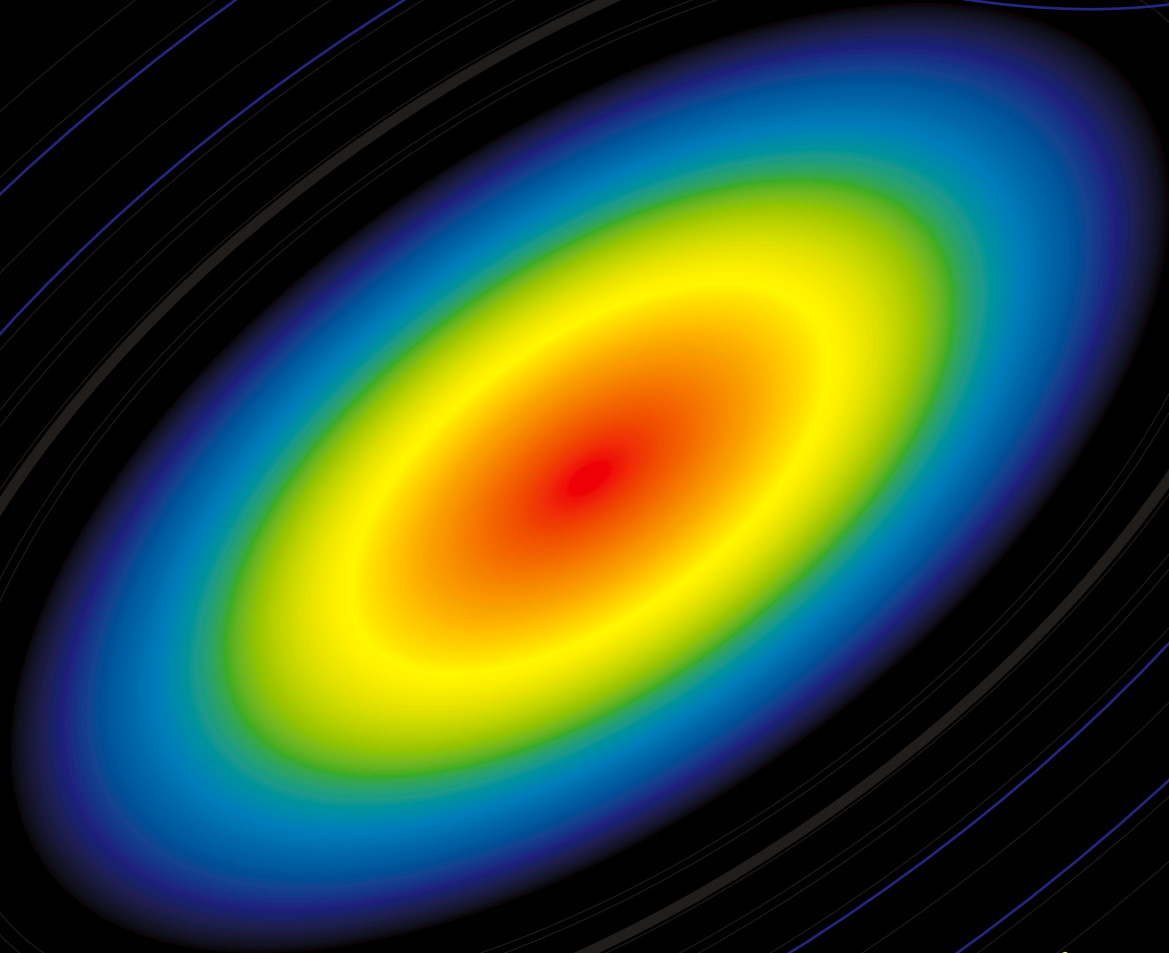


伝 熱

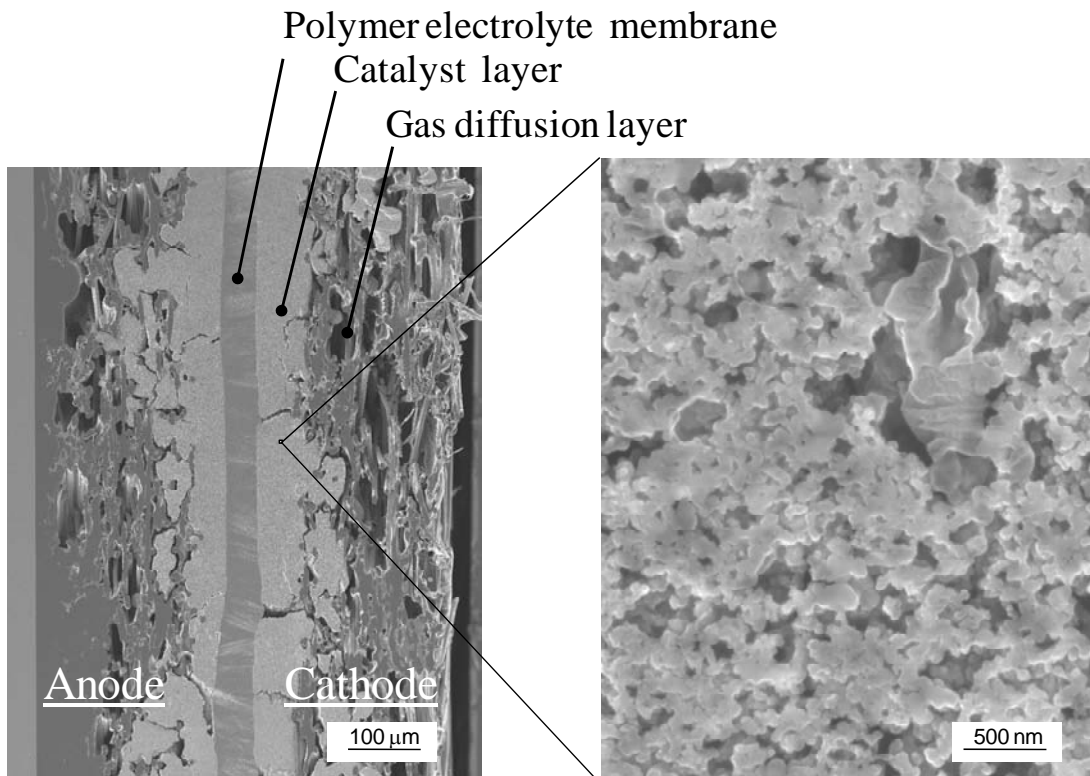
Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 49, No. 206
2010. 1



HETSJ

◆特集：燃料電池普及への鍵



a) 膜電極複合体 (MEA) 全体画像

b) 触媒層拡大画像

固体高分子形燃料電池のイオンビーム切断断面 SEM 像

Cross sectional SEM photographs of a membrane electrode assembly for polymer electrolyte fuel cell by using an ion beam polishing method

津島将司*, 平井秀一郎 (東京工業大学)

Shohji Tsushima, Shuichiro Hirai (Tokyo Institute of Technology)*

**e-mail: tsushima@mech.titech.ac.jp*

固体高分子形燃料電池は、固体高分子陽イオン交換膜を電解質膜 (Polymer electrolyte membrane) として、その両側に触媒層 (Catalyst layer) とガス拡散層 (Gas diffusion layer) (近年は、微細孔層を水分制御層として挿入する場合が多い) で挟んだ構造をしている。高分子電解質はイオン (プロトン) 輸送を担い、触媒層、ガス拡散層中の固相 (通常は炭素材料) が電子輸送パスとなり、熱輸送も担っている。燃料電池で発電に必要な反応ガス (水素、酸素) は、ガス流路から拡散層、触媒層内の多孔質空隙を輸送パスとして、触媒層内の白金表面上で電気化学反応が進行する。多孔質空隙は、反応生成水の排出パスでもあり、燃料電池の高性能化のためには、イオン、電子、反応ガス、水分の輸送を制御することが重要である。そのため、実際の多孔質場の評価を踏まえた上での現象解明が求められており、写真は、イオンビームを用いて燃料電池の平滑断面を作製し、走査型電子顕微鏡により、燃料電池の内部構造を撮影したものである。それぞれの層の空間構造を把握することで、固相と空隙のそれぞれの連結性などの情報を与えてくれる。また、触媒層の一部にマイクロクラック (き裂) が見られる (我々の軟 X 線イメージングでも、発電中の燃料電池触媒層に同様にクラックが生じていることを確認している)。さらに、触媒層の一部はガス拡散層内に入り込んでいる。燃料電池を各層のサンドイッチ構造とする従来の扱いから、各層が重畳し層内でも不均質を有する場として、今後、物質輸送を考慮していく必要があることを示唆している。

伝 熱

目 次

〈特集：燃料電池普及への鍵〉

日産自動車における燃料電池自動車の開発	上原哲也（日産自動車株式会社）	1
家庭用燃料電池（PEFC）の技術開発と今後	藤本正之（東京ガス）	6
燃料電池における「その場」計測のあれこれ	津島将司，平井秀一郎（東京工業大学）	14

〈海外レター〉

オハイオ州立大学滞在日記	小林信介（名古屋大学）	23
--------------------	-------------------	----

〈エデュケーションQ〉

ニールス・ボーア(1885~1962)の功績	村上陽一（東京工業大学）	25
------------------------------	--------------------	----

〈国際活動・会議報告〉

第7回コンパクト熱交換器とその性能向上に関する国際会議報告	石塚 勝（富山県立大学）	30
InterPACK'09 会議報告	伏信一慶（東京工業大学）	32

〈巻頭グラビア:heat-page〉

固体高分子形燃料電池のイオンビーム切断断面 SEM 像	津島将司，平井秀一郎（東京工業大学）	表紙裏
--------------------------------------	--------------------------	-----

〈行事カレンダー〉	35
-----------------	----

〈お知らせ〉

第47回日本伝熱シンポジウムのご案内	36
優秀プレゼンテーション賞（第47回日本伝熱シンポジウム）について	40
事務局からの連絡	41
編集部会ノート	45

Vol. 49, No. 206, January 2010

CONTENTS

<Special Issue>

Development of Fuel Cell Vehicle in Nissan Tetsuya KAMIHARA (Nissan Motor Co., Ltd)	1
Development and Future of Residential PEFC Co-generation System Masayuki FUJIMOTO (Tokyo Gas)	6
Recent Advances on In Situ Measurement of Fuel Cells Shohji TSUSHIMA, Shuichiro HIRAI (Tokyo Institute of Technology)	14

<International Letter>

A diary while staying The Ohio State University Nobusuke KOBAYASHI (Nagoya University)	23
---	----

<Education Q>

A meritorious deed of Niels Bohr (1885-1962) Yoichi MURAKAMI (Tokyo Institute of Technology)	25
---	----

<Report on International Conference>

Report of Seventh International Conference on Enhanced Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology Masaru ISHIZUKA (Toyama Prefectural University)	30
Report of InterPACK'09 Kazuyoshi FUSHINOBU (Tokyo Institute of Technology)	32

<Opening-page Gravure:heat-page>

Cross sectional SEM photographs of a membrane electrode assembly for polymer electrolyte fuel cell by using an ion beam polishing method Shohji TSUSHIMA, Shuichiro HIRAI (Tokyo Institute of Technology)	Opening Page
---	--------------

<Calendar>	34
------------------	----

<Announcements>	35
-----------------------	----

日産自動車における燃料電池自動車の開発 Development of Fuel Cell Vehicle in Nissan

上原 哲也 (日産自動車株式会社)
Tetsuya KAMIHARA (Nissan Motor Co., Ltd)
e-mail:t-kamihara@mail.nissan.co.jp

1. はじめに

地球温暖化の主要因の一つである CO₂ の排出量抑制のためには、自動車からの CO₂ 排出の低減が必要である。CO₂ 排出低減の方策としては、短期的には従来の内燃機関の効率向上やハイブリッド自動車の普及促進など、中長期的には電気自動車 (EV) や燃料電池自動車 (FCV) の導入が望まれている。本稿では、CO₂ 削減に効果の大きい燃料電池自動車の日産自動車における開発状況、開発車の運用状況、さらに今後の市場導入に向けた課題とその対応策について紹介する。

2. 日産自動車における FCV 開発

日産自動車は、2001 年に直接水素型燃料電池を搭載した FCV による公道走行実験を開始し、その後も順次改良を進め、X-Trail をベース車として、2003 年、2005 年と新たな FCV を開発してきた。図 1 に示す X-Trail FCV 2005 年モデル (以下、05FCV) には、初めて日産内製の燃料電池スタックを搭載をし、現在に至るまで市場の様々な条件での走行を継続し、今後の実用化に向けた課題の抽出を行っている。



図 1. X-Trail FCV 2005 年モデル

表 1 に 05FCV の主要諸元を示す[1]。05FCV は、2003 年モデルに対し、燃料電池の出力を 40% 以上向上しつつ、車重は 170kg 軽量化した。

表 1. 05FCV の主要諸元

		2005MY	2003MY
Vehicle	Overall length/width/height (mm)	4485/1770/1745	4485/1770/1800
	Curve Weight	1790 (1860)	1960
	Seating capacity	5	←
	Top speed (km/h)	150	145
	Cruising range (km)	over 370 (over 500)	over 350
Motor	Type	Coaxial motor integrated with reduction gear	
	Max. power (kW)	90	85
Fuel cell stack	Fuel cell	Polymer electrolyte type	
	Max. power (kW)	90	63
	Supplier	In-house	UTC Fuel Cell (USA)
Battery	Type	Compact Lithium-ion Battery	←
	Fueling system	Compressed hydrogen gas	
Fueling system	Fuel type	Compressed hydrogen gas	
	Max. pressure (MPa)	35 (70)	35

図 2 に燃料電池スタックをはじめとした、主要ユニットの車両レイアウトを示す[1]。

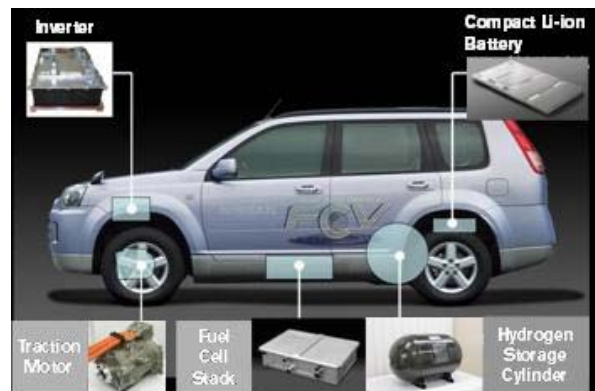


図 2. 主要ユニットの車両レイアウト

燃料電池スタックをフロントシートの下に、高圧の水素貯蔵タンクをセカンドシートの下に配置している。2次電池 (リチウムイオンバッテリー) は車両後部の荷物スペースのフロアの下に配置し、

ガソリン車と同等の荷物スペースを実現している。

高圧の水素貯蔵システムは、貯蔵圧力が 35 MPa と 70 MPa の 2 仕様があり、35MPa タイプでは航続距離 370km、70MPa タイプでは 500km を実現した。

2008 年に新たに開発した新型燃料電池スタックを図 3 に示す。05FCV 搭載のスタックに対し出力密度で 2 倍の向上、耐久性についても 1.6 倍の向上を達成し、更に白金使用量の半減も実現した。この新型燃料電池においては、水素・空気・冷却水を分離するセパレータを、従来のカーボンから薄板金属製のプレス成形品とすることにより、セルピッチを縮小しスタックを小型化した。本セパレータには表面処理を施し、高い耐腐食性と電気伝導性を両立させている[2]。

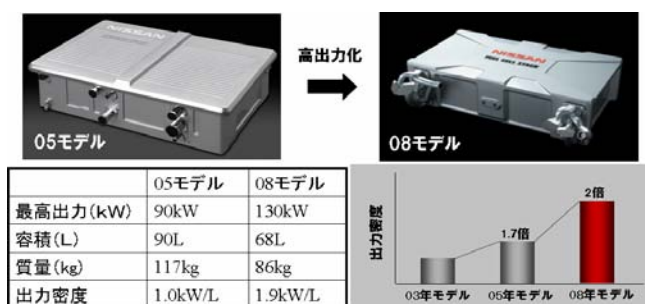


図 3. 新型燃料電池（2008 年モデル）

この新型スタックでは、氷点下からの起動性についても大幅な向上を実現し、本スタックを搭載した試験車両を用いて寒冷地実験を実施し、氷点下の凍結条件からの起動を実現することができた。

3. FCV による実証試験および広報活動

日産自動車は X-Trail FCV を用いて、各種実証試験および広報啓発活動を行っている。

FCV および水素供給インフラに関する実証試験として、日本においては水素・燃料電池実証プロジェクト（JHFC）、北米においては California Fuel Cell Partnership（CaFCP）に参加し、FCV の実用化に向けた活動に貢献している。

また、特定のお客様に FCV をリースし、実際に使っていただきながら、そこから得た情報を開発にフィードバックしている。

更に、FCV の認知度を向上させ将来の普及を促進することを目的に、各種イベントへの参加・開催や、一般の方への試乗会を行い、FCV のスマー

ズでパワフルな走行性能、静粛性に高い評価をいただいている。

4. FCV の市場導入に向けた課題

現状の FCV は、上記のように、その性能は十分に一般のお客様に乗って頂けるレベルに達しているが、今後の市場投入に向けては、いくつかの課題残されている。

今後、解決すべき主な技術課題としては、大幅なコストの低減、耐久信頼性の向上、水素貯蔵タンクの小型軽量化などがあげられる。

4.1 コストの低減

FCV のコストを低減するには、材料コストの低減および燃料電池システムの簡素化の 2 つの視点が必要である。

1) 材料コストの低減

材料コストの低減策としては、高コスト材料の使用量低減や、低コスト材料への置き換えが課題となる。

特に電極触媒に用いられている白金については、希少材料であるため、使用量の大幅な低減が求められている。

白金の使用量を低減させると、発電性能と耐久性が低下するため、その対応が必要となる。後述するように触媒の耐久性についても、種々の課題がある。これらの課題を解決しつつ、大幅な白金使用量の低減を実現するためには、実際に燃料電池が運転されている条件で起きている種々の現象（反応や物質移動等）の理解を進め、それに基づいた新たな材料開発、触媒層構造設計などを行うことが必要である。

2) システム簡素化によるコスト低減

コスト低減の課題として、材料コストの低減とは別に、燃料電池システムの簡素化がある。燃料電池システムは、発電を行う燃料電池スタック以外に、スタックに送り込むガスの加湿器や、スタックの温度を制御するための冷却システム、空気を供給するための空気系システム等の種々の補機部品が必要である。これら補機部品のコスト削減には、補機部品を可能な限り廃止しシステムを簡素化するか、廃止できない部品に関してはスペックを落とすことが必要である。

システム簡素化の一例として、加湿器の廃止が

挙げられる。加湿器の役割は、燃料電池に供給するガスを加湿することにより、膜の湿潤度を適切に維持することである。図4に示すように、電解質膜の中をプロトン (H⁺) は水を介して移動するため、膜の湿潤度が低下するとプロトンが移動しにくくなり、正常発電が継続できない。カソードで生成した水は、濃度差によりアノード側に逆拡散するが、その量が足りない場合はカソードを加湿して逆拡散を促進する、もしくはアノードを加湿することが必要なのである。従って、加湿器を廃止するためには、電解質膜の水移動特性を向上し、加湿器の助けを借りずにカソードの生成水を逆拡散させることができるMEA(膜電極接合体)、セルの開発が必須である。

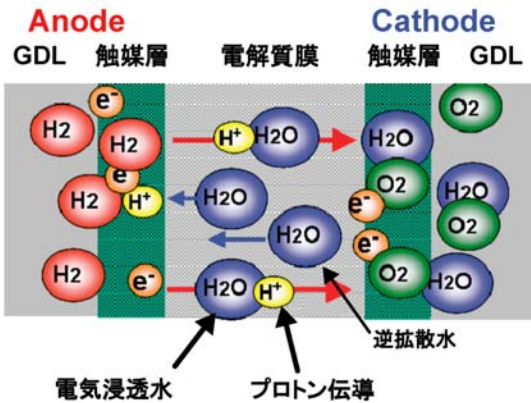


図4. MEA内のプロトンと水の動き

また、現状のFCVは通常のガソリンエンジン車に比べ、ラジエータの放熱能力の要求が非常に高く、コストアップ要因となるばかりか、その大きさにより車両のレイアウトにも非常に大きな影響を及ぼしている。ラジエータが大きくなるのは、燃料電池が許容できる最高温度が80~90℃程度と、約110℃のガソリン車より大幅に低いことが一因となっている。

電解質膜の湿潤度は相対湿度で決まるため、高温になると飽和水蒸気圧が上昇し、適切な湿潤度を維持できないことが、高温化できない一因となっている。ここでもMEAの水移動特性の向上が課題となる。

以上のように、システムを簡素化する、あるいは補機部品のスペックを落とすためには、燃料電池の更なる改良が必要である。

4.2 耐久信頼性

自動車の走行条件、状況の違いにより種々の劣化現象がある。図5に自動車の各種走行モードにおける、燃料電池スタックの想定される劣化要因について示す[3]。

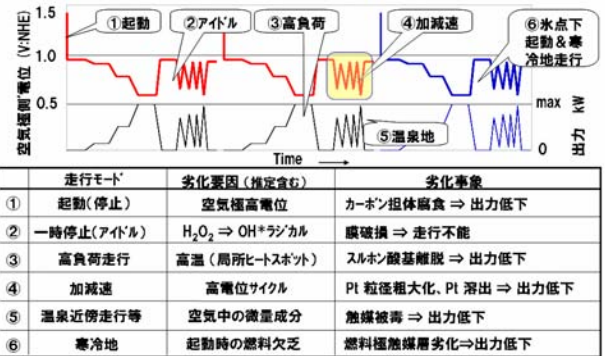


図5. 走行モードと膜・触媒の劣化要因

図6[4][5]には、日本、北米にて公道を長距離走行した05FCVの実際の燃料電池劣化代(図中◇)と、各車両の記録された走行パターンから推測した起動停止、一次停止(アイドル)、加減速による劣化代の比較を示す。同図より、上記3モードの劣化の総和は車両での劣化代とよく一致しており、FCVにおける燃料電池の劣化は上記3モードが主要因であること、また、それらの対策が燃料電池の寿命改善に重要であることが確認できた。

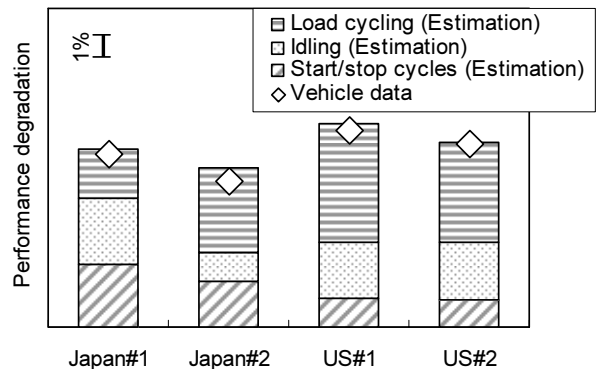


図6. 燃料電池劣化の実車両値と推測値の比較

1) 「起動停止」による劣化

「起動停止」による劣化は、停止後にアノード(水素極)が空気に置換され、両極が空気に置換された状態から、起動時に水素を供給する過程で発生する。図7に示すように水素流路の上流(①)

の領域)と対極の空気極(③の領域)で形成される燃料電池の電圧によって、水素極下流側の空気極(④の領域)の電位が上昇し、触媒を担持しているカーボン担体の腐食反応が起こる。この結果、触媒層のガス拡散性低下や、触媒粒子の凝集による触媒表面積低下を引き起こし性能低下に至る。

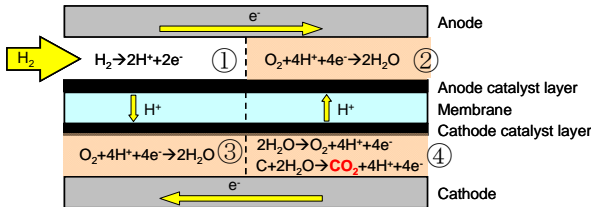


図7. 起動時劣化のメカニズム

対策として、材料に関しては腐食しにくい触媒担体材料が、運転の仕方に関しては高電位の抑制が考えられる。

2) 「一時停止 (アイドル)」 運転による劣化

「一次停止 (アイドル)」 運転では、まず電解質膜の劣化が懸念される。この原因として、アノード又はカソードから電解質膜中を透過した水素 (H₂) 又は酸素 (O₂) が対極の触媒上で反応して、過酸化水素 (H₂O₂) を生成し、この過酸化水素がラジカルとなって高分子電解質を分解することが考えられている。また、アイドルのような高電位で保持されると白金が溶解し、この溶解した白金が高分子電解質膜内の特定の位置でバンド状に析出することが知られている。この白金バンドが電解質膜劣化をさらに加速すると考えられている。

対策としては、ラジカルを酸化又は還元させて安定化させることや、触媒の溶解耐性を向上させること、分解しにくい電解質を用いることなどが考えられる。

3) 「加減速」 運転による劣化

車両の加減速は、燃料電池の出力負荷変動サイクルとなり、カソードの電極電位が変動することに繋がる。このような電位変化が触媒に加わると、白金粒子が溶解し、他の白金上に再析出することにより、白金粒子径が増大し、白金表面積が減少する。また、アイドル運転の劣化と同様に、電解質膜中へ溶解した白金が拡散し、白金バンドを形成する。このようにして、白金表面積が減少することにより性能低下が起こる。対策としては「一

時停止 (アイドル)」 運転による劣化に示したのと同様に、触媒の溶解耐性を向上させることなどが考えられる。

4.3 水素貯蔵

現在主流となっている高圧水素貯蔵の課題は、システムの小型軽量化や水素貯蔵量増大であるが、水素タンク構造の軽量化、水素吸蔵材料を併用したハイブリッド型水素タンクといった技術により、これら課題を解決することが期待されている。また、2008年度から首都圏において、従来の35MPaに加え70MPaの水素ステーション運用が開始され、高圧化による水素貯蔵量増大が実用化に近づくことが期待される。

FCVの普及にあたっては、水素インフラや規格、基準の整備など、官民一体で推進していく必要のある課題も多い。これらの課題については、各関係団体と連携して今後とも推進を図っていく。

5. まとめ

日産自動車におけるFCVの開発状況と、今後の市場導入に向けた課題について紹介した。FCVの実用化に向けた課題はまだ多いが、それらを解決しFCVを普及させることにより、地球温暖化の防止の一翼を担っていくことが期待される。

図8に示すように、2008年7月に燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)は日産自動車を含む自動車会社5社、エネルギー関係会社7社と共同で、2015年のFCV、水素ステーション事業化開始に向けたシナリオに合意した。今後も、FCVの早期市場導入を実現できるよう、研究開発に注力していきたい。

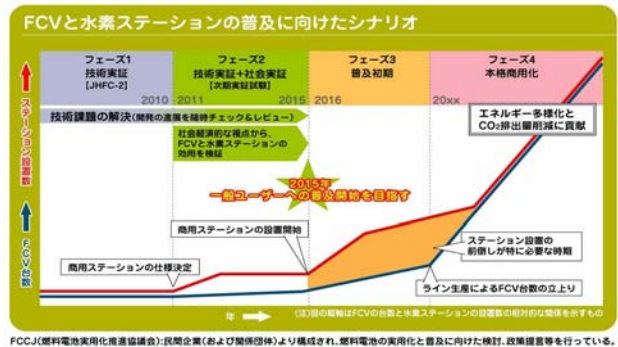


図8. FCCJの普及シナリオ (2008.7月プレスリリース)

参考文献

- [1] Aoyama, T., Iiyama, A., Shinohara, K., Kamegaya, S., Yamamoto, S., Ban Y., Status of FCV Development at Nissan and Future Work, SAE 2008-01, 0423.
- [2] 宮澤 篤史, 池添 圭吾, 奥山 陽三, 柳澤 政成, 小型高出力・低コスト新型燃料電池スタックの開発, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.5, 2009, pp. 1267-1272.
- [3] 固体高分子形燃料電池の目標・研究開発課題と評価方法の提案, 燃料電池実用化推進協議会 (FCCJ), 2007, p. 10.
- [4] 下井 亮一, 青山 尚志, 松永 亮, 飯山 明裕, 燃料電池スタックの車両搭載時における耐久性予測手法開発, 自動車技術会論文集, Vol.40, No.5, 2009, pp. 1249-1254.
- [5] Shimoi, R., Aoyama, T., Iiyama, A., Development of Fuel Cell Stack Durability based on Actual Vehicle Test Data: Current Status and Future Work, SAE 2009-01, 1014.
-

家庭用燃料電池（PEFC）の技術開発と今後 Development and Future of Residential PEFC Co-generation System

藤本 正之（東京ガス）
Masayuki FUJIMOTO (Tokyo Gas)
e-mail: fujimt@tokyo-gas.co.jp

1. はじめに

家庭用燃料電池（PEFC）（以下、「エネファーム」）は、都市ガス等の多様なエネルギー供給源から水素を生成し、水素と空気中の酸素の化学反応によって電気と熱を得る、高効率エネルギー変換システムです。2008年3月に発表された「Cool Earth エネルギー革新技術計画」においても、エネファームがエネルギー需要側の革新的技術の1つとして位置づけられています[1]。これまでのエネファーム開発は、「環境問題への対応」、「エネルギーセキュリティの確保」、「新規産業の創出」といった3つの大きな意義の元、産官学一体となり、規制緩和・標準化を進め、要素技術開発を推進してきました。中でも2005～2008年の4年間実施された「定置用燃料電池大規模実証事業」では、日本全国の一般モニタを対象に延べ3307台もの実機運転試験を行い、数々の貴重な知見を得る事ができました[2]。現在は2009年5月より順次エネファームの一般販売が開始され、新たな歴史の第一歩を踏み出し始めた状況にあります。

本稿では一般販売を開始したエネファームについて、始めに動作原理、システム構成、基本仕様をご紹介します。次にこれまでの開発経緯を振り返りながら、機器開発（技術面）での取り組みとして省エネ性、耐久性の2点について、また商品開発（運用面）での取り組みとして施工・メンテナンス、ユーザビリティの2点について、それぞれご紹介します。最後に今後の普及拡大に向けた取り組みとして、コストダウン、顧客価値向上の2点をご紹介します。将来のエネファーム開発の方向性について、決意を述べたいと考えています。

2. エネファームの構成と仕組み

始めにエネファームの動作原理、システム構成、基本仕様について、概要をご紹介します[3]。

2.1 動作原理

エネファームの心臓部である発電部（セル）は、燃料極（アノード）、電解質（固体高分子膜）、空気極（カソード）の3要素から構成されています（図1）。発電部の燃料極側には水素リッチガス、空気極側には空気が供給されます。燃料極では水素から水素イオンと電子が生成され、水素イオンのみが電解質を透過します。一方の空気極では、空気中の酸素、電解質を透過してきた水素イオン、および外部回路を通ってきた電子が反応する事で水が生成され、発電が行われます。発電時には熱が発生するので、熱回収装置を介してお湯としてエネルギーを回収し、最終的には貯湯ユニット内の貯湯槽に蓄えられます。

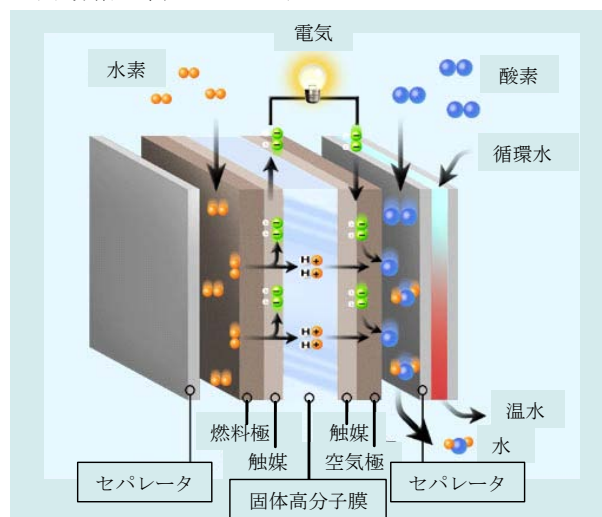


図1 エネファーム発電部（セル）構造

2.2 システム構成

エネファームは、発電を行う「燃料電池ユニット」と、お湯を蓄える「貯湯ユニット」の2ユニットで構成されています（図2）。

「燃料電池ユニット」は、都市ガスなどの化石燃料と水から発電に必要な水素を発生させる「燃料処理装置」、水素と空気中の酸素から発電を行う

「スタック」、スタックで発電した直流の電気を家庭で使用できる交流に変換する「インバータ」、発電の際に発生する熱をお湯として回収する「熱回収装置」、その他「システム補機」等の各種制御機器から構成されています。

「貯湯ユニット」は、燃料電池ユニットで回収したお湯を蓄える「貯湯槽」、貯湯槽に蓄えた以上のお湯が必要となった場合に運転する「バックアップ熱源機」から構成されています。

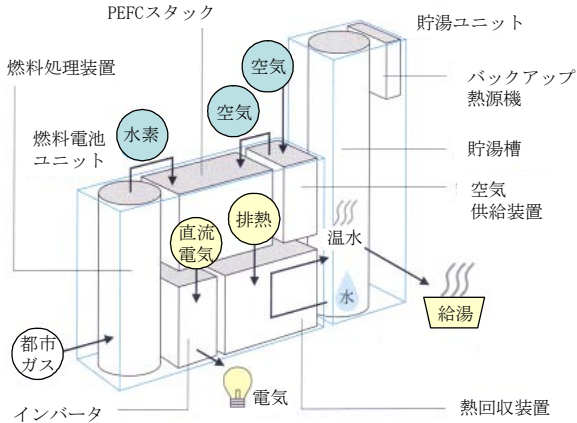


図2 システム構成

2.3 基本仕様

弊社と共同開発を行っているパナソニック(株)製エネファームの基本仕様を図3に示します。

定格発電出力は1kW、定格発電効率、定格熱回収効率はそれぞれ37%(LHV)、52%(LHV)です。定格発電出力以下で運転する場合の部分負荷効率特性も優れていることから、実家庭においても運転全体を通して高効率な運転が可能です。なお、定格発電出力を1kWとしているのは、家庭で通常時に使用される電気が概ね1kW以下である事や、発電の結果得られるお湯を有効に使うのに適正な出力である事などが理由として挙げられます。



図3 エネファームの基本仕様

3. 機器開発への取り組み状況

本章及び次章では、これまでのエネファームの開発経緯を振り返りながら、現時点でのエネファームの実力をご紹介します。本章では主に技術面にフォーカスし、エネファームの「環境性」と「耐久性」についてをご紹介します。

3.1 環境性

エネファームの商品特性を一言で表現するとすれば、「家庭用エネルギー分野の環境トッパー機器」だと言えます。季節や個々のライフスタイルにより、エネルギー需要パターンが多種多様に変化する家庭用途において、環境トッパー機器を実現する為には、機器本体の「高い発電効率」に加えて、個々の需要特性に合わせた「学習運転制御」を組み合わせて、実稼働ベースで一次エネルギー削減を実現する必要があります。

3.1.1 機器本体の発電効率

図4は、2008年7月から2009年3月までに稼動した現行機258台における、発電中の発電効率(月平均値)を示しています。定格出力付近で発電しているシステムはもとより、最低出力付近で発電しているシステムにおいても、発電効率は30%(LHV)を上回っており、機器本体の「高い発電効率」が実現している事が分かります。2.3で前述したとおり、部分負荷での発電効率特性が優れている点は、エネファームの大きな特徴の1つであると言えます。

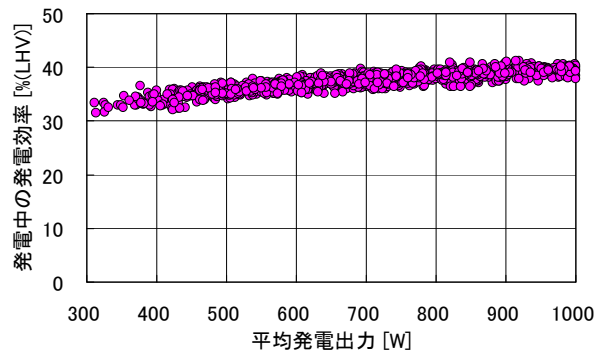


図4 発電中の発電効率(月平均値)

3.1.2 学習運転制御

図5は、東京ガスが開発した学習運転制御の基本的な考え方を示しています。初めに過去の需要データから、24時間先までの電力需要、給湯需要を予測します。次に、予測した電力・給湯需要に

対して、最も1次エネルギー消費量が少なくなるよう運転パターン（起動・停止時間）を選択します。基本的には、当日の給湯需要ピークに合わせて、必要なお湯が貯湯槽に溜められるように運転計画を立てます。

図6は、学習運転制御を行った場合と単純な制御を行った場合の、一次エネルギー削減量の差に関するシミュレーション比較結果です[4]。タイマー制御（定刻起動、定刻停止）では、常に一定時間発電を行う為、給湯需要が大きくなるほど（給湯需要に見合った）十分な発電ができなくなり、本来の省エネ性が発揮できません。また貯湯成行制御（貯湯槽に溜まったお湯の量で起動、停止を判断）では、給湯需要が小さくなるに従ってお湯が余る傾向となる為、やはり本来の省エネ性が発揮できなくなります。給湯需要の多寡によらず、高い省エネ性を発揮する為には、利用実態に合わせて運転計画を立てる学習運転制御の役割が重要であることが示唆されます。

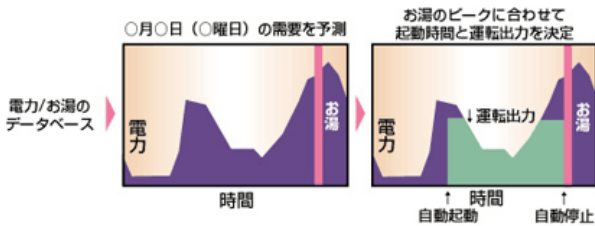


図5 学習運転制御の基本的な考え方

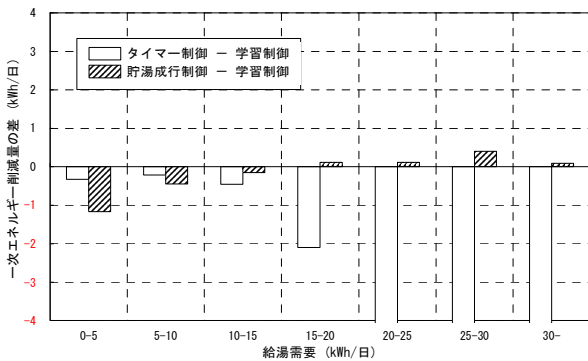


図6 シミュレーション比較結果

3.1.3 一次エネルギー削減効果

図7は、学習運転制御を搭載した現行機258台（2008年7月から2009年3月までに稼動したものを対象）における、給湯需要と一次エネルギー削減量の関係を示しています（比較対象は表1の通り）。機器本体の「高い発電効率」と、多様なエ

ネルギー需要に合わせた「学習運転制御」を組み合わせることで、従来システムと比較して高い省エネルギー効果が発揮されている事が分かります。

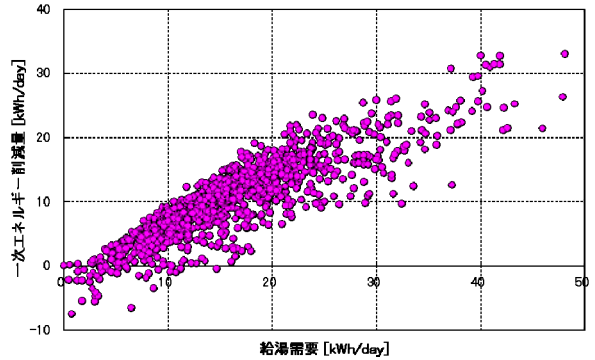


図7 一次エネルギー削減効果（月平均値）

表1 一次エネルギー削減効果の比較対象

項目	数値
火力発電効率（需要端）	36.9 % (HHV)
ガス給湯器効率	78 % (HHV)

3.2 耐久性

大規模実証事業がスタートした2005年当時、エネファームの耐久性は約3年程度の見通しでした。その後部材や製造方法の見直し等を行うことによって、現行機では約10年相当（旧型機の3倍以上）の耐久性見通しを得ています。以下では、スタック、燃料処理装置、システム補機の3点について、耐久性見通しの取り組み概要をご紹介します。

3.2.1 スタック耐久性

図8は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」）のプロジェクトで開発された、スタックの主な劣化モードと劣化メカニズムを示しています[5]。これらの知見にメーカー独自の知見を反映した上で、劣化要因毎の加速試験を実施し、耐久性への影響度合いを評価しています。

図9は、弊社における実機での耐久性評価の様子です。図10に旧型機におけるシステム耐久性評価結果の一例を示します。現在、旧型機においては発電時間最長20000時間超、起動停止回数4000回超を達成したシステムが存在しており、加速試験による耐久性見通しを裏付ける実機データが集まっている状況にあります。

劣化モード	劣化メカニズム	影響	備考
耐CO被毒性	脱合金化 ルテニウムの溶出	大	燃料中の含まれるCOに対して、エアブリードに対応しているが、それによる長期的な他の部材を含めて影響は未確認
濡れによるガス拡散性低下	触媒層の撥水性低下 (カーボン腐食) 触媒層の親水性増加 GDLの親水性増加	大	ある程度の濡れ進行で影響が大きくなる。その部位、メカニズム、評価手法は未確定。
クロスリーク	機械的破断 高分子膜の薄膜化 高分子膜の分解	大	初期の機械的破断について対策済。MEAでは、数分時間まで見通している。分解などのメカニズムは未確認。
カソードの有効面積減少	触媒のシタリング カーボン腐食 白金溶出 濡れ進行による水没	中	シタリングは飽和傾向にあり、劣化を推定は可能。カーボン腐食は、濡れと関連。白金溶出現象の確認はあるが、長期的対策は必要。
アノードの有効面積減少	触媒シタリング カーボン腐食 濡れ進行による水没	軽微	シタリングは軽微。カーボン腐食は水素雰囲気下では軽微。濡れ性と関連しており、発生する条件の確認が必要。

赤字：取り組むべき重要課題。青字：当面には対応策がある。

図8 スタックの劣化モードと劣化メカニズム



図9 システム耐久性評価の様子

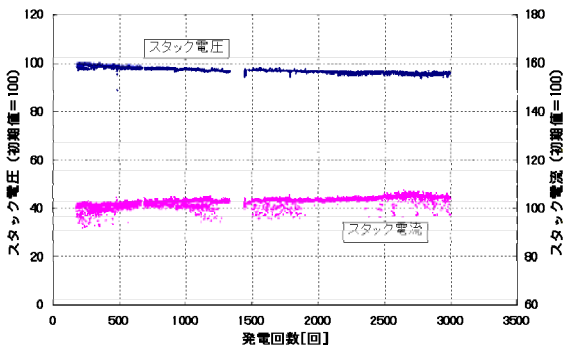


図10 耐久性評価結果 (旧型機)

3.2.2 燃料処理装置耐久性

燃料処理装置に用いられる触媒の劣化要因について図11に示します [6]。スタックと同様に、これらの劣化要因毎に加速試験を実施し、耐久性への影響度合いを評価しています。

図12は、弊社における触媒耐久性評価の様子です。図13に旧型機における燃料処理装置の耐久試験結果を示します。旧型機において、現行機の耐久性目標である40000時間に迫る試験データが得

られています。さらに触媒単体試験では、40000時間を達成した試験データが得られており、加速試験による耐久性見通しを裏づけるデータが集まっています。

- ①触媒自身の変化
 - 化学的变化(相変化、揮発等)
 - 物理的变化(熱劣化、水蒸気酸化、空気酸化)
- ②吸着(被毒) — 硫黄、塩素、金属または金属イオン
- ③付着 — カーボン
 - 無機不純物(シリカ等)
- ④機械的破壊 — 強度低下、結露

図11 各種触媒の劣化要因



図12 触媒耐久性評価の様子

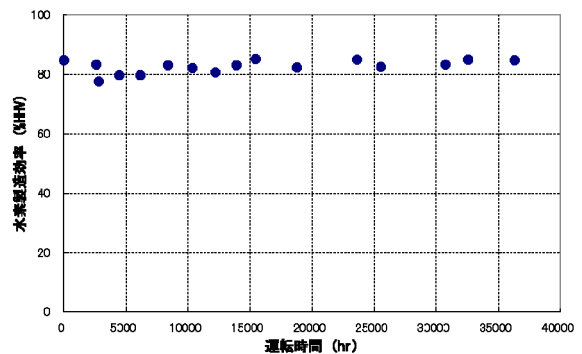


図13 燃料処理装置耐久試験結果 (旧型機)

3.2.3 システム補機耐久性

スタックや燃料処理装置といったエネファームの主要機器に加えて、回転機(プロア、ポンプ等)を中心としたシステム補機についても、耐久性を見通す必要があります。システム補機は部品点数

が多い事から、それらが占めるコスト比率が高まる事も予想されました。こうした背景から、エネファームメーカーとシステム補機メーカーがタッグを組み、コンソシアム型プロジェクトとして「家庭用燃料電池システムの周辺機器の技術開発」が実施されました。2005～2007年に実施されたフェーズ1では、回転機、弁、センサーを対象に、技術開発（耐久性向上）と量産化に向けた製造方法の確立（コスト低減）が進められ、現行機の目標である40000時間の耐久性を見通す事ができたと同時に、対象補機のコストが1/4程度まで低減される見通しを得ました[7]。

現行機では、こうしたプロジェクトの成果を活用したシステム補機が組み込まれています。さらに2008～2009年度に実施するフェーズ2においては、水処理装置、熱交換器、インバータを対象に、同様の取り組みを実施しており、本格普及に向けたさらなる性能改善や低コスト化を目指しています。

4. 商品開発の取り組み状況

本章では主に運用面にフォーカスし、エネファームの「施工・メンテ性」と「ユーザビリティ」についてご紹介します[8]。

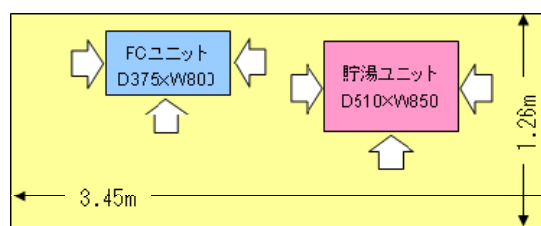
4.1 施工・メンテ性

4.1.1 設置性

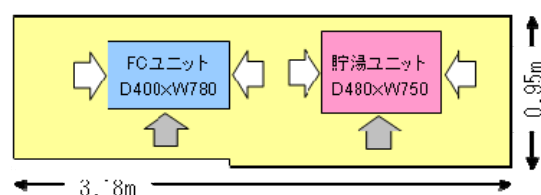
郊外地域と比較して、首都圏エリアの住宅事情では設置スペースが限られるケースが多い事から、少しでもシステム設置スペースの縮小化が重要となります。弊社検討結果では、特にシステムの奥行き方向（壁面から隣地境界まで）の短縮化が重要である事が分かっています。

図14は、旧型機と現行機での、必要な設置スペースの比較です。現行機では奥行き方向の設置スペースを縮める為、横方向からのみで主要なメンテナンスが実施できるよう工夫しています。こうした取り組みにより、設置に必要な面積を3割以上低減することに成功しました。

【旧型機の設置スペース】設置面積 4.3㎡



【現行機の設置スペース】設置面積 3.0㎡



➡主メンテ面 ➡補助メンテ面

図14 設置スペースの比較（上から見た図）

4.1.2 施工性

設置スペースに続き重要なのが、施工日数の短縮化です。旧型機では、ユニット搬入が困難、ユニット間配管作業に時間を要する、試運転時間に時間を要するといった課題があり、予備日も含めると施工に5日間を要していました。現行機では、ユニット軽量化による搬入性向上、配管部材見直しによる施工時間短縮、試運転仕様見直しによる試運転確認時間短縮により、施工に要する日数を1.5日程度まで短縮しました。

4.1.3 メンテ性

設計段階からメンテナンスに配慮した部品レイアウトを行うと共に、各エラーコードに対応した故障診断フローを確立する事によって、現行機では弊社作業員が1人でメンテナンスを実施する事が可能となりました。さらにパソコン等の専用ツールを使用しなくとも、機器内部の基板操作のみで、簡易な故障診断が可能な仕様としています。

4.2 ユーザビリティ（お客さま使い勝手）

4.2.1 アンケート結果

図15は、大規模実証事業におけるユーザーアンケートの結果の一部です。「自宅で発電ができる事」や、「地球環境に貢献できる事」といった点で満足度が高い様子が伺えます。一方で、「発電タイミングが自由に設定できない」、「ライフスタイルと発電時間が合っていない」といった、運転制御

に対するご要望を多数いただきました。さらには「リモコンの画面構成が複雑で、環境性を実感しにくい」といったご意見も頂戴しました。

燃料電池を使用していて魅力に感じることは何ですか？（単一回答）

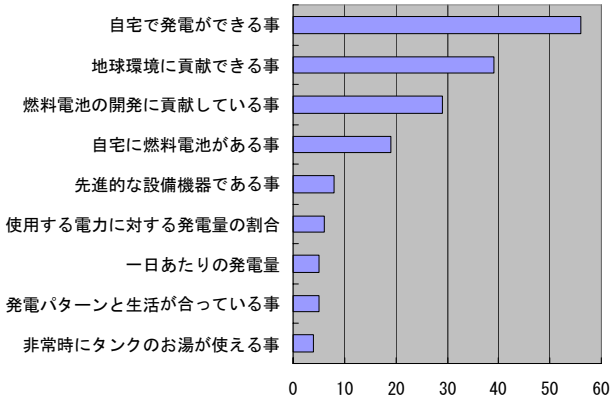


図 15 ユーザーアンケート結果

4.2.2 様々な運転モードの搭載

こうしたご要望を踏まえて、現行機では表 2 に示すとおり、従来搭載していた自動発電（学習運転制御）に加えて、貯湯量発電、予約発電、手動発電といった運転モードを新たに搭載しました。複数の運転モードを搭載することで、「ライフスタイルに合わせてエネファームを運転させたい」とのご要望にお答えすることが可能になりました。なお最近の弊社アンケート調査結果によれば、実際には約 9 割のお客さまが、省エネ性重視の「自動発電」を選択されている事が分かっています。

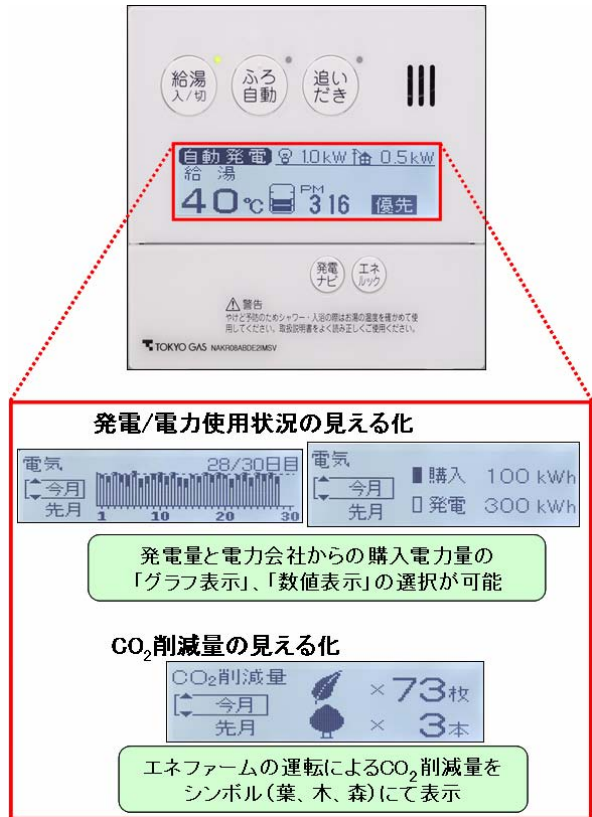
表 2 現行機の運転モード

運転モード	内容
自動発電	過去の電力・給湯需要から、最適な運転パターンを予測して運転する
貯湯量発電	発電を開始・終了させる貯湯量を設定して運転する
予約発電	発電を開始・終了させる時刻を設定して運転する
手動発電	任意のタイミングで発電を開始することが可能

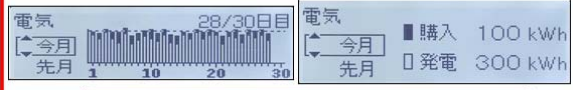
4.2.3 リモコン表示の改良

「リモコン画面構成が複雑で、環境性を実感しにくい」とのご要望に対して、現行機では発電関連情報をトップ画面に表示する等、よりエネファームの魅力を実感できるようにリモコンを改良しました（図 16）。エネファームで創った電気やお湯

で、どの程度家庭の需要をカバーしているか、またどの程度 CO₂ が削減できているかなど、リモコン上で確認できるようになりました。今後もユーザーの声を反映しながら、さらにより良いインターフェースへ改良していきたいと考えています。



発電/電力使用状況の見える化



発電量と電力会社からの購入電力量の「グラフ表示」、「数値表示」の選択が可能

CO₂削減量の見える化



エネファームの運転によるCO₂削減量をシンボル(葉、木、森)にて表示

図 16 現行機でのリモコン表示例

5. 今後の普及拡大に向けて

3 章及び 4 章では、機器開発と商品開発の両面から、エネファームの現在の實力についてご紹介してきました。本章では、今後の普及拡大に向けた技術開発の取り組みとして、コストダウンと顧客価値向上の 2 点をご紹介します。

5.1 コストダウン

一般にエネファーム普及拡大への最大の技術課題はコストダウンだと言われています。図 17 は大規模実証事業におけるエネファーム 1 台当たりのシステム価格推移を示しています[9]。平均価格で見ると、初年度から 4 年間で、57%のコストダウンを達成していることが分かります。今後の普及拡大に向けては、さらなる努力が必要です。その為の方策として、技術開発、市場拡大の 2 つをご紹介します[10]。

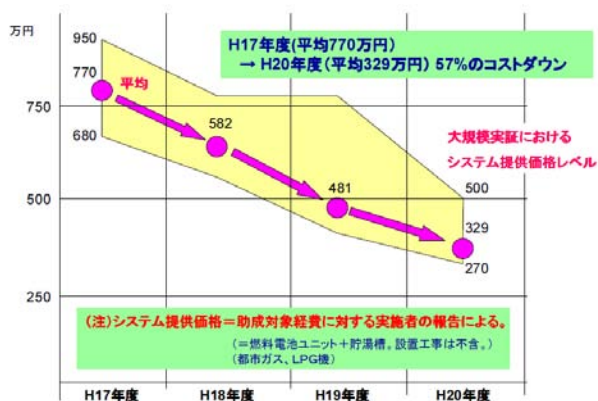


図 17 システム価格の推移

5.1.1 技術開発によるコストダウン

技術開発によるコストダウン要素としては、セルスタックの高ロバスト化による周辺部品点数の削減や制御の簡素化、セルスタック材料の低コスト化、燃料処理装置の低コスト化、インバータの低電圧駆動化、システム簡素化、メンテナンスコストの削減などが挙げられます。これらの取り組みは、産官学連携による NEDO プロジェクト（ロバストプロジェクト、改質系触媒プロジェクト、家庭用燃料電池システムの周辺機器の技術開発、等）を中心に取り組まれています。

弊社においても燃料処理装置のコストダウン開発を行っています。図 18 は現行機と将来機の燃料処理装置を比較したもので、性能を維持したままコンパクト化と構造簡素化によるコストダウンを実現しています[11]。



図 18 将来機に向けた燃料処理装置開発

5.1.2 市場拡大によるコストダウン

市場拡大によるコストダウン要素としては、国産天然ガスなど多様な燃料種に対応した燃料処理装置の開発、寒冷地など多様な設置環境への対応、

集合住宅や戸建の狭小地など多様な住居形態への対応、などが挙げられます。設置可能な市場を拡大する事によって、量産効果によるコストダウンを目指しています。

また、各エネルギー事業者が連携して仕様の共通化を図る事も、コストダウンには効果的であると考えられます。2008 年度末、東京ガス、大阪ガス、東邦ガスの 3 社は、エネファームに求める技術仕様について統一基準の策定を行いました。さらなる仕様共通化に向けて、今後も継続検討していく予定です。

5.2 顧客価値向上

エネファーム普及拡大に向けては、コストダウンと同時に、さらなる顧客価値向上が重要であると考えています。お客さまにエネファームを選んでもらうためには、コモディティとして単に消費されるエネルギーではなく、確かに実感できる価値を持ったエネルギーである必要があります。

リモコンを含めたユーザーインターフェースのさらなる充実化、停電時にも発電や給湯が可能な自立発電システム、エネファームユーザー同士をネットワークで繋ぐコミュニティの設立、家庭向けのエネルギー診断サービスなど、現段階ではアイデアレベルのものも含まれてはいますが、将来機での実現に向けて開発を推進していきたいと考えています。さらに将来には、図 19 に示すように、天然ガス、電力、水素などのネットワークが有機的に繋がった、地域全体でエネルギーの最適運用が可能な社会を目指していきたいと考えています。

6. まとめ

本稿では、一般販売を開始したエネファームについて、その開発意義、構成や仕組み、機器開発や商品開発の経緯、そして今後の普及拡大に向けた取り組みをご紹介しました。コストダウンと顧客価値向上を両輪としながら、さらに将来のエネルギーネットワーク社会も見据えて、今後もエネファームの技術開発に鋭意取り組んでいきます。



図 19 スマートエネルギーネットワーク構想

参考文献

[1] 経済産業省, Cool Earth エネルギー革新技術計画 (2008.3)

[2] (財) 新エネルギー財団ホームページ (<http://www.nef.or.jp>)

[3] 前田賢二, 藤原直彦, よくわかる水素技術, 日本工業出版 (2008.1), p128-133

[4] 小林広介, 井関孝弥, 家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの運転制御と稼働実績, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2007.9), p871-874

[5] NEDO, PEFC 共通の基盤研究平成 19 年度成果報告, スタック劣化解析基盤研究 (2008.6)

[6] 本道正樹, 藤木広志, 高橋徹, 星文之, 藤原直彦, 斎宮久幸, 白木正浩, 1kW 級 PEFC システム用都市ガス燃料処理器触媒の耐久性評

価について, 第 15 回燃料電池シンポジウム講演予稿集 (2008.5), p28-31

[7] NEDO 周辺機器開発プロジェクト, 家庭用燃料電池システムの周辺機器の技術開発, 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発事業 (2007.7)

[8] 堀江昭秀, 家庭用燃料電池 LIFUEL の導入実績と次世代機の開発について, 第 15 回燃料電池シンポジウム講演予稿集 (2008.5), p9-12

[9] (財) 新エネルギー財団, 平成 20 年度定置用燃料電池大規模実証事業報告会 (2009.3)

[10] NEDO, PEFC 技術開発の現状と課題 (2009.4)

[11] 斎宮久幸, 藤木広志, 本道正樹, 星文之, 小宮純, 白木正浩, 関根大輔, 浅香昭, エネファームの本格普及に向けた次世代型燃料処理装置の開発

燃料電池における「その場」計測のあれこれ

Recent Advances on In Situ Measurement of Fuel Cells

津島 将司, 平井 秀一郎 (東京工業大学)

Shohji TSUSHIMA, Shuichiro HIRAI (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: tsushima@mech.titech.ac.jp

1. はじめに

2009年より、世界に先駆けて、家庭用燃料電池「エネファーム」の一般家庭への販売が開始された。2009年10月には、携帯機器用の直接メタノール型燃料電池 (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) の販売も開始された。これらはいずれも、電解質として固体高分子陽イオン交換膜を用いた燃料電池であり、エネルギー効率やエネルギー密度の高さの点で有望とされ、研究開発が進められてきた。これまでの産官学あげての研究開発により、実証実験段階から普及促進段階へと着実に移行しているといえる。しかしながら、「エネファーム」は国からの補助金交付対象機器 (1台当たり上限140万円) であり、DMFCもまだまだ価格が高い。価格競争力という点では、自動車用燃料電池についても同様であり、エネルギー変換機器としての1kW当たりのコストは自動車用エンジンには及ばず、燃料電池自動車については、実証実験段階である。

燃料電池は、燃料の有する化学エネルギーを電気エネルギーに変換するエネルギー変換機器であり、必然的にエネルギー効率の高さが求められると同時に、普及促進のためには、高いエネルギー密度を達成していくことが重要である。高エネルギー密度の実現は、システムのコンパクト化をもたらすため、低コスト化にもつながる。現在、燃料電池、特に固体高分子形燃料電池 (Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC) の研究開発においては、高性能触媒の開発に加えて、高温化、低加湿化、高電流密度化、がターゲットになっている。高温化は触媒活性の向上をもたらすだけでなく、家庭用燃料電池においては排熱の利便性が向上する。低加湿化は、加湿ユニットの小型化、そして将来的には加湿器のない燃料電池を目指しており、低コスト化に貢献できる。そして、高電流密度化は、システムのコンパクト化に不可欠であり、自動車

用燃料電池においては、特に重要となる。

これらは、PEFCの運転においては、固体高分子電解質膜 (Polymer Electrolyte Membrane, PEM) の乾燥をもたらす一方で、電極内における液体水の滞留による反応ガスの輸送阻害をもたらすなど、解決へ向けた技術的課題が多く残されている。

これらの課題解決のために、特に、PEFC内の物質輸送の基礎的解明が求められており、その鍵になるのが、本稿で話題とする、「その場」計測技術、である。PEFC内の「その場」計測においては、ほとんどの場合「水」が対象となる。これは、先述のように、PEFCにおいて水分の挙動が発電性能に大きく影響を及ぼすのに加えて、近年では、燃料電池の耐久性にも深くかかわっていることが明らかになってきているためである。

PEFCの「その場」計測技術に関する報告は、2004年ごろから急増している[1]。中性子イメージング (Neutron Radiography, NRG) [2]と磁気共鳴イメージング (Magnetic Resonance Imaging, MRI) [3]という異なる非破壊・非侵襲可視化技術を用いたアプローチが報告され、現在では、放射光X線イメージング (Synchrotron X ray Radiography) [4]や軟X線イメージング (Soft X ray Radiography) [5]という新しい計測技術も報告されるなど、高空間・高時間分解能化に向けた研究開発がすすめられている。これらは、「セル中で」(in situ) 水を計測するものである。近年では、燃料電池材料内の水分挙動を基礎的に解明する、という観点から、水分透湿・流入過程を、「セル外で」(ex situ) 計測する報告もなされている。こちらについては、X線イメージング (X ray Radiography) [6]や原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy, AFM) などを用いた報告[7]もある。

本稿では、筆者らがすすめているPEFCの「その場」計測技術を中心に、PEFC内水分輸送挙動の何を解明しようとしているのか、を紹介させて

いただく。また、燃料電池普及に向けた研究課題の一つとして、なぜ、「最先端の「その場」計測技術の開発」が位置づけられているのか[8]、についても筆者らの考えを交えながら紹介したい。

2. 固体高分子形燃料電池における水

固体高分子形燃料電池 (PEFC) は、図 1 に示すように固体高分子電解質膜を触媒付きの多孔質電極 (ガス拡散電極と呼ばれる) で挟み、それぞれに水素と酸素 (空気) を供給すると発電する。ここで、電解質膜として用いられる固体高分子膜は、高湿潤状態において高いプロトン (陽イオン) 伝導性を示すため、発電中の PEFC 内の水分制御が重要である。しかしながら、近年の高温化、低加湿化、高電流密度化は、水分制御を一層、困難なものとしている。高温化と低加湿化は、直接的に電解質膜の乾燥をもたらし、高電流密度化についても発熱量の増大と電解質膜内での電気浸透流の

増大をもたらすため、高分子膜内の水分量は低下する。その一方で、高電流密度化は、電解質膜を挟む多孔質電極内での水分の凝縮を招き、反応ガスの触媒への輸送を阻害する。すなわち、高温・低加湿・高電流密度環境下において、電解質膜内では水分を保持し、多孔質電極内では速やかに水分の排出を促進する、ことが求められる。このような要請に従って、多孔質電極内に微細孔層 (Micro Porous Layer, MPL) を挿入したり[9]、ガス流路内の親・疎水性を制御するなどの試み[10]が行われているが、単位面積 (cm^2) 当たり数 A も発電する状況での水分制御は、セル内の温度分布、熱輸送とも密接に関係するため、容易ではない。

PEFC 内の水分制御において、最も基礎的かつ重要なのは膜厚 (through-plane) 方向の水分輸送である。PEFC における理想的な水分制御は、カソード (酸素極) 触媒層で生成した水を必要十分な量だけ電解質膜へ戻し、余剰分については多孔質内を速やかに輸送して、セル外へ排出することである。PEFC 膜厚方向の水分輸送とは、言い換えると膜電極複合体 (Membrane Electrode Assembly, MEA) 内水分輸送のことであり、MEA は電解質膜、触媒層、ガス拡散層 (MPL も含む) というレイヤー (層) から構成されていることから、レイヤーごとに、物質輸送学にもとづいた水分輸送を考えることができる。

電解質膜での水分輸送は、濃度拡散、電気浸透、圧力駆動、膜表面での吸着・脱離などが関わっており、通常、水分は凝縮相として扱われる。いずれの輸送過程が全体の水分輸送にどのように影響を及ぼすのか、については十分に明らかにされておらず、拡散係数、電気浸透係数、物質伝達係数、という輸送係数も報告によって異なっているのが現状である。

触媒層やガス拡散層においては、水分は液相と気相の二相流として扱う必要があり、液相輸送については、多孔質内での重力の影響がほとんどないため、毛管力支配により輸送されると考える。ここでも、相対浸透係数などの輸送係数をどのように与えるのか、について長く議論が行われており、多孔質内部の液体水流動の詳細な把握にもとづいた理解が求められている。気相輸送については、多孔質の影響を実効拡散係数という形で考慮

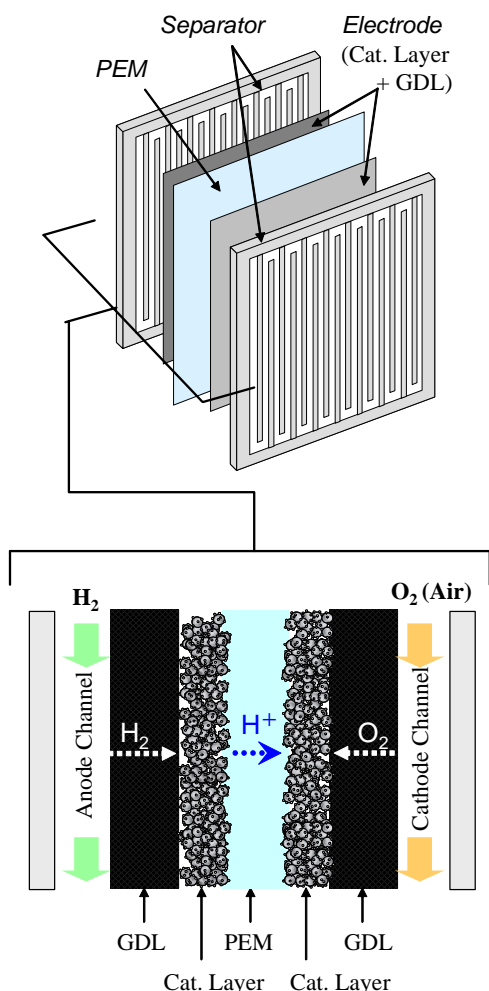


図 1 固体高分子形燃料電池の構成

している。この際、触媒層内では、1次細孔径が数十nm、2次細孔径が数百nmであり、連続流としての扱いが困難になってくる。触媒層、拡散層では、液相—気相間の相変化も考慮する必要がある。また、触媒層については、触媒担体粒子とともに高分子アイオノマーが練り込んであり、高分子アイオノマー内の水分輸送をどのように考えるのか、についても全くといっていいほど、知見が得られていない。

このようにPEFCにおける水は性能・耐久性の両面から非常に重要な役割を果たすにもかかわらず、水分輸送という観点では、とくにナノ・ミクロスケールにおける理解は進んでいない。この状況を打破するために期待されているが、「その場」計測技術であり、現在、PEFC研究開発の基礎的共通の課題として位置づけられている[8]。次節では、このような背景のもとに、我々のグループで取り組んでいるPEFC内水分の「その場」計測技術について示す。

3. PEFCにおける「その場」計測技術

3.1 磁気共鳴イメージング

我々のグループでは、発電時のPEFCにおける電解質膜内水分分布を磁気共鳴イメージング(MRI)により計測する手法を開発し、膜内水分輸送現象の基礎的解明に取り組んできた[11]。MRI計測においては、強磁場下のゼロでないスピンを持つ原子核(通常は ^1H , ^{31}P , ^{23}Na , ^{19}F , ^{13}C , ^3He , ^{129}Xe など)に対して、外部からの電磁波によって歳差運動を誘起し、その後の原子核の緩和過程における核磁気共鳴(NMR)信号を計測することで、原子核の空間分布などを画像再構成する。PEFCにおいては水素原子核を計測対象とし、水分分布を計測している。

図2は、我々が用いているMRI計測システムの外観である。本装置は縦型であり、装置中心部に位置する直径56mmの計測領域に燃料電池を設置し、MRI装置上部および下部(図中、矢印)から燃料気体の供給するための配管・配線を行い、燃料電池の発電状態を実現する。図3は我々が開発したMRI計測のためのPEFCである。MRI計測領域は強磁場下にあるため、通常の燃料電池で用いられる鉄系材料を使用することができない。そのため、セル筐体が樹脂材料でできている。電解質膜にNafion膜を用い、触媒電極付ガス拡散層で挟み込んだ構造になっている。集電体には銅板を用



図2 MRI計測システム

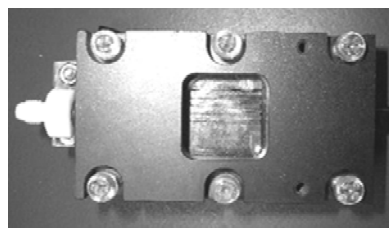


図3 MRI計測用温度制御対応PEFC

い、同時にガスチャネルとしての機能も担っており、複数の直線流路を有している。チャネルとリブの幅はそれぞれ1mmである。実際の燃料電池の発電においては、セル温度の制御が重要となるため、本セルでは、集電体の磁場環境の乱れを極力さけるために、顕微鏡観察下での細胞培養などに用いられる透明ガラスヒーターを使用し、外部回路を用いて、セル内に組み込まれた熱電対からの信号をフィードバック制御することで、最高100°Cまでの温度制御が可能な構造となっている。

図4は、燃料電池の相対湿度(40%, 80%, 92%)と電流密度(0.1A/cm², 0.2A/cm²)を変化させたときの電解質膜厚方向の一次元水分濃度分布である[12]。ここでは、MRIにより電解質膜内水分分布画像を取得した後、膜厚方向の平均含水量を算出している。

これより、低加湿(40%)においては、発電しているにもかかわらず、等温吸着曲線(ある水蒸気環境下におかれた膜内含水量と相対湿度の関係を表す)から予想される平衡含水量とほぼ等しく、3[H₂O/SO₃H]であった。すなわち、供給ガスの相対湿度が低いために、酸素極の触媒層で生成した水が蒸発し流路に排出されたと考えられる。また、電流密度を0.2A/cm²に上げた場合でも、電流密度の低い0.1A/cm²の場合と同様に水分濃度分布が平

坦のままであった．このことは，含水量が $3[\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3\text{H}]$ の領域では，濃度拡散が支配的であることが要因であると考えられる．これは，Springer ら [13] が報告したように含水量 $3[\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3\text{H}]$ と非常に小さい条件下では拡散係数が大きくなる，という結果と一致する．

次に相対湿度 80%RH のときは，電流密度が $0.1\text{A}/\text{cm}^2$ の場合，膜内含水量は約 $6[\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3\text{H}]$ であり，大きな水分濃度勾配はみられなかった．電流密度が $0.2\text{A}/\text{cm}^2$ の場合，膜内含水量は酸素極側で約 $9[\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3\text{H}]$ となり，水分濃度勾配が現れた．電流密度が $0.1\text{A}/\text{cm}^2$ の場合，膜内含水量が等温吸着曲線から予想される $6[\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3\text{H}]$ と等しいことから，酸素極で生成した水のほとんどは蒸気となり，ガス流路内に排出されたと考えられる．一方，電流密度が $0.2\text{A}/\text{cm}^2$ の場合，膜内含水量が等温吸着曲線から予想される $6[\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3\text{H}]$ よりも大きいことから，発電により触媒層内の水蒸気濃度が増加し，膜内含水量の増加をもたらしたものと考えられる．また，発電に伴って膜内に水分濃度勾配が形成されていることから，アノード側からカソード側への電気浸透による水分輸送が，大きく影響を及ぼしていることがわかる．

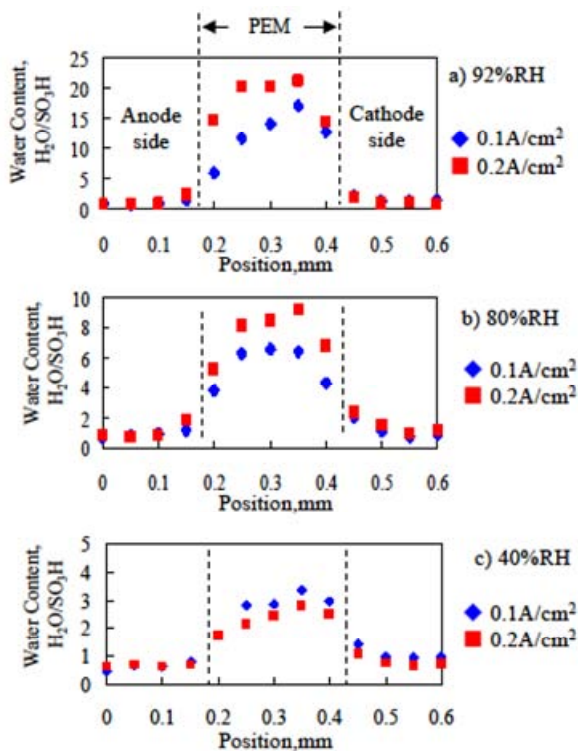


図 4 電解質膜厚方向の水分濃度分布

さらに，相対湿度を増加 (92%RH) させると，電流密度が $0.1\text{A}/\text{cm}^2$ の場合，膜内含水量は水蒸気環境下における最大含水量である約 $9[\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3\text{H}]$ 以上であり，大きな水分濃度勾配があらわれた．電流密度が $0.2\text{A}/\text{cm}^2$ の場合，膜内含水量は膜を液水に浸漬したときの含水量である約 $22[\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_3\text{H}]$ となり，水分濃度分布は平坦なものとなった．電流密度が $0.1\text{A}/\text{cm}^2$, $0.2\text{A}/\text{cm}^2$ のどちらの場合にも，水蒸気環境下での平衡含水量よりも大きい値を示していることから，酸素極触媒層で生成された水が液水となり，膜内含水量を増加させたと考えられる．また，電流密度が $0.1\text{A}/\text{cm}^2$ の場合には極間に非常に大きな水分濃度勾配があらわれた．すなわち，電気浸透現象による水素極から酸素極への水分輸送が大きく影響を与えたと考えられる．一方，電流密度が $0.2\text{A}/\text{cm}^2$ の場合には膜内水分分布は平坦化した．電流密度を大きくすると電気浸透現象により水素極から酸素極への水分輸送が促進されるのにもかかわらず，膜内水分分布が平坦化するのには，圧力駆動による水分輸送のためであると考えられる．すなわち，電流密度を大きく発生した酸素極触媒層内の液体生成水が，圧力駆動によって酸素極から水素極への水分輸送がおり，電気浸透による水分輸送量を大きく上回ったためだと考えられる．

このように，電解質膜内の水分輸送は，含水量によって，濃度拡散から電気浸透，そして圧力駆動，というように支配的な水分輸送過程が変わっていくものと考えられる．ここで，電解質膜内を湿潤状態に保つためには，いかにして生成水を膜内へ戻すのか，が重要であり，MRI 結果にもとづいて考えると，触媒層内に液体水が形成されたときに，水分は膜内へ吸収されやすくなり，高含水状態が実現しやすくなると考えられる．

3.2 軟 X 線イメージング

PEFC 内，とくにガス拡散層やガス流路内の液体水の可視化技術としては，従来，中性子イメージングが用いられてきた [14]．これは，中性子線は，通常の X 線とは異なり，水に対して十分な吸収特性を有するためである．これに対し，我々のグループでは，軟 X 線に着目し，PEFC 内水分可視化技術の開発を進めている [5]．

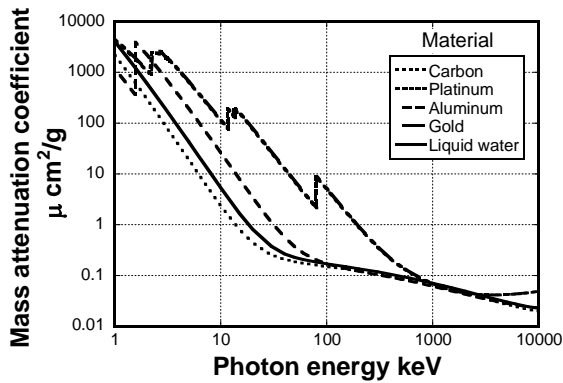


図5 PEFC材料における質量吸収係数

従来、X線は水に対して計測感度が極めて低い、と認識されてきたが、これは、X線の波長に依存して変化する。図5は、PEFCに使われている各素材の質量吸収係数と波長に対応したX線エネルギーに対する変化を示したものである。従来のX線撮像法においては100~225 keVのエネルギー領域が用いられてきた。同領域においては金や白金などの金属の質量吸収係数が液水の質量吸収係数に対して非常に大きく、PEFC内の液水を検出することが困難であることがわかる。しかしながら、図5に示すように、低エネルギー領域では金属と液水の質量吸収係数が近づくため、X線波長を制御し、軟X線領域(2.0keV以下に対応)での計測を実現することで、PEFC内の液水を検出することが可能となるはずである。そこで、我々は市販の透過型X線撮像装置を改造し、軟X線によるPEFC内水分計測を行った。

図6は、PEFCのリブ下部の軟X線透過用の可視化窓から、軟X線によりin-plane (MEA面方向)

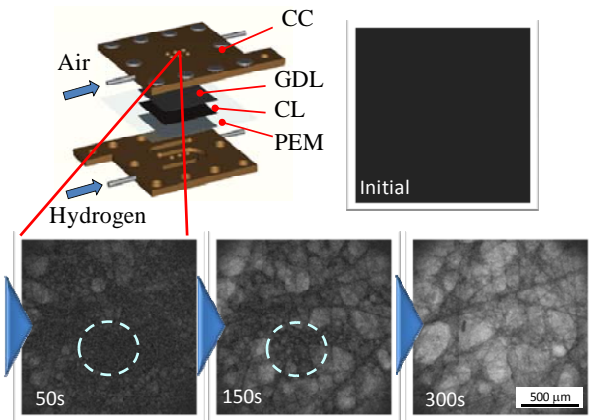


図6 MEA内水分生成過程の軟X線高分解能計測結果

高分解能計測を行った結果である。図中、白色が液体水を示しており、時間の経過に伴い、MEA細孔内に液体水が徐々に生成されていく様子が可視化されている。発電開始後のMEA内の液体水分布を見ると、発電初期の一部において、液体水の生成が観察されない領域(図中の楕円領域)があることがわかる。発電初期においては、MEA内に液水の滞留もなく、十分な水素と酸素が触媒層に供給されることから、ガス供給に起因して、このような数百マイクロスケールでの発電の不均一が形成されることは考えにくい。最近では、触媒層に形成されるマイクロクラックや触媒層・微細孔層・ガス拡散層といった多孔質層間の接触がPEFC発電に影響を及ぼすのではないかと、いう取り組みが報告されている[15,16]。触媒層やガス拡散層を含めた電子電導パスや接触抵抗などについて、MEA内の数十から百マイクロのスケールで不均一が形成される可能性もあり、今後、さらなる研究開発が必要である。

軟X線イメージングは、従来よりも高空間分解能(1μm程度)での水分可視化が実現できることから、MEA厚さ方向の水分可視化についての検討も進めている。図7は、MEA厚さ計測用PEFCにおいて液体水の可視化を行い、チャンネル下部とリブ下部のそれぞれについて、水分生成を信号強度の変化として計測したものである。これより、チャンネル下部、リブ下部のいずれにおいても、触媒層に対応する領域において顕著な水分量の増加が確認される。また、リブ下部では、より多くの水分が計測されていることから、水蒸気分圧が増加し、液体水の生成が促進されることがわかる。

さらに、MEA断面内の水分挙動を時系列計測したものを図8に示す。ここに示した一連の画像は軟X線計測時の元画像であり、液体水の存在により軟X線の透過量が低下するため、液体水の存在領域ほど画像上では暗くなっている。時系列計測結果から、リブ下部から液体水が生成され、ガス流路側へと排出される様子が可視化されている。

このように軟X線イメージングを用いて、MEA面方向、厚さ方向の水分分布の高分解能可視化が実現できることが示された。今後、軟X線イメージングにより、高空間分解能での触媒層内水分分布の「その場」計測が実現できるものと期待している。

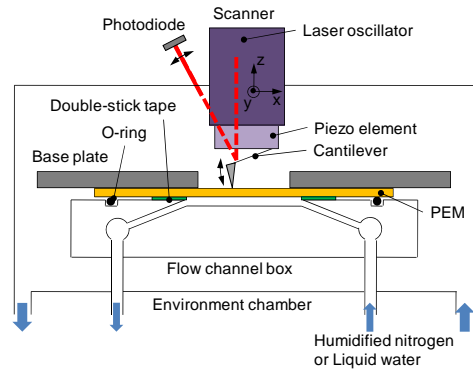
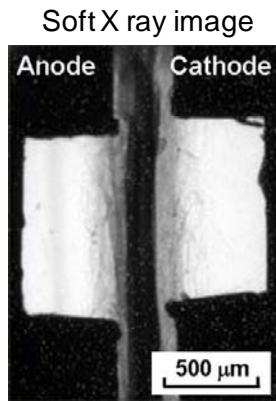


図9 AFM 内水分透湿実験装置

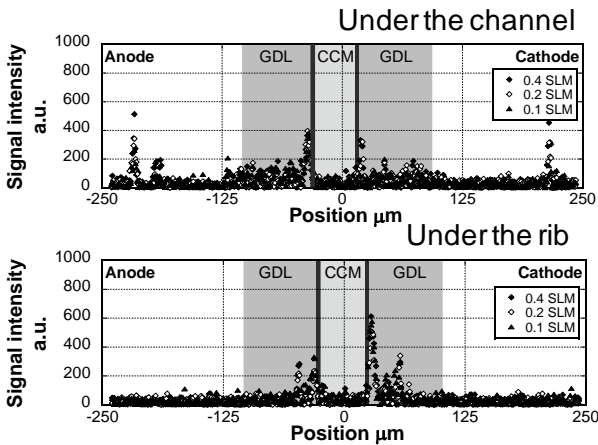


図7 軟 X 線による MEA 厚さ方向の可視化像と信号強度（水分）分布

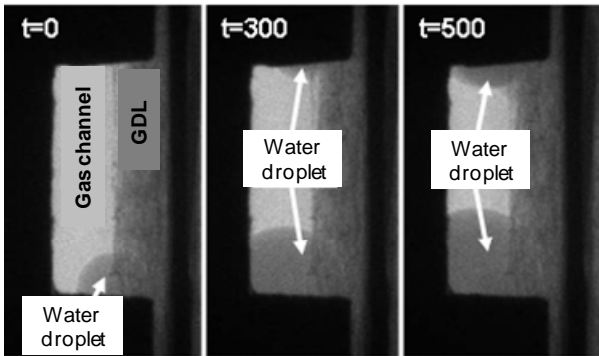


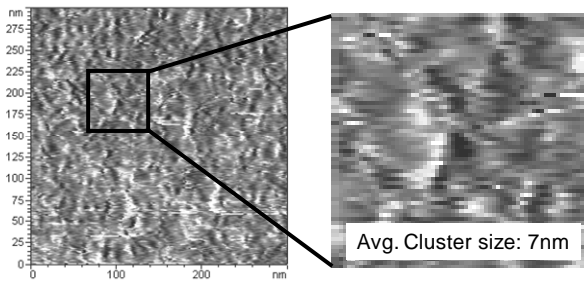
図8 MEA 内水分生成の軟 X 線時系列可視化結果

3.3 原子間力顕微鏡

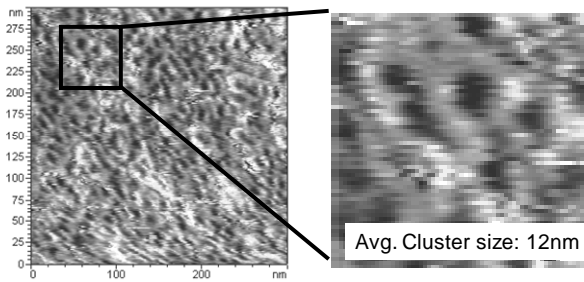
原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscopy, AFM）は、近年、電解質膜表面のクラスター構造やイオンチャンネル分布の計測に用いられている。計測法自体は、「セル外」(ex situ)における材料評価となるが、温度・湿度を制御した環境下での計測が可能であり、ナノメートルオーダーでの高い空間分解能と試料表面の様々な物理化学的情報

を計測できることが大きな利点である。我々のグループでは、タッピングモード AFM により、水分透湿過程における電解質膜表面クラスター構造の計測を行っている[7]。タッピングモード AFM では、AFM 探針（カンチレバー）を周期的に振動させ、振幅変化から材料表面の形状を計測し、位相変化から表面特性を計測する。ここでは、電解質膜表面の親水性クラスターでは、位相遅れが生じることを利用して、水分輸送チャンネルと考えられる親水性クラスターの可視化を行った。図9は AFM 試料室内で電解質膜の水分透湿実験を行うための装置である。電解質膜の両面に異なる湿度の加湿ガスを供給することで、AFM 試料室内での水分透湿実験を可能としている。

図 10(a)は電解質両面の相対湿度を約 70%に保った場合の電解質膜表面の位相画像であり、図中、黒色が親水性領域に対応している。電解質膜表面の親水性領域は離散的に分布していることがわかる。近年、電解質膜表面での物質伝達が水分輸送の律速になる場合があることが報告されており[17,18]、本実験結果から、水分の吸脱着サイトとなる親水性クラスターの面積が少ないことが物質伝達障害の要因であると考えられる。しかしながら、電解質膜が液体水に接すると状況が大きく異なってくる。図 10(b)は、AFM 計測面側を相対湿度 17%と低加湿状態に保ちながら、電解質膜の反対面に液体水を供給した場合の位相画像である。これより、低加湿側であるにもかかわらず、膜表面での平均クラスター径が約 12nm であり、相対湿度 70%の場合（図 10(a)）よりも大きくなっている。すなわち、液体水は電解質膜に吸収されやすく、膜内含水量の増加を促すことがわかる。このことは、MRI 計測で示したように、触媒層で液体



(a) 膜両側の相対湿度が約 70%



(b) 計測側側の RH=17% ; 反対側側は液体水供給

図 10 電解質膜表面の AFM 位相画像

水がある場合には膜内含水量が大きくなる，ということにも対応しており，液体水を利用することが電解質膜の高含水の実現に有効であることを示唆している。

3.4 MEA 断面計測

PEFC 膜電極複合体(MEA)内の水分輸送を基礎的に解明するためには，これまでに示したような水分の「その場」計測に加えて，MEA の多孔質場としての構造評価も不可欠である．従来は，触媒

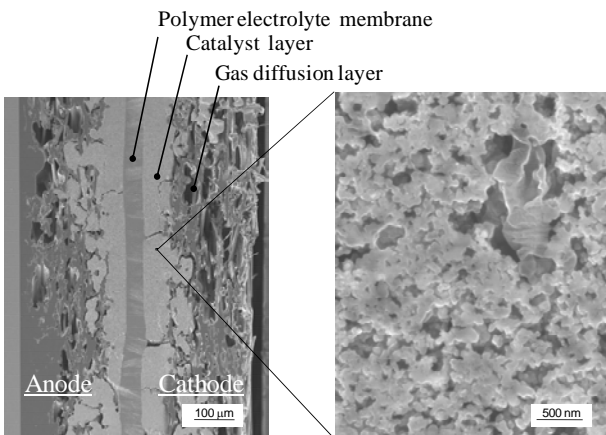


図 11 イオンビームにより作製した PEFC 膜電極複合体 (MEA) 断面の SEM 像

層ならびにガス拡散層は，バルク材料として細孔分布計測を行い，平均細孔径や空隙率を求めるとどまっていた．多孔質チャネルの連結や屈曲などの空間構造については，MEA 断面试料の作成が困難であり，十分な理解が得られていない．そこで，我々のグループでは，MEA の二次元平滑断面を作成する方法としてイオンビームによる断面作成法に着目し，検討を進めている．この方法では，試料にイオンビームを照射し，二次元断面を作成していく．図 11 はイオンビームを用いて作製した MEA 断面の走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 像である．電解質膜，触媒層，ガス拡散層の各レイヤーの構造ならびに各レイヤー間の接合の状況を観察することが可能である．MEA 断面のこのような二次元構造を計測することで，空隙構造をはっきりと可視化できる．さらに，触媒層内にいくつかのマイクロクラックが形成されていることもわかる．このようなマイクロクラックは，これまでほとんど着目されおらず，水分輸送へ及ぼす影響についても明らかにされていない．しかしながら，例えば，土質中の亀裂(クラック)は，水分輸送の支配的要因ともなることから，PEFC 内の水分や反応ガスの輸送においても重要な役割を担っているかもしれない．さらに，触媒層とガス拡散層の界面においては，触媒層がガス拡散層内に入り込んでいる様子がよくわかる．触媒層とガス拡散層は，細孔のスケールも大きく異なっており，このような両層が重畳する領域における水分輸送を，今後，どのように扱い，理解していくのかも課題であるといえる．

4. まとめ

本稿では，我々のグループで取り組んでいる PEFC の「その場」計測を中心に紹介させていただいた．燃料電池は，ナノ・マイクロ細孔を有する材料から構成されるエネルギー変換デバイスであり，内部の液相，気相，電子，イオンの輸送が性能に直接的に影響を及ぼす，という点で物質輸送学の立場から非常に興味深いプラットフォームである．特に水分輸送については，異なるレイヤーを相変化をともなって輸送され，含まれる素過程も複雑である．そのため，PEFC 内の水分輸送過程を基礎的に解明するためには，従来よりも高い空間分解能での計測が求められ，新たな計測法

の開発がすすめられている。しかしながら、未だ、PEFC の心臓部である触媒層については、十分な「その場」計測技術がない。また、PEFC 内で液体水が反応ガスの輸送を阻害する現象は、“フラッキング”として広く認められているが、MEA 内のどこで液体水が滞留し、反応ガスの輸送を抑制しているのか、という基礎的なことについても明らかになっていない。これらを解明し、材料やその3次元構造を制御することができれば、高電流密度運転や触媒使用量の低減が達成でき、燃料電池普及への足がかりになるものと考えている。そのためにも、燃料電池の「その場」計測技術の開発は、燃料電池の普及に向けて不可欠であり、さらなる高空間・高時間分解能化を目指して、取り組んでいる。

謝辞

本研究の一部は、NEDO「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発／基礎的・共通的課題に関する技術開発／物質輸送現象可視化技術（MRI 高分解能化計測および軟 X 線水分計測技術の開発）」の委託により実施したものである。関係各位に謝意を表す。ここに記した実験結果は、東京工業大学 炭素循環エネルギー研究センター 平井・津島研究室の学生諸氏の熱心な取り組みにより得られた成果であることを記し、謝意を表す。

参考文献

- [1] St-Pierre, J. PEMFC In Situ Liquid-water-content Monitoring Status, *J. Electrochem. Soc.*, **154** (2007) B724.
- [2] Bellows, R. J., Lin, M. Y., Arif, M., Thompson, A. K. and Jacobson, D. Neutron Imaging Technique for In Situ Measurement of Water Transport Gradients within Nafion in Polymer Electrolyte Fuel Cells, *J. Electrochem. Soc.*, **146** (1999) 1099.
- [3] Tsushima, S., Teranishi, K. and Hirai, S., Magnetic Resonance Imaging of the Water Distribution within a Polymer Electrolyte Membrane in Fuel Cells, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **7-9** (2004) A269.
- [4] Hartnig, C., Manke, I., Kuhn, R., Kleinau, S., Goebels, J. and Banhart, J., High-resolution In-plane Investigation of the Water Evolution and Transport in PEM fuel cells, *J Power Sources* **188** (2009) 468.
- [5] Sasabe, T., Tsushima, S. and Hirai, S., Minami, K., Yada, K., Visualization of Liquid Water Distribution in an Operational PEMFC by Soft X-Ray Radiography, *ECS Trans.*, **25-1** (2009) 513.
- [6] Sinha, P. K., Halleck, P. and Wang, C. Y., Quantification of Liquid Water Saturation in a PEM Fuel Cell Diffusion Medium using X-ray Microtomography, *Electrochem. Solid State Lett.*, **9** (2006) A344.
- [7] Tsushima, S., Tsubota, A., Tabuchi, Y., Hirai, S., Surface Structure Analysis of Polymer Electrolyte Membrane under Water Permeation Process by Tapping-Mode Atomic Force Microscopy, *ECS Trans.*, **25-1** (2009) 1433.
- [8] 新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）燃料電池・水素技術開発部，PEFC 技術開発の現状と課題，(2009)，24.
- [9] Fujii, Y., Tsushima, S. and Hirai, S., Effect of Micro Porous Layer on Membrane Hydration Path under Low Humidity Operation of PEMFC, *ECS Trans.*, **25-1** (2009) 1783.
- [10] Strickland, D. G. and Santiago, J. G., In-situ Polymerized Wicks for Passive Water Management and Humidification of Dry Gases, *ECS Trans.*, **25-1** (2009) 303.
- [11] Tsushima, S. and Hirai, S. Magnetic Resonance Imaging of Water in Operating Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, *Fuel Cells*, **5** (2009) 506.
- [12] Ikeda, T., Koido, T., Tsushima, S., Hirai, S. MRI Investigation of Water Transport Mechanism in a Membrane under Elevated Temperature Condition with Relative humidity and Current Density Variation, *ECS Trans.*, **16-2** (2008) 1035.
- [13] Springer, T. E., Zawodzinski, T. A. and Gottesfeld, S. Polymer Electrolyte Fuel-Cell Model, *J Electrochem. Soc.*, **138** (1991) 2334.
- [14] Hickner, M. A., Siegel, N. P., Chen, K. S., Hussey, D. S., Jacobson, D. L. and Arif, M. In situ High-resolution Neutron Radiography of Cross-sectional Liquid Water Profiles in Proton

- Exchange Membrane Fuel Cells, *J. Electrochem. Soc.*, **155** (2008) B427.
- [15] Manahan M. P. Kim, S. Kumbur, E. C. Mench, M. M. Effects of Surface Irregularities and Interfacial Cracks on Polymer Electrolyte Fuel Cell Performance, *ECS Trans.*, **25-1** (2009) 1745.
- [16] Bajpai, H. Khandelwal, M. Kumbur, E. C. Mench, M. M. Model to Investigate Interfacial Morphology Effects on Polymer Electrolyte Fuel Cell Performance. *ECS Trans.*, **25-1** (2009) 3.
- [17] Majsztzik, P. W., Satterfield, M. B., Bocarsly, A. B. and Benziger, J. B. Water Sorption, Desorption and Transport in Nafion Membranes, *J. Memb. Sci.*, **301** (2007) 93.
- [18] Tsushima, S., Takita, S., Hirai, S., Kubo, N. and Aotani, K. Magnetic Resonance Imaging of a Polymer Electrolyte Membrane under Water Permeation, *Exp. Heat Transfer*, **22** (2009) 1.
-

オハイオ州立大学滞在日記

A diary while staying The Ohio State University

小林 信介 (名古屋大学)

Nobusuke KOBAYASHI (Nagoya University)

e-mail: Nsuke@nuce.nagoya-u.ac.jp

2009年1月1日、私はアメリカに渡った。久しぶりのアメリカというわけでもないが、いつもの出張とは違って、今回は8月末までの8ヶ月間、かなり自由にできる。シカゴの空港に降り立つと、正月だというのに飛行機を待つ人、人、人。正月気分を味わうつもりはさらさら無かったのだが、“Happy New Year”の文字さえどこにも見かけることは無かった。シカゴから飛行機でさらに1時間半、オハイオ州立大学があるコロンバス空港に無事到着。コロンバスに到着するころには日も傾き始め、肌に突き刺す寒さが旅行気分を吹き飛ばしていた。

ペンシルバニア州の西隣、エリー湖に面し、ほとんど山の無いのがオハイオ州。広大なコーン畑の中にぽつんとあるのがオハイオ州の州都、コロンバス市である。その中心にあるのがオハイオ州立大学。ダウンタウンから数キロと繁華街にほど近い場所に広大な敷地を有する大学がある。野球場がいくつか入りそうなグリーンベルトを中心に、敷地の中には11万人を収容するフットボールスタジアム、4万人以上収容可能なアイススケートリンクやバスケットボール場、サーカスコート5面、ソフトボール場は11面……、さらにゴルフコースや大学専用の飛行場まである。アメリカといえども信じられない規模である。



オハイオ州立大学グリーンベルト
(オハイオ州立大学のホームページより [1])

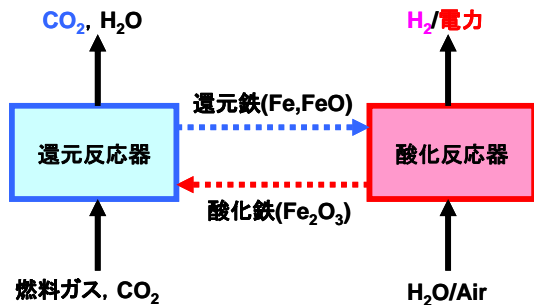
私がオハイオ州立大学でお世話になったのは化学工学科のL.S Fan先生。今までにも数多くの日本の先生方がお世話になってきたという米国化学工学の第一人者である。Fan先生の研究に対する厳しさは言うまでも無いが、20名以上在籍するFan Clubのメンバーの研究能力はかなり高く、研究に対する積極性にはかなり見習うべきものがあった。特に私が属したガス化グループのドクターコースの学生、Fanxing Liのセンスの良さには驚かされるばかりであった。



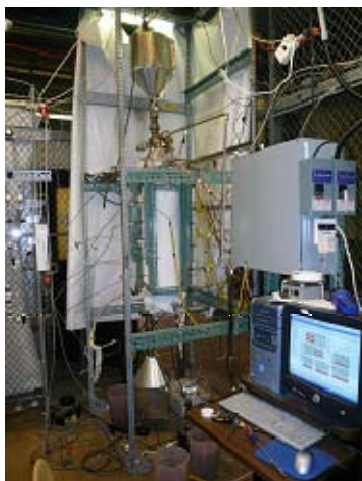
Fan先生家族とのBBQ Party

そんなオハイオ州立大学で私が学んだのはコール・ケミカル・ルーピング [2]。Fan先生肝いりの二酸化炭素回収型エネルギー変換プロセスである。今年の初めブッシュ政権からオバマ政権へと替わり、エネルギーや環境政策は大きく変わり始めているが、ケミカル・ルーピングの開発には政府の手厚いサポートが今後も続く。ケミカル・ルーピングプロセスは従来の石炭ガス化プロセスとは異なり、酸化剤として酸素担体粒子を使用するのが大きな特徴である。還元反応器と酸化反応器間で粒子を循環させ、還元反応器からは二酸化炭素、酸化反応器からは水素が生成されるため二酸化炭素を分離することなく回収でき、二酸化炭素分離・回収に伴うエネルギーの損失が無い。私が研究タ

ーゲットとしたのはバイオマス・ケミカル・ルーピング。石炭の代わりにバイオマスを原料としてプロセスを構築するのがオハイオ州立大学での私の仕事だ。酸素担体粒子の開発はほぼできているとはいえ、石炭をバイオマスに変えるだけで意外とうまくいかない。バイオマスのタールや酸素担体粒子表面の炭素析出。これらの課題はある程度予測していたとはいえ、解決するには粒子原料から根本的に変える必要があった。最初はカルシウム。しかし粒子はもろい。鉄とアルミニウムを混ぜたり、ニッケルを添加したり、焼成温度を変えてみたり。ニッケルやドロマイトを使うと論文の通りタールの問題は解決するが、炭素析出やコスト、反応性で新たな課題が。試行錯誤の上、酸化鉄をベースとした酸素担体粒子が出来上がった。



ケミカル・ルーピングシステム概念図
(酸化鉄を使用した場合)



ケミカル・ルーピング 回分式装置

もう一つの課題は反応器間の粒子の移動。ケミカル・ルーピングでは酸化反応器内の高温粒子を

取り出して酸化反応器に再び投入する必要がある。まずはコールド試験装置で反応器内での粒子の移動を確認。排出 O.K., 循環 O.K.. 予想していた問題はコールドでは意外とすんなり解決。もちろんコールドで試験を行なうところはまだまだ山ほどある。並行して行なっていたのがバッチ式の高圧反応試験。こちらは粒子の移動や反応器内の温度制御に頭を悩ませることになった。実はこちらの方はまだ全然解決していない。名古屋に持ち帰る宿題である。

自由な環境で、かなり自由に研究に身を投じている間に 8 ヶ月間があつという間に過ぎてしまった。今では 2 月の凍てつく寒さの中、車に厚く張った氷を毎日ゴリゴリと 30 分かけてそぎ落とし研究室に向かったことが懐かしく思われる。今はもう 8 月。青々と茂ったコーン畑で薄き色のコーンが大きく実っている。来週には帰国。成果は出した。在米中は多くの先生方にお世話になり、またご迷惑をかけたが、研究に、研究に、遊び?かなり濃密な 8 ヶ月間をアメリカで送らせていただいた。オハイオ州立大学で大変お世話になった Fan 先生、不在中に多大なご迷惑をお掛けした田邊先生、板谷先生をはじめとする名古屋大学の先生方、そしてわがまを聞き入れてくれた家族に心より感謝している。



8 月の車窓より (オハイオ州コロンバス近郊)

参考文献

- [1] オハイオ州立大学ウェブサイト, Available in <http://www.osu.edu/>
- [2] Fan LS. et al., Utilization of chemical looping strategy in coal gasification processes. *Particuology*, **131-142** (2008) 6.

ニールス・ボーア(1885~1962)の功績

A meritorious deed of Niels Bohr (1885-1962)

村上 陽一 (東京工業大学)

Yoichi MURAKAMI (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: murakami.y.af@m.titech.ac.jp



ニールス・ボーア (1885~1962)

1. はじめに

19世紀後半から、1900年のプランク法則の発表[1]を経て、ハイゼンベルクとシュレディンガーによってそれぞれ1925年と26年に量子力学が発見されるまでの時代は、古典力学では説明がつかない実験的観察がつかないスピードで積み重ねられていった刺激と困惑に満ちた時代だったと言えます。

本稿が焦点を当てるニールス・ボーアが1913年に発表した一連の論文は、これらの謎の幾つかに対して首尾一貫した一定の説明を与え、前期量子論の分野に本格的な研究ラッシュを引き起こした転回点となるものでした。公私に交流の深かったアブラハム・パイス博士の言葉を借りれば、ボーアは「原子がどのようにできているかを理解した最初の人物」であり、「量子現象を理解するのに不可欠な物理学の哲学的基礎に修正を迫った中心人物」[2]でした。

2. 原子スペクトル

2.1 分光分析学のおこり

19世紀後半、新しい実験物理学の分野として分析分光学が誕生しました。この分野の誕生に大き

く貢献したのが、実験演習などでお馴染みのブンゼン・バーナーの発明でした。その炎は不輝炎で、物質を熱しても炎が分光の妨げにならないという利点があったからです。

キルヒホフとブンゼン（ともにハイデルベルク大学の教授）は共同して元素とスペクトルとの間に一定の関係があることを見出し、分光学が新しい元素の発見に欠く事のできないものになると洞察します。実際、19世紀の終わり頃までに、彼ら自身による発見も含め、分光スペクトルに基づいて多くの元素が発見されてゆきます。天文学の領域においても1869年に太陽光スペクトル中にヘリウムが発見されるなど、分光スペクトルは元素の存在を示す指紋としての役割を担い始めます。

2.2 バルマー公式

ヨハン・ヤコブ・バルマー（1825 - 1898）はバーゼルの女学校の教師でした。彼は、アンデルス・オングストローム（1814 - 1874）が発見した4本の水素スペクトル線の振動数だけを恣意的に用い、それらに合うような数式を作るという試みを行います。彼が得た式は、 a, b を自然数として

$$\nu_{ab} = R \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right), \quad a > b \quad (1)$$

というものでした[3]。彼は1885年、 $b=2$ に対して $a=3, 4, 5, 6$ とし、 $R=3.2916 \times 10^{15} [\text{s}^{-1}]$ とすると、オングストロームの観測した4本の線にぴったり重なることを発見します。奇妙な事に、その後さまざまなスペクトル線が報告されても、式(1)の形式はその正しさに微塵の揺るぎも見せませんでした。なお、現在 R の正しい値は $3.2898 \times 10^{15} [\text{s}^{-1}]$ と知られています。

3. 発見にいたるまで

3.1 ボーアの経歴 — デンマーク帰国まで

ボーアはデンマークに生まれ、1911年にコペンハーゲン大学において博士号を取得しました。博士論文の題目は「金属電子論の研究」でした。博士課程を終えてすぐ、ボーアはケンブリッジのJ. J. トムソンのもとにポストクの研究を始めるべく旅立ちます。トムソンは電子の発見によって1906年にノーベル賞を受賞しており、当時キャベンディッシュ研究所の所長をしていました。しかしケンブリッジ時代のボーアは、トムソンとの関係も含めあまりうまく行かなかったようです。「ケンブリッジは全体的に大変面白いところでしたが、まったく有益なところではありませんでした」[2].)

続いてボーアは、原子核を発見したばかりのラザフォード[4]と出会います。ボーアは放射能実験の技法を身につけることを願い、ラザフォードのいるマンチェスター大学に移ることを決意します。ボーアは実験を始めますが、2, 3週間たつとラザフォードに実験を続けてもうまく行かないと思うと告げ、理論面に集中すべく家に籠もってしまいます[2]。しかし、ラザフォード研究室の研究員であったゲオルグ・フォン・ヘヴェシー（1943年にノーベル化学賞受賞）とチャールズ・ゴルトン・ダーウィン（進化論のダーウィンの孫）との交流から新しい物理学を学び、これがその後の発見に繋がる重要なインスピレーションとなります。

ボーアのマンチェスター滞在は短いものでしたが、ラザフォードとの交流および議論はその後も長く続き、この出会いがボーアの人生を大きく開いてゆきます。ボーアはデンマークに帰国し、コペンハーゲン大学に職を得ることになります。

3.2 原子構造研究の開始

帰国後のボーアは、伝熱分野でもお馴染みのマルティン・クヌーセン（1871-1949）の助手として希薄流の実験を行っていました。しかしボーアはこれがとても負担に感じられたため、クヌーセンのところに行って自分の時間がどうしても欲しいと告げ、妻をつれて田舎に引き籠もってしまいます[2]。そしてボーアは本格的に原子構造の研究に取り組み始めます。

ボーアを始めとする当時の原子構造研究者の苦闘は、言葉（量子力学）がまだ発見されていない

時代に、それをどうにか説明しようとした点にあったと言えます。ボーアが辿り着いた原子の描像は、「原子核の周りを公転運動する n 個の電子のリングを軌道として考える」というものでした。

（日本の長岡半太郎が、原子核が発見される以前に同様な原子構造（土星型原子モデル）を検討していた事[5]は言及しておくべきでしょう。）しかし、このような描像には「周回する電荷は電磁波を放射し運動エネルギーを失うため、電荷は安定して円軌道に留まれない」というやっかいな問題（不安定性）が付きまといまふ。これは当時の原子構造に取り組む研究者を悩ませていた主要な問題の一つでした。

1913年2月、ボーアは知人から水素スペクトルに関するバルマー公式（式1）のことを耳にします。ボーアは後年、「この式を知るやいなや、あらゆるものがおさまる所におさまった」と語っています[2]。こうして、3月にはこの年発表される三部作の最初の論文[6]が完成したのでした。

4. ボーアの原子モデル

4.1 原子模型と振動数条件

図1にボーアの原子模型を示します。原子核を中心として同心円状に安定な電子軌道が不連続に存在し、ボーアはこれらを「定常状態」と名付けました。それらの軌道のエネルギーは増加順に E_n ($n=1,2,3 \dots$) と表され、特に $n=1$ の軌道を「基底状態」と呼び、最低エネルギー E_1 を持つとしました。前述の円軌道の不安定性については、ボーアは大胆にもそれまで知られていた電磁輻射に関する知識を反古にし、単に「基底状態は安定である」

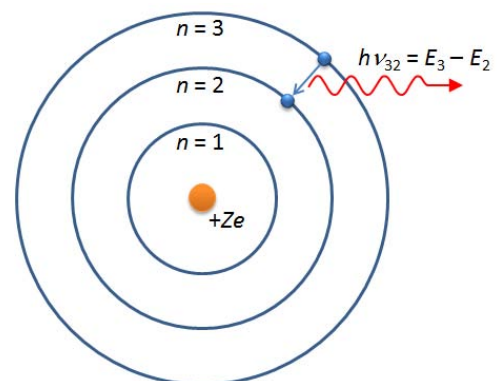


図1 ボーアの原子模型. 電子の状態遷移に伴って放出される光子の振動数はボーアの振動数条件に従う。

と説明して破綻を回避します。一方、 $n \geq 2$ の定常状態は準安定であり、電子はそこからどこかそれより低い状態へと降りてゆく。すなわち E_a から $E_b (a > b)$ に降りるような遷移があった場合には、プランク定数 h を用いて

$$E_a - E_b = h\nu_{ab} \quad (2)$$

で与えられる振動数 ν_{ab} を持った光子が一個放出されるとしました(ボーアの振動数条件)。そして、原子が光子を1個吸収した場合には、その逆向きの遷移が起こるとします。これは「スペクトル線は系が2つの定常状態間を遷移する際に放出される輻射に対応する」という、今日まで変わらず分光学の根幹をなしている概念です。

4.2 量子条件と水素スペクトル

ボーアは、このような定常状態が満たすべき制約として、 n 番目の定常軌道(半径 r_n) の電子(質量 m) は

$$mV_n r_n = \frac{nh}{2\pi} \quad (3)$$

という条件(ボーアの量子条件)を満たさなければならないと仮定しました。ここで V_n は電子の周回速度であり、これは電子の取りうる角運動量を量子化した事に対応します [7]。これにより、電子のエネルギーは式(3)によって決まる離散的な値のみを取ることになります。これは主量子数 n の最初の例となりました。

ボーアはさらに理論の展開を行います。今、 n 番目の軌道の電子が原子核(電荷 Z) からのクーロン引力と釣り合いながら定常運動をしていると考えます。力の釣り合い条件は

$$m \frac{V_n^2}{r_n} = \frac{Ze^2}{r_n^2} \quad (4)$$

となります(e : 電荷素量)。式(3)を用いて式(4)の V_n を消去すると、直ちに

$$r_n = \frac{h^2 n^2}{4\pi^2 Zme^2} \quad (5)$$

が得られます。特に水素原子($Z=1$) の基底状態半径

$$a_B \equiv \frac{h^2}{4\pi^2 me^2} \quad (6)$$

はボーア半径と呼ばれ、これは $a_B \sim 0.55 \text{ \AA}$ と計算されました。これは、当時原子の大きさとして知られていた値と一致するものでした。

一方、軌道 n にある電子のエネルギー E_n は

$$E_n = \frac{mV_n^2}{2} - \frac{Ze^2}{r_n} \quad (7)$$

なので、これに量子条件(式3)を適用すると E_n の具体的な形が得られます。さらに振動数条件(式2)に適用すると、状態が a から $b (a > b)$ に遷移する際に放出される光子の振動数 ν_{ab} は

$$\nu_{ab} = \frac{E_a - E_b}{h} = \frac{2\pi^2 mZ^2 e^4}{h^3} \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right) \quad (8)$$

と導かれます。これは式(1)そのものであり、すなわちボーアはそれまで単に実験式と考えられていたバルマー公式の導出に成功したのでした[8]。図2に、ボーアがこのモデルを発表した当時知られていた $b = 1, 2, 3$ に対応する水素スペクトルの3つの系列(それぞれライマン、バルマー、パッシェン系列)の遷移を原子模型上に示します。

式(1)と式(8)との比較から、直ちに

$$R = \frac{2\pi^2 mZ^2 e^4}{h^3} \quad (9)$$

が導かれます。ボーアは、当時得られた最も信頼できる m, e, h の実験値を用いて、 $R = 3.1 \times 10^{15}$ という値を得ました。式(9)は、ボーアが人生の中で

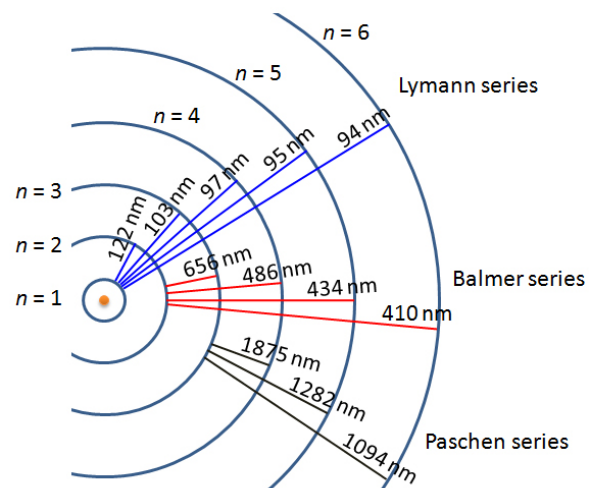


図2 ボーアの原子模型上に示した、水素原子スペクトルのライマン、バルマー、およびパッシェン系列に対応する状態遷移。

導いた最も重要な式とされています。

これによりボーアの名は知れわたりましたが、周囲から肯定的な反応を受けつつも、ボーアは自分の導いたモデルが暫定的で不完全なものである事を認識しており、モデルには決して満足していませんと伝えられています。

4.3 ピカリング線

1913年当時、恒星光のスペクトルにピカリング線と呼ばれる未知のスペクトル系列がありました。ボーアは、この系列が式(9)において $R' = 4R$ とするとバルマー公式に合致することから、これを $Z=2$ の1電子系、すなわちヘリウムの1価陽イオンと帰着します。

しかし、ある著名な天文学者から、データと一致させるためには $4R$ ではなく $4.0016R$ でなくてはならないと指摘されます。これに対してボーアは、自分の行った定式化は原子核が電子に比べて無限に重いと仮定したものであり、実際の原子核質量の値を用いて計算すると $4.00163R$ になると発表しました。このような、理論と実験値の5桁の精度での一致は大変な快挙でした。アインシュタインはこの一致を聞いたとたん、ボーアの理論の正しさを確信したといえます[2]。

4.4 物質波の観点から見たボーアモデル

ボーアが用いた描像は、電子が粒子として円軌道を周回するもの(図1)でしたが、後にド・ブロイ(1892-1987)が提唱した粒子を波として扱う解釈に基づくと、異なる描像が見えてきます。1923年、ド・ブロイは「運動量 p を持つ粒子は $\lambda = h/p$ の波長を持つ波(物質波)と捉える事ができ

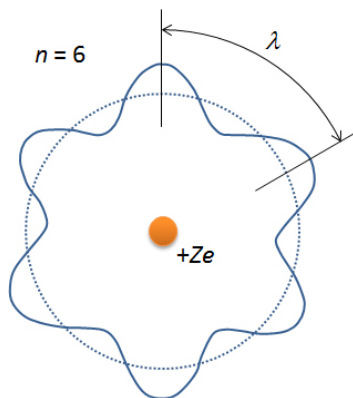


図3 電子を物質波と捉えたときのボーアの量子条件を満たす定常軌道の図示 ($n=6$)。

る」という考えを示します。ボーアの量子条件(式3)を物質波の考えを用いて表すと

$$\frac{nh}{2\pi} = \frac{hr_n}{\lambda} \Leftrightarrow 2\pi r_n = n\lambda \quad (10)$$

となります。すなわちボーアの量子条件は、物質波の観点からは図3のような「軌道の一周長さが電子波の波長の整数倍である軌道のみが、定常状態として許される」と(前期量子論の範囲内で)理解する事ができます。

4.5 ボーアモデルの描像と量子力学の差異

ボーアのモデルには、その後見出された方位量子数、磁気量子数、およびスピン量子数が含まれていません。それでもボーアモデルにより導かれた結果がこれらの発見後も妥当で有り続けたのは、これらの量子数によるエネルギー準位は通常縮退しているため、ボーアがこれらの量子数の存在を知らなくても、モデルから導かれた結果には影響が無かったという一種の幸運のためでした[9]。

何より、ボーアが図1のような(円運動による遠心力とクーロン引力の釣り合いを考える、といったような)量子力学から導かれる電子軌道とはかけ離れた描像に立脚しながら、現在でも成り立つ一般的な概念と関係式を導いた事は驚くべき事と言えます。例えば、ボーア半径(式6)や R の表式(式9)などは量子力学からも導かれるため、今日でもその意義を保っています。なお、ボーアのモデルにおいては角運動量は主量子数(原子のエネルギー)に関連するものとして扱われていましたが、量子力学において「軌道角運動量」という言葉は方位量子数に関連して電子波動関数の形状を決める因子として用いられています。

5. 対応原理

ボーアは量子現象が古典論によっては根本的に説明出来ないものである事を確信しましたが、彼は古典論を棄て去ったのではなく、古典論は量子論の一つの極限であるはずだという、両者を結び重要な概念を提案します。この考えはボーアの対応原理(correspondence principle)と呼ばれ、「量子数 n が十分大きい極限では、古典力学による記述が可能となる」と表現されるものです。この原理の適用範囲は広いのですが、以下、一つの例を考

えてみましょう。今、質量 $m = 1 \text{ g}$ の玉が振幅 $X_0 = 1 \text{ cm}$ 、周波数 $\nu = 1 \text{ Hz}$ で線上を単振動しているとします。その運動エネルギー E は

$$E_n = \frac{1}{2} m \left(\frac{\nu}{2\pi} \right)^2 X_0^2 \approx 2.0 \times 10^{-6} \text{ J}. \quad (11)$$

一方、エネルギーの量子的なはしごの間隔 ΔE は

$$\Delta E = h\nu \approx 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \quad (12)$$

となります。このような場合では E は ΔE に比べて十分大きいために、実際上その E はほとんど連続であるとみなす事ができます。(室温とすると、この玉のもつ熱振動による並進エネルギーだけでも $1/2 k_B T \sim 4 \times 10^{-21} \text{ J}$ になります。) 言い換えると、この玉は量子数 $n \approx 3 \times 10^{27}$ の状態にあります。我々は直感的に物体が大きい場合は古典力学で記述できる事を知っていますが、量子数 n は物体の大きさ(量子性の強さ)を計る尺度と考えられるのです。

6. ボーアの影響

ボーアの水素原子とヘリウムイオンに対する目を見張る成功は、それ以前の 50 年間にスペクトルを指紋として蓄積してきた分光学の分野を一変させただけでなく、前期量子論の分野に多くの参入者を呼びこみ、本格的な研究ラッシュを巻き起こしました。

ボーアは 1916 年にデンマーク初の理論物理学教授に就任した後、コペンハーゲン大学に理論物理学研究所を設立します。そして、ここに世界中から多くの若い研究者が訪れ、コペンハーゲン学派が形成されてゆきます。ボーアの研究所には、まだ 20 代だったハイゼンベルク、パウリ、ディラック、ランダウ、30 代だった仁科芳雄[10]など多くの若者が集いました。ボーアは彼らとの積極的な議論を通じて、量子物理学の形成段階において重要な指導的役割を果たしてゆきます。

前期量子論の時代、出現順にミュンヘン、コペ

ンハーゲン、ゲッティンゲンの三つの学派が現れましたが、いずれの学派も直接的・間接的にボーアの影響を受けていました。そしてそれらの学派から、次の量子力学の時代の研究者が育ってゆくこととなります。

参考文献

- [1] 花村克悟, マックス・プランクの功績, 伝熱, **48-205** (2009) 32.
- [2] ニールス・ボーアの時代 1, アブラハム・パイス著, みすず書房 (2007).
- [3] 式(1)は便宜上リュードベリ形式で示しています。実際のパルマー公式は、後にリュードベリにより一般化されたリュードベリ公式の特別な場合です。式中の R はリュードベリ定数 \times 光速となります。
- [4] ラザフォードは放射性元素に関する業績で 1908 年にノーベル賞を受賞した後で原子核の発見 (1911 年) という大業績を成しています。
- [5] H. Nagaoka, *Nature* **69** (1904) 392.
- [6] N. Bohr, *Philosophical Magazine* **26** (1913) 1.
- [7] 但し、角運動量の量子化は原子構造を研究していた J. W. Nicholson の論文 (1912 年発表) においても検討されており、ボーアはその影響を受けていたと考えられています。
- [8] ボーアは 1913 年の間に三通りの方法でパルマー公式を導出しています。本稿に示したのは、今日教科書等で最も一般的に知られている方法です。
- [9] これらの量子数が量子力学に基づき確立されると状態間の遷移選択則が明らかになりましたが、主量子数しか含まれないボーアモデルにはこのような概念はありません。
- [10] 仁科は 5 年半 (1923 - 1928) 滞在し、クライン-仁科公式の導出など重要な仕事を行います。仁科は帰国後、理化学研究所に研究室を立ち上げ、朝永振一郎、湯川秀樹を始めとする多くの若手物理学者を育ててゆきます。

第7回コンパクト熱交換器とその性能向上に関する国際会議報告
*Report of Seventh International Conference on Enhanced Compact and Ultra-Compact
 Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology*

石塚 勝 (富山県立大学)
Masaru ISHIZUKA (Toyama Prefectural University)

1. はじめに

このシリーズは今回で7回目であり、Engineering Conference International (ECI, USA) 主催の会議のひとつで、議長団は議長の Ramesh K. Shah (インド工科大学, ボンベイ) のほか A.M. Jacob (イリノイ大学, USA), Vishwas V. Wadekar (HTFS, Aspen Technology, UK) と小生の3人の共同議長から構成される。小生は第5回目から極東地区の共同議長を務めさせていただいている。

もともと、この会議は、産業用プロセスのコンパクト熱交換器の性能やその向上に限定した専門家会議として出発した経緯があるが、それでは論文があつまらないので、いまでは、自然発生的に基礎的な熱交換に関する技術も多く発表されている。よって会議の名称も微妙に変化しており、できるだけ、広い意味での熱交換器関連の会議と考えたほうがよい。

2. 会議の場所と規模

会議は、コスタリカの Heredia 地区の La Condesa Hotel というリゾートホテルを使い、食事は図1のレストラン(バフフェスタイル)で9月13日(日)の夕食から、9月18日(金)の朝食まで朝、昼、夕食つきで、1室を用いて缶詰状態で行われた。ホテルはサンホセ空港から車で30分程度の山の中腹にある。昼は温暖と言うか多少暑いくらいだが、朝晩は結構冷える。しかし、景色もよく、インターネットも問題なく、食事もよいほうで、米国ドルも使えて、リゾート地としてはよいところである。会場は全員気に入っていたようである。コスタリカはコーヒーの産地のため、見学用のコーヒー園もある。

今回は、表1でみるようにキーノートと普通講演を合わせ、合計で31件の発表予定があったが、1件中国のキーノートのキャンセルがあった。

ただし、日本、中国、韓国の貢献が多いことがわ

かる。アブストラクト集計の時点では48件あり、会場の容量から50人が適切であったので、よかったが、世界的金融危機の影響で(日本では新型インフルエンザの影響もあったと思われる)キャンセルが続出し、共同議長の Wadekar まで参加できなくなり、米国、南米からのキャンセルが多かった。そのため、共同議長の A.M. Jacob は一人で4件の発表を行い、西安交通大学の Tao 教授も3件の発表をしていた。そのため、最後まで開催が危ぶまれたが、なんとか30人以上の参加があり、開催にこぎつけた(図2参照)。もっとも、毎回参加者は減少傾向で、主催の ECI から目をつけられており、この会議が今後も続くかどうかは不明である。



図1 会場ホテルのレストランの眺め

日本からの参加は、鈴木康一先生(山口理科大学, キーノート), 藤野宏和氏(ダイキン, キーノート), 高田保之先生(九大), 伏信一慶先生(東工大), 石塚勝(富山県大)の5名であった。

3. 発表内容

今回も、単相流、二相流、沸騰、蒸発、凝縮といった現象を表わすセッション構成になっていて、その中に化学プラントの熱交換器や、ルーバーフィン熱交換器で特に空気側の fouling のモデル化という従来型の発表も数件あったが、熱交換器の技術はある意味、成熟期間であるようである。

そのなかで、今回の会議から話題性を拾い上げると以下の5点であったと思う。

(1) マイクロチャンネルを用いた熱交換器

鈴木先生のマイクロバブルを含めマイクロチャンネルを用いた熱交換器の研究開発が数件あった。

(2) 金属 foam 熱交換器を用いた熱交換器

これは、今研究段階のようであるが、どう発展するか楽しみである。

表1 国別発表件数

国別	参加者	キーノート	普通講演
USA	7	2	8
日本	5	2	3
韓国	4	1	1
中国	4	1	5
ドイツ	2	0	2
ベルギー	2	0	2
イギリス	2	0	2
インド	2	0	2
ハンガリー	1	0	1
フランス	1	0	2
ロシア	1	0	1
カナダ	1	0	1
チェコ	1	1	0
ブラジル	0	0	1
合計	33	7	31



図2 参加者記念写真

(3) 高温熱交換器

材料面とコストが問題であろう。

(4) Delta-Winglet という渦発生器を設けたフィンチューブ形の熱交換器の性能

これは、フィンチューブ形の熱交換器にDelta-Winglet 渦発生器といわれる一種の突起をもうけ、圧力損失がそれほど増えない代わりに熱伝達率

が向上するというもので、これからの発展が期待できそう。日韓中、米国、欧州から発表があった。

(5) “Entransy” の概念の導入

熱交換器の性能の最適化に Bejan 教授が提案した“Entropy Generation Minimum”では熱抵抗を考慮すると、ある条件でパラドックスが生じるので、それを改善するために精華大のGuo教授が数年前から“Entransy”概念を提案している。それをうけて、中国から2件の発表があった。米国から1件、Bejan教授型の最適化手法使う発表もあり、“Entransy”概念への疑問もふくめ議論が沸騰した。ちなみに筆者はその概念をいまだに理解できず。

4. 日韓の交流会

韓国のプサン大学のJ.H.Jeong教授(キーノート、図3の前列左)の提案で、日本と韓国の参加者との交流の場を作りたいという提案があり、16日夕食の後、交流会をもった。お互いアジアの同胞としての意識が強まったことは確かで、たのしい交流会となった。その際、会議の良さを決める指標として、“Entransy”ならぬ“Conferency”という言葉を高田先生が提案し、議論が沸騰した。



図3 日韓のコンファレンシー記念写真(中央が高田教授、右が筆者)

5. あとがき

今回は発表が30件程度のこじんまりした会議であったが、そのため、開催中に参加者と友達になれる機会が多く、国際会議としての意義はあった。

中国のキーノートのキャンセルの原因は、急遽都合で代理を立てたが、ビザが間に合わなかったということで、ビザなし渡航ができる日本人のありがたさを知った。ぜひ、この特権を幅広く利用したいものである。おわりに、日本から参加された先生方に心から感謝するしだいで。

InterPACK'09 会議報告

Report of InterPACK'09

伏信 一慶 (東京工業大学)

Kazuyoshi FUSHINOBU (Tokyo Institute of Technology)

会議について

InterPACK とは、電子機器の実装に関連した諸問題を、主として伝熱や材料といった機械工学の視点から取り扱う関係者が一堂に会する国際会議であり、ASME が中心となって隔年で開催されている。今回は InterPACK'09 と題し、サンフランシスコのウエスティン・セントフランシスホテルを会場として、2009 年 7 月 19 日から 23 日にわたって開催された。

2005 年の InterPACK'05 以降は、ASME の Summer Heat Transfer Conference (SHTC ; かつての NHTC) との co-location が常態化している。2 年前、2007 年のバンクーバーでの AJTEC (ASME-JSME Thermal Engineering Conference) の際に SHTC とともに co-location であったことから、ご記憶のある方もおられるのではないかと思う。

歴史をたどると、1992 年にカリフォルニアのサンノゼで開催された電子機器実装に関する日米の合同会議がその母体となっており、翌年は ASME 行事として開催された。その後は InterPACK の名称となり、隔年で 1995 年から西暦奇数年の 7 月頃に開催されている。(このあたりの詳細な事情は、自身の記憶だけではフォローができず、日本側で会議の立ち上げをされた中山恒先生や、当初からの中心的なメンバーである富山県立大学の石塚勝先生から教えていただいたものである。) かつては日米を中心とすることから、その中間地点となるハワイでの開催が常であったが、2003 年を最後にこの「伝統」が途絶え、以後は北米本土での開催となっている。

この会議とは別に、IEEE が中心となる ITherm と称する会議もあり、こちらは 1 年ずれ、西暦偶数年の 6 月頃に隔年で開催されており、定点観測的に参加する熱関係のメンバーは InterPACK, ITherm の両者を watch するケースが多いようである。

今回の会議について

会議の中身であるが、恒例のトラック(Track)制となっており、今回の会議では全体で 14 のトラックが設定され、それぞれ Track Chair を中心にセッションが構成された。



恒例で、幅広い話題が会議で議論されているが、伝熱に関連した議論に関しては、対流冷却を中心とした機器の冷却、熱管理に関する内容が主流となっている。これらの発表は主として、14 のトラックのうち、二つをしめる Thermal Management のトラックで発表されており、それぞれのトラックでは System level, Component level を扱っている。空冷、液冷、相変化、TIM やヒートスプレッドからデバイス、機器、データセンタ、さらには計測法やモデリングなど、実に多岐にわたる。

一方で、マイクロな視点やナノスケールの視点からの研究発表が充実していることもこの会議の特徴であり、このような微細なスケールでの発熱や輸送現象に関する研究発表も日米双方から多い。

また、熱や材料といった discipline とは一對一対応しない名称の Track が多いことも特徴である。今回も、発表者の関心がサイエンスであったり事業よりであったり、あるいは概念の提案であったり詳細なデータに基づいた議論であったりと、実に幅広いタイプの発表が並んでいる。

そのような中、今回の会議では、初めて、マルチフィジックスをはっきり前面に出した、Electro-Thermal-Mechanical Issues in Packaging (Multi-Physics)という名称のトラックが立ち上げられた。ここではデバイスシミュレーションと応力や熱、エレクトロマイグレーションなど、種々の連成現象を扱っており、4つのセッションが立ち上がっている。初めて立ち上げられたトラックにしては投稿論文も多く、関係者の関心も高かったと考えられる。

雑感

ところでこのInterPACK, という名称であるが、もはや、関係者の間でも正式な名称というのがよくわからなくなっている。ハワイでの開催がどこかデフォルト意識に残っている人や、2007年のAJTECとのco-locationのときにAJTECに出すか、あるいはInterPACKに出すかで迷ったりしたようなディープな関係者ほどそうで、とにかく、「インターパック」で通っている。実際、Interpackとググると、包装機械の展示会も出てきたりするわけだが、こちらの会議は元々international intersociety conference on electronic packagingといった名称であったはずが、今や、The ASME/Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems, MEMS, and NEMS, となっているようで、とてもではないが覚えられない。果たしてこれも正式名称かどうかよくわからない。ひょっとすると、次回も名称が変わっているかもしれない。略称もInterPACK 20xxだったり、InterPACK'xx, あるいはInterPACK xxだったり、スペースがあったりなかったり、大文字だったり小文字だったり、いずれにせよ、あまりこだわらなくてよいようである。出張書類などを作るときに少し困ったりする。IThermのほうは、次回、2010年の会議は、2010 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systemsというようだ。いずれにせよ、とにかく長い。

一方、すでに述べたように、2005年以降、隔年のInterPACKは全てSHTCとco-locationになっており、特に伝熱の関係者にとっては、一度の参加

登録で両方の会議の発表を聞き、関係者との議論を深めることもできる、という、お値打ち感の高い会議となっている。中心的な運営関係者のご苦労は多いのではとひそかに感謝申し上げるとともに、メリットを感じる参加者は多いと思われる。

ところでこのco-locationの会場、サンフランシスコ開催の2回は2回ともウエスティンであったが、街のど真ん中にあるため、アクセスなど非常に便利であるものの、会議場の構造が実に分かりにくい。果たしてここから登るのが本当に近道なのか、このまま歩くとどこに行くのか、自分はいったい今階にいるのかなど、基本的なことがいまだによくわかっておらず、意外なところにひっそりとある階段が実は近回りになっていたり、2回目となっても発見は尽きない。困ることがあるわけでもなく、理解しようとする意志の問題ではあるだろうが、今後同じ会場であったとしても、きつと同じだろう。

今回の会議参加においては、とにかく「寒い」という印象が強く残っている。議論が寒いわけではなく、7月のサンフランシスコというのが結構寒く、それにしてもこれはないだろうと思うぐらい寒かった。Tシャツの上に長袖シャツを着て、その上から夏用のジャケットを羽織っても十分とは言えない。現地で厚手のセーターを買った参加者もあった。皆で寒い寒い連発で、新型インフルエンザの脅威もあったことから、体調管理の面では弱った問題であった。

今回新たに立ち上がったマルチフィジックスのセッションであるが、日頃、なかなか足を運ぶことの少ないセッションで発表されている内容を勉強できる機会ともなった。どう考えるかいろいろとあると思うが、ある程度の範囲でこういう取り組みが継続的になされることは重要では、と感じたところである。

次回の会議について

2010年のIThermはうって変わって非常に暑そうだ。また、次回、2011年も「インターパック」が開催される予定である。今度も西海岸のようであるが、今回ほど寒くはないだろうと期待している。

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2010年					
5月	26(水) ～28(金)	第47回日本伝熱シンポジウム			

本会共催、協賛、後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2010年					
1月	21(木) ～22(金)	GTSJ ガスタービンセミナー (第38回) (開催地：東京都港区)		http://wwwsoc.nii.ac.jp/gtsj/	
2月	2(火) ～3(水)	2009.9.4	2009.11.24	(社) 溶接学会 Mate 2010 事務局 〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町1-11 http://wwwsoc.nii.ac.jp/jws/research/micro/mate/Mate2010.html	
7月	25(日) ～28(水)	2009.11.19	2010.7.8	http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=230&1umeetingid=2348&viewcon=other1144&id=1144	

第 47 回日本伝熱シンポジウムのご案内

第 47 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
委員長 近久武美
幹事 田部 豊

開催日：平成 22 年 5 月 26 日（水）～ 5 月 28 日（金）

会場：札幌コンベンションセンター (<http://www.sora-scc.jp/index.php>)
所在地 〒003-0006 札幌市白石区東札幌 6 条 1 丁目 1-1, Tel. 011-817-1010
行き方 大通駅から地下鉄東西線で約 5 分, 東札幌駅で下車, 徒歩約 8 分
<http://www.sora-scc.jp/access.php>

講演申込締切：平成 22 年 1 月 22 日（金）

講演論文原稿提出締切：平成 22 年 3 月 19 日（金）

事前参加申込締切：平成 22 年 4 月 16 日（金）

ホームページ URL：<http://hermes-me.eng.hokudai.ac.jp/nhts2010/index.htm>

【シンポジウムの形式】

- ・講演発表形式として,
 - a) 一般セッション（口頭発表）
 - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
 - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- ・1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分（発表 10 分、個別討論 5 分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5 分×セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指定に従って下さい。
- ・優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞について」をご参照下さい。

【参加費等】

- ・シンポジウム参加費
 - 一般（事前申込：12,000 円，当日申込：14,000 円）
 - 学生（事前申込：5,000 円，当日申込：6,000 円）
- ・講演論文集
 - 日本伝熱学会会員：無料（電子版は J-STAGE 上で事前に公開します。参加者には当日に冊子体・CD-ROM を配布します。不参加者のうちの希望者には、CD-ROM を事後にお送りします。）
 - 非会員：8,000 円（冊子体）。会場受付にて日本伝熱学会に入会を申し込まれる場合は、無料になります。

【懇親会】

- ・開催日：平成 22 年 5 月 27 日（木）
- ・会場：札幌コンベンションセンター（大ホール）
- ・懇親会費
 - 一般（事前申込：8,000 円，当日申込：10,000 円。同伴配偶者無料）
 - 学生（事前申込：4,000 円，当日申込：5,000 円）

【交通と宿泊】

- ・交通と宿泊につきましては、本シンポジウムのホームページをご参照ください。

講演申込方法、講演論文集、執筆要綱

【講演申込方法】

- ・原則として Web による申込に限らせていただきます。シンポジウムのホームページから必要なデータを入力して下さい。Web による申込ができない場合には、実行委員会にお問い合わせ下さい。
- ・講演申込は、J-STAGE 上で受け付けます。
- ・一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択して下さい。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込の場合には、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞について」をご参照下さい。
- ・発表申込時に、論文のアブストラクト（200～250 字）を入力して下さい。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- ・講演発表申込は、講演者 1 名につき 1 題目とさせていただきます。
- ・講演の採否およびセッションへの振分けは、実行委員会にご一任下さい。

【講演論文集】

- ・講演論文集として、オフセット印刷版（白黒）と電子版を作製します。講演論文集（電子版）はホームページにリンクしてある J-STAGE において公開します。会員には学会誌 2010 年 4 月号においてパスワード情報を通知し、電子版を J-STAGE 上で閲覧できるようにする予定です。パスワードによる閲覧は、会員が当該講演論文のちに原著論文として学術論文誌等に投稿されることを考慮し、本講演論文集が限られた範囲に配布されたものであることを明確にするためのものです。
- ・講演論文集（電子版）の CD-ROM も作製し、参加者に配布します。不参加の会員にも、希望があれば配布しますので、開催後に事務局にお申し込み下さい。
- ・オフセット印刷版の講演論文の長さは 1 題目あたり A4 サイズで 2 ページとします。講演論文の作成様式は、前回と同様の 2 段組×片側 26 字×60 行とします。
- ・電子版には、オフセット印刷版と同じものか、または 8 ページ以内のフルペーパーを掲載することができます。様式はオフセット印刷版と同じですが、カラーの使用が可能です。ファイル容量は最大で 2 MB までとし、アニメーションは含まないものとします。
- ・原稿は、シンポジウムのホームページから提出して下さい。
- ・電子版に掲載された講演論文は、本学会の論文誌“Thermal Science and Engineering（以下、TSE と略す）”にそのまま投稿することができます。ただし、掲載の可否は通常の査読プロセスを経て決まります。
- ・TSE への投稿を希望する場合には、ホームページから原稿を提出する際に、論文投稿画面中のチェックボックスを ON にして下さい。その際、TSE の投稿規程をご一読願います。査読は、電子版に掲載された論文をもとに TSE 編集委員会において担当エディターを定め、通常の手続きに従って行います。オフセット印刷版と同じ 2 ページでも TSE 投稿原稿として受け付けますが、8 ページ以内でより詳細に執筆いただくほうが、その後の査読が円滑に進みます。掲載可になった後には、TSE の論文形式に沿った原稿を提出していただきます。この場合の TSE 論文の受理日は、シンポジウム実行委員会での原稿受付日になります。
- ・講演論文原稿は、講演論文を電子化するために、原則として PDF ファイルで提出していただきます。PDF ファイルで提出できない場合には、変換作業料（1 件につき 3,000 円）を申し受けて、実行委員会が PDF 化を代行します。
- ・原稿提出締切までに提出されなかった講演論文は、講演論文集（冊子体・CD-ROM）および J-STAGE に掲載されません。J-STAGE の締切は厳密ですので、十分なご注意をお願い致します。

【執筆要綱】

○講演論文原稿の書き方

- ・講演論文は以下に従って作成して下さい。また、書式の詳細ならびにテンプレート用の電子ファイルは、シンポジウムのホームページをご参照下さい。

表題部分の書式： 原稿は、下の四角囲い部に示すように、和文表題、和文副題、英文表題、英文副題、和文著者名（会員資格、著者名、所属の略記）、英文著者名、英文所属機関・所在地、英文アブストラクト、英文キーワードの順に、段組をせず幅 150mm に収まるようにレイアウトして下さい。連名者がある場合には、講演者の前に*印をつけ、英文の所属機関・所在地についても上付き数字で区別して下さい。

論文表題および著者名は、講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いて下さい。講演申込時のデータと異なる場合には、目次や索引に反映されないことがあります。

150mm

第 47 回日本伝熱シンポジウム原稿の書き方（和文表題：Gothic 14pt）
MS-Word の場合（和文副題：Gothic 12pt）
Guide for the manuscripts (英文表題: Times New Roman 12pt)
The case of MS-Word (英文副題: Times New Roman 12pt)
(1 行あける)
伝正 *伝熱 太郎（伝熱大）（会員資格 著者名[講演者には*印]（所属略称）：明朝体 12pt）
(1 行あける)
Taro DENNETSU (英文著者名：Times New Roman 10pt)
Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., N13 W8, Kita-ku, Sapporo 060-8628
(1 行あける)
(文頭に半角スペース 5 つを挿入する) English abstract (英文アブストラクト：Times New Roman 10pt, 100 語程度)
(1 行あける)
Key Words : Heat Transfer (英文キーワード：Times New Roman 9pt, 3~5 個程度)
(1 行あける)

表題部分の書式

本文の書式： 第 1 ページで、本文は 9 ポイント明朝体の 2 段組（片側 1 行 26 文字程度）で作成して下さい。第 2 ページ以下では、先頭から 2 段組とし、片側 60 行を目安として作成して下さい。

図表： 図表中の記号およびキャプションは英語で書いて下さい。なお、電子版原稿はカラー表示が可能ですが、オフセット印刷版原稿は白黒で印刷されます。

参考文献： 参考文献は、本文中の引用箇所の右肩に小括弧をつけた番号⁽¹⁾で表し、本文の末尾に次のようにまとめて列記して下さい。

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号(発行年), 先頭ページ番号.

例：(1) 伝熱・他 2 名, 機論(B), 12-345(2006), 1234.

PDF ファイルへの変換： PDF ファイル作成のためのファイル変換時には、「フォントの埋め込みを行う」よう設定して下さい。変換後の PDF 原稿は、提出前に、必ず、印刷したものを確認して下さい。

【講演論文の公開日】

- ・講演論文は、会員を対象に、シンポジウム開催日の 1 週間程前から J-STAGE 上で公開します。
- ・したがって、特許に関わる公知日は、シンポジウム開催日よりも早くなりますのでご注意ください。

【参加費等の支払い方法】

- ・シンポジウムのホームページから事前参加登録を行った後に、本誌に挟み込まれた「払込取扱票」を用い、以下の記入例を参考にしてお支払い下さい。
- ・払込みをもって「事前申込完了」とします。ホームページからの登録だけでは「完了」ではありません。払込みが 4 月 17 日以降になった場合は当日登録扱いとし、会場受付にて差額をお支払いいただきます。

- 銀行より振込まれる場合は、下記のゆうちょ銀行口座にお振込み下さい。その際、必ず1件ずつとし、氏名の前に参加登録ID番号を付けて下さい。

店名 (店番) : 二七九 (ニナナキユウ) 店 (279)
 預金種目 : 当座
 口座番号 : 0066192
 口座名称 (漢字) : 第47回日本伝熱シンポジウム実行委員会
 口座名称 (カナ) : ダイヨンジュウナナカイニホンデンネツシンポジウムシ

- 記入例 -

登録IDは参加申込時に発行される「4桁数字」です。

お支払いいただく項目に○をつけて下さい。

振込手数料はご負担下さい。

「通信欄」の合計金額をこちらにご記入下さい。

払込取扱票		振替払込請求書兼受領証	
口座記号・番号はお間違えないよう記入してください。 口座記号 02740 口座番号(右詰めで記入) 466192 金額 ¥34000		口座記号番号 02740 4 66192 加入者名 第47回日本伝熱シンポジウム実行委員会 金額 ¥34000	
加入者名 第47回日本伝熱シンポジウム実行委員会 参加登録ID 参加者氏名 内容(該当に○) 金額 1. 0001 伝熱 太郎 シンポ・懇親会 2. 0002 札幌 花子 シンポ・懇親会 3. 0003 岡山 次郎 シンポ・懇親会 4. シンポ・懇親会 事前払込メ切 4月16日(金) 合計金額 34,000 円		加入者名 第47回日本伝熱シンポジウム実行委員会 おなまえ 伝熱太郎 (伝熱大学) 依頼人 様 料 目 附 印 金 円 備考 代表者の方のお名前をご記入下さい。	
北海道札幌市〇〇〇△△△ 伝熱大学 理工学部 伝熱工学科 伝熱 太郎 (ご連絡先電話番号 ○×× - △△○ - ×□△○)		日 附 印	
裏面の注意事項をお読みください。(ゆうちょ銀行) これより下部には何も記入しないでください。		1枚の用紙で複数の参加者の登録が可能です。本登録の代表者の方のご所属の連絡先・お名前・電話番号を「ご依頼人」の欄にご記入下さい。	

【ご注意】

- 講演申込の取消および講演論文原稿の差替は、準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮下さい。
- 論文題目と著者名が、講演申込時と論文提出時で相違しないように特にご注意下さい。
- 口頭発表用として実行委員会が準備する機器は、原則として液晶プロジェクタのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参下さい。
- 参加費、懇親会費等は参加取消の場合でも返金いたしません。
- その他、ご不明な点がございましたら、実行委員会に E-mail または Fax でお問い合わせ下さい。

【お問い合わせ先】

第47回日本伝熱シンポジウム実行委員会
 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻内
 E-mail: nhts47@eng.hokudai.ac.jp
 FAX: 011-706-7889

優秀プレゼンテーション賞（第47回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会
委員長 宮良明男

第47回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生および若手研究者を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露する機会ですので、奮ってご応募下さい。

- 開催日：平成22年5月26日（水） シンポジウム第1日
- 発表形式：発表者1名あたり3分程度のショートプレゼンテーションと80分程度のポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定ですが、詳細については現在検討中です。決定しましたら、シンポジウムのホームページに掲載します。
- 対象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、平成22年3月31日現在で28歳以下の者、または、申込当日に学生である者（ただし、社会人大学院生を除く）。
- 応募資格：発表時（＝審査時）に、日本伝熱学会の会員（正員・学生員）、または入会申込中であること。注：応募資格を満足していない場合は発表できません。また、過去に本賞を受賞された方は応募できません。
- 応募件数：指導教員または研究グループ長等あたり、1名（1件）とします。
- 応募方法：第47回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本号掲載の研究発表申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”の項目を選択し、“指導教員または研究グループ長等氏名”および“研究分野の分類番号”を入力してください。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表彰：受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰します。

<詳細は、日本伝熱学会・日本伝熱シンポジウム実行委員会・学生会委員会内で検討中です>
<最新情報はシンポジウムのホームページに公開します>



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



インターネットの普及により情報発信・交換能力の比類ない進展がもたらされました。一方、ハードコピーとしての学会誌には、アーカイブ的な価値のある内容を手にとって熟読できる点や、一連のページを眺めて全貌が容易に理解できる点など、いくら電子媒体が発達してもかなわない長所があるのではないかと思います。ただし、学会誌の印刷・発送には多額の経費も伴いますので、当部会ではこのほど、密度のより高い誌面、すなわちハードコピーとしてぜひとも残すべき内容を厳選し、インターネット（HP：ホームページ、ML：メーリングリスト）で扱う情報との棲み分けをした編集方針を検討いたしました。

この結果、これまで会告ページで取り扱ってきた各種行事・広告などの掲載につき、以下のような方針で対応させていただきたく、ご理解とご協力をお願いする次第です。

対 象	対 応	具体的な手続き (電子メールでの連絡を前提としています。)
本会（支部）主催による行事	無条件で詳細を、会誌とHPに掲載、MLでも配信	申込者は、総務部会長・編集出版部会長・広報委員会委員長・総務担当副会長補佐評議員に記事を同時送信してください。
関係学会や本会会員が関係する組織による国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載・(無料) HP：行事カレンダーに掲載しリンク形成・(無料) ML：条件付き配信(無料)	申込者は、まず内容を説明する資料を総務担当副会長補佐評議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐評議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長(会誌担当)と広報委員会委員長(HP担当)に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募(伝熱に関する分野に限る)	会誌：掲載せず HP：条件付き掲載(無料) ML：条件付き配信(無料)	申込者は、公募内容を説明する資料を総務担当副会長補佐評議員に送信してください。審議の結果掲載可となった場合には総務担当副会長補佐評議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長(会誌担当)広報委員会委員長(HP担当)に送信してください。
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載(有料) HP：条件付き掲載 (バナー広告のみ、有料)	申込者は、編集出版部会長(会誌担当)または広報委員会委員長(HPバナー広告担当)に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長又は広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては http://www.htsj.or.jp/banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・総務部会長：原村嘉彦（神奈川大学）：haramy01@kanagawa-u.ac.jp
- ・編集出版部会長：花村克悟（東京工業大学）：hanamura@mech.titech.ac.jp
- ・広報委員会委員長：佐藤洋平（慶應義塾大学）：yohei@sd.keio.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐評議員：酒井清吾（横浜国立大学）：sakai@ynu.ac.jp
- ・事務局：倉水裕子：office@htsj.or.jp

【注意】

- ・原稿はWordファイルまたはTextファイルをお願いします。
- ・HPはメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承ください。
- ・MLでは、原則としてテキスト文の送信となります。pdf等の添付ファイルで送信を希望される場合ご相談ください。

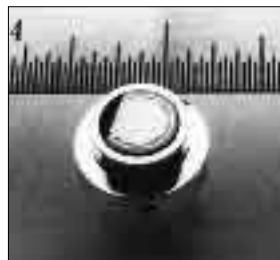
第 48 期新入会員 (2009.8.20~2009.10.30) 正 3 名

資	氏名	所属	資	氏名	所属
正	杉岡 健一	東北大学大学院工学研究科	正	高松 伴直	(株)東芝 研究開発センター
正	麻生 裕之	佐賀大学海洋エネルギー研究センター			

熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 (W/cm^2) に比例した直流電圧を出力します。弊社の製品は米国バージニア工科大学が開発した新しい技術をVatell社で商品化したもので、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

熱流束マイクロセンサー



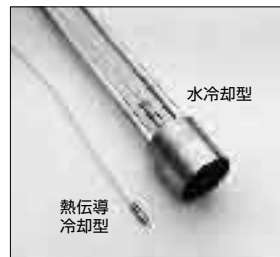
特徴

- 最高速の応答 (約 6 μ 秒)
- 850°Cまで外部冷却不要
- 低雑音 / 高感度
- 熱流束と温度を測定
- 伝導、対流、輻射に等感度

使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラバース実験
- タービンブレード熱風洞試験
- 自動車用エアバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

ガードン型円形フォイルセンサー



センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

- 焼却炉・溶鉱炉の熱量測定
- 火災実験の際の輻射熱ゲージ
- バーナーなど熱源の校正用基準器
- 着火性・燃焼性試験 (ISO5657, 5658, 5660)
- 米国連邦航空局のファイヤー・スモークテスト

シート状熱流束センサー



センサーは銅とニッケルのサーモパイルから構成されており、測定対象物に貼付けて使います。センサーは厚さが0.2mmと薄いので、柔軟性に富んでおり、直径1インチの円筒形に湾曲させる事が出来ますので、パイプなどに貼り付けてお使いになるには最適です。

使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定

熱流束センサー 校正サービス

熱流束センサーの校正作業をお引き受けいたします。校正証明書は米国基準局NISTにトレーサブルです。校正設備の物理的な制約で、お引き受けできない場合もあります。ご相談ください。

センサテクノ株式会社

〒106-0031 東京都港区西麻布3-24-17 霞ビル4F
TEL: 03-5785-2424 FAX: 03-5785-2323

URL www.senstech.jp

E-mail senstech@td6.so-net.ne.jp

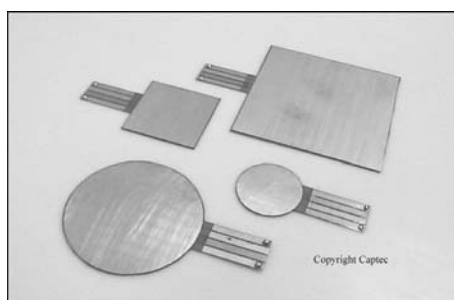
テクノオフィスは、独自の高度技術を持つ海外メーカーの

熱流計／熱流束センサーをご紹介します。

CAPTEC 社 (フランス)

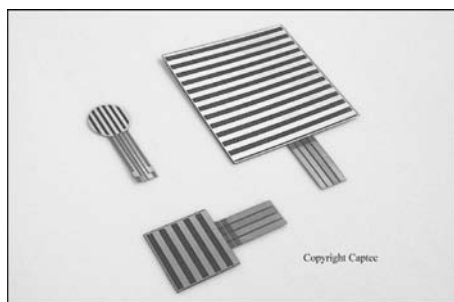
CAPTEC 社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



サイズ: 5×5～300×300 [mm] (厚み:0.4 [mm])
 熱抵抗値: 0.00015 [°C/(W/m²)]
 熱伝導率: 2.7 [W/mK]
 温度範囲: -200～200 [°C]
 応答速度: 約 200 [ms]
 柔軟性: フレキシブルー直径 30 [mm] に彎曲
 リジッドー平面用
 オプション: 温度計測用 T 型熱電対内蔵
 特注品: 最高温度 350 [°C]または 380 [°C], 防水加工

輻射センサー



サイズ: 5×5～50×50 [mm]
 厚み: 0.25 [mm]
 温度範囲: -200～250 [°C]
 応答速度: 約 50 [ms]
 柔軟性: 直径 30 [mm] に彎曲
 オプション: 温度計測用 T 型熱電対内蔵
 特注品: 最高温度 350 [°C]または 380 [°C]
 波長領域: 広帯域(可視+赤外)／標準(赤外)

【アプリケーション】

◇伝熱一般 ◇温熱環境 ◇サーマルマネキン ◇食品／調理ー焼成オーブン ◇コンクリート・地中埋設

○当社では、CAPTEC 製品に最適なデータロガーも取扱っております。お気軽にお問い合わせ下さい。

有限会社 テクノオフィス (CAPTEC 社日本総代理店)

URL: <http://www.techno-office.com/>

本社: 〒225-0011 神奈川県横浜市青葉区あざみ野 3-20-8-B

TEL. 045 (901) 9861 FAX. 045 (901) 9522

編集出版部会ノート Note from the Editorial Board

この冬は暖冬，と予報されたにも関わらず，昨年 11 月初旬には初冠雪が 1 ヶ月以上も早かった地域がありました。山々は晩秋の紅葉と初冠雪が織成す見事なコントラストを演出していました。こうした季節の移り変わりほど急峻ではないにしろ，自動車の動力源や家庭用の電力供給方法を巡り，めまぐるしい変革が起きようとしています。本号では，その一つである燃料電池に焦点をあてて，何が普及への鍵となるのか，技術的な立場からご執筆いただきました。特に固体高分子型燃料電池（PEFC）においては相変化を伴う熱と物質輸送といった，伝熱学ではおなじみの物理現象を多く含むとともに，新たな膜内水分測定手法とも相まって，研究開発が展開されています。世界初の量産が始まってから 100 年経った今でも研究開発が続けられているエンジンと同じように，少し長い時間をかけて洗練されるものと思われます。ただし，化石燃料の枯渇問題が迫っているだけに，悠長な時間が無いばかりか，再生可能エネルギーとの組合せなど，その課題は決して容易ではないとも思われます。ここで大事なことは，すでに認識されていたことかもしれませんが，伝熱学でおなじみの現象に加えて，材料の特性を熟知あるいは活かした研究開発がここにきてかなり多くなってきたことだといえます。今回の特集に限らず，他の多くの研究においてもその傾向は変わらないように思います。皆様の議論のきっかけになれば幸いです。

引き続きご支援賜りますようお願いいたします。

花村 克悟 (東京工業大学)
Katsunori Hanamura (Tokyo Institute of Technology)
e-mail: hanamura@mech.titech.ac.jp

副会長	山田幸生 (電気通信大学)	部会長	花村克悟 (東京工業大学)
委員			
(理事)	石塚 勝 (富山県立大学)	藤岡恵子 ((株)ファンクショナル・フルイッド)	
	板谷義紀 (名古屋大学)	橋本律男 (広島大学)	
	深川雅幸 (三菱重工)		
(評議員)	一法師茂俊 (三菱電機)	久角喜徳 (大阪ガス)	
	福谷和久 (神戸製鋼所)	白樫 了 (東京大学)	
	齊藤卓志 (東京工業大学)	宗像鉄雄 (NEDO)	
	大村高弘 (ニチアス)	田崎 豊 (日産自動車)	
(オブザーバー)			
	黒坂俊雄 (神鋼リサーチ)	富村寿夫 (熊本大学)	
TSE チーフエディター	門出政則 (佐賀大学)		
編集幹事	石田賢治 (佐賀大学)		

編集出版事務局：

東京工業大学炭素循環エネルギー研究センター 花村克悟
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 11-24
Tel&Fax: 03-5734-3705, hanamura@mech.titech.ac.jp