

# 中性子ラジオグラフィを用いた水観察による 燃料電池の発電環境最適化

Optimization of Fuel Cell Generation Environment by Water Observation using Neutron Radiography

千葉 裕人\*  
Hiroto CHIBA

岩澤 力\*  
Chikara IWASAWA

## 要 旨

固体高分子型燃料電池の発電には、膜電極接合体のプロトン導電性を確保するために適度な水が必要である。しかし、ガス流路やガス拡散層における過剰な水はガス供給阻害を引き起こす要因となることが考えられ、発電中の燃料電池内部の水を適切にコントロールする必要がある。

本研究では滞留水が生じるメカニズムと電圧挙動に及ぼす影響を明らかにして最適な発電条件を設定するために、中性子ラジオグラフィにて発電中における燃料電池の滞留水の状態を観察した。

中性子ラジオグラフィによる観察は燃料電池の積層方向と側面方向の2方向からおこなった。積層方向の観察では実機セルで観察をおこない滞留水と電圧挙動の相関性を明確にした。一方、側面方向の観察に用いた実験用セルでは滞留水の存在するガス流路とその原因を特定し、対策の方向性を提示した。これらの結果をふまえて、水と発電性能の観点から最適な発電環境を設定し、実車の制御に適用した。

## ABSTRACT

Electric generation by a polymer electrolyte fuel cell requires an appropriate quantity of water to help ensure proton conductivity of the membrane electrode assembly. However, excess water in the gas channels and the gas diffusion layer is thought to be a factor impeding gas supply, so it is necessary to appropriately control the water inside the fuel cell during electric generation.

This study used neutron radiography to observe the state of the water accumulated in a fuel cell during electric generation in order to clarify the mechanism by which water accumulates and its effect on voltage behavior, and set the optimum electric generation conditions.

Observation using neutron radiography was performed from the two directions of the through-plane direction and the in-plane direction of the fuel cell. Observation in the through-plane direction of an actual cell clarified the correlation between the accumulated water and the voltage behavior. On the other hand, observation in the in-plane direction of a test cell determined the gas channels in which accumulated water exists and the reason for that water accumulation, and suggested directions for countermeasures. Based on these results, the optimum electric generation environment was set in terms of water and electric generation performance, and applied to the control of an actual vehicle.

## 1. ま え が き

### 1.1. 燃料電池

地球温暖化や大気汚染等の環境問題、および石油などの化石エネルギーの枯渇によるエネルギー問題に対応するためにCO<sub>2</sub>や有害物質を排出しない究極の電気自動車である燃料電池電気自動車の開発が進められている。Hondaにおいても低温から始動可能で小型化できる固体高分子型燃料電池を用いた燃料電池電気自動車の開発を推進している。

燃料電池とは、水素と酸素の電気化学反応によって電気を取り出す発電装置である。実際の反応は、式(1)に示すアノード極における水素の酸化反応と式(2)に示すカソード極における酸素還元反応からなる。

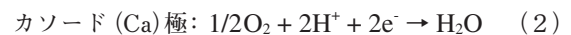


Fig. 1に燃料電池の概略図を示す。燃料電池の構造は、電解質膜(Polymer Electrolyte Membrane:PEM)を中心に触媒層(Catalyst layer)とガス拡散層(Gas Diffusion Layer:GDL)を配置した膜電極接合体(Membrane Electrode Assembly:MEA)、およびガスや冷媒の流路が形成されたセパレータから構成されている。

### 1.2. 燃料電池における水マネジメントの重要性

燃料電池の発電で高出力を得るためには、MEAを適度に含水させプロトン導電性を確保する必要がある。しか

\*四輪 R&D センター

し、過剰な水はガス拡散層やガス流路における滞留水となり、ガス供給を阻害して発電性能が低下し、電圧挙動が不安定になる。また、ガス供給阻害は電位上昇によってカーボンや白金を腐食し、耐久性能を低下させる原因となる。よって燃料電池の発電においてはMEAの適度な含水やガス流路の排水といった水マネジメントが重要である。近年、このような水マネジメントの重要性から、滞留水を可視化するさまざまな手法が検討されている。例えばアクリル窓を作製し直接燃料電池内を観察する手法やX線ラジオグラフィ計測および核磁気共鳴画像法(MRI)によって水を観察する手法が多く報告されている<sup>(1)-(4)</sup>。

Table 1に各可視化技術の計測速度と空間解像度および観察範囲を示す。滞留水の変化を連続的に捉えるにはアクリル窓による直接可視化方法が優れているがMEA内の水は観察できない。その他の手法はMEAの水を捉えることが可能であるが、中性子ラジオグラフィとX線ラジオグラフィは計測速度の点でMRIよりも有利であり水の経時変化を捉えやすい。

Fig. 2に中性子線とX線を照射したときの各原子に対する質量減衰係数を示す<sup>(5)</sup>。燃料電池内の少量の水を観察するためには、水と水を構成する原子の質量減衰係数が燃料電池部材を構成するAlやFeより高いことが有効である。X線は原子番号の増加に従い質量減衰係数が緩やかに増加する特性をもち、少量の水を切り分けることが困難である。一方、中性子線は水素などの小さな原子番号で高い質量減衰特性を示し、特に水の質量減衰係数はFeやAlに対して1桁以上高くなっている。この特性からX線よりも中

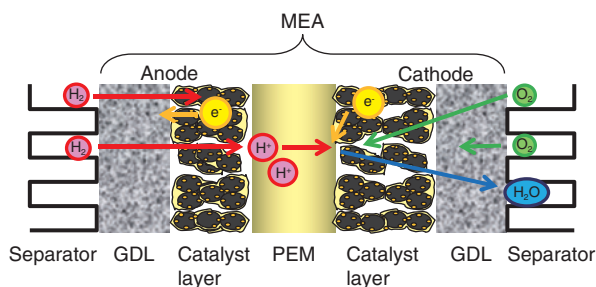


Fig. 1 Schematic image of fuel cell

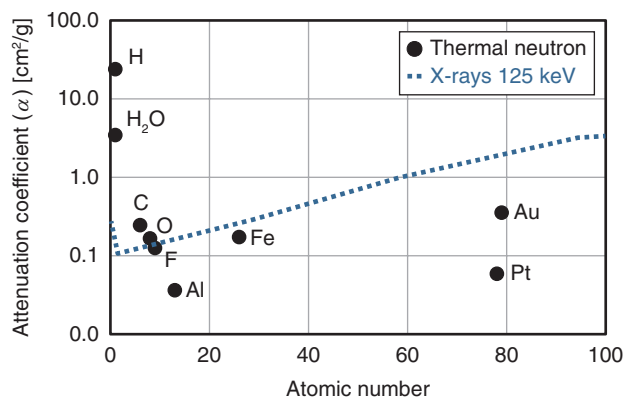


Fig. 2 Attenuation coefficient of elements

Table 1 Comparison of visualization methods

| Method               | Time resolution | Spatial resolution | Observation region |
|----------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Neutron radiography  | 5-10 sec        | 10-200 μm          | Below 300 mm       |
| X-ray radiography    | 2-10 sec        | 1-10 μm            | As required        |
| MRI                  | 5 minutes       | 10 μm              | 100 mm             |
| Direct visualization | —               | —                  | As required        |

性子ラジオグラフィ計測は少量の水を精度よく観察することが可能である。本研究では水の検出精度と計測速度および観察範囲を総合的に考慮して中性子ラジオグラフィを水計測技術として利用した。これまで小型セルに限定されていた中性子ラジオグラフィ計測の技術をHondaのFCXクラリティ搭載サイズに適用し、実機サイズにおける滞留水の状態を観察した。

### 1.3. 研究の目的

中性子ラジオグラフィを利用して、FCXクラリティ搭載サイズにおける滞留水の状態を確認することによって、滞留水と電圧挙動の関係を明らかにし、最適なスタック発電環境を実車の制御に適用することを目的とした。

## 2. 中性子ラジオグラフィによる水計測の原理

中性子ラジオグラフィとは、観察対象物に中性子線を照射し透過した中性子線をシンチレータで光に変換しCCDカメラなどの検出器で可視化する手法である。中性子線は透過する原子によって減衰係数が異なるため、減衰係数の大きい原子からなる部位は暗く、減衰係数の小さい原子は明るく描写される。

水の定量化は、まず発電中の中性子ラジオグラフィ画像から水の存在しない画像をバックグラウンドとして差し引くことで水のイメージを抽出する。次に、式(3)の中性子減衰特性を利用して計測対象物の厚み $t$  [cm]を導くことにより定量化が可能である<sup>(1)</sup>。

$$I_{out} = I_{in} \exp(-\alpha t) \quad (3)$$

ここで、 $I_{in}$ は入射中性子強度、 $I_{out}$ は透過中性子強度、 $\alpha$ は計測対象物の中性子質量減衰係数[cm<sup>2</sup>/g]を示す。本研究ではさまざまな発電条件における燃料電池内部の液水厚み $t$  [cm]に定量化面積[cm<sup>2</sup>]を乗算して、液水を体積[cm<sup>3</sup>]として表すことにより燃料電池内部の液水を定量化した。なお、本報告の中性子ラジオグラフィ画像は水の存在しない領域を黄色、水の存在する領域を青色としてある。

中性子ラジオグラフィでの水の計測は、スイス Paul Scherrer Institut (PSI) の Electrochemistry Laboratory (ECL) と Neutron Imaging and Activation Group (NIAG) の協力のもと、PSIのNeutraにておこなった。

### 3. 実験

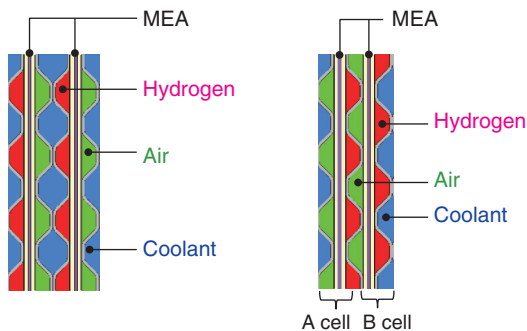
#### 3.1. 中性子ラジオグラフィによる滞留水観察方向

一般的な燃料電池スタックは1セルごとに冷却する構造であるのに対し [Fig.3(a)], FCX クラリティに搭載されている燃料電池スタックは小型軽量化のため Fig. 3(b) に示すように2セルごとに冷却する構造となっている<sup>(6)</sup>. そのためカソード面が冷却される A セルとアノード面が冷却される B セルの2種類のセルが存在する. この燃料電池スタックの滞留水の面内分布と滞留位置を正確に観察するために, 積層方向と側面方向からの観察をおこなった. Fig. 4 に中性子ラジオグラフィ観察方向の模式図を示す. 積層方向 (Through-plane) からの観察では発電面全体の水の分布をとらえることが可能であり, 側面方向 (In-plane) からの観察では, MEA の滞留水と各ガス流路に存在している滞留水の位置を正確に切り分けることが可能である.

#### 3.2. 中性子ラジオグラフィ用セルの紹介

##### 3.2.1. 積層方向観察用実機セル

FCX クラリティに搭載されているセルの滞留水の分布状況を観察するために積層方向の観察は実機セルでおこなった. Fig. 5 に使用したセルホルダと中性子ラジオグラフィ画像を示す. 撮像範囲が広いため構造のひずみが生じ



(a) Two cooling layers per two cells (b) One cooling layer per two cells

Fig. 3 Schematic image of two kinds of stacking

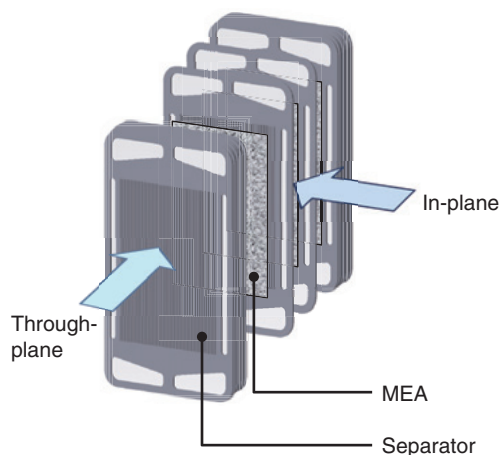


Fig. 4 Schematic image of neutron irradiation direction

ない強度と中性子透過性を考慮した材料でセルホルダを構成している. これにより, 構造を保ちつつ滞留水を鮮明に観察することが可能となった. また2セル1層冷却構造とした2セル観察 (Fig. 5) と, A セルと B セルの差異を確認するため, 個別に1セル観察することも可能である.

##### 3.2.2. 側面方向観察用セル

実機セルでは側面方向の中性子透過距離が長く透過率が低下し, 水を計測できないので, 2セル1層冷却構造を模擬した側面方向観察セルを設計した (Fig. 6). このセルは側面方向の中性子透過性を上げるため MEA のシール構造やシール材料を工夫すると同時に, ガス流路本数を少なくしている. A セルと B セルのガス流路は全てにおいて同構造とした. また, 各セパレータの温度を熱電対にて計測することが可能である.

Fig. 7 は側面方向観察セルを中性子ラジオグラフィで可

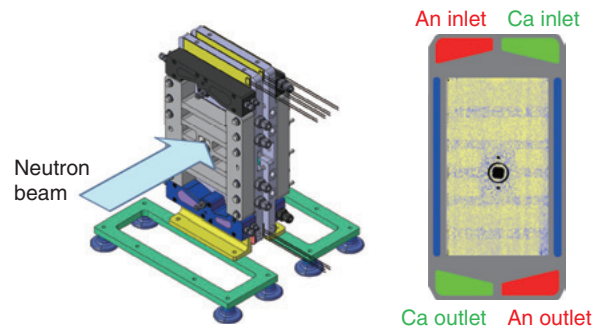


Fig. 5 Schematic and neutron images of through-plane cell

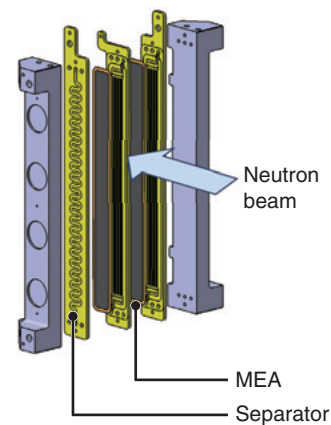


Fig. 6 Schematic image of in-plane cell

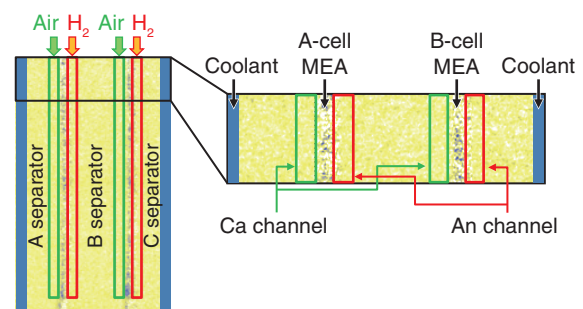


Fig. 7 Neutron radiography image of in-plane cell

Table 2 Neutron imaging condition of each cell

| Imaging condition          | Through-plane | In-plane |
|----------------------------|---------------|----------|
| Pixel size (H × W) [μm]    | 100 × 100     | 75 × 15  |
| Field of view (H × W) [cm] | 25 × 35       | 25 × 5   |
| Exposure time [sec]        | 5             | 10       |

視化した画像である。2セル1層冷却構造が模擬されており、隣接した2セルの両側を冷媒で冷却する構造となっている。Fig. 7中の赤枠部はアノード流路を示しており、緑枠部はカソード流路を示している。アノード流路とカソード流路に挟持されている領域はMEAである。

### 3.3. 実験条件

#### 3.3.1. 中性子計測条件

中性子ラジオグラフィの計測条件をTable 2に示す。側面方向観察セルでは横方向の解像度を上げた設定とし、実機セルでは計測視野領域が広くとれる設定とした。また、側面方向観察セルは画像の解像度を上げるため露光時間を長めに設定した。

#### 3.3.2. 発電条件

中性子ラジオグラフィ計測時の発電は滞留水による電圧変動への影響が大きい低負荷発電で実施した。発電条件は開発段階における標準発電条件をベースとして設定した。

実機セルではパラメータとしてカソードストイキオメトリと冷媒温度を変えて滞留水量を観察した。また、車載時の制御としておこなわれているアノードパージを模擬したテストもおこなった。実機適用検証テストとして上記の複合テストも追加した。発電装置はPSIの設備を使用した<sup>(7), (8)</sup>。

本稿ではガスの流量をストイキオメトリで表現している。ストイキオメトリ (Stoichiometry: 化学量論) とは、式(4)より計算される値であり、燃料電池の反応に必要なガス量が過不足無く供給される場合を1として表現する相対量である。

$$\text{Stoichiometry} = \text{供給ガス量} / \text{反応必要ガス量} \quad (4)$$

#### 3.3.3. アノードパージについて

アノードパージとは発電中に定期的にアノードの排気側の弁を開いて窒素などの発電に不要なガスを排出することである。この操作はアノードガスの水素純度を高めるだけでなく排水の観点からも有効であると考えられる。よってアノードパージの滞留水排水に対する効果を確認するために実機セルを用いてアノードパージを模擬した実験をおこなった。

## 4. 中性子ラジオグラフィ実験結果

### 4.1. 中性子ラジオグラフィにおける定量性

中性子ラジオグラフィにおける水の定量性を確認するために異なる水の厚みを計測して中性子の透過度を確認した。計測結果をFig. 8に示す。水の厚みの増加に伴い透過度が指数関数的に減少していくことが観察され、式(3)の妥当性が確認された。本研究における定量化数値は実験によって得られた定量化定数を用いて水の厚みを求めた後、定量化面積を乗算して水を体積[cm<sup>3</sup>]換算で示した。

### 4.2. 滞留水の現状観察と要因解析

#### 4.2.1. 実機セルの発電時における滞留水観察

FCX クラリティ搭載サイズの滞留水の状態を確認するために実機セルを用いて発電時における中性子ラジオグラフィ計測をおこなった。Fig. 9に標準条件にて発電した際の電圧変動を示す。AセルよりもBセルの電圧変動の乱れが大きいことが確認された。

AセルとBセルの電圧変動の差異を滞留水の観点から解析するために中性子ラジオグラフィ計測をおこなった。

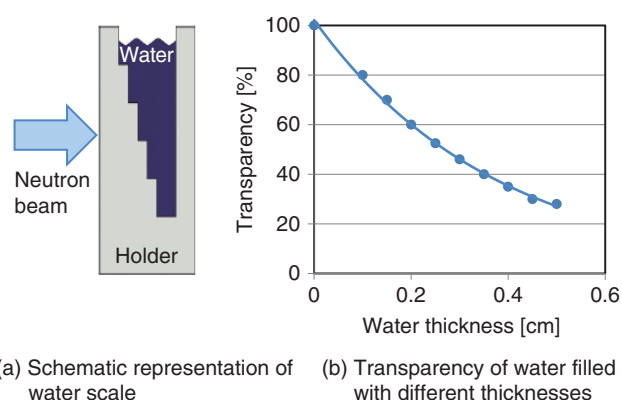


Fig. 8 Validation for water quantification

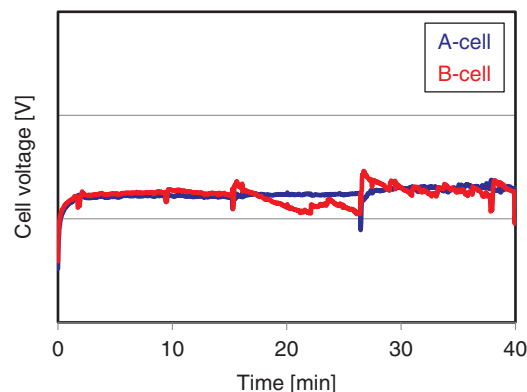


Fig. 9 Cell voltage of each cell under generation

滞留水量が一定となった発電 30 分後の画像を Fig. 10 に示す。A セルよりも B セルに多くの滞留水が観察された。また、ガス流路下部に滞留水が多く存在していることが明確になった。

Fig. 11 には標準条件にて発電した際の滞留水の変化を示す。発電初期は A セルと B セルの滞留水が同等に増加していくが、発電時間が 10 分を経過した頃から B セルの滞留水が A セルよりも多く推移していき、30 分程度で両セルとも滞留水が一定になる様子が観察された。A セルと B セルで滞留水量に違いが生じるのは結露量や排水能力の差異が原因である。また、Fig. 9 において B セルの電圧挙動が乱れる時間帯と Fig. 11 における A セルと B セルの滞留水量がかい離していく時間が等しいことから、B セルの電圧挙動の乱れは B セルに滞留水が多く存在することによってガスが供給されにくくなったことが原因と考えられる。

Fig. 9 に示した電圧挙動の 10 分ごとの標準偏差 (Standard deviation:SD) と Fig. 11 に示した同時刻帯の滞留水量の平均値との関係を Fig. 12 に示す。この結果より、滞留水が増えるほど電圧挙動が不安定になることが証明された。

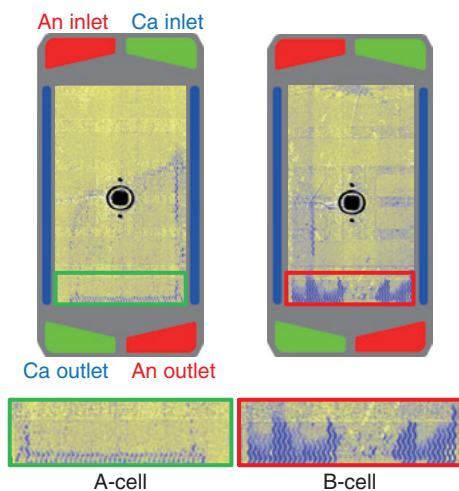


Fig. 10 Neutron radiography image of each cell

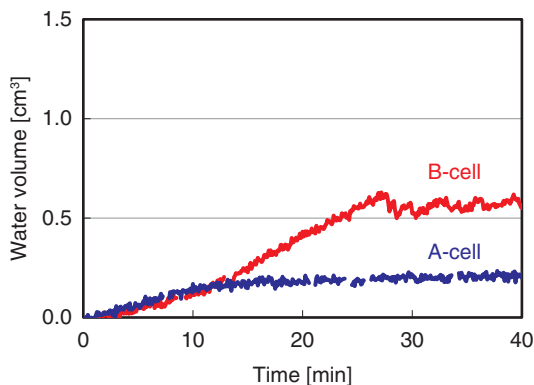


Fig. 11 Water volume transition for each cell under generation

#### 4.2.2. 側面方向観察セル観察結果

Fig. 13 に標準条件で滞留水量が一定になるまで発電を継続した際の中性子ラジオグラフィ画像を示す。水が生成されるカソード側だけでなく、アノード側にも滞留水が存在していることが観察された。これはカソードからアノードに MEA を介して水が移動するバックディフュージョンの影響と考えられる。各ガス流路の滞留水量を定量化した結果を Fig. 14 に示す。アノードとカソードの滞留水はどちらも B セル側に多く存在していることが明確になった。セパレータ構造は A セルと B セルで同構造なので、A セルと B セルの滞留水量の差は発電環境の差に起因していることが判明した。

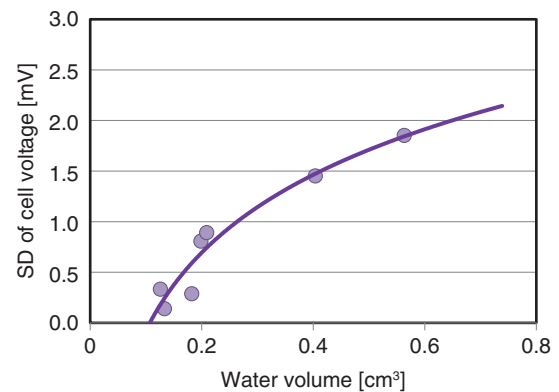


Fig. 12 SD of cell voltage at various water volumes

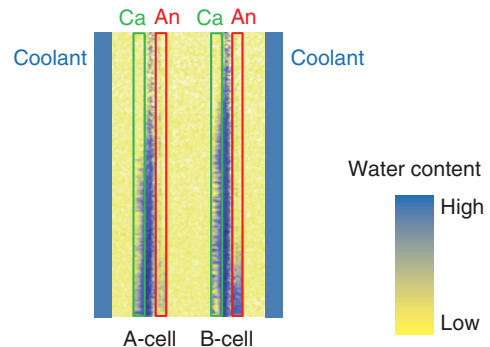


Fig. 13 Neutron radiography image of in-plane cell

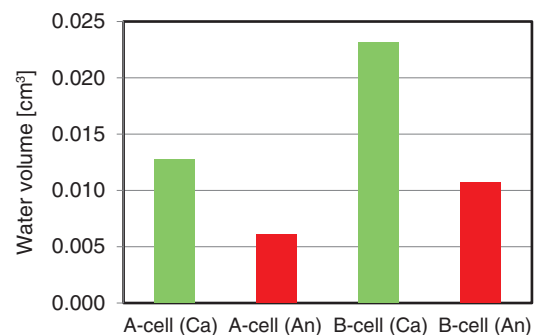


Fig. 14 Water volume of each channel

#### 4.2.3. 2セル1層冷却構造における滞留水量差異の考察

2セル1層冷却構造におけるセル間の滞留水量の差異を検証するため、発電時の環境温度に着目した。Fig. 15に低負荷における各セパレータ温度を示す。冷却面が存在している両サイドのAセパレータとCセパレータは中心部に位置するBセパレータよりも温度が低い。また、AセパレータよりもCセパレータの温度がさらに低くなっている。これはCセパレータがアノード側に位置していて、Aセパレータはカソード側に位置することに起因すると考えられる。すなわち、Cセパレータは過電圧が低く発熱の小さいアノード側に位置し、さらに冷却面も存在するため最も温度が低くなっていると考えられる。

これらの結果からセルの環境温度はAセルよりもBセルの方が低くなっており、結露が生じやすい環境になっていることが確認された。このため、アノードもカソードもBセルの方に滞留水が多く存在すると考えられる。滞留水はガスがセルに供給されるのを阻害するため、排水性がさらに低下する原因となり、供給されるガス量の偏りがセル間に生じると考えられる。

2セル1層冷却構造では冷却面がアノードとカソードで異なるため各セルの環境温度を均一にすることは構造上難しい。よって発電中の各セルへ均等にガスを供給するためには滞留水を積極的に排出して滞留水量の差を減少させる必要がある。また、滞留水はカソード側だけでなくアノード側にも存在するためアノードとカソード両極の滞留水の低減が必要であることが示唆された。

#### 4.3. 実機セルによる制御適用検討

実機セルと側面方向観察セルの結果より、発電中のガス流路に滞留水が存在することやセル間の滞留水量の差異がガス供給の偏りを引き起こしてセル電圧挙動の不安定性の原因となっていることが確認された。そこで、滞留水を低減させるために実機セルを用いて対策手法を検証した。

##### 4.3.1. カソードストイキオメトリ増大効果

カソードストイキオメトリを増大させて滞留水を低減

させる効果を検証した。テストはAセルとBセルを同時に発電する2セル構造でおこなった。Fig. 16にはストイキオメトリを増大させた際の電圧挙動の関係を標準偏差で示す。ストイキオメトリが3.4以上で電圧挙動が安定化する傾向が観察された。

電圧挙動の安定化と滞留水の関係を確認するため、各ストイキオメトリにおける滞留水を計測した。Fig. 17にカソードのストイキオメトリを変化させて発電した際の中性子ラジオグラフィ画像を示す。発電エリアの滞留水がストイキオメトリ増大にしたがい減少していく様子が観察された。

Fig. 18に発電エリアのガス流路下部を定量化した結果を示す。ストイキオメトリを2.6から6.0へ増大させることによって滞留水量を50%低減することが可能となった。これはカソードの流量が増えたことによって差圧が増大し排水性が向上したためと考えられる。

Fig. 19にストイキオメトリを変化させて発電した際のセル電圧と抵抗過電圧を示す。抵抗過電圧の増加は観察されず、発電性能の向上が確認された。これらの結果からカソードストイキオメトリを増大させると滞留水が低減して電圧挙動が安定化するとともに、発電性能も向上することが確認された。

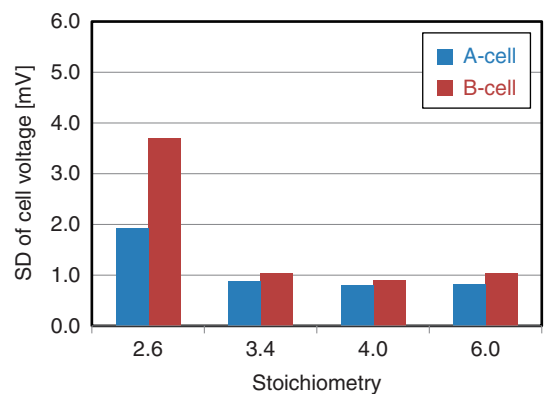


Fig. 16 SD of cell voltage at various stoichiometric quantities

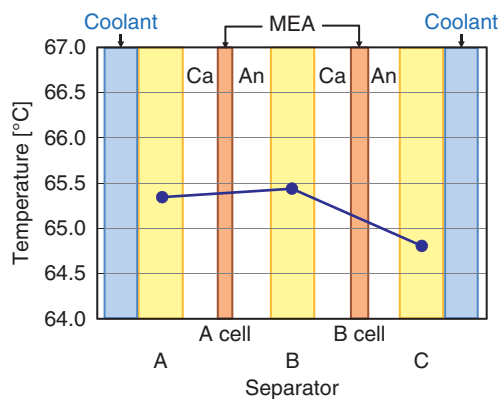


Fig. 15 Separator temperature of each cell

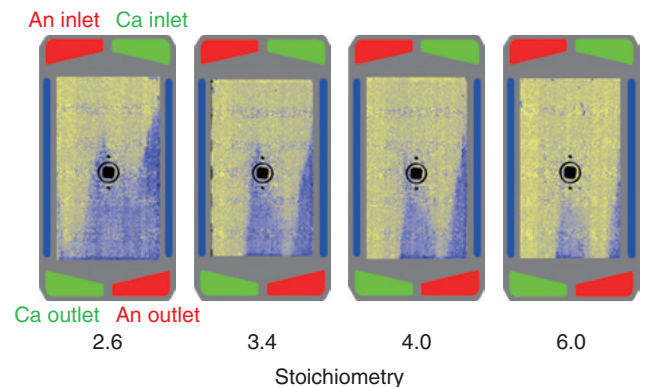


Fig. 17 Neutron radiography image at various stoichiometric quantities

#### 4.3.2. 冷媒温度高温化の効果

冷媒温度を高温化させた際の滞留水低減に対する効果を確認した。Fig. 20 に冷媒温度と電圧挙動の関係を標準偏差で示す。冷媒温度が 72.5℃ 以上において電圧挙動が安定化する傾向が確認された。

Fig. 21 に発電エリアのガス流路下部における滞留水の定量化結果を示す。冷媒温度高温化により滞留水の低減が確認できた。これはセル内部の環境温度が上昇したことで飽和蒸気圧が上昇し結露量が減少したためと推定される。

Fig. 22 に各冷媒温度におけるセル電圧と抵抗過電圧の

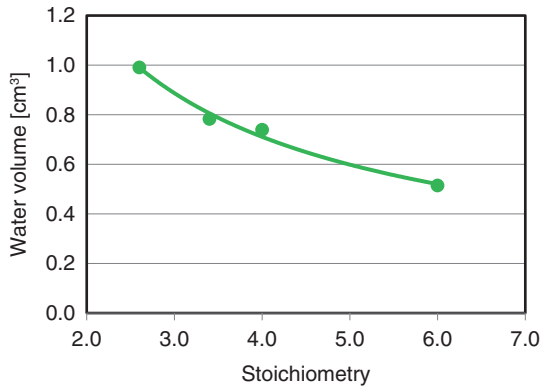


Fig. 18 Water volume at various stoichiometric quantities

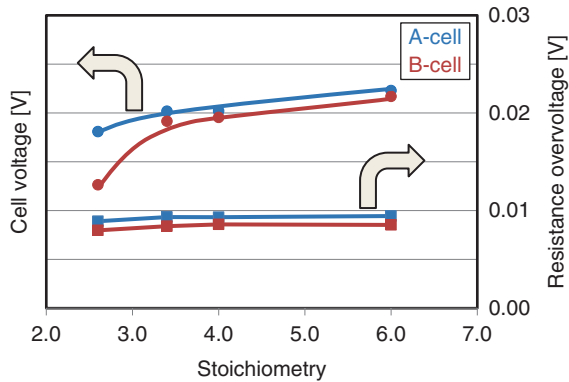


Fig. 19 Cell voltage and resistance overvoltage at various stoichiometric quantities

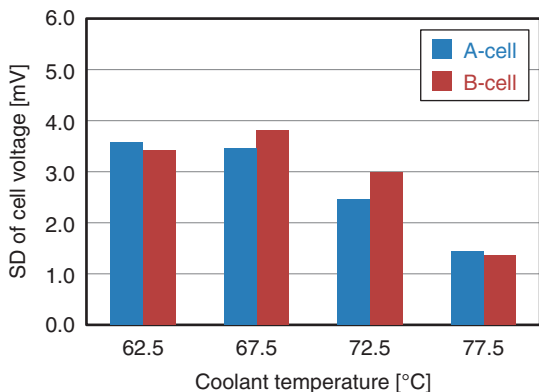


Fig. 20 SD of cell voltage at various temperatures

関係を示す。ストイキオメトリの場合とは異なり冷媒温度上昇によって抵抗が上昇し、発電性能が低下することが確認された。これはセル温度上昇によってガス流路内の滞留水を低減させると同時に MEA の含水率も低下させていることが原因と考えられる。冷媒温度高温化は滞留水低減には効果があるが、抵抗過電圧上昇によって発電性能が低下することが明確になった。

#### 4.3.3. アノードパージによる滞留水低減効果

実車におけるアノードパージが滞留水量に与える影響を確認した。Fig. 23 にアノードパージ制御におけるセル電圧の標準偏差の変化を示す。アノードパージによって電圧挙動を改善できることが判明した。

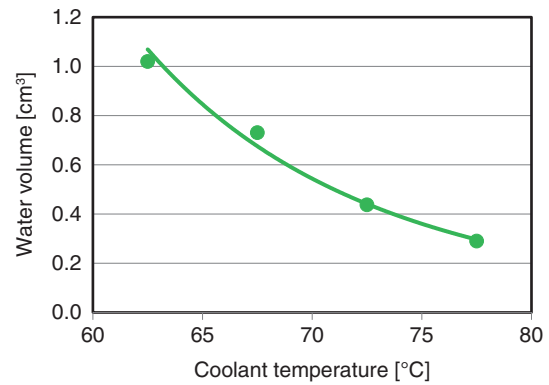


Fig. 21 Water volume at various coolant temperatures

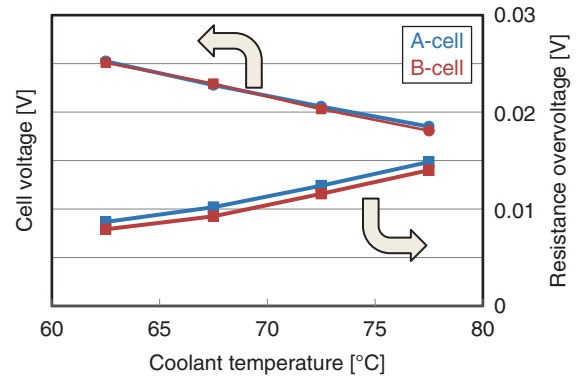


Fig. 22 Cell voltage and resistance overvoltage at various temperatures

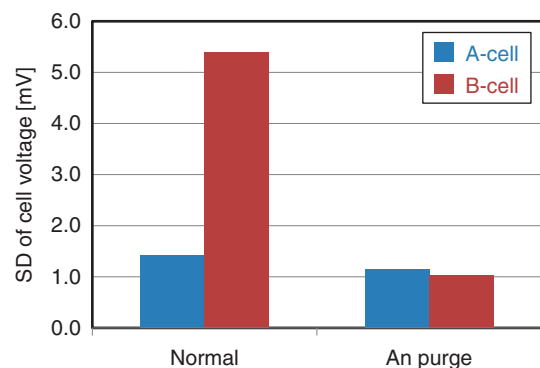


Fig. 23 SD of cell voltage before and after An purge

Fig. 24 にアノードパージ制御を開始した際の A セルと B セルのガス流路下部の滞留水量の変化を示す。アノードパージによって B セルの滞留水が低減し A セルと同等となっていることが確認された。

また、アノードパージのセル電圧への影響を Fig. 25 に示す。アノードパージによる発電性能の低下は観察されなかった。よって、ガス流路の滞留水のみが排水され、MEA の含水は保たれていると考えられる。これらの結果からアノードパージは滞留水低減効果が得られ、電圧挙動も安定し発電性能も維持できることが明確になった。

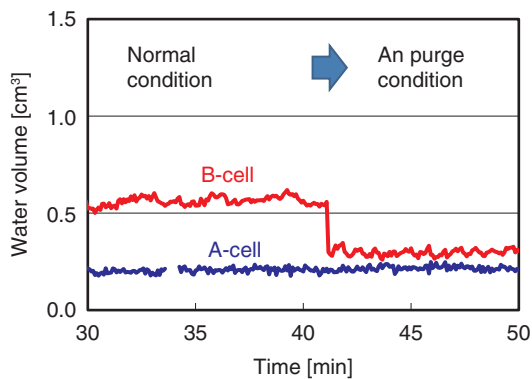


Fig. 24 Transition of water volume before and after An purge

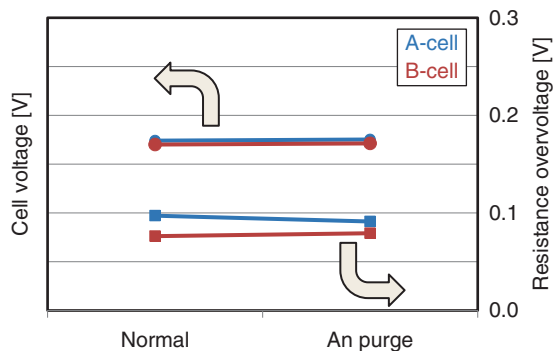


Fig. 25 Cell voltage and resistance overvoltage before and after An purge

## 5. 実車システムへの適用手法の検討

以上の結果をふまえて、実車システムへの滞留水低減手法の適用を検討した。実機セルの結果より性能を損なわずに滞留水を低減できる手法として、カソードのストイキオメトリ増大とアノードのパージが有効であることを見出した。上記の手法において、発電効率と燃費を低下させない範囲で調整をおこない制御として適用させた。

Fig. 26 に滞留水対策前後における発電中の中性子ラジオグラフィ画像を示す。発電時の滞留水が効果的に低減していることが確認された。

Fig. 27 に対策制御の効果を 4.2.1 項で提示した滞留水と電圧挙動の関係において示す。A セルと B セルの滞留水量を低減させ、かつ B セルの滞留水量を A セルと同等レベルに近づけることが可能となった。滞留水量の低減にともない電圧挙動の安定性も向上した。

対策制御によって滞留水量をコントロールし電圧挙動の安定化を図りつつ発電性能を維持することが可能となった。

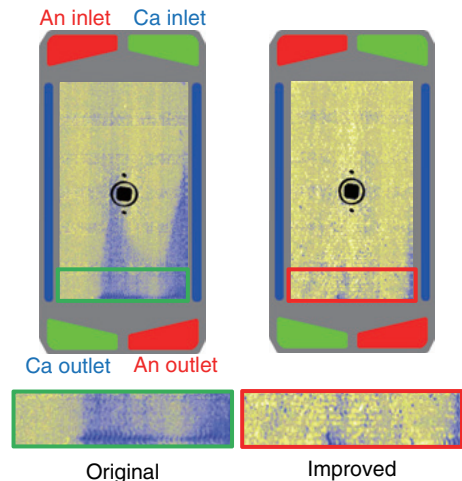


Fig. 26 Neutron radiography image of original and improved generation environment

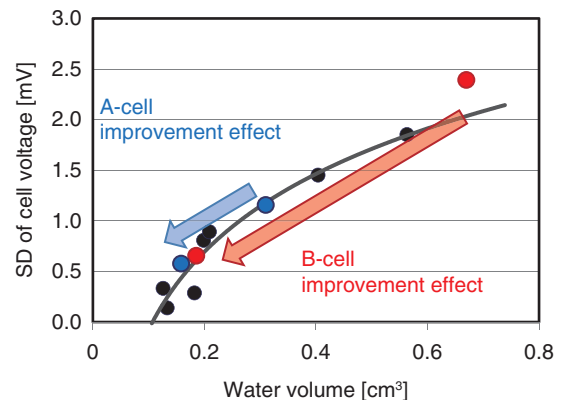


Fig. 27 Relationship of water volume and cell voltage

## 6. まとめ

実機セルと側面方向観察セルを用いて中性子ラジオグラフィにて滞留水を観察し、滞留水と電圧挙動の関係を突き止め、実車システムへの滞留水低減手法の適用をおこなった。以下に要約する。

- (1) 中性子ラジオグラフィで発電時の水挙動を観察することにより滞留水が発電時のセル電圧挙動に影響を与えていることを明確にした。
- (2) 側面方向観察セルによって水の滞留位置を切り分けて解析をおこなうことにより、滞留水量がセルによって異なり、その原因が発電環境に起因することを立証した。
- (3) 実機セルにて発電性能と滞留水を確認しながら滞留水低減手法を検討し、カソードストイキオメトリ増大とアノードパージ手法が有効であることを見出した。
- (4) 上記手法を実車の制御に適用し、MEAの含水と滞留水の排水を両立させて発電性能を維持したまま電圧挙動を安定化させることが可能となった。

## 参考文献

- (1) Wang, H: PEM FUEL CELL DIAGNOSTIC TOOLS, CRC Press, 260p.(2012)
- (2) Hickner, M. A., Siegel, N. P., Chen, K. S., Hussey, D. S., Jacobson, D. L.,: Observations of Transient Flooding in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Time-Resolved Neutron Radiography, Journal of The Electrochemical Society, Vol.157(1), p.B32-B38(2010)
- (3) Eller, J., Rosén, T., Marone, F., Stampanoni, M., Wokaun, A., Büchi, F. N.,: Progress in In Situ X-Ray Tomographic Microscopy of Liquid Water in Gas Diffusion Layers of PEFC, Journal of The Electrochemical Society, Vol.158(8), p.B963-B970(2011)
- (4) Teranishi, K., Tsushima, S., and Hirai, S.,: Analysis of Water Transport in PEFCs by Magnetic Resonance Imaging Measurement, Journal of The Electrochemical Society, Vol.153(4), p.A664-A668(2006)
- (5) 独立行政法人日本原子力研究開発機構  
<http://sangaku.jaea.go.jp/3-facility/02-field/12-23.html>
- (6) 斉藤信広, 菊池英明, 中尾靖宏:FCX クラリティ搭載の新燃料電池スタック, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.15-22
- (7) 田中慎太郎, 田中之人:中性子ラジオグラフィによる燃料電池内部の水分布可視化, Honda R&D Technical Review, Vol.23, No.1, p.43-48

- (8) Boillat, P., Frei, G., Lehmann, E. H., Scherer, G. G., Wokaun, A.: Neutron Imaging Resolution Improvements Optimized for Fuel Cell Applications, Electrochemical and Solid-state letters, 13, B25-B27(2010)

## ■ 著 者 ■



千葉 裕 人



岩 澤 力