

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## 「水素エネルギー利用社会への歩み， ガスタービンと燃料電池の最新情報」に寄せて

栗山 信宏\*<sup>1</sup>

KURIYAMA Nobuhiro

平成7年の環境白書に古代からの文明の盛衰と環境や資源との関係がまとめられている<sup>(1)</sup>。古代文明の衰退は、燃料や家や船などの生活材としての森林の減少が一因となっているとのことである。また、西欧文明においても14世紀から15世紀に人口拡大と寒冷化に伴う森林減少によって危機を迎えたが、新大陸への進出と石炭の利用によって衰退を免れるばかりか、西欧近代文明への発展につながった。即ち、石炭をエネルギー源とした18世紀後半からの産業革命である。

さらに、20世紀に目を向けると、石油が活用されるようになって、石油化学産業がプラスチック等の生活材を生み出し、石油系燃料による電力供給や自動車・船・飛行機が産業と生活の利便性を飛躍的に発展させた。20世紀後半からは、天然ガスも燃料として多量に消費され、原子力発電とも併せて地球全体に広がった現代文明を支えている。

古代から現代までの燃料の単位質量あたりの発熱量を縦軸にして、その大量採掘が始まったときから今後採年数<sup>(2)</sup>先の未来まで、いわばその資源の「利用期間」で図1に表してみた。非常に大雑把な整理ではあるが、薪（森林資源）から石炭、石炭から石油、石油から天然ガスとより質量エネルギー密度の高い燃料が使われ始めた時期が、文明が飛躍的に発展した時期とほぼ一致している。我々の豊かな生活は、高いエネルギー密度の化石

燃料を利用することによって実現されてきたことがうかがわれる。一方で、数十年から数百年のうちには化石燃料が枯渇することが懸念されている。資源開発の進展によって採年数は延びているが、次第に採掘に高度な技術が必要とされるようになり、日本のような資源小国は、枯渇の前の段階で資源価格の上昇と変動に翻弄されることは避けられないのではないかと考えられる。

本号では、水素エネルギー技術及び燃料電池技術が特集されているが、水素を図1に書き入れようとすると化石燃料の2倍以上の質量エネルギー密度（121MJ/kg）であるため枠外に出てしまう。乱暴な類推をすれば、飛躍的な文明変化を引き起こしそうなほどの違いである。

当然これだけで水素が未来のエネルギーと確信することは出来ないし、そもそも水素は他の一次エネルギー源から製造される二次エネルギーである。しかし、見方を変えれば再生可能エネルギーを含めた多種多様な一次エネルギー源をまとめるエネルギーキャリアの性格を持っているということである。また、効率の問題はあるものの、電力と水素との間の相互変換が容易であることも他の燃料にはない特質であり、再生可能エネルギーの一時貯蔵といった未来の可能性を期待させる。

質量エネルギー密度が高くても、天然ガスは自動車の主たる燃料とはなっていない。これは、天然ガスが、常温で気体であるために可搬性に劣ることが理由である。水素も常温で気体であり、同様な使い勝手の悪さを抱えている。水素の製造・利用においても、機器のコスト高の問題や水素脆化は常に指摘されている。しかし、水素のエネルギーキャリアとしての特質を考えると、化石燃料に振り回されず社会を発展させるために、上記の課題を少しでも解決して上手に水素を利用し、エネルギー源の選択肢を広げることがこれからの人類の発展のために必要ではないだろうか。

### 引用文献

- (1) 環境省「平成7年度版環境白書」(1995) 第1章 <<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/hakusyo.php3?kid=207>> (参照2016年6月10日)。
- (2) 資源エネルギー庁「平成27年度エネルギーに関する年次報告(2015) 第2部第2章<<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/>> (参照2016年6月10日)。

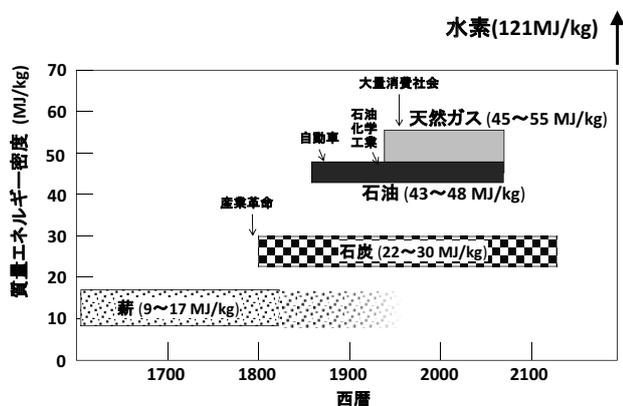


Fig. 1 Gravimetric energy densities of fuels and their "Periods as key fuels"

原稿受付 2016年5月23日

\* 1 (国研) 産業技術総合研究所 電池技術研究部門  
〒563-8577 池田市緑丘1-8-31

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## 日本における水素エネルギー関連技術の歩みと現状

笹倉 正晴\*<sup>1</sup>  
SASAKURA Masaharu

福田 健三\*<sup>1</sup>  
FUKUDA Kenzo

キーワード：水素／酸素燃焼タービン，水素社会，WE-NET，IAE 構想研究，CO<sub>2</sub>フリー水素供給チェーン  
Hydrogen/Oxygen Combustion Turbine, Hydrogen Society, WE-NET, IAE Concept Study,  
CO<sub>2</sub>-free Hydrogen Supply Chain

### 1. はじめに—我が国の水素エネルギー技術開発の歴史概観

水素エネルギー技術については，歴史的に何回かの浮き沈みがあった。将来のエネルギーシステムにかかわる技術は，研究開発から実用化までのリードタイムが長期にわたるため，国による戦略的な技術開発支援が重要である。水素エネルギー技術も例外ではなく，我が国が本格的な技術開発に取り組んだ最初は，1973年のオイルショックを契機に開始された通商産業省（当時）のサンシャイン計画（1974～1992年）においてであった。我が国の水素エネルギー関連技術開発の流れ（概要）を図1に示す。

#### ○第1次高揚期（1973～1980年代中期）

サンシャイン計画の一テーマとして取り上げられた時から，我が国の水素エネルギー技術開発の第1次高揚期が始まった。サンシャイン計画では，高温ガス炉の熱を利用する熱化学水素製造技術の開発が中核であった。製造技術のほかには，水素吸蔵合金の開発，金属材料の水素脆性の研究，水素エンジン自動車の開発などが取り上

げられた。熱化学水素製造技術の開発は，ほぼ同じ時期に世界的な盛り上がりを見せ，世界全体で150を超える熱化学サイクルが提案され，基礎研究が行われた。しかし，熱化学水素製造技術は，技術としての成立性の点でさまざまな困難に直面し，ほぼ10年で世界的に潮が引くように衰退していった。現在まで研究開発が継続されているのは，原子力研究開発機構（現在）のIS法のみである。

#### ○第1次停滞期（1980年代中期～1993年）

1980年代中ごろになると，当初大きな危機感のもとに提唱された石油代替エネルギー開発の理念も，北海油田の稼働開始などに伴う石油事情の好転も手伝って，当初の危機感は大幅に減衰した。サンシャイン計画の中の水素エネルギー技術開発も，地道な基礎研究は継続されたものの，全体としては停滞に近い状況に陥ってしまった。ただし，燃料電池の開発は，1980年代初期からサンシャイン計画とは別のムーンライト計画（省エネルギー技術開発プログラム）の枠組みの中で取り上げられ，開発が進んでいた。

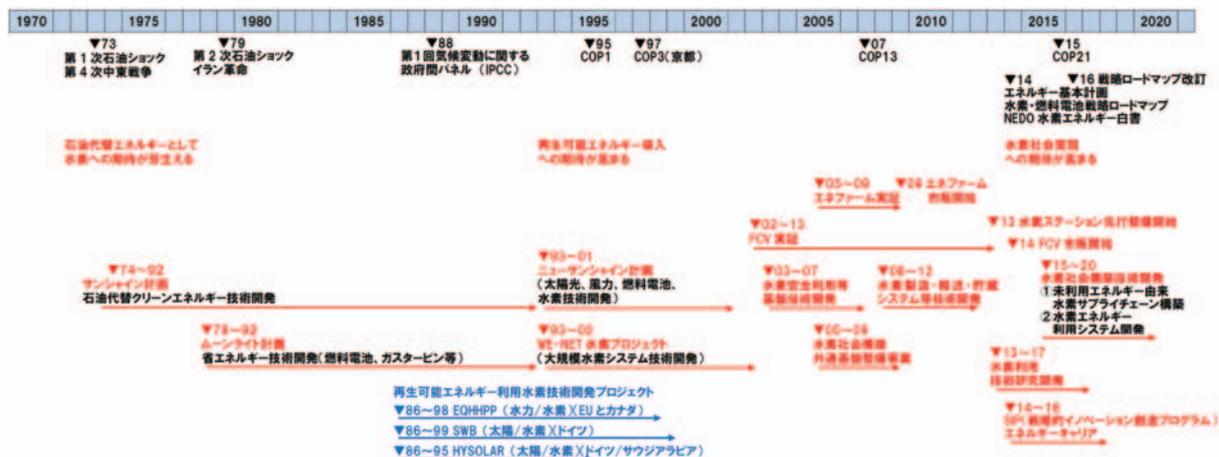


Fig. 1 History of RD&D on hydrogen energy-related technologies in Japan (summary)

原稿受付 2016年4月26日

\* 1 (一財) エネルギー総合工学研究所  
プロジェクト試験研究部  
〒105-0003 港区西新橋1-14-2

我が国の水素エネルギー技術開発が停滞状況にある中で、世界的には驚くべき新しい構想で水素エネルギーの開発が始められていた。その代表的プログラムが、EC（当時）とカナダ・ケベック州電力公社との共同研究の形で開始された、EQHHP（Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project）（1986～1998年）であった<sup>1)</sup>。これはカナダ・ケベック州の水力発電電力を水素に変換して、北極海航路を通して海上輸送し、ヨーロッパ各国で利用するという構想であった。ドイツでは、水素の用途として燃料電池自動車（FCV: Fuel Cell Vehicle）が注目を集め、ダイムラー社を筆頭にFCVの開発が精力的に展開された。

EQHHPは、水素をエネルギーキャリアとする再生可能エネルギー供給・利用のグローバルシステムの実現を目指した世界初の試みであったが、資金不足のため、カナダ・ヨーロッパ間の水素輸送を実証することなく、1998年に終了した。

我が国では、福田らが、海外再生可能エネルギーを水素の形で我が国に輸送する長距離エネルギー輸送構想<sup>2)</sup>について、サンシャイン計画室の支援のもとで、1989～1992年にわたり調査研究を実施して、来るべきWE-NETプロジェクトの基本構想をまとめた。同構想における水素利用技術は、未来の大規模発電技術としての水素/酸素燃焼タービンを取り入れた。

#### ○第2次高揚期（1993～2000年代前期）

地球温暖化問題の顕在化などの社会的諸状況の変化に対応して、1993年通商産業省（当時）はサンシャイン計画とムーンライト計画を統合してニューサンシャイン計画を立ち上げた。このニューサンシャイン計画の中核となったのがWE-NETプロジェクトであった。同プロジェクトでは、カナダ政府と連携して、カナダの水力発電電力を水素に変換して日本に輸送し、日本では水素を燃料とする水素/酸素燃焼タービン発電に利用するというシステムモデルを作り、その実現に必要な要素技術を開発することとした。システム実証は2020年ごろと想定した。また、水素の用途として、水素/酸素燃焼タービン発電のほかに、FCVや家庭用定置型燃料電池（のちに開発メーカー共通の名称としてエネファームと称されるようになった）も視野に入れた。

1988年に第1回IPCCが開催され、また1997年にはCOP3（京都）で京都議定書が採択されるなど、地球温暖化問題への取り組みが強化されてきた社会情勢を背景に、WE-NETへの期待は大きくなり、海外でも非常に高い評価を得た。

2000年を迎えるころになると、燃料電池関連技術の進展が目覚ましく、FCVやエネファームの実用化への期待が急速に高まった。ここで国の施策は一挙に、FCVとエネファームの早期実用化の方向にシフトして行った。

資源エネルギー庁長官の諮問機関であった燃料電池実用化戦略研究会が2004年に発表した燃料電池関連技術の

実用化シナリオでは、2005年からFCV市場導入が始まり、2005年にはFCV5万台、水素ステーション500か所、2020年にはFCV500万台、水素ステーション3,500か所という目標が示された。

当時の小泉首相が、官邸に納入されたFCVを前に、FCVの3年以内実用化を宣言したのも、期待の高まりに拍車をかけたと思われる。ところが、期待は間もなく裏切られ、FCVは実証走行には成功したものの、商用化のためには、解決すべき課題が多く残されていて、そう簡単には商用化はできないことが明らかになった。燃料電池関連技術実用化重視の方針の下で、WE-NETは厳しい評価にさらされた。水素/酸素燃焼タービンの開発は中止の指示を受け、1998年度のWE-NET第I期計画終了（1998年度）とともに研究開発は中断させられた。

WE-NET第II期（1999～2002年）では、水素ステーション開発など、FCV実用化サポートに力点を置いた研究開発を実施し、水素ステーション実証研究では、その後のステーション設計の基礎となる成果を収めた。しかし、水素ステーション開発での草分け的成果とは裏腹に、WE-NETが提示したグローバルエネルギーシステム構築のための努力は、2002年度でのWE-NET中止の政策判断により、むなしく宙に浮く状態となってしまった。これ以降、水素供給チェーン構想に基づく研究開発はしばらく鳴りを潜める結果となった。

#### ○第2次停滞期（2002～2014年ごろ）

この時期の水素供給問題は、どちらかといえば、FCV用の燃料供給問題に特化された感があった。一方、FCV、エネファームの研究開発は民間中心に着実に進展した。燃料電池関連技術は着実な進展を示した一方で、水素供給チェーン構築などの水素インフラ関連の技術開発はほとんど冬眠状態という、二極分化状態の時期であったと言えるであろう。

#### ○第3次高揚期（2014年ごろ～現在）

2002～2013年に及ぶFCV実証試験及び2005～2009年に及ぶエネファームの実証試験を経て、これら燃料電池関連技術は2014年末トヨタ自動車<sup>3)</sup>による初の商用車発売が実現し、エネファームは2016年1月末時点で約15万台が導入されており、いよいよ普及段階に入った。

一方で、炭酸ガス排出抑制の要請が一段と強まる情勢を受けて、再生可能エネルギー導入の動きも活発になってきた時期である。とりわけ、東日本大震災による福島第一原発事故以降、再生可能エネルギー導入拡大は国民の広範の支持を得るようになった。

水素エネルギーは、再生可能エネルギーを利用するに際して最適のエネルギーキャリアの一つであることは広く認められているところから、再生可能エネルギー導入拡大の社会的要請と軌を一にして水素エネルギー導入への期待が再び大きくなった。

政府は2014年4月策定のエネルギー基本計画で、水素社会実現の方向を明確に打ち出し、これを受けて資源エ

エネルギー庁は、2014年6月に水素・燃料電池戦略ロードマップを公表した。このロードマップによれば、短期的にはFCV、エネファームおよび水素ステーションの普及拡大を重視しつつ、中・長期的にはCO<sub>2</sub>フリー水素供給チェーンの構築と水素発電の実用化を目指すことを国の戦略としている。

WE-NETプロジェクトで手掛けながらも、途中で中断の憂き目を見た水素／酸素燃焼タービン発電技術が再び注目の的になりつつある。前掲第2次停滞期の間、WE-NETは失敗だったとの評価が蔓延したが、今日の状況を見ると、むしろWE-NET理念は脈々と受け継がれていると言えよう。WE-NET理念を一段と精緻化して、来るべき水素社会の姿を鮮明にしてゆくことが求められている。

2. WE-NETとはなんであったか

2.1 WE-NETの基本的コンセプト

WE-NETの概念図を図2に示す。WE-NETの基本的コンセプトは、世界各地に賦存する再生可能エネルギーを利用して電気分解により水から水素を製造し、製造した水素を輸送可能な媒体に変換してエネルギー消費地に輸送し利用する、という世界的規模のネットワーク構築を目指すことであった。

実際の研究計画では、カナダの余剰水力発電電力を液体水素の形で我が国に輸送し、水素／酸素燃焼タービン発電に利用するシステムをモデルとして中核的要素技術の開発とシステム設計等を総合的に推進した。カナダ連邦政府・天然資源省も積極的な協力を惜まず、水力発電サイトとして、ケベック州のほかサスカチュワン州の適地を推奨した。



Fig. 2 Concept of WE-NET

昨今のCO<sub>2</sub>フリー水素供給チェーン構想では、川崎重工業㈱が豪州褐炭などの未利用化石燃料資源を現地CCSと組み合わせて水素源として利用するコンセプトも加わって、WE-NET構想が今日的広がりを見せている。

2.2 WE-NETの年次展開 (当初計画)

WE-NETの年次展開 (当初計画) を図3に示す。

2020年システム実証 (または実用化) を目的とした長期構想であったが、実際には、2003年度で終了予定の第

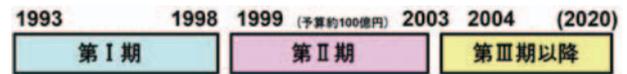


Fig. 3 Time-schedule of WE-NET (original plan)

II期計画を1年繰り上げて2002年度で終了の措置が取られた。WE-NETは2020年度システム実証を目指して、第III期以降の計画も検討していたところだったので、この中断措置は、関係企業を始め多方面に大きなマイナス・インパクトを与えた。ただし、2015年2月のNEDOフォーラム資料<sup>(3)</sup>や、2016年3月に改訂された資源エネルギー庁の水素・燃料電池戦略ロードマップ等で展開されている戦略は、WE-NET構想の発展的継承と理解できるところも多いことから、FCVやエネファームの実用化促進に力点を置く政府方針の下で、WE-NETは2002年度でひとまず中断したと理解するのが妥当であろう。

2.3 WE-NETの技術・研究開発項目

WE-NETの技術開発項目を図4に、WE-NETの第I期研究開発計画 (1993～1998年)、第II期研究開発計画 (1999～2002年) を各々、表1、表2に示す。

筆者らが所属する (一財) エネルギー総合工学研究所は、第I期、第II期を通して研究開発全体の統括の役割を担った。

表1と表2を比べて明らかなように、第II期ではFCVとエネファーム実用化重視の国の方針に従い、FCV関係の課題が設定された。このうち、顕著な成果

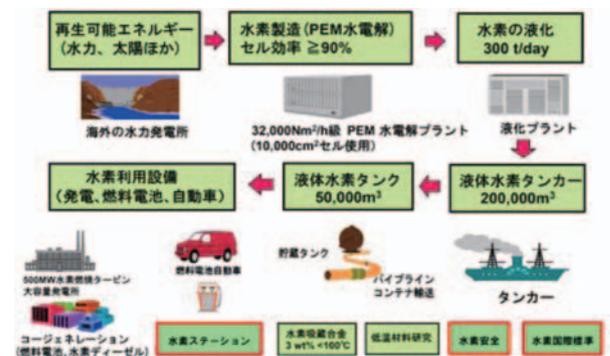


Fig. 4 Technology development items of WE-NET

Table 1 R&D scheme of WE-NET phase I

TASK	研究開発項目	内容
1	全体システム	各種水素輸送媒体での全体システム概念設計を行い、最適輸送媒体を選定する。
2	国際協力	国際的情報交換、国際協力の方策検討
3	安全対策	水素の安全性に関する調査研究
4	水素製造技術	PEM水電解技術開発:セル効率90%以上
5	輸送・貯蔵技術	高効率水素液化システムの検討 液体水素輸送タンカー、液体水素タンク開発 水素吸蔵合金の開発:100℃以下で3wt%以上
6	低温材料技術	液体水素温度における材料特性研究
7	水素利用技術	水素ディーゼル、純水素燃料電池の開発
8	水素タービン	水素燃焼タービン:タービン入口温度1700℃、発電効率60%(HHV)、66%(LHV)以上
9	革新的技術	水素製造、輸送・貯蔵、利用技術の調査研究

Table 2 R&D scheme of WE-NET phase II  
(Red letters: FCV-related themes)

TASK	研究開発項目	内容
1	システム研究	各種水素源を利用するシステム評価
2	安全対策	水素の拡散・爆燃実験による安全性検証
3	国際協力	国際標準化活動、情報交換
4	動力発生	100kW 単筒水素ディーゼルエンジン開発
5	水素燃料タンク	自動車の燃料系システム要素研究
6	純水素燃料電池	30kW PEM 燃料電池システムの実証
7	水素ステーション	水素ステーションの開発、実証
8	水素製造技術	2,500cm <sup>2</sup> 電極使用の積層電解スタック
9	輸送・貯蔵技術	水素製造、輸送・貯蔵、利用技術の調査
10	低温材料	溶接法と溶接材料の低温特性への影響
11	水素貯蔵材料	有効貯蔵量 3wt%以上の合金開発
12	革新的技術	水素関連の革新的技術の調査 (磁気冷凍法水素液化技術の基礎研究など)

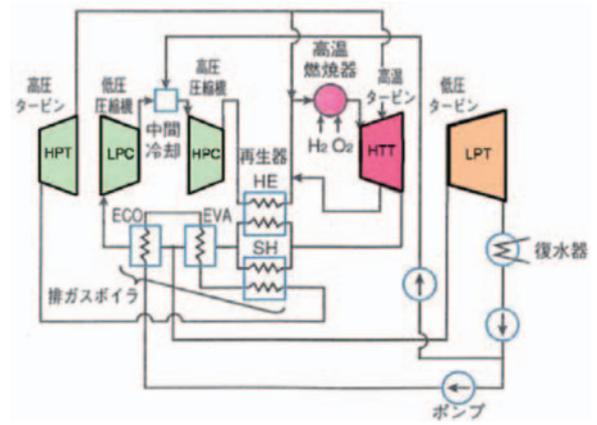


Fig. 5 Topping extraction cycle

が30Nm<sup>3</sup>/hの水素供給能力を持つ水素ステーションの実証であった。水素ステーションのタイプは、四国総研構内で実施された固体高分子電解質水電解（PEM）型オンサイトステーションと大阪ガス㈱構内で実施された都市ガス改質型オンサイトステーションであった。

### 3. WE-NETでの水素／酸素燃焼タービン開発の経緯と到達点

水素の特徴を最高に発揮できる（理想的な）発電技術は、水素／酸素燃焼タービンである。タービン作動媒体がスチームであることから、ガスタービンとスチームタービンを直結出来、さらに作動媒体であるスチームを循環させるクローズドサイクルが可能となるので高効率を期待できる。サーマルNO<sub>x</sub>生成がゼロなので材料の耐熱性の限界までタービン入り口温度を高められる。タービン入り口温度の目標1700℃に対応できる耐熱材料の開発や、1700℃のスチームを安定に作り出すための水素／酸素燃焼器の開発、タービン翼冷却技術の開発等多くの革新的技術の研究開発が行なわれた。最適タービンサイクルは設計コンペにより選定されることとなり、4方式が提案され、設計コンペの結果トッピング再生サイクル（図5）が選定された。

トッピング再生サイクルの期待される性能は以下の通りであった。

- ①出力 500 MW
- ②発電効率 61.8 % (HHV)  
68.5 % (LHV)
- ③タービン入口ガス温度 1700 °C
- ④タービン入口圧力 4.75 MPa

タービン翼用耐熱材料は次の5種類が候補となり、第I期終了時点では、いずれも約5cmφ程度の試験片を作成し、1700℃スチーム下での耐熱性評価の予備段階まで到達したが、そこで中断の措置を受けた。

- ・単結晶 (SC) 超合金 + 繊維強化セラミックス (FRC) のハイブリッド冷却翼
- ・耐熱超合金冷却翼用遮熱コーティング (TBC)
- ・セラミック基複合材料 (CMC / 長繊維)
- ・セラミック系多重構造材料 (CMC / 表面部 + 中間部 + 芯部)
- ・C / C及び弱冷却部品用CMCの3次元繊維複合材料

### 4. 水素社会構築への展望

1項で触れたように、2013年後半ごろから国の主導で本格的な水素社会の実現を目指した戦略議論が活発となった。その一つの集約点で、2014年6月に策定され、2016年3月に改訂された、水素・燃料電池戦略ロードマップ

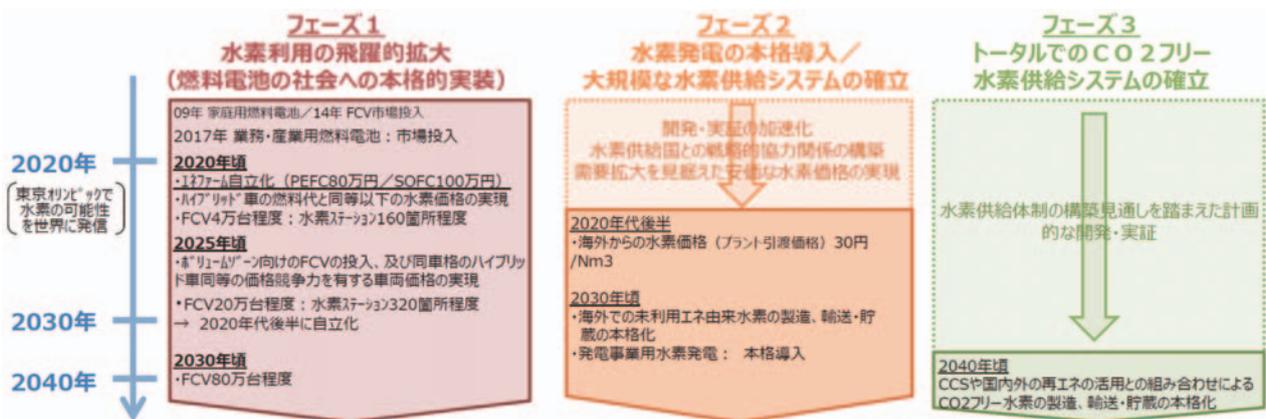


Fig. 6 Strategic road map for hydrogen and fuel cells (revised in March 2016)<sup>(5)</sup>

である<sup>(4),(5)</sup>。水素・燃料電池戦略ロードマップ（2016年3月改訂）の要点を図6に示す。

2016年3月の改訂のポイントは、①家庭用燃料電池の将来的な価格目標が明確化されたこと、②燃料電池自動車の普及目標が設定されたこと、③水素ステーションの整備目標が設定されたこと、④水素発電に関し、昨年度とりまとめられた資源エネルギー庁の「水素発電検討会」報告書を反映し、記載が具体化されたこと、⑤再生可能エネルギー由来水素の利活用に関し、技術面・経済面の具体的課題についてワーキンググループ立ち上げの検討を行い、2016年度中に結論を得る旨が記載されたこと、等である。このように、従来の技術開発であるエネファーム、FCV、水素ステーションに加え、海外からの大規模水素供給チェーン、発電事業用水素発電の本格導入、そして最終的に、トータルでのCO<sub>2</sub>フリー水素供給チェーン等に関する展開が具体化されている。

### 5. 水素エネルギー実用化に向けた主な技術開発の現状

#### 5.1 大規模（CO<sub>2</sub>フリー）水素供給チェーンの開発・実証

海外からの大規模（CO<sub>2</sub>フリー）水素供給については、有機ハイドライドによる供給チェーンと液化水素による供給チェーンの開発・実証研究が進められている（図7）

川崎重工業株式会社は、同社を主幹事とし、岩谷産業株式会社、電源開発株式会社（Jパワー）、シェルジャパン株式会社の体制で「技術研究組合CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構：HySTRA」を2016年2月に設立し、NEDO「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」の活動を本格化させている（図8）<sup>(6)</sup>。

HySTRAは、「褐炭ガス化技術」のパートと、「液

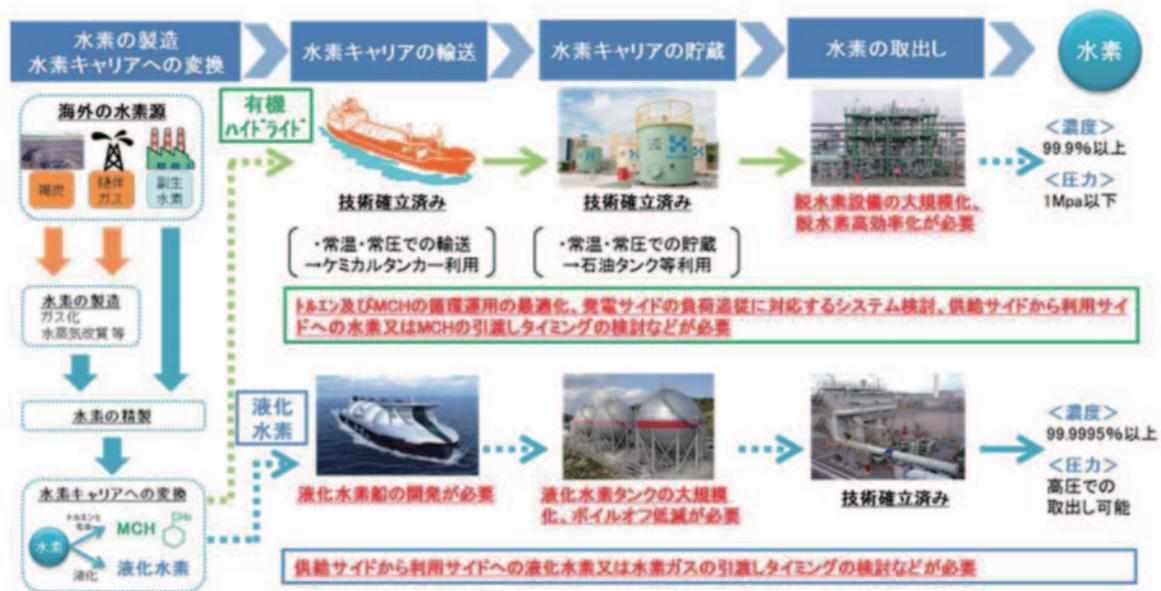
【CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン構築とHySTRAの技術実証項目】



Fig. 8 Promotion organization for CO<sub>2</sub>-free hydrogen supply chains: HySTRA<sup>(6)</sup>

化水素の長距離大量輸送技術」および「液化水素荷役技術」の2つのパートで構成され、2020年度までに各パートにおける技術実証と、商用化に向けた課題の抽出を行うことを目的としている。褐炭ガス化で副生するCO<sub>2</sub>は、豪州政府とビクトリア州政府が推進している“CarbonNET”プロジェクトと連携して貯留の実証計画が進められており、ビクトリア州ラトロブバレーの炭田から約80kmの沿岸にある枯渇ガス田に移送・貯留され、褐炭ガス化ガスはCO<sub>2</sub>フリー水素となる。液化水素関連技術については、川崎重工業株式会社は世界のフロントランナーであり、水素液化に関しては、同社播磨工場内に5トン/日の実証設備を設置し、試験中である。液化水素を海上輸送する専用タンカーの開発にも取り組んでいる。まずは内航船規模の2500m<sup>3</sup>の液化水素を運べるパイオニア船（試験船）を2020年までに建造する計画で、すでに世界で初めて液化水素格納設備（タンク）の公的な基本認証を取得している。将来的には、16万m<sup>3</sup>の専用タンカーの実用化を目標にしている。液化水素の貯蔵・陸上輸送では、JAXA種子島宇宙センターにあるロケット燃料用水素貯蔵タンクと、そこに水素を運ぶ専用コンテナの実績を有している<sup>(7)</sup>。

安倍総理大臣とターンブル豪州首相が、一特別な戦略



【出典】 資源エネルギー庁作成

Fig. 7 Large-scale hydrogen supply chains by organic chemical hydride and liquefied hydrogen<sup>(5)</sup>

的パートナーシップの次なる歩み：アジア，太平洋，そしてその先へ」と題して，平成27年12月18日に共同声明を出し，その中で，両首脳は，「水素社会」を実現するための水素サプライチェーン事業等のプロジェクトへの支持を表明している<sup>(8)</sup>。

5.2 水素燃焼発電技術

(1)水素燃焼タービンの技術開発の現状

水素燃焼発電におけるガスタービンは，主に，天然ガス・水素混焼タービン，水素／空気燃焼タービン，水素／酸素燃焼タービンに分けられる。資源エネルギー庁が作成した，水素燃焼タービンの現状と課題を図9に，CO<sub>2</sub>フリー水素燃焼発電の目指すべき形態，過渡期の形態を図10に示す。現状，天然ガス・水素混焼タービン，水素／空気燃焼タービンについて取り組まれており，川崎重工業㈱は，コージェネ用を目的に，8 MW級の水噴射型水素ガスタービン，30MW級ドライ追炊型混焼水素ガスタービン（水素混焼率60Vol%）は開発済で，さらにドライ型水素ガスタービンを開発中である<sup>(9)</sup>。これらは，いずれも空気燃焼であり，その延長に究極の革新的技術である水素／酸素燃焼タービンがある。

(2)革新的水素燃焼タービン

革新的水素燃焼タービンである，水素／酸素燃焼タービンの概念図（クローズドサイクル）を図11に示す<sup>(10)</sup>。3項で示した利点（高効率・サーマルNO<sub>x</sub>生成ゼロ等）に加え，液化水素供給チェーンの場合は液化水素の冷熱

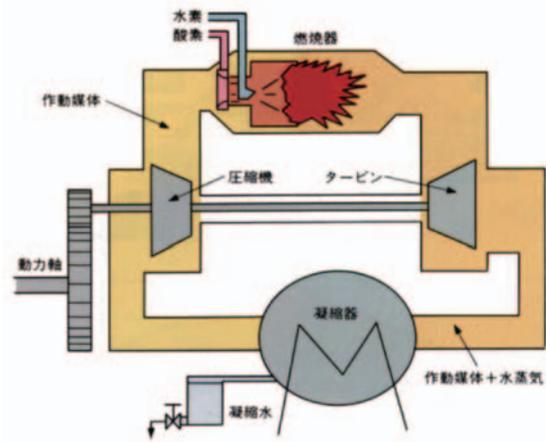


Fig.11 Concept drawing of hydrogen/oxygen combustion turbine (closed cycle)<sup>(10)</sup>

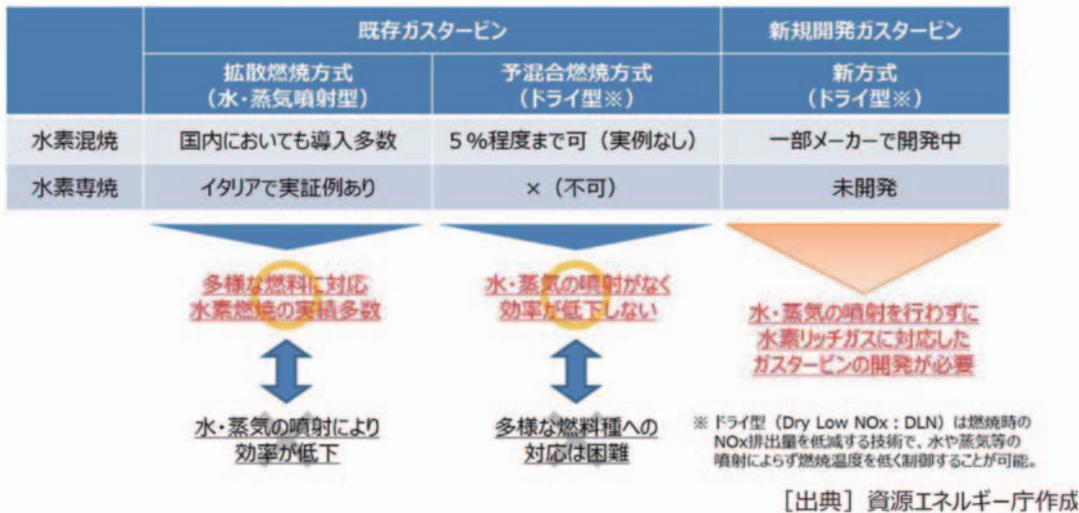


Fig. 9 Current status and issues of hydrogen combustion turbines<sup>(5)</sup>

	目指すべき形態	過渡期の形態	
発電方式	ガスタービンコンバインドサイクル発電		
燃料種の数 (専焼/混焼)	水素専焼方式	水素混焼方式	
燃焼方式	予混合燃焼方式・新方式	予混合燃焼方式	拡散燃焼方式
特徴・理由等	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱効率が高い</li> <li>プラント設置スペースが小さい</li> <li>負荷変動対応の柔軟性が高い</li> <li>インフラコストの低減が可能</li> <li>燃料制御の複雑性を回避</li> <li>エネルギーセキュリティに資する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱効率が高い</li> <li>技術的ハードルが低い（低濃度）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高濃度水素にも一定程度対応</li> <li>技術的ハードルが低い</li> </ul>

既存火力発電所に水素供給設備を付設することで建設コストを抑制可能  
大規模水素発電のオペレーションを試行可能  
専焼発電の導入初期に必要なLNG供給バックアップに向けた課題等の知見を蓄積可能

[出典] 資源エネルギー庁作成

Fig.10 Types of CO<sub>2</sub>-free hydrogen-fired power generation in the future and transition periods<sup>(5)</sup>

(マイナス253℃)を利用して深冷式空気分離による酸素製造ができる等の利点がある事から、究極の革新的熱機関として開発を推進するに値する技術であろう。WE-NETでは、正にこの革新的技術、すなわち、深冷式空気分離による酸素製造設備を含めた水素/酸素燃焼タービン発電設備について、システム設計、要素技術開発に加えて、設備費を概算し、経済性検討も実施した。

## 6. おわりに

我が国はWE-NET構想という形で、世界に先駆けて水素エネルギーに関する壮大な長期計画を立ち上げた。現在、再生可能エネルギー/未利用エネルギーを水素に変換して需要地に輸送・利用するための、地球規模での水素エネルギーシステム構築が現実の課題として議論されている。そこでは、WE-NETが掲げた基本構想が継承され、活かされている。長期構想のもとに、幅広い領域で研究開発に取り組みながらも、一方でFCV実用化をサポートするために、水素ステーション技術の開発等への課題の絞込みも行い、多くの成果をあげた。水素安全、国際標準など社会基盤関連課題にも取り組みがなされた。これらの成果はエネファーム、FCV、水素ステーションの実用化・普及および水素関連規制見直し等に多大の貢献をした。

水素燃焼発電に関しても、国の水素・燃料電池戦略ロードマップが着実に実行に移され、WE-NETで蓄積された研究開発成果の継承も含めて、水素燃焼発電技術開発が本格的に展開されることを期待する。

## 7. 引用文献

- (1) Hydro-Québec, Ludwig-Bölkow-Striftung, Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project Phase II Feasibility Study Final Report, Volume I (March 1991).
- (2) 植田稔, 福田健三, 化学媒体による海外電力の輸送, サンシャインジャーナル, Vol. 11, No. 1 (1990), PP. 7-12.
- (3) 橋本 道雄, 水素社会の実現に向けて ~ 50年の大計~ <[http://www.nedo.go.jp/nedoforum2015/program/pdf/ts4/michio\\_hashimoto.pdf](http://www.nedo.go.jp/nedoforum2015/program/pdf/ts4/michio_hashimoto.pdf)> (参照2016年4月20日).
- (4) 水素・燃料電池戦略協議会, 水素・燃料電池戦略ロードマップ (2014年6月23日) <<http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004-2.pdf>> (参照2016年4月20日).
- (5) 水素・燃料電池戦略協議会, 水素・燃料電池戦略ロードマップ (2016年3月22日改訂) <<http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009-c.pdf>> (参照2016年4月20日).
- (6) 「技術研究組合 CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構」を設立 - 水素エネルギー社会の実現に向けて活動を本格化 - <[https://www.khi.co.jp/news/detail/20160401\\_1.html](https://www.khi.co.jp/news/detail/20160401_1.html)> (参照2016年4月20日).
- (7) 見えてきた“Hydrogen Road” ~水素社会の未来を拓く~ <[https://www.khi.co.jp/knews/backnumber/bn\\_2015/pdf/news177\\_02.pdf](https://www.khi.co.jp/knews/backnumber/bn_2015/pdf/news177_02.pdf)> (参照2016年4月20日).
- (8) 安倍総理大臣とターンブル豪首相共同声明 - 特別な戦略的パートナーシップの次なる歩み: アジア, 太平洋, そしてその先へ - (平成27年12月18日) <<http://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000120556.pdf>> (参照2016年4月20日).
- (9) 吉村健二, CO<sub>2</sub>フリー水素の導入を目指して ~水素発電技術~ <<http://www.nedo.go.jp/content/100569149.pdf>> (参照2016年4月20日).
- (10) 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発評価委員会, ニューサンシャイン計画「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術 (WE-NET) 研究開発・第I期」最終評価報告書 (平成11年12月), pp. 169.

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## 水素サプライチェーンと水素発電

西村 元彦\*<sup>1</sup>  
NISHIMURA Motohiko

飴 雅英\*<sup>2</sup>  
KAZARI Masahide

神谷 祥二\*<sup>1</sup>  
KAMIYA Shoji

キーワード：水素，極低温技術，液化水素，ガスタービン

Hydrogen, Extreme Low Temperature Technology, Liquefied Hydrogen, Gas Turbine

### 1. 緒言

第四次エネルギー基本計画の閣議決定以降，中長期的視野に立ったエネルギー戦略の見直しが進んでいる。将来エネルギーの選択基準に，エネルギー安全保障，経済性，環境性および安全性（いわゆる3E+S）を据えて現在も多くの議論が続いている。その様な中で，水素・燃料電池戦略ロードマップ<sup>(1),(2)</sup>が，産学官の知見を集約して策定され，将来エネルギーを模索する視点に，インフラ整備の順序と時間軸を加え，目指すべき方向が示されている。

本稿では，該ロードマップのフェーズ2が示す，海外からの水素供給および水素発電の実現を目指して，クリーンエネルギーの本命として有望視されている水素を大量安定に供給し，CO<sub>2</sub>削減に寄与する構想と技術開発について紹介する。

### 2. CO<sub>2</sub>フリー水素の導入

再生可能エネルギーによる発電と水の電気分解とを組み合わせることで，CO<sub>2</sub>フリー水素を製造できる。しかしながら，余剰かつ安価な水力・風力発電等が存在する海外の一部地域を除いて，現状では経済性と安定供給性に課題が多い。そこで，化石燃料から水素を製造し，副生物のCO<sub>2</sub>をCCS（Carbon Dioxide Capture Storage）処理してCO<sub>2</sub>排出を削減する。これにより大量安定に水素を供給できるようになり，水素インフラの整備が可能となる。すなわち，化石燃料由来の水素でインフラを整備し，量的進展に数十年オーダーの長期を要する再生可能エネルギー由来水素をこのインフラに徐々に流して増して行くことが考えられる。

化石燃料由来の水素については，原料が安価であることが極めて重要である。そこで当社は，国際取引の無い，

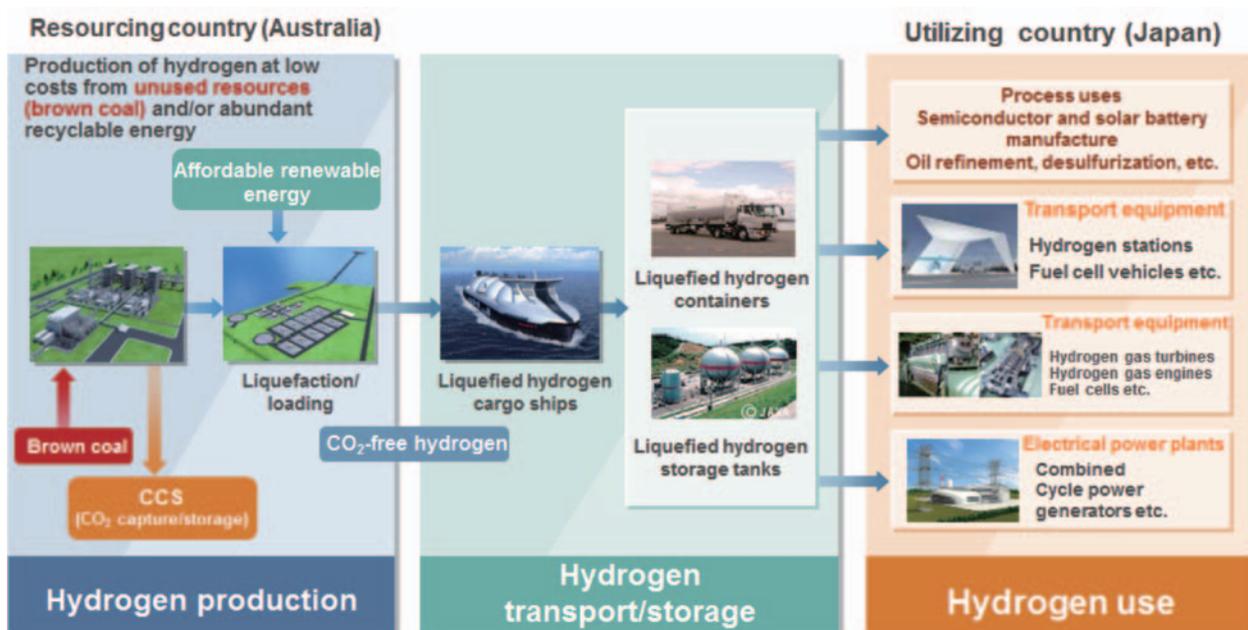


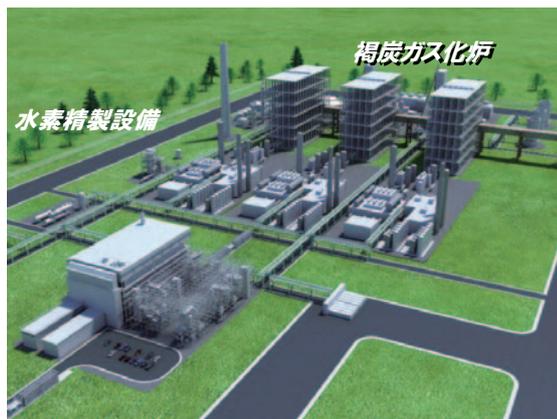
Fig. 1 Concept of CO<sub>2</sub> free hydrogen supply chain

原稿受付 2016年5月12日

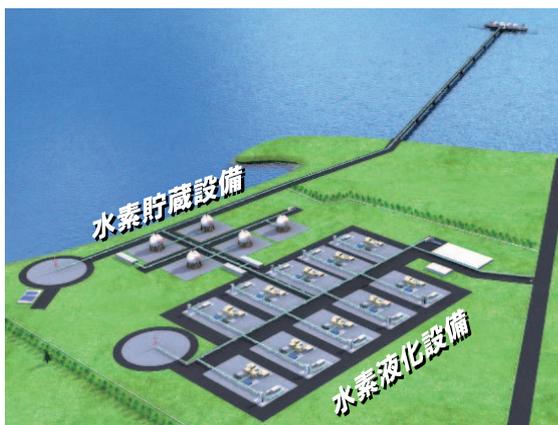
\* 1 川崎重工業(株) 技術開発本部 水素チェーン開発センター

\* 2 川崎重工業(株) 技術開発本部 技術研究所

〒673-8666 明石市川崎町1-1



(a) Hydrogen Production Plant



(b) Liquefied Hydrogen Loading Base

(c) Liquefied Hydrogen Carrier Ship (160,000 m<sup>3</sup>)Fig. 2 Feasibility study on CO<sub>2</sub> free hydrogen supply chain

いわゆる未利用資源の一種である褐炭から水素を製造し、その水素を日本に輸送して利用する構想を2010年に打ち出し<sup>(3)</sup>、その実現に向けて取組んでいる。

褐炭は、水分が多いため輸送効率が低く、乾燥すると自然発火し易いため、採掘地近傍で発電に利用されるに留まっている。世界に賦存する石炭の半分は褐炭である、特にオーストラリアのビクトリア州には莫大な量が存在する。褐炭をガス化し精製すると水素が得られるが、精製過程でCO<sub>2</sub>を副生する。このCO<sub>2</sub>を現地でCCS処理することで、CO<sub>2</sub>の大気排出を伴わない、いわばCO<sub>2</sub>フ

リーの水素が得られる。豪州連邦政府およびビクトリア州政府は共同してCCSプロジェクト「CarbonNet」を推進しており、ビクトリア州は褐炭とCCSを同時に利用できる適地となっている<sup>(4)</sup>。こうして得られたCO<sub>2</sub>フリー水素を、豪州から日本まで運んで利用する一連を、サプライチェーンになぞらえ、「CO<sub>2</sub>フリー水素チェーン」と称している。この構想の基本的な事業性を評価するために、商用化を想定して概念設計を行い（表1、図1、2）、設備費、運営経費を見積もって経済性評価（FS）を実施した。商用チェーンの水素供給規模は、燃料電池自動車300万台あるいは水素ガスタービンコンバインドサイクル発電所100万kW 1基が消費する水素量に相当する。

Table 1 Specifications of CO<sub>2</sub> free hydrogen supply chain

Brown Coal Demand	4.74 Mton/An
Hydrogen Production (CIF)	0.764 MTOE/An
Hydrogen Production (CIF)	2.51 GNm <sup>3</sup> /An
	225,500 ton/An
CO <sub>2</sub> Inventory Sequestered	4.39 Mton/An
Liquefied Hydrogen Carrier Ship	160,000 m <sup>3</sup> ×2 vessel

FSの結果、CIF（運賃・保険料込み渡し）コスト29.8円/Nm<sup>3</sup>となる良好な結果を得た。原料である褐炭およびCO<sub>2</sub>貯留のコストに占める割合は約12%である。CO<sub>2</sub>貯留のコストは「CarbonNet」のCO<sub>2</sub>引き取り費用であり、CO<sub>2</sub>の分離回収費用は水素製造に含まれる。水素製造および液化がコストに占める割合は、夫々、29%および33%と大きいことから、これらプロセスの効率向上およびシステムの合理化が重要である。

CO<sub>2</sub>フリー水素チェーンの特徴を纏めると次になる：

- ・未利用の化石燃料から水素を製造  
⇒ 大量・安定確保が可能
- ・水素製造時のCO<sub>2</sub>は現地で分離・貯留  
⇒ 使用時の環境性良好
- ・水素を扱う技術力・産業力が必要  
⇒ 産業競争力が向上
- ・高価な天然資源を単に買うのではない  
⇒ 国富流出を抑制

このように、CO<sub>2</sub>フリー水素は、将来のエネルギーに求められる条件に適合している。

なお、当FSはNEDO国際プロジェクトとして実施したものであり、日豪両政府から、その成果を認めて頂いている。すなわち、褐炭からのCO<sub>2</sub>フリー水素は安価で大量に安定して調達可能なエネルギーとして期待されている。

### 3. 水素の輸送・貯蔵

#### 3.1 液体水素 (LH<sub>2</sub>) と液化システム

水素キャリア (媒体) として, LH<sub>2</sub>, CGH<sub>2</sub> (圧縮水素ガス), 吸蔵合金, 化学媒体があるが, 商用レベルにあるLH<sub>2</sub>は大量輸送貯蔵に適し, 脱水素時のエネルギーを必要としない。LH<sub>2</sub>の密度 (70.8kg/m<sup>3</sup>) はLNG (443kg/m<sup>3</sup>) より軽い, 大気圧水素ガスの約800倍で容積効率が高い。LH<sub>2</sub>沸点 (20.3K) はLNG (112K) より約90℃低く, 容積当りの潜熱が小さく高効率の液化技術と高度な断熱技術が課題となる。

製造した水素ガスを液化するには, ガスを圧縮, 膨張するプロセスが必要となる。液化に要する最小仕事 (理想仕事, エクセルギ) は, プロセスの始点 (大気圧, 室温ガス) と終点 (LH<sub>2</sub>) の状態量から熱力学的に決まり, 約3.90 kWh/kg (0.35 kWh/Nm<sup>3</sup>) である。実際の液化仕事は, プロセスの機械損, 摩擦損等の不可逆性により最小仕事より必ず大きくなる。液化プロセスの一つであるクロードサイクルでは, 冷熱を発生するリサイクル系と原料水素を供給するフィード系から構成される。リサイクル系の冷熱は, 圧縮された冷媒ガスの膨張仕事により発生する。原料ガスは, リサイクル系で冷却され, 絞り弁で膨張液化する。実際の液化仕事は, 約1 kWh/Nm<sup>3</sup>程度で, 液化効率 (最小液化仕事/実際の液化仕事) は約30%程度である。

図3に当社が開発した国産初の大型5トン/日クラスの水素液化機の外観を示す。本機は, 膨張機にガス軸受膨張タービンを採用し高効率を目指している。現在, 試運転を行いながら構成機器の評価試験を行っている。商業チェーンでは, 液化機を大型化し液化効率を高めることでLH<sub>2</sub>製造コストの低減が重要となる。



Fig. 3 Hydrogen liquefaction system

#### 3.2 液化水素の輸送・貯蔵

LNGタンクの断熱構造には常圧の固体断熱 (ウレタンフォーム等) を適用するが, 低沸点のLH<sub>2</sub>では, 侵入熱の大幅低減の要求から真空断熱を採用する。図4に当社が建設した JAXA (航空宇宙研究開発機構) 種子島宇宙センター向けの国内最大LH<sub>2</sub>タンクの外観を示す。



Fig. 4 Liquefied hydrogen storage tank

本タンクは低温真空断熱のパーライト真空断熱を採用した二重殻式球形タンク形式で, 蒸発率は0.18% /日以下である。水素チェーンのパイロット, 実証チェーンでのLH<sub>2</sub>タンクの容量は夫々, 約2000 ~ 3000m<sup>3</sup>, 約5万m<sup>3</sup>クラスを計画している。

LH<sub>2</sub>海上輸送として, 2020年頃にパイロットチェーン用小型LH<sub>2</sub>運搬船 (容量2500m<sup>3</sup>) を, 2025 ~ 3030年頃には実証チェーン用大型LH<sub>2</sub>運搬船 (容積16万m<sup>3</sup>) を計画している。小型LH<sub>2</sub>運搬船のイメージを図5に示す。運搬船は, LNG内航船をベースとして蒸発ガスをタンク内に蓄圧する蓄圧式シリンダー型真空断熱方式タンク (容量1250m<sup>3</sup>) を2基搭載する。

LH<sub>2</sub>運搬船は世界に例がないが, 設計はLNG船に適用されるIMO (国際海事機関) のIGCコード「液化ガスのばら積み輸送のための船舶の構造及び設備に関する国際規制」がベースとなる。



Fig. 5 Pioneer carrier ship for liquefied hydrogen

当社は日本海事協会 (NK) から世界初となる小型LH<sub>2</sub>運搬船に搭載する貨物格納設備の基本認証を取得した (2013年末)<sup>(5),(6)</sup>。取得には, IGCコードに加えLH<sub>2</sub>物性を考慮した船型, 材料, 安全基準等の要件の提案, 及びHAZID解析を用いたリスク評価を行った。図6に示す格納設備のLH<sub>2</sub>カーゴクは, 内槽と外槽からなる横置き式シリンダー型二重殻タンクで, 断熱層に真空断熱, 内槽支持構造にGFRPを採用し断熱性能の向上を図っている。

IGCコードに規定されない貨物 (LH<sub>2</sub>) は荷出し国

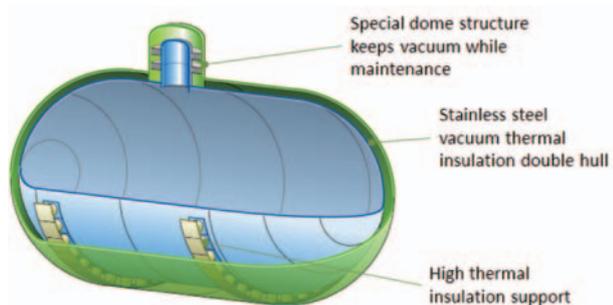


Fig. 6 Cargo contain system for liquefied hydrogen

(豪州), 受入れ国 (日本), 及び旗国 (日本) で承認した基準があれば条約整備までの暫定措置として輸送が認められる。現在, 両国政府間で安全基準の協議が進められ, またIMOの貨物運送小委員会でも両国が共同提案した安全要件が検討されている。

#### 4. 水素ガスタービン発電

CO<sub>2</sub>フリー水素が大量に輸入され水素発電に利用されるとCO<sub>2</sub>削減へのインパクトは非常に大きい。ここでは, 当社が取り組む水素ガスタービンの開発でもっとも重要な燃焼器の試験結果を紹介する。

発電用ガスタービン (図7参照) は, その構造上, 性状の異なる種々な燃料を扱うことが可能であり, 水素を燃料とすることも十分可能であるが, 以下に示す技術課題を克服できる水素特有の燃焼特性に対応した燃焼技術の開発が必要である。

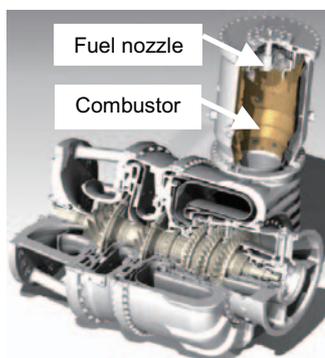


Fig. 7 Gas turbine power generator

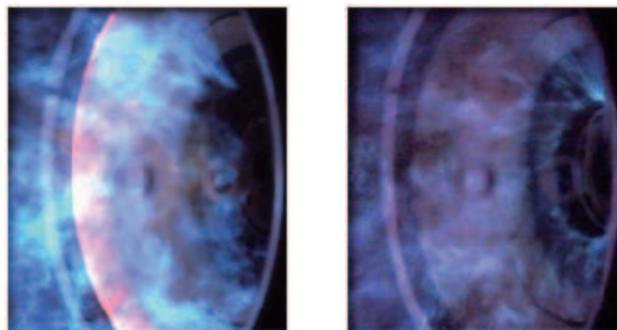
##### 4.1 燃焼器の技術課題

###### 4.1.1 燃焼器壁面の高温化

水素は天然ガスに比べ, 最大燃焼速度が速く, 消炎距離も小さいことから燃料ノズルなどの燃焼器部品に水素火炎が近づき, 高温化を起す可能性が高いため, 水素火炎が燃焼器部品の近傍に近づかないような燃焼技術の開発が必要である。

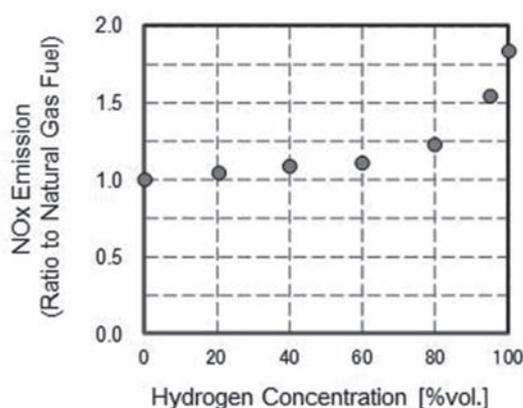
###### 4.1.2 窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) の増加

図8に燃焼器内での天然ガスと水素の混合気の火炎の様子を示す。天然ガス燃焼時は, 火炎が燃料ノズルから離れた場所に形成されるのに対し, 水素割合の増加に伴



Natural Gas	:80%	Natural Gas	:5%
Hydrogen	:20%	Hydrogen	:95%

Fig. 8 Combustion flame

Fig. 9 NO<sub>x</sub> generation with hydrogen in the mixture-fuel

い, 火炎の発生が燃料ノズル直下で安定するようになる。

このような反応域の変化及び局所的な火炎温度の上昇により, 水素火炎ではNO<sub>x</sub> (窒素酸化物) の発生量が天然ガスに比べて, 約2倍に増加する。図9に燃焼器出口でのガス温度を一定に保ち, 水素割合を変化させた場合のNO<sub>x</sub>の変化を示す。

##### 4.2 水素燃焼方式

これらの技術課題を克服し, 水素を安定かつ低NO<sub>x</sub>で燃焼させるための3種類の燃焼技術の開発を実施しおり, 以下にそれぞれの技術内容を示す

###### 4.2.1 天然ガスと水素の混焼

図10に最新の天然ガス用の低環境負荷型燃焼器 (ドライ低NO<sub>x</sub>燃焼器: 空気と燃料ガスを予め混合してから燃焼させる希薄予混合燃焼による低NO<sub>x</sub>燃焼, NO<sub>x</sub>の低減に水や水蒸気を用いないためドライ方式と称される) の構造を示す。パイロットバーナ, 低NO<sub>x</sub>燃焼方式のメインバーナ及び追焚きバーナの三つのバーナで構成する。

追焚きバーナには上流のメインバーナ部で燃焼した後の高温・低酸素な燃焼ガスが供給されるため, 追焚き燃料ガスの燃焼反応が緩やかとなり, 広い運転範囲で低NO<sub>x</sub>燃焼が可能である。

この燃焼器の追焚きバーナのみに水素を供給する事に

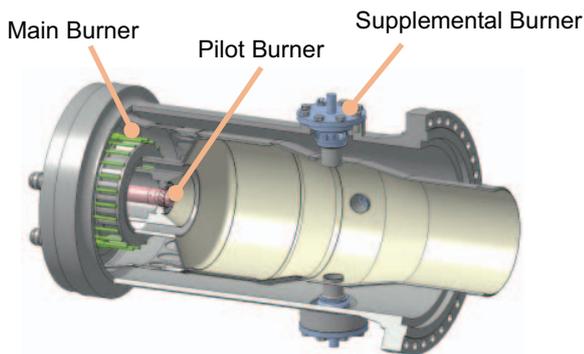


Fig.10 Dry low NOx emission combustor for natural gas fuel

よって天然ガスと同様に低NOx燃焼が可能である。水素投入量は、燃料ガス全体の60体積%（熱量ベースで約30%）まで可能である。

図11に追焚きバーナで天然ガスと水素を燃焼したときの燃焼器出口ガス温度とNOx排出量の関係を示す。破線は設計点相当を示す。追焚き燃料ガス出し始めは、天然ガス、水素ともNOx排出量に変わりはない。高負荷側でのNOx排出の立ち上がりが水素の方が早く生じるものの、設計点相当でのNOx排出量の差は僅かであり、天然ガスと変わらずエンジンでNOx排出量 25ppm保証（残存酸素15%換算）が可能である。

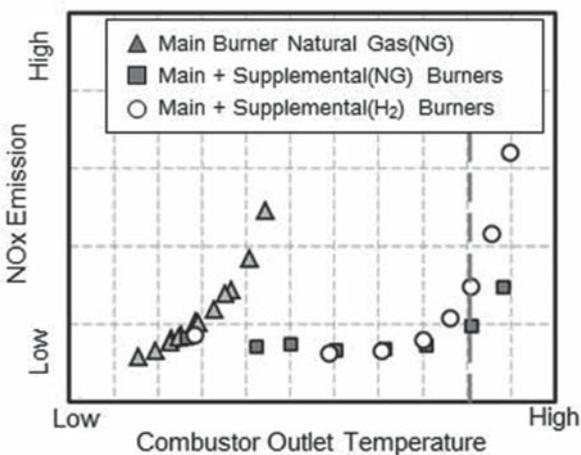


Fig.11 NOx generation dependence on fuel at supplemental burner

4.2.2 水素専焼（ウェット方式低NOx化）

現在、ガスタービンの燃料として高濃度の水素の様な反応性の高い燃料ガスで発電する場合、火炎の安定性に優れる拡散燃焼方式が使われることが多い。この燃焼方式では、安定性に優れる反面、NOxの排出量が多大となる。このため、燃焼ガス中のNOxを低減する手法として、水や水蒸気を噴射するウェット方式が用いられる。これは、火炎の高温部で発生するNOxに対し、燃焼器内に水や水蒸気を噴射し、局所的な高温箇所を無くすことによりNOx排出を抑制する手法である。

図8及び図9に示したように、燃料ガス中の水素割合

により火炎形成位置、火炎形状、高温発生域が変化し、NOx排出量が増加する。天然ガス燃焼時と同じ水噴射量で、NOx排出量を抑制するのは難しくなる。水素の火炎形成位置、高温発生域に合わせ、水素と水や水蒸気の分布を一致させる、もしくは水素と燃焼用空気の混合域に水や水蒸気を供給する必要がある。

図12に水素用燃料ノズルの一例を示す。水素の分布と水の分散を一致させるため、燃料噴射弁内の水素の高速流れに水を噴射し、水素の流れにより水を細かく微粒化し、水素と混合した後に燃焼器内に投入する。



Hydrogen/Natural Gas

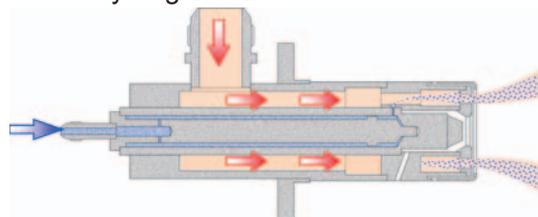


Fig.12 Hydrogen-natural gas flexible fuel burner with water injection for NOx reduction dependence on fuel at secondary burner

図13に試作燃料ノズルでの水噴射試験時の水噴射量とNOx排出量の関係を示す。水素と水を別々に噴射した場合、NOxの低減が緩やかで、規制値レベルに届かない。噴射弁内で水素と水を混合してから燃焼器に投入する場合、水燃比1程度で現行の天然ガス+水噴射と同程度までNOxの低減を図ることができている。ここで水燃比は、 $\text{水燃比} = \text{水} \cdot \text{蒸気} \text{の質量流量} / \text{燃料ガス質量流量}$ である。

4.2.3 水素専焼（ドライ低NOx燃焼）

天然ガス用のドライ低NOx燃焼器では予混合燃焼により低NOx燃焼を実現しているが、水素では反応性が高いため、予混合燃焼をすると逆火（混合気に火炎が遡る現象）が発生し、燃焼器部品の焼損が生じる。そのため、水素用ドライ低NOx燃焼器では予混合燃焼を採用することは困難である。

そのため、当社では水素用ドライ低NOx燃焼器として、微小な水素火炎を用いた燃焼器の開発をSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）エネルギーキャリアのプロジェクトとして実施してきた。図14に微小な水素火炎を用いた低NOx燃焼器の概念図を示す。

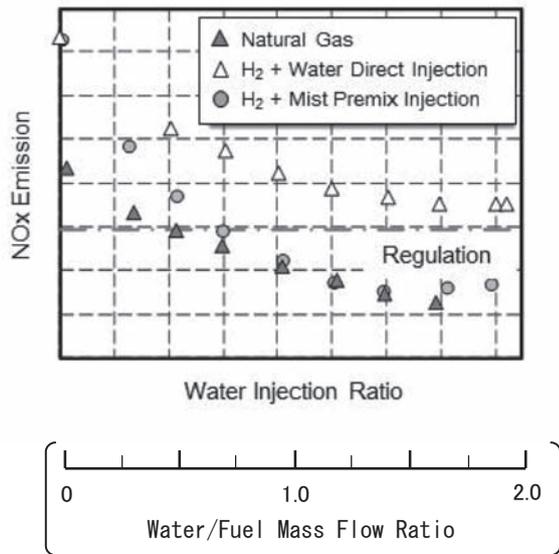


Fig.13 NOx emission reduction with water injection

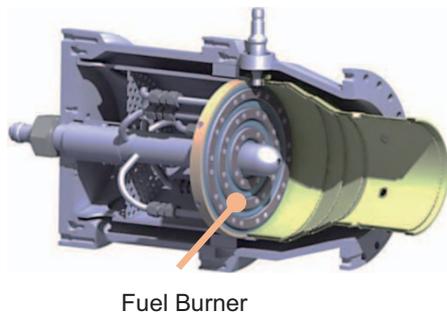


Fig.14 Dry low NOx emission hydrogen combustor

この燃焼器を用いた実機ガスタービンと同等の条件（圧力，温度）での燃焼試験をアーヘン工科大学の燃焼試験設備で実施しNO<sub>x</sub>の排出量が大气污染防治法を大きく下回る40ppm保証（残存酸素15%換算）となることを確認している。

## 5. 結言

「CO<sub>2</sub>フリー水素エネルギーチェーン」構想，および関連する技術開発，特に発電用水素ガスタービンの状況を述べた。これら技術の実用化は水素社会の実現に大きく貢献すると考える。

その実現に向けて，当社は，水素源となる資源からの水素製造，輸送・貯蔵，利用に至るチェーンで必要となる技術確立と実証を主目的とし，技術研究組合「CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構（HySTRA）」を，岩谷産業(株)，電源開発(株)およびシエルジャパン(株)と共同で設立した。この取組は，NEDOの補助事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」に採択され，2020年の実証試験開始を目指して，現在，基本設計を進めている。

大量水素の導入とエネルギー利用には，技術開発のみならず，経済性と安全性を両立した大型インフラに関連する規制・基準の整備も重要であり，技術研究組合および関係各所と連携して，世界標準の構築に寄与していきたい。

## 6. 引用文献

- (1) 資源エネルギー庁，水素・燃料電池戦略ロードマップ <<http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004-2.pdf>>（参照2014年6月24日）。
- (2) 資源エネルギー庁，水素・燃料電池戦略ロードマップ改訂版 <<http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009-c.pdf>>（参照2016年3月23日）。
- (3) 川崎重工業(株) 中期経営計画（2010～2012年度） <[http://www.khi.co.jp/ir/pdf/presentation\\_1004\\_2.pdf](http://www.khi.co.jp/ir/pdf/presentation_1004_2.pdf)>（参照2010年4月28日）。
- (4) Kenji Inoue, Yasushi Yoshino, Shoji Kamiya, Eiichi Harada, Feasibility study of CO<sub>2</sub>-free hydrogen energy supply chain utilizing Australian brown coal linked with CCS, Proc. of CRYOGENICS 2012 IIR International Conference, (2012), pp.183-187.
- (5) 海事プレス，液化水素船の貨物タンクの開発，（2014年2月7日），p. 14.
- (6) 川崎重工プレスリリース，川崎重工，液化水素運搬船用貨物格納設備の基本承認を日本海事協会より取得 <[https://www.khi.co.jp/news/detail/20140106\\_1.html](https://www.khi.co.jp/news/detail/20140106_1.html)>（参照2014年2月6日）。

## 日本ガスタービン学会入会のご案内

日本ガスタービン学会は、「エネルギー」をいかにして効率よく運用し、地球規模の環境要請に応えるかを、ガスタービンおよびエネルギー関連分野において追求する産学官民連携のコミュニティーです。

会員の皆様からは、「ガスタービン学会に入会してよかったと思えること」の具体例として次の様な声が寄せられています：

- タテ（世代）とヨコ（大学、研究機関、産業界）の交流・人脈が広がった。
- 学会誌が充実しており、学会・業界・国外の専門分野の研究動向や技術情報が効率的に得られた。
- ガスタービンに熱い思いを持った人達と、家族的雰囲気の中で階層を意識せず自由な議論ができ、専門家の指導を得られた。

### 学会の概要（2015年3月現在）

会員数：2,068名（正会員 1,995名，学生会員 73名） 賛助会員：102社  
 会員の出身母体数：企業・研究機関・官公庁等 約300，学校 約100

### 会員のメリット

個人会員（正・学生会員）：

学会誌無料配布（年6回）、学術講演会の論文発表・学会誌への投稿資格、本会主催の行事の参加資格と会員参加費の特典、本会刊行物の購入資格と会員価格の特典、調査研究委員会等への参加  
 賛助会員：

学会誌の無料配布、学会誌広告・会告掲載（有料）、新製品・新設備紹介欄への投稿、本会主催行事参加および出版物購入について個人会員と同等の特典

### 入会金と会費

会員別	入会金	会費（年額）	後期入会時 会費（初年度のみ）
正 会 員	500円	8,000円	4,000円
正 会 員（65才以上※）	500円	5,000円	2,500円
学生会員	500円	2,500円	1,250円
賛助会員	1,000円	一口 70,000円とし、一口以上	一口 35,000円

※当該年度3月1日現在

後期・・・9月1日～翌2月末まで

### 入会方法

学会ホームページにて入会手続きができます（<http://www.gtsj.org/index.html>）。

学会事務局にお電話いただいても結構です。申込書を送付致します。



公益社団法人

日本ガスタービン学会

Gas Turbine Society of Japan

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402

電話番号：03-3365-0095

E-mail: [gtsj-office@gtsj.org](mailto:gtsj-office@gtsj.org)

# 編集 後記

昨年も7月号のアソシエイトエディターを担当させていただきました。本号の編集後記を書くにあたり、あれから既に一年が経過してしまったことを気づき、時の流れをますます速く感じるようになっていくことで自らの歳の蓄積を再認識します。個人的にはこの一年は国際学会に参加する機会が多い一年でした。虎の門ヒルズでのIGTC、早稲田でのAICFM、ソウルでのAJK2015など国内あるいはアジアでの国際学会に参加させていただくことで、ガスタービンを含めターボ機械の最新技術動向を知り、技術の進歩を多く感じることができました。

さて、今月号の学会誌は「水素エネルギー利用社会へのあゆみ、ガスタービンと燃料電池の最新情報」を特集しました。近年、究極のクリーンエネルギーとして、特にわが国では化石燃料を輸入に頼らざるを得ない状況の中でCO<sub>2</sub>フリーの代替エネルギーである水素エネルギー技術が再び脚光を浴びてきているように感じます。我が家でもそろそろ燃料電池にしようか、と夕飯の話題になるなど家庭においても水素が身近になりつつあります。

本特集では、サンシャイン計画に始まり40年以上におよぶわが国の水素エネルギー技術開発のこれまでの歩みから振り返り、最近の水素エネルギーチェーン開発、家庭用ならびに事業用燃料電池や燃料電池車、航空用への燃料電池応用、ガスエンジンへの水素燃料利用技術、燃料電池とマイクロガスタービンのハイブリッド発電、さらには革新的低炭素石炭火力発電など解説をいただきました。このような水素関連のトピックスの広がりを知り、基礎的な技術開発から始まり、国際的な社会情勢の変化にも影響されて決して成功ばかりではなかったわが国の開発プロジェクトの下でもその成果は着実に国内に蓄積されていき、今日の日本は世界をリードする水素エネ

ギー利用関連技術を持つに至っていることがわかります。製品として世の中に出し、利益を上げるまでには非常に長い期間が必要である水素エネルギー技術分野での挑戦を粘り強く継続されている方々に心から敬意を表します。技術を開花させるまでにはやり通すことが大切であることを感じました。今後、日本ならびに世界の水素エネルギー関連技術がどのように発展していくのか、将来水素社会がどのように実現されていくのか、楽しみに感じます。

最後に、この場をお借りいたしまして、お忙しい中本号記事を執筆いただきました皆様に熱く御礼申し上げます。  
(渡邊啓悦)

## ● 7月号アソシエイトエディター

渡邊 啓悦 (荏原製作所)

## ● 7月号担当委員

石川 揚介 (東芝ジーイー・タービンサービス)

北條 正弘 (宇宙航空研究開発機構)

## (表紙写真)

今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。

詳細については、下記記事をご参照ください。

### ・「水素を用いた自立型エネルギー供給システム」

..... (P.235 ~ 240)

### ・「燃料電池車MIRAI, 水素社会の実現に向けて」

..... (P.265 ~ 270)

### ・「航空機用燃料電池技術の最新研究状況」...

..... (P.271 ~ 276)

だより

## ✪事務局 ✪

先月、ASME Turbo Expo 参加のため、ソウルに行ってきました。国際会議場のある「COEX」は、ホテルや地下鉄の駅2駅が直結し、また、都心空港ターミナルやショッピングモール、レストラン街が併設されており、とても便利な場所でした。都心空港ターミナルは、金浦空港や仁川空港に行く前に、その場で出国手続き、搭乗手続きができ、スーツケースも渡してしまえるので、それから搭乗時間まで身軽に自由に行動できるという便利なシステムで、私も最終日には早めにスーツケースを預け、近くのデパートを探検してきました。地下の食品売り場は日本のデパート同様、おいしそうな洋菓子やパンやお惣菜が並んでいて、その横の韓国海苔のコーナーでは、その場で海苔に自家製ごま油を塗って袋詰めしてい

る海苔屋さんもあり、思わず、海苔を買ってしまいました。フードコートもメニューが充実していて、どうしても早く気がつかなかったのだらうと後悔。今度は観光で訪れてゆっくり食べ歩きたいと思いました。

Turbo Expoの展示会場では、今年も日本ガスタービン学会のブースを出し、大勢の方々に立ち寄っていただきました。日本留学中にガスタービン教育シンポジウムに参加していた中国人の方が中国の大学のProfessorになってブースを訪れ、私のことを覚えていて声を掛けてくれたり、海外在住の会員の方が「僕も会員ですよ」と話しかけてくれたりと、今回もまた嬉しい出会いがたくさんありました。

(中村優美)

## 学会誌編集および発行要領（抜粋）

2015年4月23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。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、速報（研究速報、技術速報）、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
速報	4ページ以内
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. 依頼原稿の執筆者は、本会誌の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引用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、本学会の事務局（学会事務局）から原則として謝礼（図書カード）を贈呈する。
8. 依頼原稿および投稿原稿の執筆者には、抜刷を10部贈呈する。
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）  
ニッセイエプロ(株) 企画制作部  
学会誌担当：山田 裕子  
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
TEL：03-5733-5158  
FAX：03-5733-5167  
E-mail：eblo\_h3@eblo.co.jp

## 技術論文投稿要領（抜粋）

2015年3月10日制定

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
  - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
  - 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) 原稿執筆要領に従って執筆された、モノクロの日本語原稿であること。
  - 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. 原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
3. 著者がカラー1ページあたり50,000円を負担する場合には、カラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は、原稿執筆要領に従って作成された印刷原稿または原稿電子データを、所定の論文表紙および英文アブストラクトとともに学会誌編集事務局に提出する。
5. 投稿された論文は、論文査読に関する内規に従って査読を行い、論文委員会が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. 本技術論文の著作権に関しては、学会誌編集および発行要領（抜粋）9.および10.を適用する。

### 日本ガスタービン学会誌

Vol.44 No.4 2016.7

発行日 2016年7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 吉田 英生

発行者 久山 利之

〒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 ニッセイエプロ(株)

〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4

Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5167

©2016, 公益社団法人日本ガスタービン学会

### 複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、一般社団法人学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複写センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F

FAX：03-3457-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致していません。直接、本学会へお問い合わせください。

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## 水素を用いた自立型エネルギー供給システム

中島 良\*<sup>1</sup>  
NAKAJIMA Ryo

キーワード：水素，再生可能エネルギー，自立型エネルギー供給，電力貯蔵，燃料電池

Hydrogen, Renewable Energy, Autonomous Energy Supply System, Energy Storage, Fuel Cell

### 1. 緒言

世界に先駆けて2009年に日本で商用販売が開始された家庭用の燃料電池コージェネレーションシステム「エネファーム」や，2014年以降に一般販売が開始された燃料電池自動車などが先導する形で，国がエネルギー基本計画の中に明記して実現を目指している水素社会に向けた動きが活発化している。過去にも国内で水素エネルギー関連の大型プロジェクトが進められた例があるが，昨今の水素利用側の燃料電池の技術，特に耐久性や低コスト化における技術開発の進捗は著しく，水素社会実現に向けたロードマップもリアリティが増してきているものと思われる。

東芝は，これまでエネファームに代表される燃料電池の技術や，高効率の水素製造システム，あるいは系統制御を含めてエネルギーを高効率に扱うエネルギーマネジメントシステム（EMS）等の水素社会を支える技術開発に長年取り組んで来た。現在，これらコアとなる技術を統合して，水素社会に向けたシステム製品，ソリューション及び技術開発を進めているところである<sup>(1),(2)</sup>（図1）。

本稿では東芝の水素関連の取組の中から，再生可能エネルギーにより水電解して得られた水素を，地産地

消で様々な用途向けに電気や熱として効率的に活用する自立型のエネルギー貯蔵・供給システム（商品名H2One™）について中心に述べる。このシステムは，2015年の4月から川崎市で，非常時の防災用（BCP対応）向けとして実証を開始しており，横浜市の港湾施設におけるBCP対応システムや，佐世保市にあるホテルのエネルギー100%自給自足可能な自立型水素エネルギー供給システムとして，それぞれ2016年3月から運用が開始されている。またこのシステムをトラックに搭載して移動可能としたモデルや，さらに同様のシステムを鉄道の駅に設置する計画も進められている。いずれのシステムも，太陽光発電等の再生可能エネルギーを一次エネルギー源として，変動する発電量を平準化して一旦水素の形でエネルギーを貯蔵し，純水素型燃料電池で，電気とお湯を必要な時に施設に供給することができるCO<sub>2</sub>フリーのシステムである。

以下，それぞれのシステムのコンセプト，開発事例，今後の展開や課題等について述べる。

### 2. 再エネ水素を利活用する自立型エネルギーシステム（H2One™）

#### 2.1 自立型エネルギーシステムのコンセプト

資源の少ないわが国においては，輸入される化石燃料への依存を低減してエネルギーセキュリティを確保することや，脱化石燃料によるCO<sub>2</sub>の削減等が重要と認識されている。この対応の一つとして再生可能エネルギーの導入を進めることが急務となっているが，これらは天候等に大きく左右される自然エネルギーであり，天候状況に伴い電力の出力も大きく変動するため，再生可能エネルギー由来の電源が増えてきた昨今，電力会社の系統への接続が制限される状況が生じている。このような不安定な電力を有効かつ十分に利活用するためには，その貯蔵・利用技術が鍵となっている。東芝ではそのエネルギー貯蔵・利用方法の一つとして，水素エネルギーの活用に着目している。

図2にその利活用の仕方のイメージを示す。例えば太陽光発電（PV）システムのみ装備した場合，電力需要とPV発電量には不一致が生じるので，PVで発電した



Fig. 1 Hydrogen solutions that Toshiba is aiming

原稿受付 2016年5月10日

\* 1 (株)東芝 次世代エネルギー事業開発プロジェクトチーム  
〒212-8585 川崎市幸区堀川町72-34

電力を一旦エネルギー貯蔵する必要がある。一般的には蓄電池の利用が行われているが、蓄電池の利用に加えて、一旦水素にエネルギーを変換することで、一週間以上の長期にわたってもエネルギーを保存でき、かつ負荷に応じて出力することができる。水素としてエネルギーを貯蔵する点の大きなメリットは、蓄電池と異なり、省スペースでかつ大容量を貯蔵ことができ、更に水素容量は減衰しないことから、長期間に渡って貯蔵できる点にある。後で述べるリゾートホテル向けの例では、夏季の豊富な日照によるPV発電のエネルギーを水素で貯蔵し、冬季に燃料電池で発電して利用する季節間の「エネルギータイムシフト™」を実現している。

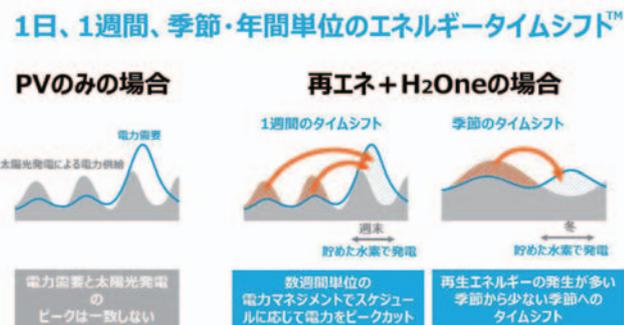


Fig. 2 “Energy time-shift” to match the PV power generation and electricity demand

東芝でのエネルギーの貯蔵・利用のコンセプトとしては、

- 1) 再生可能エネルギーの直接利用
- 2) 蓄電池による電力の貯蔵・利用
- 3) 水素エネルギーによる電力の貯蔵・利用

の要素から構成されている。これらの構成要素に対して、水素EMSを用い、全体を制御可能であることが本コンセプトの特長である。このコンセプトに基づいて、需要側における電力利用状況に応じて、システム全体でのエネルギー利用の最適化を図る自立型水素エネルギー貯蔵・供給システム (H2One™) を開発している。

H2One™を構成する主な装置は下記の5つである。(図3)

- 1) 再生可能エネルギー (太陽光, 風力等) 発電装置
- 2) 蓄電池
- 3) 水電解式水素製造装置
- 4) 水素貯蔵タンク
- 5) 燃料電池

再生可能エネルギーにて発電した電気を直接利用するだけでなく、余剰の電力を蓄電池へ貯蔵する、あるいはその余剰電力を用いて水を電気分解することで、水素を発生させる。その水素をタンクに貯蔵し、需要側に応じて水素を燃料電池へ送り、電気と温水を供給できるモデルである。また、これら構成装置のスペックはユーザー毎の利用状況に応じたカスタマイズが可能である。

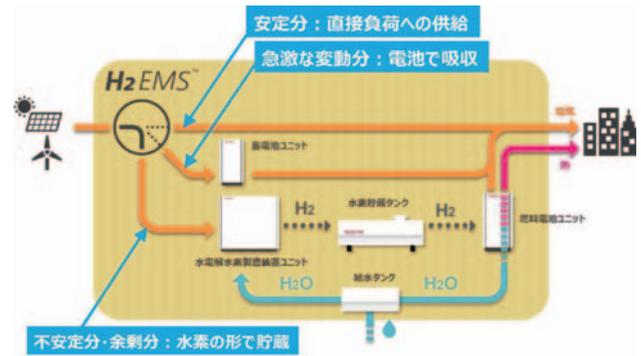


Fig. 3 Basic system diagram of hydrogen-based autonomous energy supply system H2One™

## 2.2 H2One™ BCPモデル

2011年の東日本大震災における未曾有の大災害は、巨大地震や長期間の余震、大津波、火災や土砂災害と多様でかつ広域に渡って発生した。人的被害を最小限にするためには、広域にて点在する避難所でのエネルギー供給が重要であり、東日本大震災では系統電力の脆弱性も浮き彫りとなった。また、非常用発電機を装備している施設でも、保管していた燃料を使い切ってしまった後に、数週間にわたり燃料の補給が途切れるといった事態も発生した。その結果、各コミュニティレベルにおいて非常用電源をいかに確保するかが重要と認識された。その解決策として注目され、期待されているのが再生可能エネルギーの利用であるが、前述のように日々の変動が大きく、天候にも左右されるため、災害時における直接利用の観点から未だ大きな課題を有している。そこで、災害時での電力貯蔵、更に熱の利用も実現することを目的として、H2One™のBCPモデルの開発を行った。なおBCP (Business Continuity Plan) とは、災害等の緊急事態においても、事業の損害を最小限となるように継続できる、あるいは早期復旧が可能であるよう、平常時に実施すべき取組を取り決めておく計画のことである。

本BCPモデルにおいて平常時には、水素EMSを用いて、水素の製造量、蓄電量、発電量などを最適に制御し、電力のピークシフトおよびピークカットに貢献している。いざ災害が発生した時には、ライフラインが寸断された場合においても、貯蔵している水素からエネルギーを供給でき、更に太陽光発電も稼働できるため、自立して電気と温水を供給することができる。川崎にて実証しているシステムでは、300名の避難者に対し、約7日間分の電気と温水を供給することが可能である。加えて本モデルは20ftコンテナ3台にパッケージングされているため、トレーラーでシステム自体を被災地に輸送することも可能という特長を有する。

本モデルは川崎市臨海部の公共施設「川崎市港湾振興会館および東扇島中公園」(以下、川崎マリエン) 内に設置して、2015年4月20日より実証運転を開始している。図4(a), (b)に外観写真を示す。



Fig. 4 (a) Outlook of H2One™ BCP model (from side)



Fig. 4 (b) Outlook of H2One™ BCP model (from top)

また表1に実証モデルの概要を示す。本実証運転においては、災害時に周辺地域の帰宅困難者の一時滞在施設として指定されている川崎マリエンにて、水素BCPシステムおよび平常時の水素エネルギーマネジメントシステムの有効性を検証している。またシステム全体の高効率化を進めるべく各モードでの詳細な試験を実施している。

実証試験の一例を図5に示す。これは、水素タンクに貯蔵された270m<sup>3</sup> (Normal) の水素で、避難所生活で消費される負荷を抵抗器で模擬的に与え、EMSで発電量と蓄電池の充放電や、水素製造、燃料電池発電などを最適に運用した時のデータである。7日後にも水素は約40m<sup>3</sup> (Normal) 残っており、また蓄電池も残量を50%以上残したままで自立できることを実証できた。

また、H2One™の特徴として、常時は無人運用が可能としている。これは水素の貯蔵圧力を0.8MPaと比較

Table 1 Specification of BCP demonstration model

システム仕様 (最大値)	水素製造量	1m <sup>3</sup> (Normal)/h
	水素消費量	2.5m <sup>3</sup> /h
	水素貯蔵量	33m <sup>3</sup> , 0.8MPa, (270m <sup>3</sup> (Normal))
	温水供給量	75L (40℃)
	太陽光発電量	30kW
	燃料電池出力	3.5kW
	電力貯蔵量	350kWh
	燃料電池効率	95% (発電55%, 温水40%)



Fig. 5 Example of demonstration result of the one-week stand-alone operation

的低圧にしており、高圧ガス製造にかかわる有資格者の常駐を不要にしたことで実現した。一方で、水素を扱うシステムであるので、安全対策には万全を期している。図6に図示するように、水素安全においては(1)漏らさない、(2)検知する、(3)溜めない、の3点を守って構成されている。

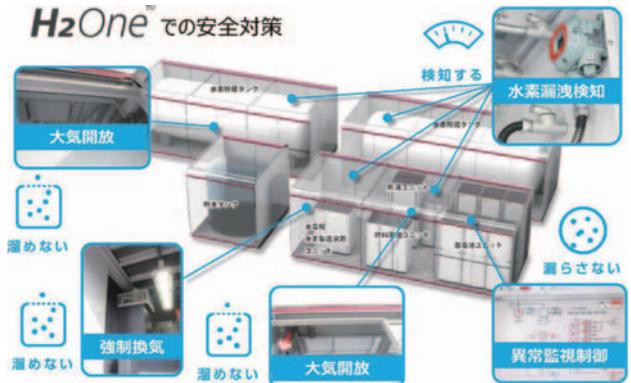


Fig. 6 Safety-conscious design of H2One™

このBCPモデルの商用一号機となったのが、2016年3月に運用を開始した、横浜市港湾局向けの横浜港流通センターに設置のH2One™ (図7) である。このシステムでは、コンテナが2つのパッケージで、川崎マリエンのモデルよりも水素貯蔵量が少ないが、災害発生後に72時間の情報伝達などに必要な電力をセンターに供給する能力を有している。

さらに、東芝ではJR東日本からJR南武線武蔵溝ノ口駅に設置するBCP対応のH2One™を受注しており、2017年春からの稼働予定で製作中である。この例では、非常時には太陽光発電で製造し貯蔵しておいた水素を、駅舎の照明などに供給することが計画されている。

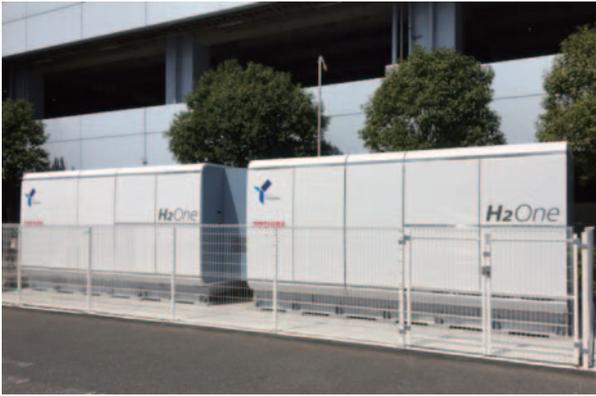


Fig. 7 H2One™ BCP model installed at the city of Yokohama's port & harbor bureau

### 2.3 H2One™ リゾートモデル

リゾート地においては、豊かな自然環境が基盤となっており、CO<sub>2</sub>の削減や再生可能エネルギーの積極的な導入等、環境に高く配慮した取り組みが国内外で精力的に推進されている。東芝ではホテル・リゾート施設内のエネルギーを100%自給自足できるCO<sub>2</sub>フリーの自立型水素エネルギー供給システムH2One™リゾートモデルを開発した。これはエネルギーインフラが十分整っていない地域においても、CO<sub>2</sub>フリーでかつ自立型で設置できるエネルギー供給システムとなっている。

前述のBCPモデルと異なる点は、年間を通じて大量の水素を貯蔵し、かつ長期間に渡って有効に水素を利用できる技術が必要なことにある。省スペースで大容量、かつ安全で長期間水素を貯められる方法としては、水素吸蔵合金が有効である。東芝における水素吸蔵合金の開発は古く、1984年に水素吸蔵合金を電池として利用する研究を世界に先駆けて報告し、ニッケル水素電池の商用化を実現して、1994年にはトップシェアを獲得した。更に2000年には超格子構造を有する全く新しい水素吸蔵合金である“LaMgNi系「超格子合金」”の合成に成功し、これは現在のニッケル水素電池に広く採用されている。水素吸蔵合金は体積当たりの水素貯蔵量が多く、また吸蔵後は水素化合物へと変化するため、低圧においても水素を高容量で安全に貯めることができる魅力的な材料である。ニッケル水素電池以外の水素吸蔵合金の利用用途として、水素吸蔵合金タンクが有望であり、水素エネルギーシステムには非常に適していると言える。

今回開発したH2One™リゾートモデルは、この水素吸蔵合金タンクを水素貯蔵方法として採用し、新たな水素吸蔵合金タンクを設計・開発した。前項のBCPモデルにて採用していた低圧水素ガスタンク（0.8MPa）の体積を約1/10サイズにまで小さくすることができ、ホテルのような敷地面積が限られる場所への設置が可能となった。更に水素化合物として水素を貯蔵するため、安全性も向上するメリットがある。図8にリゾートモデルのシステム構成図を示す。前記の川崎市に設置したBCPモデル

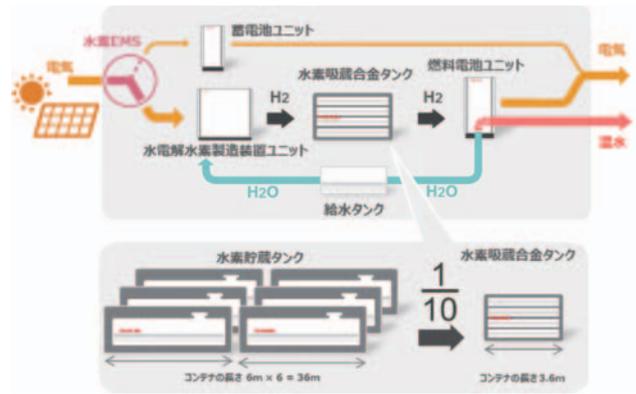


Fig. 8 System diagram of an H2One™ resort model

のタンク6台（36m）分を3.6m幅まで省スペース化を実現している。

また年間の需要電力量を全て賄うことができるCO<sub>2</sub>フリーの完全自立水素システムを構築するには、太陽光発電が生み出すエネルギーをいかに年間通じて効率良く貯蔵・利用していくかが大きな鍵となる。そこで、当システムでは次のように運用している。

1) 朝から夕方は、太陽光発電にて発電した電気は最大限に直接利用する。余剰電力は蓄電池へ貯蔵し、更に余剰となる電力で水素を製造し、水素吸蔵合金タンクへ貯蔵する。

2) 夜から朝にかけては、太陽光パネルからは電気が供給されないため、蓄電池から電力を供給し、更に燃料電池からは電力と温水を供給する。

図9にこのモデルの年間のエネルギー収支のシミュレーション結果を示す。

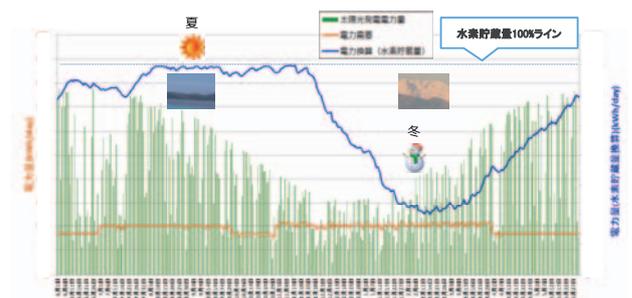


Fig. 9 Annual balance of amount of PV power generation and hydrogen energy

最大の特徴は、

1) 夏季に太陽光発電の余剰電力を水素に変換して、その水素を水素吸蔵合金内に蓄えておく、

2) 冬季には日照量が減って太陽光発電の出力が下がってくるため、夏季に貯蓄した水素を利用して発電することにある。このように、太陽光発電からの電力を夏季から冬季までシーズンシフトすることができるのは水素ならではの技術であり、これを蓄電池で構築することは困難と思われる。

本モデルはハウステンボスが様々な最先端技術を導入し、環境にも配慮したスマートホテル「変なホテル」第二期棟に設置され、2016年3月にオープンした(図10)。ホテル1棟分(12室)の電力量をCO<sub>2</sub>フリーで年間を通じて供給することができるリゾートモデルである。今後は更なる水素備蓄機能の強化による、完全地産地消型のエネルギー供給システムとしての展開を予定している。



Fig.10 H2One™ resort model installed at “Henn-na Hotel” in the Huis Ten Bosch theme park

2.4 H2One™ 車載モデル

これまで紹介した定置用のH2One™システムは、いずれも12ftあるいは20ftの標準サイズのコンテナに収容することで高い可搬性を有している。この定置モデルからさらに小型化することで機動性を高め、災害時等の迅速なエネルギー供給を実現するために、図11に示す車載モデルも開発した。

H2One™車載モデルは、4トントラック2台で構成されており、トラックには水素製造装置、水素貯蔵タンク、蓄電池、純水素燃料電池を搭載している。水素貯蔵タンクには、水素を高密度で貯蔵できる水素吸蔵合金を採用し、従来のBCPモデルの貯蔵能力を維持しながらも



Fig.11 H2One™ truck model

小型化することで、機動性を高め、災害時には被災地に短時間で移動し、電気とお湯の供給を行う電源車として活用できる。また、騒音や振動がほとんど発生しない純水素燃料電池で発電するため、夜間の使用にも適している。

2.5 さらに展開

今後のさらなる展開としては、上記リゾートモデルの面展開として、H2One™離島モデルの構築を目指している。離島地域では本土からの系統から切り離されている所が多く、その大半はディーゼル発電に頼っているために、発電のエネルギーコストが高い。電力自由化に向けて、離島における電力コストの高さは、今後大きな課題となると予想される。燃料油の輸送・貯蔵コストやCO<sub>2</sub>の排出量増大、非常時における対応等を総合的に鑑みると、再生可能エネルギーの利用促進が急務であり、エネルギーセキュリティの観点からも水素エネルギー利用のメリットは大きいものとなる。上記リゾートモデルを離島地域へ面的展開するメリットとしては、再生可能エネルギー源として、太陽光発電以外にも、風力、地熱、水力、波力、潮力、バイオマス等々、様々なエネルギー源が豊富にある地域が多く、更に限られた地域での電力利用・融通が期待できることにある。

また別の展開としては、ビル・事業所等向けにH2One™を設置して、常時はFCVやFCフォークリフトなどの水素燃料を供給し、また災害発生時にはBCP対応に適用することも考えられる。これらを発展させると、EMSによりエネルギーが最適運用される水素タウンの実現も視野に入ってくる。(図12)

開発した自立型水素エネルギー供給システムのH2One™はBCPモデル、リゾートモデル、離島モデルなどを中心として、水素地産地消型のソリューションとして展開し、更に様々な技術開発を推進していき、水素の製造から利活用までを高効率で実現する水素関連事業へ注力していく。

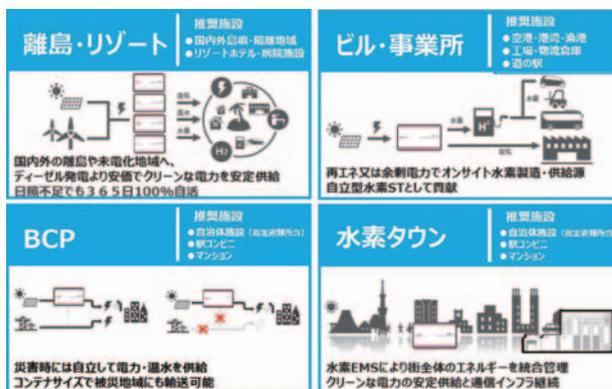


Fig.12 Further variations deployment of H2One™

### 3. 結言

以上述べたように、東芝は再生可能エネルギー由来によるCO<sub>2</sub>フリーでクリーンな水素を利活用する各種の技術開発、実証試験を開始している。国がロードマップで描いている本格的な水素社会の実現に向けては、大規模な社会インフラの整備により、水素サプライチェーンを整備して、エネルギーコストを従来の化石燃料なみに引き下げていく取組みが必要と思われる。一方で、本稿に示した東芝の水素エネルギーシステム構築の取組みは、地産地消型で水素を利活用し、新たな付加価値をもつクリーンエネルギー源としての利用の可能性を今すぐに社会へ提供可能という点で、意義あるものと考えている。

東芝は、太陽光・風力・水力発電など再生可能エネルギーを利用した発電システム、水電解装置、燃料電池など、水素社会の実現に必要な技術を社内に併せもつ企業として、グループ内の技術を融合し、今後も水素の製造から利活用までを実現する水素ソリューションの開発を積極的に展開していきたい。

### 4. 参考文献

- (1) 中島良, 山田正彦, 水素製造や燃料電池など水素社会に向けた技術への取組, 電気評論, Vol. 99, No. 11 (2014), pp. 38-42.
- (2) 吉野正人, 松永健太郎, 中島良, 高効率な水素電力貯蔵システム, 東芝レビュー, Vol. 70, No. 5 (2015), pp. 8-11.

(注) エネルギータイムシフト, H2Oneは株式会社 東芝の商標です。

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## 大崎クールジェン酸素吹IGCC実証プロジェクトの概要 及び進捗状況

江草 和也\*<sup>1</sup>  
EGUSA Kazuya

椎屋 光昭\*<sup>1</sup>  
SHIYA Mitsuaki

キーワード：石炭ガス化，コンバインドサイクル，酸素吹き，二酸化炭素，EAGLE  
Integrated Coal Gasification, Combined Cycle, Oxygen-blown, CO<sub>2</sub>, EAGLE

### 1. 緒言

2014年4月に決定された「エネルギー基本計画」に定められた通り，これからのエネルギーには，安全性のS（Safety：安全性）を前提とした上で，3E（Energy Security：安定供給，Environment：環境への適合，Economy：経済性）の同時達成が求められている。

石炭は，供給安定性及び経済性に優れたエネルギー資源で，安全性についても長年にわたる実績を有しており，2015年7月に決定された「長期エネルギー需給見通し」においては，石炭火力の高効率化を進め，環境負荷の低減と両立しながら活用することで，2030年の石炭火力の比率を26%程度とする方向性が示され，引き続き重要なベースロード電源と位置付けられた。また図1に示す通り，世界の電源別発電電力量においても，石炭火力は約4割を占める重要な電源である。

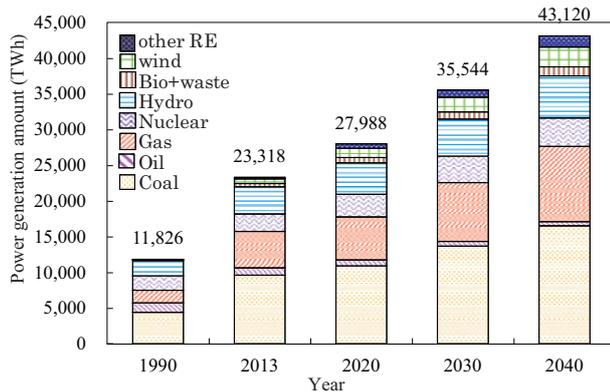


Fig. 1 Trend of world power generation by type <sup>(1)</sup>

一方で，石炭は他の化石燃料に比べ発電電力量あたりのCO<sub>2</sub>排出量が大いため，高効率なクリーンコールテクノロジー開発の重要性は非常に高い。中でも高効率な石炭ガス化複合発電（IGCC，Integrated Coal

Gasification Combined Cycle）については，超々臨界圧（USC，Ultra Super Critical）よりもなおCO<sub>2</sub>排出量を低減可能な技術として有望視されている。ここで図2には，世界のCO<sub>2</sub>排出量について示す。

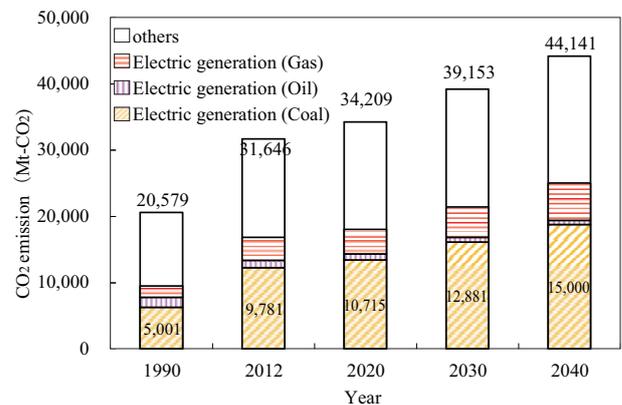


Fig. 2 Trend of world CO<sub>2</sub> emission by type <sup>(1)</sup>

前述の通り，石炭火力は将来的にも重要なベースロード電源であり，図3に示す通り運転開始後40年でリプレースされるものと仮定すると2020年以降の30年間で約3,400万kWの石炭火力がリプレース時期を迎えることとなり，その一部はIGCCにリプレースされるものと想定される。

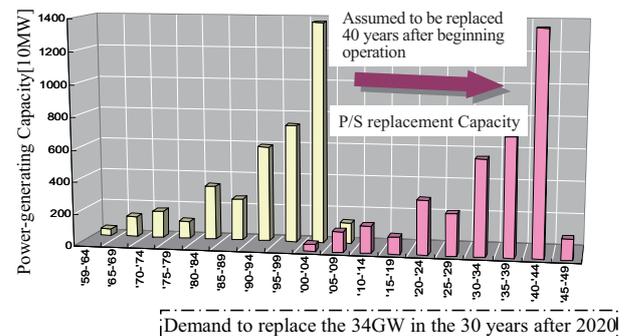


Fig. 3 Envisioned replacement demand for coal-fired thermal power plants in Japan <sup>(2)</sup>

原稿受付 2016年5月16日

\* 1 大崎クールジェン(株) 総務企画部 研究企画グループ  
〒725-0301 豊田郡大崎上島町中野6208-1

このような状況下、大崎クールジェンプロジェクトはIGCCに燃料電池を組込んだ究極の高効率発電技術である石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC, Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle）とCO<sub>2</sub>分離・回収を組合せた革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指して2012年に経済産業省の補助事業として開始し、2016年度から国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業へと移管されている。本稿では、大崎クールジェンプロジェクトの概要及び進捗状況について紹介する。

## 2. 石炭ガス化技術

### 2.1 石炭ガス化技術の開発経緯

我が国におけるIGCCの研究開発は、図4に示す通り、石炭火力発電の高効率化を目指し1970年代から本格的に技術開発が行われている。酸素吹石炭ガス化方式は、高温ガスタービンの適用とIGFCへの発展による更なる高効率化が期待できる。その中で高効率化に加えて幅広い石炭が利用できる多炭種対応性の高い石炭ガス化技術としてEAGLE炉の研究開発が進められた。

		'80	'90	2000	'10
Fluidized Bed Gasification	Low-calorie Coal Gasification Pilot Plant (Yubari)	40t/day			
	<Air blown> Air blown IGCC Pilot Plant (IGC association・Nakoso) Air blown IGCC Demonstration Plant (CCP・Nakoso)		200t/day	250MW	
Entrained Bed Gasification	<Oxygen blown> HYCOL Pilot Plant (Sodegaura)		50t/day		
	EAGLE Pilot Plant (Wakamatsu)			150t/day	
	Osaki Coolgen Demonstration Plant (STEP1) (Osaki)				166MW

Fig. 4 Main development of coal gasification and IGCC technology in Japan

### 2.2 EAGLEパイロット試験

EAGLEパイロット試験は、電源開発(株)がNEDOとの共同研究事業として北九州市の若松研究所において進めてきたもので、石炭使用量150t/日のパイロット試験設備によって、これまでに石炭ガス化性能、ガス精製性能、多炭種対応性等を確認するとともに、石炭ガス化発電システムにおける石炭ガス化ガスからのCO<sub>2</sub>分離・回収技術としての化学吸収法及び物理吸収法の検証が実施された。大崎クールジェンプロジェクトは、このEAGLEパイロット試験に続く商用化を目指した大型実証試験に位置付けられる。

EAGLE炉は、1室2段旋回型噴流床方式のガス化炉であり、ドライフィード給炭方式、水冷耐火壁構造である。特徴は1室のガス化部に上下2段に石炭バーナが配置されている点と、更に上段バーナからも酸素を供給できる方式を採用している点にある。この方式により、下段で石炭灰を溶融させた溶融スラグが安定的に下部のクエンチ部へ排出できる高温雰囲気を作りながら、全体の

酸素供給量をコントロールすることができ、最適なガス化状態を形成しやすい特徴がある。

またバーナ噴出方向をガス化炉中心部よりずらして接線方向へ石炭を投入することで、炉内でガスと粒子が旋回流を形成する方式としている。この効果により粒子の炉内滞留時間、すなわちガス化反応時間を十分に確保することができ高いガス化性能を得ることができる。この特徴を活かすことで灰溶融点が高い石炭でも比較的高いガス化効率で運転することができ、幅広い炭種に対して適合性を有するガス化炉である。図5にEAGLE炉構造概要およびガス化部断面イメージ図を示す。

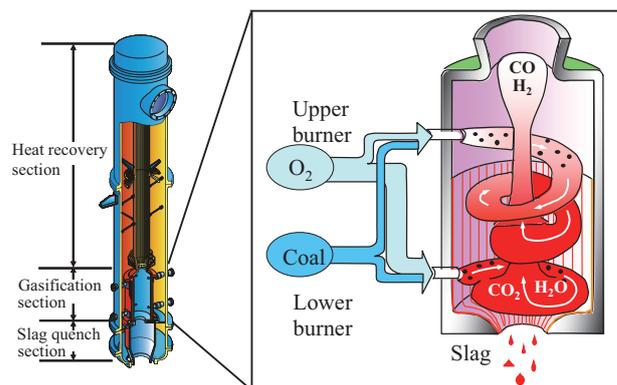


Fig. 5 Schematic cross-section of EAGLE gasifier

EAGLEプロジェクトでは、パイロット試験規模において、冷ガス効率82%と高いガス化効率を達成している。また、多炭種対応性においては、図6のEAGLEパイロット試験適用炭種に示す通り、石炭ガス化に適している灰溶融点の比較的低い石炭から従来の微粉炭火力に用いられている石炭まで幅広い石炭に対応可能であることが確認された<sup>(3)</sup>。

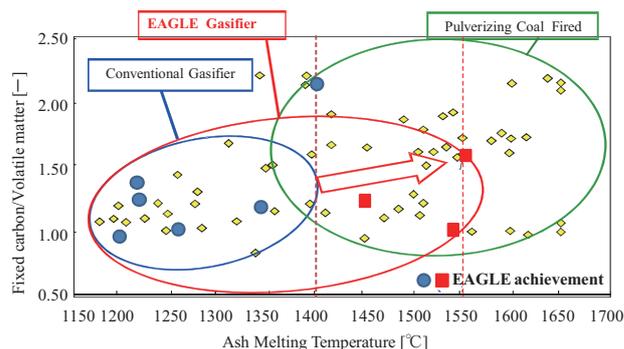


Fig. 6 Applicable coal type for EAGLE gasifier

## 3. 大崎クールジェンプロジェクト

### 3.1 会社概要

大崎クールジェン株式会社は、国のクリーンコール政策に則り、革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指す目的で、中国電力(株)と電源開発(株)の共同出資によるプロジェクト実施事業主体として2009年7月に設立された。社名には、国のクリーンコール政策である「Cool Gen

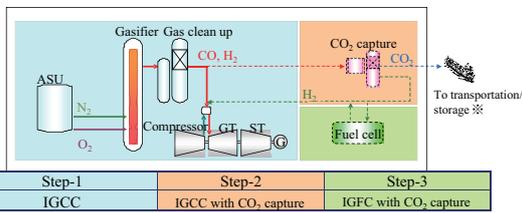
計画」を実現し、広島県の大崎上島から世界に発信することを旨とするという主旨が込められている。

3.2 プロジェクト計画

大崎クールジェンプロジェクトは、石炭火力発電から排出されるCO<sub>2</sub>を大幅に削減させるべく、究極の高効率発電技術であるIGFCとCO<sub>2</sub>分離・回収を組合せた革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指す目的で実証試験を実施するものである。実証試験は図7のプロジェクト全体計画に示す通り3段階に分けて計画しており、第1段階ではIGFCの基盤技術である酸素吹IGCC実証試験を実施し、第2段階では酸素吹IGCCにCO<sub>2</sub>分離・回収設備を付加したCO<sub>2</sub>分離・回収型IGCCの実証試験を実施し、そして最終段階として燃料電池と組み合わせたCO<sub>2</sub>分離・回収型IGFCの実証試験を計画している。なお、CO<sub>2</sub>輸送・貯留については、本プロジェクトでは実施しないこととしている。

3.3 主要設備計画

Fiscal Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Environmental Assessment													
NEDO joint research project			Feasibility study			Feasibility study							
Step-1 Oxygen blown IGCC						Design, Manufacturing and Construction				Demonstration operation			
Step-2 IGCC with CO <sub>2</sub> Capture										Design, Manufacturing and Construction		Demonstration operation	
Step-3 IGFC with CO <sub>2</sub> Capture										Design, Manufacturing and Construction		Demonstration operation	



※CO<sub>2</sub> transportation and storage are outside of the Osaki Coolgen Project.

Fig. 7 Overall plan of the Osaki Coolgen Project

図8にIGCC実証試験の概略図、表1に主要設備概要を示す。

主要設備の構成は、ガス化設備、ガス精製設備、空気分離設備、排水処理設備、複合発電設備となっている。

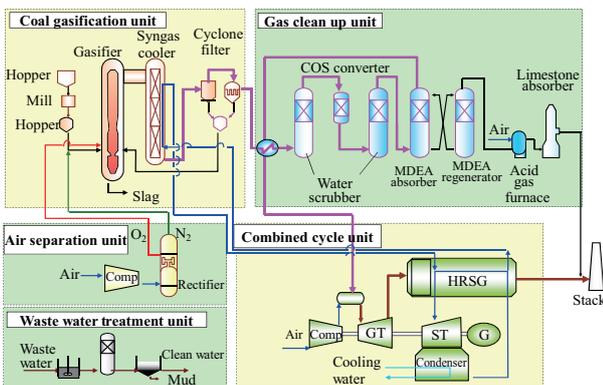


Fig. 8 Process flow of IGCC demonstration system

Table 1 Outline of the main unit

Main Unit	Spec
Coal Gasification Unit	Oxygen-blown single-chamber two-staged spiral-flow entrained bed Coal feed : 1,180t/day
Gas Clean up Unit	Desulfurization unit : Methyl-diethanol amine (MDEA) Sulfur recovery unit : Limestone wet scrubbing
Air Separation Unit	Pressurized cryogenic separation Oxygen : 30,000m <sup>3</sup> /h Nitrogen : 50,000m <sup>3</sup> /h Oxygen purity : 95%
Combined Cycle Unit	Dual shaft gas turbine : 1300°C Class Reheat & condensing Steam turbine : 170MW class
Wastewater Treatment Unit	High-strength wastewater
Existing Equipments	Wastewater treatment unit : Low-strength wastewater
	Stack : 200m
	Indoor coal storage : 45,000t
	Coal conveying system : 300t/h ※partially new construction
	House boiler : Natural circulation boiler (21t-steam/h)
	Cooling water intake : Deep water intake Cooling water discharge : Underwater discharge Coal berth : 6,000DWT

3.4 実証試験設備の設計計画・規模の考え方

実証試験設備として、EAGLEパイロット試験炉から10倍以内のスケールアップ（石炭使用量1,500t/日以内）をした場合の生成ガス量（ガスタービン燃料量）を考慮し、既存のガスタービンの中から最適なガスタービン（同出力規模で最高効率、低NO<sub>x</sub>性）を選定した。またこのガスタービン（1,300°C級）に必要な燃料ガス量に見合うガス化炉の大きさを検討し、石炭使用量を1,180t/日と決定した。

ガス精製設備、空気分離設備はガス化炉の規模に応じた設備規模、排熱回収ボイラ（HRSG）はガスタービンの排ガス量に応じた設備規模、蒸気タービンはガス化炉とHRSGの発生蒸気条件に対し最適な型式を選定した結果、実証試験設備の発電出力は166MWとなった<sup>(4)</sup>。

各設備のスケールアップ方法として、ガス化炉はHYCOL（石炭使用量50t/日）、EAGLEパイロット試験（石炭使用量150t/日）の成果に基づき構築したガス化炉設計アルゴリズムを用いており、ガス精製設備は、EAGLEで得られた成果を踏まえ、化学プラントで培われた塔槽類のスケールアップ手法を踏襲した。

また、複合発電設備には、既存のLNGコンバインド発電技術をベースに、中カロリー石炭ガスと第2段階でのCO<sub>2</sub>分離・回収実証試験を考慮し、H<sub>2</sub>リッチガスに対応可能なマルチクラスタ燃焼器を適用した。なお、詳細については次項に記載することとする。

排水処理設備については、IGCCからの排水は微粉炭火力の処理対象の濃度と異なること、石炭ガス化特有の物質も含まれることから、厳しい排水基準が要求される瀬戸内海水域の適合基準に対応可能なシステムを適用した。

### 3.5 マルチクラスタ燃焼器

石炭ガス化ガスをはじめとする水素含有燃料は、燃焼速度が速く、火炎の逆流リスクが非常に高いため、国内外共に従来のIGCCでは、燃焼室の手前で燃料と空気を混合させる予混合燃焼方式ではなく、燃料と空気を別々に供給し燃焼室以外では火炎の逆流リスクのない拡散燃焼器が採用されていた。一方拡散燃焼器では、燃料と空気の混合が不十分となる箇所において、局所的に高温領域が発生し、比較的高いNO<sub>x</sub>が発生するため、窒素などの不活性ガス（希釈剤）を投入することで対応していたが、発電効率の低下といった課題があった。そこで本プロジェクトでは、燃料ガスと空気の急速混合による希薄燃焼と噴出方向調整による火炎浮上技術を組み合わせたマルチクラスタ燃焼器を適用し、低NO<sub>x</sub>化と高効率化の両立を図った。図9にマルチクラスタ燃焼器の概要図を示す。

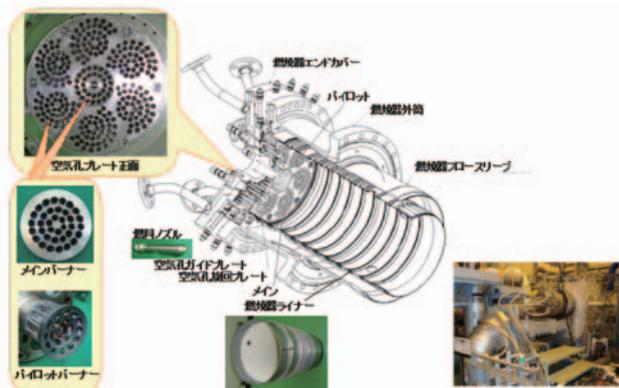


Fig. 9 Schematic of Combustor<sup>(5)</sup>

### 3.6 酸素吹IGCC実証試験の目標

第1段階では、EAGLEパイロット試験で検証された個別プロセスをスケールアップし、連係されたトータル発電システムとして、性能、信頼性、制御性等の実証を行う。表2に酸素吹IGCCの実証試験目標を示す。

基本性能である送電端効率は40.5% (HHV) で17万kW級規模としては世界最高レベルの性能であり、実証試験規模で40.5%が達成できれば、1,500℃級ガスタービンを採用した商用機においては、次世代火力発電に係る技術ロードマップ（2015年7月中間とりまとめ）のうち火力発電の高効率化で掲げるIGCCの送電端効率46%を実現できる見通しが得られることになる。環境性能は、新規微粉炭火力と同等レベルであり、我が国の厳しい環境規制にも対応可能な環境特性を有することを検証する。

多炭種適合性に対してはEAGLEパイロット試験と同

様の特性があることを確認するため、基本性能確認のための石炭に加えて多炭種対応を確認する石炭による試験を計画している。

設備信頼性としては、石炭火力として求められる微粉炭火力と同等の信頼性を目標に、長時間耐久試験によって検証する。

プラント制御性・運用性についても設備信頼性と同様に微粉炭火力と同等の制御性・運用性を目標に、EAGLEパイロット試験で構築したガス化設備とガスタービンを連携させた制御システムに、蒸気タービンを含めたIGCCプラントとしてのトータル制御性を確認する。

Table 2 Targets for Oxygen-blown IGCC demonstration

Item	Target
Efficiency	40.5% (HHV) The highest efficiency on 170MW class in the world.
Emission Level	SO <sub>x</sub> : 8ppm, NO <sub>x</sub> : 5ppm, Particulate : 3mg/m <sup>3</sup> N as 16% O <sub>2</sub> equivalent
Coal Variety Compatibility	Confirmation of coal range for gasification. To be expanded from low ash fusion temp. coal, which are poorly compatible with PCF to high ash fusion temp. coal.
Reliability	To obtain the prospect that plant availability will be more than 70%/year.
Operability	Load change rate : 1-3%/min. To obtain controllability equivalent to commercial operations.
Economy	To obtain the prospect that the generating cost in the commercial stage will be the same or less than PCF.

### 3.7 CO<sub>2</sub>分離・回収型IGCC実証試験

第2段階では、第1段階の酸素吹IGCCにCO<sub>2</sub>分離・回収装置を追設したCO<sub>2</sub>分離・回収型IGCCの実証試験及び低温作動型サワーシフト触媒実証研究を計画している。図10には、第2段階設備の概要図を示す。

CO<sub>2</sub>分離・回収方式については、EAGLEプロジェクトで実施された化学吸収法と物理吸収法の成果に基づき電源開発(株)と中国電力(株)がNEDO委託事業として比較・評価した結果から物理吸収法を採用することとし、石炭ガス化ガスの約17%を導入しIGCCプロセス全体で発生する炭素成分の15%相当量を分離・回収出来る規模の装置を設置し、CO<sub>2</sub>分離・回収装置でのCO<sub>2</sub>回収率を90%以上とする計画としている。

第2段階の実証試験ではCO<sub>2</sub>分離・回収装置の性能以外にIGCCとの関係も含め火力発電システムとしての運用性、経済性、環境性能、CO<sub>2</sub>分離・回収装置の追設による発電効率への影響等を検証する計画としている。

### 3.8 CO<sub>2</sub>分離・回収型IGFC実証試験

第3段階としては、最終目標であるCO<sub>2</sub>分離・回収型IGFCの実証試験を計画している。現時点では、IGFCに適合できる石炭ガス化ガスを燃料ガスとする大型の燃料電池及び燃料電池に対応するためのガス精製技術につい

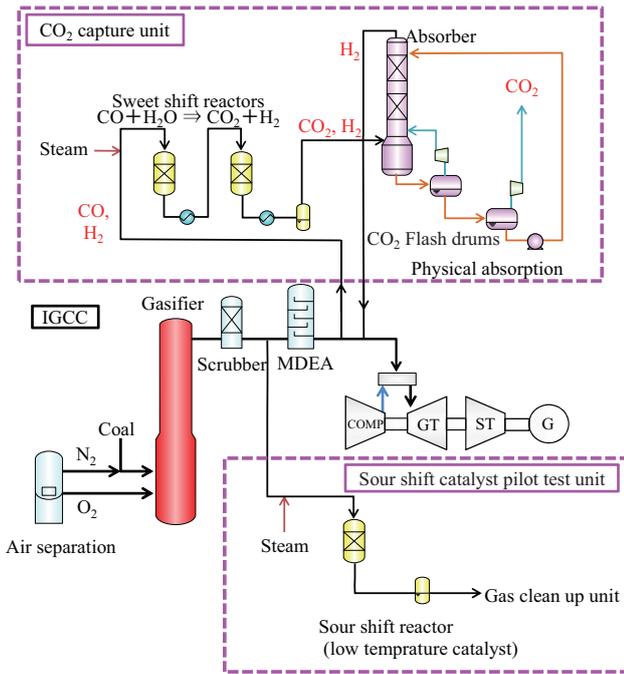


Fig.10 Schematic of second step (tentative)

て開発段階のため、燃料電池の開発状況等の成果を注視しながら、最適なIGFCシステム構築の検討を行っていくとともに実証試験実施段階で適用可能な燃料電池を選定する計画である。

なお、第3段階に移行するにあたっては、燃料電池の開発状況を十分踏まえたうえで実証試験の事業評価・実施の可否の判断を行い、次の段階に進む予定である。

#### 4. 第1段階実証事業の進捗状況

第1段階実証事業は、2013年3月に土木建築工事が着工し、5月にガス化設備の工場製作を開始し、2014年6月には機械設備、電気設備据付工事が本格的に着工した。実証試験発電所を構成する大型機器類は、2014年5月の排熱回収ボイラ（HRSG）先行搬入を皮切りに、海上輸送にて建設現場へ搬入している。

2014年9月・10月にガスタービン（GT）、発電機および蒸気タービン（ST）車室、11月・12月に熱回収ボイラ（SGC）、ST車軸他、ガス化炉本体およびガス精製設備、2015年1月には空気分離設備の搬入、据付を実施し、大型設備の搬入、据付を完了した。図11に、ガス化炉搬入、図12に、ガス精製設備搬入時の現場状況写真を示す。

各設備ともに、品質向上・工程短縮の観点から可能な限り工場でのモジュール化を進め、現地据付においては、現場状況に応じた最適据付工法により工程短縮を図った。具体的には、GTおよび発電機については、メガベント工法（ドーリーに設置したメガベント（折りたたみユニット構造の四角塔）上にて水切りした後、タービン建屋まで運搬し、レベル調整後パワーリフターにより各機器を所定の位置に設置する工法）によるタービン建屋レベルへの運搬・据付を行った。図13に、GTおよび発電

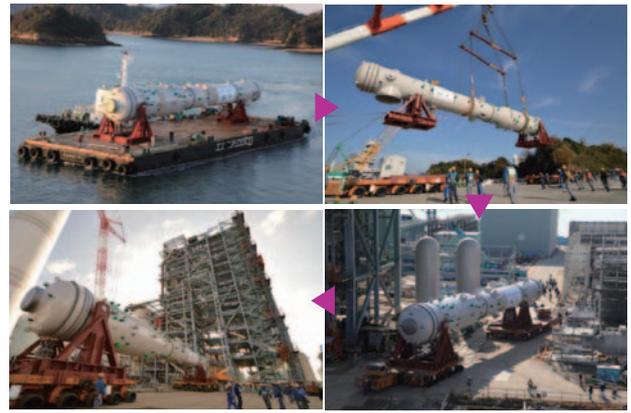


Fig.11 Transportation of gasifier



Fig.12 Transportation of Gas cleanup unit

機の搬入時の現場状況写真を示す。

また、SGCおよびガス化炉についてはジャッキアップ工法（ガス化炉架構上部より、油圧ジャッキを用いてSGC・ガス化炉の上端を引上げ、同時にドーリーにて下端を水平移動させながら架構内に据付ける工法）によるガス化炉架構への据付を行った。図14には、ジャッキアップ工法の概要図を示す。

HRSGについては、MHPSフィリピン工場で作製し、高温部と低温部にモジュール化した後、海上輸送し、ドーリーにて水切り・搬入を実施した。図15に、HRSGの搬入時の写真を示す。

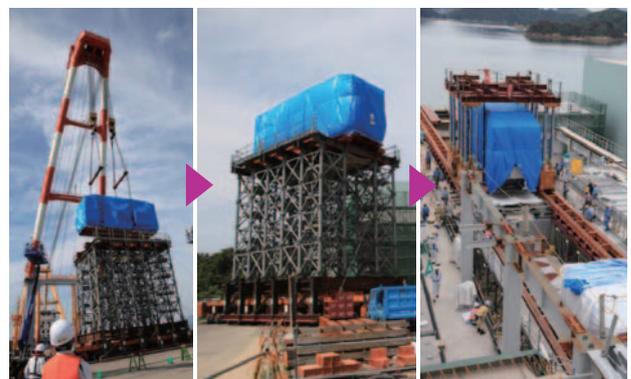


Fig.13 Transportation of GT and generator

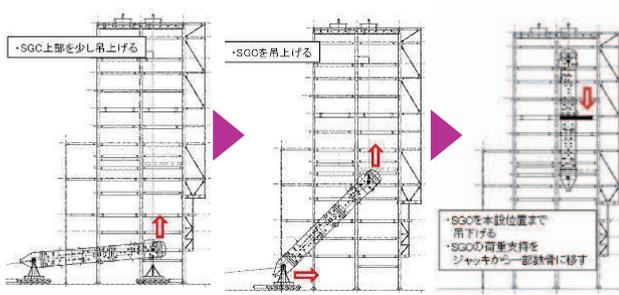


Fig.14 The jacking up method



Fig.15 Transportation of HRSG

大型機器類の搬入と並行して、補機や各機器の配管の取付けやケーブル布設工事を実施し、2015年7月には主要配管水圧試験、11月には受電を完了した。現在は、各機器の単体試運転及び系統試運転を順次行くとともに、2016年4月から総合試運転を開始し、2017年3月からの実証試験に向け、社員一丸となって邁進している（図16）。



Fig.16 Equipment work site of March 2016

## 5. まとめ

本稿では、大崎クールジェンプロジェクトの概要と現在建設工事が進む第1段階の実証事業の進捗状況について主に説明した。

現在プロジェクトの実施地点においては、建設工事及び単体試運転が順調に進捗している。2017年3月の実証試験開始に向け、今後も安全・品質・環境の確保を第一とし、工事を進めていく所存である。

最後に、本プロジェクトは、NEDO共同研究の「EAGLEパイロット試験」、「燃料電池対応型石炭ガス化複合発電最適化調査研究」の成果を反映しここに至るものであり、経済産業省、NEDO、その他多数の関係各位のご支援、ご指導に深く感謝の意を表すとともに、引き続きご支援、ご指導をお願いしたい。

## 6. 引用文献

- (1) IEA PUBLICATIONS, World Energy Outlook 2015, (2015), pp. 584-585
- (2) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部編, 電源開発の概要, (2010), pp. 252-255, 奥村印刷(株)
- (3) NEDO成果報告書『平成16年度～平成21年度成果報告書 多目的石炭ガス製造技術開発 (EAGLE) パイロット試験設備による研究およびゼロエミッション化技術に関する研究』, pp. 59-86
- (4) NEDO成果報告書『平成22～平成23年度成果報告書 ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト 燃料電池対応型石炭ガス化複合発電最適化調査研究』, pp. 258-394
- (5) NEDO事業原簿『ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト/ゼロエミッション石炭火力基盤技術/革新的ガス化技術に関する基盤研究事業/石炭ガス化発電用高水素濃度対応型低NOx 技術開発』, (2013), IV-2

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## MHPSにおけるSOFC－マイクロガスタービンハイブリッドシステムの開発状況

富田 和男\*<sup>1</sup>  
TOMIDA Kazuo

北川 雄一郎\*<sup>2</sup>  
KITAGAWA Yuichirou

キーワード：固体酸化物形燃料電池，円筒形セルスタック，複合発電システム，マイクロガスタービン，ハイブリッドシステム

Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs), Segmented-in-series Tubular Type Cell-stack, Combined Cycle System, Micro Gas Turbine, Hybrid System

### 1. 緒言

増加の一途を辿る世界の人口に対し人類が継続的に発展するには，世界経済を発展させながら，増加し続ける炭素排出量を抑制し地球環境負荷を低減させる必要がある。我が国においても，火力発電等の集中電源により構築された高度な電力網に，高効率な分散電源や再生可能エネルギーを安全性，供給安定性，経済性，環境性の何れもが成立するように導入し，適切なエネルギーミックスを確立する必要がある。また，地球資源保全のためにも化石燃料の徹底した有効活用が重要となる。

三菱日立パワーシステムズ（MHPS）はSOFC（固体酸化物形燃料電池：Solid Oxide Fuel Cell）とGT（ガスタービン）を組み合わせた複合発電システムの開発を1983年より進めてきた。これはSOFC複合発電システムが，小容量の発電設備から大規模な事業用電源に至るまで，あらゆる出力レンジにおいてエネルギーの高効率利用が可能なためである。

経済産業省が2014年6月に策定した水素燃料電池戦略ロードマップ（2016年3月改定）に業務・産業用燃料電池の2017年度市場投入が明記された。MHPSもSOFCとMGT（マイクロガスタービン：Micro Gas Turbine）を組み合わせたハイブリッドシステムを2017年度から市場に投入すべく開発を加速している。本論文ではSOFC-MGTハイブリッドシステムの開発状況を報告すると共に低炭素社会並びに水素社会の実現に向けたSOFC複合発電システムの活用計画についても紹介する。

### 2. SOFC複合発電システムの特徴

燃料の持つ化学エネルギーを直接電気に変換できる燃料電池は，単体でも高い効率で発電することが可能であ

る。電解質がセラミックスで構成されるSOFCの特徴を図1に示す。

高温で作動するSOFCはGTと接続することで，燃料のカスケード利用と高温排熱のボトムリング利用が可能となり，高い発電効率を実現可能である。

GTと複合発電システムを構成することにより，SOFCはGTと同じ運転圧力で作動することになる。即ち加圧下で運転することになる。図2に示すようにSOFCは加圧することにより電池性能が向上する。これは，加圧することでOCV（平衡起電力：Open Circuit Voltage）が向上すると共に，抵抗が低減することによる。図3に図2のI-V特性の傾きから求めたASR（面積比抵抗：Area Specific Resistance）の圧力依存性を示す。圧力の向上と共にASRが低下しているが，主に電池反応に関与する活性化過電圧が低下することによる<sup>(1),(2)</sup>。

この電池性能の向上も発電効率の向上やコンパクト化などに寄与させることができることも，複合発電システムを構成することの利点の一つである。

燃料となるメタンの水蒸気改質反応は吸熱反応である。低温作動の燃料電池は改質に必要な熱源を得るために，外部に設置した改質器で燃料を燃焼すると共に水蒸気を供給してメタンの改質を行う。一方，SOFCは高温で作動するため，白金などの貴金属触媒を用いずにSOFCのアノードに使用するNiで燃料の改質が可能である。更に，排燃料を再循環することで改質に必要な水蒸気も自

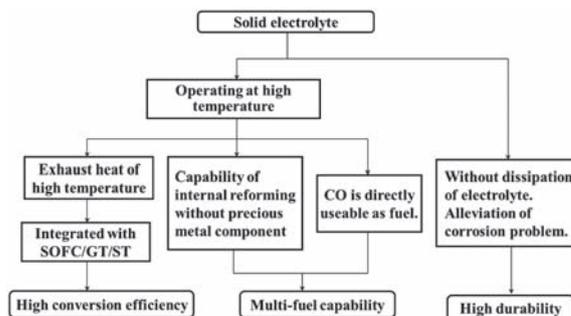


Fig. 1 The main features of SOFC.

原稿受付 2016年6月3日

\* 1 三菱日立パワーシステムズ(株) 燃料電池事業室  
〒850-8610 長崎市鮎の浦町1番1号

\* 2 三菱日立パワーシステムズ(株) 燃料電池事業室  
〒220-8401 横浜市西区みなとみらい3-3-1

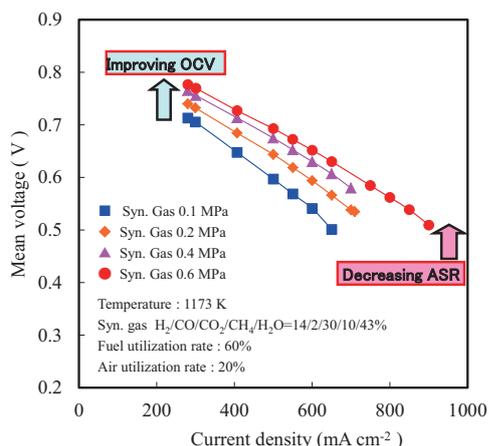


Fig. 2 *I-V* characteristics of segmented-in-series tubular cell-stack using a synthesis fuel of reformed methane with steam ( $S/C = 4$ ) under pressurization. The Cathode of cell-stack is  $(LaSrCa)MnO_3$ , the cathode interlayer is  $(Sm, Ce)O_2$ .

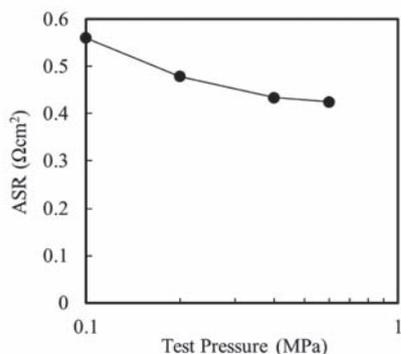


Fig. 3 ASR change of the segmented-in-series tubular cell-stack shown Figure 2 as a function of test pressure.

給可能となる。即ち改質に必要な“熱”と“水蒸気”を自前で供給できるため、天然ガスを直接供給して電気を発生するシステムを構築できる。熱と水蒸気を自給できる内部改質は、エクセルギー再生の究極の実用例といえる。

SOFCは固体高分子形燃料電池と異なりCOによる被毒を受けないため、燃料中のCO含有を許容するだけでなく、燃料として有効利用できる。このため、天然ガスだけでなく、石炭ガス化ガス、消化ガス等も燃料とすることが可能であり、燃料多様性にも優れる。

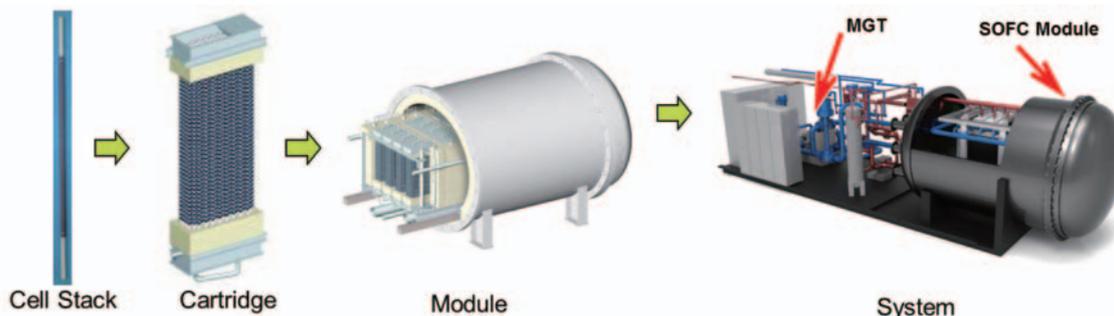


Fig. 5 Configuration of SOFC-MGT hybrid system using segmented-in-series tubular type cell-stack.

更に、SOFCは電解質が固体のため、電解質の散逸による構成材料の腐食は生じない燃料電池であり、Siemens Westinghouse社が、1990年代には単セルで約7万時間の耐久試験を実証したことから<sup>(3)</sup>、耐久性にも優れることが期待されている。

### 3. 円筒形セルスタックを適用したハイブリッドシステムの構成

構成材料が全て固体であるSOFCは設計の自由度が高く、複雑な形状のセルも製作できるため、コンセプトに応じて実に様々な形状のSOFCが提案、開発されている<sup>(4)-(6)</sup>。我々が採用している円筒形SOFCの構造を図4に、システム構成を図5に示す。

高強度のセラミックス製の構造部材である基体管の外表面に、発電反応を行うセル（燃料極/電解質/空気極の積層部）を形成し、電子導電性セラミックスのインターコネクタで隣接するセルを直列に接続している。これによりセルスタック1本当りの電気出力を低電流、高電圧で効率よく取り出すことができる。このセルスタックを束ねて数十kWの電気出力とし、支持部材、燃料と空気の供給と排出、電流の取り出しの機能を持たせてカートリッジを構成している。カートリッジを必要な容量だけまとめて圧力容器の中に入れたものがモジュールであり、このような階層構造を採ることで、据付けやメンテナンス性まで考慮したシステム化を実現している。

SOFC-MGTハイブリッドシステムの系統を図6に示す。SOFCは、MGT燃焼器の上流の高圧部に設置される。燃料の都市ガスはまずSOFCに投入され、燃料の化

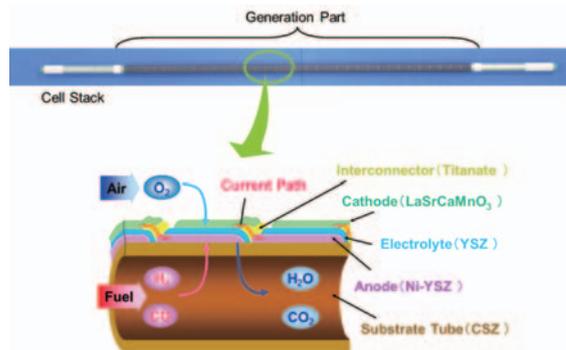


Fig. 4 Appearance of segmented-in-series tubular type SOFC and the cross section structure.

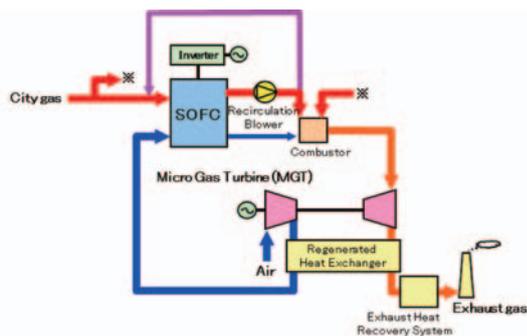


Fig. 6 Flow diagram of SOFC-MGT Hybrid system.

学エネルギーがSOFCで直接電力に変換される。その後、残燃料はMGT燃焼器に供給される。一方、空気はMGT圧縮機で0.23MPa程度まで昇圧されてSOFCに供給され、酸化剤として酸素の一部が使用された後、高温排熱とともに再びMGTに送られ、空気の持つ顕熱や圧力もエネルギーとして下流のMGT側で電力に変換される。燃料排ガスを再循環することにより改質用の水蒸気も自給できるシステムとしている。なお、排ガス系統に排熱回収設備を設置することで、蒸気、温水を同時に供給するコージェネレーションシステムとすることも可能である。

#### 4. ハイブリッドシステムの開発状況

##### 4.1 要素技術開発, 並びに耐久性・信頼性の向上

SOFC-MGTハイブリッドシステムの性能を検証するため、まず初めにMHPS長崎工場に設置した06式と称したシステムで発電効率52.1%-LHVを確認した。2011～2014年度には、引き続き開発した10式システムを東京ガス(株)千住テクノステーションに設置し、図7に示す通り、計画停止までの間、4,100時間超の連続運転を行った。夏場の重負荷期も含めて定格負荷一定条件において経時劣化は見られず、電圧低下率0%/1,000hで安定して運転できることを確認した。また、常時監視の規制を緩和するため、起動停止、負荷変化、システムの異常時を想定した緊急時対応等の運転データを取得し、システムの信頼性・安全性を実証した。東京ガスでの運転試

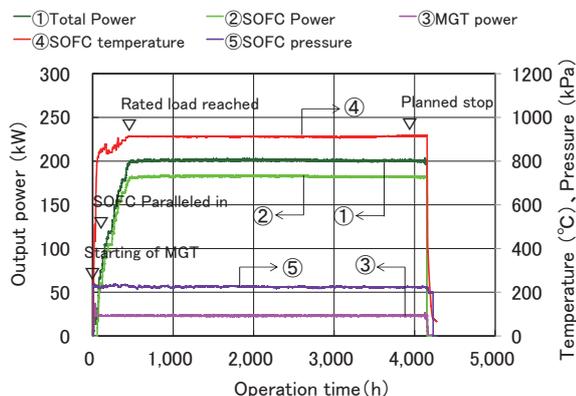


Fig. 7 Long term behavior of 10 model hybrid system installed at Tokyo Gas Co., Ltd.'s Senju Techno Station.

験においてシステム安全性を検証できたことから、合計出力300kW未満、圧力1MPa未満までのSOFC発電所は、2015年12月に常時監視の規制が緩和され、設置者の負担が軽減した。

##### 4.2 ハイブリッドシステム実証機の開発

SOFC-ハイブリッドシステムの競合機種となるガスインジンと伍していくには、10式システムよりもコンパクト化を図る必要があった。モジュールのコンパクト化を図るためにセルスタックの性能向上とカートリッジの高密充填化について取り組んだ。

06式, 10式, 15式セルスタックの比較を図8に示す。10式セルスタックでは直列セル数を48から85まで増加させ、かつ、インターコネクタ組成の最適化や空気極の改良により抵抗を低減した。15式セルスタックでは更なる高性能化に取り組み、電極と電解質の界面等を改良し、抵抗を低減した。燃料にH<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>=70/30、酸化剤に空気を使用し、900℃で燃料利用率60%、空気利用率20%で計測したI-V特性を図9に示す。I-V特性の傾きから求められるASRは06式が0.48Ωcm<sup>2</sup>、10式が0.41Ωcm<sup>2</sup>、15式が0.33Ωcm<sup>2</sup>であり、06式に対し10式で約14%、10式に対し15式で約20%の抵抗低減を図り、セルスタックの性能を向上させた。更にカートリッジの単位体積当たりの出力を高めるため、15式ではセルスタックを小径化した。これは単位体積当たりのセルスタックの表面積を高めることがカートリッジ性能の向上になるためである。

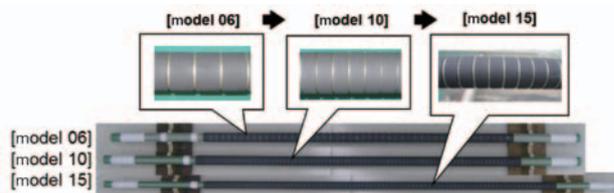


Fig. 8 Appearance comparison of model 06, model 10 and model 15 cell-stack.

カートリッジ構造を図10に示す。カートリッジは、図10に示すようにスタック中央の発電部、上部/下部の集電用リード部から構成され、燃料はセルスタック内側を上から下へ、空気はチューブの外側を下から上へ流れる。

上下のリード部には断熱ボードが設置され、上部リードでは供給燃料の改質を行うと共に、発電に使用された高温の排空気とセルに供給される低温の燃料が熱交換する。反対に、下部リードではセルに供給される低温の空気と発電に使用された高温の排燃料が熱交換することで、発電部の温度を高く保っている。カートリッジはセルスタックの小径化、密充填化に伴い発熱密度が増加するため、カートリッジの伝熱・冷却特性を適切に設計し、発電部及び発電部前後の熱交換部での伝熱量を確保した。

NEDOプロジェクトにてセルスタックの耐久性を(一財)電力中央研究所にて評価した変遷を図11、セルスタック仕様の比較を表1に示す。平成17年度から実施

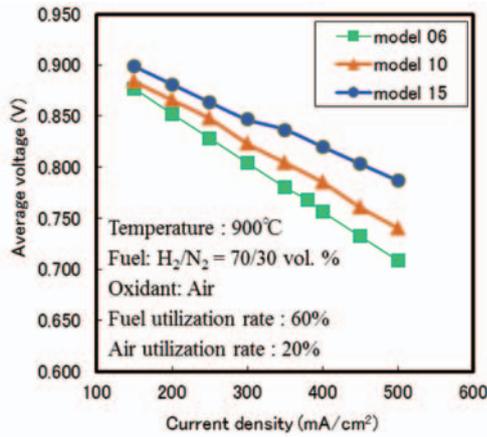


Fig. 9 I-V characteristics of segmented-in-series tubular cell-stack. ■ is model 06, ▲ is model 10, ● is model 15.

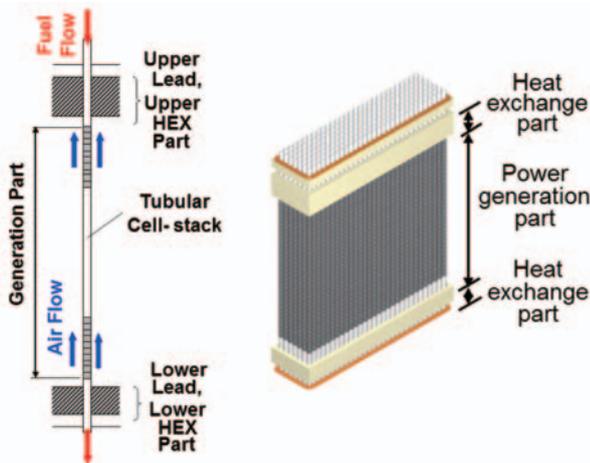


Fig. 10 Schematic diagram of cartridge.

Table 1 Specification of segmented-in-series tubular cell-stack applying durability tests in Central Research Institute of Electric Power Industr (CRIEPI).

	Type 1	Type 2	Type 3 (model 06)	Type 5	Type 6 (model 10)
Cathode interlayer	(LaSr)MnO <sub>3</sub> -YSZ		(CeSm)O <sub>2</sub>		
The number of series cells	34		48		85

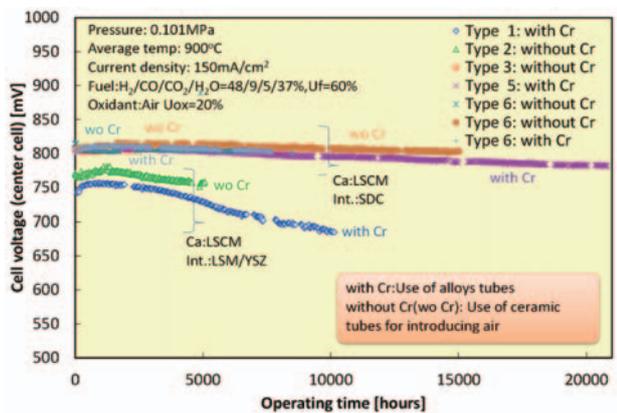


Fig.11 Comparison of long-term durability among different cathodes in segmented-in-series cell-stack in performance with/without Cr contamination.

しているが、プロジェクト開始当初はカソード中間層 (Type 1とType 2) に (LaSr) MnO<sub>3</sub>-YSZ (LSM-YSZ) を適用しており、その電圧低下率はNEDO目標値の0.25%/1000h以上であった。耐久性を向上するため、プロジェクト参画機関であるMHPSと(一財)電力中央研究所において電圧の低下要因を電気化学的に解析し、耐久試験後のセルスタックを国立研究開発法人産業技術総合研究所、九州大学、京都大学、東京大学、東北大学、ならびにMHPSを含めて解体分析し電圧低下要因を推定するということを繰り返した。

Type 1とType 2の主な電圧低下要因は電気化学解析の結果、カソード過電圧の増加であった。解体分析の結果、カソード過電圧の増加は、電解質/カソード界面のカチオンの移動が原因であり、粒界拡散と元素濃集、相変態と再析出、シンタリング、緻密化等が関係していると推定された。空気極中間層部での陽イオン移動の抑制を図るため、中間層材料をLSM-YSZからSmCeO<sub>2</sub> (Type 3からType 6) に変更し耐久性を高めた<sup>(7)</sup>。図11のType 6が10式のセルスタックであり、同一のセルスタックを適用した東京ガス千住テクノステーションの10式システムにおいても、図7に示す通り、同様の傾向が得られたことから、同一品質のセルスタックを安定して量産できていることを確認できた。

更に性能を向上させた15式セルスタックの耐久性を図12に示す。12,000時間経過し、電圧低下率は0.1%/1000h以下であり、安定した特性を示している。

カートリッジ、モジュール、システムのコンパクト化を図ることで図13に示す通り、設置面積を10式では06式の1/2、15式では円筒形セルスタックを細径・長尺化するとともにカートリッジの充填密度を高めることで、設置面積を40パーセント強小さくすることに成功した。

九州大学の伊都キャンパスに設置された15式システムを図14に示す。ハイブリッドシステムの先進性を既存発電設備にはないデザインで可視化することで、地球環境対策への取組みを人々に伝え、更には人々への環境技術への意識や関心を高めることを狙った。尚、本システムは公益財団法人日本デザイン振興会が主催する2015年度グッドデザイン賞を受賞した。

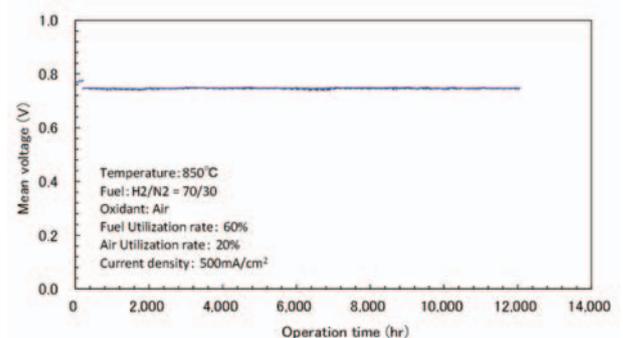


Fig.12 Long-term behavior of model 15 cell-stack.

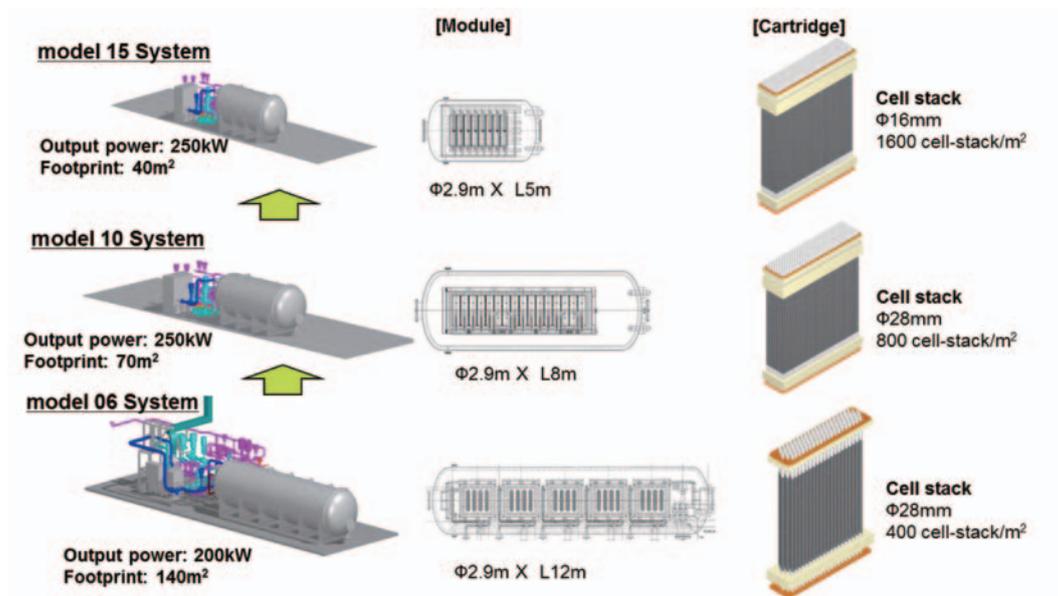


Fig.13 Comparison of the cartridge, the module and the system on the model 06, model 10 and model 15.

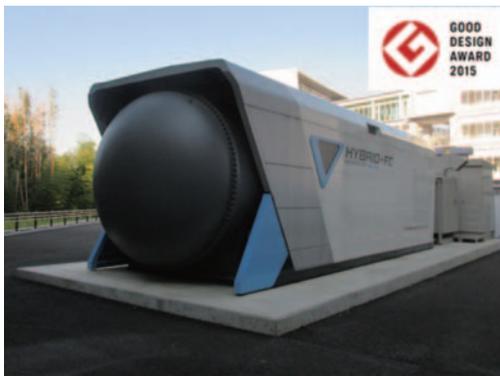


Fig.14 Appearance of model 15 SOFC-MGT hybrid system installed at the Next-Generation Fuel Cell Research Center (NEXT-FC) in Kyushu University.

九州大学の15式システムは、SOFCの本格普及につなげる産学連携の推進を目的に設立された「次世代燃料電池産学連携研究センター (NEXT-FC)」における、グリーンアジア国際戦略総合特区「スマート燃料電池社会実証」に供されており、業務産業用燃料電池を核とした水素社会の実現に向け実証運転に取り組んでいる。

2015年3月に納入し、試運転後、各種調整を行った上で発電運転を開始した。負荷上昇試験、停止・ホット状態からの再起動試験等を実施するとともに、完全自動化のためのデータを取得し、同年9月の九州大学構内の電気設備点検のための停電に併せて計画停止した。

その後、再起動し、2015年5月時点で累積発電7,500時間以上を経過し安定に運転を継続している。初めての屋外設置の中、台風、落雷、積雪、季節による寒暖差、熊本地震等を経験した。途中、落雷に伴う瞬間停電での非常停止もあったが、異常を検知し安全かつ確実に停止でき、SOFCの損傷はなく即日再起動している。

## 5. 低炭素社会・水素社会に向けた展開

先進的な低炭素社会・水素社会におけるSOFC複合発電の燃料電池の適用事例を図15に示す。

SOFC-MGTハイブリッドシステムは、都市ガス、天然ガスを燃料として、SOFC内部で水素と一酸化炭素に改質し、発電することを特徴としている。その特徴を生かし、電気、熱を取り出すコージェネレーション運用に加えて、水素も取り出せるトリジェネレーションを構成することも可能である。また、下水処理場由来の消化ガス、食品・飲料工場由来のバイオマスをメタン発酵させたバイオガスを燃料とすることで、再生可能エネルギーとしての利用も可能である。これに、水素を取り出す運用を適用することで、CO<sub>2</sub>フリーの水素供給も実現する。さらに、余剰な再生可能エネルギーによる水の電気分解などで生成した水素 (Power to Gas) を発電に利用することも可能である。

これらのことから、SOFC-MGTハイブリッドシステムは、低炭素社会・水素社会に大きく貢献することが期待できる。

## 6. おわりに

MHPSではSOFC複合発電システムによる高効率化を当面の地球温暖化対策、省エネルギー化の切り札の一つと位置付け、技術開発により実用化を進め、安全で持続可能なエネルギー環境社会の構築に貢献していきたいと考えている。

そのためにも九州大学での運転を継続すると共に、NEDO助成事業である“円筒形SOFC-マイクロガスタービンハイブリッドシステムの市場投入に向けた技術実証”にてユーザーの評価を頂きながら商品力を向上させ、経済産業省の水素・燃料電池戦略ロードマップに明記された2017年度からの市場投入を目指す所存である。

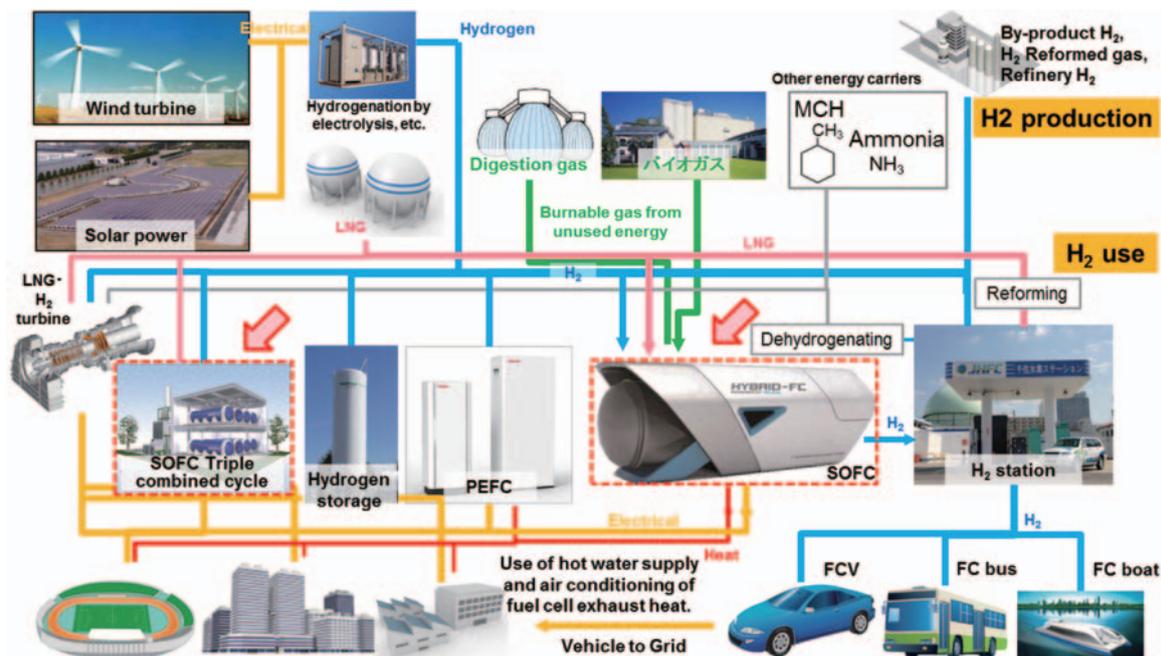


Fig.15 Study example of advanced applications on SOFC combined cycle systems for the realization of a low-carbon society and a hydrogen society.

MW級のハイブリッドシステムの開発も並行して推し進め市場投入を果たしていくと共に、更に大型のGTFC（ガスタービン燃料電池複合発電）並びにIGFC（石炭ガス化燃料電池複合発電）へ繋げていきたいと考えている。

## 謝辞

本論文は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の共同研究等の成果を含んでおり、関係各位に感謝を申し上げますと共に、15式システムの設置から試験に至るまで多大なる御指導を賜りました九州大学、東京ガスの関係各位に心より謝意を表します。また、加圧型燃料電池発電所の常時監視の規制緩和において多大なる御指導を賜った一般社団法人日本ガス協会、一般社団法人日本電機工業会、燃料電池実用化推進協議会の関係各位に深謝すると共に、今後とも一層の御支援をお願い申し上げます。更に、御指導、御助言を賜っております大学、研究機関、並びに開発・検証に御指導頂いております電力、ガス事業者、メーカー等、全ての関係各位にこの場を借りて深く感謝申し上げます。

## 参考文献

(1) Tomida, K., Hisatome, N., Kabata, T., Tsukuda, H. and Yamazaki, Y., Structural modification of segmented-in series tubular SOFCs using performance simulation on the generation characteristics under pressurization, *Electrochemistry*, Vol. 77, No. 10 (2009), pp. 865-875.

- (2) Tomida, K., Hisatome, N., Kabata, T., Tsukuda, H., Yamashita, A. and Yamazaki, Y., Optimization of segmented-in series tubular SOFCs with an (La, Sr)CoO<sub>3</sub> system cathode and the generation characteristics under pressurization, *Electrochemistry*, Vol. 77, No. 12 (2009), pp. 1018-1027.
- (3) EG&G Technical Services Inc., *Fuel Cell Handbook*, seventh edition, US Department of Energy, WV (2004), pp. 8-21.
- (4) Mizusaki, J., *Electrochemistry*, Vol. 80, No. 3 (2012), pp. 144.
- (5) Ujiie, T., in *Solid Oxide Fuel Cells X*, K. Eguchi, S. C. Singhal, Yokokawa, H. and Mizusaki, J., Editors, The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (2007), PV07-07, pp. 3.
- (6) Agnew, G. D., Collins, R. D., Jorger, M., Pyke, S. H. and Travis, R. P., in *Solid Oxide Fuel Cells X*, Eguchi, K., Singhal, S. C., Yokokawa, H. and Mizusaki, J., Editors, The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (2007), PV07-07, pp. 105.
- (7) Kobayashi, Y., Tomida, K., Tsukuda, H., Shiratori, Y., Taniguchi, S. and Sasaki, K., Durability of a segmented-in series tubular SOFCs with a (Ce, Sm)O<sub>2</sub> Cathode Interlayer: Influence of Operating Conditions, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 161, No. 3 (2013), pp. F214.

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## 家庭用及び業務用燃料電池の最新動向

越智 一喜\*<sup>1</sup>  
OCHI Kazuyoshi川端 康晴\*<sup>1</sup>  
KAWABATA Yasuharu藤木 広志\*<sup>1</sup>  
FUJIKI Hiroshiキーワード：燃料電池，水素，エネファーム，固体酸化物形燃料電池，コージェネレーション  
Fuel Cell, Hydrogen, ENE-FARM, SOFC, Cogeneration

## 1. はじめに

ガスコージェネレーションシステム（以下、CGSとする）は、ガスのエネルギーを利用して発生させる電気と熱をオンサイトで効率よく利用できるシステムであり、省エネルギー化やCO<sub>2</sub>排出量の削減が実現できる。また、施設や地域ごとに最適な容量の分散型電源を設置することでエネルギーセキュリティを向上させることも可能である。

東日本大震災を始めとした昨今の国内外エネルギー情勢の変化を踏まえ、2014年4月に「エネルギー基本計画」が新たに閣議決定された。その中で、燃料電池や蓄電池技術等による分散型エネルギーシステムの普及拡大が重要政策の一つとして位置づけられ、その存在価値が高まりつつある。燃料電池は高効率分散型CGSを実現するキーテクノロジーであり、省エネルギー化の推進と環境負荷低減、エネルギーセキュリティの向上などの重要課題を同時に解決しうる切り札として期待されている。

燃料電池CGSは、1990年代にリン酸形燃料電池が業務用として商品化されたのを皮切りに、2009年には固体高分子形（Polymer Electrolyte Fuel Cell = PEFC）の家庭用燃料電池CGS「エネファーム」が、2011年には固体酸化物形（Solid Oxide Fuel Cell = SOFC）の家庭用燃料電池CGS「エネファームtype S」が商品化された。現在は普及拡大に向けて、低コスト化やオプション仕様の充実が進められている。

さらに、高い発電効率が特長の固体酸化物形燃料電池の業務用途への適用拡大も期待されており、2017年度の商品化を目指して開発が進められている。

今回は家庭用燃料電池の最新動向と、現在開発が進められている業務用燃料電池（SOFCタイプ）の開発動向を紹介する。

## 2. 燃料電池の概要

## 2.1 燃料電池の種類

燃料電池は、電気化学反応により直接電気エネルギー

を生成するため、熱や運動エネルギーを介するエンジン、タービン方式と比較して高い発電効率が実現できる。さらに、駆動部が少ないため騒音・振動が小さく、NO<sub>x</sub>やSO<sub>x</sub>がほとんど排出されないという利点もある。

電池の構成は、燃料極（アノード）と空気極（カソード）を電解質で隔てたセル（電池）から成り、電解質の違いにより、固体高分子形や固体酸化物形などに分類される（表1参照）。

Table 1 The types and characteristics of fuel cells<sup>(1)</sup>

燃料電池の種類	固体高分子形 PEFC	固体酸化物形 SOFC	リン酸形 PAFC	溶融炭酸塩形 MCFC
電解質	陽イオン交換膜 (フッ素樹脂系)	セラミック	リン酸	リチウム・ナトリウム炭酸塩 リチウム・ナトリウム炭酸塩
媒体イオン	H <sup>+</sup>	O <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
作動温度	80~120°C	600~1000°C	190~200°C	600~700°C
使用可能燃料	都市ガス、LPガス、メタノール、石炭ガス、純水素、等			
反応式	燃料極	H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>
	空気極	1/2O <sub>2</sub> + 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O	1/2O <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> → O <sup>2-</sup>	1/2O <sub>2</sub> + 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O
全体	H <sub>2</sub> + 1/2O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O			
主な用途	・家庭用（小規模発電） ・携帯・可搬用 ・車載用	・家庭用（小規模発電） ・業務・産業用 ・事業用（大規模発電） ・車載用	・家庭用（小規模発電） ・業務・産業用 ・非常電源用	・家庭用（小規模発電） ・業務・産業用 ・非常電源用
発電効率 %LHV	33~44	45~60	40~48	44~66

## 2.2 燃料電池の政策動向

前章で述べたように、「エネルギー基本計画」において燃料電池の普及拡大が重要政策として掲げられたのち、経済産業省の水素・燃料電池戦略協議会にて、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が2014年6月に策定され、水素社会実現に向けた取り組みとして家庭用燃料電池の更なる普及拡大及び業務・産業用燃料電池の2017年度市場投入目標が明記された（図1参照）。

2016年3月の改訂版において、家庭用では2020年度140万台を導入目標とし、目標価格80万円（PEFC型）を目指して更なる低コスト化を進めていくこと、業務・産業用では2017年度の市場投入と自立的な普及拡大を進めていくことが記されている。

ロードマップの実現に向け、業務・産業用燃料電池の早期実用化を目指した技術開発や実証試験が、新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDOとする）のプロジェクトで進められている。これまでに5社が採択され、その他開発メーカーも含めると現在計6社が業務用SOFCの開発を進めている（表2参照）。

原稿受付 2016年5月17日

\* 1 東京ガス(株) ソリューション技術部  
〒105-8527 港区海岸1-5-20

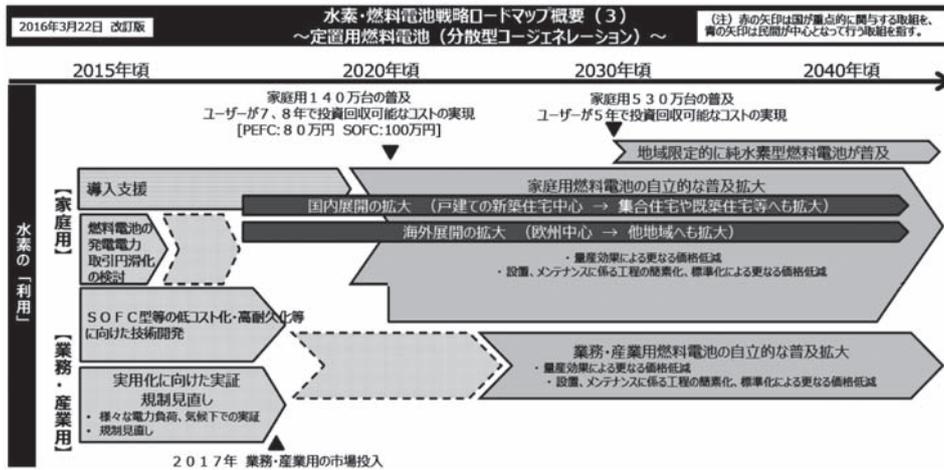


Fig. 1 The strategic roadmap for hydrogen and fuel cells ~ stationary fuel cells ~<sup>(2)</sup>

Table 2 The list of commercial fuel cells

発電容量/種類	メーカー名	備考
3kW/SOFC	京セラ (株)	開発中
4.2kW/SOFC	三浦工業 (株)	NEDO7プロジェクト (2013~)
5kW級/SOFC	デンソー (株)	NEDO7プロジェクト (2015~)
20kW~/SOFC	日立造船 (株)	NEDO7プロジェクト (2014~)
50kW級/SOFC	富士電機 (株)	NEDO7プロジェクト (2014~)
250kW/ハイブリッド SOFC	三菱日立パワーシステムズ (株)	NEDO7プロジェクト (2012~)
(参考)100kW/PAFC	富士電機 (株)	商品化済
(参考)200kW/SOFC	Bloom Energy Japan(株)	モノジェネシステム商品化済

### 3. 家庭用燃料電池CGSの最新動向

現在、家庭用燃料電池CGSにはPEFC型とSOFC型の2種類が販売されており、表3に示したようにPEFC型はパナソニックと東芝の2社が製造している。一方、SOFC型は現在アイシン精機のみが製造している。

Table 3 The latest list of commercialized residential fuel cells as of March 2016

製造メーカー	パナソニック	東芝	アイシン精機
燃料電池の種類	PEFC	PEFC	SOFC
定格発電出力	700W	700W	700W
貯湯量	140ℓ	200ℓ	28ℓ(FCユニット内蔵)
貯湯温度	約60℃	約60℃	約70℃
効率	定格発電	39%-LHV	39%-LHV
	定格総合	95%-LHV	95%-LHV
			52%-LHV
			87%-LHV

#### 3.1 家庭用燃料電池CGSエネファーム (PEFC) の動向<sup>(3)</sup>

「エネファーム」は2009年に世界に先駆けて日本国内で販売が開始されてから、その高い省エネ性とCO<sub>2</sub>削減

効果の特長とした次世代のエネルギーシステムとして一般家庭への普及が進み、図2の通り2015年末時点で累計15万台が市場に導入された。

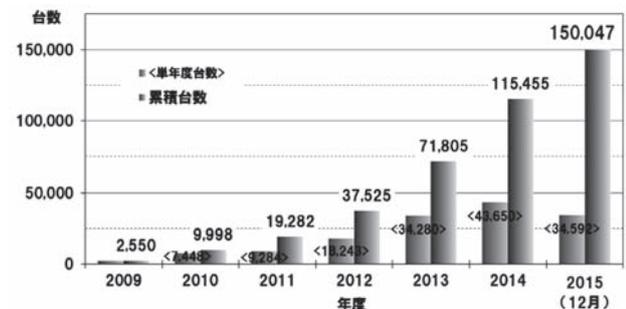
メーカー各社はコストダウンや集合住宅設置仕様の開発をはじめとする設置性の向上に加え、停電時発電機能の追加、海外展開など、普及拡大に向けた多角的な取り組みを実施してきた。今回は集合住宅設置仕様と停電時発電機能の2点を紹介する。

都心部の半数以上の世帯が集合住宅であることから、東京ガスはエネファームの更なる普及拡大に向け、パナソニックと共同で集合住宅向けエネファームの開発を行い、2014年4月より販売を開始している。本システムは、図3に示すようなマンション開放廊下側のパイプシャフト内への設置を目指し、機器本体の気密性を向上させ、さらに高所設置に対応する耐震性や耐風性も確保し、地上100m以上の超高層マンションへの設置も可能となっている。2014年4月から発売が開始された集合住宅向けモデル(新型機)と2013年4月から販売開始している戸建モデル(従来機)の各商品仕様を表4に示す。

耐震性を高めるために機器本体をアンカー固定する脚部の強度を向上させ、一般財団法人日本建築センターにおける超高層ビル屋上の耐震クラスBに相当する1.0Gに耐える設計となっている。また、機器内部への風圧の影響を低減させるため、燃料電池ユニットの給排気部を集約して30m/sの強風時でも運転継続可能な耐風性を確保している。

また、東日本大震災以降、停電時でもエネファームの電力を使用したいというニーズを受け、「停電時発電機能」を備えたオプション品(オプションA, B)が開発された(表5参照)。オプションAは、停電発生時にエネファームが運転している場合に限り、発電電力の継続供給が可能な機能である。オプションBは、停電発生時にエネファームが停止していても、電源ユニットの電力を用いてエネファームを起動することで、電力供給が可能となる。なお、停電時の出力は、オプションAは

700Wであるが、オプションBは蓄電池からの供給分も合わせると最大1,200Wの電力が使用可能である。加えて、都市ガスと水道が使用できない場合でも、蓄電池に貯めた電力を最大500W使用することもできる。



※2009～2014年度は、補助金交付決定ベース(資源エネルギー庁作成データ)。  
 ※2015年度は、2015年12月18日時点での補助金交付決定ベース(一般社団法人 燃料電池普及促進協会集計)。

Fig. 2 The trend of the spread number of ENE-FARM<sup>(4)</sup>

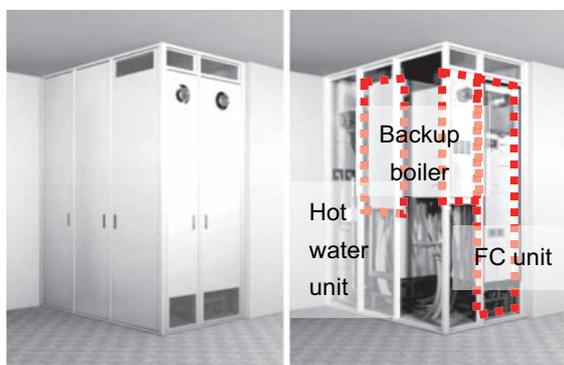


Fig. 3 Residential fuel cell installed in the pipe shaft

Table 4 Comparison of specifications between the new PEFC model for condominiums and previous one

		従来機	新型機
性能	出力	200W-750W	←
	発電出力	39.0%LHV / 35.2%HHV	←
	熱回収効率	56.0%LHV / 50.6%HHV	←
	総合効率	95.0%LHV / 85.8%HHV	←
	タンク容量	147L	←
	耐風性能	15m/sec	30m/sec
	耐震性能	0.4G対応	1.0G対応
寸法	燃料電池ユニット	H 1850mm W 400mm D 400mm	H 1750mm W 399mm D 395mm
	貯湯ユニット	H 1850mm W 560mm D 400mm	←
重量 (乾燥)	燃料電池ユニット	90kg	99kg
	貯湯ユニット	55kg	54kg

Table 5 The specifications of two option units for power generation function during a blackout

停電時発電機能		オプションA	オプションB
寸法 (質量)	発電継続用切替ユニット	H325mm, W485mm, D155mm (13kg)	(1) 自立起動用電源ユニット H350mm, W605mm, D155mm (14kg)
	自立起動用切替ユニット	H325mm, W485mm, D155mm (20kg)	(2) 自立起動用切替ユニット H325mm, W485mm, D155mm (20kg)
質量		13kg	(1) 20kg (2) 14kg
設置場所		屋内壁掛け設置	屋内壁掛け設置
性能	発電継続	○	○
	自立起動	×	○
	蓄電容量	×	1000Wh
	最大使用電力	700W	1200W
	発電継続可能時間の目安	700Wまでの使用：最長約4日間 (96時間)	700Wまでの使用：最長約4日間 (96時間)
	停電時のエネファーム電力供給先	○停電時専用コンセント (100V)	○停電時専用コンセント (100V)
		※停電時のみ使用可	※通常・停電時とも使用可
		○貯湯ユニット	○蓄電池充電
		○バックアップ熱源機	○貯湯ユニット
			○バックアップ熱源機 ○非常灯 (10W)

### 3.2 家庭用燃料電池CGSエネファームtype S (SOFC)の動向<sup>(5)</sup>

アイシン精機は、大阪ガス、京セラ、長府製作所、トヨタ自動車と共同で固体酸化物形燃料電池 (SOFC) タイプのコージェネレーションシステム (エネファームtype S) を開発し、2012年4月より販売している。

本システムの最新機が2016年4月より販売開始されている。最新機は、発電時の熱損失を低減することで従来機より5.5ポイント発電効率を向上させ、家庭用クラスでは世界最高となる52% (都市ガス13A) を実現している。さらに、発電効率の向上による廃熱回収量の低下を考慮した貯湯タンクの容量変更を行い、現行品の90Lから28Lに小型化することで、本体サイズが大幅に縮小されている (表6参照)。

Table 6 Comparison of specifications between the new residential SOFC model and previous one

		従来機	新型機
発売日		2014年4月1日	2016年4月1日
性能	発電出力	通常時：50～700W 自立時：350W	通常時：50～700W 自立時：700W
	定格発電効率	46.5%LHV	52.0%LHV
	定格総合効率	90.0%LHV	87.0%LHV
	貯湯タンク容量	90L	28L
寸法	貯湯温度	約70℃	←
	燃料電池ユニット	H935mm, W600mm, D335mm	H1195mm, W780mm, D330mm
重量 (乾燥)	セット用熱源機	H1760mm, W740mm, D310mm	H750mm, W480mm, D240mm
	燃料電池ユニット	96kg	106kg
設置スペース	セット用熱源機	91kg	38kg
	燃料電池ユニット	約1.9m <sup>2</sup>	約1.4m <sup>2</sup>
ガス種		都市ガス、LPガス	←
定期交換部品		5.5年目に交換	10年間交換不要

#### 4. 業務用SOFCの開発動向

2項で述べたように、2017年度の商品化に向けて、国内の各メーカーが業務用SOFCの開発を進めている。ここでは、小型SOFC開発を行っている京セラと三浦工業、大型SOFC開発を行っている三菱日立パワーシステムズの動向を主に紹介する。

##### 4.1 業務用小型SOFCの開発動向

**4.1.1 京セラにおける小型SOFC開発** 京セラは、3項で述べたエネファームtype Sのセルスタックを製造しているメーカーであり、SOFCセルスタックの技術・製造に関し強みを有している。その強みを活かし、2017年度の商品化を目標に3kW級の業務用SOFC開発を進めている。

開発中の3kW級SOFCシステムの目標仕様を表7に示す。発電効率50%以上、総合効率80%以上を目指しており、既存機器のラインナップがない小出力帯における高効率CGSとして期待される。

東京ガスを含めたガス4社（大阪、東邦、西部）は2017年度の商品化に向け、本システムの実証評価に協力している。東京ガスの社内実証では、システムの連続耐久性の評価を行い、1万時間超においても発電効率50%以上、発電出力3kW以上という安定した運転実績を得ている。社内における最新の実証機の外観を図4に示す。さらに、2015年度には業務用分野のお客様先における実証評価も開始し、実環境下での省エネ性、環境性の評価を進めている。

Table 7 The target specifications of 3kW-class SOFC system

項目	目標仕様	備考
AC定格発電出力	3kW	
AC定格発電効率	50%-LHV以上	
総合効率	80%-LHV以上	
寸法	W1150×D670× H1700mm	キャスター除く
重量	450kg	乾燥時

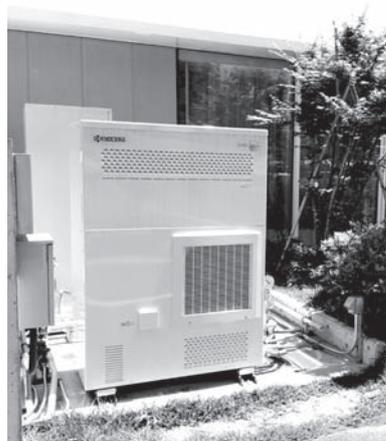


Fig. 4 Field test of 3kW-class SOFC system at Tokyo Gas

**4.1.2 三浦工業における小型SOFC開発<sup>6)</sup>** 三浦工業は住友精密工業と共同で、5kW級の業務用SOFCシステムを開発している。三浦工業は、国内トップシェアを誇るボイラに加え、水処理や食品機の販売、さらにはそのメンテナンスなど、多岐に渡る事業を展開している。これまでに培ってきた燃料ガス・廃熱の高度利用技術、システム化ノウハウを活用し、小型SOFC開発に取り組んでいる。

開発中の5kW級SOFCシステムの目標仕様を表8に示す。SOFCシステムは、発電効率が高い一方で熱損失が小さくなるため、廃熱回収量が相対的に小さくなる。目標仕様から熱電比を計算すると、0.88と1を下回り、既存の5kW級CGS（熱電比1.9）と比べてかなり小さいことがわかる。そのため、これまで普及が進まなかった事務所ビルやコンビニエンスストアなどに代表される熱電比が1以下の業務用施設への適用拡大が期待される。特に、その高い発電効率と総合効率は、業務用分野における一次エネルギー消費量及びCO<sub>2</sub>排出量の削減に大きく貢献できると考えられる。三浦工業の試算では、将来の市場ストックが5kW級・15万台とした場合、年間の一次エネルギー削減量が約86万kL（原油換算）、CO<sub>2</sub>削減量が約196万t-CO<sub>2</sub>と報告されている。

また、本SOFCシステムはコンパクトな設計を目標にしている。一般的なSOFCコージェネレーションシステムは、発電ユニットと貯湯ユニットから構成されるが、発電ユニットの目標寸法は500mm×1,000mm×1,500mmを目指している。都心部の小規模店舗などでは、設置スペースが限られる場合が多いことから、このようなコンパクトなCGSの開発が期待される。

本開発は、NEDOの「固体酸化物形燃料電池を用いた業務用システムの実用化技術実証」（以下、NEDO実証事業と記載）の助成を受けており、2013年度からシステムの実証評価を進めている。2013年度は5サイトにて長期耐久性の確認を行い、2014年度の後半には上記5サイト中4サイトにて改良型試験機に入れ替えて評価を開始した。さらに、2015年度はより商品機に近づいた新型機の評価も開始した。東京ガスを含めたガス3社（大阪、東邦）は本実証に協力しており、各社試験場において実証機を設置し評価を実施した。千住試験場に設置したSOFCシステムの外観図を図5に示す。本システムにおいて8000時間超の安定した運転実績を得ている。

また、本システムは大成建設のZEB（ネット・ゼロエネルギービル）実証棟にも設置されており、ZEB棟のエネルギー供給を構成する重要な要素として運用され、検証が行われている。SOFCシステムは、その高い発電効率と総合効率により、ZEB棟に代表される将来の民生用分野における省エネ、省CO<sub>2</sub>の実現に向けて幅広く活用されることが期待される（図6、7参照）。

Table 8 The target specifications of 5kW-class SOFC system

項目	目標仕様	備考
燃料使用量	8.80kW	都市ガス
発電量 AC	4.20kW	
発電効率 AC	48.0%-LHV	
排熱回収量	3.70kW	
排熱回収効率	42.0%-LHV	
総合効率	90.0%-LHV	
寸法	W500×D1,000×H1,500mm	
耐久性	4万時間以上	初期性能10%低下

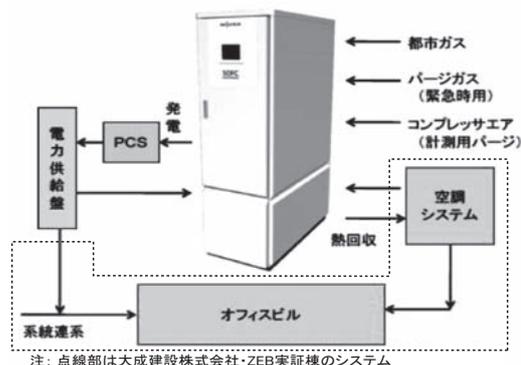


Fig. 7 The 5kW-SOFC system at ZEB demonstration by Taisei Corporation



Fig. 5 Field test of 5kW-class SOFC system at Tokyo Gas



Fig. 6 The demonstration of ZEB by Taisei Corporation

#### 4.2 三菱日立パワーシステムズにおけるSOFCハイブリッド発電システムの開発動向<sup>(7),(8)</sup>

三菱日立パワーシステムズは、タービンををはじめとする大型発電設備に関する実績が豊富にあり、非常に高い火力発電技術力・環境技術力を有している。その知見を活かし、省エネ・省CO<sub>2</sub>を実現するシステムとして、SOFCハイブリッド発電CGSの開発を進めている。

本システムの最大の特徴である「ハイブリッドシステム」とは、SOFCとマイクロガスタービン(MGT)の2段階発電システムのことである。図8にシステムの系統図を示す。燃料である都市ガスをSOFCに投入し、排出される燃料オフガスと空気をマイクロガスタービンへ投入する。燃料オフガス中に含まれる未反応の燃料(水素等)をマイクロガスタービンで使用することで、燃料利用率を向上させ、発電効率を55%まで高めるシステムとして開発を進めており、目標仕様は表9の通りである。

本システムは、2011～2012年度に設計・開発を行い、2012年度からNEDO実証事業の助成を受け、発電実証を行うとともに2017年度商品化に向けた課題抽出を行った。本実証機は東京ガスの千住テクノステーションに設置され、長期耐久性の検証や安全性の検証が行われた。長期耐久性検証試験では、この出力帯では世界初となる4,100時間の長期耐久試験を行い、システムの性能低下が無いことが確認された(図9参照)。また、停電等によるシステム異常を想定したインターロックの検証も行い、システムの安全性も確認されている。また、本検証データはSOFCの規制緩和に活用され、本システムも該当する合計出力300kW未満、圧力1MPa未満までのSOFCは常時監視の対象から外れた。

上記実証試験で得られた成果を反映させ、さらに省スペース化・高性能化を目指して電極と電解質の界面等を改良したセルスタックを用いた新型機の開発が進められている。セルスタックの小口径化によるシステム小型化のイメージを図10に示す。円筒形セルスタックを小口径化することで充填密度が高まり、設置面積が約4割削減される見通しが得られている。最新の実証機は、九州大学の伊都キャンパスを実証フィールドとした「スマート

燃料電池社会実証」において、業務産業用燃料電池を核とした水素社会の実現に向けた取り組みの一環として評価が進められている（図11参照）。

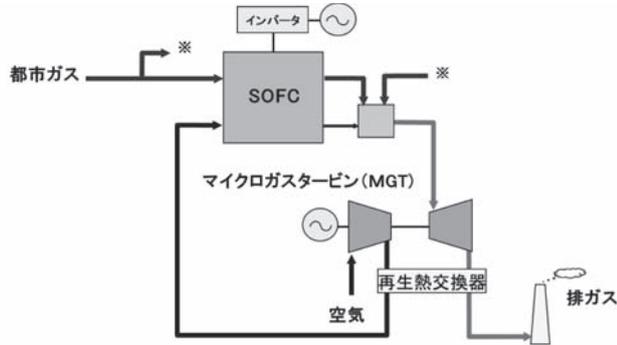


Fig. 8 The system flow image of 250kW-class SOFC-MGT Hybrid System

Table 9 The target specification of 250kW-class SOFC-MGT Hybrid System

項目	商品化時目標
AC発電出力	250kW
AC発電効率	55%-LHV
総合効率	73%-LHV
※廃熱は温水利用	

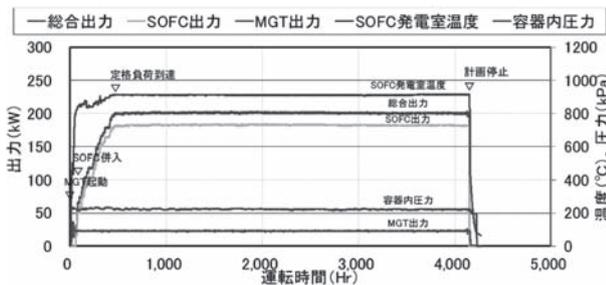


Fig. 9 Stable operation more than 4,000 hours of 250kW-class SOFC-MGT Hybrid System at Tokyo Gas

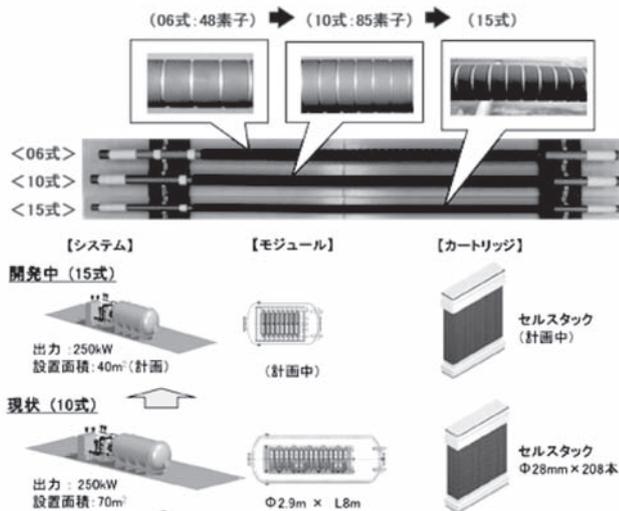


Fig.10 The downsizing plan of Hybrid System by the new small caliber cell-stacks "15ver. model"

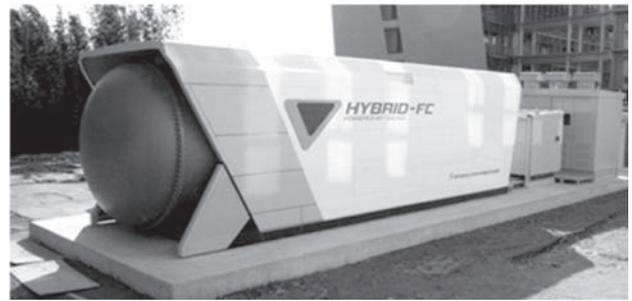


Fig.11 Field test of the new model 250kW-class SOFC-MGT Hybrid System at Kyushu University

### 5. 終わりに

化石燃料への依存度が増している昨今、省エネルギーと環境負荷低減に貢献し、将来の水素社会実現の第一歩となりうる燃料電池CGSへの期待は高まっている。

家庭用燃料電池CGSは、2009年の販売開始から7年を経て、省エネ・省CO<sub>2</sub>を実現する次世代機器としての認知が進むとともに、お客様ニーズを的確に反映した様々なオプションの提供により、着々とその普及台数を伸ばしてきた。また、業務用燃料電池CGSも、2017年度商品化という目標に向けて官民一体となった取り組みが進められ、実環境下での実証評価が行われる等、商品化に向けた最終段階に入りつつある。

東京ガスは、家庭用及び業務用燃料電池CGSの普及拡大を通じて、「快適な暮らしづくり」と「環境に優しい都市づくり」に貢献していきたいと考えている。

### 6. 引用文献

- 一般社団法人 日本電機工業会  
<<https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/fuel/about.html>> (参照2016年 5月17日)。
- 経済産業省<<http://www.meti.go.jp/press/2015/03/20160322009/20160322009.html>> (参照2016年 5月17日)。
- 渡邊崇之, 小笠原慶, 小林広介, 関根大輔, 山田浩一郎, 佐野晃, 平子俊哉, 普及拡大に向けた新型エネファームの開発, 第21回燃料電池シンポジウム講演予稿集 (2014), PP. 8-11.
- エネファームパートナーズ<[www.gas.or.jp/user/comfortable-life/enefarm-partners/common/data/20151221\\_web.pdf](http://www.gas.or.jp/user/comfortable-life/enefarm-partners/common/data/20151221_web.pdf)> (参照2016年 5月17日)。
- アイシン精機 プレスリリース<<http://www.aisin.co.jp/news/2016/010405.html>> (参照2016年 5月17日)。
- 井上一信, 徳永幸博, 田中靖国, 山本英貴, 竹本真典, 5kW級 業務用SOFCシステムの開発と実証評価について, 第22回燃料電池シンポジウム講演予稿集 (2015), PP. 54-55.
- 小林由則, 安藤喜昌, 西浦 雅則, 富田和男, 岸沢浩, 眞竹徳久, 三菱重工技報 Vol. 50 No. 3 (2013), PP. 62-66.
- 岩田光由, 大澤弘行, 森龍太郎, 樋渡研一, 西浦雅則, 岸沢浩, 安藤喜昌, 富田和男, 小林由則, 北川雄一郎, 分散型電源としての高効率SOFC発電システムの開発状況, 第22回燃料電池シンポジウム講演予稿集 (2015), PP. 50-53.

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## りん酸形燃料電池の適用事例

大内 崇<sup>\*1</sup>  
OUCHI Takashi

吉岡 浩<sup>\*1</sup>  
YOSHIOKA Hiroshi

堀内 義実<sup>\*1</sup>  
HORIUCHI Yoshimi

黒田 健一<sup>\*2</sup>  
KURODA Kenichi

キーワード：りん酸形燃料電池，バイオガス，純水素，低酸素空気供給，火災予防  
PAFC, Biogas, Pure-hydrogen, Low-oxygen Exhaust Air, Fire Prevention

### 1. 緒言

燃料電池は環境適合性に優れたコージェネレーション装置として位置づけられるとともに，東日本大震災以降災害時のバックアップ電源として病院等の重要負荷に給電を継続できる災害対応型の分散型電源としても注目されている。

また，水素発電の一つである燃料電池は電気を貯める“電池”とは異なり，水素と酸素を供給することで電気を発生させる発電システムであり，水素社会を実現するための水素エネルギー利活用ツールの一つとして期待されている。現在，家庭用燃料電池（エネファーム）や燃料電池自動車の形で着実に普及が進み，発電装置としての燃料電池の認知度は一層高まってきている。

一方，定置用燃料電池の普及促進において家庭用燃料電池より単機容量が大きい業務・産業用燃料電池への水素利活用の期待も大きくなってきており，実用化に向けた開発が各社で活発となってきた。

当社は長年にわたる基礎研究や90台を超えるフィールドテストを経てりん酸形燃料電池の開発に成功し，現在100kW燃料電池コージェネレーション（100kW燃料電池）を販売している。都市ガスに加え，カーボンニュートラルなバイオガスや副生水素等，発熱量の異なるさまざまな燃料に対応可能である。本報では，りん酸形燃料電池の適用事例を中心とした当社の水素事業への取り組みに関して紹介する。

### 2. 100i装置の開発

#### 2.1 燃料電池の特徴と種類<sup>1)</sup>

燃料電池は，従来の内燃機関による発電方式と異なり，機械エネルギーに変換することなく直接電気エネルギーを取り出すことができる。このため，小容量でも高い発電効率が得られるだけでなく，非燃焼な発電方式のため，排気ガス中のNO<sub>x</sub>はりん酸形の場合で5 ppm以下と非

常にクリーンである。ピストンのような駆動部分もないため，振動や騒音も非常に小さい。

燃料電池の発電の仕組みとして，一般的に水の電気分解の逆の反応と説明される。図1に燃料電池の発電原理を示す。具体的には燃料ガスと空気中の酸素を直接反応させるのではなく，電解質を介して正極と負極で別々に酸化還元反応を起こさせ，正極および負極に接続された外部回路に電子を引き出すことで電気エネルギーを取り出すものである。“電池”の名称がついているが，燃料ガスと酸素を供給し続ける限り電力を取り出すことができるいわば化学発電装置であり，二次電池のように充電はできない。一つの単電池（セル）で発生する直流電圧は1V以下と小さいため，セルを直列に積層して直流電圧を昇圧している。燃料電池本体を“セルスタック”と称するのは，セルを積層（スタック）した構造であることに由来している。

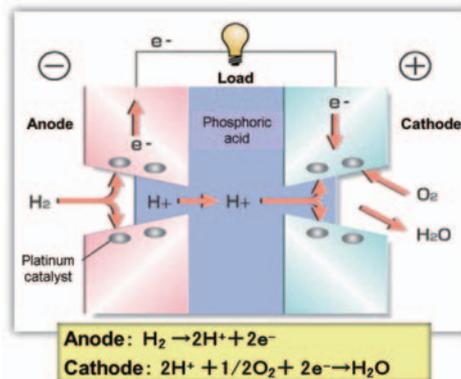


Fig. 1 Generation principle of PAFC

燃料電池の電解質膜には，イオン電導性があり，蒸発しにくく，燃料ガスと酸素が直接反応しないためのガス遮断性が求められる。この要求を満足するものとして固体高分子膜，リン酸溶液，溶融炭酸塩，固体電解質などが採用されている。それぞれの電解質は，イオン電導性を発揮する温度が異なり，その特性に応じて用途が住み分けされている。

たとえば，自動車用では常温からの始動が要求されるため，100℃以下で発電可能な固体高分子形燃料電池が

原稿受付 2016年5月9日

\* 1 富士電機(株) 燃料電池技術部  
〒210-9530 川崎市川崎区田辺新田1-1

\* 2 Fuji N<sub>2</sub>telligence GmbH  
Alter Holzhafen 15 D-23966 Wismar

採用されている。温度が低いことから安価材料を使用でき、起動停止や出力変更がしやすいメリットがある。

また、発電事業用では、反応速度をあげられる高温型の溶融炭酸塩形（650℃）や固体酸化物形（1,000℃）が採用されている。発電効率を高くすることができるメリットがあるが、材料に対して高度な耐久性が要求されること、ヒートサイクルによる損傷を回避するため起動停止や出力変更が難しいなどの課題がある。

一方、中温型のりん酸形（200℃）は、材料として一般的な工業用カーボン材を使用することができるため、新たな材料開発は不要で耐久性も確認済みである。また、排熱として90℃の温水を取り出すことができるため、吸収式冷温水器を利用して空調用の冷水も供給可能である。出力変更も容易なため、顧客デマンドにあわせて昼夜で出力を変えるパターン運転の他、停電時の顧客施設特定負荷への独立給電運転にも対応可能である。さらに、負荷遮断も可能なため、系統異常発生時には系統から即時に解列して燃料電池内部補機にのみ給電を行う待機運転に移行し、系統復帰後に再連系して短時間で送電を再開することが可能である。

このように、りん酸形は柔軟な出力変更が可能で、排熱も空調や温水利用できる使い勝手の良い発電装置であるといえる。

## 2.2 開発経緯<sup>(1),(2),(3)</sup>

図2に、富士電機におけるりん酸形燃料電池の開発経緯を示す。販売中のりん酸形燃料電池は、1973年に開発に着手し、オンサイト用として50kW、100kW、500kWの燃料電池による90台以上のフィールドテストを行い、1998年から経験とノウハウを反映させた100kW商品機（FP-100E）の販売を開始した。発電容量は、比較的エネルギーコストが割高な中小規模の施設にターゲットを絞り、100kWに特化して調達や生産、エンジニアリングの効率化を図ってきた。セルスタックの長寿命化や設置性向上にも取り組み、2009年に周辺設備を含めオールインワンパッケージ化したFP-100i商品機を開発した。

燃料に関しては改質器や脱硫器を自社開発している強みを活かして、インフラが整備されている都市ガスの他、

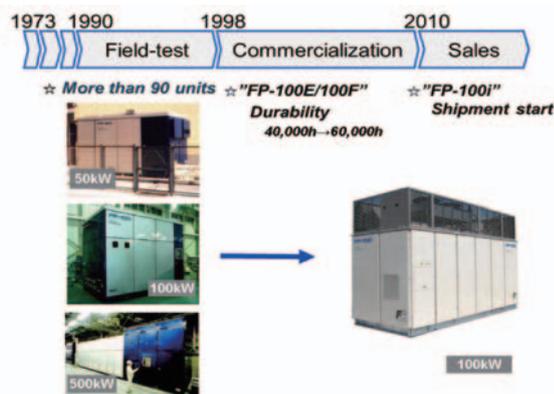


Fig. 2 Development process of PAFC

再生可能エネルギーとして注目されている下水消化ガスでも発電が可能である。さらに、次世代のインフラとして期待され、より高い発電効率が得られる水素ガス専用機もラインアップしている。FP-100i商品機は2009年度「日経優秀製品・サービス賞 優秀賞」を受賞した。

図3に商品機（FP-100i）の外観、表1に、燃料電池の代表機種における主な仕様を示す。



Fig. 3 The appearance of 100kW PAFC (FP-100i)

Table 1 PAFC specification

Fuel	City gas	Biogas	Hydrogen gas
Output	AC 105kW		
Rated voltage, frequency	210V (50/60Hz)		
Efficiency	42% (LHV)	40% (LHV)	48% (LHV)
Thermal output	123kW	116kW	99kW
Total efficiency	91% (LHV)	85% (LHV)	93% (LHV)
Main dimensions	2.2m(W) x 5.5m(L) x 3.4m(H)		
Weight	14 ton	13.5 ton	

次に、現在の100kW機のオプション対応を表2に示す。JIS適合の国内仕様機に加え、CEマーキング適合のEU仕様機もラインアップしている。EU仕様機では、ドイツの系統連系規格の認証も取得している。

Table 2 PAFC option list

Type	Fuel	Function			
		CHP	Grid independent	Fuel switch	Low Oxygen
JIS	City gas	○			
	(Emergency use)	○	○	○	
	Biogas	○			
	Hydrogen gas	○			
CE	City gas	○			
	(Fire prevention)	○			○
	Hydrogen gas	○			

オプションとしては、国内（JIS）仕様機では独立給電機能とバックアップ燃料（LPガス）との燃料切替機能を有する災害対応型<sup>5)</sup>、EU仕様機では低酸素空気供給機能を有する火災予防対応型<sup>6)</sup>等がある。

## 2.3 100kW燃料電池の概要

燃料電池のマーケットとして有望な欧州や東アジアでの普及拡大を念頭に、FP-100i商品機では寒冷地対応や

設置性の向上を図っている。

図4に、100kW燃料電池の構造図を示す。

1) オールインワン パッケージ

100kW燃料電池は、現地での据付けが容易なパッケージ構造を採用しており、トラック輸送を考慮して横幅を2.2m、高さを2.5m（据付時は3.4m）としている。従来、別置であった窒素設備、水処理設備の付帯設備もパッケージに内蔵するとともに、排熱処理用の空冷式ラジエーターを天井に設置する構造としたため、現地での配線配管工事の大幅削減と設置面積の半減化を実現している。

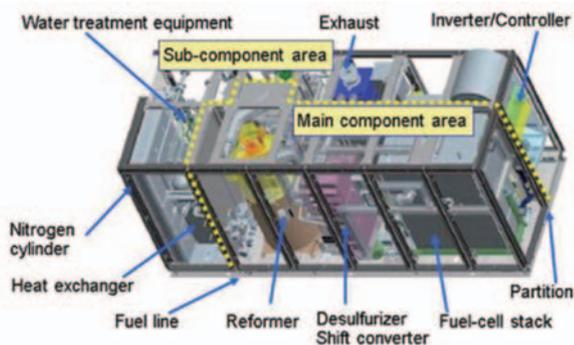
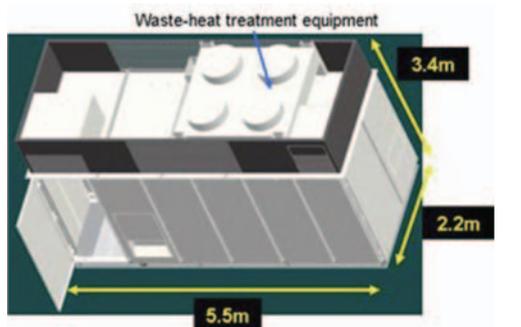


Fig. 4 The structural drawing of 100kW PAFC

2) 寒冷地対応

従来機では、気温が-5℃を下回る寒冷地では屋内設置としていたが、FP-100i機ではパッケージ内に隔壁を設けて凍結防止が必要なエリアを区画化し、そのエリアが0℃を下回らないように機器放熱と給排気量を最適制御することで、気温-20℃～+40℃の環境でも屋外設置できる設計とした。また、環境試験室における運転試験を実施し、上記温度範囲で運転継続可能なことを確認した。図5に環境試験室の外観を示す。

これにより、日本だけでなく、熱需要の高い欧州への拡販を可能とした。

3) 耐震性の向上

耐震性の向上を図るため、計画段階から装置架台と燃料電池スタックの強度解析を実施し設計へ反映させた。さらに実機を振動試験機に搭載し、新潟中越地震相当の地震波による振動試験を行い、振動試験完了後に装置が問題なく発電できることを確認した。図6に耐震試験状態を示す。



Fig. 5 The appearance of the environmental test room



Fig. 6 Appearance of the earthquake-resistant examination

3. りん酸形燃料電池の用途開発<sup>(2),(3)</sup>

100kW燃料電池は、従来都市ガスを燃料とするコージェネレーション用途がほとんどであったが、さらなる普及拡大を目指して、燃料電池の特徴を活かしたアプリケーションの開発に取り組んできた。図7に用途開発の状況を示す。当社では、使用できる燃料種の拡大と、燃料電池の特長を活かした機能追加を進めている。

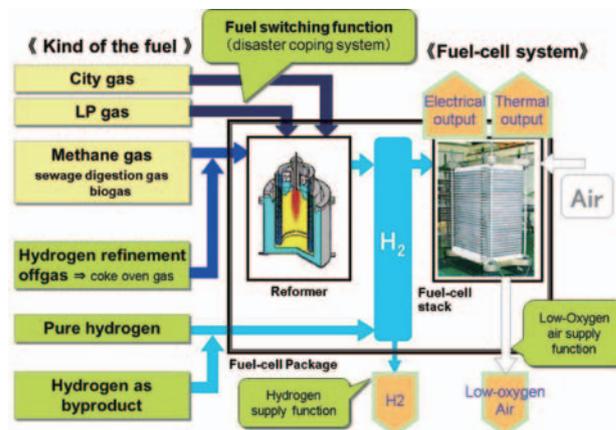


Fig. 7 The use expanding of 100kW PAFC

3.1 バイオガス（下水消化ガス）利用への取り組み

100kW燃料電池には、脱硫器・改質器・CO変成器で構成される燃料改質装置が内蔵されており、改質装置の仕様を一部見直すことで多様な燃料に対応できる。富士電機は、改質装置を自社開発している強みを活かして、燃料として都市ガスやバイオマス由来の下水消化ガスに対応した100kW燃料電池を販売している。

3.2 災害対応への取り組み

地震等で都市ガスが停ガスした場合には、瞬時にバックアップ燃料（LPガス）に切替えて発電を継続すると

ともに、重要負荷に電力を供給できる災害対応型を販売している。

図8に災害対応型燃料電池の通常時と災害時の電源供給方法と燃料切替え方法を示す。<sup>(3)</sup>

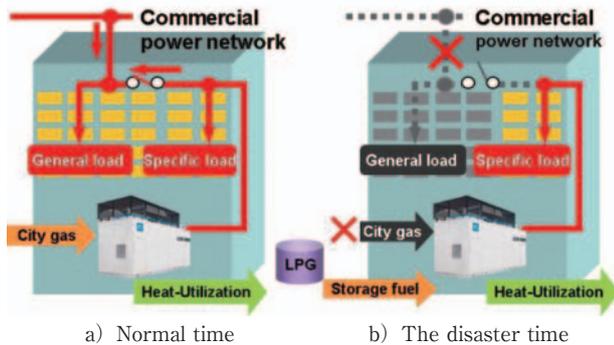


Fig. 8 The power supply method of 100kW PAFC

### 3.3 水素利用への取り組み

水素社会の実現に向けて、水素製造、水素利用、水素貯蔵、水素輸送など水素サプライチェーンの技術開発が加速している。燃料電池は水素と酸素から電気化学反応により直接電気を取り出せる水素利用に最適な発電システムである。

#### 1) 水素仕様燃料電池<sup>(2),(4)</sup>

水素利用への取り組みとして、純水素を装置へ供給して発電を行う水素仕様100kW機をラインアップしている。燃料の水素を直接燃料電池スタックに供給し、燃料電池の燃料極から排気される未利用水素をエゼクターサイクル方式により再循環させて発電に有効利用することで、発電効率は都市ガス仕様機の42%に対して48%と高めている。また純水素を直接供給して発電できるため複雑な改質装置や改質蒸気が不要となり、都市ガス仕様機と比べより多くの高温排熱を取り出すことができる。

図9に、都市ガス仕様機と水素仕様機のシステムフローを示す。

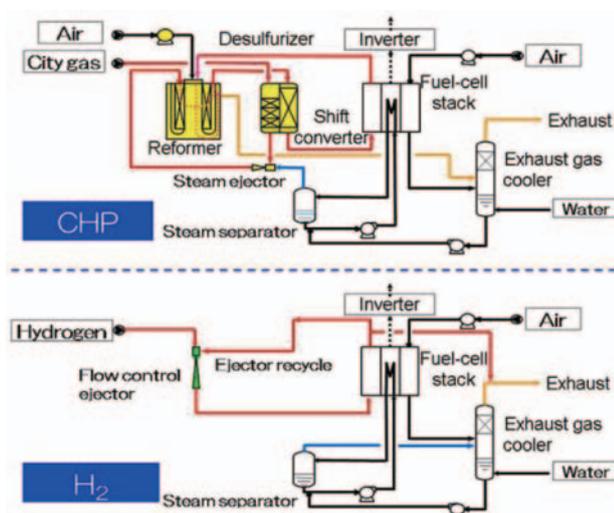


Fig. 9 System flow comparison (CHG & Pure-H2)

水素仕様100kW機は、高効率な燃料電池として水素エネルギー時代の有効な水素利活用手段となる。燃料を水素とすることで、燃料電池のポテンシャルをより引き出し、高効率化できることから、今後水素仕様100kW機の海外展開に取り組んでいく。また、燃料電池開発で培った改質技術の活用し、水素製造についても検討していく。

### 4. 納入・適用事例

過去5年間の納入台数を図10に示す。近年はバイオガス仕様燃料電池の出荷台数が増加している。実用化当初は、燃料電池の先進性や環境性の高さで注目されることが多かったが、燃料電池の特性を活かした独自用途への展開を進めている。

以下に国内と海外の納入・適用事例について紹介する。



Fig.10 The delivery results for the past 5 years

#### 4.1 国内の適用事例

##### 1) バイオガス仕様燃料電池<sup>(1),(2)</sup>

下水処理場向けでは、2012年7月に施行された再生可能エネルギー電力固定価格買取制度 (FIT) が追い風となっている。カーボンニュートラルである下水消化ガスで発電した場合、発電した電力を1 kWhあたり39円で20年間売電することができる。図11にバイオガス (下水消化ガス) システムの導入効果を示す。

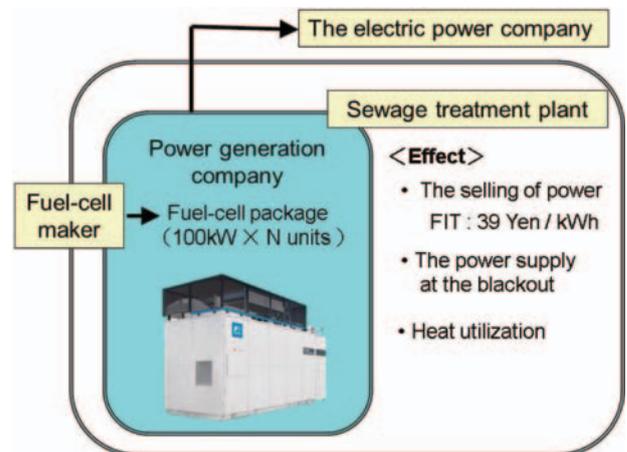


Fig.11 Introduction effect of the biogas system (FIT)

発電効率の高い燃料電池は、同規模の他方式の発電装置と比較して、より多くの電力を発生させることができ、ライフサイクルコストの点から、バイオガス仕様燃料電池が選択される事例が増えている。2014年度に10台、2015年度に8台を納入している。

## 2) 災害対応型燃料電池<sup>(2),(5)</sup>

国内のコージェネレーション市場は、燃料価格の高騰により2004年から徐々に減少傾向にあったが、2011年3月の東日本大震災以降は電源セキュリティへの関心が高まり、回復傾向にある。

平常時は都市ガスで発電し、地震など災害発生時に停電時には都市ガスで発電して重要負荷に電気を供給するとともに、さらに都市ガスが遮断した場合でも燃料を瞬時にLPガスに切り替えて重要負荷に独立給電できる電源セキュリティが高い災害対応型燃料電池を開発した。

2012年より当社川崎工場で実証運転を行い、災害発生時の拠点となる公共施設や病院に納入してきた。LPガス切替時の出力は70kWに制限されるが、50kgボンベで約3時間の給電が可能である。

## 3) 植物工場併設燃料電池

図12に2016年3月当社東京工場内の植物工場に併設した100kW燃料電池を示す。燃料電池からの電気、熱を利用するとともに、炭酸ガス濃度の調整機能を有する未来型農業施設となっている。



Fig.12 100kW PAFC for emergency use and vegetable plant

## 4.2 海外の適用事例<sup>(1),(3)</sup>

海外では、家庭用に先行して業務用燃料電池の導入が進んでいる。富士電機は2010年に海外向けに出荷を開始し、これまでドイツ、韓国、南アフリカ、アメリカの4ヶ国に合計10台の100kW燃料電池を納入している。

ドイツは、2022年までに国内の原子力発電所17基を全て停止することを決定したが、太陽光、風力、バイオマス発電等の再生可能エネルギーの導入が進むにつれ、電力系統の不安定化が問題となってきている。これを緩和する手段として、出力調整が容易なコージェネレーションに期待が寄せられている。

## 1) CEマーキング適合EU仕様機<sup>(4)</sup>

EUで販売される製品には、製品分野別で対象となるEU指令に定められる必須要求事項に適合したことを示すCEマークの貼付が義務付けられている。各指令には必要最低限の基準が記載されているだけで、製品の技術的要件の詳細はEN規格を参照する仕組みとなっている。

燃料電池は、電気と機械が一体となった一種の化学プラントであり、対象となる指令も多岐にわたる。さらに、燃料電池のCEマーキング適合の前例がなかったため、第三者認証機関の協力のもと、2012年には天然ガス燃料の火災予防対応型の適合を完了した。また、ドイツの系統連系規格VDE4105に関しても、第三者認証機関による適合認証を取得済みである。

## 2) 低酸素空気供給 防火型燃料電池<sup>(6)</sup>

あらたな付加価値としてドイツで普及しつつある室内を低酸素化して火災を予防するシステムへの燃料電池の適用に取り組んでいる。従来の空気を膜分離して窒素を得る方法では、設備費や電気料金の高さが課題となっていた。燃料電池の空気極で酸素が消費された後の副生された低酸素空気を利用して、室内の酸素濃度を低減することによりITセンターや倉庫等の火災を予防するシステムを納入している。

図13に燃料電池を利用した低酸素供給防火システムの概要を示す。

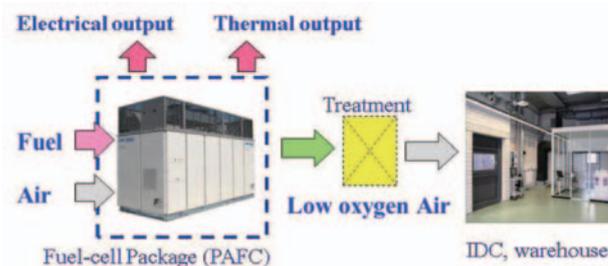


Fig.13 Fire prevention with Low-oxygen exhaust air

## 3) 韓国、南アフリカ向け燃料電池<sup>(3)</sup>

韓国は、再生可能エネルギー義務割当制度（RPS）や新規建屋への再生可能エネルギーの導入義務化等の政策が追い風となり、業務用燃料電池の導入が拡大している。当社は、2014年から韓国向けに出荷を開始し、これまでに商業ビルとデータセンターに納入した。

南アフリカは、「BRICS」の一角として成長が期待される一方、発電施設の老朽化等で電力不足が深刻化している。企業では、防衛手段として自家発電の導入を積極的に進めている。当社は、2014年に南アフリカのオフィスビルに燃料電池を納入した。平常時は系統連系してビル内に送電し、計画停電時には重要負荷に電力を供給する独立給電機能を有している。

図14に海外の設置事例を示す。

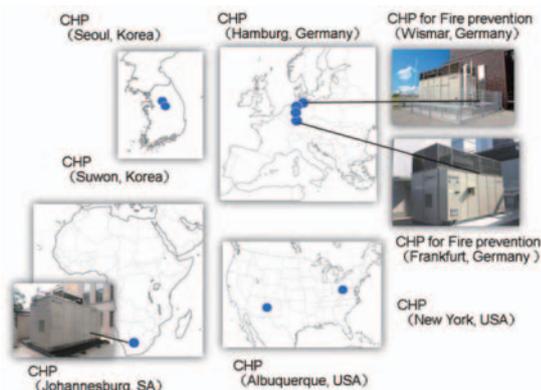


Fig.14 The delivery results (Overseas export)

#### 4) 遠隔監視システム<sup>(1)</sup>

燃料電池の稼働率向上には予防保全技術と速やかな故障診断が有効となる。仮想専用線サービスを利用した遠隔監視システムを開発し、海外設置機の運転データ監視による異常検出や故障解析、更に保守パソコンによるソフトウェアの遠隔更新を可能とした。また本システムとは別に緊急時24h連絡可能なコールセンターを開設している。図15に遠隔監視システムの概要を示す。

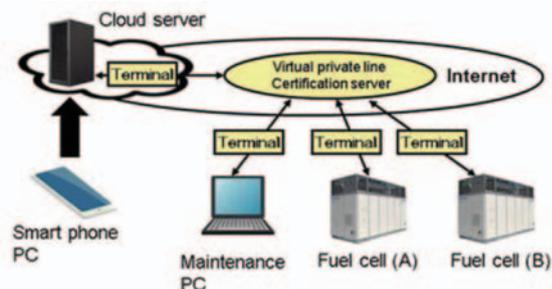


Fig.15 Summary of the remote monitoring system

#### 4.3 固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の開発事例

当社は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成を受け、50kW級固体酸化物形燃料電池 (SOFC) を2018年度上市に向け、いままで述べたりん酸形燃料電池 (PAFC) 製品化の経験・ノウハウを投入し鋭意開発中である。図16にSOFCの外観イメージを、表3にSOFCの主な仕様を示す。

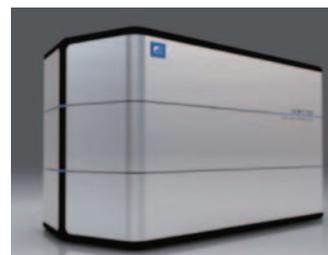


Fig.16 The image of 50kW SOFC

Table 3 SOFC specification

Output	AC 50kW (grade)
Electrical efficiency	55% (LHV)
Thermal efficiency	30% (LHV)
Total efficiency	85% (LHV)
Main dimensions	0.2 m <sup>2</sup> /kW

#### 5. 結言

りん酸形燃料電池の納入・適用事例を中心に、燃料電池特有の用途開発事例と海外への展開の現状について紹介した。水素は、旧来の化石燃料を中心としたエネルギー消費社会から、再生可能エネルギーを中心とした持続可能な社会に転換するための革新的なエネルギーになると期待されている。当社は、長年培った燃料電池技術を活用し各種アプリケーションの適用拡大を図ると共に、水素仕様燃料電池をはじめとする水素利活用機器の製造、開発を通して「水素社会の実現」に向けて貢献していく所存である。

これまでの関係機関およびユーザー各位のご指導、ご協力に感謝するとともに、今後ともなお一層のご理解とご支援をお願いするものである。

#### 6. 参考文献

- (1) 黒田健一, 燃料電池, 電設技術, 12月号 (2015), pp. 84-88.
- (2) 千田仁人, 堀内義実, 黒田健一, 吉岡浩, PAFCのポテンシャルと導入実績, 燃料電池, vol.9 (2010), pp. 11-17.
- (3) 黒田健一, 吉岡浩, 堀内義実, 武内信義, 富士電機りん酸形燃料電池の市場展開, 第22回燃料電池シンポジウム講演予稿集, (2015), pp. 1-4.
- (4) 黒田健一, 富士電機の水素事業への取り組み, 電機, vol. 778 (2015), pp. 32-35.
- (5) 堀内義実, 吉岡浩, 停電時対応燃料電池について, クリーンエネルギー 1月号 (2012), pp. 21-25.
- (6) 岡 嘉弘, 低酸素濃度供給燃料電池発電設備について, 電機, vol. 760 (2013), pp. 41-44.

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## 燃料電池車MIRAI，水素社会の実現に向けて

渡部 麻美子\*<sup>1</sup>  
WATANABE Mamiko

小島 康一\*<sup>1</sup>  
KOJIMA Koichi

キーワード：CO<sub>2</sub>ゼロ，燃料電池，燃料電池車，コスト低減，FCバス，水素社会

CO<sub>2</sub> Zero, Fuel Cell, Fuel Cell Vehicle, Cost Reduction, FC Bus, Hydrogen Society

### 1. はじめに

トヨタ自動車は、環境問題を最重要課題のひとつとして、新しいモビリティ社会のあり方を常に考え、困難な課題に真正面からチャレンジしてきた。近年、地球温暖化、資源の枯渇、生物多様性の劣化など、環境問題は広範囲に渡り、一層深刻化している。これからも地球環境と共生し続けるためには、20年、30年先の世界を見据えた新たなチャレンジが必要である。

#### 1.1 環境チャレンジ2050

トヨタ自動車は『ゼロの世界にとどまらないプラスの世界も同時に目指すTOYOTA ENVIRONMENTAL CHALLENGE 2050』として、図1に示す6つのチャレンジを掲げた。



Fig. 1 Toyota environmental challenge 2050

その中の一つに工場ゼロチャレンジがある。既にトヨタブラジル工場では、風力・バイオマス等の電力を再生可能エネルギー事業者から購入することにより、2015年から100%再生可能エネルギー利用を達成している。

さらに、国内工場において2020年頃に風力発電等を導入し、現在未利用の排熱を地域の会社などと融通しあい、未利用エネルギーの活用にも積極的に取り組み、燃料電池車（Fuel Cell Vehicle以下、略してFCV）生産ラインでのCO<sub>2</sub>ゼロ化を目指す。（図2）

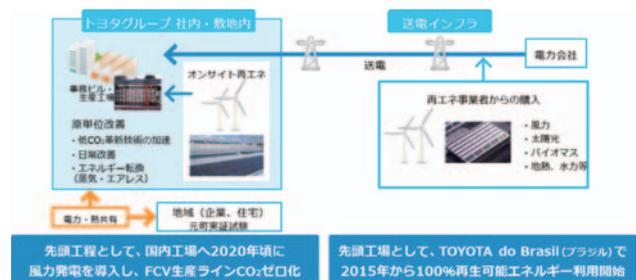


Fig. 2 Use of the renewable energies

図3、4に示すように、今後、工場でのエネルギーの使用量を徹底的に減らし、さらに再生可能エネルギーや水素の利用を進める。これらの取り組みを世界各地の新設工場、既存工場へ展開する事により、2050年にはCO<sub>2</sub>ゼロのクリーンな工場を目指す。

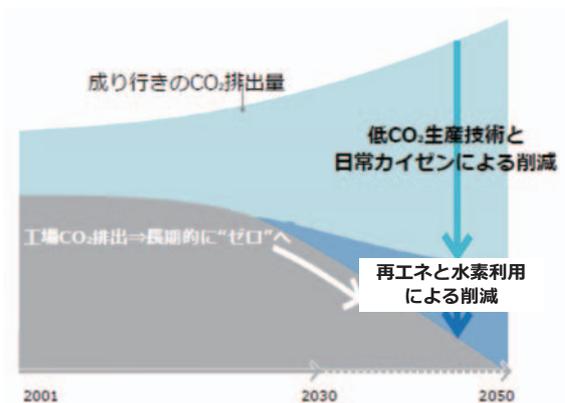


Fig. 3 Plant CO<sub>2</sub> zero challenge in 2050

原稿受付 2016年4月28日

\*1 トヨタ自動車(株) FC技術・開発部  
豊田市トヨタ町1

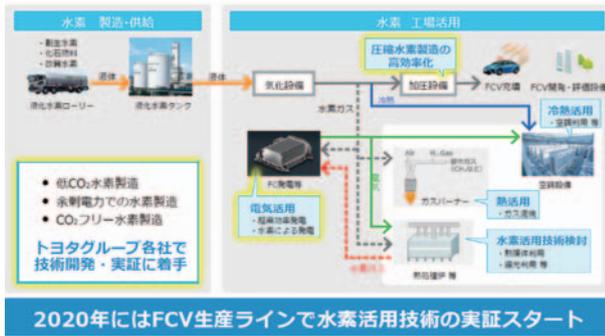


Fig. 4 Demonstration of hydrogen utilization for 2020 FCV production line

従来よりトヨタ自動車は、CO<sub>2</sub>削減に資する燃費改善を最重要課題と位置づけ、エンジン、トランスミッション、シャーシ、ボディなど、全ての開発領域で技術を磨き、新しい技術を普及させることに努めてきた。そこで『新車CO<sub>2</sub>ゼロチャレンジ』では、図5に示すように新車から排出される走行時のCO<sub>2</sub>排出量を、2050年には2010年と比べて、90%削減するという目標を掲げた。

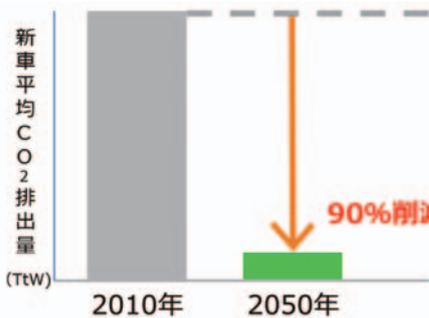


Fig. 5 Vehicle CO<sub>2</sub> zero challenge in 2050

1.2 環境対応車の棲み分け

次に、色々ある次世代環境対応車の中でのFCVの位置付けについて述べる。図6はそれらの棲み分けイメージを示している。電気自動車（以下、EV）は航続距離が短いため、短距離用途が中心となり、小型車や自動二輪車などが適していると考えられる。一方、FCVは中長距離以上をカバーできるため、小型から大型までの適用可能性を持っている。

しかしながら、EVもFCVもまだシステムコストが高い。また、インフラの課題も大きく、本格普及には相応の時間が必要である。そのため、現時点では短距離走行時はEV走行が可能で、電池がなくなると通常のハイブリット車（HV）として機能するプラグインハイブリッド車（以下、PHV）が次世代環境対応車の本命である。一方ゼロエミッション車としてはFCVの技術開発が進むことによって、徐々にFCVが普及していくものと予想される。

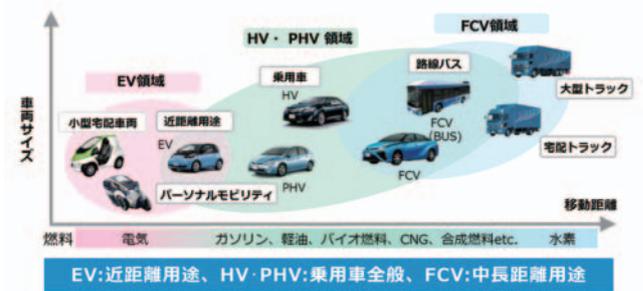


Fig. 6 Powertrain map with fuel diversification

1.3 FCVの5つの利点

FCVの5つの利点を図7に示す。燃料の水素は様々な一次エネルギーから製造が可能である。太陽光や風力などの再生可能エネルギーを活用して、水からも生成が可能である。水素は電気に比べてエネルギー密度が高く、貯蔵・輸送も容易である。FCVは走行時、車両からCO<sub>2</sub>や環境負荷物質を排出しない。そして、静かかつ低速からのレスポンスの良い加速などの楽しい走りは、大きな魅力である。さらに、実用でも500km以上の航続距離や低温始動走行性、3分程度の水素充填時間など、次世代環境車でありながら、現状のガソリン車と同等の利便性を兼ね備えている。

加えて、非常時（災害時）などでの家庭や避難所への電源供給に新たな期待が集まっている。給電時間は当然水素の残量によって変わるが、水素が満タンと仮定すると、FCVでは一般家庭へ1週間以上、また、FCバスでは避難所と想定される体育館に約5日程度給電ができ、水素を補充すれば更に長期間の給電が可能である。

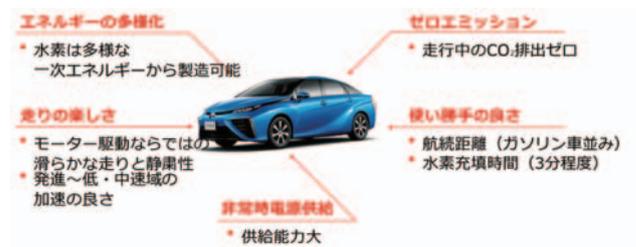


Fig. 7 Advantages of MIRAI

2. 燃料電池とは

図8にFCV用に使われている固体高分子形燃料電池の原理を示す。水素を燃料電池のマイナス極に供給すると、水素はマイナス極の触媒で活性化され電子を放出する。水素から離れた電子は、マイナス極から反対のプラス極に流れることで、電気が発生する。その際に、電子を放出した水素は水素イオン（プロトン）となり、マイナス側から高分子電解質膜を通してプラス側へ移動し、プラス極の触媒上で、酸素及び電子と結合して水となる。理論的には水素が持っているエネルギーの83%を電気エネルギーに変換出来るため、内燃機関に比べ効率が良い。

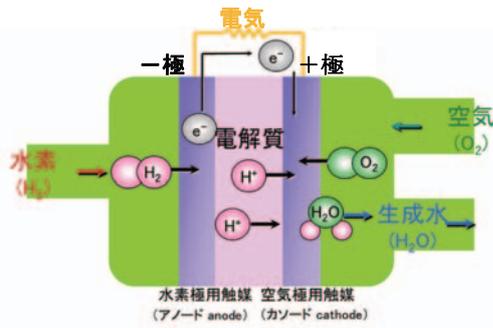


Fig. 8 Principle of Polymer electrolyte fuel cell

FCVのしくみを図9に示す。FCVは燃料の水素と空気中の酸素を燃料電池で化学反応させて発電し、その電気でモーターを駆動し、走行する。燃料電池は発電の際、水以外は排出しないため、ゼロエミッションのパワートレインである。FCVは駆動用バッテリーを搭載したハイブリッド車のため、加速時には駆動用バッテリーで電力アシストし、減速時にはモーターで回生した電力を駆動用バッテリーに充電する。このハイブリッド技術によって、FCVは高い効率を実現している。

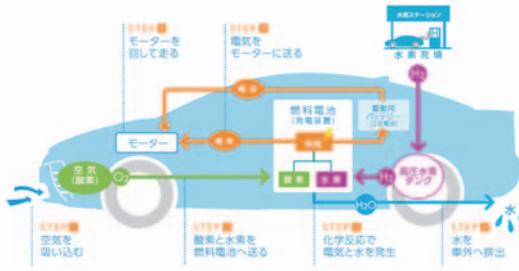


Fig. 9 Principle of FCV operation

### 3. トヨタ自動車のFCV

#### 3.1 FCV開発の歴史

図10に示すように、トヨタ自動車では1992年から燃料電池の開発に着手し、2002年12月には世界に先駆けて日米で「トヨタFCHV」の限定販売を開始した。以後改良を重ね、2008年の「FCHV-adv」では、主要技術課題であった航続距離、氷点下始動性を解決。2014年12月、世界初の量産FCV「MIRAI」を日本で販売開始し、続いて欧州では2015年9月、アメリカでは2015年10月より販売を開始した。



Fig.10 Toyota's FCV development history

#### 3.2 量産FCV「MIRAI」の開発

FCV商品化のための大きな課題であったFCシステムのコスト低減に加え、同時に従来から定評のある走行性能や静粛性に一段と磨きをかけるという高い目標を掲げ、システム・ユニット共に全てを大幅に刷新し、図11に示すトヨタフューエルセルシステム (TFCS) を完成させた。

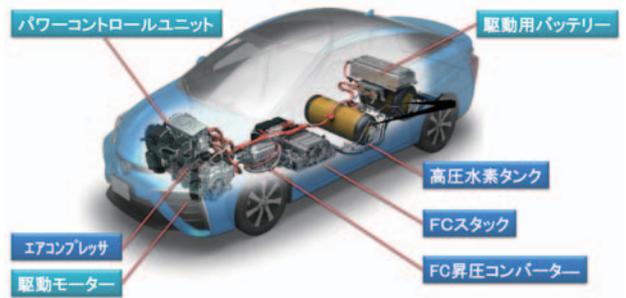


Fig.11 Toyota fuel cell system (TFCS)

#### 3.3 FCスタック<sup>(1)</sup>

新型FCスタックの最大出力は従来の90kWから114kWに27%アップ、セル当たりの出力は36%アップしている。一方セルの体格は、高電流密度化(2.4倍)及び薄型化(20%低減)により24%縮小した。また、セパレータ流路の材質をステンレスから比重の小さいチタンにして、セルの質量を39%低減した。

スタックの締結構造に関しては、セルの積層を従来の2列から1列化して締結プレートを1/2に縮小し、また、スプリングによる定圧締結からセルの内部バネ性を活用した定寸締結によりスプリングを廃止した。更にスタックケースは、プレス品からアルミ鋳造品にすることで締結強度部材としての機能を兼ね備え、締結部品点数を削減し、体格を42%低減(64→37L, 108→56kg)した。以上、高性能化と小型軽量化により出力密度を従来比2倍以上の3.1kW/Lまで向上させた。(図12)



Fig.12 FC Stack comparison with 2008model

#### 3.4 高圧水素タンク<sup>(2)</sup>

図13に高圧水素タンクの構造を示す。高圧水素タンクは最内層の水素ガスを封入する機能の樹脂ライナー、その外側の内圧に対する強度を受け持つ炭素繊維強化プラスチック層、その外側の耐衝撃性を確保するガラス繊維強化プラスチック層からなる。樹脂ライナーの両端には、バルブとの締結のためのアルミ製口金を有している。

この新型高圧水素タンクでは、炭素繊維強化プラスチック層の構成の革新により軽量化を実現し、世界最高レベルの貯蔵性能5.7wt%を達成した。



Fig.13 High pressure hydrogen tank

#### 4. コスト低減<sup>3)</sup>

図14はFCシステムコスト低減をイメージで表したものである。TFCSでは、設計・材料・生産技術の改良により前モデルのFCHV-advに比べ、2014年の量産開始までに1/20程度までシステムコストの低減を図ることができた。コスト低減の方策を下記に述べる。

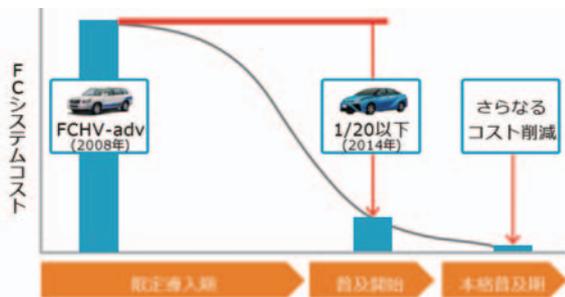


Fig.14 Fuel cell system cost reduction

##### 4.1 部品の簡素化・廃止

燃料電池の電解質膜のイオン電導には水分が必要であり、一般的に吸入空気に湿度を与えて運転している。そのため、燃料電池システムには、加湿器が必要なことが知られている。しかし、加湿器は大変高価な部品のため、取り除くことを考えた。そして、発電の際に生成される水をFCスタック内部で循環させることで、外部加湿器を廃止することができた。

##### 4.2 量産部品の流用

FCHV-advではモーターなどもFCV専用開発された部品を使用していたため、高コストとなっていた。そのため、量産ハイブリッド部品の流用を検討した。FC昇圧コンバーターを用いることにより、量産ハイブリッドのモーター、2次電池、PCU等の流用が可能となり、コスト低減に繋がった。(図15)

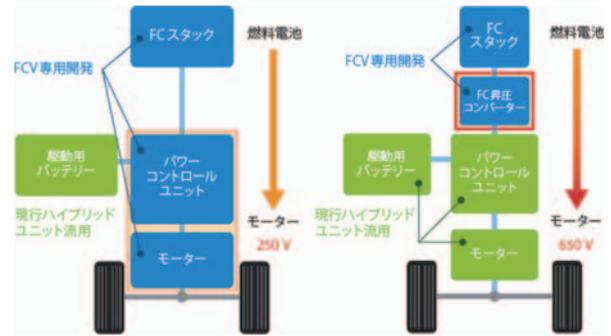


Fig.15 Use of existing hybrid units

#### 4.3 材料費の低減

燃料電池は貴金属のPt触媒や高圧水素タンクのカーボンファイバーに代表される高価な材料を多く使用している。Ptの使用料低減にはPtの有効利用率を向上させることとFCスタックの出力密度を向上させることが有効である。TFCSのFCスタックでは、セル流路構造及び電極の革新により小型・軽量化と高性能化を達成し、従来比で触媒Pt量を1/3に低減している。

高圧水素タンクに関しては、従来の4本搭載を2本に削減した。また、カーボンファイバーの巻き方の最適化とその生産技術の改良により、使用量を低減し、タンク貯蔵性能を従来のタンクに比べ、25%向上させた。また、前モデルでは航空機に使用されている高級グレードの炭素繊維を採用していたが、高圧水素タンクの原価は炭素繊維が大半を占めるため、TFCSでは炭素繊維の低コスト化に取り組んだ。炭素繊維メーカーの協力により、汎用グレードの炭素繊維を改良して、強度を航空機グレード並に高めることにより、材料コストを低減した。

#### 5. FCバス, FCフォークリフト

##### 5.1 FCバス開発の歴史

図16に示すように、トヨタ自動車では日野自動車と連携し、2001年からFCバスの開発を行っている。2003年8月～2004年12月まで都バスとして日本で初めて営業運行を実施し、2005年の愛知万博では会場間のシャトルバスとして運行した。その後も各空港にて実証試験を実施してきた。現在は、愛知県豊田市にて市内を循環する路線バス「とよたおいでんバス」として運行している。FCバスの実用化に向け、公共交通である路線バスの営業運行による実証試験を通じて、FCバスの実用性や有用性を検証し、着実に研究開発を進めている。

2020年の東京オリンピック・パラリンピックでは選手村や会場への輸送手段として100台以上のFCバスを投入する予定である。



Fig.16 Toyota's FC bus development history

5.2 FCフォークリフト

図17に示すように、トヨタ自動車は、2016年3月より神奈川県、横浜市、川崎市、岩谷産業、東芝と京浜臨海部における再生可能エネルギーを活用した低炭素水素サプライチェーンモデルの構築を図る実証プロジェクトを開始した。本実証プロジェクトでは、横浜市風力発電所（ハマウイング）敷地内で風力発電を利用し、水を電気分解してCO<sub>2</sub>フリーの水素を製造し、貯蔵・圧縮するシステムを整備する。さらに、ここで製造した水素を、簡易水素充填車により輸送し、横浜市内や川崎市内の青果市場や工場・倉庫等に導入するFCフォークリフトで使用するといったサプライチェーンの構築を目指す。この実証を通じて、将来の普及展開モデルを見据えた、コスト試算やCO<sub>2</sub>削減効果等を検証していく。

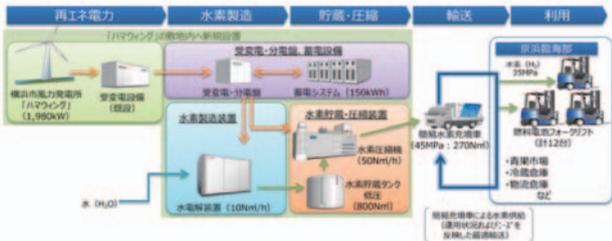


Fig.17 Public-Private Partnership to Test Demonstrate Hydrogen Supply Chain

これらに加えて、アイシン精機による家庭用燃料電池など、トヨタ自動車だけでなく、トヨタグループをあげて水素利用に取り組んでいる。(図18)



Fig.18 A broad range of initiatives in the Toyota Group

6. 普及拡大に向けた取り組み

6.1 トヨタ自動車の取り組み

今後FCVが普及するためには、2020年以降は本格普及期としてグローバルで年間3万台以上を目指す必要がある。これは2017年の生産規模である約3,000台に対して、10倍程度の大幅なレベルアップである。そのために更なるFCVのコストダウンに取り組む。

FCV導入初期段階においては普及を優先し、開発・市場導入を進める自動車メーカーや水素ステーション整備を進めるエネルギー会社などと協調した取り組みが重要であるとの考えに基づき、2015年1月、トヨタ自動車が保有する約5680件のFCV関連特許実施権の無償提供を発表した。(図19)



Fig.19 FCV patents for free use

6.2 水素ステーション整備促進に向けて

FCVの普及のためには、魅力ある商品の提供はもとより、水素ステーションの整備が重要である。政府の支援の下、現在、インフラ事業者による取り組みが進められている。政府やインフラ事業者だけではなく、自動車メーカーとしても水素ステーションの整備促進に取り組むことがお客様への利便性の向上につながり、FCVの新たな需要創出につながると考えている。これまでトヨタ、ホンダ、日産は、官民で時間軸を明確にしなが、どのような役割分担で水素社会を実現していくかを検討し、自動車メーカーの関わりや協力の方向性について認識を共有してきた。

FCVの新たな需要創出活動の一環として、水素ステーションの運営費用の補助、水素充填環境作りに関し、自動車メーカー3社が共同で取り組むことで、FCVの普及を後押しすることを発表した。(図20)



Fig.20 Hydrogen station operation support

### 6.3 水素・燃料電池ロードマップ

産学官の有識者で構成される水素・燃料電池戦略協議会にて、2014年6月に策定した「水素・燃料電池戦略ロードマップ」が2016年3月に改訂された。「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では水素社会の実現に向けて、「水素利用の飛躍的拡大」、「水素発電の本格導入/大規模な水素供給システムの確立」、「トータルでのCO<sub>2</sub>フリー水素供給システムの確立」の3つのステップで産学官の取り組みを進める。

FCVの普及目標は2020年までに4万台程度、2025年までに20万台程度、2030年までに80万台程度。水素ステーションの整備目標は2020年度までに160箇所程度、2025年度までに320箇所程度としている。

2014年には量産FCV「MIRAI」が市場投入され、2015年3月にはホンダの「クラリティ Fuel Cell」もリース販売を開始した。日本には81箇所の水素ステーションが設置され、水素社会の幕開けを迎えた。

日本の燃料電池分野の特許出願件数は、世界1位で2位以下と比べて5倍以上と諸外国を引き離しているなど、日本が強い競争力を持つ分野である。水素社会の実現に向け今後も産学官で積極的に協力し、世界に先行する水素・燃料電池分野の世界市場をリードしていきたい。

(図21)

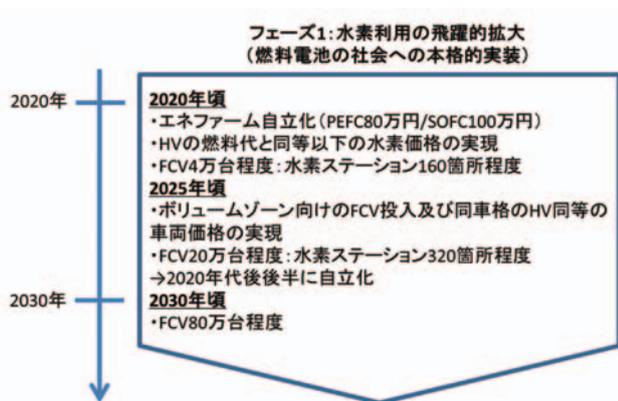


Fig.21 METI Hydrogen and Fuel cell initiative roadmap

### 7. おわりに

2014年12月の量産FCV「MIRAI」の発売からおおよそ1カ月の受注台数が約1500台に達するなどご好評頂いている。2015年9月から欧州で、2015年10月からは米国で販売開始している。今後は2016年には年間2000台程度、さらに2017年には年間3000台程度と生産台数を拡大する計画である。

FCV「MIRAI」の量産化・商品化は協賛会社の方々、水素ステーション整備を進めるエネルギー会社の方々を含め、NEDO事業の成果やDOEプロジェクトの成果も活用するなど、多くの関係者の多大なサポートと尽力により、成し遂げることができたと考えている。

今後の水素社会の実現には、今後も継続して燃料電池車の開発を続けていくと共に、産学官の連携により基礎から応用まで幅広い研究開発をお願いしたい。

### 引用文献

- (1) Mizuno, S, Nakaji, H, Yoshikawa, H, Development of High Performance and Low Cost Fuel Cell Stack, Toyota Technical Review vol.61, 2015, pp.20-25.
- (2) Kondo, M Yamashita, A, Goto, S, Taki, M, Ogami, N, Kobayashi, T, The High-Pressure Hydrogen Storage System for the Mirai FCV, Toyota Technical Review vol.61, 2015, pp.26-31.
- (3) Kizaki, M, Asai, H, Yumiya, H, Advancing into the Future with the Mirai Fuel cell system Toyota Technical Review vol.61, 2015, pp.12-14.

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## 航空機用燃料電池技術の最新研究状況

岡井 敬一\*<sup>1</sup>  
OKAI Keiichi

渡辺 紀徳\*<sup>2</sup>  
WATANABE Toshinori

キーワード：電動航空機，航空機電動化，固体高分子型燃料電池，固体酸化物型燃料電池

Electric Aircraft, More Electric Aircraft, Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC), Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

### 1. 緒言

昨今の環境負荷低減を目的としたCO<sub>2</sub>排出削減に向けた取り組みは，発電設備・地上輸送機関だけでなく，航空機にも及んでいる。航空機のシステム電動化の視点では，ボーイング社のB787やエアバス社A380等で電動化度の向上が実現している。こうした機体はMEA (More Electric Aircraft) と呼ばれている。航空機のシステム動力は油圧・高圧空気・電気によっており，それらいずれもがエンジン由来である。航空機システムの電動化度の向上については，エンジンのシステム電動化促進<sup>(1)</sup>をはじめ研究開発が活発になされている。より長期的視点にたてば，NASA<sup>(2),(3)</sup> (N+3, N+4とされる世代) やEU<sup>(4)</sup>の航空機の環境負荷低減目標が従来技術の延長では達成することが困難であるため，航空エンジンの推進動力電動化に踏み込んだ検討や提案が積極的になされつつある<sup>(5),(6),(7)</sup>。

図1には，これらの電力使用の規模の概要を示す。高効率化・低エミッション化・低騒音化等の観点から，航空用動力源として電力の割合が増大しつつあり，またそのうちの部分または全部において燃料電池を用いる構想が各所で示されている。周知のとおり，航空機へ搭載させるためには，安全性・信頼性の確保とともに，比出力（単位質量あたりの動力），エネルギー密度（単位質量あたり発生エネルギー）を高く設定する必要がある。燃料電池には様々な種類があるが，航空用途として，小規模・中期展望としては低温型の固体高分子型燃料電池（PEFC）が，大規模・高効率・長期展望としては高温型の固体酸化物型燃料電池（SOFC）が有望とされている<sup>(8)</sup>。

本稿では，これらの状況を背景に，航空機に搭載する動力源としての燃料電池の検討研究事例を紹介し可能性と技術課題についてまとめる。

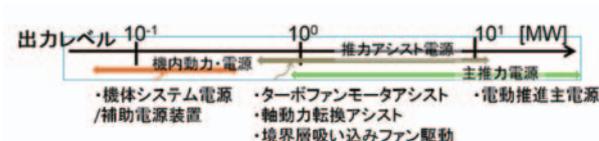


Fig. 1 Electrical power level requirements.

### 2. 航空適用が有望視される燃料電池の特性・比較

航空機に適用が期待される燃料電池の代表は，PEFCとSOFCである。

PEFCはすでに自動車産業各社が市販する燃料電池自動車用動力源としていることからわかるように，水素と取込空気（酸化剤）を用いて比較的効率の高い，水のみを生成物とする静粛な電源であるといえる。SOFCに比較すると負荷変動に対する応答性も良い。この駆動にはセル内で適切に湿潤した水の分布が必要であり，水マネジメントが重要な課題となる。酸素を酸化剤とした場合，図2に示されるような，水の電気分解反応による水素・酸素生成の逆反応と考え，PEFCと水電解装置の組み合わせにより，水素・酸素と水の間でエネルギー抽出・貯蔵のやりとりをする装置を構成することもできる。これを再生型燃料電池（Regenerative Fuel Cell = RFC）と呼ぶが，RFCとしての検討・実証事例を本稿で紹介する。これらの特性をも踏まえ，システム動力源・補助電源代替などを主なターゲットとして研究開発がなされている。

（補助）電源装置，推進動力源としての高い効率を求める場合，技術課題は多いが，ガスタービンと組み合わせ排熱を利用することが出来，高い効率を得ること

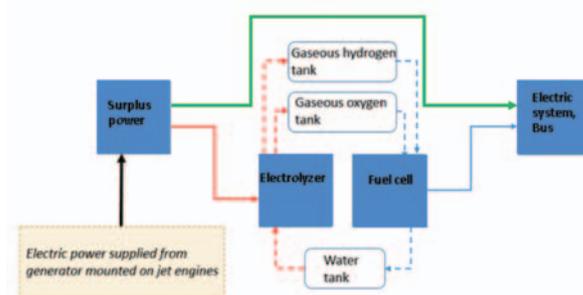


Fig. 2 A schematic of regenerative fuel cell.

原稿受付 2016年5月11日

\*1 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門  
〒182-8522 調布市深大寺東町7-44-1

\*2 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

が可能なSOFCが注目されている。以下、次章以降では、PEFC、SOFCの適用研究事例について述べる。

### 3. 固体高分子型燃料電池 (PEFC) の航空適用

PEFCを用いた航空向け技術実証としては、Boeing, DLRによる燃料電池を推進動力源とした小型有人機の飛行試験、IHI/IAとBoeingによる再生型燃料電池(RFC)の飛行試験<sup>9)</sup>等がある。

システム(補助)電源代替としてPEFCを適用する事例について以下に述べる。

#### 3.1 燃料電池による補助電源代替

PEFCの効率は、ガスタービンに比べて向上させることが出来るが、効率向上の度合いはSOFCに比べ限定的である。PEFCの利点としては、ガスタービンに比べ高温部を持たないこと、低騒音性、主構成要素に回転部を持たないことによるメンテナンス性が挙げられる。航空機の補助電源装置は、推進用エンジンに比べて効率が小さいことが一般的であり、地上で推進用エンジンを用いない際には、地上電源の導入や、より効率の高い補助電源装置の導入、推進用エンジンによらない常時電源の導入が有望視されている。

従来のガスタービンによる補助電源の代替としてPEFCを用いる際の課題は、酸化剤である空気をどのように導入するかということである。

Eelmanらの検討<sup>10)</sup>では、空気を大気から導入し圧縮機で加圧している。PEFCでは、常圧もしくは若干の加圧条件での運転が好ましいが、PEFCの運転のための圧縮機の導入は、PEFCの出力の減少となり、PEFCの導入に見合う圧縮動力、圧縮機の効率求められる。

導入空気として、機内向け空気(一般にエンジン抽気)を用いる場合には、高空で地上より低い圧力での供給となるため、PEFCの性能低下が見込まれる。また、B787で電化が進む際にダクトを排することが利点として掲げられている潮流にも反している。PEFC用に、機内空調とは別途高压空気をエンジンから導入することも考えられるが、構成を複雑にする。B787で導入されている電動圧縮機に相当する圧縮空気を導入することが有効である。

非常用電源(Ram Air Turbine = RAT)のPEFCへの変更も有望である。RATは高度速度に生成動力が依存するが、PEFCは高度速度への依存性は相対的に少ない。

#### 3.2 動力需給のバランスに寄与する再生型燃料電池適用

PEFCの特徴の一つは、燃料が水素であるということであり、航空機に水素を搭載することの安全性・搭載容積の観点で課題がある<sup>11)</sup>。一方で酸素と組み合わせることで新しい利用法も考えられる。先に示した再生型燃料電池の構成により、発電と消費の不均衡を解消することが可能となる。これが先に図2で示した再生型燃料電池の航空機搭載時の利用価値である<sup>9)</sup>。航空用のシステ

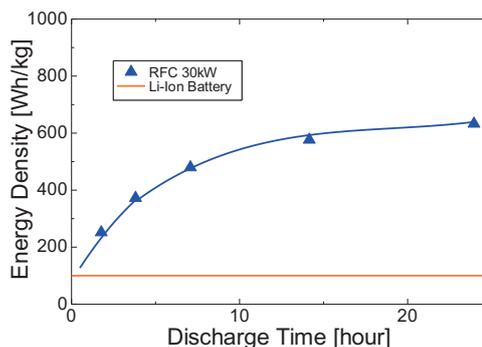


Fig. 3 Typical energy density of RFC and Li-ion Battery.

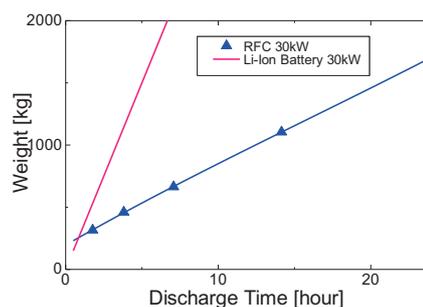


Fig. 4 System weight of RFC and Li-ion battery.

ム動力は、主に油圧・高压空気・電力からなるが、そのいずれもほとんどが推進用エンジンから供給されている。エンジンからの動力抽出は、エンジンの回転数に依存するため、機体システムが必要とする電力とは一致しない。この不一致を、再生型燃料電池は解消させることが可能である。

IHI/IAは、この再生型燃料電池の航空機適用実証を、2012年10月のBoeingによるecoDemonstratorで実施した<sup>9)</sup>。この試験では、実際に運用される旅客機(アメリカン航空用B737)に水素燃料を搭載した試験としても重要である。この試験によって飛行環境下での再生型燃料電池の充放電、電力利用が確認された。再生型燃料電池は二次電池的な利用がされているので、実用に向けては、Li-Ion電池のような二次電池が競合相手となる。

図3に再生型燃料電池とバッテリーのエネルギー密度の運用時間における比較例<sup>9)</sup>を示す。燃料・酸化剤・水のタンクの携行は運用時間が短い際には不利になるが、運用時間が長い場合には、有利となる。同様に図4には、システム重量<sup>9)</sup>比較を示す。再生型燃料電池は、このように閉鎖系のエネルギー貯蔵装置とみなすことが出来、空気でなく酸素を酸化剤源としてタンク内に充填する。

こうした視点で、利点と課題を以下に列挙する：

#### 【利点】

- ・燃料電池と水電解装置の組み合わせの観点で高い燃料密度を達成可能である。
- ・エネルギーバッファとして、オフピーク化、システム軽量化に寄与する。
- ・酸化剤が酸素であるため、空気の場合に比べてカソー

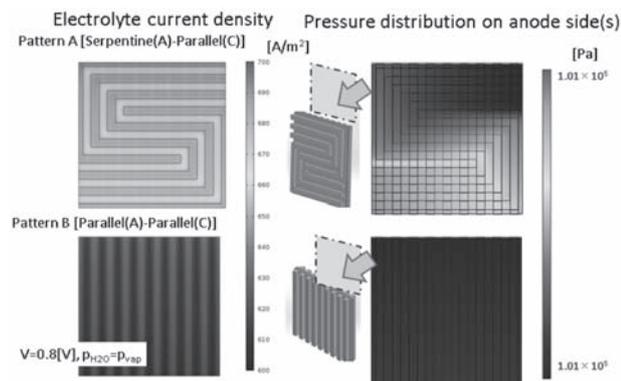


Fig. 5 Current density and pressure distribution.

下の性能向上を期待できる。

・外気を吸い込む空気吸い込み式の場合に比べ、周囲（飛行）環境の影響を受けにくい。

#### 【課題】

- ・機器の搭載重量と体積が制約条件となる。
- ・カソードの流れに窒素がないため、水の排出が空気を酸化剤にする場合に比べて困難になる。
- ・循環システムであることから、水の適切な回収を行う必要がある。

以上から、航空適用における再生型燃料電池の実用化に向けた課題の一つとして、簡潔な形で水の適切な管理を行うことであることがわかる。

こうした観点で、著者らは複数のチャンネル形状でのPEFCの特性比較を数値的にを行い、傾向調査をした<sup>(12)</sup>。図5には、アノードチャンネルをSerpentine型（パターンA）、平行流型（パターンB）、カソードチャンネルを同一の並行流とした場合の電解質電流密度分布とセル圧力分布のチャンネル形状が異なる場合の比較例を示す。計算例では、2つの形状（AとB）でアノード、カソードの流量が一致するように定めた。アノード流路がSerpentine型の方が、圧力損失が多少大きいものの、同一流入条件で高い電流密度分布を示していることがわかる。実際の運転にあたっては、たとえば利用率が70%とすると、利用された分を追加供給することになる。燃料電池の運転上、排気流が水飽和状態に近いと考えると、循環分（ここでは30%）が飽和状態で、無加湿運転の場合乾燥空気が導入されることになる。この条件下でも、カソード側で生成される水の適切な浸透で水の不足による著しい性能低下を避けることが可能と示唆された。

実際の試験においては、直接把握できる特性は限られるため、こうした解析の結果を検証込みで用いることは、開発試験の加速のために有用であると考えられる<sup>(13)</sup>。

#### 4. 固体酸化物型燃料電池（SOFC）の航空適用

SOFCは（熱機関やPEFCに比べ）高い効率を期待できるため、長期的視点にたつては、まず前節で対象とした補助電源装置としての適用が有望視された。設計例<sup>(14)</sup>

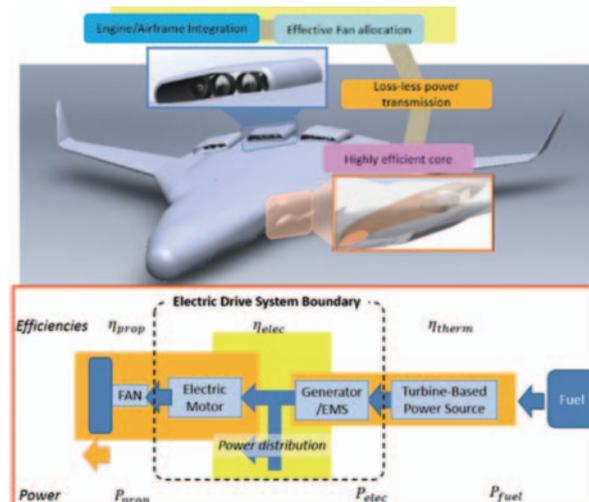


Fig. 6 SOFC/GT core separated fan propulsion (image).

も既に出ている。最近では新鋭機向きに具体的なシステム検討、設計例を与えるものもある<sup>(15)</sup>。SOFCの利点は、燃料を水素に限らないことである。動作温度が高い場合には、自己改質により炭化水素燃料の適用が可能である。SOFCを用いる場合には、高温排気を利用したガスタービンとの複合化が一般的である。SOFCの作動には、高温・高圧での作動が効率の観点で有効であるため、圧縮機での高圧化、ガスタービン排気を利用した昇温などが地上設備を中心としてなされている。

これまで推進動力として燃料電池を用いた実証例は、前述のようにPEFCを採用している。これは小型機推進動力規模に適切であること、飛行高度を限定していること、搭載が簡便であることなどによる。しかし、これら実証をした当事者にとって、PEFCを用いた試験結果をもってこのシステムが市販される航空機推進動力として適用されるとは捉えず航空機システム動力への適用を目指して飛行環境試験を実施することに重きをおいている。

その一方で、最近では、推進動力の一部もしくは全部にSOFC燃料電池を用いる検討が活発化している。以下では、推進動力としてSOFCを用いた検討例ならびに利点と課題について示す。

著者らは、推進動力電動化の一形式としてコア分離ファン形態を想定して検討を行っている<sup>(16)</sup>。図6にコア分離ファン機体搭載イメージを示す。現在亜音速機で多用されている高バイパス比ターボファンエンジンは、バイパス比の増大により低騒音化と低燃費化を図っている。しかし、ファン径の増大の限度、ダイレクトドライブでの低圧系動力伝達の困難などの課題から、バイパス比を大きく増大させることは困難である（制約の一部を緩和させるものがギア付ターボファンエンジンである）。こうした観点から、著者を含む複数の研究グループは、推進ファンと動力生成部（コア）を分離させたコア分離ファンエンジン形式の検討を行っている<sup>(5),(6),(7)</sup>。この場合、ファンの分散化、Blended Wing Body（BWB）

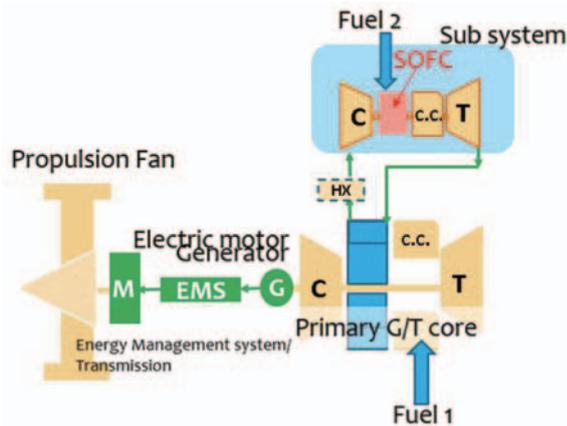


Fig. 7 A schematic of FC/GT hybrid core.

機体などの) 機体上面や従来形態機体の胴体尾部に境界層吸い込みファンを設けることで推進効率の向上を図ることが出来る。一方、コアエンジンに相当する発電機構は、超電導の活用による付加的な損失低減は見込めるものの多くの検討はターボシャフトエンジンによる発電を想定しており、熱効率の観点から熱機関の制約を受けるものである。

Boeingが提案するSugar-IIにおける一案<sup>3)</sup>として、ターボファンエンジンの圧縮機出口と燃焼器の間にSOFCを設け生成電力を胴体尾部の境界層吸い込み電動ファンに供給するというシステムがある<sup>3)</sup>。自己改質を前提としているものの、このサブシステムは約4kW/kgの軽量化が出来るものと想定している。

著者らは、熱効率向上のため、コア発電機としてSOFCとガスタービンの複合システムを想定している。SOFCの航空適用にあたっては、地上から高速で飛行する高高度にいたるまで環境要件が地上発電用設備と大きく変わるため、従来の設計思想によるSOFCの航空機搭載は困難であるとの指摘もされてきている。SOFCの視点から見た航空適用の課題として、主要なものは以下である：

- ①安定した(急変動しない)運転が必要であるが飛行状態・環境条件の変わる空気吸い込みエンジンでは入口条件の安定確保は困難である。
- ②熱交換器を利用した燃料電池の入口温度の昇温は重量過大・制御・整備性の低下をもたらす得る。

以上の視点で航空適用に適したSOFC/GTハイブリッドシステムの例として、図7に示されるようなSOFC/GTの構成を提案している<sup>17)</sup>。このシステムは以下のような構成をしている：

- ・SOFC自体が、メインのガスタービンではなく、圧縮機出口または中段出口からの空気の分流を取り込んだサブシステムの内部に存在する。
- ・サブシステムにおいて、メインの圧縮機出口空気を圧縮機でさらに圧縮し、SOFC入口に適切な温度と圧力条件となるようにする。システム構成により、熱交換器を

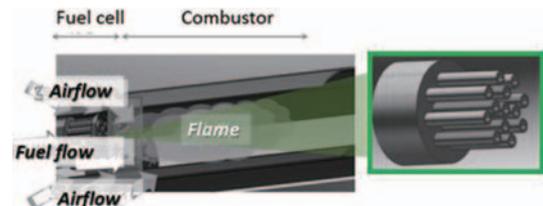


Fig. 8 A schematic of SOFC combustor.

備える場合とサブシステム圧縮機のみで良い場合がある。

- ・SOFCの燃料は、水素や炭化水素を選択しうるが、高い制御性という視点で水素を用いることが好ましい。
- ・SOFC内での未使用燃料と必要な付加燃料をサブシステム燃焼器で燃焼させ、タービンを駆動させる。
- ・タービンは、ガスタービンとして燃焼器出口排気による駆動と、選択的に付加される電動モーターで駆動され、SOFCの入口流入条件の変動を緩和する。

以上のような構成をしたハイブリッドシステムを用いることで、上記の2つの課題を解決することが可能である。

上述のサブシステム付の構成・従来のようにSOFCの下流に余剰の燃料を燃焼させる燃焼器を加える場合のいずれにおいても、要素としての燃料電池システムを軽量化することは容易ではない。燃焼器と燃料電池をともに燃料を導入する反応容器と考え、図8に示されるように一体化することが制御性向上と重量軽減に寄与する可能性がある<sup>18),19)</sup>。

燃焼器との組み合わせは、熱防御・逆火防止、空気流路との組み合わせ等課題はあるが、複合発電機の比出力増大の視点では有望なアプローチの一つである。Shimizuら<sup>20)</sup>は、こうした反応器に向けた検討を目的とした円筒型SOFC製作・試験研究の一例である。

地上向けのSOFCは、重量や容積の制約がないため、大きな圧力容器の中に燃料電池を並べる方式が高圧下で作動させる場合一般的であり、この場合の比出力は1kW/kgをこえることなく非常に小さい。先に示したNASAの例では、モジュールで約4kW/kg(2040年代技術)を想定している。これは自己改質機能を含むことを踏まえると、SOFCとしてのモジュールの比出力は、~5kW/kg程度が長期目標と考えられる。燃焼器と機能を一体化したSOFCコンバスタとして、燃焼器に付加的な重量となる場合は、より大きな比出力が期待出来る。以上のように、電動化要素の性能向上と出力密度の効果を見通すことは非常に重要である。電気駆動システムとしての設計空間を示す検討の一例を紹介する。図6下に一般化したコア分離ファンエンジンの構成要素を模式的に示している。発電用コア、電気駆動システム・推進ファンに分けており、ここではコアは単純なターボシャフトを想定している。Jansenら<sup>22)</sup>は、図中枠に囲まれた電気駆動システムの性能(効率 $\eta_{elec}$ )と比出力( $S_{pED}$ )が、システム全体の実現性・有用性のカギを握るパラ

メータであるとして解析を行った。機体と推進系（コアとファン部）の技術進展の効果を、ベースラインからの比として次のように記した：

$$\frac{(L/D)}{(L/D)_{EAC}} \left( \frac{\eta_{therm}}{\eta_{thermEAC}} \right) \left( \frac{\eta_{prop}}{\eta_{propEAC}} \right)$$

この比の要件で、Breguetの式に基づいた損益分岐評価を行った電気駆動システム効率と比出力の関係図から電動推進システムの導入が有効となる領域を提示した。図9には機体・推進系（コア+ファン）の技術進展の効果を小・中・大の3通り仮定した場合の関係を示す。元の図では、ターボエンジン部分（ $\eta_{therm}$ ）には向上がない（比が1）ものとしている。この図から、現状の機体・エンジンのベースラインに近い条件（Min. case）では、グラフの範囲で有効となる領域が見いだせないことがわかる。推進システムの電動化・コア分離化には、親和性の高い機体システムの導入で有効性を高められる。中期（Med. case）、長期（Max. case）では、電動ドライブ比出力 $Sp_{ED}$ がそれぞれ、10[kW/kg]、5[kW/kg]以上の領域で有効な領域が得られることがわかる。

この図の考え方を、コア部分構成要素がFC/GTとなる場合に適用すると、燃料電池付与の影響を、熱効率の向上と（図の領域内で評価される）電動ドライブの比出力 $Sp_{ED}$ の変化と読み替えることで、単純ターボシャフトの場合と比較することが出来る。図9には、熱効率を4%、10%向上させた場合（先の解析評価で検討した条件<sup>7)</sup>を機体・推進系の効果を最大見込むケース（Max. case）に合わせて追記した。そこから、燃料電池導入で見込む熱効率向上の効果（有効範囲の拡大）は比較的大きく見込めることがわかる。図7に見られるSOFC/GTハイブリッドコアでのターボシャフト・燃料電池双方の出力分配にもよるが、5[kW/kg]以上の電動ドライブ全体としての比出力を確保することが出来れば、推進システムとして有効であるといえる。

燃料電池を推進動力とする実証はこれまでPEFCのみであると述べた。最近の報告では、NASAがSOFCを推進動力とした小型機の実証を準備中である<sup>2)</sup>。NASA LangleyのLanair Columbia 300を原型機としたエンジン換装で出来るだけ従来技術を用いた飛行実証をしたいとしている。燃料も、炭化水素燃料からの改質を想定している。ここでは、飛行高度などを制限し、先の従来のSOFCが持つ課題については抵触しない飛行条件範囲での運転を想定しているようである。とはいえ、こうした試験から得られるデータや設定要件は、今後のSOFCの航空適用に向けて有用なデータを提供するものと期待される。

著者らが想定するSOFC/GTハイブリッド発電機について、地上設備用との相違点等についていくつかここで付言する。従来のSOFCは、排熱を有効利用するためにタービンと組み合わせボトムリングサイクルとしてシステ

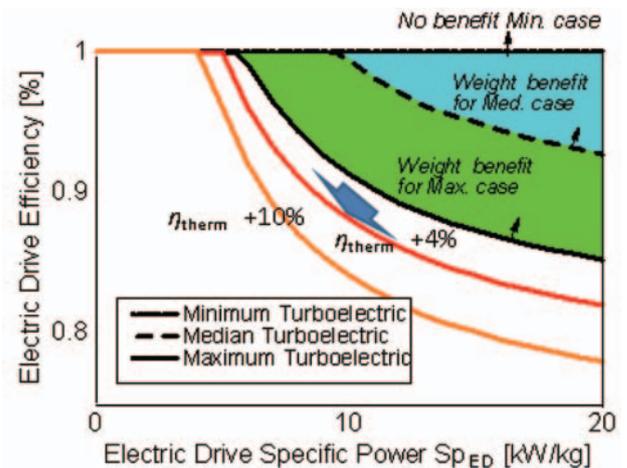


Fig. 9 NASA's Key Performance Parameter break-even curves for a range of benefits<sup>2)</sup> (two lines showing the effect of thermal efficiency change are added from the original article).

ムの効率を向上させている。こうした観点からは、発電量としては、SOFCが主、タービンが従の関係である。

しかし、推進用、あるいは推進用ターボファンに付随したSOFC発電機は、重量・容積・運転条件の制約から、発電量の主従が逆転する。そのため、効率向上の程度には予め制約がある。また、送電に常電導（カーボンノワイヤ等適用）で高圧送電するか、超電導で低中圧送電するかによっても仕様は異なるが、SOFCそのものの使われ方としては、比較的低電流負荷高効率点での作動を想定することが好ましいとされる。以上のように、コア分離型ファンエンジンのコアとしての発電機は、地上用発電機に求められる特性に近いが、航空機の運転条件、重量・容積の制約から大きく異なる点もある。こうした要件のもとで、物理的に達成可能なシステムを検討していくことが必要である。

## 5. まとめ

本稿では、将来的な搭載が期待される航空機動力源としての燃料電池について、システム動力補助電源、推進用主動力電源として検討されている構成例をまとめた。

システム動力向け電源としてPEFCの例を挙げた。ここで示された課題は、酸化剤の導入の方法、水の管理の方法である。再生型燃料電池の飛行実証例と関連技術課題の検討状況を紹介した。

推進動力向け燃料電池は、技術課題が多いものより高い効率を望むことが出来るSOFCが有望である。SOFCの航空適用には課題があり、主要な課題を克服するために著者らが提案する手法を紹介した。

燃料電池の地上利用、自動車向け利用について我が国は世界をリードしている。航空機のシステム電動化度向上が世界の潮流となっている中で、航空機電動化度の向上に貢献する燃料電池を核とした技術の発展が望まれる。

## 謝辞

本稿で紹介した内容は、東京大学将来航空推進システム技術創成社会連携講座第1期（2012年12月～2016年3月）における研究会での議論や検討内容をもとにしている。研究会に参加し、議論やご教示をくださった関係諸氏に感謝いたします。また、SOFC技術適用性については、東北大学大学院環境科学研究科橋本真一准教授との議論で多くの有益な示唆を得た。記して謝意を表す。

## 6. 引用文献

- (1) Seki, N., Development of Motor-Driven Fuel System for More Electric Engine, AJCPP2016-167, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2016, Takamatsu, Japan, March 2016.
- (2) Bradley, M. K. and Droney, C. K., Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report, NASA/CR-2011-216847, April 2011.
- (3) Bradley, M. K. and Droney, C. K., Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase II: N+4 Advanced Concept Development, NASA/CR-2012-217556, 2012.
- (4) Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation, European Commission, 2011.
- (5) Kim, H. D., Felder, J. L., Tong, M. T., Berton, J. J. and Haller, W. J., Turboelectric distributed propulsion benefits on the N3-X vehicle, Aircraft Engineering and Aerospace Technology 86/6 (2014) 558-561.
- (6) Koyama, D., How the More Electric Aircraft is influencing a More Electric Engine and More! EU-Japan Symposium on Electrical Technologies for Aviation of the Future, March 2015.
- (7) Okai, K., Himeno, T., Watanabe, T., Nomura, H. and Tagashira, T., Investigation of FC/GT Hybrid Core in Electrical Propulsion for Fan Aircraft, AIAA 2015-3888, AIAA Propulsion and Energy Forum 2015, July 2015.
- (8) 岡屋俊一, 将来型航空機用燃料電池の研究開発動向について, IC7, 第49回飛行機シンポジウム, 2011年10月.
- (9) Okaya, S., Arastu, A. H and Breit, J., Regenerative Fuel Cell (RFC) for High Power Space System Applications, AIAA 2013-3923.
- (10) Eelman, S., Pozo del Poza, I. and Krieg, T., Fuel Cell APU's in Commercial Aircraft - An Assessment of SOFC and PEMFC Concepts, 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2004.
- (11) 水素燃料航空機検討調査会, 水素燃料航空機の国内外検討調査, JAXA-SP-08-005, 宇宙航空研究開発機構特別資料, 2008年9月.
- (12) Okai, K., Himeno, T., Watanabe, T., Yachi, Y. and Shinozaki, N., Numerical Investigation of PEM Fuel Cell Performance in an Aircraft Oxygen-Gas Oxidizer System, AIAA 2016-0495, AIAA SciTech 2016, January 2016.
- (13) 谷内雄作, 航空機搭載用再生型燃料電池に関する研究開発, 第3回東京大学将来航空推進システム技術創成オープンワークショップ, 2016年3月.
- (14) Steffen, Jr., C. J., Freeh, J. E. and Larosiliere, L. M., Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Cycle Technology for Auxiliary Aerospace Power, NASA/TM-2005-213586.
- (15) Whyatt, GA and Chick, LA, Electrical Generation for More-Electric Aircraft using Solid Oxide Fuel Cells, US Department of Energy, PNNL-21382, 2012.
- (16) 岡井敬一, 姫野武洋, 渡辺紀徳, 野村浩司, 田頭剛, コア分離ファン電動ファン推進系の初期サイジングと性能評価, B11, 日本航空宇宙学会第46期年会講演会, 2015.4.
- (17) 岡井敬一, 姫野武洋, 渡辺紀徳, 野村浩司, 田頭剛, 西沢啓, 旅客機へ適用する電動推進に関する概念検討, IA02, 第53回飛行機シンポジウム, 2015.11.
- (18) Okai, K., Fujiwara, H., Nomura, H., Tagashira, T. and Yanagi, R., Performance Analysis of a Fuel Cell Hybrid Aviation Propulsion System, AIAA 2012-4238, 2012.
- (19) Roberts, R. A. and Therckelsen, P., Aircraft Engine Electrical Power Generation with a SOFC Combustor, GT2014-27106, Proceedings of ASME Turbo Expo 2014, June 2014.
- (20) Shimizu, D., Nomura, H., Okai, K., Tagashira, T. and Nishizawa, A., Fabrication of Lab-scale Tubular Solid Oxide Fuel Cell for Basic Research on Fuel Cell-Gas Turbine Combined Electric Generator for Airplane, AJCPP2016-106, Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2016, March 2016.
- (21) Borer, N. K., Nickol, C. L., Jones, F. P., Yasky, Woodham, K., Fell, J. S., Litherland, B. L., Loyselle, P. L., Provenza, A. J. and Kohlman, L. W., Overcoming the Adoption Barrier to Electric Flight, AIAA 2016-1022, January 2016.
- (22) Jansen, R. H., Brown, G. V., Felder, J. L. and Duffy, K. P., Turboelectric Aircraft Drive Key Performance Parameters and Functional Requirements, AIAA 2015-3890, AIAA Propulsion and Energy Forum 2015, July 2015.
- (23) 岡井敬一, 渡辺紀徳, 航空機エンジン電動化の最新研究状況, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43, No. 3, pp. 184-189, 2015.5.

特集：水素エネルギー利用社会への歩み，ガスタービンと燃料電池の最新情報

## CO<sub>2</sub>フリー水素を用いるマルチ燃料燃焼エンジン技術

辻村 拓\*<sup>1</sup>  
TSUJIMURA Taku

鈴木 泰政\*<sup>1</sup>  
SUZUKI Yasumasa

古谷 博秀\*<sup>1</sup>  
FURUTANI Hirohide

キーワード：CO<sub>2</sub>フリー水素，マルチ燃料燃焼，有機ハイドライド，ディーゼルエンジン，再生可能エネルギー  
CO<sub>2</sub>-Free Hydrogen, Multi-Fuel Firing, Organic Chemical Hydride, Diesel Engine, Renewable Energy

### 1. 緒言

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画<sup>(1)</sup>では，東日本大震災以降のエネルギー政策の原則を見直し，基本的視点である3E+S（エネルギーの安全保障，経済性，環境性，安全性）を確認した。一次エネルギーや電源構成における再生可能エネルギー比率をこれまでの2倍以上に高め，将来の二次エネルギーとして電気と熱に加え，水素が中心的役割を担うことを期待し，水素燃料電池の普及だけでなく水素発電等の新たな技術の実現を着実に進めていくことが記されている。

世界各国の再生可能エネルギーの導入比率<sup>(2)</sup>を見ると図1のように，世界平均では約20%が再生可能エネルギー（原子力除く）で占められている。EUや，中でもスペイン及びドイツでは太陽光や風力など出力変動が激しいとされる再生可能エネルギーの導入比率が高いのが特徴である。一方，我が国では変動する再生可能エネルギーは僅かに2～3%に留まる。エネルギー自給率が極めて低い我が国において再生可能エネルギー比率を高めることは，エネルギーの安全保障と環境性を同時に満たす手段であり，後述するように，エネルギーの貯蔵・輸送を担う水素を積極的に利用促進することが重要となる。本報では，水素貯蔵技術の一つである有機ハイドライドを使う水素発電技術について紹介する。

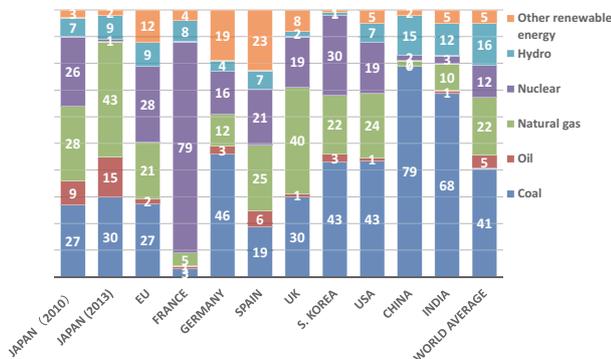


Fig. 1 Power source in each country

原稿受付 2016年6月1日

\* 1 (国研)産業技術総合研究所再生可能エネルギー研究センター  
〒968-0298 郡山市待池台2-2-9

### 2. 水素エネルギー貯蔵・利用

CO<sub>2</sub>フリー水素とは，再生可能エネルギー発電により得た発電電力を用いて水電解により製造する水素，及び褐炭等の化石資源を基にCO<sub>2</sub>貯留を伴って製造する水素を指す。前述のように，太陽光や風力等の変動を伴う発電電力は周波数変動の誘発など電力系統へ影響する。電力貯蔵手段として，図2のように，発電規模と充電（貯蔵）規模によって適切な手段がある。1日程度の短時間であればキャパシタや蓄電池で充放電するのが望ましいが，1日以上規模になると揚水，圧縮空気，及び水素として貯蔵するのが望ましいと考えられる<sup>(3)</sup>。水素は分子量が小さく，可燃性が高いことから化学変換により安定した高エネルギー密度の物質として貯蔵することが望ましく，図3のように様々な形態が考えられ，有機物に水素を化合する有機ハイドライドは，体積・重量エネルギー密度，安全性，流通インフラ整備等の点から有望な水素キャリアの一つである。

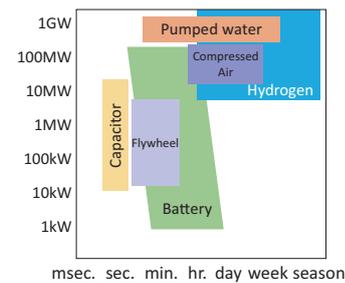


Fig. 2 Electricity storage technologies

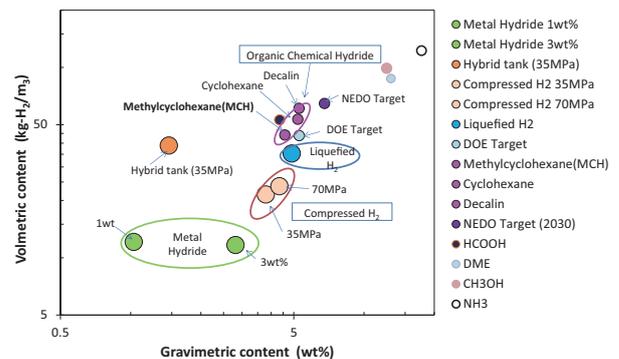


Fig. 3 Energy density of hydrogen energy carriers

有機ハイドライドには幾種類もあるが、トルエン/メチルシクロヘキサン (MCH) 系有機ハイドライドは、毒性の低さ、流動点の低さ等から利便性が高い。図4のように、トルエン/MCHの水素化・脱水素反応では205 kJ/molのエンタルピー変化を伴い、トルエンへ水素を添加してMCHとする際は発熱反応であり、MCHを脱水素してトルエンと水素に分離する際は吸熱反応である。さらに図5のように、反応熱だけでなくMCHの加熱、蒸発、平衡温度までの過熱にも熱エネルギーが必要である。したがって、化学変換を伴って貯蔵・利用されるMCH等の水素キャリアにおいて、総合的なエネルギー変換効率を高める上で熱マネジメントは非常に重要となる。

**Hydrogenation / Dehydrogenation**

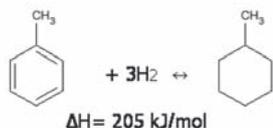


Fig. 4 Hydrogenation/dehydrogenation of toluene and MCH

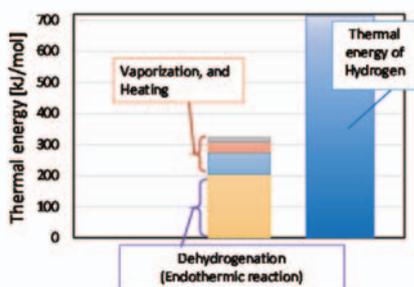


Fig. 5 Required energy for vaporization, heating, and dehydrogenation reaction, and enthalpy of hydrogen produced by dehydrogenation of MCH

本研究では、図6のように、MCHの脱水素に係る種々の熱エネルギーを、エンジン発電機等の熱機関の排気エネルギーから賄うことをコンセプトとする。すなわち、再生可能エネルギー発電電力を基に水電解により水素を製造し、その水素とトルエンを水素化反応により化合してMCHとして貯蔵する。エンジン発電機等の分散型電源において排気エネルギーを回収しながら脱水素ガスである水素とトルエンを発生させ、トルエンと分離した水素をエンジンへ供給する。したがって、エンジンでは軽

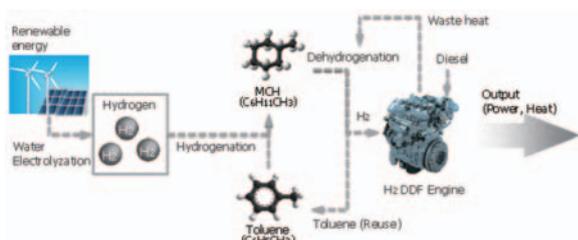


Fig. 6 Conceptual model on storing renewable energy as MCH, and utilization of MCH with wasted heat recovery

油等の従来燃料と水素を混焼することになる。本報では、ディーゼルエンジン発電機を対象に、軽油と水素の混焼特性について実験的に調べた結果等を紹介する。

**3. 水素/軽油デュアルフェューエルエンジン燃焼**

**3.1 機関諸元及びエンジン実験装置**

供試機関は、125 kW級エンジン発電機であり、表1のように、排気量5.2 Lの直列4気筒ディーゼルエンジン (圧縮比: 17.5) である。図7のように、エンジン実験装置はエンジン単体を動力計に接続し、各種排気分析計により排出ガス中の代表成分や未燃水素などを計測する。本実験では、水素の性状が明らかなボンベガス水素を用い、複数のガス噴射弁を搭載できるマニホールドを介して吸気管へ供給する。エンジン実験では先に軽油により運転を始めた後、ガス噴射弁の開弁期間や開弁周波数等によって水素供給量を調整すると同時に軽油噴射量を減量して所定の水素/軽油割合に設定する。以下で表す水素割合とは、水素と軽油の低位発熱量の合計に対し、供給する水素が有する低位発熱量の割合を指す。エンジン回転数は1500 rpm、軽油噴射圧力は約100 MPaで一定とし、軽油噴射時期は水素供給の有無に拘らず、軽油のみ噴射した場合に調整された噴射時期である。

Table 1 Specifications of multi-cylinder test engine

Type of engine	4 stroke, inline-4
Bore x Stroke mm	115 x 125
Displaced volume L	5.2
Compression ratio	17.5 : 1
Fuel	・Hydrogen (port injection) ・Diesel fuel (direct injection)
Measurement of exhaust gas components	CO <sub>2</sub> , CO, THC, NO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> , Soot

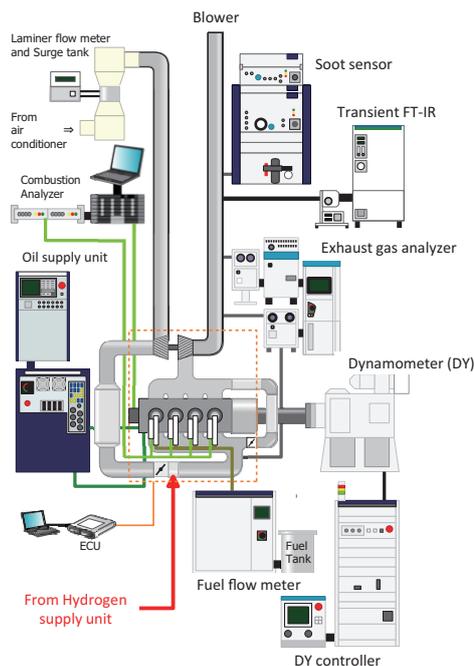


Fig. 7 Schematic diagram of engine test apparatus

3.2 水素/ディーゼル混焼特性<sup>6)</sup>

水素/軽油デュアルフェューエルエンジン燃焼の一例として、出力40 kWにおいて水素割合を0～83%まで変化させた際の筒内圧力等を図8に示す。ここではEGRを適用せず軽油の噴射時期を固定した。また本実験では、過給機の弁開度を固定しており、吸気管への水素供給量に応じて過給した新気が導入せず、水素割合を高いほど圧縮行程での筒内圧力が低下する。熱発生率について、ここでは軽油を、パイロット噴射とメイン噴射の二段階で供給したが、水素割合が20%程度では0%に比べて熱発生率に大きな変化が見られない。一方、50%以上になると軽油の燃焼に水素の燃焼が加わる形で、0%の場合には見られなかったプレ噴射とメイン噴射の間にも熱発生する。これは水素が所定の供給量あるいは濃度以上になると、プレ噴射された軽油を着火源として水素が火炎伝播を始めたためだと考えられる。

図9には水素割合とエンジン特性の関係を示す。上述のように、水素供給量が増加するにつれて過給圧力が低下し、吸気マニホールド圧力も低下する。これは供給した水素によって新気導入が妨げられたことによるが、同

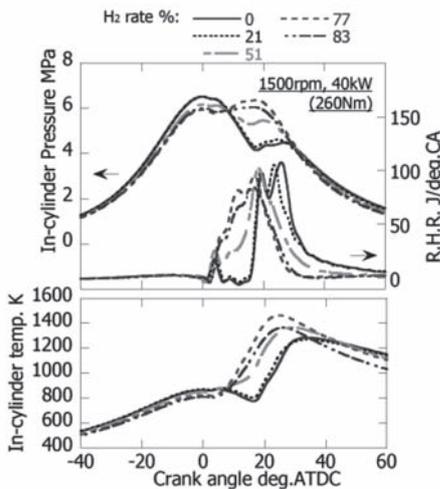


Fig. 8 Temporal histories of in-cylinder pressure, temperature, and apparent rate of heat release

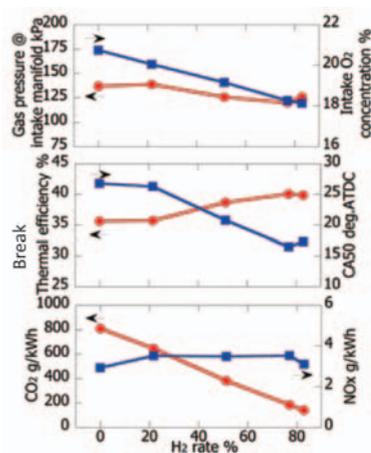


Fig. 9 Effect of H<sub>2</sub> rate on engine performance

時に吸気マニホールドにおける酸素分率も低下する。酸素分率の低下は窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) の生成にも関係し、水素割合を80%程度まで高めてもNO<sub>x</sub>が微増に留まったと考えられる。水素割合の増加に応じてCO<sub>2</sub>排出量を削減できるが、それに加えて水素割合が高いほど正味熱効率が40%を超えるほど向上しており、軽油と水素を混焼することにより軽油の削減効果以上にCO<sub>2</sub>削減効果があることが示された。

次に水素/ディーゼル混焼においてEGRを適用した例を示す。図8, 9ではEGRを適用しなかったため、NO<sub>x</sub>は3 g/kWh程度の高レベルで排出したが、ここではEGR率30%程度まで適用して排気や効率への影響を調べた。水素割合を55%とし、図10の熱発生率のように、EGR率の増加によりパイロット噴射した軽油の着火特性が変化するが、これに後続する水素と軽油による熱発生はEGR率によって大きく影響されず、熱発生率ピーク前から燃焼終了までEGR率によらず熱発生率はほぼ一致している。これは水素の燃焼性の良好さがEGR適用時の水素/ディーゼル混焼の悪化を抑制したと考えられ、図11のように、燃焼重心時期の変化が小さく熱効率の悪化も少ないにも拘らず、NO<sub>x</sub>を1 g/kWh未満に削減できた。ただし、EGR率29%においてはSootの排出が著しい。これは軽油のパイロット噴射の燃焼に起因して水素燃焼が始まり、その水素火炎中に二段目の軽油噴射が行われ、燃焼室内に極めて酸素不足となる領域が形成されると推察する。さらに過給機の弁開度を固定したことでEGR率の増加により過給圧力が低下し、さらに酸素不足を招いた。

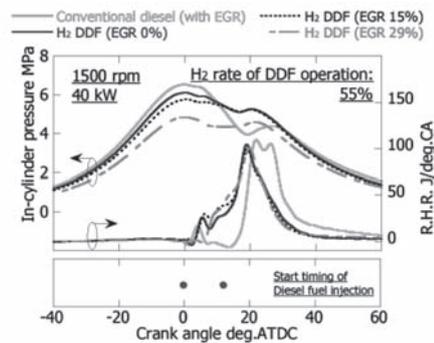


Fig.10 Combustion characteristics with EGR

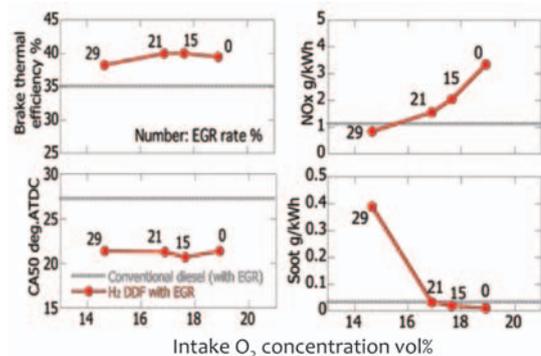


Fig.11 Effect of EGR rate on engine performance

### 3.3 水素/ディーゼル混焼の課題

水素は可燃範囲が広い、最小点火エネルギーが小さい、燃焼速度が速いなど、炭化水素系燃料とは著しく燃焼性が優れる。一方でそのことがエンジン等の熱機関において水素の扱いを困難にしている。特に本研究のように、水素を空気と予混合してエンジンへ供給する方式では、逆火、過早着火、アフターファイア等の異常燃焼による課題がある<sup>(7)</sup>。本報では、図12のように、エンジン出力や水素割合によって水素の可燃範囲を十分に超えた領域で水素/ディーゼル混焼を実施した。その結果、様々な異常燃焼を経験し、特に過早着火や燃焼変動が課題となった。

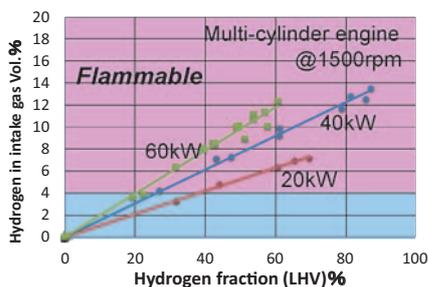


Fig.12 Hydrogen concentration operated in this study

図13は各エンジン回転数において、水素割合と吸気中の水素濃度と過早着火の関係を示し（左図）、また排気中の水素割合との関係（右図）を示す。水素割合が80%程度では吸気中の水素濃度は10 vol.%程度に達するため、過早着火が発現する。また異常燃焼は高回転ほど発生しやすく、エンジン燃焼室壁面などの温度と関係すると思われる。一方、エンジン排気に含まれる水素濃度と供給した水素との関係から水素の未燃率（ $R_{ub}(H_2)$ ）がわかり、水素割合が小さいほど $R_{ub}(H_2)$ が大きくなるのがわかる。したがって、水素を高濃度で供給すると過早着火のような異常燃焼が発現するが、一方、過度に低濃度で供給すると未燃率が高まり、排気管においてアフターファイアを起こすなどの可能性が高まる。

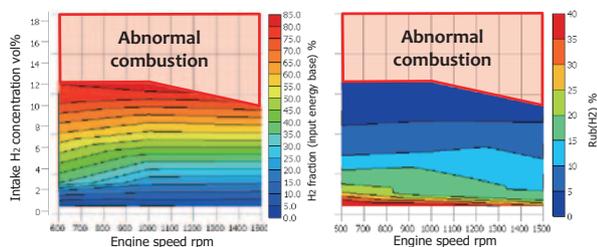


Fig.13 Relationship between hydrogen fraction and abnormal combustion

また本研究では多気筒エンジンを使って水素/ディーゼル混焼特性を調べたが、図14のように、所定の水素割合にまで水素供給量を増加すると、気筒間でのバラツキが大きく表れた。気筒間バラツキは、吸気導入管内での

水素の不均質分布に起因すると考えられ、今後はエンジンへの水素供給方式について見直す必要がある。

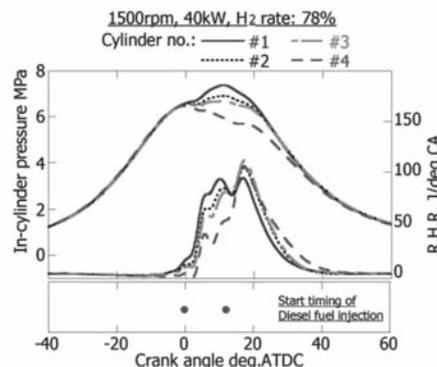


Fig.14 Example of cylinder-by-cylinder variation

## 4. まとめ

本研究では、CO<sub>2</sub>フリー水素の活用例として、分散型エンジン発電機において、水素/ディーゼル混焼特性を多気筒エンジン実験により調べた。中負荷運転域において、水素割合50%程度であれば、EGRの適用等により高効率・低NO<sub>x</sub>な水素/ディーゼル混焼が成立した。また、水素割合が高まると過早着火や気筒間バラツキ等の異常燃焼が課題となるため、それらの対策が必要である。

## 謝辞

本報の内容の一部は、「福島県再生可能エネルギー一次世代技術開発事業（平成25～27年度）」に関連して実施したものであり、関係各位に謝意を表す。

## 5. 引用文献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁<[http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/140411.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf)> (参照2016年5月11日).
- (2) International Energy Agency, Energy Balances of OECD Countries 2013, (2013)
- (3) International Energy Agency, Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells<<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>> (参照2016年5月11日).
- (4) 市川勝, 水素エネルギーがわかる本 水素社会と水素ビジネス (2007), p.109, オーム社.
- (5) Ishimoto, Y., Fukuda, K., and Sakata, K, Evaluation and Comparison of Intercontinental Renewable Energy Transportation System, J. Japan Institute of Energy, Vol. 94 (2015), pp. 1337-1342.
- (6) Suzuki, Y, and Tsujimura, T., The Performance of Multi-Cylinder Hydrogen / Diesel Dual Fuel Engine, SAE Paper, No. 2015-24-2458 (2015).
- (7) 古濱庄一, 未来をひらく水素自動車 (1992), p.26-34, 東京電機大学出版局.



## 学校で習わない英語 (6)

吉中 司\*1  
YOSHINAKA Tsukasa

### —C—章 (続き)

**【英語】** : a wild goose chase

**【意味】** : 「めくらめっぽうな追求」, 「当てにならない探求」

**【説明】** : 16世紀の末, イギリスで奇妙なスポーツが流行っていたようです。先ず乗馬したグループの人達が, 広い原野の中央で, 横一列に並びます。原野にはあちこちに藪もあり, 林も見えます。次に, その中央にいる騎手がリーダーとなって, 原野のどの方向でも, 彼 (恐らく女性はこのスポーツには参加していなかったでしょう) の思いのままの方向に, 突然走り出すのです。他の騎手達もリーダーの後を追って走り出すのですが, 渡り鳥の鴨が組む編隊と同様に, 隣の騎手達に対して少しずつ, 間隔を一定に保ったまま, 同じ方向に, 同じ速度で走り続けねばなりません (参考資料1)。そして, 前にどんな障害があっても, それを無視せねばならないのです。この無茶苦茶さが, このスポーツの醍醐味だったそうです。

この熟語は, このスポーツに由来しています。リーダーの気紛れで方向が決められ, 他の騎手達は, 何が起るか考えもせず, 盲目的にリーダーに追従する事から, この言葉, 今日では「めくらめっぽうな追求」とか「当てにならない探求」という意味に使われます。

この言葉の使用例の一つ。新しいパソコンが欲しい, としましょう。理に長けた人なら, インターネットで性能から値段まで調べ上げ, 何処の店へ行けば良い, と結論してから出掛けるでしょう。また, 人によっては, 町の中心まで行けば店が沢山あるし, 何トカだろう, と出掛ける人もいるでしょう。でも, この人に付き合っただけで大きな町の中をここあそこと彷徨するのは, 疲れるものです。とうとう相棒が不満を漏らしました。「何だよー。どこで売ってるのか, 知らないのかよー。こんなめくらめっぽうな事, 俺はもう疲れ果てて, 付いて行けねーよ。」この終わりの部分, 英語で, “This is really a wild goose chase. I am done!” となるのでしょうか。この表現, 職場での仕事のやり方に対しても使えます。

**【英語】** : with flying colo(u)rs

**【意味】** : 「大成功で」, 「上手く行って」

**【説明】** : 読者諸氏の中で, 英語圏の人達とのミーティングでこの言葉を聞かれた方が多いかと思えます。この言葉, 会話だけでなく, 業界誌にも見られます。

原稿受付 2016年3月23日

\*1 独立コンサルタント

使用例の一つ挙げましょう。或る会議での発表者が, 「このパラメーターについて, 仮定Aを使ってこのソフトをランすると, 解が収束しません。しかし, 仮定Bを使うと非常に良い収束を示し, 予測通りの解が得られます。」と報告しました。上の文の後ろ半分を英語にすると, “However, if we assume B for this parameter, the run converges with flying colo(u)rs, and the result is in a good agreement with our prediction.” となります。

この言葉の由来は, 昔の軍隊のしきたりにあったそうです (参考資料4)。戦争の前線で, 或る部隊が敵に攻撃を掛け, 敵陣を奪ったとき, 背後にいる連隊長に攻撃成功を知らせるために, 占領地の一番高い所に連隊長旗をあげたそうです。それを双眼鏡で見た連隊長は, 「オウ, 我が連隊長旗がひるがえっておる。攻撃は成功じゃ。」と言うでしょう。つまり, “Oh! A flag with our regimental colo(u)rs is flying. The attack was successful.” です。

**【英語】** : be set in concrete

**【意味】** : 「最終的な決断をする」

**【説明】** : この言葉を訳せば, 「コンクリートに固めこむ」でしょうか。一旦コンクリートに固められると, もう形を変える事は出来ません。この意味合いから, この言葉, 「最終的な決断をする」という場合に使われます。

例えば, 或る決定をせねばならないにも拘らず, グループの間で討論が尽きず, 明快な結論に達する事が出来なかったとしましょう。そこで, 討論された中から案の一つを選び, 暫定的な決定とする事になりました。中には, それに反対する人達いましたが, グループのまとめ役が, 「いや, これはあくまで暫定的なもので, 最終的な決定に至るまで, 将来, 討論を続ける。」と約束しました。これを英語に簡約すると, “No, the decision is not set in concrete. We will continue to discuss it.” となるでしょう。

これと同じ意味合いの言葉で, “be carved (or set, or written) in stone” があります。

**参考資料** (参考資料は本連載を通した番号で示しています)

1. Robert Hendrickson, QPB (Quarterly Paper Book Club) Encyclopedia of Word and Phrase Origins, Second Edition (2004), Facts on File, Inc.
4. John Ayto, Oxford Dictionary of English Idioms, Third Edition (2009), Oxford University Press.

## 流体構造連成とシステム同定による複合モード翼列フラッター解析手法

## Multimode Cascade Flutter Analysis Based on Fluid-Structure Interaction Simulation and System Identification

立石 敦\*<sup>1</sup>  
TATEISHI Atsushi渡辺 紀徳\*<sup>2</sup>  
WATANABE Toshinori姫野 武洋\*<sup>2</sup>  
HIMENO Takehiro

## ABSTRACT

A new framework of aero-structure integrated analysis is presented for the prediction of cascade flutter. The proposed analysis method considers effects of the airflow on blade vibration such as change in frequency and mode-shape based on a fluid-structure interaction (FSI) simulation and system identification technique. The aeroelastic system of vibrating cascade is identified from the free response of blade vibration obtained from a time-domain FSI simulation. Aeroelastic eigenmodes, which describe blade frequency, damping rate, and modeshape in the airflow, are obtained directly from an eigenanalysis of identified aeroelastic system. The approach is validated through comparison with semi-analytical reference solutions obtained by LINSUB program. The comparison of aeroelastic eigenmodes shows that the proposed approach is capable of obtaining flutter characteristics accurately even under the presence of aerodynamic coupling among structural modes.

**Key words** : Aeroelasticity, Cascade Flutter, Light-weight structure, Fluid-structure interaction, System identification

## 1. 緒言

高バイパス比ターボファンエンジンは、推進効率を高めるためにバイパス比が上昇する傾向にあり、ファン外径は増加の一途を辿っている。更なるバイパス比向上を実現するためには、ディスクやファンケースの強度に対する要求を緩和するために、動翼の軽量化が不可欠であるといえる。そのため中空加工や複合材料の使用、薄肉化といった技術が実機エンジンに適用されている<sup>(1)</sup>。

フラッターは翼の振動に伴い生じる空気力により翼振動が増幅される自励振動で、一般に複数の構造振動モード間での空気力による連成が存在する。しかし、翼列の場合は、慣例的に翼構造が十分剛であるという仮定のもと、翼振動モード間の空力的な連成は無視されてきた。そのため、今後いっそう翼構造の軽量化が進んだ場合に生じる翼振動形態は全く調査されていない。また、1980年代に精力的に研究されたAdvanced Turbo Propeller や Unducted Fan と呼ばれる高速プロペラ、およびオープンロータ<sup>(2)</sup>では、作動中の翼振動特性が気

流の影響で真空中のものから大きく変化し、曲げモードとねじりモードが連成する複合モードフラッターが生じる<sup>(3)</sup>。この場合の振動特性の検討には、流体・構造連成解析 (FSI) が必須となる。

振動特性が流れの影響を強く受ける場合のフラッターに関する先行研究として、古くは花村による曲げねじりフラッターの研究<sup>(4)</sup>、1980年代のAdvanced Turbo Propeller / Unducted Fan に対する研究<sup>(3),(5)-(6)</sup>、近年の類似研究にはClark<sup>(7)</sup>のものがある。これらでは空気力モデルに揚力面理論が用いられているため初期検討や感度解析には有効だが、近年主流のCFDに基づくフラッター解析と比較すると、流れ場が理想的な場合に限られ、詳細な検討には適さない。近年Mayorca<sup>(8)</sup>は翼構造にグヤン縮退を用いた自由度縮小型有限要素モデルを採用し、各自由度に対する空気力データベースを非定常CFDにより構築した後、振動方程式の固有値問題を近似的に解く汎用性の高い手法を提案している。しかし、1つの作動点に対する解析でも代数的空気力モデルの構築に「構造モデル自由度数×翼間位相差数×無次元振動数ケース」という膨大な非定常CFDの解析ケースが必要なのが実用上の欠点である。このように、複合モード翼列フラッターの検討でかつて用いられてきた古典的手法を現代的な数値解析で代替する実用的な手法は現状として存在しない。

原稿受付 2015年12月25日

校閲完了 2016年6月30日

\* 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙専攻  
日本学術振興会 特別研究員PD  
〒113-8656 文京区本郷7-3-1

\* 2 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙専攻

以上のような研究状況から、空気力と翼振動の相互作用という原理に立ち返り、長い年月を経て発展してきた数値解析手法の長所を取り込みながら、軽量構造に対する新たな翼振動解析手法を確立することの意義は大きい。

本研究では、まず、気流と翼振動の相互作用を的確に模擬するための数値解析手法である双方向のFSIに着目し、手法の構築を行った。加えて、FSIを用いてフラッターのような自励振動を解析する際に重要な概念となる「空力弾性モード」を連成解析結果から算出する手法を提案する。実用的な系への応用を念頭に置き、本報では、空力弾性モード同定の原理、数値解析手法の概要、理論解との比較を通じた検証に関し報告する。

## 2. 翼振動の解析手法

### 2.1 翼列・多重モードの空力弾性方程式

流れ中における翼振動は、変動流体力を含む翼振動の運動方程式である空力弾性方程式に支配される。フラッターは一般に低次の振動モードが関わるため、翼構造のみから定まる下位 $N_f$ 個の構造振動モードに振動自由度を取ると、運動方程式は一般に以下の形で表せる。

$$\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{A}\mathbf{q} = \mathbf{f}_{FR} + \mathbf{f}_{SE} \quad (1)$$

行列 $\mathbf{A}$ 、ベクトル $\mathbf{q}$ はそれぞれ構造振動モード剛性行列、モード変位ベクトルである。モード質量行列は単位行列となるよう規格化されている。右辺は変動空気力のモーダル力ベクトルであり、翼の運動に由来して生じない成分である強制空気力 $\mathbf{f}_{FR}$ と、翼の運動によって生じる成分である自励空気力 $\mathbf{f}_{SE}$ に分類される。また、ここでは単純化のため構造減衰を0とする。構造振動モードの導入により左辺は対角化されているため、構造振動モード間の連成は右辺の自励空気力を介してのみ生じる。

フラッターは自励空気力と翼振動の連成で生じる現象であるため、 $\mathbf{f}_{FR}$ を無視し、 $\mathbf{f}_{SE}$ のみを考慮する。ここでは翼振動を微小振幅として取り扱う。 $\mathbf{f}_{SE}$ は自励空気力であるため、翼振動変位・速度、自励空気力係数行列 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ を用いた線形結合、

$$\mathbf{f} = \mathbf{A}\mathbf{q} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} \quad (2)$$

で表す。自励空気力として全ての翼の運動を考慮に入れ、翼列中の全ての翼に対して運動方程式を立てると次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_1 \\ \vdots \\ \ddot{\mathbf{q}}_{N_b} \end{bmatrix} + \text{diag}(\mathbf{A}) \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{q}_{N_b} \end{bmatrix} = [\mathbf{A}_{ij}] \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{q}_{N_b} \end{bmatrix} + [\mathbf{B}_{ij}] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{q}}_{N_b} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Eq. (3) が翼列全体に対する自由振動の振動方程式であり、 $N_b$ は翼枚数である。なお、ここでは問題を簡略化するために、以下の仮定を置いている。

1. 翼は十分剛なディスクに植え付けられており、ディスクやシュラウドを介した自由度間の連成は無い。

2. 全ての翼は同一形状で同一の機械的性質を持つ。
3. 全ての翼は同一の流れ状態下にある。
4. 自励空気力係数行列 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ は時不変な量である。

仮定1はEq. (3) がディスクの変位や剛性行列の非対角成分を含んでいないこと、仮定2はモード剛性行列およびモード形状行列が全ての翼で等しいことで反映されている。また、仮定2、3より、自励空気力係数行列 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ は翼列周方向に回転対称性を持つため、Eq. (4) に示すブロック巡回行列として表現される<sup>(9)–(10)</sup>。

$$[\mathbf{A}_{ij}] = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_{N_b} \\ A_{N_b} & A_1 & \dots & A_{N_b-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_2 & \dots & A_{N_b} & A_1 \end{bmatrix}, [\mathbf{B}_{ij}] = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & \dots & B_{N_b} \\ B_{N_b} & B_1 & \dots & B_{N_b-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_2 & \dots & B_{N_b} & B_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 2.2 翼列の空力弾性モード

気流中における翼列の自由振動は、Eq. (3) の自由振動解で表現され、その安定性は固有値問題の解より判定できる。 $\lambda$ を固有値、 $\boldsymbol{\psi}$ を固有ベクトルとし、Eq. (3) を固有値問題にするとEq. (5) となる。

$$\lambda \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi} \\ \lambda \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{I} \\ -\text{diag}(\mathbf{A}) + [\mathbf{A}_{ij}] & [\mathbf{B}_{ij}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi} \\ \lambda \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Eq. (5) を解くことで、複素固有値 $\lambda$ 、複素モード形状 $\boldsymbol{\psi}$ が全自由度数 $N_b N_f$ 個求まる。Eq. (3) の固有モードは自励空気力を考えない構造振動モードとは異なり、空力弾性モードと呼ばれる。 $\lambda$ は自由振動解における時間方向の情報を表す。空力弾性モード減衰率 $\mu_{AE}$ 、モード振動数 $f_{AE}$ は、 $\lambda$ の実部、虚部からEq. (6) で求まる。 $\mu_{AE}$ の符号が負の際、翼振動は負減衰となり自励振動であるフラッターが生じる。また、 $\boldsymbol{\psi}$ の各成分は解の空間方向の情報を表し、自由度間の振幅比・位相差（例えばたわみモードとねじりモードの間）を求めることができる。

$$\mu_{AE} = -\text{Re}(\lambda) \quad , \quad f_{AE} = |\text{Im}(\lambda)| / 2\pi \quad (6)$$

なお、塩入<sup>(8)</sup>が述べているように、仮定2,3のもとでは運動方程式は周期対称性をもち、隣接翼との振幅・位相差が一定の複素モード形状が固有方程式の解となるため、単一構造振動モードの解析においては1自由度振動系に帰着する。しかし、モード間の空力的連成やミスマッチングを含む場合には固有値問題を解く必要がある。

Eq. (3) からわかる通り、空力弾性モードの算出には自励空気力係数 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ が必要である。しかし、これらは非定常CFDを行う前にはわからない。そのため、何らかの方法を用いて $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ を決定する必要がある。

### 2.3 翼列全体の空力弾性システムの同定

翼列に対する実験的な自励空気力の計測には、決まった翼間位相差や振動モードで翼を強制加振した際の空気力応答を計測し、自励空気力係数を取得する強制振動法が用いられる。同様のアプローチはCFDを用いた自励空気力の算出においても一般に用いられている。

しかし、複数の構造振動モードを考える際には、少なくとも考慮する構造振動モードの数だけのCFD解析が必要となり計算コストが大きい。また、 $A, B$ は翼の振動数に依存するため、CFD解析で与える翼振動数と、流れの影響により変化した翼振動数の差にも注意する必要がある。そのため、いかに効率よく空力弾性方程式 Eq. (3) を非定常CFD結果から構築し、翼列全体の自由振動特性を得るかが、実用的な系で多自由度のフラッター解析を行う上での鍵となる。そこで本研究では、既往研究にみられる翼強制加振時の空気力応答計測ではなく、流体・構造間の相互作用が自動的に考慮されるFSIと、システム同定の考え方に基づく新たな翼列フラッター解析手法を提案する。

数値解析においては、Eq. (3) における未知項は自励空気力係数 $A, B$ のみである。また仮定4に挙げたように、時間平均流れが過渡的に変化しないような短い時間を考えた場合、 $A, B$ は時不変であるとみなせる。そのもとの翼振動がEq. (3) に支配されることから、FSIで得た翼振動の時間履歴を用いて $A, B$ を決定する手続きを考えることができる。

まず翼変位履歴が既知という状況で $A, B$ を未知ベクトルとして再定義すると、Eq. (3) 右辺の自励空気力変位同期項はEq. (7), Eq. (8) のように書き換えられる。

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_{N_b} \\ A_{N_b} & A_1 & \cdots & A_{N_b-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_2 & \cdots & A_{N_b} & A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_{N_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 & \cdots & Q_{N_b} \\ Q_2 & \cdots & Q_{N_b} & Q_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Q_{N_b} & Q_1 & \cdots & Q_{N_b-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_{N_b} \end{bmatrix} = \tilde{Q}_A A \quad (7)$$

$$A_i = [A^{11} A^{12} \cdots A^{N_f N_f}]^T, \quad Q_i = \begin{bmatrix} q_i^T \\ q_i^T \\ \vdots \\ q_i^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、部分ベクトル $A_i$ 、部分行列 $Q_i$ はそれぞれ $i$ 番目の翼振動変位に同期する自励空気力係数行列を1次元のベクトルとして再定義したものと、その係数である $i$ 番目翼のモード変位を成分とする行列である。また、翼振動速度変位同期成分についても同様の変形を施す。さらに見通しの良い定式化を得るために、慣性力・弾性力の総和であるEq. (3) の左辺をEq. (9) のようにベクトル $R$

と再定義する。

$$R = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \vdots \\ \ddot{q}_{N_b} \end{bmatrix} + \text{diag}(A) \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_{N_b} \end{bmatrix} \quad (9)$$

するとEq. (8), Eq. (9) を用いて、Eq. (5) の運動方程式はEq. (10)の形に書き換えられる。ここで $X$ は任意時刻のモード変位・速度を成分とする行列、 $\partial F$ は未知量である自励空気力係数行列である。

$$\begin{bmatrix} \tilde{Q}_A & \tilde{Q}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = R \Leftrightarrow X \partial F = R \quad (10)$$

この形式を基にして自励空気力係数を決定する。図1は翼振動のFSIによって翼のモード変位がサンプルされる様子を表している。時刻 $t = t_1$  から $t = t_{K_d}$ の $K_d$ 個の時刻において、全ての翼に対してモード変位、速度、加速度のサンプルを行う。すると各時刻で $X, R$ が求まるので、 $\partial F$ が時不変であるという仮定の下に、Eq. (11) の過剰決定連立一次方程式が導ける。

$$\begin{bmatrix} X(t_1) \\ \vdots \\ X(t_{K_d}) \end{bmatrix} \partial F = \begin{bmatrix} R(t_1) \\ \vdots \\ R(t_{K_d}) \end{bmatrix} \Leftrightarrow \hat{X} \partial F = \hat{R} \quad (11)$$

上式に基づき、サンプルされた翼変位データを最も良く説明する自励空気力係数行列を、最小二乗法を用いてEq. (12) で求める。求まった係数行列を用い固有値解析を行うことで、翼列における空力弾性モードを算出することができる。

$$\partial F = (\hat{X}^T \hat{X})^{-1} \hat{X}^T \hat{R} \quad (12)$$

なお、実験的手法で用いられるシステム同定手法としてはカルマンフィルタを応用したものや、ランダムデック<sup>10)</sup>により生成された自由振動波形を用いる方法がある。本研究では翼振動の信号が連成シミュレーションによって生成されることから、最もシンプルだと考えられる、最小二乗法を用いたものを採用している。

## 2.4 空力弾性モードの同定不確かさに関する指標

ここまで展開した空力弾性モードの同定過程においては最小二乗法が用いられていることから、同定結果の質に対して常に配慮するのが望ましい。同定結果の質を考

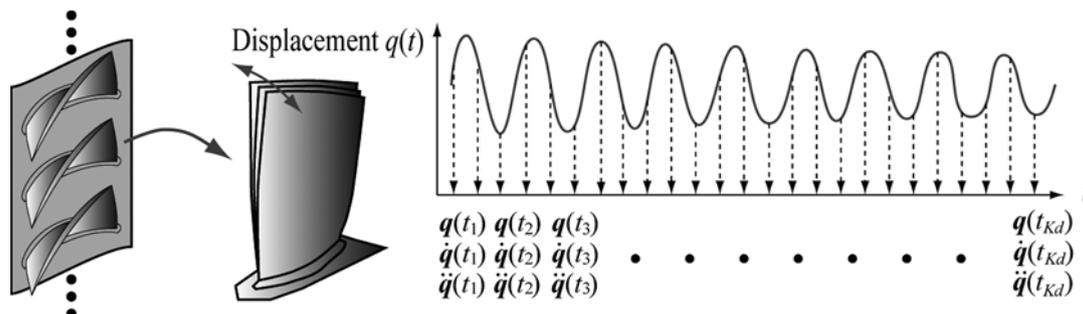


Fig. 1 Sampling of blade vibration from time history obtained by FSI

える際に、まず同定結果の自励空気力係数行列を $\hat{\Delta}\bar{F}$ と表す。 $\hat{\Delta}\bar{F}$ を用いた際に生じる、 $t_1 \sim t_{kd}$ までの全時刻に対する運動方程式の残差として、誤差ベクトル $\varepsilon$ がEq. (13)と定義できる。

$$\varepsilon = \hat{R} - \hat{X}\hat{\Delta}\bar{F} \quad (13)$$

最も単純な最小二乗法結果の品質を表す指標は、決定係数 $R^2$ 値である。これは同定結果から生じる運動方程式残差をEq. (11)右辺で規格化したもので、Eq. (14)で表せる。 $R^2$ は0から1の値を取り、1に近いほどシグナルに用いた翼振動履歴より求めた同定結果が、想定している線形化自励空気力モデルを用いた運動方程式に当てはまっていることを示している。

$$R^2 = 1 - \varepsilon^T \varepsilon / \hat{R}^T \hat{R} \quad (14)$$

次に、同定した空気力係数の分散共分散行列 $\Sigma^2$ は、誤差の伝播に対する検討を単純化するために、誤差ベクトルの各成分に平均0、無相関であることを仮定する。このとき、誤差ベクトルの各成分に対する分散を $\sigma^2$ として、次式で求められる<sup>12)</sup>。

$$\Sigma^2 = (\hat{X}^T \hat{X})^{-1} \sigma^2 \quad (15)$$

最小二乗法に起因して生じ、同定した空力弾性モード固有値に伝播した不確かさを評価する際には、固有値問題の求解過程が含まれるため、線形変換で不確かさの伝播を考慮することができない。したがって、平均 $\hat{\Delta}\bar{F}$ 、分散共分散 $\Sigma^2$ の多次元正規分布として $\hat{\Delta}\bar{F}$ の不確かさをモデル化し、この不確かさでばらつく自励空気力係数を用いて多数回の固有値解析を行う、モンテカルロ法によって同定された空力弾性モードの統計的不確かさを求めた。以降、特に断らない限り、同定結果の固有値分布には99%信頼区間幅を合わせて示している。

### 3. 流体-構造連成解析

前述の時間領域空力弾性モード同定手法は、流体構造連成解析により算出された翼振動の時間履歴に適用されることから、本節では連成解析の手法に加え、物理的に妥当な振動解析を行うためのFEM/CFDソルバ間での流体力・構造変位の受け渡しについて述べる。図2に、時間領域の流体構造連成解析において1時間ステップを進める際のフローチャートを示す。まず求まっている最新の固体壁上の空気力を構造ソルバにマッピングし、解析対象時刻(新時刻)の翼変位を求める。ここで得られた変位を流体ソルバに転送し、新時刻における流体の諸量を求める。流体・固体双方で新時刻の量が求まったら、両者が十分収束したかを確認し、次のステップに進む。連成解析は、このように内部反復を繰り返して新時刻の量を逐次更新する漸近的強連成によって行われる。

#### 3.1 流体・固体の数値計算手法

本研究では、マルチブロック有限体積法による圧縮性

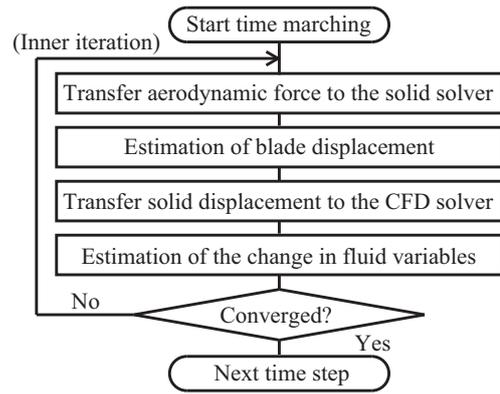


Fig. 2 Flowchart of FSI computation

流体解析と、翼の微小振動の運動方程式を組み合わせた連成解析コードを使用する。流体の解法は翼振動を模擬するためArbitrary Lagrangian - Eulerian型の支配方程式を使用し、有限体積的な移動格子法を導入した。非粘性流束はSHUS<sup>13)</sup>により評価する。時間進行法として、定常流れ解析ではEuler陰解法による局所時間刻み法を、翼振動解析では陰的な二次精度三点後退差分法を3回の内部反復と組み合わせて用いる。陰解法は圧力、速度、温度の基本変数に対して構築し、Red-Black Gauss-Seidel法により線形反復の圧力残差が初期の1/10になるまで反復する<sup>14)</sup>。翼振動の解析は、各構造振動モードの運動方程式を解き変位を重ねあわせるモード合成法を用いる。

#### 3.2 仕事保存型の流体力受け渡し法

以上の解析枠組みで解析のロバストさや複雑な系の扱いやすさを決定するのが、離散化の位置や量の定義が異なる固体ソルバと流体ソルバを結びつける手法である。また、特にフラッター解析では空力仕事の総和により翼振動の減衰・発散が決まるため、空気力による仕事が保存するような空気力/構造変位の転送手法<sup>15-16)</sup>を用いた。

仕事保存型のデータ転送手法は、仮想仕事原理に基づき、流体格子上的変位・空気力を $u_a, F_a$ 、構造モデル上の変位・空気力を $u_s, F_s$ と表すと、両モデル上で仕事の一致する条件、

$$(\text{Work}) = u_a^T F_a = u_s^T F_s \quad (16)$$

に基づく。ここで、流体格子上的変位 $u_a$ が構造モデル変位に対し行列 $G^T$ を用い線形に内挿される時、仕事の保存関係から、流体力も同じ行列 $G$ を用いて

$$u_a = G^T u_s, \quad F_s = G F_a \quad (17)$$

と算出すればよい。この関係を満足する定式化で、かつ離散化位置や格子密度の不一致に対してロバストな手法として、本研究では移動最小二乗法<sup>17)</sup>を採用した。

#### 3.3 移動最小二乗法による構造変位の受け渡し

図3に移動最小二乗法(Moving Least Squares, MLS)の模式図を示す。MLSでは、周辺の値の距離に

応じた重みつき最小二乗法によって内挿を受ける点における値が定まる。内挿係数は最終的に、基底関数ベクトル  $\mathbf{p}$ 、内挿位置と周囲の点との距離  $r$  によって決まる重み関数  $w$ 、 $N$  個の周辺の点を用いて Eq. (18)~(20) で算出される。ここで、重み関数  $w$  には、メッシュレス法で物理量再構築に用いられる重み関数の 1 つであり、Eq. (20) で表わされる 4 次スプライン関数を用いた。また、重み基準半径  $r_0$  として構造モデルの最大格子幅を用いた。

$$\mathbf{G}^T = \mathbf{p}(x_f)^T (\mathbf{P}^T \mathbf{W} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{W} \quad (18)$$

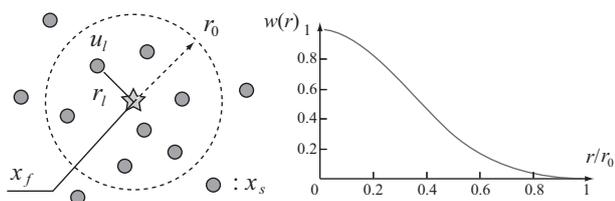
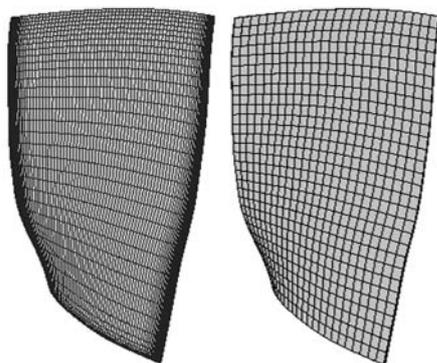


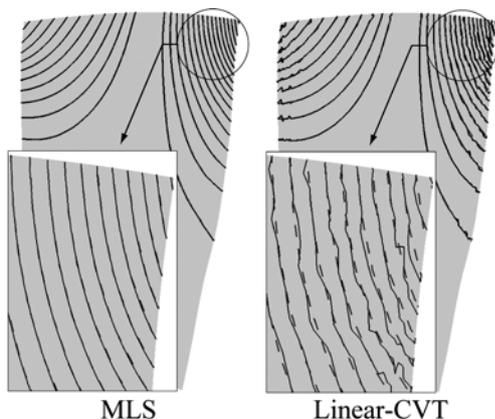
Fig. 3 Mapping of blade displacement by moving least squares interpolation



CFD Grid

FEM Grid

(a) Typical CFD and FEM grids for aeroelasticity simulations



(b) Interpolated blade displacement of 1T mode. Solid line: interpolated displacement on the CFD grid, dashed line: displacement on the FEM grid (Source)

Fig. 4 Comparison of mapping methods of the blade displacement (MLS and Linear-CVT)

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}(x_1)^T \\ \vdots \\ \mathbf{p}(x_N)^T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} w(r_1) & & \\ & \ddots & \\ & & w(r_N) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$w(r) = 1 - 6(r/r_0)^2 + 8(r/r_0)^3 - 3(r/r_0)^4 \quad (20)$$

$$\mathbf{p}^T = [1 \ x \ y \ z \ yz \ yz \ zx]$$

図 4 に、本研究で用いる MLS 法と、Sadeghi らが提案する線形内挿法の一つである Linear-CVT<sup>(6)</sup> を用いた動翼 1 次ねじりモード変位の内挿結果を比較して示す。Linear-CVT 法は近傍 3 点を用いる局所的な内挿手法であり、CFD 格子上的前縁・後縁で微小な凹凸が生じてしまう。一方、MLS 法を用いると等高線がずれることなく滑らかに補間されており、本手法による変位マッピング手法によって 3 次元的な FEM モデル・CFD 格子間のデータ交換がロバストに実現されていることがわかる。

#### 4. 半解析解との比較による検証

本研究で提案する空力弾性モードの同定に基づくフラッター解析手法が気流中における翼列の振動特性を的確に捉えられるかを検証する。「空力弾性モード」は複数のモードが干渉しあう場合のフラッター解析において重要な概念であるが、検証として参照できるデータは存在しない。そのため本研究では同定された空力弾性モードの評価に際して構造モデルや流れ条件の違いに伴う一切の不確かさを排除するために、半解析解の存在する空力弾性問題を参照解として設定する。検証は、同定された各空力弾性モードに対して振動数、減衰率、モード形状を参照解と比較することによって行う。

##### 4.1 系の設定

検証に供する解析モデルとして、非粘性の亜音速流中に迎角 0 で弾性支持された平板翼列を考える。翼列の仕様と一様流の範囲を図 5 と表 1 に示す。この系では、一様流速を上げていくと次第に減衰率が低下し、ある流速で負減衰に転じフラッターが発生する。一様流速は上流の全圧・全温が一定に保たれている、ブローダウン型のフラッター試験を想定し変化させた。

この平板翼列系に対する半解析的な自励空気のモデルとして、Whitehead により開発された LINSUB プログラム<sup>(8)</sup> を用いた。LINSUB は二次元の揚力面理論によって、一様流中で 0 迎角まわりに平板翼列が振動したときの自励空気の微係数を算出する。LINSUB の入力パラメータは、ピッチコード比  $s/c$ 、スタガ角  $\theta$ 、無次元振動数  $k$ 、翼間位相差 IBPA、一様流マッハ数  $Ma$  である。

##### 4.2 構造モデル

図 6 に検証に供した構造モデルを示す。各平板翼は翼弦中央に重心をもち、重心まわりのねじり運動  $a$  と重心の翼弦垂直方向の並進運動  $h$  が振動自由度として与えられている。この系では並進運動とねじり運動の慣性的な連成はなく、空力的にのみ両自由度は連成する。表 2

に構造モデルのパラメタを示す。これらのパラメタは、 $Ma < 0.5$ の範囲でフラッターが生じるように予め試行錯誤によって定めた。

この構造モデルに対応する運動方程式は次で表せる。

$$\begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & I_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{h} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_h & 0 \\ 0 & K_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ M \end{bmatrix} \quad (21)$$

右辺は平板に作用する揚力 $L$ およびヒンジまわりのモーメント $M$ を表している。 $m_b, I_b, K_h, K_a$ はそれぞれ翼質量、ヒンジまわり慣性モーメント、並進およびねじりばね定数である。空力弾性モードを求める際には、LINSUBによって得られた特定の無次元振動数翼間位相差に対する無次元自励空気力係数を次式

$$\frac{\partial L}{\partial h}, \frac{\partial L}{\partial \alpha}, \frac{\partial M}{\partial h}, \frac{\partial M}{\partial \alpha} \quad (22)$$

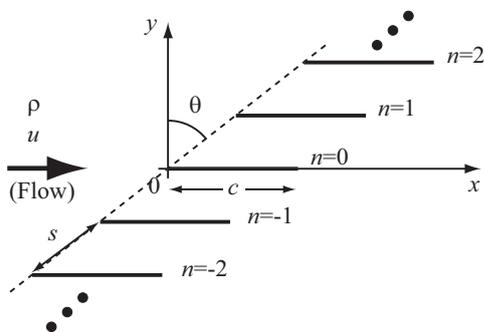


Fig. 5 Flat plate cascade configuration

Table 1 Flow condition of flat plate cascade

Pitch/Chord	s/c [-]	1
Stagger angle	$\theta$ [deg]	45
Inlet total temperature	$T_t$ [K]	288.15
Inlet total pressure	$P_t$ [Pa]	101325
Range of inlet velocity	$u$ [m/s]	0~166
Range of inlet Mach No.	$Ma$ [-]	0~0.5

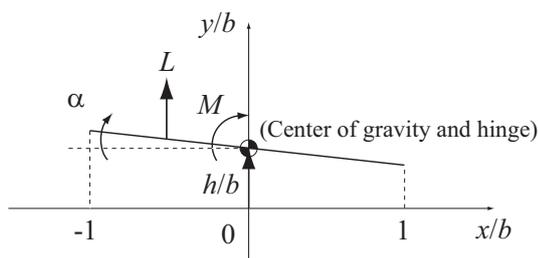


Fig. 6 Configuration of flat plate mechanical model

Table 2 Parameters of mechanical model

Span length	$l$ [m]	0.05
Chord length	$c = 2b$ [m]	0.05
Blade mass	$m_b$ [kg]	0.02
Inertia of momentum	$I_b$ [kgm <sup>2</sup> ]	$4.167 \times 10^{-6}$
Heaving stiffness	$K_h$ [N/m]	3350
Pitching stiffness	$K_a$ [Nm/rad]	10.3
Heaving natural frequency	$f_h$ [Hz]	65.1
Pitching natural frequency	$f_a$ [Hz]	250

で表わされる有次元の複素自励空気力係数に直し、 $p-k$ 法によって反復的固有値問題を解いた。

4.3 フラッター解析方法の概要

流体構造連成解析においては、全翼枚数が有限でなくしてはならないことから、全翼枚数を $N_b = 8$ とし、ピッチ方向上端と下端は周期境界条件として接続した。この場合には、ねじり運動・並進運動が連成した8つの異なる翼間位相差 (-135, -90, -45, 0, 45, 90, 135, 180[deg]) が空力弾性モードに現れ、全空力弾性モード数は翼列全体の全自由度数に等しい16個となる。

CFDの条件を設定する際には、LINSUBと極力等しい流れ条件となるよう、CFDでは非粘性のEuler方程式を解き、翼面上は断熱のすべり壁として扱った。翼振動時には流入・流出境界における擾乱の反射を防ぐため、Gilesの準一次元無反射条件<sup>9)</sup>を用いた。また、翼厚みの効果を可能な限り小さくするために、翼弦長に対する翼厚みの比を0.001とした。図7に連成解析に用いた平板翼列のCFD格子を示す。流入部・流出部にはH型格子を配置し、平板翼はO型格子に包まれている。格子点数は翼弦方向に88点、ピッチ間に78セルである。なお、翼の番号はある翼に対して負圧面側に位置する翼の番号が大きくなるように定められている。

翼振動計算の初期条件には、ねじり・並進両モードに対して微小なモード速度 (最大振幅で $2 \times 10^{-4}c$ 相当) を与えた。その際、ねじりモードに対しては1番の翼に、並進モードに対しては2番の翼に与えた。翼振動のデータサンプリングとして、ねじり振動2周期目から10周期目までの360サンプルを用いた。

4.4 自励空気力解析の検証

連成解析による検証に先立ち、LINSUBで想定する状況が本研究で用いるCFD手法を用いて正しく再現されることを示す。CFDで振動数固定、翼間位相差一定の翼振動解析を行い、Eq. (23) に示すねじり・並進両運動に対する自励空気力の空気力係数を、翼変位に対する実部と虚部にわけて取得する。ここで $\bar{a}$ 、 $\bar{h}$ はそれぞれねじり、並進運動の振幅である。

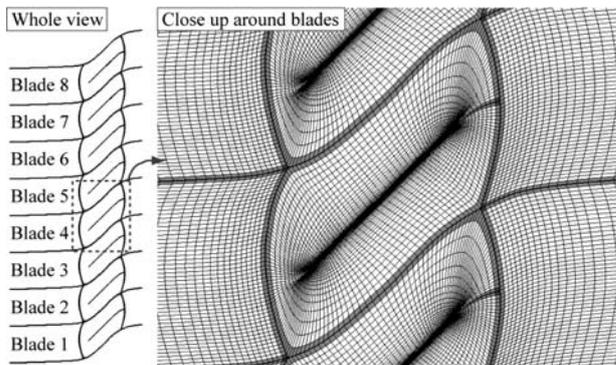


Fig. 7 Eight blades flat plate cascade configuration and CFD grid. Coloured cells are on the block boundary.

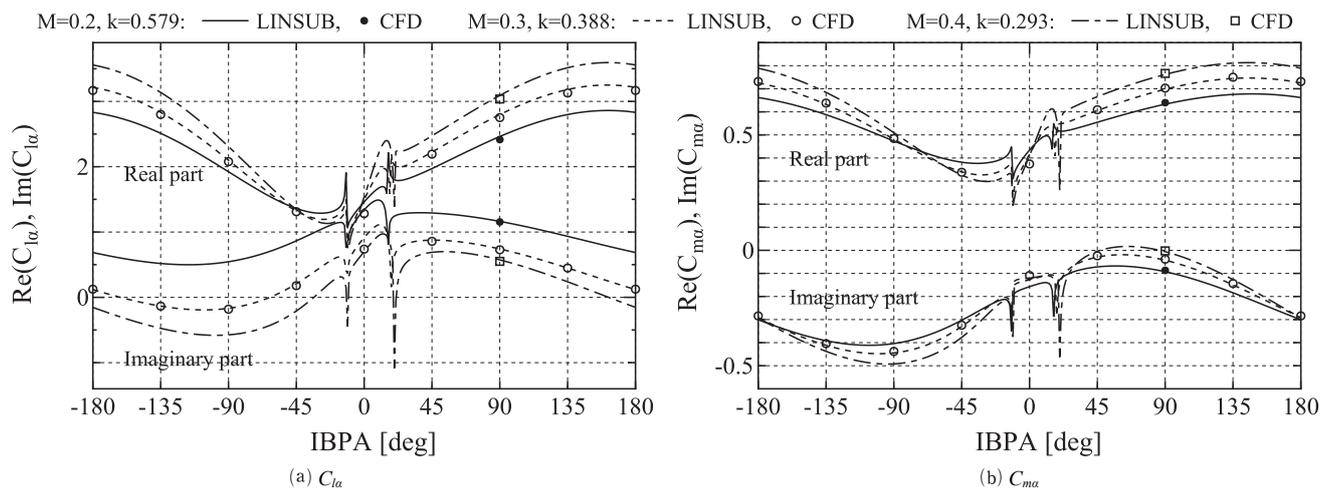


Fig. 8 Comparison of unsteady aerodynamic force coefficients between LINSUB (reference) and CFD results

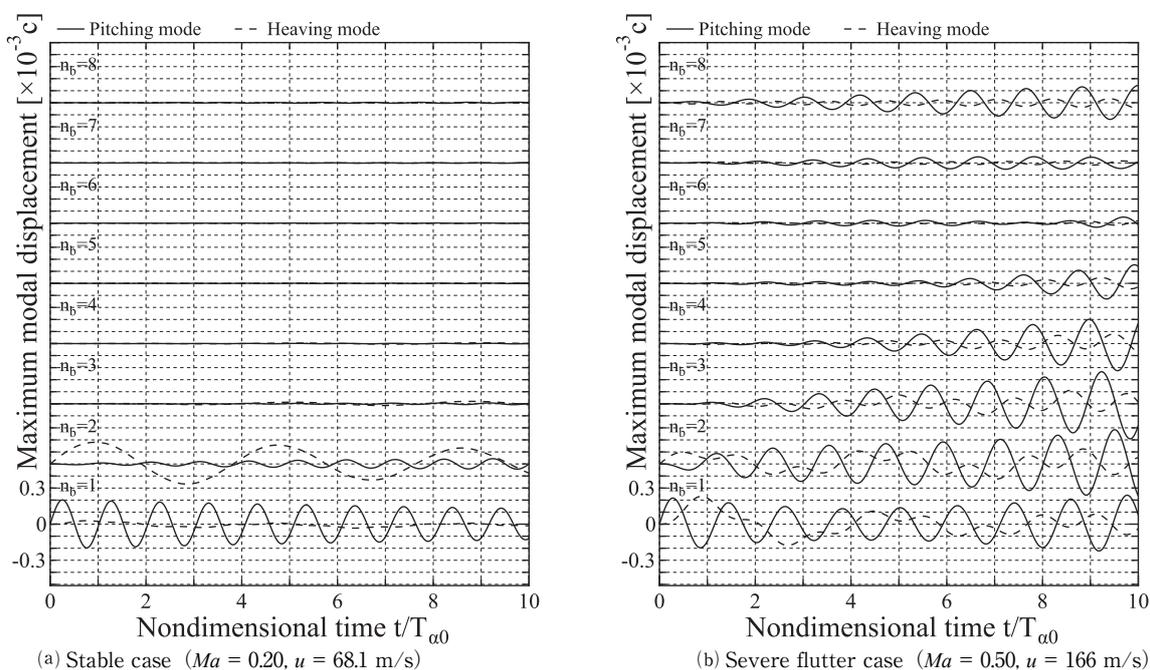


Fig. 9 Examples of free response of the flat plate cascade

$$\begin{aligned}
 C_{l\alpha} &= \frac{L}{\rho u^2 c l \bar{\alpha}}, & C_{m\alpha} &= \frac{M}{\rho u^2 c^2 l \bar{\alpha}}, \\
 C_{lh} &= \frac{L}{\rho u^2 c l (\bar{h}/c)}, & C_{mh} &= \frac{M}{\rho u^2 c^2 l (\bar{h}/c)}
 \end{aligned}
 \quad (23)$$

図8に、 $f_a = 250\text{Hz}$ の加振条件について、LINSUBとCFDで得られた空気力係数に対する比較を、代表として $C_{l\alpha}$ 、 $C_{m\alpha}$ を選んで示す。 $Ma = 0.3$ の条件に対しては全8つの翼間位相差を、また流速を変化させた際の感度として $Ma = 0.2, 0.4$ については翼間位相差 $90[\text{deg}]$ を表示している。翼間位相差・流速の変化ともにCFD結果は参照解と良好に一致している。そのため、これ以降連成解析結果を参照解と比較評価する際、空気力モデルに起因する差はほとんど無く、空力弾性モードの同定に関連して生じていると考えて良いといえる。

#### 4.5 翼の自由振動応答

連成解析によって得られた翼列の自由振動応答を図9に示す。図9(a)は $Ma = 0.20$ で翼振動が安定な場合であり、計算開始時に与えた初期擾乱が他の翼に伝わるものの激しい振幅の増大は見られない。一方、図9(b)は $Ma = 0.50$ でフラッターが発生する場合である。この場合には初期擾乱として1番翼に与えたねじり振動が振幅の増大を伴いながら他の翼に伝わっていることがわかる。増幅されている成分は、翼番号 $n = 1$ の波形と $n = 2$ の波形を比べると $n = 2$ のほうがおよそ $90\text{deg}$ 程度位相進みの状態にあるので、翼間位相差 $90\text{deg}$ のTraveling wave modeであるといえる。また、並進自由度には元々の並進振動モードに近い長周期の振動に加えて、ねじり自由度に由来する短周期の振動が重畳していることから、ねじり・並進自由度は完全に独立ではなく、自由度間の

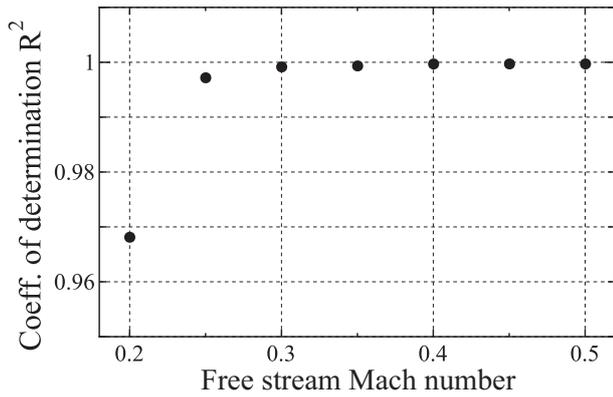


Fig. 10  $R^2$  values obtained at every simulation conditions

空力的な連成が存在し、振動特性が空気力の作用しない場合から変化している。

このように、シミュレーション結果としての波形から空気力による振動特性変化を確認できるが、空力弾性モードを同定することで定量的な比較を実施する。

#### 4.6 同定精度の確認

図10に、 $Ma = 0.2$ から $Ma = 0.5$ の流れ場における同定時に算出された決定係数 $R^2$ 値を示す。低いマッハ数側の点である $Ma = 0.2$ では他の点よりわずかに低い値をとっているものの、全ての計算点で $R^2$ 値は0.96以上となっており、自励空気力係数が翼振動の時間履歴を用いて十分よく説明されていることがわかる。したがって、結果としての空力弾性モードも精度よく求まっていることが期待される。

#### 4.7 空力弾性モードとフラッター境界の比較

図11に、一様流マッハ数をスイープした際に、各空力弾性モードがどのように変化するかを、LINSUBによる参照解と連成解析からの同定結果を比較して示す。翼列系の空力弾性モードは計算で導入した全構造自由度数と等しい。したがって本検証の場合には16個が現れるが、全てを表示し議論するのは冗長である。そこで、ここでは代表としてStanding waveである $IBPA = 0, 180$  [deg]、フラッターに突入するモードである $IBPA = 90$  [deg]の3つに対し、ねじり自由度由来の空力弾性モードであるPitching branchと、並進自由度由来の空力弾性モードであるHeaving branchを合わせて表示している。

図11(a)に、空力弾性方程式の固有値から求まる $IBPA = 0, 90, 180$  [deg]に対応する振動数と減衰率を示す。まず各翼間位相差で減衰率が異なっており、基本的な周期翼列系の空力減衰に関する性質を満足していることがわかる。また流速を増加させると $IBPA = 90$  [deg]は不安定化しフラッターが生じること、他2つでは空力減衰が増加し安定となる挙動が観察される。

フラッターは参照解、連成解析でそれぞれ $Ma = 0.318$ 、 $Ma = 0.312$ で生じ、参照解と数値解析結果は良好に一致している。さらに、フラッターが生じるマッハ数より

少し高い $Ma = 0.35$ まではどの翼間位相差でもPitching branch, Heaving branchともに良好に参照解のトレンドを捉えている。以上より、フラッターが生じない範囲(サブクリティカル)からフラッターの発生点に近い不安定条件までの減衰率は、提案手法で的確に算出することができるといえる。

図11(a)より空力弾性モードの振動数を見ると、減衰率と同様に翼間位相差によって異なっている。参照解と同定結果は $Ma \leq 0.35$ の範囲で良好に一致している。よって、減衰率のみならず揚力傾斜や付加質量効果に起因して生じる、気流中における翼振動の周波数変化に対しても、隣接翼の及ぼす効果を含めて提案手法は正しく予測できるといえる。

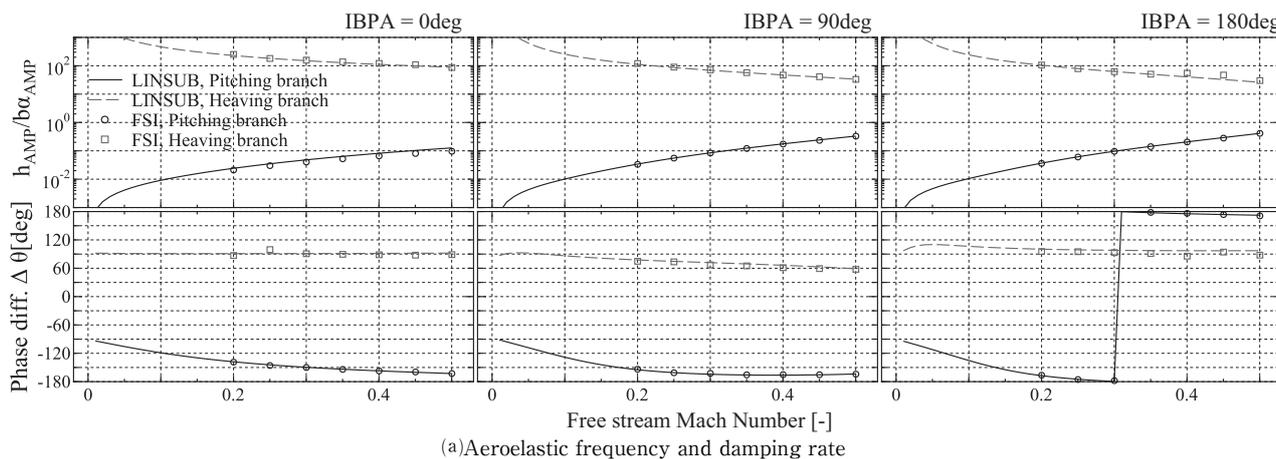
続いて、同定結果の空力弾性モード形状に対しても参照解との比較を行う。ここで、本対象における空力弾性モード形状は次式で表現される。

$$\begin{bmatrix} h \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{AMP} e^{i\Delta\theta} \\ \alpha_{AMP} \end{bmatrix} \quad (24)$$

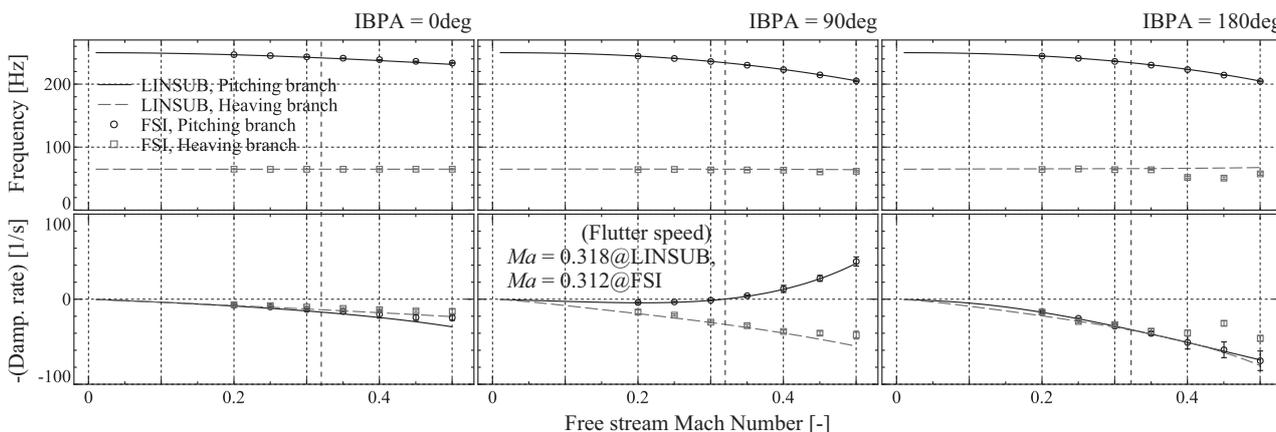
Eq. (24) 中でモード形状を決定するパラメータは、並進・ねじり自由度振幅比  $h_{AMP}/b\alpha_{AMP}$  と、ねじり自由度に対する並進自由度の位相差  $\Delta\theta$  である。

図11(b)に $Ma$ を変化させた際のこれら2つのパラメータの変化を、参照解と同定結果を比較して示す。グラフより、並進・ねじり自由度振幅比と並進・ねじり間の位相差は共に参照解とよく一致している。特に、フラッターに突入する $IBPA = 90$  [deg]のPitching branchの空力弾性モード形状を見ると、一様流速の増加に伴い単調に並進・ねじり自由度振幅比が増加している。また、フラッター速度付近の $Ma = 0.3 \sim 0.35$ では、ねじり振動の最大振幅に対しておよそ10%の並進振幅が誘起されており、フラッター時のモード形状はもはや構造振動モードのそれではなくなっている。

図11(a)において、フラッター境界以降の $Ma = 0.4$ 以上ではHeaving branchの減衰率に参照解との若干のずれが認められる。このずれの原因として、同定に用いたサンプル数の不足、または同定に用いた信号の質の2点が原因として考えられる。図12に、フラッター境界以降のHeaving branch,  $IBPA = 180$  [deg]について、サンプル数に対する減衰率の同定結果の変化を、代表として $Ma = 0.3, 0.4, 0.45$ について示す。どのケースもサンプル数を増やすと一定の結果に近づき、360サンプルで十分収束した結果が得られている。従ってこのずれは、サンプル数の不足ではなくフラッター境界以降で生じる翼振動履歴に原因があると考えられる。フラッター境界よりさらに流速を増した場合、図9(b)で示したように不安定モードが非常に急速に増幅されるために、Heaving branchの振動に関する情報がPitching branchに比べて相対的に小さくなっていることが原因である可能性がある。



(a) Aeroelastic frequency and damping rate



(b) Aeroelastic modeshape (amplitude ratio and phase difference between heaving and pitching degrees of freedoms)

Fig. 11 Comparisons of identified aeroelastic eigenvalues and eigenvectors from the free responses obtained by FSI simulations to the reference solutions obtained by LINSUB and  $p-k$  method

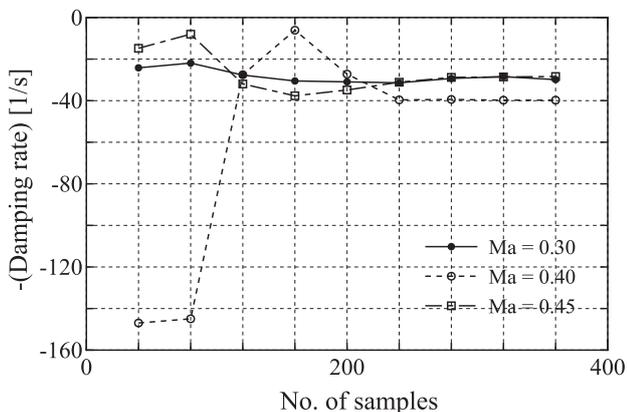


Fig. 12 Convergence history of identified aeroelastic damping rates around and after the flutter boundary (Heaving branch, IBPA = 180 [deg])

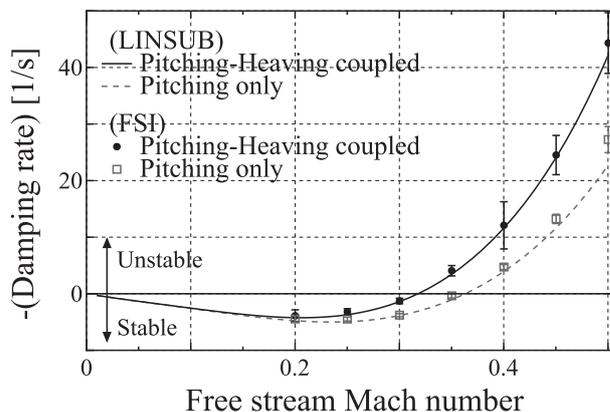


Fig. 13 Comparison of aeroelastic damping rate between pitching-heaving 2DoF model and pitching-only 1DoF model (flutter mode, IBPA = 90deg)

4.8 自由度間の連成の感度について

振動モード形状の変化がトータルの空力減衰へ与える影響として、減衰率の推移をねじり1自由度の場合と比較して図13に示す。参照解ではねじり1自由度の場合にはねじり・並進連成の場合よりもフラッター速度が12%程度高く、この感度が同定結果でも正しく捉えられている。このように振動モード形状に気流の影響が現れる場合に

も、提案手法によって得られた結果はその効果が適切に反映されている。

5. 結言

本研究では、自励空気力と構造振動間の空力的な連成に起因して翼振動の自由振動数や振動モード形状が変化する現象に着目し、気流と翼振動の相互作用を的確に模

擬するための数値解析手法である流体構造連成解析によって得られた翼振動履歴から空力弾性モードを同定する手法を開発した。本手法の特色は、翼列フラッター解析で標準的に用いられてきた、エネルギー保存の考え方に基づいた空力仕事の評価ではなく、システム同定の考えに基づき、空力弾性方程式を直接モデル化することにある。また、代数的空気力モデルの構築のために複数回のCFDを実施する必要はなく、たった1回の連成解析結果によって解を得ることができる。

亜音速流れ中の平板翼列に生じるねじり・並進フラッターについて翼1枚あたり2自由度のメカニカルモデルを設定し、LINSUBによる空気力モデルを用いた空力弾性解析結果を信頼できる参照解と位置づけ、開発した手法を評価した。提案手法により同定された空力弾性モードは、フラッターが生じない範囲またはフラッターが生じるが増幅率があまり大きくない範囲では、振動数、減衰率、モード形状、フラッター速度のいずれも正しい結果が得られることを示した。加えて、本解析手法によって自由度間の連成に起因する空力弾性モードの不安定化が的確に捉えられた。このことから、通常翼列フラッターで想定される単一構造振動モードの場合のみならず、構造振動モード間の連成がフラッター特性に影響する場合においても、提案手法が有効であることが明らかとなった。

本研究で提案する手法は、ファン・圧縮機・タービンに対する単一振動モードの解析だけでなく、高速プロペラやオープンロータといった、先進的な推進器におけるフラッター解析にも適用できると考えられる。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費14J10312の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- (1) Rolls-Royce (著), 日本航空技術協会 (翻訳), “ザ・ジェット・エンジン”, (2011), 日本航空技術協会, pp. 101-105
- (2) Stapelfeldt, S. C., Parry, A. B., and Vahdati, M., “Investigation of Flutter Mechanisms of a Contra-Rotating Open Rotor”, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 138, No. 5, (2016), 051009
- (3) Mehmed, O. and Kaza, K. R. V., “Experimental Classical Flutter Results of a Composite Advanced Turboprop Model”, (1987), NASA Technical Memorandum 88792
- (4) 花村庸治, 田中英穂, “翼列における2自由度連成フラッタ 第2報, フラッタ速度と翼列条件との関係”, *日本機械学会論文集* Vol. 33, No. 247, (1967), pp. 377-389
- (5) Kaza, K. R. V., Mehmed, O., Narayanan, G. V., and Murthy, D. V., “Analytical Flutter Investigation of a Composite Propfan Model”, NASA Technical Memorandum 88944, (1988)
- (6) Ducharme, E. H., “Velocity Scaled Aeroelastic Testing of an Unducted Fan”, Massachusetts Institute of Technology Ph. D thesis, (1987)
- (7) Clark, S. T., Kielb, R. E., and Hall, K. C., “The Effect of Mass Ratio, Frequency Separation, and Solidity on Multi-mode Fan Flutter”, *Proceedings of the 12th international symposium on unsteady aerodynamics, aeroacoustics and aeroelasticity of turbomachines ISUUAAT12*, (2009), I12-S3-2
- (8) Mayorca, M. A., Vogt, D. M., Mårtensson, H., and Fransson, T. H., “Prediction of Turbomachinery Aeroelastic Behavior from a Set of Representative Modes” *Journal of Turbomachinery* Vol. 135, No. 1, (2012), 011032
- (9) 塩入淳平, “ガスタービン翼の振動の研究 (第3報) —軸流機翼列翼のフラッタの一般理論—”, *機械試験所所報* 第9巻 第6報, (1955), pp.230-233
- (10) 塩入淳平, “ガスタービン翼の振動の研究 (第5報) —一般理論に対する補遺—”, *機械試験所所報* 第10巻 第1報, (1956), pp.4-6
- (11) Cole, H.A. Jr., “On-Line Failure Detection and Damping Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures”, NASA CR-2205, (1973)
- (12) 東京大学教養学部統計学教室 (編), “基礎統計学III 自然科学の統計学”, (1992), pp.49-51, 東京大学出版会
- (13) Shima, E., and Jonouchi, T., “Role of computational fluid dynamics in aeronautical engineering No. 12: Formulation and verification of uni-particle upwind schemes for the Euler equations,” NAL-SP-27, (1994), pp. 255-260
- (14) 嶋英志, “圧縮性CFDによる低マッハ数流れ計算のための新しい陰的時間積分法”, 第25回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2009), C02-4
- (15) Hounjet, M. and Meijer, J., “Evaluation of elastomechanical and aerodynamic data transfer methods for nonplanar configurations in computational aeroelastic analysis”, NLR-TP-95690 U, National Aerospace Laboratory NLR, (1995)
- (16) Sadeghi, M., Liu, F., Lai, K. L., and Tsai, H. M., “Application of Three-Dimensional Interfaces for Data Transfer in Aeroelastic Computations”, AIAA Paper 2004-5376, (2004)
- (17) Lancaster, P. and Salkauskas, K., “Surfaces Generated by Moving Least Squares Methods”, *Mathematics of Computation*, Vol. 37, No. 155, (1981), pp.141-158
- (18) Whitehead, D. S., “AGARD Manual on Aeroelasticity in Axial-Flow Turbomachines Vol. 1: Unsteady Turbomachinery Aerodynamics, Chapter III: Classical Two-Dimensional Methods” AGARDograph No. 298, Vol. 1, (1988)
- (19) Giles, M. B., “Nonreflecting Boundary Conditions for Euler Equation Calculations”, *AIAA Journal* Vol. 28, No. 12, (1990), pp. 2050-2058

## 遷音速ファンの部分回転数時に失速点近傍で生じるフラッターのFSI解析

## FSI Analysis of Transonic Fan Flutter under Part-speed, Near-stall Operating Conditions

立石 敦\*<sup>1</sup>  
TATEISHI Atsushi渡辺 紀徳\*<sup>2</sup>  
WATANABE Toshinori姫野 武洋\*<sup>2</sup>  
HIMENO Takehiro青塚 瑞穂\*<sup>3</sup>  
AOTSUKA Mizuho室岡 武\*<sup>3</sup>  
MUROOKA Takeshi

## ABSTRACT

This paper presents an application of an aero-structure integrated approach developed by authors for cascade flutter simulation. Transonic stall flutter experienced in a rig test was simulated over a wide range of part-speed operating conditions. The flutter boundary obtained by the present simulations agreed well on high rotational speed lines. However, the simulations for low rotational speed cases could not reproduce the flutter boundary. Detailed observation of the flowfield and local aerodynamic work revealed that the flutter boundary on the low speed lines was governed by the strong excitation force produced by the detached shock wave on near-stall operating points. An additional sensitivity study on the turbulence model showed the possibility of transonic buffet which caused flutter suppression in the low speed range. The accuracy in identified aeroelastic damping was also discussed in detail.

**Key words :** Fan, Aeroelasticity, Stall flutter, Fluid-Structure Interaction, Transonic flow

## 1. 緒言

前報<sup>(1)</sup>にて、筆者らは軽量・低剛性なファン翼や高速プロペラのフラッター解析を可能とすべく、異なる振動モード間の干渉や気流による振動数変化といった空力・構造間の相互作用効果を詳細に模擬するために、流体構造連成解析とシステム同定手法を統合した新しい振動解析手法を提案し、気流中における翼列の空力弾性モードを正しく算出できることを示した。

最近の高バイパス比エンジン向けファンでは、様々な種類のフラッター<sup>(2)</sup>の中でも、特に部分回転数のサージ線近傍で生じる遷音速失速フラッターが重要な問題となっている。図1にマップ上での典型的な発生領域を示す。このタイプの発生領域はサージ線近傍から作動線に向かって鋭く食い込むという特徴があるが、ファンの仕様としてバイパス比の上昇に伴い最適な圧力比が低下するため、背圧の高い地上静止状態では、部分回転数において作動線がフラッター発生領域に近づきやすい。その

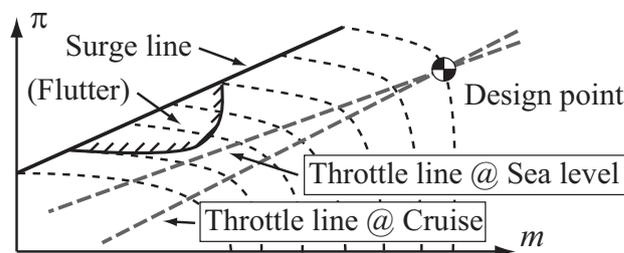


Fig. 1 Typical flutter boundary of transonic stall flutter in a fan map

ため、作動線からのマージンの予測手法や回避のための設計指針の確立が求められ続けている。

しかし、これまで失速フラッターの発生を予測することは困難であった。1970年代にF100エンジンファンの失速フラッターに関する検討を行ったJeffersらは、当時失速点付近の剥離を含む流れ場に使用できる流体力モデルが存在せず、予測が困難なことを指摘している<sup>(3)</sup>。

近年のフラッター解析における流体力モデルの多くは数値流体力学 (CFD) に基づいている。これまでCFDによる検討によって、詳細な流れ場を考慮し翼振動への影響を分析する<sup>(4)-(6)</sup>などのみならず、ファンダクトが翼振動への影響因子であることが発見される<sup>(6)-(7)</sup>など、振動現象の理解と、それに基づく予測モデルの構築に関する

原稿受付 2015年12月25日

校閲完了 2016年6月30日

\* 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙専攻  
日本学術振興会 特別研究員PD  
〒113-8656 文京区本郷7-3-1

\* 2 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙専攻

\* 3 IHI

重要な知見が得られてきた。

本報では、前報で構築・検証した解析手法を用いて、リグ試験で経験された失速点付近で生じるフラッターの再現を試みる。得られたフラッター境界および流れ場の評価を通じて、フラッター発生状況の特徴とそこから導かれた予測精度向上の指針、ならびに本研究のアプローチで空力弾性モードが適切に求められる条件を議論する。

## 2. 翼列フラッターの解析手法

### 2.1 振動系の記述と空力弾性モードの同定

本研究のフラッター解析手法は、システム同定に基づき、翼の振動方程式中の自励空気を翼振動の時間履歴を用いて直接モデル化し、流体と構造が連成した状態における振動モードである「空力弾性モード」を求める。得られる翼振動のパラメータは、空力弾性モードの振動数、減衰率、モード形状である。本手法は以下の2つの手続きからなる。

(1)流体構造連成解析を実行すると、計算で取り込んだ全ての翼(翼枚数 $N_b$ )の全ての構造振動モード(モード数 $N_f$ )に対して翼振動の変位、速度、加速度の時間履歴が求まる。そのため、十分な数のサンプル数を用いれば、翼列全体の運動方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_{N_b} \end{bmatrix} + \text{diag}(A) \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_{N_b} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_{N_b} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_{N_b} \end{bmatrix} \quad (1)$$

における未知項である自励空気力係数行列を連成解析結果に基づき同定できる。Eq. (1)で、 $q_i$ は各翼の構造振動モード変位ベクトル、 $A$ は構造振動モード剛性行列で対角行列である。また、 $A, B$ は翼の運動に対し線形に表現した自励空気力の係数行列で非対称密行列であり、最小二乗法によって同定される。

(2)自励空気力行列 $A, B$ を用い、 $\lambda$ を固有値、 $\psi$ を固有ベクトルとして、運動方程式の固有値問題が

$$\lambda \begin{bmatrix} \psi \\ \lambda \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & I \\ -\text{diag}(A) + A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \lambda \psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

と書ける。固有値問題Eq. (2)を解き、空気力と翼振動が連成した振動モードを求める。すると、翼列全体の振動方程式に対する固有値分布と振動モード形状が総自由度の数だけ得られる。固有値は振動に関する時間の情報を含んでおり、実部、虚部はそれぞれ空力弾性モードの減衰率 $\mu_{AE}$ 、振動数 $f_{AE}$ と以下のように対応する。

$$\mu_{AE} = -\text{Re}(\lambda), f_{AE} = |\text{Im}(\lambda)|/2\pi \quad (3)$$

また、モード形状からは翼列周方向のモード形状である翼間位相差や、どの構造振動モードが支配的な空力弾性モードかといった情報が得られる。

同定誤差は、翼振動のシグナルと同定結果間に生じる残差に基づき、各固有値の誤差を統計的に求め評価した。

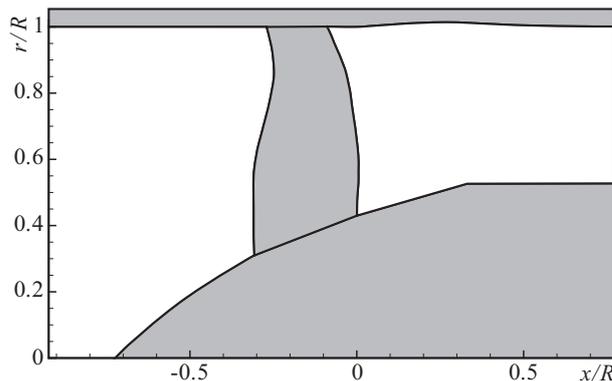


Fig. 2 Meridional view of the CEFS1 fan

Table 1 Specifications of CEFS1 fan

Number of blades	18
Aspect ratio	1.6
Relative Mach number at tip	1.4
Blade material	Ti-6Al-4V
Range of flutter region and structural modeshape	80%N, 82.5%N (1F mode)

自励空気力行列の同定過程、および同定誤差の評価法については前報<sup>1)</sup>を参照されたい。

### 2.2 フラッター境界の決定方式

前項の手法を用いて様々な作動点で求められた空力弾性モードに基づいて、ファン特性マップ上におけるフラッター発生点(以下、フラッター境界)が求められる。ある2つの作動点A, Bの間で、それぞれの点におけるモード減衰率の最小値が $(\mu_{AE})_A > 0$ (正減衰:安定)、 $(\mu_{AE})_B < 0$ (負減衰:不安定)であったとする。このとき、最低の減衰率が0となる空力弾性モードが存在する作動点はA点, B点の間にあると考えられる。したがって、フラッター境界上の作動点における圧力比 $\pi_F$ 、流量 $m_F$ をA点, B点における減衰率に基づいた内挿係数 $s$ を用い、流量 $m_A, m_B$ 、圧力比 $\pi_A, \pi_B$ から

$$s = (\mu_{AE})_A / [(\mu_{AE})_A - (\mu_{AE})_B] \quad (4)$$

$$\pi_F = (1-s)\pi_A + s\pi_B \quad (5)$$

$$m_F = (1-s)m_A + sm_B \quad (6)$$

と、線形補間して求める。

## 3. 解析対象

### 3.1 CEFS1 ファン

本報における解析対象はIHI社において高効率・高比流量を実現すべく研究開発されたCEFS1ファン<sup>8)</sup>である。子午断面流路を図2に、仕様を表1に示す。ファンは18枚の翼をもち、64チタンのプリスクで作成されている。また、CEFS1はリグ試験において設計回転数比80%N, 82.5%N(Nは回転数を表す)の失速側作動点で、動翼一次たわみモードのフラッターが発生した。

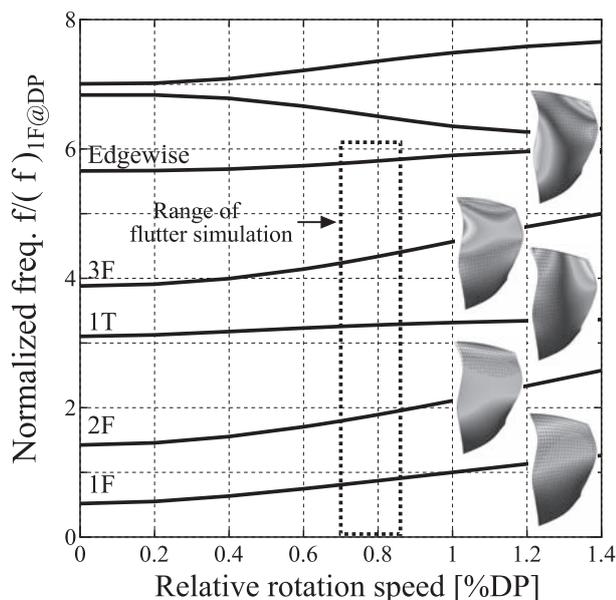


Fig. 3 Campbell diagram of CEFSI and the range of flutter simulation

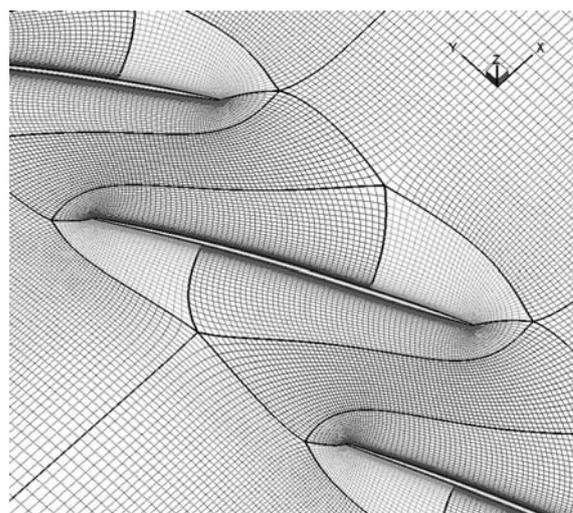
### 3.2 翼構造のモデル化と構造解析

フラッター解析に用いる翼形状および構造振動モードをTotal-Lagrange法による非線形有限要素解析<sup>9)</sup>により求めた。なお、ディスクは十分剛であるとし、翼根の全自由度を固定し翼部のみの計算を実施した。図3に得られたキャンベル線図と低次5モードのモード形状を示す。フラッター解析の対象とする回転数域は70%Nから85%Nの範囲で、特性マップ上の高流量側からサージ線間の範囲を網羅的に2.5%N刻みで行う。フラッター解析には図に示した低次5モードを取り込む。なお、解析対象範囲ではモードの縮退は見られず、翼のモード形状に大きな変化はない。

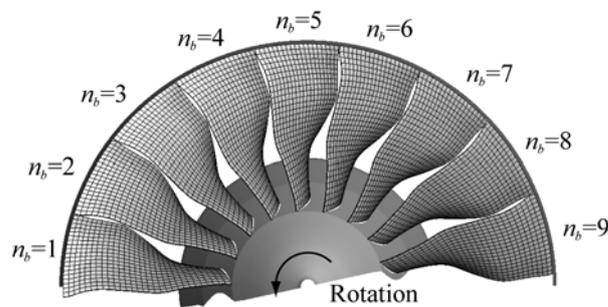
### 3.3 流体構造連成解析

全ての解析は自作の流体構造連成解析コードにより行われた。本コードは、マルチブロック有限体積法による圧縮性流体解析と、翼の微小振動の運動方程式を組み合わせたものである。流体の解法は翼振動を模擬するためArbitrary Lagrangian-Eulerian型の支配方程式を使用し、有限体積的な移動格子法を導入した。非粘性流束と粘性流束はそれぞれSHUS<sup>10)</sup>と二次精度中心差分により評価した。乱流モデルには、一方程式型のSpalart-Allmarasモデル<sup>11)</sup>を基本に、 $f_2$ 項を0とし全域乱流として用いた。時間進行法として、定常流れ解析ではEuler陰解法による局所時間刻み法を、翼振動解析では陰的な二次精度三点後退差分法を3回の内部反復と組み合わせ用いた。陰解法は圧力、速度、温度の基本変数に対して構築し<sup>12)</sup>、Red-Black Gauss-Seidel法により線形反復の圧力残差が初期の1/10になるまで反復した。

翼振動の解析は各構造振動モードの運動方程式を解き変位を重ねあわせるモード合成法を用いた。計算されたFEMモデル上の変位は移動最小二乗法によって流体格



(a) Passage view (CFD)



(b) Half-annulus domain for the flutter analysis (FEM)

Fig. 4 CFD grid and FEM model

子表面にマッピングされる。一方FEMモデル節点上の空気力は、仮想仕事原理に基づき、仕事保存型のマッピング手法で算出した。

### 3.4 解析格子と境界条件

本解析の範囲は回転数に15%Nの幅があることから、80%Nの翼形状で格子を作成し、有限要素法による格子モーフィングを用いて、回転数別にそこでの翼形状を反映した格子を生成した。図4(a)に用いた格子を示す。格子点数は翼弦、ピッチ、半径方向にそれぞれ120, 108, 120セルを配置し、1流路当たりおよそ230万点である。翼端間隙内は23セルで模擬されている。なお、入口・出口境界はそれぞれ、翼端部で前縁、後縁から軸コード長の3.5, 4.75倍を確保した。

定常流れ解析においては、単流路のみを解析領域にとった。また翼振動解析では、図4(b)に示すようにファン半周を取り込んだ。このとき、偶数の節直径 (ND = 0, ±2, ±4, ±6, ±8) が空力弾性モードに現れる。

境界条件として、ファン入口では軸方向流入とし全温・全圧を固定した。出口では単純半径平衡より静圧分布を求めた。固体壁面上では断熱・粘性条件を与えた。また、翼振動解析の際は、入口・出口にGilesの準一次元無反射境界条件<sup>13)</sup>を用いた。

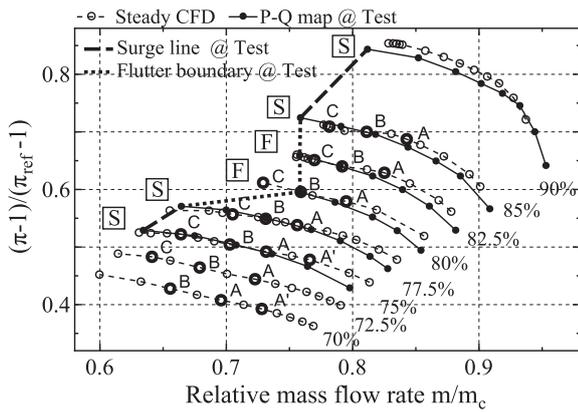


Fig. 5 Characteristic map of CEFS1 fan

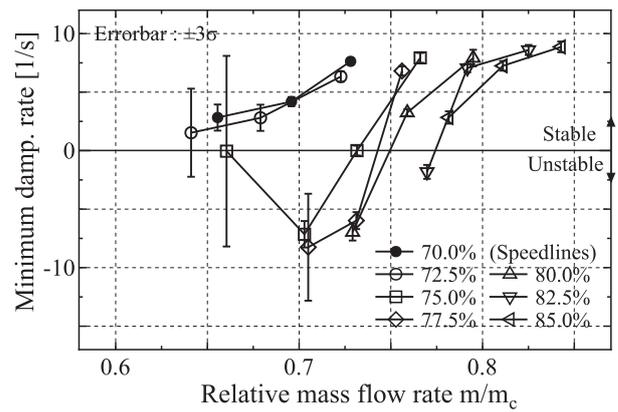


Fig. 6 Relationships of mass flow rate and minimum aeroelastic damping rate on each speed line

Table 2  $R^2$  values of least-square identification on each operating points

OP/Speedline	70.0%N	72.5%N	75.0%N	77.5%N	80.0%N	82.5%N	85.0%N
A'	0.998	-	0.998	-	-	-	-
A	0.996	0.994	0.993 (F)	0.998	0.998	0.998	0.998
B	0.975	0.974	0.973 (F)	0.995 (F)	0.998	0.998	0.998
C	-	0.869 (†)	0.720 (†)	0.972 (F)	0.998 (F)	0.998 (F)	0.998

(F): operating points where negative damping mode was detected,

(†): operating points where the stability of blade vibration could not be distinguished due to large uncertainty, dashed line: flutter boundary, dotted line: inception of accuracy deterioration in the modal identification.

#### 4. ファン特性マップとフラッター境界

##### 4.1 各回転数における定常流れ解析結果

フラッター解析に用いる定常流れ場を得るため、単流路の定常流れ解析を行った。図5に得られたファン特性マップのリグ試験結果との比較を示す。解析ではどの回転数でも高流量側で圧力比が大きめに算出されたが、回転数変化・流量変化に対する感度が適切に捉えられており、定性的には妥当な結果が得られたと判断した。フラッター解析は太線丸で示した22点に対して行い、これらの点は図5中に示すように、各回転数で高流量側から低流量側に向かってA', A, B, Cと呼ぶことにする。

##### 4.2 各回転数における空力弾性モードの同定精度

各作動点で同定された空力弾性モードについて、まず同定精度がフラッター境界を求めるために十分である範囲について議論する。表2に、各作動点において同定時に得られた決定係数 $R^2$ 値を示す。表中 (F) は負減衰のモードが存在しフラッターが生じる作動点、(†) は同定結果の不確かさが大きく安定性の判定が困難であった作動点である。フラッター境界前後では $R^2 > 0.97$ であり十分大きいので、空力弾性モードの同定結果は適切であるといえる。しかし、低回転数側の72.5%N, 75%N C点では他の作動点に比べ $R^2$ の著しい低下が生じており、同定結果は十分な精度を有さないことが示唆される。各作動点で得られた空力弾性モードから最小減衰率を抽出し、各回転数についてファン流量を横軸に、減衰率を縦軸にプロットし図6に示す。誤差棒は統計的な同定誤差解析より得られた減衰率推定値の99%信頼区間で、同

定された減衰率の不確かさを示す。誤差は特に77.5%N以下の低流量側で大きく、著しい $R^2$ 値の低下がある作動点と対応している。しかし、フラッター境界の零減衰点は誤差棒の小さい領域に位置しているため、精度よく求まっていることが高い $R^2$ 値と併せて確認できる。

##### 4.3 フラッター境界

図6の流量-減衰率の関係より、連成解析では75%Nから82.5%Nに零減衰点や負減衰点となる作動点が存在し、フラッターが生じている。これらの回転数では、零減衰付近で流量を絞った際に減衰率が急激に落ち込んでいる。しかし、72.5%N以下ではフラッターは生じず、流量を絞った際も減衰率の低下は緩和される傾向にあり、75%N以上で見られる急激な変化は見られない。このように、特定の回転数域における低流量側作動点での減衰率の急激な落ち込みが本対象におけるフラッター境界近傍の変化の特徴であるといえる。

フラッター境界の作動点を求め、マップ上に図示しリグ試験結果と比較したものを図7に示す。リグ試験結果で生じた80%N, 82.5%Nのフラッター境界は連成解析でも定性的に再現されている。なお、青塚らによる非連成の解析結果<sup>[4]</sup>でも同様の結果が得られていることから、この対象では連成解析を用いても得られるフラッター境界は大きく変化しないと考えられる。しかし、試験ではフラッターが起らないはずの低回転数側の75%Nから77.5%Nでもフラッターが生じ、数値解析結果は部分的に試験結果から逸脱する結果となった。

以上の結果における疑問点は次のようにまとめられる。

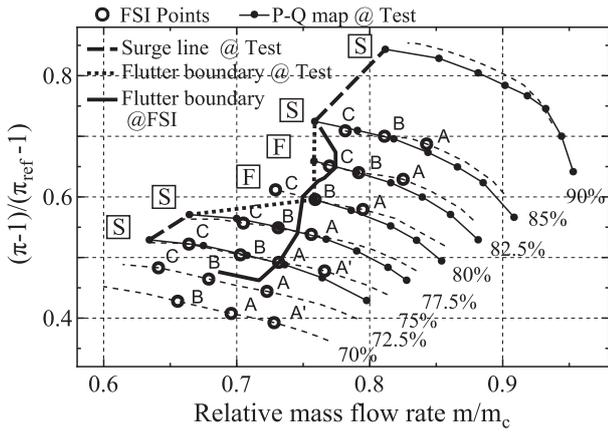


Fig. 7 Characteristic map of CEFSI and obtained flutter boundary by rig testing and FSI simulations

(1)低回転数側におけるフラッター境界の差異  
 (2)低回転数失速側作動点での著しい同定精度悪化  
 以下の章では、これらについてフラッターの発生状況に対する分析を交えながら、原因と考えられる事項について議論したい。

5. フラッター境界近傍の流れ場

まず、フラッターが起こる流れ場と起こらない流れ場の間にはどのような共通点・相違点が見られるかを調べた。図8に、代表的な回転数として、試験でも解析でもフラッターの発生しない72.5%N（作動点A, B）、85%N（作動点B, C）と、フラッターが発生する80%N（作動点B, C）におけるフラッター境界付近の翼負圧面上限界流線と85%翼高さ位置の相対マッハ数場を可視化して示す。

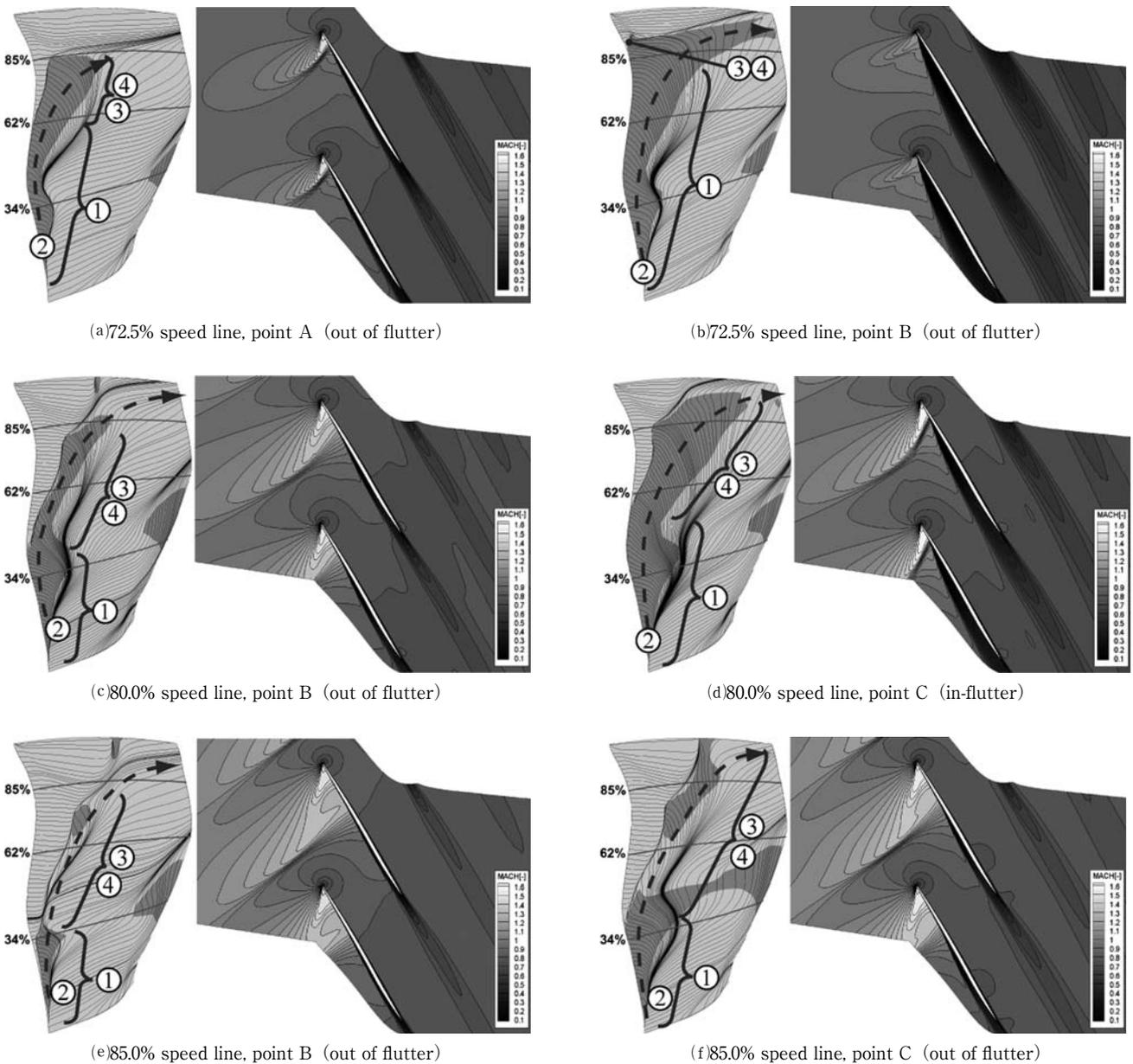


Fig. 8 Limiting streamline on the suction surface and relative Mach number field on the 85% span height. Shaded area shows axially-reversed area on the blade surface.

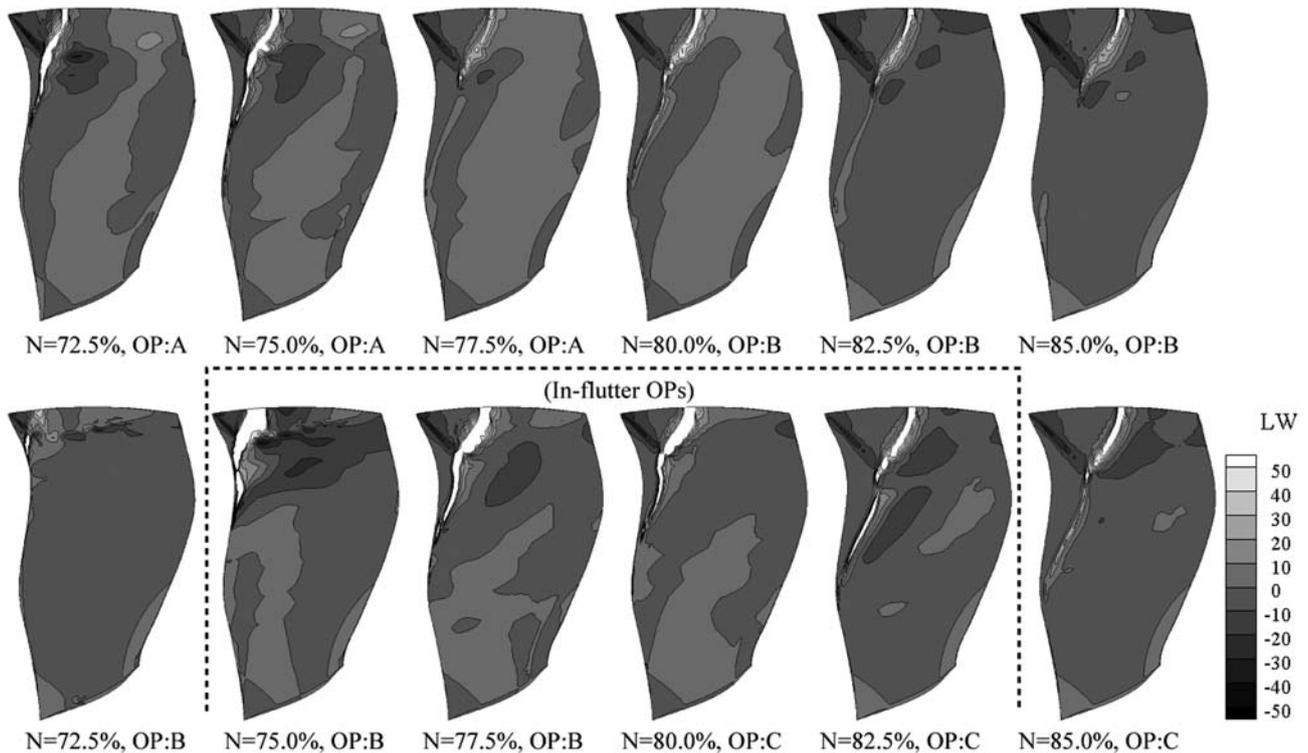


Fig. 9 Comparison of local aerodynamic work distribution on the suction side of the blade across the flutter boundary

翼面上の影付き部は軸方向の逆流域を示している。

まず、これら4つの作動点で共通する流れ現象を列挙すると、①：翼根からMidspanにかけて生じる前縁剥離、②：①の前縁剥離により生じた逆流域・低運動量流体に生じる半径方向二次流れ、③：Midspanから翼端にかけて存在する前縁付近の離脱衝撃波、④：②の低速領域と③の離脱衝撃波との干渉、とまとめられる。

しかし、①から④の挙動は回転数によって異なっている。フラッターが生じない72.5%Nでは、作動点AからBの変化で前縁剥離が90%翼高さほどまでせり上がり、A点で前縁付近に位置していた離脱衝撃波は消失する。

一方、フラッターが生じる80%Nでは、作動点BからCの変化で衝撃波は前縁側に移動するが、依然として前縁付近に位置している。また、壁面上では、低スパン位置から移流してきた低運動量流体との干渉②により衝撃波下流に大きな剥離領域が生じていると同時に、衝撃波の足元が前縁側に強く押し出されている。

回転数を上げ85%Nになると、最も失速側に位置する作動点Cでも35%翼高さ以上の前縁は付着流になっている。加えて、前縁剥離下流の二次流れと離脱衝撃波の干渉は低回転数側に比べ小さく、翼間マッハ数分布にも80%Nのような衝撃波の剥離域による前進は見られない。

以上のように、フラッター境界付近の流れ場は、回転数変化に敏感な遷音速流れ場において、異なる翼高さ位置における流れ現象が壁面付近で相互干渉することで衝撃波位置やその足元の剥離部の大きさが決まっていることが推察される。

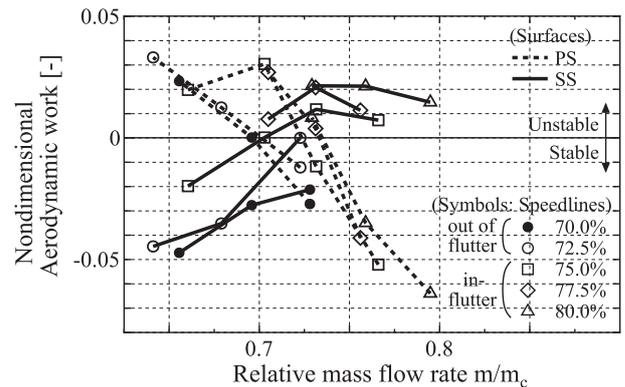


Fig. 10 Summation of aerodynamic work on the suction and pressure sides

## 6. フラッターに寄与する翼励振力と流れ場の関連

衝撃波のフラッターに対する役割を理解するために、連成解析の結果から空力弾性モードに対応する変動圧力を再構築し、Eq. (7) のように翼振動1周期の平均から翼面上の局所的な空力仕事分布LWを求めた。なお、空力仕事が正の部分は励振力、負の部分は減衰力としての自励空気力の作用を意味する。

$$LW = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} -pn \cdot v \, dt \quad (7)$$

図9に各回転数におけるフラッター境界前後での負圧面上の空力仕事分布を示す。負圧面上の離脱衝撃波足元はどの回転数でも強い励振力として作用している。また、前縁剥離部分は直接的には励振力に寄与していない。

フラッターが生じない72.5%Nでは作動点AからBの

間における衝撃波の消失と同時に励振力も消失している。一方で、数値解析でフラッターが生じた75%Nから82.5%Nまでは、流量を絞っても衝撃波が翼面上に位置し励振力も失われていない。よって、低回転数側のフラッター境界を決定づける流動現象は、「離脱衝撃波が前縁剥離に切り替わり消失すること」であるといえる。

離脱衝撃波の状態と空力仕事変化をより明瞭に対応づけるために、図10に負圧面・正圧面それぞれの空力仕事積分値を流量と共に示す。正圧面ではどの回転数でも流量に対し空力仕事が増加する。一方負圧面で空力仕事が流量に対し減少している部分は、衝撃波の入射域が小さくなることに対応している。また、回転数を増加させると負圧面の曲線が全体的に不安定側にシフトしていくのは、衝撃波の強さが増し励振力の寄与が大きくなったためだと考えられる。

以上より、試験と解析の間のフラッター境界の差異は、翼高さ方向に前縁剥離と離脱衝撃波が切り替わる前縁付近の流れ場、特に励振力として作用する衝撃波足元に関し、CFDと実際の流れ場との間で生じる差異に由来するものと推察される。

## 7. 離脱衝撃波の不安定性と乱流モデルの影響

今回の連成解析で用いたSAモデルには元来、乱流遷移点を操作するための「トリップ項」が含まれており、壁面付近の生成項・消散項を修正しコントロールする $f_2$ という制御関数がある。壁面を「全域乱流」として取り扱うには、 $f_2=0$ とすればよいが、 $f_2$ 項を有効にすると「全域乱流」としても前縁付近にごく短い層流領域 ( $Re_x \sim 1 \times 10^5$ 程度)が生じる<sup>(15)</sup>。以下では、

・ $f_2=0$ とした全域乱流のモデル (Without  $f_2$ )

・ $f_2$ 項を含めたモデル (遷移点の指定なし, With  $f_2$ )の2つのモデルを用い、フラッター境界の差異が見られた75%N作動点Aで生じる流れ場について述べる。

Without  $f_2$ では全ての作動点で定常解が安定に求まっていたが、With  $f_2$ では75%N点Aで衝撃波足元が振動し始めたため、時間二次精度のTime accurateな解析を行った。このとき翼は固定させていたため、生じている非定常流れは純粋に流れ起因のものであるといえる。

図11に、この解析で得られた衝撃波の振動の様子を示す。図11(a)は翼負圧面の圧力のRMS値であり、翼高さ60%～85%で最大入口全圧10%の非常に強い変動が生じている。最も強い変動が見られた75%翼高さの前縁付近 ( $x/c=3.3\%$ ,  $4.6\%$ ,  $7.3\%$ )における圧力変動の時間履歴を図13(b)に示す。横軸は振動周期 $T_b = 450\text{Hz}$ で規格化している。圧力波形は平坦な圧力の低い部分と、スパイク状の間欠的な圧力上昇で特徴づけられ、それぞれサンプル点が超音速・亜音速である時間に対応している。類似の圧力波形はLepicovskyらによるNASAの翼列風洞における高インシデンス状態の翼列試験<sup>(16)</sup>にて確認されており、数値的のみならず実際の流れ場でも生じうる現象であるといえる。図11(c)は1サイクル中の衝撃波振動を前縁付近の相対マッハ数分布で示しており、剥離領域と衝撃波位置が自動的に振動する遷音速バフェットが発生していると考えられる。

遷音速バフェットは前縁近傍の時間平均流れ場に対して多大な影響を与える。図12に、75%翼高さの $C_p$ 分布と前縁付近のマッハ数分布を示す。Without  $f_2$ のモデルでは衝撃波による不連続な圧力上昇が明瞭に認められるのに対し、With  $f_2$ では衝撃波が消失したような分布になる。2モデル間のマッハ数分布を比較すると、

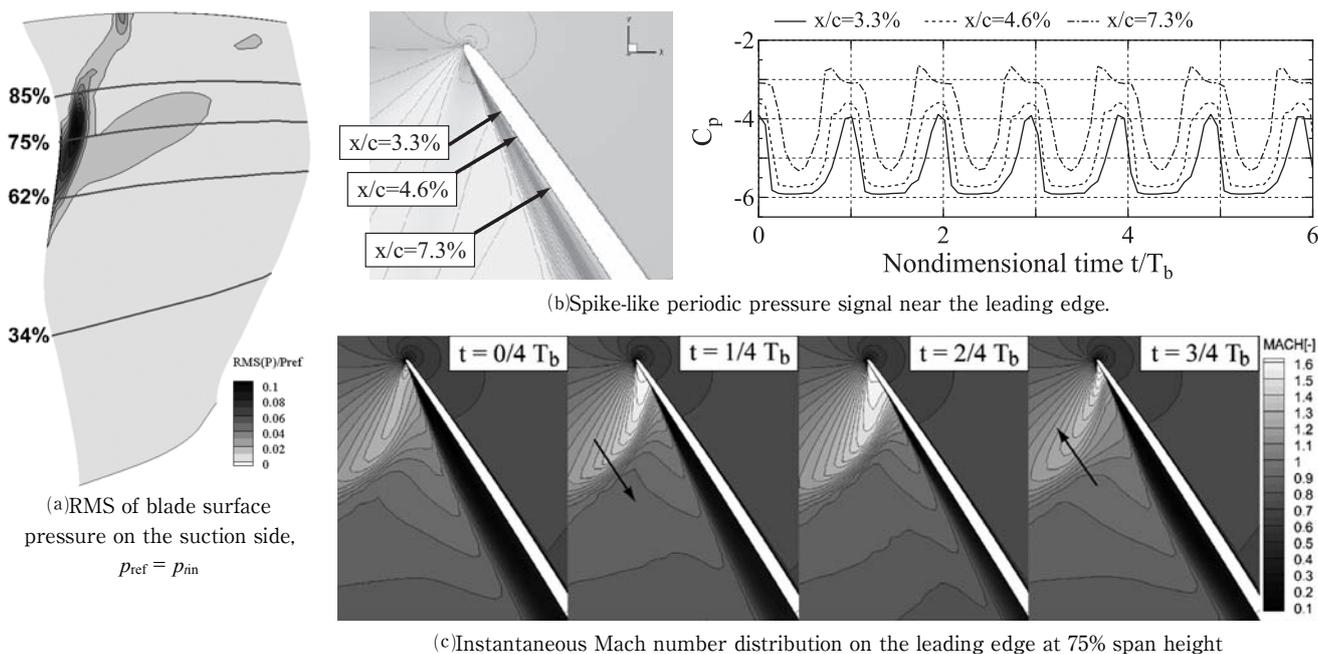


Fig. 11 Unsteadiness of the detached shock obtained by a time-accurate CFD simulation at the operating point A on the 75.0% speed line with SA turbulence model including  $f_2$  term

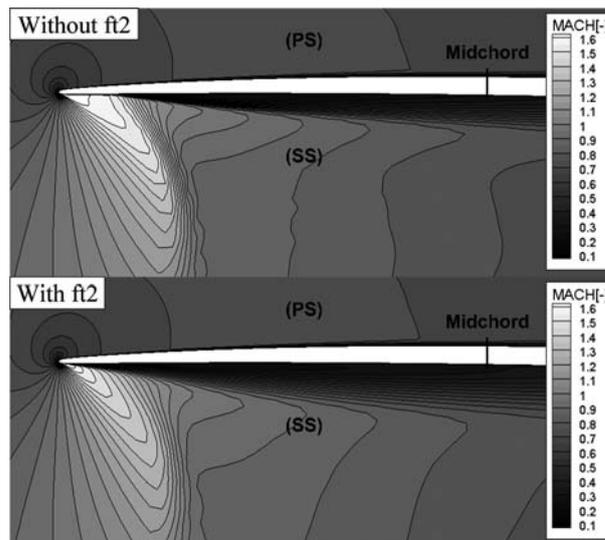
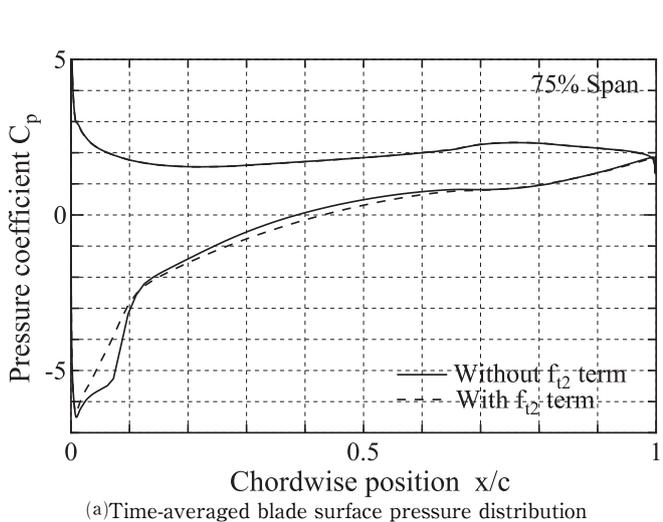


Fig. 12 Effect on the unsteady shock motion on the time-averaged flowfield at 75% span height

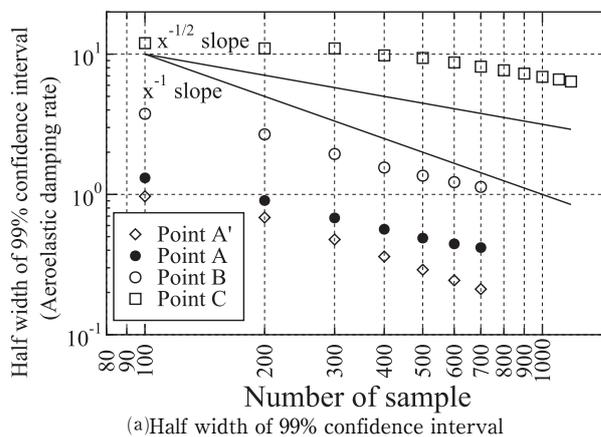
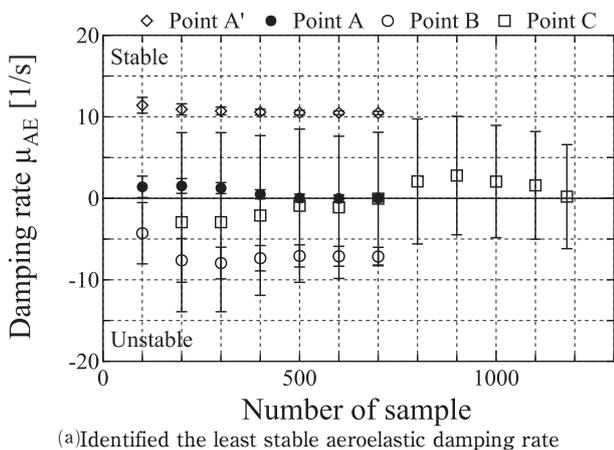


Fig. 13 Convergence history of aeroelastic damping rate at the operating points on the 75.0% speed line

Without ft2 では翼面に直接衝撃波が入射しているのに対し、With ft2 では剥離点が上流に移動し、マッハ数分布も空間的に拡散している。

低回転数側におけるフラッター境界の差異の原因として、「試験環境では遷音速バフェットの発生に起因して衝撃波が時間平均流れ場から消失し、離脱衝撃波足元における励振力も同時に消失し、フラッターが抑制されている」可能性がある。しかし、本章のように乱流モデルのたった1つの項の有無でも発現する流れ現象が変わってしまうように、本対象のバフェットには非常に大きなモデル依存性がある。したがって、フラッターを正しく予測するためには実際に発現している流れ現象をより詳しく知ったうえで、その特徴を反映したCFD並びに翼振動解析が今後必要になってくると考えられる。

### 8. CFDで生じる流れ場の非定常性と空力弾性モード同定の適用限界について

最後に、72.5N, 75%N作動点Cにおける著しい空力

弾性モード同定精度の悪化について取り上げ、空力弾性モード同定の適用限界について議論する。図13(a)には、75%Nの解析でモード同定に用いた翼振動履歴のサンプル数に対する同定結果の減衰率の依存性を示しており、エラーバーは99%信頼区間である。本研究では1F振動1周期中におよそ100サンプルを行っている。作動点A'からBまではサンプル数を増やしていくと同定結果の変化は小さくなっていくが、作動点Cでは誤差棒が非常に大きくまた平均値も落ち着かない。

図13(b)には誤差棒の半幅をサンプル数に対してプロットしている。最小二乗同定を用いているためどの作動点でも誤差棒はおおよそサンプル数の1/2乗に反比例している。しかし、C点では初期値として非常に大きく、他の作動点と同程度(1[1/s])まで不確かさを落とすためには1Fモード500周期に対応するおよそ50000Sampleが必要となる。

この高い不確かさはCFDで発現している流れ場に直接起因している。図14(a)に、75%N作動点Cの95%翼高

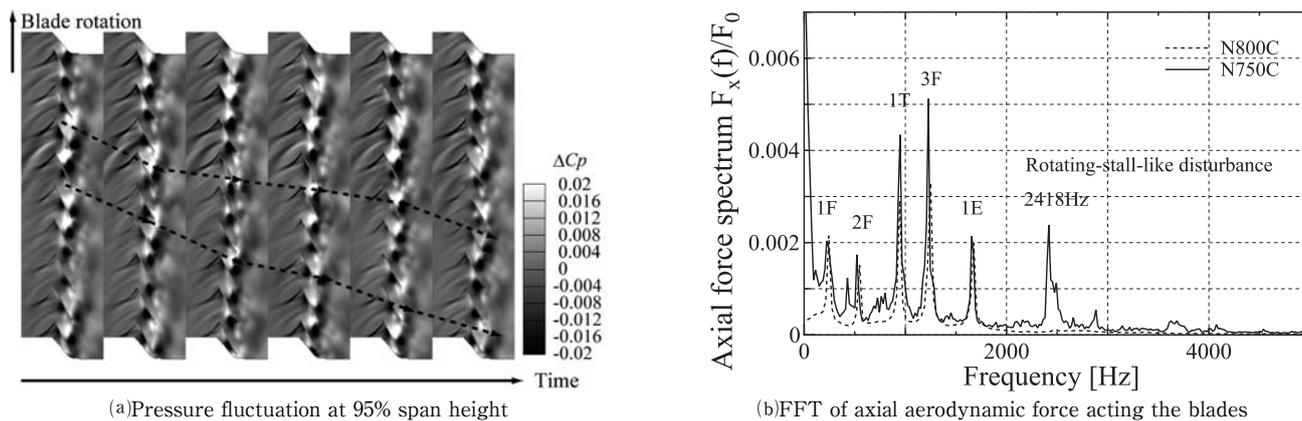


Fig. 14 Unsteady flow observed at point C on the 75.0% speed line

さ位置における変動圧力を示す。図中異なる時間のものが水平方向に並べられ、点線は低圧部分の移動を示す補助線である。この作動点では、Time-accurateな解析を行うと低圧部分が2～6流路にわたりクラスタリングし、大きさを変えながら動翼回転方向と逆に旋回（動翼相対系で見ると）するといったような、旋回失速様の非定常性が生じる流れ場になっている。

図14(b)に、翼に作用している軸方向空気力を周波数解析し全翼の平均をとったものを、同定精度に問題のない80%N作動点Cと精度悪化のある75%N作動点Cで比較して示す。80%N作動点Cではスペクトルに翼構造振動モードに対応するピークのみが確認でき、CFDにおいて自励空気力成分のみが発現していることがわかる。一方で75%N作動点Cでは自励空気力成分の他に、旋回失速様の成分が高周波数側に確認できる。また、1F～1Tモード振動数部分でも翼振動数以外の部分で増加している。翼振動数成分以外の変動成分は主に流れの不安定に起因して自発的に生じ、翼振動とは無関係である成分であると考えられる。

このように、自励空気力に加えそれに無関係な成分が重畳すると、自励空気力に無関係な成分は自励空気力を同定する際にノイズとなるため、統計的な観点からは、このノイズの影響が十分小さくなるようなサンプル数を取らねばならない。しかし、前述のように不確かさ1[1/s]まで減らすためには1Fモード500周期の解析が必要である。本研究では1作動点に対し高々10周期程度しか計算できていないため、この時間スケールを扱うのは計算時間の観点からは不可能に近い。したがって、本研究でとったアプローチである「空力弾性モードの同定」が使用できる条件に関し、

- ・旋回失速のように流れ場が自発的に変動する場合には、同定の不確かさを統計的に減らせないため使えない。
  - ・流れ場が自発的に変動しない安定な流れ場のもとでは、フラッター境界の決定に差し支えない不確かさで減衰率が求まる。
- とまとめることができる。

## 9. 結言

流体構造連成解析とモード同定法を組み合わせたフラッター解析手法によって、遷音速ファンのリグ試験において部分回転数失速点近傍で経験されたフラッターの発生領域の再現を試みた。解析結果のフラッター境界は部分的に試験結果を再現したが、低回転数側で試験結果との差異が生じた。流れ場と翼面上空力仕事を詳細に観察しフラッター発生状況を整理した後、低回転数側の差異の原因となる流れ現象とモード同定の適用できる条件について議論した。得られた知見は以下である。

- (1)フラッター境界近傍では、前縁剥離、剥離による低速流の二次流れ、前縁付近の離脱衝撃波が干渉しあう複雑な流れ場が見られる。フラッターが生じない回転数では低流量側作動点で離脱衝撃波が消失するが、フラッターが生じる回転数では衝撃波足元が翼面上にある。
- (2)翼負圧面の前縁付近に位置する離脱衝撃波の足元は励振力への寄与が大きいことから、回転数を下げた際、低流量側の作動点において離脱衝撃波が前縁剥離に切り替わり消失するタイミングが、低回転数側のフラッター境界を決定づけている。
- (3)低回転数側におけるフラッター境界の差異の原因として、75%翼高さ付近で遷音速バフェットが生じ、時間平均流れ場から衝撃波が見かけ上消失し、衝撃波足元の励振効果が失われている可能性がある。なお、数値解析においてはバフェットの有無は乱流モデル依存性が非常に大きい。
- (4)空力弾性モードはCFD中で流れ場が安定に収まる場合のみ精度良く求まる。自励空気力以外の変動空気力成分が生じる不安定な流れのもとでは使えない。

## 謝辞

本研究は、JSPS科研費14J10312、および、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基本計画による「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」の一環として独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構からの助成により実施した。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- (1) 立石敦, 渡辺紀徳, 姫野武洋, “流体構造連成とシステム同定による複合モード翼列フラッター解析手法”, 日本ガスタービン学会誌, 掲載予定
- (2) Platzler, M. F. and Carta, F. O. E., “AGARD Manual on Aeroelasticity in Axial-Flow Turbomachines Volume 1: Unsteady Turbomachinery Aerodynamics”, AGARDograph No. 298, Vol. 1, (1988)
- (3) Jeffers, J. D. and Meece, C. E., “F100 Fan Stall Flutter Problem Review and Solution”, Journal of Aircraft, Vol. 12, No. 4, (1975), pp.350-357
- (4) Isomura, K. and Giles, M. B., “A Numerical Study of Flutter in a Transonic Fan”, Journal of Turbomachinery, No. 120 (3), (1998), pp.500-507
- (5) Shibata, T. and Kaji, S. “Role of Shock Structures in Transonic Fan Rotor Flutter”. Proceedings of the 8th International Symposium of Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachinery, (1998), pp. 773-747
- (6) Vahdati, M. and Cumpsty, N. A., “The Mechanism of Aeroelastic Instability in Transonic Fans”, Proceedings of the 13th international symposium on unsteady aerodynamics, aeroacoustics and aeroelasticity of turbomachines ISUAAAAT13, (2012), ISUAAAAT13-I-5
- (7) Vahdati, M., Smith, N. H. S., and Zhao, F., “Influence of Intake on Fan Blade Flutter”, Journal of Turbomachinery, No. 137 (8), (2015), 081002
- (8) Murooka, T., Goto, S., Mizuta, I., and Kodama, H., “New Concept Design and Development of an Advanced Transonic Fan Rotor”, IGTC2007 Tokyo, (2007), TS-053
- (9) 久田俊明, 野口裕久, “非線形有限要素法の基礎と応用”, (1996), 丸善
- (10) Shima, E. and Jounouchi, T., “Role of Computational Fluid Dynamics in Aeronautical Engineering (No.12) - Formulation and Verification of Uni-Particle Upwind Schemes for the Euler Equations”. Proceedings of the 12th NAL Symposium on Aircraft Computational Aerodynamics, NAL-SP 27, (1994), pp.255-260
- (11) Spalart, P. R. and Allmaras, S. R., “A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows”, Recherche Aerospatiale, No. 1, (1994), pp. 5-21
- (12) 嶋英志, “圧縮性CFDによる低マッハ数流れ計算のための新しい陰的時間積分法”, 第25回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2011), C02-4
- (13) Giles, M. B., “Nonreflecting Boundary Conditions for Euler Equation Calculations”, AIAA Journal Vol. 28, No. 12, (1990), pp. 2050-2058
- (14) Aotsuka, M. and Murooka, T., “Numerical Analysis of Fan Transonic Stall Flutter”, ASME Paper GT2014-26703, (2014)
- (15) Rumsey, C. L., “Apparent Transition Behavior of Widely-used Turbulence Models”, International Journal of Heat and Fluid flow, Vol. 28, (2007), pp. 1460-1471
- (16) Lepicovsky, J., McFarland, E. R., Chima, R. V., Capece, V. R., and Hayden, J., “Intermittent Flow Regimes in a Transonic Fan Airfoil Cascade”, NASA TM-2002-211375, (2002)

## 2015年ガスタービン及び過給機生産統計

### ガスタービン統計作成委員会

ガスタービン統計作成委員会は、関係各社の協力を得て2015年1月から12月の間におけるガスタービン及び過給機を生産状況を調査・集計し、生産統計資料を作成した。資料提供を、陸船用ガスタービンは14社、航空用ガスタービンは3社、過給機は9社に依頼し、提供を受けた範囲で生産統計資料を纏めた。なお、過給機はすべて排気タービン方式のターボチャージャーであり、機械駆動によるものではない。

#### I. 概要

##### 1. 2015年陸船用ガスタービン生産統計概要

- (1) 生産台数および出力(図1)をみると、台数は前年の342台に対し385台で、前年に比べて43台(13%)の増加となった。出力区分別の前年との比較では、小型が8台、中型が44台の増加となり、大型は9台の減少となった。また、出力では前年の4,958MWに対し4,922MWと、前年から36MW(0.7%)の減少となった。出力区分別の前年との比較では、小型が2MW、中型が286MWの増加、大型が323MWの減少となっている。最近6年間では台数では2番目に多いが、出力では5番目となっている。2012年以降3年連続して減少していた台数・出力について、台数は増加に転じたものの、出力は僅かとはいえ、引き続き減少となっている。
- ア) 小型(735kW以下)は前年と比べて、台数は8%、出力は4%の増加で、それぞれ112台、49MWとなった。
- イ) 中型(736~22,064kW)は前年と比べて、台数は21%、出力は62%の増加で、それぞれ252台、749MWとなった。
- ウ) 大型(22,065kW以上)は前年と比べて、台数は30%、出力は7%の減少で、それぞれ21台、4,124MWとなった。
- (2) 用途別(表1, 図2, 図3)にみると、ベースロード発電用(BL)、非常用発電用(EM)、艦艇用(MM)、およびその他(MC)の用途向けで占められている。台数で最も多いのは非常用発電用(EM)の316台(82%)、出力で最も多いのはベースロード発電

用(BL)の4,265MW(87%)である。前年同様ピークロード発電用(PL)は実績なしとなった。艦艇用(MM)は前年実績なしであったが、今年は8台となった。また、前年3台実績があった実験用(XP)は今年実績なしとなった。それ以外の全体的な構成は例年と大きく変わっていない。

- ア) 非常用発電用(EM)は前年と比べて、台数は45台(17%)増加の316台、出力は68MW(16%)増加の486MWとなった。出力区分別にみると、小型は台数・出力ともに10%の増加、中型は台数で20%、出力で17%の増加となった。今年は小型・中型ともに台数・出力いずれも前年より増加となっている。
- イ) ベースロード発電用(BL)は前年と比べて、台数は7台(13%)減少の47台、出力は223MW(5%)減少の4,265MWとなり、台数・出力ともに減少した。出力区分別にみると、前年実績があった小型は今年実績なし、中型は台数で13%、出力で70%の増加、大型は台数で28%、出力で6%の減少となっている。前年は小型が増加し、中型・大型は台数は変わらず、出力は減少していたが、今年は小型が実績なし、中型は台数・出力ともに増加、大型は台数・出力ともに減少となっている。1台あたりの出力を前年と比べると、小型:前年180kW/台、今年なし、中型:前年3.6MW/台、今年5.4MW/台、大型:前年152MW/台、今年196MW/台となっており、今年実績のない小型は別として、中型・大型ともに前年より大出力化が見られる。
- ウ) 艦艇用(MM)は、前年実績なしであったが、今年は中型で8台、165MWとなった。
- エ) その他用途向け(MC)は前年と比べて、台数は増減なしの14台、出力は2MW(25%)減の7MWとなっている。
- (3) 燃料の種類別(表2, 図4, 図5)にみると、台数ではガス燃料が前年から19%増加の68台、液体燃料が前年から11%増加の317台となっている。出力ではガス燃料が前年から5%減少の4,314MW、液体燃料が前年から45%増加の608MWとなっている。台数はガス燃料・液体燃料とも前年より増加し、出力はガス燃料が減少、液体燃料は増加している。構成比率は、台数

※文中の前年との差異や増加率などの出力に関する数値は、後に示す数表に基づきkW単位で算出している。

ではガス燃料が全体の18%に対し液体燃料が82%、出力ではガス燃料が88%に対し液体燃料が12%で、この比率は前年から大きく変わらないものの、ガス燃料の割合の減少、液体燃料の割合の増加がみられる。

ア) 液体燃料では、台数・出力ともに最も多いのが重油1種(H1)で、台数は198台で燃料全体の51%、出力は265MWで燃料全体の5%をそれぞれ占めており、前年と比べると台数は2%の増加、出力は2%の減少となっている。台数で見ると、次に多いのは灯油(T)の65台で、前年と比べると20%の増加となっている。最も少ない軽油(K)は54台で、前年と比べると46%の増加となっている。出力で見ると、軽油(K)が240MW、灯油(T)が103MWとなっており、前年と比べると、軽油(K)は5倍近い大幅な増加、灯油(T)は7%の増加となっている。前々年から大幅な減少傾向にあった軽油(K)が一転して台数・出力ともに増加となり、特に出力では大幅な増加となっている。前年増加していた灯油(T)は今年も台数・出力ともに増加している。

イ) ガス燃料では、台数が最も多いのは天然ガス(GNG)の33台で、燃料全体の9%を占めている。出力でも天然ガス(GNG)が最も多く2,304MWで全体の47%を占めている。台数で見ると、次に多いのは都市ガス(GTW)の22台、以下は液化天然ガス(LNG)の13台となっている。出力で次に多いのは液化天然ガス(LNG)の1,959MW、以下は都市ガス(GTW)の51MWとなっている。前年は台数では天然ガス(GNG)、出力では液化天然ガス(LNG)が最多であったが、今年も台数・出力ともに天然ガス(GNG)が最多となっている。また、今年もガス燃料の実績はこの天然ガス(GNG)、液化天然ガス(LNG)、都市ガス(GTW)の3種で構成されており、前年実績のあった高炉ガス(GBF)、液化石油ガス(LPG)、石油プラントガス(GOG)、石炭(ガス化)ガス(GCG)は、今年も実績がなかった。

ウ) 燃料別比率を出力区分別にみると、台数の上位3種は、小型が重油1種(61%)、灯油(22%)、軽油(15%)、中型が重油1種(52%)、灯油(16%)、軽油(15%)で、大型は天然ガス(71%)、液化天然ガス(29%)の2種のみとなっている。全体では重油1種(51%)、灯油(17%)、軽油(14%)となっている。出力の上位3種は、小型が重油1種(63%)、灯油(25%)、軽油(9%)、中型が軽油(31.4%)、重油1種(31.2%)、天然ガス(15%)で、大型は天然ガス(53%)、液化天然ガス(47%)となっている。全体では天然ガス(47%)、液化天然ガス(40%)、

重油1種(5%)となっている。

エ) 2種類以上の燃料が使用できるものは、全体で50台、251MWであった。

注：燃料の集計にあたっては、2種類以上の燃料を使用する場合は、納入時点で最も多く使用する燃料で集計している。

(4) 納入地域別(表3)で見ると、台数では国内向けが前年に比べて36台増加の342台、輸出向けが7台増加の43台となった。出力では国内向けが前年に比べて672MW減少の1,952MW、輸出向けが636MW増加の2,970MWとなっている。

ア) 国内向けは総台数の89%、全出力の40%を占めており、全体に占める割合を前年と比べると、台数では変わらず、出力では13%減少となっている。また前年から台数で12%増加した一方、出力では26%減少となっている。出力区分別に台数・出力を前年と比べると、小型で8台、2MWの増加、中型で34台、194MWの増加、大型で6台、867MWの減少となっており、前年は大型の出力のみ増加したが、今年も小型・中型で台数・出力ともに増加、大型は台数・出力ともに減少となっている。さらに国内の地域別にみると、台数では、増加したのは東北(6台増)、関東(20台増)、中部(4台増)、中国(7台増)、四国(1台増)、九州(3台増)、沖縄(2台増)で、減少したのは北海道(5台減)、近畿(10台減)であった。出力では、増加したのは中部(3MW増)、九州(321MW増)で、減少したのは北海道(8MW減)、東北(647MW減)、関東(40MW減)、近畿(107MW減)、中国(327MW減)、四国(2MW減)、沖縄(30MW減)であった。地域別の構成比率は台数、出力ともに関東が最も多く、それぞれ国内全体の台数の41%、出力の63%を占めた。また、前年実績がなかった船用主機向けは8台、165MWの実績となった。

イ) 輸出は総台数の11%、全出力の60%を占めており、前年と比べた全体に占める割合は台数では変わらず、出力では13%増加となっている。前年より台数は7台、出力は636MW、それぞれ増加している。出力区分別に台数・出力を前年と比べると、小型は前年同様今年も実績なし、中型で10台、92MWの増加、大型で3台の減少、544MWの増加となっており、出力は中型・大型ともに増加している。輸出先別にみると、台数ではアジア(67%)、北米(9%)、大洋州、欧州、ロシア・NIS諸国(それぞれ7%)、中東(2%)となっている。出力ではアジア(64%)、ロシア・NIS諸国(21%)、北米(9%)、

大洋州（5%）、中東（0.8%）、欧州（0.2%）となっている。台数・出力ともにアジア向けが最も多くなっているのは例年どおりである。アジア向けは前年と比べて、台数は15台、出力は42MW、それぞれ増加となっている。

- (5) 被駆動機械別（表4、図6、図7）では、これまでと同様に、台数・出力とも発電機（G）がほとんどを占め、全体に占める割合は台数で96%、出力で97%であった。発電機（G）について出力区分別にみると、小型・中型では台数・出力ともに前年に比べて増加しているが、大型では台数・出力ともに減少している。それぞれ前年と比べると、台数では小型が9%、中型が19%の増加、大型が28%の減少である。出力では小型が5%、中型が27%の増加、大型が6%の減少となっている。水ポンプ（W）は全体で、前年に比べて3台、0.7MWの減少となっており、出力区分別にみると、小型は1台、0.3MWの減少、中型が2台、0.4MWの減少となっている。その他の被駆動機械では、前年実績がなかった推進機または回転翼（PRR）が中型で8台、165MWの実績となった。
- (6) 出力区分別（表5）を前年と比べると、小型は全体で台数・出力ともに増加している。さらに詳細な区分別（0～146kW、147～367kW、368～735kW）にみると、0～146kWでは3台の増加、0.1MWの減少、147～367kWでは3台、0.4MWの増加、368～735kWでは2台、2MWの増加となった。中型も全体で台数・出力ともに増加したが、さらに詳細な区分別（736～4,412kW、4,413～10,296kW、10,297～16,180kW、16,181～22,064kW）にみると、736～4,412kWでは18台、4MWの増加、4,413～10,296kWでは17台、98MWの増加、10,297～16,180kWでは台数は変わらず、0.6MWの減少、16,181～22,064kWでは9台、184MWの増加となった。大型は全体で台数・出力ともに減少し、さらに詳細な区分別（22,065～44,129kW、44,130kW以上）にみると、22,065～44,129kWで10台、315MWの減少、44,130kW以上では、1台の増加、8MWの減少となった。台数の多い順では、736～4,412kW、368～735kW、4,413～10,296kWとなっており、1・2番目は前年から変わっていないが、前年は6番目だった4,413～10,296kWが今年は3番目に多くなっている。また出力の多い順では44,130kW以上、736～4,412kW、22,065～44,129kWとなっており、前年とは2番目と3番目が入れ替わっている。
- (7) 発電用ガスタービン（表6）の台数と出力を前年と比較すると、事業用は、国内では4台、1,297MWとなり、前年と比べて3台、706MWの減少となった。輸出では8台、319MWとなり、前年と比べて4台、

1,555MWの減少となった。自家用は、国内が316台、483MWとなり、前年と比べて30台の増加、86MWの減少となった。輸出は35台、2,651MWとなり、前年と比べ11台、2,191MWの増加であった。事業用は国内外とも前年に比べて減少している。自家用は国内では台数は増加したものの、出力では減少し、輸出は台数・出力ともに増加が顕著であった。

- (8) 陸船用ガスタービン向けモジュールは、前年に引き続き2015年も実績がなかった。
- (9) ここ数年続いていた台数の減少傾向は止まったものの、出力は微減であった。一方で海外自家用が今年度増加となっている。

## 2. 2015年航空用ガスタービン生産統計概要

- (1) ターボジェットエンジン／ターボファンエンジンの新規製造状況については、昨年と同様にP-1固定翼哨戒機用のF7-10のみであり、製造台数は6台、合計推力は344kNであった。製造台数は昨年の9台から減少した。その他に国内で開発されたターボファンエンジンとして、HondaJetに搭載されているHF120があり、2014年に製造が開始されている。HF120エンジンは米国GEホンダ・エアロ・エンジンズ社製であり、米国内で製造されているため、本統計には含まれていない。（表7、図8参照）
- (2) 前年同様にターボプロップエンジンの新規製造は無く、ターボシャフトエンジンの新規製造状況は、MCH-101（掃海輸送用ヘリコプター）およびCH-101（南極輸送支援ヘリコプター）用のRTM322が9台、SH-60J/K、UH-60J/JA、およびAH-64D用のT700が10台で、合計台数は19台、合計出力は30,571kWであった。（表8、図9参照）
- (3) 民間航空機用エンジン向けモジュールの新規製造状況については、過去5年間、航空輸送需要の回復に伴い増加傾向にあり、2015年は1,767台となり過去最高を更新した。従来機種用モジュール（V2500およびCF34）が高い生産台数を維持しているだけでなく、新機種用モジュール（Trent1000およびGEnx）の量産が順調に増えている。また2014年のA350用エンジンであるTrentXWBの燃焼器モジュールの製造開始に続き、2015年はV2500の後継機種として開発されたA320neo用PW1100G-JMエンジンのファンモジュールと低圧圧縮機モジュールの製造が開始された。（図10参照）
- (4) 日本の航空用ガスタービン生産全体の動向としては、近年防衛省向けエンジンの製造台数はあまり変化がないが、将来開発プロジェクトとしてXF5が開発されており、ステルス性能を持った先進技術実証機「X-2」に搭載され、2016年4月に初飛行を終えた。一方民間

航空機用エンジン向けモジュールの製造台数については、増加傾向にあり、今後世界的な航空機需要の増加<sup>(1)</sup>に伴い、Trent1000, GENx, 新機種TrentXWB, PW1100G-JMのモジュール製造、部品製造が本格化することが予測される。更にビジネスジェット機であるGlobal7000及びGlobal8000に搭載されるPassport 20 (2016年5月にエンジン型式承認を取得)や次世代大型民間輸送機B777Xシリーズに搭載されるGE9X等、新機種エンジンの国際共同開発が複数行われている状況<sup>(2)</sup>であり、今後も民間航空機用エンジン関連の占める割合が増加する傾向は続くと思われる。

出典(1): (財)日本航空機開発協会「民間航空機の需要動向予測」

出典(2): 一般社団法人 日本航空宇宙工業会「平成28年版 日本の航空宇宙工業」, ISSN 0910-1527

### 3. 2015年過給機生産統計概要

(1) 生産台数(表9)については、主に自動車向けに使用される圧縮機翼車外径100mm以下のClass 1 過給機生産台数は2010年以降増加を続ける世界自動

車生産台数を背景に、前年比6.8%増の約441万台となり、6年連続の増加となった。主に建設機械、陸上発電設備、小型船舶用機関等向けに使用される圧縮機翼車外径101mm～200mmのClass 2 過給機生産台数は、前年比1.5%の増加で約3.6万台となった。主に船舶用機関向けに使用される圧縮機翼車外径201mm以上のClass 3 以上の過給機については、Class 3, 及びClass 5において、それぞれ4.2%増, 33%増となっているものの、Class 4, 6, 7, 8, 9の大幅な減少によって総じて11%減少となり、約1.5千台となった。日本国内での新造船竣工量は2011年をピークに減少傾向となっており、この影響が大きいと考えられる。

(2) 生産型式数(表10, 図11)は2015年には新規追加及び型式廃止がなく、昨年同様の183型式(全Class含む)であった。これは昨年までに追加された新型式によってIMO NOx第三次規制への対応が一段落した為と考えられ、新型式生産台数も増加傾向にある。今後も各種規制に合わせて高度な環境技術を持つ日本メーカー製品の過給機のラインアップは変化していくと考えられる。

## II. 統計

### 1. 陸船用ガスタービン

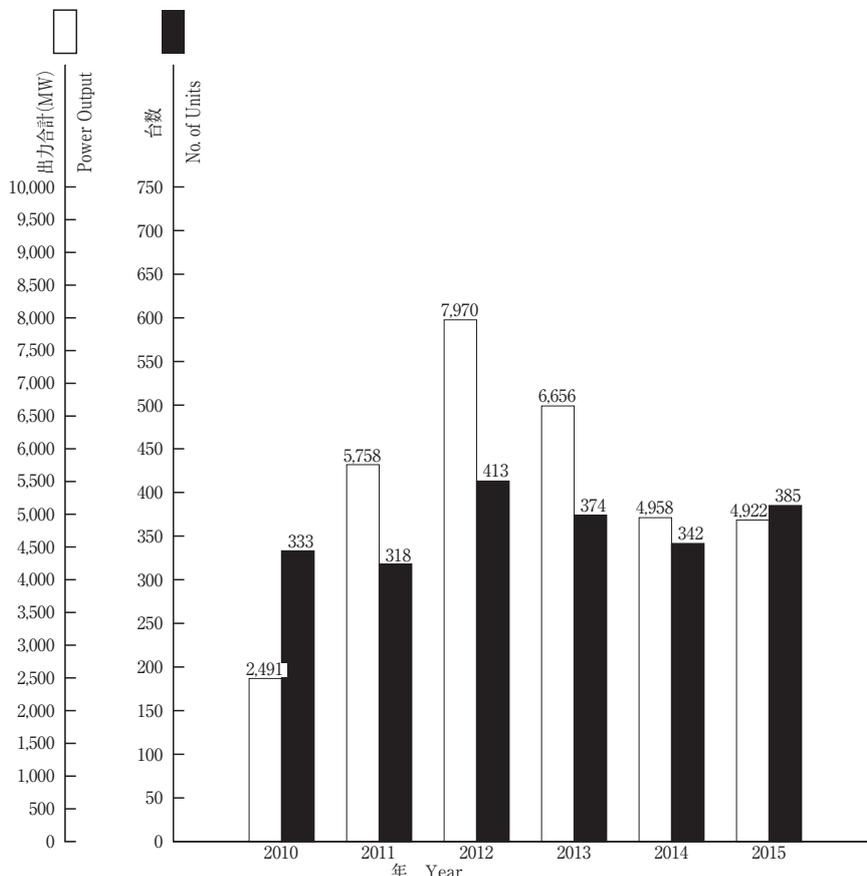


図1 陸船用ガスタービン

表1 2015年用途別生産台数及び出力 (kW)

用途 Application	区分 Code	小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全出力 Total	
		台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)
ベースロード発電用 Generator Drive for Base Load	BL	0	0	26	140,738	21	4,124,320	47	4,265,058
ピークロード発電用 Generator Drive for Peak Load	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
非常用発電用 Generator Drive for Emergency	EM	100	45,238	216	440,320	0	0	316	485,558
商船用 Merchant Marine	M	0	0	0	0	0	0	0	0
艦艇用 Military Marine	MM	0	0	8	164,864	0	0	8	164,864
石油化学プロセス用 Oil Refinery and Chemical Process	OR	0	0	0	0	0	0	0	0
その他のプロセス用 Miscellaneous Chemical Process	PR	0	0	0	0	0	0	0	0
実験用 Experimental	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
空調用 Air Conditioning	ACD	0	0	0	0	0	0	0	0
その他 Miscellaneous	MC	12	3,433	2	3,120	0	0	14	6,553
合計 Total		112	48,671	252	749,042	21	4,124,320	385	4,922,033

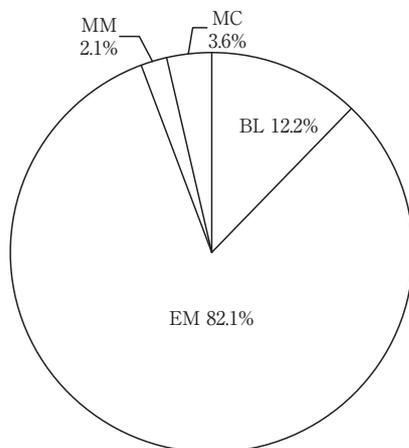


図2 2015年用途別生産台数割合 (%)

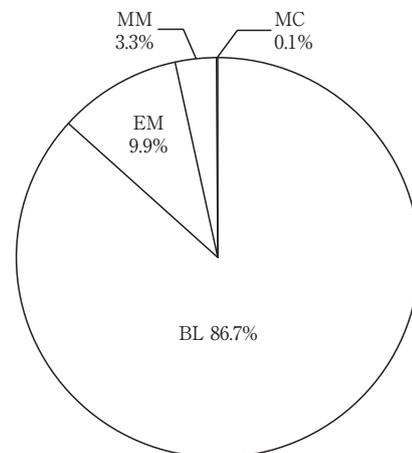


図3 2015年用途別出力割合 (%)

表2 2015年燃料別生産台数及び出力 (kW)

区分		Size	小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全出力 Total	
			台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)
燃料種類 Kind of Fuel		コード Code	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)
ガス燃料 Gaseous Fuel	液化天然ガス Liquefied Natural Gas	LNG	0	0	7	29,200	6	1,930,200	13	1,959,400
	天然ガス Natural Gas	GNG	0	0	18	109,658	15	2,194,120	33	2,303,778
	高炉ガス Blast Furnace Gas	GBF	0	0	0	0	0	0	0	0
	都市ガス Town Gas	GTW	2	1,200	20	50,000	0	0	22	51,200
	液化石油ガス	LPG	0	0	0	0	0	0	0	0
	石油プラントオフガス	GOG	0	0	0	0	0	0	0	0
	石炭(ガス化)ガス	GCG	0	0	0	0	0	0	0	0
ガス燃料 小計 Sub Total			2	1,200	45	188,858	21	4,124,320	68	4,314,378
液体燃料 Liquid Fuel	灯油 Kerosene	T	25	12,105	40	91,300	0	0	65	103,405
	軽油 Gas Oil	K	17	4,580	37	235,134	0	0	54	239,714
	重油1種 Heavy Oil No.1	H1	68	30,786	130	233,750	0	0	198	264,536
	液体燃料 小計 Sub Total			110	47,471	207	560,184	0	0	317
その他 Miscellaneous Fuel		MF	0	0	0	0	0	0	0	0
合計 Total			112	48,671	252	749,042	21	4,124,320	385	4,922,033

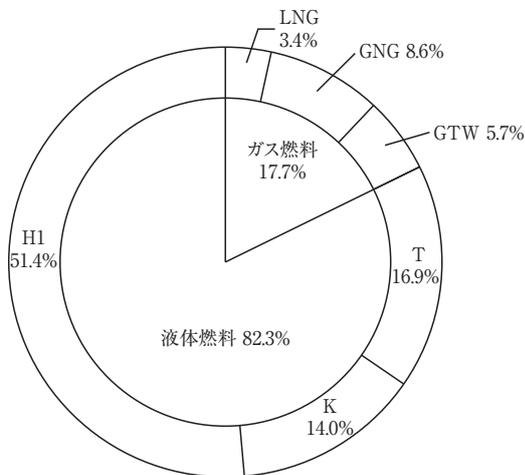


図4 2015年燃料別生産台数割合 (%)

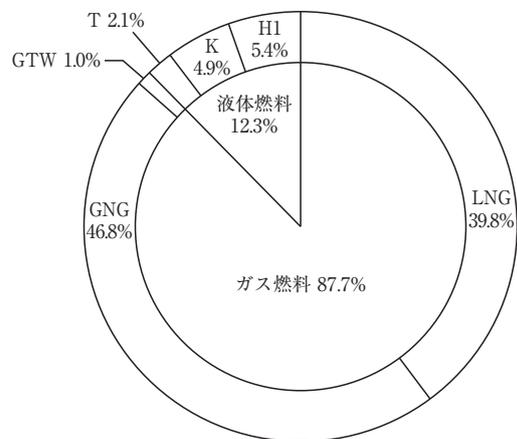


図5 2015年燃料別出力割合 (%)

表3 2015年地域別納入台数及び出力 (kW)

地域 Location		区分 Size	小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全出力 Total	
			台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)
Domestic Use	北海道 Hokkaido		5	2,638	3	4,000	0	0	8	6,638
	東北 Tohoku		6	2,600	16	22,930	0	0	22	25,530
	関東 Kanto		36	15,628	102	233,110	3	975,000	141	1,223,738
	中部 Chubu		26	11,878	26	39,580	0	0	52	51,458
	近畿 Kinki		12	5,390	43	98,420	0	0	55	103,810
	中国 Chugoku		11	4,470	10	18,600	0	0	21	23,070
	四国 Shikoku		8	2,568	0	0	0	0	8	2,568
	九州 Kyushu		7	2,900	14	18,200	1	321,800	22	342,900
	沖縄 Okinawa		1	600	4	6,400	0	0	5	7,000
	艦艇用 Military Marine		0	0	8	164,864	0	0	8	164,864
国内向け 小計 Sub Total			112	48,671	226	606,104	4	1,296,800	342	1,951,575
Export For	北米 North America		0	0	3	4,670	1	268,760	4	273,430
	中南米 South Central America		0	0	0	0	0	0	0	0
	アジア Asia		0	0	19	125,808	10	1,769,620	29	1,895,428
	大洋州 Oceania		0	0	0	0	3	137,040	3	137,040
	欧州 Europe		0	0	3	5,070	0	0	3	5,070
	ロシア・NIS諸国 Russia・NIS		0	0	1	7,390	2	627,400	3	634,790
	中東 Middle East		0	0	0	0	1	24,700	1	24,700
	アフリカ Africa		0	0	0	0	0	0	0	0
輸出向け 小計 Sub Total			0	0	26	142,938	17	2,827,520	43	2,970,458
合計 Total			112	48,671	252	749,042	21	4,124,320	385	4,922,033

表4 2015年被駆動機械別生産台数及び出力 (kW)

区分 Size	コード Code	小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全出力 Total	
		台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)
被駆動機械 Driven Machinery									
発電機 Electric Generator	G	106	45,308	242	581,058	21	4,124,320	369	4,750,686
水ポンプ Water Pump	W	6	3,363	2	3,120	0	0	8	6,483
推進機または回転翼	PRR	0	0	8	164,864	0	0	8	164,864
合計 Total		112	48,671	252	749,042	21	4,124,320	385	4,922,033

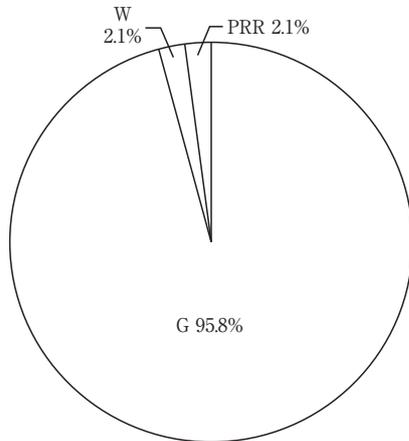


図6 2015年被駆動機械別生産台数割合 (%)

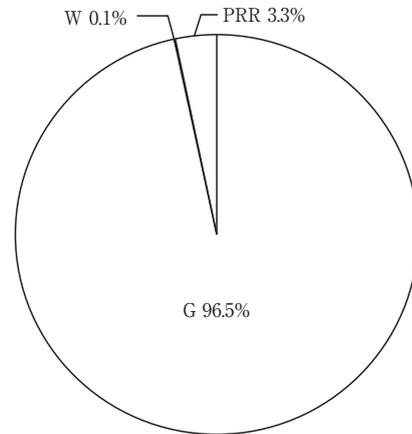


図7 2015年被駆動機械別出力割合 (%)

表5 2015年出力区分別生産台数及び出力 (kW)

出力区分 (kW) Units Output		台数 Units	出力 Output (kW)
小型 Small Unit 0~735kW	0~146	6	70
	147~367	24	5,448
	368~735	82	43,153
	小計 Sub Total	112	48,671
中型 Medium Unit 736~22,064kW	736~4,412	213	371,040
	4,413~10,296	28	165,898
	10,297~16,180	1	10,400
	16,181~22,064	10	201,704
	小計 Sub Total	252	749,042
大型 Large Unit 22,065kW~	22,065~44,129	6	207,120
	44,130~	15	3,917,200
	小計 Sub Total	21	4,124,320
合計 Total		385	4,922,033

表6 2015年発電用ガスタービン用途別生産台数及び出力 (kW)

区分 Size			小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全出力 Total	
用途 Application	コード Code	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	
国内 事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	4	1,296,800	4	1,296,800
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Public Use 国内事業用 小 計 Sub Total			0	0	0	0	4	1,296,800	4	1,296,800
国内 自家用	ベースロード発電用	BL	0	0	10	34,200	0	0	10	34,200
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	100	45,238	206	403,920	0	0	306	449,158
Domestic/Private Use 国内自家用 小 計 Sub Total			100	45,238	216	438,120	0	0	316	483,358
国内合計 Domestic Use Total			100	45,238	216	438,120	4	1,296,800	320	1,780,158
輸出 事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	8	319,460	8	319,460
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Public Use 輸出事業用 小 計 Sub Total			0	0	0	0	8	319,460	8	319,460
輸出 自家用	ベースロード発電用	BL	0	0	16	106,538	9	2,508,060	25	2,614,598
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	10	36,400	0	0	10	36,400
For Export/Private Use 輸出自家用 小 計 Sub Total			0	0	26	142,938	9	2,508,060	35	2,650,998
輸出合計 For Export Total			0	0	26	142,938	17	2,827,520	43	2,970,458
事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	12	1,616,260	12	1,616,260
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
Public Use 事業用 合計 Total			0	0	0	0	12	1,616,260	12	1,616,260
自家用	ベースロード発電用	BL	0	0	26	140,738	9	2,508,060	35	2,648,798
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	100	45,238	216	440,320	0	0	316	485,558
Private Use 自家用 合計 Total			100	45,238	242	581,058	9	2,508,060	351	3,134,356
総 計 Grand Total			100	45,238	242	581,058	21	4,124,320	363	4,750,616

Note : Code Explanation BL : for Base Load PL : for Peak Load EM : for Emergency

2. 航空用ガスタービン

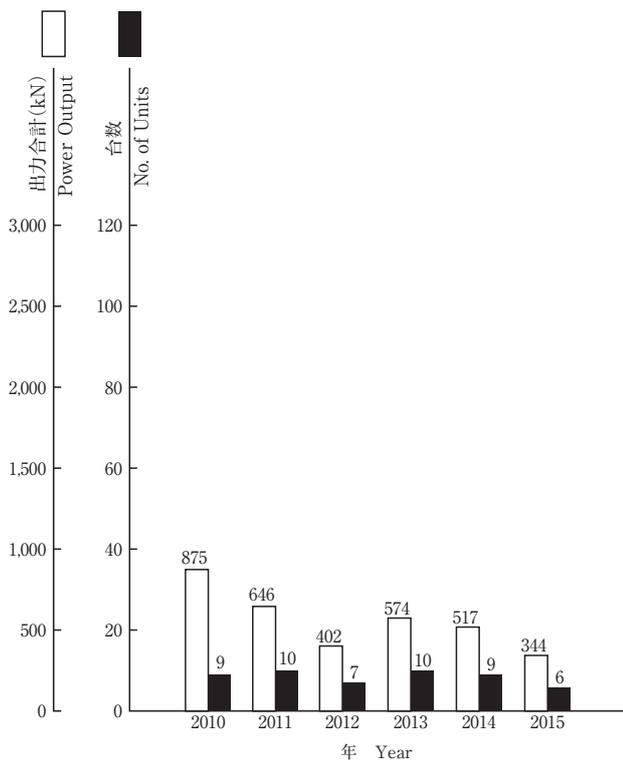


図8 ターボジェットエンジン／ターボファンエンジン

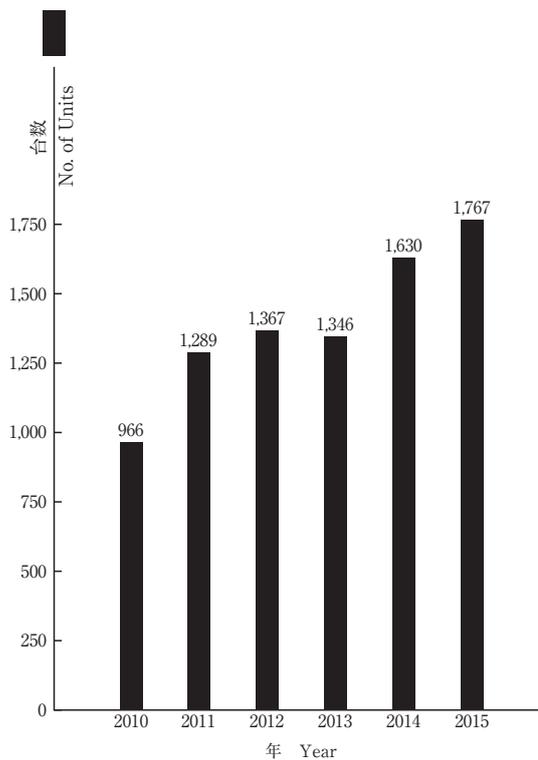


図10 民間航空エンジン用モジュール

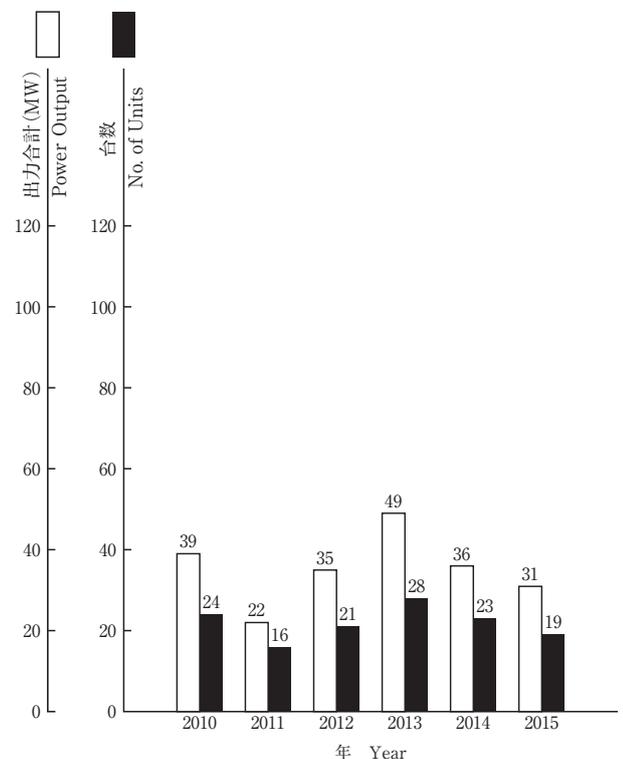


図9 ターボシャフトエンジン／ターボプロップエンジン

表7 2015年ターボジェットエンジン／ターボファン・エンジン生産台数及びスラスト合計 (kN)

生産台数 Number of Units	6	スラスト合計*1 Thrust	344
-------------------------	---	--------------------	-----

※1 海面上静止最大スラスト  
Maximum Thrust at Sea Level Static Condition

表8 2015年ターボシャフトエンジン／ターボプロップ・エンジン生産台数及び出力 (kW)

区分 Size	0~735kW		736kW~		全出力	
	台数 Units	出力*2 Output (kW)	台数 Units	出力*2 Output (kW)	台数 Units	出力*2 Output (kW)
固定翼機 Fixed Wing Aircraft	0	0	0	0	0	0
ヘリコプタ用 Helicopter	0	0	19	30,571	19	30,571
補助機関駆動用 Aux. Drive Units	0	0	0	0	0	0
合計 Total	0	0	19	30,571	19	30,571

※2 海面上静止常用出力  
Normal Output at Sea Level Static Condition

3. 過給機

表9 クラス別の年間生産台数

区分 Class	Size 圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	年間生産台数					
		2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
Class 1	0~ 100	約345万	約354万	約365万	約395万	約413万	約441万
Class 2	101~ 200	37,723	45,680	32,774	29,930	35,294	35,810
Class 3	201~ 300	482	643	538	574	641	668
Class 4	301~ 400	134	111	265	260	310	183
Class 5	401~ 500	110	57	73	74	161	214
Class 6	501~ 600	231	294	221	195	255	241
Class 7	601~ 700	282	362	274	150	232	184
Class 8	701~ 800	50	55	58	33	46	35
Class 9	801~ 900	150	214	130	94	81	11
Class 10	901~1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001~	3	24	0	0	0	0
合計 Total*		39,165	47,440	34,333	31,310	37,020	37,346

表10 クラス別の型式数

区分 Class	Size 圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	型式数					
		2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
Class 1	0~ 100	62	64	64	64	55	55
Class 2	101~ 200	29	29	29	29	29	29
Class 3	201~ 300	16	18	18	18	18	18
Class 4	301~ 400	16	15	17	18	18	18
Class 5	401~ 500	12	10	16	14	16	16
Class 6	501~ 600	12	14	15	15	16	16
Class 7	601~ 700	14	17	18	15	17	17
Class 8	701~ 800	6	5	7	5	5	5
Class 9	801~ 900	11	8	10	10	9	9
Class 10	901~1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001~	2	1	1	0	0	0
合計 Total		118	117	131	124	128	128

Class 1 の台数が多いため、Class 2 ~ 11の合計を示す。  
As the Production number of Class1 is too many, Total number only includes Class 2 to 11.

2012年、2013年に追加となったClass 9の型式を誤ってClass 8として集計していたことが判明した為、今回の集計より訂正致しました。

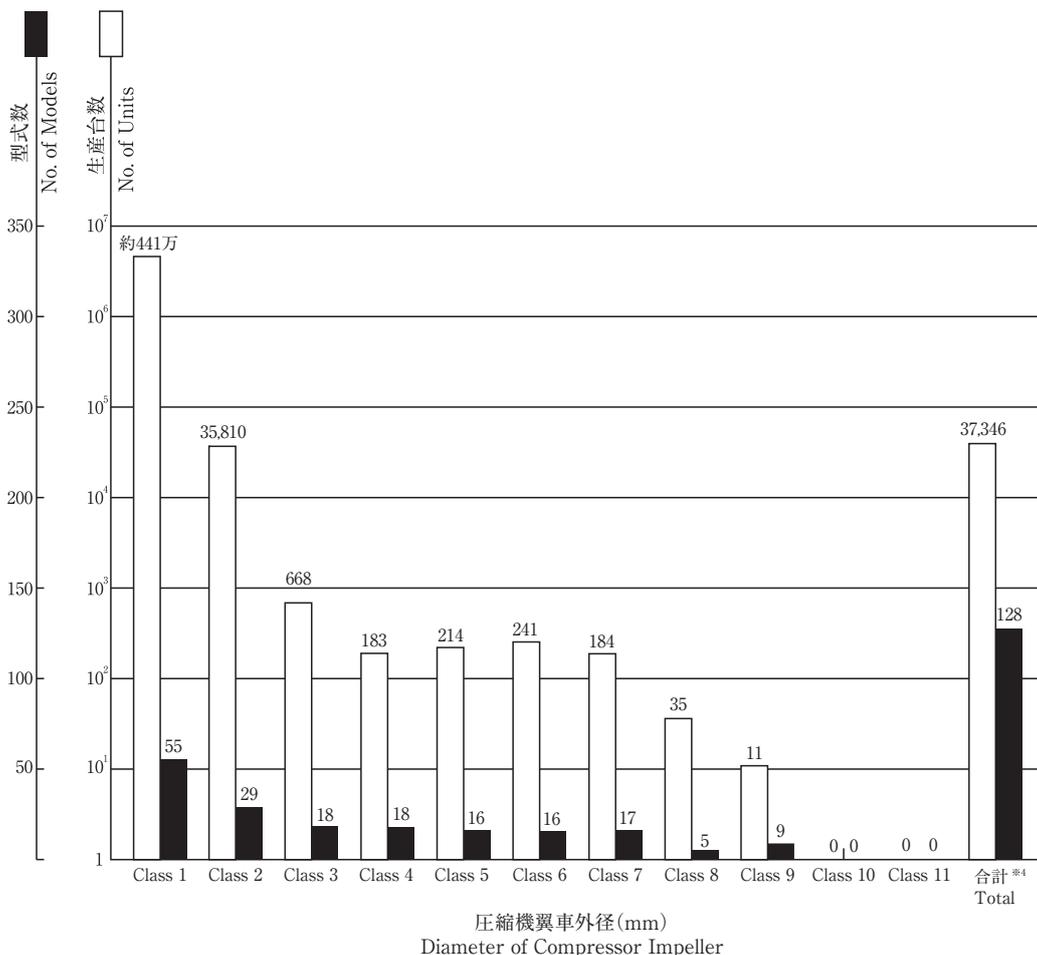


図11 2015年過給機生産台数及び型式数

## 第1回日本ガスタービン学会女性参画推進イベント開催報告

川岸 京子  
KAWAGISHI Kyoko

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互いに支え、刺激し合えるネットワークを作ることを目的として今年度「女性参画推進委員会」を立ち上げました。その第1回目活動として、2016年5月24日(火)に、第1回日本ガスタービン学会女性活躍推進イベントが(株)IHI本社ビルにて開催されました。参加者は29名で、女性24名のほか、男性5名の方にもご参加いただきました。テーマは「GT業界の各社における女性活躍推進の取り組み紹介と意見交換」です。取り組み紹介では、参加者全員の自己紹介のあと、川崎重工業(株)葉狩智子さん、三菱日立パワーシステムズ(株)森川朋子さん、国立研究開発法人物質・材料研究機構川岸京子、(株)本田技術研究所 川澄郁絵さん、(株)東芝猪亦麻子さんら女性技術者から各ご所属機関での制度の紹介やワークライフバランスに関するご自身の体験談等をご講演いただきました。その後、(株)IHI人事部 三樹あずささんに(株)IHIでの女性活躍推進に関する取組について具体的な事例を挙げながらご紹介いただきました。幅広い年代の講演者による話題に共通した課題として、女性の絶対数が少ないがために有用な情報が得られない、

先輩のモデルケースがない、などの状況の中、いかに情報を入手し制度を利用するかという問題があり、これを解決するためのネットワーク作りへの取り組みが紹介されました。また、支援システムの整備ばかりでなく本人の意識改革が必要であるという意見もありました。職場は違って共通する問題も多く、それぞれご自身の立場での気づきが得られたようです。参加者の方々にとりまして有意義な意見交換の場となっておりますら幸いです。

講演会の後は、会場を移動し、立食パーティ形式での懇親会を催し、参加者同士の交流を深めました。時のたつのも忘れて話しに花が咲き、楽しいひと時となりました。

女性活躍推進イベントは、今年度は第2回を関西で開催する予定です。今後も会社の枠を超えた女性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・検討していきたいと考えております。

最後に、会場の提供及び懇親会についてご協力を頂いた(株)IHIの関係者各位に深く感謝いたします。

(女性参画推進委員会委員)



講演会の様子



懇親会の様子

# 訃報

ご逝去の報に接し、謹んで哀惜の意を表すとともに、ご冥福をお祈り申し上げます。

名誉会員・元会長 酒井 俊道 氏  
2016年4月6日逝去（享年79歳）

## [本会関係略歴]

入会 1972年6月  
理事 (9,10,13,14,16,17,19,20,25期副会長,26期会長)  
監事 (28,29期)  
評議員 (3,4,11,12,15,18,21,22,23,24期)  
2007年4月名誉会員

## [略歴]

1959年3月	慶應義塾大学工学部機械工学科卒業
1964年3月	慶應義塾大学大学院博士課程機械工学専攻修了
1964年4月	慶應義塾大学助手
1968年9月	工学博士（慶應義塾大学）
1970年1月	東京理科大学助教授
1978年4月	東京理科大学教授
2003年3月	同大定年退職
2003年4月	同大嘱託教授
2003年11月	東京理科大学名誉教授

# 追悼

## 酒井俊道先生を偲んで

本阿彌 眞治\*1

酒井俊道先生は、昭和34年3月に慶應義塾大学工学部機械工学科を卒業され、その後大学院博士課程を修了され、引き続き、昭和44年12月まで助手を務められました。昭和45年1月に東京理科大学工学部機械工学科に助教授として赴任し、平成14年3月に定年を迎えるまで32年間にわたり奉職されました。先生は、学生時代に日本ガスタービン学会元会長であられた故渡部一郎先生の御指導を受け、東京理科大学では、東京工業大学を定年退職され理科大学へ移られた草間秀俊先生と共にターボ機械の研究に取組まれ、晩年には英国パース大学のWhitfield先生と斜流圧縮機とディフューザの流動に関する共同研究を進められました。このように、生涯、ターボ機械の研究に携わりました。

併せて、日本機械学会はじめ日本ガスタービン学会などで学会活動をされました。特に、日本ガスタービン学会では、評議員、理事、監事、そして、副会長ならびに会長職を務め、学会の活動に精力的に取組まれました。生涯、ターボ機械の研究開発を通して、この分野ばかり

でなく多くの分野に優れた人材を送り出しました。

小生にとって、先生は慶應義塾大学渡部研究室の先輩であり、東京理科大学では機械工学科の教員仲間の先輩でした。日本ガスタービン学会でも、講演会や委員会でご一緒し、50年の長きにわたるお付き合いをさせていただきました。ですから、先生には、渡部研究室のゼミ合宿や学会出張の折、研究面でのお話や日々の生活に関することまで、多くのことを教えて頂きました。併せて、お祖父様から日々、漢文の論語を素読するよう指導を受けた幼少期の御話などもお聞きしたことがあります。

先生は、弦楽器のピオラを演奏され、音楽仲間と合奏も楽しまれました。又、釣り仲間と魚釣りに出掛け、釣った魚を3枚に下ろし、皆と一緒に日本酒を楽しむ一面もありました。このように多くの研究仲間、音楽仲間、釣り仲間にも恵まれた先生でした。

先生の訃報に接して、先生の穏やかな語り口と柔和な笑みを思い起こしました。先生の御冥福を謹んでお祈り申し上げます。 合掌

原稿受付 2016年6月29日

\*1 東京理科大学 名誉教授

## 第44回日本ガスタービン学会定期講演会(酒田)・見学会のお知らせ(予告)

第44回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会を以下のように開催します。プログラム他詳細は、決まり次第、学会ホームページに掲載いたします。また、9月号にも掲載予定です。

**主催**：公益社団法人 日本ガスタービン学会  
**協賛**：協賛団体は日本ガスタービン学会ウェブサイト (<http://www.gtsj.org/>) をご覧ください。

### 開催日：

- ・講演会 2016年10月26日(水)、27日(木)
- ・見学会 2016年10月28日(金)

### 開催場所：

- ・ホテルリッチ&ガーデン酒田 山形県酒田市若竹町1-1-1  
<http://www.richgarden.co.jp/>  
Tel：0234-26-1115

### 講演会：

- ・一般講演：空力、燃焼、システム、伝熱、材料、タービン等
- ・企画講演：系統安定化対応先進ガスタービンの実現に向けたシミュレーション技術開発の最前線(予定)
- ・特別講演：講師選定中

### 参加登録費(税込)：

- ・会員・協賛団体会員 14,040円(ただし、学生は論文集有りで4,320円、論文集無しで1,080円)
- ・会員外 19,440円(ただし、学生は論文集有りで7,560円、論文集無しで4,320円)

### 宿泊：

会期中のご宿泊は、講演会場である「ホテルリッチ&ガーデン酒田」を推奨します。  
参加者向け特別価格での予約方法は、学会ウェブサイト (<http://www.gtsj.org/>) でご案内しております。

### 懇親会：

- ・第1日目の講演会終了後、講演会場(ホテルリッチ&ガーデン酒田)にて懇親会を開催いたします。  
懇親会参加費(税込)：3,240円(予定)

### 学生による優秀発表の表彰：

- ・学生による「研究報告」で、講演申込時にエントリーがあったものの中から、特に優秀な発表に対して表彰を行います。

### 見学会：

- ・日時：10月28日(金)
- ・見学先：酒田共同火力発電(株)等の見学を予定しています。
- ・定員：45名程度、先着順、講演会参加登録者に限ります。
- ・参加費：6,480円(予定)

### 参加申込方法：

- ・プログラム等詳細決定次第、学会ウェブサイト (<http://www.gtsj.org/>) に掲載いたします。  
ウェブサイトから登録されるか、9月号掲載の参加申込書に必要事項をご記入の上、学会事務局宛にお申込み下さい。  
参加登録は、受付の混乱を避けるため、事前登録をお願いします。講演者も参加登録をお願いします。

### 関連情報：

- ・講演会の前日(10月25日(火))にガスタービン市民フォーラム(会場：鶴岡市先端研究産業支援センター、共催：鶴岡工業高等専門学校)を計画しています。参加自由・無料の予定です。  
こちらも併せてご予約ください。

## 第28回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

近年、ガスタービン技術の発展にはめざましいものがあり、航空機用ジェットエンジンをはじめ大規模発電やコジェネレーション用や船舶用エンジンとして幅広く用いられています。ガスタービンは高出力・高効率であることやNOx排出を抑えることが比較的容易であることから、環境に優しい原動機として今日の人類のエネルギー問題に寄与する大変重要な役割を担っております。また、将来の地球温暖化防止に向けてガスタービンの更なる高効率化・大容量化が強く求められており、多岐にわたる研究・開発分野で若い技術者の活躍が期待されます。このような背景から、学生及びガスタービン開発に携わる新人技術者を対象とした標記シンポジウムの開催を計画しました。会員・非会員を問わず積極的にご参加下さい。

1. 日時： 2016年9月8日(木)、9月9日(金)
2. 場所： 川崎重工業株式会社 明石工場 新総合事務所1F ホール1 (明石市川崎町1番1号)
3. プログラム： 8日(木) 9:30- 受付 (新総合事務所1F ホール1)  
 10:00-10:10 開会の挨拶  
 10:10-11:40 「ガスタービン概論」 石坂浩一 (三菱重工業)  
 11:40-13:00 昼食 (新総合事務所1F ホール1)  
 13:00-14:30 「ガスタービンと流体工学」 坂元康朗 (三菱重工業)  
 14:40-15:30 特別講演「川崎重工業におけるガスタービンの開発」(仮題)  
 武 浩司 (川崎重工業)  
 15:30-17:15 明石工場 GT組立工場見学 (官学参加者, 予定)  
 明石工場 エネルギーセンター見学 (企業参加者, 予定)  
 17:30-19:00 懇親会 (西食堂)
- 9日(金) 9:00- 受付 (新総合事務所1F ホール1)  
 9:20-10:50 「ガスタービンと伝熱工学」 葉狩智子 (川崎重工業)  
 11:00-12:30 「ガスタービンと燃焼工学」 小田剛生 (川崎重工業)  
 12:30-13:30 昼食 (新総合事務所1F ホール1)  
 13:30-15:00 「ガスタービンと材料工学」 上村好古 (三菱日立パワーシステムズ)  
 15:10-16:40 「ガスタービンと制御工学」 佐藤 毅 (川崎重工業)  
 16:40-16:50 アンケート記入  
 16:50-17:00 閉会の挨拶

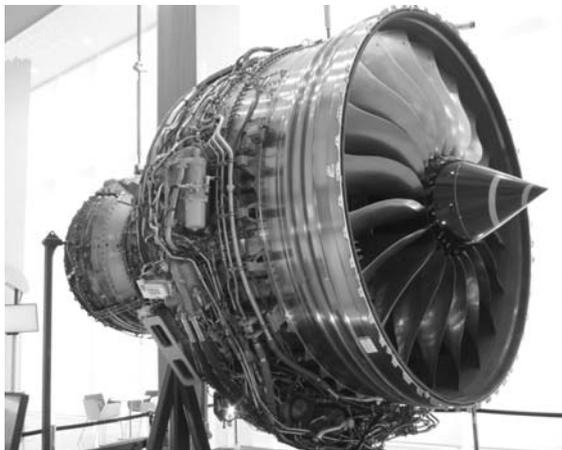
注：都合により講演順番が入れ替わる場合もございますので、最終プログラムはホームページにてご確認ください。

4. 定 員： 60名
5. 対象者：大学、大学院、高等専門学校在籍者、ならびに技術者（ガスタービン初心者）
6. 参加費（税込）：学生（会員：¥4,320、非会員：¥7,560）、社会人（会員：¥10,800、非会員：¥19,440）
7. 懇親会：参加費 無料
8. 受講証の発行：2日間の講義を受講された方には、「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行します。
9. 申込方法：下記の申込書に必要事項を明記し、学会事務局宛に、郵便、ファクシミリ、電子メールのいずれかにより2016年8月24日(水)（必着）までに、お申し込み下さい。学会ホームページからも申込ができます。
10. 参加費の支払：当日支払いですが、事前の支払いも受け付けます。事前に支払う場合は、その旨を学会事務局にファクシミリ、電子メール、電話等でお知らせ下さい。

注：開催場所案内図及び詳細については当学会ホームページをご覧ください。(http://www.gtsj.org/)

- 参加費には、テキスト（ガスタービン工学）代金が含まれております。
- 交通：JR「西明石駅」東改札口を出て南側へ徒歩8分程度で明石工場西門、西門から徒歩2分程度で新総合事務所に着きます。明石工場西門へはJRのご利用が便利です。また、駐車場はございませんので、公共交通機関をご利用下さい。
- 明石工場見学の際、歩いて移動する箇所が含まれており、雨天時には傘をお持ち下さい。また、安全のため、ヒールの高い靴を履いての明石工場入場はご遠慮下さい。
- 明石工場見学にはカメラおよびカメラ付携帯電話の持込は出来ませんので予めご了承下さい。
- 昼食：実費弁当申込を承ります（飲物付きで700円程度です）。

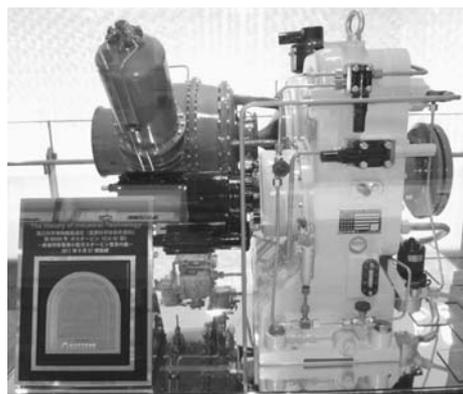
- 宿泊施設：斡旋はいたしませんので必要な方は各自手配して下さい。
- 当日の事務局での電話の取り次ぎはいたしません。緊急の用件が発生した場合、学会事務局の所持携帯（TEL：080-1066-8938）まで連絡をお願いします。
- ご欠席の場合は必ず事前に学会事務局までご連絡下さい。（TEL：03-3365-0095）
- 学会事務局：（公社）日本ガスタービン学会 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13-402
- 振込先：銀行（みずほ銀行新宿西口支店 普通預金1812298） 郵便振替（00170-9-179578）



Rolls-Royce Trent1000  
(新総合事務所1Fにて展示)



Kawasaki L30A カットモデル  
(新総合事務所1Fにて展示)



Kawasaki S1A-01  
(新総合事務所2Fにて展示)

## 第28回ガスタービン教育シンポジウム参加申込書

(2016年9月8日, 9月9日)

公益社団法人日本ガスタービン学会 行

FAX：03-3365-0387 TEL：03-3365-0095 E-mail：gtsj-office@gtsj.org

氏名		性別	男 ・ 女
所属		学年, 入社年度	
連絡先	〒		
TEL		FAX	
E-mail		GTSJ会員番号 (No. )	非会員
懇親会	出 ・ 欠	昼食申込	8日 ・ 9日

注) 外国籍の参加者には、申込書に記載した情報の他に別途、パスポート番号などを伺うことがございます。

詳しくは、申込受付後にご連絡いたします。

申込締切日： 2016年8月24日(水) (必着)

## ○ 本会協賛行事 ○

主催学協会	会合名	共催/協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本機械学会	2016年度計算力学技術者(CAE技術者)資格認定事業(固体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者)	協賛	2016/9/10,9/17,12/10	東京工業大学, 名古屋大学, 近畿大学, 金沢大学, JR博多シティ会議室	日本機械学会 事業企画G 石澤 caenintei@jsme.or.jp
日本燃焼学会	第54回燃焼シンポジウム	協賛	2016/11/23-25	仙台国際センター	URL:http://www.combustionsociety.jp/sympo54/
日本液体微粒化学会	第25回微粒化シンポジウム	協賛	2016/12/19-20	富山国際会議場大手町フォーラム	URL:http://www.iclass-japan.gr.jp



## ▷ 入会者名簿 ◁

## 〔正会員〕

手塚 津奈生(IHI)	田中 雄飛(IHI)	丸山 晃平(IHI)	山下 誠二(川崎重工業)
井上 暢(川崎重工業)	鍋島 大毅(川崎重工業)	佐々木 怜(川崎重工業)	上野 豪(キグチテクニクス)
坂本 祐麻(キグチテクニクス)	栗岡 義紀(神戸製鋼所)	小林 直樹(小林製作所)	鈴木 雅人(産業技術総合研究所)
糟谷 宏樹(東芝)	松平 雄策(新潟大学)	小幡 茂男(防衛大学校)	藤田 豊(三菱重工業)
宮崎 洸治(三菱重工業)	柚木 啓太(三菱日立パワーシステムズ)		

## 〔学生会員〕

上田 翔太(金沢工業大学)	赤見坂 祐輔(金沢工業大学)	玉田 岳洋(金沢工業大学大学院)
秋野 一輝(首都大学東京大学院)	大橋 健史(首都大学東京大学院)	櫻井 勇也(首都大学東京大学院)
古田 洋一郎(早稲田大学大学院)		

## 次号予告 日本ガスタービン学会誌2016年9月号 (Vol.44 No.5)

## 特集「ガスエンジン、ディーゼルエンジンとガスタービン」

巻頭言 塩路 昌宏(京都大学)

レシプロエンジンとガスタービンの違いと特徴 高崎 講二(九州大学)

産業用ガスエンジンの開発動向 安枝 信次(GDEC)

ガス・ディーゼルエンジンのコージェネレーションシステム 飯泉 昌幸(コージェネレーション・エネルギー高度利用センター)

ガスコージェネレーション設備における原動機選定事例紹介 速川 敦彦(東京ガスエネルギーソリューションズ)

離島(内燃力)発電所のディーゼル発電について 大嶺 吉光(沖縄電力)

ガスエンジン 江口 知孝(日立造船/バルチラ)

高効率大型ガスエンジンの開発と実用化 堀江 尚(川崎重工業)

三菱リーンバーミラーサイクルガスエンジンの最新開発概要 高井 淳(三菱重工業)

ガスエンジンの再生エネルギー利用 西田 和生(ヤンマー)

高効率大型ガスエンジンの国内導入と木質バイオマスガス化発電用ガスエンジンについて 坂本 謙一, 弓田 孔生(日立パワーソリューションズ)

エコウィルコージェネレーションユニットの技術と進化 戸川 一宏, 渡邊 生, 中川 義徳(本田技術研究所)

高効率V型中速ディーゼル機関の開発と実用化 永澤 秀明(新潟原動機)

船用ガス焚きディーゼル機関「ME-GI」の紹介 湖上 孝, 哈 強, 田淵 隆平(三井造船)

## 見聞記「2016年ASME国際ガスタービン会議」

執筆者…船崎 健一(岩手大学)/浅子 知昭(IHI)/高田 和正(三菱日立パワーシステムズ)/壹岐 典彦(産業技術総合研究所)/三浦 聡允(川崎重工業)/松沼 孝幸(産業技術総合研究所)/坂口 大作(長崎大学)/青塚 瑞穂(IHI)/武石 賢一郎(徳島文理大学)/林 茂(法政大学)/森岡 典子(IHI)/鈴木 健太(三菱重工業)/妹尾 茂樹(三菱日立パワーシステムズ)/柚木 啓太(三菱日立パワーシステムズ)

※タイトル, 執筆者は変更する可能性があります。

## 2016年度役員名簿

会長 久山 利之 (川崎重工)

副会長 船崎 健一 (岩手大)

法人管理担当執理事 今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大) (兼務), 木下 康裕 (川崎重工), 安田 聡 (MHPS), 渡辺 紀徳 (東大)

公益目的事業担当執理事 太田 有 (早大), 小森 豊明 (三菱重工), 西澤 敏雄 (JAXA), 野崎 理 (高知工科大), 藤井 智晴 (電中研), 細川 哲也 (JALエンジニアリング), 山根 秀公 (防衛装備庁), 吉田 英生 (京大), 輪嶋 善彦 (本田), 渡辺 紀徳 (東大) (兼務)

理事 渋川 直紀 (東芝), 田尻 敬次 (荏原エリオット), 松沼 孝幸 (産総研), 原田 広史 (物材研), 松崎 裕之 (酒田共同火力)

監事 坂田 公夫 (SKYエアロスペース研), 渡辺 康之 (IHI)

## 2016年度委員名簿 (順不同)

2016年6月20日現在

○は委員長

倫理規定委員会 ○木下 康裕 (川崎重工), 今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大), 西澤 敏雄 (JAXA), 安田 聡 (MHPS)

自己点検委員会 ○木下 康裕 (川崎重工), 今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大), 西澤 敏雄 (JAXA), 安田 聡 (MHPS)

運営委員会 ○今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大), 木下 康裕 (川崎重工), 酒井 義明 (東芝), 塚原 章友 (MHPS), 西澤 敏雄 (JAXA), 原田 純 (川崎重工), 松沼 孝幸 (産総研), 森岡 典子 (IHI), 安田 聡 (MHPS), 吉田 英生 (京大), 渡辺 紀徳 (東大)

企画委員会 ○太田 有 (早大), 伊東 正雄 (東芝), 今成 邦之 (IHI), 木下 康裕 (川崎重工), 塚原 章友 (MHPS), 西澤 敏雄 (JAXA), 安田 聡 (MHPS), 吉田 英生 (京大), 輪嶋 善彦 (本田), 渡辺 紀徳 (東大)

国際委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 井上 智博 (東大), 太田 有 (早大), 岡井 敬一 (JAXA), 小森 豊明 (三菱重工), 谷 直樹 (IHI), 葉狩 智子 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研), 船崎 健一 (岩手大), 松田 寿 (東芝), 三好 市朗 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大)

学術講演会委員会 ○西澤 敏雄 (JAXA), 小熊 英隆 (三菱重工), 酒井 英司 (電中研), 武田 淳一郎 (富士電機), 玉井 亮嗣 (川崎重工), 富永 純一 (東芝), 浜辺 正昭 (IHI), 姫野 武洋 (東大), 平野 孝典 (拓殖大), 藤原 仁志 (JAXA), 堀内 康広 (MHPS), 松沼 孝幸 (産総研), 渡邊 裕章 (九大)

集行事務委員会 ○輪嶋 善彦 (本田), 金澤 直毅 (川崎重工), 木村 武清 (元川崎重工), 澤 徹 (東芝), 瀬川 武彦 (産総研), 手塚 津奈生 (IHI), 西江 俊介 (三井造船), 西村 英彦 (MHPS), 平野 篤 (防衛装備庁), 細川 哲也 (JALエンジニアリング), 泰中 一樹 (電中研), 藤井 達 (日立), 松沼 孝幸 (産総研), 山形 通史 (富士電機), 吉田 征二 (JAXA)

ガスタービン技術普及委員会 ○藤井 智晴 (電中研), 石田 克彦 (川崎重工), 賀澤 順一 (JAXA), 齊藤 大蔵 (東芝), 中村 恵子 (IHI), 花井 直人 (JALエンジニアリング), 檜山 貴志 (三菱重工), 福山 佳孝 (JAXA), 村田 章 (東京農工大), 屋口 正次 (電中研), 山本 誠 (東京理科大), 横山 喬 (MHPS), 渡辺 紀徳 (東大)

学会誌編集委員会 ○吉田 英生 (京大), 荒木 秀文 (MHPS), 壹岐 典彦 (産総研), 石川 揚介 (東芝GEタービンサービス), 加藤 千幸 (東大), 齋木 正則 (中部電力), 阪井 直人 (川崎重工), 佐藤 哲也 (早大), 渋川 直紀 (東芝), 杉本 富男 (三井造船), 高橋 俊彦 (電中研), 田尻 敬次 (荏原エリオット), 辻田 星歩 (法政大), 寺澤 秀彰 (東京ガス), 寺本 進 (東大), 中野 賢治 (IHI), 中野 剛 (JALエンジニアリング), 新関 良樹 (東芝), 野崎 理 (高知工科大), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 原 浩之 (MHPS), 原田 広史 (物質・材料研), 松崎 裕之 (酒田共同火力), 北條 正弘 (JAXA), 山下 一憲 (荏原), 山根 喜三郎 (防衛装備庁), 吉野 展永 (IHI)

論文委員会 ○山根 敬 (JAXA), 青塚 瑞穂 (IHI), 壹岐典彦 (産総研), 小田 剛生 (川崎重工), 柴田 貴範 (MHPS), 田頭 剛 (JAXA), 寺本 進 (東大), 中谷 辰爾 (東大), 姫野武洋 (東大), 山本 武 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大), 吉岡洋明 (愛媛大)

ガスタービン統計作成委員会 ○小森 豊明 (三菱重工), 恵比寿 幹 (三菱重工), 坂倉 季彦 (MHPS), 澤 徹 (東芝), 野村 藤樹 (ターボシステムユニティッド), 原田 純 (川崎重工), 宮川 歩 (川崎重工), 山上 舞 (IHI), 山上 展由 (MHPS), 吉田 知彦 (MHPS), 米田 幸人 (ヤンマー)

産官学連携委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 赤城 正弘 (防衛省), 壹岐 典彦 (産総研), 岡崎 正和 (長岡技科大), 金津 和徳 (IHI), 岸部 忠晴 (MHPS), 幸田 栄一 (電中研), 佐々木 隆 (東芝), 武 浩司 (川崎重工), 福泉 靖史 (三菱重工), 藤岡 順三 (物質・材料研), 二村 尚夫 (JAXA), 古川 雅人 (九大), 吉田 英生 (京大)

広報委員会 ○山根 秀公 (防衛装備庁), 荒木 秀文 (MHPS), 酒井 義明 (東芝), 姫野 武洋 (東大), 村田 章 (東京農工大), 山根 敬 (JAXA), 吉田 征二 (JAXA)

表彰委員会 ○船崎 健一 (岩手大), 太田 有 (早大), 木下 康裕 (川崎重工), 児玉 秀和 (IHI), 西澤 敏雄 (JAXA), 野崎 理 (高知工科大), 吉田 英生 (京大)

将来ビジョン検討委員会 ○寺本 進 (東大), 小田 豊 (関西大), 賀澤 順一 (JAXA), 柴田 貴範 (MHPS), 柴田 良輔 (本田), 高橋 徹 (電中研), 仲俣 千由紀 (IHI), 姫野 武洋 (東大), 森澤 優一 (東芝), 山崎 裕之 (東北電力)

女性参画推進委員会 ○仲俣 千由紀 (IHI), 猪亦 麻子 (東芝), 川岸 京子 (物質・材料研), 葉狩 智子 (川崎重工), 森川朋子 (MHPS)

ACGT2016実行委員会 ○山根 敬 (JAXA), 仲俣 千由紀 (IHI), 葉狩 智子 (川崎重工), 松田 寿 (東芝), 三好 市朗 (MHPS)