

資料 7 - 1

複製 禁 ず

「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／  
④次世代火力発電基盤技術開発／  
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」

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	i
-----	---

プロジェクト用語集	v
-----------	---

1. 事業の位置付け・必要性について	1-1.1
1-1. 事業の背景・目的・位置づけ	1-1.1
1-2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	1-2.1
1-2.1 NEDO が関与することの意義	1-2.1
1-2.2 実施の効果（費用対効果）	1-2.1
<b>2. 研究開発マネジメントについて</b>	<b>2-1.1</b>
2-1. 事業の目標	2-1.1
2-2. 事業の計画内容	2-2.1
2-2.1 研究開発の内容	2-2.1
2-2.2 研究開発の実施体制	2-2.7
2-2.3 研究開発の運営管理	2-2.8
2-2.4 研究開発成果の実用化に向けた マネジメントの妥当性	2-2.9
2-3. 情勢変化への対応	2-3.1
2-4. 評価に関する事項	2-4.1
<b>3. 研究開発成果について</b>	<b>3-1.1</b>
3-1. 事業全体の成果	3-1.1
3-2. 研究開発項目毎の成果	3-2.1
<b>4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて</b>	<b>4-1.1</b>
4-1. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて	4-1.1

### （添付資料）

- ・ 添付資料 1) カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発 基本計画
- ・ 添付資料 2) プロジェクト開始時関連資料（平成 29 年度成果報告書 エネルギー・環境新技術先導プログラム／機動性に優れる広負荷帯高効率 GT の開発）
- ・ 添付資料 3) 特許論文等リスト
- ・ 添付資料 4) 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電システムの検討
- ・ 添付資料 5) Numerical Simulation of CO Concentration on Flame Propagation in the Vicinity of the Wall-Validity of Non-Adiabatic FGM Approach

# 概要

		最終更新日	2021年9月17日																	
プロジェクト名	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	プロジェクト番号	P16002																	
担当推進部/ PMまたは担当者	環境部 中元 崇（2018年7月～2019年3月） 環境部 新郷 正志（2019年4月～2021年10月現在）																			
0. 事業の概要	<p>本研究では、再生可能エネルギー電源の大量導入時代を見据え、電力系統安定とCO<sub>2</sub>排出量削減を両立する、機動性に優れ（起動時間の短縮、出力変化速度の向上、最低出力の引き下げ）、かつ部分負荷帯も含めて高効率なGTCC技術を実現するために必要な要素技術を開発することを目的とする。実現の鍵となる数値解析技術、材料技術、燃焼技術、空力技術、制御技術、クリアランス制御技術などの具体的な要素技術開発を実施する。また、ユーザにとって設備信頼性とコスト削減を両立させる上で重要となる、合理的な設備保守技術の開発に向けた調査にも取り組む。並行して、他技術との経済性比較調査を行うとともに、後継となる実証研究計画の策定も進める。</p>																			
1. 事業の位置 付け・必要性について	<p>2050年にCO<sub>2</sub>排出量実質ゼロ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。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。</p> <p>火力発電は、需給調整や周波数調整など系統安定化に重要な役割を果たしている。2019年6月に閣議決定した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」において、「火力発電については、再生可能エネルギーに対応するための調整力としての役割が増してきている。このため、新設及び既設火力発電所の運用改善・改修を通じて、より短時間での出力調整や部分負荷運転時の効率向上を図っていくことが重要である」とし、火力発電の調整力としての重要性がさらに増していることが示されている。</p>																			
2. 研究開発マネジメントについて																				
事業の目標	<p>再エネ電源の大量導入時代を見据え、系統安定とCO<sub>2</sub>排出量削減を両立する、下表のような機動性に優れ（起動時間の短縮、出力変化速度の向上、最低出力の引き下げ）、かつ部分負荷帯も含めて高効率なGTCC技術を実現するために必要な要素技術を開発することを目的とする。</p> <p>なお、表中の定量値は、再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発(2016)で取り纏めた2030年における目標値である。</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>起動時間 (ホットスタート)</th> <th>出力変化速度</th> <th>1/2 負荷における定格からの効率低下 (相対値)</th> <th>最低出力</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>開発目標</td> <td>10分</td> <td>20%/分</td> <td>-10%</td> <td>10% (一軸式)</td> </tr> <tr> <td>(参考) 現状性能</td> <td>60分</td> <td>5%/分</td> <td>-15%</td> <td>45%程度</td> </tr> </tbody> </table>						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	開発目標	10分	20%/分	-10%	10% (一軸式)	(参考) 現状性能	60分	5%/分	-15%	45%程度
	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																
開発目標	10分	20%/分	-10%	10% (一軸式)																
(参考) 現状性能	60分	5%/分	-15%	45%程度																
事業の計画内容	主な実施事項	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	合計														
	① 低負荷運用時の高性能燃焼器の開発	16	281	331	238	866														
	② GT全体制御技術の開発	10	19	20	19	68														

	③ 軽量動翼の開発	11	39	39	60	149
	④ 軽量/長寿命ロータの開発	10	23	31	30	94
	⑤ クリアランスコントロール技術の開発	3	42	52	55	152
	⑥ GTCC システムの成立性・性能評価	15	42	51	52	160
	⑦ 機器損傷劣化と保守管理技術の調査	3	4	2	3	12
	⑧ 既存技術との経済性比較調査	3	3	3	3	12
	⑨ 実証研究計画の策定	4	4	3	4	15
事業費推移 (会計・勘定別に NEDO が負担した実績額を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	総額
	特別会計 (電源・需給の別)	75	457	532	464	1,528
	総 NEDO 負担額	75	457	532	464	1,528
	(委託)	75	457	532	464	1,528
開発体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 資源・燃料部 石炭課				
	プロジェクトリーダー	一般財団法人電力中央研究所 エネルギー変換・エネルギー貯蔵研究本部 プラントシステム研究部門長 研究参事 渡辺 和徳				
	プロジェクトマネージャー	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部 主査 新郷 正志				
	委託先	【委託先】 一般財団法人電力中央研究所、三菱重工業株式会社  【再委託先】 国立大学法人京都大学、国立大学法人大阪大学、国立大学法人東京大学、 国立研究開発法人物質・材料研究機構、 三菱パワー株式会社				
情勢変化への対応	<p>グリーンイノベーション成長戦略が発表され、2050 年には、発電量の約 50～60%を再エネで賄い、原子力と火力は合わせて 30～40%とすることが示されており、出力変動が大きい再エネ電源が増加する一方で、これまで出力調整のみならず慣性力といった調整力を担ってきた GTCC を含む大型発電機器が大幅に減少することになる。</p> <p>これにより、本技術開発の重要性が高まり、早期の社会実装が望まれる。</p>					

評価に関する事項	事前評価	—
	中間評価	—
	事後評価	2021 年度 前倒し事後評価実施
3. 研究開発成果について	<p>【事業全体】</p> <p>本プロジェクトでは、機動性に優れ、かつ部分負荷帯も含めて高効率な GTCC 技術を実現するために必要な、燃焼器、制御、軽量動翼・ロータ、クリアランス制御等の要素技術を開発し、所期の目標を達成した。実機を対象にこれら技術を導入し、技術実証に移行できるレベルに到達している。本プロジェクトにより、再エネ導入拡大時における系統安定化と CO<sub>2</sub> 排出量削減に貢献する有力な技術の実現に大きく前進した。</p> <p>【主要研究開発項目】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高性能燃焼器の開発では、低負荷時の環境負荷性能を満足する燃焼器の仕様を選定し、改良設計した実燃焼器での一酸化炭素低減効果を確認した。</li> <li>・ GT 全体制御技術の開発では、燃料と空気の比を遅れなく制御する手法を立案／開発し、目標性能を達成できる見込みを得た。</li> <li>・ クリアランスコントロール技術の開発では、メタル温度制御によるクリアランス制御構造の概念設計を実施。AI を駆使したバーチャルセンサによるクリアランス予測技術を開発した。</li> </ul>	
	投稿論文	「査読付き」4 件、「その他」20 件
	特 許	「出願済」2 件、（うち国際出願 1 件） 特記事項：コア技術となる燃焼性向上について、基本特許を出願
	その他の外部発表（プレス発表等）	—
	4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて	出力変化速度向上や最低負荷引き下げの改善に関する、部分負荷運用範囲を拡大ならびに高負荷変化率に対応した燃焼器およびその制御技術、アクティブクリアランスコントロール技術については、実機適用に移れる段階にある。軽量動翼や軽量/長寿命ロータについても、製造実証を経た後、市場導入していく計画である。市場ニーズを捉えて順次実機適用を進められる見通しを得た。
	作成時期	2016 年 1 月 作成

<p>5. 基本計画に関する事項</p>	<p>変更履歴</p>	<p>2016年4月 研究開発項目追加、スケジュール変更</p> <p>2016年9月 研究開発項目追加、スケジュール変更</p> <p>2017年2月 研究開発の目的・目標・内容の追加、知財マネジメント追加</p> <p>2017年5月 研究開発実施体制変更</p> <p>2017年6月 研究開発項目④の中間評価の実施項目追加</p> <p>2018年2月 研究開発項目①の2)、3)の助成率を変更 研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発9) 機動性に優れる広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</p> <p>2018年7月 研究開発実施体制変更</p> <p>2018年9月 PLの変更、研究開発の実施期間の変更 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</p> <p>2019年1月 研究開発項目②1)の助成率の変更、研究開発項目④9)の最終目標を詳細な記載に変更</p> <p>2019年7月 和暦から西暦へ表記修正、研究開発項目・スケジュール表の修正</p> <p>2020年2月 基本計画の名称変更、基本計画「クリーンコール技術開発」の統合による記載内容の移管</p> <p>2020年3月 委託先等以外の第三者の土地に設置した資産の処分方法、(5)その他において追記</p> <p>2020年7月 研究開発の実施体制、研究開発項目の変更</p> <p>2020年9月 研究開発体制変更</p> <p>2020年10月 研究開発体制変更</p> <p>2021年1月 研究開発の目的・目標・内容(1)(2)において内容の追加</p> <p>2021年5月 研究開発体制変更</p> <p>2021年6月 研究開発の目的・目標・内容(3)研究開発項目の名称変更</p> <p>2021年7月 データマネジメントに係る運用における対象研究開発項目の変更</p>
----------------------	-------------	---

## プロジェクト用語集

用語	定義・解説
ACC	Active clearance control（動的翼端間隙制御）、運転状態でタービンの翼先端部間隔をコントロールする構造システム。漏れの低減による効率向上、静止部と回転部の接触防止による信頼性向上が図れる。
AM	Additive manufacturing（積層造形）、3D プリンティングによる金属加工技術の一つ。材料を積層することによって立体物を造形する手法
CCD	Counter clockwise diamond（ここではひずみ波形と温度波形の位相が IP と OP の中間位相のこと）
CCUS	Carbon capture, utilization and storage（二酸化炭素回収・利用・貯留）
CFD	Computational fluid dynamics（数値流体力学）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、流れを可視化して観察・観測・設計する手法
CMC	Ceramic matrix composites（セラミック基複合材料）は耐熱性、硬度、高温強度に優れたセラミックスと、繊維、粒子などと組み合わせて複合化し、強度、靱性を向上させた材料
CO-TALIF 法	CO-two photon absorption Laser Induced Fluorescence（二光子吸収レーザー誘起蛍光法）CO 濃度測定方法の一つ
DED	Direct Energy. Deposition（指向性エネルギー堆積法）、噴射ノズルから粉末を供給しつつ、同時にレーザーで熱を加える事で熔融結合していく造形方式
DSS	Daily start and stop（日間起動停止）、電力需要の変化により、発電設備を毎日起動停止すること
EDX 分析	電子線や X 線などの一次線を物体に照射した際に発生する特性 X 線（蛍光 X 線）を半導体検出器に導入し、発生した電子-正孔対のエネルギーと個数から、物体を構成する元素と濃度を調べる元素分析手法
EOH	equivalent operating hours（等価運転時間）、機械装置は、起動・停止や出力の変動によって通常の連続運転よりも負荷がかかるため、寿命に影響するこれらの回数を考慮し同等の連続運転時間とみなせる運転時間のこと。
FAC	Flow Accelerated Corrosion（流れ加速腐食）、配管壁（鉄）の水中への溶出（腐食）が流れにより促進される現象
GT	Gas turbine（ガスタービン）
GTCC	Gas turbine combined cycle（ガスタービン複合発電）
HCF	High Cycle Fatigue（高サイクル疲労）、疲労破壊繰返し数が 10 の 5 乗回程度以上の疲労現象
HRSG	Heat Recovery Steam Generator（排熱回収ボイラ）
IGV	Inlet guide vane（圧縮機入口案内翼）、圧縮機吸込口に取り付けられた翼。角度を変えることにより吸い込まれる空気量を調整
IP	In Phase、ここではひずみ波形と温度波形の位相が同相のこと
IR	Internal Rate of Return（内部収益率）、投資によって得られると見込まれる利回り
LCF	Low cycle Fatigue（低サイクル疲労）、疲労破壊繰返し数が 10 の 5 乗回程度以下の疲労現象

用語	定義・解説
LFC	Load Frequency Control (負荷周波数制御)、電力系統の周波数偏差、連系線潮流の変動を検出して制御信号を発電所に伝送し、発電所出力を自動制御)
Nf	破断寿命 (破断繰返し数)
OP	Out of Phase、ここではひずみ波形と温度波形の位相が逆相のこと
PV	Photovoltaic (太陽光発電)
RANS	Reynolds averaged numerical simulation、数値解析手法のひとつ。速度、圧力などの物理量を平均値と変動 (揺らぎ) とに分解して Navier-Stokes 方程式に代入し平均化して得られる方程式を数値的に解析
SA	Spalart-Allmaras 数値流体解析における乱流モデルのひとつ
SCR	Selective Catalytic Reduction (選択触媒還元脱硝装置)、GT 排ガスからの NOx 除去の方法
SEM	scanning electron microscope (走査型電子顕微鏡)
SLM	Selective Laser Melting (選択的レーザー溶融法)、金属積層造形法の一つである粉末床溶融結合の内、レーザーを熱源とする方式
SNSP	System Non-Synchronous Penetration、再エネ電源出力と域外から輸入する電力の和の、需要と域外へ輸出される電力の和に対する上限比率
T1T	Turbine inlet temperature (タービン入口ガス温度)
TBC	Thermal Barrier Coating (遮熱コーティング)、ガスタービン高温部品にセラミックスを表面にコーティングすることにより高温の燃焼ガス、から金属基材を保護する
TIG 溶接	Tungsten Inert Gas (タングステン-不活性ガス溶接)、電気を用いたアーク溶接方法の一つ。電極棒に消耗しない材料のタングステンを使用。
VRE	Variable Renewable Energy (変動型再生可能エネルギー)
$\Delta\epsilon$	ひずみの範囲
T1T	Turbine inlet temperature (タービン入口ガス温度)
TBC	Thermal Barrier Coating (遮熱コーティング)、ガスタービン高温部品にセラミックスを表面にコーティングすることにより高温の燃焼ガス、から金属基材を保護する



用語	定義・解説
クリアランス	翼端とケーシングの間隙
クリープ	物体が力を受け、変形が時間とともに進行する現象
ショットピーニング	ショットと呼ばれる鋼製の小さな粒子を、被加工材表面に高速で多数打当てること
ターンダウン	最低負荷運転
ひずみ	荷重が加えられたときの物体の変形量
フィルム空気	フィルム冷却とはスリットや冷却孔から流体を噴射することで火炎が直接構造体に触れないように断熱層を形成することにより冷却空気膜を形成して翼表面を保護する方法。フィルム空気はその冷却空気
マニホールド	多岐に分離させたり集合させたりする装置。ここでは HRSG の蒸気配管の集合管。
ミーゼス相当応力	多方向から複合的に荷重が加わるような応力場において、1 軸の引張り又は圧縮応力へ投影した値
レトロフィット	旧型式の機械を改装・改造して新型式にすること
ロータ	タービンロータ、タービン軸
許容応力	破壊や大変形などが生じず構造物が安全にその機能を発揮できる最大の応力
再エネ	再生可能エネルギー
最低負荷	電力系統に連系し、給電指令に対応できる発電設備の最低出力
残余需要	電力需要から PV と風力の出力を差し引いた値
残留応力	物体に作用する外力や拘束がないのに物体内に生じている応力
需給インバランス	電力の需要量（使われる分）と供給量の差分
出力制御	電力の発電出力を一時的に抑制すること。太陽光発電では、ルールにより無補償で出力を抑制する必要がある。
塑性	物体に力を加えて変形させた後、力を取除いても変形の一部あるいは全部が元に戻らないような材料特性
弾性	物体に力を加えて変形させた後、力を取除くと元の状態に戻る性質
低サイクル疲労	→LCF
動特性	系が有する動的な特性をいい、系のすべての動挙動を決定する基本的な性質
熱応力	拘束が無い状態で物体が温度変化を受けると熱膨脹や収縮によって熱ひずみを生じる。この熱ひずみが外部あるいは内部的な拘束によって自由に生じることができない場合に、弾性ひずみを発生させ、それによって生じる応力
予混合（燃焼）	燃料と酸化剤があらかじめ混合した後、反応帯に供給される形態の燃焼

# 1. 事業の位置付け・必要性について

## 1-1. 事業の背景・目的・位置づけ

### (1) 二酸化炭素排出削減に向けた国内における再生可能エネルギー導入目標と現状

COP21 で採択されたパリ協定が主要国により批准され、CO2 排出量削減に向けた国際的な枠組みで、各国の具体的な数値目標の設定や取り組みがなされている。

我が国においては、2020 年 10 月に 2050 年カーボンニュートラル宣言がなされ、2021 年 4 月には首相官邸に設置された地球温暖化対策推進本部において、2030 年度の新たな温室効果ガス削減目標として 2013 年度比で 46%削減することを目指す方針が示された。2021 年 5 月には、2050 年までに実質ゼロとする目標を明記した改正地球温暖化対策推進法が参院本会議において全会一致で可決、成立した。再生可能エネルギー（以下、再エネとも示す）電源の最大限の導入、火力発電においては CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage）や水素の実用化、原子力発電の活用などにより、可能な限り排出量削減に努めていく方向である。なお、2020 年 12 月に発表されたグリーンイノベーション成長戦略では、2050 年度の温室効果ガスの排出量実質ゼロに向けて、電源構成として発電量の約 50～60%を再エネで賄い、原子力と火力+CCUS/カーボンリサイクルは合わせて 30～40%とすることが発表されている。

2021 年 7 月に示された第 6 次エネルギー基本計画の素案では、再エネ電源比率の増大を盛り込んだ 2030 年度の電源構成が示されている（図 1.1-1）。ここでは、再エネ電源比率は 36～38%程度まで増大し、中でも太陽光発電（Photovoltaic Power Generation、以下、PV とも示す）の割合は約 15%（約 749 億 kWh）を目指すこととされている。一方、電力の需給調整を担ってきた火力発電は、2019 年の 76%程度から 41%に大きく減少する。

太陽光発電のこれまでの導入実績として、図 1.1-2 に日本における太陽光発電の累積導入量の変化を示す。2012 年に再生可能エネルギー発電促進賦課金制度が導入されて以来急激に増加し、2018 年には 5000 万 kW を超え、世界の中でも中国、アメリカに次いで第 3 位の導入量となっている。また、一般送配電事業者各管内（東京と中部を除く）における太陽光発電の接続済量と接続申込量、および接続可能量について 2014 年と 2021 年を比較すると、各エリアとも接続済量、接続申込量ともに大きく増加しており、既にほとんどのエリアで接続可能量を超える申込みがある。中でも北海道、東北、四国、九州においては、接続可能量を超える接続済量となっている。導入量の多いエリアにおいては、再エネ発電事業者に対して電力系統安定に向けた出力制御が行われるなど、現実として太陽光発電の急激な導入に伴う電力系統への影響は生じ始めている状況にある。

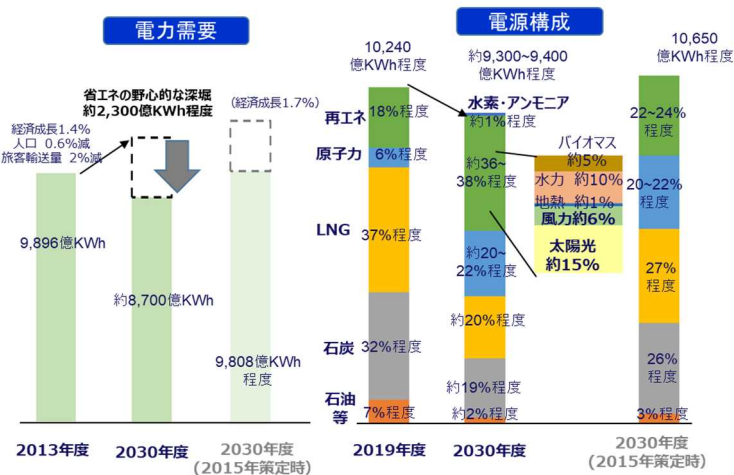


図 1.1-1 2030 年度の電力需要と電源構成 (1.1-1)

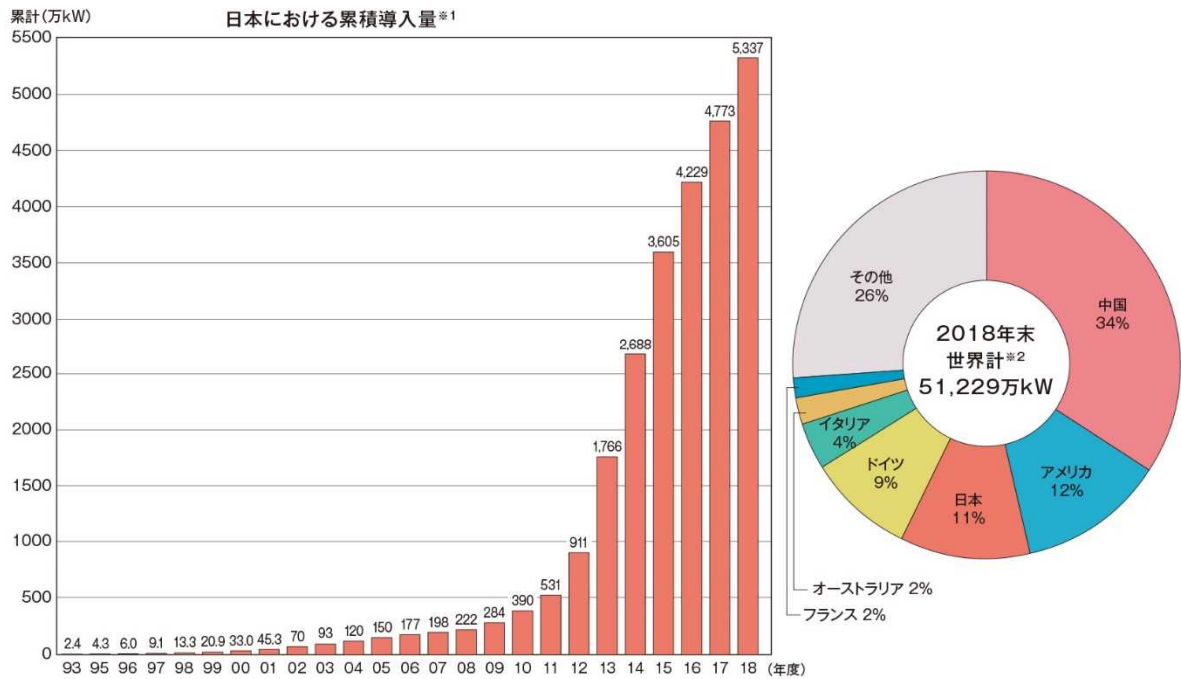


図 1.1-2 国内における太陽光発電設備導入量 (1.1-2)

## (2) 再生可能エネルギー電源の大量導入に伴う系統の課題

電力系統の需給運用の第一の目的は、時々刻々と変化する系統の状況に対して、需要と供給（発電）のバランスを維持していくことである。これまでは、需要の変化に応じて各電源の出力を調整することで需給バランスを維持してきた。その際、需給バランス維持をできるだけ経済的に行うことを狙いとして、以下のような需給運用・制御が行われている。

- ① 比較的予測がしやすい「長い周期」の需要変動（例えば日間変動）に対しては、予測結果に基づいて各電源の並解列などの運用を計画し、また、最も経済的となるように電源の出力を配分する（経済負荷配分）。
- ② ランダム性が比較的高い「短い周期」の需要変動（20分程度までの周期の変動）については、需給のバランスから決まる周波数を用いたフィードバック制御により電源の出力を調整することで対応する（負荷周波数制御、LFC (Load Frequency Control)）。

これらの需給運用・制御に用いる主たるリソースは、火力、水力などの電源であり、各電源の能力やその運用上の制約を考慮することが必要である。

一方、上述の通り、近年では地球環境問題などから、PVや風力などの再エネ電源の系統への導入が進展してきており、再エネ電源の大量導入は系統の需給運用に特に大きく影響を与える。再エネ電源の中でも導入量が特に多いPVと風力は、従来型の電源にはない、以下の特性がある。

- ・ 出力の変動性（計画的な運転が容易ではない）
- ・ 発電する時間帯の偏在（特にPV）
- ・ 導入地域の偏り
- ・ 出力予測の難しさ
- ・ インバータを介した系統への連系

これらの特性から系統に課題が生じることは、これまでも数多くの指摘がなされているが、主な課題は以下の5つに整理することができる。

- ① 発電余剰の発生への対応
- ② 再エネ電源出力の予測外れへの対応

③系統電源から見た需要カーブの変化への対応

- ・2つのピーク（朝と点灯帯）と昼の需要の大幅減
- ・需要増と再エネ出力減の重畳による変化速度増大

④系統安定性（系統擾乱時の周波数、安定度）維持のための対応

⑤短周期の変動への対応

以下にそれぞれについて課題の概要を簡単に述べる。

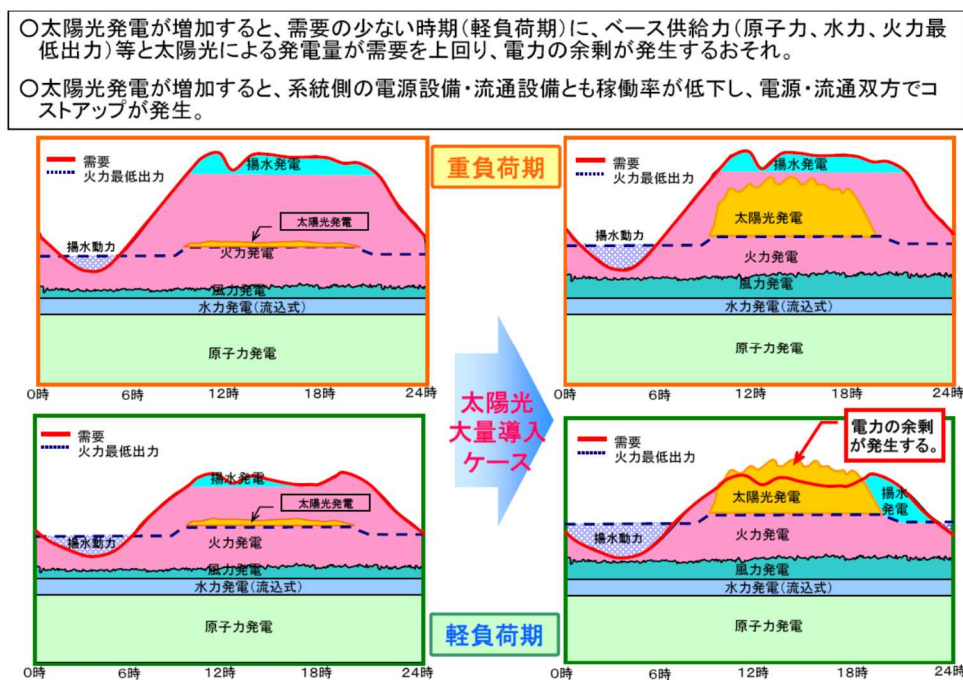
①発電余剰の発生への対応

需要の少ない時期（軽負荷期）にPVの発電量が大きくなると、ベース供給力（一定出力で運用される原子力、水力等および必要な需給調整力を確保するために並列が必要な火力等の電源の最低出力）とPVの出力の和が需要を上回り、発電電力の余剰が発生する恐れがある(図 1.1-3)。この発電余剰の発生の可能性はPVの導入量拡大の初期から指摘されており、現状の再エネ導入可能量を定める主要要因となっている。

発電余剰への対応策としては、以下が挙げられる。

- ・発電出力の下げ代の確保（最低出力の引き下げ、並列台数の低減）
- ・発電余剰の吸収（揚水機の揚水運転、電力貯蔵設備の利用）

後述するように、揚水機の揚水運転などの対応が軽負荷期には現実の運用として行われている状況にある。



資源エネルギー庁 電力・ガス事業部「系統安定化対策のオプションについて」, P.5 より引用<sup>(1.1-3)</sup>

## ②発電出力の予測外れへの対応

PV や風力の再エネ電源は、その出力が天候により左右されるため、出力の予測誤差が生じることは避けられず、例えば出力が予測よりも下回った場合、誤差分の供給力は他のリソースによる予備力を用いることでカバーする必要がある。出力の予測誤差は気象条件の予測精度に依存し、これまで数多くの研究、技術開発が行われているが、広範囲に大量の PV や風力が導入された場合の予測誤差の特性は現時点では未知であり、また、現状で確保されている予備力（需要の 8-10%程度）に対して、予測誤差が十分に小さくなる見通しは得られていない。このため、再エネ電源の大量導入条件下では、需給運用の前日計画段階で確保する予備力を増加することが必要となると予想される。この場合、出力増加方向の予備力である上げ代を確保するため、火力電源等の調整電源の出力を低めに抑えて運用することとなり、調整電源の利用率が低下することが懸念される。

出力の予測誤差への対応策としては以下が挙げられる。

- ・ 発電出力の上げ代の確保（並列台数の増加、急速に起動・並列が可能なユニットの利用）
- ・ 発電出力の下げ代の確保（日間での起動・停止が可能なユニットの利用）

上げ代と下げ代がそれぞれどの程度必要かは、出力の予測誤差の特性に依存するが、上げ代確保の対応である並列台数増加が余剰対策にはマイナスに働くといった難しさがある。

## ③系統電源から見た需要カーブの変化への対応

PV の特性の一つとして、発電する時間帯が偏在すること、具体的には昼間の時間帯のみに発電することが挙げられる。このため、残余需要（需要から PV と風力の出力を差し引いた値）のカーブは、PV の導入拡大に伴って、昼間の時間帯が落ち込む傾向を示す。昼間の需要が大きく落ち込み、電源の停止などによる下げ代の確保が必要となる一方、残余需要のピークとなる点灯帯での需要は本来の需要の増加に伴って増加しており、点灯時間帯に向けて、発電出力を短時間で大幅に増加させる必要がある。

この残余需要のカーブの変化への対応策としては以下が挙げられる。

- ・ 電源運用の柔軟性の確保（揚水機の活用、日間での起動・停止が必要なユニットの利用）
- ・ 系統大での出力変化速度の確保（並列台数の増加、出力変化速度の大きなユニットの利用）

## ④系統安定性面（系統擾乱時の周波数、安定度）の対応

以上に述べた 3 つの課題は、いずれも平常時の需給面での課題であった。これに対して、再エネ電源の導入、特に PV や風力のように変換器（インバータ）で系統に連系する電源の導入が進むにつれて、事故時の系統安定性面からの懸念が示されるようになってきている。電力系統において、事故時の安定性の維持能力は、その多くを従来型の同期機を用いる電源に負っている。同期機が有する安定性維持能力は、例えば、大電源脱落時の慣性や出力変化による需給アンバランスの軽減（周波数の大幅低下の回避に必要）、事故時の事故電流の供給（保護リレーの動作に不可欠）や無効電力供給による電圧低下の軽減（同期安定性の維持に寄与）などである。これらの能力を変換器で連系する電源から提供することは、技術開発が進められている段階であり、まだ技術が確立していない。したがって、現状の電力系統の運用においては、事故時の系統安定性確保の観点から、同期機電源を完全に変換器連系の再エネ電源に置き換えることはできず、ある程度以上の同期機電源が電力系統に並列されていることが必要となる。

このようなことから、風力の導入が進むアイルランドでは、同期機電源を一定レベル以上、電力系統に並列されていることを確保する運用が行われている。具体的には、再エネ（風力）電源出力と域外から輸入する電力の和が、需要と域外へ輸出される電力の和に対して、上限比率以下となるように運用されている。この比率は SNSP（System Non-Synchronous Penetration）と呼ばれ、現状では 55%が上限比率となっている。需要に比して風力の出力

が増加し、SNSPが上限比率を上回ると見込まれる場合には、風力の出力を抑制し、SNSPを上限比率内に留める運用が行われている(1.1-4,5)。

以上のことから事故時の系統安定性面の課題への対応策としては、以下が挙げられる。

- ・ 同期機電源の並列台数の確保（短絡容量や系統大としての慣性等、安定性維持に必要な能力の確保）

#### ⑤ 短周期の変動への対応

PVや風力の再エネ電源の出力は気象条件に依存するため、短い周期で変動する。このため、再エネ電源が大量に導入された場合には、短周期の変動に対応するための周波数調整力が不足する懸念が示されてきた(1.1-3)。PVの導入が増加するにつれて、このような短周期の変動については、地理的に分散して再エネ電源が存在することによる、系統大としての出力の均し効果があることがわかってきており、導入量の拡大に比して、必要となる短周期の調整力の増加は大きくないという見通しが得られている。しかしながら、調整力の必要量そのものは増加し、また、これまで周波数調整力を提供してきた火力電源の並列台数が減少すると調整力の必要量を確保できなくなる可能性があるため、対策が必要となる。

周波数調整力を確保するための対応策としては以下が挙げられる。

- ・ LFC幅、変化速度の大きなユニットの利用
- ・ 揚水機の可変速化（固定速の揚水機には不可能な、揚水運転時の周波数調整力の提供が可能となるため、揚水運転が見込まれる昼間時間帯の調整力確保に寄与できる）

整理すると、太陽光発電の大量導入による電力需給バランス維持に向けた主な課題として、（1）夕方から日没時の急激な太陽光発電量の減少への対応と、（2）再エネ電源由来で日中に生じる急激かつ大きな出力変動への対応の2点が重要である。そのためには、（1）に対しては急速起動や出力変化速度の向上とともに十分な量の供給力の確保が、（2）に対しては急速起動や出力変化速度の向上に加えて対応可能範囲を広げるための最低出力（＝LFC下限）引き下げが求められる。

現状では、機動性の良い揚水発電や火力発電がその役割を果たしているが、再エネ電源の大量導入時代に備えて、さらなる負荷変動対策は不可欠である。それに向けて、再エネ電源の出力予測技術の開発や、蓄電池など電力貯蔵技術の開発などが進められているものの、前者においては予測精度の向上、後者においてはコスト低減、電力の充放電損失改善、大容量化など、解決すべき課題は多い。

日本の発電電力量を見ると、年間の総発電電力量は10247億kWh（2019年度、時間平均約1.2億kW）であるが、夏季ピーク時の消費電力は1億6,500万kW（2019年度）であり、10時頃から22時頃まで高い消費が持続している。昼夜の需要変化は、毎日繰り返して発生する。22時頃まで高い電力消費が継続するため、夕方以降に日射が弱くなってからは電源として期待できない太陽光の発電量を他の電源で補完しなければならない。それには太陽光発電能力に対する補完が必要になる。風力発電の場合も、ほぼ全量について供給が期待できない状況が不規則に発生する。これらは夕刻のみならず、急激な天候変化により分・秒単位で出力変化が生じる。

#### (3) 電力系統安定化のための高機動性ガスタービン複合発電設備の必要性

電力系統の安定性を保ちつつ、太陽光・風力発電の大量導入により生じる急激で大きな残余需要に対応するには、新たな技術開発や制度設計が不可欠である。考えられる方策としては以下が挙げられる(1.1-6)（括弧内は考えられる難点）。

- ・ 揚水発電の活用（増設、再エネとの協調）
- ・ 蓄電池などの蓄エネルギーシステムの導入・活用（コスト、電力供給継続性）

- ・ 地域間連系線の活用拡大・増強（費用負担、運用ルール、安定度）
- ・ デマンドレスポンス（DR）の活用（確実な調整幅確保）
- ・ 太陽光・風力出力予測精度向上と出力抑制最適化（予測精度、経済性の確保）
- ・ 調整力の高い火力機の更なる機動性向上（新規開発）

揚水発電は、起動・停止速度が速いこと、発電のみならず余剰電力を揚水の形で特に大容量に貯蔵できること等から電力の需給調整に非常に有効な手段である。しかしながら、全国にすでに 2,700 万 kW の容量があり、立地の問題から現状以上の増設は難しく、また、揚水時と発電時においてそれぞれエネルギー損失が避けられない。

蓄電池は、その名の通り予め蓄電する必要がある、電力供給の時間的継続性の問題がある。瞬間的な小さい変動を吸収することには優れているが、夕刻や天候の急変といった大きな太陽光発電の出力変化の補完に対応するには適さない。基幹系統への集中配置より系統の末端への設置による短周期の変動吸収が比較的現実的と考えられる（ただし、この場合、周波数制御のための通信線を引くなど対応が必要）。また、蓄電池の自体での損失だけでなく、入出力時に交流⇄直流に変換するためのインバータでの損失が避けられず、現状 3 割程度の損失が生じる。

地域間連系線の活用拡大・増強や DR の活用についても、費用負担、運用ルールの策定、電力の安定度維持の課題が多く、また、変動の緩和には有効であるが、完全に吸収できるかは現状ではまだ課題が多い。

太陽光・風力出力予測精度向上も重要な取り組みであるが、自然現象を予測することに対して常に 100%的中することは不可能であり、予測外れが生じることは避けられない。

太陽光・風力発電の間欠を補完するために、必要な時にいつでも電力を供給する方策が必要である。火力発電設備は燃料を供給する限りにおいてはいつでも発電できる。また、電力系統においては発電出力だけでなく、周波数、電圧等を安定化する必要がある、火力発電設備のような回転機器は不可欠な電源である。したがって、今後も火力発電設備は電力の安定供給、品質を守る要と言える。

特に、ガスタービン（GT）やガスタービン複合発電（GTCC）は、表 1.1-1 に示すように、他の火力発電設備の中でも起動速度、負荷変化速度に優れる発電設備である。アメリカにおける電力系統での太陽光・風力発電の瞬間的な変動に対して航空転用型 GT で吸収する事例があり、GT の負荷変動吸収力の高さが示されている（ただし、それらはシンプルサイクル GT であるため、GTCC に比べ熱効率の低いことが課題である）。

表 1.1-1 各種火力発電設備の現状での運用性比較<sup>(1.1-7)</sup>

	大型 GT	GTCC	ガス汽力	微粉炭汽力
起動時間 〔 点火～全負荷 ホットスタート 〕	30 分	約 60 分	3 時間	3 時間
負荷変化率 (50-100%負荷)	10%/分	5%/分	約 5%	3%
最低負荷	-	45%	20%	20%

これまで、系統運用において需要想定誤差や周波数調整に対応するために、表 1.1-2 に分類されるように、主に火力機による予備力が確保されている。現状では、少なくとも運転予備力が前日段階で翌日の最大電力需要想定値の 8%、当日段階で当日の最大電力需要想定値の 5%、瞬動予備力が各時間の電力需要想定値の 3%（原則、運転予備力の内数）とされている。

表 1.1-2 予備力の分類<sup>(1.1-8)</sup>

分類	機能	設備
瞬動予備力	電源脱落時の周波数低下に対して即時に応答を開始し（10 秒程度以内）、少なくとも運転予備力が発動されるまで継続して自動発電可能な供給力	ガバナーフリー等
運転予備力	短時間内（10 分程度以内）で起動し、待機予備力が起動するまで継続して発電し得る供給力	部分負荷運転中の 火力発電機余力 停止待機中の水力
待機予備力	起動から全負荷をとるまでに数時間程度を要する予備力	停止待機中の火力

再エネが大量導入された場合、これら予備力がさらに重要となることが予想される。電力広域的運営推進機関の調整力等に関する委員会のその中間まとめ<sup>(1.1-9)</sup>では、総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 電力システム改革小委員会 制度設計ワーキンググループにおいて、「従来の供給予備力の必要量の概念の中では十分な配慮がなされていない、再エネ導入拡大や大規模自然災害等による電源の長期的な計画外停止への対応について、議論を行うべきである」と整理されている。また、需給バランスに対応したマージンの必要性・量の検討で、「再エネの導入拡大によって、実需給断面で対応すべき変動が非常に大きくなることを念頭に検討するべき。」とあり、再エネ大量導入時代の調整力の確保の重要性が謳われている。

夕刻から夜間にかけての大きな残余需要の変化や、規模の大きい天候の急変による比較的大きな残余需要の変化に対しては、DSS（Daily start and stop）もしくは最低負荷運転で待機させ、太陽光・風力発電が戦力外になる時に備えなければならない。汽力発電設備では、定格出力に近い高負荷域での比較的小さな出力変化は可能であるが、設備の熱容量が大きいこと、運転負荷帯による給水ポンプやバーナ切り替え、石炭火力ではミルの切り替え等も必要となるため、DSS や最低負荷からの急激な出力変化は困難である。

一方、GTCC は、DSS もしくは最低負荷運転からの急速出力上昇、急速出力低下に対し唯一対応能力がある。また、熱効率が高く、CO<sub>2</sub> の排出量が少ないと共に、必要時のみ起動できるため、化石燃料消費（CO<sub>2</sub> 排出量）の本質的抑制が可能である。しかしながら、これまでの GT、GTCC の研究開発は大型化・高効率化が目的であり、起動速度や負荷変化率等運用性の向上を主眼とした研究開発は十分なされて来なかった。

したがって、再エネ大量導入時代における電力系統安定化に貢献するため、運用性に優れた GTCC の研究開発が必要である。

#### (4) 高機動性ガスタービン複合発電設備により予想される効果

前述のように、再エネ電源の大量導入は需給バランスの維持に大きな影響を与えうる。この問題に対する抜本的な対策は再エネ電源の出力制御であり、需給バランス維持の観点から際限なく出力制御が可能であれば、問題を大きく軽減できる。しかしながら、CO<sub>2</sub> 排出量抑制に向けて再エネ電源の出力制御は最小限に抑える前提となれば、他の方策を併用して、需給バランスの維持と再エネ電源の最大利用の両方を追い求める必要がある。

ここでは GTCC の性能向上が需給バランスの維持と再エネ電源の最大利用にどのような効果があるかを定性的に整理する。ガスタービンの性能向上としては、以下の 4 つを考慮する。

- ・ 最低出力の低減
- ・ 出力変化速度の増大



- ・ 起動時間の短縮
- ・ 部分負荷効率の向上

これらの性能が向上した場合の効果を考える上で、まず再エネ電源の大量導入時における需給バランス維持の観点がある。また、需給バランス維持を系統大として経済効率的に実現することも重要である。このため、火力電源の運用コスト（燃料費と起動費の和）を考慮することとした。さらに、CO2 排出量低減にどれだけ寄与できるかも重要な観点となる。以下ではこれらの観点から GTCC の性能向上により予想される効果を整理する。

需給バランス維持の観点からは、再エネ電源の大量導入の影響は前述した 5 つの課題の内、④を除く 4 つに該当する。これらについて、GTCC の性能向上が課題の解決に寄与するかどうかの定性的な評価を表 1.1-3 に示す。ここで、表中の○は効果があることを表す。

表 1.1-3 需給バランス維持について予想される効果<sup>(1.1-10)</sup>

課題	最低出力低減	出力変化速度 増大	起動時間短縮
①発電余剰の発生	○ 系統大の最低負荷が低減し、下げ代が拡大	○ (GTCC により調整力を確保している場合) 調整力確保のための必要台数が減少し、下げ代が拡大	○ (GTCC により予備力を確保している場合) 停止していても予備力が提供できれば、予備力確保のための必要台数が減少し、下げ代が拡大
②予測外れへの対応		○ 予測外れにより生じるインバランスをより早く解消できる	○ 予測外れにより上げ代が不足した場合に、インバランスをより早く解消できる
③需要カーブの変化への対応		○ 残余需要の変化に対応するためのランプ率 <sup>*)</sup> の確保に寄与できる	
⑤短周期の変動への対応		○ 系統大での LFC の変化速度の確保に寄与できる	

\*) ここでは系統大での電源の出力変化速度を指す

CO2 排出量の低減のためには、1) 再エネ電源を活用する（出力抑制を極力少なくする）、2) 火力をなるべく効率の良い条件で運用する、3) 石炭火力の利用をなるべく抑制する、が有効と考えられる。一方、火力の運用コスト低減に対して、1) は火力の運用の抑制となるためコスト低減にプラスの効果となる。また、2) もコスト低減に寄与する。しかしながら、3) は石炭の価格が相対的に低い現状が継続する限り、火力の運用コストとしては増加する要素となる。GTCC の性能向上がどう影響を及ぼすかを考えることで、CO2 排出量および火力の運用コストの低減について予想される効果を定性的に整理することができる。

#### (5) 高機動性ガスタービン複合発電設備の開発目標

研究開発の目標としては、10分程度以内で起動し負荷・周波数調整に参加できれば、表 1.1-2 に示したように、待機予備力を運転予備力に兼ねることができ、運転予備力を確保するために効率の低い低負荷運転をする必要がなく、燃料消費量や CO2 排出量削減に貢献できる。また、現在太陽光発電設備の導入が進んでいる地域での需給調整に揚水発電が非常に貢献しており、その運用性（停止状態から 10 分以内で最大出力<sup>(1.1-11)</sup>、緊急起動～最大出力まで 2 分程度<sup>(1.1-12)</sup>）も目安になる。したがって、10 分での定格負荷までの起動が目標性能の目安として挙げられる。

#### (6) 政策的重要性

火力発電の運用性向上の必要性については、国の各種政策にも明記されている。主な内容は以下の通りである。

2016 年 6 月経済産業省の「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」には、「火力発電の高効率化の技術開発は、経済性、信頼性、運用性を確保しつつ進めることが重要」であり、「高効率化技術の進展に加え、将来的に再生可能エネルギーの拡大に伴う出力変動に対応するためには、負荷追従性を重視した系統安定化対応に貢献する技術の向上も課題であり、今後、必要な技術の開発に向けて検討を進めていく」ことが示され、国の方針として火力発電の運用性の向上の必要性やそのために必要な技術開発に取り組むことが明記された。

2018 年 7 月に閣議決定された「第 5 次エネルギー基本計画」では、「コンバインドサイクル火力発電など天然ガスの高度利用を進めるとともに、緊急時における強靱性の向上などの体制整備を進める必要がある」、「再エネについては、引き続き積極的に推進していく。そのため、系統強化、規制の合理化、低コスト化等の研究開発などを着実に進める」ことが謳われ、より具体的な方針が示された。

また、2019 年 6 月に閣議決定した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」では、「火力発電については、再エネに対応するための調整力としての役割が増してきている。このため、新設及び既設火力発電所の運用改善・改修を通じて、より短時間での出力調整や部分負荷運転時の効率向上を図っていくことが重要である」とし、火力発電の調整力としての重要性がさらに増していることが示されている。

さらに、2020 年 12 月に経済産業省が発表した「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」では、「再エネ等導入拡大に伴う調整力不足も懸念されるため、需給調整市場創設等を通じた調整力コストの低減や活用するリソースの拡大に向けた取組を進める」ことが示されている。

#### (7) 世界の取組状況

世界における GTCC の市場規模は継続的に漸増すると予想されており、特に、欧米等の先進国を中心に再エネの大量導入することに伴い、負荷変動対応応用の市場が進展することが期待できる。

2025 年以降、海外市場の内、負荷変動対応市場の割合が 5 年毎に 10% ずつ増加した場合、2040 年の市場規模は、3.2 兆円であり、さらに国内 GTCC 市場の約半分が、負荷変動対応になる場合、世界全体で合計 3.3 兆円の市場規模の拡大が期待できる。

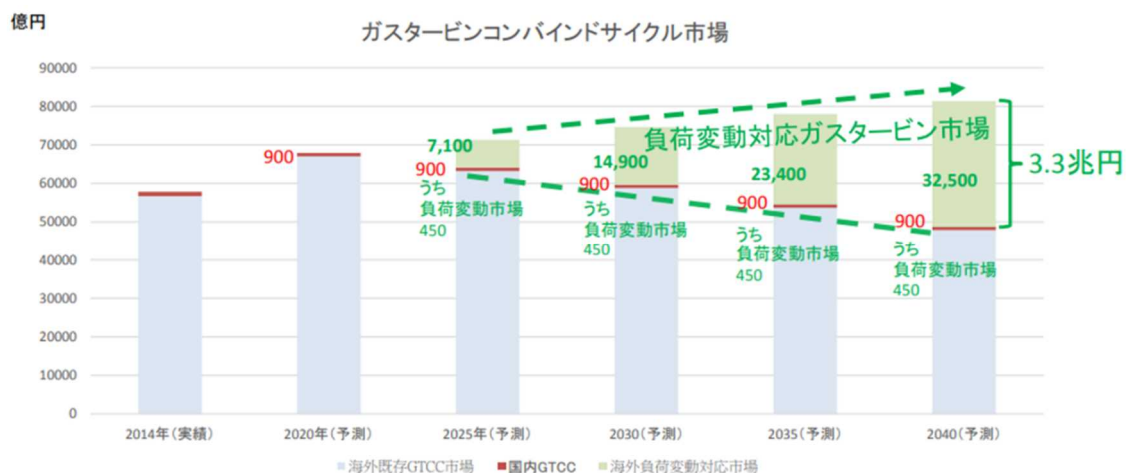


図 1.1-4 GTCC の市場予測

出典：World Wide 火力発電関連ビジネス仕様の現状と将来展望（富士経済、2015）を元に NEDO にて推計

GE の HA 型ガスタービンの性能を示す。コンバインドサイクルとしての出力は一軸で 9HA.01 型が 660MW、9HA.02 型が 826MW であり、熱効率 63%を超えている。機動性に関する性能として、負荷変化速度は 9HA.01 型が 65MW/分（9.8%/分）、9HA.02 型が 88MW/分（10.7%/分）であり、コンバインドシステムでの最低出力は両機種とも 33%、ホット起動時間は両機種とも 30 分以内としている。2016 年のカタログ（Powering the World 2016）では、9HA.02 型の負荷変化速度が 77MW/分（10.1%/分）であり、二年前に比べて性能が向上している<sup>(1.1-13)</sup>。

国外における、国家プロジェクトによる GT の研究開発の状況は以下の通りである。

米国では、図 1.1-5 に示すように、DOE（Department Of Energy）傘下の NETL（National Energy Technology Laboratory）の主導にて各種ガスタービン技術の研究開発が行われている。GE では、事業費 172 億円（\$1 = ¥105 とし）を投じ、コンバインドサイクルとしての熱効率 65%(LHV)の実現を目指して、燃焼温度 1700℃(3100°F)に向けた先進燃焼技術や材料の開発をターゲットとしている。これら以外にも超臨界圧 CO2 サイクル、圧力ゲイン燃焼関連の技術等の研究開発を推進している。

また、欧州では、図 1.1-6 に示すように、EU プロジェクト「FP7」、「Horizon 2020」にて研究開発を実施し、2014～2020 年の 7 年間に於いてエネルギー関係で 59.3 億€(7,700 億円、€1 = ¥130)、2021 年からは新プロジェクト「Horizon Europe」が開始し、2021～2027 年の 7 年間でエネルギー・気候・モビリティ関係に 152 億€(2 兆円)が投じられる。これらの中で、先進タービン技術によるフレキシブル火力発電（略称：FLEXTURBINE）の開発では、14 億円を投じて運転出力範囲の拡大や寿命／効率向上、柔軟性の向上のための研究開発が行われた。他にも燃焼器の熱音響及び空力音響非線形性の研究などが実施された。

米国、欧州共に巨額の国家予算が GTCC の技術開発に投入されている現状に鑑みると、我が国の GTCC が世界市場で競争を続けていくためには、国の支援の下で早急に技術開発に着手・実施する必要がある。他国の競合他社も政府の支援を受けながら開発を進めており、その開発競争は激化している。我が国の国際競争力の強化のためには、世界に先んじて次世代の技術を早期に確立・実用化し、いち早く海外市場を獲得することが必要である。

DOE\*1傘下のNETL\*2の主導にて各種ガスタービン技術の研究開発中。CC\*3効率65%(LHV\*4)の実現を目指し、燃焼温度1700℃(3100°F)に向けた先進燃焼技術や材料の開発がターゲット

<h2 style="color: #c0392b;">GE</h2> <p><b>【開発項目】</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① Multi-Tube Mixer : IGCC*5H2リッチ燃料向けに開発したものを天然ガスに展開</li> <li>② 高温対応セラミック基複合材料 (CMC*6)</li> <li>③ 高温対応AM*7製造技術</li> <li>④ 高温対応大型・高出力最終段タービン翼</li> <li>⑤ タービン空力伝熱制御技術</li> </ol> <p><b>【プロジェクト】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・期間： 2005～2024</li> <li>・事業総額： 172億円 (DOE補助107億円) ※\$1=¥105</li> </ul> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> <p><b>Multi-Tube Mixer</b></p> <p style="text-align: center;">Page 13</p> <p>in "Advanced Multi-Tube Mixer Combustion for 65% Efficiency, DE-FE0023965"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20GE-%20Multi-Tube%20Mixer%20for%2065%20Efficiency%20ETC%20Final%20Rev%2011%2019.pdf">https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20GE-%20Multi-Tube%20Mixer%20for%2065%20Efficiency%20ETC%20Final%20Rev%2011%2019.pdf</a></small></p> </td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> <p><b>CMC</b></p> <p style="text-align: center;">Page 1</p> <p>in "High Temperature Ceramic Matrix Composite (CMC) Nozzles for 65% Efficiency"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/node/941">https://www.netl.doe.gov/node/941</a></small></p> </td> </tr> </table>	<p><b>Multi-Tube Mixer</b></p> <p style="text-align: center;">Page 13</p> <p>in "Advanced Multi-Tube Mixer Combustion for 65% Efficiency, DE-FE0023965"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20GE-%20Multi-Tube%20Mixer%20for%2065%20Efficiency%20ETC%20Final%20Rev%2011%2019.pdf">https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20GE-%20Multi-Tube%20Mixer%20for%2065%20Efficiency%20ETC%20Final%20Rev%2011%2019.pdf</a></small></p>	<p><b>CMC</b></p> <p style="text-align: center;">Page 1</p> <p>in "High Temperature Ceramic Matrix Composite (CMC) Nozzles for 65% Efficiency"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/node/941">https://www.netl.doe.gov/node/941</a></small></p>	<h2 style="color: #2e7d32;">Siemens</h2> <p><b>【開発項目】</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 超低NOx多段燃焼システム</li> <li>② AM + CMC複合技術</li> <li>③ 軽量チタンアルミナイド翼</li> </ol> <p><b>【プロジェクト】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・期間： 2005～2024</li> <li>・事業総額： 144億円 (DOE補助88億円) ※\$1=¥105</li> </ul> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> <p><b>超低NOx多段燃焼システム</b></p> <p style="text-align: center;">Page 3</p> <p>in "Extremely Low NOx Axial Stage Combustion System"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20Siemens%20-%20Low%20NOx%20Axial%20Stage%20Combustion%20System.pdf">https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20Siemens%20-%20Low%20NOx%20Axial%20Stage%20Combustion%20System.pdf</a></small></p> </td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> <p><b>Hybrid Oxide CMC ... 冷却空気量の低減化</b></p> <p style="text-align: center;">Pages 5～6</p> <p>in "Ceramic Matrix Composite Advanced Transition for 65% Combined Cycle Efficiency, DE-FE0023955"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2017/utsr/track3/Morrison.pdf">https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2017/utsr/track3/Morrison.pdf</a></small></p> </td> </tr> </table>	<p><b>超低NOx多段燃焼システム</b></p> <p style="text-align: center;">Page 3</p> <p>in "Extremely Low NOx Axial Stage Combustion System"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20Siemens%20-%20Low%20NOx%20Axial%20Stage%20Combustion%20System.pdf">https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20Siemens%20-%20Low%20NOx%20Axial%20Stage%20Combustion%20System.pdf</a></small></p>	<p><b>Hybrid Oxide CMC ... 冷却空気量の低減化</b></p> <p style="text-align: center;">Pages 5～6</p> <p>in "Ceramic Matrix Composite Advanced Transition for 65% Combined Cycle Efficiency, DE-FE0023955"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2017/utsr/track3/Morrison.pdf">https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2017/utsr/track3/Morrison.pdf</a></small></p>
<p><b>Multi-Tube Mixer</b></p> <p style="text-align: center;">Page 13</p> <p>in "Advanced Multi-Tube Mixer Combustion for 65% Efficiency, DE-FE0023965"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20GE-%20Multi-Tube%20Mixer%20for%2065%20Efficiency%20ETC%20Final%20Rev%2011%2019.pdf">https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20GE-%20Multi-Tube%20Mixer%20for%2065%20Efficiency%20ETC%20Final%20Rev%2011%2019.pdf</a></small></p>	<p><b>CMC</b></p> <p style="text-align: center;">Page 1</p> <p>in "High Temperature Ceramic Matrix Composite (CMC) Nozzles for 65% Efficiency"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/node/941">https://www.netl.doe.gov/node/941</a></small></p>				
<p><b>超低NOx多段燃焼システム</b></p> <p style="text-align: center;">Page 3</p> <p>in "Extremely Low NOx Axial Stage Combustion System"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20Siemens%20-%20Low%20NOx%20Axial%20Stage%20Combustion%20System.pdf">https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg%20November%20%20Track%20A%2019%20UTSR%20Presentation%20-%20Siemens%20-%20Low%20NOx%20Axial%20Stage%20Combustion%20System.pdf</a></small></p>	<p><b>Hybrid Oxide CMC ... 冷却空気量の低減化</b></p> <p style="text-align: center;">Pages 5～6</p> <p>in "Ceramic Matrix Composite Advanced Transition for 65% Combined Cycle Efficiency, DE-FE0023955"</p> <p><small><a href="https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2017/utsr/track3/Morrison.pdf">https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2017/utsr/track3/Morrison.pdf</a></small></p>				

\*1 : Department Of Energy、\*2 : National Energy Technology Laboratory、  
 \*3 : Combined Cycle、\*4 : Lower Heating Value、  
 \*5 : Integrated Gasification Combined Cycle、  
 \*6 : Ceramic Matrix Composite、\*7 : Additive Manufacturing

図 1.1-5 米国における国家プロジェクトにおけるガスタービン研究開発状況 (1.1-14-16)

EUプロジェクト「FP7」、「Horizon 2020」にて研究開発を実施 (2014～2020年の7年間、エネルギー関係：59.3億€(7,700億円))。2021年～、新プロジェクト「Horizon Europe」開始 (2021～2027年の7年間、エネルギー・気候・モビリティ関係：152億€(2兆円))。 ※€1=¥130

<p><b>① 先進タービン技術によるフレキシブル火力発電 (略称：FLEXTURBINE)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 運転出力範囲を拡大するためのサージ予測制御技術</li> <li>- 劣化/損傷の防止、寿命/効率の向上のシール/ベアリング技術</li> <li>- 計画外停止の防止、稼働率/柔軟性の向上の主要コンポーネント予測、制御技術</li> </ul> <p>・期間：2016/1月～2019/3月                  ・事業総額：10.7M€(14億円) [EU補助6.5M€(8.4億円)]                  ・参画機関：GE、Siemensはじめ、23機関</p>	<p><b>② 燃焼器の熱音響及び空力音響非線形性の研究 (略称：TANGO)</b></p> <p style="text-align: right;">Fig. 37</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 燃焼器の燃焼安定性確保のため、音響/振動/渦の連成現象の解明、燃焼制御手法の開発</li> </ul> <p>in "Advances by the Marie Curie project TANGO in thermoacoustics" by M. Heckl (International Journal of Spray and Combustion Dynamics, Vol.11, pp.1-53 (2019))</p> <p><small><a href="https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1756827719830950">https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1756827719830950</a></small></p> <p>・期間：2012/11月～2016/10月                  ・事業総額：3.7M€(4.9億円) [EU全額補助]                  ・参画機関：Siemens、Ansaldoはじめ、8機関</p>
<p><b>③ 空力-熱、燃焼器-タービン相互干渉の研究 (略称：FACTOR)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 高性能・低コスト化のため、燃焼器とタービンの干渉の予測制御技術</li> </ul> <p style="text-align: center;">Fig. 1</p> <p>in "Design, Integration and Operation of a Rotating Combustor-Turbine-Interaction Test Rig within the Scope of EC FP7 Project Factor" Proc. of 13th European Conf. on Turbomachinery Fluid Dynamics &amp; Thermodynamics ETC13, (2019)</p> <p><small><a href="https://www.euroturbo.eu/paper/ETC2019-035.pdf">https://www.euroturbo.eu/paper/ETC2019-035.pdf</a></small></p> <p>・期間：2010/12月～2017/8月                  ・事業総額：7.2M€(9.4億円) [EU補助4.9M€(6.4億円)]                  ・参画機関：GE、Siemensはじめ、23機関</p>	<p><b>④ 発電用高温部品AM向け酸化物分散強化材料 (略称：OXIGEN)</b></p> <p style="text-align: right;">Figure 4.4a</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 酸化物分散強化材料用の粉末、製造技術、モニタリング用の埋込センサーの開発</li> </ul> <p>in "Oxide Dispersion Strengthened Materials for the Additive Manufacture of High Temperature Components in Power Generation"</p> <p><small><a href="https://cordis.europa.eu/docs/results/3107310279/final1-oxigen-final-report-final.pdf">https://cordis.europa.eu/docs/results/3107310279/final1-oxigen-final-report-final.pdf</a></small></p> <p>・期間：2013/2月～2017/1月                  ・事業総額：5.6M€(7.3億円) [EU補助4.0M€(5.2億円)]                  ・参画機関：GE、Siemensはじめ、10機関</p>

図 1.1-6 欧州における国家プロジェクトにおけるガスタービン研究開発状況 (1.1-17-19)

## 1-2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

### 1-2.1 NEDO が関与することの意義

二酸化炭素排出量削減のための再生可能エネルギー導入促進と電力系統安定化は、官民国全体を上げて取り組むべき重要な課題である。

火力発電の運用性向上によってこれら取り組みを指向する本事業は、広範囲にわたる革新的な技術開発を通じた基礎技術の確立と実証試験を必要とする。また、ガスタービンの技術開発はこれまで高温化・高効率化に向けて行われてきたが、本事業では機動性向上というこれまでにない新たな技術開発であり、開発リスクが高い。

事業用ガスタービンに係る燃焼、材料、制御等を含む幅広い技術分野を横断する革新的な技術開発が可能な主要な国は米・独・日の3カ国であり、我が国において重要な輸出産業である。一方、中国、インドなどの国々が台頭してきており、今後、国家間の開発競争は熾烈を極めると予想される。研究開発の難易度が高く、多大な研究開発投資を必要とする本技術開発の特性を考慮すると、今後も我が国が優位性を示すためには、民間企業だけではリスクが高く、官民がその方向性を共有する事が不可欠である。このためNEDOの関与のもとで技術開発を推進すべきである。

これらのことから、本事業はNEDOがもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業と位置付けている。

### 1-2.2 実施の効果（費用対効果）

#### (1)費用対効果

2024年までのガスタービン市場全体のプラント受注予測として、年間受注額500億円/プラント×5プラント/年とすると、2,500億円/年になる。アフターサービス比率を約50%（新規受注分とほぼ金額同等レベル）、この内、本プロジェクトによる高機動性ガスタービンに関する売上予測を10%程度と仮定すると、3年間の累計売上予測が750億円となり、プロジェクト費用の総額15.3億円に比べ大きな費用対効果が得られ、事業の妥当性を確認している。

#### (2) 火力運用コストとCO<sub>2</sub>排出量の削減

2016年度に実施したNEDO調査委託研究「再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定化における火力発電の役割とガスタービンの負荷変動吸収能力の向上によるCO<sub>2</sub>削減効果に関する調査研究」<sup>(1.1-10)</sup>では、東北、九州エリアを対象に電力需給シミュレーションを行い、ガスタービンの運用性向上による効果が算出されている。ここでは、再エネ抑制率、火力運用コストとCO<sub>2</sub>排出量削減への効果が評価されている。

なお、この評価の条件として、再エネ大量導入時のモデルケースとして、World Energy Outlook 2016（以下、WEO 2016）の450シナリオ<sup>(1.2-1)</sup>を基に、2050年の需給断面が想定されている。系統規模に対して大規模な太陽光・風力発電の導入が想定される九州エリアと東北エリアを対象とし、また、エリアに限定した検討を行うため、地域間連系線を活用した電力融通は考慮せず、連系線の電力潮流には全シナリオ共通で2015年の実績データを用いている。2050年については、エネルギー総合工学研究所（IAE）の想定<sup>(1.2-2)</sup>を基に年間総需要8,200億kWhとなるように送電端の電力需要を求めている。

その結果、2050年想定における再エネ出力抑制率（太陽光・風力の出なり出力に対する出力抑制量の比率）に関して、現状性能ケースで50%超の膨大な量となったが、性能向上ケースでは再エネ出力抑制率は約8ポイント低減することが示されている。

また、火力運用コスト、CO<sub>2</sub>排出量の変化について、①最低出力の低減、②出力変化速度の向上、③起動時間の短縮、④部分負荷効率の向上、およびそれら全項目の向上による効果をそれぞれ評価したところ、2050年断面

では、GTCC の運用性向上により再エネ抑制量が大幅に低下したことで、現状性能ケースに対して火力運用コストが 6 割以上削減、また、CO2 排出量は 4 割程度削減し、火力運用コストと双方が低減する結果が得られている。

### (3) 電力系統安定化効果

同電力需給シミュレーションでは、負荷変動対応に資するガスタービンの機動性能向上によって得られる短時間負荷変化に対する負荷追従性も評価されている。

その結果、現状性能ケースと向上性能ケースを基準に出力変化速度をそれぞれ変化させた場合の需給インバランス量について、出力変化速度の増加によって短時間負荷変化に対する追従性が高まり、需給インバランスが低下することが示されている。また、現状性能を基準に出力変化速度を向上した場合は、15%/min で飽和する傾向が見られた。これに対し、同時に最低出力の引き下げが可能であれば、調整幅の拡大によって出力変化速度向上の効果は引き上げられ、需給インバランスが大幅に低減されている。

起動時間の短縮によって最低負荷で待機するユニットが減り運用コストを低減できると期待できる。そこで、予測誤差を考慮した需給シミュレーションにより、起動時間の短縮による需給インバランスの低減効果が評価された。軽負荷期の想定断面に対して太陽光出力の予測誤差が 10%～50%生じた場合の残余需要の変化に関して、誤差のない計画時の残余需要を基に需給運用計画を作成し、予測誤差により発生する需給インバランスを求められている。その結果、起動時間の短縮によって太陽光出力の予測誤差に伴って発生する需給インバランスが低下することが示されている。

## 参考文献

- (1.1-1) エネルギー基本計画（素案）の概要、令和3年7月21日、経済産業省資源エネルギー庁
- (1.1-2) エネルギー白書 2021 経済産業省資源エネルギー庁
- (1.1-3) 系統安定化対策のオプションについて、低炭素電力供給システムに関する研究会 第2回資料、資源エネルギー庁電力・ガス事業部、2008  
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g80808a03j.pdf>
- (1.1-4) EirGrid, All Island TSO Facilitation of Renewables Studies, 2010  
<http://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/Facilitation-of-Renewables-Report.pdf>
- (1.1-5) EirGrid, Ensuring a Secure, Reliable and Efficient Power System in a Changing Environment, 2011  
<http://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/Ensuring-a-Secure-Reliable-and-Efficient-Power-System-Report.pdf>  
〔URL はいずれも 2017 年 3 月に確認〕
- (1.1-6) 再生可能エネルギー時代の火力発電“新たな役割と価値”、  
一般社団法人 火力原子力発電技術協会、2014 年 7 月
- (1.1-7) 火原協会講座 37「コンバインドサイクル発電」、火力原子力発電技術協会
- (1.1-8) 電力需給解析モデル標準化調査専門委員会編、電力需給・周波数シミュレーションの標準解析モデル、  
2016
- (1.1-9) 電力広域的運営推進機関「調整力等に関する委員会 中間まとめ」2016 年 3 月 29 日  
[https://www.occto.or.jp/oshirase/kakusfuiinkai/chousei\\_torimatome.htm](https://www.occto.or.jp/oshirase/kakusfuiinkai/chousei_torimatome.htm)（2016 年 4 月確認）
- (1.1-10) 2016 年度 NEDO 調査委託研究「再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定化における火力発電の役割とガスタービンの負荷変動吸収能力の向上による CO2 削減効果に関する調査研究
- (1.1-11) 向井一馬、宇藤祐悦、「電力系統の品質向上に寄与する水力発電技術」、東芝レビュー Vol.58 No7 (2003)
- (1.1-12) 九州電力ホームページ、  
[http://www.kyuden.co.jp/power\\_usages\\_faq\\_yousui.html](http://www.kyuden.co.jp/power_usages_faq_yousui.html)（2016 年 4 月確認）
- (1.1-13) Powering the Future with Gas Power Systems gepower.com Offerings I 2018  
<https://pdf.directindustry.com/pdf/ge-gas-turbines/powering-future-gas-power-systems-gepowercom-offerings-i-2018/34155-891083.html>
- (1.1-14) “High Temperature Ceramic Matrix Composite (CMC) Nozzles for 65% Efficiency”,  
Page 1, <https://www.netl.doe.gov/node/941>
- (1.1-15) “Extremely Low NOx Axial Stage Combustion System”, Page 3,  
<https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-11/2019%20UTSR%20Project%20Review%20Mtg/November%205/Track%20A/North.pdf>
- (1.1-16) “Ceramic Matrix Composite Advanced Transition for 65% Combined Cycle Efficiency, DE-FE0023955”, Page 5-6, <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/event-proceedings/2017/utsr/track3/Morrison.pdf>

- (1.1-17) "Design, Integration and Operation of a Rotating Combustor-Turbine-Interaction Test Rig within the Scope of EC FP7 Project Factor" Proc. of 13th European Conf. on Turbomachinery Fluid Dynamics & Thermodynamics ETC13, (2019),  
<https://www.euroturbo.eu/paper/ETC2019-035.pdf>
- (1.1-18) "Advances by the Marie Curie project TANGO in thermo acoustics" by M. Heckl (International Journal of Spray and Combustion Dynamics, Vol.11, pp.1-53 (2019),  
<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1756827719830950>
- (1.1-19) "Oxide Dispersion Strengthened Materials for the Additive Manufacture of High Temperature Components in Power Generation",  
<https://cordis.europa.eu/docs/results/310/310279/final1-oxigen-final-report-final.pdf>
- (1.2-1) IEA: "World Energy Outlook 2016", 2016
- (1.2-2) エネルギー総合工学研究所 : 「2050 年に向けたエネルギー技術ビジョン」、  
第 31 回エネルギー総合工学シンポジウム、2016



## 2. 研究開発マネジメントについて

### 2-1. 事業の目標

本プロジェクトでは、再エネ電源の大量導入時代を見据え、系統安定と CO2 排出量削減を両立する、下表のような機動性に優れ（起動時間の短縮、出力変化速度の向上、最低出力の引き下げ）、かつ部分負荷帯も含めて高効率な GTCC 技術を実現するために必要な要素技術を開発することを目的とする。

GT 発電設備研究開発の目標としては、10 分程度以内で起動し負荷・周波数調整に参加できれば、表 1.1-2 に示したように、待機予備力を運転予備力に兼ねることができ、運転予備力を確保するために効率の低い低負荷運転をする必要がなく、燃料消費量や CO2 排出量削減に貢献できる。また、現在太陽光発電設備の導入が進んでいる地域での需給調整に揚水発電が非常に貢献しており、その運用性（停止状態から 10 分以内で最大出力<sup>(1.1-11)</sup>、緊急起動～最大出力まで 2 分程度<sup>(1.1-12)</sup>）も目安になる。したがって、10 分での定格負荷までの起動が目標性能の目安として挙げられる。

表2.1-1 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
開発目標	10 分	20 %/分	-10 %	10 % (一軸式)
(参考) 現状性能	60 分	5 %/分	-15 %	45% 程度

\* ) 表中の定量値の出典：再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発(2016)で取り纏めた 2030 年における目標値

本プロジェクトでは、F 型機以上の設備容量を持つガスタービンを用いた発電用大型 GTCC（30 万 kW 程度以上に相当）を想定し、先行研究より得られた成果、ならびに、さらなる検討が必要な課題を踏まえ、実現の鍵となる数値解析技術、材料技術、燃焼技術、空力技術、制御技術、クリアランス制御技術などの具体的な要素技術開発を実施する。また、ユーザにとって設備信頼性とコスト削減を両立させる上で重要となる、合理的な設備保守技術の開発に向けた調査にも取り組む。並行して、他技術との経済性比較調査を行うとともに、後継となる実証研究計画の策定も進める。

なお、本プロジェクトにおける最終目標（2021 年度）を以下とする。

- ・ 先行研究で設定した目標性能（表 2.1-1）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。【研究項目①、②】
- ・ 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【研究項目①、②、⑤】と GT 後流（HRSG－蒸気タービン側）の成立性・性能評価【研究項目⑥】、急速起動に寄与する動翼・ロータの軽量化【研究項目③、④】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。【研究項目⑦】
- ・ 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。【研究項目⑧】
- ・ 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。【研究項目⑨】

## 2-2. 事業の計画内容

### 2-2.1 研究開発の内容

#### (1) 個別研究テーマの計画内容

研究項目①「低負荷運用時の高性能燃焼器の開発」（三菱重工業株式会社）

##### ①-1 部分負荷運用範囲の拡大に関する燃焼器改良設計（三菱重工業株式会社）

従来なしえなかった低負荷で運用する場合、燃焼器における燃焼温度が低下し、未燃分である一酸化炭素の排出量増大、火炎の不安定化等の事象が発生すると考えられている。これらの発生が制限となり、部分負荷運用が可能な負荷条件範囲が限定される可能性がある。本研究では、燃焼器を主としたガスタービンシステムの改良（燃焼器内部のフローパターン、空気配分等の適正化など）により、燃焼温度が低い条件においても未燃分の発生を抑制し、安定な火炎を実現する燃焼器仕様の選定を完了する。

##### ①-2 部分負荷運用性能予測技術の開発（京都大学に再委託）

部分負荷運用時においては、研究開発項目①-1 において記載のとおり一酸化炭素等の未燃分の発生が主たる課題となる可能性が指摘されている。本研究では、部分負荷運用時の性能評価技術として、実燃焼器を対象とした数値シミュレーション（LES）による未燃分発生の評価を実施する。実燃焼器の解析により、改良設計の一酸化炭素低減効果を予測すると共に、モデルバーナを対象とした解析により、一酸化炭素発生に関する予測精度の確認を完了する。

##### ①-3 一酸化炭素発生予測に関する検証データの取得（大阪大学に再委託）

部分負荷運用において問題となる一酸化炭素の発生は、冷却空気と火炎の接触による消炎現象等が複雑に関係していると考えられており、実燃焼器を対象とした場合、その現象を正確に把握する事が困難と考える。本研究では、シンプルなモデルバーナを対象として、一酸化炭素の発生に関する基礎試験を実施し、一酸化炭素発生の予測評価に関する検証データを4年間で取得する。データ取得に必要な一酸化炭素の濃度計測に関しては、従来のガスサンプリング法では一酸化炭素の酸化反応が進行し、精度の高い一酸化炭素濃度の計測が困難である。そのため、非接触計測法（光学計測）による一酸化炭素濃度計測手法を確立する。

##### ①-4 実機圧力燃焼試験による部分負荷運用性能の検証（三菱パワー株式会社に再委託）

従来なしえなかった低負荷運用における一酸化炭素の発生、また安定運転可能範囲の評価には実燃焼器による実機圧力条件での検証が必要となる。本研究では、研究項目①-1 で設計・製作した燃焼器について、試験条件の検討および実圧燃焼試験による燃焼特性の検証を実施する。検証試験では、燃焼器出口（タービン入口）温度をパラメータとして、ガス分析装置を使用し一酸化炭素および窒素酸化物濃度を計測（静定条件）する事により、GT 出力に対する排ガス性状の変化を予測する。なお、燃焼器がガスタービンの運転可能な範囲で成立することを確認するため、燃焼振動レベルや燃焼器各部のメタル温度計測も合わせて実施する。本試験では、非常に複雑な試験設備を使用する為、その運用および改造には多くのノウハウが必要であり、三菱パワー株式会社のみがその知見を有する。

## 研究項目②「GT 全体制御技術の開発」（三菱重工業株式会社）

### ②-1 高負荷変化率に対応した GT／燃焼器制御技術の研究

ガスタービンの機動性向上を図る目的で最低負荷を引き下げて負荷変化幅を拡大し、且つ高負荷変化率で運転する場合、負荷上昇時に排ガス温度高による負荷上昇渋滞ならびに燃料加熱の追従遅れによる燃焼不安定が発生する懸念がある。本研究では、燃料温度を考慮した燃空比および燃料配分比の適正化などにより、負荷変化幅を広げて且つ負荷変化率を高めた場合においても、負荷追従性と安定燃焼を両立できるガスタービン制御技術開発を 4 年間で実施する。

### ②-2 GT 単独で低負荷運転可能なシステム構成検討

ガスタービンの機動性向上を図る目的で最低負荷を従来より引き下げた場合、燃焼器における燃焼温度が低下し、NO<sub>x</sub> や CO などの大気汚染物質の排出量が従来よりも増大する懸念がある。それが制限となり、部分負荷運用が可能な負荷条件範囲が限定されている。本研究では、空気系統構成や燃料配分比を適正化することで、ガスタービン単独で低負荷運転した場合でも環境性能低下を抑制できるガスタービンシステム設計を行う。

### ②-3 GT 単独で低負荷運転可能な制御手法検討

②-2 で検討したガスタービンシステムに対して、負荷変化時などの過渡時でも成立する燃料ならびに空気系統の制御手法を 4 年間で開発する。

## 研究項目③「軽量動翼の開発」

### ③-1 鋳物寸法公差低減技術の開発（三菱重工業株式会社）

動翼を軽量化し、機動性に優れるガスタービンを実現するためには、精密鋳造にて製造されるタービン翼の薄肉化が必要と考えられている。精密鋳造法においては鋳物外面形状を形成する鋳型と、その内部に設置され鋳物内面形状を形成する中子を用いているが、製造プロセス中の鋳型と中子の温度差、熱膨張差による破損を防ぐべく、両者の間には裕度が設けられており、両者の相対位置変動により鋳物寸法公差が大きくなる要因となっている。薄肉化可能とする裕度低減技術の要素開発を 4 年間で行う。

### ③-2 鋳型・中子変形抑制技術の開発（三菱重工業株式会社）

タービン翼の薄肉化実現のためには上述した技術課題に加え、鋳造プロセスにおける鋳物寸法公差を低減するために鋳型・中子の変形を抑制する必要がある。そこで鋳型・中子の材質、製造プロセスの改良などにより、この変形を抑制する要素技術開発を 4 年間で行う。

### ③-3 新材料での小型部材作製と特性評価（国立研究開発法人物質・材料研究機構に再委託）

軽量・高強度な新材料の適用により、従来ニッケル基超合金を用いてきた動翼を軽量化し、機動性に優れるガスタービンの実現を図る。そのため、これまで国立研究開発法人 物質・材料研究機構（以下、NIMS）が開発し、その有用性を明らかにしてきた下記 2 種の軽量・高強度な新材料について、ラボスケールならびに実機相当製法で小型部材を作製するとともに、各種機械的特性、製造性、ならびに耐環境安定性等の評価を 4 年間で実施する。

### ③-3-1 新酸化物系 CMC

耐環境性が現状 CMC (SiC/SiC 複合材料) より著しく優れ、酸化物系材料としては高温強度が高い BaZrO<sub>3</sub> をマトリックスとする軽量な新酸化物系 CMC について試作・評価を行う。

### ③-3-2 新 TiAl 基合金

熱間鍛造法の適用が可能であり、大型かつ軽量な動翼の製造に適した新 TiAl 基合金について試作・評価を行う。

## 研究項目④「軽量/長寿命ロータの開発」(三菱重工業株式会社)

急速起動・負荷変動対応 GT 実現に向け、ロータ軽量化/長寿命化による負荷変動特性を向上することを目的に、ディスク冷却構造を考慮した構造成立性を確認すると共に、起動回数や負荷変動の増加に伴う低サイクル疲労強度の向上に向けた検討を行った上で、概念設計を行い、モデル試験にてその有効性を 4 年間で確認する。

## 研究項目⑤「クリアランスコントロール技術の開発」

### ⑤-1 過渡時の静止系構造物周方向変形抑制技術の開発 (三菱重工業株式会社)

急速起動時のチップクリアランスを高精度に管理するためには、過渡時の静止側の周方向変形を低減する必要があると考えられている。そこで、過渡応答シミュレーション及びモデル試験により影響を評価し、必要に応じた対策を 3 年間で検討する。

### ⑤-2 アクティブクリアランスコントロール技術の開発 (三菱重工業株式会社)

部分負荷効率向上に向けて、動翼のチップクリアランスを最小化して高効率を図ることのできる、急速起動 GT の要求特性を考慮した翼環のクリアランスコントロール技術の概念設計を実施し、実機成立性を確認すると共にモデル試験にてその有効性を確認する。なお、従来の研究では GT 最大負荷時 (定格定常) の性能を最大にするため、最大負荷時のチップクリアランスを最小化する検討が一般的であったが、本研究では急速起動時・部分負荷運転中を含めた幅広い条件下でのクリアランス変化を評価し、必要に応じて対策を検討する。また、計測の高精度化を図るべく、クリアランス計測手法についても検討し、モデル試験にてその有効性を確認する。特に、急速起動時には過渡のクリアランスが定格負荷定常状態のクリアランスよりも小さくなることに加え、負荷変化に伴う温度条件の変化にも対応した計測を行う必要があるため、定格負荷定常状態を対象にした計測よりも高精度な計測が必要となる。加えて、部分負荷運転時の効率向上には、運転中のクリアランス監視が考えられ、この場合クリアランスセンサのメンテナンスを考えるとケーシング外からのクリアランスセンサの交換が不可欠となる。そこで、ケーシング外からのクリアランスセンサ取り付けを考慮した高精度なクリアランス計測手法の検討を 3 年間で実施する。

### ⑤-3 急速起動時のターボ機械における流れと構造熱変形の連成数値解析 (東京大学に再委託)

流体 - 構造連成解析に熱解析を組み合わせた連成解析手法を構築し、ガスタービンの急速起動・負荷変動対応の過渡運転時に発生するロータの過渡的変形を的確に評価する手法を 4 年間で開発する。従来はロータの過渡的な熱変形を経験則に基づく構造解析から予測しており、本研究の手法が実現すれば、より高精度に翼端間隙などの構造物間クリアランスの過渡的变化を予測することが可能になると期待される。

## 研究項目⑥ GTCC システムの成立性・性能評価

### ⑥-1 排気系構造物の高温化対策（三菱重工業株式会社）

GT 高性能化を達成するための打ち手の 1 つとして、排ガス温度の高温化が考えられており、高温化に伴う許容応力の低下並びに熱応力の増大により、従来構造では排気系構造物の構造強度が成立しない可能性がある。そこで、急速起動時の排気ガス温度特性の影響を考慮し、高信頼性を有する構造物（材料変更、冷却方法変更、支持方法変更等）の成立可能性を検討し、更に高負荷変動を考慮した構造成立性を 3 年間で検討する。

### ⑥-2 プラントシステム性能解析（一般財団法人電力中央研究所）

開発対象とするガスタービン、熱効率が低い広負荷帯高効率ガスタービン複合発電システムとしての利用が想定される。そのため、ガスタービンのみならず蒸気系も含むシステム全体性能を示すことが必要である。そこで、先行研究で見出した有望なシステム構成を基に、さらに詳細な条件によるヒートマスバランス（静特性）解析やプラント動特性解析を行い、システム全体の熱効率ならびに起動時間や出力変化率等の各種運用性について、目標性能を達成するための条件や方策、課題を明確にする。

### ⑥-3 HRSG 構造・熱流体解析（一般財団法人電力中央研究所）

ガスタービンの高速な起動と負荷変動によって、排熱回収ボイラ（HRSG）の損傷が懸念される。そこで、HRSG を対象とした構造解析を行うことにより、急速な起動や負荷変化時に、管肉厚等の各因子が熱応力に及ぼす影響を把握するとともに、実機運転を想定した条件下での熱疲労試験による HRSG 材料への損傷影響の評価を行って、損傷が懸念される部位や条件、温度管理ポイントを明確にする。

## 研究項目⑦「熱疲労支配下における機器損傷劣化と保守管理技術の調査」（一般財団法人電力中央研究所）

先行して再エネ電源の導入が積極的に進められている欧米において、調整電源として運用されている火力発電所を調査し、急速な起動や出力変化に起因する熱疲労が、プラント機器の損傷劣化に及ぼす影響や、保守管理（寿命評価、交換時期決定の考え方、補修技術など）の最新状況について実態調査を行う。さらに、国内外学会への出席や文献調査などを通じて、急速起動や負荷変化が機器の損傷劣化に及ぼす影響、補修技術、新材料評価技術などの最新状況について調査を行う。これらによって、機器の合理的な保守管理の指針策定のための課題や方向性をユーザ視点から明らかにする。

## 研究項目⑧「既存技術との経済性比較調査」（三菱重工業株式会社、一般財団法人電力中央研究所）

本技術開発の対象である「機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電」の事業化を見据え、他の調整力電源（揚水発電、蓄電池など）との経済性比較評価を 4 年間で行う。また、既存 GTCC 等を本 GTCC に置き換えた場合を想定して、燃料コスト削減効果や、再エネ導入可能量に及ぼす効果等を明らかにする。

研究項目⑨「実証研究計画の策定」（一般財団法人電力中央研究所）

要素研究終了後の実証研究フェーズにおけるレトロフィットのサイト選定に向けて、電力会社への説明と意見交換、協力の要請等を行うとともに、実証試験の仕様を検討し、研究計画を立案する。また、必要に応じて有識者にご意見を頂戴する場を設定して社会情勢とニーズの把握に努め、計画策定に反映する。

表 2.1-2 研究開発スケジュール

研究開発項目	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度
<b>①低負荷運用時の高性能燃焼器の開発</b>	改良コンセプト 明確化	供試体 選定完了	供試体(2) 選定完了	最終供試体 選定完了
①-1. 部分負荷運用範囲の拡大に関する燃焼器改良設計 (MHI)	適切なCO予測 モデル選定完了	CO発生 領域明確化	CO低減効果 確認	CO低減 メカニズム評価
①-2. 部分負荷運用性能予測技術の開発 (京都市大)	モデルバーナ 製作図面完成	モデルバーナ 製作完了 低圧条件計測	高圧条件 計測	非接触 計測手法確立
①-3. 一酸化炭素発生予測に関する検証データの取得 (大阪大)		CO低減効果の 明確化	中間絞り 実圧試験	空気バイパス 実圧試験
①-4. 実機圧力燃焼試験による部分負荷運用性能の検証 (三菱パワー株式会社)		制御コンセプト 立案	新制御手法 の立案	新制御手法 の確立
<b>②GT全体制御技術の開発 (MHI)</b>	課題の整理			
②-1. 高負荷変化率に対応したGT/燃焼器制御技術の研究	システム構成 素案創出	コンセプト 構築		
②-2. GT単独で低負荷運転可能なシステム設計	制御手法の 素案創出	制御手法の コンセプト構築	制御手法 立案完了	制御手法 開発完了
②-3. GT単独で低負荷運転可能な制御手法開発				
<b>③軽量動翼の開発</b>	造型手法案の 抽出	課題の明確化	大型サンプル 試作	翼試作
③-1. 鋳物寸法公差低減技術の開発 (MHI)	セラミックスの 変形挙動把握	変形抑制の 課題の明確化	バラツキ低減 手法確立	翼試作
③-2. 鋳型・中子変形抑制技術の開発 (MHI)	実機適用性 明確化	大型部材製造の 課題明確化	小型部材 での検証	大型部材 での検証
③-3. 新材料での小型部材製作と特性評価 (NIMS)	構造コンセプト 決定	検証試験方法 明確化	検証試験 準備完了	試験による 効果検証
<b>④軽量/長寿命ロータの開発 (MHI)</b>				
⑤クリアランスコントロール技術の開発 (MHI)		課題と主要因 抽出	周方向変形 抑制対策構造 課題抽出	周方向変形 抑制対策構造 概念設計完了
⑤-1. 過渡時の静止系構造物周方向変形抑制技術の開発 (MHI)		課題と主要因 抽出	バーチャル センサ課題抽出	バーチャルセンサ 概念設計完了
⑤-2. アクティブクリアランスコントロール技術の開発 (MHI)	解析コード 基本部分開発	コードの 検証と改良	過渡応答解析	解析結果に基づく 現象解明
⑤-3. 急速起動時のターボ機械における流れと構造熱変形の連成数値解析 (東京大学)		課題と主要因 抽出	対策構造の 効果確認	概念設計 完了
<b>⑥GTCCシステムの成立性・性能評価</b>				
⑥-1. 排気系構造物の高温化対策 (MHI)	目標熱効率のため の条件等明確化	GTCCの 運用性評価	各種条件下 での影響解析	目標運用性のため の条件等明確化
⑥-2. プラントシステム性能解析 (電中研)				

⑥-3. HRSG構造・熱流体解析	負荷変化影響調査	調整火力損傷調査	補修技術調査	新材料評価技術調査
⑦熱疲労支配下における機器損傷劣化と保守管理技術の調査（電中研）	解析部位選定	構造・熱流体解析	構造・熱流体連成解析	熱応力評価モデル構築
⑧既存技術との経済性比較調査（MHI、電中研）	既存調整電源経済性調査	事業成立性検討	海外市場経済性調査	事業成立性検討
⑨実証研究計画の策定（電中研）	研究開発推進委員会	研究開発推進委員会	研究開発推進委員会	研究開発推進委員会

表 2.1-3 研究開発費

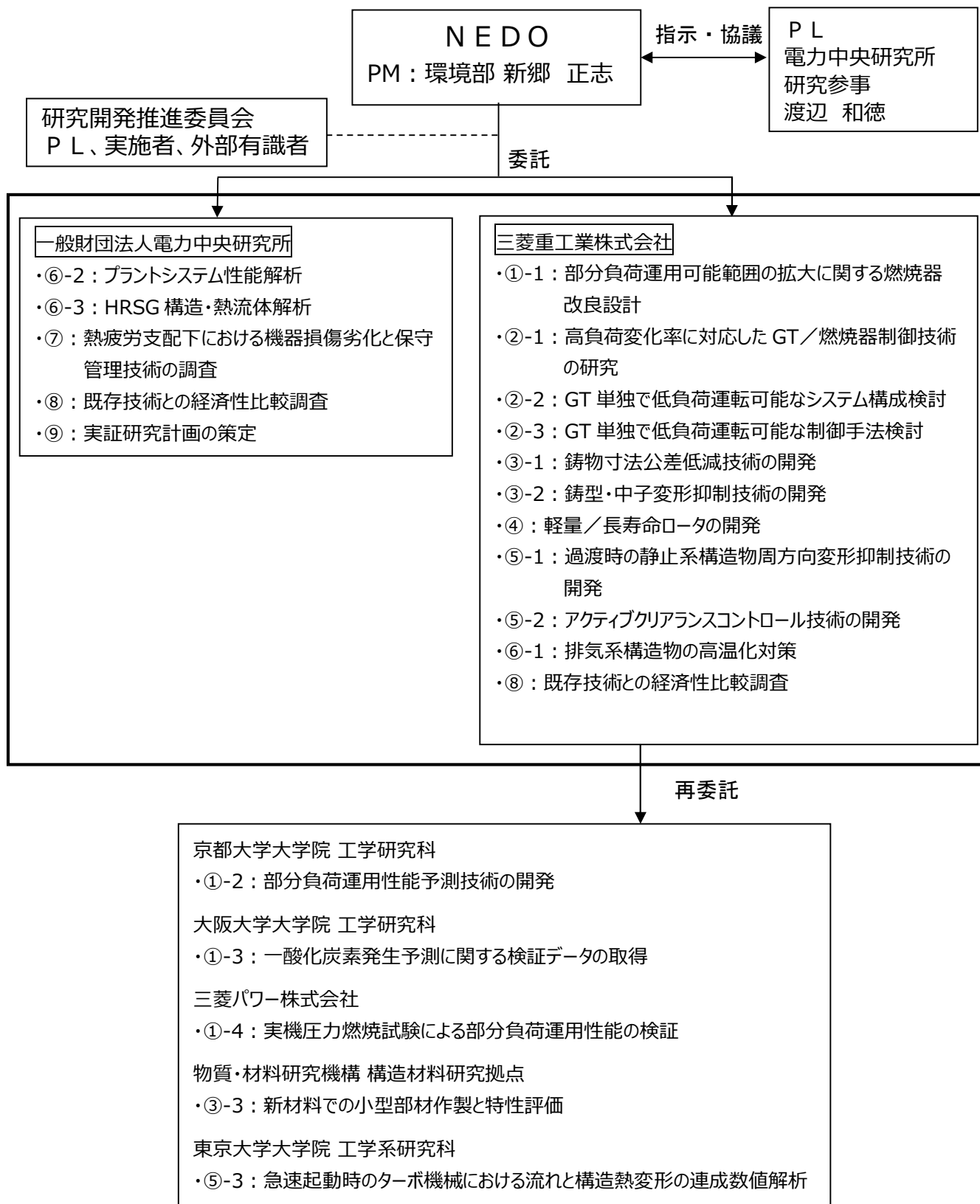
(単位：百万円)

研究開発項目	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	合計
① 低負荷運用時の高性能燃焼器の開発	16	281	331	238	866
② GT 全体制御技術の開発	10	19	20	19	68
③ 軽量動翼の開発	11	39	39	60	149
④ 軽量／長寿命ロータの開発	10	23	31	30	94
⑤ クリアランスコントロール技術の開発	3	42	52	55	152
⑥ GTCC システムの成立性・性能評価	15	42	51	52	160
⑦ 熱疲労支配下における機器損傷劣化と保守管理技術の調査	3	4	2	3	12
⑧ 既存技術との経済性比較調査	3	3	3	3	12
⑨ 実証研究計画の策定	4	4	3	4	15
<b>合計</b>	<b>75</b>	<b>457</b>	<b>532</b>	<b>464</b>	<b>1,528</b>



## 2-2.2 研究開発の実施体制

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



## 2-2.3 研究開発の運営管理

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

### (1) 進捗把握・管理

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

### (2) 技術分野における動向の把握・分析

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

### (3) 研究開発推進委員会

本委員会は、委託先である一般財団法人電力中央研究所が主催し、外部有識者ならびに研究実施担当者が委員となり、円滑な開発の推進に資するため、研究の進捗内容の議論、実証研究の立ち上げに向けた議論、開発した技術の普及に向けた制度設計に関する議論等を行った。

委員会等における外部からの指導及び協力者

#### ア. 研究開発推進委員会における登録委員

氏名	所属・役職
太田 有	早稲田大学 教授
大山 力 (2021年3月まで)	横浜国立大学 教授
佃 嘉章	元 日本ガスタービン学会会長
中澤 治久	火力原子力発電技術協会 専務理事
松崎 裕之	東北発電工業(株) 顧問
杉村 英市 (2021年6月まで)	電気事業連合会 技術開発部長
渡邊 守康 (2021年7月より)	電気事業連合会 技術開発部長

#### イ. 有識者からの指導・助言等

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
N. Swaminathan	Professor, Department of Engineering, Hopkinson Lab Director of Studies & Fellow, Robinson College University of Cambridge	解析モデルの選定
武藤 昌也	名城大学 准教授	解析モデルの選定

## 2-2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

本事業の推進にあたっては、多様な技術分野にわたる開発が必要となることから、電力中央研究所、三菱重工業が有する専門技術を最大に発揮できる体制として、それぞれの専門性が発揮できる項目を担当した。燃烧および流体、新材料に関しては特に高度な専門知識を必要とするため、東京大学、京都大学、大阪大学ならびに物質・材料研究機構に再委託し、また、実機圧力燃焼試験については高度な専門技術を有する三菱パワーに再委託して、7 機関連携の協力体制の基で研究開発を遂行する方針とした。

マネジメントとしてあたっては、電力中央研究所 渡辺和徳研究参事が P L として、責任をもって研究開発を推進し、研究実施項目の進捗状況管理や、研究開発推進委員会における意見集約を行い、進捗管理や N E D O 環境部 P M と協議して、必要に応じて実施者に指示・サポートする体制とした。

本事業における、実用化・事業化につなげる戦略として、発電事業者や一般送配電事業者、電気事業関連機関、さらには電力系統安定の制度設計に関わる有識者に対して、本研究開発の意義や必要性、研究内容などの説明を行うと共に意見集約を行って、研究開発に反映させることとした。

また、実用化につなげる知財戦略・標準化戦略については、関係者・有識者で有効なアイデア出しを実施し、研究開発のプロセス全体で、他社特許との差異を都度確認し、競合と差別化できる有望技術を抽出している。

知的財産管理として知財合意書を定め、本プロジェクトを円滑に遂行し、その成果を事業活動において効率的に活用することを目的とし、本プロジェクトの実施及びその成果の活用のために必要な知的財産権の取扱いについて規定し、また、知財運営委員会を設置して、知財の取扱いについて審議決定を行った。

知的財産管理指針の策定として、主に以下について規定した。

- ・本プロジェクトの実施により得られた知的財産権の帰属
- ・本プロジェクトの成果の第三者への開示の事前承認
- ・発明等の成果の届出及び権利化等方針の決定手続
- ・知的財産権の実施許諾

また、知財運営委員会の運用として、以下の通り実施した。

- ・ P L を委員長とし、研究開発従事者（再委託先含む各実施機関から選出）で構成
- ・特許権の帰属、成果の開示について審議・認定
- ・ P J 期間中、計 20 回程度開催

## 2-3. 情勢変化への対応

2020年7月、2030年に向けて非効率石炭火力発電のフェードアウトを確かなものにする新たな規制的措置の導入など検討指示が経済産業大臣によりなされた。2030年度までに温室効果ガス排出量について、2015年度に決定された「日本の約束草案」では2013年度比で26.0%削減することが目標設定されたが、2021年4月、首相官邸に設置された地球温暖化対策推進本部において2013年度比46%減とする新目標が発表された。

さらに、2021年5月には、2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとする目標を明記した改正地球温暖化対策推進法が可決すると共に、2050年度の電源構成として、2020年12月に発表されたグリーンイノベーション成長戦略では、図2.3-1に示すように発電量の約50～60%を再エネで賄い、原子力と火力は合わせて30～40%とすることが発表された。同図の長期エネルギー需給見通しによる2030年度計画では、再エネが22～24%、原子力と火力が73～75%に比べ、出力変動が大きい再エネ電源が増加する一方で、これまで出力調整のみならず慣性といった調整力を担ってきたGTCCを含む大型発電機器が大幅に減少することになる。電力系統安定化のための調整力の確保、単機あたりの調整力の向上がより重要になり、本研究開発の重要性はさらに向上する。また、上記グリーンイノベーション成長戦略では、発電電力量の10%をアンモニア・水素による発電で賄うとしており、GT技術は速やかにかつ高効率で水素を利用できる発電設備である。

他方、適切な量の調整力の確保ならびに効率的な調達のため、電力需給調整市場が開設された。表2.3-1に示す市場メニューの内、三次調整力②、三次調整力①について、表2.3-2の通り2020年3月より先行して中地域（中部・北陸・関西）で運用が開始され、8月には中国、9月には九州が追加され、対象地域を段階的に拡大した。三次調整力②については2021年4月に広域調達が開始された。三次調整力①も2022年度より開始されることになっており、さらに、より早い応動時間が求められる二次調整力②、①、一次調整力も2024年度以降、調達が開始される予定になっている。より調整力に対して対価が得られる制度により本技術開発の市場での価値が高まる。

再エネ導入増加と調整力を担ってきた火力発電の減少に向けた情勢変化が非常に速いため、調整力、水素利用、高効率の観点から本技術開発は着実に行うべきであり、早期の社会実装が望まれる。

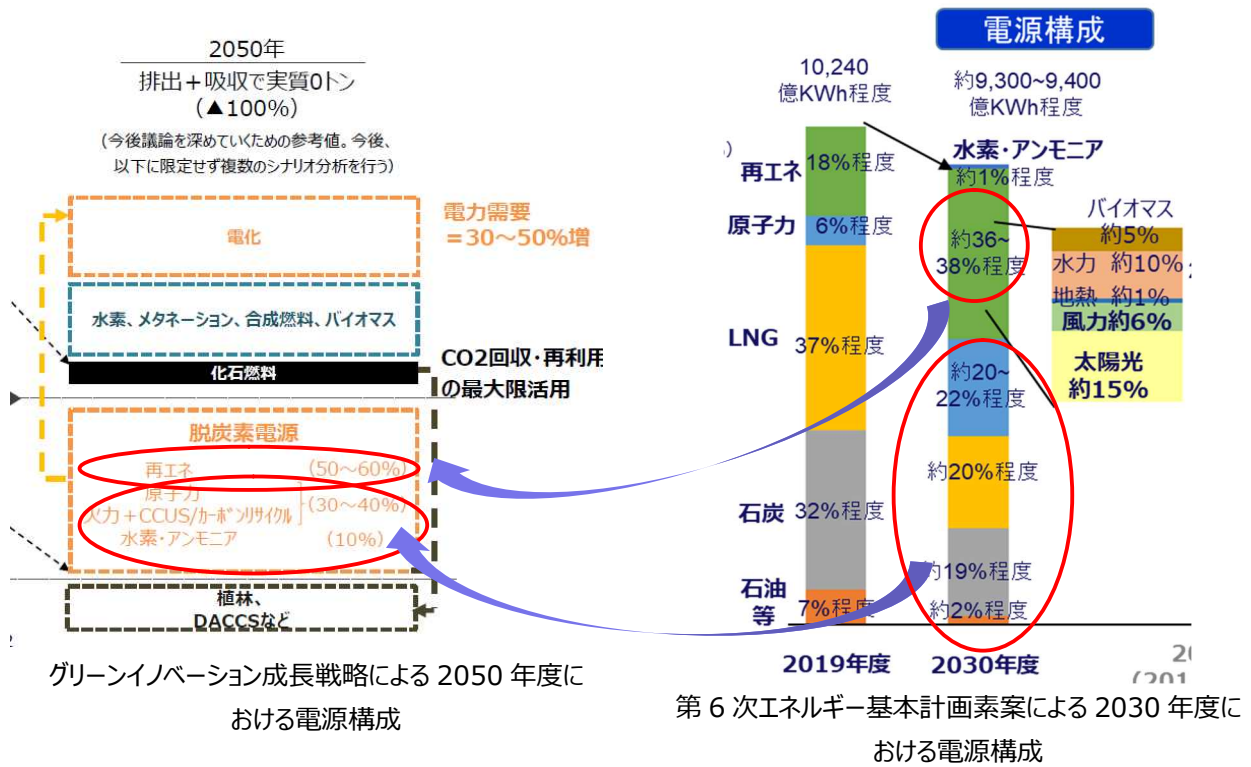


図 2.3-1 2050 年度と 2030 年度における電源構成

表 2.3-1 電力需給調整市場のメニュー

	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②
英呼称	Frequency Containment Reserve (FCR)	Synchronized Frequency Restoration Reserve (S-FRR)	Frequency Restoration Reserve (FRR)	Replacement Reserve (RR)	Replacement Reserve-for FIT (RR-FIT)
対応する事象	GCから実需給までの平常時の時間内変動や、電源脱落の事象に対応。(発電機等のGF機能に該当)	GCから実需給までの平常時の時間内変動や、電源脱落の事象に対応。(発電機等のLFC機能に該当)	GCから実需給までの平常時の予測誤差に対応。(発電機等のEDC機能に該当)	GCから実需給までの平常時の予測誤差や、電源脱落の事象に対応。(発電機等のEDC機能に該当)	FIT特例制度①③を利用している再エネの、前日からGCまでの発電予測誤差に対応。
指令・制御	オフライン (自端制御)	オンライン (LFC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン
応動時間	10秒以内	5分以内	5分以内	15分以内	45分以内
継続時間	5分以上	30分以上	30分以上	商品ブロック時間(3時間)	商品ブロック時間(3時間)
供出可能量 (入札量上限)	10秒以内に出力変化可能な量 (機器性能上のGF幅を上限)	5分以内に出力変化可能な量 (機器性能上のLFC幅を上限)	5分以内に出力変化可能な量 (オンラインで調整可能な幅を上限)	15分以内に出力変化可能な量 (オンラインで調整可能な幅を上限)	45分以内に出力変化可能な量 (オンライン(簡易指令システムも含む)で調整可能な幅を上限)
最低入札量	5MW (監視がオフラインの場合は1MW)	5MW	5MW	専用線: 5MW 簡易指令システム: 1MW	専用線: 5MW 簡易指令システム: 1MW
刻み幅 (入札単位)	1kW	1kW	1kW	1kW	1kW

出所 第17回需給調整市場検討小委員会 (2020.6.12) 資料2-1をもとに事務局にて作成

第 43 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/seido\\_kento/pdf/043\\_04\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/043_04_01.pdf)

表 2.3-2 電力需給調整市場における商品導入スケジュール

年度		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
商品区分	三次調整力②	調達					▼広域調達開始 広域調達（前日）				
		運用			自主的運用	段階的広域運用	▼広域運用開始（全地域） 広域運用				
	三次調整力①	調達					▼広域調達開始 広域調達（週間） (2022～2023年度は、年間で電源 I - b 相当の設備を調達)				
		運用			自主的運用	段階的広域運用	▼広域運用開始（全地域） 広域運用				
	二次調整力②	調達						エリア内調達※1	▼広域調達開始 広域調達（週間）		
		運用	調整力公募 (電源 I + II)						▼広域運用開始（目標） 広域運用		
	二次調整力①	調達							▼調達開始 調達（週間）		
		運用							広域化について検討中		
	一次調整力	調達							▼調達開始 調達（週間）		
		運用							広域化について検討中		

▲ 容量市場初回オークション
▲ 容量契約発効

※1 年間を通じて必ず必要となる量は年間で調達し、発電余力を活用する仕組み（現行の電源 II に相当する仕組み）を続ける。詳細については今後検討。

第 43 回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/seido\\_kento/pdf/043\\_04\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/043_04_01.pdf)

## 2-4. 評価に関する事項

### (1) 事前評価

本事業を開始するに際し、先導研究として取り組んだ「機動性に優れる広負荷帯高効率GTの開発」の事後評価の結果を本事業の事前評価として、研究開発項目に反映した。

①評価の時期：2018年7月11日

②評価手法：外部評価

③評価事務局：評価部

④評価項目・基準

「事業の目的・政策的位置付け」

「研究開発マネジメントについて」

「研究開発成果について」

「成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて」

⑤評価委員

委員長	太田 有	早稲田大学 基幹理工学部長・研究科長／機械科学・航空学科 教授
委員	黒木光広	電気事業連合会 技術開発部 副部長
	巽 孝夫	国際石油開発帝石株式会社 再生可能エネルギー・電力事業本部 事業企画ユニット シニアコーディネーター
	中澤治久	一般社団法人 火力原子力発電技術協会 専務理事

⑥評価結果

総合評価	極めて優れている
コメント	再エネ普及率向上と一体化した内容となっており、再エネ主電源化時の系統安定のためには、必須の事業であり、評価できる。先導プログラムの成果は有益かつ新規性があり、国プロとしての今後に期待できる。

⑦指摘事項とその対応

指摘	対応（要素研究着手の際に考慮した点）
系統安定性の貢献には期待できるが、コスト面や市場導入へのインセンティブなど制度面の課題がある。	GTCC の高性能、高効率化に必要となる要素技術の開発を進めるとともに、対象 GTCC と他調整力電源（揚水発電、蓄電池など）の経済性を比較し、事業性についてまとめる
研究対象となる要素が絞り込まれているが、細分化、集中化されているので、常時俯瞰的にチェックすることが必要である。	実施計画において、毎年、研究開発推進委員会を開催し、外部有識者、研究実施担当者が委員となり、各研究の進捗状況のすり合わせや実証研究の立上げに向けた検討、開発した技術の普及に向けた制度設計に関する議論を実施
有効な成果とするには、実プラントでの検証が重要となる	実証研究フェーズにおけるレトロフィットのサイト選定に向けて、電力会社への説明と意見交換、協力の要請等を行うとともに、実証試験の仕様を検討し、研究計画を立案する

## 3. 研究開発成果について

### 3-1. 事業全体の成果

#### (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

本プロジェクトでは、機動性に優れ、かつ部分負荷帯も含めて高効率な GTCC 技術を実現するために必要な、燃焼器、制御、軽量動翼・ロータ、クリアランス制御等の要素技術を開発し、所期の目標を達成した。実機を対象にこれら技術を導入し、技術実証に移行できるレベルに到達している。本プロジェクトにより、再エネ導入拡大時における系統安定化と CO2 排出量削減に貢献する有力な技術の実現に大きく前進した。

#### (2) 成果の普及

成果の普及促進のため、論文や学会における研究発表等対外的な発表を積極的に行った。下表に各年度の発表数を示す（具体的な件名などは添付資料に記載）。2020 年度において、第 48 回日本ガスタービン学会定期講演会にて、東京大学が日本ガスタービン学会学生優秀講演賞を受賞した。

成果の活用・実用化の担い手・ユーザに向けて成果を普及させる取組として、旧一般電気事業者全社ならびに電事連などの電気事業関連機関に対して、本プロジェクトの意義や必要性、研究内容などの説明、ニーズ調査を実施した。また、電力系統安定の制度設計に関わる有識者に対して、本プロジェクトの意義や必要性、研究内容などを説明し、意見交換を実施し、理解を得た。



表 3.1-1 論文等対外的な発表数と論文一覧

	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	計
論文	1	0	1	2	4
研究発表・講演	2	5	8	5	20
受賞実績	0	0	1	0	1
新聞・雑誌等への掲載	3	1	0	0	4
展示会への出展	0	0	0	0	0

(2021 年度分は予定も含む)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	高橋徹、渡邊泰、 渡辺和徳	電中研	機動性に優れる広負荷帯高効率ガ スタービン複合発電システムの検討	火力原子力発電、 Vol.70、No.3	有	2019.3.20
2	Keita Yunoki, Ryoichi Kurose	MHI, 京都大	Numerical Simulation of CO Concentration on Flame Propagation in the Vicinity of the Wall- Validity of Non-Adiabatic FGM Approach	International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems	有	2020.6.11
3	Keita Yunoki, Ryoichi Kurose	MHI, 京都大	Numerical simulation of CO formation and reduction on flame propagation due to heat loss through the cooled wall	Energy	有	2021.7.1
4	Keita Yunoki, Ryoichi Kurose	MHI, 京都大	Prediction of CO emissions in turbulent super lean premixed combustion under pressurized conditions using an LES/non-adiabatic FGM approach	International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems	有	Accept

## (3) 知的財産権等の確保に向けた取組

知的財産戦略に沿った具体的な取組として、他社特許や論文等の調査分析を行い、社内報告会を定期的開催して業界動向や他社特許について協議/共有した。パテントクリアランスチェックを実施し、2020 年度にコアとなる燃焼性向上について基本特許を出願した。周辺特許についても、オープン/クローズ戦略を意識して出願可否を判断した。2021 年にも 1 件出願を予定している。

表 3.1-2 特許出願数

	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	計
特許出願 (うち外国出願)	0	0	1(1)	1*	2(1)件

※2021 年度分は出願予定

### 3-2.研究開発項目毎の成果

各研究開発項目の成果は、表 3.2-1 に示す通りである。また、各個別テーマの成果の意義を図 3.2-1 に示す。どの研究開発とも、研究期間内に目標を達成見込みである。

表 3.2-1 各研究開発項目の成果

研究開発項目	目標	成果	達成度
①低負荷運用時の高性能燃焼器の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃焼器仕様の選定</li> <li>・燃焼特性の検証</li> <li>・CO 発生メカニズムの評価</li> <li>・CO 濃度計測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低負荷時（GTCC10%負荷）の環境負荷性能を満足する燃焼器の仕様を選定</li> <li>・改良設計した実燃焼器での CO 低減効果を確認</li> <li>・数値解析により CO 発生メカニズムを明確化</li> <li>・非接触の CO 濃度計測手法を確立</li> </ul>	△ ※1)
②GT 全体制御技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GT 制御手法の立案</li> <li>・低負荷運転可能なコンセプト構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料と空気の比を遅れなく制御する手法を立案／開発し、負荷変化幅拡大、かつ高ランプレート（20%/min）で運転制御できる見込みを得た</li> <li>・低負荷（GTCC10%負荷）かつ低環境負荷で運転可能なシステム構成を立案し、制御手法も確立</li> </ul>	△ ※2)
③軽量動翼の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・変形抑制、鋳造欠陥抑制対策の確立</li> <li>・鋳型・中子の変形を抑制する要素技術開発</li> <li>・新酸化物系 CMC と新 TiAl 合金の評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中子・鋳型一体造型による、変形抑制、鋳造欠陥抑制対策を確立</li> <li>・中子組成の適正化による鋳型・中子の変形抑制技術を開発</li> <li>・機械特性と製作性を評価 機械特性：引張・クリープの特性劣化無 製作性：実生産設備で製作可能</li> </ul>	△ ※3)
④軽量/長寿命ロータの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・軽量/長寿命ロータの概念設計と検証試験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・軽量化では長寿命化の目標寿命達成困難。形状最適化並びに表面処理による延命効果を検証し、急速機動化に必要な目標寿命（朝夕 2 回起動）達成の目途を得た。</li> </ul>	△ ※1)
⑤クリアランスコントロール技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ケーシング変形抑制の検討と概念設計</li> <li>・クリアランス制御構造の概念設計および予測技術の開発</li> <li>・連成解析手法の構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ケーシング変形抑制対策として、内側ケーシングの剛性向上、低摩擦コーティング施工案を立案し、概念設計を実施し、変形を抑制できる見込みを得た。</li> <li>・メタル温度制御によるクリアランス制御構造の概念設計を実施。AI を駆使したバーチャルセンサによるクリアランス常時（出力変化速度：20%/min を含む）予測技術を開発</li> <li>・熱流体と構造の連成解析手法を構築</li> </ul>	△ ※3)
⑥GTCC システムの成立性・性能評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高温化排気系構造の成立性確認と概念設計</li> <li>・熱効率/各種運用性の検討</li> <li>・HRSG 材料における温度管理ポイントの明確化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・起動回数増加（朝夕 2 回起動）でも、剛性確保による応力低減により、構造成立性を確認</li> <li>・GT の高機動化に加え、HRSG への助燃等により起動時間 10 分を達成見込み</li> <li>・機動性を向上により HRSG の主蒸気管寄せ部において最も熱応力が高くなることを特定。寿命にも影響を与えるため、重要な管理ポイントであることを明確にした</li> </ul>	△
⑦熱疲労支配下における機器損傷劣化と保守管理技術の調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・機器の合理的な保守管理方法の明確化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・起動停止が頻繁となっている海外プラントの現地調査や関連文献の調査から、保守管理の指針策定のための課題や方向性を明確化</li> </ul>	△

⑧ 既存技術との経済性比較調査	・他の調整力電源との経済性比較評価	・国内、海外の電力市場を対象に、火力及び競合技術の調整力価値を定量比較し、経済性（改造の目標 CAPEX）を評価完了	○
⑨ 実証研究計画の策定	・実証試験の仕様を検討と研究計画を立案	・今フェーズでの成果を踏まえ、レトロフィット実証の実施項目を抽出	△

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

\* ) 表中の定量値の出典：再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発(2016)で取り纏めた2030年における目標値

- ※ 1) 解析ベースで達成確認。試験での最終確認を残すのみ
- ※ 2) 解析ベースで達成確認。ロバスト性検討中。
- ※ 3) 簡易形態では達成目途あり、詳細形状での検証を実施

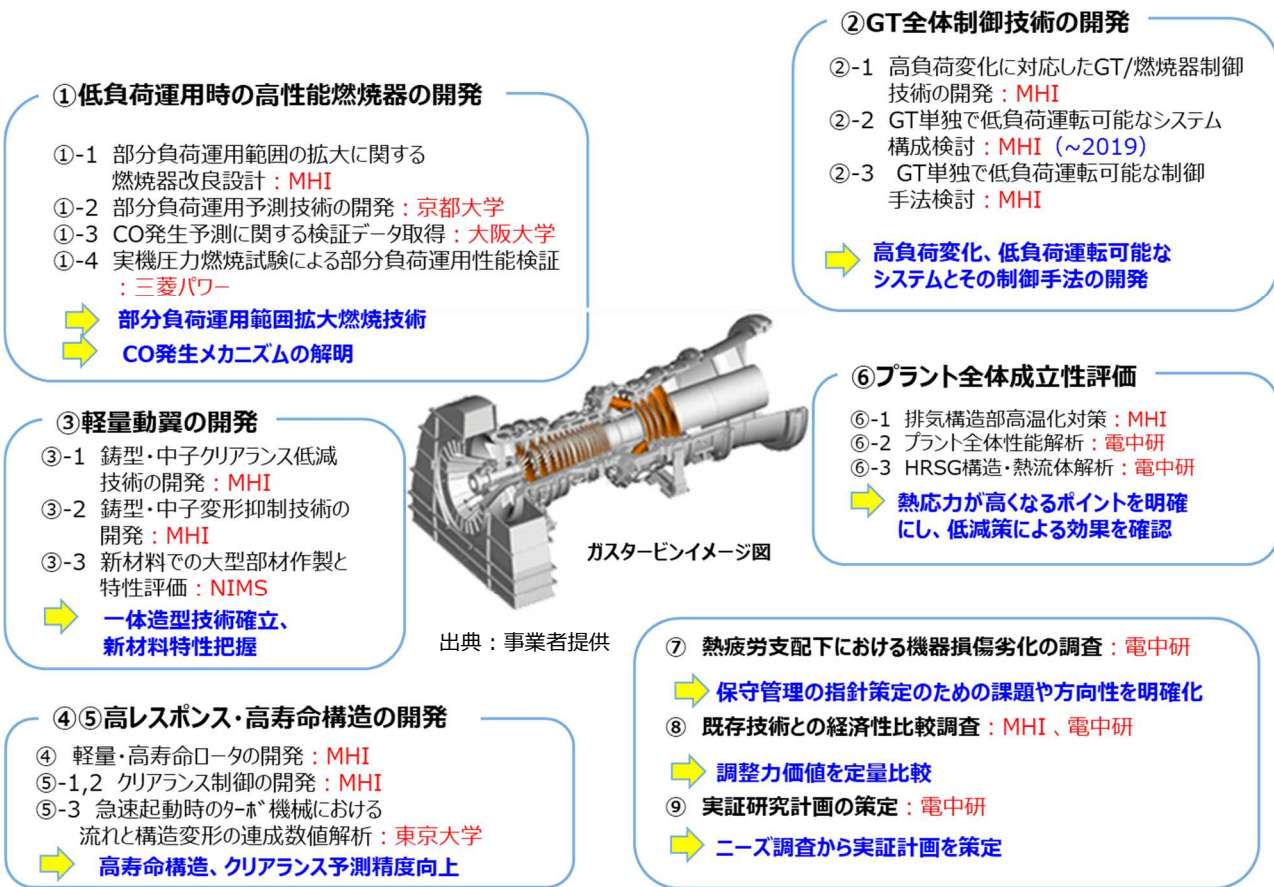


図 3.2-1 各個別テーマの成果の意義

## 4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

### 4-1. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

#### (1) 成果の実用化に向けた戦略

本プロジェクトにおける実用化とは、『当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることを言う』。具体的には、当事業で開発・実証した技術が組み込まれたガスタービンや機能向上のための関連製品が上市されることを実用化とする。

先にも述べたが、2020年7月、2030年に向けて非効率石炭火力のフェードアウトを確かなものにする新たな規制措置の導入など検討指示が経済産業大臣によりなされた。脱炭素化の推進で、非効率石炭火力の廃止進むが、そのスピードは、再エネ増加(量)より早い。既にEU、米国では、50年、40年経過の石炭火力が急激に廃止されている。今後、社会的な負担をミニマムでの脱炭素化が求められる。

2021年5月には、2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとする目標を明記した改正地球温暖化対策推進法が可決すると共に、2050年度の電源構成として、2020年12月に発表されたグリーンイノベーション成長戦略では、発電量の約50～60%を再エネで賄い、出力調整、慣性(系統安定性)といった調整力を担い、災害時の対応力の高い火力は、原子力は合わせても30～40%とすることが発表された。さらに、今後の技術開発により比率は変化するが、水素・アンモニアで10%担うことも明示された。GTCCは、本来水素・アンモニア燃焼への適応性が高いことや、既設石炭火力発電のフェードアウトに対しても、その調整力を担う可能性が高く、まだまだGTCCの活躍の可能性は否定できないものと考えている。

実施項目⑧に示した通り、このように再エネの大量導入が進むと、将来的には現在再エネ比率が上がっているイギリスやアメリカの西海岸の様に電力が余剰傾向となり、結果調整市場価格は低下する。結果、調整力としてのガスタービンの稼働率は低下する可能性がある。一方、その過渡では、高効率でベースロード運用が可能で且つフレキシブルな新鋭機は、kWh市場、ΔkW市場の両方で適用可能であり、現在の市場動向として新鋭機に高機動性を合わせて要望されることもある。また、F形レベルの既存機についても、今後の調整市場の動向によっては、投資対象となる可能性も十分ありうる。

そこで、以下の点を考慮し、国内外での社会実装を推進する。まず、既設GTには、発電事業者の設備投資コストをできるだけ抑えた最低負荷の引き下げやランプレート(出力応答の変化速度)改善などを定期点検時のサービスメニューとして提案する。また、新設の天然ガス燃焼GTの導入が見込まれる発電事業者には、新設GTの機能として、最低負荷引き下げやランプレート改善などを導入提案していく。

#### (2) 成果の実用化に向けた具体的取組

適用先プラントの各種制約を考慮する必要があるものの、出力変化速度向上や最低負荷引き下げの改善に関する、部分負荷運用範囲を拡大ならびに大きな負荷変化率に対応した燃焼器およびその制御技術、アクティブクリアランスコントロール技術については、実機適用に移れる段階にある。比較的低コストで実施可能なメニューについては、発電事業者に対してレトロフィット実証についての提案を開始している。軽量動翼や軽量/長寿命ロータについても、製造実証を経た後、市場導入していく計画である。

(3) 成果の実用化の見通し

開発した要素技術を導入した GTCC は、再エネ電源と共存しながら、同一設備からの下記いずれの価値をも創出可能な電源設備である。

- ・高効率のベース電源 (kWh : 面積 S)
- ・再エネの大容量バックアップ電源 (kW : 高さ H)
- ・高機動な調整電源 ( $\Delta$ kW : 点線の長さ L)

前述の通り、本プロジェクトで得られた成果は、すでに実機適用可能な技術も開発できており、客先ニーズに合わせた事業用ガスタービン商品オプションとして採用する見込みを得ている。

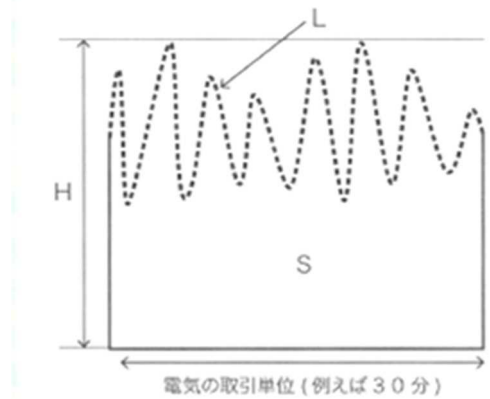


図 4.1-1 再エネ電源の時間変化イメージ図

2 章で述べたように、2021 年 4 月から電力需給調整市場において 3 次調整力②の広域運用が開始された。開始したばかりであり、他のメニューは未開設であるため、市場規模や動向は十分には見えないが、2018 年 12 月 26 日の経済産業省「再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会」では、3 次調整力②における  $\Delta$ kW 調達量として、約 200 億  $\Delta$ kW/年が予想されている。本年 4 月実績としては約 9 億  $\Delta$ kW/月であり、年間に換算すると 100 億  $\Delta$ kW/年規模となる。オーダーとしては一致しており、今後の再エネ導入量増加と共にさらに取引量は増加すると予想される。また、実績の加重平均単価が 1.74 円/ $\Delta$ kW であり、今後も 1~3 円/ $\Delta$ kW で推移し、3 次①および 2 次①、②も同程度の市場規模と単価と仮定すると、24 年度以降、数 1000 億円以上の規模の市場になる可能性がある。再エネ電力が増加し、火力発電の発電電力量が減少する中で、相対的に調整力の市場価値は向上し、火力発電を所有する発電事業者にとっては、重要な収入源となる。

- このたびの試算は三次②の年間で調達することになるであろう量のおおよその規模感を把握することが目的であること、および FIT 特例制度①が FIT の大宗を占めていることから、FIT 特例制度①で試算した。
- FIT 特例制度①のための三次②  $\Delta$ kW 必要量の試算結果は以下のとおり
  - ✓  $\Delta$ kW 調達量 (1 年分) : 約 200 億  $\Delta$ kW (10 社年間合計)
  - ※一定の条件に基づく概算であり、今後精査することで変わり得る

	三次② $\Delta$ kW 年間調達量(概算) [億 $\Delta$ kW]
北海道	17
東北	13
東京	37
中部	27
北陸	3
関西	18
中国	21
四国	14
九州	48
沖縄	2
<b>10 社合計</b>	<b>200</b>

FIT 特例制度①による再エネ対応の調整力調達量(三次②  $\Delta$ kW 調達量)の試算結果  
 経済産業省「再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会」2018 年 12 月 26 日資料 3

成果の実用化に向けた取組として、旧一般電気事業者の発電事業者を中心に、系統および発電設備の運用の現状と課題や本事業に対する意見、実証研究に対する意見などについてヒアリング調査を行った。

調整力向上、本プロジェクトへの取組について否定的な意見は全くなく、成果の必要性・重要性が理解された。一方、新技術の開発や導入に対する投資を回収できる見込みが得られないと導入インセンティブが働かないため、本技術を開発・普及させていくためには、調整市場が成熟するタイミングが重要である。

すでに実機を対象に開発した技術を導入できるレベルに到達しているため、市場ニーズを捉えて順次実機適用を進めて行く所存である。

#### (4) 波及効果

CO<sub>2</sub> 排出量削減に向けては世界的にも加速化が進んでおり、主要国が具体的なカーボンニュートラルの数値目標を宣言している。国内においても、2030 年 CO<sub>2</sub> 排出 46%削減(2013 年比)、および 2050 年 CO<sub>2</sub> 排出実質ゼロが宣言されている。再エネの導入促進ならびに大量導入時の電力系統安定化のため、本技術はそれら CO<sub>2</sub> 排出量削減目標達成に向けてトランジションを支える重要な役割を果たす。可能な機能から順次反映させて技術普及を図ることが重要であり、強力な調整電源を需給調整市場に投入することで、市場の活性化、電力コスト低減にもつながる。

我が国のガスタービン技術は、世界（GE、Siemens）と勝負できる技術レベルにあり、大型ガスタービンにおけるシェアは、ここ数年世界一である。今後 25 年間におけるガスタービンの世界市場は 150 兆円規模と想定されている中で、本技術開発により更なる技術力の向上を図ることで世界レベルを維持することは、国内の産業技術成長戦略として重要である。

さらに、本技術は、将来の脱炭素を目指した水素やアンモニアを燃料とするガスタービンへも適用可能であり、将来にわたり貢献が可能である。最新鋭 GTCC の技術を供与し CO<sub>2</sub> 排出量削減に貢献することは、我が国の高度な技術により国際貢献を果たすとともに、国内生産増加/輸出増/ライセンス収入増加などに貢献が可能である。

## 添付資料 1)

カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発 基本計画



P16002

P16003

P10016

P92003

## 「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発」基本計画

環境部

### 1. 研究開発の目的・目標・内容

#### (1) 研究開発の目的

##### ①政策的な重要性

2015年7月に決定された長期エネルギー需給見通しにおいては、3E+S（安全性、安定供給、経済効率性、環境適合）を同時達成しつつ、バランスの取れた電源構成を実現していくこととしており、火力発電分野においては、石炭火力発電及びLNG火力発電の高効率化を図り、環境負荷の低減と両立しながら、有効活用を推進することとしている。火力発電の高効率化は、再生可能エネルギーの最大限の導入促進、安全性の確認された原子力発電の活用と合わせ、温室効果ガス削減目標積み上げの基礎となった対策・施策として位置づけられている。これを踏まえ、2016年6月に官民協議会で策定した「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」においては、火力発電の高効率化、CO<sub>2</sub>削減を実現するため、次世代の火力発電技術の早期確立を目指すこととしている。2050年に向けて化石燃料の利用に伴うCO<sub>2</sub>の排出を大幅に削減していくためには、あらゆる技術的な選択肢を追求していく必要があることから、CO<sub>2</sub>を炭素資源（カーボン）と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルを推進することとしており、2019年6月に策定された「カーボンリサイクル技術ロードマップ」において、カーボンリサイクル技術の確立、普及を目指していくこととしている。2020年3月に策定された「新国際資源戦略」では、CO<sub>2</sub>排出削減に向け、液体アンモニアの混焼を含めて着実に技術開発等を進めることが必要とされている。石炭利用に伴って発生するCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじん等への対応や、石炭需要の拡大に伴って、増大する石炭灰及びスラグの有効利用方を確立することが大きな課題である。そのため、今後とも石炭を活用し、エネルギー需給安定化に貢献していくためにも、より高度なクリーンコールテクノロジーの開発が必要である。

##### ②我が国の状況

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

うるCO<sub>2</sub>の回収・貯留・利用（CCUS）やCO<sub>2</sub>フリー燃料の利用技術の開発・推進も重要なテーマであり、国内でのCCS（二酸化炭素の回収・貯留）大規模実証事業や貯留ポテンシャル調査等に加え、CO<sub>2</sub>を炭素資源と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルを推進する取組や石炭火力発電におけるアンモニア混焼試験が進められている。

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

### ③世界の取組状況

地球温暖化問題の対策として、CO<sub>2</sub>排出量の削減が強く求められている中で、米国や欧州においても国家レベルで巨額の研究開発費を投じ、基礎研究から技術開発、実証研究等の様々な取組が行われており、日本と同様にIGCCや先進的超々臨界圧火力発電（A-USC）、高効率ガスタービン、CO<sub>2</sub>有効利用技術等の開発が進められている。また、大幅なCO<sub>2</sub>削減を達成するため、CO<sub>2</sub>分離・回収を行ったIGCCやCCS-EOR（石油増進回収）の実証といったプロジェクトも進められている。近年の世界的な環境志向の高まりを受け、環境装置の需要は急激に高まっている。特に、中国では環境規制が大幅に見直されており、他国で開発された環境装置を新たに導入している他、自国において、低コスト環境装置の開発が盛んに行われている。

### ④本事業のねらい

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

石炭の効率的利用、環境対応等を目的として、石炭利用の環境対策に関する調査・技術開発を実施する。これらの取組により、石炭の安定調達性が増し、石炭を安価で安定的に使用することが可能となり、我が国におけるエネルギーセキュリティーの向上に資する。また、インフラ輸出による日本の輸出拡大に貢献できる他、石炭消費国の産業活性化にも貢献できる。

## (2) 研究開発の目標

### ①アウトプット目標

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

研究開発項目ごとの目標については、別紙にて定める。

### ②アウトカム目標

本事業の開発成果により、2030年頃にLNG火力においては、将来のガスタービン燃料電池複合発電(GTFC)商用機として送電端効率63%(高位発熱量基準)を達成し、さらには、IGFC商用機へと繋げることで、石炭火力として送電端効率55%(高位発熱量基準)を達成する。また、世界の火力発電市場は、今後、2040年にかけて石炭火力では約520兆円、LNG火力では約270兆円で、累計790兆円の規模が見込まれる。年平均では約30兆円であり、このうちのシェア1割、約3兆円の次世代火力技術の市場を獲得する。また、2040年頃に燃料としての年間アンモニア利用量1,000万トン達成し、アンモニア35,000円/tを想定した場合において、3,500億円相当の燃料アンモニア市場を創出する。CCUSの実現に向け、CO<sub>2</sub>分離・回収コスト1,000円台/t-CO<sub>2</sub>という大幅な低減を達成する。また、CO<sub>2</sub>有効利用の一例として、CO<sub>2</sub>由来のメタンで天然ガスパイプラインの許容圧力変動幅の1割を活用して負荷変動対応に供する場合として、1,300億円相当の天然ガス代替を獲得する。

また、カーボンリサイクルの観点からは、2030年頃に短期的に実現可能な技術(ポリカーボネートなどの化学品、バイオジェットなどの液体燃料、道路ブロックなどのコンクリート製品など)を既存のエネルギー・製品と同等のコスト実現を目指すとともに、2050年以降に実現をめざした需要の多い汎用品(オレフィンやBTXなどの化学品、ガス、液体などの燃料、汎用コンクリート製品など)へ拡大する。

### ③アウトカム目標達成に向けての取組

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

## (3) 研究開発の内容

火力発電の効率化及びCO<sub>2</sub>フリー燃料の利用、CO<sub>2</sub>分離・回収・有効利用等に関する調査、開発及び実証、石炭灰や溶融スラグの有効利用及び削減に関する調査及び技術開発並びに排煙処理技術等の環境対策に関する調査等を実施する。実施に当たっては、各事業の性質に合わせ、委託事業又は助成事業（NEDO負担1／3、2／3、1／2）により実施するとともに、必要に応じてステージゲート審査を用いる。

なお、個別研究開発項目の研究開発内容の詳細については、別紙にて記載する。

研究開発項目① 石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業 [助成事業]

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

研究開発項目② 高効率ガスタービン技術実証事業 [助成事業]

- 1) 1700℃級ガスタービン  
（2016～2018年度：2／3助成、2019～2020年度：1／2助成）
- 2) 高温分空気利用ガスタービン（AHAT）（2／3助成）

研究開発項目③ 先進超々臨界圧火力発電技術開発 [助成事業（2／3助成）]

研究開発項目④ 次世代火力発電基盤技術開発 [委託事業]

- 1) 次世代ガス化システム技術開発
- 2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究
- 3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発
- 4) 燃料電池石炭ガス適用性研究
- 5) CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭利用技術開発
- 6) 石炭火力の負荷変動対応技術開発
- 7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発
- 8) CO<sub>2</sub>分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発
- 9) 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究

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

研究開発項目⑥ 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）]

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

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

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

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

研究開発項目⑩ 石炭利用環境対策事業 [委託・助成事業]

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

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

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

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

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 研究開発の実施体制

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

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

なお、研究開発項目ごとのPM、PLは以下のとおり。また、研究開発項目④2)、3)、4)は、推進にあたって、燃料電池に関する情報共有と開発戦略の整合性を図るため、プロジェクトチーム(PT)にNEDO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 戸島正剛、PL:大崎クールジェン株式会社 木田一哉

研究開発項目② 高効率ガスタービン技術実証事業

1) 1700℃級ガスタービン

PM:NEDO 園山希、PL:三菱重工業株式会社 石坂浩一

2) 高温分空気利用ガスタービン(AHAT)

PM:NEDO 山中康朗、PL:三菱日立パワーシステムズ株式会社 吉田正平

研究開発項目③ 先進超々臨界圧実用化要素火力発電技術開発

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

研究開発項目④ 次世代火力発電基盤技術開発

1) 次世代ガス化システム技術開発

PM:NEDO 中田博之、PL:一般財団法人電力中央研究所 牧野尚夫

2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ要素研究

PM:NEDO 春山博司、PL:電源開発株式会社 早川宏

3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

PM:NEDO 福原敦、PL:三菱日立パワーシステムズ株式会社 北川雄一郎

4) 燃料電池石炭ガス適用性研究

PM：NEDO 福原敦、PL：電源開発株式会社 大畑博資

5) CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭利用技術開発

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

6) 石炭火力の負荷変動対応技術開発

PM：NEDO 野原正寛、PL：契約毎に設置

7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発

PM：NEDO 天野五輪磨、PL：日本大学工学部客員教授 坂西欣也

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

PM：NEDO 森匠磨

9) 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究

PM：NEDO 新郷正志、PL：一般財団法人電力中央研究所 渡辺 和徳

研究開発項目⑤ CO<sub>2</sub>回収型次世代IGCC技術開発

PM：NEDO 青戸冬樹、PL：一般財団法人電力中央研究所 牧野尚夫

研究開発項目⑦ 次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発

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

研究開発項目⑧ CO<sub>2</sub>有効利用拠点における技術開発

PM：NEDO 戸島正剛

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

PM：NEDO 荒川純

研究開発項目⑩ 石炭利用環境対策事業

PM：NEDO 菅本比呂志

研究開発項目⑪ アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業

PM：NEDO 園山希

## (2) 研究開発の運営管理

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

### ①進捗把握・管理

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

### ②技術分野における動向の把握・分析

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

## 3. 研究開発の実施期間

本事業の実施期間は、2016年度から2025年度までの10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。

#### 4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、事業の意義及び目標達成度や成果に係る技術的意義及び将来の産業への波及効果等について、評価を実施する。研究開発項目①～⑤、⑦～⑨、⑪については、技術評価実施規程に基づき、プロジェクト評価を行い、⑩については事業評価を行う。

評価の時期については、研究開発項目①は、中間評価を2017年度、2020年度及び2023年度に、前倒し事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目②は、中間評価を2018年度、事後評価を2021年度に実施する。研究開発項目④1)は、研究開発項目⑤と統合の上、評価を行う。研究開発項目④2)は、事後評価を2019年度に実施する。研究開発項目④3)、4)は、中間評価を2019年度に、事後評価を2022年度に実施する。研究開発項目④5)は中間評価を2017年度に実施し、研究開発項目④6)は、中間評価を2020年度に、前倒し事後評価を2022年度に実施し、研究開発項目④7)は前倒し事後評価を2021年度に実施し、研究開発項目④8)は中間評価を2022年度に、事後評価を2025年度に実施し、研究開発項目④9)は前倒し事後評価を2021年度に実施する。研究開発項目⑤は、中間評価を2017年度、前倒し事後評価を2020年度に実施する。研究開発項目⑥は、調査事業については内容に応じて研究開発項目①から⑤、⑦～⑪の中間評価、事後評価の際に合わせて評価を実施し、共通基盤技術開発については研究開発項目⑨の中間評価、事後評価の際に合わせて評価を実施、先導研究については内容に応じて研究開発項目⑨、⑪の中間評価、事後評価の際に合わせて評価を実施する。研究開発項目⑦は、中間評価を2019年度、事後評価を2022年度に実施する。研究開発項目⑧および研究開発項目⑨は、中間評価を2022年度、前倒し事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目⑩は、中間評価を2019年度、2022年度、前倒し事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目⑪は、中間評価を2023年度、前倒し事後評価を2025年度に実施する。

#### 5. その他の重要事項

##### (1) 委託事業成果の取扱い

###### ①成果の普及

得られた事業成果については、NEDO、実施者とも普及に努める。

###### ②標準化等との連携

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

###### ③知的財産権の帰属

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

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

#### ④知財マネジメントに係る運用

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

#### ⑤データマネジメントに係る運用

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

### (2) 基本計画の変更

PMは、当該事業の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、事業内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、基本計画を見直す等の対応を行う。

### (3) 根拠法

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

### (4) 委託先等以外の第三者の土地に設置した資産の処分方法

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

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

### (5) その他

最新の技術動向や政策上の必要性に鑑み、必要に応じた研究開発項目の追加や見直しを行うことがある。本事業の実施を通じて、イノベーションの担い手として重要な若手研究員及び女性研究員の育成や中堅・中小・ベンチャー企業等を支援することとする。



## 6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2016年1月、基本計画制定。

(2) 2016年4月、3. 研究開発の実施方式(1) 研究開発実施体制 研究開発項目③、④(1)と2)、⑤のPMの変更。

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

(3) 2016年9月、5. 評価に関する事項、研究開発項目④(5) 中間評価、事後評価の年度を1年後ろ倒ししたが、当初計画通りに戻す。

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

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

(4) 2017年2月

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

3. 研究開発の実施方式のPM及びPLを追記・修正した。

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

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

(5) 2017年5月

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

(6) 2017年6月

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

(7) 2018年2月

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

3. 研究開発の実施方式のPM及びPLを追記・修正した。

5. 評価に関する事項の④(1)、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④(2)、8)のPMの変更、及び、研究開発項目④(5)のPLの変更、研究開発項目④(6)のPLの記載変更。別紙 研

究開発項目⑥ 1. 研究開発の必要性、2. 具体的研究内容にかかる記載を一部変更した（バイオマスに係る記載の追記）。

(9) 2018年9月

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

(10) 2019年1月

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

(11) 2019年7月

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

(12) 2020年2月

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

(13) 2020年3月

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

(14) 2020年7月

2. 研究開発の実施方式 (1)研究開発の実施体制 研究開発項目②2) ④3)、4)、8) ⑧、⑨のPMと研究開発項目④8)の名称を変更。別紙 研究開発項目④8) 1. 研究開発の必要性、2. 具体的研究内容、3. 達成目標の記載から噴流床ガス化技術に係る記載を追加 別紙 研究開発項目⑤ 2. 具体的研究内容の記載から噴流床ガス化技術(ポ

リジェネレーション)に係る記載を削除。研究開発スケジュール表の修正。その他誤記修正。

(15) 2020年9月

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

(16) 2020年10月

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

(17) 2021年1月

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

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

(19) 2021年6月

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

(20) 2021年7月

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

## 研究開発項目① 「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」

## 1. 研究開発の必要性

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

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

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

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画においても、石炭火力発電は、「安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源」と評価されている一方、「温室効果ガスの排出量が多いという課題がある」と指摘され、その課題を解決すべく、次世代高効率石炭火力発電技術として、石炭ガス化複合発電（IGCC）の開発・実用化を進めるとともに、2020年頃の二酸化炭素回収貯留（CCS）の実用化を目指した研究開発を行うことが盛り込まれている。

その後、エネルギー基本計画を踏まえ、2014年12月にまとめられた「エネルギー関係技術開発ロードマップ」において、「高効率石炭火力発電」、「二酸化炭素回収・貯留技術」が国際展開も見据えた形で整理されている。

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

## 2. 具体的研究内容

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

## 1) 酸素吹IGCC実証（1/3助成）

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

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

酸素吹IGCC実証試験設備とCO<sub>2</sub>分離・回収設備を組み合わせ、CO<sub>2</sub>分離・回収型石炭火力システムとしての性能、運用性、信頼性及び経済性に係る実証を行う。また、CO<sub>2</sub>分離・回収装置を追設した場合のIGCC運用性について実証を行う。更に、CO<sub>2</sub>分離・回収と組み合わせたCO<sub>2</sub>液化プロセスを構築する。加えて、IGCCの負荷変動に対応したCO<sub>2</sub>分離・回収装置とIGCC設備の運用性について実証を行う。

3) CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証（1/2助成）

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

4) 信頼性向上、低コスト化(1/3助成)

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

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

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

### 3. 達成目標

#### [実施期間]

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

#### [中間目標（2017年度）]

1) 酸素吹IGCC実証

(a) 発電効率：40.5%程度（送電端効率、高位発熱量基準）を達成する。

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

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

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

2) CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCC実証

CO<sub>2</sub>分離・回収設備の詳細設計を完了する。

#### [中間目標（2020年度）]

1) 酸素吹IGCC実証

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

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

(b) 設備信頼性：商用機において年間利用率 70% 以上の見通しを得る。

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

(c) 多炭種適用性：灰融点の異なる数種類の炭種で適合性を確認する。

酸素吹 I G C C 商用機には、微粉炭火力に適合し難い灰融点の低い亜瀝青炭から、微粉炭火力に適合する比較的灰融点の高い瀝青炭までの適用炭種の広さが求められる。商用化に向け、実用化時期や日本への供給可能性も考慮に入れつつ、性能と経済性を評価する。

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

国内外において酸素吹 I G C C 商用機の普及を促進するためには、発電原価を微粉炭火力と同等以下とすることが求められる。また、海外普及を目的としたマイルストーンを検討する。

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

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

CO<sub>2</sub>回収時のエネルギーロスによる発電効率の低下という課題に対し、CO<sub>2</sub>を 90% 回収（全量ガス処理）しながらも、現状の微粉炭火力と同等レベルの発電効率 40% 程度の見通しを得る。これを実現するために、実証機プラントにおいて、CO<sub>2</sub>分離回収にかかるエネルギー原単位「0.90 GJ/t-CO<sub>2</sub>（電気エネルギー換算）」を発電効率に係る性能として確認する。

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

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

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

商用機において、CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹 I G C C システムを構築するには、プラントの起動停止や、発電所特有の負荷変動等に対し、I G C C 本体に追従した CO<sub>2</sub>分離・回収装置の運用手法を確立し、信頼性を検証する。また、生成ガスの全量を CO<sub>2</sub>分離した場合の I G C C 運転との相互影響やガスタービン性能についても検証する。

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

CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCCを普及させるに当たっては、費用原単位評価が必要であり、CO<sub>2</sub>分離・回収装置建設時期や発電所敷地等の制約に応じた評価を実施する。また、実用化・事業化に向けたマイルストーンを検討する。

(e) IGCCプラント運用性：

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

3) CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証

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

[最終目標（2022年度）]

2) CO<sub>2</sub>分離・回収型酸素吹IGCC実証

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

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

3) CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証

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

4) 信頼性向上、低コスト化

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

[中間目標（2023年度）]

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

水素濃度の変動に対応した燃焼試験を開始する。

[最終目標（2025年度）]

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

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

## 研究開発項目② 「高効率ガスタービン技術実証事業」

### [実施期間]

1700℃級ガスタービン: 2012年度～2020年度(うち2012年度～2015年度は経済産業省において実施)

高温分空気利用ガスタービン(AHAT): 2012年度～2017年度(うち2012年度～2015年度は経済産業省において実施)

### 1. 研究開発の必要性

2008年3月に閣議決定された「Cool Earth—エネルギー革新技术計画」において、天然ガスタービンの高効率化が環境負荷低減の実現のための重要な技術開発であると位置づけられている。また、2011年8月に制定された「第4期科学技術基本計画」においては、安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現のため火力発電の高効率化に資する技術開発は重点的な取組として位置づけられている。

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

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

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

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

### 2. 具体的研究内容

#### 1) 1700℃級ガスタービン

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

#### 2) AHAT

AHATシステムについては、ユーザーニーズとしてミドル運用以上(年間50回以上の起動・停止)における長期信頼性が求められていることから、既存40MW級総合試験装置



の改造による実証機製作、実証試験による長期信頼性評価を実施する。また、実証機試験結果を用いて商用機化の検討を実施する。

### 3. 達成目標

#### 1) 1700℃級ガスタービン

[中間目標(2018年度)]

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

[最終目標(2020年度)]

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

#### 2) AHAT

[最終目標(2017年度)]

実証機を用いた試験により、長期信頼性の実証として以下を達成する。

- ・ミドル運用(年間50回以上の起動・停止)の2倍である年間100回以上の起動・停止での実証試験を実施し、等価運転時間 10,000時間以上を確保する。  
(等価運転時間とは、起動・停止等の機械装置の寿命を考慮し、同等の連続運転時間とみなせる運転時間)

### 研究開発項目③ 「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」

[実施期間] 2008年度～2016年度（うち2008年度～2015年度は経済産業省において実施）

#### 1. 研究開発の必要性

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

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

#### 2. 研究開発の具体的内容

##### （1）システム設計、設計技術

基本設計、配置最適化、経済性の試算

##### （2）ボイラ要素技術

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

##### （3）タービン要素技術

大型鋼塊の製造性を確認するとともに10万時間の長期信頼性を確保する

##### （4）高温弁要素技術

実缶試験・回転試験に組み込み、信頼性を確認する

##### （5）実缶試験・回転試験

実缶試験、回転試験により、ボイラ要素及びタービン要素の信頼性の実証を行う。

#### 3. 達成目標

[最終目標（2016年度）]

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

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 1) 次世代ガス化システム技術開発

[実施期間] 2015年度～2018年度（うち2015年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

#### 1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画（2014年4月閣議決定）においては、石炭火力発電は重要なベースロード電源として位置づけられているが、温室効果ガスの大気中への排出をさらに抑えるため、石炭ガス化複合発電（IGCC）等の次世代高効率石炭火力発電技術等の開発及び実用化を推進することとされている。中長期的には、さらなる高効率化に向けて、現在開発中のIGCCを効率でしのぐ次世代高効率石炭火力発電技術等の開発を実施する必要がある。

#### 2. 具体的研究内容

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

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

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

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

##### (1) 水蒸気添加による冷ガス効率向上効果の検証

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

##### (2) エネルギー効率の高い酸素製造装置の適用性評価

エネルギー効率の高い酸素製造装置の適用性を評価する。

##### (3) IGCCシステム検討

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

冷ガス効率の向上及び試設計を踏まえて、送電端効率を精査する。

#### 3. 達成目標

[中間目標（2017年度）]

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

[最終目標（2018年度）]

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

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

#### 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

##### 2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究

[実施期間] 2015年度～2017年度（うち2015年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

#### 1. 研究開発の必要性

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

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

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

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

#### 2. 具体的研究内容

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

#### 3. 達成目標

[最終目標（2017年度）]

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

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

[実施期間] 2016年度～2021年度

#### 1. 研究開発の必要性

2015年7月に経済産業省における「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」により策定された「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」において、ガスタービン燃料電池複合発電(GTFC)については、小型GTFC(1,000kW級)の商用化、量産化を進め、SOFCのコスト低減を図り、中小型GTFC(10万kW級)の実証事業を経て、発電効率63%程度、CO<sub>2</sub>排出原単位:280g-CO<sub>2</sub>/kWh程度を達成し、2025年頃に技術を確立することが示されている。また、量産後は従来機並の発電単価を実現することとされている。

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

#### 2. 具体的研究内容

小型GTFC(1,000kW級)の商用化及び量産化を進め、SOFCのコスト低減を図る。さらに、中小型GTFC(10万kW)の要素技術を開発し、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。
- ・小型GTFC(出力1,000kW級)において、57%LHV(低位発熱量基準)の発電効率(送電端)の見通しを得る。

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 4) 燃料電池石炭ガス適用性研究

[実施期間] 2016年度～2021年度

#### 1. 研究開発の必要性

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

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

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

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

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

#### 2. 具体的研究内容

##### (1) IGFCシステムの検討

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

##### (2) 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

石炭ガス燃料の適用性試験に供する高温型燃料電池モジュールについては、天然ガス燃料で既に実用化されている燃料電池モジュールとする。本試験に係る設計、製作、据付け等を行い、まず、天然ガスを燃料とした試運転を行う。次いで、天然ガスをH<sub>2</sub>リッチガスに改質した燃料を用い、燃料電池モジュールの運用性、性能等を把握するとともに、天然ガス燃料の場合との比較から課題を抽出する。さらに、石炭ガス化の実ガスを燃料として、燃料電池の被毒成分をガス精製によりクリーン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) IGFCシステムの検討

[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。

#### (2) 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

[中間目標 (2019年度)]

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

[最終目標 (2021年度)]

石炭ガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの運用性と性能を把握し、課題を抽出する。また、石炭ガス適用時の燃料電池出力変化率を天然ガスと同等の1%/min程度とする石炭ガス化炉連係システムを構築する。



## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 5) CO<sub>2</sub>分離型化学燃焼石炭利用技術開発

[実施期間] 2015年度～2017年度（うち2015年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

#### 1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画（2014年4月閣議決定）においては、石炭火力発電は重要なベースロード電源として位置づけられているが、温室効果ガスの大気中への排出をさらに抑えるため、環境負荷の一層の低減に配慮した石炭火力発電の導入を進めることとされている。

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

#### 2. 具体的研究内容

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

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

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

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

##### (1) 酸素キャリアの評価と選定

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

##### (2) プラント試設計及び経済性検討

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

##### (3) ベンチ試験装置によるプロセス検証

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

#### 3. 達成目標

[中間目標（2017年度）]

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

[最終目標（2020年度）]

分離・回収コスト1,000円台/t- $\text{CO}_2$ を見通せる $\text{CO}_2$ 分離型化学燃焼石炭火力発電システムを提示する。

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

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

### 6) 石炭火力の負荷変動対応技術開発

[実施期間] 2017年度～2022年度

#### 1. 研究開発の必要性

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

また、2019年7月に閣議決定された「第5次エネルギー基本計画」において、石炭は「現状において安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源の燃料として評価されているが、再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、適切に出力調整を行う必要性が高まると見込まれる」とされている。今後とりわけ自然変動電源（太陽光・風力）の導入が拡大する中で、電力の需給バランスを維持し周波数を安定化するために、火力発電等による調整力の一層の確保と信頼性・運用性の向上が求められている。

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

#### 2. 具体的研究内容

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

#### 3. 達成目標

[中間目標（2020年度）]

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

[最終目標（2022年度）]

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

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

7) CO<sub>2</sub>有効利用技術開発

[実施期間] 2017年度～2021年度

1. 研究開発の必要性

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

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

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

2. 具体的研究内容

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

3. 達成目標

[最終目標 (2021年度) ]

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

## 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

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

[実施期間] 2020年度～2024年度

#### 1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画において、石炭火力は、安定供給性と経済性に優れたベースロード電源の燃料として評価されているものの、温室効果ガスの排出量が多いという問題があるため、高効率化およびCO<sub>2</sub>排出削減が望まれている。

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

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

#### 2. 具体的研究内容

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

##### (1) 流動床ガス化燃焼技術の適用

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

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

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

##### (2) 噴流床ガス化技術の適用

酸素吹き石炭ガス化においては、ガス化炉にガス化剤として酸素を供給して石炭を部分燃焼させ、石炭を熱分解しているが、投入された石炭が一部燃焼して消費されること、酸素製造装置等の所内動力の増加により送電端効率が低下することから、熱分解の一部をガスタービン排熱

等を利用して作る水蒸気を用いた石炭ガス化反応に置き換えることにより、冷ガス効率の向上を図るとともに酸素供給量の低減を図り、送電端効率の向上が可能となる。このような $O_2/C$   
 $O_2/H_2O$ 吹き噴流床ガス化技術をベースとし、燃料として石炭だけでなく炭素系廃棄物等を利用することで $CO_2$ 排出量を削減し、化学品を併産することで $CO_2$ 分離・回収コストの低減が期待できる。

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

### 3. 達成目標

[中間目標（2022年度）]

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

[最終目標（2024年度）]

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

#### 研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

##### 9) 機動性に優れ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CO<sub>2</sub>排出量削減の両立を狙い、既存の火力発電設備へのレトロフィットやリプレース向けに定格時の効率を維持したうえで、機動力と再エネ出力不調時のバックアップ電源の両機能を具備した、機動性に優れた広負荷帯高効率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にする。

#### 2. 具体的研究内容

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

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

表 先行研究で設定されたGTCCとしての目標性能

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

### 3. 達成目標

[最終目標（2021年度）]

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



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

[実施期間] 2015年度～2020年度（うち2015年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

### 1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画（2014年4月閣議決定）においては、石炭火力発電は重要なベースロード電源として位置づけられているが、温室効果ガスの大気中への排出をさらに抑えるため、石炭ガス化複合発電（IGCC）等の次世代高効率石炭火力発電技術等の開発及び実用化を推進することとされている。石炭は他の化石燃料と比べ利用時の二酸化炭素排出量が大きく、地球環境問題での制約要因が多いという課題を抱えており、石炭火力発電についても更なる二酸化炭素排出量の抑制が求められている。今後CO<sub>2</sub>排出量抑制のためには、さらなる高効率化に向けて、現在開発中のIGCCを効率でしのぐ次世代高効率石炭火力発電技術等の開発に加え、CCSによる低炭素化を図っていく必要がある。

しかしながら、CCSは多大な付加的なエネルギーが必要であり、効率の低下や発電コストの上昇を招く。そのためエネルギー資源を海外に依存する我が国では、資源の有効利用と発電コストの抑制のため、このエネルギーロス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CO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCCの開発、水蒸気を添加した次世代ガス化システム及び両技術の相乗効果確認を実施する。とりわけ相乗効果については、既存のIGCCへ両要素技術の適用性についても効果を検証する。クローズドIGCCシステムは、排ガスCO<sub>2</sub>を一部系統内にリサイクルすることにより、CO<sub>2</sub>回収型石炭ガス化発電システムの効率を大幅に向上することのできる、世界でも例のない次世代IGCCシステムである。本システムは高効率に加え、CO<sub>2</sub>の100%回収が可能であるため、CO<sub>2</sub>を排出しないゼロエミッション石炭火力の実現が期待できる。また、次世代ガス化システムは、冷ガス効率及び送電端効率の向上並びに実用化に向けた技術開発に向けて、酸素吹石炭ガス化においては、ガス化炉にガス化剤として酸素を供給して石炭を部分燃焼させ、石炭を熱分解しているが、投入された石炭が一部燃焼して消費されること、酸素製造装置等の所内動力の増加により送電端効率が低下することが効率向上のための課題となっていることから、熱分解の一部を、ガスタービン排熱を利用して作る水蒸気を用いた石炭ガス化反応に置き換えることにより、冷ガス効率の向上を図るとともに、酸素供給量の低減を図り、送電端効率の向上を目指す。CO<sub>2</sub>回収型クローズドIGCCの実現に向けては、2008年度から2014年度まで実施した「CO<sub>2</sub>回収型次世代IGCC技術開発」において、石炭投入量3 t/dの小型ガス化炉を活用し、送電端効率42%（高位発熱量基準）以上を達成可能とする基盤技術を開発してきた。

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

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

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

(1) 水蒸気添加による冷ガス効率向上効果の検証

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

(2) エネルギー効率の高い酸素製造装置の適用性評価

エネルギー効率の高い酸素製造装置の適用性を評価する。

(3) I G C C システム検討

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

冷ガス効率の向上及び試設計を踏まえて、送電端効率を精査する。

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

### 3. 達成目標

[中間目標 (2017年度)]

CO<sub>2</sub>回収型クローズド I G C C については、送電端効率42% (高位発熱量基準) を見通すための要素技術確立の目途を得る。

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

[最終目標 (2020年度)]

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

次世代ガス化システムについては、2018年度までに既存の I G C C (1500℃級GTで送電端効率46~48%) を凌駕する高効率石炭ガス化発電システムの見通しを得る。

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

## 研究開発項目⑥ 「次世代火力発電技術推進事業」

[実施期間] 2016年度～2024年度

### 1. 研究開発の必要性

長期エネルギー需給見通しにおける基本方針は、3E+S（安全性、安定供給、経済効率性、環境適合）を同時達成しつつ、バランスの取れた電源構成を実現することである。2030年以降、中長期的に火力発電から排出されるCO<sub>2</sub>を一層削減するには、次世代技術の普及による更なる高効率化や再生可能エネルギーの利用拡大、並びにカーボンリサイクルの推進が重要である。これらの推進を実現するには中長期的な研究開発も重要であるため、革新的技術の先導研究や調査が必要となる。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およびカーボンリサイクルにおける最新技術の普及可能性、技術開発動向、産業間連携等の調査や、新規技術開発シーズ発掘のための調査を実施する。また、IEA/CCC (Clean Coal Centre)、IEA/FBC (Fulldized Bed Combustion)、等に参画し、技術情報交換・各種技術情報収集を行うとともに、国内関係者への情報提供を行う。また、今後の国際市場における日本の火力発電所受注に向けて、高い競争力を発揮できる戦略及びビジネスモデルを構築する。さらに、低コスト高効率次世代火力発電システム実現に向けた検討や次世代火力発電における燃料多様化（バイオマス、アンモニア等）のための調査および先導研究を進める。また、カーボンリサイクルにおいては、要素技術検討のための共通基盤技術開発（CO<sub>2</sub>還元、炭酸塩化等）を進める。

### 3. 達成目標

[最終目標（2024年度）]

火力発電技術分野において、CO<sub>2</sub>排出量低減、環境負荷低減及び国際競争力の強化を図るために必要となる基礎的情報や、最新情報の収集・解析及び将来における次世代火力の技術開発や導入可能性について、関連技術の適応性、課題等の調査を行う。また、海外との協力を通して、我が国の優れたCCTの導入に向けた取組を行う。カーボンリサイクル分野において、先導研究や調査の成果を俯瞰して、関連技術の経済性や導入可能性、CO<sub>2</sub>削減効果に関する基礎的情報や課題を整理する。

## 研究開発項目⑦ 「次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発」

[実施期間] 2017年度～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、適用箇所の拡大を目的とした非破壊検査技術開発を実施する。

### 3. 達成目標

[中間目標（2019年度）]

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

表面処理技術開発等の高温材料信頼性向上及びタービンロータ超音波探傷試験（UT検査）精度向上等の保守技術については、技術確立の見通しを得る。

[最終目標（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。

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

[実施期間] 2020年度～2024年度

### 1. 研究開発の必要性

供給安定性及び経済性に優れた天然資源である石炭を利用した火力発電は、将来的にも、国内の発電供給量の26%を担う重要な電源であるが、これら石炭火力発電ではCO<sub>2</sub>排出量が比較的多い課題がある。このような石炭火力を中心とした産業部門から生成するCO<sub>2</sub>を削減するため、2019年6月に経済産業省において策定された「カーボンリサイクル技術ロードマップ」において、CO<sub>2</sub>を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化や人工光合成、メタネーションによる素材や燃料への利用等とともに、大気中へのCO<sub>2</sub>排出を抑制していく方針が示された。

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

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

### 2. 具体的研究内容

#### 1) CO<sub>2</sub>有効利用拠点化推進事業

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

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

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

### 3. 達成目標

[中間目標(2022年)]

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

[最終目標(2024年度)]

2030年の実用化に向け、広島県大崎上島の研究拠点にて個々の技術開発および実証試験を行い、各CO<sub>2</sub>有効利用技術の経済性、CO<sub>2</sub>削減効果等を評価する。

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

1) 化学品へのCO<sub>2</sub>利用技術開発

[実施期間] 2020年度～2025年度

### 1. 研究開発の必要性

供給安定性及び経済性に優れた天然資源である石炭を利用した火力発電は、将来的にも、国内の発電供給量の26%を担う重要な電源であるが、これら石炭火力発電ではCO<sub>2</sub>排出量が比較的多い課題がある。2019年6月に経済産業省において策定された「カーボンリサイクル技術ロードマップ」において、CO<sub>2</sub>を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化や人工光合成、メタネーションによる素材や燃料への利用等を通じて、大気中へのCO<sub>2</sub>排出を抑制していく方針が示された。

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

### 2. 具体的研究内容

CO<sub>2</sub>を原料とした化学品の合成においては、CO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>Oから基幹物質であるCO、H<sub>2</sub>の合成ガスあるいはメタノール等を製造する技術、これら基幹物質から汎用物質であるオレフィンやBTX（ベンゼン・トルエン・キシレン）等を製造する技術やバイオマス由来の化学品を製造する技術などが必要である。これらについて高効率な製造技術の開発や、全体システムの最適化を行う。

### 3. 達成目標

[中間目標（2022年）]

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

[最終目標（2025年度）]

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

## 2) 液体燃料へのCO<sub>2</sub>利用技術開発

[実施期間] 2020年度～2025年度

### 1. 研究開発の必要性

供給安定性及び経済性に優れた天然資源である石炭を利用した火力発電は、将来的にも、国内の発電供給量の26%を担う重要な電源であるが、これら石炭火力発電ではCO<sub>2</sub>排出量が比較的多い課題がある。2019年6月に経済産業省において策定された「カーボンリサイクル技術ロードマップ」において、CO<sub>2</sub>を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化や人工光合成、メタネーションによる素材や燃料への利用等を通じて、大気中へのCO<sub>2</sub>排出を抑制していく方針が示された。

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

### 2. 具体的研究内容

液体燃料（CO<sub>2</sub>由来燃料またはバイオ燃料（微細藻類由来を除く））製造に関するFT合成やその他合成反応など製造プロセスの改善、バイオエタノールなど微生物利用合成ガス製造プロセスの最適化検討などに取り組む。

### 3. 達成目標

[中間目標（2022年）]

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

[最終目標（2025年度）]

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

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

[実施期間] 2020年度～2025年度

#### 1. 研究開発の必要性

供給安定性及び経済性に優れた天然資源である石炭を利用した火力発電は、将来的にも、国内の発電供給量の26%を担う重要な電源であるが、これら石炭火力発電ではCO<sub>2</sub>排出量が比較的多い課題がある。2019年6月に経済産業省において策定された「カーボンリサイクル技術ロードマップ」において、CO<sub>2</sub>を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化や人工光合成、メタネーションによる素材や燃料への利用等を通じて、大気中へのCO<sub>2</sub>排出を抑制していく方針が示された。

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

#### 2. 具体的研究内容

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

#### 3. 達成目標

[中間目標（2022年）]

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

[最終目標（2025年度）]

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



#### 4) 気体燃料へのCO<sub>2</sub>利用技術開発

[実施期間] 2021年度～2025年度

##### 1. 研究開発の必要性

供給安定性及び経済性に優れた天然資源である石炭を利用した火力発電は、将来的にも、国内の発電供給量の26%を担う重要な電源であるが、これら石炭火力発電ではCO<sub>2</sub>排出量が比較的多い課題がある。2019年6月に経済産業省において策定された「カーボンリサイクル技術ロードマップ」において、CO<sub>2</sub>を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化や人工光合成、メタネーションによる素材や燃料への利用等を通じて、大気中へのCO<sub>2</sub>排出を抑制していく方針が示された。

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

##### 2. 具体的研究内容

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

##### 3. 達成目標

[中間目標 (2022年)]

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

[最終目標 (2025年度)]

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

## 研究開発項目⑩ 「石炭利用環境対策事業」

[実施期間] 2016年度～2025年度

### 1. 研究開発の必要性

石炭は、経済性、供給安定性に優れた重要なエネルギー資源であり、「エネルギー基本計画」においても、重要なベースロード電源と位置付けられており、今後とも新興国を中心に世界的に利用が拡大していくと見込まれている。一方、石炭利用に伴い発生するCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじん等への対策や、石炭需要の拡大により増大する石炭灰やスラグの有効利用方策を確立することが喫緊の課題である。

### 2. 具体的研究内容

石炭利用に伴い発生する環境影響の低減等に貢献する技術の開発を行う。

#### 1) 石炭利用環境対策推進事業

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

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

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

#### 2) 石炭利用技術開発

石炭等の燃焼灰の利用用途拡大に関する技術開発を行う。

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

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

### 3. 達成目標

[中間目標（2019年度）]

#### 1) 石炭利用環境対策推進事業

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

石炭等の燃焼灰の有効利用、及び削減に寄与する技術の確立に向けた知見を得る。

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

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

## 2) 石炭利用技術開発

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

### [中間目標（2022年度）]

#### 1) 石炭利用環境対策推進事業

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

## 2) 石炭利用技術開発

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

### [最終目標（2025年度）]

#### 1) 石炭利用環境対策推進事業

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

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

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

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

## 2) 石炭利用技術開発

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

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

[実施期間] 2021年度～2025年度

### 1. 研究開発の必要性

2018年7月「第5次エネルギー基本計画」では、石炭は、経済性、供給安定性に優れた重要なエネルギー資源であり、重要なベースロード電源と位置付けられている。また、既存のインフラを有効利用した脱炭素化のための技術開発として、アンモニアを燃料として直接利用する技術開発が挙げられている。

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

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

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

### 2. 具体的研究内容

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

1) 要素研究 [委託事業]

2) 実証研究 [助成事業 (1/2助成)]

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

### 3. 達成目標

[中間目標 (2023年)]

火力発電等におけるアンモニアの燃料としての利用技術の見通しを得る。

[最終目標 (2025年度)]

火力発電等におけるアンモニアの燃料としての利用技術を確立する。

研究開発スケジュール

◇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	2024	2025	
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 <sub>2</sub> 分離・回収型酸素吹IGCC実証(2/3、1/3助成) 3) CO <sub>2</sub> 分離・回収型IGFC実証(1/2助成) 4) 信頼性向上、低コスト化(1/3助成) 5) CO <sub>2</sub> 分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発(1/2助成)					※1														
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 <sub>2</sub> 分離型化学燃焼石炭利用技術開発(委託)									※2										
6) 石炭火力の負荷変動対応技術開発(委託)																			
7) CO <sub>2</sub> 有効利用技術開発(委託)																			
8) CO <sub>2</sub> 分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発(委託)																			
9) 機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究(委託)																			
研究開発項目⑤ CO <sub>2</sub> 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)																			

年度(西暦)	1982	~	14	15	16	17	18	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
研究開発項目⑧ CO <sub>2</sub> 有効利用拠点における技術開発(委託・助成)											◇			◆
									CO <sub>2</sub> 有効利用拠点化推進事業					
									研究拠点におけるCO <sub>2</sub> 有効利用技術開発・実証事業					
研究開発項目⑨ CO <sub>2</sub> 排出削減・有効利用実用化技術開発(委託・助成)														
1) 化学品へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発(委託・助成)											◇			◆
									化学品へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発					
2) 液体燃料へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発(委託・助成)											◇			◆
									液体燃料へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発					
3) コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO <sub>2</sub> 利用技術開発(委託・助成)											◇			◆
									コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO <sub>2</sub> 利用技術開発					
4) 気体燃料へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発(委託・助成)											◇			◆
									気体燃料へのCO <sub>2</sub> 利用技術開発					
研究開発項目⑩ 石炭利用環境対策事業(委託・助成)								◇			◇			◆
1) 石炭利用環境対策推進事業(委託)				※2	石炭発熱性調査・先導研究、スラグの規格化、石炭灰発生量及び有効利用実態調査、石炭灰利用・削減技術開発等									
2) 石炭利用技術開発(2/3補助)			※1	セメント不使用フライアッシュ製造技術開発										
									石炭ガス化溶融スラグのコンクリート実規模性能試験					
⑪アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業(委託・補助)												◇		◆
									アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業					

※1 経済産業省にて実施

※2 NEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施

## 添付資料 2)

プロジェクト開始時関連資料（平成 29 年度成果報告書 エネルギー・環境新技術先導プログラム／  
機動性に優れた広負荷帯高効率 GT の開発）

平成 29 年度成果報告書

エネルギー・環境新技術先導プログラム/  
機動性に優れた広負荷帯高効率 GT の開発

平成 30 年 3 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

委託先 一般財団法人電力中央研究所

三菱重工業株式会社



## 和文要約

2030年のエネルギーミックスや2050年のCO<sub>2</sub>排出量の大幅削減の実現に向けて、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー電源（以下、再エネ電源）が大量導入されることが予想される。再エネ電源は、発電出力が天候に左右される不安定な電源であることから、電力システムを安定運用するための負荷変動対策が重要な課題となっている。負荷変動対応の電源としては、高効率かつ機動性に優れるガスタービン複合発電（GTCC）が有望であり、これまでの先行研究において、2030年に開発すべき目標性能と実現のための具体的な技術開発課題が取りまとめられるとともに、電力システムの需給運用とCO<sub>2</sub>排出削減の観点から火力発電およびGTCCが担うべき役割が整理され、機動性能を向上したGTCC（以下、高機能GTCC）により得られる省エネルギー効果とCO<sub>2</sub>排出量削減効果が明らかにされた。同時に、高機能GTCCの開発・普及に向けた課題についても検討され、再エネ電源大量導入時には火力発電の稼働率低下が避けられないため、発電電力量による料金収入だけでなく、電力システムの安定運用に貢献する調整力としての火力の価値に価格がつくような、発電事業者が事業を成立できる新たな制度設計が不可欠であることも示された。

今日、制度面の検討が進められている最中ではあるが、技術開発は一朝一夕に成し遂げられるものではなく、制度の成立を待ってから開発に着手などと悠長なことは言っていられない。そこで本研究では、再エネ電源と共存しシステムの安定運用とCO<sub>2</sub>排出量の削減を両立する高機能GTCCの早期実現に向けて、その鍵となる要素技術開発にいち早く着手した。研究項目と主な成果は以下のとおり。

研究項目 A：急速起動・急速負荷変動対応大型ガスタービン複合発電システムの概念設計

- ・先行研究で設定された目標性能を達成できるシステム構成と運転条件を明確化
- ・安定燃焼および失火耐性を確保可能なGT制御コンセプトを立案
- ・数値解析により逆火事象を再現

研究項目 B：ロータ・動翼の軽量化技術の基礎検討

- ・高性能冷却構造・非定常熱応力低減・軽量化を同時に実現するGT動翼コンセプトを立案
- ・NIMSが開発した軽量新材料の適用可能性の明確化
- ・翼間・回転軸内部の熱流体解析と、構造温度分布・変形の解析を強連成させる手法を開発

研究項目 C：部分負荷運転時の効率向上に向けた翼周りの可変機構制御技術の検討

- ・翼環温度制御によるクリアランスコントロールのコンセプトを立案

本研究の推進により、急速な起動や出力変動など機動性を向上するための設計コンセプトを明らかにした。

また、具体的な開発プロジェクト提案に向けた検討も進め、商用化にいたる開発計画案を策定した。開発ステップとしては、本先導研究の成果を踏まえた要素研究フェーズを経て、実機による実証研究フェーズに進むことを想定する。要素研究フェーズにおいては、先行研究で設定された目標性能の実現に向けた燃焼技術、制御技術、冷却・シール技術、空力技術、数値解析技術、材料技術などの開発を行う。実証研究の推進は、スピード感と開発コスト低

減の観点から、発電事業者の協力の下、既存設備のレトロフィットにより、できる部分から段階的に性能実証を進めることが有効と考える。

なお、GTは幅広い燃料に対応可能であり、将来的には余剰再エネから製造された水素をLNGと混焼、あるいは水素専焼とするGTの実用化も想定できる。系統安定への貢献や広い負荷帯での高効率運転などの効果の観点から、開発する技術の適用は可能であり、将来にわたり活用される重要な技術開発と考える。

## Summary

It is expected that a large amount of introduction of renewable energy power sources such as photovoltaic power generation and wind power generation will be carried out in order to drastically reduce future CO<sub>2</sub> emissions. Since the output of the power source is affected by the weather and it is unstable, measures to cope with load fluctuation for stable operation of the electric power system are important issues. Gas turbine combined cycle power generation (GTCC), which has high efficiency and excellent flexibility, is promising as a power source that handles load fluctuations. In the previous research, the target performance to be developed by 2030 and concrete technical development tasks were clarified. Furthermore, the effectiveness of energy saving and the reduction of CO<sub>2</sub> emissions obtained by advanced GTCC with improved flexibility performance were clarified.

At the same time, issues to develop and disseminate advanced GTCC were also examined. The introduction of a large amount of renewable energy power sources inevitably reduces the operation rate of thermal power plants. Therefore, to establish a business for power producers, it is indispensable to design a new system, which not only charge income due to the amount of power generation but also the value of thermal power as an adjustment power that contributes to the stable operation. Technological development is not able to be easily accomplished, so it is too late to start development after the system is established. In this research, we began to develop key element technologies that promptly realize advanced GTCC that coexists with renewable energy and achieves both stable operation of the system and reduction of CO<sub>2</sub> emissions. The design concept for improving maneuverability such as rapid start-up and ramp rate was clarified. In addition, studies were also made for development project proposals, and a development plan was also drafted.

Research items and main results are as follows.

Item A: Conceptual design of large-scale gas turbine combined cycle power plant system with rapid start-up and ramp rate

- Clarified system configuration and operating conditions that is able to achieve target performance set in previous research
- Designed a GT control concept capable of ensuring stable combustion and misfire resistance

Item B: Basic investigation of weight saving technique of rotor and turbine blade

- Designed a concept of GT rotor blades that is able to simultaneously realize high performance cooling structure, reduction of unsteady thermal stress and weight reduction
- Development of a method to strongly couple the thermal fluid dynamics analysis inside

the rotating shaft and between blades and analysis of stress, temperature distribution, and deformation

Item C: Variable mechanism control technique around the blade for improvement of efficiency during partial load operation

- Designed the concept of clearance control by temperature control of shroud

## 目次

1. はじめに.....	1
2. 本研究開発の意義.....	2
2.1 CO <sub>2</sub> 排出量削減に向けた国の方針.....	2
2.2 再生可能エネルギー電源の大量導入が電力需給バランスに及ぼす影響.....	4
2.3 各種調整力の役割の整理と高機動 GTCC の価値.....	6
2.4 制度面の整備の必要性.....	7
2.5 技術開発の必要性.....	8
3. 実施概要.....	9
3.1 実施項目・体制.....	9
3.2 研究開発推進委員会.....	12
4. 研究成果.....	14
4.1 プラントシステムの全体性能評価.....	15
4.2 高負荷変化率に対応した GT/燃焼器制御技術の検討.....	30
4.3 燃焼器の急速負荷変動時における逆火リスク評価技術の開発.....	44
4.4 超軽量精密鋳造タービン動翼の概念設計.....	48
4.5 軽量・高強度耐熱新材料の適用化検討.....	58
4.6 圧縮機・タービンの急速起動時における構造熱変形と流れとの関係に関する連成解析.....	67
4.7 軽量・高レスポンスロータコンセプトの検討.....	82
4.8 部分負荷運転時の効率向上に向けたケーシングの温度制御技術の検討.....	93
5. 開発プロジェクト案の策定に向けて.....	100
5.1 海外における GTCC の調整力向上の技術開発動向と特許調査.....	100
5.2 開発プロジェクト案の概要.....	104
6. 結び.....	105

## 1. はじめに

2030年のエネルギーミックスや2050年のCO<sub>2</sub>排出量の大幅削減の実現に向けて、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー電源（以下、再エネ電源）を最大限導入することが、国の方針として示されている<sup>(1-1)</sup>。再エネ電源は出力が天候に大きく影響を受けるなど基本的に不安定な電源であり、電力系統を安定的に運用するためには、負荷変動対策が重要な課題となる。現状では、機動性の良い揚水発電や火力発電が重要な役割を果たしているが、再エネ電源の大量導入時代に備えて、さらなる負荷変動対策が必要である。それに向けて、再エネ電源の出力予測技術の向上や、蓄電池など電力貯蔵技術の開発などが進められているが、前者においては予測精度の向上、後者においてはコスト低減、電力の充放電損失改善、大容量化など、解決すべき課題は多い。

電力系統においては、電力量のバランスだけでなく、周波数や電圧等を安定化させる必要がある。そのためには、火力発電のような同期機は不可欠な電源である。また、火力発電は燃料を供給する限りいつでも発電できることから、電力の安定供給、品質を維持する要と づけても過言ではない。将来的には、火力発電による負荷変動対応の重要性が高まり、火力発電設備には頻繁な起動停止や急激な負荷変動を伴う部分負荷での運転が求められることが予想される。その結果、熱効率が低下し、火力機1台から排出される出力1kWhあたりのCO<sub>2</sub>排出量（単機あたりの排出原単位）は増加することが懸念されており、系統の安定運用とCO<sub>2</sub>排出量の削減の両立が課題となる。

火力電源の中でもLNGを燃料とするガスタービン複合発電設備（以下、GTCC）は、高効率かつクリーンであることに加えて、機動性に優れる特長を持つ。技術開発により、起動時間や出力変化速度などの機動力をさらに向上させるとともに、幅広い負荷帯で高効率に運用可能な電源を実現できれば、先述した急激かつ大きな負荷変動に対応する現実解として有望である。現状性能をさらに向上させた急速起動・負荷変動対応型GTの開発に向けて、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）平成26年度エネルギー・環境新技術先導プログラムに採択された「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」（以下、先行エネ環研究）においてFSが行われ、2030年に実現すべき性能目標が取りまとめられるとともに、技術開発課題が示された<sup>(1-2)</sup>。その後、平成28年度に実施されたNEDO調査研究「再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定化における火力発電の役割とガスタービンの負荷変動吸収能力の向上によるCO<sub>2</sub>削減効果に関する調査研究」（以下、先行調査研究）においては、系統の安定性、CO<sub>2</sub>排出量の削減、コスト削減等の観点から、再エネ電源の負荷変動対策においてガスタービン（以下、GT）に求められる役割や性能が検討された。負荷変動対応に資するGTの機動性能向上によって得られる省エネルギー効果やCO<sub>2</sub>排出量削減効果、さらには再エネ電源の出力の予測はずれ時に生じるインバランスの低減効果などが明らかとなった<sup>(1-3)</sup>。

それらの成果を踏まえ、本研究では、再エネ電源と共存し系統の安定運用と

CO<sub>2</sub> 排出量の削減を両立する GTCC の早期実現に向けて、その鍵となる要素技術開発にいち早く着手し、急速起動や負荷変動への対応など機動性を向上する GT の設計コンセプトを明確にする。

## 文献

- (1-1) 「地球温暖化対策計画」別表 1-74, 経済産業省, 2016
- (1-2) 平成 26 年度～平成 27 年度成果報告書 エネルギー・環境新技術先導プログラム「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」, NEDO, 2016
- (1-3) 平成 28 年度成果報告書 再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定化における火力発電の役割とガスタービンの負荷変動吸収能力の向上による CO<sub>2</sub> 削減効果に関する調査研究, NEDO, 2017

## 2. 本研究開発の意義

### 2.1 CO<sub>2</sub> 排出量削減に向けた国の方針

2015 年に開催された COP21 で採択されたパリ協定が主要国により批准され、CO<sub>2</sub> 排出量削減に向けて国際的な枠組みでの取り組みが開始されている。米国の動向が不透明ではあるものの、CO<sub>2</sub> 排出量削減は世界的な大きな流れとして無視できない状況であることに変わりない。我が国においては、2020 年以降の国際枠組みの構築に向けた対応と貢献案である「日本の約束草案」において、2030 年度までに温室効果ガス排出を 2013 年度比で 26.0%削減することが目標設定されている<sup>(2.1-1)</sup>。さらに将来の 2050 年断面では、80%削減という大きな目標が掲げられており、火力発電の高効率化、原子力発電の活用、再エネ電源の最大限の導入、CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) の実用化などにより、可能な限り排出量削減に努めていく方向である。2015 年に発表された長期エネルギー需給見通しでは、原子力の再稼働と再エネ電源比率の増大を盛り込んだ 2030 年度の電源構成が示された (図 2.1-1)。ここでは、火力発電の比率は 56%程度まで減少する一方で、再エネ電源比率は 22~24%程度まで増大し、中でも太陽光発電の割合は 7% (749 億 kWh) を目指すとされている。これは、太陽光発電の設備利用率が年平均で 13%程度であることを考慮すると、全ての電源容量の約 1/4 (6,400 万 kW) に相当する膨大な太陽光発電設備が、電力系統に接続されることを意味する。

図 2.1-2 に東京と中部を除く電力各社管内における太陽光発電の接続済量と接続申込量、および接続可能量について 2014 年と 2017 年を比較して示す。各エリアとも、2014 年に比べて接続済量、接続申込量ともに大きく増加しており、既にほとんどのエリアで接続可能量を超える申込みがある。中でも北海道、九州、沖縄においては、接続可能量に迫る接続済量となっている。導入量の多い九州エリアにおいては、軽負荷期である 2017 年 4 月 23 日に、一時、需要の 76%を太陽光発電が賄う事態が生じた。また、夏季には再エネ発電事業者に対して、電力系統安定に向けた出力抑制の訓練も行われるなど、現実として太陽光発電

の導入は急激に進んでいる状況にある。

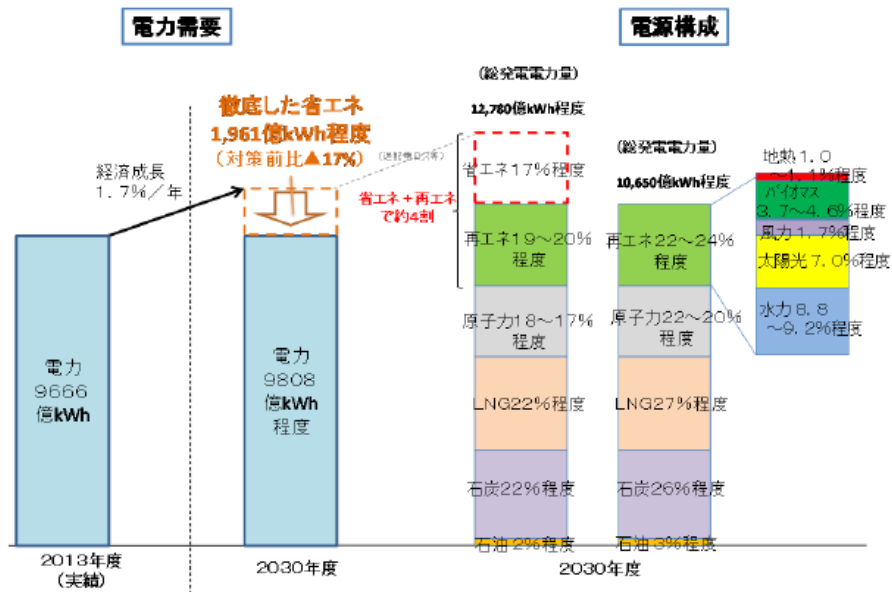


図 2.1-1 2030 年度の電力需要と電源構成

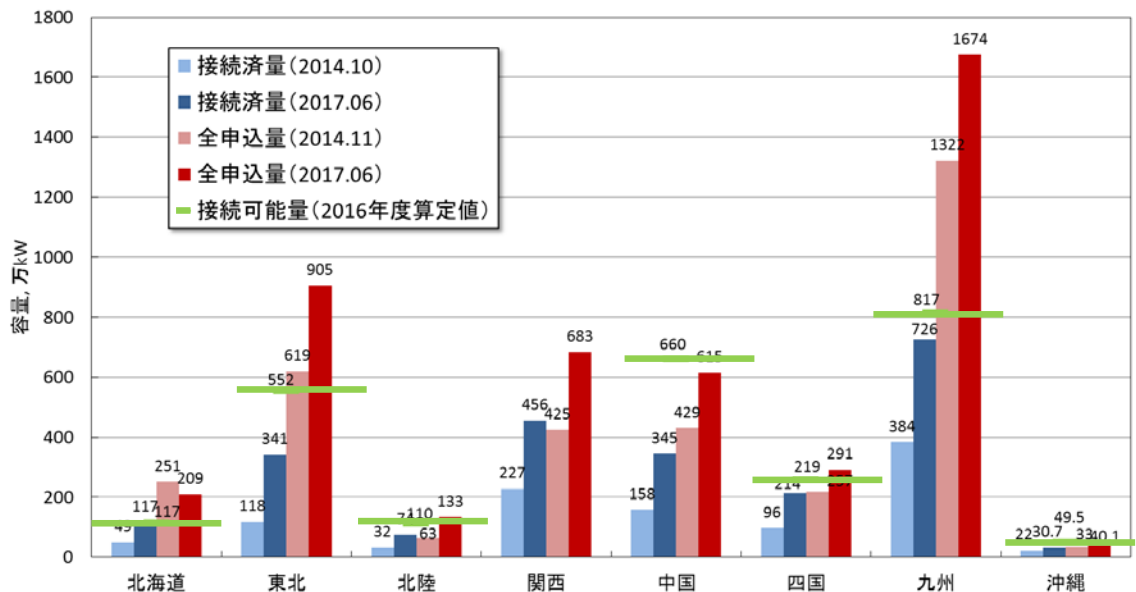


図 2.1-2 電力各社管内の接続済み量，接続申込量と接続可能量  
(2014 年は文献 2.1-2，2017 年は各社ホームページの情報を元に作成)

※2017 年の北海道・沖縄の値は 5 月末日，中国は 7 月 21 日時点。

※全申込量には，接続量申込を含む。東北，北陸，九州の全申込量には承諾済も含む。

※九州の全申込量には，さらに接続検討申込を含む。

### 文献

(2.1-1) 環境省，日本の約束草案，平成 27 年 7 月



(2.1-2) 資源エネルギー庁，再生可能エネルギー各電源の導入動向について，総合資源エネルギー調査会長期エネルギー需給見通し小委員会（第4回会合）資料3，平成27年3月

## 2.2 再生可能エネルギー電源の大量導入が電力需給バランスに及ぼす影響

太陽光や風力などの再エネ電源は，出力が天候に大きく影響を受けるなど基本的に出力が不安定な電源であり，電力システムを安定的に運用するためには，負荷変動対策が重要な課題となる．現状では，機動性の良い揚水発電や火力発電がその役割を果たしているが，再エネ電源の大量導入時代に備えて，さらなる負荷変動対策は不可欠である．それに向けて，再エネ電源の出力予測技術の開発や，蓄電池など電力貯蔵技術の開発などが進められているものの，前者においては予測精度の向上，後者においてはコスト低減，電力の充放電損失改善，大容量化など，解決すべき課題は多い．

太陽光発電が大量導入された場合に需給バランスを維持するためのイメージを図2.2-1に示す<sup>(2.2-1)</sup>．朝から午前中に生じる太陽光出力の増加に対して火力の抑制で対応し，日中は揚水発電の動力運転や火力の停止などが行われる．夕方には太陽光発電出力が急激かつ大量に減少し，揚水発電や火力の増出力・再起動等により対応する．図2.2-1において赤線の需要曲線から日中太陽光発電を差し引いた緑線は，太陽光発電を除く残余需要であり，朝晩に比較し日中に大きく下がることからダックカーブと呼ばれる．夕方に生じる急激かつ大量の太陽光発電による発電量の減少と点灯需要増への対応は重要で，速さと量が同時に求められることになる．

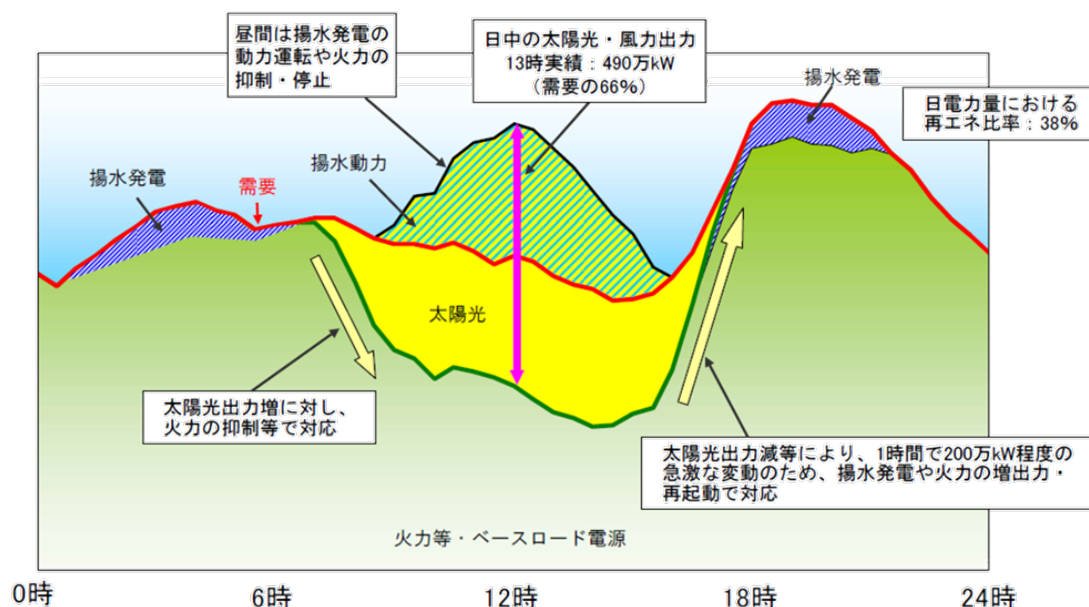


図 2.2-1 再エネ電源大量導入時の需給バランスのイメージ  
（九州電力管内における平成28年5月4日の例）<sup>(2.2-1)</sup>

図 2.2-2 には、天候による太陽光発電出力の違いのイメージを示す。曇天時においては、日射の有無に応じて発電量に急激な変化が生じ、雨天時はほとんど発電が期待できない。晴天時の発電量になるよう補完電源が必要となるが、必要となる電力量が多いことを考慮すれば、当面は現状ミドル・ピーク電源の役割を持つ火力機によるバックアップは不可欠と考えられる。

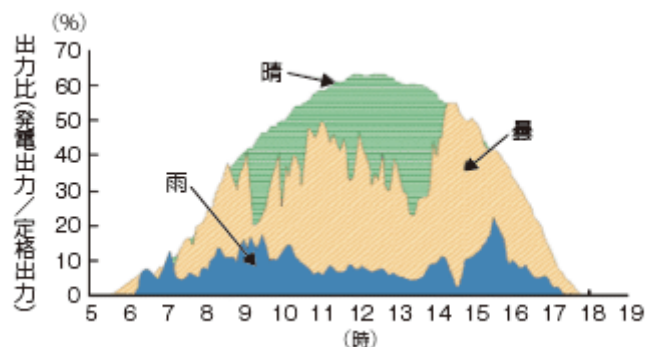


図 2.2-2 太陽光発電の天候別発電電力量推移 (2.2-2)

日中の天候急変に伴う太陽光発電出力変化の例を図 2.2-3 に示す(2.2-3)。これは、60Hz エリアにおいて NEDO 日射量データベースで理論日射量(理論出力)を算出し、アメダスデータより日照時間を乗じて太陽光発電出力を算出した例である。13 時頃～14 時頃にかけて、各地点での出力低下が合わさることで全体として出力が急変している。この例では、約 40 分で約 450 万 kW の出力低下(11 万 kW/分)が生じており、ここでも速さと量の両者が求められることが分かる。

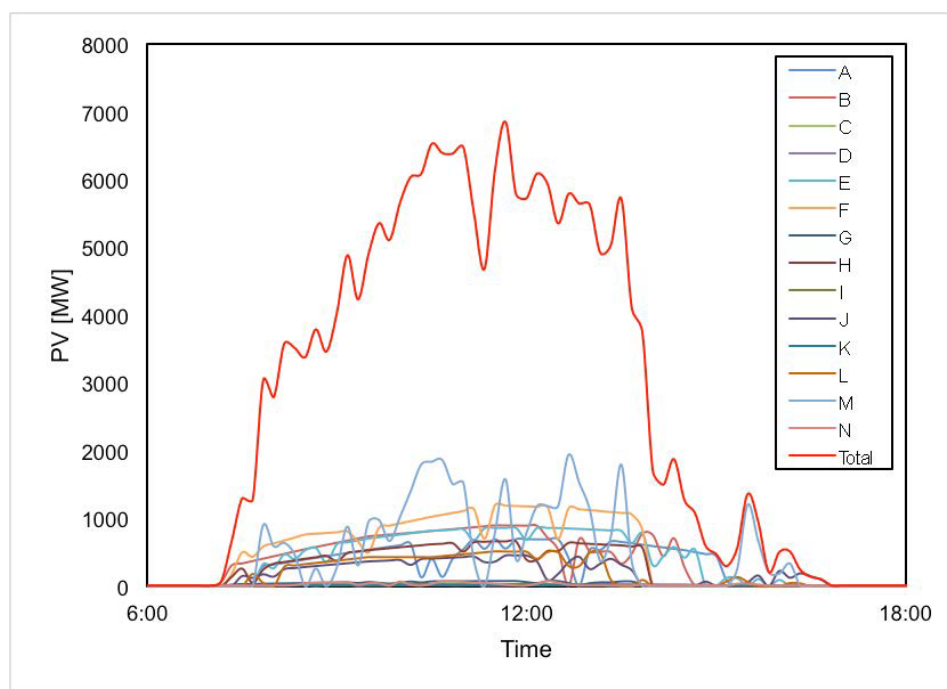


図 2.2-3 ある日の太陽光発電出力の例 (2.2-3)

整理すると、太陽光発電の大量導入による電力需給バランス維持に向けた主な課題として、(1) 夕方から日没時の急激な太陽光発電量の減少への対応と、(2) 再エネ電源由来で日中に生じる急激かつ大きな出力変動への対応の2点が重要である。そのためには、(1) に対しては急速起動や出力変化速度の向上とともに十分な量の供給力の確保が、(2) に対しては急速起動や出力変化速度の向上に加えて対応可能範囲を広げるための最低出力 (=LFC 下限) 引き下げが求められる。

## 文献

- (2.2-1) 再エネの導入状況と至近の需給状況について、九州電力、2016  
<https://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0055/4201/2ntja6f6cpd.pdf>
- (2.2-2) 資源エネルギー庁ホームページより、2018  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/ohisama\\_power/about/kadai.html](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/ohisama_power/about/kadai.html)
- (2.2-3) 大山，再生可能エネルギーと電力ネットワーク，第23回CCEシンポジウム with NEDO 発表資料，P16，2016  
[https://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/html\\_seminar/20160809/2016\\_0809\\_03.pdf](https://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/html_seminar/20160809/2016_0809_03.pdf)

### 2.3 各種調整力の役割の整理と高機動GTCCの価値

現状，系統の調整電源として，火力のLFC運用や揚水発電が用いられている。電力系統においては，電力量のバランスだけでなく，周波数や電圧等を安定化させる必要がある。周波数維持のためには，慣性力の観点から，火力発電のような大型の回転機は不可欠である。将来技術として，大容量の蓄電池の開発も進められているが，蓄電池はその役割を担うことはできない。また，火力発電は燃料を供給する限りいつでも発電できることから，再エネ電源大量導入時代においても電力の安定供給，品質を維持する要である位置づけには変わらないと考える。将来的に，火力発電による負荷変動対応の重要性がさらに高まれば，火力発電の主な役割は，定格高効率のベースロード電源から，再エネ電源出力の不安定性を補完する調整電源にシフトしていくと想定される。すなわち，火力発電設備には頻繁な起動停止や，急激な負荷変動を伴う部分負荷での運転が求められるようになり，その結果，運転時の熱効率が低下し，火力機1台から排出される出力1kWhあたりのCO<sub>2</sub>排出量（単機あたりの排出原単位）が増加することになるため，系統の安定運用とCO<sub>2</sub>排出量の削減の両立が重要な課題となる。

火力電源の中でもLNGを燃料とするGTCCは，高効率かつクリーンであることに加えて，機動性に優れる特長を持つ。技術開発により，起動時間や出力変化速度などの機動力をさらに向上させるとともに，幅広い負荷帯で高効率の運転を実現できれば，先述した急激かつ大きな負荷変動に対応する現実解として有望である。この開発の方向性は、「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」

にも、「負荷追従性の向上など、再生可能エネルギーの拡大に対応する観点からの運用性の向上を合わせて追及する」と、文言として盛り込まれている。

国内においては、現在エネルギー基本計画の見直しが進んでいるが、原子力の再稼働が進まない現実に鑑みれば、CO<sub>2</sub> 排出量削減のために再エネ電源導入拡大の加速化も選択肢としてあり得る。その場合、長期的には化石燃料による火力発電を少なくしていく方向に進むと予想されるが、再エネ電源代替としてのコストや大型の同期発電機による周波数安定など系統への効果等を考慮すれば、当面は大型の GTCC なしに電力の安定供給は維持できない。高機動の GTCC は、再エネ電源と共存しながら、同一設備から大容量のベースロード電源(kWh)、再エネ電源のバックアップ電源(kW)、高機動な調整力(ΔkW)のいずれの価値をも創出可能な電源設備としての活用が可能である。

## 2.4 制度面の整備の必要性

我が国においては、平成 28 年度から調整電源の公募が開始されている。一般送配電事業者が周波数制御・需給バランス調整に活用する調整力は、送配電事業者があらかじめ調整用に確保するもの(電源 I + 電源 I')と、小売事業者の供給力として用いながら送配電事業者の調整力としても活用するもの(電源 II)に整理されている。また、電源 I については、周波数調整機能を有する電源等を電源 I a、周波数調整機能を必須としない電源等を電源 I b として区分し、希頻度事象(10 年に 1 回程度の猛暑・厳寒)に対応する電源等として電源 I' を設け、募集要件が整理されている。電源 I の入札は、原則として容量価格(kW 価格)で評価されるが、周波数制御・需給バランス調整に高く貢献できる電源等については、容量価格以外の評価項目(非価格要素)に加点される。しかしながら、非価格要素が占める割合は 1 割にも満たないうえ、各社募集要項に示される性能も応札を広く行うために現状レベルにとどまるなど、現状では高い調整能力を有する設備が導入されやすいような仕組みにはなっていない。

また、高機動 GTCC を活用することによる系統安定と CO<sub>2</sub> 排出量削減の効果が見込めたとしても、発電電力量(kWh)にしか料金がかからない電力料金制度下では、今後 GTCC による発電機会が減少する時代においては十分な料金収入が得られず、発電事業として成立しない懸念がある。さらに、稼働率の低下に加えて、再エネ電源の導入により卸電力価格が低下し、販売電力収入のみでは火力の設備費の回収が困難になり、安定供給の維持に必要な供給能力(アデカシー)の確保が困難になる可能性も指摘されている<sup>(2.4-1)</sup>。このような事態を避けるためには、設備費回収の方策の整備が必要であり、調整力に対する収入を含めて設備費および運用費を回収可能とする仕組みが必要になる。費用回収の予見性に乏しければ、導入だけでなく開発のインセンティブが働かない。CO<sub>2</sub> 排出量削減に向けて、前節で述べたとおり kWh, kW, ΔkW のいずれの価値をも創出可能な本技術を開発・普及させていくためには、それらの価値が適性に認められて料金収入が得られるような、発電事業者が事業を成立できる仕組みができることが不可欠となる。

## 文献

(2.4-1) 永井雄宇，岡田健司，電力システム改革におけるアデカシー確保の考察—長期エネルギー需給見通しにおける火力電源の収支分析—，電力経済研究 No.64（2017年3月刊行），電力中央研究所

[http://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/pdf/periodicals64\\_01.pdf](http://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/pdf/periodicals64_01.pdf)

## 2.5 技術開発の必要性

世界の GTCC シェアは，GE，Siemens，MHPS の 3 社で約 90%を占める状況にあり，我が国の技術は世界のトップレベルにある．先述したとおり，CO<sub>2</sub> 排出量削減は世界的にも大きな流れであり，再エネ電源の導入拡大は方向性として間違いのないと考えられる．そのような中，発展途上国においては，電力需要増への対応と CO<sub>2</sub> 排出量削減が同時に求められる，低コストかつクリーンな再エネ電源の導入が進んでいるが，電力系統安定の観点から調整力を備えた火力電源もまた不可欠となっている．更なる需要が見込まれるアジア圏は大きなマーケットを有しており，そこに対して，高効率でクリーン，かつ高機動性も備えた最新鋭の GTCC 技術を供与し，電力安定供給と CO<sub>2</sub> 排出量削減に貢献することは，我が国の高度な技術により国際貢献を果たすことを意味する．GE や Siemens は，機動性能向上の視点で GTCC の技術開発を先行している<sup>(2.5-1, 2.5-2)</sup>．我が国が世界に遅れをとらずに存在感を示していくための産業技術成長戦略として，本技術開発と海外マーケットの確保に向けた取り組みを推進することは重要であると考えられる．

先行調査研究で示されたとおり，高機動 GTCC の導入による系統安定，CO<sub>2</sub> 排出量削減，火力コスト削減の効果は大きく，逆に言うと，今後の再エネ電源の大量導入時代において導入が進まない場合は，電力の需給バランスの維持，周波数変動，下げ代不足等に十分対応できない可能性がある．前節で述べたとおり，我が国においては制度面の検討が進められている最中ではあるが，技術開発は一朝一夕に成し遂げられるものではなく，制度の成立を待ってから着手などと悠長なことは言っていられない．そこで，本先導研究では，再エネ電源と共存し系統の安定運用と CO<sub>2</sub> 排出量の削減を両立する，先行エネ環研究<sup>(2.5-3)</sup> で設定された目標性能（表 2.5-1）を有する GTCC の早期実現に向けて，その鍵となる要素技術開発にいち早く着手し，急速起動や負荷変動への対応など機動性を向上する GT の設計コンセプトを明確にする．

表 2.5-1 先行エネ環研究で設定された目標性能

	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
開発目標	10 分	20 %/分	-10 %	10 % (一軸式)
(参考) 現状性能	60 分	5 %/分	-15 %	45% 程度

## 文献

- (2.5-1) GE Power, Powering the World 2016, [gepower.com](https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/product/2016-gas-power-systems-products-catalog.pdf)  
[https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en\\_US/documents/product/2016-gas-power-systems-products-catalog.pdf](https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/product/2016-gas-power-systems-products-catalog.pdf)
- (2.5-2) SGT-8000H gas turbine Series -proven in commercial operations, [Siemens.com/gasturbines](https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/SGT-8000H_Gas_Turbine_series_EN.pdf)  
[https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/SGT-8000H\\_Gas\\_Turbine\\_series\\_EN.pdf](https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/SGT-8000H_Gas_Turbine_series_EN.pdf)
- (2.5-3) 平成 26 年度～平成 27 年度成果報告書 エネルギー・環境新技術先導プログラム「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」, NEDO, 2016

## 3. 実施概要

急速起動・負荷変動対応 GT 実現のためには、出力規模は維持しながら、ロータと圧縮機およびタービンの動翼を可能な限り軽量化する必要がある。そのためには、発電用 GT にとっては新たな視点となる、これまで必要とされなかった航空機用ジェットエンジンで用いられている軽量化技術の発電用 GT への適用を念頭におき、強度を維持できる薄肉化限界の検討、軽量かつ耐熱性・熱疲労特性に優れた新素材適用の可能性探索など、技術動向調査も含めて検討を行った。また、CO<sub>2</sub> 排出量削減の観点から、部分負荷運転時の効率低下を抑えるクリアランス能動制御のための要素技術研究にも着手した。研究の実施にあたっては、新技術適用コストと系統運用コストや CO<sub>2</sub> 削減コストのバランスを考慮しつつコスト意識を持ち、コストアップ抑制のため、新設だけでなく既設リプレースも含めて検討を実施した。

### 3.1 実施項目・体制

本研究では、急速起動・負荷変動対応 GT 実現のための課題として以下①から⑨の項目を取り上げ、調査・検討を行った。それぞれの実施項目の概要と担当機関を示す。また、図 3.1-1 に実施体制図を示す。

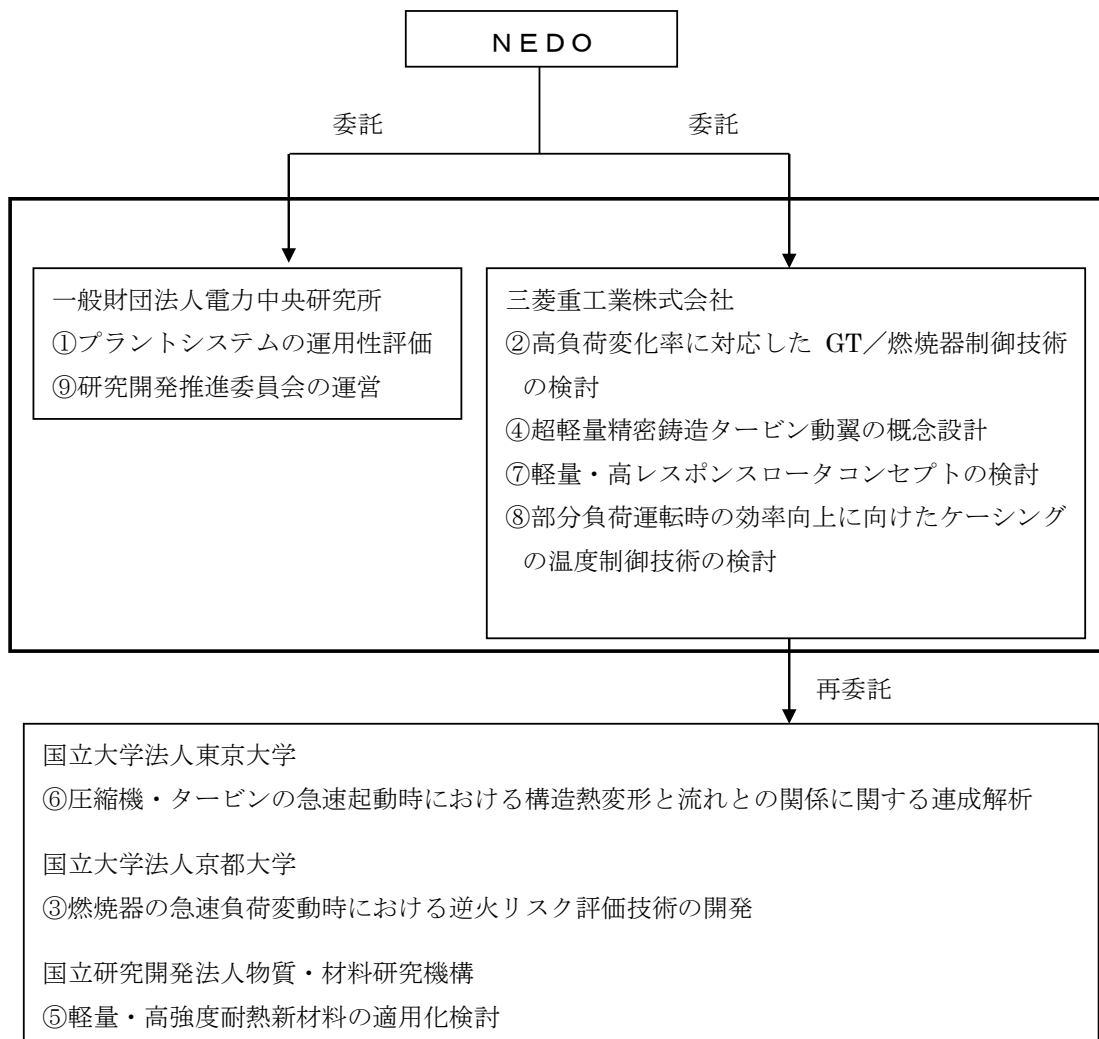


図 3.1-1 実施体制図

研究項目 A. 急速起動・急速負荷変動対応大型ガスタービン複合発電システムの概念設計

① プラントシステムの全体性能評価（担当：一般財団法人電力中央研究所）

開発対象とする GT は、熱効率が高い複合発電システムとしての利用が想定される。その場合、GT のみならず複合発電システムとしてのシステム全体性能を把握することが必要である。そこで、本研究項目においては、機動性に優れた広負荷帯高効率 GT を用いた複合発電システムについて、ヒートマスバランス解析等によりシステム全体の熱効率や運用性について検討し、表 2.5-1 に示された目標性能（起動時間 10 分（ホットスタート時）、出力変化速度 20%/分、1/2 負荷効率（LHV）：相対値で定格効率-10%以内、など）が達成できる構成や条件を明らかにする。

② 高負荷変化率に対応した GT/燃焼器制御技術の検討（担当：三菱重工業株式会社）

GT が高負荷変化率で動作する場合，低負荷変化率（準定常状態）での動作に比べ，燃焼器の作動状態が定常状態とずれが生じるために，安定燃焼を得ることが困難となる．また，機器のバラつきや経時変化により安定性は異なる．そこで，負荷変化率を大幅に高めた場合においても，安定燃焼や耐失火性能が確保可能な，インテリジェントな GT 制御技術の検討を行う．負荷変化率に対する安定燃焼及び失火耐性を確保可能な制御コンセプトの立案と，その適用時の課題を明らかにする．

③ 燃焼器の急速負荷変動時における逆火リスク評価技術の開発（担当：三菱重工業株式会社/再委託先：京都大学）

大型 GT で急速起動・急速負荷変動を実施する際，制御に対する燃料システムの応答遅れや，燃兼圧車室内部および燃焼器内部に想定外の非対称性・非定常性を伴う流れが発生する可能性があり，それに伴う速度偏差や高濃度領域は，燃焼不安定や逆火のリスクを高める可能性がある．本研究では，急速起動・急速負荷変動時のリスク評価技術として，燃焼器内部の逆火現象を解析により評価する．実機燃焼器を対象に世界的にも例がない逆火現象の数値シミュレーション (LES) を実施することにより，数値的に逆火現象が起こりうることを示す．本検討結果を踏まえた対策技術については，次フェーズ以降の検討課題とする．

研究項目 B. ロータ・動翼の軽量化技術の基礎検討

④ 超軽量精密鋳造タービン動翼の概念設計（担当：三菱重工業株式会社）

タービンロータに加わるタービン動翼の遠心荷重の大幅な低減を目的に超軽量の精密鋳造タービン動翼の構造概念設計を実施し，従来とは異なる新コンセプトの動翼形状を開発する．具体的には，高性能複雑冷却構造・非定常熱応力低減・軽量化を同時に実現するタービン動翼コンセプトの検討・開発・初期評価，セラミックスコアの変形防止技術を導入した高精度の超薄肉鋳造技術の検討，薄肉翼の高次振動モードの励振応力の評価・低減コンセプトの検討，等を実施する．ロータ軽量化につながる冷却，強度，軽量化を両立する精密鋳造翼の設計コンセプトを立案し，適用時の課題を明らかにする．

⑤ 軽量・高強度耐熱新材料の適用化検討（担当：三菱重工業株式会社/再委託先：国立研究開発法人物質・材料研究機構）

ロータ・動翼の軽量化のためには，軽量材料または高強度材料の適用が最も有効である．そこで物質・材料研究機構開発の新材料である下記 a)～c)の3種類の材料の適用可能性を明らかにする．なお，a)は GT 一段動翼，b)は GT 最終段動翼，c)はロータへの適用を想定する．

a) 新酸化物系 CMC (セラミックスマトリックスコンポジット)：従来材の約 1/2 の比重



- b) 新 TiAl 基合金：従来材の約 1/2 の比重
- c) TMW 合金：従来材の約 2 倍の強度により小型，薄肉化が可能

⑥ 圧縮機・タービンの急速起動時における構造熱変形と流れとの関係に関する連成解析（担当：三菱重工業株式会社/再委託先：東京大学）

流体－構造連成シミュレーションの高度化により，GT の高速起動・負荷変動等による翼構造の応答や振動特性を的確に予測する手法を検討する．また，温度場も考慮して過渡応答における回転系と静止系の構造部品の温度分布変化を予測し，過渡変形解析を可能とする解析法の構築を検討する．シミュレーションの高精度化に向けて，検証のための非定常流れ実験データを取得・蓄積する．連成数値解析法の高度化により，急速起動・負荷変動時の構造過渡応答や振動現象を高精度にシミュレートする手法の確立に向けて課題を明らかにする．

研究項目 C. 部分負荷運転時の効率向上に向けた翼周りの可変機構制御技術の検討

⑦ 軽量・高レスポンスロータコンセプトの検討（担当：三菱重工業株式会社）

チップクリアランスを高精度に管理するために，ロータ内部の熱応答性向上を図るべく，ロータディスクの冷却設計技術の高度化などの熱伝導方向・速度の制御によるクリアランスコントロール技術の概念設計を行う．下記⑧項の静止側コンセプトと組み合わせたチップクリアランスコントロールコンセプトを立案する．

⑧ 部分負荷運転時の効率向上に向けたケーシングの温度制御技術の検討（担当：三菱重工業株式会社）

部分負荷効率向上に向けて，起動，昇速，昇負荷の全領域に渡り，動翼のチップクリアランスを最小化して高効率を図るべく，翼環の温度制御（起動時加熱，高負荷時冷却）によるクリアランスコントロール技術の概念設計を実施し，実機開発の目途付を行う．また，起動・負荷変動時の構造熱応答シミュレーションを基に，翼環温度制御によるクリアランスコントロールのコンセプトを立案する．

研究項目 D. 研究開発推進委員会の開催（国家プロジェクト化に向けた検討）

⑨ 研究開発推進委員会の運営（担当：一般財団法人電力中央研究所）

研究進捗内容の議論および国家プロジェクト化に向けた検討を目的として，研究開発推進委員会を設置する．必要に応じ外部有識者を委員として，年数回程度の委員会を開催し，議論の結果を生かした国家プロジェクト化のための必要計画をまとめる．

### 3.2 研究開発推進委員会

本先導研究を計画的かつ効率的に推進するとともに，開発プロジェクト提案

に向けた検討を進めるため、実施者および有識者より 10 名の委員から構成される研究開発推進委員会（表 3.2-1）を組織し、表 3.2-2 に示すとおり 3 回の委員会を開催した。具体的な開発プロジェクトの提案に向けて、本先導研究に続く要素開発研究と実証研究の計画案策定について議論した。

表 3.2-1 研究開発推進委員会委員名簿(2018 年 1 月時点)

	氏名	所属・役職
委員長	太田 有	早稲田大学 基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授
委員	石上 秀之	中部電力(株) 発電カンパニー 火力発電事業部 技術グループ長(部長)
〃	石坂 浩一	三菱重工業(株) 総合研究所 主席プロジェクト 統括(GTCC/航空エンジンセンター長)
〃	梅田 健司	電気事業連合会 技術開発部長
〃	黒瀬 良一	京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻 教授
〃	高橋 徹	(一財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所 次世代火力発電領域 上席研究員
〃	鉄井 利光	国立研究開発法人物質・材料研究機構 構造材料 研究拠点 エネルギー構造材料分野 超合金グループ 主席研究員
〃	中澤 治久	(一社)火力原子力発電技術協会 専務理事
〃	松崎 裕之	東北発電工業(株) 取締役副社長
〃	渡辺 紀徳	東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 教授
事務局	渡辺 和徳	(一財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所 次世代火力発電領域リーダー 上席研究員

(委員は五十音順、敬称略)

表 3.2-2 研究開発推進委員会の開催実績

	開催日	開催場所	出席人数*	主な議題
第 1 回	2017 年 8 月 2 日	電力中央研究所 大手町地区	25 人	・これまでの経緯と本先導研究の概要紹介 ・開発国プロの計画策定に向けたディスカッション
第 2 回	2017 年 11 月 9 日	電力中央研究所 大手町地区	30 人	・研究の進捗状況報告 ・第 1 回委員会を踏まえ頂戴した指摘事項と対応案 ・開発国プロの計画策定に向けたディスカッション
第 3 回	2018 年 1 月 31 日	電力中央研究所 大手町地区	25 人	・研究成果報告 ・第 2 回委員会で頂戴した主な指摘事項と対応案 ・開発国プロの計画提案について

\* オブザーバ含む

#### 4. 研究成果

本章では、3.1節で示した各研究項目における詳細実施内容を報告する。表 4-1 に研究成果の総括を示す。

表 4-1 研究成果の総括

実施項目	担当機関 (再委託先)	主な実施内容	達成目標	主な成果
①プラントシステムの全体性能評価	電中研	ヒートマスバランス解析等により、機動性に優れる広負荷帯高効率GTを用いた複合発電システム全体の熱効率や運用性を検討する。	・先行研究で設定された目標性能が達成できるGTCCシステム構成と運転条件の明確化	対象システムとして1650℃級ガスタービンを想定し、圧力比を従来より高めたケースも検討した。蒸気系としては三重圧の蒸気タービン(ST)と二重圧のST、および超臨界圧のSTを想定し、それらの組み合わせも考慮した。解析の結果、三重圧STの場合において目標熱効率63%を達成できる諸条件を見出し、また、超臨界圧STとした場合、部分負荷も含めさらに高効率を得られること可能性があることを示せた。さらに、排熱回収ボイラを貫流式とすることで、起動速度を向上できる可能性が得られた。
②高負荷変化率に対応したGT/燃焼器制御技術の検討	三菱重工	ダイナミックシミュレーションを活用して、高負荷変化率で運転した際の運用上の課題を抽出すると共に、安定燃焼や耐火性能が確保可能なGT制御コンセプトを立案する。 ・負荷上昇渋滞を回避する燃料制御およびIGV制御手法の立案 ・運転状態に応じた燃焼パラメータの自動調整手法に関するコンセプト立案	・高負荷変化率に対する安定燃焼および失火耐火性を確保可能なGT制御コンセプトの立案 ・高負荷変化率GTを実現するための課題、実施項目の明確化	負荷変化率を大幅に高めた場合における安定燃焼や耐火性能の阻害要因を分析し、燃料比制御系統の遅れを補正するGT制御コンセプトを立案し、数値シミュレーションを用いてその有用性を確認した。また、負荷変化率を大幅に高める場合は負荷渋滞が発生することをシミュレーションで示し、負荷追従性を高める燃料制御および空気制御のコンセプトも立案した。検討を行った結果、ハード面での検証の必要性を明らかにした。
③燃焼器の急速負荷変動時における逆火リスク評価技術の開発	三菱重工 (京大)	数値解析による逆火リスク評価技術の検証を目的に、火炎温度を一定に保つ条件下における燃焼器内部空気流速の低下による逆火発生現象を対象に、燃焼器1本をモデル化した(逆火発生時の延長管間空気偏差を模擬可能)大規模燃焼解析により、実圧燃焼試験(MHIにて過去に実施)における逆火発生状況を再現する。	・数値解析による逆火現象の再現可否の確認	極端に燃焼器内流速の低い条件を設定する事で、燃焼器内の火炎が安定状態から逆火に至るまでの経過を仮想的に再現することに成功した。一部ノズルで逆火が発生した後は、逆火の発生していないノズルでは火炎遡上傾向も現れないことが確認された。
④超軽量精密鋳造タービン動翼の概念設計	三菱重工	タービンロータに加わるタービン動翼の遠心荷重の大幅な低減を目的に、超軽量の精密鋳造タービン動翼の構造概念設計を実施する。 ・高性能複雑冷却構造の実現により非定常熱応力を低減し、薄肉翼の高次振動モードの励振応力についても低減するタービン動翼コンセプトを検討する。 ・セラミクスコアの変形防止技術を導入した高精度の超薄肉鋳造技術を検討する。	・高性能複雑冷却構造・非定常熱応力低減・軽量化を同時に実現するタービン動翼コンセプトの立案および課題の明確化 ・薄肉複雑構造実現のための製造技術コンセプトの立案および課題の明確化	タービンロータに加わるタービン動翼の遠心荷重の大幅な低減を目的に超軽量の精密鋳造タービン動翼を実現するための鋳造技術の基礎検討を行った。タービン動翼鋳造薄肉化の際の課題となる肉厚寸法精度確保のため、鋳型・中子を一体造形する手法を検討し、要素試験により技術課題を明らかにした。また高次振動モードの励振応力の評価・低減検討を行い、上下流の静翼の翼枚数増加をコンセプトに設計を行うことで、効果的に励振力を低減できることが分かった。
⑤軽量・高強度耐熱新材料の適用化検討	三菱重工 (NIMS)	ジェットエンジンに最近実用化された軽量・高強度耐熱新材料に関し、物質・材料研究機構で開発し、特性を改善した以下3種の新材料を対象に、既存データの整理、解析、ならびに不足データの新規取得等により、GTへの適用可能性検討を行う。 ・新酸化物系CMC(セラミックスマトリックスコンポジット)：GT一段動翼等 ・新TiAl基合金：GT最終段動翼 ・TMW合金：ロータ	・物質・材料研究機構開発の3種の新材料のGTへの適用可能性の明確化	下記結果により、GTへの適用可能性が明らかとなった。 ・新酸化物系CMC：開発材は、耐環境性はCMC現状材を著しく凌駕するとともに、切削加工は可能であり、室温での塑性変形性を有することを確認した。 ・新TiAl基合金：開発材は、強度ならびに大型部材製造性はTiAl基合金現状材より著しく優れることを確認した。 ・TMW合金：開発材は、クリープ強度と低サイクル疲労特性は現状最強のNi基鍛造超合金を凌駕し、大型部材製造の可能性があると確認した。
⑥圧縮機・タービンの急速起動時における構造熱変形と流れとの関係に関する連成解析	三菱重工 (東大)	・流体・熱構造連成：有限要素法による構造温度解析コードを構築し、多段ターボ機械・複雑流路内流れの解析が可能な流体解析コードと連成させる。 ・温度場・変形連成：翼構造解析コードで、熱ひずみを考慮するよう改良する。 ・変形・流体連成：構造変形を流体解析に反映する手法を開発する。 ・軸内部の非定常流解析手法の高度化と非定常流検証データを取得する実験を行う。	・翼間・回転軸内部の熱流体解析と、構造温度分布・変形の解析を強連成させる手法の開発 ・非定常流解析の高度化と、実験による非定常流れ検証データの取得	・静荷重と熱変形の双方を同時に考慮できる、幾何非線形変形・温度場連成熱構造有限要素法プログラムを開発し、基礎的な検証を実施した。 ・高圧圧縮機軸内部キャビティに生じる旋回熱対流現象の全段全周非定常解析を実施し、モジュール全体を通した浮力誘起非定常流現象を把握した。 ・翼列非定常CFDの解析精度検証に資する、1.5段の圧縮機翼列を対象とした定常・非定常計測を実施し、失速セルの伝播速度や個数などの定量的データを蓄積した。
⑦軽量・高レスポンスロータコンセプトの検討	三菱重工	チップクリアランスを高精度に管理するため、ロータ内部の熱応答向上を図るべく、ロータディスクの冷却手法を高度化し、クリアランスコントロール技術の概念設計を行う。	・⑧の静止系コンセプトと組み合わせたチップクリアランスコントロールコンセプトの立案	チップクリアランスの高精度な管理を可能とすることを目的として、タービンディスクの熱応答性を向上させるため、重量低減検討およびボアディスク適用検討を行った。重量低減に関して、翼遠心荷重低減・高強度材適用により重量低減効果が得られる見込みを得たが、新たにピーク応力対策ディスクの設計が課題として抽出された。ボアディスクの適用性に関して、Ni基超合金などの高強度材を用いることで適用可能な見込みを得た。一方で、ボアディスク中央孔に冷却空気を流すためには、ロータ側にもボアディスクを適用する必要があり別部品への影響が大きいこと、また、冷却空気が常に内径側を通るためアクティブな制御が困難であることなどの課題が抽出された。
⑧部分負荷運転時の効率向上に向けたケーシングの温度制御技術の検討	三菱重工	部分負荷効率向上に向けて、起動、昇速、昇負荷の全域にわたり、動翼のチップクリアランスを最小化して高効率を図るべく、翼環の温度制御によるクリアランスコントロール技術の概念設計を実施する。	・翼環温度制御によるクリアランスコントロールコンセプトの立案	部分負荷効率向上を目的に、構造応答シミュレーションを用い、翼環の温度制御によるクリアランスコントロール技術の概念設計を実施した。結果、起動前加熱と高負荷時冷却を組み合わせるコンセプトで温度制御を行うことで、起動時に発生するクリアランスの過渡最小点(ピンチポイント)を回避し、部分負荷を含めた全負荷条件でクリアランスを低減できる可能性を示した。

#### 4.1 プラントシステムの全体性能評価

開発対象とするガスタービン（以下，GT）は，熱効率が高い複合発電システム（以下，GTCC）としての利用が想定される．その場合，GTのみならずGTCCとしてのシステム全体性能を把握することが必要である．

そこで，本研究項目においては，機動性に優れる広負荷帯高効率GTを用いたGTCCについて，ヒートマスバランス解析によりシステム全体の熱効率や，動特性解析により運用性について検討し，目標性能が達成できる構成や条件を明らかにした．

##### 4.1.1 本研究項目の目的

本研究項目では，機動性に優れる広負荷帯高効率GTを用いたGTCCについて，各種システム構成や条件下でのヒートマスバランス解析を行い，プラント全体の目標性能が達成できるシステム構成や条件を明らかにすることを目的とする．検討手順は以下の通りである．

- (1) システム構成の検討
- (2) 温度・圧力および機器性能，制約条件等の検討
- (3) ヒートマスバランス解析（サイクル計算）
- (4) 動特性計解析
- (5) 各システムの熱効率・運用性評価

##### 4.1.2 システム構成と計算制約条件の検討

解析対象の新規開発GTCCシステムとして，以下を想定した．

GTに関して，現状，市場投入されているGTが1600℃級である一方，1700℃級GTの研究開発が国の支援により進められている．これらを鑑み，比較的近い将来市場投入が期待できる高効率GTとして，1650℃級（燃焼器出口温度1650℃）のGTを想定した．

目標とする熱効率に関して，現在商用運転を行っている1600℃級GTCC（東京電力（株）川崎火力2-2,2-3号機，中部電力（株）西名古屋7号系列など）の熱効率（LHV基準）が約61,2%程度を達成できているため，本件で検討するシステムの目標熱効率を63%とし，システム構成や各機器の仕様などを検討した．

本研究で開発目標とするGTCCは，熱効率だけでなく運用性も合わせて高い必要がある．GTの運用性向上のための各要素機器の開発課題や解決方策については次節以降で行い，本節では上記の1650℃級GTをトッピングとし，ボトムリングの蒸気系について各種システム構成や条件を検討することとした．

検討対象としたシステムおよびそれら概要を表4.1-1に示す．まず，現状の事業用GTCCの蒸気系として多く用いられている，高・中・低圧の三重圧蒸気の排熱回収ボイラ（以下，HRSG）および蒸気タービン（以下，ST）を有するGTCC（以下，三重圧蒸気GTCC）を基本システムとした．また，運用性向上を念頭に蒸気系のシステム構成を単純化するため，GTを高圧力比としてGT出力を増加させる一方で，蒸気系は中・低圧の二重圧蒸気としてST出力を低下させたシステム（以下，高圧力比GT二重圧蒸気GTCC），さらに，蒸発器のドラ

ムを無くして貫流式とすると共に、熱効率向上のため主蒸気圧力を臨界圧力としたシステム（超臨界貫流蒸気 GTCC）について検討を行った。

各回転機器の断熱効率について、各システムにおいて温度や圧力、流量などの条件が異なる場合、値が異なることが考えられるが、今回の検討は各システムのサイクル特性を比較することを目的とするため、それらの値はシステム間において同一とした（部分負荷ではこれらは変化するとした）。

表 4.1-1 検討対象としたシステム

名称	システム概略	主な特徴
三重圧蒸気 GTCC	高・中・低圧の三重圧蒸気系を有するシステム	高効率 GTCC として実績の多い三重圧蒸気系を有する。
高圧力比 GT 二重圧蒸気 GTCC	GT を高圧力比とする一方、蒸気系は中・低圧の二重圧としたシステム	GT 高圧力比化により GT 出力を向上する一方、蒸気系は簡略化して運用性向上を図る。
超臨界貫流蒸気 GTCC	蒸発器を貫流式とすると共に、主蒸気圧力を超臨界圧としたシステム	蒸気系の簡略化および熱効率の更なる向上を図る。

なお、ヒートマスバランス解析における蒸気系の制約条件は下記とし、これら条件下でヒートマスバランスが成立し、目標の熱効率を達成できる機器仕様や蒸気条件、システム構成を検討した。

- ・主蒸気、再熱蒸気温度：600℃以下
- ・アプローチポイント温度差：2℃以上
- ・各伝熱面出入口ガスと水・蒸気の温度差：5℃以上
- ・HRSG 出口ガス温度：85℃以上
- ・LPT 出口乾き度：0.9 程度以上

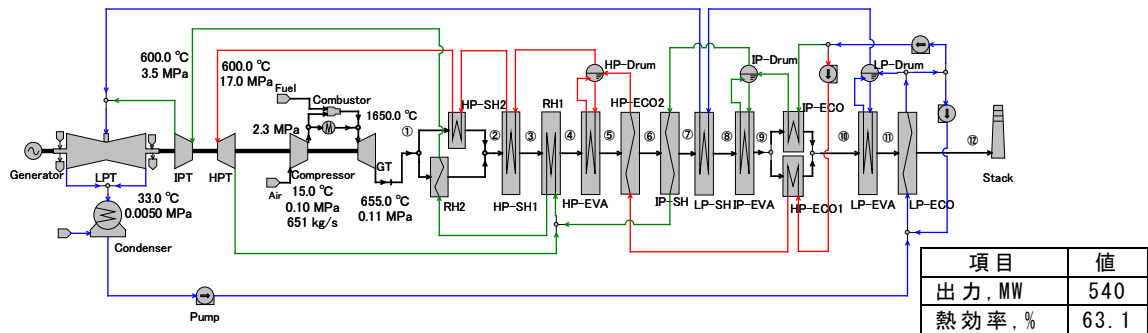
#### 4.1.3 ヒートマスバランス解析による熱効率の検討

本項では、前項で解析対象とした各 GTCC システムについて、ヒートマスバランス解析を行って制約条件の下でヒートマスバランスが成立するようシステム構成を検討し、熱効率を算出した結果を示す。

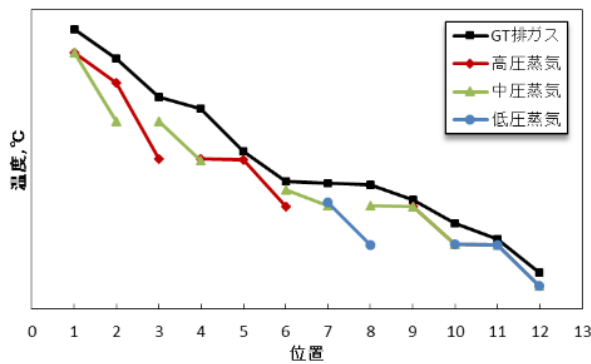
##### 4.1.3.1 三重圧蒸気 GTCC

三重圧蒸気 GTCC について、前述の制約条件の下で目標の熱効率 63% を達成できるように、各機器の仕様や蒸気条件、HRSG 各伝熱面の構成を検討し、図 4.1-1(1) に示すシステム構成およびヒートマスバランスを得ることが出来た（図中、HP：高圧、IP：中圧、LP：低圧、ECO：節炭器、EVA：蒸発器、SH：過熱器、RH：再熱器、HPT：高圧蒸気タービン、IPT：中圧蒸気タービン、LPT：低圧蒸気タービンを示す。以下同様）。

GTの圧力比は23とし、主蒸気/再熱蒸気温度は600℃とした。各回転機器の断熱効率も現行機器と大差はなく、近い将来十分達成が見込める機器仕様にて目標熱効率が得られることが分かった。また、同図(2)にHRSGにおけるGT排ガスと水・蒸気の熱交換状況を示す(以下、HRSG熱交換線図。横軸は図4.1-1(1)に示したHRSG各伝熱面出入口の位置番号を示す)。本図から、前述の制約条件を超えることなく、熱交換が出来ていることを確認した。



(1) システム構成とヒートマスバランス



(2) HRSG 熱交換線図

図 4.1-1 三重圧蒸気 GTCC システム構成とヒートマスバランス, HRSG 熱交換線図

部分負荷効率についても検討を行った。部分負荷効率曲線を図4.1-2に示す。比較として、同図に電気学会の標準モデルシステムのカーブを燃種毎に平均化して用いた値も付記する(4.1-1)。50%負荷時において相対値で定格出力での熱効率-10%以内となる各種条件を検討した。燃焼器出口温度1480℃、圧力比13程度とし、GT出口ガス温度を655℃とすることで主蒸気/再熱蒸気温度を600℃に維持でき、現状のGTCCより熱効率の低下を抑えることができた。

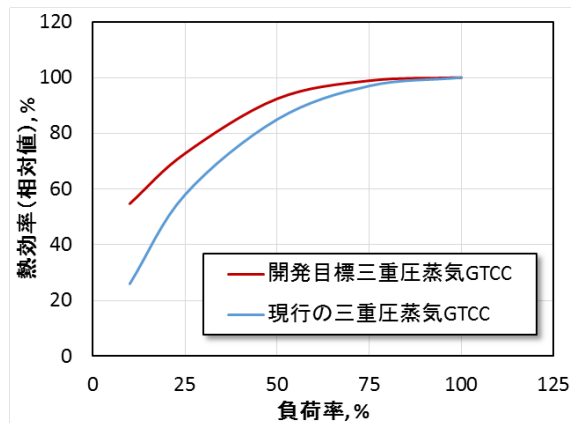


図 4.1-2 三重圧蒸気 GTCC システムの部分負荷効率曲線

#### 4.1.3.2 高圧力比 GT 二重圧蒸気 GTCC

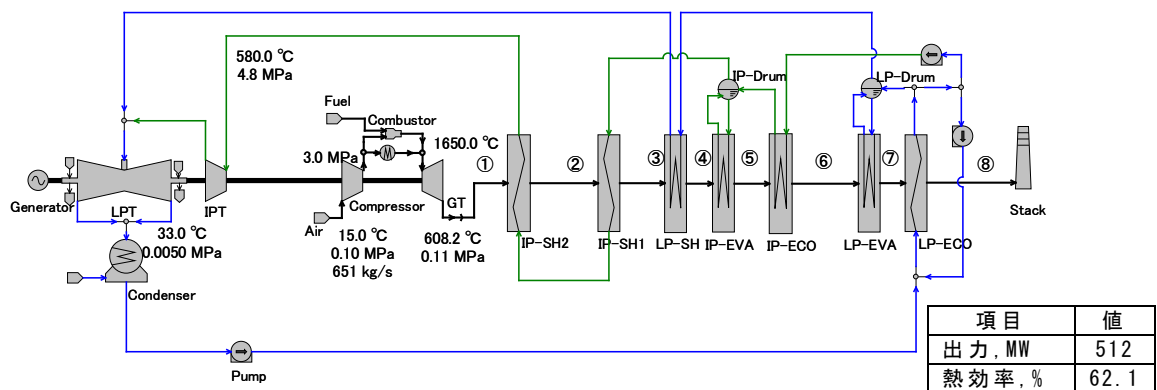
蒸気系の構成を単純化し運用性を向上することを目的として、GT の圧力比を高くして GT 出力を増加させる一方、蒸気系を中・低圧の二重圧とした、高圧力比 GT 二重圧蒸気 GTCC についてヒートバランス解析を行った。

GT の圧力比を 30 とする一方、圧縮機や GT、各 ST の断熱効率や GT 冷却空気流量は前述の三重圧 GTCC と同様とした。これら条件と前述の制約条件の下、最も高い熱効率が得られるようシステム構成を検討した。

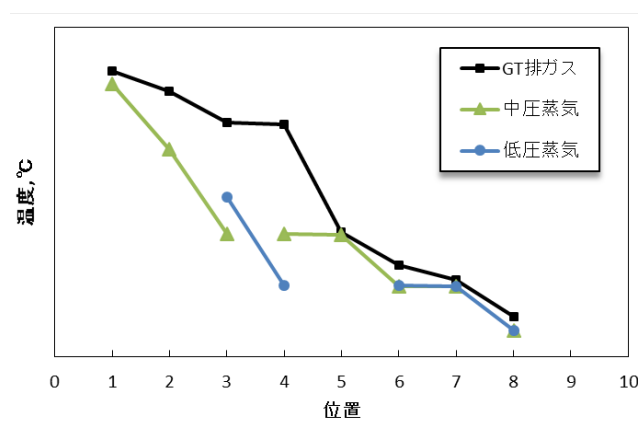
その結果、図 4.1-3 (1)に示すシステム構成およびヒートマスバランスを得た。同図(2)の HRSG 熱交換線図が示すように、上述の制約条件を超えることなく、熱交換が出来ることを確認した。これら図が示すように、三重圧蒸気 GTCC に比べ蒸気系はかなり簡素化されることが分かる。しかしながら、GT 出力は向上されたものの、蒸気圧力が低下し、また、GT 出口ガス温度の低下により蒸気温度が 600℃から 580℃に低下したため ST 出力低下が大きくなり、熱効率が絶対値で 1%程度低下する結果となった。また、高圧力比化により圧縮機出口温度が 50℃程度上昇した。

そこで、システム構成や条件を再検討し、三重圧蒸気 GTCC の熱効率と比較した。その結果を図 4.1-4 に示す。まず、高圧力比化により圧縮機出口温度が上昇したため、GT 冷却用空気流量増加の必要性が生じる可能性がある。仮に燃焼ガスと GT 冷却用空気が合流したとしたタービン入口ガス温度(以下、TIT)を三重圧蒸気 GTCC (圧力比 23) のそれと同じとする場合、およそ 4%GT 冷却用空気を増加する必要がある、若干の熱効率低下に影響した(同図②)。

また、圧縮機動力低減および GT 冷却空気流量低減による熱効率向上を狙って圧縮機中間冷却を行ったところ、GTCC 出力は増加したが、燃焼器入口(圧縮機出口)空気温度が低下したため、むしろ熱効率は低下する結果となった(同図③)。そこで、圧縮機中間冷却に HRSG 系統の水をバイパスして行い、再度 HRSG に戻すことで熱回収を行った。その結果、熱効率向上効果が得られたが、前述の三重圧蒸気 GTCC や中間冷却を行わない場合の熱効率には及ばない結果となった(同図④)。



(1) システム構成とヒートマスバランス



(2) HRSG 熱交換線図

図 4.1-3 高圧力比 GT 二重圧蒸気 GTCC のシステム構成とヒートマスバランス,HRSG 熱交換線図

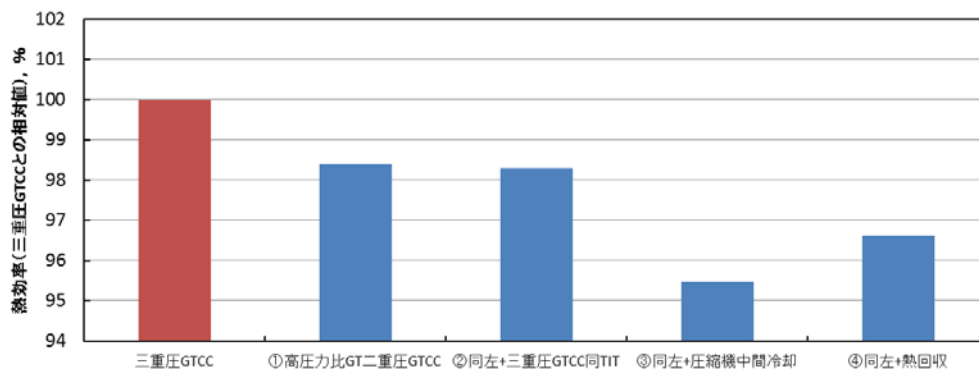


図 4.1-4 三重圧蒸気 GTCC システムと各種高圧力比 GT 二重圧蒸気 GTCC の熱効率の比較

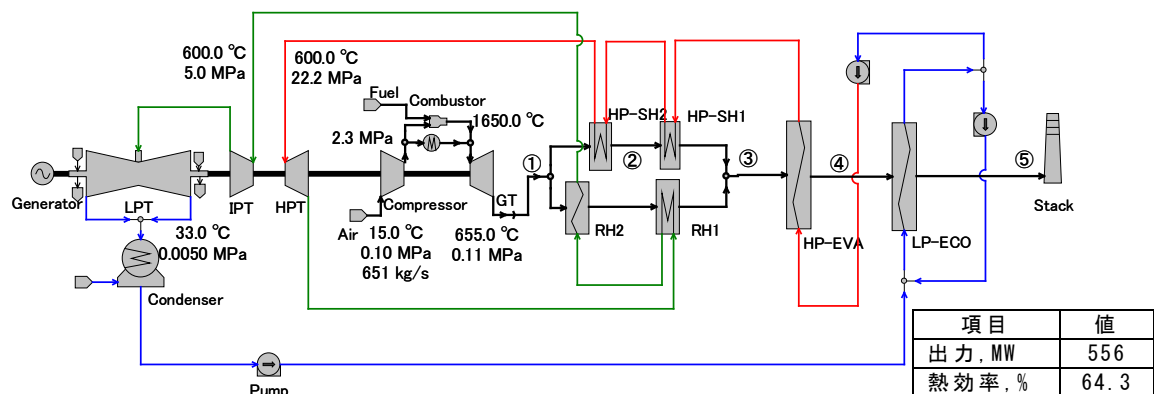
#### 4.1.3.3 超臨界貫流蒸気 GTCC

蒸気系を簡略化する他の方針として、蒸発器のドラムを無くして貫流式とすると共に、熱効率向上のため主蒸気圧力を超臨界圧とした超臨界貫流蒸気

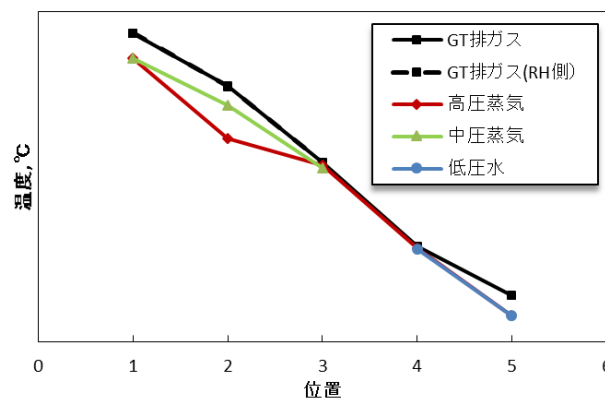


GTCCについて検討を行った。この検討においても圧縮機やGT、各STの断熱効率やGT冷却空気流量は三重圧蒸気GTCCの場合と同様とした。これら条件と前述の制約条件の下でヒートマスバランス解析を行い、最も高い熱効率が得られるようシステム構成を検討した。

その結果、図4.1-5(1)に示すシステム構成およびヒートマスバランスを得た。同図(2)にHRSG熱交換線図が示すように、上述の制約条件を超えることなく、熱交換出来ることを確認した。これら図が示すように、三重圧蒸気GTCCに比べ蒸気系がかなり簡素化されると共に、熱効率が絶対値で1%以上高い値が得られた。さらに、同図(2)の位置5のGT排ガス温度が制約条件(85℃)に対してまだ10℃以上の余裕があることが分かった。



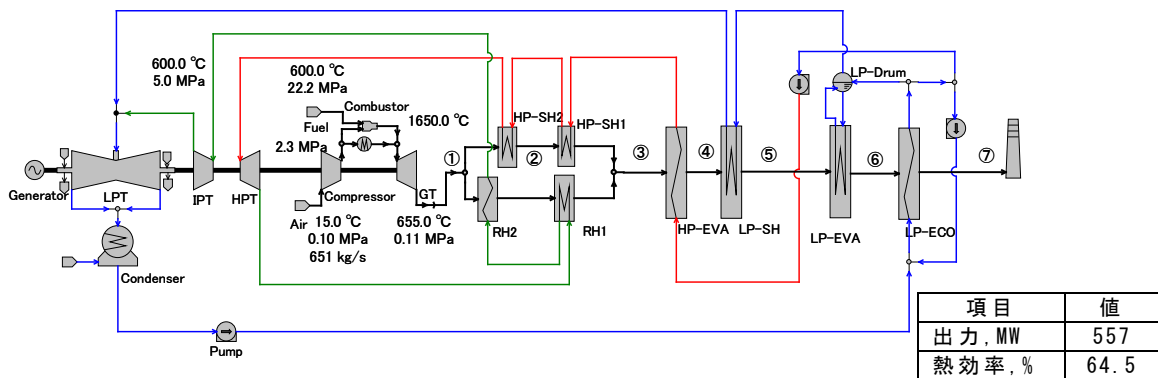
(1) システム構成とヒートマスバランス



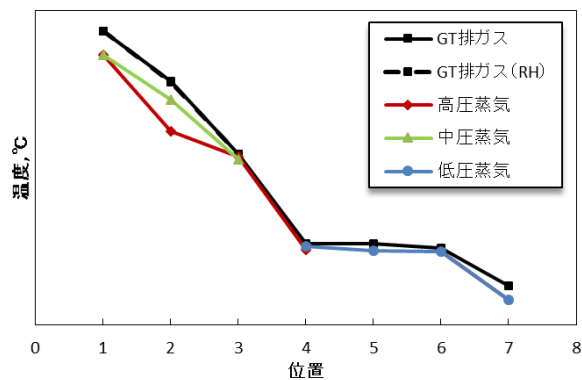
(2) HRSG 熱交換線図

図 4.1-5 超臨界貫流蒸気 GTCC のシステム構成とヒートマスバランス, HRSG 熱交換線図

そこで、蒸気系の後段側にさらに低圧蒸発器(図中、LP-EVA)を設置して熱回収を行い、生成した蒸気を低圧蒸気タービンに送り動力を得るシステム(以下、超臨界貫流および低圧蒸気GTCC1)について検討を行った。その際のシステム構成とヒートマスバランス、HRSG熱交換線図を図4.1-6(1),(2)に示す。さらに熱回収および動力増加ができ、熱効率が超臨界貫流蒸気GTCCより絶対値で0.2%向上できた。



(1) システム構成とヒートマスバランス



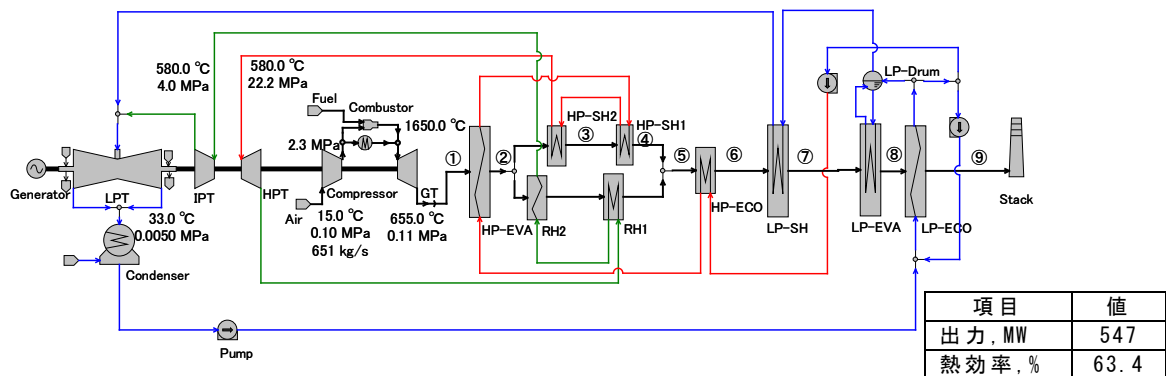
(2) HRS G 熱交換線図

図 4.1-6 超臨界貫流および低圧蒸気 GTCC1 のシステム構成とヒートマスバランス, HRS G 熱交換線図

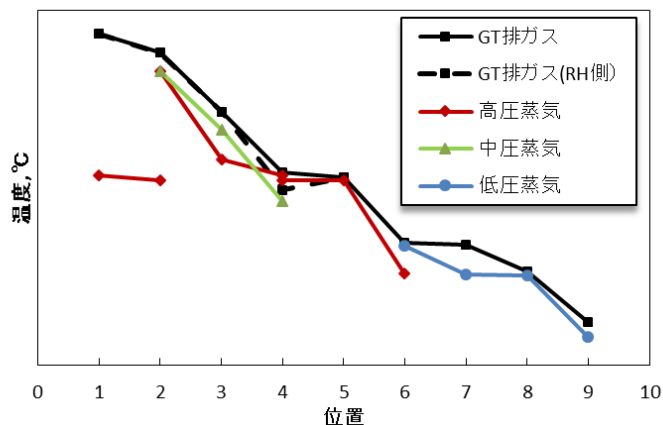
上述の通り，蒸気系を超臨界圧および貫流式を用いることで，蒸気系の構成を簡略化しつつ熱効率向上を図ることができ，三重圧蒸気 GTCC より高い熱効率が得られた．しかしながら，HRS G の各伝熱面の中で最も熱交換量が多く（GT 排ガス温度の低下が最も大きい），システムの成立性の鍵となる高圧蒸発器（図中，HP-EVA）において，図 4.1-5 と図 4.1-6 の(2)の HRS G 熱交換線図で示したように，ガス側と水・蒸気側の温度差が小さく，その実現性が懸念される．実現できたとしても，温度差が小さいためかなり大きな伝熱面積が必要になり，運用性に対してむしろデメリットとなる可能性がある．

そこで，ガス温度が最も高い HRS G の最前段部に高圧蒸発器を設置し，再度システム構成を再検討してヒートマスバランス解析を行った．本システムにおいても，蒸気系の後段に低圧蒸発器を設置して熱回収を行い，生成した蒸気を低圧蒸気タービンに送り動力を得て，熱効率向上を図った（以下，超臨界貫流および低圧蒸気 GTCC2）．

その結果を図 4.1-7 に示す．本システムでも，制約条件の下でヒートマスバランスを成立することができた．超臨界貫流および低圧蒸気 GTCC1 よりも熱効率が絶対値で 1% 低下したが，三重圧蒸気 GTCC よりも高い熱効率が得られた．



(1) システム構成とヒートマスバランス

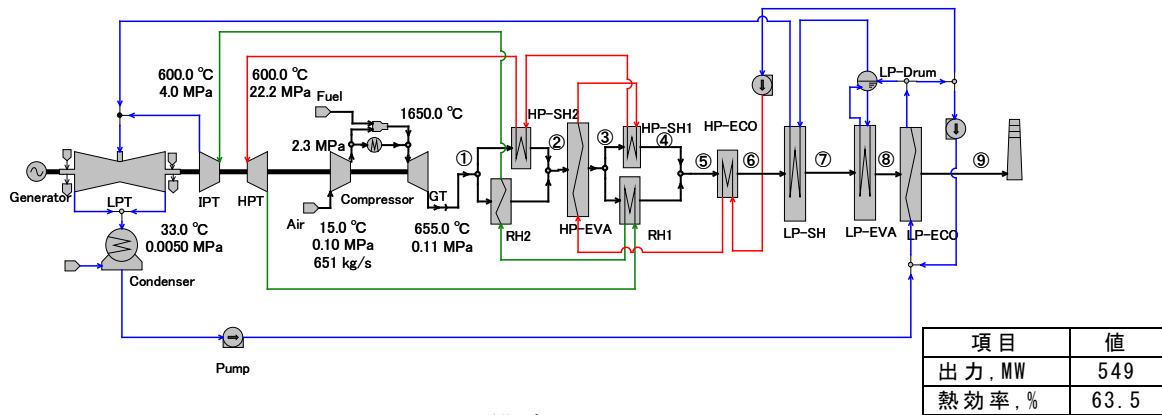


(2) HRSG 熱交換線図

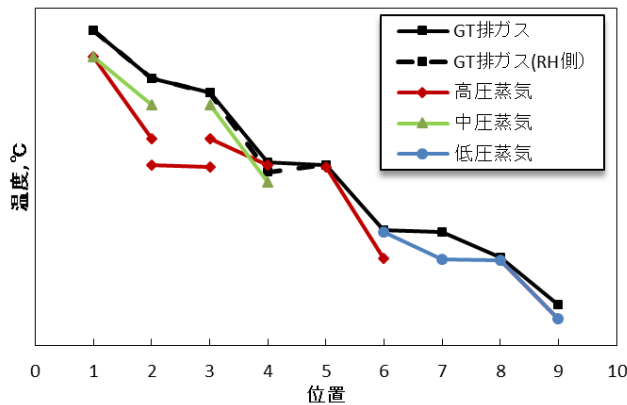
図 4.1-7 超臨界貫流および低圧蒸気 GTCC2 のシステム構成とヒートマスバランス, HRSG 熱交換線図

高圧蒸発器（図中，HP-EVA）を最前段に設置することで熱効率が低下した一因として，高温過熱器と高温再熱器（図中，HP-SH2 と RH2）がその後段となったため，主蒸気温度と再熱蒸気が低下した（600℃→580℃）ことが挙げられる．そこで，高圧蒸発器を高温過熱器 2 と高温再熱器 2 の後段に設置し，システム構成を検討してヒートマスバランス解析を行った（以下，超臨界貫流および低圧蒸気 GTCC3）．

その結果を図 4.1-8 に示す．本システムもヒートマスバランスが成立し，また，主蒸気温度と再熱蒸気を 600℃とすることができた．超臨界貫流および低圧蒸気 GTCC2 よりも熱効率が絶対値で 0.1% 向上し，三重蒸気 GTCC よりも高い熱効率が得られた．



(1) システム構成とヒートマスバランス



(2) HRSG 熱交換線図

図 4.1-8 超臨界貫流および低圧蒸気 GTCC3 のシステム構成とヒートマスバランス, HRSG 熱交換線図

#### 4.1.3.4 ヒートマスバランス解析結果のまとめ

以上の検討結果を図 4.1-9 にまとめた。定格出力時に加え 1/2 出力時の熱効率も付記した。なお、本図の値は、三重圧蒸気 GTCC の定格出力時の熱効率を 100% とした相対値を示している。

制約条件の下、高効率 GTCC として実績の多い三重圧蒸気 GTCC において目標熱効率を達成できる機器仕様やシステム構成、蒸気条件を検討し、近い将来十分達成が見込める機器仕様にて目標熱効率を得られることが分かった。

得られた機器仕様や同じ制約条件の下、運用性が向上することを念頭に、蒸気系の構成を単純化した高圧力比 GT 二重圧蒸気 GTCC と超臨界貫流蒸気 GTCC について、それらのシステム構成と熱効率を検討した。その結果、前者では熱効率が低下したが、後者では、成立性については十分検討する必要があるもののサイクル的には熱効率向上が図れ、また 1/2 出力時でも熱効率の低下が低減できる可能性があることを示すことができた。

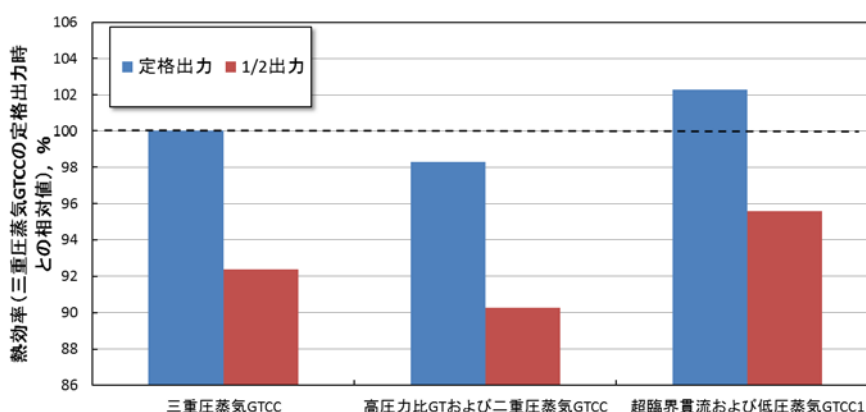


図 4.1-9 熱効率解析結果のまとめ

#### 4.1.4 動特性解析による運用性検討

本研究開発の最終的な目標は、高い熱効率を維持したまま運用性の高い GTCC を開発することである。本項では、前項で熱効率を検討したシステムを元に動特性解析を行い、運用性の項目のひとつとして、並列からの定格出力までの起動時の出力変化特性（以下、起動特性）について検討を行った。

##### 4.1.4.1 解析方法

動特性解析は、計算機上でプラントや機器等の過渡変化の現象を模擬することである。火力発電システムのように、物理則や化学則に従う対象では動特性は保存則に従う。これは、ある系の内部の量が下式のような時間  $t$  に関する微分方程式（保存則）で表されることを意味する。保存則から導かれる数式モデルは状態量の変化に対して広い範囲で使用できる。したがって、火力発電システムにおける起動から定格までの広い運転範囲でのシミュレーションのために、機器に対する数式モデルは、主にこのアプローチで作成する必要がある。

$$d/dt \{ \text{内部の量} \} = \{ \text{単位時間当たり入る量} \} - \{ \text{単位時間当たり出る量} \} + \{ \text{単位時間当たり内部で発生する量} \}$$

微分方程式による数式モデルを積分計算し、解を得るためには解析ツールが必要となる。（一財）電力中央研究所では、Modelica 言語による物理系複合モデリング・シミュレーションツールをベースに火力発電システムに必要な動特性機器モデルや制御系モデルを開発し、また、プラント内の作動流体であるガス、水・蒸気の温度（エンタルピ）や圧力等の計算を行うための物性計算関数群を実装して、図 4.1-10 に示すような火力発電システム動特性解析ツールの構築を進めている(4.1-2)。

この火力発電システム動特性解析ツールを用いて、各種 GTCC システムの動特性解析モデルを構築し、機器仕様を設定して各種条件下での動特性解析を行った（ただし、各構成機器について重量や容積などに関する詳細なデータが必要であるが、現状それらデータが得られる段階にないため、既存の三重圧蒸気 GTCC の値を参考とし、それら値からの相対値を設定することで解析を行った）。

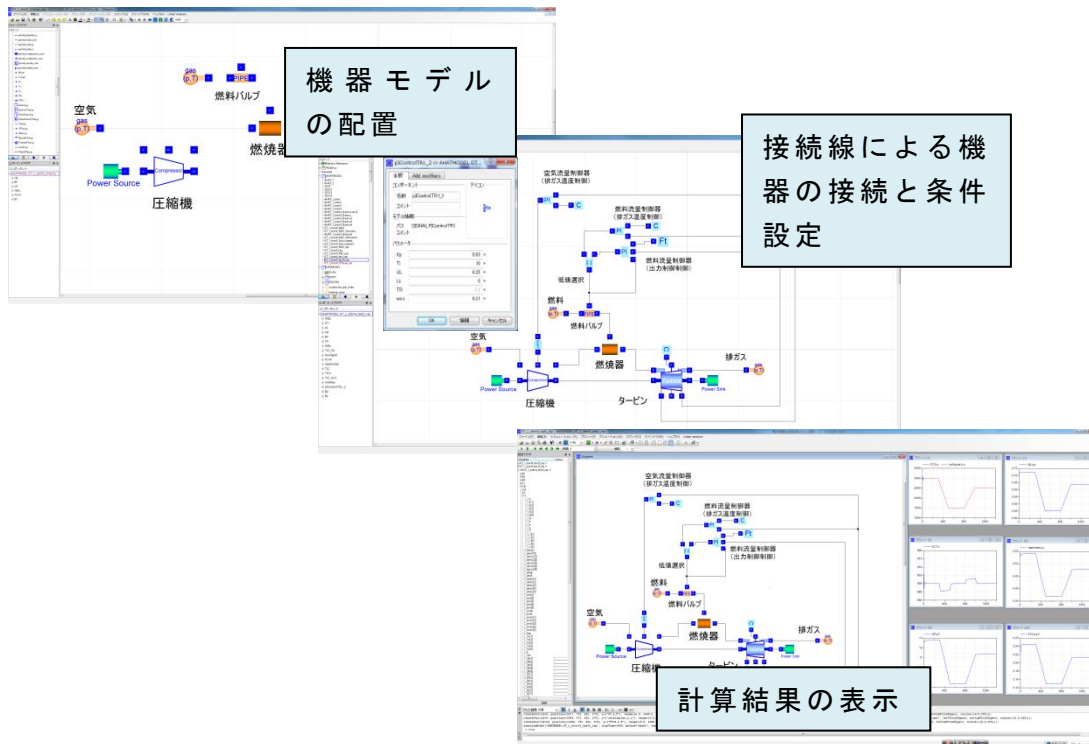


図 4.1-10 火力発電システム動特性解析ツールの実行画面(4.1-2)

#### 4.1.4.2 ガスタービンコンバインドサイクルの制御

GTCC の一般的な制御方法の概略を以下に示す(4.1-3),(4.1-4)．制御系統図を図 4.1-11 に示す．GT 出力や温度制御は，主に燃料流量と空気流量によりなされる．燃料流量は燃料弁開度により調整することで制御され，起動時における燃料プログラム制御，ガバナとして負荷・速度制御，また，燃焼温度の制限により高温部品を保護するための温度制御の内，低値選択により決定される．空気流量は圧縮機の入口案内翼（IGV）開度により吸込空気流量を調整することで GT 出口ガス温度を制御する．実プラントでは脱硝制御や補助蒸気圧力制御などもあるが，今回の検討の目的でないため，これらは考慮しなかった．

HRSG および蒸気タービンなどの蒸気タービン系の主な制御として，加減弁制御，タービンバイパス制御，ドラム水位制御などがある．

加減弁制御について，HRSG で発生する蒸気は GT 出力（GT 出口ガス温度・流量）により変化し，静定するまで時間遅れがあるため，加減弁にはガバナ機能がなく，通常運転時には全開を維持する．主に起動時に，GT 出力上昇による蒸気流量増加に伴いタービンバイパス制御と協調をとってプログラムの開度を上げていく．タービンバイパス制御は，バイパス弁開度を調整することにより起動・停止時と負荷遮断時に余剰蒸気を復水器に回収する．

ドラム水位制御は，ドラム内の水位偏差と給水量，蒸気量を先行値として加えた 3 要素制御が取られ，水位を一定に制御することで蒸気流量を制御する．

本検討においても，以上の制御方法を参考に動特性解析を行うこととした．

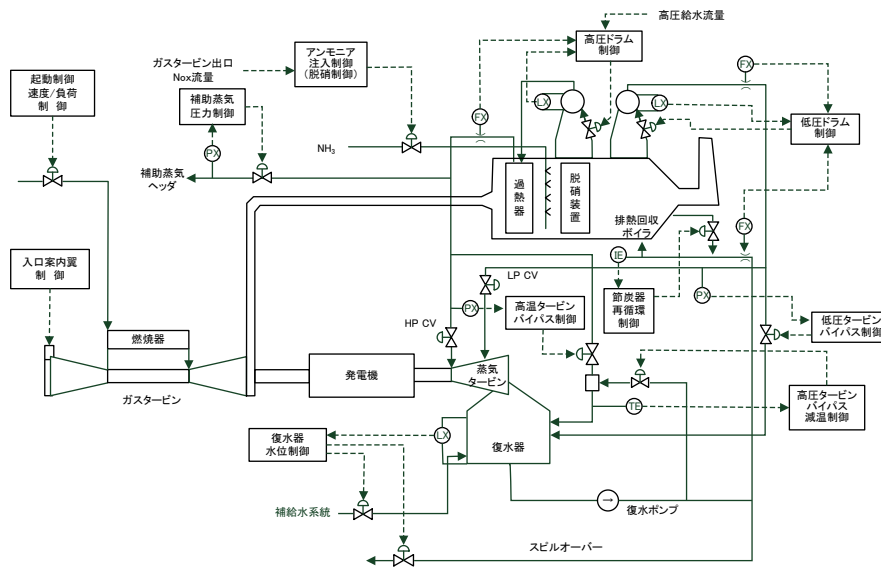


図 4.1-11 ガスタービンコンバインドサイクルの構成と制御系統概略(4.1-3)

#### 4.1.4.3 各システムの起動特性の比較

本検討では、GTCC の出力が並列から 5 分で定格出力に達する（GTCC の負荷変化率 20%/分）起動指令（要求出力値）を与え、GT が 2 分で GT の定格出力に到達した（GT の負荷変化率 50%/分）と想定し、その際の GT 出口ガス温度、流量の変化を条件として与え、ST の起動特性について検討を行った。

図 4.1-12 に、三重圧蒸気 GTCC における ST の起動特性を示す（図中、①三重圧 ST）。図が示すように起動完了までおよそ 20 分程度を要し、現行の GTCC の 30、40 分程度に対して高速ではあるが、目標の 5 分起動のためには蒸気系についても何らかの工夫が必要である。

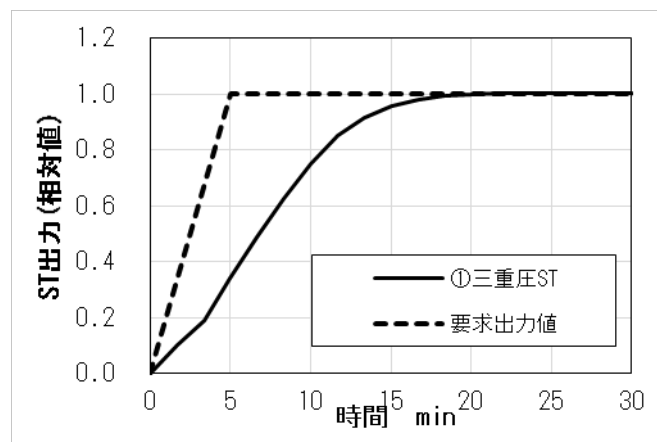


図 4.1-12 三重圧蒸気 GTCC における ST の起動特性

その一つの方策として、HRSG の熱容量の低減が考えられる。そこで、HRSG 全体熱容量を 1/2 とし、再度計算を行った。その結果を図 4.1-13 に示す（図中、②三重圧 ST (HRSG 熱容量 1/2)）。①三重圧 ST に比べて幾分高速化できたもの

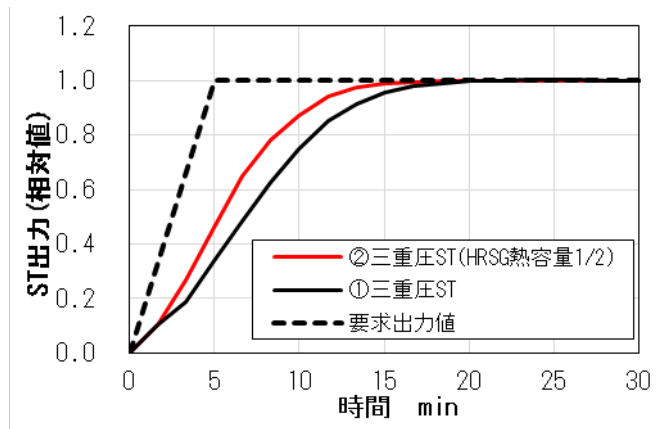


図 4.1-13 三重圧蒸気 GTCC における ST の起動特性  
(HRSG 全体熱容量を 1/2 としたケース)

の、定格出力まで 15 分程度を要し、さらなる改善が必要であることが分かる。

図 4.1-14 に、二重圧蒸気系における ST の起動特性を示す。IP ドラム容積が三重圧蒸気 GTCC の HP ドラムと同じと仮定した場合（図中、③二重圧 ST）、①三重圧 ST よりもやや高速化できることが分かる。しかしながら、これも十分な起動時間には至らなかった。

そこで、IP ドラム容積が三重圧蒸気 GTCC の IP ドラムと同じと仮定した場合の解析結果を同図に付記する（図中、④二重圧 ST (IP ドラム容量小)）。図が示すように、目標の起動時間には達しなかったものの、IP ドラム容積を減少することでかなりの高速化が図れることが分かる。

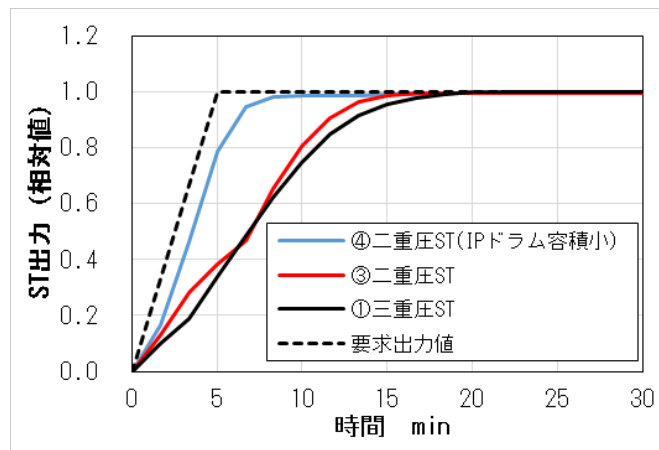


図 4.1-14 二重圧蒸気系における ST の起動特性

超臨界貫流蒸気 GTCC について、超臨界圧での水から蒸気の変化過程において熱貫流率の変化挙動が複雑であり、解析のための諸条件を詳細に検討する必要がある。そこで今回の検討では、三重圧蒸気 GTCC を基本に、主蒸気ボイラを貫流とした場合の効果についてのみ検討を行った。

図 4.1-15 にその結果を示す。図 4.1-13 の②三重圧 ST (HRSG 熱容量 1/2) の



ケースからさらに HP ドラムを貫流型に想定した場合(図中, ⑤三重圧 ST(HRSG 熱容量 1/2, HP ドラム貫流), 起動時間を大きく短縮できることが分かる. さらに IP ドラムと LP ドラムの容積を 1/2 に低減した場合(図中, ⑥三重圧 ST(HRSG 熱容量 1/2, HP ドラム貫流, IP・LP ドラム容積 1/2)), 途中の負荷帯では, 負荷変化率 20%/分を達成でき, 起動時間を 7 分程度に短縮することができた.

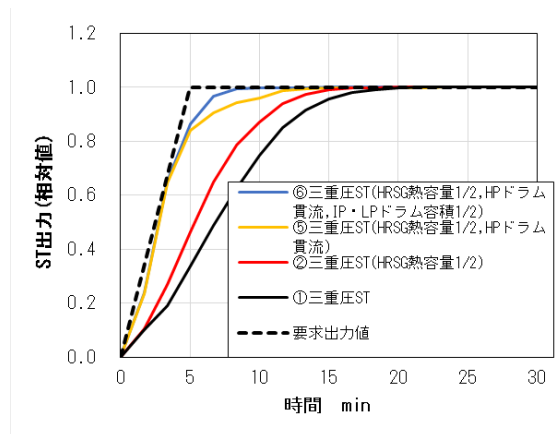
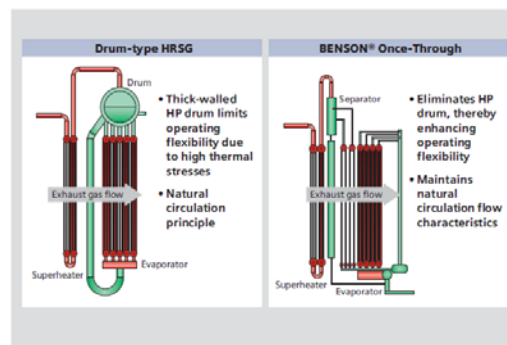
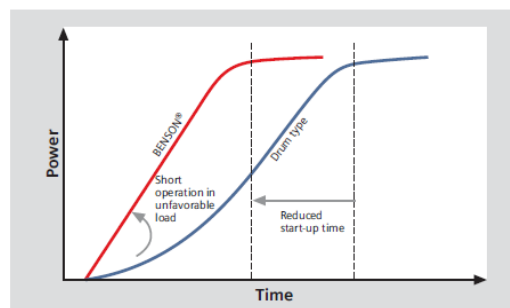


図 4.1-15 貫流ボイラとした場合の ST の起動特性



The BENSON® system – Elimination of thick-walled components

(1) Benson 型ボイラとドラム型ボイラの比較



Exemplary combined cycle plant start-up curve

(2) 起動時間短縮の例

図 4.1-16 BENSON® Once-Through technology for Heat Recovery Steam Generators<sup>(4.1-5)</sup>

GTCC 向けの貫流ボイラはすでに実用化が進められている。例として、Siemens 社製の Benson ボイラがある。図 4.1-16 にその概念図と起動時間短縮のイメージ図を示す。すでに海外プラントで用いられた実績があり、同図(2)のように起動時間短縮の実例が示されており、その有効性が示されている。高速に起動可能な GT と組み合わせることで GTCC 全体としての高速化を図れるものとする。

#### 4.1.4.4 動特性解析による運用性評価のまとめ

本項での検討結果を図 4.1-17 にまとめた。今回は、機器仕様のデータが十分ではなかったため粗い検討ではあるが、GTCC の運用性向上のためには蒸気系に対する何らかの工夫が必要であることが示唆された。HRSG の熱容量低減やドラム容積の低減、特に貫流ボイラを採用することで起動特性を改善でき、目標の起動速度を達成できる可能性は高いと考える。一方で、急激な負荷変動や周波数変動等に対する耐力などの検討も必要であり、今後、蒸気系についても概念設計などを含め、さらに詳細な検討を行う必要がある。

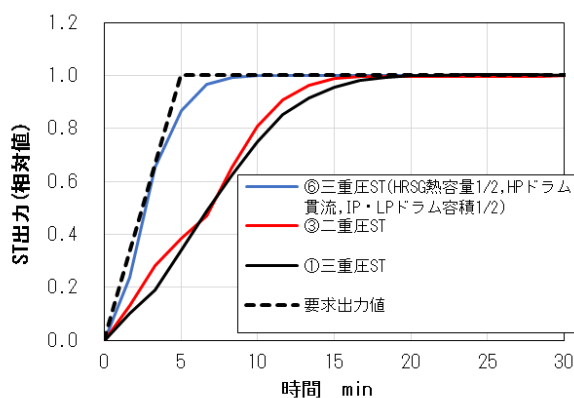


図 4.1-17 各システムの動特性解析による起動特性評価

#### 4.1.5 一軸型 GTCC と多軸型 GTCC について

今回は、一軸型 GTCC (GT と ST それぞれ 1 台がひとつの回転軸に連結) のみについて検討を行ったが、GTCC には多軸型 (複数台 GT と 1 台 ST で別々の回転軸を有する) もある。それぞれの一般的な特徴は以下の通りである (文献 (4.1-3)を参考に、多軸型 GTCC のヒートマスバランス解析結果も合わせて取り纏めた)。

一軸型：複数のユニットを台数制御することで、全体としての部分負荷効率を高く維持でき、蒸気タービンメンテナンス時も他の軸を運転できる等フレキシビリティが高いことがメリットである。一方、全負荷の効率は多軸型に劣る (部分負荷効率が高い例：一軸型 3 基の場合、全体の 1/3 の負荷の場合でも、1 基を運転、2 基を停止すれば良いため、蒸気タービンを定格で運転でき、定格効率が得られる)。

多軸型：全負荷で運転できる場合は蒸気タービンのスケールメリットで一軸型

よりも高効率を得られることが長所。一方、部分負荷では蒸気タービンの負荷が低くなり、効率が低下する。また、蒸気タービンメンテナンス時は全停する必要がある、フレキシビリティは一軸型に劣る。

以上のように、一般的には一軸型 GTCC の方の運用性が高い。しかしながら、多軸型でも複数の GT をうまく運用し、電力需要が急増した時に短時間で出力を増大する等、有益な運転方法等も考えられる。今後これらについても検討、比較が必要である。

#### 4.1.6 本研究項目のまとめ

本研究項目では、GTCC システムについて、システム構成や各種条件下でのヒートマスバランス解析と動特性解析を行い、プラント全体の目標性能が達成できるシステム構成や運転条件を明らかにした。また、検討した各システムに関して以下の結果を得た。

三重圧蒸気 GTCC：高い効率が得られ、実績も多い。目標の起動速度を得るためには工夫が必要。

高圧力比 GT 二重圧蒸気 GTCC：起動速度をやや向上できるが、三重圧蒸気 GTCC に比べて熱効率が低くなる。

超臨界貫流蒸気 GTCC：三重圧 ST システムより部分負荷も含め高効率を得られる可能性あり。貫流を想定した HRSG を用いた解析から運用性向上の可能性も見られた。ただし、成立性や機器性能・仕様について更なる検討が必要である。

### 文献

- (4.1-1) 再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定化における火力発電の役割とガスタービンの負荷変動吸収能力の向上による CO<sub>2</sub> 削減効果に関する調査研究，平成 29 年 3 月，国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- (4.1-2) 高橋徹，中本政志，渡邊泰，「火力発電システム動特性解析ツールの構築」，電力中央研究所報告 M15005，2016
- (4.1-3) 火原協会講座 37「コンバインドサイクル発電」，火力原子力発電技術協会
- (4.1-4) 火原協会講座 36「計測と制御」，火力原子力発電技術協会
- (4.1-5) SIEMENS ホームページ(2018/03/26 確認)，  
<https://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-generation/power-plants/gas-fired-power-plants/combined-cycle-powerplants/scc5-4000f-1s/A96001-S90-A496-X-4A00.pdf>

## 4.2 高負荷変化率に対応した GT/燃焼器制御技術の検討

### 4.2.1 本研究項目の概要・目的・目標

高負荷変化率対応化は、電力系統安定化に加えて、CO<sub>2</sub> や NO<sub>x</sub> 排出総量を抑えることができるので、環境面からも有意義な対応技術である。しかしながら、

GT が高負荷変化率で動作する場合、低負荷変化率（準定常状態）での動作に比べ燃焼器の作動状態にずれが生じるため、安定燃焼を得ることが困難になる。また、機器のバラつきや経時変化により安定性は異なる。そこで、本研究では負荷変化率を大幅に高めた場合においても安定燃焼や耐失火性能が確保可能なGT制御技術の検討を目的とする。

本年度の目標は、負荷変化率に対する安定燃焼を確保可能な制御コンセプトの立案と、適用時の課題を明らかにすることである。

#### 4.2.2 高負荷変化率対応 GT の課題

本研究ではGT制御に着目して次の2つの検討課題を設定する。

- 1) 負荷上昇渋滞 GTを高負荷変化率で運転すると、排ガス温度制御に抵触して負荷上昇渋滞が発生し、負荷追従性が悪化するリスクがある。そこで、負荷上昇渋滞を回避する燃料/空気制御コンセプトを立案する。
- 2) 燃焼振動発生 GTを高負荷変化率で運転すると、低負荷変化率での動作に比べて燃焼器の状態にずれが生じるため、安定燃焼を得ることが困難となる。そこで安定燃焼が得られる制御コンセプトを立案する。

#### 4.2.3 文献調査結果

本研究を実施するにあたり、海外メーカの動向把握を目的として海外の知財、特許について調査した。キーワード検索した結果、急速起動や制御性向上に関わる代表事例1件を図4.2-1にまとめる。本特許はGTのIGVの制御に関したもので、モデルベースのフィードフォワードを考慮することで、高精度での制御を可能とするであった。

今後、海外メーカに比べて遜色のない高負荷変化率GTに対応した技術開発を推進する必要がある。

#### 4.2.4 負荷上昇渋滞回避手法の検討

現状把握のため、負荷追従性に関する課題の調査を実施したのちに、負荷追従性向上のための検討を実施した。

- 1) 高負荷変化率運転時の負荷追従性に関する課題 現状把握のために数値シミュレーションを活用して負荷変動時の挙動を予測した。負荷変化率は5%/min, 20%/min, 50%/minの3種類を試行した。5%/minは現行の負荷変化率に近い特性、20%/minは本研究で目標とする負荷変化率、50%/minは更なる負荷変化率向上を狙った条件である。

図4.2-2のシミュレーション結果に示す通り、現行制御でも負荷下げ時は50%/minの高負荷変化率運転が達成可能な見込みである。一方、負荷上げ時に排ガス温度制御に干渉して、20%/minならびに50%/minで負荷渋滞が発生し、所望の負荷追従性が得られないことが分かった。

- 2) 負荷上昇渋滞回避手法の検討 前述の通り、従来制御で高負荷変化率運転を行うと、所望の負荷追従性が得られない。ここでは、負荷上昇渋滞回避手法について検討する。

排ガス温度制御は、排ガス温度の目標値と計測した排ガス温度との偏差に基づき PI 制御を行って燃料指令値を算出している。高負荷変化率で運転すると排ガス温度偏差が従来よりも小さくなり、燃料指令の上昇レートが制限されるので負荷制御を下回り、所望の負荷変化率が得られなくなる。

そこで、温度制御の燃料指令制限を回避するため下記の 2 つの対策ロジックを立案した。

(1)温度目標バイアス付与・・・排ガス温度目標値を一時的に逃がすことで負荷上昇時の温度偏差を増大させて所望の燃料指令上昇レートを確保する。

(2)IGV 開度バイアス付与・・・IGV 開度を一時的に計画よりも開いて空気量増で排ガス温度を下げることで負荷上昇時の温度偏差を増大させて所望の燃料指令上昇レートを確保する。

まず、(1)温度目標バイアス付与について説明する。図 4.2-3 に制御ロジックの概略図を示す。従来の排ガス温度制御ロジックに対して、温度偏差の絞り込みによる温度制御の燃料指令制限を回避するため、負荷変化率を考慮して排ガス温度目標値にバイアスを付与している。この温度目標バイアスを設計するにあたり、バイアス量、バイアス上昇レート、バイアス下降レートを選定した。選定のクライテリアは以下の 2 点とし、両者を同時に満たすパラメータを選定した。選定結果は図 4.2-4 に示す通りである。

- ・ 所望の負荷変化レートが達成可能な下限値。
- ・ 排ガス温度がクライテリアを超過しない。

上記ロジックを適用した数値シミュレーション結果を図 4.2-5 に示す。負荷変化率に応じて温度目標値を一時的に逃がして温度偏差を増大させることで、50%/min の負荷変化へ追従できる見込みを得た。

次に、(2)IGV 開度バイアス付与について説明する。図 4.2-6 に制御ロジックの概略図を示す。従来の IGV 開度制御ロジックに対して、温度偏差の絞り込みによる温度制御の燃料指令制限を回避するため、負荷変化率を考慮して IGV 開度指令にバイアスを付与している。IGV 開度指令バイアスを設計するにあたり、バイアス量、バイアス上昇レート、バイアス下降レートを選定した。選定のクライテリアは上記(1)と同じなので省略する。選定結果は図 4.2-7 に示す通りである。

上記ロジックを適用した負荷変化シミュレーション結果を図 4.2-8 に示す。負荷変化率に応じて IGV 開度を増やして一時的に排ガス温度を下げることで、50%/min の負荷変化へ追従できる見込みを得た。

#### 4.2.5 燃焼パラメータの自動調整手法の検討

現状把握のため、燃焼不安定化についての課題の調査とその分析、対策について検討を行った。

##### 1) 高負荷変化率運転時の燃焼不安定化に関わる課題

最近の GT では、NO<sub>x</sub> 低減のために予混合方式の低 NO<sub>x</sub> 燃焼器が採用されている。この燃焼器は、全負荷帯において低 NO<sub>x</sub> と安定燃焼を図るために燃料系統が複数に分かれており、系統が分別化された数だけ燃料制御弁も増えている。

これらの制御弁を各運用負荷に応じて最適に組み合わせて低 NO<sub>x</sub> を図りながら出力制御を行っているが、負荷変化率を上げると追従遅れが顕著になり、燃焼不安定による燃焼振動の発生が懸念される。

また、さらなる低 NO<sub>x</sub> 化を図るために開発した予混パイロット方式の燃焼器は、従来の拡散パイロット方式に比べて燃焼裕度が大幅に狭まるという特徴がある。図 4.2-9 燃焼ガス温度と燃料配分比の概略特性を示す。これは燃焼振動発生領域を可視化したものであり、以下、燃焼裕度マップと称する。この図によれば、拡散パイロット方式は安定燃焼範囲が広く裕度が大きいのが、予混パイロット方式は安定燃焼範囲が大幅に狭まっていることが分かる。

高負荷変化率運転時における燃焼安定性の現状を把握するために、負荷変化シミュレーションを行い燃焼裕度マップ上の作動線を予想した。負荷変化率は 20%/min と 50%/min の 2 種類を試行した。

図 4.2-10 シミュレーション結果を示す。燃焼裕度が特に狭まっている付近を拡大表示している。ここで、赤線で示した範囲は燃焼振動発生領域を示している。負荷変化率が大きくなるほど、負荷上げ作動線（緑線）および負荷下げ作動線（桃線）が設定値（青線）から乖離する傾向を示している。また、作動線が燃焼振動発生領域に抵触しており、燃焼不安定リスクが高まることを示している。なお、以下では、燃料配分比などの燃焼特性を左右するパラメータのことを「燃焼パラメータ」と称する。

## 2) 高負荷変化率運転時の燃焼不安定化要因の分析

先の検討結果から、負荷変化率が大きくなるほど、負荷上げ作動線および負荷下げ作動線が設定値から乖離して、燃焼不安定リスクが高まると分かった。

ここでは、負荷変化時に燃焼パラメータの作動線が設定値から乖離する要因について分析する。

図 4.2-11 に GT プラントの概略ブロック図を示す。同図を用いて、動的挙動に遅れをもたらす要因を示す。

- (1)燃焼ガス温度推定部の遅れ・・・計測ノイズ対策のために設けたローパスフィルタならびに移動平均処理部にて発生する位相遅れ。
- (2)燃料弁の応答遅れ・・・燃料弁が有する機械的特性（応答無駄時間、動作レート）による遅れ。
- (3)燃料配管の遅れ・・・燃料ガス自体の圧縮性（圧力応答）に起因する遅れ。
- (4)信号変換器遅れ・・・信号変換器が有する遅れ。

上記のうち、(1)は制御系遅れ、(2)～(4)は機械系遅れに大別できる。

ここに示した遅れ要素が負荷変化中の燃焼パラメータに及ぼす影響を把握するため、数値シミュレーションを用いて感度分析を行った。

負荷変化率を 5～50%/min まで変化させて、負荷変化時の燃焼パラメータ作動線における負荷上げと負荷下げの燃焼ガス温度のヒステリシス量を評価した。図 4.2-12 に結果を示す通り、負荷変化率が大きくなるほどヒステリシス量が大きくなる傾向を示しており、応答遅れによる作動線のずれが顕著に表れている。

また、ヒステリシス量における機械系遅れ：制御系遅れの内訳は、負荷変化

率小の場合 45 : 55 だが、負荷変化率大の場合 85 : 15 となっており、負荷変化率に応じて制御系と機械系の遅れ割合が変化すると分かる。

以上のことから、燃焼不安定化を招く動的遅れ要因と負荷変化率に応じた感度が明らかになった。作動線が設定値から乖離する要因は以下の 2 点に整理できる。

- ・ 制御系遅れの影響により燃焼ガス温度の真値と推定値に動的な遅れが生じることで、燃焼裕度マップの作動線がグラフ横軸方向にずれる。
- ・ 機械系遅れの影響により燃料配分比の指令値と実際に動的な遅れが生じることで、燃焼裕度マップの作動線がグラフ縦軸方向にずれる。

### 3) 燃焼パラメータ自動調整手法の検討

前述の通り、燃焼パラメータの作動線が設定値から大幅に乖離する要因は、制御系遅れと機械系遅れの 2 種類あり、さらに負荷変化率の大きさに応じて両者の遅れ割合が変化すると分かった。

ここでは、上記を踏まえて燃焼不安定化を回避すべく作動線の乖離を低減する打ち手について検討する。

本研究では、ローパスフィルタなどの制御系遅れと圧力応答遅れに代表される機械系遅れを先行的に補正する制御ロジックを提案する。図 4.2-13 に制御ロジック改善案の概要を示す。この改善案の狙いは、燃焼ガス温度推定に用いる GT 出力信号を燃料信号の大きさで変化する先行信号で補正して、燃焼ガス温度推定部の応答遅れを補償する点にある。負荷変化率の大きさにより変化する制御系遅れと機械系遅れの割合も考慮して適切な補正量が確保できる制御ロジックを目指した。

上記ロジックを適用した負荷変化シミュレーション結果を図 4.2-14 に示す。20%/min ならびに 50%/min の負荷変化において、燃焼裕度マップの作動線が燃焼振動領域を回避できる見込みを得ると同時に、負荷変化率の大きさによらず適切な補正量が確保できていることが示された。

#### 4.2.6 高負荷変化率に対応した GT 制御技術コンセプト適用時の課題

先に述べた制御コンセプトを適用するにあたり、次の課題に取り組む必要があると考える。

- 1) 高負荷変化率運転の実現性確認 負荷追従性を優先するため温度制御を大幅に緩和しており、排ガス温度がクライテリアを超過するリスクがある。高応答な排ガス温度センサを用いた実機確認が必要と考える。また、負荷変化率 UP により温度変化率大になるため、高温部品への寿命インパクトの確認も必要である。
- 2) IGV 超開の制御高度化 現状、負荷上昇回避の IGV 超開量は固定値を設定しているが、最適化されておらず、過度な排ガス温度低下などによりコンバインド効率の低下が懸念される。そこで、排ガス温度見合いで IGV 超開量を制御する技術を開発する。
- 3) HRSG や蒸気タービンも組み合わせた GTCC の評価 排熱回収ボイラ(HRSG)

はメタル熱容量大につき応答が鈍いため、HRSG や蒸気タービンも組み合わせた GTCC の評価が必要と考える。そのためには、GTCC モデルの構築が必要である。その上で、高負荷変化率に CC 負荷を追従させるための技術課題を抽出し、制御コンセプトを立案する。GTCC モデルを構築することで、GT 補機（燃料ガス加熱器/タービン冷却空気）も含めた GT 運用性も評価可能になる。

その他、再生可能エネルギー増大に対応すべく、最低負荷引き下げも検討課題と考える。

#### 4.2.7 まとめ

高負荷変化率を大幅に高めた場合における安定燃焼や耐失火性能の阻害要因を分析し、燃料比制御システムの遅れを補正する GT 制御コンセプトを立案し、数値シミュレーションを用いてその有用性を確認した。また、負荷変化率を大幅に高める場合は負荷渋滞が発生することをシミュレーションで示し、負荷追従性を高める燃料制御および空気制御のコンセプトも立案した。検討を行った結果、ハード面での検証の必要性を明らかとした。



名称 / 出願番号	出願人 / 時期	特許の概要
MODEL-BASED FEED FORWARD APPROACH TO COORDINATED AIR-FUEL CONTROL ON A GAS TURBINE / 14/190,181	GENERAL ELECTRIC COMPANY	ガスタービンの IGV の制御に関し、モデルベースのフィードフォワードを考慮することで、高精度で制御可能となる。 高速応答時は、燃料系統に加えて IGV も精度よく制御する必要があり、急速起動時には類似の方法が有効となる可能性あり。

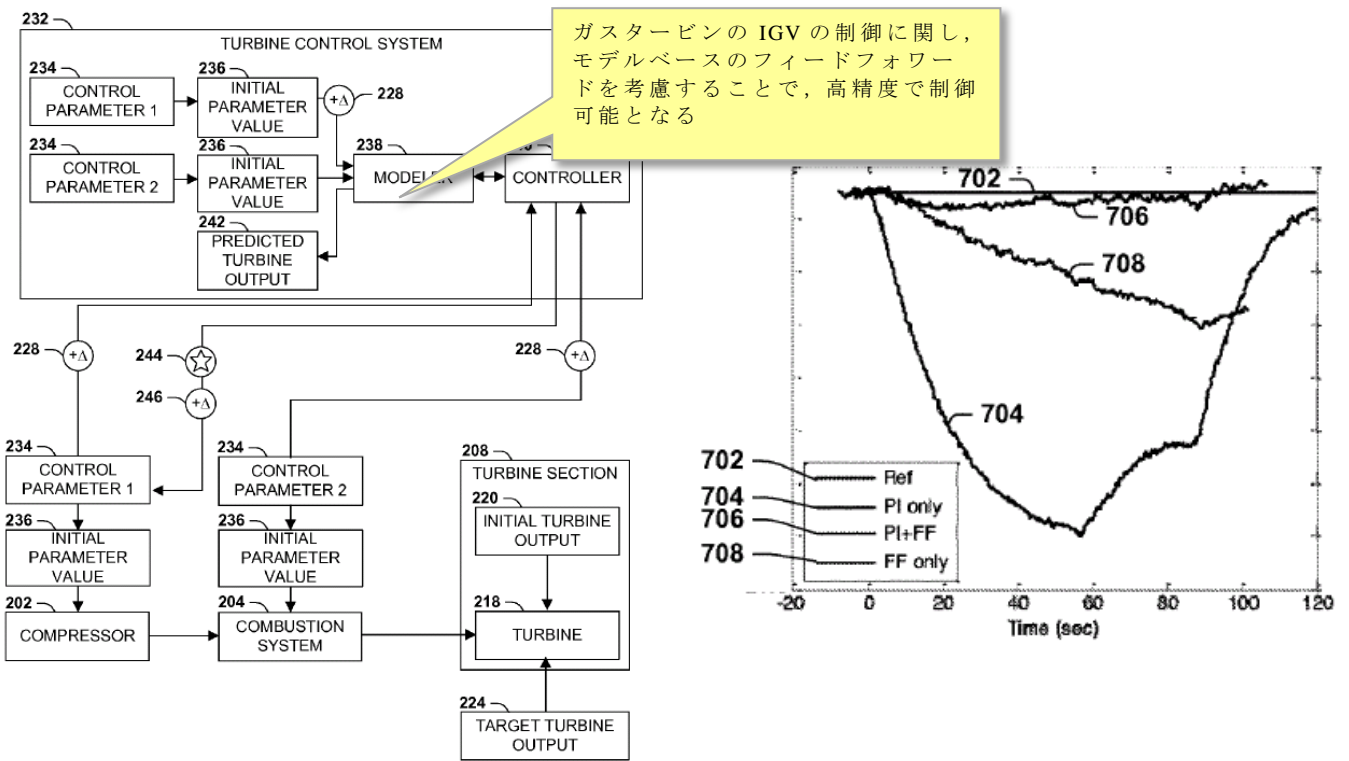


図 4.2-1 海外特許調査結果の一例

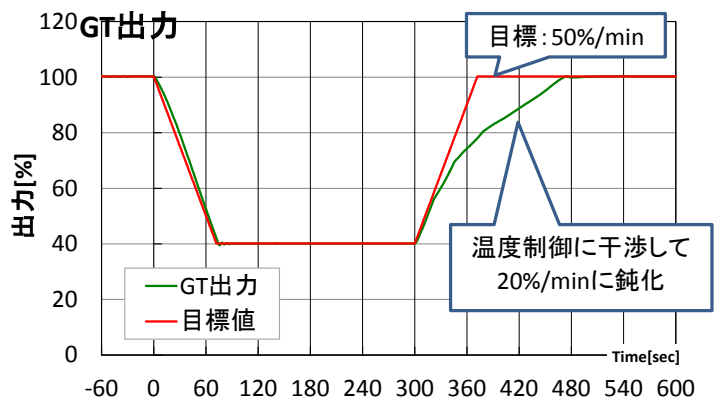
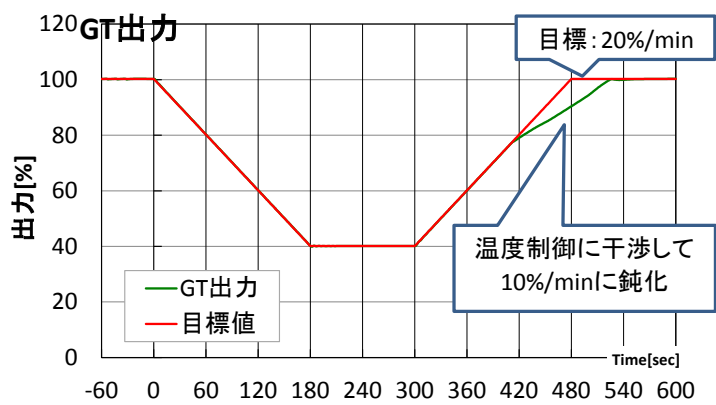
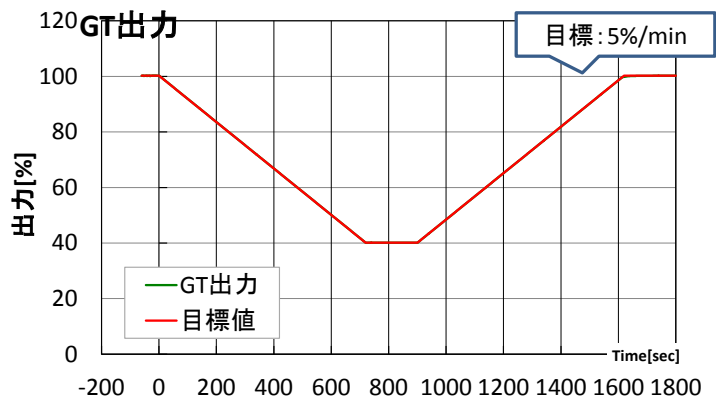


図 4.2-2 負荷変動シミュレーション結果

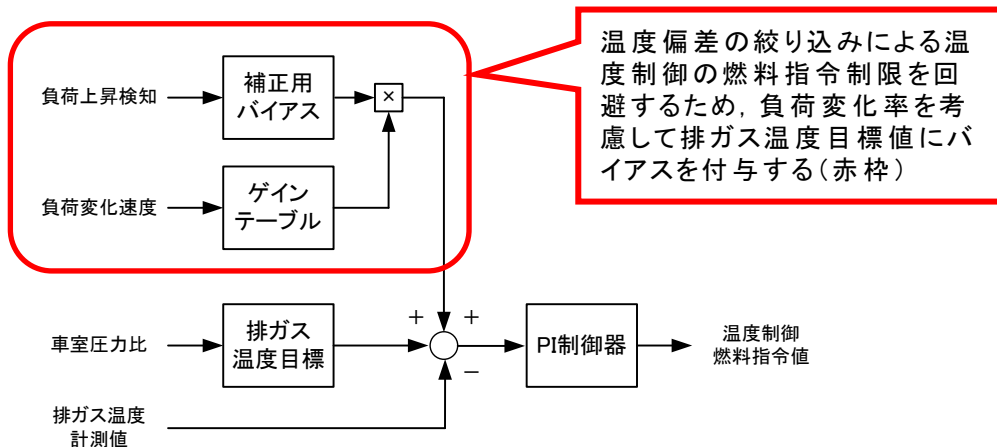


図 4.2-3 排ガス温度目標バイアス付与の制御ロジック概略図

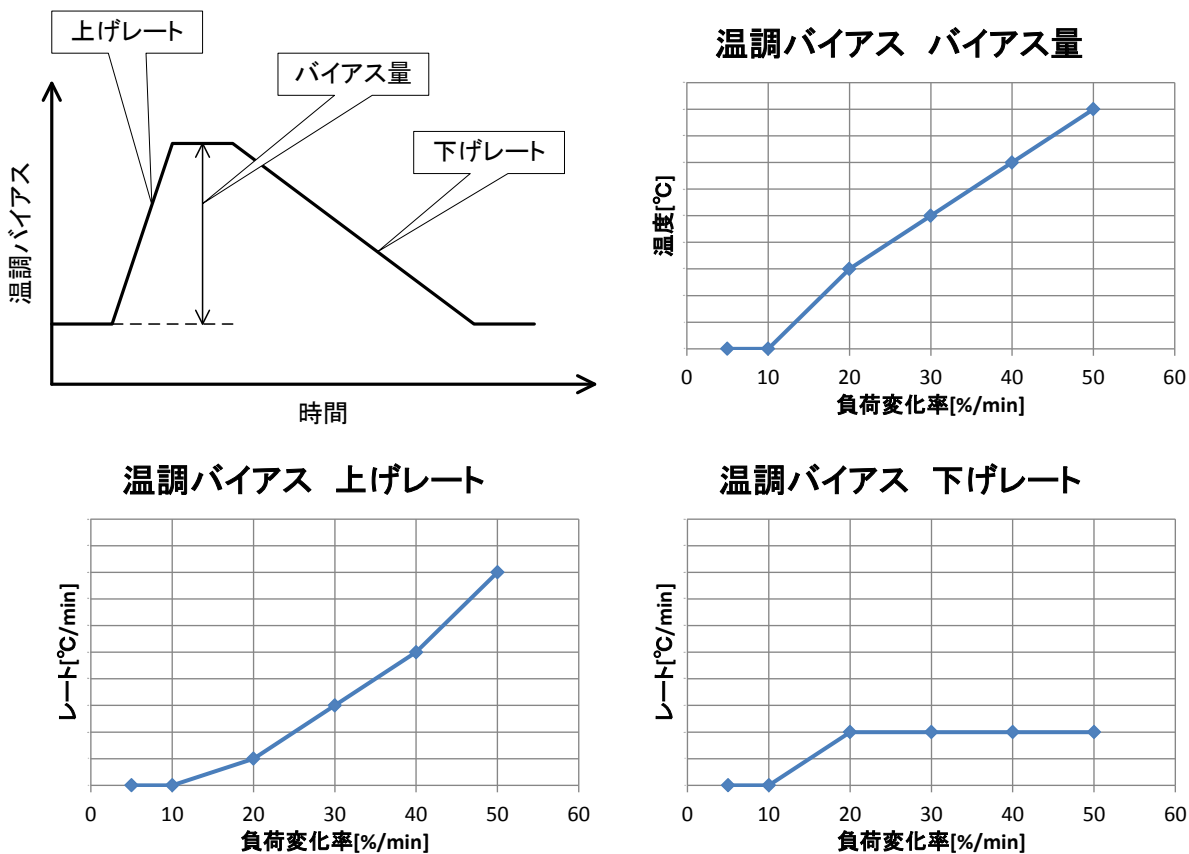


図 4.2-4 排ガス温度目標バイアスの制御パラメータ選定結果

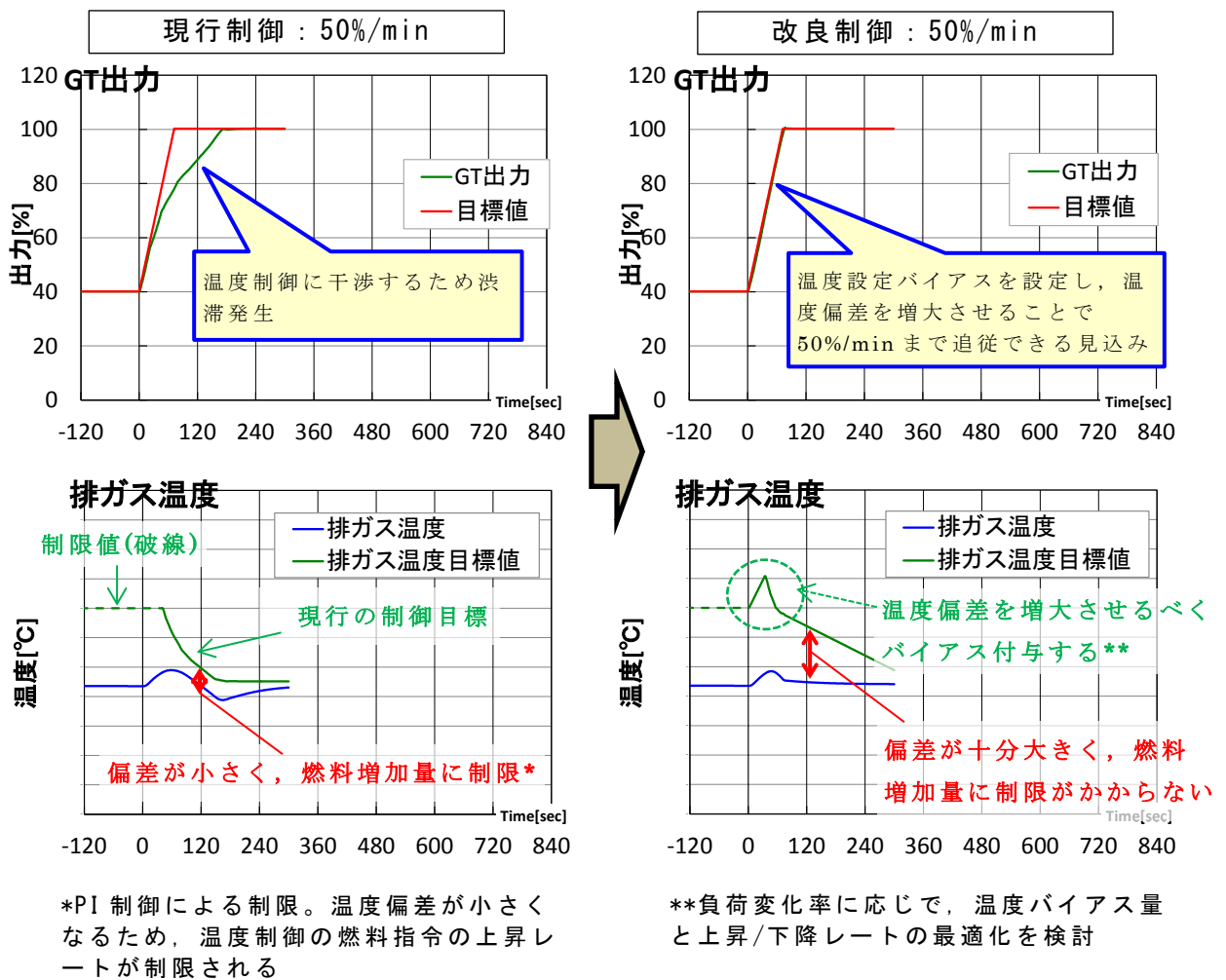


図 4.2-5 排ガス温度目標バイアス付与のシミュレーション結果

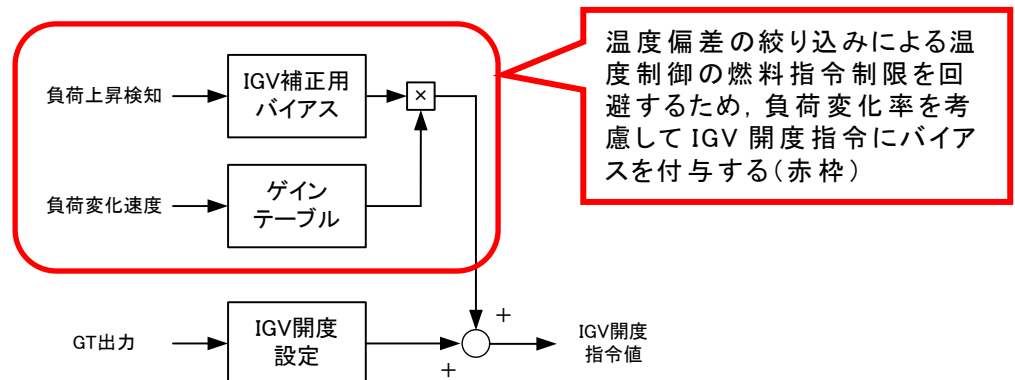


図 4.2-6 IGV 開度バイアス付与の制御ロジック概略図

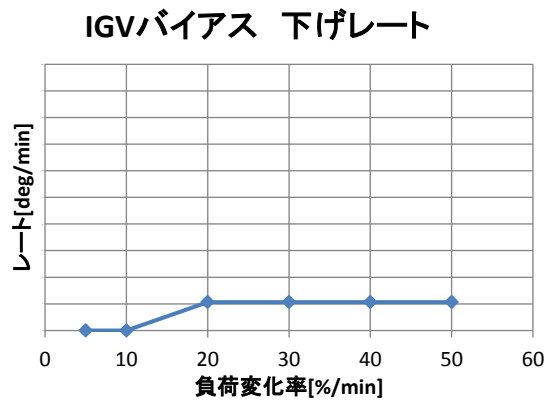
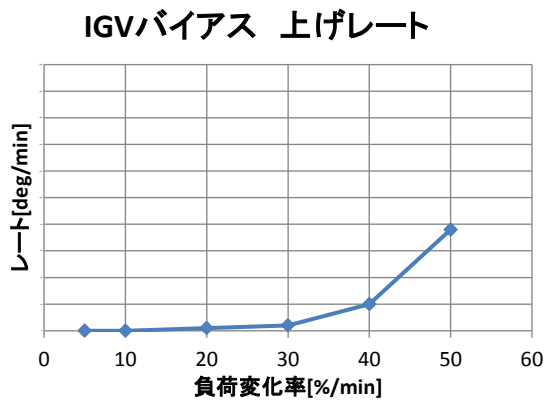
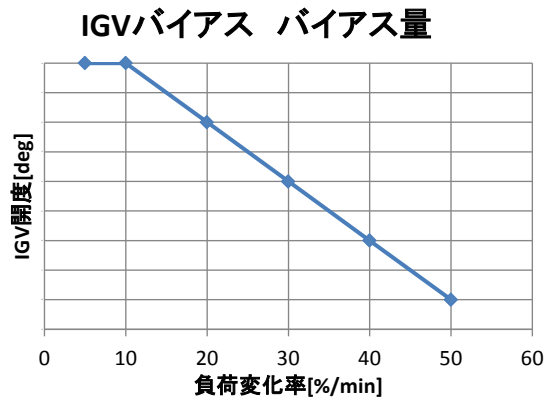
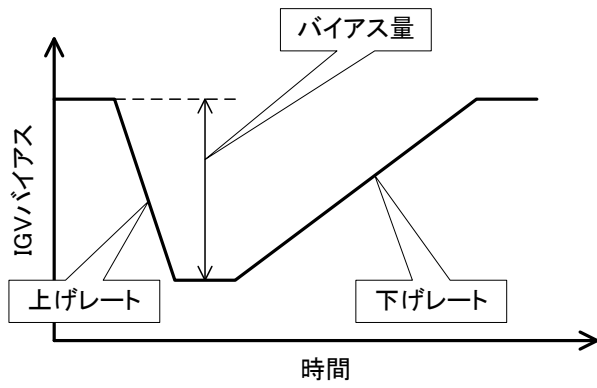
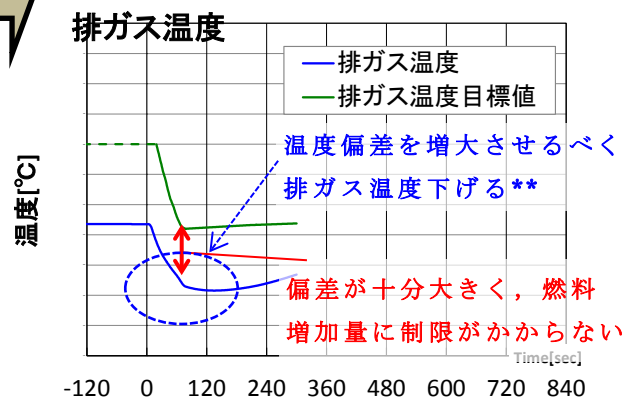
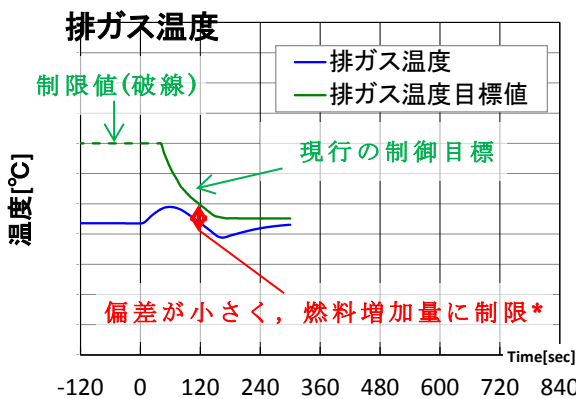
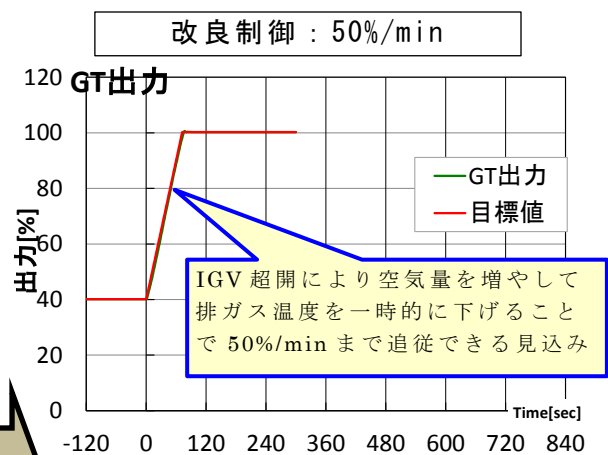
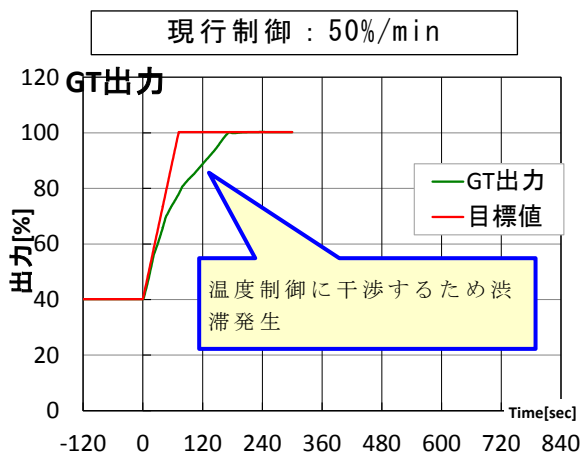


図 4.2-7 IGV 開度バイアスの制御パラメータ選定結果



\*PI 制御による制限。温度偏差が小さくなるため、温度制御の燃料指令の上昇レートが制限される

\*\*負荷変化率に応じて、IGV バイアス量（固定値）と上昇/下降レートの最適化を検討

図 4.2-8 IGV 開度バイアス付与のシミュレーション結果

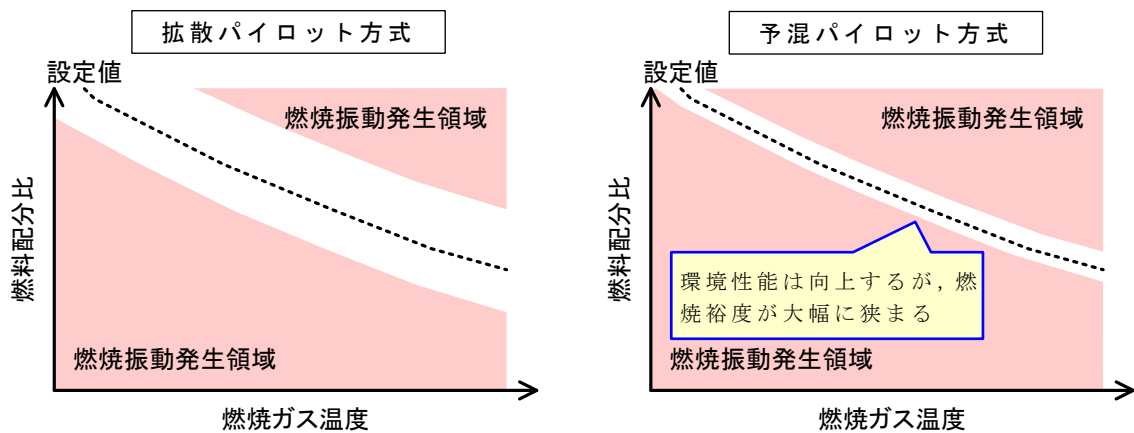


図 4.2-9 低 NOx 燃焼器の燃焼裕度マップのイメージ図

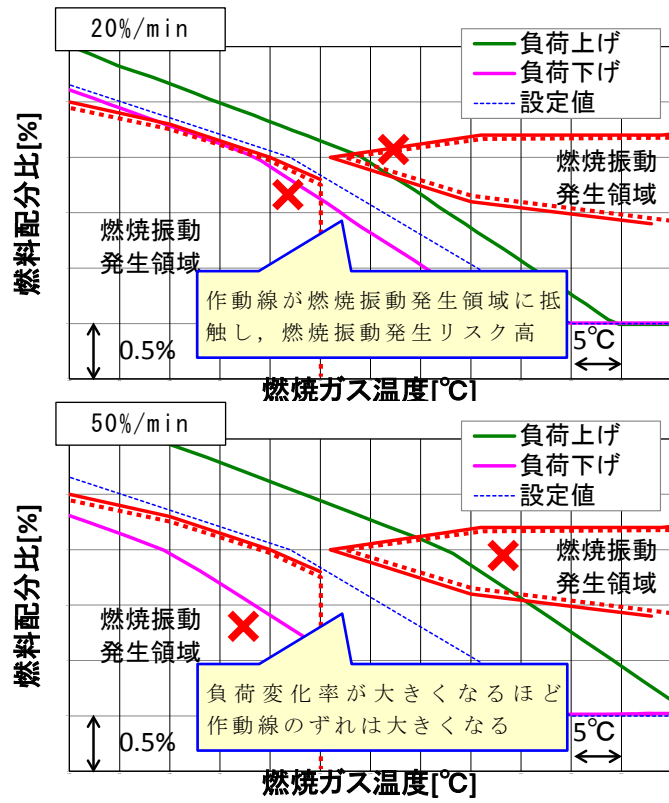


図 4.2-10 負荷変動運転時の燃焼裕度マップ上の作動線

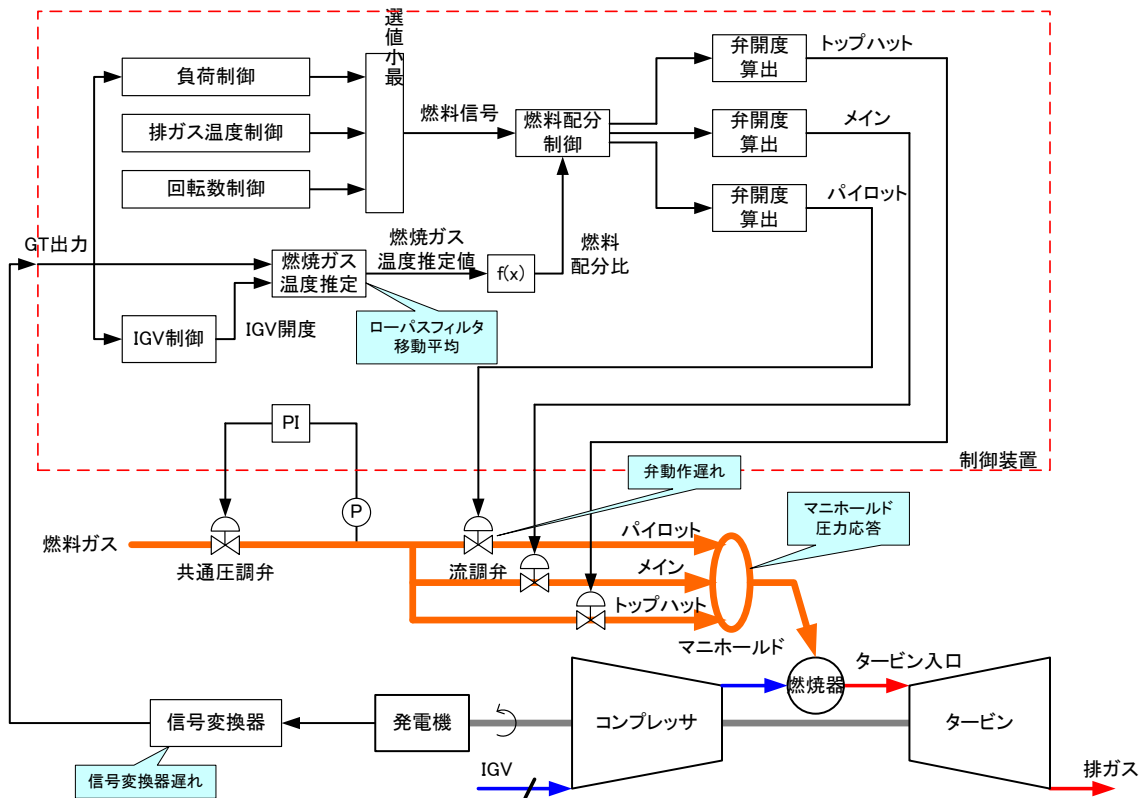


図 4.2-11 GT プラントの概略構成図

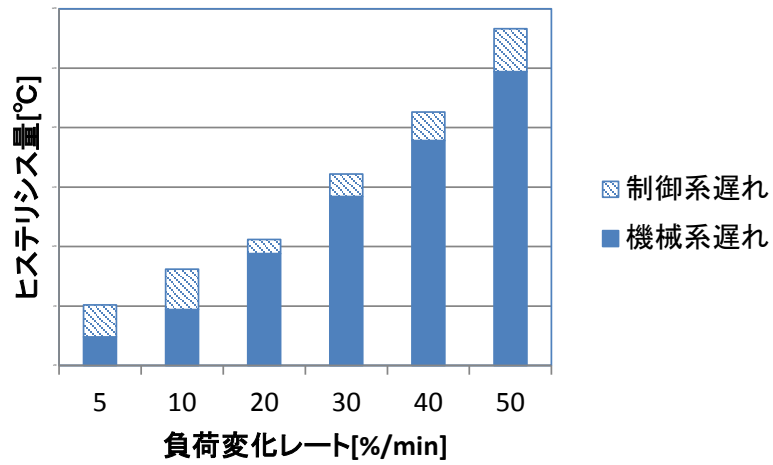


図 4.2-12 負荷変化時の燃焼裕度マップの作動線ヒステリシス量の内訳

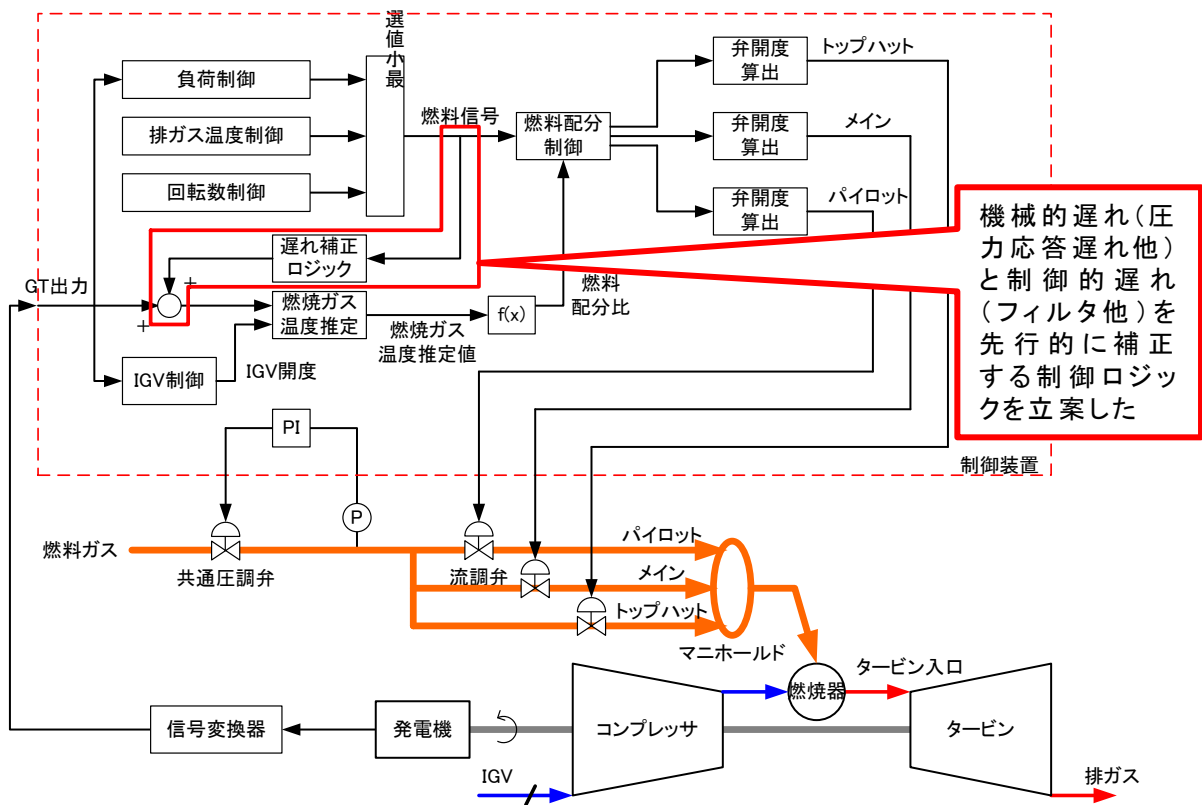


図 4.2-13 制御ロジック改善案の概要



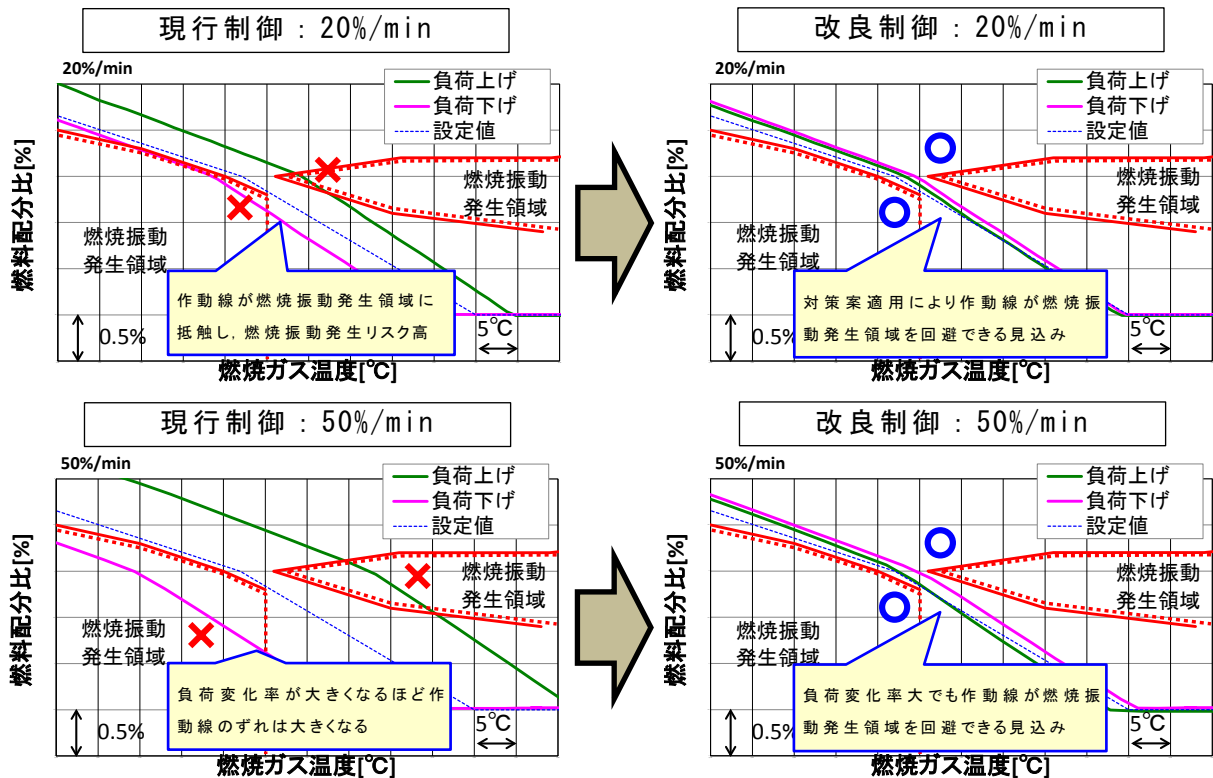


図 4.2-14 燃焼パラメータ自動調整手法適用時のシミュレーション結果

### 4.3 燃焼器の急速負荷変動時における逆火リスク評価技術の開発

大型 GT で急速起動・急速負荷変動を実施する際、制御に対する燃料系統の応答遅れや、燃兼圧車室内部および燃焼器内部に想定外の非対称性・非定常性を伴う流れが発生する可能性があり、それに伴う速度偏差や高濃度領域は、燃焼不安定や逆火のリスクを高める可能性がある。

#### 4.3.1 本研究項目の目的

本研究では、急速起動・急速負荷変動時のリスク評価技術として、燃焼器内部の逆火現象を解析により評価する。実機燃焼器を対象に逆火現象の数値シミュレーション (LES) を実施することにより、数値的に逆火現象を再現する事を目的とする。

#### 4.3.2 数値計算方法

解析対象は、ガスタービン燃焼器内の流動場とする。燃焼器上流部には、8つのスワールダクトが周方向に等間隔に配置されており、各ダクト内で空気と燃料が予混合され、メイン燃焼器内部に流入する燃焼器上流ダクト部分及び燃焼器下流部分にはテトラメッシュを、燃焼器メイン管部分にはヘキサメッシュを用いた。燃焼器上流ダクト部分は、ダクト折り返し部分での剥離や、燃料噴射ノズル出口での燃料ジェットの広がりを高精度に予測するために、格子の粗密を適切に調整した。また、燃焼器出口で、逆流等による影響を抑えるために、

出口部分を延長し絞りをつけた。本解析に適用した格子はセル数 4.18 億、節点数 1.30 億であり、2,000 コアを用いた大規模並列計算を実施し、後述の各条件とも約 3 週間の計算時間を要した。

燃焼モデルとして、多化学種の多段反応を比較的低い計算負荷で考慮することが可能な Flamelet 法の一つである Flamelet Generated Manifold (FGM) 法を用いる。以下に FGM 法の概要を述べる。

FGM 法では、火炎片中の物理量が燃料混合分率  $Z$  および反応進行変数  $C$  により表すことができるという関係から、以下に示す一次元断熱予混合火炎方程式から、様々な当量比下で得られた火炎データを、 $Z$ - $C$  空間に変換することで FGM ライブラリを作成し、 $Z$  および  $C$  を参照パラメータとして化学種  $k$  の質量分率  $Y_k$  および反応生成物生成速度  $\dot{\omega}_C$  を抽出する。本解析では、反応進行変数  $C$  を  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  の質量分率の和として定義する。

$$\frac{\partial \rho_{sL}}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho_{sL} Y_i}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\lambda}{Le_i c_p} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) = \dot{\omega}_i,$$

$$\frac{\partial \rho_{sL} h}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\lambda}{c_p} \sum_{i=1}^{N_s} \left( \frac{1}{Le_i} - 1 \right) h_i \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right).$$

計算手法の詳細は文献 (4.3-1 — 4.3-5) を参照していただきたい。

### 4.3.3 結果および考察

本研究では、解析条件として、定格条件と、低流速条件の 2 条件を設定した。定格条件は、1600°C 級ガスタービンの標準的な運転条件をベースに設定している。低流速条件では、実圧燃焼試験により確認された逆火限界条件をベースに、タービン入口温度を維持した状態で燃焼器流速を低下させ、逆火発生限界に対して極端に厳しい条件を設定した。設定条件の概念図を図 4.3-1 に示す。解析の順序として、まず定格条件での解析を実施し、その結果を初期条件として境界条件を低流速条件に変更し、逆火発生の状況を評価した。

定格条件での解析のガス温度分布を図 4.3-2 に示す。定格条件の解析結果では、逆火が発生せず、火炎位置が適正に再現されている事がわかる。解析条件を低流速条件に変更後の、ノズル出口代表点におけるガス温度履歴を図 4.3-3 に示す。1.37~1.38sec 間においてガス温度が上昇し、逆火が発生している事がわかる。境界条件変更 0.08sec 後におけるガス温度分布を図 4.3-4 に示す。一部ノズルで逆火が発生した後には、逆火の発生していないノズルでは、火炎の遡上傾向も確認されない状態となる。これは逆火が発生したノズルでは燃焼圧損によって空気量が減少し、その他のノズルでは逆に空気量が増加し、流速が上昇すると共に、火炎温度が下がる為、火炎の遡上傾向がなくなるものと考えられる。

#### 4.3.4 本研究項目のまとめ

ガスタービン燃焼器内乱流燃焼場に対して LES 燃焼解析を適用し、フラッシュバック燃焼現象の再現、解析を実施した。本解析には、セル数 4.18 億、節点数 1.30 億の格子を設定し、2,000 並列計算により一条件あたり約三週間で解析を完了した。LES/FGM 法による計算により、フラッシュバック燃焼現象が再現された。今後の課題として、流動場の離散化スキームの精度向上、燃焼器壁面温度条件の変更による、さらなる予測精度向上が挙げられる。

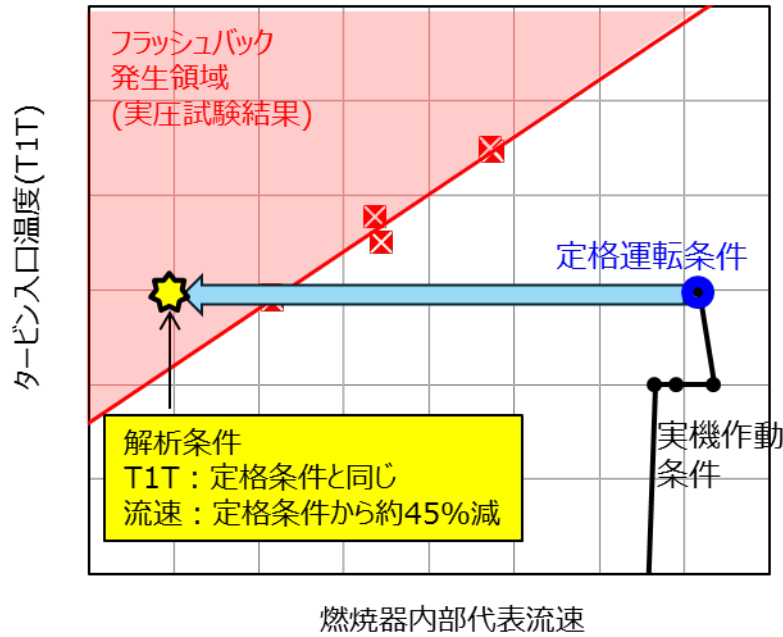


図 4.3-1 解析条件の概念図

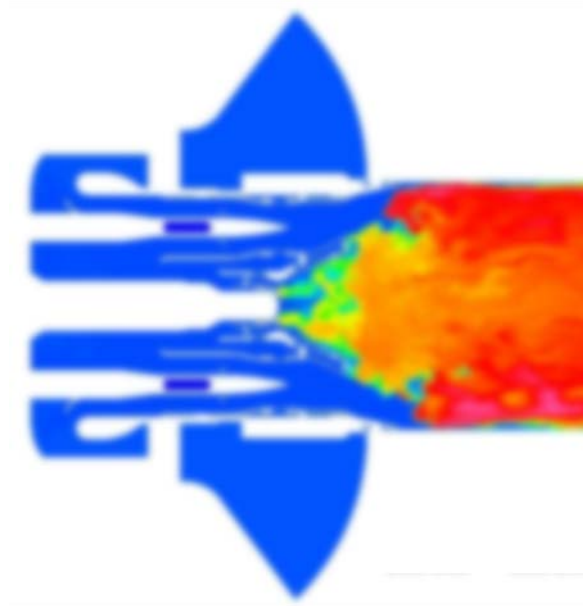


図 4.3-2 定格条件での解析結果 (ガス温度分布)

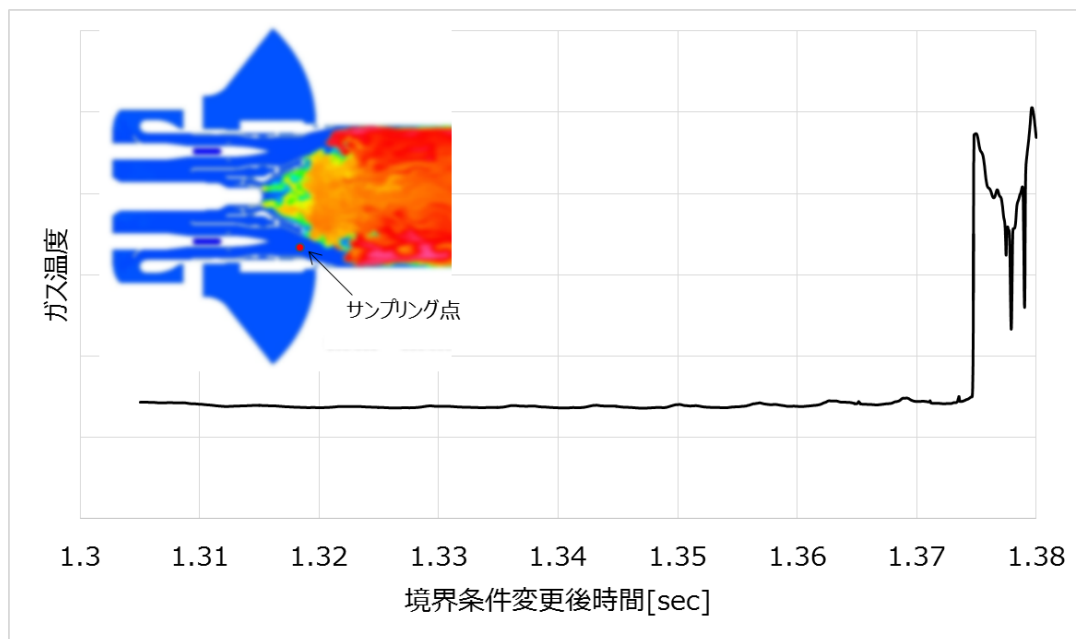


図 4.3-3 ノズル出口代表点のガス温度履歴

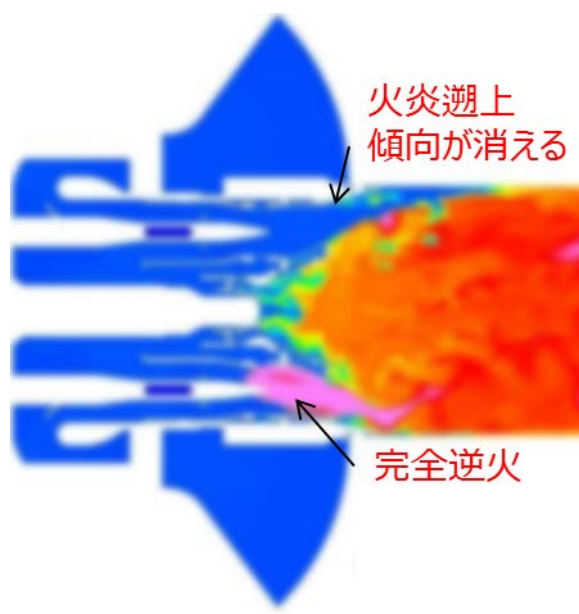


図 4.3-4 逆火発生後のガス温度分布

#### 文献

- (4.3-1) H. Moriai, R. Kurose, H. Watanabe, Y. Yano, F. Akamatsu, S. Komori, "Large-eddy simulation of turbulent spray combustion in a subscale aircraft jet engine combustor- Predictions of NO and soot concentrations -", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.135, 091503 (2013).

- (4.3-2) S. Tachibana, K. Saito, T. Yamamoto, M. Makida, T. Kitano, R. Kurose, "Experimental and numerical investigation of thermo-acoustic instability in a liquid-fuel aero-engine combustor at elevated pressure: validity of large-eddy simulation of spray combustion", *Combustion and Flame*, Vol. 162, pp. 2621-2637 (2015).
- (4.3-3) T. Nishiie, M. Makida, N. Nakamura, R. Kurose, "Large-eddy simulation of turbulent spray combustion field of full annular combustor for aircraft engine", In Proc. of *International Gas Turbine Congress 2015 (IGTC2015)*, Toranomon Hills, Tokyo, Japan, CD-ROM (7 pages), 2015.
- (4.3-4) K. Hirano, Y. Nonaka, Y. Kinoshita, M. Muto, R. Kurose, "Large-eddy simulation of turbulent combustion in multi combustors for L30A gasturbine engine", In Proc. of *ASME Turbo Expo 2015*, Palais des Congress, Montreal, Canada, GT2015-42545 (8 pages), 2015.
- (4.3-5) Y. Hu, R. Kurose, "Nonpremixed and premixed flamelets LES of partially premixed spray flames using a two-phase transport equation of progress variable", *Combustion and Flame*, Vol. 188, pp. 227-242 (2018).

#### 4.4 超軽量精密鋳造タービン動翼の概念設計

タービンロータに加わるタービン動翼から遠心荷重を大幅に低減するため、超軽量化精密鋳造タービン動翼の鋳造技術向上検討を行い、次に励振力低減のための空力検討を行った。

##### 4.4.1 鋳造技術開発

薄肉のタービン動翼を製作するための鋳造技術向上検討を行った。

###### 1) 目的

タービン動翼軽量化のためには鋳物の薄肉化が有効であるが、鋳型で製品外形を、中子で内部冷却通路を形成する現行の製法では薄肉化に制約がある。要因の一つとして両者の膨張・収縮挙動の差異があげられる。鋳造プロセス中の各ステージにおける膨張・収縮を考慮して、鋳型-中子間のクリアランスが設定されているが、このため中子位置ズレを考慮した寸法公差を設定する必要があり、壁厚の低減の障害となっている。そこで、本研究では鋳型-中子間のクリアランスを最適化するべく、鋳型-中子材の膨張、収縮挙動を把握した。また、鋳型-中子間の線膨張係数差低減のための技術調査、製造・材料技術開発を行った。

###### 2) 鋳型、中子材の線膨張、焼結収縮挙動把握

鋳型材及び中子材について、線膨張率測定試験を行い、室温と鋳込温度である1500℃までの間における膨張、収縮挙動を把握した。図4.4-1に示すとおり、鋳型材は、昇温過程の約1200℃まで熱膨張し、その後1500℃まで焼結収縮していた。また、冷却過程においては、1500℃から室温まで直線状に熱収縮していた。一方、中子材については、昇温過程の約200℃の温度域において、結晶性シリカであるクリストバライトの相変態に伴う膨張が確認され、その後は約1200℃まで緩やかに熱膨張していた。また、冷却過程においては、クリストバ

ライトの相変態に伴う収縮が確認された。なお、昇温過程における膨張量に比べて、降温過程における収縮量が大きくなっているのは、中子材に添加している溶融シリカが試験中にクリストバライトへ変態したものと考えられる。鋳型材と中子材の熱膨張率差は最大 0.6%程度あり、鋳型-中子間のクリアランス低減の障害になっていることが確認された。

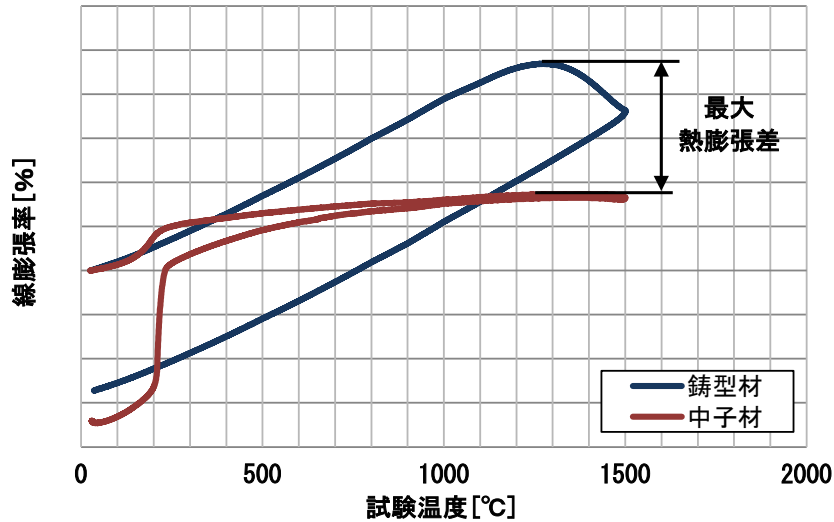


図 4.4-1 鋳型材及び中子材の線膨張率測定結果

### 3) 線膨張係数差低減のための技術調査

製造技術開発，材料技術開発の参考とするため，鋳型，中子材料の線膨張係数変化に関する文献調査を実施した。文献調査結果の一覧を表 4.4-1 に示す。

文献では，材料組成調整によって線膨張係数を変化された事例が多くみられ，組成調整により線膨張係数を数%変化させた事例もあった。組成変更による線膨張係数変化の例を，図 4.4-2，図 4.4-3 に示す。

今回の調査結果より，材料組成調整によって，鋳型-中子間の線膨張係数差を低減できる可能性が示唆された。一方で，鋳型-中子を同一材質で一体造形できれば，線膨張量の差異を考慮する必要がないことから，本研究では，鋳型-中子の同一材一体造形に関する検討を実施した。

表 4.4-1 線膨張係数変化に関連する文献調査結果一覧(4-4-1~4-4-12)

No.	文献名	概要
1	J. J. et. al., <i>Journal of Materials Science &amp; Technology</i> <b>33</b> (2017) 204-209.	シリカに添加するアルミナ量を変化させた際の、線膨張係数変化について記載
2	Y. H. Kim et. al., <i>Ceramics International</i> <b>42</b> (2016) 14738-14742.	シリカ系中子材料に添加する SiC 量を変化させた際の、線膨張係数変化について記載
3	Y. H. Kim et. al., <i>Ceramics International</i> <b>42</b> (2016) 8878-8883.	シリカ系材料をコロイダルアルミナに浸漬する時間を変化させた際の、線膨張係数変化について記載
6	K. Kapranos et. al., <i>Comprehensive Materials Processing</i> <b>5</b> (2014) 39-67.	種々のセラミクス材料（シリカ、ジルコン等）の線膨張係数測定結果について記載
7	R. Asthana et. al., <i>Materials Processing and Manufacturing Science</i> (2014) 39-67.	種々のセラミクス材料（シリカ、ジルコン等）の線膨張係数測定結果について記載
4	P. M. Jebaraj et. al., <i>National Conference on Advances in Production Technology</i> , February 7-9 (1998) 52-56.	シリカ系セラミクス材料の線膨張係数について記載
5	Z. Li et. al., <i>Journal of Materials Processing Technology</i> <b>217</b> (2015) 1-12.	Ni 基合金と鋳型、中子の線膨張係数を比較した結果について記載
8	A. A. Wereszczak et. al., <i>Journal of Materials Science</i> <b>37</b> (2002) 4235-4245.	シリカ、ジルコン、アルミナ配合を変えた材料の、昇温時の寸法変化について記載
9	A. Kazemi et. al., <i>Ceramics International</i> <b>40</b> (2014) 1093-1098.	シリカ系中子材料に添加するジルコン量を変化させた際の、材質変化について記載
10	W. Jiang et. al., <i>Journal of Asian Ceramic Societies</i> <b>5</b> (2017) 410-417.	アルミナ系中子材料にシリカファイバーを添加した際の、材質変化について記載
11	C. Yuan et. al., <i>Journal of the European Ceramic Society</i> <b>23</b> (2003) 399-407.	鋳型材料に有機物ファイバーを添加した際の、鋳型厚さや材質変化について記載
12	P. J. Wilson et. al., <i>Journal of the European Ceramic Society</i> <b>31</b> (2011) 1849-1855.	シリカ-ジルコン系材料に含まれるジルコン粒子径を変化させた際の、材質変化について記載

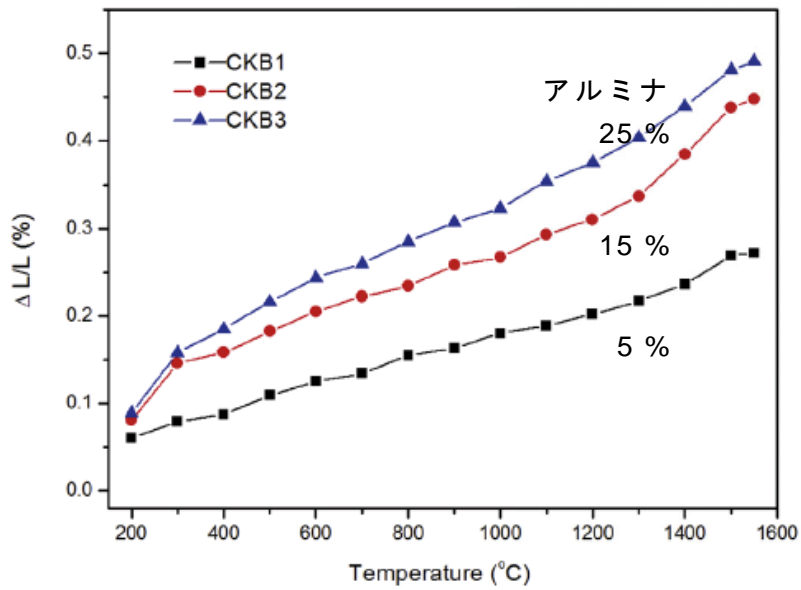


Fig. 6. Linear thermal expansion curves during heating up to 1550 °C of the core samples sintered at 1220 °C.

図 4.4-2 シリカにアルミナを添加した際の線膨張係数変化  
(J. J. Liang et. al., Journal of Materials Science & Technology 33 (2017) 204-209.)

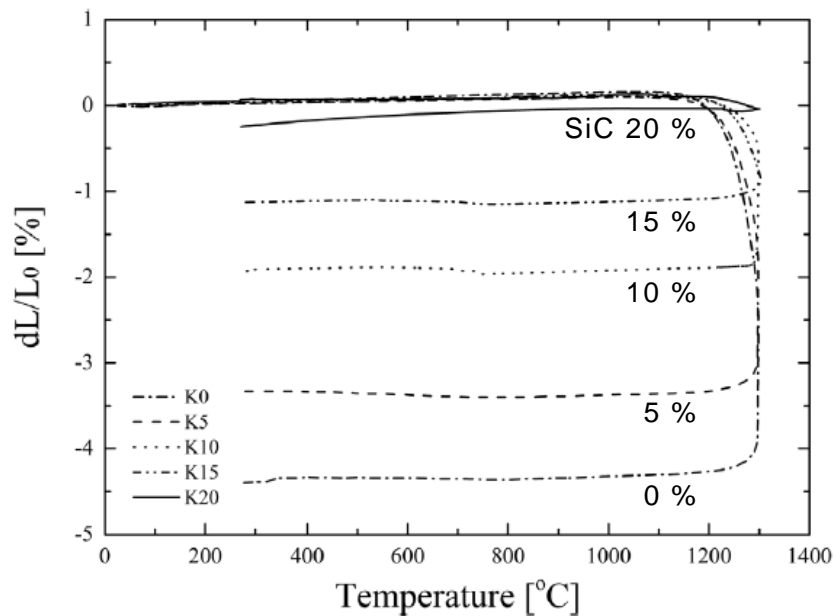


Fig. 4. Thermal expansion and contraction of silica-based composites during dilatometry.

図 4.4-3 シリカ系材料に SiC を添加した際の線膨張係数変化  
(Y. H. Kim et. al., Ceramics International 42 (2016) 14738-14742.)



4) 線膨張係数差低減のための製造技術開発

鑄型-中子間の線膨張率差低減のためには、鑄型-中子を同一材料にて成型する方法が有効である。そこで、鑄型-中子を同一材料かつ一体成形する製造技術として、射出成型法を検討した。最終製品となる部分を 3D 積層造形（樹脂造形）により作製し、それを金型にセットして射出成型を行った。樹脂モデルと金型間には鑄型を形成するためのクリアランスを、また、樹脂モデルの内部には中子を形成するための中空部を設けた。今回造形した樹脂モデルを図 4.4-4 に示す。また、樹脂モデルを金型へセットした状況を図 4.4-5 に、射出成型後の鑄型-中子一体成型品を図 4.4-6 に示す。

鑄型-中子一体成型品の射出材料は従来の中子材として使用している有機バインダとセラミクス粉体を混合したものを使用した。射出成型の結果、鑄型-中子一体成型品には極端な割れ等は確認されなかった。しかし、図 4.4-7 に示すとおり、焼成工程において、一体成型品の破損が確認された。焼成中に射出材料の有機バインダが軟化・消失し、樹脂モデルを内包している一体成型品の形状を維持出来なかったものと考えられた。

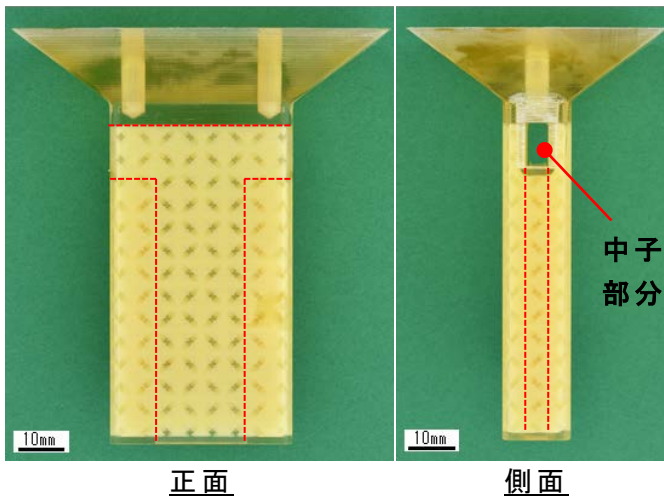


図 4.4-4 鑄型-中子一体造型用樹脂モデル

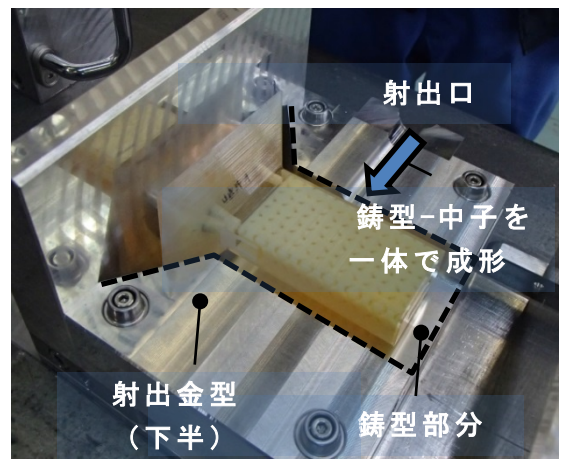


図 4.4-5 鑄型-中子一体造型用金型

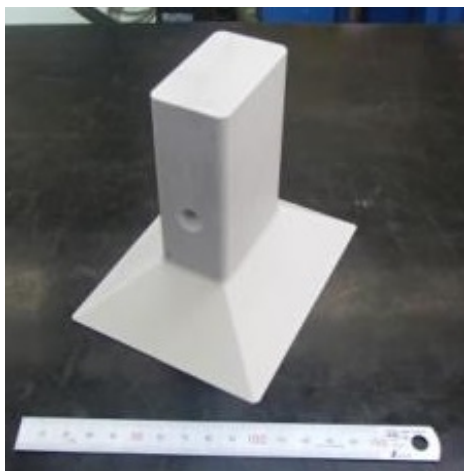


図 4.4-6 鑄型-中子一体造型品 (成型体)



図 4.4-7 鑄型-中子一体造型品 (焼成体)

#### 5) 線膨張係数差低減のための材料技術開発

有機バインダを使用した一体成型品では、焼成中に破損する事象が生じたことから、焼成工程においてバインダの軟化・消失が生じない無機バインダを使用した新規射出用スラリーの検討を行った。無機バインダとセラミクス粉体及び分散剤を混合することで、新規射出用スラリーを作製することが出来た。新規射出用スラリーは射出成型後の乾燥・固化までの間にスラリー中のセラミクス粉体が沈殿する可能性があるため、固形分濃度を極力高めにする事とした。一方、固形分濃度が高すぎると流動性を失い、射出成型性が低下する可能性が高い。検証の結果、射出成型用スラリーの固形分濃度は、沈殿量も少なく、かつ十分な流動性を有している約 84wt% に設定した。本射出材料を幅 35 mm、長さ 60 mm、深さ 8 mm のプラスチックケースに流し込み、乾燥、固化させた結果、図 4.4-8 に示すとおり、射出材料の表面の一部に乾燥割れが生じた。次年度は本乾燥割れの原因究明及び対策材の検討を行う計画である。



図 4.4-8 新規射出用スラリーの乾燥後外観

#### 6) 鑄造技術向上検討結果まとめ

鑄型-中子間のクリアランスを最適化するべく、鑄型-中子材の線膨張、収縮挙動を把握した。また、鑄型-中子間の線膨張係数差低減のための技術調査、製造・材料技術開発を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- ・鑄型材と中子材の熱膨張率差は最大 0.6% 程度であった。
- ・文献調査より、鑄型・中子材料の組成調整によって、鑄型-中子間の線膨張係数差を低減できる可能性がある。
- ・射出成型法により鑄型-中子を同一材料にて一体成型することが出来た。
- ・有機バインダを用いた一体成型品は焼成中に有機バインダが軟化・消失して、破損した。
- ・無機バインダを用いた射出用スラリーは乾燥・固化中に割れが生じた。

今後、既規射出用スラリーの改良による乾燥・固化中の割れ防止手法の開発と、本スラリーを用いた一体成型品の成型可否確認を行う計画である。

#### 4.4.2 動翼励振力低減のための空力検討

ガスタービンの起動時間短縮・負荷応答速度向上に向けてロータを軽量化する場合、タービン動翼の小型化が必要となる。この際に背反となる振動強度の低下量を試算し、対策となる励振力低減技術を検討した。

タービン動翼を小型化する場合、既存設計から空力設計を変更しない想定であれば、動翼枚数を増加させ、動翼枚数に反比例して翼型を相似縮小（翼高さは維持）することになる（図 4.4-9）。この際、動翼 1 枚あたりに作用するガス力は翼枚数に反比例し、翼型の断面定数は翼枚数の 3 乗に反比例する為、定常ガス曲げ応力は動翼枚数の 2 乗に比例することになる。スティミュラス（定常ガス力に対する非定常ガス力の比）を一定と仮定すると、振動応力も動翼枚数の 2 乗に比例することになり、仮に動翼枚数を 1.3 倍に増加させると振動応力は 1.69 倍になると試算できる。

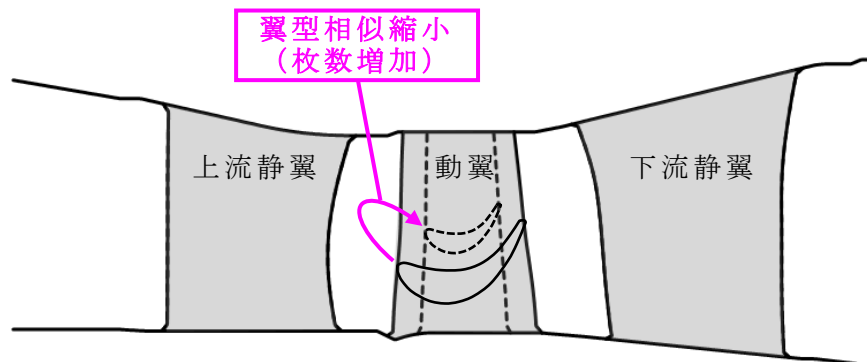


図 4.4-9 タービン子午面形状（動翼の翼型縮小・枚数増加）

上記の振動応力増加の対策として、下記 2 案を検討した。

- 上流静翼の枚数増加（翼型縮小・静動翼間距離拡大）
- 反動度（静動翼負荷配分）の変更

上流静翼枚数を増加させる場合も、既存設計から空力設計を変更しない想定であれば、静翼枚数に反比例して翼型を相似縮小することになる（図 4.4-10）。この際、静翼 Pitch や静動翼間距離（Axial Gap）は図 4.4-11 の通り変化する。

上流静翼の周囲に生じる周方向静圧分布は動翼の励振源となるが、この静圧分布の伝播特性は理論的に図 4.4-12 に示す通りであり、Axial Gap/Pitch の増加に対し指数関数的に減少する。この特性より、上流静翼枚数を 1.25 倍に増加させると動翼が曝される圧力変動（励振力）を約半減できる予想となる。

この効果を非定常 CFD 解析で評価した結果、上流静翼に起因する動翼表面の圧力変動は図 4.4-13 に示す通りとなり、静翼枚数増加に伴い前述の理論予測（図 4.4-12）と同等の圧力変動低減を示した。更に、FEM 応答解析により励振力（モーダル・フォース）を評価すると、理論予測同様、上流静翼枚数を 1.25 倍に増加させると動翼の励振力（振動応力）を約半減できる結果を得た（図 4.4-14）。

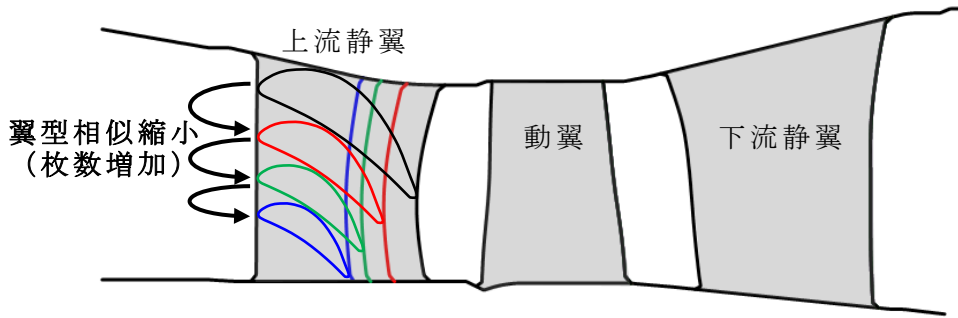


図 4.4-10 タービン子午面形状（静翼の翼型縮小・枚数増加）

静翼枚数増加による Pitch 減少と翼型縮小による Gap 拡大で Gap/Pitch が拡大

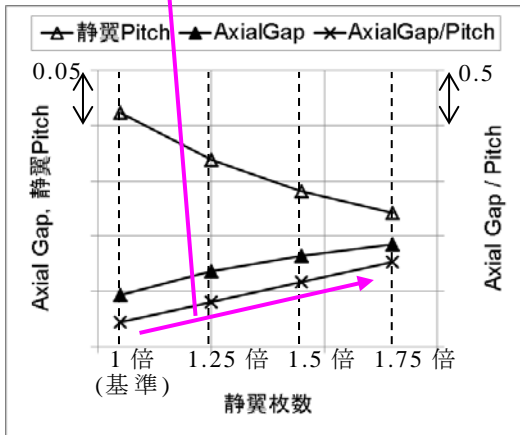


図 4.4-11 上流静翼枚数と Axial Gap/Pitch の関係

上流静翼枚数を 1.25 倍とすることで動翼が曝される圧力変動(励振力)が約半減できる理論予想

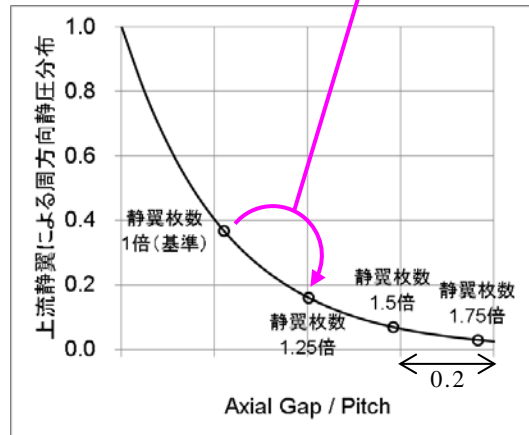


図 4.4-12 上流静翼による周方向静圧分布の伝播特性

CFD 解析でも理論(図 4.4-12)と同等感度で圧力変動低下を予想。

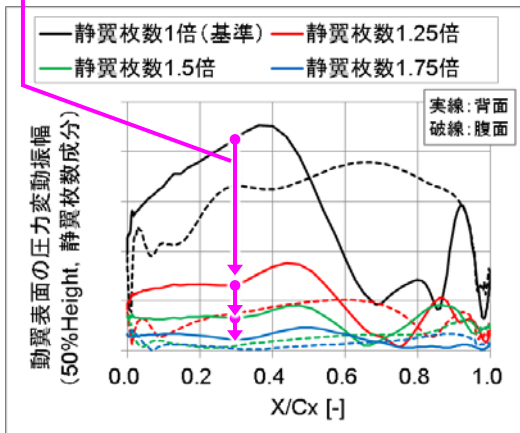


図 4.4-13 動翼表面の圧力変動 (非定常 CFD 解析結果)

FEM 応答解析でも上流静翼枚数を 1.25 倍とすることで励振力約半減。理論(図 4.4-12)と同等感度。

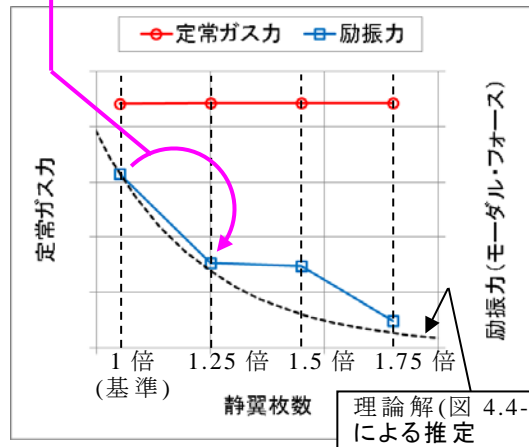


図 4.4-14 動翼の励振力 (FEM 応答解析結果)

反動度（静動翼負荷配分）を変更することによる励振力低減の可能性についても検討した．動翼を Open リスタガ，静翼を Close リスタガして（図 4.4-15）反動度を低減した場合（図 4.4-16），上流静翼のマッハ数が上昇する為（図 4.4-17），上流静翼に起因する動翼表面の圧力変動が増加し（図 4.4-18），励振力は増加する結果となった（図 4.4-19）．

従って，励振力（振動応力）を低減する為には反動度を増加させる必要があると考えるが，この場合は定常ガス力（静応力）の増加（図 4.4-19）が背反となる．また，上流静翼枚数増加と比べると励振力低減感度も小さいことから，高反動度化は振動強度改善策として有効性が乏しいと考える．

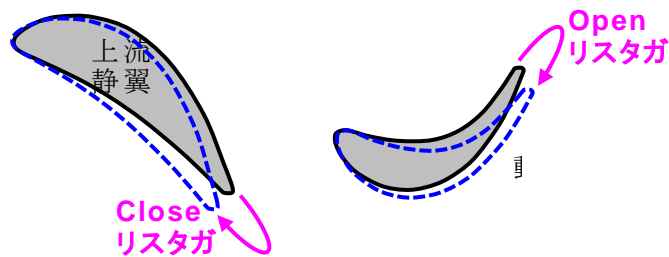


図 4.4-15 タービン翼のリスタガ（反動度低減）

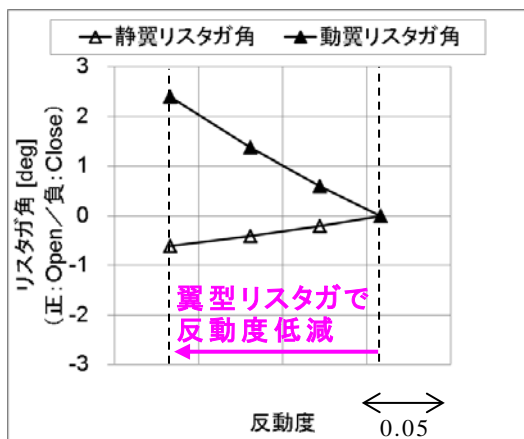


図 4.4-16 タービン翼リスタガによる反動度変化

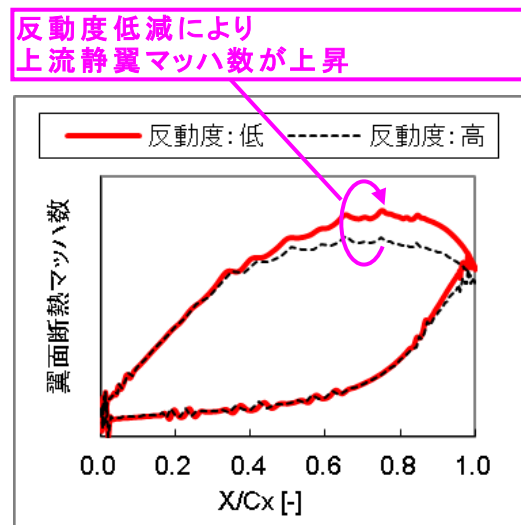


図 4.4-17 上流静翼 50%Height の翼面断熱マッハ数分布

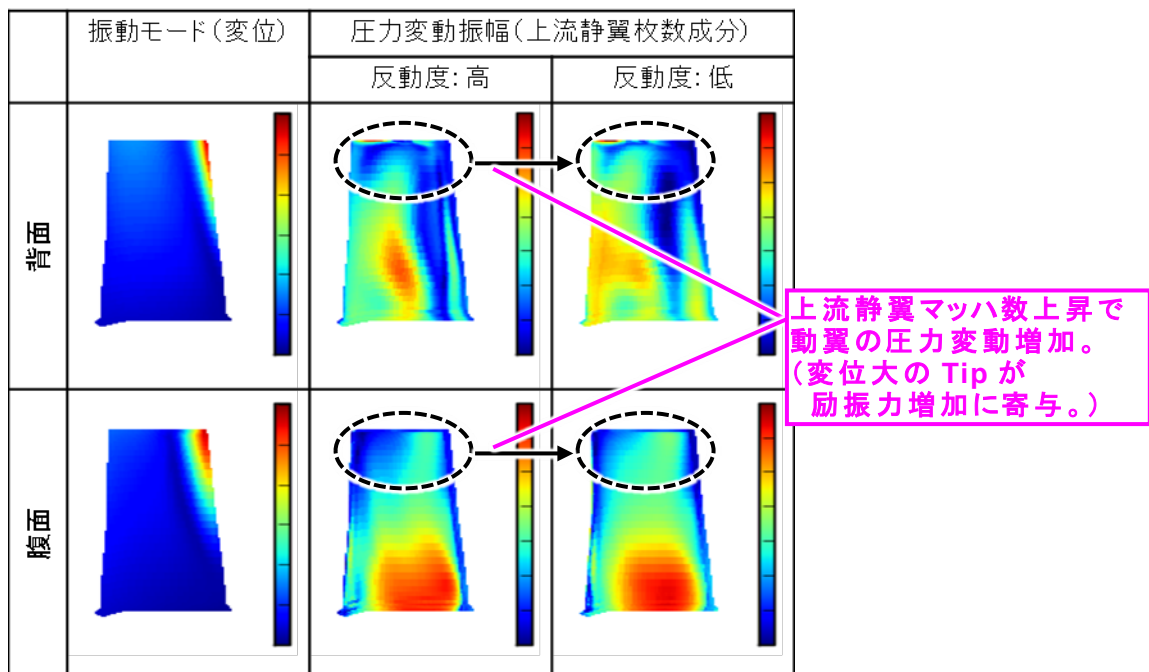


図 4.4-18 動翼の振動モード (FEM 結果) と翼面圧力変動 (CFD 結果)

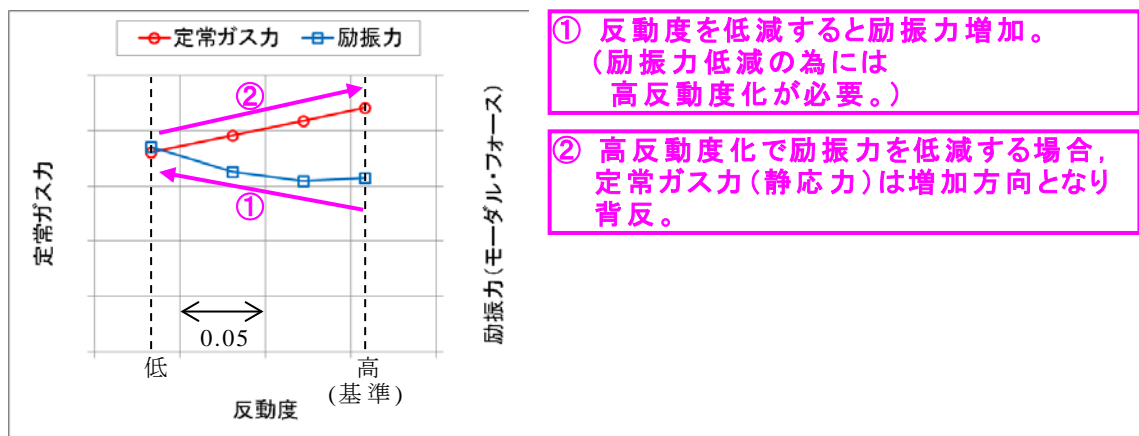


図 4.4-19 動翼の励振力 (FEM 応答解析結果)

以上より、ガスタービンの起動時間短縮・負荷応答速度向上に向けてロータ軽量化・タービン翼小型化を適用する際に背反となるタービン動翼振動強度低下に対しては、静翼枚数増加(翼型縮小・静動翼間距離拡大)による動翼振動応力低減が有効と考える。

### 文献

(4.4-1) Liang, J. J. *et. al.*, “Effects of Alumina on Cristobalite Crystallization and Properties of Silica-Based Ceramic Cores”, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 33 (2017), pp. 204-209.

- (4.4-2) Kim, Y. H. *et. al.*, “Influence of silicon carbide as a mineralizer on mechanical and thermal properties of silica-based ceramic cores”, *Ceramics International*, Vol. 42 (2016), pp. 14738-14742.
- (4.4-3) Kim, Y. H. *et. al.*, “Shrinkage and flexural strength improvement of silica-based composites for ceramic cores by colloidal alumina infiltration”, *Ceramics International*, Vol. 42 (2016), pp. 8878-8883.
- (4.4-4) Kapranos, K. *et. al.*, “Advanced Casting Methodologies: Investment Casting, Centrifugal Casting, Squeeze Casting, Metal Spinning, and Batch Casting”, *Comprehensive Materials Processing*, Vol 5 (2014), pp. 39-67.
- (4.4-5) Asthana, R. *et. al.*, *Materials Processing and Manufacturing Science* (2006), p. 39-67, ELSEVIER.
- (4.4-6) Jebaraj, P. M. *et. al.*, “Prediction of Thermal Shock of Ceramic Shells Using Fused Silica as Reinforcing Filler at Casting Conditions”, *National Conference on Advances in Production Technology*, February 7-9 (1998), pp. 52-56.
- (4.4-7) Li, Z. *et. al.*, “Deformation and recrystallization of single crystal nickel-based superalloys during investment casting”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 217 (2015), pp. 1–12.
- (4.4-8) Wereszczak, A. A. *et. al.*, “Dimensional changes and creep of silica core ceramics used in investment casting of superalloys”, *Journal of Materials Science*, Vol. 37 (2002), pp. 4235-4245.
- (4.4-9) Kazemi, A. *et. al.*, “Effect of zircon content on chemical and mechanical behavior of silica-based ceramic cores”, *Ceramics International*, Vol. 40 (2014), pp. 1093-1098.
- (4.4-10) Jiang, W. *et. al.*, “Effect of silica fiber on the mechanical and chemical behavior of alumina-based ceramic core material”, *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 5 (2017), pp. 410-417.
- (4.4-11) Yuan, C. *et. al.*, “Investigation of fibre modified ceramic moulds for investment casting”, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 23 (2003), pp. 399-407.
- (4.4-12) Wilson, P. J. *et. al.*, “The role of zircon particle size distribution, surface area and contamination on the properties of silica–zircon ceramic materials”, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 31 (2011), pp. 1849-1855.

#### 4.5 軽量・高強度耐熱新材料の適用化検討

国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）で開発し、特性を改善した3種の軽量・高強度耐熱新材料についてGTへの適用可能性を明らかにするための検討を行った。

##### 4.5.1 本研究項目の目的

GTのロータ、動翼の軽量化のためには、ジェットエンジンに最近実用化さ

れた軽量・高強度な耐熱新材料の適用が著しく有効であるが、ジェットエンジンと GT は使用環境、部品サイズ等が異なるため、現状材のままでは適用困難である。そこで、NIMS で開発し、特性を改善した以下の 3 種の軽量・高強度耐熱新材料について GT への適用可能性を明らかにするための検討を行った。

- a) CMC (セラミックスマトリックスコンポジット) ; ジェットエンジンでは主に高温の静止部品などに使用されている。
- b) TiAl 合金 ; ジェットエンジンではタービン最終段動翼に使用されている。
- c) Ni 基鍛造超合金 ; 種々の合金がジェットエンジン各所に使用されているが、タービンディスクに最も耐熱性が高い合金が使用されている。

#### 4.5.2 新酸化物系 CMC

NIMS で開発した新酸化物系 CMC について、GT のタービン一段目動翼等への適用可能性を検討した。ジェットエンジンで使用されている CMC 従来材 (SiC/SiC 複合材料) は高温の耐環境性に限界があり、また空冷などの冷却が行えないことから 1300°C 程度以下の部品にしか使用されていなかった。NIMS では本質的に耐環境性に優れた酸化物系材料に着目し、比較的高強度な酸化物であるジルコニアについて連続繊維の製造技術を開発した<sup>(4.5-1)</sup>。また、この繊維に適合するマトリックス材料として BaZrO<sub>3</sub> を選定するとともに繊維・マトリックスの複合化技術を開発した<sup>(4.5-2)</sup>。本開発項目ではこの NIMS 開発の新酸化物系 CMC について、小型素材を試作して各種材料特性を取得することで、対象用途への適用可能性を明らかにすることを目的とした。

図 4.5-1 に BaZrO<sub>3</sub> マトリックス 80wt%、ジルコニア繊維 20wt% で試作した開発 CMC の評価用素材の外観写真を示す。密度は 5.54g/cm<sup>3</sup> である。図 4.5-2 に開発 CMC の評価用素材のミクロ組織を示す。

試作した開発 CMC の特性評価試験として、まず CMC 現状材の構成材料である SiC と比較しての耐環境性試験を実施した。試験条件は大気中における 1700°C での 6 時間保持であり、外観変化の観察ならびに重量変化の測定を実施した。図 4.5-3 に試験前後の試験片の外観状況を示す。SiC の酸化は著しく原形をとどめていないが、開発 CMC に変化は全くない。また、重量変化も 0 である。つまり、開発 CMC の耐環境性は CMC 現状材より著しく優れることが確認できる。



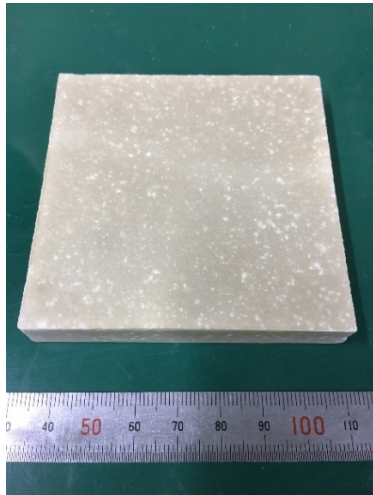


図 4.5-1 開発 CMC の評価用素材

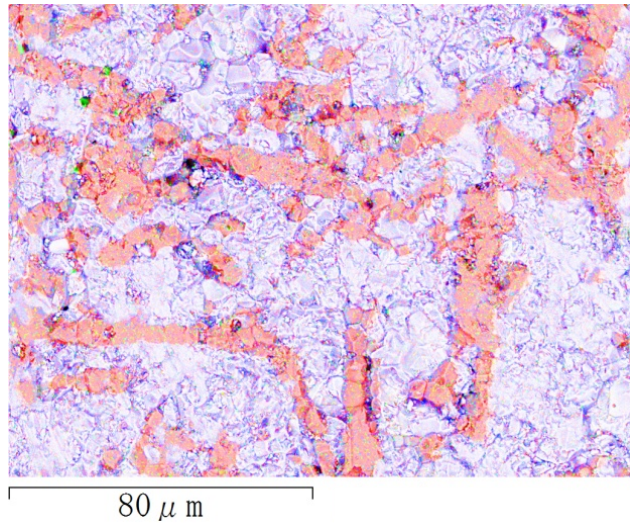


図 4.5-2 開発 CMC の評価用素材のミクロ組織

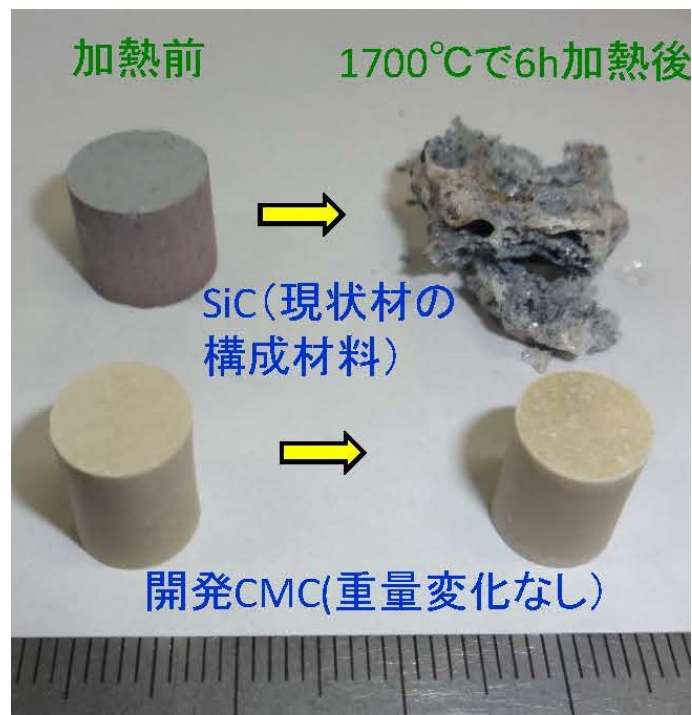


図 4.5-3 耐環境性評価試験結果

次に、開発 CMC の試作材より  $\phi 8\text{mm} \times 8\text{mm}$  の円柱試験片を加工し、室温、ならびに  $1200^\circ\text{C}$  で圧縮試験を実施した。図 4.5-4 に圧縮試験の応力ひずみ曲線を示す。両温度において一定量の塑性変形量を示すことが分かる。つまり、モノリシックなセラミックスとは異なり CMC に求められる変形能を開発

CMC も有することが確認できる。最大応力は室温で 651MPa, 1200℃で 524MPa である。CMC を使用した場合のタービン一段目動翼の温度，応力は現状未定であるが，少なくとも，負荷応力が小さいリングシュラウドなどには有望と考えられる。

実際の部品を精度良く加工するためには素材には切削加工性が求められることから，開発 CMC の切削加工性を評価した。図 4.5-5 にこの目的で試作したクリープ試験片の外観写真を示す。ネジ山に欠けなどはなく，またすべての部位でチッピングなどは生じていないことから，開発 CMC は一定の切削加工性を有することが確認できる。

以上の結果より，NIMS で開発した新酸化物系 CMC は，ジェットエンジン用 CMC 現状材と比較すると耐環境性は圧倒的に優れているとともに，室温でも塑性変形能を有し，切削加工も可能なことが分かった。高温強度の可否については適用対象部品での要求特性に応じて判断する必要があるが，少なくとも負荷応力が小さい高温部品には有望と考えられる。

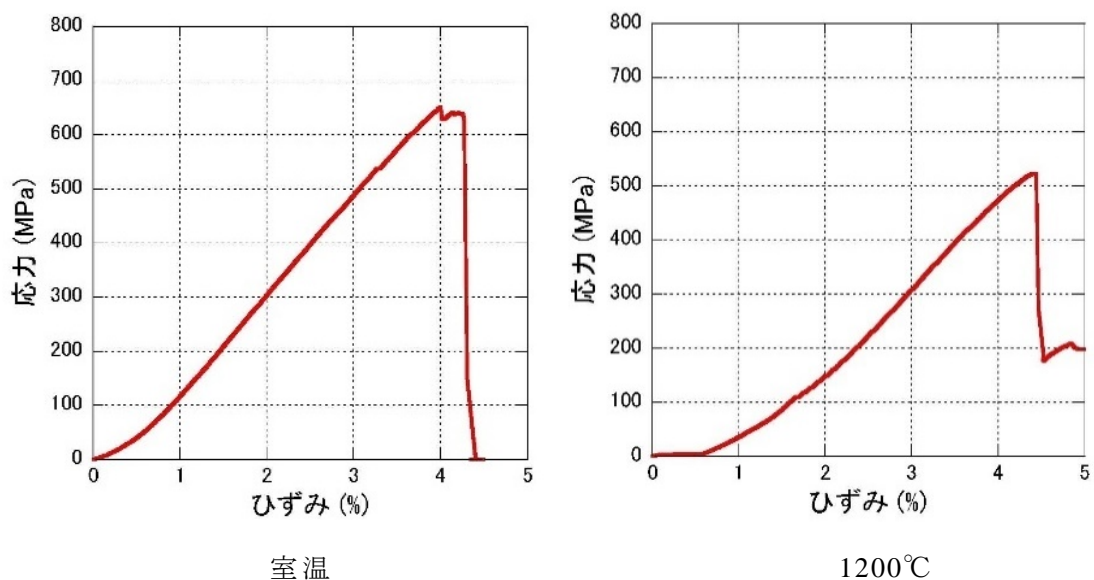


図 4.5-4 開発 CMC の圧縮試験での応力・ひずみ曲線



図 4.5-5 開発 CMC のクリープ試験片

### 4.5.3 新 TiAl 合金

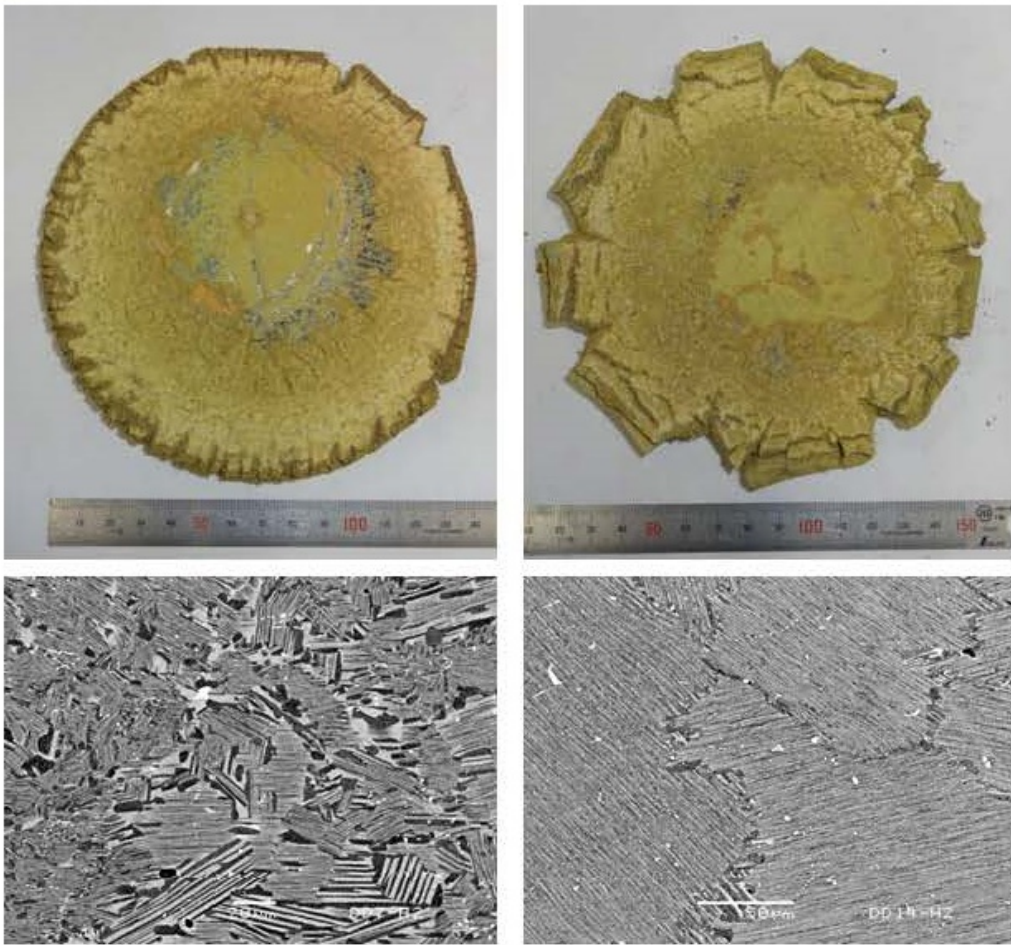
NIMS で開発した新 TiAl 合金について、GT のタービン最終段動翼への適用可能性を検討した。最終段動翼は最大、最重量の動翼であることから、軽量材が使用できれば動翼自身の重量減に加え、負荷応力減少によってロータも軽量化できるため、全体として著しい軽量化効果が得られる。ジェットエンジンではすでにタービン最終段動翼に TiAl 合金が使用されており、著しい効率向上効果をもたらしている。しかしながら、ジェットエンジン用 TiAl 合金を GT に使用することは、以下の点で困難である。まず、現在の製造方法である精密鋳造では GT 用の大型動翼を製造することは困難であるため、熱間鍛造法の適用が必要である。しかしながら TiAl 合金現状材では高温においても塑性変形能に限界があるため、熱間鍛造法の適用は困難である。次に、最終段動翼の使用温度はジェットエンジンよりも GT の方が大幅に高いため、従来の TiAl 合金では高温強度の限界によって使用困難である。

一方、NIMS では熱間鍛造可能であり、高温強度を大幅に向上した新 TiAl 合金(Ti-42.0Al-1.2Cr-1.0Nb (at%))を開発した<sup>(4.5-3)</sup>。本開発項目ではこの新 TiAl 合金について、小型鍛造素材を熱間鍛造で試作し、各種材料特性を TiAl 合金現状材と比較して取得することで、対象用途への適用可能性を明かにすることを目的とした。また、大型部品製造性に関する検討結果の既存データについても触れることとする。

図 4.5-6 に熱間鍛造で試作した小型鍛造素材の外観と熱処理後のマイクロ組織を TiAl 合金従来材と比較して示す。開発 TiAl 合金の熱間鍛造性は大幅に良好であり、また粒径などのマイクロ組織も著しく微細なことが分かる。熱処理後の鍛造素材の引張試験の結果、開発 TiAl 合金の室温延性は 2.0% であり、TiAl 合金現状材と遜色ないことが分かった。図 4.5-7 に開発合金と現状材の引張強度の比較を示す。開発 TiAl 合金は 800℃ まで TiAl 現状材より著しく高強度なことが確認できる。

次に、大型部品製造性に関する検討結果の既存データについて示す。大型部品を製造するためには、熱間鍛造性に優れた TiAl 合金を用いることが前提であるが、それに加え、溶解、鍛造、成形加工等の各工程において大型化プロセスを開発する必要がある。図 4.5-8 は大型インゴット溶解のために用いた大型の Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 二層ルツボである。このルツボを用い、図 4.5-9 に示すインゴットを製造した。外周切削後のサイズは直径 300mm、長さ 500mm で重量は 145kg である。図 4.5-10 はこのインゴットの熱間鍛造の状況であり、熱間鍛造で得たパンケーキを成形加工することで、図 4.5-11 に 2 つの例を示す大型部材が成形できることを確認した。

以上の結果より、開発した新 TiAl 合金は、ジェットエンジン用 TiAl 合金現状材と比較すると熱間鍛造性や高温強度は圧倒的に優れており、室温延性は遜色ないことが分かった。また、大型部材の製造性も問題ないことより、GT 最終段タービン動翼へ適用に有望であることが分かった。



開発 TiAl 合金

TiAl 合金従来材

図 4.5-6 小型鍛造素材の外観と熱処理後のミクロ組織の比較

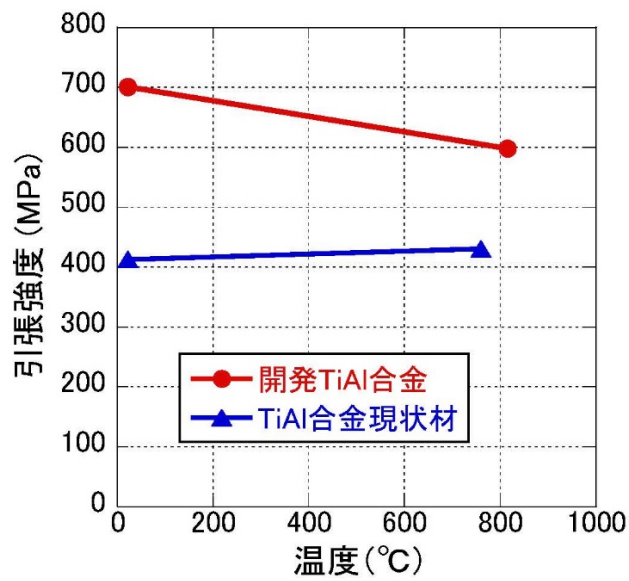


図 4.5-7 開発 TiAl 合金と TiAl 合金現状材の引張強度の比較

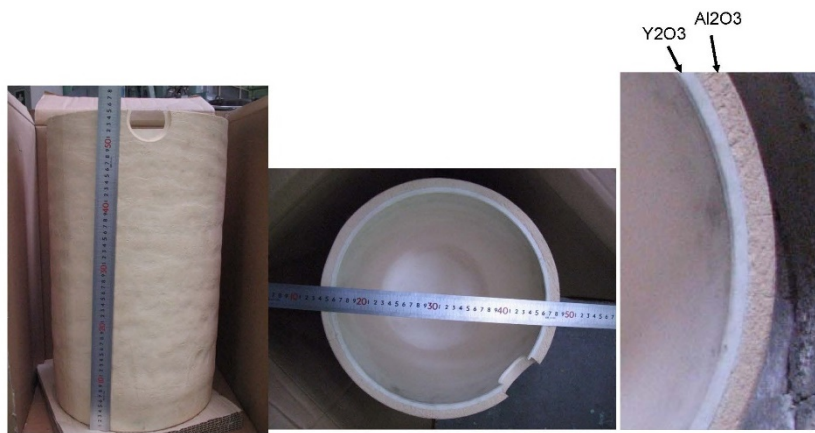


図 4.5-8 大型インゴット溶解用  $Y_2O_3/Al_2O_3$  二層ルツボ



図 4.5-9 開発 TiAl 合金の大型  
インゴット (φ 300mm×500mm、  
145kg)



図 4.5-10 開発 TiAl 合金  
の熱間鍛造の状況



図 4.5-11 開発 TiAl 合金での大型成形品の例

#### 4.5.4 TMW 合金

NIMS で開発した Ni 基鍛造超合金である TMW 合金について、GT のロータへの適用可能性を検討した。通常、Ni 基超合金は高温強度を向上させるためには  $\gamma'$  相の体積率の増加が必要であるが、これに伴い鍛造性が低下する。従って、ロータに必要な鍛造材では従来は鍛造性の限界より耐用温度向上に限界があった。比較的小型なジェットエンジン用ディスクでは使用温度上昇に伴い、粉末冶金材の開発、適用が行われてきたが、GT 用大型ロータでは粉末冶金材を適用することはコスト等の観点から困難である。

一方、NIMS では新しい概念にもとづいて世界最高の耐熱特性を持ち粉末冶金合金に匹敵する TMW 合金 (Ni-25Co-14Cr-3Mo-1W-2Al-6Ti (wt%)) を開発した(4.5-4)。この合金をロータに適用すれば小型・薄肉化による著しい軽量化が期待できる。本研究項目ではこの NIMS 開発 TMW 合金について、既存データを評価することで、本用途への適用可能性を明かにすることを目的とした。

図 4.5-12 に 0.2%クリープ強度をジェットエンジン用 Ni 基鍛造超合金現状材と比較した結果を示す。IN718 は良く使用されている一般的な材料であり、Alloy720Li は近年実用化された現状材としては最高強度の材料である。開発 TMW 合金は Alloy720Li に較べても耐用温度が 76°C も向上することが分かる。図 4.5-13 に 650°C での低サイクル疲労特性を、Alloy720Li と比較した結果を示す。TMW 合金はクリープ強度は大幅に高いにもかかわらず、低サイクル疲労特性も Alloy720Li より優れていることが分かる。図 4.5-14 に TMW 合金の熱間鍛造素材の外観写真を示す。サイズは  $\phi 440\text{mm}$  であり GT のロータよりは小さいが、今後の大型化プロセスなどの開発によって GT 用ロータ製造の可能性があるとと言える。

なお、これらデータなどを用いたロータの軽量化効果の検討結果は 4.7 節「軽量・高レスポンスロータコンセプトの検討」に記載している。

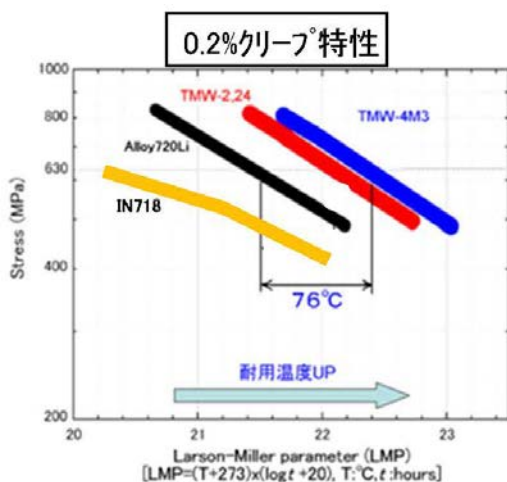


図 4.5-12 TMW 合金のクリープ強度の現状材との比較

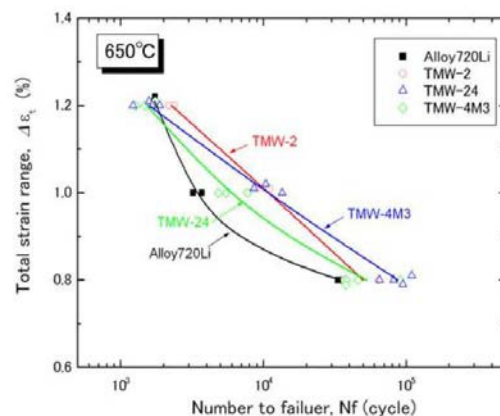


図 4.5-13 TMW 合金の低サイクル疲労特性の現状材との比較



図 4.5-14 TMW 合金の熱間鍛造素材の外観

#### 4.5.5 本研究項目のまとめ

ジェットエンジンに最近実用化された 3 種の軽量・高強度な耐熱新材料の適用は GT のロータ、動翼の軽量化に著しく有効であるが、使用環境、サイズ等が異なるため現状材のままでは GT に適用困難である。そこで、国立研究開発法人物質・材料研究機構 (NIMS) で開発し、特性を改善した 3 種の耐熱新材料について GT への適用可能性を検討した。結果は以下の通りである。

a) CMC (セラミックマトリックスコンポジット) ; 一段目動翼他を想定

開発した新酸化物系 CMC (ジルコニア繊維/BaZrO<sub>3</sub>マトリックス複合材料) は、耐環境性は CMC 現状材(SiC/SiC 複合材料)を著しく凌駕するとともに、切削加工は可能であり、室温での塑性変形能を有することを確認した。

b) TiAl 合金 ; 最終段動翼を想定

開発した新 TiAl 合金 (Ti-42.0Al-1.2Cr-1.0Nb (at%)) は、強度ならびに大型部材製造性は TiAl 合金現状材より著しく優れることを確認した。

c) Ni 基鍛造超合金 ; ロータを想定

開発した TMW 合金 (Ni-25Co-14Cr-3Mo-1W-2Al-6Ti (wt%)) は、クリープ強度と低サイクル疲労特性は現状最強の Ni 基鍛造超合金(Alloy720Li)を凌駕し、大型部材製造の可能性のあることを確認した。

以上示すように NIMS で開発した 3 種の軽量・高強度耐熱新材料は GT のロータ、動翼の軽量化に著しく寄与できる可能性があることが明らかとなった。

#### 文献

- (4.5-1) 鉄井利光, 原田広史, 長谷川良雄, “超高温用酸化物系 CMC の開発”, 第 43 回日本ガスタービン学会定期講演会 (米子) 講演論文集, 2015.9, pp.75-78.

- (4.5-2) 国立研究開発法人 物質・材料研究機構,“ジルコニア連続繊維と酸化物系セラミックスからなる複合材料とその製造方法”, 特願 2014-04742.
- (4.5-3) 国立研究開発法人 物質・材料研究機構,“熱間鍛造型 TiAl 基合金”, 特許第 6202556 号.
- (4.5-4) 横川忠晴, 谷月峰, 催博勇, 小泉裕, 藤岡順三, 原田広史, 福田正, 三橋章,“開発 Ni-Co 基鍛造超合金を用いた模擬タービンディスクの機械的特性”, 日本金属学会誌, Vol.74, No.3 (2010), pp.221-225.

#### 4.6 圧縮機・タービンの急速起動時における構造熱変形と流れとの関係に関する連成解析

ガスタービンの高速負荷変動等による翼構造の応答等を的確に予測するための流体-構造連成シミュレーション手法について検討した。固体の大変形解析と伝熱解析を連成させた有限要素解析コードを開発するとともに、ロータ内部流動現象理解のため、多段全周非定常解析を用いて明らかにした。また、流体非定常現象である旋回失速を対象に、失速セルの伝播速度等の計測を行った。結果、流体-構造連成現象のより詳細な検証データの必要性が明らかとなった。

##### 4.6.1 本研究項目の目的

天候により発電量が大きく変化する太陽光・風力発電が電力系統に大量導入されることが見込まれているため、ガスタービン発電プラントにはこれまで以上の需要調整能力が必要とされる。そのため、ガスタービンの負荷変動追従性、過渡応答性を向上させる必要があり、設計段階からこれらを予測するための数値解析技術が求められている。

本研究項目では、流体-構造連成シミュレーションの高度化により、GTの高速起動・負荷変動等による翼構造の応答や振動特性を的確に予測する手法を検討する。また、温度場も考慮して過渡応答における回転系と静止系の構造部品の温度分布変化を予測し、過渡変形解析を可能とする解析法の構築を検討する。また、シミュレーションの高精度化に向けて、検証のための非定常流れ実験データを取得・蓄積する。

これらのことより、連成数値解析法を高度化し、急速起動・負荷変動時の構造過渡応答や振動現象を高精度にシミュレートする手法の確立に向けて課題を明らかにする。

##### 4.6.2 構造過渡応答解析を可能とする連成解法の構築の検討

熱構造解析と流体解析を連成させ、ガスタービン起動時の過渡的な構造変形と流れ場からの入熱を同時にシミュレーションする手法（構造過渡応答連成解析）の実現にむけて、有限要素法により固体内の温度場の解析と大変形の解析を同時に実行する、幾何非線形熱構造解析プログラムを構築した。また、構築したコードを圧縮性流体の有限体積法コードと連成させることに関して検討し、構造過渡応答連成解析の実現にむけた課題を抽出した。



#### 4.6.2.1 幾何非線形有限要素法と熱解析の連成

Table 4.6-1 に用いる基礎方程式群を，Table 4.6-2 に用いる記号を示す．変位場の基礎方程式は，構造の大変形場を記述するため，構成方程式に幾何非線形性を考慮した仮想仕事式とする．温度場は，エネルギー保存則に基づく熱伝導方程式を基礎とし，試験関数と体積積分により，弱形式に変換されている．熱膨張後の応力場は，応力-歪関係式において，応力の発生に寄与する垂直歪みから，膨張したぶんを差し引くことで求められる．なお熱膨張はせん断変形を生じないため垂直歪みのみを修正すればよい．このように，変位場と温度場は応力-歪み関係式を介して連成している．なお，現在は簡単のため弾性定数，比熱は温度に対して一定とした．

Table 4.6-1 の基礎方程式は，変形前の物質点配置を基礎とした Total Lagrange 法によって解かれる．解析領域は六面体の 20 点二次要素を用いた有限要素法によって離散化され，少ない要素数で曲げ変形挙動を精度良く解析することが可能である．

歪は変位について非線形性を有するので，仮想仕事式の離散化には，Newton 法に基づき厳密に導出された増分型の陰解法を用いる．一方，熱伝導方程式は未知変数である温度に対して線形であるため，陰解法を用いれば Newton 法を用いることなく 1 度の連立一次方程式求解で解を得ることができる．ただし，Table 4.6-1 内，熱伝導方程式中の第二項目である内部熱流束項は，変形後の形状（現在配置： $\mathbf{x} = \mathbf{X} + \mathbf{u}$ ）を積分領域としてもつため，仮想仕事式で解かれた最新の変位を常に用いることに注意する必要がある．

線形ソルバは，フィルインを考慮した強力な前処理を使用した反復法である，ILU(1)前処理付共役勾配法を用いた．ただし，要素が非常に薄くなった場合において，直接法と比べどの程度求解速度に違いがあるかは確認できていない．

#### 4.6.2.2 コードの検証（1：棒の熱伸び）

熱ひずみによる変形が正しく解けることを確認するため，一様な温度で加熱した角棒に生じる熱のびを題材とした検証を実施した．角棒のサイズは 20mm×20mm×1m である．材料は鋼 ( $\alpha = 12.1$  [1/K])，無変形時の基準温度は  $T_0 = 300$  [K] とした．境界条件として，長辺の下端面の変位を 0 に，温度を  $T_0 + \Delta T$  [K] に固定し，他の面は全て荷重なし・断熱条件とした．このとき，棒内部のすべての領域で同じ温度 ( $T_0 + \Delta T$ ) となる解が実現され，基準温度との差によって熱のびが誘起される．

Fig. 4.6-1 に，下端面の温度と生じた長手方向の熱伸びとの関係を示す．有限要素法による解析は解析的に算出される値を正しく再現しており，本ソルバに熱のびによる変形挙動が正しく取り込めていることが確認できた．

Table 4.6-1 Governing equations for the developed thermo-structure FEM code

種別	数式表現
仮想仕事式	$\int_{V_x} \delta \mathbf{u} \cdot \rho_0 \mathbf{a} dV_x + \int_{V_x} \delta E : S dV_x = \int_{S_x} \delta \mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\tau} dS_x + \int_{V_x} \delta \mathbf{u} \cdot \rho_0 \mathbf{g} dV_x$ $\delta E = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \delta \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} + \frac{\partial \delta \mathbf{u}^T}{\partial \mathbf{X}} + \frac{\partial \delta \mathbf{u}^T}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} + \frac{\partial \mathbf{u}^T}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \delta \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} \right]$
熱伝導 方程式	$\int_{V_x} \delta T \rho_0 C \frac{\partial T}{\partial t} dV_x + \int_{V_x} \nabla(\delta T) \cdot (\kappa \nabla T) dV_x = \int_{S_x} \delta T \mathbf{q} \cdot dS_x$
Green-Lagrange 歪	$E = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} + \frac{\partial \mathbf{u}^T}{\partial \mathbf{X}} + \frac{\partial \mathbf{u}^T}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} \right]$
応力-歪 関係式	$\begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ S_{12} \\ S_{23} \\ S_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & 2\mu & 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 2\mu & \lambda + 2\mu & 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 2\mu & 2\mu & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} - \varepsilon_T \\ E_{22} - \varepsilon_T \\ E_{33} - \varepsilon_T \\ E_{12} \\ E_{23} \\ E_{33} \end{bmatrix}$
熱ひずみと 線膨張係数	$\varepsilon_T = \alpha(T - T_0)$

Table 4.6-2 Nomenclature

$\rho_0$	density without deformation	$\mathbf{q}$	heat flux vector
$\mathbf{a}$	acceleration vector	$\lambda$	Lame's elastic constant
$\mathbf{u}$	displacement vector	$\mu$	Lame's elastic constant
$E$	Green-Lagrange strain tensor	$\varepsilon_T$	thermal expansion strain
$S$	2nd Piola-Kirchhoff stress tensor	$\alpha$	coefficient of linear thermal expansion
$\boldsymbol{\tau}$	Cauchy stress tensor on surface	$X$	position of material point before deformation
$\mathbf{g}$	volume force vector	$x$	position of material point after deformation
$T$	temperature	$S_x$	surface vector after deformation
$C$	specific heat capacity	$V_x$	volume before deformation
$t$	time	$V_x$	volume after deformation
$\kappa$	thermal conductivity	$\delta$	test function or virtual field

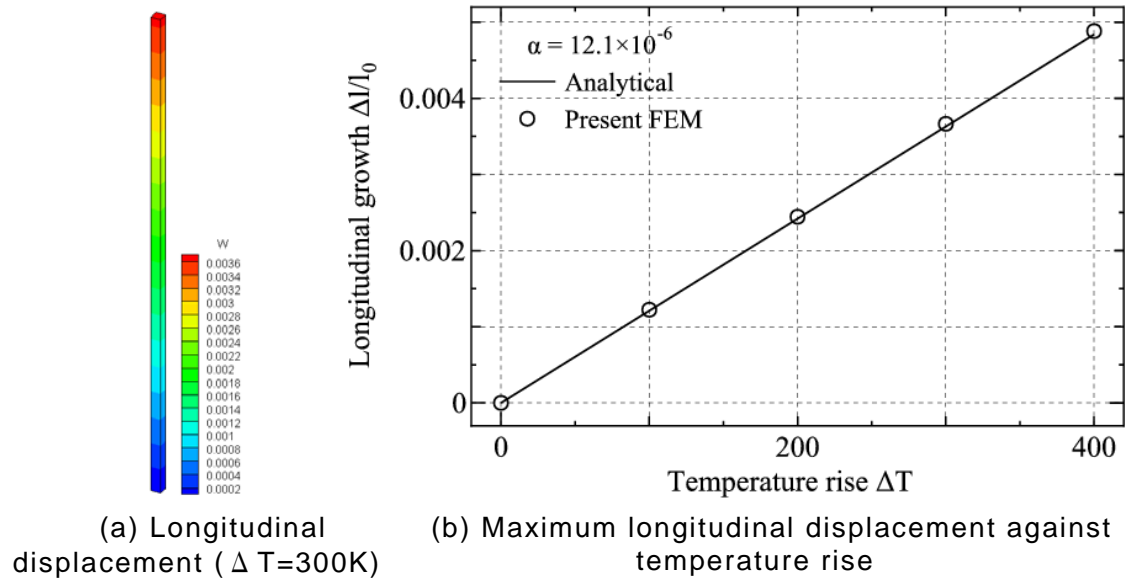


Fig. 4.6-1 Verification on the thermal growth of a heated bar

#### 4.6.2.3 コードの検証（2：温度場を考慮した Hot-Cold 変換）

温度分布がある状態において、現実に近い FEM モデルで正しい収束解が得られることを確かめるために、温度場を考慮した Hot-cold 変換（製造時形状を求める）の問題を取り上げた。翼型は設計形状が公開されている NASA Rotor 67 であり、回転数は 16200rpm、材料はチタンである。ここでは、Fig. 4.6-2 (a) に示すように、翼根で変位を全固定、温度 288.15K、翼端で温度 338.15K の境界条件を与えた。翼面は荷重なし、熱流束なしとした。

この境界条件のもと、空力設計形状（回転時形状）を満たす製造時形状（静止時形状）を反復的に求める。これが収束しているかどうかは、逆算した回転時形状と空力設計形状の差で定義された残差  $\epsilon_{\text{hotcold}}$  をモニターして確かめる。

$$\epsilon_{\text{hotcold}} = \text{Max}(x_{\text{deformed}} - x_{\text{design}}) / \text{Max}(|u|_{\text{deformed}})$$

Fig. 4.6-2 (b) は与えられた境界条件のもとで収束した温度場、速度場であり、翼高さ方向にほぼ線形な温度分布が与えられていることがわかる。これを計算する過程で得られた Newton 反復、Hot-cold 変換の残差を Fig. 4.6-2 (c) に示す。最大変位に対する翼面座標の差を  $10^{-4}$  まで減らすには、20 回程度 Newton 反復が収束させることが必要なこと、しかし熱ひずみがあっても Hot-Cold 変換は正しく収束に向っていることがわかる。

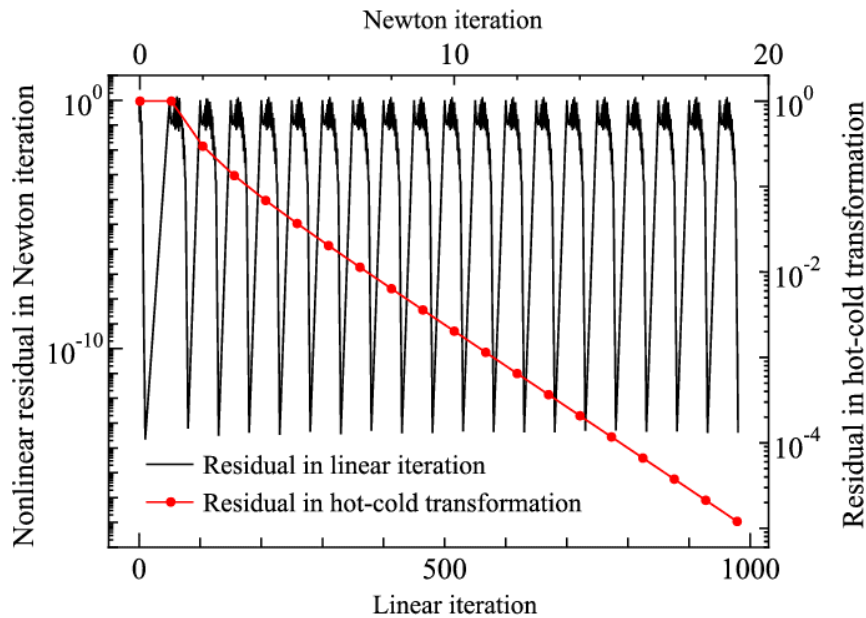
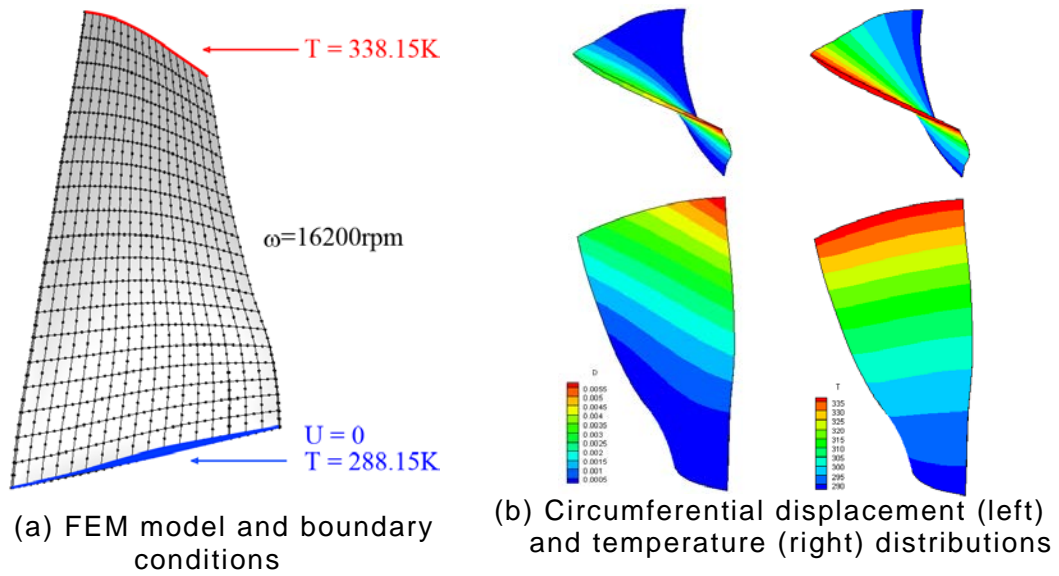


Fig. 4.6-2 Hot-cold transformation of NASA rotor 67

#### 4.6.2.4 まとめと今後の課題

本研究項目では、構造過渡応答連成解析の実現に向けて、流体解析と連成させるための熱構造有限要素法ソルバを構築し、基礎的な検証を行った。その結果、熱伝導方程式が正しく求解されていること、熱ひずみが正しく構造変形に反映されていることが確認できた。また、翼設計時に使用する製造形状の逆解析（Hot-cold 変換）についても、熱ひずみがある状態において適切に収束することが確認できた。

今後、本項目で開発したコードを CFD と連成させるにあたり新たに必要になるであろう事項として、以下が挙げられる。

#### 1. FEM モデルの二次元軸対称化を行うための回転周期境界条件の実装

現在の FEM コードは完全に 3 次元の定式化で実装されているが、ロータなどの回転体の熱構造解析では、軸対称として解析領域を近似できる場合が多いと考えられる。そのため、有限の角度を持つセクタを計算で扱うために、回転周期境界条件を構造変形ソルバに組み込む必要がある。

#### 2. FEM コードの非定常解析対応

現在の FEM コードは時間微分項を無視した定常状態を解くソルバとして定式化されているため、構造過渡応答問題を解くためには、非定常問題に拡張することが必要である。

#### 3. 熱流束・温度の内挿手法の実装

FEM コードからは構造表面変位を流体コードに渡し、逆に流体コード側で算出された熱流束を FEM コードに渡すかたちの熱構造連成を考えている。ここで、CFD と FEM の格子解像度や自由度配置は一般に大きく異なるため、何らかの内挿手法が必要である。著者らは翼変形を解くため変位・力について「移動最小二乗法」を利用して内挿する手法<sup>(4.6-1)</sup>を開発しているが、類似の手法が応用できる可能性がある。

#### 4. 解析モデルケースの確立

本研究では単純に熱構造解析プログラムを作成したのみであり、具体的な応用対象やモデルとなるテストケースについては確立できなかった。プログラムの確認や段階的応用に使えるような、圧縮機やタービンの翼端隙間の変化、およびそれを解析するためのモデルケースを今後確立していく必要があると考えられる。

### 4.6.3 ガスタービン軸内部の浮力支配旋回流の大規模非定常解析

高温の空気や燃焼ガスにさらされるガスタービンの圧縮機やタービンでは、運用中の加熱や冷却により回転・静止部の隙間は過渡的な挙動を示す。運用中の隙間を予測するためには起動から停止にわたる構造部材の温度分布や熱変形を予測する必要があるが、そのためには構造表面の入熱予測が重要である。

しかし、特に圧縮機の軸内部のように、軸方向の貫流のある回転ディスクキャビティ内では、ガスパス側は高温、軸中心部は低温となることから、浮力によって誘起される流れが発生し、キャビティ内の温度場や熱流束に大きな影響を及ぼすことが知られている。この流れは特に温度差の大きい圧縮機の後段側で顕著に生じるため、翼高さの小さい後段側における翼端隙間の予測や制御にとって非常に重要であると考えられる。

この浮力で誘起される圧縮機軸内部流れについて、Ansari ら<sup>(4.6-2)</sup>、Smirnov ら<sup>(4.6-3)</sup>の Detached Eddy Simulation、Sun らの Large Eddy Simulation<sup>(4.6-4)</sup> など Eddy resolving な解析手法が現象を定性的に再現し、RANS よりも精度がよいという報告がある。

本研究項目では、圧縮機軸全体の旋回熱対流現象について、高解像度・多段・全周の非定常流れ解析を用いて解析することで、圧縮機軸内部で生じる熱対流現象の全体像を得ること、さらには RANS との比較を行うことを目的とする。

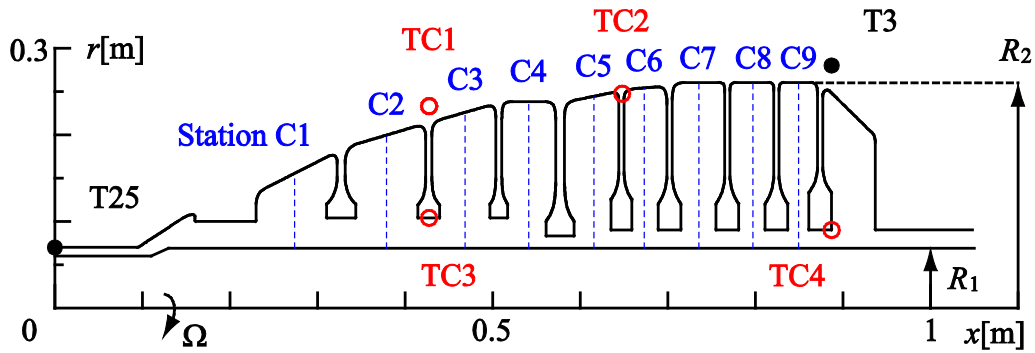


Fig. 4.6-3 Internal flow path of E<sup>3</sup> HPC shaft.  
Positions of referential and measured temperatures are also shown.

Table 4.6-3 Test conditions and results of core performance test results (4.6-6)

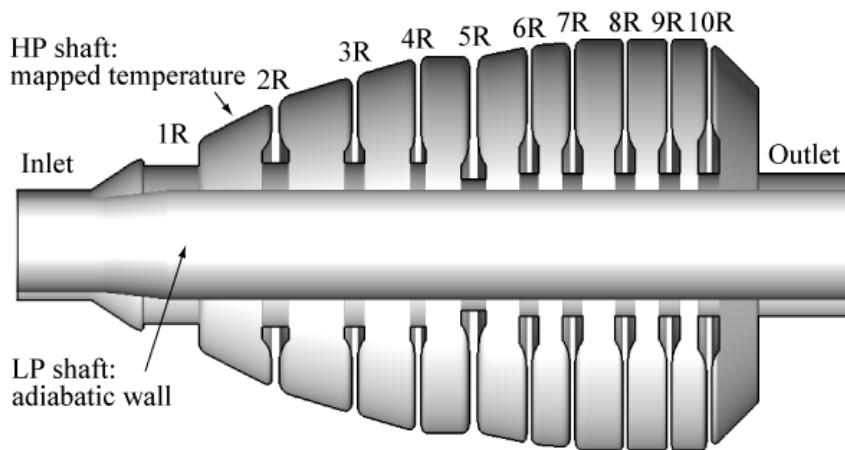
(a) Test conditions	
T25 [K]	302
P25 [kPa]	96.6
T3 [K]	808
W [rpm]	12600
T <sub>bore</sub> [K]	302
m <sub>bore</sub> [kg/s]	0.25
(b) Measured temperature	
TC1 [K]	530
TC2 [K]	561
TC3 [K]	302
TC4 [K]	545

#### 4.6.3.1 解析モデル

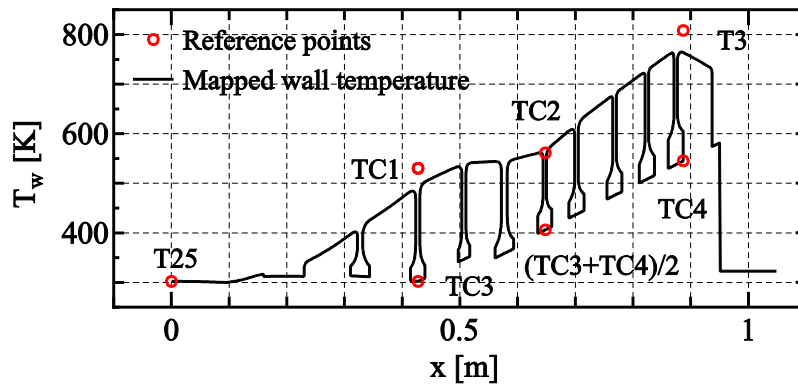
本研究では、圧縮機またはタービンについて二次空気系の温度分布や流量の実験値が公開されている文献を調査し、NASA Energy Efficient Engine (E<sup>3</sup>) 高圧圧縮機を対象とした。圧縮機は10段で圧力比23を実現するように、1980年代前半当時最先端の技術により設計された。詳細な設計は Holloway ら<sup>(4.6-5)</sup> の、二次空気系の試験結果は Stearns ら<sup>(4.6-6)</sup> の NASA Report を参照されたい。

Fig. 4.6-3 に解析対象の模式図を、Table 4.6-3 に圧縮機試験条件と各計測値をそれぞれ示す。軸内部は前段から後段までそれぞれ10個のディスクキャビティからなり、軸方向中央部を Station C1~C9 と名付ける。軸内部を通過する冷媒は圧縮機入口から導かれ、軸中をタービン側に抜けていく。また、動翼プラットフォームとディスク内径側に熱電対が合計4箇所貼られており、各部分の温度が計測されている。これらの計測値が Table 4.6-3 (b) であり圧縮機入口・出口全温と併せて壁面の熱的境界条件に用いることにする。

Fig. 4.6-4 に、解析モデルの全体像と境界条件を示す。まず Fig. 4.6-4 (a) はモデルの全体像であり、圧縮機前方に冷媒の流入境界、後段側の出口で流出境界をおいている。なお、流出部での背圧は流量が実験値と合うように調整している。高圧圧縮機側の軸は温度固定境界条件、低圧軸は断熱壁条件である。



(a) 3D view of the disk cavities and boundary conditions



(b) Wall temperature mapped on the HP shaft

Fig. 4.6-4 Computational model and thermal boundary conditions

Fig. 4.6-4 (b) に、高圧軸側にマッピングされた温度分布を示す。圧縮機入口・出口温度と熱電対計測値より、線形補間、Bilinear 補間を組み合わせマッピングしている。圧縮機後段のガスパス側ほど温度が高くなっていることがわかる。

#### 4.6.3.2 数値解析手法と格子

数値解析には、Tateishi により開発が続けられている、大規模並列圧縮性流体解析コードを用いる。本コードではかつて航空用エンジン翼振動<sup>(4.6-7)</sup>の流体構造連成解析に用いられてきた。近年、重合格子法の導入による複雑流路形状への対応<sup>(4.6-8)</sup>、高解像度・低散逸差分スキームの導入と大規模並列化による Large Eddy Simulation への対応<sup>(4.6-8)</sup>などにより、大幅な機能拡張が施されている。

本検討では軸内部の温度場や非定常流れの全体像をおおまかに捉え、実機に近い形態でどのような現象が起こっているのかを把握することを目的とするため、数値解析手法としてできるだけロバストなアプローチを採用した。離散化はセル中心型の有限体積法に基づく。移流項は3次精度の MUSCL 法で高次精度化し、流束を SHUS で評価する。なお、衝撃波の生じない流れであるから勾

配制限関数は用いない．粘性項は二次精度中心差分で有限体積的に評価する．

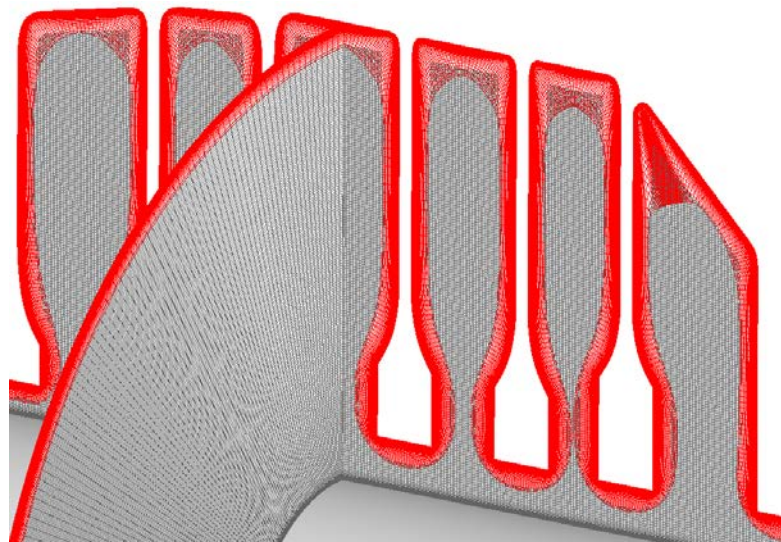
RANS の乱流モデルとして，1 方程式型の Spalart-Allmaras モデル (SA) と，それを拡張した DES (SA-DES) を用いた．SA モデルは二次元の軸対称計算，SA-DES は三次元の全周非定常計算に使用し，両者でどのように計算結果が異なるかを調べる．

Fig. 4.6-5 に，解析で用いる格子を示す．赤い部分が高圧軸壁面格子，黒い部分がキャビティ内を解像する背景格子であり，これらを重合格子法で接続している．壁面格子は壁に沿った方向，壁垂直方向，周方向にそれぞれ (2462×50×400) セル，背景格子は (950×210×400) セルを有し，合計約 129M セル (袖領域を入れて 160M セル) である．格子解像度は半径方向・軸方向に 1.0mm で，周方向には外径部分で 4.1mm 以下になっている．最小格子幅は 10 $\mu$ m であり， $y^+ < 1$  を満足している．

時間進行には二次精度の三点後退差分を 3 回の内部反復とともに用いる．時間刻みは  $1.0 \times 10^{-6}$  sec であり，軸 1 回転に約 4762step を必要とする．流れ場の時間平均は，軸回転 42 回転目～147 回転目について行った．



(a) Meridional view, upper half domain



(b) Detailed view around the 5th to 10th rotor disks

Fig. 4.6-5 Overset mesh for HPC disk cavities



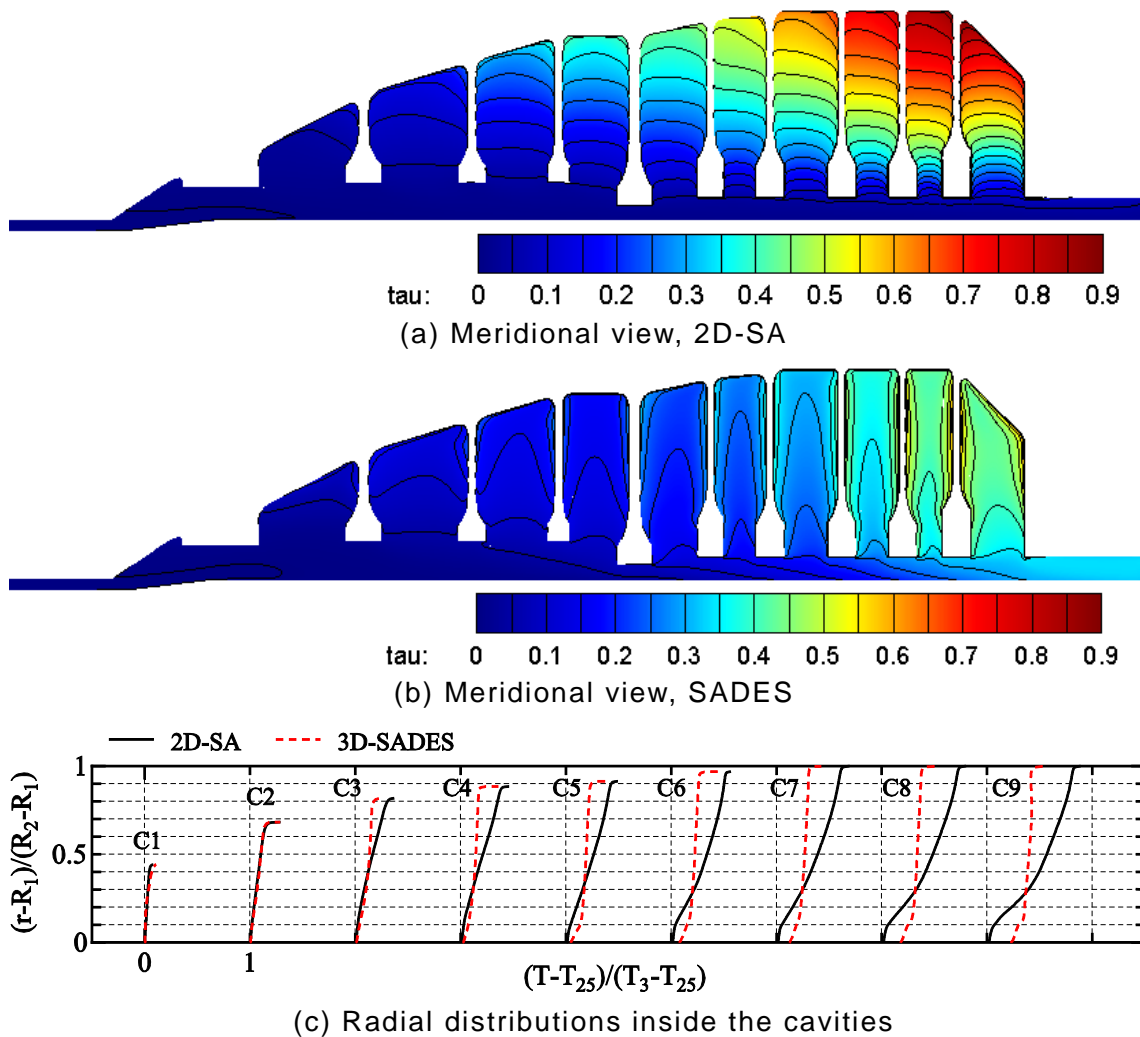


Fig. 4.6-6 Time-averaged temperature distributions in the meridional plane

#### 4.6.3.3 結果と考察

ここからは、解析結果である時間・空間平均と瞬時温度場について示していく。Fig. 4.6-6 に、二次元軸対称 RANS(2D-SA)と 3次元の全周 DES(SADES)で得られた時間平均温度場を示す。ここで、温度は圧縮機入口・出口全温度  $T_{25}, T_3$  を用いて次のように無次元化されている。

$$\tau = \frac{T - T_{25}}{T_3 - T_{25}}$$

Fig. 4.6-6 (a), (b)の 2D-SA と SADES の結果は、後段側のキャビティ内温度に非常に大きな差があることが確認できる。2D-SA では温度勾配はほとんど半径方向に生じており、軸近傍の冷媒はほとんど温度上昇しないままタービン側へと流出する。一方、SADES では軸中心の低温部分がディスクキャビティ間に貫入し、壁面と垂直な方向に強い温度勾配があること、またタービン側に流出する空気の温度も 2D-SA に比べてかなり高いことがわかる。

Fig. 4.6-6 (c) には、キャビティ内中央の半径方向温度分布を C1~C9 までそれぞれ示している。C2 より前段側では 2D-SA と SADES の差はほとんどないが、C3 より後段側で徐々に違いが現われてくる。C3~C5 までは主にシュラウド側で D-SA に比べ DES の温度が低くなる。さらに後段側の C6~C9 では、DES でキャビティ内の温度はほぼ平坦になっている。

SADES でみられた、キャビティ内が RANS に比べて低温であったことの原因を探るために、Fig. 4.6-7 に DES で得られた瞬時温度場を示す。Fig. 4.6-7 (a) の子午断面図では、上側の断面を見ると、後段側のキャビティ (C6~C9) において高温のガスがボア領域に吐出される様子がわかる。一方で下側の断面では、ボア付近の低温流体がキャビティ内に貫入している。

Fig. 4.6-6 (b) は Fig. 4.6-7 (a) の時刻に対応する各キャビティ内の温度分布である。前段側の C2, C4 ではそれほど大きな温度分布はみられず、大きな流れ構造もみられないが、後段側の C7, C9 では低压軸付近の低温流体が”radial arm” (腕のような構造) をつくりながら、キャビティ内に貫入していく様子がわかる。このような流れ構造がボア付近の冷媒とキャビティ内で加熱された空気の混合を促進し、DES ではキャビティ内の温度が平坦かつ低温に保たれたものと考えられる。

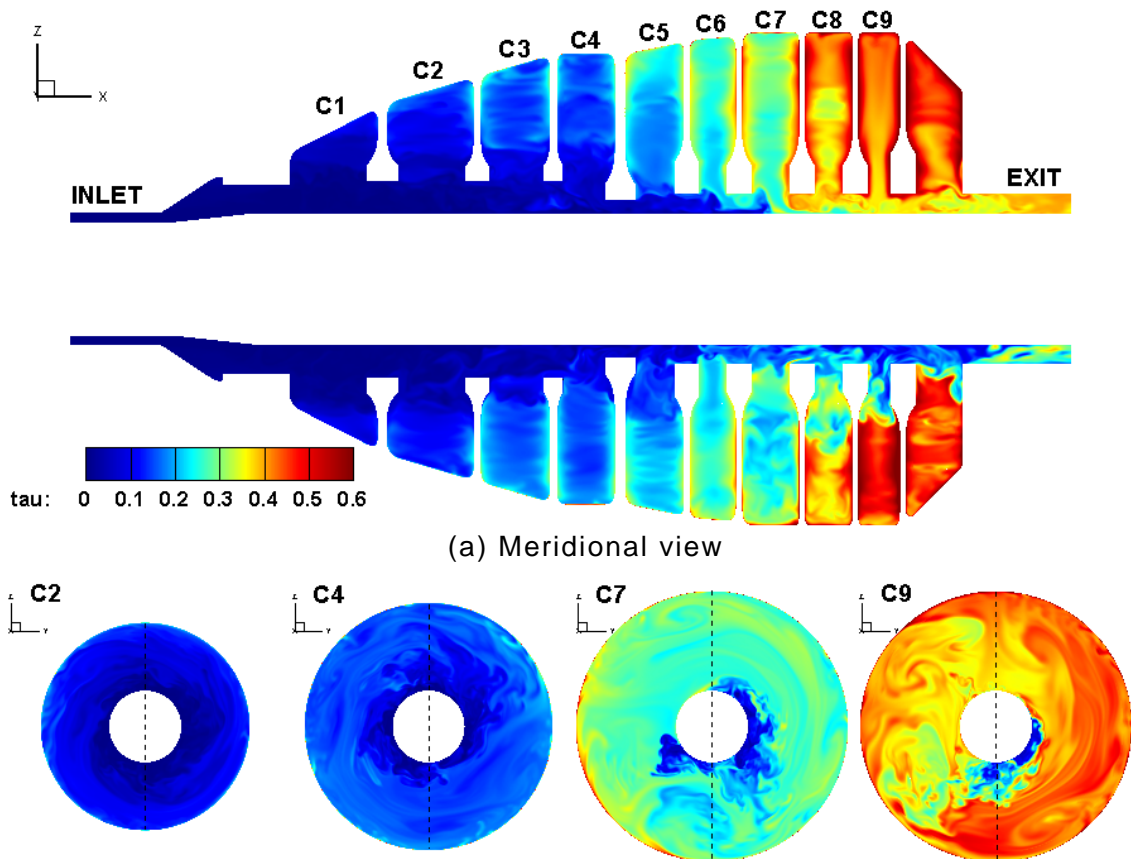
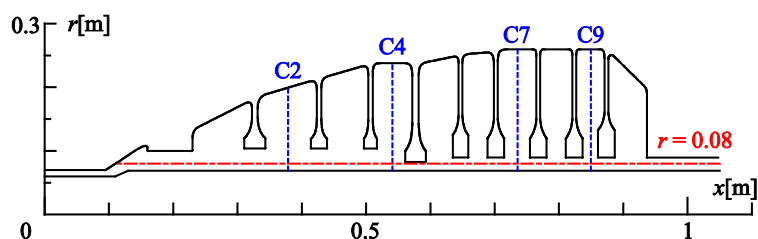
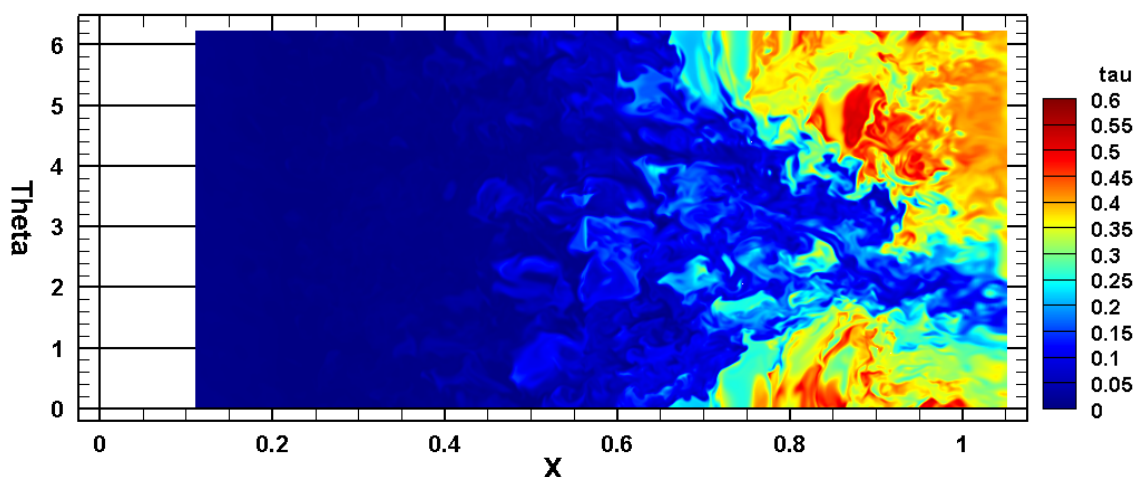


Fig. 4.6-7 Instantaneous temperature distributions inside the disk cavities



(a) Radial position of the extracted circumferential surface



(b) Temperature distribution at 58.0 shaft rev.

Fig. 4.6-8 Axial and circumferential development of heated air discharged from the cavities

冷媒と高温空気がどのように軸内部で分布しているかを調べるために、Fig. 4.6-8 にボア部である  $r = 0.08$  [m] (Fig. 4.6-8 (a)の位置) の等値面上の温度分布を示す。キャビティから吐出された高温空気は、 $x=0.7$  (およそ C7) より下流において、ひとかたまりのセルのような高温領域を形成している。

同時に、上流側からやってきた冷媒は高温ガスとただちに混合することはない、ひとつの流れの道すじを形成して下流側に流されている。

これら高温のセルと低温の筋からなる構造は常に同じ周方向位置にとどまっているのではなく、(静止系でみて)ロータの回転と同じ方向に旋回していた。このように、周方向に顕著な非一様性と特徴的な流れ構造が生じ、それによってキャビティ内の温度分布が大きな影響を受けるのが、多段圧縮機軸内部の流れの特徴であると考えられる。

#### 4.6.4 翼列非定常流実験データの取得・蓄積

数値解析手法の検証のためには、解析結果を実験結果と比較することが必須である。しかしながら、これまで述べたような複雑な現象を実験で捉えた前例は無く、直接の比較検証は不可能である。そこで本研究では、基本的な圧縮機試験装置を用いて回転翼列における非定常流れの計測を実施し、数値解析手法の基礎的な部分について検証に利用することができるレベルの非定常流データを取得・蓄積することを目的に実験を行った。

実験には既設の低速軸流圧縮機試験装置を用いた。Fig.4.6-9 に試験装置の断面を、Fig.4.6-10 に測定部の断面を示す。もともとは入口案内翼（IGV）を有する 3.5 段の圧縮機で、翼端直径 500mm、翼根直径 300mm となっており、翼高さは 100mm である。モーター駆動による定格 3,800rpm の圧縮機翼列で、圧力比は約 1.06 である。本研究の実験では 3.5 段のうち後方の 2 段を外し、入口案内翼列+1 段動静翼の 1.5 段の圧縮機として計測を行った。主として熱線流速計による非定常流速の計測を行い、また圧縮機壁面における非定常圧力と温度の計測も試みた。

計測結果の一例として、Fig.4.6-11 に動翼列（1R）の下流における非定常流速を示す。Fig.4.6.11(a)は最高効率点近傍の安定な作動点における結果で、(b)は高負荷の作動で流れが旋回失速に入った不安定状態の結果である。いずれもミッドスパン位置での非定常流速の時間変化が横軸を回転数として示されている。それぞれ 2 枚ずつの図があり、周方向に 180° 離れた位置に 2 本の熱線流速計を設置し、同時に 2 か所で流速を計測した結果が上下に並べて描かれている。(a)の結果では流れの変動が少なく、ほぼ一様な流れが 60m/s 程度の流速で安定に流れているのに対し、(b)では周期性を持って大きく変動する流速が観測されている。周方向に離れた 2 つの計測点の間には流速変動に位相差が現れており、典型的な旋回失速の変動が捉えられている。位相差から失速セルの伝播周期を計算すると 37Hz となり、回転速度に換算すると、ロータ回転速度の約 59% の速度で失速セルが回転するような旋回失速が発生していることが分かった。

本研究ではこのような非定常計測データを様々なケースについて取得し、データベースとして蓄積することができた。これらは数値解析手法の妥当性を検証するための基礎データをして活用することが可能である。

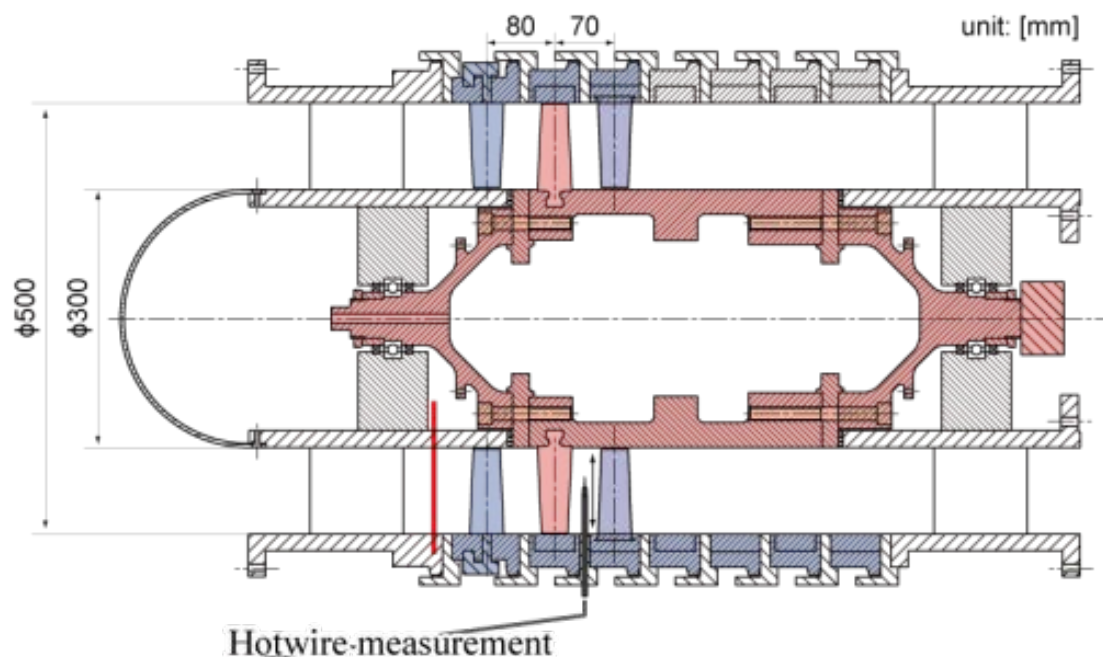


Fig.4.6-9 低速軸流圧縮機試験装置断面

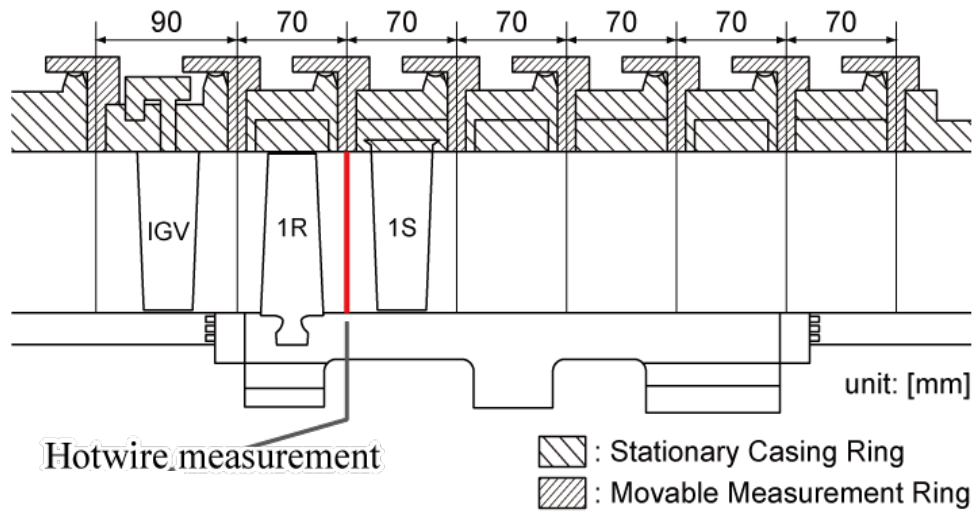
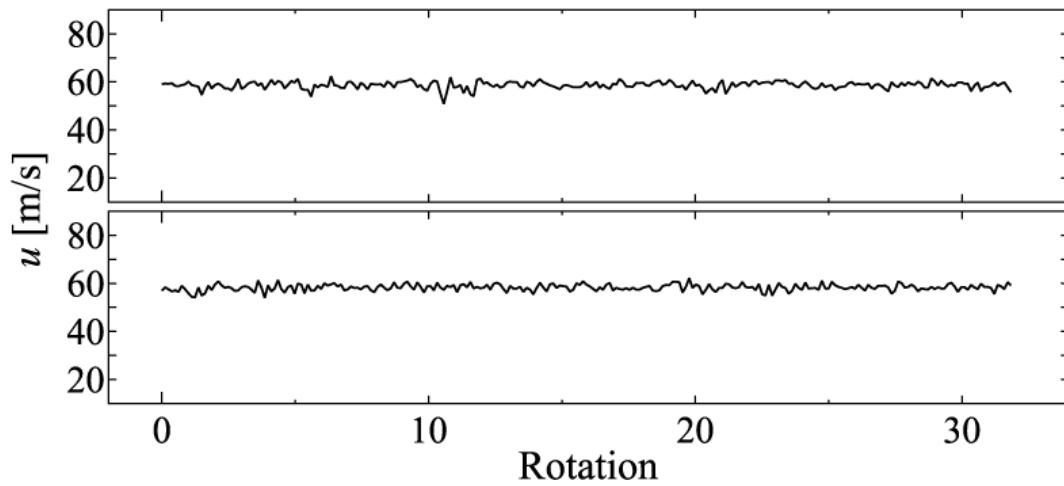
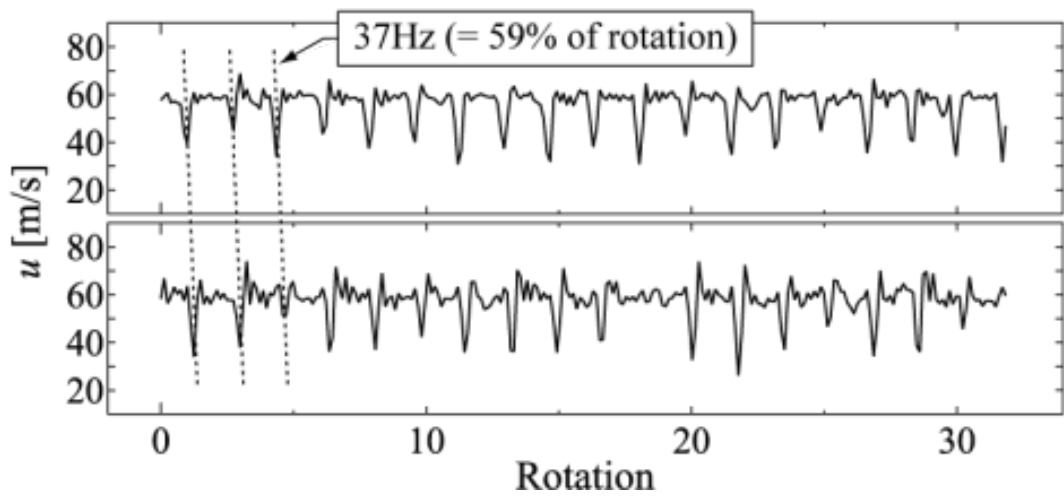


Fig.4.6-10 圧縮機計測部



(a) 安定作動点における非定常流速 (ミッドスパン)



(b) 高負荷不安定作動点における非定常流速 (ミッドスパン)

Fig.4.6-11 非定常流速の計測結果

#### 4.6.5 本研究項目のまとめ

以下に本研究項目で得られた成果を列挙する。

- (1) 流体解析コードと強連成させた構造過渡応答評価に用いる熱構造解析コードを構築した。高温構造部材の変形挙動を模擬するため、熱ひずみを考慮した幾何非線形構造解析と熱伝導解析を同時に実施可能な、有限要素法による構造解析コードを構築でき、応用にむけた課題を抽出した。
- (2) 圧縮機軸内部の冷却に重要な浮力支配旋回流の特徴を理解するため、全段全周の非定常 DES 解析（1.6 億セル）を実施した。その結果、前方段から流入する低温空気がキャビティ内に回転しながら貫入する様子や、軸後方の流体温度分布が詳細に明らかになった。
- (3) 非定常流れの数値解析結果を検証するためのデータ取得を目的に、1.5 段の軸流圧縮機を対象とした実験を実施した。検証に際し重要となる、圧縮機入口と出口での温度・圧力の条件を明らかにするとともに、失速セルの伝播速度やその個数について定量的なデータを取得した。

#### 文献

- (4.6-1) 立石敦，渡辺紀徳，姫野武洋，”流体構造連成とシステム同定による複合モード翼列フラッター解析手法”，日本ガスタービン学会誌 Vol.44 No.4, Jul. 2016, pp. 62-71
- (4.6-2) Ansari, A., Forsythe, J., and Strang, W. J., “Three-Dimensional Simulations of Buoyancy-Driven Flows Within High Pressure Compressor Bore Cavities”, AIAA Paper AIAA 2009-5376, 2009
- (4.6-3) Smirnov, P. E., Kapetanovic, S., Braaten, M. E., Egorov, Y., and Menter, F. R., “Application of the SAS Turbulence Model to Buoyancy Driven Cavity Flows”, ASME Paper GT2009-59621, 2009
- (4.6-4) Sun, Z., Lindblad, K., Chew, J. W. and Young, C., “LES and RANS Investigations into Buoyancy-Affected Convection in a Rotating Cavity With a Central Axial Throughflow”, J. Eng. Gas Turbines Power 129(2), 318-325, 2006
- (4.6-5) Holloway, P. R., Knight, G. L., Koch, C. C, and Shaffer, S. J., “Energy Efficient Engine High Pressure Compressor Detail Design Report”, NASA CR-165558, 1982
- (4.6-6) Stearns, E. M. et al., “Energy Efficient Engine Core Design and Performance Report”, NASA CR-168069, 1982
- (4.6-7) Tateishi, A., Watanabe, T., Himeno, T., Aotsuka, M., and Murooka, T., “Verification and Application of Fluid-Structure Interaction and a Modal Identification Technique to Cascade Flutter Simulations”, Intl. J. Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, Vol. 8, No 3, pp.20-28, 2016
- (4.6-8) Tateishi, A., Watanabe, T., Himeno T., and Uzawa, S., “Numerical Method for an Assessment of Steady and Motion-Excited Flowfields in a Transonic

Cascade Wind Tunnel”, Journal of the Global Power and Propulsion Society, Vol. 1, pp.171–183, 2017

(4.6-9) Tateishi, A., Watanabe, T., and Himeno T., “Development and Validation of a Compressible Large-Eddy Simulation Code with Overset Mesh Method”, ASME Paper GT2017-64195, 2017

#### 4.7 軽量・高レスポンスロータコンセプトの検討

##### 4.7.1 はじめに

急速起動時もしくは急速負荷変化時の課題である，タービンチップクリアランスの悪化に対して，本節では，クリアランスの高精度な管理を可能とするため，タービンディスクの熱応答性を向上させる検討を実施した．

今回検討した，タービンディスクの熱応答性を向上させる手法を表 4.7-1，図 4.7-1，図 4.7-2 に示す．本検討では，翼の遠心荷重低減・高強度材適用によるディスク軽量化効果確認と，ボアディスクの適用性検討を実施した．

表 4.7-1 熱応答性向上手法

打ち手	変更点	備考
翼遠心荷重低減によるディスク軽量化	翼小型化 (リム軸長 30%)	翼の小型化によりリム軸長 30% 減 (翼枚数 30% 増). 精密鑄造技術の向上による(4.4 項).
	翼重量 20% 減	CMC 材の適用を想定
高強度材の適用	例として，従来材 (鉄鋼材) から Ni 基超合金への変更検討を実施した.	
ボアディスクの適用	ディスク中央に円筒孔を空ける	図 4.7-1 および図 4.7-2 参照

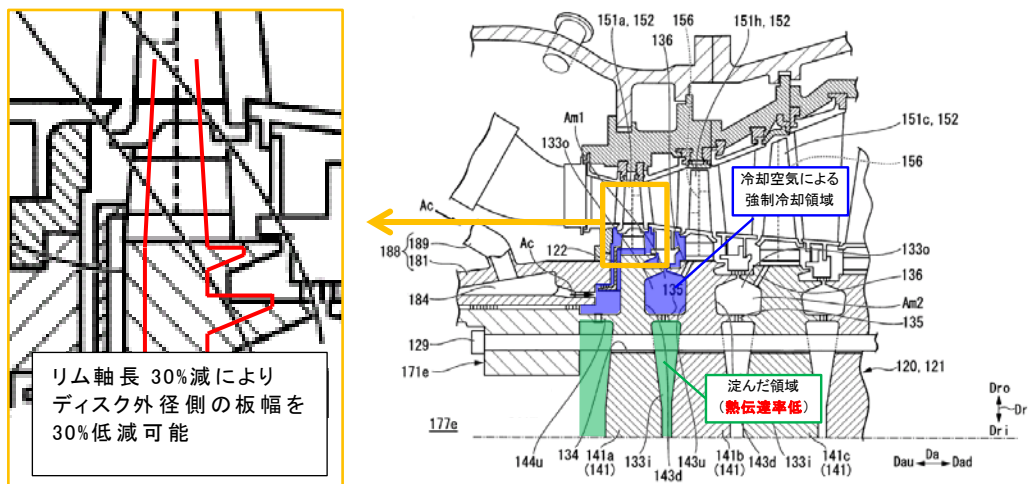


図 4.7-1 現行ディスク (4.7-1)

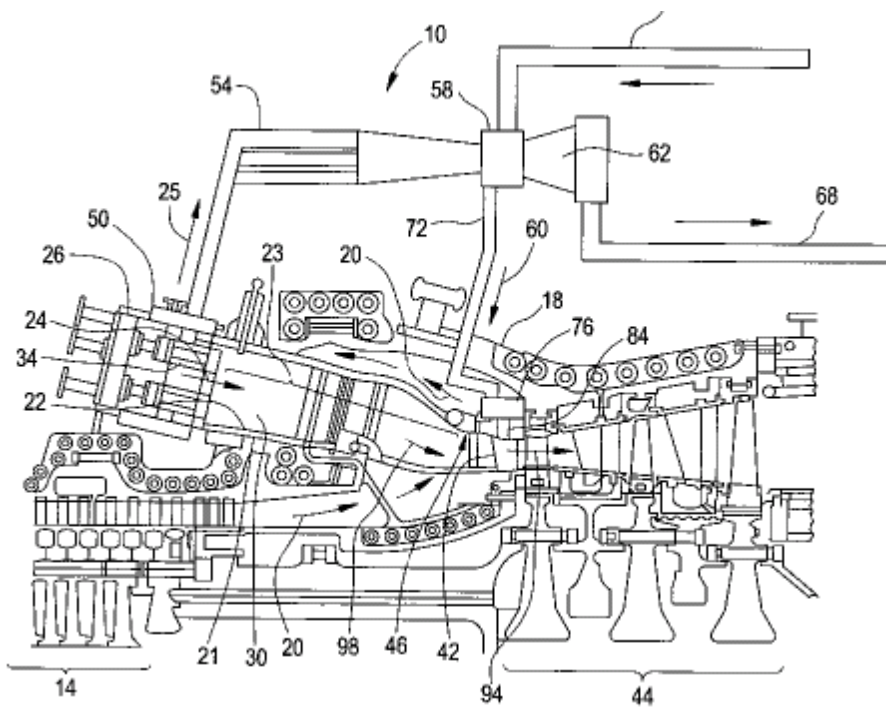


図 4.7-2 ボアディスク (4.7-2)

#### 4.7.2 一次応力設計

高レスポンスロータの一次応力検討を実施した。

##### 1) 目的

本項では、表 4.7-1 に示す、翼遠心荷重低減・高強度材 (Ni 基超合金) 適用によるディスク軽量化効果確認と、ボアディスクの適用性検討のために、ドナート法を用いた一次応力設計を実施した。

##### 2) 検討対象

検討対象を図 4.7-3 および図 4.7-4 に示す通り、大型ガスタービンのタービン 1 段ディスク～4 段ディスクとした。

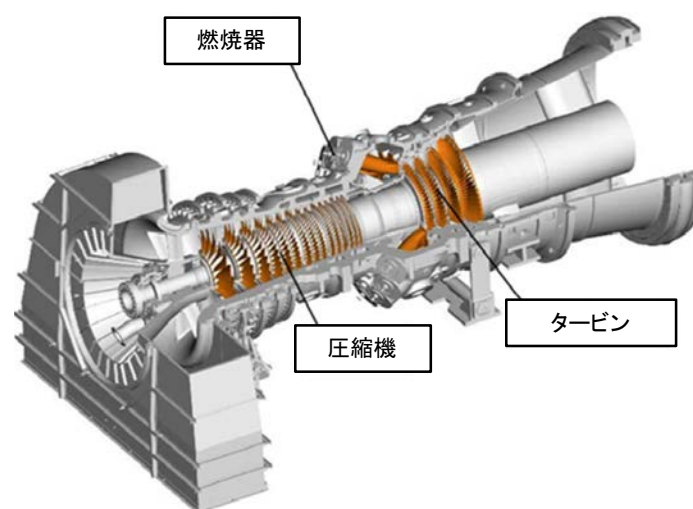


図 4.7-3 大型ガスタービン鳥瞰図 (4.7-3)



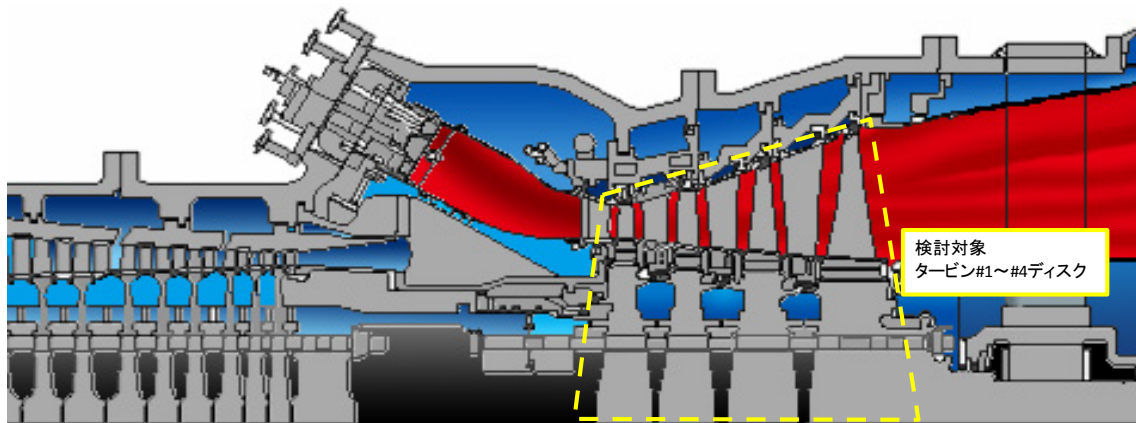


図 4.7-4 ディスク重量低減検討 検討対象 (4.7-4)

### 3) 計算条件

軽量化設計検討実施に当たり，計算条件を以下に定めた．

- ① 従来構造から基本形状を変更しない
- ② 翼取り付け外径は変更しない
- ③ ディスク間距離は変更しない

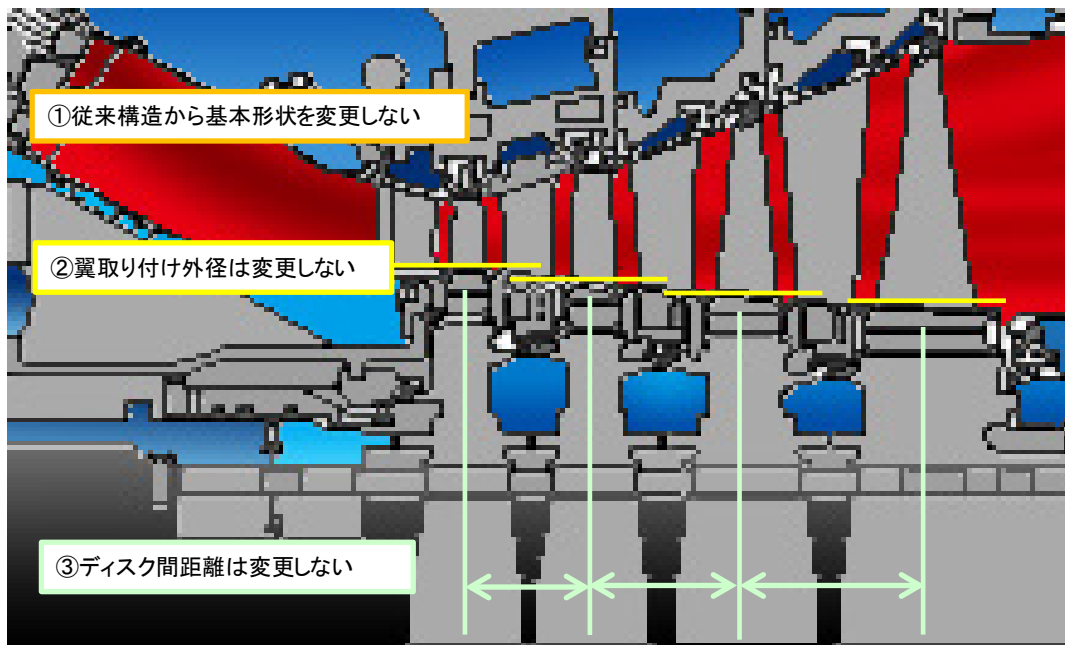


図 4.7-5 ディスク重量低減検討 検討対象 (4.7-4)

### 4) 一次応力評価結果

一次応力評価結果まとめを表 4.7-2～表 4.7-5 に，タービン 1 段ディスク検討時の概略形状（抜粋）を図 4.7-6 に示す．

リム軸長 30%低減の重量低減効果は 10%程度，翼重量 20%低減の重量低減効果は 5%程度であった．高強度材適用は，最も効果が高く 15～20%程度であった．

ボアディスクにおいては、ボア部の応力集中が大きく、内径側の板幅が大きくなる。従来材（鉄鋼材）を用いる場合、隣接ディスクに干渉する可能性が高く成立性が非常に低い。高強度材（Ni基超合金）を用いることで、ボアディスクの適用可能性を得た。また、高強度材は許容応力が大きいいため従来材と同条件においても、重量を15%程度低減する結果となった。

表 4.7-2 一次応力評価結果まとめ（タービン1段ディスク）

		従来ディスク（中実）		ボアディスク（中空）	
		重量	慣性モーメント	重量	慣性モーメント
		比率 %	比率 %	比率 %	比率 %
従来材 （鉄鋼材）	従来設計条件（※）	基準		成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
	→翼小型化（リム軸長30%減）	-11%	-12%	成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
	→翼重量20%減	-16%	-15%	-10%	-12%
高強度材 （Ni基超合金）	従来設計条件（※）	-20%	-12%	-17%	-9%
	→翼小型化（リム軸長30%減）	-29%	-21%	-26%	-19%
	→翼重量20%減	-32%	-24%	-29%	-22%

表 4.7-3 一次応力評価結果まとめ（タービン2段ディスク）

		従来ディスク（中実）		ボアディスク（中空）	
		重量	慣性モーメント	重量	慣性モーメント
		比率 %	比率 %	比率 %	比率 %
従来材 （鉄鋼材）	従来設計条件	基準		成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
	→翼小型化（リム軸長30%減）	-10%	-11%	成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
	→翼重量20%減	-15%	-13%	成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
高強度材 （Ni基超合金）	従来設計条件	-17%	-8%	-15%	-6%
	→翼小型化（リム軸長30%減）	-25%	-18%	-23%	-16%
	→翼重量20%減	-29%	-20%	-27%	-18%

表 4.7-4 一次応力評価結果まとめ（タービン3段ディスク）

		従来ディスク（中実）		ボアディスク（中空）	
		重量	慣性モーメント	重量	慣性モーメント
		比率 %	比率 %	比率 %	比率 %
従来材 （鉄鋼材）	従来設計条件	基準		成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
	→翼小型化（リム軸長30%減）	-9%	-11%	成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
	→翼重量20%減	-15%	-14%	成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
高強度材 （Ni基超合金）	従来設計条件	-16%	-7%	-12%	-5%
	→翼小型化（リム軸長30%減）	-24%	-17%	-21%	-15%
	→翼重量20%減	-28%	-20%	-25%	-18%

表 4.7-5 一次応力評価結果まとめ（タービン4段ディスク）

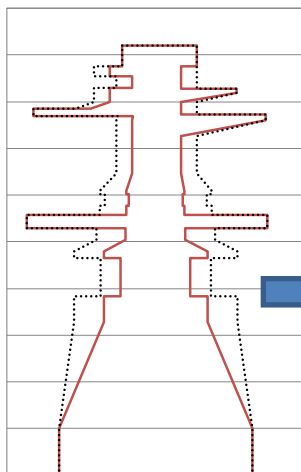
		従来ディスク（中実）		ボアディスク（中空）	
		重量	慣性モーメント	重量	慣性モーメント
		比率 %	比率 %	比率 %	比率 %
従来材 （鉄鋼材）	従来設計条件	基準		成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
	→翼小型化（リム軸長30%減）	-12%	-13%	成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
	→翼重量20%減	-19%	-17%	成立性なし（隣接ディスクに干渉）	
高強度材 （Ni基超合金）	従来設計条件	-16%	-6%	-12%	-3%
	→翼小型化（リム軸長30%減）	-24%	-17%	-21%	-15%
	→翼重量20%減	-29%	-20%	-26%	-18%

従来ディスク  
従来材（鉄鋼材）

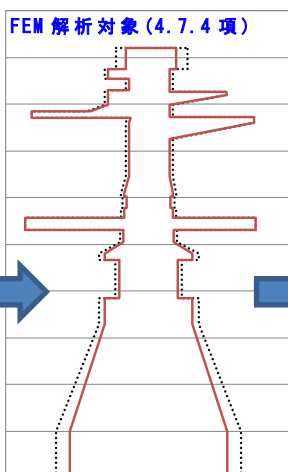
従来設計条件（※）  
制限値まで軽量化

翼の小型化  
（リム軸長 30%減）

翼重量 20%減

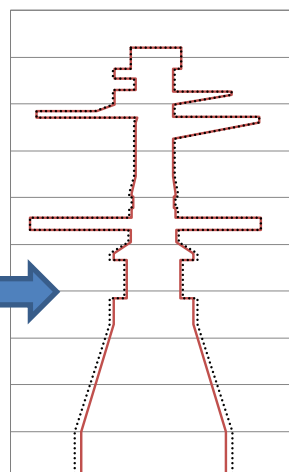


重量評価基準



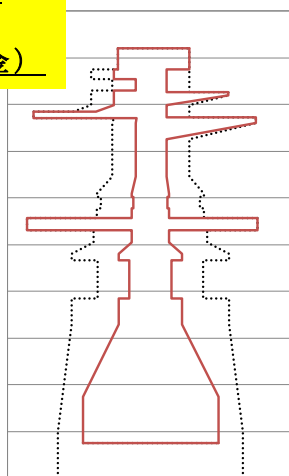
FEM 解析対象 (4.7.4 項)

重量 -11%

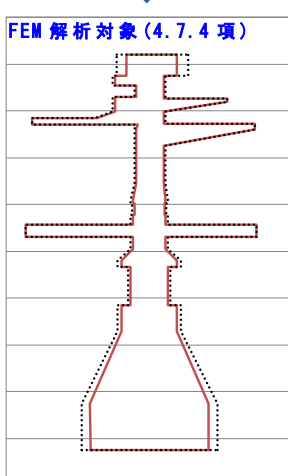


重量 -16%

ボアディスク  
高強度材  
（Ni 基超合金）

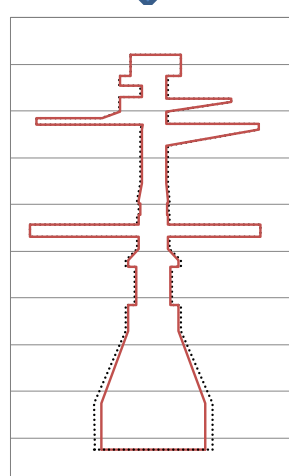


重量 -17%



FEM 解析対象 (4.7.4 項)

重量 -26%



重量 -29%

（※） 1 段ディスク重量低減のためシールアーム径を従来よりも大きくした

図 4.7-6 一次応力設計結果 タービン 1 段ディスク概略形状（抜粋）

### 4.7.3 構造過渡応答シミュレーション

前項で検討した形状に対して、構造過渡応答シミュレーションを行い、過渡時の局所応力も考慮した評価を実施した。

#### 1) 目的

算出されたディスク形状に対して、非定常 FEM 解析を実施し、許容応力および LCF 回数を制限として軽量化形状を精査した。また、各構造の昇温時間を比較し、熱応答性向上効果を確認した。

#### 2) 検討対象

検討対象は、1 段ディスクの以下 2 条件とした。

- ① 従来ディスク（中実） 従来材 リム軸長 30%減 ※図 4.7-6 中央上
- ② ボアディスク（中空） 高強度材 リム軸長 30%減 ※図 4.7-6 中央下

#### 3) 起動スケジュール

解析条件には、表 4.7-6 および図 4.7-7 の急速起動のスケジュールを用いた。また、COLD 起動および HOT 起動の 2 種類の熱境界条件を用いて LCF 回数を評価した。

- ① COLD 起動： 停止後十分時間が経過した後起動
- ② HOT 起動： 停止後 8 時間後に起動

表 4.7-6 起動スケジュール

	通常起動	急速起動
昇速時間（0-100%回転数）	10 分	5 分
昇負荷時間（0-100%負荷）	11 分	5 分

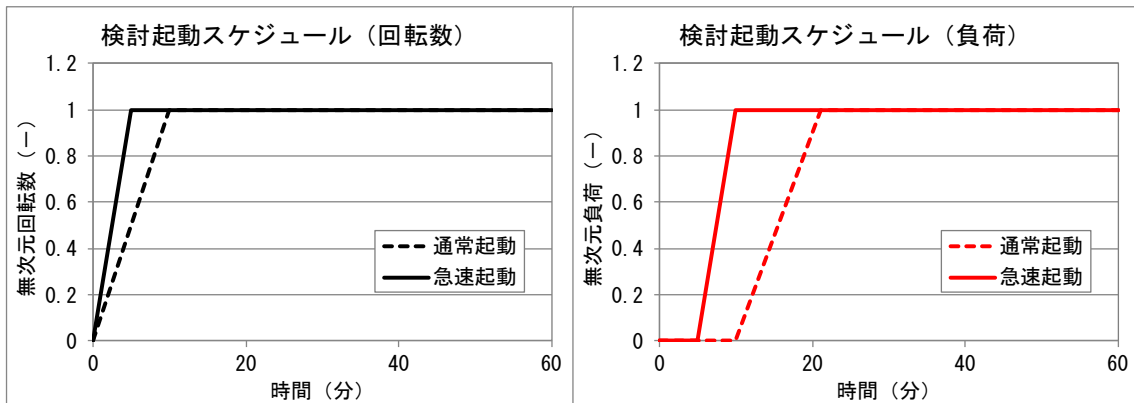


図 4.7-7 起動スケジュール

#### 4) 冷却条件

従来ディスクおよびボアディスクの冷却条件を図 4.7-8 に示す。ボアディスクの冷却条件は、締付けボルト穴に冷却空気を通すことで、強制冷却（熱伝達率大）の面積を増やし、熱応答性向上を狙ったものである。

ボアディスクのディスク中央に冷却空気を通すには（図 4.7-2 参照）、圧縮機側からロータ内部を通して冷却空気を供給する必要があり、ロータ側にもボアディスクを適用する必要がある等、別部品への影響が大きい。また、冷却空気が常に内径側を通るためアクティブな制御（クーラの適用等）が困難である。

そのため本検討においては、比較的実現性の高いボルト穴に冷却空気を通す手法にて、LCF 評価検討を実施した。

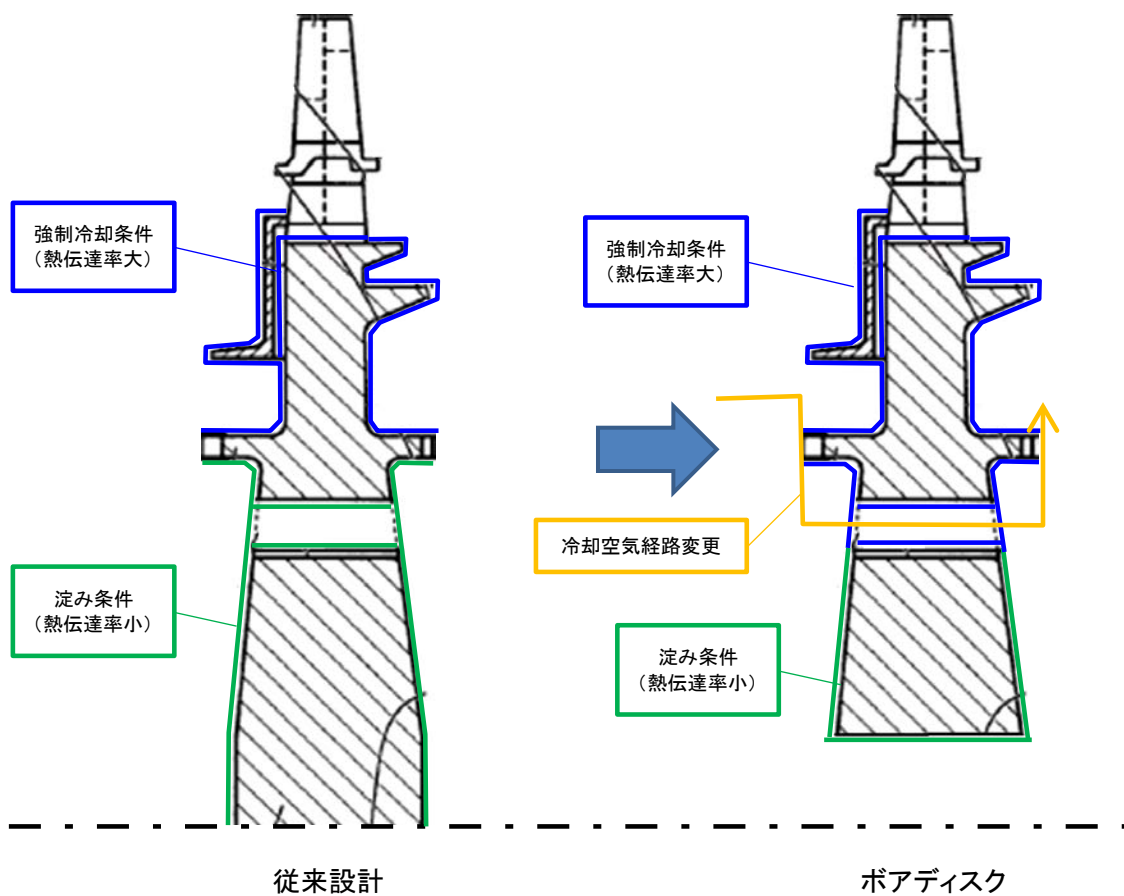


図 4.7-8 冷却条件

### 5) LCF 評価結果

LCF 評価結果を図 4.7-9 及び図 4.7-10 に示す。従来ディスク，ボアディスクともに，ボルト穴，トルクアーム付け根等の構造不連続部のピーク応力が大きく，一次応力設計形状では目標 LCF 回数を満足しない。

基本形状を変更せずに，板幅のみの変更で LCF 回数を満足する形状を設計した場合，従来ディスクの重量は 12% 増大し，ボアディスクの重量も従来ディスクと同等にまで増大する。高強度材（Ni 基超合金）の LCF 強度が従来材（鉄鋼材）と同程度であるため，従来ディスクと同程度の体格になったといえる。

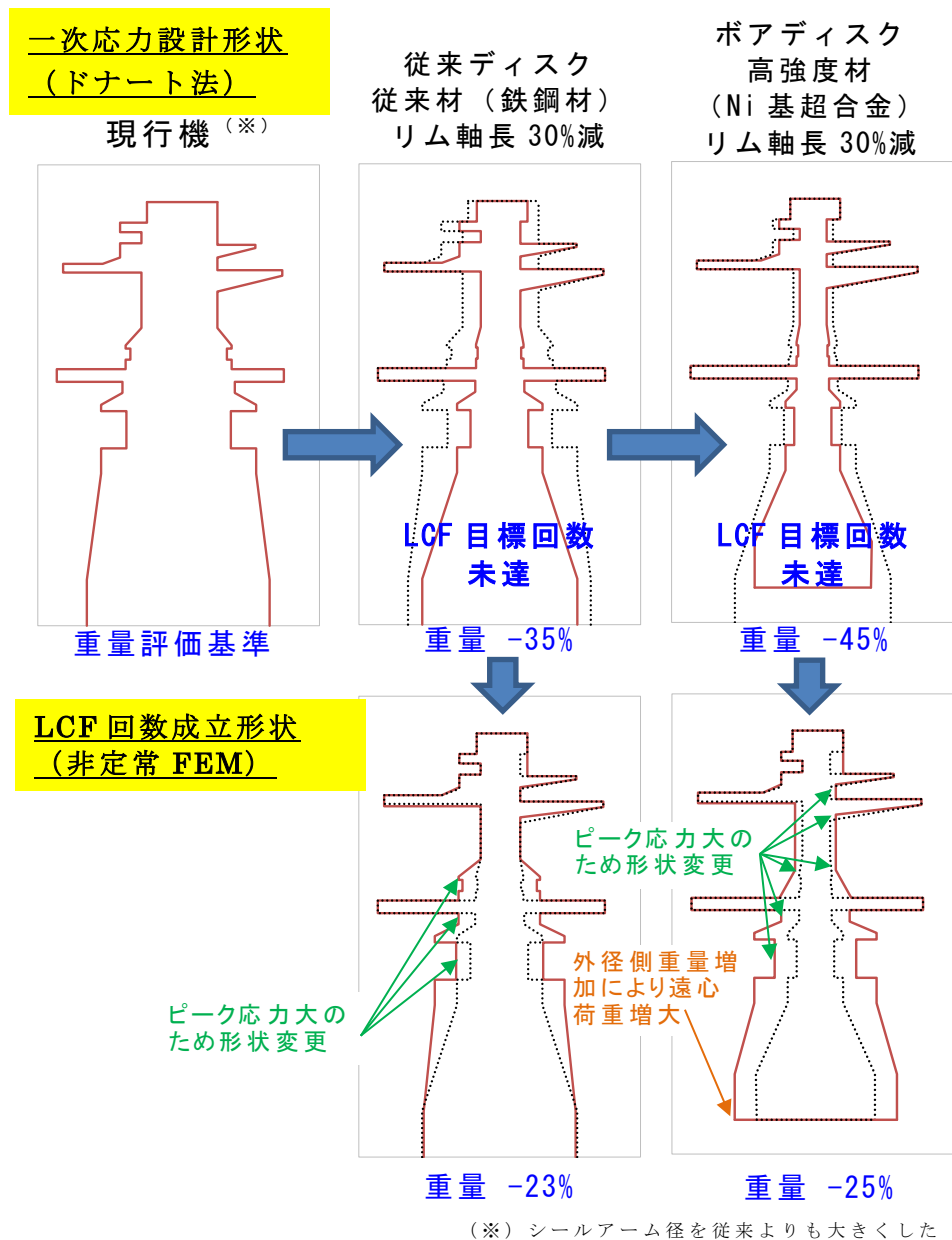


図 4.7-9 LCF 評価結果 (概略形状)

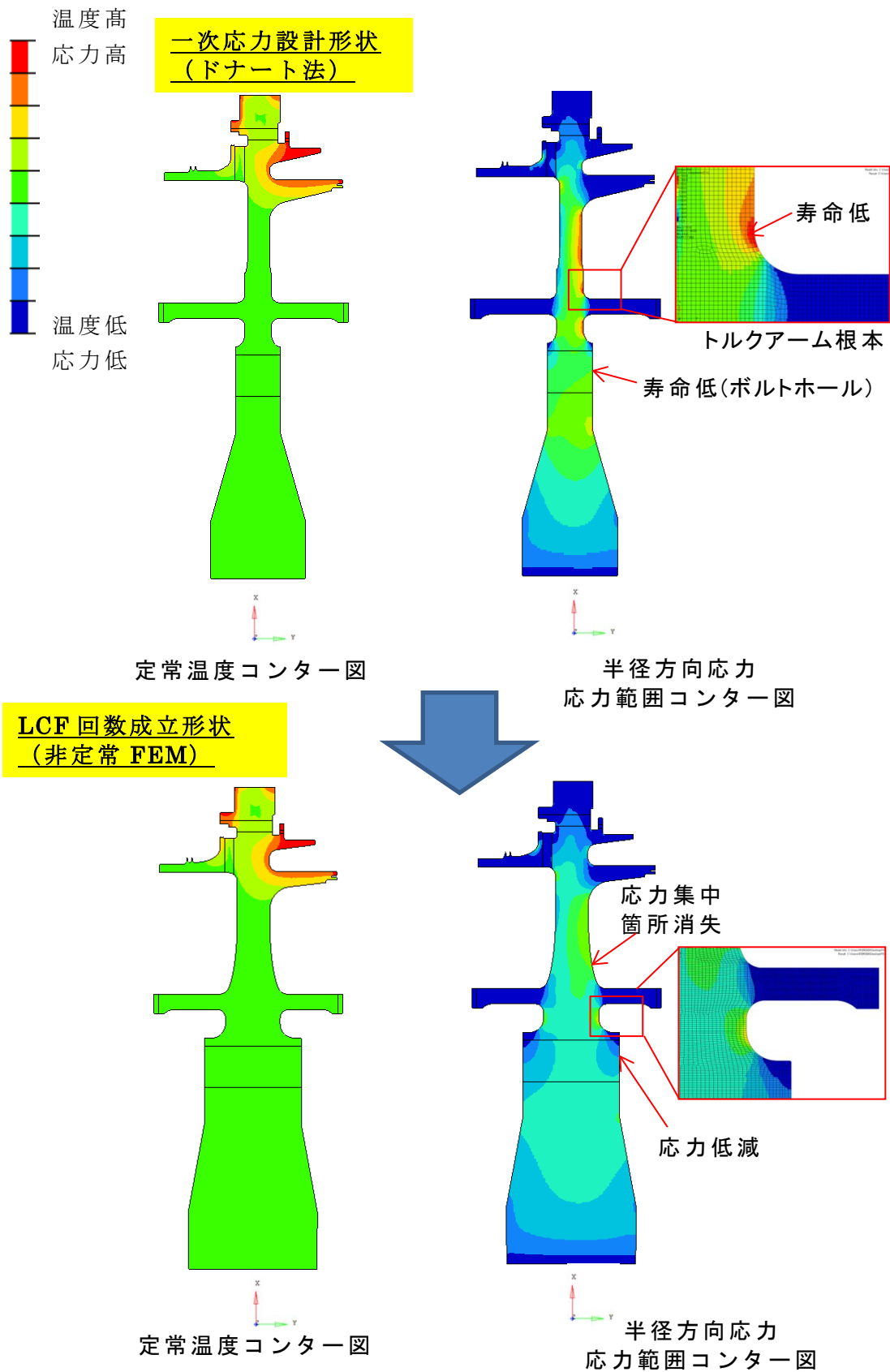


図 4.7-10 ボアディスク LCF 評価結果 (FEM 解析結果)

### 6) 熱応答性評価結果

図 4.7-11 に、熱応答性評価結果を示す。熱応答性を、負荷上昇終了後から定常の 95%の伸び量に達するまでに要する時間、として評価した。

その結果、ボアディスク (Ni 基超合金) の一次応力設計後の形状では、現行機形状に対して 45%熱応答時間を低減できている。一方で、LCF 強度設計後は、現行機以上の時間を要している。Ni 基超合金の熱伝導性が従来材 (鉄鋼材) よりも低いため、LCF 強度設計後の形状は従来ディスクとボアディスクの体格が同等であるにもかかわらず、ボアディスクの熱応答時間が長くなること明らかとなった。

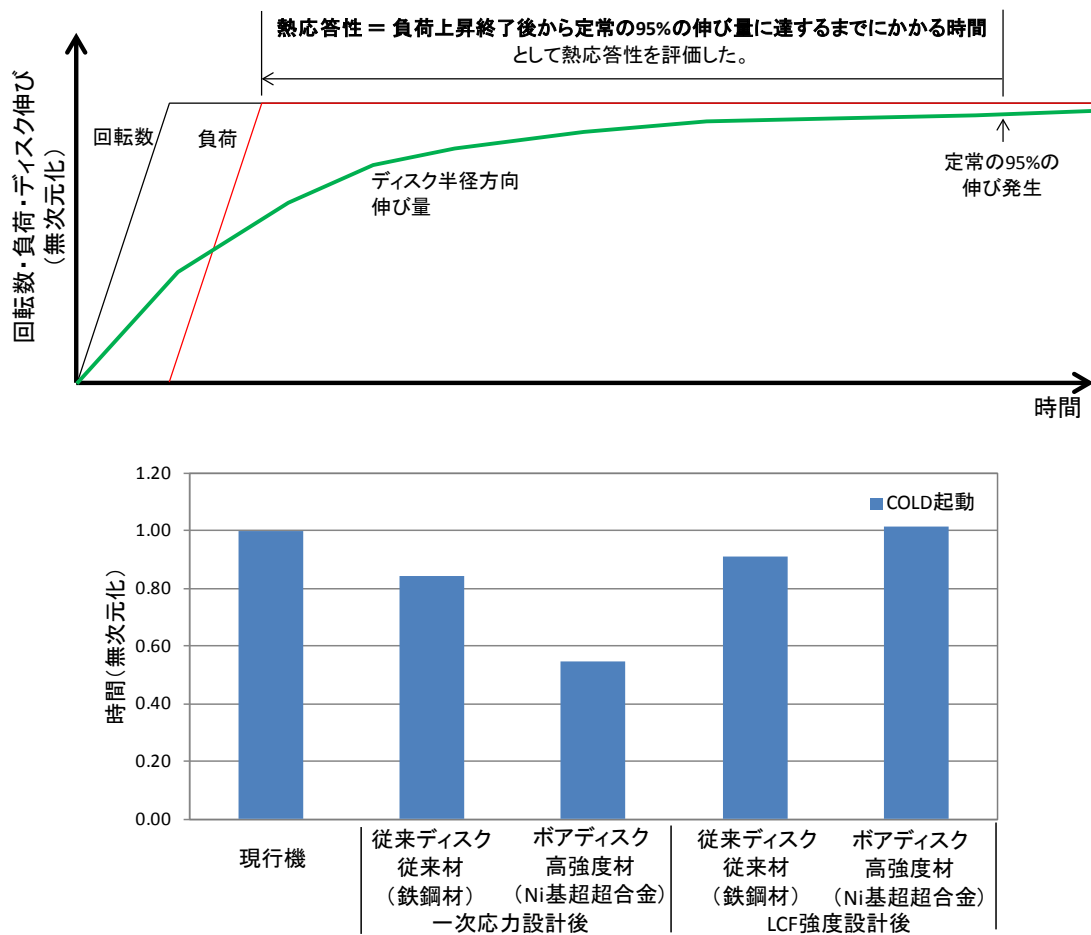


図 4.7-11 熱応答性評価



#### 4.7.4 まとめ

チップクリアランスの高精度な管理を可能とすることを目的として、タービンディスクの熱応答性を向上させる検討を実施した。結果および得られた課題を以下にまとめる。

LCF強度評価により、従来ディスク形状のスライド設計では、ピーク応力が高くなるため重量低減効果が得られないことが分かった。

ボアディスクの適用性に関して、適用のためには Ni 基超合金と同等以上の高強度材を用いる必要がある。また、ボアディスク中央孔に冷却空気を流すためには、ロータ側にもボアディスクを適用する必要があり別部品への影響が大きいこと、また、冷却空気が常に内径側を通るためアクティブな制御が困難であることなどの課題が挙げられた。

表 4.7-7 軽量化の課題と対策案

課題	対策（案）
ピーク応力低減構造の設計 （重量低減）	[小規模な構造変更] ・ ボルト穴，冷却穴の長穴化 ・ R 形状の最適化 ・ シールアームの内径化
	[大規模な構造変更] ・ ボアディスク中央孔に締付ボルト適用．現行ボルト穴の数を減らす． ・ シールディスクの適用
	[その他] ・ 引張特性と LCF 強度のバランスの良い材料選定 <sup>(4.7-5)</sup>

#### 文献

- (4.7-1) 三菱日立パワーシステムズ株式会社，“ガスタービンロータ，ガスタービン，及びガスタービン設備”，公開特許公報(A)，特開 2017-82605
- (4.7-2) GENERAL ELECTRIC COMPANY，“エンジンターンドアウンを可能にするための方法およびタービンエンジン”，公開特許公報(A)，特開 2007-182883
- (4.7-3) 羽田ら，“世界初の 1600℃級 M501J ガスタービンの実証発電設備における検証試験結果”，三菱重工技報，Vol.49，No.1（2012），pp19-24
- (4.7-4) Satoshi Hada, et. al, “Evaluation and future trend of large frame gas turbines. A new 1600 degree C, J class gas turbine”, 2012, Proceeding s of ASME TurboExpo2012,GT2012-68574
- (4.7-5) 横川忠晴，谷月峰，崔傳勇，小泉裕，藤岡順三，原田広史，福田正，三橋章，“開発 Ni-Co 基鍛造超合金を用いた模擬タービンディスクの機械的特性”，日本金属学会誌，Vol. 74，No. 3（2010），pp. 221-225.

#### 4.8 部分負荷運転時の効率向上に向けたケーシングの温度制御技術の検討

部分負荷効率向上に向けて、起動、昇速、昇負荷の全領域に渡り、動翼のチップクリアランスを最小化して高効率を図るべく、翼環の温度制御（起動時加熱・高負荷時冷却）によるクリアランスコントロール技術の概念設計を実施した。

クリアランスコントロールを実施しない場合、図 4.8-1 上図に示すように過渡のクリアランス変化から、クリアランスが最小となる点（ピンチポイント）で最小クリアランスを確保できるように設計を行う必要がある。そのため、運転クリアランスは過渡のクリアランス変化の差と最小クリアランスを足し合わせた値となり、必ず最小クリアランスより大きな値となってしまふ。そこで、クリアランスコントロール技術を導入することで、ピンチポイントのクリアランス、高負荷時の運転クリアランスの片方もしくは双方を改善することを考えた。図 4.8-1 に示すようなクリアランス挙動を実現するため、構造熱応答シミュレーションを用いて、翼環の温度制御を行った場合のクリアランス変化を予測・評価した。その結果、起動前加熱と高負荷時冷却を組み合わせたコンセプトでクリアランスコントロールを行うことで、全領域に渡り動翼のチップクリアランスを最小化できる目処が得られた。クロージャー（クリアランスの初期値からの変化量）の挙動に着目し、以下に検討結果の詳細を記載する。

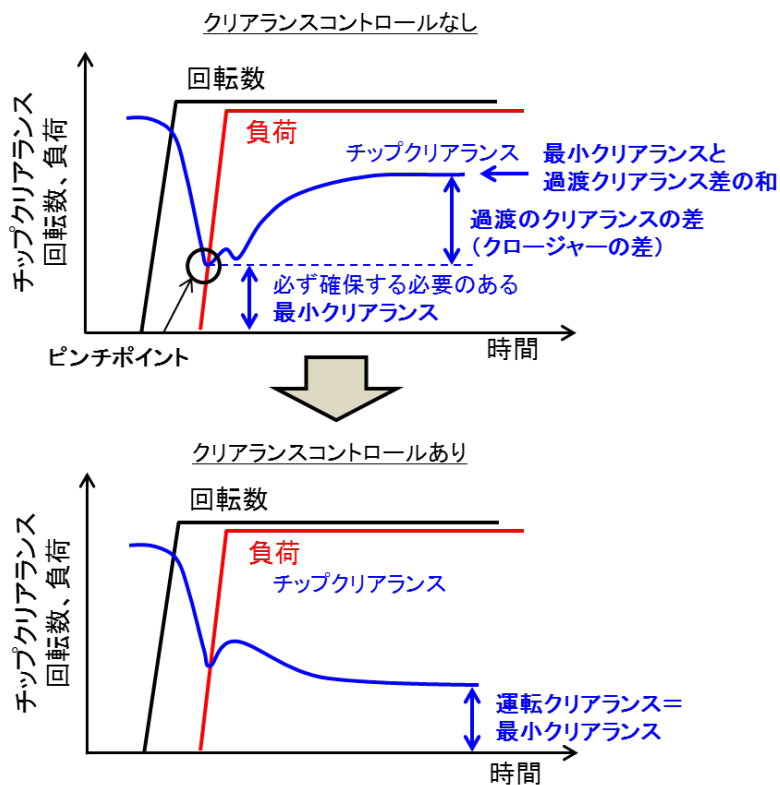


図 4.8-1 クリアランスコントロールのコンセプト

#### 4.8.1 急速起動によるクロージャー変化

起動スケジュールを早めることで翼環が温度上昇する前にロータの遠心・熱変形により、ピンチポイントのクリアランスが低下（悪化）することが懸念される。そこで、クリアランス制御の検討を実施する前に本検討を行った。急速起動を5分昇速（20%/分）、5分昇負荷（20%/分）と定義し、急速起動時のタービン1段動翼のクロージャーと通常起動時（10分昇速、11分昇負荷）のクロージャーを比較した。なお、本検討では4.7節の検討結果である現行材での軽量ディスク形状（ディスクA）を用いて検討を行った。図4.8-2に起動スケジュールの比較を、図4.8-3にディスク形状を示す。

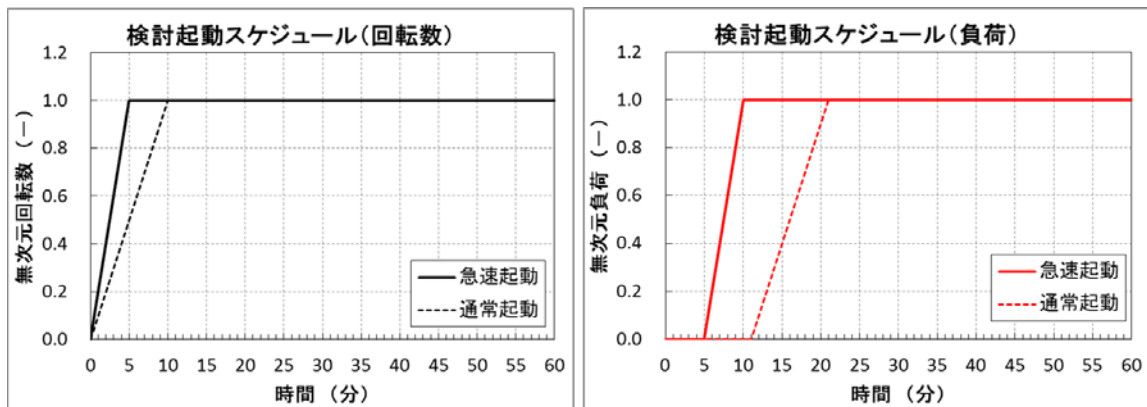


図 4.8-2 起動スケジュール比較

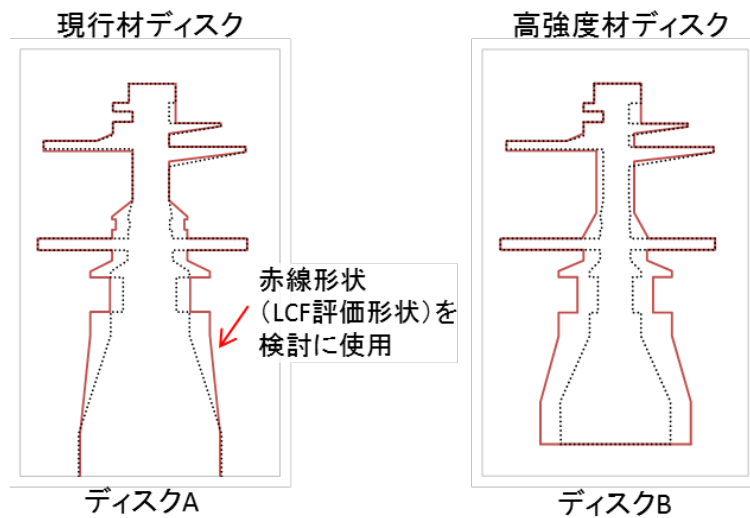


図 4.8-3 検討に用いたディスク形状

## 1) 平均クロージャー比較

上下左右平均のクロージャーの比較を図 4.8-4 に示す．急速起動時は，翼環が温度上昇して熱伸びする前にディスクや動翼が遠心・熱伸びする傾向が強まり，ピンチポイントのクロージャーが低下する結果となった．チップクリアランスを最小化するためには，定常クロージャーとピンチポイントクロージャーの差を最小化する必要があるが，急速起動によってこのクロージャー差が拡大する傾向が見られた．

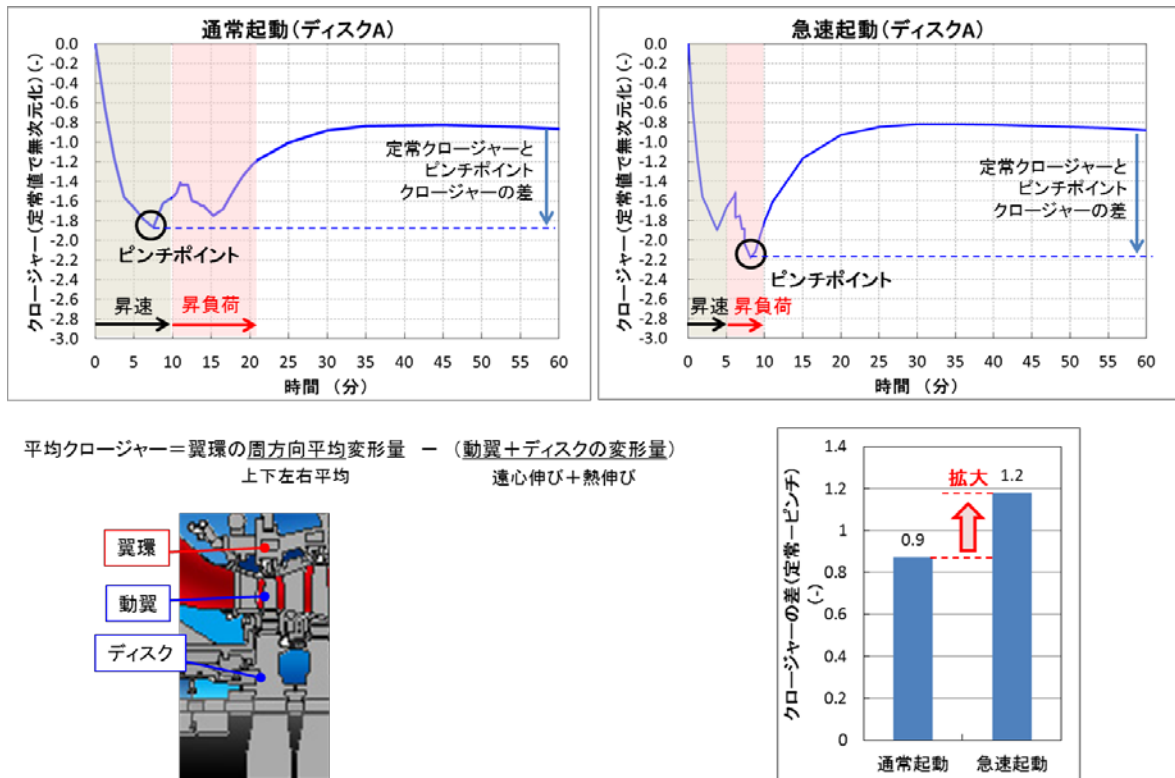


図 4.8-4 クロージャー比較 (左：通常起動，右：急速起動) (4.8-1)

## 2) 局所クロージャー

大型の GT では翼環は二分割構造となっているため，過渡時には翼環に周方向温度分布が発生し，周方向不均一変形が発生する．そのため，クロージャーにも周方向分布が発生する．図 4.8-5 に，上下平均クロージャー，左右平均クロージャー，上下左右平均クロージャーを示す．翼環の周方向不均一変形によって，過渡のクロージャーに周方向分布が発生しているが，ピンチポイントが発生する時刻では周方向の不均一変形量は非常に小さく，急速起動時にはクリアランスの周方向分布は大きな問題にならない可能性が高いことがわかった．

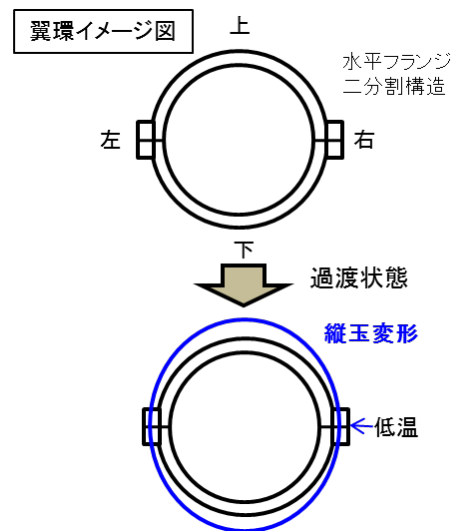
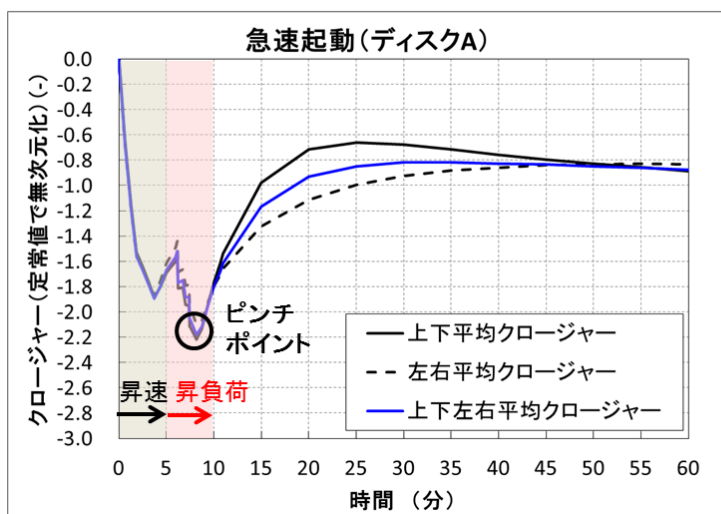
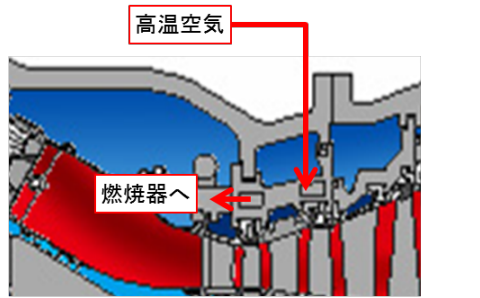


図 4.8-5 クロージャの周方向分布

#### 4.8.2 翼環の起動時加熱によるクリアランスコントロール

ケーシングの温度制御によるクリアランスコントロールには、起動時に加熱してピンチポイントでのクリアランス低下を抑制する手法と、高負荷時に冷却して運転クリアランスを低減する手法の2つがある。そこで、起動時加熱に着目した検討を実施した。起動時に、従来加熱している温度まで翼環を加熱した場合の構造熱応答シミュレーションを実施した。結果を図 4.8-6 に示す。起動時加熱によりピンチポイントでのクロージャは改善し、定常クロージャとピンチポイントクロージャの差も改善した。ピンチポイントでのクロージャが改善した分、初期クリアランスを削減し、運転クリアランスを削減することが可能となる。しかし、ピンチポイントでのクロージャを定常クロージャより大きくするためには、従来加熱している温度以上に翼環を起動時に加熱する必要があることがわかった。そこで、翼環の高負荷時冷却に着目した検討を次に行った。



平均クロージャー = 翼環の周方向平均変形量  
 - (動翼+ディスクの変形量)

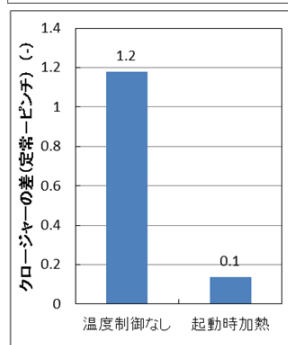
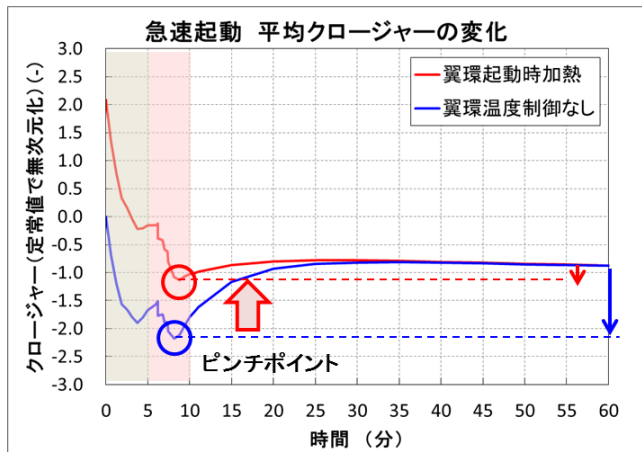
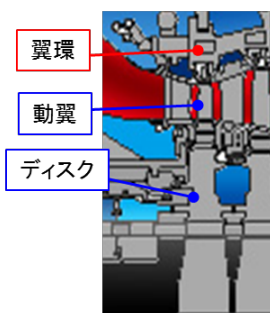


図 4.8-6 翼環の起動時加熱によるクロージャー変化 (4.8-1)

### 4.8.3 翼環の高負荷時冷却によるクリアランスコントロール

翼環を高負荷時に冷却することによるクリアランスコントロールの検討を行った。翼環へ供給する冷却空気の温度は、クーラの設計でコントロールできるため、大気温度レベルまで冷却した空気で翼環を冷却する場合の構造熱応答シミュレーションを実施した。なお、翼環の強度低下を防ぐため、既存の翼環冷却構造を流用するとして検討を行った。結果を図 4.8-7 に示す。ピンチポイントが発生するタイミングは昇負荷途中(翼環の温度制御を開始する前)であるため、ピンチポイントのクロージャーは変化しないが、高負荷時の定常クロージャーは翼環の冷却によって低下するため、定常クロージャーとピンチポイントクロージャーの差は改善しており、運転クリアランスを低減できる試算が得られた。起動時加熱と高負荷時冷却の検討結果をもとに、クリアランスコントロールコンセプトを検討した。

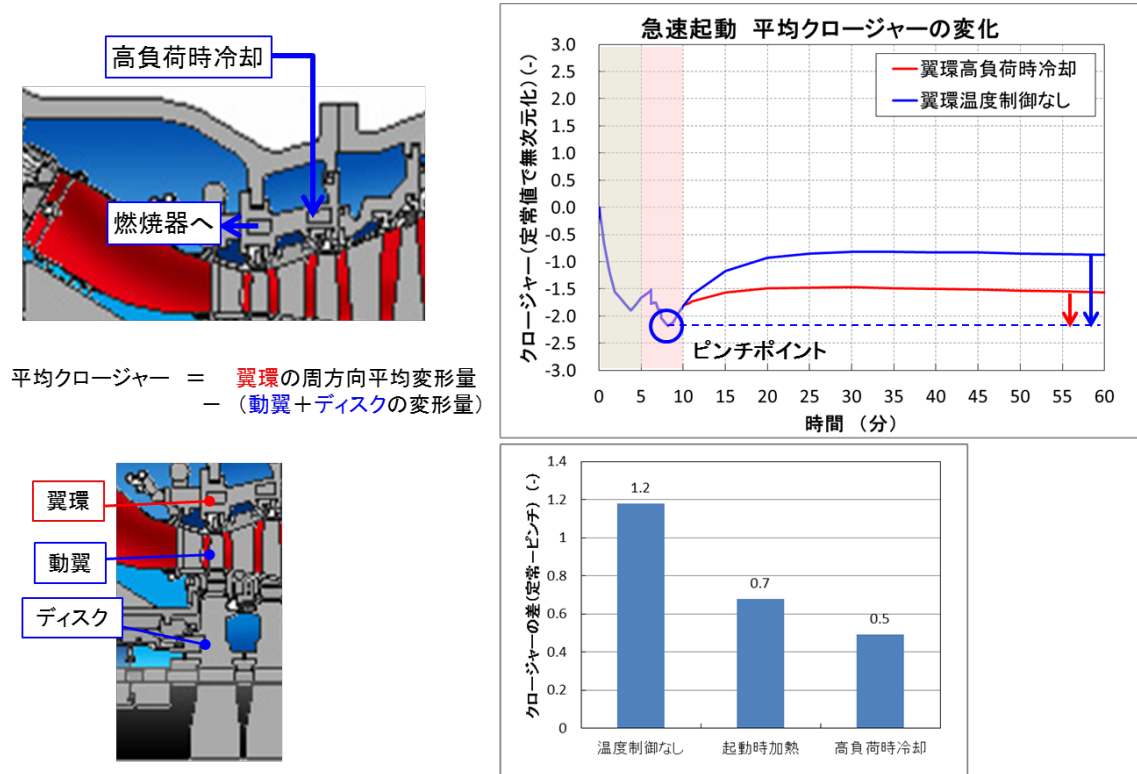
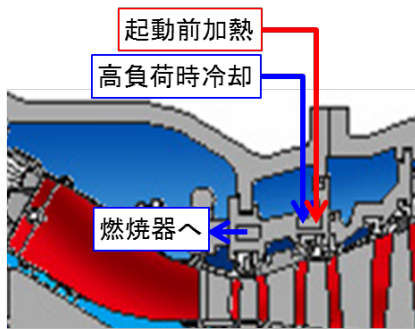


図 4.8-7 翼環の高負荷時冷却によるクロージャー変化 (4.8-1)

#### 4.8.4 クリアランスコントロールのコンセプト検討

起動，昇速，昇負荷の全領域に渡り，動翼のチップクリアランスを最小化するためには，ピンチポイントでのクロージャーを高負荷時のクロージャーより大きくする必要がある．そこで，起動時加熱と高負荷時冷却を組み合わせたクリアランスコントロールコンセプトを立案し，検討を行った．結果を図 4.8-8 に示す．起動前加熱と高負荷時冷却を組み合わせることで，ピンチポイントクロージャーと高負荷時定常クロージャーの差をほぼなくすることができる試算が得られた．動翼チップクリアランスの最小化のためには，起動前加熱と高負荷時の冷却を組み合わせる必要があると考える．ただし，高負荷時の翼環冷却空気を GT 内部から抽気することで GT 性能は低下するため，チップクリアランス削減効果と抽気による性能低下を比較し，全体性能を最適化するクリアランスコントロールを行う必要がある．



平均クロージャー = 翼環の周方向平均変形量  
 - (動翼+ディスクの変形量)

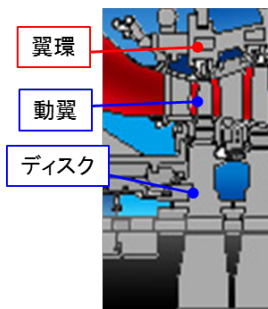
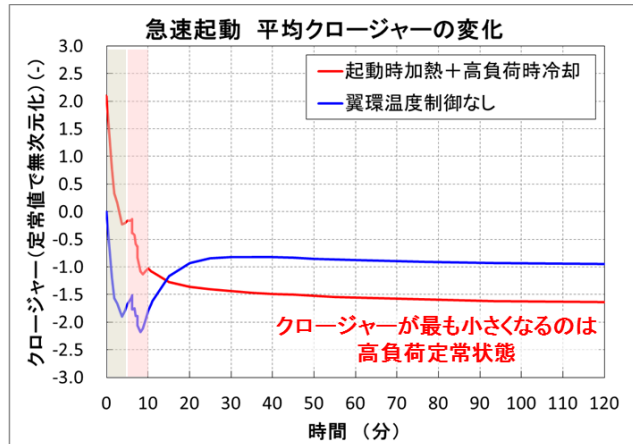
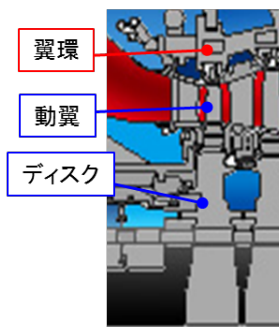


図 4.8-8 翼環の起動時加熱と高負荷時冷却を組み合わせた場合の  
 クロージャー変化 (4.8-1)

#### 4.8.5 ロータ改良によるクリアランス改善効果

翼環の温度制御に着目して検討を実施したが、ロータ（ディスク）の変形をコントロールすることで、さらにクリアランスを改善できる可能性がある。これまでの検討は、図 4.8-3 に示したディスク A を対象に行ってきたが、高強度材を適用したディスク B を採用することで、クリアランスをさらに改善することができる。図 4.8-9 に翼環の温度制御を実施しない場合を対象に、ディスク A のクロージャーとディスク B のクロージャーの比較を示す。ディスク B のクロージャー差の方がディスク A より小さくなっており、クリアランスの改善効果が見られた。翼環の温度制御でクリアランスはコントロールできるが、ロータを見直すことでコントロール量を削減することができるため、翼環の冷却・加熱に使用する空気流量を削減できると考える。GT 性能の更なる向上のためには、ロータの見直し可否も含めてクリアランスコントロールの設計を行う必要があると考える。





$$\text{平均クロージャー} = \text{翼環の周方向平均変形量} - (\text{動翼} + \text{ディスクの変形量})$$

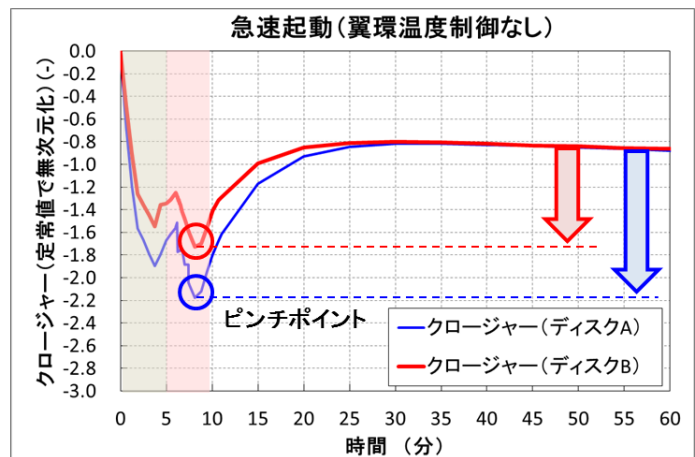


図 4.8-9 ディスク形態を変えた場合のクロージャー変化<sup>(4.8-1)</sup>

#### 4.8.6 まとめ

部分負荷効率向上に向けて、構造応答シミュレーションを用いて、翼環の温度制御によるクリアランスコントロール技術の概念設計を実施した。ロータ材を現行材から変更しない場合、起動前加熱と高負荷時冷却を組み合わせるコンセプトで温度制御を行うことで、起動時に発生するクリアランスの過渡最小点（ピンチポイント）を回避し、高負荷条件でクリアランスを最小化できることが可能性が高いことがわかった。さらに、ロータリプレースまで含めてクリアランス最適設計を行うことができる場合、ロータ材を高強度材に変更して設計を行うことで、翼環の温度制御に必要な空気流量を削減し、GT性能をさらに向上させることが可能と考える。

#### 文献

- (4.8-1) Satoshi Hada, et. al, “Evaluation and future trend of large frame gas turbines. A new 1600 degree C, J class gas turbine”, 2012, Proceeding s of ASME TurboExpo2012,GT2012-68574

### 5. 開発プロジェクト案の策定に向けて

#### 5.1 海外における GTCC の調整力向上の技術開発動向と特許調査

海外（GE、シーメンス）でも調整力向上のための GTCC の開発が進んでいるため、海外の動向も視野に入れ、海外の知財、特許調査を行った。

GTCC の調整力向上のためには急速起動化が必要となるため、過去 5 年間を対象に「急速」「起動」「リスタート」といったキーワードで特許調査を行い、ガスタービン本体制御、ボトミング、クリアランス制御・漏れ低減の 3 つのカテゴリーに分けて整理を行った。

##### 5.1.1 ガスタービン本体制御

GE より 5 つの特許が出願されていた（図 5.1-1）。1 つ目は急速起動時のサージ回避のための IGV 開度や、燃焼器のエミッション調整のための燃焼パラメー

タを計算し、この計算に基づいて GT 出力制御を行うというものであった。2 つ目は急速起動時の高圧圧縮機の温度調整のため、低圧圧縮機出口空気の一部を中間冷却するというものであった。残り 3 つは加圧した空気や燃料を貯蔵しておき、急速起動・出力増大が必要なタイミングで用いるというものであった。

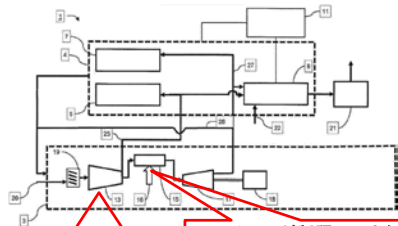
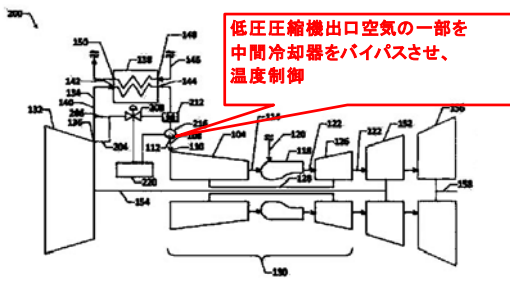
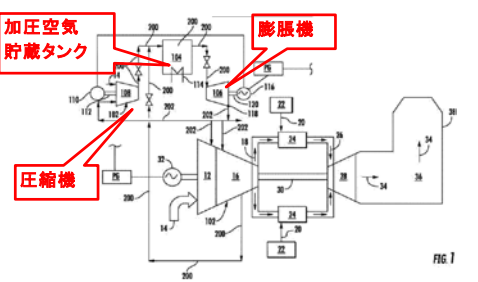
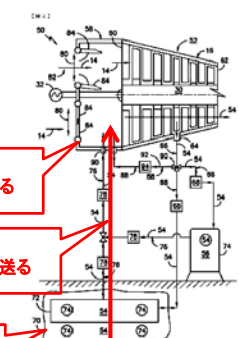
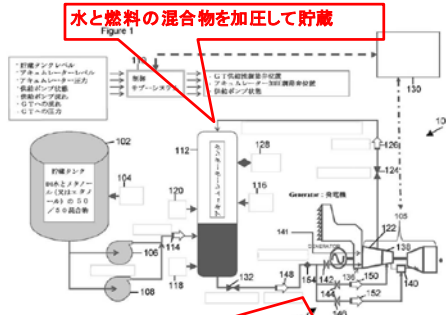
公開番号	特開2013-108493	公開番号	特開2016-148330
名称	柔軟な負荷のもとでタービンシステムの運転を最適化...	名称	中間冷却ガスタービンエンジンの入口空気温度を制御...
出願日	2012.11.13	出願日	2016.02.05
出願人	ゼネラル・エレクトリック	出願人	ゼネラル・エレクトリック
権利化	登録(権利有):特許第6205118号	権利化	未審査請求
概要	GT出力制御方法で、目標出力となる圧縮機流量係数、燃焼器エミッションを計算し、これらが制限値を超える場合は、制限値を満たす圧縮機パラメータ(IGV角度等)、燃焼器パラメータ(燃空比等)を計算して、計算したパラメータに運転状態を変化させる。	概要	急速起動時等、高圧圧縮機入口空気の温度を上昇させる必要がある場合に、低圧圧縮機出口空気の一部を中間冷却器をバイパスさせ、温度制御、高圧圧縮機
 <p>サージに入らないIGV角度等の圧縮機パラメータを計算</p> <p>エミッションが制限以下となる燃空比等の燃焼器パラメータを計算</p>		 <p>低圧圧縮機出口空気の一部を中間冷却器をバイパスさせ、温度制御</p>	
公開番号	特開2017-20505	公開番号	特開2014-206162
名称	ガスタービン出力増大システム	名称	ガスタービン出力を増強するためのシステム及び方法
出願日	2016.07.04	出願日	2014.04.07
出願人	ゼネラル・エレクトリック	出願人	ゼネラル・エレクトリック
権利化	未審査請求	権利化	通常審査中
概要	圧縮機、加圧空気貯蔵タンク、膨脹機で構成される補助ガスタービンを持つ。通常、加圧空気貯蔵タンクに空気を貯蔵しておき、系統周波数低下時に膨脹機を駆動して発電する。補助ガスタービンは主ガスタービンの起動にも用いることができる。	概要	圧縮空気を地下に貯蔵し(CAES)、貯蔵した圧縮空気をを用いて、起動、出力増大する。
 <p>加圧空気貯蔵タンク</p> <p>膨脹機</p> <p>圧縮機</p>		 <p>起動時は吸気部のハッチを閉じる</p> <p>起動時は貯蔵された圧縮空気を吸気部に送る</p> <p>圧縮空気を地下に貯蔵、起動時、出力増大時に利用</p>	
公開番号	特開2014-159808		
名称	ガスタービンの不足周波数応答改良システム...		
出願日	2014.01.22		
出願人	ゼネラル・エレクトリック		
権利化	通常審査中		
概要	電力不足時等に加圧して貯蔵した水と燃料の混合物をGTに供給、出力増大。		
 <p>水と燃料の混合物を加圧して貯蔵</p> <p>電力不足時等に貯蔵した混合物を供給、出力増大</p>			

図 5.1-1 ガスタービン本体制御に関する海外メーカーによる特許例

### 5.1.2 ボトミング

シーメンスより3本の、GEより1本の特許が出願されていた(図5.1-2)。シーメンスからは、急速起動時や負荷変動時の排熱回収ボイラ(HRSG)の温度調整のための水噴射、熱電変換発電機のボトミングとしての使用、GT/ST間の軸ねじれの制御パラメータへの使用といった特許が出願されていた。GEからはHRSGを加熱気体でパージすることで再起動を速やかに実施するという特許が出願されていた。

公開番号	特表2016-528417, WO2014/202384	公開番号	特表2014-524543, WO2013/026702
名称	ガス・蒸気タービン設備の煙道ガス路の内部への水の噴入を制御...	名称	ガスタービン装置、発電所および該発電所の運転方法
出願日	2014.06.04	出願人	シーメンス
出願日	2016.09.23	出願人	シーメンス
権利化	登録(権利有):特許第6193486号	権利化	登録(権利有:審判完):特許第6008966号
概要	急速起動時等、HRSGの温度上昇時にHRSGの排ガス内に水を噴射、温度上昇を抑制する。水噴射量は煙道ガス温度で制御する。	概要	熱電変換発電機をGTのボトミングとして利用。熱容量が小さく、急速で負荷追従、起動が可能。
公開番号	特表2017-512276, WO2015/124332	公開番号	特開2013-92146
名称	蒸気タービンとガスタービンを所望の差分角度で結合する方法	名称	排熱回収ボイラを動作させるシステム及び方法
出願日	2015.01.15	出願人	シーメンス
出願日	2012.10.23	出願人	ゼネラル・エレクトリック
権利化	通常審査中	権利化	未審査請求によるみなし取下
概要	一軸GTCCにおいて、GT/ST間の軸のねじれを検出して制御に利用する。	概要	HRSGを加熱した気体でパージする。HRSGの温度を高く維持しつつ、未燃分をパージすることにより、次の起動を速やかに実施することができる。

図 5.1-2 ボトミングに関する海外メーカーによる特許例

### 5.1.3 クリアランス制御・漏れ低減

急速起動を行うことで過渡的にクリアランスが詰まってしまうため、重接触回避のため組立クリアランスを通常よりも広く設計する必要があるが、こうした設計は性能低下の原因となるため、シーメンス、GEよりクリアランス制御や漏れ流量低減についての特許が出願されていた(図5.1-3)。シーメンスからはアブレイダブルコーティングを利用した漏れ流量低減の特許2本と弾性変形を利用した漏れ流量低減の特許1本が出願されていた。GEからは、燃料加熱

に使用した冷却空気を用いたケーシング冷却によるクリアランス制御や、二重ケーシング構造を利用した重接触回避の構造、最適クリアランスの設計方法についての特許が出願されていた。

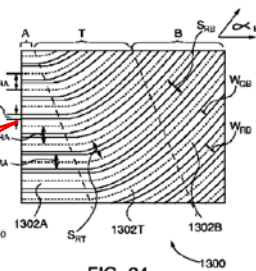
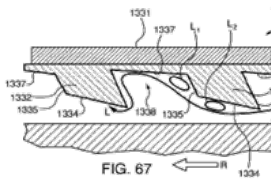
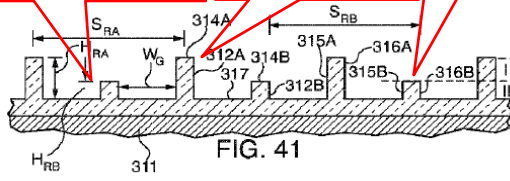
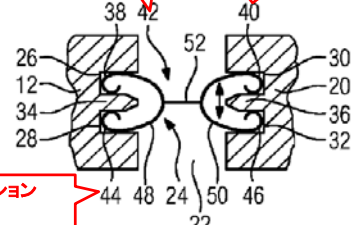
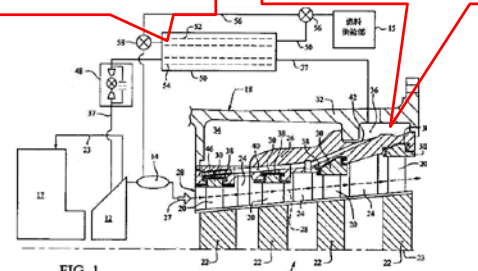
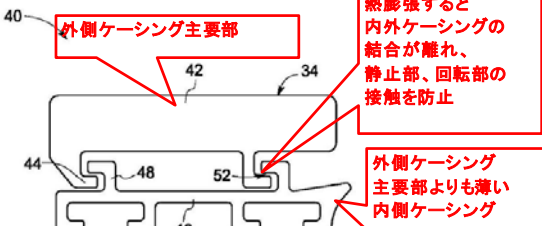
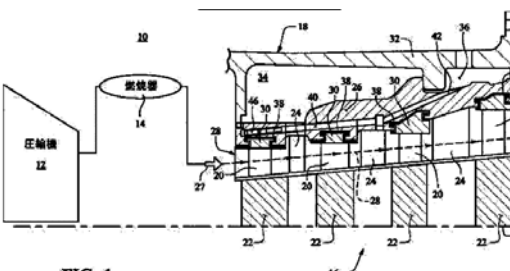
公開番号	特表2017-509821, WO2015/130524	公開番号	特表2017-508917, WO2015/130520
名称	タービンエンジン	名称	・・・タービンアブレイダブル層
出願日	2015.02.18	出願日	2015.02.18
出願人	シーメンス	出願人	シーメンス
権利化	登録査定(最新審査中間C参照)	権利化	登録(権利有): 特許第6223589号
概要	<p>アブレイダブル部材に溝パターンを設け、漏れ間隙を複雑な形状として漏れ低減。</p>  <p>【図67】</p>  <p>FIG. 64</p> <p>FIG. 67</p> <p>アブレイダブル部材に溝パターンを設ける</p> <p>漏れ間隙が複雑な形状となり漏れ低減</p>	<p>アブレイダブル部材が複数の高さの峰を持ち、標準起動モードでは高い峰のみが、急速起動モードでは低い峰の少なくとも一部が削れることにより、標準、急速起動モードの両方で適切なクリアランスが得られる。</p>  <p>FIG. 41</p> <p>アブレイダブル部材が高さの異なる峰を持つ</p> <p>標準起動モードでは高い峰のみが削れる</p> <p>急速起動モードでは低い峰の少なくとも一部が削れる。</p>	
公開番号	特表2016-512865, WO2014/146955	公開番号	特開2015-200307
名称	間隙を密封するためのシール要素	名称	燃料加熱を利用するクリアランス制御・・・
出願日	2014.03.12	出願日	2015.04.01
出願人	シーメンス	出願人	ゼネラル・エレクトリック
権利化	拒絶査定(1年未満・最新審査中間C参照)	権利化	未審査請求
概要	<p>可撓性の高いシール構造を実現し、シール性、耐久性を高める。</p>  <p>FIG. 2</p> <p>2つの平行セクションの組の間に中央領域を持つ</p> <p>平行な2つのセクション 40/46を持つ</p> <p>平行な2つのセクション 38/44を持つ</p>	<p>燃料と熱交換し、温度が低下した冷却空気をケーシングに供給、クリアランス制御。</p>  <p>FIG. 1</p> <p>冷却空気を燃料と熱交換</p> <p>温度が低下した冷却空気をケーシングに供給、クリアランス低減</p>	
公開番号	特開2015-55250	公開番号	特開2015-75106
名称	回転機械のためのクリアランス制御・・・	名称	ガスタービンエンジンにおける受動的クリアランス制御・・・
出願日	2014.09.09	出願日	2014.10.01
出願人	ゼネラル・エレクトリック	出願人	ゼネラル・エレクトリック
権利化	通常審査中	権利化	通常審査中
概要	<p>外側ケーシング主要部よりも薄い内側ケーシングを持ち、内側ケーシングが外側ケーシングよりも短時間で熱膨張することにより、内外ケーシングの結合が離れ、静止部、回転部の接触を防止、急速起動を可能とする。</p>  <p>FIG. 1</p> <p>外側ケーシング主要部</p> <p>内側ケーシングが熱膨張すると内外ケーシングの結合が離れ、静止部、回転部の接触を防止</p> <p>外側ケーシング主要部よりも薄い内側ケーシング</p>	<p>静止部およびロータそれぞれの半径方向熱膨張速度を見積もるステップと、計算した熱膨張速度から、クリアランスを見積もるステップと、見積もったクリアランスに基づいて、静止部またはロータの質量または表面積を決定するステップを含む、タービン設計方法。</p>  <p>FIG. 1</p>	

図 5.1-3 クリアランス制御・漏れ低減に関する海外メーカーによる特許例

## 5.2 開発プロジェクト案の概要

本エネ環研究においては、再エネ電源と共存し系統安定と CO<sub>2</sub> 排出量削減を両立する火力発電プラントの早期実現に向けて、鍵となる要素技術開発にいち早く着手し、本格的な要素研究フェーズに進める目処を得る成果を獲得した。それらを踏まえて、各研究項目において今後必要となる検討項目を、以下のとおり整理した。

### 研究項目 A. 急速起動・急速負荷変動対応大型ガスタービン複合発電システムの概念設計

- ①プラントシステムの全体性能評価  
⇒ 蒸気系についての概念設計も含めた詳細検討
- ②高負荷変化率に対応した GT/燃焼器制御技術の検討  
⇒ タービン効率算出にクリアランスの変化を加味した排ガス温度モデルの精緻化，IGV 超開の制御高度化，GTCC としての評価
- ③燃焼器の急速負荷変動時における逆火リスク評価技術の開発  
⇒ 逆火が発生しない燃焼器制御技術の確立

### 研究項目 B. ロータ・動翼の軽量化技術の基礎検討

- ④超軽量精密鋳造タービン動翼の概念設計  
⇒ 薄肉軽量翼の試作
- ⑤軽量・高強度耐熱新材料の適用化検討  
⇒ 実機使用環境を想定した材料特性データの取得
- ⑥圧縮機・タービンの急速起動時における構造熱変形と流れとの関係に関する連成解析  
⇒ 下記⑦⑧の詳細検討と構造の最適化

### 研究項目 C. 部分負荷運転時の効率向上に向けた翼周りの可変機構制御技術の検討

- ⑦軽量・高レスポンスロータコンセプトの検討  
⇒ レスポンスと長寿命を両立する構造の検討
- ⑧部分負荷運転時の効率向上に向けたケーシングの温度制御技術の検討  
⇒ 高応答クリアランス制御技術の確立

開発ステップとしては、本先導研究結果を踏まえた要素研究フェーズを経て、実機による実証研究フェーズに進む。要素研究フェーズにおいては、上記課題の解決に向けた燃焼技術、制御技術、冷却・シール技術、空力技術、数値解析技術、材料技術などの開発を行う。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、ユーザにとって設備信頼性とコスト削減を両立させる上で重要となる、合理的な設備保守技術の開発研究にも取り組むことが必要である。

実証研究の推進は、スピード感と開発コスト低減の観点から、実証機を新規

に設計・設置して行うのではなく、既存設備のレトロフィットにより、先行エネルギー研究で目標性能を設定した起動時間、出力変化速度、最低負荷、部分負荷効率のできる部分から、段階的に性能実証を進めることが有効と考える。2020年代には1990年代後半以降に運開した1300℃級GTによるGTCCのリプレース時期を迎えることから、研究成果の反映が大いに期待できる。

## 6. 結び

本先導研究「機動性に優れる広負荷帯高効率GTの開発」において、再エネルギーと共存しシステムの安定運用とCO<sub>2</sub>排出量の削減を両立するGTCCの早期実現に向けて、その鍵となる要素技術開発にいち早く着手し、急速起動や負荷変動への対応など機動性を向上するGTの設計コンセプトを明確にした。来るべき低炭素社会に向けて、再エネルギーと共存するGTCC設備を実現するための技術課題を踏まえて、要素研究・実証研究と引き続き着実に研究開発を進めていく所存である。

なお、GTは幅広い燃料に対応可能であり、更なるCO<sub>2</sub>排出量の削減に向けて、将来的には余剰再エネルギーから製造された水素をLNGと混焼、あるいは水素専焼のGTの実用化も想定できる。システム安定への貢献や広い負荷帯での高効率運転などの効果の視点から、ここで開発する技術の適用は可能であり、将来にわたり活用される重要な技術開発と考える。

契約管理番号	1 7 1 0 0 3 5 8 - 0
--------	---------------------

契約管理番号	1 7 1 0 0 3 5 9 - 0
--------	---------------------

## 添付資料 3)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外 国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	三菱重工業 株式会社	PCT/JP2021/013809	PCT	2021/3/31	出願	ガスタービンの燃焼器、 及び、ガスタービン	福場信一,他

(Patent Cooperation Treaty: 特許協力条約)



【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	高橋徹、渡邊泰、渡辺和徳	電中研	機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電システムの検討	火力原子力発電、Vol.70、No.3	有	2019.3.20
2	Keita Yunoki, Ryoichi Kurose	MHI 京都大	Numerical Simulation of CO Concentration on Flame Propagation in the Vicinity of the Wall-Validity of Non-Adiabatic FGM Approach	International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems	有	2020.6.11
3	Keita Yunoki, Ryoichi Kurose	MHI 京都大	Numerical simulation of CO formation and reduction on flame propagation due to heat loss through the cooled wall	Energy	有	2021.7.1
4	Keita Yunoki, Ryoichi Kurose	MHI 京都大	Prediction of CO emissions in turbulent super lean premixed combustion under pressurized conditions using an LES/non-adiabatic FGM approach	International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems	有	Accept

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	渡辺和徳	電中研	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開発プロジェクト	第 46 回日本ガスタービン学会定期講演会	2018/10/11
2	高橋徹、渡邊泰、渡辺和徳	電中研	機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電システムの検討	平成 30 年度火力原子力発電大会	2018/10/25
3	Keijiro Saitoh	MHI	MHPS Gas Turbine Technologies and Strategies for a Low-Carbon Society with Hydrogen-fired Combustion	KEPCO GT Conference 2019	2019/6/4
4	Toshinori Watanabe	東京大	Flexible Gas Turbines for the Renewable Age	SUPEHR'19	2019/6/4
5	Keita Yunoki, Reo Kai, Shinpei Inoue, Kento Konish, Ryoichi Kurose	京都大 MHI	Numerical simulation of CO concentration on flame propagation in the vicinity of the wall	IGTC2019	2019/11/17
6	岡崎公宣	大阪大	火炎冷却に伴う CO 生成過程の計測	第 57 回燃焼シンポジウム	2019/11/20
7	岡崎公宣、芳中雅毅、森本巖、林潤、堀司、赤松史光	大阪大	一次元層流火炎の冷却に伴う CO 生成過程の計測	日本機械学会 関西支部第 95 期定時総会講演会	2020/3/12
8	中村大樹、姫野武洋、渡辺紀徳	東京大	流体-熱-構造連成解析による軸流圧縮機動翼の運転時挙動の検討	第 48 回日本ガスタービン学会定期講演会講演	2020/10/15
9	柚木啓太、黒瀬良一	MHI 京都大	LES with non-adiabatic FGM approach for prediction of CO emission in premixed combustion	第 48 回日本ガスタービン学会定期講演会講演	2020/10/15
10	北野裕太郎、石破滉也、吉田舜一郎、森本巖、林潤、堀司、赤松史光	大阪大 MHI 京都大	昇圧環境下での空気希釈を伴う予混合火炎の CO 生成過程の計測	第 58 回燃焼シンポジウム	2020/12/4
11	北野裕太郎、石破滉也、森本巖、林潤、堀司、赤松史光	大阪大	2 光子吸収レーザー誘起蛍光法を用いた昇圧環境下で空気希釈を受ける乱流予混合火炎の CO 計測	日本機械学会 関西支部第 96 期定時総会講演会	2021/3/18
12	Yutaka Watanabe, Toru Takahashi, Kojun Suzuki	電中研	Performance Analysis and Dynamic Simulation of Large-Scale Gas Turbine Combined Cycle Power System with Rapid Start-up and Ramp Rate	GPPS Chania20 Technical Conference	2020/9/7

13	渡邊泰、高橋徹、 鈴木晃純	電中研	動特性解析によるガスタービン複合 発電システムの急速負荷変化時の 運用性評価	日本機械学会年 次大会	2020/9/14
14	鉄井利光	NIMS	新 TiAl 合金での小型鍛造動翼試 作と特性評価	第 48 回日本ガス タービン学会定期 講演会講演	2020/10/14
15	吉葉史彦、高橋 徹、 渡辺 和徳	電中研	部分負荷運用特性を改善した GTCC の電力需給運用に及ぼす 効果の検討	第 48 回日本ガス タービン学会定期 講演会講演	2020/10/15
16	Toshinori Watanabe, Daiki Nakamura, Takehiro Himeno	東京大	Thermo-Fluid-Structure Coupled Simulation of Compressor Blade Shape during Rapid Start-Up	Asian Congress on Gas Turbines 2020 (ACGT2020)	2021/8/19
17	Yutaka Watanabe, Toru Takahashi, Kojun Suzuki	電中研	Dynamic simulation of rapid load-change on high flexible gas turbine combined cycle power plants	第 15 回動力エネ ルギー国際会議 (ICOPE-2021)	2021/10/17- 21
18	Eiji Sakai, Toshihiko Takahashi, Yuji Ozawa	電中研	Development of surrogate models for estimating transient temperature of hot gas path part	第 15 回動力エネ ルギー国際会議 (ICOPE-2021)	2021/10/17- 21
19	石破滉也、吉田舜一郎、 森本巖、林潤、堀司、 赤松史光	大阪大 京都大	2 光子吸収レーザー誘起蛍光法を 用いた昇圧環境下における空気 希釈を伴う予混合火炎の CO 生 成過程の計測	第 59 回燃焼シン ポジウム	2021/11/22- 24
20	小澤裕二、高橋徹、 茂山治久	電中研	改良 9Cr 鋼の熱疲労寿命に及 ぼす CCD 波形と温度範囲の影 響	第 59 回高温強 度シンポジウム	2021/11/25, 26

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	渡辺和徳	◇技術トピックス◇「機動性に優れる広負荷帯 高効率 GTCC の開発状況」	日本機械学会動力エネル ギーシステム部門ニューズレ ター、第 58 号	2018/5/15
2	渡辺和徳	再生可能エネルギー電源と共存する機動性に 優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電 の提案	エネルギーと動力 2018 春 季号、日本動力協会	2018/5/15
3	渡辺和徳、高橋徹	我が国のエネルギー計画に基づくガスタービン開発 と高負荷変動に対応する GTCC の課題	日本ガスタービン学会誌 2019 年 1 月号	2019/1/20
4	渡辺和徳	総論：高効率ガスタービン開発の現状と将来	電気評論 4 月号	2019/4

## 添付資料4)

火力原子力発電、Vol.70、No.3

発表年月 2019.3.20

発表者 電中研 高橋徹、渡邊泰、渡辺和徳

タイトル 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電システムの検討

# 機動性に優れる広負荷帯高効率GTCCシステムの検討

(Study on High Flexible GTCC Contributing to Stability of Electric Power Systemon)

高橋 徹\*・渡邊 泰\*・渡辺 和徳\*  
(T. Takahashi) (Y. Watanabe) (K. Watanabe)

出力の不安定な太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギー電源の大量導入時における負荷変動対策のひとつとして、機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電システムの研究開発を進めている。本報では、本研究開発に至る経緯や、目標性能を実現するためのシステム構成・条件について検討した内容について報告する。

Enhancing flexibility of GTCC is one of the most effective measure to compensate for unstable outputs of renewable energy generation systems such as solar power and wind power. Therefore, study and development of high flexible GTCC has been carried out. In this paper, we will show the background and process to this study, results of examining the system configurations and conditions to achieve development goals of the GTCC.

## 1. はじめに

2030年のエネルギーミックスや2050年のCO<sub>2</sub>排出量の大幅削減の実現に向けて、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー電源（以下、再エネ電源）を最大限導入することが、国の方針として示されている<sup>(1)</sup>。しかしながら、再エネ電源の出力は天候に大きく影響を受けるため基本的に不安定な電源であることから、電力システムを安定的に運用するためには、負荷変動対策が重要な課題となる。

現状では、機動性の良い揚水発電や火力発電が重要な役割を果たしているが、再エネ電源の大量導入時代に備えて、さらなる負荷変動対策が必要である。その方策のひとつとして、機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電システム（以下、高機動GTCC）の研究開発を進めている。

## 2. 本技術開発の背景

### 2.1 高機動GTCCの必要性

再エネ電源の大量導入による負荷変動の対策として、再エネ電源の出力予測技術の向上や、蓄電池など電力貯蔵技術の開発などが進められているが、前者においては予測精度の向上、後者においてはコスト低減、電力の充放電損失改善、大容量化など、解決すべき課題は多い。

また、電力システムにおいては、電力量のバランスだけでなく、周波数や電圧等を安定化させる必要がある。そのためには、火力発電のような同期機は不可欠な電源である。さらに、火力発電は燃料を供給する限りいつでも発電できることから、電力の安定供給、品質を維持する要と位置づけても過言ではない。

将来的には負荷変動対応の重要性が高まり、火力発電設備には頻繁な起動停止や急激な負荷変動を伴う部分負荷での運転が求められることが予想される。その結果、熱効率が低下し、火力機1台から排出される出力1 kWhあたりのCO<sub>2</sub>排出量（単機あたりの排出原単位）が増加することが懸念されており、電力システムの安定運用とCO<sub>2</sub>排出量削減の両立が課題となる。

火力発電設備の中でもLNGを燃料とするGTCCは、高効率かつクリーンであり、さらに機動性に優れる特長を持つ。技術開発により、起動時間や出力変化速度などの機動力をさらに向上させると共に、幅広い負荷帯で高効率なGTCCを実現できれば、図1に示すように、再エネ発電の予測外れへの対応やインバランスの解消、さらにはCO<sub>2</sub>排出量削減にも貢献できる。したがって、再エネ電源の受け入れ拡大のための現実解として有望であると考えられる。

\*一般財団法人電力中央研究所

(Central Research Institute of Electric Power Industry)

原稿受付 平成31年1月15日

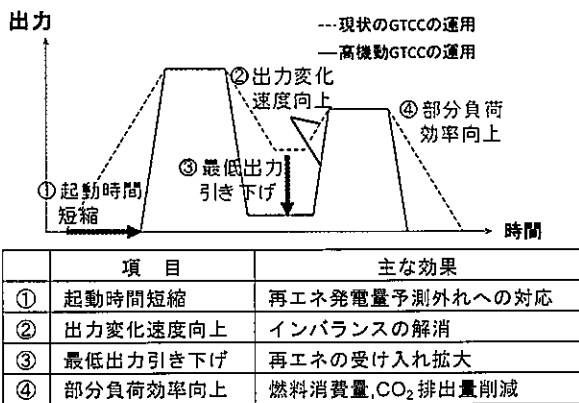


図1 GTCC機動性向上による効果

### 2.2 高機動GTCCの開発に至る経緯

(公社)日本ガスタービン学会に設けられた産官学連携委員会のワーキンググループである「ガスタービンを考える会」において、ガスタービン(以下、GT)の将来像についての議論がなされており、上記背景を踏まえて、機動力を向上させた先進GT開発のプロジェクト立ち上げに向けた検討が行われた。そこでの検討結果を取り纏め、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、NEDO)の2014-2015年度エネルギー・環境新技術先導プログラムに「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」(以下、先行エネ環研究)を応募し採択された。その中で、現状性能をさらに向上させた急速起動・負荷変動対応型GTの開発に向けたフィージビリティスタディを行い、表1に示すような2030年に実現すべき性能目標を取り纏めると共に、技術開発課題を示した<sup>(2)</sup>。

表1 高機動GTCCの開発目標

	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
開発目標	10分	20%/分	-10%	10% (一軸式)
(参考) 現状性能	60分	5%/分	-15%	45%程度

その後、2016年度に実施されたNEDO調査研究「再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定化における火力発電の役割とガスタービンの負荷変動吸収能力の向上によるCO<sub>2</sub>削減効果に関する調査研究」において、系統の安定性、CO<sub>2</sub>排出量の削減、運用コスト削減等の観点から、再エネ電源の負荷変動対策においてGTに求め

られる役割や性能を検討した。そこでは、2030年のエネルギーミックスを基に、東北エリアと九州エリアを対象にした電力需給シミュレーションにより、図2に示すように、表1のGTCCの性能向上によって、電源構成(各電源の発電量比率)の変化を得ると共に、図3に示すCO<sub>2</sub>排出量削減効果や運用コスト低減効果、さらには再エネ電源の出力に対する予測外れ時に生じるインバランスの低減効果などについて、定量的に明らかにした<sup>(3)</sup>。

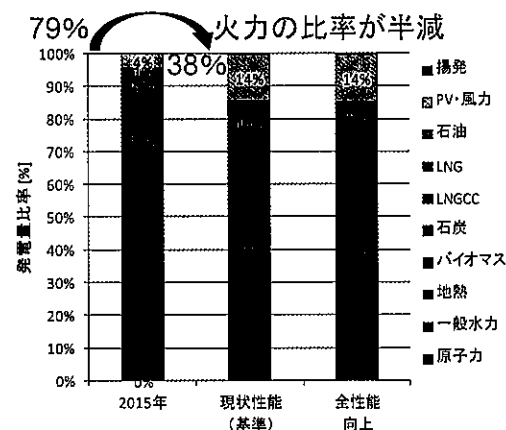


図2 電力需給シミュレーションによる東北エリアにおける各電源の発電電力量比率

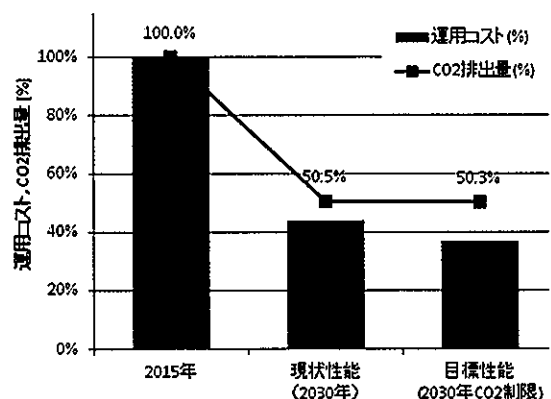


図3 電力需給シミュレーションによる九州エリアにおける運用コストとCO<sub>2</sub>排出量

2017年度には、大型GTの本格的な開発国プロの実現に資するため、(一財)電力中央研究所(以下、電中研)を取り纏め役とし、三菱重工業(株)(以下、MHI)、東京大学、京都大学、(国研)物質・材料研究機構で再度NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム(以下、2017年度エネ環研究)を実施した<sup>(4)</sup>。本研究では、設計コンセプトの明確化と共にGT要素研究の一部にも着手した。研究項目と主な成果の概要は以下の通りである。

研究項目A：急速起動・急速負荷変動対応大型ガスタービン複合発電システムの概念設計

- ・先行研究で設定された目標性能を達成できるシステム構成と運転条件を明確化
- ・安定燃焼および失火耐性を確保可能なGT制御コンセプトを立案
- ・数値解析により逆火事象を再現

研究項目B：ロータ・動翼の軽量化技術の基礎検討

- ・高性能冷却構造・非常常熱応力低減・軽量化を同時に実現するGT動翼コンセプトを立案
- ・軽量新材料の適用可能性の明確化
- ・翼間・回転軸内部の熱流体解析と、構造温度分布・変形の解析を強連成させる手法を開発

研究項目C：部分負荷運転時の効率向上に向けた翼周りの可変機構制御技術の検討

- ・翼環温度制御によるクリアランスコントロールのコンセプトを立案

さらに、具体的な開発プロジェクトにつなげるため、研究と並行して必要計画の策定にも取り組んだ。

### 3. システム全体性能の検討

#### 3.1 システム構成と制約条件の検討

2017年度エネ環研究の研究項目Aにおいて、システム全体としての熱効率や機動性について検討を行った。本章ではその内容を示す。

先行エネ環研究では、既存GTCCに対する動特性解析の結果、出力変化指令を現状性能の5%/分から目標の20%/分へと向上させた場合、蒸気タービン（以下、ST）の負荷追従性が劣り十分追従できなかった。したがって、運用性向上のためにはGTだけでなく、STや排熱回収ボイラ（以下、HRSG）を含めた蒸気系システムの検討の必要性が示唆された。

そこで、2017年度エネ環研究では、蒸気系システムについて各種構成や条件下での動特性解析を行い、表1に示したプラント全体の目標性能が達成できるシステム構成や条件について検討を行った。

本研究で開発目標とするGTCCは、運用性だけでなく熱効率も合わせて高い必要がある。そこで、解析対象の新規開発GTCCとして、以下を想定した。GTに関して、現状、市場投入されている最新鋭GTが1600℃級であり、それを用いたGTCCの熱効率（LHV基準）が63%を達成できている。これに鑑み、GTCCの目標熱

効率を63%とし、ボトムシングの蒸気系について各種システム構成や条件を検討することとした。

検討対象とした蒸気系システムおよびそれらの概要や特徴を表2に示す。まず、現状の事業用GTCCの蒸気系として多く用いられている、高・中・低圧の三重圧蒸気のHRSGおよびSTを有するGTCC（以下、三重圧蒸気系GTCC）を基本システムとした。また、運用性向上を念頭に蒸気系のシステム構成を単純化するため、GTを高圧力比としてGT出力を増加させる一方で、蒸気系は中・低圧の二重圧蒸気としてST出力を低下させたシステム（以下、高圧力比GTおよび二重圧蒸気系GTCC）、さらに、蒸発器のドラムを無くして貫流式とすると共に、熱効率向上のため主蒸気圧力を超臨界圧としたシステム（超臨界貫流蒸気系GTCC）について検討を行った。

解析で用いた各構成機器の機器性能値について、各システムおける温度や圧力、流量などの条件が異なる場合、機器性能値が異なることが考えられるが、今回の検討は各システムのサイクル特性を比較することを目的とするため、機器性能値はシステム間において同一とした。

表2 検討対象とした蒸気系システム

システム	システム概略	主な特徴
三重圧蒸気系	高・中・低圧の三重圧蒸気系を有するシステム	高効率GTCCとして、実績の多い蒸気系。
二重圧蒸気系	GTを高圧力比とする一方、蒸気系は中・低圧の二重圧としたシステム	GT高圧力比化によりGT出力を向上する一方、蒸気系は簡略化して運用性向上を図る。
超臨界貫流蒸気系	蒸発器を貫流式とすると共に、主蒸気圧力を超臨界圧としたシステム	蒸気系の簡略化および熱効率の更なる向上を図る。

なお、蒸気系システムにおける解析上の制約条件は下記とし、これら条件下でヒートマスマランスが成立し、目標の熱効率や運用性を達成できる機器仕様や蒸気条件、システム構成を検討した。

- ・主蒸気、再熱蒸気温度：600℃以下
- ・アプローチポイント温度差：2℃以上
- ・各伝熱面出入口ガスと水・蒸気の温度差：5℃以上
- ・HRSG出口ガス温度：85℃以上
- ・低圧蒸気タービン出口乾き度：0.9程度以上

#### 3.2 動特性解析による運用性検討

##### 3.2.1 解析方法

動特性解析は、計算機上でプラントや機器等の過渡変

化の現象を模擬することである。火力発電システムのように、物理則や化学則に従う対象では動特性は保存則に従う。これは、ある系の内部の量が下式のような時間 $t$ に関する微分方程式（保存則）で表されることを意味する。保存則から導かれる数式モデルは状態量の変化に対して広い範囲で使用できる。したがって、火力発電システムにおける起動から定格までの広い運転範囲でのシミュレーションのために、機器に対する数式モデルは、主にこのアプローチで作成する必要がある。

$$d/dt\{\text{内部の量}\} = \{\text{単位時間当たり入る量}\} - \{\text{単位時間当たり出る量}\} + \{\text{単位時間当たり内部で発生する量}\}$$

微分方程式による数式モデルを積分計算し、解を得るためには解析ツールが必要となる。電中研では、Modelica言語による物理系複合モデリング・シミュレーションツールをベースに火力発電システムに必要な動特性機器モデルや制御系モデルを開発し、また、プラント内の作動流体であるガス、水・蒸気の温度（エンタルピ）や圧力等の計算を行うための物性計算関数群を実装して、火力発電システム動特性解析ツールの構築を進めている<sup>(6)</sup>。

このツールを用いて、各種GTCCの動特性解析モデルを構築し、機器仕様を設定して各種条件下での動特性解析を行った。ただし、各構成機器について重量や容積などに関する詳細なデータが必要であるが、現状それらデータが得られる段階にないため、既存の三重圧蒸気系GTCCの値を参考とし、それら値からの相対値を設定することで解析を行った。

### 3.2.2 ガスタービンコンバインドサイクルの制御

本検討での動特性解析における制御方法は、参考文献<sup>(6),(7)</sup>を参考に以下とした。GT出力や温度制御は、燃料流量と空気流量により行なった。燃料流量は燃料弁開度により調整することで制御され、起動時における燃料プログラム制御、負荷・速度制御、また、燃焼温度の制限により高温部品を保護するための温度制御の内、低値選択により決定するとした。空気流量は圧縮機の入口案内翼（IGV）開度により吸込空気流量を調整することでGT出口ガス温度を制御した。

蒸気系システムの主な制御として、加減弁制御、タービンバイパス制御、ドラム水位制御を用いた。加減弁制御について、HRSGで発生する蒸気はGT出力（GT出口ガス温度・流量）により変化し、静定するまで時間遅

れがあるため、GT出力上昇による蒸気流量増加に伴いタービンバイパス制御と協調をとって、開度を上げていくこととした。タービンバイパス制御は、バイパス弁開度を調整することにより余剰蒸気を復水器に回収する。また、ドラム水位制御は、ドラム内の水位偏差と給水量、蒸気量を先行値として加えた3要素制御が取られ、水位を一定に制御することで蒸気流量を制御した。

一方、実プラントでは脱硝制御や補助蒸気圧力制御などもあるが、今回の検討の目的でないため、これらは考慮しなかった。

### 3.2.3 各システムの起動特性の比較

本検討では、GTCCの出力が並列から5分で定格出力に達する（GTCCの負荷変化率20%/分）起動指令（要求出力値）を与え、GTが2分でGT定格出力に到達した（GTの負荷変化率50%/分）と想定し、その際のGT出口ガス温度、流量の変化を条件として与え、STの起動特性について検討を行った。

図4に、三重圧蒸気系GTCCにおけるSTの起動特性を示す（図中、①三重圧ST）。図が示すように起動完了までおよそ20分程度を要し、現行のGTCCの30、40分程度に対して高速ではあるが、目標の5分起動のためには蒸気系についても何らかの工夫が必要であることが示唆された。

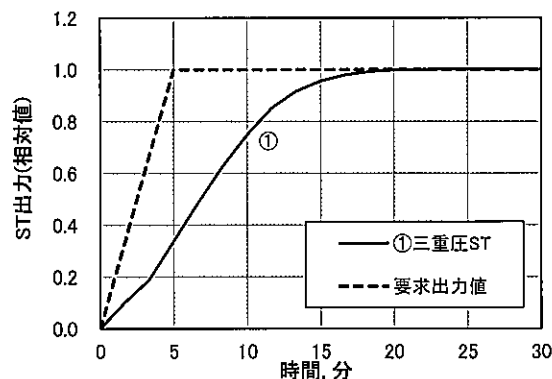


図4 三重圧蒸気系GTCCにおけるSTの起動特性

その一つの方策として、HRSGの熱容量の低減が考えられる。そこで、HRSG全体熱容量を仮に1/2にできたとした際の計算を行った。その結果を図5に示す（図中、②三重圧ST（HRSG熱容量1/2））。①三重圧STに比べて幾分高速化できたものの、定格出力まで15分程度を要し、さらなる改善が必要であることが分かる。



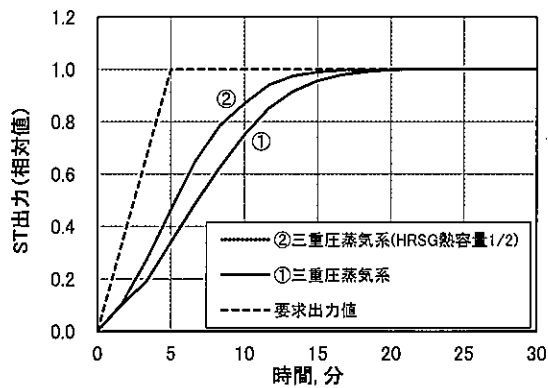


図5 三重圧蒸気系GTCCにおけるSTの起動特性 (HRSG全体熱容量を1/2としたケース)

図6に、高圧力比GTおよび二重圧蒸気系GTCCにおけるSTの起動特性を示す。IPドラム容積が三重圧蒸気系GTCCのHPドラムと同じと仮定した場合(図中、③二重圧ST)、①三重圧STよりもやや高速化できることが分かる。しかしながら、これも十分な起動時間には至らなかった。

そこで、IPドラム容積が三重圧蒸気系GTCCのIPドラムと同じと仮定した場合の解析結果を同図に付記する(図中、④二重圧ST(IPドラム容量小))。図のように、目標の起動時間には達しなかったものの、IPドラム容積を減少することでかなりの高速化が図れることが分かる。

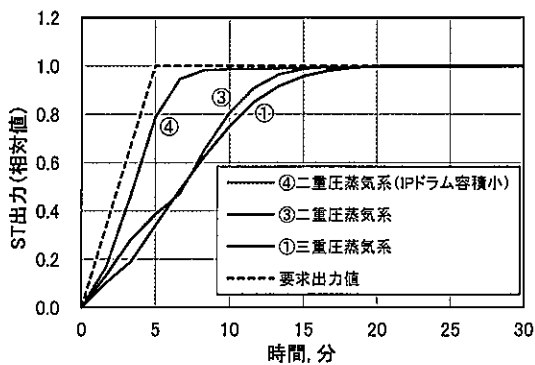


図6 二重圧蒸気系GTCCにおけるSTの起動特性

超臨界貫流蒸気系GTCCについて、超臨界圧での水から蒸気の変化過程において熱貫流率の変化挙動は複雑であり、解析のための諸条件を詳細に検討する必要があるが、今回の検討ではこれらは簡略化し、三重圧蒸気系GTCCを基本に、主蒸気系を貫流とした場合の効果についてのみ検討を行った。図7にその結果を示す。図5

で示した②三重圧ST(HRSG熱容量1/2)のケースからさらにHPドラムを貫流型に想定した場合(図中、⑤三重圧ST(HRSG熱容量1/2, HPドラム貫流))、起動時間を大きく短縮できることが分かる。

さらにIPドラムとLPドラムの容積を1/2に低減した場合(図中、⑥三重圧ST(HRSG熱容量1/2, HPドラム貫流, IP・LPドラム容積1/2))、途中の負荷帯では、負荷変化率20%/分を達成でき、起動時間を7分程度まで短縮することができた。

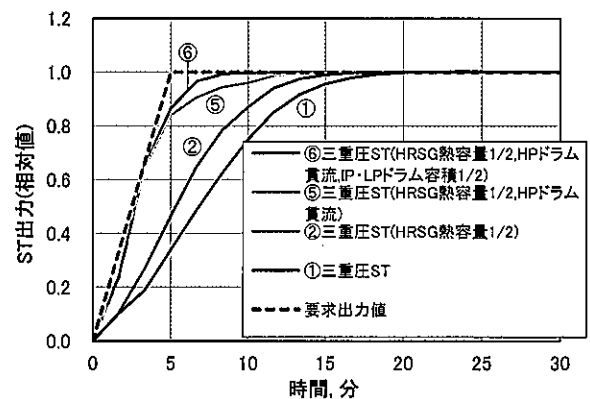


図7 貫流ボイラとしたGTCCのSTの起動特性

GTCC向けの貫流ボイラは実用化が進められている。例として、Siemens社製のBensonボイラがある。すでに実GTCCプラントで用いられており、起動時間短縮の実例があり、その有効性が示されている<sup>(8)</sup>。高速に起動可能なGTと組み合わせることでGTCC全体としての高速化を図れるものとする。

### 3.3 ヒートマスバランス解析による熱効率の検討

これら各種システムの熱効率についても検討を行った。高圧力比GTおよび二重圧蒸気系GTCCでは、三重圧蒸気系GTCCに比べて、GT出力が向上し蒸気システムの構成が簡素化できた。しかしながら、蒸気圧力が低下し、また、GT出口ガス温度の低下により蒸気温度も低下したため、図8に示すように、熱効率としては相対値で2%程度低下する結果となった。

一方、超臨界貫流蒸気系GTCCでは、三重圧蒸気系GTCCに比べ蒸気システムの構成が簡素化されると共に、蒸気圧力の向上により熱効率が相対値で2%以上高い値が得られた。また、定格負荷だけでなく部分負荷においても高効率を得られる可能性があることを示すことができた。

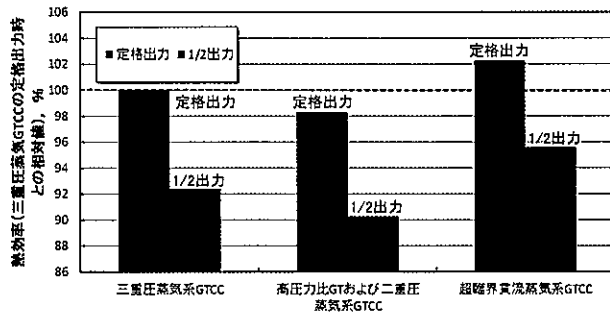


図8 各種システムの熱効率の比較

### 3.4 システム全体性能の検討結果まとめ

本章では、GTCCにおける蒸気系システムについて各種構成や条件下での動特性解析を行い、プラント全体の目標性能が達成できるシステム構成や条件を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- ・三重圧蒸気系GTCC：  
高い効率が得られ、実績も多い。目標の起動速度を得るためにはさらなる検討が必要。
- ・高圧力比GTおよび二重圧蒸気系GTCC：  
起動速度をやや向上できるが、三重圧蒸気系GTCCに比べて熱効率が低くなる。
- ・超臨界貫流蒸気系GTCC：  
三重圧蒸気系GTCCより部分負荷も含めて高効率を得られる可能性あり。貫流を想定したHRSGを用いた解析から運用性向上の可能性も見られた。ただし、その成立性や機器性能・仕様については更なる検討が必要である。

今回の検討で、GTCCの運用性向上のためには、蒸気系システムに対しても何らかの検討が必要であることが示唆された。

HRSGの熱容量低減やドラム容積の低減、特に貫流ボイラを採用することで起動特性を改善でき、目標の起動速度を達成できる可能性は高いと考える。一方で、急激な負荷変動や周波数変動等に対する耐力などの検討も必要であり、今後、蒸気系システムについても、さらに検討を行う必要がある。

## 4. おわりに

再エネ大量導入時において想定される急激かつ大きな負荷変動に対応するGTCCの技術開発は、発電事業者の投資を抑えつつ電力系統安定とCO<sub>2</sub>排出量削減を両立できる現実解として有望であり、着実に開発を進めて

おく必要があると考える。

本稿で示した取り組みを受け、本技術の要素開発が、NEDOの「次世代火力発電等技術開発」④次世代火力発電基盤技術開発に盛り込まれるに至り、2018年度より「機動性に優れた広負荷帯高効率GTCCの要素開発」が開始された。本要素開発フェーズは、MHIと電中研が実施主体となり、先行研究より抽出された技術課題も踏まえて、中核機器であるGTの機動性の向上、部分負荷効率の向上、最低負荷の低減など、負荷変動対応についての要素技術を確立し、実機に反映できる目処を付けることを目的としている<sup>(9)</sup>。

CO<sub>2</sub>排出量削減と電力系統の安定性維持のため、再エネ電源と火力発電の共生の実現に向けて、今後も研究開発に取り組んでいきたい。

## 謝 辞

3章で紹介した研究成果は、NEDOからの委託事業において、得られたものです。

また、高機動GTCCの研究開発の立ち上げに向けて議論を重ねた日本ガスタービン学会の関係諸氏、ならびに共同で先導研究を推進した各機関の関係諸氏、先導研究および調査研究における研究推進委員会の委員各位のご尽力に、心より御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- (1) 長期エネルギー需給見通し, P7, 経済産業省 (2015)
- (2) 平成27年度NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」成果報告書
- (3) 平成28年度NEDO調査研究「再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定化における火力発電の役割とガスタービンの負荷変動吸収能力の向上によるCO<sub>2</sub>削減効果に関する調査研究」成果報告書
- (4) 平成29年度NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム「機動性に優れた広負荷帯高効率GTの開発」成果報告書
- (5) 高橋徹, 中本政志, 渡邊泰, 「火力発電システム動特性解析ツールの構築」, 電力中央研究所報告 M15005, 2016
- (6) 火原協会講座37「コンバインドサイクル発電」, 火

- 力原子力発電技術協会
- (7) 火原協会講座36「計測と制御」, 火力原子力発電技術協会  
cycle-powerplants/scc5-4000f-1s/A96001-S90-A496-X-4A00.pdf>. (2018/03/2確認)
- (8) SIEMENSホームページ, <[https://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-generation/power-plants/gas-fired-power-plants/combined-](https://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-generation/power-plants/gas-fired-power-plants/combined-cycle-powerplants/scc5-4000f-1s/A96001-S90-A496-X-4A00.pdf)
- (9) NEDOニュースリリース「機動性に優れた高効率ガスタービン複合発電の要素技術開発に着手」, <[http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100996.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100996.html)> (参照日2018年11月2日)

## 添付資料 5)

Energy

発表年月 2020.6.11

発表者 京都大学 柚木啓太、黒瀬良一

タイトル Numerical Simulation of CO Concentration on Flame Propagation in the Vicinity of the Wall-Validity of Non-Adiabatic FGM Approach

Presented at International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo,  
November 17-22, Tokyo, Japan  
Review Completed on June 11, 2020

# Numerical Simulation of CO Concentration on Flame Propagation in the Vicinity of the Wall -Validity of Non-Adiabatic FGM Approach-

Keita Yunoki<sup>1,2</sup>, Reo Kai<sup>1</sup>, Shinpei Inoue<sup>1</sup>, Ryoichi Kurose<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering and Science, Kyoto University,  
 Kyoto daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, Kyoto 615-8540, Japan

<sup>2</sup> Research & Innovation Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

## ABSTRACT

To design a gas turbine combustor for low emissions, carbon monoxide (CO) generated near the cooled wall is one of the important indexes. However, the measuring of CO concentration is difficult in experiments in actual conditions of high pressure and temperature. In this study, in order to take the heat loss effect on the cooled wall into account, a non-adiabatic flamelet generated manifolds (NA-FGM) approach, which can account for the change of gas composition due to the heat loss, is applied to two-dimensional numerical simulations of premixed flame near the cooled wall and the effect of equivalence ratio variation on the CO concentration is investigated. The results show that the CO concentrations predicted for the equivalence ratio of 1.0 using the NA-FGM approach are in good agreements with those using the detailed reaction approach, and that the NA-FGM approach can adequately catch the tendency of CO generation in the vicinity of the wall with heat loss.

## NOMENCLATURE

$C$	Progress variable
$C_p$	Isopiestic specific heat
$D_h$	Thermal diffusivity
$D_Y$	Diffusion coefficient ( $D_Y = \lambda/\rho C_p$ )
$h$	Enthalpy
$p$	Pressure
$\dot{q}_{loss}$	Source term of heat loss
$R$	Gas constant
$S_L$	Laminar flame velocity
$T$	Temperature
$u$	Velocity vector
$V_k$	Diffusion velocity of chemical species $k$
$W_k$	Molecular weight
$Y_k$	Mass fraction of chemical species $k$
$Z$	Mixture fraction

## Greeks

$\alpha$	Adjustment parameter
$\delta_L$	Laminar flame thickness
$\lambda$	Thermal conductivity
$\tau$	Shear stress tensor
$\phi$	Equivalence ratio
$\rho$	Density

$\dot{\omega}_C$  Generation rate of progress variable  
 $\dot{\omega}_k$  Chemical reaction rate of chemical species  $k$

## Subscripts

$k$  Chemical species

## INTRODUCTION

Aim of a recent gas turbine development is to reduce air pollution emissions (CO, NOx and etc.) with low environmental load. In this developed combustor, premixed combustion is applied to reduce NOx emissions. For premixed combustion fields, CO emission is one of the important issues to solve at a partial load for an industrial gas turbine [1, 2]. CO emission is mainly generated at the flame front, actually reaction zone, in the combustion chamber. When CO emission is formed in the vicinity of the wall, unburned fuel and CO are prone to flow out downstream. Therefore the prediction of CO emission in the vicinity of the wall is important in order to design a low emission combustor. However the measurement of CO is difficult at actual gas turbine conditions in high temperature and pressure fields.

Computational fluid dynamics (CFD) is a powerful tool to investigate the detailed distributions of various chemical species and temperature under the complicated combustion fields. CFD has been used to support to engineers in predicting the property of flame dynamics during the combustor design process [3-9]. Prediction of CO emission with high accuracies is required consideration of the detailed reaction mechanism in general. Because this detailed reaction approach needs to pay much expensive computational cost, a number of combustion models have been proposed. Conventionally, the G equation model [10, 11] is used to calculate premixed combustion; however this model does not calculate CO concentration accurately because it calculates unburned and burned gas compositions in the equilibrium conditions. Recently, the flamelet generated manifolds (FGM) approach [12] has been used for premixed combustion, because this model considers the detailed reaction mechanism by database called flamelet library. However, the database of the conventional FGM approach does not included the effect of heat loss. The FGM approach taking heat loss effect into account is called the non-adiabatic FGM (NA-FGM) approach. Some researches have attempted to develop efficient NA-FGM approaches [12-15]. Fiorina et al. [13] and Proch and Kempf [14] have suggested the way to take the heat loss effect into account to the database and verify its applicability to the steady burner flame. Fiorina et al. [15] have performed three-dimensional large-eddy simulations and showed the improvement in the accuracy of the flame height. There are some researches employing NA-FGM approach, however, most of their studies targeted on the steady turbulent flame, and the

Presented at International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo,  
 November 17-22, Tokyo, Japan  
 Review Completed on June 11, 2020

applicability to propagating turbulent flame is not well investigated.

In this study, the validity of the NA-FGM approach to predict the CO concentration in the vicinity of the wall with heat loss is examined by comparing with those employing the detailed reaction approach, and the effect of equivalence ratio variation on the CO concentration is investigated using the NA-FGM approach.

## TURBULENT COMBUSTION MODELS

### Detailed reaction approach

The governing equations for the detailed reaction approach can be written as:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h u) = \frac{DP}{Dt} + \nabla \cdot [\rho D_h (\nabla h - \sum_k (h_k \nabla Y_k))] - \rho \sum_k (h_k Y_k V_k) + \tau : \nabla u \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_k u) = -\nabla \cdot (\rho Y_k V_k) + \rho \dot{\omega}_k \quad (4)$$

$$p = \rho RT \sum_k \frac{Y_k}{W_k} \quad (5)$$

where  $\rho$  is the density,  $u$  is velocity vector,  $p$  is pressure,  $\tau$  is shear stress tensor,  $h$  is enthalpy,  $h_k$  is enthalpy of chemical species  $k$ ,  $D_h$  is thermal diffusivity,  $Y_k$  is mass fraction of chemical species  $k$ ,  $V_k$  is diffusion velocity of chemical species  $k$ ,  $\dot{\omega}_k$  is chemical reaction rate of chemical species  $k$ ,  $T$  is temperature,  $R$  is gas constant and  $W_k$  is molecular weight of chemical species  $k$ .

### Flamelet Generated Manifolds approach

The governing equations for the FGM approach can be written as:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h u) = \frac{DP}{Dt} + \nabla \cdot (\rho D_h \nabla h) + \tau : \nabla u \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Z u) = \nabla \cdot (\rho D_Z \nabla h) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C u) = \nabla \cdot (\rho D_C \nabla C) + \rho \dot{\omega}_C \quad (10)$$

where  $\dot{\omega}_C$  is generation rate of progress variable,  $C$  is the progress variable defined as mass fraction of burned gas ( $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$  and  $CO$ ),  $D_\gamma$  is diffusion coefficient ( $D_\gamma = \lambda / \rho C_p$ ),  $\lambda$  is thermal conductivity and  $C_p$  is isopiestic specific heat.

This model needs a database called a flamelet library, which is obtained by the calculation of laminar flow flame under various conditions and generated by the calculation of a one dimensional laminar premixed flame. The governing equations for generating the flamelet library can be written as:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\rho u \frac{\partial \rho u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \dot{m}_k \quad (12)$$

$$\rho u C_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \sum_k C_p j_k \frac{\partial T}{\partial x} - \sum_k h_k \dot{m}_k \quad (13)$$

This library was generated by the calculation of a one dimensional laminar premixed flame. This library was calculated by the detailed elementary reaction calculation with the FlameMaster code [16] in combination with GRImech-3.0 [17]. This database provides all filtered scalar quantities as a function of the filtered mixture fraction  $Z$  and filtered progress variable  $C$ . Figure 1 shows an example of flamelet library for the FGM approach.

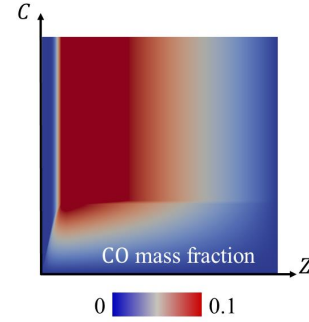


Fig. 1 An example of flamelet library for FGM approach

### Non-Adiabatic Flamelet Generated Manifolds approach

In general, flamelet library for the FGM approach is not considered with heat loss. However, flame is generated in vicinity of the cooling wall for gas turbine combustor. Therefore, we applied a NA-FGM approach [14] due to include the effect of the heat loss.

Flamelet library considered the effect of the heat loss is calculated by the eq. (11), (12) and the following equation (14).

$$\rho u C_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \sum_k C_p j_k \frac{\partial T}{\partial x} - \sum_k h_k \dot{m}_k + \dot{q}_{loss} \quad (14)$$

$$\dot{q}_{loss} = \alpha \sum_k h_k \dot{m}_k \quad (15)$$

where  $\dot{q}_{loss}$  is the source term of heat loss and  $\alpha$  is adjustment parameter. In this study, adjustment parameters from 0.0 to 0.4 were calculated every 0.05. The adjustment parameter is based on the maximum value of predicted heat loss. The maximum value of predicted heat loss was calculated by enthalpy of burnt gas at wall temperature. Figure 2 shows an example of flamelet library for the NA-FGM approach. Flamelet library for NA-FGM approach is defined three variable (mixture fraction  $Z$ , progress variable  $C$  and difference of enthalpy  $\Delta h$ ) in order to output some physical quantity. Difference of enthalpy  $\Delta h$  can be written as:

$$\Delta h = h_0 - h \quad (16)$$

where  $h_0$  is enthalpy without heat loss,  $h$  is enthalpy obtained by eq. (8).

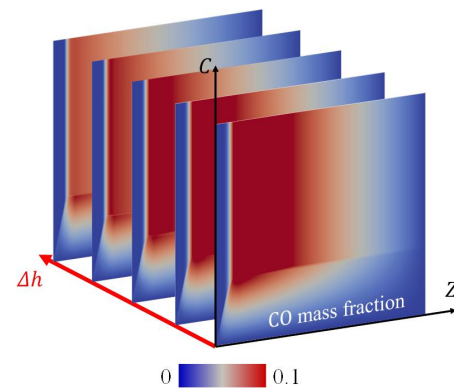


Fig. 2 An example of flamelet library for NA-FGM approach

Table 1 Calculation conditions

Equivalence ratio $\phi$ [-]	Initial pressure [atm]	Initial temperature [K]	CFD approach	
			Detailed reaction	NA-FGM
0.8	1.0	700	-	Done
1.0	1.0	700	Done	Done
1.2	1.0	700	-	Done

**DESCRIPTIONS OF CALCULATION SETUP**

In this study, two-dimensional premixed flame propagation near the cooled wall was adopted as verification object. Figure 3 shows the diagram of premixed turbulent combustion regimes [18]. According to this diagram, corrugated flamelets, thin reaction zones regime, and broken reaction zones regime are mainly recognized as a combustion configuration of the gas turbine combustor. This object can set thin reaction zones regime as calculation conditions for each equivalence ratio.

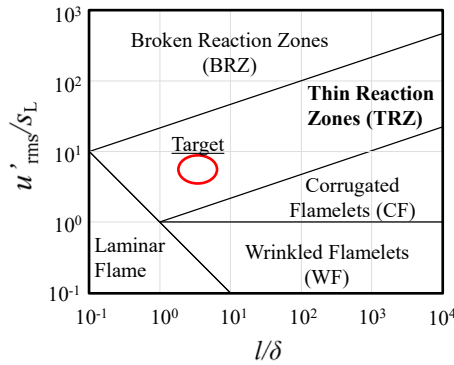


Fig. 3 Diagram of premixed turbulent combustion regimes

The schematic diagram of the calculation domain is shown in figure 4. These calculations were conducted under atmospheric pressure in two-dimensional combustion field. Calculation domain is two-dimensions rectangular (40.96 mm×5.12 mm). The x coordinate means a direction parallel to long side and the y coordinate means a direction vertical to long side. Computational grids are divided into same range (20 μm) as staggered grid. 2048 grids are set at x direction and 256 grids are set at y direction. The boundary at x direction is outlet. At the outlet boundary, the dirichlet boundary condition was imposed for pressure, with free outflow conditions being imposed for the other variables. The boundary at y direction is set the cooled wall, which is 700 K constant. A no-slip condition was used for all walls.

Table 1 lists the calculation conditions. Pressure is 0.1 MPa and temperature is 700 K (premixed fuel) as initial conditions. Gas composition is methane only. Three equivalence ratios are changed as a parameter to evaluate the sensitivity of CO concentration. For ignition in case of using the NA-FGM approach,  $C_{ign}$  (2000 K for  $Z_{st}$ ) in flamelet library is set at central position of computational domain. On the other hand, gas composition for  $Z_{st}$  and  $C_{ign}$  in flamelet library and temperature of 2000 K are set at central position of computational domain in case of using the detailed reaction approach. Simulation using the detailed reaction approach was carried out for equivalence ratio  $\phi = 1.0$  in order to compare the results with NA-FGM approach. Simulation using the NA-FGM approach is carried out for equivalence ratios  $\phi = 0.8, 1.0$  and  $1.2$ .

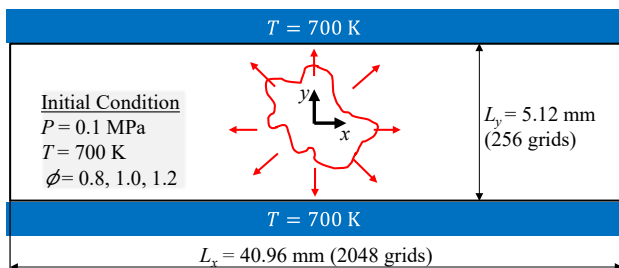


Fig. 4 Schematic diagram of the calculation domain

Presented at International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo, November 17-22, Tokyo, Japan

Review Completed on June 11, 2020

Figure 5 shows the initial turbulence fields in this study. As initial turbulence conditions, artificial turbulence fields obtained from the inverse fourier transform of an energy spectrum are applied [19]. Turbulence variance intensity, laminar flame velocity, laminar flame thickness and integral length scale are decided to become a thin reaction zones regime for each equivalence ratio.

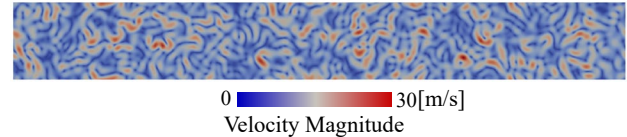


Fig. 5 Initial turbulence fields (artificial)

The Laminar flame velocity  $S_L$  was calculated by the detailed elementary reaction calculation with the FlameMaster code [16]. The laminar flame thickness  $\delta_L$  is calculated by equation (17). These parameters are calculated at 700K. Lewis number is assumed 1 in case of the NA-FGM approach. Reynolds number is approximately 50 for each equivalence ratio.

$$\delta_L = \frac{\lambda}{\rho C_p S_L} \tag{17}$$

In this study, inhouse-code FK<sup>3</sup> is used [20-23]. The spatial derivative of convective term in the momentum equation is approximated with a fourth-order central difference scheme, and a WENO scheme [24] is used to evaluate the scalar gradients. A third-order accurate SSP Runge–Kutta method [25] is adopted in time integration. Combustion behavior was calculated for 0.01 sec using CRAY: XE6 at the ACCMS, Kyoto University, with 1024 cores and 62.5 h of wall clock time in case of detailed reaction approach, and with 256 cores and 33.5 h of wall clock time in case of NA-FGM approach. CFL-number of all cases is less than 0.15. Time-step is 0.1 μsec.

**RESULTS AND DISCUSSION**

**Validation of NA-FGM approach**

Figures 6 and 7 show the instantaneous distribution of temperature, enthalpy, CO mass fraction at 800 μsec. The equivalence ratio of these results was set as stoichiometric ratio. The results using the detailed reaction approach are shown in figure 6. The results using the NA-FGM approach are shown in figure 7. In this study, high temperature region, which is more than 1500 K, is defined as flame.

Flame front structure is complicated by the effect of turbulence intensity for thin reaction zones regime. Flame reached the wall is propagating along the wall. After 800 μsec, maximum temperature 2291 K for the detailed reaction approach is similar with 2307 K for the NA-FGM approach. However, the NA-FGM approach underestimates flame reaching time at the part of calculation domain (a). This reason is that flamelet library does not consider flame stretch and unsteady flame phenomenon.

There is a difference of enthalpy for the detailed reaction approach between burned gas and unburnt gas on the line (b). The distribution of enthalpy on this line (b) for the NA-FGM approach does not agree well with the results of detailed reaction approach. However, the NA-FGM approach can reproduce the decrease in

enthalpy near the flame reaching wall.

From these points on, we confirmed the NA-FGM approach is effective for predicting the phenomenon in the vicinity of the wall.

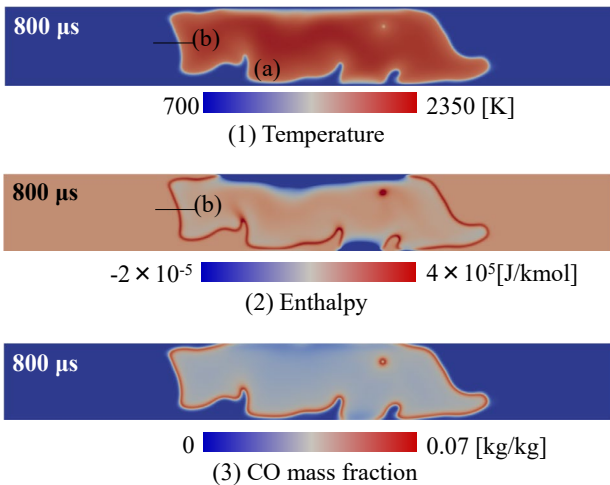


Fig. 6 Instantaneous distributions of temperature, enthalpy and CO mass fraction by detailed reaction approach at  $\phi = 1.0$

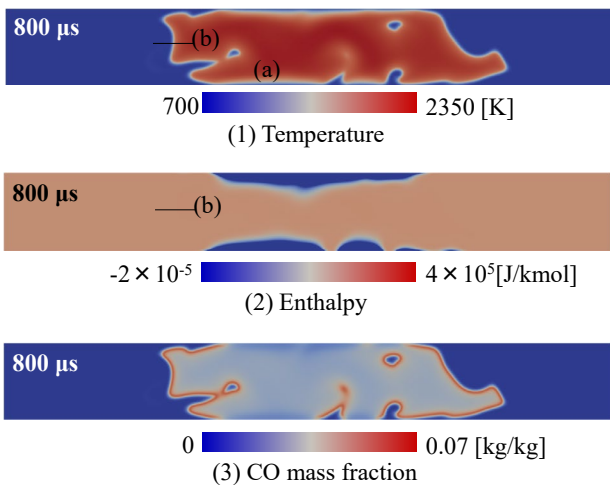


Fig. 7 Instantaneous distributions of temperature, enthalpy and CO mass fraction by the NA-FGM approach at  $\phi = 1.0$

Figure 8 shows the schematic diagram of point I, point II, line A-A' and line B-B' in order to validate CO mass fraction and heat flux in the vicinity of the wall. Figures 9 and 10 show the time series data of CO mass fraction and temperature at points I and II. The results at point I for NA-FGM approach are captured the trends of temperature and CO mass fraction when time is passing. On the other hand, at point II, the results of the NA-FGM approach need to be shifted for 300μsec due to overestimating flame propagation rate as shown figures 6 and 7. By shifting time, both of the result is match well as shown (c).

Figure 11 shows the instantaneous distribution of CO mass fraction on lines A-A and B-B. The distribution of CO mass fraction for the NA-FGM approach was compared with the results of the detailed reaction approach. On line A-A', the results using the NA-FGM approach are in good agreement with the detailed reaction approach. On the other hand, the NA-FGM approach cannot reproduce the distribution of CO mass fraction at the point (d) on line B-B'. This is caused that the turbulent flow affected to flame propagation velocity. The detailed reaction approach is not considering turbulence flow simply, so it only adheres to the upper wall surfaces. By considering the turbulent flow, the flame propagation

velocity in the upward direction and the downward direction are different as shown Fig.9 and 10. There was no significant difference in temperature and CO mass fraction between detailed reaction and NA-FGM at the upper wall (A-A) where the arrival time was fast. This is because the reaction is sufficiently advanced. On the lower wall (B-B) where the arrival time is slow, the reaction shows good agreement with the detailed reaction at the position where the reaction has progressed sufficiently ( $x=2\sim 10$  mm). However, the difference becomes large at the position where the flame has not arrived ( $x = -10\sim 2$  mm). This feature is indicated for other scalars as well as for CO.

Figure 12 shows the comparisons of the time series of maximum heat flux between detailed reaction approach and the NA-FGM approach on each wall. Since the wall heat flux affect the lifetime of the combustor, it is significance to investigate the predictability of the maximum wall heat flux. In figure 12, for the case of the NA-FGM approach, although the timing when the wall heat flux starts to increase is faster than the detailed reaction approach, the maximum wall heat flux value is approximately same as the detailed reaction approach.

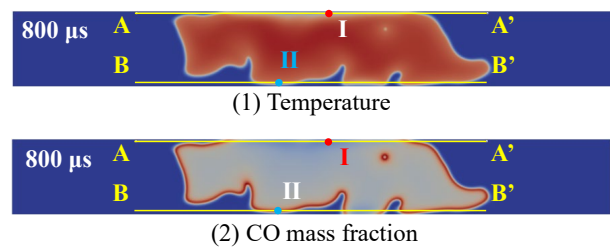


Fig. 8 Schematic diagram of point I, point II, line A-A' and line B-B',

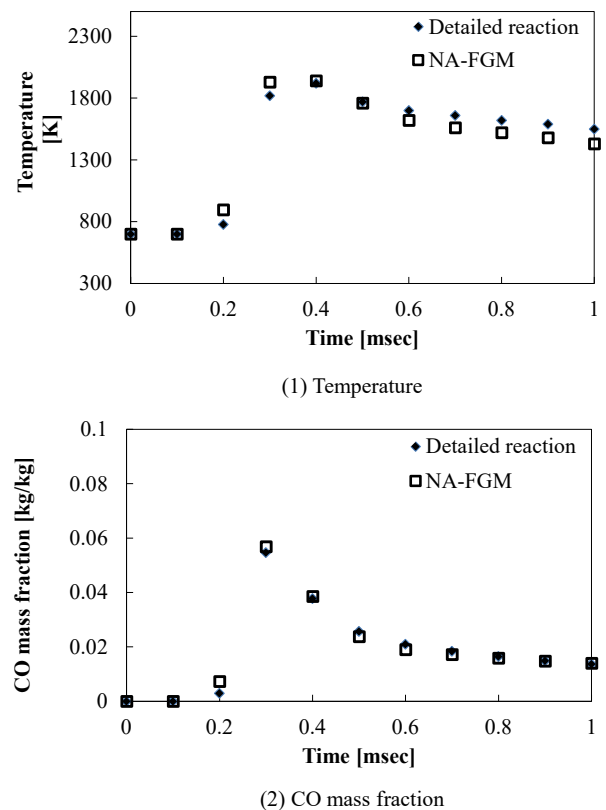


Fig. 9 Time series data of temperature and CO mass fraction at point I



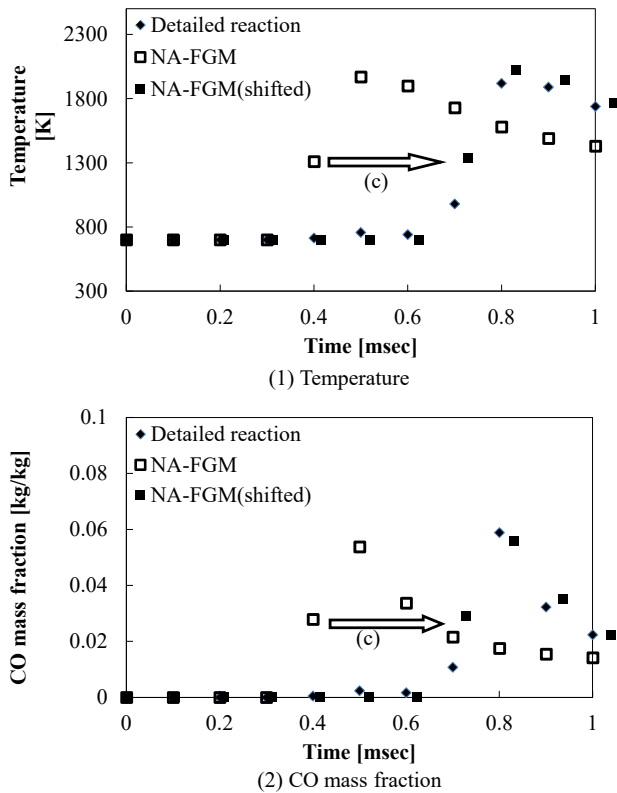
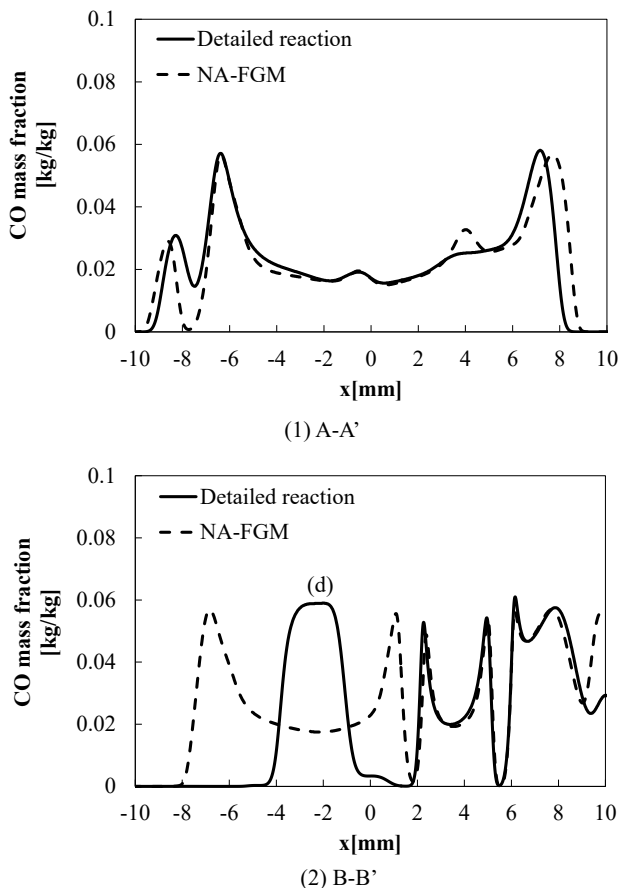


Fig. 10 Time series data of temperature and CO mass fraction at point II



Presented at International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo, November 17-22, Tokyo, Japan  
Fig. 11 Comparison of CO mass fraction between detailed reaction approach and the NA-FGM approach at  $\phi = 1.0$  on lines A-A' and B-B.

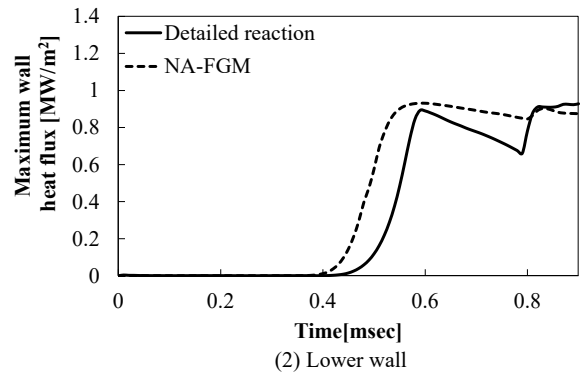
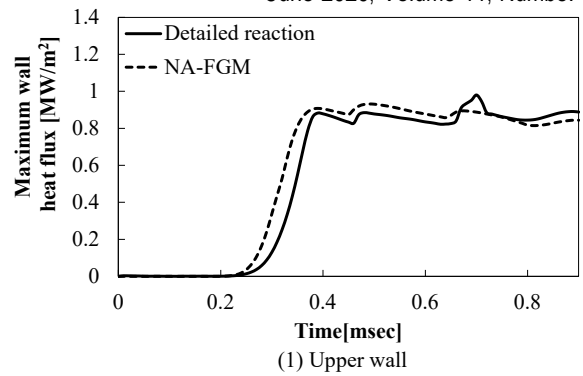


Fig. 12 Comparisons of time series data of maximum wall heat flux on the wall between detailed reaction approach and the NA-FGM approach at  $\phi = 1.0$ .

#### Effect of equivalence ratio on CO concentration

Figures 13, 14 and 15 show the time series of temperature, enthalpy and CO mass fraction distributions at each equivalence ratio. Figure 16 shows the time series of CO<sub>2</sub> mass fraction distributions at  $\phi = 1.0$ . Figure 17 shows the schematic diagram of point III. Figure 18 shows the time series of CO mass fraction at point III obtained by the NA-FGM approach. Flame propagation rate at  $\phi = 1.0$  is fastest in this study by the difference of laminar flame velocity. Flame propagation rate at  $\phi = 0.8$  is 17% slower than that at  $\phi = 1.0$ . Flame propagation rate at  $\phi = 1.2$  is 10% slower than that at  $\phi = 1.0$ . There is a little difference of enthalpy distribution at all equivalence ratio, and maximum value was changed by the quantity of heat loss at each equivalence ratio. This feature is also obtained for CO mass fraction. For lower equivalence ratio, CO mass fraction generated at flame front and flame zones is lower than higher equivalence ratio. Moreover, CO is prone to oxidize near the cooled wall. This is because CO oxidation, an exothermic reaction, is activated by decreasing temperature due to the heat loss. This is also evident from the increase in CO<sub>2</sub> as shown figure 15.

Figure 19 shows the time series of CO rate of change by heat loss at point III obtained by the NA-FGM approach. 0 msec means flame reaching time to the wall. CO rate of change by the heat loss is calculated the following equation (18).

$$\Delta Y_{CO} = \frac{Y_{CO_{NA-FGM}}}{Y_{CO_{\Delta h=0}}} \quad (18)$$

where  $Y_{CO_{NA-FGM}}$  is CO mass fraction obtained by the NA-FGM approach,  $Y_{CO_{\Delta h=0}}$  is CO mass fraction obtained at  $\Delta h = 0$ . by the NA-FGM approach.

$\Delta Y_{CO}$  peaks immediately after flame reached the wall. Then  $\Delta Y_{CO}$  is decreasing gradually as time goes by. The rate of  $\Delta Y_{CO}$  at  $\phi = 0.8$  is slower until 0.4 msec. However, the rates of  $\Delta Y_{CO}$  at  $\phi = 1.0$  and 1.2 are slower than that at  $\phi = 0.8$  after 0.4 msec. This is because the fuel is lean  $\phi = 0.8$  and oxygen is sufficiently present.

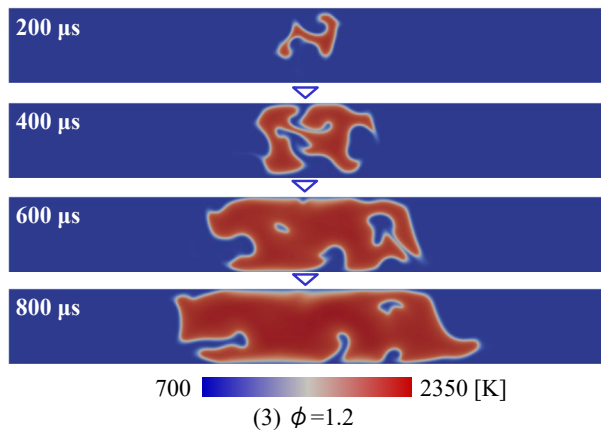
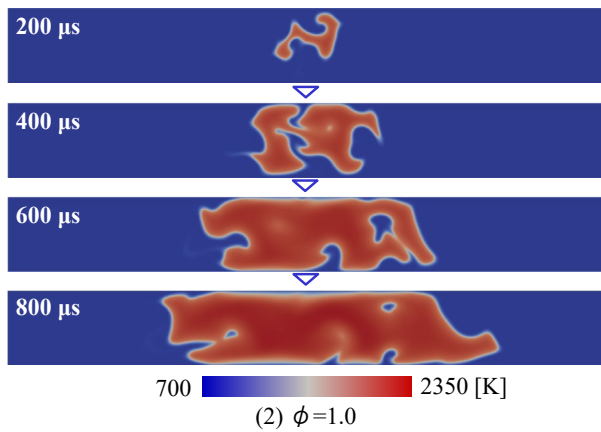
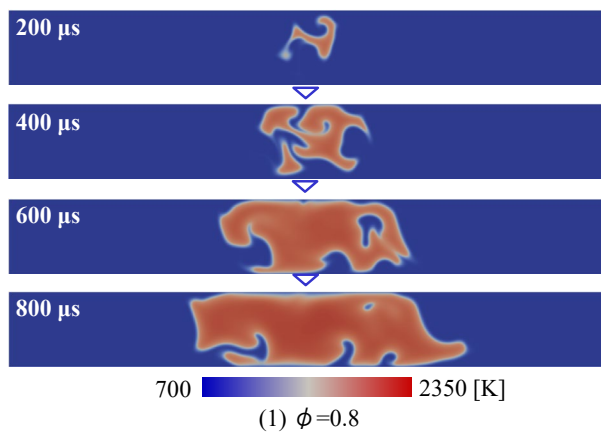


Fig. 13 Time series of temperature distributions at  $\phi=0.8, 1.0$  and  $1.2$  by NA-FGM approach

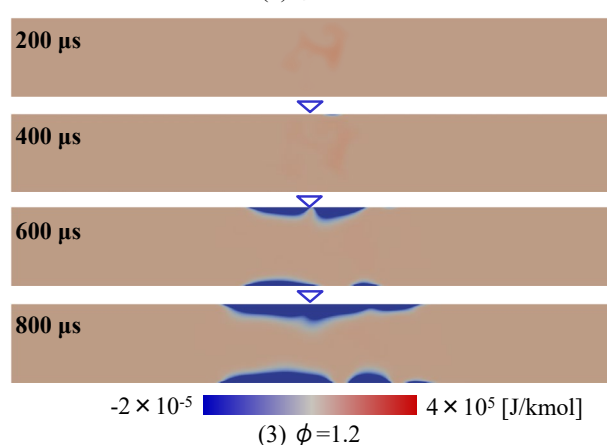
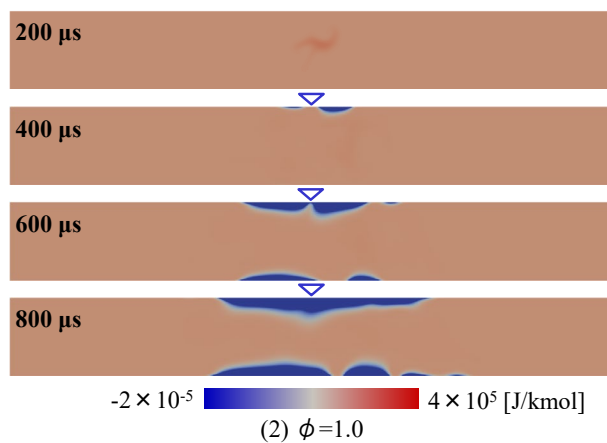
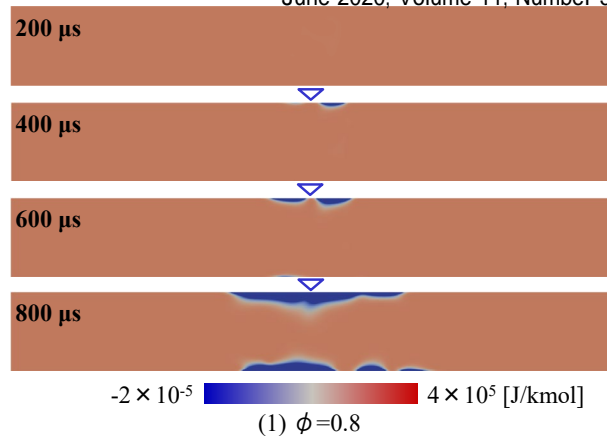


Fig. 14 Time series of enthalpy distributions at  $\phi=0.8, 1.0$  and  $1.2$  by NA-FGM approach

Presented at International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo,  
 November 17-22, Tokyo, Japan  
 Review Completed on June 11, 2020

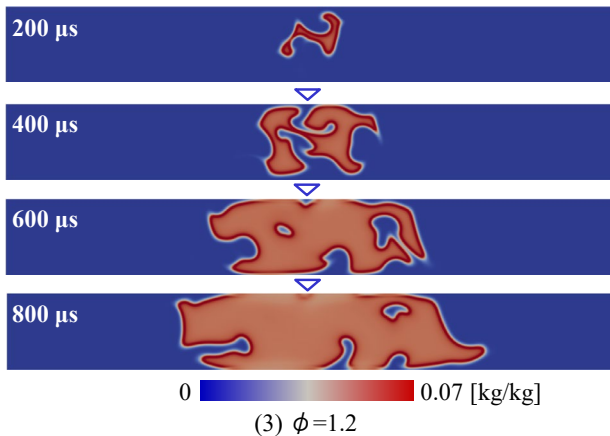
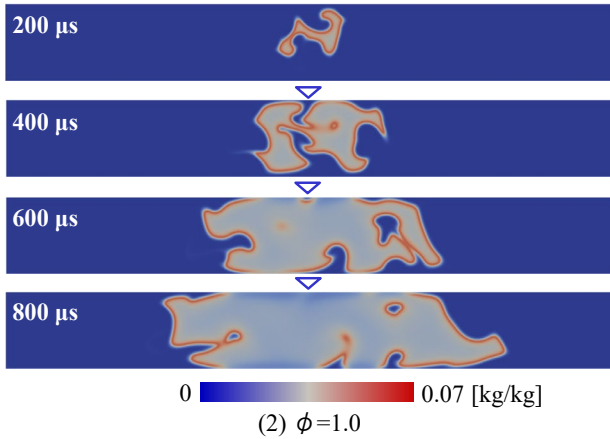
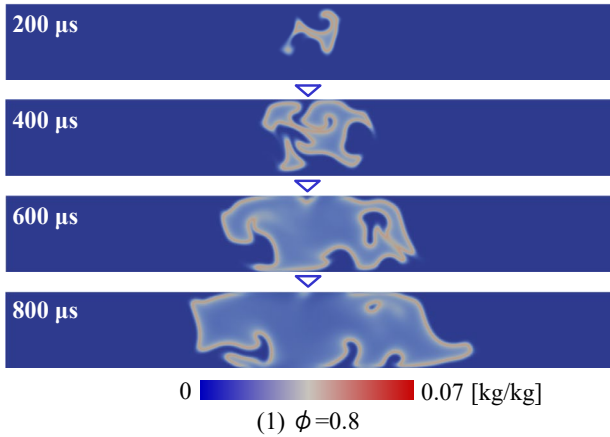
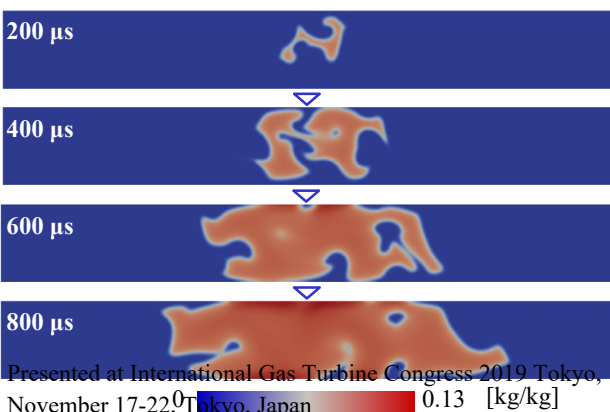


Fig. 15 Time series of CO mass fraction distributions at  $\phi=0.8, 1.0$  and  $1.2$  by NA-FGM approach



Presented at International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo, November 17-22, 2019, Tokyo, Japan  
 Fig. 16 Time series of CO mass fraction distributions at  $\phi=1.0$  by NA-FGM approach  
 Review Completed on June 11, 2020



NA-FGM approach -  $\phi=1.0$  - Temperature  
 Fig. 17 Schematic diagram of point III

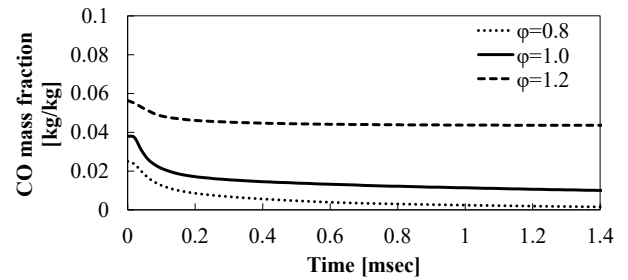


Fig. 18 Time series of CO mass fraction at point III by the NA-FGM approach

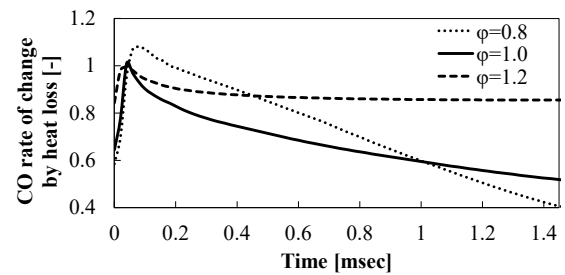


Fig. 19 Time series of CO rate of change by heat loss at point III by the NA-FGM approach

### CONCLUSIONS

We applied two-dimensional numerical simulations employing a NA-FGM approach to consider the effect of the heat loss in the vicinity of the wall and examined the validity of the NA-FGM approach to predict the CO concentration by comparing with those employing a detailed reaction approach. Then we investigated the influence of the equivalence ratio on the CO generation in vicinity of the wall. The main results obtained are summarized as follows:

- 1) The NA-FGM approach can predict the progress of CO generation in the vicinity of the wall and maximum wall heat flux accurately for turbulent lean premixed combustion.
- 2) The CO concentration in the vicinity of the wall predicted using the NA-FGM approach tends to decrease due to the effect of heat loss through the cooled wall at each equivalence ratios. The effect of the heat loss plays an important role in prediction of CO generation near the wall for turbulent premixed combustion.

In conclusion, these results suggest that the NA-FGM approach is quite effective for the CO prediction for turbulent premixed combustion.

### ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Mr. Kenichiro Takenaka and Mr. Kento Konishi at Kyoto University for useful discussion. This paper was supported by a project commissioned by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) and by MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology) as "Priority issue on Post-K computer" (Accelerated Development of Innovative Clean Energy Systems).

### REFERENCES

- [1] K. Yunoki, T. Murota, K. Miura, and T. Okazaki, 2013, "Numerical Simulation of Turbulent Combustion Flows for

Coaxial Jet Cluster Burner”, POWER2013-98143, Proceedings of the ASME 2013 Power Conference.

[2] T. Koganezawa, K. Miura, T. Saitou, K. Abe, and H. Inoue, 2007, “Full Scale Testing of a Cluster Nozzle Burner for the Advanced Humid Air Turbine” GT2007-27737

[3] S. Tachibana, K. Saito, T. Yamamoto, M. Makida, T. Kitano, and R. Kurose, 2015, “Experimental and numerical investigation of thermo-acoustic instability in a liquid-fuel aero-engine combustor at elevated pressure: Validity of large-eddy simulation of spray combustion. *Combustion and Flame*, 162, 2621-2637.

[4] M. Ihme and H. Pitsch., 2008, “Modeling of radiation and nitric oxide formation in turbulent nonpremixed flames using a flamelet/progress variable formulation” *Physics of Fluids*, 20, 055110.

[5] H. Moriai, R. Kurose, H. Watanabe, Y. Yano, F. Akamatsu, and S. Komori., 2013, “Large-eddy simulation of turbulent spray combustion in a subscale aircraft jet engine combustor - predictions of no and soot concentrations”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 135.

[6] K. Hirano, Y. Nonaka, Y. Kinoshita, M. Muto, and R. Kurose, 2015, “Large-eddy simulation of turbulent combustion in multi combustors for I30a gas turbine engine”, In ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. ASME.

[7] T. Nishiie, M. Makida, N. Nakamura, and R. Kurose, 2015, “Large-eddy simulation of turbulent spray combustion field of full annular combustor for aircraft engine”, In International Gas Turbine Congress 2015, Gas Turbine Society of Japan.

[8] K. Yunoki, T. Murota, T. Asai, and T. Okazaki, 2016, “Large Eddy Simulation of a Multiple-Injection Dry Low NOx Combustor for Hydrogen-Rich Syngas fuel at High Pressure”, In ASME Turbo Expo 2016: Turbine Technical Conference and Exposition. ASME.

[9] K. Yunoki and T. Murota, 2018, “Large Eddy Simulation to Predict Flame Front Position for Turbulent Lean Premixed Jet Flame at High Pressure”, In ASME Turbo Expo 2018: Turbine Technical Conference and Exposition. ASME.

[10] F. A. Willams, 1985, *The Mathematics of Combustion*, SIAM, pp.99-131.

[11] F. A. Sethian, 1996, “Level Set Methods”, *Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

[12] J. A. v. Oijen and L. P. H. d. Goey., 2000, “Modeling of premixed laminar flames using flamelet-generated manifolds”, *Combustion Science and Technology*, 161,113-137.

[13] Fiorina, B., Baron, R., Gicquel, O., Thevenin, D., Carpentier, S., and Darabiha, N., 2003, “Modelling non-adiabatic partially premixed flames using flame-prolongation of ILDM,” *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 7, pp. 449-470.

[14] F. Proch and A. M. Kempf., 2015, “Modeling heat loss effects in the large eddy simulation of a model gas turbine combustor with premixed flamelet generated manifolds”, *Proceedings of the Combustion Institute* 35, 3337-3345.

[15] Fiorina, B., Mercier, R., Kuenne, G., Ketelhen, A., Avdic, A., Janicka, J., Geyer, D., Dreizer, A. Alenius, E., Duwig, C., Trisjono, P., Kleinheinz, K., Kang, S., Oitsch, H., Proch, F., Morincola, F. C., and Kempf, F., 2015, “Challenging modeling strategies for LES of non-adiabatic turbulent stratified combustion,” *Combustion and Flame*, Vol. 162, pp. 4264-4282.

[16] H. Pitsch., 1998, “Flamemaster: A c++ computer program for 0d combustion and 1d laminar flame calculations”.

[17] GRImech3.0 HomePage; “[http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/version30/tex30.html](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/version30/tex30.html)”.

[18] N. Peters, 1999 “The Turbulent burning velocity for large scale and small scale turbulence”, *J. Fluid Mech.*, 384, November 17-22, Tokyo, Japan pp.107-132

[19] R. S. Rogallo, 1981, “Numerical experiments in homogeneous turbulence”, NASA Technical Memorandum

81315.

[20] T. Hara, M. Muto, T. Kitano, R. Kurose, and S. Komori., 2015, “Direct numerical simulation of a pulverized coal jet flame employing a global volatile matter reaction scheme based on detailed reaction mechanism”, *Combustion and Flame*, 162, 4391-4407.

[21] A.L. Pillai, R. Kurose, 2019, ”Combustion noise analysis of a turbulent spray flame using a hybrid DNS/APE-RF approach”, *Combustion and Flame*, 200, 168-191.

[22] M. Muto, K. Yuasa, R. Kurose, 2018, “Numerical simulation of soot formation in pulverized coal combustion with detailed chemical reaction mechanism”, *Advanced Powder Technology*, 29, 1119-1127.

[23] <http://www.tse.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/link.php>

[24] V. Titarev and E. Toro., 2005, “Weno schemes based on upwind and centred tvd fluxes”, *Computers & Fluids*, 34, 705-720.

[25] S. Gottlieb and C.-W. Shu., 1998, “Total variation diminishing runge-kutta schemes”, *Mathematics of computation of the American Mathematical Society*, 67, 73-85.