

「次世代火力発電等技術開発／ 次世代火力発電基盤技術開発」

- 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
- ④ 3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発
- ④ 4) 燃料電池石炭ガス適用性研究
 - (1) IGFC システムの検討
 - (2) 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
1. 事業の位置付け・必要性について	11
1. 事業の背景・目的・位置付け	11
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	17
2-1. NEDO が関与することの意義	17
2-2. 実施の効果（費用対効果）	17
2. 研究開発マネジメントについて	20
1. 事業の目標	20
1-1. 事業の目標設定の背景	20
1-2. 各基盤技術開発事業の目標	24
2. 事業の計画内容	26
2-1. 研究開発の内容	26
2-2. 研究開発の費用	32
2-3. 研究開発の実施体制	32
2-4. 研究開発の運営管理	34
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	35
3. 情勢変化への対応	36
3. 研究開発成果について	37
1. 事業全体の成果	37
1-1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発	37
1-2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究	38
1-3. 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究	38
1-4. IGFC システムの検討	39
2. 研究開発項目毎の成果	40
2-1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発	40
2-2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究	73
2-3. 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究	105
2-4. IGFC システムの検討	125
4. 成果の実用化に向けての見通し及び取組について	174
1. 成果の実用化に向けた戦略	174
2. 成果の実用化の見通し	176

（添付資料）

1. プロジェクト基本計画
2. 特許論文等リスト

概要

		最終更新日	2019年8月23日	
プロジェクト名	次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電基盤技術開発 ④2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 ④3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 ④4) 燃料電池石炭ガス適用性研究 (1) IGFC システムの検討 (2) 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	④2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 環境部 PM 春山主査／副担当 高橋主査 (2019年8月現在) PM 西岡主査 (2016年4月～2018年3月) PM 在間主幹 (2015年4月～2016年3月) ④3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 ④4) 燃料電池石炭ガス適用性研究／ (1) IGFC システムの検討 (2) 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 環境部 PM 高橋主査 (2019年8月現在)			
0. 事業の概要	<p>2014年4月に閣議決定された「第4次エネルギー基本計画」を基に2015年7月に決定された「長期エネルギー需給見通し」において、石炭火力、LNG火力の高効率化を進めつつ環境負荷の低減と両立しながら活用することで、2030年の石炭火力の比率を26%程度、LNG火力の比率を27%程度とする方向性が示されている。また、2018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、石炭火力、ガス火力については、温室効果ガスの排出という問題はあるものの、長期を展望した環境負荷の低減を見据えつつ活用していくエネルギー源とされている。</p> <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ものである。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] 2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 [④2] 3. 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)-(2)] 4. 燃料電池石炭ガス適用性研究／IGFC システムの検討 [④4)-(1)] <p>※報告順は上記の通りとする。</p>			
1. 事業の位置 付け・必要性 について	<p>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、CO2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。</p> <p>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るためには、ガスタービン燃料電池複合発電 (GTFC) や石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) 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、本事業は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

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。

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。

2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンアップ技術要素研究 [④2]
 [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。

3. 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)-(2)]
 [中間目標 (2019 年度)]
 H2 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。

4. 燃料電池石炭ガス適用性研究/IGFC システムの検討 [④4)-(1)]
 [最終目標 (2019 年度)]
 IGFC 実証機の容量を決定し、実証機の試設計を完了する。

事業の計画内容

1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]	2015fy	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy
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. 燃料電池向け石炭ガスクリーンアップ技術要素研究 [④2]	2015fy	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy
セル被毒耐性評価		■	■	■			
燃料電池用ガス精製技術性能評価		■	■	■			
燃料電池用ガス精製装置の試設計			■	■			
3. 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性検討 [④4)-(2)]	2015fy	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy
水素リッチガス適用及び石炭ガス設備に係る運転・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								
	4. IGFC システムの検討 [④4)-(1)]	2015fy	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	
	高温燃料電池及び IGFC の技術動向調査								
	商用機のシステム検討								
	実証に向けたシステム評価								
	実証機試設計								
	実証試験内容の検討								
事業費推移 (会計・勘定別に NEDO が負担した実績額(評価実施年度については予算額)を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	2015fy	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	総額
	一般会計	—	—	—	—	—	—	—	—
	特別会計 (電源・需給の別)	399	844	2,674	831	857	229	137	5,971
	1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3]	—	554	1,297	574	97	69	22	2,613
	2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 [④2]	399	150	150	—	—	—	—	699
	3. 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4)-(2)]	—	131	1,203	196	760	160	115	2,565
	4. IGFC システムの検討 [④4)-(1)]	—	9	24	61	—	—	—	94
	開発成果促進財源	—	—	—	—	—	—	—	—
総 NEDO 負担額(委託)	399	844	2,674	831	857	229	137	5,971	
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] 三菱日立パワーシステムズ株式会社 北川雄一郎 2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 [④2] 3. 燃料電池石炭ガス適用性研究 [④4] 電源開発株式会社 早川宏							
	プロジェクトマネージャー	NEDO 環境部 主査 高橋 洋一 主査 春山 博司							

	委託先	<p>1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] 三菱日立パワーシステムズ株式会社 日本特殊陶業株式会社 (再委託先) 三菱重工業株式会社 株式会社トヨタエナジーソリューションズ</p> <p>2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 [④2] 電源開発株式会社 (再委託先) 株式会社巴商会 国立研究開発法人産業技術総合研究所 一般財団法人電力中央研究所</p> <p>3. 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)-(2)] 電源開発株式会社 (再委託先) 三菱日立パワーシステムズ株式会社</p> <p>4. 燃料電池石炭ガス適用性研究/IGFC システムの検討 [④4)-(1)] 電源開発株式会社 中国電力株式会社</p>
情勢変化への対応	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2018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、IGCC・IGFC等の次世代高効率石炭火力発電技術の開発・実用化を推進すること、また高効率LNG火力発電の技術開発を促進すること、とされている。 ・ GTFCについて、段階的に大型化への流れが進展している。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 250kW級加圧型SOFCモジュールはすでに上市されており、三菱地所、安藤ハザマより受注を受けている。また、MW級モジュールについて市場ニーズは高い。 ➢ 2019年7月5日付プレスリリースによると、日本特殊陶業と三菱日立パワーシステムズが燃料電池セルスタックの製造・販売を行う合併会社の設立・共同運営に関する契約を締結しており、セルスタック量産化に向けた取り組みが加速している。 ・ IGFCの前提となるIGCCについて、実用化に向けた取り組みが進んでいる。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 空気吹IGCCは、勿来、広野にて540MW級商用機の建設が進んでおり、勿来は2020年の、広野は2021年の運転開始を予定している。 ➢ 酸素吹IGCCは、実証試験は2018年度に完了し、大崎クールジェンの親会社である電源開発・中国電力にて商用化の検討が進められている。2019年4月24日付プレスリリースによると、電源開発が山口宇部パワー西沖の山発電所の新設計画にて、酸素吹石炭ガス複合発電(IGCC)による商用機開発への計画変更を検討する旨を表明。 ・ 以上の状況により、GTFC、IGFCの実用化に向けた環境が整いつつある。 	
中間評価結果への対応	—	
評価に関する事項	事前評価	—
	中間評価	2019年度
	事後評価	2019年度、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。</p> <p>②セルスタック低コスト品質安定化 連続炉模擬検証炉にて運転条件を最適化することで、品質を保ちつつ製造時間1/3を達成できた。また、成膜条件と成膜状態の関係を把握し、品質安定化の目処を得た。</p> <p>③高性能セルスタック検証 高性能セルスタックを用いてハーフモジュール試験を行うための計画を検討した。</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。

2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 [④2]

①セル被毒耐性評価

模擬ガスとセルスタックによる発電試験を行い、電池の性能に影響を及ぼす被毒成分は H₂Se と H₂S であることを特定した。

②燃料電池用ガス精製技術性能評価

①で特定した被毒成分について吸着試験を行い、定量下限値以下まで除去可能となる最適な吸着剤を選定した。

③燃料電池用ガス精製装置の試設計

②の結果を基に、実証機の脱硫塔および水素化物吸着塔の試設計を実施した。

3. 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)-(2)]

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。

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の基本性能及び運用性を確認した。

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 CO₂ 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。

④石炭ガス化炉連係試験

ガス化炉と燃料電池モジュールの連係工事を実施した。

4. 燃料電池石炭ガス適用性研究／IGFC システムの検討 [④4)-(1)]

①高温燃料電池及び IGFC の技術動向調査

事業用燃料電池の開発状況と IGFC 実用化に向けた課題を明らかにした。

②商用機のシステム検討

商用 CO₂ 分離・回収型 IGFC についてシミュレーションを実施し、最適なプロセスフローを選定した。

③実証に向けたシステム評価

実証機に適した燃料電池の仕様、プロセスフローを検討した。また、被毒成分に対する吸着材を選定し、処理方法を決定した。

④実証機試設計

実証機の設計条件を明らかにし、システム系統、設備構成、物質収支、設備レイアウト、ユーティリティ等を明らかにした。

⑤実証試験内容の検討

実証試験にて実証すべき試験項目と試験工程を明らかにした。

投稿論文	1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] 「査読付き」1件、「その他」1件
特 許	1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] 「出願済」6件（うち国際出願0件）
その他の外部発表 (プレス発表等)	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」8件、「受賞実績」1件、「HP 掲載」5件、 「展示会等への出展」2件

		<p>2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究〔④2〕 「学会等発表」3件</p> <p>3. 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)-(2)〕 「学会等発表」4件</p>
4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見直しについて	<p>1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発〔④3〕 GTFCの本格普及のためには燃料電池の大型化・量産化技術開発を進める必要があり、より低コスト化を見据えた燃料電池の高性能化を指向する。小型GTFC(1MW級)を市場投入してユーザーを拡大することで、燃料電池の量産化体制を構築してコストを低減し、中小型GTFC(10万kW級)の実証につなげる。また、本事業の成果をCO2分離・回収型IGFC実証事業に反映し、実証事業の成功に貢献する。また、IGFC実用化に必要な燃料電池の性能向上・量産化技術を確立する。</p> <p>2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究〔④2〕</p> <p>3. 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)-(2)〕</p> <p>4. 燃料電池石炭ガス適用性研究／IGFCシステムの検討〔④4)-(1)〕 本事業で得られた成果を、2018年度より開始するCO2分離・回収型IGFC実証事業の設計、試験条件、運用方法等に反映し、実証事業の成功に貢献する。また、本事業で得られた成果を、2022年度に完了するCO2分離・回収型IGFC実証事業の成果と組み合わせることで、IGFC商用機的设计思想に反映する。</p>	
5. 基本計画に関する事項	作成時期	2016年1月作成
	変更履歴	<p>2016年4月改訂(④2)のPM変更)</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>2018年2月改訂(④2)4)のPL変更)</p> <p>2018年7月改訂(④2)のPM変更、④2)の評価時期変更)</p> <p>2019年7月改訂(④3)4)の中間評価の追加、④2)3)4)の事後評価時期の変更、④34)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>

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 (ガスクリーンナップ) 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、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 (サージニング) 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 ₂ 分離回収型 IGFC では石炭ガス中の CO ₂ を除去するため、H ₂ 割合の高いガスになる。CO ₂ 分離・回収型酸素吹 IGCC 実証機で想定している H ₂ 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 ₃ ²⁻)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 ₂ 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. 事業の背景・目的・位置付け

(1) 事業の背景

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、今後も高効率発電技術の有効利用等により環境負荷を低減しつつ活用していくエネルギー源であるとされている。また、世界の発電電力量は、新興国の旺盛な需要を背景に今後も拡大する見通しであり、その中で大きな割合を占める石炭火力、ガス火力については、より高効率な発電技術の導入が求められている（図 1-1）。

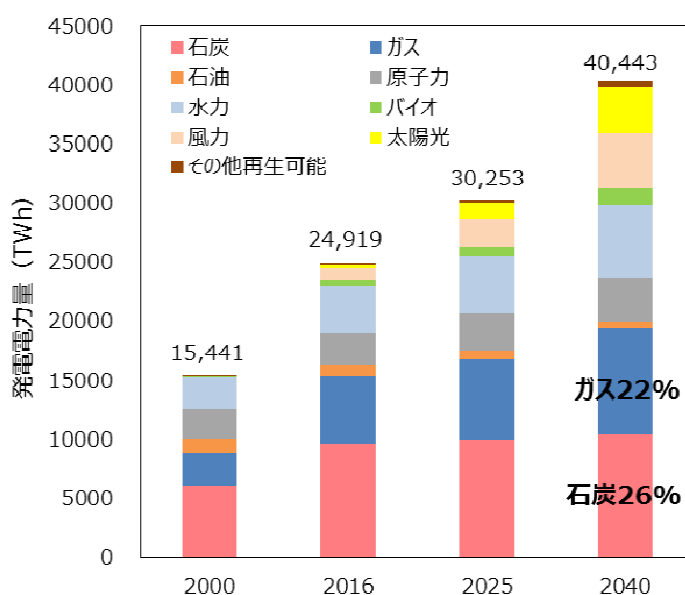


図 1-1 世界の発電電力量の推移
(出展：IEA World Energy Outlook 2018)

(2) 政策的重要性

2014年4月に閣議決定された「第4次エネルギー基本計画」において、石炭火力は、温室効果ガスの排出量が多い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ベースロード電源と評価されており、高効率石炭火力発電の有効利用等により環境負荷を低減しつつ活用していくエネルギー源であるとされている。また、ガス火力については、化石燃料の中で温室効果ガスの排出が少なく、熱源としての効率性が高いことから、ミドル電源の中心的な役割を果たしており、今後役割を拡大していく重要なエネルギー源であるとされている。

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、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おり、2030年時点の電源構成において、高効率化の促進により、石炭火

力は26%、ガス火力は27%の割合を占めると予想されている（図1-2）。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、火力発電の高効率化、CO2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1-3, 1-4）。

2018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、石炭火力は引き続き重要なベースロード電源と評価されており、再生可能エネルギー導入拡大に伴う出力調整の必要性を見据えつつ、高効率化・次世代化を推進するとされている。またガス火力においては、引き続きミドル電源として中心的な役割を果たしつつ、長期を展望した環境負荷の低減を見据えつつその役割を拡大していく重要なエネルギー源であるとされている。

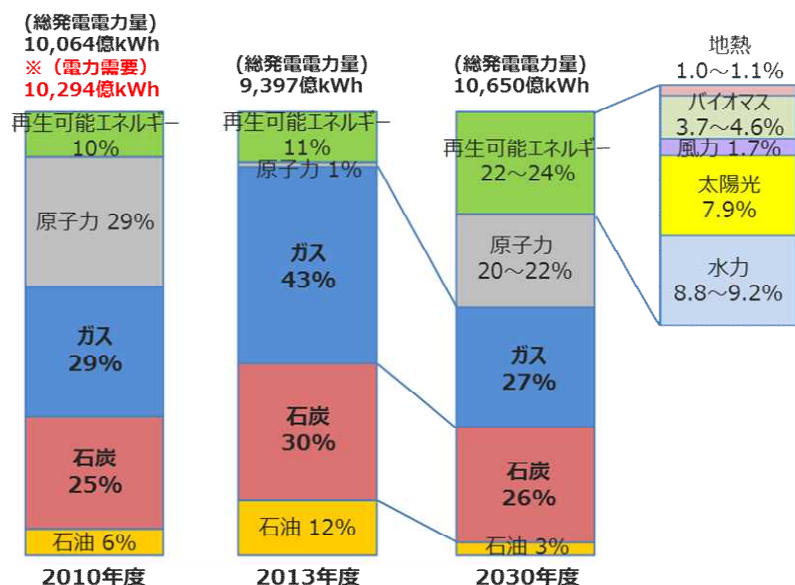


図1-2 日本における電源構成
 (出展：総合資源エネルギー調査会資料)

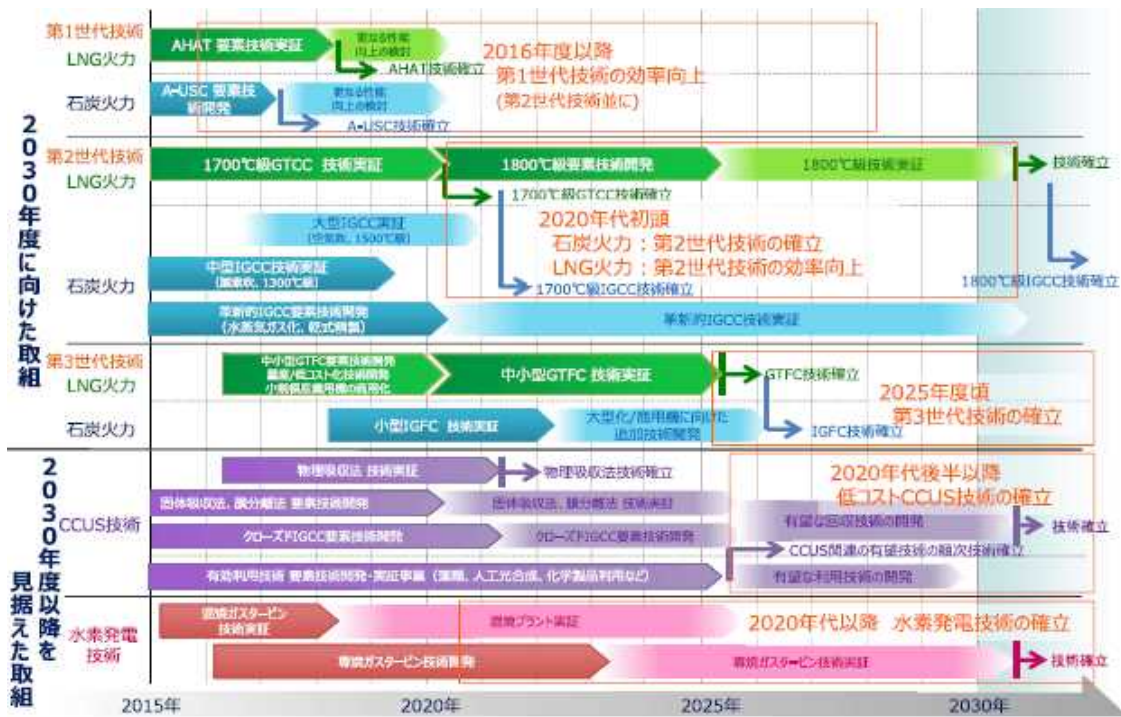


図 1-3 次世代火力発電に係る技術ロードマップ
 (出展：次世代火力発電の早期実現に向けた協議会資料)



図 1-4 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)

(3) 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。

(4) 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) (MHPS) 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 1-5)。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 社の平板筒型セルを用いた加圧 15kW 級モジュールの開発が行われている他、欧州では、スイス Hexis 社、英国 Ceres Power やイタリア SOLID-POWER 社などが数 kW と小型モジュールの開発を行っている。

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。MHPS 社製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を行っており、これらの用途に適していると考えられる。

名称	5kW級業務用 SOFC (仮)FC-5	15式250kW導入機 (ハイブリッドシステム)	15式 1MW導入機 (ハイブリッドシステム)	FP-100i	ES-5700 Energy Server	(参考) ガスエンジン
メーカー	三浦工業	三菱重工	三菱重工	富士電機	Bloom Energy	A社
外観						
定格出力(kW)	5	250	1350	105	200	400
発電効率(%-LHV)	48	55	55	42	50-60	39.6
総合効率(%-LHV)	90	73(温水) 65(蒸気)	76(温水) 68(蒸気)	62	-	73.8
ユニット寸法/設置面積 (m/m ² (m ² /kW))	0.7×1.1×1.8/0.8 (0.15)	12.0×3.2×3.2/40 (0.15)	24.0×5.0×3.2/120 (0.09)	2.2×5.6×3.4/12 (0.11)	9.1×2.6×2.1/24 (0.12)	8.2×3.5×3.6/29 (0.08)
運用方法	ペーロード コジエ対応可	ペーロード コジエ対応可	ペーロード コジエ対応可	ペーロード コジエ対応可	ペーロード コジエ対応不可	DSS運用 コジエ対応可
備考	SOFC 実証中	SOFC 実証中	SOFC 計画中	PAFC	SOFC 拡張性が高い	-
市場投入予定時期	2020	2017	2018	商用化済	商用化済	-

出典：経産省「水素・燃料電池戦略協議会WG」資料

図 1-5 SOFC の開発状況 (出展：経済産業省「水素・燃料電池戦略協議会 WG」)

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、IGFC 技術の開発が行われており、250MW 級の実証プラントにて IGCC の実証試験が行われるとともに、IGFC に使用する燃料電池の開発が行われているとの情報がある。日本においては、250MW 規模の空気吹 IGCC 実証プラントにおいて 3,917 時間、166MW 規模の酸素吹 IGCC 実証プラントにおいて 2,168 時間の連続運転が報告されている。空気吹 IGCC については、540MW の商用機が建設中であり、2020 年度には勿来で、2021 年度には広野でそれぞれ商用機が運転を開始する予定である。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 CO₂ 分離・回収型 IGFC 実証事業が開始されており、2021 年度末から 2022 年度にかけて行われる実証試験に向けた準備が進められている。世界における IGCC、IGFC プロジェクトの進捗状況を図 1-6 に示す。

【海外プロジェクトの例】

Taeon

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



GreenGen

- ・中国 GreenGen社
- ・発電容量 250MW~400MW
- ・2013 運転開始



- 運転中
- 建設中
- △ 計画中
- 年数は運転予定時期

□ : 日本プロジェクト

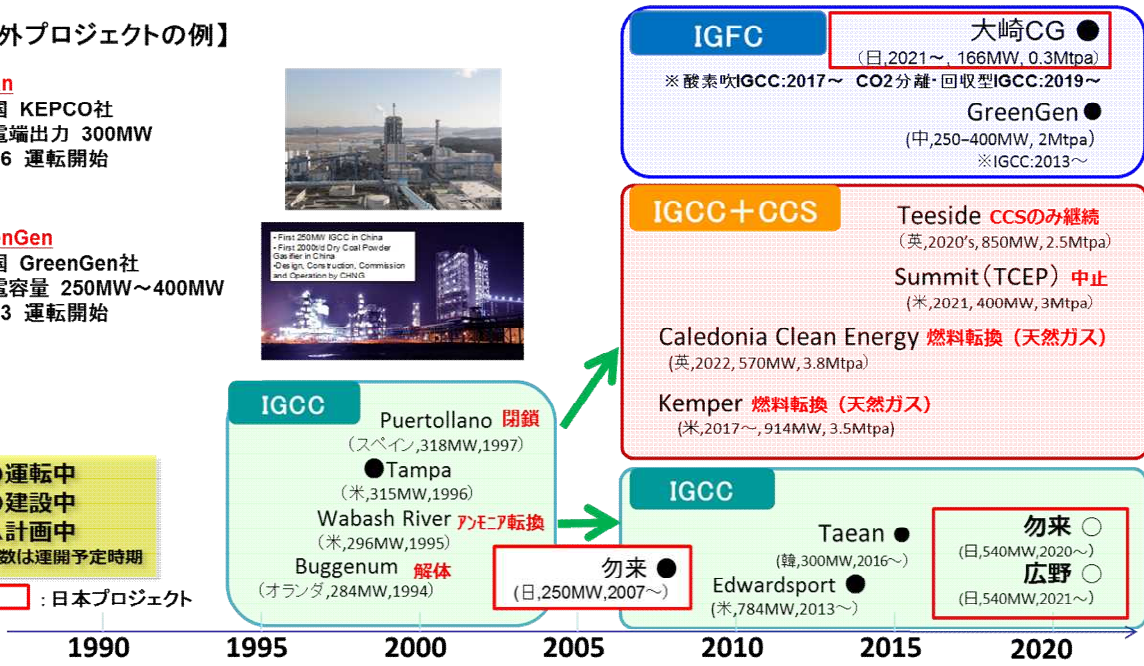


図 1-6 世界の IGFC, IGCC プロジェクトの進捗例

(Japan CCS フォーラム 2015 NEDO 資料(2015. 6)に IAE が加筆, GCCSI データを元にアップデート)

2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2-1. NEDO が関与することの意義

石炭火力、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CO₂排出削減効果が見込まれ、また火力発電メーカーの海外競争力強化にも貢献できる有益な技術である。一方で、石炭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。一方で、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。従って、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。

2-2. 実施の効果（費用対効果）

(1) 経済効果

図1-7に、2018～2040年度における世界の発電設備の新設・リプレース見込みを示す。2018年～2040年にかけて、世界全体では、石炭火力は730GW（31.7GW/年）、ガス火力は1,506GW（65.5GW/年）が新設・リプレースされる見込みである。うちアジア・大洋州では石炭火力584GW（25.4GW/年）、ガス火力482GW（21.0GW/年）の増加が見込まれ、新設容量の大半を占める。アジア・大洋州は産炭国・産ガス国も多く、他産業との連携等のニーズに応じた日本の高効率火力発電技術の導入促進で地球環境問題対策に大きく貢献することが期待出来る。

ガス火力の発電原価を12万円/kW（コスト等検証委員会で提示された2030年のLNG火力発電建設単価）とすると、2018～2040年におけるガス火力の市場規模は約8兆円/年と試算される。また同様に、石炭火力の発電原価を25万円/kW（コスト等検証委員会で提示された2030年の石炭火力発電建設単価）とすると、2018～2040年における石炭火力の市場規模は約8兆円/年と試算され、ガス火力と同様に大きな市場が見込まれている。更に、国内における石炭火力は、2020年からの30年間でリプレース需要約34GWと見込まれており、ここから想定される市場規模は約8兆円と試算される。

ガス火力、石炭火力共に新設・リプレースの市場は大きく、一方で温室効果ガス削減の観点からは高効率発電への置き換えが進展するため、GTFC、IGFCのシェアを拡大することで、日本発の技術の国際展開に貢献することができ、大きな経済効果が見込める。

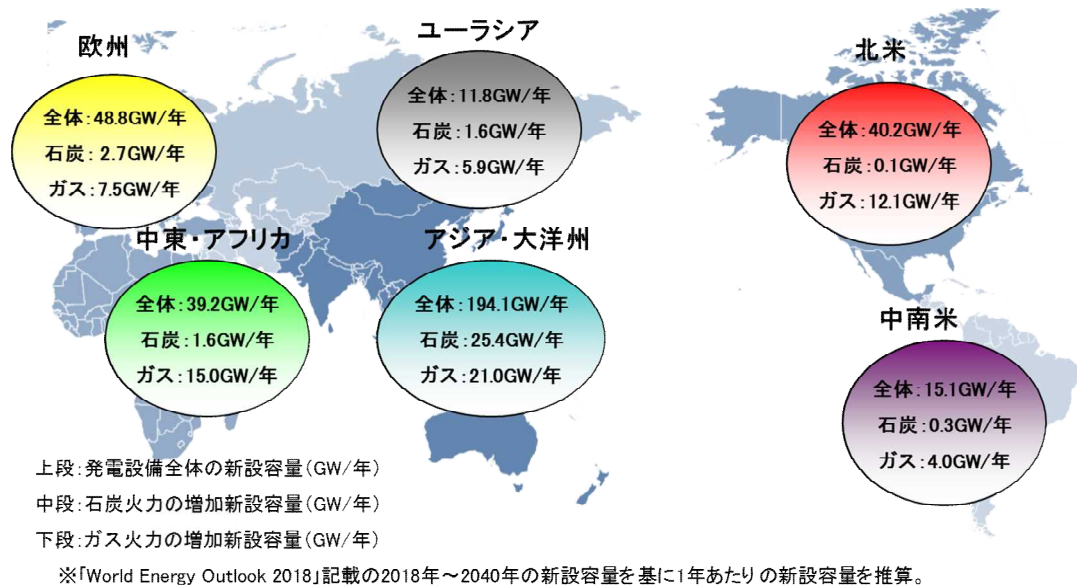


図 1-7 世界の発電設備の新設・リプレース見込み
(出展: IEA World Energy Outlook 2018)

(2) CO2削減効果

ガス火力において、現行の最高効率である1500℃級GTCCの発電効率52%をベースとした場合、1500℃級GTFCの導入により発電効率は63%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CO2排出量を18万t/年減らすことができ、1500℃級GTCC比で約17%のCO2排出削減効果が見込める。

また、石炭火力においては、現行の最高効率であるUSC（超超臨界圧微粉炭火力）の発電効率40%をベースとした場合、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CO2排出量を33万t/年減らすことができ、USC比で約28%のCO2排出削減効果が見込める。

表1-1 ガス火力におけるGTFC適用時のCO2削減効果の試算（500MW級発電所）

	発電効率	kWhあたりのCO2排出量	CO2排出量*	CO2削減量	CO2削減割合
1500℃級 GTCC	52%	0.34kg/kWh	104万 t/年	ベース	ベース
1700℃級 GTCC	57%	0.31kg/kWh	95万 t/年	9万 t/年	約 9%
1500℃級 GTFC	63%	0.28kg/kWh	86万 t/年	18万 t/年	約 17%

表1-2 石炭火力におけるIGFC適用時のCO2削減効果の試算（500MW級発電所）

	発電効率	kWhあたりのCO2排出量	CO2排出量*	CO2削減量	CO2削減割合
現行 USC	40%	0.82kg/kWh	251万 t/年	ベース	ベース
IGCC	46%	0.71kg/kWh	218万 t/年	33万 t/年	約 13%
IGFC	55%	0.59kg/kWh	181万 t/年	70万 t/年	約 28%

* 500MW規模の発電所に適用された場合の排出量を試算

$500\text{MW} \times 8,760\text{時間} \times 0.7$ (稼働率) = 3,066,000MWh/年

1500℃級GTCC : $3,066,000\text{kWh/年} \times 0.34\text{kg/kWh} = 104\text{万t/年}$

現行USC : $3,066,000\text{kWh/年} \times 0.82\text{kg/kWh} = 251\text{万t/年}$

2. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1-1. 事業の目標設定の背景

1-1-1. 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 (CO₂) 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 CO₂ 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 CO₂ 分離回収設備を付加した CO₂ 分離・回収型酸素吹 IGCC の実証を、第3段階では CO₂ 分離・回収型酸素吹 IGCC に燃料電池を組み合わせた CO₂ 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 CO₂ 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いくこととしている。

※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)

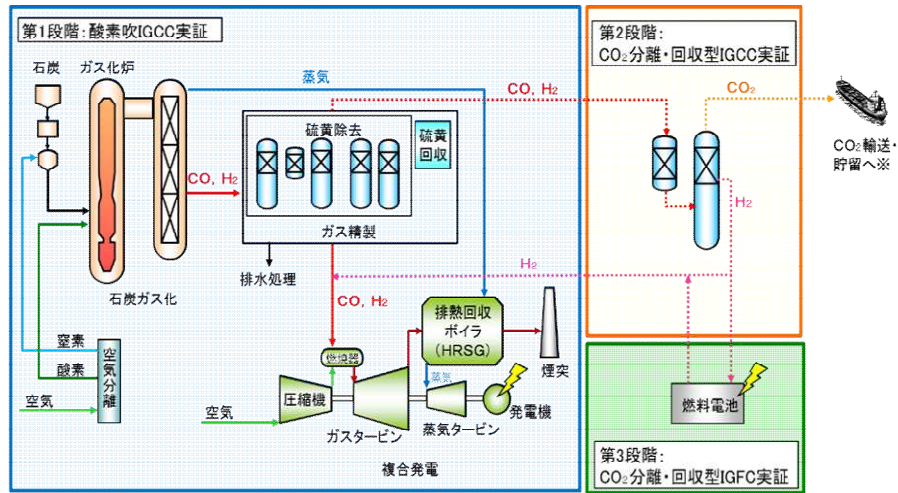


図 2-1-2 大崎クールジェン事業の概要

表 2-1-1 大崎クールジェ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 ₂ 分離・回収型IGCC実証					設計・製作・据付			実証試験			
第3段階 CO ₂ 分離・回収型IGFC実証								設計・製作・据付			実証試験

1-1-2. 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携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ります。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、これは高压化で加速される課題がある。現時点で、高压化対応の可能性が最も高いのは SOFC とされ、MHPS が円筒型 SOFC セル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。

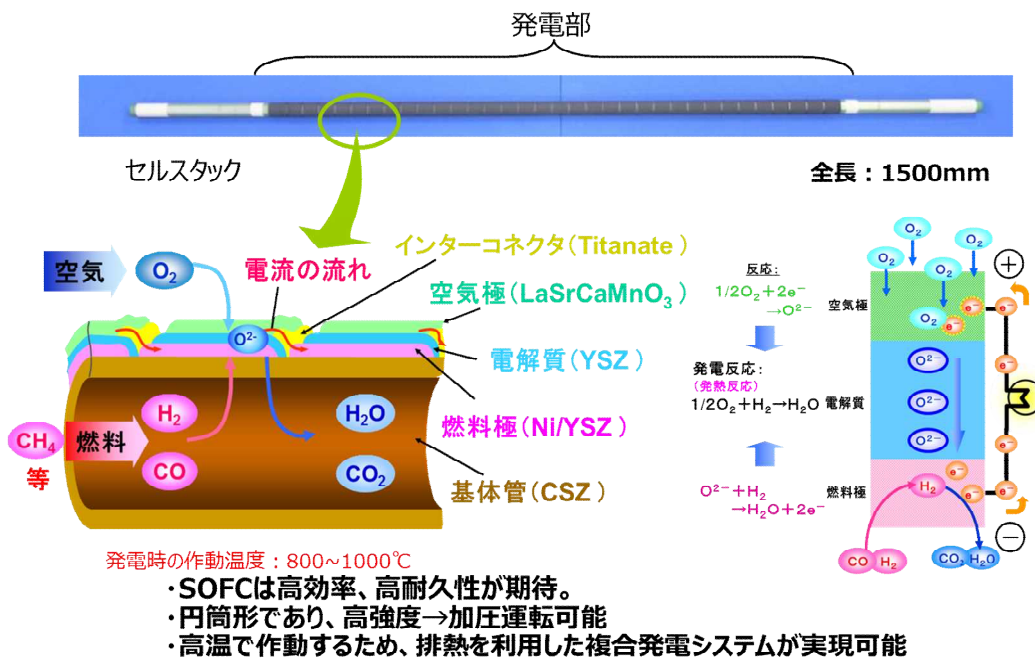


図 2-1-3 円筒型固体酸化物形燃料電池 (SOFC)

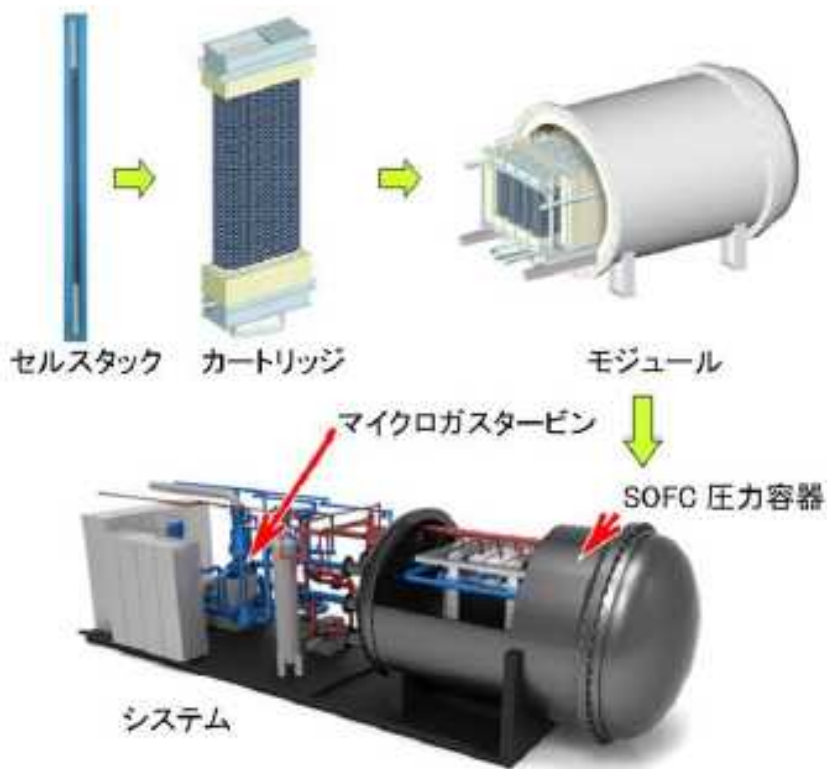


図 2-1-4 SOFC 燃料電池システムの構成

1-1-3. IGFC 実証に向けた課題と取組

IGFC 実現に向けた技術課題と取組を表 2-1-2 に示す。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 H₂ 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いる。

表 2-1-2 燃料電池の適用に向けた技術的課題と取組

技術的課題		基盤技術開発での取り組み
運転圧力の違い	マイクロGTとの組合せ：約0.3MPa 1700℃級GTとの組合せ：約2.5MPa 運転圧力の上昇に伴う温度分布の不均一化対策	④3)ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 カートリッジによる2.0MPa程度までの高圧試験を行い、温度分布、発電特性を確認
大容量化	大容量化に伴う電気及びガスの偏流対策	④3)ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 ハーフモジュールを用いたガス分配性、温度分布等のデータを取得し、制御方法の最適化
燃料ガス組成の違い	石炭ガス化ガス(水素リッチガス)では、メタン改質反応(吸熱反応)による冷却効果がないため、新たな冷却システムの構築	④4)燃料電池石炭ガス適用性研究 カートリッジ及び250kW級モジュールによる水素リッチガスに対応した再循環ガス冷却システム等の効果を確認し、運転条件を適正化
微量成分の影響	石炭ガス化ガス中の微量成分の影響によりセル性能の低下及び劣化率の増大が予想される。微量成分の閾値及び除去方法の明確化	④4)燃料電池石炭ガス適用性研究 250kW級モジュールによる小型ガス化炉の実ガス試験による検証
		④2)燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 単セルスタックを用いた微量成分の影響把握及び除去技術の適正化

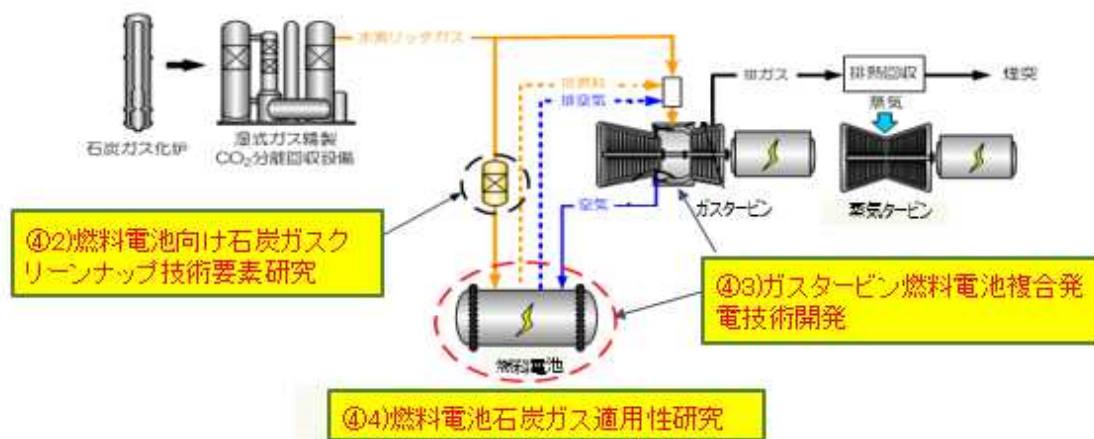


図 2-1-5 IGFC 技術確立に向けた基盤技術開発

表 2-1-3 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	④3)ガスタービン燃料電池複合発電技術開発	三菱日立パワーシステムズ(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)	④2)燃料電池向け石炭ガスクリーナップ技術要素研究	電源開発(株)	
	④4)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	電源開発(株)
		(2)IGFCシステムの検討	電源開発(株) 中国電力(株)

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 CO₂ を大幅に削減させるべく、石炭火力、LNG 火力ともに、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。

1-2-1. 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。

1-2-2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ要素技術研究〔④2〕

【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。

【目標設定の根拠】

石炭ガスには天然ガスには含まれない微量の燃料電池被毒成分が含まれており、IGFC 普及のためには被毒成分の特定、定量化、および被毒成分の除去方法の確立が必須である。本目標の達成により、IGFC 普及に向けた石炭ガスクリーンナップの基礎技術が確立され、IGFC 実証試験の詳細設計及び試験内容検討に反映することができる。

1-2-3. 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)-(2)〕

【中間目標(2019 年度)】

H₂ 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。

1-2-4. 燃料電池石炭ガス適用性研究／IGFC システムの検討〔④4)-(1)〕

【最終目標(2018 年度)】

IGFC 実証機の容量を決定し、実証機の試設計を完了する。

【目標設定の根拠】

本事業で得られる IGFC 実証機の試設計の成果は、2018 年度から開始する CO₂ 分離・回収型 IGFC 実証事業に活用することができる。

2. 事業の計画内容

2-1. 研究開発の内容

2-1-1. 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 (1,000kW 級) の商用化、量産化を進めてコストを低減し、中小型 GTFC (10 万 kW 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、CO2 分離・回収型 IGFC 実証事業へ活用する。

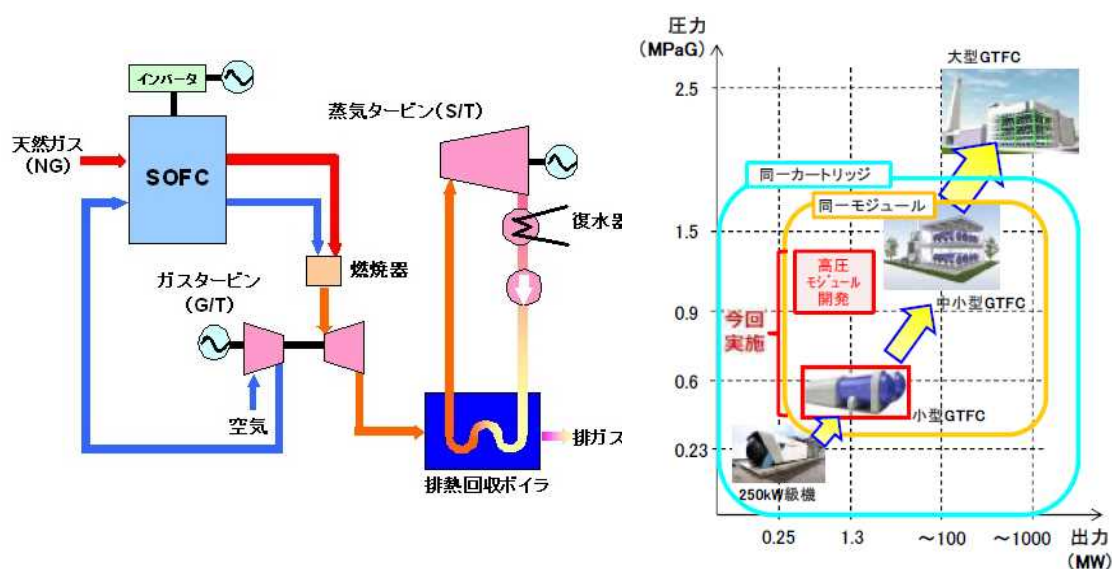


図 2-2-1 ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 事業概要

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	<ul style="list-style-type: none"> 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(1,000kW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1,000kW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	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温度分布改善の効果検証	
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(10万kW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	69	22	2,613

2-1-2. 燃料電池向け石炭ガスクリーナップ要素技術研究 [④2]

石炭をガス化して得られた石炭ガス中には、燃料電池の被毒成分が含まれており、石炭ガスを燃料電池に適用するためには、微粒子や硫黄化合物の他、多種類の被毒成分を精密除去する必要がある。燃料電池の長期安定稼働の実現に向け、燃料電池実セルへの通ガス試験により石炭ガス化ガス中の被毒成分を高度に除去する技術を確立する。

文献等から、燃料電池の被毒成分は、S, Cl, Si, B, As, P, Se, Cd, Sbの9種類とされている。これらの被毒成分のうち、運転環境において気体として存在するものについて、石炭ガス化ガスの模擬ガス試験により燃料電池の発電性能へ与える影響を確認することで、被毒耐性を確認し、被毒成分を特定する。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高効率に除去する吸着剤を検討することでガス精製技術を検討するとともに、被毒成分除去設備の試設計を行う。

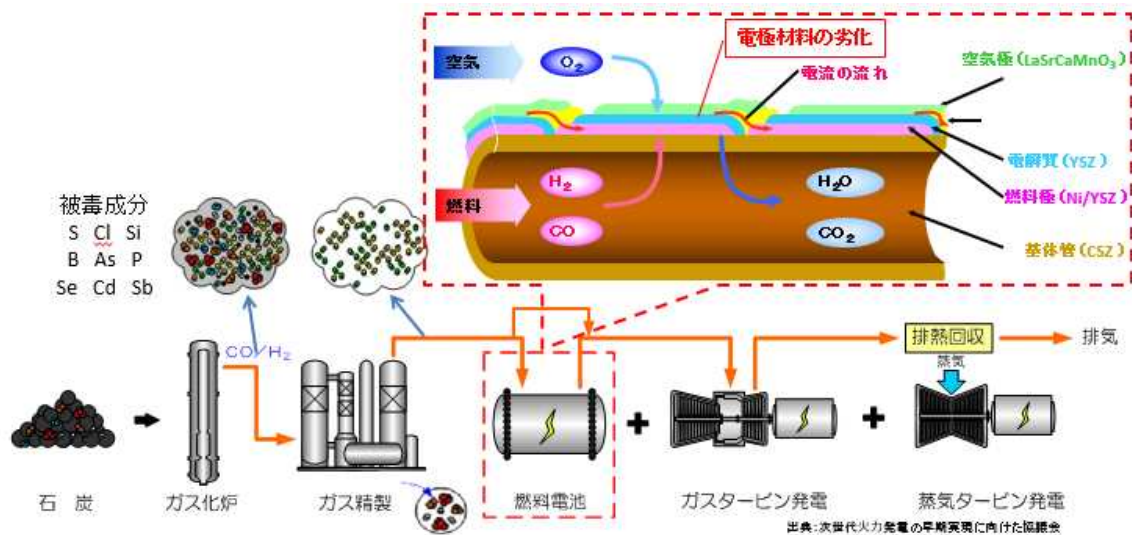


図 2-2-2 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 事業概要

表 2-2-3 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標	根拠
①セル被毒性評価	SOFCセルの被毒耐性を調べ、石炭ガス中の燃料電池被毒成分を特定する。	石炭ガス中の被毒成分の特定及び適用可能性の高い吸着剤の選定により、石炭ガスに対し最適な被毒成分除去システムを設計することができる。
②燃料電池用ガス精製技術性能評価	既存の吸着剤について、SOFC被毒成分に対する除去性能を評価し、適用可能性の高い吸着剤を選定する。	
③燃料電池用ガス精製装置の試設計	上記結果を基に吸着塔を試設計し、燃料電池用ガス精製装置について検討する。	

表 2-2-4 研究開発項目とスケジュール、年度予算

年度	2015fy	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy
研究開発項目					◇ 事後評価
①セル被毒耐性評価	燃料電池セル被毒影響評価試験				
②燃料電池用ガス精製技術性能評価	吸着剤評価試験				
③燃料電池用ガス精製装置の試設計			試設計		
年度	2015fy	2016fy	2017fy	2018fy	合計
研究開発費(百万円)	399	150	150	—	699

2-1-3. 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〕-(2)〕

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、CO2 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、天然ガスを水素リッチガスに改質した燃料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ナ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。

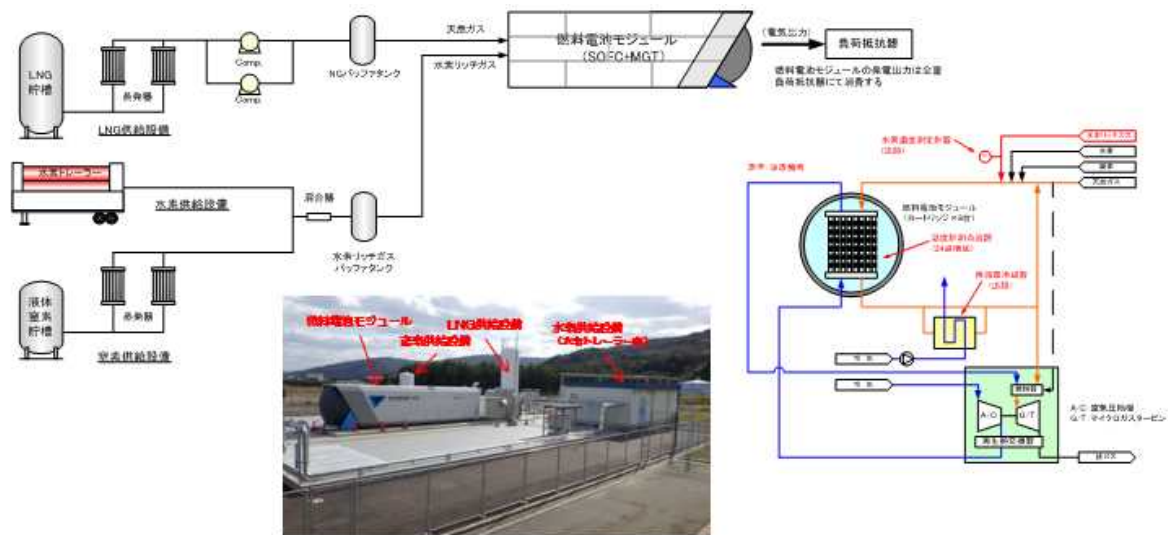


図 2-2-3 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 事業概要

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携に係る運転・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し、発電特性や運転制御、運用等に関する課題を抽出する。	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。	—
③燃料電池カートリッジ試験	カートリッジ(25kW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する。	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等を確認する。	水素リッチガス試験時に燃料電池モジュールの発電特性を把握する必要があるため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運用性、適用性を確認し、出力を最大化する運転条件を見出す。
⑤水素リッチガス切替試験	天然ガスから水素リッチガスへ切替え、発電特性やモジュール内温度分布の変化等を確認する。	
⑥水素リッチガス最大負荷試験	再循環冷却器の効果を確認し、水素リッチガス運転可能な最大負荷、発電特性や温度挙動を把握する。	
⑦水素リッチガス起動・停止試験	起動・停止から温度挙動、昇温・降温レート、運転制約の有無等を確認し起動・停止方法を確立する。	
⑧実証機模擬ガス試験	IGFC実証機のガスにはH ₂ ,N ₂ の他CO ₂ が含まれるためCO ₂ の影響を確認し、実証機運用データに反映する。	より実ガスに近いCO ₂ 混合ガスでデータを採取し実証試験に活用する。
⑨石炭ガス化炉連係試験	ガス化設備と燃料電池モジュールを連係し、発電特性及び連係運転時の起動停止・緊急停止等の運用性(協調性)を確認。	実証機に必要なガス化炉との連係制御及び発電特性を確認しOCG運用に活かす
⑩石炭ガス(COリッチガス)適用に係る技術検討	机上検討からCOリッチガスの課題を抽出し、モジュールで発電試験から課題解決に向けた技術検討を行う。	COリッチガスの運転は前例がなく、事前に課題を抽出し検討する必要性のため
⑪燃料電池モジュールの解体調査	モジュールの解体調査を行い、石炭ガス適用時の課題を抽出する。	COリッチガス運転後のモジュールに与える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	[進捗]						
②燃料電池モジュール試験設備の製作	[進捗]						
③燃料電池カートリッジ試験	[進捗]						
④燃料電池モジュール基本特性確認試験		[進捗]					
⑤水素リッチガス切替試験		[進捗]					
⑥水素リッチガス最大負荷試験		[進捗]	[進捗]				
⑦水素リッチガス起動・停止試験		[進捗]					
⑧実証機模擬ガス試験			[進捗]				
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			[進捗]	[進捗]	[進捗]	[進捗]	
⑪燃料電池モジュールの解体調査					[進捗]	[進捗]	
年度	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	合計
研究開発費(百万円)	131	1,203	196	760	160	115	2,565

2-1-4. 燃料電池石炭ガス適用性研究/IGFC システムの検討[④4)-(1)]

IGFC 実証にあたり、IGFC を構成する要素技術の状況を把握するとともに、課題を整理し、実証可能な IGFC 機及びそれを用いた実証試験の内容について検討する。

具体的には、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ことで、IGFC 実証に適した燃料電池につき精査する。また、CO₂ 分離・回収型 IGFC の商用機システムについて、CO₂ 分離・回収方法や燃料電池設置位置等を検討し、望ましいプロセスフローを選定する。更に、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「燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究」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、試設計を行うことで、IGFC 実証事業のベースデータとする。

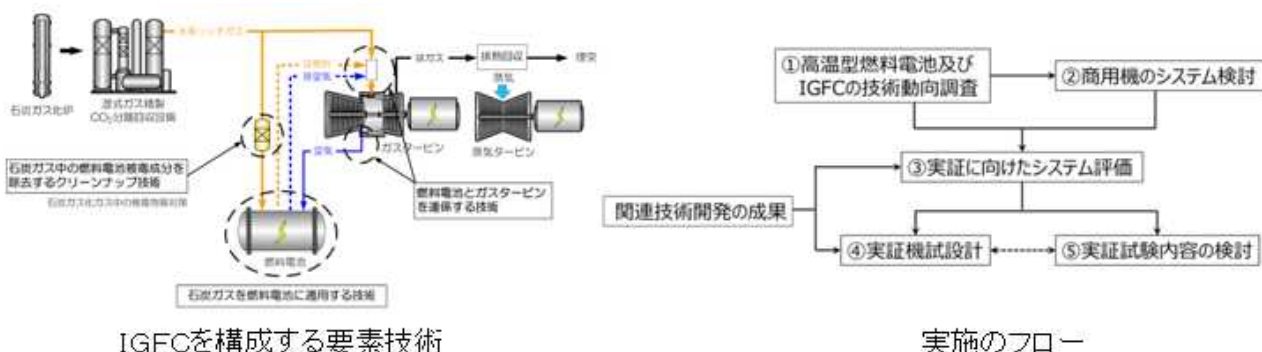


図 2-2-4 IGFC システムの検討 事業概要

表 2-2-7 IGFC システムの検討 研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標	根拠
①高温燃料電池及びIGFCの技術動向調査	最新情報入手し、IGFCの実用化に向けた課題の整理を行う。	IGFC実証機に適した燃料電池の選定のための情報を把握するとともに、IGFC実証試験における検証項目を把握する必要があるため。
②商用機のシステム検討	CO2分離・回収型IGFCについて、CO2分離・回収方法や燃料電池設置位置等を検討し、望ましいプロセスフローを選定する。	CO2分離・回収型IGFCに最適なプロセスを明らかにするため。
③実証に向けたシステム評価	実証機向け燃料電池の種類、発電容量、燃料電池への石炭ガス分岐位置、石炭ガス中の被毒成分の処理方法等を決定する。	実証機の試設計を行うに当たり、システム仕様を決める必要があるため。
④実証機試設計	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。	実証機のシステム系統、レイアウト、ユーティリティ等プラントのイメージを明らかにするため。
⑤実証試験内容の検討	IGFC実証機における試験内容を検討する。	IGFCの課題及び開発状況を踏まえて、検証内容を明らかにするため。

表 2-2-8 研究開発項目とスケジュール、年度予算

年度	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy
研究開発項目				◆ 事後評価
①高温燃料電池及びIGFCの技術動向調査				
②商用機のシステム検討				
③実証に向けたシステム評価				
④実証機試設計				
⑤実証試験内容の検討				
年度	2016fy	2017fy	2018fy	合計
研究開発費(百万円)	9.2	23.8	61.1	94.1

2-2. 研究開発の費用

各事業の年度ごとの費用を表 2-2-9 に示す。2015 年度～2018 年度は実績、2019 年度以降は計画値を示す。

表 2-2-9 各事業の研究開発予算

	2015 年度	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	69	22	2,613
燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究 [④2]	399	150	150	—	—	—	—	699
燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究 [④4)-(2)]	—	131	1,203	196	760	160	115	2,565
IGFC システムの検討 [④4)-(1)]	—	9	24	61	—	—	—	94
年度合計	399	844	2,674	831	857	229	137	5,971

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 (PM) 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、必要に応じてプロジェクトリーダー (PL) を指名する。各研究開発の実施体制を以下に示す。

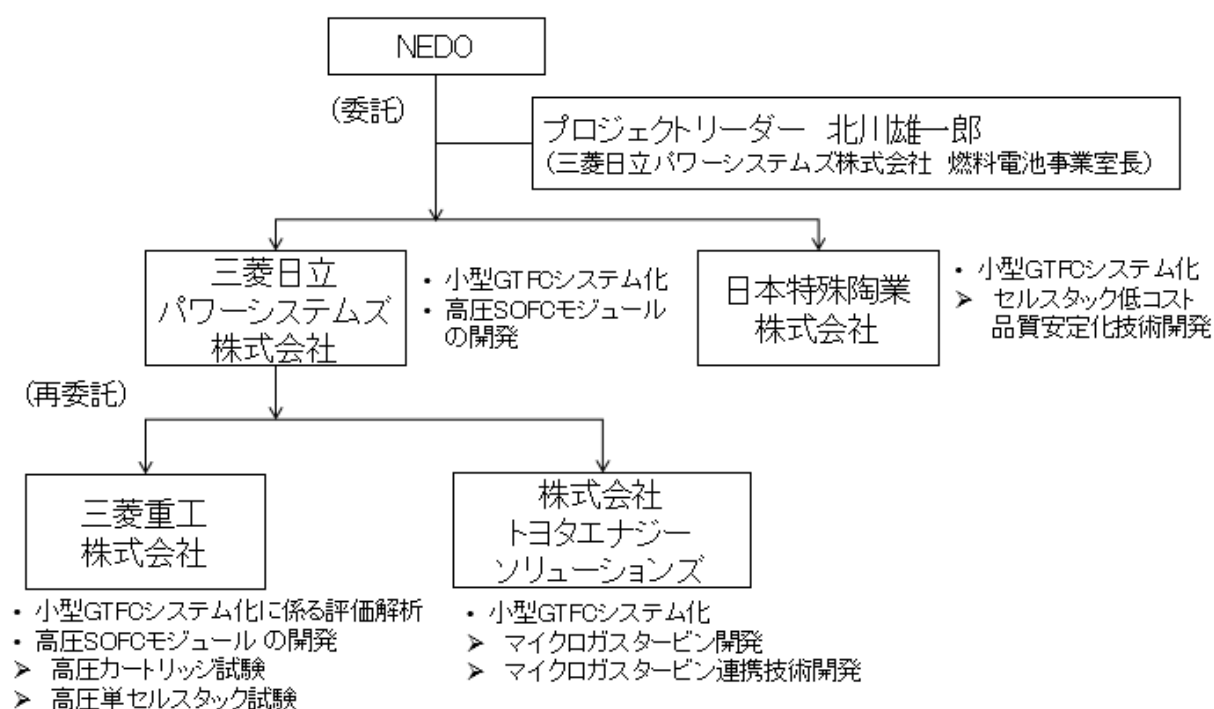


図 2-2-5 ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [④3] の実施体制

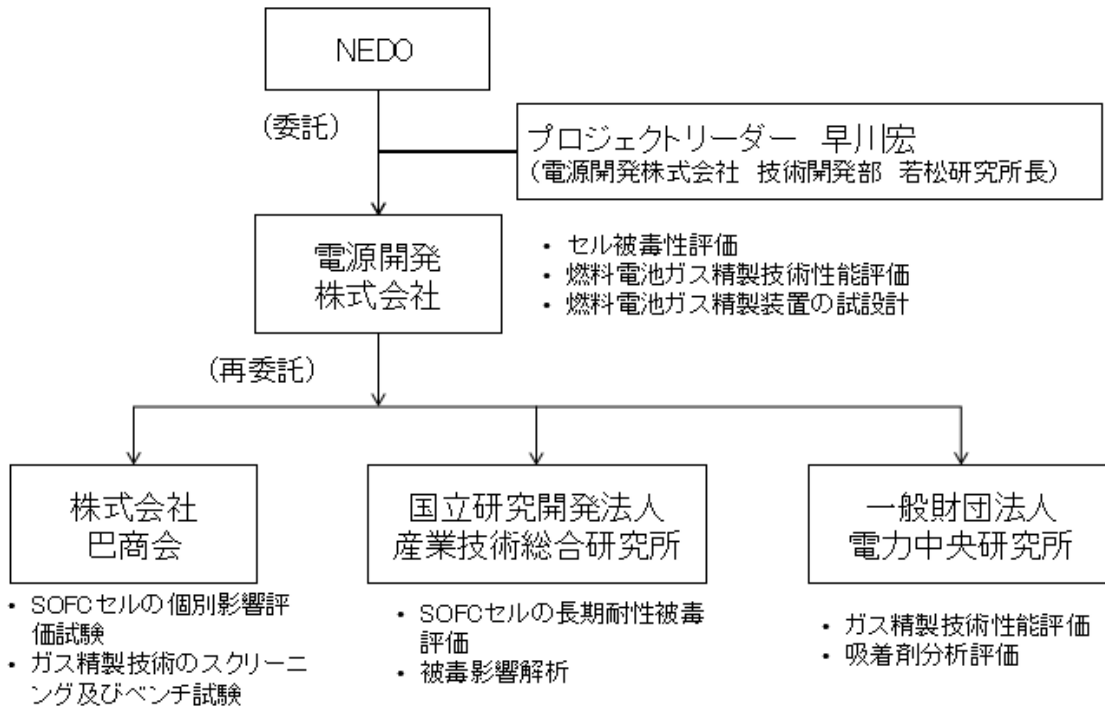


図 2-2-6 燃料電池向け石炭ガスクリーンアップ技術要素研究〔④2〕の実施体制

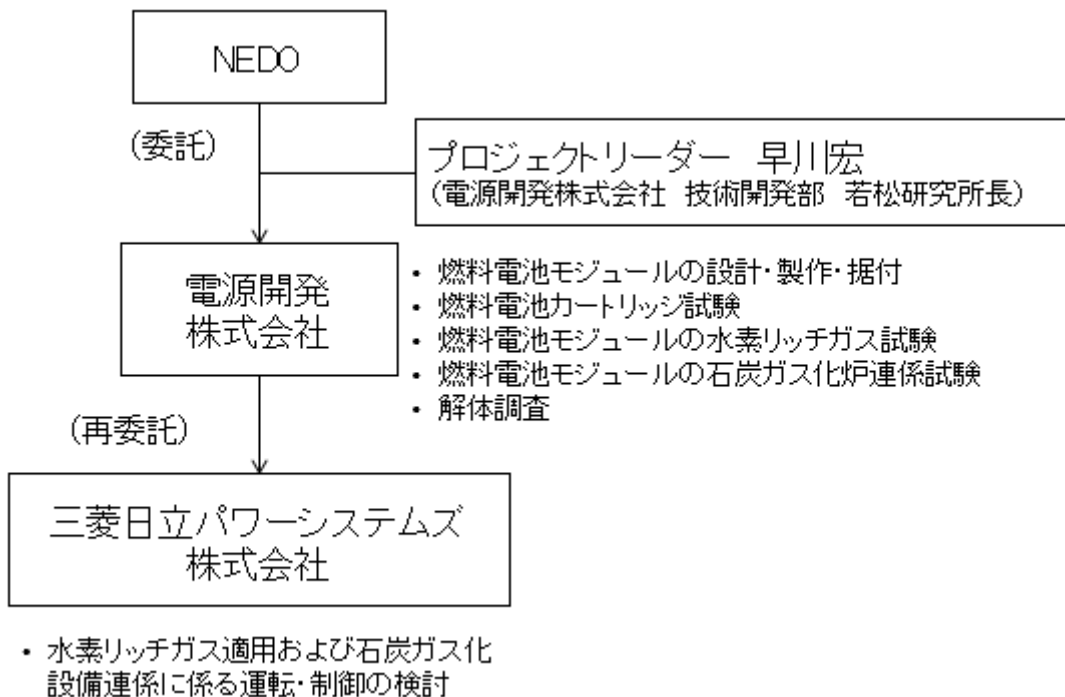


図 2-2-7 燃料電池石炭ガス適用性研究／燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究〔④4)-(2)〕の実施体制

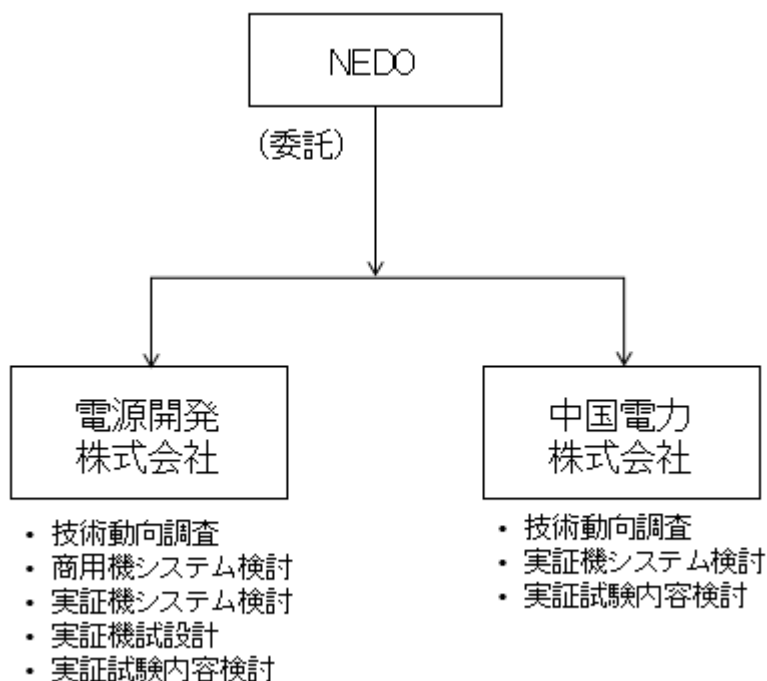


図 2-2-8 燃料電池石炭ガス適用性研究／IGFC システムの検討 [④4)-(1)] の実施体制

2-4. 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とともに、事業がスムーズに進捗するよう適切にマネジメントを行う。

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込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

PM は、外部有識者で構成する技術検討委員会を定期的に開催し、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。

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

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) 研究開発の実用化に向けた取組

本事業は、革新的な高効率発電技術である GTFC、IGFC の基盤技術を開発するものであり、本事業における実用化とは、成果を基に GTFC、IGFC の各技術開発が実証フェーズに移行することである。従い、実用化の定義は、「事業成果が IGFC 実証事業に活用されること、もしくは、中小型 GTFC を構成する主要な要素が開発され、発電システム構築の目処がつくこと」とする。

GTFC においては、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）のガスタービン連係技術を確立し、早期市場投入を目指す。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。

IGFC においては、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性がある。その成果を、2019 年 3 月より開始した CO₂ 分離・回収型 IGFC 実証事業の設計や運用計画に反映する。

(2) 実用化に向けた知財戦略

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

知的財産管理については、実施者は社内の知的財産部門と協議して、知的財産戦略上有望な開発成果については権利化について検討することとしている。また、共同実施者間及び実施者と再委託先との間では、知財の取扱に係る契約を締結し、成果の権利化について協議することとしている。

3. 情勢変化への対応

2014年4月に閣議決定された「第4次エネルギー基本計画」において、化石燃料については、次世代高効率石炭火力発電技術の開発・実用化を推進すること、また高効率LNG火力発電の技術開発を促進すること、とされた。これを受けて2015年7月に決定された「長期エネルギー需給見通し」において、石炭火力、LNG火力の高効率化を進めつつ環境負荷の低減と両立しながら活用することで、2030年の石炭火力の比率を26%程度、LNG火力の比率を27%程度とする方向性が示された。また、2015年12月にパリ協定が採択され、日本の目標としては、2030年度に2013年度比26%の温室効果ガスを削減することが提出されている中、達成に向けては石炭火力、LNG火力の高効率化が前提となっている。更に、2018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、IGCC・IGFC等の次世代高効率石炭火力発電技術の開発・実用化を推進すること、また高効率LNG火力発電の技術開発を促進すること、とする方針が維持されている。

このような外部状況に加え、GTFC、IGFCともに実用化に向けた取り組みが進展している。GTFCについては、段階的に大型化への流れが進展している。三菱日立パワーシステムズ(株)から上梓されている250kW級加圧型SOFCモジュールについて、三菱地所(株)、安藤ハザマ(株)より受注を受けている状況である。また、1MW級モジュールについても市場ニーズが見込まれており、本事業の成果を基に早期市場投入が待たれる。更に、2019年7月5日付プレスリリースによると、日本特殊陶業(株)と三菱日立パワーシステムズ(株)の間で、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しており、セルスタック量産化に向けた取り組みが加速している。

IGFCについては、技術導入の前提となるIGCCについて実用化に向けた取り組みが進んでいる。空気吹IGCCについてはすでに実証フェーズを終え、現在は540MW級商用機の建設が、勿来、広野で進んでおり、勿来は2020年の、広野は2021年の運転開始を計画している。また、酸素吹IGCCについて、実証試験は2018年度に完了し、大崎クールジェン(株)の親会社である電源開発(株)・中国電力(株)にて商用化の検討が進められている。2019年4月24日付プレスリリースによると、電源開発が山口宇部パワー西沖の山発電所の新設計画にて、酸素吹石炭ガス化複合発電(IGCC)による商用機開発への計画変更を検討する旨を表明している。

以上のように、GTFC、IGFCの実用化に向けた環境が整いつつあり、本事業の重要性は一層高まっている。

3. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

1-1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

表 3-1-1 ガスタービン燃料電池複合発電技術開発の中間目標（2019年度）および達成状況

研究開発項目	目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針	
①小型GTFCシステム化	(a)小型GTFCハーフモジュール実証	<ul style="list-style-type: none"> 高圧、大容量化対応のSOFCモジュール、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(1,000kW級)に使用するガスタービンの開発 マイクロガスタービン(MGT)とSOFCの連係技術確立 	<ul style="list-style-type: none"> 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 燃焼器温度を管理値内に抑制できる改良型のMGTを開発 SOFCとMGTを連係し、起動～昇温～SOFC低負荷の運転を実施 	△ (2019年度達成見込)	2019年度内にSOFCシステム性能を検証
	(b)セルスタック低コスト品質安定化技術	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	<ul style="list-style-type: none"> 連続炉模擬検証炉にて、窒素ガス量の増加や降温時のエア供給量増加などにより、連続化による焼成時間の短縮に目処が付き、品質を保ちつつ製造時間1/3を達成 成膜条件と成膜状態の関係を把握し品質を安定化 	△ (2019年9月達成見込)	焼成光熱費削減に向けたパラメータ試験を実施
	(c)高性能セルスタック検証	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温度分布改善の効果検証	<ul style="list-style-type: none"> 高性能セルスタックを用いたハーフモジュール試験計画の検討 	△ (事後)	2020年度から試験開始
②高圧SOFCモジュール開発	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	<ul style="list-style-type: none"> カートリッジにて高圧下(～2.1MPa)の試験を実施。また、放熱対策を実施。 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電圧低下特性を把握(低圧と同等) 	△ (2019年9月達成見込)	0.6MPa以上の運転圧力で放熱増加の傾向があり、放熱低減策を検討	

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み（中間）、×未達

表 3-1-2 ガスタービン燃料電池複合発電技術開発の最終目標（2021年度）および達成見通し

研究開発項目	現状	最終目標 (2021年度末)	達成見通し
①小型GTFCのシステム化 (a)小型GTFCハーフモジュール実証	MGTを改良型に換装し、SOFCと連係したシステム試験を実施し、性能を確認中	小型SOFCシステムを完成し、フルモジュール時1,000kW級、発電効率57%LHV(送電端)の見通しを得る。	2019年度中に目標達成の見込み
①小型GTFCのシステム化 (c)高性能セルスタックの性能検証	高性能セルスタックを用いたハーフモジュール試験計画の検討	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モジュール内温度分布改善の効果を検証し、GTFCの大容量低コスト化の見通しを得る	2021年度中に達成見込み

1-2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究

表 3-1-3 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究の最終目標(2017年度)および達成状況

研究開発項目	目標	成果	達成度
①セル被毒耐性評価	SOFCセルの被毒耐性を調べ、石炭ガス中の燃料電池被毒成分を特定する。	電池の性能に影響を及ぼす被毒成分はH ₂ SeとH ₂ Sであることを特定。	○
②燃料電池用ガス精製技術性能評価	既存の吸着剤について、SOFC被毒成分に対する除去性能を評価し、適用可能性の高い吸着剤を選定する。	特定した被毒成分を定量下限値以下まで除去可能となる最適な吸着剤を選定	○
③燃料電池用ガス精製装置の試設計	上記結果を基に吸着塔を試設計し、燃料電池用ガス精製装置について検討する。	実証機の脱硫塔および水素化物吸着塔の試設計を実施	○

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み(中間)、×未達

1-3. 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

表 3-1-4 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究の中間目標(2019年度)および達成状況

研究開発項目	目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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 水素リッチガスにCO₂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 	○	—
石炭ガス化炉連係試験	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COの影響把握	<ul style="list-style-type: none"> ガス化炉と燃料電池モジュールの連係工事を実施 	△ 2021年度達成見込	<ul style="list-style-type: none"> 2019年度に実ガス試験開始 2020年度に解体調査を実施

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み(中間)、×未達

表 3-1-5 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究の最終目標（2021 年度）および達成見通し

研究開発項目	現状	最終目標	達成見通し
⑨石炭ガス化炉連係試験	ガス化設備との関係に向けて連係系統及び燃料電池用ガス精製設備の設計・製作・据付を行い、試験を計画	石炭ガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの発電試験を実施し、運用性と性能を把握。課題を抽出し、IGFC実証機の設計・運用・試験計画へ反映する。	2019-2020年度にかけて達成見込み
⑩石炭ガス(COリッチガス)適用に係る技術検討	COリッチガス試験に向けて、熱力学平衡計算等から炭素析出領域を検討するとともに、COリッチガス運転での試験詳細と課題を検討中	COリッチガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの発電試験の結果から性能を把握し、実証機に向けた課題を抽出する。	2019-2020年度にかけて達成見込み
⑪燃料電池モジュールの解体調査	解体調査箇所、内容、費用等について検討中	運転終了後に解体調査を実施し、石炭ガス適用時の課題を抽出する。	2021年度に達成見込み

1-4. IGFC システムの検討

表 3-1-6 IGFC システムの検討の最終目標（2019 年度）および達成状況

技術課題	目標	成果	達成度
①高温燃料電池及びIGFCの技術動向調査	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。	事業用燃料電池の開発状況とIGFC実用化に向けた課題を明らかにした。	○
②商用機のシステム検討	CO2分離・回収型IGFCについて、CO2分離・回収方法や燃料電池設置位置等を検討し、望ましいプロセスフローを選定する。	商用CO2分離・回収型IGFCについてシミュレーションを実施し、最適なプロセスフローを選定した。	○
③実証に向けたシステム評価	実証機向け燃料電池の種類、発電容量、燃料電池への石炭ガス分岐位置、石炭ガス中の被毒成分の処理方法等を決定する。	実証機に適した燃料電池の仕様、プロセスフローを検討した。また、被毒成分に対する吸着材を選定し、処理方法を決定した。	○
④実証機試設計	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。	実証機の設計条件を明らかにし、システム系統、設備構成、物質収支、設備レイアウト、ユーティリティ等を明らかにした。	○
⑤実証試験内容の検討	IGFC実証機における試験内容を検討する。	実証すべき試験項目と試験工程を明らかにした。	○

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み（中間）、×未達

2. 研究開発項目毎の成果

2-1. ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

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）のガスタービン連係技術を確立し、2020 年度からの市場投入を目指す。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）技術確立に向け、本事業では中小型 GTFC の要素技術を確立するため、以下の事業を実施する。

【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連係技術を確立し、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 基のみで試験を行った。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 インバータ 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 排ガス 排熱回収</p> <p>定格空気流量 ≒ 7000m³/h</p>	<p>都市ガス インバータ 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 排ガス 排熱回収</p> <p>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 3-7 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

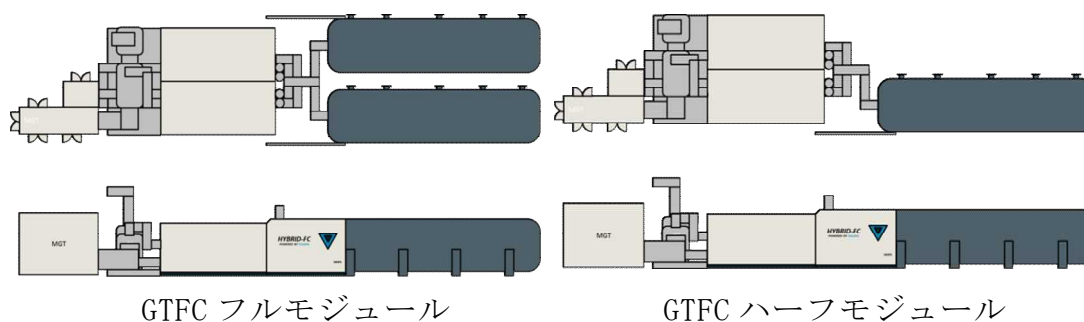
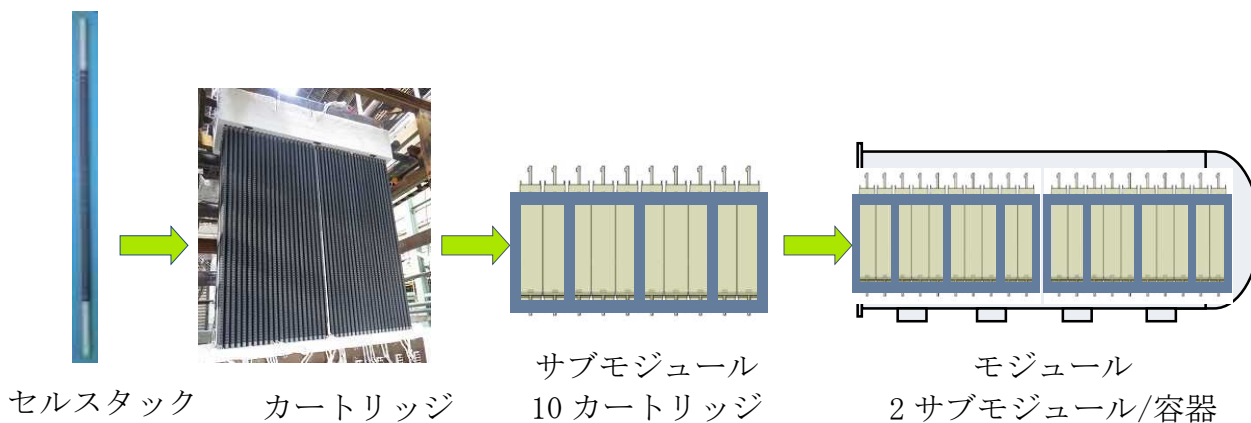


図 3-2-1-1 システム概要図と外観写真

(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、従来のカートリッジ構造では循環流が増加して発電室の温度が低下する可能性があった。この対策として断熱構造の見直しを行い、実際の試験結果から 0.6MPa 運転時の放熱量予測を行った。断熱構造の見直し概要を図 3-2-1-2 に示す。

図 3-2-1-2 に示すように、従来のカートリッジ構造では側面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により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ている。

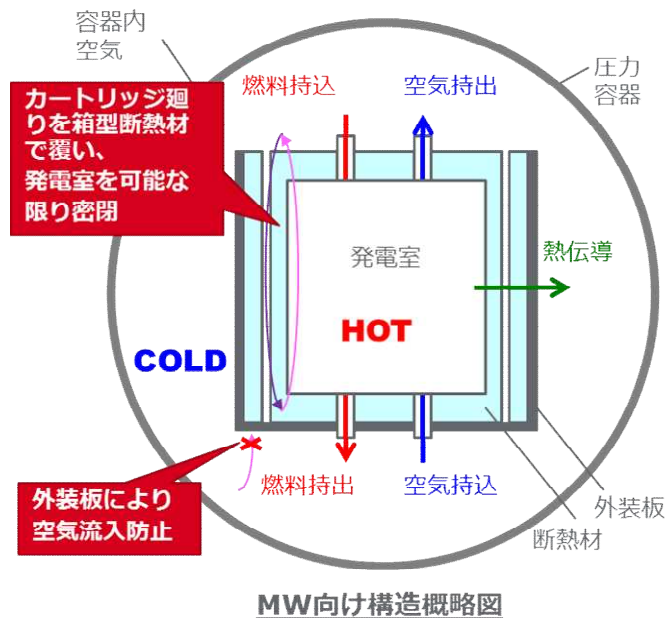
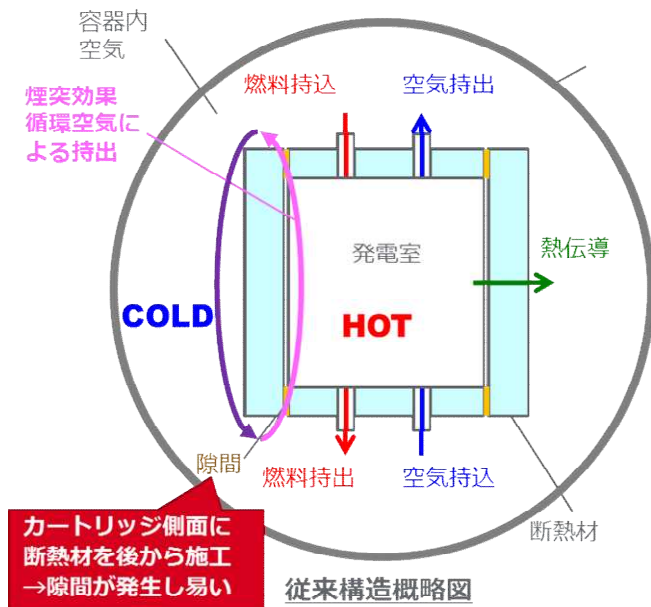


図 3-2-1-2 断熱構造の見直し

図 3-2-1-3 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り、0.23MPa にて放熱量が大幅に低減できることが確認できた。また、本結果をもとに 0.6MPa での放熱量を予測したところ、従来カートリッジ構造で 0.23MPa 発電時とほぼ同等の放熱量に抑制できる見込みを得た。

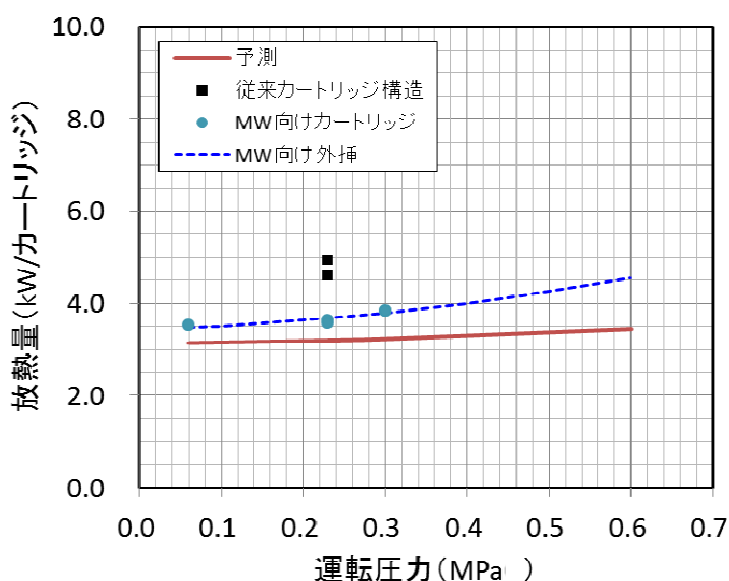


図 3-2-1-3 カートリッジ放熱量の比較

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 3-2-1-4 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に比例して起電力が向上しつつ、セル抵抗が低下して作動電圧が向上し、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 3-2-1-5 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。

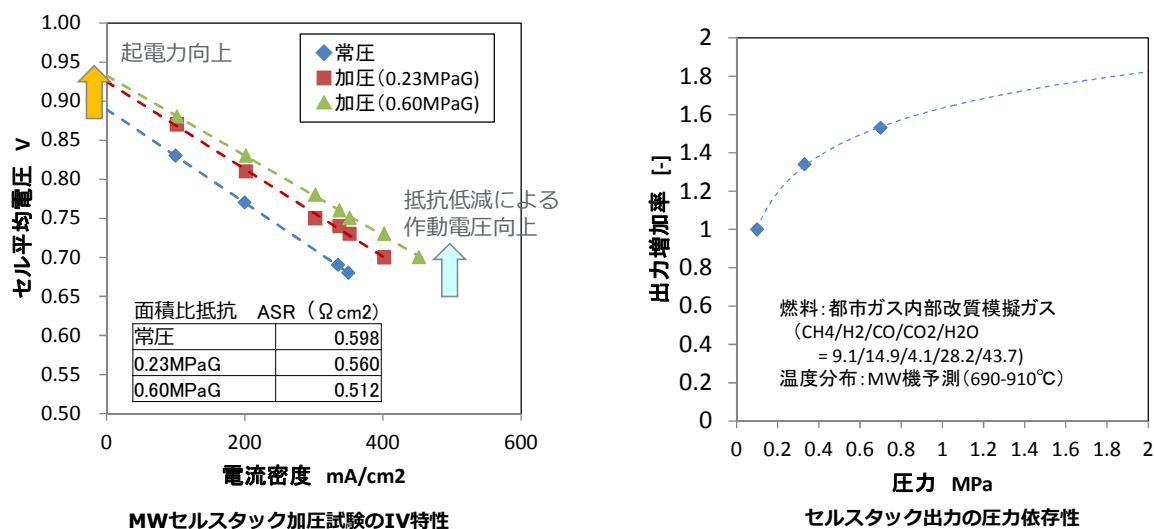


図 3-2-1-4 加圧運転時のセルスタック発電性能

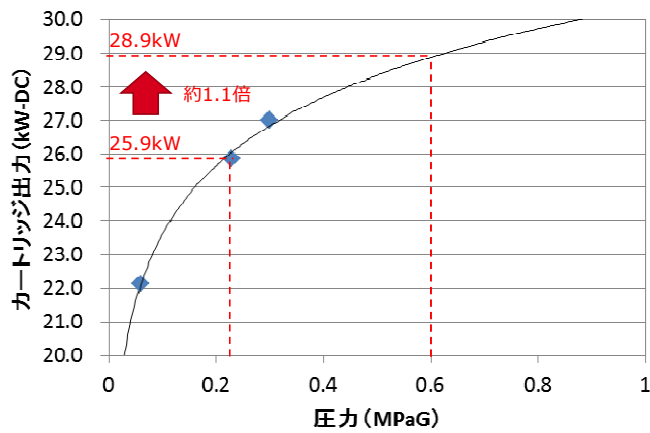


図 3-2-1-5 加圧運転時のカートリッジ発電性能

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 3-2-1-6 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 3-2-1-7) に実際の試験で得られた温度データをプロットしたところ、解析値と計測値が良く一致していることが確認できた。

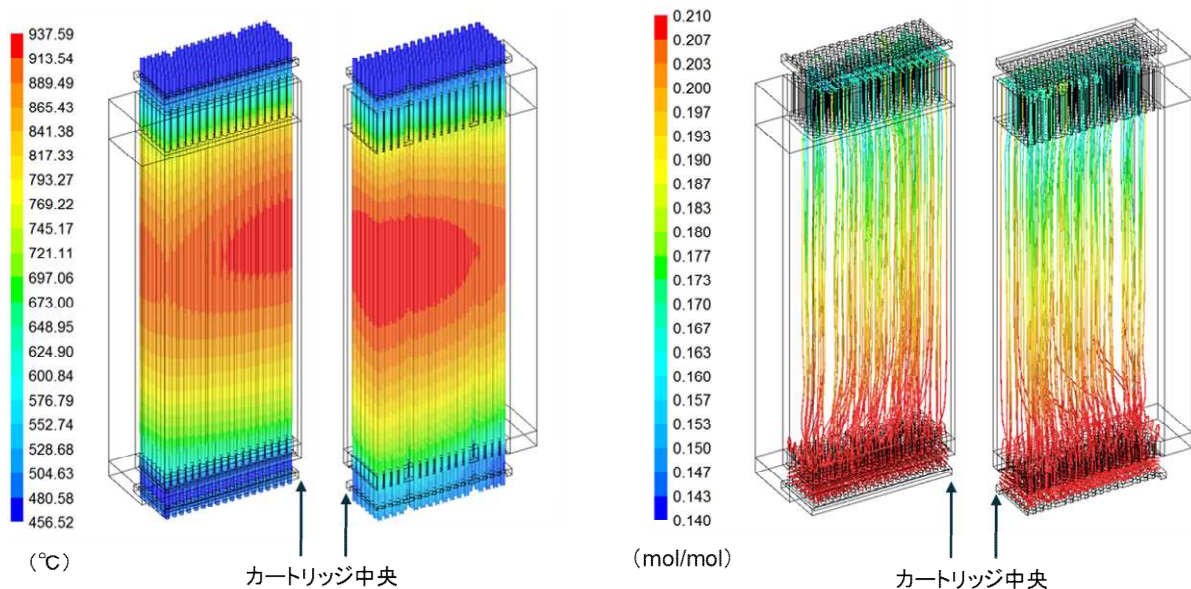


図 3-2-1-6 セルスタック温度分布／空気流線図

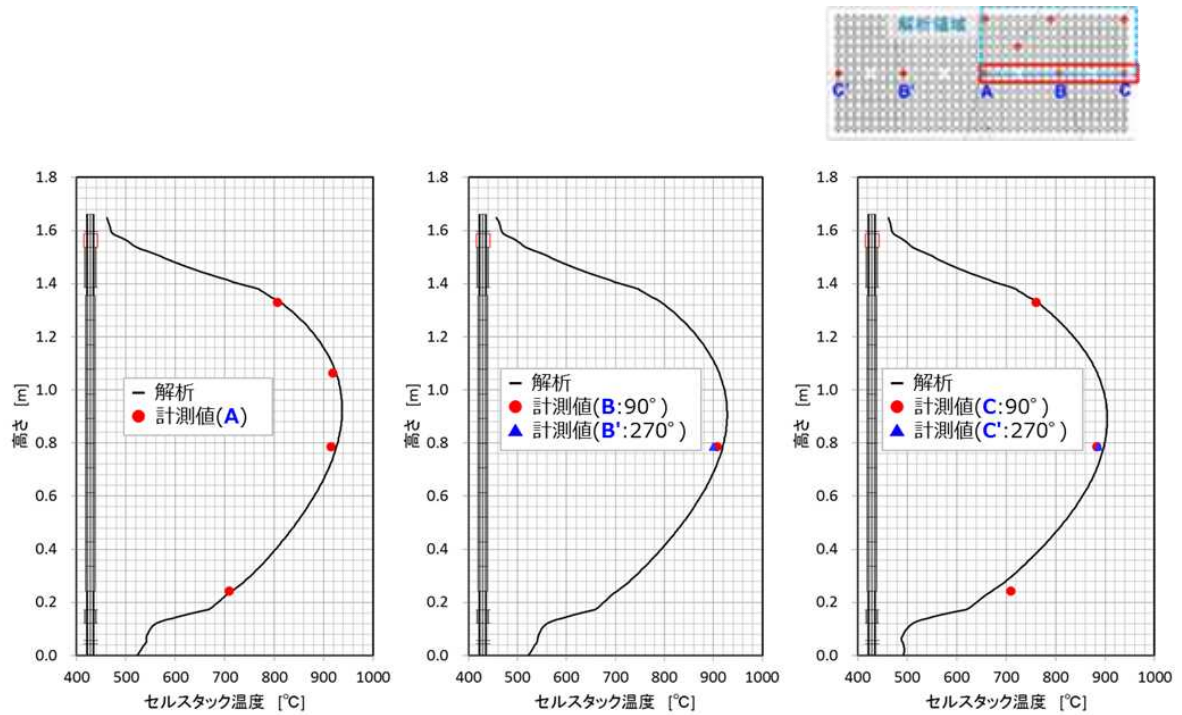


図 3-2-1-7 セルスタック温度分布—解析値と計測値

(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 3-2-1-8 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。

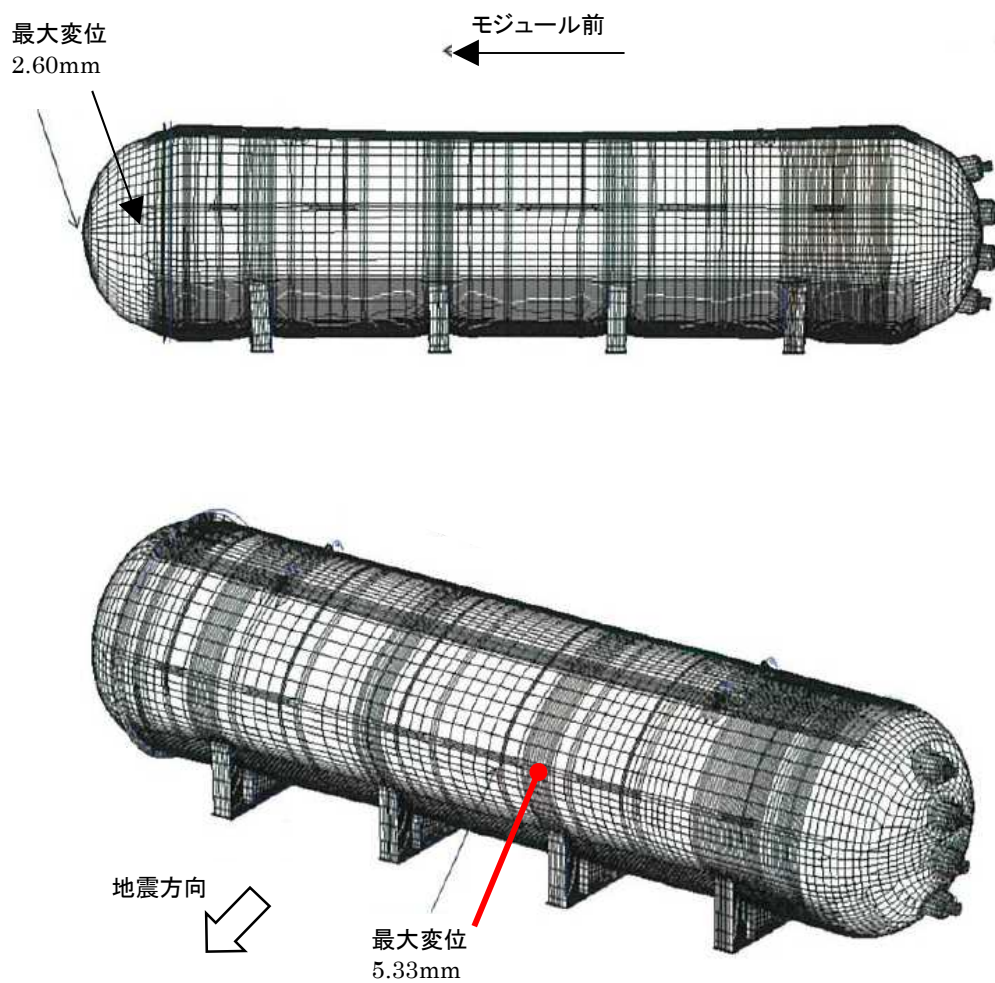
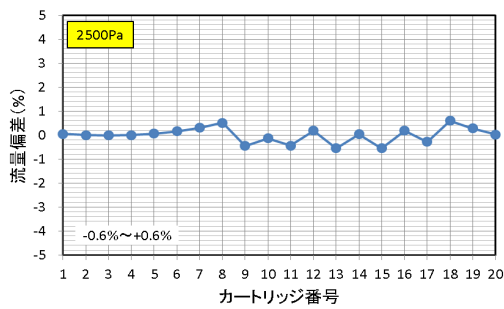


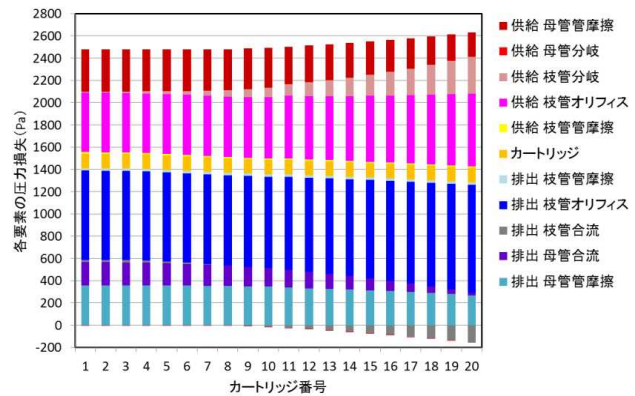
図 3-2-1-8 モジュール容器の運転時および地震時の変位量

(i-1-4) モジュール特性評価

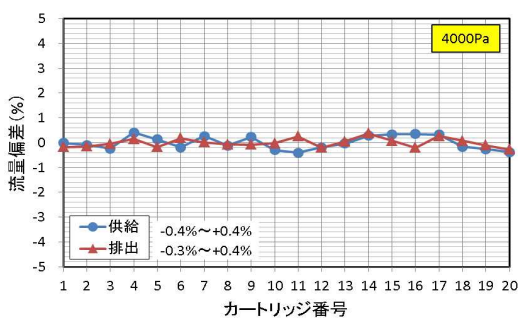
モジュール容器内の各カートリッジに燃料と空気を均等に供給するため、カートリッジ間分配予測の精査及びカートリッジ枝管に設置するオリフィス径の選定を行った。選定したオリフィス径での流量偏差および圧力損失の計算結果を図 3-2-1-9 に示す。燃料系統での流量偏差は $-0.6\sim+0.6\%$ と十分小さく、圧力損失も目標としていた $2,500\text{Pa}$ 以下を達成した。空気系統についても流量偏差は $-0.4\sim+0.4\%$ に収まっており、圧力損失も目標である $4,000\text{Pa}$ 以下を達成した。



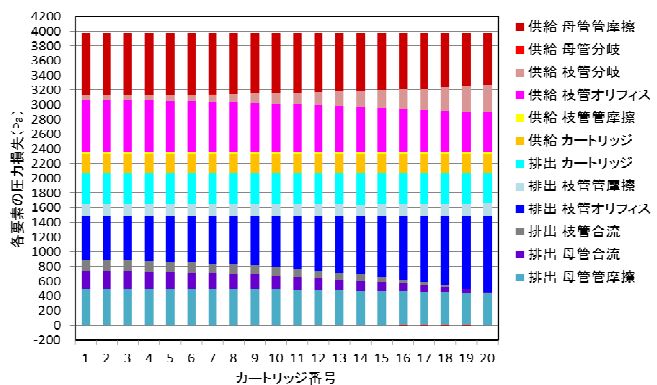
燃料系統の流量偏差



燃料系統の各部圧損



空気系統の流量偏差



空気系統の各部圧損

図 3-2-1-9 各カートリッジの流量偏差/圧力損失

※各要素の説明

供給	母管管摩擦	供給側母管で発生する、分岐以外の圧損	排出	枝管管摩擦	排出側枝管で発生する、分岐・オリフィス以外の圧損
供給	母管分岐	供給側の(母管→枝管)の分岐で発生する圧損の母管分	排出	枝管オリフィス	排出側の枝管オリフィスで発生する圧損
供給	枝管分岐	供給側の(母管→枝管)の分岐で発生する圧損の枝管分	排出	枝管合流	排出側の(枝管→母管)の合流で発生する圧損の枝管分
供給	枝管オリフィス	供給側の枝管オリフィスで発生する圧損	排出	母管合流	排出側の(枝管→母管)の合流で発生する圧損の母管分
供給	枝管管摩擦	供給側枝管で発生する、分岐・オリフィス以外の圧損	排出	母管管摩擦	排出側母管で発生する、分岐以外の圧損
	カートリッジ	カートリッジ入口～出口で発生する圧損 (なお空気側は供給・排出各々で区分した)			

(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 3-2-1-10 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。

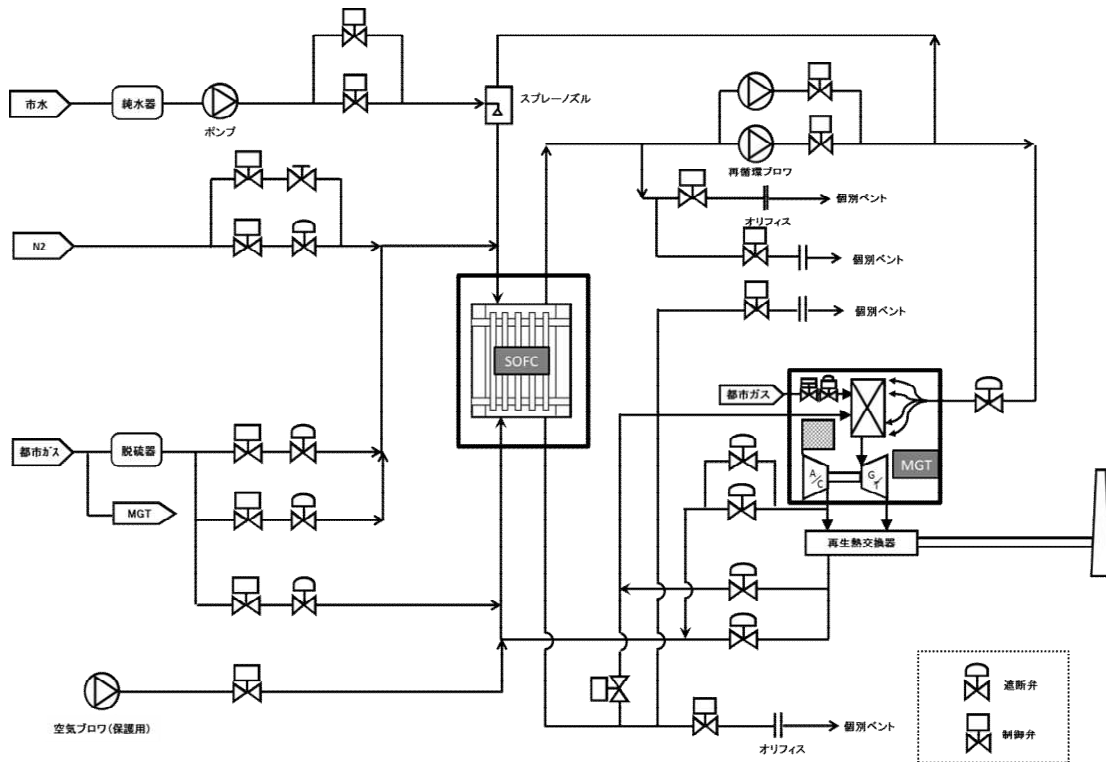


図 3-2-1-10 小型 GTFC システム系統

(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 3-2-1-11 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。

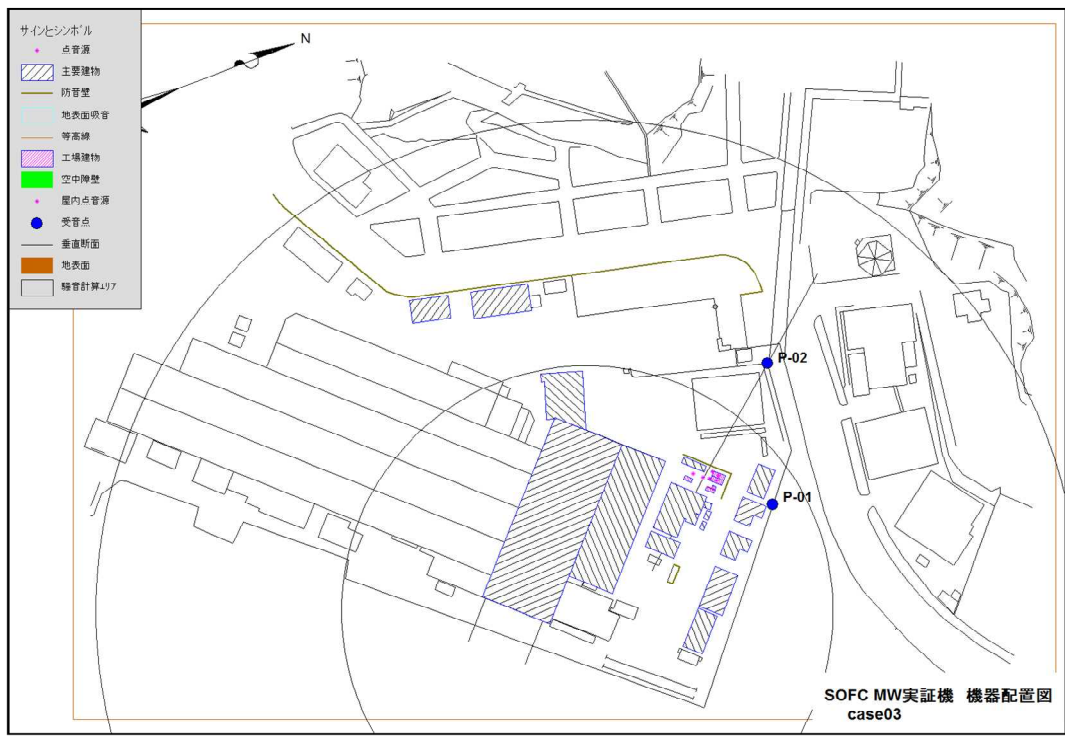


図 3-2-1-11 評価点と機器配置の位置関係

表 3-2-1-3 音源対象機器

項目	各機器の設定値
MGT	放射音：0. A. (Overall 値) 73. 4dB (A)
ガスコンプレッサ	放射音：0. 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 (0. 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 (0. 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：0. A. 68dB (A)
MGT 排ガスサイレンサ	放射音：0. A. 68. 6dB (A)
蒸気ボイラ	放射音：0. A. 68. 2dB (A)

騒音予測結果を表 3-2-1-4 に、騒音コンタ図を図 3-2-1-12 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 55.6dB(A) に対して予測値 44.5dB(A) である。評価点高さ 15m 地点では 48.5dB(A) 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	○

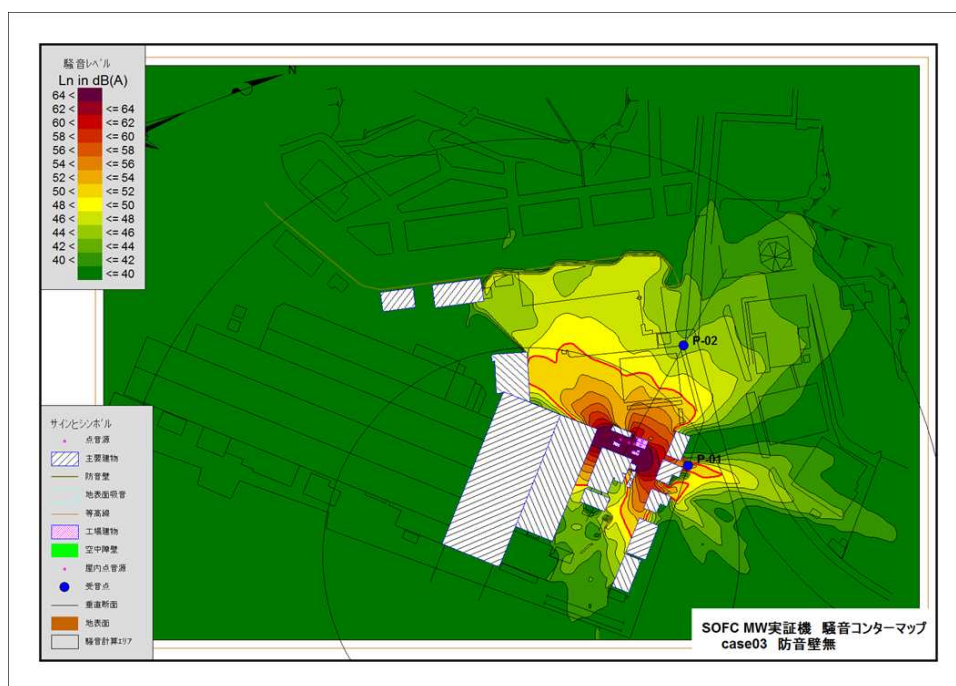
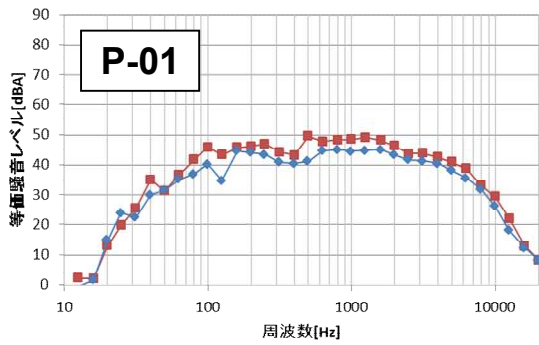
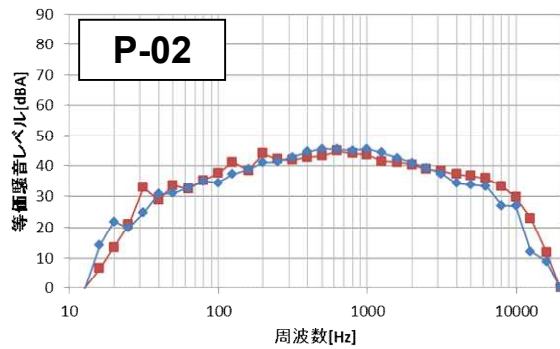


図 3-2-1-12 騒音コンタ図

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 3-2-1-13 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。



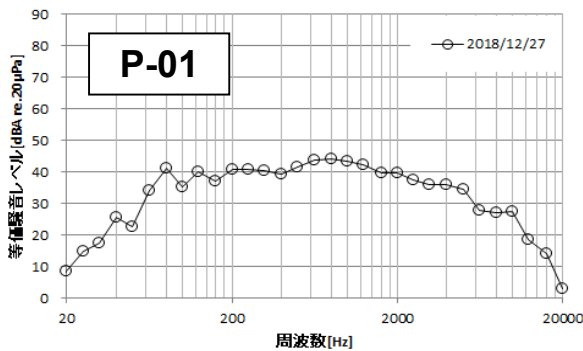
Overall 値: 59.2dBA



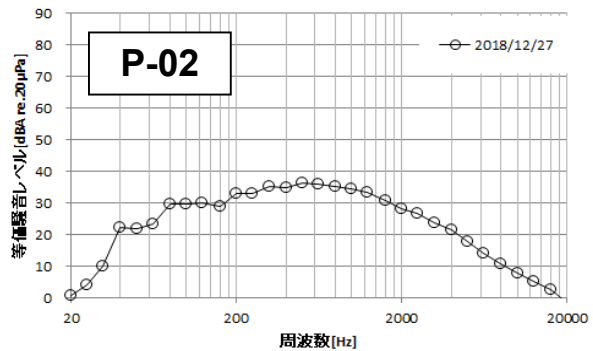
Overall 値: 60.9dBA

図 3-2-1-13 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 3-2-1-14 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。



Overall 値: 53.4dBA

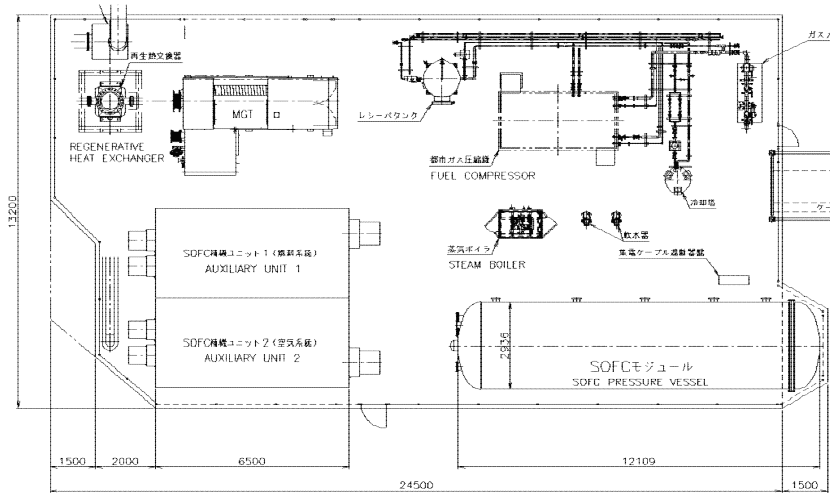


Overall 値: 45.3dBA

図 3-2-1-14 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 3-2-1-15 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 3-2-1-15 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°C	295kW@25°C
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 3-2-1-16 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 との連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 との連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。

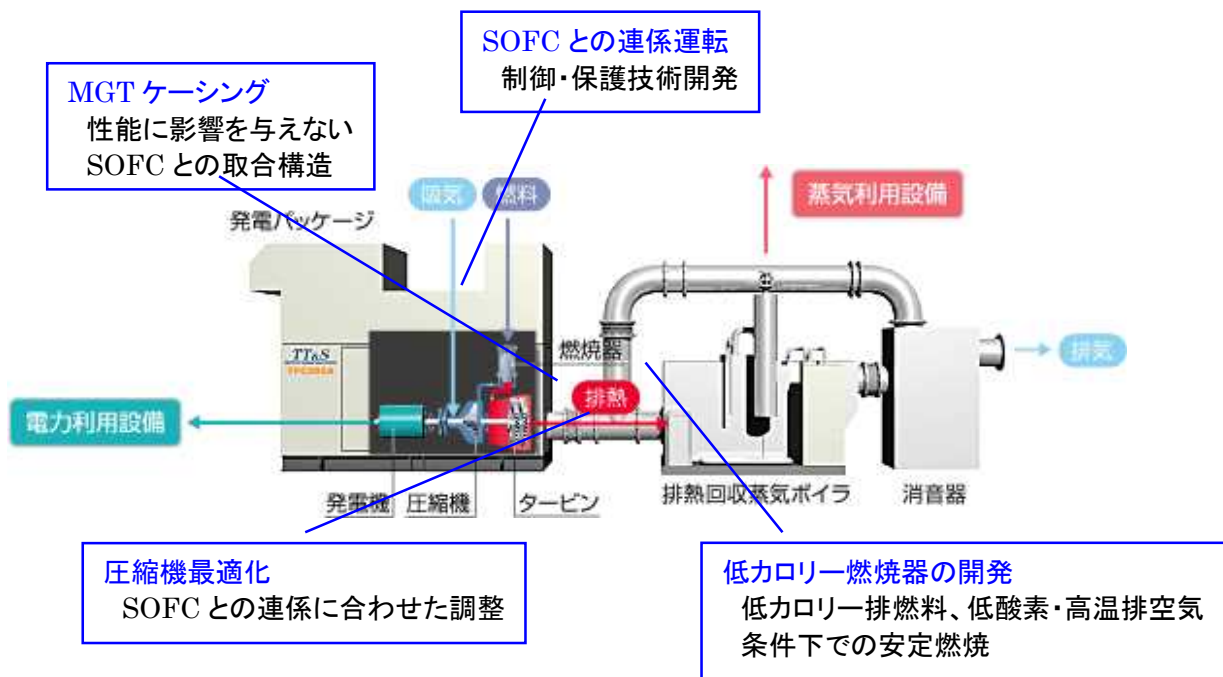


図 3-2-1-16 小型 GTFC 向け MGT 開発項目

(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 の発電をおこなっている。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 ハイブリット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。これまでに 5 個の試作を実施しており、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ている。

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する。

- 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（図 3-2-1-17）、壁面温度が大幅に低下することが確認できた。

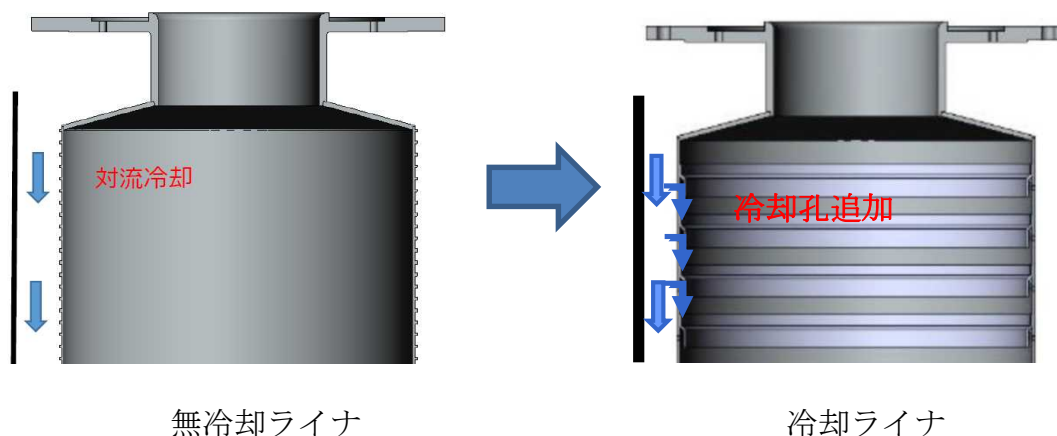


図 3-2-1-17 燃焼器壁面温度高対策

(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 に適合するために平成 29 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により MGT の 1 段目静翼に流入する燃焼空気を減少させ、サージマージンを確保する運転方法に見直した。本運転方法を採用することで MGT 圧縮機の空気流量を減少させる必要がなくなり、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 へ供給する必要がある。また SOFC において反応を終えた空気（排空気）のタービンへの供給および低カロリー燃焼器を接続する必要があり、MGT ケーシングを試作した。試作したケーシングを組み込んだ MGT（図 3-2-1-18）をハーフモジュール実証機に搭載し評価を開始した。

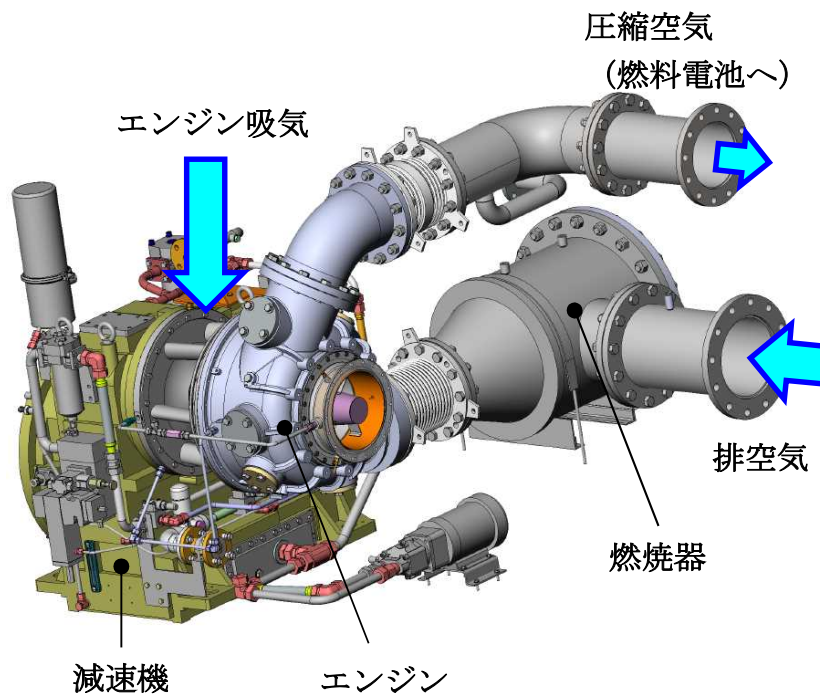


図 3-2-1-18 小型 GTFC 用 MGT エンジン

小型 GTFC 向けの MGT、低カロリー燃焼器、MGT 制御バルブ等の補機類を収納することができるパッケージ（図 3-2-1-19）をハーフモジュール実証機に組み込んだ。また MGT の排気騒音を敷地境界における規制値 55dBA 以下に低減をはかるため排気サイレンサーを設置している。

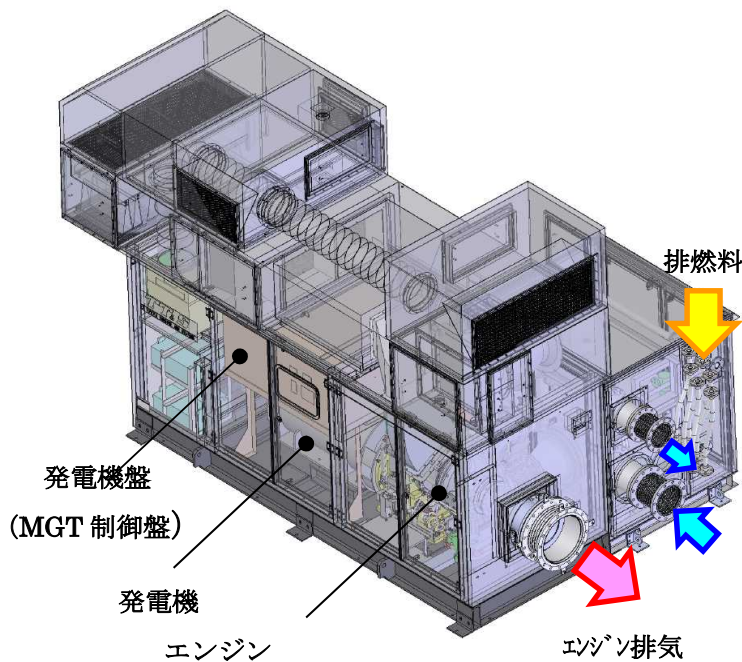


図 3-2-1-19 小型 GTFC 用ガスタービンパッケージ

(ii-4) SOFC との連係運転

SOFC と連係をおこなうため、250 kW 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ている。SOFC との組合せシステムにおいて必要なバルブ制御や小型 GTFC 向けの排ガス中の窒素酸化物を低減する為におこなう蒸気噴射の制御を追加した。またハーフモジュール実証機にて燃焼器の燃料ノズル周辺の温度が高くなる条件が確認されたため、窒素酸化物を低減するための蒸気噴射システムから蒸気を噴射することにより冷却をはかる制御を追加している。あわせて、エンジン運転中に MGT 運転時に圧損増加により MGT 圧縮機サージに至る可能性がある場合、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。本問題については(ii-5)にて詳細を記す。

(ii-5) SOFC への供給空気量増加に関する MGT 本体の改良

(ii-4)にて記載のとおり、MGT 単体試験にて MGT の圧縮機から SOFC へ供給される空気量が MGT の吸込み空気量と比較して 20%以上少ないことが判明した。空気量が少ない要因として、圧縮機からタービン側への内部バイパスが考えられる。内部バイパスは通常 MGT 内部部品の勘合部のクリアランスにより発生しているが、通常コージェネレーションで使用する場合は内部バイパスが発生してもタービン側へ流入する空気量は変わらない為 MGT 性能への大きな影響はない。しかし SOFC と連係運転を実施する場合、SOFC への空気量の減少は SOFC 出力および効率を低下させるため、MGT の内部バイパス量は最小限にする必要がある。

この問題を解決するため、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なるケーシング構造へ構造を変更した (図 3-2-1-20)。本構造は、圧

縮機とタービン部を分離するため、圧縮空気が内部パイパス箇所を経由しない。従って、グランドリークと呼ばれる冷却およびシール等に用いられる空気以外の全量が SOFC へ供給可能となり、SOFC への供給空気量増大が期待できる。内部パイパスを低減させた MGT はスクロールコンプレッサおよびタービンハウジング、エンジンハウジングと呼ばれるケーシングから構成されるが、これらの部品の試作をおこなった。MGT 主軸系（圧縮機およびタービンロータ）についてはこれまでの構成を使用している。

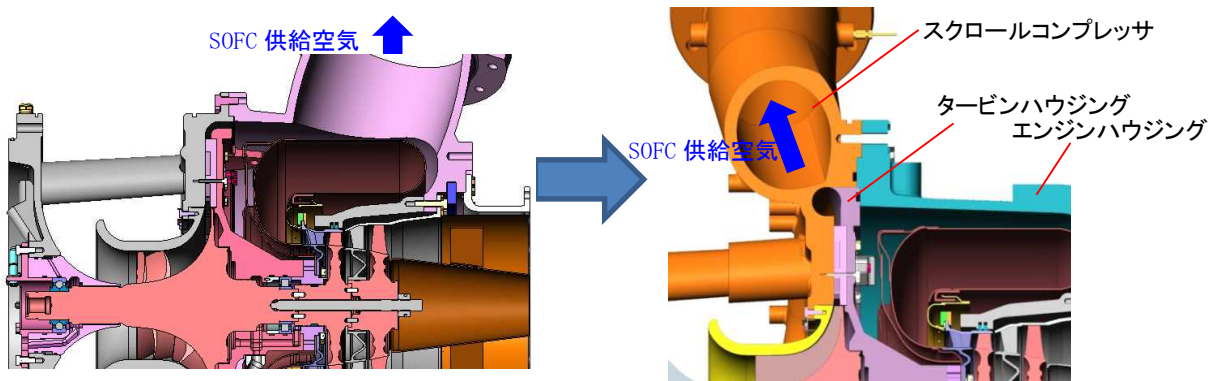


図 3-2-1-20 SOFC 供給空気流量低下対策

試作したスクロールコンプレッサ等を採用した MGT についてトヨタエネルギー社内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。

さらにトヨタエネルギー社内にある 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 と連係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、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（図 3-2-1-21）。また MGT 圧縮機のサージ特性を確認し、これまでの MGT と同等のサージマージンが確保されていることを確認した。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。

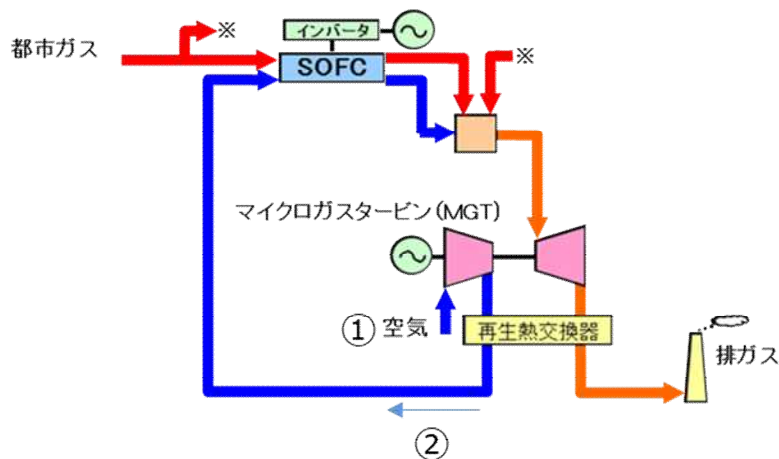


図 3-2-1-21 SOFC 供給空気流量確認

試作した MGT および冷却ライナ燃焼器を MHPs 長崎工場に設置されるハーフモジュール実証機へ搭載した。搭載後、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。今後、ハーフモジュール実証機において組み合わせ運転評価を実施する。

(iii) ガスタービンとの関係運転技術の確立

(iii-1) SOFC-MGT 関係運転技術

図 3-2-1-22 に示すように、昇温開始時は、MGT 出力を高め MGT 排気温度を高めることで SOFC モジュールを昇温し、一定温度到達後、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“発電室燃焼”にて発電に必要な温度まで昇温する関係運転技術を確立した。また、負荷電流 24mA/cm² (定格 330mA/cm²、7%負荷) まで印加し、問題なく運転できることを確認した。運転圧力も高まったが差圧も起動～昇温～低負荷まで安定に制御できることを確認した。

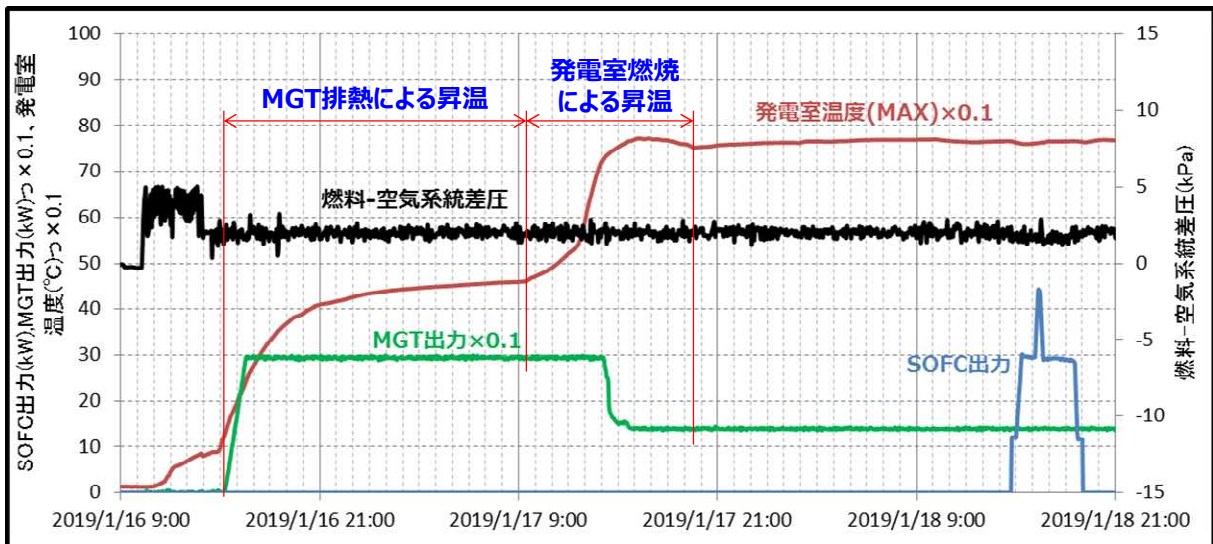


図 3-2-1-22 昇温時における MGT 関係運転

(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。

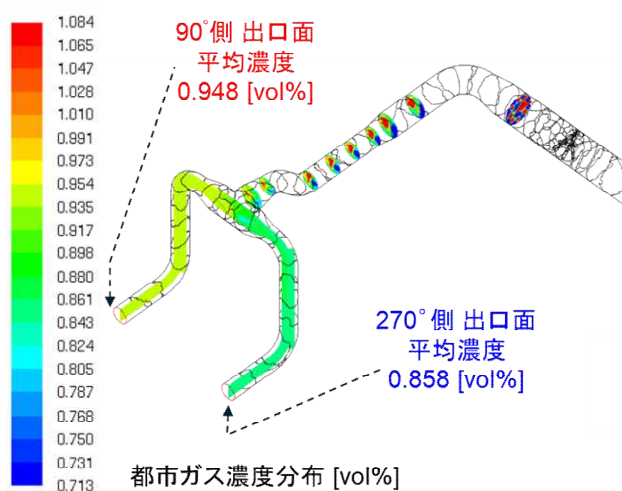


図 3-2-1-23 主系統ノズル解析

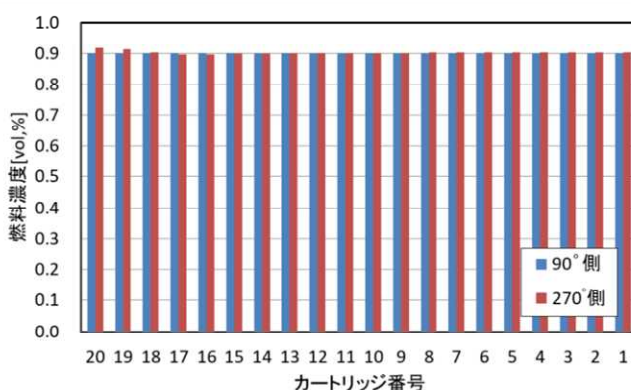


図 3-2-1-24 各カートリッジ都市ガス濃度

(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、図 3-2-1-22 に示す通り、0.2MPa 級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、他)

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必要があるため、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り、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)。

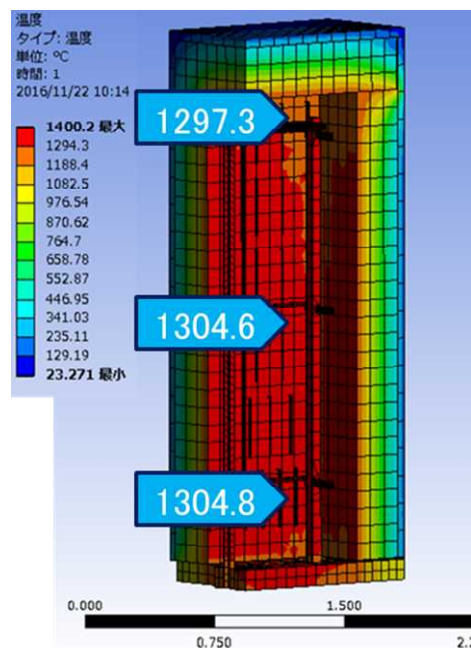


図 3-2-1-25 焼成温度解析結果

【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】

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条件を各種変更し、製造時間短縮に向けた検証試験を実施した。具体的には、窒素ガス供給量の増加による炉内換気効率の向上、降温時のエア供給量増加による焼成時間の短縮により、目標である製造時間 1/3 を達成した（図 3-2-1-26）。

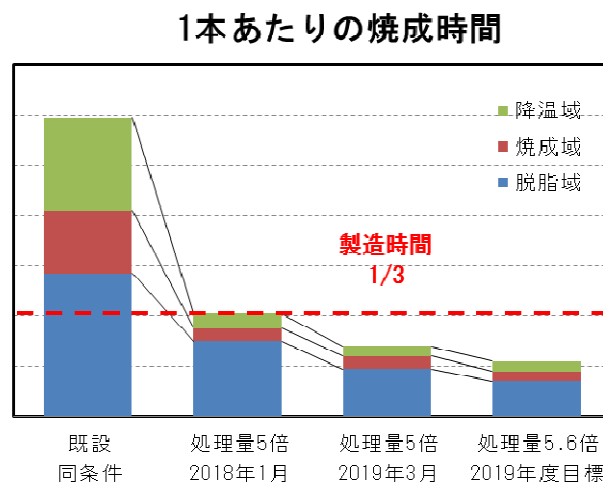


図 3-2-1-26 1本あたりの焼成時間

しかしながら、焼成工程におけるエネルギー使用量（電気、ガス）の観点では、焼成サヤを無くした構造の適用により電気の使用量は削減できたものの、換気効率向上のための窒素ガス使用量が増加したため、顕著な削減が見られなかった（図 3-2-1-27）。そのため、2019年度は焼成処理量の増加且つ処理時間の短縮、及び窒素ガス使用量の低減によるエネルギー使用量を削減する量産技術の確立を目指す。

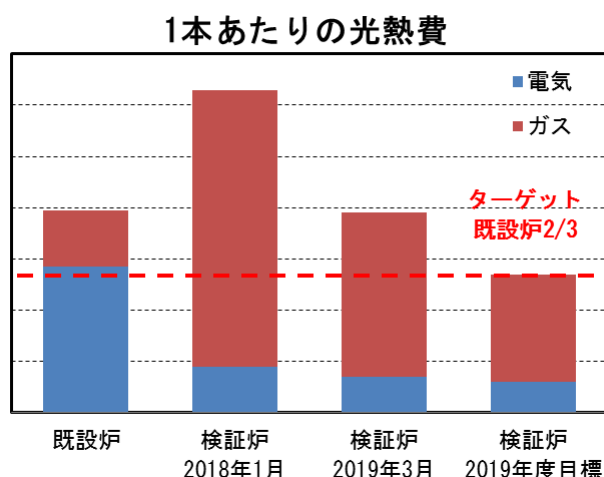


図 3-2-1-27 1本あたりの光熱量

【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、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 3-2-1-28)

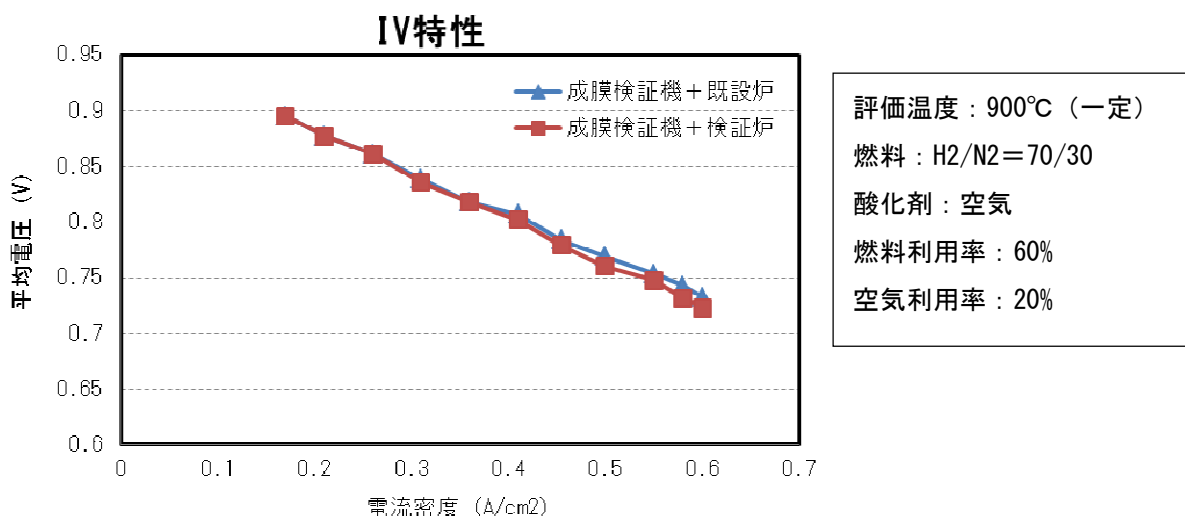


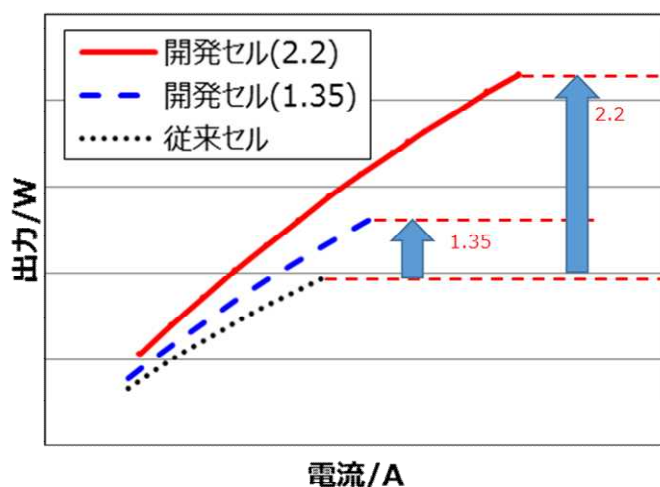
図 3-2-1-28 発電特性

(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、発電性能を高めることができる目処を図 3-2-1-29 に示す通り、独自開発で得ており、検証を進めている。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。



単セル試験結果

図 3-2-1-29 高性能セルスタックによる出力増加 (独自開発)

(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する。

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み込む。2 カートリッジとするのは、図 3-2-1-30 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 3-2-1-31 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 20 台のカートリッジのうち、5 台を取り出し、高性能カートリッジ 2 台を組み込む。

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・検証を実施する。

高性能カートリッジのモジュール、並びに小型 GTFC ハーフモジュール実証機での特性評価結果から、小型 GTFC のシステム基本構成を改良設計する。また、関連する他事業等の成果と本継続研究で得られた成果を組み合わせ、IGFC にも適用できる SOFC システムの基本構成の改良検討を行い、関連する他事業等の成果に反映する予定である。

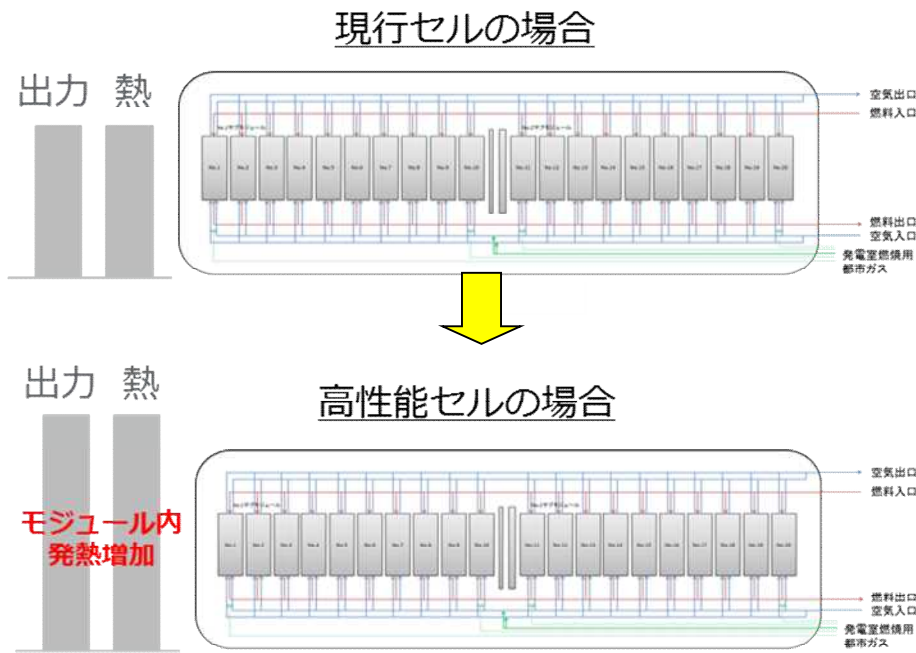
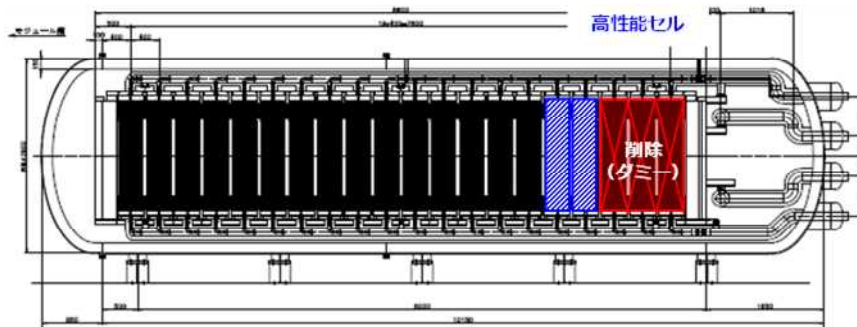


図 3-2-1-30 モジュール実証機への高性能セルスタック適用法の検討



高性能セル適用時の課題	対応策
発熱増加・温度分布の拡大	ガス増量、断熱構造検討開発等
ガス分配の偏り拡大	ガス分配均等化構造検討開発等
実機での起動停止特性検証	起動停止試験にてパラメータ最適化
実機での性能検証	実機での性能評価・課題の抽出

図 3-2-1-31 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

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 3-2-1-32 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となっている。



カートリッジ外観



サブモジュール化

図 3-2-1-32 高圧試験用カートリッジ

(ii) カートリッジ圧力特性試験

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。

その後、カートリッジを移設し、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 3-2-1-33 に示す。

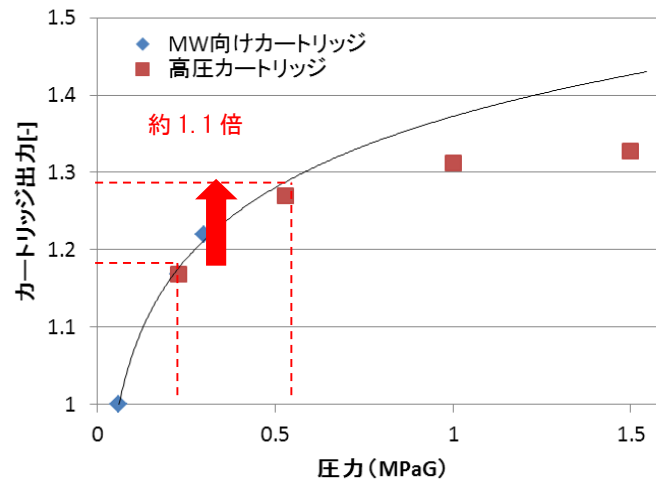


図 3-2-1-33 カートリッジ出力の圧力依存性 (高圧試験その 1)

0.53MPaGでのカートリッジ出力は0.23MPaGの約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。

(iii) 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。この隙間にて図 3-2-1-34 に示すサブモジュール内外のガス循環が発生し、発電室内の熱が持ち出されていると推定される。この問題解決の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) にて評価を行うこととした。

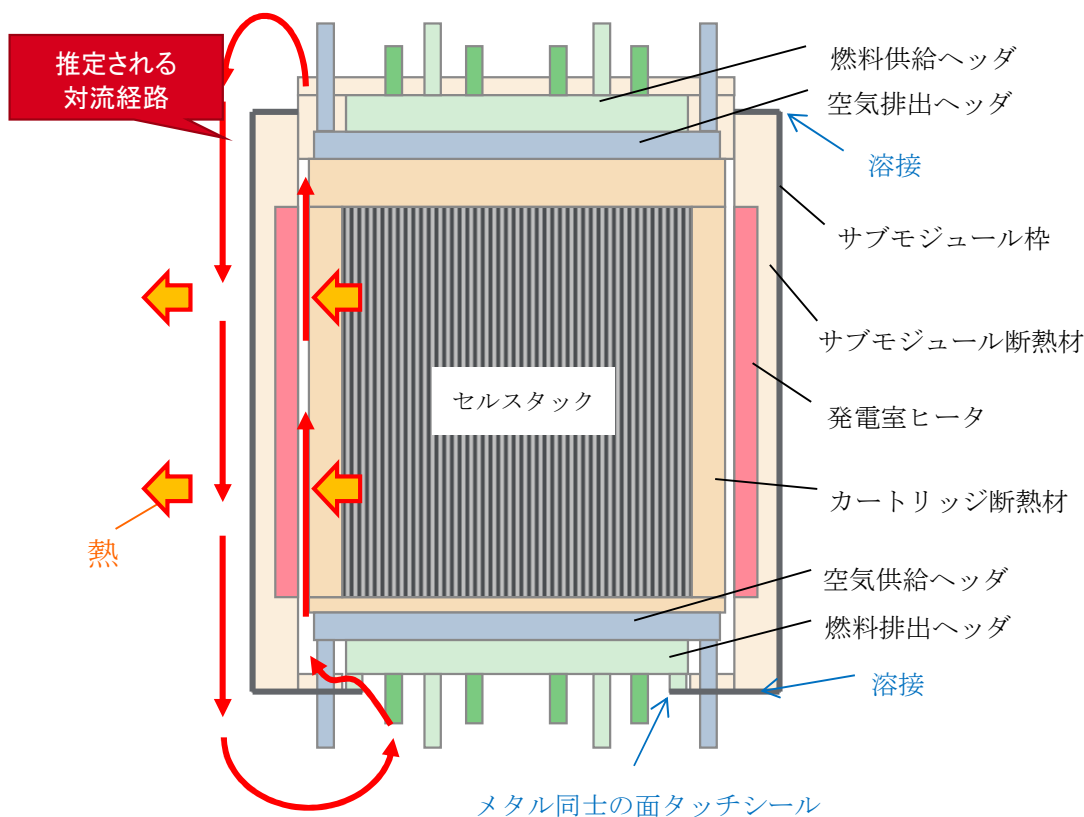


図 3-2-1-34 推定されるカートリッジ放熱経路

(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。その結果を図 3-2-1-35 および図 3-2-1-36 に示す。

カートリッジ出力は予想曲線と概ね一致する結果となり、放熱対策が一定の効果を上げたことが確認できた。一方、放熱量は試験前に予測していた放熱量よりも大きく、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り、高圧化の課題であることが分かった。

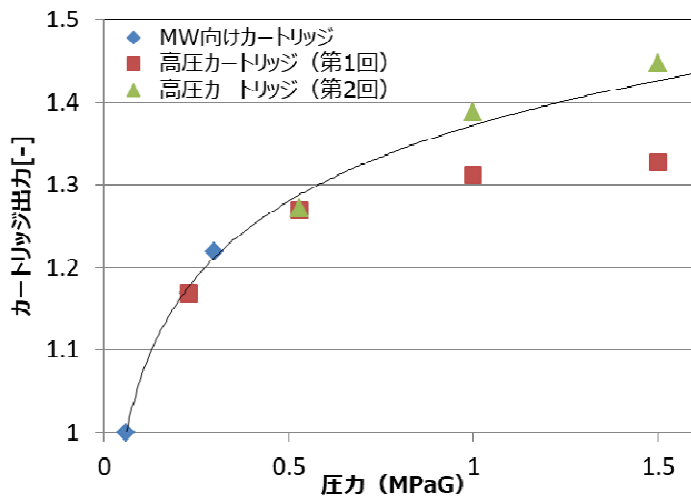


図 3-2-1-35 カートリッジ出力の圧力依存性（高圧試験その 2）

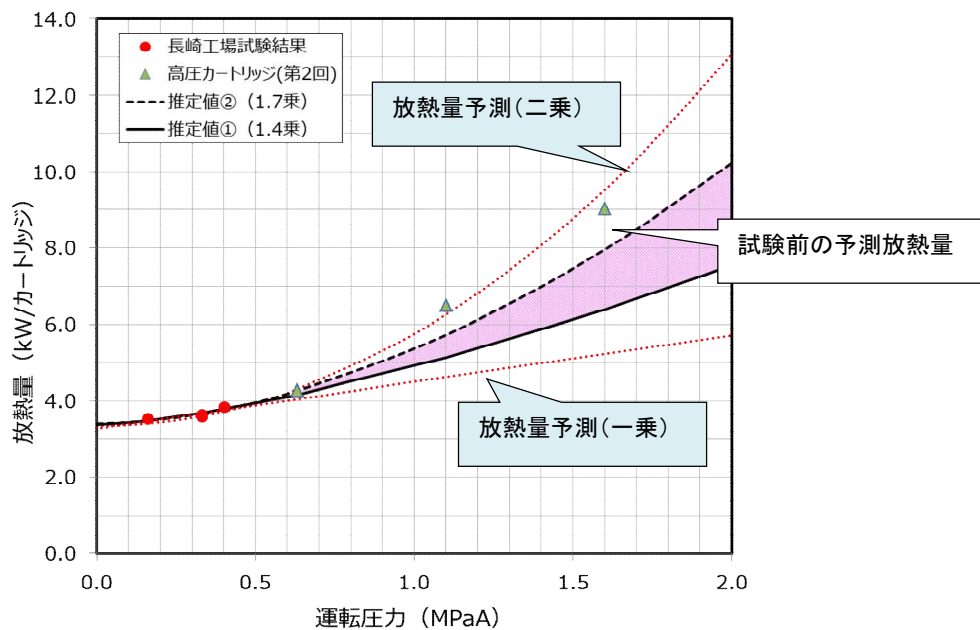


図 3-2-1-36 放熱量の運転圧力依存性

(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。本試験から得られた IV 特性から運転点（セル平均電圧 0.75V）での出力を計算し、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が得られた。その結果を図 3-2-1-37 に示す。

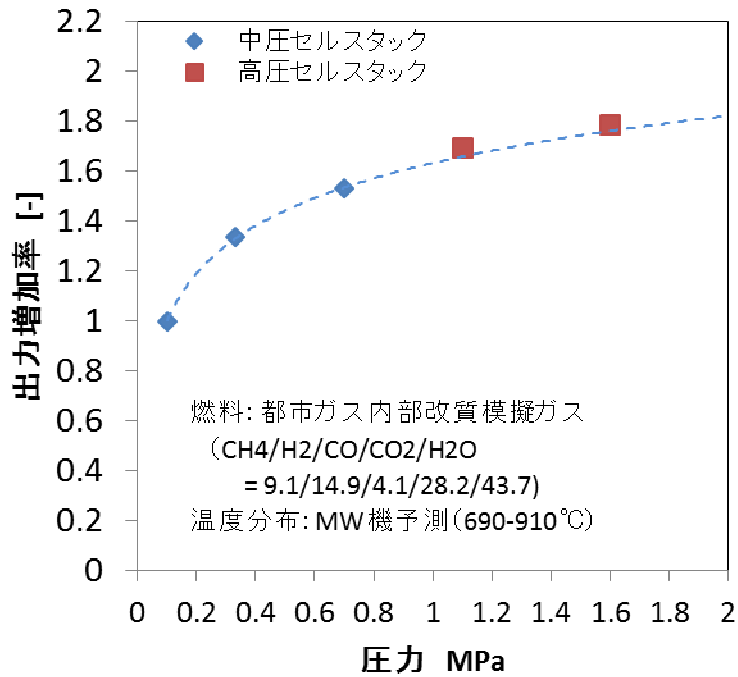


図 3-2-1-37 セルスタック出力の圧力依存性

(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。その結果を図 3-2-1-38 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°C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。

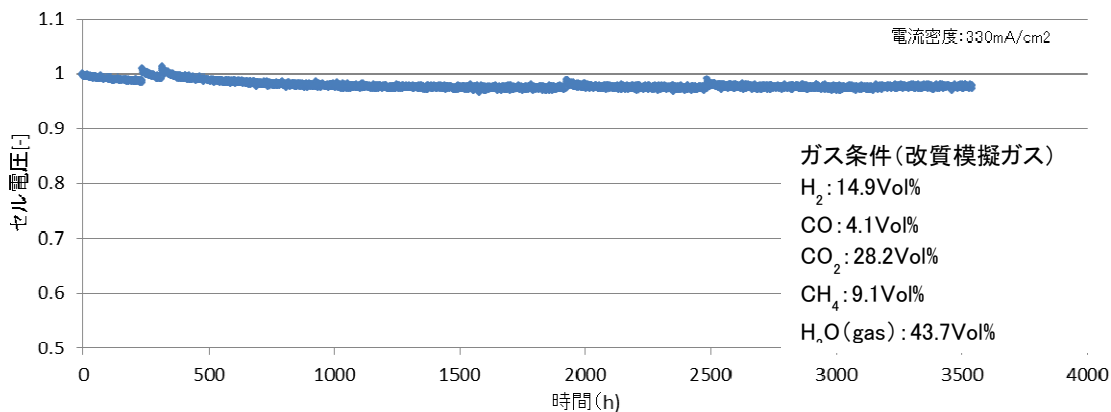


図 3-2-1-38 高圧条件(1.5MPaG)における長期耐久試験セル電圧推移

(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。外観観察の結果、空気極に割れや剥離は認められず健全であった。光学顕微鏡にて素子部の断面を観察したところ、図 3-2-1-39 に示すように燃料極内の Ni の粗大化が確認された。高圧耐久性試験の影響と推定されるが、先述の通り、顕著な性能への影響は観察されなかった。

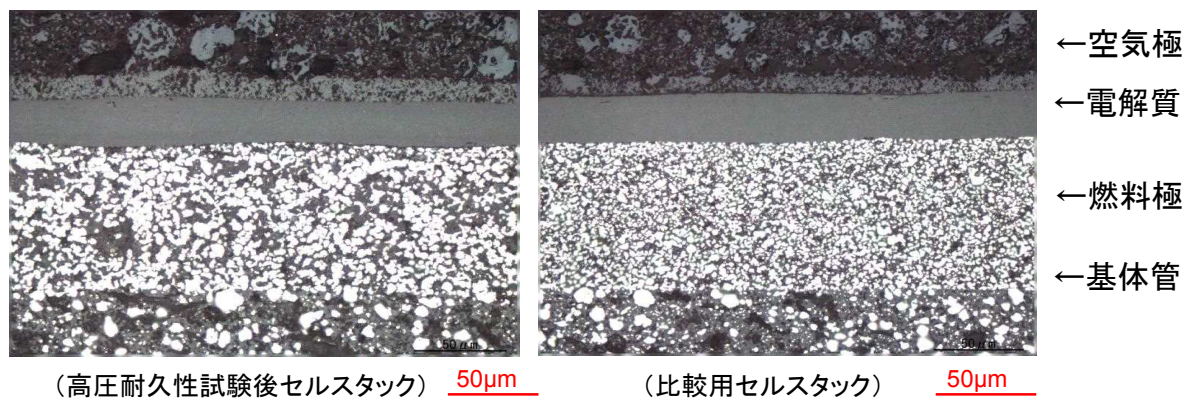


図 3-2-1-39 セルスタックの光学顕微鏡撮影結果

2-2. 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究

1. 研究概要

IGFC 特有の課題の一つとして、石炭ガスに含まれる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懸念されている。そのため、本研究開発は、石炭ガス中の被毒成分が燃料電池へ及ぼす影響を把握するとともに、燃料電池の被毒成分を除去するための燃料電池用ガス精製技術を確立することを目的として実施した。

燃料電池用ガス精製技術の検討にあたっては、SOFCの被毒成分を把握するとともに、被毒成分に対するSOFC実セルの被毒耐性を調べ、その上でSOFCに影響を及ぼす被毒成分を除去するためのガス精製技術を検討した。

これまで国内外の大学や研究機関等で行われている SOFC 被毒に関する研究について調査したところ、硫黄 (S)、塩素 (Cl)、ヒ素 (As)、リン (P)、セレン (Se)、ホウ素 (B)、アンチモン (Sb)、カドミウム (Cd)、ケイ素 (Si) などが被毒を引き起こす成分として報告されているため石炭ガス中含まれる被毒成分を対象として評価した。(図 3-2-2-1)

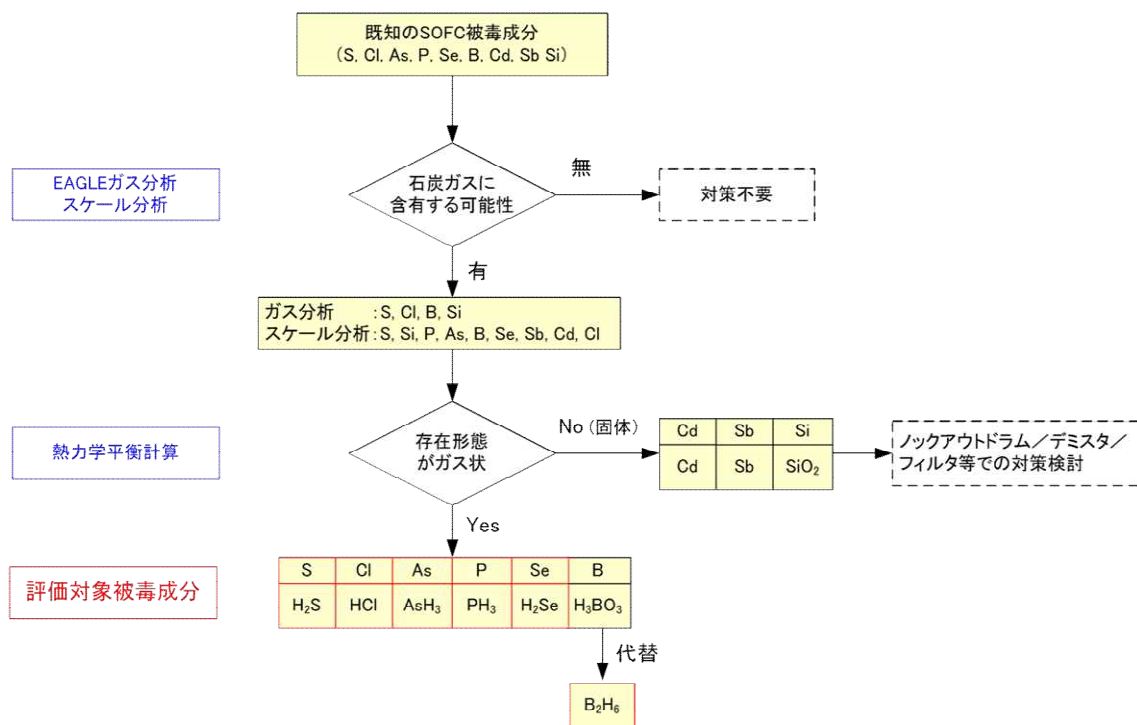


図 3-2-2-1 評価対象被毒成分の選定フロー

2. 実施内容

研究開発項目① セル被毒耐性評価

SOFC の被毒耐性評価として、個別被毒影響評価試験と長期被毒耐性評価試験を実施した (図 3-2-2-2 参照)。なお、試験に用いた燃料電池は三菱日立パワーシステムズ (株) 製の円筒横縞形 SOFC とした。

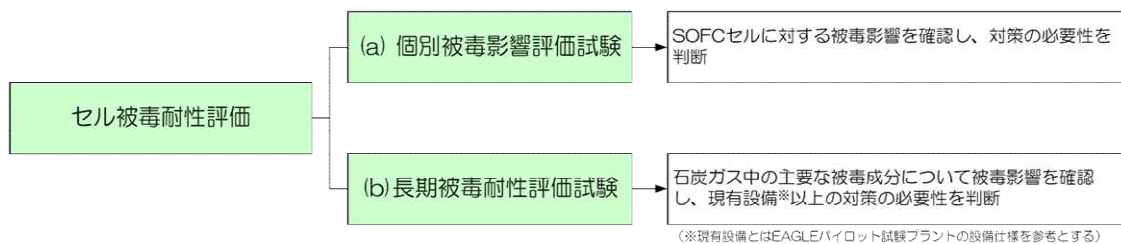


図 3-2-2-2 セル被毒耐性評価試験

(1) 個別被毒影響評価試験

評価対象とした被毒成分 (AsH₃, PH₃, H₂Se, B₂H₆, HCl, H₂S) について SOFC のショートセル (3 素子で構成されたセルスタック) にて水素 80%、窒素 20%の割合で常圧にて供給し、被毒成分をそれぞれ設定濃度になるように添加し、個別に被毒影響を評価した。

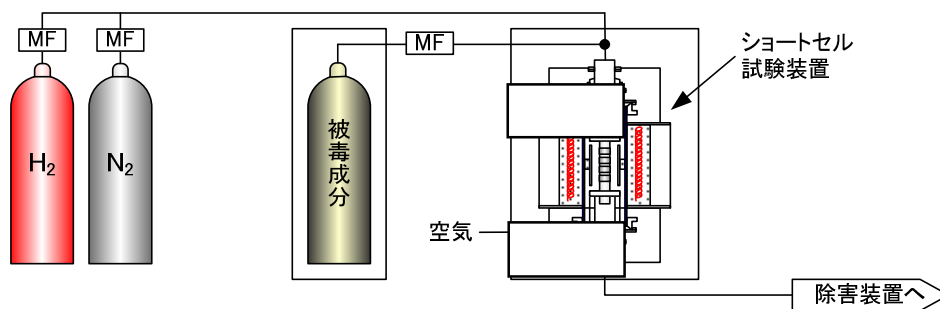


図 3-2-2-3 個別被毒影響評価試験 設備イメージ

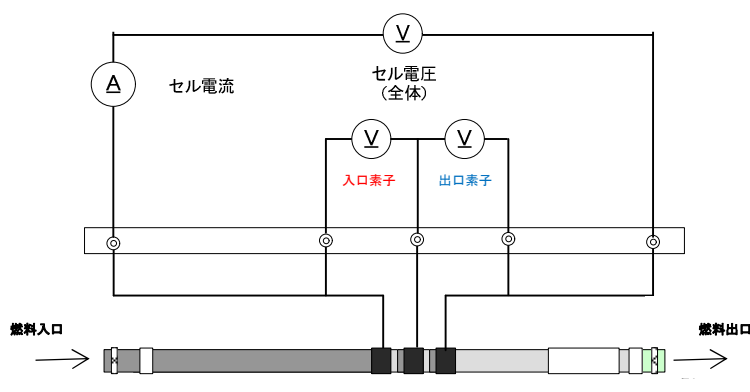


図 3-2-2-4 ショートセル(基体管)の電圧測定点

①個別被毒影響評価試験

(a)アルシン (AsH₃)

アルシン (AsH₃) では、1ppm を約 950 時間添加したが、電圧の変化は見られなかった。ただし、試験後にショートセルを取り外した際、排燃料側の部品に白色の付着物

が観察された。この付着物について走査型電子顕微鏡（SEM）観察及び電子線マイクロアナライザー（EPMA）による分析を行ったところセルの材料である Zr、Ni が多く検出された。この結果から、AsH₃ はセルを分解している可能性が示唆される。そのため、電圧には影響は生じていないが、長期間の発電においては電圧への影響が発現する可能性が考えられる。

表 3-2-2-1 AsH₃ 被毒試験のセル分析結果

分析項目	分析結果
光顕・SEM	基体管内表面で細かい粒状物質が確認された。
EPMA	基体管内表面で As が検出された。
SIMS	妨害イオンの影響で、As の分布は得られなかった。

(b) ホスフィン (PH₃)

次にホスフィン (PH₃) 1ppm を添加した。約 660 時間添加したが、電圧の変化は見られなかった。セル分析を実施したところ、基体管内表面に細かな粒状物質が付着していることが確認され、EPMA 分析で P であることが確認された。また、二次イオン質量分析法 (SIMS) 分析では基体管内部に P が局所的に確認されたことから、基体管によって P が燃料極に侵入することを防いでいると考えられる。

表 3-2-2-2 PH₃ 被毒試験のセル分析結果

分析項目	分析結果
光顕・SEM	基体管内表面で細かい粒状物質が確認された。
EPMA	基体管内表面で P が検出された。
SIMS	基体管で P が局所的に検出された。

(c) セレン化水素 (H₂Se)

続いて、セレン化水素 (H₂Se) 1ppm を添加した。その結果、H₂Se 添加後約 180 時間から、入口素子、出口素子の電圧が順に低下し、燃料の流れ方向に被毒が進行していることが確認された。その後、入口素子と出口素子ともに電圧が安定したことから、被毒が飽和状態に達した可能性が考えられる。

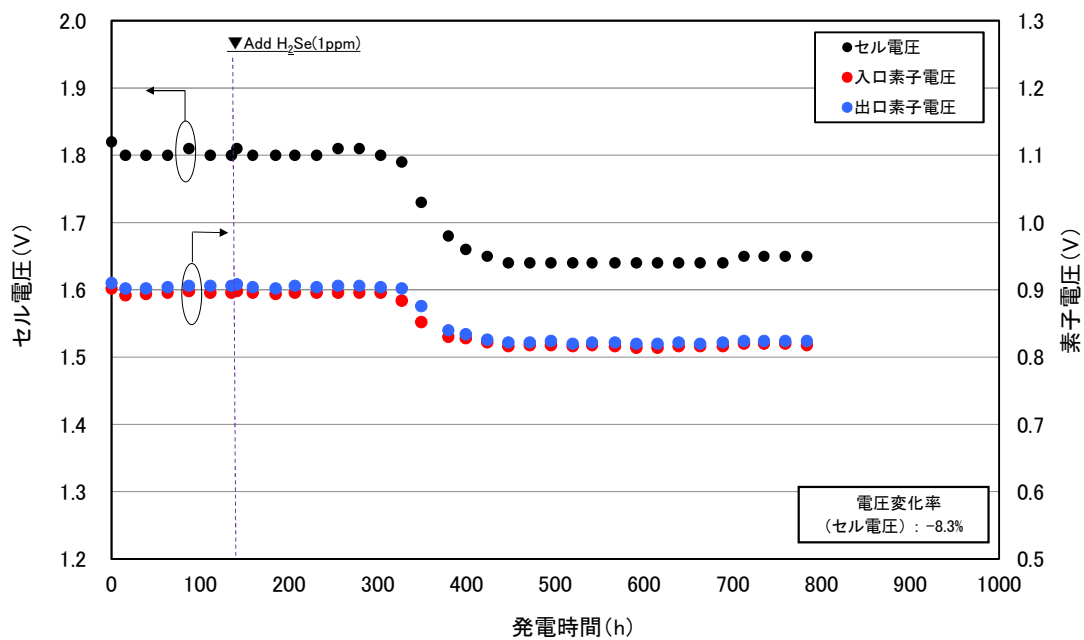


図 3-2-2-5 H₂Se 1ppm 添加時の経時的な電圧変化

その後 H₂Se の添加を停止したところ、セル電圧および各素子電圧が徐々に回復する挙動が確認されたが、電圧低下前の値までは戻らなかった。既往の研究で、燃料極の Ni との反応物生成によって被毒を起こすことが報告されており、反応物生成による不可逆の性能劣化を引き起こした可能性も考えられる。

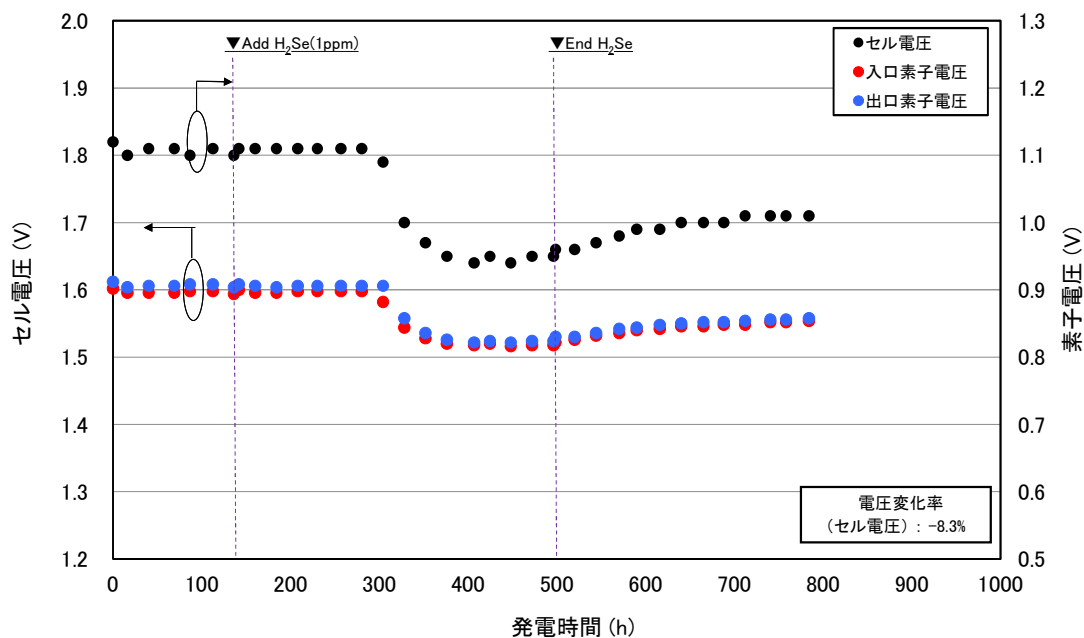


図 3-2-2-6 H₂Se 1ppm (2 回目) 添加時の経時的な電圧変化

表 3-2-2-3 H₂Se 濃度による試験結果の比較

項目	H ₂ Se 濃度		
	1ppm	1ppm (2回目)	0.5ppm
H ₂ Se 添加～電圧低下開始 (h)	169	156	324
電圧低下開始～安定 (h)	110	90	179
H ₂ Se 添加後の電圧比 (%)	91.7% (-8.3%)	91.7% (-8.3%)	93.0% (-7.0%)
H ₂ Se 添加停止後の電圧比 (%)	-	95.0% (+3.3%)	95.7% (+2.7%)

試験後にセル分析を実施したところ、基体内表面で細かい粒状物質が確認された。EPMA 分析により確認したところ、基体内表面で Se が検出された。SIMS 分析においては燃料極中にも Se が分布していることを確認した。この結果から Se が燃料極に到達し、被毒影響を生じさせている可能性が考えられる。

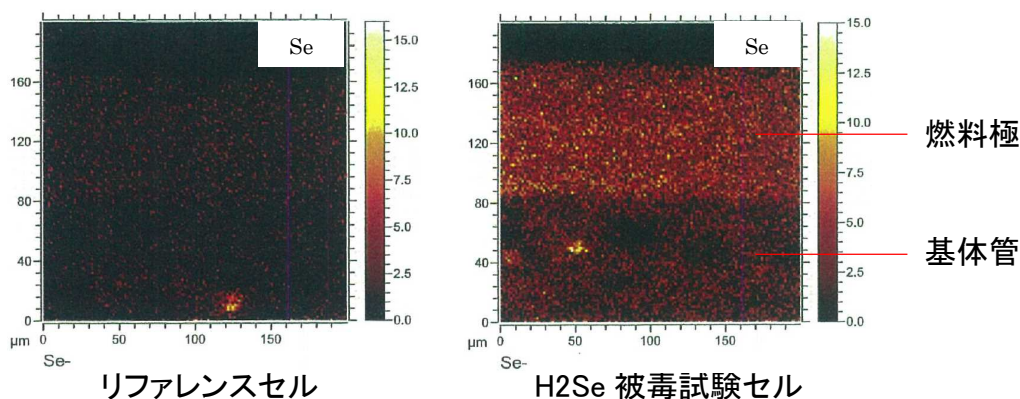


図 3-2-2-7 燃料極/基体管全体における SIMS 分析結果

表 3-2-2-4 H₂Se 被毒試験のセル分析結果

分析項目	分析結果
光顕・SEM	基体内表面で細かい粒状物質が確認された。
EPMA	基体内表面で Se が検出された。
SIMS	燃料極及び基体管で Se が検出された。

(d) ジボラン (B₂H₆)

ジボラン (B₂H₆) については、1ppm 約 740 時間添加したが、特に電圧の変化・付着物は観察されなかった。

(e) 塩化水素 (HCl)

塩化水素 (HCl) は 10ppm 添加し試験したが、セル電圧でみると電圧の変化は無かった。試験後、ショートセルを取り外した際、排燃料側の金属部品に白色の結晶が付着していることが確認され、X 線回折法 (XRD 法) による分析を行った結果、塩化アンモニウム (NH₄Cl) であることが判明した。

表 3-2-2-5 HCl 被毒試験のセル分析結果

分析項目	分析結果
光顕・SEM	付着物は確認されなかった。
EPMA	C1 は検出されなかった。
SIMS	C1 は検出されなかった。

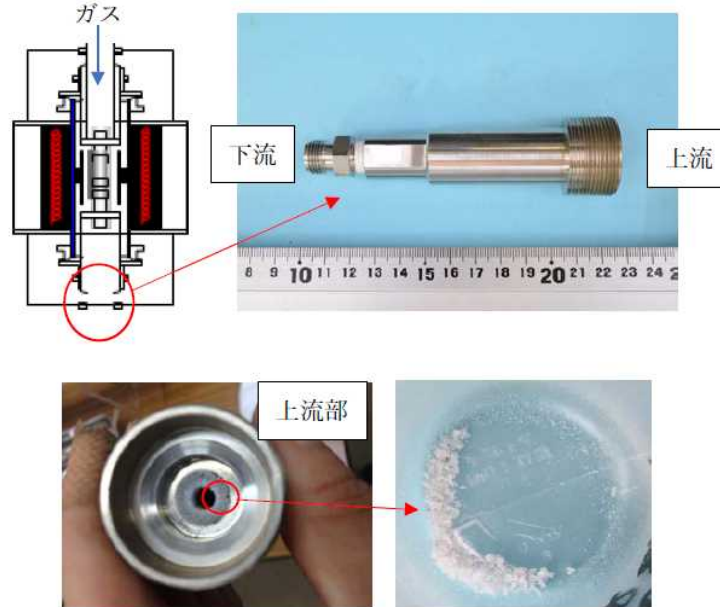


図 3-2-2-8 排燃料側の部品で確認された付着物

(f) 硫化水素 (H₂S)

続いて硫化水素 (H₂S) H₂S 1ppm 添加時を添加した。H₂S 添加後約 90 時間から入口素子、出口素子電圧が順次低下し、燃料の流れ方向に沿って被毒が進行していることが確認された。Ni への吸着により、電圧が低下した可能性が考えられる。その後、入口および出口素子ともに電圧が安定したことから、S の被毒が平衡状態に達したことが考えられる。電圧変化率は-3.3%となった。温度を上げることで吸着した S が脱離するとの報告から、発電温度を 900℃から 930℃に変更し、電圧の変化を確認したが、温度上昇によりセルの抵抗が減少したため電圧が上昇したものの、S の脱離による電圧の回復傾向は明確に確認できなかった。その後、H₂S の添加を停止したところ、セル電圧および各素子電圧が徐々に回復する傾向が見られたが、被毒による電圧低下前の値までは戻らないことが確認された。

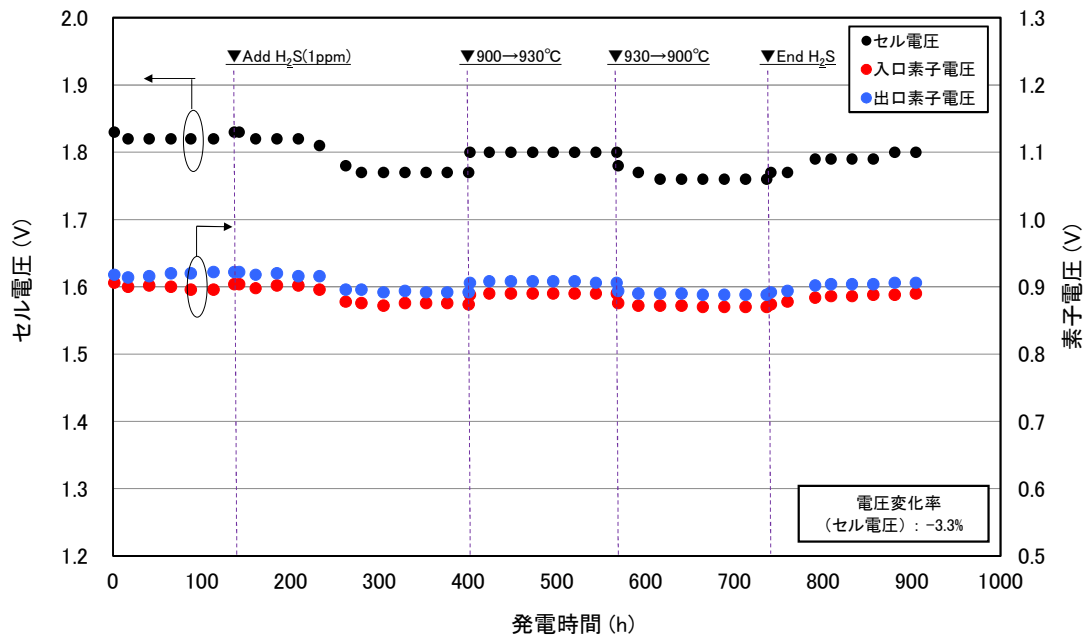
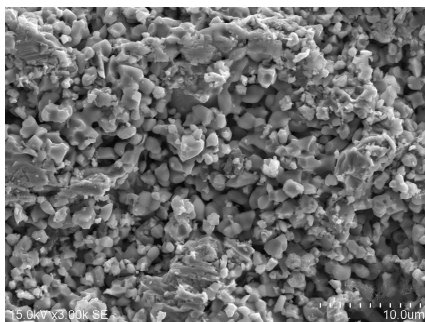
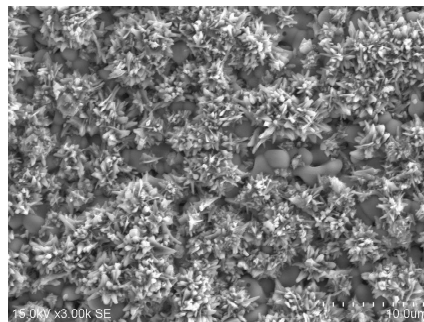


図 3-2-2-9 H₂S 1ppm 添加時の経時的な電圧変化

試験終了後、セル分析を実施したところ、基体管内表面に針状の物質が生成していることが確認された。EPMA 分析により確認したところ、基体管内表面で S が検出された。(図 3-2-2-10 , 図 3-2-2-11)

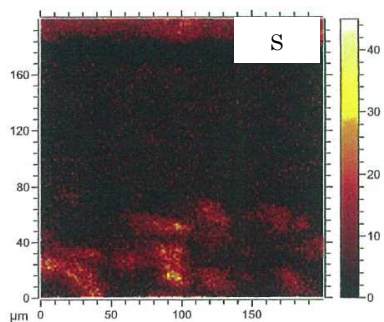


リファレンスセル

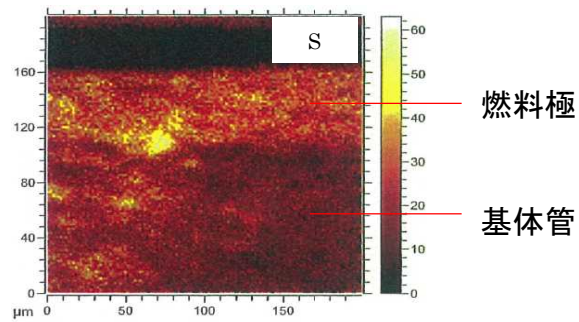


H₂S 被毒試験セル

図 3-2-2-10 基体管内表面における SEM 観察結果



リファレンスセル



H₂S 被毒試験セル

図 3-2-2-11 燃料極/基体管全体における SIMS 分析結果

表 3-2-2-6 H₂S 被毒試験のセル分析結果

分析項目	分析結果
光顕・SEM	燃料極の触媒 Ni が粗大化していることが確認された。また、基体管内表面に針状の物質が生成していることが確認された。
EPMA	基体管内表面で S が検出された。
SIMS	燃料極と基体管で S が検出された。

(2) 長期被毒耐性評価試験

石炭ガス中の主要な被毒成分である H₂S と HCl について、実ガス中の濃度レベルを模擬して長期 (5,000 時間以上) の被毒耐性を調べ、既存のガス精製設備以上の対策の必要性について評価した。被毒試験セルは、被毒成分を添加しない条件で約 2,000 時間程度の初期発電を行い、セル性能の安定を確認してから H₂S と HCl を各 1ppm 被毒成分を添加した。また、セル性能についてはセル電圧の他、セルスタックの燃料入口素子 (以下、入口素子)、燃料中央素子 (以下、中央素子)、燃料出口素子 (以下、出口素子) の電圧を測定した。なお、運転温度は入口、中央、出口ともに一定となる様に調整した。セルスタックの電圧測定点を図 3-2-2-13、試験条件を表 3-2-2-7 に示す。

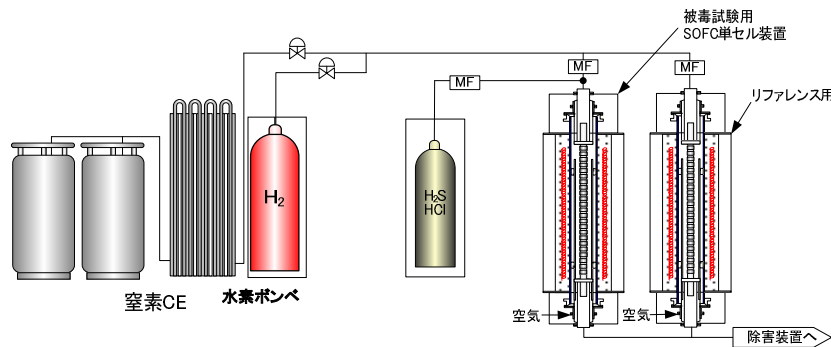


図 3-2-2-12 長期被毒耐性評価試験 設備イメージ

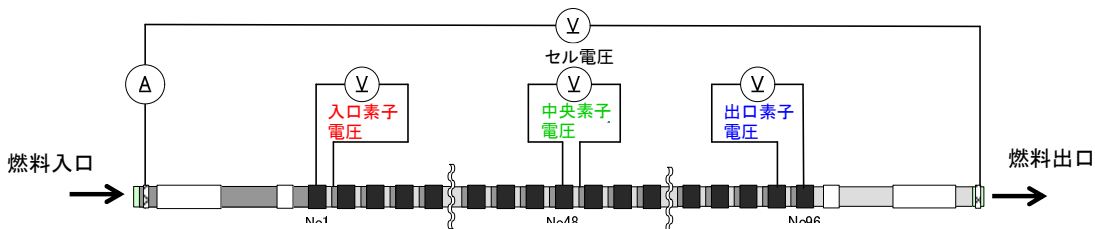


図 3-2-2-13 セルスタックの電圧測定点

表 3-2-2-7 長期被毒耐性評価試験条件

燃料 H2 濃度 [%]	80
燃料 N2 濃度 [%]	20
H2S 濃度 [ppm]	1.0
HCl 濃度 [ppm]	1.0
加湿濃度 [%]	1.0
燃料利用率 [%]	60
空気利用率 [%]	20
圧力 [MPa]	0.101
運転温度 [°C]	900
電流密度 [mA/cm ²]	350

(長期被毒耐性評価試験結果)

被毒試験セルの経時的な電圧変化を図 3-2-2-14 に示す。被毒試験は約 7500 時間実施し、被毒成分添加後約 40 時間から約 3%電圧低下が生じることが確認された。セル電圧低下が一定値に収束して以降、約 5000 時間継続したが経時的な電圧変化は確認されなかった。個別被毒影響評価試験から電圧低下は H2S の影響であることが考えられ、燃料電池入口 H2S 濃度を 1ppm に抑えれば最大 3%電圧低下するが運転継続は可能と考えられる。

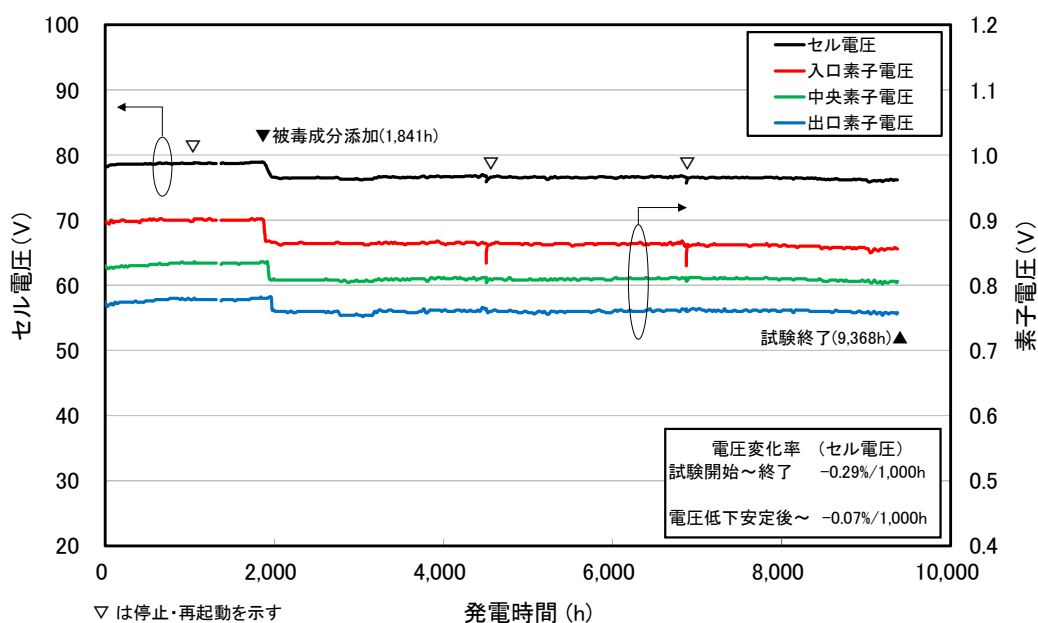


図 3-2-2-14 被毒試験セルの経時的な電圧変化

試験終了後、セルスタック試験装置の開放点検を実施した。開放点検の結果、被毒試験セルの排燃料部の金属部品で腐食が確認された。燃料に添加した HCl によって生じたものと考えられる。(図 3-2-2-15)



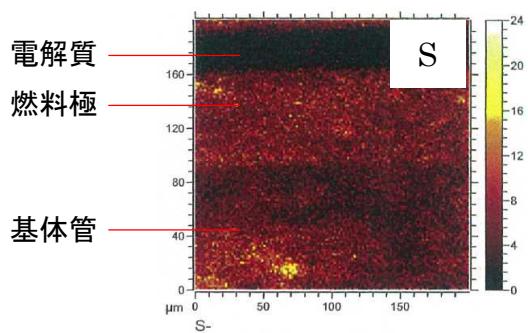
(a) リファレンスセル



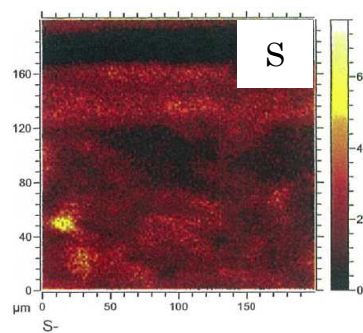
(b) 被毒試験セル

図 3-2-2-15 被毒試験セル 排燃料部の腐食

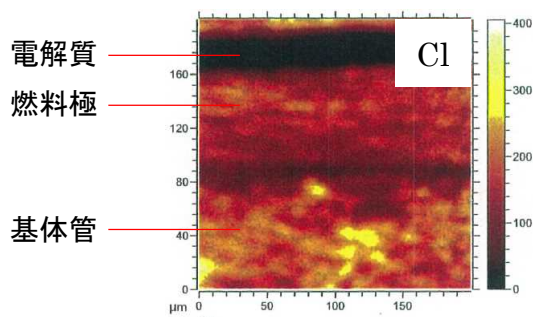
被毒試験終了後、光学顕微鏡、SEM、EPMA、SIMS を用いてセル断面の組織観察及び元素分析を実施した。リファレンスセル及び被毒試験セルにおける SIMS 分析結果 (図 3-2-2-16) から、被毒試験セルの基体管と燃料極において、リファレンスセルの約 3 倍の強度で S が検出された。また、Cl については、基体管及び燃料極で検出された。



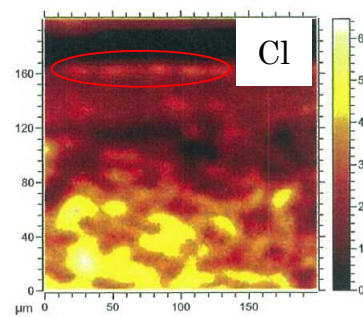
(a-1) リファレンスセル



(b-1) 被毒試験セル



(a-2) リファレンスセル



(b-2) 被毒試験セル

図 3-2-2-16 燃料極/基体管全体における SIMS 分析結果

分析結果のまとめを表 3-2-2-8 に示す。

表 3-2-2-8 セル分析結果まとめ

分析項目	分析結果
光顕・SEM	付着物は確認されなかった。
EPMA	S、Cl は検出されなかった。
SIMS	S が燃料極及び基体管で検出された。 また、Cl が基体管および燃料極/電解質界面で検出された。

研究開発項目② 燃料電池用ガス精製技術性能評価

燃料電池用ガス精製技術には、燃料電池の被毒許容濃度を下回るレベルまで被毒成分を除去する性能が求められる。燃料電池用ガス精製技術としては可能な限り被毒成分を除去する吸着剤を選定する必要があるが、不純物を除去可能な吸着剤について、各被毒成分の除去性能を調べた。選定した吸着剤を評価するためのスクリーニング試験として、①吸着容量試験、②低濃度リーク確認試験、③被毒成分除去性能評価を行った。

(1) スクリーニング試験

① 吸着容量試験

評価用の吸着剤として、アルシン (AsH_3)、ホスフィン (PH_3)、セレン化水素 (H_2Se)、ジボラン (B_2H_6) の水素化物用 3 種類、 H_2S 用 3 種類、 HCl 用 2 種類を試験した(図 3-2-2-17)。表 3-2-2-9 に被毒成分と吸着剤の組み合わせ、表 3-2-2-10 に試験条件を示す。被毒成分の供給濃度は 2,000ppm とし、検知管法で被毒成分が検出された時点を吸着剤の破過とした。吸着容量試験のイメージを図 3-2-2-18 に示す。

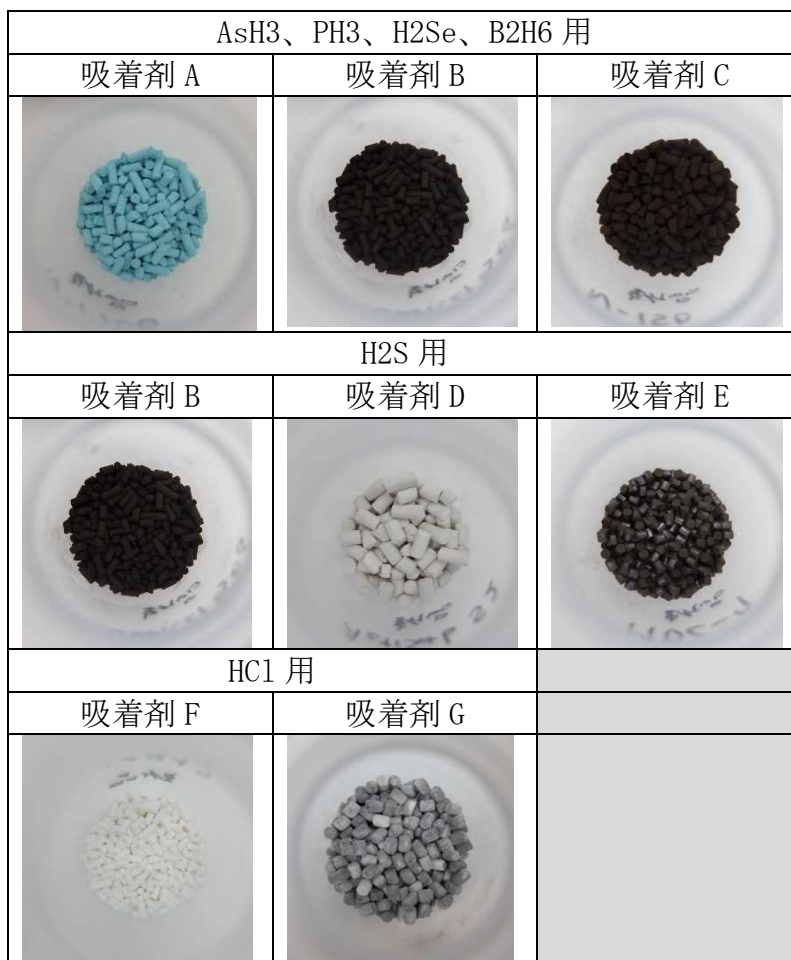


図 3-2-2-17 吸着剤写真

表 3-2-2-9 SOFC 被毒成分と吸着剤の組み合わせ

吸着剤	主成分	AsH ₃	PH ₃	H ₃ Se	B ₂ H ₆	H ₂ S	HCl
吸着剤 A	Cu	○	○	○	○	—	—
吸着剤 B	Cu	○	○	○	○	○	—
吸着剤 C	Fe/Mn	○	○	○	○	—	—
吸着剤 D	Zn	—	—	—	—	○	—
吸着剤 E	Zn/Cu	—	—	—	—	○	—
吸着剤 F	Al/Mg	—	—	—	—	—	○
吸着剤 G [*]	NaAlO ₂	—	—	—	—	—	○

※ (一財) 電力中央研究所で開発されたハロゲン化物吸収剤

表 3-2-2-10 吸着容量試験条件

吸着剤	H ₂ /N ₂ [%]	被毒成分濃 度 [ppm]	LV [m/s]	SV [hr-1]	温度 [°C]
吸着剤 A	75/25	2,000	0.25	1,000	20-25 (室温)
吸着剤 B					20-25 (室温)
吸着剤 C					20-25 (室温)
吸着剤 D					350
吸着剤 E ^{※1}					350
吸着剤 F					20-25 (室温)
吸着剤 G					450

※1 吸着剤 E は H₂ にて還元後に実施

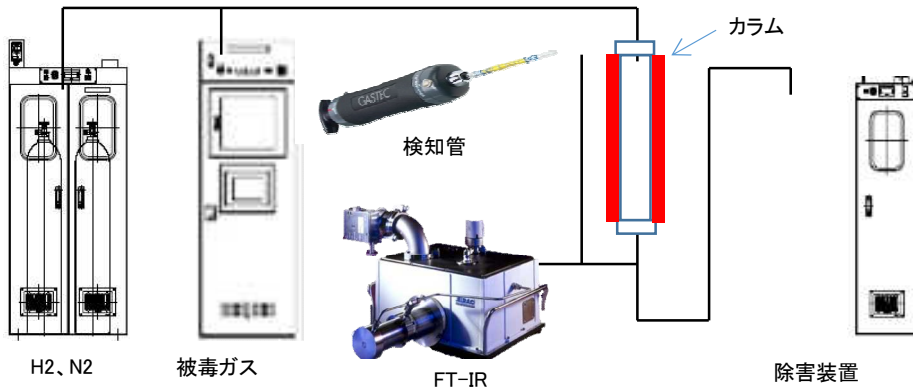


図 3-2-2-18 吸着容量試験イメージ

(吸着容量試験結果)

吸着容量試験の結果、最も吸着容量の高い吸着剤の吸着容量を基準とした場合（吸着容量比）の各吸着剤の吸着容量の相対比を図 3-2-2-19 に示す。また、カラム内温度上昇幅 ΔT のグラフを図 3-2-2-20 に示す。

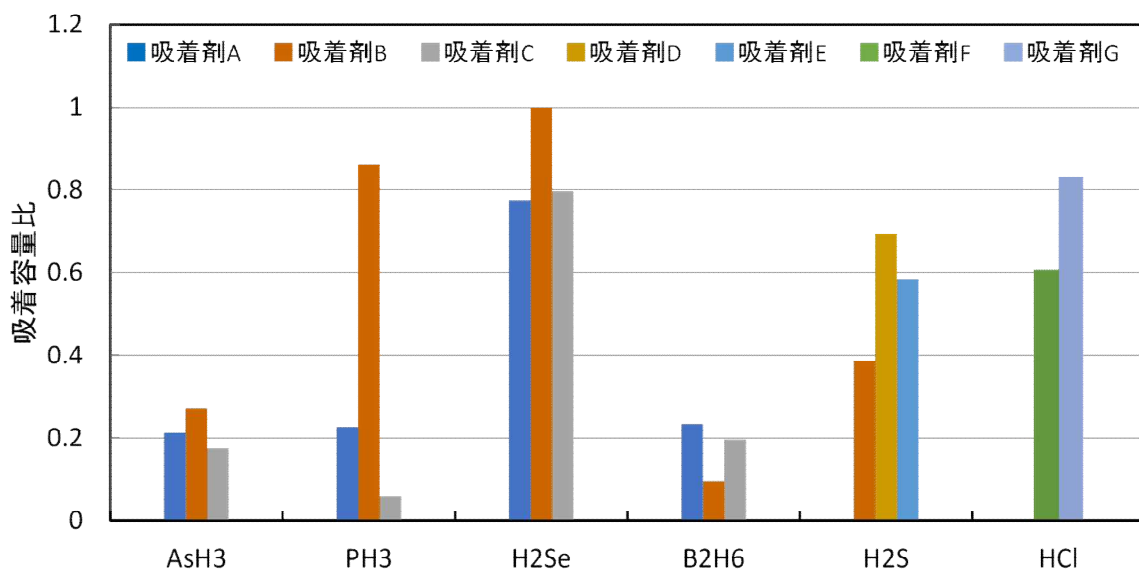


図 3-2-2-19 各吸着剤の吸着容量

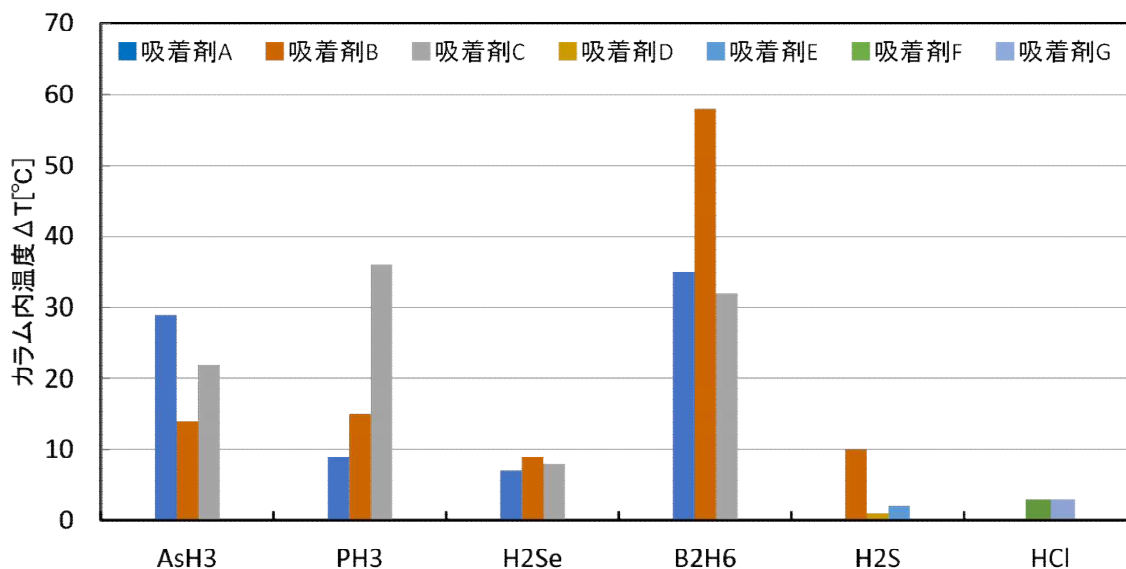


図 3-2-2-20 各吸着剤のカラム温度上昇幅

水素化物については、AsH₃、PH₃、H₂Se に対しては吸着剤 B が最も吸着容量が大きく、B₂H₆ に対しては吸着剤 A が最も吸着容量が大きい結果となった。吸着剤 B の特徴として PH₃ や H₂Se に対して大きな吸着容量を有するものの、AsH₃ に対しては 1/3 程度に低下することが確認された。一方、吸着剤 A と吸着剤 C については H₂Se に対する吸着容量は大きいものの、AsH₃ や PH₃ に対しては吸着容量が小さく、特に PH₃ に対する吸着剤 C の吸着容量は著しく小さいことが確認された。

H₂S については、吸着剤 D と吸着剤 E と比較すると吸着剤 B がやや吸着容量は小さかった。これは、吸着剤 D と吸着剤 E については吸着剤の運用温度が 350℃ と高く、H₂S と吸着剤の反応が進みやすいと考えられる。

HCl については、吸着剤 F および吸着剤 G とともに大きな吸着容量を示したが、吸着剤 G の方が吸着容量は大きかった。これは、吸着剤 G については吸着剤の温度が 450℃

と高く HCl と吸着剤との反応が進みやすいと考えられる。

なお、水素化物の吸着において温度上昇幅を比較すると、吸着容量が大きいもの程低く、吸着容量が小さいもの程高くなる傾向にあることがわかった。また、B2H6 での試験において、最大で 60°C 程度の温度上昇を確認したが、2,000ppm という高濃度の試験であることを考慮すると運用上特に問題となる温度上昇ではないと言える。

吸着容量試験終了後、カラムより吸着剤を大気開放とした時に発熱が生じた組み合わせがあった。その組み合わせを表 3-2-2-11 に示す。

表 3-2-2-11 吸着容量調査後の大気開放時の発熱の有無

吸着剤	主成分	AsH3	PH3	H2Se	B2H6	H2S	HCl
吸着剤A	Cu	有	有	無	有	—	—
吸着剤B	Cu	有	有	無	有	無	—
吸着剤C	Fe/Mn	有	有	有	発火	—	—
吸着剤D	Zn	—	—	—	—	無	—
吸着剤E	Zn/Cu	—	—	—	—	無	—
吸着剤F	Al/Mg	—	—	—	—	—	無
吸着剤G	NaAlO2	—	—	—	—	—	無

H2S および HCl と各吸着剤の組み合わせ、また、H2Se と吸着剤 A および吸着剤 B の組み合わせでは発熱が見られなかったが、その他組み合わせでは発熱が見られた。これは、水素化物により還元された吸着剤が大気中の酸素と反応して発熱したと考えられる。

なお、B2H6 と吸着剤 C の組み合わせに関しては、大気開放時に発火まで至ったことから、この組み合わせについては危険が伴うため、低濃度リーク確認試験は中止した。

② 低濃度リーク確認試験

吸着剤の低濃度除去性能を確認するため低濃度リーク確認試験を実施した。低濃度の場合、評価に長時間がかかることから加速試験とし、加速方法は吸着容量試験により破過までの吸着容量を既に把握している事から、初期～50%消費状態および 50%～90%消費状態の間は、2,000ppm で被毒成分を供給し、低濃度除去性能は試験開始時と中間 (50%消費状態) と破過直前 (90%消費状態) で確認することとした (図 3-2-2-21 参照)。被毒成分濃度である AsH3、B2H6、H2Se、PH3 については 1ppm と 0.1ppm、H2S、HCl については 10ppm と 1ppm とし、カラム出口のガス分析を行うことで低濃度の被毒成分のリークの有無を調べた。ガス通気条件を表 3-2-2-12 に示す。カラム出口のガス分析には吸収液法を用いた。低濃度リーク確認試験イメージを図 3-2-2-22 に示す。

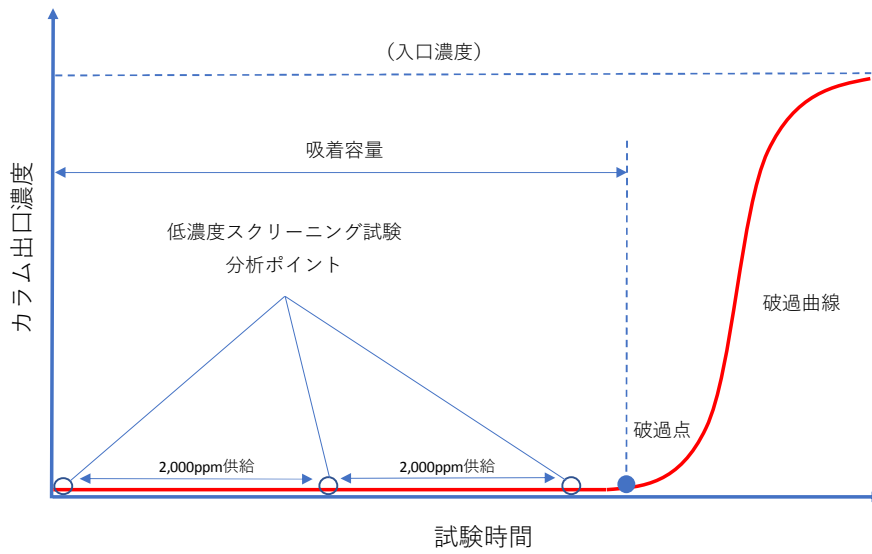


図 3-2-2-21 低濃度リーク確認試験ガスサンプリングイメージ

表 3-2-2-12 低濃度リーク確認試験ガス通気条件

H2 流量	2.475L/min	
N2 流量	0.825L/min	
LV	0.25m/s	
SV	1000hr ⁻¹	
被毒成分濃度	10ppm、1ppm H2S、HCl	1ppm、0.1ppm AsH3、B2H6、H2Se、PH3
被毒成分濃度 (加速時)	2,000ppm	

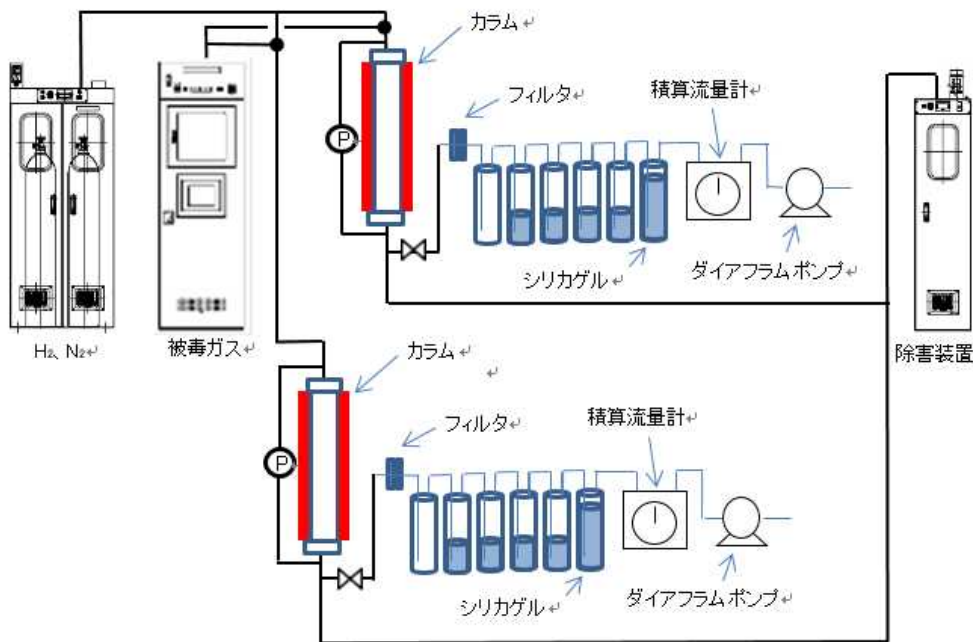


図 3-2-2-22 低濃度リーク確認試験イメージ

(低濃度リーク確認試験結果)

全ての吸着剤についてカラム出口に被毒成分は検出されず、定量下限値以下まで除去可能であることが確認された。1ppm や 0.1ppm の低濃度であっても十分な吸着性能が得られ、フィルタ捕集の結果も、いずれの組み合わせにおいても定量下限値以下であることが確認された。

③ 被毒成分除去性能評価

吸着容量試験および低濃度リーク確認試験の結果を基に、被毒影響が確認された H₂Se と H₂S を除去対象とする吸着剤について、吸着容量、低濃度除去性能、圧力損失を評価した。

(被毒成分除去性能評価結果)

(a) H₂Se

H₂Se について、各試験結果を基にした吸着剤の吸着容量、低濃度除去性能、圧力損失の比較を表 3-2-2-13 に示す。

表 3-2-2-13 H₂Se 除去用吸着剤比較

吸着剤	評価項目		
	吸着容量	除去性能	圧力損失
A	○	○	○
B	○	○	○
C	○	○	×

すべての吸着剤で高い吸着容量と低濃度除去性能を示し、特に吸着剤 B の吸着容量が高かった。圧力損失に関しては、吸着剤 A と吸着剤 B は使用前後で大きな変化は見られなかったが、吸着剤 C に関しては使用中に剤が粉化してしまい圧力損失が高くなった。

(b) H₂S

H₂S について吸着剤の吸着容量、低濃度除去性能、圧力損失の比較を表 3-2-2-14 に示す。

表 3-2-2-14 H₂S 除去用吸着剤比較

吸着剤	評価項目		
	吸着容量	除去性能	圧力損失
B	△	○	○
D	○	○	○
E	○	○	○

H₂S に関しては、吸着容量に関しては吸着剤 D と吸着剤 E が高い吸着容量を示し、吸着剤 B は他の 2 種と比較して 2/3 程度と低かった。低濃度除去性能に関してはすべての吸着剤で良好な性能を有しており、圧力損失についても使用前後で大きな変化がなかった。

以上の評価により、H₂Se に関しては吸着剤 A、B が燃料電池用ガス精製に適用できる可能性があり、H₂S に関しては、吸着剤 B、D、E のいずれも吸着剤も適用できる可能性がある。本研究では、吸着容量が最も大きい吸着剤 B と吸着剤 D を用いてベンチ試験ならびに燃料電池用ガス精製設備の試設計を行った。

(2) ベンチ試験

ベンチ試験は実プラントでの使用条件を模擬して、スクリーニング試験で確認した吸着性能が得られることを検証するために実施した。試験で用いた吸着剤は、スクリーニング試験において、H₂Se に対して吸着容量が最も大きい吸着剤 B、H₂S に対して吸着容量が最も大きい吸着剤 D とした。想定したプラントの仕様（燃料電池出力）および通気ガス条件を表 3-2-2-15 に示す。

表 3-2-2-15 想定したプラントの仕様および通気ガス条件

燃料電池出力	2.4MW
通期ガス流量	1,900Nm ³ /h
H ₂ /N ₂ 濃度	85/15
被毒成分濃度 (H ₂ S)	0.1ppm
被毒成分濃度 (H ₂ Se)	0.01ppm

ここでガス精製塔の寿命を5年とした場合、ベンチ試験で性能を評価するためには、被毒成分濃度を上げて濃度加速にて試験する必要があるが試験時間の制約から146倍にして試験した。H₂Se の場合、146倍→1.46ppm 以上並びに H₂S の場合、実機想定146倍→14.6ppm 以上の濃度でベンチ試験を行うことで、5年の寿命を示すことから、供給濃度は H₂Se を 1.5ppm、H₂S を 15ppm とした。ベンチ試験条件を表 3-2-2-16 に示す。吸着塔について実プラントガス通気条件、LV:0.25m/s 以下、SV:1,000hr⁻¹ 以下の条件および L/D:1.2 とした。

表 3-2-2-16 ベンチ試験条件

	H ₂ Se	H ₂ S
カラム	H : 900m × φ : 22.1mm、 0.345L	
H ₂ 流量	4.93L/min	
N ₂ 流量	0.87L/min	
H ₂ /N ₂ 濃度	85/15	
被毒成分濃度	1.5ppm	15ppm
吸着剤	吸着剤 B	吸着剤 D
温度	常温	350°C
LV	0.25m/s	
SV	1,000hr ⁻¹	

H₂Se のベンチ試験イメージを図 3-2-2-23 に示す。H₂Se ベンチ試験では、H₂Se 1.5ppm を 300 時間通気した。

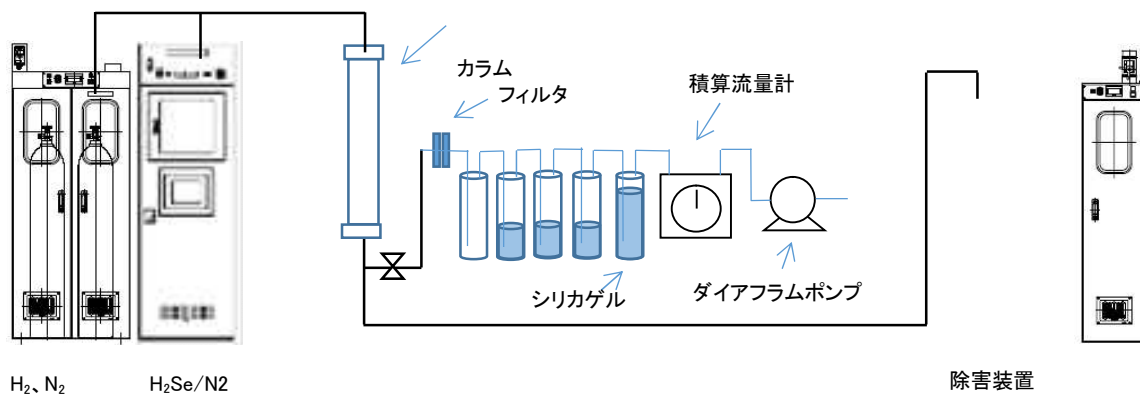


図 3-2-2-23 H₂Se ベンチ試験イメージ

H₂S ベンチ試験イメージを図 3-2-2-24 に示す。H₂S ベンチ試験では、H₂S 15ppm を 300 時間通気し、吸着塔排気からフィルタを介してガスバッグに捕集し性能を調べた。

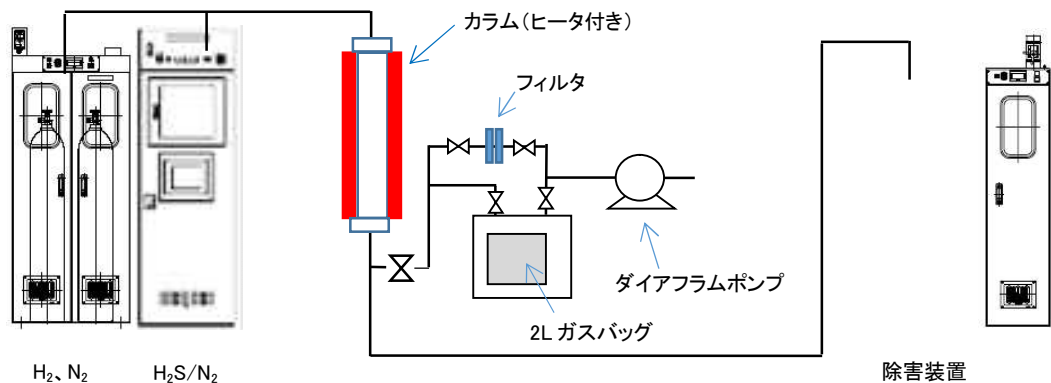


図 3-2-2-24 H₂S ベンチ試験イメージ

(ベンチ試験結果)

(a) H₂Se

吸着剤 B における H₂Se ベンチ試験の結果を図 3-2-2-25、図 3-2-2-26 に示すとともにカラム出口の分析結果を表 3-2-2-17 に示す。

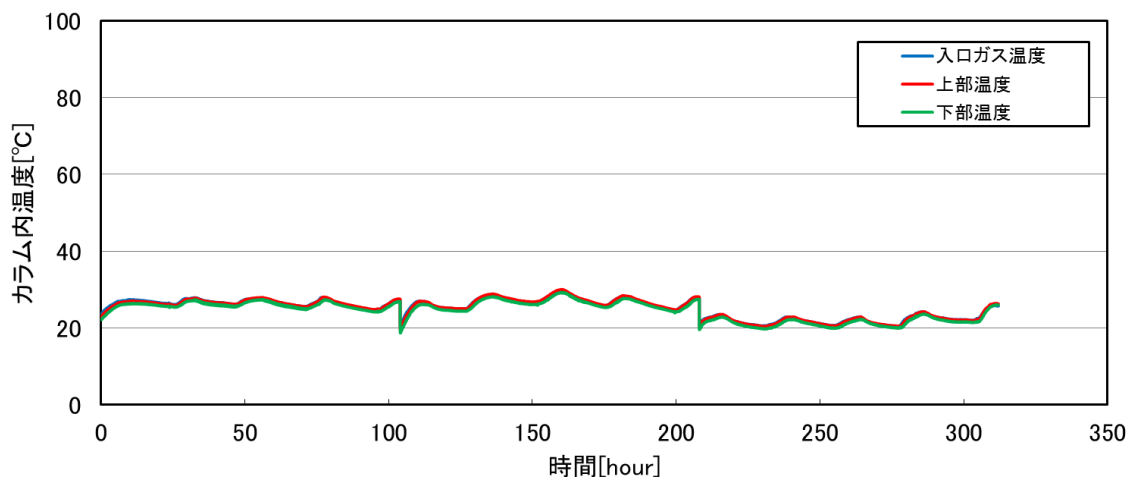


図 3-2-2-25 吸着剤 B における H₂Se ベンチ試験時のカラム内温度

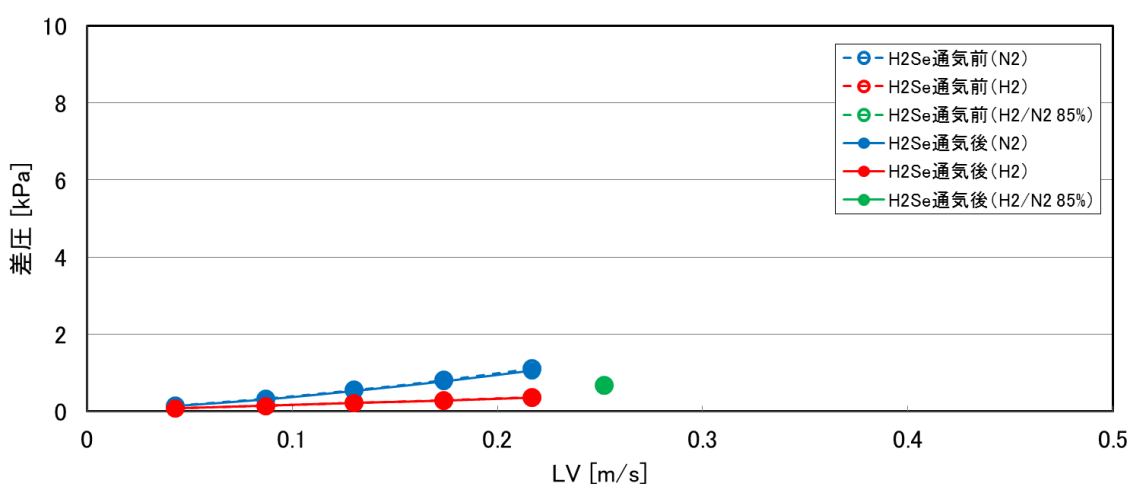


図 3-2-2-26 吸着剤 B における H₂Se ベンチ試験前後のカラム内差圧

表 3-2-2-17 吸着剤 B における H₂Se ベンチ試験分析結果

	吸収瓶 ppb			フィルタ μg/m ³
	1 本目	2 本目	3 本目	
1~15 回目	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0

H₂Se を供給してもカラム内温度が一定温度を保っていることから、温度制御に影響を及ぼすような発熱はないことを確認した。また、試験前後のカラムの差圧は、試験前後で変化は見られず吸着剤の形状も変化していないことも確認した。ガス分析の結果では、すべての条件において定量下限値以下であったことから、低濃度リーク確認試験の結果同様、H₂Se を吸着剤 B により除去できていることが確認された。フィルタの分析では、すべての条件において定量下限値以下であったことから、使用後の吸着剤や被毒成分の酸化物の飛散がないことを確認した。

(b) H2S

吸着剤 D における H2S ベンチ試験の結果を図 3-2-2-27、図 3-2-2-28 に示すとともにカラム出口の分析結果を表 3-2-2-18 に示す。

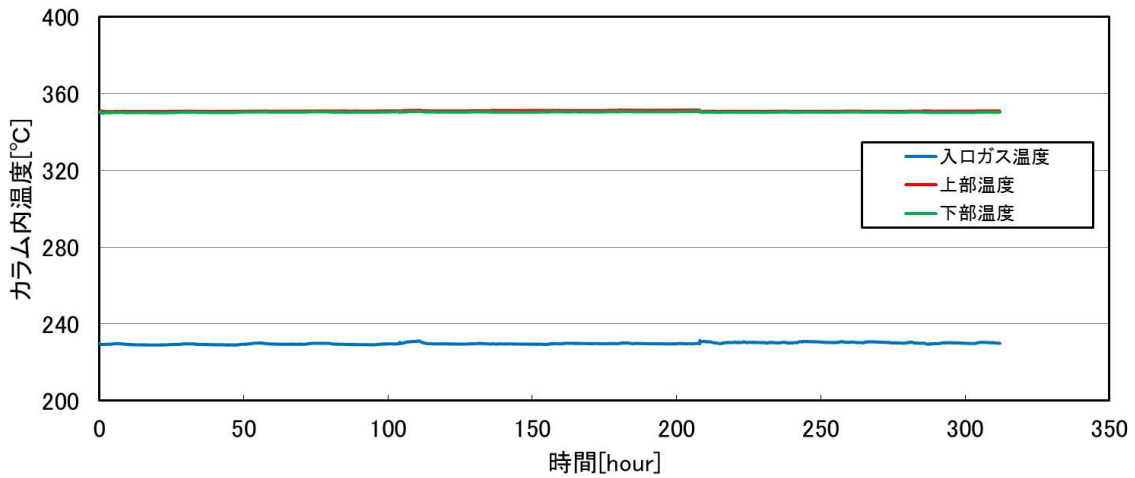


図 3-2-2-27 吸着剤 D における H2S ベンチ試験時のカラム内温度

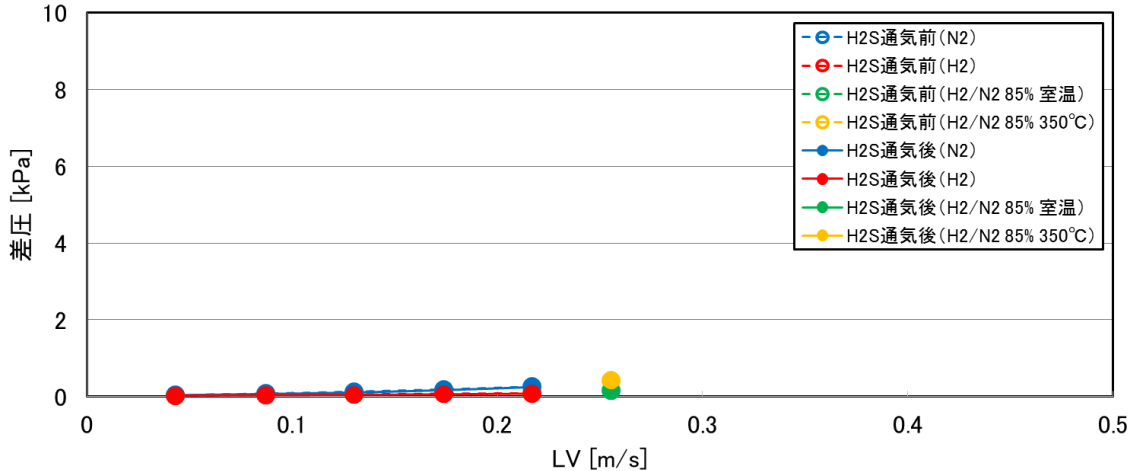


図 3-2-2-28 吸着剤 D における H2S ベンチ試験前後のカラム内差圧

表 3-2-2-18 吸着剤 D における H2S ベンチ試験分析結果

	吸収瓶 ppb			フィルタ $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	1 本目	2 本目	3 本目	
1~15 回目	<1.0	<1.0	<1.0	<10

H2S を供給してもカラム内温度が一定温度を保っていることから、温度制御に影響を及ぼすような発熱はないことを確認した。また、試験前後のカラムの差圧は、試験前後で変化は見られず吸着剤の形状も変化していないことも確認した。ガス分析の結果では、すべての条件において定量下限値以下であったことから、低濃度リーク確認試験の結果同様、H2S を吸着剤 D により除去できていることが確認された。フィルタの分析では、すべての条件において定量下限値以下であったことから、使用後の吸着

剤や被毒成分の酸化物の飛散がないことを確認した。

研究開発項目③ 燃料電池用ガス精製装置の試設計

(1) 燃料電池用ガス精製装置の試設計

燃料電池用ガス精製技術性能評価で得られた設計データを用いて吸着塔を試設計し、付帯設備を含めたシステム構成について検討した。

① IGFC システム構成

本検討では、NEDO「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」で計画されているCO₂分離・回収型IGFC実証試験およびNEDO「ガスタービン燃料電池複合発電技術開発」で進められている1.2MW級(600kW×2並列)SOFC開発を参考に、CO₂分離・回収型IGFC(SOFC容量:2.4MW)を想定して燃料電池用ガス精製装置の検討を行った。図3-2-2-29に本検討で想定するCO₂分離・回収型IGFCの全体構成を示す。

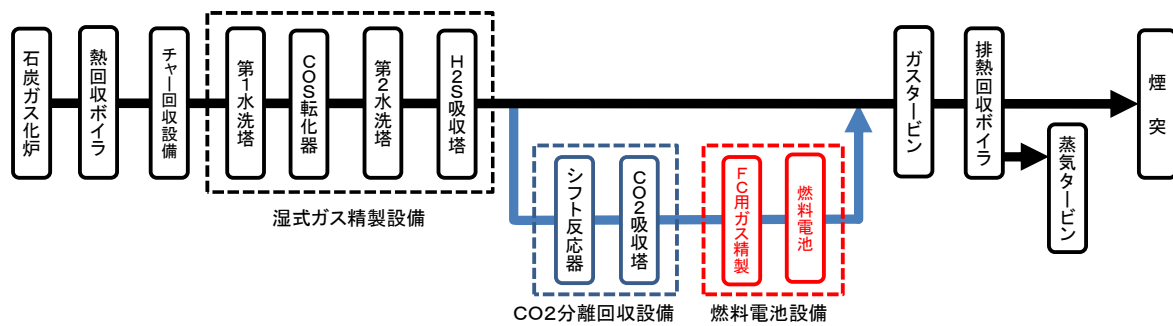


図 3-2-2-29 CO₂ 分離・回収型 IGFC 全体構成案

原燃料である石炭を石炭ガス化炉に供給し、一酸化炭素(CO)と水素(H₂)を主成分とする生成ガスを発生させる。生成ガスには硫化水素(H₂S)や硫化カルボニル(COS)などの硫黄化合物の他、アンモニア(NH₃)やハロゲン化物(HCl, HF)等の不純物が多く含まれているため、水洗塔やH₂S吸収塔などからなる湿式ガス精製設備を設置してこれらの不純物を除去している。H₂S吸収塔で硫黄分を除去した精製ガスはガスタービンの燃料となり、ガスタービンで発電を行う。また、高温のガスタービン排気から排熱回収ボイラを用いて熱を回収し、蒸気タービンで発電を行う複合発電システムがIGCCとなる。

さらに、CO₂分離・回収型IGFCシステムの場合、H₂S吸収塔出口の精製ガスをCO₂分離・回収設備に導入し、シフト反応器を用いて一酸化炭素(CO)を二酸化炭素(CO₂)と水素(H₂)に変換し、CO₂濃度を高めてCO₂を吸収塔で除去している。そのため、CO₂吸収塔出口のガス組成は、水素を主成分とした水素リッチガス(水素濃度:80~85%程度)となり、この水素リッチガスを燃料電池へ供給して発電を行うシステムがCO₂分離・回収型IGFCとなる。

② 燃料ガス条件

燃料電池用ガス精製装置は、燃料電池へ供給される燃料流量に合わせて設計する必要がある。本検討では、燃料ガスに含まれる被毒成分については、個別被毒影響評価試験の結果を踏まえ、硫化水素(H₂S)とセレン化水素(H₂Se)を想定し、NEDO「IGFC

向け石炭ガス化ガスのクリーンナップ要素研究」の結果を参考に H₂S 濃度 0.1ppm、H₂Se 濃度 0.01ppm を想定して検討を行った。表 3-2-2-19 に燃料ガス条件を示す。

表 3-2-2-19 燃料ガス条件

燃料電池出力	2.4MW (DC 端)
燃料組成	水素:80%、窒素:20%
燃料流量	1,900Nm ³ /h
燃料入口温度	40℃
燃料入口圧力	2.0MPa
燃料中 H ₂ S 濃度	0.1ppm
燃料中 H ₂ Se 濃度	0.01ppm

③ 燃料電池用ガス精製装置のシステム構成

燃料電池用ガス精製装置のシステム構成としては、燃料電池に供給される燃料を脱硫塔と水素化物吸着塔に全量通気し H₂S と H₂Se を除去するものとした。

また、脱硫塔の運転温度は約 350℃となるが、CO₂ 分離・回収設備出口の水素リッチガスの温度は 40℃であるためヒータを用いて昇温しヒータ熱量を試算した。

燃料電池用ガス精製装置構成例を図 3-2-2-30 に示す。

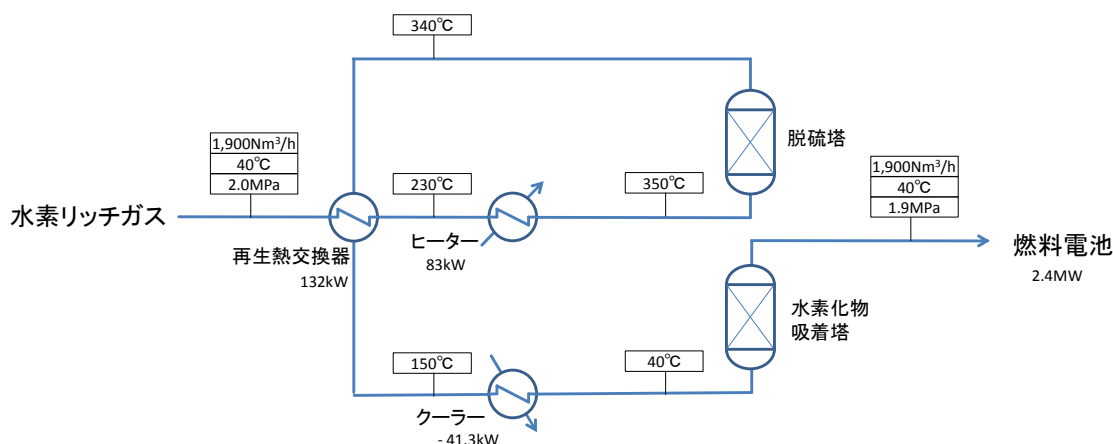


図 3-2-2-30 燃料電池用ガス精製装置構成例

④ 脱硫塔の試設計

脱硫塔の設計では、脱硫剤の量論的な必要量は燃料ガス中の H₂S 濃度、脱硫剤の吸着容量および交換周期（寿命）から吸着剤の充填容量、塔内径、充填層高さを決定する必要がある。吸着剤の吸着容量については、燃料電池用ガス精製技術性能評価において実施したスクリーニング試験の結果をもとに脱硫塔の線速度（LV 値）、空塔速度（SV 値）および脱硫塔の内径 D に対する充填層高 H の比（H/D）から充填量を設定した。なお、吸着容量の単位 [L/L] は吸着剤の単位体積 [L] あたり吸着可能な被毒成分の容量 [L]、および単位 [L/kg] は吸着剤の単位重量 [kg] あたり吸着可能な被毒成分の容量 [L] を表す。表 3-2-2-20 に脱硫塔の設計条件を示す。

表 3-2-2-20 脱硫塔の設計条件

燃料流量	: 1,900 Nm ³ /h
燃料中 H ₂ S 濃度	: 0.1 ppm
運転圧力	: 2.0 MPa
運転温度	: 350 °C
設計流量	: 206 m ³ /h
設計線速度 LV	: 0.25 m/s
設計空塔速度 SV	: 1,000 h ⁻¹
設計 H/D	: 1.2
設計吸着容量	: 63 L/L
	: 70 L/kg

上記の設計条件で検討すると、年間あたりの燃料量は 16,644,000Nm³/年、年間あたり処理される H₂S 量は 1.66Nm³/年となる。そのため、脱硫剤の交換周期を 5 年に仮定すると H₂S 処理量は 8.32Nm³ となり、脱硫剤の吸着容量から求められる量論的な必要量は約 0.133m³ (約 119kg) となる。検討の結果、設計 LV や設計 SV から求められる脱硫剤充填層のサイズは φ540mm×1,300mmH (充填容量: 0.3m³、約 270kg) となり、量論的な必要量に対して裕度を持った充填容量となる。表 3-2-2-21 に脱硫塔の設計仕様、図 3-2-2-31 に脱硫塔概略図を示す。

表 3-2-2-21 脱硫塔設計仕様

充填層サイズ	: φ540mm×1,300mm
脱硫剤充填量	: 0.30m ³ (270kg)
SV 値	: 約 687 h ⁻¹

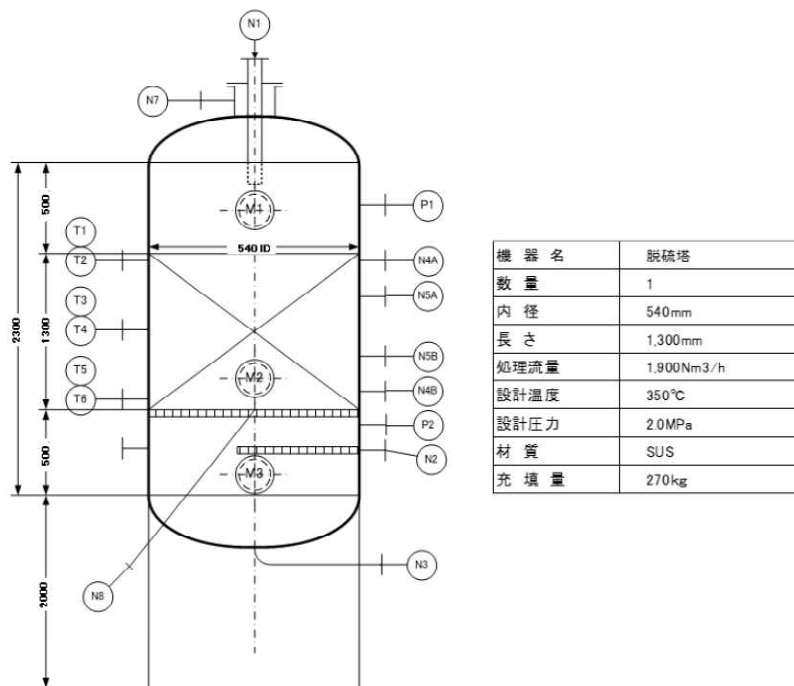


図 3-2-2-31 脱硫塔概略図

④ 水素化物吸着塔の試設計

脱硫塔と同様、2.4MW 機を想定すると、年間あたりの燃料ガス量は 16,644,000Nm³ /年、年間あたり除去すべき H₂Se 量は 0.17Nm³ /年となる。そのため、吸着剤の交換周期を 5 年と仮定した場合、H₂Se の総処理量は 0.83Nm³ となり、吸着剤の吸着容量から求められる量論的な吸着剤の必要量は 0.01m³ (約 9kg) となる。表 3-2-2-22 に水素化物吸着塔の設計条件を示す。

表 3-2-2-22 水素化物吸着塔の設計条件

燃料流量	:	1,900 Nm ³ /h
燃料中 H ₂ Se 濃度	:	0.01 ppm
運転圧力	:	2.0 MPa
運転温度	:	40 °C
設計流量	:	104 m ³ /h
設計線速度 LV	:	0.25 m/s
設計空塔速度 SV	:	1,000 h ⁻¹
設計 H/D	:	1.2
設計吸着容量	:	90 L/L
	:	90 L/kg

水素化物吸着塔の設計についてはベンチ試験で確認した吸着性能を確保するため、線速度 LV=0.25m/s 以下、空塔速度 SV=1,000h⁻¹ 以下の条件を満足する必要がある。

検討の結果、吸着剤充填層サイズは φ380mm×1,700mm (充填容量:0.2m³、約 200kg) となり、必要吸着剤量に対して十分裕度を持った設計となる。表 3-2-2-23 に水素化物吸着塔の設計仕様、図 3-2-2-32 に水素化物吸着塔概略図を示す。

表 3-2-2-23 水素化物吸着塔設計仕様

設計 LV	:	0.25 m/s
設計 H/D	:	1.2
吸着塔サイズ	:	φ380mm×1,700mm
吸着剤充填量	:	0.20m ³ (200kg)
SV 値	:	約 520 h ⁻¹

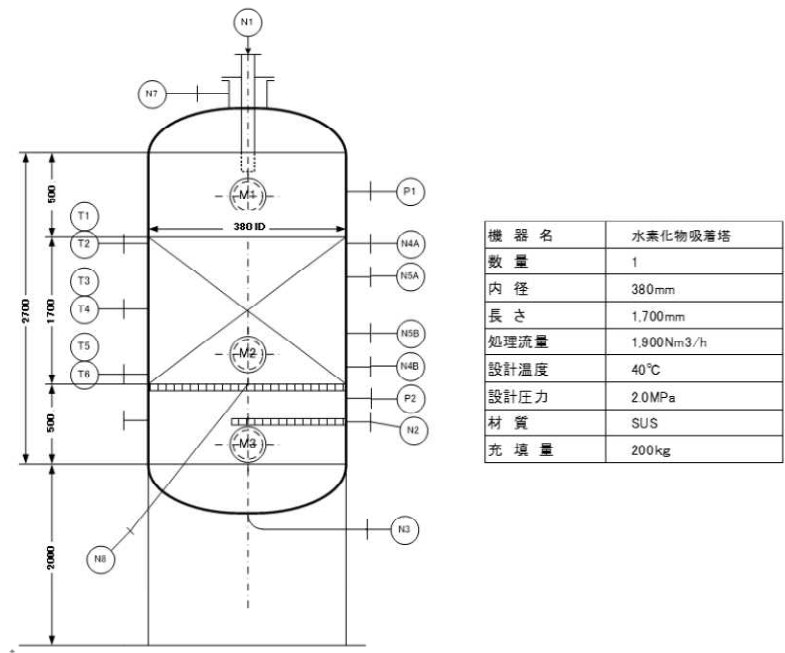


図 3-2-2-32 水素化物吸着塔概略図

(2) 燃料電池出力と燃料電池用ガス精製装置容量に関する検討

燃料電池と燃料電池用ガス精製装置による脱硫塔や水素化物吸着塔の容器サイズおよびヒータ容量について検討した。

図 3-2-2-33 に燃料電池出力と燃料流量の関係を示す。水素リッチガス（水素 80：窒素 20）、ガス圧力 2.0MPa、燃料電池の燃料利用率を 80% に想定すると、燃料電池出力 5MW での燃料流量は約 4,000Nm³/h であるが、20MW クラスになると約 16,000Nm³/h 規模となる。

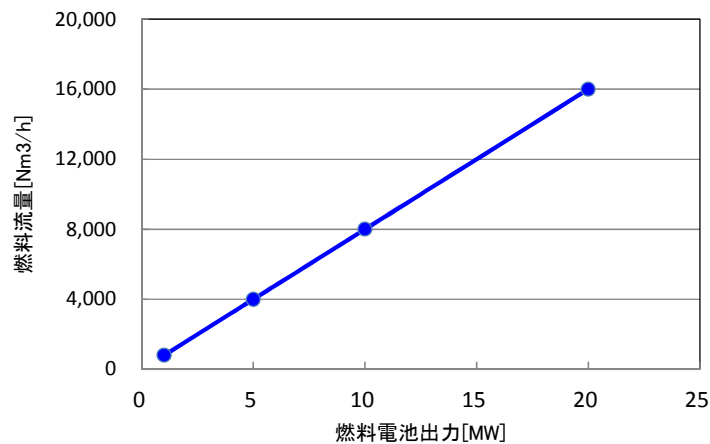


図 3-2-2-33 燃料電池出力と燃料流量の関係

次に、燃料電池出力と塔サイズの関係について図 3-2-2-34、燃料電池出力と吸着剤充填量の関係について図 3-2-2-35 に示す。

本検討では、設計線速度 $LV=0.25$ 、設計空塔速度 $SV=1000h^{-1}$ 、充填層高 H と塔内径 D の比を $H/D=1.2$ として検討した。水素化物吸着塔については、燃料ガス中の H_2Se 濃度が低く、運用温度が常温となることが想定されるため、脱硫塔よりもコンパクト

な設計となる。設計 $LV=0.25\text{m/s}$ を満足するように塔内径 D を決定すると燃料電池の出力が 15MW クラス以上になると 1m を超えるサイズとなる。また、充填容量は 9MW 未満では H/D から求められる充填容量が小さく $SV=1000\text{h}^{-1}$ 以下を満足できないため、設計 SV から充填容量を設計する必要がある。なお、 9MW 以上になると $H/D=1.2$ により充填容量が求められる充填容量が大きくなり、 $SV=1000\text{h}^{-1}$ 以下を満足することができる。また、 17MW クラス以上で充填容量（重量）は 1t を超える規模となる。

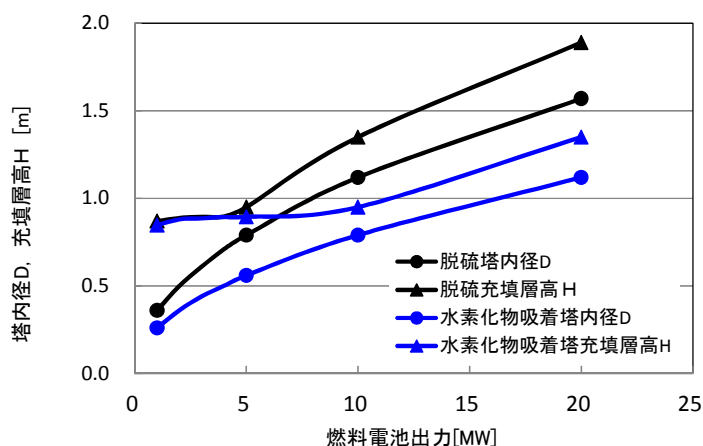


図 3-2-2-34 燃料電池出力と塔サイズの関係

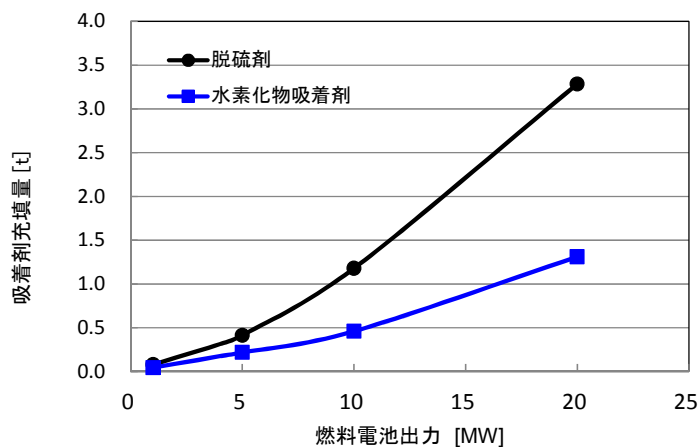


図 3-2-2-35 燃料電池出力と充填量の関係

燃料電池の出力規模を 1MW 、 5MW 、 10MW 、 20MW とした場合の燃料電池ガス精製装置の概略仕様について表 3-2-2-24 に示す。

表 3-2-2-24 燃料電池出力とガス精製装置概略仕様

燃料電池出力		MW	1	5	10	20
水素リッチガス流量		Nm ³ /h	800	4,000	8,000	16,000
脱硫塔	塔内径D	m	0.360	0.790	1.120	1.570
	充填層高H	m	0.870	0.950	1.350	1.890
	脱硫剤重量	t	0.078	0.414	1.179	3.285
水素化物吸着塔	塔内径D	m	0.260	0.560	0.790	1.120
	充填層高H	m	0.847	0.894	0.950	1.350
	水素化物吸着剤重量	t	0.044	0.218	0.460	1.310

次に、燃料電池用ガス精製装置に設置する熱交換器について概略検討を行った。図 3-2-2-36 に燃料電池用ガス精製装置構成例を示す。前述の通り、脱硫塔の運転温度は 350℃であるが、水素化物吸着塔の運転温度は常温となるため、脱硫塔前に再生熱交換器とヒータを設置し、水素化物吸着器の上流側にクーラを設置する構成が考えられる。

図 3-2-2-37 に燃料電池出力とヒータ容量の関係、図 3-2-2-38 に燃料電池出力とクーラ冷却水量の関係を示す。

燃料電池の出力規模が増加するのに伴い燃料流量が比例して増加するが、脱硫塔の運転温度を確保するために外部から供給する熱量は極力抑えるほうが好ましい。図 3-2-2-37 より再生熱交換器での交換熱量が大きく温度差を大きくとるほどヒータ容量が小さくなる。さらに、水素化物吸着塔の上流に設置するクーラについても再生熱交換器での交換熱量が大きくなるほど、冷却水の流量を少なくできる。

そのため、燃料電池の規模が大きくなるほど、再生熱交換器の容量を大きくし、最適化を図る必要があると考えられる。また、燃料流量が大きくなるほどクーラ出口の凝縮水が増加するため、ノックアウトドラムを設ける必要がある。

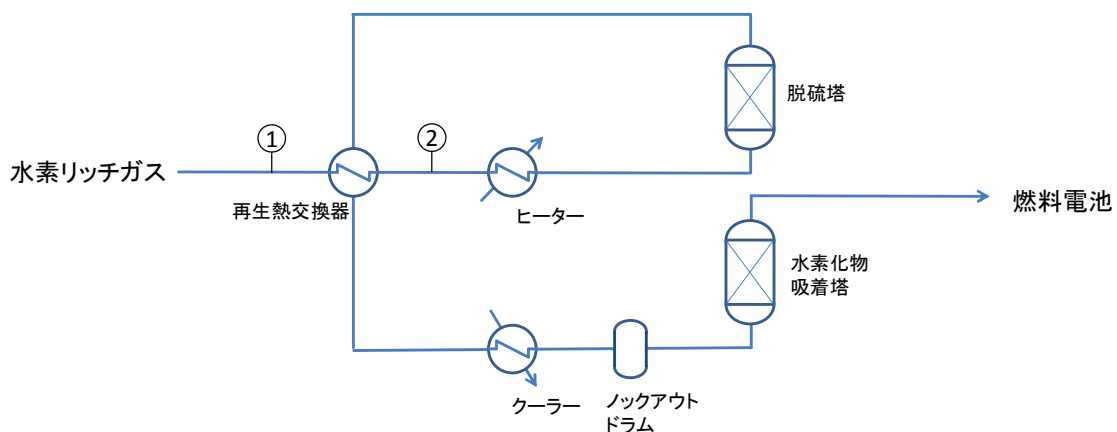


図 3-2-2-36 燃料電池用ガス精製装置構成例

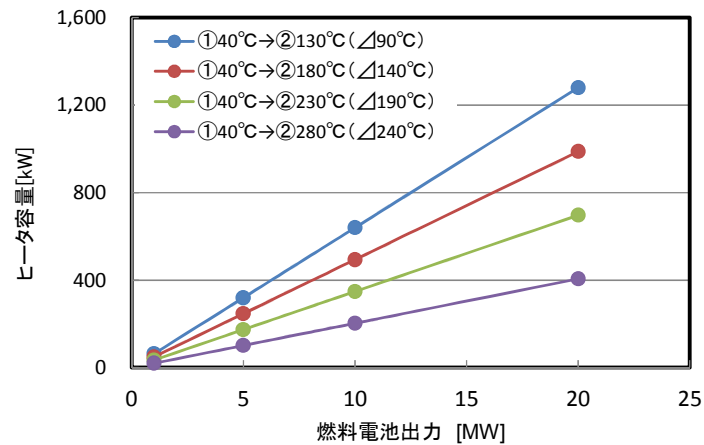


図 3-2-2-37 燃料電池出力とヒータ容量の関係

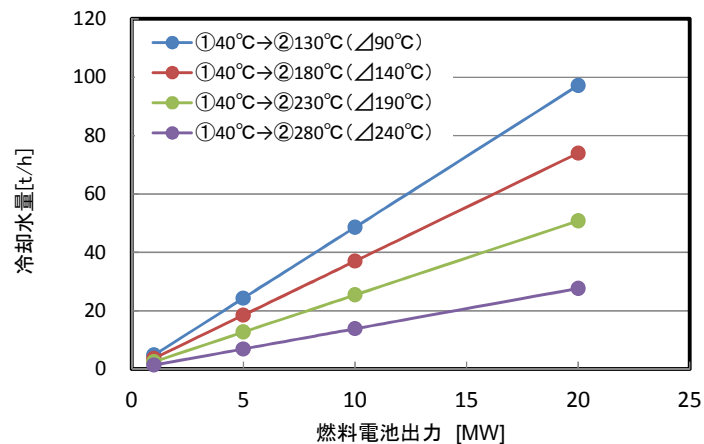


図 3-2-2-38 燃料電池出力とクーラ冷却水量の関係

3. 総括及び結論

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託事業として2015年9月から2018年2月末まで実施した「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研究」において得られた成果の要約は以下の通り。

3.1 セル被毒耐性評価

燃料電池用ガス精製技術を検討するにあたり、IGFCへの適用が期待される三菱日立パワーシステムズ(株)製「円筒横縞形固体酸化物形燃料電池(SOFC)」の実セルを用いて被毒影響を与える成分を特定するための個別被毒影響評価試験を実施した。また、石炭ガス中の主要な不純物である硫化水素(H₂S)と塩化水素(HCl)の影響を長期で確認するための長期被毒耐性評価試験を実施した。

(1) 個別被毒影響評価試験

石炭ガス中に存在する可能性の高い被毒成分としてアルシン(AsH₃)、ホスフィン(PH₃)、セレン化水素(H₂Se)、ジボラン(B₂H₆)、塩化水素(HCl)、硫化水素(H₂S)について、それぞれ被毒試験を実施した。

①アルシン(AsH₃)については、被毒による電圧低下は確認されなかった。また、被毒試験後のセル分析では基体管内表面にAsが確認されたが、燃料極には検出されておらず、基体管によってAsが燃料極に侵入することを防いでいると考えられる。一

方、排燃料系統にセルの構成材料である Zr 等を多く含んだ付着物が確認されており、AsH₃ はセルを分解している可能性が示唆される。

②ホスフィン (PH₃) については、被毒による電圧低下は確認されなかった。また、セル分析の結果、基体管内表面に粒状の物質が付着しており、P であることが確認された。また、基体管内部にも P が検出されたが、燃料極には確認されておらず、基体管によって P の侵入を防いでいると考えられる。

③セレン化水素 (H₂Se) については、被毒による明確な電圧低下が確認された。H₂Se 濃度 1ppm で約 8%、0.5ppm で約 7%程度の比較的大きな電圧降下が生じた。また、セル分析では基体管内部および燃料極にも Se が検出されており、燃料極に到達した Se によって電圧低下が生じていると考えられる。

④ジボラン (B₂H₆) については、被毒による電圧低下は確認されなかった。また、セル分析の結果、いずれの箇所にも B は検出されなかった。

⑤塩化水素 (HCl) については、他よりも高い 10ppm で被毒試験を実施したが、被毒による電圧低下は生じておらず、セル分析でも Cl は検出されなかった。しかし、試験後の排燃料系統に塩化アンモニウム (NH₄Cl) の結晶が付着していることが確認された。これは、セル内部で生じたアンモニア (NH₃) と HCl が反応して NH₄Cl を生成し、低温部で析出したものと考えられる。そのため、HCl はセルの被毒は生じないものの、小口径配管などでは配管閉塞などの影響を生じる懸念がある。

⑥硫化水素 (H₂S) については、被毒による明確な電圧降下が確認された。H₂S 濃度 1ppm では約 3%、0.5ppm で約 2.7%の電圧降下であった。また、被毒試験後のセル分析の結果、基体管や燃料極に広く S が検出されており、燃料極では触媒 Ni が粗大化している様子も確認された。

<まとめ>

燃料電池の性能に大きな影響を及ぼす被毒成分は H₂Se と H₂S であることが判明した。また、セル分析の結果、電圧低下を生じた H₂S と H₂Se は燃料極中にも S や Se が存在していたが、その他の成分については燃料極中には確認されておらず、基体管表面または内部にのみにとどまり、電圧低下を発現するまでには至らなかったと考えられる。なお、AsH₃ については電圧低下等の影響は生じていないものの、セルを分解している可能性が示唆される。

(2) 長期被毒耐性評価試験

石炭ガス中の主要な被毒成分である H₂S と HCl を各 1ppm ずつ燃料に添加し、約 7,526 時間の被毒試験を実施した。試験の結果、被毒成分を添加した 40 時間後から約 3%程度の電圧低下が生じ、セルの入口素子から出口素子にかけて順に電圧低下が進行している様子が確認された。また、セル電圧低下が一定値に収束して以降、約 5,500 時間程度試験を継続したが経時的な電圧低下は確認されなかった。なお、個別被毒影響評価試験では HCl による電圧低下は生じていないことから、電圧低下は H₂S に起因するものと考えられる。なお、性能表示式による解析の結果、燃料極反応抵抗が被毒前に比べて約 2.3 倍に増加していることが判明した。また、被毒試験後のセル分析では、基体管や燃料極に S や Cl が広く分布している様子や燃料極/電解質界面に Cl が帯状に存在している様子などが確認された。

本試験の結果から、既存のガス精製技術を用いて燃料電池入口 H₂S 濃度を 1ppm 以下に抑えれば最大 3%程度の電圧低下が生じるものの、燃料電池の運転継続は可能と考えられる。さらに、本研究で別途評価した脱硫剤は H₂S を定量下限以下まで除去できる能力を有しており、現行技術を用いて十分な対策を講じることが可能と判断され

る。

3.2 燃料電池用ガス精製技術性能評価

石炭ガス中の被毒成分を除去するための燃料電池用ガス精製として適用可能な化学吸着を利用した吸着剤についてスクリーニング試験を実施した。さらに燃料電池用ガス精製の設計に必要なデータを確認するためのベンチ試験を実施した。

(1) スクリーニング試験

石炭ガス中に含まれるアルシン (AsH_3)、ホスフィン (PH_3)、セレン化水素 (H_2Se)、ジボラン (B_2H_6) 等の水素化物用吸着剤として 3 種類、塩化水素 (HCl) 用吸着剤 2 種類、硫化水素 (H_2S) 用吸着剤 3 種類について吸着容量試験および低濃度リーク確認試験を実施した。

①吸着容量試験

本試験では被毒成分濃度を 2,000ppm として供給し、吸着剤が破過するまでの吸着容量を確認した。試験の結果は以下の通り。

(i) 水素化物用吸着剤

今回供試した 3 種類の吸着剤については、いずれも H_2Se に対して大きな吸着容量を示し、 H_2Se は比較的除去しやすい成分であることが確認された。そのため、セル被毒耐性評価で被毒影響が確認された H_2Se に対しても除去対策が可能であると考えられる。さらに、 AsH_3 に対しては吸着容量が比較的小さいものの、吸着除去可能であることを確認した。

(ii) 硫化水素用吸着剤

今回供試した 3 種類の吸着剤については、いずれも H_2S を吸着除去が可能であり、吸着剤 D (Zn 系) の吸着容量が最も大きいことを確認した。

(iii) 塩化水素用吸着剤

今回供試した 2 種類の吸着剤とも HCl に対して大きな吸着容量を有することを確認した。

②低濃度リーク確認試験

実ガス中の濃度レベルを想定し、各被毒成分を 1ppm や 0.1ppm の低い濃度で供給した場合における吸着性能を確認した。試験の結果、いずれの吸着剤についてもカラム出口に被毒成分は検出されず、被毒成分が低濃度であってもリークすることなく定量下限値以下まで除去可能であることを確認した。

なお、低濃度リーク試験ではカラム出口の被毒成分を測定するために吸収液法を採用したことから、別途、被毒成分を捕集するための吸収液およびサンプリング条件を検討した。その結果、 HCl 、 H_2Se 、 PH_3 、 AsH_3 の測定に適した吸収液を選定することができた。今回確認した吸収液は、実プラントにおける被毒成分の測定用吸収液として適用できる。

(2) ベンチ試験

個別被毒耐性評価試験で被毒影響が確認された H_2Se および H_2S に対して高い吸着容量を有する吸着剤 B (Cu 系) と吸着剤 D (Zn 系) を用いて、実プラントでの使用条件を想定して吸着性能を確認した。試験の結果、いずれの試験においてもカラム出口へのリークや異常な温度上昇は確認されず、実プラントにも適用可能な条件であることを確認した。

(3) 吸着剤分析評価

吸着容量試験前後の吸着剤について細孔特性や被毒成分の吸着濃度、吸着状態等を

分析し、カラムにおける吸着剤の消費状況を確認した。分析の結果、被毒成分が吸着剤の主成分と反応し、吸着されている状態を確認した。また、カラム内の吸着分布を把握した。

3.3 燃料電池用ガス精製装置の試設計

出力 2.4MW の燃料電池を想定し、燃料電池用ガス精製装置のシステム構成を検討するとともに、脱硫塔および水素化物吸着塔の試設計を行った。

試設計の結果、IGFC の場合 2MPa 程度の高圧となるため実流量が少なく、被毒成分濃度も低いことから脱硫剤および水素化物用吸着剤の充填容量は数 100kg 程度のレベルになることを確認した。また、燃料電池容量に対する燃料電池用ガス精製装置の容量について検討を行った結果、燃料電池が 10MW 級以上になると脱硫剤は 1t を超え、20MW 以上で水素化物吸着塔も 1t を超える規模になることを把握した。なお、実プラントの設計においては CO₂ 分離・回収設備出口における被毒成分濃度を確認し、設計条件を見直す必要がある。

2-3. 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

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：CH₄）を燃料としており、石炭ガス（COリッチガス：主成分CO/H₂/N₂）やCO₂分離・回収後の石炭ガス（水素リッチガス：主成分H₂/N₂）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)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CO₂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3-2-3-1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。

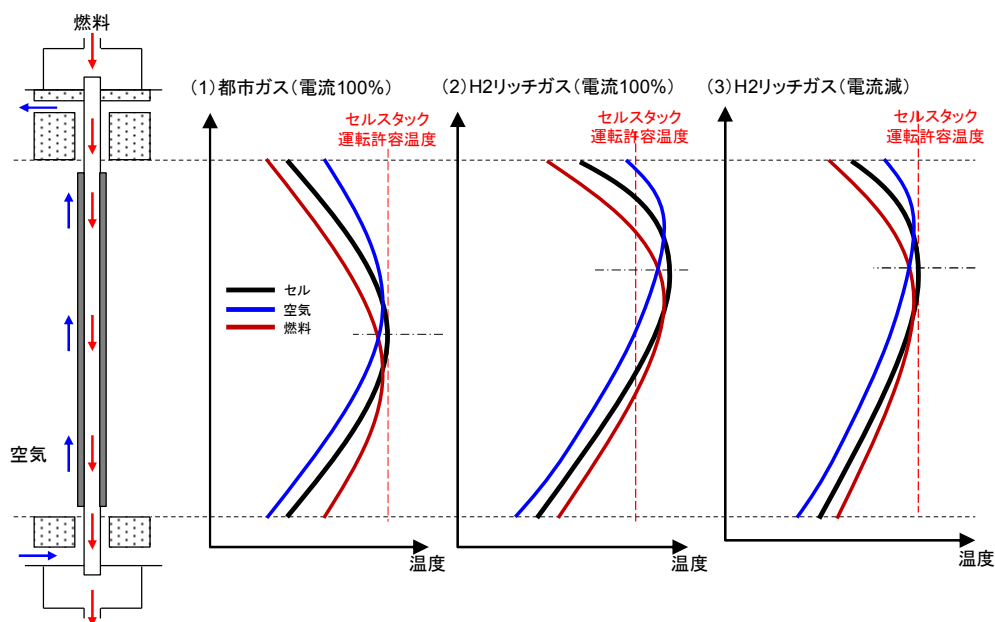


図3-2-3-1 天然ガスおよび水素リッチガス供給時のセル廻り温度分布イメージ

(a) 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(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 3-2-3-2 に解析結果を示す。

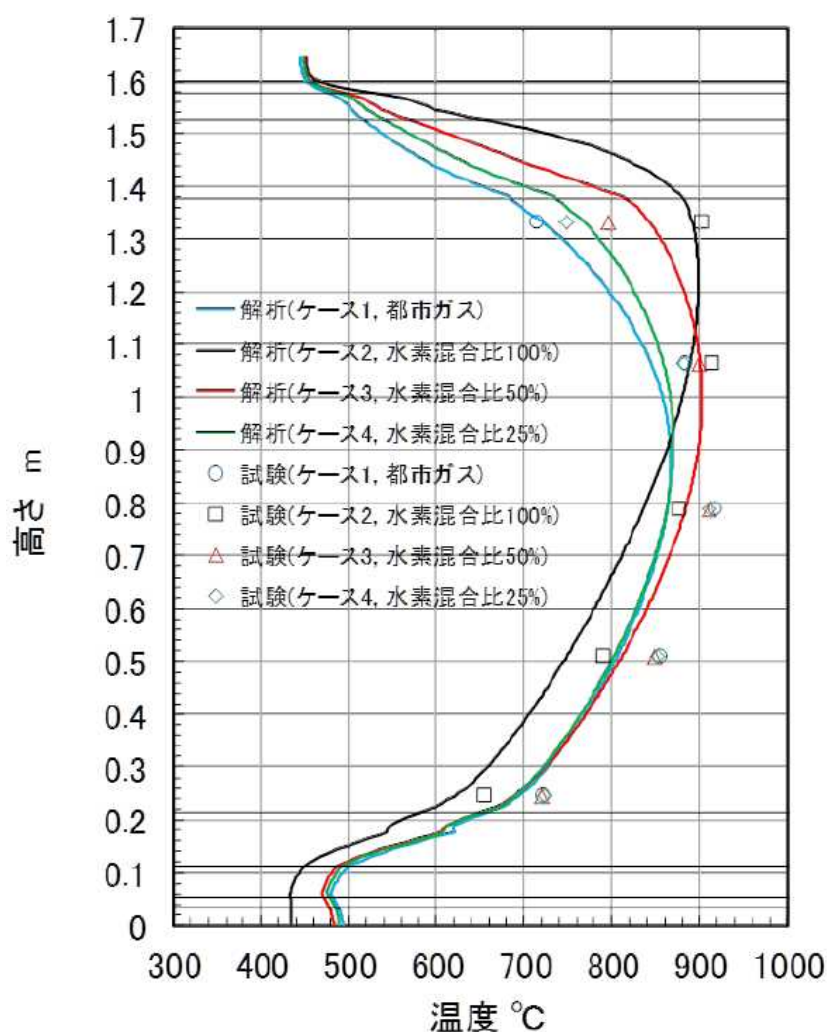


図 3-2-3-2 水素混合比変化時のセルスタック温度分布

(b) 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 3-2-3-3 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。

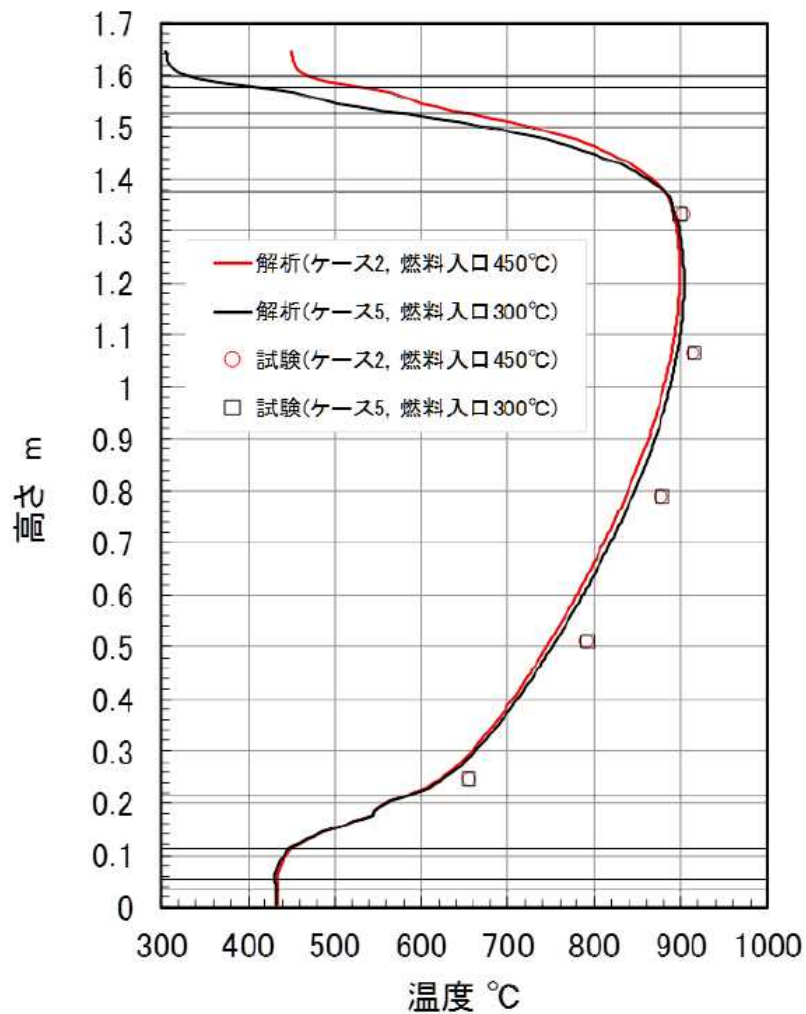


図 3-2-3-3 入口燃料温度変化時のセルスタック温度分布

(c) 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 3-2-3-4 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。

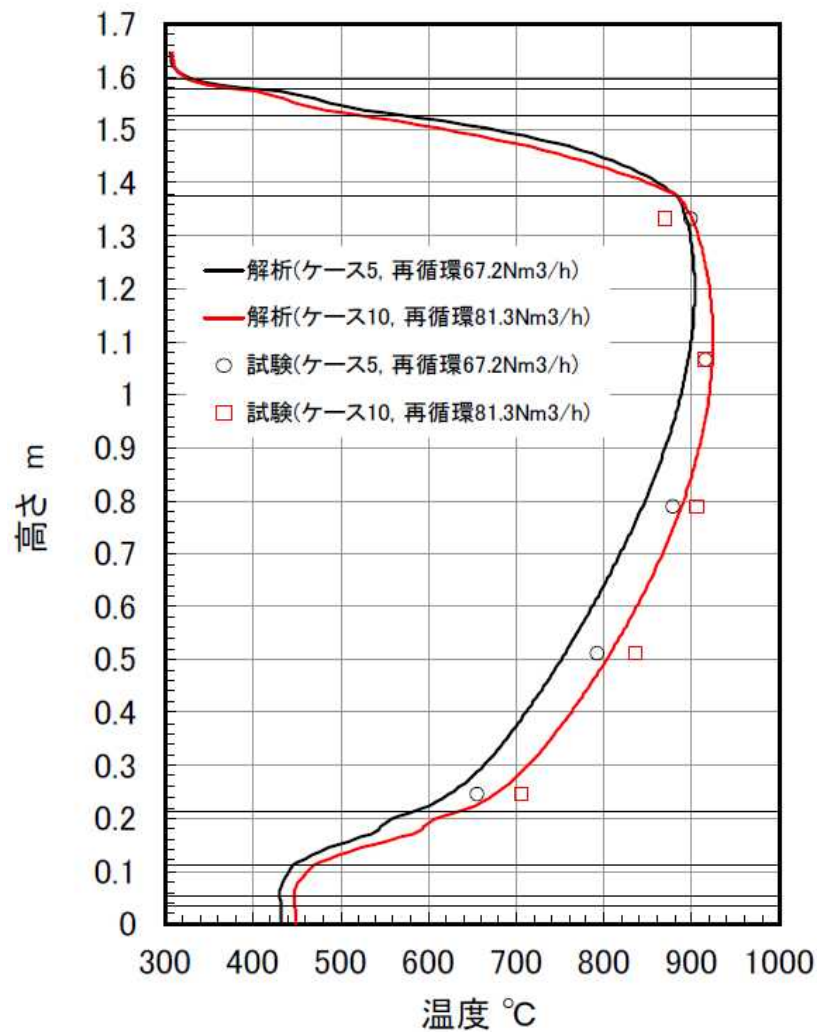


図 3-2-3-4 再循環流量変化時のセルスタック温度分布

(d) 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 3-2-3-5 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°C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。

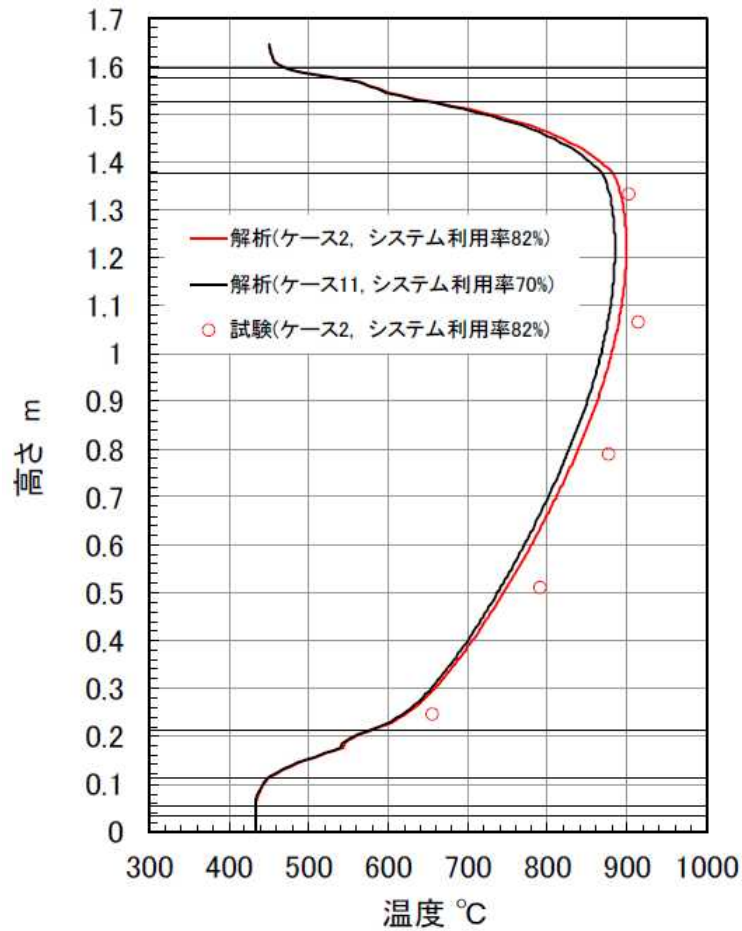


図 3-2-3-5 システム燃料利用率変化時のセルスタック温度分布

(e) 入口空気温度変化

セルスタック温度分布の改善効果を確認するために、セルスタック下部側から供給する入口空気温度を変化させた時の温度分布を予測した。図 3-2-3-6 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、入口空気温度変化によるセルスタック温度分布の改善効果は比較的小さいことが分かった。

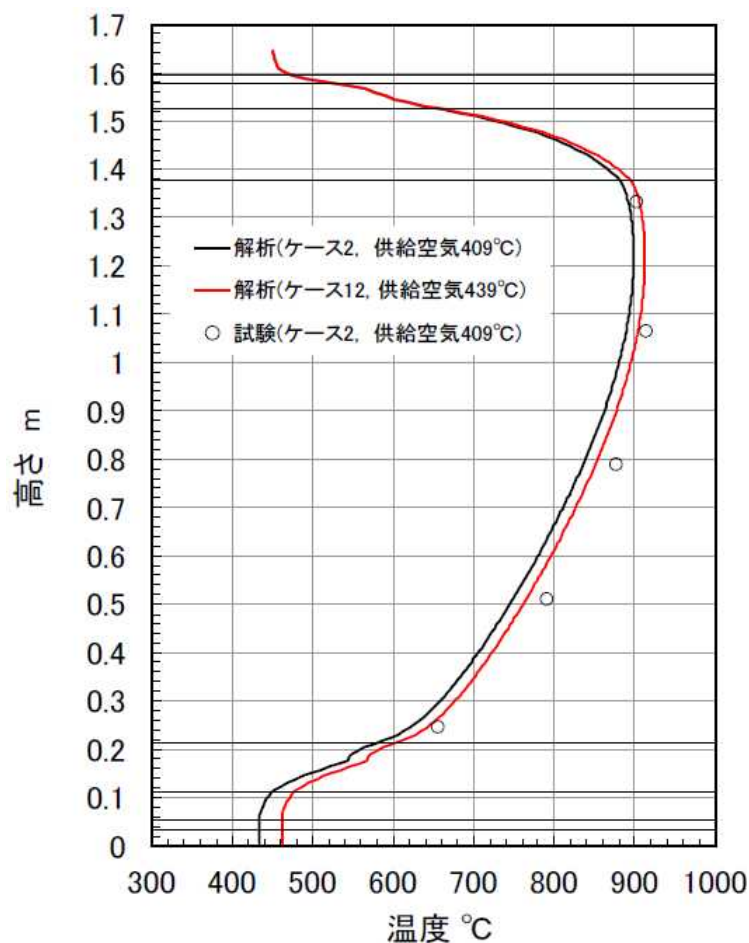


図 3-2-3-6 空気入口温度変化時のセルスタック温度分布

(f) CO₂ 濃度変化

石炭ガス化ガスから CO₂ 分離回収した水素リッチガスでは、一部の CO₂ が残留することも想定されることから、CO₂ 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、CO₂ 濃度を 0%、3%、8% に変化させて解析を実施した。図 3-2-3-7 に解析結果を示す。

水素リッチガス中の CO₂ 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 CO₂ 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、CO₂ 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。

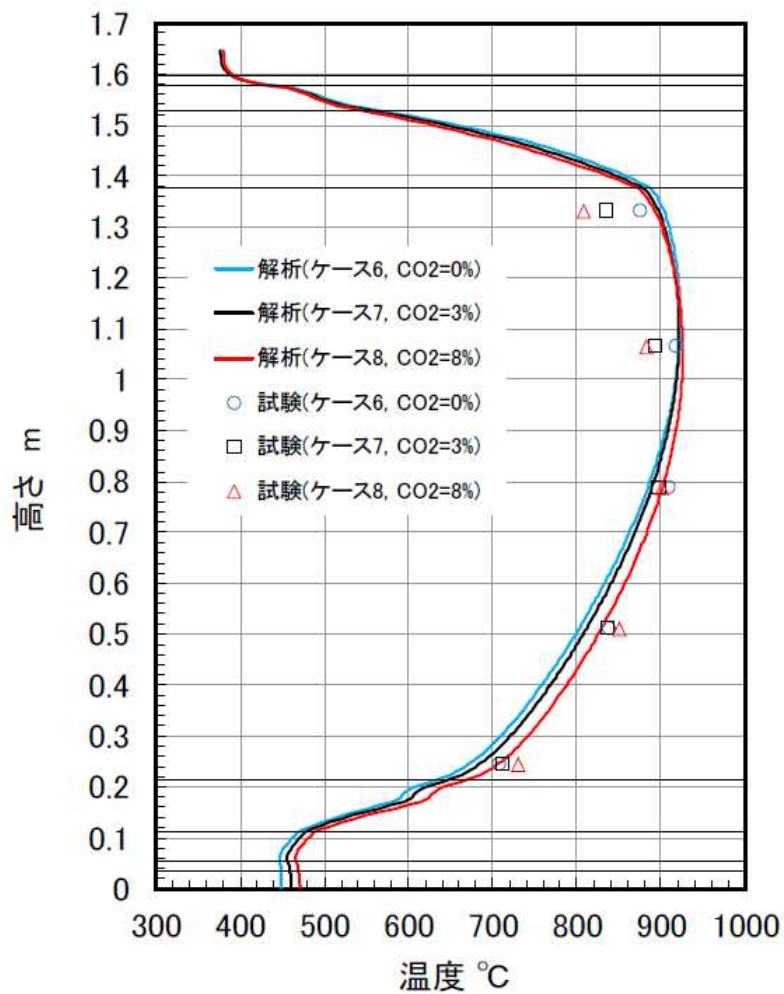


図 3-2-3-7 CO2 濃度変化時のセルスタック温度分布

(ii) 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 3-2-3-8 に燃料電池モジュールの概略系統を示す。

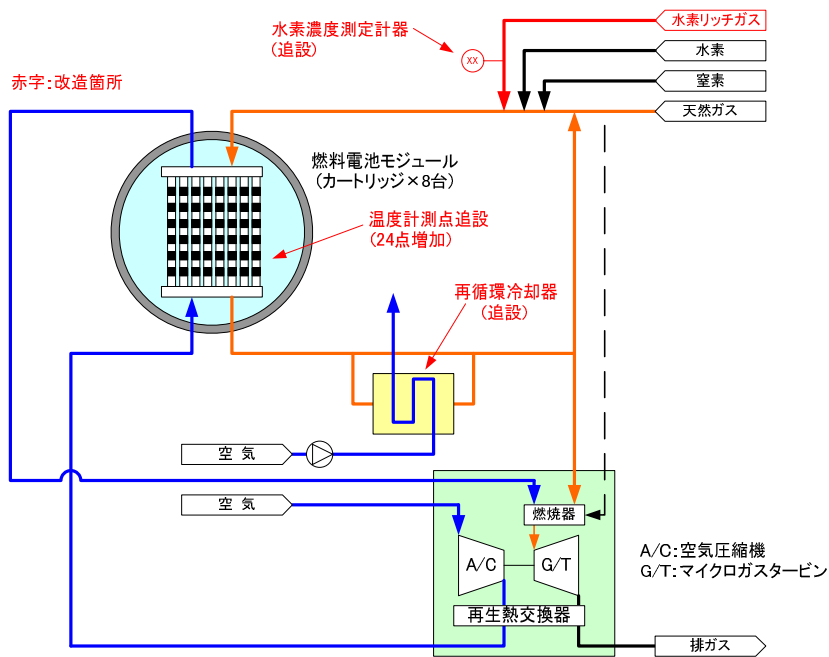


図 3-2-3-8 燃料電池モジュールの概略系統

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)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 3-2-3-9) やユーティリティ供給設備 (図 3-2-3-10) 等の据付工事および試運転調整を実施し、2017 年 11 月末までに据付を完了した。

表 3-2-3-1 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	■			(機器製作)	■				据付工事	■		
燃料電池モジュール試験設備据付工事	■			(機器製作)	■				機器調整・試運転	■		



図 3-2-3-9 燃料電池モジュール試験設備



(a) LNG/N₂ 供給設備



(b) 水素供給設備

図 3-2-3-10 ユーティリティ供給設備

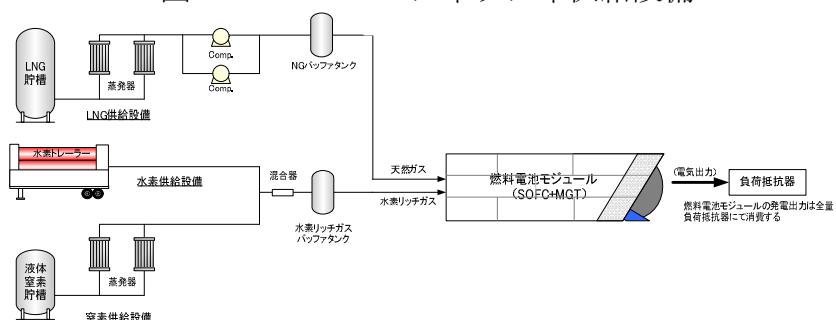


図 3-2-3-11 試験設備概略系統

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（H₂/N₂）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 年度は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 3-2-3-12 燃料電池カートリッジ試験

(i) 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 230kPaG への加圧操作を行い、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 (800℃以上目安) 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 3-2-3-13 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。

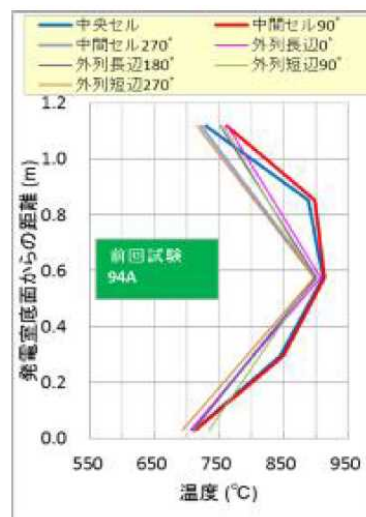


図 3-2-3-13 LNG 発電時の温度分布

(ii) 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 930℃以下になる様に電流値を増減する自動運転制御を行う。図 3-2-3-14 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。

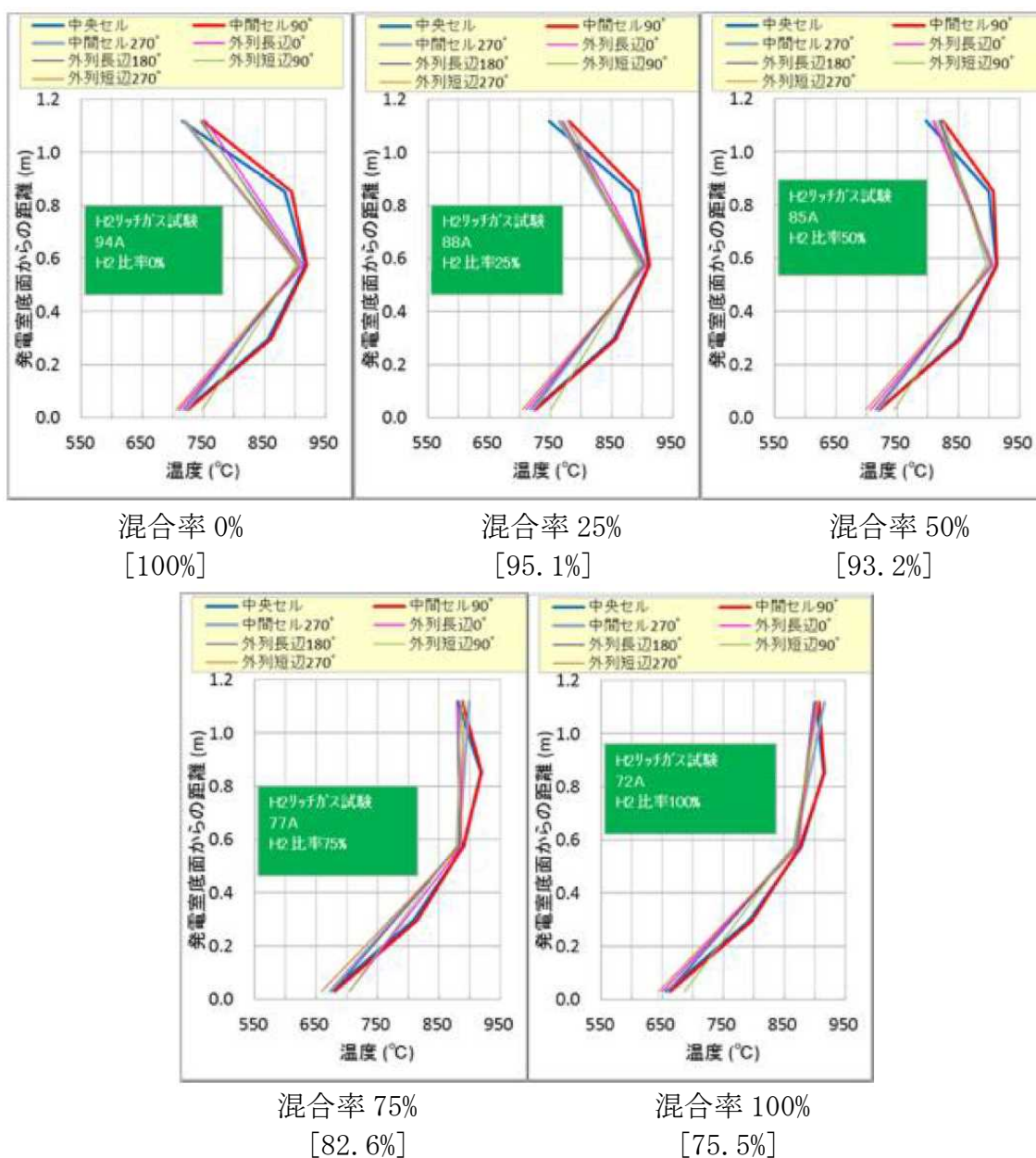


図 3-2-3-14 水素リッチガス混合率変化時の温度分布
 ([]は都市ガス運転時を 100%とした時の出力割合)

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 3-2-3-15 に運転実績を示す。

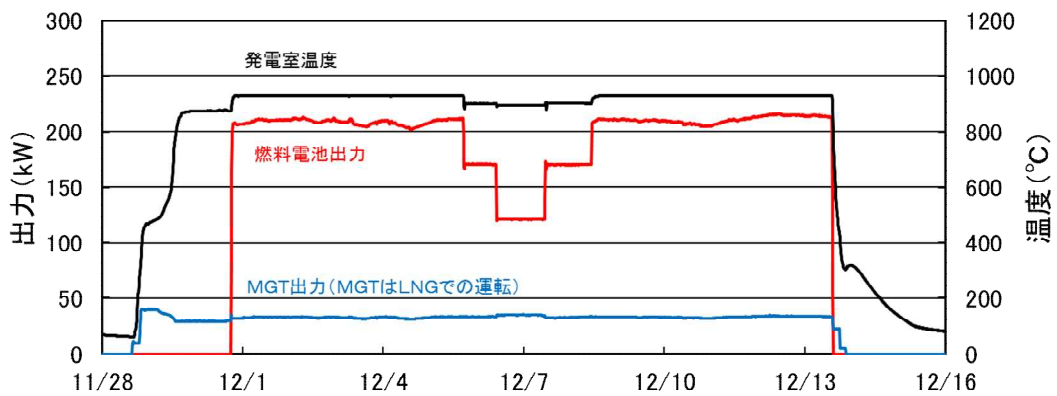


図 3-2-3-15 基本特性確認試験時の運転実績

表 3-2-3-2 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)
システム燃料利用率	最大 83.0%
空気利用率	最大 25.2%
運転時間	402時間

研究開発項目⑤ 水素リッチガス切替試験

図 3-2-3-16 に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 3-2-3-17 に水素リッチガス試験時の発電室温度分布、図 3-2-3-18 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。

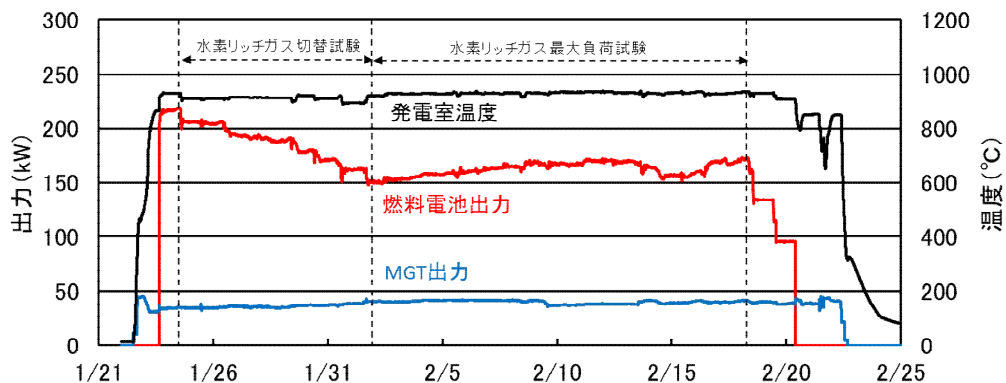


図 3-2-3-16 水素リッチガスでの運転実績

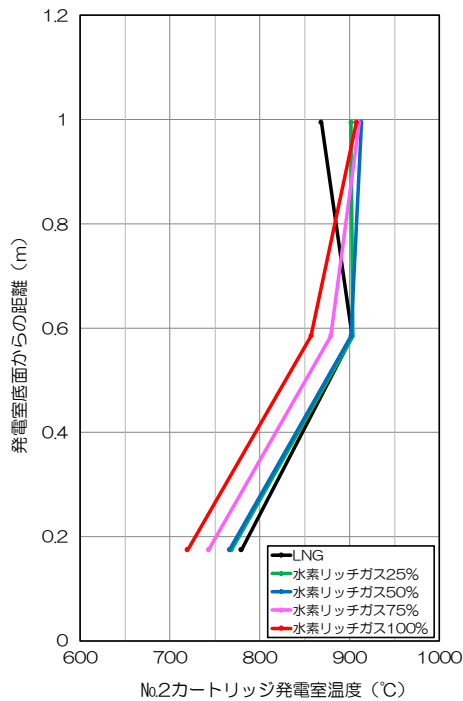


図 3-2-3-17 水素リッチガス切替試験時の温度分布

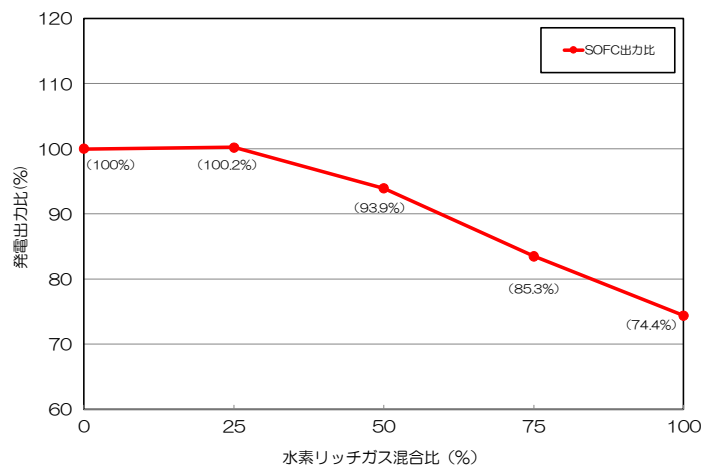


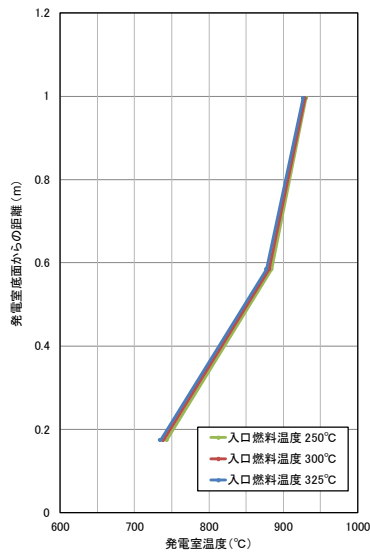
図 3-2-3-18 水素リッチガス切替試験時の発電出力推移

研究開発項目⑥ 水素リッチガス最大負荷試験

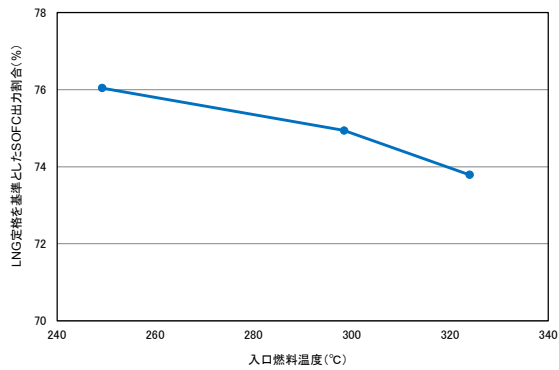
水素リッチガスのみで運転可能な最大負荷を確認し、発電特性や温度挙動を確認した。

(a) 入口燃料温度変化

図 3-2-3-19 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

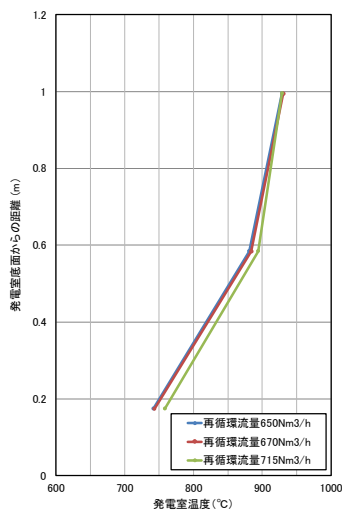


(b) 出力

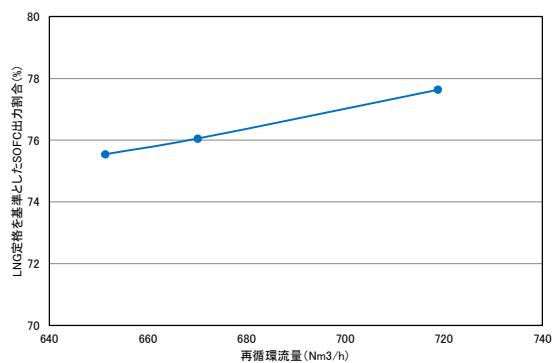
図 3-2-3-19 入口燃料温度変化時の発電室温度・出力推移

(b) 再循環流量変化

図 3-2-3-20 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 65Nm³/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



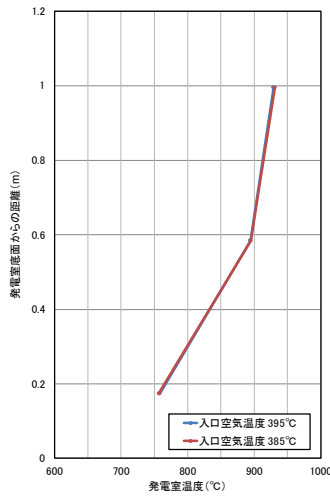
(b) 出力

図 3-2-3-20 再循環流量変化時の発電室温度・出力推移

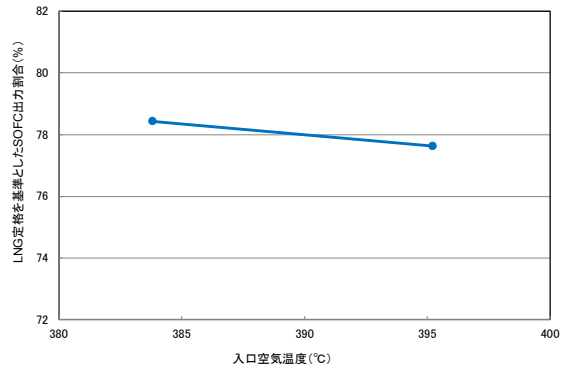
(c) 入口空気温度変化

図 3-2-3-21 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

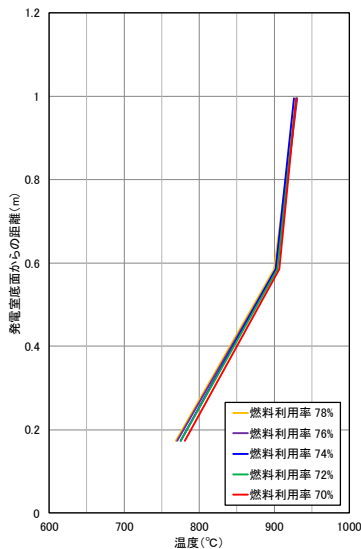


(b) 出力

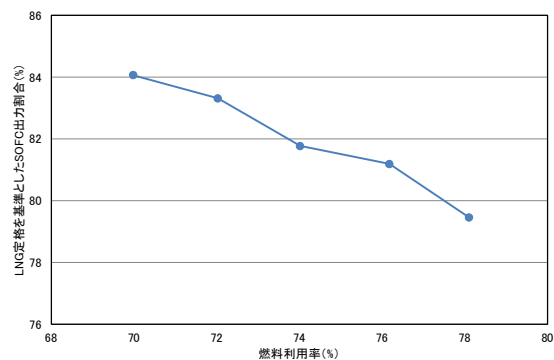
図 3-2-3-21 入口空気温度変化時の発電室温度・出力推移

(d) システム燃料利用率変化

図 3-2-3-22 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 3-2-3-22 システム燃料利用率変化時の発電室温度・出力推移

(e) 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 3-2-3-23 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。

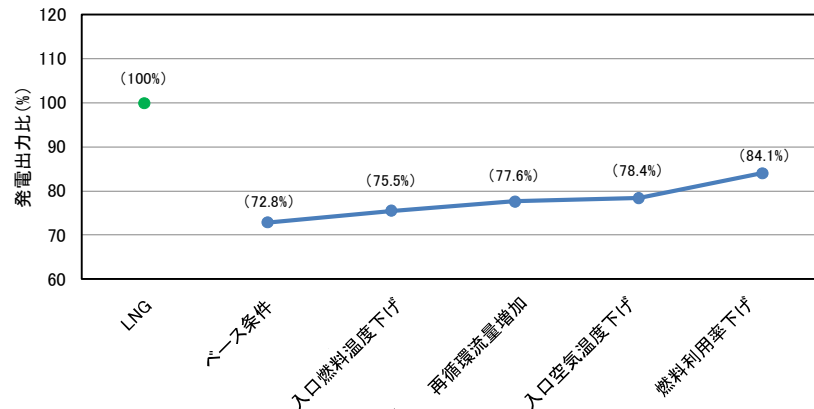


図 3-2-3-23 水素リッチガス最大負荷試験における発電出力推移

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、燃料系統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 3-2-3-24 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。

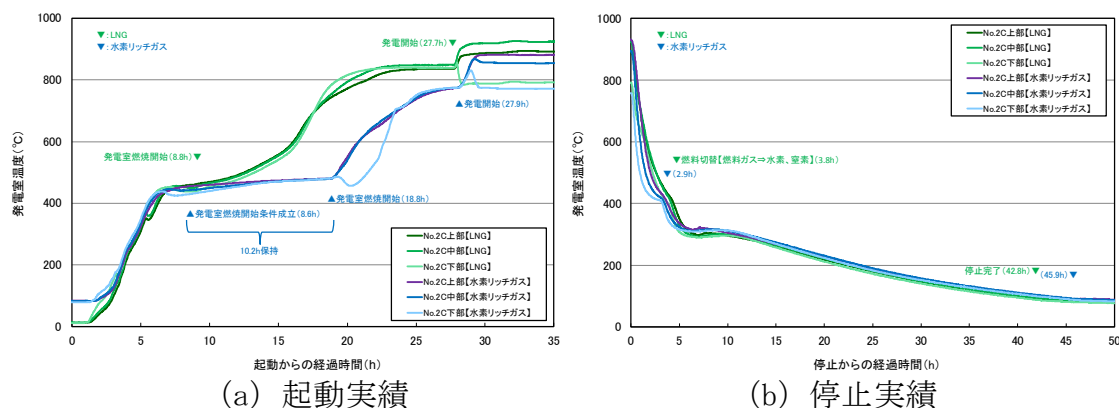


図 3-2-3-24 LNG および水素リッチガスにおける起動・停止実績

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 CO₂ 分離回収後の水素リッチガス組成である H₂ : 85%とするため、H₂ と N₂ 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 CO₂ 分離回収後

のガスには H₂, N₂ 以外に CO₂, CO, CH₄ 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 CO₂, CO, CH₄ の炭素成分をまとめて CO₂ で代替し、水素リッチガスに CO₂ 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 3-2-3-25 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 CO₂ 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。更に実証機には CO₂ 以外に CO が含まれていることから CO の影響も想定され、CO を含むガスでの試験が望まれる。

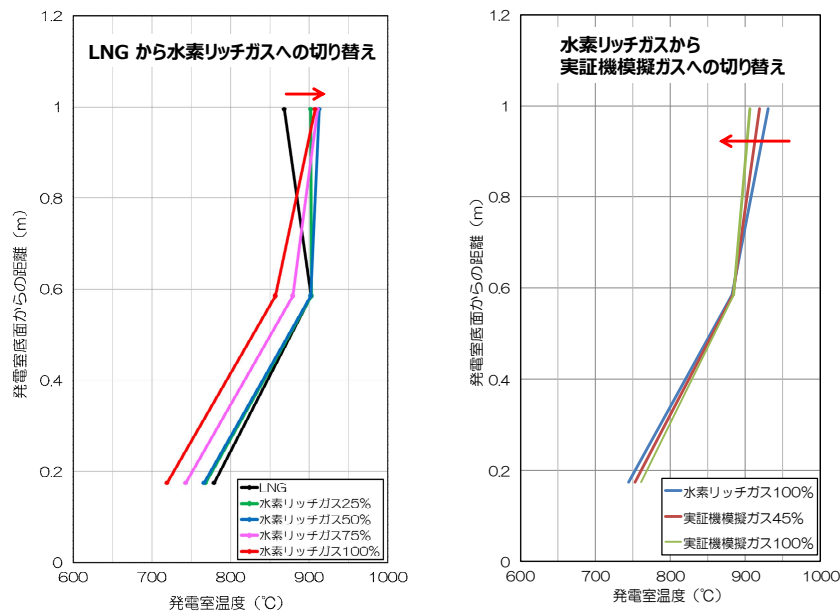


図 3-2-3-25 発電室内温度分布の推移

(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 3-2-3-26 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た。

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 of 出力改善を行うことができた。この結果から少量の CO₂ 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。

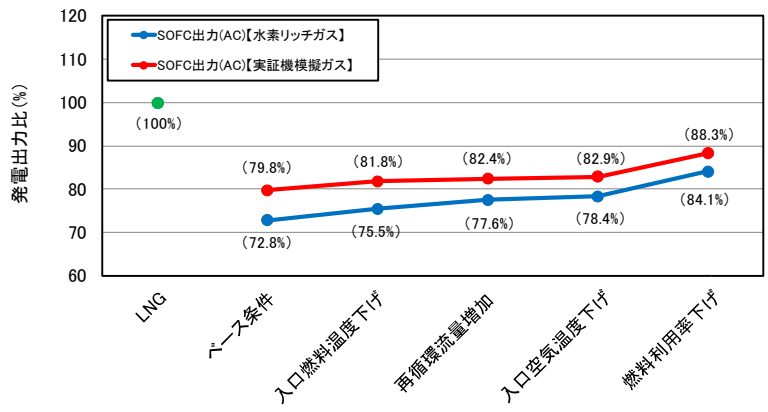


図 3-2-3-26 実証機模擬ガス最大負荷試験における発電出力推移

(f) 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、CO₂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CO₂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 3-2-3-27 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）。

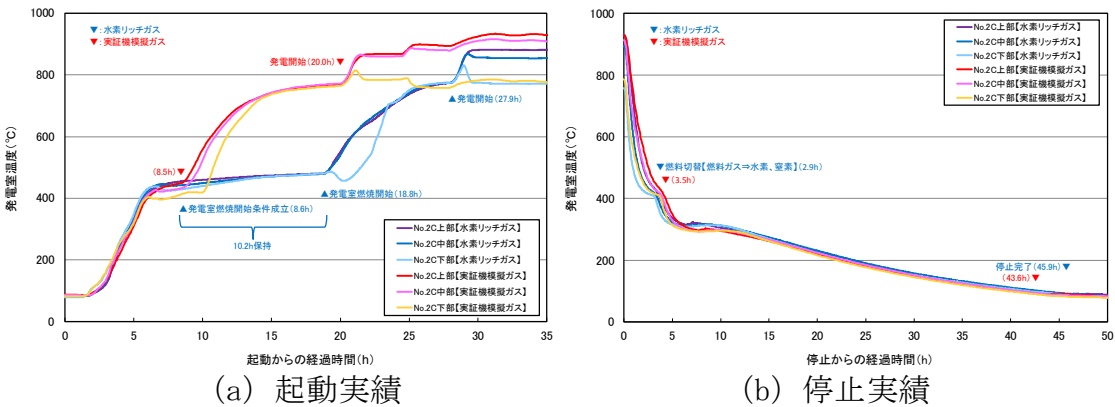


図 3-2-3-27 水素リッチガスおよび実証機模擬ガスにおける起動・停止実績

研究開発項目⑨ 石炭ガス化炉連係試験

石炭ガス化炉との連係運転時におけるプラント挙動および制御性について、電源開発株式会社 若松総合事業所に設置の石炭ガス化炉との連係試験を行う。昨年度実施した「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ナップ技術要素研究」での成果を基に、現在、石炭ガス化炉から供給される石炭ガス中の SOFC 被毒成分を除去するための燃料電池用ガス精製設備を設置し、試験を実施している。

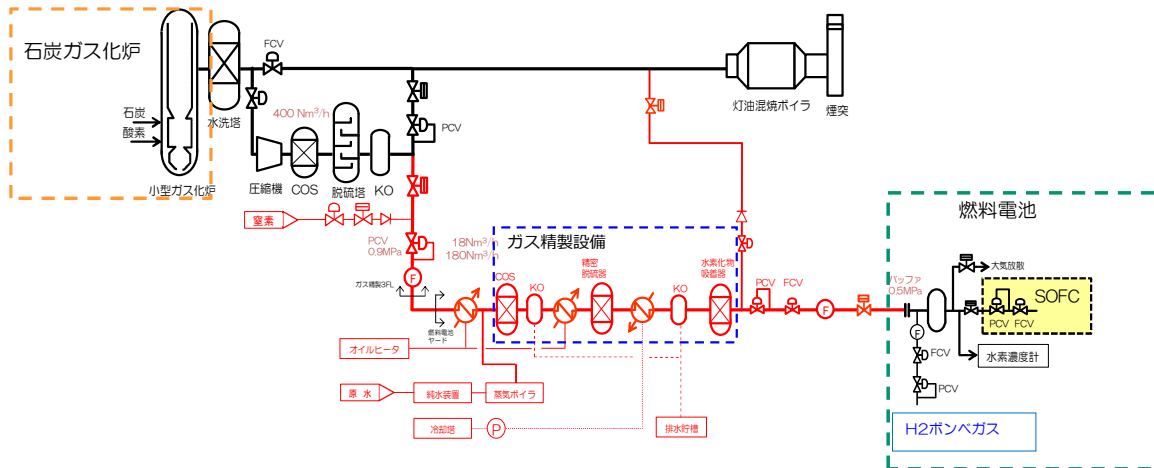


図 3-2-3-28 燃料電池用ガス精製設備の概略系統



図 3-2-3-29 燃料電池用ガス精製設備（追設工事中）

研究開発項目⑩ 石炭ガス（CO リッチガス）適用に係る技術検討

「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研究」で評価した吸着剤を対象に CO リッチガスにおける吸着性能を評価した。また加圧下にて吸着剤を使用するため還元ガス雰囲気における吸着剤の還元開始温度（吸着剤と還元ガスが反応し始める温度。吸着剤は還元すると機能しなくなる。）の圧力依存性を調べた。

結果、CO リッチガス雰囲気においても吸着剤の吸着容量に変化はなかった。一方で、吸着剤の還元開始温度に関して、CO リッチガスとすることで吸着剤 A は還元開始温度が上がり、吸着剤 B は還元開始温度が下がる結果となった。この結果から、吸着剤の使用温度（40℃）においては、吸着剤 A の方が還元開始までの温度差を取れることから、より安定して使用できることが分かった。

今回の石炭ガス連係試験では CO リッチガス環境下での使用となることから、吸着剤 A を採用することとした。表 3-2-3-3 に還元ガス雰囲気における吸着剤の還元開始温度を示す。

表 3-2-3-3 還元ガス雰囲気での吸着剤還元開始温度

吸着剤	圧力 [MPa]	水素リッチガス [°C]	CO リッチガス [°C]
吸着剤 A	大気圧	180	216
	0.3	154	190
	0.6	136	186
	0.9	132	182
吸着剤 B	大気圧	140	94
	0.3	130	76
	0.6	123	72
	0.9	120	70

研究開発項目⑪ 燃料電池モジュールの解体調査

石炭ガス化炉関係試験終了後、炭素析出や微量な不純物の影響を確認するため、燃料電池モジュールを圧力容器から取り出した後、解体調査を行い内部の状況を確認する。

2-4. IGFC システムの検討

1. 事業全体の成果

本研究において、IGFC の技術確立に向けた実証機について、SOFC 設備として「600kW 級モジュールの 2 並列」と容量を決定。CO₂ 分離回収後の水素リッチガスを用い SOFC 設備の試験を行う設備の試設計を完了した。設備の概要は表 3-2-4-1 に示す通り。これらの成果は小型 IGFC 実証試験に反映されるものであり、最終目標「IGFC 実証機の容量を決定し、実証機の試設計を完了する。」ことを達成した。表 3-2-4-2 に本事業の開発項目の達成状況を示す。

表 3-2-4-1 実証試験設備 仕様概要

大分類	項目	圧力 (MpaG)	容量 (流量)	概要
SOFC設備	SOFC本体	0.6-2.0	600kW×2	SOFC本体は、複数並列とし拡張性を確認する
	空気圧縮機	2.3	—	高圧化対応のため、別置き圧縮機を設置
	触媒燃焼器	—	—	SOFCからの排燃料処理は、低Noxの触媒燃焼器を設置
	排ガス冷却器	—	—	排ガスはダクトの耐熱の 180°Cまで水噴霧にて冷却
冷却水設備	冷却水ポンプ	—	50%×2	冷却水ポンプは予備機無し
	密閉式ラジエーター型熱交換機	—	—	排水量低減のため、ブローが不要な密閉式ラジエーター型の熱交換器を採用
窒素供給	液窒タンク	1.1	40kL級	SOFCトリップ時に冷却用窒素を供給。停電時を考慮し、制御空気に自らの窒素を使用。タンク圧は 1.1 MPa とし、自圧供給 (0.9Ma) を可能とする。通常供給圧0.9~2.3MPa。
	窒素圧縮機	2.3	400m ³ N/h	
	空温気化器	—	700m ³ N/h×2	
水素供給	水素チューブトレーラー	19.6	2600m ³ N級×4 (最大)	緊急時の窒素供給時に還元雰囲気を保つ為に供給。チューブトレーラー (圧力容器) の昇温対策のため、遮光と散水設備が必要。
	減圧供給	2.3	30m ³ N/h	
	日除・散水設備	—	—	
吸着剤試験器	吸着剤試験容器	2.0	90m ³ N/h	実験室模擬ガスによる吸着特性を実ガスにて確認。吸着状況について分析を実施し、吸着状態を把握する。
	連続ガス分析計	—	—	

表 3-2-4-2 本事業の開発項目・目標および達成状況

技術課題	目標	成果	達成度
① 高温燃料電池及びIGFCの技術動向調査	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。	事業用燃料電池の開発状況とIGFC実用化に向けた課題を明らかにした。	○
② 商用機のシステム検討	CO2分離・回収型IGFCについて、CO2分離・回収方法や燃料電池設置位置等を検討し、望ましいプロセスフローを選定する。	商用CO2分離・回収型IGFCについてシミュレーションを実施し、最適なプロセスフローを選定した。	○
③ 実証に向けたシステム評価	実証機向け燃料電池の種類、発電容量、燃料電池への石炭ガス分岐位置、石炭ガス中の被毒成分の処理方法等を決定する。	実証機に適した燃料電池の仕様、プロセスフローを検討した。また、被毒成分に対する吸着材を選定し、処理方法を決定した。	○
④ 実証機試設計	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。	実証機の設計条件を明らかにし、システム系統、設備構成、物質収支、設備レイアウト、ユーティリティ等を明らかにした。	○
⑤ 実証試験内容の検討	IGFC実証機における試験内容を検討する。	実証すべき試験項目と試験工程を明らかにした。	○

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み（中間）／一部達成（事後）、×未達

2. 1. 1 固体酸化物型燃料電池 (SOFC) の国内外の動向

SOFC については、基礎的な研究から商用化すべく実証検証さらには商品化済みの段階まで存在する。比較的開発段階が高いものとして、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 (MHPS) の加圧 250kW 級ハイブリッドシステムが上市された。主な燃料電池の開発状況を表 3-2-4-3 に示す。

表 3-2-4-3 燃料電池の開発状況

名称	5kW級業務用 SOFC (仮)FC-5	15式250kW導入機 (ハイブリッドシステム)	15式 1MW導入機 (ハイブリッドシステム)	FP-100i	ES-5700 Energy Server	(参考) ガスエンジン
メーカー	三浦工業	三菱重工	三菱重工	富士電機	Bloom Energy	A社
外観						
定格出力 (kW)	5	250	1350	105	200	400
発電効率 (%-LHV)	48	55	55	42	50-60	39.6
総合効率 (%-LHV)	90	73(温水) 65(蒸気)	76(温水) 68(蒸気)	62	—	73.8
ユニット寸法/設置面積 (m/m ² (m ² /kW))	0.7×1.1×1.8/0.8 (0.15)	12.0×3.2×3.2/40 (0.15)	24.0×5.0×3.2/120 (0.09)	2.2×5.6×3.4/12 (0.11)	9.1×2.6×2.1/24 (0.12)	8.2×3.5×3.6/29 (0.08)
運用方法	ペーロード コジェネ対応可	ペーロード コジェネ対応可	ペーロード コジェネ対応可	ペーロード コジェネ対応可	ペーロード コジェネ対応不可	DSS運用 コジェネ対応可
備考	SOFC 実証中	SOFC 実証中	SOFC 計画中	PAFC	SOFC 拡張性が高い	—
市場投入予定時期	2020	2017	2018	商用化済	商用化済	—

[出典] 経済産業省「水素・燃料電池戦略協議会 WG」

2. 1. 2 Bloom Energy

米国 Bloom Energy は、業務用・産業用規模の SOFC を世界的に販売している。同社は DOE の SOFC 開発に参画せず開発、商業化に成功している。

NASA プロジェクトで採用された SOFC 技術を用いて、2001年に会社を設立し、2006年初頭にテネシー大学チャタヌーガに 5kW 実証実験機器を出荷した。テネシー州、カリフォルニア州、アラスカ州で成功したフィールド試験を踏まえて、2008年7月に最初の商品(100kW) を出荷した。

(1) セル、モジュールの構造

セルは10cm×10cmの平板で25W/枚(図3-2-4-2)。積層化して1kWとし、これを組み合わせて標準モジュール40kWを構成する(図3-2-4-3)。モジュール(幅1m奥行き1m高さ1m)を複数並べてシステムとしては200kWもしくは250kWとしている。Bloom Energyはモジュール群と電力変換装置等からなるSOFCシステムを「Bloom エナジーサーバ」と称している。仕様については表3-2-4-4の通り。



図 3-2-4-2 SOFC セル

[出典] <http://www.bloomenergy.co.jp/product/solid-oxide/>

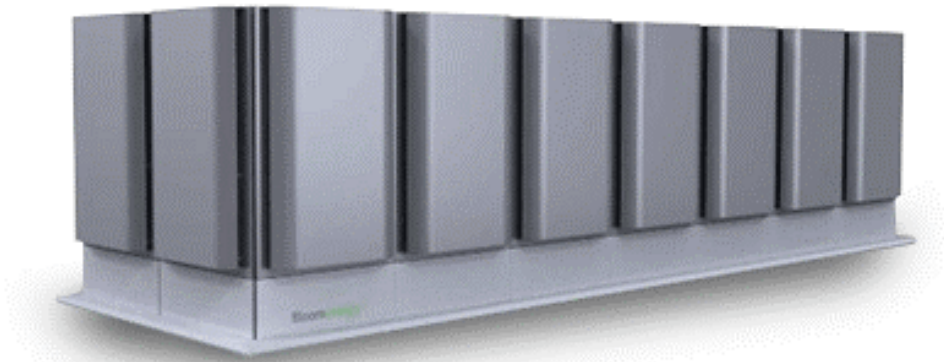


図 3-2-4-3 SOFC システム (1つの区切りが40kWモジュール)

[出典] <http://www.bloomenergy.co.jp/product/architecture/>

表 3-2-4-4 SOFC システム (Bloom エナジーサーバ) 仕様

主な仕様	(ES5-LABAJA)	(ES5-FABAJA)	(ES5-JA2AJA)	(ES5-EA2AJA)
出力				
定格出力	200kW		250kW	
電気接続	480V,3相			
定格出力	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
入力				
燃料	都市ガス(年間消費量:28万Nm ³)		都市ガス(年間消費量:35万Nm ³)	
供給燃料圧力	0.069~0.095MPa			
水	通常運転時は不要			
効率				
発電効率(LHV net AC)	平均53%(初期値:60%以上)			
排出ガス				
NO _x	0.005kg/MWh 未満			
SO _x	ごく微量			
本体情報および使用環境				
重量	14,655kg		16,277kg	
燃料電池本体基礎サイズ(配置による)	4.8m × 2.6m × 2.1m/ 8.9m × 1.3m × 2.1m		5.9m × 2.6m × 2.1m/ 10.1m × 1.3m × 2.1m	
UPM*基礎サイズ	1.1m×2.3m×2.1m			
設置面積(配置による)	約58m ²		約62m ² / 66m ²	
標準温度範囲	-20℃~45℃			
耐震基準	981Gal(1G)			
設置環境	屋外			
騒音レベル(定格出力時)	70dBA 未満(1.83mにおいて)			
技術基準				
技術基準	ANSI/CSA America FC1-2014			
その他				
出力・効率等の確認が可能なウェブサイト(アクセス保護付き)を提供 Bloom Energy Corporationのリモートモニタリングコントロールセンターからの常時遠隔監視・制御				

[出典]

<http://www.bloomenergy.co.jp/wp-content/themes/bloomenergy/files/ES5-Datasheet.pdf>

(2) 特徴

商品の性能や特徴及びビジネスモデルについて以下に列挙する。

- Bloom Energy 製の SOFC システムはモノジェネ用システム。熱は改質用に使う (コジェネ)。ユーザにとっては電気のみアウトプット。
- Bloom Energy のビジネスモデルは、燃料電池システムを販売するが、20 年間の性能保証を行っている。性能低下が起こると発電モジュールを丸ごと交換する。
- SOFC は一定出力で運転される。つまり、需要家にとっては契約電力量を低減する。
- 250kW システムは発電モジュール 6 個、燃料処理モジュール 1 個、インバータ 2 個 (1 個は一般負荷用、もう 1 個は重要負荷用) で構成される

- ・ 発電モジュールの出力は、通常 42kW×6 台。最大出力は 60kW。1 つ止めても 5 台で 250kW が可能であり、最大 300kW も可能。部分負荷も問題ない。
- ・ 作動圧力は常圧、作動温度は 800°C。
- ・ 発電効率は初期 60%-LHV (実績 63%)、その後定期的なメンテナンス (注：発電モジュールの交換含む) を施し、20 年平均で 53%-LHV。性能低下への対応は、40kW 単位のモジュールを交換。交換の際には他の発電モジュールを停止させずに行う。
- ・ 発電モジュールには熱除去として、それぞれブロワとチョッパ用ファンがあり、排気温度は 60°C。その他排出関係では、ドレンは出ず、水はリサイクルしている。騒音は 1.8m で 70dB。
- ・ 定期的なメンテナンスは、フィルタを半年に 1 回交換するのみ。
- ・ 非常用には専用のインバータを有しており、非常の場合のみ負荷追従運転を行う。導入実績は重要負荷を持っている需要家。
- ・ 日本での燃料の実績は 13A と LNG。LPG には対応していない。
- ・ 設置場所は屋外のみ。

2. 1. 3 三菱日立パワーシステムズ (MHPS)

三菱重工業は、1983 年より SOFC の開発を行っており、円筒横縞型セルと平板型セル (MOLB 型：Mono-block Layer Built) の 2 つの開発に取り組んでいた。その後、将来の大型化を念頭に円筒形セルへの選択と集中を行い、現在は三菱日立パワーシステムズへ承継されている。

(1) 円筒セルスタック

MHPS の円筒セルスタックは、セラミックスをベースとした基体管の外表面に、発電反応を行う素子 (燃料極/電解質/空気極の積層体) を複数形成し、インターコネクタで素子間を直列に接続した構造 (円筒横縞形セルスタック) である。図 3-2-4-4 にセルスタック及びその構造を示す。

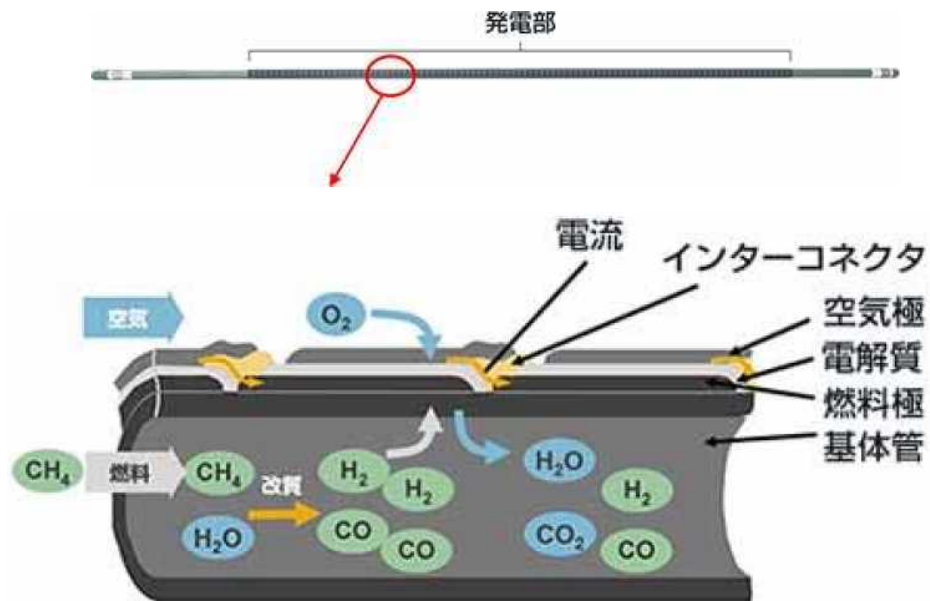


図 3-2-4-4 セルスタック及びその構造

[出典]

<https://www.mhps.com/jp/products/sofc/introduction/index.html>

(2) SOFC システムの構成

MHPS の SOFC システムについて、その構成概要を図 3-2-4-5 に示す。カートリッジはセルスタック数百本を束ね、支持部材、燃料・空気の供給/排出、電流の取り出しの機能を持たせたものであり、カートリッジを複数組み合わせたものをサブモジュールとし、SOFC モジュールはサブモジュールを圧力容器の中に入れたもの。現在商品化されている SOFC システムとしては、燃料電池の高温排燃料をマイクロガスタービンで燃焼させ電力を得るハイブリッドシステムとなっている。燃料の改質は内部改質型である。

上記の様な階層構造を取ることで、据付けやメンテナンスが容易になる。また、カートリッジあるいはモジュールの数により、電気出力を調整できるため、必要に応じた電気出力の設計が可能となる。

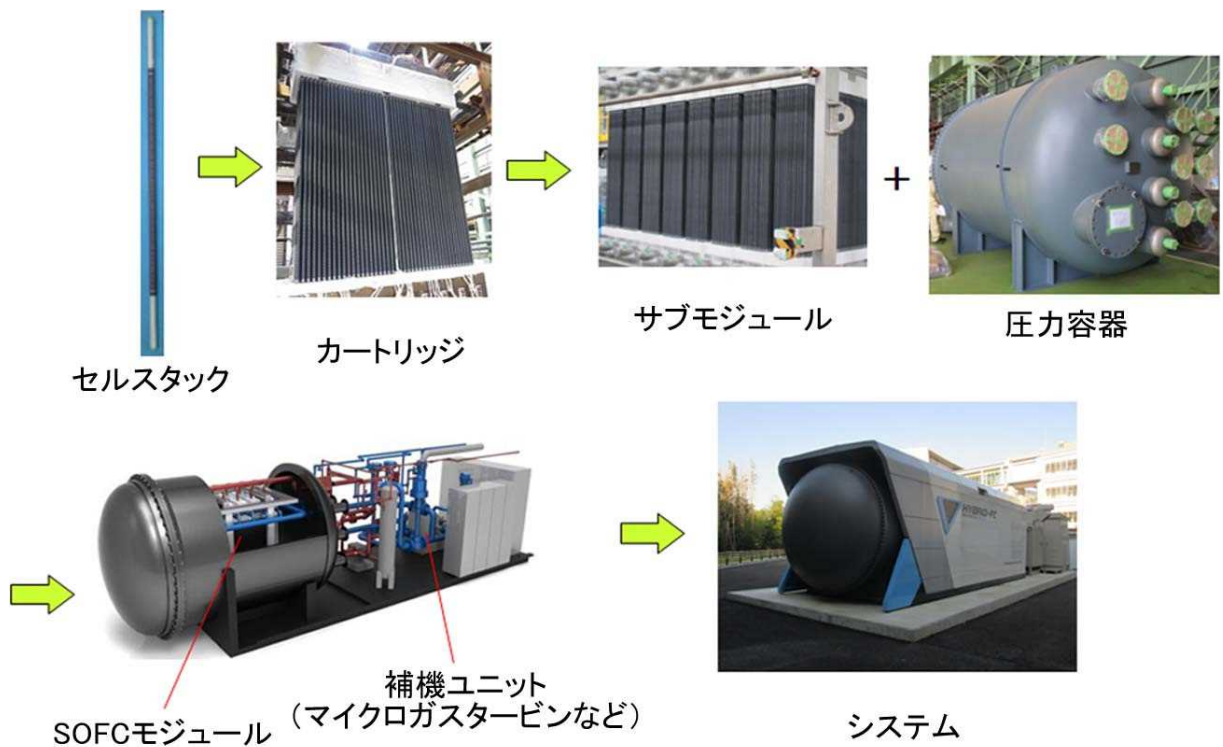


図 3-2-4-5 SOFC システム

[出典]

https://www.mhps.com/jp/randd/technical-review/pdf/index_47j.pdf

(3) モジュールのコンパクト化

モジュールのコンパクト化（高密度化）に向けて、セルスタックの改良、カートリッジの高密度化がなされてきた。

セルスタックについては、長尺化とセル幅の低減により素子数を増加させることにより高電圧化を図った。合わせて、セルスタックを細くすることにより、カートリッジに充填するセルを高密度化させることで、カートリッジのコンパクト化を図った。

セルスタックの改良の推移について図 3-2-4-6 に、カートリッジの高密度化について図 3-2-4-7 に示す。

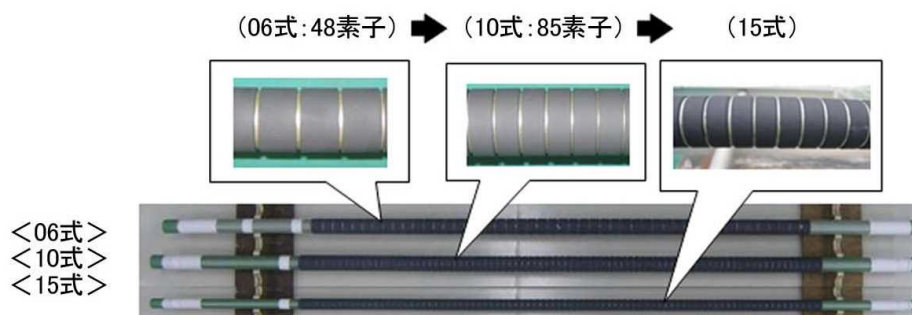


図 3-2-4-6 セルスタックの改良

[出典]

https://www.mhps.com/jp/randd/technical-review/pdf/index_47j.pdf

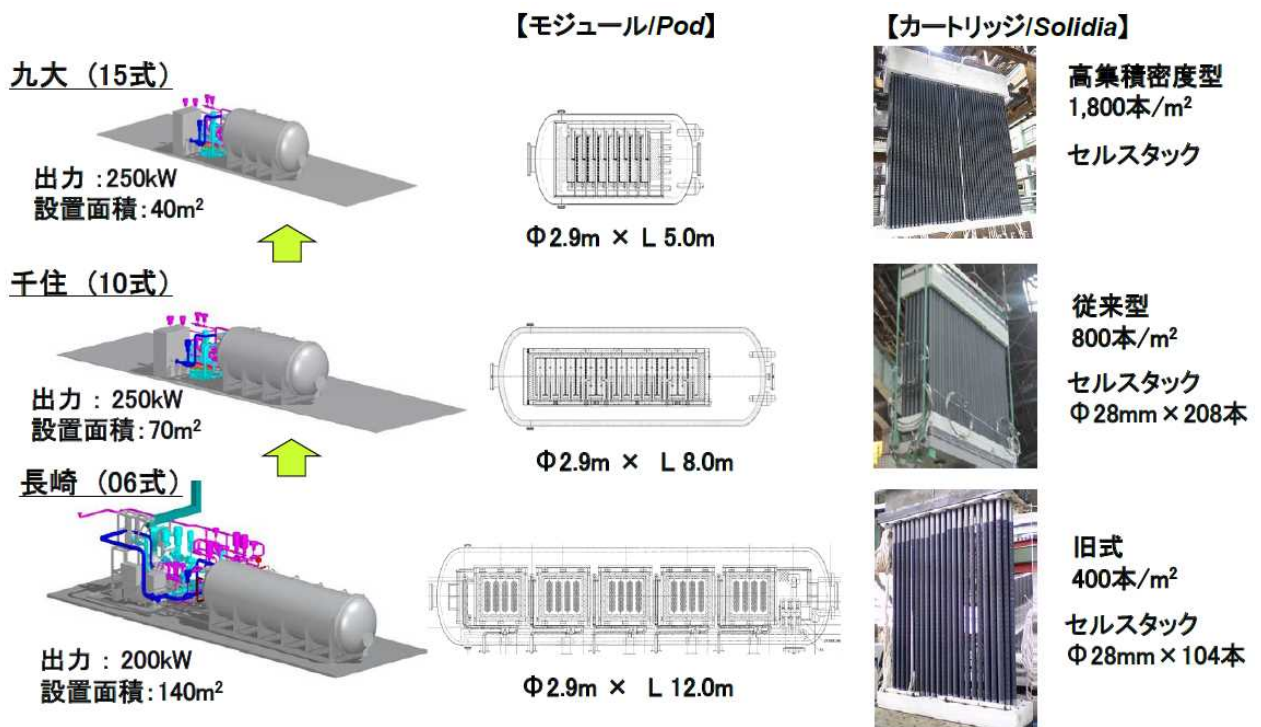


図 3-2-4-7 カートリッジのコンパクト化

[出典]

https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/003_01_00.pdf

(4) ハイブリッドシステム

SOFC の加圧高温排ガスを有効利用する、燃料電池とマイクロガスタービン (MGT) を複合した加圧型の高効率発電システムである。

ハイブリッドシステムの系統及び外観を図 3-2-4-8 と図 3-2-4-9 に示す。ここで、燃料系統 (図の赤色の線)、空気系統 (青色の線) 及び排ガス系統 (黄色の線) からなる。燃料ガスは脱硫器を通過して硫黄分が取り除かれ、圧縮機で昇圧されてから SOFC に投入される。一方、空気は MGT によって昇圧されてから SOFC に投入される。SOFC からの排燃料は再循環ブローによって昇圧された後、一部が SOFC に戻され、残りが排空気とともに MGT の燃焼器に投入される。燃焼器で燃焼した排ガスは、再生熱交換器で、SOFC へ送られる空気と熱交換されたのちに大気に放出される。熱利用する場合には、排熱回収装置を設け、温水や蒸気を製造したのちに大気に放出される。

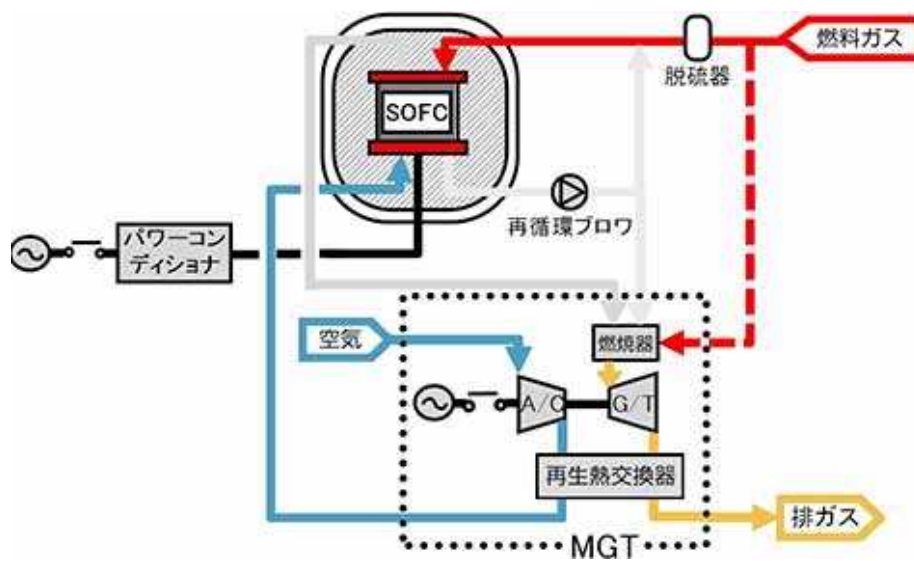


図 3-2-4-8 ハイブリッドシステム系統図

[出典] <https://www.mhps.com/jp/products/sofc/overview/index.html>



図 3-2-4-9 ハイブリッドシステム外観

[出典] <https://www.mhps.com/jp/news/20180131.html>

本ハイブリッドシステムは NEDO 事業「固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発」において、2011～2014 年度に東京ガス千住テクノステーションで、10 式セルを用いた 200kW 級ハイブリッドシステムが試験された。さらにその成果を基に 15 式ハイブリッドシステム実証機の設計が進められ、2015 年 3 月に九州大学伊都キャンパスに設置され、SOFC の性能・耐久性・信頼性の向上のための基盤研究に活用された。2016 年 10 月には累積運転時間 10,000 時間が達成された。なお、作動圧力は 0.2MPa 級である。

(5) ハイブリッドシステムの商用化

2017 年 8 月 9 日に MHPS は、SOFC ハイブリッドシステムの業務・産業用としての市場投入を開始する旨、発表を行った。その後 2018 年 1 月 31 日には、三菱地所が東

京・丸の内ですべて所有・運営する丸の内ビルディング向けに初めて受注した旨、発表がなされている。本格運転開始は2019年2月の予定である。

2. 1. 4 熔融炭酸塩形燃料電池 (MCFC) の技術動向調査

2. 1. 4. 1 MCFC の技術動向の概要

熔融炭酸塩型燃料電池 (Molten Carbonate Fuel Cell、以下 MCFC) は SOFC と同じ高温型燃料電池に分類されるタイプの燃料電池で、運転時の温度は SOFC よりもやや低い 600~700℃程度である。内部改質が可能であるため、燃料には天然ガス、バイオガスや石炭合成ガスを用いることができる。発電効率は 60% (HHV) を超え、さらに排熱利用をすることで総合効率 85%以上とすることができる。

燃料電池を設置する際にまず課題となるのはコストであるが、現状では MCFC システムのコストのうち約 60%をスタックが占めている。システムコストダウンを目指すために研究開発が為されたが残された課題は多く、スタック寿命、エネルギー密度、ガスクリーンアップのコストダウンの研究開発が重要である。

MCFC のコストについて、2015 年現在でシステム価格は 100 万円/kW 以下(工事費込)とされているが、将来展望としては Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells (IEA) の Technical Annex (2015 年 6 月) の中で、MCFC システムは楽観的に見ても初期コストが USD2,000/kW を大幅に下回することは考えにくいと指摘している。

MCFC のセルスタックは発電システムの構成要素として必要な数百 V の電圧を得るために、セパレータを介して単セルを直接積層して構成し、セルスタックを構成する各単セルへ均一にガスを供給する構造となっている。さまざまな形状の単セルが開発されている SOFC とは対照的に、MCFC は運転時に電解質が液体であることから加工形状に制限があり、現在のところ市販されているのは平板形だけである。なお、(一財)電力中央研究所において、円筒型 MCFC (特許第 5825524 号) が試作されているが、まだ実験室レベルである。

セルスタック形式には、別に設置した燃料改質器で燃料を水素リッチなガスに変換して燃料極に供給するもの (外部改質方式) と、セル内で燃料を改質させるタイプのセルスタック (内部改質方式) がある。

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で始まった。1988 年に熔融炭酸塩型燃料電池技術組合 (MCFC 技術組合) と電力業界が中心となった開発体制が組まれたが、既に解散している。

日本国内の実績としては、2005 年の愛知万博でトヨタが MCFC とマイクロガスタービンとを組み合わせた実証試験をおこない、世界最高 (当時) の発電効率 55%を実現した。また丸紅が米国の FuelCell Energy 社 (以下 FCE 社) から販売権を獲得し、2003 年からキリン取手工場に 300kW 級 MCFC を設置するなど市場展開が期待されたが、2010 年頃には販売を終了した。

海外では、米国、欧州を中心に燃料電池メーカー、大学等が MCFC 研究開発でしのぎを削ったが、現在では大半の企業が撤退し、2013 年時点で FCE 社が MCFC の唯一の

商用ディベロッパーとなった。FCE 社は大規模定置型システムを製造するメーカーであり、最大で 4MW 級の MCFC 発電システムを販売している。

FCE 社は韓国の POSCO Energy 社と製造パートナーシップを結び韓国でも市場展開している。Posco Energy 社は FCE 社とライセンス契約を結び、韓国の浦項市に MCFC のスタック部材から商品まで一貫生産するセル生産工場を 2015 年 11 月に完成させた。また欧州においては、FCE 社は MCFC を開発していた MTU Onsite Energy 社（2011 年撤退）から資産を引き継ぎ、ドイツの Fraunhofer IKTS の資本参加を得て、合弁会社 FuelCell Energy Solutions 社を設立（有限会社、本社 Doresden）。欧州の販路拡大に貢献している。

2. 1. 4. 2 北米の MCFC 技術動向 - FCE 社（米国）

FCE 社は MCFC のシステム及びセルの開発・販売を手掛けており、同電池では世界首位の実績を誇る。また MCFC とガスタービンを組み合わせた発電システムや MCFC の内部改質を利用し、水素を供給するシステムなど、MCFC を利用したシステムの開発もおこなっている。

FCE 社の MCFC 製品ラインナップは以下の通りで、表 3-2-4-5 と図 3-2-4-10 にそれらの製品である SureSource TM 製品群の仕様と外観を示す。

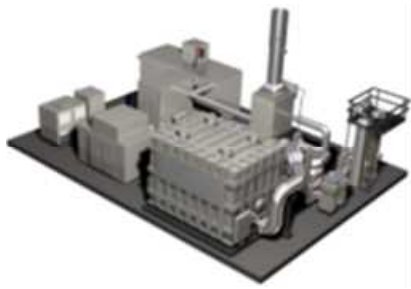
MCFC 製品ラインナップ

- ・ SureSource 1500 (1.4MW)
- ・ SureSource 3000 (2.8MW)
- ・ SureSource 4000 (3.7MW)

FCE 社は Connecticut 州の Beacon Falls Energy Project（総発電容量 63.3MW（世界最大級））を目指していたが、2016 年 10 月に New England 地方の RFP を得られないことが決定したことで、Pending となっている。

表 3-2-4-5 Sure Source™製品群の仕様 (FCE)

	SureSource 1500	SureSource 3000	SureSource 4000
Gross Power Output			
Power @ Plant Rating	1,400 kW	2,800 kW	3,700 kW
Standard Output AC voltage	480 V	13,800 V	13,800 V
Standard Frequency	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Optional Output AC Voltages	By Request	By Request	12,700 V 4,160 V
Optional Output Frequency	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Efficiency			
LHV	47 +/- 2 %	47 +/- 2 %	60%
Available Heat			
Exhaust Temperature	700 +/- 50 °F	700 +/- 50 °F	325°F
Exhaust Flow	18,300 lb/h	36,600 lb/h	38,000 lb/h
Allowable Backpressure	5 iwc	5 iwc	5 inches
Heat Energy Available for Recovery			
(to 250 °F)	2,216,000 Btu/h	4,433,000 Btu/h	734,000 Btu/h
(to 120 °F)	3,730,000 Btu/h	7,460,000 Btu/h	2,000,000 Btu/h
Additional Hot Water Capability			
Water up to 120 °F	—	—	2,500,000 Btu/h
Fuel Consumption			
Natural gas (at 930 Btu/ft ³)	181 scfm	362 scfm	383 scfm
Heat rate, LHV	7,260 Btu/kWh	7,260 Btu/kWh	5,785 Btu/kWh
Water Consumption			
Average	4.5 gpm	9 gpm	0 gpm
Peak during WTS backflush	15 gpm	30 gpm	< 1 gpm
Water Discharge			
Average	2.25 gpm	4.5 gpm	—
Peak during WTS backflush	15 gpm	30 gpm	—
Pollutant Emissions			
NO _x	0.01 lb/MWh	0.01 lb/MWh	0.01 lb/MWh
SO _x	0.0001 lb/MWh	0.0001 lb/MWh	0.0001 lb/MWh
PM ₁₀	0.00002 lb/MWh	0.00002 lb/MWh	0.00002 lb/MWh
Greenhouse Gas Emissions			
CO ₂	980 lb/MWh	980 lb/MWh	725 lb/MWh
CO ₂ (with waste heat recovery)	520-680 lb/MWh	520-680 lb/MWh	550-680 lb/MWh
Sound Level			
Standard	72 dB(A) at 10 feet	72 dB(A) at 10 feet	72 dB(A) at 10 feet



SureSource 1500



SureSource 3000



SureSource 4000

図 3-2-4-10 FCE 社の燃料電池外観

[出典]

SureSource 1500

(<https://www.fuelcellenergy.com/wp-content/uploads/2017/02/Product-Spec-Sure-Source-1500.pdf>)

SureSource 3000

(<https://www.fuelcellenergy.com/wp-content/uploads/2017/02/Product-Spec-Sure-Source-3000.pdf>)

SureSource 4000

(<https://www.fuelcellenergy.com/wp-content/uploads/2017/02/Product-Spec-Sure-Source-4000.pdf>)

2. 1. 4. 3 アジアの MCFC 技術動向 - POSCO Energy (韓国)

POSCO Energy 社は POSCO の子会社であり、1800MW の設備容量を擁する韓国最大の発電事業者である。POSCO Energy 社は専門家を多数抱え、40 年にわたりビル管理、発電所運転の経験を重ねており、蓄積されたノウハウにより、ビジネスリーダーの役割を担っている。POSCO Energy 社は 2000 年代初頭から国の補助を受けたプロジェクトにより MCFC の技術進歩を進めてきた。この国プロでは POSCO Energy 社は KEPCO と共同で外部改質型 MCFC を開発し、2010 年には 125kW システムのプロトタイプの開発に成功した。また、2007 年から POSCO Energy 社は FCE 社と製造、流通に関して合意した戦略的ライセンス契約を締結し、単なるアジア窓口ではなくメーカーとして燃料電池市場に参入した。韓国では 2012 年から RPS 法が施行され、500,000kW 以上の発電設備を保有する事業者は段階的に目標%だけ対象電源による供給を義務付けられる。韓国の RPS 法の特徴として、対象電源として太陽電池や風力だけでなく、再エネではない燃料電池も対象となっていることが挙げられる。しかも燃料電池には海上風力、潮力と同じ最高の 2.0 という係数が設定され(1kW 燃料電池が 2kW とカウントされる)、非常に優遇されている。POSCO Energy 社は 2015 年 12 月にサービスセンター、テストラボ、および生産プラント(年間製造能力 50MW)の燃料電池製造工場を浦項(韓国)

に建設した。燃料電池は 100kW、300kW、2.5MW の燃料電池製品を供給しており、その主な仕様を表 3-2-4-6 に示す。

表 3-2-4-6 POSCO Energy の主な燃料電池製品仕様

	300kW Fuel Cell Power Generation System	2.5MW Fuel Cell Power Generation System
Fuels used	LNG, Bio Gas, and SNG	
Power output		
Power output	300 kW	2,500 kW
Voltage	480 VAC	13.8 kVAC
Standard frequency	60 Hz	60 Hz
Power generation efficiency		
LHV	47% ± 2%	47% ± 2%
Pollutant emissions		
NOx	0.4 ppm or less	0.4 ppm or less
SOx	0.01 ppm or less	0.01 ppm or less
CO	10 ppm or less	10 ppm or less
Noise	72 dB(A) (3m)	72 dB(A) (3m)
Exhaust gases		
Conditions	Utilizing hot water and steam	Utilizing hot water and steam
Exhaust temperature	371° C ± 28° C	358° C ± 25° C
Exhaust flow	2,090 kg/hr	16,866 kg/hr
Exhaust pressure	127 mmH2O	127 mmH2O
Water consumption		
Water supply	170 liter/hr	2,010 liter/hr
LNG consumption		
LNG	61.9 Nm3/hr	507 Nm3/hr
LHV	9,347 kcal/Nm3	9,347 kcal/Nm3

[出典] Prepared Future

(http://eng.poscoenergy.com/eng/renew/_ui/down/Fuel_Cell_eng.pdf)

これまで POSCO Energy 社は京畿道、慶尚道、忠清道などに 8.8MW の MCFC 発電所を供給、また 2011 年には順天、唐津、一山、仁川に 14MW を供給した。生産と設置を加速させ、2012 年には大邱に 11.2MW を供給、2013 年には世界最大の燃料電池発電所 59MW

を華城に供給した。現在、韓国国内に 20 サイト以上、合計 171.8MW の MCFC 発電所がある。

2. 1. 5 石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) の技術動向調査

石炭ガス化燃料電池複合発電の確立に当たっては、石炭ガスを燃料電池に供給する観点より、以下の構成要素について検討を行う必要があることから、開発動向を調査した。

- ・ 石炭ガス中の燃料電池被毒成分を除去するクリーンナップ技術
- ・ 石炭ガスを燃料電池用に適用する技術
- ・ 燃料電池とガスタービンに係る技術

それぞれについて、以下に記すとともに IGFC 実用化へ向けた課題について考察を行う。

2. 1. 5. 1 石炭ガス中の燃料電池被毒成分を除去するクリーンナップ技術

燃料電池向け石炭ガス精製技術の検討に当たっては、燃料電池に対する被毒成分の影響の大きさや石炭ガス化中の被毒成分濃度レベルを考慮して除去技術の必要性を判断することが重要となる。

NEDO 事業「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ナップ技術要素研究」(2015 年度～2017 年度)において得られた成果は以下の通り、燃料電池に対する各被毒成分の影響を確認するための石炭ガス化ガス中の主要な 6 成分の被毒候補成分に対する被毒試験の結果、硫化水素及びセレン化水素が被毒物資であることが特定されている。また被毒成分に対して、それぞれの成分に対する吸着材を特定のうえ吸着容量が把握された。

本項目における出典は次の通り。

NEDO「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ナップ技術要素研究」報告書

(1)セル被毒耐性評価

セレン化水素 (H₂Se) については、H₂Se 1ppm 添加後約 180 時間から、入口素子、出口素子の電圧が順に低下し、燃料の流れ方向に被毒が進行していることが確認された。なお、入口素子と出口素子の電圧低下に大きな差はなかった。被毒成分の濃度と電圧低下幅を評価すると、H₂Se 濃度が高い程、電圧低下が大きいことから、H₂Se の濃度が高い程、被毒の影響は早く、電圧低下も大きいことが確認された。

一方、H₂Se 添加停止による回復挙動を比較すると、1ppm 条件では +3.3%、0.5ppm 条件では +2.7% であり、H₂Se の濃度が高い程、吸着量が多い分、脱離する量も多く、電圧回復の幅も大きくなったと考えられる。

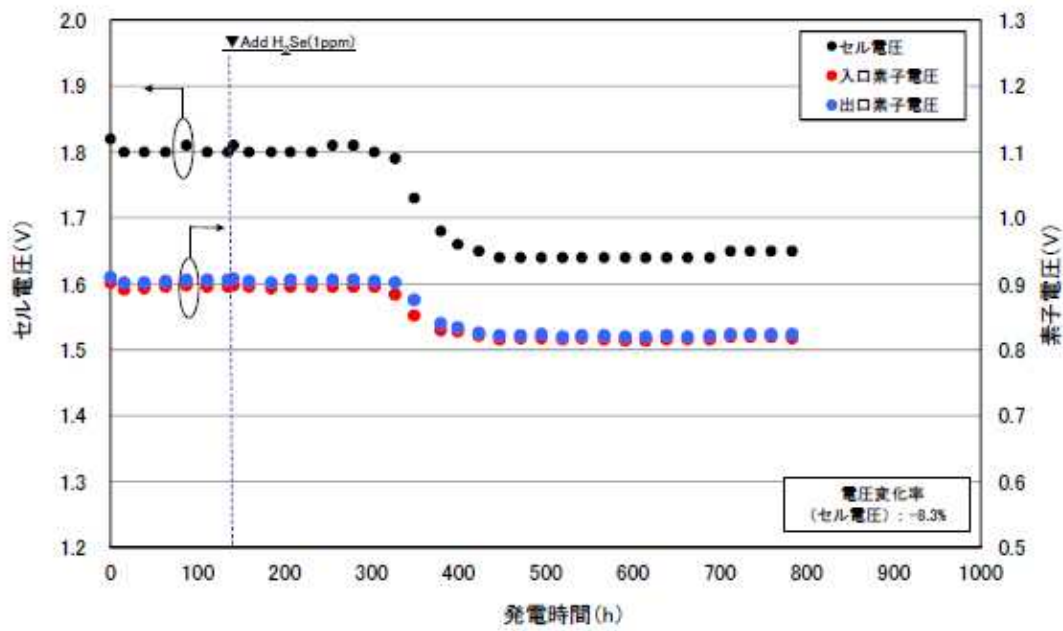


図3-2-4-11 H₂Se 1ppm 添加時の経時的な電圧変化

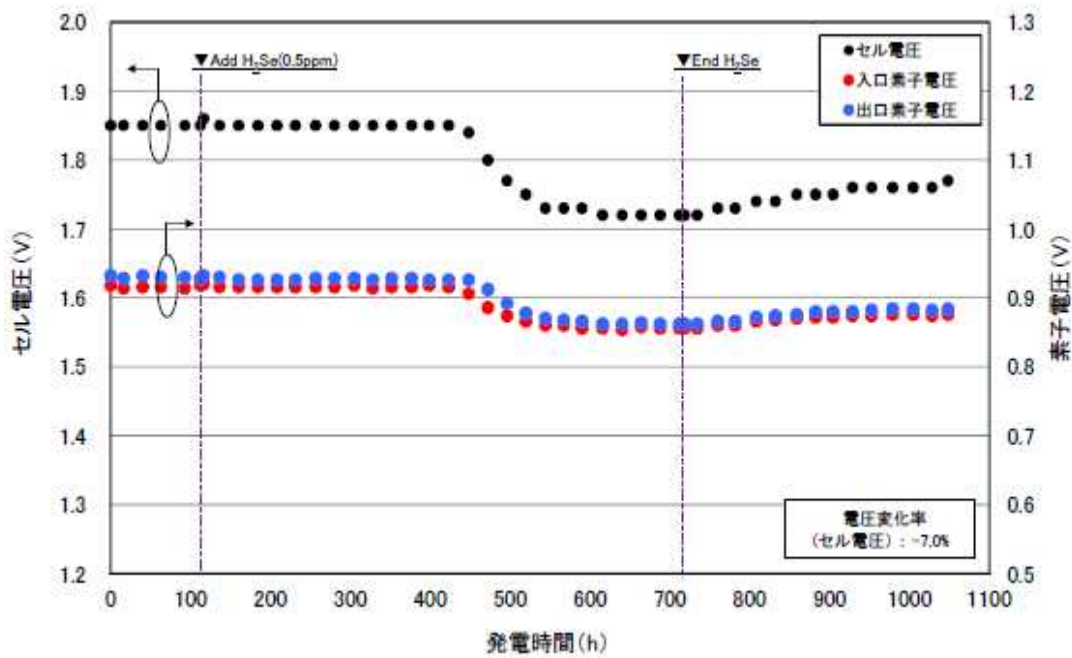


図3-2-4-12 H₂Se 0.5ppm 添加時の経時的な電圧変化

硫化水素 (H₂S) については、被毒による明確な電圧降下が確認された。H₂S 1ppm 添加後約90時間から入口素子、出口素子電圧が順次低下し、燃料の流れ方向に沿って被毒が進行していることが確認された。既往の研究から、Niへの吸着により、電圧が低下した可能性が考えられた。その後、入口および出口素子ともに電圧が安定したことから、Sの被毒が平衡状態に達したことが考えられる。電圧変化率は-3.3%となった。

ここで、温度を上げることで吸着したSが脱離するとの報告から、発電温度を900°Cから930°Cに変更し、電圧の変化を確認した。その結果、温度上昇によりセルの抵抗が減少したため電圧が上昇したものの、その後の変化はなく、Sの脱離による電圧の回復傾向は明確に確認できなかった。しかし、その後900°Cに戻したところ、温度操作により電圧が低下した後も電圧が徐々に低下し、温度上昇前の電圧レベルに戻ることを確認した。温度を下げた後、電圧が徐々に低下する挙動は被毒成分添加時の電圧低下と同様の挙動であり、温度を低下させた分、Niへの吸着が進んでいる可能性が考えられる。

また、H₂S 0.5ppm添加の場合では、約150時間後から電圧が低下し始めることが観察された。その後、セル電圧および各素子電圧は安定した。H₂S添加を停止する直前の電圧変化率は-2.7%となり、1ppm条件と比較すると、電圧の低下が小さいことが確認された。

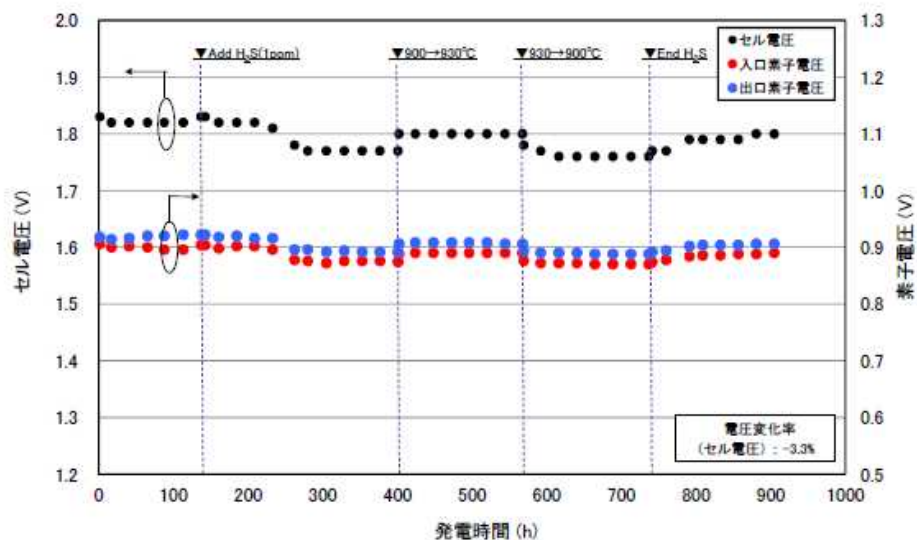


図3-2-4-13 H₂S 1ppm 添加時の経時的な電圧変化

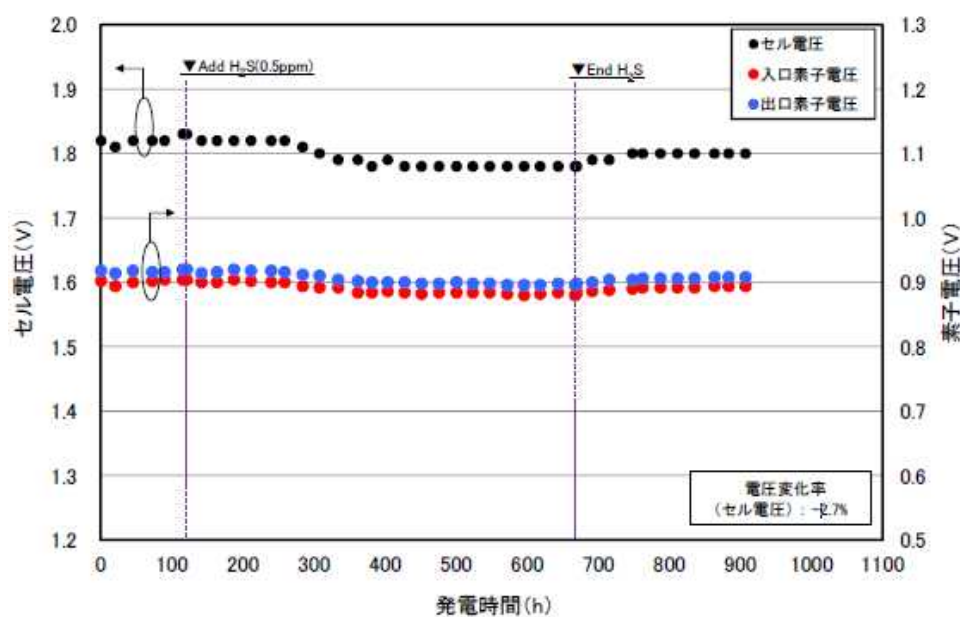


図3-2-4-14 H₂S 0.5ppm 添加時の経時的な電圧変化

(2) 燃料電池用ガス精製技術性能評価

吸着容量試験については、最も吸着容量の高い吸着剤の吸着容量を基準とした場合（吸着容量比）の各吸着剤の吸着容量の相対比を図3-2-4-15 に示す。

水素化物については、AsH₃、PH₃、H₂Seに対しては吸着剤Bが最も吸着容量が大きく、B₂H₆に対しては吸着剤Aが最も吸着容量が大きい結果となった。吸着剤Bの特徴としてPH₃ やH₂Seに対して大きな吸着容量を有するものの、AsH₃に対しては1/3程度に低下することが確認された。一方、吸着剤Aと吸着剤CについてはH₂Seに対する吸着容量は大きいものの、AsH₃やPH₃に対しては吸着容量が小さく、特にPH₃に対する吸着剤Cの吸着容量は著しく小さいことが確認された。

H₂Sについては、吸着剤Dと吸着剤Eと比較すると吸着剤Bがやや吸着容量は小さかった。これは、吸着剤Dと吸着剤Eについては吸着剤の運用温度が350℃と高く、H₂Sと吸着剤の反応が進みやすいと考えられている。

HClについては、吸着剤Fおよび吸着剤Gともに大きな吸着容量を示したが、吸着剤Gの方が吸着容量は大きかった。これは、吸着剤Gについては吸着剤の温度が450℃と高くHClと吸着剤との反応が進みやすいと考えられている。

被毒影響評価試験の結果も踏まえると、吸着容量としては、H₂Sに対しては吸着剤Dが最も優れ、H₂Seに対しては吸着剤Bが最も優れることが判明した。

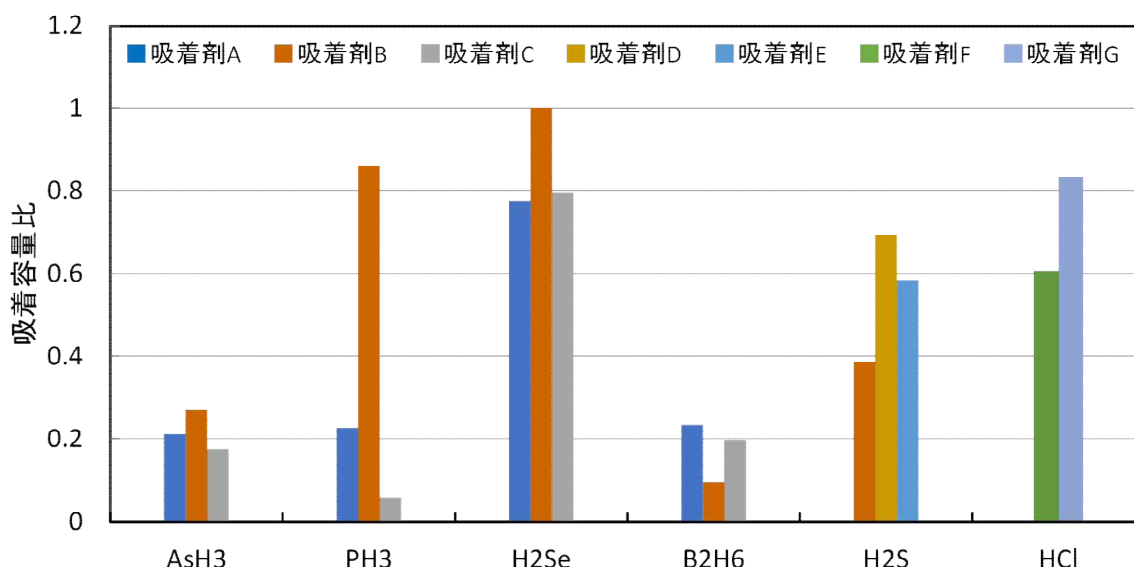


図3-2-4-15 各吸着剤の吸着容量

2. 1. 5. 2 燃料電池を石炭ガスに適用する技術

実用化、あるいは開発中の SOFC 燃料電池モジュールは燃料として都市ガス（天然ガス）を使用しており、都市ガスの主成分であるメタン（CH₄）の内部改質反応を考慮したモジュールの温度設計となっている。CO₂ 分離回収型 IGFC では燃料電池の燃料が水素リッチガスとなり、改質反応がおこらないため、天然ガスに比べて発電特性やモジュール内の温度分布が変化し、運転制約が生じる可能性が考えられる。

このため、NEDO 事業「次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電基盤技術開発／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」（2016 年度～）において、水素リッチガスを燃料として供給した場合のモジュール内部の温度挙動の確認のために、都市ガス用の 250kW 級ハイブリッドシステムを用いて水素リッチガスによる運転を行うと共に、水素リッチガス利用の対策について検討・試験が実施されている。

本項目における出典は次の通り。

NEDO「次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電基盤技術開発／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」報告書

(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

① 燃料電池モジュール内熱挙動解析

水素リッチガスを燃料とする場合、メタン改質反応による吸熱が無くなることによりモジュール内の熱バランスの変化およびセル温度、ガス温度が上昇することが予想される。そのため、水素リッチガスの混合率や二酸化炭素（CO₂）濃度、燃料流量、再循環流量、空気流量、供給ガス温度などの変化がモジュール内熱バランスおよび温度へ与える影響を検討するため、流体解析（CFD）を用いた電気-熱流動-化学反応連

成解析を実施された。

① 循環冷却器検討

都市ガス燃料向けに設計された SOFC モジュールに水素リッチガスを適用するに当たり、新規追加する再循環冷却器の仕様検討に加えてマイクロガスタービンや再循環ブロワ等の補機類への影響も考慮したシステム系統構成が検討された。また、再循環冷却器の運転・制御方法および温度制御性などの詳細仕様が検討された。

② 石炭ガス化設備に係る運転・制御の検討

石炭ガス化炉・CO₂ 分離回収設備の運転状態の変化や炭種／ロット切替等により変化する可能性がある。そこで、ガス性状の変化・変動を常時監視できるように、ガス分析機器（ガスクロマトグラフおよびガス密度計）の追設が検討された。また、燃料ガス組成変動に対して、ガス密度計による計測結果から燃料流量を補正するよう運転パラメータへの反映する方法が検討された。さらに、石炭ガス化設備と SOFC ハイブリッド機の連係運転にあたり、系統・機器追加等の見直しや運用・制御方法の見直しがなされた。加えて、水素リッチガス連係運転時における保護インターロック方法についても検討がなされた。

(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製の SOFC 220kW 級の燃料電池モジュール（システムとしてはマイクロガスタービンを含めて 250kW 級）を用いて水素リッチガスの適用性試験が実施されている。

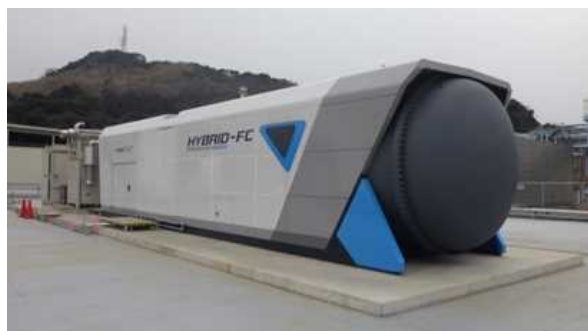


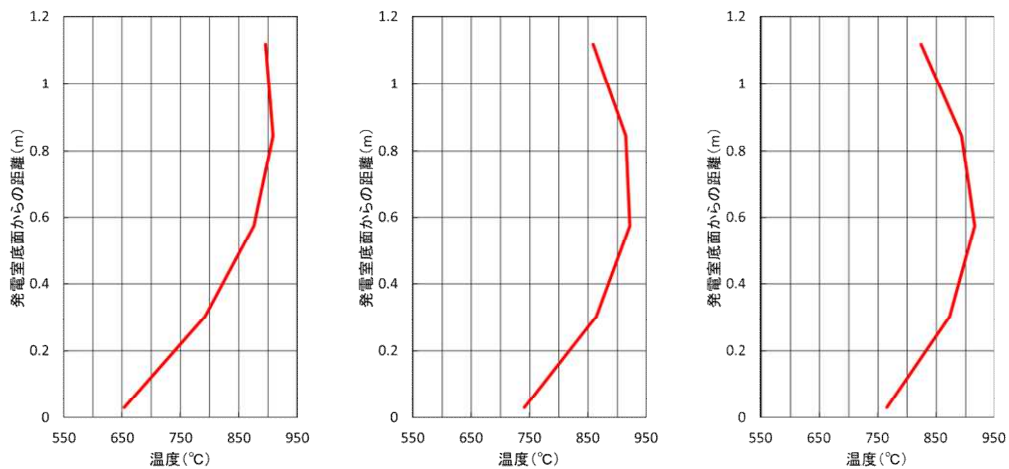
図 3-2-4-16 燃料電池モジュール試験設備

(3) 燃料電池カートリッジ試験

セルスタックを数百本束ねた燃料電池モジュールを用いた水素リッチガスの適用性試験に先行し、燃料電池モジュールの基本構成単位である燃料電池カートリッジを用いて水素リッチガスを適用した場合の発電特性や温度分布に関する基礎データが取得された。

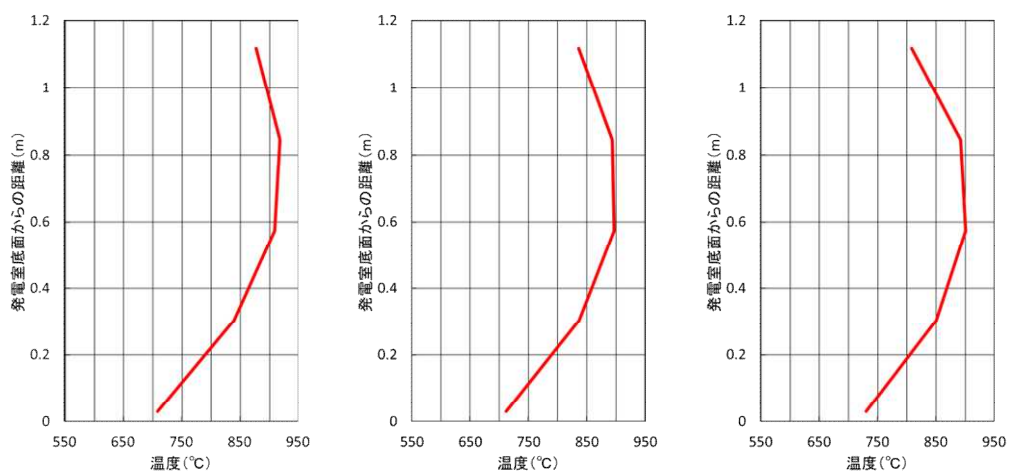
燃料入口温度やアノード再循環流量を変化させた場合の挙動および CO₂ 分離回収型

IGFC の実ガス組成を模擬して窒素 (N₂) の一部を炭酸ガス (CO₂) に置き換えた場合の影響を確認する試験が実施された。図 3-2-4-17 にアノード再循環流量を変化させた場合の温度分布について示す。アノード再循環流量の増加に伴い、セル上部温度が低下、セル下部温度が上昇し発電性能が改善する結果が得られた。また、燃料入口温度を下げることによりセル最高温度が低下し、電流を増加させることができることを確認した。図 3-2-4-18 に電流一定の条件にて N₂ の代わりに CO₂ を 3%、8% 供給した場合の温度分布を示す。CO₂ の増加に伴いセル上部温度が低下し、都市ガス運転時の温度分布に近づく傾向が確認された。



(a) 再循環流量 65Nm³/h (b) 再循環流量 90Nm³/h (c) 再循環流量 100Nm³/h

図 3-2-4-17 アノード再循環流量とセル温度分布の関係



(a) CO₂ 0% (b) CO₂ 3.0% (c) CO₂ 8.0%

図 3-2-4-18 CO₂ ガス混合比率とセル温度分布の関係 (電流一定)

(4) 燃料電池モジュール基本特性確認試験

燃料電池モジュールの基本特性を確認するために、設計燃料である都市ガスと同等の液化天然ガス (LNG) を用いて基本特性確認試験が実施され、運転実績を図 3-2-4-19

に示す。本試験では、水素リッチガス試験に先立って、ベースとなる LNG を燃料として運転した場合の起動・停止時のプラント挙動を確認するとともに、定格負荷および部分負荷での発電特性、温度分布等が確認された。

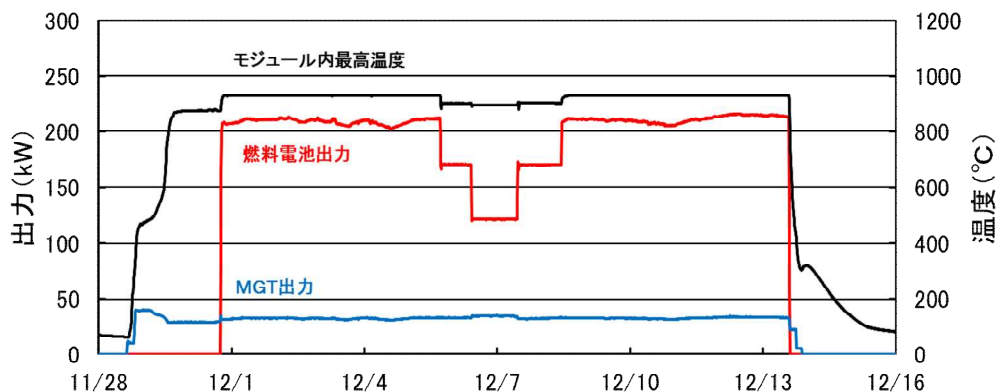


図 3-2-4-19 基本特性確認試験時の運転実績

(5) 水素リッチガス切替試験

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での運転に切替える試験が実施された。図 3-2-4-20 に水素リッチガスの混合割合と LNG 運転時の出力を 100%とした場合の出力の関係を示す。試験の結果、水素リッチガスの混合割合を増加させることにより、メタン改質による吸熱が減少するため、モジュール内の温度が上昇し、温度管理値を超える傾向になることが確認された。そのため、モジュール内最高温度が一定となるよう出力（電流）を制御した場合、水素リッチガス運転での出力は LNG 運転時の約 73%になることを確認した。

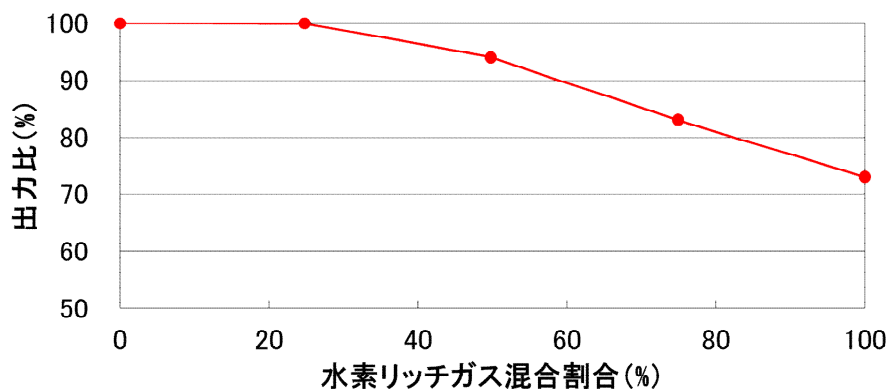


図 3-2-4-20 水素リッチガス混合割合と出力の関係 (@モジュール内最高温度約 910°C)

(6) 水素リッチガス最大負荷試験

水素リッチガス運転に切替後、燃料電池の出力を増加させることを目的に、アノード再循環量流量や再循環冷却器を活かして燃料入口温度を調整し、モジュール内の最高温度が一定とした場合の出力が確認された。試験の結果、アノード再循環流量の増

加や燃料入口温度の低下によりモジュール内の最高温度が低下するため、その分、出力を増加させることができ、LNG 運転時(@モジュール内最高温度 約 930℃) の約 79% まで出力を上昇させることができることが確認された。

(7) 水素リッチガス起動・停止試験

水素リッチガスを用いた場合の起動・停止試験が実施された。LNG 運転時の制御パラメータを水素リッチ運転用に調整し、水素リッチガスのみで起動・停止が問題なく可能であることが確認された。

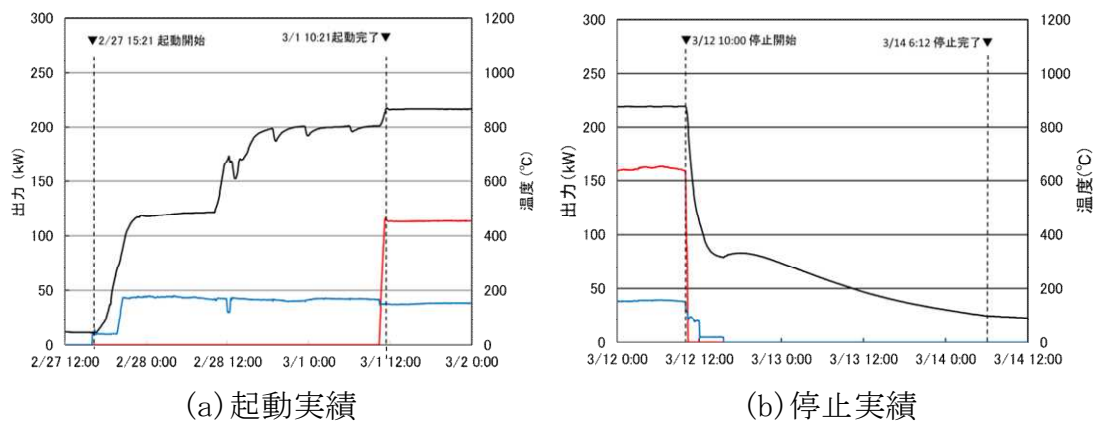


図 3-2-4-21 水素リッチガス起動・停止実績

以上の結果より、都市ガス（天然ガス）用に設計された SOFC 燃料電池モジュールについて、CO₂ 分離回収型 IGFC としての燃料が水素リッチガスとなる場合においても、周辺機器設計や燃料電池の運転条件の適正化により運転が可能であることが分かった。

2. 2 商用機のシステム検討

商用機システムとして、CO₂ 分離・回収型 IGFC について、燃料電池の位置やガスタービン燃焼器温度等についてケーススタディを行い、商用機として最適な CO₂ 分離・回収型の IGFC システムを明らかにする。

2. 2. 1 解析モデル

CO₂ 分離・回収型 IGFC のモデルを構築するため、プラント性能、ヒートバランス図や熱物質収支が既知である商用機 IGCC 及び CO₂ 分離・回収型 IGCC に燃料電池を組み込む検討を実施した。具体的なデータは、NEDO 事業「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト/クリーン・コール・テクノロジー実用化可能性調査/石炭ガス化複合発電における CO₂ 分離回収システム最適化に関する検討」（2014～2015 年度）より引用。

CO₂ 分離回収各ケースのシステム構成並びに各部状態量、熱物質収支及び所内動力

等を確認の上、先ず IGCC 及び CO₂ 分離・回収型 IGCC の熱効率解析モデルを作成した。その後、燃料電池を組み込み、燃料電池の排燃料と排空気の熱を回収するため、蒸気系に燃料電池排燃料熱交換器と排空気熱交換器を組合せ、蒸気系の統合・適正化を行った。CO₂ 分離・回収型 IGFC の熱効率解析検討のモデル例を以下に示す。

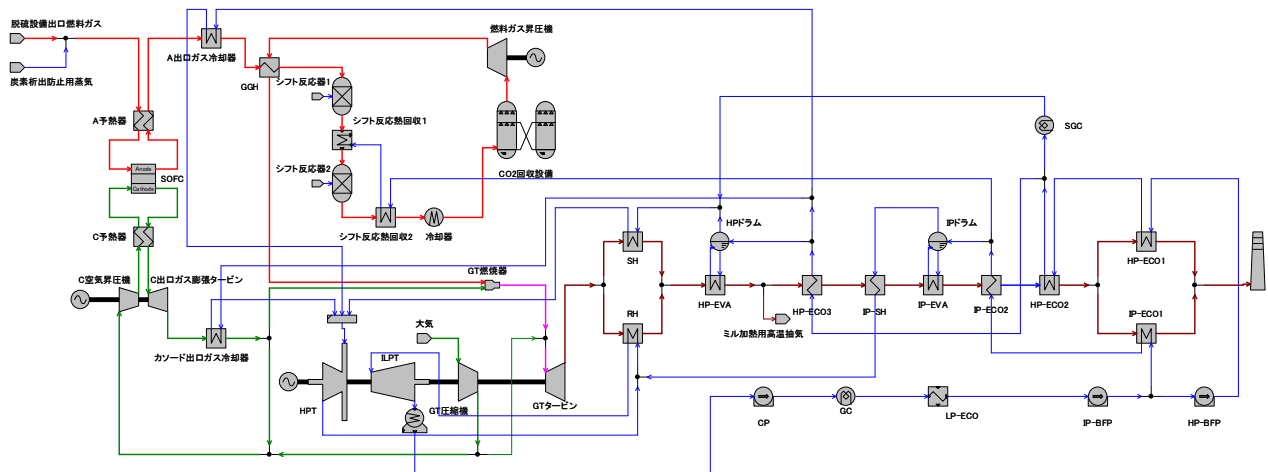


図 3-2-4-22 CO₂ 分離・回収型 IGFC の熱効率解析検討モデル例

2. 2. 2 試算条件

試算条件については以下の通りとした。

- ・ 石炭入熱量を固定。
- ・ CO₂ 分離・回収装置は、加圧プロセスに適する物理吸収法を選択。
- ・ 燃料電池はガス組成に応じた出力電圧@900℃とした。
- ・ 燃焼器空気系はリサイクルを実施。
- ・ ガスタービンは断熱効率一定として条件毎にサイズを変えた。
- ・ 蒸気は燃料電池の高温排空気からも回収。ガス系の各部収熱量をもとに、給水流量を最適化して蒸気タービン出力を求めた。
- ・ 燃料電池の入口温度は 800℃、出口温度は 900℃（出入口ガス温度差 100℃）
- ・ アノードおよびカソードリサイクルラインの圧力損失：0.2MPa（アノードおよびカソード予熱器の低温側と高温側で 0.1MPa の圧力損失を設定し、燃料電池および配管の圧力損失は 0.0MPa として計算）
- ・ 燃料電池設備における圧力損失分を補うため、最も燃料ガス温度が低くなる CO₂ 吸収塔出口にて燃料ガスの昇圧を行うものとした。このことにより吸収塔入口ガス冷却器の冷却熱量が若干増加するものの影響はごく僅かであるため、ここでは冷却水系の動力増加は無視するものとした。
- ・ 各機器断熱効率

燃料電池電流密度：150mA/cm²

CO2 吸収塔出口燃料ガス昇圧機：75%
 それ以外の昇圧機およびブロワ類：88%
 膨張タービン：92%

- ・ その他機器効率
 - 発電機効率／モータ効率：98.5%
 - 軸機械効率：99.0%
 - インバータ効率：95.0%

2. 2. 3 解析ケース

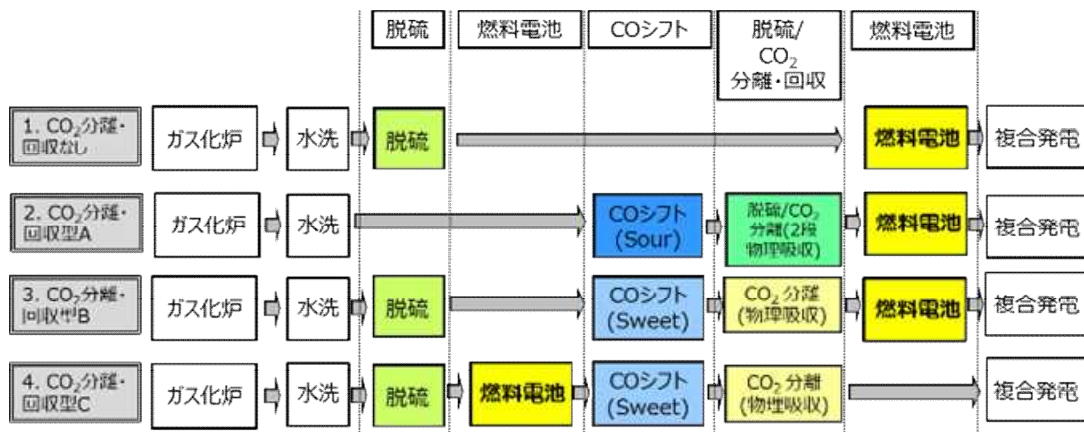


図 3-2-4-23 IGFC 及び CO2 分離・回収型 IGFC のシステムフロー

図 3-2-4-23 に検討するシステムフローの概念図を示す。それに相応するケーススタディのケース区分について表 3-2-4-7 に示す。

- ・ ケース1では、CO2分離・回収を行わないIGFCシステムを対象に、IGFCシステム構成を検討する。具体的には、燃料電池へ導入する燃料の割合ごと、燃料電池冷却のためのカソードリサイクルの有無、ガスタービン (GT) 運転温度について、熱効率解析を行ない、システム構成を検討する。図3-2-4-24にFCへのガス導入率ならびにカソードリサイクルの影響の概要を示す。
- ・ ケース2～4においては、CO2分離・回収型IGFCとして、最適なシステム構成を検討するため、燃料電池の位置、COシフト反応の種類について検討を行う。

表 3-2-4-7 ケーススタディのケース区分

No.	ケース	CO ₂ 分離・回収		燃料電池位置	GT温度	カソードリサイクル動力
1	CO ₂ 分離・回収なし	なし		脱硫後	1,500℃級	ベース
2-1	CO ₂ 分離・回収A	Sour シフト	物理吸収	CO ₂ 分離・回収後	1,300℃、1,500℃、1,700℃級	ベース
2-2	CO ₂ 分離・回収A	Sour シフト	物理吸収	CO ₂ 分離・回収後	No.2-1結果より選定	増加
3	CO ₂ 分離・回収B	Sweet シフト	物理吸収	CO ₂ 分離・回収後	No.2-1結果より選定	ベース
4	CO ₂ 分離・回収C	Sweet シフト	物理吸収	CO ₂ 分離・回収前	No.2-1結果より選定	ベース

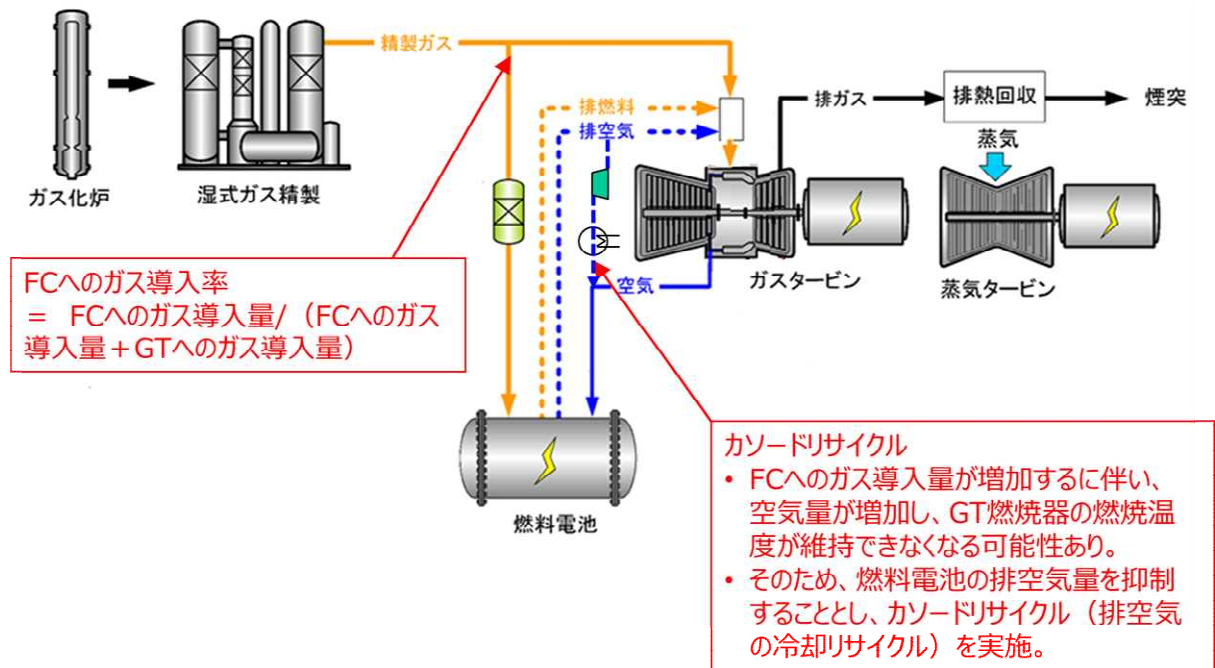


図 3-2-4-24 FC へのガス導入率およびカソードリサイクル概念図

2. 2. 4 解析結果

(1) プラント全体性能

CO₂ 分離・回収型 IGCC について、ガス系の解析結果から求めた各部集熱量等をもとに蒸気タービン出力の計算し、さらに補機動力を考慮して送電端出力(効率)を算出した結果を表 3-2-4-8 に示す。商用機として高効率期待でき、現実性が高いと考えられる 1,500℃級 GT による 90% CO₂ 回収 (Sour シフト&物理吸収) をベースとする。

表 3-2-4-8 プラント全体性能解析結果

検討ケース	単位	1,300℃級		1,500℃級		1,700℃級		
		IGCC単独	IGCC単独	90%回収	90%回収	IGCC単独	90%回収	90%回収
IGCC単独に対する発電端出力比	%	100	100	95.9	98	100	96.7	97.9
大気温度	℃	15						
炭種	-	B炭						
COシフト方式	-	-	-	スイート	サワー	-	スイート	サワー
CO2分離回収プロセス方式	-	-	-	物理吸収	物理吸収	-	物理吸収	物理吸収
吸収液供給温度	℃	-	-	0	0/0/0	-	0	0/0/0
CO2分離回収設備入口圧力	MPaG	-	-	3.65	3.65	-	5.71	5.71
COシフト入口S/CO	mol/mol	-	-	1.7260	1.6000	-	1.4000	1.2000
シフト触媒入口温度 (NO.1/NO.2/NO.3)	℃	-	-	300/300/200	225/215/210	-	290/290/200	235/225/220
COシフト変換率	%	-	-	98.0	98.4	-	95.7	94.5
CO2吸収塔のC回収率	%	-	-	91.6	90.1	-	91.0	90.1
CO2回収率	%	-	-	90.0	90.0	-	90.0	90.0
CO2回収純度	%	-	-	98.9	99.2	-	98.7	98.9
CO2吸収液L/G (+H2S吸収液L/G)	kg/kg	-	-	11.9	9.81+1.38	-	8.1	6.78+1.01
冷ガス効率	%	82.1	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8
ガス化炉微粉炭処理量	kg/h	48,633	98,360	107,098	107,169	133,296	147,939	147,408
IGCC単独に対する石炭処理量比	%	100	100	109	109	100	111	111
石炭発熱量 (HHV)	kJ/kg	25,566	25,566	25,566	25,566	25,566	25,566	25,566
発電端出力	kW	165,700	369,200	354,000	361,900	519,900	502,900	508,800
ガスタービン出力	kW	105,600	228,600	225,900	226,700	318,000	316,500	316,900
蒸気タービン出力	kW	60,100	140,600	128,100	135,200	201,900	186,400	191,900
補機動力合計 (CO2圧縮設備除く)	kW	25,720	50,590	63,530	64,080	70,940	88,910	89,940
補機動力合計 (CO2圧縮設備含む)	kW	25,720	50,590	103,730	104,180	70,940	144,210	145,140
送電端出力 (CO2圧縮液化設備除く)	kW	139,980	318,610	290,470	297,820	448,960	413,990	418,860
送電端出力 (CO2圧縮液化設備含む)	kW	139,980	318,610	250,270	257,720	448,960	358,690	363,660
発電端効率 (HHV)	%	47.98	52.90	46.54	47.55	54.92	47.87	48.60
所内率 (CO2圧縮液化設備除く)	%	15.5	13.7	17.9	17.7	13.6	17.7	17.7
所内率 (CO2圧縮液化設備含む)	%	15.5	13.7	29.3	28.8	13.6	28.7	28.5
送電端効率 (HHV) (圧縮液化設備除く)	%	40.53	45.61	38.19	39.19	47.43	39.40	40.01
送電端効率 (HHV) (圧縮液化設備含む)	%	40.53	45.6	32.9	33.9	47.4	34.1	34.7
CO2排出量 (煙突入口)	t/h	113.0	233.6	25.9	27.7	313.2	37.6	38.7

(2) 燃料電池規模 (ガス導入率)

CO2 分離・回収を行わない IGFC における燃料電池へのガス導入率と燃焼器出口温度ならびに発電端および送電端効率との相関を図 3-4-2-25 に示す。燃料電池規模を大きくするほど(ガス導入率を上げるほど)、燃料電池の冷却用空気が必要となるため、GT 燃焼器温度が低下するので、カソードリサイクルを行うこととした。1,500℃級 GT の燃焼器温度を維持できる燃料電池へ燃料ガス導入率は 76%であるが、効率の観点からは更に燃料ガス導入率を上げることが望ましい。IGFC 実用化に当たっては、GT (規模、圧縮比、温度等) の最適化が必要であり、これに応じて全体システムが構築されることになる。

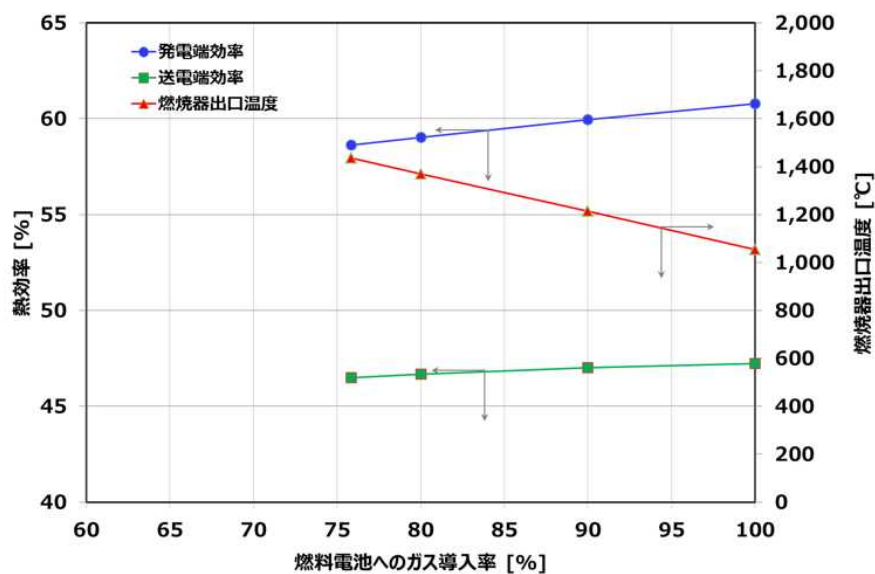


図 3-4-2-25 燃料電池へのガス導入率、熱効率、燃焼出口温度の相関 (1, 500°C級 GT)

(3) カソードリサイクルの圧損の影響

圧力損失の影響を含めたカソードリサイクルの影響についての解析結果を図 3-2-4-26 に示す。圧力損失が増大すると発電端効率が上昇し、送電端効率が低下する。これはブロワ等の動力が大幅に増加する一方、蒸気系へ回収される熱量が増加することによる。

燃料電池へのガス導入率の増加に伴う送電端熱効率の向上は圧量損失の設定を大きくすることで鈍化するものの、今回設定した 0.4MPa の圧力損失ではガス導入率が 100% のケースが最も高効率となった。

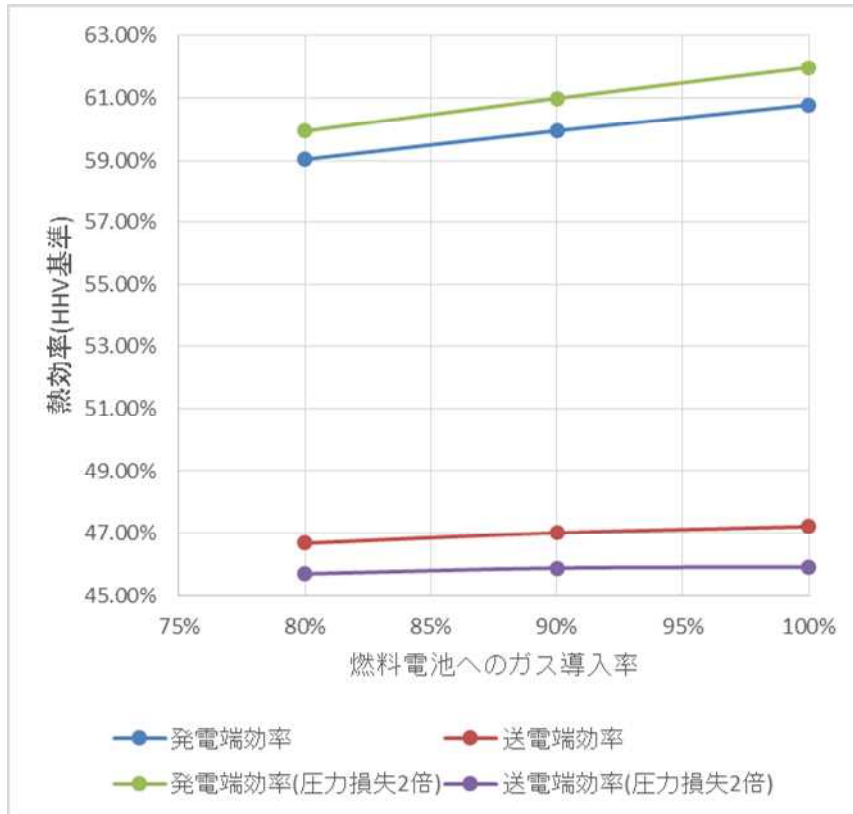


図 3-2-4-26 燃料電池周り圧力損失増加の影響

(4) システム構成

今回検討したシステムフローを図 3-2-4-27 に同解析結果を表 3-2-4-9 に示す。燃料電池は CO₂ 分離・回収後、CO シフトは Sour シフト (CO₂ 分離回収型 A) の送電端効率が最も高く、炭素析出のリスクがないことから、最も望ましいシステム構成である。

CO₂ 分離回収型 C の場合、シフト蒸気供給は不要となるが、炭素析出防止のための水蒸気供給により H₂/CO 分圧が低下するため燃料電池電圧が低下する。また、燃料電池で生成した水蒸気は CO₂ 分離・回収装置にて凝集分離されるため、GT への入熱量が低下する。ここでは、炭素析出防止用水蒸気は抽気としたが、燃料系リサイクルによる水蒸気を活用することで、効率改善の可能性が考えられる。

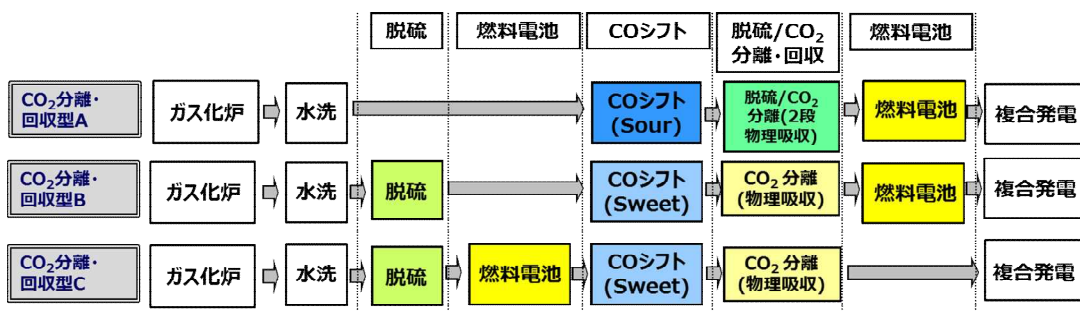


図 3-2-4-27 CO₂ 分離・回収型 IGFC システムフロー

表 3-2-4-9 CO₂ 分離・回収型 IGFC(1,500℃級 GT)、ガス導入率 100%時の
プラント解析結果

CO ₂ 分離・ 回収型	SOFC出力 [MW]	GT出力 [MW]	ST出力 [MW]	所内動力 [MW]	発電端効率 [%-HHV]	送電端効率 [%-HHV]
A	300	67	96	103	60.8	47.2
B	301	67	87	102	59.7	46.3
C	248	49	89	96	50.8	38.2

(5) コスト評価

CO₂分離・回収型IGCCとして、A/B/Cについてコスト評価結果を図3-2-4-28に示す。まず、CO₂分離回収型Cについては、機器構成がCO₂分離回収型Bとほぼ同等であるが、送電端効率において8%もの差があることから、CO₂分離回収型Bに大きな優位性があることは明らかである。次に、CO₂分離回収型AとBとの比較であるが、AとBとの差は燃料電池の差ではなく、CO₂分離回収までのプロセスの差である。ここで、「脱硫+CO Sweetシフト+CO₂物理回収」と「CO Sourシフト+CO₂物理回収」との比較は既往の研究にて新設プラントを想定する場合は「CO Sourシフト+CO₂物理回収」にコスト優位性があることが知られている。燃料電池を組み込んだ場合も、AとBでは燃料電池はほぼ同規模であることから、コスト比較においてCO₂分離回収型Aに優位性があることは明らかである。

以上から、CO₂分離回収型Aが最もコスト優位性があり、順位としてはA>B>C (Aが最もコスト優位性が高い) の関係となる。

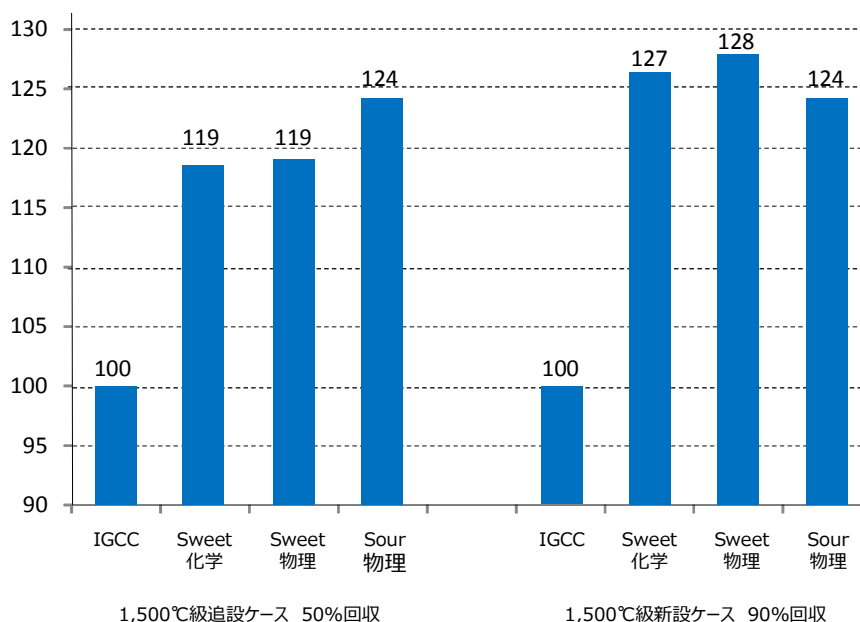


図3-2-4-28 発電コスト比較

[出典]NEDO「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト クリーン・コール・テクノロジー実用化可能性調査 石炭ガス化複合発電におけるCO₂分離回収システム

最適化に関する検討」報告書

2. 3 実証に向けたシステム評価

C02 回収型 IGFC の小型実証に向け、適応する燃料電池の選択を主眼にシステム評価を行った。対象となる燃料電池は技術動向調査の結果を踏まえ、「SOFC」と「MCFC」を対象とした。

2. 3. 1 燃料電池の IGFC 適用性について

IGFC の実証試験に求められる主な条件は、石炭ガス化ガスを用いる発電プラントとして大型のガスタービンと連携するために、次の3点が挙げられる。

- ① ガス化炉およびガスタービンを想定した高圧化に対応すること
- ② ある程度規模の大きな発電容量を持った燃料電池ユニットであり、拡張性があること
- ③ 石炭ガス化ガス（水素リッチガス）への適応性があること

実証へ向けたシステムの評価ならびに燃料電池の選定においては、SOFC ならびに MCFC に関する技術動向調査の結果から、上記を念頭に検討を行うものとする。

2. 3. 2 SOFC の IGFC 適応性検討

第1章における SOFC に関する技術動向調査の結果から、上記3条件を満たす可能性がある調達可能なメーカーとしては MHPS が挙げられ、特に GTFC として現在開発が進められている「0.6 MPa 600kW※級モジュール」が IGFC 用に最も適している可能性が高い。

MHPS 製の「0.6 Mpa、600kW 級モジュール」を想定した実証機の構成例を図 3-2-4-29 に示す。実証機は MHPS 製の 600kW 級モジュール複数台で構成する。

※ SOFC 設備容量は都市ガス運転時の発電端予想出力を示す。

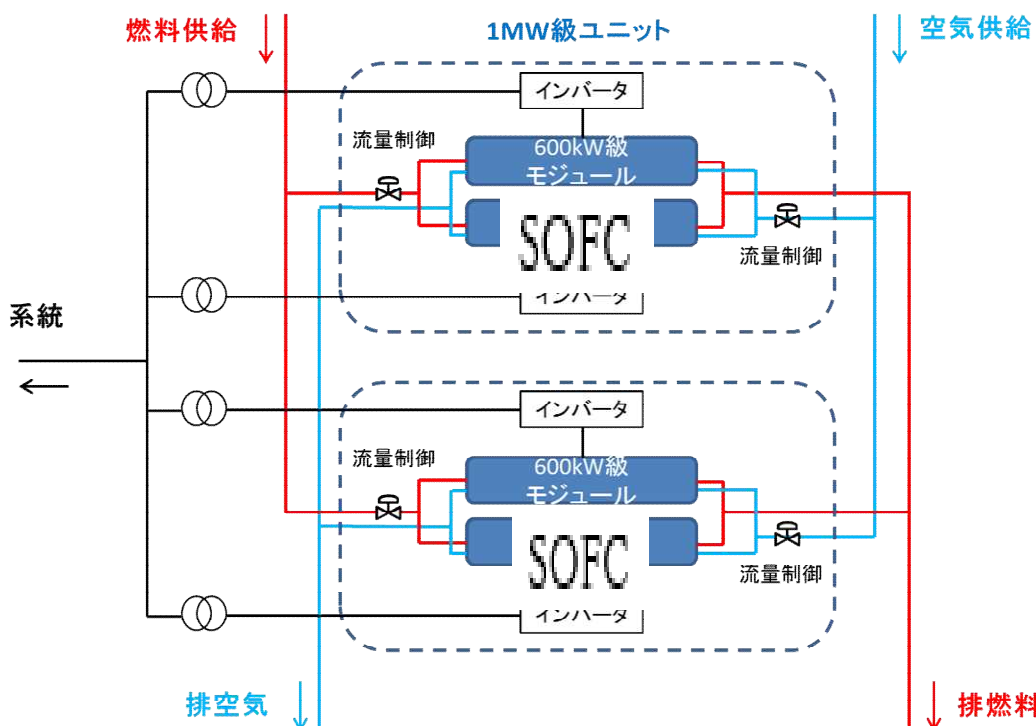


図 3-2-4-29 IGFC 実証機における SOFC 構成例

MHPS 製の「0.6 MPa、600kW 級モジュール」を想定した場合、IGFC 実証に適用する SOFC モジュールには以下の仕様を求めるものとする。

- (1) SOFC モジュールは、現在、NEDO プロジェクト「GTFC(1000kW 級)のシステム」で開発された SOFC モジュールとし、モジュール容器の運転圧力は最大 2.0 MPaG の仕様とする。
- (2) 水素リッチガスにて高圧 (Max. 2.0 MPaG) 下での試験を前提に設備仕様設計を行なう。
- (3) SOFC 設備は水素リッチガスの供給条件下において安定して運転・監視可能な制御システムを構築する。図 3-2-4-29 に示すように複数台の SOFC モジュールに対し補機一系統とし、各補機ならびに各流量の制御も複数台の SOFC モジュール分を一系統にて制御することで拡張性確認を可能とする。
- (4) 発電電力の制御は 1 つのインバータで 1 つの燃料電池モジュールを制御する。複数並列化した電力の集電は交流母線に複数のインバータが接続することになり、マスターコントロールで複数のインバータを制御することで拡張性確認を可能とする。

2. 3. 3 MCFC の IGFC 適用性検討

第 1 章における MCFC に関する技術動向調査の結果から、ある程度規模の大きな発電容量を持った MCFC についてその燃料電池の供給者を探すと、日本国内においては 2008 年にこれまで開発を行なっていた IHI が開発を凍結し撤退状態になり、MCFC ス

タックを製造するメーカーは存在しない。一方海外では、米国 Fuelcell Energy (以後、FCE) が天然ガスやバイオガスを燃料とした常圧内部改質型 MCFC システムを商品化しており、韓国 POSCO Energy などのライセンス企業とともに国の補助の下で米国、韓国等で順調に普及を進めている。

MCFC を使用した IGFC 実証試験を行う場合、現在商用化されている MCFC 製品を使用する必要があることから、FCE 製スタック適用の可能性についての検討が必要である。しかし燃料は天然ガス・バイオガスであり、現時点では石炭ガス対応へ向けた開発の動きは見られない。そこで、補機類も含め天然ガス用にパッケージングされた現行製品に対して石炭ガス化ガスを導入する際の成立性確認・課題抽出が必要である。

高圧化への対応においては、現状、販売されている MCFC には加圧運転を想定されているものはない。また、試験レベルでは 1.2MPa まで実証済みであるが、IGFC 実証機で想定されている運転圧力 (約 2.5MPa) には及ばない。

以上を踏まえ、MCFC を IGFC 実証機に適用した場合、商用化 MCFC は常圧タイプのため、高圧の石炭ガス化ガスをそのまま導入することはできない。そのため、ガス導入前に圧力を常圧まで降下させる必要がある。

上述のように MCFC を IGFC に適用するためには、石炭ガス化ガス使用、加圧運転、Ni 短絡などの課題や、不純物等による性能低下の可能性があるため、実証試験に採用するためには別途詳細な検討や試験による検証が必要であり、現時点での実証試験への適用は難しい。

2.3.4 燃料電池の種類と発電容量の決定

(1) MCFC の IGFC 適用性検討で得られた調査結果まとめ

- ・ IGFC に適用する燃料電池はシステム構成の都合上、高圧での発電となるが、現状、販売されている MCFC には加圧運転を想定されているものはない。
- ・ 電極間を電氣的に短絡させてしまうニッケル短絡が、MCFC の長時間運転に対する障壁のひとつとなっている。
- ・ 日本国内では、MCFC メーカーが不在である。また、海外の燃料電池システムメーカーが、日本などへの海外展開するような情報は見当たらなかった。
- ・ 上記課題に対して別途詳細な検討や試験による検証が必要であり、また、入手性が困難であること等から判断すると、実証試験への採用は現段階では困難である。

(2) SOFC の IGFC 適用性検討で得られた調査結果まとめ

- ・ 石炭ガス化ガスを CO₂ 分離回収後の H₂ リッチガスは内部改質が無いので、モジュール内の温度管理が必要だが、250kW 機での試験において設計対応を通じて、水素リッチガスの対応が可能であることを確認済み。
- ・ 高圧化については、0.23MPa は商品化され、0.6MPa までの開発がなされている。

- ・ 高圧運転は理論的に可能。ただし、高圧化に伴いモジュール内の熱伝達特性の変化が想定されることから、モジュール内の温度分布には留意必要。
- ・ 上記に対して国内メーカーである MHPS が開発を継続中。
- ・ また、MHPS は事業用 GTFC（天然ガストリプルコンバインド発電）開発を目指しており、本開発は将来的には IGFC につながっていく。

(3) 燃料電池の種類と発電容量について

上述の通り、IGFC 実証機に向けては MCFC は技術課題が多く、入手性の点からも採用が困難と言える。SOFC については、MHPS 製 SOFC モジュールが高圧化への対応ならびに水素リッチガスへの対応の点から有望であり、モジュール規模は現状では 600kW 級モジュールが有力な候補と考えられる。

なお、発電容量としては複数のモジュールを並列化し実証することで、その拡張性が確認できることから、実証機のコストを最小化するモジュール数を考慮し、実証機容量は 600kW 級モジュール×2 台と決定することとする。

2.3.5 実証機システム構成

(1) CO₂ 回収型 IGFC 実証システム構成

IGFC 実証は SOFC を燃料電池として採用することとし、特に大型化・高圧化に優れる MHPS 製の 600kW 級モジュールを採用する。導入ガスは CO₂ 回収型 IGFC を想定し、CO₂ 分離回収後の水素リッチガスとすることで、ガス中カーボンによる炭素析出リスクが低い条件とする。IGFC においては、本来、燃料電池からの排燃料ガスをマイクロガスタービンに導入するが、MHPS の SOFC システムは燃料電池を 2.0MPa での高圧確認を目的に改造しており、マイクロガスタービン圧縮機が 2.0MPa に対応出来ないことから、マイクロガスタービンを不設置としており、排燃料ガスは燃焼炉（触媒燃焼器）に送られ燃焼処理される。

SOFC 設備は緊急停止時等において、燃料電池内を還元雰囲気中に保ちつつ冷却する必要があるため、周辺設備として窒素供給設備ならびに水素供給設備を持つ。実証機システムの概略システムを図 3-2-4-30 に示す。

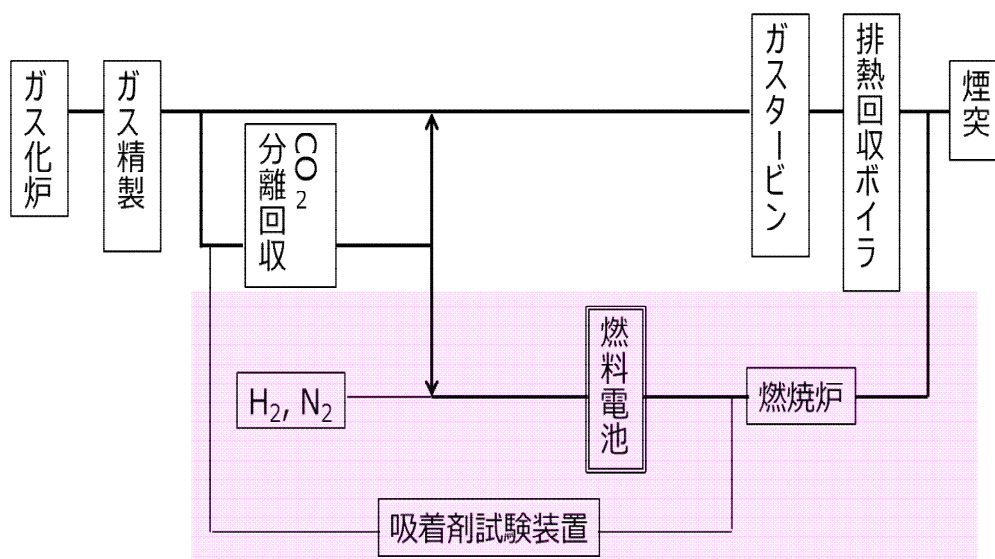


図 3-2-4-30 実証機対応システム構成系統図

同図の赤い領域が新設される部分となり、燃料電池の試験には「商用機のシステム検討」におけるシステム構成の比較検討結果を踏まえ、石炭ガス化ガスはガス精製装置を通り、CO₂ 分離回収装置出口から必要ガスを抜き取ることで、水素リッチガスとして実証機 SOFC へ供給される。

燃料電池モジュールからの排気ガスは触媒燃焼器で未利用燃料と空気を燃やし、燃焼ガス排ガス冷却器で 180℃以下まで冷却後、煙突から大気中へ放出する。

ここで燃料電池に導入される水素リッチガスは別途研究が行われた「石炭ガス中の燃料電池被毒成分を除去するクリーンナップ技術」を通じて得られた IGCC+CO₂ 分離回収による燃料電池に対する被毒成分の挙動から、CO₂ 分離回収プロセスを Sweet シフトとすると、燃料電池の前段に燃料電池用のガス精製試験設備の必要性は低いと判断できる。

(2) 吸着剤試験装置

吸着剤試験装置は、将来的な IGFC 用燃料電池の被毒成分に対する吸着剤特性を明らかにする目的で設置される。よって、CO₂ 分離回収プロセスの前（IGCC ガス精製出口）に試験ループを設置して実施することが適当であると判断でき、除去すべき被毒成分としては、「石炭ガス中の燃料電池被毒成分を除去するクリーンナップ技術」の結果から、H₂S と H₂Se が対象に挙げられる。試験用ガスの供給系統構成としては、ガス精製装置出口のガスの一部を抽気し、そのガスを吸着剤試験装置へ供給し、評価後のガスは燃料電池モジュールの後流に設置された触媒燃焼器で燃やされ、SOFC モジュール排ガスと同様に排ガス冷却器を通り、煙突から大気へ放出される。

吸着試験装置へ供給されるが組成の一例を表 3-2-4-10 に示す。

表 3-2-4-10 供給されるガス組成例

	CO2 回収後水素リッチガス	ガス精製設備出口精製ガス
H2 mol%	85.34	27.89
CO mol%	1.44	56.86
CO2 mol%	1.79	3.48
CH4 mol%	1.19	1.19
H2O mol%	0.01	0.42
H2S ppm mol	H2S+ COS<0.1	23 吸着剤処理後<0.1
COS ppm mol		
N2 mol%	9.10	8.86
Ar mol%	1.13	1.11
NH3 ppm mol	0	1
HCN ppm mol	0	0
CH4O ppm mol	0	0

2. 4 実証機試設計

2. 4. 1 試設計条件

試設計の条件は以下の通りとする。

(1) 設置場所

国内で高圧水素リッチガスの供給が可能な地点

(2) SOFC モジュール設備容量

1MW 級 (600kW) モジュール×[複数台 (2 台)] (制御弁等は複数モジュールを独立に制御するモードと複数モジュールを 1 系として制御するモードの切替が可能とする)

(3) 設備構成

1MW 級 (600kW) モジュール×2 並列

なお、ユーティリティ設備等の一部設備は 2 ユニット共用とする。

(4) 設備仕様条件

- ① 水素リッチガスにて高圧 (2.0MPaG) 下での試験実施を前提に設備仕様設計を行なう。
- ② 運転圧力の下限は 0.6MPaG 級までとし、運転圧力変更時には一旦装置を停止の上、自立式圧力調整弁の設定変更、手動弁開度変更や圧力調整用オリフィスを交換し、運転圧力を変更する。
- ③ 水素リッチガス供給の条件下において、試験運転が実施できる設備とする。

- ④ 水素リッチガスの供給条件下において、SOFC 設備ならびに周辺設備について安全に起動停止操作を行うことが出来るものとする。
- ⑤ 緊急停止時(電源断等)において、設備機能を損なうことなく安全に停止することが出来ること、また、その後、再起動ならびに継続した発電ができるよう配慮する。

(5) 排出物

①排気ガス

- ・ SOFC 設備に付属して設置される排燃料燃焼器にて SOFC 排燃料と SOFC 排空気を混合、燃焼させて排出する。
- ・ SO_x:0.1ppm NO_x:8ppm 煤塵:4mg/m³N(全て O₂:16%換算、定格運転中)、温度<180℃、流量<15,100m³N/h 但し、煤塵に関しては、供給ガス中にダスト成分、タール分等が含まれないものとする。
- ・ NO_x に関しては、SOFC 排燃料中に NH₃ が含まれることから、現段階では上記の NO_x 値を満足するか不明なため、脱硝装置を設置して NO_x 値を満足するものとして計画する。必要に応じ排ガス燃焼器の要素試験を実施し、発生 NO_x 量を評価することで、脱硝装置の要否を最終判断する。
- ・ 排ガス分析用仮設座を設置するものとするが、運転に必要な場合、排ガスの連続計測は実施しない。
(脱硝装置を設置した場合には、脱硝装置の運転に必要な排ガス分析計を設置する)

②SOFC 排燃料

停電時及び制御装置故障、排燃料燃焼器故障時には SOFC 排燃料をグラウンドフレアに排出する。

③ドレン(通常運転時)

- ・ ドレン発生量を削減するため、冷却水系統を密閉式ラジエーター方式とする。
- ・ 発生ドレンを排ガス冷却器スプレーとして再利用し、ドレンの系外排出量を抑制する。(定格負荷の場合、ドレン発生量≤スプレー量となり、無排水化となる計画) 但し、大気温度変動時や運転条件によっては、ドレン発生量>スプレー量となる条件も有り得ることから既設排水処理設備へ排水を送出可能な設備、もしくは排水を産廃処理するために排出可能な設備とする。
- ・ 排水には油分が含まれないよう配慮する。

2.4.2 実証機運転範囲

(1) 運転圧力

運転圧力は設備としては、0.6MPa 級~2.0MPa までの運転に対応可能な仕様とし、気密、耐圧試験に関しては、2.0MPa での試験を想定した試験圧力で実施する。

(2) 燃料利用率、空気利用率

① 定格運転時の燃料利用率、空気利用率は以下

システム燃料利用率 :76%程度(供給燃料に対し発電反応で使用する燃料の水素比率)

モジュール燃料利用率:37%程度(供給燃料と再循環燃料を混合したモジュール入口燃料に対し反応で使用する燃料の水素当量比率)

空気利用率 :20%程度とする。

② システム燃料利用率、

システム燃料利用率に関しては、ハイブリッド機では75~82%程度で運転しているこのため、定格負荷運転では、この範囲にて運転可能な設備とする。定格負荷にてシステム燃料利用率を下げた場合、水素リッチガスの供給量の増加及びそれに伴う供給システムの容量アップ、排ガス処理設備側の容量アップ、排ガス量の大幅な増加→アセス枠超過となるため、これらが発生しない範囲で対応する。

③ 空気流量

空気流量は発電反応により発生した熱及び燃料の顕熱/化学反応熱(改質吸熱等)に対し発電部温度が空気冷却により規定温度となる様に設計した。空気利用率の低下は問題ないが、空気利用率が過度に上昇した場合にはカートリッジ内で局所的な酸素濃度の低下箇所の発生、発電部の温度が上昇することで、セルスタックが損傷する可能性がある。空気利用率は30%程度を上限として設定する。発電部の温度を規定温度以上とするためには、空気利用率が30%以上となるまで空気流量を絞る必要がある状態(熱自立が出来ない状態)では、空気流量は絞らずに発電室燃焼用燃料を投入することで温度を運転温度に維持する。

(3) モジュール入口空気温度

① 定格負荷時にモジュール入口空気温度を規定温度(380~420℃程度)まで昇温可能な空気予熱器を設置する(定格負荷時は空気加熱器不使用)。

② 空気温度をこれよりも上昇させる必要がある場合には、空気加熱器を使用して温度を上昇させる。空気加熱器により500℃まで空気を昇温可能な設備とする。

(4) 再循環流量

① 燃料再循環量は再循環ブロワーの回転数により制御する。

② 再循環流量は、定格負荷時の予想流量の1.2倍程度まで供給可能な仕様とする。

(5) 燃料-空気差圧

① ハイブリッド機では、燃料-空気間の差圧を低下させることで、燃料-空気間のクロスリーク量を低減し、性能への影響を少なくしている。燃料-空気間の差圧は発電中±0~2kPa程度、それ以外は±10kPa程度になる様に制御する。

- ② 運転中の差圧は差圧設定の変更により可能とする。
設定値以上の差圧となった場合には、設備保護のために、インターロックにて装置を非常停止する。

2. 4. 3 SOFC 設備の運用

(1) 基本方針

- ①SOFC 設備の運転は、下記の条件が満足されているときにのみ実施する。
- ・IGCC 設備及び CO₂ 分離回収設備の起動が完了し、水素リッチガス性状が SOFC にて運用できる状態となっていること(ガス化炉負荷 \geq 規定値かつ CO₂ 分離回収装置定常運転中)
 - ・ユーティリティが供給可能であること
- ②そのため、SOFC 設備の停止は、IGCC 設備及び CO₂ 分離回収設備の停止を開始する前に停止を完了することを基本とする。
- ③SOFC 発電設備運転中に IGCC 設備もしくは CO₂ 分離回収設備に非常停止が発生した場合にも SOFC を非常停止可能な様に、ユーティリティ設備仕様に反映する。

(2) 運用計画

IGCC 設備の運転条件(ガス化炉最低負荷 50%)を考慮した SOFC 設備運用として計画する。

CO₂ 分離回収設備は原料ガス量 50~100%の範囲で運転する計画であり、変化速度(1~3%/min)及び変化幅(50~100%)を設定入力することにより CO₂ 分離回収設備単独で原料ガス量を変化させるモードと、ガス化炉入力指令と連動して変化させるモードの 2 つの機能を有する。CO₂ 分離回収設備と十分協調をとった SOFC 設備運用で計画する。

但し、設備設計のためには、水素リッチガスのガス組成の変動幅や変動範囲、ガス化炉負荷/炭種/CO₂ 分離回収装置の運転モードのガス組成へ与える影響が明確化される必要がある。SOFC 設備は、燃料ガス(H₂ リッチガス)量を各ユニット毎に 10~100%の範囲で変化させて運転する。また、燃料流量は電流指令と連動して変化させ、電流指令変化速度 1~5%/min を設定することが出来る。燃料流量を単独で変化させることは出来ず、電流指令に対する燃料流量を変更することにより、流量設定を変化させる。但し、燃料流量制御を手動(燃料流量設定)とし、燃料流量設定変化速度を設定することで、燃料流量単体を変化させることは可能となるが、燃料利用率が規定範囲外となった場合には SOFC 設備が非常停止する。

2. 4. 4 設備保護

非常停止が必要な際は、蒸留設備と連携し自動で非常停止動作を行い、安全な状態まで移行させるものとする。SOFC のトリップ項目(重故障および軽故障項目)を表

3-2-4-11 に示す。

表 3-2-4-11 トリップ項目（重故障および軽故障項目）

No.	警報リスト	重故障 トリップ+警報	軽故障 警報のみ
1	非常停止 PB	○	—
2	制御装置異常	○	○
3	パワーコンディショナ異常	○	○
4	再循環ブロワ異常	○	○
5	補機ユニットバルブ異常	○	○
6	SOFC モジュール異常（電圧、温度）	○	○
7	燃料利用率異常	○	○
8	モジュール容器内温度異常	○	○
9	モジュール入口燃料温度異常	○	○
10	モジュール出口燃料温度異常	○	○
11	モジュール入口空気温度異常	○	○
12	モジュール出口空気温度異常	○	○
13	補機ユニット内温度異常	○	○
14	発電用空気圧縮機異常	○	○
15	燃料元圧異常	○	○
16	圧縮空気元圧異常 (N2 によるバックアップ有り)	—	○
17	窒素元圧異常	○	○
18	水素元圧異常	○	○
19	モジュール圧力異常	○	○
20	再循環燃料圧力異常	○	○
21	燃料-空気系統差圧異常	○	○
22	モジュール内可燃性ガス濃度異常	○	○
23	補機ユニット内可燃性ガス濃度異常	○	○
24	燃料流量異常	○	○
25	純水流量異常	○	○
26	純水ポンプ異常	○	○
27	UPS 異常	○	○
28	計装空気圧縮機異常	—	○
29	補機ユニット換気ファン異常	—	○
30	排燃料燃焼器異常	○	○
31	排ガス冷却器異常	○	○
32	脱硝装置異常	—	○
33	排ガス温度異常	○	○
34	冷却水系統異常	○	○
35	ドレン系統異常		
36	停電	○	—

2.4.5 実証試験設備の系統設計

表 3-2-4-12 に SOFC 実証設備の仕様一覧を示す。

表 3-2-4-12 SOFC 実証設備仕様一覧

ID	項目		内容	
1	名称		SOFC 実証設備(600kW 級モジュール×2 系列)	
2	種別		固体酸化物形燃料電池	
3	目標定格出力		Later kW	
4	入出力電力仕様		AC6600V 3相 60Hz	
6	設置環境	使用場所	屋外	
7		気温・湿度	-5~40℃、0~100%RH	
8	構成本体	本体	発電部	固体酸化物形燃料電池 (円筒横縞形)
11			電気計装	制御装置 (MHPS 製)
12		高圧分電盤、低圧分電盤 等		
13		パワーコンディショナ		
14		空気供給	発電用空気圧縮機	
15			空気予熱器/空気加熱器	
16			保護用空気ブロウ	
17		ガス供給	燃料/窒素/水素/改質スプレー	
18		燃料再循環	再循環冷却器	
18			再循環ブロウ	
19		排ガス処理	排空気/排燃料減圧設備 (バルブ+サイレンサ)	
20			排燃料冷却器	
21			排燃料燃焼器	
22			排ガス冷却器	
23			脱硝装置	
		計装空気	計装空気圧縮機	
24		冷却水・ドレン (2 ユニット共用)	ラジエータ	
25			冷却水ポンプ / 再循環ブロウ冷却水ポンプ	
27			ドレン設備 (MHPS 所掌機器)	
28		構成 (BOP)	ユーティリティ (2 ユニット共用)	窒素供給設備
29	水素供給設備			
30	ドレン設備 (電源開発所掌機器)			
31	その他	吸着剤試験装置		
32	既設設備の流用/改造		電源設備 / 非常用電源設備	
33			純水設備 / 工業用水設備	
34			グラウンドフレア	
35			排ガス煙突	
36	装置保護機能		警報装置、自動停止機能	
37	停電対応		外部から非常電源を供給し、停止	
38	運転	定格時	自動 (ベースロード)	
39		起動停止時	自動	
40		非常停止時	自動 (手動でも可)	
41	保守点検		消耗品等は連続運転: 3000h 以上の交換インターバル	
42	資格・技術者		電気主任技術者	
43	適用法規		電気事業法 (事業用電気工作物)	

(1) SOFC 実証設備

本設備は SOFC モジュール、補機類及びユーティリティ設備から構成される。

SOFC 実証設備は、1MW 級×2 系列とし、それぞれに 600kW 級加圧型 SOFC モジュールを設置する。モジュール容器には圧力容器を採用し、運転圧力 2MPaG へ対応し、それぞれに安全弁が設置されている。

(2) 空気供給

発電に使用する空気を供給する。

発電用空気圧縮機にて空気を加圧供給し、最大空気流量を供給可能な容量とする。空気の供給時は、空気予熱器にて SOFC 排空気と熱交換することで、必要な温度まで空気を加熱する(供給空気温度:380~420℃)。

起動時及び低負荷時には空気供給温度 \geq 排空気温度となるため、空気加熱器を設置する。空気加熱器は触媒燃焼器方式により、水素リッチガスを燃焼させることにより空気を加熱する。なお、装置故障等が発生した際に、セルスタックの空気極側の酸化性雰囲気維持及びサブモジュール冷却のための保護用空気ブロワーが設置される。

(3) ガス供給系統

- ・水素リッチガスの供給条件は CO₂ 吸収塔後の昇圧圧縮機下流から SOFC に供給するものとする。最大圧力は 3.97MPaG として設計し、圧縮機下流:常用圧力 3.51MPaG、温度:0~100℃とする。
- ・発電に使用する水素リッチガスを供給は発電により消費する燃料流量は電流に比例するため、燃料供給量は電流指令に対する関数として設定する。
- ・起動時等にセルスタック発電部を規定温度以上まで昇温させるため、発電室燃焼による昇温を行う発電室燃焼用水素リッチガス供給系統を設置する。
- ・燃料系統のパージ、水素及び水素リッチガスの希釈のために窒素供給系統を設置する。
- ・起動・停止時(水素リッチガスを供給出来ない温度域)及び水素リッチガス系統不調時に燃料系統を還元性雰囲気維持するために、水素供給系統を設置する。

2. 4. 6 実証試験設備の機器配置計画

実証試験設備の機器配置計画図（案）を図 3-2-4-31 に示す。

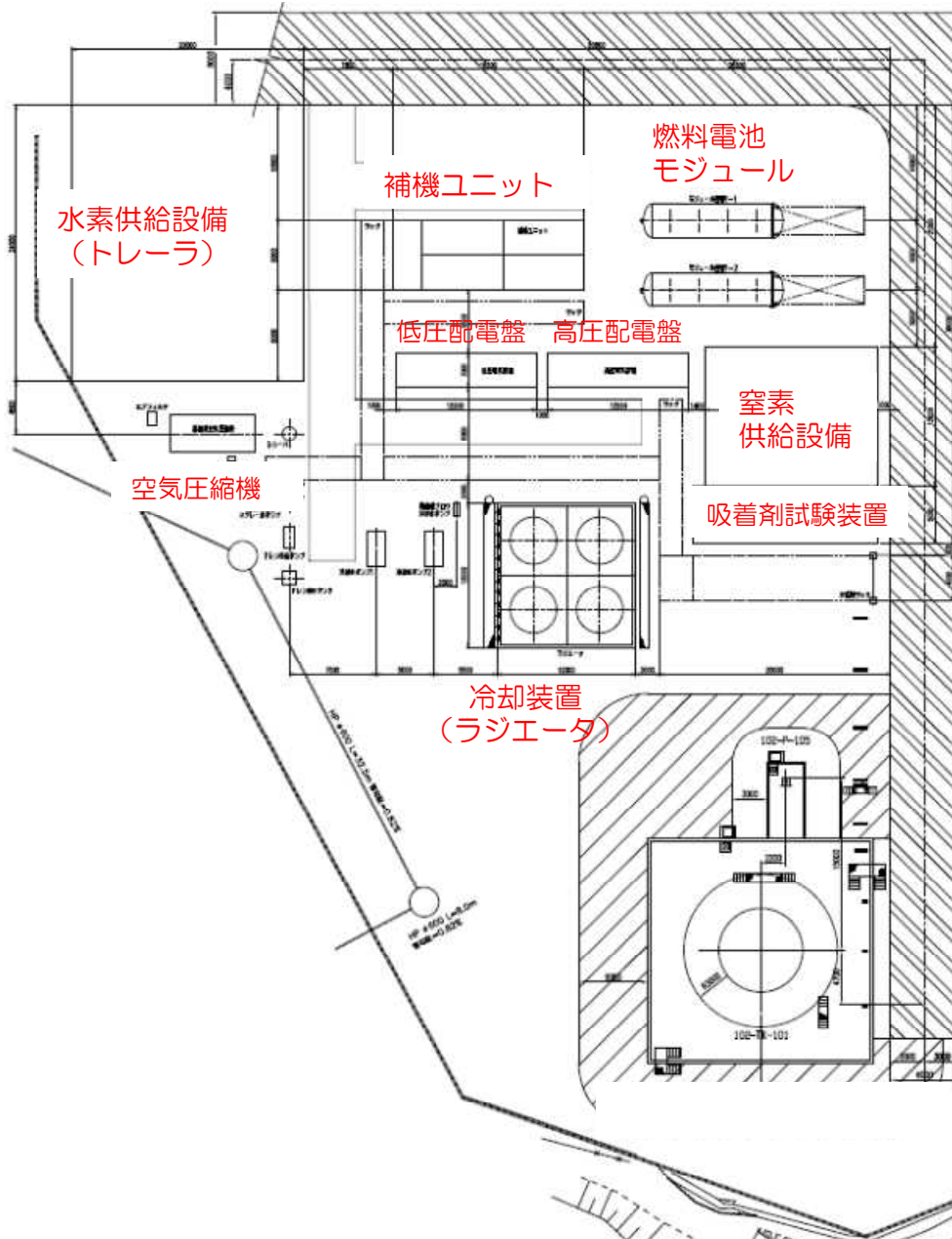


図 3-2-4-31 機器の配置計画図

2.4.7 実証機システム運用・試験の課題

(1) SOFC カートリッジの上下金属ヘッダー部温度

メタンを燃料に含む都市ガス（天然ガス）と比較し、石炭ガス化ガス中にはメタンは1%程度しか含まれず、メタン改質による吸熱効果がないため、燃料供給ヘッダー側のセル温度が燃料排出ヘッダー側よりかなり高温となる。

これまでの試験結果をもとに今回の試設計ではカソードガス利用率を20%とし、定格負荷運転（セル温度が設計許容温度以下で）を可能としている。しかし、燃料供給ヘッダー側の温度が高くなる温度分布は変わらず、空気利用率、セル供給空気温度を変えた発電試験は燃料ヘッダー温度（600℃以下）を監視し、実施する。

(2) 運転圧力を変えた発電性能試験

高圧運転となる商用機のモジュール設計にあたっては、圧力による発電性能データをもとにセルの運転条件（電流密度、電圧、燃料利用率など）の最適化を検討することになる。その際、圧力を変えた時の電流-電圧特性（セル温度、燃料利用率、空気利用率などを一定とした）データが必要となる。

空気、燃料の供給温度を変えてセル温度を制御した場合、温度分布までを同じにすることは難しく、セル性能を表すと考えられるセル平均温度を一定とすることで性能評価を実施する。

(3) 空気流量、温度を変えた発電性能試験

GTとの連係運転、カソードガスリサイクルシステムなどの商用化にあたっては、カソードガス（空気）の流量変化、温度変化、発電性能がどのように変化するかのデータを取得し、設計へ反映する必要がある。

空気流量一定、供給温度を変化させる試験では、空気予熱器を通る空気のバイパス流量を変えることになるが、供給温度が変化することでセル温度、セル出口空気温度が変化し、空気予熱器高温側の温度が変化する。この変化は低温側の供給温度を変化させることになり、この循環がしばらく続くことになる。この過程を律速している現象はセル温度のゆっくりした温度変化だと考えられ、この特性が空気流量を変えた時にどのように変化するかのデータが得られれば、GTと連係したシステムでの負荷制御に利用できる。

カソードガスリサイクルは空気供給源の限られた流量をリサイクルすることで流量を増すことができ、SOFCの容量を増大でき、商用機ではシステム効率の向上策として検討されている。

(4) 高圧運転時の放熱損失

圧力上昇によってネルンスト・ポテンシャルが増加することで、セル性能は向上する。また、圧力上昇により性能向上が期待される条件において、運転圧力上昇は、カートリッジ周辺の雰囲気圧力も上昇し、雰囲気ガスの密度差による対流が発生するため、収納容器からの放熱損失が増加する。放熱損失の増加によりセル温度が設定温度よりも下がった場合、SOFCではセル温度が性能に著しい影響を与えることから、この温度低下が圧力上昇による性能向上分を打ち消し、セルの性能低下につながる。

高圧化によるセル性能低下の原因が上記のようなセル温度低下によるものであるかどうかを明確にするため、モジュール収納容器からの放熱損失評価が必要となる。高温、高圧、高電流場での温度計測は難しいが、セルからカートリッジ、容器内断熱材、容器外表面温度を容器先端、中央、後部の同一断面で計測し、放熱量評価を行い、セル性能低下の原因を明らかにする。

(5) 燃料再循環率の最適化

試設計ではシステム燃料利用率を 76%、燃料系統を再循環することにより、モジュール燃料利用率を 37%に設定している。メタンを 80%以上含有する都市ガスと異なり、H₂ リッチガスには 1%程度しか含まれず、メタン改質に必要な水蒸気流量はセルの発電反応に伴い発生する水蒸気で十分である。したがって、H₂ リッチガスでの再循環は未利用燃料を入り口燃料に戻し、燃料 (H₂) 流量を多くすることで、発電室内の燃料出口側での燃料濃度低下が小さな発電運転を実現するとともにカートリッジ内の温度分布の平準化を目的としている。

しかし、H₂ リッチガスでは発電反応で発生した H₂O が改質反応に使われないため、この H₂O はそのまま再循環され、セル入り口の H₂O 濃度は高くなり、結果として H₂ 成分の濃度が低くなる。H₂ 成分の濃度低下は起電力の低下となり、燃料 (H₂) 流量の増加と濃度低下とが相反する効果を生み出すことになり、再循環率についての最適化が必要になる。

(6) SOFC モジュール並列ユニットの差圧制御

将来の大型商用機における SOFC モジュールの多並列ユニット設計法を検証するため、試設計では 2 並列ユニットを模擬した設計とし、実証試験により並列運転を実施する。特に、セルへ供給される空気-燃料間の差圧については運転圧力 2MPa で差圧 0 ~2KPa の制御を目標としている。2 並列の試験結果から多並列へ展開するためには、1 つの流量、圧力制御で微妙に異なる特性 (流量、温度分布、各部の流路抵抗、発電性能) を持つ 2 つのモジュールを運転した際、各流量制御部の圧力データ (差圧も含め) を基にした試験結果の評価が求められ、高温、高圧、高電流場での限られた計測点数から可能とするためには事前のコールドテストによる計測位置、内容の検討が必要となる。

2. 5 実証試験

2. 5. 1 実証試験目標

IGFC 技術動向調査における課題や実証に向けたシステム評価結果を踏まえ、実証試験における目標としては以下が考えられる。

事業用の燃料電池を CO₂ 分離回収後の水素リッチガスにより運転し、運用性と信頼性を把握すること。

燃料電池の耐久性として天然ガス並みであること

⇒ 電圧低下率 0.1%/1,000 時間程度

設備信頼性として天然ガス並みの運転時間であること

⇒ 運転時間 3,000 時間程度

複数の燃料電池モジュールの運転より、拡張性の確認すること

CO₂ 分離回収設備と燃料電池の協調運転を確立すること

吸着剤の耐久性把握

CO₂ 分離回収型 IGFC 商用機 (500MW 級) として、送電端効率 47% (HHV) 程度の達成見通しを得ること

大型 IGFC 技術開発にむけた課題を整理すること。

2. 5. 2 実証試験項目

上記の実証試験目標を検証するための試験項目を表 3-2-4-13 に示す。

表 3-2-4-13 試験項目

試験項目		試験操作	確認事項
起動・停止方法の確認	H ₂ リッチガスのみでの通常起動・停止	<ul style="list-style-type: none"> 燃料電池起動モード 燃料電池停止モード 	<ul style="list-style-type: none"> H₂ リッチガスのみでの起動と停止
	インターロック停止		<ul style="list-style-type: none"> 燃料電池保護 既設側への影響がないこと
600kW 級モジュールの高圧 H ₂ リッチガス適用性	600kW 級モジュールでの H ₂ リッチガス適用性	<ul style="list-style-type: none"> 段階的負荷変化 	<ul style="list-style-type: none"> モジュール温度上限に合わせた空気流量制御、電流制御 モジュール内温度、電流、電圧
	高圧化対応として 2.0MPa までの試験を目指す。	<ul style="list-style-type: none"> 燃料電池への供給圧力を 2.0MPa までに段階的変化 	<ul style="list-style-type: none"> モジュール温度上限に合わせた空気流量制御、電流制御 モジュール内温度、電流、電圧
	運転パラメータの適正化と性能把握	<ul style="list-style-type: none"> 燃料入口温度変化 再循環流量変化 空気入口温度変化 燃料利用率変化試験 	<ul style="list-style-type: none"> モジュール温度上限に合わせた空気流量制御、電流制御 モジュール内温度、電流、電圧
燃料電池ユニットの並列運転	複数並列したユニットへの燃料・空気の流量制御、電流制御		<ul style="list-style-type: none"> 各ユニット毎の燃料、空気制御の確認 各モジュール毎の燃料、空気流量の確認 各モジュールのモジュール内温度、電流、電圧
	複数ユニットの統合運転		<ul style="list-style-type: none"> ユニット毎の燃料流量アンバランス時の空気制御、電流制御の確認
石炭ガス組成に応じた制御	石炭ガス組成 (H ₂ 濃度) の変動に応じた燃料電池制御	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ 分離回収装置の特性を踏まえて、CO₂ 回収率を調整して、H₂ 濃度を変動させる 	<ul style="list-style-type: none"> H₂ 濃度に応じた燃料流量制御の確認
燃料電池信頼性	通常運転の継続性		<ul style="list-style-type: none"> 累積 3,000 時間以上の運転
石炭ガス中の被毒成分に対する燃料電池の耐久性評価	CO ₂ 分離回収後に吸着剤を設置しない石炭ガスにおける燃料電池の耐久性を試験		<ul style="list-style-type: none"> 燃料電池入口ガスの被毒成分分析 電圧低下率 0.1%/1,000 時間程度の確認
	CO ₂ 分離回収前の被毒成分が多い石炭ガスを対象に吸着剤性能評価		<ul style="list-style-type: none"> 吸着剤入口、出口ガスの被毒成分分析 被毒成分破過の有無の確認

なお、CO₂ 分離・回収型 IGFC システムにおける送電端効率 47%程度の見通しについては、今回の実証機は熱効率解析と同じ CO₂ 分離・回収型 IGFC システムとは異なり、実証機で検証できる部分としては燃料電池のみである。従って、システム全体の熱効

率解析については、燃料電池で検証した結果を熱効率解析（シミュレーション）により補う必要がある。具体的には、熱効率解析により、石炭ガス化炉・ガス精製装置から供給される燃料電池入口ガス組成に基づき燃料電池の電圧、H₂ と CO の分圧により電流が計算されるが、電圧についてはネルンスト式による開回路電位からモデル化された過電圧を引くことにより出力電圧が求められている。ここで、実証試験で得られた燃料電池の運転電圧は前述の出力電圧に相当するため、燃料電池の運転電圧とシミュレーションによる出力電圧の差異の有無を踏まえて解析する必要がある。

2. 5. 3 実証試験工程

上記の実証項目を実施するための基本的な実証試験工程を表 3-2-4-14 に示す。

表 3-2-4-14 実証試験工程

試験項目	経過時間(ヶ月)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
起動・停止方法の確認	→												
600kW級モジュールの高压 H ₂ リッチガス適用性		→		→									
燃料電池ユニットの並列運転		→		→									
石炭ガス組成に応じた制御					→								
燃料電池信頼性評価										→			
石炭ガスに対する燃料電池の耐久性評価										→			
石炭ガス中被毒成分に対する吸着剤性能評価										→			
内部点検											→		
成果とりまとめ												→	→

2. 6 特許・成果の普及

本事業は他事業として実施中の CO₂ 分離回収型 IGFC 技術実証に関わる各要素技術開発の成果を連携させ、具体的な小型 IGFC 実証へ向けた方向性を明らかにするものであり、成果の普及先が限られるため、対外的な発表等はない。

研究発表・講演 なし
 文献掲載 なし
 特許等 なし
 その他の公表（プレス発表等）なし

4. 成果の実用化に向けての見通し及び取組について

1. 成果の実用化に向けた戦略

(1) 本事業における実用化の定義

本事業は、革新的な高効率発電技術である GTFC、IGFC の基盤技術を開発するものであり、本事業における実用化とは、成果を基に GTFC、IGFC の各技術開発が実証フェーズに移行することである。

従い、実用化の定義は、「事業成果が IGFC 実証事業に活用されること、もしくは、中小型 GTFC を構成する主要な要素が開発され、発電システム構築の目処がつくこと」とする。

GTFC においては、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）のガスタービン連係技術を確立し、早期市場投入を目指す。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。

IGFC においては、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性がある。その成果を、2019 年 3 月より開始した CO₂ 分離・回収型 IGFC 実証事業の設計や運用計画に反映する。

(2) 成果の実用化に向けた戦略

(2)-1. ガスタービン燃料電池複合発電 (GTFC)

ガスタービン燃料電池複合発電技術開発 [(4)3]

業務・産業用燃料電池の普及については、経済産業省の「水素・燃料電池戦略ロードマップ（2019 年 3 月）」において、以下のとおり定められている。

「セルスタック等の技術開発を進め、2025 年頃に 55%超（送電端効率、LHV）の発電効率を目指す。また、現状 9 万時間程度の耐久性については、2025 年頃までに 13 万時間を見通すことを目指す。さらに、その先の次世代の業務・産業用燃料電池として、発電効率 65%超（送電端効率、LHV）の実現を目指す。」

ロードマップの実現に向け、2020～2021 年度頃に 1MW 級燃料電池システムの市場投入を行い、燃料電池の普及に努める。これと並行して燃料電池の量産化体制を構築し、次フェーズとして中小型 GTFC（10 万 kW 級）の技術確立、技術実証につなげる。

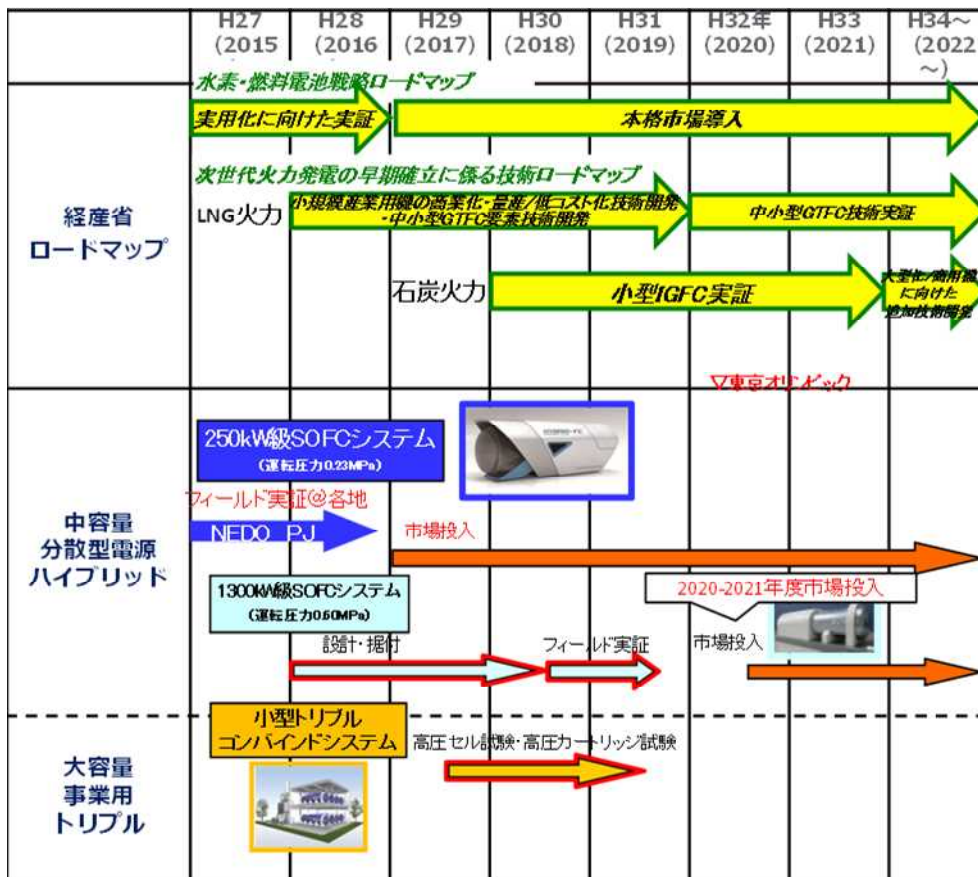


図 4-1 燃料電池システム市場投入に係るロードマップ (出展：三菱日立パワーシステムズ(株))

(2)-2. 石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC)

燃料電池向け石炭ガスクリーンアップ要素技術研究 [④2]]

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)-(2)]

燃料電池石炭ガス適用性研究/IGFCシステムの検討 [④4)-(1)]

本事業における成果については、2018年度から開始された、「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」における、第3段階であるCO2分離・回収型IGFCの実証試験の設備設計及び試験内容の検討に適時反映・活用することで、実証事業を効率的に進め、事業の成功につなげる。また、実証事業の成果を本事業の成果と組み合わせることで、IGFC実用化に向けた有用なデータとする。

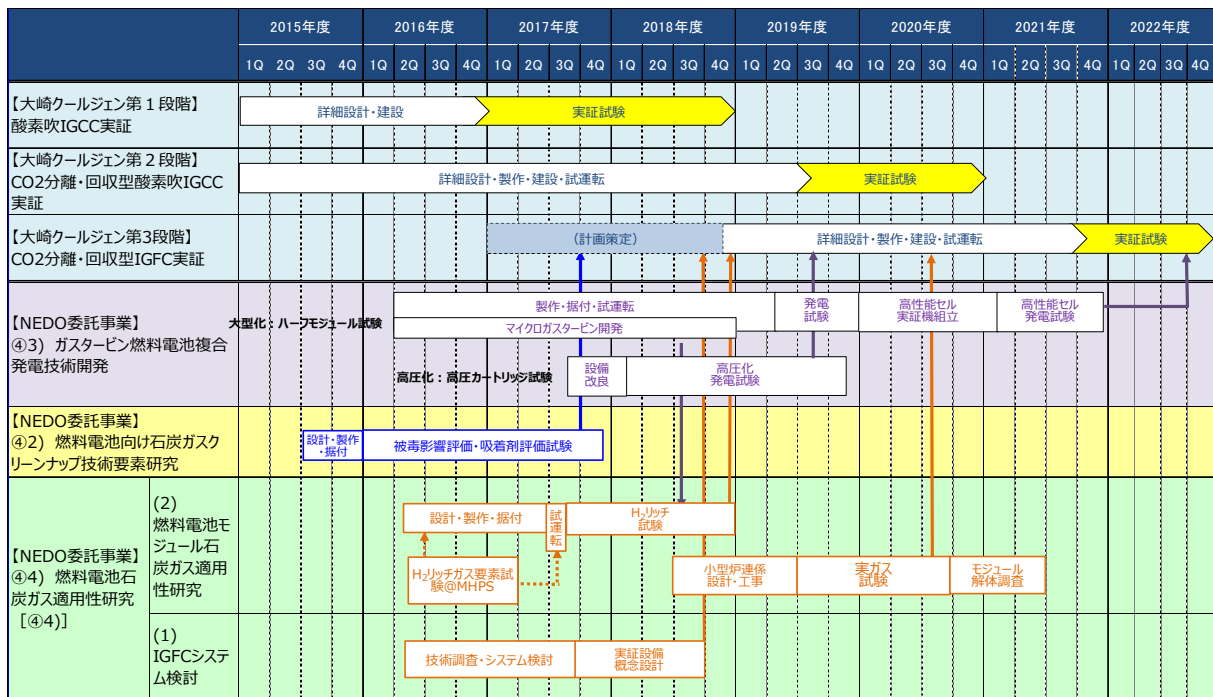


図 4-2 基盤技術開発のスケジュールと大崎クールジェン第3段階への反映時期

2. 成果の実用化の見通し

(1) 市場ニーズ

石炭火力、ガス火力は、新興国を中心に今後も需要の伸びが見込まれており、高効率化の需要は多いと予想される。World Energy Outlookによると、2018年～2040年にかけて、世界全体では、石炭火力は730GW（31.7GW/年）、ガス火力は1,506GW（65.5GW/年）が新設・リプレースされる見込みである。

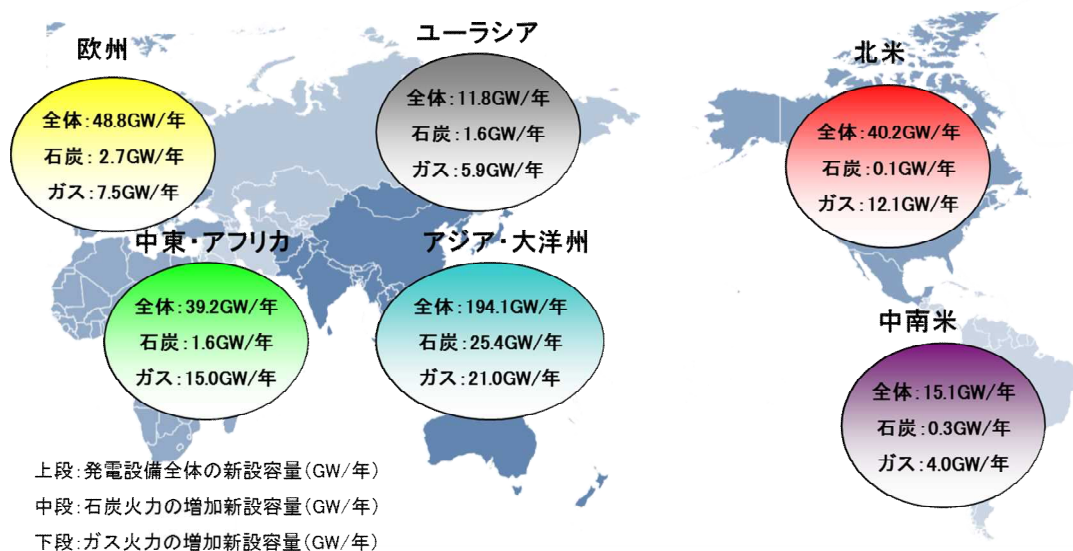


図 4-3 世界の発電設備の new 設・リプレース見込み
(出展：IEA World Energy Outlook 2018)

(2) 競合技術に対する優位性

大型の GTFC, IGFC システムに適用可能な大容量かつ高圧対応可能な燃料電池技術は日本が世界に先駆けて開発しているものであり、技術優位性は高い。また、IGFC 技術については大崎クールジェンにて世界初の試みとなる実証事業が開始されている。更に、IGFC 導入の前提となる IGCC 技術については世界に先駆けて日本国内で空気吹 IGCC の商業機が建設されており、酸素吹 IGCC と併せて世界的に先行している状況である。これらの状況に鑑み、GTFC, IGFC については世界的に競合に対し大きく先行しており、日本の国際競争力強化に貢献できるといえる。

(3) 技術確立の見通し

「次世代火力発電における技術ロードマップ」に記載の通り、GTFC については中小型 GTFC を実証すること、IGFC については CO₂ 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で、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 CO₂ 分離・回収型 IGFC 実証事業に反映し、IGFC 技術確立に活用することで、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。
- ・ 本事業で開発する水素リッチガスを用いた燃料電池システムの最適化技術は、将来の水素社会において、燃料電池の燃料多様化に貢献できる技術である。また、他事業で実施している水素専焼ガスタービンの開発成果と組み合わせることで、水素社会における発電の多様化に貢献できる。

「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、CO₂削減を実現するため、次世代の火力発電技術の早期確立を目指すこととしている。

②我が国の状況

我が国の火力発電の熱効率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）を商用化し、さらには高効率な空気吹石炭ガス化複合発電（IGCC）が既に実用化段階であり、酸素吹IGCCにおいても実証フェーズにある。また、効率向上に大きく寄与するガスタービンにおいて、1600℃級という高温化を世界に先駆けて実現する等、熾烈な国際競争の中においても、我が国の高効率火力発電システムは、トップレベルを維持しており、世界をリードしている。しかしながら、燃料資源を他国に大きく依存する我が国にとっては、限られた資源の有効利用を図ることは至上命題であり、今後とも、更なる効率化を図っていく必要がある。また、中長期的な視点では、大幅なCO₂削減を実現しうるCO₂の回収・貯留・利用（CCUS）の技術の開発・推進も重要なテーマであり、国内でのCCS（二酸化炭素の回収・貯留）大規模実証事業や貯留ポテンシャル調査等が進められている。

③世界の取組状況

地球温暖化問題の対策として、CO₂排出量の削減が強く求められている中で、米国や欧州においても国家レベルで巨額の研究開発費を投じ、基礎研究から技術開発、実証研究等の様々な取組が行われており、日本と同様にIGCCや先進的超々臨界圧火力発電（A-USC）、高効率ガスタービン等の開発が進められている。また、大幅なCO₂削減を達成するため、CO₂分離・回収を行ったIGCCやCCS-EOR（石油増進回収）の実証といったプロジェクトも進められている。

④本事業のねらい

長期エネルギー需給見通しの実現に向けて、火力発電の高効率化に関しては、石炭火力の発電効率を大幅に引き上げる石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）の実証事業をはじめ、石炭火力、LNG火力の双方につき、新たな火力発電技術の開発等を実施する。また、火力発電から発生するCO₂排出量をゼロに近づける切り札となる技術として、火力発電所から発生する大量のCO₂を効率的に分離・回収・有効利用するための技術開発等を実施する。これまでの火力発電に係る技術開発は、個別の技術ごとに進められていたが、石炭火力、LNG火力は共通する要素技術が多く、火力発電全体の技術開発を加速するためには、個別技術開発を統合し、包括的かつ一体的に推進することが有効である。そこで、次世代火力発電技術に係る事業を本事業において統合し、関連事業を一元管理し、一体的に進めることで、開発成果を共有しつつ、技術開発に係るリソースを最適化する。これにより、次世代火力発電技術の開発を加速し、早期の技術確立及び実用化を狙う。

（2）研究開発の目標

①アウトプット目標

本事業を通じて、発電効率の大幅向上やCO₂分離・回収後においても高効率を維持すること及びCO₂有効利用等、CO₂排出の削減に寄与する革新的な次世代火力発電技術の確立を目指す。

研究開発項目ごとの目標については、別紙にて定める。

②アウトカム目標

本事業の開発成果により、2030年頃にLNG火力においては、将来のガスタービン燃料電池複合発電（GTFC）商用機として送電端効率63%（高位発熱量基準）を達成し、さらには、IGFC商用機へと繋げることで、石炭火力として送電端効率55%（高位発熱量基準）を達成する。また、CCUSの実現に向け、CO₂分離・回収コスト1,000円台/t-CO₂という大幅な低減を達成する。また、CO₂有効利用の一例として、天然ガスパイプラインの許容圧力変動による、負荷変動対応能力は、6,000万kWと推定される。そのうち、1割をCO₂由来のメタンで代替すると、1,300億円を獲得する。

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

③アウトカム目標達成に向けての取組

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

（3）研究開発の内容

火力発電の効率化及びCO₂分離・回収・有効利用等に関する調査、開発及び実証を実施する。実施に当たっては、各事業の性質に合わせ、委託事業又は助成事業（NEDO負担1/3、2/3、1/2）により実施する。

なお、個別研究開発項目の研究開発内容の詳細については、別紙にて記載する。

研究開発項目① 石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業 [助成事業]

- 1) 酸素吹IGCC実証 (1/3助成)
- 2) CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証 (1/3, 2/3助成)
- 3) CO₂分離・回収型IGFC実証 (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) CO₂分離型化学燃焼石炭利用技術開発
- 6) 石炭火力の競争力強化技術開発
- 7) CO₂有効利用技術開発
- 8) 流動床ガス化燃焼を応用した石炭利用技術開発 (新規)
- 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 (新規)

研究開発項目⑤ CO₂回収型次世代IGCC技術開発 [委託事業]

研究開発項目⑥ 次世代火力発電技術推進事業 [委託事業]

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

3. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本事業は、NEDOが単独又は複数の企業、大学等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別の研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点から国外企業との連携が必要な部分はこの限りではない。）から、原則公募によって実施者を選定し実施する。ただし、移管事業に関してはこの限りではない。

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

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

研究開発項目① 石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業

PM：NEDO 高橋洋一、PL：大崎クールジェン株式会社 木田一哉

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 山中康朗、PL：三菱重工業株式会社 石坂浩一

2) 高温分空気利用ガスタービン (AHAT)

PM：NEDO 山中康朗、PL：三菱日立パワーシステムズ株式会社 吉田正平

研究開発項目③ 先進超々臨界圧実用化要素火力発電技術開発

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

研究開発項目④ 次世代火力発電基盤技術開発

1) 次世代ガス化システム技術開発

PM：NEDO 中田博之、PL：一般財団法人電力中央研究所 牧野尚夫

2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ要素研究

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 高橋洋一、PL：三菱日立パワーシステムズ株式会社 北川雄一郎

4) 燃料電池石炭ガス適用性研究

PM：NEDO 高橋洋一、PL：電源開発株式会社 早川宏

5) CO₂分離型化学燃焼石炭利用技術開発

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

6) 石炭火力の競争力強化技術開発

PM：NEDO 中元崇、PL：契約毎に設置

7) CO₂有効利用技術開発

PM：NEDO 西海直彦、PL：日本大学工学部客員教授 坂西欣也

8) 流動床ガス化燃焼を応用した石炭利用技術開発

PM：NEDO 名久井博之、PL：NEDOにおいて選定

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 CO₂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 青戸冬樹、PL：一般社団法人高効率発電システム研究所 福田雅文

(2) 研究開発の運営管理

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

①進捗把握・管理

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

②技術分野における動向の把握・分析

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

4. 研究開発の実施期間

本事業の実施期間は、2016年度から2022年度までの7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。

5. 評価に関する事項

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

評価の時期については、研究開発項目①は、中間評価を2017年度及び2020年度に、事後評価を2023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④6)は、事後評価を2020年度に実施し、5)は中間評価を2017年度に実施し、7)は前倒し事後評価を2019年度に実施し、8)、9)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、その調査内容に応じて研究開発項目①から⑤、⑦の中間評価、事後評価の際に合わせて評価を実施する。研究開発項目⑦は、中間評価を2019年度、事後評価を2022年度に実施する。

6. その他の重要事項

(1) 委託事業成果の取扱い

①成果の普及

得られた事業成果については、NEDO、実施者とも普及に努める。

②標準化等との連携

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

③知的財産権の帰属

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

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

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次世代火力発電技術推進事業は、「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①石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業3)及び研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発8)、研究開発項目⑥次世代火力発電技術推進事業は、「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) その他

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

7. 基本計画の改訂履歴

(1) 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) CO₂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)機動性に優れた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)CO₂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。

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CO₂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CO₂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CO₂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。

以上のとおり、石炭火力発電におけるCO₂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CO₂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CO₂を大幅に削減させるべく、究極の高効率石炭火力発電技術である石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）とCO₂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) CO₂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CO₂分離・回収設備を組み合わせ、CO₂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、CO₂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。

3) CO₂分離・回収型IGFC実証（1／2助成）

CO₂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CO₂分離・回収型IGFCシステムの実証を行う。

2. 達成目標

[実施期間]

酸素吹 I G C C 実証：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）

CO₂分離・回収型酸素吹 I G C C 実証：2016～2020年度

CO₂分離・回収型 I G F C 実証：2018年度～2022年度

[中間目標（2017年度）]

1) 酸素吹 I G C C 実証

(a) 発電効率：40.5%程度（送電端効率、高位発熱量基準）を達成する。

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

(b) 環境性能：「SO_x < 8 ppm」、 「NO_x < 5 ppm」、 「ばいじん < 3 mg/Nm³」を達成する（O₂ = 16%）。

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

2) CO₂分離・回収型酸素吹 I G C C 実証

CO₂分離・回収設備の詳細設計を完了する。

[中間目標（2020年度）]

3) CO₂分離・回収型 I G F C 実証

CO₂分離・回収型 I G F C 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（2018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IGCC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。

[最終目標（2020年度）]

2) CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証

(a) 基本性能（発電効率）：新設商用機において、CO₂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。

CO₂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、CO₂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、CO₂分離回収にかかるエネルギー原単位「0.90GJ/t-CO₂（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）：CO₂分離・回収装置における「CO₂回収効率>90%」、「回収CO₂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CO₂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。CO₂地中貯留から求められる可能性があるCO₂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：CO₂分離・回収型IGCCシステムの運用手法を確立し、信頼性を検証する。

商用機において、CO₂分離・回収型酸素吹IGCCシステムを構築するには、プラントの起動停止や、発電所特有の負荷変動等に対し、IGCC本体に追従したCO₂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CO₂分離した場合のIGCC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CO₂分離・回収の費用原単位を評価する。

CO₂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、CO₂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：

CO₂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。

[最終目標（2022年度）]

3) CO₂分離・回収型IGFC実証

500MW級の商業機に適用した場合に、CO₂回収率90%の条件で、47%程度の発電効率（送電端効率、高位発熱量基準）達成の見通しを得る。

研究開発項目② 「高効率ガスタービン技術実証事業」

[実施期間]

1700℃級ガスタービン：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、CO₂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 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。

3. 達成目標

[中間目標 (2017年度)]

既存の I G C C (1500℃級 G T 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 I G C C (1500℃級 G T 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⑤CO₂回収型クローズド I G C C 技術開発と統合して、新名称 研究開発項目⑤CO₂回収型次世代 I G C C 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アップ技術要素研究

[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るとトリプル複合発電を行うもので、究極の高効率発電技術として、実現が望まれている。

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

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

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

2. 具体的研究内容

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

3. 達成目標

[最終目標（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、CO₂排出原単位：280g-CO₂/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、2022年度から開始する中小型GTFCの技術実証に活用する。

3. 達成目標

[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。

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るとトリプル複合発電を行うもので、究極の高効率石炭火力発電技術として、その実現が望まれている。

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

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

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

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

2. 具体的研究内容

(1) IGFCシステムの検討

国内外における高温型燃料電池及びIGFCの技術開発動向をレビューすることにより、最新情報を入手し、IGFCの実用化に向けた課題の整理を行う。商用機システムとして、CO₂分離・回収を行わないIGFCとCO₂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H₂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ナ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)]

H₂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。

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

5) CO₂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CO₂の分離・回収技術の開発が進められているが、CO₂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、CO₂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CO₂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、CO₂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、CO₂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CO₂の分離・回収が可能である。

さらに、CO₂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CO₂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-CO₂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-CO₂を見通せるCO₂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) 石炭火力の競争力強化技術開発

[実施期間] 2017年度～2019年度

1. 研究開発の必要性

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

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

2. 具体的研究内容

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

3. 達成目標

[最終目標(2019年度)]

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

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

7) CO₂有効利用技術開発

[実施期間] 2017年度～2019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CO₂排出量が比較的多く、将来的にCO₂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CO₂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CO₂ (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CO₂の適用性を評価する。

3. 達成目標

[最終目標 (2019年度)]

事業終了時に本事業として実施するCO₂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) 流動床ガス化燃焼を応用した石炭利用技術開発

[実施期間] 2019年度～2021年度

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。

石炭火力からのCO₂排出抑制技術としては、CO₂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CO₂を分離・回収できる流動床ガス化燃焼を適用した技術が有望視されている。

本技術の適用先としては、枯渇油田の増加に伴いCO₂-EOR市場が拡大傾向にあることから、その市場への導入を目指し、実機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

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、CO₂、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CO₂ガスのみが分離回収できる。

本技術は流動床を用いていることから多様な燃料（低品位炭、バイオマス等）に活用でき、中小規模（100MW級）の発電に適用できる。また、別置きのCO₂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CO₂の分離・回収が可能となる。

これまでの試験で、有望な流動材（酸素キャリア）の選定に見通しが得られていることから、実機設計技術の確立を目指し、以下の課題を実施する。

(1) 煤発生抑制技術開発

ガス化炭化水素からの煤発生に対して、ガス化触媒(CaO)による生成抑制を検証する。

(2) プラント設計に向けた検討

実機運転を想定した起動、停止、負荷変化時の運転・制御性の検討、排ガスや廃棄流動材（酸素キャリア）の環境影響評価、並びに長時間運転時の課題検討を実施する。

3. 達成目標

[最終目標（2020年度）]

分離・回収コスト1,000円台/t-CO₂を見通せる火力発電設備の設計技術確立

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

9) 機動性に優れた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CO₂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、機動性に優れた広負荷帯高効率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とする。

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。

1. 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 「CO₂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CO₂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を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CO₂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CO₂を一部系統内にリサイクルすることにより、CO₂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、CO₂の100%回収が可能であるため、CO₂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。CO₂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「CO₂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CO₂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、O₂/CO₂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)]

CO₂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)]

CO₂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CO₂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 「次世代火力発電技術推進事業」

[実施期間] 2016年度～2021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CO₂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、そして、CO₂の回収、貯留・利用の推進が重要である。また、日本の優れた火力発電技術を海外に展開していくことにより、地球規模での温暖化問題の解決を推進していく必要がある。

2. 具体的研究内容

最新の技術動向や社会情勢、社会ニーズに合わせ、国内外の火力発電技術分野における最新技術の普及可能性及び技術開発動向等の調査や新規技術開発シーズ発掘のための、CCT関連やCCS関連の調査を実施する。また、IEA/CCC(Clean Coal Centre)、IEA/FBC(Fulldized Bed Combustion)、GCCSI(Global CCS Institute)等に参画し、技術情報交換・各種技術情報収集を行うとともに、国内関係者への情報提供を行う。また、今後の国際市場における日本の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。

3. 達成目標

[最終目標（2021年度）]

火力発電技術分野において、CO₂排出量低減、環境負荷低減及び国際競争力の強化を図るために必要となる基礎的情報や、最新情報の収集・解析及び将来における次世代火力の技術開発や導入可能性について、関連技術の適応性、課題等の調査を行う。また、海外との協力を通して、我が国の優れたCCTの導入に向けた取組を行う。

研究開発項目⑦ 「次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発」

[実施期間] 2017年度～2021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（2021年度）]

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

4. その他重要事項

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

研究開発スケジュール

◇中間評価 ◆事後評価

年度(西暦)	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	2019	2020	2021	2022	2023
研究開発項目① 石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業 1) 酸素吹IGCC実証(1/3助成) 2) CO ₂ 分離・回収型酸素吹IGCC実証(2/3、1/3助成) 3) CO ₂ 分離・回収型IGFC実証(1/2助成)					※1						◇					◆
研究開発項目② 高効率ガスタービン技術実証事業 1) 1700℃級ガスタービン(1/2助成) 2) 高温分空気利用ガスタービン(AHAT)(2/3助成)					※1						◇				◆	
研究開発項目③ 先進超々臨界圧実用化要素火力発電技術開発(2/3助成)					※1											
研究開発項目④ 次世代火力発電基盤技術開発																
1) 次世代ガス化システム技術開発(委託)										※2						
2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究(委託)										※2						
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 ₂ 分離型化学燃焼石炭利用技術開発(委託)										※2						
6) 石炭火力の競争力強化技術開発(委託)																
7) CO ₂ 有効利用技術開発(委託)																
8) 流動床ガス化燃焼を応用した石炭利用技術開発(委託)																
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(委託)																
研究開発項目⑤ CO ₂ 回収型次世代IGCC技術開発(委託)										※2						
研究開発項目⑥ 次世代火力発電技術推進事業(委託)																
研究開発項目⑦ 次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発(1/2助成)																

※1 経済産業省にて実施したプロジェクトで2016年度からNEDOへ移管
 ※2 NEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施

添付資料 2

【特許】

④ 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 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	公開 未請求	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	公開 未請求	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	公開 未請求	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	公開 未請求	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	国内	2019/2/25	未公開 未請求	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	国内	2019/2/25	未公開 未請求	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

【論文】

a.国内投稿

④ 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	岸沢 浩	SOFC 燃料電池コージェネレーションについて	Engine Review, Vol. 9 No. 1, 2019	有	2018/12
2	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	2018/12

b.海外投稿

無し

【外部発表】

(a)学会発表・講演

④ 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	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MHPS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
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	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	ファイナセラムックス関連団体連絡協議会	2017/10/26
3	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
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	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り組み	地球環境関西フォーラム 第 12 回地球温暖化対策シンポジウム	2017/11/24
5	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
6	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

7	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
8	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

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

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 若松研究所の取り組み	第 55 回石炭科学会議	2018/10/29
3	須藤 哲郎	電源開発(株) 若松研究所石炭ガス利用システム研究G	燃料電池用石炭ガスクリーンナップ技術要素研究	第 27 回 SOFC 研究発表会	2018/12/13

④ 4) 燃料電池石炭ガス適用性研究

(2) 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 若松研究所の取り組み	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 回燃料電池シンポジウム	2019/5/23

(b)新聞・雑誌等への掲載

④ 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	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・販売を行う合併会社の設立・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

(c)その他

展示会

④3) 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	スマートエネルギーWeek2018 次世代火力発電 EXPO	2018/2/28~3/2
2	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

④3) 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