

「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発」

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
- 4) 燃料電池石炭ガス適用性研究
  - (1)燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

事業原簿

公開版

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—

概 要	1
プロジェクト用語集	7
<b>1. 事業の位置付け・必要性について</b>	<b>1-1.1</b>
1-1. 事業の背景・目的・位置づけ	1-1.1
1-2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	1-2.1
1-2.1 NEDO が関与することの意義	1-2.1
1-2.2 実施の効果（費用対効果）	1-2.1
<b>2. 研究開発マネジメントについて</b>	<b>2-1.1</b>
2-1. 事業の目標	2-1.1
2-1.1 事業の目標設定の背景	2-1.1
2-1.2 各基盤技術開発の目標	2-1.5
2-2. 事業の計画内容	2-2.1
2-2.1 研究開発の内容	2-2.1
2-2.2 研究開発の費用	2-2.5
2-2.3 研究開発の実施体制	2-2.7
2-2.4 研究開発の運営管理	2-2.6
2-2.5 研究開発成果の実用化に向けた マネジメントの妥当性	2-2.8
2-3. 情勢変化への対応	2-3.1
2-4. 評価に関する事項	2-4.1
<b>3. 研究開発成果について</b>	<b>3-1.1</b>
3-1. 事業全体の成果	3-1.1
3-2. 研究開発項目毎の成果	3-2-1.1
3-2-1 ガスタービン燃料電池複合発電技術開発	3-2-1.1
3-2-2 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究	3-2-2.1
<b>4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて</b>	<b>4-1.1</b>
4-1. 成果の実用化および実現に向けた取組及び見通しについて	4-1.1

(添付資料)

- 添付資料 1) 特許論文等リスト
- 添付資料 2) プロジェクト基本計画

「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発」事業一覧（抜粋）

◇中間評価、◆事後評価

年度（西暦）	15	16	17	18	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
<b>研究開発項目①</b> 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) CO <sub>2</sub> 分離・回収型酸素吹IGCC実証（2／3、1／3助成） 3) CO <sub>2</sub> 分離・回収型IGFC実証（1／2助成） 4) 信頼性向上、低コスト化（1／3助成） 5) CO <sub>2</sub> 分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発（1／2助成）			◇			◇			◇		◆
	※1	酸素吹IGCC実証									
		CO <sub>2</sub> 分離・回収型酸素吹IGCC実証									
				CO <sub>2</sub> 分離・回収型IGFC実証							
							信頼性向上、低コスト化				
								CO <sub>2</sub> 分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発			
<b>研究開発項目②</b> 高効率ガスタービン技術実証事業 1) 1700℃級ガスタービン（1／2助成） 2) 高温分空気利用ガスタービン（AHAT）（2／3助成）				◇			◆				
	※1	実証機の設計・製作・試運転									
	※1	AHAT実証		◆							
<b>研究開発項目③</b> 先進超々臨界圧実用化要素火力発電技術開発（2／3助成）		◆									
	※1	A-USC実証									
<b>研究開発項目④</b> 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	基盤技術開発			2018年度以降は研究開発項目⑤へ統合						
2) 燃料電池向け石炭ガスクリーナップ技術要素研究（委託）	※2	基盤技術			◆						
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）				◇				◆			

## 概 要

		最終更新日	2022年7月31日	
プロジェクト名	カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発 ／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 4)燃料電池石炭ガス適用性研究 - (1) 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究	プロジェクト番号	P16002	
担当推進部/ PMまたは担当者	環境部 高橋 洋一 (2016年5月～2020年3月) 環境部 牛嶋 隆士 (2020年4月～2021年3月) 環境部 福原 敦 (2021年4月～2022年8月現在)			
0. 事業の概要	<p>本事業は2016年6月に策定された「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」に基づき、究極の高効率発電であるガスタービン燃料電池複合発電 (GTFC : Gas Turbine Fuel Cell Combined Cycle) 、および石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC : Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle) について、2025年頃の技術確立を目的として以下の基盤技術開発を実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]</li> <li>2. 燃料電池石炭ガス適用性研究／燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4)-(1)]</li> </ol> <p>本研究は「CO<sub>2</sub>分離・回収型 IGFC」の実現のために、その実証試験に向けた燃料電池複合発電に係る要素技術開発を実施するものであり、石炭ガス化ガスを CO<sub>2</sub> 分離・回収することにより得られる「水素リッチガス」の燃料電池モジュールへの適用性について検証試験を行うとともに、燃料電池モジュールの高圧化、大容量化を行い、燃料電池の低コスト化を目指すことで、中小型 GTFC (100MW 級) に向けた要素技術を確認し、「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」への研究成果適用を行うものである。</p>			
1. 事業の位置 付け・必要性について	<p>2021年10月に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」では、S+3E (安全性、安定供給、経済効率性、環境適合) の視点の重要性は従来と何ら変わりはないとしながらも、2030年度の新たな削減目標や2050年カーボンニュートラルという野心的な目標の実現を目指し、あらゆる可能性を排除せず、使える技術は全て使うとの発想に立つことが今後のエネルギー政策の基本戦略としている。そのような中で、適切な火力ポートフォリオを構築しながら、脱炭素型の火力発電への置き換えに向け、アンモニア・水素等の脱炭素燃料の混焼やCCUS／カーボンリサイクル等の火力発電からの CO<sub>2</sub> 排出を削減する措置の促進や、火力運用の効率化・高度化のための技術開発・導入環境整備を進めるとしている。一方で、脱炭素化を見据えつつ、次世代の高効率石炭火力発電技術である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) などの技術開発等を推進するとしている。</p> <p>「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」においては、2030年度に向けた取組の中心となる技術として、GTFCとIGFCが示されており、GTFCはMW級の商用化、量産化を進め、SOFCのコスト低減を図り、中小型の技術確立をおこない、IGFCの基盤技術開発と並行して実施して行くとし、IGFCはGTFCの技術開発成果を活用して、大型IGFCの技術を確認して行くことが示されており、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を進め、石炭ガス化燃料電池複合発電等、発電効率を飛躍的に向上させる次世代火力を早期に技術確立する必要があり、そのための基盤技術開発を行うものである。</p>			
2. 研究開発マネジメントについて				

事業の目標	<p>各事業につき、中間目標及び最終目標を以下の通り設定する。</p> <p>1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]          [中間目標 (2019 年度)]          中小型 GTFC (10 万 kW) の要素技術を開発する。          ・高圧 SOFC モジュールを開発する。          ・ガスタービンとの関係技術を確認する (燃焼器、燃料/空気差圧制御系、排燃料・排空気・空気抽気)。</p> <p>[最終目標 (2021 年度)]          中小型 GTFC (10 万 kW) の要素技術を確認する。          ・燃料電池の高性能化による中小型 GTFC システムの最適化を行う。          ・小型 GTFC (出力 1,000kW 級) において、57%LHV (低位発熱量基準) の発電効率 (送電端) の見通しを得る。</p> <p>2. 燃料電池石炭ガス適用性研究/燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4)-(1)]          [中間目標 (2019 年度)]          ・H<sub>2</sub> リッチガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの基本性能を確認するとともに、発電性能を最適化するための運用性を確認する。また、石炭ガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの基本性能を確認する。</p> <p>[最終目標 (2021 年度)]          ・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。</p>																																																																																																																
事業の計画内容	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="384 1077 762 1160">1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]</th> <th data-bbox="762 1077 847 1160">2016 年度</th> <th data-bbox="847 1077 948 1160">2017 年度</th> <th data-bbox="948 1077 1048 1160">2018 年度</th> <th data-bbox="1048 1077 1149 1160">2019 年度</th> <th data-bbox="1149 1077 1249 1160">2020 年度</th> <th data-bbox="1249 1077 1350 1160">2021 年度</th> <th data-bbox="1350 1077 1439 1160">2022 年度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="384 1160 762 1211">小型 GTFC ハーフモジュール実証</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">—————</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1211 762 1294">セルスタック低コスト品質安定化技術開発</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">—————</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1294 762 1346">高性能セルスタック性能検証</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">—————</td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1346 762 1397">高圧 SOFC モジュールの開発</td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">—————</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th data-bbox="384 1397 762 1458">2. 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性検討 [④4)-(1)]</th> <th data-bbox="762 1397 847 1458">2016 年度</th> <th data-bbox="847 1397 948 1458">2017 年度</th> <th data-bbox="948 1397 1048 1458">2018 年度</th> <th data-bbox="1048 1397 1149 1458">2019 年度</th> <th data-bbox="1149 1397 1249 1458">2020 年度</th> <th data-bbox="1249 1397 1350 1458">2021 年度</th> <th data-bbox="1350 1397 1439 1458">2022 年度</th> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1458 762 1541">水素リッチガス適用及び石炭ガス設備連係に係る運転・制御の検討</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">—————</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1541 762 1624">燃料電池モジュール試験設備の設計・製作・据付</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">—————</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1624 762 1675">燃料電池カートリッジ試験</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">—————</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1675 762 1758">燃料電池モジュールの水素リッチガス試験</td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">—————</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1758 762 1809">実証機模擬ガス試験</td> <td></td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">—————</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1809 762 1861">石炭ガス化炉連係試験</td> <td></td> <td></td> <td colspan="4" style="text-align: center;">—————</td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1861 762 1944">石炭ガス(CO リッチガス)適用に係る技術検討</td> <td></td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">—————</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td data-bbox="384 1944 762 1989">燃料電池モジュールの解体調査</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">—————</td> </tr> </tbody> </table>	1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	小型 GTFC ハーフモジュール実証	—————							セルスタック低コスト品質安定化技術開発	—————							高性能セルスタック性能検証					—————			高圧 SOFC モジュールの開発		—————						2. 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性検討 [④4)-(1)]	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	水素リッチガス適用及び石炭ガス設備連係に係る運転・制御の検討	—————							燃料電池モジュール試験設備の設計・製作・据付	—————							燃料電池カートリッジ試験	—————							燃料電池モジュールの水素リッチガス試験		—————						実証機模擬ガス試験			—————					石炭ガス化炉連係試験			—————					石炭ガス(CO リッチガス)適用に係る技術検討			—————					燃料電池モジュールの解体調査						—————	
1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度																																																																																																										
小型 GTFC ハーフモジュール実証	—————																																																																																																																
セルスタック低コスト品質安定化技術開発	—————																																																																																																																
高性能セルスタック性能検証					—————																																																																																																												
高圧 SOFC モジュールの開発		—————																																																																																																															
2. 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性検討 [④4)-(1)]	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度																																																																																																										
水素リッチガス適用及び石炭ガス設備連係に係る運転・制御の検討	—————																																																																																																																
燃料電池モジュール試験設備の設計・製作・据付	—————																																																																																																																
燃料電池カートリッジ試験	—————																																																																																																																
燃料電池モジュールの水素リッチガス試験		—————																																																																																																															
実証機模擬ガス試験			—————																																																																																																														
石炭ガス化炉連係試験			—————																																																																																																														
石炭ガス(CO リッチガス)適用に係る技術検討			—————																																																																																																														
燃料電池モジュールの解体調査						—————																																																																																																											
事業費推移	<b>会計・勘定</b>	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	総額																																																																																																									

(会計・勘定別に NEDO が負担した実績額を記載) (単位:百万円)	一般会計	-	-	-	-	-	-	-
	特別会計 (電源・需給の別)	699	2,499	769	828	207	205	5,208
	1.ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]	556	1,297	574	97	19	90	2,632
	2.燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4)-(1)]	142	1,203	196	731	189	115	2,576
	開発成果促進財源		1,405	84	319	19		1,827
	総 NEDO 負担額 (委託)	699	2,499	769	828	207	205	5,208
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	1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] 三菱重工業株式会社 北川雄一郎 2. 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4] 電源開発株式会社 早川宏 (2016年5月~2020年6月) 電源開発株式会社 大畑博資 (2021年7月~)						
	プロジェクトマネージャー	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 主査 高橋 洋一 (2016年5月~2020年3月) 環境部 主査 牛嶋 隆士 (2020年4月~2021年3月) 環境部 主査 福原 敦 (2021年4月~2021年8月現在)						
	委託先	1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] 三菱重工業株式会社 日本特殊陶業株式会社 (再委託先) 株式会社トヨタエナジーソリューションズ 2. 燃料電池石炭ガス適用性研究 /燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4)-(1)] 電源開発株式会社 (再委託先) 三菱重工業株式会社						
情勢変化への対応	2050年カーボンニュートラルを目指して再エネの導入促進が加速され、火力発電比率は減少傾向に向かう。火力発電については、脱炭素燃料への転換や CCUS 技術により脱炭素化を図る一方で、高効率石炭発電技術は推進して行くとしており、石炭ガス化ガスを CO <sub>2</sub> 分離・回収することにより得られる水素リッチガスを燃料とする IGFC 研究の重要性は高く、実現に向けた要素技術の確立を整える。							
中間評価結果への対応	中間評価での主な指摘 (1) 石炭ガス運用時の SOFC 側からの取組みがないことから、実施者間の連携を強化する必要がある。 (2) 100MW 級 GTFC の早期実用化のために 1MW 級 SOFC を多数並べる方式は適切だが、将来も同様の 1MW 級にするのか大容量化により台数低減を目指すのかは今後の検討課題である。 (3) 世界初、世界最高水準の技術だが、今後の展開には汎用性等の検討が必要である。 指摘への対応							

	<p>(1) 【石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業】の実施者である「大崎クールジェン」、【ガスタービン燃料電池複合発電】の実施者である「三菱重工業」、【燃料電池石炭ガス適用性研究】の実施者である「電源開発」による『OCG 第3段階 SOFC 関係者合同会議』を2019年より実施。これまでの成果の共有や今後必要となるデータの洗い出しを行い、IGFC 実証試験の詳細設計に反映させた。</p> <p>(2) 2021年度には、高性能セルスタックを用いたカートリッジのGTFC実証機へ適用し検証。解析の結果、同一サイズのSOFCモジュールで性能が2倍以上に向上でき、SOFCモジュールの容器台数を半減できる見込みを得た。</p> <p>(3) CO<sub>2</sub>分離回収しないCOリッチガスを使用した運転試験を行い、IGFC適用範囲拡大に向けた追加検討を行った。また、水素リッチガスでの燃料電池発電への技術確立により、将来の水素社会におけるGTFCの適用範囲拡大に貢献。</p>	
評価に関する事項	事前評価	—
	中間評価	2019年度
	事後評価	2022年度
3. 研究開発成果について	<p>1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]</p> <p>①小型GTFCハーフモジュール実証          小型GTFC用に大容量化したSOFCモジュールと各システム機器を開発した。また、燃焼器温度を管理値内に抑制できるマイクロガスタービンを開発した。改良型MGTを適用したシステムで試験を行い、起動～昇温～定格に至る関係技術を検証した。また、フルモジュールにおける課題と対策を明らかにした。</p> <p>②セルスタック低コスト品質安定化          成膜技術と焼成技術の成果を反映すると共に、他工程（基体管＋空気極）の自動化等の目処を得て、製造面積、製造速度、工数、光熱費の全てを1/3以下にする目標を達成した。</p> <p>③高性能セルスタック検証          高性能カートリッジ2台を換装した試験を実施。課題と対策を明らかにし最終目標達成の目処を得た。</p> <p>④高圧SOFCモジュール開発          放熱対策を施したカートリッジにて2MPa程度の高圧試験を実施し、予想通りの発電出力が得られることを確認した。また、耐久試験を実施し電圧低下特性が低圧と同等であることを把握した。</p> <p>2. 燃料電池石炭ガス適用性研究／燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4)-(1)]</p> <p>①燃料電池モジュール試験に向けた検討          天然ガス用に設計された燃料電池モジュールに水素リッチガスを適用するための予備検討を実施し、挙動を把握した。その結果を基に、試験用250kW級燃料電池モジュールを設計、製作した。また、カートリッジ試験を行い水素リッチガスの発電基本特性を把握した。</p> <p>②燃料電池モジュール基本特性確認試験          水素リッチガスを用いた場合の燃料電池モジュールの基本性能及び運用性を確認した。</p> <p>③水素リッチガス最大負荷試験          水素リッチガスは天然ガスよりも出力が低下するが、再循環流量増や燃料利用率など、運転パラメータの変更により発電出力が改善することを確認した。また、水素リッチガスにCO<sub>2</sub>を添加した場合に発電室上部の温度が低下し、発電出力が増加することを確認した。</p> <p>④石炭ガス化炉関係設備の設計</p>	

	<p>ガス化炉からの石炭ガスを燃料電池モジュールに使用するため相互の協調した圧力制御等を行い、燃料電池用のガス精製設備を備えたガス化炉連係設備の設計、工事を実施した。</p> <p>⑤石炭ガス化炉連係試験 石炭ガス化炉と燃料電池を連係し、実証機に向けた燃料電池の運用性(圧力制御性確認、連係起動、緊急停止等)を確認した。連係設備を通じた石炭ガスを使った発電が可能であることを確認し、実石炭ガスを使用したパラメータ変化による発電特性を把握した。</p> <p>⑥燃料電池用ガス精製設備の被毒成分除去性能の確認 燃料電池の被毒成分である H<sub>2</sub>S を除去するガス精製設備において、設計値の 2 倍以上の濃度 (500ppm)でも 1ppb 以下(基準 10ppb)まで除去できることを確認した。</p> <p>⑦石炭ガス(CO リッチガス) 適用に係る技術検討 IGFC の適用範囲拡大に向けた検討として、燃料電池モジュールに石炭ガス (CO リッチガス) を直接燃料として供給するケースについて技術検討し、発電性能の把握、熱平衡計算から算出した運転条件による炭素析出の状況について確認した。</p>
投稿論文	<p>1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] 「査読付き」6 件、「その他」2 件 ※査読というより、依頼受けした寄稿</p>
特 許	<p>1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] 「出願済」8 件 (うち国際出願 3 件)、国内登録済 7 件 2. 燃料電池石炭ガス適用性研究/燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4)-(1)] 「出願済」1 件 (うち国際出願 0 件)</p>
その他の外部発表 (プレス発表等)	<p>1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] 「学会等発表」17 件、「受賞実績」2 件、「HP 等掲載」13 件、「展示会等への出展」3 件 2. 燃料電池石炭ガス適用性研究/燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4)-(1)] 「学会等発表」8 件</p>
4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて	<p>ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] および燃料電池石炭ガス適用性研究 [④4] の研究成果が【石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業】の要素研究として反映され、2022 年 4 月より実証試験を開始している。</p> <p style="text-align: center;">基盤技術開発成果の CO<sub>2</sub> 分離回収型 IGFC 実証への反映</p> <p>【大崎クールジェン第3段階】CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証</p> <p>【NEDO委託事業】④3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発</p> <p>【NEDO委託事業】④2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンアップ技術要素研究</p> <p>【NEDO委託事業】④4) 燃料電池石炭ガス適用性研究 [④4]</p> <p>(1) IGFCシステム検討</p> <p>(2) 燃料電池モジュール石炭ガス適用性研究</p> <p>作成時期 2016 年 1 月 作成</p>

<p>5. 基本計画に関する事項</p>	<p>変更履歴</p>	<p>2017年2月改訂 ④3)4)のPM、PL変更、知財マネジメント適用プロジェクトへの追記)</p> <p>2019年7月改訂 ④3)4)の中間評価の追加、④3)4)の事後評価時期の変更、④3)4)の実施期間の延長、中間目標の策定及び最終目標の修正)</p> <p>2020年2月改訂 ④3)4)において中間評価結果反映のため最終目標を追記。</p> <p>2020年7月改訂 ④3)4)のPM変更</p> <p>2020年9月改訂 ④4)のPL変更</p> <p>2021年5月改訂 ④3)4)のPM変更</p>
----------------------	-------------	---



## プロジェクト用語集

名称	略号	意味
暗騒音 background noise		信号の生成、伝送、検出、測定または記録に用いるシステムの中にある全ての音源からの妨害の全部
加圧形燃料電池 pressurized fuel cell		作動圧力が大気圧近傍を超える燃料電池 (反応ガスの最高使用圧力が、0.1 MPa 以上の燃料電池)
ガス精製 (ガスクリーナップ) gas clean-up		燃料電池用として、石炭ガス化ガスから被毒成分を除去するプロセスであり、被毒成分を吸着する吸着剤が用いられる。
ガスタービン燃料電池複合発電 Gas Turbine Fuel Cell combined cycle	GTFC	GTCC に燃料電池を組み合わせたトリプルコンバインドサイクル方式の発電
ガスタービン複合発電 Gas Turbine Combined Cycle	GTCC	ガスタービンと蒸気タービンによる複合発電
カートリッジ cartridge		セルスタックを集合させて、燃料/空気の供給/集電を行う最小ユニット
基体管 substrate tube		円筒形燃料電池において、電極、電解質などを積層するための多孔性支持管
吸着剤 adsorbent		表面に他の物質を吸着する性質の強い物質。物質表面の原子が近接した特定の分子やイオンなどの化学種を結合する。
空気極 (空気極) air electrode (cathode)		空気などの酸化剤ガスを電気化学的に還元する電極 (負荷側から見て正極である)
空塔速度 Space Velocity	SV	単位時間あたりに体積の何倍相当分を処理しているかという速度。
検知管法 detection tube method		細長いガラス管に対象成分と選択的に反応し、呈色する試薬をつめておき、一定体積の試料を吸引導入したときの呈色した長さから濃度を求める方法
固体酸化物形燃料電池 Solid Oxide Fuel Cell	SOFC	電解質に高温でイオン導電性をもつ酸化物を用いる燃料電池。電解質としてイオン伝導性セラミックスを用いており、作動温度は 700~1000℃。燃料には水素の他に天然ガスなどが利用可能
サージ (サージング) surging		圧縮機内及びこれに続く管路内の作動流体の質量流量、並びに圧力の低周波数変動によって特徴付けられる不安定状態
シフト反応 Shift reaction		一酸化炭素と水蒸気から水素と二酸化炭素を生成する反応。水性ガスシフト反応とも言う。 $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$

触媒燃焼 catalytic combustion		触媒作用による火炎を形成しない酸化反応
ショートセル Short cell		円筒横縞型セルは百個程度のセルが直列に積層されているが、試験のため少数(主に3つ)のセルのみ直列に積層して使用するもの。
水素リッチガス Hydrogen rich gas		CO <sub>2</sub> 分離回収型 IGFC では石炭ガス中の CO <sub>2</sub> を除去するため、H <sub>2</sub> 割合の高いガスになる。CO <sub>2</sub> 分離・回収型酸素吹 IGCC 実証機で想定している H <sub>2</sub> 成分 85%のガスを水素リッチガスとしている。
石炭ガス化燃料電池複合発電 Integrated coal Gasification Fuel Cell combined cycle	IGFC	IGCC 同様石炭をガス化し得られた石炭ガス化ガスを燃料とし、ガスタービン、蒸気タービンに、さらに燃料電池発電を組み合わせた複合サイクル火力発電。
石炭ガス化複合発電 Integrated coal Gasification Combined Cycle	IGCC	石炭をガス化し得られた石炭ガス化ガスを燃料とし、ガスタービンと蒸気タービンによる複合サイクル火力発電。
セルスタック fuel cell stack		単セルを複数つなげた円筒型積層体。SOFC の基本構成単位
線速度 Liner Velocity	LV	単位時間あたりに塔の断面積を通過する流体速度。
走査型電子顕微鏡 Scanning Electron Microscope	SEM	電子顕微鏡の一種。電子線を絞って電子ビームとして対象に照射し、対象物から放出される二次電子、反射電子（後方散乱電子、BSE）、透過電子、X線、カソードルミネッセンス（蛍光）、内部起電力等を検出する事で対象を観察する。
送電端効率 net electrical efficiency		燃料電池発電設備に投入される原燃料のもつ発熱量に対する送電電力量（熱量換算）の比。[送電電力量とは、発電電力量から設備内の補機などによる所内動力の消費電力量を差し引いたもの]
多目的石炭ガス製造技術開発 coal Energy Application for Gas, Liquid & Electricity	EAGLE	化学原料用、水素製造用、合成液体燃料用、電力用等幅広い用途への適用が可能な石炭ガス化技術及びガス精製技術の確立等を目的とする技術開発。
単セル single cell		燃料極、空気極及び基体管が一組となって構成される電池の基本構成単位
炭素析出 Carbon deposition		反応ガス中の炭素化合物の分解によって固体の炭素が系統内に堆積する現象。代表的にはブドワール反応。 $2CO = C + CO_2$

低位発熱量 lower heating value	LHV	燃料を完全燃焼させたときの水蒸気の凝縮潜熱を差し引いた発熱量
電圧低下率 Voltage drop rate		発電時間に対するセル電圧の低下の割合。
電解質 electrolyte		空気極と燃料極との間のイオン伝導を行う物質
電子線マイクロアナライザー Electron Probe Micro Analyzer	EPMA	電子線を対象物に照射する事により発生する特性 X 線の波長と強度から構成元素を分析する電子マイクロプローブ (EMP) 装置の一つ。元素分析を主体としたものであり、定量精度は良いが検出効率が悪く、より高い照射電流を必要とする。
内部改質方式燃料電池 internal reforming fuel cell		燃料電池モジュール内で自己の発熱を利用して原燃料の改質を行う燃料電池
二次イオン質量分析法 Secondary Ion Mass Spectrometry	SIMS	質量分析法におけるイオン化方法の種類の一つ。固体の表面にビーム状の一次イオンを照射し、そのイオンと固体表面の分子・原子レベルでの衝突によって発生する二次イオンを質量分析計で検出する表面計測法。
燃料極 (アノード) fuel electrode (anode)		水素、一酸化炭素などの燃料ガスを電気化学的に酸化する電極 (負荷側から見て負極である)
燃料利用率 Fuel utilization		供給燃料の内、燃料電池内で消費される燃料の割合。
被毒成分 poisoning component		燃料電池の燃料極の触媒と反応したり、触媒に吸着する物質のことで、性能低下を引き起こす。
ブロワ blower		羽根車もしくはロータの回転運動またはピストンの往復運動によって気体を圧送する機械を圧縮機というが、有効吐出し圧力が 200kPa 以下のものをブロワと呼ぶ。
ベンチ試験 Bench test		事前に想定した設計が正確・妥当であるかどうかを検証・確認するための試験。
マイクロガスタービン micro gas turbine	MGT	ガスタービンの中で、小型のものをマイクロガスタービンといい、発電量が小さい一方、コストと設置面積を抑えられる特徴を持つ。
マスフローコントローラ mass flow controller	MFC	流体の質量流量を計測し流量制御を行う機器
モジュール fuel cell module		所要出力を得るために一つ又は複数のセルスタック、燃料、酸化剤、排気ガス及び電力の接続部で構成されたセルスタック群

溶融炭酸塩形燃料電池 Molten Carbonate Fuel Cell	MCFC	燃料電池の一種。電解質のイオン伝導は炭酸イオン (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )である。一般的に電解質にリチウム、ナトリウムの混合物が融解した溶融炭酸塩、燃料極の触媒にニッケル、空気極の触媒に酸化ニッケルが使われる。化学反応が高温で行われるため、白金などの高価な触媒が不要である。高温で稼働し水素以外に一酸化炭素も燃料にできる。作動温度は 700～1,000℃程度。
ライナ flame tube		燃焼器で燃焼領域、混合領域及びタービン入口に向かう燃焼ガス流路を形成する筒状の構造物。燃焼器内筒。
CFD 解析 computational fluid dynamics		流体の運動方程式をコンピュータにより数値的に計算し、流れを可視化する手法
CO リッチガス CO rich gas		CO <sub>2</sub> 分離回収前の CO 成分が高いガス。
EDS 分析 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy		電子ビームを照射し微小領域、局所領域の元素を分析する手法
X 線回析法 X-ray diffraction	XRD	X 線が結晶格子で回折する結果から結晶内部で原子がどのように配列しているかを決定する手法。

# 1. 事業の位置付け・必要性について

## 1-1. 事業の背景・目的・位置づけ

### (1) 政策的重要性

エネルギー資源に乏しい我が国にとって、石炭火力、ガス火力は、温室効果ガスの排出という課題があるが、安定供給性や経済性に優れた重要な電源であり、2015年7月に決定された「長期エネルギー需給見通し」においても、S+3E（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いる。火力発電分野においては、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きた。

これを踏まえ、2016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、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が取りまとめられている（図1-1-1,1-1-2）。

しかしながら近年の世界的な地球温暖化対策への取り組みに向け、2021年10月に策定された「第6次エネルギー基本計画」においては、エネルギー政策を進める上での大原則としての、S+3Eの視点の重要性は従来と変わらないとしながらも、2030年度の新たな削減目標や2050年カーボンニュートラルという野心的な目標の実現を目指し、あらゆる可能性を排除せず、使える技術は全て使うとの発想に立つことが今後のエネルギー政策の基本戦略とすることが示しており、非効率な火力のフェードアウトに取り組むとともに、脱炭素型の火力発電への置き換えに向け、アンモニア・水素等の脱炭素燃料の混焼やCCUS/カーボンサイクル等の火力発電からのCO<sub>2</sub>排出を削減する措置の促進を促している。

一方で、火力運用の効率化・高度化のための技術開発・導入環境整備の進めながらも、引き続き脱炭素化を見据えつつ、次世代の高効率石炭火力発電技術である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）などの技術開発等を推進することとしている。

これらの背景を踏まえ、本事業ではCO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証事業の要素技術開発として、

- ・ ガスタービン燃料電池複合発電技術開発
- ・ 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

を実施し、その成果を実証事業に適用させることとしている。

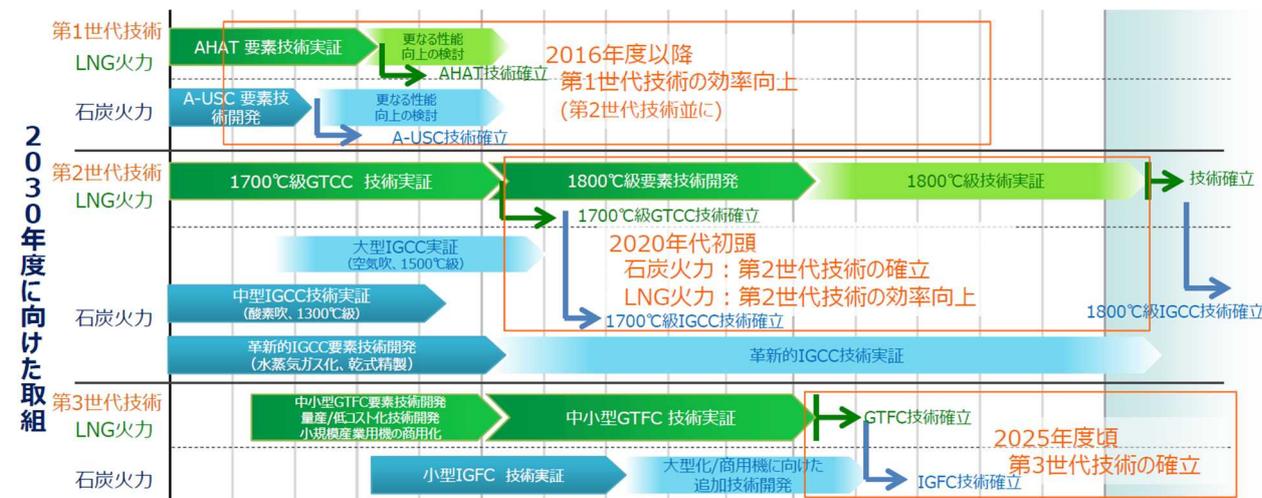


図 1-1-1 次世代火力発電に係る技術ロードマップ  
(出展：次世代火力発電の早期実現に向けた協議会資料)

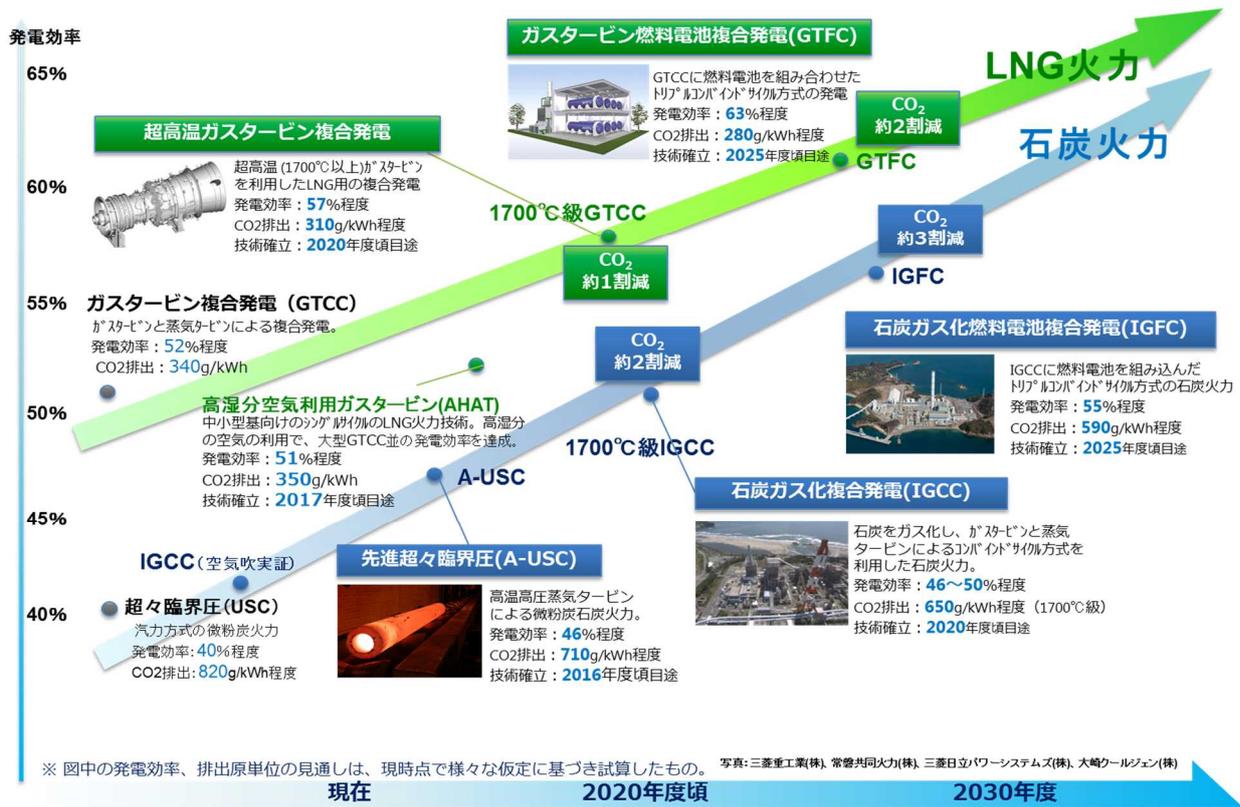


図 1-1-2 次世代火力発電に係る技術ロードマップ（次世代火力発電技術）  
（出展：次世代火力発電の早期実現に向けた協議会資料）

(2) 我が国の状況

我が国の火力発電の熱効率は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）を実用化し、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 においても実証を完了している。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、更なる高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）や CO<sub>2</sub> フリー燃料の利用技術の開発・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に加え、CO<sub>2</sub> を炭素資源と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルを推進する取組や石炭火力発電におけるアンモニア混焼試験が進められている。

(3) 国内外の技術動向

燃料電池発電に関しては、米国や韓国、日本などで研究・販売が行われている。GTFC、IGFC のような火力発電との複合発電に使用可能な燃料電池としては、作動温度が高く、ガスタービンとの組み合わせが容易で、かつ石炭ガス化ガスも利用可能であることなどから、熔融炭酸塩型燃料電池（MCFC）と固体酸化物型燃料電池（SOFC）が対象として想定される。

MCFC については、Fuel Cell Energy（米）および同社とライセンス契約を締結している POSCO Energy（韓）が市場投入しているものに代表される。MCFC は、カソード（空気極）材料の NiO が電解質に溶解し、

電解質で内部短絡を起こす問題があり、これは高圧化で加速される。そのため、常圧システムの商品化が行われている。日本における MCFC 研究開発は、ムーンライト計画の一部として国家プロジェクトとして始まったが、現在は既に解散している状況である。

SOFC については、2013 年に米国 Bloom Energy がモノジェネ型の SOFC を我が国に市場投入し、2017 年に三菱日立パワーシステムズ(株) (現三菱重工業) の加圧 250kW 級ハイブリッドシステムが上市されている。その他、数十 kW 規模の SOFC としては、国内では NEDO 事業として日立造船(株)の平板型セルを用いた常圧 20kW 級システム及び富士電機(株)の円筒型セルを用いた常圧 50kW 級システムの実証が行われている (図 1-1-3) 。国外では、米国エネルギー省 National Energy Technology Laboratory (NETL) が Solid State Energy Conversion Alliance (SECA) 計画で FuelCell Energy 社の平板型セルを用いた常圧 50kW 級モジュール及び LG Fuel Cell Systems 社の平板型セルを用いた加圧モジュールの開発が行われている。

GTFC、IGFC に適用する場合、大容量化に伴いガスタービンが大型化し、入口圧力が高くなることから、燃料電池も高圧化に対応する必要がある。三菱重工業(株)が開発している円筒型セルスタックを用いた燃料電池は、NEDO 事業「ガスタービン燃料電池複合発電技術開発」にて 2.0MPa の高圧化に対応する燃料電池の技術開発が行われ、これらの用途に適していると考えられる。

	三菱日立 パワーシステムズ	三浦工業	京セラ	富士電機	日立造船
外観					
出力 (AC)	250kW/1350kW SOFC:227kW/1140kW	4.2kW	3kW	50kW級	20kW級
発電効率 [LHV%]	55%	48%	52%	55%	52%超
総合効率 [LHV%]	73%/76% 蒸気の場合:65%/68%	90%	90%	85%	90%超
発電方式	SOFC+マイクロガスタービン	SOFC	SOFC	SOFC	SOFC

図 1-1-3 経済産業省「水素・燃料電池戦略ロードマップの進捗状況/参考資料」より一部抜粋

次世代火力発電に関しては、米国、欧州、中国、韓国等において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 IGFC、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。

IGFC を実用化するためには、基盤となる IGCC 技術が確立されていることが前提となる。IGCC の実証事業は、1990 年代に実施された Buggenum IGCC(オランダ)、Puertollano IGCC(スペイン)、Wabash River IGCC、Tampa IGCC(いずれもアメリカ)が 4 大プロジェクトとして知られている。内、Buggenum は、欧州の再生エネルギー拡大の影響を受け、2013 年 3 月末に廃止され、Puertollano についても、同様の理由により、2015 年 8 月に廃止されている。Wabash River については、天然ガス価格の低下や運転費用の増加によりアンモニア製造設備への転換を予定している。なお、Tampa については、ガス化しやすいペトロコークスとの混焼により運転を継続しているが、スラッジの発生が主な要因で、連続運転時間が 3,000 時間以下と短い。中国では、

GreenGen プロジェクトとして IGCC 技術の開発が進められており、250MW 級の実証プラントにて実証試験が行われている。また、国家エネルギー集団にて IGFC に使用する 20kW 級固体酸化物燃料電池発電システムの開発が行われているとの情報がある。日本においては、166MW 規模の酸素吹 IGCC 実証試験が 2018 年度に完了しており、空気吹 IGCC については 500MW 級機が 2021 年 4 月に勿来、11 月に広野でそれぞれ営業運転が開始されている。また、日本の大崎クールジェン(株)において、2019 年 3 月より商用規模の燃料電池を用いた世界初の CO<sub>2</sub> 分離・回収型 IGFC 実証事業が開始され、2022 年 4 月より実証試験が開始されている。

## 【海外プロジェクトの例】

### Taan

- ・韓国 KEPCO 社
- ・発電端出力 300MW
- ・IGCC
- ・2016 運転開始



### GreenGen

- ・中国 GreenGen 社
- ・発電容量 250MW
- ・IGCC+CCS
- ・2012 運転開始



図 1-1-4 世界の IGCC プロジェクトの例

## 1-2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

### 1-2.1 NEDO が関与することの意義

石炭火力、ガス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 NEDO 事業として統合し、「次世代火力発電等技術開発」として一体的に進めている。

その中でも、石炭火力、ガス火力の発電効率を大幅に引き上げることのできるガスタービン燃料電池複合発電 (GTFC) 技術、及び石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) 技術は、従来の火力発電に比べ高効率化による大幅な CO<sub>2</sub> 排出削減効果が見込まれる有益な技術である。一方で、石炭ガスやそれを CO<sub>2</sub> 分離・回収することにより得られる水素リッチガスを含むガスタービンと燃料電池を組み合わせた大型発電システムの構築については世界的に例が無く、技術課題が多く残されており、また投資規模も大きいため、民間企業だけで進めるのはリスクが高い。火力発電からの温室効果ガス削減のためには、これら技術のできるだけ早い実用化・市場投入が求められる状況である。

これらのことから、本事業は NEDO がもつこれまでの知識、実績を活かし、研究を推進・加速すべき事業であるといえる。

### 1-2.2 実施の効果（費用対効果）

#### (1) 費用対効果

2016 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」にて示されているように、IGCC の発電効率を 46%程度、IGFC を 55%程度と想定し、その発電効率向上分より燃料費は、IGCC で 3.8 円/kWh、IGFC で 3.1 円/kWh と試算される（商用規模である 500MW 級を想定し、「経済産業省 発電コストレビューシート」および IGCC 実証試験データを用いて NEDO にて試算）。

設備利用率を 70%に設定すると IGCC および IGFC の 1 機あたりの年間燃料コストは、表 1-2-1 に示すように試算される。

表 1-2-1 IGCC、IGFC における燃料コスト

	発電効率 (%)	燃料費 (円/kWh)	燃料コスト (商用機 500MW 級 : 1 機あたり)
IGCC	46	3.8	117 億円/年
IGFC	55	3.1	95 億円/年

1 機あたりの IGFC による燃料コスト削減効果は、燃料電池の稼働年数 15 年（「NEDO 燃料電池ロードマップ」2030 年以降の耐用年数 13 万時間より）から、330 億円と試算され、この費用は燃料電池複合発電化に充てることが可能であると考えられる。

#### (2) CO<sub>2</sub> 排出量の削減

IGCC と比べ IGFC の導入により発電効率は 55%まで向上するため、500MW 級発電所に導入した場合、1 基あたりの CO<sub>2</sub> 排出量は 18 万 t/年減らすことが可能であり、IGCC 比で約 9.4%の CO<sub>2</sub> 排出削減効果が見込める。

表 1-2-2 石炭ガス化複合発電における燃料電池適用時の CO<sub>2</sub> 削減効果の試算（500MW 級発電所）

	発電効率 (%)	kWh あたりの CO <sub>2</sub> 排出量*	CO <sub>2</sub> 排出量**	CO <sub>2</sub> 削減量	CO <sub>2</sub> 削減割合
IGCC	46	0.65kg/kWh	199 万 t/年	ベース	ベース
IGFC	55	0.59kg/kWh	181 万 t/年	17 万 t/年	約 9.4%

\* 「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」

\*\* 500MW 規模の発電所に適用された場合の排出量を試算

500MW×8,760 時間×0.7（稼働率）= 3,066,000MWh/年

IGCC : 3,066,000kWh/年×0.65kg/kWh = 199 万 t/年

IGFC : 3,066,000kWh/年×0.59kg/kWh = 181 万 t/年

表 1-2-3 事業費用

	事業名	事業期間（年）	事業費（億円）
GTFC	ガスタービン燃料電池複合発電技術開発	6	26.3
IGFC	燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究	6	25.8
全事業費の合計			52.1

IGCC を燃料電池複合発電化する事により高効率化が可能であり、更なる温室効果ガス削減の観点からもその効果が期待され、CO<sub>2</sub> 分離・回収型 IGFC のシェアが拡大することで、大きな経済効果が見込める。

## 2. 研究開発マネジメントについて

### 2-1. 事業の目標

#### 2-1-1. 事業の目標設定の背景

##### (1) 石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) 実証事業について

NEDO は、石炭火力発電から排出される二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) を大幅に削減するため、究極の高効率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・回収を組み合わせた革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指す「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業 (助成事業)」に大崎クールジェン株式会社 (※) と取り組んでいる。

当該事業は 3 つの段階に分かれており、第 1 段階では、IGFC のベースとなる酸素吹石炭ガス化複合発電 (IGCC) の実証を、第 2 段階では酸素吹 IGCC に CO<sub>2</sub> 分離回収設備を付加した CO<sub>2</sub> 分離・回収型酸素吹 IGCC の実証を、第 3 段階では CO<sub>2</sub> 分離・回収型酸素吹 IGCC に燃料電池を組み合わせた CO<sub>2</sub> 分離・回収型 IGFC の実証をそれぞれ実施している。このうち、第 3 段階である CO<sub>2</sub> 分離・回収型 IGFC については、2019 年 3 月から事業を開始しており、現在は実証試験に向けた準備を行っている。実証試験は 2021 年度末～2022 年度を予定している (図 2-1-1、図 2-1-2、表 2-1-1)。

当該実証事業は、2012 年度～2015 年度までは経済産業省の直轄下、2016 年度以降は NEDO が事業を承継して進められている。2025 年度頃に IGFC の技術を確立するために取り組んでおり、究極の高効率発電技術の実現に向けてその意義は大きい。一方で、石炭ガス化複合発電と商用規模の燃料電池を組み合わせた高効率発電技術実証は世界初の試みであり、解決すべき課題が残されている。今回の評価対象である各基盤技術開発で得られた成果については、大崎クールジェンの第 3 段階実証事業の設計や計画に適時反映してきた。

※中国電力株式会社と電源開発株式会社の共同出資会社



図 2-1-1 大崎クールジェン(株)全景  
(出展：大崎クールジェン(株)より提供)

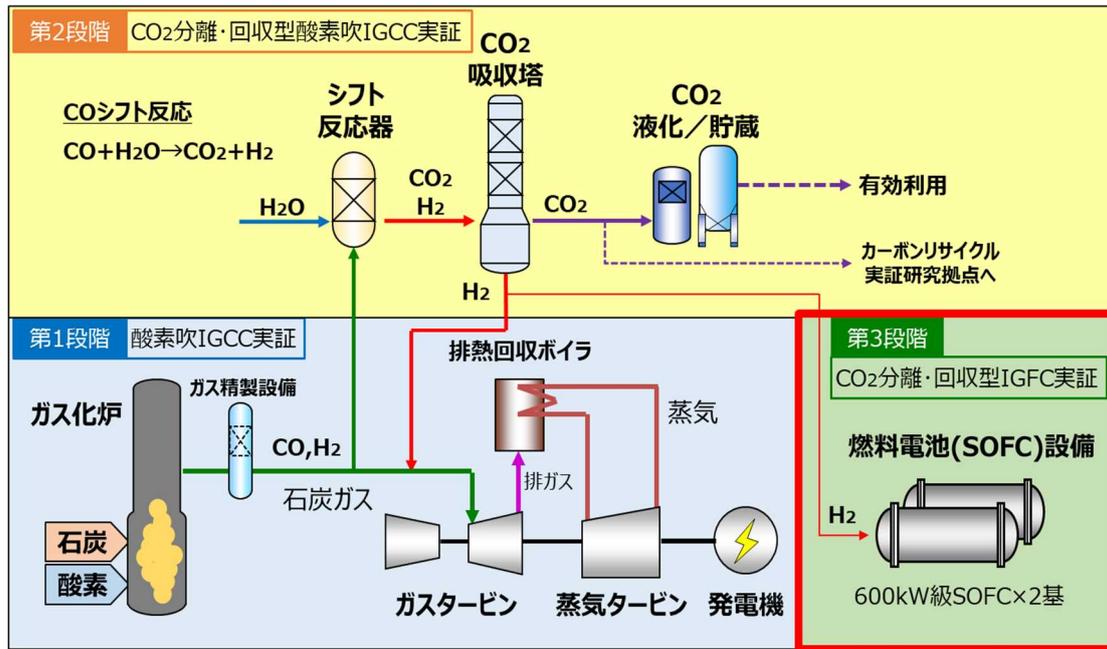


図 2-1-2 大崎クールゼン事業の概要

表 2-1-1 大崎クールゼン事業のスケジュール

年度	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
第1段階 酸素吹IGCC実証	設計・製作・据付					実証試験					
第2段階 CO <sub>2</sub> 分離・回収型IGCC実証					設計・製作・据付			実証試験	製作・メンテナンス	実証試験	
第3段階 CO <sub>2</sub> 分離・回収型IGFC実証								設計・製作・据付		実証試験	

## (2) IGFC用燃料電池について

IGFCに使用する燃料電池には、大容量かつ事業用ガスタービンとの連係運転が可能な設備であることが要求されるため、これに適用可能性の高い燃料電池を選択する必要がある。燃料電池としては、作動温度が高く、ガスタービンとの組み合わせが容易で、かつ石炭ガス化ガスも利用可能であることなどから、熔融炭酸塩型燃料電池 (MCFC) と固体酸化物型燃料電池 (SOFC) が対象として想定される。うち、MCFCについては、カソード (空気極) 材料の NiO が電解質に溶解し、電解質で内部短絡を起こす問題があり、これは高圧化で加速される課題がある。現時点で、高圧化対応の可能性が最も高いのは SOFC とされ、三菱重工業が円筒型 SOFC セルススタックを用いた加圧型燃料電池モジュール (250kW 級、圧力 0.23MPa) を上市している状況である。

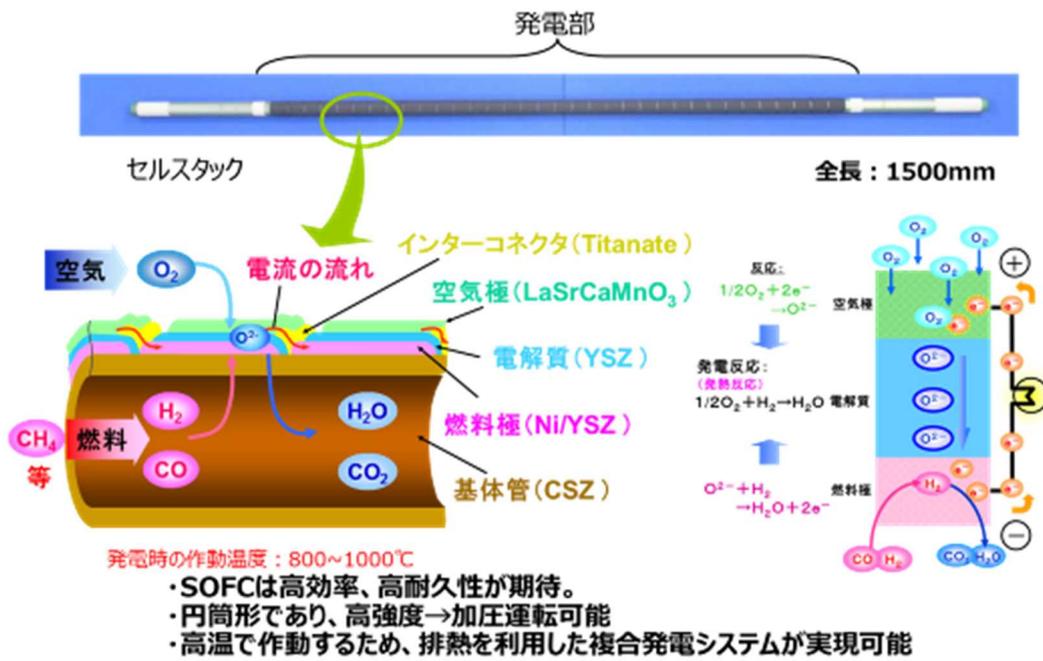


図 2-1-3 円筒型固体酸化物形燃料電池 (SOFC)

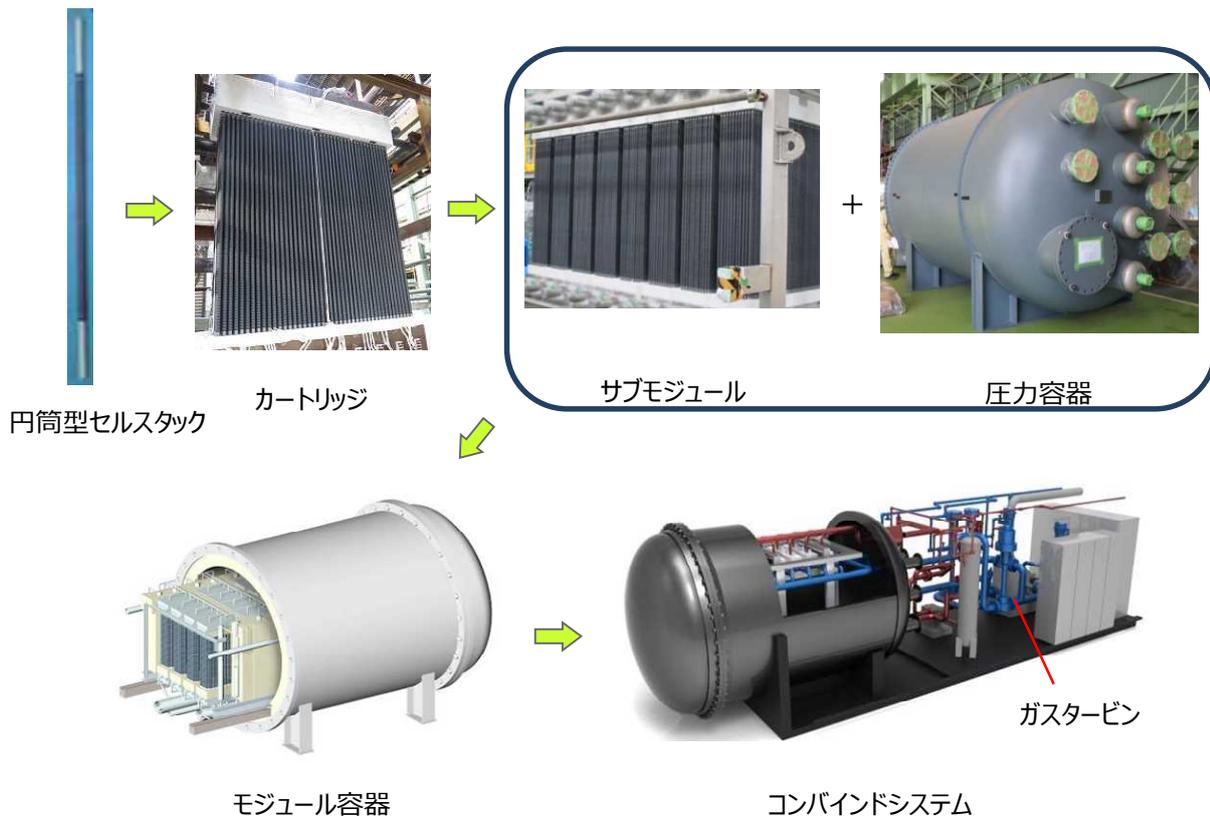


図 2-1-4 SOFC 燃料電池システムの構成

### (3) IGFC 実証に向けた課題と取組

燃料電池の課題としては、運転圧力の違い（高圧化）と燃料電池の大容量化の課題が挙げられる。GTFC、IGFC を実現するためには、大型のガスタービンと燃料電池を組み合わせる必要があり、事業用ガスタービンは入口圧力が 2.0～3.0MPa となるため、これに対応できる燃料電池を開発する必要がある。燃料電池の高圧化に伴い、温度分布の不均一化やリークなどの課題について対策が必要となる。また、GTFC、IGFC を実現するためには大型の燃料電池システムを構築する必要がある。商用規模の GTFC、IGFC における燃料電池モジュールの最小単位は 1MW 程度と想定されている。燃料電池モジュールを 1MW 級に大容量化することで、電気およびガスの偏流が予想され、これに対し燃料電池モジュールを最適化する必要がある。

また、現状の 250kW 級 GTFC システムは天然ガスを燃料として設計されており、IGFC 実現のためには、石炭ガス化ガスに適したシステムを設計する必要がある。石炭ガス適用における課題としては、微量成分の影響と燃料ガス組成の違いが挙げられる。微量成分については、石炭ガス化ガスには天然ガスに含まれない燃料電池を被毒する可能性のある成分が微量含まれており、これら被毒成分について、燃料電池性能に与える影響を把握するとともに、その除去方法を検討する必要がある。また、燃料を天然ガスから CO と H<sub>2</sub> を主成分とする石炭ガスに変更する場合、天然ガスの場合は燃料極の入口付近でメタン改質に伴う吸熱反応の影響を受けるのに対し、石炭ガスではその効果が得られないことから、石炭ガスに最適な冷却システムを構築する必要がある。これらの課題について、NEDO は基盤技術開発を実施して解決に取り組んできた。

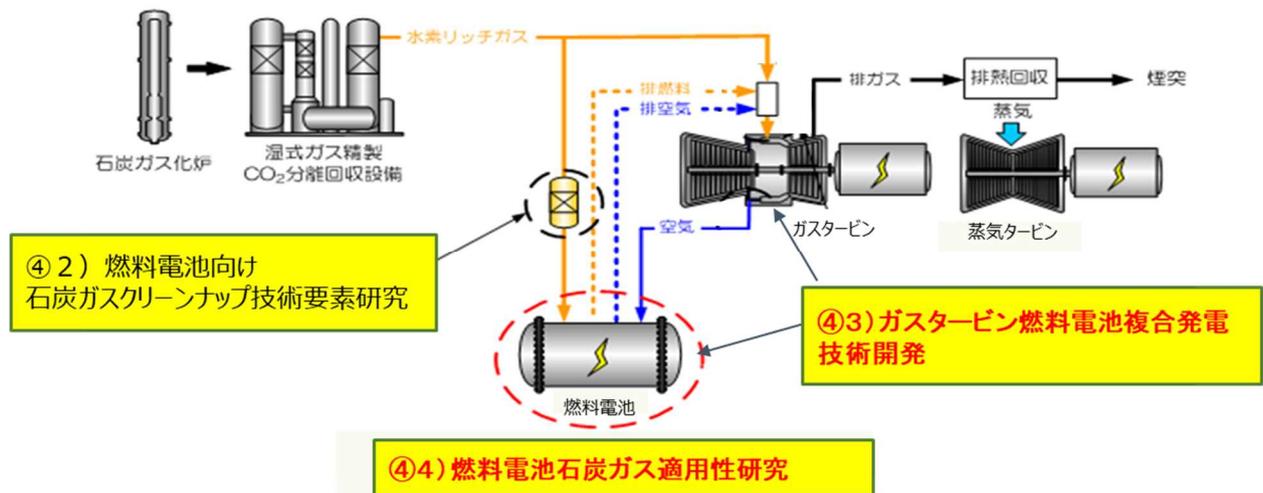


図 2-1-5 IGFC 技術確立に向けた基盤技術開発

表 2-1-2 IGFC 技術確立に向けた基盤技術開発と委託先

課題	委託事業名	委託先	
燃料電池の大容量化、高圧化	④ 3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 (2016.5～2022.3)	三菱重工業 (株) 日本特殊陶業 (株)	
燃料電池への石炭ガスの適用 (微量成分の影響、燃料ガス組成の違い)	④ 2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 (2015.9～2018.2)	電源開発 (株)	
	④ 4) 燃料電池石炭ガス適用性研究	(1)燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 (2016.5～2021.6)	電源開発 (株)
		(2)IGFCシステムの検討 (2016.5～2018.12)	電源開発 (株) 中国電力 (株)

## 2-1-2. 各基盤技術開発事業の目標

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、石炭火力、LNG 火力とともに、究極的な高効率技術であるガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクルに燃料電池を組み合わせたトリプルコンバインドサイクル（第 3 世代）の技術を確立することで、革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指す。各基盤技術開発事業の目標を以下の通り設定する。

### （1）ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]

#### 【中間目標(2019 年度)】

中小型 GTFC(10 万 kW)の要素技術を開発する。

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

#### 【最終目標(2021 年度)】

中小型 GTFC(10 万 kW)の要素技術を確立する。

- ・燃料電池の高性能化による中小型 GTFC システムの最適化を行う。

#### 【目標設定の根拠】

GTFC, IGFC 普及のためには、大容量かつ高圧対応が可能な燃料電池の開発、量産化技術の開発が不可欠である。本目標の達成により、小型 GTFC の商用化が可能となり、得られた成果は中小型 GTFC の実証に活用することができる。また、本事業で得られた成果は IGFC 実証事業に活用することができる。

### （2）燃料電池石炭ガス適用性研究／燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4)-(1)]

#### 【中間目標(2019 年度)】

H<sub>2</sub> リッチガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの基本性能を確認するとともに、発電性能を最適化するための運用性を確立する。また、石炭ガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの基本性能を確認する。

#### 【最終目標(2021 年度)】

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。

#### 【目標設定の根拠】

本目標の達成により、IGFC 実証試験の詳細設計や試験内容を具体化できるとともに、商用 IGFC の設計に向けたデータを得ることができる。

## 2-2. 事業の計画内容

### 2-2.1 研究開発の内容

#### (1)ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]

ガスタービン燃料電池複合発電(GTFC)技術は、天然ガスを改質して燃料電池で発電した後に、改質残ガスをガスタービンに供給して発電し、さらに排熱を利用して蒸気タービンで発電するトリプル複合発電技術であり、ガス火力発電技術の中で最も高効率化が図れる。

本技術開発において、燃料電池の高圧化、大容量化に資する技術を開発し、小型 GTFC（1MW 級）の商用化、量産化を進めてコストを低減し、中小型 GTFC（100MW 級）の実証を経て、2025 年頃に技術を確立する。また、本事業を通じて得られた成果については、CO<sub>2</sub> 分離・回収型 IGFC 実証事業へ活用する。

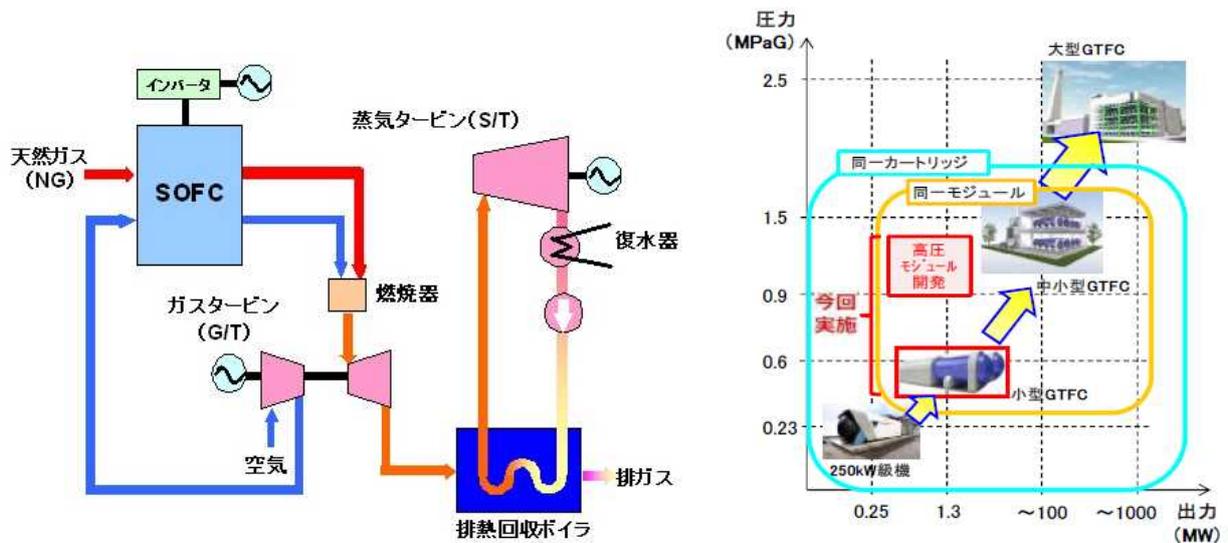


図 2-2-1 ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 事業概要

本事業では、小型 GTFC ハーフモジュール実証、セルスタック低コスト品質安定化技術開発、高性能セルスタックを適用したモジュール性能検証等の研究開発などの実施により小型 GTFC システムを確立し、57%LHV（低位発熱量基準）の発電効率（送電端）の見通しを得ることで、中小型 GTFC の要素技術を確立することを目的とする。また、中小型 GTFC や IGFC の運転圧力である 2.0MPa 程度の高圧条件下にてカートリッジ試験を実施し、高圧化での圧力特性と放熱抑制の効果を把握し、システムの適正化を検討する。

表 2-2-1 ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 研究開発目標と根拠

研究開発項目		研究開発目標	根拠
① 小型 GTFC のシス テム化	(a)小型GTFC ハーフモジュール 実証	・高圧・大容量化対応SOFCモジュール、各機器開発 ・MW級モジュールで送電端効率57%LHVの見通しを得る ・小型GTFC(1MW級)に使用するガスタービンの開発 ・運転圧力0.6MPa級のMGTとSOFCの連係技術確立	小型GTFC(出力1MW級) 商用化のために 必要な技術を開発し、中小型GTFCの実証 につなげるため
	(b)セルスタック 低コスト品質安 定化技術開発	・セルスタックを安定した品質で生産可能な技術を開発する こととし、セルスタックの品質ばらつきが性能に及ぼす許容範 囲の明確化による歩留り向上を目指す	燃料電池ロードマップのコスト目標（2025年 度に30万円/kW）達成のため、燃料電池 製造コストを現状の1/3以下にする必要があり、 製造工程の効率化やセルの高性能化による コストダウンが必要となるため
	(c)高性能セル スタック性能検 証	低コスト品質安定化技術を反映した高性能セルスタックでの 発電性能の効果検証と温度分布の確認	
②高圧SOFCモジュールの 開発		・高圧SOFCモジュール（～2.0MPa級）開発に向けた設 計データの取得および運転条件の検討	中小型GTFC(100MW級、圧力1～2MPa 程度)の実証につなげるため

表 2-2-2 研究開発項目とスケジュール、年度予算

年度		2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	2022fy	
研究開発項目					中間評価			事後評価	
① 小型 GTFC のシス テム化	(a)小型GTFCハーフ モジュール実証	ハーフモジュール用システム開発 MW級向けマイクロガスタービン開発							
	(b)セルスタック 低コスト品質 安定化技術開発	焼成工程連続化技術開発 成膜技術開発							
	(c)高性能セルスタック 性能検証					高性能セル試験			
②高圧SOFCモジュールの 開発			高圧試験						

年度	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	合計
研究開発費（百万円）	556	1,297	574	97	19	90	2,632

(2) 燃料電池石炭ガス適用性研究／燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究[④4)-(1)]

天然ガスをベースに開発されている250kW級SOFCモジュールを用いて、CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFCを想定した石炭ガス化ガス（水素リッチガス）の適用性について検証試験を行うとともに、石炭ガス化設備と燃料電池の連係運転に係る検討を行う。

具体的には、石炭ガスからCO<sub>2</sub>分離・回収した水素リッチガスを用いた場合の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し、水素リッチガスに対し最適なシステムを

検討する。また、石炭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し、石炭ガスに対し最適なシステムを検討する。試験終了時には、装置の解体調査を行うことで、石炭ガス適用時の課題を抽出する。

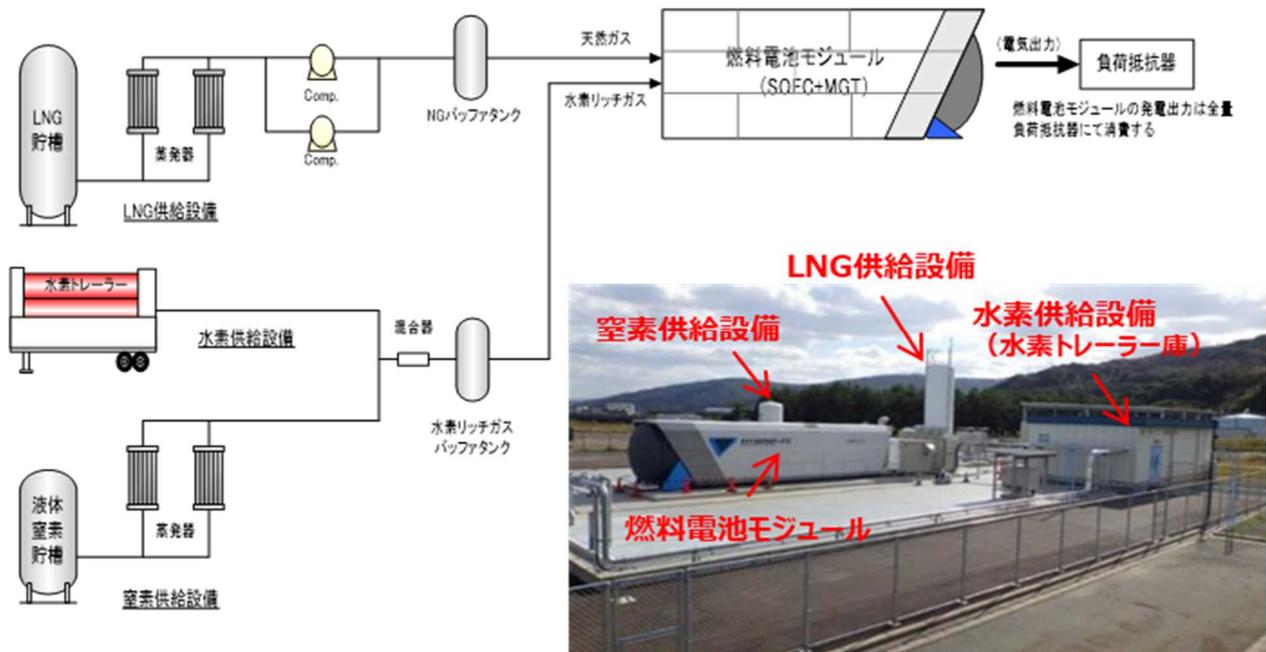


図 2-2-3 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 事業概要

表 2-2-5 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標	根拠
①水素リッチガス適用および石炭ガス化設備連係に係る運転・制御の検討	燃料電池モジュールに水素リッチガスを適用するための運転制御、運用等に関する課題を抽出し、対策を検討する。	燃料電池モジュールは水素リッチガス用に設計したものでないため。
②燃料電池モジュール試験設備の設計・製作・据付	燃料電池モジュール設備、ユーティリティ供給設備等の設計、製作、据付を行う。	IGFC実証の事前試験データ採取として使用するため。
③燃料電池カートリッジ試験	カートリッジ(250kW級)を用いて水素リッチガス適用時の発電特性や温度挙動等の基礎データを取得し、試験計画に反映する。	基本構成単位となるカートリッジで水素リッチガス適用時の基礎データを取得し、モジュール試験に反映するため。
④燃料電池モジュール基本特性確認試験	設計のベースとなる天然ガス運転時の発電特性、起動・停止時のプラント挙動を確認する。	水素リッチガス試験に先立ち設計燃料の天然ガスで燃料電池モジュールの性能・発電特性を把握するため。
⑤水素リッチガス切替試験	水素リッチガス燃料比率の増加に伴う温度や発電特性の変化と水素リッチガス用に調整した制御性について確認する。	天然ガスから水素リッチガスへ切り替え時の燃料電池モジュール特性の挙動を把握し、水素リッチガスを燃料電池モジュールに適用した場合の基本特性を確認するため。
⑥水素リッチガス最大負荷試験	水素リッチガスによる天然ガス70%程度の最大負荷を目標に、運転パラメータ変化試験を行い高出力運転時のリスク等を確認する。	運転パラメータの変化による温度特性や負荷増加の変化を把握し、IGFC実証試験の参考とするため。

研究開発項目	研究開発目標	根拠
⑦水素リッチガス起動・停止試験	水素リッチガスでの燃料電池モジュール起動・停止試験を実施し、温度挙動、運転制御の有無等の確認、各種制御系の調整を行いながら起動・停止方法を確立する。	燃料電池モジュールは水素リッチガス用に設計したものでなく、過渡期となる起動停止方法及び制御性を確立するため。
⑧実証機模擬ガス試験	実証機に則したガス組成試験を行うため、一定のガス組成で連続試験が可能なボンベ供給による実証機模擬ガスで試験を実施し、発電特性や温度挙動等の基礎データを取得する。	CO <sub>2</sub> を含んだ実証機模擬ガスを使用し、IGFC実証試験の事前試験データとするため。
⑨石炭ガス化炉連係試験	若松ガス化炉と燃料電池モジュールを連係し、生成した石炭ガスを実証機相当のガス組成に調整する。そのガスを燃料電池モジュールに供給しながらガス化炉と燃料電池モジュールの連係システムの制御性と協調性を確認する。また、石炭ガスに含まれるCOや微量物質が燃料電池モジュール性能に及ぼす影響を確認し、実証機の運用に反映する。石炭ガス中の被毒物を除去するための燃料電池用ガス精製設備を設置し、石炭ガス（COリッチガス）を用いて除去性能を確認する。 燃料電池用ガス精製精密脱硫器出口H <sub>2</sub> S濃度（目標値）：1ppb以下、 水素化合物吸着器出口H <sub>2</sub> Se濃度（目標値）：1ppb以下。	実機での連係試験により、ガス化設備と燃料電池モジュールの相互の制御性をIGFC実証試験に先立ち確認、石炭ガスを使った実証試験ガス組成の燃料を使用することにより、実証への設計や運転手法他、実証試験時の事前データとするため。
⑩石炭ガス（COリッチガス）適用に係る技術検討	燃料電池モジュールに石炭ガス（COリッチガス）を直接燃料として供給するケースについて技術検討（机上検討）を行い、課題を抽出するとともに、課題解決に向けた方向性を検討する。また、机上検討の結果を基に石炭ガス化炉で生成した石炭ガス（COリッチガス）を直接使用した燃料電池モジュール運転試験を行い、COが及ぼす温度分布の状況や発電性能の把握、炭素析出ししない運転を行うためのS/C等の運転条件範囲を確認、モジュールでのCOリッチガス運転の適用性、及び起動停止方法を検討する。	IGFCの適用範囲拡大に向けた検討とするため。
⑪燃料電池モジュールの解体調査	石炭ガス化炉連係試験終了後、燃料電池セル、及びセルスタックや構成機器の健全性を調べるため、燃料電池モジュールを解体し、内部の状況を確認する。	本研究で用いる燃料電池は、天然ガス仕様であるため、局所的に高温となっている部分があること、石炭ガス化炉連係試験に伴う炭素析出や微量な不純物の影響を確認するため。

表 2-2-6 研究開発項目とスケジュール、年度予算

年度	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	2022fy
研究開発項目				◇ 中間評価			◆ 事後評価
①水素リッチガス適用および石炭ガス化設備連係に係る運転・制御の検討	▶						
②燃料電池モジュール試験設備の製作	▶						
③燃料電池カートリッジ試験	▶						
④燃料電池モジュール基本特性確認試験		■					
⑤水素リッチガス切替試験		■					
⑥水素リッチガス最大負荷試験		■	■				
⑦水素リッチガス起動・停止試験		■					
⑧実証機模擬ガス試験			■				
⑨石炭ガス化炉連係試験		石炭ガス化炉連係試験設計検討	OCG模擬ガス・石炭ガス試験				
⑩石炭ガス（COリッチガス）適用に係る技術検討			石炭ガス技術検討		石炭ガス試験		
⑪燃料電池モジュールの解体調査					▶		
年度	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	合計
研究開発費（百万円）	142	1,203	196	731	189	115	2,576

## 2-2.2 研究開発の費用

各事業の年度ごとの費用の実績値を表 2-2-6 に示す。

表 2-2-6 各事業の研究開発予算

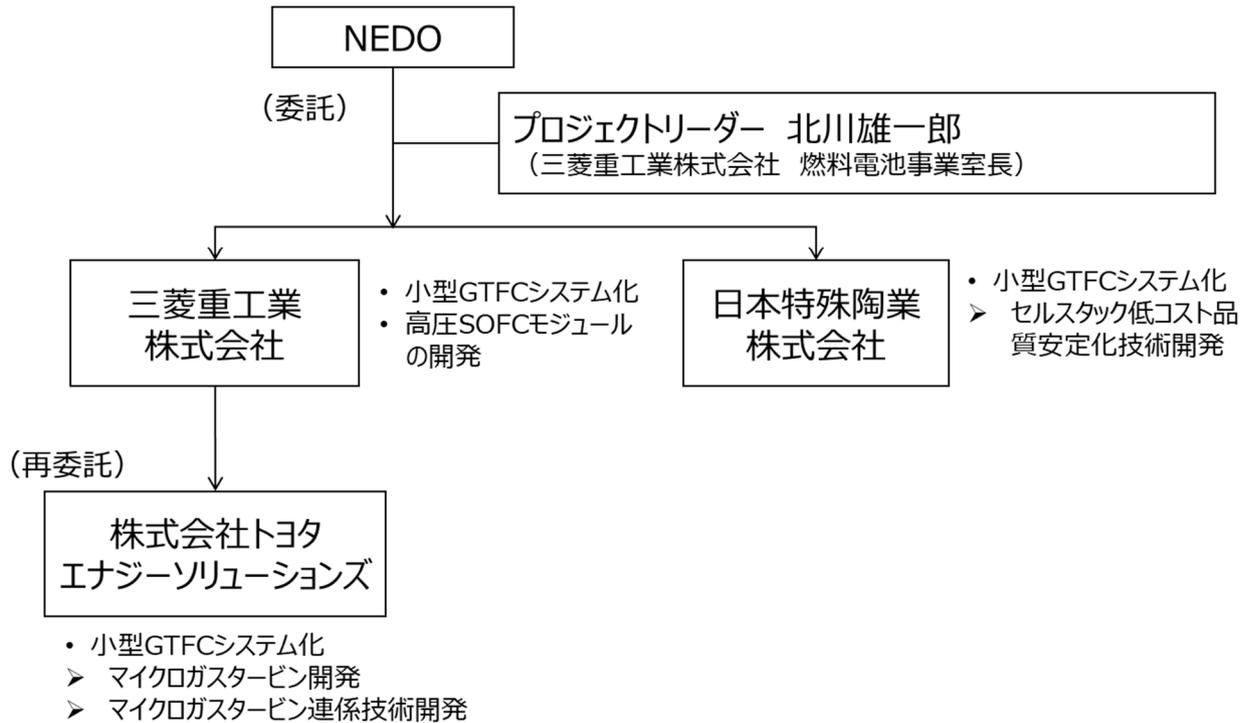
(単位：百万円)

	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	事業 合計
ガスタービン燃料電池複合 発電技術開発 [④3]	556	1,297	574	97	19	90	2,632
燃料電池モジュールの石炭ガ ス適用性研究 [④4)-(1)]	142	1,203	196	731	189	115	2,576
年度合計	699	2,499	769	828	207	205	5,208

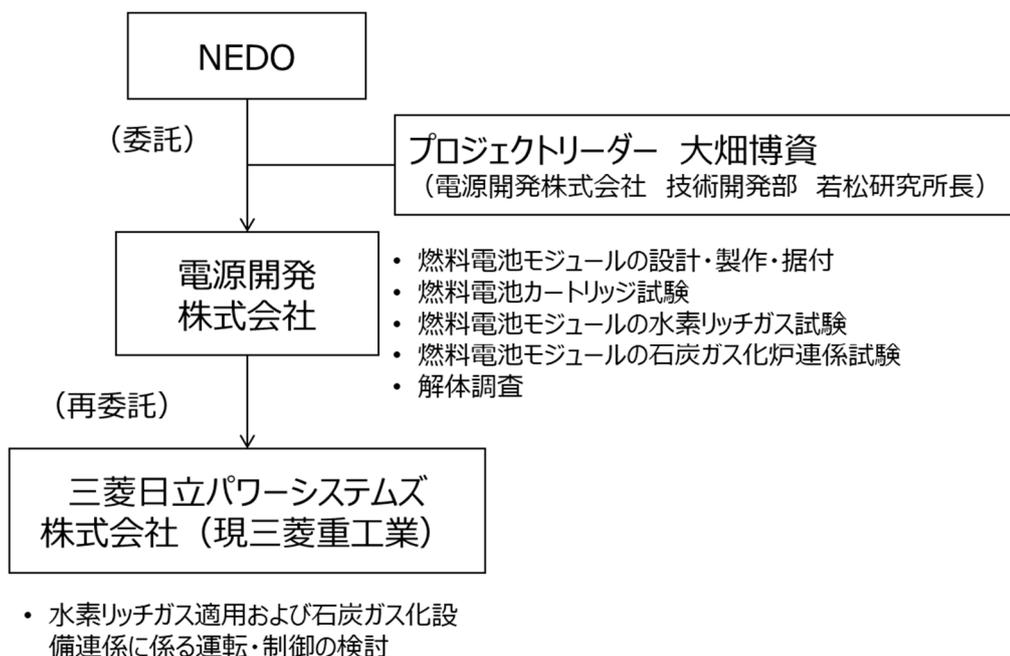
## 2-2.3 研究開発の実施体制

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。下図に実施体制を示す。

### (1) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]



### (2) 燃料電池石炭ガス適用性研究／燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究[④4)-(1)]



## 2-2.4 研究開発の運営管理

N E D O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、研究開発責任者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。従事日誌や執行管理表の確認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。

研究開発責任者は、共同実施者間や再委託先との打ち合わせを頻繁に行うとともに、全実施者が進捗方向を行うワーキング会議を定期的開催し、各研究開発項目の進捗状況、成果及び課題を把握し、プロジェクトの計画や工程に反映する。

### (2) 技術分野における動向の把握・分析

P M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。

### (3) 外部有識者による指導

P Mは、外部有識者で構成する技術検討委員会を定期的開催し、事業の進捗や計画、目標達成の見通しなどにつき指導・助言を受けることで、より効果的な事業推進に努める。

表 2-2-7 技術検討委員会における登録委員  
【次世代火力発電基盤技術開発・ゼロエミッション石炭火力基盤技術開発】  
(①2018年1月、②2018年10月、③2019年6月)

氏名	所属・役職
藤岡 祐一	福岡女子大学 名誉教授
石田 政義 (②のみ)	筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学域 教授
伊藤 響 (①のみ)	中部大学 工学部 創造理工学実験教育科 応用化学科 教授
小野崎 正樹 (①、②のみ)	一般財団法人エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長
倉本 浩司 (③のみ)	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 創エネルギー研究部門 炭素資源転換プロセスグループ グループ長
中澤 治久	一般社団法人火力原子力発電技術協会 専務理事
麦倉 良啓 (③のみ)	一般財団法人 電力中央研究所 エネルギー技術研究所 研究参事
義家 亮	名古屋大学 大学院 工学研究科 機械理工学専攻 准教授

表 2-2-8 技術検討委員会における登録委員  
 【石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業・次世代火力発電基盤技術開発】  
 (①2021年6月、②2022年5月)

氏名	所属・役職
平井 秀一郎	国立大学法人東京工業大学 工学院機械系 教授
神原 信志 (②のみ)	国立大学法人東海国立大学機構 岐阜大学 工学部 化学・生命工学科 教授
林 潤一郎	国立大学法人九州大学 先導物質化学研究所 教授
藤原 尚樹	出光興産株式会社 石炭・環境事業部 企画課 シニアリサーチャー
牧野 尚夫	一般財団法人電力中央研究所 エネルギー技術研究所 名誉研究アドバイザー
吉川 将洋	日本大学 理工学部 電気工学科 教授

参考：これまでに実施した技術検討委員会

- 2018年 1月30日
- 2018年 10月15日
- 2019年 6月10日
- 2021年 6月25日
- 2022年 5月17日

## 2-2.5 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

### (1) 知的財産等に関する戦略

#### 基本戦略

- 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。
- ノウハウとして保有する方が有利な技術は出願しない。
- 競合技術の出願状況を定期的に調査し、対策を検討する。

### (2) 知的財産管理

知的財産権の帰属については、産業技術力強化法第19条第1項に規定する4項目及びNEDOが実施する知的財産権の状況調査（バイ・ドール調査）に対する回答を条件として、知的財産権は全て発明等をなした機関に帰属する。

知財マネジメントに係る運用として、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。全実施機関で構成する知財運営委員会、または同機能を有する委員会を整備した上で、「知財の取り扱いに関する合意書」を作成済みである。

データマネジメントに係る運用として、「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針」を適用する。全実施機関で構成する知財運営委員会、または同機能を有する委員会を整備した上で、「データの取り扱いに関する合意書」を作成済みである。

なお、本事業で得られた知財については、関係各機関の知財管理部門と連携し、特許管理、知財管理を推進する。

## 2-3. 情勢変化への対応

本事業が開始された 2016 年とは、地球温暖化対策への取り組みに向けた情勢は著しく変化している。

2020 年 10 月 26 日、当時の菅内閣総理大臣が所信表明演説において、我が国が 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。加えて、2021 年 4 月には、地球温暖化対策推進本部及び米国主催の気候サミットにおいて、「2050 年目標と総合的で、野心的な目標として、2030 年度に、温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減することを目指す。さらに、50%の高みに向けて、挑戦を続けていく」ことを表明した。これらの目標に向け、我が国の今後のエネルギー政策としては、あらゆる可能性を排除せず、使える技術は全て使い、2030 年度の新たな削減目標や、2050 年カーボンニュートラルという野心的な目標の実現を目指すことが示されている。2021 年 10 月に策定された第 6 次エネルギー基本計画において火力発電については、適切な火力ポートフォリオを構築しながら、次世代化・高効率化を推進するとする一方で、非効率な火力のフェードアウトに着実に取り組むとともに、脱炭素型の火力発電への置き換えに向け、アンモニア・水素等の脱炭素燃料の混焼や C C U S /カーボンリサイクル等の火力発電からの CO<sub>2</sub> 排出を削減する措置の促進や、火力運用の効率化・高度化のための技術開発・導入環境整備の推進に取り組むことが示されている。その様な中ではあるが、次世代の高効率石炭火力発電技術である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）などの技術開発等は引き続き推進して行くことが示されており、石炭を原料に用いて石炭ガスを製造し CO<sub>2</sub> 分離・回収することにより得られる水素リッチガスを燃料とする IGFC の要素技術研究である本事業の重要性は示された。

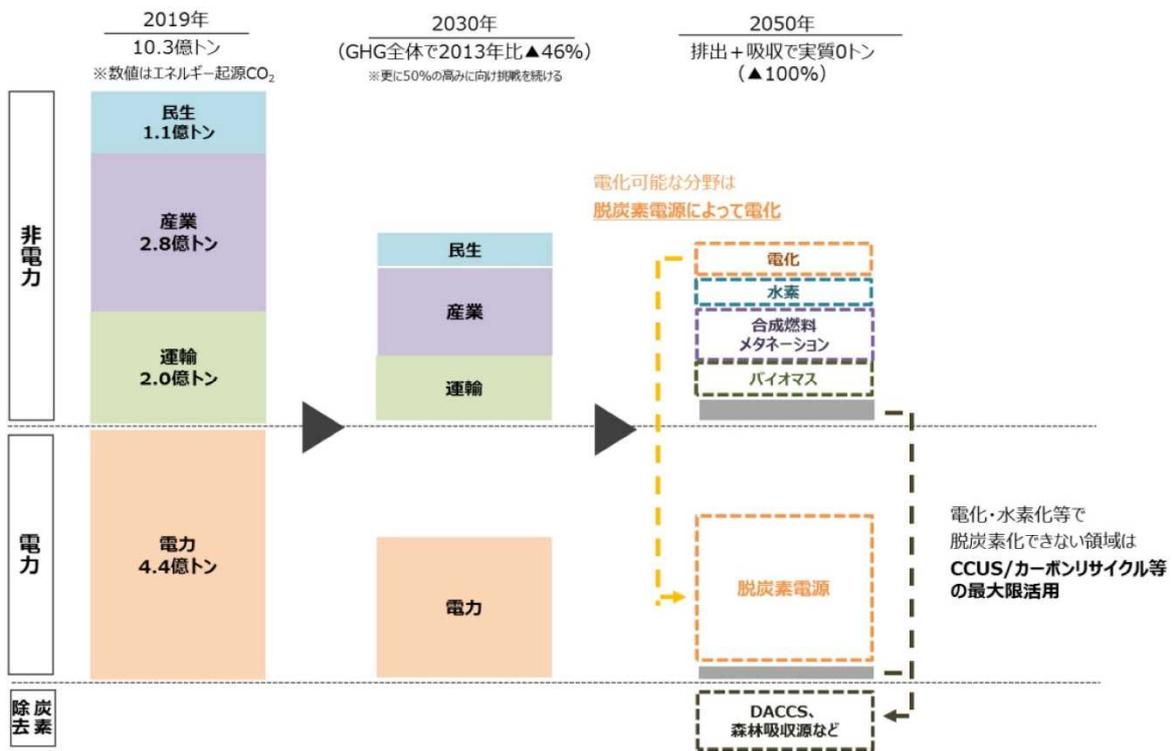


図 2.3-1 2050 年に向けたエネルギー政策のイメージ <出典> 経済産業省

## 2-4. 評価に関する事項

### (1) 中間評価

①評価の時期：2019年9月3日

②評価手法：外部評価

③評価事務局：評価部

④評価項目・基準

「事業の目的・政策的位置付け」

「研究開発マネジメントについて」

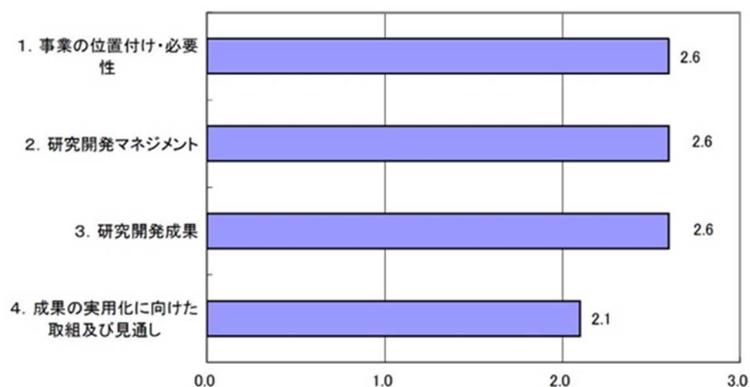
「研究開発成果について」

「成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて」

⑤評価委員

分科会長	清水 忠明	新潟大学 工学部工学科化学システム工学プログラム 教授
分科会長代理	成瀬 一郎	名古屋大学 未来材料・システム研究所 兼務 大学院工学研究科機械システム工学専攻 副所長／教授
委員	板谷 義紀	岐阜大学 工学部 機械工学科 教授／ 地方創成エネルギーシステム研究センター センター長
委員	稲垣 亨	関西電力株式会社 研究開発室 技術研究所 チーフリサーチャー
委員	稲葉 稔	同志社大学 理工学部 機能分子・生命科学科／ エネルギー変換研究センター 教授
委員	西田 亮一	大阪ガス株式会社 エネルギー技術研究所 担当部長
委員	山崎 晃	千葉工業大学 社会システム科学部 金融・経営リスク科学科／ 社会システム科学研究科 マネジメント工学専攻 教授

⑥評価結果



⑦研究評価委員会コメント

国の方針の下で天然ガス及び石炭を燃料とした火力発電に関する最先端の技術開発を進め、高効率で環境性、経済性などに優れた発電技術を開発した。さらに、当該プロジェクトの狙いは燃料電池発電システムであるので、それに向けての技術開発も着実に進めることを期待したい。

## ⑧中間評価結果への主な対応

(指摘1) 達成度を評価できる数値目標の設定の検討が必要である。

(対応1) 基本計画に以下の【最終目標(2021年度)】を追加し、その達成が成された。

「ガスタービン燃料電池複合発電技術開発」

・小型GTFC(1MW級)において、57%LHV(低位発熱量基準)の発電効率(送電端)の見通しを得る。

「燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究」

・石炭ガス適用時の燃料電池出力変化率を天然ガスと同等の1%/min程度とする石炭ガス化炉連係システムを構築する。

(指摘2) 石炭ガス運用時のSOFC側からの取組みがないことから、実施者間の連携を強化する必要がある。

(対応2) 2019年10月より「OCG第3段階SOFC関係者合同会議」を実施。

【石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業】の実施者である「大崎クールジェン株式会社」、【ガスタービン燃料電池複合発電技術開発】の実施者である「三菱重工業株式会社」、【燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究】の実施者である「電源開発株式会社」にて開催。これまでの成果の共有や今後必要となるデータの洗い出しを行い、IGFC実証試験の詳細設計に反映させた。

(指摘3) 100MW級GTFCの早期実用化のために1MW級SOFCを多数並べる方式は適切だが、将来も同様の1MW級にするのか大容量化により台数低減を目指すのかは今後の検討課題である。

(対応3) 2021年度には、高性能セルスタックを用いたカートリッジのGTFC実証機へ適用し検証。解析の結果、同一サイズのSOFCモジュールで性能が2倍以上に向上でき、SOFCモジュールの容器台数を半減できる見込みを得た。

(指摘4) 世界初、世界最高水準の技術だが、今後の展開には汎用性等の検討が必要である。

(対応4) 2019年より、CO<sub>2</sub>分離・回収しないCOリッチガスを使用した運転試験を行い、IGFC適用範囲拡大に向けた追加検討を行った。また、水素リッチガスでの燃料電池発電への技術確立により、将来の水素社会におけるGTFCの適用範囲拡大に貢献。

(指摘5) 海外向け情報発信を充実させ、特許についても特許化により知財保護ができるものについては積極的に海外出願すべきである。

(対応5) 燃料電池複合発電システムに商品名を付け製品カタログを作成し、ホームページ上においても情報取得を可能とし情報の発信を充実させた。燃料電池複合発電の実用化に必要なキーテクノロジーについて特許を出願し、重要特許3件については戦略的にPCTで海外出願の手続きを進めている。

### 3. 研究開発成果について

#### 3-1. 事業全体の成果

##### (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

本事業は、大型化に向けた GTFC を構成する主要な要素技術と、ガス組成の異なる燃料による燃料電池への適用性が確立され、所期の目標を達成した。その成果は「CO<sub>2</sub> 分離・回収型 IGFC 実証事業」に適用され 2022 年 4 月より実証試験が開始されている。

##### (2) 成果の普及

成果の普及促進のため、研究成果の発表や新聞・雑誌への掲載を積極的に行った。下表に各年度の発表数を示す（具体的な件名などは添付資料を参照）。

また、成果の活用や実用化の担い手、あるいはユーザーに向けて実施内容や成果を普及させる取組の第一歩として、旧一般電気事業者全社並びに電事連などの電気事業関連機関に対して、本事業の意義や必要性、研究内容を説明することにより、事業に関する理解の深化に繋げた。

表 3-1-1 論文等対外的な発表数と論文一覧  
(ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3])

	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	計
論文		1	2	1	3	1	8
研究発表・講演	2	6	3	3	2	1	17
受賞実績		1		1			2
新聞・雑誌等への掲載		2	1	7	2	1	13
展示会への出展	1	1	1				3

(燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4]-(1))

	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	計
論文							0
研究発表・講演		1	2	4	1	2	10
受賞実績							0
新聞・雑誌等への掲載						1	1
展示会への出展							0

(3) 知的財産権等の確保に向けた取組

知的財産戦略に沿った具体的な取組として、他社特許や論文等の調査分析を行い、社内報告会を定期的を開催して業界動向や他社特許について協議/共有した。燃料電池複合発電の実証化に必要なキーテクノロジーについては特許を出願し、重要特許 3 件は戦略的に PCT で海外出願の手続きを進めており、権利化を目指している。

表 3.1-2 特許出願数

(ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3])

	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	計 予定含む
特許出願 (うち外国出願)	3 (0)	0	4 (3)	0	1 (0)	0	8 (3)

(燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4]-(1))

	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	計 予定含む
特許出願 (うち外国出願)						1 (0)	1 (0)

### 3-2.研究開発項目毎の成果

#### 3.2.1 ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

各研究開発項目の成果は、表 3-2-1 に示す通りである。全ての研究開発項目は達成された。

表 3-2-1 各研究開発項目の成果

研究開発項目	目標	成果	達成度	
①小型GTFCシステム化	(a) 小型GTFC フル モジュール 実証	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高圧・大容量化対応 SOFC モジュール、各機器開発</li> <li>・MW 級モジュールで送電端効率 57%LHV の見通しを得る</li> <li>・小型 GTFC(1MW 級)に使用するガスタービンの開発</li> <li>・運転圧力 0.6MPa 級の MGT と SOFC の関係技術 確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小型 GTFC 用に大容量化した SOFC モジュールと各システム 機器を開発</li> <li>・2020 年度に改良型 MGT を適用したシステムでフルモジュールにおける課題と対策を明らかにし、改善により概ね 57%の 効率を達成できる目処を得た。</li> <li>・内部バイパスを低減し、燃焼器温度も管理値内に抑制できる 改良型 MGT を開発</li> <li>・起動～昇温～定格の運転を実施し、関係技術を検証。</li> <li>・2019 年度、SOFC-MGT 関係運転にて課題を抽出し、 IGFC 実証事業の設計へ反映。</li> </ul>	○
	(b) 低コスト 品質 安定化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・セルスタックの品質ばらつきが 性能に及ぼす許容範囲の明 確化による歩留り向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・成膜技術と焼成技術の成果を反映すると共に、他工程（基 体管＋空気極）の自動化等の目処を得たため、製造面積、 製造速度、工数、光熱費の全てを 1/3 以下にする目標を達 成</li> <li>・セルスタックの製造販売を行う合弁会社【CECYLLS】を設 立。</li> </ul>	○
	(c) 高性能 セルスタック 検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低コスト品質安定化技術を反 映した高性能セルスタックでの 効果検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2021 年度に高性能カートリッジ 2 台を換装した試験を実 施。課題と対策を明らかにし最終目標達成の目処を得た。</li> </ul>	○
②高圧 SOFC モジュール 開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高圧 SOFC モジュール (2MPa 級) 開発に向けた 設計データの取得および運転 条件の検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カートリッジにて高圧下（～2.1MPa）の試験を実施。また、 放熱解析を実施。</li> <li>・単セルスタックで～1.5MPa の圧力特性を取得。また耐久試 験を実施し、経時変化特性が低圧同等であることを確認</li> </ul>	○	

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

本研究では、従来（出力 250kW 級、運転圧力 0.2MPa 級）に比べ、中小型 GTFC（出力 10 万 kW 級、運転圧力 1.0～2.0MPa 級）により近い容量・圧力条件の小型 GTFC（出力 1,000kW 級、運転圧力 0.6MPa 級）のガスタービン関係技術を確立し、市場投入を目指す。また、小型 GTFC（1,000kW 級）の市場投入、及び、中小型 GTFC（10 万 kW 級）の実証を行うためには、セルスタックの量産化、低コスト化が必須であり、製造工程において量産に必要な技術開発を行う。更に、中小型 GTFC の基本技術を確立すべく、高圧モジュール開発を行うことを目的とする。加えて、本プロジェクトで開発した低コスト品質安定化技術を反映した高性能セルスタックによるモジュール特性を検証する。

中小型 GTFC（10 万 kW 級）の要素技術確立に向け、本事業では以下の実施項目に取り組む。

#### 【実施項目】

##### ①小型 GTFC（出力 1,000kW 級、運転圧力 0.6MPa 級）のシステム化

- (a)小型 GTFC ハーフモジュール実証
- (b)セルスタック低コスト品質安定化技術開発
- (c)高性能セルスタックの性能検証

##### ②高圧 SOFC モジュールの開発（運転圧力～2.0MPa 級）

- (a)高圧カートリッジ試験
- (b)高圧単セルスタック試験

##### ①小型 GTFC（出力 1,000kW 級、運転圧力 0.6MPa 級）のシステム化

###### (a)小型 GTFC ハーフモジュール実証

小型 GTFC（1,000kW 級、運転圧力 0.6MPa 級）の実用化に向け、従来の技術（250kW 級、運転圧力 0.2MPa 級）と比べ中小型 GTFC（10 万 kW 級、運転圧力 1.0～2.0MPa 級）により近い容量・圧力条件のガスタービンとの関係技術を確立し、小型 GTFC（1,000kW 級）の市場投入につなげる。

小型 GTFC（1,000kW 級）は SOFC モジュール容器を 2 基設置する計画であるが、本研究開発では実証コスト低減の観点から SOFC モジュール容器 1 基で試験を行った。これをハーフモジュールと称し、本来のモジュール容器 2 基のシステムをフルモジュールと称する。フルモジュールとハーフモジュールの目標仕様を表 3-2-1-1 に示す。

表 3-2-1-1 フルモジュール実機とハーフモジュール実証機 目標仕様

項目	目標仕様	
	1,000kW 級ハイブリッド機実機 (フルモジュール)	実証機 (ハーフモジュール)
発電効率	57%LHV(交流, 送電端)	43%LHV(交流, 送電端)
定格出力	1250kW (交流, 送電端)	680kW (交流, 送電端)
SOFC 単体発電効 率	54%LHV(交流)	54%LHV(交流)
設置面積	18 m (W) ×9.5m (L) ×3.8m (H)	18 m (W) ×5m (L) ×3.8m (H)
運転圧力	0.6 MPa 級	0.6 MPa 級
モジュール容器台数	2	1
カートリッジ数	20 カートリッジ /モジュール	20 カートリッジ /モジュール
概略構成	<p>都市ガス            SOFC            インバータ            マイクロガスタービン(MGT)            空気            再生熱交換器            排熱回収            排ガス            定格空気            流量            ≒ 7000m³/h</p>	<p>都市ガス            SOFC            インバータ            マイクロガスタービン(MGT)            空気            再生熱交換器            排熱回収            排ガス            試験空気            流量            ≒ 3500m³/h</p>

- ( i ) 小型 GTFC 用 SOFC 開発
  - ( i -1) SOFC モジュールの開発
    - ( i -1-1)モジュール基本設計及び詳細設計

表 3-2-1-1 の目標仕様に基づき、小型 GTFC 用 SOFC モジュールの基本設計を行った。基本的な仕様とシステム概要図、並びに外観を表 3-2-1-2 および図 3-2-1-1 に示す。モジュール容器内に 20 カートリッジを配置する。

表 3-2-1-2 基本仕様

項目		GTFC フルモジュール	GTFC ハーフモジュール
サブモジュール	カートリッジ数	10 カートリッジ /サブモジュール (支持枠)	
モジュール	サブモジュール数	2 サブモジュール /モジュール	
	カートリッジ数	20 カートリッジ /モジュール	
GTFC システム	モジュール数	2	1
	カートリッジ数	40	20

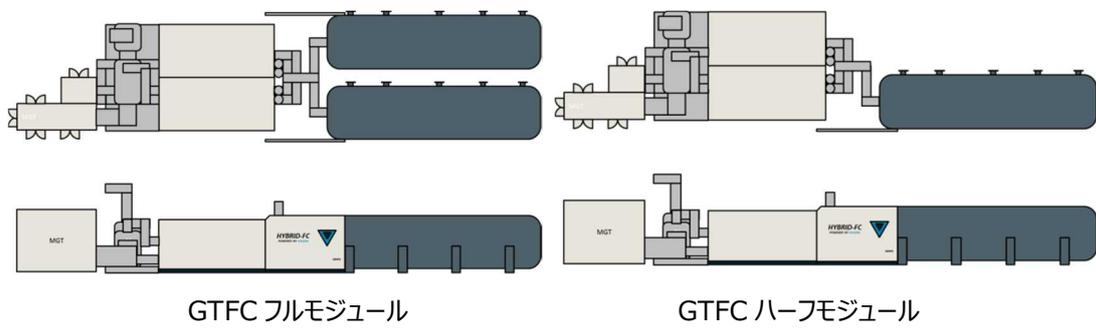
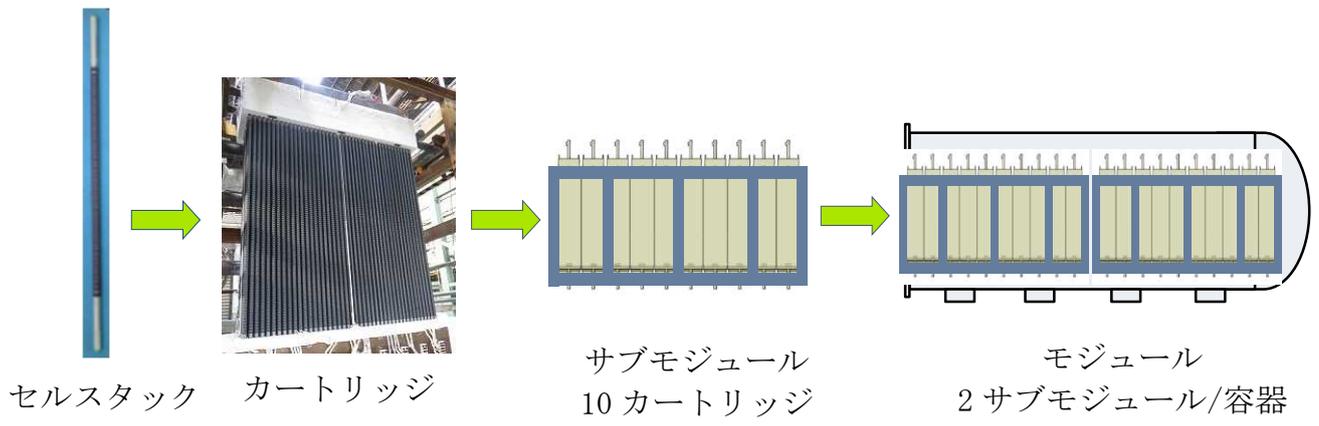


図 3-2-1-1 システム概要図と外観写真

### ( i -1-2)カートリッジ温度分布、ガス分配性解析

ハーフモジュール実証機では運転圧力が 0.6MPa 級と従来 (0.2MPa 級) よりも高圧となるため、発電室と容器内の温度差から循環流が増加し、発電室の温度が低下することが懸案事項であった。この対策として断熱構造の見直しを行った。

従来構造ではカートリッジ用断熱関係部品に隙間が発生しやすい構造であったため、煙突効果による循環空気が発生し、熱が発電室外へ持ち出される問題があった。この対策としてカートリッジ周囲を箱型断熱材で覆うことで可能な限り発電室を密封し、さらに外装板を設置することで空気の流入を防止する構造に改良した。

図 3-2-1-2 は、この改善を施したカートリッジで発電試験を行い、従来カートリッジ構造との比較を行った結果である。断熱構造の改良により 0.2MPa において、放熱量は低減できることを確認した。また、放熱量の $\sim$ 0.3MPa までの圧力依存性をカートリッジ試験で確認し、0.6MPa の放熱量を予測した結果、改良型を採用することで、0.6MPa で従来型の 0.2MPa と同等の放熱量に抑制できる見込みを得た。

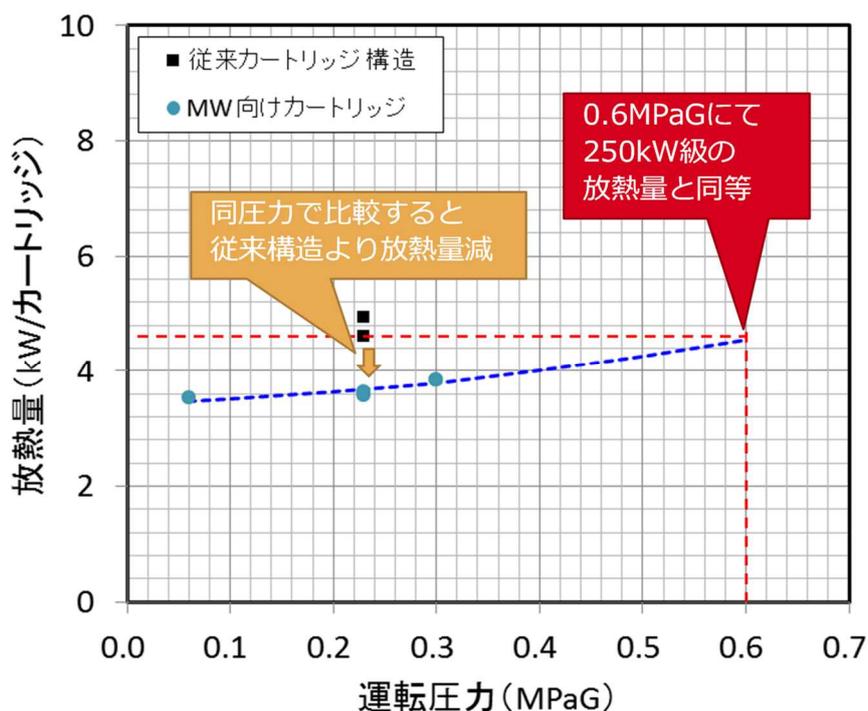


図 3-2-1-2 カートリッジ放熱量の比較

加圧時の発電特性についても単セルスタックとカートリッジの試験を行い、確認した。図 3-2-1-3 に単セルスタックでの発電試験結果を示す。セルスタックは圧力上昇とともに起電力が向上、かつセル抵抗も低下して作動電圧が向上し、0.6MPa では 0.23MPa に比べ約 1.1 倍の出力が得られることを確認した。カートリッジ発電試験を実施した結果を図 3-2-1-4 に示す。0.6MPa におけるカートリッジ出力は単セルスタック同様、0.23MPa 運転時の約 1.1 倍まで上昇する見込みを得た。

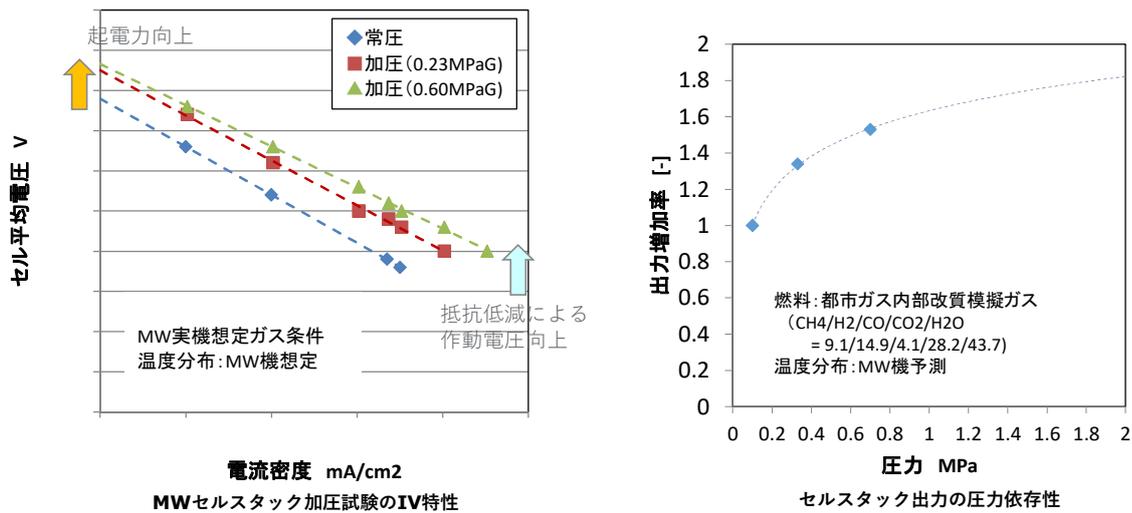


図 3-2-1-3 加圧運転時のセルスタック発電性能

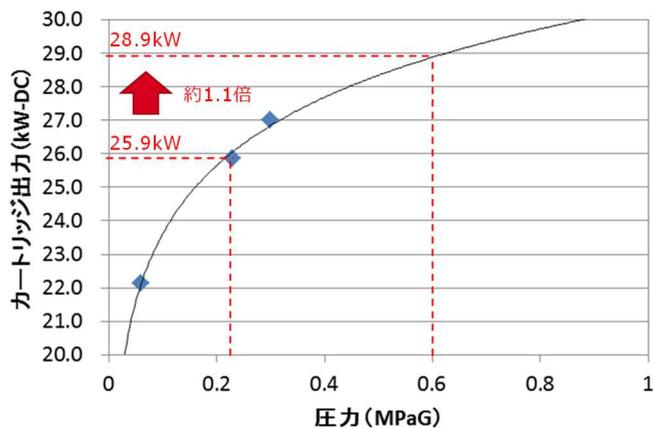


図 3-2-1-4 加圧運転時のカートリッジ発電性能

断熱性能を向上させたカートリッジの高圧条件下における温度分布検討のため、0.23MPa 試験時の温度分布について電気－熱流動－化学反応連成 CFD 解析を実施した。その結果を図 3-2-1-5 に示す。セルスタック温度分布コンタ図、空気流線及び酸素濃度に関する解析結果から、循環流等の発生は見られず、均一に近い状態で空気が発電室内を上昇していることが解る。また、本解析結果のグラフ（図 3-2-1-6）に実際の試験で得られた温度データをプロットした結果、解析値と計測値が良く一致していることが確認できた。

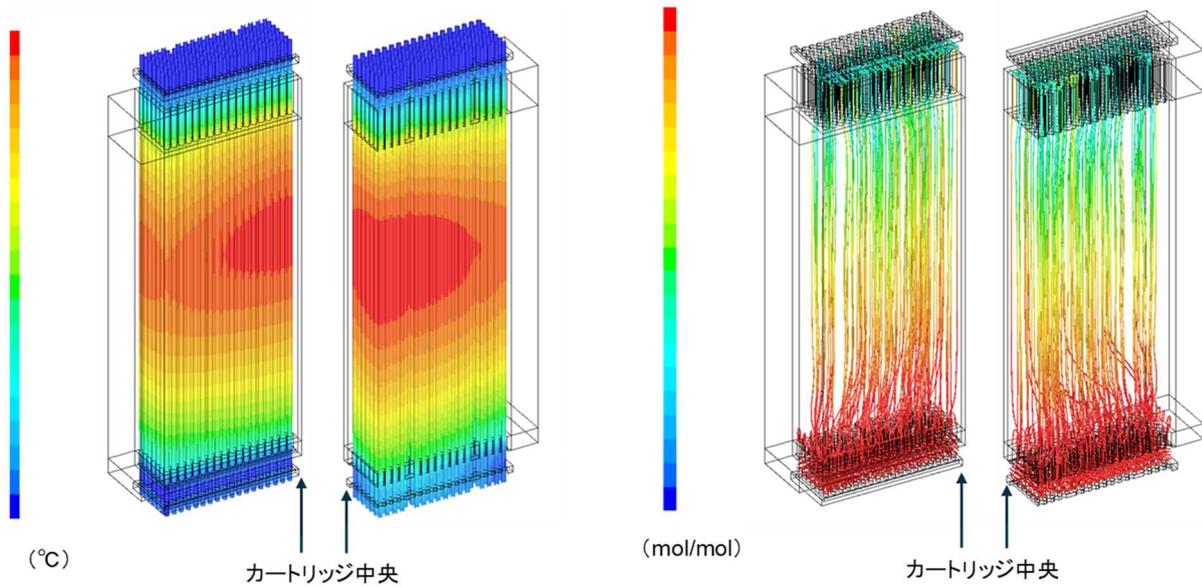


図 3-2-1-5 セルスタック温度分布／空気流線図

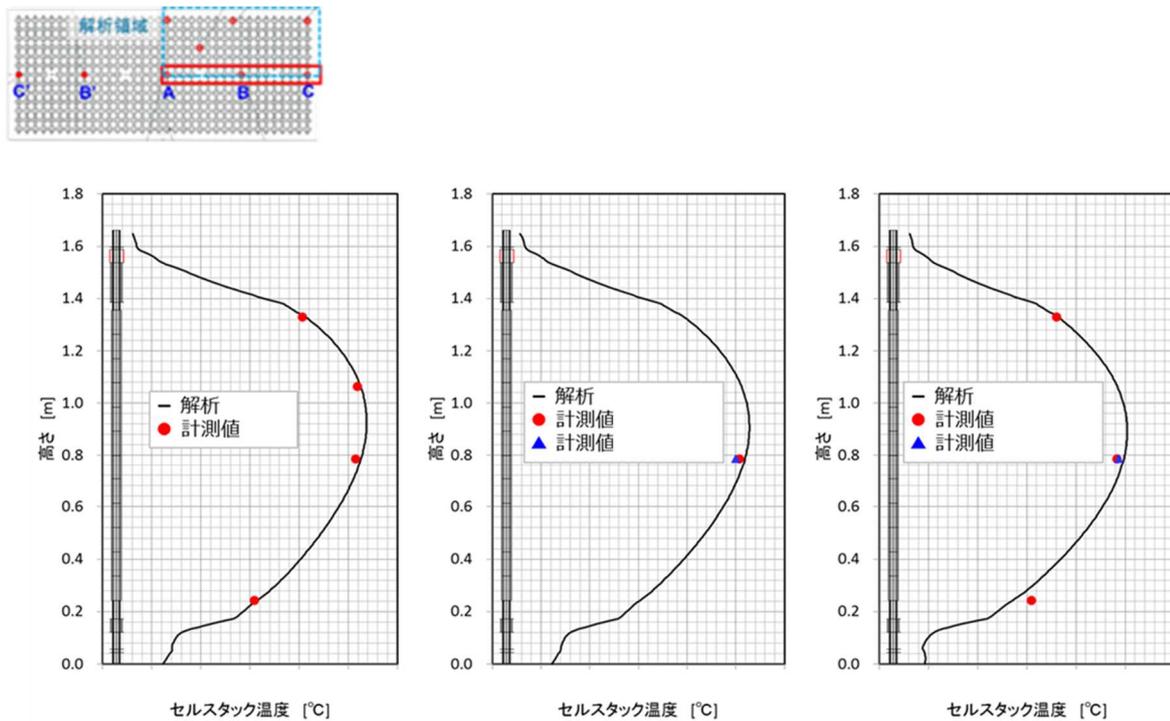


図 3-2-1-6 セルスタック温度分布－解析値と計測値

### (i-1-3)モジュール製作

ハーフモジュール実証機にて使用するモジュール容器は内部に20個のカートリッジが設置できるよう大型化するため、モジュール容器の強度についても詳細な検討が必要となる。高圧運転を考慮し耐圧は0.98MPaとし、耐震性は水平方向に0.4G・垂直方向に0.2G、風荷重は38m/sを想定している。上記条件でモジュール容器の変形量を計算したところ、図3-2-1-7に示すとおり通常運転時の最大変位は2.60mm、地震による最大変位は5.33mmとなり、内部カートリッジ保護に必要な変位量6mm以下に抑制可能なことが確認できた。

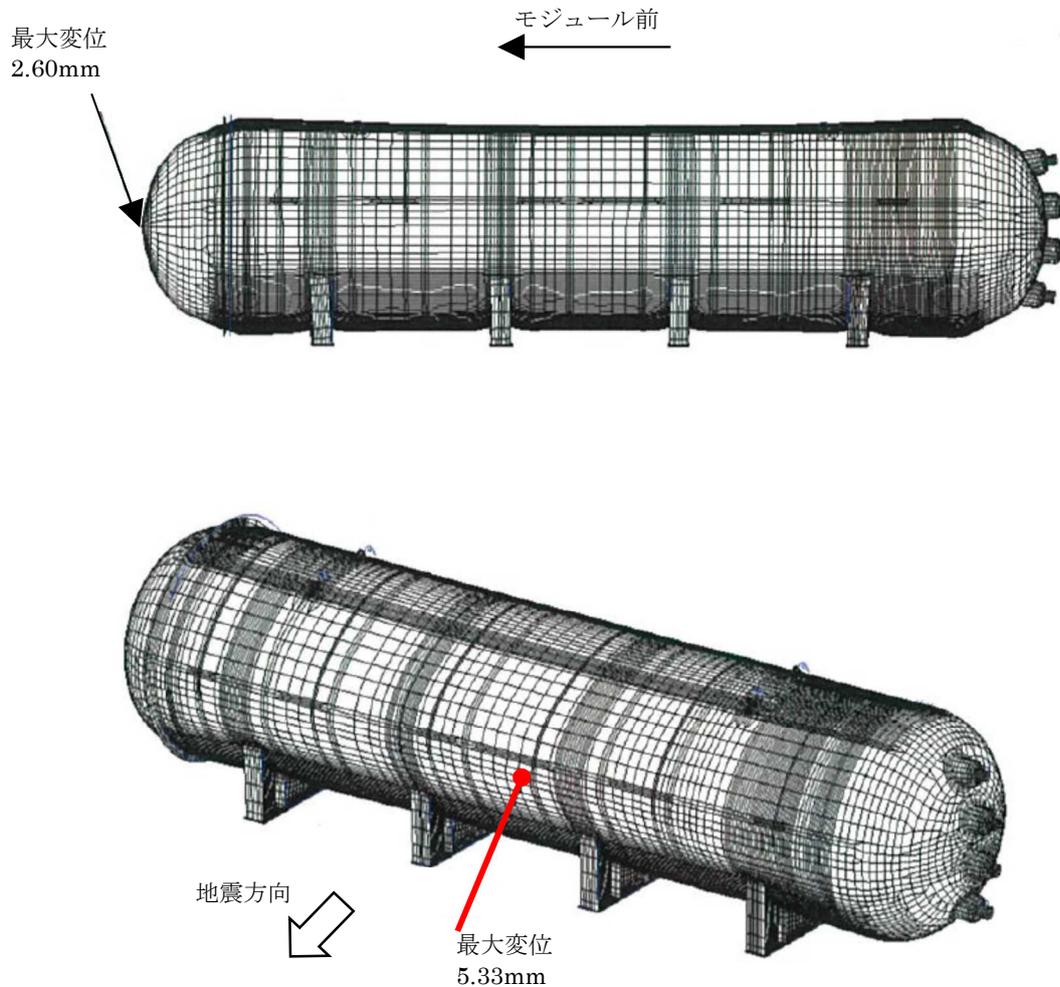
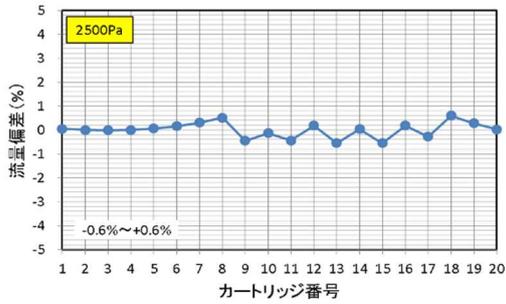


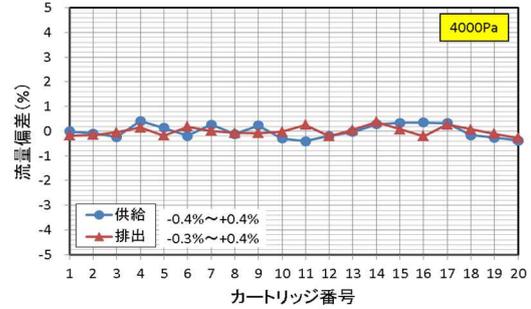
図 3-2-1-7 モジュール容器の運転時および地震時の変位量

( i -1-4)モジュール特性評価

モジュール容器内の各カートリッジに燃料と空気を均等に供給するため、カートリッジ間分配予測の精査及びカートリッジ枝管に設置するオリフィス径の選定を行った。選定したオリフィス径での流量偏差および圧力損失の計算結果を図 3-2-1-9 に示す。流量偏差を燃料系統が $-0.6\sim+0.6\%$ 、空気系統が $-0.4\sim+0.4\%$ と共に十分小さくするオリフィスを選定すると共に、燃料・空気の配管設計を適切に実施することで系統圧損をそれぞれ許容値以下に収めることができた。



燃料系統の流量偏差



空気系統の流量偏差

図 3-2-1-8 各カートリッジの流量偏差／圧力損失

( i -2) 小型 GTFC 用システムの開発

( i -2-1)システム基本設計及び詳細設計

250kW 級をベースに 0.6MPa 級への高圧化及び SOFC 大容量化に対応するよう機器仕様及びシステム系統を検討した。その結果を図 3-2-1-9 に示す。250kW 級機からの主な変更として、非常時を含めた停止時の消費動力を低減するため、保護用空気圧縮機をブロワに変更し、小流量マスフローコントローラの電動弁化等を行った。

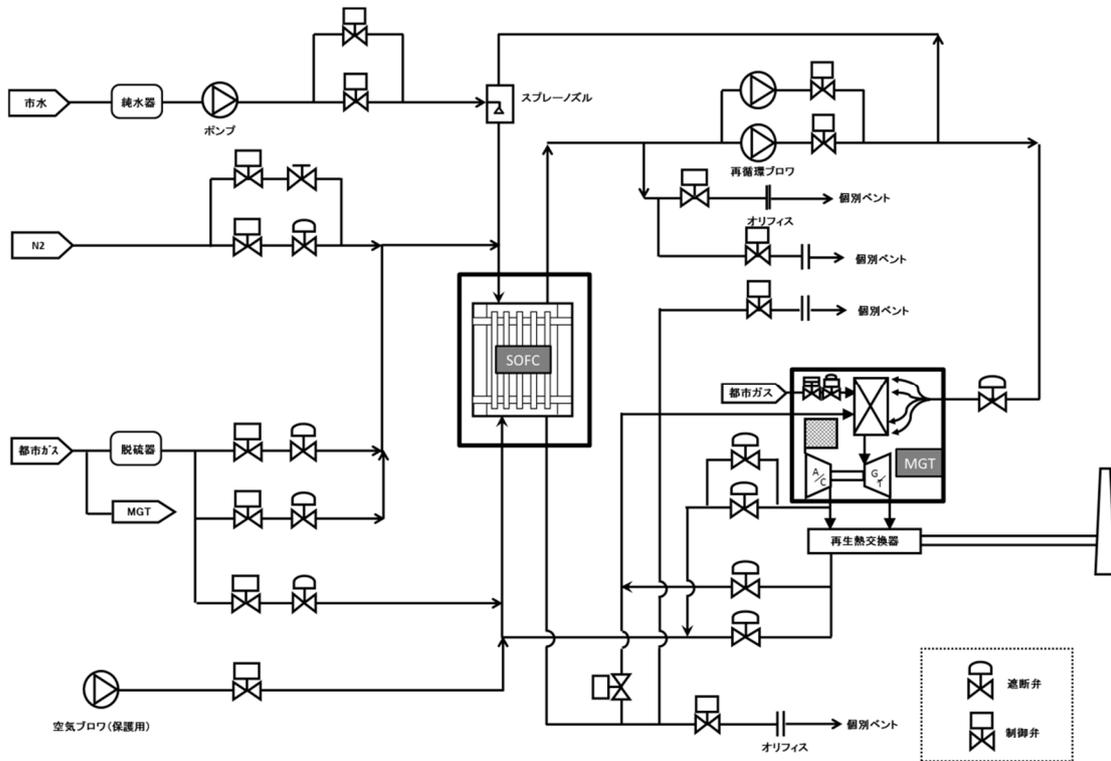


図 3-2-1-9 小型 GTFC システム系統

### ( i -2-2)システムシミュレーション

ハーフモジュール実証機は弊社長崎工場敷地内へ設置するため、工場周辺に対する環境騒音への影響を評価した。

シミュレーションは各機器の騒音レベルをメーカー等から入手して音源をモデル化し、想定した音源から評価点に与える各機器の影響を解析により評価した。図 3-2-1-10 に評価点と機器配置の位置関係を示す。評価点として、直近敷地境界線上 (P-01) と近隣住宅 (P-02) の二箇所を設定した。音源は表 3-2-1-3 に記載する機器をモデル化している。

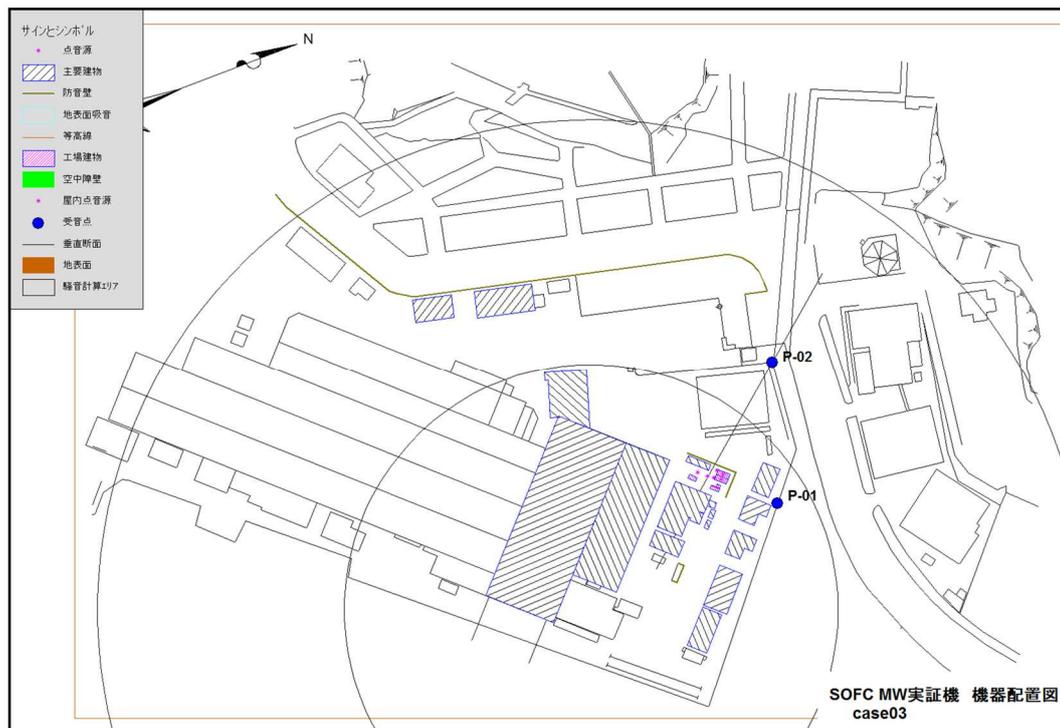


図 3-2-1-10 評価点と機器配置の位置関係

表 3-2-1-3 音源対象機器

項目	各機器の設定値
MGT	放射音：O.A. (Overall 値) 73.4dB(A)
ガスコンプレッサ	放射音：O.A.75.0dB(A)
補機モジュール (燃料ユニット)	内部音源に再循環ブロワ (O.A.60dB(A)) を設定し透過音計算 →機側騒音 46.5dB(A)で設定
補機モジュール (空気ユニット)	内部音源に空気コンプレッサ (O.A.49dB(A)) を設定し透過音計算 →機側騒音 35.6dB(A)で設定
補機モジュール換気ファン (各モジュール)	放射音：O.A.68dB(A)
MGT 排ガスサイレンサ	放射音：O.A.68.6dB(A)
蒸気ボイラ	放射音：O.A.68.2dB(A)

騒音予測結果を表 3-2-1-4 に、騒音コンタを図 3-2-1-11 に示す。なお、評価点 P-02 については近隣に 3 階建てのビルがあるため、高さ方向の傾向確認のために高さ方向 3 点の評価点を追加した。シミュレーション結果は以下の通りである。

- ・ 防音壁無しでも、近傍の境界 (P-01) 及び正門付近 (P-02) とともに規制値を満足する。
- ・ 民家近傍である P-02 においては、暗騒音 55.6dBA に対して予測値 44.5dBA である。評価点高さ 15m 地点では 48.5dBA となり、約 4dB 上昇するが暗騒音以下である。

以上より、評価点を地上 1.2m 点とした場合、防音壁による対策は不要と判明した。

表 3-2-1-4 シミュレーション結果

評価点	高さ[m]	騒音規制値 [dB(A)]	予測値 [dB(A)]	適否
P-01	1.2	55	54.2	○
P-02	1.2	50	44.5	○
P-02-2	5	50	46.1	○
P-02-3	10	50	47.5	○
P-02-4	15	50	48.5	○



図 3-2-1-11 騒音コンタ図

これまでのシミュレーション結果を確認するため、全ての機器を設置した条件にて MGT インターロック時の敷地境界騒音計測を行った。計測結果を図 3-2-1-12 に示す。計測の結果、MGT インターロック時には排空気および排燃料バント操作により大気中に放風操作があり最も騒音が大きくなるが、敷地境界騒音への影響はほとんど無いことが確認できた。

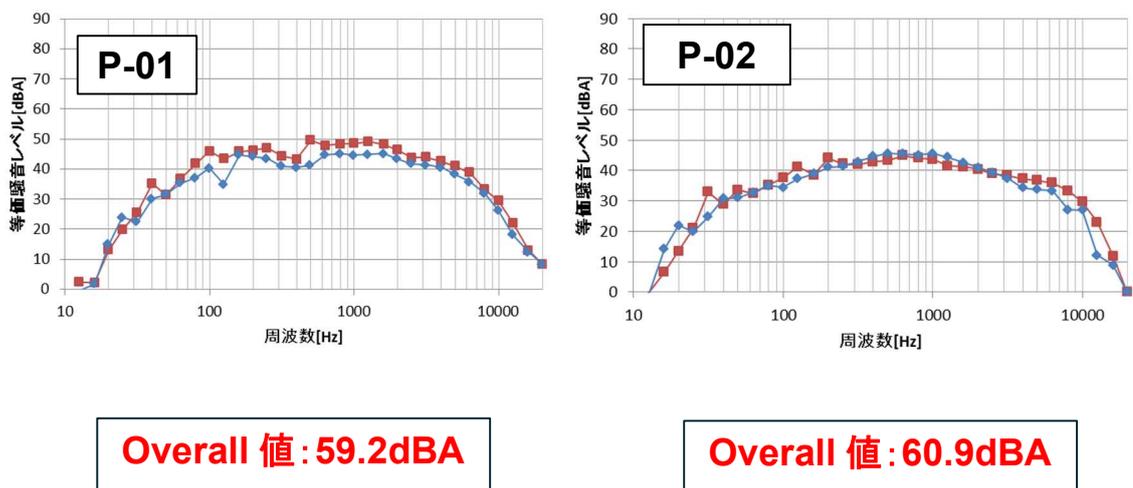


図 3-2-1-12 MGT インターロック時の敷地境界騒音計測結果

(赤：暗騒音、赤：インターロック時の計測値)

また、夜間の暗騒音データを取得するため、交通騒音や虫などの外乱が少ない冬期（2018/12/27）に計測を実施した。その結果を図 3-2-1-13 に示す。当該地域は外乱の影響が無ければ規制値 55dBA 以下を満足する事が確認できた。

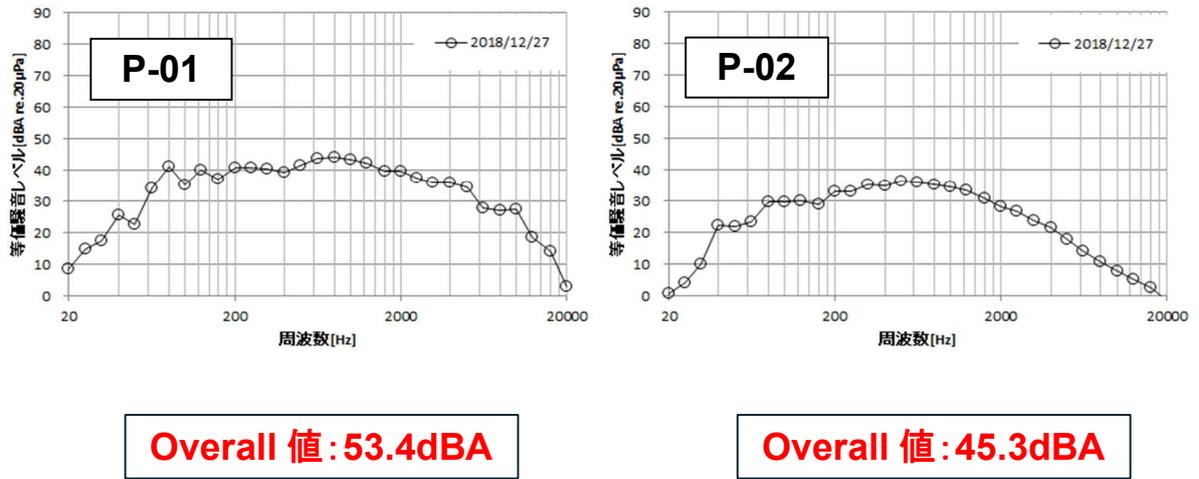
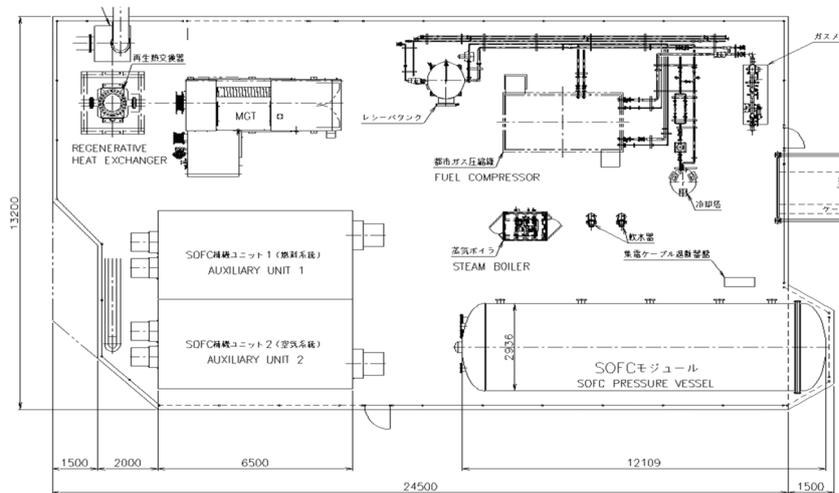


図 3-2-1-13 夜間敷地境界暗騒音計測結果（2018/12/27 22:17:40）

( i -2-3)システム製作

2017 年末より弊社長崎工場内にハーフモジュール実証機の据付工事を開始した。その様子を図 3-2-1-14 に示す。据付工事後、各機器の作動および動作の確認試験（コールド試験）は問題なく完了した。



設備配置



主要機器据付前 敷地全景



MGT 設置



都市ガス圧縮機



圧力容器搬入



屋内設備設置状況



システム全景

図 3-2-1-14 小型 GTFC 用システム据付状況

(ii) 小型 GTFC 用 MGT 開発

小型 GTFC (1,000kW 級、運転圧力 0.6MPa 級) の実用化に向け、従来の技術 (250kW 級、運転圧力 0.2MPa 級) 向けマイクロガスタービン (MGT) をベースとしながら MGT の開発を行った。要求される仕様を表 3-2-1-5 に示す。

表 3-2-1-5 マイクロガスタービン仕様比較

	250kW 級向け MGT	1,000kW 級向け MGT
型番	TPC50RA	TPC300A
定格出力	50kW@15℃	295kW@25℃
寸法	W2,550×D1,000×H2,600	W1,500×D4,000×H2,602
圧力比	3.67	6.42
回転数	80,000 rpm	40,000 rpm
発電機	永久磁石同期型 370V、2.66kHz、3相4極 インバータにて 200/210/220V、50/60Hz に変換	交流同期発電機 6,600V、50 or 60Hz、3相4極 減速機にて 1500 or 1800 rpm に減速

図 3-2-1-15 に開発項目を示す。SOFC の低カロリー排燃料、低酸素・高温排空気条件下での安定燃焼が可能な燃焼器の開発、SOFC との係に必須となる圧縮機の最適化、SOFC 発電性能への悪影響が出ない取合構造を有する MGT ケーシングの最適化、SOFC との係運転を可能とする制御・保護技術の開発などの開発項目に取り組んだ。

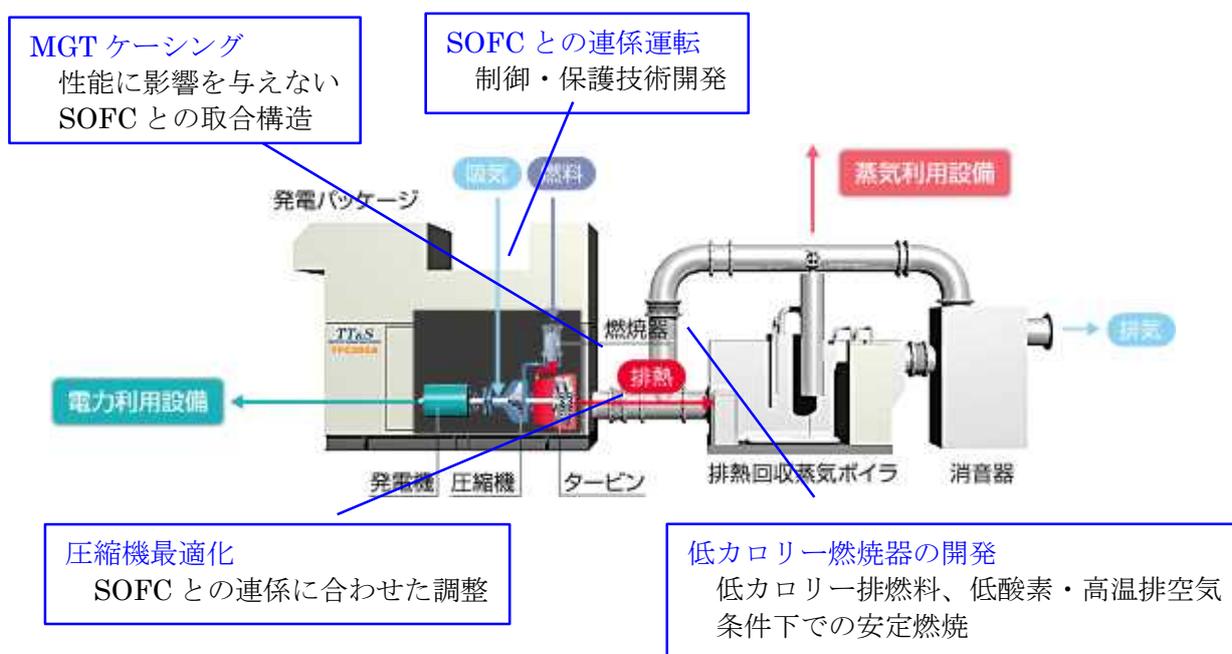


図 3-2-1-15 小型 GTFC 向け MGT 開発項目

## (ii-1) 燃焼器開発

小型 GTFC 向け MGT は SOFC において反応を終えた燃料である排燃料を燃焼させて MGT の発電を行う。MGT に供給される排燃料は都市ガスと比較して可燃成分が少なく低カロリー大流量燃料となっており、燃焼させるために低カロリー燃焼器の開発が必要となる。250 kW 級 SOFC-MGT ハイブリッドシステムにおいて使用している燃焼器の設計パラメータをベースに小型 GTFC (1,000kW 級) に使用する燃焼器の開発設計を実施した。以下に示す 5 個の試作を実施し、判明した課題に対して修正を施しつつ最適な形状の燃焼器開発を行った。

SOFC との組み合わせ条件を模擬するため SOFC からの排空気および排燃料を模擬できる評価設備をトヨタエナジー社内に構築し事前評価をおこなうとともに、ハーフモジュール実証機に搭載し評価を実施した。

燃焼器 1 2016 年度検討燃焼器

燃焼器 2 2016 年度試作燃焼器をベースに冷却性の改善をおこなった燃焼器

燃焼器 3 燃焼器 2 から燃焼室内の滞留時間を短くした燃焼器

燃焼器 4 燃焼器 3 と同形状で各種評価用燃焼器

燃焼器 5 燃焼器 3 と同形状だが冷却孔を追加した燃焼器 (冷却ライナ)

2017 年度に試作した小型 GTFC 向けの MGT パッケージを MHPS 長崎工場内のハーフモジュール実証機に設置し、実際の SOFC と MGT の組み合わせ条件下における評価を実施した。試験用燃焼器は燃焼器 3 を使用したが、SOFC 昇温時の運転条件において燃焼器ライナの温度が上昇することが判明したため、燃焼器ライナを保護するため MGT の出力を制限して運転を行った。MGT の出力を制限したことにより MGT の排気温度が低下したが、SOFC の昇温工程時は MGT の排気ガスにより再生熱交を用いて SOFC への圧縮空気温度の上昇をはかっているため、MGT の排気ガス温度を低下させないよう、高負荷にて運転する必要がある。そのため、昇温アシスト系統 (圧縮機出口空気を燃焼器入口に戻す系統) を追加することにより燃焼器入口空気温度を低下させライナ温度の抑制をはかったが、SOFC へ供給される高温圧縮空気量が減少するため SOFC の昇温に多くの時間を費やす影響が発生した。

起動時の燃焼器ライナ温度高の対策としてライナに冷却孔を追加した冷却ライナの開発を行い、燃焼器 5 にて壁面温度が大幅に低下することが確認できた。

### (ii-2) 圧縮機最適化

300kW 用 MGT 圧縮機は SOFC 組み合わせ運転時に MGT の空気流量を制限しているタービン 1 段静翼へ流入する燃焼空気（排空気+排燃料）が増加するため圧縮機圧力が上昇し、圧縮機の圧力上昇により圧縮機サージに至る恐れがあった。SOFC に適合するために 2017 年度に空気流量を減少させた圧縮機を試作したが、試作した圧縮機では SOFC へ供給される空気量、圧力比が減少するためシステム総合効率が低下する可能性があった。

SOFC および MGT の運転条件の再検討を行った結果、SOFC 定格運転中では MGT は部分負荷運用されるため圧縮機サージ領域まで十分なマージンが確保されていることが確認できた。また SOFC 組み合わせ運転時における MGT 圧縮機のサージマージンが厳しい条件は SOFC 昇温工程時の MGT 出力が高い条件であることが確認できたため、SOFC 昇温工程時は MGT から SOFC へ供給する圧縮空気を外部にベントすることでサージマージンを確保できることが確認できた。本運転方法を採用することで、標準の 300kW-MGT 用圧縮機を採用することができた。

### (ii-3) MGT ケーシング最適化

SOFC 向け MGT は MGT の圧縮機で圧縮した空気を SOFC へ供給後、SOFC において反応を終えた空気（排空気）をタービンへ供給する必要がある。また、低カロリー燃焼器、MGT 制御バルブ等 MGT の補機類を備えると共に、排気騒音を敷地境界における規制値 55dBa 以下に低減するため排気サイレンサーの設置も必要となる。更に、(ii-5)に示すように、MGT 単体試験にて内部リークがあることが判明したため、その対策としてガスタービン構造を見直し、250kW 級ハイブリッドシステムで実績のある圧縮機とタービンが別室とする必要も生じた。これらの条件を満足すべく図 3-2-1-16 に示すケーシング構造へと最適化を行った。

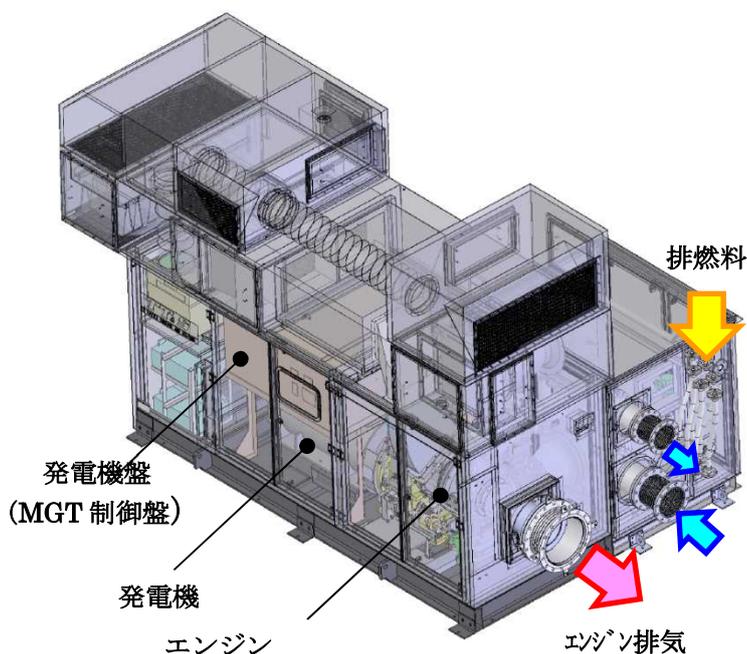


図 3-2-1-16 小型 GTFC 用ガスタービンパッケージ

#### ( ii -4) SOFC との連係運転

SOFC と連係をおこなうため、250kW 級 SOFC 向け MGT 制御コントローラをベースとし、系統連系盤および高圧盤を一体化させ、さらに MGT 制御コントローラを内蔵した MGT 制御盤を MGT パッケージに搭載した。SOFC との組合せシステムにおいて MGT を安定に運転するため、燃焼器ライナ温度を制御システムへ取り込み、自動制御で MGT 出力を増減させる制御方法へと改良を行った。また、エンジン運転中に MGT の圧損増加により MGT 圧縮機サージに至る可能性がある場合は、事前に MGT をトリップさせるサージ検出制御を追加した。

SOFC 制御機器との信号確認および MGT の単体運転を実施したところ、MGT から SOFC に供給される圧縮空気量が予定よりも少ないことが判明した。このため、( ii -5)にて SOFC へ供給する圧縮空気量を増加する改良を行った。

(ii-5) SOFC への供給空気量増加に関する MGT 本体の改良

MGT 本体（圧縮機＋タービン＋燃焼器）は圧縮機からタービン側への内部バイパスが多く、SOFC へ供給できる空気流量が少ないことが確認されたため、MGT 本体の内部バイパスを低減すべく、図 3-2-1-17 に示すように、圧縮機側とタービン側を分離する構造に変更した。

試作したスクロールコンプレッサ等を採用した MGT について株式会社トヨタエネルギーソリューションズのエンジン評価ベンチで性能評価を実施し、MGT の性能（空気流量、圧力比）はこれまで評価してきた MGT と同等であることを確認した。

さらに新たに製作した冷却方式を採用した燃焼器 5 を MGT に組付け、株式会社トヨタエネルギーソリューションズ社内にある SOFC からの排空気および排燃料を模擬できる評価設備にて SOFC と連携運転できることの模擬確認評価をおこなった。評価設備において MGT の吐出空気流量の確認をおこない、図 3-2-1-18 に示す MGT 吸い込み空気量①に対し SOFC への供給空気量②は 4.4%減（150kW 時）であることを確認した。あわせてハーフモジュール模擬条件（排空気温度条件および排燃料の体積、熱量条件模擬条件）において運転できることを確認した。

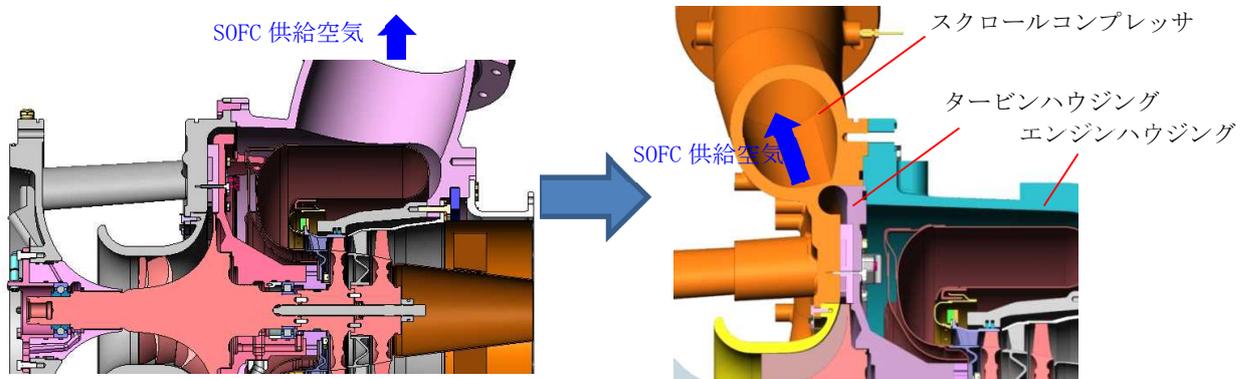


図 3-2-1-17 SOFC 供給空気流量低下対策

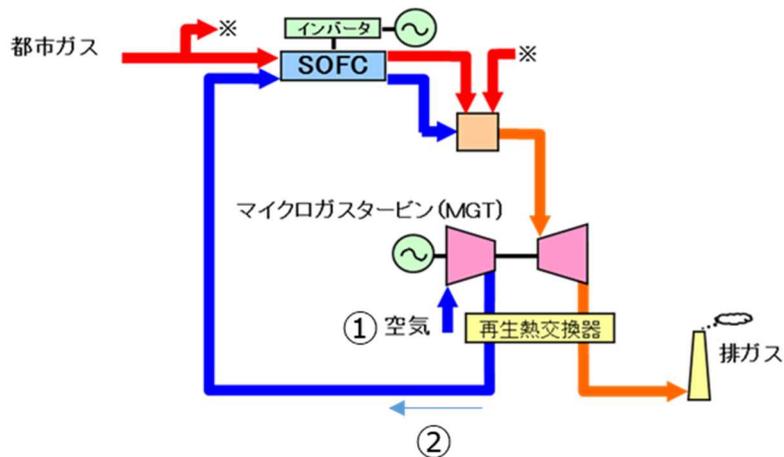


図 3-2-1-18 SOFC 供給空気流量確認

(iii) ガスタービンとの連係運転技術の確立

(iii-1) SOFC-MGT 連係運転技術

2019年に改良前のMGTと連係して試験した結果を図3-2-1-19に示す。昇温開始時は、MGT出力を高めMGT排空気温度を高めることでSOFCモジュールを450℃程度まで昇温し、その後、“発電室燃焼”にて発電に必要な温度まで昇温し、MGTとの連係運転技術を確立した。“発電室燃焼”は、SOFCの空気供給系統に都市ガスを供給し、セルスタックのカソードで触媒燃焼して昇温を行うプロセスである。また7%負荷まで印加し、問題なく運転できることを確認した。下記の運転後、燃料系統の圧力損失と温度が変化するため点検・是正を行った。

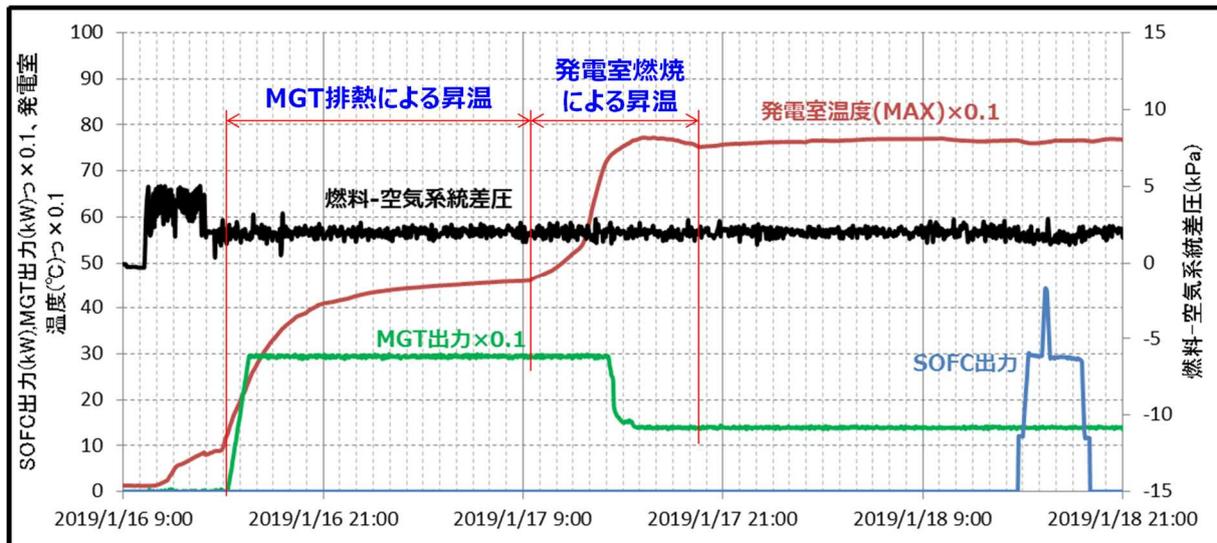


図 3-2-1-19 MGT 改良前の MW 級ハーブモジュールでの SOFC と MGT 連係試験結果

(iii-1-2) 改良型 MGT を適用した発電・実証試験

改良後の MGT および冷却ライナ燃焼器を MHI 長崎工場に設置のハーフモジュール実証機へ搭載し、MGT の単体試運転を実施し、問題なく運転できることを確認した。その後、SOFC との連係運転を実施した結果を図 3-2-1-20 に示す。定格に対し、67% 負荷まで印加し、起動時から部分負荷までの連係運転技術を確認した。改良型 MGT 換装後は懸念された SOFC 昇温時のライナ温度上昇も抑制でき、起動～昇温～部分負荷まで安定して制御できることを確認した。しかしながら、集電システムの施工不良とモジュール内温度高が発生したため点検・是正を行った。

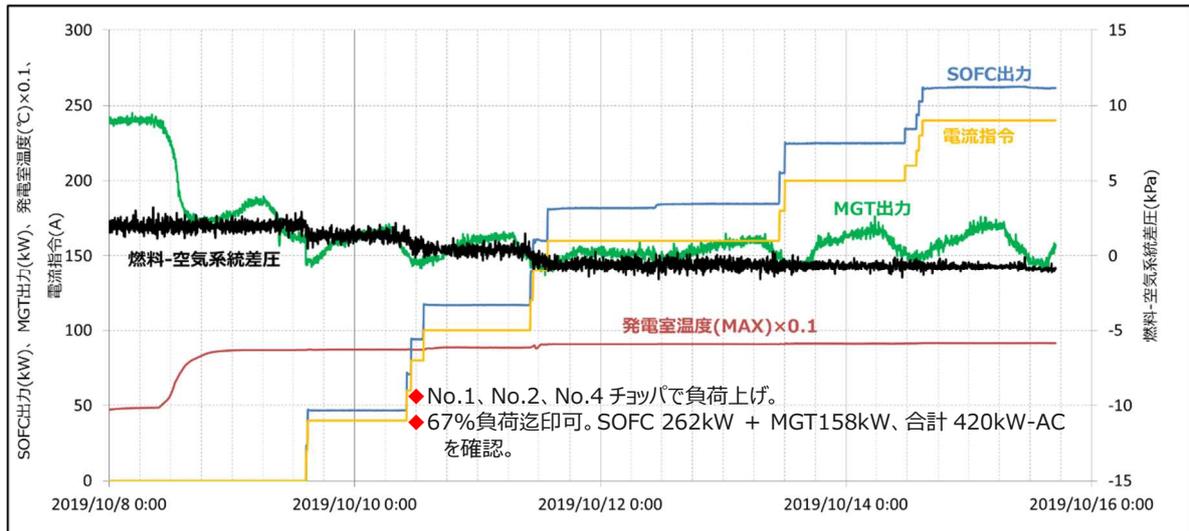


図 3-2-1-20 MGT 改良後の MW 級ハーフモジュールでの SOFC と MGT 連係試験結果

(iii-1-3) 運転条件適正化試験

2020年1月に試運転を行った際、地絡不適合によりカートリッジ2台が損傷したため、図3-2-1-21に示すようにカートリッジ数を2台減らして、18カートリッジで復旧し、試運転を実施した。

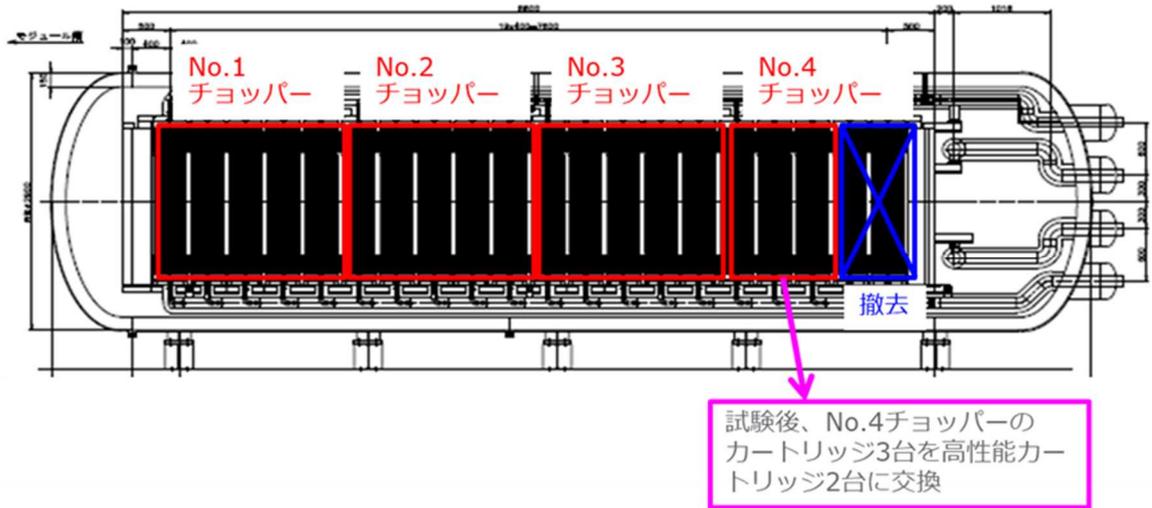


図 3-2-1-21 SOFC ハーフモジュールの改造

カートリッジ 18 台で試験した結果を図 3-2-1-22 に示す。420A で発電室燃焼を遮断した。本条件でカートリッジ・モジュール・システムの温度、圧力等、各種パラメータが管理値内で静定し、安定運転を維持できることを確認した。本試験において、起動から定格、熱自立、停止に至るまでの MGT との連系運転技術を確認した。

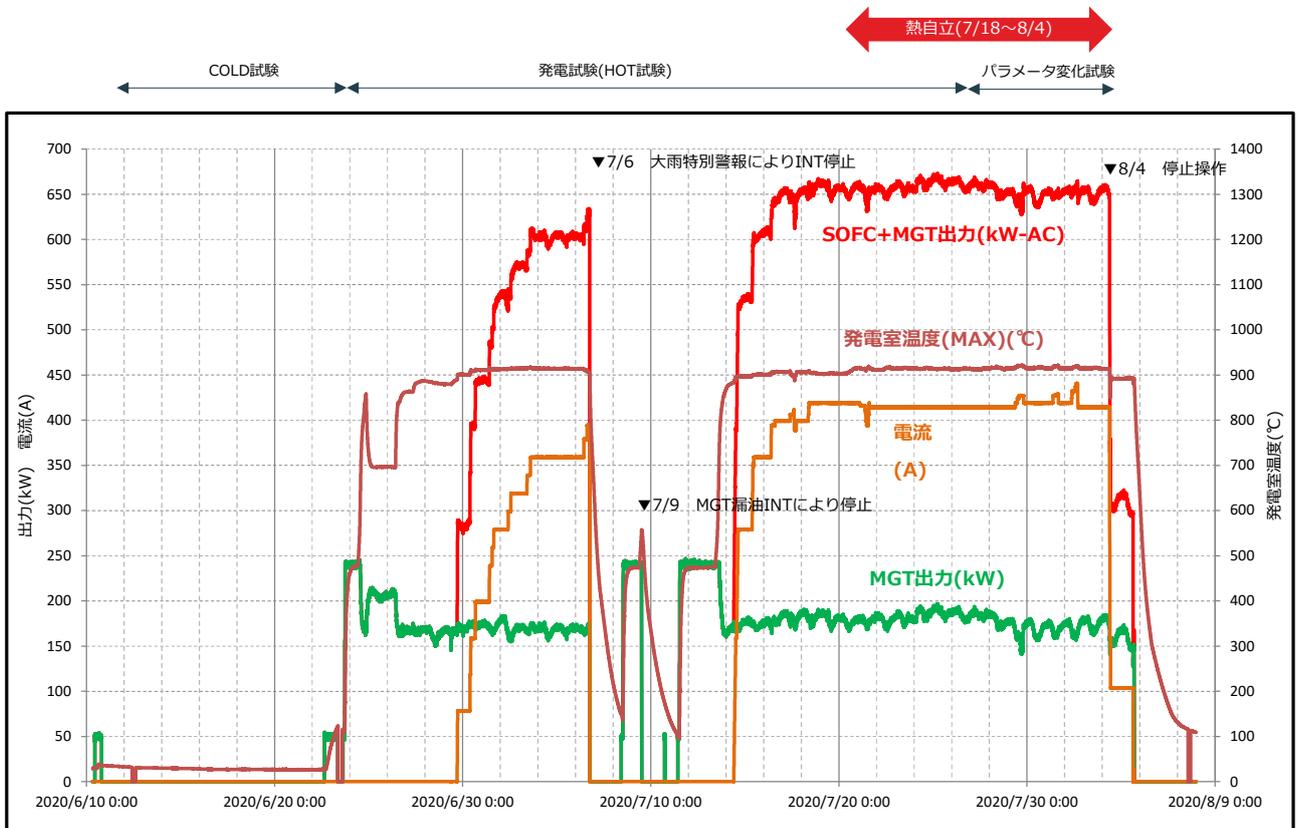


図 3-2-1-22 従来型セルでの小型 GTFC ハーフモジュール実証機の試験結果

(iii-1-4)システム特性評価 (MGT 改良後)

18カートリッジでの試験結果、およびカートリッジ 20 台に健全セルを適用した場合の性能を予測した結果を表 3-2-1-6 に示す。健全セルについて以下に示す。2019 年の試験時に発生した燃料システムの圧力損失変化は、SOFC 発電開始前の燃料改質用に供給する市水の管理不適合により、SiO<sub>2</sub> 系の白色異物をセル内を含む燃料システムに発生させてしまった影響で起きたものであり、その影響でセル性能が低下させてしまった。このため、セル性能低下の影響を除き、全て健全セルを適用した場合の性能も解析した。カートリッジ 18 台運転、電流指令 420A、カートリッジ 1 台当たりの空気流量が計画 (178Nm<sup>3</sup>/h/C) の条件において、送電端効率は 39.7%となった (表 3-2-1-6 内(a))。本試験結果から、カートリッジ 20 台、健全セル適用時の効率を予測すると 41.8%となった (表 3-2-1-6 内(b))。

最高効率点検討の為、フルモジュールで MGT が供給できる空気流量上限まで増やした際 (178Nm<sup>3</sup>/h/C → 183Nm<sup>3</sup>/h/C) の効率を試験結果から予測した。空気流量増により効率が 0.6%増加することを確認した (表 3-2-1-6 内(c))。ハーフモジュールとしての最高効率点検討の為、更に空気流量を増加させた際の (183Nm<sup>3</sup>/h/C → 187Nm<sup>3</sup>/h/C) の効率を試験結果から予測した。効率 42.6%となることを確認 (表 3-2-1-6 内(d)) した。ハーフモジュールとしては、健全なカートリッジであれば概ね目標達成することを確認した。

表 3-2-1-6 従来型セルを適用した小型 GTFC ハーフモジュール実証試験結果

項目		計画値		従来型			
				実績(18C)(a)	20C (b)	電流増 (432A) (c)	電流増 (440A) (d)
		ハーフ	フル	ハーフ			
吸気35℃	吸気15℃			吸気15℃	吸気15℃		
SOFC	カートリッジ数	20台	40台	18台	20台	20台	20台
	カートリッジ電流	414A	414A	419A	419A	432A	440A
	カートリッジ電圧	72.0V	72.0V	66.5V	68.2V	68.0V	67.6V
	SOFC出力(DC端)	596kW	1192kW	501kW	571kW	588kW	596kW
	SOFC出力(AC端)	566kW	1132kW	479kW	546kW	562kW	570kW
MGT	MGT出力	133kW	146kW	160kW	245kW	245kW	245kW
補機動力		17kW	20kW	8.3kW	8.3kW	8.3kW	8.3kW
送電端出力		682kW	1258kW	630kW	783kW	799kW	806kW
効率 (LHV)	SOFC単体(DC)	56.6%	56.6%	54.8%	56.2%	56.1%	55.8%
	SOFC単体(AC)	53.7%	53.7%	52.4%	53.7%	53.7%	53.4%
	SOFC+MGT(発電端)	44.5%	57.4%	40.3%	42.3%	42.8%	43.1%
	SOFC+MGT(送電端)	43.4%	56.5%	39.7%	41.8%	42.4%	42.6%

SOFC をフルモジュールにした場合の効率をハーフモジュール試験結果から予測した。検討結果を表 3-2-1-7 に示す。カートリッジ 1 台当たりの空気流量が計画 (178Nm<sup>3</sup>/h/C) の条件において、フルモジュールの効率を試験結果より予測すると、送電端効率 52.4%となった (表 3-2-1-7 内(a))。最高効率点検討の為、MGT が供給できる空気流量を上限まで増やした際 (178 Nm<sup>3</sup>/h/C → 183 Nm<sup>3</sup>/h/C) の効率を予測した。その結果、空気流量増により効率が 0.2 ポイント増加し、52.6%となった (表 3-2-1-7 内(b))。

計画性能からの効率低下は、カートリッジ-PCS 間の電圧低下が計画と比べ大きかったことが要因の 1 つである。また、カートリッジ面内温度差を管理値内に収める為に、SOFC 供給空気温度を計画と比べ高くする必要があった。SOFC への供給空気温度を高めるため、MGT 出力を計画より高くする必要があり、MGT 用の追い炊き燃料を増加する必要があったことも効率が低下した要因である。更なる効率上昇のためには、この 2 点の課題解決が有効であり、カートリッジ-PCS 間の電圧低下の改善 (表 3-2-1-7 内(c))、および MGT 出力を下げる (表 3-2-1-7 内 (d)) ことで、概ね目標を達成できる見込みを得た。MGT 出力低下により、MGT の追焚き燃料流量を減らせるため、システム効率が向上する。MGT 出力を下げる為には、カートリッジ内のセルスタックを全並列ではなく集電を 4 分割し、空気供給温度を 425℃程度⇒380℃程度に下げる必要がある。システムコスト低減を目的に、MW 級ハーフモジュールシステムではカートリッジ内のセルスタックを全て並列で接続したが、今後は性能・運転制御性を向上するため、並列接続するセル本数を削減し、カートリッジ内の集電を 4 分割とする。

表 3-2-1-7 従来型セルを適用した  
小型 GTFC ハーフモジュール実証試験結果からのフルモジュール時の性能予測

項目		計画値		従来型					
				実績(18C)	20C	40C (a)	電流増 (b)	電路抵抗低下 (c)	MGT出力減 (d)
		ハーフ	フル	ハーフ			フル		
				吸気35℃	吸気15℃	吸気15℃	吸気15℃	吸気15℃	吸気15℃
SOFC	カートリッジ数	20台	40台	18台	20台	40台	40台	40台	40台
	カートリッジ電流	414A	414A	419A	419A	419A	432A	432A	432A
	カートリッジ電圧	72.0V	72.0V	66.5V	68.2V	68.2V	67.7V	67.7V	67.7V
	SOFC出力(DC端)	596kW	1192kW	501kW	571kW	1142kW	1171kW	1171kW	1171kW
	SOFC出力(AC端)	566kW	1132kW	479kW	546kW	1092kW	1119kW	1142kW	1142kW
MGT	MGT出力	133kW	146kW	160kW	245kW	245kW	245kW	245kW	158kW
補機動力		17kW	20kW	8.3kW	8.3kW	9.3kW	9.3kW	9.3kW	9.3kW
送電端出力		682kW	1258kW	630kW	783kW	1328kW	1355kW	1378kW	1291kW
効率 (LHV)	SOFC単体(DC)	56.6%	56.6%	54.8%	56.2%	56.2%	55.9%	55.9%	55.9%
	SOFC単体(AC)	53.7%	53.7%	52.4%	53.7%	53.7%	53.4%	54.5%	54.5%
	SOFC+MGT(発電端)	44.5%	57.4%	40.3%	42.3%	52.8%	53.0%	53.8%	56.0%
	SOFC+MGT(送電端)	43.4%	56.5%	39.7%	41.8%	52.4%	52.6%	53.5%	55.6%

### (iii-2) 大容量化時の温度制御技術

ハーフモジュール実証機は 20 台のカートリッジで構成され、昇温は (iii-1) 項でも示した通り、ガスタービンの排熱で 450℃程度まで昇温後、セルスタックの空気極で燃料ガスを触媒燃焼させて昇温するため、空気系統に発電室燃焼用都市ガスが主系統ノズルより供給される。全 20 台のうち、端部に配置されるカートリッジは放熱が大きくなるため、主系統ノズルに加え都市ガス追加投入用の個別系統ノズルを設置している。主系統及び個別系統ノズルにおけるガス混合について詳細な解析を行い、昇温時のガス流量アンバランスの改善を行った。その結果を図 3-2-1-23 および図 3-2-1-24 に示す。

燃焼都市ガス流量に加え、モジュール内の温度解析、燃料・空気利用率の解析を行い、管理値内で運転可能な開発を行った。

(iii-1)に示した通り、起動～昇温～部分負荷～定格負荷～停止において、カートリッジ内の温度アンバランスが拡大することなく安定して制御できることを確認した。

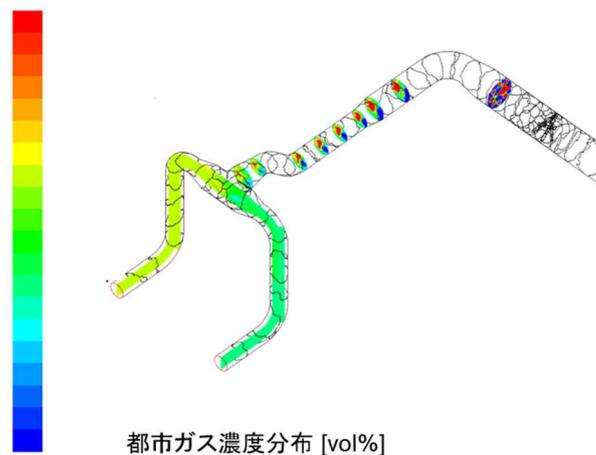


図 3-2-1-23 主系統ノズル解析結果

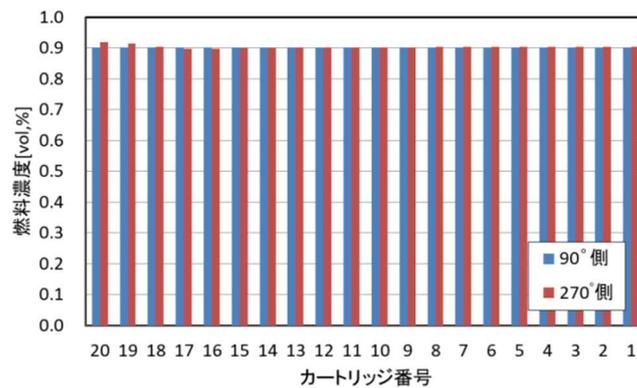


図 3-2-1-24 各カートリッジ都市ガス濃度

### (iii-3) 高圧化時の差圧制御技術

0.6MPa 級ハーフモジュール実証機運転に必須となる微差圧制御技術の開発に取り組み、改良型 MGT 換装後も 0.23MPa と同等の精度でコントロールできる差圧制御技術を確立した。

(b)セルスタック低コスト品質安定化技術開発

(i) 要素検討（安定搬送方法、炉内温度・雰囲気制御方法、解析手法構築、等）

【連続炉模擬検証炉】

焼成技術検証では、エネルギーロスが少なく低コストで大量生産するため、従来のバッチ炉焼成（セラミックス製の円筒管であるサヤ内に製品を吊り下げ輻射熱を利用する焼成方法）からサヤレス搬送台車を用いた連続焼成（セラミック製の棒で枠組みした専用台車(サヤレス)に製品を吊り下げ、搬送しながら、直接製品を加温する焼成方法）への移行を目指した。そのため、安定した搬送を可能とする搬送方法やサヤレス焼成時の炉内温度・雰囲気制御方法について検討した。

・サヤレス搬送台車のフレーム構造の最適化による安定した搬送方法の検討

セルスタックは細径長尺体であり、それを吊下げて焼成するため、焼成炉は通常の焼成炉と比較し高さが高く幅が狭い不安定な構造体となる。また、1400℃を超える焼成温度で長期に渡り使用できる構造体を設計するため、サヤレス搬送台車のフレーム構造（支柱形状、肉厚、長梁、短梁の配置、本数等）は、静的構造解析を用いて設計した。

・シミュレーション技術を活用した連続炉模擬検証炉の均一温度・雰囲気制御方法の検討

従来のバッチ式焼成炉は、サヤ内を雰囲気制御しながら焼成するため、均一温度・雰囲気で焼成することが可能であった。本研究では、サヤを無くし、焼成炉の内壁および焼成用ヒータと近接する環境で均一温度・雰囲気で焼成する必要があるため、焼成炉仕様検討ではシミュレーション技術を活用しながら、サヤレスフレーム設計、焼成用ヒータ配置等について検討した。

焼成炉にサヤレス搬送台車を配置し、所定のメッシュを形成、それぞれの物性値を設定して解析した。サヤレス構造においても最高温度域で、約 10℃の温度分布で制御できることを確認した（図 3-2-1-25）。

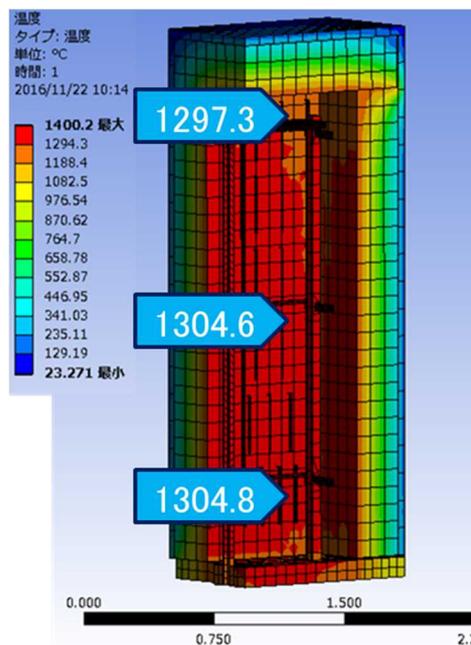


図 3-2-1-25 焼成温度解析結果

#### 【成膜検証装置】

・成膜品質を明確化するための統計的解析手法を活用した品質ばらつき判定手法の検討

成膜品質ばらつきが発電性能に及ぼす影響を検証するため、従来の成膜装置とは異なり、様々な品質パラメータが制御可能な成膜検証装置仕様を検討した。装置は成膜圧力、成膜スピード、スキージドクター角度等を可変制御できる機構を付与した。装置以外もスクリーンマスクのテンション、スラリー粘度等、成膜品質に及ぼす影響を想定し、検証計画を策定した。

#### (ii) 連続炉模擬検証炉、成膜検証装置の導入、立ち上げ

要素検討と並行して設備仕様について検討し、連続炉模擬検証炉と成膜検証装置を日本特殊陶業(株)小牧工場内に導入した。

#### 【連続炉模擬検証炉】

導入した連続炉模擬検証炉において、焼成プログラムと炉内の実測温度を比較したところ、脱バインダー域、最高温度域の温度誤差は、共に 10℃以内でコントロール可能であることを確認した。本結果は設備導入前に解析していたシミュレーション解析と同等の結果であることも確認できた。

#### 【成膜検証装置】

導入した成膜検証装置において、設備の機能確認、及び電極や電解質の成膜基本条件を設定した。

#### (iii) 焼成温度・雰囲気制御開発

連続炉模擬検証炉を用いて、セルスタックを低コストで大量生産可能な量産装置に適用できる焼成技術の検討を実施した。

焼成条件は既存条件をベースに検証したが、処理量増加毎に焼成不具合が生じたため、シミュレーションを用い製品周辺のガス流れ（製品配置、高さの影響の検証）、導入ガスの供給・排気流れを解析し、炉内換気効率を向上させて適正化を図った。その他焼成温度プロファイル、ガス流量、炉内圧力等の条件を変更した検証試験を実施し、脱脂域は約 2.5 倍の時間を要するものの、一度に約 300 本焼成可能な焼成条件を見出した。

焼成プロファイルの短縮化やガス使用量の削減等、更なる低コスト化について検討するためには、連続炉模擬検証炉の改造が必要であることが分かり、検証炉内の偏流を防止するために、『検証装置の給排気能力向上』、『ガス供給流量増加』、『ガス導入口の増設』等の工事を実施した。

(iv) 成膜状態・品質・性能検証試験

成膜検証装置において、電極や電解質の膜厚、成膜速度・印刷スキージ（スラリー塗布用のゴム製板）角度・印圧等の様々な成膜条件を変化させて試験を行ったが、機能不足であったため、スキージユニットの位置微調整機能、角度調整機能等、容易且つ正確に初期設定可能とする調整機構を追加し高精度で試験を行った。そして、その成膜状態（膜厚やニジミ、カスレ、未充填等の外観、等）を新たに導入した成膜測定装置を用いてインラインで計測・定量化し得られたデータを焼成後の品質、発電性能と紐付け統計的解析を行い、膜厚や成膜品質に大きく影響を及ぼす成膜条件を得た。

それらの成膜条件を最適化することで、安定した成膜品質で且つ製造時間を 1/3 に低減できる目途付けができた。

(v) 低コスト化技術開発

【連続炉模擬検証炉】

連続炉模擬検証炉において、焼成工程におけるエネルギー使用量（電気・ガス）の削減に向けた検証試験を実施し、焼成処理量の増加且つ処理時間の短縮、および窒素ガス使用量の低減によるエネルギー使用量の削減を行い、図 3-2-1-26 に示すように目標である焼成光熱費の既設炉からの 33%削減を達成した。これにより、表 3-2-1-8 に示すように、全工程での光熱費 1/3 以下である当初の目標を達成した。

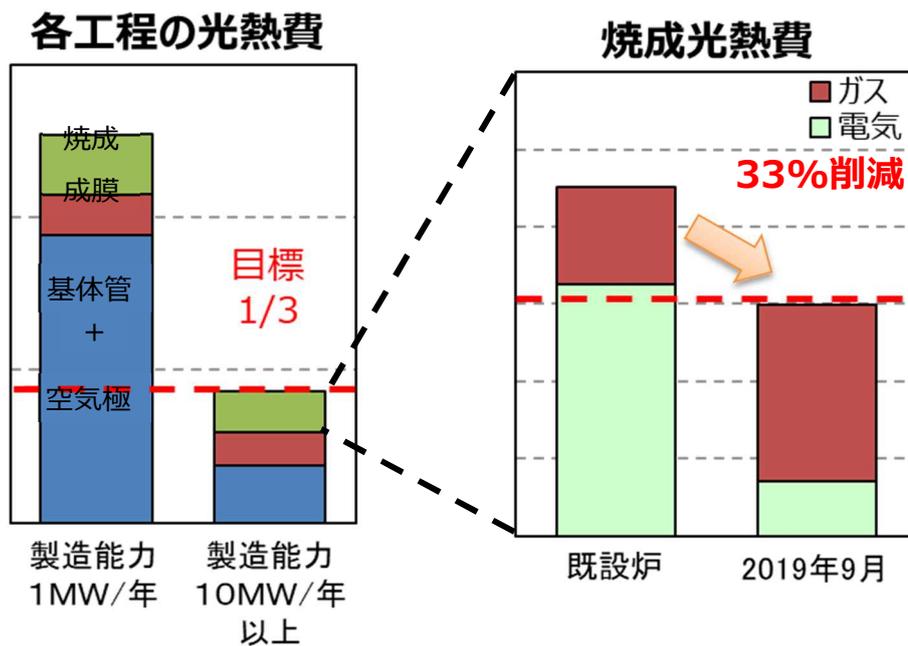


図 3-2-1-26 焼成工程におけるエネルギー使用量の削減

表 3-2-1-8 低コスト化技術開発の目標達成状況

項目	目標	達成状況	補足
製造面積	≤1/3	○	処理量5倍により達成
製造速度	≤1/3	○	処理量5倍および降温時間短縮により達成
工数	≤1/3	○	安定品質が得られる目途が立ち、自動化により達成見込み
光熱費	≤1/3	○	処理量5.6倍およびガス使用量削減により達成
製造コスト	≤1/3	○	製造速度と工数が目標以上の削減効果を達成し、 全て合わせた製造コストは目標達成

【発電特性】

成膜検証装置にて最適化された条件で成膜し、連続炉模擬検証炉で焼成したセルスタックの発電性能は、図 3-2-1-27 に示すように既設炉焼成品と同等の発電性能であることを確認した。

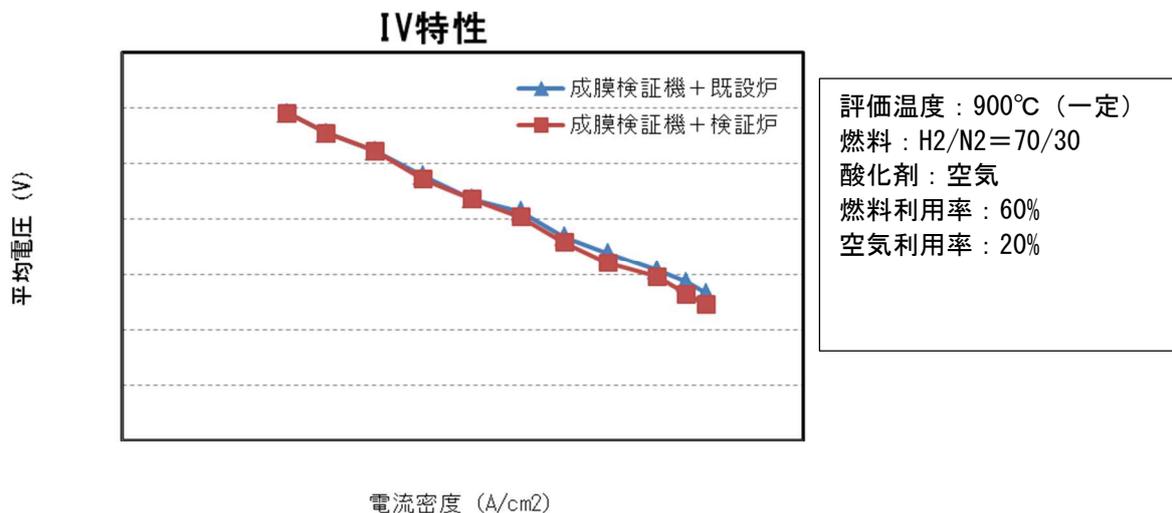


図 3-2-1-27 連続炉模擬検証炉における昇温時間の短縮検討結果と成膜検証機で成膜したセルを従来炉と検証炉で焼成したセルの発電性能比較

### (c) 高性能セルスタックの性能検証

セルスタックの低コスト化には、製造コストの低減が有効であり、本事業では、焼成工程、並びに印刷工程に成果を得たが、セルスタックの高出力化が更なるコストダウンに有効である。

印刷精度向上・薄肉化、印刷パターン変更、発電面積増大化などの手段により、発電出力を2～2.2倍に高めることができるセルスタックを独自開発で進めている。本成果を本事業の低コスト品質安定化技術に反映し、独自開発した高性能セルスタックをハーフモジュールに適用することで、発電性能、温度分布特性を検証する。

### (i) MW 級ハーフモジュール実証機への高性能セルスタックの適用

高性能セルスタックを適用したカートリッジを小型 GTFC ハーフモジュール実証機に一部換装し、高圧下での発電特性を検証すると共に、システムでの検証も実施する。高性能セルスタックの生産は、本事業のセルスタック低コスト品質安定化技術で開発した焼成技術と成膜技術を活用した。

### (ii) MW 級実証機組込

高性能セルスタックを適用したカートリッジ2基を独自に製作後、MW 級ハーフモジュール実証機に組込んだ。2カートリッジとするのは、図 3-2-1-28 に示す通り、高性能セルスタックを同一容器内で適用する場合、出力、発熱ともに増加し、同一仕様のシステムを適用した検証が困難なためである。このため、図 3-2-1-29 に示す通り、GTFC ハーフモジュール実証機に組み込んでいる従来型のセルスタックを適用した15台のカートリッジと高性能セルスタックを適用したカートリッジ2台と仕様の異なるカートリッジを組み合わせたモジュールで検証した。

カートリッジ構成の変更に伴い、一部配管・集電線等の変更、パワーコンディショナの設定変更、制御システムの改修などの改造を行い、高性能カートリッジの運転圧力0.6MPa級でのSOFC発電量、温度分布などのデータを採取し、ガス分配性、断熱構造を含めたモジュール性能を評価すると共に、小型GTFCハーフモジュール実証機としての特性評価・検証を実施した。

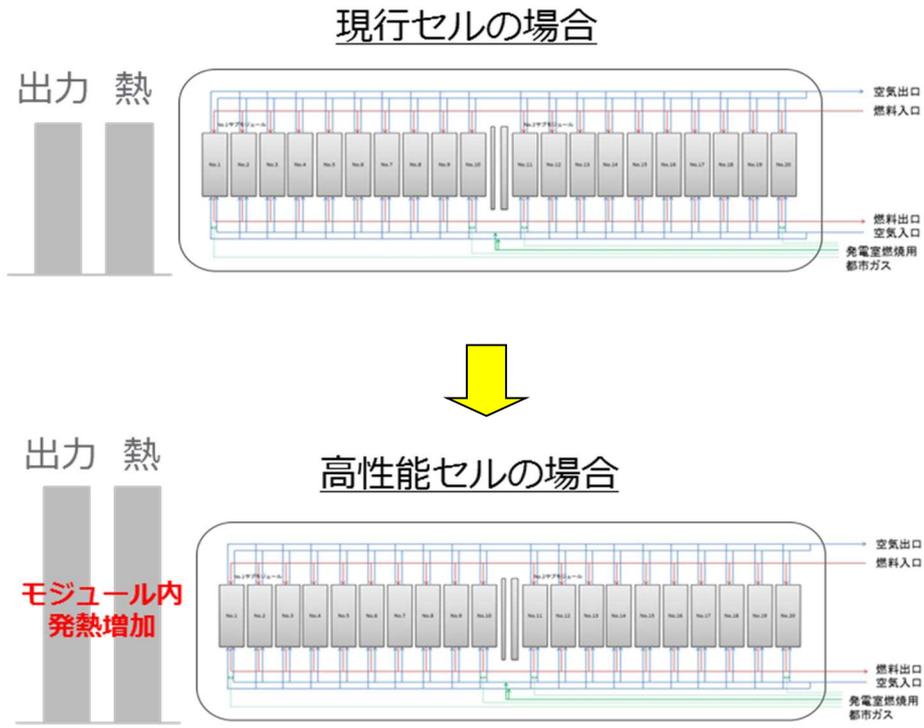


図 3-2-1-28 ハーフモジュール実証機への高性能セルスタック適用法の検討

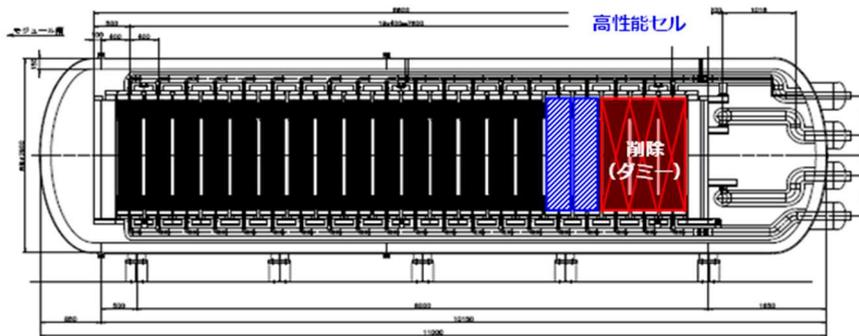


図 3-2-1-29 ハーフモジュール実証機への高性能セルスタックの適用

(iii) MW 級実証機調整試運転

図 3-2-1-31 に高性能カートリッジを適用したハーフモジュール実証機の容器内電気系統を示す。従来型のカートリッジはカートリッジ内のセルスタックを全て並列で接続していたが、高性能セルスタックを適用したカートリッジにおいて全セルスタックを並列で接続すると、カートリッジ内の温度分布が大きくなることが予想されたため、高性能カートリッジはカートリッジ内の集電を 4 分割にし、カートリッジ内の並列接続本数を削減し、集電 A、D 系統と集電 B、C 系統でそれぞれ電流を調整できるような接続とした。このように集電方法が異なるため、従来設置していたパワーコンディショナー（PCS）のみでは運転ができなくなるため、図 3-2-1-30 のように、仮設で PCS を 1 台設置し、試験を実施した。

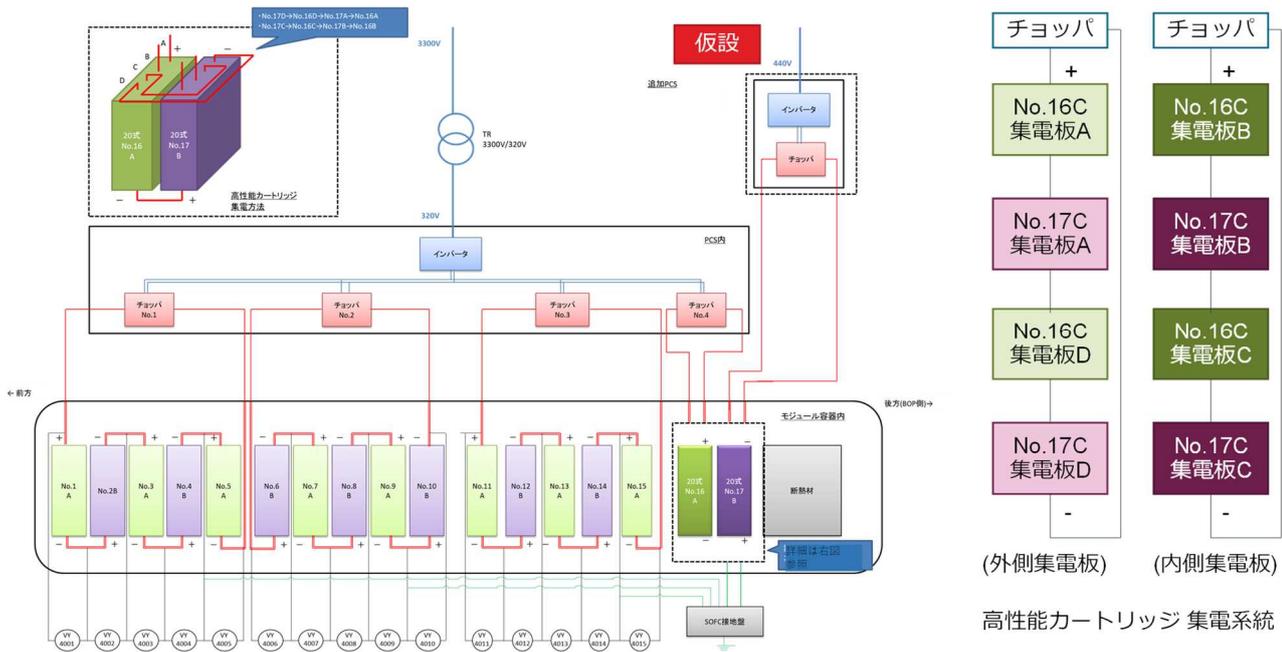


図 3-2-1-30 高性能カートリッジを適用したハーフモジュール実証機の容器内電気系統

図 3-2-1-31 に高性能カートリッジを適用したハーフモジュール実証機の試験結果を示す。2022 年 1 月 31 日(月)にモジュール容器の鏡板を締め、2 月 1 日(火)より全体系統の気密試験と SOFC の気密性を確認し、SOFC 本体の乾燥運転を行った。その後、2 月 7 日(月)より MGT を起動し、SOFC の昇温を開始した。

2 月 12 日(土)に SOFC を系統に併入し負荷上げを開始した。2 月 19 日(土)に発電室燃焼を 408A (従来カートリッジ基準) で遮断し熱自立させた。その後、425A (従来カートリッジ基準) で条件を適正化し、SOFC 507kW-AC+MGT 228kW-AC=合計 735 kW-AC で従来カートリッジ 15 台、高性能カートリッジ 2 台を合わせた出力は概ね計画通りであることを確認した。

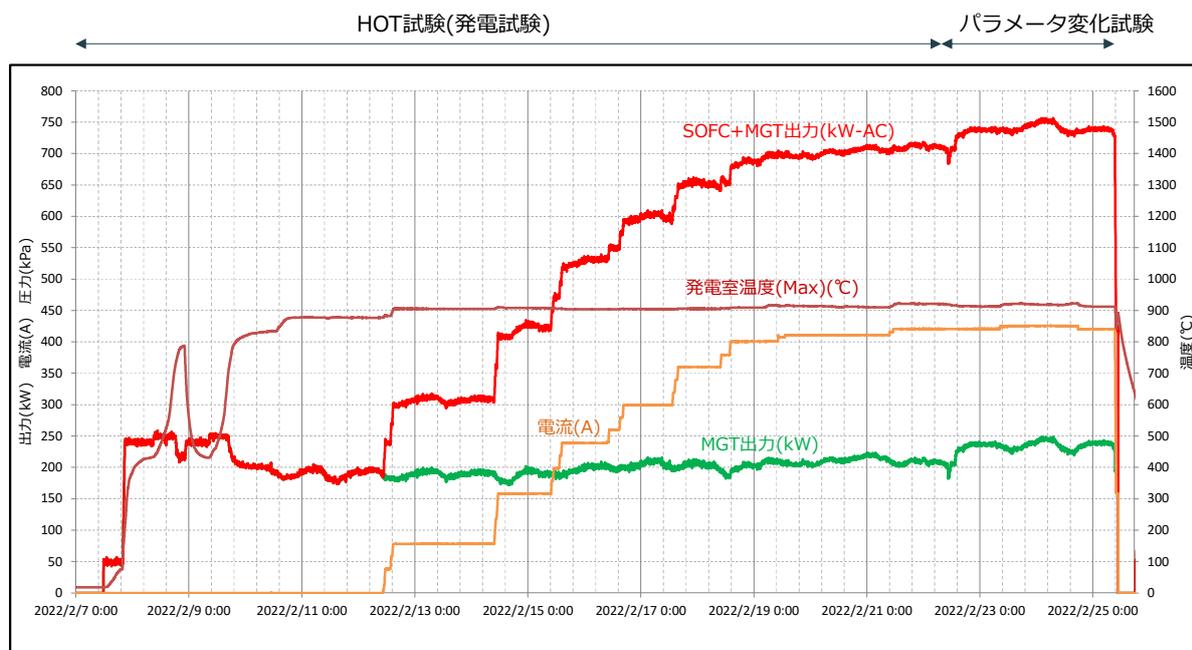


図 3-2-1-31 高性能カートリッジを適用したハーフモジュール実証機の試験結果

#### (iv) 高性能カートリッジによるモジュールの性能評価

図 3-2-1-32 に高性能カートリッジ 2 台を換装した際の従来カートリッジの平均と高性能型のカートリッジ毎の I-V 特性を示す。尚、高性能カートリッジ試験は、高性能セルスタックの検証として独自に行った。

従来型カートリッジは図 3-2-1-32 より 2020 年 6 月の試験と同等の性能を得ることができた。本試験では従来型カートリッジと高性能カートリッジを同一容器内に設置し、同時に評価するため、燃料と空気の分配をカートリッジ仕様に応じて適正に分配する必要があった。本試験結果から、カートリッジの発電性能に大きな影響を及ぼす燃料・空気が 2020 年の試験時と同等に分配でき、温度分布も同等であったと考えることができる。

一方で高性能カートリッジは No.17 が単体の高性能カートリッジ試験と同等、No.16 はカートリッジ試験よりも高い性能を得た。MW ハーフモジュールと高性能カートリッジ試験の温度分布を比較した結果を図 3-2-1-33 に示す。図 3-2-1-33 はカートリッジ面内中央のセルスタック軸方向温度である。

No.16 カートリッジは、上部と中央の温度はカートリッジ試験と同等であるが、セルスタック下部の温度が高いことが分かる。この下部温度が高かったため、カートリッジ電圧が高くなったと考える。No.17 カートリッジは軸方向の温度分布が計測できていないが、中央の温度がカートリッジ試験よりも低いことが分かる。セルスタック中央部の温度が低いにも関わらず、カートリッジ試験と同等の電圧であったのは、No.16 カートリッジ同様、下部の温度が高かったためと推測できる。尚、図 3-2-1-33 にも示したが、カートリッジ試験では中央と上部の間の温度も計測しているが、MW ハーフモジュールでは計測

できていないため、中央と上部の温度を直線で結んだ。MW ハーフモジュールにおいても当該温度を計測していれば、同様の温度分布になったと考える。

また、図 3-2-1-34 より、従来型カートリッジと高性能型カートリッジを比較すると、下部温度は同等であるが、中央と上部の温度差が高性能型よりも小さいことが分かる。これは燃料流量の差による改質吸熱量の相違によると考える。

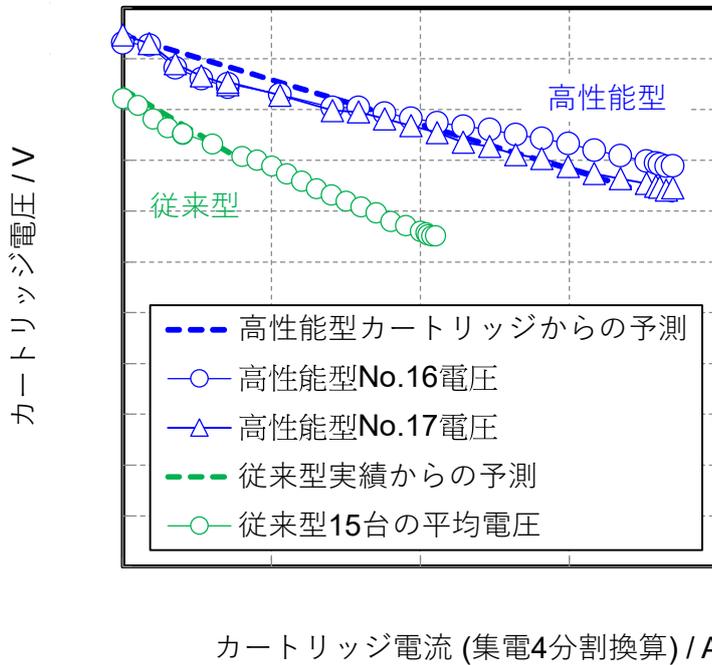


図 3-2-1-32 高性能カートリッジ 2 台を換装した際の従来カートリッジの平均と高性能型のカートリッジ毎の I-V 特性

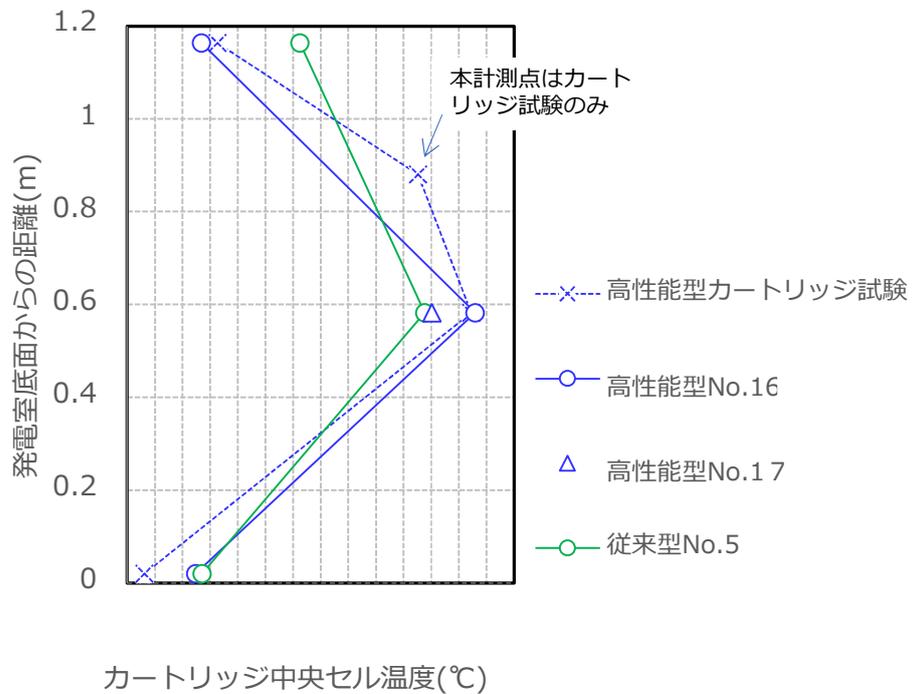


図 3-2-1-33 高性能カートリッジ 2 台を換装した際の従来カートリッジの平均と高性能型のカートリッジ毎の I-V 特性

高性能カートリッジの MW 級ハーフモジュールでの性能とカートリッジ試験での性能差を解析した結果を表 3-2-1-9 に示す。カートリッジ試験の温度に MW 級ハーフモジュールの No.16 カートリッジの温度を適用し、更に運転圧力の相違を考慮して計算すると、カートリッジ試験の電圧が No.16 カートリッジの電圧と一致した。このため、カートリッジとハーフモジュールの性能差は、温度分布と圧力の差に起因している考える。尚、運転圧力はカートリッジ試験が 0.23MPa、MW 級ハーフモジュールが 0.6MPa である。

表 3-2-1-9 高性能カートリッジの MW 級ハーフモジュールとカートリッジ試験における電圧差の解析結果

項目	No.16 カートリッジ	No.17 カートリッジ (参考)	カートリッジ 試験結果	カートリッジ 試験結果の 温度を No.16へ補正	カートリッジ 試験結果の 温度と圧力を No.16へ補正
圧力 (MPa)	0.6	0.6	0.23	0.23	0.6
試験結果 電圧(-)	1	0.946	0.942	-	-
性能解析 電圧(-)	<u>0.990</u>	0.938	0.953	0.973	<u>0.990</u>

※電圧は No.16 カートリッジを 1 として比で表記。

(v) GTFC に適用可能な SOFC 基本システム構成検討

高性能カートリッジ 2 台を換装した試験結果と高性能カートリッジを適用してフルモジュールを構成したときの性能を解析した結果を表 3-2-1-10 に示す。従来カートリッジ 15 台と高性能カートリッジ 2 台を換装して試験した結果、送電端効率は計画 40.6%に対し、表 3-2-1-10 (a)列に示す通り、実績は 40.7%であり、概ね計画通りとなった。

仮設した PCS の変換効率を従来と同じ PCS の効率を用いると送電端効率は 40.9% (表 3-2-1-10 の b 列)、MGT の吸気温度を 15℃に換算し、高性能カートリッジ 10 台でハーフモジュールを構成すると 42.2% (表 3-2-1-10 の c 列) になった。これをベースとしてフルモジュールを高性能カートリッジ 20 台で構成すると送電端効率は 53.0% (表 3-2-1-10 の d 列) となった。フルモジュールは従来型ではカートリッジ 40 台必要であったため、カートリッジ数は 1/2 になる。

表 3-2-1-10 の d 列は高性能カートリッジの空気流量が 320Nm<sup>3</sup>/h/カートリッジの場合であり、MGT から供給できる空気を 941Nm<sup>3</sup>/h バイパスしている。このため、カートリッジ空気流量を 320→364Nm<sup>3</sup>/h まで増加し MGT の供給空気量と一致させた。空気流量を増加した分、SOFC での空気利用率を固定した条件で電流を増加した場合の送電端効率は 53.9%(表 3-2-1-10 の e 列)となった。尚、電流を上昇させた時の電圧は、実績の IV から外挿し電圧を算出した。

2020 年度の検討時と同様に、効率低下要因であるカートリッジ-PCS 間の電路抵抗改善と MGT 出力の低下による追い焚き燃料の低下で、送電端効率がそれぞれ 54.3%(表 3-2-1-10 の f 列)、56.3%(表 3-2-1-10 の g 列) へ向上し、概ね目標を達成できる見込みを得た。更に、今回の高性能セルスタックは従来型の出力 2 倍相当であったが、量産の目処付けを得ている 2.2 倍のセルスタックを適用することで送電端効率が 57.5%へ高まり、目標の 57%を超える見込みを得た。

表 3-2-1-10 高性能カートリッジを適用したシステムの性能解析結果

項目	計画値		(b) 高性能型											
			(a) 運転実績		(b) PCS変換効率統一		(c) 高性能(2倍)							
	ハーフ	フル	ハーフ		ハーフ		ハーフ		(d) フル		(e)	(f)フル	(g)	(h)
			従来型	高性能	従来型	高性能	吸気 15℃	吸気 15℃	空気・電流増	電路抵抗低下	MGT追焚き減	高性能(2.2倍)		
SOFC	カートリッジ数	20台	40台	15台	2台	15台	2台	10台	20台	20台	20台	20台	20台	20台
	カートリッジ電流	414A	414A	425A	748A	425A	748A	748A	748A	852A	852A	878A	884A	
	カートリッジ電圧	72.0V	72.0V	65.8V	76.7V	65.8V	76.7V	76.7V	76.7V	74.9V	74.9V	74.4V	76.1V	
	SOFC出力(DC端)	596kW	1192kW	420kW	115kW	420kW	115kW	574kW	1147kW	1277kW	1277kW	1308kW	1344kW	
	SOFC出力(AC端)	566kW	1132kW	400kW	107kW	400kW	111kW	552kW	1103kW	1228kW	1239kW	1269kW	1304kW	
MGT	MGT出力	133kW	146kW	228kW		228kW		214kW	214kW	214kW	214kW	158kW	158kW	
補機動力		17kW	20kW	8.6kW		8.6kW		8.6kW	9.3kW	9.3kW	9.3kW	9.3kW	9.3kW	
送電端出力		682kW	1258kW	727kW		730kW		757kW	1308kW	1433kW	1444kW	1418kW	1453kW	
効率 (LHV)	SOFC単体(DC)	56.6%	56.6%	54.4%	56.2%	54.4%	56.2%	56.2%	56.2%	54.9%	54.9%	54.6%	55.8%	
	SOFC単体(AC)	53.7%	53.7%	52.0%		52.3%		54.1%	54.1%	52.8%	53.3%	53.0%	54.1%	
	SOFC+MGT(発電端)	44.5%	57.4%	41.2%		41.4%		42.7%	53.3%	54.3%	54.7%	56.6%	57.9%	
	SOFC+MGT(送電端)	43.4%	56.5%	40.7%		40.9%		42.2%	53.0%	53.9%	54.3%	56.3%	57.5%	

## ②高圧 SOFC モジュールの開発（運転圧力～2.0MPa 級）

### (a) 高圧カートリッジ試験

#### ( i ) カートリッジ製作

中小型 GTFC（10 万 kW 級、1～2MPa 程度）の開発に向けた設計品質向上のため、高圧カートリッジ試験装置を用いた高圧（～2.0MPa 程度）でのカートリッジ圧力特性評価試験を計画し、本試験用の高圧試験用カートリッジを製作した。

製作したカートリッジを図 3-2-1-34 に示す。カートリッジはハーフモジュール実証機と同一構造であり、カートリッジ廻りを箱形断熱材で覆い、発電室を可能な限り密閉した構造を採用している。



カートリッジ外観



サブモジュール化

図 3-2-1-34 高圧試験用カートリッジ

#### ( ii ) カートリッジ性能検査

製作した高圧試験向けカートリッジの低圧での性能検査を弊社長崎工場の試験設備にて実施した。性能検査にて確認した運転圧力は 0.23MPaG および 0.3MPaG である。0.23MPaG は従来の運転圧力に相当し、0.3MPaG は試験装置の上限運転圧力である。試験結果を図 3-2-1-35 に示す。

(iii) 高圧試験（その 1）

(ii) のカートリッジ性能検査後、カートリッジを三菱重工業(株)総合研究所（高砂）に移設し、～2.1MPa までの試験が可能な高圧カートリッジ試験装置に据え付け、カートリッジの高圧下での特性評価試験を実施した。高圧試験（その 1）にて実施した～1.5MPaG までの圧力特性の試験結果を図 3-2-1-35 に示す。

0.53MPaG でのカートリッジ出力は 0.23MPaG の単セルスタック試験同様、約 1.1 倍に向上したが、加圧による放熱量の増加が大きく、1.0MPaG および 1.5MPaG でのカートリッジ出力は予想曲線よりも低い結果となった。本結果よりカートリッジの断熱構造の強化が必要であることが判明したため、カートリッジを取り出して点検することとした。

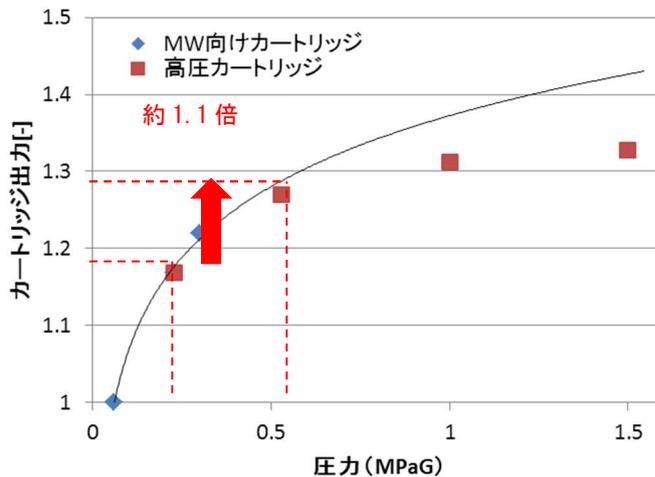


図 3-2-1-35 カートリッジ性能検査と高圧試験その 1 で得たカートリッジ出力の圧力依存性

(iv) カートリッジ開放点検・再組立

カートリッジを取り出して開放点検を行ったところ、カートリッジ下部のサブモジュール枠と燃料排出ヘッダの金属接触部に、枠のたわみなどでわずかに隙間が発生している事が明らかとなった。この隙間でサブモジュール内外の循環流が発生し、発電室内の熱が持ち出されていると推定された。この問題を解決するためシール構造を強化した改良型カートリッジを製作し、高圧試験（その 2）の評価を行うこととした。

(iv) 高圧試験（その 2）

放熱対策を強化した改良型カートリッジを高圧カートリッジ試験装置に組み込み、高圧試験（その 2）にて 1.5MPaG までの圧力特性を評価した。試験結果を図 3-2-1-36 に示す。

1.5MPaG まではセルスタック表面の最高温度を 920℃まで昇温でき、カートリッジ出力は単セルスタックと同等の向上を示したが、2.1MPaG では放熱が大きくセルスタック表面の最高温度は目標よりも約 50℃低くなった。このため、1.5MPaG で 2.1MPaG と同じ温度であるセルスタック最高温度を 50℃低くしたときの性能を計測した。その結果、1.5MPaG において最高温度が 50℃低い時と 920℃では、920℃の方が 1.07 倍、カートリッジ出力が高くなることが分かった。2.1MPaG においても同じ比率で出力が高まると仮定すると、図 3-2-1-36 に示すように出力予想曲線とほぼ一致する結果を得た。

運転圧力とカートリッジ放熱量の関係を図 3-2-1-37 に示す。放熱量の増加は運転圧力の 1 乗～2 乗に比例して増加すると予想されたが、放熱量予測（二乗）とほぼ一致する結果となり、特に 0.6MPa 以上の運転圧力での放熱増加が顕著である。発電室と容器内雰囲気との温度差に起因した循環流に起因していると推定している。

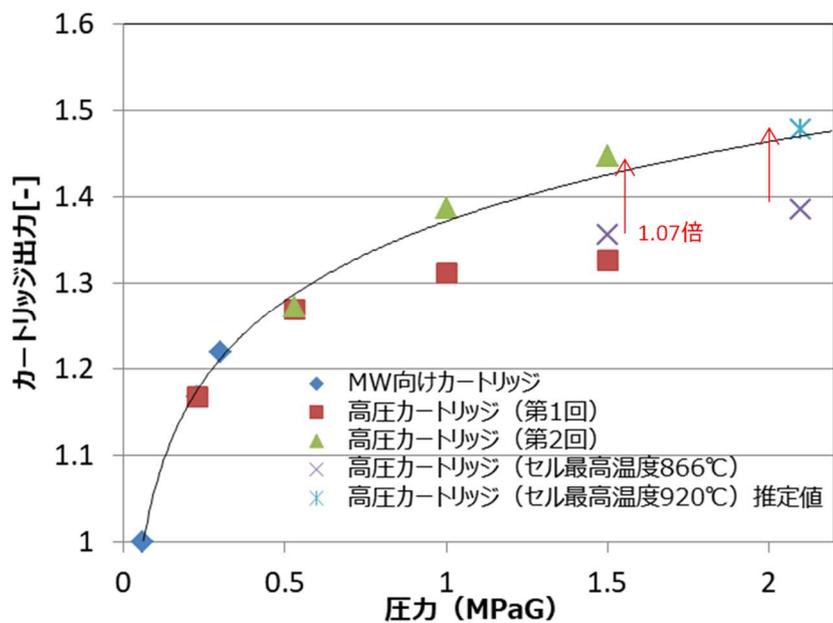


図 3-2-1-36 高圧試験その 2 で得たカートリッジ出力の圧力依存性

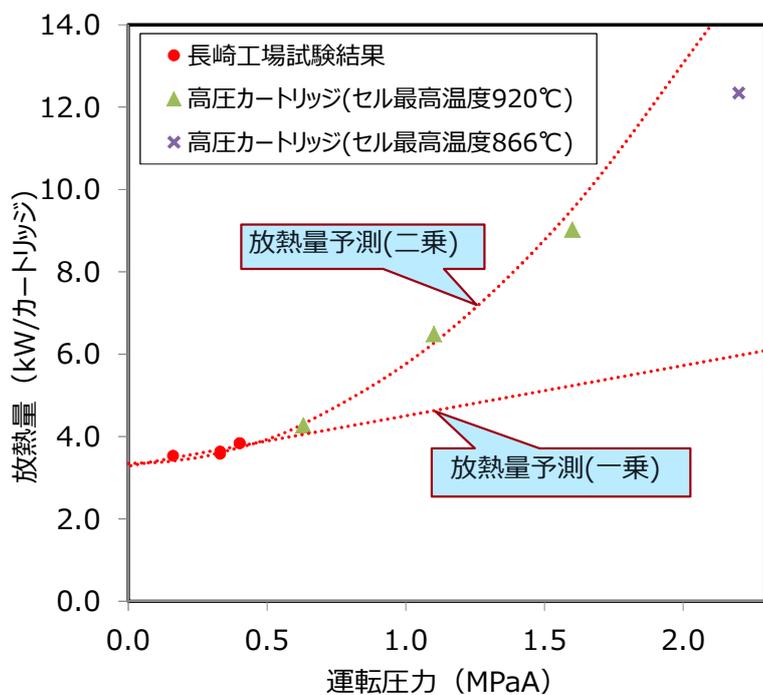


図 3-2-1-37 高圧試験その 2 で得たカートリッジ放熱量の圧力依存性

(vi) 解体調査結果

高圧発電試験後のカートリッジを解体してセルスタックを抜き出し、分析した結果を以下に示す。

- ・セルスタックの外観には割れや剥離などの異常はなく健全（図 3-2-1-38）であった。
- ・光学顕微鏡および SEM による観察結果でも異常は無く、新品セルスタックと比較して高圧条件特有と思われる特異な変化はなかった。
- ・試験後のセル強度も設計許容応力以上の強度が確保されていることを確認した。

以上の分析結果より、数百時間の運転ではあるが、0.53MPaG 以上の圧力条件でもセルスタックに顕著な問題は発生しないと考える。



図 3-2-1-38 セルスタック外観

(b)高圧単セルスタック試験

( i ) 発電特性試験

高圧単セルスタック試験装置を使用して高圧条件でのセルスタック発電特性試験を実施し、圧力をパラメータとして実機運転条件に反映するための基礎データを取得した。本試験で得た IV 特性から運転点（セル平均電圧 0.75V）での出力を解析した結果、中圧セルスタック試験結果から予測した性能向上カーブと同等の結果を得た。試験結果を図 3-2-1-39 に示す。

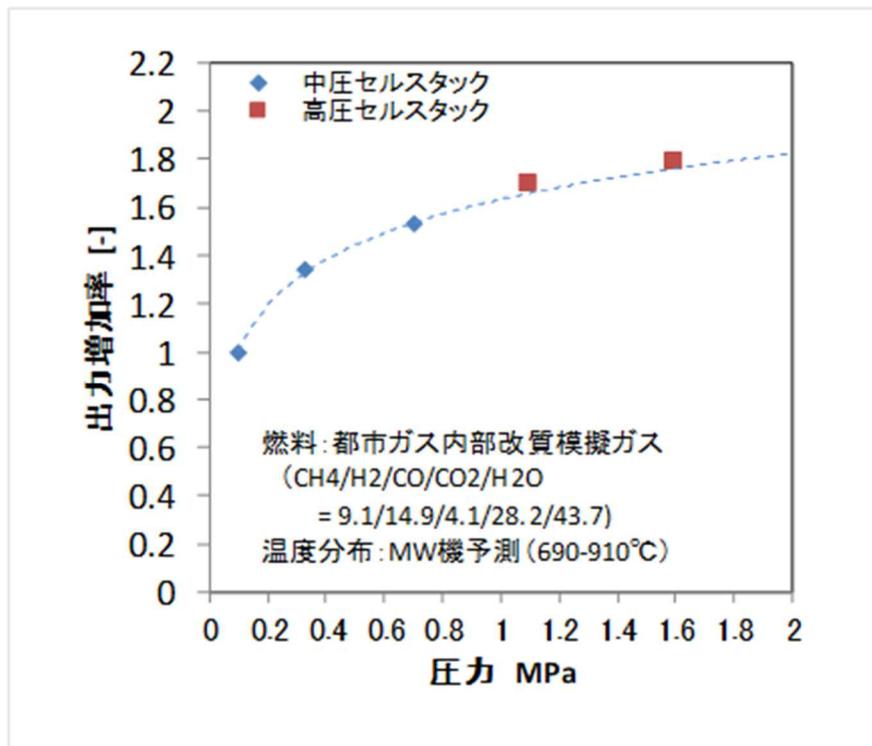


図 3-2-1-39 セルスタック出力の圧力依存性

## (ii) 信頼性・耐久性試験

実機環境を模擬した高圧条件（1.5MPaG）にてセルスタックの 3500 時間耐久性試験を実施した。試験結果を図 3-2-1-40 に示す。セル全体電圧が耐久性試験開始初期に低下する傾向が認められ、特に 800℃以下の低温部位は常圧よりも電圧低下が大きい傾向が確認されたが、電圧低下は 1000 時間程度で安定し、それ以降は安定した性能を示している。

1000 時間以降のセル電圧低下率は 0.014%/1000h であり、1.5MPaG の高圧条件でも 3500 時間レベルの運用が可能であることが確認できた。

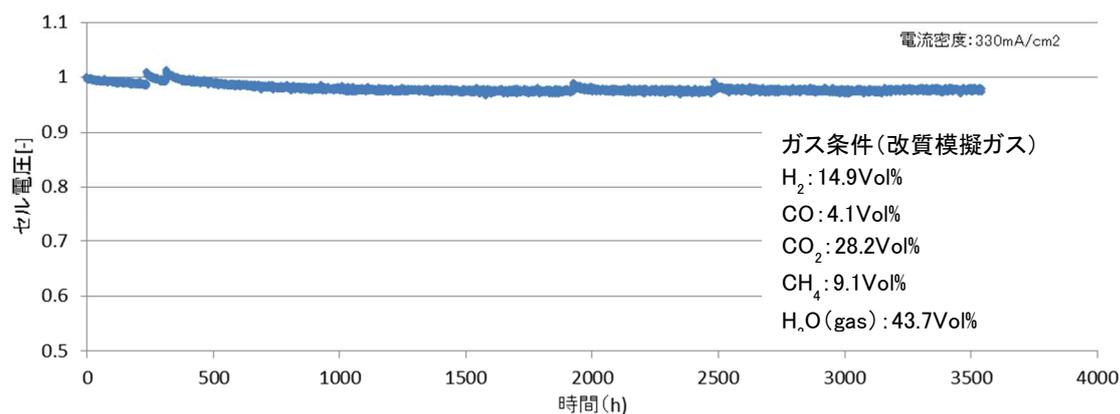


図 3-2-1-40 高圧条件(1.5MPaG)における長期耐久試験結果

## (iii) 解体分析

高圧耐久性試験後のセルスタックを取り出し解体分析を実施した。外観観察は健全であった。断面観察を行った結果、燃料極の Ni 粒子が一部粗大化していたが、顕著な性能への影響は観察されなかった。

### 3.2.2 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

各研究開発項目の成果は、表 3-2-2 に示す通りである。全ての研究開発項目は達成された。

表 3-2-2 各研究開発項目の成果

研究開発項目	目標	成果	達成度
燃料電池モジュール試験に向けた検討	①水素リッチガス適用および石炭ガス化設備に係る運転・制御の検討 ②燃料電池モジュール試験設備を設計・製作・据付 ③燃料電池カートリッジ試験による基礎データ取得	・水素リッチガスの運転・制御の検討を実施 ・試験用の 250kW 級燃料電池モジュールを製作 ・カートリッジ試験にて水素リッチガスの発電基本特性を把握	○
燃料電池モジュール基本特性確認試験	④燃料電池モジュール基本特性確認 ⑤水素リッチガス切替時の特性を把握 ⑦起動・停止方法の確立	・天然ガス基礎データ取得 ・水素リッチガスを用いた場合の燃料電池の基本性能及び運用性を確認	○
水素リッチガス最大負荷試験	⑥水素リッチガス最大負荷試験による燃料電池モジュールの発電性能を最適化するための運用性確立 ⑧実証機模擬ガス試験によるガス組成の影響把握	・再循環流量や燃料利用率等運転パラメータの変更により発電出力改善を確認 ・CO <sub>2</sub> を含む水素リッチガスの場合に発電室上部の温度が低下し、発電出力が増加することを確認	○
石炭ガス化炉関係試験	⑨ガス化炉と燃料電池を連結し発電特性及び運用性確認 ⑩CO リッチガスの発電特性を把握 ⑪解体調査により石炭ガスの影響把握	・ガス化炉と燃料電池モジュールの連係を実施し、連係制御と石炭ガス（CO リッチガス）による発電特性を確認 ・燃料電池用ガス精製設備の被毒物除去性能を確認 ・解体調査から石炭ガスがセル等に与える影響について確認	○

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

## 1. 研究概要

「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」において、石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）の開発方針として、2025年度頃の技術確立、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ている。現在開発されている固体酸化物形燃料電池（SOFC）は、主に天然ガス（主成分：CH<sub>4</sub>）を燃料としており、石炭ガス（COリッチガス：主成分CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>）やCO<sub>2</sub>分離・回収後の石炭ガス（水素リッチガス：主成分H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>）を燃料とする場合、特性が異なると想定されるため、事前の検証にて課題を抽出し対策を検討することが重要となる。

本プロジェクトでは、天然ガスを燃料として三菱日立パワーシステムズ(株)（現：三菱重工(株)）で開発された固体酸化物形燃料電池（SOFC）（以後、燃料電池という）とマイクロガスタービンを組み合わせた250kW級燃料電池モジュール設備を用いてCO<sub>2</sub>分離・回収型IGFCを想定した石炭ガス（水素リッチガス）の適用性について試験を行い、発電特性や運転制約の有無を確認した。

## 2. 実施内容

### 研究開発項目① 水素リッチガス適用および石炭ガス化設備連係に係る運転・制御性の検討

水素リッチガスを燃料として使用する場合、天然ガスを燃料とする場合と比較し、改質反応による吸熱が無くなることによりカートリッジ内の熱バランスが変化し、セルスタックおよび各ガス温度が上昇することが予想される。それに伴いセルスタック温度、金属部材温度（ヘッド温度、管板温度）が上昇し、耐熱温度を超過する可能性が懸念された。図3-2-2-1にセル廻りの温度分布のイメージを示す。

そのため、水素リッチガス混合比や運転パラメータがカートリッジ熱バランスに与える影響を検討するためにCFDを用いた電気-熱流動-化学反応連成解析手法を用いてモジュール中のセルスタックを模擬したモデルでの熱バランス解析を実施した。

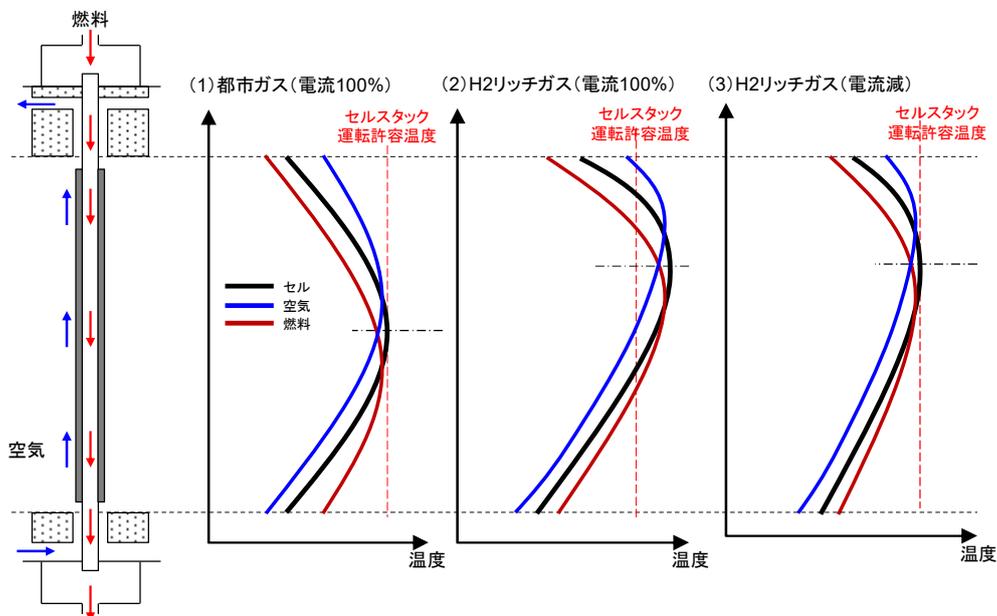


図 3-2-2-1 天然ガスおよび水素リッチガス供給時のセル廻り温度分布イメージ

(1) 運転パラメータ変化

(i) 水素リッチガス混合比変化

水素リッチガス混合比を0%~100%まで変化させた場合の影響を確認するため、4モデルケース(天然ガス、水素ガス、水素ガス混合比50%、水素ガス混合比25%)の解析を行い、別途実施したカートリッジ試験の結果(研究開発項目③参照)と比較した。

その結果、温度分布の傾向や最高温度を概略再現していることを確認した。水素混合比が上昇すると、セルスタック最高温度の位置がセルスタックの中央部から上部方向にシフトすると共に最高温度が高くなった。これは、水素リッチガス混合比増加に伴い、セルスタック内部での改質反応が発生する領域が減少することで最高温度となる場所が上部方向へシフトしたものと考えられる。図3-2-2-2に解析結果を示す。

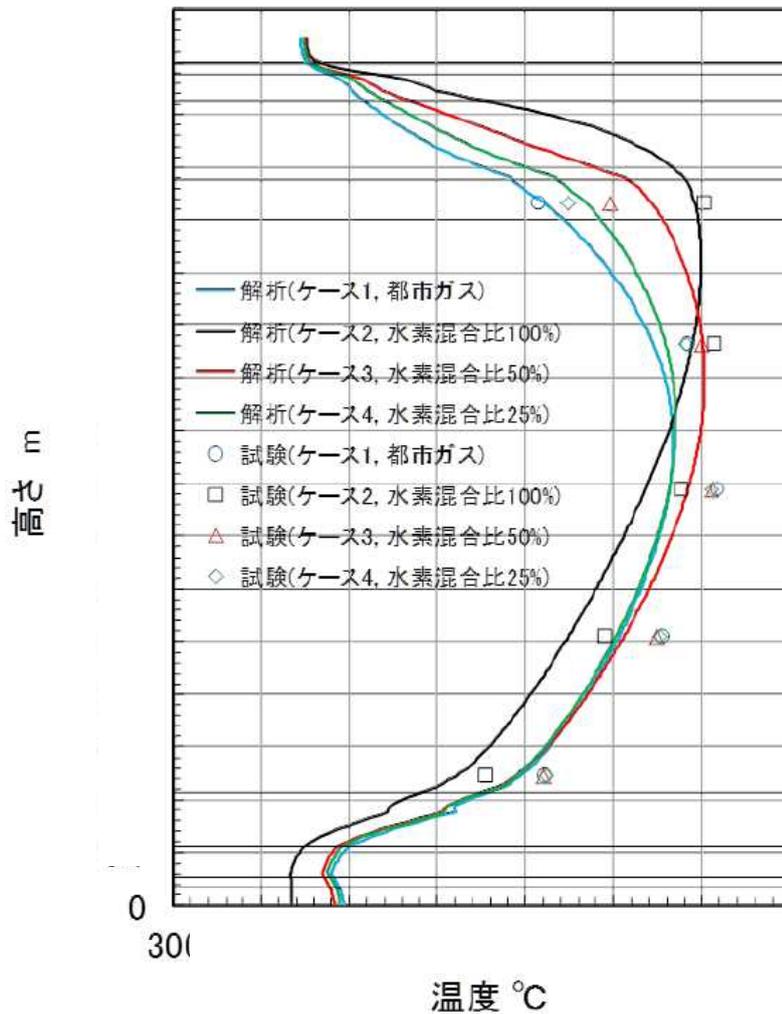


図 3-2-2-2 水素混合比変化時のセルスタック温度分布

(ii) 入口燃料温度変化

水素リッチガス 100%条件における温度分布改善を目的として、上部側の入口燃料温度の変化が温度分布に及ぼす影響について解析を実施した。図 3-2-2-3 に解析結果を示す。

カートリッジ試験では入口燃料温度が低下することによりセルスタック温度もわずかに低下することを確認した。解析結果でも同様であり、試験結果を再現し、試験結果の妥当性を確認できた。

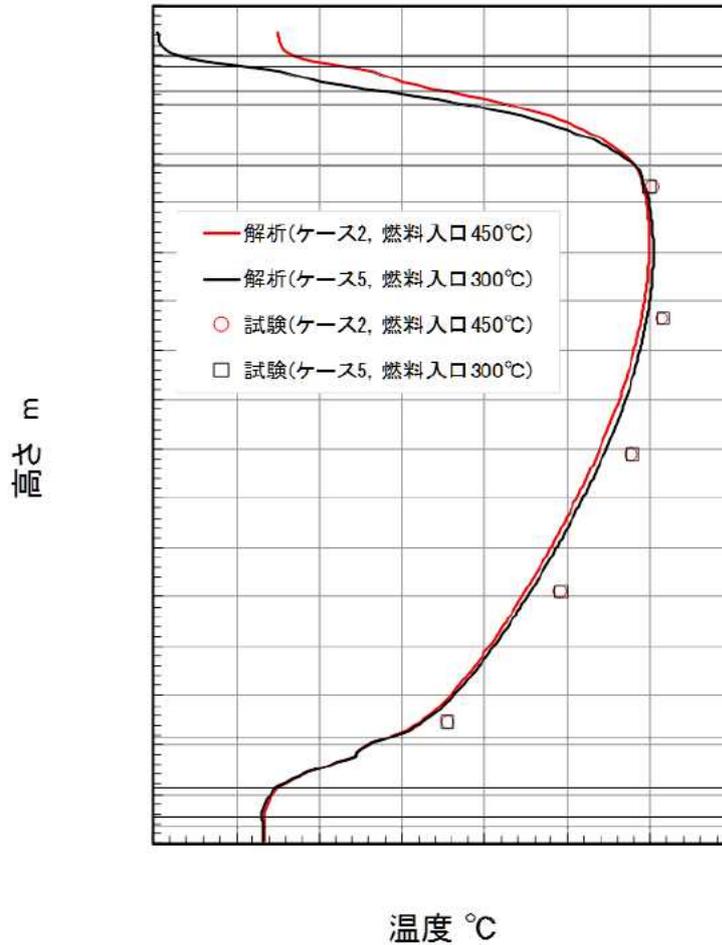


図 3-2-2-3 入口燃料温度変化時のセルスタック温度分布

(iii)再循環流量変化

水素リッチガス 100%条件における温度分布改善を目的として再循環流量の変化が温度分布に及ぼす影響について解析を実施した。図 3-2-2-4 に解析結果を示す。

再循環流量を増加すると、セルスタック内で最高温度となる位置が下側へシフトし、下部側の温度が上昇してセルスタック温度分布を大幅に改善できることを確認した。

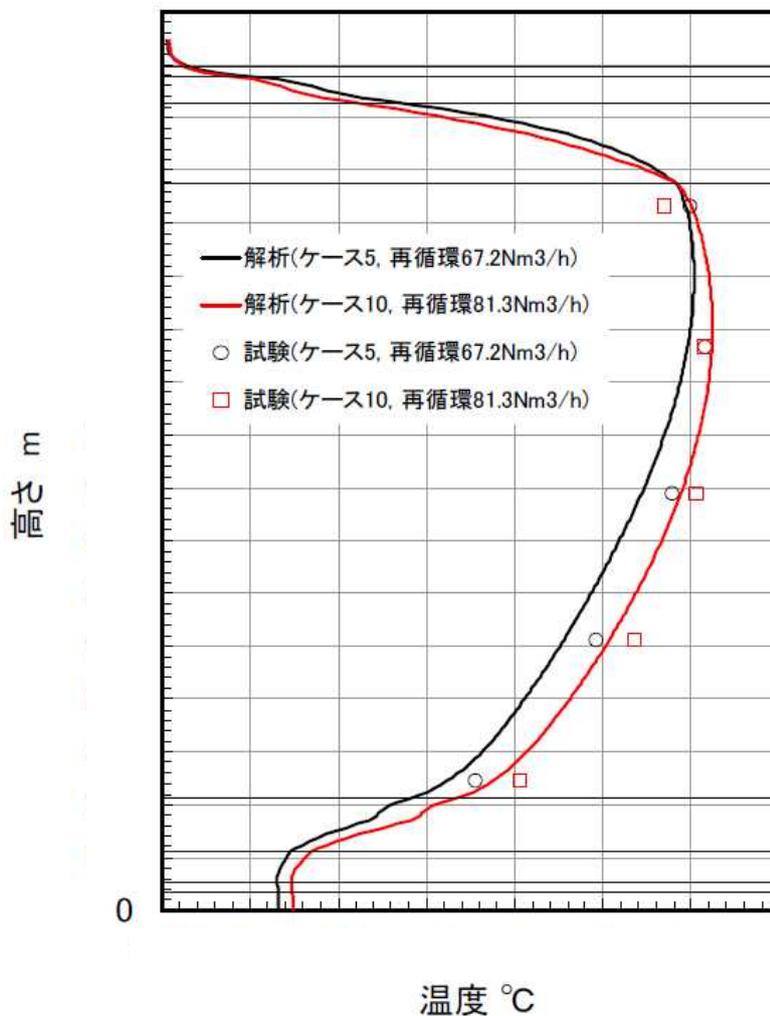


図 3-2-2-4 再循環流量変化時のセルスタック温度分布

(iv)システム利用率変化

燃料投入量を調整してシステム燃料利用率を変化させた時の、セルスタック温度分布に及ぼす影響を確認した。

カートリッジ試験の設備上の制約から、システム燃料利用率の低下は未実施であったが、解析手法によりシステム燃料利用率低下時の温度分布の変化を予測した。図 3-2-2-5 に解析結果を示す。

システム燃料利用率を 82%から 70%へ低下させると、セルスタックの最高温度が 15℃程度低下する結果となった。システム燃料利用率を低下するには燃料投入量を増加することになり、燃料増加による冷却効果が大きくなったことが影響したと考えられる。

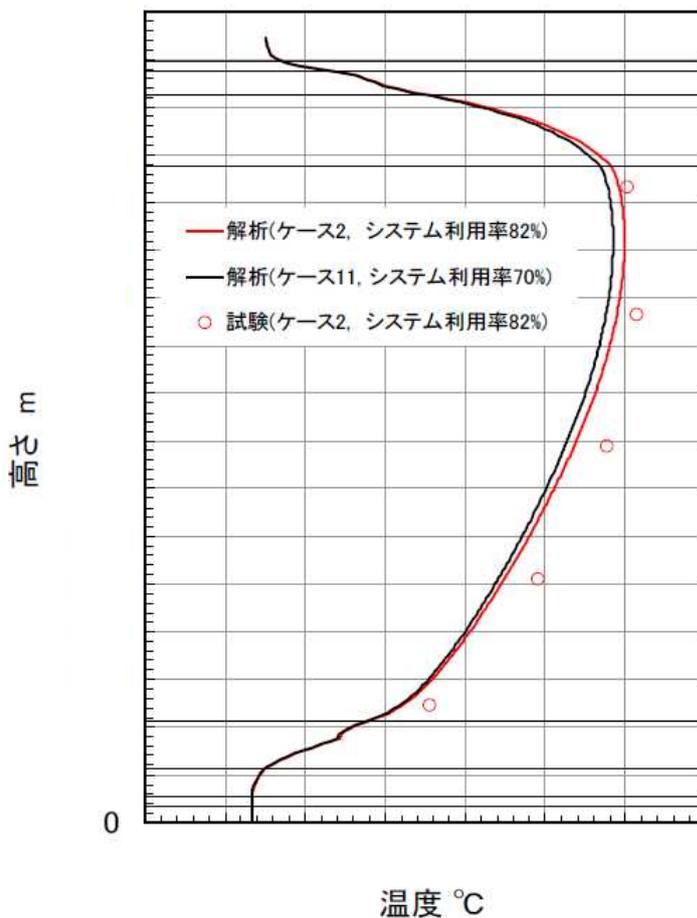


図 3-2-2-5 システム燃料利用率変化時のセルスタック温度分布

### (v) 入口空気温度変化

セルスタックの下部側の温度を上昇させた場合の温度均一化を確認するため、セルスタック下部側から供給する入口空気温度を上昇させた時の温度分布を予測した。図 3-2-2-6 に解析結果を示す。

入口空気温度が高いほどセルスタック下部温度が上昇することを確認したが、中部・上部もほぼ同等に温度が上昇し、セルスタック最高温度も上昇した。そのことから、入口空気温度上昇によるセルスタック温度分布の改善効果は得られないことが分かった。

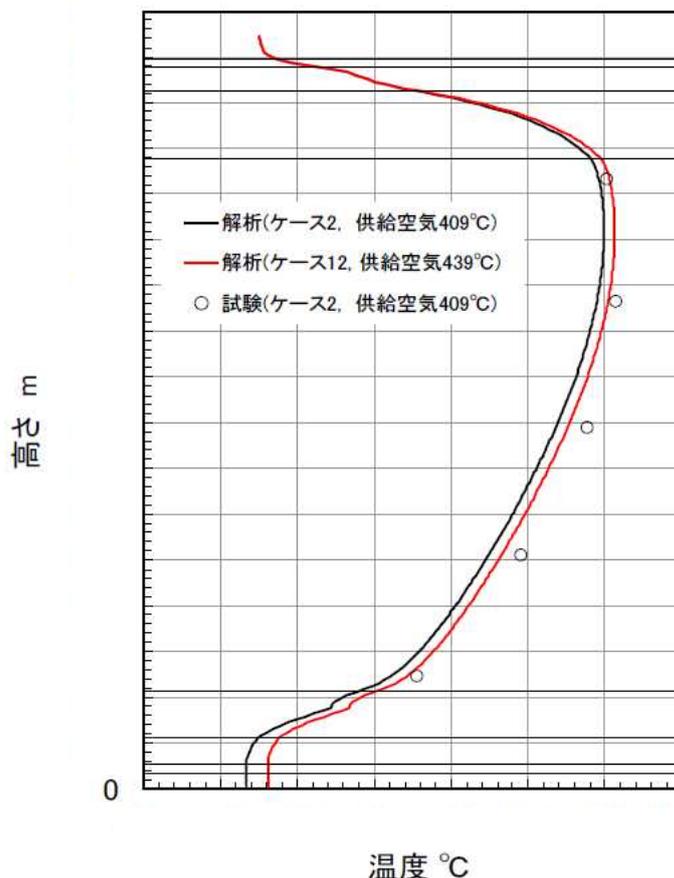


図 3-2-2-6 空気入口温度変化時のセルスタック温度分布

### (vi) CO<sub>2</sub> 濃度変化

石炭ガス化ガスから CO<sub>2</sub> 分離回収した水素リッチガスでは、一部の CO<sub>2</sub> が残留することも想定されることから、CO<sub>2</sub> 濃度がセルスタック温度分布へ及ぼす影響を確認するため、CO<sub>2</sub> 濃度を 0%、3%、8% に変化させて解析を実施した。図 3-2-2-7 に解析結果を示す。

水素リッチガス中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇に伴い、セルスタックの最高温度が低下し、上部温度も低下した。これは CO<sub>2</sub> を含まない水素リッチガスでは水性ガスシフト反応 ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ) が発生しないが、CO<sub>2</sub> を添加することで水性ガス逆シフト反応が生じ、逆シフト反応の吸熱によりセルスタックの上部温度が低下したものと考えられる。一方、セルスタック下部では逆シフト反応により生じた CO によるメタネーション反応 ( $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ) の発熱により下部温度が上昇し、セルスタック温度分布が改善する傾向が見られた。

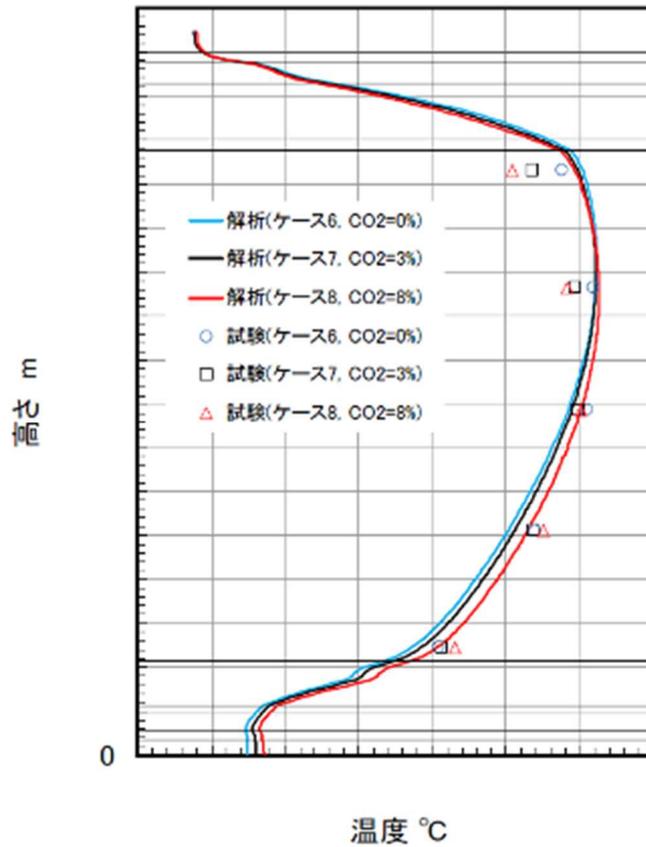


図 3-2-2-7 CO<sub>2</sub> 濃度変化時のセルスタック温度分布

(2)再循環冷却器検討

上記の検討により、水素リッチガス適用に伴う温度上昇対策として、入口燃料温度を下げる運用が有効であると考え、再循環ガスを冷却するための再循環冷却器を追設し、燃料電池モジュールの設計に反映した。図 3-2-2-8 に燃料電池モジュールの概略系統を示す。

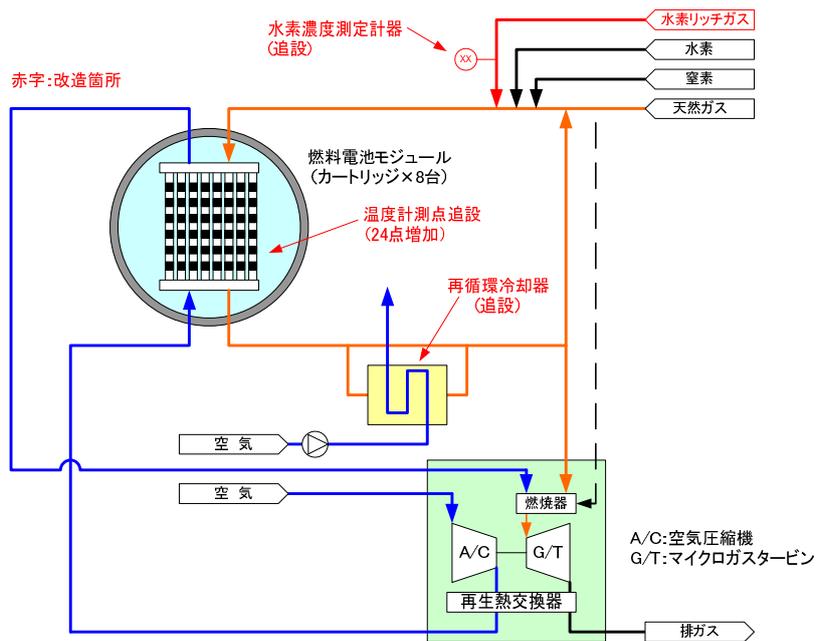


図 3-2-2-8 燃料電池モジュールの概略系統

研究開発項目② 燃料電池モジュール試験設備の設計・製作・据付

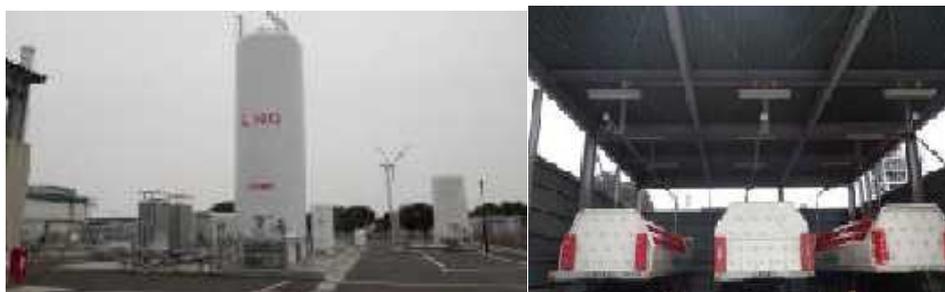
三菱日立パワーシステムズ(株)(現：三菱重工(株)) で開発された固体酸化物形燃料電池 (SOFC) とマイクロガスタービンを組み合わせた 250kW 級燃料電池モジュール試験設備 (図 3-2-2-9) やユーティリティ供給設備 (図 3-2-2-10) 等の据付工事および試運転調整を実施し、2017 年 11 月末に据付を完了した。

表 3-2-2-1 工程表

	平成29年 (2017)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水素トレーラー庫工事		■	■									
基礎工事		■	■									
外構工事					■	■	■	■				
電源設備工事					■	■	■	■				
ユーティリティ供給設備据付工事	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
燃料電池モジュール試験設備据付工事	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■



図 3-2-2-9 燃料電池モジュール試験設備



(a)LNG/N<sub>2</sub> 供給設備

(b)水素供給設備

図 3-2-2-10 ユーティリティ供給設備

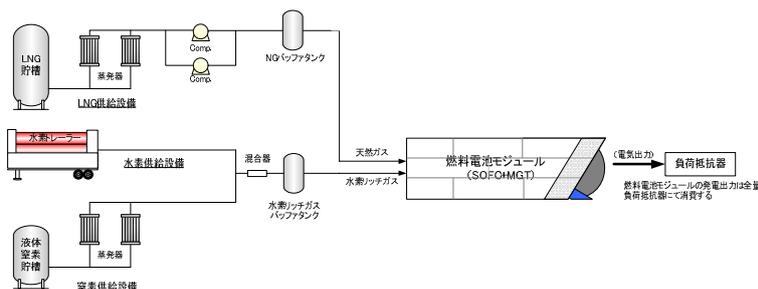


図 3-2-2-11 試験設備概略系統

### 研究開発項目③ 燃料電池カートリッジ試験

燃料電池モジュールの基本構成単位となるカートリッジ（出力 25kW 級）を用いて水素リッチガス（ $H_2/N_2$ ）適用時の発電特性や温度挙動等の基礎データを取得し、燃料電池モジュールでの水素リッチガス試験の詳細計画に反映した。

2016 年度にカートリッジの製作、据付を行うとともに試験を開始し、2017 年度にかけて水素リッチガス適用時のデータを取得した。本試験では、水素リッチガス運転による電流-電圧特性等の発電特性やカートリッジ各部の温度データを取得した。特に、燃料電池モジュールを用いた試験ではモジュール内の計測点数が限られることから、カートリッジ試験にてカートリッジ各部の詳細な温度測定を行い、温度分布を把握した。



図 3-2-2-12 燃料電池カートリッジ試験

#### (1) LNG での発電特性確認試験

LNG100%でのリファレンスデータを取得するための発電特性確認試験を行った。装置起動後、運転圧力運転圧力まで加圧操作を行い、燃料・空気加熱ヒータにて発電室燃焼開始温度まで昇温後、LNG での発電室燃焼によりセル温度を発電可能温度まで昇温し、定格負荷までの負荷上げを実施した。その後、温度を静定させデータを取得した。図 3-2-2-13 にセル温度分布を示す。この結果から、LNG における発電特性を確認した。LNG での運転では主成分であるメタンの改質反応により上部温度が下がるため、中部温度が最高温度となった。

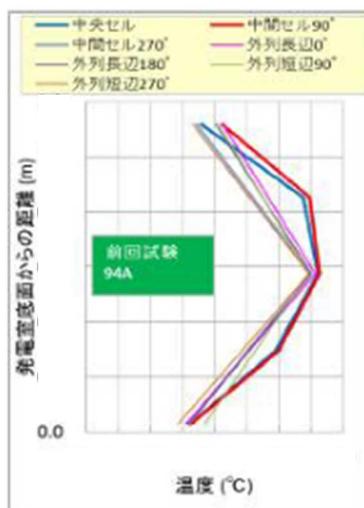


図 3-2-2-13 LNG 発電時の温度分布

(2)水素リッチガスでの発電特性確認試験

水素リッチガス混合率を0%、25%、50%、75%、100%と徐々に増加した際の発電性能、温度分布、管板温度の上昇有無を確認したところ、水素リッチガス混合率を増加させるとセル最高温度は上昇傾向となった。なお本燃料電池では、設備保護のため発電室最高温度を設定し、電流値を増減する自動運転制御としている。図 3-2-2-14 に示すように、水素リッチガス混合率上昇に伴いセル上部温度が上昇し、下部温度が低下する傾向が見られた。水素リッチガス 100%条件では、LNG の定格負荷での出力の約 75%の出力が得られた。

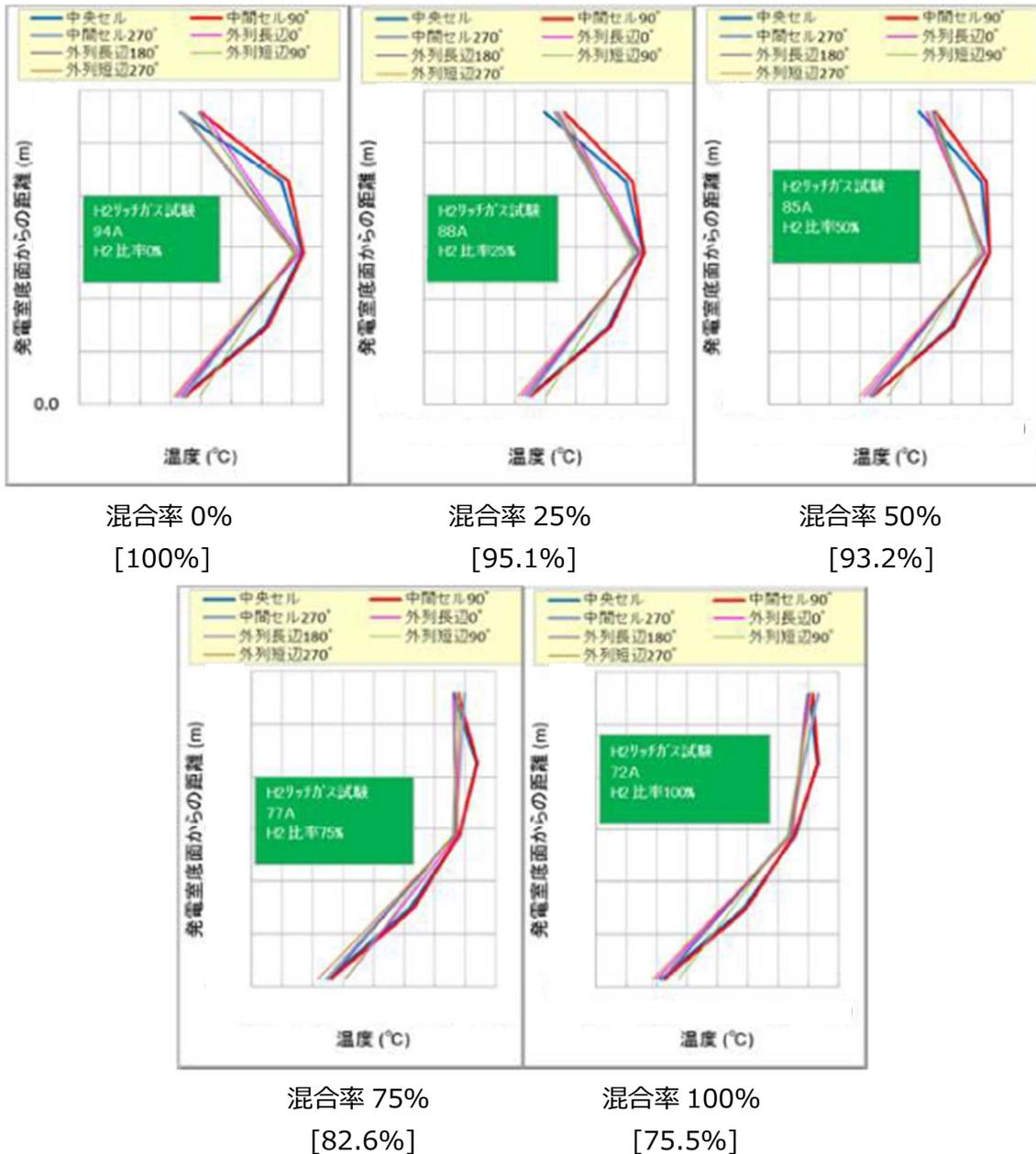


図 3-2-2-14 水素リッチガス混合率変化時の温度分布  
([]は都市ガス運転時を 100%とした時の出力割合)

研究開発項目④ 燃料電池モジュール基本特性確認試験

液化天然ガス（LNG）を用いて燃料電池モジュールの起動・停止時のプラント挙動、発電特性、温度分布等の水素リッチガス運転時のリファレンスとなる基本性能を確認した。図 3-2-2-15 に運転実績を示す。

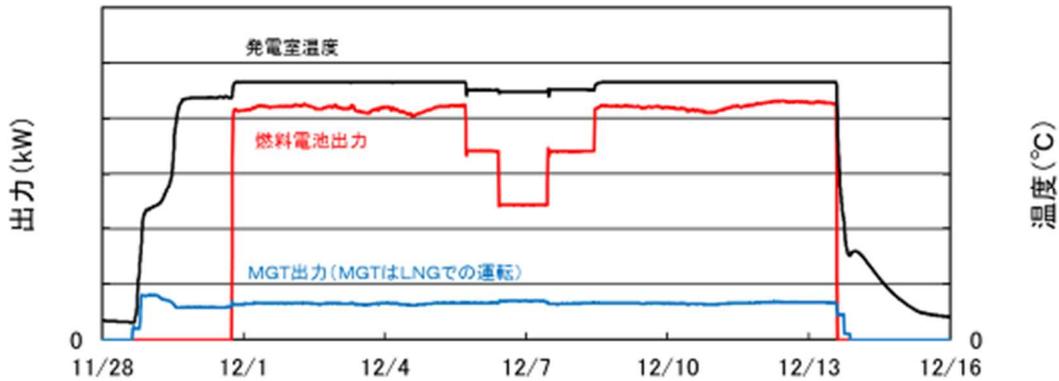


図 3-2-2-15 基本特性確認試験時の運転実績

表 3-2-2-2 基本特性確認試験での運転実績表

項目	実績
目標定格出力	最大 250.6kW (AC) SOFC : 215.7kW MGT : 34.9kW
目標発電効率	最大 55.0% (AC)

研究開発項目⑤ 水素リッチガス切替試験

図 3-2-2-16 にモジュールにおける水素リッチガスでの運転実績を示す。LNG 運転中に水素リッチガスを供給して徐々にその割合を高め、最終的に水素リッチガスのみの運転に切替える試験を実施した。図 3-2-2-17 に水素リッチガス試験時の発電室温度分布、図 3-2-2-18 に水素リッチガス切替試験時の発電出力推移を示す。試験の結果、水素リッチガスの混合割合の増加に伴い、カートリッジ試験と同様にメタン改質による吸熱が減少することで、上部温度が大きく上がり、下部温度が低下した。また、上部温度を管理値以下に抑えるため、電流を下げた結果、出力が 74%程度まで低下した。

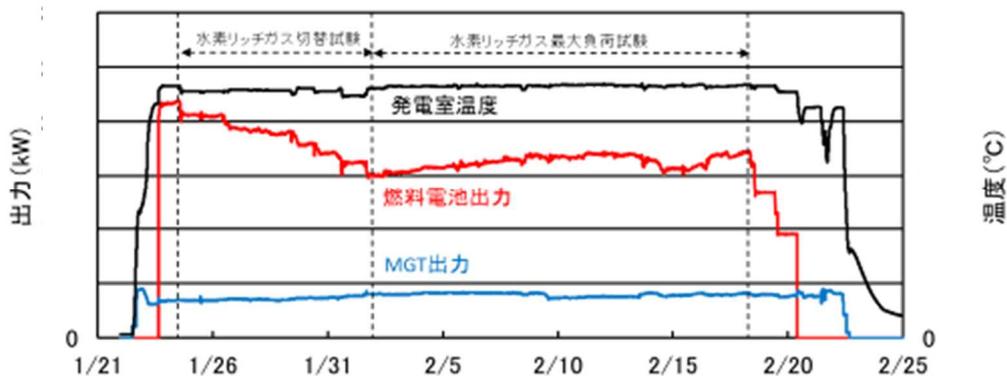
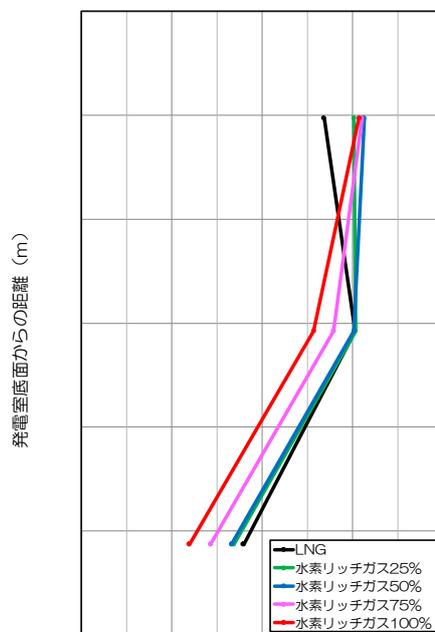


図 3-2-2-16 モジュールの水素リッチガス運転実績



No.2カートリッジ発電室温度 (°C)

図 3-2-2-17 水素リッチガス切替試験時の温度分布

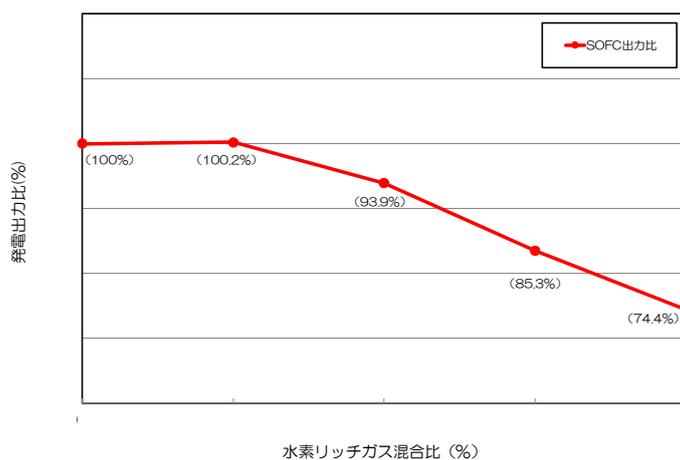


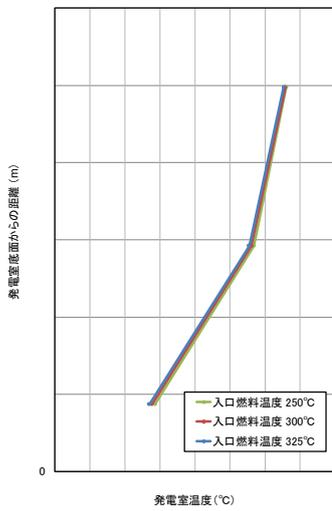
図 3-2-2-18 水素リッチガス切替試験時の発電出力推移

#### 研究開発項目⑥ 水素リッチガス最大負荷試験

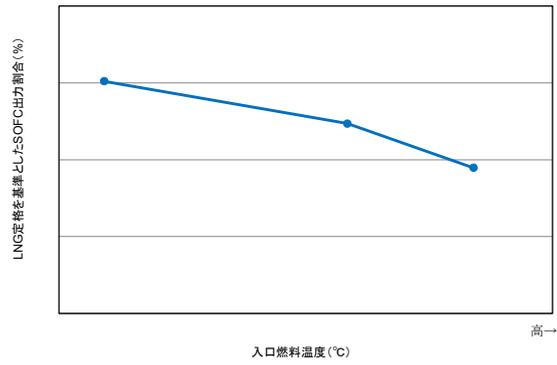
水素リッチガスのみで運転可能な最大負荷を確認し、発電特性や温度挙動を確認した。

##### (1) 入口燃料温度変化

図 3-2-2-19 に入口燃料温度を変化させた時の発電室温度・出力推移を示す。入口燃料温度は再循環冷却器を用いて下げることができる。再循環冷却器の空気ファン（冷却器再循環冷却ファン）の回転数を変化させ、温度を調節した。入口燃料温度を 75℃下げると、上部温度がわずかに低下することで、出力が 2%程度上昇したことを確認した。



(a) 発電室温度

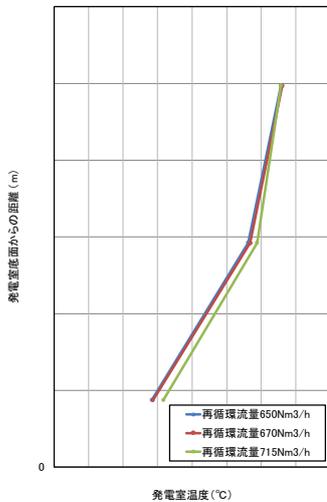


(b) 出力

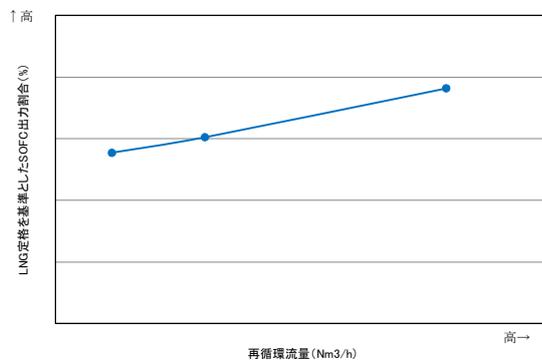
図 3-2-2-19 入口燃料温度変化時の発電室温度・出力推移

### (2) 再循環流量変化

図 3-2-2-20 に再循環流量を変化させた時の発電室温度・出力推移を示す。再循環流量を 65Nm<sup>3</sup>/h 増やすと、上部温度が低下し、下部温度が上昇した。また、発電出力においても 2% 程度の改善を確認した。これはガス流量の冷却効果が大きくなり、最高温度が下がったため、電流上昇につながったと考えられる。



(a) 発電室温度

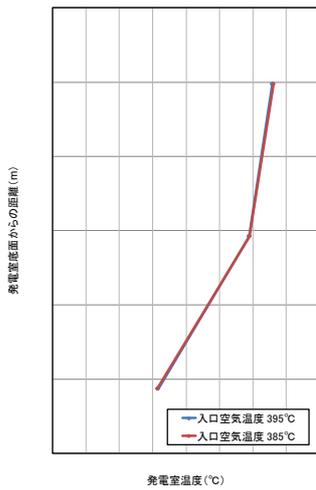


(b) 出力

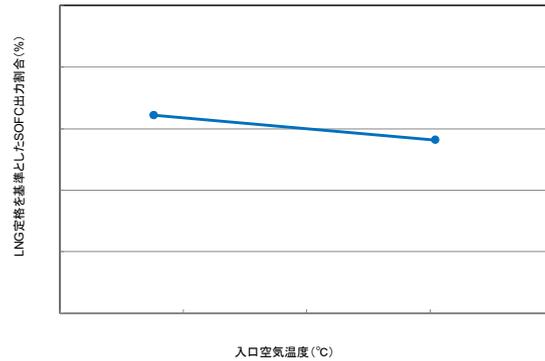
図 3-2-2-20 再循環流量変化時の発電室温度・出力推移

### (3) 入口空気温度変化

図 3-2-2-21 に入口空気温度を変化させた時の発電室温度・出力推移を示す。入口空気温度を 10°C 下げると、出力は 1% 程度向上した。これは、モジュール供給空気の冷却効果が大きくなり最高温度が下がったため、電流上昇につながったと考えられる。



(a) 発電室温度

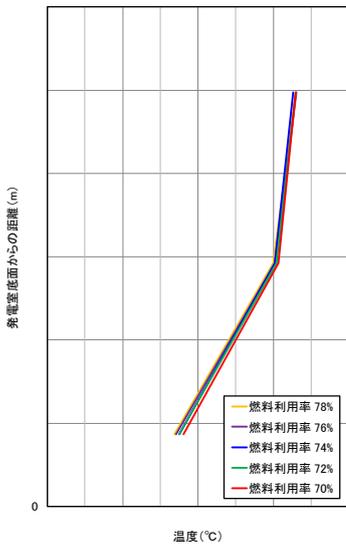


(b) 出力

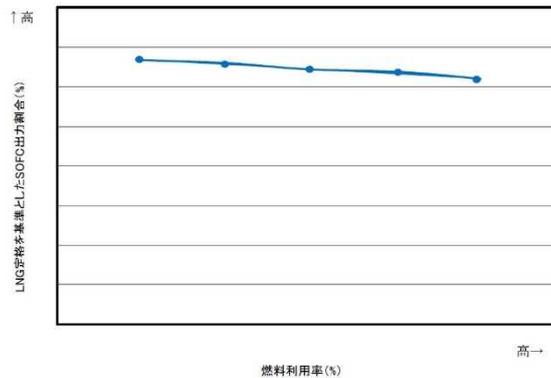
図 3-2-2-21 入口空気温度変化時の発電室温度・出力推移

(4) システム燃料利用率変化

図 3-2-2-22 に入口空気温度を変化させた時の発電室温度・出力推移を示す。システム燃料利用率を 78% から 70% まで下げた結果、流量増加により上部温度が下がり、温度分布が改善されることを確認した。また、出力も 5% 程度改善され、発電性能の向上に大きく寄与することを確認した。これは、温度分布の改善に加え、燃料の供給流量増加により再循環系統内の水素濃度上昇による電圧向上のためと考えられる。



(a) 発電室温度



(b) 出力

図 3-2-2-22 システム燃料利用率変化時の発電室温度・出力推移

(5) 最大負荷試験

以上の条件を全て出力が大きくなる様に調整し、水素リッチガス適用時の出力改善効果を確認した。図 3-2-2-23 に水素リッチガス最大負荷試験時における発電出力の推移を示す。水素リッチガス切替後のベース条件から、再循環流量や入口燃料温度等のパラメータを調整することで、発電出力を 11% 程度改善することができた。

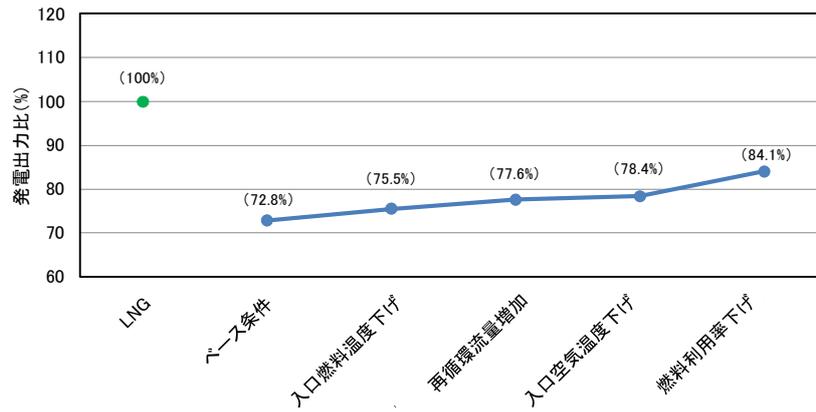


図 3-2-2-23 水素リッチガス最大負荷試験における発電出力推移

### 研究開発項目⑦ 水素リッチガス起動・停止試験

実証機では LNG を使用できないことから、水素リッチガスでの燃料電池モジュールの起動・停止試験を実施した。燃料電池を起動するには発電反応が起きる温度まで昇温する必要があるが、発電室温度を上げるために、空気極側に燃料を注入し発電室燃焼をさせることで昇温している。適切な燃料制御を行わないと自着火現象が発生し、燃料システムの配管部を損傷させてしまうため、制御調整を行った。その結果を図 3-2-2-24 に示す。水素リッチガスのみを用いた場合でも、水素リッチガス用に制御調整を行うことで起動・停止が可能であることを確認した。また、水素リッチガスでの停止過程についても、LNG と同様の挙動を示すことを確認した。

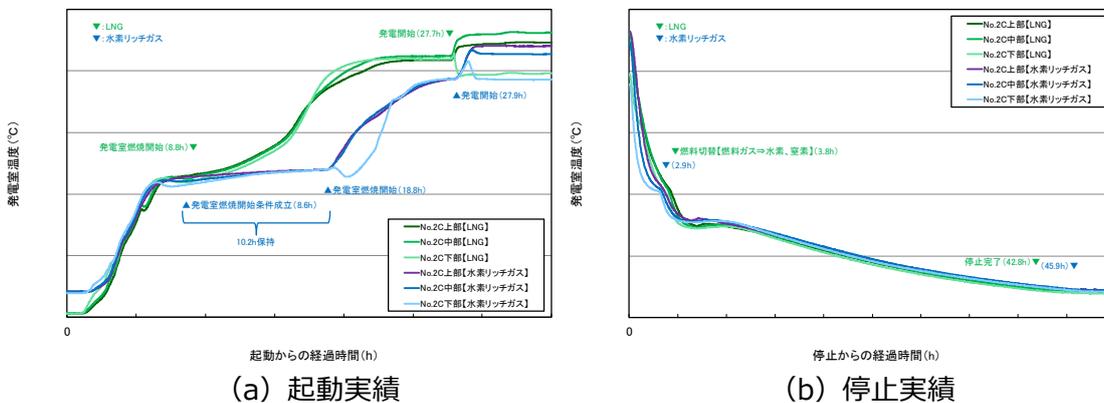


図 3-2-2-24 LNG および水素リッチガスにおける起動・停止実績

### 研究開発項目⑧ 実証機模擬ガス試験

#### (1) 実証機模擬ガス切替試験

これまでは CO<sub>2</sub> 分離回収後の水素リッチガス組成である H<sub>2</sub> : 85%とするため、H<sub>2</sub> と N<sub>2</sub> の 2 種類のガスで組成調整して試験を行ってきたが、実証機である CO<sub>2</sub> 分離回収後のガスには H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 以外に CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> も含まれる

と想定される。そのため実証機に則したガス組成とするため CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> の炭素成分をまとめて CO<sub>2</sub> で代替し、水素リッチガスに CO<sub>2</sub> を添加したガスを「実証機模擬ガス」として試験を行った。図 3-2-2-25 に実証機模擬ガス切替時の発電室温度分布の推移を示す。カートリッジ試験で得られたように、最大温度が発電室上部から発電室中部へ移動する傾向にあることを確認した。この結果から CO<sub>2</sub> が発電室温度の分布に影響を与えることが明らかになった。

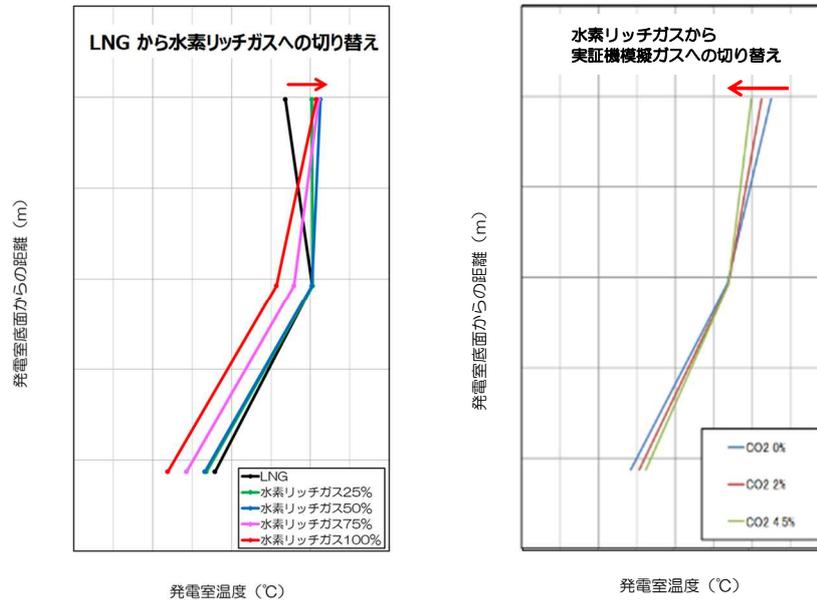


図 3-2-2-25 発電室内温度分布の推移

## (2)最大負荷試験

水素リッチガス適用時において、パラメータ調整による出力改善効果を確認したが、実証機模擬ガスでも同様にパラメータ調整による最大負荷を確認した。

図 3-2-2-26 に実証機模擬ガスでの最大負荷試験時における発電出力の推移を示す。ベース条件を比較すると実証機模擬ガスでは水素リッチガスよりも出力が高いことが確認された。再循環ガスを分析したところ、CO が検出されたことから、逆シフト反応により吸熱が進み、その分電流上昇につながったことが考えられる。

また、どのパラメータ変化に対しても、水素リッチガスと同様の傾向で出力が変化し、ベース条件から 8.5% 程度の出力改善を行うことができた。この結果から少量の CO<sub>2</sub> 添加においても発電特性に影響を及ぼすことがわかった。

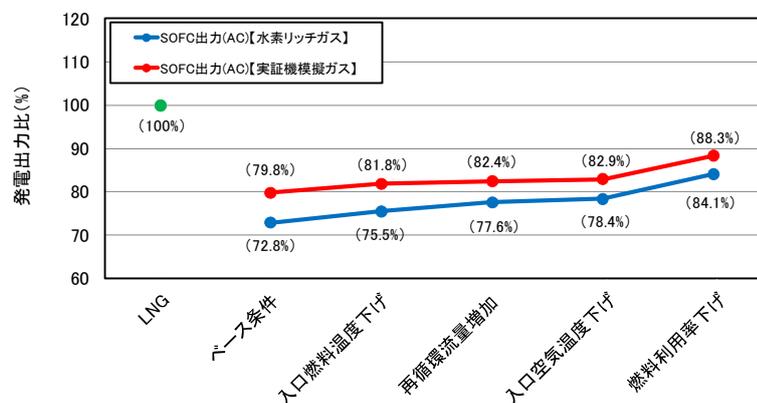


図 3-2-2-26 実証機模擬ガス最大負荷試験における発電出力推移

### (3) 起動・停止試験

実証機模擬ガスを用いた燃料電池モジュールの起動・停止試験を実施した。発電室燃焼には水素濃度を密度計で常時測定し制御調整を行っているが、CO<sub>2</sub>により密度変化が生じ制御パラメータが変化することから、密度補正を行い適切な制御が行われる様に制御ロジックの調整を行った。制御調整を行うことでCO<sub>2</sub>を添加した場合においても、自着火することなく起動することができた。その結果を図3-2-2-27に示す。水素リッチガスと比較するとほぼ同等の起動・停止時間となった（水素リッチガスでの起動に関しては保持時間を除いた時間とする）。

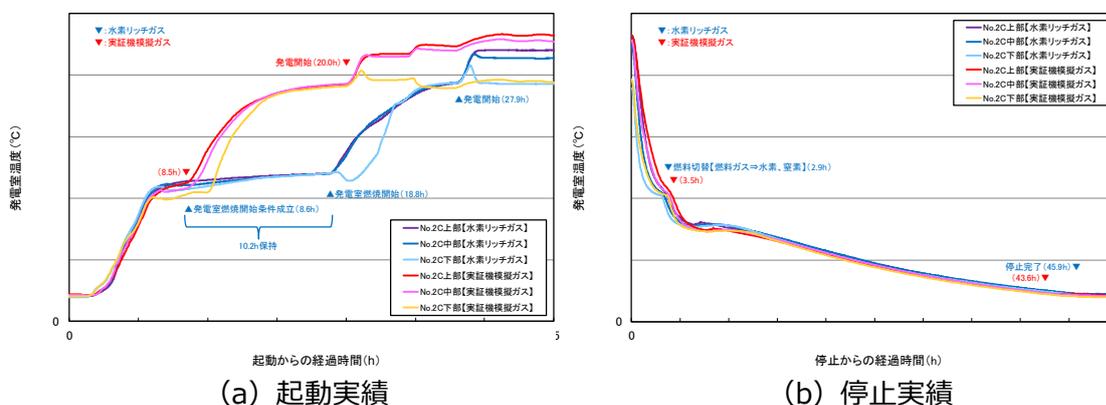


図 3-2-2-27 水素リッチガスおよび実証機模擬ガスにおける起動・停止実績

### 研究開発項目⑨ 石炭ガス化炉連係試験

本試験では電源開発株式会社 若松研究所内に設置してある石炭ガス化炉と燃料電池モジュールを連係して、ガス化炉で発生した石炭ガスとポンペ等からの供給ガスにより、IGFC 実証機相当のガス組成（以下、石炭実証機模擬ガス※）に調整し、そのガスを燃料電池モジュールに供給しながらガス化炉と燃料電池モジュールの連係システムの制御性と協調性が有効に機能し、プラント全体が安定して運転できることを確認するため実施した。

また、石炭実証機を使うことから、これまで実施してきた研究開発項目⑧ 実証機模擬ガス試験の燃料成分であるH<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>だけでなく、石炭ガスに含まれるCOや微量物質が燃料電池モジュール性能に及ぼす影響を確認し、IGFC 実証機の運用に反映するための試験として実施した。

※ 石炭実証機模擬ガス：石炭ガスを使って実証機のガス組成を想定し模擬したガス  
(H<sub>2</sub> : 85%, N<sub>2</sub> : 10%, CO : 2.5%, CO<sub>2</sub> : 2.0%)

#### (1) ガス化との連係

本試験を実施するため、ガス化炉連係設備の設計を行った。ガス化炉連係設備は、既設のガス化炉と燃料電池モジュール間を繋ぐ設備（配管・ガス化炉からの抽排気用制御弁等）と燃料電池用ガス精製設備から構成される。

連係設備の系統は、ガス化炉から発生した石炭ガスを一部抽気して燃料電池に導入、余剰分を灯油混焼ボイラに排気する系統とし、ガス化炉設備と燃料電池の相互の圧力制御等の協調を図れる様な設計とした。設備全体の系統を図3-2-2-28に示す。

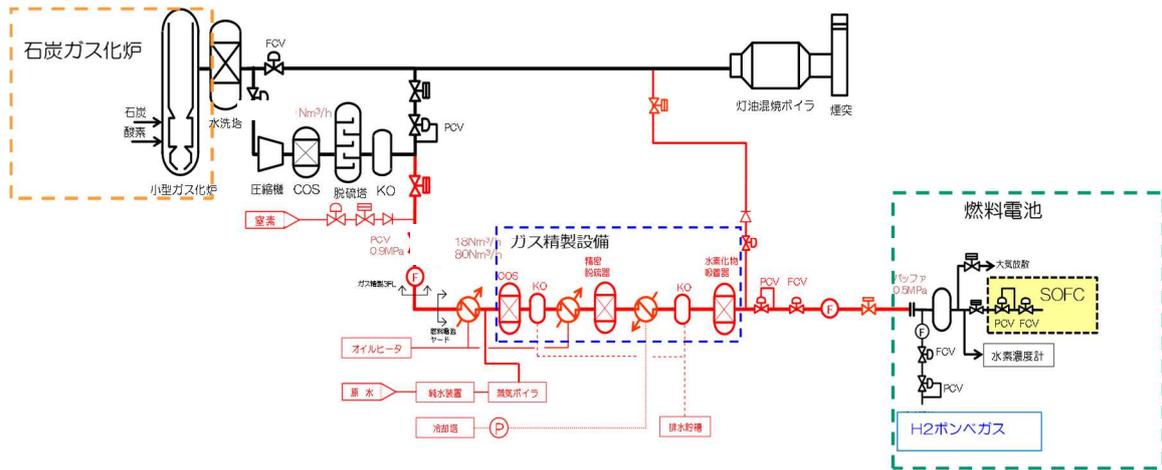


図 3-2-2-28 燃料電池用ガス精製設備の概略系統

## (2)ガス化炉連係設備の機器構成

ガス化炉連係設備はガス化炉と燃料電池を配管等で連係するだけでなく、石炭ガス中に含まれる被毒物質を除去するため、燃料電池用に設計したガス精製設備を設置した。関連研究として別途実施した「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト/ゼロエミッション石炭火力基盤技術開発/燃料電池向け石炭ガスクリーンアップ技術要素試験」における成果を踏まえ、被毒対象物は、主に硫化水素 ( $H_2S$ ) やセレン化水素 ( $H_2Se$ ) とした。燃料電池用ガス精製設備は、これらを除去するための脱硫酸器、水素化物吸着器、付帯設備から構成され、ガス化炉で生成した石炭ガス (CO リッチガス) から被毒物を除去する。

「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト/ゼロエミッション石炭火力基盤技術開発/燃料電池向け石炭ガスクリーンアップ技術要素試験」で対象被毒物の吸着性に優れた脱硫酸吸着剤 (A) と水素化物吸着剤 (B) を選定し、想定される被毒物濃度、吸着剤の吸着容量、交換周期 (寿命) から圧力損失・空塔速度等を考慮し、燃料電池に供給できる最大ガス容量から定格流量の石炭ガスが処理できる様、連係設備の設備仕様および吸着塔容量を設計した。

燃料電池用ガス精製設備外観を図 3-2-2-29 に示す。燃料電池用ガス精製設備の被毒物除去設計および目標としては、以下の通り。

脱硫酸器設計 : 入口  $H_2S$  濃度 210ppm , 出口目標値 : 1ppb 以下  
 水素化物吸着器設計 : 入口  $H_2Se$  濃度 1ppm , 出口目標値 : 1ppb 以下



図 3-2-2-29 燃料電池用ガス精製設備

(3)ガス化炉関係試験の概要

ガス化炉との関係試験はガス化炉の運転時に合わせ実施し、試験名(Run) 番号を付け 6 回実施する計画とした。表 3-2-2-3 に石炭ガス化炉関係試験概要を示す。

各 Run の主な目的、内容は次の通り。

- ・ガス化炉と関係した状態の燃料電池の起動について、これまでの H<sub>2</sub> リッチガス (H<sub>2</sub>:85%,N<sub>2</sub>:15%) 同様に起動・昇温(発電室燃焼) 可能であることを確認するとともに、電流変化率 1 A/min に合わせて燃料流量が増加した場合でも相互の圧力制御が追従し、ガス化炉との安定した関係運転が可能であることを検証した。(Run01, Run02)
- ・実証機の石炭ガス試験では CO が含まれることから、CO 等を含む石炭ガスのモジュール性能を評価するため燃料利用率、及び再循環流量の運転パラメータ変化時の特性を事前に把握し、発電特性、制御方法、運用性、及び試験計画検討等を実証機の運転と共有化するため運転データを取得した。(Run03, Run04)
- ・関係運転中の燃料電池の非常停止時には、燃料ガスが瞬時遮断されるため、非常停止試験を行いプラント急変時の圧力変動がガス化炉設備側へ及ぼす影響を確認した。(Run05)
- ・IGFC の適用範囲拡大に向けた検討に関する、石炭ガス(CO リッチガス) 適用に係る技術検討」の試験は Run06 で実施した。
- ・燃料電池用ガス精製設備の性能評価は全試験に亘り実施した。(Run01～Run06)

表 3-2-2-3 石炭ガス化炉関係試験概要

試験名	試験概要	燃料ガス
Run01	( i )石炭実証機模擬ガス切替試験 (a) ガス化炉と関係設備の協調制御試験 (b) 石炭実証機模擬ガスの組成調整試験 (c) 関係運転時の燃料電池モジュール発電特性試験 (d) 燃料電池用ガス精製設備性能評価試験	石炭実証機模擬ガス
Run02	( ii )石炭実証機模擬ガス起動試験 (a) 石炭実証機模擬ガスによる起動試験 (b) 燃料ガス組成変化による発電特性試験 (c) 燃料電池用ガス精製設備性能評価試験	
Run03	( iii )関係時の燃料電池モジュール運転条件変化試験(燃料利用率変化) (a) 燃料利用率変化時の発電特性試験 (b) 燃料電池用ガス精製設備性能評価試験	
Run04	( iv )関係時の燃料電池モジュール運転条件変化試験(再循環量変化) (a) 再循環量変化時の発電特性試験 (b) 石炭実証機模擬ガスによる停止試験 (c) 燃料電池用ガス精製設備性能評価試験	
Run05	( v )ガス化炉関係非常停止試験 (a) 非常停止時におけるガス化炉との協調制御確認試験 (b) 燃料電池用ガス精製設備性能評価試験	CO リッチガス
Run06	( vi )石炭ガス CO リッチガス適用に係る技術検討 (a) CO リッチガスの燃料電池モジュール起動停止・発電特性試験 (b) 燃料電池用ガス精製設備性能評価試験	

(4)ガス化炉関係における各試験

( i )Run01 石炭実証機模擬ガス切替試験

(a)ガス化設備と関係設備の協調制御試験

ガス化炉から発生した石炭ガスはガス化設備の吸収塔出口から抽気し、燃料電池のユーティリティ設備系統で試験組成に調整した後、燃料電池に導入されるが、余剰分のガスはガス化設備にある灯油混焼ボイラ系統に排気され焼却処理される。そのため、ガス化炉設備への影響は、主にガス化炉本体と灯油混焼ボイラに関係することになる。よって、初めにガス化炉からの石炭ガスを燃料として燃料電池を運転するにあたり、設計・設置した関係設備が既設備である石炭ガス化炉および灯油混焼ボイラの圧力等に大きな変動を与えず、設備全体が安定して運転可能であることを確認した。(表 3-2-2-4 図 3-2-2-30)

表 3-2-2-4 Run01 試験実績一覧

試験項目	確認事項	結果
(1)関係設備協制御	石炭ガス化炉への影響	関係時における石炭ガス化炉の圧力変動等無し。
	灯油混焼ボイラへの影響	N <sub>2</sub> を含めた処理ガス量(石炭ガス流量)が規定値(届出値*)以下
(2)石炭実証機模擬ガス組成調整	関係設備の石炭ガス供給制御性	CO <sub>2</sub> 回収後の実証機ガス組成に調整可能
(3)燃料電池モジュールの発電特性	石炭実証機模擬ガス中のCO 他の影響	実証機模擬ガスと同程度
(4)燃料電池用ガス精製設備性能	被毒成分除去性能の確認	被毒成分濃度が全て 1ppb 以下(設計値内)

※大防法 (ばい煙発生施設届出値

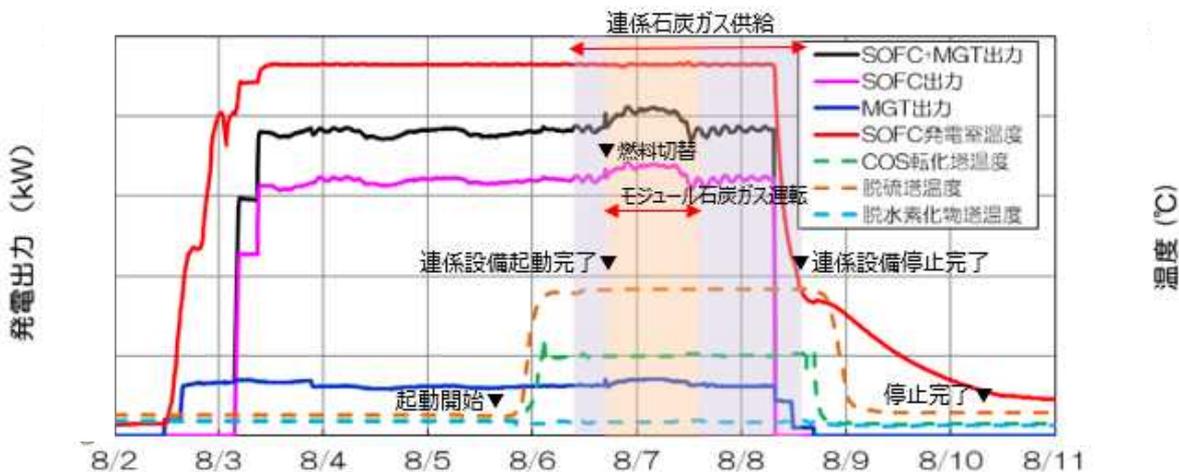


図 3-2-2-30 Run01 の試験実績

(b)石炭実証機模擬ガスの組成調整

ガス化炉との関係試験で石炭実証機模擬ガスに調整するには、H<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub>,石炭ガスの4種のガス流量を調整制御する必要があるため、目標とするガス組成に調整可能であることを確認した。

(c) 連係運転時の燃料電池モジュール発電性能

本設備で石炭実証機模擬ガス組成に調整が可能であることを確認後、燃料電池モジュールの初期状態（ベース状態）となる石炭実証機模擬ガスの発電性能を確認した。

定格運転時の燃料電池モジュール出力および発電室内温度を図 3-2-2-31、図 3-2-2-32 に示す。発電は実証機模擬ガス→石炭実証機模擬ガス→再度実証機模擬ガスに切り替えて実施した。なお、燃料電池モジュールの電圧と電流は各セルカートリッジによって異なるので平均値としている。各運転時の外気温度等により電流値が変化するため、必ずしも同一電流値とはならないが、これまで実施してきた実証機模擬ガス時とほぼ同様の温度分布および出力となった。ガス切替前後の比較から石炭ガス使用による電圧低下はなく、本試験内での急激な劣化等といったモジュールへの不具合は見られない事を確認した。（石炭実証機模擬ガス約 30 時間運転）

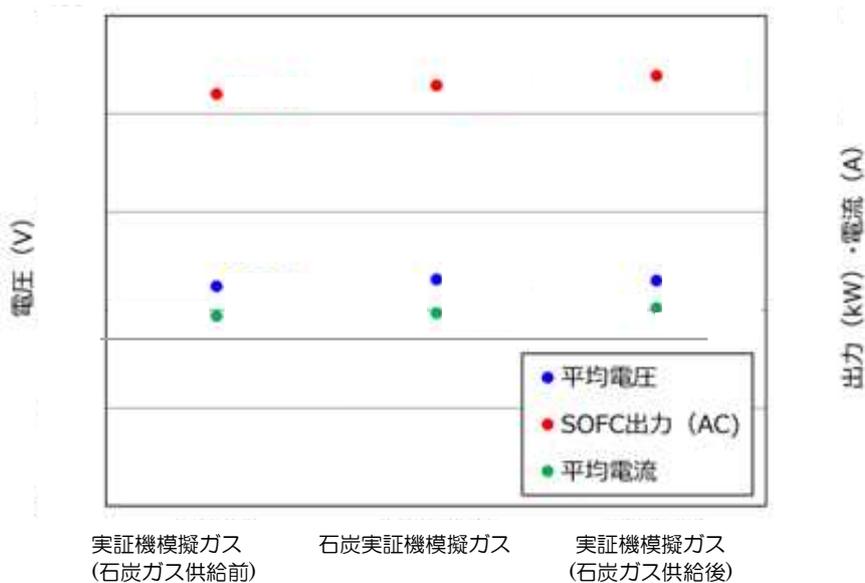


図 3-2-2-31 各ガスによる発電特性

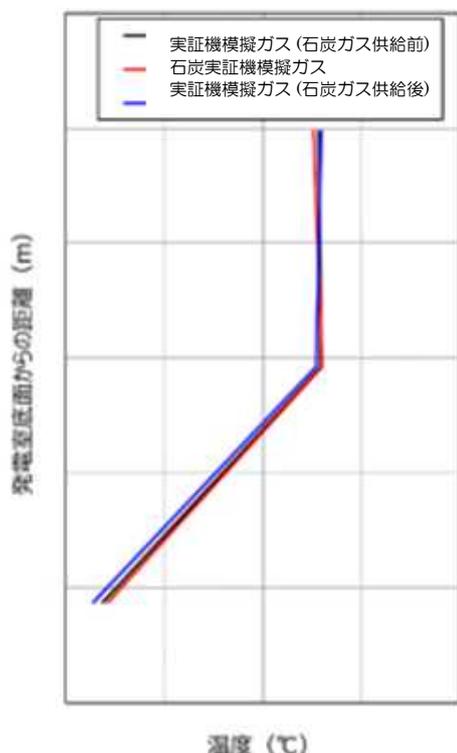


図 3-2-2-32 各ガス発電時のモジュール内温度分布

(d)燃料電池用ガス精製設備の性能確認

石炭ガスを燃料として運転するにあたり、燃料電池用ガス精製設備（脱硫器、水素化物吸着器、付帯設備）通過後のガスが燃料電池に使用可能な条件を満たすこととして、COS および H<sub>2</sub>S について各被毒成分が 1ppb 未満にまで除去できていることを確認した。また、燃料電池用ガス精製設備の起動や停止時の制御設定値等、運用性に関する事項について確認調整を行った。

本結果からガス精製設備を通過した石炭ガスの燃料電池への使用は可能と判断し、以降の Run 試験を実施した。

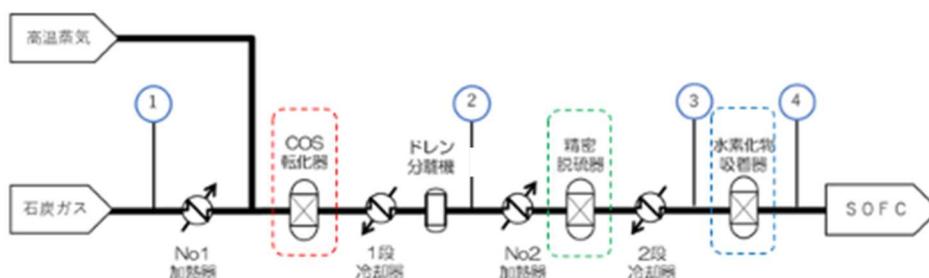


図 3-2-2-33 ガスサンプリング箇所

表 3-2-2-5 各吸着器における微量成分の除去性能

成分	Run01			
	COS	H <sub>2</sub> S	Se	Cl(参考)
①COS 転化器入口	1.60ppm	150ppm	<1ppb	—
②脱硫器入口	0.59ppm	150ppm	<1ppb	—
③脱硫器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb	—
④水素化物吸着器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb	<0.1ppm

(ii) Run02 石炭実証機模擬ガス起動試験

(a) 石炭実証機模擬ガスによる起動試験

SOFC の特徴として、 $H_2$  だけでなく、他の燃料電池には被毒物質となる石炭ガス中の  $CO$  が燃料として利用できることが挙げられる。 $CO$  が燃料として反応する場合、 $H_2$  ガス量をベースに燃料制御を行うと燃料が過剰となることが予想されるため、これまでとは異なる燃料制御を要する。特に起動時の昇温には「発電室燃焼」を伴う事から、石炭ガス組成に適合した起動(昇温)が可能となるよう制御調整を行い有効に機能することを確認した。

発電室燃料の系統を図 3-2-2-34 に示す。

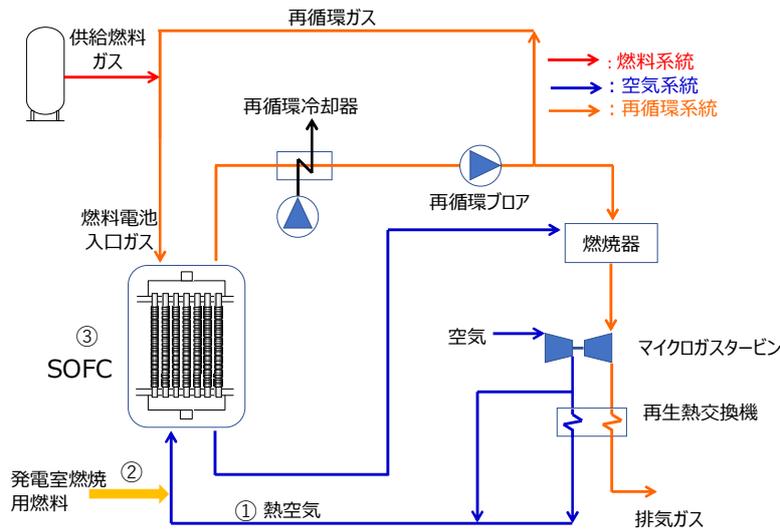


図 3-2-2-34 燃料電池試験設備系統

発電室燃焼は、空気側に燃料である  $H_2$  と  $CO$  の可燃性ガスを供給することから、爆発限界範囲で供給すると発電室内でなく供給直近の空気供給配管内で発火する恐れがあり、その量が少なれば熱量が不足し所定の温度まで昇温ができない。そのため、供給する燃料組成から供給流量を制御する必要がある。石炭実証機模擬ガス組成の発熱量を計算し、発電室燃焼用流量を図 3-2-2-35 の様に調整変更し試験を実施した。

結果、自着火と思われる空気供給配管内での温度上昇なく、発電可能な温度まで昇温ができることを確認した(図 3-2-2-36)。また、Run01 と同等の発電出力が得られたことから、石炭実証機模擬ガスでの発電室燃焼による影響は見られないことを確認した。

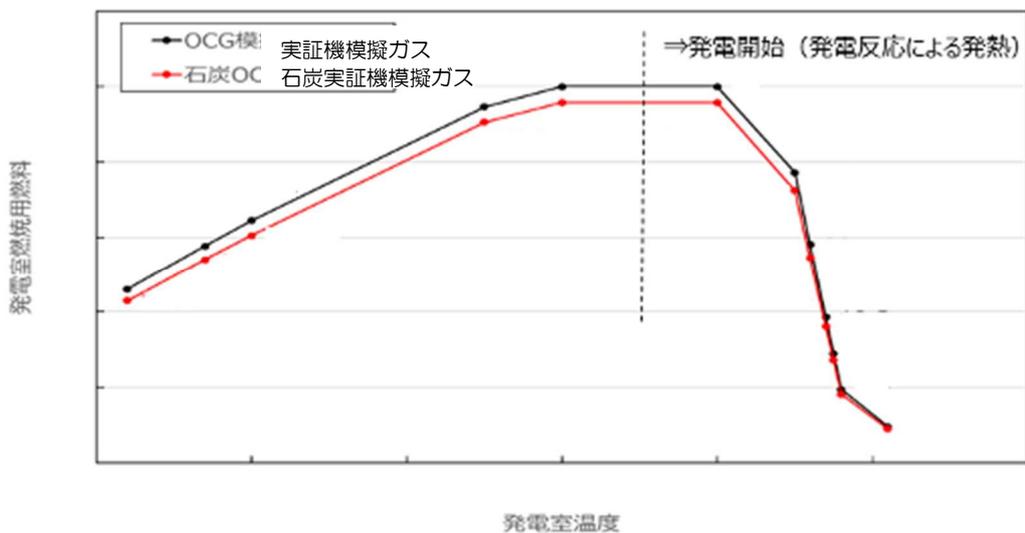


図 3-2-2-35 各温度域による発電室燃焼用燃料設定の概念図

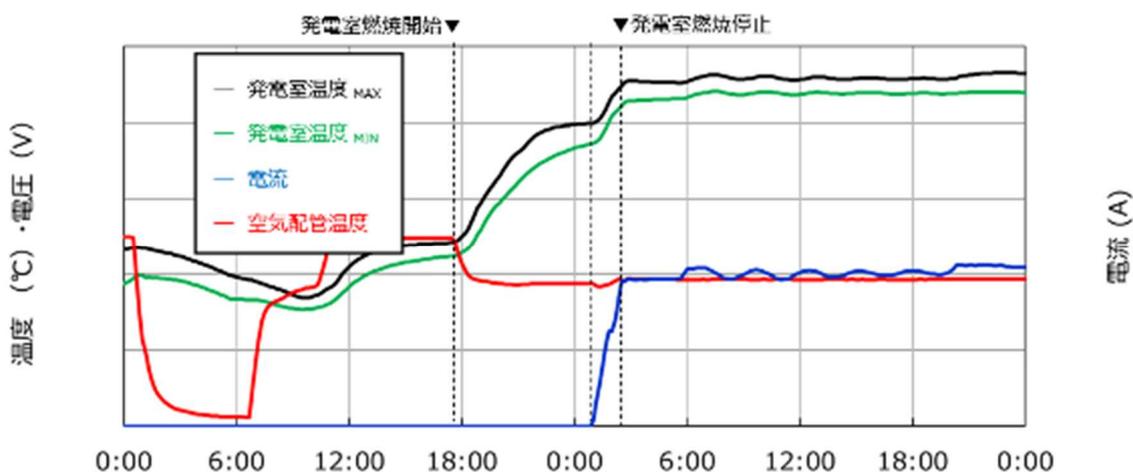


図 3-2-2-36 石炭実証機模擬ガスによる起動トレンド

(b)燃料ガス組成変化による発電特性試験

これまで実施してきた実証機模擬ガスにおいて、燃料中の  $\text{CO}_2$  による逆シフト反応と推定される現象により発電室温度分布が変化(最高温度となる発電室上部温度が吸熱反応により低下)し、出力増が図れる事が確認できているが、石炭ガス中には  $\text{CO}$  も含まれるため、石炭実証機模擬ガスにおける特性を確認した。試験条件は以下の通り。

- ・供給実証機模擬ガスの  $\text{CO}_2$  濃度を増変化させた条件：試験条件 ①→②→③
  - ・供給石炭実証機模擬ガスの石炭ガス比率を増変化させた条件：試験条件 ④→⑤
- 各試験条件における発電室温度分布を図 3-2-2-37 に示す。

燃料電池入口組成は、 $\text{CO}_2$  濃度が高い順に③⇒⑤⇒②⇒①⇒④であり、実証機模擬ガスの温度分布(③②①)に着目すると、その順番で中部・下部温度が高くなっている。これは、 $\text{CO}_2$  濃度が高いほど燃料入

口にて逆シフト反応(吸熱)が起こることで上部温度(最高温度)が下がり、相対的に中・下部温度が上がってくるためと推測される。

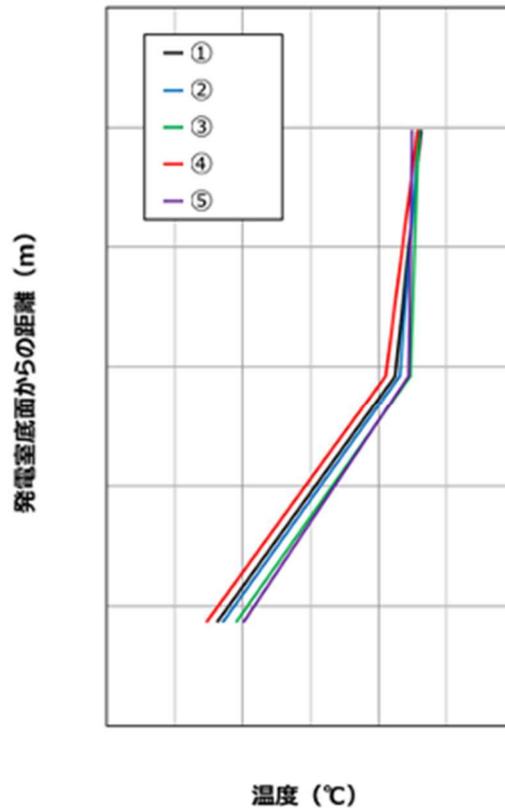
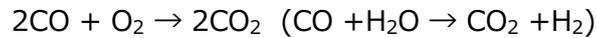
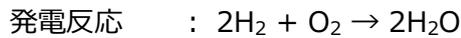
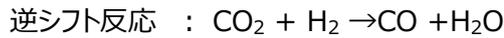


図 3-2-2-37 各試験条件における発電室温度分布

(c)燃料電池用ガス精製設備性能評価試験

Run01 に引き続き、COS 転化器、脱硫器、水素化物吸着器による不純物除去性能等について確認した。Run02 では、使用炭種の性状特性から Run01 より高濃度な  $\text{H}_2\text{S}$  (約 500ppm : 設計値の 2 倍以上) を通気し、除去性能を確認した。

表 3-2-2-6 各吸着器における微量成分の除去性能

成分	Run02		
	COS	$\text{H}_2\text{S}$	Se
①COS 転化器入口	13.0ppm	510ppm	<1ppb
②脱硫器入口	1.7ppm	470ppm	<1ppb
③脱硫器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb
④水素化物吸着器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb

(iii) Run03 連係時の燃料電池モジュール運転条件変化試験（燃料利用率変化）

(a)燃料利用率変化時の発電特性試験

運転条件の変化試験としては、H<sub>2</sub>リッチガスと実証機模擬ガスで運転パラメータ変化試験を行っており、発電特性が変化することを確認している。特にCO<sub>2</sub>を含む実証機模擬ガス試験では燃料中のCO<sub>2</sub>が燃料電池の発電特性に大きく影響を与えることが判明したが、石炭実証機模擬ガスの試験では、CO<sub>2</sub>に加えてCOが含まれるため、運転パラメータ変化時にCOが発電特性に影響を与える可能性がある。

そこでCO他成分等を含む石炭ガスのモジュール特性を評価するため、これまでの試験実績から発電特性に与える影響が大きい燃料利用率と再循環流量（Run04で実施）を運転パラメータとして選定し、石炭実証機模擬ガスでの発電特性を確認するとともに、ガス中に含まれるC分(CO/CO<sub>2</sub>)の影響について確認した。燃料利用率変化試験は、設備条件および試験時間の関係から2条件(利用率：X% → Y%)で実施した。

結果、燃料利用率変化時の発電特性は、燃料利用率を低下させることにより、供給燃料量（常温）の割合が増加し、供給される燃料の温度が低下、発電室入口温度が下がることから電流が上がり、H<sub>2</sub>の分圧も上がることから電圧も上昇し出力が増加するといった、これまでの実証機模擬ガスと同様の傾向があることを確認した。しかし、出力は上がるが燃料として未利用な燃料が多くなることから、全体として効率は低下する傾向にある。

H<sub>2</sub>リッチガス、および実証機模擬ガスとの発電特性の比較として、電流および電圧を図3-2-2-38に示す。

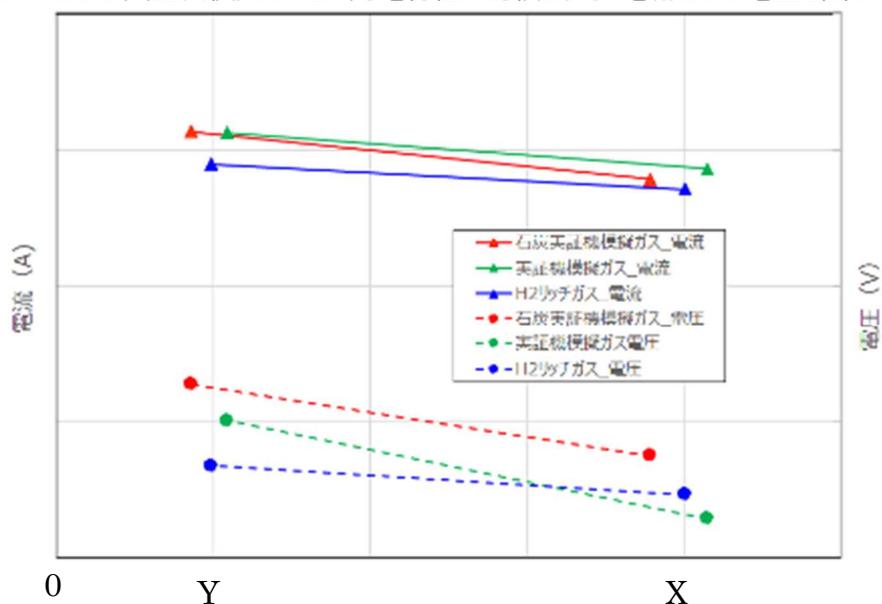


図 3-2-2-38 各種燃料ガスの電流および電圧の比較

H<sub>2</sub>リッチガス、実証機模擬ガスと比較した温度分布図を図3-2-2-39に示す。燃料利用率の低下により、他燃料ガス同様、上部温度が低下し、中・下部温度が上昇することで全体的に温度が平準化する傾向が見られた。H<sub>2</sub>リッチガスよりも上部温度低下による平準化が見られ、利用率が変化しても実証機模擬ガスとほぼ同じグラフとなって両者の違いは顕著に見られなかった。これらから石炭実証機模擬ガスの燃料利用率低下は上部温度が低下し、温度は平準化されるが、COを含まない実証機模擬ガスとほぼ同様であることが確認された。

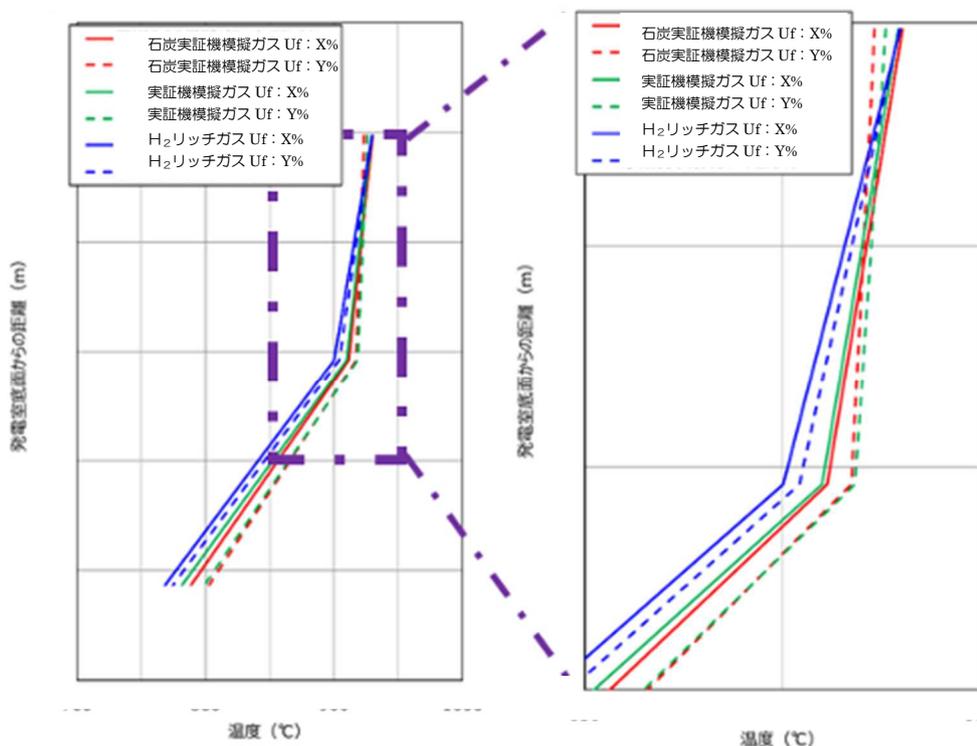


図 3-2-2-39 各種燃料ガスのモジュール内温度分布の比較

(b)燃料電池用ガス精製設備性能評価

本 Run における COS 転化器、脱硫器、水素化物吸着器の被毒物除去性能について確認した。これまでの分析にて燃料電池用ガス精製設備出口から、 $H_2Se$  が確認できていないことから、燃料電池用ガス精製設備の上流側であるガス化炉出口直後の石炭ガス中に Se が含まれるかを確認したところ、燃料電池用にガス抽気している系統の上流部にあるガス化炉設備の直近にある第 1 水洗塔入口（図 3-2-2-48 の①）の石炭ガスから、 $H_2S$  に換算して 45ppb の Se が存在することを確認した。

燃料電池用ガス精製設備の入口（図 3-2-3-40 の②）にて  $H_2Se$  を確認できなかったことから、Se は既設の設備（主に水洗塔）で除去されており、後流にある燃料電池入口では確認できないと推測される。

また、Run03 においては、燃料電池用ガス精製設備に供給される S 分について 500ppm 程度と設計を超えるガスが供給されたが、電圧変動もなく燃料電池用ガス精製設備出口において目標濃度以下（ $<1ppb$ ）になっていることを確認した。（表 3-2-2-7）

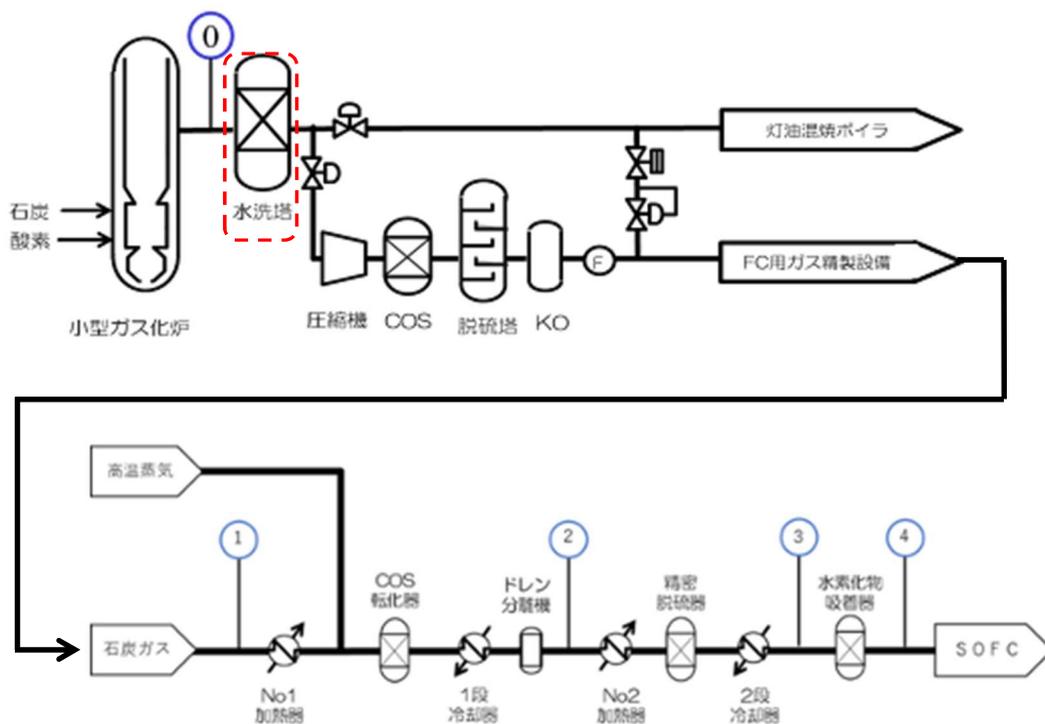


図 3-2-2-40 石炭ガスの燃料電池までの系統

表 3-2-2-7 各吸着器における微量成分の除去性能

成分	Run03		
	COS	H <sub>2</sub> S	Se
①COS 転化器入口	14.0ppm	470ppm	<1ppb
②脱硫器入口	0.67ppm	490ppm	<1ppb
③脱硫器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb
④水素化物吸着器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb

(iv)Run04 石炭ガス化炉連係試験（再循環流量変化）

(a)再循環量変化時の発電特性試験

Run03 に続き実証機模擬ガスでの運転条件の変化試験として、再循環流量を変化させた場合の発電特性を確認するとともに、ガス中に含まれる C 分（CO/CO<sub>2</sub>）の影響について確認した。

本設備では再循環系統に冷却器を設置してあるが、実証機では、再循環プロア容量を大型化した設計としており、実証機模擬ガス時の再循環ガス量変化の効果、および冷却器の使用・不使用の影響についても確認した。(図 3-2-2-41)

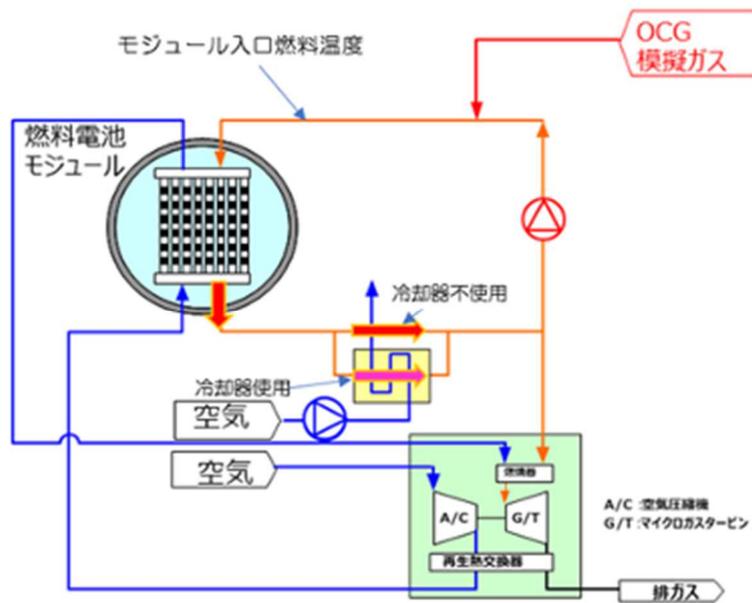


図 3-2-2-41 モジュール燃料・再循環系統図

①再循環冷却器の有無による影響

試験は、初めに再循環冷却器の有無によるモジュール燃料入口温度に与える影響を確認するため、再循環冷却器使用時と不使用時（系統バイパス）における再循環量変化を行いモジュール入口燃料温度の変化について確認した。結果を図 3-2-2-42 に示す。

再循環流量に関わらず、冷却器使用により入口燃料温度が大きく低下している。

再循環冷却器は冷却用のファンを備えており、冷却器使用の場合は再循環流量の増加に伴い温度制御を行うため、再循環流量に関わらず温度はほぼ一定となる。

一方、再循環冷却器不使用の場合は、再循環流量が増加した際に温度上昇が見られた。これは再循環されたガスは燃料電池入口で供給燃料と合流し、燃料電池に導入されるが、再循環量増によって燃料電池で高温となった排ガスの割合が相対的に高くなり燃料電池入口が上昇したと考えられる。

しかし、再循環量がある程度増加した後は、ほとんど温度上昇は見られていない。そのため、冷却器が無い場合、再循環流量を更に増加しても一定の温度に落ち着くと考えられる。

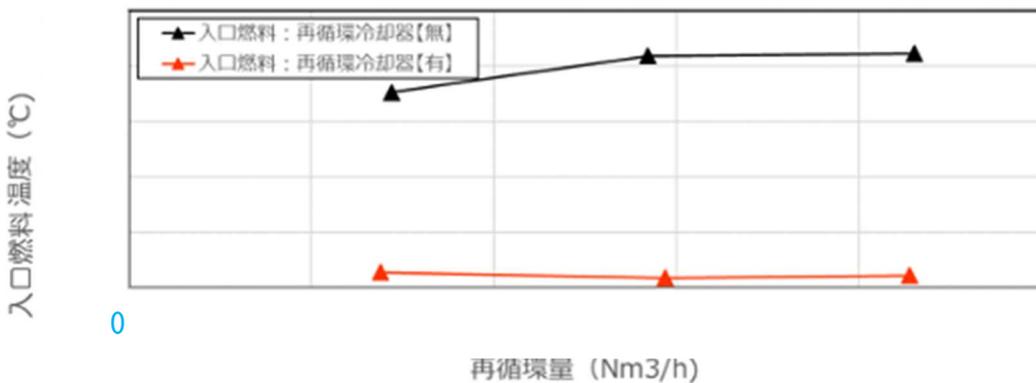


図 3-2-2-42 再循環量に対するモジュール入口燃料温度

## ②発電特性

再循環冷却器の有無による再循環量変化時の発電特性として、電流および電圧を

図 3-2-2-43、燃料電池入口出口温度を図 3-2-2-44、出力および効率を図 3-2-2-45 に示す。

電圧については、冷却器の有無による大きな差は見られない。また再循環量が増加する初期は電圧上昇しているが、それ以降はあまり変化していない。再循環流量が増加すると電圧が上昇するのは、 $H_2$  リッチガス、実証機模擬ガスでも見られた事象であり、再循環ガスに含まれる残燃料がモジュール内に供給されることで燃料分圧が上がり電圧上昇に繋がるためと考えられる。ただし、再循環量を更に増加させても残燃料には限りがあるので、それ以上の電圧上昇の効果は見られないと推測される。

電流については、冷却器の有無により差が見られた。電流指令は発電室内の最高温度により制御されるので冷却器による温度低下の効果が顕著に電流増に表れている。冷却器有りの場合、冷却された再循環量が増加することで発電室内温度が低下し電流増となったと推測される。

一方、冷却器無しの場合、循環量の増加は高温ガスが熱循環する事になるため、結果的に燃料電池入口のガス温度も上昇する傾向にある。

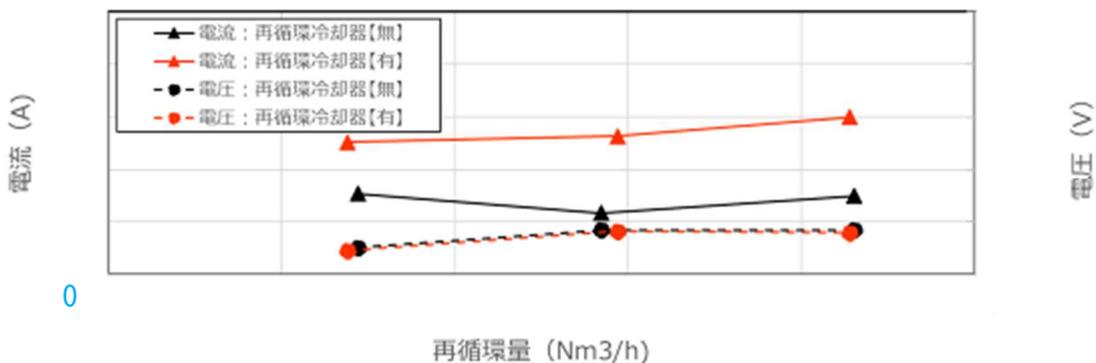


図 3-2-2-43 再循環量変化時の電流および電圧

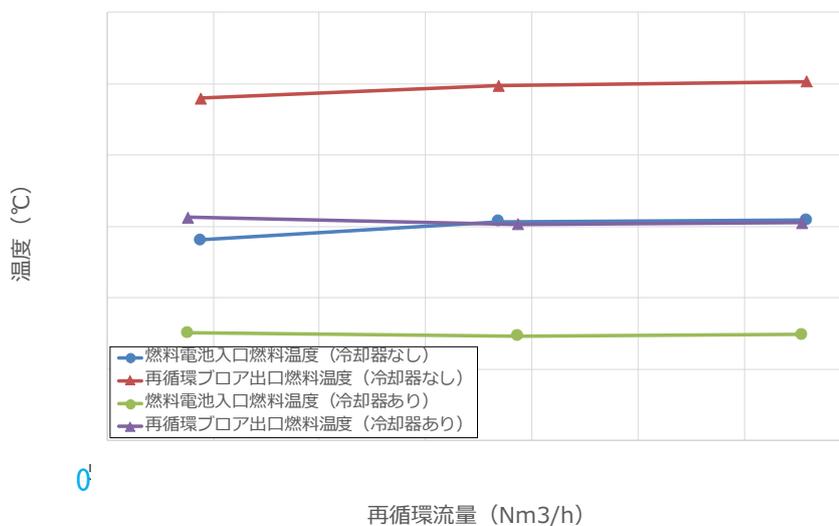


図 3-2-2-44 再循環量変化時の再循環ガス温度

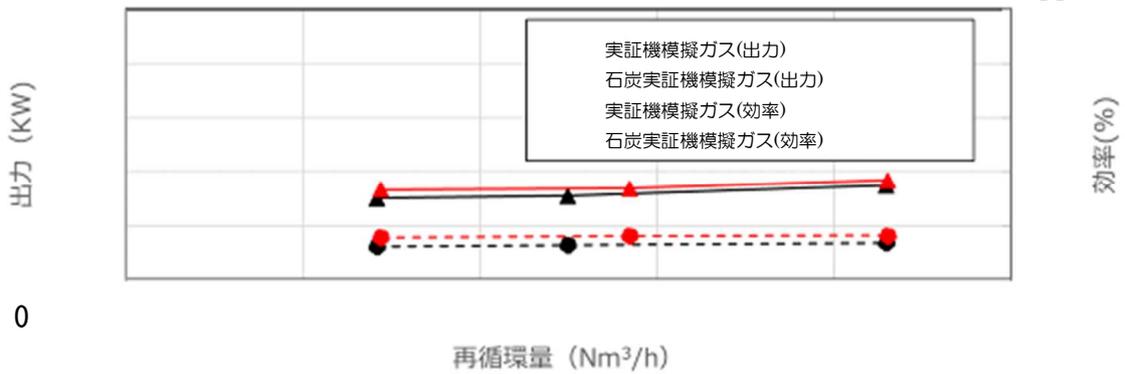
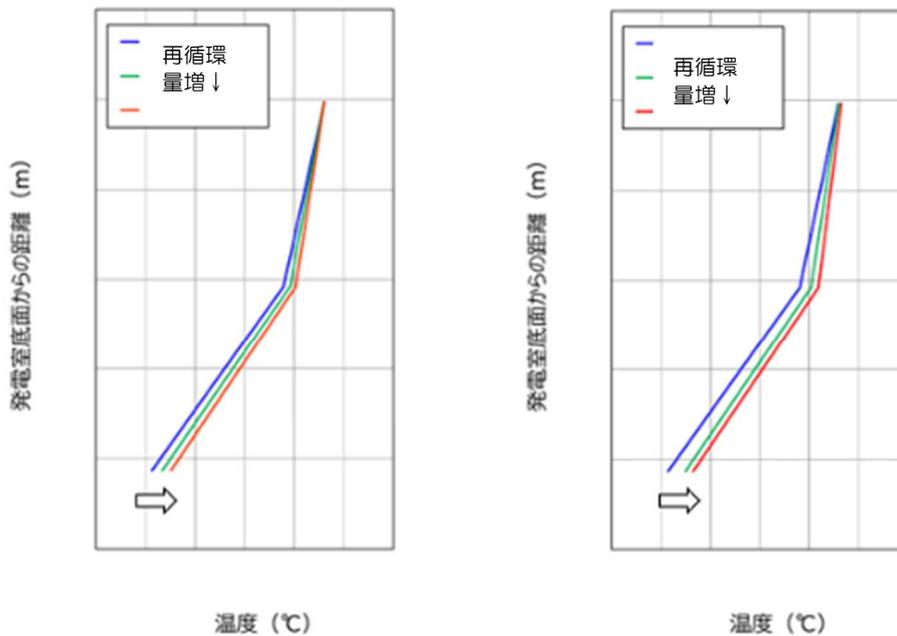


図 3-2-2-45 再循環量変化時の出力及び効率(LHV)

③発電室温度分布特性

続いて、再循環量変化時の発電室温度分布を冷却器の有無別に図 3-2-2-46 に示す。

再循環流量は、H<sub>2</sub> リッチガスや実証機模擬ガスと同様に再循環量が増加するにつれて発電室下部の温度上昇が見られた。



( i )冷却器無

( ii )冷却器有

図 3-2-2-46 発電室温度分布変化

④カートリッジ毎の温度分布

再循環量変化時の発電室上部温度について、カートリッジ毎の温度変化を図 3-2-2-47 に示す。燃料ガスは図 3-2-2-48 の様に NO.8 カートリッジ手前方向から各カートリッジに分歧しながら NO.1 カートリッジ方向に向かって流れる。発電室内の最高温度である NO.2 カートリッジ上部温度は再循環量に関わらず変化していないが、燃料供給の上流部に近い NO.7 カートリッジでは再循環増による温度低減効果が見られる。しかし、供給配管下流側にある NO.4 カートリッジに向かうにつれ、高温の熱雰囲気配管内を通るため温度が上昇し、NO.4 カートリッジに与える再循環量増の冷却効果は NO.7 と比較して小さくなっていくと推測される。なお、一番奥側にある NO.1 カートリッジはモジュールの最外側に位置し、断熱材に覆われているが放熱しやすいため温度が低くなっている。各

カートリッジに供給される燃料ガス量については、均一に流れるように設計されているが、カートリッジ毎の編流の影響の可能性もあると思われる。

また、本試験では設備上、大きく再循環量を変化できず、最高温度にあたる NO.2 カートリッジの上部温度を冷却する効果は確認できなかったが、再循環量を増加させることで NO.4 カートリッジの上部温度にわずかに低下の傾向が見えていることから、放熱等を効果的に行い再循環量を増加すれば、NO.2 カートリッジの上部温度も下げることができる可能性はあると推測する。

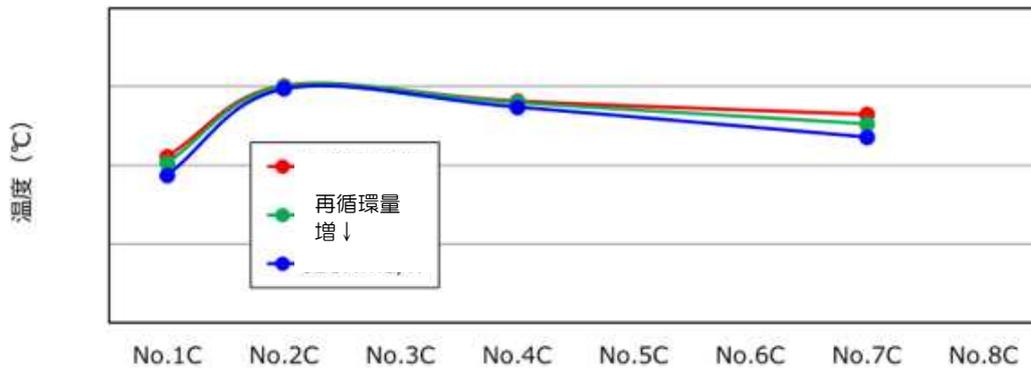


図 3-2-2-47 発電室上部のカートリッジ毎の温度

※ C : カートリッジ

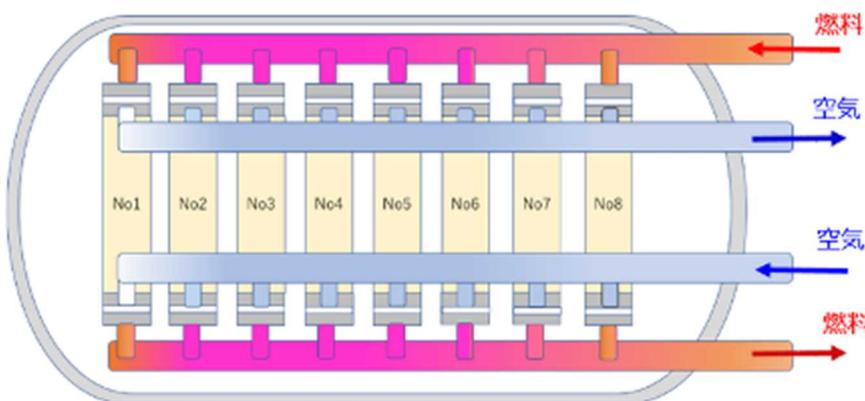


図 3-2-2-48 カートリッジ断面フロー図

#### (b)石炭実証機模擬ガスによる停止試験

石炭実証機模擬ガスでの停止試験については、これまでの H<sub>2</sub> リッチガスや実証機模擬ガスの実績から制御変更等は特に実施せず、停止シーケンス通りに停止（降温）制御が行われ、運用上の停止時間や停止時間等の遅れ等、問題がなく安全に停止可能であることを確認するため実施した。

結果、石炭実証機模擬ガスにおいても停止シーケンス通り進み、H<sub>2</sub> リッチガス、実証機模擬ガスと同様に問題なく自動で停止が可能であることを確認した。

これまでに実施してきた実証機模擬ガスとの比較を図 3-2-2-49 に示す。停止工程における警報等なく、完全冷却停止することを確認した。

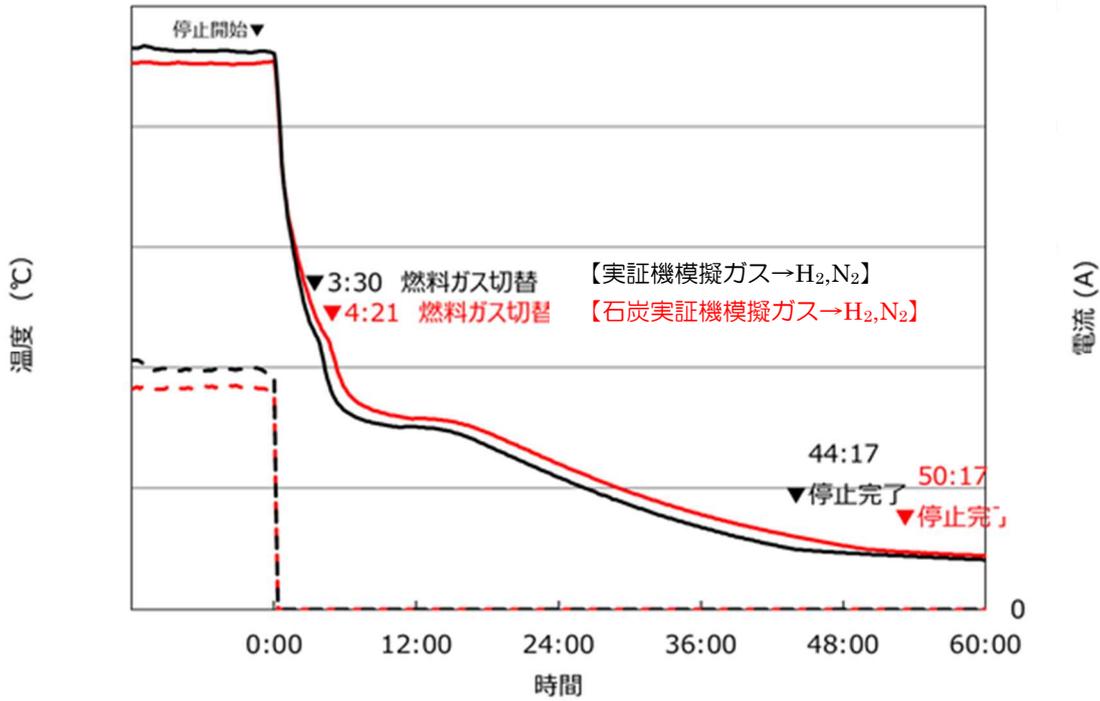


図 3-2-2-49 石炭実証機模擬ガスでの燃料電池モジュール停止

(c) 燃料電池用ガス精製設備性能評価

引き続き本 Run における COS 転化器、脱硫器、水素化物吸着器の被毒物除去性能を確認した。分析結果を、表 3-2-2-12 に示す。結果、目標濃度以下 (<1ppb) であったことから H<sub>2</sub>S は問題なく除去されていることを確認した。採取箇所については従前の通り。

表 3-2-2-12 各吸着器における微量成分の除去性能

成分	Run04		
	COS	H <sub>2</sub> S	Se
①COS 転化器入口	5.4ppm	180ppm	—
②脱硫器入口	1.1ppm	180ppm	—
③脱硫器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb
④水素化物吸着器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb

(v) Run05 ガス化炉関係非常停止試験

(a) 非常停止時におけるガス化炉との協調制御確認試験

燃料電池で重大なトラブルが発生した場合、燃料電池を緊急的に停止する必要があるが、燃料電池単体においては、ポンペ供給運転時にインターロック非常停止試験を実施しており、安全に停止できることは既に確認済みである。

一方、ガス化炉との関係運転時において、燃料電池にトラブルが発生した場合、燃料電池へ供給している系統の石炭ガス供給を停止し、システムパージを行い、関係設備を安全に冷却停止する必要があるが、ガス化炉はそのまま運転継続できなければならない。特に燃料電池での石炭ガス使用量が多い時には、瞬時の燃料遮断はガス化炉

に与える影響が大きいため、ガス化炉を安定して運転継続させるには関係設備側での圧力逃がし等の制御が適切に行われる必要がある。

そこで関係運転時における燃料電池の非常停止時を想定した石炭ガスの遮断試験を行い、圧力変動等がガス化炉設備側へ波及しないことを確認した。(図 3-2-2-50)

なお、非常停止時の設備の制御追従性については、最大石炭ガス流量を使用する必要性から、これまでの石炭実証機模擬ガスではなく、実石炭ガス(CO リッチガス)を燃料電池に通ガスして実施した。ただし、実石炭ガス(CO リッチガス)を燃料電池に通ガスした場合、炭素析出する懸念があり以降の試験が実施できない可能性があるため、燃料電池の発電は行わない状態で試験を実施した。

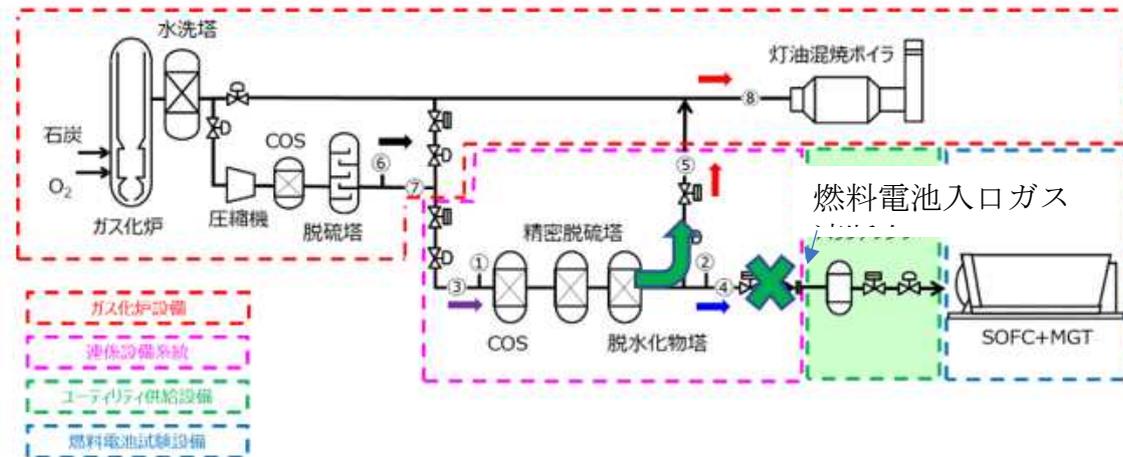


図 3-2-2-50 ガス化炉－燃料電池モジュール関係試験

①非常停止時におけるガス化炉との協調制御確認試験

本試験において評価基準とした流量、圧力およびその実測値について表 3-2-2-13 に示す。また、挙動については図 3-2-2-59 および図 3-2-2-60 に示す。いずれの値においても変動値は基準値を下回っており、灯油混焼ボイラ等の設備にも問題ないことから本システムにおいて設定した制御設定値で燃料電池モジュール試験設備のトラブルによりガス化炉との関係が遮断されても問題はないことを確認した。

本システムにおいては、ガス遮断によるガス化炉の制御系への影響はほとんどなく運転を継続できた。実証機においても本制御の設計に基づいた検討方法で応用可能と考えるが、一時的に灯油混焼ボイラへの供給流量が増加することを確認した。大型化した実証機においても同様の挙動となることが予想されることから、同現象が起こった際の増加流量を考慮し、常にフレアスタック（灯油混焼ボイラ等）側で許容できるような制御設定値や運用方法を検討する必要がある。

表 3-2-2-13 ガス化炉関係非常停止試験時の評価基準と実測値

<燃料電池用ガス精製設備>

	評価基準		判定
	①石炭ガス圧力	Max 1.00MPa	
	Min 0.60MPa	燃料電池への供給圧より高いこと	○
②燃料電池供給圧力	Max 0.95MPa	安全弁動作しないこと	○
	Min 0.60MPa	燃料電池への供給圧より高いこと	○
③石炭ガス供給流量	—	各箇所の温度警報が出ないこと	○
④灯油混焼ボイラ供給ガス流量	—	ガス化炉との取合最大値	○

<小型ガス化炉設備>

		評価基準	判定
⑥吸収塔出口圧力	—	トリップしないこと	○
⑦吸収塔出口流量	—		○
⑧灯油混焼ボイラ 供給ガス流量	1670Nm <sup>3</sup> /h>	北九州市との協定値	○

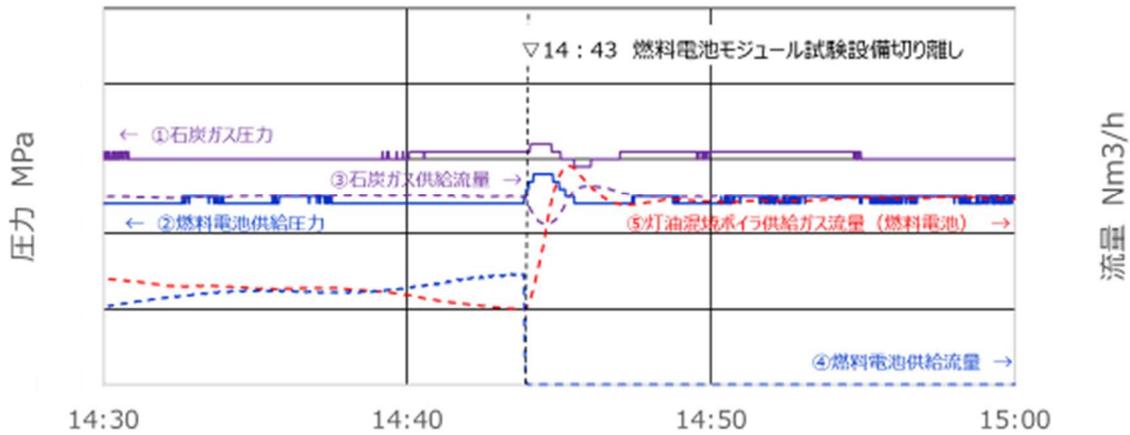


図 3-2-2-51 非常停止試験時の燃料電池用ガス精製設備の挙動

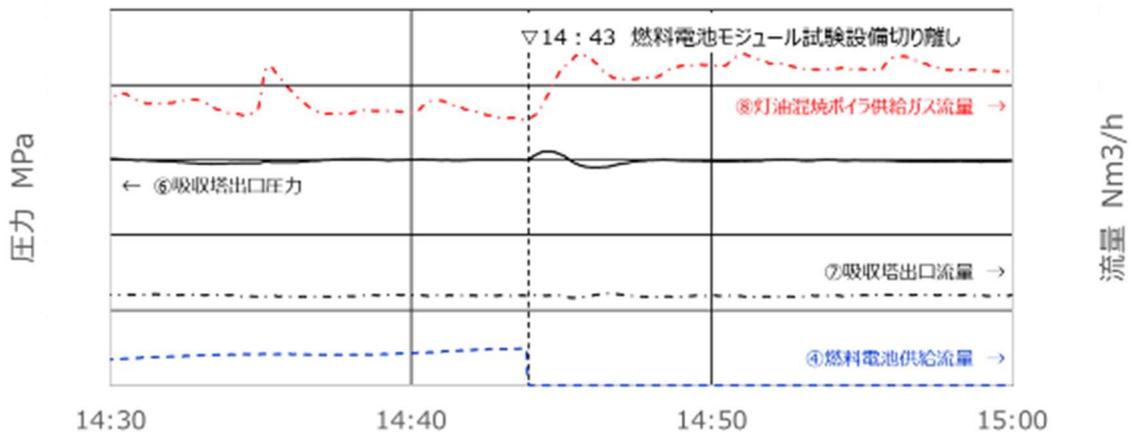


図 3-2-2-52 非常停止試験時のガス化炉の挙動

(b)燃料電池用ガス精製設備性能評価

Run05 の各吸着器の前後における分析結果を表 3-2-2-14 に示す。今回も高濃度な H<sub>2</sub>S が供給されたが吸着剤出口分析において H<sub>2</sub>S および COS が目標濃度以下 (<1ppb) と検出されなかったことから H<sub>2</sub>S は問題なく除去されていることを確認した。

表 3-2-2-14 各吸着器における微量成分の除去性能

成分	Run05		
	COS	H <sub>2</sub> S	Se
①COS 転化器入口	3.10ppm	460ppm	—
②脱硫器入口	0.87ppm	430ppm	—
③脱硫器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb
④水素化物吸着器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb

## 研究開発項目⑨ 石炭ガス(CO リッチガス)適用に係る技術検討

IGFC の適用範囲拡大に向けた検討として、高効率な IGFC を実現するためには、直接、石炭ガス（以下 CO リッチガスという）を燃料電池に供給して発電を行うシステムが想定される。しかし、CO リッチガスを燃料電池に直接供給する場合、燃料供給系において CO が炭素となって析出し、配管の詰まりや偏流が生じるなど影響が生じる懸念がある。

そのため、熱力学平衡計算等のシミュレーションにより、炭素析出がしやすい領域を求め、その領域を回避する為の運転パラメータについて机上検討を行った。その結果を基に SOFC 単セルスタック試験装置を用いて発電基本特性等を確認し、実際の燃料電池モジュールで CO リッチガス運転を実施する上での S/C 等の運転条件やパラメータの選定を行った。

### (1)炭素析出に係る机上検討

燃料電池モジュールにおいて、CO リッチガスで運転した場合、燃料電池モジュール内部でガス種や温度に起因した平衡反応が生じ、ガス組成が変化することが推定される。そのため炭素が析出しやすい領域を検討する手法として、CO リッチガス運転時にモジュール内部で生じる反応によるガス組成を推定し、その組成から炭素析出領域を算出した。また、運転パラメータ変化による影響についてのシミュレーションモデルを検討した。概念図を図 3-2-2-53 に示す。

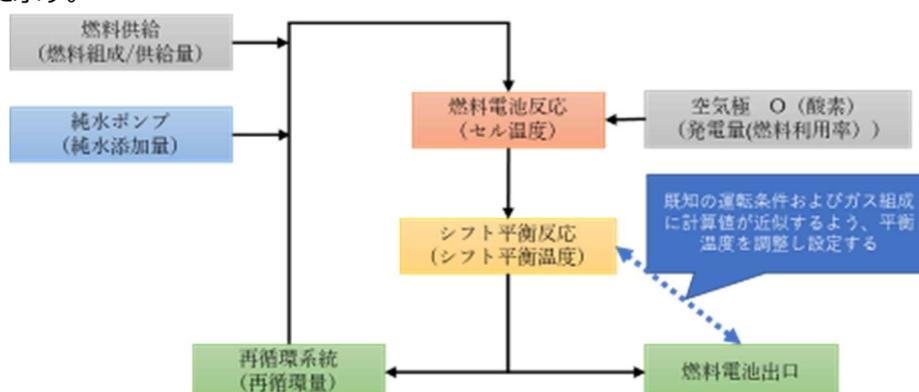
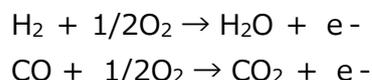


図 3-2-2-53 シミュレーションモデルの検討概念図

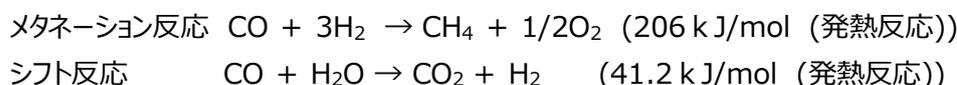
#### ①燃料電池内部での発電反応

発電反応は、燃料電池のセル部で空気極側から供給された  $O_2$  が反応する。シミュレーションモデルでは、発電反応は下記の反応式によって発生することと定義し、電流から酸素消費量を求めた。その酸素消費量分の空気を空気極の発電室入口に供給し、発電室内の温度にて燃料ガスが反応するとした。



#### ②シフト平衡反応

供給燃料ガスは発電室内部のセル部にて発電反応に利用されるが、燃料に炭素分が含まれている場合、発電室内の温度変化によりガス組成が変化する。これは、温度等の条件によって下記反応が発生し、 $CH_4$  や  $CO_2$  が生成するためと考えられる。



燃料電池内部の発電反応のみを考慮したモデル(①のみ)で求めた組成では、実際の組成と差異が生じてくるため、出口ガス組成から平衡計算して発電室出口部付近のシフト平衡温度を算出した。なお、シフト平衡温度は発電室内の温度、燃料流量に影響されるため、運転条件ごとに異なる。

以降、本モデルを基に CO リッチガス運転時のガス組成をシミュレーションにより推定した。なお、CO リッチガスでの運転は実績が無く、実機でのシフト平衡温度は不明なため、机上検討では実証機模擬ガス運転時から求めた値を CO リッチガスにおけるシフト平衡反応温度と仮定し計算のモデル検討を行った。

## (2)炭素析出領域の算出、及び運転パラメータの影響について

前述したモデルを使って実機モジュールの CO リッチガス運転時にガス組成から想定される炭素析出領域の算出と、運転パラメータによる影響を検証した。

燃料ガスは上部から発電室内に入り下部に向かって流れていくが、導入されたガスは発電室内部の輻射熱で温度が上昇していき、析出領域の温度に入ることによって炭素析出が発生する可能性が高いと想定される。そこで炭素析出が想定される発電室入口付近の 3 か所 (図 3-2-2-54(A):発電室入口、(B):額縁、(C):管板) の温度条件にて炭素析出する条件を検討した。3 か所の温度については、CO リッチガスでの運転実績がないため、実証機模擬ガスでの運転条件における運転実績の温度等を基に設定してシミュレーションを実施した。

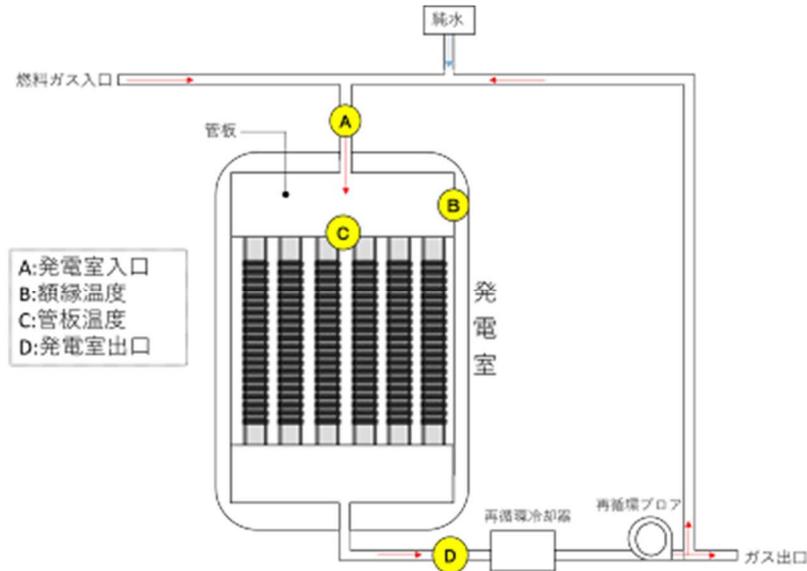
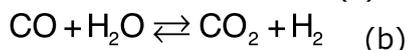


図 3-2-2-54 炭素析出シミュレーション対象の位置

炭素析出領域の平衡計算に必要な圧力条件を定めるために、各箇所の温度圧力条件に対応するガス組成条件から、炭素析出に関わる三成分 (C,H,O) に関与する分圧を求めた。全圧 P を絶対圧に変換し、そこから炭素析出に関与する元素 (C,H,O) 以外で構成されるガス成分、すなわち N<sub>2</sub> および Ar の分圧を差し引き、C,H,O の成分に関わる分圧を計算した。

平衡計算にはメタネーション反応は考慮していないが、CH<sub>4</sub> はモジュール内で改質されて炭素析出に影響する可能性があるため分圧の計算に含めた。この圧力条件下で、式(a)に示した逆 Boudouard 反応の平衡計算を行い、反応が右に進む炭素析出条件と、左に進む非炭素析出条件の境界条件を計算した。



式(a)には元素として水素が関与していないが、CO と CO<sub>2</sub> は燃料ガスに含まれる H<sub>2</sub> ガスと水蒸気 (H<sub>2</sub>O) による式(b)の水蒸気シフト反応を通じて組成が変わるため、平衡計算では式(a)と式(b)の両方が平衡組成になる条件 (二平衡条件) で計算を行う必要がある。二平衡条件で得られる炭素析出の境界条件、つま

り式 (a) の炭素 (C) が生成されるか否かの境界は、式(a)と式(b)の各成分の組成として表され、そこから得られる C,H,O の組成比を三角図上にプロットすることとした。この炭素析出の境界条件は C-H-O 三角図上にプロットすると 1 本の曲線として決定され、境界線の上部に位置する側の領域は炭素析出条件、境界線を挟んで反対側は非炭素析出条件となる。

任意のガス組成について元素 (C,H,O) 組成を計算して C-H-O 三角図にプロットすれば、描かれた炭素析出境界線のいずれの側にあるかによって、式(a)が進む炭素析出条件に入るかを判定することができる。

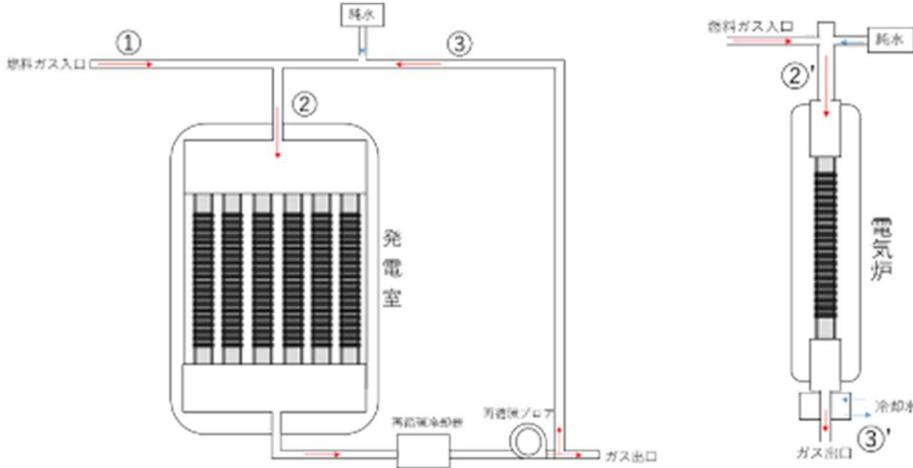
## (2)単セル試験装置による CO リッチガス事前確認試験

### (i)試験概要

単セル試験装置による CO リッチガス事前確認試験(以下、単セル試験という)は、燃料電池モジュールの CO リッチガス試験に向け、単セルで事前に発電への影響や炭素析出の有無、運転時の試験条件を確認する目的で実施した。

なお、単セル試験で使用する CO リッチガスは、予めガス化炉運転中にポンペに貯蔵していたものを使用した。単セル試験装置は、図 3-2-2-55 の左側に示す燃料電池モジュールの発電室を模擬するものとし、モジュールの供給燃料ガス(図中①)と再循環ガス(図中③)の合流後である発電室入口ガス(図中②)を模擬するため、石炭ガス以外に N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> ガスと純水を供給できるようにした。単セル試験装置の設備イメージは図 3-2-2-56, 図 3-2-2-57 に示す。各試験条件ごとに内部点検を実施し、炭素析出の発生が最も懸念される箇所である管板内部の壁面や底部、セル上端部に異常がないか確認を行った。

また、試験に用いた単セルは、モジュールと同様、三菱パワー(株)製の円筒横縞型 SOFC を使用した。



<左：燃料電池モジュール> ①燃料ガス ②発電室入口 ③再循環系統  
<右：単セル試験装置> ②'燃料ガス (②発電室入口を模擬) ③'装置出口

図 3-2-2-55 燃料電池モジュール及び単セル試験装置

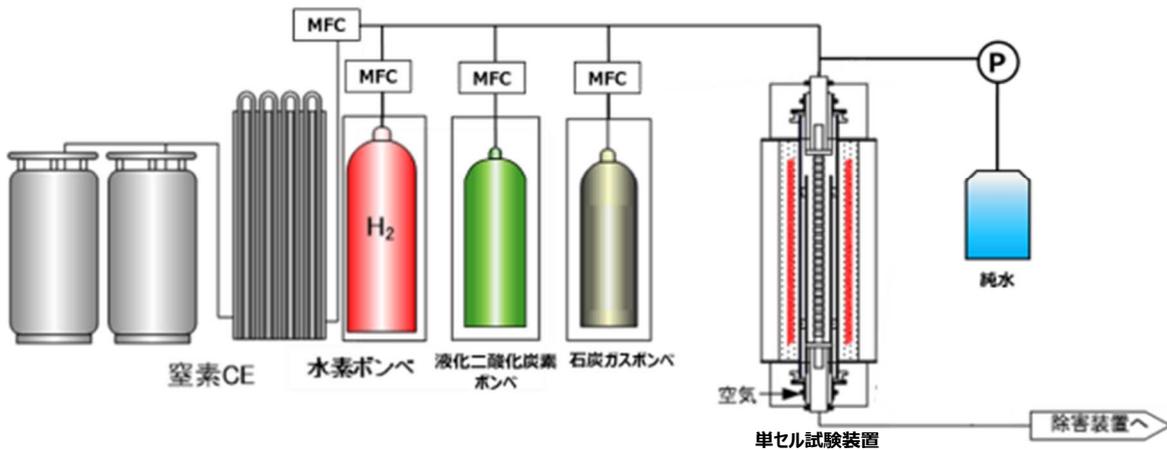


図 3-2-2-56 単セル試験装置 設備イメージ

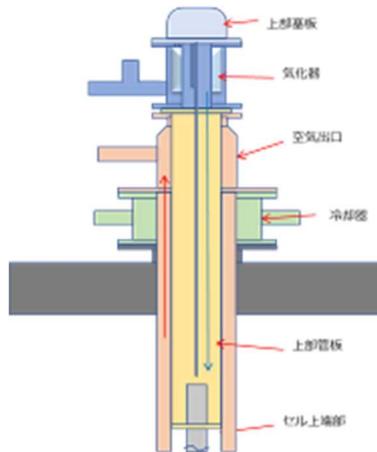


図 3-2-2-57 単セル試験装置内部構造(上部)

表 3-2-2-15 に単セル試験で実施した試験条件を示す。モジュール運転を想定した試験条件から、単セル試験で実施する試験条件を算定し試験を行った。

表 3-2-2-15 モジュール運転を想定した各試験の条件概要

	条件①	条件②	条件③	条件④
	炭素析出回避 条件 I	炭素析出回避 条件 II	炭素析出 条件 I	炭素析出 条件 II
概要	最小燃料供給 量に若干裕度	最小燃料供給 量での運転	最大燃料供給量 での運転	最大燃料供給 し、効率向上のため水添加無
炭素析出想定	無	無	有	有
水素枯渇	無	無	無	懸念有り

## (2)試験結果

単セル試験での CO リッチガス発電による影響と、炭素析出の有無等の確認結果について表 3-2-2-16 にまとめる。

表 3-2-2-16 試験結果

	発電影響確認	水素枯渇確認	付着物確認	炭素析出確認
条件① 炭素析出回避試験 I	無	無	有	無
条件② 炭素析出回避試験 II	無	無	有	無
条件③ 炭素析出試験 I	無	無	有	無
条件④ 炭素析出試験 II	無	無	有	無

各試験共に付着物については見られたものの全ての条件において炭素の析出は確認されず、影響も見られなかった。よって熱平衡計算上、炭素析出領域にあってもすぐには炭素析出しないと思われる。

### (a)CO リッチガスの燃料電池モジュール発電特性・起動停止試験

本試験では、CO リッチガスを燃料として燃料電池モジュールに供給し、発電特性（電圧・温度分布等）を確認するとともに、CO リッチガスを用いた起動・停止等 CO リッチガス運転時の影響について確認した。

ただし、CO リッチガスで常温から起動を行った場合、昇温過程において炭素析出が起きやすい温度領域（400℃～600℃）を通過することから、燃料電池内部に炭素析出が起きてしまい、その後の運転に影響を及ぼすことが懸念される。そのため、常温からのモジュール起動は H<sub>2</sub> リッチガスを燃料として起動し、発電可能温度に昇温後、CO リッチガスに切り替え、発電特性を確認した。また、CO リッチガス切替後は設備制約上、供給燃料量が少ないため発電量が低下してしまう。そのため発電室温度が低下した際には LNG による発電室燃焼追い焚きを行い、燃料電池発電可能な温度を保つ操作を適宜行って対応した。

また CO リッチガスによる起動は上記の炭素析出の理由から、発電室燃焼の確認を目的として実施した。

#### ( i )CO リッチガス発電特性試験

CO リッチガスを燃料として供給し発電特性（電圧、温度分布等）を確認するとともに、炭素析出した場合の影響を確認した。

##### ①運転条件

試験は発電時における以下の炭素非析出条件（条件①）と析出条件（条件②）で行った。条件②については途中、発電室燃焼試験を実施したので②-1, ②-2 に分けて実施した。図 3-2-2-58 の各条件における C-H-O 三角線図で示すように、すべての条件において試験目的を満たすポイントで運転し、試験を実施した。また、図 3-2-2-59 に燃料電池モジュール試験設備概略図を示す。

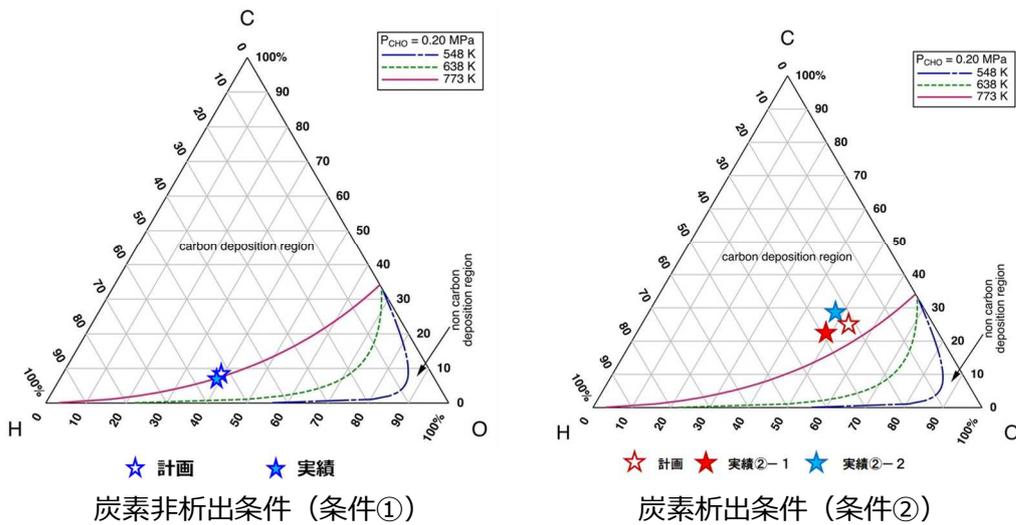


図 3-2-2-58 CO リッチガス試験 C-H-O 三角線図

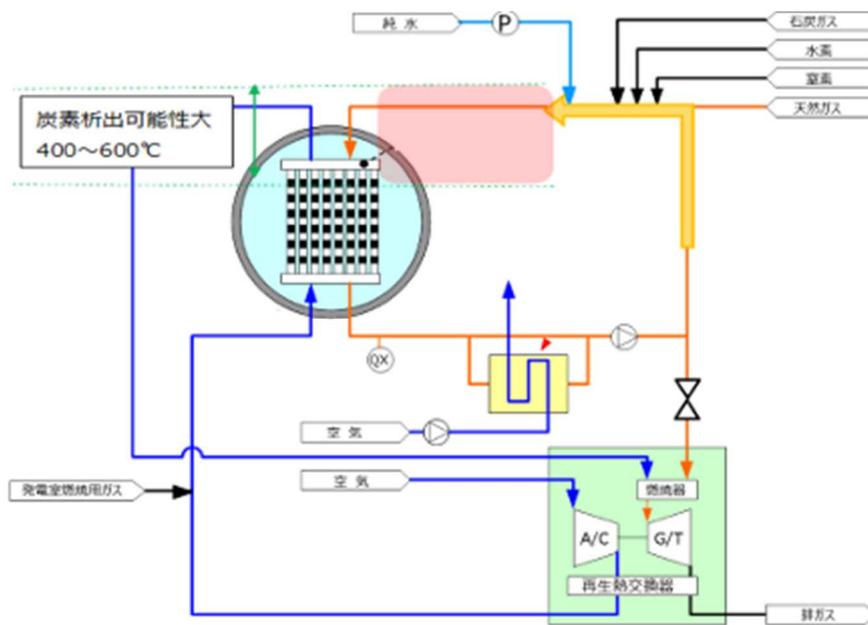


図 3-2-2-59 燃料電池モジュール試験設備概略図

## ②CO リッチガス発電特性試験結果

### <条件①について>

炭素非析出条件とするため、供給石炭ガス量を最低流量とし、再循環ガス量の比率を上げることでセル内部に供給される燃料組成を調整した。また添加水量については最大供給量とした。燃料入口温度については時間の制約からその調整が困難であったことから再循環冷却器不使用条件で試験を実施した。

発電特性として、条件①、②-1 の電圧電流及び温度を図 3-2-2-60~3-2-2-63 に示す。なお、図中の C はカートリッジ、S は電気的な接続状態を意味する。

供給される燃料が少なく H<sub>2</sub> 及び CO 濃度が低いため、電流増による電圧低下が大きい、安定した状態であった。発電室温度についても、熱自立していないが大きな変動なく安定した状態であった。

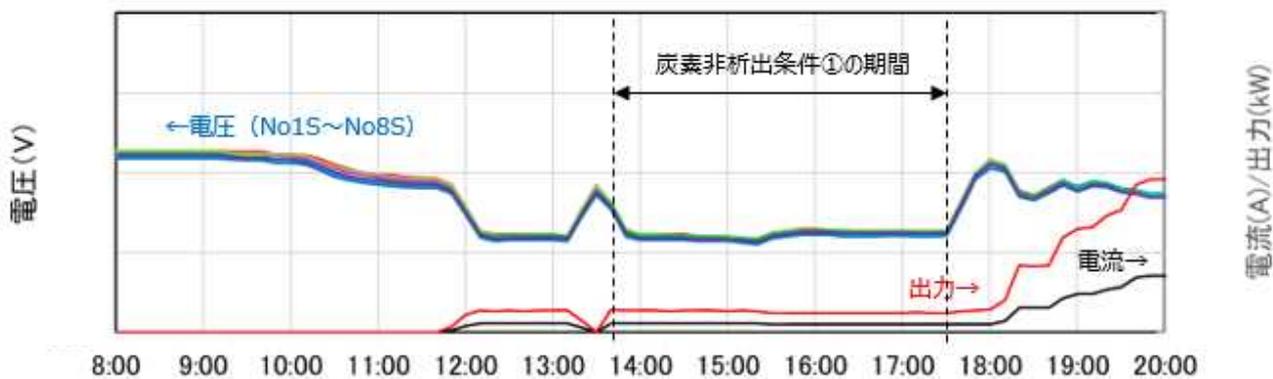


図 3-2-2-60 電圧・電流および出力 (条件①)

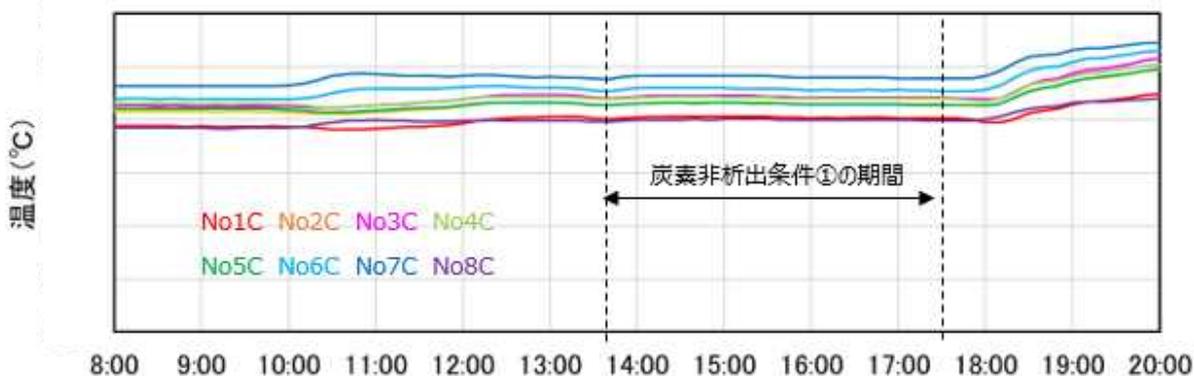


図 3-2-2-61 No.1C~8C 発電室中部温度 (条件①)

<条件②-1 について>

炭素析出条件としては、本設備で運転可能な最大石炭ガス供給量、および最大出力(電流)での運転とし、添加水量は最小とした。当初計画では添加水量は 0 とする予定であったが、燃料枯渇の可能性があったことから少量添加した。供給される燃料中の H<sub>2</sub> および CO 濃度が低く電流増による電圧低下があるが、安定した推移を示した。発電室温度についても、熱自立しないものの安定していた。

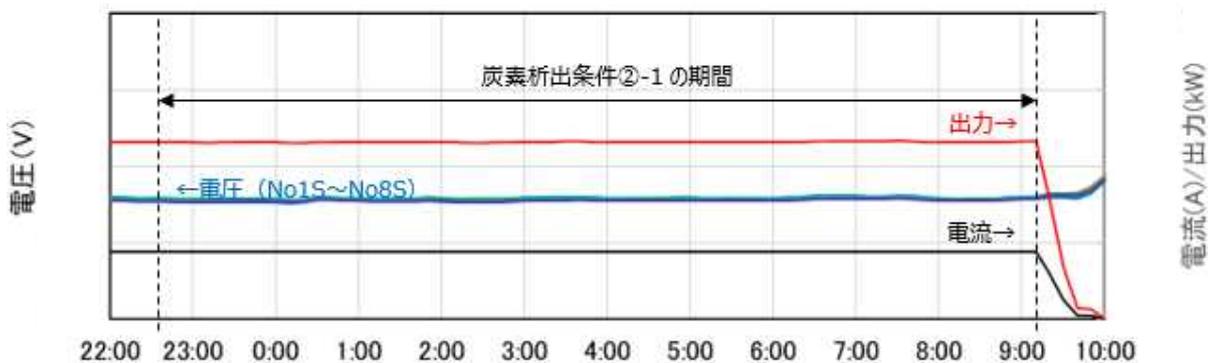


図 3-2-2-62 電圧・電流および出力 (条件②-1)

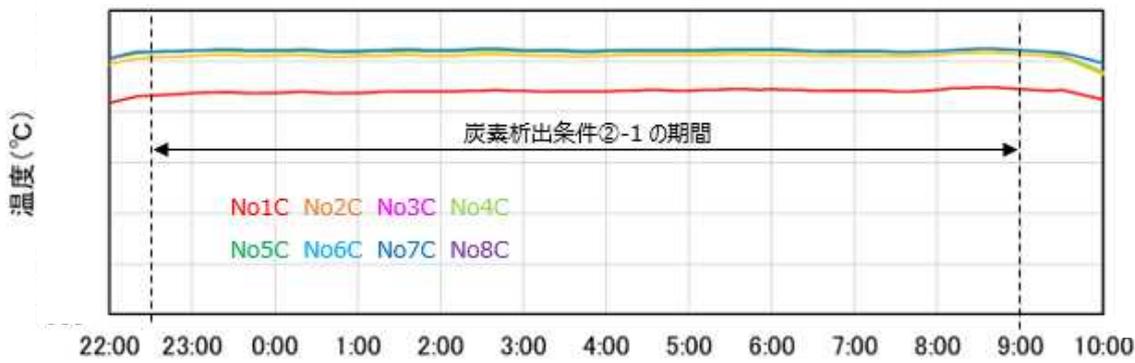


図 3-2-2-63 No.1C~8C 発電室中部温度 (条件②-1)

(ii) CO リッチガスにおける発電室燃焼試験

通常、発電室燃焼用の燃料(空気極側)、と発電するための燃料(燃料極側) (以下、発電用燃料)は同一であるのが、設備構成上、ユーティリティ設備の簡略ができ有益と考えられるが、CO リッチガスで燃料電池モジュールを起動・昇温する過程においては、炭素析出が起きやすい温度領域を通過してしまうため、この温度域で CO リッチガスを燃料として運転することはリスクを伴う。

本設備では、発電用燃料の系統とは別に LNG による発電室燃焼ができる系統を備えているため、前述した (i) CO リッチガス発電特性試験では LNG を発電室燃焼に使用して試験した。

一方、起動時においては発電室燃焼は昇温に必須であり、発電室燃焼用に CO リッチガスを使用するケースや、起動完了後に発電室内温度が低下し、発電室燃焼が再度必要となるケースは考えられる。これまで発電室燃焼には水素 85%のガス(H<sub>2</sub>リッチガス、実証機模擬ガス、石炭実証機模擬ガス)で実施してきたが、CO リッチガスを使用した場合の適用性について本試験で確認した。具体的には、セル触媒上での CO リッチガスの燃焼性、電池発電に必要な温度まで昇温維持可能か、その他の不具合等有無について確認した。

① 試験条件

前述した様に炭素析出の懸念から、立ち上げの発電室燃焼は LNG で実施し、その後 CO リッチガスに切り替えて供給量の調整を行った。CO リッチガスの発電室燃焼用供給量は、LNG 相当の熱量に換算し、同等になるよう調整を行った。図 3-2-2-64 に各温度域での発電室燃焼用燃料の供給量を示す。H<sub>2</sub>リッチガスの場合、自着火を考慮しガス濃度の調整を行うが今回は可燃性ガス濃度が薄い事からガス濃度調整は実施せずに CO リッチガスを直接発電室燃焼用に使用した。

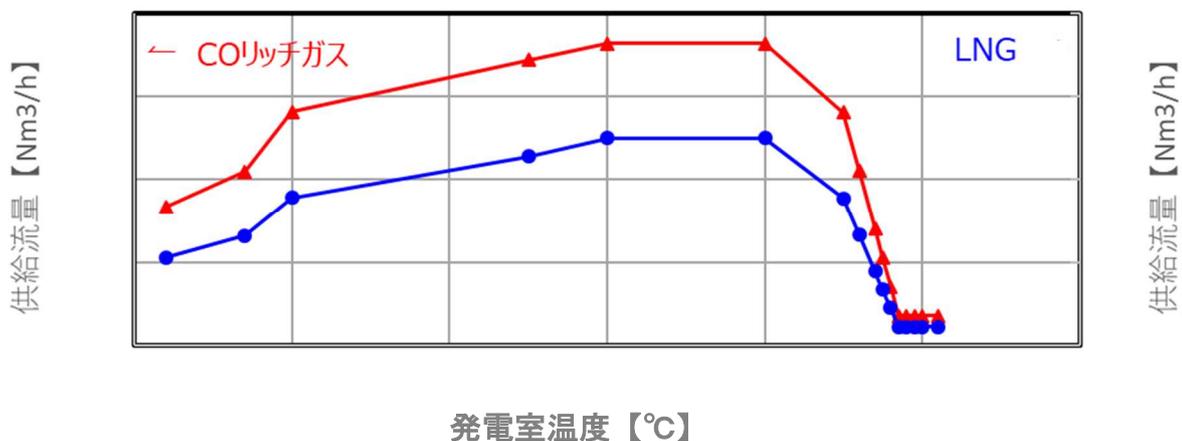


図 3-2-2-64 発電室燃焼用燃料供給量

## ②試験結果

発電室燃焼試験時のトレンドを図 3-2-2-65 に、発電室内温度分布を図 3-2-2-66～図 3-2-2-68 に示す。試験は各運転パラメータを手動にて適切に調整しながら LNG から CO リッチガスへの切替を行った。

発電室燃焼用石炭ガス流量は設備の仕様上、計画値まで流すことができず、切替時の発電室 MAX(中)温度は計画より低めに留まった。結果、発電室温度(中) min については目標値を維持できなかったが、セル表面温度について発電可能温度を維持できたことから試験を続行しデータの採取を行った。

今回は設備上、必要流量の 8 割程度の CO リッチガスしか供給していないことや N<sub>2</sub> が多く低発熱量ガスであったため、目標より低い温度になったが、温度は変動等なく安定した状態を保っていることから、熱量や流量が確保できれば昇温は可能であると思われる。また、自着火も発生せず、温度分布についても大きな差がつくことなく、温度状態も安定していることから空気極での CO リッチガスの触媒燃焼が機能していると判断できる。

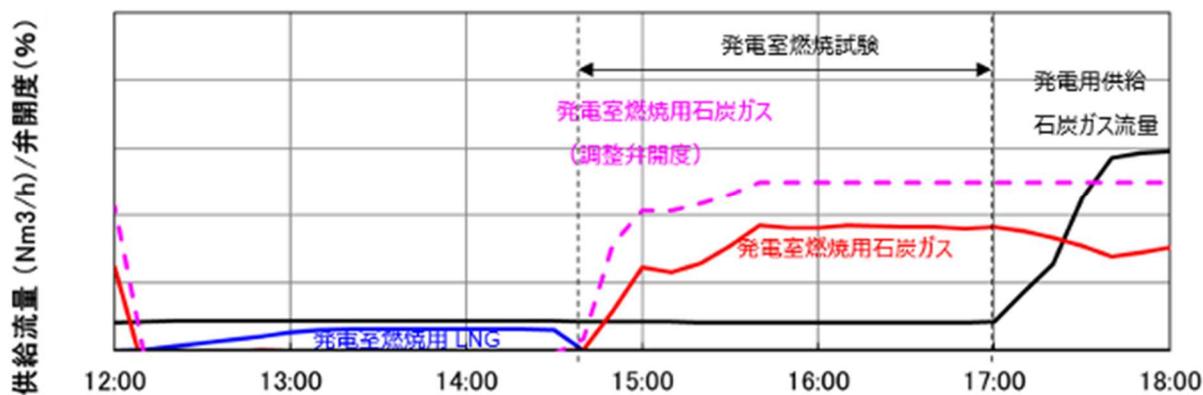


図 3-2-2-65 CO リッチガス発電室燃焼試験実績

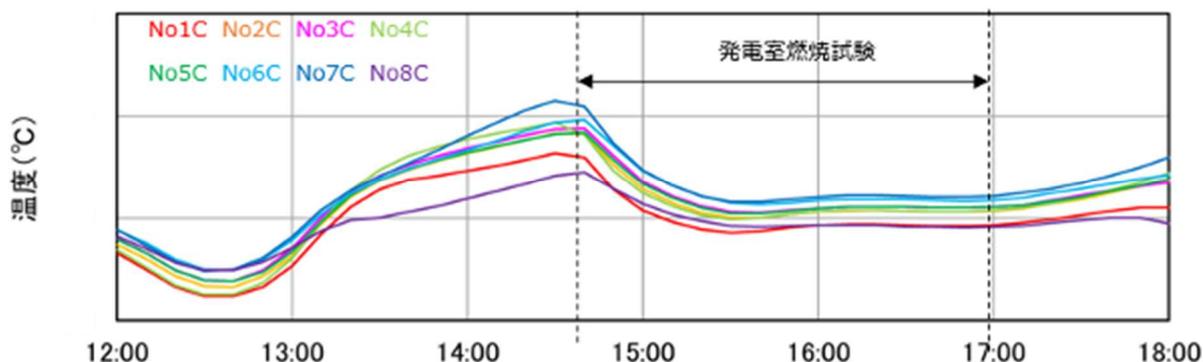


図 3-2-2-66 CO リッチガス発電室燃焼試験時の発電室温度

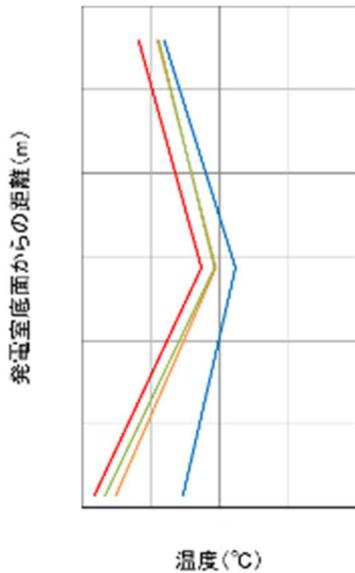


図 3-2-2-67 CO リッチガス発電室  
燃焼時カートリッジのセル表面温度

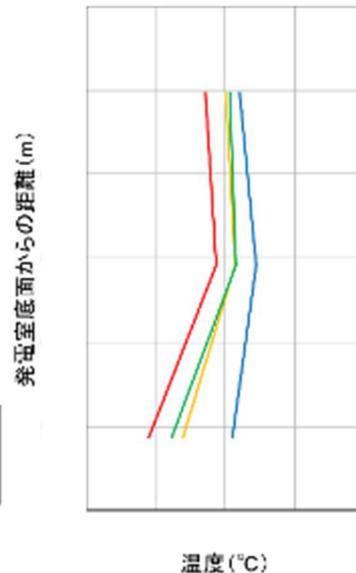


図 3-2-2-68 CO リッチガス発電室  
燃焼時カートリッジの発電室温度

これまでの燃料の比較として、発電室燃焼時の各種燃料毎の温度分布を図 3-2-2-69 に示す。発電室燃焼用燃料に CO リッチガスを使用した場合、発電室の下部温度が中部および上部と比較すると低くなっている。これまでのガスでの起動時は、発電室内の温度分布は上中下ともにフラットであり、発電室燃焼で下部温度が下がるような分布が確認できていないため、このような分布となるのは CO が LNG および H<sub>2</sub> に比べ燃焼しにくいことから、燃焼ポイントが上部 (A→B に移行) となるためと推測される。また、LNG および CO リッチガスを供給した場合は、発電室上部温度が下がっている。OCV の状態であり発電はしていないが、これは発電時と同様、CH<sub>4</sub> 改質による吸熱が働いているためと推測する。

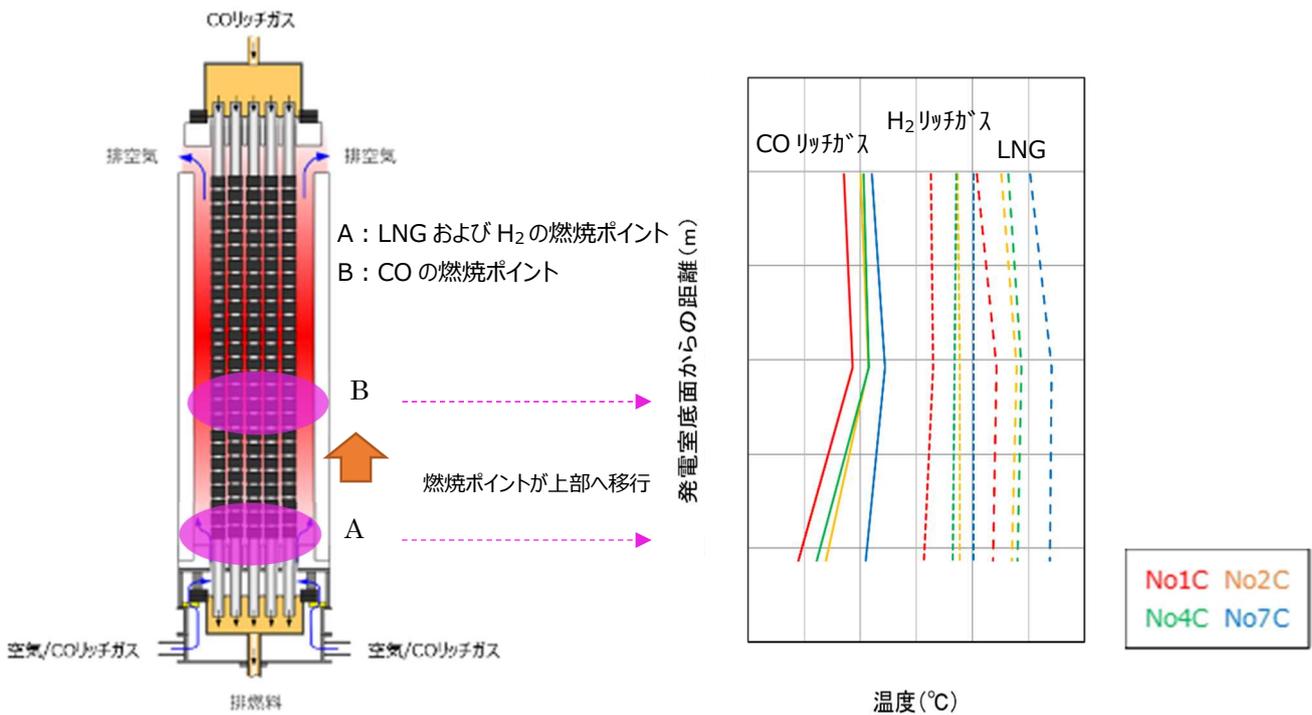


図 3-2-2-69 発電室燃焼時のガス種による発電室温度分布

### (3)CO リッチガス停止試験

CO リッチガスの運転状態から停止操作を行い、停止工程である燃料切替迄の動作及び降温レート等を確認した。

#### ① 試験結果

CO リッチガスで停止した停止カーブと、比較のため石炭実証機模擬ガスでの停止カーブを図 3-2-2-70、図 3-2-2-71 に示す。石炭実証機模擬ガスの停止と比較すると燃料供給 停止までの時間が 1 : 00 程度短いが問題なく降温できることを確認した。

停止時間（燃料切替迄）の時間が短くなったのは、OCV 状態から停止操作を行ったため停止開始時の温度が低かったからであり、CO リッチガスでの停止については問題ないことが確認できた。

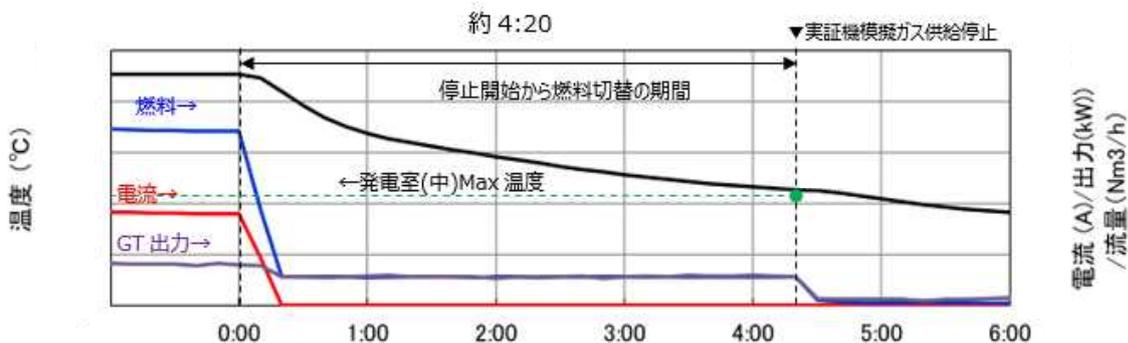


図 3-2-2-70 実証機模擬ガスでの停止実績

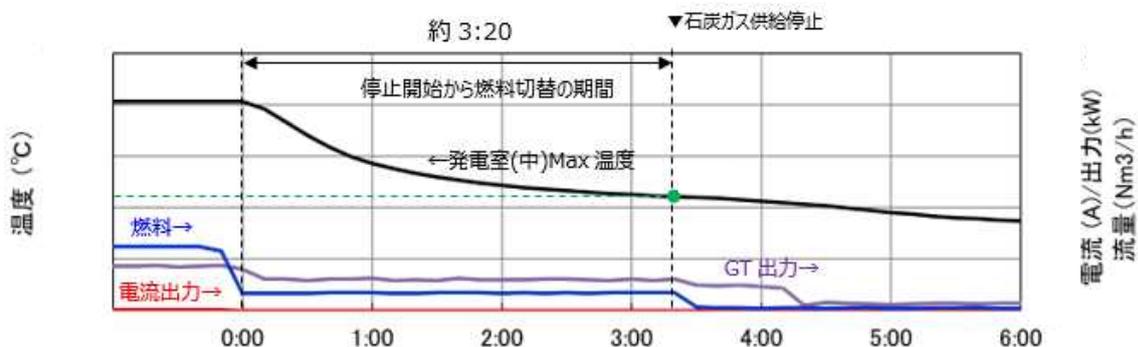


図 3-2-2-71 CO リッチガスでの停止実績

### (b)燃料電池用ガス精製設備性能確認

#### ①被毒成分除去性能

Run06 の各吸着器の前後におけるガスサンプリングの分析結果を、表 3-2-3-17 に示す。設計値を超える H<sub>2</sub>S が供給されたが、吸着剤出口分析において H<sub>2</sub>S および COS が目標濃度以下 (<1ppb) と検出されなかったことから H<sub>2</sub>S は問題なく除去されていることを確認した。採取箇所については従前の通り。

表 3-2-2-17 各吸着器における微量成分の除去性能

成分	Run06		
	COS	H <sub>2</sub> S	Se
①COS 転化器入口	9.5ppm	400ppm	<1ppb
②脱硫器入口	2.9ppm	400ppm	<1ppb
③脱硫器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb
④水素化物吸着器出口	<1ppb	<1ppb	<1ppb

## 研究開発項目①燃料電池モジュールの解体調査

石炭ガス化炉との連係試験終了後、燃料電池セル、及びセルスタックや構成機器の健全性を調べるため燃料電池モジュールを解体し、内部状況の調査を実施した。

解体調査は、天然ガス仕様の設備を水素リッチガスで運転しているため、局所的に高温となっている部分の損傷や連係試験により石炭ガスを通ガスしているため不純物等の有無、および CO リッチガス運転により熱平衡計算上は炭素析出運転をしているため、炭素析出の状況を確認するためとして実施した。

燃料供給ヘッダ、空気供給配管および排出ヘッダ部の損傷、異物付着状況の確認、および圧力容器からサブモジュールを引出して、各カートリッジから任意のセルチューブを抜き取り表面・断面等の分析を実施した。調査実施機関は製造元である三菱パワー(株) (現：三菱重工(株)) に解体および分析を依頼し、長崎工場にて実施した。

### (1)燃料電池モジュールの解体調査

#### ( i )各部位の分析調査

石炭ガス化炉連係試験後の石炭ガス中に含まれる被毒物質の影響を調査するため①セルスタック（内部表面,断面部）、②燃料供給、③燃料排出系統、④空気供給系等の不純物等析出状況の確認を行った。(図 3-2-2-72～図 3-2-2-74)

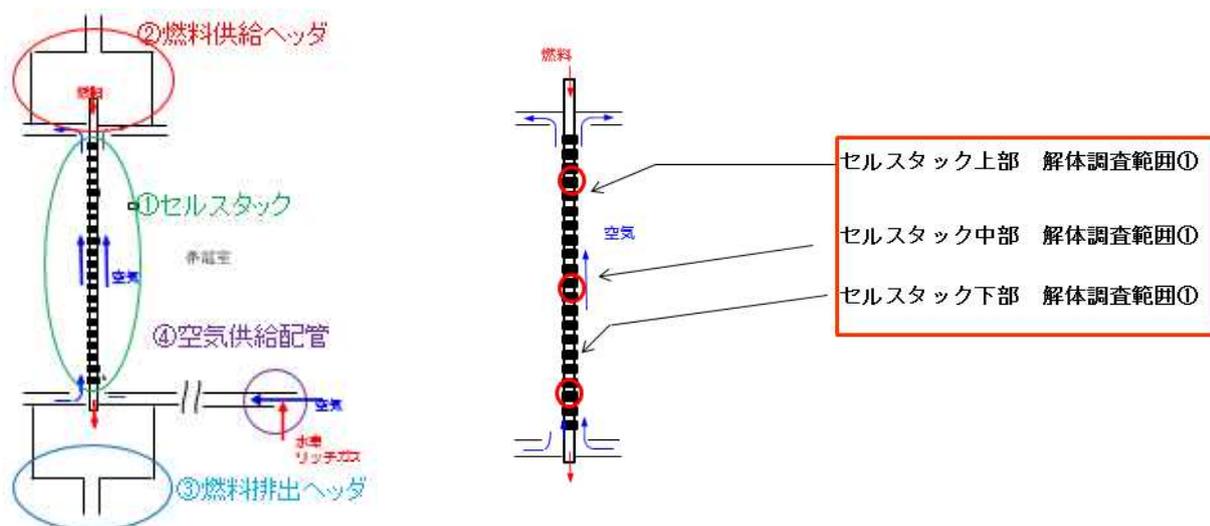


図 3-2-2-72 調査対象箇所

図 3-2-2-73 セルスタック調査箇所

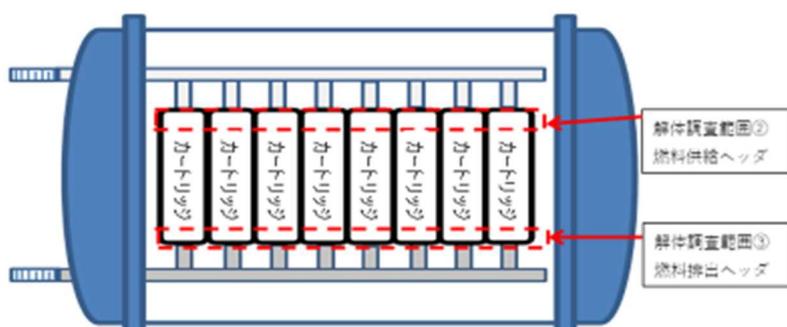


図 3-2-2-74 燃料電池モジュール側面

(ii) 解体調査結果

保温材、蓋板を外しての外観検査、気密検査、絶縁導電検査、狭小部についての確認はファイバーを入れて確認した。

①内部調査

主な結果としては以下の通り。

- (a)セルスタックに黒色付着物・破損が見られた。
- (b)保温材、計測線は異常なし。
- (c)燃料・空気、供給・排出ヘッダ外側は異常なし。
- (d)燃料供給ヘッダ内側に黒色付着物有り。
- (e)発電室燃焼供給部、空気供給配管内は異常なし。

②セルスタックの分析

セルを抜き出し、セル及び付着物の状態を光学顕微鏡、SEM、EPMA を用いて分析を実施した。なお、分析の対象は要素試験から想定した元素を選定した。

- ・セルを分析した結果、一部で P が検出された。
- ・元素分析のまとめた結果を表 3-2-2-19 に示す。

表 3-2-2-18 セル分析条件

分析装置	サンプル	測定箇所
光学顕微鏡 SEM > 二次電子像 > 反射電子像 EPMA > 元素分析 > マッピング	> 最上部素子	① 燃料極/電解質界面 (断面)
	> 中央素子	② 燃料極 (断面)
	> 最下部素子	③ 燃料極/気体管界面 (断面)
		④ 基体管 (断面)
		⑤ 基体管 (内表面)
		⑥ 燃料極/気体管全体 (断面)
	> 燃料入口側リード部	⑦ 基体管 (断面)
	> 燃料出口側リード部	⑧ 基体管 (内表面)

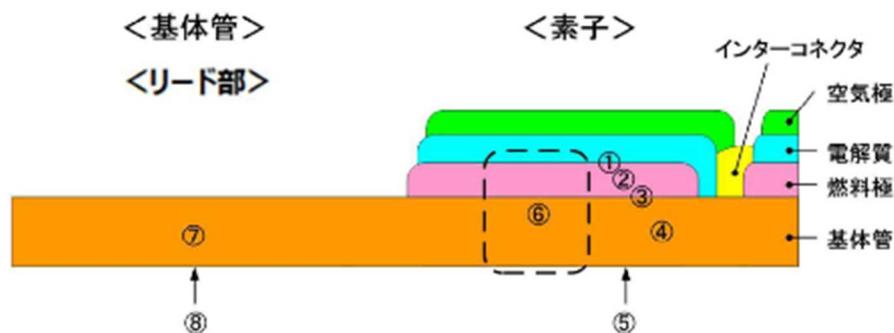


図 3-2-2-75 拔出セルの分析箇所

表 3-2-2-19 セル分析結果まとめ

NO.	分析対象	結果
NO.1C	セルスタック	基体管内部に P が検出された以外にその他の被毒成分は存在しなかった。
NO.4C		基体管内部に P が検出された以外にその他の被毒成分は存在しなかった。
NO.5C		基体管内部に P が検出された以外にその他の被毒成分は存在しなかった。
NO.7C		基体管内部に P が検出された以外にその他の被毒成分は存在しなかった。

(a)光学顕微鏡観察

光学顕微鏡でのセル観察部位について図 3-2-2-76 に示す。

光学顕微鏡での測定結果から表面に黒色粉体が見られたが、特異的な点は確認できなかった。(図 3-2-2-77)



図 3-2-2-76 セル測定部位画像



図 3-2-2-77 測定部表面像

(b)SEM 観察

図 3-2-2-78 にセル表面を示す。表面にカーボンと思われる物質の存在が確認できたが、その他に特異的な部分は確認できなかった。

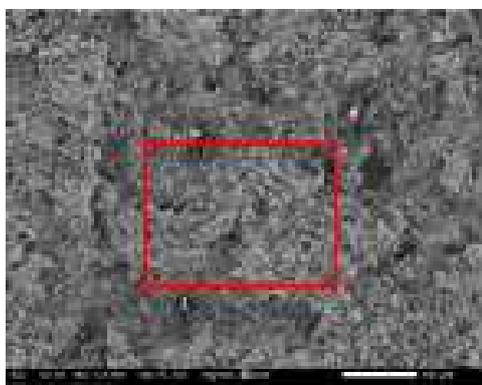


図 3-2-2-78 セル SEM 画像

### (c)EPMA 分析

EPMA 測定によりカーボンが検出された。炭素析出領域での運転を実施しているためと思われる。また、一部であるが P が検出されている。石炭ガス由来のものと思われるが、僅かでありセル性能には影響がないレベルと考えられる。(図 3-2-2-79)

被毒物資として燃料電池用ガス精製設備の除去対象としていた S と Se については全く検出されず、ガス精製設備は有効に機能していたと判断できる。

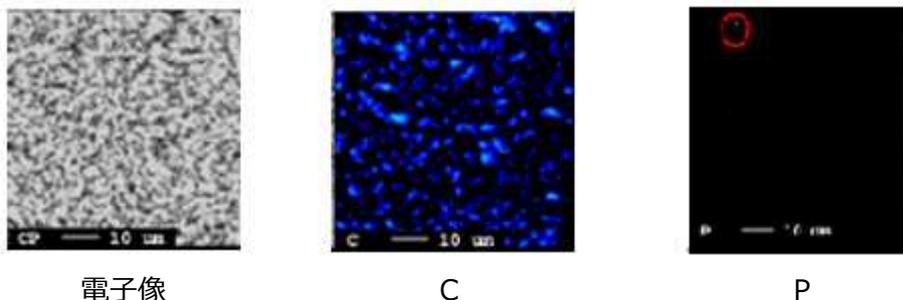


図 3-2-2-79 セル EPMA 画像

### (2)燃料電池用ガス精製設備の吸着剤分析

石炭ガス化炉との関係試験 Run01～06 の全試験期間中に亘り、燃料電池用ガス精製設備で S と Se を対象にして吸着剤による除去性能を確認してきた。

各 Run でのガス分析により被毒物の除去性能は確認しているが、石炭実ガスを通ガスした吸着剤の試験については、初めてのことであり Run 中に蓄積した状況等を確認するため、全ての試験終了後、COS 転化器、脱硫器、水素化物吸着器から触媒および吸着剤を抜き出し、分析を実施した。

#### ( i )分析サンプルおよび分析方法

サンプリングの採取箇所はガス流れを考慮して、各塔の上部、中部、下部から採取し、転化触媒、吸着剤（以下、剤とする）を分析し、試験前後の比較による評価を行った。

#### ( ii )分析結果

採取した剤の写真を図 3-2-2-80 に示す。図の脱硫吸着剤と水素化物吸着剤は左から未使用品、上部、中部、下部の順である。脱硫吸着剤の変色は熱によるもので、水素化物吸着剤の変色は配管からの鉄錆によるものである。

触媒及び吸着剤を分析した結果、S の分析値に関しては脱硫吸着剤の塔上部の吸着剤でしか検出されておらず、中部および下部は未使用の吸着剤と同等の値であった。そのため塔上部でほとんど S は除去され、後段の水素化物吸着剤まで達していなかったと考えられる。

また、COS 転化触媒、脱硫吸着剤、水素化物吸着剤の全てにおいて Se については全く検出されなかったため、Run 時のガス分析値と同様に石炭ガス中に Se は含まれていなかったと思われる。(表 3-2-2-20、図 3-2-2-81～図 3-2-2-83)



COS 転化触媒      脱硫吸着剤      水素化物吸着剤

図 3-2-2-80 サンプル採取した触媒および吸着剤

表 3-2-2-20 ICP による Se および S の分析結果

剤名称	項目	成分分析	
		Se	S
	単位	mg/kg	wt%
COS 転化触媒	上部	< 1	-
	下部	< 1	-
脱硫吸着剤	未使用品	< 1	0.13
	上部	< 1	26.8
	中部	< 1	0.13
	下部	< 1	0.13
水素化物 吸着剤	未使用品	< 1	0.13
	上部	< 1	0.01
	中部	< 1	0.03
	下部	< 1	0.12
備考	前処理方法: 酸分解		
	Se 分析: ICP 質量分析法 島津製作所 ICPMS-2030		
	Cu,S 分析: ICP 発光分光分析法 島津製作所 ICPS-8100		

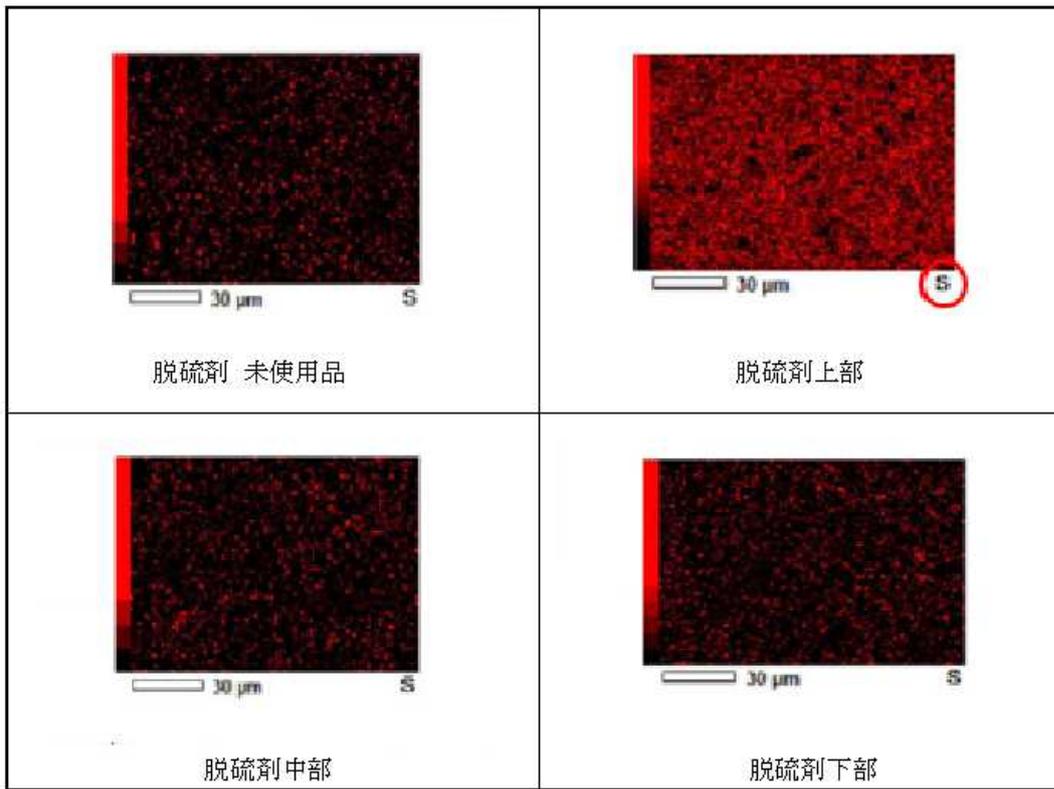


図 3-2-2-81 脱硫吸着剤マッピング

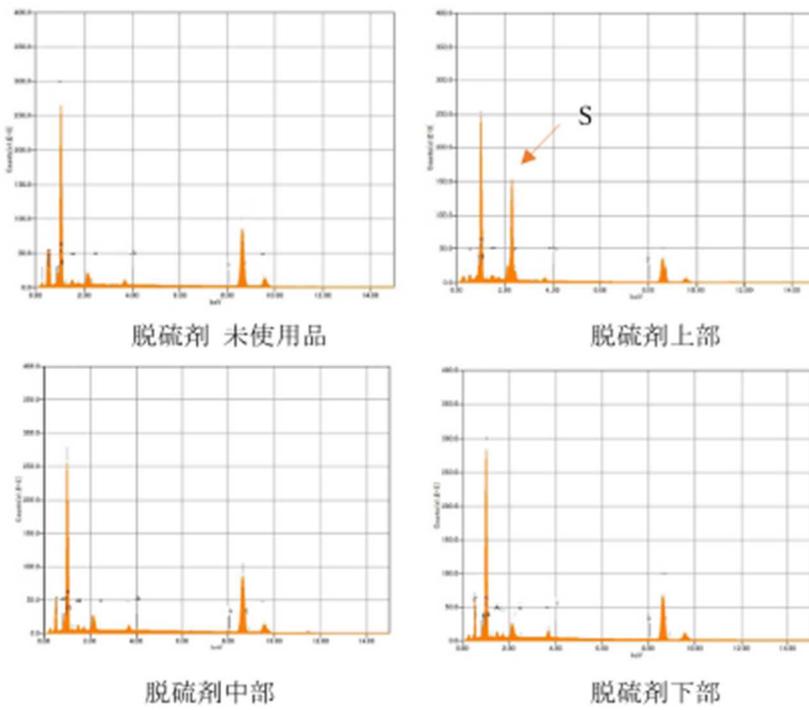


図 3-2-2-82 脱硫吸着剤定性分析

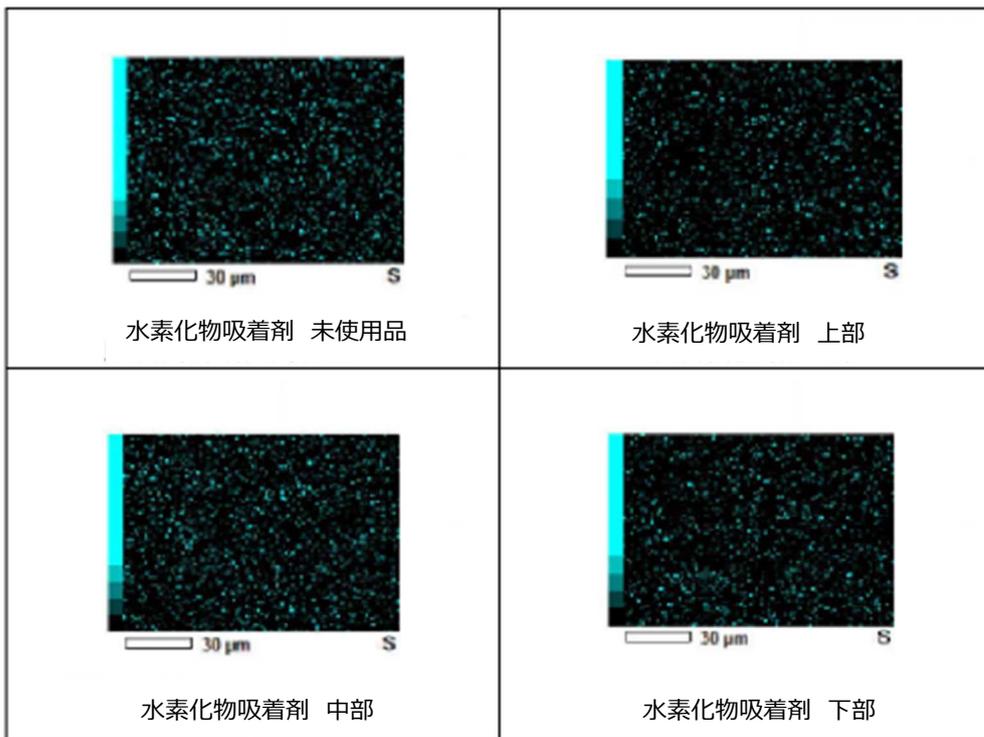


図 3-2-2-83 水素化物吸着剤マッピング

## 4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

### 4-1. 成果の実用化および実現に向けた取組及び見通しについて

#### (1) 成果の実用化および実現に向けた戦略

本プロジェクトにおける実用化とは、「大型化に向けた GTFC を構成する主要な要素技術と、ガス組成の異なる燃料による燃料電池への適用性が確立されるとともに、その成果が【CO<sub>2</sub> 分離・回収型 IGFC 実証事業】に適用されること」を云う。本事業の研究成果は「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」に適用され、2022 年 4 月 18 日より CO<sub>2</sub> 分離回収型 IGFC システムの実現に向けた実証試験を開始している。

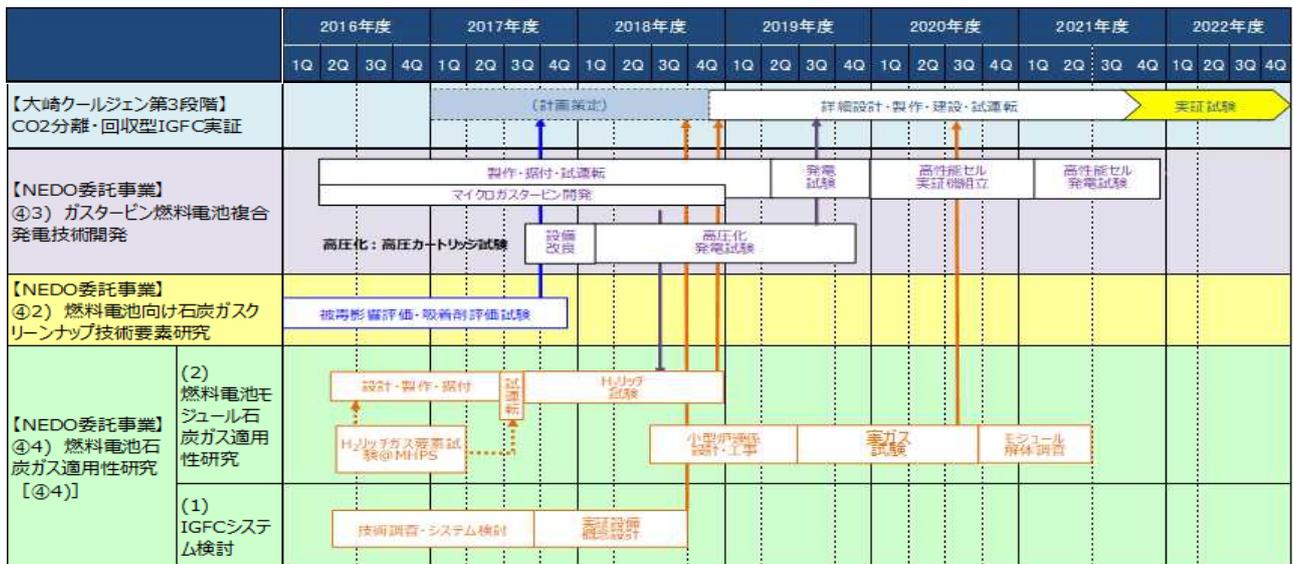


図 4-1-1 基盤技術開発の「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」への反映スケジュール

IGFC の実現に向けては、燃料電池の大容量化・量産化を進める必要がある。それには、低コスト化を見据えた上で燃料電池の高性能化をおこなって行くことが重要であり、燃料電池システムの大型化に向けガスタービン出力も上がることから燃料電池モジュールの更なる高圧化への対応も必要である。このように IGFC 実現の為には、並行して GTFC の大型化に向けた技術確立が必須である。

本事業で得られた成果は 100MW 級 GTFC が技術実証に移行できる段階まで到達しており、「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」と共に、IGFC 実現に向けて技術開発を進めて行くことが戦略となる。

#### (2) 成果の実用化および実現に向けた具体的取組

本事業の技術成果は「石炭ガス化燃料電池複合発電実証」に適用され既に実証試験中であるが、IGFC の実現に向けては燃料電池の低コスト量産化が必要である。本技術成果である要素技術の確立により、MW 級 GTFC の商用化、量産化を進め、SOFC のコスト低減を図り、大型 GTFC の技術確立へ進むことが重要である。

本事業において量産化技術開発を行い、その技術も用いて設立されたセルスタックの製造販売会社である「CECYLLS (セシルス)」が、2020 年 1 月に日本特殊陶業株式会社と三菱パワーシステムズ (現 三菱重工業株式会社) の合併会社として設立され、将来の燃料電池事業における社会へ向けた大きな一歩である。

「ガスタービン燃料電池複合発電技術開発」研究開発項目①(c)高性能セルスタック性能検証に用いられたセルスタックは「CECYLLS（セシルス）」の生産ラインで製造されている。現在は更なる高性能化セルスタックの生産技術開発に取り組んでおり、燃料電池の更なる高性能化と量産技術確立に向けて期待される取組である。

「図 4-1-2」は GTFC 商用化に向けたロードマップである。国内コージェネレーション導入実績の調査を行った結果、MW 級市場の顕在化が期待された。今後、本事業により技術開発された小型 GTFC（MW）の市場投入により、技術の蓄積と燃料電池量産によるコスト削減を進めて行くとしている。

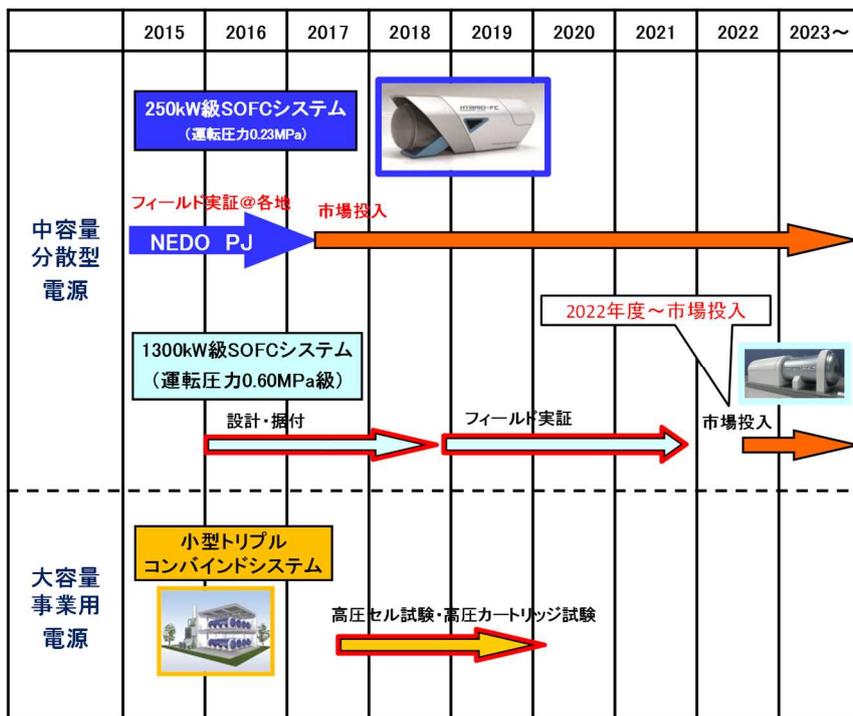


図 4-1-2 GTFC 商用化に向けたロードマップ

### (3) 成果の実用化の見通し

「次世代火力発電における技術ロードマップ」の記載されている通り、GTFC については中小型 GTFC を実証すること、IGFC については CO<sub>2</sub> 分離・回収型 IGFC 実証及び関連する技術開発の成果を活用することによって、2025 年度頃に技術を確立する見込みである。併せて燃料電池の生産技術を強化し低コスト化を進めること、GTFC、IGFC の早期市場投入が可能となる。

### (4) 波及効果

考えられる波及効果を以下に示す。

- ・本事業の成果を CO<sub>2</sub> 分離・回収型 IGFC 実証事業に反映し技術が確立されることで、火力発電においても低炭素社会の実現に貢献できる。
- ・燃料電池コストを低減することで、業務・産業用燃料電池の普及に貢献できる。
- ・本事業で開発された水素リッチガスを用いた燃料電池発電技術を確立することは、将来の水素社会における GTFC の運用範囲を広げることに貢献できる。

# 特許論文等リスト

添付資料

【特許】

## 3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称
1	三菱日立パワーシステムズ(株)	特願 2017-028091	国内	2017/2/17	権利化できず	燃料電池モジュール、これを備えた複合発電システム及び燃料電池モジュールの温度調整方法
2	三菱日立パワーシステムズ(株)	特願 2017-030053	国内	2017/2/21	国内登録済(特許第06932515号)	燃料電池および複合発電システムならびにその運転方法
3	三菱日立パワーシステムズ(株)	特願 2017-033582	国内	2017/2/24	国内登録済(特許第06953146号)	燃料電池モジュール及び燃料電池モジュールを備えた複合発電システム並びにサブモジュールの組み立て方法
4	三菱日立パワーシステムズ(株)	特願 2019-025837	国内	2019/2/15	2件に分割し国内登録済(特許第0695314号、特許第06780044号)	燃料電池サブモジュール、燃料電池モジュール及び複合発電システム並びにサブモジュールの組み立て方法
5	三菱日立パワーシステムズ(株)	特願 2019-032120	PCT	2019/2/25	国内登録済(特許第06940539号)	燃料電池モジュール及び発電システム
6	三菱日立パワーシステムズ(株)	特願 2019-032125	PCT	2019/2/25	国内登録済(特許第06943904号)	燃料電池モジュール、発電システム及び燃料電池モジュールの運転方法
7	三菱日立パワーシステムズ(株)	特願 2019-228112	PCT	2019/12/18	手続き中	加圧空気供給システム、及び、加圧空気供給システムの起動方法
8	三菱日立パワーシステムズ(株)	特願 2021-030237	国内	2021/2/16	国内登録済(特許第07013605号)	管台結露防止用パージシステム

4) (1)燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称
1	電源開発株式会社(株)	特願 2022-067163	国内	2022/4/14	公開 未請求	固体酸化物形燃料電池の運転方法

【論文】

a.国内投稿

3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

番号	発表者	タイトル	発表誌名	査読	発表年月
1	富田 和男、 北川 雄一郎	MHPS における SOFC—マイクロガスター ビンハイブリッドシステムの開発状況	日本ガスタービン学会誌	有	2017/7
2	岸沢 浩	SOFC 燃料電池コージェネレーションについて	JSAE Engine Review (自動車技術会エンジンレ ビュー誌), Vol. 9 No. 1, 2019	有	2019/3
3	樋渡 研一	固体酸化物形燃料電池ハイブリッドシステムの開 発と実用化	ペテロテック, Vol.41 No.9, 2018	無	2019/12
4	岩田 光由	低炭素社会に向けた高効率 SOFC 発電システ ムの取り組み	JEMA 機関紙「電機」 No.811	無	2020/5
5	岸沢 浩	バイオマス活用政策にも対応可能なコージェネ 設備 高効率なハイブリッド発電システムで 低・脱炭素社会の実現を目指す	ジチタイワークス, Vol.10	無	2020/6
6	岩田 光由	低炭素・脱炭素社会に向けた MHPS の SOFC の取り組み	都市環境エネルギー協会誌, Vol.126	無	2020/7
7	岩田 光由	低炭素・脱炭素に向けた三菱パワーの SOFC の 取り組み	FCDIC「燃料電池誌」 2020 年秋号, Vol.20 No.2 p.28	無	2020/10
8	富田和男、西 浦雅則、大澤 弘行、水原昌 弘、山根 司、 眞竹徳久	燃料電池『MEGAMIE』の市場導入状況と今後 の取り組みについて	三菱重工技報, Vol.58 No.3	無	2021/7

b.海外投稿

無し

【外部発表】

(a)学会発表・講演

3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	中山博之、 富田和男、 安藤義昌、 樋渡研一、 西浦雅則、 岸沢浩、大 澤弘行、北 川雄一郎	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	Recent Progress of SOFC-Micro Turbine Combined Cycle System with Tubular Type Cell Stack	2016 Asian SOFC Symposium	2016/9/4
2	富田和男	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	水素社会へ向けた MHPS における 複合発電システムの開発状況と 今後の展開	日本機械学会年次大会	2016/9/12
3	岩田 光由	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	業務産業用燃料電池システムのM の取り組み	平成 29 年度 福岡水素 エネルギー-人材育成センター-技 術者育成セミナー	2017/9/4
4	富田 和男	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	MHPS における SOFC 複合発 電システムの開発状況と今後の展開	ファイナテックス関連団体連 絡協議会	2017/10/26
5	高島 正	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	SOFC-MGT ハイブリッドシステムの市 場導入に向けた取り組み	第 6 回電力エネルギー-未来 技術シンポジウム	2017/11/13
6	富田 和男	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	業務用・産業用固体酸化物形 燃料電池 SOFC-MGT ハイブリ ッドシステムの市場導入に向けた取 組み	地球環境関西フォーラム第 回地球温暖化対策シン ポジウム	2017/11/24
7	樋渡 研一	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	SOFC 複合発電システム開発状 況と今後の展開	火力原子力発電技術協会 中部支部講演会	2017/12/15
8	岸沢浩、高 島正、樋渡 研一、岩田 光由、須藤 隆紀	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	SOFC-MGT ハイブリッドシステム	次世代火力発電 EXPO	2018/2/28 ~3/2
9	樋渡 研一	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	固体酸化物形燃料電池ハイブ リッドシステムの開発と実用化	石油学会 第 61 回年 会	2018/5/22
10	小林 由則	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	定置用燃料電池システムの技術 動向と今後の展開	平成 30 年度 福岡水素 エネルギー-人材育成センター-技 術者育成セミナー	2018/11/5
11	小林 由則	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	燃料電池複合発電による低炭素 社会への貢献	スマートエネルギー Week2019 次世代火 力発電 EXPO	2019/2/28
12	岩田 光由	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	MHPS SOFC system	KESCO-IPPA技術協力 Workshop	2019/9/5
13	富田 和男	三菱日立パワーシステム ズ(株)燃料電池事業室	業務・産業用燃料電池の開発	福岡水素エネルギー戦略 会議 人材育成セミナー	2019/11/28

14	北川 雄一郎	三菱日立パワーシステムズ(株)燃料電池事業室	業務産業用燃料電池・SOFC 市場導入	コーゼネシンプोजウム 2020	2020/2/7
15	岩田 光由	三菱日立パワーシステムズ(株)燃料電池事業室	水素・燃料電池の未来 大型燃料電池の今後の取り組み	日本機械学会 2020 年度年次大会	2019/9/15
16	岩田 光由	三菱日立パワーシステムズ(株)燃料電池事業室	脱炭素に向けた MEGAMIE (SOFC システム) の取り組み	第 119 回 SOFC 研究会	2021/1/29
17	富田 和男	三菱日立パワーシステムズ(株)燃料電池事業室	三菱重工業における業務・産業用燃料電池システムの取り組み 状況と今後の展開	山口県周南市 水素関連産業創出勉強会	2021/11/12

#### 4 ) (1) 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	芳賀 剛	電源開発(株) 若松研究所石炭ガス 利用システム研究 G	J-POWER における IGFC 開発 に向けた取り組みについて	第 4 回 SOFC 技術セミナー	2017/10/17
2	早川 宏	電源開発(株) 若松研究所	低炭素社会に向けた J-POWER 若松研究所の取組み	第 55 回石炭科学会議	2018/10/29
3	鈴木 慎一郎	電源開発(株) 若松研究所石炭ガス 利用システム研究 G	燃料電池モジュールの石炭ガス適 用性研究	第 27 回 SOFC 研究発表 会	2018/12/13
4	作野 慎一	電源開発(株) 若松研究所石炭ガス 利用システム研究 G	燃料電池モジュールの石炭ガス適 用性に関する研究	第 26 回燃料電池シンプ ोजウム	2019/5/23
5	作野 慎一	電源開発(株) 若松研究所エネルギー 利用システム研究 G	Study on coal Syngas Applicability to SOFC Module	16th_International Symposium on Solid Oxide Cells (SOFC-XVI)	2019/11/6
6	作野 慎一	電源開発(株) 若松研究所エネルギー 利用システム研究 G	Study on coal Syngas Applicability to SOFC Module	2019 Fuel Cell Seminar & Energy Exposition	2019/9/9
7	小川 直也	電源開発(株) 若松研究所エネルギー 利用システム研究 G	燃料電池モジュールの石炭ガス適 用性に関する研究	第 28 回 SOFC 研究発表 会	2019/12/12
8	鈴木 慎一郎	電源開発(株) 若松研究所エネルギー 利用システム研究 G	燃料電池モジュールの石炭ガス適 用性に関する研究	第 27 回燃料電池シンプ ोजウム	2020/5/22
9	小川 直也	電源開発(株) 若松研究所エネルギー 利用システム研究 G	燃料電池モジュールの石炭ガス適 用性に関する研究	第 58 回石炭科学会議	2021/10/27
10	鈴木 慎一郎	電源開発(株) 若松研究所エネルギー 利用システム研究 G	燃料電池モジュールの石炭ガス適 用性に関する研究	第 30 回 SOFC 研究発表 会	2021/12/17

## (b)新聞・雑誌等への掲載

## 3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

番号	掲載内容	掲載媒体	発表年月
1	固体酸化物形燃料電池(SOFC)ハイブリッドシステムとマイクロガスタービン(MGT)との組み合わせにより業務・産業用に市場投入	プレスリリース 三菱日立パワーシステムズ (株)HP 掲載	2017/8/9
2	固体酸化物形燃料電池(SOFC)とマイクロガスタービン(MGT)のハイブリッドシステム業務・産業用分散型電源として初受注・着工	プレスリリース 三菱日立パワーシステムズ (株)HP 掲載	2018/1/31
3	業務・産業用として製品化した固体酸化物形燃料電池(SOFC)とマイクロガスタービン(MGT)の組み合わせによる加圧型複合発電システム(ハイブリッドシステム)について、シリーズの名称を「MEGAMIE」に決定	プレスリリース 三菱日立パワーシステムズ (株)HP 掲載	2018/11/8
4	固体酸化物形燃料電池(SOFC)とマイクロガスタービン(MGT)のハイブリッドシステム「MEGAMIE」を安藤ハザマ向けに受注	プレスリリース 三菱日立パワーシステムズ (株)HP 掲載	2019/4/25
5	丸ビルで新型発電稼働	ガスエネルギー新聞	2019/5/20
6	日本特殊陶業と三菱日立パワーシステムズ、燃料電池セルスタックの製造・販売を行う合弁会社の設立・共同運営に関する契約を締結	プレスリリース 三菱日立パワーシステムズ (株)HP 掲載	2019/7/5
7	分散型や熱供給 進化するエネルギー利用の高度化へ	富士山マガジンサービス 月間エネルギーフォーラム	2019/9
8	三菱重工パワー 製品案内 カタログ SOFC ハンドブック	三菱日立パワーシステムズ (株)HP 掲載	2020/2
9	日本特殊陶業と三菱日立パワーシステムズ、燃料電池セルスタックの製造・販売を行う合弁会社「(セシルス)」の設立	プレスリリース 三菱日立パワーシステムズ (株)HP 掲載	2020/2/4
10	HYDROGEN - POWERING A NET ZERO FUTURE	三菱日立パワーシステムズ (株)HP 掲載	2020/3
11	ビール工場排水由来のバイオガスを活用した燃料電池発電の実証事業を開始 - CO2 排出量削減の新技术 実用化に向けた最終試験	プレスリリース 三菱日立パワーシステムズ (株)HP 掲載	2020/8/26
12	欧州向けで海外初の SOFC を受注 (GWI 向け) 水素を柔軟に利用し高効率に電力と熱を供給	プレスリリース 三菱日立パワーシステムズ (株)HP 掲載	2020/10/29
13	世界に、カーボンニュートラルを。茅島みずき in 三菱重工 長崎造船所 <a href="https://www.youtube.com/watch?v=4ejx9sxM4q8">https://www.youtube.com/watch?v=4ejx9sxM4q8</a>	YouTube	2022/1

## 4) (1) 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

番号	掲載内容	掲載媒体	発表年月
1	燃料電池モジュールの石炭ガス適用性に関する研究	電気評論 1月号	2021/1/5

(c)その他

展示会

3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

番号	展示内容	展示会名	展示年月
1	SOFC-MGT ハイブリットシステム@東京ビックサイト展示会	次世代火力発電 Expo	2017/3/1 ~ 3/2
2	SOFC-MGT ハイブリットシステム	スマートエネルギーWeek2018 次世代火力発電 EXPO	2018/2/28 ~ 3/2
3	SOFC-MGT ハイブリットシステム	スマートエネルギーWeek2019 次世代火力発電 EXPO	2019/2/27 ~ 3/1

表彰

3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

番号	受賞者	表彰名	受賞題目	表彰機関	受賞年度
1	三菱日立パワーシステムズ(株)	石油学会 学会賞 [工業的なもの]	固体酸化物形燃料電池 (SOFC) ハイブリットシステムの開発 と実用化	(公社)石油学会	2017 年度
2	三菱日立パワーシステムズ(株)	コージェネ大賞・技術 開発部門・理事長賞	業務産業用燃料電池・SOFC の市場導入	コージェネ財団	2019 年度

# プロジェクト基本計画

P16002

P16003

P10016

P92003

## 「カーボンリサイクル・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

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、火力発電分野においては、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、2016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。また、2021年10月に策定された「第6次エネルギー基本計画」においては、火力発電は再生可能エネルギーの変動性を補う調整力・供給力として柔軟な運転（幅広い負荷変動への対応）が求められることから、負荷変動対応や機動性に優れた火力技術開発等の取組を推進することとしている。

2050年に向けて化石燃料の利用に伴うCO<sub>2</sub>の排出を大幅に削減していくためには、あらゆる技術的な選択肢を追求していく必要があることから、CO<sub>2</sub>を炭素資源（カーボン）と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルを推進することとしており、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」では、カーボンニュートラル社会を実現するための重要分野の1つにカーボンリサイクル技術が位置づけられた。また、「カーボンリサイクル技術ロードマップ」（2019年6月策定、2021年7月改訂）において、カーボンリサイクル技術の確立、普及を目指していくこととしている。

2020年3月に策定された「新国際資源戦略」では、CO<sub>2</sub>排出削減に向け、液体アンモニアの混焼を含めて着実に技術開発等を進めることが必要とされている。

石炭利用に伴って発生するCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじん等への対応や、石炭灰及びスラグの有効利用方策を確立することが大きな課題である。そのため、今後とも石炭を活用し、エネルギー需給安定化に貢献していくためにも、より高度なクリーンコールテクノロジーの開発が必要である。

##### 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 I G C C 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）やCO<sub>2</sub>フリー燃料の利用技術の開発・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に加え、CO<sub>2</sub>を炭素資源と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルを推進する取組や石炭火力発電におけるアンモニア混焼試験が進められている。

また、我が国においては、石炭の排ガスに関して、世界的に見ても非常に厳しい環境基準（環境保全協定値）が定められ、その基準が遵守されている。そのような背景から、脱硫、脱硝、ばいじん処理技術等、高度な環境保全技術が過去から培われており、日本の強みが発揮できる分野のひとつである。一方、石炭利用に伴い排出する石炭灰については、主にセメントの原料として、これまでは有効利用されてきたが、近年セメント生産量は減少傾向にあり、セメント原料に代わる石炭灰の利用方法の確立が喫緊の課題である。

### ③世界の取組状況

気候変動対策のため、2021年11月時点では世界の150ヶ国以上で年限付きのカーボンニュートラル目標が掲げられており、各国でCO<sub>2</sub>排出量を大幅に削減するための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いる。

火力発電のCO<sub>2</sub>排出の削減に向けた高効率化、ゼロエミッション火力発電、再エネ導入時の負荷変動対応に向けた開発等が海外でも進められている。また、火力発電とCCUSの組み合わせによるカーボンニュートラルにも注力する方向であり、火力発電や各種産業等の排ガスからのCO<sub>2</sub>を分離・回収する技術として、高性能の材料等を用いて省エネルギー・低コストを目指す化学吸収法や物理吸着法、膜分離法等の研究開発と実証等が世界各地で進められている。さらに、回収したCO<sub>2</sub>を様々な物質に変換させて有効利用する技術についても、先進的な取組が行われており、CO<sub>2</sub>と水素から基礎化学品や機能性化学品、液体燃料や気体燃料を合成する技術、コンクリート等にCO<sub>2</sub>を効率的に固定化させる技術の開発や実証等が進められている。

### 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、CO<sub>2</sub>フリー燃料の利用及び火力発電所等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。また、LCA的な観点も含めたCO<sub>2</sub>の利用に係るカーボンリサイクル技術開発を一元的に進めることで、火力発電プロセスの更なる効率化を図るとともに、CO<sub>2</sub>排出削減に向けた取り組みの効率化を図る。

石炭の効率的利用、環境対応等を目的として、石炭利用の環境対策に関する調査・技術開発を実施する。これらの取組により、石炭の安定調達性が増し、石炭を安価で安定的に使用することが可能となり、我が国におけるエネルギーセキュリティの向上に資する。

## (2) 研究開発の目標

### ①アウトプット目標

本事業を通じて、発電効率の大幅な向上技術、調整力確保に寄与する負荷変動対応発電技術、CO<sub>2</sub>分離・回収後においても高効率を維持する技術、CO<sub>2</sub>フリー燃料の利用技術、低コストなCO<sub>2</sub>分離・回収技術及びCO<sub>2</sub>有効利用技術(カーボンリサイクル等)により、CO<sub>2</sub>排出の削減に寄与する革新的なカーボンリサイクル技術及び次世代火力発電技術の見通しを得る。また、石炭灰の有効利用率を100%まで向上させるなど、石炭の有効利用技術を確立する。

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、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。また、2040年頃に燃料としての年間アンモニア利用量1,000万トンを実現し、アンモニア35,000円/tを想定した場合において、3,500億円相当の燃料アンモニア市場を創出する。CCUSの実現に向け、CO<sub>2</sub>分離・回収コスト1,000円/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、CO<sub>2</sub>由来のメタンで天然ガスパイプラインの許容圧力変動幅の1割を活用して負荷変動対応に供する場合として、1,300億円相当の天然ガス代替を獲得する。また、負荷変動対応技術を確立することで、電力市場整備の一つとして進められてきた調整力公募市場(短期間での電力需給調整能力(ΔkW 価値)を取引する市場公募)での電力供給機会の更なる創出に寄与し、電力市場の活発化に貢献する。

また、カーボンリサイクルの観点からは、2030年頃に短期的に実現可能な技術(ポリカーボネートなどの化学品、バイオジェットなどの液体燃料、道路ブロックなどのコンクリート製品など)を既存のエネルギー・製品と同等のコスト実現を目指すとともに、2040年以降に実現をめざした需要の多い汎用品(オレフィンやBTXなどの化学品、ガス、液体などの燃料、汎用コンクリート製品など)へ拡大する。

### 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>フリー燃料の利用、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、石炭灰や溶融スラグの有効利用及び削減に関する調査及び技術開発並びに排煙処理技術等の環境対策に関する調査等を実施する。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）により実施するとともに、必要に応じてステージゲート審査を用いる。

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 (1/3, 2/3助成)
- 3) CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証 (1/2助成)
- 4) 信頼性向上、低コスト化 (1/3助成)
- 5) CO<sub>2</sub>分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発 (1/2助成)

#### 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  
(2016～2018年度: 2/3助成、2019～2020年度: 1/2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) 石炭火力の負荷変動対応技術開発
- 7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発
- 8) CO<sub>2</sub>分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発
- 9) 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究

#### 研究開発項目⑤ CO<sub>2</sub>回収型次世代IGCC技術開発 [委託事業]

#### 研究開発項目⑥ カーボンリサイクル・次世代火力推進事業 [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)]

#### 研究開発項目⑧ CO<sub>2</sub>有効利用拠点における技術開発 [委託・助成事業]

- 1) CO<sub>2</sub>有効利用拠点化推進事業 [委託・助成事業]
- 2) 研究拠点におけるCO<sub>2</sub>有効利用技術開発・実証事業 [委託・助成事業]

研究開発項目⑨ CO<sub>2</sub>排出削減・有効利用実用化技術開発 [委託・助成事業]

- 1) 化学品へのCO<sub>2</sub>利用技術開発 [委託・助成事業]
- 2) 液体燃料へのCO<sub>2</sub>利用技術開発 [委託・助成事業]
- 3) コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO<sub>2</sub>利用技術開発 [委託・助成事業]
- 4) 気体燃料へのCO<sub>2</sub>利用技術開発 [委託・助成事業]

研究開発項目⑩ 石炭利用環境対策事業 [委託・助成事業]

- 1) 石炭利用環境対策推進事業 [委託事業]
- 2) 石炭利用技術開発 [助成事業 (2/3助成)]

研究開発項目⑪ アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業 [委託・助成事業]

- 1) 要素研究 [委託事業]
- 2) 実証研究 [助成事業 (1/2助成)]

※1)の実施者を公募した後の、1)から2)への移行の可否は、外部有識者で構成される委員会の審査(ステージゲート審査)を経て決定する。

研究開発項目⑫ CO<sub>2</sub>分離・回収技術の研究開発 [委託事業]

(2021年度までは「CCUS研究開発・実証関連事業」において実施)

- 1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発
- 2) 先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究
- 3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発
- 4) 二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発

研究開発項目⑬ 火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業 [委託・助成事業]

- 1) 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の技術開発・実証研究 [委託・助成事業]
- 2) 石炭火力の負荷変動対応技術開発・実証研究 [委託・助成事業]

## 2. 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スマートコミュニティ・エネルギーシステム部を加える。

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 戸島正剛、PL:大崎クールジェン株式会社 木田一哉

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 園山希、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ンナップ要素研究

PM: NEDO 春山博司、PL: 電源開発株式会社 早川宏

3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

PM: NEDO 福原敦、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 福原敦、PL: 電源開発株式会社 大畑博資

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) 石炭火力の負荷変動対応技術開発

PM: NEDO 野原正寛、PL: 契約毎に設置

7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発

PM: NEDO 天野五輪磨、PL: 国立研究開発法人産業技術総合研究所 坂西欣也

8) CO<sub>2</sub>分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発

PM: NEDO 森匠磨

9) 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究

PM: NEDO 新郷正志、PL: 一般財団法人電力中央研究所 渡辺 和徳

研究開発項目⑤ CO<sub>2</sub>回収型次世代IGCC技術開発

PM: NEDO 青戸冬樹、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 西里友志、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⑧ CO<sub>2</sub>有効利用拠点における技術開発

PM: NEDO 戸島正剛

研究開発項目⑨ CO<sub>2</sub>排出削減・有効利用実用化技術開発

PM: NEDO 荒川純

研究開発項目⑩ 石炭利用環境対策事業

PM: NEDO 菅本比呂志

研究開発項目⑪ アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業

PM: NEDO 園山希

研究開発項目⑫ CO<sub>2</sub>分離・回収技術の研究開発

PM: 選定中

研究開発項目⑬ 火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業

PM: 選定中

## (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。

## 3. 研究開発の実施期間

本事業の実施期間は、2016年度から2026年度までの11年間とする。なお、研究開発項目①及び②は2012年度から2015年度、研究開発項目③は2008年度から2015年度まで経済産業省により実施したが、2016年度からNEDOが実施している。研究開発項目⑫は2018年度から2021年度まで「CCUS研究開発・実証関連事業」により実施したが、2022年度より本事業で実施する。

## 4. 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、⑦～⑨、⑪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い、⑩については事業評価を行う。

評価の時期については、研究開発項目①は、中間評価を2017年度、2020年度及び2023年度に、前倒し事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目②は、中間評価を2018年度、事後評価を2021年度に実施する。研究開発項目④1)は、研究開発項目⑤と統合の上、評価を行う。研究開発項目④2)は、事後評価を2019年度に実施する。研究開発項目④3)、4)は、中間評価を2019年度に、事後評価を2022年度に実施する。研究開発項目④5)は中間評価を2017年度に実施し、研究開発項目④6)は、中間評価を2020年度に、事後評価を2023年度に実施し、研究開発項目④7)は前倒し事後評価を2021年度に実施し、研究開発項目④8)は中間評価を2022年度に、事後評価を2025年度に実施し、研究開発項目④9)は前倒し事後評価を2021年度に実施する。研究開発項目⑤は、中間評価を2017年度、前倒し事後評価を2020年度に実施する。研究開発項目⑥は、調査事業については内容に応じて研究開発項目①から⑤、⑦～⑪の中間評価、事後評価の際に合わせて評価を実施し、共通基盤技術開発については研究開発項目⑨の中間評価、事後評価の際に合わせて評価を実施、先導研究については内容に応じて研究開発項目⑨、⑪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、中間評価を2019年度、事後評価を2022年度に実施する。研究開発項目⑧および研究開発項目⑨1)、2)、3)は、中間評価を2022年度及び2025年度、事後評価を2027年度に実施する。研究開発項目⑨4)は中間評価を2023年度、前倒し事後評価を2026年度

に実施する。研究開発項目⑩は、中間評価を2019年度、2022年度、前倒し事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目⑪は、事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目⑫は、中間評価を2022年度、事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目⑬は、中間評価を2024年度、前倒し事後評価を2026年度に実施する。

## 5. 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、我が国の優れたカーボンリサイクル・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。

#### ④知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトのうち、研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発及び研究開発項目⑥カーボンリサイクル・次世代火力推進事業、研究開発項目⑧CO<sub>2</sub>有効利用拠点における技術開発、研究開発項目⑨CO<sub>2</sub>排出削減・有効利用実用化技術開発、研究開発項目⑩石炭利用環境対策事業及び研究開発項目⑪アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業、研究開発項目⑫CO<sub>2</sub>分離・回収技術の研究開発、研究開発項目⑬火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業は、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

#### ⑤データマネジメントに係る運用

本プロジェクトのうち、研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発(8)、研究開発項目⑥カーボンリサイクル・次世代火力推進事業、研究開発項目⑧CO<sub>2</sub>有効利用拠点における技術開発、研究開発項目⑨CO<sub>2</sub>排出削減・有効利用実用化技術開発、研究開発項目⑩石炭利用環境対策事業及び研究開発項目⑪アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業、研究開発項目⑫CO<sub>2</sub>分離・回収技術の研究開発、研究開発項目⑬火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業のうち2018年度以降に公募を行う事業は、「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針」を適用する。

(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) 委託先等以外の第三者の土地に設置した資産の処分方法

研究開発項目⑧においては委託先等以外の第三者の土地に拠点整備インフラを設置する予定である。第三者の土地に設置した資産であっても、委託先は、委託事業終了後、有償により、NEDOに帰属する資産をNEDOから譲り受けることとなっている（約款第20条の2①）。ただし、以下の要件を満たすものに限り、委託事業内における当該資産の解体撤去を実施できる。

・事業目的達成後に、取得資産を設置した第三者の敷地等の速やかな原状回復を必要とし、かつ、その時点で利活用できない資産（機能が著しく低下している、移設するとその機能を失う等、物理的に使用できない資産）である場合

(5) 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。本事業の実施を通じて、イノベーションの担い手として重要な若手研究員及び女性研究員の育成や中堅・中小・ベンチャー企業等を支援することとする。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2016年1月、基本計画制定。

(2) 2016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) 2016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) 2017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）C

O<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④1)、5)の前倒しの区分を明確化し、④6)、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) 2017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) 2017年6月

研究開発項目④の1) 3. 達成目標に中間目標を設定し、2017年度に中間評価を実施する。

(7) 2018年2月

1. 研究開発の目的・目標・内容の(3)研究開発の内容のうち、研究開発項目①の2)、3)の助成率を変更した。また、研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発8)流動床ガス化燃焼を応用した石炭利用技術開発、9)機動性に優れる広付加帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究の内容を追加した。また、研究開発項目④次世代火力基盤技術開発1)次世代ガス化システム技術開発を、研究開発項目⑤に統合し、研究開発項目⑤の名称を変更した。

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④1)、6)、8)、9)の評価時期を追記・修正した。

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注釈を追記した。

(8) 2018年7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④2)、8)のPMの変更、及び、研究開発項目④5)のPLの変更、研究開発項目④6)のPLの記載変更。別紙 研究開発項目⑥ 1. 研究開発の必要性、2. 具体的研究内容にかかる記載を一部変更した(バイオマスに係る記載の追記)。

(9) 2018年9月

3. 研究開発の実施方式において、研究開発項目①及び研究開発項目④7)、9)のPLの変更、4. 研究開発の実施期間の変更、5. 評価に関する事項の研究開発項目①の中間評価時期及び事後評価時期の変更、研究開発項目④2)の評価時期変更、研究開発項目④5)の事後評価を削除。6. その他の重要事項のデータマネジメントに係る運用に研究開発項目①3)を追記。また、別紙 研究開発項目①について、期間の延長および、2)CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCC実証の最終目標を詳細な記載に変更。別紙 研究開発項目④9)について、目標値を補足。研究開発スケジュール表の修正。

(10) 2019年1月

1. 研究開発の目的・目標・内容の(3)研究開発の内容において、研究開発項目②1)の助成率の変更。5. 評価に係る事項において、研究開発項目⑦の中間評価の追加及び事後評価時期の変更、研究開発項目④8)の前倒し事後評価時期の変更。別紙 研究開発項目④8)の実施期間の変更。別紙 研究開発項目④9)の最終目標を詳細な記載に変更。別紙 研究開発項目⑥の2. 具体的研究内容に燃料多様化に係る記載を追記。別紙 研究開発項目⑦の実施期間の変更及び中間目標の策定、最終目標年度の変更。研究開発スケジュール表の修正。

(11) 2019年7月

和暦から西暦へ表記修正。3. 研究開発の実施方式において、研究開発項目④6)、7)、9)、⑤及び⑦のPMの変更。5. 評価に関する事項において、研究開発項目④3)、4)の中間評価の追加及び研究開発項目④2)、3)、4)の事後評価時期の変更。別紙 研究開発項目④3)、4)について、実施期間の延長、中間目標の策定及び最終目標の修正。研究開発項目⑥の文言修正。研究開発スケジュール表の修正。その他誤記修正。

(12) 2020年2月

改訂： 基本計画の名称変更、基本計画「クリーンコール技術開発」の統合による記載内容の移管、1. 研究開発の目的・目標・内容(1)(2)において内容の追加、1. 研究開発の目的・目標・内容(3)研究開発の内容及び2. 研究開発の実施方式(1)研究開発の実施体制において名称変更と項目の追加、3. 研究開発の実施期間において期間変更及び追加、4. 評価に関する事項において評価時期の変更及び追加、5(1)④知財マネジメントに係る運用⑤データマネジメントに係る運用において対象研究開発項目の追加、研究開発項目④3)4)において中間評価結果反映のため最終目標を追記。研究開発項目⑧⑨の追加、研究開発項目⑩の移管。

(13) 2020年3月

5. その他重要事項(4)委託先等以外の第三者の土地に設置した資産の処分方法、(5)その他において追記。

(14) 2020年7月

2. 研究開発の実施方式(1)研究開発の実施体制 研究開発項目②2) ④3)、4)、8) ⑧、⑨のPMと研究開発項目④8)の名称を変更。別紙 研究開発項目④8)1. 研究開発の必要性、2. 具体的研究内容、3. 達成目標の記載から噴流床ガス化技術に係る記載を追加 別紙 研究開発項目⑤ 2. 具体的研究内容の記載から噴流床ガス化技術(ポリジェネレーション)に係る記載を削除。研究開発スケジュール表の修正。その他誤記修正。

(15) 2020年9月

2. 研究開発の実施方式(1)研究開発の実施体制 研究開発項目①、④6)、⑧のPMを変更、④4)のPLを変更、⑧と⑨のPLに関する記載を削除。

(16) 2020年10月

2. 研究開発の実施方式(1)研究開発の実施体制 研究開発項目①、⑧のPMを変更。

(17) 2021年1月

1. 研究開発の目的・目標・内容(1)(2)において内容の追加、1. 研究開発の目的・目標・内容(3)研究開発の内容及び2. 研究開発の実施方式(1)研究開発の実施体制において項目の追加、3. 研究開発の実施期間において期間変更、4. 評価に関する事項において評価時期の変更及び追加、5(1)④知財マネジメントに係る運用⑤データマネジメントに係る運用において対象研究開発項目の追加、研究開発項目①2)の内容拡充、研究開発項目①4)5)、⑨4)の追加。研究開発項目⑩の追加。

(18) 2021年5月、2. 研究開発の実施方式(1)研究開発実施体制 研究開発項目④3)、4)、6)、7)及び8)、研究開発項目⑦、研究開発項目⑩のPMの変更。

(19) 2021年6月

1. 研究開発の目的・目標・内容(3)研究開発項目⑨3)における項目名の変更。別紙 研究開発項目⑨3)の項目名の変更および内容の拡充。

(20) 2021年7月

5. その他の重要事項(1) 委託事業成果の取扱い④知財マネジメントに係る運用及び⑤データマネジメントに係る運用における対象研究開発項目の変更。

(21) 2022年3月

1. 研究開発の目的・目標・内容(1)(2)において内容の追加、1. 研究開発の目的・目標・内容(3) 研究開発の内容及び2. 研究開発の実施方式(1) 研究開発の実施体制において項目の追加、3. 研究開発の実施期間において期間変更及び記載の追加、4. 評価に関する事項において評価時期の変更及び追加、5(1) ④知財マネジメントに係る運用、⑤データマネジメントに係る運用において対象研究開発項目の追加。別紙において、研究開発項目⑦、研究開発項目⑧、研究開発項目⑨、研究開発項目⑩において期間変更及び研究開発項目⑫、研究開発項目⑬の追加。

(22) 2022年8月

2. 研究開発の実施方式(1) 研究開発の実施体制における部署名の変更。別紙研究開発項目⑥2. の組織名の修正。

## 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、燃焼時の単位発電量当たりの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。

2014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、2014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。

2021年10月「第6次エネルギー基本計画」において、石炭火力は、再生可能エネルギーを最大限導入する中で、調整電源としての役割が期待されるが、電源構成における比率は、安定供給の確保を大前提に低減させる一方で、脱炭素化を見据えつつ、次世代の高効率石炭火力発電技術であるIGCCや石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）などの技術開発等を推進することが盛り込まれている。

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IGFCとCO<sub>2</sub>分離・回収を組み合わ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（1/3助成）

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（1/3、2/3助成）

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。また、CO<sub>2</sub>分離・回収装置を追設した場合のIGCC運用性について実証を行う。更に、CO<sub>2</sub>分離・回収と組み

合わせたCO<sub>2</sub>液化プロセスを構築する。加えて、IGCCの負荷変動に対応したCO<sub>2</sub>分離・回収装置とIGCC設備の運用性について実証を行う。

### 3) CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証(1/2助成)

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。

### 4) 信頼性向上、低コスト化(1/3助成)

酸素吹IGCCシステムの早期商用化を実現すべく、設備信頼性の向上及び経済性の改善に係る実証を行う。

### 5) CO<sub>2</sub>分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発(1/2助成)

CO<sub>2</sub>分離・回収型IGCCシステム及びIGFCシステムのCO<sub>2</sub>分離・回収設備の負荷変動に対応すべく、CO<sub>2</sub>分離・回収負荷変動対応ガスタービンの環境性能、安定性、信頼性に係る要素技術開発を実施する。

## 3. 達成目標

### [実施期間]

- 1) 酸素吹IGCC実証：2012年度～2018年度(うち2012年度～2015年度は経済産業省において実施)
- 2) CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCC実証：2016年度～2022年度
- 3) CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証：2018年度～2022年度
- 4) 信頼性向上、低コスト化：2021年度～2022年度
- 5) CO<sub>2</sub>分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発：2021年度～2025年度

### [中間目標(2017年度)]

#### 1) 酸素吹IGCC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2,000～3,000t/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IGCC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IGCC実証

CO<sub>2</sub>分離・回収設備の詳細設計を完了する。

### [中間目標(2020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。商用化に向け、実用化時期や日本への供給可能性も考慮に入れつつ、性能と経済性を評価する。

- (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。また、海外普及を目的としたマイルストーンを検討する。

## 2) CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹 I G C C 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。これを実現するために、実証機プラントにおいて、CO<sub>2</sub>分離・回収にかかるエネルギー原単位「0.90 GJ/t-CO<sub>2</sub>（電気エネルギー換算）」を発電効率に係る性能として確認する。

- (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 I G C C 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 I G C C 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、I G C C 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。また、生成ガスの全量を CO<sub>2</sub>分離した場合の I G C C 運転との相互影響やガスタービン性能についても検証する。

- (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。また、実用化・事業化に向けたマイルストーンを検討する。

(e) IGCCプラント運用性：

CO<sub>2</sub>分離・回収装置を追設した場合のIGCC運転への影響を確認し、運用性を検証する。

3) CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証

CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証設備の詳細設計を完了する。また、機器製作に着手する。

[最終目標（2022年度）]

2) CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCC実証

CO<sub>2</sub>液化プロセス開発：CO<sub>2</sub>分離・回収型IGCCとCO<sub>2</sub>液化を組み合わせた場合の最適プロセスを構築する。

CO<sub>2</sub>分離・回収負荷変動対応IGCC運用性向上：IGCCの負荷変動に伴うCO<sub>2</sub>分離・回収設備の追従性を確認し、運用性を検証する。

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。

4) 信頼性向上、低コスト化

信頼性向上により5,000時間以上の長期運転の達成、また経済性向上により早期商用化の見通しを得る。

[中間目標（2023年度）]

5) CO<sub>2</sub>分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発

水素濃度の変動に対応した燃焼試験を開始する。

[最終目標（2025年度）]

5) CO<sub>2</sub>分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発

CO<sub>2</sub>分離・回収の負荷変動に伴う、経時的な水素濃度変化に対応したガスタービン燃焼技術を確立する。

## 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：2012年度～2020年度（うち2012年度～2015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）：2012年度～2017年度（うち2012年度～2015年度は経済産業省において実施）

### 1. 研究開発の必要性

2008年3月に閣議決定された「Cool Earth—エネルギー革新技術計画」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、2011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（2018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（2020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（2017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] 2008年度～2016年度（うち2008年度～2015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（2016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] 2015年度～2018年度（うち2015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（2014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（2017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（2018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。

2018年度以降については研究開発項目⑤CO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCC技術開発と統合して、新名称 研究開発項目⑤CO<sub>2</sub>回収型次世代IGCC技術開発とする。

#### 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] 2015年度～2017年度（うち2015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、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术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（2017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] 2016年度～2021年度

#### 1. 研究開発の必要性

2015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、中小型GTFCの技術実証に活用する。

#### 3. 達成目標

[中間目標(2019年度)]

中小型GTFC(10万kW)の要素技術を開発する。

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

[最終目標(2021年度)]

中小型GTFC(10万kW)の要素技術を確立する。

- ・燃料電池の高性能化による中小型GTFCシステムの最適化を行う。
- ・小型GTFC(出力1,000kW級)において、57%LHV(低位発熱量基準)の発電効率(送電端)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」

### 4) 燃料電池石炭ガス適用性研究

[実施期間] 2016年度～2021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て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

(1) I G F Cシステムの検討

[最終目標 (2019年度) ]

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

[中間目標 (2019年度) ]

H<sub>2</sub>リッチガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの基本性能を確認するとともに、発電性能を最適化するための運用性を確立する。また、石炭ガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの基本性能を確認する。

[最終目標 (2021年度) ]

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。また、石炭ガス適用時の燃料電池出力変化率を天然ガスと同等の1%/min程度とする石炭ガス化炉連係システムを構築する。

## 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] 2015年度～2017年度（うち2015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（2014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（2017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（2020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。

2017年度の間評価で、中間目標は達成したものの「データ解釈の精密化と実用的な設計提案の立案についてより深く検討する」ことが求められたことから、研究開発体制を見直す必要があると考えた。従って2017年度で本研究を中止し、研究開発の内容を見直し、ラボ試験を行いデータを蓄積し精度向上を図ると共に、実用的な設計立案に向け、実機設計技術の確立を目指した要素研究を「研究開発項目④8）流動床ガス化燃焼技術を応用した石炭利用技術開発」で実施する。

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 6) 石炭火力の負荷変動対応技術開発

[実施期間] 2017年度～2022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。

また、2019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、石炭は「現状において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評価されているが、再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、適切に出力調整を行う必要性が高まると見込まれる」とされている。さらに、2021年10月に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」において、今後、石炭火力は、電源構成における比率は、安定供給の確保を大前提に低減とされている一方で、「再生可能エネルギーを最大限導入する中で、調整電源としての役割が期待される」とされている。

今後とりわけ自然変動電源（太陽光・風力）の導入が拡大する中で、電力の需給バランスを維持し周波数を安定化するために、火力発電等による調整力の一層の確保と信頼性・運用性の向上が求められている。

そこで本事業では、石炭火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるための先進的な技術開発を実施する。そのことにより、日本の石炭火力発電プラントの競争力向上にも寄与する。

#### 2. 具体的研究内容

負荷変動対応に伴う事故リスクと保守コスト低減に必要な故障予知・寿命予測等の保守技術および石炭火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるための先進的な技術開発を実施する。

#### 3. 達成目標

[中間目標（2020年度）]

長期保守契約（L T S A）等に寄与できる各種モニタリング・センシング・解析等の要素技術を確立する。

[最終目標（2022年度）]

負荷変動対応に伴う事故リスクと保守コスト低減に必要な故障予知・寿命予測等の保守技術および石炭火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるための先進的な技術の見通しを得る。

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発

[実施期間] 2017年度～2021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CCU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 (2021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④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 8) CO<sub>2</sub>分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発

[実施期間] 2020年度～2024年度

#### 1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画において、石炭火力は、安定供給性と経済性に優れたエネルギー源として評価されているものの、温室効果ガスの排出量が多いという問題があるため、脱炭素化を見据えた高効率化が望まれている。

石炭火力からのCO<sub>2</sub>排出抑制技術としては、CO<sub>2</sub>の分離・回収技術があるが、エネルギー損失が大きいことから、発電システムとしてCO<sub>2</sub>を分離・回収できるガス化技術を適用した技術が有望視されている。また、この技術は、バイオマスや炭素系廃棄物等を燃料として発電することによるCO<sub>2</sub>排出削減や有価な生産物（水素や化学品等）の製造に応用できる技術として期待されている。

本事業ではガス化技術を適用して、燃料を多様化するとともに、有価な生産物を併産することで、CO<sub>2</sub>分離・回収コストの低減を目指したCO<sub>2</sub>分離・回収型ポリジェネレーションシステムを構築する火力発電設備設計技術の確立に向けた技術開発を実施する。

#### 2. 具体的研究内容

CO<sub>2</sub>分離・回収型ポリジェネレーションシステムを構築可能な技術として、流動床ガス化燃焼技術と噴流床ガス化技術がある。

##### (1) 流動床ガス化燃焼技術の適用

流動床ガス化燃焼技術は、流動床技術をベースとして、空気燃焼塔、揮発分（可燃性ガス）反応塔、石炭反応塔（ガス化）で構成され、流動材（酸素キャリア）を媒介として空気燃焼塔で流動材を酸化し、酸化された流動材を揮発分反応塔、石炭反応塔に供給し、酸化された流動材の酸素を用いて石炭をガス化し、発生した可燃性ガスを燃焼させるシステムで、窒素が揮発分反応塔や石炭反応塔に同伴されないことから、石炭は燃焼後、CO<sub>2</sub>、水蒸気、ばいじんとなる。煤塵を集塵機で捕集し、ガス温度を下げることで水蒸気を凝縮するとCO<sub>2</sub>ガスのみが分離・回収できる。

本技術は中小規模（100MW級）の発電プラントにも適用でき、多様な燃料（低品位炭、バイオマス等）に活用できる。また、水素反応器を追加することにより、水素併産が期待できる。また、別置きCO<sub>2</sub>分離・回収装置や空気分離装置が不要であることから、エネルギー損失がないCO<sub>2</sub>分離・回収および水素製造が可能となる。

具体的研究内容としては、水素併産に最適な流動材の選定およびシステム開発、プラント構成の最適化を実施し、流動床ガス化燃焼を適用した火力発電設備設計技術確立のための研究開発を実施する。例えば、流動材を利用した水素製造技術の最適化、バイオマス燃焼の適用性、長期運転における課題検討などを実施する。

##### (2) 噴流床ガス化技術の適用

酸素吹き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から、熱分解の一部をガスタービン排熱

等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、送電端効率の向上が可能となる。このような $O_2/C$   
 $O_2/H_2O$ 吹き噴流床ガス化技術をベースとし、燃料として石炭だけでなく炭素系廃棄物等を利用することで $CO_2$ 排出量を削減し、化学品を併産することで $CO_2$ 分離・回収コストの低減が期待できる。

具体的研究内容としては、炭素系廃棄物燃焼の適用性検証、ガス化ガスからの化学合成技術の選定、システム構成の最適化を実施し、噴流床ガス化技術を適用した火力発電設備設計技術確立のための研究開発を実施する。

### 3. 達成目標

[中間目標（2022年度）]

$CO_2$ 分離・回収型ポリジェネレーションシステムの実証設備設計に必要な要素技術の確立に目途をつける。

[最終目標（2024年度）]

$CO_2$ 分離・回収型ポリジェネレーションシステムにより分離・回収コスト1,000円台/t- $CO_2$ を見通せる火力発電設備の設計技術確立および経済性を評価する。

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 9) 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究

[実施期間] 2018年度～2021年度

#### 1. 研究開発の必要性

我が国では、2050年に温室効果ガス80%削減の目標が掲げられており、その達成に向けた手段の一つとして、再生可能エネルギー電源（以下、再エネ電源）の増加が見込まれている。2015年7月に公表された、長期エネルギー需給見通しにおいて示された2030年度の電源構成比では、太陽光発電が7%の発電電力量を占めることになる。太陽光発電の利用率を平均の13%とすると、約6400万kWの設備容量を必要とし、これは国内事業用の全発電設備容量の1/4程度に相当する。一方で、普及の拡大が予測される太陽光発電や風力発電の出力は天候に大きく影響を受けるため、電力の安定供給を考えた場合、系統安定化が必要不可欠である。

火力機は、大量に導入される再エネ電源に対応して、需給調整や周波数調整など重要な役割を果たしている。例えば、太陽光発電の日中に生じる急激な天候変動等による大幅な出力変動に対応するには、ガスタービン複合発電（以下、GTCC）を用いることが有望な手段の一つであるが、現状の性能では起動時間が長い、出力変化速度が遅い、最低出力が高い等の課題がある。

そこで本研究開発では、再生可能エネルギー電源の大量導入時の電力安定供給とCO<sub>2</sub>排出量削減の両立を狙い、既存の火力発電設備へのレトロフィットやリプレース向けに定格時の効率を維持したうえで、機動力と再エネ出力不調時のバックアップ電源の両機能を具備した、機動性に優れる広負荷帯高効率GTCCを開発するため、中核機器であるガスタービン（以下、GT）の負荷変動対応に係る要素技術を開発し、実機に組み込める目処を得ることを目的にする。

#### 2. 具体的研究内容

急速起動・出力変動時のGTCCの安定運転の実現に向け、GTの数値解析技術、材料技術、燃焼技術、制御技術、冷却・シール技術などの要素技術開発を行う。具体的には、試験設備を用いて、燃焼器の急速起動・燃焼負荷変動・ターンダウン等の試験、軽量化したタービンロータの設計と翼の試作、クリアランスや冷却・シール空気の能動制御機構の設計等を行い、実証に進める目処を得る。

並行して、発電事業者にとって重要となる設備信頼性の確保に向けて、合理的な設備保守技術の開発研究に取り組むとともに、実機レトロフィットによる機器実証の準備を行う。

表 先行研究で設定されたGTCCとしての目標性能

	起動時間 (ホットスタート)	出力変化速度	1/2負荷における定格からの 効率低下(相対値)	最低出力(一軸式)
開発目標	10分	20%/分	10%	10%
(参考) 現状性能	60分	5%/分	15%	45%程度

### 3. 達成目標

[最終目標（2021年度）]

- 先行研究で設定した目標性能（上表）を実現する目処を得るために、実規模の燃焼器を設計・試作し、単缶実圧燃焼試験により、無負荷から定格まで5分で到達すること、最低負荷条件においても安定燃焼が可能であることを確認する。
- 急速起動、出力変化速度向上、最低負荷引き下げ、部分負荷時の効率低下抑制を含む、GTCCシステムとしての運転制御技術とGT後流（HRSG－蒸気タービン側）の成立性・性能評価、急速起動に寄与する動翼・ロータの軽量化については、実プラントの設計に反映できる目処を得る。
- 合理的な設備運用保守を行うために、従来の考え方からの違いを整理する。
- 対象GTCCと他の調整力電源（揚水発電、蓄電池など）の経済性を比較評価し、事業として成立するための課題を整理する。
- 既存設備のレトロフィットによる実証研究計画を立案し、実証試験の仕様を明らかにする。

## 研究開発項目⑤ 「CO<sub>2</sub>回収型次世代IGCC技術開発」

[実施期間] 2015年度～2020年度（うち2015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（2014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。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、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

本技術開発においてはCO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCCの開発、水蒸気を添加した次世代ガス化システム及び両技術の相乗効果確認を実施する。とりわけ相乗効果については、既存のIGCCへ両要素技術の適用性についても効果を検証する。クローズドIGCC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。また、次世代ガス化システムは、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に向けて、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ことから、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。CO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCCの実現に向けては、2008年度から2014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。

次世代ガス化システムの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 I G C C 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 I G C C 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) I G C C 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 I G C C 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。

また、両技術の相乗効果確認及び既存の I G C C へ適用した場合の効果を検証する。

### 3. 達成目標

[中間目標 (2017年度)]

CO<sub>2</sub>回収型クローズド I G C C については、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。

次世代ガス化システムについては、既存の I G C C (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 (2020年度)]

CO<sub>2</sub>回収型クローズド I G C C については、2019年度までに送電端効率42% (高位発熱量基準) を見通すための要素技術を確立する。

次世代ガス化システムについては、2018年度までに既存の I G C C (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。

両技術の相乗効果として、2020年度までにCO<sub>2</sub>回収型クローズド I G C C の目標効率から更に0.5ポイント程度の向上の見通しを得る。

## 研究開発項目⑥ 「カーボンリサイクル・次世代火力推進事業」

[実施期間] 2016年度～2024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や再生可能エネルギーの利用拡大、並びにカーボンリサイクルの推進が重要である。これらの推進を実現するには中長期的な研究開発も重要であるため、革新的技術の先導研究や調査が必要となる。

### 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、国内外の火力発電技術分野およびカーボンリサイクルにおける最新技術の普及可能性、技術開発動向、産業間連携等の調査や、新規技術開発シーズ発掘のための調査を実施する。また、IEA/ICSC (International Centre for Sustainable Carbon)、IEA/FBC (Fluidized Bed Combustion)、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、低コスト高効率次世代火力発電システム実現に向けた検討や次世代火力発電における燃料多様化（バイオマス、アンモニア等）のための調査および先導研究を進める。また、カーボンリサイクルにおいては、要素技術検討のための共通基盤技術開発（CO<sub>2</sub>還元、炭酸塩化等）を進める。

### 3. 達成目標

[最終目標（2024年度）]

火力発電技術分野において、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。カーボンリサイクル分野において、先導研究や調査の成果を俯瞰して、関連技術の経済性や導入可能性、CO<sub>2</sub>削減効果に関する基礎的情報や課題を整理する。

## 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] 2017年度～2022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

[中間目標（2019年度）]

長時間クリープ疲労試験、材料データベースの拡充については、各種データの取得を行い、2021年度末までの試験計画を策定する。

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については、技術確立の見通しを得る。

[最終目標（2022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。

## 研究開発項目⑧「CO<sub>2</sub>有効利用拠点における技術開発」 [委託・助成事業]

[実施期間] 2020年度～2026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が、これら石炭火力発電ではCO<sub>2</sub>排出量が比較的多い課題がある。このような石炭火力を中心とした産業部門から生成するCO<sub>2</sub>を削減するため、経済産業省において策定された「カーボンリサイクル技術ロードマップ」（2019年6月策定、2021年7月改訂）において、CO<sub>2</sub>を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化や人工光合成、メタネーションによる素材や燃料への利用等とともに、大気中へのCO<sub>2</sub>排出を抑制していく方針が示された。

2019年9月に開催されたカーボンリサイクル産学官国際会議において、経済産業省より、カーボンリサイクル3Cイニシアティブ、すなわち、3つのCのアクションとして、①相互交流の推進（"C"aravan）、②実証研究拠点の整備（"C"enter of Research）、③国際共同研究の推進（"C"ollaboration）に取り組むことが示された。

カーボンリサイクル技術の開発を効率的に進めるためには、CO<sub>2</sub>の分離・回収が行われている場所において、カーボンリサイクル技術開発を重点的に進める必要がある。

### 2. 具体的研究内容

#### 1) CO<sub>2</sub>有効利用拠点化推進事業

CO<sub>2</sub>が得られる広島県大崎上島を研究拠点に、複数の企業や大学等が要素技術開発および実証試験等を行うための拠点化に向けた検討および整備を行い、拠点の運営業務、要素技術開発および実証試験の総括的な評価等を行う。

#### 2) 研究拠点におけるCO<sub>2</sub>有効利用技術開発・実証事業

2030年の実用化に向け広島県大崎上島の研究拠点において、CO<sub>2</sub>有効利用に係る要素技術開発および実証試験を実施する。

### 3. 達成目標

[中間目標（2022年）]

複数の企業や大学等が要素技術開発および実証試験等を行うための拠点化に向けた検討および整備を行う。また、CO<sub>2</sub>有効利用に係る要素技術開発を行い、実現可能性を検討し、拠点候補地で行うべき事業を選定する。

[中間目標（2025年）]

当該拠点化に向けた追加整備を必要に応じて行う。また、CO<sub>2</sub>有効利用に係る要素技術開発や実証試験を行い、実施済の要素技術開発等についてCO<sub>2</sub>有効利用技術の経済性、CO<sub>2</sub>削減効果等を評価する。

[最終目標（2026年度）]

CO<sub>2</sub>有効利用に係る要素技術開発や実証試験を行い、2026年度まで実施した要素技術開発等についてCO<sub>2</sub>有効利用技術の経済性、CO<sub>2</sub>削減効果等を評価する。

## 研究開発項目⑨ 「CO<sub>2</sub>排出削減・有効利用実用化技術開発」 [委託・助成事業]

### 1) 化学品へのCO<sub>2</sub>利用技術開発

[実施期間] 2020年度～2026年度

#### 1. 研究開発の必要性

火力発電や各種工場で排出される二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を資源として捉え、回収し、有効利用するカーボンリサイクル技術の開発は、気候変動対策の一つとして重要なものと考えられている。経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(2019年6月策定、2021年7月改訂)では、化学品や燃料(液体や気体燃料)、鉱物(コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など)などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める方向性が示された。また、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においてカーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーに位置づけられた。

化学品へのCO<sub>2</sub>利用技術については、既存の化石燃料由来化学品に代替可能でありCO<sub>2</sub>削減・CO<sub>2</sub>固定化に繋がること、高付加価値品製造に利用可能であること、新規技術導入による効率向上やコスト低減の可能性があること等から、カーボンリサイクル技術として実現への期待は大きい。一方で、現状では基礎研究レベルに留まる研究も多く、今後重点的に技術開発に取り組むべき分野である。

#### 2. 具体的研究内容

CO<sub>2</sub>を原料とした化学品の合成において、CO<sub>2</sub>と水素あるいは合成ガスから一段で直接オレフィン合成する技術や、CO<sub>2</sub>と水素あるいは合成ガスからBTX(ベンゼン・トルエン・キシレン)等を製造する技術の開発、CO<sub>2</sub>分離・回収技術とメタノール合成技術とを一体化させたシステムの技術の開発等が必要である。これらについて高効率な製造技術の開発や、全体システムの最適化を行い、適用条件の明確化や事業性の検討を行う。

#### 3. 達成目標

[中間目標(2022年)]

CO<sub>2</sub>を原料とした化学品合成の各技術について、要素技術開発および全体システムの構築を行う。

[中間目標(2025年度)]

CO<sub>2</sub>を原料とした化学品合成の各技術について技術開発もしくは実証研究を実施し、全体システムを最適化するとともに、プロセス全体のCO<sub>2</sub>削減効果および経済性評価を実施する。

[最終目標(2026年度)]

CO<sub>2</sub>の排出源や製品の用途等に応じた適用技術の成果の整理を行い、化学品に関するカーボンリサイクル技術の実用化の見通しを得る。

## 2) 液体燃料へのCO<sub>2</sub>利用技術開発

[実施期間] 2020年度～2026年度

### 1. 研究開発の必要性

火力発電や各種工場で排出される二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を資源として捉え、回収し、有効利用するカーボンリサイクル技術の開発は、気候変動対策の一つとして重要なものと考えられている。経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」（2019年6月策定、2021年7月改訂）では、化学品や燃料（液体や気体燃料）、鉱物（コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など）などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める方向性が示された。また、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においてカーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーに位置づけられた。

CO<sub>2</sub>由来の液体燃料については、既存の石油サプライチェーンを活用でき液体燃料の低炭素化を促進する技術であることから、カーボンリサイクル技術としての実現への期待は大きい。一方で、現状では生産効率やコストなどの面で課題が大きいことから、普及に向けて技術開発に取り組む必要がある。

### 2. 具体的研究内容

CO<sub>2</sub>を原料とした既存の液体化石燃料（ガソリン、軽油等）の代替品となり得る液体燃料（微細藻類由来のバイオ燃料を除く）製造に関するF T合成やその他合成反応など製造プロセスの改善などを通じ、CO<sub>2</sub>を有効利用しつつ、その排出削減を目指す技術開発を行う。

### 3. 達成目標

[中間目標（2022年）]

CO<sub>2</sub>を原料とした液体燃料合成の各技術について、要素技術開発および全体システムの構築を行う。

[中間目標（2025年度）]

CO<sub>2</sub>を原料とした液体燃料合成の各技術について技術開発もしくは実証研究を実施し、全体システムを最適化するとともに、プロセス全体のCO<sub>2</sub>削減効果および経済性評価を実施する。

[最終目標（2026年度）]

CO<sub>2</sub>の排出源や製品の用途等に応じた適用技術の成果の整理を行い、液体燃料に関するカーボンリサイクル技術の実用化の見通しを得る。

### 3) コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO<sub>2</sub>利用技術開発

[実施期間] 2020年度～2026年度

#### 1. 研究開発の必要性

火力発電や各種工場で排出される二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を資源として捉え、回収し、有効利用するカーボンリサイクル技術の開発は、気候変動対策の一つとして重要なものと考えられている。経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(2019年6月策定、2021年7月改訂)では、化学品や燃料(液体や気体燃料)、鉱物(コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など)などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める方向性が示された。また、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においてカーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーに位置づけられた。

コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO<sub>2</sub>利用については、CO<sub>2</sub>固定化ポテンシャルが高いこと、生成物が安定していること、土壌改質などへの適用も見込めることなどから、カーボンリサイクル技術としての実現への期待は大きく、早期の社会実装が望まれる分野である。

#### 2. 具体的研究内容

鉄鋼スラグ、廃コンクリート、石炭灰等の産業副産物、廃鉱物、海水(かん水)等からの有効成分(CaやMgの化合物)の分離や微粉化等の前処理の省エネ化、湿式プロセスにおける省エネ化、安価な骨材や混和材等の開発および炭素・炭化物の生成技術などの要素技術を開発する。また、CO<sub>2</sub>発生源から製造・供給までの一貫システム構築・プロセスの最適化、用途拡大と経済性の検討を行い事業性について検討する。

#### 3. 達成目標

[中間目標(2022年)]

コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへの各CO<sub>2</sub>利用技術について、要素技術開発および全体システムの構築を行う。

[中間目標(2025年度)]

コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへの各CO<sub>2</sub>利用技術について技術開発もしくは実証研究を実施し、全体システムを最適化するとともに、プロセス全体のCO<sub>2</sub>削減効果および経済性評価を実施する。

[最終目標(2026年度)]

CO<sub>2</sub>の排出源や製品の用途等に応じた適用技術の成果の整理を行い、コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などに関するカーボンリサイクル技術の実用化の見通しを得る。

#### 4) 気体燃料へのCO<sub>2</sub>利用技術開発

[実施期間] 2021年度～2026年度

##### 1. 研究開発の必要性

火力発電や各種工場で排出される二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を資源として捉え、回収し、有効利用するカーボンリサイクル技術の開発は、気候変動対策の一つとして重要なものと考えられている。経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(2019年6月策定、2021年7月改訂)では、化学品や燃料(液体や気体燃料)、鉱物(コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など)などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める方向性が示された。また、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においてカーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーに位置づけられた。

気体燃料へのCO<sub>2</sub>利用技術については、既存の化石燃料を代替可能であり既存燃料市場へ適応した場合、大規模なCO<sub>2</sub>削減を実現する可能性を持つことや、既存のインフラを活用可能な点から技術確立後のCO<sub>2</sub>削減効果の波及のしやすさが大きく期待される等、カーボンリサイクル技術として実現への期待は大きい。一方で、現状では基礎研究レベルに留まる研究も多く、今後重点的に技術開発に取り組むべき分野である。

##### 2. 具体的研究内容

CO<sub>2</sub>を原料とした気体燃料製造技術においては、触媒長寿命化や活性マネージメント、熱マネージメント、スケールアップ検討、電解技術等を活用した基盤技術等の開発が必要である。これらについて高効率な製造技術の開発や全体システムの最適化、またそれらを通じた低コスト化検討等を行う。

##### 3. 達成目標

[中間目標(2023年)]

CO<sub>2</sub>を原料とした気体燃料製造の各技術について、要素技術開発および全体システムの構築を行う。

[最終目標(2026年度)]

CO<sub>2</sub>の排出源や製品の用途等に応じた適用技術の成果の整理を行い、気体燃料に関するカーボンリサイクル技術の実用化の見通しを得る。

## 研究開発項目⑩ 「石炭利用環境対策事業」

[実施期間] 2016年度～2025年度

### 1. 研究開発の必要性

石炭は、経済性、供給安定性に優れた重要なエネルギー資源であり、「第6次エネルギー基本計画」においては、再生可能エネルギーを最大限導入する中で、調整電源としての役割が期待されている。一方、石炭利用に伴い発生するCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじん等への対策や、石炭灰やスラグの有効利用方策を確立することが喫緊の課題である。

### 2. 具体的研究内容

石炭利用に伴い発生する環境影響の低減等に貢献する技術の開発を行う。

#### 1) 石炭利用環境対策推進事業

石炭利用時に必要な環境対策に関わる調査を実施する。また、今後のCCT開発を効率的に支援するコールバンクの拡充及び石炭等の発熱性に係る調査・技術開発を行う。

石炭灰の発生量や有効利用に関する実態調査等を行う。具体的には、国内石炭灰排出量・利用量を把握するとともに、海外の石炭灰利用技術及び利用状況等を調査する。また、石炭等の燃焼灰利用及び削減に係る技術開発を行う。

さらに、石炭ガス化溶融スラグ有効利用技術を開発し、工業製品として規格化することにより、スラグ製品として新しい販路を開拓し、石炭等の燃焼灰有効利用の用途を広げる。

#### 2) 石炭利用技術開発

石炭等の燃焼灰の利用用途拡大に関する技術開発を行う。

セメントを使用しないフライアッシュコンクリート製造技術の開発を実施する。加えて、低品位フライアッシュの硬化体原材料としての適用範囲を把握し、有望視される用途（土木分野、建築分野、環境分野等）に適した硬化体製造技術を確立する。

石炭ガス化溶融スラグを利用したコンクリート構造物を製造し、強度、組成、耐久性などに関する評価試験を実施し、信頼性・性能の確認を行う。また、コンクリートを使用する際のガイドラインとなる設計・施行指針を作成する。

### 3. 達成目標

[中間目標（2019年度）]

#### 1) 石炭利用環境対策推進事業

石炭利用環境対策に関わる調査、コールバンクの拡充及び石炭等の発熱性を把握することにより、石炭の有効利用技術の確立に向けた知見を得る。

石炭等の燃焼灰の有効利用、及び削減に寄与する技術の確立に向けた知見を得る。

また、新たな石炭ガス化溶融スラグ有効利用技術を開発し、工業製品としての規格化の見通しを得る。

石炭の有効利用に資する国内石炭灰排出量・利用量等の共通基盤データをとりまとめる。

#### 2) 石炭利用技術開発

石炭等の燃焼灰の利用拡大技術として、セメントを使用しないフライアッシュコンクリート製造技術を確立し、製品化に向けた用途を提案する。

[中間目標（2022年度）]

1) 石炭利用環境対策推進事業

石炭等の発熱性を把握すると共に、石炭管理の指針に資する知見を得る。石炭等の燃焼灰の有効利用、削減及び用途拡大に寄与する技術の確立に向けた知見を得る。

2) 石炭利用技術開発

石炭等の燃焼灰の利用拡大技術として、セメントを使用しないコンクリート製造技術を確認、製品性能の見通しを得る。また、石炭ガス化溶融スラグを使用したコンクリートの信頼性・性能を示し、また設計・施工指針を作成するための知見を得る。

[最終目標（2025年度）]

1) 石炭利用環境対策推進事業

石炭利用環境対策に関わる調査、コールバンクの拡充及び石炭等の発熱性を把握することにより、石炭の有効利用技術確立の見通しを得る。

石炭等の燃焼灰の有効利用、及び削減及び用途拡大に寄与する技術確立の見通しを得る。

また、新たな石炭ガス化溶融スラグ有効利用技術を開発し、工業製品としての規格化の見通しを得る。

石炭の有効利用に資する国内石炭灰排出量・利用量等の共通基盤データを取りまとめる。

2) 石炭利用技術開発

石炭等の燃焼灰の利用拡大技術として、セメントを使用しないフライアッシュコンクリート製造技術を確認し、製品化に向けた用途を提案する。加えて、石炭ガス化溶融スラグを使用したコンクリートの信頼性・性能を示し、設計・施行指針を作成する見通しを得る。

研究開発項目⑪「アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業」〔委託・助成事業〕

[実施期間] 2021年度～2024年度

### 1. 研究開発の必要性

2018年7月「第5次エネルギー基本計画」では、石炭は、経済性、供給安定性に優れた重要なエネルギー資源であり、重要なベースロード電源と位置付けられている。また、既存のインフラを有効利用した脱炭素化のための技術開発として、アンモニアを燃料として直接利用する技術開発が挙げられている。また、2021年10月「第6次エネルギー基本計画」では、アンモニアを燃料とした発電は燃焼時にCO<sub>2</sub>を排出せず、カーボンニュートラル実現に向けた電源の脱炭素化を進める上で有力な選択肢の一つと位置付けられている。

2020年3月に策定された「新国際資源戦略」では、CO<sub>2</sub>排出削減に向け、液体アンモニアの混焼を含めて着実に技術開発等を進めることが必要とされている。

CO<sub>2</sub>フリーアンモニアは、水素を輸送・貯蔵できるエネルギーキャリアとして、火力発電の燃料として直接利用が可能であり、燃焼時にはCO<sub>2</sub>を排出しない燃料として、温室効果ガスの排出量削減に大きな利点がある。

火力発電等におけるアンモニアの燃料としての利用は、2030年以降、中長期的に火力発電から排出されるCO<sub>2</sub>を一層削減し、アンモニアをはじめとする水素エネルギーの社会実装に繋がる技術開発である。

### 2. 具体的研究内容

火力発電等におけるアンモニアの燃料としての利用技術を実証すべく、設備費、運転費並びにアンモニアの製造・輸送コストを考慮した経済性検討、実証試験に必要な技術検討などを実施する。

1) 要素研究〔委託事業〕

2) 実証研究〔助成事業（1／2助成）〕

※1)の実施者を公募した後の、1)から2)への移行の可否は、外部有識者で構成される委員会の審査（ステージゲート審査）を経て決定する。

### 3. 達成目標

[中間目標（2023年）]

火力発電等におけるアンモニアの燃料としての利用技術の見通しを得る。

[最終目標（2024年度）]

火力発電等におけるアンモニアの燃料としての利用技術を確立する。

研究開発項目⑫ CO<sub>2</sub>分離・回収技術の研究開発 [委託事業]

[実施期間] 2018年度～2024年度

(2021年度までは「CCUS研究開発・実証関連事業」において実施)

### 1. 研究開発の必要性

2020年1月に策定された「革新的環境イノベーション戦略」においては、CO<sub>2</sub>分離・回収コストの低減が技術課題として記載されており、新たな研究開発・実証として、固体吸収材や分離膜を用いた分離回収技術が挙げられている。

また、2021年7月に経済産業省が改定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」では、CO<sub>2</sub>の分離・回収は共通技術として重要な位置づけとされている。

本事業では、石炭火力発電所等で発生するガスからCO<sub>2</sub>を分離・回収するのに有効な技術として、固体吸収法および膜分離法について研究開発を行う。

### 2. 具体的研究内容

#### (1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発【2019年度終了】

CO<sub>2</sub>の分離・回収技術の一つである化学吸収法のうち、高効率な回収が可能な「アミンを固体に担持した固体吸収材」について、燃焼排ガスを対象としたプラン1ト試験設備を用いた実用化研究を行う。

#### (2) 先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究

石炭火力発電所の燃焼排ガスに最適化された、固体吸収材移動層システムの研究開発を行う。

固体吸収材移動層システムのCO<sub>2</sub>分離・回収試験を実施するために、移動層パイロットスケール試験設備(40t-CO<sub>2</sub>/d規模)について、設計・建設・運転等を行う。また、固体吸収材の性能向上を図るとともに、固体吸収材の大量製造技術、移動層システムにおけるCO<sub>2</sub>分離・回収等の各工程にかかるプロセスシミュレーション技術等、CO<sub>2</sub>固体吸収法に関わる基盤技術開発を行い、石炭火力発電所からの実燃焼排ガスを用いて、固体吸収法による石炭燃焼排ガスへの適用性を研究する。

#### (3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発

石炭ガス化複合発電等で発生する比較的高い圧力を有するガスからCO<sub>2</sub>を分離・回収するのに有効な分離膜技術について、実ガスを用いた実用化研究を行う。

#### (4) 二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発

火力発電所等で発生するガスからCO<sub>2</sub>を分離・回収するのに有効な膜分離技術について、実ガスに適用可能な分離膜モジュールおよび分離膜システムの実用化研究を行う。

また、CO<sub>2</sub>分離・回収プロセスとCO<sub>2</sub>利用プロセスの統合を考慮した膜分離技術の研究開発を行う。

### 3. 達成目標

#### (1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発

[最終目標] 2019年度

CO<sub>2</sub>分離・回収エネルギーを1.5GJ/t-CO<sub>2</sub>を達成する固体吸収材・システムを開発する。

(2) 先進的二氧化碳素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究

[中間目標] 2022年度

移動層パイロットスケール試験設備すべての機器の据付、受電を完了し、石炭火力発電所煙道から移動層パイロットスケール試験設備へ実燃焼排ガスを導入し、CO<sub>2</sub>を分離し回収出来ることを確認する。

固体吸収材のスケールアップ製造技術開発を行い、パイロット試験開始に必要な固体吸収材の供給を完了する。また、移動層シミュレーションによる実ガス試験での最適運転条件を提示する。

[最終目標] 2024年度

火力発電所などの燃焼排ガスなどからCO<sub>2</sub>を分離・回収する固体吸収法について、実燃焼排ガスからのCO<sub>2</sub>分離・回収連続運転を実施し、パイロットスケール設備においてCO<sub>2</sub>分離・回収エネルギー1.5GJ/t-CO<sub>2</sub>の目途を得る。

(3) 二氧化碳素分離膜モジュール実用化研究開発【2021年度終了】

[最終目標] 2021年度

石炭ガス化複合発電等で発生する比較的高い圧力を有するガスからのCO<sub>2</sub>分離・回収エネルギーについて、実用化段階(数百万t-CO<sub>2</sub>/年規模を想定)で回収エネルギー0.5GJ/t-CO<sub>2</sub>以下を達成する分離膜技術を開発する。

(4) 二氧化碳素分離膜システム実用化研究開発

[中間目標] 2022年度

実用化段階で想定される条件下でCO<sub>2</sub>分離・回収に用いることができる分離膜材料の設計方針の見通しを得て、評価設備による性能検証を開始する。

[最終目標] 2023年度

火力発電等で発生するガスからのCO<sub>2</sub>の分離・回収において、CO<sub>2</sub>の利用プロセスに適する分離膜材料を適用した分離膜システムを開発し、比較的高い圧力を有するガスからのCO<sub>2</sub>の分離・回収においては実用化段階でCO<sub>2</sub>分離・回収エネルギーが0.5GJ/t-CO<sub>2</sub>以下を達成できる技術を開発する。

研究開発項目⑬「火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業」〔委託・助成事業〕

1) 機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の技術開発・実証研究〔委託・助成事業〕

[実施期間] 2022年度～2026年度

### 1. 研究開発の必要性

2021年10月に策定された「第6次エネルギー基本計画」では、再生可能エネルギーを大量導入するには、調整力の確保等の電力システムの柔軟性の向上が必要であるとされており、火力発電の今後の在り方についても、安定供給を大前提に設備容量の確保が挙げられている。

火力発電の運用性向上を目指すため、調整力電源の安定性維持に貢献する機動性に優れたガスタービン複合発電（GTCC）に適用する技術について、既存設備への適用を対象とした社会実装に取り組むことが重要である。

### 2. 具体的研究内容

急速起動・出力変動時のGTCCの安定運転の実現に向け、発電事業者が抱える現状ガスタービンの課題に対し、本事業の要素研究にて確立した燃焼技術、制御技術、数値解析技術等を中心とした要素研究の成果を、発電事業者の設備投資コストをできるだけ抑えた形で実用化する検討を実施し、最低負荷の引き下げや出力変化速度改善の検証等を行う。

1) 要素研究〔委託事業〕

2) 実証研究〔助成事業（1／2助成）〕

※1)の実施者を公募した後の、1)から2)への移行の可否は、外部有識者で構成される委員会の審査（ステージゲート審査）を経て決定する。

### 3. 達成目標

[中間目標（2024年度）]

機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電について、電力事業者の方針や対象機器の要求仕様等に応じた設備仕様等をまとめる。

[最終目標（2026年度）]

機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電について、実証設備での目標性能達成の目途を得る。

研究開発項目⑬「火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業」〔委託・助成事業〕

2) 石炭火力の負荷変動対応技術開発・実証研究〔委託・助成事業〕

[実施期間] 2023年度～2026年度

### 1. 研究開発の必要性

2021年10月に策定された「第6次エネルギー基本計画」において、火力発電は、再生可能エネルギーの瞬時的・継続的な発電電力量の低下にも対応可能な供給力を持つ形で設備容量を確保することを求められており、とりわけ自然変動電源（太陽光・風力等）の導入が今後拡大する中で、電力の需給バランスを維持し周波数を安定化するために、火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性の向上が必要となる。

### 2. 具体的研究内容

火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるために、機動性に優れた広負荷帯高効率発電用ボイラに関する技術開発・実証研究を実施する。

1) 要素研究〔委託事業〕

2) 実証研究〔助成事業（1／2助成）〕

※1)の実施者を公募した後の、1)から2)への移行の可否は、外部有識者で構成される委員会の審査（ステージゲート審査）を経て決定する。

### 3. 達成目標

[最終目標（2026年度）]

負荷変動対応に伴う事故リスクと保守コスト低減に必要な故障予知・寿命予測等の保守技術および火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるための先進的な技術の社会実装に向けた見通しを得る。

研究開発スケジュール

年度(西暦)	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026		
<b>研究開発項目①</b> 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)CO <sub>2</sub> 分離・回収型酸素吹IGCC実証(2/3、1/3助成) 3)CO <sub>2</sub> 分離・回収型IGFC実証(1/2助成) 4)信頼性向上、低コスト化(1/3助成) 5)CO <sub>2</sub> 分離・回収変動対応ガスタービン要素技術開発(1/2助成)					※1																
<b>研究開発項目②</b> 高効率ガスタービン技術実証事業 1)1700℃級ガスタービン(1/2助成) 2)高温分空気利用ガスタービン(AHAT)(2/3助成)					※1																
<b>研究開発項目③</b> 先進超々臨界圧実用化要素火力発電技術開発(2/3助成)					※1																
<b>研究開発項目④</b> 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)CO <sub>2</sub> 分離型化学燃焼石炭利用技術開発(委託)																					
6)石炭火力の負荷変動対応技術開発(委託)																					
7)CO <sub>2</sub> 有効利用技術開発(委託)																					
8)CO <sub>2</sub> 分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発(委託)																					
9)機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究(委託)																					
<b>研究開発項目⑤</b> CO <sub>2</sub> 回収型次世代IGCC技術開発(委託)																					
<b>研究開発項目⑥</b> カーボンサイクル・次世代火力推進事業(委託)																					
<b>研究開発項目⑦</b> 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)																					

年度(西暦)	1982	~	14	15	16	17	18	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
研究開発項目⑧ CO <sub>2</sub> 有効利用拠点における技術開発(委託・助成)											◇			◇	
									CO <sub>2</sub> 有効利用拠点化推進事業						
									研究拠点におけるCO <sub>2</sub> 有効利用技術開発・実証事業						
研究開発項目⑨ CO <sub>2</sub> 排出削減・有効利用実用化技術開発(委託・助成)															
1) 化学品へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発(委託・助成)											◇			◇	
									化学品へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発						
2) 液体燃料へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発(委託・助成)											◇			◇	
									液体燃料へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発						
3) コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO <sub>2</sub> 利用技術開発(委託・助成)											◇			◇	
									コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO <sub>2</sub> 利用技術開発						
4) 気体燃料へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発(委託・助成)												◇			◇
									気体燃料へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発						
研究開発項目⑩ 石炭利用環境対策事業(委託・助成)								◇							◇
1) 石炭利用環境対策推進事業(委託)															
									※2 石炭発熱性調査・先導研究、スラグの規格化、石炭灰発生量及び有効利用実態調査、石炭灰利用・削減技術開発等						
2) 石炭利用技術開発(2/3補助)															
									セメント不使用フライアッシュ製造技術開発						
									※1 石炭ガス化溶融スラグのコンクリート実規模性能試験						
研究開発項目⑪ アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業(委託・補助)															◇
									アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業						
研究開発項目⑫ CO <sub>2</sub> 分離回収技術の研究開発(※3)									◇						◇
1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発															
									※1 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発						
2) 先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究															
									先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究						
3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発															
									※1 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発						
4) 二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発															
									二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発						

※1 経済産業省にて実施

※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

※3 2021年度までは「CCUS 研究開発・実証関連事業」において実施

年度(西暦)	1982	~	14	15	16	17	18	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
研究開発項目⑬ 火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業													◇		◆
1) 機動性に優れた広負荷帯 高効率ガスタービン複合発電 の技術開発・実証研究											機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の 技術開発・実証研究				
2) 石炭火力の負荷変動対応 技術開発・実証研究											石炭火力の負荷変動対応技術開発・実証研究				