

# ガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムの展望

A Prospect of Gas Turbine-Fuel Cell Hybrid System

笠木 伸 英\*

Nobuhide Kasagi

君島 真 仁\*\*

Shinji Kimijima

## 1. はじめに

小型分散エネルギーシステムは、原動機をエネルギー需要に近接して設置し、電力と共に熱エネルギーを利用することから総合的なエネルギー利用率を向上させることに意義がある<sup>(1)</sup>。しかし、エネルギーの質的側面に眼を向けると、原動機の熱効率改善が有効な技術開発の方向である。現在、経済性に優れた数10kW～数100kWの出力規模のマイクロガスタービン(μGT)の市場導入が進み、同時に効率向上に向けた技術開発が展開されている<sup>(2)</sup>。原理的には再生サイクルを基本とするμGT単体の発電効率は40%が上限と見られ、さらに将来を見据えると、要素効率の向上とは異なった視点からのアプローチが必要となる。その一つとして、高温作動型の固体酸化物形(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)あるいは溶融炭酸塩形(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)燃料電池との複合化が注目を集めている。

図1は米国エネルギー省(DOE)がプラント種別に発電規模と発電効率の関係を整理したものである<sup>(3)</sup>。数100kW～数10MWクラスの発電プラントで最も高い発電効率を狙うシステムとしてガスタービンと燃料電池による複合発電に大きな期待が寄せられている。新世紀に相応しいゼロ・エミッションプラントの実現を目標としたDOEの

Vision 21 プロジェクト<sup>(4)</sup>では、2010年度までに発電効率70%を越えるハイブリッドシステムの開発を目標の一つとしており、様々なシステム開発が始まっている<sup>(5)</sup>。熱機関と燃料電池との複合化に関する概念は既に1970年代半ばに提案されているが<sup>(6)</sup>、マイクロガスタービンの実用化や燃料電池技術の成熟、さらには高効率な分散エネルギーシステムの要請から、現在に至ってハイブリッドシステムの実用化への技術開発が加速しつつある状況と言えよう。

本稿では、まず、ハイブリッドシステムの主要な構成要素である高温作動型燃料電池の技術開発状況を概観する。次に、ガスタービンサイクルと燃料電池の複合形態ならびにハイブリッドシステムの特徴を示す。さらに、現在までの研究・開発状況を整理し、ハイブリッドシステムの実現のための技術課題を概観する。

## 2. 燃料電池の技術開発状況

ガスタービンの作動温度域と燃料電池のそれとを考慮すると複合化の対象はSOFCとMCFCとなる。SOFCで900～1000°C、MCFCで650～700°C程度と高温作動であることから白金触媒が不要であり、改質ガスに含まれるCOも燃料となる。また、セルの発熱を利用した燃料の内部改質が可能であるという特徴がある<sup>(7)</sup>。

### 2.1 SOFC

米国では、DOEの支援によりSiemens-Westinghouse社(SWPC)を中心とした先導的な研究・開発プロジェクトが遂行されている。オランダにおいて同社の円筒型セルを用いた出力100kW規模の常圧SOFC(図2)の性能試験が実施され、16000時間の運転実績が報告されている<sup>(8)</sup>。この成果を基に、さらに300kW級のコージェネレーション・パッケージが開発されている。また、家庭用を狙った数kW級機では、スイスのSulzer-Hexis社<sup>(9)</sup>やカナダのGlobal Thermoelectric社<sup>(10)</sup>での開発例がある。我が国では1989年よりNEDO主導のプロジェクトが推進されており、円筒型やMOLB型セルの開発実績がある。2000年度までに初期特性0.180W/cm<sup>2</sup>の目標値に対して0.192W/cm<sup>2</sup>の出力密度を有し、電圧低下率も目標の1.0%/1000hに対して0.4%/1000hまで抑制した円筒型セルが開発されている<sup>(11)</sup>。

DOEはSOFCの大幅な低コスト化を目的とした10年間の研究開発プログラムをスタートさせている<sup>(12)</sup>。National

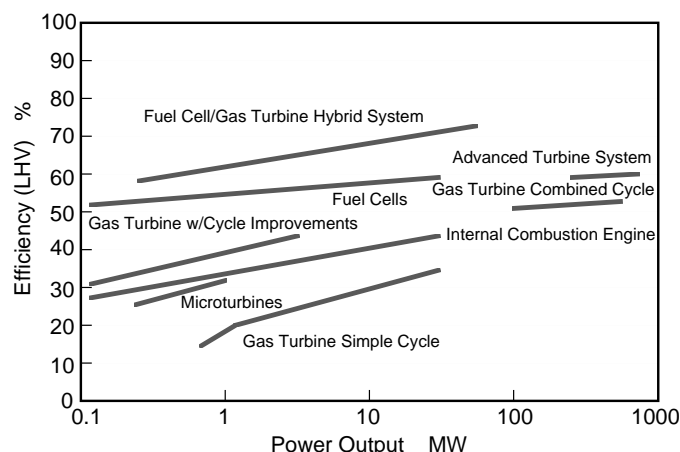


図1 各種発電設備の容量と効率との関係<sup>(3)</sup>

\* 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻教授

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

E-mail: kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

\*\* 芝浦工業大学システム工学部機械制御システム学科講師

〒330-8570 埼玉県さいたま市深作307

Energy Technology Laboratory と Pacific Northwest National Laboratory とが推進母体となり産官学連携プロジェクト SECA (Solid State Energy Conversion Alliance) が 2000 年に発足した .コスト低減達成目標は \$400/kW としている .家庭用ならびに自動車補助電源用を想定した数 kW ~ 10kW 程度の小型のモジュールを開発し ,大量生産体制の整備による低コスト化を狙っている .

2.2 MCFC

米国では , 1970 年代から M-C Power 社 と Fuel Cell Energy 社 ( 当時は Energy Research Corporation ) とが定置型用電源として大容量化を視野に入れた技術開発を展開している . Fuel Cell Energy 社 ( FCE ) は , 1993 年から内部改質方式のセルスタックの開発に着手し , 実用機 Direct Fuel Cell™ としてまとめ上げている . 分散電源として欧米にて導入事例があり , その商用化に向けたフィールド試験が行われている<sup>(13)</sup> . 欧州においては , オランダ , イギリス , フランス , スウェーデンの共同プロジェクトにて , 病院での電力供給をターゲットとした 250kW 直接内部改質型 MCFC の研究・開発例がある<sup>(14)</sup> . また , FCE と協力関係にあるドイツの Motoren und Turbinen Union 社 ( MTU ) が Hot Module™ の名称で図 3 のような実用機を仕上げている

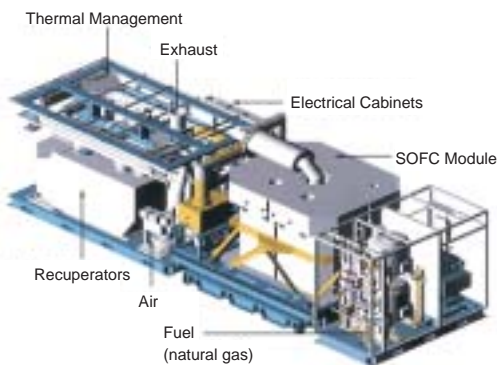


図 2 100kW 級 SOFC プラント<sup>(8)</sup>

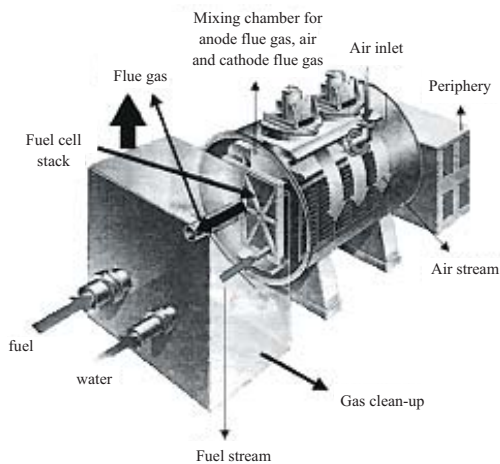


図 3 300kW 級 MCFC プラント<sup>(7)</sup>

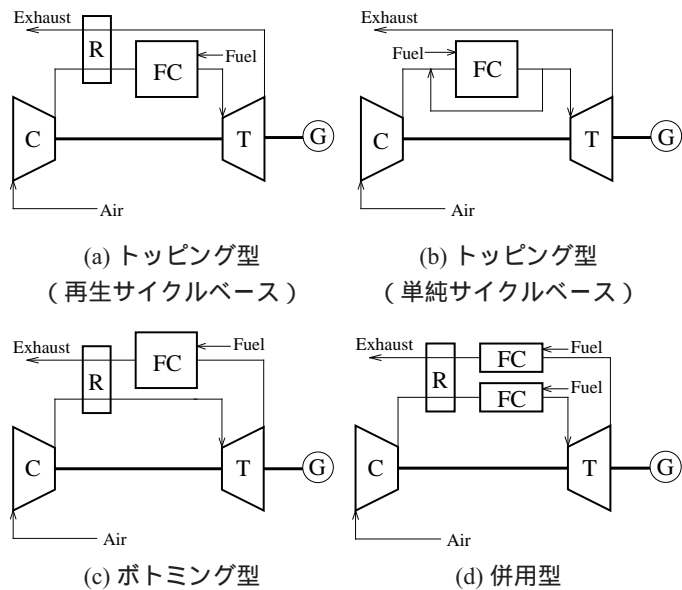
(7) . このシステムは , 天然ガスをはじめ , バイオガスや石炭ガスの利用が可能であり , 出力規模は 300kW ~ 10MW , MCFC 作動温度 650°C , 20% ~ 100% の範囲で出力制御可能 , 発電効率は 52% ~ 65% と発表されている . 我が国には , 1MW 級事業用発電プラントを想定した実用化試験が行われており , 出力 1MW で発電効率 45% が記録され , 2670 時間の発電時間 , スタック性能劣化率 0.5 ~ 0.7% / 1000h ( 目標値 : 1.0% / 1000h ) の実績が得られている<sup>(15)</sup> .

3. ハイブリッドシステムの構成と特徴

3.1 システム構成

図 4 はガスタービンと燃料電池との複合化の概念図である . システム構成としては , ガスタービンサイクル内での燃料電池の配置により様々な形態が考えられる . 燃料電池の作動圧力に着目すると , 加圧 / 常圧運転の二種類に大別できる<sup>(16)</sup> . 図 4(a) および (b) が加圧運転となるトッピング方式であり , (c) が常圧運転となるボトムング方式である . (a) は再生サイクルを基本として再生熱交換器後段に燃料電池を配置しており , 燃焼器を燃料電池に置き換えた構成と見ることができる . (b) では単純サイクルの高圧側に燃料電池を配置し , 燃料電池排気ガスの再循環により圧縮機吐出空気を予熱する . (c) は再生サイクルのタービン後段に燃料電池を配置し排気エネルギーを再生熱交換器で回収してタービンを駆動する . さらに , (d) のように (a) あるいは (b) と (c) を組み合わせた併用型も考えられる .

通常 , 燃料電池では供給した燃料が 100% 反応せず , 未反応の H<sub>2</sub> , CO が排出される . そのため燃料電池の後段にはこれらを完全に酸化するための燃焼器が必要となる . ま



FC: Fuel Cell, C: Compressor, T: Turbine, R: Recuperator, G: Generator

図 4 ガスタービンと燃料電池の複合形態

た、燃料改質の形態(内部改質/外部改質)や改質プロセスへの水蒸気供給方式(アノード排気再循環/排ガスボイラ付帯)、さらに燃料、空気の予熱用熱交換器等を含めるとシステム構成は多岐に渡るため、出力規模や運転条件、コスト等を考慮した最適システムの構築が求められる。

3.2 ハイブリッドシステムの特徴

図5は、筆者らが検討対象としているμGT-SOFCハイブリッドシステムの構成である<sup>(17)</sup>。図中の数値は出力30kWを想定したサイクル解析結果の一例であり、これらの条件下では、μGTとSOFCの出力比は1:4程度となる。

図6は、このシステムにおける各構成要素のエクセルギー損失の内訳を試算し、燃料のエクセルギーを100として表示したものである<sup>(17)</sup>。図6には比較のために再生ガスタービンサイクルならびに常圧SOFCの各々単体についての同様の試算結果を併記している。再生ガスタービンサイクルでは、燃焼器でのエクセルギー損失が大きく、常圧SOFCでは排気のエクセルギー損失が大きくなる。一般に、燃焼プロセスの不可逆性は大きく、高温ガスを得るために燃料のもつ化学エネルギーを熱エネルギーに変換する過程で大きなエクセルギー損失を伴う。また、高温作動の燃料電池では排気温度が高く、これを単に大気放出する際には大きなエクセルギー損失となる。これらに対して、ハ

イブリッドシステムでは、燃焼プロセスに替わる燃料から電力への直接変換によりエクセルギー損失を低減し、燃料電池排気から動力を回収することで排気損失を低減する。すなわち、両者の欠点を相互に補完することにより発電効率が高くなる。

4. ハイブリッドシステムの研究・開発動向

4.1 システム解析

熱機関による発電プラントの効率向上を阻害する大きな要因が燃焼プロセスにおけるエクセルギー損失であることに着目し、燃料電池の導入による高効率化に関する検討が行われている。例えば、ランキンサイクルのボイラーを燃料電池で置き換えることにより大幅に発電効率が改善されることが報告されている<sup>(18)</sup>。ガスタービンサイクルとの複合化の評価も行われており、アノード排気の再循環ループをもつSOFCを配置した数100MW級の発電プラントで発電効率70%(LHV)が得られることが示されている<sup>(19)</sup>。また、高温作動の利点を活かした石炭ガス化ガスタービン発電プラントへのSOFCの導入が検討されており、発電効率が60%を超える可能性が示されている<sup>(20)</sup>。

ハイブリッドシステムは、ガスタービンや蒸気タービンとの組み合わせの形態により、前述のように多様なシステム構成を採り得る<sup>(21)(22)</sup>。内部改質型SOFCとガスタービンの複合化について、四種類の異なる構成を対象としたサイクル解析が報告されている<sup>(23)</sup>。これまでの多くの研究例は、燃料電池を加圧下で運転し、その高温排気をタービンで直接膨張させる構成を採っている。これに対して、熱交換器を介して間接的に熱回収を行い、これをタービン駆動に利用する方式も提案されており、MCFCとの複合化で60%を超える発電効率が報告されている<sup>(24)</sup>。

サイクル解析は主として比較的大型の発電プラントを想定した例が多いが、数kW～数10kW級のμGTとSOFC複合化に関する検討も行われている<sup>(25)</sup>。筆者らは、分散電源として各種商業施設や事務所ビル、ホテル、病院、集合住宅等のエネルギー需要への対応を想定し、出力30kWのμGT-SOFCハイブリッドシステムの性能評価を行い、60%を超える発電効率が期待できることを示した<sup>(17)</sup>。

ハイブリッドシステムの分散電源としての利用を想定すると、需要地に近接して設置されることが前提となることから、ユーザーのニーズに柔軟に対応することが求められる。そのためには、システム設計の段階で、定格設計点を外れた運転条件での性能(部分負荷特性)を評価しておくことが不可欠となり、負荷が変化した際にも各部の温度等を安全な運転範囲内に維持しうるような運転方法の確立が求められる。このような観点から、部分負荷特性の予測に関する検討も行われている<sup>(26-29)</sup>。負荷変動に関しては、過

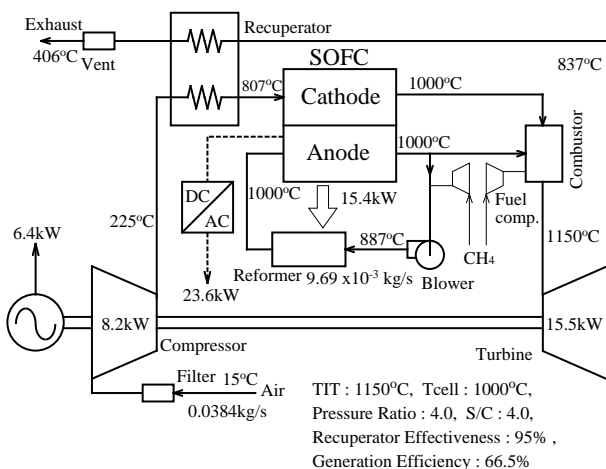


図5 μGT-SOFC ハイブリッドシステムの例<sup>(17)</sup>

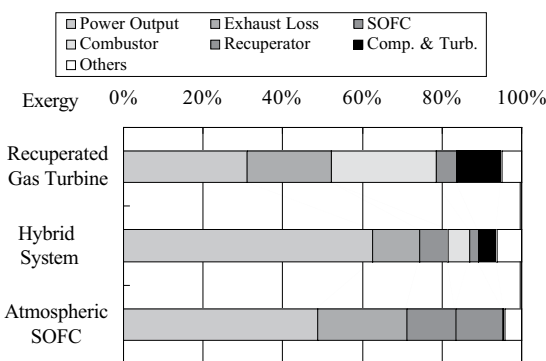


図6 ハイブリッドシステムのエクセルギー解析例<sup>(17)</sup>

渡的な追従性が優れていることも必須であることから、ハイブリッドシステムの動特性解析も重要な課題である。これを受けて、実機の挙動を模擬しうる解析モデルの構築に関する研究が行われており<sup>(30)</sup>、安全な運用方法の検討や制御系設計の支援ツールとしての利用が期待されている。

より一層の発電効率向上の為に、ハイブリッドシステムの後段での動力回収も重要な研究課題である。水蒸気を作動媒体とするランキンサイクルやアンモニア-水系混合媒体によるボトムリングサイクルのフィージビリティに関する検討例<sup>(31)</sup>や排ガスボイラで発生した水蒸気をタービン前段へ注入しタービン動力増大を狙ったシステムに関する検討例もある<sup>(32)</sup>。さらに、ハイブリッドシステムを主幹ユニットとするコージェネレーションシステムを対象として、電力および熱エネルギーの需要パターンに基づいた運用評価を試みた例も見られる<sup>(33)</sup>。

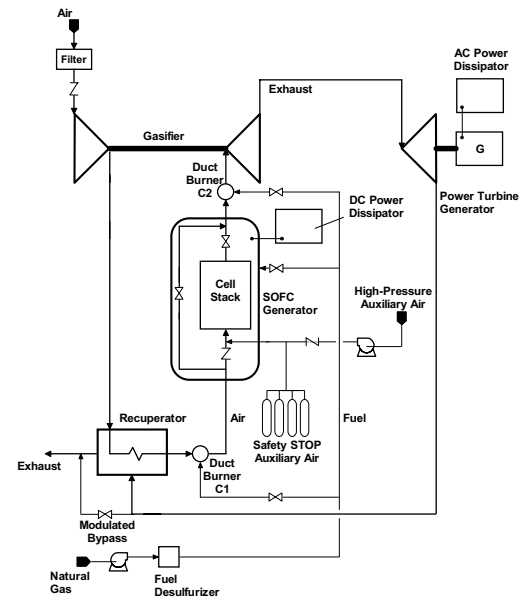
4.2 プラント開発研究

図7はU. C. Irvine校のNational Fuel Cell Research Centerにてフィールドテストが実施されている250kW級試験機である<sup>(34)</sup>。図7(a)の通り、再生ガスタービンサイクルを基本として燃焼器前段にSOFCを配置する構成を採り、直径22mm、有効長1500mmの円筒セル576本で構成されたサブスタック(図7(b))を使用したSWPCのSOFCとIngersoll-Rand社の75kW機をベースとしたμGTとを複合化したシステムである。図7(c)はプラントの外観であり、規模は7.4m(L)×2.8m(D)×3.9m(W)である。SOFCの単セル電圧0.61V、μGTの圧縮比2.9、タービン入口温度780°Cと計画され、出力は、SOFCが176kW、μGTが47kW、総発電効率は57%(LHV)と見積もられている。運転試験より蓄積される知見を基に、さらに高効率なシステム提案のための解析ツールの構築や、システム制御技術の開発等を目標としている。さらに出力300kW級の試験機のテストも計画されている。

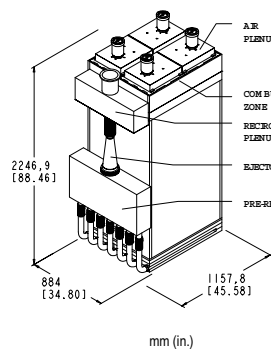
図8はFCEのDirect Fuel Cell™(MCFC)を利用したハイブリッドシステムである<sup>(35)</sup>。このシステムでは、間接的にMCFC(内部改質)の排熱を利用する構成を採っており、MCFC排気により圧縮空気を加熱し、これを膨張させることでタービン動力を得ている。膨張後の空気はアノード排気と混合し、MCFCでの未反応成分を完全に酸化した後にカソードに供給される。燃料電池の単セル電圧が0.817V、燃料利用率は0.78である。出力19MW程度のプラントの発電効率が65%と計画されている。

5. 実用化に向けた技術課題

燃料電池では、内部抵抗により損失が発生するため、性能向上には構成材料の電気抵抗、イオン導電抵抗の低減、活性化エネルギーに起因する分極抵抗の低減が求められ



(a) システム構成

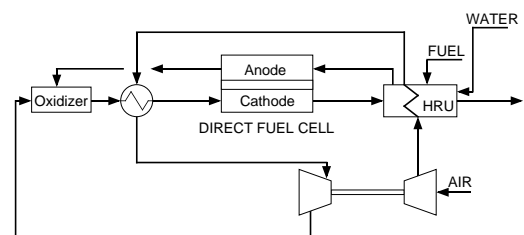


(b) サブスタック



(c) 試験機の外観

図7 Siemens-Westinghouse社のハイブリッドシステム<sup>(34)</sup>



(a) システム構成



(b) 20MW級プラントのレイアウト

図8 Fuel Cell Energy社のハイブリッドシステム<sup>(35)</sup>

る。特に、起動/停止の容易性ならびに耐熱性能、低コスト化等の観点から 700 ~ 800°C の SOFC の低温駆動が要請されており<sup>(36)</sup>、この温度域で内部損失を抑制しうる電極および電解質の材料開発が重要な課題である。一方で効率向上の観点からは、より高温で運転することが望ましく、高い耐熱性能を有する材料の開発も求められる。

図5の通り、出力 30kW のハイブリッドシステムでは、 $\mu$ GT 出力は 6kW 程度となる。したがって、数 10kW 規模の分散電源を想定すると高効率な数 kW 級の超小型  $\mu$ GT の開発が課題となる。そのためには、CFD を駆使した数 10 万 rpm の高速ターボ機械内部の熱流動解析に基づく最適設計、燃料電池から流出する未反応成分を完全に酸化する小容積希薄予混合燃焼技術、伝熱性能向上と圧力損失ペナルティ最小化を同時に満足するコンパクトな再生熱交換器の最適設計等が求められる。さらには高温化を想定したセラミック材料の適用も必須となる。

これらの要素技術開発と共に、個々の要素性能を十分に活かすシステム化技術の開発も重要である。また、負荷変動への柔軟な対応や起動/停止の速応性、さらには、燃料電池の熱自立運転を含めたシステム・ダイナミクスならびに制御技術に関する検討が不可欠である。

さらに、エネルギーのカスケード利用の観点からはハイブリッドシステム後段へのボトムリングシステムの導入も考慮に入れることが望ましい。排熱利用を含めた統合化に関する技術開発と共に、資源循環の観点からは LCA 的な手法に基づく総合的なシステム評価も必要であろう。

## 6. おわりに

ガスタービンと燃料電池の複合化は、60% を越える発電効率を達成しうる技術である。エネルギー需要に適合した排熱利用機器を付帯することで、これまでに無い高い総合エネルギー利用率を有する分散エネルギーシステムを構築することが可能となる。ハイブリッドシステムの実用化への技術的ハードルは高いが、我が国には、ガスタービンならびに燃料電池に関する優れた要素技術の基盤が揃っている。個別技術の高度化とそれらの統合化に向けた産官学の連携が実現すれば、夢の高効率分散エネルギーシステムの達成が可能となろう。

## 参考文献

- (1) 平田賢, コージェネレーションシンポジウム 2001 (第 17 回) 発表抄録集 (2001), 3-18.
- (2) 笠木伸英, 高压ガス, Vol. 38, No.6 (2001), 544-552.
- (3) U.S. Department of Energy, Hybrid Fuel Cell Technology Overview, CD-ROM Publication (2001).
- (4) U.S. Department of Energy, Vision 21 Program Plan (1999).

- (5) A. Layne, M. Williams, S. Samuelsen and N. Holcombe, ASME Paper, 2001-GT-588.
- (6) D.J. White, ASME Paper, 99-GT-419.
- (7) L. Carrette, K.A. Friedrich and U. Stimming, Fuel Cells, Vol. 1, No. 1 (2001), 5-39.
- (8) R.A. George, Journal of Power Sources, 86 (2000), 134-139.
- (9) M. Schmidt, Fuel Cells Bulletin, 1-1 (1998), 9-11.
- (10) E.N. Potter, Fuel Cells Bulletin, 3-26 (2000), 8-11.
- (11) T. Nakamura and M. Suzuki, Solid Oxide Fuel Cells VII, Electrochemical Society Proceedings, Volume 2001-16 (2001), 8-13.
- (12) M.C. Williams, Solid Oxide Fuel Cells VII, Electrochemical Society Proceedings, Volume 2001-16 (2001), 3-7.
- (13) P. H. Eichenberger, Journal of Power Sources, 71 (1998), 95-99.
- (14) P. J. Kortbeek and R. Ottervarger, Journal of Power Sources, 71 (1998), 223-225.
- (15) 前田俊之・中山稔夫, 化学工学, 65-10 (2001), 544-550.
- (16) S.A. Ali and R.R. Moritz, ASME Paper, 99-GT-361.
- (17) 上地英之・君島真仁・笠木伸英, 日本機械学会論文集 (B 編), 68-666 (2002), 626-635.
- (18) W.R. Dunbar, N. Lior and R.A. Gaggioli, Energy, Vol. 16, No. 10 (1991), 1259-1274.
- (19) S.P. Harvey and H.J. Richter, Trans. ASME, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 116 (1994), 305-318.
- (20) K. Lobachyov and H.J. Richter, Trans ASME, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 118 (1996), 285-292.
- (21) S. Campanari and E. Macchi, ASME Paper, 2001-GT-383.
- (22) M.-T. Basurto, P. Pilidis and R. Hales, ASME Paper, 2001-GT-90.
- (23) A.F. Massardo and F. Lubelli, Trans. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 122 (2000), 27-35.
- (24) S. Ubertini and P. Lunghi, Fuel Cells, Vol. 1, No. 4 (2001), 174-180.
- (25) A.F. Massardo, C.F. McDonald and T. Korakianitis, Trans. ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 124 (2002), 110-116.
- (26) S. Campanari, Trans. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 122 (2000), 239-246.
- (27) P. Costamagna, L. Magistri and A.F. Massardo, Journal of Power Sources, 96 (2001), 352-368.
- (28) J. Palsson and A. Selimovic, ASME Paper, 2001-GT-379.
- (29) L. Magistri, A. Massardo, C. Rodgers and C.F. McDonald, ASME Paper, 2001-GT-92.
- (30) R.S. Gemmen, E. Liese, J.G. Rivera, F. Jabbari and J. Brouwer, ASME Paper, 2000-GT-554.
- (31) W.L. Lundberg, S.E. Veyo and M.D. Moeckel, ASME Paper, 2001-GT-521.
- (32) A.F. Massardo and B. Bosio, Trans. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 124 (2002), 103-109.
- (33) S. Campanari and E. Macchi, ASME Paper, 2000-GT-0318.
- (34) S.E. Veyo, L. A. Shockling, J.T. Dederer, J.E. Gillett and W.L. Lundberg, ASME Paper, 2000-GT-550.
- (35) A.J. Leo, H. Ghezel-Ayagh and R. Sanderson, ASME Paper, 2000-GT-0552.
- (36) 土器屋正之・小林謙一・安本憲司・高橋伊久磨・蔡子輝・第 9 回 SOFC 研究発表会講演要旨集 (2000), 13-20.