

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集

日本ガスタービン学会創立50周年に寄せて

In Honor of 50th Anniversary of GTSJ



渡辺 紀徳*1

WATANABE Toshinori

学会が創立50周年、半世紀を迎えた。誠に喜ばしいことであり、会員の皆様とともに祝いたいと思う。

筆者が活動に関わっているのは50年のうちの後半くらいであるが、創立に携わった諸先生、諸先輩の方々からご苦勞のお話をたくさん伺っている。また、その後の学会の発展は多くの方々の多大なご努力の成果である。創業と発展に苦心された皆様のご尽力に敬意を表するとともに、お礼を申し上げる次第である。

ガスタービン関連産業の発展とともに学会も成長を遂げている。国際的な存在感が高まっているのも喜ばしいことである。一方で新たな学術・技術分野への展開や、新分野の創出も今後の発展のために不可欠である。学会は2011年に公益社団法人に移行し、再出発をしたが、この際に定款を改定し、対象とする分野を「ガスタービン及びエネルギー関連技術」に広げて再設定している。

新定款のもと、公益社団法人として従来の講演会や国際会議、集会行事、出版などの事業が継続的に行われ、充実度が増している。また、新たに若手技術者懇談会や男女共同参画事業などが実施され、活動の幅を広げている。更に新定款で学会の事業内容に「学術・技術に関する建議」を加えたこともあり、産官学連携による研究開発プロジェクトの学会からの提案および実施なども行われているところである。

10年前の創立40周年時点での技術展望と比べると、近年は温室効果ガス削減への急速な集中が顕著である。昨今は発電でも航空推進でも2050年のカーボン・ニュートラル実現に向けて、ほとんどの研究開発が邁進している印象を受ける。この実現のため、水素燃焼・アンモニア燃焼ガスタービンの開発、航空推進の電動化、水素利用、持続可能な燃料の利用などに関して世界的に急ピッチで研究開発が進められている。他方、最近の航空推進分野では飛行機雲や水分が温室効果に大きく寄与しており、二酸化炭素削減だけでは不十分という指摘がなされてきている。

このような状況から、研究開発の多様化が今後益々重要になると思われる。従来はガスタービンに関係の薄かった分野から様々な知見を導入することが必要であり、また、背景の異なる人たちとの協力が不可欠となる。学会活動でも他分野との連携や他の学協会との連携を図っていくことが従来よりも重要性を増すと思われる。以前から指摘されている男女共同参画や若年会員増強の重要性も含め、多様化が学会発展のために一つのキーとなるであろう。

さて、50周年を祝うため、学会では2020年度に創立50周年記念事業実行委員会を立ち上げた。委員会では検討の結果、主に以下の8つの事業を実施することを決め、進めているところである。(1)記念行事(式典・講演会)実施、(2)若年層向けガスタービン入門資料制作、(3)「ガスタービン工学」改訂版発行、(4)学会誌特集号発行、(5)学会誌表紙ロゴ掲載、(6)学会50年史作成、(7)功労賞表彰、(8)永年賛助会員感謝状贈呈。

これらのうち、(1)の記念行事は2022年11月8日に東京大学で開催し、多くの参加者を得て盛会となった。また、(3)のガスタービン工学改訂版は近く発刊の予定で、10年前に発行された初版に最新の動向を盛り込んだものとなっている。(4)の特集号が学会誌の前号と本号である。(記念事業全体については別途学会誌で報告される。)

創立50周年を一つの契機として学会活動を改めて省察し、関連する技術の現状を把握した上で、今後の50年に向けた活動の展開を計画するのは重要と思われる。50周年記念特集がそのために役立てば幸いである。

原稿受付 2023年1月20日

* 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1
E-mail: watanabe@aero.t.u-tokyo.ac.jp

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン学会半世紀の歩みと将来ビジョン

産官学連携活動の展開

Development of Industry-Government-Academia Collaboration



渡辺 紀徳*1
WATANABE Toshinori

キーワード：ガスタービン，航空エンジン，産官学連携，研究開発プロジェクト

Key Words：Gas Turbine, Aeroengine, Industry-Government-Academia Collaboration, R&D Project

1. はじめに

日本ガスタービン学会には産業界の会員が多く，学会が対象とする分野は学術的にも応用を目指す研究が主流となっているため，産学の連携協力が比較的盛んな環境にある。また，航空用ガスタービンでも産業用ガスタービンでも国家プロジェクトとして実施される研究開発が多くあり，これらをもとにして国内産業が発展してきた経緯もあることから，学会における産官学の連携は相当に活発であると言ってよい。国家プロジェクトの成果については学会誌でもこれまで数々の特集や解説記事が掲載され，貴重な技術情報が提供されている。

このような環境を踏まえ，2000年代からはより明示的かつ積極的に産官学連携活動の実施を目指すため，様々な方策が講じられてきている。

2007年度に「ガスタービンを考える会」（略称：考える会）というワーキンググループが発足し，産官学の様々な機関から人が集まってガスタービンやエネルギー技術の動向と今後の方向性について自由に話し合う活動が始まった。また，2009年度には元会長の本阿弥眞治先生が音頭を取られて「産官学連携懇談会」が組織され，連携した共同研究開発促進のため，問題点の抽出や共同利用設備の実態調査などが行われた。2010年度にはこの懇談会を発展させて「産官学連携委員会」が設置され（活動開始は2011年度），連携による研究開発プロジェクトの実現に向けた方策の検討などを実施している。これに合わせて考える会は産官学連携委員会の傘下で活動するワーキンググループに改めて位置付けられた。以後，考える会では学会版の技術ロードマップが策定され，これに基づいて研究開発プロジェクト案を検討する活動が行われている。提案の中にはNEDO（新エネルギー・

産業技術総合開発機構）のプロジェクトとして採択され，実現するものが出てくる状況に至っている。

本稿ではこれら近年の産官学連携活動の体制と概要を紹介したい。

2. ガスタービンを考える会

国内に存在する複数のガスタービンメーカー間で技術的な協力を実現し，国際競争力を高めることはできないか，また，学术界も連携できないか，という目的意識のもと，2005年度に当時40代だった数名で意見交換の機会を持った。現会長の福泉靖史氏も参加している。下相談の結果，そのような連携活動を話し合うなら日本ガスタービン学会をプラットフォームにするのが良いということになり，2006年度に賛同者を増やして「日本のガスタービンの将来を考える会（仮称）」を学会に立ち上げた。同年度内に5回の会合を開いている。会合での討論は非常に盛り上がり，同業他社，他機関との目的を共有するコミュニケーションが極めて大切で，学会がそれに大変適した場であることが強く認識された。この活動を受けて，2006年度の終わりに「ガスタービンを考える会」の設置が承認され，2007年度から活動を開始した。その際に学会ホームページでメンバーを広く募り，14名でスタートしている。学会の公益法人化前の当時は企画委員会傘下のワーキンググループと位置付けられた。学会の公式な委員会としては組織されておらず，委員会のような名簿の承認などはなしに，興味を持つ会員が自由に参加できる体制を取っている。発足後は活動の展開と共に成長を続け，現在メールアドレスをリストされているメンバーは40名を超える。

考える会は国内外のガスタービン技術や業界の現状，今後のガスタービン事業の展開，国内産業の世界へ向けての戦略などについて，関連各社・各機関の技術者・研究者により，自由な雰囲気です話し合うことを目的としている。

原稿受付 2023年1月23日

* 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1
E-mail: watanabe@aero.t.u-tokyo.ac.jp

会合を重ねて活発な討論を行ううち、そろそろアウトプットを考えるべきではないかという議論が起こった。そこで当時経済産業省（経産省）が幅広い分野で技術戦略ロードマップを策定していたことを見ながら、手始めに学会版のガスタービン技術ロードマップを作るのが良からうということになり、議論を重ねて産業用および航空用のガスタービン技術ロードマップを2010年に作り上げた⁽¹⁾。これをもとにした技術マッピングの結果から更に議論を重ね、今後の研究開発で重要かつ緊急性が高いと思われる技術項目を絞り込んだ。

この議論をもとに、参加各社・各機関が共同で実施できる研究開発プロジェクトの実現を目指して具体的な議論を続けた。

その結果、後で詳細を紹介する負荷変動対応型発電ガスタービンの研究開発が共同プロジェクトになり得るといふ合意が形成され、電力中央研究所（電中研）を中心に研究開発プロジェクト案をまとめることになった。この案に基づいて2014年度に経産省の担当部署に相談したところ、NEDOが当時スタートさせていた「エネルギー・環境新技術先導プログラム（エネ環）」にまずは応募し、小規模な先導研究から開始して大型プロジェクト化を図るのが良からうとのことになった。

こうして2014年度・2015年度のエネ環に「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」というプロジェクトが採択され、その後、様々な変遷を経て最終的に2018年度から2021年度まで4年間、「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」という題目の研究開発プロジェクトが実施された。

航空エンジンの研究開発については、2013年3月に終了したエコエンジンプロジェクト以降、完成機を目指した研究開発プロジェクトがなく、経産省をはじめ関連機関で問題認識されている。考える会では航空エンジンに関連する技術開発の共同プロジェクトを継続的に検討してきているが、最近の情勢も勘案して、現在は電動化や水素ジェットエンジンなどの技術を含めて議論が行われている。その中で関連各社が共同体制を組んで実施できる研究項目を話し合ったところ、国内共同利用が可能な材料データベースの構築という課題が浮かび上がった。基盤共通的な範囲でジェットエンジン用材料データをプロジェクト参加各機関で取得し、集約して国内のデータベースを整備した後、参加機関はそのデータベースを共同利用するというもので、将来的には日本独自の材料で国際的な認証を取得するところまでを目指すという高い目標を議論した。物質・材料研究機構（NIMS）に取りまとめてもらう体制を整え、関係者でプロジェクト案を作成したところ、内閣府のSIPプログラムの一部として取り上げてもらうことができ、先導的な研究を開始した。その後、経産省とも相談が整い、2021年度から2025年度のNEDOプロジェクトが実現している。

2021年度からの考える会では水素利用にやや重点を置き、国際情勢や国内各社の開発状況、学術的な研究情報などを持ち寄って討論を行っている。これに関するプロジェクト案も下相談しているが、まだ話し合いは集約の方向まで至っていない。その他、ずっと以前から課題に挙げられている項目に、基礎的な実験データベースの構築および実験施設の整備がある。流体、伝熱、燃焼、構造、およびそれらの複合現象に関する実機環境での実験データを取得・集約し、これを検証に用いることにより数値シミュレーションの高度化に資することを目的とするもので、実機環境で面、あるいは三次元の詳細実験データを取得できるような試験設備・施設の設置も含む内容である。このような実験データの不足は世界的に問題となっており、必要性、重要性については各社・機関も認識が一致しているものの、財政面を含めた具体化にはまだハードルがある状況である。

考える会の活動は日本ガスタービン学会の特性が大変よく生かせる例であると思われる。会合を通じて同業他社間のコミュニケーションも生まれ、大学や官界との間の話も広がっている。産官学連携のプラットフォームを学会が提供するという、学会の本領を発揮する意義深い活動と言えるだろう。

3. 産官学連携委員会

産官学連携委員会は、2010年当時、ガスタービンに関する研究開発や事業を取り巻く状況が極めて厳しいという認識のもとに、企業、大学、研究所個々の活性化ばかりでなく、各組織間のシナジー効果の発現に取組む必要があるとの意識から設置された。かつてのムーンライトプロジェクトやFJRプロジェクトのような国家プロジェクトが終了して年月が経ち、当時の知見が継承されなくなっているという危機意識もあった。そのような状況で産官学が有機的に連携できる形態を具体的に検討し、ガスタービン技術の推進に必要な産官学の連携システムを構築することが急務であり、学会が社会に果たすべき役割を明らかにすることが目標とされた。

その後、ガスタービンを考える会をこの委員会傘下のワーキンググループと位置付けて連携する体制となった。技術項目の具体的な検討や研究開発プロジェクトの案出などは考える会で行い、この委員会は俯瞰的な立場から、プロジェクト実現に向けた体制や提案方法の検討、問題点の抽出を行い、また、学会が関連技術分野の産官学連携を促進する方策の調査検討などを行ってきた。

共同プロジェクトがスタートすると、参加者間の情報交換を緊密に行い、研究開発を横通して円滑に進めることが重要となる。このため、産官学連携委員会が当該技術テーマに関する調査研究委員会を組織し、プロジェクトをコントロールする場を提供することになっている。調査研究委員会は学会の臨時委員会として定義されており、扱うべき技術テーマが生じた場合に、それに合わせ

で設置することになっている。

また、産官学連携委員会の独自の活動として、「産官学連携委員会懇談会」を2014年から実施している。これは委員会の委員と各地の地域企業とが会合する懇談会を開催し、ガスタービン関連技術の普及や産業振興を目指して技術情報の交換や技術討論を行うものである。これまでに長岡市、富山市、酒田市、盛岡市、能代市で会合を持ち、各地で好評を得ている。関連産業のサプライチェーン構築への寄与という視点もある。今後も活動の意義を吟味しつつ、各地での開催を企画したい。

現在計画中の事業に、若手研究者と産業界との懇談会がある。若手会員・学生会員増強のためには、大学の若手教員に会員になってもらうのが有効である。そのきっかけを作るため、企業と若手教員のニーズとシーズを共有して、産学協同の橋渡しをするような懇談会を実施したいという意図で計画している事業である。企業にとっては大学における研究状況をより広範に把握し、その後の共同研究等に発展する出発点となり得るメリットがあり、また大学研究者には企業のニーズを知り、研究の動機づけを得るとともに、更に進んで共同研究のチャンスが得られる可能性もある。大学・研究所の若手研究者に参加してもらい、本委員会メンバーや理事の所属企業の技術担当者と懇談会を開催する。会合では若手研究者から研究内容を紹介してもらい、企業側からは技術上の問題点に関する基礎的、学術的なニーズを提示し、技術討論を行う。当面の目的は対面による情報交換とし、公開情報ベースで自由討論を行う計画である。コロナ禍の状況では対面の会合が難しかったため未実施であるが、今後できるだけ早い時期にキックオフしたいと思う。

4. 研究開発プロジェクトの事例

4.1 急速起動・負荷変動対応ガスタービンの研究開発プロジェクト

4.1.1 プロジェクトの経緯 CO₂排出削減のため、電力供給における再生可能エネルギーの割合を飛躍的に高め、化石燃料の使用を減らすことが急務となっている。再生可能エネルギーの大量導入は今後のエネルギー供給に不可欠の選択肢であるが、周知のとおり日照量や天候に大きく影響されるため、電力の消費量と供給量のバランスをとって安定的に電力を供給するのが困難になる。したがって電力システムを安定化させる信頼性の高い調整電源が必須となるが、これを担うにはガスタービンが最適と考えられている。その主な理由はガスタービンの高効率と起動時間の短さである。しかし従来の発電用ガスタービンはベース・ミドル電源としての役割を想定して開発されてきているため、再生可能エネルギー大量導入に合わせて電力供給の不安定を解消するには、ガスタービンの特徴をさらに強化する機能改善が必要である。

このような状況から、系統安定化対応型先進ガスタービン発電設備に関する技術開発を目指し、負荷変動追従

性を高める技術開発のプロジェクトを立案した。系統安定化を実現するガスタービンには急速起動・過渡応答性に優れ、過酷な繰り返し運用に耐えることができ、かつ部分負荷における効率低下が少ないという特性が要求される。言わば従来の大型ガスタービンの高効率と、ジェットエンジンの高速応答性を同時に有するガスタービンの実現を目指す研究開発である。

考える会における討論ではこのような技術の重要性が早くから指摘されていたが、これが共同研究開発プロジェクトに適した課題であるという議論が煮詰まり、NEDOのプロジェクトを想定して実施案を検討するとともに、産官学連携委員会を通して調査研究委員会を立ち上げた。委員会と考える会で作成した案をもとに経産省の担当部署に相談し、NEDO関係者を含めてさまざまな協議と検討を行った結果、上述したようにNEDOの「エネルギー環境新技術先導研究プログラム（エネ環）」に応募することになった。幸いに提案は採択され、2014年度・2015年度の2年間のプロジェクトとして「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」という先導研究が実施された。電中研（渡辺和徳氏、高橋徹氏）が全体を取りまとめ、産業技術総合研究所（産総研）および関連メーカー5社が参加し、4大学およびNIMSが再委託で参加するという共同プロジェクトで、ガスタービン学会ならではの体制を構築することができた。実施内容は次項で述べる。

先導研究プログラムの各課題は、終了後に本格的なプロジェクトに移行する前段階の意味を持っている。このプロジェクトについても大型プロジェクトへの移行が経産省・NEDOとの間で計画されていたが、他に実施されていた技術開発事業との関連もあり、すぐに実現できる状況ではなかった。このためNEDOから先導研究にもう一度応募するよう指導があり、2017年度のエネ環に再度応募して採択された。テーマは「機動性に優れる広負荷帯高効率GTの開発」で、一回目のエネ環プロジェクトを引き継いで基盤的な要素技術の検討を行う内容であり、主にローターや動翼等の回転体の軽量化技術、回転体と静止体とのクリアランスの能動制御技術などの基礎検討を行った。また、機動性に優れる急速起動・負荷変動対応の発電用大型ガスタービンの概念設計を行い、加えてその後の具体的な開発プロジェクトの計画を策定した。

この時点で残念ながら一回目のエネ環のように多くの機関が参加する共同プロジェクトは不可との方針がNEDOから示され、体制の継続を断念せざるを得なかった。そこで2017年度エネ環プロジェクトは電中研と三菱重工が実施機関となり、NIMSと3大学が再委託で参加する体制となった。

学会としては、限られた企業・機関が実施するプロジェクトに直接関与するのは公益性に鑑みて適切でないと考え、この時点でプロジェクトは学会事業から卒業とした。同時に調査研究委員会はプロジェクト採択をもつ

てミッション完了により解散することとした

二回目のエネ環プロジェクトも無事に終了し、その体制を継続して2018年度から4年間の拡大プロジェクトが採択・実施された。NEDOの「次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電基盤技術開発」の枠組みの中で、テーマは「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」である。実施機関は電中研と三菱重工で、再委託先は三菱日立パワーシステムズ (MHPS, 当時), NIMS, 大阪大学, 京都大学, 東京大学であった。出力30万kW程度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ガスタービンコンバインドサイクルシステムを想定し、先行研究より得られた成果を踏まえて、鍵となる数値解析技術, 材料技術, 燃焼技術, 空力技術, システム制御技術, クリアランス制御技術などの要素技術開発を実施した。また、保守技術の開発に向けた調査や、他技術との経済性比較調査, および後継となる実証研究計画の策定なども行われた。社会実装にはプロジェクトで開発した要素技術を順次既設の発電施設に導入していく, いわゆるレトロフィットの手法を導入することとした。

プロジェクトは2021年度に予定通り終了し、NEDOの終了時審査では大変高い評価を得たとのことである。更に先の技術実証プロジェクトに向けて現在も検討と交渉が続けられているところであり、今後の更なる進展が期待される。

4.1.2 エネ環第一回プロジェクト 前項で述べたように、2014年度・15年度にわたってNEDOエネ環先導研究として、「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」というプロジェクトが実施された。考える会および調査研究委員会で2014年度までに実施案をまとめて応募したものであるが、考える会で長年にわたり議論を重ね、関連メーカー各社が参加できる内容を煮詰め、分担を詳細に決めた結果、多数の会社と機関が参加するプロジェクトを案出することができた。Fig. 1 に実施体制を示す。NEDOと7機関の間の並行契約となっている。また、NEDOの事業では研究推進委員会が設けられるが、その委員長を 元ガスタービン学会会長にお願いし、リーダーシップを取っていただいた。委員には電力各社の方々に就任いただいて、ユーザーの意見を十分反映する技術開発を心がけた。余談だが、応募した当時は申請書に各社の社長印が必要で、紙版の申請書を各社・機関に回して印鑑をもらったが、応募の締切りまで時間の余裕がなくなり、ある2社の考える会メンバーがJR線の某駅ホーム上で書類を受け渡すというドラマ的な事態が現出した。その時受け渡しの写真を撮らなかったことが後で悔やまれた。

こうして実現した先導研究のテーマ分担がTable 1 に示されている。各テーマの研究結果についてはNEDOの成果報告書²⁾を参照いただくと幸いである。

先導研究の結果をまとめ、開発すべきガスタービンコンバインドサイクルシステムの目標仕様をTable 2 のように設定した²⁾。参加各社の開発技術の特性を生かすため、大型, 中型, 小型のサイズを分け、それぞれについて基礎技術の検討を行った結果である。大容量ガスタービンコンバインドではホットスタートで起動時間を従来の60分から10分に縮める目標で、出力変化率, 最低負荷とともに、極めて高い目標が設定されている。なお、小容量で最低負荷が設定されていないのは、このサイズだと完全に停止することが可能なためである。

その後の第二回エネ環プロジェクトと2018年度から2021年度まで実施されたプロジェクトは、前項で述べたように電中研と三菱重工が大型ガスタービンコンバインドシステムを対象として実施した。詳細はNEDOの成果報告書を参照されたい^{3),4)}。

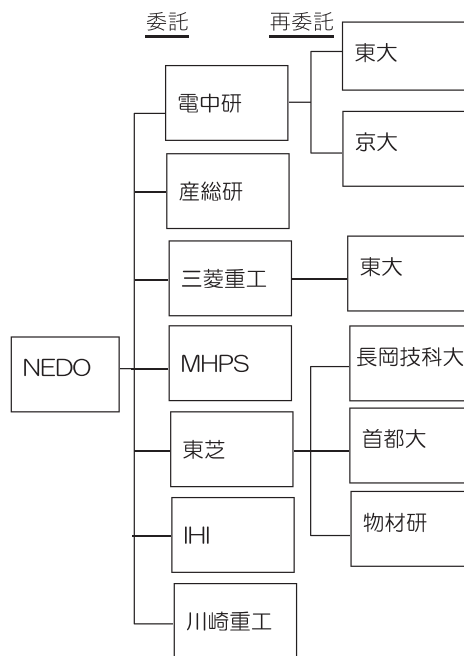


Fig. 1 Project Organization

Table 1 R&D Topics of Member Organizations

研究開発項目	実施機関
急速負荷変動のガスタービンプラントへの影響評価	電中研
負荷変動を吸収する発電システムの検討	産総研
燃焼シミュレーション手法の高度化	電中研, 東大, 京大
非定常流れおよび構造過渡応答シミュレーション高度化	三菱重工, 東大
発電量制御できるガスタービンの効率維持	三菱日立パワーシステムズ
航空転用ガスタービンを用いた系統安定化制御技術	IHI
需給予測に基づく発電量制御技術	川崎重工
高負荷変動に対する材料・コーティングの特性評価・設計技術	東芝, NIMS, 首都大, 長岡技科大

Table 2 Target Specification

	大容量 (100MW～)	中容量 (10-100MW)	小容量 (～10MW)
出力変化率	50%/分	50%/分	50%/分
最低負荷	10%	10%	——
起動時間	10分	5分	5分
最高効率	63%	58%	36%

(起動時間：大容量はコンバインド，ホットスタート)
(最高効率：LHV基準，大・中容量はコンバインド効率)

4.2 航空エンジン用材料データベース構築プロジェクト

考える会では航空エンジンに関しても共同研究開発プロジェクトの実現を目指し、様々な技術課題について検討を行ってきている。その中で各社・各機関が共通に意識を持ち、協力できる項目として、まずは材料データベースの構築が挙げられた。

民間航空エンジン用材料はほとんど外国企業によって開発されたものが用いられている。日本の現在の民間エンジン事業は外国メーカーの国際共同開発プログラムに参画することで成立していることもあり、国内で開発された独自のエンジン材料が使用されることはほぼない状況である。しかしながら、例えばNIMSでは世界最高のクリープ強度を持つ第6世代単結晶超合金や、ディスク用材料として従来材より高い耐用温度を持つ鍛造材、粉末冶金材などが開発されている。これらの国内開発材料を民間エンジンに使用するためには材料データベースとそれを活用した寿命予測を的確に実施して信頼性を立証し、FAA等の認定機関で認証を取得する必要がある。この事業には多大な労力と費用が必要なため、産官学の協力が強く求められる。

このような状況の下、考える会では2018年に材料データベース構築の共同研究開発プロジェクトを立案し、関係機関と相談を重ねた。2019年度のガスタービン学会定期講演会では材料関係の先端技術フォーラムが実施されたが、パネリストとして登壇された科学技術振興機構の竹村誠洋氏にこのプロジェクト案を説明したところ、大変興味を持っていただいた。これがきっかけとなって竹村氏のご尽力によりプロジェクトを内閣府のSIPプログラム（戦略的イノベーション創造プログラム）の中に加えてもらい、2020年度に調査研究を開始することができた。同時に経産省航武課（村橋課長補佐および廣田係長（当時））のご尽力でNEDOのプログラムに助成事業として取り上げられることになり、SIPの後継のような形でNEDOプロジェクトとして「航空機エンジン用評価システム基盤整備」が2021年度から5年間の予定で進められているところである。NIMS（川岸京子氏、長田俊郎氏）が中心になってプロジェクトを取りまとめており、参加企業・機関は本田技術研究所、三菱重工航空エンジン、三菱重工、川崎重工、IHI、JAXAとなっている。また、材料メーカーが発注先として参画している。学会では対

応する調査研究委員会（川岸委員長）を立ち上げ、プロジェクト全体のコントロールと参加者間のコミュニケーションの確保を担っている。

プロジェクトでは研究開発段階を第1フェーズから第5フェーズまで設定し、最終的にはデータベースを運用して航空エンジン部品に実用するところまでを目標としているが、共同研究開発として実施するのは第2フェーズまでで、材料データを取得し、共通データベースを構築する段階までを予定している。第3フェーズでは形状付与を行って設計データベースを作るが、ここからは各社のノウハウが入るため、NIMSと各社との個別契約で開発が進められることを想定している。第2フェーズまでの材料データベースはNIMS内に構築し、NIMSによって管理される。また、国際認証の取得は日本では経験が少ないため、取得の手順やノウハウ、課題などについて調査を行い、取得までのシナリオを明確にする必要があると思われる。このような活動もプロジェクト内で行う計画である。

幸い経産省航武課の事業の中でこのプロジェクトの内容が重点項目に取り上げられる状況になっている。今後も研究開発を進展させ、国際競争力の高い材料技術が実現していくことを強く期待したい。

5. おわりに

創立50周年を迎えた日本ガスタービン学会における産官学連携活動の進展について紹介した。当学会は企業所属の会員が多く、企業の積極的な参加が得られていることが特徴で、産官学連携の基盤が築かれていると言える。今後もこれを生かして連携・協力のためのプラットフォーム機能を充実させ、ガスタービンおよびエネルギー関連技術分野の発展に寄与していければ幸いである。

参考文献

- (1) 渡辺紀徳, ガスタービン これまでの40年これからの40年: 総論, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1 (2013), pp. 14-18.
- (2) NEDO成果報告書データベース
<https://www.nedo.go.jp/library/database_index.html>
報告書管理番号20160000000495
(参照日2023年1月10日)
- (3) 同上, 報告書管理番号20180000000464
(参照日2023年1月10日)
- (4) 同上, 報告書管理番号20220000000677
(参照日2023年1月10日)

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン学会半世紀の歩みと将来ビジョン

学会の公益法人化による再出発とその後

Re-start of GTSJ by Becoming a Public Interest Incorporated Association and Its Aftermath



太田 有*1
OHTA Yutaka

キーワード：日本ガスタービン学会，公益社団法人

Key Words：Gas Turbine Society of Japan, Public Interest Incorporated Association

1. はじめに

2006年6月に制定された「公益社団法人及び公益財団法人の認定等に関する法律」，「一般社団法人及び一般財団法人に関する法律」および「一般社団法人及び一般財団法人に関する法律および公益社団法人及び公益財団法人の認定等に関する法律の施行に伴う関係法律の整備等に関する法律」によって，各種法人は2013年11月末までに「新公益法人」または「一般法人」に移行しなければ解散という制度改革が行われることになった。その間の移行措置として，2008年12月1日より当学会の法人格は名称が「財団法人」のまま「特例民法法人」に切り替わり，移行先の検討が始められることになった。

まず，2009年度第33期理事会のもと，吉識晴夫元会長を委員長とする「組織検討委員会」によって，移行方針と組織改編，将来事業計画の検討が開始された。「組織検討委員会」では，どちらの法人に移行するかの判断基準として，(1) 新公益法人の認定基準（認定法第5条）の確認，(2) 公益目的事業（認定法第2条別表）の確認，および(3) 公益目的事業の収支相償（認定法第15条）の試算が行われた。当学会の場合，内部留保率が高い点と公益事業費比率が低い点，および定期講演会やセミナー，4年毎に開催される国際会議（IGTC）が収支相償に適合しないことが「新公益法人」への移行に際して大きな問題点となることがわかった。日本機械学会を始めとする関連学協会の多くが早く「一般社団法人」へと舵を切る中，収益事業が比較的少なく，経常収支が4年周期ではほぼバランスしている当学会にとっては，事業区分の見直しや事業収益を特定費用準備金として積立てることで遊休財産額を大幅に減額できる見通しを得たために「公益社団法人」への移行を目指すことになった。当時の理事会や組織検討委員会の中には，単に税制上の優遇

措置のみならず「公益社団法人」としての学会の「格」を重視する傾向が強かったように記憶している。この結果を受けて，2009年6月に開催された理事会において「公益社団法人」を目指すべきとの答申案が「組織検討委員会」から提案され承認されている。

2. 公益社団法人への制度改革

このように「公益社団法人」への移行が理事会で承認されたものの，依然として問題は山積であった。そこで本阿弥眞治会長を委員長，渡辺康之副会長を副委員長とする「新公益社団法人移行推進委員会」およびその下部組織として6つのワーキンググループ（WG）が発足して，移行申請に必要な条件整備，書類作成および定款や各種既定類の作成が行われることになった（組織図参照）。6つのワーキンググループの主査・委員（敬称略）および検討内容は以下の通りである。

- (1) 定款改訂検討WG（主査：刑部真弘，委員：渡辺和徳，広川順一）：公益社団法人移行に向けた定款の改定とそれに伴う各種事業内容の見直し・修正，会員資格の確認。
- (2) 申請書類作成検討WG（主査：太田有，委員：幸田栄一）：学会事業区分の見直しと公益社団法人申請に向けた各種申請書類作成の準備。
- (3) 経理関係書類作成検討WG（主査：島内克幸，委員：七條高史）：経理関係の認定申請書類の確認と収支相償，遊休財産額の保有制度の判定，特定費用準備金の試算。
- (4) 理事・幹事の職務分掌・既定類作成検討WG（主査：和泉敦彦，委員：石井潤治，渡辺紀徳）：公益法人化に則した理事・幹事の職務分掌の見直しと規程構成の検討。
- (5) 事業活動の業務プロセス整理，規定集作成検討WG（主査：瀧花清作，委員：衣斐正宏，満岡次郎，福田雅文）：各種公益事業の分類と新規規定の作成。
- (6) 法人管理の業務プロセス整理と規定集の作成検討

原稿受付 2022年12月15日

*1 早稲田大学 基幹理工学部
〒169-8555 新宿区大久保3-4-1
E-mail: yutaka@waseda.jp

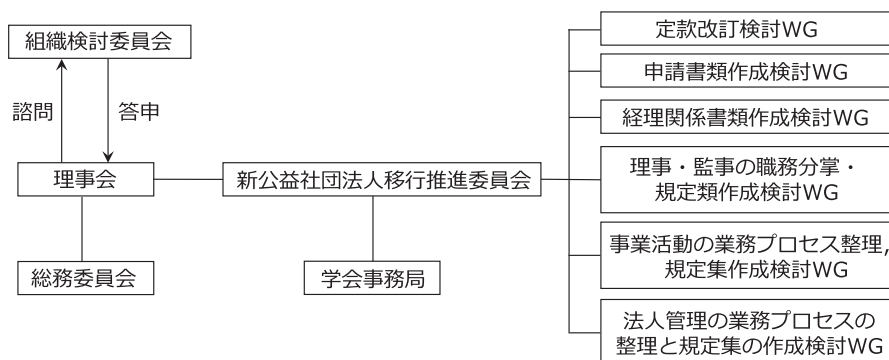


Fig. 1 Organization chart for the transition to a public interest incorporated association

WG（主査：三巻利夫）：新公益社団法人の組織検討および法人管理に関する各種規定案の作成。

「新公益社団法人移行推進委員会」および6つのWGは発足から1年4か月間の長期に及ぶ検討を行っている。特に、本学会の事業区分をどのように設定するかは、公益社団法人の申請に大きく関わる重要議題であり、活発な議論が行われた。当初は本学会の事業を全て3種類の公益目的事業（集会行事事業、学術・調査研究事業、表彰・助成事業）に分類する方向で検討が進められていたが、本学会の場合、収益が得られている事業は学術講演会や教育シンポジウム、セミナーなどのごく一部と4年毎に開催される国際会議（IGTC）くらいであり、その他事業の殆どが支出超過となっていることを鑑み、最終的には全ての事業を一つの公益目的事業「ガスタービン及びエネルギー関連技術の発展とその普及・振興を目的とする事業」に集約することになった。このように全ての事業を一つの公益目的事業として集約することで、事業ごとの収支バランスの均等化が図られ、4年毎に開催される国際会議（IGTC）の収益についても、特定費用準備金として積立てることで公益社団法人の財務不達条件となっている公益三指標（収支相償、公益目的事業比率、遊休財産保有額）を適合させることが可能となる目途が立った。また、公益目的事業が不特定多数の者の利益の増進に寄与することが条件となっているため、見学会やセミナーをはじめとする集会行事に会員外の参加を認め、定期講演会や国際会議でも一般市民を対象とした市民フォーラムの開催や展示会の開放など、大幅な制度改革を行うことも合わせて決定された。

3. 公益社団法人としての再出発とその後

「新公益社団法人移行推進委員会」は2010年10月15日に内閣府に宛てて「公益社団法人」への移行を電子申請した。その後、申請内容の追加修正を3度行った後、2011年2月23日付で「公益社団法人」の認定書が交付され、2011年3月1日に「公益社団法人日本ガスタービン学会」の設立登記が行われた。2009年度第33期（本阿弥真治会長）に始まり、2010年度第34期（渡辺康之会長）を経て、2011年度第35期（筒井康賢会長）まで、3期に

またがる学会の大改革はこのようにして行われたのである。

この公益法人改革は、従来の民法に準拠した監督官庁の指導による管理体制から、新しい法律の定めに基づく民による自己管理体制への変更であり、我が国の公益法人体制としては100年振りの大改革になりました。この移行に伴い新たに定めた定款によって、学会の目的をガスタービンや過給機に限定せず、広くエネルギー関連技術全般に拡張して、「ガスタービンおよびエネルギー関連技術に関する研究発表・調査・知識の交換ならびに関連学協会との連絡・提携を図り、もって学術・技術の進展および社会の発展に寄与することを目的とする」とすることになりました。また、学会内の全ての委員会および実施する全ての公益事業に関して、その目的や運営・実施方法を詳細に定める必要性から、規程、要領、内規の整備を行いました。

公益社団法人に移行して10年以上が経過した現在でも、毎事業年度開始日の前日までに、内閣府に対して事業計画と共に収支予算書、資金調達および設備投見込を記載した書類を提出しており、公益三指標は毎年度適合性がチェックされていますが、全ての事業を一つの公益目的事業として大括りにした当時の決断は、財務関係書類の作成を大幅に簡略化させ、公益社団法人として本学会が継続し続けている大きな要因の一つになっているようです。ただ、申請前に考えられていた公益社団法人が享受できる長所としての学会活動の活性化や知名度の向上、会員増強にはあまり影響していないようで、税制上の優遇措置を除けば一般社団法人との違いを個人会員である我々が感じることはできないようです。今後は一般社団法人との違いを明確化して、公益性に基づく学会活性化策をより一層推進することで、政策の提言や学術的諸問題の解決など、公益社団法人としての活動を検討していくことが重要になってくると考えている。

最後に、学会の公益法人化に際して公益等認定協会へ何度も足を運んで相談や質問を行ったり、6つのWGをまとめる形で申請に必要な事務的書類の作成から提出に至るまでの作業を一手に引き受けて頂いた伊藤高根事務局長（当時）に感謝を申し上げる。

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン学会半世紀の歩みと将来ビジョン

国際活動の進展とIGTCの発展

Progress in International Activity and IGTC



渡辺 紀徳*¹
WATANABE Toshinori

キーワード：日本ガスタービン学会，国際活動，International Gas Turbine Congress

Key Words：Gas Turbine Society of Japan, International Activity, International Gas Turbine Congress

1. はじめに

日本ガスタービン学会（以下、当学会）は1971年にASME（American Society of Mechanical Engineers）が東京で開催したガスタービン国際会議を契機に創立された。この経緯から当学会は創立当初より国際活動を重要な活動と位置付けており，中でも独自の国際会議 International Gas Turbine Congress (IGTC) を主要な事業の一つとして継続的に開催しているところである。

2000年代に入りアジア地域での国際協力が進展し，当学会の働きかけでAsian Congress on Gas Turbines (ACGT) が2005年から共同開催されている。現在は日中韓印の4か国が持ち回りで隔年開催する国際会議に発展し，域内の交流に貢献している。

これらの活動を通じて国際的な協力関係は大きく発展しており，当学会の国際的な認知度も高まっていると思われる。ここでは近年の主な国際活動の展開について紹介する。

2. IGTCの発展

IGTCは多年にわたる多くの方々のご尽力により，4年に一度の国際会議として定着し，国際的にもよく知られるようになった。開催地は1995年の第6回まで首都圏のみであったが，1999年に初めて神戸で開催され，以後は2回首都圏，1回関西というローテーションで進められている。近年では2015年と2019年のIGTCが東京の虎ノ門ヒルズで開催され，今年のIGTC2023は京都国際会議場が予定会場となっている。

参加者数はほぼ500名規模が維持されている。発表される論文数は150件程度で推移していたが，2015年の第11回では200件を超え，プログラムが窮屈になり過ぎたため，2019年の第12回では少し抑制するほどになってい

る。近年は外国人の参加者数および発表件数が大幅に増加しており，2019年には外国からの発表が初めて半数を超えた。また，毎回実施している展示でも外国企業からの出展が増えている。

このようにIGTCは国際的な会議としての位置を高めて来ていると言える。講演会の内容は参加者に概ね好評で，後に紹介するInternational Advisory Committee (IAC) の委員各位には高い評価を得ている。外国人の参加者からは，ガスタービン関連分野の日本における産業や学術活動の情報が豊富に得られるという声が聞かれる。このことからIGTCの価値を確認することができるが，もっと国際的な情報発信を学会としても常に積極的に行うべきではないかとも思われる。また，IGTCの規模はほどよく，参加者間のコミュニケーションが取りやすいという評価の声も聞かれる。

時代の変遷にしたがって，IGTCの性格や役割も変化して然るべきである。ASME Turbo Expoをはじめとする国際会議が方々で開催される中，日本ガスタービン学会が独自に国際会議を主催することの意義がどこにあるのか（筆者は大いにあると思っているが）常に熟考し，説得力を持つ発信を行うことが重要である。

発表された論文は当学会が発行する英文電子ジャーナル Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (JGPP) に投稿することが可能である。このジャーナルはオープンアクセスで投稿料が不要であり，掲載される論文は増加傾向にある。今後さらに充実した論文集として認知度が高まることが期待される。

今年の11月に開催されるIGTC2023 Kyotoに向けて，実行委員会が鋭意準備を進めているところである。開催地の魅力もあり，外国人からは高い関心が寄せられている。会員各位も是非積極的に参加され，京都で情報交流および人的交流を深められることを望みたい。

原稿受付 2023年1月20日

* 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1
E-mail: watanabe@aero.t.u-tokyo.ac.jp

3. ACGTの創始と進展

国際社会におけるアジア地域の重要性が高まるのに伴い、当学会が関連する技術分野でもアジア各国との協力や連携を進める必要性が強く認識されるようになった。そこで従来から関係の深かった韓国の関係者に2003年から働きかけを行い、アジア地域の国際会議を開始することを検討した。その結果、Asian Congress on Gas Turbines (ACGT)を開催することを合意し、2005年にソウル大学で第1回を開催することができた。国内の定期講演会のアジア版をイメージし、参加登録費を安く抑え、また発表論文の完成度は必ずしも求めず、交流を主題とする会議として発足させた。参加者の国籍は制限せず、どの国からも参加できるものとした。会議は好評を博したため、その後も4年に一度、IGTCと重ならない年に開催を継続するという方針が立てられ、第2回は2009年に東京大学で実施した。その前から中国より共催への参加打診があり、相談の結果、第3回から日中韓3か国の持ち回りで、かつ4年に一度では間隔が長すぎるという中韓からの強い要望により、開催間隔を縮めることになった。第3回は2012年に上海で行われ、以後、隔年開催となって、2014年に第4回がソウルで実施されている。この間、インドからも共催への参加希望が寄せられ、4か国体制となって2016年にムンバイで会議が開催された。2018年は日本の番で盛岡にて開催、2020年はコロナのため2021年に延期して中国の青島でハイブリッド開催、2022年には韓国カンヌンでやはりハイブリッド開催と続き、次回は2024年にインドで開催される予定である。昨年の韓国における会議で、新たにベトナムから共催への参加希望が寄せられ、現在検討中となっている。会議は150名～200名参加の小規模なものであるが、以上から分かるようにアジア域で高い関心が持たれており、情報交流、人的交流のプラットフォームを形成することができている。論文発表のほか、各国からの招待講演やパネルセッションを実施し、最新の技術開発状況および各国の情勢について知見を広め、相互に討論を行う機会を提供している。今後も更に広範な情報が集まり、アジア域での協力関係を深めていく活動が発展して行くことを期待したい。

4. ASMEとの協力関係

学会創立の事情からも分かるように、ASMEとは深い協力関係が特にIGTCに関して持たれていた。諸般の事情により、一時期この協力関係が中断していたが、2003年のIGTCから再び協力関係を回復し、以後、より緊密な連携を行っている。

ASMEが毎年開催するTurbo Expoには日本からも多くの参加があるが、2010年にはTurbo Expoやその他のASMEの会議に対し、当学会がParticipating Organizationとして参加する協定を結んだ。これにより当学会の会員はTurbo Expoの参加登録費が割引となる。

その後、協定が発展し、Turbo Expoの展示にASMEからの招待で無料のブースを出展することができるようになった。そこで2014年から国際委員会内にASME展示ワーキンググループを組織し、中村事務局長を中心に学会の展示を行っている。ブースでは学会活動や日本のガスタービン開発を紹介するポスターを展示するとともに、IGTCのパンフレットや会員組織を紹介する資料などを配布し、情報を発信している。この活動も当学会およびIGTCの知名度向上の一因となっているものと思われる。ブースを訪れるリピーターも多く、人脈の形成に役立っているとともに、日本人参加者が気軽に集う拠点の機能も果たしている。

一方、当学会もIGTCの展示でASMEに無料のブースを提供しており、2015年からASMEのガスタービン部門事務局が展示を行っている。

これらの活動を通じた交流の促進により、様々な協力が円滑になっているのは喜ばしいことであり、今後もこの関係を維持発展させて行くのが望ましい。

5. International Advisory Committee (IAC)

国際活動について助言をいただくため、当学会の活動に深く関与して下さっている外国人20名にお願いしてIACを組織している。IGTCの期間中に会議を実施するほか、毎年のTurbo Expoでも会議を開催し、多くの貴重なご意見をいただいている。また、IGTCやACGTなどの情報を委員各位から周囲に発信し、会議への参加を奨励してもらっている。当学会の国際活動の企画と推進に多大な協力をいただいております。今後とも委員を適切に選任しつつ、継続的に会議を実施していく予定である。

かつてIACの会議で、「日本ガスタービン学会は国際社会で何を指すのか、何がやりたいのか？」という課題の提起があった。虚を突かれる思いでその場では即答できず、持ち帰って検討するとした場面を鮮明に記憶している。その後、国内的にも国際的にも学会活動の目指すところを学会ウェブサイトなどで表明するに至っている。学会のビジョンを常に考え、更新しながら活動を展開していくこと、それを発信することの重要性を深く認識する機会となった。

6. まとめ

当学会では国際委員会が国際活動の内容を常に検討し、国際交流の発展を目指している。これまでの50年で活動が大いに進展していると思われるが、益々の活発化に向けて更に努力が求められる。国際会議を通じた人的交流と情報交流は最も効果的であろうが、その他に国際的な情報発信がもっと強力に行われることが望ましい。学会ウェブサイトや電子メディアを通じた発信など今後の手立てを考えて行きたい。カーボンニュートラルを目指す上で国際協力は不可欠であり、そのような国際活動にも積極的に参加して行くことが期待される。今後とも会員各位のご協力をお願いする次第である。

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービン学会半世紀の歩みと将来ビジョン

男女共同参画の推進

Gender Equality in Gas Turbine Society

森川 朋子*¹

MORIKAWA Tomoko

1. はじめに

日本ガスタービン学会では、ガスタービンおよび関連技術に携わる女性技術者が男女共同参画の下に活躍成長して行けることを主な目的として2016年度に委員会を発足しました。2019年度からは委員会名称を「女性参画推進委員会」から「男女共同参画推進委員会」へ改め、より充実した活動を目指しています。

“100人に2人”が当学会における女性比率であり、各団体をヒアリングした結果からも業界の実態と齟齬のない数字であると認識されます。

これは、ガスタービンを一生の仕事として選択した女性にとって、小さい組織や一地方に在籍する場合には同じ志を持つ同性と巡り合うことが極端に難しいことを意味します。

当委員会はこれらの女性の交流促進を最初の目的として活動を開始し、今年7年目に入りました。

2. 女性参画推進委員会の発足背景

男女雇用機会均等法から30年の節目の2015年に女性活躍推進法が成立し、社会全体で女性活躍に焦点が当たる中で本委員会を発足しました。各企業においてはこの数年前から女性活躍を支える働きやすい職場を目指すべく、まずは出産育児をメインとした制度の充実が大きく前進した時期でもありました。トップダウンで制度改革が進む中、各社の制度のばらつきや実際に使ってみると十分整備されていない面が明らかになってきたり、制度を使わない人との不公平さなどの課題が見えはじめていました。そのような時期に各社のよい取り組み例の情報交換を行うことでヒントを得て、一人で悩んでいたことに対して会社の枠を超えて助け合うことは学会として果たせる役目が多くありました。

これらを時代背景に各社・組織から6名の女性委員から構成される「女性参画推進委員会」を発足させました。本組織は集会行事委員会の下部の臨時委員会として設置され、2019年度に名称を「男女共同参画推進委員会」に改名し現在に至ります。

内閣府によると、男女共同参画社会とは「男女が、社

会の対等な構成員として、自らの意思によって社会のあらゆる分野における活動に参画する機会が確保され、もって男女が均等に政治的、経済的、社会的および文化的利益を享受することができ、かつ、ともに責任を担うべき社会」とあります。この目指すべき社会のゴールは「ひとりひとりの豊かな人生」と示されており、最終的には男女問わず社会全体のすべての個人のための取組と定義されていることが特徴です。

3. 活動

(1) 全般

年に2回の委員会と2回のイベント開催を実施しています。イベントでは交流会を主軸としながらも、社会の変化に応じてテーマや実施形態を柔軟に工夫してきました。これまでのイベント経緯と主な活動について紹介いたします。

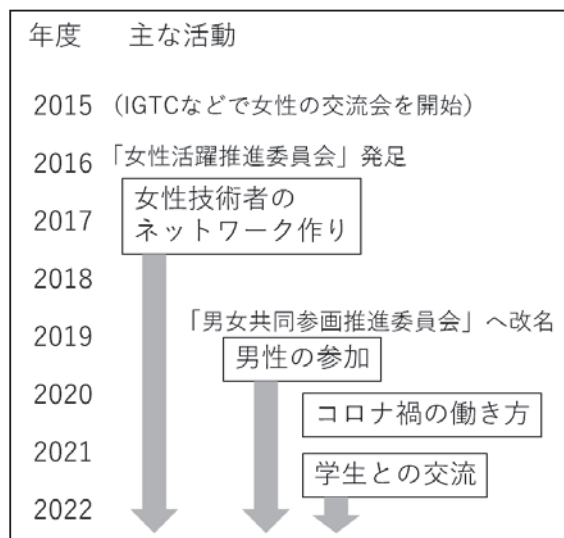


Fig. 1 Themes

(2) 女性技術者のネットワーク

ガスタービン業界で活躍する女性を講師にお迎えしてご専門分野の講義とプライベートのライフワークバランスの実践についてご紹介いただく会や、異業種交流会、複数企業の制度紹介を行う会、工場見学を通して参加者と交流を深める会などさまざまな会を実施してきました。

会員・非会員や会社の枠を超えて毎回30名程度の参加者が集まりグループディスカッションや懇親会で交流を

原稿受付 2023年1月10日

* 1 三菱重工業(株) エナジー・トランジション&パワー事業本部
GTCC事業部 ガスタービン技術部
〒676-8686 高砂市新井町新浜 2-1-1

深めました。似た背景を持つ女性技術者同士が専門分野でも生活面でも会話をする機会は希少で、普段必要性を感じなくても話してみることでこういう話をしたかったという気づきや自分の日々の職場や将来につながるヒント、励ましを持ち帰る人も少なくありませんでした。参加者からはまた参加したいという声も多く頂戴しました。

しかしながらこのような対面での行事はコロナ禍で実施が難しくなりました。行動制限が続く中、本年度は他学会の実施例を参考に女性オンラインランチミーティングを実施するなど短時間でのオンライン交流会を試みました。

女性の交流会で扱うテーマは育児や出産に限りません。むしろ日々の職場、キャリアの将来性や目指すべき人物像も大きな興味です。女性活躍と一言で言っても、入社年度の若い世代からチームリーダーを担う世代、ベテラン世代まで多様な人で構成されていることから、興味のある分野や提供できる話題は幅広く、今後も多くの価値観を大事にした活動を意識していきたいと考えます。



Fig. 2 2018年交流会風景

(3) 学生との交流

機械系に進学する女性比率が低い状況は過去数十年間大きく変わっていません。学校基本調査の公開データによると2022年の時点で機械工学専攻の女性比率は6%と大変低い数字です。業界の女性比率を押し上げるためには、理系を選択する女性が増えることと、現在理系の道に進んでいる女性に将来に希望を持って業界に進んでもらうこと、の二つの柱が考えられます。

本委員会では、高校の先生との交流、現役大学生との意見交換会を実施してきました。大学生からは、ガスタービン学会は固いイメージ、業界の働き方はどうなのか、どういった業務を行っているか、実際に工場に行ってみたいなどの意見を聞き、昨年と今年は学生を対象に若手技術者との交流を通じて具体的に業界を感じてもらう会を実施しました。イベントの中では女子学生部屋を

設け、将来に対する不安や率直な悩みについて意見交換を行う場を設けました。

(4) コロナ禍の在宅ワーク

2019年度末からの緊急事態宣言をきっかけに多くの人が在宅勤務を行うようになりました。それまでは限られた育児/介護者だけが使用していた制度であり、その評価者や同僚からの理解が得にくい点や不公平感も課題としてありましたが、コロナをきっかけにあらゆる階層の人が使用するようになり、理解が進むと同時にシステムや制度の整備が進みました。コロナ収束後も多様な働き方を後押しする大きな変革となりました。委員会では在宅ワークをテーマにオンラインイベントの開催も行いました。

(5) 男性の参加

女性を中心とした活動から始めて3年が経ち、より活動の幅を広げるべく男性に参画いただく「男女ともに働きやすい職場とは」をテーマに会を開催しました。女性を部下に持つ男性を講師にお招きし、男性上司の視点や取組を共有いただき、若手社会人や男性にご参加いただいた盛況な会となりました。参加者によるグループディスカッションでは各社共通点を改めて認識し女性一方ではない意見を聞く貴重な会となりました。

また、最近の動向として男性の育児休暇取得や育児参加率も各社増えてきた実感があります。男子学生からは育児に携わる男性や働き方の生の声をきいてみたいという声も出てくるなど時代の変化を感じます。今後は男性にも参加いただきやすい活動も企画していきたいと考えます。

4. 活動の総括と今後へ向けて

2016年に委員会を発足以来、前例がない中で自由に活動を行ってきました。委員長を務められたIHI仲保様、川崎重工都留様、本田技術研究所川澄様はじめ、女性技術者のメンター的な役割をお引き受けくださった多くの委員の皆様、講演をいただいた皆様、イベントにご参加いただいた皆様、学会事務局皆様に感謝申し上げます。

私自身がこの会で目標としたい多くの先輩方に出会うことができました。学会創立50周年のこの節目に、ガスタービンという未来ある技術や研究を選択する女子学生、女性技術者の仲間を増やす活動を地道に続けていきたいと気持ちを新たにいたします。

男女共同参画推進委員会は臨時委員会であり、理想的には目標達成=委員会の解散ということになりますが、解散のその日まで男女共同参画に向き合い、社会の変化に応じた柔軟な活動を展開していきたいと思えます。

(男女共同参画推進委員会委員長)

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀【組織】

国による航空用ガスタービンに関する取組と今後の期待

The Past National Project of Jet Engine and Future Strategy



呉村 益生*1
KUREMURA Masuo

キーワード：航空機産業政策, ガスタービン, ジェットエンジン

Key Words : Industrial Policy in the Commercial Aircraft Industry, Gas Turbine, Jet Engine

1. はじめに

2020年に発生した新型コロナウイルス感染症の影響により影響を受けた経済活動が徐々に回復に向かっている一方で、特に航空機産業においては、航空旅客需要・航空機生産はコロナ前の水準と比べ落ち込んでおり、引き続き厳しい状況が続いている。航空機産業は、幅広い裾野産業に支えられているため、地域の中小企業の経営や雇用への影響も大きい。他方で、航空機産業は中長期的には、アジア等の新興国の経済成長を背景に、持続的な成長が期待されており、また、様々な先端技術が適用され、そこで開発・実用化された技術が他の産業にも展開されることを通じ、産業全体にも波及効果が期待される重要産業であるという位置づけは変わらない。

そのため、足下の厳しい状況への対応も着実に進める一方で、ポストコロナを見据えた対応を進めていくことが重要である。特に、国際的な脱炭素の流れや人権への関心の高まりなど、サステナビリティに対する認識が強まっているほか、経済安全保障をめぐる国際情勢の変化や、更なるデジタル化の加速など、製造業を巡る環境変化は速度を増しており、官民一体となった取組が必要となっている。

今後の日本の航空機産業の未来を描くにあたって、航空用ガスタービン（以下、ジェットエンジン）の重要性は疑いようのないことと思われる。経済産業省として適切な産業政策を打ち出していくためには、先人に学ぶことが重要であり、ジェットエンジンの発展の歴史から学ぶことは多いだろう。

今回、有り難いことに「ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀」という記念特集への寄稿の依頼をいただいた。日本ガスタービン学会が50周年を迎える記念すべき節目の年に、過去を振り返り未来を考える機

会とさせていただきたい。

2. 民間機に関する国の技術開発プロジェクトの歩み

日本の航空機産業は、戦後の空白期間を経て、航空機の製造の面では自衛隊機や「飛鳥」等を中心に技術を育て、民間航空機（機体・エンジン）の国際共同開発に参画することで発展してきた⁽¹⁾。

民間のジェットエンジンに関しては、エアバス社の中小型機であるA320に搭載されるV2500エンジン、その後継であるPW1100G-JMエンジンにおいて、23%の事業比率で参加しており、また、米国のGEやPratt & Whitney社（以下、P&W）、英国のRRの中大型機、リージョナル機向けのジェットエンジンにおいても、RRSP（Risk Revenue Sharing Partnership）等の形式で国際共同開発事業における地位を築いてきた。

戦後、日本として民間ジェットエンジンを開発する能力を獲得するところから始まり、国際共同開発において一定の地位を形成するまでには先人達の数々の挑戦があったことは言うまでもないが、中でも産学官が一体となって進めてきた技術開発プロジェクトが果たした役割は今後の方針を検討する際には振り返る必要があるだろう。

2.1 国際共同開発への参画

日本として初めて民間ジェットエンジンを開発する技術的能力を獲得したプロジェクト⁽²⁾として、FJR710ジェットエンジン開発プロジェクト（以下、FJRプロジェクト）は、その技術力が国際的に認められる端緒となったプロジェクトと言える。1971年度から1981年度にかけて通商産業省工業技術院の大型工業技術研究開発制度（大型プロジェクト）の一環として実施された同プロジェクトにおいて実際に開発に携わったのは、石川島播磨重工（現IHI）、川崎重工及び三菱重工の3社であり、科学技術庁航空宇宙技術研究所が設計資料の提供のほか研究開発を指導した。第一期は、推力5トンのエンジンの開発が目標とされ、そのためにファン、圧縮機等

原稿受付 2023年2月14日

* 1 経済産業省製造産業局航空機武器宇宙産業課
〒100-8901 千代田区霞が関1丁目3番1号
E-mail: iwanaga-kentaro@meti.go.jp

の構成要素の性能向上を目指した研究が行われた。続く第二期では、推力6～7トンの高性能ファンジェットエンジンの開発が目標とされた。研究開発の推進主体として、前掲3社により航空機用ジェットエンジン技術研究組合が新たに設立され、個々の技術課題に関しては航空宇宙技術研究所が担当し、組合では試作研究と運転研究を担当した³⁾。第二期における試作エンジンの改良型が、航空宇宙技術研究所のファンジェット短距離離着陸実験機「飛鳥」に4基搭載された。

1977年に行われたFJRプロジェクトの第一期の第二試作エンジンの高空性能試験は、英国の国立ガスタービン研究所の施設を借用して実施されたが、各種試験の成績は極めて良好であり⁴⁾、英国航空工業界に対してその技術力を印象づけた。その後、1978年にはRolls Royce社(以下、RR)から、100～120席クラスの航空機用エンジンの共同開発を持ちかけられ、翌年、正式にRRと日本側で共同事業契約を結ぶこととなり、XJBプロジェクトとして、国の補助金による支援の基、我が国初の実用化に向けた民間ジェットエンジン開発が開始された。

XJBプロジェクトが進む中で、国際的な航空機市場における需要が150席クラスに移行した。150席クラスの市場は、RRのみならず、GE、P&Wも含めた注目領域である中、日英両国は1981年にGE、P&Wから共同開発の打診を受け、P&Wの参加を受け入れることとし、日英米の3者で協議を開始した。この際、P&Wが既にMTU(独)、フィアット(伊)と共同開発を進めていたことから、これらを含む日、英、米、独、伊の5か国による国際共同開発事業として合意に至った。1983年、スイスに合弁会社IAE(International Aero Engines AG)が設立され、XJBプロジェクトは、V2500の開発プロジェクトへと移行した。V2500及び同時期に検討が進んでいたYXXプロジェクトの開発費が大きくなること等から、航空機国際共同開発促進基金が創設され、V2500開発プロジェクトに対しても当該基金等の基、政府支援が行われた。

こうした官民一体となった取組を契機として開発されたV2500は、ベストセラーエンジンとして今なお製造が続いているおり、日本の航空機産業が国際共同開発へ参画し、民間ジェットエンジンの事業に漕ぎ出した初の事例となった。

2.2 国際的な地位の向上

その後、1996年に、GEと石川島播磨重工、川崎重工によって国際共同開発が実現したCF34-C8等を経て着実に日本のジェットエンジン開発における地位が向上したが、1980年代後半以降の超音速旅客機をめぐるプロジェクトについても、日本のジェットエンジン技術を高め、国際的な地位を向上させたという観点から注目したい。

当時、超音速旅客機に関する調査が国内外において行われていたが、将来、その国際共同開発が行われるのであれば、機体とエンジンの両方に参画したいというのが

日本関係者の思いであったという⁵⁾。そこで、通商産業省は、大型プロジェクトとして、1989年度から1999年度にかけて超音速輸送機用推進システム(HYPR)の研究開発を推進した。同プロジェクトは、鉦工業技術研究組合に基づく、超音速輸送機用推進システム技術研究組合によって実行された。さらに、1991年には、UTC(P&W)、GE、RR、スネクマの4社が参加し、大型プロジェクトにおける初めての海外企業参加となった⁶⁾。あわせて、国立試験研究機関と参加企業との連携が可能となる体制整備がなされた⁷⁾。その後、研究開発活動では、ラムジェットのマッハ5での燃焼実験の成功や、ターボジェットエンジンのマッハ2.5の飛行環境でのエンジン運転試験の成功、世界初の超音速機用コンバインドサイクルエンジンの運転の成功等、技術的成果を上げた。同プロジェクトに対する最終評価報告書において「蓄積された技術やノウハウ、国内外メーカーとの共同開発の経験は、我が国にとって大きな財産となるとともに、我が国航空エンジン産業の国際的地位の向上に寄与したものと認められる」⁸⁾と評価された他、2000年8月の国際航空科学技術会議のフォン・カルマン賞をはじめ、多くの賞を受けた。

HYPRの終了後、超音速輸送機の社会的受容性を高める観点から、環境適合型次世代超音速推進システム(ESPR)のプロジェクトが、1999年度から2003年度まで実施された。HYPR、ESPRで培われた世界水準の基盤技術成果を継承し、2003年度から10年間、経済産業省の航空機・宇宙産業イノベーションプログラムとして、環境適応型小型航空機用エンジン研究開発(エコエンジンプロジェクト)が実施された。同プロジェクトは、省エネルギー、環境適合性の社会的要請を捉え「次世代の「環境に優しく高性能。低コスト」の小型航空機用エンジンの実用化を目指し、その実現に要する個別要素技術と高度なシステムインテグレーション技術の確立を行う」⁹⁾ことを目的とし、IHIを幹事会社として川崎重工、三菱重工、日本航空機エンジン協会、ESPR組合、JAXAをはじめ大学、研究機関が参画した。世界の経済事情の変化、航空燃料費の高騰、当初ターゲットとしていた50席クラスの航空機の需要の減少等も影響し、掲げられていたデモエンジンの製作は叶わなかったが、達成された技術は事後評価において「近い将来における海外エンジンメーカーとの共同開発への参画等、このプロジェクトで獲得した技術の一部が実用に供される予定であり、企業活動に貢献できることは評価できる。エンジン要素技術、低騒音技術、低NOx技術は波及効果として継続されるであろうし、人材育成の効果は顕著である。」¹⁰⁾とされている。

こうした一連の実証機プロジェクトにより技術力を示すことで、日本のジェットエンジン産業は、特に低圧系において国際的な地位を築いて来たと言える。

その後も、2015年に基幹産業化に向けた航空ビジネス

戦略に関する関係省庁会議により決定された「航空産業ビジョン」において「従来取り組んでいる機体やエンジンの国際共同開発等においては、産業規模の拡大と、国内産業基盤の強化のため、現在の支援枠組みを強化して機材の国際共同開発に積極的に参画・拡大する」こと、「また、技術開発や先端技術実用化などにより、我が国企業の主体性の発揮に繋がるような参画レベルの向上を推進する」ことといった方針が打ち出された。その上で、JAXAのaFJRプロジェクトやクリーンエンジンプロジェクト、NEDOプロジェクト等により技術力を高める取組が推進されている他、国際共同開発の文脈では、航空機国際共同開発基金を活用して、次世代中小型民間輸送機用エンジン（次世代GTF）関連技術についてP&Wとの国際共同開発等が行われている。

3. 航空機産業をめぐる環境変化と国の取組

ここまで、官民プロジェクトが日本のジェットエンジン産業の発展に果たしてきた役割を振り返った。それは、当然、技術を成熟させることが第一だが、そのみに没頭したのではなく、市場動向をはじめとした時々の国内外の環境を鋭く捉え、海外エンジンメーカーと戦略的な関係を築きながらプロジェクトを推進してきたことで、プロジェクト毎に着実にステップアップを果たしてきた歴史であるとも捉えられる。

「はじめに」で述べたとおり、製造業をめぐる環境変化は速度を増しており、航空機産業も例外ではない。こうした航空機産業をめぐる環境変化と国の取組について紹介したい。

3.1 航空分野における脱炭素化の動向

2015年、国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）において、2020年以降の温室効果ガス排出削減等のためのパリ協定が採択され、世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも2℃高い水準を十分に下回るものに抑えること及び世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも1.5℃高い水準までのものに制限するための努力を続けることとされている¹¹⁾。こうした中、航空分野においては、国際民間航空機関（ICAO）において、2010年に、短中期目標として燃料効率の年平均2%改善や2020年以降CO₂排出量増加制限の目標を掲げ、この目標を達成するためには、運航方式の改善や新技術導入、代替燃料、市場メカニズムの活用を組み合わせることが必要であるとされている¹²⁾。2016年には、2035年までの国際航空におけるカーボンオフセット及び削減スキーム（CORSIA）が設定された。さらに、2022年の第41回ICAO総会において、国際航空分野における脱炭素化の長期目標として「2050年までのカーボンニュートラル」が採択された。また、業界目標としても、2021年に、国際航空運送協会（IATA）において、2050年に2005年比でCO₂総排出量を半減するという2010年に表明した目標を切り上げ、2050年実質ゼロの目標が採択されたところ。

前述の2000年代初頭に開始されたエコエンジンプロジェクトの当時から省エネルギーに向けての技術開発を進めてきており、ジェットエンジン産業にとっては決して不連続な変化ではないが、2050年カーボンニュートラルというCO₂排出量削減に関して非常に高い目標が掲げられたことから、技術的にも踏み込んだ検討が必要になると思われる。実際、こうした流れの中、欧米では政府の強力な支援の基、代替航空燃料（SAF：Sustainable Aviation Fuel）の導入拡大に向けた取組みはもとより、現状において、SAFは供給量や製造コストに関する課題があるため、2050年カーボンニュートラルに資する新技術開発も推進されている。

3.2 グリーン成長戦略と国の技術開発の方向性

我が国においても、2020年10月に2050年カーボンニュートラルの実現を宣言し、地球温暖化対策の推進に関する法律（平成10年法律第117号）の基本理念として掲げるとともに、2021年には、同法に基づく地球温暖化対策計画（令和3年10月22日閣議決定）において2030年度に、温室効果ガス2013年度比46%削減を目指し、さらに、50%の高みに向け、挑戦を続けていくこととしている。

国としては、2020年12月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（2021年6月に更新。以下、グリーン成長戦略）では、温暖化への対応を、経済成長の制約やコストとするのではなく、国際的にも、成長の機会と捉える時代になったとして、従来の発想を転換し、積極的に対策を行うことで、産業構造や社会経済の変革をもたらす、次の成長につなげていく、「経済と環境の好循環」を作っていく産業政策を掲げている。そのために、官民で野心的かつ具体的な目標を共有した上で、これに経営課題として取組む企業等に対して、10年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援する仕組みとして、グリーンイノベーション基金事業（2兆円）を立ち上げるなど、政府を挙げての具体的な取組が進んでいる。

航空分野に関して、運航方式の改善、新技術導入、代替燃料といったICAOにおける目標達成のための手法のそれぞれについて包括的に取組を進めている。ジェットエンジンに特に関係するのは、新技術導入、代替燃料である。国際輸送行動グループ（ATAG：Air Transport Action Group）が、2050年カーボンニュートラルに向けた分析を行ったレポートであるWaypoint 2050 2nd Editionでは、Fig. 1に示すように、航空機の主な「エネルギー源」の変革が技術的にどのサイズ、タイムラインで商業的に適用可能なレベルになるかについて分析がなされている。これによると、SAFは機体サイズや航続距離の制限なしに2020年代から、電動化は、コンピューター機やリージョナル機を中心に2020年代後半以降、水素燃料電池は2025年以降、コンピューター機、リージョナル機を中心に、水素直接燃焼方式は2035年以降に中小型

機中心に適用可能となるとされている。加えて、航空機用ガスタービンとモーター（電池、あるいは、航空機用ガスタービンに取り付けた発電機から給電）を組み合わせた推進方式である電動ハイブリッド化については、2030年代以降、リージョナル、中小型機から、大型機まで適用可能性があるとされている。

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Commuter + 9-19 seats + 60 minute flights + <1% of industry CO ₂	SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF
Regional + 30-100 seats + 30-90 minute flights + ~3% of industry CO ₂	SAF	SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF	SAF or Hydrogen fuel cell and/or SAF
Short haul + 100-150 seats + 45-120 minute flights + ~14% of industry CO ₂	SAF	SAF	SAF	SAF potentially some Hydrogen	Hydrogen and/or SAF	Hydrogen and/or SAF	Hydrogen and/or SAF
Medium haul + 150-250 seats + 60-150 minute flights + ~43% of industry CO ₂	SAF	SAF	SAF	SAF potentially some Hydrogen	SAF potentially some Hydrogen	SAF potentially some Hydrogen	SAF potentially some Hydrogen
Long haul + 250+ seats + 150 minute + flights + ~30% of industry CO ₂	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF

Fig. 1 An indicative overview of where low-and zero-carbon energy could be deployed in commercial aviation¹³⁾

2050年カーボンニュートラルに資する新技術導入に関する取組は、代替燃料の取組が進んでいたとしても、その燃料価格、供給量の課題を機体側から解決するための革新的な燃費向上技術の導入、さらには、炭化水素系の燃料の燃焼を前提とした既存の技術や取組の延長を超えた抜本的な変革が起きる可能性が否定できず、新技術をきっかけとして、ジェットエンジンを含む航空機産業において我が国産業が既存の国際的な立ち位置に囚われずさらに重要な役割を担うために飛躍的に競争力を強化する機会として捉え得る。その一方で、Fig. 1で見たように、新技術の方策には複数の選択肢が存在し、どの選択肢がどの時期に適用されるか現時点では不確実性が残る。

こうした中で競争力を獲得していくために、海外OEMが掲げる技術の方向性を踏まえ、受け身に回ることなく、複数の有力技術（電動化（推進系、装備品）、水素適用、軽量化・効率化）に主体的・積極的に取り組み、我が国として選択余地を増やしつつ、適切にソリューションを提供していくという方針で、経済産業省は、Fig. 2に示す技術開発のロードマップを策定している。このロードマップに基づいて、現時点では、国家プロジェクトにおいて、推進系、装備品の電動化技術の開発、炭素繊維複合材、耐熱複合材（CMC）、耐熱合金（ニッケル基超合金）といった材料技術の開発（認証取得に向けたデータベース構築含む）、グリーンイノベーション基金事業において、水素航空機のコア技術（液体水素燃料貯蔵タンク、液体水素供給システム、燃焼器）の開発などを進めている。

技術開発を推進するのみならず、社会実装を戦略的に進めて行くことが必要である。そのために、ルールメイキングへの関与、国際連携についても技術開発と一体と

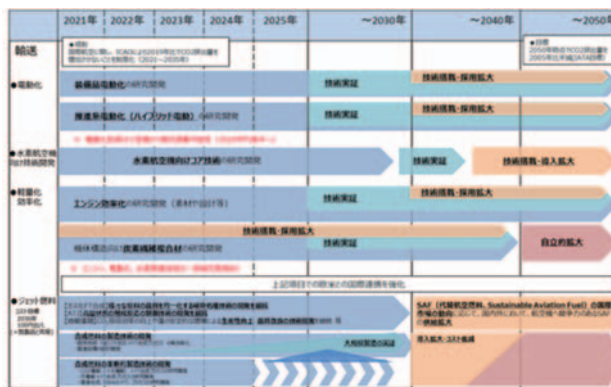


Fig. 2 “Roadmap” in “Green Growth Strategy” for aircraft industry¹⁴⁾

なって取組んでいる。

航空機関連技術には、高い安全性が求められ、新技術導入にあたっては、航空当局が定める安全基準への適合が必要であり、開発した新技術を社会実装し、日本の航空機産業の競争力強化に繋げていくためには、技術開発を推進するとともに安全基準の策定や国際標準化に向けた取組を進めて行くことが重要である。2022年6月、経済産業省と国土交通省は合同で、「航空機の脱炭素化に向けた新技術官民協議会」を設置し、日本企業が持つ優れた技術の社会実装及び産業競争力の強化に向けた取組を開始した。

主要な航空機OEMが海外に存在していることから、新技術導入にあたって、海外政府、企業との戦略的な連携を進めていくことが不可欠である。経済産業省は将来的に適用される新技術の不確実性を低減させるための情報収集や、さらには、日本企業との研究段階からの連携促進のために、ボーイング社やフランス政府等との協力枠組を活用し、情報交換、マッチングイベントの実施などを行っている。2022年度には、日仏民間航空産業ワークショップを開催し、仏民間航空総局、仏企業と2050年カーボンニュートラルに向けた技術動向等に関して情報交換等を行ったことに加え、ボーイング社とは航空機に関するサステナビリティ分野での協力を強化し、次世代の航空機の技術的な実現可能性や市場へのインパクト等の研究においての協力等に関して覚書を交わした。

代替燃料の適用に関しては当然のことながら、新技術の導入においても推進系の全電動化の方策を除いては、ジェットエンジンの活用を前提としている。これまでのジェットエンジンに関する研究開発の重要性は脱炭素化の文脈でもは変わらないが、航空機全体として、多様な技術的な選択肢が存在する中、これまで以上にエンジンOEMを超えて様々なステークホルダーと連携の上、今後の打ち手を検討していく必要性が増していると考えられる。

3.3 経済安全保障

ジェットエンジンの製造に係るサプライチェーンは高度な技術と品質を維持しつつ安定供給が可能な企業によ

りグローバルに構築されている。前述の通り、脱炭素化の要請が強まる中、ジェットエンジンの部品又はその生産に必要な原材料等には軽量、高強度、高耐熱を実現する優れた素材・製造技術が求められる他、生産設備、工程、品質管理方法など生産プロセス全体を対象とした安全認証が存在することから、サプライチェーンの代替や新規立ち上げに数年を要する場合が多く、その機能を直ちに代替可能な製品を調達することが困難である¹⁵⁾。

そうした中、国際的な情勢に目を向けると、近年、コロナ禍やウクライナ情勢に端を発した物資や資源の供給制約が断続的に発生している。過去にも、国外の紛争や外交摩擦を背景とした供給制約は繰り返し発生してきており、不確実性の高まる世界情勢の中、今後同様の供給リスクはさらに高まっていく可能性があり¹⁶⁾、航空機産業においても安定供給に対して信頼あるサプライチェーンの構築が重要性を増していくと考えられる。これは、供給元の多角化、国内回帰、よりリスクの低い供給元への切り替え等、様々な選択肢を採り得るが、サプライチェーン全体で連携した取組を推進し、強靱な産業構造を作り得るか否かということが、日本の経済安全保障上重要であることは元より、ジェットエンジン産業の成長においても鍵となると考えられる。経済産業省では、「経済施策を一体的に講ずることによる安全保障の確保の推進に関する法律（経済安全保障推進法）」に基づき、2023年1月、「航空機の部品に係る安定供給確保を図るための取組方針」を策定し、ジェットエンジン含む航空機サプライチェーンの強靱化を目指していく方向性を示した。

4. 今後の展望

航空機産業の成長を実現するには、次世代航空機において日本の航空機産業の高付加価値化を狙うことが必要となるが、これまで見てきたように脱炭素化や経済安全保障の動向等、適用される技術には不確実性が残る。そうした不確実性を前提に、我が国がより主体的に技術開発を行い、より高みを目指すためには、機体・エンジンメーカー、エアライン、燃料メーカー、有力な技術を有する他産業のプレイヤー等を含む産学官で産業戦略を共有し、連携を深めていく必要があると考えられる。ジェットエンジンは、想定される多くの技術方策において必須となっており、ジェットエンジン産業の参加に大いに期待しているところである。

国は、経済・社会、産業構造をクリーンエネルギー中心に移行させ経済社会システム全体の変革、すなわち、GX（グリーントランスフォーメーション）を実行するべく、必要な施策を検討するためGX実行会議を設置した。2022年12月、同会議においてGX実現に向けた基本方針の案が示されたが、その中で航空機産業についても、今後10年の道行きを示している。そこでは、次世代航空機に係る新技術の不確実性を前提に、我が国がより主体

的に技術開発を行い、航空機産業の高付加価値化を図るために、実証環境の整備、実証機開発の機会等について触れている。

経済産業省としては、こうしたGXの議論も含め、航空機産業戦略について産学官での議論をリードしていく方針である。ここまで国の技術開発プロジェクトが果たしてきた役割等を振り返ったが、こうしたプロジェクトにおいて国際連携の戦略を持って実証機に取組んだ先人達の挑戦が、日本のジェットエンジン産業の立ち位置を引き上げてきた歴史は今後の産業戦略の検討において重要なヒントとなるのではないだろうか。

参考文献

- (1) 基幹産業化に向けた航空ビジネス戦略に関する関係省庁会議、航空産業ビジョン（2015）。
- (2) 財団法人日本航空機エンジン協会、航空機エンジン国際共同開発20年の歩み（2001）。
- (3) 独立行政法人経済産業研究所、通商産業政策史7 機械情報産業政策 1980-2000（2013）。
- (4) 通商産業省、高空性能試験に合格-航空機用ジェットエンジンの国産・実用化に大きく前進、通産省公報（1977）。
- (5) 今井康夫、民間航空機産業政策史第15回（2012）、時評社。
- (6) 通商産業省、大型工業技術研究開発制度「超音速輸送機用推進システムの研究開発」への海外企業の参加について、通産省公報（1991）。
- (7) 市丸修、黒沢俊晴、大型プロジェクト「超音速輸送機用推進システムの研究開発」の概要、日本ガスタービン学会誌第20巻第77号（1992）p. 7。
- (8) 通商産業省、産業科学技術研究開発制度「超音速輸送機用推進システム」最終評価報告書、通産省公報（1985）。
- (9) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、プロジェクトの概要説明資料（公開）事業の位置づけ・必要性及び研究開発マネジメント、第1回「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」（事後評価）分科会資料6-1（2013）。
- (10) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価委員会、「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」事後評価報告書（2013）。
- (11) 国土交通省、航空脱炭素化推進基本方針（2022）。
- (12) ICAO ENVIRONMENT, ON BOARD A SUSTAINABLE FUTURE（2016）。
- (13) 内閣官房、経済産業省、内閣府、etc., 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（2021）。
- (14) ATAG, WAYPOINT 2050 second edition（2021）。
- (15) 経済産業省、航空機部品に係る安定供給確保を図るための取組方針（2023）。
- (16) 経済産業省、経済秩序の激動期における経済産業政策の方向性、第30回産業構造審議会総会資料2（2022）。

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀【組織】

ガスタービン・ジェットエンジンとともに歩んだ NAL/JAXAの半世紀とこれから

Half a Century of NAL/JAXA with Gas Turbines and Jet Engines



山根 敬*1
YAMANE Takashi

キーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，航空宇宙技術研究所，宇宙航空研究開発機構

Key Words：Gas Turbine, Jet Engine, National Aerospace Laboratory (NAL), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

1. 緒言

航空宇宙技術研究所（航技研，NAL）から宇宙航空研究開発機構（JAXA）となった現在までの研究開発の歴史は，半世紀を超えて70年に迫る。著者のNAL/JAXAでの経歴は現在までの30年に過ぎないので，諸先輩方が残した貴重な資料を元にこれまでを振り返るとともに，これからの研究開発計画の一部を紹介するものである。特にNAL時代の記述は参考文献¹⁾を元に行っているが，非売品であるため，参考にされたい場合は図書館等をあたっていただきたい。

2. 航技研草創期

2.1 設立

航空研究の再開を受けて1955年に設立された航空技術研究所（当時，1963年より航空宇宙技術研究所）の原動機部がジェットエンジン研究部署の始まりである。航技研は東京都調布市と三鷹市の境界近辺の国有地に新たに建設したため，すべての設備を1956年度からの第一次6か年計画と続く第二次6か年計画で集中的に整備するとともに，研究体制を構築した。

2.2 エンジン研究設備の整備

以下に草創期に整備された主な設備について，紙面の都合で名称のみを列挙する。これだけの規模，件数の設備が一気に整備された当時の，ジェットエンジン研究への熱意が感じ取れる。なお，航技研では機体研究用の各種大型風洞も同時期に整備された。

- ・空気源（3,700kW，10,500kW）
- ・圧縮機試験設備（4,600kW，15,000kW）
- ・回転タービン空力試験設備
- ・回転タービン高温試験設備

- ・燃焼器試験設備（缶型，円環型）
- ・翼列試験設備（高速，低速）
- ・回転振動試験装置
- ・熱衝撃試験設備

これらのエンジン試験設備のうち，当時の姿のままに現存するものはないが，その後の研究開発へのニーズに応じて更新や新たな設備が整備されて現在に至っている。

2.3 研究体制の構築

ジェットエンジンの要素研究として，圧縮機，タービン，翼列，燃焼器，熱伝達，構造強度，振動，潤滑・軸受け，エンジン性能，エンジン計測制御の研究体制が構築され，後述するリフトジェットエンジンの研究などを推進する基盤が整った。

3. リフトジェットエンジン研究開発

3.1 経緯

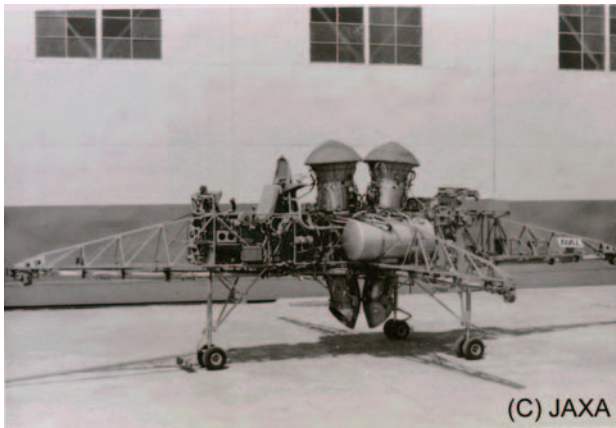
1960年頃に欧米でさかんに行われていたV/STOL研究に触発されて，航技研では1962年度から1976年度までVTOL機研究開発が行われた。これに必要な軽量ジェットエンジン研究試作のため，1962年に産官学で構成するジェットエンジン研究委員会が設立され，リフトジェットエンジンの開発が始まった。

3.2 JR100の開発とFTB

最初に取り組んだのがJR100で，Jet Engine Researchと目標推重比10から名付けられた。JR100の開発に先立ち，日本初の量産ジェットエンジンとなったJ3エンジンの開発でも航技研の試験設備が使用されたが，そこから得られた知見もJR100で活用された。JR100は1964年に完成し，その後，耐久性向上型のJR100Fを2台搭載したVTOL実験機FTB（Flying Test Bed）（Fig. 1）で1970年の初飛行を経て翌年に初めての自由飛行に成功した。その後，VTOL技術研究は経済性の観点から中断され，STOLへ軸足を移すこととなった。

原稿受付 2023年2月6日

* 1 （国研）宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
コアエンジン技術実証（En-Core）プロジェクトチーム

Fig. 1 FTB with JR100F Engines ⁽¹⁾Fig. 2 JR220 Engine ⁽¹⁾

3.3 JR200, JR220の開発

VTOL技術研究と並行して、飛行試験には至らなかったものの、JR100の推力強化型としてJR200とJR220が試作された。

まずJR200は、JR100よりも推重比をさらにアップするために、空気流量の増大と軽量化を行い、1966年に試作が完了した。特に圧縮機について、高負荷化により6段から5段に減らしてもJR100と同程度の圧力比を維持し、チタン合金の採用も軽量化に貢献した。

次にJR220 (Fig. 2) では、空気流量はJR200を維持しつつ、圧力比の増加とタービン入口温度の上昇等による推力増強を行った。タービン入口温度を850°Cから950°Cに上げるために、今日では見られない板金構造ではあるが日本で初めて空冷タービン静翼が採用された。

JRエンジンの開発は、その後のFJRエンジンへのコアエンジン技術獲得への重要なステップになったと言えるだろう。

4. FJR710エンジン研究開発プロジェクト

4.1 経緯とプロジェクト体制

1970年前後に高バイパス比ターボファンエンジンが搭載されたワイドボディ旅客機が続々と登場し、米英の主要ジェットエンジンメーカーがエンジン開発にしのぎを削る中、日本でも航空エンジン産業を定着させようという機運が高まっていた。一方、通産省工業技術院では1966年に大型工業技術研究開発制度（通称大型プロジェクト；大プロ）を発足させており、1971年度の予算措置によりFJR710研究開発が開始された。FはFan, 71はプロジェクト開始年を意味する。

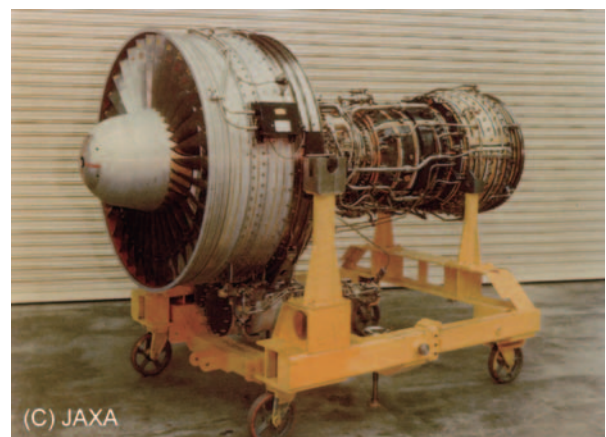
研究開発の主要な部分は、工業技術院と石川島播磨重工業（現IHI）、川崎重工業、三菱重工業（現三菱重工航空エンジン）が結成した研究組合との間の委託契約であったが、航技研は要素研究のみならず、プロジェクト全体のマネジメントの役割を担った。また、航技研には地上エンジン運転試験設備（テストセル）、環状燃焼器試験設備が整備され、これらは今日まで数度の改修を経て現在も活躍している。

4.2 第一期5ヵ年計画

1971年度に開始された第一期5ヵ年計画では、地上静止推力5,000kgfの高バイパス比ターボファンエンジンを目標に、第一次試作としてFJR710/10を3基製作し、1973年に試作1号機の自立運転に成功した。その後、改良を加えたFJR710/20の3号機で、1975年に目標推力の達成を確認した。また、航技研角田支所に設置した屋外エンジン試験設備で、騒音試験、排ガス試験等を実施した。

4.3 第二期5ヵ年計画

1976年度からの第二期では、大幅な軽量化による実機レベルの推重比実現とタービン入口温度を1,250°Cにする等の性能向上を行ったFJR710/600 (Fig. 3) が製作された。また、第一期のFJR710/10、/20を使用した鳥、水吸い込み、着氷、水吸い込み試験等が行われ、航空エンジンとして必要な耐久性等を確認した。さらに英国NGTE (National Gas Turbine Establishment) で実施

Fig. 3 FJR 710/600 Turboprop Engine ⁽¹⁾

したFJR710/600の航空性能試験に航技研メンバーも参加し、完全な目標達成を確認した。FJR710/20から始まったNGTEでの試験での成功が、後のV2500エンジン国際共同開発のきっかけになったと言われている。

4.4 STOL実験機飛鳥へのFJRエンジン搭載

FJRプロジェクト実施中の1977年から航技研の総力を挙げて始まった「ファンジェットSTOL機の研究」では、USB (Upper Surface Blowing) 方式による高揚力装置に使用するエンジンが検討され、1978年にFJR710/600エンジンの採用が決定された。STOL実験機の名に合せて機装・搭載して適合確認試験を行い、実機搭載用のFJR710/600Sが設計された。製作されたエンジンがC-1輸送機FTBで合計25回の空中試験を行ったことで、FJRが実際に空を飛ぶエンジンとなった。STOL実験機飛鳥 (Fig. 4) の飛行実験にあたっては、耐空性審査要領に基づいた耐空証明取得に準じた安全性立証が航空局から求められ、対処した。飛鳥の1985年10月初飛行でFJRは機体を飛ばすエンジンとなり、1988年3月にSTOL形態での着陸実験成功で目標を達成した。



Fig. 4 STOL Experimental Aircraft "ASKA"⁽¹⁾

5. FJR, STOL以後

5.1 航技研の役割変化

FJRプロジェクトにより、航技研のエンジン研究は、要素技術からインテグレート技術、完成機の試験技術、さらにSTOL飛鳥により、機体・エンジン統合設計も経験した。同時に国内メーカーも実力をつけ、航空エンジンの国際共同開発に参画することになり、以降の国内のエンジン関連プロジェクトにおいては、航技研の役割は全体のとりまとめから技術開発への部分的な参加にシフトすることとなった。

また、試験設備については一通りの整備が完了したが、エンジン屋外試験設備は次の使用が見込まれず、解体されることとなった。後に防衛装備庁のXF7開発においても屋外試験設備の新設と使用後の解体が行われ、国内での完成機エンジンの開発機会の少なさによる残念な点であろう。

5.2 高効率ガスタービンの研究開発への協力

第一次オイルショックを契機に創設された「ムーンライト計画」の一つの柱として1978年度から1987年度まで実施された「高効率ガスタービンの研究開発」では、民間企業を中心とする技術研究組合が実施主体となり、パイロットプラントAGTJ-100Aでの実証を行った。航技研は研究者を工業技術院に派遣するとともに、JR、FJRでの経験を生かして、プロトタイプ用要素技術（圧縮機、燃焼器、タービン、計測制御）の研究開発を主に担当した。中でも燃焼器については、当時世界最高の設計点圧力5.6MPaを目指すものであったことから、高温高压燃焼試験設備を設置して、開発を支援した。この設備²⁾はその後の増強を経て、今日の低NO_x燃焼器研究の重要な基盤となった。

5.3 セラミックガスタービンの研究開発への参加

1988年度から1997年度まで実施された「セラミックガスタービンの研究開発」においても同様に、研究者の派遣、要素技術の開発の他、SiC材料による高温熱交換器の試作などのセラミック材料の適用研究を行った。

5.4 HYPR/ESPRプロジェクトへの参加

将来の超音速輸送機用推進システムの研究開発を行った工業技術院の両プロジェクトにも、航技研は全面的に協力した。

まず1989年度から10年間実施されたHYPRプロジェクトでは、多岐にわたる要素研究・システム研究を担当した。また、マッハ2以上の速度域でターボジェットエンジンから切り替えて作動させるラムジェットについては、角田支所のラムジェット試験設備 (RJTF) でマッハ5相当条件でのインテーク及びフリージェット試験を実施し、1,900℃でのラム燃焼と約100kgfの正味推力の実証に成功した。

続いて行われた環境適合型次世代超音速推進システム技術の研究開発 (ESPRプロジェクト) はHYPRプロジェクトと同様の体制で実施され、航技研も引き続き参加した。

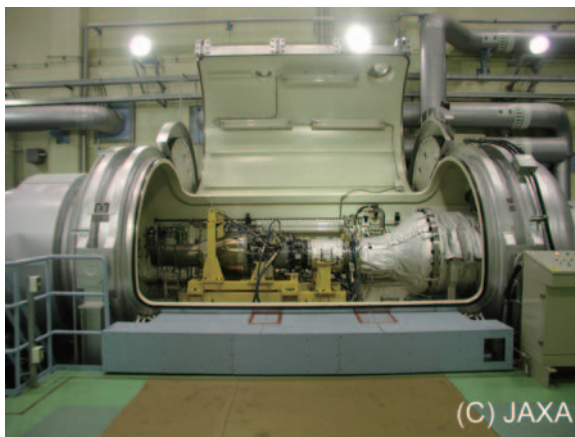
ESPRプロジェクトの終了後、開発されたプロトタイプエンジンは航技研で引き取り、他のエンジンにはない可変機構を制御して燃料消費を最適化する研究などに活用された。

5.5 次世代超音速機技術の研究開発

航技研で1997年度から実施した次世代超音速技術の研究開発は、マッハ2で巡行する超音速機の設計技術を飛行実験で実証するプロジェクトで、実験機を固体ロケットで飛ばすフェーズIとジェットエンジンで自力飛行させるフェーズII (Fig. 5) の計画であった。エンジン研究に関しては、フェーズIIに向けて、搭載エンジンの選定と運転試験を行った。このために、2001年に高空性能試験設備 (ATF) (Fig. 6) が完成し、フェーズIIに向けた候補エンジンのYJ69の運転データを取得してジェット実験機設計に必要なデータを提供した。

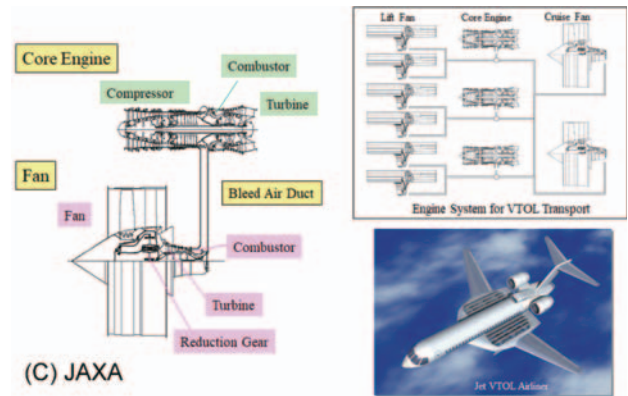
Fig. 5 Design of Small SST Test Aircraft "NEXST-2"⁽¹⁾

残念ながらこのプロジェクトはフェーズ I までで終了することとなったが、ATFは当初の超音速機用エンジン想定環境だけでなく、亜音速エンジンの巡航条件にも対応できるように改修され、活用が続いている。

Fig. 6 Altitude Test Facility (ATF)⁽¹⁾

5.6 超高バイパス比可変形状エンジンの研究

超高バイパス比可変形状エンジンは内外主要航空エンジンメーカーによる様々な提案が行われてきたが、航技研は1987年度から実施した「超高バイパス比可変形状エンジンの研究」で、独自の「コア分離型超高バイパス比エンジン」のコンセプトを提示した。VTOL機での使用を想定し、コアエンジンは空気圧縮機の役割を担い、リフトファンと推進ファンには圧縮機を持たせずにコアエンジンからの高圧ブリード空気を各ファンの燃焼器・タービンに送ってファンを駆動する (Fig. 7)。これにより、ファンをオンデマンドで必要な基数だけ運転することが可能となる。当初、ファンの大きさは既存ターボファンと同程度を想定していたが、後に、1種類の小型ファンで必要推力に応じて搭載基数を変えるクラスターファンのコンセプトに発展し、少人数用VTOLの可能性も提示し、今日の「空飛ぶ自動車」の原型と言えるものとなった。

Fig. 7 Concept of Separated Fan-Core Engine System⁽¹⁾

6. JAXA発足以後

6.1 NALからJAXAへ

2003年10月1日に、国内の宇宙3機関が統合して宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が発足した。組織体制には大きな変化があったが、引き続きJAXA独自の航空エンジン研究を進めつつ、国内メーカーと連携してプロジェクト等を推進することとなった。

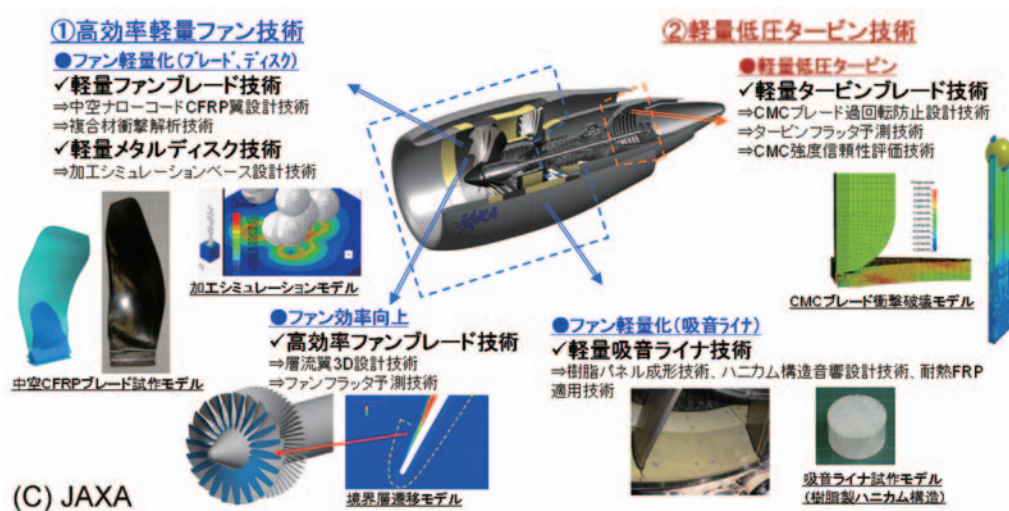
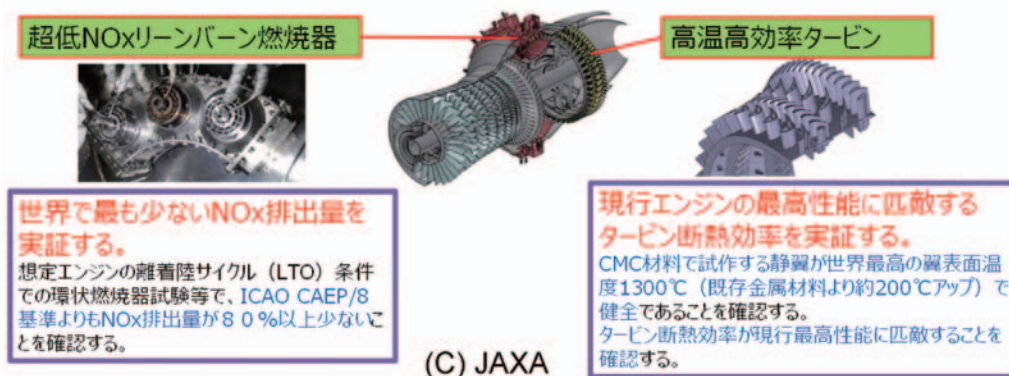
6.2 NEDOエコエンジンプロジェクトとJAXAクリーンエンジン研究開発

JAXA設立とともに環境性能 (低NO_x, 低騒音, 低CO₂) に優れた技術を開発するクリーンエンジン技術の研究開発 (TechCLEAN) を開始した⁽³⁾。これは特定のエンジンの開発を目指すものではないが、同じく2003年度に始まったNEDO環境適応型小型航空機用エンジン研究開発 (エコエンジンプロジェクト) よりも少し将来に実現すべき技術目標を設定して研究開発を進めつつも、対象とする技術項目には共通性がありエコエンジンプロジェクトを支援することも目的としていた。特に、新設した回転要素試験設備による多段圧縮機の性能評価、既存の高温高圧燃焼試験設備の増強と環状燃焼器試験設備の改修で候補燃焼器各形態の性能評価を可能とするなど、大きく貢献した。

6.3 JAXA aFJRプロジェクトとグリーンエンジン研究開発

エコエンジンは周知の通り、プロジェクト実施中の航空燃料の高騰トレンドを受けて燃費重視の設計に変更され、プロトタイプエンジンの試作には至らなかった。しかしエコ/クリーン終了後も経済性と環境性能を両立する技術開発のニーズはさらに高まり、JAXAでは国内メーカーと連携して、低圧系についてはaFJRプロジェクト、高圧系についてはクリーンエンジンの後継の事業としてグリーンエンジン研究開発で、技術強化に貢献することにした。

V2500エンジンを契機に国内メーカーが獲得したエンジン低圧系のシェアをさらに盤石にする国際競争力強化に貢献する目的で開始したのが、2013年度から2017年度の「高効率軽量ファン・タービン技術実証 (aFJRプロジェ

Fig. 8 Overview of aFJR Project ⁽⁴⁾Fig. 9 Overview of En-Core Project ⁽⁵⁾

クト)」(Fig. 8)で、外部のプロジェクトへの参加ではなく、ロケットや人工衛星と同様の、JAXAが主導するプロジェクトとして実施した。aFJRのaはadvancedを意味し、ここにFJRプロジェクトで得た国際競争力をさらに強化するという意図を込めた。高効率化の効果とあわせてエンジン軽量化による機体総重量の削減で、航空機の低燃費化を目指すものである。ファンに対しては、中空CFRP翼、軽量メタルディスク、層流翼設計、樹脂製軽量吸音ライナ等を、低圧タービンに対してはCMC (Ceramic Matrix Composites) 適用による軽量化に必要な設計・強度信頼性評価等の研究開発を成功させた⁽⁴⁾。

同期間に実施したグリーンエンジン技術の研究開発は、プロジェクトよりは規模が小さいものの、aFJRでは対象としなかった高圧系コアエンジンを構成する圧縮機・燃焼器・タービンの環境技術を高める研究の集合体である。aFJRで想定したターボファンのコアエンジンのスペックを前提に各要素の要求性能を定めて、燃費低減、低NO_x、騒音低減の研究開発に取り組んだ。

7. 現在とこれから

7.1 En-Coreプロジェクト

aFJR / グリーンエンジンに引き続き、JAXAではコアエンジン技術実証 (En-Core) プロジェクト (Fig. 9) を2018年度から2023年度までの計画で実施中である。コアエンジンの、特に高温高圧部位については、民間機用エンジン国際共同開発において国内メーカーは設計からの分担に至っておらず、さらなる国内エンジン産業の発展のために強化が必要である。En-Core (アン・コア) とは、Environment (環境) を重視したコア (Core) エンジンを意図した名称で、JAXAと国内メーカーの技術を結集して、世界最高レベルの燃焼器の低NO_x性能と高圧タービンの効率の技術実証を目標としている。

いずれもCMC材料を活用した設計による性能向上を狙っており、2023年度の環状燃焼器試験と回転タービン試験等による実証試験の成功を目指している⁽⁵⁾。

7.2 F7エンジンの導入

前述の通りJAXAの地上エンジン運転試験設備 (テストセル) はFJRプロジェクトを契機に整備され、その後も各種エンジンを使った運転試験や制御研究を行ってきたが、ESPRエンジンの老朽化以降はセルの機能を生かすエンジン試験が途絶えることとなった。一方、国内

メーカーやJAXAが開発した新技術を実機エンジンで実証するためのプラットフォームの必要性は以前から指摘されており、F7-10エンジンの導入が決定された。海上自衛隊のP-1固定翼哨戒機用エンジンであるため、P-1の運用が続く限りメンテナンスと保守部品入手がすべて国内で可能であることが大きなメリットである。

導入に先駆けて、テストセルもF7クラスの推力とファン口径に対応する大幅な改修を行い、2019年度のF7エンジン導入を経て2020年度より運用を開始した⁽⁶⁾。

7.3 現在の研究概要と保有設備

本記事ではNAL/JAXAのこれまでを振り返るにあたり、大きなプロジェクト等を中心に記述した。一方、JAXAの航空エンジンの研究は多岐にわたり紹介しきれないため、現在の研究概要と保有設備については2019年発行のパンフレット「JAXAの航空エンジン研究」を参照していただきたい⁽⁷⁾。

7.4 これからのJAXA航空エンジン研究

航空輸送の低燃費化は、過去の研究開発では、エンジン単体での燃費向上や、機体の抵抗低減・軽量化それぞれの効果を積み上げてきた。しかしエンジンのファンバイパス比の大幅な向上などのインパクトの大きい技術革新には限界がある中で、2050年カーボンニュートラルを目指すには、機体とエンジンの統合設計技術開発が欠かせない。また、水素等の新燃料に対応した燃焼技術の研究も必要である。

一例として、電動ハイブリッド推進技術の研究開発⁽⁸⁾を紹介する (Fig. 10)。これは前述の「コア分離型超高バイパス比エンジン」のコンセプトを、最新の技術で実現を目指すものとも言える。ファンの分散配置により、エンジン単体では限界に近付きつつあるバイパス比

の実質的な向上を実現する。また、従来機と同様に主翼に搭載したターボファンエンジンには大電力の発電能力を持たせ、分散配置する電動ファンは機体尾部に搭載することで、境界層吸い込み効果 (BLI: Boundary Layer Ingestion) による機体抵抗の低減効果も狙うものである。現在、JAXAの新たなプロジェクトとして実施すべく、準備を進めている。

8. 最後に

航技研究足からの研究開発の歴史を振り返ってみると、産業界のニーズに応えるプロジェクト等の実施・参画のなかで、常にガスタービン・ジェットエンジンという原動機を構成する要素の研究が続けられてきた。重量に対して生み出せるエネルギー・推進力の大きさが重要な航空機向け原動機という観点では、前述の電動ハイブリッド推進においてもガスタービンが主要な動力源と位置付けられており、今後もJAXAでは、要素研究とシステム研究の両輪での研究開発で、引き続き高まる航空輸送へのニーズと環境の両立に貢献していきたい。

参考文献

- (1) NAL航空推進研究センター, 航空エンジン研究50年の歩み, (2003), 非売品
- (2) 下平, 山田, 牧野, 山本, 林, 高温高压燃焼器試験設備の拡充整備, JAXA-RM-05-007 (2006)
- (3) 二村, JAXAクリーンエンジン技術の研究開発について, 第53回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, JSASS-2013-S1 (2013)
- (4) 西澤, aFJRプロジェクト (高効率軽量ファン・タービン技術実証) の成果概要, JAXA航空シンポジウム2018講演資料 <<https://www.aero.jaxa.jp/news/event/pdf/sympo181003/ssymp02.pdf>> (参照日 2023年2月1日).
- (5) 山根, En-Coreプロジェクト (コアエンジン技術実証) - 環境技術の実証に向けて -, JAXA航空シンポジウム2021講演資料 <<https://www.aero.jaxa.jp/news/event/pdf/sympo211105/sympo02.pdf>> (参照日 2023年2月1日).
- (6) 航空エンジン技術の実証に向けたF7-10エンジンの運用開始について, <https://www.jaxa.jp/press/2020/12/20201224-1_j.html> (参照日 2023年2月1日).
- (7) JAXAの航空エンジン研究, <<https://www.aero.jaxa.jp/about/pamphlets/pdf/pam-aeroengine.pdf>> (参照日 2023年2月1日).
- (8) 西沢, 電動ハイブリッド推進技術の研究開発 - CO2排出量の削減を促進する新しい技術への転換を目指して -, JAXA航空シンポジウム2021講演資料 <<https://www.aero.jaxa.jp/news/event/pdf/sympo211105/sympo06.pdf>> (参照日 2023年2月1日).

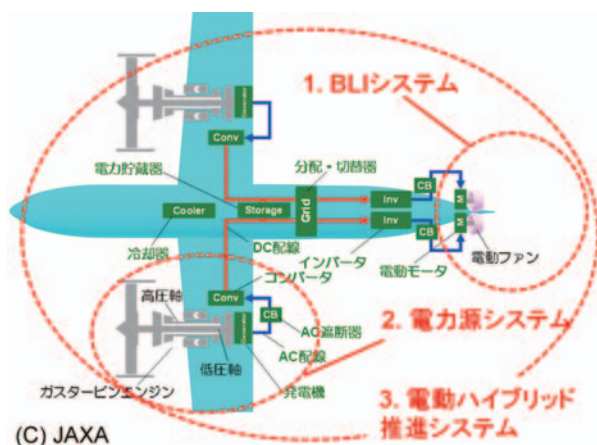


Fig. 10 Concept of Hybrid Electric Aircraft with BLI⁽⁸⁾

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀【組織】

国立研究開発法人産業技術総合研究所の取組み

Action of AIST



壹岐 典彦*¹
IKI Norihiko



古谷 博秀*¹
FURUTANI Hirohide



倉田 修*²
KURATA Osamu



鈴木 雅人*³
SUZUKI Masato



松沼 孝幸*²
MATSUNUMA Takayuki



范 勇*²
FAN Yong

キーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，コジェネレーション，水素，アンモニア，セラミック

Key Words：Gas Turbine, Jet Engine, Cogeneration, Hydrogen, Ammonia, Ceramics

1. はじめに

国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研）は、我が国最大級の公的研究機関で常勤職員2900名、契約職員と産学官制度来所者を含めて9000名で研究開発に取り組んでいる。研究組織は、5つの領域（エネルギー・環境、生命工学、情報・人間工学、材料・化学、エレクトロニクス・製造領域）と2つの総合センター（地質調査、計量標準）に分けられ、日本の産業や社会に役立つ技術の創出とその実用化や、革新的な技術シーズを事業化に繋げるための「橋渡し」「社会実装」に取り組んでいる。

産総研の歴史は1882年設立の農商務省地質調査所に始まり、その後、前身となる試験所や研究所が設置されたのち、2001年に工業技術院に属する15研究所が統合・再編して独立行政法人化し、産総研となった。

ガスタービン及びエネルギー関連技術については、数多くの研究開発プロジェクトに関わってきた。産総研の前身の1つである機械試験所では、1951年からガスタービンの研究に取り組み始めている。4段軸流圧縮機、単段軸流タービンを組み合わせた空力試験装置や二次元翼列風洞を製作し、翼列の空力特性、フラッタ現象、タービン翼の冷却、燃焼器特性、流体計測法など、様々な研究が実施された⁽¹⁾。1955年に航空技術研究所（現JAXA）が設立され、機械試験所のガスタービン研究者の大部分が航空技術研究所に移籍した。その後、1978年から始まった工業技術院のムーンライト計画では、機械技術研

究所、大阪工業試験所などが高効率ガスタービン研究開発に参加し、高圧燃焼試験やタービン用材料開発材料技術の研究開発が行われた^{(2),(3)}。さらに、工業技術院ではセラミックガスタービン、HYPRプロジェクトなど、ガスタービンに関係する研究開発が実施され、傘下の機械技術研究所、大阪工業技術研究所などが参加した。1994年にはサンシャイン計画とムーンライト計画がニューサンシャイン計画に統合され、その一環として水素社会への先駆けとなる水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（WE-NET：World Energy Network）プロジェクトが開始された。WE-NETでは水素利用技術の柱として、水素燃焼タービンが取り上げられ、セミクロードガスタービンの研究開発が進められた。

独立行政法人となつてからは、NEDOや環境省など国費の研究開発だけでなく、民間資金の研究開発なども行われるようになってきている。本稿では、産総研の研究開発について、作動媒体循環型ガスタービン、セラミックガスタービン、アンモニア燃焼ガスタービン、分散型エネルギーシステム、材料プロセス技術、要素技術開発について紹介していく。

2. 作動媒体循環型ガスタービン

WE-NETにおける水素燃焼ガスタービンに先駆けて、機械技術研究所では、アルゴンを作動媒体として循環するセミクロードサイクルの研究開発を実施した。不活性ガス循環型水素燃焼システム⁽⁴⁾を試作、燃焼制御技術を開発したのち、アルゴン雰囲気中で水素-酸素燃焼を行うガスタービン（Fig. 1参照）を開発した⁽⁵⁾。

1994年に開始されたWE-NET第I期では水蒸気を作動媒体とするサイクルが採用され、1700℃ 50気圧 500MW級ガスタービンについて、機械技術研究所が、水蒸気雰囲気中で水素-酸素燃焼の基盤技術⁽⁶⁾、サイクル計算など、大阪工業技術研究所がセラミック複合材、

原稿受付 2023年1月26日

* 1 (国研) 産業技術総合研究所・福島再生可能エネルギー研究所
〒963-0298 郡山市待池台2-2-9

E-mail: n-iki@aist.go.jp

* 2 (国研) 産業技術総合研究所
〒305-8564 つくば市並木1-2-1 つくば東事業所

* 3 (国研) 産業技術総合研究所
〒305-8569 つくば市小野川16-1 つくば西事業所

セラミックコーティング，名古屋工業技術研究所が金属材料に取り組むなど工業技術院の研究所が関わるプロジェクトであった。第Ⅱ期では，一般的な天然ガスを燃料とする高効率ガスタービン開発へ移管され，CO₂回収対応クローズド型高効率ガスタービンの技術研究開発が1999年に開始された。CO₂を作動媒体とするサイクルについて取り組んだものの，2002年に終了した。その後はワルシャワ工科大学との科学技術協力協定による共同研究⁶⁾などに波及したが，作動媒体循環型の研究開発はしばらく進まなかった。

2017年には2040年代での社会実装を目指して1700℃級100気圧100MW級を想定したNEDOプロジェクトについてNEDOの水素先導研究でFSが行われ，2019年には1400℃級100気圧100MW級の共通基盤技術の研究開発に取り組んでいる。産総研は，マルチクラスターバーナや高温高压水蒸気雰囲気に対応するセラミックコーティングなどの研究開発を進めている。

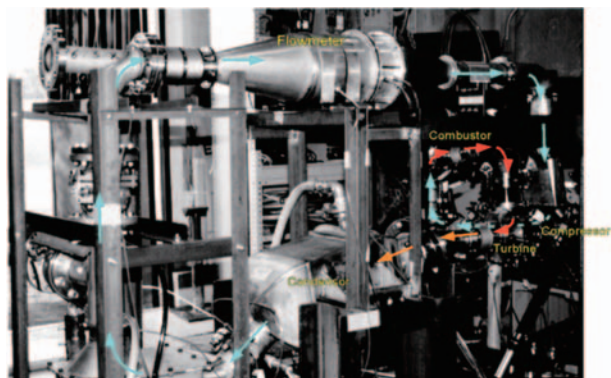


Fig. 1 H₂-O₂ Combustion gas turbine with argon gas recirculation (rotating speed: 98,000rpm, pressure ratio: 3.8, output power: 23.5kW)

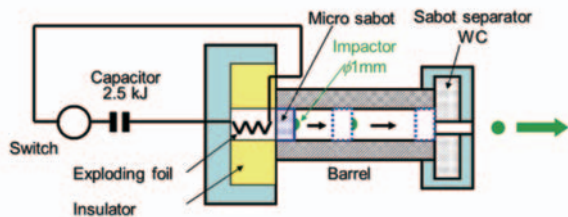
3. セラミックガスタービン

1988年にムーンライト計画で300kWセラミックガスタービンの研究開発に関わり，ニューサンシャイン計画でも取組み，低レイノルズ数領域におけるタービン翼の空力特性，機能性多層膜コーティング技術，異物衝撃(FOD)試験技術 (Fig. 2参照)，燃焼器の研究と再生器の研究について要素研究を実施した⁷⁾。低レイノルズ数域におけるタービン翼列特性に着目し，熱線流速計やレーザードップラ流速計 (LDV) を用いた非定常流れの詳細計測などが実施された^{8),9)}。

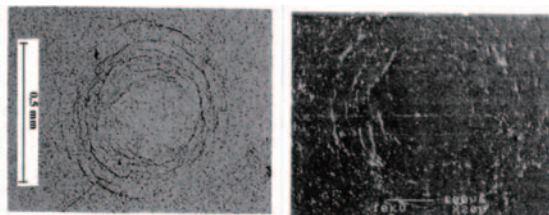
国プロ終了後には産総研独自予算での研究開発を進めるため，ミニジェットエンジンをベースとしてセラミックと金属のハイブリッド構造のエンジン (Fig. 3参照)の研究開発を進めた¹⁰⁾。

Electrothermal Gun

- for launching single, small particle -



- 1) Several mg particle, up to 2-3 km/sec
- 2) Negligible amount of driving gas



Type ST-2, $v=410 \text{ msec}^{-1}$, room temperature.

Type SN252, $v=460 \text{ m sec}^{-1}$, room temperature.

Fig. 2 Structure of electrothermal gun and FOD images

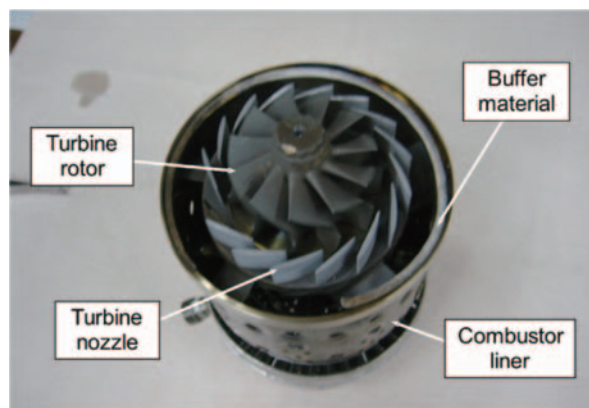


Fig. 3 Micro gas turbine using ceramic rotor

4. アンモニア燃焼ガスタービン

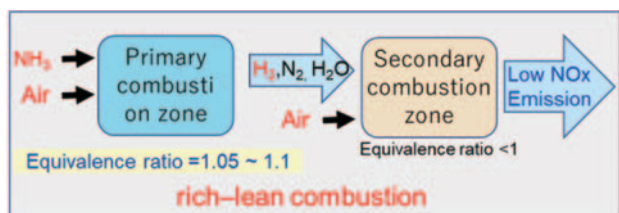
WE-NETにおいて水素キャリアとしてのアンモニアについても検討が行われていたが，当時の検討では水素発電でのコストは他のキャリアの方が安かった。2000年代になりアンモニアを直接燃料として利用する技術開発が注目された。2014年には内閣府の戦略的イノベーション創造プログラムSIPのエネルギーキャリアにおいて燃料アンモニアについて研究開発が実施され，アンモニア直接燃焼ガスタービン発電では発電コストが安いことが示された。産総研はこの研究開発において，同年に開所した福島再生可能エネルギー研究所 (FREA) をベースとして，アンモニア合成，アンモニア燃焼の課題に参加した^{11),12),13)}。灯油焚き50kWのマイクロガスタービンを改造してアンモニア混焼可能とし，2014年にアンモニアを燃料としたガスタービン発電を実現した (Fig. 4

参照)。翌年は灯油起動ながらアンモニア専焼やアンモニア-メタン混焼での発電を実現し、2018年にはアンモニア合成プラントと連携して、FREA内でグリーンアンモニアのサプライチェーンのモデル実証を行った⁽⁴⁾。アンモニア直接燃焼ガスタービンについては、リッチリーン燃焼によるNOx低減技術を開発し、50kWガスタービンコジェネレーションシステム開発を行い、発電実証を行った。SIP終了後、同システムは、2020年にはサウジアラビアから世界初で輸出されたブルーアンモニアのバリューチェーン実証⁽⁵⁾でも使用された。また2021年度には環境省の実証事業で同モデルのコジェネレーションの農業ハウスでの実証が開始されている。

また、液体アンモニアの噴霧燃焼、起動燃料のカーボンニュートラル化などに取り組んできた。NEDOプロジェクトでは2MWガスタービンに対して、50kW級のスケールモデルで噴霧燃焼技術に取り組んできた⁽⁶⁾。また、民間資金のプロジェクトでは50kWマイクロガスタービンの噴霧燃焼とシングルフェーエル化に取り組んできた^{(17),(18)}。



(a) Test facility



(b) Concept of low NOx combustion

Fig. 4 Ammonia combustion gas turbine

5. 分散エネルギーシステム

産総研では分散型エネルギーシステムを重点課題として取り組む中で、前述のセラミックガスタービンやアンモニア燃焼ガスタービンなども含まれるが、ガスタービンコジェネレーションに関わる研究開発を実施してきた。2005年には分散型エネルギーネットワークの実証研究がスタートし、札幌市と連携して札幌市立大学に蓄熱槽を組み合わせた熱供給の実証試験を実施した。30kWマイクロガスタービンコジェネレーションに相変化蓄熱槽を組み合わせたシステムを構築し、ボイラーを代替して実証試験を行った^{(19),(20),(21)}。

6. 材料プロセス技術

産総研では、ガスタービンに必要な耐熱材料について研究開発を行ってきた⁽²²⁾。大阪工業試験所では80年代後半からセラミックコーティング技術としてプラズマ溶射法の研究開発を実施しており、HYPRプロジェクトにおいては従来材のイットリア安定化ジルコニア(YSZ)の熱遮蔽コーティング(TBC)よりも遮熱能力と耐熱性を向上させる研究を行った。遮熱特性の向上のために、セリアを添加したCeYSZ材を開発し、熱伝導率をYSZ被膜のおよそ1/2に低下させることに成功した。しかしながら、TBCの耐熱疲労特性等の信頼性に欠けたため、強度に優れるYSZを金属上に薄くコーティングした上に、遮熱性に優れるCeYSZのコーティングを行い複層化した構造を形成することにより、非常に優れた耐熱衝撃性を示すことを見出した。

また炭素繊維研究の一環として炭素繊維強化炭素複合材料(C/Cコンポジット)の開発を実施してきた。WE-NETでは水素燃焼タービン用部材としてのC/Cコンポジット開発に取り組み、材料力学特性は繊維/マトリックス界面近傍の結晶構造や組織に大きく支配され、特に界面での結合強度の制御によって大きく左右されることを見出した。高弾性タイプのピッチ系炭素繊維を強化材とし、マトリックス原料としてビスマレイミド-トリアジン樹脂(BTレジン)を用いることが最適であることを見出したが、BTレジンが高価であった。そこで、BTレジンに炭素繊維上に薄くコーティングし、その後安価な熱硬化性樹脂を含浸・熱分解してマトリックス炭素とすることで、機械的特性を飛躍的に向上させることに成功した。

セラミック基複合材料(CMC)に関するガスタービン研究としては、1999年に開始された環境適合型次世代超音速推進システムの研究開発(ESPR)プロジェクトにおいて、耐熱金属を代替するための、高温大気中で長期間使用可能なCMCの開発を担当した。セラミック繊維を強化材とするCMCは、その破壊挙動を非脆性的なものに変換させることが可能である。その機械的特性や破壊挙動は、C/Cコンポジットと同様に、その繊維/マトリックス界面の結合強度に強く支配される。繊維による強化機構発現のため、炭化珪素(SiC)繊維強化SiC複合材料を対象に、繊維に対してアルミナをコーティングすることで、従来材と同様な非脆性的な破壊と大きな破壊エネルギーを示すことを確認した。またCMC部材全体の耐酸化保護として、部材表面への耐環境コーティング(EBC)の開発も行った。EBCの材料として、SiCと熱膨張率の近いムライトを選択し、コーティングの際にCMCを高温に加熱することでガスシール性を有する緻密なムライトコーティングを形成することに成功した。アルミナ界面とムライトEBC技術を併用したCMCは、1200℃の大気中で100時間の曝露試験を行った後も、酸化前の90%以上の曲げ強度を維持しており、従来材よ

り高い耐酸化性を示した。

セラミックコーティング技術としてサスペンションプラズマ溶射法 (Suspension Plasma Spray: SPS法) に取り組んできた²³⁾。従来のプラズマ溶射では、溶射材料の粒径は細くなると連続的な送給が困難となるため、粒径に制限のある粉末材料に代わって、ナノ～サブミクロンサイズの微粉末をエタノール等の溶媒に分散したサスペンション (液相) を直接プラズマジェットに投入して溶射成形を行う (Fig. 5)。この実用化に向けて、緻密なコーティング膜から多孔質コーティング膜まで構造の異なる膜の作成に成功しており、遮熱コーティング以外の用途も期待されている。

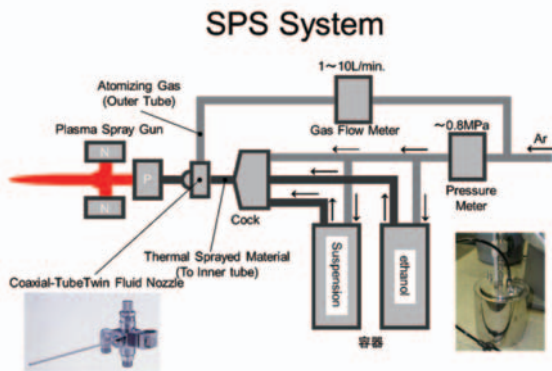


Fig. 5 Suspension plasma spray system²³⁾

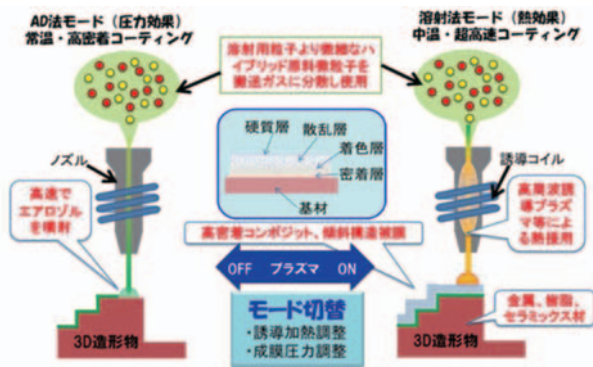


Fig. 6 Concept of hybrid aerosol deposition (HAD)²⁴⁾

また、産総研の先進製造システム研究部門では成膜技術として、AD法 (Aerosol Deposition Method) の研究開発を進めてきた。AD法は微粒子を空気などの搬送ガスにのせ、基材に吹き付け、高速衝突により生じる常温衝撃固化現象を利用し、粒子-基材、粒子同士を強固に結合させることで、緻密、高密着なセラミックス膜、金属皮膜を常温で形成できるが、応力集中が原因の皮膜剥離の課題もある。ハイブリッドAD法²⁴⁾は、AD法にプラズマを重畳し、堆積効率の向上や3次元被覆性の向上を狙ったプロセス (Fig. 6) で、先進コーティング技術研究センターでは、内閣府SIP革新的設計生産技術 (FY2014-2018) で取り組まれた^{25), 26)}。堆積効率の向上や、AD法では応力集中により困難であった3次元被覆性能

の向上も確認されている。YSZ系においても緻密な皮膜を形成できるようになってきている²⁷⁾。実際に類似技術によって、タービンプレードのTBC上に緻密膜を堆積した例も報告されている²⁸⁾。

7. 要素技術研究・基礎研究

産総研ではターボ機械に関わり、流れや燃焼、サイクルなどに要素技術研究や基礎研究を行ってきた^{29), 30)}。流れの能動制御技術についても、センサ開発、アクチュエータ開発、システム構築・評価を進めてきた。それらを踏まえ、可動部分がなく軽量であることから、誘電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge: DBD) を用いたプラズマアクチュエータについても早期に着目し、様々な研究開発を進めてきた^{31), 32), 33)}。基礎的な研究だけでなく、翼型における能動剥離抑制が可能であることから、タービン翼列の剥離や二次流れの抑制や風力タービン翼の制御への適用も取り組んでいる。

8. 今後の研究開発

産総研は様々な研究開発のプロジェクトを大学及び産業界と連携して行っており、本稿で取り上げたものの多くも、連携により成果を上げてきた。産学官連携における橋渡しの役割を担うことが重要となっており、内部予算で実施する研究開発も、将来外部との連携が期待されている。地球温暖化など、社会が抱える課題に対して、産総研の取組みは社会実装を重視するようになってきており、特に2050年カーボンニュートラルを目指す中、グリーンイノベーションへの取組みにおいて連携の重要性は増してきている。

ともに挑む。つぎを創る。

未来をデザインし、社会と共に未来を創る。互いを認め、共に挑戦する研究所を築く。



Fig. 7 AIST Vision²⁴⁾

2021年に産総研は、誰もが理解し共有することができるものとして、「産総研ビジョン」 (Fig. 7) を策定した。これは、産総研が今後、日本や世界の社会に対してどのような役割を果たしていくべきか、産総研に集う者にとってどのような組織であるべきかを示している。

直近では、第5期中期計画において、「社会課題解決と産業競争力強化」をミッションとしており、「産総研

の持つイノベーション創出機能を大幅に強化し、日本全体のイノベーション・エコシステムの中核としての役割を果たすことが不可欠である。」として研究開発活動を推進している。ガスタービンやエネルギー関連分野においても、微力ながらそのような役割の一部を担うべく取り組んでいる。

2030年度以降（第7期以降）においては、「産総研が中核となるナショナル・イノベーション・エコシステムの進化」期と位置付け、「社会から信頼され続ける産総研」をスローガンに、「産総研を中核とする強者連合モデルが日本の産業発展の要」、「多様な連合体から創出した新産業が地域経済を牽引」を目指す。社会実装加速化のための外部法人を含めた「産総研グループ」の事業規模は、現在の事業規模（約1,000億円）の2倍となる2,000億円規模を目指し、民間資金、公的資金、運営費交付金の比率を1:1:1に近づけていこうとしている。

産総研は日本の産業を支える国立研究所として、今後もガスタービン及びエネルギー分野においても、様々な課題に取り組んでいく。

参考文献

- (1) 松木正勝ほか, “ガスタービンに関する研究”, 機械試験所報告, 第26号, 1956, pp. 1-127
- (2) 筒井康賢, “機械試験所から産総研でのガスタービン研究”, 第32回ガスタービン定期講演会（高知）講演論文集, 2004, pp. 1-6
- (3) 工業技術院大阪工業技術研究所, 大阪工業技術研究所八十年史, (1998)
- (4) 濱純ほか, “不活性ガス循環型水素燃焼システムの基礎研究（装置の試作および燃焼制御法について）”, 第28回燃焼シンポジウム講演論文集, 1990, p. 380-382
- (5) Hama, J., Takahashi, S., Furutani, H. and Iki, N., A closed gas turbine system by using of hydrogen-oxygen combustion. HYDROGEN ENERGY PROGRESS, 2, (1996), p.1909-1912
- (6) Miller, A., Lewandowski, J., Badyda, K., Kiryk, S., Milewski, J., Hama, J., Iki, N., 14th World Hydrogen Energy Conference A207-e (2002-6), p. 1
- (7) 筒井康賢, 吉田博夫, 佐々木信也, 阿部裕幸, 倉田修, 松沼孝幸, 機械技術研究所報告, 187, (2000-3)
- (8) Matsunuma, T., Trans. ASME, Journal of Turbomachinery, 128-1 (2006), p. 166-177
- (9) Matsunuma, T., Trans. ASME, Journal of Turbomachinery, 129-2 (2007), p. 360-371
- (10) 壹岐典彦, 松沼孝幸, 吉田博夫, 袖岡賢, 井上貴博, 鈴木雅人, 日本ガスタービン学会誌, 38-4 (2010-7), p. 259
- (11) Iki, N., Kurata, O., Matsunuma, T., Inoue, T., Suzuki, M., Tsujimura, T. and Furutani, H., Micro Gas Turbine Firing Kerosene and Ammonia, Proceedings of ASME Turbo Expo 2015, GT2015-43689 (2015).
- (12) 産業技術総合研究所, SIPエネルギーキャリア「アンモニア直接燃焼 アンモニアガスタービンコジェネレーションの技術開発」終了報告書, <<https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team6-7.pdf>> (参照日 2023年1月13日).
- (13) 壹岐典彦, 倉田修, 井上貴博, 松沼孝幸, 日本ガスタービン学会誌, 48-2 (2020-3), p. 113
- (14) 日揮, 再生可能エネルギー由来の水素を用いたアンモニア合成と発電に世界で初めて成功, <<https://www.jgc.com/jp/news/assets/pdf/20181019.pdf>> (参照日 2023年1月13日)
- (15) 日本エネルギー経済研究所, ブルーアンモニアサプライチェーンの実証試験に関するビデオリリース, <<https://eneken.ieej.or.jp/press/press201026.pdf>> (参照日 2023年1月13日)
- (16) Okafor, E.C., Kurata, O., Yamashita, H., Inoue, T., Tsujimura, T., Iki, N., Hayakawa, A., Ito, S., Uchida, M., Kobayashi, H., Liquid ammonia spray combustion in two-stage micro gas turbine combustors at 0.25 MPa; Relevance of combustion enhancement to flame stability and NOx control, Applications in Energy and Combustion Science, 7, 100038 (2021)
- (17) 大友光彰, 井戸田芳典, 春日俊相, 安井芳則, 壹岐典彦, 倉田修, 井上貴博, 范勇, 第50回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, A-4 (2022)
- (18) 春日俊相, 大友光彰, 安井芳則, 壹岐典彦, 倉田修, 井上貴博, 范勇, 第50回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, A-5 (2022)
- (19) Kurata, O., Iki, N., Matsunuma, T., Maeda, T., Hirano, S., Kadoguchi, K., Takeuchi, H. and Yoshida, H., Micro Gas Turbine Cogeneration System with Latent Heat Storage at the University Part I Plan and Energy Flow Test, Applied Thermal Engineering, 65-1 (2014), p. 513
- (20) Kurata, O., Iki, N., Matsunuma, T., Maeda, T., Hirano, S., Kadoguchi, K., Takeuchi, H. and Yoshida, H., Micro Gas Turbine Cogeneration System with Latent Heat Storage at the University Part II Part Load and Thermal Priority Mode, Applied Thermal Engineering, 65-1 (2014), p. 246
- (21) Kurata, O., Iki, N., Matsunuma, T., Maeda, T., Hirano, S., Kadoguchi, K., Takeuchi, H. and Yoshida, H., Micro gas turbine cogeneration system with latent heat storage at the University: Part III: Temperature control schedule, Applied Thermal Engineering, 70-1 (2014), p. 705
- (22) 倉田修, 井上貴博, 鈴木雅人, 松沼孝幸, 壹岐典彦, 日本ガスタービン学会誌, 41-1 (2013-1), p. 93
- (23) 鈴木雅人, 微粒化, 19-67 (2010-9), p. 91
- (24) 篠田健太郎, 鈴木雅人, シャヒン ムハマド, 明渡純, 井上貴博, 高木英行, 壹岐典彦, 日本ガスタービン学会誌, 49-4 (2021-7), p. 229
- (25) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）革新的設計生産技術 高付加価値セラミックス造形技術の開発成果報告書（報告書管理番号: 2019000000416）, p. 122 (2019)
- (26) 明渡純, 篠田健太郎, 総説 ハイブリッドコーティング技術, セラミックス, Vol. 52, No. 10 (2017), pp. 687-691
- (27) Shahien, M., Suzuki, M., Shinoda, K., and Akedo, J.,

- Ceramic Coatings Deposited from Fine Particles by Different Spraying Processes, *J. Therm. Spray Technol.*, Vol. 29 (2020), pp. 2033-2047
- (28) Bohno, T., Tanigawa, S., Mega, M., Kamo, K., Shinoda, K., and Akedo, J.: Dense Ceramic Coating Technology by Plasma-Assisted Aerosol Deposition Method on Porous Ceramic, Presented at 8th International Congress on Ceramics (April 25-30, 2021, Virtual), (2021)
- (29) 松沼孝幸, 筒井康賢, 日本ガスタービン学会誌, 32-4 (2004-7), pp. 303-312
- (30) 松沼孝幸, 筒井康賢, 日本ガスタービン学会誌, 32-4 (2004-7), pp. 313-321
- (31) Matsunuma, T., and Segawa, T., Effects of Input Voltage and Freestream Velocity on Active Flow Control of Passage Vortex in a Linear Turbine Cascade Using Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator, *Energies*, 13-3 (2021), 764
- (32) Matsunuma, T., Effects of the Installation Location of a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator on the Active Passage Vortex Control of a Turbine Cascade at Low Reynolds Numbers, *Actuators*, 11-5 (2022), 129
- (33) Matsunuma, T., Effects of Burst Ratio and Frequency on the Passage Vortex Reduction of a Linear Turbine Cascade Using a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator, *Actuators*, 11-8 (2022), 210
- (34) 産業技術総合研究所, 産総研ビジョン, < https://www.aist.go.jp/aist_j/information/aist_vision.html > (参照日 2023年1月13日)

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀【組織】

物材機構におけるガスタービン材料研究の50年の歩みと将来への期待

Gas Turbine Material Researches at NIMS in the Last 50 Years and the Expectations for the Future



原田 広史*¹ 川岸 京子*¹
HARADA Hiroshi KAWAGISHI Kyoko

キーワード：タービン翼，タービンディスク，コーティング，合金設計，バーチャルガスタービン

Key Words：Turbine airfoil, Turbine Disc, Coating, Alloy Design, Virtual Gas Turbine

1. 緒言

国立研究開発法人物質・材料研究機構（以後物材機構）の前身の一つである金属材料技術研究所（以後金材技研）は1956年7月1日に当時の科学技術庁内に発足、同年10月に東京都目黒区の旧海軍技術研究所の一部を用いて研究活動を開始した。

50年前になる1973年の第一次オイルショックをきっかけに、1975年、発電用高温ガス炉（ヘリウムタービン）などへの適用を想定して、当時の特殊鋼第一研究室山崎道夫室長をリーダーとしてNi基超合金の研究開発が開始された。その後48年間、金材技研（2001年3月まで）あるいは物材機構（2001年4月より）にて、Ni基超合金を主体に、Ti合金、TiAl合金、高融点超合金、セラミック基複合材料（以後CMC）、コーティング材などガスタービン材料の研究が行われてきた。

本稿では、金材技研あるいは物材機構が主導あるいは参画した代表的なプロジェクト研究の成果を中心に、この50年間の発電ガスタービンおよびジェットエンジン用材料の研究開発の進展についてご紹介するとともに将来への期待を述べる。

2. 合金設計によるNi基普通鑄造超合金開発（1975～78年度）

ガスタービンの高温部を構成するNi基超合金は、NiをベースにCo, Cr, Mo, W, Al, Ti, Nb, Ta, Hfなど少なくとも7～10元素が添加される多元合金であり、実験のみでの最適組成探索は困難な作業であった。そこで、膨大な組み合わせ数のなかから目標特性を有する合金組成を探索するための合金設計プログラムを、合金組成と組織・特性因子に関する重回帰式などを用いて開発した^{(1),(2)}。Fig. 1はプログラムが打ち込まれた当時のパン

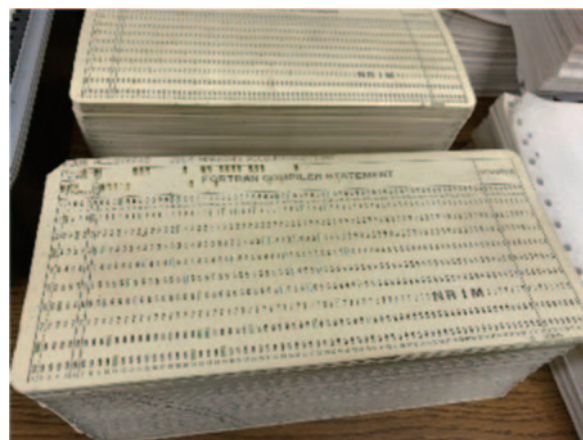


Fig. 1 Alloy design computer program in punched cards.

チカードである。

得られた“重回帰型合金設計”コンピュータプログラムを用いて、582120通りの組み合わせの中からクリープ強度と耐高温腐食性の両方が期待される16合金を選んで実験実証を行った結果、TM-47, TM-49など7合金が従来の最高レベルを超える特性を発揮し、合金設計法の有用性が実証された⁽²⁾。ここにTMは東京のTと目黒のM、すなわち金材技研の住所の頭文字である。

Fig. 2は上記研究の過程でNi基超合金を構成する γ 相（固溶体）と γ' 相（Ni₃Al型金属間化合物）の量比を γ 相100%から γ' 相100%まで変化させる“タイライン合金設計”を行って、クリープ強度が最大となるのが γ あるいは γ' 単相ではなくFig. 3に示すような γ/γ' 2相組織であることを初めて明らかにしたものである⁽³⁾。2つの結晶の界面が“整合界面導入強化”と名付けた重要な役割を果たすことを示している。

1970年代当時、東京・三鷹の航空宇宙技術研究所（現JAXA航空部門）を中心にFJR710開発プロジェクトが進められていた。金材技研の研究リーダー山崎道夫室長が開発合金のエンジン搭載への協力の可能性をFJR担当者に相談したが、なにかあった場合の責任の所在について

原稿受付 2023年1月27日

* 1 国立研究開発法人物質・材料研究機構
〒305-0047 つくば市千現1-2-1
E-mail: KAWAGISHI.Kyoko@nims.go.jp

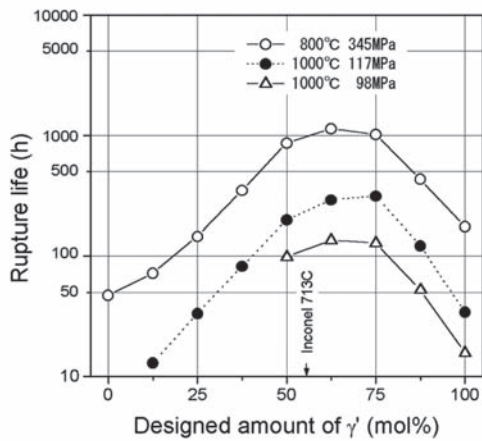


Fig. 2 Experimental data showing the effect of the γ' phase amount on creep rupture life.

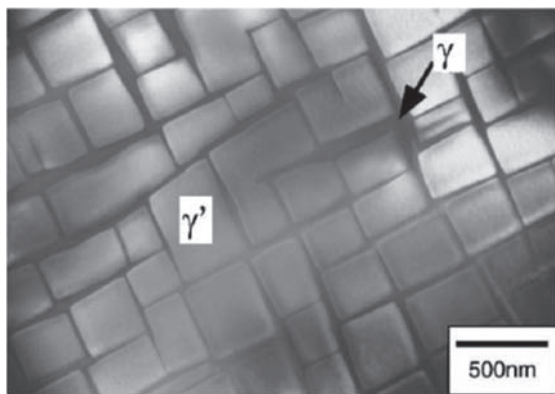


Fig. 3 Typical ideal γ/γ' two-phase microstructure in a Ni-base superalloy.

て合意に至らず、タービン翼の試作までの協力になったと聞いている。

3. 高効率ガスタービンの研究開発への参画 (1979 ~ 84年度)

通産省工業技術院(当時)の省エネルギー技術研究開発制度が「月の光も無駄にしない」ムーンライト計画として1978年に発足した。その目玉として、同年開始されたのが高効率ガスタービンプロジェクトである⁽¹⁾。タービン入口ガス温度の目標が世界最高の1500°Cとされたことで優れた超耐熱材料が必要となり、金材技研が材料開発、評価のまとめ役として1979年度より参画させていただくこととなった。

Fig. 4は金材技研で合金設計プログラムを用いて開発した一連の普通鑄造(CC: Conventionally cast) 超合金をクリープ破断寿命と硫化腐食試験での金属消耗速度にてプロットしたものである⁽⁴⁾。プロジェクトでは燃料に純度の高い天然ガスを用いることになり、当初目標(図中Target1)はクリープ強度重視へと変更になった。開発合金の中でクリープ強度と引張破断延性のバランスを考慮してTM-321がタービン翼の候補材として選定された。またクリープ強度の点で優れるTM-220を一

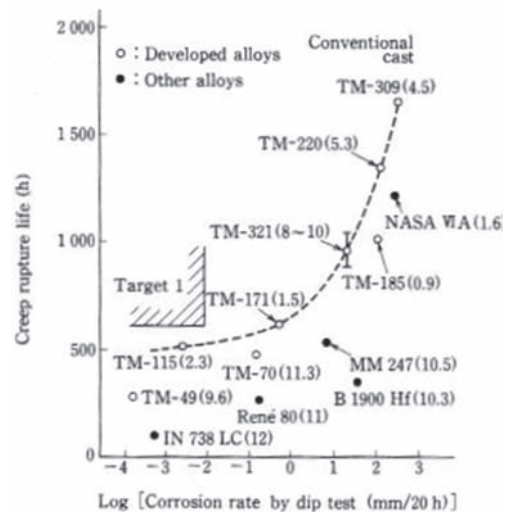


Fig. 4 Creep rupture life (1000°C/117.6MPa) and hot corrosion rate in salt mixture (900°C, Na_2SO_4 -25% NaCl) of conventionally cast superalloys. Tensile elongation at 900°C is shown in ().

方向凝固(DS: Directionally Solidified)タービン翼の基本組成とし、鑄造時の結晶粒界での縦割れを抑制したTMD-5(D: Directionally cast)が開発された。

開発合金TM-321およびTMD-5について、参画した民間企業でインゴット製造から始まる各種材料特性、物性の評価試験が行われた。これらの合金を用いて高压第1段タービン動翼を作製し、高温高速回転試験装置(HTDU)による1300°Cあるいは1400°Cの燃焼ガスによる回転試験が成功裏に行われた。Fig. 5はその際の、材料や冷却方式を変えたタービン翼を同時に評価するいわゆるレインボー配置の様子である⁽⁵⁾。高压第2段静翼にはTM-269が用いられた。

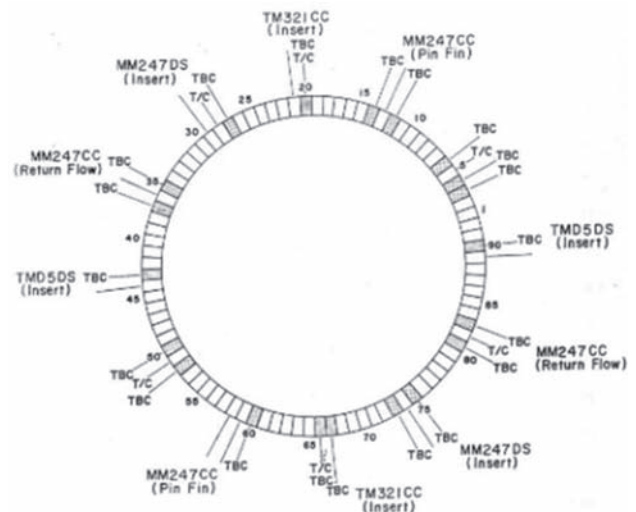


Fig. 5 Rainbow arrangement of the 1st stage turbine blades for high temperature durability test.

4. 高性能結晶制御合金 (1981 ~ 89年度)

次世代産業基盤技術制度に基づく「高性能結晶制御合金」プロジェクトでは、4種の合金について合金開発と部材成形技術開発が行われた^{(1),(6)}。

4.1 単結晶合金

合金設計プログラムを用いて高強度が期待される合金組成を選び、単結晶試験片を作成し、完全溶体化と時効熱処理後クリーブ特性を評価した。その結果、TMS-1, TMS-6, TMS-12 (S: Single crystal) などが既存単結晶合金を大きく超えるクリーブ破断寿命を示し⁽⁷⁾、プロジェクト目標 (耐用温度1040℃: 応力137MPaにてクリーブ破断寿命1000時間, 以下同様) をクリアした。さらにTMS-12をベースにTMS-26など破断延性にも優れた合金も得られ、民間企業にて中空タービン翼の単結晶化にも成功した (Fig. 6)。

開発合金中の γ 相と γ' 相の組成分析結果やクリーブ試験結果を用いて重回帰分析することにより、合金設計プログラム (Fig. 7) の精度を向上し、目標特性を有する合金をより精度よく探索できるようにした⁽⁸⁾。このように、合金設計と実験解析を両輪にしてデータのフィー

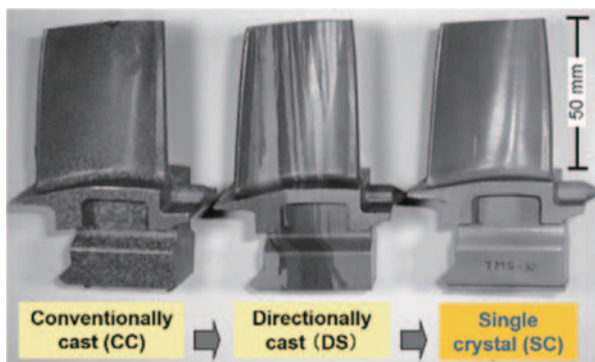


Fig. 6 CC, DS, and SC turbine blades made of developed alloys.

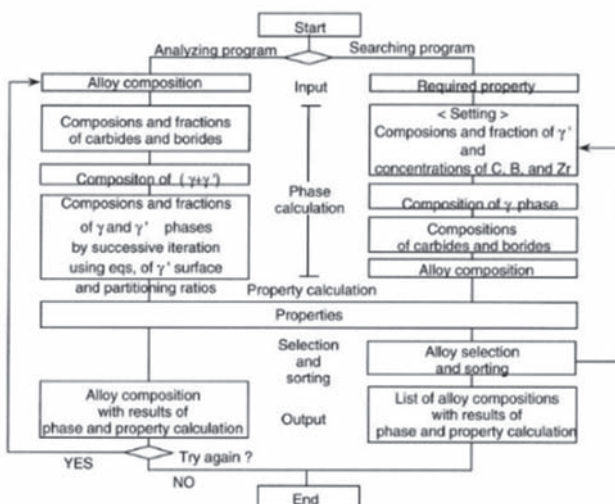


Fig. 7 The flow of our alloy design program composed of analysing and searching sub- programs. Creep/tensile properties and hot corrosion resistance are predicted for alloy selection.

ドバックを繰り返しながら今日まで合金開発を進めてきた。また、Fig. 8に示すように格子定数ミスフィットを負 (γ 相の格子定数 $>$ γ' 相の格子定数) に大きく設計することにより耐用温度が向上する可能性が予測され⁽⁹⁾、今日に至る合金開発の重要な指針となった。

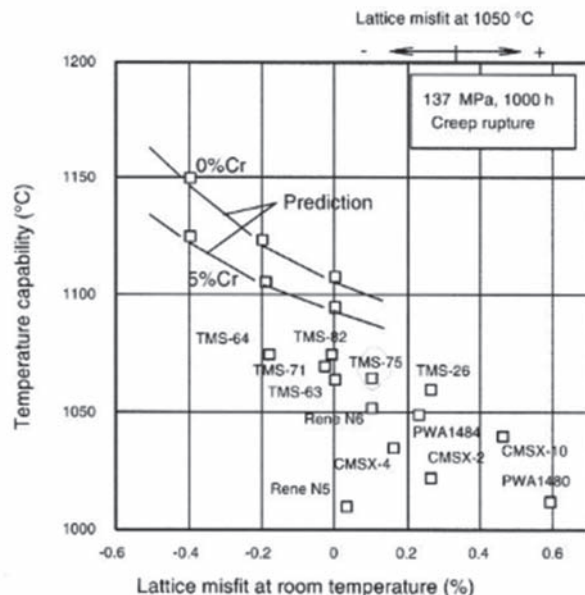


Fig. 8 Effect of lattice misfit on the creep temperature capability of SC superalloys predicted by our alloy design computer program.

4.2 粒子分散強化超合金

機械的合金化, 押し出し加工, 一方向再結晶というプロセスで製造される酸化物粒子分散強化合金 (ODS合金: Oxide Dispersion Strengthening) は Y_2O_3 のような安定な微細酸化物で分散強化されているため、特に1000℃を超える高温で優れたクリーブ強度を発揮する。合金設計プログラムを用いてベースとなる γ 相/ γ' 相の2相組織のクリーブ強度を向上させたTMO-2, TMO-20などの新ODS超合金が開発された⁽¹⁰⁾。これらの合金のクリーブ強度はMA6000など既存合金を大幅に上回り、開発目標の1090℃を大きくクリアした。またプロセスを担当した民間企業にて動翼を模擬した部材成形にも成功した (Fig. 9)。

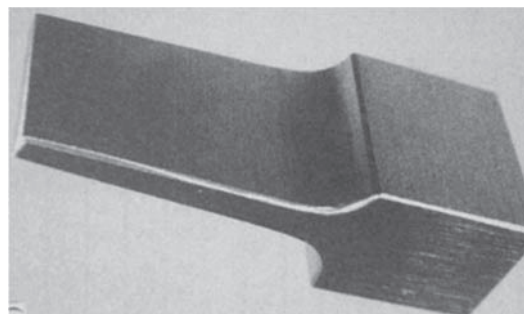


Fig. 9 A near-net shape turbine blade of ODS superalloy TMO-2 (about 60 mm long), made by mechanical alloying and directional recrystallization.

4.3 Ni基耐熱強靱合金

タービンディスク用の粉末冶金 (P/M: Powder Metallurgy) プロセスによる超合金を開発した。当時最強合金の一つであったRene95合金についてタイライン合金設計により γ' 相量を0~100%に変化させて、粉末製造、押し出し加工後、超塑性変形能と760℃での引張特性を調べた。その結果Rene95に比べて γ' 相量を10%増加させたTMP-3合金は超塑性変形能、引張強度ともに改善されることが分かった。TMP-3合金は引張強度160gf/mm²、破断伸び20%の目標には達しなかったが、民間企業のプロセス研究により、直径340mmのパンケーキを作成、機械加工により最終形状のタービンディスクが試作された (Fig. 10)⁽¹⁾。

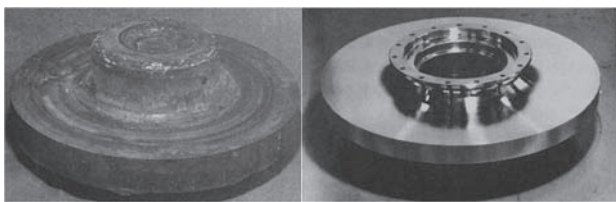


Fig. 10 P/M turbine disc of superalloy TMP-3, forged superplastically to 340mm diameter after HIPing (left) and machined to be rotation-tested (right).

4.4 Ti基軽量強靱合金

Ti合金の合金設計法として熱力学に基づく方法などを開発し、合金開発に用いた。合金を構成する α 相と β 相の量比やAl当量 β 安定化元素量などの超塑性特性や高温強度特性への影響について調べて合金設計プログラムに組み込み、新合金を設計した。その結果、目標の比強度300℃、28kgf/mm²/g/cm³以上で20%以上の延性をほぼ満足するGT33合金などが得られた。民間企業のプロセス研究によりGT33合金を用いて150mm径の翼付きコンプレッサーディスクの製造に成功した (Fig. 11)⁽²⁾。

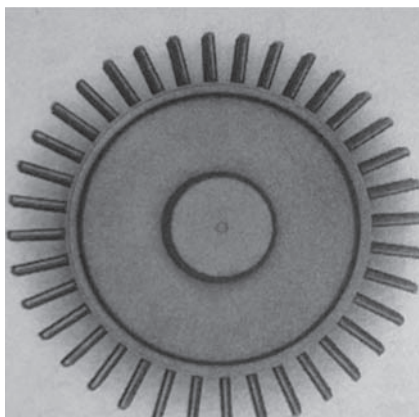


Fig. 11 Ti alloy compressor disc with blades, made by superplastic forging of compacted alloy powder (400mm diameter).

5. JST/日英共同研究「新素材の原子配置設計制御」(1990~95年度)

1980年代後半の日本の好景気に対して、海外からは、基礎研究ただ乗りの結果との厳しい指摘もあった。日本政府の対応の一つとして、海外に拠点を置いた基礎研究が立案され、新素材の原子配置設計制御プロジェクト^{(1),(3)}はその第一号であった。

構造材料として超合金と鉄鋼、機能材料として半導体をそれぞれ対象とした。西東京科学大学山崎道夫教授 (当時) が日本側代表研究者となり、超合金、鉄鋼に関しては英国ケンブリッジ大学に拠点を置いて研究が行われた。金材技研を主体に、大学、重工・鉄鋼メーカーから研究員を募ってケンブリッジ大学に共同研究チームを発足させた。当時世界に数カ所しかなかったアトムプローブ解析装置を導入し、単結晶超合金中の合金元素の原子配置を解析し、統計熱力学計算⁽⁴⁾やモンテカルロ計算⁽⁵⁾結果と比較検討しつつ予測計算精度を向上させた。また平衡相界面が数原子層の幅を持つことなど合金のマイクロ組織を扱ううえで重要な基礎的知見も得られた (Fig. 12)⁽⁶⁾。

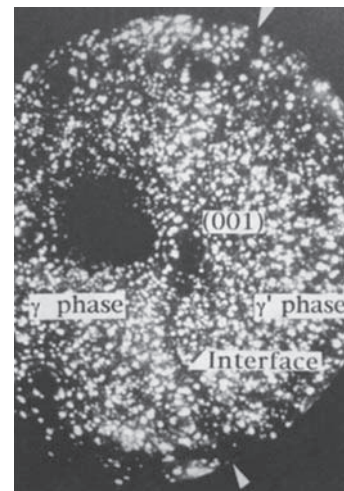


Fig. 12 Atom probe image of the γ/γ' phase boundary. Each bright spot corresponds to an atom.

酸化物分散強化超合金については組織制御のポイントとなる一方向再結晶のメカニズムを解明した⁽⁷⁾。当時まだ新しかったニューラルネットワークによるNi基超合金の特性予測も行い有用性を確認した⁽⁸⁾。1994年にロールス・ロイス (RR) 社が基礎研究のアウトソーシング先の一つとしてケンブリッジ大学をRR UTC (University Technology Centre) に選定したことで、結果的に金材技研とRRの交流が深まったことは、後の物材機構-RR共同研究への伏線となった。Fig. 13はプロジェクト成果報告会の参加メンバーである。



Fig. 13 Atomic Arrangement Design and Control Project Symposium, with researchers from Cambridge University, Oxford University and Rolls-Royce (Derby).

6. 新世紀耐熱材料プロジェクト (1999～2010年度)

国立研究機関の独立法人化を控えて、1999年に科学技術庁の独立行政法人先導プロジェクトとして金材技研・無機材研の新世紀耐熱材料プロジェクトが採択された。このプロジェクトでは、Ni基超合金を主体に国内海外のメーカー・研究機関との広範な研究協力を行った。

6.1 第一期 (1999～2003年度)

(1) タービン翼用超合金

タービン翼用の第2世代単結晶超合金TMS-82+ (2.4wt%Re, 耐用温度1075℃) を東芝との共同研究にて開発¹⁹⁾、第3世代単結晶超合金TMS-75 (5wt%Re, 耐用温度1065℃) とともに東芝の1300℃級15MW発電ガスタービンによる実証運転を行った。東京電力からの要請に応じて電力を供給するという方法で、起動停止回数65回、積算430時間の実証運転ができた。Fig. 14はレインボー配置での試験の様子である。



Fig. 14 TMS-82+ and TMS-75 were tested successfully in a 15MW power generation gas turbine.

またNEDO先端分野提案公募プロジェクト「超高温ガスタービン用単結晶超合金の設計開発」(1997～99年度)にてIHIとの協力で開発された第4世代単結晶超合金TMS-138 (4.9wt%Re, 耐用温度1080℃) は、NEDO環境適合型次世代超音速推進システム (通称ESPRプロジェクト) (1999～2003年度)にて短時間ではあるが

タービン入口ガス温度1650℃の実機試験に供された。さらに“第5世代単結晶超合金”TMS-196 (6.4wt%Re, 5wt%Ru, 耐用温度1100℃)が開発された。耐用温度向上にはラフト化した γ/γ' 相界面に微細な転位のネットワーク (Fig. 15)を形成させる“界面転移網微細化強化”が極めて有効であることが分かった²⁰⁾。

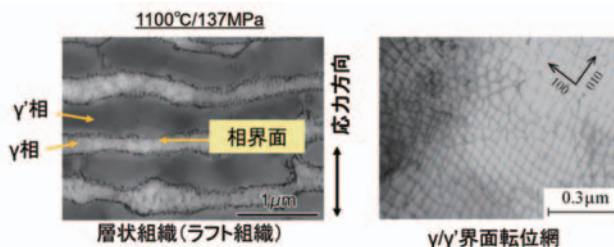


Fig. 15 The fine interfacial dislocation network on the rafted γ/γ' interface was found to improve creep strength.

(2) コーティング

タービン翼材の耐用温度上昇につれて、金属系ボンドコート材にもより高温で使用可能な材料が必要となった。そこで“熱力学平衡コーティング” (EQコーティング: Equilibrium coating) を考案した²¹⁾。これはNi基超合金中に平衡状態で存在する γ' 相の組成を基本組成として用いることにより、使用温度での基材との相互拡散・劣化を抑えた画期的なボンドコートである (Fig. 16)。EQコーティングを第4世代超合金TMS-138の薄肉板材に施工してクリープ試験を行った結果、従来コーティング材は相互拡散による二次反応層 (SRZ: Secondary Reaction Zone)を生じて有効断面積が減少し大幅な強度劣化を生じるのに対し、EQコーティング材は全く強度劣化を生じないことが実証された²²⁾。また電子ビーム物理蒸着装置 (EB-PVD) を自作し、EQコーティング上にイットリア安定化ジルコニア系の遮熱コーティングを施工し²³⁾、優れた耐剥離特性を確認した。

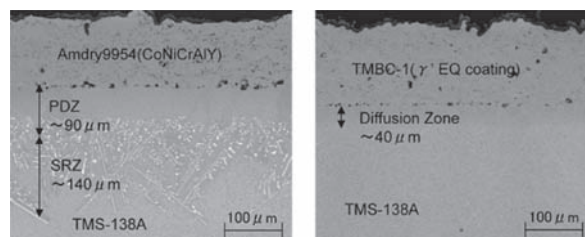


Fig. 16 Degradation in substrate SC superalloy TMS-138 is observed under conventional bond coating with Amdry9945 (CoNiCrAlY) but not under EQ coating with TMBC-1, after heating at 1100℃ for 300h.

(3) タービンディスク用超合金

国産のタービンディスク材の開発が切望された。通常、粉末冶金 (P/M: Powder Metallurgy) プロセスによる方が凝固偏析を抑えられ、より高強度の合金が得られる。しかし当時国内にはP/Mプロセスの装置とノ

ウハウが不足していた。そこで、国内で実績がありP/Mプロセスの1/3のコストで可能な鍛造・鍛造 (C&W: Cast and Wrought) プロセスを用いて合金開発を行った。Ni基C&W超合金U720に、同じ γ/γ' 2相合金であるCo-Co₃Ti合金を混合するという方法で、Co増量による組織安定化と鍛造性向上、Ti増量による強度向上を図った²⁴⁾。その結果、TMW-24、TMW-4M3などC&W超合金としては世界最強でP/M超合金と同等のクリープ強度を有する“Ni-Co基超合金”が開発された (Fig. 17)。

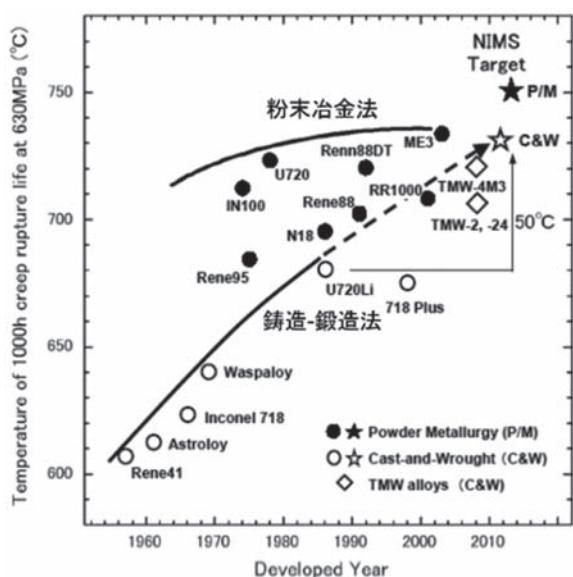


Fig. 17 Developed Cast&Wrought disc superalloys, TMW-2, TMW-24 and TMW-4M3 have creep strengths comparable with powder metallurgy processed alloys.

これらの合金については、NEDO先導研究「高温タービンディスクに関する製造技術の開発」(2007～08年度)において、三菱マテリアルにてトンオーダーのトリプルメルト溶解インゴットからビレット、パンケーキを作製し広範な材料評価が行われた²⁵⁾。その結果を受けて、防衛省将来戦闘機用エンジンXF-9の高圧タービンディスクへの適用可能性を調べるため、防衛装備庁航空装備研究所にて評価試験が行われた。その結果、優れた合金としてTMW-24が高圧タービンディスクに適用できることが確認された²⁶⁾。引き続き、地上のエンジンでの過回転・過温度試験など実用化に向けた評価試験が行われているものと推察される。

TMW-24よりも高強度のTMW-4M3については、NIMS-日立金属次世代材料開発センター(2016～20年度)にて実用化に向けた材料評価が行われた²⁷⁾。

(4) 新材料

耐用温度1500°Cを目標としたSi₃N₄については、ルテチウム (Lu) 添加による粒界相結晶化により、優れたクリープ強度を発揮して目標を達成した²⁸⁾。延性の向上が課題である。同じく1800°Cを目標としたイリジウム (Ir) 基“高融点超合金”は耐用温度1750°Cに到達した²⁹⁾。

1800°Cの目標達成にはさらに単結晶化による強度向上などが必要と考えられた。Ni基超合金との融合によるコストパフォーマンス向上設計などの成果が得られた。Irなどの白金族金属は宇宙には多く存在するので、50年後が楽しみである。

(5) 合金設計とバーチャルガスタービン

材料シミュレーションとシステムシミュレーションの融合による“バーチャルガスタービン”を考案し、物材機構、東芝、JAXAの共同研究によりコンピュータプログラムを開発した (Fig. 18)³⁰⁾。物材機構が開発した合金設計プログラムとタービン設計プログラムが連動することにより、任意の組成の超合金タービン動翼に対して、実現可能なガスタービンの出力、熱効率などを予測できるようになった。バーチャルガスタービンは世界初の試みであった。さらにジェットエンジンに特化した“バーチャルジェットエンジン”³¹⁾も得られた。

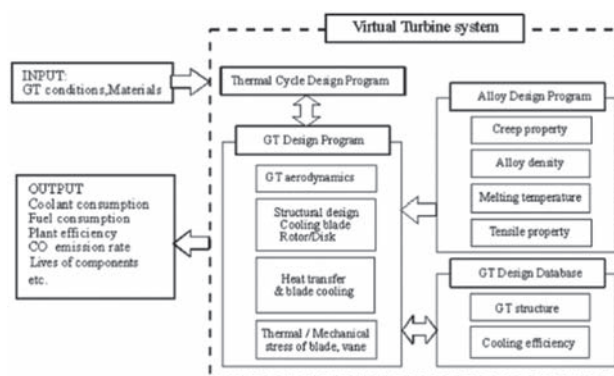


Fig. 18 Virtual gas turbine system combining alloy design and turbine system design programs.

6.2 第二期 (2004～2010年度)

第一期の成果を踏まえ民間企業の協力を得て、1700°C大型発電ガスタービン、コジェネレーション用小型ガスタービン、大型および小型ジェットエンジン用の材料開発、実用化研究を行った。

(1) 1700°C大型ガスタービン

単結晶超合金タービン翼を用いてタービン入口ガス温度1700°Cの超高効率ガスタービンを開発することを提案した。物材機構から三菱重工への委託調査研究(2004～07年度)により、クリープ特性に加えて熱疲労特性、耐酸化特性、単結晶鍛造性にも優れた単結晶超合金を設計し、第1世代単結晶超合金TMS-1700 (MGA1700) (耐用温度1060°C) など目標を満足する単結晶超合金を得た³²⁾。Fig. 19はTMS-1700を用いて鍛造した第一段単結晶タービン翼である。これをきっかけにNEDO省エネ革新技術開発事業「高効率ガスタービン用タービン翼部材の研究開発」(三菱重工-物材機構、2010～12年度)³³⁾などの要素研究を経て、三菱重工にて1700°C発電ガスタービン開発が進捗し、現在、熱効率が世界最高レベルの1650°C天然ガスコンバインドサイクル発電システムが

7. 超高温無冷却ガスタービン実現のための超耐熱材料開発 (2011～13年度)

NEDO省エネ革新技術開発事業にて1800℃無冷却ガスタービンを可能にするための超耐熱材料開発を行った。1800℃用酸化物系CMC、1250℃用酸化物分散超合金、1200～1800℃用高融点超合金、部材成形プロセス、パーチャルタービンによる評価の研究を行った。例えば、酸化物系CMCでは世界初のジルコニア系長繊維を開発した。従来のSiC/SiC複合材料が24時間で完全に酸化蒸発する1750℃でも重量変化を生じないジルコニアに着目し、これを繊維としBaZrO₃をマトリックスとする複合材“ジルコニア系CMC”を開発した。強度試験後の破面にはCMC特有の繊維引き抜け効果が観察されている (Fig. 23)³⁸⁾。防衛装備庁安全保障技術推進制度「超耐環境性高強度酸化物系セラミック複合材料の開発」(2019～21年度)にてジルコニア連続繊維を量産するためのプロセスや、繊維へのコーティング技術の開発を進めた。耐環境コーティング (EBC: Environmental Barrier Coating) 不要の1800℃対応CMCとして、海外の航空エンジンOEMをリードする新材料となることが期待される。

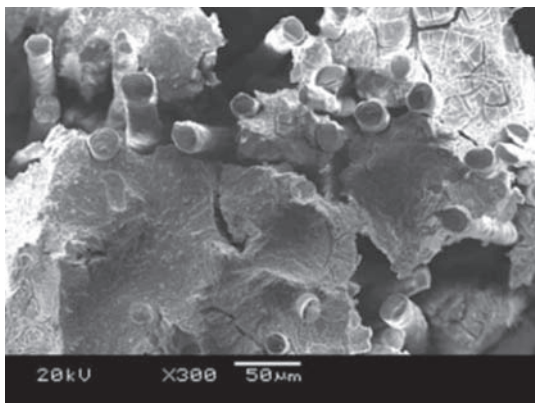


Fig. 23 SEM photograph of fracture surface of zirconia fiber uni-directional reinforced composite.

8. 超合金タービン翼の直接完全リサイクル法の開発 (2013～19年度)

従来廃棄されていたタービン翼の“直接完全リサイクル”により実質材料コストを1/4に削減する技術開発を行った³⁹⁾。

ジェットエンジンのタービン翼として使用中に大気から付着侵入する硫黄 (S) などの不純物の除去がリサイクルにあたっての技術課題であった (Fig. 24)。カルシア (CaO) 坩堝中で再溶解 (2～20kg)、あるいはカルシア粒添加再溶解 (3ton: IHIマスターメタル) することで、CaOの精錬効果によるSの低減や、合金中の残留SのCaS化合物としての固定化により、材料表面へのSの拡散が抑制され耐酸化性がオリジナル材よりも向上することが分かった⁴⁰⁾。リサイクルの拡大によって混入の可能性が高くなる金属系低融点不純物、例えばアンチモン

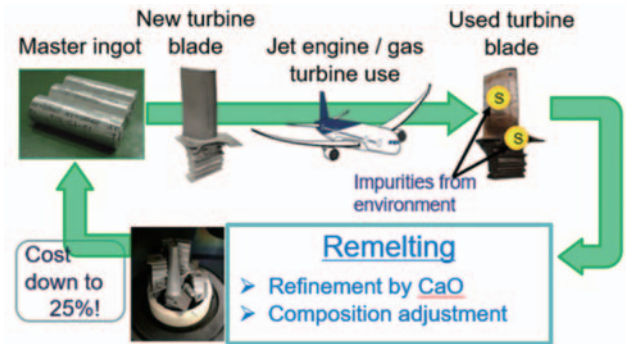


Fig. 24 Direct recycling of turbine blades, providing high recycling rate, low recycling cost, and low environmental pollution.

(Sb)の無害化の可能性などについても研究が進められている。ガスタービン部材の完全リサイクルは、近年ますます上昇する材料コストの低減はもちろん、資源の有効利用の観点からも大きな意義があり、材料サプライチェーンに組み込んで早期に実用化することが望まれる。

9. 耐熱合金性能向上のための熱処理技術 (2016～19年度)

単結晶超合金は通常1300℃以上の高温の溶体化処理が必要である。国内にはこのような高温で量産に対応できる熱処理炉がなく、国内での単結晶超合金の実用化に支障をきたす恐れがあった。そこで、JST/A-STEP研究成果最適展開支援プログラムにてキグチテクニクスと協力し、物材機構特許の二室型超高温真空熱処理炉 (研究用) を大型化し、10kgの発電用大型タービン翼を数枚単位で処理可能な真空熱処理炉を開発した⁴¹⁾。Ni基単結晶超合金は溶体化加熱後の冷却速度が大きいほど析出 γ' 相が微細化し、高温クリープ特性が向上する。そこで冷却室での高速Arガス流による急冷機構により、一般的なガスファンクーリングの約3倍の冷却速度300℃/minを可能にした。開発熱処理炉は、現在、商用にてガスタービン部材の研究開発などに寄与している (Fig. 25)。

10. 無冷却タービンを成立させる革新的材料技術の関する研究 (2017～2021年度)

防衛装備庁安全保障技術推進制度にて、IHIとの協力により、Mo合金製無冷却タービン動翼を支えるNi基超合金性タービンディスク用に、耐用温度が800℃のNi基P/M超合金の開発を行った (従来合金ME3は720℃)。800℃、735MPaの試験条件では同一組成のP/M超合金と単結晶超合金のクリープ強度 (圧縮) がほぼ一致するという新しい知見を得た⁴²⁾。この知見をもとに、単結晶の合金設計プログラムを用いて、普通鑄造合金TM-47などをベースにCo-Co₃Ti合金との混合による強化を図ることによって目標に近い合金の開発が可能であることが示された。目標達成に向けてP/Mプロセス研究との一層の協力が望まれる。



Fig. 25 Developed two-chamber large vacuum heat treatment furnace for ultra-high temperature use, equipped with rapid cooling mechanism by high-speed argon gas flow.

11. 高速で亀裂を完治する自己治癒セラミックス (2012～24年度)

SiC/Al₂O₃系酸化物の自己治癒反応を従来の6万倍に高速化することで、飛行中にジェットエンジン部材に生じたクラックを1000℃にて最速1分で治癒させ着陸に備えることのできる自己治癒セラミックスが開発された⁴³⁾。セラミックス系材料の安全性向上による適用範囲の拡大が大いに期待されている。

12. 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) への参画

第1期の革新的構造材料(2014～18年度)にて、1500トン鍛造シミュレータが物材機構に設置された。物材機構内外の研究者と協力してジェットエンジン部材に使用される既存のTi合金やNi基超合金鍛造実験を行い、塑性加工データ、材料組織・特性データを取得し、塑性加工シミュレーションおよび組織・特性予測システム開発が行われた⁴⁴⁾。

第2期の統合型材料開発システムによるマテリアル革命(2018～22年度予定)でも予測精度をさらに向上すべく研究を継続している。また、タービン翼用単結晶超合金TMS-238とタービンディスク用C&W超合金TMW-4M3などについて、航空機材料の国際標準化・認証のための材料データベース構築が行われている。

13. JST/A-STEPジェットエンジン用TiAlタービンブレードの低コスト量産技術 (2020～25年度)

ジェットエンジン低圧タービンブレード後段用の素材として、軽量・高強度のTiAlが用いられているが、铸造性が悪く铸塊からの機械加工による総削り出しで生産されているため、製造コストの削減が困難であった。そこで、物材機構が開発した铸造性に優れたTiAlを用いて、TiAl合金タービン翼の低コスト量産技術を確立するための研究を行っている。

前述のNEDO次世代火力発電基盤技術/「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」(2018～21年度)にて得られた熱間鍛造性に優れたTiAl合金⁴⁵⁾と併せて、TiAl合金のコストパフォーマンス向上による適用範囲の大幅拡大が期待される。

14. 航空機エンジン用評価システム基盤整備 (2021～25年度)

NEDO「航空機エンジン向け材料開発・評価システム基盤整備事業」にて米国航空局 (FAA) での材料認定を視野に入れたデータベース構築がSIPプロジェクトを引き継いで開始された⁴⁶⁾。タービン翼用Ni基単結晶超合金TMS-238及びタービンディスク用Ni-Co基C&W超合金TMW-4M3の許容組成幅の検討には最新の合金設計プログラム⁴⁷⁾が有効に利用されている。

15. 将来展望：発電ガスタービン、ジェットエンジンでの実用化への期待

15.1 材料技術とシステム技術の連携

ガスタービン用の重要部材をすべて国産材料で提供できるという、50年前にはなかった状況が生まれつつある。しかし実機実証の機会は極めて限られている。このような状況で効果を発揮するのは、実機に近い環境で温度、圧力などを精密に計測できる高温タービン試験装置であろう。ムーンライト計画の高効率ガスタービンでは、高温高速回転試験装置 (HTDU) による高圧タービン材料と空力・冷却構造の評価が極めて有用であった。この装置はその後の1500℃級タービン設計にも活躍したと聞く。今日の最新計測技術を用いた高温タービン試験装置、即ちリアルタービンと、高速コンピュータ技術によるバーチャルタービンとを連動させて新材料、冷却構造、空力特性などを評価することにより、新材料適用から実機開発への流れが大きく加速されるものと期待される。

15.2 発電ガスタービン、ジェットエンジンへの期待

(1) 発電ガスタービン

この50年間の国内発電用ガスタービン技術の発展、世界的地位の向上には目を瞠めるものがある。ムーンライト高効率ガスタービンプロジェクトをきっかけに三菱重工にて1500℃級ガスタービンを開発、さらに1700℃ガスタービンを目標にGEに先行し今や1650℃ガスタービンが実稼働している。2022年上半期の世界ガスタービン市場シェアトップの36%を獲得し、GE、シーメンスを抑えて三菱重工が世界のリーダーの立場を確立しつつある。今後、水素燃料の導入にあたり、中・小型も含めて発電ガスタービンの一層の高効率化、機動性向上が必要であり、そのためには単結晶超合金、CMC、TiAl合金をは

じめ各種先進材料技術の適用が有効であろう。

(2) ジェットエンジン

50年前の航空宇宙技術研究所（当時）のFJR710エンジンはRJ500エンジンを経てジョイントベンチャー（JV）でのV2500エンジン開発（1988年FAA認証）へと発展し、7600基以上のベストセラーエンジンの一つになった。高圧タービンは担当できなかったが、JVでの23%の参画比率獲得は当時大きな成果であった。しかしその後日本はほとんどRSPに封じ込められてきた。近年PW1100G-JM/PW1400G-JMエンジンのJVにて日本航空機エンジン協会（JAEC）として35年前と同じ23%の参画比率を獲得したものの、世界シェアはIHI、三菱重工、川崎重工三社合わせて6%台（2019年）にとどまっている。

本田技研のビジネスジェット用HF120エンジンや防衛省将来戦闘機用エンジンXF-9には大いに期待される。しかし世界シェアを6%台から10%、20%へと拡大するには、民間機用中・大型エンジンの国産あるいは主導が必須であろう。後発国が今や日本に先行する勢いである。諸先輩が50年前に行ったような民間機用エンジン全機開発から、日本企業がブランドメーカー（OEM）となって高圧タービンを担当し、国内の先進材料技術とも連携して、世界シェアを大きく拡大する日が一日も早く来ることを念願している。

16. 結言

金材技研及び物材機構が50年をかけて行ってきたガスタービン材料研究を、大型プロジェクトの研究成果を中心に時系列的に紹介し、将来への期待を述べた。

一連の研究により、第5世代・第6世代単結晶超合金（TMS合金）、Ni-Co基超合金（TMW、TMP合金）、熱力学平衡コーティング（EQコーティング）、鍛造あるいは鍛造性に優れたTiAl合金、ジルコニア系CMC、高速自己治癒セラミックス、バーチャルガスタービン・ジェットエンジン、直接完全リサイクルなどに代表される新コンセプトが創出され、それらの実用化を目指して研究開発を行ってきた。振り返ると、実用化したもの、実用化に近づいているものもあるが、まだまだ未達成感が強い。これらの材料技術は互いに関連しており複合的・総合的に適用してこそ本来の効果を発揮する。今後、タービン設計技術者と材料技術者のより緊密な情報交換が実用化の鍵となると思われる。

次の50年間も世界をリードする独創的なコンセプトにて新材料技術を創出し続け、発電ガスタービンやジェットエンジンをはじめ広汎な先端技術の開発に寄与することがこの分野での物材機構の最大の責務であろう。やりがいのある楽しい仕事のように思われる。成果を大いに期待するところである。

謝辞

日本ガスタービン学会創立50周年を記念する特集号に

物材機構の研究開発と将来への期待について紹介させていただく機会を頂戴したことに心より謝意を表します。また、種々のプロジェクト研究にてご指導ご協力を賜りました大学、研究機関、民間企業各社の皆様に心より御礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 山崎道夫, 二つの国家プロジェクトで行われたガスタービン用耐熱合金の研究開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 44, No. 6 (2016), pp. 498-503.
- (2) 原田広史, 山崎道夫, Ti, Ta, Wを含む γ' 析出強化型Ni基耐熱鋳造合金の合金設計, 鉄と鋼, Vol. 65, No. 7 (1979), pp. 1059-1068.
- (3) 原田広史, 山崎道夫, 小泉裕, 713C合金の γ - γ' 結線上にある一連のNi基耐熱合金, 鉄と鋼, Vol. 65, No. 7 (1979), pp. 1049-1058.
- (4) ムーンライト計画 高効率ガスタービンの研究開発における耐熱合金の研究開発-最終報告書, 昭和60年3月, 科学技術庁金属材料技術研究所, p. 13.
- (5) ムーンライト ガスタービン 高効率ガスタービン研究開発10年の歩み, 高効率ガスタービン技術研究組合, p. 109.
- (6) 山崎道夫, 高性能結晶制御合金技術ハンドブック, 日本規格協会 (1991).
- (7) Yamagata, T., Harada, H., Nakazawa, S., Yamazaki, M., and Nakagawa, Y.G., Alloy Design for High Strength Nickel-Base Single Crystal Alloys, Superalloys 1984, ASM (1984), pp. 157-166.
- (8) Harada, H., and Murakami, H., Design of Ni-Base Superalloys, Computational Materials Design, Springer, Saito, T (Ed.), p. 51.
- (9) 同上. p. 55.
- (10) 山崎道夫, 高性能結晶制御合金技術ハンドブック, 日本規格協会 (1991), p. 17.
- (11) 同上, pp. 413-414.
- (12) 同上, p. 569.
- (13) 「新素材の原子配列設計制御」研究終了報告書, 日英共同研究 (1990.3 ~ 1995.3), 新技術事業団.
- (14) Enomoto, M., Harada, H., and Yamazaki, M., Calculation of γ - γ' Equilibrium Phase Composition in Nickel-base Superalloys by Cluster Variation Method, CALPHAD, Vol.15 (1991), pp. 143-158.
- (15) Saito, Y., The Monte Carlo Simulation of Microstructure in Metals, Materials Science and Engineering A223 (1997), pp. 114-124.
- (16) Harada, H., Ishida, A., Murakami, H., Bhadeshia, HKDH., and Yamazaki, M., Applied Surface Science, Vol. 67 (1993), pp. 299-304.
- (17) Murakami, K., Mino, K., Harada, H., Bhadeshia, HKDH., Nonuniform Recrystallization in a Mechanically Alloyed Nickel-base Superalloy, Met. Trans. A-Physical Metallurgy and Materials Science, Vol. 24 (1993), pp. 1049-1055.
- (18) Fujii, H., Mackay, DJC., Bhadeshia, HKDH., Harada, H., Nogi, K., Prediction of Creep Rupture Life in Nickel-Base Superalloys using Bayesian Neural Network, Journal of

- The Japan Institute of Metals, Vol. 63 (1999), pp. 905-911.
- (19) Hino, T., Kobayashi, T., Koizumi, Y., Harada, H., Yamagata, T., Development of a New Single Crystal Superalloy for Industrial Gas Turbine, *Superalloys 2000*, TMS (2000), pp. 729-736.
- (20) Zhang, JX., Murakumo, T., Koizumi, Y., Kobayashi, T., Harada, H., and Masaki, S., Jr., Interfacial Dislocation Network Strengthening a Fourth-Generation Single-Crystal TMS-138 Superalloy, *Met. Mat. Trans A*, Vol. 33A (2002), pp. 3741-3746.
- (21) Kawagishi, K., Harada, H., Sato, A., Matsumoto, K., EQ Coating: A New Concept for SRZ-Free Coating System, *Superalloys 2008*, TMS (2008), pp. 761-768.
- (22) 川岸京子, 佐藤彰洋, 松本一秀, 小林敏治, 原田広史, 青木祥宏, 荒井幹也, 溶射EQコーティングの組織安定性および機械的特性, *日本金属学会誌*, Vol. 71 (2007), pp. 226-232.
- (23) 松本一秀, 川岸京子, 原田広史, 遮熱コーティング技術の開発, *まてりあ*, Vol. 52 (2013), pp. 469-474.
- (24) Gu, Y., Harada, H., Cui, C., Ping, D., Sato, A., Fujioka, J., A New Ni-Co-base Disk superalloys with higher strength and creep resistance, *Scripta Materialia*, Vol. 55 (2006), pp. 815-818.
- (25) 藤岡順三, 谷月峰, 崔傳勇, 横川忠晴, 小林敏治, 原田広史, 福田正, 三橋章, 新しい概念に基づく高温タービンディスク用Ni-Co基超合金の開発, *日本ガスタービン学会誌*, Vol. 40 (2012), pp. 107-112.
- (26) 金子昂弘, 永井正夫, 将来の戦闘機に向けたエンジンの高圧タービンディスクの研究, *防衛技術ジャーナル*, (June 2016), pp. 28-33.
- (27) 小林信一, 伊達正芳, 上野友典, 大野丈博, 川岸京子, Ni-Co基超合金の高温引張およびクリープ特性に及ぼすBとZrの影響, *日本ガスタービン学会誌*, Vol. 47 (2019), pp. 329-334.
- (28) Guo, S., Hirosaki, N., Yamamoto, Y., Nishimura, Y., and Mitomo, M., Improvement of high-temperature strength of hot-pressed sintering silicon nitride with Lu₂O₃ addition, *Scripta Materialia*, Vol. 45 (2001), pp. 867-874.
- (29) Gu, Y.F., Yamabe-Mitarai, Y., Nakazawa, S., Harada, H., Creep Behaviors of an Ir-23Nb Alloy at Ultra-high Temperature, *Met. Mat. Trans A*, Vol.14A (2003), pp. 2217-2221.
- (30) Yokokawa, T., Saeki, H., Fukuyama, Y., Yoshida, T., and Harada, H., The Virtual Gas Turbine System for Alloy Assessment, *Superalloys 2004*, TMS (2004). pp. 859-866.
- (31) Fukuda, M., Harada, H., Yokokawa, T., Kitashima, T., Virtual Jet Engine System, *Materials Science Forum*, Vols.638-642 (2010), pp. 2239-2244.
- (32) Kawagishi, K., Yokokawa, T., Kobayashi, T., Koizumi, Y., Sakamoto, M., Yuyama, M., Harada, H., Okada, I., Taneike, M., Oguma, H., Development of Low or Zero-Rhenium High- performance Ni-Base Single Crystal Superalloys for Jet Engine and Power Generation Applications, *Superalloys 2016*, TMS (2016), pp. 115-122.
- (33) 岡田郁夫, 原田広史, 発電用ガスタービンの材料の変遷と将来展望, *日本機械学会誌*, Vol. 119 (2016), pp. 454-457.
- (34) Kobayashi, T., Sato, M., Harada, H., Yamagata, T., Tamura, A., and Fujioka, J., Development of a Third Generation DS Superalloy, *Superalloys 2000*, TMS (2000), pp. 323-328.
- (35) Kawagishi, K., Yeh, AC., Yokokawa, T., Kobayashi, T., Koizumi, Y., Harada, H., Development of an Oxidation-Resistant High-Strength Sixth-Generation Single-Crystal Superalloy TMS-238, *Superalloys 2012*, TMS (2012). pp. 189-195.
- (36) 齊藤拓馬, 原田広史, 横川忠晴, 大澤真人, 川岸京子, 鈴木進捕, *日本金属学会誌*, Vol. 86 (2022), pp. 157-171.
- (37) Gu, Y.F., Osada, T., Yokokawa, T., Harada, H., Fujioka, J., Nagahama, D., Okubo, M., Development of Nickel-Cobalt Base P/M Superalloys for Disk Applications, *Superalloys 2016*, TMS (2016). pp. 209-216.
- (38) 長谷川良雄, 秦青, 鉄井利光, 超耐環境性高強度酸化物系セラミック複合材料用強化繊維の開発, *日本ガスタービン学会誌*, Vol. 49 (2021), pp. 201-208.
- (39) 原田広史, 川岸京子, 鈴木進捕, 単結晶超合金タービン翼の直接完全リサイクル法の開発, *金属*, Vol. 90 (2020), pp. 563-570.
- (40) Tabata, C., Kawagishi, K., Uzuhashi, J., Ohkubo, T., Hono, K., Yokokawa, T., Harada, H., Suzuki, S., Quantitative Analysis of Sulfur Segregation at the Oxide/Substrate Interface in Ni-base Single Crystal Superalloy, *Scripta Materialia*, Vol. 194 (2021) 113616.
- (41) 宮本伸樹, 内田博之, 原田広史, 小林敏治, 高速アルゴン流による急冷機構を有する二室型超高温大型真空熱処理炉の開発, 第47回日本ガスタービン学会定期講演会(函館)講演論文集(2019), A6.
- (42) Mori, Y., Kawagishi, K., Osada, T., Harada, H., Yuyama, M., Takata, Y., Osawa, M., Ikeda, A., Alloy Composition Screening for Ni-Base Turbine Disc Superalloys Using the Creep Property of Single Crystal, *Met. Mat. Trans A*, Vol.51A (2020), pp. 2035-2043.
- (43) 長田俊郎, 自己治癒セラミックスの設計: 航空機エンジン部材への適用を目指して, *日本ガスタービン学会誌*, Vol. 49 (2021), pp. 247-258.
- (44) Ueshima, N., Aoki, C., Osada, T., Horikoshi, S., Yanagida, A., Murakami, H., Ishida, T., Yamabe-Mitarai, Y., Oikawa, K., Yukawa, N., Yanagimoto, A., *Superalloys 2020*, TMS (2020), pp. 491-499.
- (45) Tetsui, T., Practical Use of Hot-Forged-Type Ti-42Al-5Mn and Various Recent Improvements, *Metals* 2021, 11 (9), 1361.
- (46) 川岸京子, 調査研究委員会報告 航空機エンジン材料の国際標準化に向けたデータベース構築, *日本ガスタービン学会誌*, Vol. 49 (2021), pp. 299-300.
- (47) Yokokawa, T., Harada, H., Kawagishi, K., Kobayashi, T., Yuyama, M., Takata, Y., Advanced Alloy Design Program and Improvement of Sixth-Generation Ni-Base Single Crystal Superalloy TMS-238, *Superalloys 2020*, TMS (2020). pp. 122-130.

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀【組織】

電力中央研究所における発電用ガスタービン研究について －保守管理技術への取り組みを中心に－

Research on Power Generation Gas Turbine by CRIEPI -Focusing on Development of Maintenance-Management Technology-



高橋 俊彦*¹
TAKAHASHI Toshihiko



藤井 智晴*¹
FUJII Tomoharu



尾関 高行*¹
OZEKI Takayuki



酒井 英司*¹
SAKAI Eiji

キーワード：発電用ガスタービン，保守管理，高温部品，吸気フィルタ，コンバインドサイクル

Key Words：Power generation gas turbine, Maintenance-Management, Hot-gas-path parts, Air intake filters, Combined cycle

1. はじめに

電力中央研究所（電中研）の発電用ガスタービン研究の背景として，わが国電気事業の火力発電分野におけるガスタービン（GT）利用の変遷をごく簡単に述べる。

GTは，1960年代中盤からの電力需要の伸び，夏季・冬季の需要ピークへの対応のため，1970年代にピーク用・非常用の電源として導入が進められた。起動・停止が比較的容易で起動時間が短いこと，建設の期間やコストが比較的安いこと，冷却水が不要であることなど，当時，GTは電力ピーク吸収に適していた。

しかし，石油ショック以降は，景気後退による需要停滞やエネルギー供給の情勢変化で，単機では熱効率が低かったGTは，稼働率，新設とも低下した。この間，航空エンジンは，耐熱超合金や高性能冷却技術の開発等により，著しい進歩を遂げた。発電用GTも，ムーンライト計画の「高効率ガスタービンの研究開発」などを契機に，高温化・高効率化が進められ，燃料に硫黄分がなく，燃焼によるばいじん等もほぼ排出されないLNGが導入されることで，ベースロード電源としての基礎ができた。

1980年代中盤には，東北電力（株）東新潟火力発電所や東京電力（株）富津火力発電所をはじめ，LNG焼き大型GTを用いた複合発電設備（GTCC）の建設が，GTを本格導入させた。GTCCは熱効率がよく，石炭や重油を焚く設備に比べて環境影響が小さいことや運用の柔軟性など，メリットも多かった。その後も，高温化・高効率化，大容量化が進み，GTCCの設備容量は増加してきた。

現在，世界的な脱炭素の動きのなか，わが国も2050年カーボンニュートラルに向けて，燃料としての水素やアンモニアの利用，再生可能エネルギー（再エネ）の導入拡大に向けた取り組みが進められている。再エネは，気象等で変動するため，それだけでは，電力安定供給に懸念がある。GTCCなどの火力機は，慣性エネルギーを以て系統安定に寄与するほか，大量の再エネ補完を可能にするなど，調整力として重要な役割を担うものと考えられる。

電中研は，上記の動向に応じて，GTSJ（前身の日本ガスタービン会議）が設立された数年後の1970年代後半から，発電用GTに関する研究開発を開始した。

2. これまでの主な取り組み概要

電中研の発電用GTへの取り組みは，他機関と同様に，大括りでは，高効率化（高温化や熱サイクルの改良）や燃料多様化（環境負荷の低減やエネルギーセキュリティの確保）を目標として進められ，近年ではこれに，再エネとの協調等が加わっている。以下では，電中研の主な取り組みのあらまし⁽¹⁾を，初期のものから紹介する。

2.1 高温化に向けて

1980年代半ば頃に運転を開始したLNG焼きGTCCは，TITが1100℃級のGTを用いて，熱効率は48～49%（LHV基準）であった。現在，TITは1600℃を超え，熱効率が60%を優に超えるプラントが運転を始めている。こうしたGTCCの高効率化に対する，タービン動・静翼や燃焼器（高温部品）の構造材や冷却に関する技術の寄与は論を俟たない。1970年代後半からの，電中研の研究は，耐熱超合金やセラミックGTに関するものから始められた。

原稿受付 2023年1月19日

* 1 （一財）電力中央研究所
〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1
E-mail（高橋俊彦）：tosihiko@criepi.denken.or.jp

2.1.1 単結晶超合金の開発・評価 1986年度から1988年度には、三菱金属(株)(現三菱マテリアル(株))と共同でNi基単結晶超合金MDSC-7Mの開発に取り組んだ。1993年からは、川崎重工業(株)と共同研究を行い、同超合金の小型GT動翼への適用性を評価するため、強度試験や耐食性試験を実施した。これらにより、同材料の基本特性が把握され、GT用材料として適用できる見通しが得られた。

2.1.2 セラミックスのGTへの応用 冷却空気の大規模な削減が期待できるセラミックスの応用が検討された。燃焼器・静翼を対象に、セラミックス適用時の応力を低減する構造が検討され、強度において初期信頼性を確保できる見通しが得られた。1990年には1300℃級GTの、さらに1993年には1500℃級GTの燃焼器および静翼を試作して、高圧試験により、その信頼性を確認した^{(2),(3),(4),(5)}。一方、燃焼ガス流中に置かれたセラミック材料の減肉劣化現象も明らかになった。加圧条件下の燃焼ガス曝露試験により、セラミック材料の表層劣化に及ぼす影響因子やメカニズム解明、またその抑制が検討された。

2.2 石炭ガスの利用, NO_xの低減に向けて

2.2.1 石炭ガス化複合発電プラント用燃焼器の開発

比較的安定な供給が見込まれる石炭を利用するため、1986年から、電気事業は、旧通産省の補助のもとNEDOの委託を受けて、石炭ガス化複合発電(IGCC)技術研究組合を発足させ、IGCCの研究開発を始めた。開発目標として、空気吹き噴流床石炭ガス化炉、乾式ガス精製、1300℃級GT他の適用により送電端効率43.5%が掲げられた。

電中研もこれに参加して、1987年には、IGCC用GT要素実験設備を設置して、研究に着手した。石炭ガス化燃料は、発熱量が低く、アンモニアを含むため、フェルNO_xを低減するために、過濃希薄燃焼による2段燃焼法を適用した燃焼器の開発が進められた。1990年には、1300℃級GT用低NO_x燃焼器、さらに1995年には、1500℃級GT用の低NO_x燃焼器が開発された^{(6),(7)}。

2.2.2 触媒燃焼器の開発 1988年から、低NO_x燃焼技術の1つとして、触媒燃焼技術の開発を開始した。既存の触媒材料を適用し、かつ高温化に適応するため、反応させた触媒の後流に、燃料あるいは燃料と空気の混合ガスを噴射して、燃焼させる方式が適用された。この方式は、触媒用燃料と2段目の燃焼用追加燃料を独立して供給できるため、燃焼制御も比較的容易であった。1989年からは関西電力(株)総合技術研究所と共同で、1300℃級GT用触媒燃焼器の開発が進められ、概念構造や触媒の検討、設計・試作を経て、燃焼試験が行われ、NO_x排出特性や、燃焼効率の圧力や燃焼温度の影響、表面温度、圧力損失などが評価された^{(8),(9)}。1995年には、1300℃かつ高圧下で10ppm以下のNO_x排出が実証された⁽⁸⁾。

2.3 保守管理の高度化に向けて

1990年代に、1300℃級GTによるGTCCが運転を開始して、GTCCの設備容量が増えてくると、保全や耐久性の維持・向上に係る技術も大きく注目された。わが国の電気事業でも、頻繁な交換・補修を要し、高価な高温部品の保守コストが課題とされた。電中研では、1990年代の後半から、高温部品の寿命管理や耐久性評価に関する研究開発に着手し、さらに、2013年からは、発電用GTの性能維持に欠かせない吸気フィルタの保守管理にも取り組んできた。これらについては、次章以降に内容を述べる。

2.4 中小型GTの高効率化に向けて

2004～2015年度まで国の補助金事業、2016年度・2017年度にはNEDOの助成金事業として、旧三菱日立パワーシステムズ(株)を中心に、住友精密工業(株)、電中研は、3MW級および40MW級試験装置を用いてAHATシステムの研究開発を行った。

AHATシステムは、起動や負荷応答が速いのみならず、空気の加湿と排熱回収により、蒸気タービンなしでも高出力・高効率を得られ、中小容量(概ね200MW以下)で他システムよりも優位性が想定されていた。電中研は、熱効率解析により、AHATシステムの優位性を明確にして、運転試験データに基づく各種特性解析により、機動性や運用性を評価し⁽¹⁰⁾、長期信頼性や商用機システムの全体イメージや熱効率、機動性を明らかにした⁽¹¹⁾。

2.5 出力変動への対応に向けて

GTSJでは、先見の明をもって2010年頃から、GTCCの機動性に着目した技術開発の議論が重ねられた。それを基に、2015年から電中研を取り纏め役として、国内主要メーカー、研究機関、大学など計12機関によりNEDOエネルギー・環境新技術先導プログラムが行われた⁽¹²⁾。同プログラムで抽出された開発目標は、NEDO調査研究において、CO₂排出量と燃料費の削減効果が定量的に明らかにされた⁽¹³⁾。2018年度からは、電中研を取り纏め役として、4年間のNEDO「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電基盤技術開発/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」が行われた。同プロジェクトでは、最低出力時にもCO₂排出を抑制できる高環境型燃焼器、急激な出力変化時の運転制御技術、高レスポンス化/長寿命化技術などが開発され、実機に実装できる目処が得られた⁽¹⁴⁾。電中研は、GTCCのシステム性能の評価他を担った。

3. 高温部品の保守管理技術の開発

GTの高温部品は、耐久性確保のために構造材に耐熱超合金が用いられ、高性能冷却や遮熱コーティング(TBC)等の技術が適用されるため、高価である。一方、電力の安定供給を担う発電プラントでは、燃焼ガスに曝されて、き裂、減肉、変形、コーティングはく離などの

損傷リスクの高い高温部品は、頻繁な補修、交換が推奨される。そのため、高温部品の保守コストは、GTCCの保守運用コストの大きな割合を占める。GTユーザーとしては、経済性確保の観点から、高温部品の管理寿命を使い切るように運用することや、その耐久性（余寿命）を評価することで、補修や交換の時期を伸ばして、長期間、安全に使用し続けることが望まれる。しかし、GT1機あたり膨大な数が搭載される高温部品の、使用履歴の管理や運用計画の作成には多大な労力を要する。また、余寿命評価においても、運転中のGT内部を計測して温度や損傷を把握することは困難である。そこで電中研では、電力各社の支援の下、1996年から高温部品の保守管理技術の開発に取り組み、機能や適用範囲を拡充しながら、プラントに適用してきた。以下にその主なものを挙げる。

3.1 保守支援ソフトウェア

GTユーザーによる保守管理の省力化や合理化を支援するために、①高温部品の使用履歴管理やローテーション計画作成を支援するシステム¹⁵⁾、②タービン静翼に発生するき裂の進展を将来の運転計画から予測するシステム¹⁶⁾、③高温部品に対するリスクベースメンテナンスの実施を支援するシステム¹⁷⁾を開発してきた。本節では、①の概要を述べる。

GTユーザーは、基本的にメーカーに推奨された補修周期や管理寿命に従って高温部品の補修や交換を行う。この際に、部品管理業務の省力化や補修に必要な日数の確保を目的に、部品種類毎にGT1台分の部品数を1セットにして、予備品セットと交換を行う部品ローテーションが行われている。発電所内に同型のGTを複数ユニット保有している場合には、ユニット数分の部品セットと、複数の予備品セットによる部品ローテーションが行われる。高温部品の数はGT一台当たり500個程度であるため、多い場合では、数千を超える部品の使用履歴を個別に管理する必要が生じる。また、将来の部品ローテーション計画に従って、部品セットの補修計画や購入計画を策定する必要があるが、その際には、個別部品の使用履歴、各GTの運転計画および点検計画、予備品セット数、補修に必要な日数など、多数のパラメータを考慮する必要があり、多大な労力が必要となる。このため、多くのGTユーザーは、部品の使用履歴の管理とローテーション計画の作成を効率的に行うために、独自のシステムを導入している¹⁸⁾。このような状況の下、電中研は、部品の使用履歴の管理とローテーション計画の作成を効率化するソフトウェア「ガスタービン高温部品保守最適化支援システム（略称：MapsGT）」の開発に1997年から取り組んできた。Fig. 1に燃焼器部品に対する部品管理画面の例を、Fig. 2に部品ローテーション計画画面の例を示す。

本システムでは、個別部品毎に購入履歴、使用履歴、補修履歴などを管理することが可能である。また、ユー

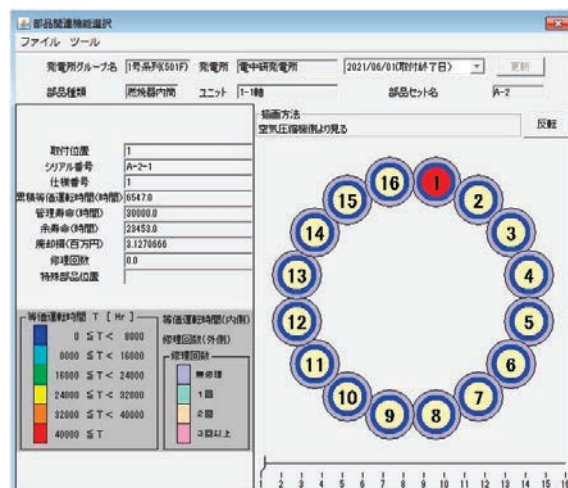


Fig. 1 Example of combustion liner conditions display



Fig. 2 Example of parts rotation schedules display

ザーが指定したアルゴリズムに従って、最長10年分のローテーション計画を自動または手動により短時間で作成することが可能であり、作成した計画に対する各年度の点検費用や部品購入費用などを計算する機能を備えている。また、管理寿命の考え方は、メーカーによって異なる場合があるため、等価運転時間、実運転時間、起動回数のいずれの方法による使用履歴の管理も可能としている。さらに、将来の計画変更に対するシミュレーション機能も備えている。例えば、計画途中から予備品セット数を削減するケースや、GTの将来の運転計画がベース運用からDSS運用に変更されるケース、計画途中から定期点検の周期が延伸されるケースなどに対して、これらの計画変更が、将来のローテーション計画や各種費用に与える影響を事前に確認することが可能である。本システムはこれまでに、国内電力会社のみならず、海外事業者を含め、多数のGTユーザーに活用されており、これらの実績から得られた改善点を踏まえて、機能の拡充を図っている。

3.2 耐久性評価技術

高温部品の損傷やTBCの健全性を量る評価技術を開発してきた。Fig. 3に、タービン動翼を例に、その概要を示す。同評価技術は、プラントで使用する高温部品そのものや運転データを用いて、交換・補修の時期や今後の運用変化が損傷に及ぼす影響を検討するために活用で

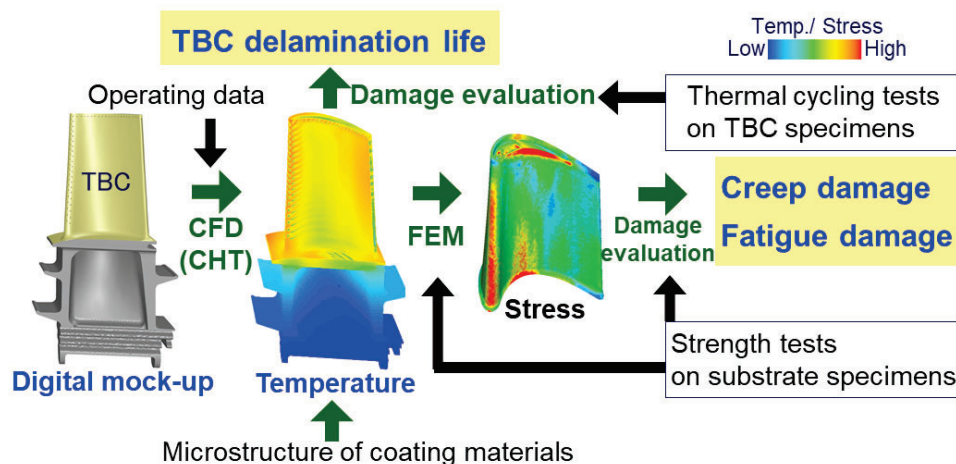


Fig. 3 Outline of durability assessment of GT blade

きる。基本的には、特定のGT機種等に依らず、例えば、サードパーティー製部品のOEMとの比較にも適用可能である。

3.2.1 部品構造の損傷評価 耐久性を律する構造材のクリープ損傷、疲労損傷の観点から、評価手法を開発してきた。これらの損傷は、GT運転中に同部品に作用する応力・ひずみが直接の因子であり、さらにその支配的な影響因子は、部品の温度分布である。これに従い、Fig. 3に示すような各因子を評価する手法を開発、連携した。

温度の推定には、対象部品のデジタルモックアップを用いた数値解析、およびTBCなどのコーティングの微視組織分析に基づく、2つの方法に取り組み、両者の結果を比較、検証しながら開発した。数値解析については、材料の熱物性測定やプラント運転データに基づいて、部品周囲のCFD計算、構造部の熱伝導計算（TBCの遮熱効果含む）、冷却流のCFD計算を統合して、部品の温度分布を評価する連成伝熱（CHT）解析手法を構築した^{19), 20)}。コーティングの微視組織分析に基づく手法については、劣化層（例えば、TBCのトップコートとボンドコート界面に生じるAlの低下層）を顕微鏡観察して、劣化層の厚さとGTの運転時間（部品が燃焼ガスに曝されている時間）から当該部位の温度を推定する手法を開発した²¹⁾。

上記の温度推定結果に基づいて、同じくデジタルモックアップを用いる、FEMによる応力解析手法も構築した²²⁾。このFEM解析には、耐熱超合金の強度試験に基づいて、弾塑性クリープ変形を一括して扱える統一型構成式を開発して^{23), 24)}用いている。また、応力やひずみの解析結果を用いた損傷率（余寿命）の評価にも、耐熱超合金の強度試験データを活用している。

3.2.2 TBCの健全性評価 構造材を燃焼ガス的高温から保護するTBCは、運用中のはく離が懸念されるため、健全性を担保するために、定期点検等のタイミングでリコーティング（剥がして、再施工する補修）がなされる。

電中研では、リコーティングの合理的な時期を検討するため、GTの起動、一定負荷運転、停止を模擬した熱サイクル試験（熱サイクルを負荷したTBC試験片の破壊評価）に基づいて、材料の劣化を把握することで、はく離を予測する手法を開発してきた^{25), 26)}。ここでは、はく離の要因とされるトップコートとボンドコート界面における酸化層（TGO）や、界面近傍におけるき裂の成長挙動（Fig. 4）を把握するとともに、TGOの成長に伴うはく離に対しては、熱サイクル数（起動・停止の回数）と加熱温度（TBC界面の構造材温度）や加熱保持時間（一定負荷運転の時間）の関係を整理している。

また上記とともに、TBCのはく離に繋がる内部き裂（コーティングの浮き）を、レーザー光によるアクティブサーモグラフィーで検出する非破壊検査手法を開発した²⁷⁾。この手法は、従来のランプによるパッシブサーモグラフィーで障害となっていた、熱流束の不足やTBC表面の汚れ等（放射率のバラつき）の影響を、レーザー光の採用やその走査により克服した。これ以外にも、TBCトップコートの厚さの非破壊測定方法²⁸⁾や、複数種類の損傷劣化を非破壊で検査する方法²⁹⁾などを開発してきた。

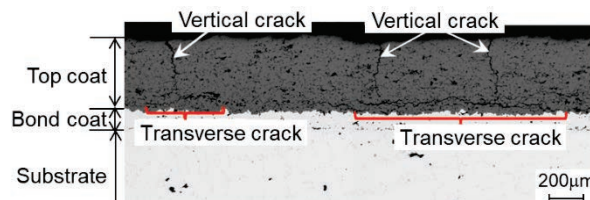


Fig. 4 Example of cross-sectional morphology of TBC specimen after a thermal cycling test

4. 吸気フィルタの保守管理技術の開発

発電用の大型GTには、吸気中の粉塵（以下、大気塵）が翼に付着することによる圧縮機効率の低下³⁰⁾を抑えて、GTの熱効率を長期間維持するために、吸気フィルタシステムが設置されている。本システムでは、通常、捕集

可能な粒子径の異なる、数種類の吸気フィルタ³¹⁾が、流れ方向に複数段（3段程度、合計数百枚）配置される。各段の吸気フィルタも大気塵を捕集することで、差圧が使用時間に対して指数関数的に上昇する³²⁾ため、GTユーザーは、交換に係るコストを考慮しつつ、交換推奨差圧に到達する前に、各段の吸気フィルタを交換しなければならない。

電中研では、GT用吸気フィルタの適切な交換時期の設定に向けて、差圧上昇の推定手法を開発して³³⁾、実機吸気フィルタシステムへの適用に取り組んできた。本研究では、各段吸気フィルタの差圧を、その捕集量との相関に基づいて推定することを目標に、吸気フィルタの差圧の経時変化や粒子捕集率を、実機同様の3段構成の吸気フィルタ配置で長時間連続通風が可能な試験装置（Fig. 5）を製作して、計測した。また、吸気フィルタが捕集する大気塵の粒子径や質量濃度などは、発電所の場所や季節によって異なるため、大気塵の質量濃度を、公開されている環境省大気汚染物質広域監視システム³⁴⁾の測定データと粒子径分布から推定する手法を考案した。これらにより、吸気フィルタの粒子捕集率と大気塵の質量濃度から、吸気フィルタの捕集量を推定して、その捕集量を用いて、実測に基づく相関から差圧を推定する手法を開発した³³⁾。

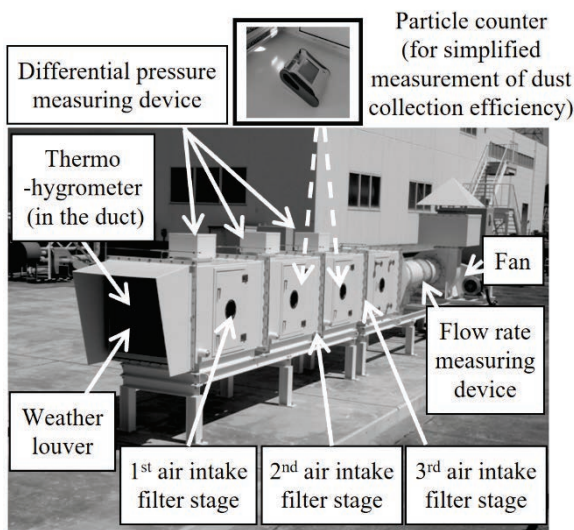


Fig. 5 Test equipment for GT air intake filter system

Fig. 6に、異なる2つの試験期間1, 2（いずれも数か月間程度）における、捕集量の推定結果を、吸気フィルタの質量増加から求めた捕集量とともに示す。図中の捕集量の推定結果には、試験期間内の情報に基づく推定結果（Estimation）と、試験期間前3年間の質量濃度の平均値から、試験期間2の捕集量を推定した結果（Forecast）を示している。これらにより、本研究による捕集量推定手法の妥当性を確認した。さらに、Fig. 7には、各段の吸気フィルタについて、試験期間2における差圧の経時変化と捕集量の関係を例示する。相関式と

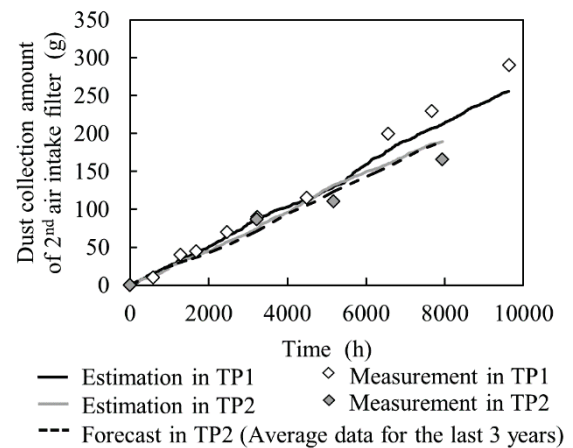


Fig. 6 Estimations of dust collection amount of 2nd filter (TP1: Test period 1, TP2: Test period 2)

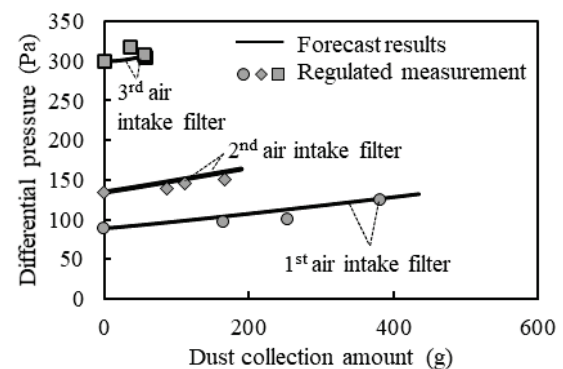


Fig. 7 Relationship between the differential pressure and the dust collection amount of each filter (Test period 2)

捕集量から推定した差圧は、試験装置による計測結果と概ね一致しており、実機吸気フィルタの差圧推定に適用できる見通しが得られた。

5. 今後に向けて

2050年カーボンニュートラルに向けて、その方策の一つとして、火力機における水素やアンモニアの混焼/専焼が検討されている。水素/アンモニア焚きGTCCによる電力の安定供給には、まずは、水素やアンモニアの十分かつ低廉な供給が重要であるが、前章までに挙げた保守管理や高機動化の技術は、引き続き活用できる。ただし、こうしたGTについては、従来のLNGを専焼するGTに比べて、燃料中の水素の増大、それによる燃焼ガス中の水蒸気濃度の増大が材料、延いては部品の耐久性に及ぼす影響を確認する必要があると考えられる。

また近年、様々な産業保安分野では、IoTやAI技術の普及、設備の高経年化と人員不足を背景に、いわゆるスマート保安が推進されている³⁵⁾。火力発電設備の保守運用にも、様々なDX技術が検討、適用されており、その目的の一つは、損傷の監視や予知による状態基準保守(CBM)である。しかし、前述の通り、センサー等の設置が困難なGTの内部、特に高温部品は、監視や予知が難しい。また、CFDやFEMでも、GTの運転中に、リア

ルタイムで温度や応力などの変化を計算することは困難である。

電中研では、タービン翼の温度や応力、ひずみのリアルタイム推定手法の開発に取り組んでいる³⁶⁾。この目標は、数値解析結果を機械学習させた、数値解析の代替(サロゲート)モデルを、温度や応力、ひずみを計測するバーチャルなセンサーとして、損傷状態の監視、把握に役立てようというものである。Fig. 8は、過渡変化するGT運転を仮定して、タービン翼前縁の温度、ミーゼス相当応力、相当ひずみを、ガウス過程回帰によるサロゲートモデルで推定した結果である。サロゲートモデルは、検証用の数値解析を良好に再現しており、かつ、GT運転の過渡変化に対して、十分短い時間で推定可能であることを確認している。今後、推定精度のさらなる向上とともに、損傷状態の監視やCBMへの活用が期待される。

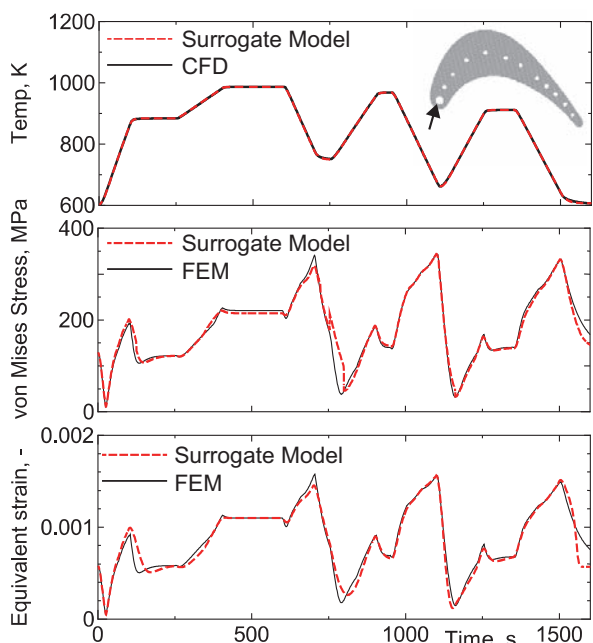


Fig. 8 Estimations by surrogate models compared with CFD/FEM

参考文献

- (1) 佐藤幹夫他, 電中研レビュー No. 34 (1997).
- (2) 森則之, 久松暢, 百合功, 渡辺和徳, 佐藤幹夫, 1300°C級ガスタービン用セラミック静翼の開発, 電力中央研究所報告 W90047 (1990).
- (3) 百合功, 久松暢, 森則之, 渡辺和徳, 佐藤幹夫, 1300°C級ガスタービン用セラミック燃焼器の開発, 電力中央研究所報告 W90048 (1991).
- (4) 久松暢, 百合功, 渡辺和徳, 餌取良幸, 森則之, ガスタービン用セラミック燃焼器の研究-20MW, 1500°C級SiC製燃焼器による高温化検討-, 電力中央研究所報告 W93031 (1994).
- (5) 百合功, 久松暢, 渡辺和徳, 餌取良幸, 森則之, 中山真人, 町田隆志, ガスタービン用セラミック静翼の研究

- 20MW, 1500度級SiC製静翼の設計・試作と高圧試験結果-, 電力中央研究所報告 W94008 (1995).
- (6) 佐藤幹夫, 中田俊彦, 芳根俊行, 山田正彦, 石炭ガス化用1300°C級ガスタービン燃焼器の開発, 日本機械学会論文集 (No.89-1095A), Vol. 56, No. 530, B (1990), pp. 3147-3154.
- (7) Nakata, T., Sato, M., Ninomiya, T. and Hasegawa, T., A Study on Low NOx Combustion in LBG-Fueled 1500°C-Class Gas Turbine, ASME paper, 94-GT-218.
- (8) Fujii, T., Ozawa, Y., and Kikumoto, S., Yuasa, Y., and Inoue, H., 1996, High Pressure Test Results of a Catalytic Combustor for Gas Turbine, ASME Paper 96-GT-382 (1996).
- (9) Ozawa, Y., Tochiara, Y., Mori, N., Yuri, T., Kanazawa, T., Sagimori, K., High Pressure Test Results of a Catalytically Assisted Ceramic Combustor for a Gas Turbine, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 121, Issue 3 (1999), pp. 422-428.
- (10) 高橋徹, 渡邊泰, 荒木秀文, 江田隆志, アドバンスト高温分空気利用ガスタービン (AHAT) システムの研究開発 -第2報 3 MW級検証機運転試験による特性解析と運用性評価-, 電力中央研究所報告M10004 (2011).
- (11) 高橋徹, 渡邊泰, 吉田正平, 麻尾孝志, 佐藤和彦, 荒木秀文, 辻井潤一, アドバンスト高温分空気利用ガスタービン (AHAT) システムの研究開発 -第4報 実証機による長期信頼性評価と商用機スケールシステムの検討-, 電力中央研究所報告M18003 (2019).
- (12) NEDO, 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」(2016)
- (13) NEDO, 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CO₂削減効果に関する調査研究 (2017)
- (14) NEDO, 2018年度~2021年度成果報告書「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電基盤技術開発/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」(2022)
- (15) 藤井智晴, 藤岡照高, 高温部品の保守計画作成支援システムの開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 37, No. 1 (2009), pp. 17-22.
- (16) 藤井智晴, 高橋毅, ガスタービン静翼き裂進展予測システムの開発-1100°C級補修静翼と1300°C級静翼のき裂進展分析-, 電力中央研究所報告, W01026 (2002).
- (17) Fujii, T., Fujioka, T., Ablitt, C., Speck, J., Cane, B., Development of Risk-Based Maintenance Software for Gas Turbines, ASME paper GT2007-27054 (2007).
- (18) 小池高雄, 岩狭幸男, ガスタービン保守管理支援システム, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 29, No. 5 (2001), pp. 366-370.
- (19) 高橋俊彦, 渡辺和徳, 高橋毅, リブ付き内部流路によるガスタービン冷却動翼の連成伝熱解析, 日本機械学会論文集 B編, Vol. 73, No. 727 (2007), pp. 809-814.

- (20) 高橋俊彦, 酒井英司, 藤井智晴, デジタルモックアップによるガスタービン翼の温度分布解析モデル, 第46回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集 C-18 (2018).
- (21) 岡田満利, 久松暢, 藤岡照高, 「ガスタービン用コーティングの組織変化を用いた温度推定手法の開発－実機使用翼を利用した温度推定式の導出－」電中研研究報告Q08015 (2009).
- (22) 酒井高行, 緒方隆志, 屋口正次, 山本真人, 高橋俊彦, 渡辺和徳, Ni基一方向凝固超合金の高温強度評価法の開発－第7報1300℃級ガスタービン初段動翼の解析的寿命評価法の開発－, 電力中央研究所報告 Q04013 (2005).
- (23) 屋口正次, 山本真人, 緒方隆志, Esteban Busso, Ni基一方向凝固超合金の高温強度評価法の開発－第4報: 弾塑性クリープ変形に対する統一型構成式－ Q04010 (2005).
- (24) 屋口正次, 緒方隆志, 多軸応力下におけるNi基一方向凝固超合金の構成式の開発. 電力中央研究所報告 Q05009 (2006).
- (25) 岡田満利, 百合功, 久松暢, 有川秀行, 児島慶享, 泉岳志, ガスタービン遮熱コーティングの耐熱サイクル特性評価手法の開発－等温場熱サイクル条件下におけるはく離寿命予測手法に関する提案－, 電力中央研究所報告 M15010 (2016).
- (26) Okada, M., Kitazawa, R, Takahashi, T., Ozeki T., Crack Growth in Thermal Barrier Coating Subjected to Thermal Cycling under Temperature Gradient, Int. J. Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, Vol. 13, No. 3 (2022)
- (27) 藤井智晴, 尾関高行, 酒井英司, 福地哲生, 布施則一, ガスタービン翼を対象としたTBC遮熱性能非破壊評価法の開発－TBC施工動翼を対象とした熱抵抗の推定値の精度検証－, 電力中央研究所報告 M11009 (2012).
- (28) 福地哲生, 布施則一, 高橋紹大, 岡田満利, 藤井智晴, 藤岡照高, テラヘルツ波を用いたガスタービン用遮熱コーティングの非破壊検査技術の開発－トップコート膜厚測定への適用－, H10003 (2011).
- (29) 藤井智晴, 福地哲生, 福富広幸, 尾関高行, ガスタービン動翼の遮熱コーティングを対象とした非破壊検査手法の開発－基材表面のき裂への渦電流法の適用性検討と複数種類の損傷劣化を対象とした検査フローの提案－, 電力中央研究所報告 M14006, 2014.
- (30) 三浦千太郎, ガスタービンにおける吸気フィルタ総論－吸気浄化技術へのユーザーの取り組みと実績－, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 25, No. 99 (1997), pp. 3-10.
- (31) 藤井智晴, 尾関高行, ガスタービン用吸気フィルタの保守管理の実態調査. 電力中央研究所報告 M13008 (2014).
- (32) 金子清隆, 岩間秀司, 寺澤秀彰, 自家発電設備用ガスタービンの吸気系改善事例 (日本ガスタービンユーザー会), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 3 (2014), pp. 166-173.
- (33) 尾関高行, 松井陽平, 藤井智晴, 大気環境を考慮したガスタービン用吸気フィルタの差圧上昇の推定, 第49回日本ガスタービン学会定期講演会論文集, A-17 (2021).
- (34) 環境省大気汚染物質広域監視システム (そらまめくん) <<https://soramame.env.go.jp/>> (参照日2021年8月23日).
- (35) スマート保安推進のための基本方針 <https://www.meti.go.jp/shingikai/safety_security/smart_hoan/index.html> (参照日 2015年10月23日).
- (36) 酒井英司, 高橋俊彦, タービン翼の温度・応力・ひずみ推定のためのサロゲートモデル構築に関する研究, 第50回日本ガスタービン学会定期講演会論文集, C-3 (2022).

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀【ユーザ】

発電用ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後への期待

Half-Century with Gas Turbines for Power Generation and Expectations for the Future



清野 幸典*1
SEINO Yukinori

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，効率，運用性，技術アセスメント

Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Efficiency, Operability, Technology Assessment

1. 緒言

大型発電用ガスタービンの本格導入が1980年代中盤に実現され、間もなく40年を迎える。導入当時はまさに黎明期であり、ガスタービンコンバインドサイクル発電（以下「GTCC」と略記）の持つ高効率性や高運用性に非常に期待感が高い一方、もう一つの火力発電設備の中核である従来型発電設備と比較し、高温下での材料強度、低NO_x燃焼といった技術的なハードルもあったが、その安定的な運用に多くの技術者の不断の英知が結集され、その後の発展・熟成期を形作り現在に至っている。

本書では、これまでのGTCCの歴史を今一度振り返るとともに、ユーザーとしてどのような取り組みの中で本技術の発展・熟成に向き合ってきたか、さらにはその成果が今現在どういった形で結実しているのか、今後を考えた場合どのような未来に繋がっているのかを、弊社における取り組み事例を紹介しながら概説してみたいと思う。この日本ガスタービン学会50周年記念誌の中で、少しでも関係諸氏のお役に立てれば幸いである。

2. ユーザーとしてのGTCC発展への系譜

まずはFig. 1をご覧頂きたい。本書を執筆している2022年12月現在における、旧一般電気事業者が保有する大型GTCCの導入状況である。出力ベースで見ると約49,000 MWの設備が導入されており、LNGを主体としたガス火力の中核を占めることは勿論のこと、火力発電設備全体としても主体的な設備比率にあり、名実ともに火力発電設備の基幹的役割を果たしている。GTCCがこれほど発展した背景としては、高効率であるということは勿論であるが、設備の起動時間や負荷応答性といった運用面での優位性や、温排水を中心とした環境負荷の低さといった発電設備に要求される基本的な資質が具備されていたことが挙げられる。

また従来型発電設備と比較し、GTCCは設備構成がシンプルであることは大きな特徴の一つである。ただしその構成や建設を考える際には、パワートレインであるGTのパフォーマンスは勿論重要であるが、GTからの排熱を回収して発電を行うボトムサイクルを含めた全体最適の視点が大切である。その検討にあたっては、設備運用パターンやそれに応じた部分負荷も含めた熱効

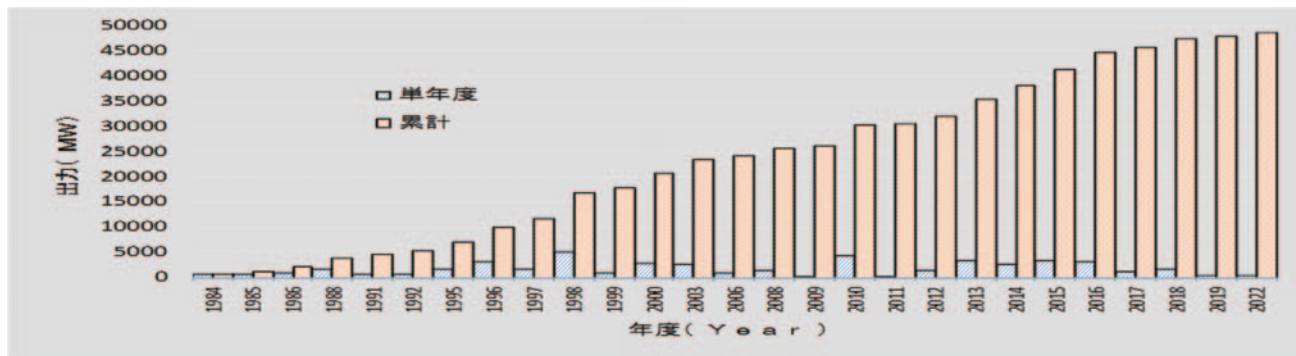


Fig. 1 Introduction Status of GTCC (Gas Turbine Combined Cycle Plant) in Japan

原稿受付 2023年1月16日

* 1 東北電力(株) 能代火力発電所
〒016-0807 能代市宇大森山1-6

率の選択、さらには設備配置を含めた立地地点での設計条件等の考慮、そしてその軸構成の選択（一軸型・多軸型・別軸型）やシステム構成の選択がされる。またその設備の多くがLNG燃料設備との協調が必要なため、LNG基地からの直接供給、パイプラインでの供給等、条件の若干の違いに拠り詳細な設計が必要であることも、GTCCを建設するユーザーとしては、総合的な設備構成を考える上で非常に重要な視点である。

これまでの設備開発の歴史に関し、基軸を持って線引きすることは難しいが、前述の特徴点を踏まえ、ユーザーとしてその開発を進めてきた歴史は、メーカーを始めとした関係者との綿密な技術検討による“活きた経験学”としての積み重ねであり、こうした視点で振り返ることが重要と感じている。従い、黎明期（基盤形成期）・発展期（技術進展期）・成熟期（高度な技術形成と応用期）に取って分けて振り返ることで、その時期毎にどういった行動がされたか、その行動が今にどういった恩恵をもたらしているのか、さらには今後の可能性にどう繋がっているのかをはっきりと示すことが可能になると考え、以下に整理を試みたことから参考に一読願いたい。

2.1 黎明期における取り組み（導入～1990年代中盤）

旧一般電気事業者におけるGTCCの本格的な導入は弊社東新潟火力発電所3号系列と東京電力(株)(現株JERA)富津火力発電所1号系列の開発に端を発し、1984年のことである。周知のとおり、1975年に発生したオイルショックの影響もあり、国内における省エネの意識は非常に高く、環境負荷の低いLNGの導入が盛んな時期にも呼応し、その適合性の高さから開発が促進された。



Fig. 2 Premixed Combustor of Higashi-Niigata Thermal Power Station Unit No.3 Series (Essential Historical Materials for Science and Technology.)

導入当時を黎明期と位置付ければ、弊社におけるこの時期は、高効率な設備を安定的に稼働させるための技術的な挑戦と試行錯誤の繰り返しの時期と言って良いであろう。当時のタービン入口ガス温度（TIT）は1,100℃級であり、大容量化に必要な世界初の乾式予混合燃焼器を搭載する等、新技術が多く採用された。そしてその多くの技術が様々な試行錯誤の中で「如何に実運用レベ

ルでの安定度を高め、設備の特徴である高効率／高運用性のパフォーマンスを高めるか」の視点で、創意工夫とTry&Errorを繰り返し熟成度を高めたと伝え聞く。まさに失敗学の権威である畑村洋太郎先生の言を借りれば「未知」によるものだったかも知れない。現時点では、CFDを中心とした解析技術や、3Dプリンタ技術も含めた製造技術の進歩、さらには運転状態の監視を可能とするレーザー技術等の進展により、様々な予見性が確保されているが、当時は燃焼振動一つとっても、そのメカニズムから監視方法、さらには燃焼調整方法に至るまで手探りの状況であった。こうした未知の領域をメーカーとユーザー関係者が一丸となって、創造力と技術的胆力で補いつつ、経験値として積み上げていった歴史である。前述の技術的事項の解明も含め、確固たる基盤技術にまで積み上げた先輩諸氏の辛苦には、心から敬意を表するとともに、こうした一連の対応は、これ以降の弊社における技術者のDNAとなっている。

なおこうした一連の成果も含め、東新潟火力3号系列の開発については、国内でも高い評価を受け、「日本産業技術大賞（内閣総理大臣賞）」を受賞している。

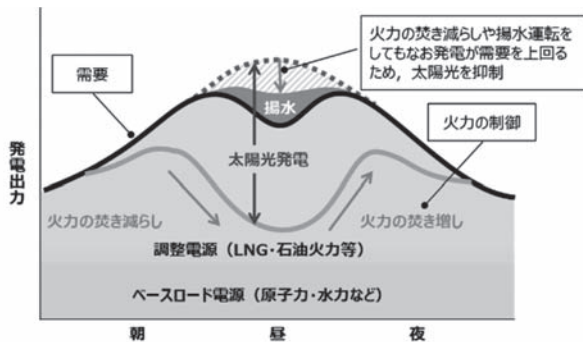
2.2 発展期における取り組み（1990年代中盤～2000年代中盤）

1990年代中盤から2000年代中盤に掛けては、黎明期における様々な取り組みが功を奏し、基盤技術となる材料開発や冷却技術、燃焼技術といった基本技術が劇的な進歩を遂げ、TITの上昇や設備の大型化が推進された。一方、内部資料に拠り確認したところ、この時期における国内GTCC設備の事故報告数は全体の約半分を占めており、裏を返せばより高いレベルの技術的挑戦があった結果かもしれない。そうした背景もあり、弊社における当該時期の取り組みは、前述の黎明期における経験学に加え、発展期における社としての到達ポイントを「次世代級のTIT 1,500℃級GTを採用したGTCCと定めつつも、その事前技術的アセスメントを徹底して実施する」といった行動となったことは理解に難く無いであろう。

こうした状況を踏まえ、1988年には高効率ガスタービンの開発研究（弊社では「AGT開発研究」と呼んでい



Fig. 3 Higashi-Niigata Thermal Power Station

Fig. 6 Daily load and generation curve⁽¹⁾

用い簡便に示せば、Fig. 6のとおりであり、従来と大きく変化している。

その結果、火力発電に求められる役割は、電力供給にあたって需要に併せて供給力を的確に増減し、供給電圧の維持と周波数の調整を図る需給調整機能が主体となり、現実はその調整を行う機会が増大している。同じ火力発電で比較しても、石炭を利用する石炭火力発電においては、様々な高運用性の取り組みが進められているものの、液体・気体燃料を利用する発電方式に比較し、燃料供給量の弾力的な調整が難しく、その負担割合は現時点では総じて小さい。また過去の高度経済成長時期と比較しても、電力需要の伸びは小さく、多くの投資と開発期間が必要となる新規地点の開発行動には結び付きにくい中、電力システム改革の進展に拠り電力市場を通じた売買が進む等、周辺環境の変化に応じた設備の競争力の確保が必須となっている。こうした背景を通じた行動は結果、以下のとおり収斂されることとなる。

【行動1】設備のシンプル性を活かし従来型発電設備のGTCC設備へのリプレースが進展。

【行動2】既存のGTCC設備についても高運用性ニーズの高まりから最新技術のフィードバックが進展。

次項で弊社が取り組んだ事例を紹介したい。

2.3.2 高運用性を企図した実現事例 弊社において行動1に則った事例としては、大きく分けて4地点の実例があるが、ここでは代表的な仙台火力・新仙台火力の事例を紹介したい。何れの地点も元来は従来型発電設備で運用されていたが、高経年化によるパフォーマンス低下から、そのリプレースがされた。リプレースを行う場合、当然既設の設備流用設備との位置的な問題や、工事の実践の関係からその自由度は完全な新設の場合と比較して難易度も高い。何れの設備についても、高運用性を確保する意味から、空気冷却式の燃焼器を採用した設備を導入しているが、当時の先進技術のフィードバックを取り入れた設備であり、前述までの技術的アセスメントのプロセスの中で導入されたことは言うまでも無い。従い、ここでは詳述をせず、リプレース独特な事情の中でGTCCとしての柔軟性が発揮された点を中心に紹介したい。

まずは仙台火力発電所から紹介したい。Fig. 7にリプ

レース前後の姿絵を示すが、従来は赤白煙突が特徴的な石炭火力であったものを高効率GTCCにリプレースされている。立地が特別景勝松島に面して立地されていることから、文化財保護での工事の制約等、数多くのハードルが存在したが、景観に配慮した低層煙突の採用や、建屋へ伝統的な蔵をイメージした設計を採用する等、最大限の環境配慮をした中での工事であった。こうした事情を確立出来たのも、元来GTCC設備の有する簡便性が為せる業の一つと認識している。



(Before replacement)



(After replacement)

Fig. 7 Sendai Thermal Power Station in Before and After Replacement

ここで話を2011年3月に発生した東日本大震災における対応に移したい。弊社の太平洋側発電設備に位置する数多くの火力発電設備が地震後に発生した津波の影響を受け、甚大なる被害を被り、電力供給において深刻な供給力不足に陥った。前述した仙台火力発電所も約8mの津波の影響を受け相当のダメージを受け、復旧まで相当な時間を要すると想定されたが、関係者のたゆまぬ努力により約1年の短期間で復旧された。

また深刻な需給不足を救ったのもGTであった。地震後に急遽建設が進められたシンプルサイクルGTの採用による供給力の確保である。当時の動きは非常に早く、メーカーの最大限の協力もあって、震災より1年の時を待たず、約100万kWの供給力が確保され、厳しい需給状況を支え続けた。その後、被災した設備の復旧によりシンプルサイクルGTとしての役割は終了したが、その後緊急電源として設置されたGTの一部はGT換装工事として東新潟火力4-1号系列への活用⁽²⁾、さらには八戸火力5号機のコンバインド化工事として使用され、現在も貴重な戦力として引き続き活躍している。こうした活用幅の広さもGTCCの大きな持ち味の一つであるだろう。

またこの震災の経験を踏まえ実感した事実がもう一つある。GTCCに関わる関係者の、ユーザーとメーカーの垣根を超えた「絆」である。当時の動きは非常時とは思

えない程、関係者の一人一人が「自分は今何をすべきか」を自然に意識した行動がされ、それが早期の復旧方針や物品調達の方針に至るまで神業の如く実践され実現された。これは前述の歴史において、半ば苦楽をともにした戦友だからこそ為せる業であり、こうした「実践の歴史」を伝承していくことがこの不確実性の強い現在の重要な視座とも感じている。

余談が過ぎたが、話を元に戻したい。新仙台火力発電所のリプレース事例である。新仙台火力の大きな特徴は前述の震災の痛い経験も踏まえ、その耐力向上に至る点でされた点にある。新仙台火力発電所も元々は天然ガスならびに重油を主燃料とした従来型発電設備であったが、最新のGTCC設備にリプレースされた。

リプレースの中で考慮された最大の対策は、減災の考えに基づき設備の設計である。津波による設備の直接的損傷を抑制する防潮堤見直し等、最大限の考慮がされている。またLNG燃料設備を併設した設置スペースの理由から、煙突構造は自立型では無く、排熱回収ボイラ上部に設置される直上型が採用されたが、環境面の配慮から高さを100mとする必要があり、地震による直接的な被害を防ぐ意味から排熱回収ボイラと一体化された強固な基礎構造と支持鉄骨構造による設備としている。加えて復旧に時間を要する設備の設置高さを最大浸水高さ以上とすることで、東日本大震災相当の地震ならびに津波に襲われたとしても半年の復旧期間を持って復旧出来るシステムとしている。これもGTCC設備の持つ、設備の簡便性がもたらす特徴であり、2021年、2022年春に立て続けに発生した東日本大震災の余震と考えられる大規模地震においても高い耐力を持つことを確認している。



Fig. 8 Shin-Sendai Thermal Power Station

行動2に基づく事例は、国内においても数多く紹介されており、設備としての効率向上や高温部品のハイスペック化がされ、貴重な戦力として活用されている。弊社においても、前述の東新潟火力3号系列に用いられる高温部品においてその技術活用がされ、営業運転を開始してはや40年となる現在においても高いパフォーマンスが維持されている。こうした事例が数多く見出されているのも、GTCCが持つ設備の簡便性と設備としての冗長性がもたらす効果の一つであろう。

2.3.3 至近の高効率GTCCの技術動向 ここでは、本年12月に営業運転を開始した弊社上越火力発電所1号機の特例を紹介したい。上越火力1号機に採用されたGTの特徴をFig. 10に示す。強制空冷燃焼器システムを採用して、TIT 1,650℃を実現する中でもNO_x上昇レベルを運用レベルまで抑制し、さらに高圧力比圧縮機と超厚膜化TBCを採用することでGTCCとしての全体性能を高めている。その結果、熱効率は63%を超えるレベルを実現している。さらに特徴的な点としては、強制空冷燃焼器システムを採用する中で、負荷一定運用や負荷変動対応に応じたGT内部クリアランスの最適化を冷却空気の流れを変え実現し、従来と比較した性能向上や飛躍的な運用性向上が可能となったことが挙げられる。こうした機能の保持は、今後の複雑化する需給運用への貴重な戦力となると確信している。



Fig. 9 Joetsu Thermal Power Station

なお今回採用した、「強制空冷燃焼器システム採用次世代ガスタービン」は、(一社)日本機械工業連合会による「2018年度優秀省エネ機器・システム表彰」において、本技術の省エネ、環境保全効果ならびにプラント運用性改善効果が評価されるとともに、世界的な普及・省エネへの貢献が期待され、最高位となる「経済産業大臣賞」を受賞している。

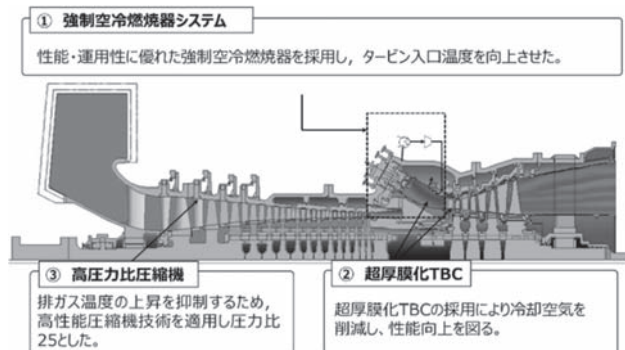


Fig. 10 Adopted Technology for the Latest GT

2.3.4 高運用性に向け今後必要なもの ここまで熟成期における取り組みについて高運用性をキーワードに回顧してきたが、現時点で相当な高運用性技術の進展が得

られている。しかしながら、今後はCN2050への挑戦という大命題があり、様々なエネルギー源が錯綜すると予想される次世代において、これを如何に達成するかについては真剣に検討する必要がある、またGTCCの高運用性の持ち味をどう生かすのかと関連性が深い。さらに検討を深めた内容については、不退転の覚悟の中で推進していく実行力が必要となる。次項に今後50年への期待の中で概括してみたので、一読願えれば幸いである。

3. 結言（今後50年への期待）

第6次エネルギー基本計画が2021年に示され、さらに政府方針として2030年に46%のCO₂削減、2050年断面でCN社会を実現することが示されているが、その際のエネルギーの供給形態や利用形態はその多くが現状とは非連続なものと考えられる。ただしエネルギー利用は時々刻々、その絶対量は変化することから、貯蔵技術の進展は予想されるものの、相当量を能動的に補う調整力の必要性は変わらないであろう。その際、これまで培われてきたGTCC技術が、その役割の一端を担うことは周知の事実であろう。ではどういった形でその持ち味を生かしていくのか。自論の域を超えないが、以下に考察してみたので参照されたい。

まずは脱炭素の一丁目一番地となる脱炭素燃料、例えば水素などへのシフトの影響である。少量の混焼レベルであれば、技術的なハードルはそれほど高くなく、既存設備のマイナーチェンジと想定されるが、ある一定量を超えた時点では全く発想を変える必要がある。この流れを柔軟且つ適切に実施していくためには、相当練られた時間軸の考え方が必要であり当然必要投資も伴う。社会実装には経済的観念が必要不可欠であり、さらにエネルギー供給事情は凹凸があってはならない。俗に言うS (Safety) + 3E (Energy security, Economic efficiency, Environment) の視点である。将来活用が有望視されている脱炭素燃料 (NH₃, H₂等) については、人工的な合成プロセスを有する以上、単なる石油・石炭・LNGといった資源に該当するものとは根本から趣を異にしている。ただし、合成プロセスを伴うということは、逆にエネルギー貯蔵の面からのアドバンテージも有する。まずはこの点についてはしっかり認識する必要がある。

さらに将来に渡り、GTCCが電力供給周波数調整の役割を引き続き担うと想定すれば、繰り返しにはなるが、電力貯蔵設備としての技術革新には期待値は高いものの、その広範な導入には一定の時間が必要な感覚も受けており、現実的には一定の規模感を持ってGTCCを活用するのが現実的であろう。そうした場合、前述のとおりGTCCに関する基本的対応は既に概ねの道筋が出来ることから、その社会実装の蓋然性は高いものと考えられる。

以上を総括して考えていくと、やはり今後の脱炭素社

会実現の大きな鍵は、脱炭素燃料を如何に柔軟性を持たせ、競争力ある形で使うかをグランドデザイン出来るかに拠るであろう。ここでGTCCの活用の歴史は、燃料ハンドリングの歴史でもあり、またGT燃焼器での安定燃焼の追求も様々な状況下における余裕度・ロバスト性の確保の歴史でもある。従い、国内で持つGTCCの高い技術があれば、日本国に合った形での脱炭素燃料の製造プロセスの確立や、同時にエネルギー貯蔵としての脱炭素燃料の活用、前述の視点に基づく脱炭素燃料純度を中心としたスペック事項の緩和、さらには全体を通じたシステムの簡便化や効率化の可能性追求等を行うことにより、これまでの「燃料＝輸入」という概念から脱却した新たな世界を作ることにも可能であろう。それが日本としての選択肢の様に思えてならない。即ち、「燃料製造（エネルギーとしての貯蔵を含む）から発電・利用までを国内の競争力強化に誘う最適サプライチェーンの構築」であり、独自の日本版モデルの開発である。当然簡単な道筋では無いが、ここ50年で基幹技術として国内で磨かれてきたGTCCに拠るエネルギー活用技術があるからこそ為せる業ではないか。こうした取り組みに日本ガスタービン学会が主体的役割を果たせる姿が構築されることを懇願して止まない。ここで弊社の格言的な言葉をFig. 11に紹介して結びとしたい。前述した国内初の東新潟火力発電所3号系列へのGTCC導入を決断した際の弊社社長の言葉である。

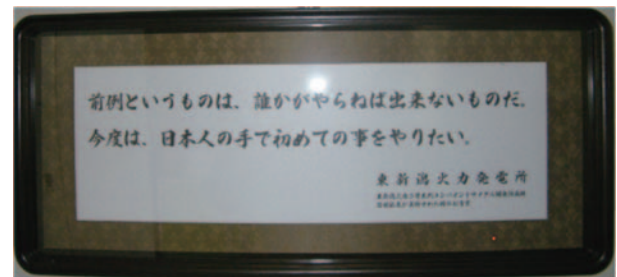


Fig. 11 Our Company's Proverbial Words in the Startup Phase of GTCC

先人が指し示したこうした言葉を胸に挑戦していくことで、不透明感の高い今後の脱炭素社会実現に向けた歩みをチャンスとして活かすことも可能ではないか。今後に大いに期待しつつ、これまでGTCCの発展の歴史の末端を担ってきた私個人としても、改めて鋭意取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) 山崎裕之, 恩田徳雄, 青山光正, 丸山敏春, VPPの活用について, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 50, No. 6 (2022), pp. 423
- (2) 柳谷伸, 金谷政孝, 小山一直, 高橋正大, 大型ガスタービンの既存設備への有効活用, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 48, No. 6 (2020), pp. 352-356.

特集：日本ガスタービン学会創立50周年記念特集 ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀【ユーザ】

ガスタービンとともに歩んだ半世紀と今後の半世紀，航空エンジン

The Progress of Jet Engines During the Half Century and the Next Half Century



三ヶ田 一裕*1
MIKETA Kazuhiro

キーワード：ジェットエンジン，カーボンニュートラル，持続可能な航空燃料，エンジン電動化

Key Words：Jet Engine, Carbon neutral, Sustainable Aviation Fuel, Electric Engine

1. 緒言

1903年，ライト兄弟が水平直立4気筒エンジンを用いて世界初の動力飛行を実現して以降，航空エンジンは目覚ましい進歩を遂げてきた。主に1950年頃までは戦争を背景に技術が発展，軍用機のスピード向上を目的としてレシプロエンジンやターボジェットエンジンが開発されたが，その後1950年以降は旅客需要を背景に燃費性能の良いターボプロップエンジンやターボファンエンジンが主流となった。特に大型航空機に搭載されているターボファンエンジンはファンが大型化されバイパス比が大きくなり，燃費性能や安全性，信頼性を大幅に向上させている。

近年では更なる燃費改善を目的として，ファンを最適なスピードで回転させる機構を備えたPratt & Whitney (PW) 社ギヤードターボファン (GTF) エンジンがすでにナローボディ機に搭載されている他，Rolls-Royce (RR) 社ウルトラファンエンジンはまもなく試作エンジンのテストセルでの最初の運転が計画されている。

今後に向けては，国土交通省から航空機運航における「2050年カーボンニュートラル，脱炭素社会の実現」に向けた工程表⁽¹⁾でも示されている通り，燃費向上はもちろんのこと，更なるCO₂排出量削減を目的とした取り組みが必須であり，持続可能な航空燃料 (SAF：Sustainable Aviation Fuel) の推進，水素燃料や電動化技術の開発など，更に環境に優しい脱炭素に向けた次世代航空エンジンの開発，実用化が必要になる。

本稿では，航空エンジンがこの半世紀にどのように発展してきたかを振り返るとともに，今後の半世紀に果たすべき役割について，エアライン目線で紹介する。

2. これまでの半世紀，JAL機で見るエンジン形態の進化

2.1 ターボジェットエンジン，DC-8-32

1960年に導入されたDC-8は初のジェット旅客機であり，ターボジェットエンジン，PW社製JT3Cエンジン (出力18,000 lbs.) が搭載されていた。ターボジェットエンジンは吸入した空気をコンプレッサーで高温高圧に圧縮，燃焼器で燃料と混合して燃焼，その排気流でタービンを回転させ同軸上のコンプレッサーを駆動させるとともに，タービンから高速の燃焼ガスを後方に排出することで100%の推進力を得る仕組みである (Fig. 1)。

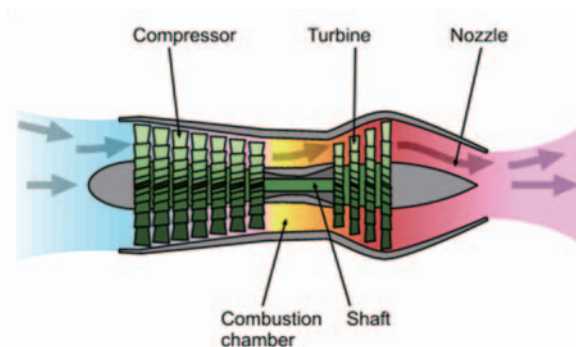


Fig. 1 Turbojet Engine

ここで，ジェットエンジンにおける推進効率は，流入空気速度を V_a ，排気速度を V_j とすると

$$\eta = \frac{2V_a}{V_j + V_a}$$

と表すことができ，理論上は流入空気速度と排気速度が等しい時に最大の1，排気速度が流入空気速度より速くなればなるほど効率が低下する。実際には機体の空気抵抗との関係により，排気速度が流入空気速度より若干速い場合に最も推進効率は良くなるが，DC-8の巡航速度は約870 km/h程度の亜音速域であり，流入空気速度に対して排気速度がかなり高く，燃費性能が悪くかつ騒音

原稿受付 2023年1月10日

* 1 JALエンジニアリング
エンジン整備センター整備技術グループ
〒282-0011 成田市三里塚御料牧場 1-1
E-mail: miketa.g4f7@jal.com

も大きいという問題があった。そのため、ターボジェットエンジンはコンコルドなどの超音速旅客機には適していたものの、亜音速から遷音速域が巡航速度となる旅客機のエンジンとしてはその後使われなくなっていった。

2.2 ターボプロップエンジン, YS-11

戦後初めて日本で開発された旅客機であるYS-11は1965年に初号機が導入された。最大巡航速度が470km/h程度の中速機であり、ターボプロップエンジン、RR社製ダートエンジンが搭載されていた。

ターボプロップエンジンの仕組みもターボジェットエンジンと同様、圧縮機、燃焼器、タービンから構成されているが、タービンの回転運動を軸出力として取り出し減速装置 (Gearbox) を介して前方プロペラに伝えられ、プロペラの回転によって推進力を得る仕組みである (Fig. 2)。

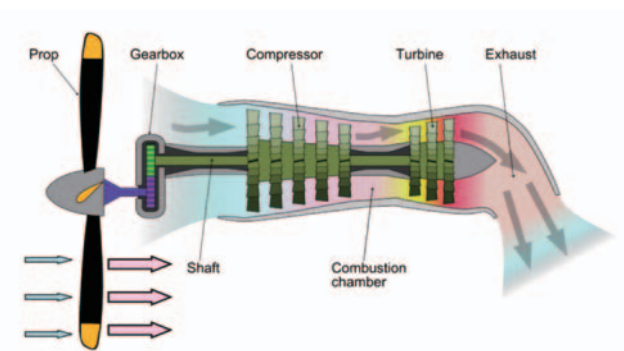


Fig. 2 Turboprop Engine

このように、現在のギヤードターボファンエンジンと類似した仕組みであり、高回転の方が効率の良いタービンシャフトと、プロペラ先端速度が音速を超えないように制限が必要なプロペラシャフトのどちらにも理想的な回転数でコントロールすることが出来るため、燃費性能に優れている。しかし、プロペラの速度が音速に達すると衝撃波が発生して効率が低下するため高亜音速機には効率的ではなく、またターボプロップエンジン開発段階では技術的問題によりエンジン出力に対する減速装置の大きさ、重量に限界があり大出力を得るのが難しい。さらに経済性の高いターボファンエンジンがその後実用化されたため、小型機や双発軽飛行機にのみ使用されている。

2.3 ターボファンエンジン

前述のターボジェットエンジン、ターボプロップエンジンの欠点を補う形で開発されたものがターボファンエンジンである。基本的な構造はターボジェットエンジンの前方にファンが追加されたもので、現在大型機に搭載されているターボファンエンジンでは、低圧タービンとファンが同軸上にあり、低圧タービン出力によってファンが駆動される形式が最も一般的である。

ターボファンエンジンにおいては、流入空気の一部は圧縮機、燃焼器、タービンの「コアエンジン」に流れ高

温高速の燃焼ガスとして後方に排気されるものの、ファンを通りコアエンジンに流れない空気は低温低圧の空気流となり、最終的にそれらが混ざり合うことで後方への空気噴流速度は平均化される。よって、前述のターボジェットエンジンよりは低速、ターボプロップエンジンよりは高速の最適な空気噴流速度が得られ、ファンが大型化することで出力、推進効率、燃費性能が向上する。また、排気噴流がファンからの空気噴流に包まれるため、騒音の低下にもつながっており、現在の旅客機のエンジンではターボファンエンジンが主流となっている。

2.3.1 低バイパス比エンジン, MD81 ターボファンエンジンにおいて、ファンのみを通る空気流量と、コアエンジンに流れる空気流量の比を「バイパス比 (BPR)」と呼ぶ。バイパス比が1から2未満のターボファンエンジンは低バイパス比エンジンと呼ばれ、形状はターボジェットエンジンに酷似している (Fig. 3)。

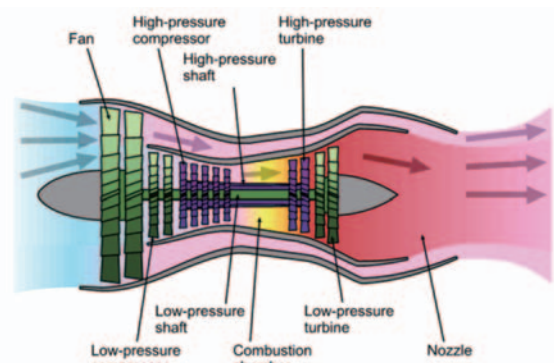


Fig. 3 Low BPR Turbofan Engine

初期のターボファンエンジンであり、1981年に旧日本エアシステム (JAS) に導入されたT尾翼を持つMD81ではPW社製JT8Dエンジン (出力18,500 lbs.) が搭載されていた。エンジンのバイパス比は1程度のためファンからの空気噴流が少なく特性はターボジェットエンジンに近い。また、騒音は純粋なターボジェットエンジンに比べて相対的には小さくなるが、依然として大きかった。

2.3.2 高バイパス比エンジン, 737, 767, 777, 787, A350 高バイパス比エンジンはバイパス比が5以上のものを指し、低バイパスエンジンと比べてより大きなファンが取り付けられているのが特徴である (Fig. 4)。現在JALの主要機材である737, 767, 777, 787, A350といった旅客機にはいずれも高バイパス比のターボファンエンジンが搭載されており、大型旅客機エンジンの主流となっている。

JAL機材での代表的な高バイパス比エンジンの出力とバイパス比の関係はTable 1の通りであり、出力が大きくなるにつれてバイパス比が大きくなり、またファン直径も大きくなり、777, 787, A350などの大型機ではバイパス比は9:1、ファン直径は約3mに達する。

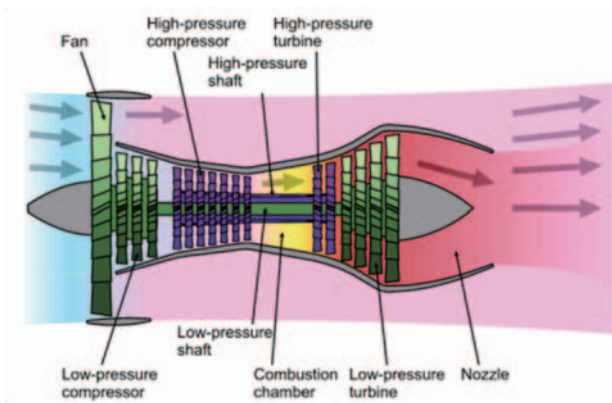


Fig. 4 High BPR Turbofan Engine

Table 1 Engine Specification of High BPR Turbofan Engines

Aircraft	767	737	777	787	A350
Delivery	1985	1995	2004	2012	2019
Model	CF6	CFM56	GE90	GEnx	TrentXWB
Thrust (lbs)	62,100	27,300	110,760	74,100	84,200
BPR	5.3 : 1	5.1 : 1	9 : 1	9 : 1	9 : 1
Fan Dia. (m)	2.48	1.55	3.25	2.80	3.00

2.4 これまでを振り返って

旅客機エンジンにおいては何十年にも渡って燃費性能を如何にして改善していくが大きなテーマであり、ターボジェットエンジン、ターボプロップエンジンを経てターボファンエンジンに至るまで、Fig. 5に示す通りエンジン形態の変化により燃費性能向上が図られてきた。

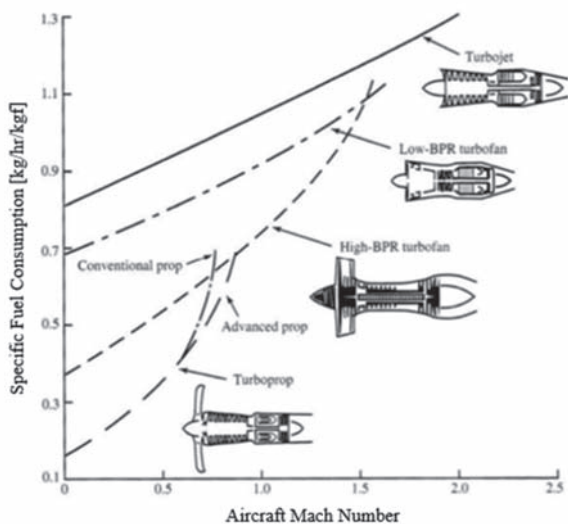


Fig. 5 Specific Fuel Consumption vs Engine Model

ターボファンエンジンが主流となって以降は、バイパス比を大きくしていくことが更なる燃費性能改善へ最も効果的な方法となり、前述の通り初期はバイパス比 1 : 1 であったところ現在では 9 : 1 まで増加した。一方で、高バイパス化によりファン直径が大きくなるとファンブレードも大きくなりエンジン重量も増すことから、PW社やRR社はチタン製中空構造ファンブレード

を採用、General Electric (GE) 社では複合材 (FRP) ファンブレードを採用して重量軽減を図っている。特にGE社では空力解析の向上によりファンブレード形状の最適化がなされ、GE90エンジンでは22枚のファンブレードが使用されていたところ、GEnxエンジンでは18枚、今後GE90エンジンの改良型として777Xに使用されるGE9Xエンジンでは16枚まで減らすことが計画されている他、GEnxエンジンやGE9Xエンジンではファンケースにも複合材が使用されるなど、様々な重量軽減対策が施されている。なお、GE9Xエンジンではバイパス比 10 : 1、ファン直径3.39m、燃費性能に関してはGE90エンジンと比較して更に約10%の改善効果が見込まれる⁽²⁾。

2.5 エンジン信頼性, モニタリングの進化

エアラインとして最も重要であるエンジンの信頼性を確認する指標として、1,000飛行時間あたりのエンジン空中停止率 (In Flight Shutdown (IFSD) Rate) が一般的であるが、Fig. 6に示されるようにターボジェットエンジンと比較して、今日のターボファンエンジンでは劇的に改善していることが確認できる。

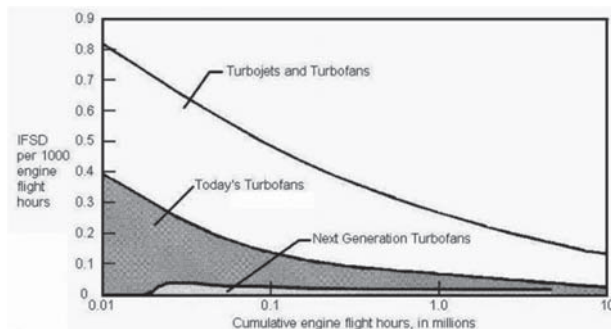


Fig. 6 IFSD Rates for Turbojet and Turbofan Engines since 1958

理由として、エンジン開発における設計、製造、またエンジン修理における検査手法、精度向上によるハード面での進歩はもちろんのこと、エアライン側でもエンジンのヘルスマニタリング、トレンドモニタリング手法が発達、ソフト面でも進歩してきたことが非常に大きい要素である。

現在のエンジンヘルスマニタリングの仕組みは、日々の1便1便の運航において、エンジンスタート、離陸、上昇、巡航、降下、到着後のエンジンシャットダウンにおけるエンジンパラメータを都度機上システムから地上を経由してエンジンメーカーに送付、エンジンの排気温度、振動、オイル圧等各種パラメータのモニタリングを行い、通常と違う挙動を示すなど何か不具合の兆候が認められる場合、即座にエアライン側に通知が送られる (Fig. 7)。このモニタリングにより、エンジンがIFSDを引き起こすような重大な部品内部損傷に至る前に整備や検査を実施、見つかった不具合に対して事前に適切な整備処置を行うことが出来るようになっている。

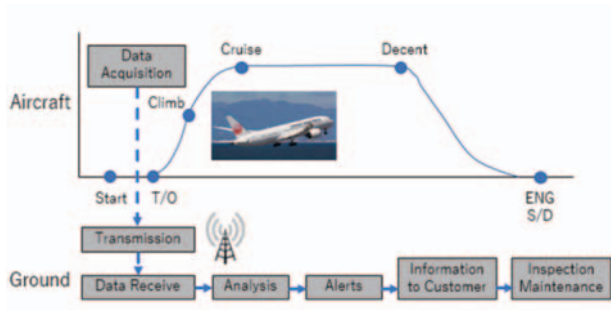


Fig. 7 Engine Health Monitoring

また、エンジンメーカーでのモニタリングに加え、JAL独自に過去の不具合事例を参照にしたモニタリングも行っており、特定のパラメータに対し独自に定めた閾値を設定、それを越えた場合自動的に情報が共有され、整備処置のトリガーとなるような仕組みも導入されている。

さらに、以前から定期的にエンジン内部を内視鏡で検査するプログラムは導入されており、これまで内視鏡で直接検査員がブレード1枚1枚の状況を確認していたが、現在では内視鏡で撮影した画像データを取り込み、微細な亀裂を発見したり不具合個所の長さや面積を計算したりするソフトウェアの使用トライアルが行われており、IT技術の進歩に応じて検査方法も進化し続けている。

3. 今後の半世紀に向けて

3.1 今後のエンジン形態の進化

これまでの半世紀で成熟してきたターボファンエンジンにおいてまだ残る課題として、ファンと低圧タービン回転数の最適化が挙げられる。ターボファンエンジンでは、ファンブレード先端部の周速が最も速くなるが、先端部が音速に達する場合には空気の圧縮により衝撃波が形成され効率が大幅に低下するため、ファンの回転数を必要以上に上げることが出来ない。一方で、同軸で繋がっている低圧圧縮機、低圧タービンは回転数が高い方が効率がよく、ファンに合わせて回転数を下げる代わりに低圧タービン側の段数を増やす必要があり、エンジン重量が増えてしまうこととなる。このように同軸上のファンと低圧タービンで最適な回転数が異なる問題に対し、ファンと低圧圧縮機間に減速装置を設けてお互いが最適な回転数で運転できるようにしたエンジンがギヤードターボファンエンジンである (Fig. 8)。

このギヤードターボファンエンジンはすでにPW社製PW1100Gエンジンがナローボディ機であるA320neoに搭載されており、低圧圧縮機3段、高圧圧縮機8段、高圧タービン2段、低圧タービン3段でコアエンジンが構成され、そこに減速装置とファンが備わっており、バイパス比は12:1である。PW社の説明によれば、A320neo搭載のIAE社製V2500エンジンに比べて17%の燃料消費率が改善される⁽³⁾。

一方で、このPW1100Gギヤードターボファンエンジン

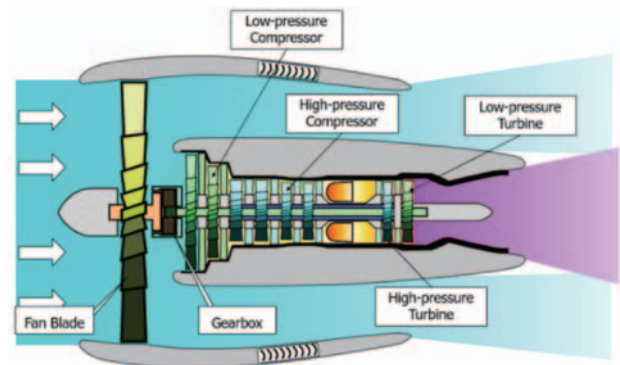


Fig. 8 Geared Turbofan Engine

ンのコンセプトと同等の減速機構を有した大型旅客機用エンジンはまだ実用化されていない。大型機用エンジンとして実用化するためには、低圧タービンの回転を減速装置を用いて大きなファンに伝達する必要があり、その伝達を実際に行うため大きな出力に耐えうる減速機構が必要となる。

RR社で現在開発中のウルトラファンでは、パワーギヤボックスと呼ばれる減速装置が2017年から開発中であり、テストでは64,000 kWの出力まで記録している。また、そのパワーギヤボックスを搭載した試作エンジン1号機のテストが2023年始に計画されている。ウルトラファンの諸元としては3.5 mのファン直径を有しバイパス比は15:1、Trent700に比べて25%、TrentXWBエンジンに比べて10%の燃費性能向上が見込まれる⁽⁴⁾。現状のターボファンエンジンにおいてはこれ以上の高バイパス化が物理的に難しいと考えられるが、減速装置に十分な信頼性、耐久性が確認できれば今後ギヤードターボファンエンジンのコンセプトによりさらにバイパス比を高めることが可能となり、大型旅客機用エンジンとしても実用化されることになると考えられる。

3.2 CO₂排出量削減に向けた取り組み

航空業界におけるCO₂排出量削減は優先度の高い重要案件であり、国際民間航空機関 (ICAO) は2022年10月7日、「国際航空分野で2050年までにCO₂排出を実質ゼロにする (カーボンニュートラル)」という長期目標を採択するとともに、2035年までの取り組みについてオフセット量算定基準となるベースラインを2019年の85%に変更することを決定した⁽⁵⁾。従来、「2020年以降国際航空における温室効果ガスの総量を増加させないこと」、「2050年時点で2005年対比半減」を目標としていたが、従来の目標から排出削減へと大きく方針転換したことになる。

2019年、国際航空全体からのCO₂排出量は9.1億トンで世界全体の約1.8%を占めていたが、もし航空業界で脱炭素化が何も進まなかった場合、2050年には2019年の2.6倍に相当する23.5億トンのCO₂排出量が発生、全世界のCO₂排出量の22%を占める可能性がある、との試算もある。航空機のCO₂排出量の多くは燃料を燃焼する過程で

発生するものであり、CO₂排出量削減のためにはどのように航空機に動力、推進力を供給するのが重要な要素になる。前述のギヤードターボファンエンジンの大型機への実用化はこの削減目標を達成するための打ち手の一部になると思われるが、それ以外に特に航空機への推進力供給の観点から期待できる技術として、

- i) SAFの利用
- ii) エンジン電動化
- iii) 水素ガスタービンエンジン

が考えられる。

3.3 SAFの推進

SAFの原料は主に植物などのバイオマス由来原料や日々の生活の中で排出される廃食油、廃棄物等であり、従来の化石燃料と異なり化石由来の原料を使用していない。化石燃料はその使用サイクルにおいて一方的にCO₂を排出するだけでリサイクル出来ないものであるが、SAFの主な原料である植物は光合成によりCO₂を吸収してくれるため、燃焼で発生したCO₂を相殺することで実質的なCO₂排出量をゼロに近づけリサイクルしながら使用出来るのが持続可能と言われる理由である (Fig. 9)。

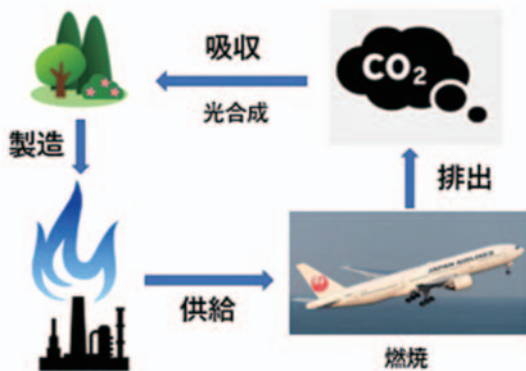


Fig. 9 Sustainable Aviation Fuel Lifecycle

また、従来の化石燃料と混合して使用することが出来るため、既存の航空機や給油設備に改修が不要となる点も大きな特徴であり、GE社やRR社の全てのエンジンで使用することが可能となっている。現在ではSAFの混合率は最大50%までとなっているが、将来的に100%まで引き上げるとともに、原料の栽培から収穫、SAFの製造から輸送など、Lifecycle全体で排出量を削減することでよりCO₂排出量削減効果を高めることが出来、2050年のカーボンニュートラルに向けた有効な打ち手の一つである。

3.3.1 SAFに対するJALグループの取り組み JALグループでは、2030年に全燃料の10%をSAFに置き換えることを目指しており、そのためには安定的なSAFの供給を確保することが必須である。2018年9月、株式会社海外交通・都市開発事業支援機構および丸紅株式会社と共同で、米国カリフォルニア州にあるFulcrum BioEnergy, Inc. (フルクラム社) の株式の一部を取得、

SAF製造事業への出資としては日本企業で初めての案件となった。フルクラム社は、通常は埋め立てて廃棄される一般廃棄物を原料としてSAFを製造するプロセスの開発に取り組んでおり、製造技術は国際標準化・規格設定機関であるASTM Internationalによる燃料規格も取得している。2021年にネバダ州の第1号プラントの建設が完了し2022年12月に稼働を開始しており、さらにインディアナ州での建設計画を発表するなど、今後も複数のプラントの展開を予定しており、SAFの大量生産について、実現性が最も高い企業の一つである。

SAFの国内製造技術開発に関しては、現在研究が行われている最中であり、2030年ごろの商業化が目標とされている。現在SAFはまだ供給量が圧倒的に少なく、2020年時点では世界のジェット燃料供給量の僅か0.03%である。また製造コストも高く従来の化石燃料と比べて数倍から数十倍のため、早期国内供給体制構築に向けて民官一体となって技術開発や実験を進めていく必要がある。そのため、2022年3月に日揮ホールディングス株式会社、株式会社レボ・インターナショナル、全日本空輸株式会社と共同で国産SAFの商用化および普及・拡大に取り組む有志団体「ACT FOR SKY」を設立、国産SAFのサプライチェーン構築、利用促進に向けて、業界を横断した国内企業22社 (Fig. 10) とオールジャパンで取り組んで行く他、日本全体でのSAFの開発・利用促進のため、国土交通省が主催する「SAFの導入・促進に向けた官民協議会」に積極的に参画している。



Fig. 10 Act for Sky 23 companies

3.4 エンジン電動化

SAF利用によりカーボンニュートラルへ大きく貢献できるものの、現在のガスタービンエンジンで燃料を燃焼する限りCO₂排出がゼロになるわけではなく、更なるCO₂排出量削減のためには航空エンジンそのものに対する新たな技術革新が必要である。その内の一つがエンジンの電動化である。特に自動車業界における昨今の技術発展を応用しリチウム電池でモーターを作動させファン

を回転させることが可能となれば、航空機からのCO₂及びそれ以外の燃焼排出物を劇的に削減することが可能となる。JAXAの分類⁷⁾では純電動化以外にハイブリッド方式が考えられており (Fig. 11), 究極的には一切燃料を燃焼させる必要のない純電動化エンジンが理想的であるが、航空機に搭載するための高出力な電池、モーターに対する出力と重量のバランスが求められるため、まずはハイブリッド方式のエンジンが最初に台頭すると考えられる。

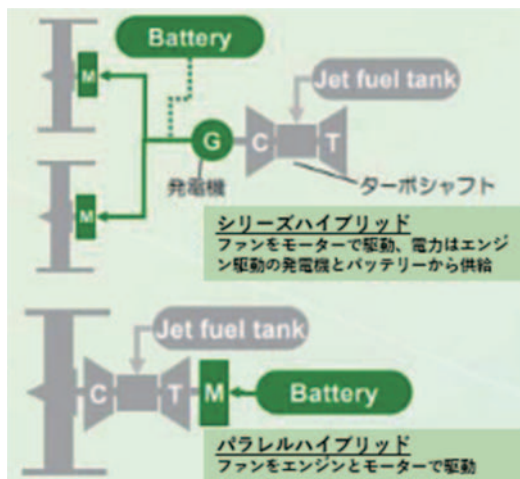


Fig. 11 Hybrid Electric Engine

3.5 水素ガスタービンエンジン

もう一つの新たな技術として、水素ガスタービンエンジンの研究開発も進んでおり、エアバス社は水素を主な動力源とする旅客機「ZEROe」のコンセプトを2020年に発表しており、液化水素を燃料として燃焼させるガスタービンエンジンと、それを補完する水素燃料電池から構成されるハイブリッド型システムが採用されている。この水素ガスタービンエンジンは、現在の航空機における化石燃料をそのまま液化水素に置き換えるイメージであり、水素をエンジンで燃焼させて推進力を得るためCO₂は発生しない。しかしながら、液化水素は従来のジェット燃料と比較して約4倍の体積が必要となるため、航空機全体の構造を含めた燃料タンクの再配置が必要となる他、航空機の巡航高度での低温環境下でも適切に貯蔵しエンジンに安定的に供給する技術も必要になる。

4. 結言

この半世紀、航空エンジンはエンジン形態の変化により大きな燃費性能改善がなされ、今後もギヤードターボファンエンジンにより更に高バイパス化、低燃費化が実現されると思われる。一方、今後の半世紀においてはCO₂排出量削減の取組は避けて通れず、SAFの推進やガスタービンエンジンに対する大きな技術革新無くして2050年のカーボンニュートラルの目標を達成することは困難である。

JALでも2050年カーボンニュートラルに向けたロードマップをFig. 12に示す通り発表しており、目標達成に向けての打ち手としてSAFの使用と新技術導入がそれぞれ大きな役割を担っている。

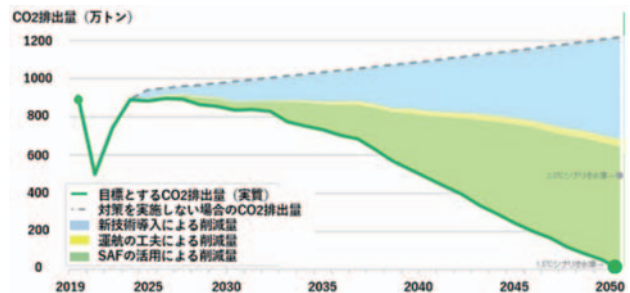


Fig. 12 JAL Group Roadmap to 2050 Carbon Neutral

一方で、これら施策において現時点で「确实」なものがなく、また特に航空業界においてはこれら新しい技術を上空で十分な安全性、信頼性を確保した上で実現していかなければならず、2050年までの目標を達成する道のは引き続き困難なものになると思われる。しかしながら、このような状況であるからこそ更なる技術革新や企業の成長が促進される可能性があると感じ、航空業界における今後の半世紀の発展、役割の一翼を担っていきたい。

参考文献

- (1) 国土交通省, 航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会
<https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk8_000004.html>
(参照日2022年12月30日)
- (2) GE Aerospace, GE9X Engine
<<https://www.geaerospace.com/propulsion/commercial/ge9x>> (参照日2022年12月30日)
- (3) Pratt & Whitney, GTF Advantage
<<https://pwgtf.com/advantage>>
(参照日2022年12月30日)
- (4) Rolls-Royce, UltraFan
<<https://www.rolls-royce.com/innovation/ultrafan.aspx>>
(参照日2023年1月2日)
- (5) ICAO, Latest News and Highlights
<<https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>>
(参照日2023年1月2日)
- (6) JAXA, 電動航空機
<https://www.aero.jaxa.jp/spsite/eclair-sp/electric_aircraft.html>
(参照日2023年1月5日)

既存重構造ガスタービンと固体酸化物形燃料電池 (SOFC) のハイブリッドシステムに関する基礎検討

Fundamental Study on Hybrid System of Existing Heavy-duty Gas Turbine and Solid Oxide Fuel Cell

矢嶋 遼太郎*¹
YAJIMA Ryotaro

中野 晋*²
NAKANO Susumu

竹田 陽一*^{1,2}
TAKEDA Yoichi

ABSTRACT

A solid oxide fuel cell (SOFC) hybrid system combined with an existing medium-capacity heavy-duty gas turbine (GT) is proposed to promote the use of hydrogen. As the output power of SOFC is about 10% of total output power of the system, this hybrid system could be thought to maintain a function of load following by the GT. A calculation method to analyze the cell performance and flow conditions of the cell tube for the actual-scale SOFC is presented, and is validated by comparing with the measured results of the performance tests of the actual SOFC. As the SOFC shows high performance under the high temperature operation condition, supply gases to the SOFC are heated by recuperators using exhaust gas of the catalytic burner in which residual hydrogen of the SOFC exhaust gas is burned. For the same condition of fuel flow rate in hydrogen co-firing GT, the output power of this system increases by 4% compared to the 30 volume % hydrogen co-firing GT.

キーワード：SOFC, ガスタービン, ハイブリッドシステム, 再生熱交換器, 効率, 水素混焼

Key words : SOFC, Gas Turbine, Hybrid system, Recuperator, Efficiency, Hydrogen co-firing

1. 緒言

地球温暖化の抑制のため、温室効果ガス排出量の削減、とりわけ二酸化炭素の排出削減が求められている。発電分野においては、再生可能エネルギーによる発電の大量導入や水素やアンモニアによる発電が計画⁽¹⁾されている。しかし、再生可能エネルギーは気象条件に依存するため、発電出力が電力需要に関係なく変動する。気象条件による発電出力の変動の影響を減らし、電力の安定供給を行うためには高い負荷追随性を有する発電機器の利用や、余剰電力を吸収できる蓄電池等が不可欠である。また、水素は燃焼時に水のみを生成するため、クリーンな燃料として古くから着目されていた。しかし、安価に大量生産する方法や水素を燃料とする大容量の発電機器の実用化にはなお時間を要するため、発電には十分に活用されてこなかった。水素の大量生産として、再生可能エネルギーによって発電された余剰電力を利用することが検討されている。しかし、水素を生成し、その水素燃料によって安定的に発電する、いわゆるPower to Gasに

よるグリーン水素⁽²⁾の段階に至るには、まだ30年以上の時間が掛かるとされている。一方、将来の水素社会実現のためには水素インフラの構築を進める必要があるため、水素社会の実現には、今から水素の利用を進めていく必要がある。水素を燃料とする大容量発電機器としては固体酸化物形燃料電池 (SOFC) や水素タービンがある。SOFCを利用した発電機器は出力250 kW^{(3),(4),(5)}のものが実用化され、MW級の機器の開発⁽⁶⁾が進められているが、大型発電用となる数十MW級の機器の実現は不透明である。水素タービンは30%水素混焼ガスタービン⁽⁷⁾の開発が進められており、将来の水素専焼ガスタービンにつなげることが計画されている。以上のように、グリーン水素の移行段階までは、再生可能エネルギーの大量導入による二酸化炭素排出削減を行うと同時に、電力系統安定化のため負荷追随機能を有する発電機器の運転が必要である。負荷追随に対応できる発電機器としては、比較的応答性の高いガスタービンが有効である。

本研究では、負荷追随機能の可能性を有し、かつ水素燃料の部分利用を促進する大容量発電システムとして、負荷追随機能は既存の重構造ガスタービン (GT) が担い、水素消費の発電機器としてSOFCを組み合わせたハイブリッドシステムを提案する。本提案システムの発電システムとしての定量的な評価を行うため、初めに、実機SOFCを対象とした電極部のガス流動解析を含む燃料電池の計算プログラムを作成した。SOFCの解析モデル

原稿受付 2022年3月29日

査読完了 2023年1月24日

* 1 東北大学大学院工学研究科 ファインメカニクス専攻
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11

* 2 東北大学大学院工学研究科 附属先端材料強度科学研究センター
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11
E-mail: susumu.nakano@rift.mech.tohoku.ac.jp

として、これまでに多くの計算方法^{(8)~(12)}が提案されてきたが、実機セルスタック全長を対象とした計算はあまり報告されていない。本方法による計算結果を、実機計測結果と比較することで本計算方法の妥当性の確認を行う。SOFCは高温型燃料電池のため動作温度が高い状態で性能を発揮する電池である。燃料はシステム外部から常温で供給されると仮定して、動作温度を高めるため、本提案システムではシステムの高温部位のガスを用いて再生熱交換器によりSOFC供給ガスを加熱する。再生熱交換器の設置場所によるSOFCおよびシステム出力への影響を把握する。最後に水素の利用方法として本提案システムと水素混焼GTの出力比較を行い、水素利用方法として本システムの定量的な評価を行う。さらに、本提案システムを、既存GTシステムの運転条件で運用した場合のシステム出力を確認する。

2. 記号の説明

A : 流路断面積 [m²]
 C_f : 摩擦係数 [-]
 C_p : 定圧比熱 [J/(kg K)]
 D : 直径 [m]
 D_{el} : 電解質中心直径 [cm]
 E : 電圧 [V]
 F : ファラデー定数 [C/mol]
 f : 圧縮機吸気流量の ω に関する関数 [-]
 g : 質量比 [-]
 H_B : 燃料の発熱量 [J/kg]
 h : 比エンタルピー [J/kg]
 I : 電流 [A]
 I_p : 慣性モーメント[kg m²]
 J_e : 電流密度 [A/cm²]
 J_o : 交換電流密度 [A/cm²]
 M : モル質量 [kg/mol]
 \dot{m} : 質量流量 [kg/s]
 N : セル数 [-]
 P : 圧力[Pa], 分圧[Pa]
 P_0 : 標準圧力 [Pa]
 R : 気体ガス定数 [J/(kg K)]
 T : 温度 [K]
 t : 時間 [s]
 U_f : 燃料利用率 [-]
 $U_{f,cell}$: セルでの燃料利用率 $U_{f,cell}=U_f/N$ [-]
 u : 流速 [m/s]
 W : 出力 [W]
 α : 熱伝達率 [W/(m² K)]
 ΔG_0 : 標準圧力でのギブスの自由エネルギー変化[J/mol]
 $\Delta \dot{m}$: 移動質量流量 [kg/s]
 ΔQ_R : 反応熱 [J/kg]
 ΔS : 分割領域の表面積 [m²]
 δ_{el} : 電解質軸方向長さ [cm]

ζ : 電気抵抗またはイオンの流れに対する抵抗 [Ω]
 η : 断熱効率 [-]
 η_B : 燃焼効率 [-]
 θ : 壁面温度 [K], IGV開度 [°]
 λ : 管の熱伝導率 [W/(m K)]
 ρ : 密度 [kg/m³]
 φ : 温度効率 [-]
 ω : 角速度 [rad/s]
 添え字
 1 : 要素入口
 2 : 要素出口
 a : 吸気
 air : 空気側
 an : アノード
 atm : 大気
 C : 圧縮機
 CO₂ : 二酸化炭素
 c : 要素中心 (式(12),(13)), 低温側 (式(23)~(30))
 ct : カソード
 el : 電解質
 f : 燃料
 fuel : 燃料側
 G : 発電機
 g : 燃焼ガス
 H₂ : 水素
 H₂O : 水
 h : 高温側
 ic : インターコネクタ
 in : 内径 (式(16)), 入口 (式(19)~(21),(23),(26),(27),(30))
 \dot{m} : 移動質量
 N₂ : 窒素
 O₂ : 酸素
 out : 外径 (式(17)), 出口 (式(19),(20),(23),(26),(27),(30))
 rated : 定格
 SOFC : SOFC排ガス
 T : タービン
 θ : IGV開度

3. SOFCハイブリッドシステムの構成

3.1 SOFCハイブリッドシステム

実用化されたSOFCハイブリッドシステムは、SOFCとマイクロガスタービンによって構成され、250 kWを発電する。このシステムは分散用電源として開発され、SOFCを主機、マイクロガスタービンを補機として発電を行う。現在、商用機をベースとしたSOFCとターボチャージャーを組み合わせたSOFC-TCシステム⁽⁶⁾でMW級機器の開発が進められている。さらに大型火力発電用として、高効率化を目的としたトリプルコンバインドシステムの構想⁽¹³⁾がある。しかし、大型火力用の大容量SOFCの実用化には、さらに時間を要すると考えられる。

3.2 本提案のSOFCハイブリッドシステム

本研究で提案するSOFCハイブリッドシステムをFig. 1に示す。GT圧縮機から吐出される空気の一部を圧力調整弁を介してSOFCに供給する。圧力調整弁はSOFCに供給する空気圧を、常時、GTの最低負荷時の吐出空気圧になるよう調整し、GTの負荷追従運転時もSOFCの供給圧力を一定に保つ。SOFCの排ガスは、未燃水素を含むため、触媒燃焼器に送り残水素を燃焼させる。触媒燃焼器での燃焼後、SOFC排ガスはタービン燃焼器からの燃焼ガスと混合し、タービンに供給される。本システムで消費する水素燃料は、水素混焼GTの当面の目標である容積率30%とする。GT燃料を都市ガスとし、GT単独運転時の定格燃料の熱量と等しくなる容積率30%の水素と容積率70%のGT燃料の熱量比は約1:9になる。このため、本システムは現在開発が進められているMW級のSOFCを既存の中容量GTシステムに組み込む構成とする。SOFC供給ガスはタービンシステム内の高温部位のガスを加熱ガスとする再生熱交換器で昇温される。加熱ガスには触媒燃焼器の排ガスを用いるが、タービン排ガスおよび圧縮機吐出空気を加熱ガスとして用いる場合の加熱効果についても検討したので、Fig. 1には、それらの引き込み部と戻し部を破線で示す。タービン燃焼ガスとSOFC排ガスの混合ガス温度が、GT単独運転でのタービン入口温度を超えることがなければ、GTは機器の変更なしにそのまま本提案システムの運用に用いることができる。

圧縮機吐出空気の一部はSOFCに供給されるが、それらはSOFC排ガスとして再びGTに供給されるため、ハイブリッドシステム運転時もタービン単独運転時と同量のタービン流量が確保される。このため、GTは部分負荷から定格負荷までの運用が可能であり、GTシステムの持つ負荷追従機能は損なわれないものと考えられる。

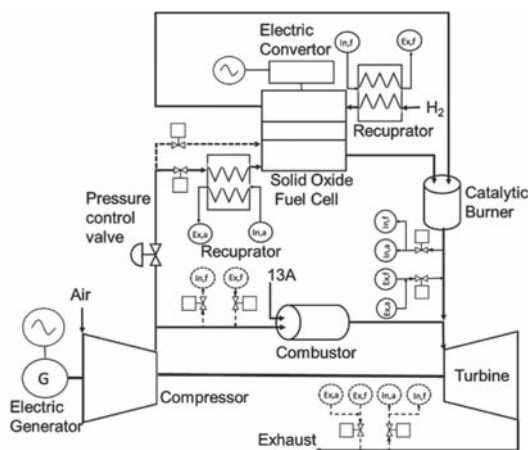


Fig. 1 Proposed SOFC-GT hybrid system

3.3 SOFCの供給ガス条件

Fig. 1に示したようにSOFCの空気源は圧縮機吐出空気を用いる。またSOFC供給ガス圧は、GTの負荷変動

に対しても一定に保持するため、GT最低負荷運転状態での圧縮機吐出圧とした。本解析では中容量GTシステムの動作解析結果¹⁴⁾からSOFC供給圧を1.41 MPaとした。燃料に関しては高圧ボンベから供給されると仮定し、供給圧力は供給空気圧と等しい圧力とした。SOFCの燃料は水素とする。その質量流量は、GTに供給する燃料を含めたハイブリッドシステムに供給する全燃料の熱量を、中容量GT単体運転時の都市ガス100%の熱量と等しくし、全燃料に対する水素燃料の容積比が30%になる流量とした。

4. 計算方法

4.1 SOFC電極構造と発電反応

計算対象の実機SOFCセルスタックは、Fig. 2に示すように外径28 mm、内径22 mm、全長1.5 mの基体管の中央部1.0 mに48個のセルがスタックされている¹⁵⁾。Fig. 3に電極部(セル)構造の模式図³⁾を示す。管内側に燃料を、外側に空気を供給する。基体管に燃料極(アノード)、電解質、空気極(カソード)を積層して形成されるセル(縞)を、管軸方向に複数個スタックした円筒横縞形³⁾と呼ばれる構造を取る。

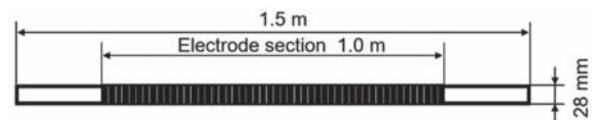


Fig. 2 The external view of SOFC cell stack

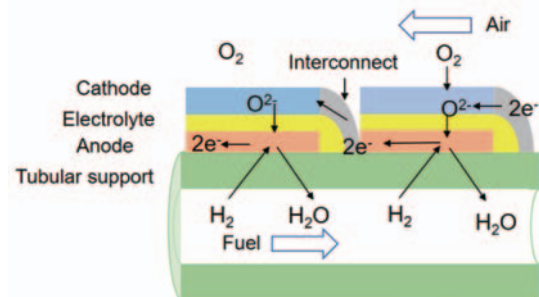
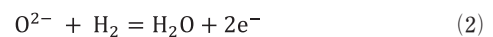


Fig. 3 Schematic diagram of cell stack

空気側を流れる酸素は、式(1)で示される反応によって酸素イオンになり、カソードと電解質を通過し、式(2)で示される反応によって、アノードと電解質の界面で水素と反応し水と電子を生成する。電子はインターコネクタを通り隣の空気極に送られ酸素と反応する。各セルでこの反応が繰り返され、電子の移動によりセルスタックに電流が流れ、各セルで電圧が発生する。



4.2 SOFCの電流電圧基礎式

式(2)に示したように水素分子1個の反応で2個の電子が放出されるため、水素の質量流量 \dot{m}_{H_2} 、各セルでの燃

料利用率 $U_{f,cell}$ を用いて、電流 I は以下の式で表される。

$$I = 2F \frac{\dot{m}_{H_2} U_{f,cell}}{M_{H_2}} \quad (3)$$

電圧 E は、式(4)に示すように、ギブスの自由エネルギー放出分に対応する起電力から、損失として活性化過電圧 E_{act} 、抵抗過電圧 E_{ohm} 、および濃度過電圧 $E_{concent}$ を差し引いて求める。損失となる3種類の過電圧は式(5)、(9)、(10)で与えた。式(5)は、タフェルの式を変形した永田らの式(16)を用いた。式(9)は、電極およびインターコネクタの電気抵抗と電解質でのイオンの流れに対する抵抗に起因する損失^{(17),(18)}である。式(10)はKimらによって提案された計算モデル^{(19),(20)}を用いた。

$$E = \frac{-\Delta G_0}{2F} + RT \ln \left\{ \frac{\frac{P_{H_2}}{P_0} \left(\frac{P_{O_2}}{P_0} \right)^{0.5}}{\frac{P_{H_2O}}{P_0}} \right\} - E_{act} - E_{ohm} \quad (4)$$

$$E_{act} = \left[\frac{-E_{concent}}{E_a \ln(0.4/J_o) / \ln(1 + 0.4/J_o)} \right] \ln(1 + J_e/J_o) \quad (5)$$

$$E_a = 0.074(T/1273) \quad (6)$$

$$J_e = I / (\pi D_{el} \delta_{el}) \quad (7)$$

$$J_o = 10^{\left(\frac{-7520}{T} + 4.51 \right)} \quad (8)$$

$$E_{ohm} = (\zeta_{an} + \zeta_{el} + \zeta_{ct} + \zeta_{ic}) I \quad (9)$$

$$E_{concent} = \left(\frac{8J_e}{e10^3} \right) / 10^4 \quad (10)$$

4.3 SOFCの流れ解析

セルスタック内外のガス流動は、Fig. 4に示すように、外管外径 D_{air} 、内管外径 D_{out} の二重管を仮定した。セルスタック軸方向に計算領域を分割し、分割領域の軸方向長さはセルに対応するようにした。各分割領域の出入口で、式(11)~(13)に示す一次元の質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式と、式(14)に示す状態方程式を燃料側と空気側で解く。

$$\rho_2 u_2 = \rho_1 u_1 + (\Delta \dot{m}) / A \quad (11)$$

$$\rho_2 u_2^2 + p_2 = \rho_1 u_1^2 + p_1 - 0.5 C_f \rho_c u_c^2 \Delta S / A + \Delta \dot{m} (u)_{\dot{m}} / A \quad (12)$$

$$\rho_2 u_2 \left(C_p T_2 + \frac{u_2^2}{2} \right) = \rho_1 u_1 \left(C_p T_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) + \alpha (\theta - T_c) + \Delta \dot{m} (C_p T)_{\dot{m}} / A + \Delta Q_R / A \quad (13)$$

$$p = \rho RT \quad (14)$$

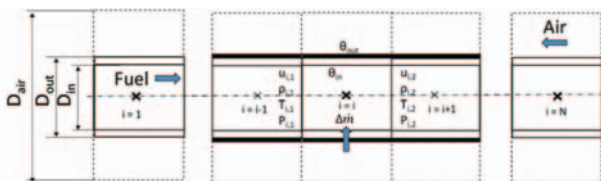


Fig. 4 Numerical grid of gas flow calculation

空気流路側から燃料流路側へ酸素イオンの移動に伴う質量変化、質量移動に伴う運動量移動およびエネルギー移動の発生が、通常の流れ解析と異なる点である。また、水素反応による発熱が燃料流路側に発生する。各要素での移動質量 $\Delta \dot{m}$ は、水素反応に必要な酸素イオンの流量で、 M_{O_2} を酸素のモル質量とすると式(15)で表される。式(11)~(14)を燃料側で解くとき、 $\Delta \dot{m}$ は+、空気側では-になる。反応で生成した水蒸気は燃料と共に内管を流れる。

$$\Delta \dot{m} = \pm U_{f,cell} \dot{m}_{H_2} \frac{M_{O_2}}{2M_{H_2}} \quad (15)$$

軸方向の熱伝導を無視すると、円管壁面温度は、燃料と空気の温度差による強制対流熱伝達と管壁半径方向の熱伝導によって、式(16)および(17)で表される。

$$\begin{aligned} \theta_{in} &= T_{fuel} \\ -(T_{fuel} - T_{air}) / \left(1 + (\alpha_{fuel} D_{in} / \alpha_{air} D_{out}) \right. \\ &\quad \left. + (\alpha_{fuel} D_{in} / 2\lambda) \ln(D_{out} / D_{in}) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \theta_{out} &= T_{air} \\ +(T_{fuel} - T_{air}) / \left(1 + (\alpha_{air} D_{out} / \alpha_{fuel} D_{in}) \right. \\ &\quad \left. + (\alpha_{air} D_{out} / 2\lambda) \ln(D_{out} / D_{in}) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

なお、式(12)の摩擦係数と、式(16)、(17)の熱伝達率の算出に用いるヌセルト数の計算には、燃料側は円管の式を、空気側には平板の式を用いた⁽²¹⁾。

流れ計算の境界条件として、管入口部のガスの温度、圧力、および質量流量を与える。燃料側および空気側とも上流側分割要素から解き、分割要素出口の状態量を求める。管路全域の定常解が得られるまで計算を繰り返す。本解析では、燃料と空気の流れる方向は同一の場合と対向する場合の両ケースに適用できるが、対象とするSOFCは対向流になる。対向流の場合は、燃料側の入口から数えた要素番号と、空気側の出口から数えた要素番号が一致する要素間で、質量移動と熱移動を計算することになる。

実機のセルスタックは、電極部の両端に基体管からなる流入流出部が設けられているため、本解析においても、電極部の両端に電極部全長の約25%長さの領域を設けた。この部分は、質量移動は発生しないが熱移動は発生する。

4.4 GTシステムの出力計算

GTシステムの出力 W_G は、式(18)に示すタービンロータの運動方程式を解くことで求められる。タービン出力および圧縮機動力は、式(19)および式(20)に示すように入口出口のエンタルピー差で表すことができる。タービン入口温度は、式(21)に示すように燃焼前後のエンタルピーの釣り合いから算出する。圧縮機動力の計算では、出入口のエンタルピー差は、断熱変化を仮定して入口温度、入口圧力、および圧力比から算出し、圧力比は対象としたガスタービンシステムの圧縮機特性曲線⁽²²⁾ (流量-圧力比線図) から求めた。圧縮機吸気流量も同様に対象としたガスタービンシステムの特性曲線から求めた。圧縮機吸気流量は回転数の関数として特性曲線から読み取った

値にIGV開度の面積比を乗じて算出する。圧力比は流量に対応する圧力比を特性曲線から読み取った。本研究ではマイクロタービンの動作解析用に作成したプログラム^(23,24)を中容量GTに拡張したもの⁽¹⁴⁾を用いている。計算は、入力データとして回転数、圧縮機入口案内羽根(IGV)開度、および燃料流量を必要とする。

$$I_p/2(d\omega^2/dt) = W_T - W_C - W_G \quad (18)$$

$$W_T = \eta_T \dot{m}_g (h_{T,in} - h_{T,out}) \quad (19)$$

$$W_C = \frac{\dot{m}_a}{\eta_c} (h_{c,out} - h_{c,in}) \quad (20)$$

$$T_{in,T} = (h_a \dot{m}_a + h_f \dot{m}_f + \eta_B H_B \dot{m}_f + h_{SOFC} \dot{m}_{SOFC}) / \dot{m}_g (C_{p,CO_2} g_{g,CO_2} + C_{p,H_2O} g_{g,H_2O} + C_{p,N_2} g_{g,N_2} + C_{p,O_2} g_{g,O_2}) \quad (21)$$

$$\dot{m}_a = \frac{A_\theta}{A_{\theta,rated}} f(\omega) \quad (22)$$

なお、式(21)で、燃焼効率 η_B は低位発熱量に対する燃焼過程で発生する熱量の比で、発熱量は都市ガスを燃料とする場合は49 MJ/kgを、水素を燃料とする場合は121 MJ/kgを用いた。

4.5 再生熱交換器の計算

SOFCに供給される燃料は本システム外から常温で供給されると仮定し、GTシステム内の高温部位のガス流と熱交換することで昇温する。また、SOFCに供給される空気は圧縮機吐出空気を用いるが、空気に関しても燃料と同様に再生熱交換器で昇温することを考える。なお、6.4に示すGTシステムの解析結果で圧縮機吐出空気温度は374°C⁽¹⁴⁾になる。

再生熱交換器出口での低温側ガス温度 $T_{c,out}$ は、温度効率 ϕ_c を用いて以下の式で表される。

$$T_{c,out} = T_{c,in} + \phi_c (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (23)$$

ここで $T_{c,in}$ は低温側ガスの入口温度を、 $T_{h,in}$ は高温側ガスの入口温度を表す。対向流形の熱交換器を用いた場合、温度効率 ϕ_c は熱移動単位数 NTU_c と、定圧比熱と質量流量の積の比 R_c を用いて以下のように表される⁽²⁵⁾。

$$\phi_c = \frac{1 - \exp[-(1 - R_c)NTU_c]}{1 - R_c \exp[-(1 - R_c)NTU_c]} \quad (24)$$

$$R_c = \frac{C_{p,c} \dot{m}_c}{C_{p,h} \dot{m}_h} \quad (25)$$

低温側ガスの吸収熱量は低温ガスの出入口の熱量差に等しいと仮定し、また吸収熱量を対数平均温度で表すと熱移動単位数は次式に示すように、両ガスの出入口の温度で表すことができる。

$$NTU_c = \ln \left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}} \right) / \left(\frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{T_{c,out} - T_{c,in}} - 1 \right) \quad (26)$$

同様の式が高温側ガス(添え字h)に対しても導ける。

$$T_{h,out} = T_{h,in} - \phi_h (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (27)$$

$$\phi_h = \frac{1 - \exp[-(1 - R_h)NTU_h]}{1 - R_h \exp[-(1 - R_h)NTU_h]} \quad (28)$$

$$R_h = \frac{1}{R_c} = \frac{C_{p,h} \dot{m}_h}{C_{p,c} \dot{m}_c} \quad (29)$$

$$NTU_h = \ln \left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}} \right) / \left(1 - \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{h,out}} \right) \quad (30)$$

両ガスの入口温度と流量を与え、式(23)と(27)から両ガスの出口温度を算出する。式(23)と(27)を代数的に解くことは困難なので、それぞれの出口温度を仮定して、その仮定値が両式を満足するまで計算を繰り返す。

5. 計算条件

5.1 SOFC実機計測値との比較

SOFCセルスタック単体の計算を行い、実機計測結果との比較を行う。計算では空気側の流路としての外円管の径を定義しなければならない。ここでは、セルスタック1本分の燃料流量と空気流量の比を商用機⁽⁴⁾の燃料流量と空気流量の比と同等にして、さらに燃料と空気の供給状態には大きな差異を付けないと仮定して、空気流速が燃料流速と同等になる流路断面積として、空気側流路の外直径を50 mmとした。

はじめに、セルスタック外壁の温度分布およびセル電圧分布の計測結果⁽¹⁵⁾と比較する。実験条件と計算条件をTable 1に示す。供給ガスの流量と温度に関しては公開されていないため、燃料流量は計算結果の電流密度が実験結果と同等になるように設定し、空気流量は酸素利用率が実験結果と同等になるように設定した。また、ガス供給温度に関しては、それぞれのガス流路でセルスタック開始点に一番近い温度計測位置で、管壁面温度の計算結果が、計測温度と同等になるように流路入口での供給温度を設定した。

次にSOFCの作動圧力の影響に関しては、常圧と1.5 MPaでの電池特性の計測結果⁽²⁶⁾と比較した。実験に用いたセルスタックの寸法と空気流路の外径は前述の通りであるが、セル数は85個⁽²⁶⁾と多セル化している。実験条件および計算条件をTable 2に示す。

5.2 再生熱交換器によるSOFC供給ガスの昇温

セルスタック単体試験では約900°Cの動作温度が確保されているが、動作温度はSOFCに供給されるガス温度に依存する。SOFCの燃料はシステム外部から供給されるため、常温で供給されると仮定した。SOFC燃料はGTシステム内の高温部位のガスを用いて再生熱交換器で昇温することを考える。再生熱交換の低温ガス側に供給される燃料と空気の条件をTable 3に示す。流量は、商用機⁽⁴⁾におけるSOFC燃料流量と空気流量の比と等しくなるように設定した。

再生熱交換器の加熱用のガス供給源は、GTシステム

内の高温部位として触媒燃焼器排ガスが考えられる。ここでは、参考としてGT排ガスと圧縮機吐出空気を加えた3ケースでの熱交換を考える。Table 4に3ケースの再生熱交換器計算の高温ガス流入条件を示す。燃料加熱用の高温ガス供給流量条件を統一するため、1台の再生熱交換器に供給する高温ガスの最大流量はSOFC排ガス全流量を超えない8 kg/sに設定した。触媒燃焼器排ガスを利用する場合は、燃料と空気の加熱用ガスの合計流量が触媒燃焼器排ガス流量になる。ここでは、触媒燃焼器排ガスを加熱用ガスに用いた場合の、燃料と空気の温度上昇を、燃料側の加熱用ガス流量をパラメータとして計算を行った。タービン排ガスと圧縮機吐出空気をを用いる場合は、触媒燃焼器排ガス利用との比較のため、燃料に関してのみ加熱用ガス流量をパラメータとした計算を行った。空気の加熱計算は、タービン排熱を用いる場合は高温ガス最大流量で計算した。圧縮機吐出空気を直接SOFCに供給する場合は、Fig. 1のSOFC空気供給口に破線で示すように、再生熱交換器は不要になる。

Table 1 Experiment and calculation conditions for temperature and voltage distribution test

Items		Unit	Experiment	Calculation
Gas composition	Fuel	-	H ₂ /N ₂ 0.7/0.3	H ₂ /N ₂ 0.7/0.3
	Air	-	O ₂ 0.21	O ₂ /N ₂ /CO ₂ 0.209/0.781/0.01
Inlet conditions of gas flow	Temperature	Fuel °C	-	920
		Air °C	-	300
Pressure		MPa	0.101	0.101
Fuel utilization ratio		%	25	25
Current density		mA/cm ²	380	380.5 (Calculation result)
Oxidant utilization ratio		%	14.5	14.5 (Calculation result)

Table 2 Experiment and calculation conditions for current-voltage characteristics test

Items		Unit	Experiment	Calculation
Gas composition	Fuel	-	Hydrogen	H ₂ /N ₂ 0.7/0.3
	Air	-	-	O ₂ /N ₂ /CO ₂ 0.209/0.781/0.01
Inlet conditions of gas flow	Temperature	Fuel °C	900	900
		Air °C	(Operation temperature)	900
Pressure		MPa	0.101, 1.5	0.101, 1.5
Fuel utilization ratio		%	60	60
Oxidant utilization ratio		%	20	19.9 - 20.1 (Calculation result)

Table 3 Inlet conditions of cold gas for recuperator

	Mass flow rate [kg/s]	Temperature [°C]
Fuel	0.63	20
Air	8.42	374

Table 4 Inlet conditions of hot gas for recuperator

Heat source	Recuperator application	Mass flow rate X [kg/s]	Temperature [°C]
Compressor discharge air	Fuel heating	1.0 ≤ x ≤ 8.0	374
	-	-	-
Catalytic burner exhaust gas	Fuel heating	1.0 ≤ x ≤ 8.0	920 - 1030
	Air heating	9.05 - x	
Turbine exhaust gas	Fuel heating	1.0 ≤ x ≤ 8.0	600
	Air heating	8.0	

5.3 水素混焼GTとの比較

GTシステムにおける水素利用の検討のため、水素混焼GTと本提案のSOFCハイブリッドシステムの出力計算を行う。定格出力38.6 MW、都市ガス(13A)を燃料とした既存中容量GTシステムを計算のベースとして、既開発のGTシミュレータ¹⁴⁾を用いて計算した。水素混焼GTの計算では、都市ガスと水素を容積比70:30で混合し、都市ガスのみを燃料とする場合の熱量と等しくなるようそれぞれの質量流量を決める。SOFCハイブリッドシステムでは水素混焼GTの水素と同量の水素をSOFCに供給する。計算条件をTable 5に示す。ベースとなる既存GTの計算を含めて3ケース実施した。なお、Table 6に計算に用いた都市ガスのガス組成を示す。また、SOFCの燃料利用率は実機SOFCと同じ60%とした。

Table 5 GT system calculation conditions

		Gas composition			Fuel calory ratio	Ratio of fuel mass flow rate		Ratio of air mass flow rate
		13A	H ₂	N ₂		13A	H ₂	
Existing GT	-	100	0	0	1.0	1.0	0	1.0
30% hydrogen co-firing GT	-	70	30	0	1.0	0.899	0.041	1.0
Proposed system	GT	100	0	0	0.9	0.899	0	0.922
	SOFC	0	70	30	0.1	0	0.041	0.078

Table 6 Gas composition of city gas

Gas composition	Methane	Ethane	Propane	Butane
Volume ratio	0.882	0.053	0.048	0.017

5.4 既存GT運転条件での本システム出力

最後に、本提案システムを既存GTシステムの運転条件で運用した場合のシステム出力を算出し、部分負荷から定格負荷運転におけるシステム出力を確認する。計算対象としたGTシステムの基本仕様をTable 7に示す。対象としたGTシステムは、コンバインドサイクルであり発電機出力は、ガスタービン出力と蒸気タービン出力の和になる。蒸気タービン出入口の蒸気の圧力と温度、および蒸気流量から蒸気タービン出力を推定して計測データから差し引くことでGT出力を算出した¹⁴⁾。4.4で述べたようにシステムシミュレータの入力データとしては、回転数、IGV開度、および燃料流量が必要になり、それらはFig. 11に示すように運転データを近似して与えた。

Table 7 Specifications of existing gas turbine system

Item	Value
Rated Output of the Plant	109 MW ((Gas Turbine+Steam Turbine+Generator)×2 Systems)
Rated Rotational Speed	7280 rpm
Compressor	17-stage Axial
Turbine	3-stage Impulse
Combustor	Low NOx Combustor (10 Cans)

6. 解析結果と考察

6.1 SOFCセルスタック計測結果との比較

Fig. 5にセルスタックの外表面温度の計測結果¹⁵⁾と、本解析の円管外壁面温度 θ_{out} の比較を示す。セルスタック電極部は軸方向距離0.25～1.25 mの部分で、この領域における計測値と計算結果は概ね一致する。しかし、出入口領域で乖離が生じる。この原因は、計算では電極以外の領域も二重円管で計算するのに対して、実験では燃料の給気・回収ポートが設けられて、この部分でのガスの流動状態が計算とは異なることと、計算では軸方向の熱伝導は無視しているが、管端領域では管端面からの熱放出の影響が無視できないことが理由として考えられる。しかし、燃料の給気・回収ポートの形状等の詳細な情報は示されていないため計算で再現することは困難である。ここでは電極部での結果を重視した。

Fig. 6にセル電圧の計測値¹⁵⁾と計算結果の比較を示す。セル電圧に関してもFig. 5に示した温度分布と同様に、セルスタックの流入・流出領域に近い部分の計測値と計算値の差異は大きく、この部分において、計算では活性化過電圧および抵抗過電圧による電圧低下が少ないことが差異を生じる原因と考えられる。しかし、この部分を除くセルスタックの電圧分布は、計測値と計算結果は比較的良く一致することが分かる。

次に、ガス供給圧に対するセルスタック性能の影響を確認する。前述の結果は、セルスタックの基本性能の把握のため、ガス供給圧は常圧で行われた。ハイブリッドシステムでは、GT圧縮機の吐出空気をSOFCに供給するため、ガス供給圧は常圧以上に昇圧される。Fig. 7はセルスタックの電圧特性を2条件のガス供給圧、0.101 MPaと1.5 MPaで行った計測結果¹⁶⁾と計算結果を比較したものである。Fig. 7より本計算モデルで、常圧条件および加圧条件に対しても十分な一致が得られることが確認できた。以上の結果より、実機SOFCの動作予測として本計算方法の妥当性が示されたものと考えられる。なお、Fig. 7から、SOFCをGTと組み合わせることで、SOFC出力に供給空気の昇圧効果もたらされることが分かる。

6.2 SOFC供給ガス温度による出力比較

Fig. 8に再生熱交換器の計算結果を示す。SOFC供給燃料温度は高温ガス流量の増加に伴い上昇し、圧縮機吐出空気利用とタービン排ガス利用では、高温ガス流量8 kg/sで、それぞれ318℃、403℃になり、触媒燃焼器排ガス利用では、高温ガス流量5 kg/sで613℃にな

る。触媒燃焼器排ガス利用時は、燃料加熱と空気加熱の2台の再生熱交換器に排ガスを供給するため、SOFC供給空気の加熱用には燃料加熱用に供給された残りの排ガスが供給される。そのため、燃料加熱用高温ガス流量に対して、空気温度の上昇の傾向は燃料温度の上昇と逆になるが、最高で572℃になる。タービン排ガス利用時のSOFC供給空気の計算結果は、排ガス流量8 kg/sで431℃に昇温する。圧縮機吐出空気を利用する場合は、SOFC供給空気は圧縮機吐出空気を直接供給するため374℃になる。

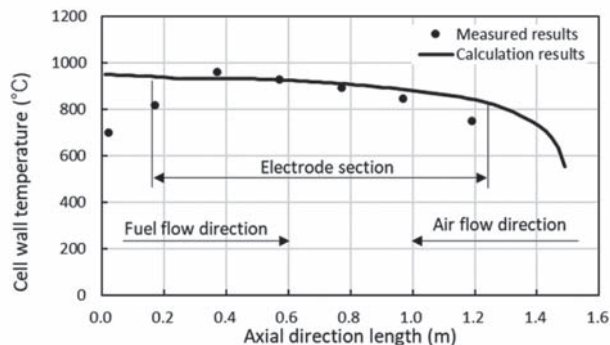


Fig. 5 Temperature distribution of cell stack

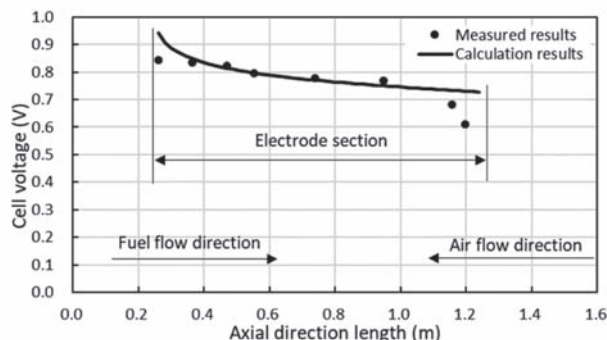


Fig. 6 Cell voltage distribution of cell stack

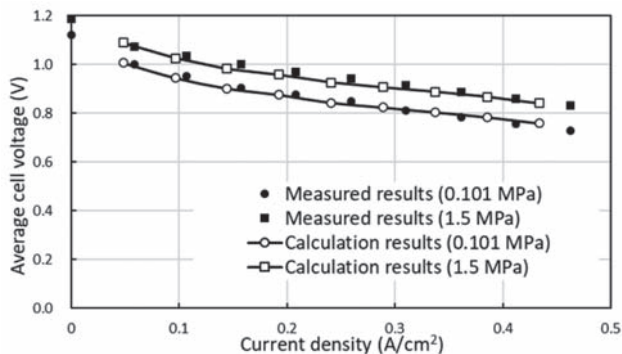


Fig. 7 Current-voltage characteristics of cell stack

Fig. 9に再生熱交換器で昇温した燃料を供給した時のSOFC出力を示す。SOFC動作温度の低温化^{27),28)}は進められているが、350℃以下での動作は困難と考え、供給ガス温度が350℃以下になるものは除外した。縦軸のSOFC出力は既存GT定格出力で正規化した値を示す。燃料供給燃料温度の増加に伴いSOFC出力も増加するが、触媒燃焼器排ガスを利用する場合は、Fig. 8に示したように燃料温度を上げると空気温度の上昇が抑えられる。空気と燃料の両方の温度上昇が確認される高温ガス流量4 kg/sでSOFC出力は最大になる。

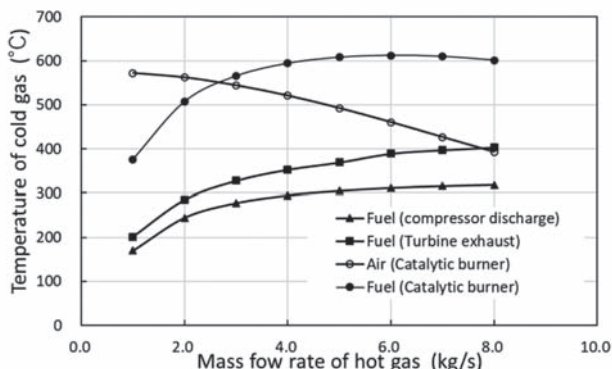


Fig. 8 Temperature of cold gas at recuperator exit

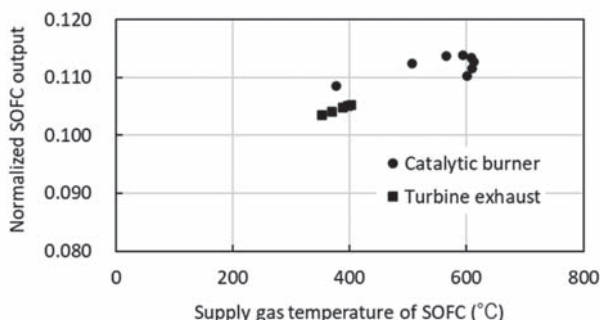


Fig. 9 SOFC outputs with supply fuel temperature

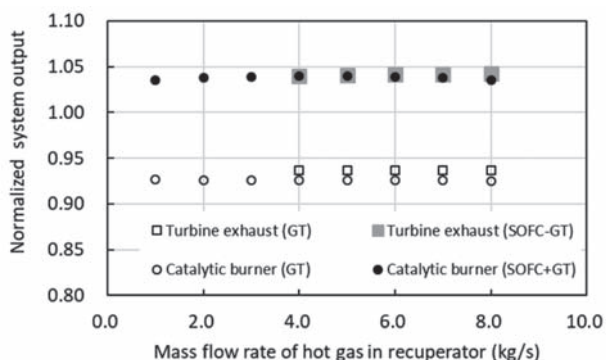


Fig. 10 Hybrid system outputs with flow rate of hot gas in recuperator

再生熱交換器でSOFC供給ガスを昇温させることは、加熱に使われたガスの温度低下を起こすため、GTシステムの発電に対してはマイナスの影響となる。Fig. 10にハイブリッドシステムの合計出力を塗りつぶしマークで、SOFC出力を除くGTのみの出力を白抜きマークで示す。合計出力は、GT排ガス流量8 kg/sを再生熱交換器の加熱に用いる場合に最大になる。これは触媒燃焼器排ガスを熱交換器に使用しないためであるが、触媒燃焼器排ガスを熱交換に用いた場合との差はわずかであり、ほぼ同等と言える。なお、触媒燃焼器排ガスを用いる場合は、再生熱交換器の製作には高温耐熱材を用いなければならず、難加工性の課題は残る。

6.3 GTシステムの水素利用方法による出力比較

Table 8に既存GT、水素混焼GT、および本ハイブリッドシステムの出力、熱効率、およびタービン入口温度を示す。それぞれ既存GTの定格値を基準とした。

投入熱量および空気流量が同一のため、既存GTと水素混焼GTの各項目は同じになるはずであるが、水素混焼GTの計算結果は既存GTに比べてわずかに下回る値を示す。しかし、その差は1%以内である。本ハイブリッドシステムの結果は、再生熱交換器に触媒燃焼器排ガスを用いSOFC燃料加熱に4 kg/sを供給した場合の結果である。出力および熱効率は、既存GTおよび水素混焼GTに比べて約4%増加する。供給水素の60%をSOFCで発電するが、SOFC計算結果から供給水素60%の熱量に対するSOFCの発電効率は約63%と高効率になっており、このことがシステム全体の効率向上に寄与している。

Table 9に本ハイブリッドシステムの高温部位のガス温度を示す。本ハイブリッドシステムは、GT燃焼器の燃焼温度およびタービン入口の燃焼ガス温度は既存GT

Table 8 Comparison of proposed system with hydrogen co-firing turbine system

	Output ratio [-]	Efficiency ratio [-]	Turbine inlet temperature [°C]
Existing GT	-	1.0	1280
30% hydrogen co-firing GT	-	0.99	1270
Proposed system	GT	0.926	1.04
	SOFC	0.114	

Table 9 Gas temperature of hot section in hybrid system

		Temperature (°C)		
		Air	Fuel	Combustion gas
GT combustor	inlet	374	20	-
	exit	-	-	1240
SOFC	inlet	521	594	-
	exit	605	889	-
Catalytic burner	inlet	605	889	-
	exit	-	-	998
Recuperator	inlet	374	20	998
	exit	521	594	Air side: 817, Fuel side: 800

を上回らない。このことはSOFCハイブリッドシステムを構成するうえでGTシステムは機器の仕様や運用の変更を必要としないことを意味する。

6.4 既存GT運転条件での本システム出力

最後に実機GTシステムの運転条件で本システムを運用した場合のシステム出力を確認する。Fig. 11は実機運転データとGTシステムシミュレータの入力値として近似した値を示す。太実線は実機運転データを、細実線、細破線、細点線はシミュレータ入力値として近似した値を示す。いずれも定格値で正規化した値である。計算では60%回転数からの起動が必要なため、計算開始から約0.1 hに仮想的な起動を設定している。計算は、Table 5に示した既存GTの運転を再現する場合と、回転数、IGV開度、および燃料の熱量を既存GT運転と同一として、容積比30%水素をSOFCに供給する場合の2ケースの計算を行った。Fig. 12にその結果を示す。実機GTの出力と既存GTシミュレーション結果は部分負荷および定格負荷運転で概ねの一致を示している。本システムでは、Fig. 11の細破線で示したように、GT供給燃料流量が既存GT運転よりも減少するため、GTのみの出力は既存GT出力よりも低下する。しかしSOFC出力との合計出力では、部分負荷および定格負荷運転状態で既存GTよりも約4%の増加が確認できる。

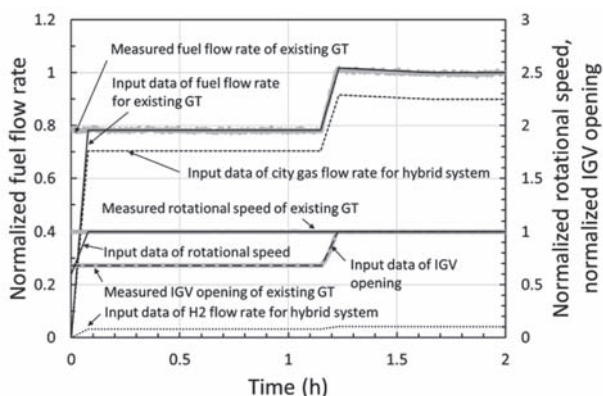


Fig. 11 Input data of GT system simulator

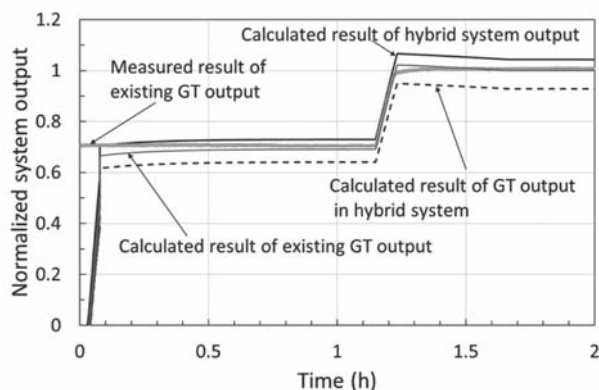


Fig. 12 Comparison of hybrid system output with existing GT output

7. 結論

グリーン水素への移行期間の発電方法として、水素利用を促進し、かつ系統安定化のため、既存GTが有する負荷追従機能の維持が可能と考えられる発電システムとして、重構造中容量GTとその定格出力の約10%の発電を行うSOFCとのハイブリッドシステムを提案した。その基本性能を把握する計算プログラムを作成し以下の結論を得た。

- (1) SOFC商用機のセルスタック全長を対象とした計算プログラムを作成し、セルスタックの温度および電圧分布の実機計測値との比較と、常圧と1.5 MPaの2種類の供給ガス圧に対する電流-電圧特性の実機計測値との比較を行い、計算モデルの妥当性を確認した。
- (2) GTシステム内の高温部位のガス流を用いて再生熱交換器によりSOFC供給ガスの昇温を検討し、再生熱交換器の加熱用ガスの温度と流量に対するSOFC出力への影響を把握した。SOFC排ガス中の残水素を燃焼させる触媒燃焼器の排ガスを再生熱交換器の加熱用ガスに用いる場合に、SOFC出力はGT定格出力の11.4%に達する。
- (3) 容積比30%の水素を投入した水素混焼GTと本ハイブリッドシステムを比較し。本研究で提案したSOFCハイブリッドシステムは出力および効率で水素混焼GTよりも4%向上することを確認した。

謝辞

本研究は東北電力株式会社と東北大学の共同研究において実施されたもので、研究の遂行に対して東北電力株式会社から多大な支援を頂いた。また、SOFC発電出力計算に関しては電力中央研究所の鈴木晃純氏に貴重な助言を頂いた。両者に深く感謝の意を示す。

参考文献

- (1) 令和2年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書2021), 経済産業省 資源エネルギー庁, 第3部, 第8章, pp. 314-325.
- (2) 石原顕光, 太田健一郎, 持続可能な社会を支えるグリーン水素エネルギーシステム, 安全工学, Vol. 53 No. 6 (2014), pp. 359-365.
- (3) 小林由則, 安藤喜昌, 西浦雅則, 富田和男, 岸沢浩, 眞竹徳久, 次世代燃料電池SOFC複合発電システム (高効率ハイブリッド発電システム), 三菱重工技報, Vol. 50 No. 3 (2013), pp. 62-66.
- (4) 河野雅人, 新井啓介, 安井芳則, 250kW級SOFC-MGTハイブリッドシステム向けマイクロガスタービンの開発, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 45 No. 3 (2017), pp. 186-191.
- (5) 安藤喜昌, 大澤弘行, 水原昌弘, 入江弘毅, 浦下靖崇, 池上卓夫, SOFC-マイクロタービン (MGT) ハイブリッドシステム九州大学向け実証機の運転状況, 三菱重工技報, Vol. 52 No. 4 (2015), pp. 48-53.
- (6) 富田和男, 西浦雅則, 大澤弘行, 水原昌弘, 山根司, 眞竹徳久, 燃料電池システム『MEGAMI』の市場導入状

- 況と今後の取り組みについて, 三菱重工技報, Vol. 58 No. 3 (2021).
- (7) 井上慶, 宮本健司, 道免昌平, 田村一生, 川上朋, 谷村聡, 水素・天然ガス混焼ガスタービンの開発, 三菱重工技報, Vol. 55, No. 2 (2018).
- (8) M. A. Khallel, Z. Lin, P. Singh, W. Surdoval, D. Collin, A finite element analysis modeling tool for solid oxide fuel cell development: coupled electrochemistry, thermal and flow analysis in MARC, Journal of Power Source 130 (2004).
- (9) S. Campanari, P. Iora, Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry, Journal of Power Sources, 132 (2004), pp. 113-126.
- (10) Pei-Wen Li and Kenjiro Suzuki, Numerical Modeling and Performance Study of a Tubular SOFC, Journal of The Electrochemical Society, 151 (4) (2004), pp. A548-A557.
- (11) 中島裕典, 許斐敏明, 北原辰巳, 伊賀上聡, 円筒型マイクロ固体酸化物形燃料電池のインピーダンス解析 (第1報, アノード・カソードインピーダンス分離解析), 日本機械学会論文集 (B編), 75巻, 755号 (2009), pp. 1510-1516.
- (12) Otomo, J., Oishi, J., Miyazaki, K., Okamura, S., Yamada, K., Coupled analysis of performance and coasts of segmented-in-series tubular solid oxide fuel cell for combined cycle system, International journal of Hydrogen Energy, 42 (2017), pp. 19190-19203.
- (13) 小林由則, 安藤喜昌, 加幡達雄, 西浦雅則, 富田和男, 眞竹徳久, 究極の高効率火力発電-SOFC (固体酸化物形燃料電池) トリプルコンバインドサイクルシステム, 三菱重工技報, Vol. 48, No. 3 (2011), pp. 16-21.
- (14) 野々村弘樹, 中野晋, 竹田陽一, 負荷調整用地上型圧縮空気エネルギー貯蔵 (CAES) を備えたガスタービンシステムの基礎検討, 日本ガスタービン学会誌, Vol.48 No.6 (2020), pp. 41-49.
- (15) Kobayashi, Y., Tomida, K., Tsukuda, H., Shiratori, Y., Taniguchi, S., Sasaki, K., Durability of a Segmented-in-Series Tubular SOFC with a (Ce, Sm) O₂ Cathode Interlayer: Influence of Operating Conditions, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 161, No. 3 (2014), pp. F214-F225.
- (16) 永田進, 恩田和夫, 門馬昭彦, 春日康弘, 嘉藤徹, 固体電解質型燃料電池の発電特性と電解特性の温度依存シミュレーション, 電子総合研究所彙報, 第57巻, 第5,6号, (1993), pp. 598-615.
- (17) Ferguson, J. R., Fiard, J. M., Herbin, R., Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells, Journal of Power Sources, 58 (1996), pp. 109-122.
- (18) Kazakovicius, E., Tsekouras, G., Michalow-Mauke, K. A., Kazlauskas, S., Graule, T., Electronic Conductivity Enhancement of (La, Sr) TiO₃ with Nb-Doping on B-Site, FUEL CELLS, 14 No.6 (2014), pp. 954-960.
- (19) Kim, J., Lee, S., and Srinivasan, S., Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance with an Empirical Equation, Journal of The Electrochemical Society, Vol.142, No.8, (1995), pp. 2670-2674.
- (20) James Larminie, Andrew Dicks 共著 植谷治紀訳, 解説 燃料電池システム, Ohmsha, (2004).
- (21) 西川兼康, 藤田恭伸 共著, 機械工学基礎講座 伝熱学, 理工学社, (1982).
- (22) Kashiwabara, Y., Katoh, Y., Ishii, H., Hattori, T., Matsuura, Y., and Sasada, T., Developments leading to an axial flow compressor for a 25 MW class high efficiency gas turbine, 90-GT-238, (1990).
- (23) 関慧一, 中野晋, 竹田陽一, マイクロガスタービンの動作解析, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43 No. 3 (2015), pp. 68-74
- (24) 鈴木晃純, 中野晋, 関慧一, 竹田陽一, 岸部忠晴, 150kW級高湿分空気利用マイクロタービンの動作解析, 日本ガスタービン学会誌, Vol.45 No.3 (2017), pp60-67.
- (25) Frank P. Incropera., David P. Dewitt., Theodore L. Bergman., Adrienne S. Lavine., K. N. Seetharamu., and T. R. Seetharam., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, (2013), pp. 622-626, WILEY.
- (26) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 固体酸化物形燃料電池を用いた事業用発電システム要素技術開発, 燃料電池・水素技術開発部, 平成25年度中間報告, (2013).
- (27) Toshi Suzuki, Toshiaki Yamaguchi, Koichi Hamamoto, Yoshinobu Fujishiro, Masanobu Awano, and Nigel Sammes, A functional layer for direct use of hydrocarbon fuel in low temperature solid oxide fuel cells, Energy & Environmental Science, Issue 3, (2011).
- (28) 山崎仁丈, プロントラッピング~個体酸素物形燃料電池, 低温動作の鍵となる金属酸化物中におけるプロトンの拡散~, までりあ, 第54巻, 第5号 (2015), pp. 242-249.

酸素を添加した水素雰囲気中におけるNi基合金の高温酸化挙動

High Temperature Oxidation Behavior of Ni-Based Alloys in Hydrogen Atmosphere Containing Oxygen

福本 倫久*¹

FUKUMOTO Michihisa

原 聖也*¹

HARA Seiya

高橋 弘樹*¹

TAKAHASHI Hiroki

ABSTRACT

Global warming has become a serious issue. This issue is caused by greenhouse gases emitted from heat engines using fossil fuels. Therefore, hydrogen energy is currently attracting attention instead of fossil fuels. By burning hydrogen and using it in a gas turbine, it is possible to generate electricity without emitting greenhouse gases. However, when hydrogen is used as fuel, the high-temperature oxidation behavior of alloys has not been investigated. In particular, no report has been made on the effects of oxygen in a hydrogen environment. Therefore, in this study, the effect of oxygen in a hydrogen environment was investigated by accurately supplying oxygen using hydrogen as a fuel and using an oxygen pump sensor, which is an oxygen supply device.

キーワード：水素, Ni基合金, 酸素ポンプ・センサー, 酸素分圧, ガスタービン

Key words : Hydrogen, Ni-based Alloy, Oxygen Pump-Sensor, Oxygen Partial Pressure, Gas Turbine

1. 緒言

現在、地球温暖化が大きな問題となっている。これは石炭火力発電などの電力プラントから排出される温室効果ガスが原因である。温室効果ガスの排出を抑制するためには化石燃料に依存しない発電方法の確立が必須である。そこで現在、再生可能エネルギーである風力発電が注目されている。しかし、再生可能エネルギーである風力発電は電力供給において天候に左右される。したがって、需要と供給のバランスを保つためには、電気エネルギーではなく利用しやすいエネルギーに変換する必要がある。そこで風力発電による電力を利用した電気分解により水素を製造し、化学エネルギーである水素を利用した社会の確立が進められている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。そして、電力プラントのガスタービン発電に水素を用いることによって脱炭素を達成することができる。しかし、水素を燃料としてガスタービンを稼働させた場合の材料の耐環境性については調査がなされていない。

これまでガスタービンなどに用いられているNi基合金の酸素中での酸化や大気中での酸化については数多くの報告がある⁽⁴⁾⁻⁽¹⁰⁾。Stottら⁽⁴⁾はNi-Cr-Al合金を酸素中で酸化し合金元素の影響について詳細に調査し、生成する酸化物の種類に及ぼす添加元素の影響を明らかにしてい

る。Zurekら⁽¹¹⁾は、低酸素分圧中でのNi基合金の酸化挙動について調査し、Cr₂O₃の生成機構について明らかにしている。Putら⁽¹²⁾は、アルミナフォーマーのFe基合金およびNi基合金を用いて、H₂-CO-CO₂-H₂O環境中における各ガス種を変化させて、水蒸気酸化における酸素分圧の影響について調査している。Hayashiら⁽¹³⁾は、Ni-Cr-Al合金への添加元素の影響についてAl₂O₃の変態挙動を明らかにしている。しかし、これまでの報告において水素雰囲気中に酸素を供給した際のNi基合金の耐環境性を考察した報告は無い。水素を燃料とした場合、実際のガスタービン燃料雰囲気では水素と酸素を燃焼反応させるが、実験室レベルでは酸素ガスと水素ガスを燃焼反応させる実験には危険を伴う。したがって、水素燃料を想定した環境下での材料評価は困難である。

著者らは、これまで固体電解質を用いた酸素ポンプ・センサーを用い、電位制御によりポンプ部に電流を印加することで雰囲気に酸素を供給してきた⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾。そこで、本研究では水素環境中に酸素の供給量を精密に制御できる酸素ポンプ・センサーを用いることで、Ni-Cr合金およびNi-Al-Cr合金の水素、水蒸気および酸素-水蒸気環境下での合金の酸化挙動を調査することを考えた。すなわち、本研究では、酸素ポンプ・センサーを装着した過熱炉を用いることで水素環境中に供給する酸素量を制御し、水素と酸素を電気化学的に反応させることにより、酸素分圧および水蒸気分圧を変化させた場合の合金の酸化挙動について検討した。また、後段に設置した酸素センサーにより、酸化に伴う雰囲気中の酸素分圧の変化を測定した。

原稿受付 2022年8月5日

査読完了 2023年1月24日

*1 秋田大学 理工学研究所
革新材料研究センター

〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

E-mail: fukumoto@gipc.akita-u.ac.jp

2. 実験方法

試料にはNi-10CrおよびNi-10Cr-5Al合金 (wt.%) を用いた。以下、Ni-10CrおよびNi-10Cr-5Alと表記する。酸化実験は、Ar-10% H_2 雰囲気中で試料を1時間で1100℃まで昇温し、その後1100℃で4時間保持した。ガスの流速は30 cc min^{-1} とした。Fig. 1に装置の概略図を示す。酸化炉の入口に設置した酸素供給デバイスである酸素ポンプ・センサーで電位を制御することにより異なる条件で酸素を供給して、水素と酸素を反応させることで雰囲気中の酸素分圧を変化させた。電位制御にはポテンショスタット (北斗電工 HZ-7000) を用いた。酸化実験時の酸素分圧制御に使用した酸素ポンプ・センサーの電解質は、酸化物イオン伝導体であるイットリア安定化ジルコニア (YSZ) であるため、電位制御により電流を印加することで雰囲気中の酸素の供給量を精密に制御できる。これを電気炉前段 (1st stage) に設置し雰囲気を制御した。電気炉後段 (2nd stage) には酸素センサーを設置し、酸化によって発生するガスを測定することで酸素分圧の変化を測定している。

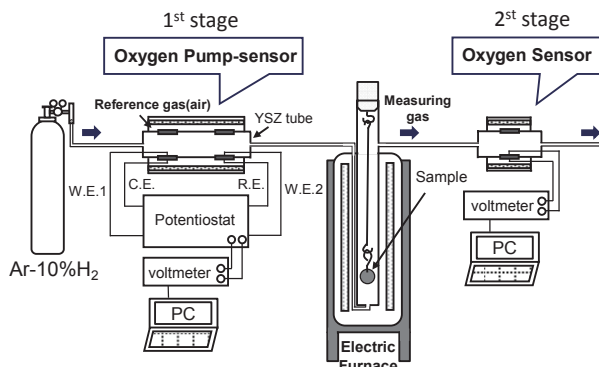


Fig. 1 Oxygen supply type oxidation experimental device in the hydrogen atmosphere.

Fig. 1の1st stageの酸素ポンプ・センサーの概略図をFig. 2に示す。酸素ポンプ・センサーの電解質であるイットリア安定化ジルコニア管の内側と外側に白金を塗布して、それぞれ酸素ポンプ、酸素センサーの電極とした。また、センサー温度を850℃とした。

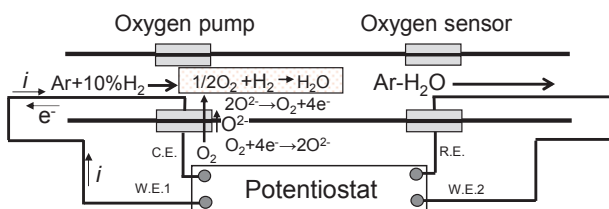


Fig. 2 Schematic diagram of principle of oxygen pump sensor.

センサー部では式(1)に示すNernstの式に従い、測定した起電力を代入することで酸素分圧 ($P_{O_2(meas)}$) を算出した。

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{O_2(meas)}}{P_{O_2(ref)}} \quad (1)$$

ここで、 R : 気体定数 ($J K^{-1} mol^{-1}$), T : 温度 (K), F : ファラデー定数 ($A s mol^{-1}$), E : 測定起電力 (V), $P_{O_2(ref)}$: 参照ガス (大気: 0.21 atm) である。酸素ポンプ部では、電解質管に取り付けた両電極間に電流を印加することで酸化物イオンを移動させることができ、(2)式に示すようにアノード側に酸素が発生する。この仕組みを利用して電解質管内に酸素を供給している。



この酸素と雰囲気の水素がPt電極表面で電気化学反応することにより水蒸気を生成する。供給する酸素を精密にコントロールすることで雰囲気の水素と酸素の反応を制御することが可能となる。

このとき、酸素を供給する際の印加電流 I を測定し、式(3)に示すファラデーの法則に代入することで供給される酸素量 J を算出した。

$$J = \frac{I}{4F} \quad (3)$$

ここで、 F : ファラデー定数 ($A s mol^{-1}$), I : 印加電流 (A), J : 酸素ポンプにより管内に供給される酸素量 ($mol s^{-1}$) である。したがって、この電流値から供給酸素量を正確に制御できる。

各酸化条件での酸化後の試料はXRD, FE-SEM, EPMAを用いて分析および観察を行った。

3. 結果

3.1 電位を変化させた時の酸素分圧の変化

Fig. 3に、1st stageの酸素ポンプ・センサーのポンプ部で電位制御により電流を印加して酸素を供給した時の電流と酸素分圧の変化(a)および電位と酸素分圧の変化(b)を示す。酸素分圧は2nd stageの酸素センサーで測定した。Fig. 3 (a)において、電流を印加すると酸素分圧が上昇することがわかる。(2)式の反応により酸素が供給され、雰囲気中の水素と酸素の反応が進んでいると考えられる。この時、電流が0.3 Aを過ぎると急激に酸素分圧が増加した。しかし、0.3 Aまでは酸素分圧は上昇しなかった。すなわち、雰囲気中にAr- H_2 として供給される水素を水蒸気生成反応により完全に消費するためには、0.3A以上の電流印可で酸素を供給する必要がある。これは0.3A未満でも水素と酸素は反応するが、供給された酸素はすべて水素と反応してしまうため、0.3A以下では酸素分圧は低いが、0.3A以上では、水素との反応に必要な量以上の酸素が供給されるため、酸素分圧が急激に増加する。(3)式より、0.3 Aでの供給酸素量は $7.8 \times 10^{-7} mol s^{-1}$ であった。この酸素量によってAr-10% H_2 雰囲気中の H_2 と酸素の反応が進行する。

一方, Fig. 3 (b)においてマイナスの電位では酸素分圧は上昇しなかった。しかし, 電位がプラスになると酸素分圧は急激に増加した。最終的に酸素分圧は 10^{-2} atmまで上昇することがわかった。この現象は, 雰囲気中の水素と酸素が反応して水蒸気になり, 水素は雰囲気中に存在せず過剰な酸素が供給されるため酸素分圧が上昇すると解釈できる。酸素分圧はある変曲点を境に急激に変化する。したがって, 変曲点前後の条件で実験をする必要がある。そこで, 本酸化実験は酸素を供給しない場合, 少量の酸素を供給した場合 (-0.5 V) および多量の酸素を供給した場合 (0.2 V) の3条件で実施した。

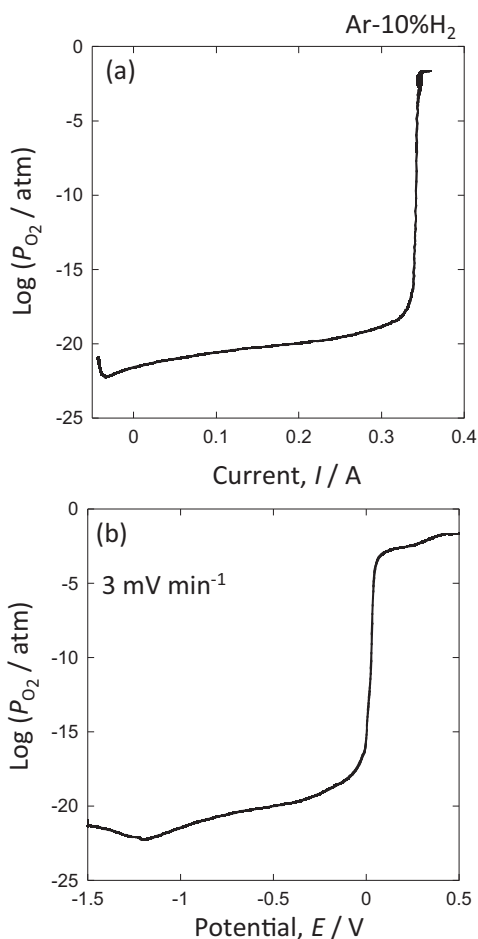


Fig. 3 Relationship between current and oxygen partial pressure when the potential is controlled by the 1st stage oxygen pump sensor.

3.2 電流を印加しないときの酸化挙動

Fig. 4に, Ar-10%H₂中でNi-10CrおよびNi-10Cr-5Alを1100°Cで4時間酸化した時の酸素分圧の変化を示す。比較として試料を電気炉内に設置しない時の酸素分圧の結果も示す。これより, Ar-10%H₂では雰囲気中の酸素分圧は 10^{-21} atmであることがわかる。一方, Ni-10CrおよびNi-10Cr-5Alを電気炉内に設置して酸化した際の酸素分圧は試料を入れない場合と同様の挙動を示した。したがって, 雰囲気中の不純物酸素と金属が反応して酸素分

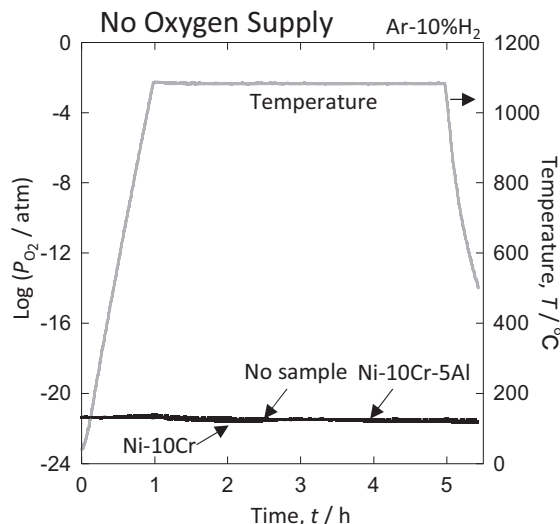


Fig. 4 Time dependence of oxygen partial pressure when no current is applied to the oxygen pump sensor at the 1st stage.

圧が低下するような急激な酸化は起こっていないことがわかる。

Fig. 5に, Ar-10%H₂中でNi-10CrおよびNi-10Cr-5Alを1100°Cで4時間酸化した時の断面組織を示す。Ni-10Crにおいて表面に3 μm程度のCr₂O₃が密着性良く生成した。さらにNi酸化物は観察されずCr₂O₃単層であることがわかった。一方, Ni-10Cr-5Alでは, 1 μm程度のAl₂O₃が密着性良く生成していた。Ni酸化物およびCr酸化物は観察されず, Al₂O₃単層であった。このように, 水素雰囲気中での酸化試験において, Ni-10CrではCr₂O₃単層が生成し, Ni-10Cr-5AlではAl₂O₃単層が生成することが明らかになった。

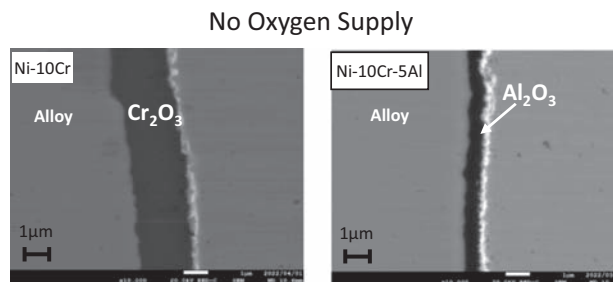


Fig. 5 Cross-sectional microstructure of Ni-10Cr and Ni-10Cr-5Al after oxidation under Ar-10%H₂ atmosphere for 4 h.

3.3 電流印加し酸素を供給したときの酸化挙動

次に, -0.5 Vおよび0.2 Vで酸素を供給してAr-10%H₂中でNi-10CrおよびNi-10Cr-5Alを1100°Cで4時間酸化試験を実施した。Fig. 6に, 1st stageの酸素ポンプ・センサーに印加した電流値(a)と2nd stageで測定した酸素分圧の変化(b)を示す。比較として試料を電気炉内に設置しない時の酸素分圧の結果も示す。-0.5 Vでは電流は0.2 Aになった。酸素分圧は 10^{-20} atm程度であり, 酸素と水

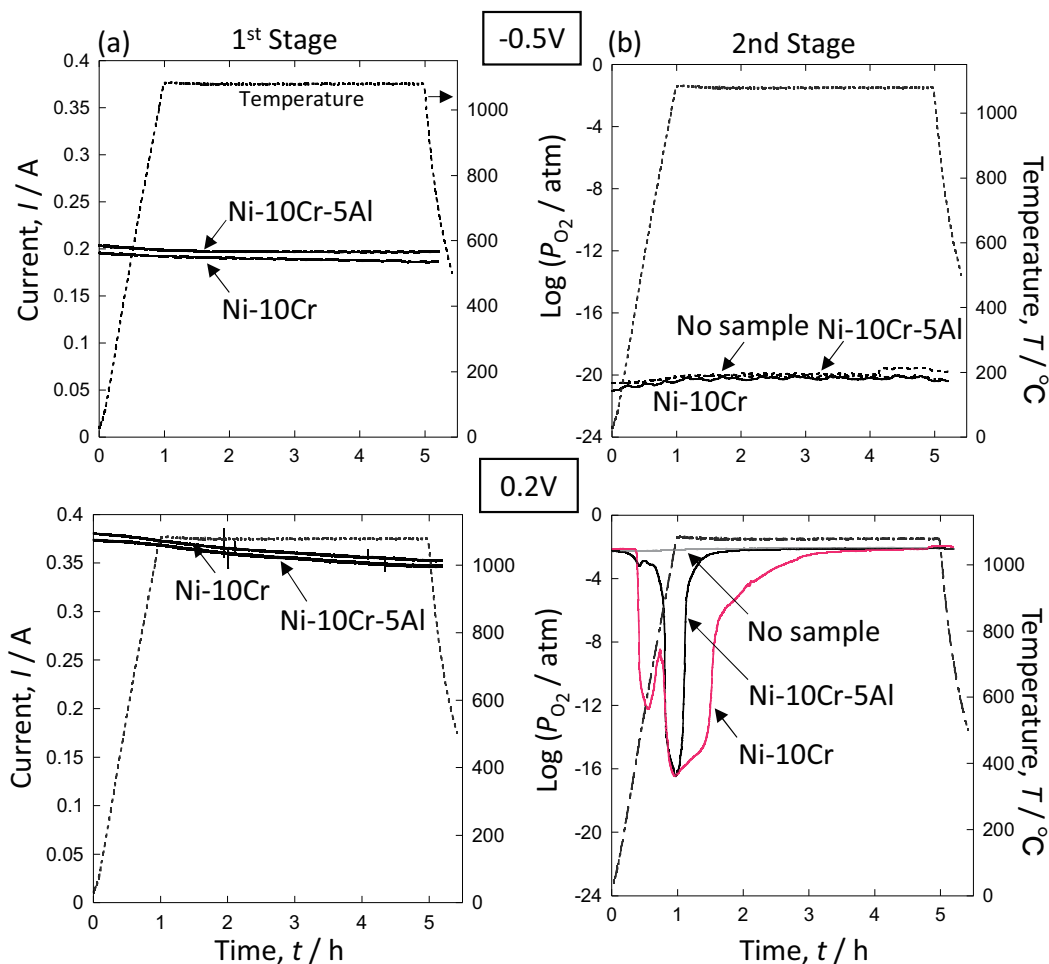


Fig. 6 Time dependence of current (a) and oxygen partial pressure (b) when oxygen is supplied using the oxygen pump sensor at the 1st stage by controlling the potential at -0.5 V and 0.2 V.

素の反応が完全に進行していないため酸素分圧は低い状態である。この時のNi-10CrおよびNi-10Cr-5Alの酸化中における酸素分圧の変化は、試料が無い場合と同様の挙動を示した。したがって、-0.5 V印加時にはNi合金の酸化に伴う酸素分圧の変化が観察されないため、酸素を供給していない場合と同様に急速な酸化が起こっていないと思われる。

一方、0.2 Vでは(a)の電流は0.35 A程度になった。そして(b)の酸素分圧は 10^{-2} atmになった。水素と酸素が反応して水蒸気が生成し、水素が消費されたために酸素分圧は上昇したと解釈できる。すなわち、酸素を供給しない場合は水素のみの環境であり、酸素を供給すると水蒸気のみの環境になる(-0.5 V)。そして、さらに供給すると酸素と水蒸気の環境になると推察される(0.2 V)。電気炉内に試料を設置すると、初期に酸素分圧が急激に低下した。試料と雰囲気中の酸素および発生した水蒸気との反応により水素が発生し、酸素分圧が低下したと考えられる。したがって、0.2 V印加時には酸化が進行していることが明らかとなった。Ni-10Crでは短時間側で酸素分圧が低下し、時間の経過とともに徐々に酸素分圧が 10^{-2} atmに戻った。一方、Ni-10Cr-5Alでは1 hで急激に酸素分圧が低下し、その後、初期の酸素分圧に戻った。

この結果は、Ni-10Crでは酸化物の成長によって酸素分圧が徐々に変化するが、Ni-10Cr-5Alでは酸化が抑制され酸素の消費および水蒸気と金属の反応が進まないためNi-10Crよりも早く元の酸素分圧に戻ることを意味している。すなわち、Ni-10Cr-5Alでは保護的な皮膜が生成していることが推察された。

Fig. 7に、-0.5 Vおよび0.2 Vで酸素を供給してAr-10% H_2 中でNi-10CrおよびNi-10Cr-5Alを1100°Cで4時間酸化した時の断面組織を示す。-0.5 VではNi-10Crにおいて表面には酸素を供給しない場合と同様に Cr_2O_3 が生成し、Ni-10Cr-5Alでは、 Al_2O_3 が生成していた。

一方、0.2 VではNi-10Crにおいて-0.5 Vよりも厚い Cr_2O_3 が生成していた。Ni-10Cr-5Alでは、2層構造を呈しており、外層に $NiAl_2O_4$ が生成し、内層に Al_2O_3 が生成していた。すなわち、外層においてNi酸化物が生成していることが示唆される。これは、酸素供給量が多くなると酸化量が急激に増加する。

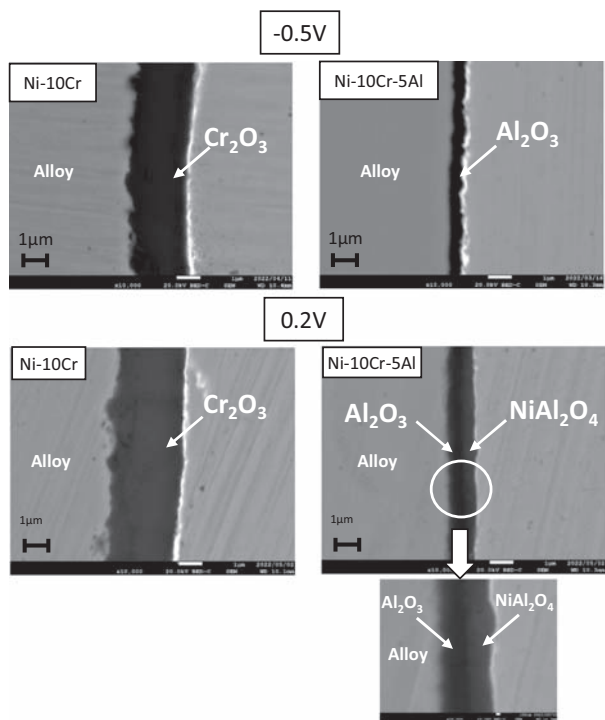


Fig. 7 Cross-sectional microstructure of oxidized Ni-10Cr and Ni-10Cr-5Al by controlling the potential at -0.5 V and 0.2 V with the oxygen pump sensor at the 1st stage to supply oxygen.

4. 考察

4.1 供給酸素量と酸化増量の関係

Fig. 8に、各電位で供給した全供給酸素量と酸化増量の関係を示す。全供給酸素量は、1st stageの酸素ポンプ・センサーで印加した電流値を積分することにより算出した。Ni-10Crの方がNi-10Cr-5Alと比較して酸化増量が大きくなった。Ni-10Cr上に生成するCr₂O₃はAl₂O₃よりも保護性能が低い事がわかった。さらに、Ni-10Crで

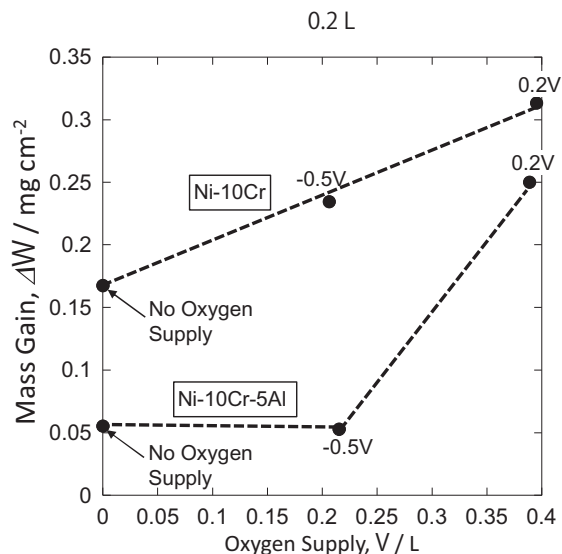


Fig. 8 Relationship between oxygen supply calculated from the current value at 1st stage and mass gain during oxidation.

は酸素の供給量の増加にしたがい直線的に酸化増量が増加した。一方、Ni-10Cr-5Alでは全酸素供給量が0.2 Lまでは酸化増量はほぼ変化しないが、0.2 L以上になると酸化増量は急激に増加した。これは雰囲気中の水素と酸素が完全に反応し、水蒸気が生成し酸素分圧が上昇することによって急激な酸化が進行することに起因している。すなわち、高温でAl₂O₃を生成する材料では、酸素供給量に依存して急激な酸化が進行することがわかる。

4.2 水素環境下における酸素の影響

Fig. 9に酸素供給時における酸化挙動の模式図を示す。図中の酸素分圧はFig. 6の結果を用いている。酸素供給が無い場合および少ない場合、保護的な皮膜が生成し酸化は抑制される。しかし、酸素供給量が増加していくとNi-10CrではCr₂O₃単層が成長する。そして、直線的に酸化増量が増大する。したがって、酸素および水蒸気との反応によりCr₂O₃が成長することが考えられる。しかし、Ni-10Cr-5AlのようなAl₂O₃が生成する合金では酸素供給量がある値を超えると急激に酸化増量が増大する。すなわち、酸素供給量の増加によって酸素分圧が上昇しNiが酸化しNiAl₂O₄が生成すると考えられる。このように酸素供給によって水素と反応して生成した水蒸気が酸化挙動に大きく寄与することがわかる。また、Fig. 6に示したように酸素分圧の急激な低下は水蒸気と金属の反応により水素が発生したことに起因する。

したがって、本実験のシステムは水素環境中の高温環境での材料評価に適していることが明らかになった。

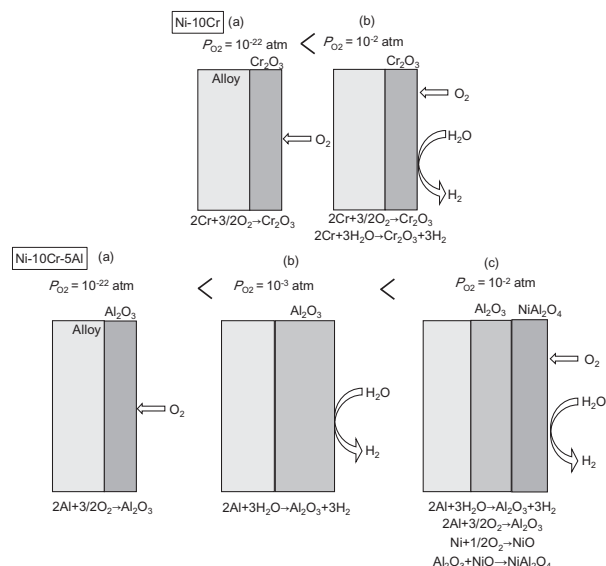


Fig. 9 Schematic diagram of the oxidation mechanism at each oxygen partial pressure.

5. 結論

- (1) 酸素を供給しない水素雰囲気中では酸化が進行せず、酸化増量も小さかった。一方、酸素を供給すると供給した酸素量に依存して酸化挙動が変化した。
- (2) 微量の酸素では、酸化増量は小さかったが、供給酸素量を増加させると雰囲気中の水素と酸素が反応して酸素分圧が上昇し、酸化が進行した。
- (3) Cr_2O_3 を生成する合金では、供給する酸素量によって酸化増量は直線的に増加する。一方、 Al_2O_3 を生成する合金では、酸素供給量が少ない時は高い耐酸化性を示すが、酸素供給量が多くなると加速的に酸化した。
- (4) 酸素供給デバイスを設置した酸化炉を用いることで水素環境中での酸素の影響を詳細に検討することができた。

参考文献

- (1) Momirlan, M., Veziroglu, T. N., The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30 (2005), pp. 765-802.
- (2) Matsuo, Y., Endo, S., Nagatomi, Y., Shibata, Y., Komiyama, R., Fujii, Y., A quantitative analysis of Japan's optimal power generation mix in 2050 and the role of CO_2 -free hydrogen, *Energy* Vol. 165 (2018), pp. 1200-1219.
- (3) Tratter, A., Klell, M., Radner, F., Sustainable hydrogen society - Vision, findings and development of a hydrogen economy using the example of Austria, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47 (2022), pp. 2059-2079.
- (4) Stott, F. H., Wood, G. C., Hobby, M. G., A comparison of the oxidation behavior of Fe-Cr-Al, Ni-Cr-Al, and Co-Cr-Al Alloys, *Oxidation of Metals*, Vol. 3 (1971), pp. 103-113.
- (5) Ingard, A. K., Kofstad, P., The oxidation behavior of some Ni-Cr-Al alloys at high temperature, *Metallurgical Transactions* Vol. 3 (1972), pp. 1511-1519.
- (6) Barrett, C. A., Lowell, C. E., Resistance of Ni-Cr-Al alloys to cyclic oxidation at 1100 and 1200°C, *Oxidation of Metals* Vol. 4 (1977), pp. 199-223.
- (7) Ecer, G. M., Meier, G. H., Oxidation of High-chromium Ni-Cr alloys, *Oxidation of Metals*, Vol. 13 (1979), pp. 119-158.
- (8) Liu, Z., Gao, W., Dahm, K., Wang, F., The Effect of coating grain size on the selective oxidation behaviour of Ni-Cr-Al alloy, *Scripta Materialia*, Vol. 37 (1997), pp. 1551-1558.
- (9) Liu, Z., Gao, W., Oxidation behaviour of microcrystalline Ni-Cr-Al alloy coating at 900°C, *Scripta Materialia*, Vol. 38 (1998), pp. 877-885.
- (10) Martínez-Villafañe, A., Stott, F. H., Chaco-Nava, J. G., Wood, G. C., Enhanced oxygen diffusion along internal oxide-metal matrix interface in Ni-Al alloys during internal oxidation, *Oxidation of Metals*, Vol. 57 (2002), pp. 267-279.
- (11) Ul-Hamid, A., TEM study of the oxide scale development in Ni-Cr-Al alloys, *Corrosion Science* Vol. 46 (2004), pp. 27-36.
- (12) Peraldi, R., Pint, B. A., Effect of Cr and Ni contents on the oxidation behavior of ferritic and austenitic model alloys in air with water vapor, *Oxidation of Metals*, Vol. 61 (2004), pp. 463-483.
- (13) Zurek, J., Young, D. J., Essuman, E., Hänsel, M., Penkalla, H. J., Niewolak, L., Quadackers, W. J., Growth and adherence of chromia based surface scales on Ni-base alloys in high- and low- pO_2 gases, *Materials Science and Engineering A* Vol. 477 (2008), pp. 259-270.
- (14) Kim, D., Sah, I., Lee, H. J., Jang, C., Hydrogen effects on oxidation behaviors of Haynes 230 in high temperature steam environment, *Solid State Ionics* Vol. 243 (2013), pp. 1-7.
- (15) Put, A. R. V., Unocic, K. A., Brady, M. P., Pint, B. A., Performance of chromia- and alumina-forming Fe- and Ni-base alloys exposed to metal dusting environments: The effect of water vapor and temperature, *Corrosion Science* Vol. 92 (2015), pp. 58-68.
- (16) Wang, J. W., Chen, M., Zhu, S., Wang, F., Ta effect on oxidation of a nickel-based single-crystal superalloy and its sputtered nanocrystalline coating at 900-1100°C, *Applied Surface Science*, Vol. 345 (2015), pp. 194-203.
- (17) Schmucker, E., Petitjean, C., Martinelli, L., Panteix, P. J., Lagha, B., Vilasi, M., Oxidation of Ni-Cr alloy at intermediate oxygen pressures. II. Towards the lifetime prediction of alloys, *Corrosion Science* Vol. 111 (2016), pp. 467-473.
- (18) Hayashi, S., Kudo, D., Nagashima, R., Utsumi, H., Effect of Cu on oxidation behaviour of FCC Fe-Ni-Cr-Al and Ni-Cr-Al based alloys, *Corrosion Science* Vol. 163 (2020), pp. 108273.
- (19) Wang, Z., Takeda, Y., Role of permeated hydrogen in the oxidation process of Ni-based alloy in high temperature water environment, *Corrosion Science* Vol. 179 (2021), pp. 109139.
- (20) Fukumoto, M., Kawamori, Y., Sonobe, H., Hara, M., Kaneko, H., Investigation of High-Temperature Oxidation in Steam for Ni-Al Alloys Using the Combination of a Hydrogen Sensor and an Oxygen Pump-Sensor, *Oxidation of Metals* Vol. 89 (2018), pp. 357-373.
- (21) Fukumoto, M., Kawamori, Y., Hara, M., Investigation of cyclic oxidation in Ar- H_2O for NiAl containing Hf or Zr by the combination of a hydrogen sensor and an oxygen pump-sensor, *Corrosion Science* Vol. 149 (2019), pp. 68-74.
- (22) Fukumoto, M., Nakajima, K., Kawamori, Y., Investigation of Alumina Formation and Oxidation Rate of Ni-5wt%Al-Xwt%Cr Alloy Using Hydrogen Sensor and Oxygen Pump Sensor, *Oxidation of Metals*, Vol. 94 (2020), pp. 191-204.

レーザ粉末床溶融結合法における溶融池形状制御による ニッケル単結晶の造形

Fabrication of a Nickel Single Crystal by Controlling Melt Pool Geometry in Laser Powder Bed Fusion

北嶋 具教*^{1,2}
KITASHIMA Tomonori

ジョディ デニス*^{1,2}
JODI Dennis

小泉 雄一郎*³
KOIZUMI Yuichiro

中野 貴由*³
NAKANO Takayoshi

渡邊 誠*¹
WATANABE Makoto

ABSTRACT

The demand for additive manufacturing of high-temperature components with nickel-base single-crystal superalloy is increasing in aircraft and gas-turbine industries. We investigated the effect of laser scan speed on the microstructure and texture of pure nickel specimens fabricated via laser powder bed fusion using a flat-top laser beam. The $\langle 110 \rangle$ texture changed to near- $\langle 100 \rangle$ as the scan speed increased. A further increase in the scan speed resulted in the closer- $\langle 100 \rangle$ texture accompanied with the formation of stray grains. Under the condition in which the most uniform texture close to $\langle 100 \rangle$ was formed, the density of geometrically necessary dislocation was at a minimum. Additionally, the length of the high-angle grain boundary became almost zero, resulting in a single-crystal structure. The difference in-between the build direction and grain growth direction in a planer melt pool on the X-Z plane may contribute largely to the grain selection before the formation of the single-crystal structure.

キーワード：ジェットエンジン，ガスタービン，積層造形，単結晶，ニッケル，レーザ粉末床溶融結合法
Key words : Jet Engine, Gas Turbine, Additive Manufacturing, Single Crystal, Nickel, Laser Powder Bed Fusion

1. はじめに

近年、航空機部品が積層造形で製造されている。積層造形は複雑形状の造形が可能であり、部品点数を減らすことができる。接合部の肉厚増強を考慮する必要がなく、部品軽量化に貢献できる。また、製造プロセスの低コスト化、短期納期等の面で有利であり、航空機エンジンのタービン用耐熱材として用いられているNi基超合金の単結晶についても積層造形による製造が期待されている。

Ni基超合金は多結晶、一方向凝固材よりも単結晶の方が高温クリープ強度に優れる。粉末床積層造形で単結晶を造形するには、種結晶を用いて種結晶と同じ結晶構造の材料を造形する方法は報告されているものの^{(1),(2)}、種結晶を使わない造形方法では粉末床積層造形のレーザ方式では報告されておらず、電子ビーム方式で2018年以降

に報告されていた⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。著者らはレーザ方式でレーザの照射面強度分布が一様なフラットトップレーザを用いて、純ニッケルの造形において、大角粒界の形成を抑制し、単結晶の造形に成功した⁽⁶⁾。しかし、フラットトップレーザを用いた造形のパラメータがマイクロ組織や集合組織の形成に及ぼす影響は不明な点が多い。造形パラメータには、レーザパワー、レーザ走査速度、ハッチスペース、レイヤー厚さ等が挙げられ、とりわけ走査速度が結晶方位に及ぼす影響は大きい^{(7),(8)}。これらの造形パラメータがフラットトップレーザで造形する単結晶の結晶粒構造の形成に及ぼす影響は報告されていない。本論文ではフラットトップレーザを用いた粉末床溶融結合法において、単結晶が得られるパラメータの近傍でレーザ走査速度が結晶方位に及ぼす影響について報告する。単結晶の造形では結晶粒界形成の抑制が重要になるが、造形体の結晶粒界形成やひずみに及ぼす影響についても議論する。従来のガウス強度分布に従うレーザを使用した造形体の集合組織、結晶方位や結晶粒界、ひずみと比較して議論する。

原稿受付 2022年10月27日

査読完了 2023年1月24日

- * 1 物質・材料研究機構 (NIMS)
〒305-0047 つくば市千現1-2-1
E-mail: KITASHIMA.Tomonori@nims.go.jp
- * 2 九州大学大学院工学府
〒819-0395 福岡市西区元岡744
- * 3 大阪大学大学院工学研究科
〒565-0871 吹田市山田丘2-1

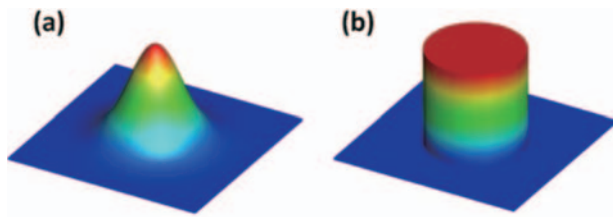


Fig. 1 Schematics of the intensity distribution of (a) Gaussian and (b) flat-top laser beams.

2. 材料と実験方法

高純度の純ニッケル球状粉末 (AMPERIT 176, HÖGANÄS社) を使用した。D₁₀, D₅₀, D₉₀はそれぞれ 24.6, 34.8, 51.3 μmであり, 平均粒径34.0 μmであった。造形にはSLM 280 HL (SLM Solutions社) を用いた。造形装置はガウス分布レーザーとフラットトップレーザーを搭載しており, それぞれビームの直径は80 μm, 700 μmである。Fig. 1にガウス分布レーザーとフラットトップレーザーの照射面強度分布の概念図を示す。造形ステージ上にはSUS304プレートを設置し, その上に, 各レイヤーごとに粉末を敷いて直径12 mm, 高さ30 mmの円柱を造形した。造形ステージは加熱せず, 造形では種結晶を使用していない。Ar雰囲気下で造形した。本論文では造形方向をZ方向, レーザの走査方向X方向, ハッチ方向をY方向とする。スキャンストラテジーとしてXY面で双方向(ジグザグ)に走査し, レイヤー毎に走査方向を90度回転させた。造形時のひずみや残留応力を最小限にするため, レーザの走査方向を67度回転されるスキャンストラテジーが報告されているが⁹⁾, 本研究では単結晶造形時の結晶粒選択(後述)で重要となる90度回転を採用した。レーザー直径の異なるガウス分布レーザーとフラットトップレーザーのエネルギー密度が同程度になるTable 1の造形パラメータを使用した。ガウス分布レーザーを使用したパラメータをG, フラットトップレーザーを使用したものはFTとした。レイヤー厚さは全て30 μmである。本研究では下記のエネルギー密度E_Mの定義式を用いた¹⁰⁾。

$$E_M = \beta P / h \sqrt{4\alpha d_b v} \quad (1)$$

ここで, β は吸収係数 (0.8), α は熱拡散率 (22 mm²/s), P はレーザーパワー, h はハッチスペース, d_b はレーザービーム直径, v はレーザー走査速度である。G1とFT2のレーザー走査速度とレーザー出力の条件で純Niの板材にレーザーを照射して形成した溶融池は, それぞれG1: 直径144.5 μm, 深さ148.1 μm, FT2: 直径143.7 μm, 深さ20.0 μmである⁶⁾。

組織の解析では, 造形まま材を切断し, 樹脂に埋め込んだ後, #320, #600の研磨紙, 9, 3, 1 μmのダイヤモンド砥粒, 粒径0.06 μmのコロイド状シリカ懸濁液で研磨を行った。結晶方位, 結晶粒界長さ, 転位密度分布を電子線後方散乱回折 (EBSD) により解析した。EBSDデータの解析にはTSL OIM 7を使用した。本論文

Table 1 Fabrication parameters in this study.

	Laser power [W]	Laser scan speed [mm/s]	Hatch space [μm]	Energy density [J/mm ³]
G1	300	600	80	46.16
G2	300	900	80	37.89
G3	300	1200	80	32.64
FT1	500	100	100	50.96
FT2	500	140	100	43.07
FT3	500	200	100	36.04

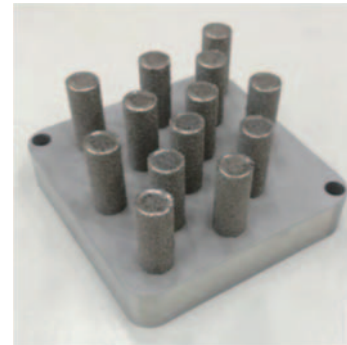


Fig. 2 Fabricated cylindrical specimens.

では小角粒界と大角粒界の結晶方位差をそれぞれ5~15°, >15°と定義した。

3. 結果及び考察

3.1 集合組織の形成

Fig. 2に造形後の試料外観写真を示す。Fig. 3にガウス分布レーザーを使用した造形まま材の高さ25mmにおける組織のIPF (Inverse Pole Figure) マップを示す。黒の実線は大角粒界である。また, それぞれのIPFマップにおける結晶方位分布を逆極点図に示す。G1~G3の積層方向 (BD) に垂直な面で”レーザー走査跡”を確認できる。積層方向に平行な面において積層方向に大角粒界が伸び, レーザ走査跡がわかる。ガウス分布レーザーの照射ではYZ面で半楕円形の溶融池が生じるため⁶⁾, 溶融池の固液界面で温度勾配が最大となる方向が最深部からエッジにかけて連続的に変化する。これにより, 溶融池のYZ面において<100>と<110>のセルの競争成長が起こるが, 溶融池の両側の固液界面でエピタキシャル成長し, その後, 競争成長して凝固セルがぶつかり大角粒界を形成する¹¹⁾。同様の結晶粒界の形成は溶接溶融池においても観察されている¹²⁾。溶融池の両側から結晶粒が溶接センターラインに向かって成長してぶつかり形成する。G1, G2では主に<110>集合組織を形成しているが, G3に走査速度が上がると<100>に近い集合組織が増加する。

フラットトップレーザーを使用したFT1, FT2, FT3では上記のガウス分布レーザーを使用した場合と同じスキャンストラテジーであるが, 積層方向に垂直な面と平行な

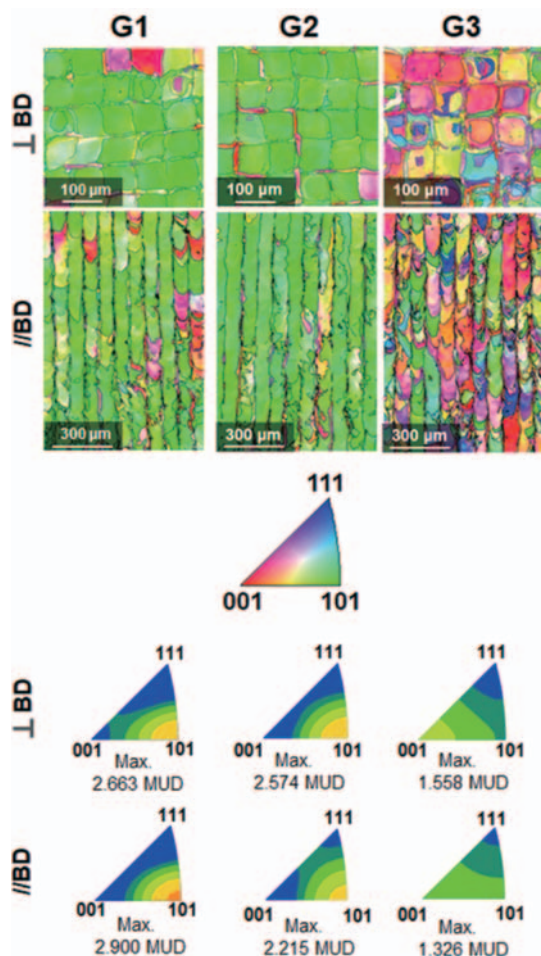


Fig. 3 IPF maps and textures of Gaussian-laser fabricated specimens (G1, G2, G3) on the cross-sections perpendicular to and transverse to the build direction. All IPF maps were set along the build-direction axis.

面でレーザー走査跡が見られない。フラットトップレーザを使用した場合、溶融池の形状は浅くて幅が広い平面状に近くなる⁽⁶⁾。FT1では $\langle 110 \rangle$ 集合組織を形成し、大角粒界が存在する (Fig. 4)。一方、レーザー走査速度を上げたFT2では大角粒界の形成が抑制され、 $\langle 100 \rangle$ に近い集合組織を有し、単結晶化していることがわかる。この集合組織は $\langle 710 \rangle$ であり、積層方向から $\pm 8^\circ$ のずれである。さらにレーザー走査速度を上げたFT3では、より $\langle 100 \rangle$ に近い集合組織を形成したものの、大角粒界を形成し、結晶方位 $\langle 210 \rangle$ 付近 (Fig. 4標準ステレオ三角形の丸印) 等、 $\langle 100 \rangle$ から離れた方位の漂遊結晶粒 (Fig. 4矢印) が出現した。レーザー走査速度が増加すると、集合組織の結晶方位が $\langle 110 \rangle$ から $\langle 100 \rangle$ に変わり、さらに速度が上がると、ランダムな方位の結晶粒が増加していくことが報告されている⁽⁷⁾。本研究においても同様の傾向となった。

集合組織の形成は溶融池形状の影響を受け、その溶融池形状は造形パラメータの影響を受ける⁽³⁾。Fig. 5にガウス分布レーザを高速走査、低速走査で使用した場合のXY面、XZ面、YZ面の溶融池形状の模式図を示す。条

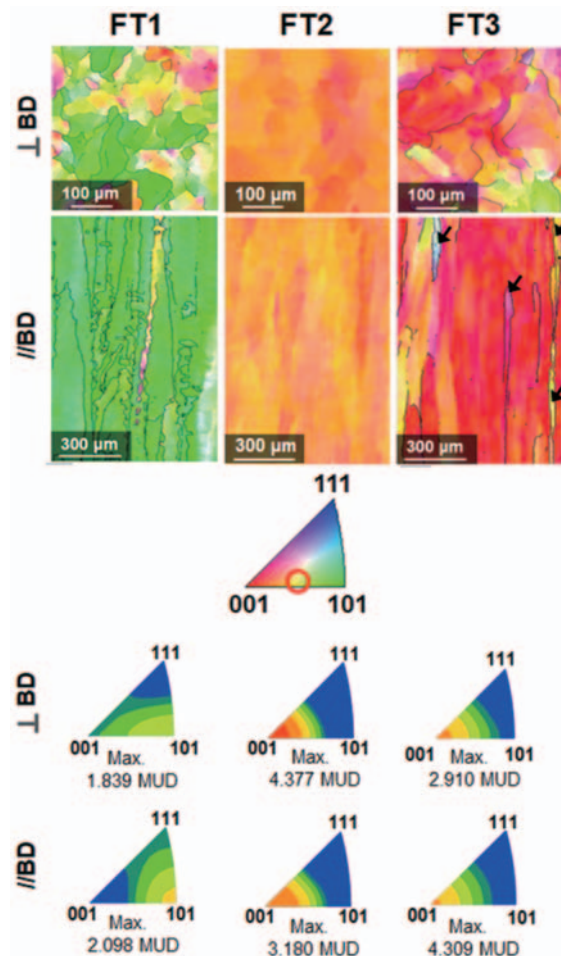


Fig. 4 IPF maps and textures of flat-top-laser fabricated specimens (FT1, FT2, FT3) on the cross-sections perpendicular to and transverse to the build direction. All IPF maps were set along the build-direction axis.

件によってXZ面で柱状晶が成長する“軸方向成長 (axial growth)”が起こる^{(12),(14),(15)}。そのときの模式図もFig. 5 (g), (h)に示し、軸方向成長を矢印で示した。レーザー走査速度が速い場合、XY面では溶融池がレーザー走査方向に伸び、Teardrop形状になる。溶融池の固液界面の両側から結晶粒が成長し、溶融池センターライン付近でそれらがぶつかり結晶粒界を形成する。溶融池の深さは浅いが、YZ面で正規分布のような形状は維持され、結晶粒はFig. 5 (e)のように溶融池表面に向かって成長する⁽⁷⁾。また、XZ面では凝固セルの成長方向が造形方向により近く、細かい結晶粒が増加する⁽⁶⁾。一方でレーザー走査速度が遅い場合、溶融池形状はXY面で楕円形に近くなり、溶融池センターライン付近でも固液界面に対して垂直方向に競争成長する。また、YZ面において溶融池は深くなり、結晶粒の成長方向の曲率が上がる。XZ面においても結晶粒の成長方向が湾曲し、成長方向の角度が造形方向から外れて 45° 方向に近づく⁽⁶⁾。これらは溶接、ガウス強度分布レーザを使った粉末床溶融結合法で報告されている。

フラットトップレーザを用いた粉末床溶融結合法で

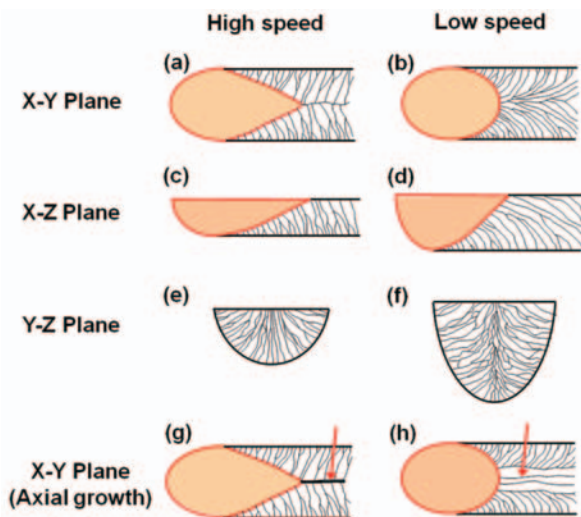


Fig. 5 Schematic grain morphologies at high and low laser-scan speeds on X-Y, X-Z, Y-Z planes. Grain morphologies with axial growth on X-Y plane are also shown in (g) and (h).

スーパーガウシアンと呼ばれるなだらかな正規分布状と平面状の溶融池形状が確認された⁽⁶⁾。スーパーガウシアンはレーザー走査速度が遅い条件で観察され、YZ面の溶融池形状はガウス分布レーザーを高速走査した条件のFig. 5 (e)に近くなり、溶融池のXY面、XZ面はガウス分布レーザーを低速走査した条件の結晶成長挙動 (Fig. 5 (b), (d)) に近くなると考えられる。したがって、YZ面とXZ面で結晶成長方向の曲率が上昇し、 $\langle 110 \rangle$ 集合組織が優勢になると考えられる。しかし、YZ面はガウス分布レーザー照射によりできる溶融池の形状に比べてなだらかなり、センターライン付近で凝固セルがぶつかる程の成長角度の分布ではなく、Fig. 4のFT1のようにレーザー走査跡を確認できない。レーザー走査速度を速くし、Fig. 6 (c)のようにYZ面で溶融池の形状が平面状になるとエピタキシャル成長を経て凝固セルが造形方向に成長し、軸方向成長 (Fig. 5 (h)) のように結晶方位が揃った結晶粒の成長が起こる (Fig. 6)。さらにレーザー走査速度が速くなると、XZ面で凝固セルはさらに造形

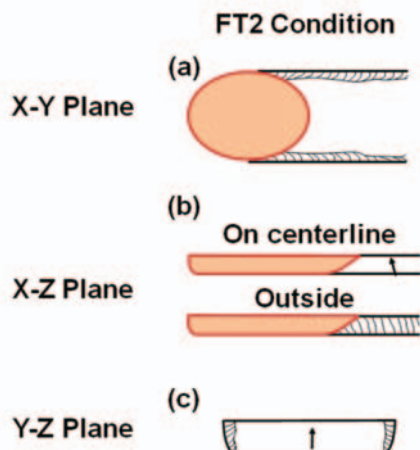


Fig. 6 Schematic grain morphologies under the FT2 condition on X-Y, X-Z, Y-Z planes.

方向に近い成長となり、集合組織はさらに $\langle 100 \rangle$ に近づくが、ランダムな結晶方位を持つ細かい漂遊結晶粒が増加すると考えられる。単結晶化する条件については3.3節で議論する。

3.2 造形体のひずみおよびGN転位分布

造形時、溶融池に近い領域ではレーザー照射による発熱の影響を受け、急速加熱、急速冷却を繰り返す。造形体中の小角粒界や大角粒界の形成はこの熱サイクル時に生成されるひずみや転位形成の影響を受ける⁽⁷⁾。このひずみ量をKAM (Kernel Average Misorientation) 値で議論する。KAM値とはEBSDで対象となる測定点とその周囲の測定点との間の結晶方位差の平均値であり、この値が大きいと結晶中の歪が大きいことを示す。Fig. 7にKAMマップを示す。また、KAM値は塑性変形後の形状を成立させるために幾何学的に必要な転位 (GN転位) の転位密度にほぼ比例することが報告されており⁽⁸⁾、EBSDデータからGN転位密度をPantleonらのモデル⁽⁹⁾を用いて算出した。図中に四角で囲んだ領域のGN転位密度 (単位: $\times 10^{14} / \text{m}^2$) を示す。G1, G2, G3では、レーザー照射したがレーザー走査跡で値が大きく、溶融池のエッジ部分に近いところでは値が小さい。一方でフラットトップレーザーではKAMマップでレーザー走査跡を確認できなかった。フラットトップレーザーを用いた場合、ガウス分布レーザーに比べてGN転位密度の値が小さい。造形中に生成するひずみと残留応力は、各レイヤーで往来するレーザー照射部の熱サイクルが影響し、その繰り返し数が多いほどひずみが増大する⁽¹⁰⁾。ガウス分布レーザーは溶融池が深く、フラットトップレーザーよりもレイヤーに影響する積層方向の領域が広く、造形中、各レイヤーの熱サイクルが増大することが考えられる。さらに、前述のとおり、ガウス分布レーザーの照射では半楕円形の溶融池が形成するが、溶融池のレーザー走査跡 (センターライン付近) で凝固セルがぶつかり、大角粒界を形成し、その部分でのひずみは大きい⁽¹¹⁾。フラットトップレーザーでは溶融池が平面状であるため、優先成長する凝固セルが

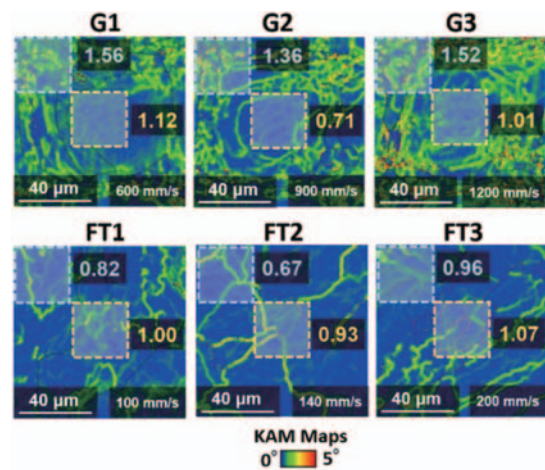


Fig. 7 Kernel average misorientation (KAM) maps of G1, G2, G3, FT1, FT2 and FT3 specimens.

同じ方向であり、ひずみが分散する⁽²⁾。フラットトップレーザを使用した造形体で大角粒界の形成が抑えられるのは、この生成ひずみが小さいことも理由の一つとして考えられる。GN転位密度とレーザ走査速度の関係については、それらの相関はないものの、Fig. 7に示す通り、集合組織の結晶方位が比較的揃っているG2の溶融池エッジ部とFT2全体において、それぞれG1とG3、FT1とFT3と比較して、わずかに値が小さいように見受けられる。

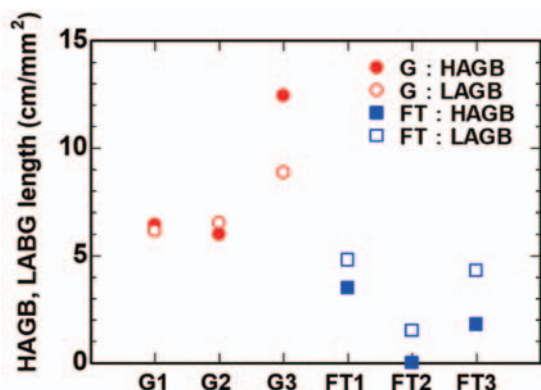


Fig. 8 High and low angle grain boundaries (HAGB, LABG) lengths of G1, G2, G3, FT1, FT2 and FT3 specimens.

3.3 単結晶構造の形成

Fig. 3とFig. 4で示した造形方向に垂直な面のG1～G3, FT1～FT3の大角粒界と小角粒界の長さをFig. 8に示す。フラットトップレーザを使用した場合ではガウス分布レーザに比べて小角粒界と大角粒界の形成が抑制される。また、それぞれのレーザにおいて、集合組織の結晶方位が揃っているほど小角粒界長さや大角粒界長さの値は小さい。つまりG2の値はG1, G3よりも小さく、FT2の値はFT1, FT3よりも小さい。FT2の大角粒界長さはゼロであり、単結晶構造であることがわかる。本研究では造形ステージにSUS304プレートを使用しており、造形開始初期は、高さ6 mmほどまで<100>と<110>方位の結晶粒の選択が起こっている。

3.1節の集合組織形成の議論を踏まえ、単結晶化には下記の2つの条件を満たす必要があると考えられる。

(a) レーザ走査中、溶融池が安定な形状を維持し、溶融池のYZ面の固液界面で凝固セルの成長方向が造形方向に近く、造形方向と凝固セルの成長方向の角度差がある範囲内に入る。

(b) スキャンストラテジーでレイヤー毎の走査方向の回転角度は90°の倍数である(例えば180°)。

(a)で「<100>凝固セルの成長方向が造形方向に近くなる」としたが、レーザ走査速度が速い場合は集合組織の結晶方位が<100>に近づくものの、ランダムな結晶方位の細かい結晶粒が出現する。しかし、(a)と(b)は基本的に結晶粒成長の第一方向(造形方向)と第二方向(XY面内方向)に関する条件である。

造形中、レーザ走査により熱源がXY面を移動し、結晶成長方向は造形方向と完全に一致しない。フラットトップレーザを用いた造形では、溶融池の形状が平面状に近づくにつれ、YZ面での結晶粒成長方向が造形方向に近くなるため、XZ面での造形方向と結晶成長方向のずれが最終的な結晶粒の成長方向の和と造形方向のずれの大部分を占めると考えられる。

単結晶の種結晶を用いない本研究では、上記の通り、造形開始初期に結晶粒の選択(grain selection)を経て単結晶に成長する。一方向凝固精密 castingでは、溶湯がチルプレートに接触する底面で不均質核生成により多数の結晶粒が生成し、鋳型を低温室に引下げることでデンドライトが上方方向に成長する。その際、セクターと呼ばれる螺旋階段状の部分で凝固フロントが通過して、柱状晶の一つが物理的に選択されて、単結晶に成長する。このセクターで成長する結晶粒をあらかじめ選択することはできず、最終的に残った結晶粒のXY面(引き上げ方向に垂直な面)の結晶方位を前もって選択することはできない。本研究では、XZ面において、造形方向と温度勾配が最大となる方向に角度差を持った何層ものレイヤーが積み重なる(Fig. 6(b))。その角度差に従って凝固セルが成長していく過程で<100>に近い方位の結晶粒が選択されて、単結晶になると考えられる。この角度の範囲については今後の課題である。

同じレイヤー内でレーザをハッチスペースの距離を空けて平行に走査していくが、YZ面の溶融池外側(Fig. 6(c))では、その前に凝固したレイヤーの結晶構造から造形方向と垂直面内方向にエピタキシャル成長を起こしていると考えられる。これはガウス分布レーザによる造形でも確認されている⁽¹⁾。従って、造形方向とそれと垂直面内方向で四面体の結晶方位が決まっており、それをエピタキシャル成長しながらZ方向に成長していく。つまり、造形が次のレイヤーに移る際には下部の四面体構造(面心立方格子)の結晶方位と一致するように走査方向を回転させなければ、単結晶格子の連続性が途切れる⁽⁴⁾。従って、レイヤー毎の走査方向の回転角度は90°の倍数であることが必要である。この走査方向の回転角度の影響については詳細な実験的検証が期待される。

4. まとめ

これまで電子ビームの粉末床溶融結合法で単結晶造形が報告されていた。本研究ではフラットトップレーザを用いたレーザ方式で純ニッケル単結晶を造形し、レーザ走査速度が集合組織の形成、GN転位密度、大角粒界長さに及ぼす影響を調査した。また、単結晶の造形に必要な条件について考察した。

フラットトップレーザを用いた造形においてレーザ走査速度が速くなると<110>集合組織から<100>集合組織に変わる。しかし、さらに速度が大きくなると、<100>に近い集合組織が増加するが、漂遊結晶粒が出現する。

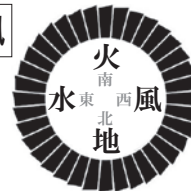
集合組織の結晶方位が揃う条件において、GN転位密度が最小になり、大角粒界長さがほぼゼロになるとともに、単結晶構造が得られた。フラットトップレーザを用いて単結晶を造形した条件では溶融池形状がYZ面で平面状になり、XZ面における造形方向と結晶成長方向のずれは結晶粒の選択に大きく寄与すると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(三島 良直 プログラムディレクター)の一環で実施されました。物質・材料研究機構の鈴木大氏に造形をサポートしていただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 石川毅, 越智大介, 原田広史, 小林敏治, 横川忠晴, 湯山道也, 川岸京子, Additive ManufacturingによるNi基単結晶超合金の製造, 日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集 (2016), pp. 187-190.
- (2) Chen, J., Schwarze, D., Niendorf, T., Single crystal microstructure built by Selective Laser Melting, Lasers in Manufacturing Conference 2017 (2017).
- (3) Chauvet, E., Tassin, C., Blandin, J.J., Dendievel, R., Martin, G., Producing Ni-base superalloys single crystal by selective electron beam melting, Scripta Materialia, Vol. 152, (2018), pp. 15-19.
- (4) Fernandez-Zelaia, P., Kirka, M.M., Rossy, A.M., Lee, Y., Dryepont, S.N., Nickel-based superalloy single crystals fabricated via electron beam melting, Acta Materialia, Vol. 216, (2021), No. 117133.
- (5) Gotterbarm, M.R., Rausch, A.M., Körner, C., Metals, Vol. 10, (2020), No. 313.
- (6) Jodi, D.E., T. Kitashima, T., Koizumi, Y., Nakano, T., Watanabe, M., Manufacturing single crystals of pure nickel via selective laser melting with a flat-top laser beam, Addit. Manuf. Lett., Vol. 3, (2022), No. 100066.
- (7) Higashi, M., Ozaki, T., Selective laser melting of pure molybdenum: Evolution of defect and crystallographic texture with process parameters, Materials and Design, Vol. 191, (2020), No. 108588.
- (8) Sun, S.H., Hagihara, K., Ishimoto, T., Suganuma, R., Xue, Y.-F., Nakano, T., Comparison of microstructure, crystallographic texture, and mechanical properties in Ti-15Mo-5Zr-3Al alloys fabricated via electron and laser beam powder bed fusion technologies, Additive Manufacturing, Vol. 47, (2021), No. 102329.
- (9) Marc Dimter, Ralph Mayer, Ludger Hummeler, Rainer Salzberger, Juha Kotila, Tatu Syvanen, Method and device for manufacturing a three-dimensional object, US 2008/0241392 A1.
- (10) Ferro, P., Meneghello, R., Savio, G., Berto, F., A modified volumetric energy density-based approach for porosity assessment in additive manufacturing process design, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 110, (2020), pp. 1911-1921.
- (11) Ishimoto, T., Hagihara, K., Hisamoto, K., Sun, S.H., Nakano, T., Crystallographic texture control of beta-type Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy by selective laser melting for the development of novel implants with a biocompatible low Young's modulus, Scripta Materialia, Vol. 132, (2017), pp. 34-38.
- (12) DuPont, J.N., Fundamental of weld solidification, ASM Handbook, Vol. 6A, (2011), pp. 96-113.
- (13) Jadhav, S.D., Dadbakhsh, S., Goosens, L., Kruth, J-P, Van Humbeeck, J., Vanmeensel, K., Influence of selective laser melting process parameters on texture evolution in pure copper, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 270, (2019), pp. 47-58.
- (14) Wei, H.L., Elmer, J.W., DebRoy, T., Crystal growth during keyhole mode laser welding, Acta Materialia, Vol. 133, (2017), pp. 10-20.
- (15) Sun, S.H., Ishimoto, T., Hagiwara, K., Tsutumi, Y., Hanawa, T., Nakano, T., Excellent mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel with a unique crystallographic lamellar microstructure via selective laser melting, Scripta Materialia, Vol. 159, (2019), pp. 89-93.
- (16) Zhang, Y., Zhang, J., Modeling of solidification microstructure evolution in laser powder bed fusion fabricated 316L stainless steel using combined computational fluid dynamics and cellular automata, Additive Manufacturing, Vol. 28, (2019), pp. 750-765.
- (17) Wang, G., Ouyang, H., Fan, C., Guo, Q., Li, Z., Yan, W., The origin of high-density dislocations in additively manufactured metals, Materials Research Letters, Vol. 8, (2020), pp. 283-290.
- (18) D.P. Field, P.B. Trivedi, S.I. Wright, M. Kumar, Analysis of local orientation gradients in deformed single crystals, Ultramicroscopy, Vol. 103, (2005), pp. 33-39.
- (19) Pantleon, W., Resolving the geometrically necessary dislocation content by conventional electron backscattering diffraction, Scripta Materialia, Vol. 58, (2008), pp. 994-997.
- (20) Mukherjee, T., Zhang, W., DebRoy, T., An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing, Computational Materials Science, Vol. 126, (2017), pp. 360-372.
- (21) Agarwal, G., Kumar, A., Richardson, I.M., Hermans, M.J.M., Evaluation of solidification cracking susceptibility during laser welding in advanced high strength automotive steels, Materials and Design, Vol. 183, (2019), No. 108104.



ウズベキスタンにおける ガスタービン・コジェネレーション設備の建設プロジェクト Construction Project of the Gas Turbine Cogeneration System in Uzbekistan



大竹 伸明*¹
OHTAKE Nobuaki

キーワード：ガスタービン，コジェネレーションシステム，効率

Key Words：Gas Turbine Cogeneration System, Efficiency

1. はじめに

東北電力は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）からの受託事業として、ウズベキスタン共和国（以下、ウズベク）において、「省エネモデル事業」を実施した。同国において、我が国が「NEDO省エネモデル事業」を実施するのは本件がはじめてであった。

省エネモデル事業は、日本政府とウズベク政府の共同事業として、2009年7月に両国間で基本協定書を締結し、老朽化した既設の熱電併給所に、ガスタービン・コジェネレーション設備（以下、GTCS）を導入し、既設の蒸気タービンと組み合わせて高効率の発電を行ったものである。

具体的には、首都タシケント市内にあるタシケント熱電併給所において、既設設備に加え、新たにガスタービン（出力27,000kW）と排熱回収ボイラで構成する高効率GTCSを導入したものである。東北電力は、ガスタービンなどの機器の設計・製作・輸送を行うとともに、ウズベク側が実施する建設工事、試運転・実証運転に対して技術指導を行った。

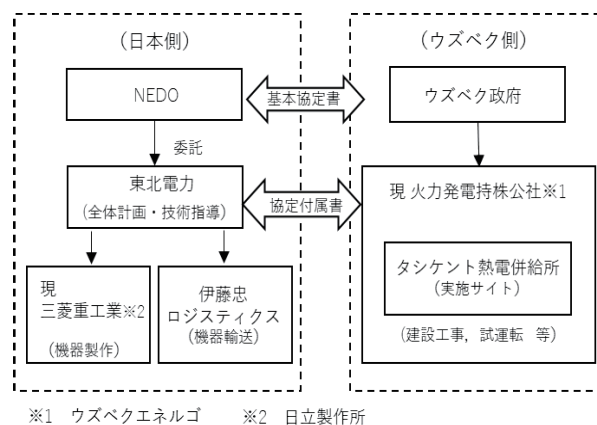
2008年度に本プロジェクトの実施可能性調査（以下、FS）を実施後、2009年8月にウズベク側実施事業者である火力発電持株公社・旧ウズベクエネルギーとの間で、実証事業に必要な契約（協定付属書）を締結した上で、詳細な協議や現地調査などを重ねて、2011年度に土木工事着工、2013年度に運転開始し、FSから延べ6年間かけて実施したプロジェクトである。

Fig. 1に本プロジェクトの契約形態と体制図を示す。

なお、東北電力は、2002～2006年度にカザフスタン共和国（以下、カザフ）ウラルスク市において、同様の事業をNEDOから受託して実施しており、こうした経験を活かしながら、ウズベクにおける初めてのGTCSの導

入、かつ省エネルギーにも貢献できたと考えている。

本稿では、プロジェクトの概要・建設工事およびGTCSがウズベクにも普及した実績などについて、カザフでの知見が活かされた事例を織り交ぜながら紹介する。



※1 ウズベクエネルギー ※2 日立製作所

Fig. 1 本プロジェクトの契約形態と体制図

2. プロジェクトの概要

2.1 実施地点とその特徴

本プロジェクトの実施地点は、ウズベクの北東部にある首都タシケントのタシケント熱電併給所（Fig. 2）で、実施サイトの既設設備は火力発電持株公社・旧ウズベクエネルギーが運営している。

タシケント熱電併給所は、1938年より運転を開始し、5缶の蒸気ボイラがあり、近隣工場へ蒸気を送っている。また、7缶の温水ボイラがあり、暖房および給湯用として市内居住区へ温水を供給している。さらに、蒸気ボイラの発生蒸気の一部は発電用として用いられ、系統への電力供給を行っている。重要なインフラ設備ということもあり、入退構は厳重なセキュリティ確認を行い、構内の立哨警備員はライフル銃を装備していた。

ウズベクは、中央アジアに位置し、カザフ、キルギス、タジキスタン、トルクメニスタン、アフガニスタンの5つの内陸国に囲まれている世界でも2カ国しかない二重

原稿受付 2023年2月8日

*1 東北電力(株) 八戸火力発電所
〒039-1101 八戸市大字河原木字宇兵工河原1番地1



Fig. 2 タシケント熱電併給所

内陸国であり、海へ出るためには2つの国境を越える必要がある。全国土面積は、約45万平方キロメートルと日本の約1.2倍の面積を持ち、天然ガス、石油、石炭、ウラン等の豊富な地下資源に恵まれており、今後発展していくことが期待できる地域であるが、当時はインフラの能力不足で冬になるとガスが足りなくなり、停電も発生するような状況であった。

Fig. 3は、本プロジェクトの実施地点と完成した発電プラント全景である。

2.2 現地調査・協議

本プロジェクトの第一段階として、2008年度にFSを

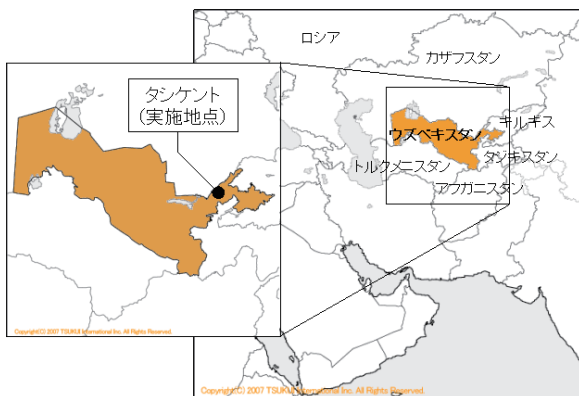


Fig. 3 実施地点と完成した発電プラント全景

実施した。

内容は、タシケント熱電併給所の既設設備の状況およびウズベクの法制度の調査、GTCSの基本システム設計、協定付属書の原案となる詳細実施計画の策定・立案を実施した。

既設設備は、50年以上運用し老朽化していたが、メンテナンスを丁寧に行いながら設備を維持している印象を持った。建物・基礎などは、1966年のタシケント大地震を経験しているが特に大きな被害はなく、これは、第二次世界大戦前で爆撃を想定して建屋等を頑丈に設計したものと考えられる。

法規制については、首都に立地している設備ということもあり環境規制が特に厳しく、煙突の高さは、環境アセスメントの結果を踏まえて、当初計画から2倍程度高くするなど、ウズベク側所掌設備のコスト増要因となっていた。近隣にはマンションもあり、住民への説明会も行われ、活発な質疑応答や関係機関からのコメントがあったが、特に反対意見はなかった。

協定付属書には、両国の設備・工事所掌や取合い条件も記載するが、カザフでの同プロジェクトの知見を踏まえ、所掌が不明確など、相手国のプロジェクトコストが変動し、場合によっては資金不足で工事が停滞する懸念もあることを念頭に、数十回にわたって設計・工事機関と協議を重ねた。

これらの協議において、カザフの同プロジェクトの導入実績があったことから、初期の段階から、設計等の打合せに活用できたので細部を詰めることができた。

結果として、ウズベク側の費用は、当初計画より約3倍に増額となったが、投資プロジェクトの合理性を示し、早い段階で審査関係機関への承認を得ることができた。

協定付属書締結に係る協議 (Fig. 4) においては、使用言語や設備の規格、設備認証、通関手続き等で協議に時間を要したが、使用言語は、英語を正式とし、ロシア語・日本語は参考扱いとすることで、設備の規格等は国際規格とすることで合意し、通関手続きの詳細は別途協議事項とすることで、2009年8月に締結できた。



Fig. 4 関係者との協議状況

2.3 設計

本プロジェクトの実施について、ウズベク大統領令により、火力発電持株公社・旧ウズベクエネルギーに対して、ウズベク政府からの工程前倒し要請が強く、そのため日本側からの設計データの早期提示を強く求められた。一方、日本側の機器設計・発注を進めるためには、ウズベク側の各種条件の確約を得ないと進まないという状況に陥っていた。

カザフの同プロジェクトの経験から、設計データの更新（図面更新）という概念がなく、最終版とした図面で最後まで建設を行うという考え方が通例であることを認識していたことから、設計データ提示は慎重に行っていたが、最終版図面の完成を待っている、工程を前倒しすることは不可能であった。

少しでも設計を早く進めないと前倒しどころか遅延する可能性もあることから、ウズベク側の設計機関等の協力のもと、図面管理を徹底することを前提で先に進めることにした。その分、図面改定には設計機関と連携とハードな折衝が必要であった。

さらに、本プロジェクトは、ウズベク国内において初めて日本製の発電設備を導入するものであり、設備設計に当たってはさまざまな困難があり、早期にデータを提示してもその内容を理解してもらうには時間を要した。その一つが設計基準の違いであった。

ウズベク側は、旧ソ連時代のGOSTなどの規格に基づいて話を進める一方で、日本側の提供設備は、国際規格であることから、例えば、配管であればANSI規格にある配管材質・配管寸法表を提示するが、そのような規格はみたこともなく、「SUS, STPG」といってもその材質はどのようなものかわからない、「1B」といってもどの位のサイズかわからないので、一からの説明が必要であった。

日本側は、ガスタービンなどの主要機器の設計・製作・輸送を行うが、ウズベク側は、土木基礎・建築工事・機器据付工事のみならず、補助機器（主要変圧器、純水処理装置、水噴射水昇圧設備他）発注などをする必要があったことから、その確認も合わせて行った。

なお、本来、ウズベク側の発注設備設計・各種許認可取得は、ウズベク側の所掌であるが、発電設備の建設経験者がほとんどいない状況（いても優秀な人はヘッドハンティングされいつのまにかいなくなる）から、設計担当箇所との協議は、東北電力が前面に立って進めた。このような折衝はすべてロシア語⇄日本語の通訳を介して実施することから、通訳も技術的内容を正しく理解しないと伝わらないため、その習熟にも労力がかかっていた。

3. 建設工事

3.1 プロジェクト工程

本プロジェクトにおける許認可手続き・建設工事は、ウズベク側で実施した。プロジェクトの実績工程は、

Table 1のとおり。

Table 1 プロジェクト実績工程

主要工程	2008年度	2009年度	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度
			▼基本協定書締結 ▼協定付属書締結	☆東日本大震災 ▼土木着工		試運転完了▼ ▼機械着工 ▼運転開始▼
FS	■					
機器設計・調達		■				
機器製作			■			
機器輸送				■		
許認可手続き			■			
土木建築工事				■	■	
機器据付工事					■	
試運転						■
実証運転						■

3.2 機器輸送

機器の輸送は、東北電力が輸出事業者として、外国為替および外国貿易法の規定に基づく輸出・役務取引許可対応や安全保障貿易管理体制の整備などの対応を行った。

機器輸送ルートについては、二重内陸国内にある実施サイトまでの輸送ということもあり、複数ルートの調査（ロードサーベイ等）を行い、カザフの同プロジェクトにおける大型機器の重量物かつ形状等による橋梁通行制約等への対応など、知見も考慮し、トルクメニスタンを通する輸送ルートとした。

ガスタービン本体については、2011年6月、日立港から横浜港への内航船により第一便の輸送が開始された。その後、横浜港からトルコのデリンス港まで海上輸送、デリンス港からトルクメニスタンのトルクメンバシ港まで河川輸送、トルクメンバシから実施サイトまで陸上輸送で、横浜港からは約5ヶ月で実施サイトに到着した。河川輸送は、冬季凍結期間中は通行不可になるなど制限があったが、なんとか回避できた。

なお、ガスタービン本体は、日立製作所（現三菱重工業）で出荷準備中に東日本大震災（2011年3月11日）に見舞われ、地震被害が懸念されたが、被害は限定的であったことから、大工程に影響を与えない範囲で輸送することができた。

主要機器の現地搬入にあたっては、現地受入れ側も不慣れであったことから、作業が錯綜したが、輸送会社等の現地指揮が適切な現地指揮のおかげで、無事終了できた。Fig. 5に発電機の移送状況を示す。



Fig. 5 発電機移送状況

3.3 機器の保管

東北電力手配の発電設備は、ほぼ予定どおりタシケントに到着したが、据付工事の進捗状況から、据付するまで現地にて長期間の保管が必要となったことから、防犯、防湿面も考慮しすぐに開梱せず、梱包に設置した加速度計の指示が許容値以内であったことも踏まえて、輸送用に梱包した状態で、据付までの期間、倉庫にて保管を行った。

電気品の保管については結露防止のため空調された倉庫内保管を要求したが、現地でこうした設備を確保することは事実上困難であったので、倉庫内の環境を確認するため温・湿度計を設置し、計測に立会いを行った。

このように保管を行った結果、電気・機械品とも保管の影響はなく、顕著な不具合は見られなかった。

3.4 土木建築・機器据付工事

土木建築工事は、2011年7月の開閉所基礎工事の開始（土木着工）を皮切りに、本館基礎工事および機械基礎工事が進められ、2012年5月から排熱回収ボイラのアンカーボルト位置決め作業等の工事が行われた。工事を少しでも早く完了できるように、着手可能な開閉所基礎工事から1か月程度前倒しで始まったが、建築工事は計画より遅れ、結果して、試運転直前の2013年5月まで続けられた。

機器据付工事は、2012年8月からガスタービン、発電機、減速機などのパッケージ据付が開始された。施工業者や据付クレーン（250t→150t）などの急遽予定変更および据付時の予期せぬトラブル、ウズベク側施工の基礎と日本側所掌設備との干渉など様々な問題があったが、両国の間で、折衝・調整することで完了することができた。

Fig. 6にガスタービンの据付状況を示す。

この後、アライメント調整、センタリング、配管据付工事を順次行い、試運転までに電気制御設備・ケーブル類の据付工事が行われた。

排熱回収ボイラも2012年8月からダクト、ボイラモジュール等の設置作業を行った。東北電力からは大型クレーン使用を推奨したが、手配は進展せず、250tクレー



Fig. 6 ガスタービン据付状況

ンと160tクレーンの2台を使用して実施した。Fig. 7にボイラドラムの設置作業状況を示す。その後、配管・弁類などの据付を実施したが、配管などの溶接について、十分な技量を持った技師はなかなか手配できず苦労したが、大口径の配管については、唯一1名だけ信頼できる技師がおり、施工の大半はその技師頼みであった。



Fig. 7 ボイラドラムの設置作業状況

3.5 現場管理

建設工事における安全・品質管理などを行うため、現地工事開始に伴い、1ヶ月程度の交代出張による数名の常駐体制を組み、2011年5月に実施サイト内に東北電力タシケント分室を設置し、建設工事に対する技術的助言、施工管理の強化を図った。

本事業の機器据付工事における工程管理は、据付工事を実施するウズベク側の責任であったが、先例のカザフでの同プロジェクト同様、詳細な工事工程表を作成して、工程管理を行うという慣習がなかった。そのため、全体工程管理については、東北電力が工事工程表や資材管理表を作成することで工程管理を支援したが、ウズベク側の慣習からか、工事管理の意識は低いままであった。

現場安全管理については、現場巡視時に安全帽・手袋・安全帯着用 of 徹底等の基本事項について、随時安全指導を行った。

結果して、日々の安全への取り組みの積み重ねにより、日本関係者、ウズベク関係者とも一人のけが人を出すことなく建設工事を終了できた。

3.6 試運転・実証運転

2013年5月に主要変圧器系統受電を行い、補機関係の試運転を開始したが、遅れていたウズベク側所掌のケーブル・配管布設工事や配管洗浄などを並行して進めるといった錯綜した状況での試運転であった。

試運転期間中は、各種トラブルが発生し、予定より遅れが出ていたところに、政府レベルで竣工式開催日程のみが決定されたことにより、現地関係者に圧がかかった。そのような中、メーカー技術指導員をはじめ工事関係者の努力により、2013年8月にプラント性能試験を行い、所定の性能を確認でき、竣工式を無事迎えることができ

た。

その後、新設設備が連続的に性能を維持しながら安定した運転が継続できることを確認するため、2カ月間実証運転を実施した。燃料ガス中の異物除去が不十分な面もあり、燃料ガス圧縮機入口圧力確保が不十分な時期があったり、一部の機器に不具合が認められ停止した期間もあったが、運転時間全体で見たプラント性能は当初計画どおりとなった。

4. おわりに

本プロジェクトのFS実施と同時期に、ウズベク国内で火力発電所建設プロジェクトも円借款案件で動き出そうとしていたが、入札の遅延等により期限切れになりそのような状況であった。

また、他の分野のプロジェクトは、地元の会社（技術レベルが不十分）を使い工事がストップしてしまう例が多く、ウズベク国内でのプロジェクトが進まない状況であった。日本国大使館へ訪問した際には、道路などの案件は、日本の顔は見えにくいだが、発電事業に関してはアピール性が高いので、プロジェクトを成功させて、日本のプレゼンスを上げてほしいとの話があった。

こういった状況の中、本プロジェクトは、FS開始から6年間（2008～2013年度）の年月を経て、無事終了できたことに加えて、その後の設備の稼働実績等が評価され、2022年に円借款により、同サイトへ日本の同型ガスタービンの採用が決定しており、日本の省エネルギー技術の普及にも寄与することができた。

このほか、本プロジェクト以降に、ウズベクのナボイ火力発電所、タリマルジャン、トゥラクルガン火力発電所、シルダリア火力発電所などに、日本製のガスタービン設備が次々と導入されており、電力の安定供給およびエネルギーの効率化にも日本の技術が貢献していると感じている。

本プロジェクトが成功した背景の一つ目は、ウズベクが親日国であることに助けられたと考えている。

オペラとバレエで有名なタシケント市のナボイ劇場（Fig. 8）は、第二次世界大戦後、抑留されていた数百名の旧日本軍兵士が建造に従事したもので、完成後の1966年のタシケント大地震の際、約78,000棟もの建物が倒壊したが、ナボイ劇場は無傷であり、市民の避難場所としても機能した歴史がある。強制労働にもかかわらず、見事な建造物を造り上げた日本人への信頼は厚く、記念プレートにもその功績が刻まれていた。建設当時は、「日本人の捕虜が建てた」と書かれていたプレートがあったようだが、新しい大統領は「彼らは恩人だ、間違っても捕虜と書くな」と命令して、「数百名の日本国民がナボイ劇場の建設に参加し、完成に貢献した」と書き直されたとのことである。（Fig. 9）

二つ目は、カザフでの同プロジェクトの成功事例があったことも大きかった。



Fig. 8 オペラ・バレエ・ナボイ劇場

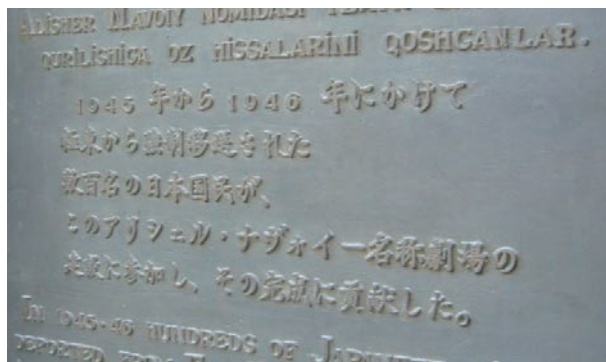


Fig. 9 劇場建設にあたった日本国民の功績をたたえた記念プレート

本プロジェクトで採用した既設熱電併給所の蒸気タービンにガスタービンを組み合わせ合わせて高効率発電を行う本事業スキームは、カザフでの同プロジェクトで提案したものであり、同じ中央アジアでプロジェクトを完遂させた実績なくしては、本プロジェクトを計画通りに実施することはできなかったであろうと感じている。カザフの同プロジェクト関係者に感謝する。

最後に、本プロジェクトの実施にあたりご指導いただいたNEDO殿、本事業にご協力いただいた日立製作所（現三菱重工業）殿、伊藤忠ロジスティック殿をはじめとする関係者の皆様、そしてウズベク国政府をはじめとするウズベク側関係者にも改めて感謝を申し上げます。

参考文献

- (1) 二本柳保, 奥野敏彦, 平尾総悦, 松崎裕之, 千葉秀樹, カザフスタンにおけるガスタービン・コジェネレーション設備の建設, 火力原子力発電技術協会誌, Vol. 59, No. 9 (2008), pp. 31-36.
- (2) 浦井研二, 須田裕之祐, ウズベキスタンの電力事情～豊富な地下資源と環境対策～, 火力原子力発電技術協会誌, Vol. 71, No. 9 (2020), pp. 375-380.
- (3) 三菱重工業株式会社 ウズベキスタンのタシケント熱電併給所向けにH-25形ガスタービン2基を受注
<<http://www.mhi.com/jp/news/22033003.html>>

日本ガスタービン学会創立50周年記念行事報告

創立50周年記念事業実行委員会

1. はじめに

1972年に創立された日本ガスタービン学会は2022年に創立50周年を迎えた。学会では2020年に50周年記念事業実行委員会を立上げ、主に8つの事業を企画・実施している。すなわち(1)記念行事(式典・講演会)実施、(2)若年層向けガスタービン入門資料制作、(3)「ガスタービン工学」改訂版発行、(4)学会誌特集号発行、(5)学会誌表紙ロゴ掲載、(6)学会50年史作成、(7)功労賞表彰、(8)永年賛助会員感謝状贈呈、の8事業である。

2022年も新型コロナウイルスの感染拡大が相変わらず繰り返される状況であったが、秋になって比較的落ち着いたため、11月8日(火)午後15時(1)の記念行事を実施することができた。当日のプログラムは表1の通りである。

表1 記念行事次第

日本ガスタービン学会創立50周年記念行事
日時：2022年11月8日(火) 15:30～20:00
会場：東京大学 武田ホールおよびオンライン
プログラム：

1. 記念式典 15:30～16:30

- (1) 実行委員長挨拶
- (2) 会長挨拶
- (3) 来賓祝辞
日本機械学会会長殿
日本航空宇宙学会会長殿
ターボ機械協会副会長殿

- (4) 祝辞披露
- (5) 功労者紹介
- (6) 永年賛助会員紹介
- (7) 記念事業紹介

2. 記念講演 16:30～18:00

- (1) 航空エンジン動向
盛田英夫氏 (IHI)
- (2) 産業用ガスタービン動向
伊藤栄作氏 (三菱重工)

3. 祝賀パーティー 18:30～20:00

2. 記念式典

11月8日15:30から16:30まで東京大学の武田ホールおよびZoom会議室を用いて記念式典がハイブリッド形式で開催された。司会は山本誠副会長が担当した。参加者は117名(会場72名、オンライン45名)であった。ハイブリッドのためもあり、多くの会員に参加いただくことができた。

開会にあたり、記念事業実行委員会の渡辺紀徳実行委員長から挨拶があり、記念行事の実施経緯や会員諸氏の協力に対する謝意などが述べられた。続いて福泉靖史会長より学会を代表して挨拶があり、ガスタービン・エネルギーに関連する社会状況や学会の会員数減少と学会の対応、今後の展望などが話された。



写真1 記念式典会場(東京大学 武田ホール)



写真2 司会(山本誠 副会長)



写真3 実行委員長挨拶(渡辺紀徳 委員長)



写真4 会長挨拶（福泉 靖史 会長）

続いて他学協会からの来賓による祝辞をいただいた。まず、日本機械学会会長・加藤千幸殿（東京大学）より、当学会の公益社団法人としての活動に対する敬意が示され、また、会員の減少は他の学協会も共有する問題であり、将来に向けて協力して対策を講じたい旨のお言葉をいただいた。続いて日本航空宇宙学会会長・鈴木宏二郎殿（東京大学）から、当学会が創立当初から国際活動に重点を置いて継続的に活動していることへの賛辞をいただき、また、今後の航空機技術の進展に鑑みて、より強い協力関係を構築していきたい旨のコメントをいただいた。最後にターボ機械協会副会長・宮川和芳殿（早稲田大学）からは、当学会とターボ機械協会には共有する技術課題が豊富にあり、今後の地球環境への対応技術などを見据えて、両者がより深く協力していくことが重要であるとお言葉をいただいた。

次に祝辞披露として、米国機械学会（ASME）のCostabile会長、当学会のInternational Advisory Committee（IAC）委員でLeipzig University HannoverのSeume教授、韓国流体機械学会（KSFM）のKim会長、IAC委員でIndian Institute of Technology BombayのPradeep教授、および中国工程熱物理学会（CSET）代表で中国科学院のZhu教授からの祝辞が司会の山本副会長により読み上げられた。いずれも本会50周年を祝い、これまでの協力関係を踏まえて今後の協力の進展を期する内容となっていた。

引き続き福泉会長より、これまで本会に顕著な貢献があった方々に功労賞を贈呈する旨の趣旨説明があり、対象となる40名の方々が紹介された。また賛助会員制度が創設された当時から継続して協力いただいている賛助会員に永年賛助会員として感謝状をお贈りすることが説明され、対象となる19社が紹介された。詳細は後述する。

最後に、渡辺実行委員長より50周年記念事業全体の内容が紹介され、滞りなく記念式典が閉会となった。

3. 記念講演

創立50周年記念行事の一環として、記念式典と同じ東京大学武田ホールおよびZoom会議室において16：30から18：00まで記念講演会が開催され、航空エンジンおよび産業用ガスタービンのそれぞれについて技術動向や展

写真5 来賓祝辞
（一般社団法人日本機械学会会長 加藤 千幸 殿）写真6 来賓祝辞
（一般社団法人日本航空宇宙学会会長 鈴木 宏二郎 殿）写真7 来賓祝辞
（一般社団法人ターボ機械協会副会長 宮川 和芳 殿）

望に関する2件の講演がなされた。当学会会員以外の参加も広く受け付けることとして実施され、約190名の参加者があった。

まず(株)IHI 航空・宇宙・防衛事業領域長の盛田英夫氏より「航空機エンジンの発展と今後の動向～脱炭素化への対応と我が国の総合力・競争力強化に向けて～」と題して、航空エンジン開発の歴史と現状が広範に俯瞰され、それを踏まえて今後の技術開発におけるわが国の技術力・競争力の向上に向けた提言がなされた。航空推進システムとしてガスタービンが引き続き重要と認識される中、脱炭素に向けて更に燃料消費を削減する高性能化が極めて重要であることが強調された。また、電動ハイブリッドやデジタル技術などの新たな技術の適用が進め

られており、この過程で新しいサプライチェーンの構築や、ルール作りへの着実な参画が重要で、発展のチャンスでもあることなどが示された。これまでの技術開発で日本のガスタービン技術は着実にレベルアップしており、国際共同開発でも日本の技術が多く採用され、また、国産戦闘機用エンジンも視野に入る段階であるとの紹介があった。更なる飛躍のために産官学の一層の連携が必要ということで講演が締めくくられた。

続いて三菱重工業(株)CTOの伊藤栄作氏より「産業用ガスタービン 開発と展望」と題して、同社のガスタービン開発の歴史が概括された後、脱炭素に向かう最近の技術動向と開発活動および将来展望が紹介された。ムーンライトプロジェクトでの高効率ガスタービン開発から始まり、大型ガスタービンの分野で世界トップシェアを獲得した現在に至るまでの研究開発の歴史が網羅的に示され、流体、燃焼、伝熱、材料、製造など個別分野の技術の進展も詳しく解説された。一方、カーボンニュートラルへの技術動向について、水素ガスタービンの技術開発や、CO₂回収技術開発の内容が紹介された。脱炭素の流れの中で、ガス焚きコンバインドサイクルの需要が増加しており、水素混焼可能性が要件となること、再生可能エネルギーのバックアップとしてガスタービンコンバインドが必要であること、水素混焼・専焼、アンモニア利用、バイオ燃料使用などの燃料多様性が重要であることなどから、我が国のガスタービン技術が活躍する可能性の大幅な増大が期待されることとコメントが最後に述べられた。

4. 功労者・永年賛助会員の顕彰

当学会は多くの個人会員や賛助会員のご協力に支えられて50年間発展を続けて来た。

学会活動と運営への顕著な貢献を顕彰するため、創立20周年には134名、30周年には32名、40周年には39名の個人会員に功労賞が授与されている。今回はその後の10年間を含めて多大な貢献をいただいた個人会員40名の方々を対象に、記念式典において福泉靖史会長から功労賞受賞者として紹介された。受賞者の方々は、これまでの功労賞受賞者および名誉会員を除く個人会員の中から、会長、副会長、監事、理事、委員長、委員の経験回数をもとに、実行委員会で候補者を選出し、理事会で審議決定された。

学会の運営には賛助会員各社のご協力が非常に重要である。50周年では賛助会員制度が制定された当初から現在まで継続的に協力をいただいている賛助会員各社を永年賛助会員と定義し、該当する19社に感謝状を贈呈した。記念式典においては福泉会長から対象各社が紹介された。



写真8 記念講演
(株式会社 IHI 盛田 英夫 氏)



写真9 記念講演
(三菱重工業株式会社 伊藤 栄作 氏)

功労賞受賞者（五十音順、敬称略）

伊藤栄作、伊東正雄、今成邦之、岡崎正和、刑部真弘、岸部忠晴、北山和弘、木下康裕、幸田栄一、佐藤哲也、澤 徹、柴田貴範、渋川直紀、鈴木伸寿、鈴木 健、田頭 剛、高橋 徹、田沼唯士、塚原章友、寺本 進、新関良樹、西澤敏雄、幡宮重雄、原田広史、春海一佳、姫野武洋、平野孝典、福泉靖史、松崎裕之、松田 寿、松沼孝幸、村田 章、山根秀公、山本 悟、山本 武、山脇栄道、吉田征二、輪嶋善彦、渡邊裕章、渡邊啓悦

永年賛助会員（五十音順、敬称略）

(株)IHI、(株)IHIエアロスペース、ウッドワード・ジャパン合同会社、ENEOS(株)、川崎重工業(株)、島津産機システムズ(株)、ダイハツディーゼル(株)、東京ガス(株)、東芝エネルギーシステムズ(株)、日本精工(株)、日本特殊陶業(株)、日本内燃機関連合会、日立造船(株)、北海道電力(株)、(株)本田技術研究所、(株)三井E&Sマシナリー、三菱重工業(株)、(株)明電舎、ヤンマーパワーテクノロジー(株)

5. 祝賀パーティー

記念式典に引き続き、18:30より東京大学構内のレストラン アブルポアで約60名の参加により祝賀パーティーが開催された。佐藤哲也実行委員の司会の下、福泉会長の挨拶・乾杯で賑やかにパーティーが始まった。コロナ禍で懇親の場がなかなか設けられなかった中、久

しぶりに対面で話し合える機会ができ、感染拡大防止に留意しつつも大いに盛り上がるパーティーとなった。創立から50年間変わらずに続いている当学会の親密で開放的な気分が大いに発揮されるひとときであった。和やかに賑やかな会話のうちに、今後10年の一層の発展を期して、山本副会長の手締めで散会となった。

6. おわりに

記念行事は多くの方々のご尽力、ご協力で実現した。来賓の方々、講演者のお二人、そして当日参加いただいた会員の皆さんに深くお礼を申し上げます。また、学会理

事各位、事務局の皆さん、当日現場で様々な対応をいただいた東京大学の皆さんに心から感謝したい。

創立50周年記念事業はまだ継続しており、事業全体については今後の学会誌で報告する予定である。会員各位には今後ともご協力をいただけると幸いである。

日本ガスタービン学会創立50周年記念事業実行委員会

委員長：渡辺紀徳

委員：太田有，佐藤哲也，鈴木伸寿，高橋徹，新関良樹，
姫野武洋，船崎健一，松沼孝幸，山本誠

第10回日本ガスタービン学会男女共同参画推進イベント開催報告

池田 亜矢子
AYAKO IKEDA

日本ガスタービン学会では、ガスタービンおよび関連技術に携わる女性技術者同士のネットワークと、共に成長していける場を提供することを主な目的として、2016年度から活動を続けています。学生から若手技術者との交流の希望を受け、ガスタービン業界で働くイメージを持っていただくことを目的として開催した昨年度のオンラインイベントが好評であったため、今年度も引き続き「GT関連企業の業務と働き方を知る」というテーマで、学生を対象としたオンラインイベントを2022年12月14日(水)に開催いたしました。オンライン開催でしたが、21名の学生が参加して下さいました。

イベントの第一部では㈱IHI 山上氏の進行のもと三菱重工業㈱ 森川氏、川崎重工業㈱ 都留氏、㈱本田技術研究所 川澄氏、東芝エネルギーシステムズ㈱ 猪亦氏、国立研究開発法人物質・材料研究機構 池田を交えて、座談会の形態で各社の仕事と働き方について議論をしました。チャットによる質問に答えながら、各社の具体的な業務内容とカーボンニュートラルへの取り組み、また、ライフステージ別の1日のスケジュールを紹介することができました。

第二部では各社の若手技術者を囲んでのグループディスカッションの時間を設けました。2-6名ずつのグループに分かれ、自己紹介後質疑応答や意見交換を行いました。就活についての質問が多く、入社した場合の具体的な働き方、配属、キャリアパスなどに加え、コロナ禍で大きく環境が変わった在宅勤務についての質問がありました。男性の育休が取りやすいかという質問が複数あり、男性が育休を取ることが浸透している印象を受けました。また、子供を持つ・持たない場合の働き方についての質問もあり、依然として仕事と育児の両立について漠然と不安を抱えている学生がいることが分かりました。このイベントにてそのような悩みや不安を話せる場を提供することができたことは委員会としての本懐です。

イベント後のアンケート調査では、特に第二部の技術者との交流会の満足度が高く、昨年と同様に「実際に働いている人の声を聞いて良かった」、「就職活動を進める上でより理解を深められた」という回答が多くありました。「普段聞けない話を多く聞くことができた」という

コメントもあり、忌憚ない議論で多くの「生の声」を提供できたようです。良い交流の場を提供できて良かったと感じました。その他にも「男性社員の方からも育児についてお話を聞きたい」という意見もあり、委員会としても対応ができたかと考えています。いただいたご意見を振り返り、今後の企画に活かしていきたいと思えます。

男女共同参画推進イベントは、今後も会社の枠を超えた技術者のネットワークを作っていけるよう、委員会にて企画・検討してまいります。

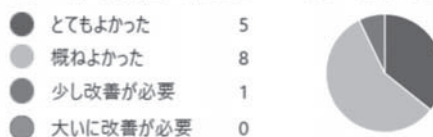
最後に、講師の皆様およびイベント参加者の皆様に深く感謝いたします。

(男女共同参画推進委員会委員)



(写真) オンラインイベントの様子

2. 第一部の各社座談会について、いかがでしたか？



4. 第二部の技術者との交流会について、いかがでしたか？



図1 アンケート結果 (一部)

第51回ガスタービンセミナー報告

泰中 一樹

TAINAKA Kazuki

第51回ガスタービンセミナーが、「ガスタービンの最新技術動向および脱炭素社会への展望」をテーマとして、2023年1月24日(火)、25日(水)の2日間にわたり、東京大学武田ホールならびにオンラインにてハイブリッド開催された。117名（うち学生26名）の方々にご参加いただき、活発な質疑応答が行われ、盛況のうちに終了した。講師には、産業用ガスタービン、航空用ジェットエンジンに関わる産学官の第一線でご活躍されている方々を迎え、8件のご講演と1件のパネルディスカッションを行った。以下に概略を報告する。

1日目は、「セッションⅠ：航空分野脱炭素化の最新動向」と「セッションⅡ-①：水素の最新技術動向」の2つのセッションが開催された。1.「国の航空機産業政策として『航空分野の脱炭素』に向けた今後の方針について」では、岩永健太郎氏（経済産業省）が、日本の政策における航空分野の方針を説明した。2.「電動化・水素化の動向を理解するための基礎」では、姫野武洋氏（東京大学）が、航空機の電動化・水素化技術の定量的な理解に必要な基礎を説明した。3.「エアラインパイロットによるCO₂削減について」では、毛利洋志氏（日本航空㈱）が、CO₂削減を目指した操縦の施策とその効果について説明した。4.「三菱重工における水素・アンモニア燃焼ガスタービンの開発状況と高砂水素パークについて」では、齊藤圭司郎氏（三菱重工業㈱）が、三菱重工業㈱での水素・アンモニアを利用した発電用ガスタービンの開発状況、および水素製造から発電までの一貫した検証が可能な“高砂水素パーク”を説明した。5.「水素航空機向けコア技術開発」では、飴雅英氏（川崎重工業㈱）が、川崎重工業㈱が取り組んでいる水素航空機の実現に向けた技術開発を説明した。

2日目は、「セッションⅡ-②：水素の最新技術動向」、「セッションⅢ：航空用ガスタービンの最新技術動向」、および「セッションⅣ：持続可能な航空燃料（SAF）の活用に向けた取り組み」の3つのセッションが開催された。6.「Hondaの水素技術開発の取組みと新領域への適用」では、針生栄次氏（㈱本田技術研究所）が、Hondaが取り組む燃料電池ならびに高圧水電解技術に加え、それらの技術展開を説明した。7.「航空機・航空エンジン安全性向上のための技術開発」では、賀澤順一氏（(国研)宇宙航空研究開発機構）が、JAXAの航空安全イノベーションハブにおける航空機や航空エンジンの研究について説明した。8.「SAFの認証取得プロセスについて」では、橋本康氏（(一財)日本航空機エンジン協会）が、SAFに関する国際認証制度取得プロセスを紹介した。

2日目の最後にパネルディスカッションが開催された。「航空輸送を持続可能にするために～Sustainable Aviation Fuel (SAF) 社会実装に向けての取り組みと課題～」をテーマとして、SAFの社会実装に向けてなすべきことを考えるべく、利用者、国家政策、技術開発、生産者といった様々な視点でSAF利用に向けた活動と今後の課題について紹介し、議論いただいた。（座長：塚田央氏（㈱IHI））。

最後に、ご多忙な中、貴重な内容をご発表いただきました講師の方々、会場の準備・運営に多大なご協力をいただきました東京大学および東京大学渡辺・姫野研究室の方々、そしてご参加いただきました皆様に、厚く御礼を申し上げます。

（集会行事委員会委員）



パネルディスカッション



会場の様子

Frans Breugelmans先生には長年にわたり当学会の活動にご貢献いただきました。1995年に設置されたInternational Advisory Committeeには最初から委員にご就任いただき、国際活動に関して数々のご助言を賜りました。2004年には名誉会員になられています。IGTCに毎回出席して下さり、時には厳しいご意見を出されつつ、会議の発展を温かく見守って下さいました。心より感謝申し上げるとともに、ご冥福をお祈り致します。

名誉会員 Frans Breugelmans 氏

2022年10月22日逝去（享年83歳）

[本会関係略歴]

1995年～2022年 International Advisory Committee委員

2004年～ 名誉会員

[略歴]

1977 - 2000 Full professor VKI

1991 - 2000 Assistant director von Karman Institute

1996 - 2004 Associate lecturer KU Leuven

2000 - 2022 Honorary Professor von Karman Institute

2004 - 2022 Prof. Emeritus University KU Leuven



追悼

追悼：Frans Breugelmans先生

長島 利夫*1

昨2022年10月22日、本学会の名誉会員でもありInternational Advisory Committee委員としても長く活躍されたFrans Breugelmans先生が急逝されました、享年83歳でした。先生はベルギー VKI (von Karman研究所) 教授として長年ターボ機械の研究教育に携わり、ISABE (エアブリージングエンジン国際会議) のAdministrative Secretaryとして関連科学技術の世界的な発展に貢献されました。航空分野ではTheodore von Karman を初代会長とする1957年発足のICAS (国際航空科学会議) が高名ですが、その推進系メンバーらにより派生した1972年創設のISABE初回マルセユ会議名誉委員会リストには仏科学アカデミー (ONERA元長官) M.Royを筆頭に、英RAS (王立航空協会) S.D.Davies会長やW.Hawthorne卿とJ.Lighthill, 米A.Ferriらが名を連ねています。爾来Frans先生はvon Karmanと直に接触した最後のVKI Profとして欧米の絆を請け負う使命を担い、ICASとの隔年相互開催や欧州・米加・アジア

豪印の3地区輪番の国際協働などISABE活動を順調に定着させ40年に及ぶSecretary重責を果たし2013年第21回ISABE@釜山にて勇退されました。

Frans先生との出会いは、小生助教授の1980年代後半、たしか元会長・高田浩之先生からお世話を申付けられ日光を案内して以来と覚えています。当時、サンシャイン・ムーンライト計画 (コジェネ) や国産ターボファン (FJR710) など国家プロジェクトのもとガスタービンへの関心が高まり、先達による1971年日本ガスタービン会議を経て当学会GTSJが産声をあげ10年余り、その国際的立ち位置を巨大なASME/IGTIはじめ欧米から学び協調しながら見定めていった重要な時期に当たります。1985年第7回ISABE@北京が中国科学院呉仲華先生の尽力により初めてアジア地区で開催された契機もあり、次のアジア開催は東京の気運が生まれ関係者間準備が進む過程でFrans先生への役割期待は大切だったと推測できますし、今更ながら親日の情に篤く世界観に通じる良き理解者に我々は巡り合えた幸運に感謝せねばと感じます。因みにISABEでは九大名誉教授・難波昌仲

原稿受付 2023年1月28日

*1 東京大学名誉教授

先生がひょっとして存命最後の創設メンバーかも知れず、1972年第1回から2009年第19回まで日本代表として尽力され、Frans先生との親睦を深めて1993年第11回@東京開催に成功されました。

Frans先生は、コロナ禍の以前まで毎年米国西海岸カリフォルニアあたりを愛用複葉機Stripes操り飛び回り英気を培ってられました。小生にはタスマニア島まで一緒に南半球を経験した懐かしい思い出が残ります。現世から解き放たれて千の風に乗る今ころは東海道五十三次富士山あたりを飛んでおられるのだろうか、飛び降り休むところは勿論故郷Diestの町、Brusselsからオランダ方向東へ60kmほど、ご両親の墓石と一緒にの筈です。そこでのご葬儀の写真では、中央の献花（白地に赤）が日本国旗を模し、親日だった先生へのご家族粋な計らいを見て取れます、また琴の音色も流された由、残念ながら小生参列は叶わなかったけれども我これまでの半生40年近くに及ぶ家族含む親睦に感謝の念が溢れて仕方ありません。さらば永遠のFrans先生、さらば我が愛する長兄よ、どうぞ安らかに！ 合掌



grave stone with parents at home Diest
墓石上の日本国旗（上側 実際は白地に赤）を模した
献花は親日家の証し

第35回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

学生及び技術者（ガスタービン初心者）を対象とした標記シンポジウムを開催いたしますので、奮ってご参加ください。

1. 日 時：2023年7月6日（木）、7日（金）
2. 場 所：東芝エネルギーシステムズ(株) 京浜事業所タービン工場
(神奈川県横浜市鶴見区末広町1-9)
3. プログラム：
 - ・ガスタービン概論
 - ・ガスタービンと流体工学／伝熱工学／燃焼工学／材料工学／制御工学
 - ・特別講演（東芝）
 - ・見学会：東芝エネルギーシステムズ(株) 京浜事業所タービン工場，タービン羽根工場，ガスタービン補修工場
4. 募集概要：
 - ・対象者：大学，高等専門学校，大学院在籍者，ならびにガスタービン初心者の社会人
 - ・定員：40名程度
 - ・教育シンポジウムの詳細および申し込み方法は本誌5月号およびホームページ（<https://www.gtsj.or.jp/>）に掲載する予定です。

★今年度は、関西地区における教育シンポジウムは開催いたしません。

2023年度第1回見学会のお知らせ

2023年度第1回見学会を、下記の通り開催いたします。

1. 日 時： 2023年6月2日(金) 13:00～17:15 (予定)
成田空港第2ターミナル集合・解散
2. 場 所： (株)JALエンジニアリング エンジン整備センター/成田航空機整備センター
(千葉県成田市成田国際空港内)
3. 内 容： エンジン整備センターにおいて、エンジン整備の概要説明、及び見学
成田航空機整備センターにおいて、航空機整備の概要説明、及び見学
※スケジュールは、学会ホームページにてご確認ください。
4. 参加要領：
 - (1)参加資格： 高校生以上
 - (2)定 員： 40名程度 (お申込み多数の場合、お断りすることがございます。)
 - (3)参加費 (税込。移動バス代を含む。)：事前振込
正会員 3,300円
非会員 4,400円
学生 (会員/非会員問わず) 2,200円
※振込先等は、申込締切後にご案内いたします。

5. 申込方法：

学会ホームページ (<https://www.gtsj.or.jp/>) よりお申込みください。または、「2023年度見学会 参加申し込み」と明記のうえ、下記の情報を、FAXまたはE-mailにて学会事務局 (FAX：03-3365-0387, E-mail：gtsj-office@gtsj.or.jp) までお送り下さい。

なお、見学先での手続きのため、ご自宅TELおよび住所が必要となりますので、ご了承ください。

- (1) 氏名 (フリガナ)
- (2) 会員種別 (会員の場合は、会員番号)
- (3) 生年月日
- (4) 勤務先・部署 (学生の場合は学校名)
- (5) E-mailアドレス
- (6) 自宅電話番号 (携帯可)
- (7) 自宅住所

◆申込締切：2023年5月19日(金)

* 申込者全員に、参加可否を5月24日(水)までにお知らせいたします。学会からの連絡がない場合には、お問い合わせください。

第51回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会のお知らせ

第51回日本ガスタービン学会定期講演会を以下の要領で開催いたします。なお、開催場所については現時点の予定であり、オンライン開催、またはハイブリッド開催となる場合がありますことをご了承ください。

講演会開催日 2023年10月4日(水)、5日(木)
 講演会開催場所 福井県国際交流会館
 〒910-0004 福井市宝永3丁目1-1
 見学会 2023年10月6日(金)

講演申込要領は、学会誌5月号、学会ホームページ (<https://www.gtsj.or.jp>) に掲載いたします。奮ってご応募くださいますようお願い申し上げます。

講演申込締切 2023年6月2日(金)予定
 講演採否連絡 2023年7月7日(金)予定
 論文原稿締切 2023年8月18日(金)予定

参加申込方法は、学会誌7月号、学会ホームページに掲載する予定です。



○本会協賛行事○

主催学協会	会合名	協賛	開催日	詳細問合せ先
日本機械学会	No.23-20講習会「機械学習×熱・流体工学の最先端」	協賛	2023/3/24	URL : https://www.jsme.or.jp/event/23-20/
日本機械学会 関西支部	第385回講習会「構造・強度設計における数値シミュレーションの基礎と応用」	協賛	2023/5/22-23	URL : https://jsmekansai.org/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

[正会員]

小川 泰一郎(大阪公立大学) 内山 悠太(川崎重工業) 有野 剛史(関西電力) 花井 直人(JALエンジニアリング)

次号予告 日本ガスタービン学会誌2023年5月号 (Vol. 51 No. 3)

論説・解説

巻頭言 渡邊 啓悦 (荏原製作所)

ニューラルネットワークをメタモデルとした遠心圧縮機の多目的最適化

坂口 大作 (長崎大学)

航空宇宙工学における発見的最適化技術の活用 金崎 雅博 (東京都立大学)

(仮題) 形状最適化への機械学習と感度法によるアプローチ 米倉 一男 (東京大学)

ガスタービン翼の端壁面近傍における冷却孔配置の最適化 宮部 正洋 (大阪工業大学)

翼やインペラの振動強度の最適化 (ミストチューンを考慮した最適化) 金子 康智 (龍谷大学)

圧縮機動翼の空力・強度最適化設計事例の紹介 青木 拓 (本田技術研究所)

3D Inverse Design based Optimization of Axial Turbines and Compressors

Prof. Mehedad Zangeneh (University College London)

※タイトル, 執筆者は変更する可能性があります。



◇2023年度会費納入のお願い◇

2023年度会費 (2023年3月1日～2024年2月末日) の納入をお願いいたします。会費は、下記の通りとなっておりますので、2023年4月30日までにお納め下さいますようお願い申し上げます。

なお、口座自動振替をご利用の方は、2023年3月23日にご指定の口座よりお引き落としさせていただきます。

<2023年度会費 (不課税)>

正会員	8,000円
正会員 (65歳以上*)	5,000円
学生会員	2,500円
賛助会員 1口	70,000円

(*2023年3月1日現在)

【納入先】

郵便振替: 00170-9-179578

銀行振込: みずほ銀行 新宿西口支店
普通預金口座 1703707

いずれも口座名は、

シャ) ニホンガスタービンガックイ

※振込手数料は貴方にてご負担願います。

※会費の納入は、簡単・便利な口座自動振替への切替えをお願いしております。自動振替をご利用されますと、振込手数料は学会負担となります。ご希望の方は巻末の「預金口座振替依頼書」にご記入の上、学会事務局までお送りください。

編集 後記

日本ガスタービン学会が創立50周年を迎え、2020年度にそれを祝うため、創立50周年記念事業実行委員会が立ち上がり、そのうちの主要事業として、学会誌記念特集号が企画されました。Vol. 51, No. 1が1月号としてすでに発行され、そしてVol. 51, No. 2として、本号が3月号として発行される運びになりました。二冊に渡って、50周年記念号を発行することができたのも、ひとえに学会誌編集委員長である新関先生を初め、編集委員会メンバーの努力の賜物であったと思います。みなさん多忙中にもかかわらず、特集号の編集にご尽力いただき、この場を借りてお礼申し上げます。私は今年度から編集担当理事として、編集委員会に参加させていただきましたが、産官学に所属するガスタービン及びエネルギー関連研究・技術の専門集団からなる編集委員会は、他学会には類を見ないほど専門性のきわめて高い集まりであることを実感しています。そのような編集委員会から推薦いただいた本特集号のご執筆者は、長年本学会にご貢献いただいた会員の方々であり、その方々がこれまで共有されてきた技術開発や学会運営の歴史、また苦労話などがこれら二冊の特集号には集大成されています。1月号で

は、主にこの半世紀に渡るガスタービン・蒸気タービン技術の歩みと今後の展望が特集されています。一方、3月号では、日本ガスタービン学会の組織としての歩み、特に2011年度の公益社団法人化に向けた会員皆様の並々ならぬご努力と、法人化後の運営における役員ならびに事務局のご苦勞が記されています。また、国際化や男女共同参画にも積極的に取り組み、公益法人として広く社会一般にガスタービン関連技術の啓蒙と普及を行ってきた、ここ10年の取り組みを知ることができます。さらに、本学会を支えている産官学の組織の歩みや、発電用ガスタービンや航空エンジンのユーザーの歩みもまとめられています。学会として歩んだこの50年間の布石がこの二冊に俯瞰されていますので、その歴史を手っ取り早く知るのにも、たいへん便利な二冊に仕上がっています。

(山本 悟)

(表紙写真)

表紙写真は、昨年11月に開催された50周年記念式典および記念講演のものです。

詳細につきましては記念式典事業報告 (P.193～P.196) をご参照ください。

だより ✠事務局 ✠

ご近所の梅の花を目にする頃から日ごとに暖かくなっているのを実感します。本号発行の時期には東京で桜が咲き始めているのでしょうか。

長い間放置していた歯のメンテナンスを再開しました。案の定、治療しなくてはいけない歯があり、このところ、ほぼ毎週歯医者さんに通っています。場所は、クリニックが引越したためちょっと遠くなり、これまで降りたことのない駅と街で、毎回治療後はその知らない街をぶらぶら散歩しています。お昼にお蕎麦を食べたり、おいしそうなパン屋さんでパンを買ったり、おかげで歯医者通いがとても楽しみになっています。チェーン店ではない個人経営のお店も多いのですが、電子マネーが普及しつつある昨今、支払いのときに「細

かくてすみません」と小銭で支払ったら「いえいえ助かります。お客さんが少ないのに両替にも手数料が取られるのでねえ」とのこと。2件くらい同じことを言われ、家にある小銭(小銭貯金というよりは管理していなかった)を集めて100円玉と10円玉を10枚ずつお財布に入れて出かけることにしました。単純。

さて、当学会は3月から新年度となりました。毎度のお願いとなりますが、3月下旬には4月開催の通常総会招集通知をお送りします。正会員の皆様にはWeb会員ページあるいは葉書にて議決権を行使していただきたくよろしく願いいたします。また、ご所属の変更、異動、引越などございましたら、学会事務局へもご一報ください。(中村 優美)

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2018年7月13日改定

1. 本会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 依頼原稿：学会誌編集委員会（以下、編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下、会員）外でもよい。
 - B. 投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - C. 学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。
- 1.2. 技術論文の投稿については、「技術論文投稿要領」による。
- 1.3. 英文技術論文の投稿については、Instruction to Authors, JGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) による。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事の掲載欄に掲載することとし、刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説、講義	6ページ以内
技術論文	「技術論文投稿要領」による
寄書、随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内
3. 原稿の執筆者は、本会誌の「学会誌原稿執筆要領」に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局（以下、編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1に示す。
4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて、執筆者への照会、修正依頼を行う。
5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
6. 投稿原稿のうち技術論文の審査、掲載については、「技術論文投稿要領」に従う。
7. 依頼原稿の執筆者には、学会事務局から原則として「学会誌の執筆謝礼に関する内規」第2条に定めた謝礼を贈呈する。
8. 非会員の第一著者には掲載号学会誌1部を贈呈する。
9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」による。
10. 他者論文から引用を行う場合、本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
 ニッセイエブプロ(株) 企画制作部
 学会誌担当：高橋 邦和
 〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17 明産西新橋ビル
 TEL：03-5157-1277
 E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2021年7月11日改定

1. 本学会誌に投稿する和文技術論文（以下和文技術論文）およびJGPPに投稿する英文技術論文（以下英文技術論文）は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 和文技術論文の責任著者は、論文投稿時および論文掲載時に、本学会の正会員または学生会員であること。英文技術論文についてはこの限りではない。
 - 2) ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。
 - 3) 和文技術論文は「学会誌原稿執筆要領」に従って執筆された日本語原稿、英文技術論文は「Instruction to Authors」に従って執筆された英語原稿であること。
 - 4) 一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし、以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。
 - 本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
 - 特許および実用新案の公報、科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
 - 他学協会の講演要旨前刷、社内報・技報、官公庁の紀要等の要旨または抄録
2. 技術論文のページ数は、和文技術論文は原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、「学会誌の掲載料に関する内規」第2条に定めた金額の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。英文技術論文は「Instruction to Authors」に定める。
3. 和文技術論文のカラー図は電子版と本学会ホームページ上の「技術論文掲載欄」に掲載し、冊子体にはモノクロ変換した図を掲載する。著者が「学会誌の掲載料に関する内規」第3条に定めた金額を負担する場合には、冊子体もカラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は、「学会誌原稿執筆要領」「Instruction to Authors」に従って作成された原稿電子データを、「技術論文原稿表紙」とともに技術論文投稿システム(Editorial Manager)から提出する。
5. 投稿された論文は、論文委員会が「論文査読に関する内規」に従って査読を行い、掲載可否を決定する。
6. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
7. 和文技術論文の著作権に関しては、別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」、および「学会誌編集および発行要領」第5章第16条を適用する。英文技術論文の著作権に関しては、別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程 (Copyright Regulations of the Gas Turbine Society of Japan)」, および「英文論文集発行要領」第6章を適用する。

日本ガスタービン学会誌
Vol. 51 No. 2 2023.3

発行日 2023年3月20日
 発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 新関 良樹
 発行者 福泉 靖史
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
 第3工新ビル402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 郵便振替 00170-9-179578
 銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
 (普) 1703707
 印刷所 ニッセイエブプロ(株)
 〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17
 明産西新橋ビル
 Tel. 03-5157-1277

©2023. 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写複製をご希望の方へ

公益社団法人日本ガスタービン学会では、複写複製に係る著作権を一般社団法人学術著作権協会に委託しています。当該利用をご希望の方は、学術著作権協会 (<https://www.jaac.org/>) が提供している複製利用許諾システムを通じて申請ください。