

「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/
次世代高効率石炭ガス化技術開発」

事業原簿 (公開版)

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部
-----	--------------------------------

目次

概 要.....	i
プロジェクト用語集.....	v
I. 事業の位置付け・必要性について.....	1
1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性.....	1
1.1 NEDOが関与することの意義.....	1
1.2 実施の効果（費用対効果）.....	3
2. 事業の背景・目的・位置づけ.....	4
II. 研究開発マネジメントについて.....	6
1. 事業の目標.....	6
2. 事業の計画内容.....	7
2.1 研究開発の内容.....	7
2.2 研究開発の実施体制.....	9
2.3 研究開発の運営管理.....	10
3. 情勢変化への対応.....	11
4. 中間評価結果への対応.....	11
5. 評価に関する事項.....	14
III. 事業全体の成果.....	15
1. 事業全体の成果.....	15
2. 研究開発項目毎の成果.....	17
IV. 実用化の見通し.....	44
1. 実用化の見通し.....	44
2. 実用化までのシナリオ.....	45
3. 波及効果.....	46
V. 成果普及について.....	47

(添付資料)

- ・イノベーションプログラム基本計画
- ・プロジェクト基本計画
- ・技術戦略マップ（分野別技術ロードマップ）
- ・事前評価関連資料（事前評価書、パブリックコメント募集の結果）

概 要

	作成日	平成 24 年 9 月 13 日	
プログラム名	エネルギーイノベーションプログラム		
プロジェクト名	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 石炭利用プロセスにおける微量成分の環境への影響低減手法の開発 高度除去技術	プロジェクト番号	P 0 7 0 2 1
担当推進部 / 担当者	環境部 / 在間主幹、正木主査		
0. 事業の概要	<p>石炭は、石炭火力発電を中心に、今後とも世界的に需要が拡大し、世界の一次エネルギーに占める割合が高くなると見込まれている。我が国でも一次エネルギー総供給量に占める石炭の割合および発電量に占める石炭火力の割合は 20%以上であり、石油に次いで大きな割合を占め、石炭は重要な基幹エネルギーとなっている。</p> <p>一方、その単位エネルギー当たりの二酸化炭素（CO2）排出量が他の化石燃料よりも高いことから、我が国が経済成長を図りつつ 2050 年に向けた CO2 の大幅削減目標を実現するためには、3E（供給安定性、経済性、環境適合性）の同時達成が可能となる革新的な技術開発が求められている。</p> <p>このような状況の下、我が国の環境調和型エネルギー技術開発は CO2 排出低減に向け、高効率な石炭火力発電技術の開発を推進していく必要がある。</p> <p>世界をリードする次世代の CCT の開発のために、中核となるガス化技術の戦略的開発を目的として、「次世代高効率石炭ガス化技術開発」については、現在開発中の IGCC（石炭ガス化複合発電）、IGFC（石炭ガス化燃料電池複合発電システム）を効率で凌ぐ高効率石炭ガス化技術の開発を目的として、ガス化効率の向上のため、低温ガス化、触媒ガス化などの技術開発を行った。</p>		

I. 事業の位置付け・必要性について	<p>温室効果ガスの大幅削減等、エネルギーに関わる環境問題へ積極的に取り組む必要があるという認識のもと、NEDO エネルギー分野戦略マップ 2009 に沿った技術開発の推進と総合資源エネルギー調査会鉱業分科会クリーンコール部会で示された Cool Gen 計画（世界的に需要が拡大する石炭クリーン利用に関する技術開発の強力な推進）の着実な進展を図ることが必要となっている。</p> <p>エネルギーイノベーションプログラムは、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、その有効かつクリーンな利用を図ることを目的としている。また、石炭を環境に配慮して効率的に利用する技術である Clean Coal Technology (CCT)は、2006年5月の「新・国家エネルギー戦略」において重要と位置付けられている。現在、世界をリードしている我が国の高効率な石炭利用技術の優位性を保つとともに次世代の高効率利用技術の基盤となる技術シーズの発掘や、今後、世界的なエネルギー需要の増加に伴い良質の石炭資源の入手が徐々に難しくなることへの対応から、地球環境問題を考慮しながら石炭適用範囲を拡大する技術は我が国のエネルギー・セキュリティの観点からも重要となる技術である。</p> <p>本事業は、エネルギーイノベーションプログラムに位置づけられる石炭ガス化技術分野において、革新的な効率向上が期待される技術、あるいはエネルギー・セキュリティに寄与する技術について、海外との競争力強化を念頭に基礎的な技術開発を加速・推進するとともに、本格的なプロジェクト研究につながる技術シーズを発掘することを目的として実施した。</p>
--------------------	--

II. 研究開発マネジメントについて

事業の目標	<ul style="list-style-type: none"> ・目標値：ガス化温度 900℃以下のガス化プロセスの原理検証 上記プロセスを適用した発電プラント概略仕様の策定 ・設定根拠：発電効率 65%以上（送電端/燃料電池との組合せ）を成立させるための石炭ガス化条件であり、また発電プラントとしての実用化イメージを明確にする。
-------	--

事業の計画内容	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #e0f0e0;">開発項目</th> <th>H19</th> <th>H20</th> <th>H21</th> <th>H22</th> <th>H23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1. 低温ガス化</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1-1 水蒸気ガス化及びチャーの燃焼の基礎研究</td> <td colspan="5" style="text-align: center;">→</td> </tr> <tr> <td>1-2 常圧ホットモデルによる熱分解炉の検討</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">→</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2. 触媒ガス化</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2-1 触媒ガス化の基礎特性及び実用的触媒探索</td> <td colspan="5" style="text-align: center;">→</td> </tr> <tr> <td>2-2 ケミカルループを用いたCaの触媒的利用ガス化技術</td> <td colspan="5" style="text-align: center;">→</td> </tr> <tr> <td>3. 炉内流動解析</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3-1 コールドモデルによる高濃度粒子循環システムの開発</td> <td colspan="5" style="text-align: center;">→</td> </tr> <tr> <td>3-2 高速高濃度粒子循環の評価のためのシミュレーション</td> <td colspan="5" style="text-align: center;">→</td> </tr> <tr> <td>4. システム解析</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4-1 効率化を達成可能なシステムの最適化と効率の検討</td> <td colspan="5" style="text-align: center;">→</td> </tr> <tr> <td>4-2 発電プラントに係る概略仕様の検討</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">→</td> </tr> </tbody> </table>	開発項目	H19	H20	H21	H22	H23	1. 低温ガス化						1-1 水蒸気ガス化及びチャーの燃焼の基礎研究	→					1-2 常圧ホットモデルによる熱分解炉の検討	→					2. 触媒ガス化						2-1 触媒ガス化の基礎特性及び実用的触媒探索	→					2-2 ケミカルループを用いたCaの触媒的利用ガス化技術	→					3. 炉内流動解析						3-1 コールドモデルによる高濃度粒子循環システムの開発	→					3-2 高速高濃度粒子循環の評価のためのシミュレーション	→					4. システム解析						4-1 効率化を達成可能なシステムの最適化と効率の検討	→					4-2 発電プラントに係る概略仕様の検討				→	
開発項目	H19	H20	H21	H22	H23																																																																										
1. 低温ガス化																																																																															
1-1 水蒸気ガス化及びチャーの燃焼の基礎研究	→																																																																														
1-2 常圧ホットモデルによる熱分解炉の検討	→																																																																														
2. 触媒ガス化																																																																															
2-1 触媒ガス化の基礎特性及び実用的触媒探索	→																																																																														
2-2 ケミカルループを用いたCaの触媒的利用ガス化技術	→																																																																														
3. 炉内流動解析																																																																															
3-1 コールドモデルによる高濃度粒子循環システムの開発	→																																																																														
3-2 高速高濃度粒子循環の評価のためのシミュレーション	→																																																																														
4. システム解析																																																																															
4-1 効率化を達成可能なシステムの最適化と効率の検討	→																																																																														
4-2 発電プラントに係る概略仕様の検討				→																																																																											

開発予算（会計・勘定別に事業費の実績額を記載） （単位：百万円）	会計・勘定	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	合計金額
	一般会計	0	0	0	0	0	0
	特別会計（需給）	37	218 補正予算 180含む	201	127	127	710
	予算額	37	218	201	127	127	710

開発体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 資源・燃料部 石炭課
------	---------	---------------------

	プロジェクトリーダー	九州大学 先導物質化学研究所、林 潤一郎 教授				
	委託先	H19～H21 年度まで				
		<ul style="list-style-type: none"> ・ (株) IHI (H19-H21) 再委託：東京大学、大阪大学、九州大学、北海道大学 (H20 まで)				
		<ul style="list-style-type: none"> ・ (一財) 石炭エネルギーセンター 再委託：東北大学、群馬大学、九州大学				
		<ul style="list-style-type: none"> ・ (独) 産業技術総合研究所 				
		H22～H23 年度				
		<ul style="list-style-type: none"> ・ 三菱重工業 (株) (H22-H23) 再委託：秋田大学、群馬大学、九州大学				
		<ul style="list-style-type: none"> ・ (独) 産業技術総合研究所 ・ (国) 東京大学 ・ (国) 大阪大学 ・ (国) 九州大学 				
情勢変化への対応	(1) 「Cool Earth –エネルギー革新技术計画」の策定 「世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比して 2050 年までに半減する」という長期目標が提案された。					
III. 研究開発成果について		開発項目	中間目標 (平成 20 年度末)	最終目標	成果	最終目標 に対する 達成状況
		低温ガス化	ガス化温度 900℃ 以下の低温ガス化 炉の選定	ガス化温度 900℃以下の低温 ガス化炉開発	循環流動層+熱分解分離型ガス化炉を選 定し、ラボスケール試験によりガス化効 率の向上効果を確認した。	○
		触媒ガス化	850℃における触媒 水蒸気ガス化プロ セスの構築	750℃触媒水蒸気 ガス化プロセス の構築	4 種の触媒において 750℃以下での高活 性特性を確認し、触媒とケミカルルーピ ング低温ガス化プロセスの構成と条件を 確立した。	○
		炉内流動解析	循環流動層フラッ クス 200 kg/m ² ・s 条件の達成、シ ミュレーション技 術検討	循環流動層粒子 フラックスを 350 kg/ m ² ・s 達 成装置の構築	コールドモデル試験により、フラックス 546kg/(m ² ・s)を達成した	○
		システム検討	ガス化温度 900℃ 以下のガス化シス テムの選定	ガス化温度 900℃以下のガス 化システム開発	褐炭を用いた方が高効率を得られやす い。送電端効率 65%にするには A-IGFC 化だけでなく、ガス化炉におけるエクセ ルギー再生が必要。	○

	発表論文	「査読付き」64件, 「その他」解説7件, 国際学会発表80件, 国内学会発表117件
	特許	3
IV. 実用化の見通しについて	<p>本技術は、新しい概念に基づく次世代高効率石炭ガス化発電システムの開発であり、主要課題である低温ガス化炉については、本プロジェクトにおいて平成19年度から5ヵ年計画で実用化に向けた要素技術の確立とシステムの最適化設計を実施し、ガス化炉の大型化については技術開発の進捗に合わせて見極めを行った後、次のステップに移行する。</p> <p>ガス化炉の開発と並行してシステム解析を行い、新規石炭ガス化発電システムを構築するための周辺技術を含めてその最適化を行う。その結果と、ガス化炉以外の主要構成要素であるガスタービン、燃料電池、その他周辺技術の技術開発状況を総合的に勘案して実用化を図る。</p>	
V. 評価に関する事項	事前評価	平成19年度実施 担当部 環境技術開発部
	中間評価以降	平成21年度 中間評価実施 平成23年度 事業終了後、事後評価実施予定
VI. 基本計画に関する項	作成時期	平成19年3月 作成
	変更履歴	<p>平成20年3月：別紙研究開発項目①及び②の達成目標の時期に誤記があったため改訂</p> <p>平成20年7月：イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂</p> <p>平成21年7月：別紙研究開発項目①の研究開発の具体的内容に(3)を追加。合わせて、達成目標を設定。</p> <p>平成22年3月：基本計画をゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトとして新たに制定。</p> <p>平成22年5月：事業項目②ゼロエミッション石炭火力基盤技術開発 研究開発項目(2)「次世代高効率石炭ガス化技術開発」について、2. 事業の具体的内容に(5)を追加。また、3. 達成目標の表現を一部変更。</p> <p>平成23年1月：2. 事業の実施方式 (1) 事業の実施体制 に研究開発責任者(PL)の氏名を記載。また、事業進捗を反映し、4. 評価に関する事項 の評価時期を一部見直し。</p> <p>平成23年1月：事業進捗を反映し、4. 評価に関する事項を一部見直し。</p>

プロジェクト用語集

A-IGCC	<u>A</u> dvanced- <u>I</u> GCCの略称で、この研究開発で目指すIGCCにガス化炉でのエクセルギー再生を組み込んだ次世代型のIGCC
A-IGFC	<u>A</u> dvanced- <u>I</u> GFCの略称で、この研究開発で目指すIGFCにガス化炉でのエクセルギー再生を組み込んだ次世代型のIGFC
A-USC	<u>A</u> dvanced- <u>U</u> ltra <u>S</u> uper <u>C</u> riticalの略称で、超々臨界圧火力発電よりも更に高い蒸気温度を採用した蒸気火力発電システム。
BSU	<u>B</u> ench- <u>s</u> cale <u>u</u> nit、ベンチスケールユニットの略。実証プラントの前の段階として、プロセス開発やサンプル試作のために使用される実験プラント。多くの場合、連続操作がおこなわれる。
CWP	<u>C</u> oal <u>W</u> ater <u>P</u> aste の略称で、石炭、水、脱硫剤および石灰石を混合した燃料であり、加圧流動床ボイラ (PFBC) の燃料としてしようされている。
DI	<u>D</u> rum <u>I</u> ndex、ドラム指数の略で、JISが規定するコークスの機械的強度指標である。コークスを回転ドラム内で振とうして所定の衝撃を与えた時の微粉の発生しにくさで強度を表す。
DSS	<u>D</u> aily <u>S</u> tart <u>S</u> top の略。発電所などでの運用方法であり起動停止を毎日行う運用方法。
FOB	<u>F</u> ree <u>o</u> n <u>B</u> oardの略で、本船積み込み渡し条件 (の価格) と訳される。積み出し港から買主までの運賃や保険料は含まれていない。
GT	<u>G</u> as <u>T</u> urbineの略称で、燃焼により発生した高温のガスでタービンを回して動力を得る原動機の一つ。
HGI	<u>H</u> ardgrove <u>G</u> rindability <u>I</u> ndexの略称で、石炭の粉碎性を示す数値。粉碎性100として選んだ標準石炭と比較した相対値を示す。指数が高いほど粉碎され易い。
IGCC	<u>I</u> ntegrated <u>G</u> asification <u>C</u> ombined <u>C</u> ycleの略称で、石炭をガス化して発生したガスをガスタービン燃料とする複合発電形式の高効率発電システム。
IGFC	<u>I</u> ntegrated <u>G</u> asification <u>F</u> uel <u>C</u> ell combined cycle の略称で、IGCCに燃料電池を付加した更なる高効率発電システム。
LNG C/C	<u>L</u> iquefied <u>N</u> atural <u>G</u> as <u>C</u> ombined <u>C</u> ycleの略称で、液化天然ガスを利用したガスタービン複合発電システム。
NO _x	<u>N</u> itrogen <u>O</u> xidesの略称で、窒素酸化物を示す。
OF	<u>O</u> ver <u>F</u> low、オーバーフローの略。本研究では、沈降槽上部にある上澄み液の領域から排出されるハイパーコール溶液の流れを指す。
PC	<u>P</u> ulverised <u>C</u> oal の略称で、微粉碎した石炭 (微粉炭) を指す。
PCF	<u>P</u> ulverised <u>C</u> oal <u>F</u> iring の略称で、微粉炭燃焼を指す。
PFBC	<u>P</u> ressurized <u>F</u> luidized <u>B</u> ed <u>C</u> ombustionの略称で、加圧流動床燃焼を指す。

S-IGFC	Super-IGFCの略称。本技術開発で提案する、燃料電池（FC）の廃熱を直接ガス化炉へ熱交換により供給する形式のIGFC。
WSS	Weekly Start Stop の略。発電所などでの運用方法で週毎に起動停止をを行う運用方法。
エクセルギー	Exergy、エネルギーのうち仕事に変換可能な有効エネルギー
エクセルギー再生	Exergy recuperation, 正確にはエクセルギー率の再生。仕事をしてエクセルギー率の低くなった熱エネルギーを、吸熱化学反応等を利用してエクセルギー率の高い、化学エネルギーに変換するようなことを指す。この過程でエネルギーは保存されるが、エネルギーの質は向上する。
循環流動層	流動層でガス速度が比較的大きくなると、粒子の飛び出しが大きくなるため、外部に粒子の捕集機構を設けて粒子をガスから分離し、再び装置に循環させることにより、装置内に濃厚な流動層を維持する装置形式。
フローインジェクション	試料の定量、定性分析を行う際に、一定量の液体サンプルを液体が連続して流れる中へ注入することで、均等に微量の試料を導入する方法である。
噴流床ガス化	ガス流速が比較的大きく、固体粒子がガスの流れにお同伴されガス化反応が進行する装置形式。ガス化炉に適用した場合、高温ガス化に適している。噴流床ガス化装置では、石炭灰は熔融してスラグとなる。
ライトサイクルオイル（LCO）	石油精製過程の流動接触分解（FCC）または残油流動接触分解（RFCC）において副生する軽質軽油を指す。2環の芳香族を主成分とする。
流動層	上向きのガス流れの中で固体粒子が比較的濃厚な粒子層（流動層）を形成する気-固接触の装置形式。
流動層ガス化	ガスの流れの中で固体粒子が比較的濃厚な粒子層（流動層）を形成する状態でガス化が進行する装置形式。ガス化炉に適用した場合、高温では粒子が熔融し大粒子を形成し流動層を維持できなくなるため不適で、必然的に低温ガス化となる。固体粒子の滞留時間が長いのが特徴。
冷ガス効率	ガス化原料が保有していた化学エネルギーに対する生成ガスの化学エネルギーの割合を指す。エネルギーのリサイクルがない通常のガス化炉では冷ガス効率は70～75%程度となる。本技術開発では、ガス化炉へのエネルギーのリサイクルがあるため、見かけ上生成ガスの保有エネルギーが供給石炭の保有エネルギーより大きくなる。

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDOが関与することの意義

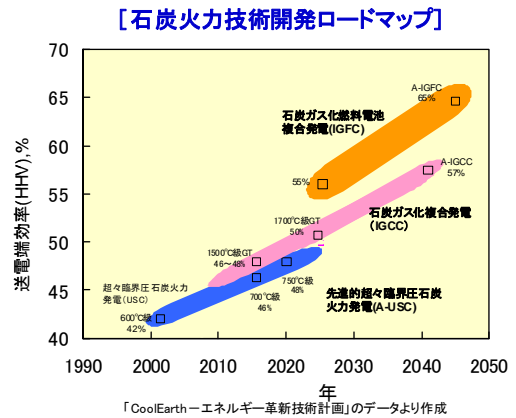
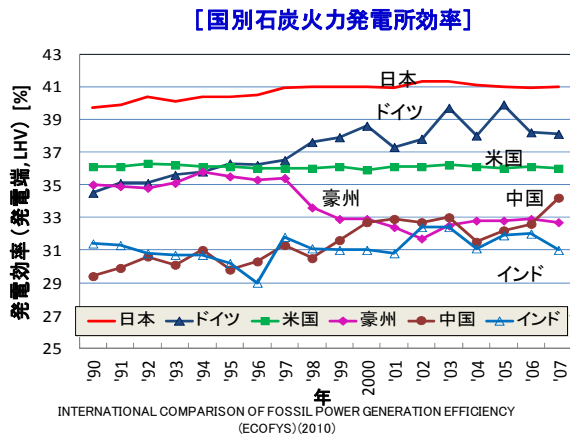
エネルギーイノベーションプログラムは、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、その有効かつクリーンな利用を図ることを目的としている。また、石炭を環境に配慮して効率的に利用する技術である Clean Coal Technology (CCT)は、2006年5月の「新・国家エネルギー戦略」において重要項目として位置付けられている。

現在、世界をリードしている我が国の高効率な石炭利用技術の優位性を保つとともに次世代の高効率利用技術の基盤となる技術シーズの発掘や、今後の世界的なエネルギー需要の増加、すなわち中国・インドで見られる急速な経済成長に伴う良質の石炭資源の入手難への対応、地球環境問題を考慮しながら石炭適用範囲を拡大する技術は我が国のエネルギー・セキュリティーの観点からも重要となる技術である。

本事業は、エネルギーイノベーションプログラムに位置づけられる石炭ガス化技術分野において、革新的な効率向上が期待される技術、あるいはエネルギー・セキュリティーに寄与する技術について、海外との競争力強化を念頭に基礎的な技術開発を加速・推進するとともに、本格的なプロジェクト研究につながる技術シーズを発掘することを目的として実施した。

一般的にこのような、中長期的視点に立ったエネルギー戦略は、公益性高く、社会的な必要性は大きいですが、実用化に向けては多大な技術開発資金と開発期間を要するため、費用回収の面から民間企業で実施することが現実的に難しく、NEDOの研究開発のマネジメント（体制、交付金など）の下で行われることが望ましい。

このように、NEDOには我が国のクリーンコール技術の国際競争力強化し、高効率石炭火力の実現に向けた技術開発・調査研究を積極的に推進する使命がある。



- 世界をリードする日本の高効率石炭利用技術の優位性を保つ
- 次世代の高効率技術の基盤となる技術シーズを発掘

環境問題、革新的技術開発に寄与し、国際競争力のある基礎的な技術開発の加速・推進

図 I-1.1 CCT 推進の目的と技術背景

次世代高効率石炭ガス化技術

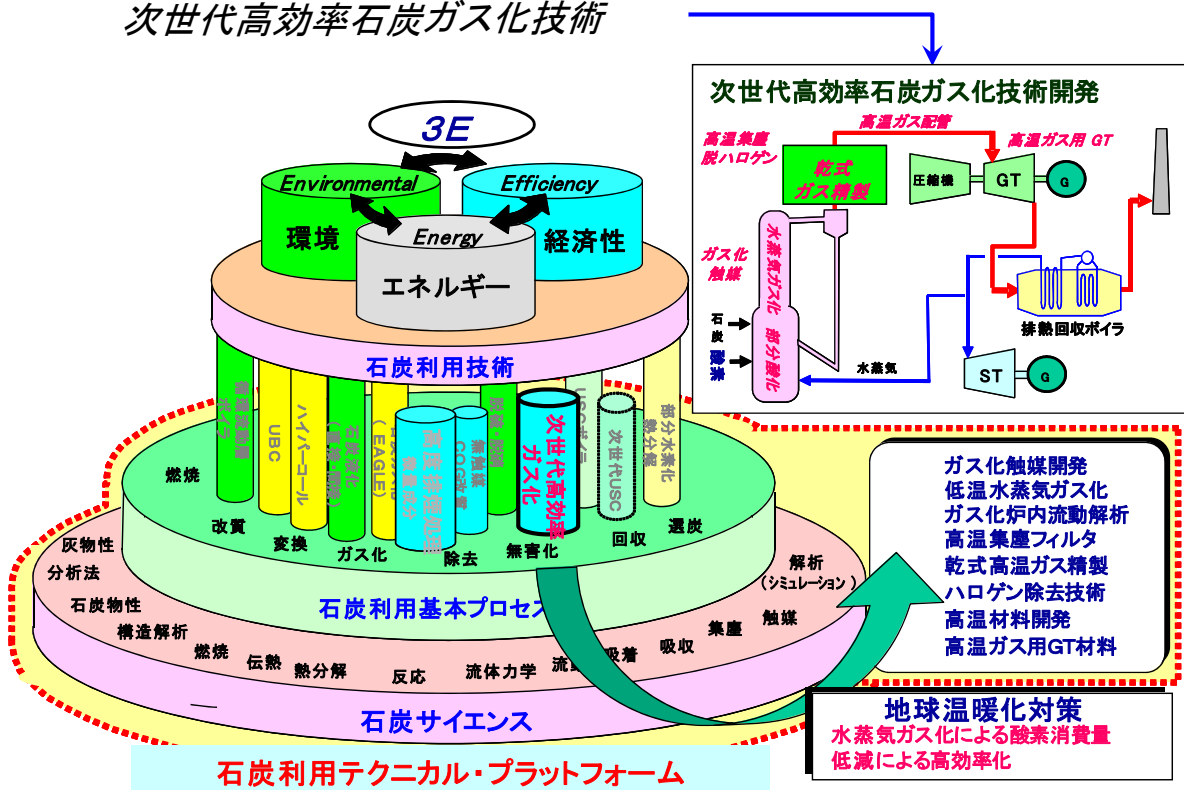


図 I-1.2 本プロジェクトの CCT 中の位置付け

1.2 実施の効果（費用対効果）

本事業は2040年以後に実用化を目指す次世代高効率石炭ガス化技術開発の初期段階であり、主に反応の確認や適用反応器形式の選定などの基盤技術の成果を得た。

本事業の遂行により、石炭の低温ガス化及び触媒ガス化反応速度が分かり、本技術に適する低温ガス化反応装置として熱媒体循環型の流動層タイプであることも分かった。これに基づいて小型装置のガス化試験や、コールドモデルによる流動解析を実施した。また、最適発電システムの検討(発電効率：A-IGCC 57%, A-IGFC 65%)の結果から判断し、現在の日本における石炭火力発電の平均発電効率は約40%（送電端、HHV）であるが、仮に将来、これら全ての石炭火力発電所のうち20%が高効率なA-IGCC/A-IGFC（送電端効率：57%/65%）にリプレースすると想定すると、2040年までに運開35年以上を経過する石油・石炭火力の設備容量は約50GWであり、リプレース需要は10GW（60万kWプラント約17基分）となる。またその実施の効果としては石炭消費量にして500万トン～700万トン、CO₂排出量にして0.13～0.18億トンの削減が期待できる。

石炭価格は他の化石エネルギーよりかなり安いことが予測され、とくに本技術は低品位褐炭も利用できるため、2040年以後において低価格で発電できると推測する。

⑤「化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用」 に寄与する技術の技術ロードマップ(7/13)

【抜粋】

No.	エネルギー技術 個別技術	2010	2015	2020	2025	2030～
5613H	61.石炭火力発電	送電端効率 41%HHV(250 MW実証機)	46%HHV(1500℃級GT・湿式ガス精製)	48%HHV(1500℃級GT・乾式ガス精製)	50%HHV(1700℃級GT・乾式ガス精製)	57%HHV(A-IGCC)
	石炭ガス化複合発電(IGCC)	空気吹き石炭ガス化技術 多炭種対応技術 高効率酸素製造技術		乾式ガスクリーニング技術	低温高効率石炭ガス化技術 高温ガスタービン技術(1700℃級)	IGHAT
5614H	61.石炭火力発電					65%HHV(A-IGFC)
	石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)	プラント規模/送電端効率 実証機(1000 t/d級)			商用機(600 MW級/送電端効率55%HHV)	
		多炭種対応技術	酸素吹き石炭ガス化技術 乾式ガスクリーニング技術 精密ガスクリーニング技術 高温ガスタービン技術 高効率酸素製造技術	大容量高温形燃料電池		

図 I-1.3 技術戦略マップにおける位置付け

2. 事業の背景・目的・位置づけ

現在、世界をリードしている我が国の高効率な石炭利用技術の優位性を保つとともに、次世代の高効率利用技術の基盤となる技術シーズの発掘や、今後、世界的なエネルギー需要の増加に伴い良質・低価格の石炭資源の入手が徐々に難しくなることへの対応から、地球環境問題を考慮しながら石炭の適用出来る範囲を拡大する技術は我が国のエネルギー・セキュリティの観点からも重要となる技術である。

そこで、世界をリードする次世代の CCT の開発のために、中核となるガス化技術および燃焼技術の戦略的開発を目的に、「次世代高効率石炭ガス化技術開発」について、現在開発中の IGCC(石炭ガス化複合発電)、IGFC(石炭ガス化燃料電池複合発電システム)を効率で凌ぐ、更なる高効率を目指した、石炭ガス化技術の開発を目的とする、低温ガス化、触媒ガス化などの技術開発をする。またそれによって我が国の高効率な石炭利用技術における世界トップの地位を維持する。

石炭は、可採埋蔵量が豊富でしかも世界中に広く分布すること、また価格が安価で安定していることから、世界の一次エネルギーの 27%を占めている。しかしながら、地球温暖化の観点から、石炭利用に際して発生する CO₂ をできるだけ少なくすることが求められている。排出する CO₂ を回収・隔離する技術も検討されているが、石炭利用システムをできるだけ高効率化することも重要であり、その方策を追求することは大いに意義がある。現在、高効率の石炭発電技術として、石炭ガス化複合サイクル発電 (IGCC) や石炭ガス化燃料電池複合サイクル発電 (IGFC) の開発が行われているが、石炭の一部を燃やして高温(約 1600°C)で石炭をガス化するとともに石炭灰を熔融・排出するため、酸素を多く使用する他、熱損失が大きい。今後、我が国では IGCC、IGFC が商業化されて、石炭利用の高効率化、CO₂ 貯留が実現することが予測されるが、2050 年の CO₂ 排出削減 50%の実現と資源供給制約の克服には一層の高効率化が必要であり、我が国のエネルギー環境技術分野において指導性を発揮するにはさらなる高効率な石炭利用技術の基盤を構築することが要請される。

一方、褐炭や亜瀝青炭は石炭資源の約 1/2 を占めるがその利用は限定的である。上質な瀝青炭が逼迫していく中、今後、これら低品位炭のエネルギー源としての位置付けが高まると予想されるほか、我が国のエネルギー安全保障や海外進出企業のエネルギー確保の観点から、その利用技術の開発は非常に重要である。そこで、本研究開発では、未利用石炭(褐炭、亜瀝青炭)等高水分・難粉碎性の燃料にも対応可能な高効率発電プロセスの開発に当たっての要素技術を開発することを目的とした。

本事業の事前調査として、平成 16～18 年度に「次世代高効率石炭ガス化発電プロセスの開発に関する調査」を実施した。事前調査により、実施内容および目標の設定をおこなった。

平成16～18年度:次世代高効率石炭ガス化発電プロセスの開発に関する調査

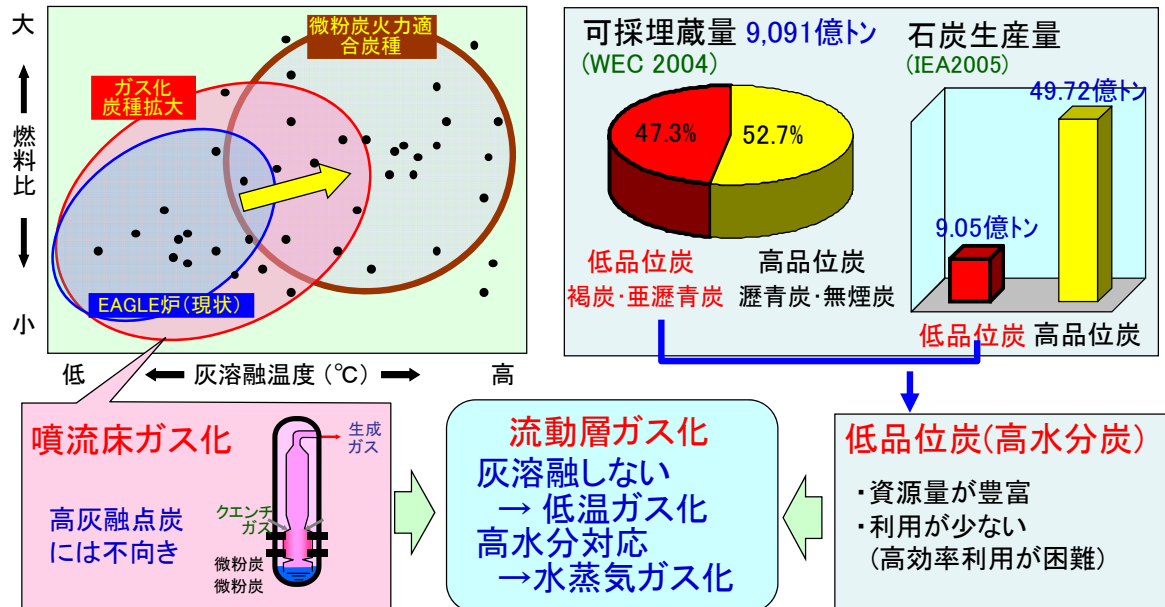


図 I -2.1 研究開発目標

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

石炭利用技術分野において、我が国の石炭利用分野における国際競争力強化のために基礎的な技術開発を実施し、効率向上、エネルギー・セキュリティに寄与することを目標とする。

海外での石炭火力ガス化技術は、塊炭を空気や酸素でガス化する固定床方式や粉炭・粒炭をガス化する流動床方式から、ガス化効率の高い微粉炭をガス化する噴流床方式へ移行しており、米国、オランダ、スペイン等で技術開発が進んでいる。また中国の GreenGen プロジェクトのように技術開発が推進されている。これまで微粉炭火力発電では高効率な石炭利用技術における世界トップの地位を維持してきたが、石炭ガス化分野においても、我が国の高効率な石炭利用技術における世界トップの地位を維持する。

そこで、研究開発目標を次のように設定した。

[中間目標（平成 20 年度）]

- ・目標値：ガス化温度 900℃以下のガス化プロセスの選定
- ・設定根拠：ガス化温度 900℃以下のガス化プロセスの開発に向けたプロセス選定

[最終目標（平成 23 年度）]

当初の最終目標（平成 23 年度）

- ・目標値：ガス化温度 900℃以下のガス化プロセスの開発
- ・設定根拠：発電効率 65%以上（送電端）を成立させるための石炭ガス化条件
中間評価以降、見直した最終目標（平成 23 年度）

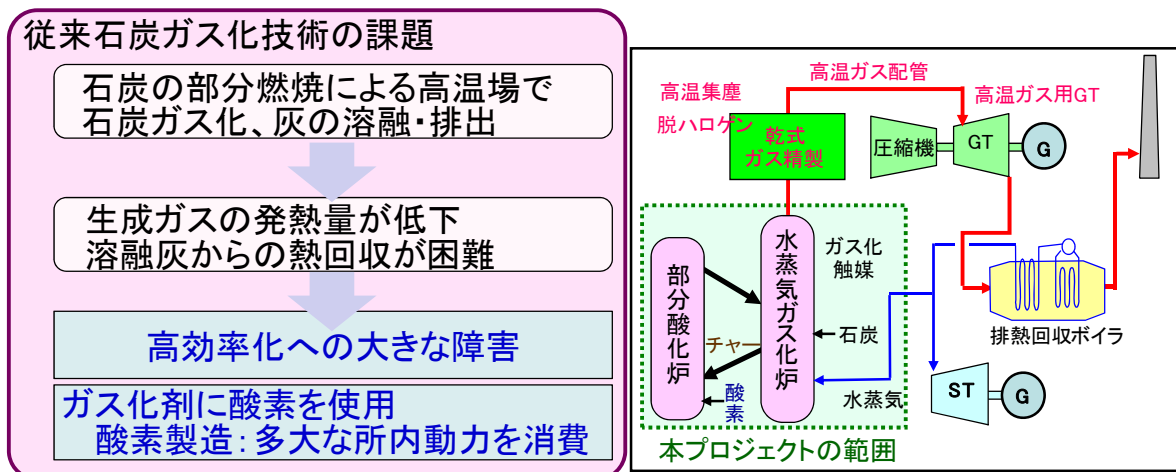
- ・目標値：ガス化温度 900℃以下のガス化プロセスの原理検証
上記プロセスを適用した発電プラント概略仕様の策定
- ・設定根拠：発電効率 65%以上（送電端/燃料電池との組合せ）を成立させるための石炭ガス化条件であり、また発電プラントとしての実用化イメージを明確にする。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

現在の噴流床ガス化技術では、石炭の一部を燃焼して形成した高温場で石炭をガス化するとともに石炭灰を溶融・排出している。このため生成したガスの発熱量が低下するだけでなく、溶融灰からの熱回収も容易でないことから、高効率化への大きな壁となっていた。

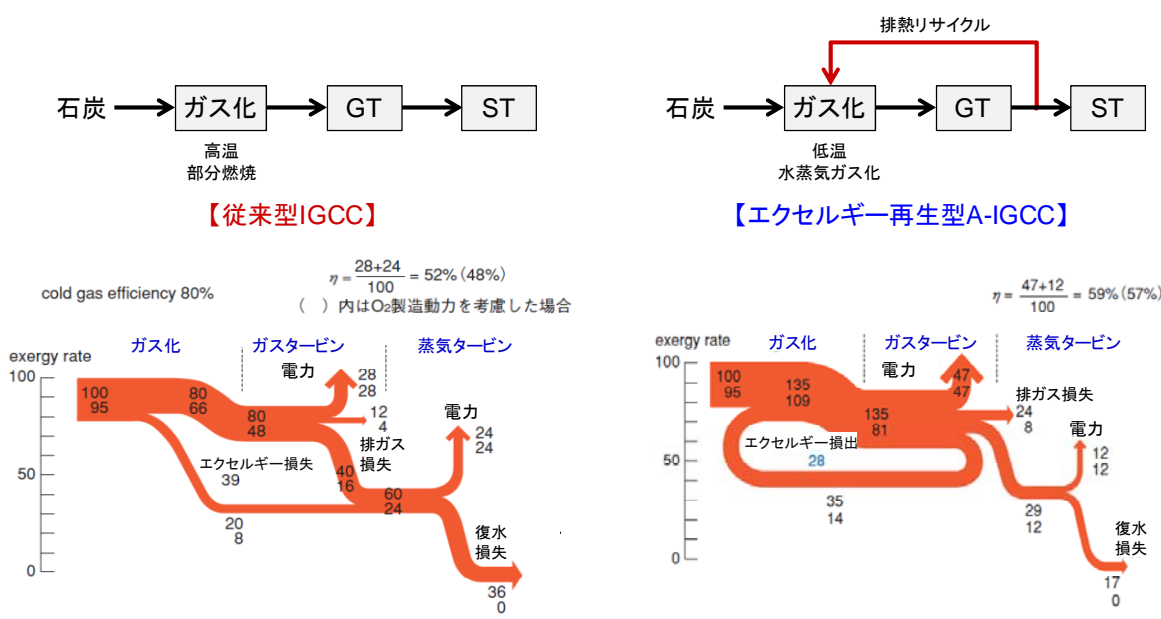
さらに、高温場の形成を容易にし、生成ガスの発熱量を確保するためにガス化剤に酸素を用いることが多く、酸素製造により多大な所内動力を消費するために、送電端の効率低下が免れなかった。そこで、高効率が得られる、排熱リサイクルによるエクセルギー再生型 IGCC を開発するため、低温水蒸気ガス化や触媒ガス化などの新たなガス化プロセスへ向けて次の要素技術開発を行った。



低温水蒸気ガス化や触媒ガス化などの新たなガス化プロセスに向けて、次の研究開発を行った。

- (1)低温ガス化 : 流動層ガス化、水蒸気ガス化の基礎プロセスの開発。
- (2)炉内流動解析: 高速に移動する流動媒体の伝熱・流動などの解析
- (3)触媒ガス化 : 低温ガス化に必要な低コストの触媒の探索および開発
- (4)システム検討: 高効率化を達成可能なシステムの最適化と効率の検討

図 II-2.1 研究開発内容の概要



図Ⅱ-2.2 従来型 IGCC との比較

表Ⅱ-2.1 研究開発項目及び研究開発スケジュール

開発項目	H19	H20	H21	H22	H23
1. 低温ガス化					
1-1 水蒸気ガス化及びチャーの燃焼の基礎研究	→				
1-2 常圧ホットモデルによる熱分解炉の検討			→		
2. 触媒ガス化					
2-1 触媒ガス化の基礎特性及び実用的触媒探索	→				
2-2 ケミカルループを用いたCaの触媒的利用ガス化技術	→				
3. 炉内流動解析					
3-1 コールドモデルによる高濃度粒子循環システムの開発	→				
3-2 高速高濃度粒子循環の評価のためのシミュレーション	→				
4. システム解析					
4-1 効率化を達成可能なシステムの最適化と効率の検討	→				
4-2 発電プラントに係る概略仕様書の検討				→	
開発予算(百万円)	37	218 補正予算 180含む	201	127	127

2.2 研究開発の実施体制

本事業は、NEDO が単独ないし複数の企業、大学等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別の研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点から国外企業との連携が必要な部分はこの限りではない。）から、公募によって事業実施者を選定し実施する。事業実施にあたり、実用化まで長時間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いにノウハウを持ちより協調して実施する事業であり、委託事業として実施した。

NEDO は、事業に参加する各事業グループの有する研究開発ポテンシャルを検討し、これを最大限活用することにより効率的かつ効果的な研究開発の推進を図る観点から、各事業の実施先決定後に必要に応じて研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を指名し、その下で運営管理を実施する。

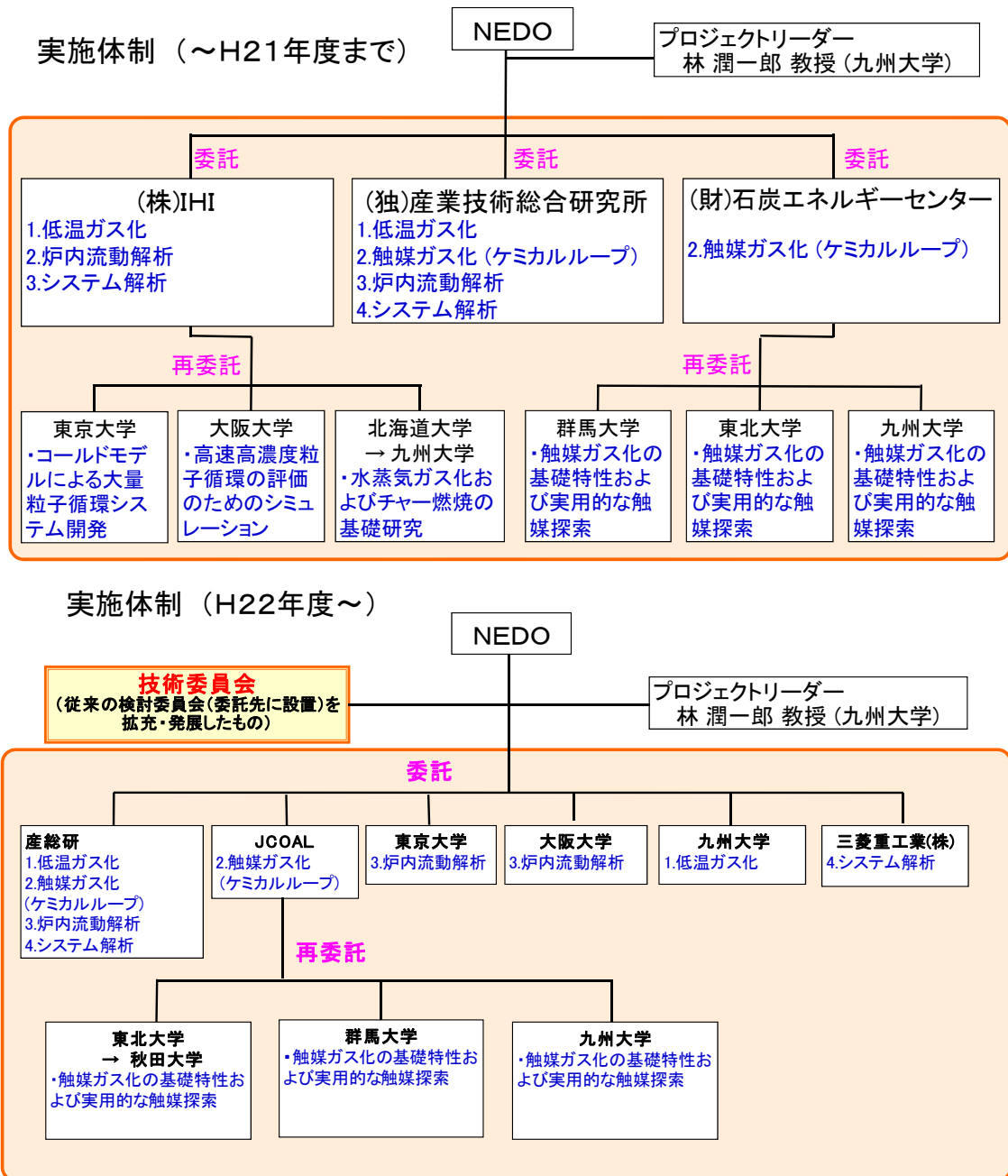


図 II-2.2 実施体制図

表 II-2.1 各テーマ目標

項目		最終目標 (H23)	中間目標 (H20)	目標設定の根拠
低温ガス化	当初	ガス化温度900°C以下のガス化プロセス用の低温ガス化炉の開発	ガス化温度900°C以下のガス化プロセスの開発に向けた低温ガス化炉の選定	発電効率A-IGCC 57%、A-IGFC 65% (送電端)を成立させるための石炭ガス化条件
	中間評価以降	ガス化温度900°C以下のガス化プロセス用の低温ガス化炉の原理検証		発電効率65%以上(送電端/燃料電池との組合せ)を成立させるための石炭ガス化条件
炉内流動解析		循環流動層ライザーの粒子フラックスを350 kg/m ² /s以上で調整できる装置を構築する。	コールドモデルで循環流動層ライザーの粒子フラックス200 kg/m ² /sを実現する。またシミュレーション技術等を併用しガス化システム内各プロセスの最適化を図る。	ガス化温度を900°Cよりさらに低い温度にした場合、同じ発電効率(65%以上、送電端/燃料電池との組合せ)を維持するためにはより大量に粒子媒体を循環させる必要があるため
触媒ガス化		ガス化温度750°Cにおける触媒水蒸気ガス化、プロセスの構築	ガス化温度850°Cにおける触媒水蒸気ガス化プロセスの構築	発電効率70%以上を実現する低温触媒ガス化プロセス
システム検討	当初	ガス化温度900°C以下のガス化プロセス用のシステムの開発	ガス化温度900°C以下のガス化プロセスの開発に向けたシステムの選定	発電効率A-IGCC 57%、A-IGFC 65% (送電端)を成立させるための石炭ガス化条件
	中間評価以降	ガス化温度900°C以下のガス化プロセス用のシステムの構築		発電効率65%以上(送電端/燃料電池との組合せ)を成立させるための石炭ガス化条件

2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、NEDO技術開発機構に設置する委員会及び技術検討会等、外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度プロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

【技術委員会】(2回/年)

第三者で構成され、NEDOとともに研究の方向、計画、成果を審議することで、現状の課題に対する解決の道筋を立て、より実用化見通しを明らかにする。

委員長: 持田 勲 特命教授(九州大)
 委員: 三浦 孝一 教授(京都大)
 岡崎 健 教授(東工大)
 守富 寛 教授(岐阜大)
 梅景 俊彦 教授(九州工大)
 金子 祥三 特任教授(東京大)
 後藤 秀樹 所長(Jパワー)
 犬丸 淳 領域リーダー(電中研)

※平成21年度までは委託先設置の検討委員会を開催していたが、中間評価を反映し、平成22年度からNEDOの委員会として設置



研究の方向、計画、成果

【ワーキンググループ会議】(3~5回程度/年)

実施者及びNEDOによる研究開発成果、進捗状況の討議、確認
 (委託先内にプロジェクトマネージャを設置:産総研)

図 II-2.3 研究開発の運営管理体制

3. 情勢変化への対応

(1) 「Cool Earth –エネルギー革新技术計画」の策定

「世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比して 2050 年までに半減する」という長期目標が提案された。

この目標の実現は、従来の技術の延長では困難であり、革新的技術の開発が不可欠。

エネルギー分野において、世界トップ水準の技術を有する我が国は、世界をリードできる技術分野に研究開発資源を重点化し、技術開発を加速・推進することにより、我が国の競争力を強化・維持しつつ、技術は我が国の貴重な資源であるとの認識に立って、国際的な連携を強力に推進し、世界全体での 2050 年までの大幅削減に積極的に貢献していくことが必要。このため、以下の検討を進めてきた

- ・ 2050 年の大幅削減に向け我が国として重点的に取り組むべき技術の特定
- ・ 長期にわたる技術開発のマイルストーンとして、各技術のロードマップの作成
- ・ 長期的視点から技術開発を着実に進めるためロードマップを軸とした国際連携のあり方

【対応内容】 研究加速費用配賦（平成 20 年度補正予算）

- ・ 低温ガス化：小型循環流動層ガス化試験装置の改造
- ・ 流動解析：コールドモデル循環流動試験設備の設置

4. 中間評価結果への対応

<成果に関する評価 実用化の見通しに関する評価 今後に対する提言>

研究開発の初期段階であり、技術的見通しは今後の研究の成否に掛っているが、中間目標は達成している。一方、中間目標から最終目標までのハードルは数も多く、かつ高いと考えられるため、最終目標の達成を見通すことはできない。今後は、石炭の無触媒／触媒ガス化反応性に関する過去の膨大なデータのさらなる活用、燃料輸送費を含めた経済性の試算・評価、ガス化触媒の挙動研究、タール処理の代替方式、本テーマが実証規模で実用化可能かの Feasibility study (FS) 等を含めた多面的な検討を定量的に実施して頂きたい。

なお、本プロジェクトにより、どこが従来の触媒ガス化プロセスを超えた新しい技術や知見が得られたのかの明確な提示を望む。また、フェーズ I 終了時において、世界に対して本技術の実用化イメージを発信できるように解決すべき課題を整理して頂きたい。

<肯定的意見>

○非常にスケールが大きく、また息の長いプログラムであり、ある意味では我が国の石炭関連の研究者や技術者が総力を挙げて取り組むプロジェクトとも言える。フェーズ 1 の原理実証では要素試験が主であるので、これらの成果から実用化の可能性について論じることは難しい面もある。しかしながら、プロジェクト開始 2 年間の成果としては目標値はクリアしているのではないだろうか。論文発表等は満足できるものである。

○中間目標は達成している。ただし、システム選定、基礎データ取得、シミュレーションによる評価といった開発の初期段階であり、技術的見通しは今後の研究の成否に掛っている。

○技術的には世界をリードする内容である。高度のシミュレーションや多くの要素を組み合わせる最適化するシステム化技術など、学術面や研究者養成面での効果も大きい。

○熱分解炉とガス化炉、燃焼炉を分離した新しいガス化システムを考案し、その開発課題と目標が明確にされており、基盤技術開発のひとつとして妥当である。

○石炭火力の発電効率を 65% または 57% 達成するための A-IGFC や A-IGCC のシステムを原理的に目指すチャレンジな研究と評価できる。中間目標に対して、65% の発電効率が得られるシステム計算を実施し、ガス化炉の基本仕様を提案することとすれば、十分達成している。また、現状の気流層ガス化炉では灰融点がかかなり低い石炭に限定されるのに対して、多炭種に対応でき、閉塞のトラブル少ない非スラグ方式のガス化と熱回収を組み合わせたシステム、従来の循環流動層に比べ粒子フラックスが大きな流動層ガス化炉などを開

発のターゲットとしている点では、新規性が高い戦略的研究である。

○現在、1000～2000 t/dの灰溶融気流層ガス化炉方式の実証プラントが稼働しているが、本方式は低融点炭灰の利用が前提である。一方、埋蔵量の多い高融点炭灰に対するドライガス化システムの開発が求められているものの、流動層を中心としたドライガス化プロセスの開発が、現在、ほとんど中断されている。本システムの実用化検討の成果に多くの期待が寄せられている。その成果は新たな技術領域を開拓すると期待される。成果は中間目標値をクリアしていると判断される。プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果があると評価される。

○現在進行している他のガス化研究開発の不得手な部分をカバーし、かつ高効率化を目標としていることからNEDOとしてのテーマとして評価できる。

<問題点・改善すべき点>

●中間目標は最終目標の達成のために不可欠であることは理解できるが、中間目標から最終目標までのハードルは数も多く、かつ高いと考えられるため、最終目標の達成を見通すことはできなかった。

●実用化が2029年以降の計画である。地球環境上の制約を考えると、2029年実用化では遅きに失する可能性もある。

●アルカリゲッターの導入や同時脱硫も含めたガスクリーニングの検討が必要ではないか。またガス化触媒となるアルカリ金属や他の金属について、その挙動を明らかにしておくべきと考えられる。

●本事業では新たな流動層による中低温ガス化システムを開発のターゲットにしているため、関連する要素技術の基盤研究が中心となっているが、それぞれの要素技術に対する具体的な数値目標または装置イメージの概念設計を明確にするべきである。また、中低温ガス化の最大の課題のひとつであるタール生成については、触媒によるケミカルループ方式の採用を想定されているが、スケールアップを前提とした場合の展望について、さらに詳細な検証が必要であろう。本研究が原理実証を目標としているものの、次のフェーズ以降では順次スケールアップによる実証試験となっていることから、最終的なガス化炉のイメージを想定して、タール処理の代替方式も含めた多面的な検討を実施しておく必要があると考えられる。これに関して、さらにガス化炉の実機をイメージしたラボスケールガス化炉でもホットモデル試験を行っておくことが望まれる。

●A-IGCCは流動層/粒子循環型ガス化方式であり、1970～2000年に開発された夕張ガス化、トッピングサイクル、A-PFBCなどと同じ技術課題を共有するタイプのシステムと考えられる。流動層/粒子循環型ガス化方式の先行プロジェクトが実用化されず、後発の灰溶融気流層ガス化炉方式が採用され、2000 t/dの実証プラントが稼働したという現実をもっと直視すべきである。

(1) A-IGCCシステムが実証規模である1000～2000 t/d規模で実用化できる可能性を有しているのか、また必要な要素技術が2020年代に開発できるのか否かを、Feasibility study (FS)を通じて明らかにする必要がある。石炭の無触媒/触媒ガス化反応性に関しては過去の膨大なデータがあり、それをもっと活用すべきである。

(2) 本システムが高効率発電を指向しているため、わが国での立地が前提である。ガス化速度などで低品位炭(亜瀝青炭、褐炭など)を使用した低温ガス化が有利であることは明白であるが、低品位炭の発熱量が低く、総合効率(発電効率などを含む)が高くなったとしても、正味の発電量が低いこと2000 t/d規模の実用化には向かないと思われる。瀝青炭を中心にFSを進めるべきと考える。低品位炭のガス化、低品位炭の触媒ガス化、およびケミカルループを、本システムの候補として掲げるのであれば、燃料輸送費を含めた経済性の試算・評価が必要である。例えばNi触媒の場合、実施者側から「2000 t/dガス化炉に必要なNi量は140 t/d程度(約7%として)であり4万t/年程度(負荷率80%)と計算されます。一方、廃液中のNi量は日本で20万t/年、世界全体では130万t/年となっており、十分にカバーするものと判断されます。」との回答を得たが、ガス化炉1基で、日本全体で発生する廃液Ni量の1/5を回収・消費することは現実的とは思われない。

<今後に対する提言>

- ・要素試験をさらに実施して、データの蓄積を図り、フェーズ2 に進んで欲しい。
- ・システム検討、低温ガス化、炉内流動解析、触媒ガス化といった要素技術間の情報および意見交換を定常的に行い、それぞれの開発項目へのフィードバックを図ることを強化してほしい。また、今回の研究（要素試験）が次フェーズ（ベンチ試験）へ移行するための技術的必要条件を定性的でなく定量的に定め、適時、その条件達成の可能性チェック、課題対策検討を行いつつ進めてほしい。これは、スケジューリングされた評価時期にとらわれることなく行うことが必要と考える。
- ・本研究では複数の技術が組み合わせられている。システム全体の完成は2029 年になるとしても、できるところから逐次実用化する計画とすべきではないか。
- ・本プロジェクトにより、どこが従来の触媒ガス化プロセスを超えた新しい技術や知見が得られたのかを、明確に提示した方が良い。
- ・企業の役割がシステム検討に限定されているが、本事業がNEDO事業として全く新しいガス化方式と炉を提案されているものと理解すると、実用化されたときのガス化炉のイメージを具現化するための検証にも積極的に企業が関わることが必要であろうと考えられる。
- ・A-I G C Cのコンセプトは新しく、ドライガス化方式を再度見直すよい機会であり、本プロジェクトの実施は高く評価できる。フェーズI 終了時において、世界に対してA-I G C Cの実用化イメージを発信できるように課題の整理をお願いしたい。
- ・実用化に向けて、過去の経験から、主要各プロセスの最適化とトータルとしての主要プロセスの最適はもちろんですが、補助的なプロセスも含めた総合的なシステムの最適化を目指した開発を望みます。

<その他の意見>

- ・システムとしての優位性を定量的に評価するためにA-I G F CまたはA-I G C Cとしての発電効率で比較することはやむを得ないが、高い効率が得られる要因として石炭ガス化技術とは独立したS O F Cや1 7 0 0℃級の高温ガスタービン的前提としている。今後ガス化炉としての性能評価法についても、従来方式と比較して検討して頂きたい。
- ・温暖化問題に関して、ここ2 年間に情勢は大きく変わっている。燃焼効率を上げる程度では十分とは言えない。どのように対応するのか、説明が必要である。

<その後の対応>

中間評価における指摘

- ・ガス化システム実現のためにブレークスルー しなければならない具体的な技術課題と解決の道筋が明らかにされていない。
- ・実用化イメージが明確でない。

以下の項目について H22 年度実施方針へ反映。

・実施体制の見直し

本プロジェクトは低温ガス化プロセスの開発であり、当初は低温ガス化に知見のある IHI を体制に組み込んでいたが、低温ガス化プロセスに目途が立ったこと、また中間評価を受け、三菱重工を体制に組み込んだ。体制を見直すことで、発電プラントを構成するための課題整理を行い、実用化イメージを明確化することとした。

・委員会体制の見直し

従来の委託先設置を改め、NEDO の委員会とし、プロジェクト全体を包括的に成果と実用化見通しの両面から討議・確認するとともに、第 3 者有識者からの指摘、助言を受ける場として、『技術委員会』を設置。（平成 22 年度より年 2 回開催）

5. 評価に関する事項

① 評価の実施時期

2007年1月9日～2月5日 事前評価
2007年2月21日～3月1日 事前評価
2009年8月6日(木) 中間評価

② 評価手法

パブリックコメント (事前評価)
外部評価 (中間評価)

③ 評価事務局

推進部 (事前評価)
研究評価部 (中間評価)

④ 評価項目・基準

知的基盤・標準整備等の評価項目・評価基準

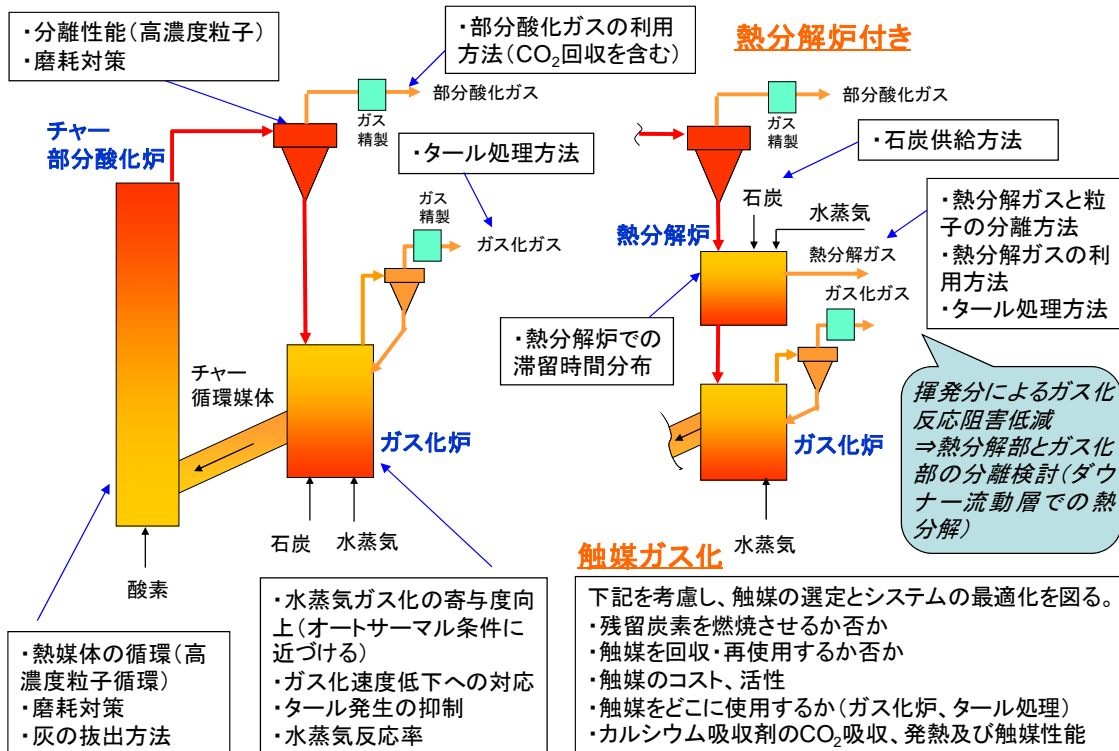
⑤ 評価委員 (中間評価)

評価委員

席	評価における立場	氏名	所属	役職
○	分科会長	真下 清	日本大学 理工学部 物質応用化学科	教授
○	分科会長代理	菅原 勝康	秋田大学 工学資源学部 環境物質工学科	教授
○	委員	板谷 義紀	名古屋大学 大学院工学研究科 化学・生物工学専攻	准教授
○	委員	田中 雅	中部電力株式会社 技術開発本部 電力技術研究所	研究主幹
○	委員	二宮 善彦	中部大学 工学部 応用化学科	教授
○	委員	原田 孝	九州電力株式会社 火力部	副部長 兼 事業推進グループ長
○	委員	村上 清明	株式会社 三菱総合研究所 科学技術部門統括室	参与

III. 事業全体の成果

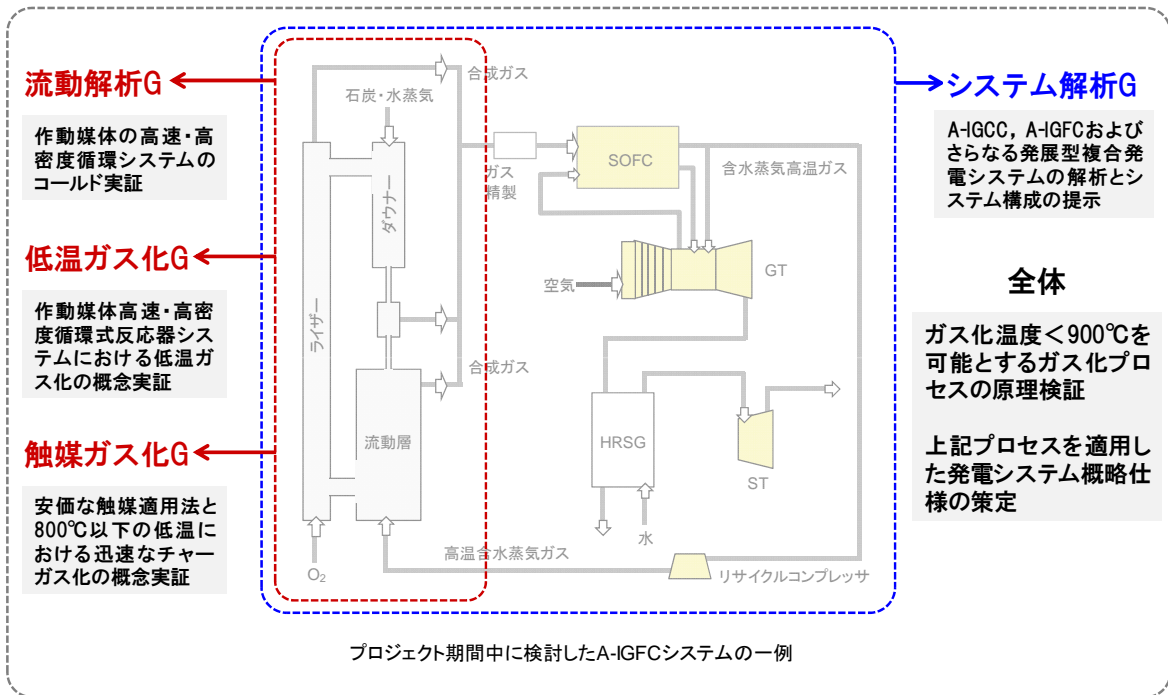
1. 事業全体の成果



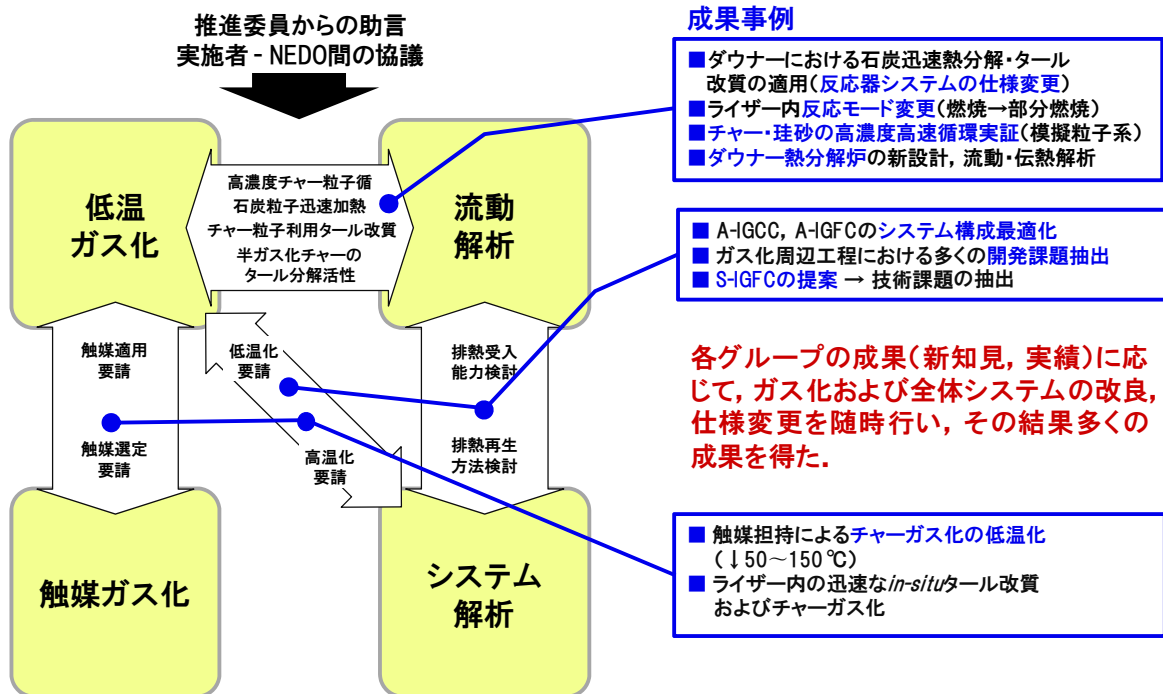
図III-2.1 ガス化技術の課題

表 III-1.1 本事業の中間目標、最終目標、達成状況及び最終目標に対する達成状況

開発項目	中間目標 (平成20年度末)	最終目標	達成内容	最終目標に対する達成状況
低温ガス化	ガス化温度 900℃以下の低温ガス化炉の選定	ガス化温度 900℃以下の低温ガス化炉開発	循環流動層+熱分解分離型ガス化炉を選定し、ラボスケール試験によりガス化効率の向上効果を確認した。	○
炉内流動解析	循環流動層フラックス 200 kg/m ² ・s 条件の達成、シミュレーション技術検討	循環流動層粒子フラックスを 350 kg/m ² ・s 達成装置の構築	コールドモデル試験により、フラックス 546kg/(m ² ・s)を達成した。	○
触媒ガス化	850℃における触媒水蒸気ガス化プロセスの構築	750℃触媒水蒸気ガス化プロセスの構築	4種の触媒において750℃以下での高活性特性を確認し、触媒とケミカルルーピング低温ガス化プロセスの構成と条件を確認した。	○
システム検討	ガス化温度 900℃以下のガス化システムの選定	ガス化温度 900℃以下のガス化システム開発	褐炭を用いた方が高効率を得られやすい。送電端効率65%にするにはA-IGFC化だけでなく、ガス化炉におけるエクセルギー再生が必要。	○



図III-2.2 各テーマの実施内容



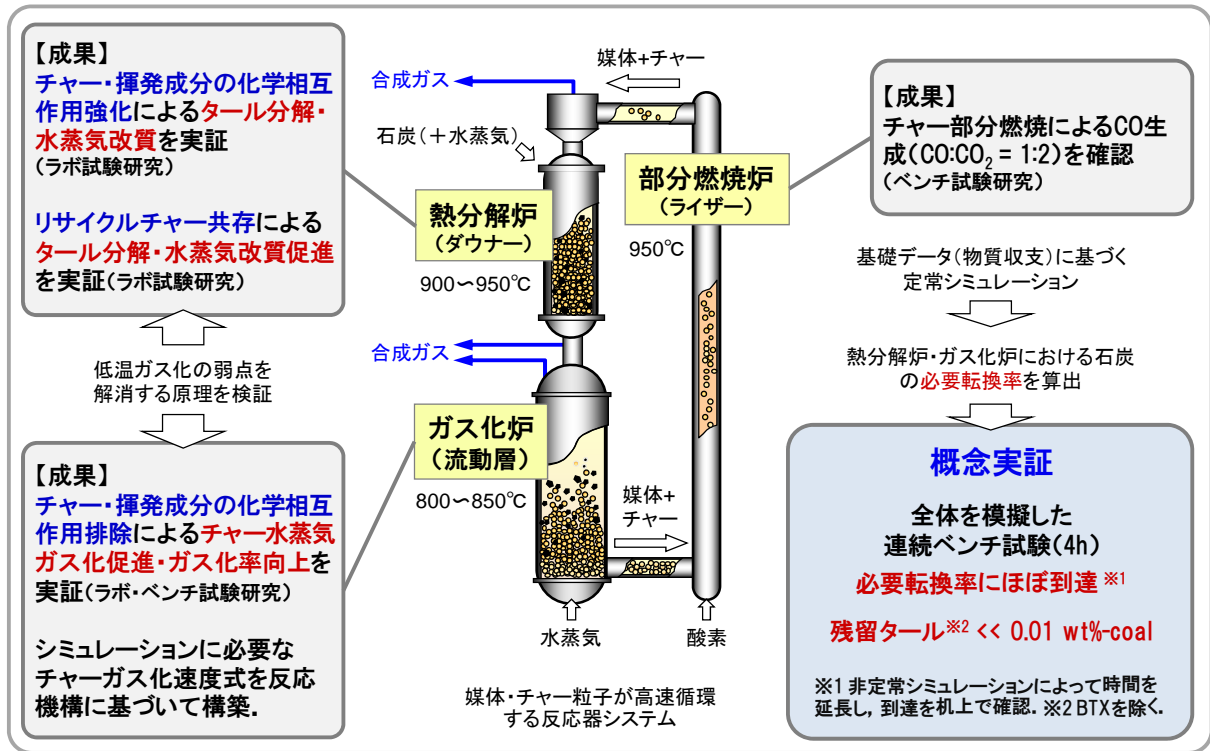
図III-2.3 各テーマの研究連携

2. 研究開発項目毎の成果

(1) 低温ガス化

表III-2.1 研究テーマ目標および達成度

検討課題	最終目標	結果と達成度
・900℃以下での石炭のガス化を実現するための、熱分解分離形式の2塔循環流動層ガス化炉の有効性の確認	・実験室規模の2塔循環流動層ガス化装置の連続運転によるコンセプトの確認	・連続運転(6時間以上)を達成し、熱分解炉におけるタールフリークリーンガスと炭化物併産のためのproof-of-conceptを得た。
・チャーリサイクルによるガス化促進	・2塔循環流動層ガス化装置においてチャーリサイクルによるガス化促進 S/C=1.5におけるガス化率: 52%(中間評価)	・S/C=1.5におけるガス化率: 63%を達成
・チャーによるタール分解によるタールの低減	・ダウンナー条件、900℃、チャー:石炭=0.85:0.15において重質タール収率0.5%以下までの低減	・ダウンナー形式の装置で、900℃、チャー:石炭=0.7:0.3において重質タール収率0.3%まで低減を達成



図III-2.4 低温ガス化の研究成果

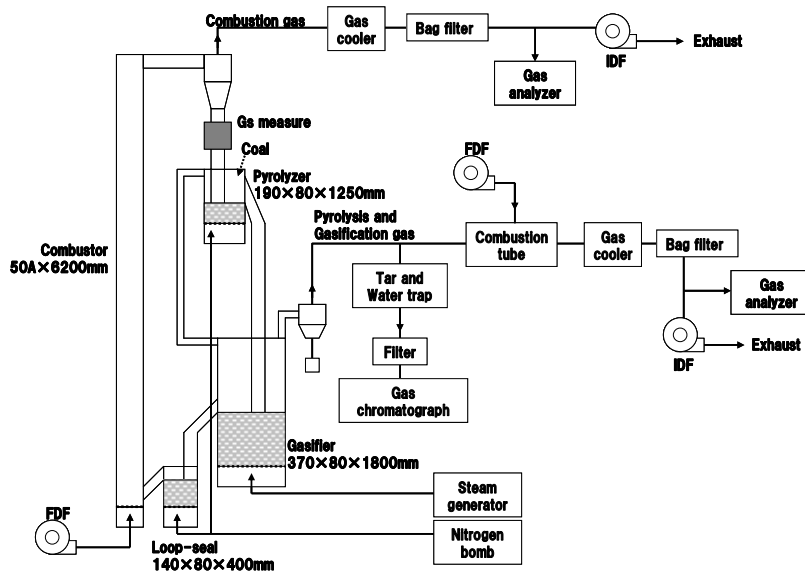
① 流動層を利用した水蒸気ガス化の基礎プロセス開発 (IHI)

水蒸気ガス化における阻害効果を、文献調査と数値解析により評価した。また、低温ガス化による水蒸気ガス化特性を把握するため、常圧流動層ラボガス化試験装置を用いてバッチ試験を実施した。熱分解炉を模擬する反応管(ヒータ加熱炉)を設計・製作し、熱分解炉をラボガス化試験装置の前段に設置して熱分解とガス化を分離する装置を製作し試験を実施した。さらに、現有の常圧循環流動層型小型ガス化炉(NEDO資産)の加熱ヒータ、フィーダ、バルブなどの保守点検を実施した。

チャーの水蒸気ガス化反応は、ガス化によって発生したタールや揮発分等によって阻害されることが分かっている。数値解析ソフトにより、流動層ガス化条件における阻害効果の評価を行った。数値

解析ソフトとしては、石炭の熱分解および水蒸気ガス化反応の定量評価が可能な PC Coal Lab.(Niksa Energy Associates 社製)を用いた。計算の結果、熱分解ガスの分離により水蒸気ガス化反応の速度が向上し、50%炭素転換率を得るための滞留時間が 40%程度低減可能なことが分かった。常圧流動層ラボガス化試験装置を用いた試験を行ったところ、熱分解過程の条件により水蒸気ガス化反応速度の向上効果が見られない場合もあることを明らかにした。これらより、ダウンナー熱分解炉に必要な条件を検討した。

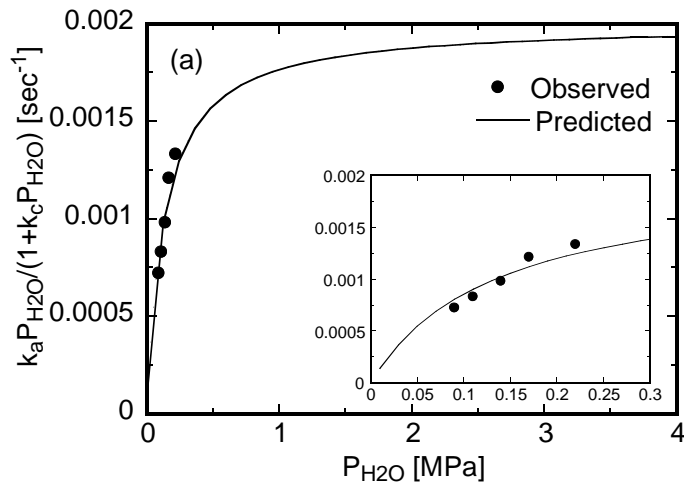
水蒸気濃度の影響を含めたラボガス化の試験結果及びガス化阻害効果の解析結果より、最終的にダウンナー熱分解炉に必要な条件を決定し、おおよそのスケールを明らかにした。また、小型循環流動層ガス化炉に気泡流動層型熱分解炉を設置し、チャーの水蒸気ガス化反応に対する熱分解分離の効果を検証した。



図III-2.5 小型循環流動層ガス化炉のフロー図

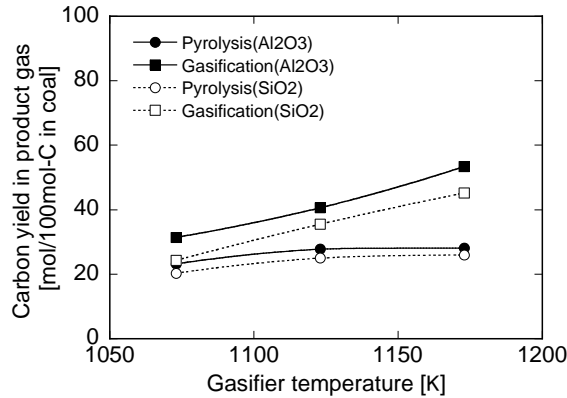
② 水蒸気ガス化およびチャーの燃焼の基礎研究 (産総研)

常圧二塔式循環流動層水蒸気ガス化連続試験で、アダロ炭ガス化速度の温度依存性を検討した。また、流動媒体として、多孔質アルミナを用いた場合、タールがほぼ全てアルミナに吸収され、コーキングされながら改質されるため、通常の循環流動層において利用される砂砂を用いた場合に比べてガスへの転換率が向上することを明らかにした。さらに、加圧下での石炭とチャーの水蒸気ガス化速度を測定し、速度解析の結果、Langmuir-Hinshelwood 機構に従いチャーガス化が進行することを示した。



図III-2.6 アダロ炭の加圧下における水蒸気ガス化速度の実測結果と Langmuir-Hinshelwood 式による予測値の比較

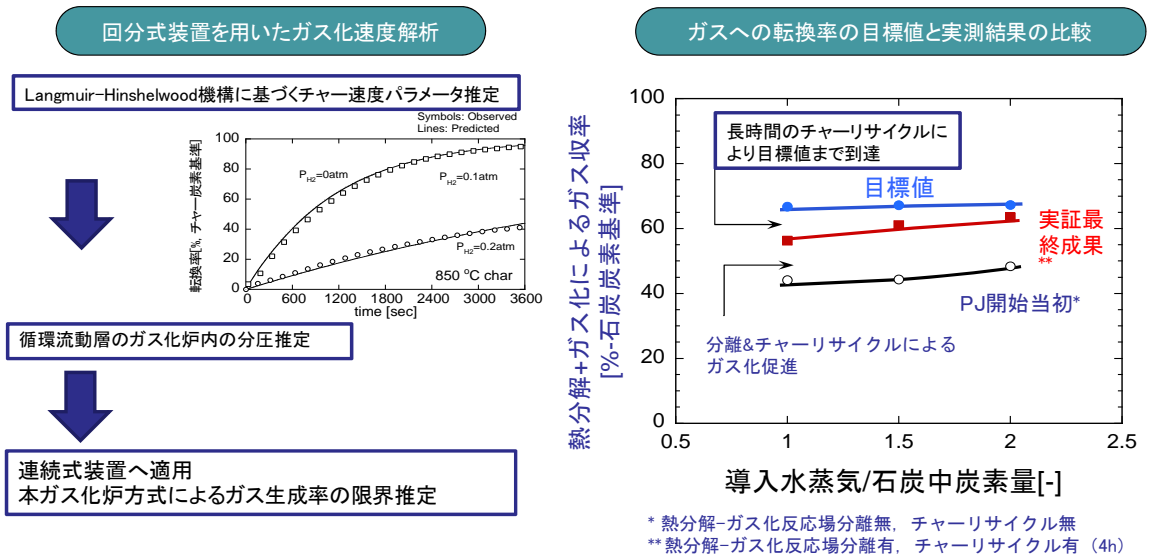
一方、二塔式流動層ガス化炉における高速燃焼炉に着目し、亜瀝青炭チャーの燃焼における温度、圧力および粒径の影響について、加圧流動層燃焼炉を用いて実験的に検討した。結果として、チャーの燃焼完結時間は、高圧・高温・小粒径ほど速くなることを定量的に示した。初期燃焼速度は、大粒径の場合、高圧ほど速くなるが、高温ではその影響は小さくなった。0.5~1.0mm のような小粒径の粒子では、圧力の影響はほとんど生じなかった。また、圧力：0.5MPa、粒径：0.5~1.0mm の条件でも、50%の燃焼には、20 秒程度必要となることを明らかにした。



図III-2.7 二塔式循環流動層におけるガス収率（媒体粒子の影響）

ガス化率の目標値と達成可能性

- チャーガス化速度パラメータを実験的に決定し、チャーリサイクルによるガス化率の限界を推定
- 長時間のリサイクルによりガス化率は向上し、目標値まで到達



図III-2.8 熱分解分離型ガス化炉方式によるガス化性能

低温ガス化では、熱分解に伴い発生する揮発分（主に水素）とタール成分がチャーの水蒸気ガス化を阻害するため、流動層形式の熱分解炉をガス化反応器の直前に設置し、熱分解とガス化の反応場を物理的に分離することを試みた。アダロ炭による連続ガス化実験を行い、熱分解炉を設置した場合と設置しない場合との結果を比較し、熱分解とガス化の分離の効果を調べた。その結果、熱分解反応場を分離し、分解生成物をチャーガス化反応器に同伴させないことにより、ガス生成量、チャー反応速度のいずれも5~10%程度向上し、熱分解とガス化を分離することは、石炭全体のガス化速度、ガス収率に有効であるというコンセプトを実験的に検証することに成功した。

ここで、上記コンセプト検証に用いた装置では、熱分解装置は気泡流動層型であり、熱分解における滞留時間が長く、本プロジェクトで想定しているダウンナー方式による迅速熱分解条件ではなかった。迅速熱分解条件ではさらなる分離の効果が期待できるが、これを確かめるため新たにダウンナー形式の熱分解反応器をもつ、2塔循環式ガス化装置を設計・試作した。

熱分解炉がドロップチューブタイプであり、ガス化炉、燃焼炉を気泡流動層とする新規な循環流動層ガス化装置を用いて、アダロ炭のガス化基礎特性を検証した。まず、媒体粒子を多孔質アルミナとした場合、熱分解、ガス化、燃焼の各炉から排出されるガスから求めた炭素の物質収支はほぼ良好であり、また長時間の安定したガス化試験が可能であることを確認した。ついで、循環速度（ガス化炉での固体粒子滞留時間）、水蒸気濃度等の操作条件を変化させた場合の熱分解、ガス化反応場の分離によるガス化速度促進の効果を検証し、分離によりガス化が促進されることを確認した。

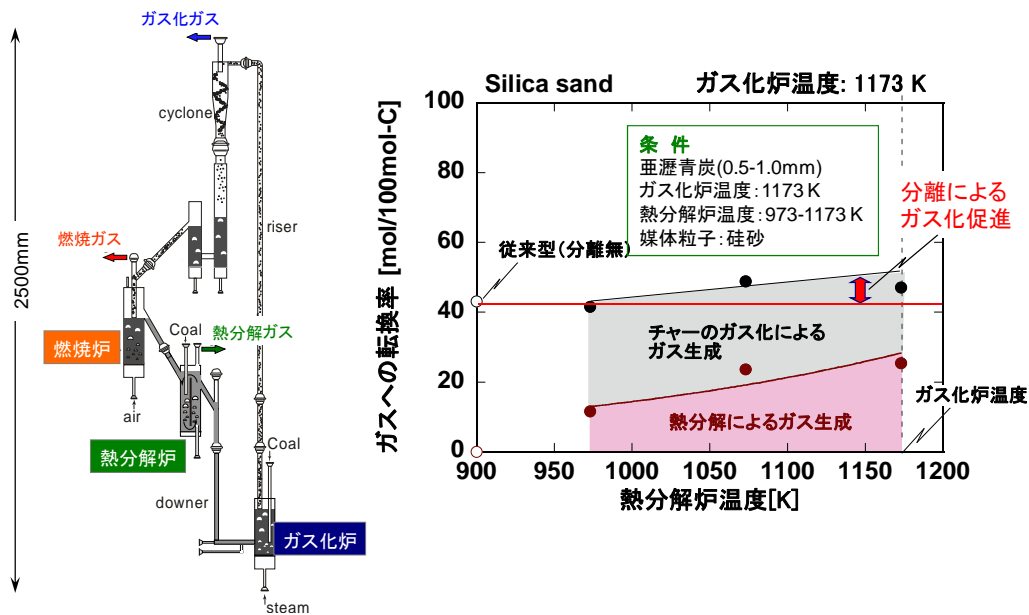


図 III-2.9 熱分解炉とガス化炉の分離によるガス化促進の一例

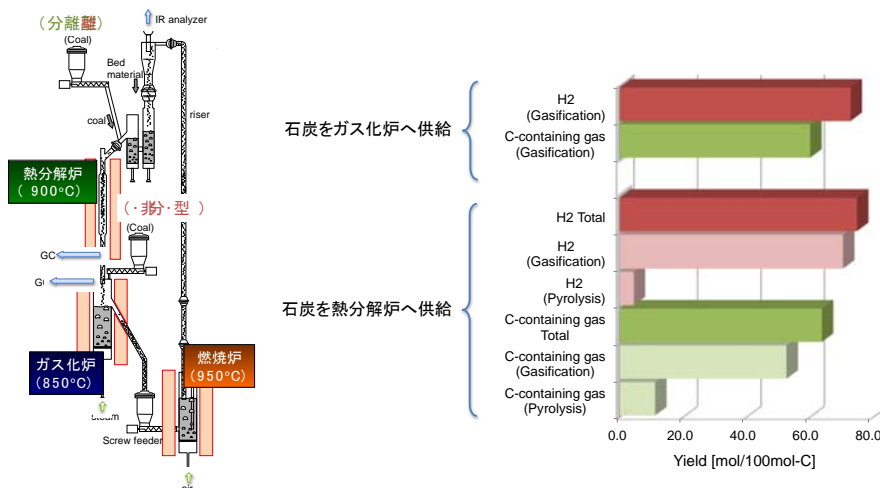
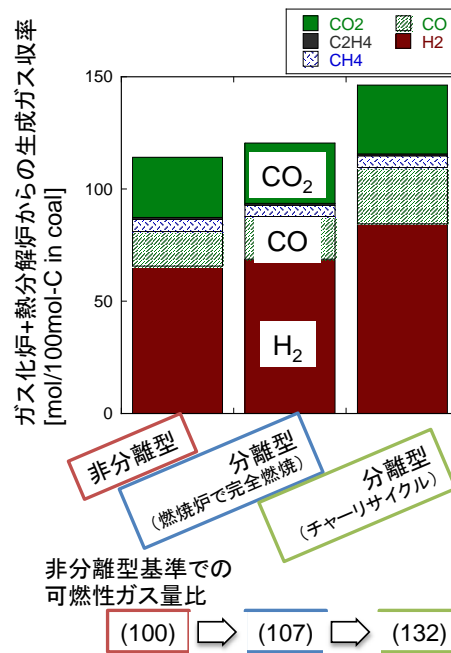


図 III-2.10 新規熱分解分離型循環流動層の模式図と熱分解分離の効果の一例

熱分解分離型循環流動層ガス化装置はガス化促進に効果的であることを実証したが、その促進効果がどの程度、効率向上に寄与しているのかを明らかにするため、熱・物質収支を考慮したガス化炉の簡易シミュレーションを行った。その結果、ガス化炉と燃焼炉の熱収支を考慮すると、熱分解・ガス化反応場の分離によるガス化率向上では、未だ不十分であり、更な

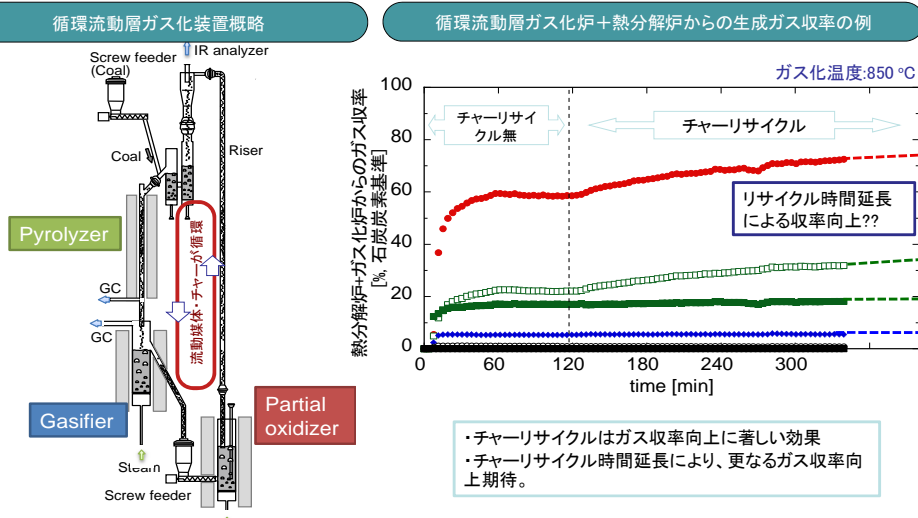
るガス化促進が必要であることが明らかとなった。



図Ⅲ-2.11 熱分解分離型流動層においてチャーリサイクルを行った場合のガス収率向上の一例

そこで、上述の新規流動層によるガス化促進効果を更に加速させるために、ガス炉にて未反応のチャーの熱分解炉とガス化炉へのリサイクルを試みた。チャーのリサイクルにより、まず熱分解炉では揮発分とチャーの相互作用が強化されたことにより、チャー表面でのタールのクラッキングが促進し、熱分解炉から排出されるタールの低減および水素、CO ガス収率の向上を見出した。一方で、リサイクルされたチャーは、ガス化炉にて再度ガス化されるため、ガス化炉からの生成ガスの向上も確認した。チャーリサイクルにより、通常の熱分解炉非分離型の循環流動層よりもトータルのガス収率を30%程度向上することに成功した。このように、ガス化反応装置内にて、揮発分とチャーの相互作用を巧みに制御することにより、ガス収率が向上することを検証することに成功した。また、リサイクル時間の延長にともなうガス化率の向上の度合いを定量的に把握するため、チャーならびにコークの Langmuir-Hinshelwood 機構に基づくガス化速度解析を行い、リサイクル時間にともなうガス収率向上の予測も行った。

本ガス化炉方式によるガス化率の向上
● 熱分解-ガス化炉分離(チャーと揮発分の相互作用回避)とチャーリサイクル(チャーと揮発分の相互作用強化)を装置内で巧みに実現することで、ガス収率は大幅に向上。

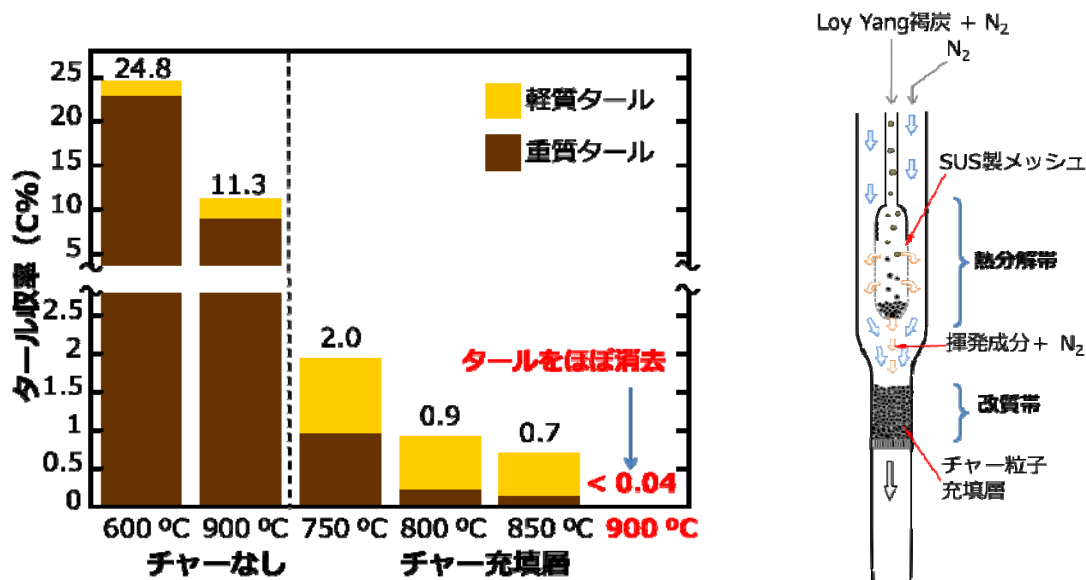


図Ⅲ-2.12 反応炉形式・操作条件の最適化によるガス収率の向上

③ 石炭迅速熱分解により生成した揮発成分の媒体粒子ならびにチャー粒子表面における in-situ 接触分解に関する基礎研究 (北大 (H19-H20)、九大(H21-H23))

炭化水素ガスやタールを高濃度で含む揮発成分は、チャーの水蒸気ガス化を著しく阻害するので、ガス化速度向上のためには石炭の熱分解とチャーガス化を分離することが望ましい。そこで、石炭の迅速熱分解によって生成した揮発成分のチャー粒子あるいは流動媒体粒子表面における in-situ 分解特性を実験室規模の反応器において模擬し、得られた知見をもとに熱分解工程における揮発成分のタールフリー化、すなわち、チャー・コークとタールフリーガスを併産する熱分解工程の可能性を検証することを目的とした。

熱分解で生成するタールを含む揮発成分の接触分解特性を石炭の迅速熱分解条件から独立させて追跡するため、石炭迅速熱分解反応器の直下流に固定層反応器を備えた試験装置を製作した。これを用い、下流の固定層反応器に予め 800℃の流動層反応器で調製したチャー粒子を充填し、充填粒子表面における接触分解特性を 750、800 および 850 °C、接触時間 0.14 s で調査した。また、上流のドロップチューブ/固定層反応器での褐炭熱分解により得られたチャー収率はほぼ一定で、下流の固定層反応器に供給された揮発成分の濃度は温度によらず一定であることを確認した。さらに、タールはチャー充填層温度が高いほど分解し、800℃での重質タールの収率は 0.1mol-C/100mol C-coal sample まで低下、さらにチャー粒子表面でコーキングが進行しても、充填チャーに対する供給石炭の質量比が約 1.5 の範囲では、ほぼ定常的に重質タールが分解することを確認した。また、タール分解特性に及ぼす粒子供給時間の影響や液体クロマトグラフィーによる生成物中の多環芳香族化合物の高感度分析手法を確立した。その結果、チャーとの接触によりタールは主としてコークへ転換し、900℃ではチャーガス化を伴いながら難分解成分であるベンゼンおよびナフタレンの収率をそれぞれ 0.01 および 0.001%-C まで減少できることを見いだした。



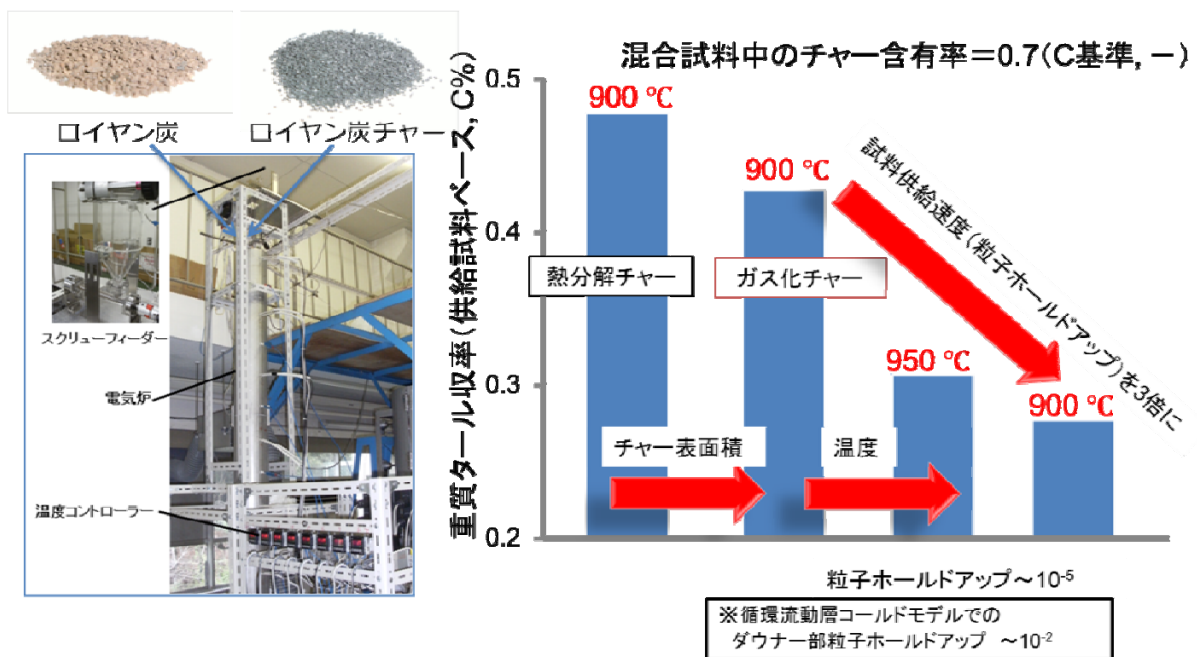
図Ⅲ-2.13 石炭迅速熱分解反応器の直下流に固定層反応器を備えた試験装置 (左) とチャーによるタールの改質結果 (右)

石炭粒子を迅速熱分解する反応器の直下流に固定層反応器を備えたドロップチューブ/固定層-固定層二段反応器およびこれまで蓄積したタール改質特性解析実験技術を駆使してロイヤン炭ばかりでなくインドネシア産アダロ炭を石炭試料とした実験を実施し、タール改質特性に関する実験データを取得した。また、チャー充填層の媒体粒子(けい砂)による希釈効果についても調査し、粒子循環型流動層を用いた次世代石炭ガス化炉実現に向けたダウンナー部での熱分解タール除去の可能性について検証した。その結果、水蒸気の添加はタールの改質に有効であること、改質温度 900℃において、アダロ炭タール収率は <0.7 C% (ロイヤン@900℃ <0.1 C%) まで低減できること、シリカサンドによる

チャー充填層の希釈のタール収率に及ぼす影響は小さいことを明らかにした。

より実プロセスに近い実験条件下で石炭熱分解生成タールの改質特性についても検討した。加熱長 2.5m のドロップチューブ型反応器を製作し、これに褐炭と流動層反応器 (800°C) を用いて調製した褐炭チャーを同時に供給し、反応器を落下する過程で発生するタールがチャー表面でどの程度分解するかを調査した。反応温度 900°C、反応器内ガス滞留時間 6s、及び石炭とチャーの混合比 50 : 50 (炭素基準) で供給した場合、重質タール収率は、1.4 %-C であった。これはチャーの相互作用がないときの重質タール収率 (計算値) の 1.8 %-C より少ないため、粒子落下の数秒間にタールの改質が進行したことを裏づける。タールの改質は、チャーの割合が多いほど顕著となり、石炭:チャー比=25:75 および 15 : 85 の場合、重質タール収率は、それぞれ、0.47 %-C および 0.16 %-C となった。以上、ダウン型模擬実験条件下においても揮発成分チャー相互作用によりタール改質効果を見出すとともに、チャー/石炭比、粒子ホールドアップの増加やチャー細孔度の増加により、より顕著なタール改質が期待できることを示した。

タール改質特性に及ぼす粒子ホールドアップの影響に特に着目してダウン型模擬実験研究をさらに推進した。本実験系では、反応器内の粒子ホールドアップ、つまりチャー濃度を二段反応器で用いたチャー充填層のように高めることはかなわないものの、 10^{-5} 程度のチャー濃度希薄条件においても、石炭チャー/石炭の比の増加による顕著なタール改質を確認した。反応温度を 900°C から 950°C にすることでもタールの収率は減少する。更に、温度を 900°C に固定で試料供給速度を約 3 倍 (0.15 から 0.5 g/min へ) に増やすと温度を 50°C 上げるよりもタール収率の低減に効果があることも明らかとなった。この時の粒子ホールドアップは、 10^{-5} 程度であり、本プロジェクトで想定している循環流動層のコールドモデルによる大量粒子循環システムの場合、ダウン型において 10^{-3} オーダーの粒子ホールドアップが実現されていることから、もしそのような環境が実現できた場合は、更なるタールの低減を期待できる。



図Ⅲ-2.14 ダウン型模擬実験研究に用いたドロップチューブ反応器 (左) とチャー共存によるタールの改質結果 (右)

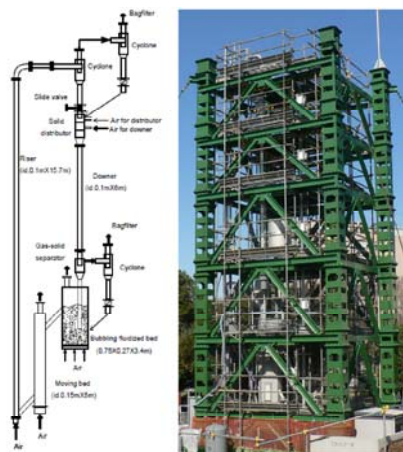
以上をもって粒子循環型流動層石炭ガス化システムの熱分解炉での石炭熱分解タールの石炭チャーによる迅速改質の可能性を実験事実に基づいて示すことができ、当初の目標である、ダウン型 (流動層ガス化炉前段に設けた熱分解炉) におけるタールフリークリーニングガスと炭化物併産のための proof-of-concept を得た。

(2) 炉内流動解析

表III-2.2 研究テーマ目標および達成度

検討課題	最終目標	結果と達成度
<ul style="list-style-type: none"> ・実反応系で想定される固気比における高速粒子循環の達成 ・気泡流動層とライザーの非機械式バルブの構造最適化 	最終目標値 $G_s=350 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上	<ul style="list-style-type: none"> ・最大$G_s=546 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$を達成 ・$G_s=$約200-500 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$の範囲で調節可能 ・固気比:35-40達成
<ul style="list-style-type: none"> ・ダウンナー石炭粒子供給方法の検討と構造の最適化 	<ul style="list-style-type: none"> ・固気混合部の粒子一粒子混合・伝熱を最適化するノズル構造の決定 ・2成分粒子間の伝熱係数と操作条件の関係の解明 	<ul style="list-style-type: none"> ・二粒子間の混合による温度変化を測定 ・法線型構造が接線型構造より粒子混合に優れることを解明(達成) ・1.9%の範囲では、ダウンナー内の伝熱係数は130-145 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$(達成)
<ul style="list-style-type: none"> ・数値シミュレーションによる流動の検討 	相似則モデルの粒径比が計算結果に与える影響の検討とケイ砂・チャー2成分系への拡張	相似則モデルの粒径比が粒子混合と粒子運動のエネルギーを与える影響を評価、2成分系モデル開発

大型コールドモデルを用いて高速・高濃度粒子循環システムを実証するとともに、ライザー、ダウンナー、流動層および各インターフェースに必要な構造と性能を明らかにする。



実規模比(塔径比)1/10の大型コールドモデル

■流動媒体の高速高密度循環システム

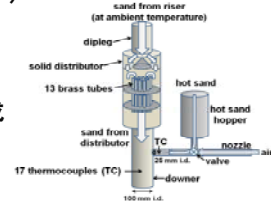
■低温ガス化実現に必要なとされる高固気比の高速高密度粒子循環を達成

- 粒子循環速度 G_s 最大546 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (目標値; 350 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
- 固気比 35~40 ($G_s = 200 \sim 500 \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

■ダウンナー(熱分解炉)の構造最適化

- 石炭粒子一媒体粒子迅速混合のための法線型インレットを設計
- 高伝熱係数(130~140 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)を達成

■流動層~ライザーインターフェース(非機械式バルブ)の構造最適化



■数値シミュレーションによる流動の検討

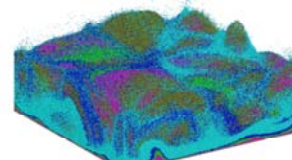
■流動層ガス化炉内の流動解析を行うための計算コードを開発

- 層内の粒子対流時間分布を分析

■流動層~ライザー粒子輸送のシミュレーションコードを開発

■粒子間付着カモデルの導入により、流動層内の珪砂・チャー二成分系流動特性の表現に成功

■計算負荷低減のための相似則モデル導入に成功



並列計算による1千万個オーダーの大規模流動解析

図III-2.15 流動解析の研究成果

① コールドモデルによる高速高濃度粒子循環システムの開発 (東大、産総研)

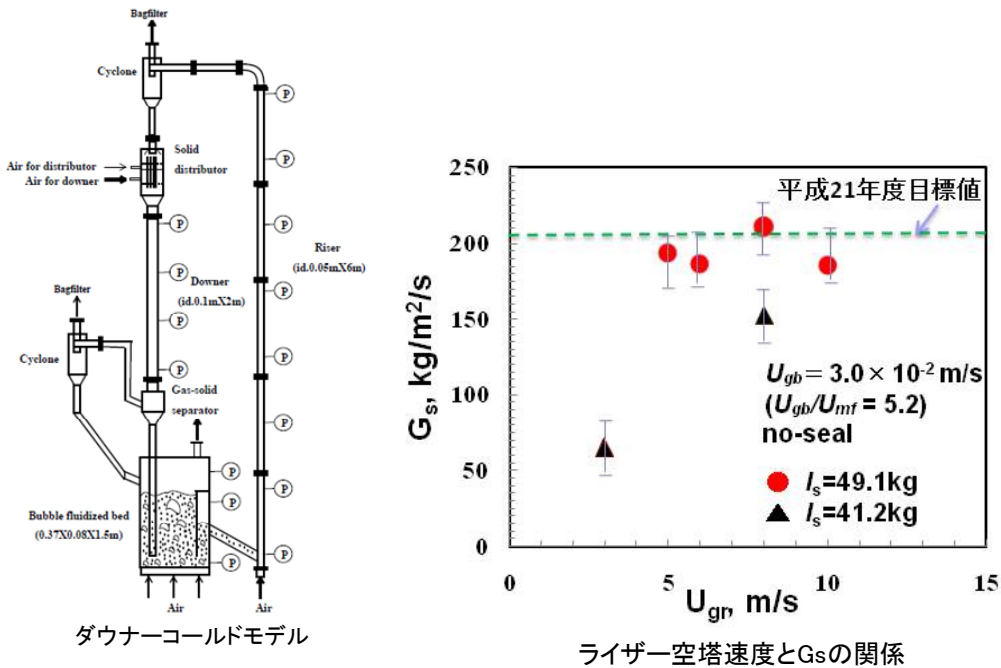
各操作因子(粒子循環速度・圧力損失・滞留時間分布など)の測定方法を検討した。本プロジェクトで製作する二塔式循環流動層型ベンチスケールホットモデルを想定したコールドモデルの設計と試作を行い、各操作因子の影響について調べた。石炭熱分解で生成する揮発分をチャーと分離することを想定して、ダウンナーおよびダウンナーの構造を検討した。また、ダウンナーを流動層上部に設置できる構造とした装置の設計・試作を行い、ダウンナー内の粒子の流動特性について調べた。その結果、ライザーガス流速 $u_{gr}=6.0 \text{ m/s}$, 気泡流動層ガス流速 $u_{gb}=3.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ ($u_{gb}/u_{mf}=5.2$) の条件において最大の G_s ($=116 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{s})$)を得た。さらに、ライザーの静圧分布から粒子ホールドアップを求め、ライザー部分の $\epsilon_s \leq 0.04$ であり、希薄層の形成がみられたことがわかった。

次に、二塔式循環流動層コールドモデルを改造し、熱分解炉を想定したダウンナーも含めた小型三塔式循環流動層コールドモデルを試作し、ガスシールが流動に及ぼす効果を調べた。三塔式循環流動層

コールドモデルのライザー部（長さ 6.4 m、内径 50 mm）、ダウナー部（長さ 1.3 m、内径 100 mm）は、透明アクリル樹脂製または透明塩化ビニル樹脂製のパイプを組み合わせた構造となっており、内部の流動状態が可視化可能となっている。

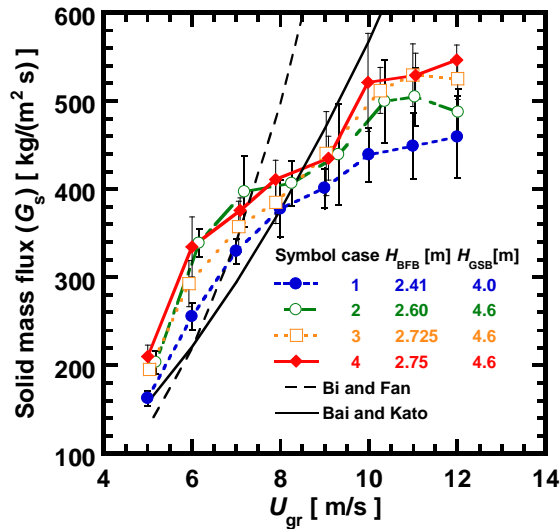
実験結果より、気泡流動層の層高を増すにつれ粒子循環量及びライザー各部の時間平均粒子密度が増加することを明らかにした。ライザーガス流速が $U_{gr}=8.0$ m/s の条件において最大の粒子循環速度 $G_s=336$ kg/(m²・s) が得られた。同時に、高密度粒子ダウナー(高さ 3.8 m、内径 0.05m と 0.1m の 2 種類)を試作し、多管式粒子分散器の粒子通過能力と気固分離器の分離効率を調べた。珪砂 6 号（平均粒径 $d_p=320$ μm）と 8 号（平均粒径 $d_p=82.5$ μm）に対して、直径 50 mm のダウナーの最大粒子質量流量はそれぞれ 815 と 1876 kg/(m²・s) を達成した。気固分離効率については、ダウナー空塔速度(U_{gd}) 1-7 m/s, 珪砂 6 号または 8 号を使用、直径 50 mm のダウナー使用、の条件において、気体固体分離効率 99.8% 以上という高い効率を得ることができた。

さらに、小型コールドモデルから得られた知見をもとに、実機の大きさ並びに 1/10 スケールの大型循環流動層ガス化炉コールドモデルの設計と建設を行った。大型循環流動層コールドモデルの各主要部の概略仕様は以下の通りである。(1) 気泡流動層：内径 750mm×270mm×高さ 3400mm；(2) 移動層：内径 150mm×高さ 5000mm；(3) ライザー：内径 100mm×高さ 15700mm；(4) ダウナー：内径 100mm×高さ 6500 mm。



図III-2.16コールドモデルを用いた流動媒体の循環システムの検討結果

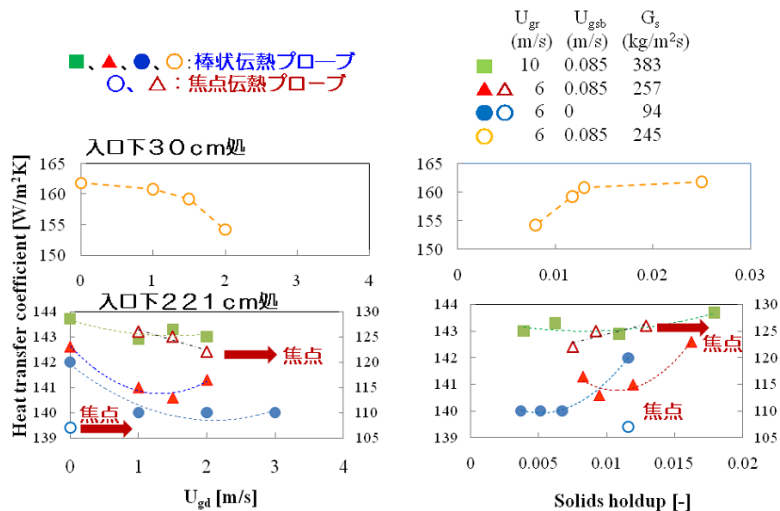
建設したライザー・ダウナー・気泡流動層から成る大型循環流動層において、高速・高密度条件でのケイ砂粒子の流動特性を測定した。ライザー空塔速度とガスシール層高の増加により、粒子質量フラックス(G_s)が増加することを明らかにし、 $G_s > 500$ kg/m² s での高速粒子循環を達成した。 G_s 最大値は 546 kg/m² s に達した。この運転状況での、ライザーの粒子ホールドアップ(ϵ_s)は 0.04-0.05 程度であった。ダウナーでは、入口 1.5-2 m 以内の領域で加速領域の形成が見られることとガス流速増加に伴い、粒子ホールドアップの減少が見られることを確認した。また、大型循環流動層での圧力バランスの式から G_s と ϵ_s の推算を行い、ライザーとダウナー同時に高密度を達成する運転条件の試算を行った。



図III-2.17 流動層実験装置ライザー空塔速度とGsの関係

ダウナー入口の石炭粒子供給部における、石炭粒子—循環砂粒子間の混合を模擬して、加熱砂粒子をダウナーに投入し、ダウナー入口0.1m下、1.8 m下、3.8 m下で温度を調べて加熱粒子—循環砂粒子間の混合特性を調べた。ノズルを1本用いた場合、ダウナー直下では接線型の混合特性の方がいいものの、それより下の領域では法線型ノズルの方が、良好に混合が進むことを明らかにした。

さらに、ダウナー入口の石炭粒子供給部における、石炭粒子—循環砂粒子間の混合を模擬して、加熱砂粒子をダウナーに投入し、ダウナー入口0.1m下、1.8 m下、3.8 m下で温度を調べて加熱粒子—循環砂粒子間の混合特性を調べた。ノズルを2本用いた場合は法線型ノズルの方が、良好に混合が進むことを明らかにした。

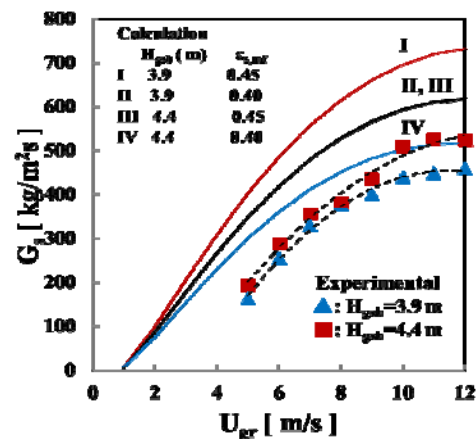
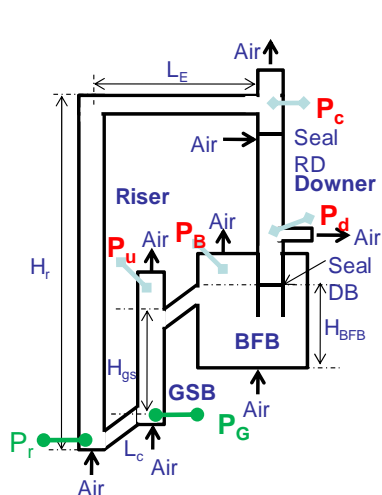


図III-2.18 ナー内の伝熱係数の測定結果

大型循環流動層コールドモデルにおいて、チャー模擬粒子を大量に含む二種混合粒子の高速高密度運転時の流動特性を調べた。ライザー空塔速度 $U_{gr}=6.0$ m/s、10.0 m/sにおいて粒子循環を行い、砂粒子とチャー模擬粒子が混合した状態で循環すること、また、その存在比が安定していることを確認した。チャー模擬粒子存在下での高速循環では、チャー模擬粒子30vol%相当の場合で最大 G_s 394 kg/(m² s)、チャー模擬粒子50vol%相当の場合で最大 G_s 349 kg/(m² s)で高速運転を行うことが可能であった。

ダウナー内の伝熱特性を測定するため、水平管伝熱プローブと焦点発熱プローブを設計した。焦点発熱プローブはダウナー各所での局所伝熱係数を、伝熱プローブはガス—粒子相と伝熱プローブの表

面との間の伝熱係数 h [W/m²K]を測定できる。各操作条件において、ダウナー入口近傍と入り口から2.21mの所で測定した平均伝熱係数およびダウナーの発達領域中心部の局所伝熱係数を測定した。伝熱係数は粒子の循環量、ダウナーのガス速度、粒子のホールドアップなどに依存していた。 G_s を一定にした場合、ダウナー内のガス流速の増加に伴い、伝熱係数はわずかに下がっていることが分かった。また、ダウナー中心部の粒子のホールドアップは他のところと比べて低いので、局所伝熱係数も低いことが分かった。図III-2.13 に伝熱係数と粒子のホールドアップの関係を示す。この図に示したように、 G_s を一定にした場合では低ホールドアップの範囲で伝熱係数は殆ど変化しないことが分かった。低ホールドアップの場合では、ダウナー内の伝熱は主にガス相とプローブ間の伝熱に依存していると考えられる。



(1) $P_c = P_s = P_b = P_u =$ 大気圧

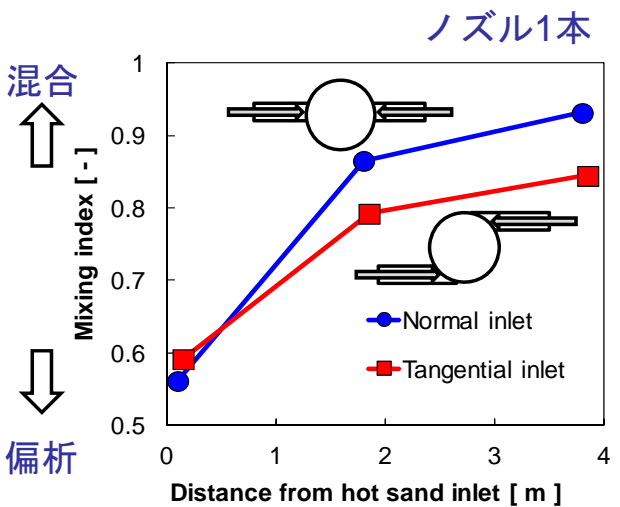
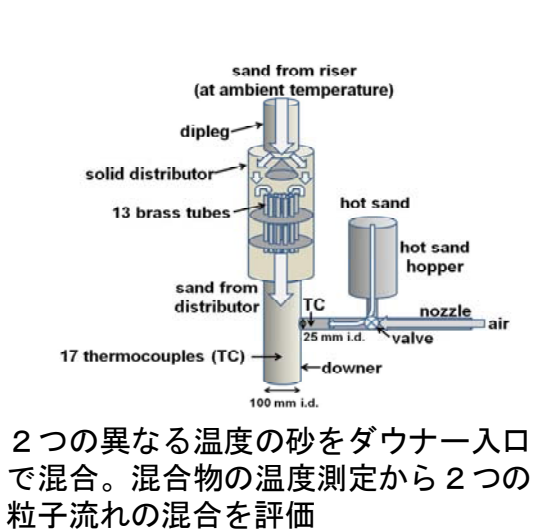
(2) ライザー底の圧力
 $P_r = \Delta P_{r,static} + \Delta P_c + \Delta P_{r,ac} + \Delta P_{r,fg} + \Delta P_{r,fs}$

(3) ガスシール底の圧力

$$P_G = [\rho_p \epsilon_{s,mf} + \rho_g (1 - \epsilon_{s,mf})] g H_{GS} - [\Delta P_{r,static} + \Delta P_{E,static} + \Delta P_{cy-d,static}] \left(\frac{D_r}{D_{GS}}\right)^2 + \Delta P_{GS,ac} - \Delta P_{GS,f}$$

(4) 圧力バランス $P_G = P_r$

図III-2.19 循環流動層の圧力バランスモデル



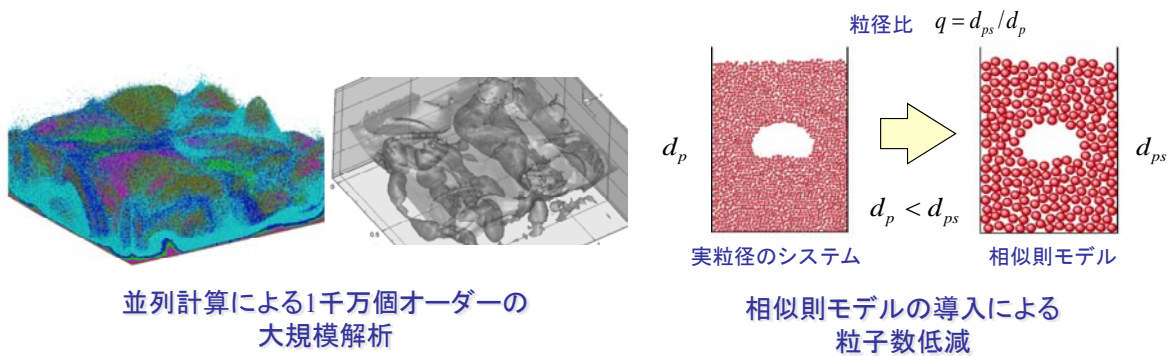
2つの異なる温度の砂をダウナー入口で混合。混合物の温度測定から2つの粒子流れの混合を評価

図III-2.20 粒子混合の最適化

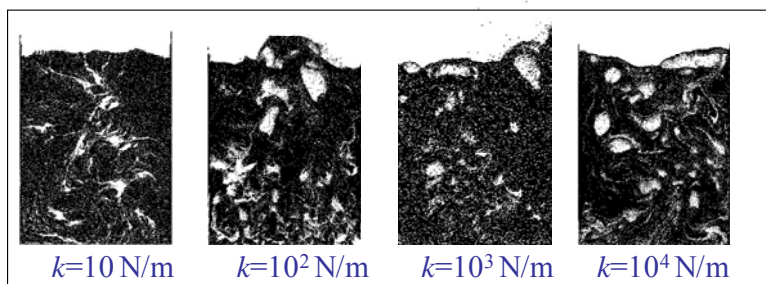
② 高速高濃度粒子循環の評価のためのシミュレーション (阪大)

2成分系流動層に対する流体力モデルの検討と検証実験を実施した。また、粒子数 900 万個の 3次元大規模流動層に対する並列計算を可能にし、3次元流動層に対する検証用実験装置を作成して粒子流動化挙動に対する検証実験を行った。さらに、計算コードに固体境界の幾何形状の表現に対して自由度を大きくする手法を導入し、伝熱管などの内挿物の表現を可能とした。これにより容器形状に対する自由度拡大の見込みが立った。次に、DEM-CFD カップリングモデルによる数値解析に対して IB 法を適用することにより、コールドモデルで採用されているガス化炉への粒子供給を行う鉛直内挿管の境界条件を表現し、ガス化炉内の流動解析を行う計算コードを開発した。本計算コードを用いて試行的な計算を行い、ガス化炉におけるガス化効率を評価する上で重要となる粒子のガス化炉内での滞留時間分布を分析した。計算を行った条件の範囲内で、設計値に比べて非常に短い滞留時間を有する粒子が存在することが確認された。コールドモデルのダウナー下部の流動層からライザー下部への粒子輸送をシミュレーションするため、DEM-CFD カップリングモデルによる数値解析に対して IB 法 (埋め込み境界法) を適用することにより、流動層への鉛直内挿管の境界条件を表現し、コールドモデルの流動解析を行う計算コードを開発した。本計算コードを用いてコールドモデルの運転条件で計算を行い、ガス化炉におけるガス化効率を評価する上で重要となる粒子のガス化炉 (ダウナー下部の流動層) 内での滞留時間分布を分析した。計算では、流動層の出口溢流管高さを変化させ、粒子の平均滞留時間分布を調べた。その結果、出口溢流管の高さは、粒子輸送速度や平均滞留時間には大きな影響がないことが示された。ガス化炉内のケイ砂、チャー2 成分系に対して、付着・凝集が粒子挙動や偏析現象へ与える影響、およびそれらが粒子のガス化炉内における滞留時間に及ぼす影響の評価を可能とするため、流動層の DEM-CFD カップリングシミュレーションへの粒子間付着力モデルの導入と検討を行った。まず、粒子間の相互作用力に付着力を付加した場合、流動パターンに対する付着力の影響は接触力モデル中のバネ定数に大きく依存することを示し、動的付着力モデルを用いることにより、この問題を解消し、実験で得られる流動を良好に表現できることを示した。

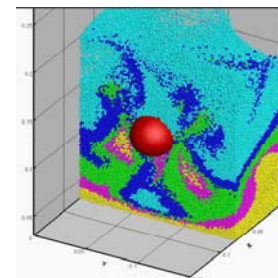
さらに計算負荷を軽減するため、実粒径よりも大きな粒径を用いる相似則モデルを導入し、そのモデル粒径を実粒径の 2 倍とした場合と 4 倍とした場合について流動に及ぼす影響を検討した。その結果、実粒径の 2 倍のモデル粒径の場合には、付着力のある場合とない場合の流動パターンおよび粒子層の変形パターンを良好に表現できること、粒子モデル径の増大により粒子層内の対流が抑制される傾向のあることを明らかにした。



図III-2.21 並列大規模解析、相似則モデル



図III-2.22 粒子間付着力の影響の検討

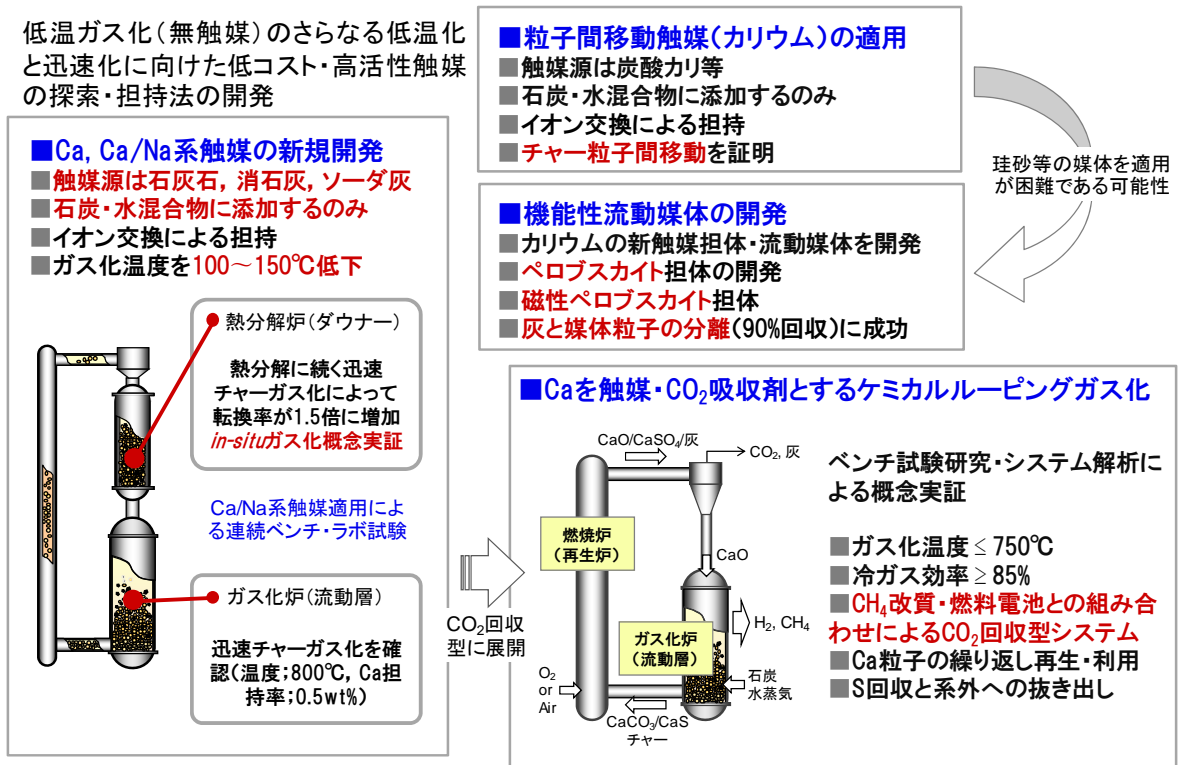


図III-2.23 流体力モデル

(3) 触媒ガス化

表III-2.3 研究テーマ目標および達成度

検討課題	最終目標	結果と達成度
低コスト触媒および触媒ガス化方法の探索	ガス化温度 750°C以下における触媒ガス化、プロセスの構築	<ul style="list-style-type: none"> ・Ni等金属精錬工場の廃液を用いてNiを担持し、500°Cでガス化 ・循環流動層での担持法の確立 ・高価なNiを回収可能
・廃棄物を利用する触媒		<ul style="list-style-type: none"> ・石灰石やソーダ灰等を担持 ・700°Cでのガス化可能 ・触媒回収必要なし
・天然鉱物を利用する触媒		<ul style="list-style-type: none"> ・ペロブスカイト系担体を用いた金属触媒を開発 ・700°Cでガス化可能 ・サイズ分離や磁性分離で約90%の触媒回収率 ・触媒の回収によって活性が回復
・回収可能な触媒		<ul style="list-style-type: none"> ・20回以上の熱分解・再炭酸塩化で粒子の強度変化のないことを確認 ・CaOの力焼エネルギーの80%以上をガス化ガスエネルギーに転換 ・CaOケミカルルーピングガス化プロセスの提案
・CaCO ₃ を利用するケミカルルーピング水蒸気ガス化		



図III-2.24 触媒ガス化の研究成果

① 石炭担持型高活性触媒の探索と回収技術の構築（東北大(H19-H21)、秋田大(H22-H23)）

豪州産 Loy Yang 褐炭、CaCO₃、KCl を用い、常温で褐炭中の COOH 基と金属イオンとのイオン交換により金属イオン担持炭の調製を行い、CaCO₃ から導入される Ca²⁺量は KCl の有無に依らないが、一方、K⁺担持量は KCl 単独時より CaCO₃ 共存下で大きくなり、CaCO₃ と KCl を同時に使用すると、K 量の多い Ca/K 共担持炭が製造できることが見出された。

次に、石英製固定床反応器を用い、常圧 100 % CO₂ 中 750°C で 2 h ガス化したところ、触媒効果は

K < Ca < Ca/K となり、Ca/K では相乗効果が出現し、チャー基準の転化率は 90% に達した (図 III-2.12)。ガス化後の Ca/K 担持チャーの X 線回折 (XRD) 測定によると、Ca²⁺ は CaO に変化し粒子凝集により平均結晶子径は 30 nm 程度と成長したが、一方、K 種の回折線は全く観測されず、K 触媒は微細な状態で高い活性を維持していることが示された。

アルカリ金属の有効性が確認されたので、アメリカ Wyoming 州に膨大な埋蔵量を持つ天然ソーダ灰 (> 99 % Na₂CO₃) に着目し、Loy Yang 炭と共通試料の Adaro 炭との Na⁺ 交換を行ない、反応は前者で迅速に進行するものの、条件を最適化することで、イオン交換サイトの少ない Adaro 炭でも、1.5 mass % Na を担持できることが明らかとなった。

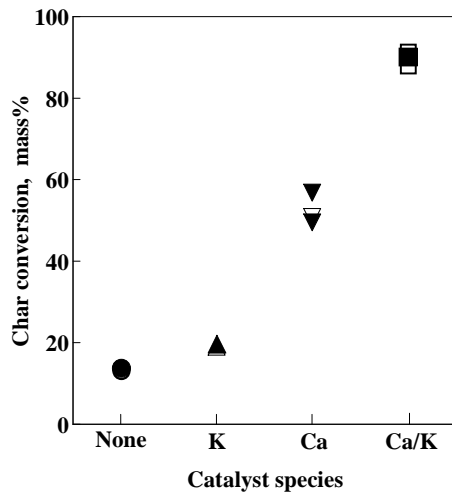


図 III-2.25 750 °C 固定床 CO₂ ガス化における原炭、K、Ca、Ca/K 担持炭の反応性

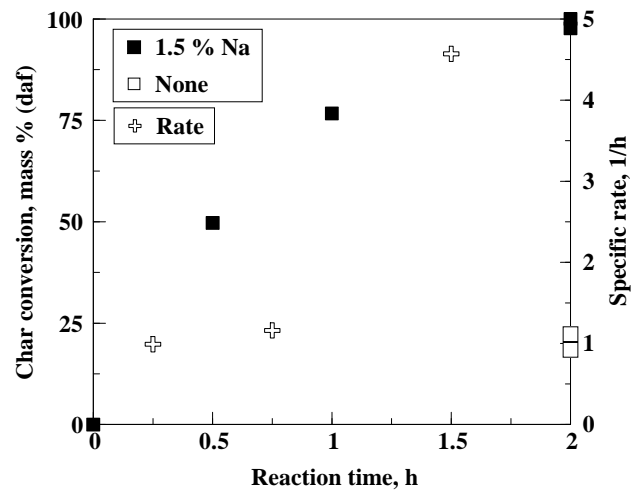
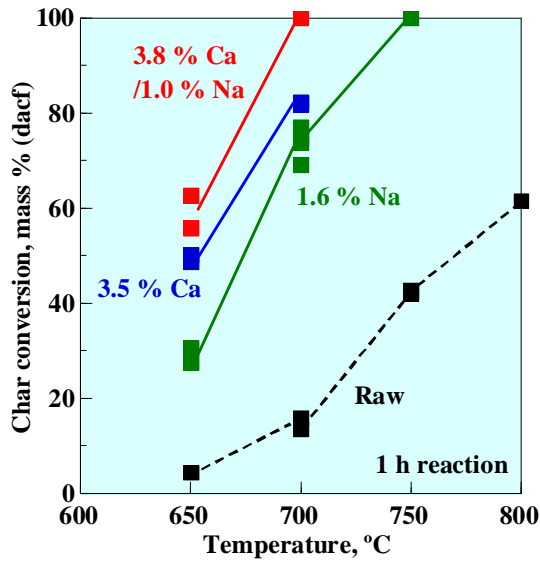


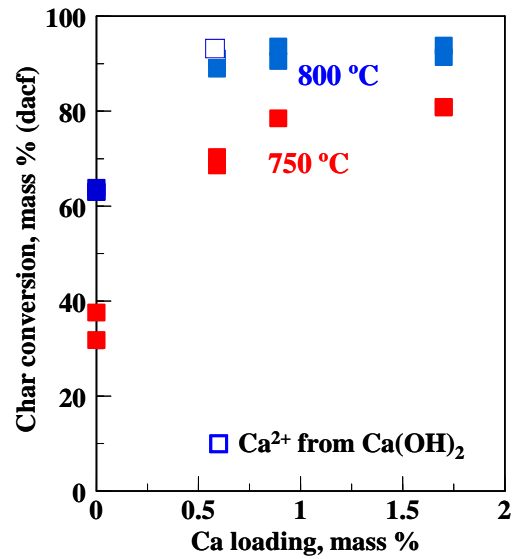
図 III-2.26 Na⁺ 交換 Adaro 炭の固定床 H₂O ガス化での 700 °C チャー転化率と反応速度

Na⁺ 交換 Adaro 炭を 700 °C で H₂O ガス化した結果、チャー転化率は 2 h でほぼ 100 % に達し、イオン交換 Na は少量で大きな効果を発揮した。残存チャー基準の速度 (specific rate) は、指数関数的に増加してアルカリ金属に特有な挙動を示し、Na 種は転化率 50 % でも XRD で検出できないほど微細であった。このように、低コスト天然ソーダ灰は亜歴青炭のガス化触媒として非常に有望であることが判明した。

以上の研究から天然ソーダ灰の有用性が明白となったので、アルカリ金属とは異なる機能を持つ Ca または Fe とを組み合わせた複合触媒の開発を進め、Ca(OH)₂ とソーダ灰より Adaro 炭上にイオン交換担持した Ca/Na は各々単独より大きな効果を発揮し、700 °C でのチャー転化率は 1 h でほぼ 100 % に上り、原炭より 150 °C 低温でのガス化が達成され、新規な高性能複合触媒の開発に成功した。一方、リモナイト (褐鉄鉱; 主成分は α-FeOOH) を分散させたソーダ灰水溶液より得た Fe/Na は、相乗作用を示すものの Ca/Na より低活性であった。

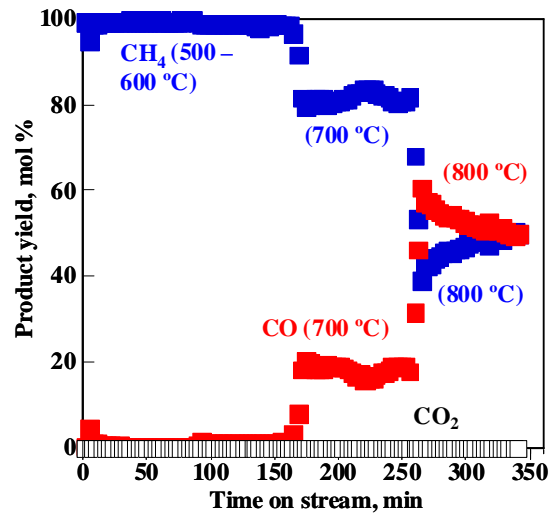
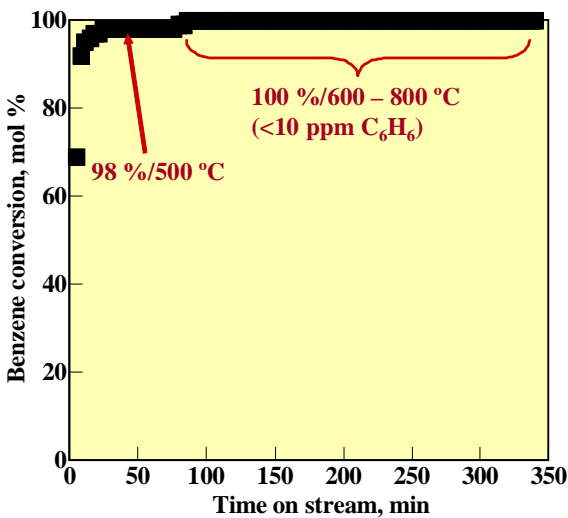


図III-2.27 Adaro 炭試料の固定床 H₂O ガス化におけるチャー転化率の温度依存性



図III-2.28 Adaro 炭の固定床 H₂O ガス化に対する CaCO₃ 由来 Ca 触媒の有効性

さらに、産総研と共同で熱分解非分離型循環流動床 (CFB) を用いて連続 H₂O ガス化試験を行い、Ca 触媒の効果は 800 °C で最も顕著となることを見出し、石炭中炭素のガス化率と生成ガス総量はいずれも原炭時の約 2 倍に上った。粒子循環型ガス化に適した低コスト低担持量触媒の開発を目指し、Ca(OH)₂ の原料の CaCO₃ は、単に Adaro 炭と水の混合物に添加することで、約 0.5 % Ca の少量でもチャーの H₂O ガス化を促進して Ca(OH)₂ 水溶液由来のイオン交換 Ca に匹敵する効果を示し、1 h 後の転化率は 750 °C で原炭の約 2 倍となった。これは CaCO₃ 中の Ca²⁺ が石炭中の COOH 基とイオン交換する結果であり CaCO₃ の有効性が実証された。



図III-2.29 45 %H₂/15 % H₂O/He 中 500 – 800 °C におけるリモナイト触媒上のベンゼン転化率 (左) と生成物収率 (右) の時間変化

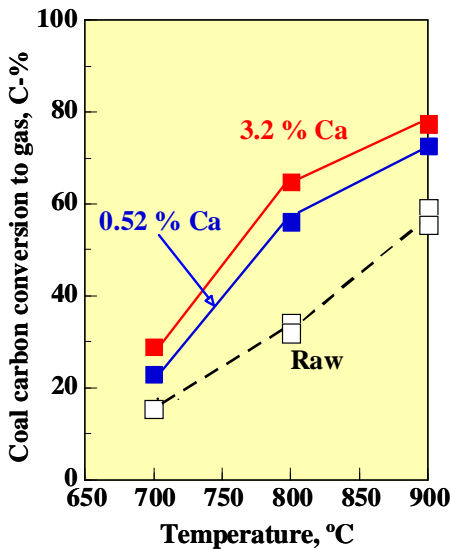
イオン交換 Ca 触媒は、低温ガス化グループと共同で実施した、ダウンナーを模擬したドロップチューブ反応器 (DTR) によるガス化で高い活性を示すことを見出され、H23 年度で詳細に検討した。さらに、流通式接触分解装置に低品位鉄鉱石のリモナイトを充填して用いたところ、タールモデル化合物の難分解性ベンゼン (1700 ppm) が H₂/H₂O 中 600 °C で完全に分解・除去 (10 ppm 以下) できることに成功し、反応は C₆H₆ → CH₄ → CO で進行した (図III-2.20)。この結果は、タールが発生し

ない粒子循環型ガス化法の開発に資するものと期待される。

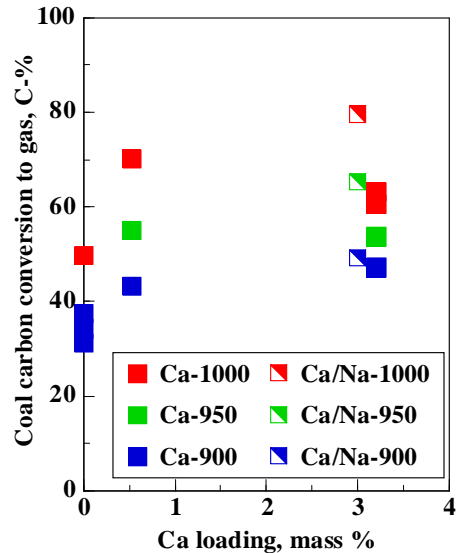
これまでの成果を発展させ、CFB を用いる常圧 H₂O ガス化における Ca 触媒の性能ならびに DTR による H₂O ガス化に対する Ca 単独と Ca/Na 複合触媒の効果を中心に検討した。

前者では、Ca(OH)₂ 水溶液より Adaro 炭にイオン交換した Ca 触媒は、0.5 % Ca の少量でも、700 – 900 °C でのガス化を促進して炭素ガス化率と燃料ガス生成量を増大させ、800 °C で最大の効果を発揮し、約 100 °C 低温でのガス化を実現することを実証した。

一方、Adaro 炭の DTR ガス化では、Ca 触媒は、急速加熱下数 sec の短い粒子滞在時間にもかかわらず、0.5 % Ca の少量で 900 – 1000 °C でのタールやチャーのガス化に活性を示して炭素ガス化率を向上させ、Ca/Na は Ca 単独を上回る性能を発揮することを見出した (図III-2.22)。



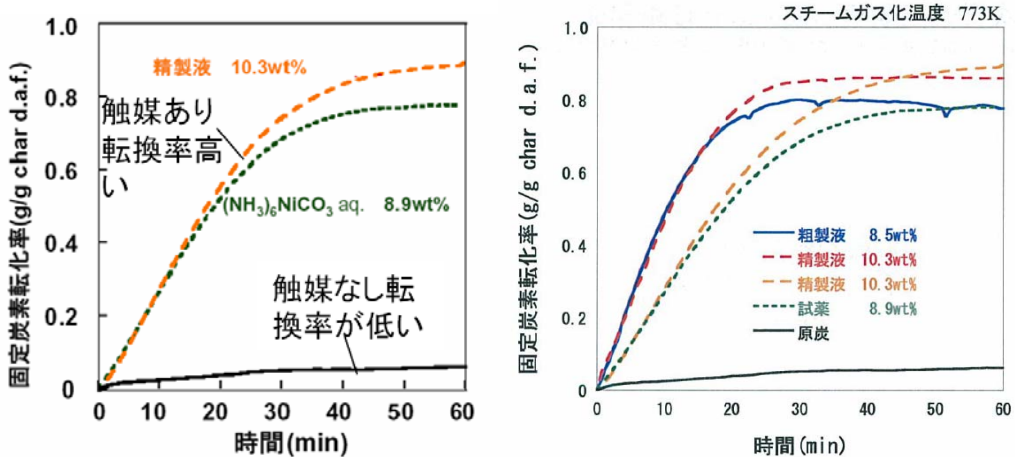
図III-2.30 CFB ガス化における炭素ガス化率の温度依存性と Ca 触媒の効果



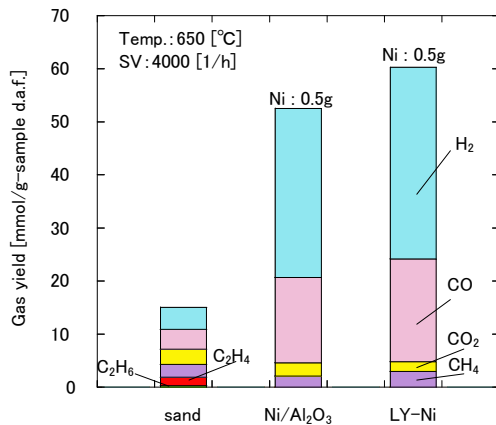
図III-2.31 DTR ガス化時の炭素ガス化率に対する Ca および Ca/Na の触媒性能

② 低コスト鉱物資源ガス化触媒の探索と利用法の構築 (群馬大)

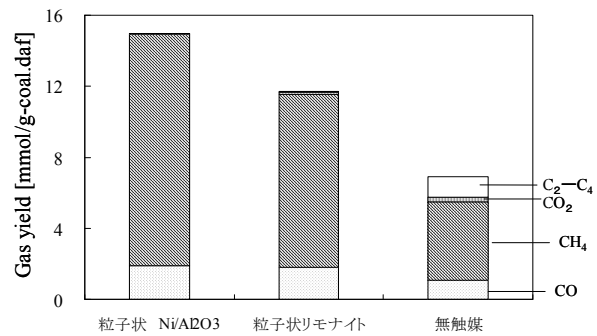
低コストかつ高効率な触媒ガス化を実現する方法として、褐炭および亜瀝青炭に、Ni の湿式精錬工程液および Ni めっき廃液を用いて、Ni をイオン交換担持し、高分散状態の Ni による接触ガス化について検討した。その結果、湿式精錬工程液や Ni めっき廃液からも Ni を担持可能であること、また、亜瀝青炭でも十分にイオン交換担持可能であることを明らかにした。また、Ni めっき廃液を用いた場合においては、担持の際、共存するリン酸が担持を阻害するものの、その後のガス化活性にはリン酸はほとんど影響せず、試薬や湿式精錬工程液を用いて担持した場合と同様、高い活性を示すことが明らかになった。



図III-2.32 Ni 精錬廃液を利用した Ni 担持炭の低温ガス化反応性(500°C)



図III-2.33 触媒種による下水汚泥タールの分解効果（ガス収率）



図III-2.34 650°Cにおける触媒種による石炭タールの分解効果（ガス収率）

また、石炭タールやバイオマス廃棄物タールの分解に対し、調製したニッケル担持褐炭チャーが高い触媒活性を示した。安価なソロアコ・リモナイトがタール分解用高活性Fe触媒の原料として用いた場合、触媒層温度650°Cの場合が最もガス収率が高いことがわかった。この場合、触媒再生がタール分解活性に影響しないことが確認された。

触媒の回収や担持工程はコストの大幅な増加に繋がり、将来的なA-IGCC導入の足枷になることが懸念される。そこで、これらの煩雑なプロセスを回避し、かつ高効率での石炭低温ガス化を実現するため、粒子間移動触媒の概念を導入し、石炭の水蒸気ガス化におけるその有効性を評価した。あらかじめイオン交換によりアルカリ金属を担持した褐炭(以下アルカリ担持炭)を作製し、これを褐炭および瀝青炭の原炭と混合した後、熱重量・質量分析装置を用いて0.3atmの水蒸気雰囲気下(キャリアガス:アルゴン)、室温~900°Cでガス化を行った。アルカリ担持炭との混合ガス化を行った場合、褐炭ならびに瀝青炭双方において、各々の原炭の場合と比較して著しく水蒸気ガス化が促進されることを見出した。このことは、触媒が石炭チャー粒子間を移動し、原炭のガス化を促進した事を意味しており、石炭の低温ガス化における粒子間移動触媒の導入の有効性が示された。

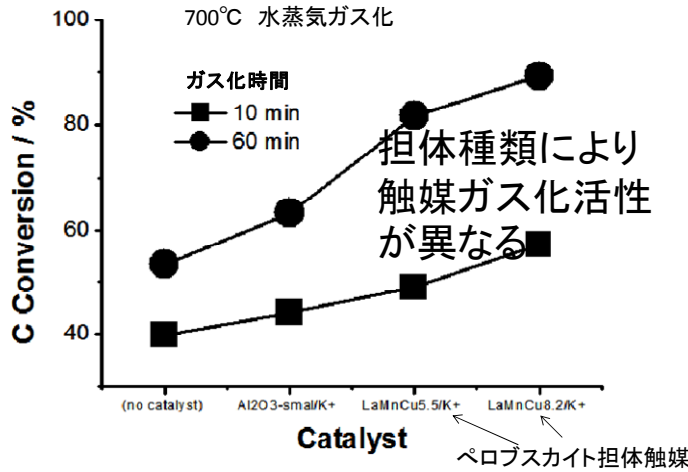
次いで、ヒノキ、Loy Yang 褐炭、大同炭、ホンゲイ炭由来のチャーならびに黒鉛とアルカリ金属を担持した褐炭チャーとを混合して水蒸気ガス化を行い、アルカリ金属触媒の移動によるガス化促進効果のチャー構造依存性について、原料の炭素含有量、チャーの比表面積および粒子径の影響を評価した。各チャーは密閉白金るつぼ中、700°Cで7分間急速熱分解して作製した。また、ガス化は熱重量分析装置を用いて、0.5atmの水蒸気雰囲気下(キャリアガス:アルゴン)、700°Cで行った。ガス化促進効果は原料中の炭素含有率の減少ならびにチャーの比表面積の増加とともに著しく増加した。また、ガス化促進効果は、いずれのチャーにおいても粒子径が250~500μm程度までは持続され、特に褐炭では500~1000μm程度でも低下が認められなかった。これらの結果は、本プロセスが、特にA-IGCCにおいて利用が見込まれる亜瀝青炭や褐炭といった低品位石炭のガス化に特に有効であることを示している。

③ 担持型高活性ガス化触媒の探索と鈹物、触媒分離を含むガス化プロセスの構築 (九大)

様々な担持触媒の石炭ガス化特性を調べるため、まず、流動層ガス化装置を立ち上げ、動作を確認した。次に、メソ細孔性アルミナ触媒がガス化特性に与える影響を検討するため、細孔構造の異なるアルミナにK₂CO₃を高分散し、石炭(アダロ炭)燃焼挙動を調べた。その結果、細孔容量が小さくなるにつれ燃焼温度が低下することがわかった。さらにMn系Perovskite担体の物性と触媒作用との相関を調べるために、組成の異なる3種類のPerovskite担体を調製し、その構造を分析した。

700°C以下のガス化の実現するために、反応速度の向上(反応時間又は石炭/触媒量)、高活性及び30分以内にガス化目標値を達成できる触媒の高性能化を目指し、ペロブスカイト担持型ガス化触媒の設計、調製及び性能評価を行った。ガス化性能に対し担体のマンガン含有量、及び担体の細孔径の影響を調べたところ、マンガンの含有率が18%のLaMn_{0.8}Cu_{0.2}O₃担体を用いた10%K₂CO₃担持触媒は、10分と60分のガス化で各々55%と91%のガス化転換率を示した。ナノ繊維状の単位構造を持つメソ孔

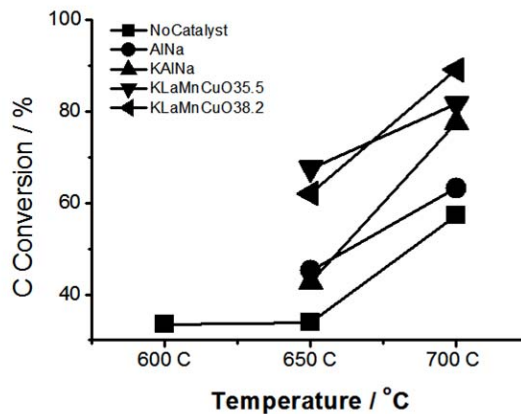
性アルミナ担体触媒は同一条件で各々43%と62%の転換率を、無触媒の条件では同一条件で各々39%と51%の転換率を示した。ペロブスカイト担体触媒の中でMnを18%含有する K_2CO_3 10 wt%/ $LaMn_{0.8}Cu_{0.2}O_3$ 触媒が最も高いガス化転換率を示した。他の触媒に比べて高い水素含有率を示し、生成ガスの組成改質及び二酸化炭素の生成抑制等の制御が可能であることが確認された。また、ガス化時のタール生成量が低減し、700°Cではタールの形成がほぼゼロ、650°Cと600°Cでのガス化でもタールの形成が殆ど認められないことが確認できた。



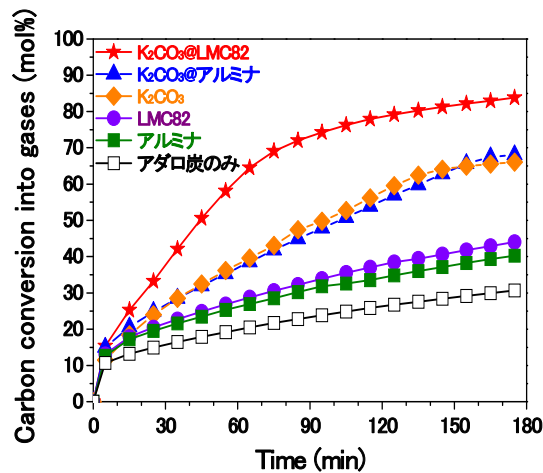
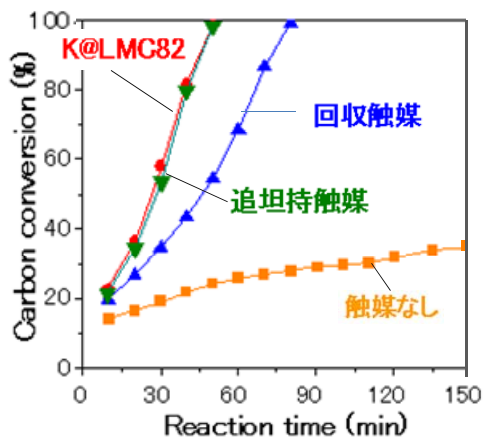
図III-2.35 各種往還型触媒を利用した石炭低温ガス化反応性

触媒の再利用性については、使用済み触媒を用いた二回目のガス化活性を評価した。回収触媒のガス化再利用の際にガス化活性は、一回目に比べてやや低く、一回目ガス化時に5%程の K_2CO_3 の揮発したことが活性低下の原因と見られる。なお、5 wt%の K_2CO_3 を追加担持することで触媒活性の回復が見られ、特に700°Cガス化では未使用触媒と同程度の活性を示した。

反応後の触媒を石炭灰から分離するため、粒子サイズの違いによる触媒と石炭灰の分離を検討した。ペロブスカイトが均一に多孔性アルミナの表面に付着されることが確認した。



図III-2.36 各触媒場合の石炭ガス化炭素転換率の比較



図III-2.37 回収触媒のガス化活性（炭素転換率）の比較

活性種の回収性能およびタール生成抑制性能を評価するのに適した、K 化合物との反応性が低いステンレス製の反応器を用いたタール回収ユニット付き水蒸気ガス化評価装置を設計・作成した。この装置を用いて K₂CO₃@LMC82 触媒のアダロ炭の水蒸気ガス化試験を行ったところ、ガス化反応性とガス化反応後の活性種損失抑制の両面から判断して、反応温度 700°C が本開発触媒においては適していることを明らかにした。また、担体としての性能をアルミナと比較すると、LMC82 は活性種である K₂CO₃ とのシナジー効果により高い触媒ガス化特性を示し、活性種回収能についても、LMC82 はガス化反応終了時点で約 80% の高い活性種回収率と、アルミナ担体より優れていることを確認した。活性種 (K₂CO₃) 担持量については、本研究に用いた LMC82 担体においては 10 wt% が最も効率が高いことを見出した。また、K₂CO₃ を 10 wt% 担持した LMC82 を石炭に対して 2 倍量使用することにより、炭素転換率 95% 以上を達成した。更に、触媒なしと比べて K₂CO₃@LMC82 触媒は約半分へとタール生成量を抑制できることを明らかにした。

ペロブスカイト酸化物型 (LMC82) 担体の場合は、炭素転換率 30% 程度までは一時的に担体上の K イオン量が減少したものの、その後増加し、反応終点付近では約 78% の K イオンが担体上に回収されることを確認した。長期反復使用時における触媒能について、LMC82 担体を用いた場合は 5 回目までは高いガス化触媒能を保持し、6 回目以降に反応性が低下することを確認した。LMC82/アルミナ担体を用いた場合は 3 回目から、磁性を有するペロブスカイト型 (LKM91) 担体を用いた場合は 6 回目から触媒能の低下が見られた。

LMC82 及び LMC82/アルミナ担体を用いた場合は篩を用いたサイズ分離を、磁性を有する LKM91 担体を用いた場合は永久磁石を用いた磁性分離を、夫々試みたところ、何れの場合も石炭灰との混合物から約 90% の触媒の回収が可能であることを確認した。

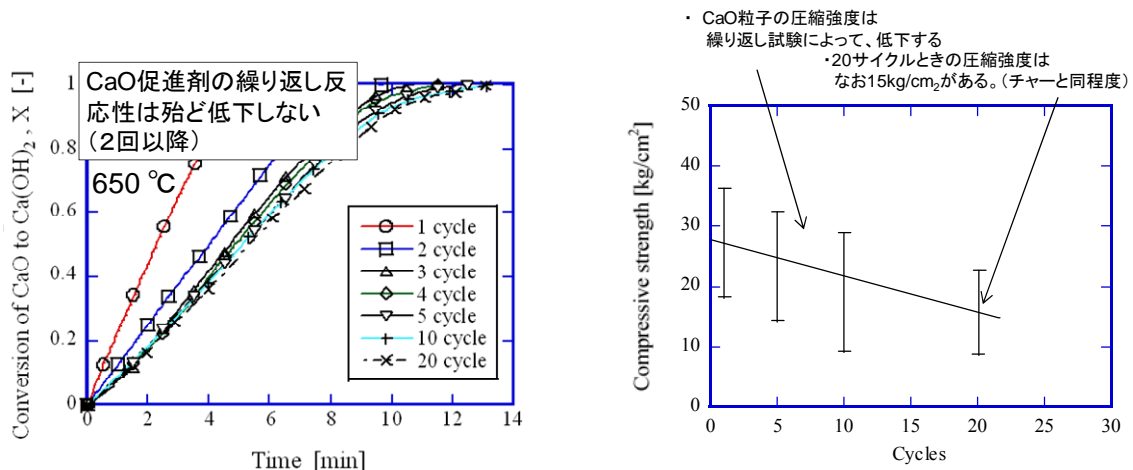
また、LMC82/アルミナ担体の高いタール改質効果を確認した。

④ ケミカルループを利用するカルシウム系ガス化促進剤の開発と低温ガス化プロセスの構築 (JCOAL)

世界の主なケミカルループ石炭ガス化プロセスについて最近の研究開発動向を調査した。その結果、ケミカルループ石炭ガス化プロセスは我が国のものを含め 4 種類あり、実験室規模からパイロット規模まで世界中で盛んに研究が進められていること、また石灰石を CO₂ 吸収剤として利用し石炭から水素を製造するプロセスは、日本と欧州で開発が進められていることが明らかになった。さらに、ケミカルループ石炭ガス化による CO₂ 回収水素製造の原理、石炭利用の効率アップ及び低温ガス化の可能性を検討した。その結果、ケミカルループ石炭ガス化を利用すれば、低い反応温度でも CO₂ 回収とともに水素の高効率な製造が可能であることを明らかにした。

カルシウム系ガス化促進剤を用いたケミカルループ石炭ガス化システムの実用性を向上させるため、CaO の水酸化及び未反応のまま排出される Ca(OH)₂ の分解の繰り返し反応時における CaO の反応性及び物性 (結晶及び圧縮強度) の変化を調べた。CaO の水酸化及び Ca(OH)₂ の分解の転換率がほぼ 100% に達成し、繰り返し反応の影響はほとんど見られなかったが、CaO の水酸化反応速度が繰り返し反応とともに徐々に低下した。繰り返し反応により CaO 結晶が大きく成長したのがその原因と考えられる。

また、繰り返し反応によってCaO粒子の強度は低下する傾向を示したが、20回繰り返し反応してもなおガス化炉内の流動に耐える15kg/cm²（チャーの強度と同程度）があることが確認された。

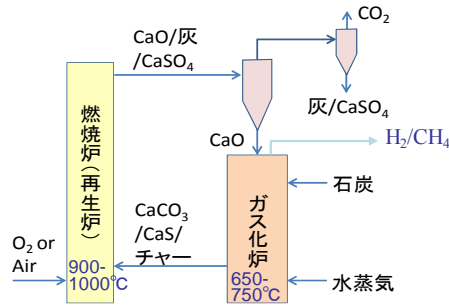


図III-2.38 ケミカルループガス化促進剤の繰り返し反応性及び粒子強度変化

次にガス化特性について調べた。まず、高圧熱天秤、連続供給石炭ガス化装置及び吸収剤再生（カ焼）装置を用いて、高水素分圧/高水蒸気分圧下での石炭チャーとCa担持炭チャーの反応速度、石炭ガス化炉内及びカ焼炉内におけるCaO（CO₂吸収剤）による硫黄分の吸収等によるガス洗浄効果、ならびにカ焼装置出口のサイクロンとフィルターによる石炭灰と吸収剤の分離効果を検討した。また、高濃度でCO₂を回収するために採用する酸素燃焼においては、酸素を水蒸気で希釈する方法（水蒸気サイクル）とCO₂で希釈する方法（CO₂サイクル）があるが、両方式についてのカ焼エネルギーを検討した。さらに、ケミカルループ石炭ガス化システムを構成するプロセスの評価と全体の効率を解析し、次の結果を得た。

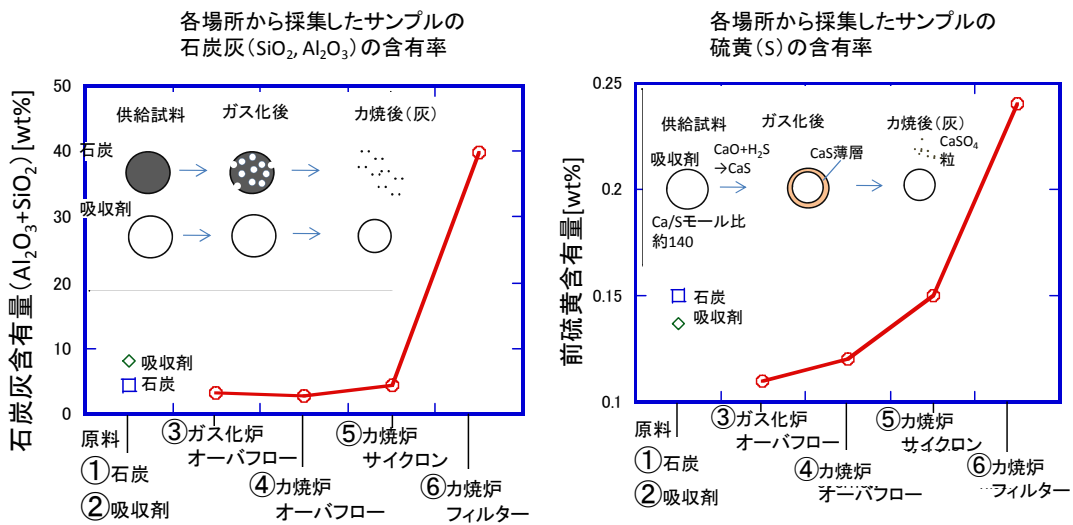
- 高水素分圧/高水蒸気分圧下でのチャー及びCa担持炭チャーガス化速度も水素分圧の増加とともに減少した。しかし、ガス化反応速度に対する水素分圧の影響はチャーよりCa担持炭チャーの方が少なかった。
- CaO（CO₂吸収剤）をガス化炉内に供給したケミカルループ石炭ガス化では、石炭中の硫黄分の約4-7%が生成ガスとして排出され、残りの約96-93%が吸収剤にCaSとして固定されるか、チャーやタールに残されることがわかった。ガス化から排出した固体残渣を再生（カ焼）した際、フィルターで採集された粒子中の硫黄分が最も多く、その次がサイクロンで、オーバーフローから採集した粒子の硫黄分は最も少ないことがわかった。従って、オーバーフローから採集した粒子を吸収剤として再利用し、フィルター及びサイクロンから採集した粒子を系外に抜き出すことで、プロセス内での炉内脱硫の実現が可能である。
- 吸収剤再生（カ焼）装置出口のサイクロン分級による吸収剤と石炭灰の分離の可能性について検討した。その結果、サイクロンで捕集できなかった細かい粒子（フィルターによる捕集）に含まれる石炭灰の主成分（SiO₂+Al₂O₃）は最も多いことが分かった。このことから、サイクロン分級を適切に利用すれば、石炭灰を濃縮し、吸収剤との分離が可能であることが分かった。
- 再生（カ焼）条件における酸素希釈方法として水蒸気サイクルとCO₂サイクル方式のカ焼エネルギー解析を行った。その結果、総合的には水蒸気サイクルの方がメリット大きい。
- カ焼装置出口のサイクロンによる灰分の分離を導入した場合、システム熱効率が約2%（一例として）高くなることが分かった。また、灰分の多い石炭の場合では灰分分離によるシステム熱効率の向上効果がさらに大きくなる。
- 連続供給石炭ガス化試験から採集した排水中のフェノール、有機酸及びTOCを分析し、廃水処理のためのプロセス構成を検討した。凝縮水のpHは10程度のアルカリ性を示し、NH₄⁺とCa⁺によるものであるが、通常のイオン交換でNa⁺に交換すれば良い。高沸点分としてはフェノール類や芳香族類が検出されており、活性汚泥法などで有機分の分解除去が必要となる。
- 加圧ガス化炉への粉体供給および加圧ガス化炉からの粒子抜出しはロックホッパー方式を採用し、また、CO₂の回収のため、吸収剤の再生（カ焼）はCO₂を循環するための動力消費でエネルギー損失になる。解析の結果からは、供給、落圧コンプレッサによる動力消費はシステムの熱効率を

約 0.54% 低下させ、カ焼 CO₂ 循環ブローによる動力消費は熱効率を約 1.48% 低下させることが分かった。



<p>ガス化炉：</p> <p>① 石炭ガス化反応：$C(\text{石炭}) + H_2O(\text{水蒸気}) + \text{熱} \leftrightarrow H_2 + CO_2 + \text{チャー}$</p> <p>② CaOのCO₂吸収反応：$CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + \text{熱}$</p> <p>③ CaOのH₂S吸収反応：$CaO + H_2S \rightarrow CaS$</p>	<p>燃焼炉(再生炉)：</p> <p>① CaCO₃の再生反応：$CaCO_3 + \text{熱} \leftrightarrow CaO + CO_2$</p> <p>② チャーの燃焼反応：$C(\text{チャー}) + 2O_2 \rightarrow CO_2 + \text{熱}$</p> <p>③ CaSの酸化反応：$CaS + 2O_2 \rightarrow CaSO_4(\text{石膏})$</p>	<p><特長></p> <ul style="list-style-type: none"> ・媒体熱容量が大きい(硅砂の十数倍) ・炉内脱硫可能 ・低質炭の利用可能 ・安価な媒体が利用可能
--	--	--

図III-2.39 ケミカルルーピングの概念



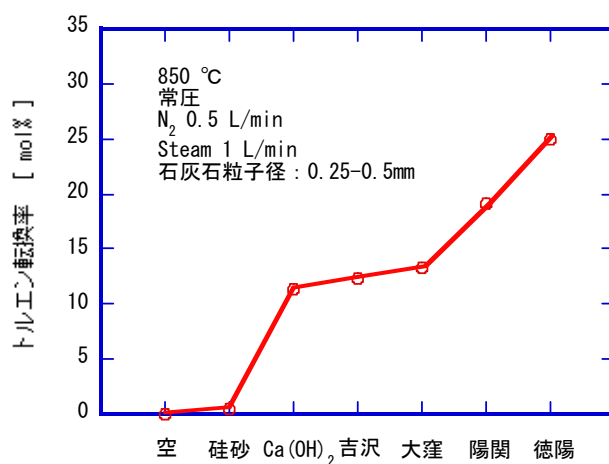
図III-2.40 ガス化及びカ焼過程で採取した試料に灰 (SiO₂ と Al₂O₃) と硫黄の割合

Ca 系ケミカルルーピングガス化試験から採集した固体サンプルを分析し、炉内脱硫のメカニズム及び廃吸収剤 (CaSO₄) の分離方法を検討した。また、ケミカルルーピングガス化の凝縮水による生成ガス中の有害ガスの吸収、及び凝縮水の再利用方法を検討した。さらに、プロセス構成条件について、高圧ガス化/低圧カ焼条件下での粒子ハンドリング技術を調査しながら、同圧ガス化/カ焼条件の粒子循環を実現するための吸収剤カ焼条件を検討し、次の結果を得た。

- ・カ焼装置のフィルターから採集したサンプル中の硫黄分が他場所のサンプルより濃縮されていたため、効率的に硫黄化合物を分離することができる。また、ガス化炉で硫黄吸収による生成した CaS は粒子の薄い表面にしか存在しないため、カ焼炉で CaSO₄ に酸化し易いことが分かった。

ガス化炉： $\text{CaO} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{CaS}$ ； カ焼炉： $\text{CaS} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$

- ケミカルルーピングガス化の凝縮水には、有機物（有機酸、フェノール類など）がおおく、 NH_3 も含まれる。
- 同圧循環に必要な CO_2 分圧 19 気圧の場合に、 CaCO_3 分解の反応平衡温度は約 1100°C であるものの、天然石灰石の実際分解温度(CO_2 20 気圧)は約 1000°C であることを実験から明らかにした。
- CaO によるタール低減効果調査の一環として、固定層反応器を用いて、 CaO 粒子による模擬タール（トルエン）水蒸気改質の触媒効果 (850°C) を調べた。珪砂だけ充填の場合と比べて、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及び天然石灰石充填の場合のトルエン転換率は約 20 倍～50 倍高いことが明らかになった。
- 熱水処理法について、触媒担持炭の触媒活性変化を調べ、さらに熱水処理法と一般乾燥法の褐炭ガス化プロセスの熱効率を解析した。 Ca 担持炭を熱水処理した Ca 担持熱水改質炭チャーは、 Ca 担持炭チャーに比べて若干ガス化速度は遅いものの、 Ca 担持していないチャーに比べて非常に速く、 750°C 、約 7 分で 50%炭素転換が達成できた。プロセス解析結果として、熱水処理プロセスの熱利用効率が高く、発電効率は乾燥プロセスより約 2%高いことが分かった。



図III-2.41 充填物なし、珪砂、各種石灰石充填時のトルエン水蒸気改質転換率

(4) システム解析

表III-2.4 研究テーマ目標および達成度

検討課題	最終目標	結果と達成度
・全体システムに関するプロセス解析	・送電端効率56%が可能なA-IGCCシステムの構成 ・送電端効率65%が可能なA-IGFCシステム ・CO ₂ 回収時、65%以上の送電端効率が得られるシステム構成	・送電端効率56%のA-IGCCの構成を示した。実現のためには1700℃級ガスタービンおよび高圧/常圧熱交換器(ガスタービン排熱再生器)が必要であることを示した。 ・A-IGCCでは、燃焼後CO ₂ 回収のほうが効率低下が小さい。 ・送電端効率65%のA-IGFCの構成を示した。実現のためには、アノード排ガスをリサイクルのためのリサイクルコンプレッサおよび高温ガス精製が必要である。 ・FCとガス化炉で直接熱交換するS-IGFCを提案。S-IGFCでは、CO ₂ 回収を行っても送電端効率65%以上が期待できる。
・次世代石炭ガス化システムの開発のための技術課題	・ガス化炉以外の周辺技術について、システム実現のための技術障壁を明らかにする	・エクセルギー再生による熱効率向上を確認。 ・S-IGFCシステム実現のための、技術課題を抽出 ガス化炉: 純水蒸気ガス化の困難性 SOFC: バンドル法、新規開発のSOFC 熱交換器: 方式、高温材料 ・将来技術を含めてレビュー

■ガス化温度900℃以下のガス化炉を採用するA-IGCC, A-IGFCのコンセプトを具現化したシステムを設計。

■送電端効率65%を達成する高効率発電を実現するために鍵となる技術を示し、今後開発が必要な要素プロセスや機器等のスペックを抽出。

■エクセルギー再生の効果を具現化する、送電端効率56%のA-IGCC, 65%のA-IGFCのシステムを設計

□今後開発が必要となる要素工程と機器スペックを抽出

□現状の技術レベルに照らして開発課題を整理

□現状レベルのCO₂回収技術を適用した場合の効率低下が比較的大きい。

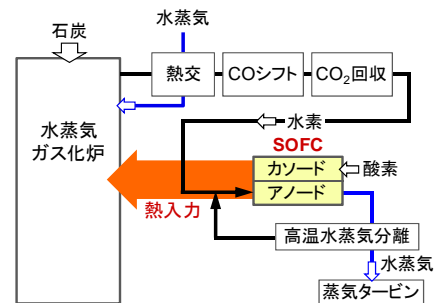
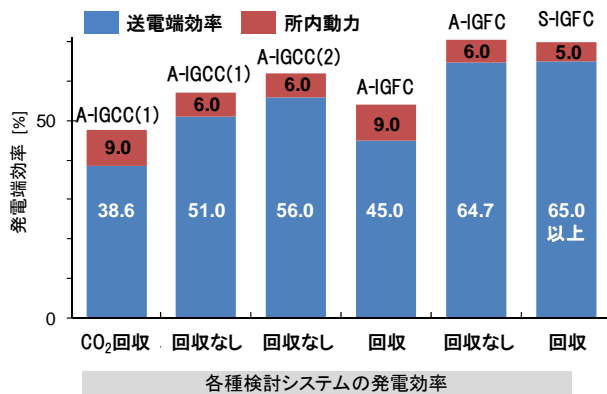
■新概念に基づくIGFC(S-IGFC)を提案、発電端効率>65%のCO₂回収型複合発電のシステム構成を提示。

■ガス化炉におけるSOFC排熱の直接再生

■水蒸気のみをガス化剤とする流動層ガス化

■ガスタービン不使用

□SOFCの新設計、高温水蒸気・水素分離工程開発が必要。



図III-2.42 システム解析の研究成果

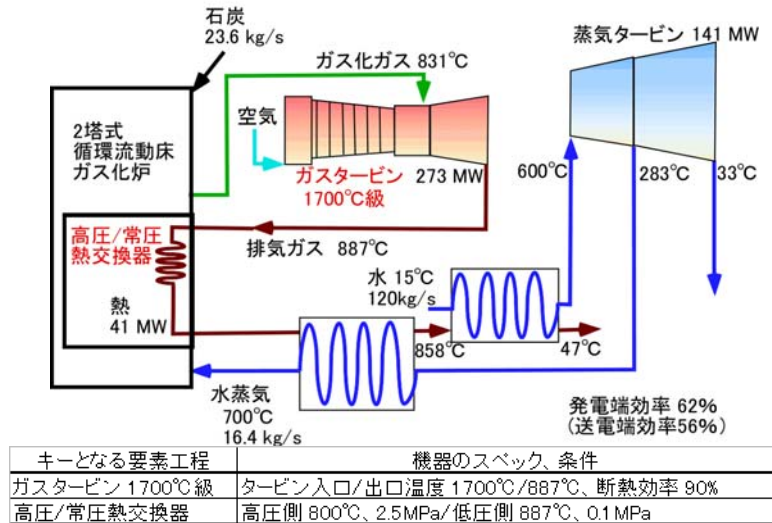
① 効率化を達成可能なシステムの最適化と効率の検討および課題整理 (産総研、三菱重工)

A-IGCC の設計

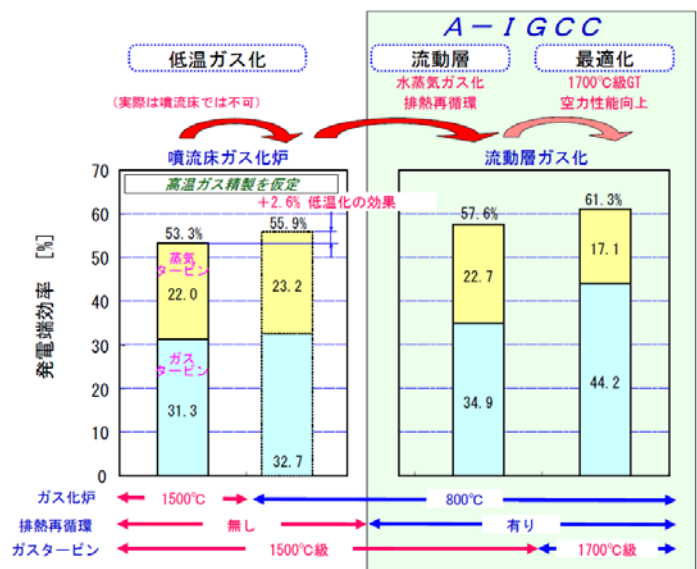
様々な炭種対応のため、システム解析条件の投入石炭量を 667MW(HHV)に統一し、石炭を亜瀝青炭とした場合について、「低温ガス化」での分析結果を用いて IGCC、A-IGCC を分析した。オートサーマル条件にするにはガス化炉に 41MW の入熱が必要であるが、1700℃級の A-IGCC ではガスタービン排気温度が高いため、排熱でこの入熱を賄えることが示された。また、IGCC と A-IGCC の性能の変化を圧縮機やタービンの空力性能や熱交換器性能の向上を想定して調べた。その結果、以下のことが分かった。オートサーマル条件の IGCC システムでは、空力性能向上により、発電効率は 50%を超えるポテンシャルがある。A-IGCC は、空力特性を向上し、ピンチポイント温度差を 15℃にすると、1700℃級で効率 60%超のポテンシャルがある。A-IGCC の方が噴流床ガス化を用いた IGCC システムに対しても効率が高い。また、ガス精製を高温で行うかもしくは同等のエネルギー損失で済ませ

る熱再生により、A-IGCC が可能となり、同じガス化炉を用いた IGCC よりも効率が高くなること、A-IGCC と同等のガス精製技術を用いた場合でも、噴流床ガス化炉の IGCC よりも A-IGCC の方が高効率であることが示された。

以上の検討から、以下のことが分かった。1700℃級ガスタービンの採用によって 62%の発電端効率(56%の送電端効率)が得られる。高効率化はガス化炉にリサイクルするガスタービン排熱のエクセルギーが化学エネルギーに再生されるためである。今後開発が必要である機器は、1700℃級ガスタービンおよび高圧/常圧熱交換器（ガスタービン排熱再生）である。



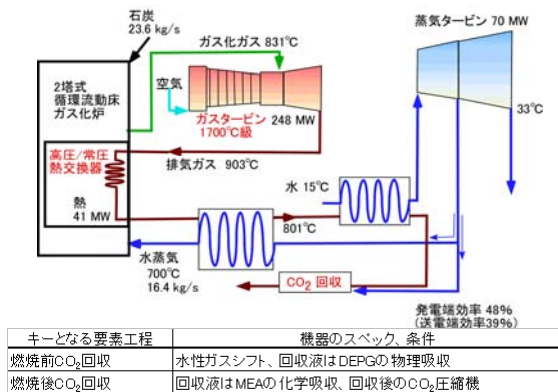
図Ⅲ-2.43 A-IGCC の検討結果



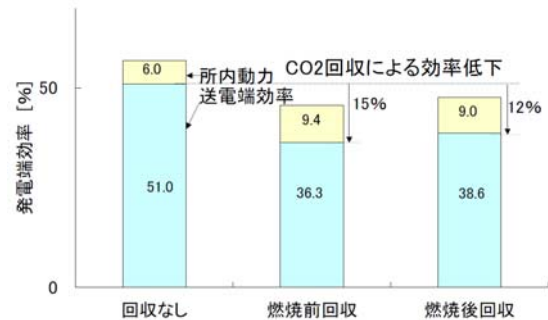
図Ⅲ-2.44 A-IGCC システム出力の計算結果及び各種ガス化との比較

CO₂回収型 A-IGCC の設計

CCS 対応を検討するため、CO₂回収装置を組み込んだ IGCC について、アミン法を採用した場合の効率を調べた。シンプルなアミン法では CO₂回収装置に多くの熱を必要とし、燃焼後 CO₂回収の方が、結果的に燃焼前 CO₂回収に比べ効率低下が抑えられた。また、CO₂回収型 A-IGCC について、燃焼前回収、燃焼後回収を比較した。AMSIM を導入して CO₂回収ユニットの解析を厳密に行ったところ、PRO/II のみで解析を行った平衡状態の結果よりも効率が低下した。燃焼前回収にはシフト転換が必要であり、発熱反応であることから、ガス中の化学エネルギーが減少してしまう。その結果、タービン出力の低下につながる事が明確になった。このため、システム全体で熱の更なる有効利用を検討する必要がある。



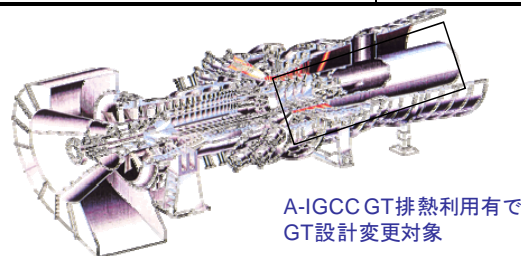
図III-2.45 CO₂回収型 A-IGCC の検討結果



図III-2.46 回収方式による発電効率の比較

以上の検討から、以下のことが分かった。燃焼前および燃焼後の CO₂回収による発電効率の低下は 12~15%である。従来の IGCC とは異なり、A-IGCC では、燃焼後回収のほうが効率低下が小さい。回収液の性能向上によって燃焼前/燃焼後の優劣が逆転する可能性がある。

項目	課題	検討項目
1.GT排ガス温度の制約 タービン高温段から排ガス取出	・ GT設計変更 (構造/材料等)	・ 設計変更したGT検証 設計変更の費用回収
2.高圧/常圧熱交換器 高圧：ガス化炉(流動媒体) 常圧：GT高温排ガス	・ 高圧/常圧熱交 ・ 熱交換器内ガス化炉流動媒体の挙動及び熱交特性 ・ 熱交換器摩耗	・ 構造(差圧/熱伸び吸収) ・ 熱交特性 ・ コールドモデルによる検討 ・ 耐摩耗材の高温強度
3.GT高温排ガス配管計画 10×10mダクト	・ 配置/配管	・ 材料/構造/コスト/信頼性
4.部分負荷時の運用	・ GT排ガス温度低下	・ 部分負荷時のガス化炉制御



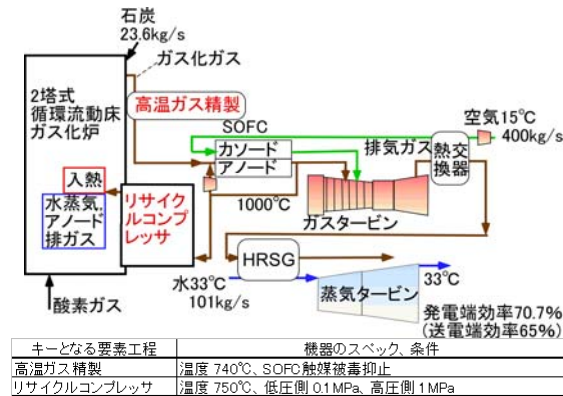
図III-2.47 A-IGCC の課題

A-IGFC の設計

燃料電池、燃料電池ガスタービンハイブリッドシステムの開発動向を調査するとともに、その結果を踏まえて高温型燃料電池を組み込んだガス化温度 900°C以下のガス化プロセスの開発に向けて最適なシステムを検討した。アノード(燃料極)排ガスの一部をアノード入口にリサイクルした場合、

61.8%の発電端効率(55.8%の送電端効率)が得られた。さらに、700℃のアノード排ガスを昇圧し石炭ガス化炉に戻すなどの工夫により、アノード排ガスの一部を水蒸気、アノード排ガスと入熱として石炭ガス化炉にリサイクルした場合、70.7%の発電端効率(約65%の送電端効率)が得られた。燃焼後回収ありのA-IGFCの発電効率は、CO₂回収により減少する。燃焼後回収なしのA-IGFCの場合も送電端効率65%にするには、SOFCのアノードガスのガス化炉へのリサイクルにより、エクセルギー再生を行なう必要がある。

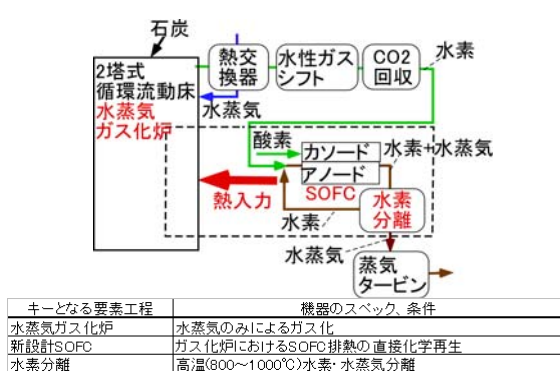
以上の検討から、以下のことが分かった。アノード排ガスのガス化炉への直接リサイクルによって、吸熱的ガス化によるエクセルギー再生の効果が顕著になる。CO₂回収に伴ない発電効率は低下する。送電端効率65% (HHV)の達成には、アノード排ガスリサイクルのためのリサイクルコンプレッサおよび高温ガス精製が必要である。



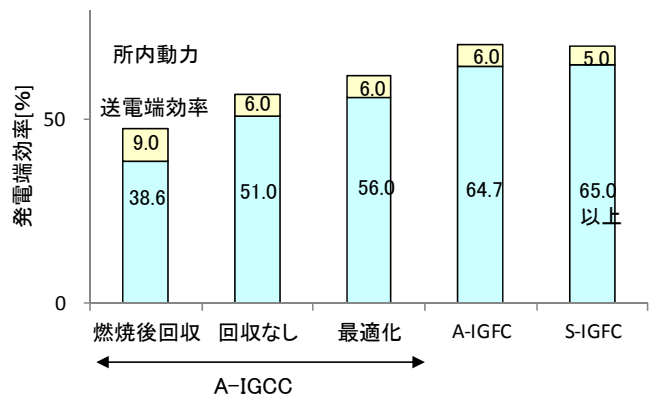
図Ⅲ-2.48 A-IGFC の検討結果

S-IGFC の設計

さらに、A-IGFC の効率(64.7%)を凌駕する、究極のエクセルギー再生型 IGFC として、スーパーIGFC (S-IGFC) を提案するに至った。S-IGFC は、ガス化炉における SOFC 排熱の直接化学再生、水蒸気のみによるガス化、ガスタービン不使用の発電等によって、CO₂ を回収しても 65%以上の発電効率が得られる。S-IGFC の実現には、水蒸気のみを酸化剤とする迅速な石炭ガス化(触媒ガス化)、新設計 SOFC、高温水素・水蒸気分離などの新技術が必要となる。



図Ⅲ-2.49 S-IGFC の構成



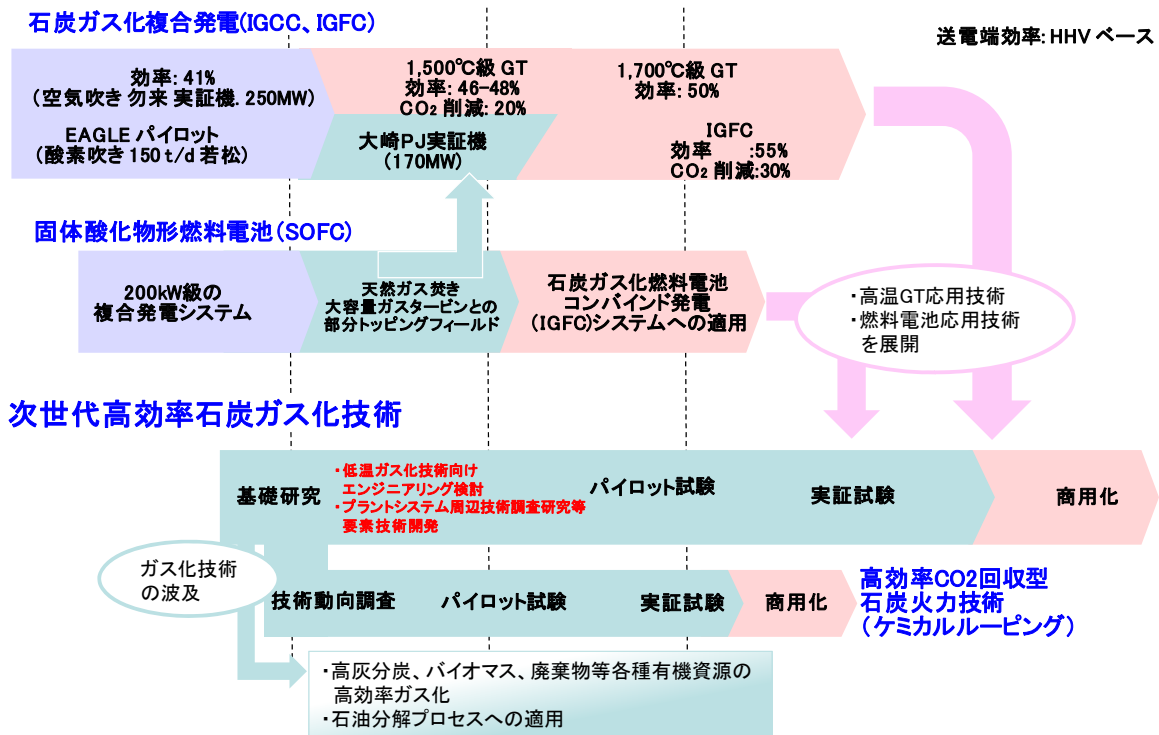
図Ⅲ-2.50 A-IGCC, A-IGFC と S-IGFC 発電効率の比較

表 III-2.5 S-IGFC 現状技術レベル・開発課題

場所	システム構成上の問題点	問題点の解決案
1.全体システム構成	構成システムの成立性。 適用石炭性状範囲の明確化	構成設備・性能を明確化した上で エクセルギの回収システムの検討
2.ガス化炉	SOFCを包含するガス化炉の成立性 ①酸素供給ゼロでの部分酸化炉 ・投入炭素の60%をガス化 ②SOFCよりの直接熱交換 ・必要伝熱面積の検討など ③ガス化炉構造 ・SOFC配置, 流動床構成など ④構成材料の耐久性 ・摩耗・腐食・層内応力など	システム仕様決定後検討 ①ガス化炉成立性の検討 ②熱交特性・配置検討 ③構造検討・コールドモデルによる流動状態検討 ④構造材料の高温強度検討
3.SOFC	バンドル化内装構造の成立性 ①バンドル内温度平準化 ②バンドル構造 ・集電方法, シール方法など ③酸素供給方法 ・酸素/空気、封込め/循環など	システム仕様決定後検討 ①SOFCバンドル熱解析 ②集電材料の検討・構造解析検討 ③空気供給/循環冷却を推奨
4.ガス精製	後流システムとの適合性 ①CO Shift反応器 ・CO転換率目標 100% ②脱硫設備 ・温度-出口S濃度 0 ppm ③CO2分離設備 ・CO2回収率 100% ・不純物回収 全量回収	システム仕様決定後検討 ①反応条件を反映 ②選定システム仕様反映 ③選定システム仕様反映
5.水素系統	水素分離・循環システムの成立性 ①水素分離装置 ・純度 100% & 回収率 100% ②H2タービン ・入口温度815°C ③H2圧縮機 ・出口温度937°C ④H2配管の信頼性 ・温度815~937°C	システム仕様決定後検討 ①水素純度の低減 ②冷却器によるH2温度低減 又は高温水素タービンの開発 ③中間冷却器による冷却 ④水素温度低減 高温高圧水素雰囲気下の材料 特性評価
6.酸素供給設備	全体システムの成立性・信頼性 ①空気分離装置 ・酸素濃度 100% ②酸素圧縮機 ・酸素圧縮機 出口温度447°C	システム仕様決定後検討 ①酸素純度の適正化 ②中間冷却器による温度低減
7.熱交換器	高温熱交換器の成立性・信頼性 ①H2ガス温度796°C	システム仕様決定後検討 ①5.水素系統見直し
8.BOP	①高温配管・高温制御弁	システム仕様決定後検討

IV. 実用化の見通し

1. 実用化の見通し



図IV-1 次世代高効率石炭ガス化技術の展開

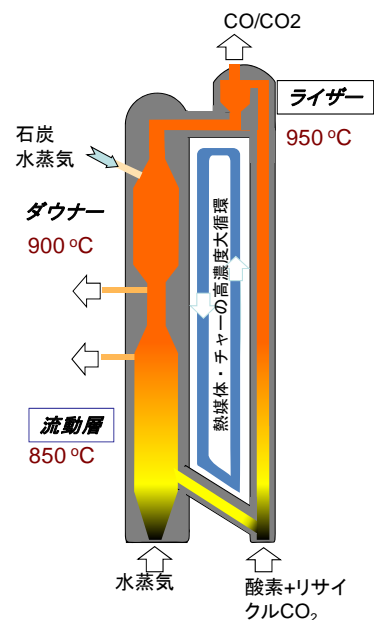
■ A-IGCC、A-IGFCの熱効率予測とその最適構成の提示

■ A-IGCC実現のための、具体的なプロセス構成とその中心となるガス化炉の構造の提案

熱分解炉分離方式の2塔循環流動層による低温ガス化

- ・ガス化温度低下とタール除去の方法 (構造、運転方法、触媒の利用法....)
- ・大循環量の実現方法

■ A-IGCCの実現のための、技術開発要素の明確化



図IV-2 成果までの具体的イメージ

2. 実用化までのシナリオ

本研究では、エクセルギー再生を行い高効率発電を目指す次世代石炭ガス化発電システムの中核である、循環流動層ガス化炉の基礎的な要素技術の開発に目処をつけた。すなわち、

- (1)エクセルギー再生を行うためのプロセスの基本的要請である、900℃以下の低温ガス化技術
- (2)上記低温ガス化をさらに補強するための、触媒ガス化技術

(3)同様にガス化装置の基本的要請である、高濃度・大循環速度を両立する循環流動層の実現に一定の技術的目処を付けることができた。また、要素技術開発と並行して行ったプロセス解析の結果、次世代石炭ガス化発電システムとして検討すると、システムの中核である循環流動層石炭ガス化炉と組み合わせて、高効率化を実現させるためには、エクセルギー再生を取り入れることが不可欠であり、ガスタービンの設計変更や燃料電池の技術開発が必須である。

これらの結果を踏まえ、エクセルギー再生を取り入れた高効率発電を目指す次世代石炭ガス化発電システムの開発に当たっては、これら周辺技術の成熟を待って、システム構成に一定の見通しが得られた段階で、今回得られた成果を基に次の段階であるベンチ試験によるプロセスの確認の段階を再開することとする。

3. 波及効果

本研究で開発した石炭の低温流動層ガス化技術、高濃度・大循環量の循環流動層技術、二成分粒子からなる流動層のシミュレーション技術、触媒ガス化技術は、本研究が直接目指す次世代石炭ガス化発電技術の中核である石炭ガス化炉への応用の他に、次のような波及効果が考えられる。

表IV-3.1 本研究で開発された技術の波及効果

番号	要素技術	波及効果
1	低温ガス化技術	<p>流動層による低温ガス化技術の適用</p> <p>高温ガス化に本質的に向いていない、バイオマス、廃棄物等各種有機資源を効率よくガス化可能となる。当面は、木質バイオマスのガス化に直ちに応用可能。</p> <p>(1)木質バイオマスの高効率ガス化装置 (2)石炭チャーによるタール改質器（石炭とバイオマスとの共ガス化） (3)流動層形式の急速熱分解装置への応用</p>
2	高濃度・大循環量の循環流動層技術	<p>他プロセスへの応用</p> <p>循環流動層の粒子循環量および粒子濃度を大幅に増大させることにより、いろいろな化学反応速度を大幅に向上可能で、極めて小型で高性能な反応装置が実現できる可能性がある。例えば、</p> <p>(1)低品位炭の(水蒸気)熱分解による液体燃料の生成 (2)石油分解（FCC）プロセス（特に重質油分解） (3)バイオマスガス化による合成ガス生成 (4)粒子による吸収、吸着プロセスの高度化</p>
3	二成分粒子からなる流動層のシミュレーション技術	<p>気-固システムの数値解析への応用</p> <p>これまでの多くのシミュレーションは均一粒子を想定したもので、密度、粒径、付着力の異なる二成分系の粒子群（移動層、流動層、噴流層、その他）とガスとの混相流の挙動の予測は困難であった。これが、シミュレーション可能となると、粒子系の混合・偏析等が予測できる。例えば、</p> <p>(1)ダウンナー反応器内での熱媒体粒子と、固体燃料の混合の解析 (2)バイオマス燃焼炉・ガス化炉での、バイオマス粒子・チャー粒子・熱媒体粒子の混合と偏析の解析 (3)固体-固体接触操作（乾燥・吸着・吸収・造粒など）での、操作前・操作後粒子の混合と偏析の解析</p>
4	安価な触媒ガス化技術	<p>低温ガス化と組み合わせた高性能ガス化システムの構築</p> <p>安価な触媒による低温での石炭ガス化およびケミカルルーピングガス化技術は、産炭地で実際に応用可能と思われる。</p> <p>(1)褐炭・亜瀝青炭の低温ガス化 (2)ケミカルルーピングプロセス（ガス化、化学合成）</p>

V. 成果普及について

(1) 特許出願状況

特許出願件数：3件

表V-1 特許出願状況

番号	特 許
1	「石炭ガス化方法及びガス化設備」、(株) I H I、電中研、産総研、JCOAL 特願 2009-172381.2009.7.23 Australia Patent Application2010-203035
2	「ガス化炉で蒸発したアルカリを再利用したガス化システム」、村上高広、松岡浩一、倉本浩司、鈴木 善三、特願 2007-270215, 2007.10.17
3	“Fe and Ni Catalysts Supported on Peat Derived Carbon”, Chunbao (Charles) Xu, Jaelyn Donald, Yasuo Ohtsuka, Applied to American and Canadian Patents, 2009.

(2) 外部発表

表V-2 外部発表の状況

	論文 査読つき	著書・総論	国際会議 口頭発表	国内口頭発 表	受賞	特許 (国際出願)
2007年			1	2		1
2008年	6	2	10	10		
2009年	10	2	24	25	1	2(2)
2010年	13	2	22	33	2	
2011年	8		20	38	2	
2012年	16	1	6	9	1	
合計	53	7	83	117	6	3(2)