

当財団では、2018年度から産学の有識者による「エネルギーシステム最適化検討研究会（座長：加藤丈佳 名古屋大学未来材料・システム研究所教授）」を組織し、2050年を見据えた将来の中部圏のエネルギー需給モデルのグランドデザインを描くとともに、地域事情も加味した最適なエネルギーシステムの構築を目指した調査研究を進めています。

今回、昨年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画において、ベースロード電源として一定の稼働を見込む石炭火力発電について、最新の石炭ガス化複合発電設備（Integrated Coal Gasification Combined Cycle：以下、「IGCC」）に二酸化炭素（以下、「CO<sub>2</sub>」）分離・回収設備（Carbon Dioxide Capture Unit）を組合せた実証試験設備「大崎クールジェンプロジェクト」を見学する機会を得たので、その概要について報告する。

## 大崎クールジェンプロジェクト～石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業～

公益財団法人中部圏社会経済研究所企画調査部長 加藤 啓

### 1. 調査の背景と目的

2016年に発効した、気候変動問題に関する国際的な枠組み「パリ協定」においては、長期目標として「2℃目標」が設定され、今世紀後半にはCO<sub>2</sub>の排出量と吸収量をバランスさせる事が求められている。また、この6月に閣議決定された「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」では、2030年に温室効果ガスの26%削減、2050年に80%削減を目指す計画になっており、目標達成には、革新的な技術開発に加え社会構造などあらゆる分野でのイノベーションが必要な状況にある。

石炭火力発電は、発電電力量当たりのCO<sub>2</sub>排出量が他の化石燃料よりも多いため、CO<sub>2</sub>排出量を削減し環境に優しい脱炭素社会を実現するために、欧州などでは石炭火力発電について一定の条件下で投融資を制限する動きなども出てきている。その一方で、生活や経済活動に必用なエネルギー源を海外からの輸入に頼るわが国においては、火力・水力・原子力・再生可能エネルギーなどをバランス良く組み合わせたエネルギーのベストミックスを目指す必要がある。中でも石炭は、埋蔵量が多く価格が安定している事などから、3E+S（安定

供給・経済効率性・環境適合性+安全性）の側面をバランス良く満たすエネルギー源として、引き続き重要な位置付けにある。

石炭火力発電の中でもIGCCは、固体の石炭をガス化することで蒸気タービンとガスタービンを組合せた複合発電が実現できる事などから、3E+Sが同時に達成できる革新的な高効率発電技術として、またCO<sub>2</sub>回収貯留（Carbon Dioxide Capture and Storage：以下CCS）と組合せる事でゼロエミッション石炭火力発電が実現できる有望技術として、その実現に期待が集まっている。

そこで今回、国の「Cool Gen計画<sup>(※1)</sup>」の実証事業の一環として実施されている「大崎クールジェンプロジェクト」について調査を行った。本稿では、現地調査および現地での質疑応答などを通じて得た情報も含めて、その概要を紹介する。

### 2. 調査結果

#### (1)「大崎クールジェン株式会社（以下、大崎クールジェン）」会社概要

大崎クールジェンは、2009年7月に中国電力株式会社（以下、「中国電力」）と電源開発株式会社

(※1) Cool Gen計画：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「ゼロエミッション石炭火力発電の実現」を目指す国の実証研究プロジェクト



図表1 大崎クールジェンの位置（出典：大崎クールジェン）

図表2 大崎クールジェン株式会社

会社名	大崎クールジェン株式会社 (Osaki CoolGen Corporation)
設立	2009年7月29日
所在地	〒725-0301 広島県豊田郡大崎上島町中野6208番地1 (中国電力大崎発電所構内)
資本金	4億9,000万円
出資企業(比率)	中国電力(50%)、J-POWER(50%)
事業内容	高効率石炭火力発電である酸素吹IGCC技術、CO <sub>2</sub> 分離・回収技術に関する大型実証試験の実施および石炭ガス化燃料電池複合発電(Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle、以下、「IGFC」)技術の実現を目指す実証事業



図表3 大崎クールジェンの外観（出典：大崎クールジェン）

(以下、「J-POWER」)の共同出資により設立された会社で、瀬戸内海のほぼ中央に位置する大崎上島(広島県豊田郡大崎上島町)の中国電力大崎発電所の敷地の一角に位置している。「クールジェン」の由来は、国のクリーンコール政策である「Cool Gen計画」を実現するという思いを込めて命名されたもので、革新的な低炭素石炭火力発電の実現を目指す事を目的に、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、「NEDO」)の支援を受け、実証試験プラントの運転・評価を行っている。

## (2) 大崎クールジェンプロジェクトの概要

### ア. 実施スケジュール

大崎クールジェンプロジェクトは、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、究極の高効率発電技術である「IGFC」と「CO<sub>2</sub>分離・回収技術」を組合せた革新的な発電技術の確立を目指す実証プロジェクトであり、実証事業は図表4に示したとおり3段階に分けて実施されている。

第1段階では、「酸素吹石炭ガス化複合発電設備(酸素吹IGCC)」の実証試験(2016~2018年度:図中の青色部)を行った。第2段階では、酸素吹IGCCにCO<sub>2</sub>分離・回収設備を付設した「CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCC」の実証試験(2019~2020年度:図中の橙色部)を行っている。また、第3段階では、その後段にさらに燃料電池を付設した「CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC」の実証試験(2022年度以降;図中の緑色部)が計画されている。なお、本プロジェクトは、2012年度から経済産業省

補助事業、2016年度からNEDO助成事業として実施されている。

### イ. 設備概要

IGCC実証試験設備は、図表5に示したとおり、大きく①石炭ガス化設備、②ガス精製設備、③複合発電設備(ガスタービンおよび蒸気タービン)、④空気分離設備、⑤排水処理設備の5つで構成されている。

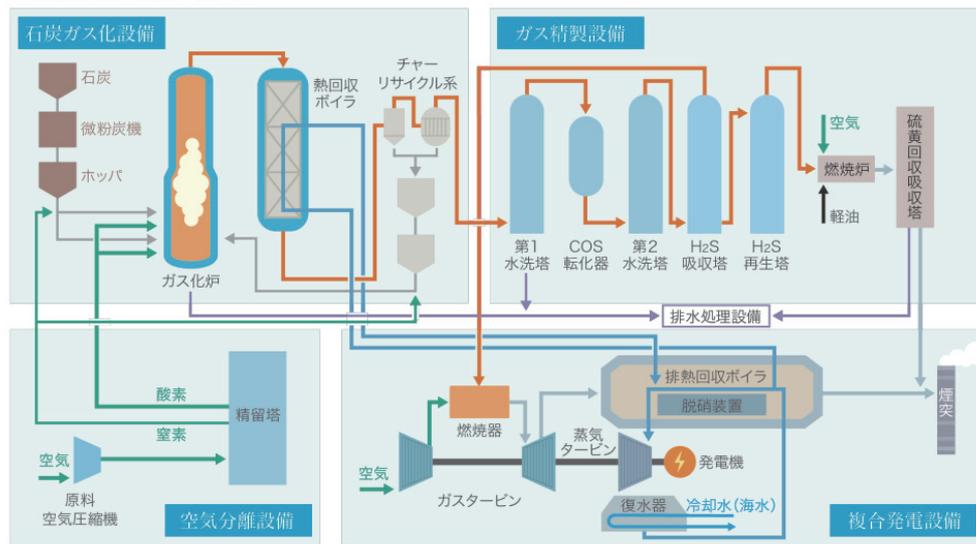
IGCCは、初めにガス化炉で酸素を吹き込みながら粉末状の石炭を蒸し焼きにし、一酸化炭素(以下、「CO」)と水素(以下、「H<sub>2</sub>」)を主成分とする石炭ガス化ガス(可燃性ガス)を生成させ、この可燃性ガスを燃やしてガスタービンで発電するとともに、ガスタービンの排熱を回収して蒸気を発生させ、蒸気タービンでも発電をする。2つの発電プロセスを組み合わせる(ガスタービン・コンバインドサイクル発電:GTCC)事で、発電効率を飛躍的に向上させる事ができる。また、従来の石炭火力発電所で利用されてきた瀝青炭と呼ばれる品質の高い石炭に加え、これまで十分利用されてこなかった亜瀝青炭といった低品位の石炭まで利用できるなどのメリットがある。

IGCCには、供給された石炭をガス化する際に用いるガス化剤に「酸素(酸素吹)」を用いるのか、「空気(空気吹)」を用いるのかで2つの方式がある。「酸素吹」は窒素が空気吹と比べて少なく燃焼温度も高くできるので、石炭をガスに転換する効率(冷ガス効率)が高い、生成ガスの主成分が有用成分であるCO+H<sub>2</sub>のみで化学用途など多目的に利用可能となるなどメリットが多い。



図表4 大崎クールジェンプロジェクトのスケジュール(出典:大崎クールジェン)

■ 実証試験設備/概略フロー



図表 5 実証試験設備概略フロー図 (出典：大崎クールジェン)

一方で、ガス化剤である酸素を製造する空気分離設備が大きくなるため、コストダウンと発電効率の向上をバランスさせるように設計される。

ガス化炉で発生した石炭ガス化ガスは、熱回収ボイラーで熱回収され、ガス精製設備で不純物と硫黄分が除去された後、ガスタービン燃焼器で燃焼しガスタービンを駆動する。ガスタービンの燃焼排ガスは排熱回収ボイラーで熱回収した後、煙突から放出される。一方、熱回収ボイラーおよび排熱回収ボイラーの熱回収により発生した蒸気で蒸気タービンを駆動する。このガスタービンと蒸気タービンとの複合発電により、従来の微粉炭火力発電を上回る発電効率の達成が可能となる。

IGCCは、システムの高効率化により、発電電力量当たりの硫黄酸化物（以下、「SO<sub>x</sub>」）、窒素酸化物（以下、「NO<sub>x</sub>」）、ばいじんの排出量を低減できる。また、従来型石炭火力発電と比較して温排水量を低減できる。

さらに、従来型石炭火力発電の排煙脱硫装置（硫黄回収設備）は、燃料を燃やした後の排ガス段階で脱硫処理を行うため多量の水が必要だったが、IGCCはガス精製設備で硫化水素（H<sub>2</sub>S）を主成分としたガスのみを取り出し、小型の硫黄回収設備で処理を行うため、用水使用量を大幅に低減できるシステムである。

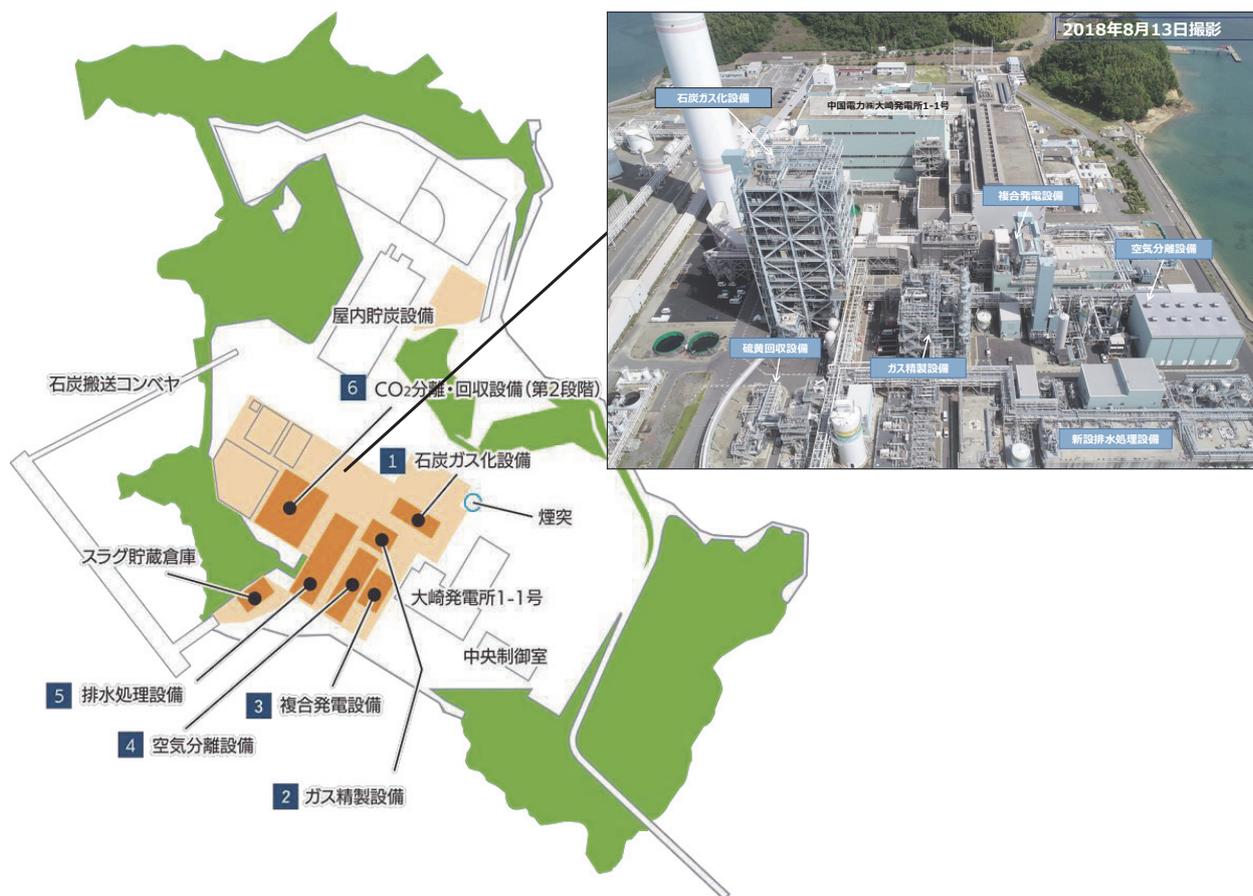
### (3) 設備詳細および見学内容

実証試験設備は図表 6 に示すとおり、中国電力大崎発電所構内に設置されており、石炭ガス化設備、ガス精製設備、複合発電設備、空気分離設備、排水処理設備などで構成されている。

現地調査は、2019年11月11日に実施した。当日は、同社取締役総務企画部長の久保田晴仁氏、総務企画部総務グループ課長代理の沖野剛久氏から説明を受け、質疑応答の後、稼働中の実証プラントの見学を行った。見学は、中国電力大崎発電所機械建屋屋上からプラントおよび施設全景を鳥観した後、見学順路に沿って、石炭ガス化設備、ガス精製設備、複合発電設備、空気分離設備、石炭バースなどを見学した。図表 7 に、見学した主要設備の構成と詳細仕様を示す。

#### <石炭ガス化設備>

ガス化炉は、全高約40mの円筒状の圧力容器に収納され、ガス化部の上下に2段の石炭バーナを配置した「1室2段旋回流」方式を採用している。また、上段部と下段部の酸素供給量を適切に制御するとともに、石炭粒子に旋回流を加えて石炭粒子の炉内滞留時間を長くしてガス化反応を促進させるなど、「高いガス化効率（＝発電効率）」と「スラッグの安定排出」の両方が実現できている。



図表 6 実証設備の配置と設備外観（出典：大崎クールジェン）

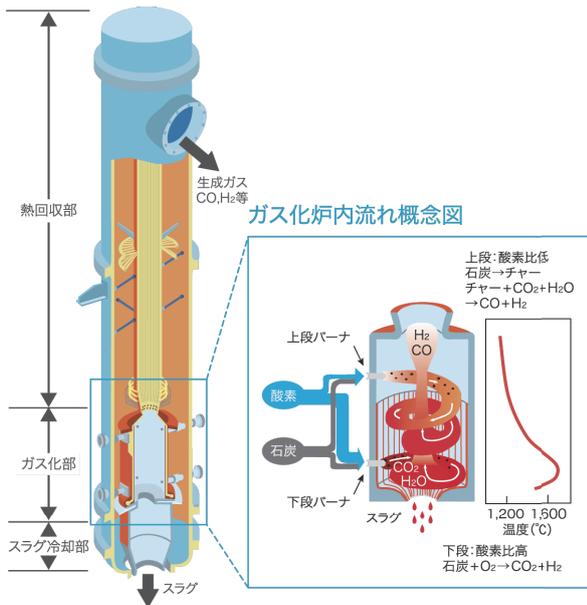
図表 7 主要設備の構成、詳細仕様

項 目	設 備 仕 様	
1. 石炭ガス化設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>方式：酸素吹1室2段旋回型噴流床方式</li> <li>石炭使用量：1,180t/日</li> </ul>	
2. ガス精製設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>硫黄除去設備：湿式化学吸着法</li> <li>硫黄回収設備：湿式石灰石石膏法</li> </ul>	
3. 複合発電設備（ガスタービンおよび蒸気タービン）	<ul style="list-style-type: none"> <li>方式：1軸型コンバインドサイクル発電方式（出力：166MW）</li> <li>ガスタービン：開放サイクル型（1,300℃級）</li> <li>蒸気タービン：再熱復水型</li> </ul>	
4. 空気分離設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>方式：深冷分離方式</li> <li>容量：酸素約30,000m<sup>3</sup>N/h、窒素約50,000m<sup>3</sup>N/h</li> </ul>	
5. 排水処理設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>低塩系（既設）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高塩系</li> </ul>

また、酸素吹きガス化炉であるため、生成ガス中に窒素（以下、「N<sub>2</sub>」）が少なく、空気吹きに比べて燃料成分（CO、H<sub>2</sub>）の割合が高い。今後利用拡大が見込まれる低品位炭に加え、従来の微粉炭火力で利用される瀝青炭の領域まで拡大できるなど、幅広い炭種の利用が可能となる。

<空気分離設備>

空気を極低温まで冷却・液化し、蒸留による沸点の差を利用して空気を酸素と窒素に分離する装置であり、酸素は石炭のガス化に、窒素は石炭の搬送等に利用されている。



図表 8 石炭ガス化炉の構造と特長 (出典：大崎クールジェン)



図表 9 プラント写真①<石炭ガス化設備、空気分離設備>

<CO<sub>2</sub>分離回収設備>

CO<sub>2</sub>分離回収法には、アミン等のアルカリ性水溶液（吸収液）とCO<sub>2</sub>含有ガスを接触させ、吸収液にCO<sub>2</sub>を選択的に吸収させて分離・回収する化学吸収法と、圧力差を利用してCO<sub>2</sub>を吸収液に溶解して吸収させる「物理吸収法」などがある。前者は、常圧のガスからCO<sub>2</sub>を回収するのに適しており、後者は、高圧のガスからCO<sub>2</sub>を分離回収するのに適した技術である。

本実証試験設備では、IGCCからの石炭ガス化ガスが非常に高圧である事から、物理吸収方式が採用されている。



図表10 プラント写真②<CO<sub>2</sub>分離回収設備>

#### (4) 運転実績

第1段階の酸素吹IGCCの実証試験運転は2017年3月から開始されており、2018年10月の実証試験運転完了までに5,119hrを運転し、耐久運転の目標時間である5,000hrをクリアしている。また、実証期間中は「EAGLEプロジェクト」で蓄積した技術知見を反映しており、大きなトラブルは発生していない。

#### (5) 実証試験成果

図表11に、実証試験目標とその達成度を示した。商用機で送電端効率約46%達成の見通しが得られ、現状の最高効率の微粉炭火力（Ultra Super Critical、以下、「USC」）と比べて、CO<sub>2</sub>排出量の約15%削減に目途をつける事ができた。実証機において目標の効率を達成できた事から、1,500℃級のガスタービンの採用を予定している商用機では、NEDOの技術開発ロードマップに掲げる高効率石炭火力発電（送電端効率約46%：HHV）を達成できる見通しが得られた。

また、従来の微粉炭火力を大幅に上回り、LNGコンバインドサイクル発電と同等の負荷変化率を達成しており、今後大量導入が予想される太陽光発電などの再生可能エネルギーの急な出力変動にも対応できる高い「調整力」を有している。

(※2) EAGLE (coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity) プロジェクト：NEDOとJ-POWERが1995～2006年にかけて実施した多目的石炭ガス製造技術開発事業

図表11 酸素吹IGCCの実証目標と成果

開発項目	目 標	実 績
送電端効率	・40.5% (HHV) 以上	・40.8% (HHV)
環 境 性 能	・SOx : 8ppm ・NOx : 5ppm ・ばいじん : 3mg/m <sup>3</sup> N (O <sub>2</sub> : 16%換算)	・SOx : <8ppm ・NOx : <5ppm ・ばいじん : <3mg/m <sup>3</sup> N (O <sub>2</sub> : 16%換算)
多炭種適合性	・多炭性情適合範囲の把握	・4炭種を試験し良好な適合性を確認
設 備 信 頼 性	・商用機レベルの年利用率70%以上 (5,000hr以上の長時間耐久試験)	・長時間耐久試験 : 5,119hr ・連続運転 : 2,168hr
プラント制御性・運転性	・事業用火力発電所として必要な運転特性 (負荷変化率 : 1~3%/分 他)	・負荷変化率 : 最大16%/分 ・送電端出力0MWで安定運転を確認 ・Cold起動時間 (GT起動~定格負荷) 約7hrの見通しを得た
経 済 性	・商用機レベルで発電原価が微粉炭火力と同等以下の見通しを得る	・商用機レベルで発電原価が微粉炭火力と同等になる見通しを確認

図表12 CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCC実証試験目標

開発項目	目 標
基本性能 (発電効率)	・新設商用機 (1,500℃級IGCC) においてCO <sub>2</sub> を90%回収しつつ送電端効率40% (HHV) 程度の見通しを立てる
基本性能 (回収効率・純度)	・CO <sub>2</sub> 分離・回収設備におけるCO <sub>2</sub> 回収効率 <sup>(※3)</sup> : 90%以上 ・回収CO <sub>2</sub> 純度 : 99%以上
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について検証する
経済性	・商用機におけるCO <sub>2</sub> 分離・回収の費用原単位 <sup>(※4)</sup> について、技術ロードマップに示された費用原単位をベンチマークとして評価する

(6) 課題、今後の計画

第2段階のCO<sub>2</sub>分離回収設備については、見学会当日も既に試運転が行われており、12月から本格的な実証試験を開始している。今後2年間程度をかけて、図表12に示したとおり、CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCCの石炭火力発電システムとしての基本性能やプラント運用性・信頼性・経済性等を検証していく他、ガス化炉で生成したガスから効率的にCO<sub>2</sub>を分離・回収する実証試験等も実施していく予定である。

また、第3段階のCO<sub>2</sub>分離・回収型IGFCにつ

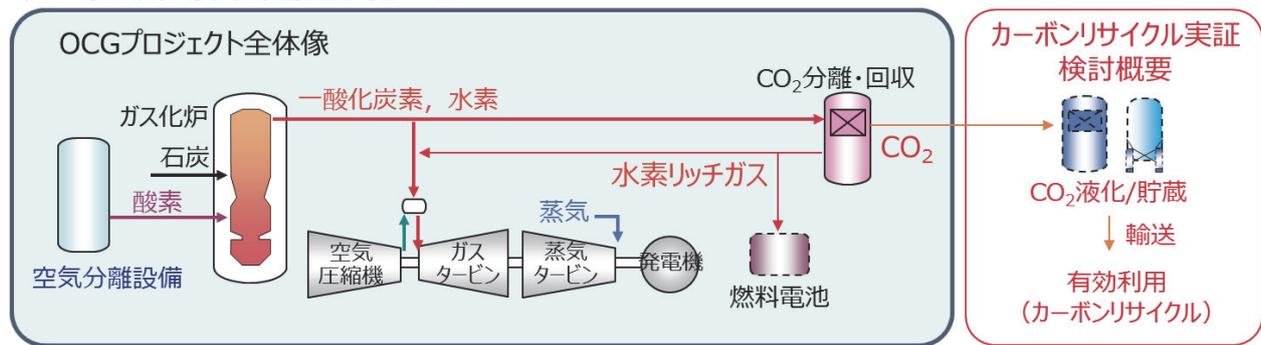
いては、CO<sub>2</sub>分離・回収型IGCC設備から得られる水素リッチガスを燃料とする燃料電池発電を組み合わせた実証事業となっており、「500MW級の商用機に適用した場合に、CO<sub>2</sub>回収率90%の条件で、47%程度の発電効率(送電端、HHV)達成の見通しを得る」ことを目標として実証試験を実施する計画である。さらに酸素吹IGCCの特徴を生かして、石炭ガス化ガスからの効率的なCO<sub>2</sub>分離・回収技術の確立を図るとともに、国が進めるカーボンリサイクル<sup>(※5)</sup>に対しても協力していく計画であり、国によるカーボンリサイクル研究拠点

(※3) CO<sub>2</sub>回収効率 : CO<sub>2</sub>分離・回収設備単体のCO<sub>2</sub>回収割合 (分離・回収されたCO<sub>2</sub>ガスのC量 / CO<sub>2</sub>分離・回収設備に導入されたガスのC量) × 100

(※4) 費用原単位 : 1トンのCO<sub>2</sub>を分離・回収するために必要な費用 (円 / トン-CO<sub>2</sub>)

(※5) カーボンリサイクル : CO<sub>2</sub>を炭素資源 (カーボン) ととらえ、これを回収して、化学品、燃料、鉱物等の素材・資源に転換させ、多様な炭素化合物として再利用 (リサイクル) するもの

## カーボンリサイクル実証のイメージ



図表13 カーボンリサイクル実証のイメージ（出典：大崎クールジェン）

化や、親会社のJ-POWERと中国電力がすすめるトマト栽培や鉱物化に回収したCO<sub>2</sub>を有効利用する等の検討が進められており、革新的な石炭火力発電の実現に貢献していく計画である。

氏、総務企画部総務グループ課長代理の沖野剛久氏の両氏に心からの謝意を表します。

### 3. まとめ

今回調査した「大崎クールジェンプロジェクト」は、石炭をガス化した際に発生する高温ガスを発電に利用して高い発電効率を得ると共に、後段にCO<sub>2</sub>分離・回収設備を備えた最先端の酸素吹IGCCである。IGCCは、効率が従来のUSCと比べて大幅に高くなる他、第3段階で計画されているように、CO<sub>2</sub>分離・回収設備のCO<sub>2</sub>分離後の水素を用いて固体酸化物形燃料電池（SOFC）でも発電してトリプル複合発電とする事で、さらなる高効率化や出力増が期待できる。

CO<sub>2</sub>排出量の多い石炭火力発電への逆風が強まる中で、日本発の石炭ガス化トリプル複合発電の普及は、冒頭で述べたエネルギーの3E+Sの側面、ひいては地球温暖化問題の解決に貢献する大きな可能性を有する技術であると感じた。

### 謝辞

今回の施設見学会に際し、快く訪問を受け入れていただいた大崎クールジェン株式会社の関係の皆様、また、当日現地での説明やプラント見学、参加メンバーからのさまざまな質問に丁寧に対応いただいた同社取締役総務企画部長の久保田晴仁