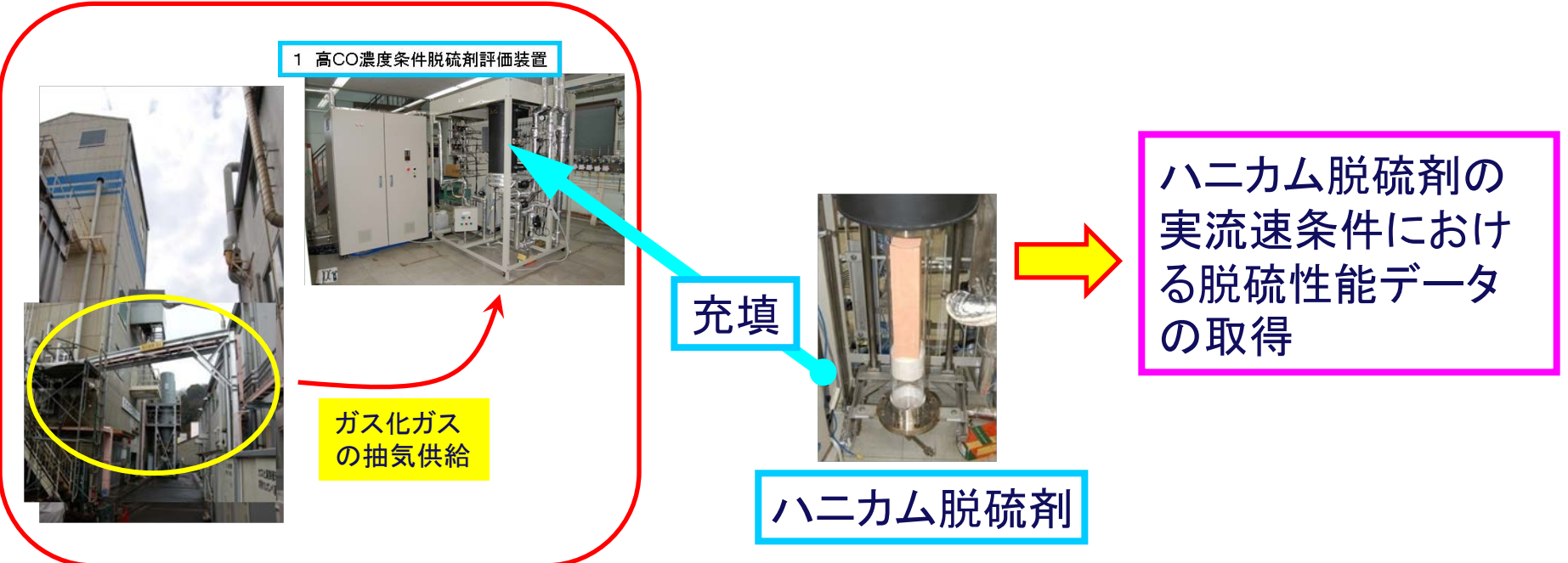
【活用】ベンチ炉試験に向けた試験炭選定のベースデータとなる



実ガス流速条件での脱硫剤性能評価と設計データ取得

【目的】ハニカム脱硫剤性能評価法の開発と設計データの取得

小型ガス化炉から抽気したガス化ガスを用いて、実機に用いるハニカム脱硫剤反応器の実機相当条件における硫黄化合物除去特性を評価する手法を開発し、ハニカム脱硫剤を用いる反応器の設計データを簡便かつ短時間に得られるようになった。



【成果】ハニカム脱硫剤の実流速条件での脱硫特性データを取得できるようになった。

【活用】次フェイズで製作が必要な乾式脱硫装置の基本設計に反映する。



事業の概要と目標

I. 研究の背景、目的および目標

II. 開発システムの特徴と本フェイズにおける開発課題

III. 実施項目の詳細および成果

1. 基本コンセプトの確認

2. 基盤技術の開発

3. 全体システム成立性の検討

4. 次フェイズの検討

5. 本技術の普及に向けた検討

IV. 今後の展開



プラントメーカーFSによる課題抽出とシステム改良

【目的】様々な機器、設備で構成される複雑なシステム、全体での課題を抽出

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

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
- ②GT排ガスの酸露点(約85~110℃)の考慮
- ③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

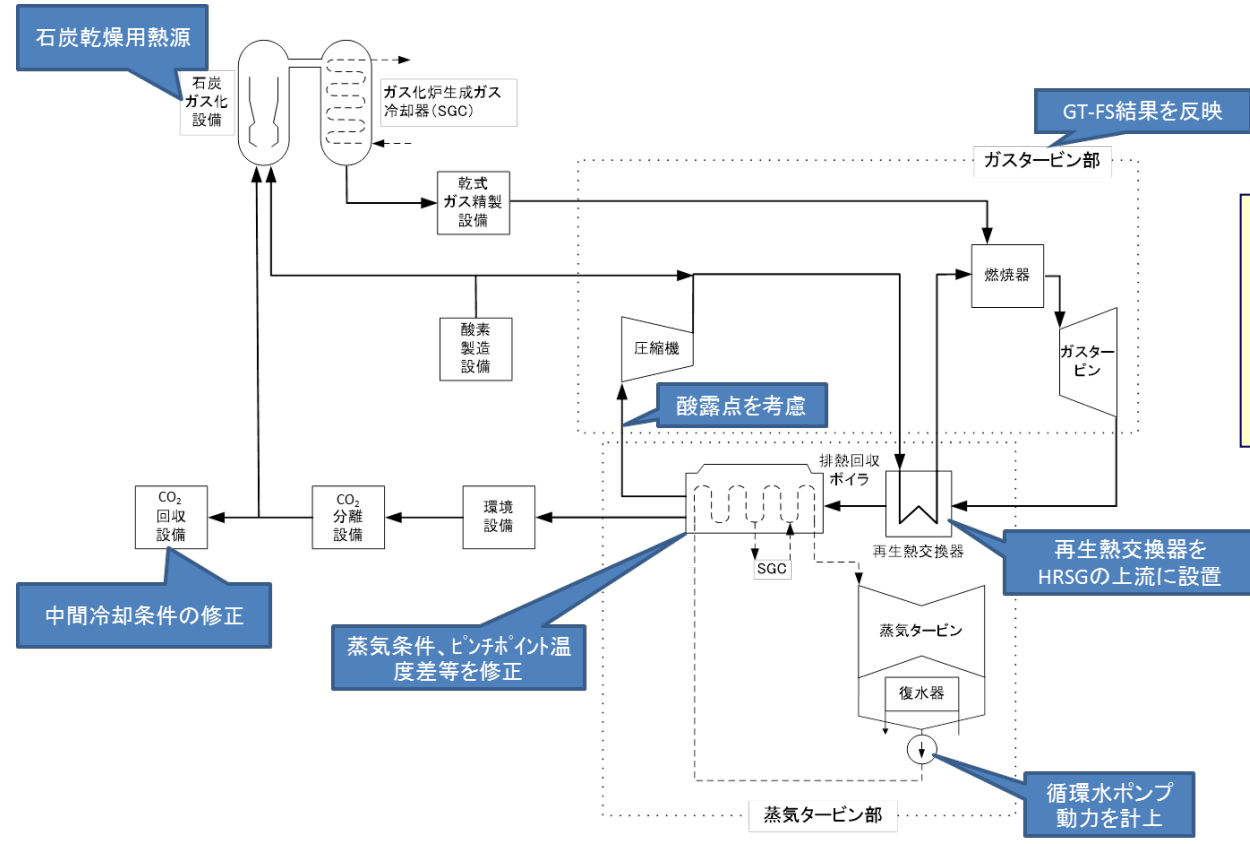
【成果】各機器の開発状況を整理し、本システムの課題を抽出した

【活用】実現性の高いシステムを構築するためのシステム構成見直しに反映



プラントメーカーFSによる課題抽出とシステム改良

【目的】実現性の高いシステムとなるようシステム構成などを見直す



再生熱交換器、ASUについては専門メーカーによる詳細検討が望ましい

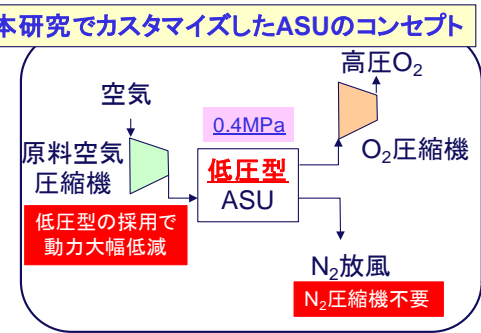
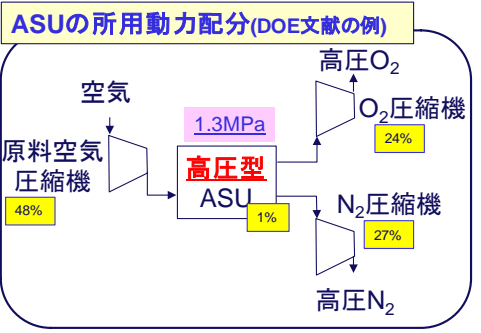
【成果】本システムの改良点を検討し、追加検討が必要な点を抽出した

【活用】本システムをベースに効率計算などを進め、専門メーカーによるFSも行う

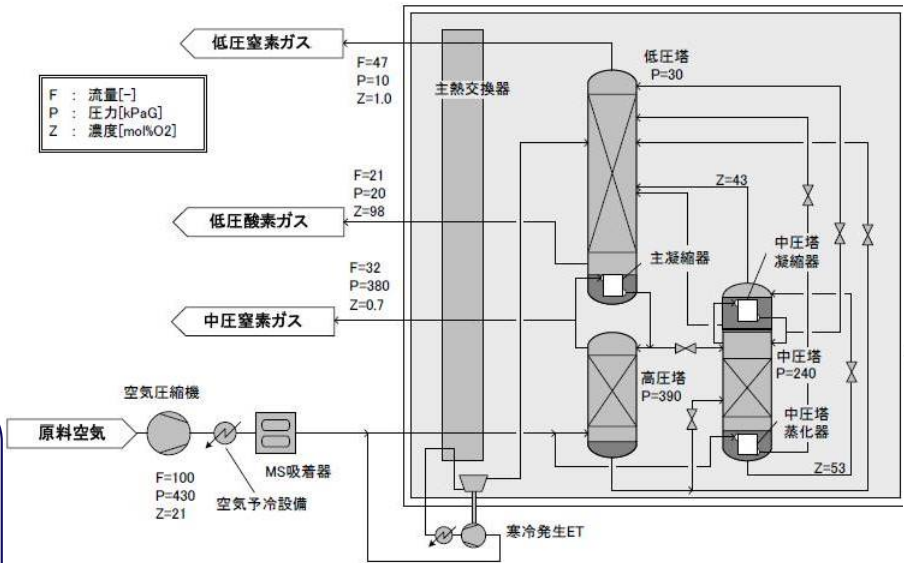


空気分離装置メーカーによるASUカスタマイズの検討

【目的】本システムにカスタマイズしたASUを試設計する

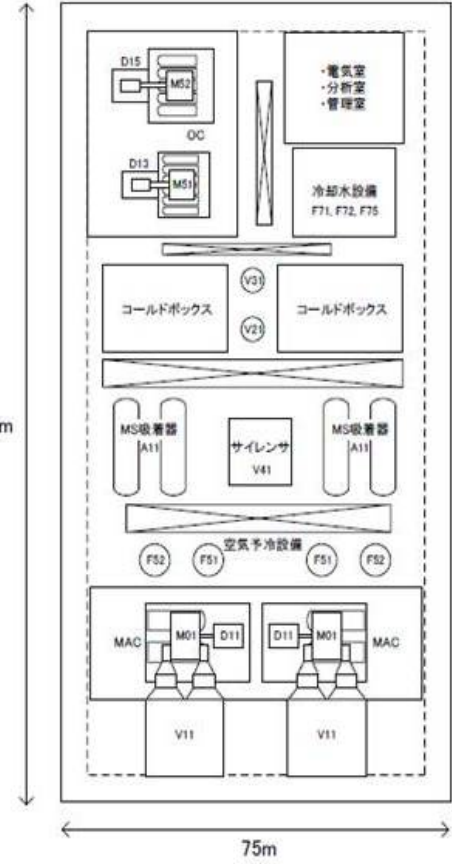


カスタマイズのコンセプト



カスタマイズASUの概要
(酸素圧縮機は省略)

(中間評価時文献値) 0.40 kWh/kg-O_2
 → (最新データ) 0.322 kWh/kg-O_2



カスタマイズASUのレイアウト

【成果】ASUの試設計により、酸素製造動力が低減されレイアウトが明らかとなった

【活用】本システムをベースに送電端効率や敷地面積などを評価する



再生熱交メーカーによる試設計

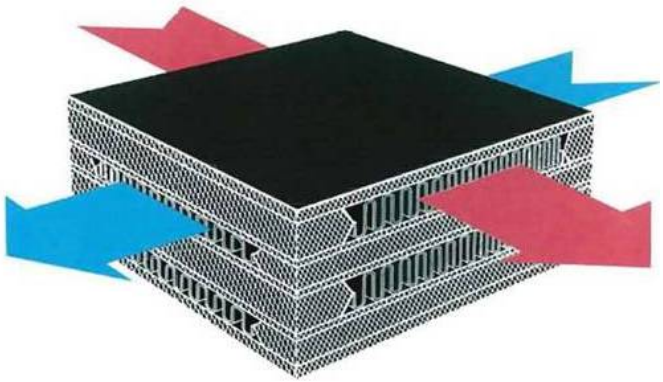
【目的】本システムの条件にあわせた再生熱交換器を試設計する

再生熱交換器とは

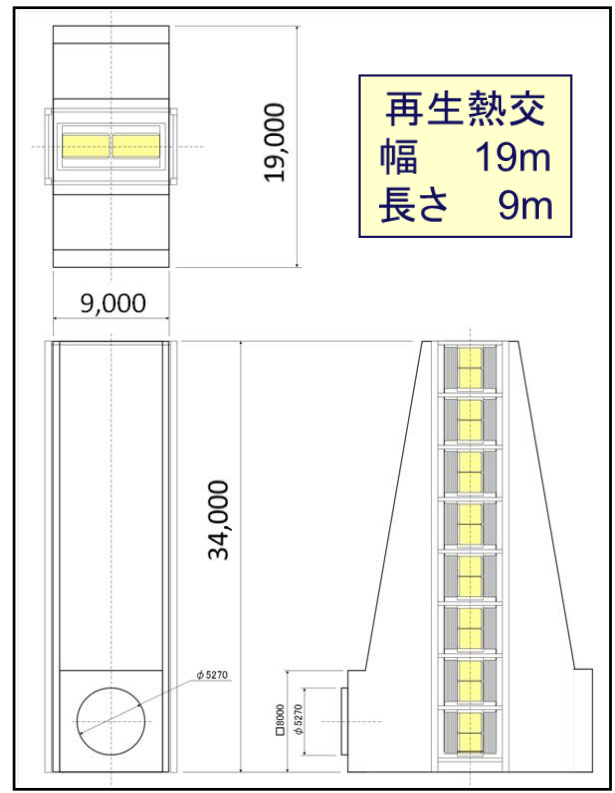
→ プレートフィン式の高性能ガス-ガス熱交換器

- ・シェル&チューブ式と比べ、体積比1/20のコンパクト化が可能
- ・耐圧、気密性、耐久性にすぐれる

直交流型



再生熱交換器のコンセプト(メーカーカタログより)



本システム用の再生熱交換器

【成果】従来にない大容量の再生熱交換器がコンパクト化できる見通しが得られた

【活用】本システムをベースに敷地面積などを評価する



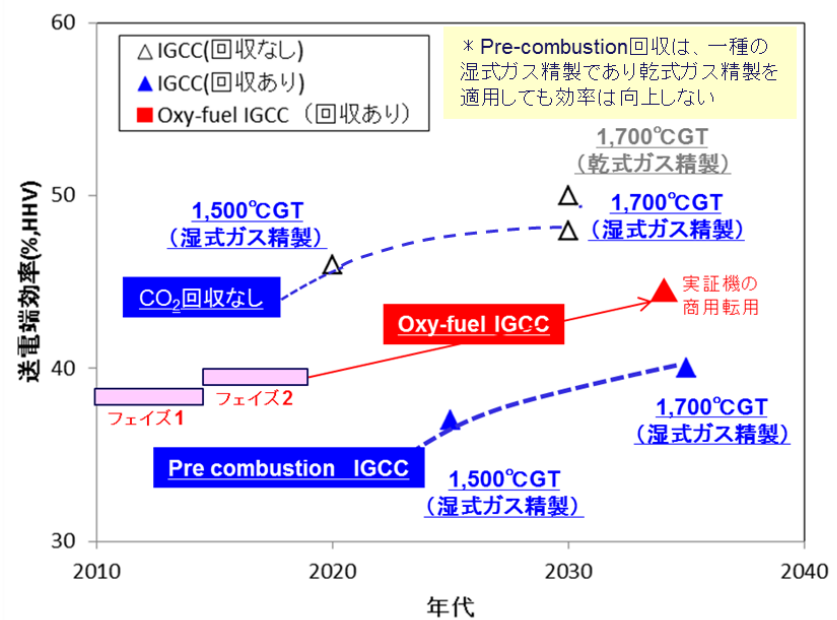
送電端効率の検討

【目的】本システムの送電端効率を評価する

メーカFS結果等を反映した最新システムを対象として、電中研が開発した効率計算ソフト EnergyWin™を用いて燃料比1.2~2.2と性状の異なる3炭種の送電端効率を計算した。

検討炭の概略性状と供試時の送電端効率

炭種	DD炭	MN炭	MO炭
	中国	インドネシア	豪州
発熱量(kJ/kg, 気乾)	28.8	29.4	30.0
固有水分(% , 気乾)	3.9	4.7	3.6
灰分(% , 無水)	10.8	8.4	9.6
燃料比(- , 無水)	2.26	1.25	1.86
酸素比(-)	0.38	0.38	0.38
送電端効率 (% , HHV)	43.8	43.6	43.6



商用段階における他システムとの効率比較

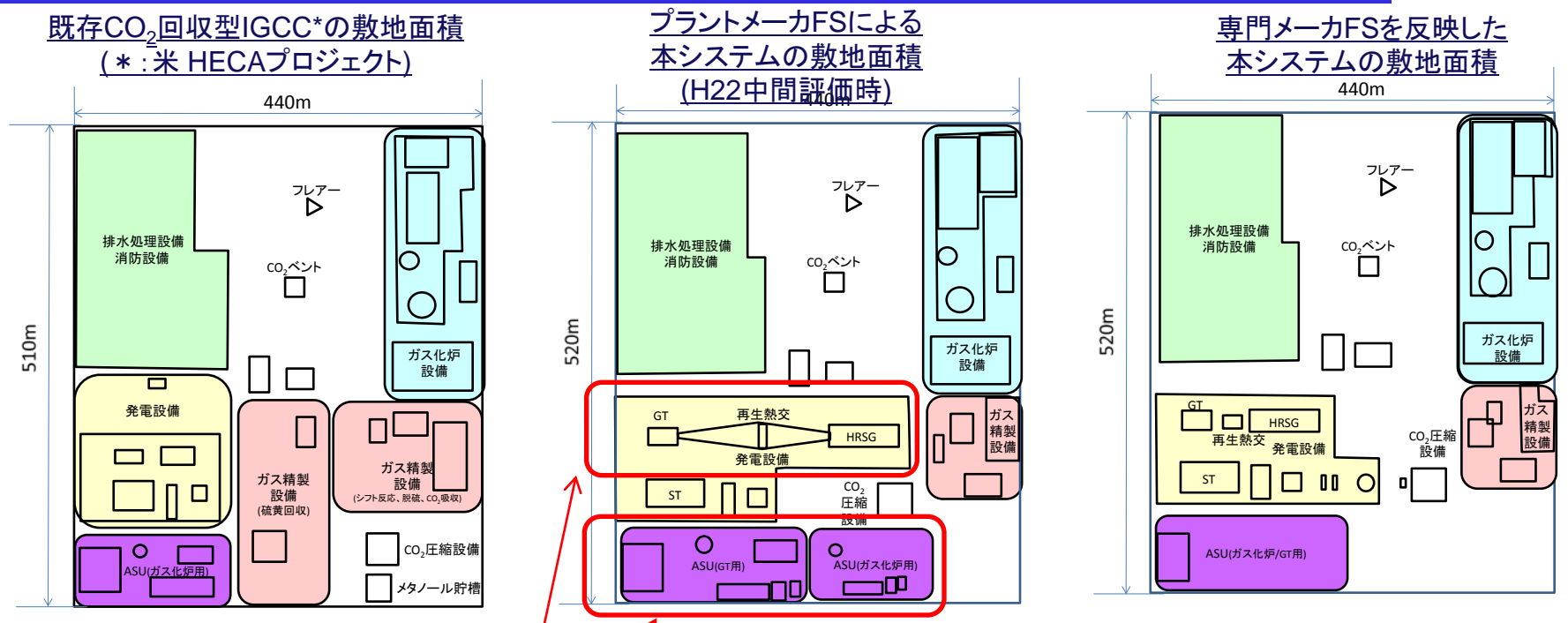
【成果】3炭種について、目標の送電端効率42%をクリアできることが確認された

【活用】本データを元に、次フェイズへの展開を図る

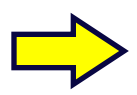


プラントレイアウトの検討

【目的】本システムの敷地面積が現実的な範囲にあることをみきわめる



【抽出課題】再生熱交とASUのスペースが著しく大きい



【専門メーカーFSI結果】再生熱交およびASUのコンパクト化が可能

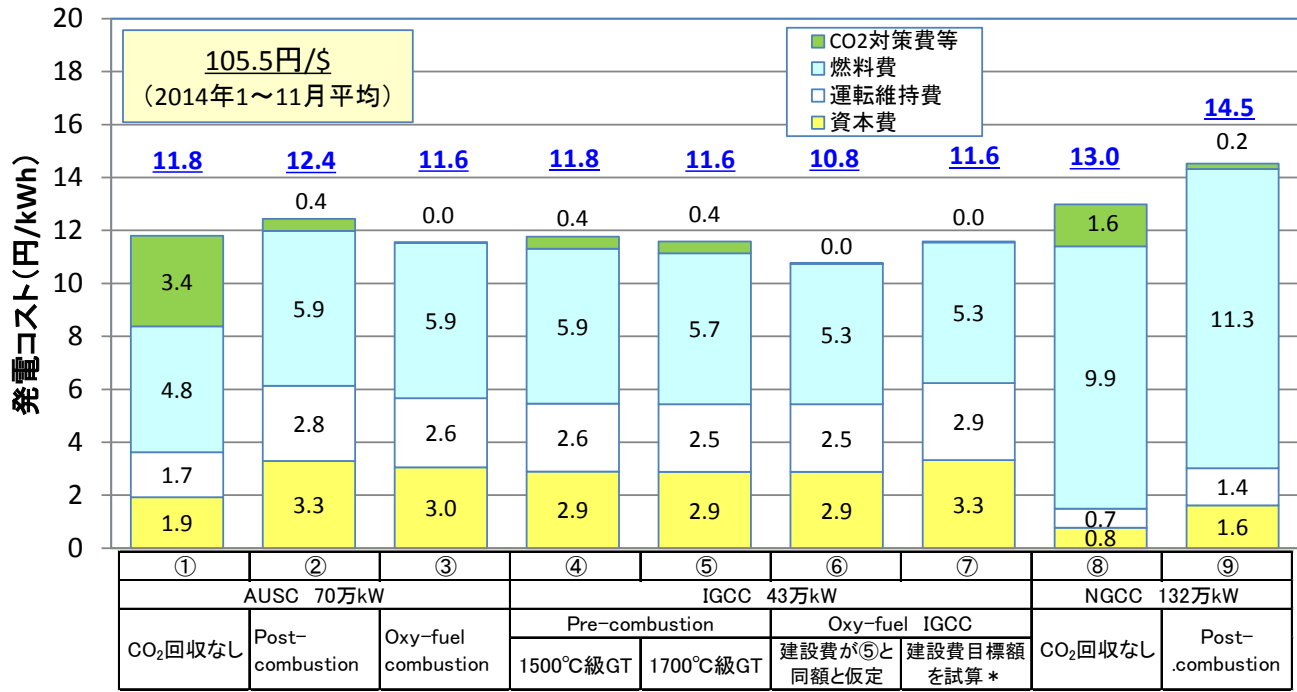
【成果】本システムの敷地面積が既存CO₂回収IGCCと同等以下であると確認した

【活用】本データを元に、次フェイズへの展開を図る



発電コストの検討

【目的】本システムの発電コスト面の優位性をみきわめる



* : ⑥はOxy-fuel IGCCの「発電コストが⑤の発電コストと同額」となる建設費を見積もった結果で、建設費が⑤の1.15倍未満なら発電コストが有利。

- 【試算法について】
- 1) コスト等検証委員会が公開した報告書のエクセルシートを用いて試算。
 - 2) 上記報告書の「2030年モデル石炭火力」(効率48%)を「AUSC」、「IGCC*」と考えた。(*: 1700°C級GT、湿式ガス精製)
 - 3) 出力は発電方式毎に統一、送電端効率とともに、ロードマップなどから、一般的と考えられる数値を設定。
 - 4) 稼働年数等は上記報告書の設定値で試算。(燃料費とCO₂価格はWorld Energy Outlook2013データに更新)
 - 5) ①、⑧の所内率や建設費単価などは上記報告書、②～⑦、⑨については、DOE/NETL報告書などのデータを元に設定。

本システムの建設費が1,700°C級GTのPre-Combustion回収型IGCCの1.15倍未満であれば発電コストが有利

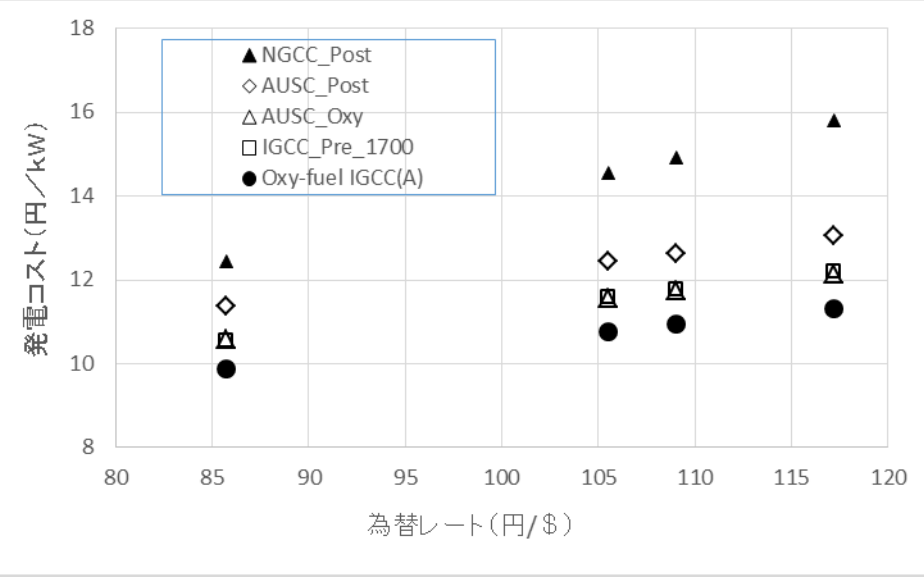
【成果】ターゲットとなる建設費をみきわめた

【活用】本データを元に、次フェイズへの展開を図る

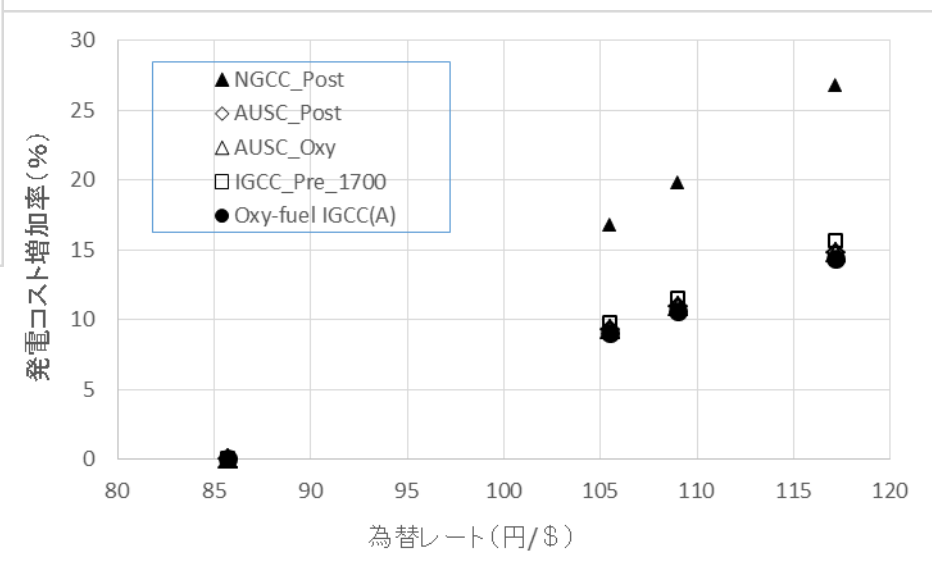


為替レートの発電コストへの影響検討

【目的】本システムの発電コスト面の優位性をみきわめる



85.74円/\$: 2010年の年間平均レート*
 105.50円/\$: 2014年1~11月の平均レート
 108.99円/\$: 2014年10月の月間平均レート
 117.21円/\$: 2014年11月の月間平均レート
 (* : 三菱東京UFJ銀行のTTSLレート)



発電コスト増加率 = (その時点の発電コスト) ÷ (為替レート85円の時の発電コスト)

【成果】高効率な本システムは為替レートに関わらずCCS火力中での優位性を保つ

【活用】本データを元に、次フェイズへの展開を図る



事業の概要と目標

I. 研究の背景、目的および目標

II. 開発システムの特徴と本フェイズにおける開発課題

III. 実施項目の詳細および成果

1. 基本コンセプトの確認

2. 基盤技術の開発

3. 全体システム成立性の検討

4. 次フェイズの検討

5. 本技術の普及に向けた検討

IV. 今後の展開



次フェイズ機器検討(既設炉改造と新設の比較)

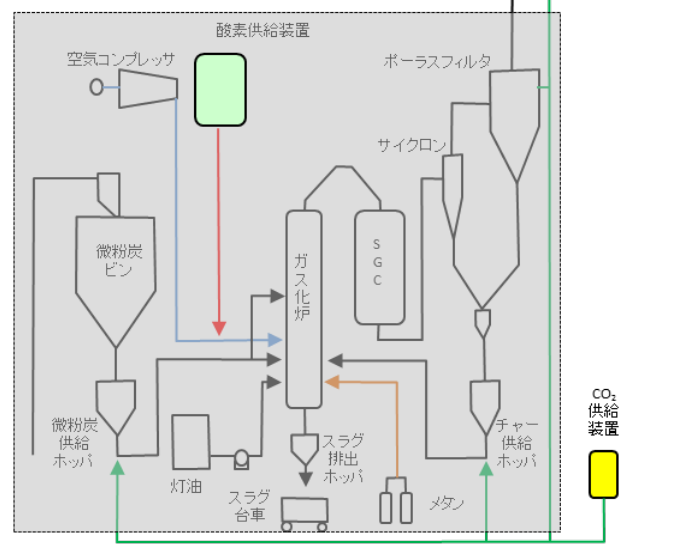
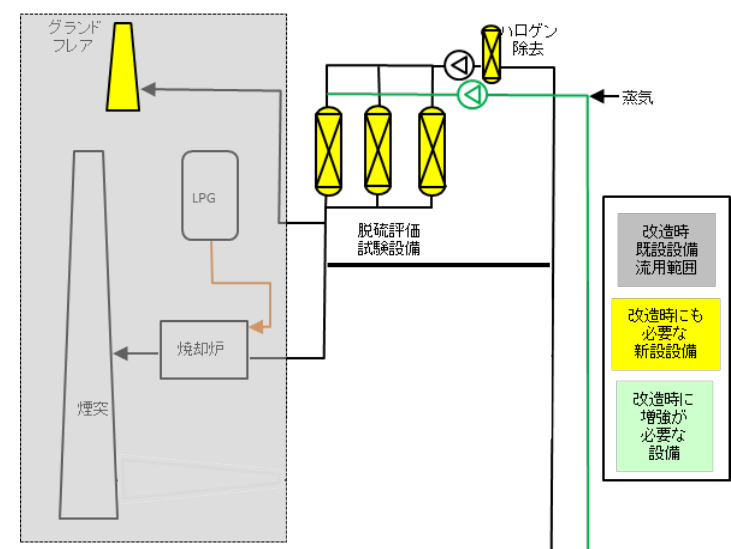
【目的】次フェイズ計画／設置機器を検討する

項目	ガス化炉試験設備を新規設置	ガス化炉試験設備を流用
連続試験時間	約100時間※	約50時間
データ取得可能試験条件数	5条件 (1回の試験あたり)	2条件 (1回の試験あたり)
設備系統	・既設ガス化炉設備と同様 ・CO ₂ 供給、原炭処理設備を新設	・既設ガス化炉設備を流用 ・CO ₂ 供給設備を追加
設備配置	—	既設高圧ガス設備横にCO ₂ 供給設備を配置
建設工程	13.5ヶ月	11ヶ月
建設コスト	△	○

※ 新設炉では、1試験の連続ガス化運転時間でより多くの条件を設定でき、効率的に試験できるよう、100時間程度を想定した設備容量とした。

【成果】次フェイズで使うガス化炉は、メーカー既設炉(改造)で対応できることを確認

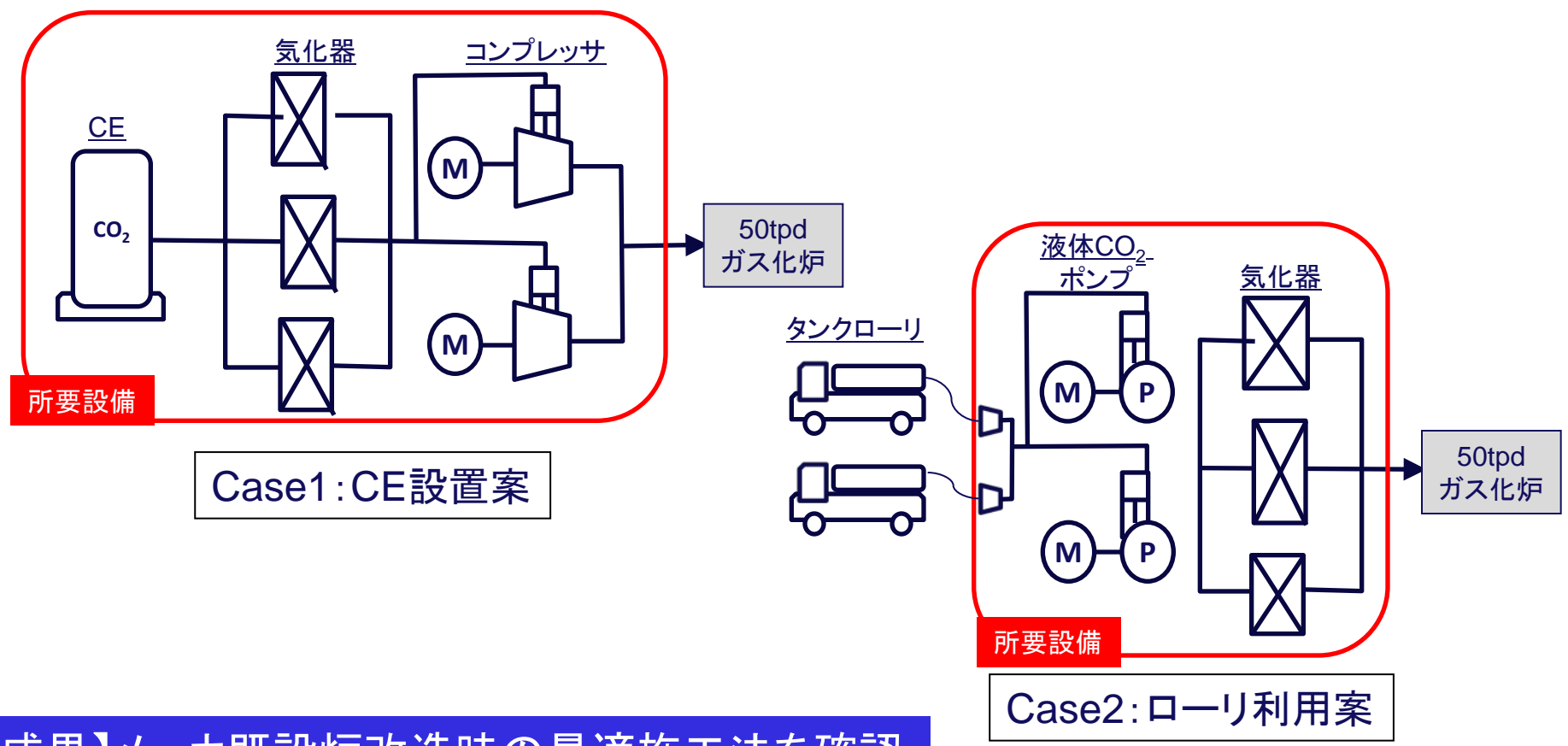
【活用】本検討をベースに関連機器の試設計や次フェイズ計画の検討を進める





【検討の一例】CO₂供給設備の方式検討

【目的】ベンチ炉の主要追設設備であるCO₂供給設備の検討



【成果】メーカー既設炉改造時の最適施工法を確認

【活用】本検討をベースに関連機器の設計などを進める



GT基礎燃焼試験(単一バーナ基礎燃焼試験)

【背景】従来のセミクローズドGT燃焼器開発はH₂O循環による試験評価であり、本システムのような多量のCO₂循環を想定した試験評価はなされていない

プロジェクト	燃料ガス	酸化剤	希釈剤 (試験評価時)	量論比条件での 燃え切り性	試験評価時の 課題
WE-NET	H ₂	O ₂	H ₂ O	H ₂ の酸素燃焼であり、燃え切り性は 良好	—
CO ₂ 回収対応クローズド型高効率GT技術	天然ガス(主にCH ₄)	O ₂	CO ₂ +H ₂ O (<u>H₂Oのみ</u>)	CH ₄ の酸素燃焼であり、燃え切り性は比較的 良好	希釈剤中CO ₂ の影響検討未実施
本プロジェクト	CO(74%) +H₂(26%)	O ₂	CO₂(72%) +H₂O(28%)	燃え切り性の悪いCOを多く含む燃料のため酸素燃焼でも、 <u>量論比に近い条件</u> で燃焼効率を上げるには、 <u>基礎的な燃焼データの収集が必要</u> 。	・希釈剤中CO₂の影響検討が必要 ・燃料中不純物の検討も重要

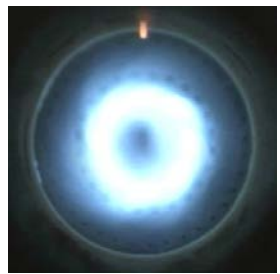
・CO₂を主成分とする希釈剤を用いた検討事例はなく、基礎データの取得が必要。
 ・これまで未検討である排ガス循環の影響についても、早期に検討する必要がある。



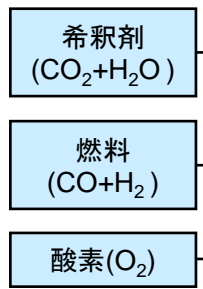
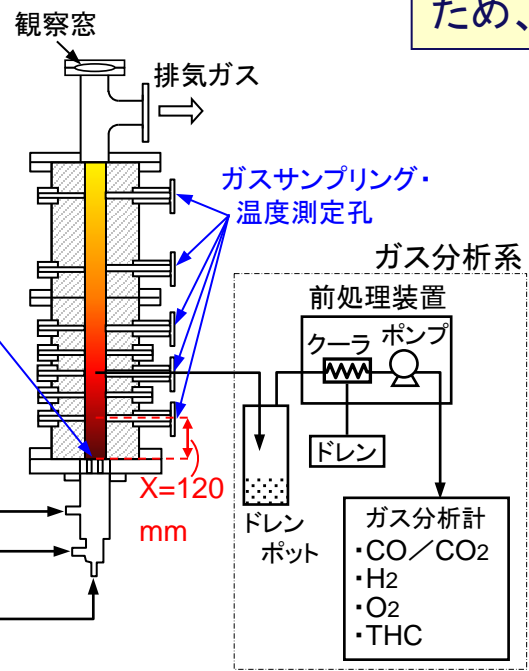
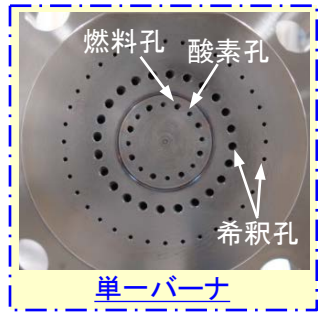
GT基礎燃焼試験(単一バーナ基礎燃焼試験)

【目的】次フェイズで本格検討するGT燃焼器の基礎データ収集

- セミクローズドGTの燃焼器設計に必要な燃焼特性基礎データ(希釈剤中CO₂の影響等)取得
- 微量成分(NH₃)の挙動評価とそれによる課題抽出 ⇒ 循環ガスへの影響検討を開始



セミクローズドGTを想定した循環ガス(CO₂+H₂O)中での燃料(CO+H₂)と酸素の量論比近傍での燃焼が可能な単一バーナによる大気圧燃焼試験装置。
 燃料中微量成分の循環ガスへの影響検討を開始するため、NH₃供給・分析系等を今年度12月に設置予定。

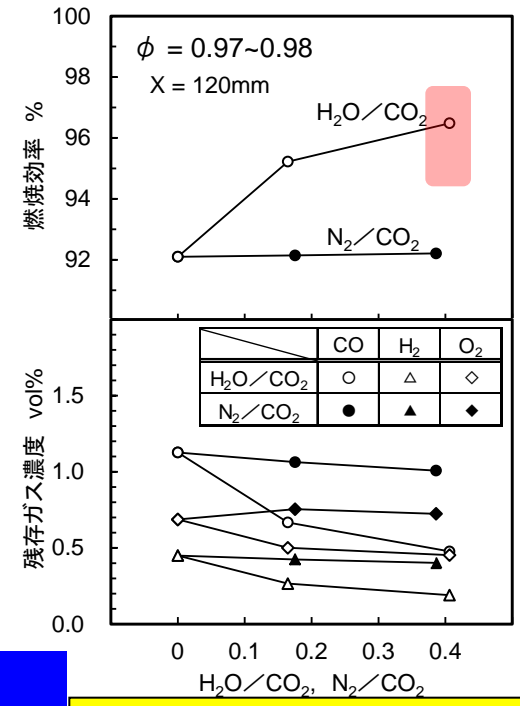
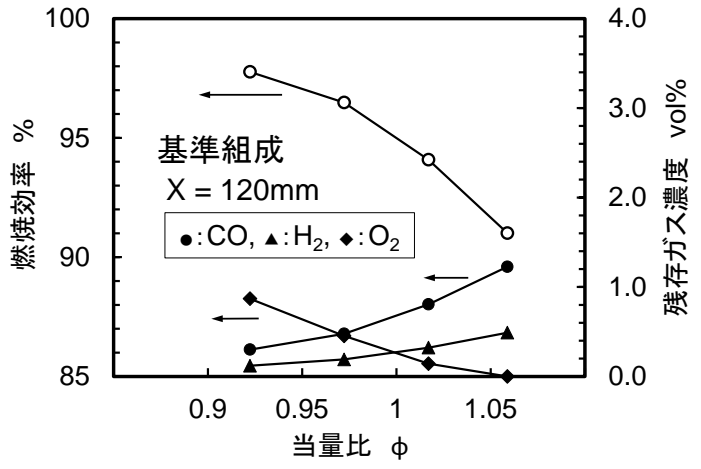
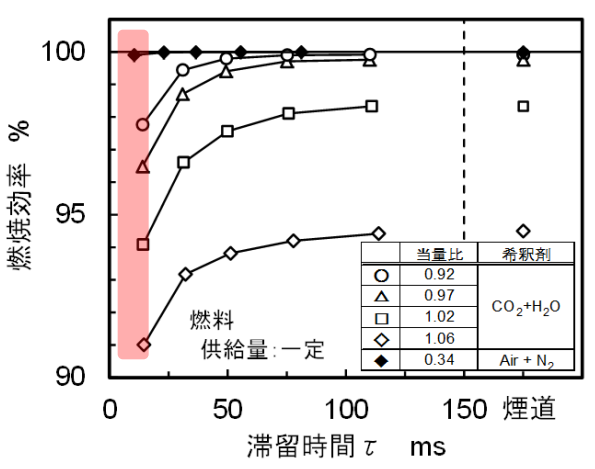


- 主な仕様
- ・燃料供給系
 - 組成: CO, H₂, CH₄, CO₂
 - 入口温度: 最大400°C
 - ・酸素供給系
 - 入口温度: 常温
 - ・希釈ガス供給系
 - 組成: CO₂, H₂O, (Air, N₂)
 - 入口温度: 最大400°C
 - ・燃焼装置本体:
 - 寸法: 内径65mm × 高さ900mm
 - ・分析装置
 - CO/CO₂計、H₂計、O₂計、THC計



GT基礎燃焼試験(単一バーナ基礎燃焼試験)

【目的】 基準組成(1350°C条件)における当量比、滞留時間と燃焼効率の関係を把握する
 燃焼効率に及ぼす希釈剤組成(H₂O/CO₂比)の影響を把握する



燃焼器を想定した滞留時間では、量論比条件における燃焼効率は低い

【成果】

- ・燃焼効率の向上には、当量比φ<1とし、滞留時間を長くする工夫が必要
- ・H₂O/CO₂比は、燃焼効率や残存ガス量に大きな影響を及ぼす

従来のセミクロードGTの燃焼器開発はH₂O循環による試験評価であり、**多量のCO₂を循環する本システムの燃焼器開発の技術的難度は極めて高い**

【活用】 次フェイズに行うGT燃焼器設計に向けた基礎データとして活用

事業の概要と目標

I. 研究の背景、目的および目標

II. 開発システムの特徴と本フェイズにおける開発課題

III. 実施項目の詳細および成果

1. 基本コンセプトの確認

2. 基盤技術の開発

3. 全体システム成立性の検討

4. 次フェイズの検討

5. 本技術の普及に向けた検討

IV. 今後の展開



(1)炭種適合性評価のための基盤技術開発

① O₂/CO₂ 吹き対応チャーガス化反応モデルの構築

→ 実機規模ガス化炉数値解析へ反映

② O₂/CO₂ガス化雰囲気におけるスート生成挙動解明と チャーガス化反応モデルの高精度化

→ 次フェイズ以降に数値解析に組み込み、精度向上を図る

③ スラグ排出性評価技術の開発

→ スラグ排出性評価技術の構築に向け、NMRを用いた石炭灰の類型化手法、排出性予測モデル、高温溶融挙動直接観察法、などを開発した。

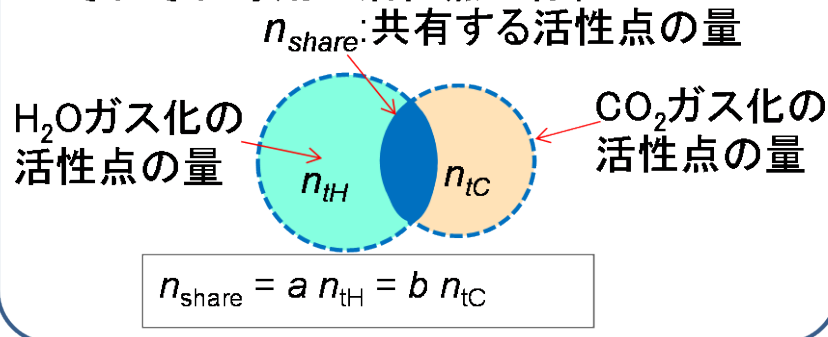
(1) ① O₂/CO₂ ガス化のチャーガス反応モデル構築

【目的】O₂/CO₂ガス化に適用できる反応モデルを構築する

Langmuir-Hinshelwoodモデル

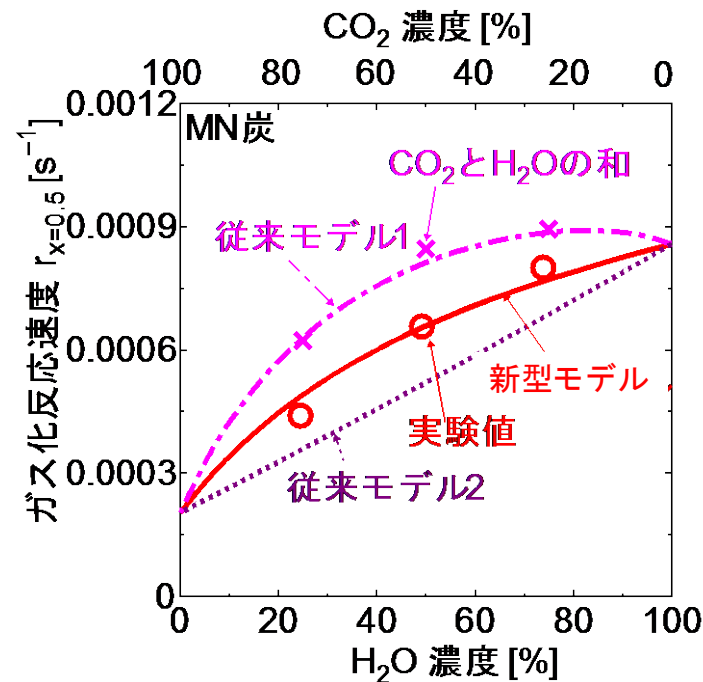
新型モデル

CO₂ と H₂O で共有する活性点と
それぞれ専用の活性点が存在



$$r = \frac{k_{11}P_{CO_2}}{1 + k_{12}P_{CO_2} + k_{13}P_{CO} + \frac{a}{c}k_{22}P_{H_2O} + \frac{a}{c}k_{23}P_{H_2}} + \frac{k_{21}P_{H_2O}}{1 + bck_{12}P_{CO_2} + bck_{13}P_{CO} + k_{22}P_{H_2O} + k_{23}P_{H_2}}$$

$$c = \left(\frac{a}{b} \right) \frac{1 + (1-b)k_{22}P_{H_2O} + (1-b)k_{23}P_{H_2}}{1 + (1-a)k_{12}P_{CO_2} + (1-a)k_{13}P_{CO}}$$



TGによるチャーのCO₂-H₂O競合ガス化
(950°C、全圧:0.1 MPa、CO₂とH₂Oの合計:100%)

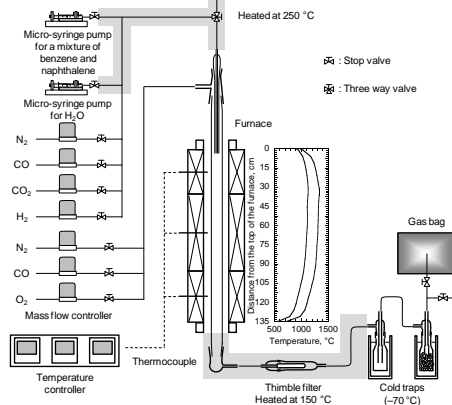
【成果】O₂/CO₂ガス化炉用の反応モデルを構築した

【活用】開発した反応モデルを実機規模ガス化炉数値解析ツールに組み込んだ

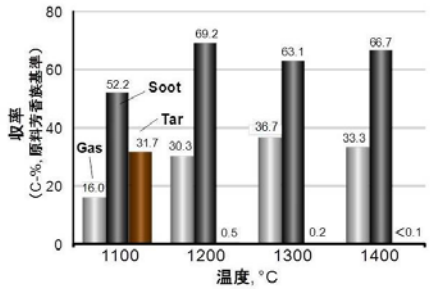
(1)(2) O₂/CO₂ガス化における

スート生成挙動解明とチャーガス化反応モデルの高精度化

【目的】O₂/CO₂ガス化に特有なスート生成挙動を解明する

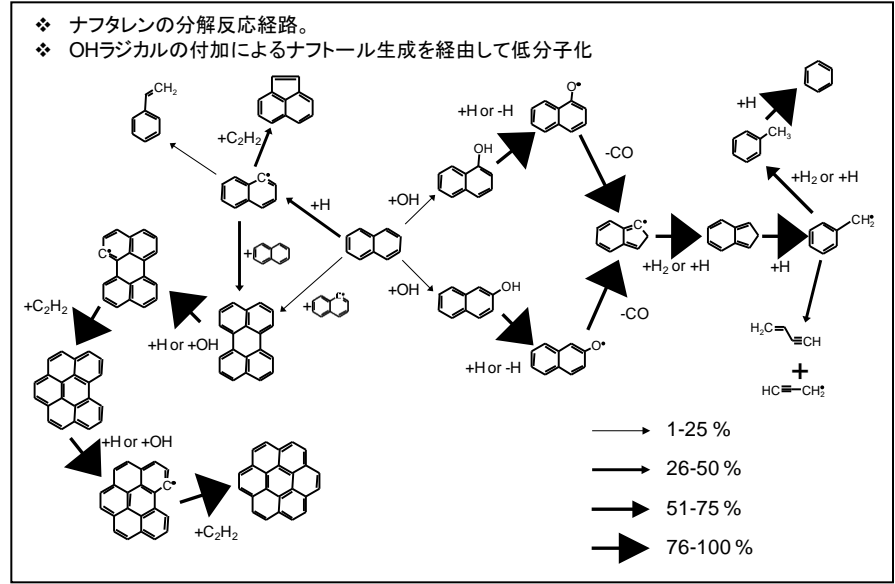


縦型管状反応器の概要(九州大学)

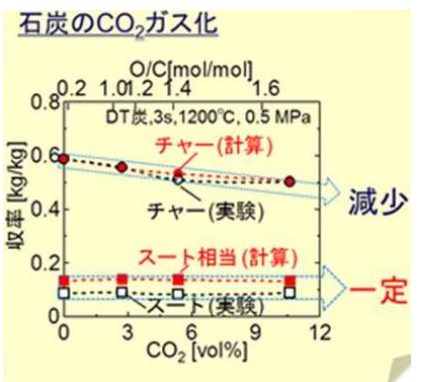
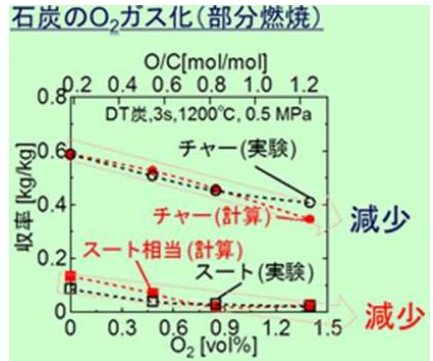


T _r / °C	1100	1200	1300	1400
転換率 / %	72.1	99.6	99.8	>99.9

芳香族混合物の分解・改質試験(一例、九州大学)



解明したスート生成経路



PDTF試験におけるスート挙動とモデルによる計算値の比較

【成果】開発した初期熱分解モデルと詳細反応モデルを用いてスート生成挙動を解明した

【活用】数値解析ツールに組み込める反応モデルを開発する

(1)③スラグ排出性評価技術の開発

a) NMRを活用した炭種による石炭灰及びスラグの構造類型化と高温粘度特性との相関検討

【目的】NMR分析データを元にスラグ排出性を予測する手法を見出す

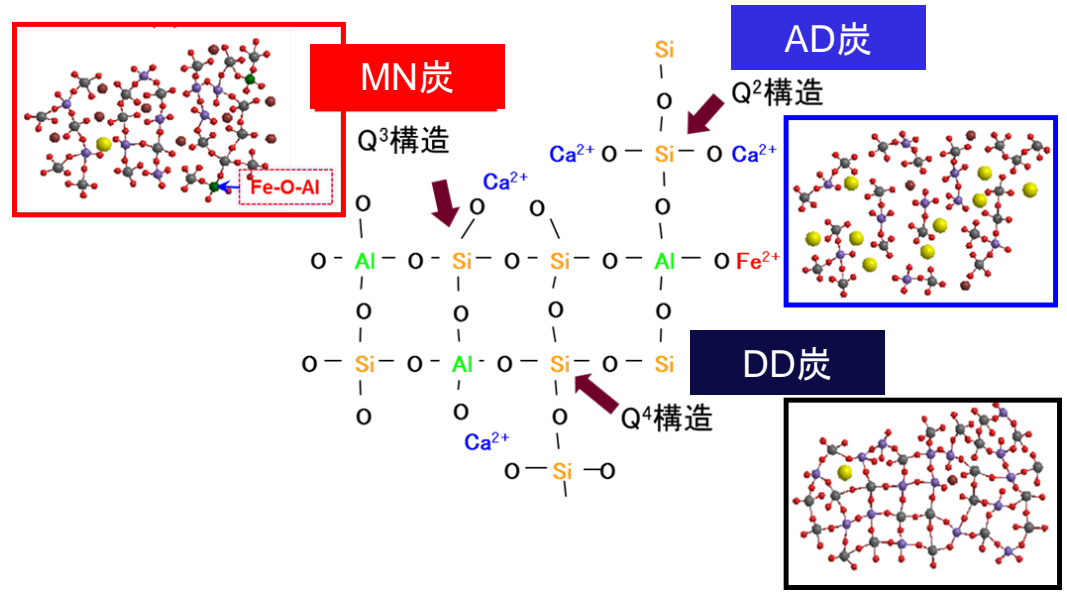
800 MHz多核固体NMR装置

測定可能核種:

^1H , ^2H , ^{13}C , ^{14}N , ^{15}N , ^{17}O , ^{23}Na , ^{25}Mg , ^{27}Al , ^{29}Si , ^{43}Ca , ^{51}V , ^{61}Ni , ^{95}Mo , ^{97}Mo など



多様なアジア炭灰の構造類型化



【成果】NMRによる灰・スラグ構造評価法を開発し、高温粘度との相関を解明した

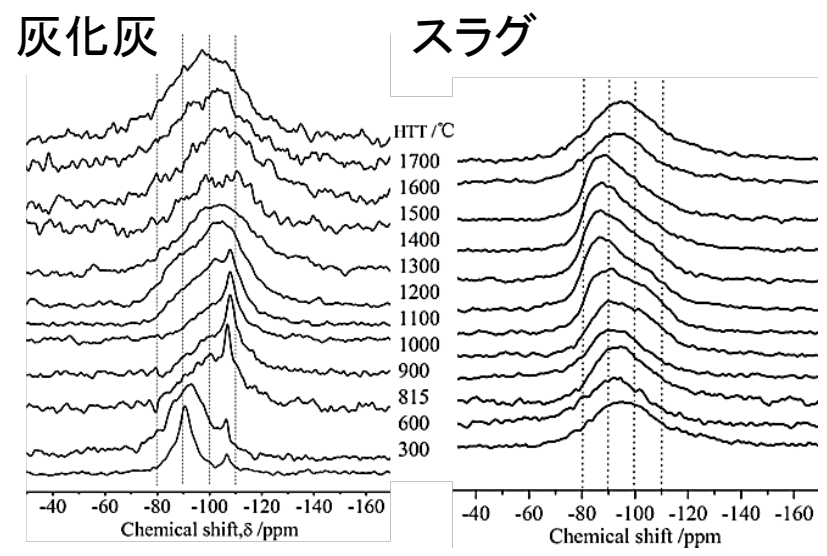
【活用】スラグ排出性評価技術開発のベースとする

(1)③スラグ排出性評価技術の開発

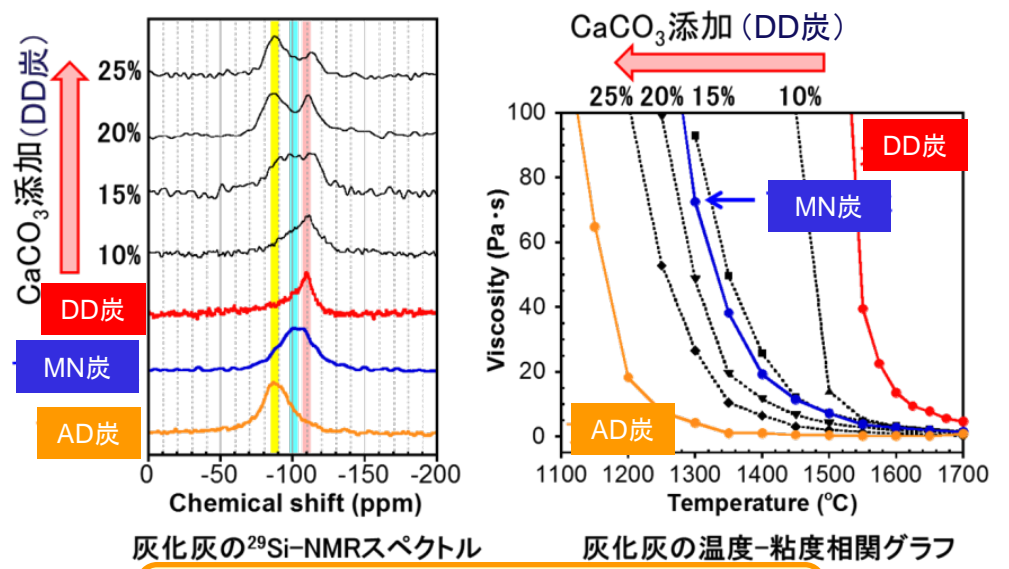
a) NMRを活用した炭種による石炭灰及びスラグの構造類型化と高温粘度特性との相関検討

【目的】NMR分析データを元にスラグ排出性を予測する手法を見出す

石炭灰とスラグの高温構造変化の違いの把握



NMRによる構造評価と高温溶融性の相関説明



NMRスペクトルと溶融特性が良い相関 (CaCO₃ 15wt%添加したDD炭灰化灰 = MN炭灰化灰)

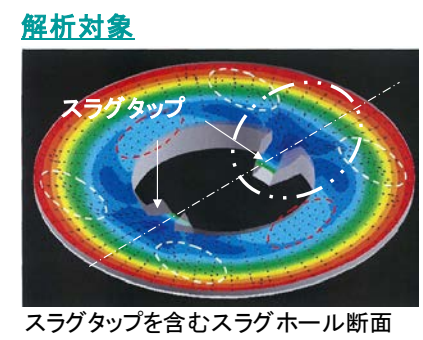
【成果】NMRによる灰・スラグ構造評価法を開発し、高温粘度との相関を説明した

【活用】スラグ排出性評価技術開発のベースとする

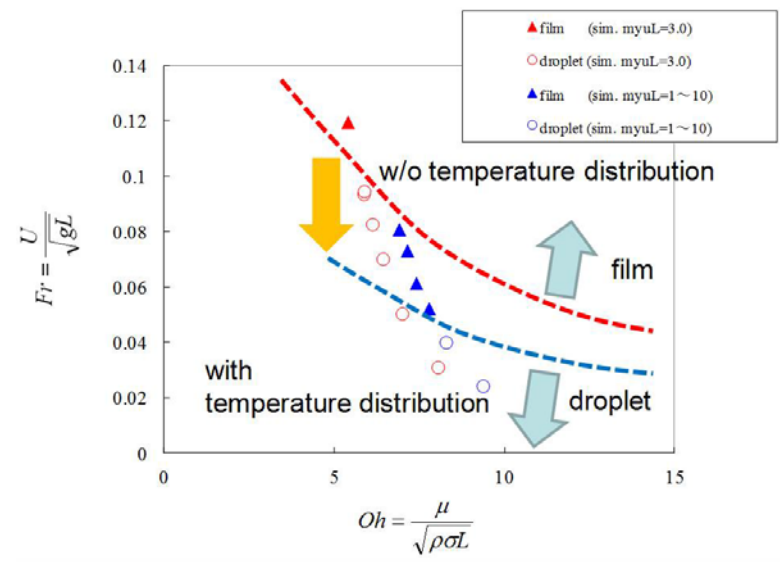
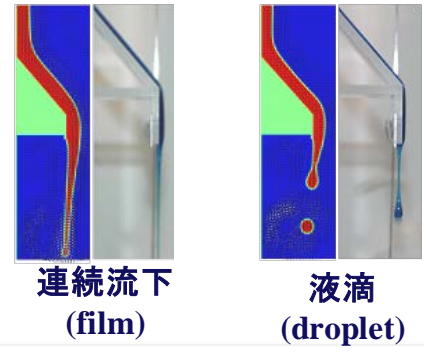
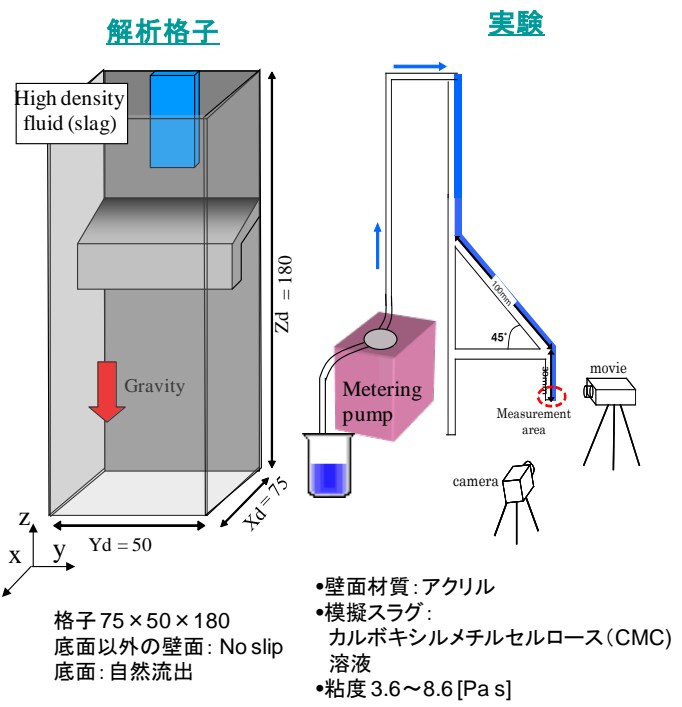
(1)③スラグ排出性評価技術の開発

b)スラグ排出現象の類型化と予測モデルの開発

【目的】スラグ排出現象を類型化する



- パラメータ**
- スラグ粘度 μ
 - 表面張力 σ
 - 重力 g
 - スラグ流入量 Q
- 無次元数**
- $$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}}$$
- 慣性力:重力
- $$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma L}}$$
- 粘性力:慣性力・表面張力
- U :スラグホールでのスラグ平均流速
 L :スラグホールでのスラグ膜厚さ
 μ :スラグ粘度 σ :スラグ表面張力係数



【成果】コールド試験と数値解析でスラグ排出現象を無次元数で類型化した

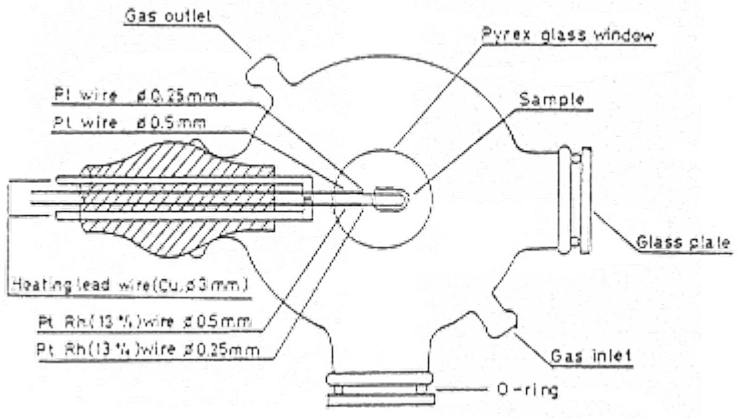
【活用】スラグ排出性評価技術開発のベースとする



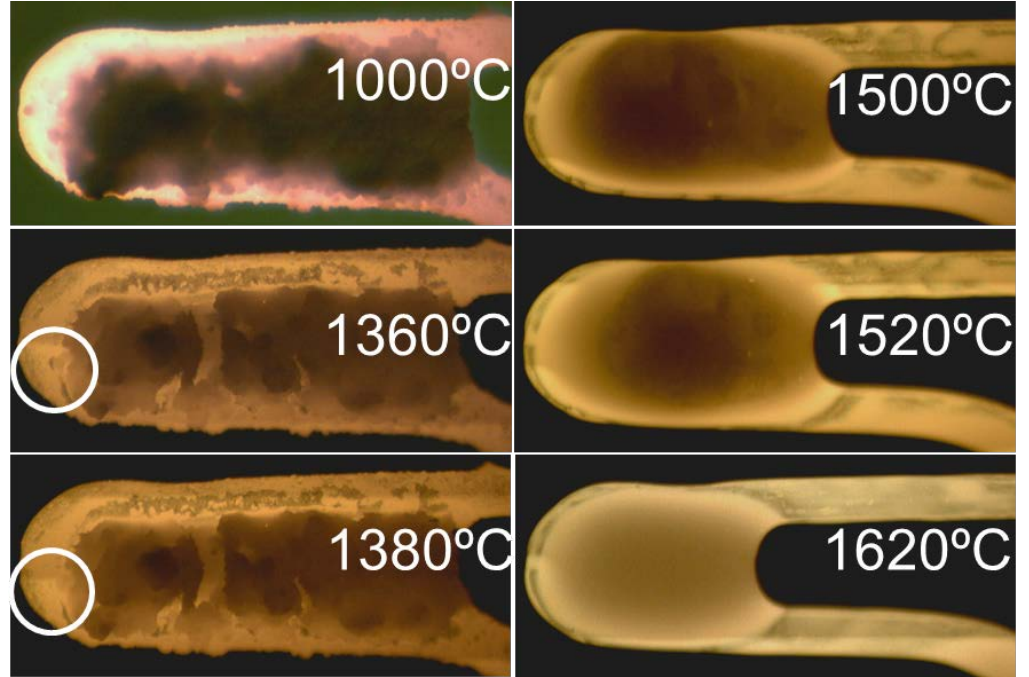
(1)③スラグ排出性評価技術の開発

c) 高温熔融石炭灰の直接観察法の開発

【目的】熔融状態の石炭灰・スラグの直接観察により熔融挙動を把握する



ホットサーモカップルセル



DD炭灰化灰の熔融挙動直接観察

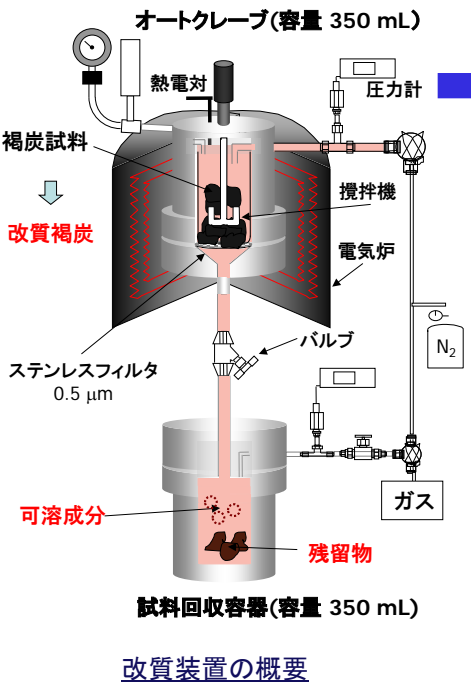
【成果】石炭灰・スラグの均一融体形成挙動の直接観察が可能となった

【活用】スラグ排出性評価技術開発のベースとする



(2) 適合炭種拡大に向けた取り組み

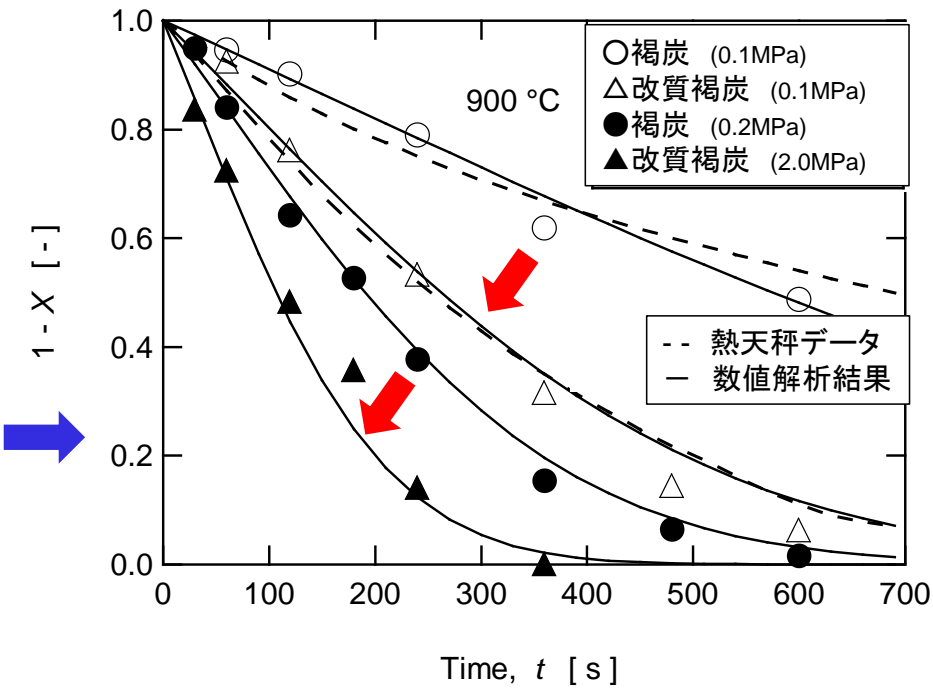
【目的】適合炭種拡大に向けた褐炭改質法を開発する



褐炭を350°Cの
1-メチルナフタレン中で
1時間処理

得られた改質炭を、
N₂気流中で
加熱速度10°C/minで
900°Cまで加熱し、
その温度で30分保持

調製したチャーを
900~1,200°Cの
CO₂ガス中でガス化し
反応速度を比較



改質炭チャーの反応特性
(未反応率 1-X の時間依存性)

【成果】溶剤抽出による褐炭改質法を開発し、改質効果を反応速度により確認した

【活用】本システムに限らず、褐炭の火力燃料利用に資する

本フェイズの目標と達成状況

開発項目	最終目標	達成状況 (○達成、×未達成)	
事業全体	性状の異なる環太平洋地域の3種以上の石炭を用い、CO ₂ 回収後も送電端効率42%(HHV ₁)を実現する基盤技術を確立する	・電中研の効率計算ソフトEnergyWin™により、メーカFS結果を反映した実現性の高いシステムに性状の異なる3炭種を供試した場合、効率が43.6~43.8%となることを確認した。	○
1.基本コンセプトの確認	本システムの基本コンセプトを確認する。	・本システムがCO ₂ 回収後も高い効率を維持できる要因を整理し、ガス化試験や基礎試験により、CO ₂ 添加に伴う反応促進効果を確認した。	○
2.基盤技術の開発	実機規模数値解析技術の開発とO ₂ /CO ₂ ガス化炉の特性評価	・実機規模O ₂ /CO ₂ ガス化炉の特性を評価できる数値解析ツールを開発し、運転条件の影響を明らかとした。	○
	高CO条件における炭素析出対策の構築	・本システムで懸念される炭素析出現象を、ほとんど効率低下なく抑制できる手法を構築した。	○
3.全体システム成立性の検討	プラントメーカFSによる課題抽出とシステム改良	・プラントメーカの知見を活かし、成立性の高いシステムに改良した(抽出課題:再生熱交等の詳細検討)	○
	ASU、再生熱交メーカによる試設計	・前項の抽出課題につき専門メーカ試設計で確認。	○
	効率、敷地面積、発電コストの検証	・FS結果を元に、効率などから成立性を確認。	○
4.次フェイズの検討	試験基本計画策定および試験設備試設計	・実用化のロードマップとマイルストーンを明確化するとともに次フェイズ試験計画検討、設備試設計等を行った。	○
5.本技術の普及に向けた検討	炭種適合性評価のための基盤技術開発	・反応モデルを構築し数値解析ツールに導入した。スラグ排出性評価法構築に向けたスラグ挙動類型化や高温粘度のための基盤技術を開発した。	○
	適合炭種拡大のための基盤技術開発	・触媒を使用することなく、低品位炭のガス化速度を促進する改質方法として、溶剤改質法を提案し、その有効性を確認した。	○

本フェイズのまとめ

【事業目標】

性状の異なる環太平洋地域の3種以上の石炭を用い、CO₂回収後も送電端効率42%(HHV)を実現する基盤技術を確立する。



【達成】

性状の異なる3炭種で、CO₂回収後の送電端効率43.6～43.8%(HHV)

●本研究(フェイズ1)の成果

- ・これまでに前例のないO₂/CO₂ガス化場を想定した、小型ガス化炉によるCO₂富化試験を行い、反応促進によるチャー低減効果を確認した。
- ・本システムの成立性を左右する炭素析出現象を、ほとんど効率低下なく抑制できる手法を構築した。
- ・従来にないCO₂循環を特徴とする本システムの実現性を高めるため、プラント全体に関するFS、重要構成機器(再生熱交換器、空気分離装置)のFSを行い、成立性の高いシステムを構築した。
- ・商用化に向けたロードマップとマイルストーンを明確化するとともに、次フェイズの基本計画を構築し、次フェイズの設備を試設計した。



実用化の
目処を得た



事業の概要と目標

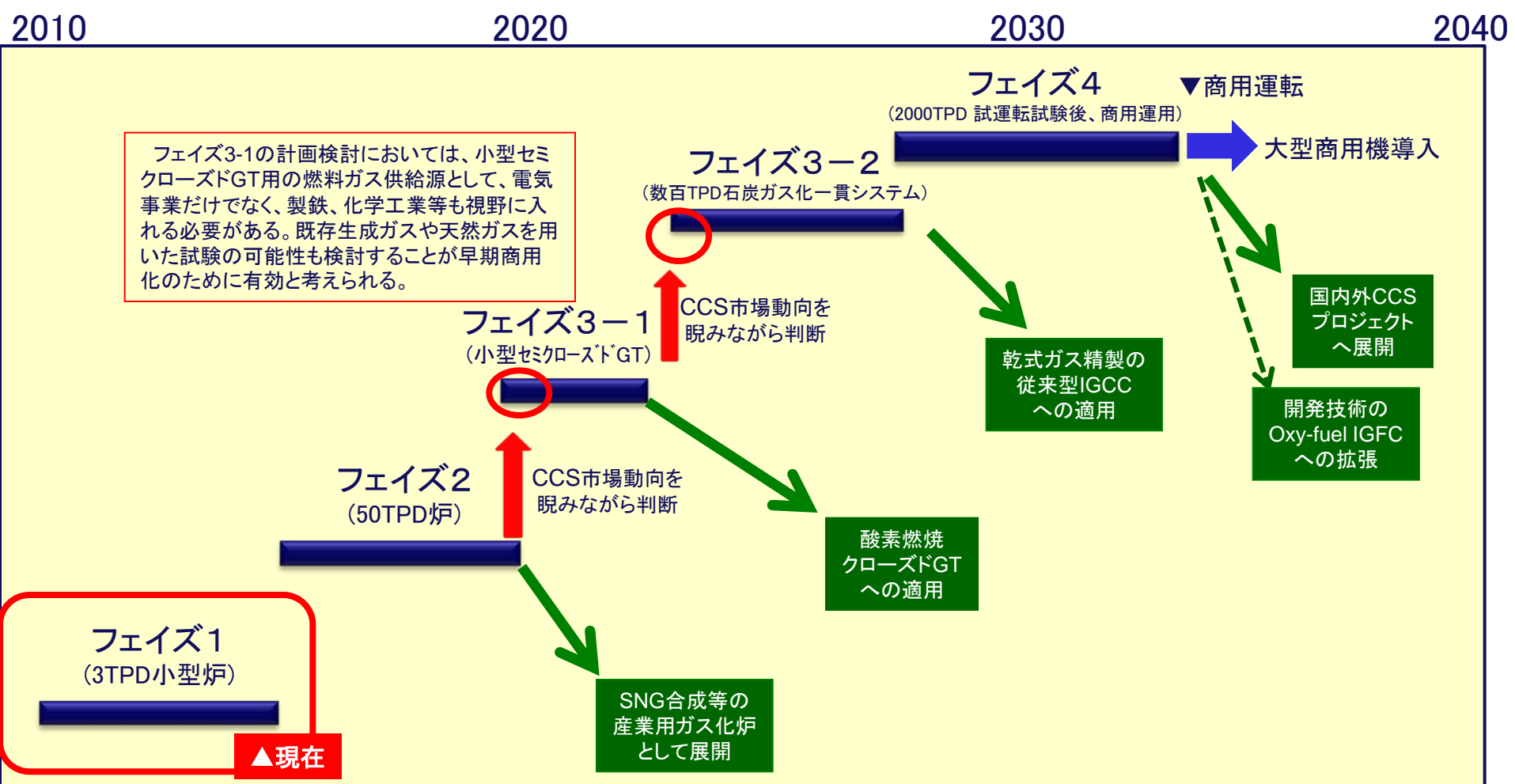
I. 研究の背景、目的および目標

II. 開発システムの特徴と本フェイズにおける開発課題

III. 実施項目の詳細および成果

IV. 今後の展開

商用化までのロードマップ



商用化までのマイルストーン

フェイズ		目標	次フェイズに向けクリアすべき課題	開始時期	終了 目途	波及効果	備考
フェイズ2	ベンチ炉試験 (50TPD)	パイロット設備に向けた技術構築	<ul style="list-style-type: none"> ① ベンチ炉試験による ガス化／乾式脱硫性能検証 ② セミクローズドGT燃焼器の開発 (模擬ガス燃焼器試験とCFD解析) ③ 硫黄以外の不純物対策の構築 (対象毎にPre/Post除去の適合性を評価) 	2015	2019	SNG合成等の産業用石炭ガス化炉として適用可能	
フェイズ3-1	パイロット試験 (数百TPD)	天然ガス等を用いたセミクローズドGT一貫システムの構築	天然ガス、プロセスガス等 を利用した循環系を含む 小型セミクローズドGT によるシステム構築、検証	2020	2023	酸素燃焼セミクローズドGTへの適用可能	開始時期はCCS市場動向を睨みながら判断
フェイズ3-2		実証試験設備構築のためのシステム成立性検証	<ul style="list-style-type: none"> ① ガス精製スケールアップ ② 石炭ガスを用いた循環系を含む小型セミクローズドGTによるシステム構築、検証 	2024	2028	乾式ガス精製技術を国内外IGCCに適用可能	開始時期はCCS市場動向を睨みながら判断
フェイズ4	大型実証試験 (2000TPD)	実機フルシステムでの性能実証	発電設備としての信頼性検証	2029 (FEED)	2034	国内外のCCSプロジェクトで商用化可能	

次フェイズのマイルストーン

目標	クリアすべき課題	開始時期	終了目途	波及効果
パイロット試験に向けた技術構築	<ul style="list-style-type: none">①ベンチ炉試験によるガス化／乾式脱硫性能の検証②セミクローズドGT燃焼器の開発(模擬ガス燃焼器試験とCFD解析)③硫黄以外の不純物対策の構築(対象不純物毎に燃焼前除去と燃焼後除去の適合性を評価)	2015	2019	SNG合成等の産業用石炭ガス化炉として直ちに適用可能

本フェイズ成果の次フェイズへの反映

フェイズ	ベンチ炉試験	目標	フェイズ3に向けてクリアすべき課題
2		パイロット設備に向けた技術構築	①ベンチ炉試験によるガス化/乾式脱硫性能検証 ②セミクローズドGT燃焼器の開発 (模擬ガス燃焼器試験とCFD解析) ③硫黄以外の不純物対策の構築 (対象毎にPre/Post除去の適合性を評価)

○本研究(フェイズ1)の成果

- ①・多炭種でCO₂富化による反応促進を確認した
 - ・乾式脱硫剤の特性を確認し、炭素析出対策を構築した
 - ・ベンチ炉の設備(新設/追設の比較)と試験計画を検討した
- ②CO₂希釈を想定した単一バーナ基礎燃焼特性データを取得した
- ③ハロゲン化物除去剤を試作し、その初期性能を把握するとともに、性能向上の課題を明らかにした



○フェイズ2の課題解決に向けた成果の活用について

- ①・ベンチ炉の炭種選定データ等として活用
 - ・ベンチ炉実ガス抽気による乾式脱硫設備設計等の基礎データとして活用
 - ・ベンチ炉の設計、試験計画に反映する
- ②セミクローズドGT燃焼器開発の基礎データとして活用
- ③硫黄以外の不純物対策を効率的に立案するため、吸収剤の基本性能データを活用