

「次世代火力発電等技術開発／  
次世代火力発電基盤技術開発（5）  
CO<sub>2</sub> 分離型化学燃焼石炭利用技術開発」

事業原簿





担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部
-----	--------------------------------------

## —目次—

次世代火力発電等技術開発」事業一覧 .....	- 1 -
概 要 .....	- 2 -
プロジェクト用語集 .....	- 5 -
1. 事業の位置付け・必要性について .....	- 7 -
1. 事業の背景・目的・位置づけ .....	- 7 -
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性 .....	- 11 -
2.1 NEDO が関与することの意義 .....	- 11 -
2.2 実施の効果（費用対効果） .....	- 11 -
2. 研究開発マネジメントについて .....	- 12 -
1. 事業の目標 .....	- 12 -
2. 事業の計画内容 .....	- 14 -
2.1 研究開発の内容 .....	- 14 -
2.2 研究開発の実施体制 .....	- 16 -
2.3 研究開発の運営管理 .....	- 16 -
2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性 .....	- 17 -
3. 情勢変化への対応 .....	- 18 -
4. 評価に関する事項 .....	- 19 -
3. 研究開発成果 .....	- 20 -
1. 事業全体の評価 .....	- 20 -
2. 研究開発項目毎の成果 .....	- 21 -
2-① キャリア及び製造方法の開発評価と選定 .....	- 21 -
2-② キャリア性能の技術評価 .....	- 24 -
2-③ プロセス構造、条件の最適化評価 .....	- 43 -
2-④ 技術調査、市場・経済性検討、検討委員会開催 .....	- 47 -
4. 成果の実用化に向けた取組み及び見通しについて .....	- 53 -
1. 成果の実用化に向けた取組み及び見通しについて .....	- 53 -
添付資料 .....	- 54 -
プロジェクト基本計画 .....	- 54 -
特許論文リスト .....	- 79 -



# 概要

		最終更新日	平成 29 年 10 月 2 日		
プロジェクト名	C02 分離型化学燃焼石炭利用技術開発	プロジェクト番号	P10016		
担当推進部/ PMまたは担当者	環境部 PM：中田 博之				
0. 事業の概要	<p>エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月閣議決定）においては、石炭火力発電は重要なベースロード電源として位置づけられているが、温室効果ガスの大気中への排出をさらに抑えるため、環境負荷の一層の低減に配慮した石炭火力発電の導入を進めることとされている。また、官民協議会で策定した次世代火力発電に係るロードマップ（平成 28 年 6 月）では、C02 分離回収技術は、2020 年代後半から 2030 年頃に経済的な回収技術を確認すると示されている。</p> <p>C02 分離型化学燃焼石炭利用技術は、流動層反応器を用い流動材の化学変化を介して、石炭を O2 ガス（空気）と直接接触させることなく、熱や燃料ガスに転換し、C02 を分離する方法であり、空気分離の必要がなく、C02 を回収してもプラント効率が低下しない高効率石炭火力発電技術の研究開発である。</p>				
1. 事業の位置 付け・必要性 について	<p>石炭は他の化石燃料と比べ利用時の C02 排出量が大きく、地球環境問題での制約要因が多いという課題を抱えており、石炭火力発電についても更なる C02 排出量の抑制が求められている。今後 C02 排出量抑制のためには、石炭火力発電の高効率化に加え、CCS による低炭素化を図っていく必要がある。しかしながら、CCS は多大な付加的なエネルギーが必要であり、効率の低下や発電コストの上昇を招く。そのためエネルギー資源を海外に依存する我が国では、資源の有効利用と発電コストの抑制のため、このエネルギーロス可能な限り低減する必要がある。</p> <p>現在、石炭の燃焼排ガス又は石炭ガス化プラントの石炭ガス化ガスからの C02 の分離・回収技術の開発が進められているが、C02 分離・回収工程において多くのエネルギー損失が発生することが課題となっている。これを解決するため、エネルギー損失が少なく（空気分離装置や C02 分離回収装置が不要）、C02 の分離・回収ができる化学燃焼石炭利用技術について、実用化に向けた研究開発が求められている。</p>				
2. 研究開発マネジメントについて					
事業の目標	<p>[中間目標（平成 29 年度）] 分離・回収コスト 1,000 円台/t-C02 を見通せるキャリアを選定する。</p> <p>[最終目標（平成 32 年度）] 分離・回収コスト 1,000 円台/t-C02 を見通せる C02 分離型化学燃焼石炭火力発電システムを提示する。</p>				
事業の計画内容	主な実施事項	H27fy	H28fy	H29fy	
	(1) キャリアの選定				
	(2) キャリアの技術性能評価				
	(3) プロセス構造、条件の最適化評価				
	(4) 技術、市場性調査				
事業費推移 (会計・勘定別に NEDO が負担した実績額（評価実施年度については予算額）を記載） (単位: 百万円)	会計・勘定	H27fy	H28fy	H29fy	総額
	一般会計	—	—	—	—
	特別会計 (需給)	65	151	114	330
	開発成果促進財源	—	—	—	—
	総 NEDO 負担額				
委託	(委託)				

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	一般財団法人石炭エネルギーセンター 原田 道昭
	プロジェクトマネージャー	環境部 中田 博之
	委託先	(一財)石炭エネルギーセンター 三菱日立パワーシステムズ(株) (一財)エネルギー総合工学研究所 (国研)産業技術総合研究所  再委託先：大阪大学、神奈川工科大学、東京大学、群馬大学 共同実施先：産業技術総合研究所
情勢変化への対応	2014年4月11日に閣議決定された「エネルギー基本計画」の中で、石炭は安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源の燃料として再評価されている。また、2015年7月に決定された「長期エネルギー需給見通し」において、石炭火力の高効率化を進め、環境負荷の低減と両立しながら活用することで、2030年の石炭火力の比率を26%程度とする方向性が示された。更に、2015年12月にパリ協定が採択され、日本の目標としては、2030年度迄に2013年度比26%、2050年には80%の温室効果ガスを削減することを掲げている。これらの情勢変化に対応するため、石炭火力への適用を目指した本事業の開発が求められている。	
評価に関する事項	事前評価	—
	中間評価	2017年度 中間評価
	事後評価	2020年度 事後評価
	<p>ケミカルルーピング (CLC) を用いた石炭利用技術は、酸素を運ぶ流動材 (酸素キャリア) を用いることが前提となるため、酸素キャリアの性能 (反応性、耐久性など) がプロセスの性能 (プラントコスト、キャリア消費等運転コスト) を左右する。</p> <p>本開発では、天然キャリア及び人工キャリアの評価、選定を行った。コスト面で有利な天然キャリア (イルメナイト: チタン鉄鉱石) 5タイプのキャリア性能評価を行い、最も性能の高い豪州産2号 (IL<sub>au2</sub>) を選定した。人工キャリアでは第一候補として酸化鉄含有量を30%とし、焼成温度を1300℃としてハーシナイト (FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) 化したキャリアを、第二候補として天然キャリアであるイルメナイトにCaを含浸させ1300℃で焼成したキャリアを選定した。</p> <p>天然キャリアを対象に技術課題を抽出し実現性を評価した。評価結果をもとにCO<sub>2</sub>分離・回収コストを試算すると、CO<sub>2</sub>回収コスト1,100円/t-CO<sub>2</sub>となり、中間目標値である1,000円台/t-CO<sub>2</sub>を見通すことが可能となった。</p> <p>今後、平成29年度中に石炭ガス化ガス中のS分の酸化還元速度の影響把握やキャリアとチャー粒子、灰の分離構造の検討を進め、石炭固有の課題を検討し上記目標の精度を高める。</p> <p>(1)キャリアの選定 人工キャリアは、工業的に最も低コストで量産可能な噴霧造粒法によるキャリア粒子製造を中心に性能を調査すると共に、天然キャリアについては、イルメナイトを豪州、インド、アフリカから調達し性能確認して有望キャリアを選定した。</p> <p>(2)キャリアの技術性能評価 酸素キャリアを用いて反応性ガス (CO, CH<sub>4</sub>) 雰囲気下でのガスとの反応速度を確認した。また、チャーを酸素キャリア流動層に投入し、その生成ガスを分析しチャーガス化速度を求めた。更に、カルシウムで表面を改質したイルメナイト粒子は、酸化還元繰り返しにおいて高い還元速度反応が保持されると共に粒子の構造変化を抑制することが分かった。キャリア粒子の耐摩耗性については、循環流動層の試験を行い、珪砂と比較した結果、イルメナイトは2倍程度摩耗したが設計条件を満足していた。石炭とキャリアの混合性については、比重差のある粒子の混合流動をコールドモデルと流動層シミュレーションで最適な流動条件を把握した。タール改質では、天然キャリアはタールが生成しても水生ガス化反応でほぼCO<sub>2</sub>に転化可能であった。</p> <p>(3)プロセス構造、条件の最適化評価 今回の研究開発成果を反映し、各反応塔の概略寸法を検討した。これをもとにCLC (炉のみ) 重量はCFBボイラ部位の1.3倍であった。CFB建設単価20万円/kWe、ボイラ部位15%相当とすると、CLC (炉のみ) 建設費3.9万円/kWe (20万円/kWe×0.15×1.3)、CLC全プラント建設費20.9万円/kWe (3.9万円/kWe+20万円/kWe×0.85) となり、ある一定の条件であるが、天然イルメナイトによるCO<sub>2</sub>回収費は1,000円台/t-CO<sub>2</sub>になる見通しを得た。</p>	

	<p>(4)技術・市場調査          欧米各国では100kWth～3MWのパイロット試験が実施されている。EUのACCLAIRプロジェクトでは、1MWthの装置で鉄系キャリアの試験を行い熱自立に成功したが、CO2回収率が52%と低かった。また米国DOEプロジェクトではCa酸素キャリアによる3MWth試験を実施している。          市場調査として、国内液化炭酸ガス供給事業の可能性と海外EORの可能性について検討した。国内では、コプロダクションとしてのCLCの利用の可能性があり、海外では米国の他に東南アジアでのEORの可能性等が示唆された。</p>																																																																						
投稿論文	「査読付き」1件、「その他」0件																																																																						
特 許	「出願済」1件（うち国際出願0件） 「出願予定」1件（うち国際出願0件）																																																																						
その他の外部発表 (プレス発表等)	「学会等発表」17件、「受賞実績」2件、「研究報告・雑誌投稿」0件																																																																						
4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	<p>実用化スケジュールについて、PDU装置によるプロセス原理実証以降のスケジュールを表1に示す。基盤研究プロジェクト終了後、実機を想定した各機器の開発を行い、その後数万kWクラスの実証炉でボイラとしての性能評価を行い、各機器開発に2年程度、実証試験炉に3年程度の開発期間を想定しており、約5年後の実用化を想定している。</p> <p>今回、有望なキャリアについて目途が立ったものの、国内CCSの制度化時期、海外EOR事業を見極めながら、次のPDUを用いた研究開発時期を決める必要がある。</p> <p style="text-align: center;">表1 実用化スケジュール</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">西 暦</th> <th style="text-align: center;">20XX</th> <th style="text-align: center;">20XX</th> <th style="text-align: center;">20XX</th> <th style="text-align: center;">20XX</th> <th style="text-align: center;">20XX</th> <th style="text-align: center;">20XX</th> <th style="text-align: center;">20XX</th> <th style="text-align: center;">20XX</th> <th style="text-align: center;">20XX</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>原理実証 (PDU)</td> <td colspan="9" style="text-align: center;">▲国内CCS政策動向、海外EOR市場を踏まえて実施判断</td> </tr> <tr> <td>機器のコストダウン</td> <td colspan="9" style="text-align: center;">コストダウン目途▲</td> </tr> <tr> <td>実証炉建設</td> <td colspan="9" style="text-align: center;">▲90億円</td> </tr> <tr> <td>実証試験</td> <td colspan="9" style="text-align: center;">▲20億円</td> </tr> <tr> <td>実用化評価</td> <td colspan="9" style="text-align: center;">適宜実用化FS</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="4" style="text-align: center;">事業の継続判断▲</td> <td colspan="5" style="text-align: center;">実用化の可否判断▲</td> </tr> </tbody> </table> <p>今後、EORと石炭焚きボイラが両立する海外市場調査の深掘し研究開発の継続判断を行う。</p>	西 暦	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	原理実証 (PDU)	▲国内CCS政策動向、海外EOR市場を踏まえて実施判断									機器のコストダウン	コストダウン目途▲									実証炉建設	▲90億円									実証試験	▲20億円									実用化評価	適宜実用化FS										事業の継続判断▲				実用化の可否判断▲				
西 暦	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX																																																														
原理実証 (PDU)	▲国内CCS政策動向、海外EOR市場を踏まえて実施判断																																																																						
機器のコストダウン	コストダウン目途▲																																																																						
実証炉建設	▲90億円																																																																						
実証試験	▲20億円																																																																						
実用化評価	適宜実用化FS																																																																						
	事業の継続判断▲				実用化の可否判断▲																																																																		
5. 基本計画に関する事項	<p>作成時期 平成28年1月 作成</p> <p>変更履歴          平成28年4月改訂（実施体制、PM、評価時期等の変更）          平成28年4月改訂（評価時期、研究開発スケジュール等の変更）          平成29年2月改訂（研究開発項目の追加、PM・PLの修正、評価実施時期の修正等）          平成29年6月改訂（中間目標の設定、中間評価時期の修正）</p>																																																																						

## プロジェクト用語集

名称	略号	意味
ケミカルループニング燃焼 <u>C</u> hemical- <u>L</u> ooping <u>C</u> ombustion	CLC	CLCとは温室効果ガスCO <sub>2</sub> の分離回収・隔離貯蔵に関連した石炭燃焼技術の一つである。 本技術は空気を石炭に直接接触させずに金属酸化物で石炭を酸化反応させる。還元された金属は空気で酸化して金属酸化物として再利用する。反応生成物はCO <sub>2</sub> とH <sub>2</sub> Oとなり、冷却によって高純度CO <sub>2</sub> ガスを回収でき、エネルギーロスを伴わない次期CO <sub>2</sub> 回収技術として注目されている。 なお、CLCの名称*は1994年、東京工業大学石田愈・名誉教授によって始めて提唱された。 ※Ishida, M. et al., Energy, 19, 415-422, 1994
酸素キャリア		金属酸化物の総称である。 CLCでは金属酸化物の酸化/還元反応で酸素を運搬（キャリア）することから名付けられた。
天然キャリア		天然鉱物系酸素キャリアの総称である。 CLCでは大量の酸素キャリアを必要とするので、天然鉱物を利用できるならば実用上極めて有利である。しかし、一般に多孔質では無いためガスとの反応性は極めて低い。
人工キャリア		人工合成系酸素キャリアの総称である。 より多く酸素が運搬可能な酸素キャリアを人工的に合成したもの。性能向上が図れる反面、高コストになる。
空気反応塔 <u>A</u> ir <u>R</u> eactor	AR	還元されて金属となった酸素キャリアを空気で酸化反応を行う反応塔である。 酸素キャリアは金属酸化物として再利用する。塔内の酸化反応熱はボイラで熱回収し発電に利用する。
チャー反応塔 <u>C</u> har <u>R</u> eactor	CR	石炭を投入し、熱分解で生成したチャーをガス化反応させる反応塔である。 塔内では石炭が投入直後に熱分解して揮発分とチャー（固体炭素）が生成する。揮発分は即座に塔外の揮発分反応塔に移動し、塔内に残ったチャーをガス化剤（CO <sub>2</sub> やH <sub>2</sub> O）でガス化反応させる。生成したガスは揮発分と共に揮発分反応塔へ移動させる。塔内の酸素キャリアは主に熱媒体の役割とガス化反応を阻害するH <sub>2</sub> やCOの酸化反応に使用する。
揮発分反応塔 <u>V</u> olatile <u>R</u> eactor	VR	CRから移動した揮発分や生成ガスを酸素キャリアで酸化反応させる反応塔である。塔内ではCO <sub>2</sub> とH <sub>2</sub> Oが生成し、酸素キャリアは還元されて金属粒子となる。金属粒子はARに移動して空気で酸化反応させ再利用する。
CO <sub>2</sub> 転換率		生成ガス（CH <sub>4</sub> , CO）中の炭素が酸素キャリアで酸化され、CO <sub>2</sub> になった炭素割合である。
チャーガス化率		チャー中の炭素（C）がガス化反応し、生成ガス（CH <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub> ）中の炭素割合である。
キャリア繰り返し反応性		一般的な酸素キャリアが酸化/還元を繰り返すと酸化熱によるシンタリングや膨張/収縮の繰返による粉化が生じ、反応性が低下する。 一方、酸化鉄を主成分とするチタン鉱石（FeTiO <sub>3</sub> ）は酸化/還元を繰り返すとFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> の混合物となり、表面にFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> が移動して層を形成して反応性が向上する。

名称	略号	意味
キャリア耐久性		キャリア粒子の循環中の物理的な摩耗、粉化が少ないことである。
キャリアの摩耗量		小型循環流動層による酸素キャリア循環試験において、酸素キャリアが物理的に粉化し、装置外に排出されたキャリアの重量である。
キャリア粉化率		上記 キャリアの摩耗量と初期キャリア重量との比である。すなわち、摩耗＝粉化を意味する
キャリア補充率		キャリア補充量をキャリア初期充填量で割ったもの。キャリア補充量は物理的なキャリアの摩耗の他に性能低下による補充を含む。
気泡流動層		大部分のガスが粒子層内を気泡となって上昇し、水の沸騰に似た流動状態である。気泡により粒子層内が攪乱された状態となる。
粒子循環流束 Solid circulation Flux	Gs (Kg/ m <sup>2</sup> s)	キャリア粒子はAR断面積平均の質量速度(Gs)で循環するので、Gsは層内の流動状態の判断に用いる。特にGsの大小によってAR内の流動状態が異なるため、GsはARの設計に使用する。 Gs=10～70であると層下部に粒子濃厚領域、上部に希薄域が構成され、内部循環が活発に行われる。
ライザー		粒子上昇管。キャリア長時間循環反応評価装置では、AR(空気反応塔)上部のキャリア粒子上昇部を「ライザー」と称している。
タール改質		タールとは石炭熱分解(乾留)から発生した粘り気のある黒から褐色の油状の液体である。 改質とはタールを水蒸気やCO <sub>2</sub> 、あるいはO <sub>2</sub> ガスと反応させ、H <sub>2</sub> やCOガスに転換することである。
二酸化炭素分離・貯留 Carbon Dioxide Capture and Storage(Sequestration)	CCS	発電所や天然ガス鉱山など大規模な排出源で発生するCO <sub>2</sub> を、他のガスから分離・回収し、安定した地層に貯留したり、海洋に隔離することにより、CO <sub>2</sub> を大気から長期間隔離する技術
発電効率 Thermal efficiency		投入した燃料の総熱量に対する発電電力量の比。分子の発電電力量に対し、発電機で発生した発電電力量を基準とする発電端効率と、発電所内で消費される所内動力を差し引いた送電端効率の2つがある。
石炭 Coal		化石燃料の一つ。土砂に埋没した植物が長時間高い地圧と地熱などによる加圧、乾留などの作用を受けて変質した可燃性固体。火力発電などに用いられる石炭は、製鉄業でコークス用に用いられる原料炭と区別して一般炭と呼ばれる。 一般に、発熱量4,000kcal/kg以下、湿分と水分の合計が30%以上、灰分40%以上の、揮発分10%以下のものは低品位炭と呼ばれる(火力原子力発電技術協会 纂：火力発電用語辞典より)。



## 1. 事業の位置付け・必要性について

### 1. 事業の背景・目的・位置づけ

石炭は、他の化石燃料と比べ、可採年数が長く、かつ世界各国に幅広く分布する等、供給安定性が高く、経済性に優れることから、エネルギー自給率が極めて低い我が国にとって重要な一次エネルギー源であり、発電の分野においても石炭火力発電は発電電力量の約3割を占める重要な電源の一つである。

一方で、石炭は他の化石燃料と比べ、燃焼時の単位発熱量当たりのCO<sub>2</sub>排出量が多く地球環境面での制約要因が多いという課題を抱えており、石炭火力発電についてもさらなるCO<sub>2</sub>排出量の抑制が求められている。

したがって、石炭火力発電の高効率化及びCO<sub>2</sub>排出量削減の観点から本事業を実施する必要性がある。

#### (1) 政策的重要性

平成26年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画においても、石炭火力発電は、「安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源」と評価されている一方、「温室効果ガスの排出量が多いという課題がある」と指摘され、その課題を解決すべく、次世代高効率石炭火力発電技術として、石炭ガス化複合発電(IGCC)の開発・実用化を進めるとともに、2020年頃の二酸化炭素回収貯留(CCS)の実用化を目指した研究開発を行うことが盛り込まれている。

その後、エネルギー基本計画を踏まえ、平成26年12月にまとめられた「エネルギー関係技術開発ロードマップ」において、「高効率石炭火力発電」、「二酸化炭素回収・貯留技術」が国際展開も見据えた形で整理されている。平成27年7月に決定された長期エネルギー需給見通しにおいては、3E+S(安全性、経済効率性、環境適合、安定供給)を同時達成しつつ、バランスの取れた電源構成を実現していくこととしており、火力分野においては、石炭火力発電及びLNG火力発電の高効率化を図り、環境負荷の低減と両立しながら、有効活用を推進することとしている。火力発電の高効率化は、再生可能エネルギーの最大限の導入促進、安全性の確認された原子力発電の活用と合わせ、温室効果ガス削減目標積み上げの基礎となった対策・施策として位置づけられている。これを踏まえ、平成28年6月に官民協議会で策定した「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」においては、石炭火力やCO<sub>2</sub>回収・利用(CCUS)を含む次世代火力発電関連技術を早期に技術確立し、実用化するための技術ロードマップ(図1-1、図1-2、図1-3)がとりまとめられ、火力発電の高効率化、CO<sub>2</sub>削減を実現するため、次世代の火力発電技術の早期確立を目指し、今後とも、官民一体となり技術開発を加速化させることとしている。

CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭利用技術(ケミカルルーピング技術)は、エネルギーロスが少なく、CO<sub>2</sub>を回収してもプラント効率が低下しない高効率石炭火力発電技術であり、クローズドIGCC技術と同様コンセプト(CO<sub>2</sub>分離回収装置が不要)であることから、次世代火力発電技術ロードマップの中ではCCUS技術として位置づけられる。

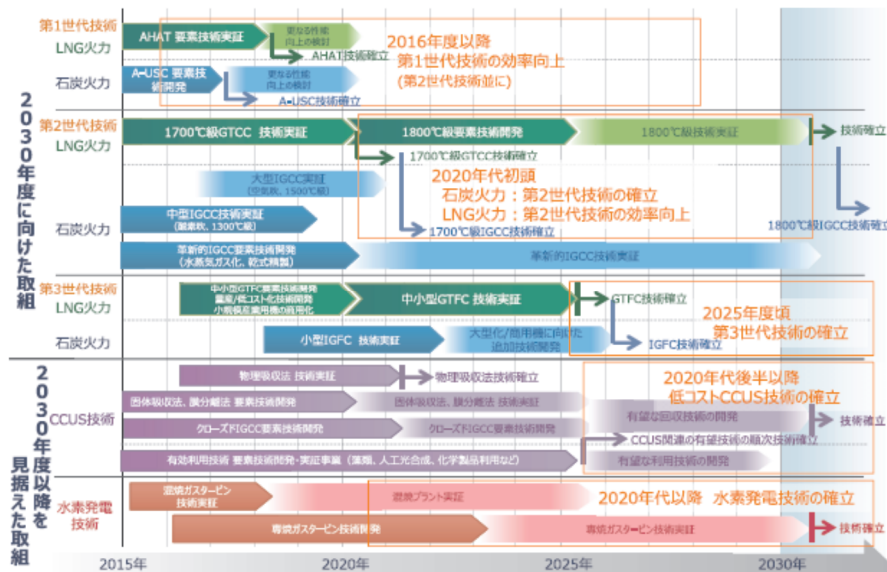


図 1-1 次世代火力発電に係る技術ロードマップ

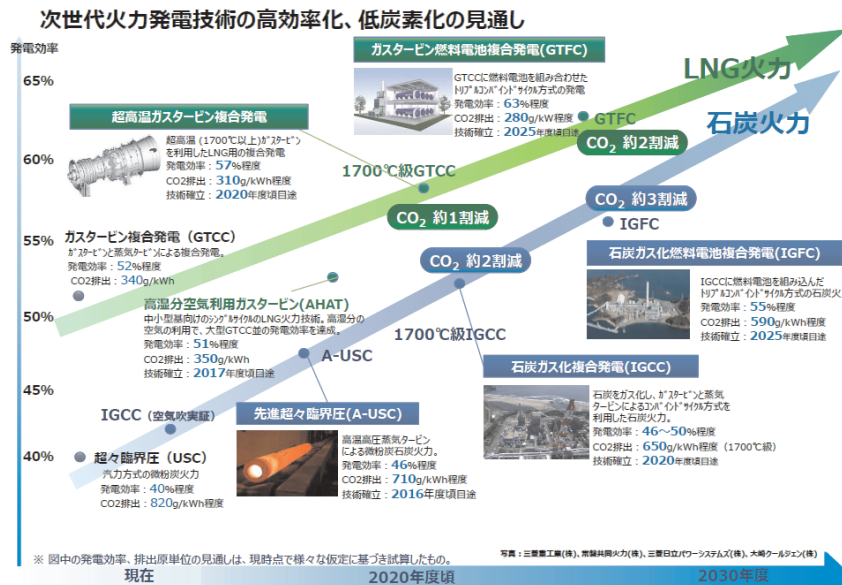


図 1-2 次世代火力発電に係る技術ロードマップ（次世代火力発電技術）

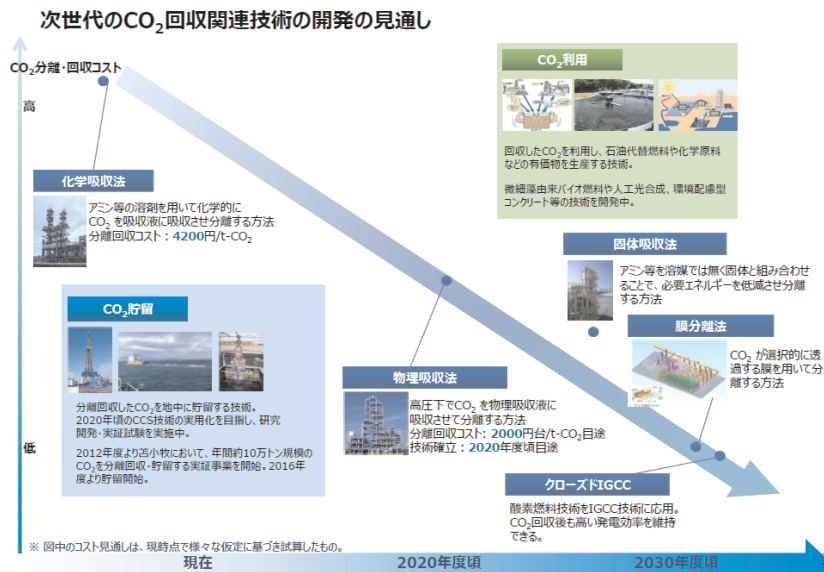


図 1-3 次世代火力発電に係る技術ロードマップ（CO<sub>2</sub>回収関連技術）

(2) 我が国の状況

我が国におけるケミカルルーピング技術は、1995年頃から東工大石田教授グループで研究を開始した。1995年～2002年にかけて、天然ガスを燃料とした場合の反応特性、内部循環型の流動特性、耐高温酸素キャリアとしてはNi系からFe系に改良した知見を得た。その後、2010年からJCOAL技術開発員会小委員会（ケミカルルーピング開発チーム）を立ち上げ、石炭を燃料とし実用化を想定した方式を検討した。

現在、100kWh クラスに相当[空気燃焼塔、石炭反応塔、揮発分反応塔の3塔で構成：高さ約7m、キャリア充填量約130kg、粒子循環速度約0.164kg/s（600℃）、ライザの空塔速度約7.4m/s]の試験装置（図1-4）をAISTつくば西事業所の敷地内に設置し、キャリアの酸化／還元反応性及び連続運転による装置の安全性、操作性を確認している。2016年度メタンガスを燃料として運転し、2017年度はメタンガスに代わり石炭を投入し、キャリアに対する石炭の影響等を評価している。

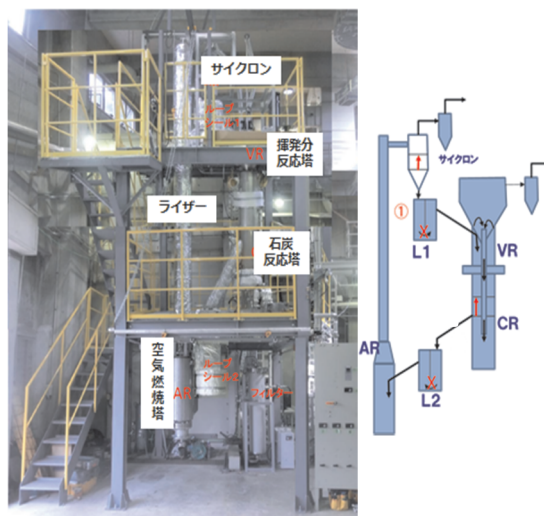


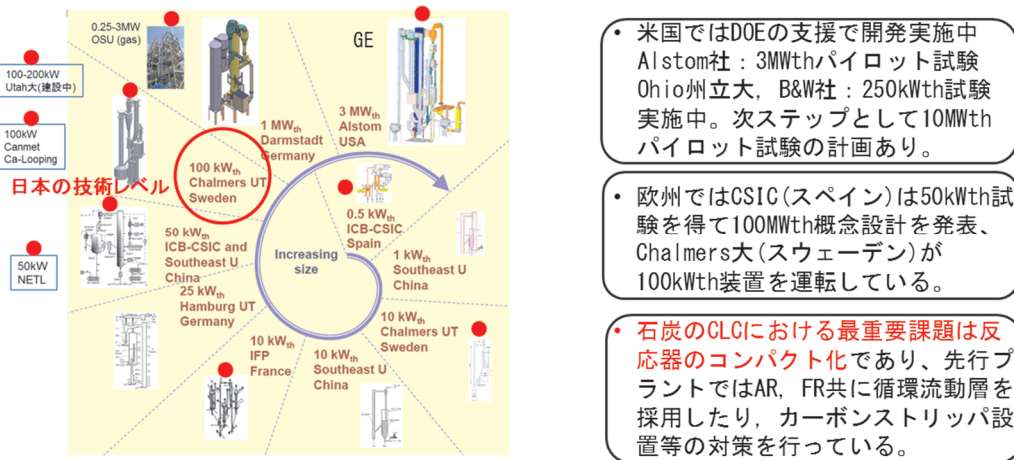
図 1-4 100kWh 級 CLC

(3) 世界の取組状況

欧米では、ケミカルルーピング技術開発は、熱自立可能な1~3MWth級規模のパイロット試験装置を運転中、米国では10MWth級規模までスケールアップを検討しており、日本よりも開発ステージが進んでいる。用途は発電向けが中心で、送電端効率は(HHV基準、CO2回収付き)35%以上がターゲットとなっている。

また各国のCO2回収コスト目標は、平均30ドル/t-CO2と日本の研究開発目標1,000円台/t-CO2と比較して高い。

図1-5に海外技術動向を示す。



- 米国ではDOEの支援で開発実施中  
Alstom社：3MWthパイロット試験  
Ohio州立大、B&W社：250kWth試験  
実施中。次ステップとして10MWth  
パイロット試験の計画あり。
- 欧州ではCSIC(スペイン)は50kWth試験  
を得て100MWth概念設計を発表、  
Chalmers大(スウェーデン)が  
100kWth装置を運転している。
- 石炭のCLCにおける最重要課題は反  
応器のコンパクト化であり、先行プ  
ラントではAR、FR共に循環流動層を  
採用したり、カーボントリッパ設  
置等の対策を行っている。

図1-5 海外先行プロジェクトプラント規模

## 2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

### 2.1 NEDO が関与することの意義

石炭は他の化石燃料と比べ利用時の CO2 排出量が大きく、地球環境問題（温暖化対策）では、その削減が今後のエネルギー・環境政策上の重要な課題である。石炭火力発電においては、高効率化が鋭意進められているが、2050 年以降には更なる CO2 排出量の抑制が求められており、今後 CO2 排出量抑制のためには、CCS による低炭素化を図っていく必要がある。

しかしながら、CCS は多大な付加的なエネルギーが必要であり、効率の低下や発電コストの上昇を招く。そのためエネルギー資源を海外に依存する我が国では、資源の有効利用と発電コストの抑制のため、このエネルギーロスを可能な限り低減する必要がある。

また、CO2 削減対策は生産性が低く民間での取り組みは経済的負担が大きいことから、国が積極的に関与しなければ、その技術開発はなかなか進まないと言うのが現状であり、NEDO が引き続き日本の CCS 対策を牽引する必要性は高いと考えられる。

更に、研究開発のステージが基盤研究の段階であり、実用化までのリードタイムが長いことから、民間ではリスクが高く、NEDO が関与する必要がある。

### 2.2 実施の効果（費用対効果）

#### （1）経済性効果

##### ①米国 CO2/EOR

現在、米国で CO2/EOR で用いられる CO2 量は、約 5,000 万トンであり、そのうち約 4,000 万トンが CO2 貯留層から産出される CO2 から供給されており、価格は 15～19 \$/ton である。（出展：GCCSI CCS の採用を促進する回収 CO2 の工業利用 2011 年 3 月）

米国では既に CO2 パイプラインが整備されており、CO2 の供給はパイプライン入口での価格で取引されているため、CLC によって安価な石炭から CO2 を 15 \$/ton で供給できるようになれば、この CO2 貯留層からの CO2 に対して競争力を持つことができると想定される。

実際には CO2 パイプラインに近い炭鉱の山元で、発電と CO2 製造を行い、パイプラインに CO2 を供給するビジネスモデルを想定しており、このようなサービスを供給する会社を設立するか、事業者がビジネスモデルの提案をすることによって CLC ボイラの販売事業を行う。

年間、CO2 貯留層から産出される CO2 を CLC から発生する CO2 で代替できるとした場合、CLC 発電設備 10 万 kW から発生する CO2 回収量は 81t/h、年間稼働率 70%と仮定して 6,000 時間運転すると CO2 が 48.6 万トン回収できるので、4,000 万トン÷48.6 万トン/基≒80 基の CLC 発電設備の市場導入が期待できる。

CLC 発電設備の建設単価を 20.9 万円/kW として、10 万 kW で 209 億円となることから、209 億円×80 基=1.7 兆円の市場規模となる。

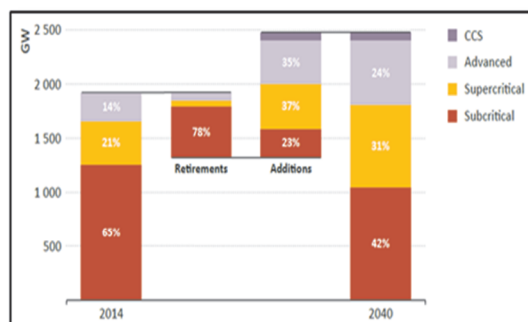
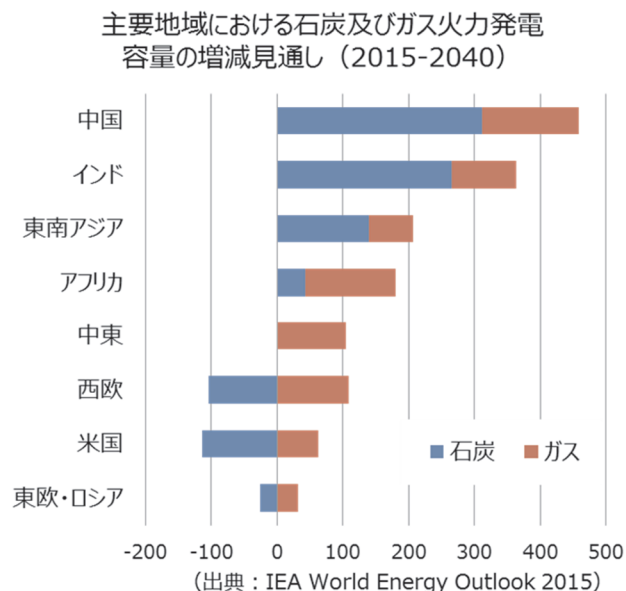
この市場のうち、初年度 1 基、2 年目以降年間 2 基受注すると、5 年で 1,881 億円/年（シェア 11%）、15 年間で 6,061 億円（シェア 36%）の経済効果が期待できる。

##### ②世界における石炭火力需要

世界的に地球温暖化対策を念頭に置いた政策が進んでおり、併せて石炭需要には地域性がある。IAE World Energy Outlook 2015 によれば、欧米の石炭火力は縮小傾向だが、アジアや豪州など

は、今後も石炭火力が導入される見込み。世界全体では石炭火力発電の容量(GW)が約 25%増えると予想されている。

従って、石炭火力発電所から CO2 を分離回収する政策が広まればアジア、豪州などでは本技術の導入が期待できる。



## (2) CO2 削減効果

本技術は循環流流動床技術がベースであり、現状商用規模の発電効率は 38% (HHV) 相当と考えられる。仮に出力 500MW 級の石炭火力発電所を想定し、年間利用率 70% 程度の条件では、CO2 の発生量は 264 万 t-CO2/年 (500MW×8,760 時間×0.7×0.86kg/kWh=263.676 万 t-CO2/年) であるが、ケミカルルーピング技術ではシステムとして CO2 を分離し、本研究では分離効率 98% 程度期待できることから、分離回収した 259 万 t-CO2/年 (264 万 t-CO2/年×0.98) がそのまま削減可能となる。発電効率は多少低くても CO2 削減効果は大きい。

## 2. 研究開発マネジメントについて

### 1. 事業の目標

#### CO2 分離型化学燃焼石炭利用技術

ケミカルルーピングを利用した化学燃焼技術とは、流動層反応器を用い流動材の化学変化を介して、燃料を O2 ガス (空気) と直接接触させることなく、熱や燃料ガスに転換し、CO2 を分離する方法である。石炭を燃料とする場合、空気分離の必要がなく、CO2 を回収してもプラント効率 (送電端効率) が低下しない高効率の石炭火力発電の実現が期待される。図 2-1-1 に CO2 分離型化学燃焼石炭利用技術の概念図を示す。

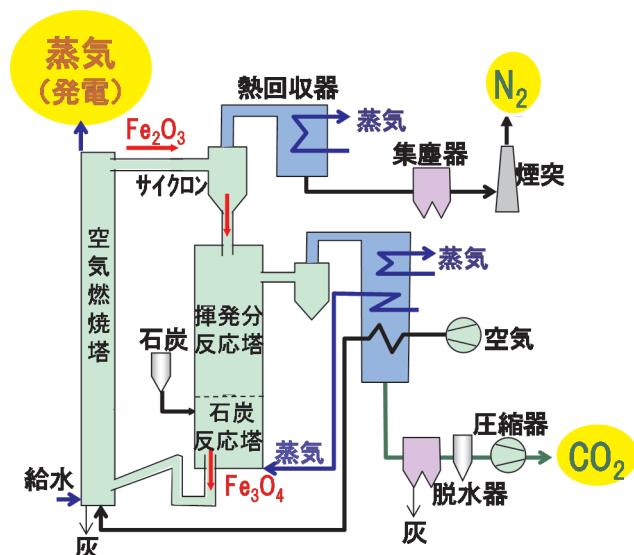


図 2-1-1 CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭利用技術の概念図

ケミカルルーピングを用いた石炭利用技術は、CO<sub>2</sub>を回収しつつ高効率発電が可能となる一方で、酸素を運ぶ流動材（酸素キャリア、以下キャリアと記す）を用いることが前提となることから、その反応性や耐久性等に起因するキャリア消費コスト及びプラントコストを含めたCO<sub>2</sub>分離・回収コストが、競合する石炭火力発電システムより安価とする必要がある。図2-1-2はキャリア消費コストとプラント初期充填量、キャリア消費率およびキャリア価格との関係を示す。

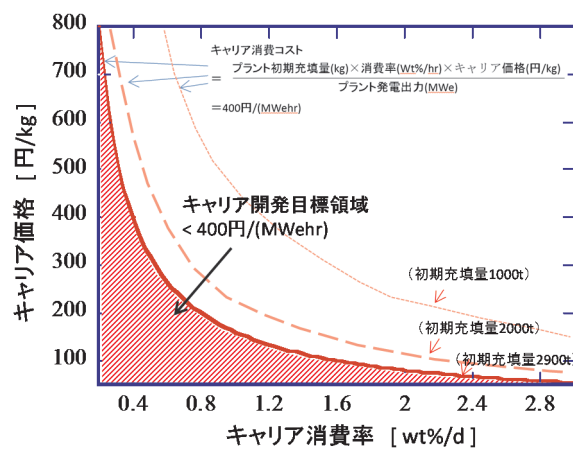


図 2-1-2 キャリア消費コストとプラント初期充填量、キャリア消費率およびキャリア価格との関係  
 (キャリア消費率：(消費量/d) / プラント初期充填量 × 100)

本研究開発の目的は、分離回収コスト 1,000 円台/CO<sub>2</sub>-t 以下に達成できる酸素キャリアの選定及びプロセスを構築することである。

[中間目標(平成 29 年度)]

分離・回収コスト 1,000 円台/t-CO<sub>2</sub> を見通せるキャリアを選定する。

[最終目標(平成 32 年度)]

分離・回収コスト 1,000 円台/t-CO<sub>2</sub> を見通せる CO<sub>2</sub> 分離型化学燃焼石炭火力発電システムを提示する。

## 2. 事業の計画内容

### 2.1 研究開発の内容

表2-2-1にキャリア選定とプロセス構築に関する技術課題と対応策を示す。

表2-2-1 キャリア、プラント開発の技術課題及び対応策

	技術課題	対応策（定量分析、評価方法）
1	キャリアとガス（H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> ）との反応速度（初期、平均速度）の把握	キャリア反応速度の測定方法（装置）策定、速度測定、動的解析を行い、気固反応モデルを作成
2	キャリアによる石炭反応促進メカニズムの解明、石炭反応速度の把握	キャリアの石炭反応促進メカニズムを解明、石炭反応速度を測定、反応速度を動的に評価、単一粒子反応モデルを作成 また、環境への影響評価として、石炭を反応させる時の排ガス中の窒素化合物、硫黄化合物について測定すること。また、キャリア廃棄物と石炭灰の混合物が環境への影響を与えないことの見通しを立てること。
3	キャリア繰り返し反応性、物性変化の把握	繰り返し反応評価試験で、キャリア反応性、物性（溶融、細孔分布、強度など）変化を評価
4	キャリア耐久性、磨耗、粉化の把握	コールド、ホット、耐磨耗性評価装置によって、キャリア耐久性を評価
5	流動層内の石炭とキャリアの混合、滞留条件を把握	コールドモデル試験によって、異なる比重粒子の混合、滞留方法を検討
6	粒子の循環流動（BFB流動化速度、ライザーホールドアップ）の把握	粒子の流動化速度（バブリング流動層）、ライザー（キャリア粒子上昇部）のホールドアップをコールドとホット条件で測定し評価
7	長時間キャリア循環反応評価	天然ガスを燃料として、長時間（約1000サイクル）ホット装置試験によって、キャリア循環、反応、劣化、粉化を評価 燃料に石炭を混合した試験も実施し、石炭の影響についても評価を行う。
8	灰とキャリアの分離	灰とキャリア分離方法の策定、分離方法を試験的に評価
9	プラント構成の最適化、プロセス効率アップ	プロセス解析、反応器構造のシミュレーションによって、プラント最適構成、効率向上方法を検討
10	ケミカルルーピング石炭利用技術原理の実証	実機に近い条件（熱自立）の大型PDU試験によって、CLC石炭利用技術原理を実証

これらを分類すると次の①～⑤となり、それぞれについて研究開発を行うものとする。

#### ① キャリア及び製造方法の評価と選定

高性能かつ低コストの人工キャリアの製造方法を検討し、5タイプ程度の人工キャリアを②の供試体として選定する。また天然キャリアについては、反応性や耐久性等の物性、調達価格及び調達方法を調査し、5タイプ程度の天然キャリアを②の供試体として選定する。②のキャリア性能評価の結果をフィードバックしながら、キャリア反応性、耐久性及びコストなど総合評価を行い、人工キャリアと天然キャリアについて各1～2タイプ程度を選定する。



## ② キャリアの技術性能評価

キャリアの基礎的な酸化・還元反応性、繰り返し反応性、耐摩耗性及びキャリアの構造・物性変化について、試験装置を製作のうえ、天然ガスを燃料として要素試験を行い、各特性を把握する。

燃料を石炭とする場合についても、酸化・還元反応性及びキャリアの構造・物性変化について、試験装置を製作のうえ、要素試験を行い、特性を把握する。

キャリアを長時間、循環反応させる装置を製作し、天然ガスを燃料として、キャリア候補に対して長時間の試験を行うとともに、燃料に石炭を混合した条件についても試験を行い、キャリアの反応性や構造・物性変化を把握する。天然ガスと石炭の要素試験によるキャリア特性結果と合わせて、燃料を石炭とした場合と天然ガスとした場合におけるキャリア反応性の差異を評価する。

また、石炭を反応させる時の排ガス中の窒素化合物、硫黄化合物について測定をおこなうとともに、キャリア廃棄物と石炭灰の混合物が環境への影響を与えないことの見通しを立て、環境への影響を評価する。

以上の結果を踏まえて、補充コストの要件400円/MWhを達成するキャリアとして、人工キャリアと天然キャリアについて各1~2種類程度を選定する。

コールドモデルを製作し、異なる比重の模擬粒子の流動、混合、滞留条件を測定することで、石炭とキャリアの流動混合について検討を行う。

## ③ プロセス構造、条件の最適化評価

②のキャリア性能評価の結果を反映したケミカルルーピングプロセスモデルの解析により、プロセス各部分の物質及び熱収支を把握し、プロセス構成条件及び効率向上方法を検討する。

揮発分反応塔及び石炭反応塔における比重差のある粒子の混合流動について、流動層シミュレーションで評価して最適な流動条件を把握する。

選定されたキャリア候補の特性を反映したプロセス構成及びプラントの合理化の検討結果を反映して、プラント最適仕様を作成する。

同仕様に基づき、プラントコスト及び保守・運転コストを含めて経済性を検討し、選定したキャリアで分離・回収コスト（圧縮コストは除く）1,000円台/t-CO<sub>2</sub>が見通せるかどうか評価を行う。

## ④ 技術動向調査、市場・経済性検討

国内外のケミカルルーピング技術及びCCUSの技術開発動向を把握しながら、将来ビジネスを見据えたFSや市場調査を実施し、ケミカルルーピング技術実用化の経済性を検討する。

⑤ また、H29年度の中間評価の良好な結果及び事業化の見通しが得られれば、石炭を燃料とするPDU試験装置を用いて、実機に近い熱自立条件で石炭燃焼、粒子循環反応試験を行い、ケミカルルーピングプロセス原理の実証を行うとともに、装置内部の摩耗、腐食を確認するため解体研究を実施する予定である。

## 2.2 研究開発の実施体制

プロジェクトの進行全体の企画・管理やプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させるため、必要に応じてプロジェクトマネージャー（以下「PM」という。）を任命する。また、各実施者の研究開発ポテンシャルを最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、必要に応じて研究開発責任者（プロジェクトリーダー、以下「PL」という。）を指名する。図 2-2-1 に実施体制を示す。

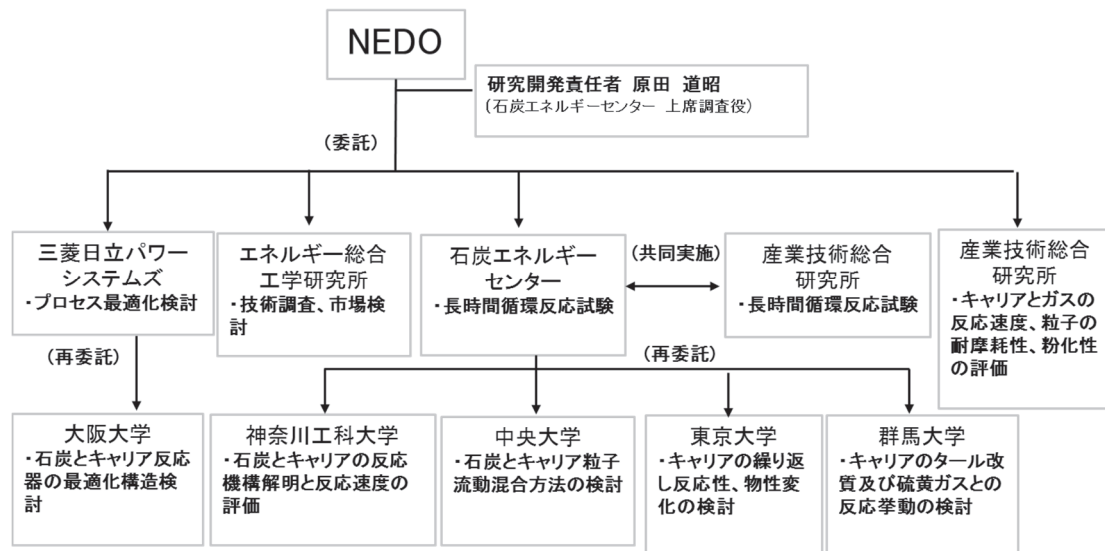


図 2-2-1 CO2 分離型化学燃焼石炭利用技術開発の実施体制

## 2.3 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理及び執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適切に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

### (1) 進捗把握・管理

PMは、PLや研究開発実施者と密接に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。従事日誌、月間工程表、執行管理表および現地調査並びに適宜ヒアリングにより実施状況をチェックし、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

### (2) 技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策の分析及び検討を行う。

## 2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

技術開発進捗状況と事業環境を整理しながらステップを踏んで着実に事業化検討を進める考えである。現状ラボレベルの要素開発段階であり、

中間評価後の PDU 装置によるプロセス原理実証以降のスケジュールを示す。基盤研究プロジェクト終了後、実機を想定した各機器の開発を行い、その後数万 kW クラスの実証炉でボイラとしての性能評価を行い、各機器開発に 2 年程度、実証試験炉に 3 年程度の開発期間を想定しており、約 5 年後の実用化を想定していた。表 2-2-2 に実用化迄のイメージ工程を示す。

今後の課題としては、国内 CCS の制度化、CO<sub>2</sub> パイプラインなどのインフラ整備などの実用化環境の整うまでに、いかに製品化、事業化を継続させるかにあるが、今回の調査で当面の石炭焼き CLC の市場が無いことから国内 CCS の制度化時期を見極めながら実用化事業化する必要がある。

表 2-2-2 に実用化迄のイメージ工程

西 暦	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX
原理実証 (PDU)	▲国内CCS政策動向、海外EOR市場を踏まえて実施判断								
機器のコストダウン			コストダウン目途▲						
実証炉建設					▲90億円				
実証試験							▲20億円		
実用化評価				適宜実用化FS					
			事業の継続判断▲				実用化の可否判断▲		

実用化・事業化につなげる知財戦略・標準化戦略については、ノウハウとして保有する方が有利な技術は出願せず、知財として確保する方が有利な技術については積極的に特許として出願する方針とする。

本プロジェクトにおける特許出願・論文投稿件数・研究発表・講演数を、それぞれ表 2-2-3 に示す (H29 年度は予定を含む)。

表 2-2-3 特許出願・論文投稿件数・研究発表・講演数

	平成27年度	平成28年度	平成29年度	計
特許出願(うち外国出願)	0	1(0)	1(0)	2
論文	0	1	1	2
研究発表・講演	0	17	0	17

### 3. 情勢変化への対応

石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業開始（平成 24 年度）以降、下記のような情勢変化があり、本実証事業の重要性が一層強くなったと考えられる。

#### （1）エネルギー基本計画

平成 26 年 4 月 11 日に閣議決定された新しい「エネルギー基本計画」の中で、石炭は、温室効果ガスの排出量が多いという問題はあるが、安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源の燃料として再評価されている。

#### （2）電力システム改革

電気事業の自由化は、卸電力自由化は 1995 年より、小売供給自由化は 2000 年の大口需要家を対象に実施されて以降、段階的に実施され、2016 年 4 月より全面自由化されており、事業者としても自由化範囲拡大を念頭に競争力（安定性、経済性、環境性）のある電源の開発が必要だという認識のもと、安定供給性や経済性に優れた石炭火力の更なる効率向上を目指し、本事業を立ち上げ、推進してきている。

現在、国が進めている電力システム改革において、2016 年に小売全面自由化、2018 年～2020 年目途に小売料金規制撤廃の法整備がなされている。電力自由化に向けては、競争力のある電源を確保するため、各分野の事業者が多くの石炭火力の新増設を計画中である。安全性、経済性、安定供給性ととも環境性、いわゆる 3E+S は我が国のエネルギー政策の基本であり、環境性に優れた本技術の早期実用化が一層重要になってくる。

#### （3）海外における石炭火力発電を取り巻く情勢

2015 年 12 月開催予定の気候変動枠組条約締約国会議（COP21）において京都議定書に代わる温室効果ガス排出削減等のための新たな国際枠組みとして「パリ協定」が採択され、主要排出国を含むすべての国が削減目標を 5 年ごとに提出・更新すること、その実施状況を報告し、レビューを受けることが合意された。また世界共通の長期目標として、気温上昇を 2℃より十分低く保持すること、1.5℃に抑える努力を追及することにも言及された。世界的に環境負荷低減に向けた規制が厳しくなっている。

米国においては、2013 年 6 月にオバマ大統領が「オバマ大統領気候変動計画（米国）」を発表、その中で石炭火力発電にとっては CCS を設置しなければ現状達成が困難なレベルの CO2 排出基準（環境保護庁規制案：約 0.499kg-CO2/kWh）の制定が検討されている。またイギリスにおいては排出原単位基準（EPS）が制定され、新設の場合は設備の CO2 排出原単位 0.45kg-CO2/kWh という規制値が、カナダにおいては新設の石炭火力発電所、経済的耐用年数に達した古い発電所を対象に 0.42kg-CO2/kWh の排出基準が課されており、CCS 設備を備えない新規石炭火力は建設が困難な状況にある。

さらに米英は、平成 26 年 4 月 OECD 輸出信用に関する国際ルールを決める OECD 輸出信用会合で石炭火力向けの輸出信用の原則禁止を共同提案した。

それに対し、日本は石炭火力に頼らざるをえない国が多い中、高効率化こそが現実的な気候変動対策であると主張、平成 27 年 11 月、石炭火力向け支援に関する見直し案として、高効率石炭火力向けの支援は継続するが低効率の石炭火力向けの支援を制限することで合意した。

今後経済発展を進める新興国、途上国がその増大する電力需要に応えるためには、一定程度石炭火力発電プラントの新増設・リプレースに依存せざるをえないことは明らかであり、こうした

中、新興国では公的金融支援がなければ、高効率な石炭火力発電プラントよりも低コストながら低効率な発電プラントが導入されることになり、CO2 排出抑制の観点からはむしろ望ましくない結果となる恐れがあることが懸念されている。

こうした CO2 排出規制の強化に向けた検討の動きがある中、米国政権がトランプ大統領に交代し、気候変動に関する政策変更が明らかになっているものの、長期的な視点に立てば、世界的に気候変動への対策が強化されていくことは避けられないと考えられる。エネルギー資源の大半を輸入に頼る我が国においては、安定供給性やコストの面で優れたエネルギー源である石炭火力は今後も必要不可欠な存在であり、今後もその役割を継続的に果たしつつ環境影響を抑制していくためには、高効率の石炭火力発電を利用していく必要がある。

#### **4. 評価に関する事項**

研究開発としては、平成 27 年度に立ち上げ、今回初めて中間評価を実施する。これまで試験準備のためのリアクターの製作や試験を行い成果の一部が平成 28 年度末頃からでてきた状況である。今後技術検討会の開催を企図すると共に、今回の中間評価のコメントを反映したいと考えている。

### 3. 研究開発成果

#### 1. 事業全体の評価

ケミカルルーピング（CLC）を用いた石炭利用技術は、酸素を運ぶ流動材（酸素キャリア）を用いることが前提となるため、酸素キャリアの性能（反応性、耐久性など）がプロセスの性能（プラントコスト、キャリア消費等運転コスト）を左右する。

本開発では、天然キャリア及び人工キャリアの評価、選定を行った。コスト面で有利な天然キャリア（イルメナイト：チタン鉄鉱石）5タイプのキャリア性能評価を行い、最も性能の高い豪州産2号（IL<sub>au2</sub>）を選定した。人工キャリアでは第一候補として酸化鉄含有量を30%とし、焼成温度を1300℃としてハーシナイト（FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>）化したキャリアを、第二候補として天然キャリアであるイルメナイトにCaを含侵させ1300℃で焼成したキャリアを選定した。

天然キャリアを対象に技術課題毎に評価を行った結果を表3-1-1に示す。評価結果をもとにCO<sub>2</sub>分離・回収コストを試算すると、CO<sub>2</sub>回収コスト1,100円/t-CO<sub>2</sub>（CO<sub>2</sub>圧縮費を含む）となり、目標値である1,000円台/t-CO<sub>2</sub>を見通すことが可能となった。

表3-1-1 天然キャリアによる技術的な実現性の評価結果

◎ 大きく上回って達成、○達成・達成見込み、△一部達成、×未達

実施計画	技術課題	H26年度 概念設計条件	中間成果	評価
②-1	キャリアとガスとの反応速度	・生成ガスのCO <sub>2</sub> 転化率:98% ・VR滞留時間:キャリア3分、ガス1秒	・生成ガスのCO <sub>2</sub> 転化率:98% ・VR滞留時間:キャリア6分、ガス2秒(粒子層高増加で対応可)	○
②-2	キャリアと石炭との反応速度	・CR滞留時間:キャリア12分、ガス2秒 ・チャーガス化率:97.3%以上	・チャーガス化率:94% → カーボンストリップ設置や反応器構造の改良で対応可(設計ガス化率97.3%で変更なし)	○
②-3	キャリアの繰返反応性、物性変化	・酸化/還元繰返し反応性:10倍向上と仮定	・繰返し反応性:天然キャリア5倍、Ca添加改質イルメナイトで12倍向上可 → 天然キャリアのVR滞留時間を3分→6分とする。	○
②-4	キャリアの耐久性、摩耗	・摩耗量、粉化率:未考慮 ・キャリア補充率:0.40wt%/dと仮定	・キャリア摩耗量は珪砂の2倍であることを確認。CFBでの珪砂補充率経験値より概念設計時の補充率0.40wt%/dは安全側であると判断。	○
②-5	石炭とキャリアの混合性	・流動条件:気泡流動層形成 ・粒径:石炭100μm、イルメナイト123μm ・混合性、滞留方法:未検討	・石炭とキャリアの混合は円滑に進むことを確認。 ・チャーがキャリア同伴されARに移動を防ぐ反応器構造の改良案を提案。	○
②-6	循環流動性	・運転制御条件:未検討 ・粒子循環流速 G <sub>s</sub> :52kg/m <sup>2</sup> s	・長時間循環反応評価装置(ベンチ試験装置)で検討開始。 ・ベンチ試験装置で、粒子循環流速設計条件(G <sub>s</sub> :52kg/m <sup>2</sup> s)を満足することを確認した。	○
	長時間循環反応評価	・連続運転性能:性能は低下しないと仮定 ・S分、N分挙動:机上検討	・ベンチ試験装置で検討開始。 64h連続運転達成し、装置の安定化確立。	○
②-7	灰とキャリアの分離	・サイクロン:完全分離と仮定 ・反応塔内:CR、VRでは灰飛散なしと仮定	・ベンチ試験装置で検討開始。	○
	タール改質、硫黄ガス影響	・タール改質:未検討 ・硫黄ガス:未検討	・固定層試験でキャリアによるタール改質活性を把握。 ・S/C増加で煤の生成減少。タール改質への影響因子を検討中。	○
CO <sub>2</sub> 回収コスト		2,000円台/t-CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> 圧縮費を含む)	1,000円台/t-CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> 圧縮費を含む)	○

今後、平成29年度中に石炭ガス化ガス中のS分の酸化還元速度の影響把握やキャリアとチャー粒子、灰の分離構造の検討を進め、石炭固有の課題を検討していく。

## 2. 研究開発項目毎の成果

CO<sub>2</sub>分離回収コスト1000円台/CO<sub>2</sub>-t以下を達成できる酸素キャリアの選定およびプロセス構築のため、①キャリアおよび製造方法の評価と選定、②キャリア性能の技術評価、③プロセス構造、条件の最適化評価及び④技術動向調査、市場・経済性検討、検討委員会開催を行った。以下に項目毎の成果について記す。

なお、三菱日立パワーシステムズ株式会社をMHPS、石炭エネルギーセンターをJCOAL、エネルギー総合工学研究所をIAE、産業技術総合研究所を産総研、【 】内は再委託先を表記して各委託先の成果を示す。

### 2-① キャリア及び製造方法の開発評価と選定

#### 2-①-1 人工キャリアの開発評価と選定（JCOAL【中央大、神奈川工大、東大】）

工業的に最も低コストで量産が可能な方法である噴霧造粒法によるキャリア粒子製造を中心として性能を調査した。

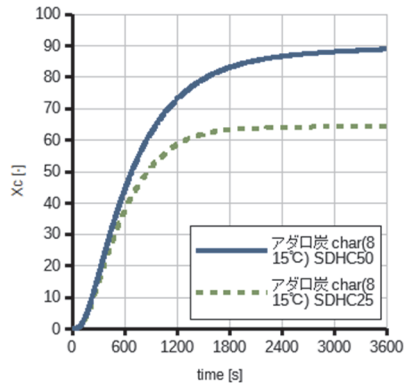
その結果、(1) 酸化鉄含有量を50%とし、焼成温度を1300℃としてハーシナイト(FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)化したキャリア粒子(SD<sub>50</sub>)の耐摩耗性が高く、第一の候補として選定した。図3-2-①-1-1は酸化鉄の含有量による炭素転換率と反応速度の違いを示した図である。初期の反応速度自体は含有率による差が無いことが分かる。

一方、反応速度がハーシナイトより高くなる含侵法によるキャリア製造についても調査した。

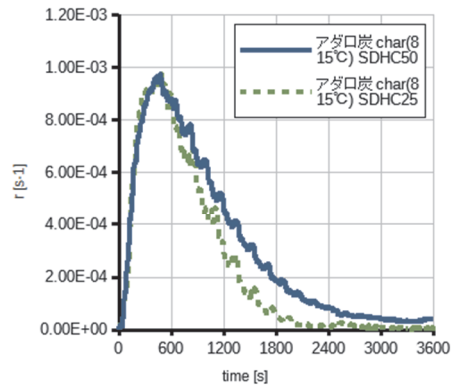
(2) 原材料として天然キャリアであるイルメナイトにCaを含侵させ1300℃で焼成したキャリアは、耐摩耗性は劣るものの反応速度がイルメナイトより向上し、第二の候補として選定した。さらに、(3) 強靱で高性能な触媒担体である水澤化学製ネオビードに酸化鉄を含侵させたものは、担体自体が高価格であるが反応速度が非常に速いことが分かった。

これらを比較し、(1)と(2)を人工キャリア粒子の候補として有力なものとして位置付けた。ただし、(2)は全く新規に開発したキャリア粒子で量産方法が確立されていないため、(3)を予備候補とする。

図3-2-①-1-2は今回検討した人工格子酸素キャリアのFE-SEM像で、(a)は噴霧造粒粉で1100℃焼成品、(b)は1300℃焼成品（ハーシナイト）、(c)は酸化鉄を担持した高耐久性触媒ネオビードを示す。1,100℃焼成では粒子間の結合がごく一部で起こっており、1,300℃焼成によって粒子間の結合が非常に強くなっていることが分かった。一方、(c)については非常に緻密なことが分かり、それによって強度が高いと考えられた。

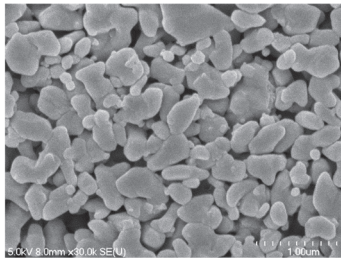


炭素転換率

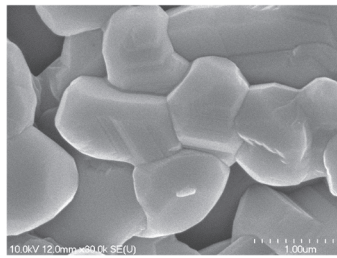


反応速度

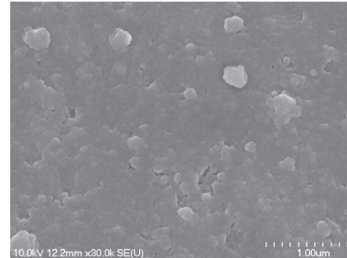
図 3-2-①-1-1 ハーシナイト化した酸素キャリア粒子の性能比較  
(SDHC50 (SD<sub>50</sub>) : 50 %Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SDHC25 (SD<sub>25</sub>) : 25 %Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



(a) 噴霧造粒品1100°C焼成  
酸化還元10サイクル後



(b) 噴霧造粒品1300°C焼成  
酸化還元10サイクル後



(c) 酸化鉄含侵ネオビード  
酸化還元10サイクル後

図 3-2-①-1-2 人工格子酸素キャリア粒子の FE-SEM 像参考図\*

(Ca 含侵イルメナイト粒子表面像については②-3 項に示す。)

\* 平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「化学ループ燃焼 (CLC) 用多孔質セラミックス粒子の開発」



2-①-2 天然キャリアの開発評価と選定 (MHPS、JCOAL)

イルメナイトを豪州、インド、アフリカから計5タイプのサンプルを商社から調達し、組成（酸化チタン、酸化鉄、酸化マンガン含有量）の調査と熱重量測定（TG）試験によるキャリア性能評価を実施した。図 3-2-①-2-1 は 5 タイプのイルメナイトの写真である。図 3-2-①-2-2 は 5 タイプのイルメナイト還元反応性の比較である。豪州産 2 号 (IL<sub>au2</sub>) のイルメナイトの初期反応性は他 4 タイプより高かったため、豪州産 2 号 (IL<sub>au2</sub>) を天然キャリアの候補として選定した。

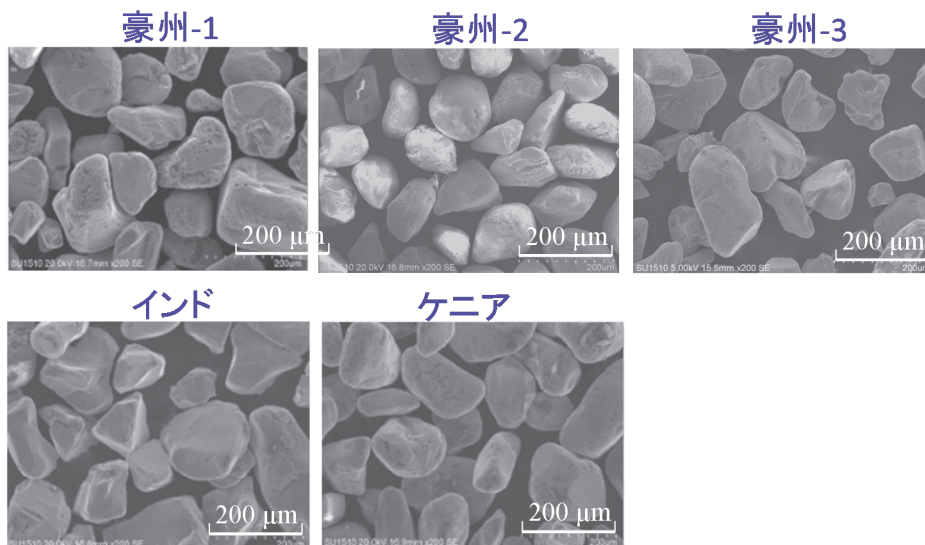


図 3-2-①-2-1 5 タイプ イルメナイトの SEM 写真

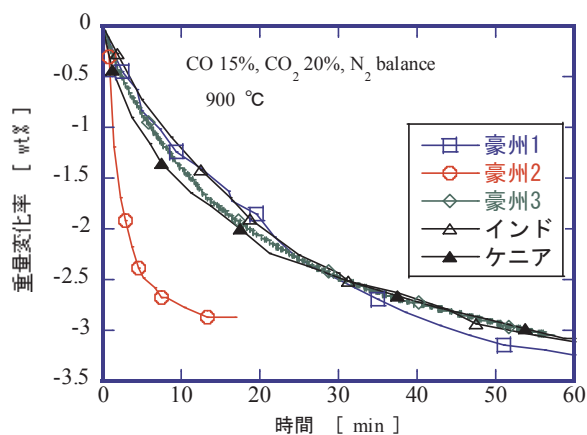


図 3-2-①-2-2 TG 試験による 5 種類のイルメナイトの還元反応性の比較

## 2-② キャリア性能の技術評価

### 2-②-1 キャリアとガスの反応速度の評価 (産総研)

最終的に選定された天然キャリアの豪州産2号 (IL<sub>au2</sub>)、人工キャリア SD<sub>50</sub>、と天然キャリア (IL<sub>au1</sub>, IL<sub>IN</sub>, IL<sub>KE</sub>)、人工キャリア (SD<sub>10</sub>) を用いて 900℃、800℃、700℃での温度で CO および CH<sub>4</sub> 反応性ガス雰囲気下還元実験を実施した。天然キャリア豪州産2号 (IL<sub>au2</sub>) の反応性は人工キャリア SD<sub>50</sub> と同等であった。得られたデータから反応速度の動的解析を行い、各キャリアの還元速度定数を求めた。

還元ガスの酸化反応を一次反応と仮定し、以下の式よりガス側反応速度を算出した。

$$-\ln(1 - X) = kt \quad \text{①}$$

$$X = \frac{\text{供給還元ガス量} - \text{未反応還元ガス量}}{\text{供給還元ガス量}} \quad (\text{還元ガス反応率}) \quad \text{②}$$

$$X = \frac{CO_{\text{入口濃度}} - CO_{\text{出口濃度}}}{CO_{\text{入口濃度}}} = CO_2 \text{ 転換率} \quad (\text{還元ガスが CO の場合}) \quad \text{③}$$

図 3-2-②-1-1 に還元温度 900℃、還元ガス 10%CO の場合の CO<sub>2</sub> 転換率「X」を示した。滞留時間「t」は反応管の容積および CO ガスの体積流量から計算した。図 3-2-②-1-2 に天然キャリア豪州産2号 IL<sub>au2</sub> について、式①を用いて横軸に滞留時間「t」、縦軸に「-ln(1-X)」をプロットした結果を示した。直線であるため還元ガス酸化反応は仮定した一次反応であることが確認された。

また、得られた直線の傾きからガス側反応速度を算出した。

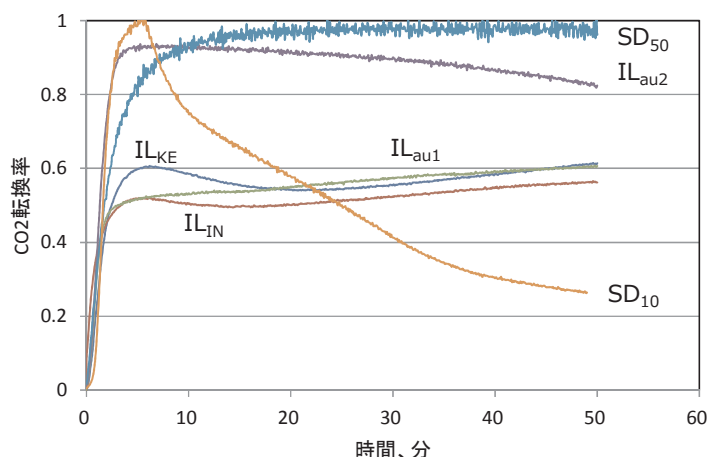


図 3-2-②-1-1 CO<sub>2</sub> 転換率の比較による酸素キャリアの還元反応性の評価 ; 900℃、10%CO

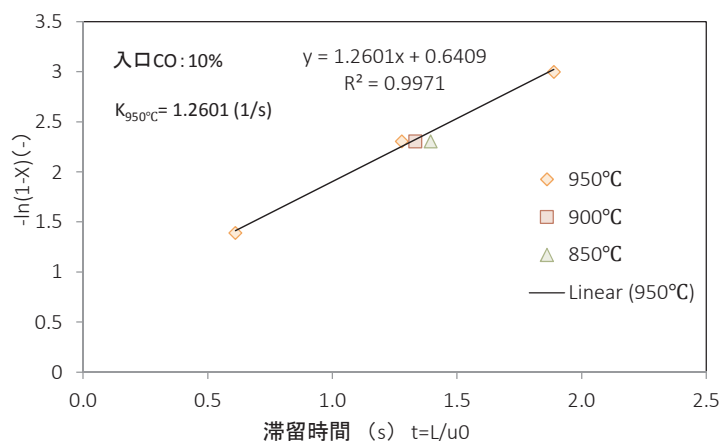


図 3-2-②-1-2 天然キャリア IL<sub>au2</sub> のガス側還元反応速度定数；10%CO

天然キャリア IL<sub>au2</sub> と人工キャリア SD<sub>50</sub> の反応速度が同等であったことから、価格の安い天然キャリア IL<sub>au2</sub> で VR ガスの滞留時間の検討を行った。

図 3-2-②-1-3 には還元温度 950°C、900°C、850°C、還元ガス 10%CO の場合における滞留時間と還元反応率「CO<sub>2</sub> 転換率 X」との関係を示す。同図より概念設計時の CO<sub>2</sub> 転換率 98%を達成するのに必要なガス滞留時間は 2 秒であることが明らかとなった。そこでガス滞留時間を概念設計時の VR ガス滞留時間を 2 秒に変更するため、設計仕様を変更した結果を表 3-2-②-1-1 に示す。キャリア静止層高を 1m から 2 倍にすることでガス滞留時間を確保した。

層高の見直しに伴い、圧力損失が約 3 倍に増加する。仕様を見直した VR の圧力と風量条件を満たす送風機を確認するために、図 3-2-②-1-4 の通り P-Q 線図と各種送風機適用範囲を示すマップ上で、送風機の適用範囲内であることを確認した。

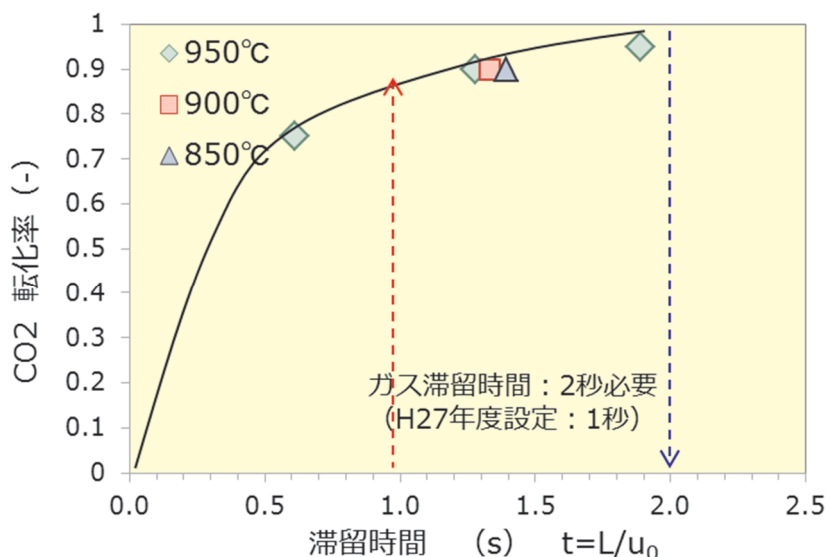


図 3-2-②-1-3 CO<sub>2</sub> 転換率と滞留時間の関係

表 3-2-②-1-1 VR 設計仕様の変更 (250MWth)

		H27年度条件	H28年度見直し
ガス滞留時間	秒	1	2
キャリア層高	m	1	2
キャリア充填量	t	176	352
塔断面積	m <sup>2</sup>	70	←
塔高	m	9.3	10.2
空塔速度	m/s	1.5	←
ガス量	m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /min	1376	←
圧力損失	kPa	33	98
流動状態	-	気泡流動化	乱流流動化
フロア形式	-	軸流送風機	←

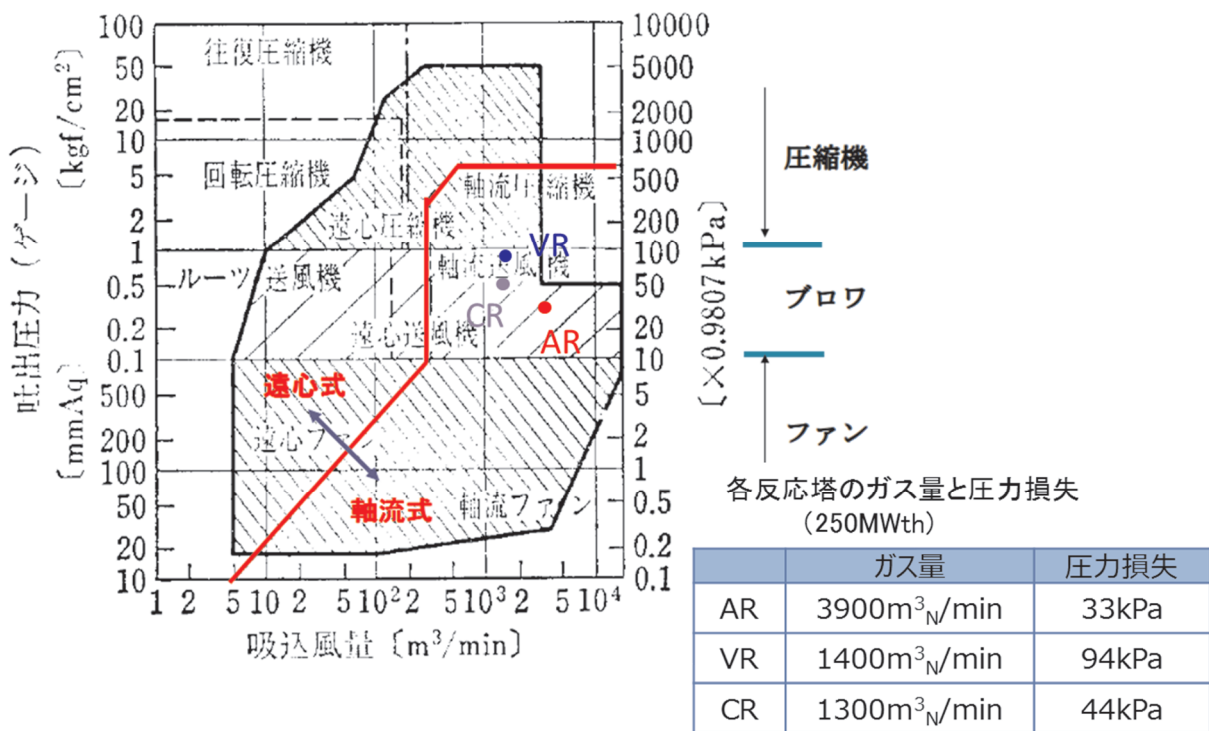


図 3-2-②-1-4 P-Q 線図と各種送風機適用範囲

2-②-2 石炭とキャリアの反応機構の解明と反応速度の評価（IAE、JCOAL【神奈川工大】）

図 3-2-②-2-1 に示す小型流動層試験により、石炭チャーのガス化反応速度を測定した。実験方法は、チャーを酸素キャリア流動層に投入し、その生成ガス进行分析しチャーガス化速度を求めた（CR 運転）。CR 運転終了後に空気を入れ流動材を酸化した（AR 運転）。人工キャリア（SD<sub>50</sub>）と天然キャリア（イルメナイト IL<sub>au2</sub>）を対象とし、流動層の温度は 850℃、900℃及び 950℃で実施した。

図 3-2-②-2-2 に AR 運転と CR 運転でのチャーの炭素収支を示す。CR 運転でガス化したチャーの炭素は設計温度 950℃で最大で 94%であることが明らかとなった。これは小径化したチャーが層内から飛散したのち AR 運転で酸化したためと考えられ、これよりチャーガス化率は概念設計値 97%には僅かながら到達しない可能性がある。設計ガス化率 97%を満たすために、カーボンストリップやチャー反応塔構造の見直しを行うことにより、未反応チャーの飛散を防止し、計画ガス化率の達成を見込む。

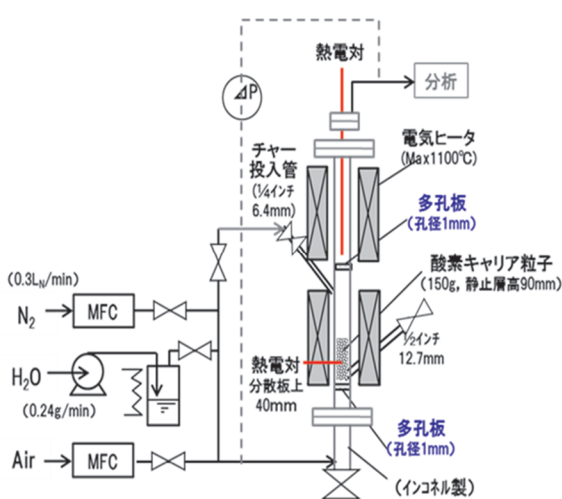


図 3-2-②-2-1 小型試験装置

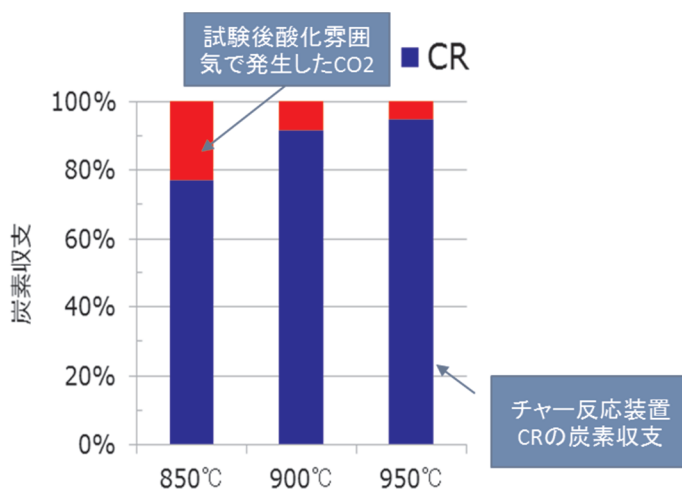
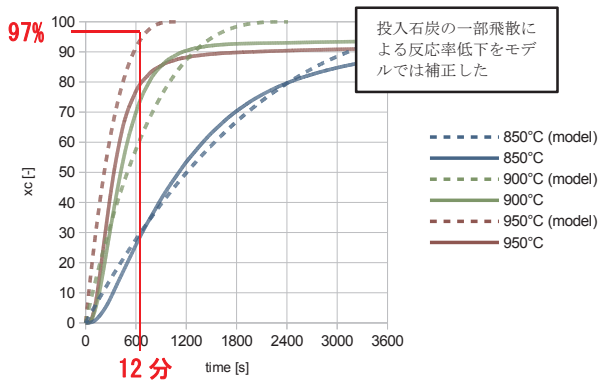
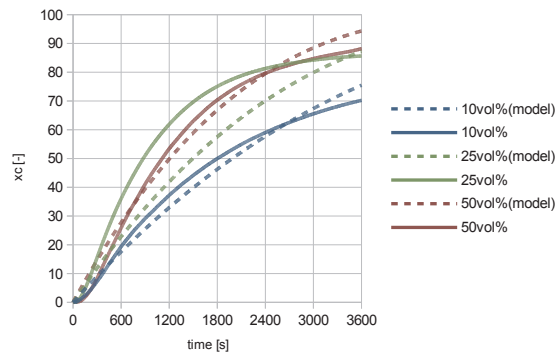


図 3-2-②-2-2 炭素収支

アダロ炭チャーとイルメナイトにおける反応率の経時変化を図 3-2-②-2-3 に示す。同図には未反応核モデル（表面反応律速）で整理した結果を併せて示している。同モデルでは、投入石炭の一部飛散による反応率低下を補正しており、その未反応核モデル各パラメータを表 3-2-②-2-1 に示す。設計炭であるアダロ炭のチャーガス化反応速度パラメータは H26 年度の設計条件とほぼ同等の結果であった。図 3-2-②-2-3 に示したモデル計算結果によると、設計条件の 950℃、12 分でチャーガス化率が 97%に到達することがわかる。従って反応塔構造の見直しにより小径化したチャーの反応時間を確保すれば、計画ガス化率を達成できると考えられる。



(a) 温度



(b) 水蒸気濃度

$$\frac{dX_{Char}}{dt} = k_c (1 - X_{Char})^{2/3}$$

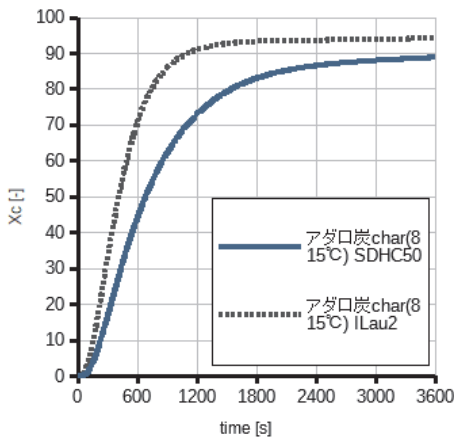
$$1 - (1 - X_{Char})^{1/3} = \left(\frac{k_c}{3}\right)t$$

$$k_c = \frac{dX_{Char}}{dt} \Big|_{X_c=0} = A_{H_2O} \exp\left(-\frac{E_{H_2O}}{RT}\right) P_{H_2O}^n$$

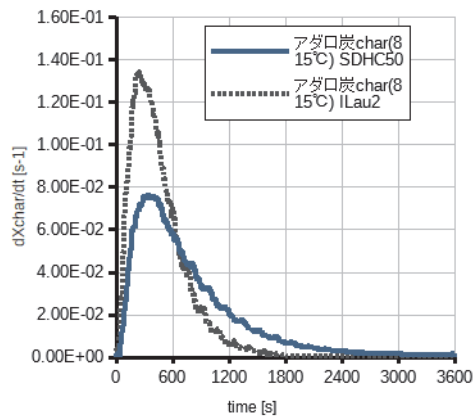
未反応核モデル（表面反応律速過程）

図 3-2-②-2-3 アダロ炭チャーとイルメナイトとの反応および反応モデルとの比較

また、キャリアの比較結果を図 3-2-②-2-4 に示した。この結果からは、人工キャリアの SD<sub>50</sub> よりも天然キャリアのイルメナイト IL<sub>au2</sub>の方が反応速度は速いことが分かった。



(a) 反応率



(b) 反応速度

図 3-2-②-2-4 人工キャリアと天然キャリアとの比較

表 3-2-②-2-1 チャー反応塔の設計に必要な反応速度データ

項目	記号	H26年度設計条件	H28年度 成果 (速報)
供試炭 チャー	—	亜瀝青炭	アダロ炭
頻度因子	$A_{H_2O}$	$4.62 \times 10^6$ /MPa <sup>n</sup> s	$6.60 \times 10^6$ /MPa <sup>n</sup> s
活性化エネルギー	$E_{H_2O}$	200 kJ/mol	194 kJ/mol
反応次数	n	0.47	0.31

## 2-②-3 キャリアの繰り返し反応性、物性変化の検討（【東大】、JCOAL）

平成 28 年度は、酸化鉄を酸素キャリアに用い、担体としてアルミナ微粒子を用いた噴霧造粒粉の酸化還元反応の繰り返し時の劣化挙動について、走査型電子顕微鏡による画像解析と熱天秤による反応速度解析の連成解析を実施した。酸素キャリアの質量比、還元度、酸素濃度、反応温度等の種々の反応条件における酸化還元反応速度、粒子内の酸化鉄の凝集状態、および酸化鉄の粒子表面への偏析状態について検討した。その結果、還元反応速度定数の劣化速度は、キャリアの再酸化時の粒子内温度と強い相関があることがわかった。この相関関係を利用することで、次年度以降の粒子寿命予測やメークアップ率の向上の提言につなげることができる。

今年度はさらにカルシウムで表面を改質したイルメナイト粒子について検討を行った。イルメナイトを表面改質し酸化物イオン・電子混合伝導体であるチタン酸カルシウムを粒子の表面及び内部に形成することで、酸化還元反応速度の向上と粒子構造変化の抑制について検討した。図 3-2-②-3-1 に示すように、未改質の純イルメナイトでは、酸化還元反応繰り返し時に鉄の偏析と空洞化が観測された。一方、表面改質イルメナイトでは、粒子の構造変化の抑制も観測された。

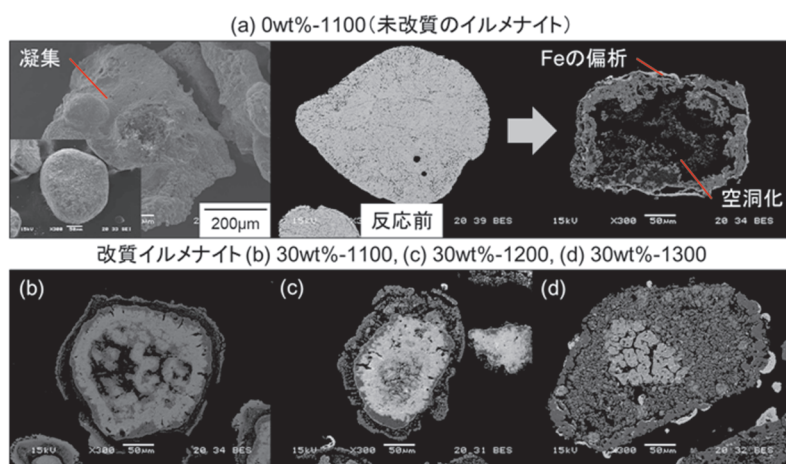


図 3-2-②-3-1 (a)純イルメナイトおよび(b, c, d)改質イルメナイトの酸化還元 50 サイクル後の粒子断面 SEM 写真

また、図 3-2-②-3-2 の酸化還元サイクルでの還元反応速度に示すように、表面改質イルメナイトでは、酸化還元繰り返しにおいて、高い還元反応速度が保持されることも明らかになった。天然イルメナイトの繰り返し反応性向上は約 5 倍であるが、表面改質により約 12 倍の還元速度向上が見られた。キャリアの繰り返し反応性は概念設計時には 10 倍向上を仮定していたが、表面改質を行えばこれを達成できると考えられる。

さらに、図 3-2-②-3-3 に示すように、エネルギー分散型 X 線分光法 (SEM-EDX) を用いて表面改質イルメナイトの粒子内部の組成分析を行った結果、表面改質イルメナイト中では、酸化還元時の Fe の粒子表面への拡散が抑制され、構造を保持していることが明らかになった。Fe の粒子構造変化は粒子内鉄と酸素のイオン輸送現象と関係しており、酸化物イオン・電子混合伝導体であるチタン酸カルシウムによる酸化物イオンの輸送特性向上が構造変化抑制に寄与していることが示唆された。この成果により、酸化還元繰り返し時の粒子構造変化の抑制に関して、粒子内のカチオンと酸化物イオンの輸送特性制御に基づく新たな粒子設計指針を示すことができる。



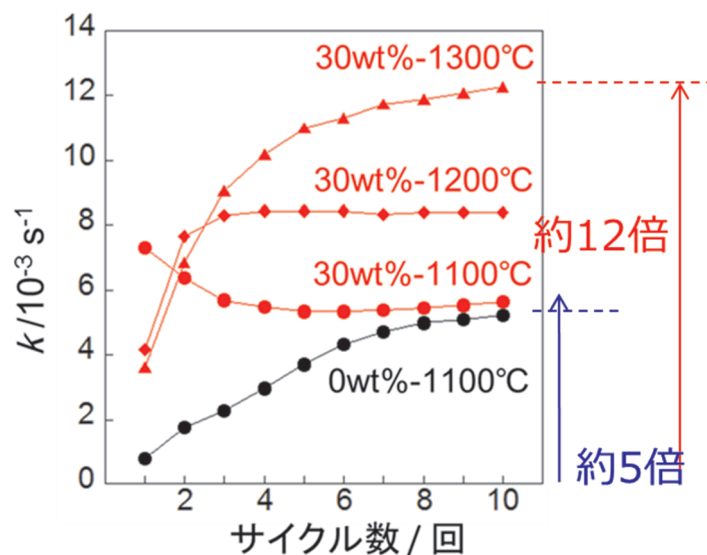


図 3-2-②-3-2 酸化還元サイクル(水素/酸素)での還元反応速度 黒線：純イルメナイト；赤線：改質イルメナイト (CaO 添加量(wt%)と焼成温度(°C)を記載)

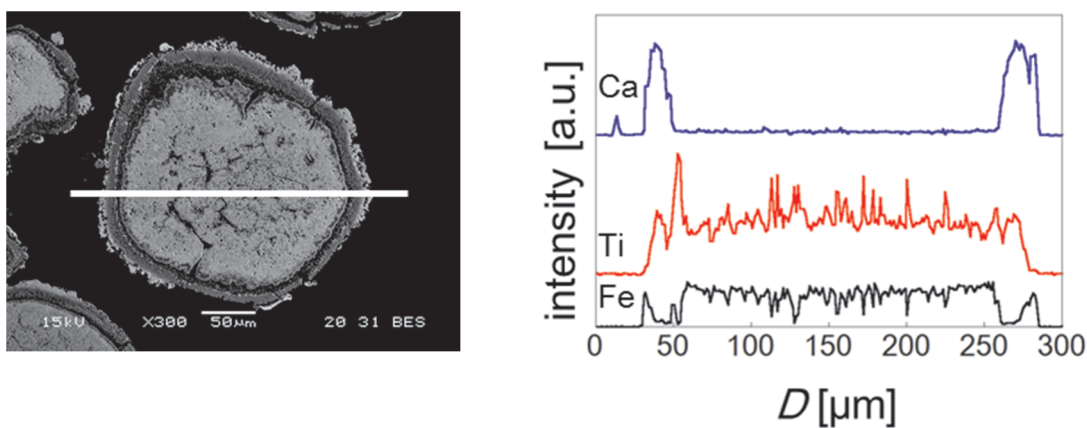


図 3-2-②-3-3 SEM-EDX の線分析による Fe の粒子表面への拡散評価 (試料：表面改質イルメナイト)

#### 2-②-4 キャリア粒子の耐摩耗性、粉化性の評価（産総研）

循環流動層型の耐摩耗性評価装置のホットモデルを製作した。この装置とバブリング流動層型の装置を用いて、各種キャリアについて10条件以上で摩耗試験を実施した。摩耗率の絶対値は装置によって異なる可能性があるため、実機で使用実績のある珪砂に対する相対的な摩耗率比で評価した。

バブリング流動層型では、層内粒子の粒度分布を測定し、大粒径の粒子が摩耗により小さくなる割合を定量して、摩耗速度を算出した。耐摩耗性が高い順に、廃 FCC 触媒、イルメナイト ( $IL_{in}$ )、噴霧造粒粒子 ( $SD_{25}$ , 1300°C 焼成) となった。

循環流動層型では排気中の粒子を定量して摩耗速度を求め、キャリア粒子の補充率を算出した。図 3-2-②-4-1 に循環流動層によるキャリア粒子の耐摩耗性評価装置概図を、図 3-2-②-4-2 に循環流動層によるキャリア粒子の耐摩耗性評価結果を示す。空塔速度 8m/s での補充率は珪砂が 0.17 wt.%/日、イルメナイトは 0.36wt.%/日であり約 2 倍となった。カルシウムで表面を改質したイルメナイト (Ca 含浸  $IL_{in}$ ) の補充率は、未改質のイルメナイトの 2 倍強となった。これは表面付近のカルシウムが削られて装置内から排出された影響が大きいと推定され、排出された粉末は未改質の場合より白くなった。

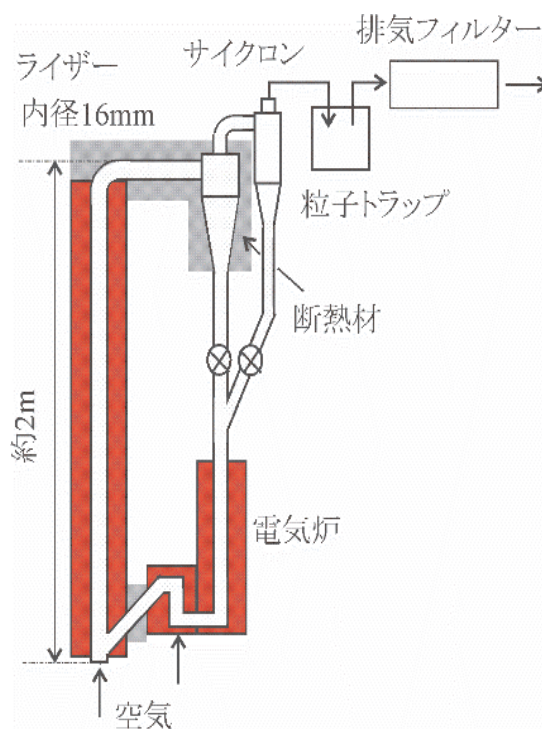


図 3-2-②-4-1 循環流動層によるキャリア粒子の耐摩耗性評価装置概略図

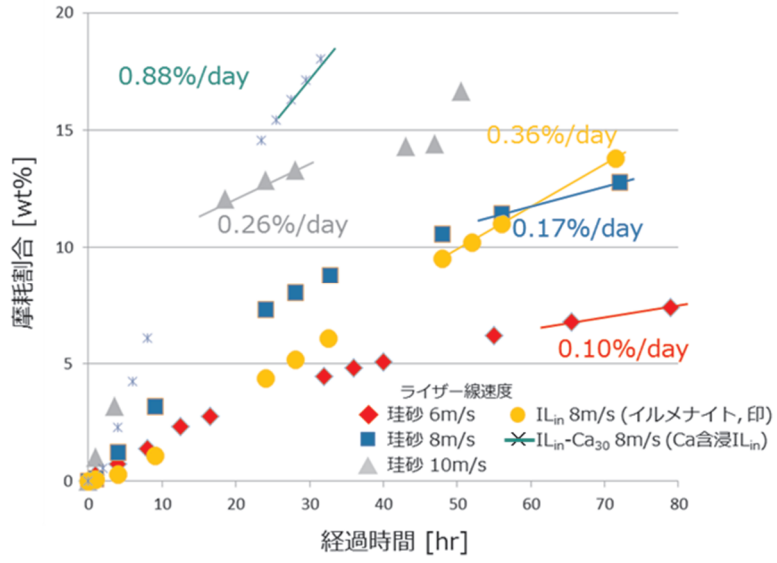


図 3-2-②-4-2 循環流動層によるキャリア粒子の耐摩耗性評価結果

## 2-②-5 石炭とキャリア粒子の流動混合方法の検討

### (1) 流動層モデル実験による検討 (【中央大】、JCOAL)

燃料反応塔の中では、チャーの良好な混合と、空気反応塔への流出を防ぐという相矛盾することを解決しなくてはならない。そのため、チャーの混合と分離条件が必要となる。また、微粒子についても同様に良好な混合と分離を行わないと行けないが、飛び出し損失についてはサイクロンなどの粒子回収機構を付加することで対応できる。

ここでは幅 400 mm、奥行き 100 mm の矩形断面流動層コールドモデルや幅 300 mm、奥行き 10 mm と 50 mm、奥行き 5 mm の二次元流動層を用い、流動媒体として天然キャリアであるイルメナイトに近い粒子密度を有するユニビーズ (UB:  $d_p = 0.1 \text{ mm}$ 、 $\rho_p = 4200 \text{ kg/m}^3$ ) あるいはジルコニア粒子 (Zr:  $d_p = 0.1 \text{ mm}$ 、 $\rho_p = 6000 \text{ kg/m}^3$ ) を用いた。チャー模擬粒子として粒子径の大きな ABS 樹脂球 (ABS:  $d_p = 6 \text{ mm}$ 、 $\rho_p = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) を浮上性粗粒子、c-Flotsam、として、粒子径が流動媒体より小さくて軽い中空ガラスビーズ (HG:  $d_p < 100 \mu\text{m}$ 、 $\rho_p = 700 \text{ kg/m}^3$ ) を浮上性微粒子、f-Flotsam、として使った。種々の流速でビデオ撮影により浮上・沈降の様子を調べた。

その結果、粗粒子の c-Flotsam ではガス流速が 20-30cm/s 以上で図 3-2-②-5-1 の写真に示すように粒子濃厚領域の下降流が発達し十分な混合が行われることが分かった。

一方、微粒子の f-Flotsam では小さな気泡でも発生すると気泡に伴われて上昇するが、粒子濃厚領域では浮力が小さすぎて自由に動けないことが判明した。そのため、図 3-2-②-5-2 のように下降流に伴われて層内に分散していた。また、層表面からフリーボードに射出され、気流搬送によって装置上部にまで輸送されることも確認できた。微粒子の飛び出し速度は大きく 1 分程度で 50%以上飛び出していることが目視観察で分かった。

粗粒子の c-Flotsam は、粒子混合は全く問題が無く、微粒子の f-Flotsam はフリーボードに射出された粒子をサイクロンなどで回収して流動層に戻せば円滑な粒子混合が実現可能であるといえた。

一方、空気反応塔へのチャー流出を防ぐために、チャー粒子の分離条件を明らかにする必要がある。そこで、良好な粒子混合と粒子分離を同時に実現するために、粒子分離条件を定量的に把握することを試みた。

ここでは、塔径 40 mm の流動層を使って浮上性粗粒子の浮上、沈降挙動を測定した。ガス流速を最小流動化状態程度に保ち、粒子放出器に取り付けた単一粒子の放出深さを変え、浮上するか沈降したままかを調べ、浮上限界深さとしてまとめた。

流動媒体としてジルコニア、ユニビーズ、ガラスビーズの 3 種類を用いた。チャー模擬した浮上性粒子として、直径 6 mm の ABS 樹脂球、直径 3.2 mm のポリプロピレン粒子、比重が 0.02 と極端に小さい直径 9 mm、5.5 mm、3 mm のポリスチレン粒子を使用した。これらの物性を表 3-2-②-5-1 に示す。

詳細に浮上・沈降を調べ、流動層内での浮上性粗粒子の浮遊条件のマップ化を行った。チャー微粒子の模擬粒子として中空ガラスビーズを用いたが、これは 3 次元流動層での観察が非常に難しいため、幅 50 mm の二次元流動層に微粒子を少量放出し、その動きをビデオで調べた。その結果、フリーバブリングと同様、気泡が存在しない場合は全く浮上できないことが分かった。

図 3-2-②-5-3 に示す様に、小気泡が来ると一部は気泡に伴われて上昇するが、気泡ウェイク部分から粒子濃厚領域に放出された微粒子はもはや浮上しなかった。

微粒子の場合、十分な浮力が無いことから、流動媒体を押しつけて浮上することが出来ないと考えられる。

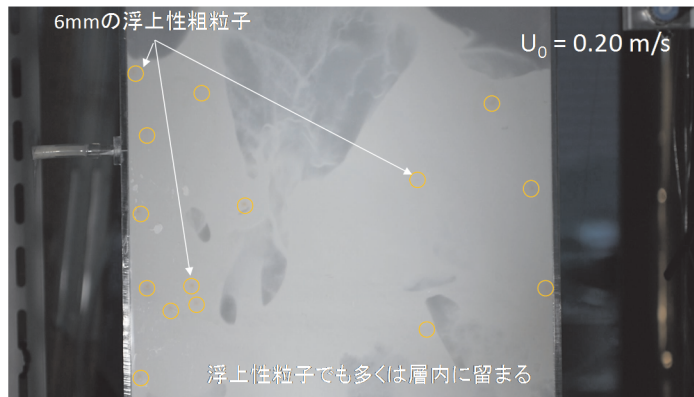


図 3-2-②-5-1 黄色い○で囲った直径 6 mm の浮上性粗粒子が層内に混合している様子が分かる、特に、気泡が少ない粒子が濃厚な領域に集中している。なお、空気流速が 0.1 m/s より遅いと、多くの粗粒子は層表面に留まるが、0.1-0.2 m/s では、ガス流速に応じて層内に留まる粒子と層表面に浮上している粒子に分かれる。

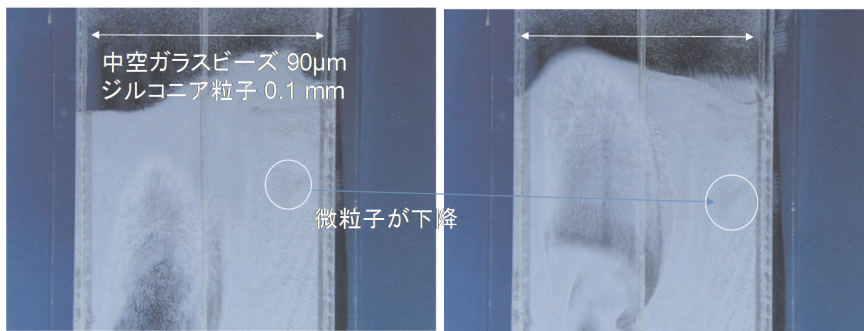
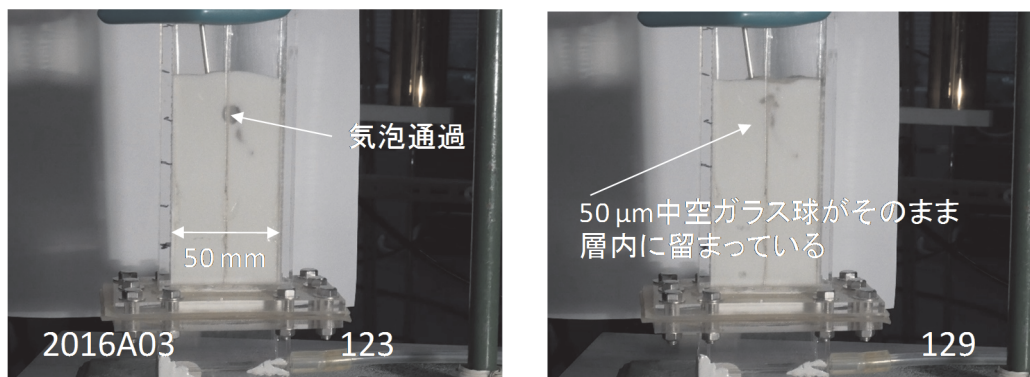


図 3-2-②-5-2 浮上性微粒子が層内に混合していく様子、気泡周辺の浮上性微粒子は層内を上昇、層表面でフリーボードに射出される。



(a) 気泡と共に上昇する微粒子 (b) 気泡に取り残された粒子は層内に留まる

図 3-2-②-5-3 浮上性微粒子が流動層内に保持される様子

表 3-2-②-5-1 使用粒子の特性

(a) 流動媒体の特性				
粒子	材質	$d_p$ [mm]	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	略号
Zr	Zirconia	0.1	6000	BM1
UB	Uni beads	0.1	4200	BM2
GBL	Glass beads L	0.39	2600	BM3
GBS	Glass beads S	0.18	2600	BM4
(b) 浮上性粒子の特性				
粒子	材質	$d_p$ [mm]	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	略号
BB	ABS	6	1000	cF1
PP	Polypropylene	3.2	1000	cF2
PSs	Polystyrene	9	20	cF4
PSm	Polystyrene	5.5	20	cF5
PSL	Polystyrene	3	20	cF6
HG5	Hollow glass beads	< 0.05	700	fF1
HG7	Hollow glass beads	0.05 _ 0.07	700	fF2
HG9	Hollow glass beads	0.07 _ 0.1	700	fF3
cF: Coarse Flotsam, fF: fine Flotsam				

## (2) 石炭とキャリア反応器の最適構造（混合、滞留）検討【阪大】

本検討項目では、VR、CRの比重差のある粒子の混合流動を流動層シミュレーションで評価して最適な流動条件を把握することを目的とする。本プロジェクトで扱うような微粒子の流動化挙動をDEM-CFDシミュレーションにより計算する場合、オリジナルの粒径の条件では計算負荷が大きくなり過ぎるため実用的な計算を行うことは不可能である。そこで、流動層流路断面18mm×1.4mmのミリスケール2次元流動層を検証用実験装置として、相似則モデルの粒径比が2までの条件に対して、実粒子条件の計算も用いて検証を行い、相似則モデルが有効であることが確認されている。

この相似則モデルの粒径比をさらに拡大し、検討を行うとともに、さらに空間スケールの大きな検証用実験の条件の検討を行い、検証用実験装置の製作に着手した。流動層流路断面を80mm×40mmの2次元流動層とし、相似則モデルの粒径比の大きな4.0 および 8.0 の条件を検討した。以後、それぞれの相似則モデルの粒子条件を  $4d_p$  モデル、 $8d_p$  モデルと呼ぶ。計算の初期条件としては、ガラス粒子層の上部にカーボン粒子を配置した。

実空塔速度0.04m/sと0.16m/sでの計算結果を図3-2-②-5-4に示す。実空塔速度0.04m/sの場合、粒子の混合は進まないが、実空塔速度0.16m/sの場合は気泡通過による攪拌により混合が進行することが確認された。これより、流速の増加によりチャーの偏析を防止でき、良好な混合を維持可能であると判断される。

両粒子条件とも各空塔速度条件に対する流動化の挙動はほぼ一致しており、これらの結果は、流動層流路断面18mm×1.4mmのミリスケール2次元流動層に対する結果ともほぼ一致している。

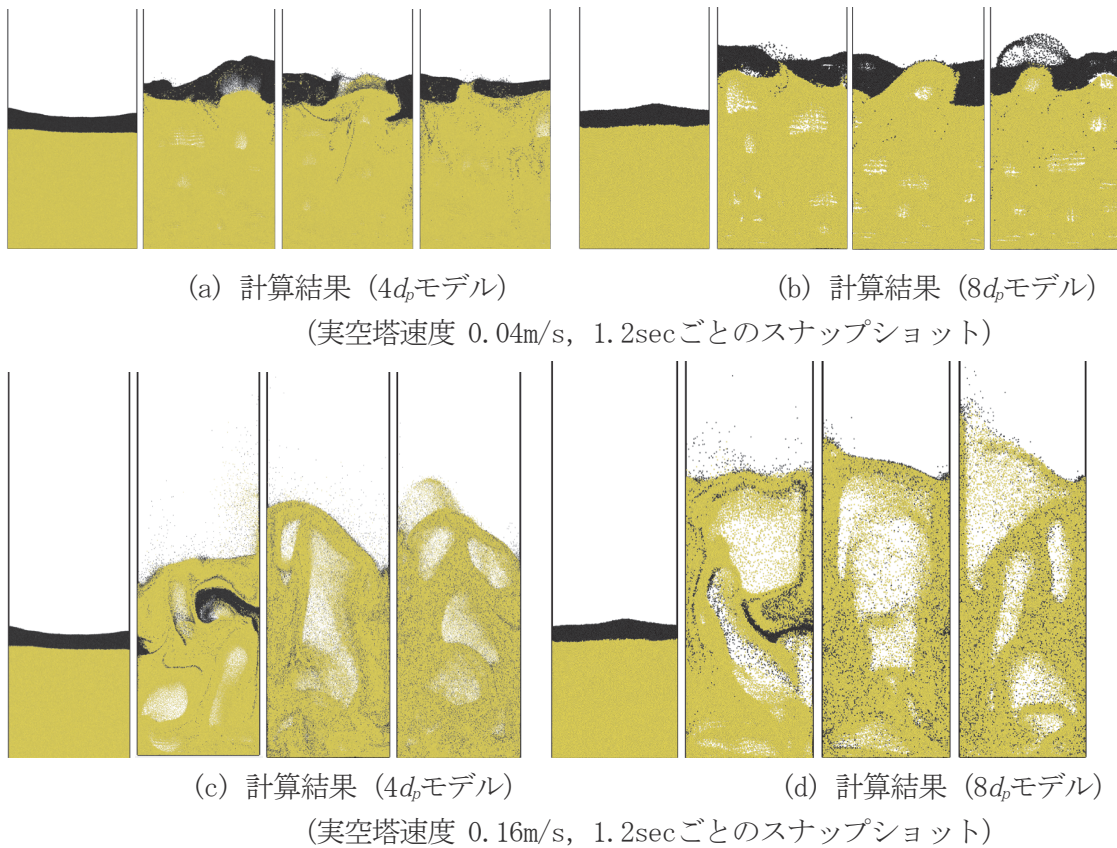


図3-2-②-5-4 混合の進行

時間進行に対する混合の進展の様子は同図に示す通りよく一致しているが、 $8d_p$ モデルの結果は  $4d_p$  モ

デルの結果に比べて層膨張が大きくなる傾向がある。これは、 $8d_p$ モデルの場合、流動層奥行き厚さのモデル粒径に対する比が7.5しかなく、壁の影響により、 $4d_p$ モデルに比べて $8d_p$ モデルでは流動層内の空隙率が大きくなる傾向があるためと考えられる。

以上の計算結果から、相似則モデルの粒径比が 8 程度までの検証が可能であると考え、本計算条件に対応した検証用実験装置の製作に着手した。ここでは、静電気発生の影響などを排除するため、ガラス製流路を製作し、これを検証用流動層として用いる。



## 2-②-6 長時間キャリア粒子の循環、反応性の検討（JCOAL、産総研）

本年度は三塔循環流動層キャリアの長時間循環反応装置の製造と据付を完了した後、三塔式循環流動層の試運転を実施し、三塔式循環流動層の運転、制御方法を把握した。また、天然ガスを燃料としたキャリア長時間循環反応試験を累計約 200h 実施し、長時間循環反応によるイルメナイト酸素キャリアの反応性、粉化性、凝集性等性質の変化を検討した。イルメナイトは豪州産 2 号（IL<sub>au2</sub>）より反応性は劣るが量が確保可能なインド産で試験を行った。さらに石炭燃料投入のため、必要な装置、データ取得（水蒸気発生装置、石炭フィーダー、等）等の準備を行った。

図 3-2-②-6-1 は長時間循環反応評価装置の写真である。AR、CR 及び VR の 3 つの反応器、ライザーと 2 つのループシール、2 つのサイクロン、ガスフィルター及び排ガス処理装置によって構成され、3 階建て(高さ 7m)の架台に設置した。

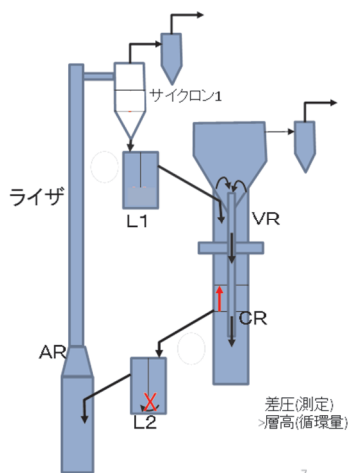
実機 AR の設計条件では断面積平均の粒子循環流束( $G_s$ )を  $G_s=52\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  に設定したが、天然イルメナイトの密度が大きく、粒子の上部方向への輸送が不足し  $G_s=52\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  を維持できない可能性がある。そこで、本装置による天然イルメナイト粒子の循環流動性の評価として  $G_s$  の確認を行った。測定方法と結果を図 3-2-②-6-2 に示す。計測の結果、ライザーでの粒子輸送能力は、実機 AR 設計条件  $G_s=52\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  以上の  $G_s=91\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  を確保できており、粒子を上部へ輸送・循環できることを確認した。



図 3-2-②-6-1 キャリア長時間循環反応評価装置（写真）

CRの差圧変化から層高変化(循環量)を計算する。

- ・粒子定常循環時にL2を30s程度止める
- ・CRの差圧変化から層高変化を計算し、循環量を求める。



- ・ 粒子循環速度 (600°C) : 0.164 kg/s
- ・ ライザの内径 : 48 mm
- ・ ライザ空塔速度 : 7.4 m/s

ライザ粒子輸送能力(600°C):  
Gs = 91 kg/m<sup>2</sup>/s

図 3-2-②-6-2 循環量測定方法及び結果

計 21 回の試運転から、装置の性能、容量、操作条件、安定性 (64 時間連続運転)、安全対策等を確認したうえ、天然キャリア(イルメナイト)を用いて、連続 64h 試験を含め累計約 200h のキャリア長時間循環反応試験を実施した。その結果の一部は図 3-2-②-6-3 と図 3-2-②-6-4 に示す。CH<sub>4</sub> 転換率が比較的安定しており、イルメナイトの長時間循環流動性は良好であることが推定できた。また、図 3-2-②-6-4 に示す通り、粒子間の磨耗率は低いことが確認できた。さらに、図 3-2-②-6-5 に示す通り、イルメナイトの反応性は試験時間とともに増加し、CH<sub>4</sub> 転換率も初期の 40%から後期の 74%に増加したことが確認された。

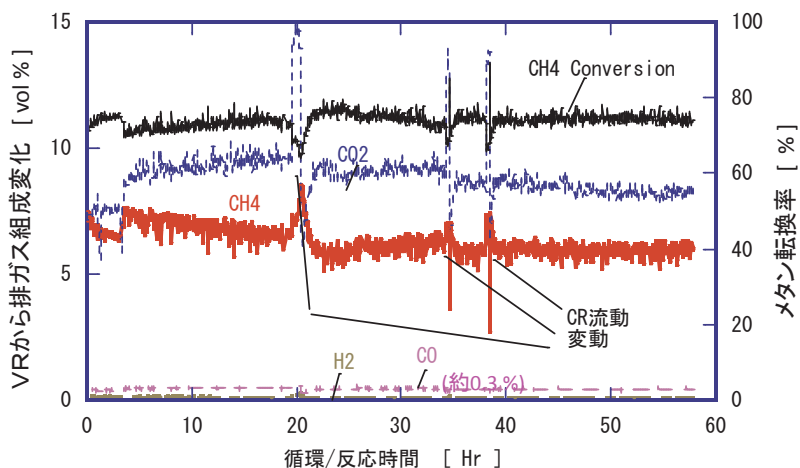


図 3-2-②-6-3 キャリア (インド) 三日間長時間試験、VR 出口ガス組成とメタン転換率

循環 / 反応試験のフィルタから粉塵の回収及び摩耗率の計算

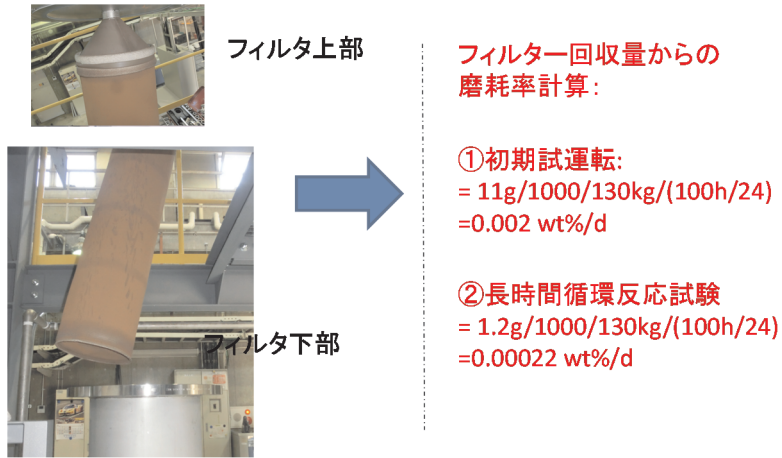


図 3-2-②-6-4 フィルタから粉塵の回収及びキャリア摩耗率の計算

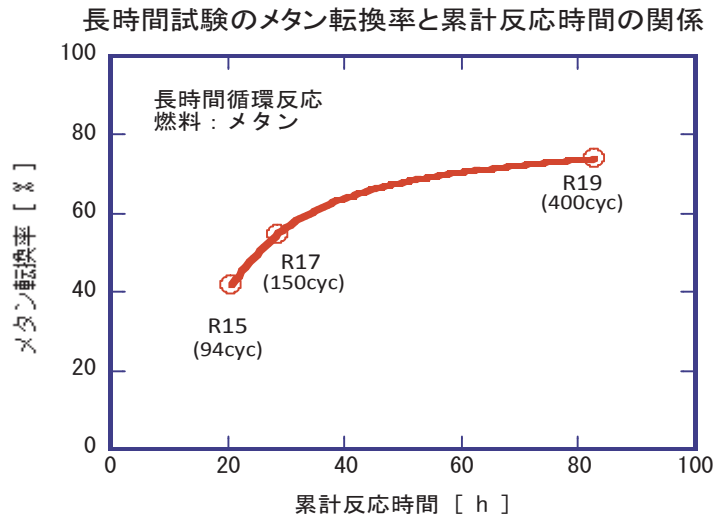


図 3-2-②-6-5 メタン転換率と累計反応時間の相関

2-②-7 キャリアのタール改質及び硫黄ガスとの反応性の検討（【群馬大学】、JCOAL）

2種類のケミカルルーピングキャリア（天然および人工キャリア）を用い、石炭タールの水蒸気改質実験を行うことで、各キャリアのタール改質活性を検討した。石炭の水蒸気改質実験には、固定層流通式二段反応器を用いた。反応管の下段部には未処理の各キャリアを3.5g充填し、上段部には1gの石炭試料を石英ウールで包んでセットした。未処理の状態においては、SD<sub>50</sub>はIL<sub>au1</sub>と比較し、高いタール改質活性を示した。また、酸化前処理によりIL<sub>au1</sub>のタール改質活性が向上した。また、S/Cを1.5とすることで、S/C=0.5と比較して、煤が著しく減少することを明らかにした。

図3-2-②-7-1に酸化前処理が石炭揮発分の炭素収支に及ぼす影響を、図3-2-②-7-2に水蒸気導入量が石炭揮発分の炭素収支に及ぼす影響を示す。

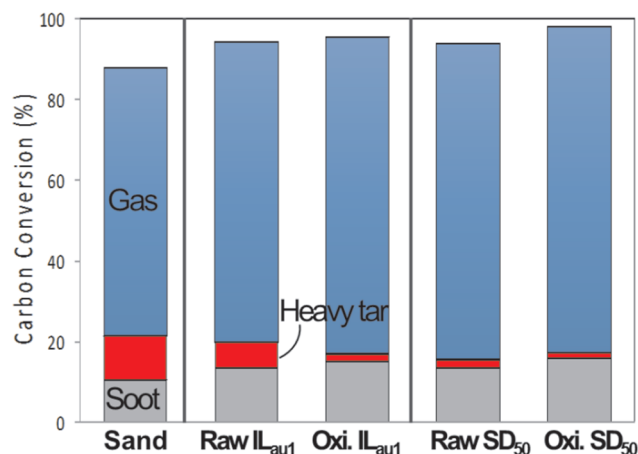


図3-2-②-7-1 酸化前処理が石炭揮発分の炭素収支に及ぼす影響

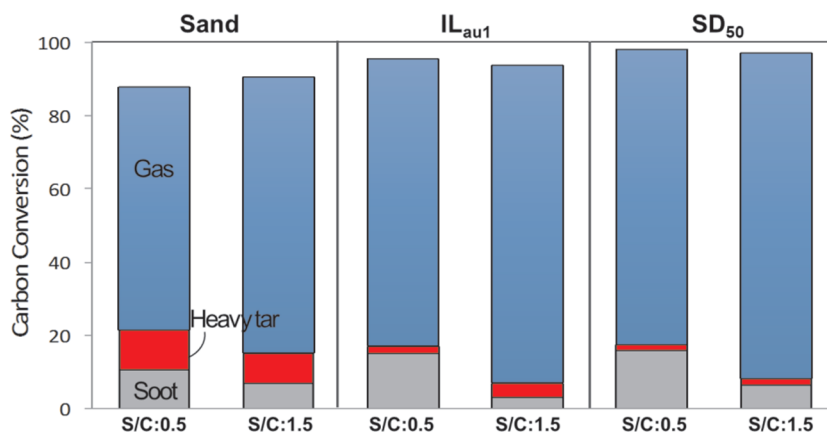


図3-2-②-7-2 水蒸気導入量が石炭揮発分の炭素収支に及ぼす影響

## 2-③ プロセス構造、条件の最適化評価

### 2-③-1 プロセス最適条件解析 (JCOAL)

プロセス最適条件を解析するため、化学プロセスシミュレータ Aspen で CLC プロセス解析モデルを作成し、物質収支、熱収支、運転条件の評価を可能にした。図 3-2-③-1-1 に作成した解析モデルを示す。反応器モデルには Kunii - Levenspiel 2 相モデル (図 3-2-③-1-2) を採用し、バブリング流動層反応器をモデル化するに必要な各パラメータ、気体交換係数  $K_{be}$ 、気泡径  $D_b$ 、気泡上昇速度  $u_b$  等を求め、キャリア、ガスなどの滞留時間、反応時間を評価可能にした。今後キャリア性能評価結果を反映してモデルで解析を行い、プロセス最適条件の検討を行う。

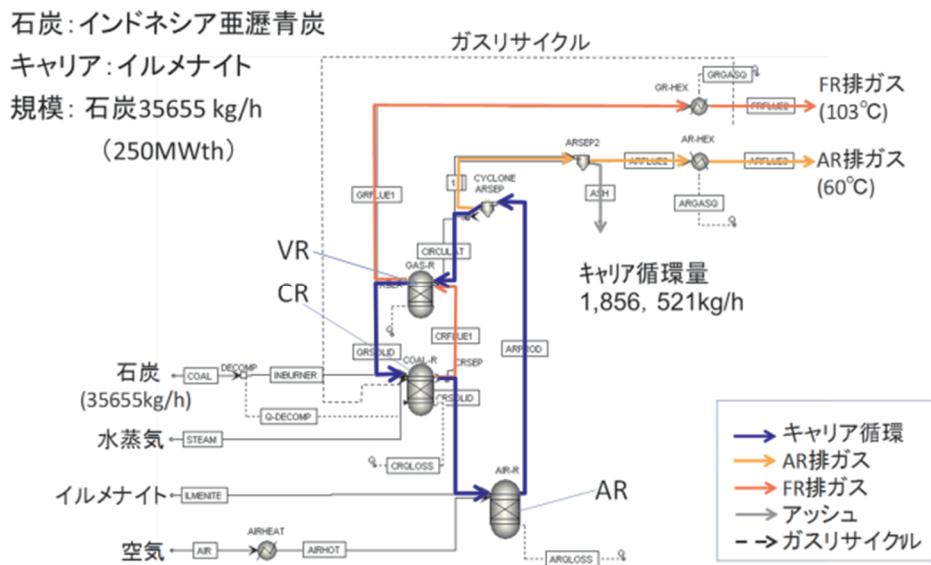
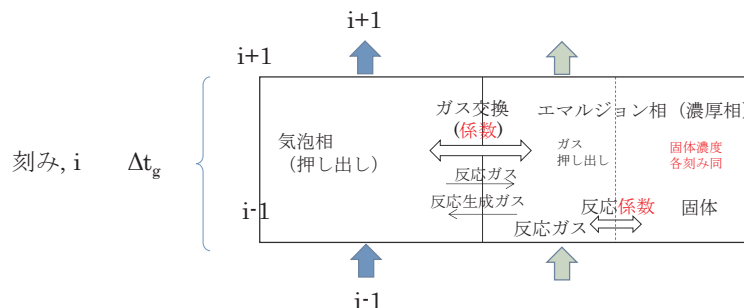


図 3-2-③-1-1 CLC プロセス解析モデル

Kunii - Levenspiel  
2相モデル(1990)

$$\text{気泡相: } -\delta u_b \frac{dC_{Ab}}{dz} = \delta \gamma_b K_y C_{Ab} + \delta K_{be} (C_{Ab} - C_{Ae})$$

$$\text{濃厚相: } -(1-\delta)u_{mf} \frac{dC_{Ae}}{dz} = (1-\delta)(1-\varepsilon_{mf})K_y C_{Ae} - \delta K_{be} (C_{Ab} - C_{Ae})$$



- パラメータ求め:
- ① 固体反応濃度 (kg, 層内キャリア重量) }  $K_y$
  - ② 気一相反応速度係数 (反応ごとに、実験値) }
  - ③ ガス交換係数 (気泡相一濃厚相間、実験値 (文献値)) }  $K_{be}$

図 3-2-③-1-2 流動層二相モデル

## 2-③-2 プラントの合理化の検討 (MHPS)

2-②-1、2-②-2 での検討の結果、ガスの反応性は天然キャリア、人工キャリアともに同等であったが、石炭チャーの反応性の高い天然キャリア豪州産 2 号 (IL<sub>au2</sub>) を選定した。選定した IL<sub>au2</sub> の性能を基にプラント仕様を見直し、建設費、運転費を評価し CO<sub>2</sub> 回収費を算出した。課題毎に概念設計時に対し下表のとおり見直しを行った (表 3-2-③-2-1)。

表 3-2-③-2-1 各評価結果のプラント仕様への反映

②-1 キャリアとガスとの反応速度	VR のガス滞留時間は、ガス滞留時間を 1 秒から 2 秒への変更が必要であり、キャリア層高を 2 倍に変更した。VR の層高を変更すると圧力損失は増加するが、必要な送風機能力は既存品の適用範囲である。またループ圧力分布を検討し循環流動に支障ないことを確認している。
②-2 キャリアと石炭との反応速度	CR のチャー反応速度は、これまでの設計条件とほぼ同等の結果であった。得られた反応速度データを基にしたチャー反応率は 94% と設計条件 97% より若干低い。チャー反応率を向上させるため、未反応チャーを反応塔内で滞留させる内部構造改良で対応可能である。
②-3 キャリアの繰返反応性、物性変化	キャリアの繰返反応性は初期性能から 10 倍増と仮定したが、約 5 倍程度であった。このため VR のキャリア滞留時間を 3 分から 6 分に変更し VR 寸法を見直した。
②-4 キャリアの耐久性・摩耗性	キャリア摩耗量は珪砂の 2 倍であることを確認。CFB での珪砂補充率経験値より概念設計時の補充率 0.40wt%/d は安全側であると判断されたので変更はしない。
②-5 石炭とキャリアの混合性	概念設計時の粒径 (石炭:100 μm、イルメナイト:123 μm) で円滑な混合が確認されたため、本粒子条件で反応塔を計画。また比重差のある石炭とキャリアの混合は流速を増加させることでチャーの偏析を防止し、良好な混合状態を維持できることが分かったため、CR の流動条件を見直した。また、CR 内部構造は未反応チャーが内部循環する構造に改良する。
②-6 循環流動性	今回のベンチ試験で設計条件 (Gs : 52kg/m <sup>2</sup> s) 以上の粒子循環量が確認されたので設計変更は行わない。
②-6 長時間反応性評価	現在ベンチ試験で検討中であり、設計変更を行わない。
②-6 灰とキャリアの分離	設計条件のキャリア補充率 0.4wt%/日と仮定したが、得られた補充率は 0.36wt%/日であり設計条件を満足しており変更は行わない。
②-7 タール改質、硫黄ガス影響	灰とキャリアの分離はまだ未実施 (今年度後半実施予定) なので設計変更行わない。

この結果、図 3-2-③-2-1 に示す通り CLC 重量は CFB ボイラ部位の約 1.3 倍に相当した。図 3-2-③-2-2(b) に示す通り CLC 全プラント建設費は、CFB 建設費が 20 万 kWe\* と仮定すると、ボイラの

単価はプラントの15%程度なので、図3-2-③-2-2(a)に示す通り20.9万円/kWe程度と想定され、天然キャリアイルメナイトによるCO<sub>2</sub>回収費は図3-2-③-2-2(c)の様に1,100円/t-CO<sub>2</sub>と想定された。また図3-2-③-2-2(d)に示す脱硫や脱硝および脱水などの後処理装置やCO<sub>2</sub>精製装置の設置有無により建設費は変動するので平成29年度中に検討する。

※：NEDO 平成24年度成果報告書「国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業／基礎事業／石炭高効率利用システム案件等形成調査事業」インドネシアにおける低品位炭高効率利用石炭火力発電所プロジェクトの案件発掘調査 平成25年3月

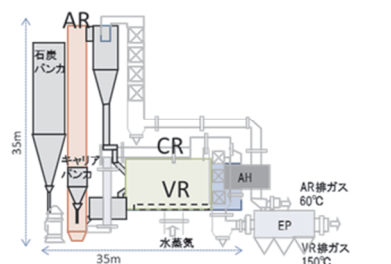
## CLCのコスト試算 - CFB ボイラ部位別の重量

表1 H27年度CLC100MWe級の  
各反応塔サイズによる重量

部位	寸法(m)	重量(t)
AR	W3.1 × D9.4 × H33	1060
VR	W6.5 × D19.5 × H10.2	575
CR	W4.8 × D14.4 × H9.3	720

表2 CFBからCLCによる重量増加割合

部位	重量(t)
外部熱交換器 (FBHE)	170 t
VR+CR	1295 t
FBHE 対 (VE+CR)	7.6倍



**AR, VR, CRの重量計算条件**  
 ・全壁面にキャスト、外壁金属にSUS304を使用した重量を算出。  
 ・H24年度報告書より、金属温度：200℃、キャスト厚さ：95mm、外壁金属厚さ：10mmに設定

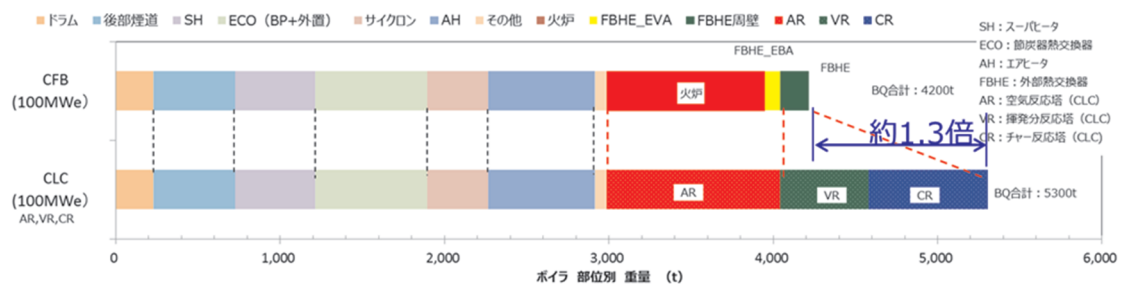


図3-2-③-2-1 ボイラ部位別重量におけるCFBとCLCの比較

CLC建設費はCFB建設費の1.1倍相当の**20.9万円/KWe**と想定

天然キャリアイルメナイトによるCO2回収費：**1,100円/t-CO2**と想定。

但し、後処理装置が必要なときはCLC建設費が増加し、CO2回収費が増加する可能性があり、今後、検討予定

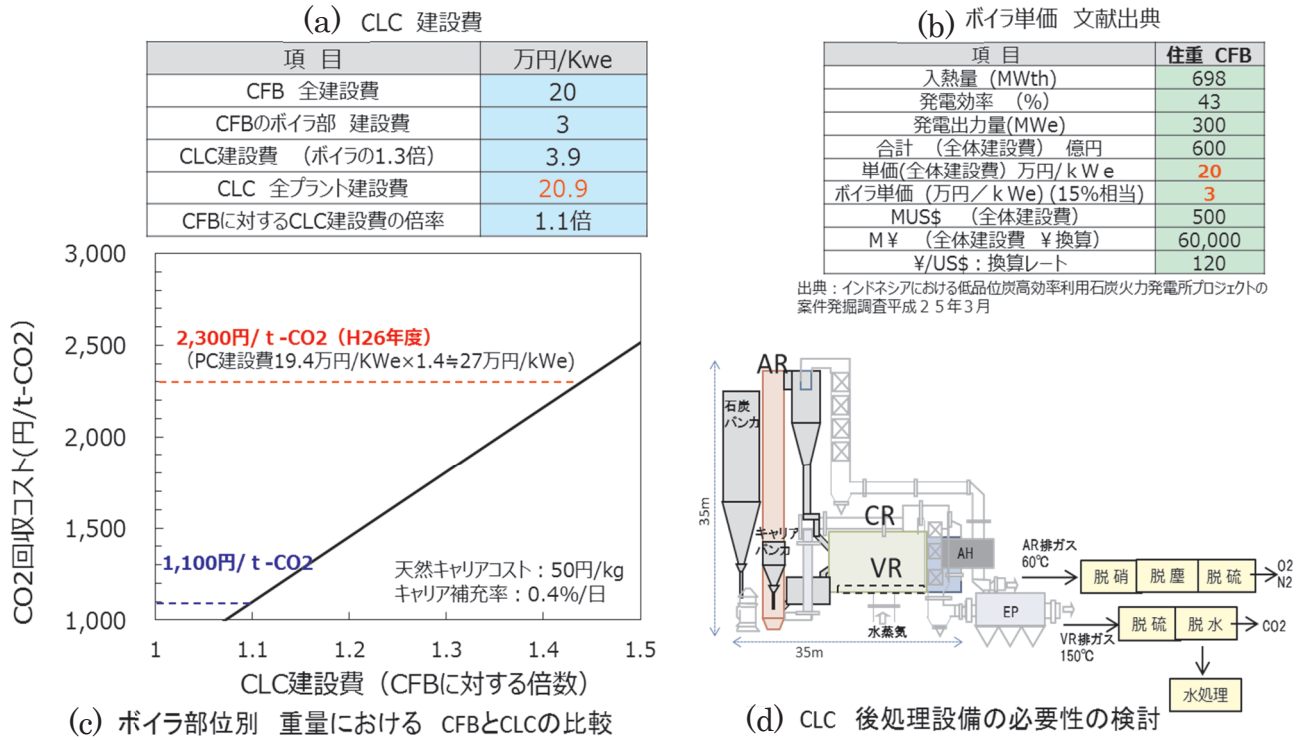


図 3-2-③-2-2 CLC コスト試算結果



## 2-④ 技術調査、市場・経済性検討、検討委員会開催

### 2-④-1 技術動向調査 (JCOAL、MHPS、【東京大学】、産総研、IAE)

ケミカルルーピングの技術開発は、当初、気体燃料を対象に行われてきた。石田東工大名誉教授は、2000年にはパイロット規模の空気反応塔の外側を囲む燃料反応塔から成る二重管式内部循環装置を開発し、燃焼試験を実施した。この数年間に欧米では石炭を対象に 10kWth から 3MWth に及ぶパイロット規模の技術開発が進められている。

欧米の主な CLC プロジェクトの特徴と開発期間を図 3-2-④-1-1 に示す。欧米では今後も CLC 技術開発が続けられる予定である。米国では Alstom 社が 3MWth プラントを継続中であり、また Ohio 大が開発した技術を B&W 社が引継ぎ 250kWth 試験及び次ステップとして 10MWth パイロット試験の計画がある。欧州では Darmstadt 大の 1MWth 試験は終了したが、Shalmars 大の NOCO2 プロは継続している。

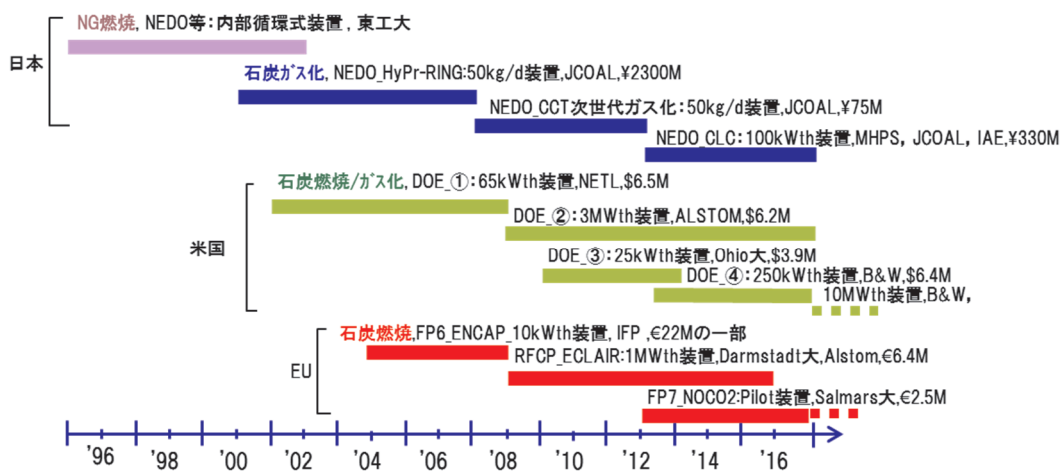


図 3-2-④-1-1 欧米の主な CLC プロジェクトの特徴と開発期間

2016年9月25日～28日に、中国南京で開催された、第四回 CLC 国際会議に参加し、世界の CLC 開発状況等を調査した。本会議は2年に1回開催されるケミカルルーピングをテーマとした最大の国際会議である。約100件の発表と約200人の参加を得て盛況であった。発表内容は、大学での酸素キャリアや条件を変えて実験した発表が多く、大きく目を引くものは Chalmers やスペインなどの従来から研究を進めていたグループに限られた。

また、IEA-GHGT13 国際会議にも参加し、世界の CLC 開発状況等を把握した。特に海外技術開発状況としてベンチ、パイロット装置試験の実施状況は以下の通り。

EU の ACCLAIR プロジェクトでは Darmstadt 工科大と Alstom(仏)が 1MWth 装置による鉄系酸素キャリアの試験を行っているが 2015 年で一旦完了した。試験成果としては熱自立運転に成功したが、CO<sub>2</sub>回収率が 52%と低かった。このため、カーボンストリッパーを改良し、引き続き 1MWth 試験を実施予定である。

米国の DOE プロジェクトでは Alstom (米) が Ca 酸素キャリアによる 3MWth 試験を 2017 まで実施予定である。試験結果はまだ未公表である。今後も継続して調査を実施する。併せて、文献調査でもキャリア反応性や CLC 条件での石炭反応性などの情報を継続し収集する。

2-④-2 市場・経済性検討 (IAE、JCOAL)

(1) 国内のCO2市場

基盤研究2年間の成果概要をまとめ、将来のCLCユーザと成りうる、化学、石油、ガス、製紙、炭酸ガス製造会社にヒアリングを行い意見交換した。その中から将来事業として成立できる「業界」として、液化CO2(含むドライアイス)のCO2供給源として、日本の石油の将来需給から、製油所由来のCO2供給量を求め、事業の可能性を検討した。図3-2-④-2-1に2015年度の炭酸ガス出荷量と、液化炭酸ガス供給会社を示す。

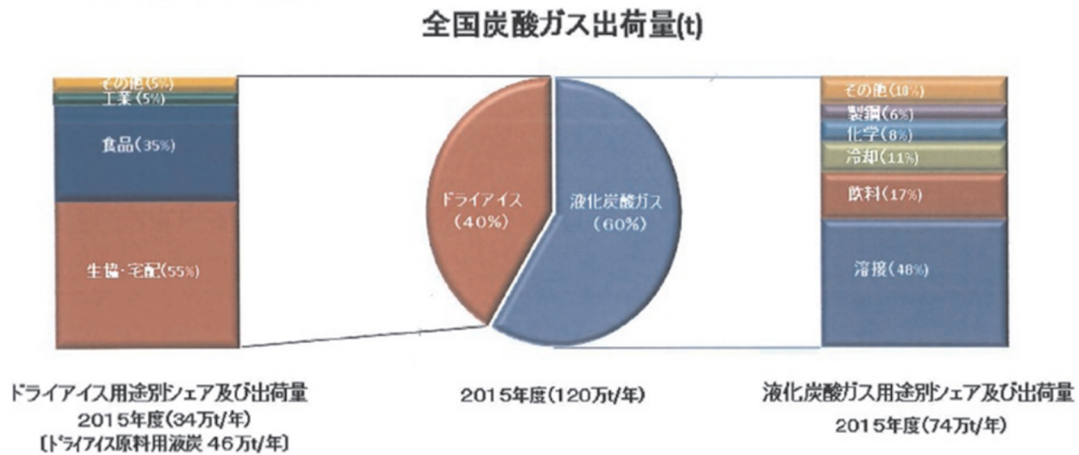


図3-2-④-2-1に2015年度の炭酸ガス出荷量と液化炭酸ガス供給会社

わが国の炭酸ガス市場(出荷ベース)は、2015年度では年間120万トンで、60%が液化炭酸ガ

ス(液炭)として、残りの 40%がドライアイスとして流通している。液炭の約半分が溶接用であり、飲料(ビールや炭酸飲料)17%、冷却用が 11%である。ドライアイスの 55%が生協や宅配便に、35%が食品の冷却用に使用されており、90%が冷却用である。

わが国の液炭またはドライアイスの製造会社は 27 社あり、原料となる CO<sub>2</sub> は製油所や化学工場(アンモニア等)から主に供給されて来たが、エア・ウオータ炭酸・室蘭では、供給源であった室蘭製油所の閉鎖により、室蘭製鉄所の熱風炉排ガスからの CO<sub>2</sub> 分離回収に切替えるなど、製油所の統廃合や化学工場の閉鎖などで、特に西日本では CO<sub>2</sub> 原料が不足しているのが現状である。

なお、液化炭酸ガスの品質は、最も厳しい飲料向けの品質(硫黄分他 34 項目について ppm、ppb、ND の規格有)に合わせて製造されていることから、これら多くの不純物を含有する石炭は液化炭酸ガス製造の原料として用いることは非常にハードルが高いことがわかった。

一方で、CLC の特徴として、ガス分離装置が不要で低コスト高純度の炭酸ガス、窒素が回収できる点がある。そこでガスを燃料とすれば燃料自体がクリーンであるため、炭酸ガス、窒素ガスを利用しているユーザに供給できる可能性があることも分かった。

## (2) 海外の CO<sub>2</sub>-EOR 市場

図 3-2-④-2-2 に東南アジア(インドネシア、ベトナム)の油田の位置関係を示す。

インドネシアは、2000 年代前半から石油の純輸入国となったが、現在も、国際石油価格が高値時の市場参入と、石油収益を維持する狙いから、原油とコンデンセートの輸出を継続している。輸出されている原油は主に、インドネシア最古で最大の 2 つの油田である、ドゥリ油田とミナス油田から産出されている。両油田は、スマトラ島東部沿岸の南スマトラ盆地に位置しており、ドゥリ油田は 1952 年から生産開始し現在およそ 14 万 bbl/日である。一方、ミナス油田は 1955 年から生産開始し、現在は約 19 万 bbl/日を生産している。両油田の操業社はシェブロンであり、石油増進回収法 (EOR) を採用しているものの生産量は減少傾向にある。ミナス原油の性状を見ると、流動点が非常に高い(常温で固体)のが特徴であり、一般的にインドネシアの油田は EOR に不向きと云われている。

ベトナムは石油の確認埋蔵量 44 億バレルと中国、インドに次ぐアジア地域で三番目に多い石油資源を保有している。ランドン油田では、JX 開発が石油天然ガス・金属試験機構 (JOGMEC) と共同で CO<sub>2</sub> 注入実証試験を 2011 年に海上油田で実施した。このパイロットテストは、東南アジア初の CO<sub>2</sub>-EOR 適用事例で、海上油田のため CO<sub>2</sub> はコンテナ船によってベトナム本土で生産された CO<sub>2</sub> を海上輸送で供給され、10%程度の増産効果があったと報告されているが、施設の追加コストや CO<sub>2</sub> 調達コストから商業化はなされていない。



図 3-2-④-2-2 東南アジア(インドネシア、ベトナム)の油田の位置関係

図 3-2-④-2-3 に米国の CO<sub>2</sub>-EOR 市場の調査結果を示す。

米国の炭酸ガス市場は約 8,000 万トン/年で、約 60%がパイプラインによる EOR 用で、使用量は 5,000 万トンになる。EOR 以外の外販分は、需要全体の約 40%で、約 3,000 万トン/年で、日本の出荷量の約 30 倍に当たる。CO<sub>2</sub> の取引価格(推計)は、EOR 用が 20~30 ドル/ト

ン、外販が 100 ドル/トンと推測される。EOR 用の CO2 はパイプラインで大量供給され、そのうち約 4000 万トンが CO2 貯留層から産出される CO2 から供給されている。\*) 純度も日本の液化炭酸ガスのような高純度は要求されていない (CO2 純度は 94%程度で良い) ため、取引価格が安くなっていると推測される。

\*) 出展 GCCSI CCS の採用を促進する回収 CO2 の工業利用 2011 年 3 月

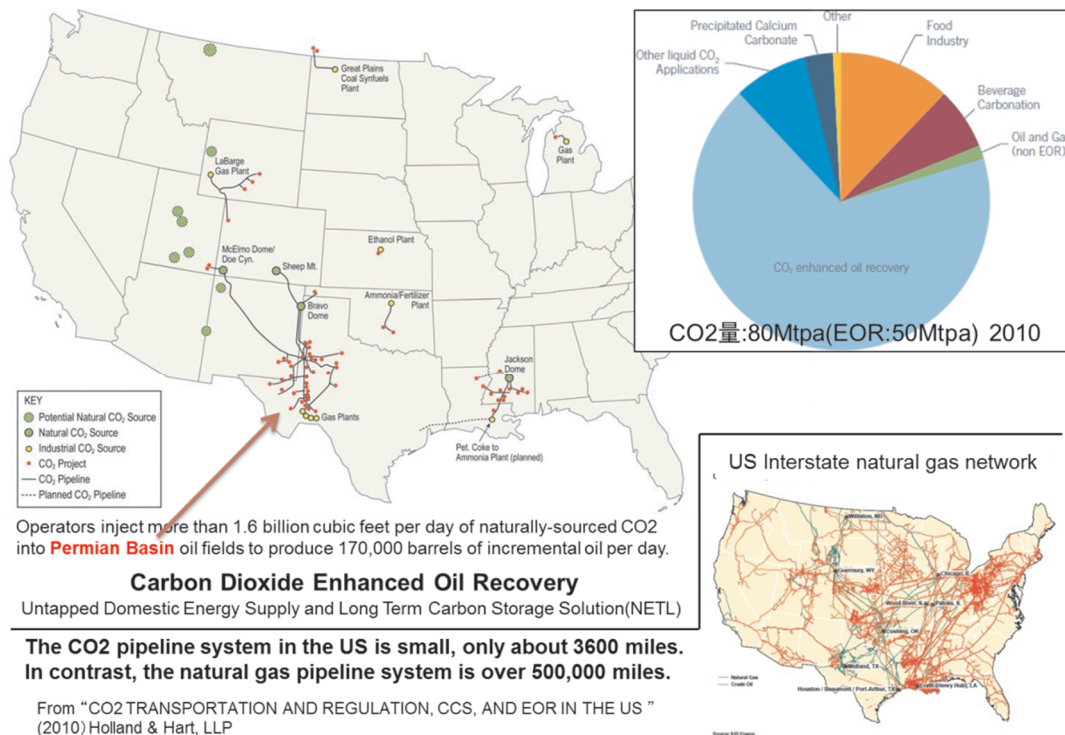


図 3-2-④-2-3 米国の CO2 市場

2-④-3 検討委員会（IAE）

実施者の自主的な取り組みとして、外部の大学等学識経験者、重工業メーカ、エンジニアリング、シンクタン等の有識者を招聘した技術検討会を行い、研究開発の成果や課題解決方法等について意見を求め、その後の研究の方針の参考にした。NEDO もオブザーバーとして参画し動向を注視すると共に、研究計画の妥当性の判断の一助とした。

表 3-2-④-3-1 に技術検討会の委員メンバーを示す。

表 3-2-④-3-1 に技術検討会委員メンバー

氏名	機関名	所属・タイトル	備考
成瀬 一郎	名古屋大学	大学院工学研究科 教授	委員長
谷口 泉	東京工業大学	大学院理工学研究科 准教授	
伏見 千尋	東京農工大学	工学研究院 准教授	
大川原 正明	日本粉体工業技術協会	粒子加工技術分科会 幹事	
伊藤 一芳	住友重機械工業	エネルギープラント技術部 副部長	
片桐 務	日揮	技術開発センター チーフエンジニア	
木戸口 晃	三井造船	技術開発本部 技術理事	
村岡 利紀	川崎重工業	環境システム研究部 課長	
佐川 篤男	エネルギー経済研究所	石炭・ガスサブユニット 研究理事	
本郷 尚	三井物産戦略研究所	シニア研究フェロー	

## 4. 成果の実用化に向けた取組み及び見通しについて

### 1. 成果の実用化に向けた取組み及び見通しについて

表 4-1-1 に事業開始時に想定していた、中間評価後の PDU 装置によるプロセス原理実証以降のスケジュールを示す。基盤研究プロジェクト終了後、実機を想定した各機器の開発を行い、その後数万 kW クラスの実証炉でボイラとしての性能評価を行い、各機器開発に 2 年程度、実証試験炉に 3 年程度の開発期間を想定しており、約 5 年後の実用化を想定していた。

今後の課題としては、国内 CCS の制度化、CO<sub>2</sub> パイプラインなどのインフラ整備などの実用化環境の整うまでに、いかに製品化を継続させるかにあるが、今回の調査で当面の石炭焚き CLC の市場が無いこと、NEDO で行われた他の調査事業から北米での石炭火力から回収した CO<sub>2</sub> による EOR 実現の可能性が政策的に困難になってきたことから、国内 CCS の制度化時期、海外での EOR 市場を見極めながら原理実証実施時期を決める必要がある。

現状、国内の CCS 制度化は未定であることから、EOR と石炭焚きボイラが両立する地域、市場の調査を進めることで、海外 EOR 市場への展開の可能性を検討する。

表 4-1-1 実用化・事業化のスケジュール

西暦	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX	20XX
原理実証 (PDU)	▲市場動向を踏まえて実施												
機器のコストダウン			コストダウン目途▲										
実証炉建設 実証試験					▲90億円			▲20億円					
事業化検討				事業化 FS						▲実用化判断			
顧客への 拡販活動				▲続行判断						▲初号機 (建設期間4年)			
初号機受注													
収益発生												収益発生▲	

プロジェクト基本計画

P 1 6 0 0 2
P 1 0 0 1 6
P 9 2 0 0 3

「次世代火力発電等技術開発」基本計画

環境部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

平成27年7月に決定された長期エネルギー需給見通しにおいては、3E+S（安全性、安定供給、経済効率性、環境適合）を同時達成しつつ、バランスの取れた電源構成を実現していくこととしており、火力分野においては、石炭火力発電及びLNG火力発電の高効率化を図り、環境負荷の低減と両立しながら、有効活用を推進することとしている。火力発電の高効率化は、再生可能エネルギーの最大限の導入促進、安全性の確認された原子力発電の活用と合わせ、温室効果ガス削減目標積み上げの基礎となった対策・施策として位置づけられている。これを踏まえ、平成28年6月に官民協議会で策定した「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」においては、火力発電の高効率化、CO<sub>2</sub>削減を実現するため、次世代の火力発電技術の早期確立を目指すこととしている。

②我が国の状況

我が国の火力発電の熱効率の世界最高水準を保っている。世界で初めて超々臨界圧火力発電（USC）を商用化し、さらには高効率な空気吹石炭ガス化複合発電（IGCC）が既に実用化段階であり、酸素吹IGCCにおいても実証フェーズにある。また、効率向上に大きく寄与するガスタービンにおいて、1600℃級という高温化を世界に先駆けて実現する等、熾烈な国際競争の中においても、我が国の高効率火力発電システムは、トップレベルを維持しており、世界をリードしている。しかしながら、燃料資源を他国に大きく依存する我が国にとっては、限られた資源の有効利用を図ることは至上命題であり、今後とも、更なる効率化を図っていく必要がある。また、中長期的な視点では、大幅なCO<sub>2</sub>削減を実現しうるCO<sub>2</sub>の回収・貯留・利用（CCUS）の技術の開発・推進も重要なテーマであり、国内でのCCS（二酸化炭素の回収・貯留）大規模実証事業や貯留ポテンシャル調査等が進められている。

③世界の取組状況

地球温暖化問題の対策として、CO<sub>2</sub>排出量の削減が強く求められている中で、米国や欧州においても国家レベルで巨額の研究開発費を投じ、基礎研究から技術開発、実証研究等の様々な取組が行われており、日本と同様にIGCCや先進的超々臨界圧火力発電（A-USC）、高効率ガスタービン等の開発が進められている。また、大幅なCO<sub>2</sub>削減を達成するため、C



O<sub>2</sub>分離・回収を行ったIGCCやCCS-EOR（石油増進回収）の実証といったプロジェクトも進められている。

#### ④本事業のねらい

長期エネルギー需給見通しの実現に向けて、火力発電の高効率化に関しては、石炭火力の発電効率を大幅に引き上げる石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）の実証事業をはじめ、石炭火力、LNG火力の双方につき、新たな火力発電技術の開発等を実施する。また、火力発電から発生するCO<sub>2</sub>排出量をゼロに近づける切り札となる技術として、火力発電所から発生する大量のCO<sub>2</sub>を効率的に分離・回収・有効利用するための技術開発等を実施する。これまでの火力発電に係る技術開発は、個別の技術ごとに進められていたが、石炭火力、LNG火力は共通する要素技術が多く、火力発電全体の技術開発を加速するためには、個別技術開発を統合し、包括的かつ一体的に推進することが有効である。そこで、次世代火力発電技術に係る事業を本事業において統合し、関連事業を一元管理し、一体的に進めることで、開発成果を共有しつつ、技術開発に係るリソースを最適化する。これにより、次世代火力発電技術の開発を加速し、早期の技術確立及び実用化を狙う。

### （2）研究開発の目標

#### ①アウトプット目標

本事業を通じて、発電効率の大幅向上やCO<sub>2</sub>分離・回収後においても高効率を維持すること及びCO<sub>2</sub>有効利用等、CO<sub>2</sub>排出の削減に寄与する革新的な次世代火力発電技術の確立を目指す。

研究開発項目ごとの目標については、別紙にて定める。

#### ②アウトカム目標

本事業の開発成果により、2030年頃にLNG火力においては、将来のガスタービン燃料電池複合発電（GTFC）商用機として送電端効率63%（高位発熱量基準）を達成し、さらには、IGFC商用機へと繋げることで、石炭火力として送電端効率55%（高位発熱量基準）を達成する。また、CCUSの実現に向け、CO<sub>2</sub>分離・回収コスト1,000円台/t-CO<sub>2</sub>という大幅な低減を達成する。また、CO<sub>2</sub>有効利用の一例として、天然ガスパイプラインの許容圧力変動による、負荷変動対応能力は、6,000万kWと推定される。そのうち、1割をCO<sub>2</sub>由来のメタンで代替すると、1,300億円を獲得する。

世界の火力発電市場は、今後、2040年にかけて石炭火力では約520兆円、LNG火力では約270兆円で、累計790兆円の規模が見込まれる。年平均では約30兆円であり、このうちのシェア1割、約3兆円の次世代火力技術の市場を獲得する。

#### ③アウトカム目標達成に向けての取組

市場ニーズを見極めつつ、各技術開発プロセスの進捗管理を行い、開発優先度の調整、開発スケジュールの最適化、技術開発の相互連携を図り、中長期の火力発電技術開発の全体プロセスの最適化・効率化を図る。そして、技術開発のプロセスにおけるコスト低減の取組と信頼性の確保により、商用機導入を早期に拡大する。

### (3) 研究開発の内容

火力発電の効率化及びCO<sub>2</sub>分離・回収・有効利用等に関する調査、開発及び実証を実施する。実施に当たっては、各事業の性質に合わせ、委託事業又は助成事業（NEDO負担1/3、2/3、1/2）により実施する。

なお、個別研究開発項目の研究開発内容の詳細については、別紙にて記載する。

#### 研究開発項目① 石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業 [助成事業]

- 1) 酸素吹IGCC実証（1/3助成）
- 2) CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCC実証（2/3助成）
- 3) CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証

#### 研究開発項目② 高効率ガスタービン技術実証事業 [助成事業]

- 1) 1700℃級ガスタービン（2/3助成）
- 2) 高湿分空気利用ガスタービン（AHAT）（2/3助成）

#### 研究開発項目③ 先進超々臨界圧火力発電技術開発 [助成事業（2/3助成）]

#### 研究開発項目④ 次世代火力発電基盤技術開発 [委託事業]

- 1) 次世代ガス化システム技術開発
- 2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究
- 3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発
- 4) 燃料電池石炭ガス適用性研究
- 5) CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭利用技術開発
- 6) 石炭火力の競争力強化技術開発
- 7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発

#### 研究開発項目⑤ CO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCC技術開発 [委託事業]

#### 研究開発項目⑥ 次世代火力発電技術推進事業 [委託事業]

#### 研究開発項目⑦ 次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発 [助成事業（1/2助成）]

### 3. 研究開発の実施方式

#### (1) 研究開発の実施体制

本事業は、NEDOが単独又は複数の企業、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、原則公募によって実施者を選定し実施する。ただし、移管事業に関してはこの限りではない。

NEDOは、プロジェクトの進行全体の企画・管理やプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させるため、必要に応じてプロジェクトマネージャー（以下「PM」という。）を任命する。また、各実施者の研究開発ポテンシャルを最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、必要に応じて研究開発責任者（プロジェクトリーダー、以下「PL」という。）を指名する。

なお、研究開発項目ごとのPM、PLは以下のとおり。また、研究開発項目④2）、3）、4）は、推進にあたって、燃料電池に関する情報共有と開発戦略の整合性を図るため、プロジェクトチーム（PT）にNEDO新エネルギー部を加える。

研究開発項目① 石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業

PM：NEDO 高橋洋一、PL：大崎クールジェン株式会社 木田淳志

研究開発項目② 高効率ガスタービン技術実証事業

1) 1700℃級ガスタービン

PM：NEDO 山中康朗、PL：三菱重工業株式会社 石坂浩一

2) 高温分空気利用ガスタービン (AHAT)

PM：NEDO 山中康朗、PL：三菱日立パワーシステムズ株式会社 吉田正平

研究開発項目③ 先進超々臨界圧実用化要素火力発電技術開発

PM：NEDO 足立啓、PL：一般社団法人高効率発電システム研究所 福田雅文

研究開発項目④ 次世代火力発電基盤技術開発

1) 次世代ガス化システム技術開発

PM：NEDO 中田博之、PL：一般財団法人電力中央研究所 牧野尚夫

2) 燃料電池向け石炭ガスクリーナップ要素研究

PM：NEDO 西岡映二、PL：電源開発株式会社 小俣浩次

3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

PM：NEDO 高橋洋一、PL：三菱日立パワーシステムズ株式会社 北川雄一郎

4) 燃料電池石炭ガス適用性研究

PM：NEDO 高橋洋一、PL：電源開発株式会社 小俣浩次

5) CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭利用技術開発

PM：NEDO 中田博之、PL：一般財団法人石炭エネルギーセンター 原田道昭

6) 石炭火力の競争力強化技術開発

PM：NEDO 中元崇、PL：NEDOにおいて選定

7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発

PM：NEDO 村上武、PL：NEDOにおいて選定

研究開発項目⑤ CO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCC技術開発

PM：NEDO 足立啓、PL：一般財団法人電力中央研究所 牧野尚夫

研究開発項目⑦ 次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発

PM：NEDO 足立啓、PL：NEDOにおいて選定

## (2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理及び執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適切に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

### ①進捗把握・管理

PMは、PLや研究開発実施者と密接に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討委員会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

### ②技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策の分析及び検討を行う。

#### 4. 研究開発の実施期間

本事業の実施期間は、平成28年度から平成33年度までの6年間とする。なお、研究開発項目①及び②は平成24年度から平成27年度、研究開発項目③は平成20年度から平成27年度まで経済産業省により実施したが、平成28年度からNEDOが実施している。

#### 5. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、事業の意義及び目標達成度や成果に係る技術的意義及び将来の産業への波及効果等について、評価を実施する。研究開発項目①～⑤、⑦については、技術評価実施規程に基づき、プロジェクト評価を行う。

評価の時期については、研究開発項目①は、中間評価を平成29年度及び平成31年度、事後評価を平成34年度に実施する。研究開発項目②は、中間評価を平成30年度、事後評価を平成33年度に実施する。研究開発項目④1)は、中間評価を平成29年度、前倒し事後評価を平成30年度に実施し、2)は事後評価を平成30年度に実施し、3)、4)及び6)は、事後評価を平成32年度に実施し、5)は中間評価を平成29年度、前倒し事後評価を平成32年度に実施し、7)は前倒し事後評価を平成31年度に実施する。研究開発項目⑤は、中間評価を平成29年度、前倒し事後評価を平成31年度に実施する。研究開発項目⑥は、その調査内容に応じて研究開発項目①から⑤、⑦の中間評価、事後評価の際に合わせて評価を実施する。研究開発項目⑦は、事後評価を平成33年度に実施する。

#### 6. その他の重要事項

##### (1) 委託事業成果の取扱い

###### ①成果の普及

得られた事業成果については、NEDO、実施者とも普及に努める。

###### ②標準化等との連携

得られた事業成果については、標準化等との連携を図り、我が国の優れた次世代火力発電等技術を普及させるために、標準化への提案等を積極的に行う。

###### ③知的財産権の帰属

事業成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。

なお、海外動向や国際展開を見据えた知財管理を行うとともに、海外における知財の確保を積極的に推進する。

知財マネジメント適用プロジェクトは、研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発の3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発、4) 燃料電池石炭ガス適用性研究、6) 石炭火力の競争力強化技術開発及び7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発である。

##### (2) 基本計画の変更

PMは、当該事業の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、事業内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目

標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、基本計画を見直す等の対応を行う。

(3) 根拠法

本事業は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第一号ハ、第三号及び第六号イに基づき実施する。

(4) その他

最新の技術動向や政策上の必要性に鑑み、必要に応じた研究開発項目の追加や見直しを行うことがある。

7. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成28年1月、基本計画制定。

(2) 平成28年4月、3. 研究開発の実施方式(1) 研究開発実施体制 研究開発項目③、④(1)と2)、⑤のPMの変更。

5. 評価に関する事項、研究開発項目④(5) 中間評価、事後評価の年度を1年後ろ倒し。別紙 研究開発項目④(5)の3. 達成目標、中間目標年度と最終目標年度を1年後ろ倒し。研究開発スケジュールは研究期間を1年延長し、中間評価と事後評価を1年後ろ倒し。

(3) 平成28年9月、5. 評価に関する事項、研究開発項目④(5) 中間評価、事後評価の年度を1年後ろ倒ししたが、当初計画通りに戻す。

別紙 研究開発項目④(5)の3. 達成目標、中間目標年度と最終目標年度を1年後ろ倒ししたが、当初計画通りに戻す。

研究開発スケジュールは研究期間を1年延長し、中間評価と事後評価を1年後ろ倒ししたが、当初計画通りに戻す。

(4) 平成29年2月

1. 研究開発の目的・目標・内容の(2) 研究開発の目標並びに(3) 研究開発の内容に、研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発6) 石炭火力の競争力強化技術開発、7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発及び研究開発項目⑦次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発の内容を追加した。

3. 研究開発の実施方式のPM及びPLを追記・修正した。

5. 評価に関する事項の①及び⑥の実施時期を修正し、並びに④(1)、5)の前倒しの区分を明確化し、④(6)、7)、⑦を追加した。

6. その他の重要事項の(1) 委託事業成果の取扱い③知的財産権の帰属に知財マネジメント適用プロジェクト名を追記した。

(5) 平成29年5月

3. 研究開発の実施体制(1) 研究開発実施体制 研究開発項目②の(1)と2)及び④の(6)のPMの変更。

(6) 平成29年6月

研究開発項目④(1) 3. 達成目標に中間目標を設定し、平成29年度に中間評価を実施する。

## 研究開発項目① 「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」

## 1. 研究開発の必要性

石炭は、他の化石燃料と比べ、可採年数が約110年と長く、かつ世界各国に幅広く分布する等、供給安定性が高く、経済性に優れることから、エネルギー自給率が極めて低い我が国にとって重要な一次エネルギー源であり、発電の分野においても石炭火力発電は発電電力量の約3割を占める重要な電源の一つである。

一方で、石炭は他の化石燃料と比べ、燃焼時の単位発熱量当たりのCO<sub>2</sub>排出量が多く、地球環境面での制約要因が多いという課題を抱えており、石炭火力発電についてもさらなるCO<sub>2</sub>排出量の抑制が求められている。

したがって、石炭火力発電の高効率化及びCO<sub>2</sub>排出量削減の観点から本事業を実施する必要性がある。

平成26年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画においても、石炭火力発電は、「安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源」と評価されている一方、「温室効果ガスの排出量が多いという課題がある」と指摘され、その課題を解決すべく、次世代高効率石炭火力発電技術として、石炭ガス化複合発電（IGCC）の開発・実用化を進めるとともに、2020年頃の二酸化炭素回収貯留（CCS）の実用化を目指した研究開発を行うことが盛り込まれている。

その後、エネルギー基本計画を踏まえ、平成26年12月にまとめられた「エネルギー関係技術開発ロードマップ」において、「高効率石炭火力発電」、「二酸化炭素回収・貯留技術」が国際展開も見据えた形で整理されている。

以上のとおり、石炭火力発電におけるCO<sub>2</sub>排出量の課題を克服していくことが一層重要となっており、石炭火力発電の高効率化及びCO<sub>2</sub>排出量削減を目指す本事業の必要性は大きい。

## 2. 具体的研究内容

本事業では、石炭火力発電から排出されるCO<sub>2</sub>を大幅に削減させるべく、究極の高効率石炭火力発電技術である石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）とCO<sub>2</sub>分離・回収を組合せた実証試験を行い、革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指す。

## 1) 酸素吹IGCC実証

IGFCの基幹技術である酸素吹IGCCの実証試験設備により、性能（発電効率、環境性能）、運用性（起動停止時間、負荷変化率等）、経済性及び信頼性に係る実証を行う。

2) CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCC実証

酸素吹IGCC実証試験設備とCO<sub>2</sub>分離・回収設備を組み合わせ、CO<sub>2</sub>分離・回収型石炭火力システムとしての性能、運用性、信頼性及び経済性に係る実証を行う。

3) CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証

CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCCシステムと燃料電池を組み合わせ、石炭ガス化ガスの燃料電池への利用可能性を確認し、最適なCO<sub>2</sub>分離・回収型IGFCシステムの実証を行う。

## 2. 達成目標

### [実施期間]

酸素吹 I G C C 実証：平成 24 年度～30 年度（うち平成 24 年度～27 年度は経済産業省において実施）

CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹 I G C C 実証：平成 28～32 年度

CO<sub>2</sub>分離・回収型 I G F C 実証：平成 30 年度～33 年度

### [中間目標（平成 29 年度）]

#### 1) 酸素吹 I G C C 実証

(a) 発電効率：40.5%程度（送電端効率、高位発熱量基準）を達成する。

商用機の 1/2～1/3 倍の規模で、1300℃級ガスタービンを採用する実証試験設備により送電端効率（高位発熱量基準）40.5%を達成すれば、1500℃級ガスタービンを採用する商用機（石炭処理量 2,000～3,000 t/d）で送電端効率約 46%を達成する見通しが得られる。

(b) 環境性能：「SO<sub>x</sub><8ppm」、 「NO<sub>x</sub><5ppm」、 「ばいじん<3mg/Nm<sup>3</sup>」を達成する（O<sub>2</sub>=16%）。

我が国における最新の微粉炭火力は世界的に見ても最高水準の環境諸元を達成しており、酸素吹 I G C C を導入する場合には同等の環境諸元を達成することが求められる。

#### 2) CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹 I G C C 実証

CO<sub>2</sub>分離・回収設備の詳細設計を完了する。

### [最終目標（平成 30 年度）]

#### 1) 酸素吹 I G C C 実証

(a) プラント制御性運用性：事業用火力発電設備として必要な運転特性及び制御性を確認する。

我が国における微粉炭火力はベースからミドル電源として運用されており、酸素吹 I G C C 商用機を導入する場合にも同等の制御性、運用性を確保する。

(b) 設備信頼性：商用機において年間利用率 70%以上の見通しを得る。

我が国における微粉炭火力は年間利用率 70%以上で運用されており、酸素吹 I G C C 商用機を導入する場合にも同等の設備信頼性を確保する。

(c) 多炭種適用性：灰融点の異なる数種類の炭種で適合性を確認する。

酸素吹 I G C C 商用機には、微粉炭火力に適合し難い灰融点の低い亜瀝青炭から、微粉炭火力に適合する比較的灰融点の高い瀝青炭までの適用炭種の広さが求められる。

(d) 経済性：商用機において発電原価が微粉炭火力と同等以下となる見通しを得る。

国内外において酸素吹 I G C C 商用機の普及を促進するためには、発電原価を微粉炭火力と同等以下とすることが求められる。

[最終目標（平成33年度）]

2) CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCC実証

(a) 基本性能（発電効率）：新設商用機において、CO<sub>2</sub>を90%回収しつつ、発電効率40%（送電端効率、高位発熱量基準）程度の見通しを得る。

CO<sub>2</sub>回収時のエネルギーロスによる発電効率の低下という課題に対し、CO<sub>2</sub>を90%回収（全量ガス処理）しながらも、現状の微粉炭火力と同等レベルの発電効率40%程度の見通しを得る。

(b) 基本性能（回収効率・純度）：CO<sub>2</sub>分離・回収装置における「CO<sub>2</sub>回収効率>90%」、「回収CO<sub>2</sub>純度>99%」を達成する。

革新的低炭素型石炭火力の実現のためにCO<sub>2</sub>分離・回収装置単体における回収効率は90%以上を目標とする。CO<sub>2</sub>地中貯留から求められる可能性があるCO<sub>2</sub>純度について、湿式物理吸収法を使って定常運転時、体積百分率99%以上を目標とする。

(c) プラント運用性・信頼性：CO<sub>2</sub>分離・回収型IGCCシステムの運用手法を確立し、信頼性を検証する。

商用機において、CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCCシステムを構築するには、プラントの起動停止や、発電所特有の負荷変動等に対し、IGCC本体に追従したCO<sub>2</sub>分離・回収装置の運用手法を確立し、信頼性を検証する。

(d) 経済性：商用機におけるCO<sub>2</sub>分離・回収の費用原単位を評価する。

CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCCを普及させるに当たっては、費用原単位評価が必要であり、CO<sub>2</sub>分離・回収装置建設時期や発電所敷地等の制約に応じた評価を実施する。

3) CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証

500MW級の商業機に適用した場合に、CO<sub>2</sub>回収率90%の条件で、47%程度の発電効率（送電端効率、高位発熱量基準）達成の見通しを得る。



## 研究開発項目② 「高効率ガスタービン技術実証事業」

### [実施期間]

1700℃級ガスタービン：平成24年度～32年度（うち平成24年度～27年度は経済産業省において実施）

高温分空気利用ガスタービン（AHAT）：平成24年度～29年度（うち平成24年度～27年度は経済産業省において実施）

### 1. 研究開発の必要性

平成20年3月に閣議決定された「Cool Earth —エネルギー革新技术計画」において、天然ガスタービンの高効率化が環境負荷低減の実現のための重要な技術開発であると位置づけられている。また、平成23年8月に制定された「第4期科学技術基本計画」においては、安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現のため火力発電の高効率化に資する技術開発は重点的な取組として位置づけられている。

欧米は巨額の研究開発費を投じており、厳しい国際競争の中で我が国の優位性を維持するため、また電力産業の保守高度化とリプレース需要にあった大容量機の高効率化を目指し、コンバインド効率向上、CO<sub>2</sub>排出量削減を達成するため、1700℃級に必要な革新的技術開発に取り組み、早期に実用化する事が必要である。

また、高温分空気利用ガスタービン（AHAT）は、ガスタービンサイクルを改良したシステムであり、比較的早期に実用化が期待できる高効率発電システムで、電力産業の短中期的ニーズに対応する中小容量機（10万kW程度）の高効率化（45%（高位発熱量基準）→51%（高位発熱量基準）以上）を目的とした日本オリジナルの技術であり、世界初となるAHATの実用化は急務である。

これらの政策を実現するために、発電規模に応じた発電熱効率の一層の向上が必要であり、ガスタービン高温部品の技術向上と発電サイクルの工夫が必要不可欠である。また、環境負荷の少ない発電システムを開発することは、電力の安定的かつ低廉な供給を確保する上で極めて重要な対策である。

さらに、石炭ガス化複合発電（IGCC）や石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）における更なる効率向上には、将来的に1700℃級ガスタービンやAHATシステムの導入が不可欠である。

### 2. 具体的研究内容

#### 1) 1700℃級ガスタービン

1700℃級ガスタービンにおける性能向上、信頼性向上に関する要素技術開発を実施する。例として、製造技術・検査技術の開発、超高温高負荷タービンの信頼性向上、過酷環境下でのデータ取得のための特殊計測技術開発等を実施する。また、1700℃級での実証運転時における特殊計測の実施、試運転データの評価・分析を行い、商用化の検討を実施する。

#### 2) AHAT

AHATシステムについては、ユーザーニーズとしてミドル運用以上（年間50回以上の起動・停止）における長期信頼性が求められていることから、既存40MW級総合試験装置の改造による実証機製作、実証試験による長期信頼性評価を実施する。また、実証機試験結果を用いて

商用機化の検討を実施する。

### 3. 達成目標

#### 1) 1700℃級ガスタービン

[中間目標 (平成30年度)]

1700℃級ガスタービンの性能向上、信頼性向上に関する要素技術開発により、商用機に適用できる見通しを得た上で、設計・製作の仕様を決定する。

[最終目標 (平成32年度)]

1700℃級ガスタービンの実証試験データの取得、及び評価を実施し、送電端効率57%達成(高位発熱量基準)の見通しを得る。

#### 2) AHAT

[最終目標 (平成29年度)]

実証機を用いた試験により、長期信頼性の実証として以下を達成する。

- ・ミドル運用(年間50回以上の起動・停止)の2倍である年間100回以上の起動・停止での実証試験を実施し、等価運転時間 10,000時間以上を確保する。

(等価運転時間とは、起動・停止等の機械装置の寿命を考慮し、同等の連続運転時間とみなせる運転時間)

### 研究開発項目③ 「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」

[実施期間]平成20年度～28年度（うち平成20年度～27年度は経済産業省において実施）

#### 1. 研究開発の必要性

従来型石炭火力発電の中で最高効率である超々臨界圧火力発電（USC）は蒸気温度の最高温度は630℃程度が限界と言われてきた。しかしながら、近年の材料技術の進歩により700℃以上の蒸気温度を達成できる先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発（A-USC）の実現可能性が見えてきた。

本事業では2020年以降に増大する経年石炭火力のリプレース及び熱効率向上需要に対応するため、高い発電効率を実現できるA-USCの開発を行う。

#### 2. 研究開発の具体的内容

##### (1) システム設計、設計技術

基本設計、配置最適化、経済性の試算

##### (2) ボイラ要素技術

700℃級候補材料について、耐久試験により、10万時間の長期信頼性を確保する

##### (3) タービン要素技術

大型鋼塊の製造性を確認するとともに10万時間の長期信頼性を確保する

##### (4) 高温弁要素技術

実缶試験・回転試験に組み込み、信頼性を確認する

##### (5) 実缶試験・回転試験

実缶試験、回転試験により、ボイラ要素及びタービン要素の信頼性の実証を行う。

#### 3. 達成目標

[最終目標（平成28年度）]

蒸気温度を700℃へ高めるための要素技術開発を実施し、2020年以降において商用プラントでの送電端熱効率46%（高位発熱量基準）達成の技術的見通しを得る。

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 1) 次世代ガス化システム技術開発

[実施期間]平成27年度～30年度（うち平成27年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

#### 1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画（平成26年4月閣議決定）においては、石炭火力発電は重要なベースロード電源として位置づけられているが、温室効果ガスの大気中への排出をさらに抑えるため、石炭ガス化複合発電（IGCC）等の次世代高効率石炭火力発電技術等の開発及び実用化を推進することとされている。中長期的には、さらなる高効率化に向けて、現在開発中のIGCCを効率でしのぐ次世代高効率石炭火力発電技術等の開発を実施する必要がある。

#### 2. 具体的研究内容

次世代高効率石炭ガス化発電システムについて、冷ガス効率及び送電端効率の向上並びに実用化に向けた技術開発を実施する。

酸素吹石炭ガス化においては、ガス化炉にガス化剤として酸素を供給して石炭を部分燃焼させ、石炭を熱分解しているが、投入された石炭が一部燃焼して消費されること、酸素製造装置等の所内動力の増加により送電端効率が低下することが効率向上のための課題となっている。

そこで、熱分解の一部を、ガスタービン排熱を利用して作る水蒸気を用いた石炭ガス化反応に置き換えることにより、冷ガス効率の向上を図るとともに、酸素供給量の低減を図り、送電端効率の向上を目指す。

これまでのシミュレーションによる検討結果では、①噴流床型IGCCガス化炉への高温の水蒸気の注入による冷ガス効率及び送電端効率の向上、②エネルギー効率の高い酸素製造技術を組み込んだIGCCシステムの構築による更なる送電端効率の向上、の可能性があると分かった。そこで、これらの可能性を検証及び評価するため、以下の項目を実施する。

##### (1) 水蒸気添加による冷ガス効率向上効果の検証

噴流床型ガス化炉への高温の水蒸気の注入による冷ガス効率の向上について、小型ガス化炉での検証を行う。

##### (2) エネルギー効率の高い酸素製造装置の適用性評価

エネルギー効率の高い酸素製造装置の適用性を評価する。

##### (3) IGCCシステム検討

エネルギー効率の高い酸素製造装置を組み込んだIGCCの最適化システム試設計及び経済性検討を行う。

冷ガス効率の向上及び試設計を踏まえて、送電端効率を精査する。

#### 3. 達成目標

[中間目標（平成29年度）]

既存のIGCC（1500℃級GTで送電端効率46～48%）を凌ぐ高効率石炭ガス化発電システムの見通しを得るため、小型ガス化炉による水蒸気添加ガス化試験方法を確立する。

[最終目標（平成30年度）]

既存のIGCC（1500℃級GTで送電端効率46～48%）を凌駕する高効率石炭ガス化発電システムの見通しを得る。

#### 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

##### 2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究

[実施期間]平成27年度～29年度（うち平成27年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

#### 1. 研究開発の必要性

石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）は石炭をガス化させ、燃料電池、ガスタービン、蒸気タービンの3種の発電形態を組み合わせるトリプル複合発電を行うもので、究極の高効率発電技術として、実現が望まれている。

クールアースエネルギー革新技術開発ロードマップにおいても2025年頃の高効率石炭火力発電技術として55%の送電端効率を目指すIGFCが位置づけられている。

IGFCにおいては、燃料である石炭ガス化ガスに多種類の微量成分が含まれており、この微量成分の一部が燃料電池の劣化を招き、長期信頼性を損なう可能性があることが懸念されている。

そのため、IGFCの実現に向けては、石炭ガス化ガス中の微量成分の燃料電池への影響を把握するとともに、燃料電池の被毒成分に対するガス精製技術を確立することが必要である。

#### 2. 具体的研究内容

燃料電池用ガス精製技術と燃料電池を組み合わせ、石炭ガス化ガスの模擬ガス試験により燃料電池の被毒耐性を確認する。また、特定された被毒成分に対して、成分を許容レベルまで除去するガス精製技術を検討し、模擬ガスによる性能評価を行う。

#### 3. 達成目標

[最終目標（平成29年度）]

- ・模擬ガス試験により燃料電池の被毒耐性を評価する。
- ・模擬ガス試験により燃料電池用ガス精製技術性能を評価し、ガス精製技術を確立する。

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

[実施期間]平成28年度～31年度

#### 1. 研究開発の必要性

平成27年7月に経済産業省における「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」により策定された「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」において、ガスタービン燃料電池複合発電（GTFC）については、小型GTFC（1,000kW級）の商用化、量産化を進め、SOFCのコスト低減を図り、中小型GTFC（10万kW級）の実証事業を経て、発電効率63%程度、CO<sub>2</sub>排出原単位：280g-CO<sub>2</sub>/kWh程度を達成し、2025年頃に技術を確立することが示されている。また、量産後は従来機並の発電単価を実現することとされている。

さらには、同ロードマップにおいて、IGFCの技術を確立するためには、GTFCの開発成果を活用していくことが示されており、次世代火力発電技術の早期確立に向けて、本事業の必要性は高い。

#### 2. 具体的研究内容

小型GTFC（1,000kW級）の商用化及び量産化を進め、SOFCのコスト低減を図る。さらに、中小型GTFC（10万kW）の要素技術を開発し、2020年度から開始する中小型GTFCの技術実証に活用する。

#### 3. 達成目標

[最終目標（平成31年度）]

中小型GTFC（10万kW）の要素技術を確立する。

- ・ 高圧SOFCモジュールを開発する。
- ・ ガスタービンとの連係技術を確立する（燃料器、燃料／空気差圧制御系、排燃料・排空気・空気抽気）。

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 4) 燃料電池石炭ガス適用性研究

[実施期間]平成28年度～31年度

#### 1. 研究開発の必要性

石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）は、石炭をガス化し、燃料電池、ガスタービン、蒸気タービンの3種類の発電形態を組み合わせるとトリプル複合発電を行うもので、究極の高効率石炭火力発電技術として、その実現が望まれている。

「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」において、IGFCの開発方針として、2025年度頃技術確立、発電効率55%及び量産後従来機並の発電単価の実現を目指すことが示された。

IGFCを構成する高温型燃料電池については、現在、天然ガスを燃料とした燃料電池の開発が進んでいるが、石炭ガスを燃料とした場合の適用性についての検証及びシステムの検討を行う必要がある。

燃料を石炭ガスとした場合に、燃料電池の劣化を引き起こすガス中被毒成分濃度の確認と被毒成分の除去技術についての研究は、すでに着手されている。

IGFCを構成する燃料電池モジュールについて、石炭ガスを燃料とした場合の運用性や性能を把握する必要があることから、実燃料電池モジュールを用いた石炭ガス燃料の適用性試験を行い、その結果を踏まえて、IGFCの技術確立に必要な実証機に係るシステム検討を行う必要がある。

#### 2. 具体的研究内容

##### (1) IGFCシステムの検討

国内外における高温型燃料電池及びIGFCの技術開発動向をレビューすることにより、最新情報を入手し、IGFCの実用化に向けた課題の整理を行う。商用機システムとして、CO<sub>2</sub>分離・回収を行わないIGFCとCO<sub>2</sub>分離・回収型IGFCについて、ケーススタディを行い、送電端効率とコストの試算を行う。IGFCの実用化に向けた課題、商用化システムの検討結果及び(2)の成果を踏まえて、IGFC実証システムについて検討を行い、実証機の容量を決定のうえ、試設計を行う。

##### (2) 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

石炭ガス燃料の適用性試験に供する高温型燃料電池モジュールについては、天然ガス燃料で既に実用化されている燃料電池モジュールとする。本試験に係る設計、製作、据付け等を行い、まず、天然ガスを燃料とした試運転を行う。次いで、天然ガスをH<sub>2</sub>リッチガスに改質した燃料を用い、燃料電池モジュールの運用性、性能等を把握するとともに、天然ガス燃料の場合との比較から課題を抽出する。さらに、石炭ガス化の実ガスを燃料として、燃料電池の被毒成分をガス精製によりクリーンアップしたうえで燃料電池モジュールに供給し、その運用性、性能等を把握するとともに、石炭ガス適用時の課題を抽出する。さらに、これまで実績のない石炭ガスによる運転を行うことから、燃料電池セル及びモジュール内部構造への影響を把握するため、装置の解体調査を行い、石炭ガス適用時の課題を抽出する。

### 3. 達成目標

[最終目標（平成31年度）]

#### (1) I G F Cシステムの検討

I G F C実証機の容量を決定し、実証機の試設計を完了する。

#### (2) 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

石炭ガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの運用性と性能を把握し、課題を抽出する。



## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 5) CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭利用技術開発

[実施期間]平成27年度～32年度（うち平成27年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

#### 1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画（平成26年4月閣議決定）においては、石炭火力発電は重要なベースロード電源として位置づけられているが、温室効果ガスの大気中への排出をさらに抑えるため、環境負荷の一層の低減に配慮した石炭火力発電の導入を進めることとされている。

現在、石炭の燃焼排ガス又は石炭ガス化プラントの石炭ガス化ガスからのCO<sub>2</sub>の分離・回収技術の開発が進められているが、CO<sub>2</sub>分離・回収工程において多くのエネルギー損失が発生することが課題となっている。これを解決するため、エネルギー損失のない高効率でありながら、CO<sub>2</sub>の分離・回収が可能な化学燃焼石炭利用技術について、実用化に向けた開発を実施する。

#### 2. 具体的研究内容

従来、石炭の燃焼時の排気ガス又は石炭ガス化プラントの石炭ガス化ガスからのCO<sub>2</sub>分離・回収に当たっては、この過程における多くのエネルギー損失が課題となっているが、CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭利用技術においては、酸素キャリアとなる金属を媒体とする石炭の燃焼反応と金属の酸化反応を二つの反応器で別個に発生させることにより、CO<sub>2</sub>の分離・回収装置及び空気分離装置が不要となり、エネルギー損失のないCO<sub>2</sub>の分離・回収が可能である。

さらに、CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭火力発電は、流動床燃焼技術を用いることから多様な燃料（低品位炭、バイオマス等）が活用でき、IGCCやA-USCが大規模プラントであるのに対して、中小規模プラント（10～50万kW）におけるCO<sub>2</sub>の分離・回収に適しているといった特長がある。

しかしながら、実用化に向けては、酸素キャリアのコスト抑制及び反応塔の小型化に向けた酸素キャリアの反応性の向上という課題がある。

そこで、有望な酸素キャリアの評価と選定並びにプラント構築を目的として、以下の項目を実施する。

##### (1) 酸素キャリアの評価と選定

酸素キャリアの反応性、耐久性及び流動性等について要素試験にて評価を行い、コストを踏まえて選定する。

##### (2) プラント試設計及び経済性検討

酸素キャリアの反応性からプロセス解析を行うとともに酸素キャリアの流動や循環を検討し、プラント試設計を行う。この結果をもとに経済性検討を行う。

##### (3) ベンチ試験装置によるプロセス検証

酸素キャリアの反応性、耐久性及び流動性等並びに流動や循環を含むプラントの成立性を検証するため、ベンチ試験装置を製作し、試験・評価を行う。

#### 3. 達成目標

[中間目標（平成29年度）]

分離・回収コスト1,000円台/t-CO<sub>2</sub>を見通せるキャリアを選定する。

[最終目標（平成32年度）]

分離・回収コスト1,000円台／t-CO<sub>2</sub>を見通せるCO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭火力発電システムを提示する。

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 6) 石炭火力の競争力強化技術開発

[実施期間]平成29年度～31年度

#### 1. 研究開発の必要性

日本の石炭火力発電所は、長年の技術開発の成果により、高い発電効率や排出ガス対策で、世界的に最高レベルの技術を有している。しかしながら、日本の技術を採用したプラント価格は、他の国のプラントに比べて高価であるため、国際市場に於いて必ずしも高い競争力を有しておらず、海外での導入事例も限られているのが現状である。日本の石炭火力発電所が受注に至った地域では、厳しい技術要件が定められており、日本の高効率発電技術が入札時に評価されている一方、他国性の石炭火力発電所を導入した諸外国のユーザーの多くが、稼働率の低下をはじめとしたオペレーション上の様々な課題を抱えている。

そこで、日本の高効率発電技術と共にユーザーニーズに的確にマッチングした日本の高いO&M品質を長期保守契約（L T S A）で提供するビジネスモデルを構築することで、結果として日本の石炭火力発電所の競争力が向上すると考えられることから、L T S Aを実現するために必要な技術開発を実施する。

#### 2. 具体的研究内容

L T S Aを実現するために必要な各種モニタリング・センシング・解析等の要素技術を特定、開発し、発電所における技術実証に活用する。

#### 3. 達成目標

[最終目標（平成31年度）]

L T S Aを実現するために必要な各種モニタリング・センシング・解析等の要素技術を確立する。

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発

[実施期間]平成29年度～31年度

#### 1. 研究開発の必要性

供給安定性及び経済性に優れた天然資源である石炭を利用した火力発電は、将来的にも、国内の発電供給量の26%を担う重要な電源である。

しかし、これら石炭火力発電ではCO<sub>2</sub>排出量が比較的多く、将来的にCO<sub>2</sub>分離回収有効利用：Carbon Capture and Utilization (CCU) が検討されている。現時点ではCO<sub>2</sub>の大規模処理が困難であるものの、有価物の製造等により利益を創出する可能性がある。

2030年度以降を見据え、将来の有望なCCU技術の確立を目指して、我が国の優れたCCT (Clean Coal Technology) 等に、更なる産業競争力を賦与する事が可能なCO<sub>2</sub>有効利用技術=CCU (Carbon Capture and Utilization) 技術について、実用化に向けた開発を実施する。

#### 2. 具体的研究内容

短～中期において大規模且つ高濃度のCO<sub>2</sub> (99%以上)を、エネルギーとして工業的に活用可能な国産の技術開発を実施する。一例として、メタネーション技術については石炭火力発電所等から回収した高濃度CO<sub>2</sub>の適用性を評価する。

#### 3. 達成目標

[最終目標 (平成31年度) ]

事業終了時に本事業として実施するCO<sub>2</sub>有効利用技術の適用性を確認する。一例としては、将来的に天然ガス代替では0.9円～1.4円/MJ (LHV)を見通す経済性を評価する。

## 研究開発項目⑤ 「CO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCC技術開発」

[実施期間]平成27年度～31年度（うち平成27年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

### 1. 研究開発の必要性

石炭は他の化石燃料と比べ利用時の二酸化炭素排出量が大きく、地球環境問題での制約要因が多いという課題を抱えており、石炭火力発電についても更なる二酸化炭素排出量の抑制が求められている。今後CO<sub>2</sub>排出量抑制のためには、石炭火力発電の高効率化に加え、CCSによる低炭素化を図っていく必要がある。

しかしながら、CCSは多大な付加的なエネルギーが必要であり、効率の低下や発電コストの上昇を招く。そのためエネルギー資源を海外に依存する我が国では、資源の有効利用と発電コストの抑制のため、このエネルギーロス可能な限り低減する必要がある。

### 2. 具体的研究内容

本システムは、排ガスCO<sub>2</sub>を一部系統内にリサイクルすることにより、CO<sub>2</sub>回収型石炭ガス化発電システムの効率を大幅に向上することのできる、世界でも例のない次世代IGCCシステムである。本システムは高効率に加え、CO<sub>2</sub>の100%回収が可能であるため、CO<sub>2</sub>を排出しないゼロエミッション石炭火力の実現が期待できる。

本システムの実現に向けては、平成20年度から平成26年度まで実施した「CO<sub>2</sub>回収型次世代IGCC技術開発」において、石炭投入量3t/dの小型ガス化炉を活用し、送電端効率42%（高位発熱量基準）以上を達成可能とする基盤技術を開発してきた。

本事業では、この基盤技術開発の成果を活用し、実機により近い大型のサイズのガス化炉において検証を行い、システム実現に向け、基盤技術をより確実な技術として発展させるとともに、他のCO<sub>2</sub>分離・回収技術と比較した本システムの経済的優位性を確認することを狙いとする。

具体的には、石炭投入量50t/d規模のガス化炉を用いた、O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>ガス化技術の実証や乾式ガス精製システムの実証といった高効率発電を可能とする各要素技術を開発する。また、セミクローズドGTについては、燃焼試験とCFD解析を通し、実スケールの燃焼器の特性評価を行う。

### 3. 達成目標

[中間目標（平成29年度）]

送電端効率42%（高位発熱量基準）を見通すための要素技術確立の目途を得る。

[最終目標（平成31年度）]

送電端効率42%（高位発熱量基準）を見通すための要素技術確立する。

## 研究開発項目⑥ 「次世代火力発電技術推進事業」

[実施期間]平成28年度～33年度

### 1. 研究開発の必要性

長期エネルギー需給見通しにおける基本方針は、3E+S（安全性、安定供給、経済効率性、環境適合）を同時達成しつつ、バランスの取れた電源構成を実現することである。2030年以降、中長期的に火力発電から排出されるCO<sub>2</sub>を一層削減するには、次世代技術の普及による更なる高効率化、そして、CO<sub>2</sub>の回収、貯留・利用の推進が重要である。また、日本の優れた火力発電技術を海外に展開していくことにより、地球規模での温暖化問題の解決を推進していく必要がある。

### 2. 具体的研究内容

最新の技術動向や社会情勢、社会ニーズに合わせ、国内外の石炭利用技術分野における最新技術の普及可能性及び技術開発動向等の調査や新規技術開発シーズ発掘のための、CCT関連やCCS関連の調査を実施する。また、IEA/CCC（Clean Coal Centre）、IEA/FBC（Fulldized Bed Combustion）、GCCSI（Global CCS Institute）等に参画し、技術情報交換・各種技術情報収集を行うとともに、国内関係者への情報提供を行う。また、今後の国際市場における日本の石炭火力発電所受注に向けて、高い競争力を発揮できる戦略及びビジネスモデルを構築する。さらに、低コスト高効率石炭火力発電システム実現に向けた検討を進める。

### 3. 達成目標

[最終目標（平成33年度）]

石炭利用技術分野において、CO<sub>2</sub>排出量低減、環境負荷低減及び国際競争力の強化を図るために必要となる基礎的情報や、最新情報の収集・解析及び将来における次世代火力の技術開発や導入可能性について、関連技術の適応性、課題等の調査を行う。また、海外との協力を通して、我が国の優れたCCTの導入に向けた取組を行う。

## 研究開発項目⑦ 「次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発」

[実施期間]平成29年度～32年度

### 1. 研究開発の必要性

従来型石炭火力発電の中で最高効率である超々臨界圧火力発電（USC）は蒸気温度の最高温度は630℃程度が限界と言われてきた。700℃以上の高温蒸気へ適用されるボイラ・タービン適用材料開発については、長期高温環境下での使用を想定したクリープ試験を実施する等、更なる信頼性の向上が必要である。本事業では2020年以降に増大する経年石炭火力のリプレース及び熱効率向上需要に対応するため、高温材料信頼性向上及び保守技術開発を行う。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### (1) 高温材料信頼性向上試験

信頼性向上のため、クリープ疲労試験、異種材料溶接部健全性評価、材料データベースの拡充、表面処理技術開発等を実施する。

#### (2) 保守技術開発

タービンロータ超音波探傷試験（UT検査）等の精度向上、高効率化、適用箇所の拡大を目的とした非破壊検査技術開発を実施する。

### 3. 達成目標

[最終目標（平成32年度）]

事業終了時において送電端熱効率46%（高位発熱量基準）達成可能な商用プラントへ適用する長時間クリープ疲労試験、材料データベースの拡充、表面処理技術開発等の高温材料信頼性向上及びタービンロータ超音波探傷試験（UT検査）精度向上等の保守技術を確立する。

### 4. その他重要事項

本事業については、他の事業との連携を図りながら、ユーザー及び外部有識者等の意見を適切に反映し、着実な運営を図る。情報発信及び知財化についても、技術の流出防止と適宜知財化を適切に助成先へ指導する。

研究開発スケジュール

◇中間評価、 事後評価

年度(平成)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
研究開発項目① 石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業 1) 酸素吹IGCC実証(1/3助成) 2) CO2分離・回収型酸素吹IGCC実証(2/3助成) 3) CO2分離・回収型IGFC実証(未定)					※1					◇		◇			
研究開発項目② 高効率ガスタービン技術実証事業 1) 1700℃級ガスタービン(2/3助成) 2) 高温空気を利用したガスタービン(AHAT)(2/3助成)					※1										
研究開発項目③ 先進超々臨界圧実用化要素火力発電技術開発(2/3助成)									◇						
研究開発項目④ 次世代火力発電基盤技術開発															
1) 次世代ガス化システム技術開発(委託)										◇	◇				
2) 燃料電池向け石炭ガスクリンナップ技術要素研究(委託)															
3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発(委託)															
4) 燃料電池石炭ガス適用性研究(委託)															
5) CO2分離型化学燃焼石炭利用技術開発(委託)										◇					
6) 石炭火力の競争力強化技術開発(委託)															
7) CO2有効利用技術開発(委託)															
研究開発項目⑤ CO2回収型クローズドIGCC技術開発(委託)										◇		◇			
研究開発項目⑥ 次世代火力発電技術推進事業(委託)															
研究開発項目⑦ 次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発(1/2助成)															

※1 経済産業省にて実施したプロジェクトでH28年度からNEDOへ移管  
 ※2 NEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施



## 特許論文リスト

### 【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学法人 東京大学、三 菱日立パワー システムズ株 式会社	特願 2016- 151114	国内	2016/08/01	出願	高活性 酸素リ キャリ ア材料 の製造 方法	大友順一郎 竹田誠 武田 豊
2	中央大学、三 菱日立パワー システムズ		国内		明細書 作成中	燃料反 応塔及 びこれ を備え たケミ カルル ング燃 焼シス テム	幡野博之 武田 豊

### 【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	T. Saito, K. Nakayama, S.Y. Lin and T. Takarada	JCOAL 群馬大学	Kinetics of Char and Catalyzed Char Gasification at High Steam Partial Pressures with or without H <sub>2</sub> for Chemical-Looping Coal Combustion	J. of Chem. Eng. Japan	有	2016.12
2	K. Miya, J. Otomo	東京大学	Improvements in reaction kinetics and stability of ilmenite as oxygen carrier by surface modification with calcium titanate in redox cycles of chemical-looping systems	Chemical Engineering Journal	有	2017.6

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	幡野、藤野	中央大学	固気系流動層内の浮上性粗粒子の混合と分級	第 22 回流動化・粒子プロセスシンポジウム	2016/12/09
2	藤野、金井塚、幡野	中央大学	化学ループ燃焼用格子酸素キャリアの酸化還元反応特性	第 22 回流動化・粒子プロセスシンポジウム	2016/12/09
3	Shiyong Lin, Tomonao Saito, Keiichiro Hashimoto	JCOAL	Study on the oxygen carrier recycle reactivity for Chemical Looping Coal Combustion (CLC)	4 <sup>th</sup> International Conference on Chemical Looping, Nanjing, China	2016/9/26-28,
4	Tomonao SAITO, Shi-Ying LIN	JCOAL	Study on the oxygen carrier recycle reactivity for Chemical Looping Coal Combustion (CLC)	4 <sup>th</sup> International Conference on Chemical Looping, Nanjing, China	2016/9/26-28,
5	Junichiro Otomo, Yuya Saito, Kazuyuki Miya, Noriaki Kikuchi, Fumihiko Kosaka	東京大学	Reaction kinetics and morphological variation of Fe-based oxygen carriers in redox cycles of chemical looping systems	4 <sup>th</sup> International Conference on Chemical Looping, Nanjing, China	2016/9/26-28,
6	Shiyong Lin, Tomonao Saito, Keiichiro Hashimoto	JCOAL	Development of the Three-Tower Chemical Looping Coal Combustion Technology	13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-13, Lausanne, Switzerland	2016/11/14-18
7	Tomonao Saito and Shi-Ying Lin	JCOAL	Chemical Looping Coal Combustion Technology Development in Japan	The 1st Australia-Japan Symposium on Carbon Resource Utilisation, Australia	2016/11/27-30
8	林石英	JCOAL	CO <sub>2</sub> 分離型化学燃焼石炭利用技術 (ケミカルループ技術)	CO <sub>2</sub> 等ガス分離回収の技術開発と応用セミナー、東京	2016/06/22
9	林 石英、齋藤知直	JCOAL	三塔循環流動層ケミカルループ石炭利用技術の開発	第 25 回日本エネルギー学会、東京	2016/8/9-10
10	齋藤知直、林石英	JCOAL	酸素キャリアの繰り返し反応における生成ガスの影響	化学工学会第 48 回秋季大会、徳島	2016/09/6-8
11	齋藤知直、林石英	JCOAL	酸素キャリアの還元速度におよぼす影響因子の検討	化学工学会第 48 回秋季大会、徳島	2016/09/6-8
12	齋藤佑耶・幡野博之・大友順一郎	東京大学中央大学	ケミカルループ法における酸素キャリア粒子の構造変化と酸化還元反応速度の相関	化学工学会第 48 回秋季大会、徳島	2016/09/6-8

13	味谷和之・大友順一郎	東京大学	水素生成・貯蔵を指向したケミカルループ法におけるイルメナイト系酸素キャリアの開発	化学工学会第 48 回秋季大会、徳島	2016/09/6-8
14	齊藤知直、林石英	JCOAL	生成ガスによるチャーガス化反応速度への阻害作用の解明	第 53 回石炭科学会議、福山	2016/10/26-28
15	味谷和之・大友順一郎	東京大学	ケミカルループ法におけるイルメナイト系酸素キャリアの高活性化及び構造評価	化学工学会第 82 年会、東京	2017/03/6-8
16	斎藤 佑耶・高坂文彦・幡野博之・大友順一郎	東京大学中央大学	ケミカルループ法における鉄/アルミナ酸素キャリア粒子の劣化挙動	化学工学会第 82 年会、東京	2017/03/6-8
17	畑中健志、余田幸陽、松村明光	産総研	ケミカルループ燃焼における酸素キャリア粒子の磨耗特性評価	第 22 回流動化・粒子プロセスシンポジウム	2016/12/06

(b)新聞・雑誌等への掲載

なし

(c)その他

なし