

高効率 SOFC システムによる分散型発電の実現に向けて

— SOFCシステム早期導入に向けた性能評価手法の開発と規格標準化 —

田中 洋平*、門馬 昭彦、根岸 明、加藤 健、高野 清南、野崎 健、嘉藤 徹

高効率分散型発電システムとして期待される固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の早期導入と公正な商取引を実現するには、性能評価手法の確立とその試験方法の規格標準化が重要である。この研究では、SOFCシステムの基本構成パーツのSOFC単セル、スタックおよびシステムの発電効率の評価手法について、市販の測定器、計量標準にトレーサブルな高精度流量計・標準物質、触媒技術等を組み合わせて、計量標準から製品までつながるSOFCの高精度性能評価手法・試験装置等を開発するとともに、SOFC開発企業等と連携して開発した装置の性能と実用性を評価した。さらに、発電効率試験方法のJIS規格化を中心に、性能試験方法の規格標準化への取り組みを報告する。

キーワード: 固体酸化物形燃料電池、SOFC、高効率分散型発電、性能評価手法、規格標準化

Progress towards realizing distributed power generation with highly efficient SOFC systems

– Development and standardization of performance evaluation methods
targeting early market-entry of SOFC systems –

Yohei TANAKA*, Akihiko MOMMA, Akira NEGISHI, Ken KATO, Kiyonami TAKANO, Ken NOZAKI and Tohru KATO

For solid oxide fuel cells (SOFC) that are expected to be highly-efficient distributed power generation systems, establishing performance evaluation methods and their standardization are important for early market entry and fair trade. For this purpose, we have developed high-precision performance evaluation methods and test apparatuses to measure power generation performance of SOFC cells, stacks, and systems. These methods were achieved by combination of elemental technologies and tools, such as commercial measuring instruments, precise flowmeters and reference materials that are traceable to national standards, and catalysis technology. The performance and usefulness of the test apparatuses developed in cooperation with SOFC manufacturers and others were evaluated. Our activities, mainly on JIS standardization of power generation efficiency test methods, are also presented.

Keywords: Solid Oxide Fuel Cell, SOFC, highly efficient distributed power generation, performance evaluation methods, standardization

1 はじめに

3.11 東日本大震災以来、電力を中心にエネルギーの安定供給が議論され、沿岸部の大規模集中型発電システムへの過度の依存からの脱却が重要な課題になっている。その一環として、小型分散発電システムを需要地に近い場所に設置してエネルギーを高度に利用するスマートコミュニティが注目されつつある^{[1][2]}。スマートコミュニティの中核として、太陽電池等の再生可能エネルギーによる発電システムが考えられているが、夜間および天候条件等で必要な電力が供給できない場合が多い。このため、電力貯蔵システムが適用されつつあるが^[3]、燃料を高効率に利用する分散型発電システムも有効な手段と考えられる。

高効率発電システムについては、最近、50万kW級の天然ガス利用コンバインドサイクルシステムで発電端効率

60%が達成され、大都市付近の大規模電力需要地に近い湾岸部への導入が開始された^[4]。一方、内陸部の中小都市では沿岸の火力発電所等からの送電距離が長く、送電ロスが無視できない。このような立地点においては、数千kW～数万kW程度の高効率発電システムの方が効率的である。燃料電池は燃料の化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換できるので、高効率分散型発電システムとして期待されてきた。特に2000年代より、80℃付近で作動する固体高分子形燃料電池 (PEFC) と700-1,000℃で作動する固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の研究開発が盛んに行われてきた。図1に示すように、1-10,000kWの発電規模では、SOFC単独およびSOFCとガスタービンとのコンバインドシステム以外に50%以上の発電効率を達成できるものはなく、究極的にはSOFCでは70%の発

産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第2
Energy Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan * E-mail: tanaka-yo@aist.go.jp

Original manuscript received February 1, 2012, Revisions received June 21, 2012, Accepted July 24, 2012

電効率が期待できる^[5]。

後述するように、SOFC システムは、発電部として最小構成単位の単セルを複数積層したスタック、および流量制御器等の補機類で構成されている。したがって、SOFC の研究開発では、単セル、スタック、システムの性能をそれぞれ精度よく評価し、性能を向上していくことが重要である。国内では、一般財団法人新エネルギー財団の「固体酸化物形燃料電池実証研究」で家庭用 700 W システムでも 45 % の発電効率が実証され^[6]、2011 年 10 月より JX 日鉱日石エネルギー (株) から都市ガスや液化石油ガスを利用する電気出力 700 W のコージェネレーションシステム (コージェネ機) が世界に先駆け販売開始された。また、最近では 5 kW から 250 kW の業務用発電システムの開発が始まり、さらにガスタービンとスチームタービンを組み合わせたトリプルコンバインドシステム (目標：容量～800 MW、発電効率 60 % 以上) の開発が計画されている^[5]。また、国外では家庭用 2 kW システムが実用化し、発電効率 60 % が達成されている。なお、SOFC および火力発電所の発電効率は、燃料の低位発熱量 (LHV) 基準 (水の蒸発潜熱を含まない) で記述されることが多く、上記効率についても LHV 基準で示した。以降、高位発熱量基準 (HHV) で効率を記述する場合、その都度注釈を記す。都市ガス・天然ガスの場合、LHV 基準の効率は HHV 基準に比べ 11 % 高くなる。

我々は、民間の SOFC システムの研究開発を支援して早期実用化を促進し、さらに SOFC が商用化された際の公正な取引を行う上で重要な性能試験方法の規格標準化を行うために、経済産業省や新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から支援を受け、2001 年頃より SOFC の最小構成単位である単セル、スタック、および最終製品

であるシステムを対象とした高精度性能評価手法を研究開発してきた。特に、近年、IEC、ISO 規格等では、測定信頼性を表す尺度として、これまでの誤差・確度等に代わって不確かさを用いることが推奨されていることから^[7]、我々は国家計量標準へトレーサブルな性能測定手法を開発することを念頭に置き、産業技術総合研究所 (産総研) 計測標準研究部門、関連民間企業等と連携しつつ研究開発を進めてきた。なお、不確かさは、真の値は分からないという前提の下、観測値の平均値 (測定値) と各種ばらつきにより母平均の存在する範囲を通常 95 % の信頼の水準で推定するものであり^[8]、不確かさの詳細については参考文献 [7] を参照されたい。

この論文では、SOFC システムの研究開発で重要な SOFC 単セルおよびスタックの性能評価手法の研究開発と SOFC システムの発電効率測定手法の研究開発・規格標準化について報告する。

2 SOFC 早期実用化に向けた研究目標と研究展開

2.1 SOFC システム概要と研究目標

最終的な製品である SOFC システムは、概略図を図 2 に示すように、主に流量制御器、蒸発器 (水蒸気発生器)、改質器、SOFC スタック、インバータ等により構成される。外部からシステムに供給される物質は、燃料極 (アノード) 用都市ガス等の原燃料、原燃料改質用の酸化剤 (水、空気)、および空気極 (カソード) 用空気である。原燃料は改質器で、水素、一酸化炭素、メタン、水蒸気、二酸化炭素に改質され、アノードガスとしてスタック内の各セルのアノードへ分配される。アノードでは、水素、一酸化炭素がカソード側から電解質をとおり移動してきた酸化物イオン (O^{2-}) と反応し、水蒸気、二酸化炭素が生成すると同時

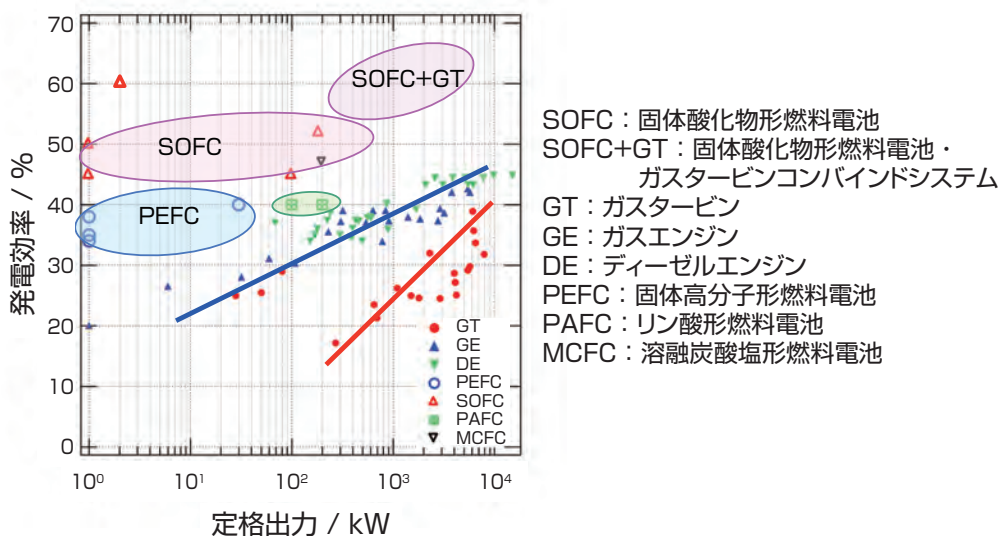


図 1 各種小型発電システムの定格出力と発電効率

に、電子が外部回路へ移動することにより直流出力（電力）が得られる。一般的には、直流出力をインバータ等のパワーコンディショナーで交流出力に変換し、SOFC システム内部でその一部が消費され（5-10 % 程度）、残りが正味の交流出力となる。

したがって、SOFC システムの研究開発は、一般的に、単セル材料・構造の開発→スタックの開発→改質器等システム構成部品的设计・開発の順に行われる。スタックを開発するには、図3に示すように、単セル性能を把握した上で、スタック内の温度分布、燃料分配の不均一性等による各セル性能のばらつきを評価し、最適な設計を行うことが重要である。また、システム開発ではスタック性能に加えて、熱設計、改質器性能等が重要で、システムの性能指標として発電効率が最も重要である。我々は、単セル、スタック、システムそれぞれの性能評価技術を開発することで民間のSOFC システムの研究開発を支援して早期実用化を加速することだけではなく、SOFC が商用化された際の公正な商取引を行ううえで重要となる性能試験方法の規格標準化を行うことも、公的機関である産総研の役割と考えた。

SOFC 単セル・スタックの発電性能は、SOFC 自体の特性だけではなく、ガス流量・組成、温度、燃料利用率（供給した燃料に対し、発電に利用された燃料の割合）等試験条件によって大きく左右される。しかし、これまでガス流量・組成精度等を規定した性能評価手法は確立されて

いなかった。また、アノードガス中には毒性の強い一酸化炭素が 10 % 前後含まれ、一般的な試験では純一酸化炭素や純水素等をそれぞれ供給して混合したガスが使用されるため、純一酸化炭素の取り扱いには厳重な安全対策が必要で、試験設備が複雑になりコスト増となる問題があった。

一方、発電効率の測定手法については、NEDO プロジェクトのコージェネ機発電効率目標値 40 %（定格時、送電端、HHV 基準）に対して^[9]、±1 % 以下の不確かさ（相対不確かさ±2.5 %）で測定するのが妥当と考えられる。しかし、開発の先行したリン酸形燃料電池、固体高分子形燃料電池では、性能評価方法において測定精度を規定する規格は当時は存在せず、既存のコージェネレーションユニットの規格（JIS B8122）の型式試験における測定器精度として電力計±1.5 %、燃料ガス用流量計±3 %が規定されているのみであり^[10]、発電効率の不確かさは±5 % 程度と推定され、不十分であった。また、10 kW 以上の SOFC システムは測定環境が整った実験室に移動させることが難しく、発電効率は民間等の SOFC 設置サイトで測定するのが最良であることから、可搬型の効率測定手法が重要になると考えた。

性能試験方法の規格標準化については、当初、1-200 kW 級 SOFC システムの開発がセル製造企業とシステム開発企業の間で進められ、実用化が迫っていたため、まず

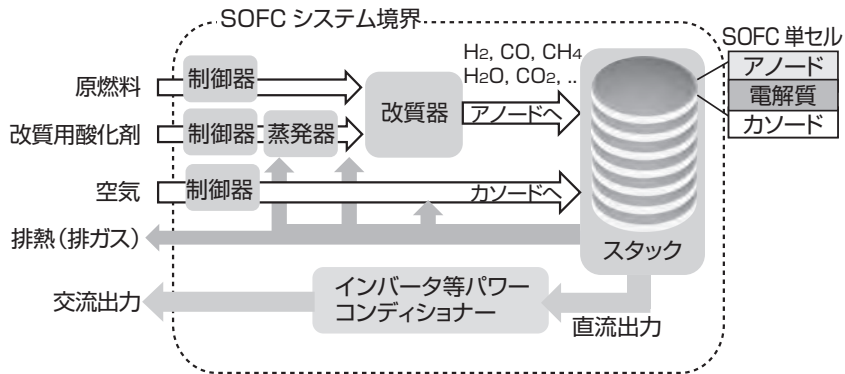


図2 一般的な SOFC システムの構成（制御器：流量制御器）

	単セル	スタック	システム
主な性能指標	電圧-電流特性	スタック電圧-電流特性	交流出力、発電効率
性能規定要因	<ul style="list-style-type: none"> 内部抵抗、過電圧 ガス流量・組成 燃料・空気利用率 温度 	<ul style="list-style-type: none"> セル品質の均一性 燃料分配のばらつき 温度分布 インターコネクト特性 	<ul style="list-style-type: none"> 熱設計（温度制御） 流量制御精度 改質器性能 インバータ性能

図3 性能指標・性能規定要因の包含関係

はシステム試験方法の規格標準化が最優先事項と判断した。なお、最近では、単セルおよびスタックを販売する企業が国内外で出てきており、今後商取引が活発になることから、それらの性能測定方法の規格標準化が重要になっている。我々は現在、単セル・スタック試験方法の IEC および JIS 規格提案を行っており、この取り組みについては別報にて報告した^[1]。

そこで、この研究では、単セル・スタックの発電性能評価手法については、SOFC システムの運転条件を簡便に模擬でき、試験者がより安全に、かつ電圧等の性能を相対不確かさ $\pm 1\%$ で測定するための「発電性能測定評価手法」および、スタック性能のばらつきおよびその要因を評価できる「スタック性能評価手法」の開発を目標とした。発電効率測定に関しては、測定システムに由来する発電効率の相対不確かさの目標値を SOFC 設置サイトでは $\pm 1.0\%$ とし、高精度に都市ガスや LNG 等原燃料の流量・組成を測定する技術を中心に技術開発を行うとともに、発電効率試験方法の規格標準化を行った。

2.2 研究目標を実現するための研究展開

この研究開発では、測定値の不確かさを低減するため、繰り返し性・直線性がよい市販の熱式質量流量計、ガス組成分析計 (ガスクロマトグラフ)、電圧計、電流計等各種測定器を、国家計量標準へのトレーサビリティを確保しつつ、高精度に校正する手法を念頭に置き、研究開発を展開した。

図 4 に、この研究開発で取り入れた各種要素技術とその統合を簡易的に示す。流量測定の例では、連携した産総研計測標準研究部門・流量計測科が都市ガス・水素流量の標準器と実用標準器の開発を行いつつ、当グループは流量校正方法と効率測定用高精度流量測定手法および装

置の開発を担当した。ガス組成分析では、標準ガスメーカーの協力のもと、不確かさが低減できる質量比混合法による標準ガスを利用する分析方法を採用し、高精度ガス組成分析システムを精密分析機器メーカーと開発した。また、図 4 に示すように、発電性能評価手法の研究開発では既存の触媒技術と上記高精度流量測定等を組み合わせた新規な手法を開発し、民間の実用サイズの SOFC セル・スタックを試験可能な装置を燃料電池用機器メーカーと共同で開発した。さらに、スタック性能評価手法の研究開発では、基礎的な電気化学的評価手法の交流インピーダンス法を応用して、電気化学測定器メーカーとともにスタックの性能のばらつきを同時に測定できる装置を試作した。

このように、この研究では、市販の測定器、計量標準にトレーサブルな高精度流量計・標準物質、触媒技術等を適宜組み合わせ、高精度で新規な SOFC 性能測定手法および装置等を開発するとともに、SOFC 開発企業等と連携して開発した装置の性能と実用性を評価した。

3 性能評価と測定手法

3.1 SOFCセル・スタック性能評価手法の開発

3.1.1 発電性能評価手法の開発

SOFC の単セル電圧は、アノードガス中およびカソードガス中の酸素分圧と温度から決まる起電力からオーミック抵抗による抵抗過電圧、電極反応過程による活性化過電圧、電極近傍の物質拡散速度による濃度過電圧を差し引いたものである。アノードガス (H_2 - H_2O - CO - CO_2 - CH_4 等) 中の酸素分圧はアノードガス組成と圧力、燃料利用率等に依存するので、セル・スタックの性能試験ではこれらを規定することが重要である。また、上記過電圧項は SOFC 自体



図 4 この研究開発で取り入れた主要素技術とアウトカムイメージ

の材料・構造に依存し、それらを低減することが SOFC の性能向上につながる。

SOFC システムでは都市ガス、液化石油ガス等多様な原燃料を利用でき、図 2 に示すように、それらを改質してアノードに供給する。つまり、原燃料種、改質条件により、アノードガスの組成は広く変化する。一般的な発電性能試験時の問題として、1. 加湿水素による簡易試験では SOFC システムの実運転条件と試験条件が大きく異なる、2. 改質ガスを模擬して供給する場合、毒性の強い純一酸化炭素を取り扱う必要があり危険で、小流量の水蒸気を安定に発生させることは難しく、セル電圧の変動が大きくなることが挙げられる。なお、SOFC システム (製品) では、アノードガスがそのまま漏えいすることはなく、アノード排ガス中の一酸化炭素等未利用燃料成分は、カソード排ガス中の酸素で燃焼されるので、一酸化炭素の危険性は極めて低い。

そこで、この研究では、これらの問題点を解決し、SOFC 開発者等がより安全に、簡便に、かつ信頼性をもって発電性能を試験できる模擬改質ガス供給方法を中心に、試験方法の研究開発を行った。開発した改質ガス供給方法を図 5 に示す。水蒸気発生は、過剰水素を供給のもと、市販の白金触媒を充填した触媒燃焼器にて水素と酸素を 200 °C 以上で反応させることにより行った。小流量の水蒸気でも安定に発生でき、H₂-H₂O 混合ガスを調製できる。また、純一酸化炭素の取り扱いを避けるために、市販のニッケルあるいはルテニウム触媒 (メタン化用) を用いて、逆シフト反応 (H₂ + CO₂ → H₂O + CO) を利用してアノ

ードの直前で二酸化炭素から一酸化炭素をその場発生させると同時に、メタン化反応 (4H₂ + CO₂ → CH₄ + 2H₂O) を併発させ、メタンも同時に発生できる平衡反応器を開発した。この手法の特徴をまとめると、水素、酸素、二酸化炭素を原料とし、触媒燃焼器と平衡反応器を用いて、改質反応の平衡時と同じ組成・流量の模擬改質ガスを発生させ、アノードに供給できる。また、万一、試験中に一酸化炭素が漏えいした場合でも、二酸化炭素の供給を止めることにより、一酸化炭素の発生を止めることができ、試験時の安全対策を講じることができる。

次に、開発したアノードガス供給方法のノウハウを技術移転し、図 5 に示すように、英和 (株) と共同で SOFC 発電性能試験装置を開発した (特願 2008-045311)。100 W 級 SOFC 試験の場合、コンパクトな触媒燃焼器 (10 mL) および平衡反応器 (20 mL) を実現した。模擬改質ガスの原料流量は熱式の質量流量計 (MFC) で制御しており、高精度流量計 (不確かさ ± 0.2 %) ^[12] を用いた流量校正により、不確かさ ± 0.5-1.0 % を達成した。この装置の性能を確認したところ、模擬改質ガスの組成精度は平衡値に対し ± 0.5-1.0 mol% (図 5)、ガス組成の安定性 ± 0.04 mol% が得られ、高精度な発電性能試験方法が実現できた ^[13]。また、民間の実用 SOFC を試験したところ、原燃料の流量比を変えることにより、想定する原燃料や改質条件を容易にかつ迅速に変更することができ、セル電圧は 30 s 程度で安定して大幅に試験時間を短縮できるとともに、セル電圧の変動を ± 0.1 % 以下に抑制できることが

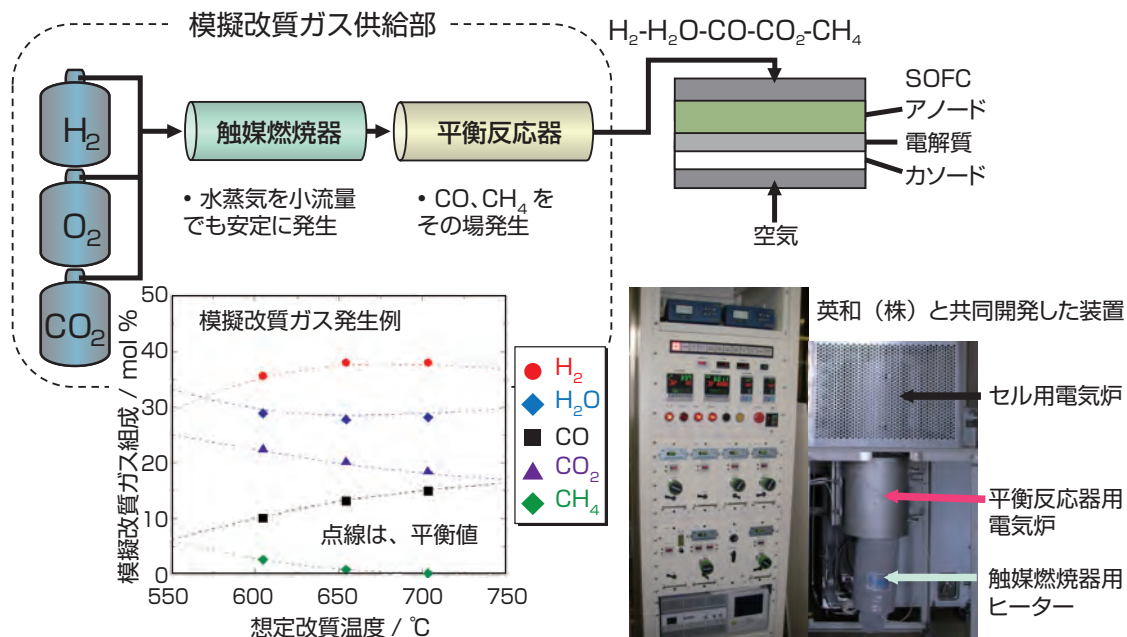


図 5 開発した SOFC 発電性能評価手法と試験装置

分かった。

以上をまとめると、開発した SOFC 発電性能評価手法および試験装置は、小流量でも安定にかつ精度よく模擬改質ガスをアノードに供給でき、かつ、毒性の強い純一酸化炭素の使用を避けることができるので、これまでよりも簡便、安全で、かつ高精度な SOFC 発電性能試験が行えるようになった。最近、複数の SOFC 開発企業がこの装置を購入しているので、今後とも装置メーカーへ技術協力をを行い、製品化に向けた SOFC 研究開発に役立ててもらえるように貢献していきたい。さらに、この研究で得られた知見を活かしつつ、単セルやスタックの性能試験方法の素案を作成し、現在、JIS 規格化および IEC 規格化を同時に進めている^[11]。

3.1.2 スタック性能評価手法の開発

SOFC システムでは単セルを複数積層したスタック (図 6) の性能が重要であり、スタック内の各セル性能のばらつきを抑えることによりシステム制御が容易になる。また、通常、セルは直列接続されているので、セルが一つでも故障あるいは激しい劣化をすると、スタックの運転ができなくなる。以上の理由から、SOFC システムの研究開発では、スタック内の各セルの性能を個別に評価することが望まれている。図 6 に示すように、各セル性能のばらつき要因とし

ては、セル・周辺部材の個体差、燃料分配の不均一性、スタック内の温度分布、および部分的な性能劣化が挙げられる。しかし、このような SOFC スタックの性能を評価する手法は確立されていなかった。

そこで、我々は、単セルの電気化学的性能評価手法としてよく用いられる交流インピーダンス法を応用して、直列スタック中のセル性能のばらつき要因を同時にかつ、各要因を区別して測定できる評価手法を開発し、図 6 (b) に示すように、47セルのインピーダンスを同時に測定できるマルチインピーダンス測定装置を試作した^[14]。この装置では、直流電流に交流電流 (周波数を数十 kHz から 0.01 Hz 程度まで変化) を重畳させ、各セルの電圧応答波形をフーリエ変換することにより、電極反応等の時定数に応じたマルチインピーダンススペクトルが得られる。さらに、試作装置を用いて、共同研究先の関西電力 (株) と三菱マテリアル (株) が開発中の 1 kW スタック (46 セル直列接続) の試験を行った。マルチインピーダンス測定結果の一例 (セル #41-46) を図 6 (c) に Cole-Cole プロットとして示す。x 軸はインピーダンスの実部であり、#46 のスペクトルのように、SOFC の場合、A: オーム抵抗、B: 活性化過電圧に相当する抵抗、C: 燃料消費に伴うガス濃度変化に相当する抵抗の 3 つに分けられる。例えば、セル #41、42 では

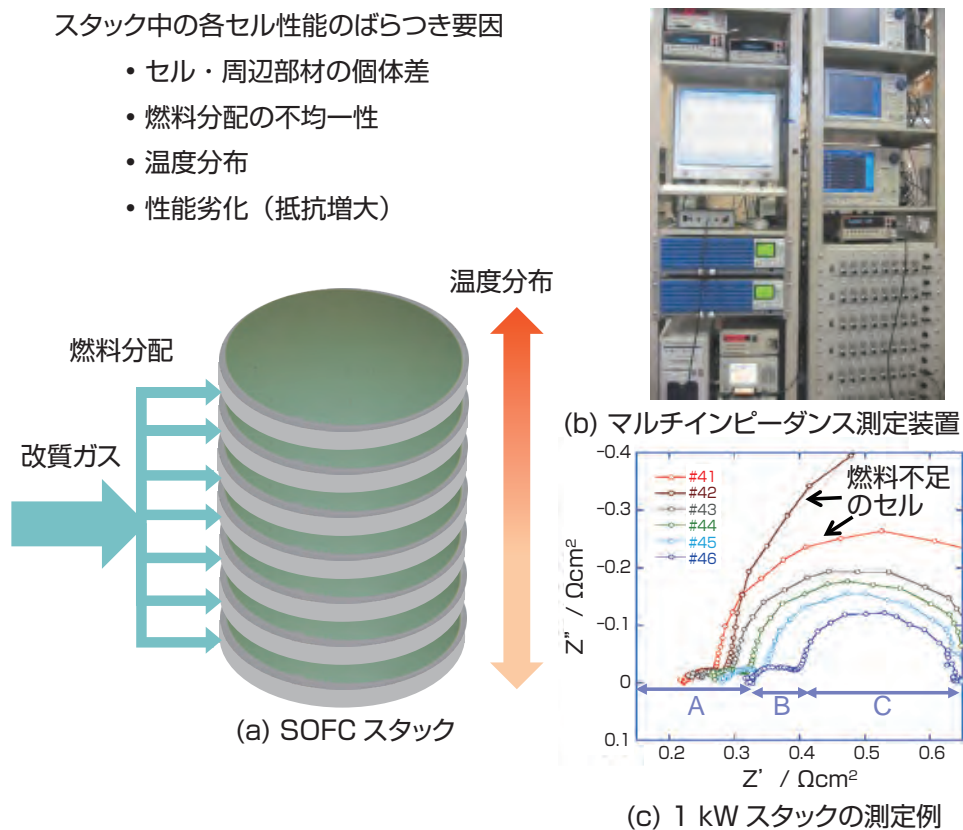


図 6 スタック性能評価手法の開発と民間 1 kW スタックの測定例

C が他のセルに比べ大きく、燃料供給不足により実質の燃料利用率が増加していると診断できる。このような測定結果を SOFC の研究開発にフィードバックすることにより、研究開発を加速させることができる。

以上をまとめると、スタック内の各セル性能のばらつきと各種抵抗成分を分離して測定できるスタック性能評価手法を開発し、民間企業の 1 kW スタックを実測することにより燃料分配の不均一性等の情報を多角的に評価でき、SOFC の研究開発に役立つことが分かった。この成果は、連携企業の 10 kW コージェネ機開発に活かされた。さらに、この手法は、耐久性試験にも応用できると考えている。

3.2 SOFCシステムの発電効率測定手法の開発と規格標準化

3.2.1 高精度発電効率測定手法の開発

NEDO プロジェクト「システム効率計測評価技術の研究」では、産総研計測標準研究部門・流量計測科と共同で、SOFC システムの発電効率の高精度測定手法を中心に研究開発を行った。流量計測科は都市ガス流量用標準器や実用標準器の開発を行った。当グループは可搬型の発電効率測定手法を開発し、同 NEDO プロジェクトで関西電力（株）と三菱マテリアル（株）が開発した 10 kW コージェネ機の発電効率を設置サイトで測定し、不確かさ解析を行った。セクション 2.1 で述べたように、発電効率は高位発熱量 (HHV) 基準を採用した。

SOFC システムの発電効率 η_e は、式 (1) で示すように、SOFC システムに供給される都市ガス等原燃料の発熱量 H と流量 f および正味の交流出力 (電力) P から定義される。

$$\eta_e = \frac{P}{H \times f} \quad (1)$$

よって、発電効率の測定では、これらのパラメータをそれぞれ、目標不確かさに応じた方法で測定することが重要になる。不確かさには、各種測定器の不確かさだけではなく、試験中の測定対象に起因する変動（例：都市ガス組成、出力）も含まれるので、測定システムに由来する発電効率の目標値を相対不確かさ $\pm 1.0 \%$ とし、 H, f, P に平等に割り当てると、それぞれを $\pm 0.6 \%$ の相対不確かさで測定することが要求される。

そこで、この研究開発では、発熱量、流量、出力の測定器の相対不確かさの目標値をそれぞれ $\pm 0.6 \%$ とし、不確かさを低減するために、計量標準にトレーサブルな測定器の校正方法を含む高精度な測定手法を検討した。以下、各測定手法についてまとめる。

3.2.1.1 発熱量測定手法の開発

都市ガス等気体燃料の発熱量は、JIS K 2301 および ISO 6974, 6976 (ISO は天然ガスのみ対象) で規定されているように、ガスクロマトグラフによりガス組成を測定し、計算によって求める方法が主流となっている。この研究では、不確かさの計算方法が規定されている ISO の方法を基に、SOFC 設置サイトでガスを可搬型ガスサンプリング（特願 2008-045311）に採取し、研究室に輸送上記 JIS あるいは ISO 規格準拠のガスクロマトグラフで測定する手法、および可搬性に優れ、数分程度での高速分析が可能なマイクロガスクロマトグラフで測定する手法を開発した（図 7）。なお、ISO 6976 では、発熱量の計算に用いる

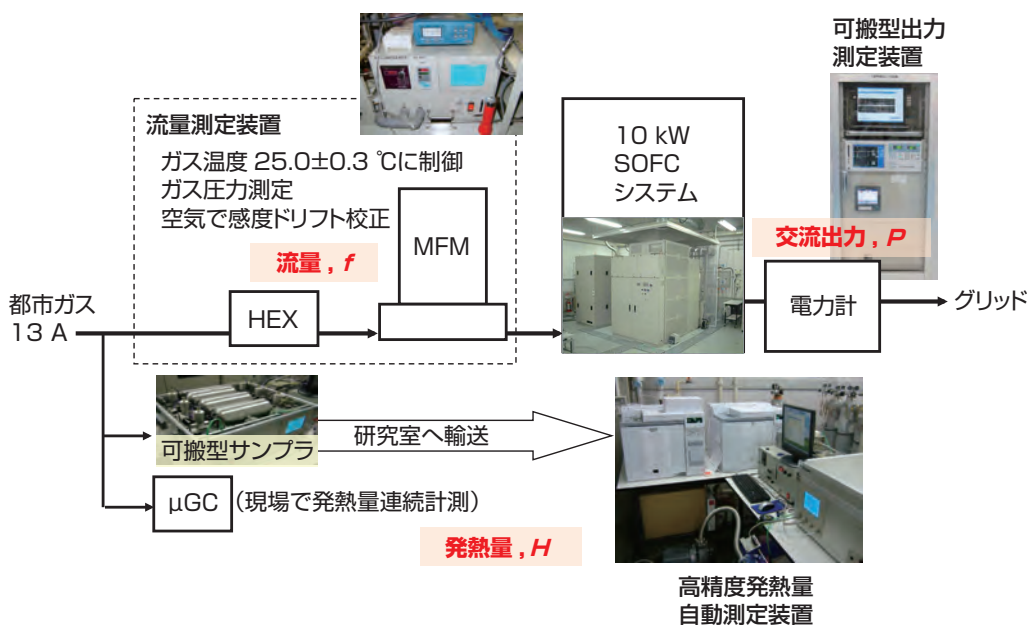


図 7 可搬型高精度発電効率測定システムの概要
HEX：熱交換器、MFM：メタン用熱式質量流量計、μGC：マイクロガスクロマトグラフ

各都市ガス成分の発熱量の不確かさ $\pm 0.1\%$ 程度を議論しているものの、不確かさ計算に取り入れていないので、この研究ではその不確かさも取り入れた。

燃料ガスの組成を高精度に分析するには、ガスクロマトグラフ校正用の標準ガス(ガス成分の濃度が既知)の不確かさが重要である。国内で市販されている不確かさ付きの都市ガス用標準ガスを調べたところ、主成分のメタン濃度については、例えば $88.47 \pm 0.89\%$ ($k = 2$)のように、相対不確かさ $\pm 1.0\%$ であり、この研究には不十分であることが判明した。そこで、住友精化(株)の協力のもと、質量比混合法により都市ガス中の各成分を47 Lガスボンベに充填し、各充填質量を国家質量標準にトレーサブルな大型天秤を用いて3回ずつ繰り返し測定し、標準ガスを調製した。得られた充填質量、天秤の不確かさ等から、ISO 6142の方法に従い、標準ガス中の各成分のモル分率およびその不確かさを計算した。その結果、メタンの場合、 88.002 ± 0.016 、相対不確かさ $\pm 0.02\%$ ($k = 2$)となり、標準ガス組成の不確かさを既存標準ガスの1/50に低減できた。次に、このような高精度標準ガスを複数用いて、ガスクロマトグラフの校正(検量線の作成)を行った。

さらに、サンプルを測定前後に3種類の標準ガスを繰り返し分析でき、別途開発した可搬型のガスサンプラ中の都市ガスサンプルを自動で分析し、ガスサンプリング時の都市ガス流量、ガス圧力、温度等と共に分析データを出力できる高精度発熱量自動測定装置(図7)を紀本電子工業(株)と共同開発した。以上の結果から、都市ガスの発熱量を不確かさ $\pm 0.12\%$ で測定できるシステムを構築することができた。

3.2.1.2 都市ガス流量測定手法の開発

SOFCシステムに供給される都市ガス等原燃料の流量を測定するには、図7に示すように、SOFCシステムの上流に効率測定用流量計(測定装置)を設置する必要がある。家庭用ガスメーターの検定には計量法で指定された湿式体積流量計が基準器として用いられているが^[15]、日本では都市ガスの流量標準がなく、トレーサビリティが十分確保できていないことが問題であったので、計測標準研究部門流量計測科は、この研究開発で都市ガス流量の標準器と実用標準器を開発した。また、上記のようなオイルや水ミストが発生する流量計は、後段のSOFCに影響を与える可能性があるため、効率測定用には向いていない。一方、SOFCシステムの試作機等では、メンテナンスが容易で、繰り返し性に優れた熱式の質量流量制御器(MFC)がよく用いられている。そこで、この研究では、市販のメタン用熱式質量流量計(MFM)を利用した都市ガス流量測定および流量校正システムを構築した。

市販のMFMやMFCのメタン流量を高精度質量流量計で校正したところ、8%の器差を示すものもあり、目標の相対不確かさ $\pm 0.6\%$ の高精度流量測定を実現するには、使用ガスによる流量校正が必須であり、校正に用いる都市ガス等燃料流量の不確かさを低減することが重要であることが判明した。また、ガス組成の影響が少ない体積流量計に対して、MFMは気体の種類によって感度が変わるので、ガスの種類(組成)による補正が必要である。さらに、精密な流量測定にあたっては、質量流量計といえども、圧力・温度の影響を考慮する必要がある。そこで、図7に示すように、MFMの温度依存性を低減するため、熱交換器等によりガス温度を $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ の変動で調整でき、各種データを記録できる可搬型の流量測定装置を開発した。また、SOFCシステムの耐久性試験に備え、試験対象に影響を与えず、一定期間ごと(例えば1か月ごと)にMFMを校正し感度ドリフトを空気で評価できるように、同装置には都市ガスのバイパスラインおよび小型空気コンプレッサーと層流式高精度流量計(米国DHI製molbloc)を搭載した。なお、MFMで測定された質量流量(g/min)を標準状態($0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 101.325 kPa)の理想気体の体積で換算した流量(l min^{-1} 、 $\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)をそれぞれ、 Nl min^{-1} 、 $\text{Nm}^3\text{ s}^{-1}$ で表す。

MFMの流量校正には、都市ガス主成分のメタン(濃度約89%)、エタン(6%)、プロパン(3%)、イソブタン(2%)用のMFCをそれぞれ用意し、各流量を質量流量で校正し、各流量を調整後スタティックミキサーで混合し、熱交換器で温調した模擬都市ガスを発生する都市ガス流量校正器を試作した。この校正器を用いて、MFMの校正やMFMのガス組成依存性・温度依存性・圧力依存性等のMFM特性試験を実施した。この校正器では、20 kWのSOFCに相当する 70 Nl min^{-1} までの都市ガス流量を校正できる。詳細については、別報^[16]を参照されたい。また、使用したメタン用MFMの都市ガス組成補正係数(CF_{mix})は、重回帰分析により、式(2)で示す多項式で計算できることを確認した^[16]。計算値の不確かさは $\pm 0.15\%$ であった。

$$1/CF_{\text{mix}} = \sum x_i / CF_i \quad (2)$$

ここで、 x_i は成分*i*のモル分率、 CF_i は熱式質量流量計におけるメタンに対するガス成分*i*の相対感度である。さらに、MFMの繰り返し性、直線性、温度依存性、圧力依存性、経時的な感度ドリフトについては、カタログスペックと同程度であることを確認し、これらに起因する不確かさの解析にはカタログスペックを使用してもよいと判断した。

以上をまとめると、20 kW級SOFCシステムまで対応できる高精度可搬型都市ガス流量測定装置、流量標準にトレーサブルな流量校正方法および校正器を開発し、校正

表1 10 kW コジェネ機の発電効率初期特性試験時の測定値と不確かさ

パラメータと発電効率	平均値	相対不確かさ ^{a)} ($k = 2$)	(JIS 規定例 ^{b)})
都市ガス発熱量、 H^c (MJ Nm ⁻³)	44.69	±0.12 %	なし
都市ガス流量、 f (10 ⁻⁴ Nm ³ s ⁻¹)	5.507	±0.58 %	±3.0 %
交流出力、 P (kW)	10.14	±0.46 %	±1.5 %
発電効率、 η_e (%)	41.2	±0.74 %	なし

- a) 測定器の不確かさと測定値の変動を含む
- b) JIS-B8122 (2001) コジェネユニットの性能試験方法 (型式試験) の測定器精度¹⁹⁾
- c) 高位発熱量 (HHV) 基準

用流量の相対不確かさ± 0.44 % を達成するとともに、熱式質量流量計感度のガス組成依存性の予測式等都市ガス流量測定時の不確かさを解析するための MFM 特性を明らかにした。計測標準研究部門が開発した都市ガス流量標準器、実用標準器にトレーサブルな高精度流量計あるいは最近市販が開始された校正事業者認定制度 (JCSS) に基づく流量計を校正に用いることにより、トレーサビリティを確保した原燃料流量測定が可能になった。

3.2.1.3 出力測定手法の開発

10 kW 級 SOFC の出力測定には、精度± 0.1 % 級の電力計が市販されている。また、電力および電力量計測については JCSS に基づく高い精度の校正が確立されており、日本電気検定所では不確かさ± 0.04 % の一般校正 (JCSS 校正の最高測定能力は± 0.02 %) を利用できる。よって、出力測定の相対不確かさの目標± 0.6 % は達成可能である。

ただし、SOFC システムの交流出力は、スタックから出力される直流電力をインバータで商用周波数の交流に変換したものであり、一般的に商用周波数の基本波の他に、各種高調波やインバータのキャリア波等を含む。そこで、この研究では、基本波の有効電力のみを出力 P と定義した。高調波成分を含む交流電力の国家標準はなく、通常の商用電力量計では等級誤差の範囲内の高調波成分を含む交流しか対象にない。このため、出力評価において、電力測定への基本波以外の高調波成分等の影響が重大な不確かさ因子となる場合も想定され、高調波成分等の評価が不可欠である。

以上の理由で、必要な場合には直流電力も測定可能で、商用交流電力を高精度で測定でき、高調波等の解析も可能な市販の精密電力解析器 (YOKOGAWA WT3000) をベースに、図 7 に示すようなコンパクトな可搬型出力測定装置を開発した。測定項目は、有効電力の他に、出力条件の電圧、電流、力率、高調波やインバータキャリア波である。また、不確かさ解析のために、測定時の環境温度や測定器温度を測定できるようにした。

3.2.1.4 民間企業が開発した10 kW機の発電効率測定

3.2.1.1 ~ 3 で開発した可搬型高精度効率測定装置を用いて (図 7)、関西電力 (株) と三菱マテリアル (株) が NEDO プロジェクトで開発した 10 kW 級コジェネ機 (交流出力:60 Hz、三相三線 200 V、最大電流 38 A、力率 0.99) の発電効率の初期特性試験、および 3000 h にわたる耐久性試験において発電効率を同機設置サイトで測定した。10 kW 機と可搬型出力測定装置の接続は、不確かさを低減させるために、スターゼロポイントアダプターによる模擬中性点を利用する三相四線三電力計測定方式を採用した¹⁶⁾。

図 8 に初期特性試験時の都市ガス流量と出力を示す。この 10 kW 機は、燃料利用率 (原燃料の内、電池反応に利用される割合) を一定に制御しているため、都市ガス流量は比較的安定しており、変動は± 0.14 % であった。一方、交流出力は SOFC システム内部で消費される補機動力等の変動により、± 0.45 % 変動した。都市ガスの発熱量の変動については、10 kW 機設置サイトでマイクロガスクロマトグラフにより分析するとともに、可搬型サンプラで試験前後の都市ガスをサンプリングし、産総研で発熱量の変動を分析した。その結果、初期特性試験時の発熱量の変動

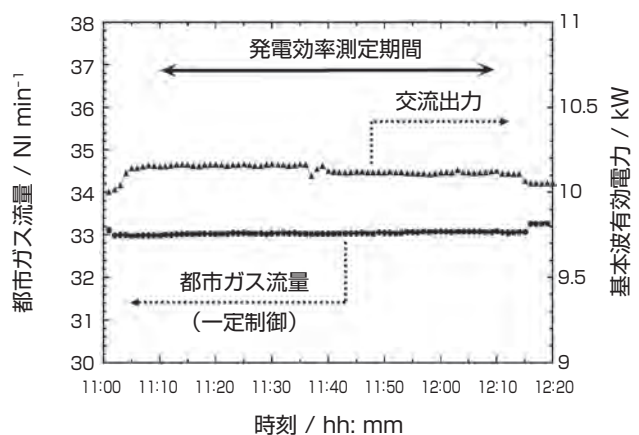


図 8 10 kW コジェネ機の発電効率初期特性試験時の都市ガス流量と交流出力

幅は $\pm 0.02\%$ で十分小さいことが判明した。都市ガスの高位発熱量 (HHV) と流量、出力 (60 Hz 有効電力) の平均値を測定値とし、表 1 に示すように、それぞれ 44.69 MJ Nm^{-3} 、 $5.507 \times 10^{-4} \text{ Nm}^3 \text{ s}^{-1}$ 、 10.14 kW であり、式 (1) より高位発熱量ベースの発電効率 41.2% (HHV) が得られた。上記各パラメータの変動幅、効率測定時の都市ガス温度・圧力等測定条件が与える不確かさ、および 3.2.1.1 ~ 3 で示した測定装置由来の不確かさを合成したところ、表 1 に示すように、発熱量、流量、出力、発電効率の相対不確かさは、それぞれ、 $\pm 0.12\%$ 、 $\pm 0.58\%$ 、 $\pm 0.46\%$ 、 $\pm 0.74\%$ となった。したがって、発電効率は $41.2 \pm 0.3\%$ (HHV) と推定でき、NEDO プロジェクトの目標不確かさ $\pm 1.0\%$ を達成するとともに、この 10 kW 機が NEDO の開発目標発電効率 40% (HHV) 以上をクリアしたことを証明することができた。

以上をまとめると、この研究では国家計量標準へトレーサブルな可搬型の高精度効率測定手法および装置を開発し、発電効率を SOFC 設置サイトでも相対不確かさ $\pm 1.0\%$ 以下で測定できることを明らかにした。よって、将来的に発電効率が $50 \sim 70\%$ に向上した場合でも、効率を不確かさ $\pm 0.5 \sim \pm 0.7\%$ で測定することが可能になった。また、この手法は、SOFC だけではなく、その他の燃料電池システムあるいはエネルギーシステムの発電効率測定にも応用できると考えられる。

3.2.2 発電効率測定試験方法の規格標準化

燃料電池システムの発電効率試験方法は、国際規格として IEC 62282-3-2 が発行されているものの、国内では SOFC の発電効率試験方法の JIS 規格は確立されていなかった。また、SOFC が実用化・普及開始される段階では少なくとも商用電力並み (出力測定の不確かさ $\pm 0.1\%$ 級) の測定精度をもつ試験方法が必要である。そこで、この研究では、3.2.1 項で開発した高精度発電効率測定手法の知見を活かしつつ、SOFC 設置サイトへの機器輸送等が測定器に与える影響を調査し、SOFC システムの最も重要な性能指標の発電効率を有意に比較できるような不確かさで試験できる発電効率試験法の JIS 素案を作成し、(社) 日本電機工業会のご協力のもと、セル・スタック製造企業、システム開発企業、中立研究機関等から構成される審議委員会で検討を行った。

委員会の審議結果を反映しつつ、既存の JIS 規格、校正制度等を調査し、SOFC システムに対し、国家計量標準へのトレーサビリティを確保しつつ、発電効率を $\pm 1\%$ よりも小さな不確かさで測定する JIS 標準仕様書 (TS) 原案を 2008 年に作成した。原案は日本工業標準調査会 (JISC) で審議された後、2010 年に JIS TS C0054「メタンを主成

分とする気体燃料を用いる固体酸化物形燃料電池システムの発電効率試験方法」が発行され、2011 年 10 月からの家庭用 SOFC システムの販売開始に間に合わせる事ができた。

4 まとめと今後の展望

SOFC システムの早期実用化を支援するとともに、SOFC が商用化された際の公正な取引に重要な性能試験方法の規格標準化を行うために、国家計量標準へのトレーサビリティを確保しつつ、市販の測定器、触媒技術等を統合し、SOFC 単セルからシステム (最終製品) までの新規な SOFC 性能評価手法を開発した。SOFC システムの研究開発で重要な SOFC 単セル・スタックの性能評価手法については、簡便、安全で、かつ高精度な発電性能評価手法を開発し、民間企業と試験装置を開発するとともに、スタック内の各セル性能のばらつき要因を同時に測定できる手法・装置を開発して、民間の SOFC システムの研究開発に貢献してきた。また、SOFC システムの発電効率測定については、可搬型で SOFC 設置サイトでも高精度に効率を測定できる手法および装置を開発し、民間企業が開発した 10 kW 機の発電効率を実測したところ、 $41.2 \pm 0.3\%$ (HHV) という値を得、NEDO プロジェクトの目標値 (発電効率 40% 以上かつ不確かさ $\pm 1.0\%$) を達成していることを証明した。なお、将来的に発電効率が向上した場合でもこの手法を十分使用できる。さらに JIS (TS) の原案を作成し、SOFC システムの販売開始に先駆け JIS (TS) 発行が実現できた。

今後は、SOFC 単セル・スタック性能試験方法の JIS 規格化、IEC 規格化を急ぐとともに、この研究で開発した手法を活かして、SOFC システムの発電効率のさらなる向上、新燃料 (ジメチルエーテル等) ・バイオマス・石炭を利用できる SOFC システムの研究開発、自動車等の補助電源として期待されている可搬用 SOFC の研究開発に貢献し、高効率分散型 SOFC 発電システムの普及および適用性の拡大に努めていきたい。さらに、SOFC の製品化で重要になる耐久性試験方法の規格標準化も進めていきたい。

謝辞

本研究開発および性能試験方法の規格標準化は、経済産業省、NEDO から支援を受け実施しましたので、関係各位に感謝申し上げます。また、研究開発にあたり、関西電力 (株)、三菱マテリアル (株)、住友精化 (株)、紀本電子工業 (株)、英和 (株)、産総研計測標準研究部門流量計測科をはじめ、連携していただいた皆さまにお礼を申し上げます。試験方法の規格標準化では、(社) 日本電機

工業会、SOFC セル製造企業、SOFC システム開発企業、
中立研究機関等の方々からのご協力をいただきました。

参考文献

- [1] スマートコミュニティ・アライアンス(JSCA), スマートコミュニティ・アライアンス規約, <https://www.smart-japan.org>, JSCA, 東京 (2011).
- [2] W.W. Clark II and L. Eisenberg: Agile sustainable communities: On-site renewable energy generation, *Utilities Policy*, 16 (4), 262-274 (2008).
- [3] 電気化学会エネルギー会議電力貯蔵技術研究会(編): 大規模電力貯蔵用蓄電池, 8-25. 日刊工業新聞社, 東京 (2011).
- [4] 川上 潔, 河合 潤, 永井雅明: 1500 °C級ガスタービンコンバインドプラントの設計と試運転実績-東京電力(株)川崎火力発電所第1号系列の建設-, *三菱重工技報*, 46 (2), 30-33 (2009).
- [5] 小林由則, 安藤喜昌, 加幡達雄, 西浦雅則, 富田和男, 眞竹徳久: 究極の高効率火力発電-SOFC(固体酸化物形燃料電池)トリプルコンバインドサイクルシステム, *三菱重工技報*, 48 (3), 16-21 (2011).
- [6] 奥田 誠: 平成22年度固体酸化物形燃料電池実証研究成果報告会, 33-62, 新エネルギー財団, 東京 (2011).
- [7] 飯塚幸三 監修: 計測における不確かさの表現のガイド-統一される信頼性表現の国際ルール-, 日本規格協会, 東京 (1996).
- [8] 奥 雅司: 標準化教育プログラム [個別技術分野編-電気電子分野] 第15章計測の信頼性と測定の不確かさ, http://www.jsa.or.jp/stdz/edu/pdf/b4/4_15.pdf, 19.
- [9] 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO): 「固体酸化物形燃料電池システム技術開発」基本計画, <http://www.nedo.go.jp/content/100085124.pdf>, 東京 (2004).
- [10] 日本規格協会: コージェネレーションユニットの性能試験方法JIS B8122: 2001, 1-41, 日本規格協会, 東京 (2001).
- [11] 門馬昭彦, 高野清南, 田中洋平, 嘉藤 徹: 固体酸化物形燃料電池(SOFC)単セル/スタックの発電性能試験方法の規格化における不確かさ評価, *Synthesiology*, 5 (4) (2012).
- [12] Bios International Corporation: model ML-800-10, <http://www.biosint.com/Products/biosmetlabseries.php>, Butler NJ (2012).
- [13] Y. Tanaka, A. Momma, K. Sato and T. Kato: Fuel flexibility of anode-supported planar solid oxide fuel cell evaluated with developed simulated-reformate-gas generator, *J. Fuel Cell Sci. Technol.*, 8, 061012, 1-6 (2011).
- [14] A. Momma, K. Takano, Y. Kaga, K. Nozaki, A. Negishi, K. Kato, T. Kato, T. Inagaki, H. Yoshida, K. Hosoi, M. Shibata, M. Yamada, T. Akbay, J. Akikusa and N. Chitose: Simultaneous impedance measurement of 46 cells in 1 kW SOFC stack: Evaluation of the fuel flow rate distribution among the cells, *Proc. SOFC9*, 1, 554-563 (2005).
- [15] 社団法人 日本計量機器工業連合会: 流量計の実用ナビ, 40-41および174-183, 社団法人 日本計量機器工業連合会, 東京 (2005).
- [16] Y. Tanaka, A. Momma, K. Kato, A. Negishi, K. Takano, K. Nozaki and T. Kato: Development of electrical efficiency measurement techniques for 10 kW-class SOFC system: Part I. Measurement of electrical efficiency, *Energy Conversion Manage.*, 50 (3), 458-466 (2009).

執筆者略歴

田中 洋平 (たなか ようへい)

2005 年京都大学大学院工学研究科物質エネルギー化学専攻博士課程修了。同年、産業技術総合研究所入所。現在、エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループ研究員。専門は、触媒化学、燃料電池性能評価、エネルギー工学。この論文では、発電性能評価手法および高精度都市ガス流量・発熱量測定手法の研究開発と効率測定法の統括、発電効率測定試験法の規格標準化、論文の全体調整を担当。



門馬 昭彦 (もんま あきひこ)

1985 年東京工業大学金属工学科博士課程修了。SRI インターナショナル客員研究員を経て、1989 年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。現在、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループ主任研究員。専門は、電気化学計測・評価。この論文では、各種規格標準化、スタック性能評価手法の研究開発、および 10 kW 級出力測定手法の開発を担当。



根岸 明 (ねぎし あきら)

1968 年、通商産業省工業技術院電気試験所入所。1972 年東京理科大学理学部Ⅱ部化学科卒業。現在、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループテクニカルスタッフ。専門は、電気化学、電池技術。燃料電池や新型電池等の電気化学的エネルギー変換貯蔵技術の研究開発等に従事。この論文では、高精度都市発熱量測定手法の研究開発を担当。



加藤 健 (かとう けん)

1969 年通商産業省工業技術院電気試験所入所。1973 年電機大学工学部Ⅱ部電子工学科卒業。元産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループ主任研究員。専門は、電子工学。この論文では、高精度都市ガス流量測定手法の研究開発を担当。



高野 清南 (たかの きよなみ)

1966 年徳島大学工学部電気工学科卒業後、通商産業省工業技術院電気試験所入所。MHD 発電に関する研究開発、システム解析、発電特性の解析、発電実験等に従事。現在、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループに産学官制度で来所。岩谷直治記念賞、ムーンライト計画推進功労者表彰、小平記念賞等を受賞。1989 年東京工業大学工学博士取得。その後、リチウム二次電池のシミュレーション技術の研究を経て、2001 年より固体酸化物燃料電池の発電特性評価に関する研究に従事。この論文では、スタック性能評価手法の研究開発と 10 kW 級出力測定手法の開発を担当。



野崎 健 (のざき けん)

1968 年 3 月東京大学大学院工業化学専攻修士課程修了。1968 年 4 月通商産業省工業技術院電気試験所入所。現在、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループテクニカル

スタッフ。燃料電池や新型電池等の電気化学的エネルギー変換貯蔵技術の研究開発および地球環境技術の研究開発等に従事。この論文では、高精度都市ガス発熱量・流量測定手法の研究開発と発電効率測定試験法の JIS (TS) 規格の原案作成を担当。



嘉藤 徹 (かとう とおる)

1991 年東北大学大学院修士、工学博士。1992 年通産省工業技術院電子技術総合研究所入所。固体酸化物形燃料電池および高温水蒸気電解技術の研究に従事。産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門燃料電池システムグループを経て現在は、経済産業省産業技術環境局研究開発課産業技術総括調査官。この論文では、研究開発全体の統括および発電効率測定試験法の JIS (TS) 規格の原案作成・とりまとめを担当。



くと、全体の流れがとてもわかりやすくなると思います。燃料電池の性能評価とは具体的に何を測定すれば相互評価ができるようになるのか、試験方法としてどのようなものが考えられるか、それぞれのメリット・デメリットは何か、セル・スタック・システム各レベルにおける評価手法の違いは何か、等々を整理していただけるとよいかと思います。

回答 (田中 洋平)

1 章および 2.1 節に単セル、スタック、システム性能評価の重要性を述べるとともに、新たに図 3 を作成し、各レベルの包含関係を示しつつ、性能指標と性能規定要因を整理したものを追加し、論文の前半で各レベルの評価項目 (性能指標) の説明と関連性の記述を追加しました。

議論3 技術開発の階層性

コメント (立石 裕)

議論 2 と関連しますが、3 章における個別の技術開発項目の関連性があまり記述されていないので、まったく独立な技術開発のように見えてしまいます。

3.1.1 単セルの性能評価手法の開発

3.1.2 スタックの性能評価手法の開発

3.2 システムの性能評価手法の開発と標準化

これらの項目の関連性と技術開発の流れの説明が必要かと思えます。例えば、単セルの評価手法は、スタックやシステムの評価手法にどう生かされているのでしょうか？

回答 (田中 洋平)

貴重なコメントありがとうございます。議論 2 の回答で一部お答えしましたように、単セルからシステムまでの性能評価・研究開発の流れと各レベルにおける性能指標および評価技術について、1 章で簡易的に記述し、2.1 節で説明するようにしました。

単セル性能がスタックあるいはシステムにどう活かされるかにつきましては、SOFC システムの発電部は、最小構成単位の単セルを複数積層したスタックであり、スタックの開発には単セルの性能を把握した上で、温度分布、流量分配の不均一性等による各セル性能のばらつきを評価し、最適な設計を行うことが重要です。さらに、システムでは、スタック性能に加えて、熱設計、流量制御精度等の補機類の設計が重要になりますが、特にスタック性能が発電効率等のシステム性能に直結いたします。

議論4 標準化の流れ

質問 (立石 裕)

システムの性能評価の標準化が先行し、セル・スタックの性能評価の標準化が後追いになっている理由は何でしょうか？ 常識的には、要素から標準化が始まり、システムの標準化は最後にくるような気がしますが。

回答 (田中 洋平)

ご指摘のとおり、通常ですと単セル・スタック→システムの順で開発も標準化も進んでいくと考えられますが、当初、1-200 kW 級 SOFC システムの開発がセル製造企業とシステム開発企業の間で進められ、実用化が迫っていたため、まずはシステム試験方法の規格標準化が最優先事項と判断いたしました。なお、最近、単セルおよびスタックを販売する企業が国内外で出てきており、今後国内外で商取引が活発になることならびに国際間連携による SOFC 開発が活発化することが予想されていますので、単セル・スタックの性能測定方法の規格標準化が重要となっています。我々は現在、単セル・スタック試験方法の IEC および JIS 規格提案を行っており、この取り組みについては *Synthesiology* 5 巻 4 号で報告しました (参考文献 [11])。

この点に関しては、2.1 節内に加筆しました。

査読者との議論

議論1 記述のわかりやすさ

コメント (立石 裕: 産業技術総合研究所つくばセンター)

全体に分量が多いので、記述の簡潔化が必要です。特に「1 はじめに」の部分はお題目的な内容が多いので、専門外の読者にとって必要最低限な記述にした方がよいと思います。温暖化対策と分散電源の必要性、SOFC がなぜそれに対応できるのか、開発状況、著者らの研究開発の意義とポイント (特に評価手法の現状と重要性)、を簡潔に述べてください。また、文末の「不確かさ」に関する記述は、どの程度の読者が正しく理解できるか疑問です。参考文献を追加した方が親切かと思えます。

コメント (長谷川 裕夫: 産業技術総合研究所つくばセンター)

Synthesiology は他分野の読者にもストレスなく読めるよう、筆者には分かり易い記述を心がけていただいています。その意味で、「不確かさ」について参考文献を上げていますが、簡単な解説をこの論文に書き込んだ上で、詳細は参考文献とした方がよりわかりやすくなると思います。「不確かさ」という何となく意味が分かったような気がしてしまう日本語のため、なおさらそうした注意が必要かと思えます。

回答 (田中 洋平)

導入の部分に関しては簡潔な記述を心がけ、これまでの SOFC の細かい開発経緯を削除し、現状のシステム開発の状況と今後の開発計画等を紹介し、高効率発電システムとしての SOFC システムの特長に触れるとともに、当グループの取り組みである高精度性能評価技術の重要性を記述しました。また、SOFC の位置付けとしては、温暖化対策としても有効だと考えますが、沿岸部の大規模集中型発電システムとは対照的に、特に内陸部の高効率分散型発電システムとし今後の電力・熱の安定供給を担っていくこと (エネルギーの高度利用) がより重要な役割だと考えており、関連する部分はほとんど修正していません。不確かさについては、ご指摘のとおり、簡単な説明を追加するとともに、参考文献 [7] を参照していただきたい旨を加筆しました。

議論2 性能評価の体系

コメント (立石 裕)

性能評価手法の開発に関して、セル・スタック・システムのそれぞれのレベルにおいて、具体的にどのような要素を評価すればよいのが統一的に述べられていないため、非専門家から見ると、個々の技術開発の目的がわかりにくくなっています。16 ページの 3.1.1 の二つ目のパラグラフの中の「一般的な発電性能試験時・・・大きくことが挙げられる。」という部分を最初にもう少し詳しく説明していた