JAEA-Technology
2011-037

熱中性子ラジオグラフィ装置における燃料電池発電システムの整備

Arrangement of Fuel Cell System for TNRF

野島 健大　安田 良　竹中 信幸　林田 洋寿
飯倉 寛　酒井 卓郎　松林 政仁

Takehiro NOJIMA, Ryo YASUDA, Nobuyuki TAKENAKA, Hirotoshi HAYASHIDA
Hiroshi IIKURA, Takuro SAKAI and Masahito MATSUBAYASHI

量子ビーム応用研究部門
量子ビーム材料評価・構造制御技術研究ユニット

Materials Science Research Division
Quantum Beam Science Directorate

February 2012

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

JAEA-Technology 2011-037

熱中性子ラジオグラフィ装置における燃料電池発電システムの整備

日本原子力研究開発機構　量子ビーム応用研究部門
量子ビーム材料評価・構造制御技術研究ユニット
野島　健大、安田　良、竹中　信幸*、林田　洋寿+、飯倉　寛、酒井　卓郎、松林　政仁

（2011 年 12 月 14 日受理）

固体高分子型燃料電池は、酸素と水素を燃料として発電し、副生成物が水のみであることからクリーンな次世代エネルギー源として注目されている。しかし、電池内で生成された水によりガス供給が阻害され、発電性能が低下することが問題となっている。そのため燃料電池開発においては、発電時における生成水の制御・管理を最適化するために、こうした生成水挙動解明が重要な課題となっている。中性子ラジオグラフィは、非破壊で物体内部を透過画像として観察する手法であり、軽元素で構成される水に対して高い検出能を持ち、かつ金属に対して高い透過性をもつため、金属で構成された電池の内部における水分布を計測するというニーズに対し、極めて有効な手段と言える。そこで我々は JRR-3 に設置されている TNRF (Thermal Neutron Radiography Facility; 熱中性子ラジオグラフィ装置) において、発電時における燃料電池内部の水分布の可視化を行うために、燃料電池発電システムの整備を行った。

発電システムは、主にガス供給や燃料電池の発電・制御に係る機器に加え、使用水素の希釈システム、配管内や各機器内から水素を除去する窒素パージシステム等の機器によって構成される。また、原子炉施設において可燃性ガスである水素ガスを使用するため、運転中は水素リークをモニターし、TNRF 内部や水素ボンベ付近に水素検知器を完備した。

JARI (Japan Automobile Research Institute) 標準セルを用いた特性試験の結果、発電システムが安定に動作することを確認した。さらに、中性子ラジオグラフィ実験を行い、発電中の電池内部の水の可視化をすることができた。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
＊ 神戸大学大学院 工学研究科 機械工学専攻
＋ J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン

JAEA-Technology 2011-037

Arrangement of Fuel Cell System for TNRF

Takehiro NOJIMA, Ryo YASUDA, Nobuyuki TAKENAKA*, Hirotoshi HAYASHIDA+,
Hiroshi IIKURA, Takuro SAKAI and Masahito MATSUBAYASHI

Materials Science Research Division, Quantum Beam Science Directorate,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 14, 2011)

Polymer electrolyte fuel cells (fuel cells) can be potentially employed as sources of clean energy because they discharge only water as by-products. Fuel cells generate electricity with supply of oxygen and hydrogen gases. However, the water produced by the fuel cells blocks the gas supply, thereby degrading their performances. Therefore, it is important to understand the behavior of the water produced by the fuel cells in order to facilitate their development. Neutron radiography is a useful tool for visualizing the distribution of water in fuel cells. We have designed fuel cell operation system for TNRF (Thermal Neutron Radiography Facility) at JRR-3. The fuel cell operation system consists of various components such as gas flow and humidification systems, hydrogen-diluting system, purge system, and safety system for hydrogen gas. We tested this system using a Japan Automobile Research Institute (JARI) standard cell. The system performed stably and efficiently. In addition, neutron radiography tests were carried out to visualize the water distribution. The water produced by the fuel cell was observed during the fuel cell operation.

Keywords: Fuel Cell System, Water Distribution, JRR-3, TNRF

*Department of Mechanical Engineering, Kobe University
+Materials and Life Science Division, J-PARC Center

目次

1. はじめに 1
1.1 背景と目的 1
1.2 固体高分子型燃料電池の概要 1
1.3 TNRF の概要 2
2. 発電システムの仕様 3
2.1 発電システムの構成 3
2.1.1 制御装置本体 3
2.1.2 ガス供給系 4
2.1.3 配管部 5
2.1.4 排圧制御装置 5
2.1.5 水素希釈システム 5
2.1.6 窒素パージシステム 6
2.1.7 水素検知システム及び非常停止機器 6
2.1.8 発電システムの TNRF への設置 6
2.2 発電システムの制御 7
2.2.1 制御画面 7
2.2.2 トレンドグラフによるモニタリング 7
2.2.3 運転中の異常検出 7
2.2.4 電子負荷装置 7
3 特性試験 8
3.1 試料 8
3.2 試験条件及び方法 8
3.3 試験結果 8
4. 中性子ラジオグラフィ実験 9
4.1 発電中における単セルの内部可視化 9
4.1.1 実験方法 9
4.1.2 実験結果 9
4.2 発電中における 3 連スタックの内部可視化 10
4.2.1 実験方法 10
4.2.2 実験結果 10
5 まとめ 11
謝辞 11
参考文献 11

Contents

1. Introduction 1
1.1 Background and purpose 1
1.2 Outline of polymer electrolyte fuel cell 1
1.3 Outline of TNRF 2
2. Specification of fuel cell operation system 3
2.1 System configuration 3
2.1.1 Main controller 3
2.1.2 Gas supply system 4
2.1.3 Piping part 5
2.1.4 Back pressure control part 5
2.1.5 Hydrogen dilution system 5
2.1.6 Nitrogen purge system 6
2.1.7 Hydrogen detection system 6
2.1.8 Installation in TNRF of the fuel cell operation system 6
2.2 Controll of the fuel cell operation system 7
2.2.1 Controll monitor 7
2.2.2 Trend graph 7
2.2.3 Anomaly detection during operation 7
2.2.4 Electronic load unit 7
3. Evaluation test 8
3.1 Sample 8
3.2 Test condition 8
3.3 Test results 8
4. Neutron radiography experiment 9
4.1 Visualizing on performance of Fuel cell 9
4.1.1 Experimental method 9
4.1.2 Experiment results 9
4.2 Visualizing on performance of three stacked Fuel cell 10
4.2.1 Experimental method 10
4.2.2 Experiment results 10
5. Summary 11
Acknowledgment 11
References 11

図一覧

Fig. 1.1　燃料電池発電原理の模式図 13
Fig. 1.2　JRR-3 炉室における TNRF の設置位置・外観及び模式図 14
Fig. 2.1　発電システムのフロー模式図 15
Fig. 2.2　制御装置本体 16
Fig. 2.3　制御装置本体の制御システム模式図 18
Fig. 2.4　水素ガス供給源の模式図及び外観 19
Fig. 2.5　排圧制御装置 19
Fig. 2.6　水素希釈システムの外観及び模式図 21
Fig. 2.7　TNRF に設置された発電システムの模式図 22
Fig. 2.8　TNRF に設置された発電システムの状態 23
Fig. 2.9　コンピュータ制御画面 24
Fig. 2.10　トレンドグラフ 25
Fig. 2.11　システム異常ウインドウ 25
Fig. 3.1　JARI 標準セルの模式図、JARI 標準セル及びセパレータの外観 26
Fig. 3.2　本システムを用いた JARI 標準セルの発電特性 27
Fig. 3.3　発電中の各パラメータ 27
Fig. 4.1　撮像システムの模式図 28
Fig. 4.2　試料配置 28
Fig. 4.3　JARI 標準セルのガス供給方向 29
Fig. 4.4　実験で得られた JARI 標準セルの発電データ 29
Fig. 4.5　発電中の燃料電池セル内の水分布画像 30
Fig. 4.6　発電前における JARI 標準セル 3 連スタックの中性子透過画像 31
Fig. 4.7　JARI 標準セル 3 連スタック内部可視化の実験配置 31
Fig. 4.8　電池内部 3 次元水分布画像の例 32
Fig. 4.9　JARI 標準セル 3 連スタックの発電データ 32
Fig. 4.10　発電中の各時刻における JARI 標準セル 3 連スタックの内部可視化画像 33

This is a blank page.

1. はじめに

1.1 背景と目的

固体高分子型燃料電池(以下、燃料電池)は、酸素と水素を供給することにより発電するシステムで、副生成物が水のみであることから次世代のクリーンなエネルギー源として期待されている。しかし、電池内で生成された水によりガス供給が阻害され発電性能が低下することから、発電時における生成水の挙動解明は燃料電池実用化において重要な課題となっている。

中性子をプローブとする中性子ラジオグラフィは、非破壊で物体内部を透過画像として観察する手法であり、軽元素で構成される水に対しては高い検出能を、金属に対しては高い透過性をもつため、金属で構成された電池の内部における水分布を計測するというニーズに対し極めて有効な手段と言える[1) 2) 3)]。

JRR-3 に設置されている熱中性子ラジオグラフィ装置(Thermal Neutron Radiography Facility; TNRF)は国内最高性能の中性子ラジオグラフィ装置であるが、燃料電池の発電中における内部水分布の測定のニーズが高まっている中、対応可能な発電実験設備は整備されていなかった。そこで我々は TNRF を用いて発電時における燃料電池内部の水分布の可視化実験を可能にするため燃料電池発電システム（以下、発電システム）の整備を行った。本稿では発電システムの主な仕様、特性試験の結果、及び発電システムを使用した中性子ラジオグラフィ実験の結果について報告する。

1.2 固体高分子型燃料電池の概要

燃料電池は 100℃以下の比較的低温で動作が可能であること、小型でも高い出力を持つことなどの特徴から、自動車、家電分野などでの応用が期待されている。

燃料電池は、電解質膜を中心に触媒層、ガス拡散層、セパレータ、集電板で、はさんだ構造であり、アノードに水素、カソードに空気（酸素）を供給することにより発電を行う。燃料電池の発電原理の概要を Fig.1.1 に示す。

燃料電池は、水の電気分解と逆の化学反応により、化学エネルギーから電気エネルギーへと直接変換することから、他のシステムに比べて発電効率が高いという特徴を有する。その原理を以下に述べる。アノードにおいては、セパレータ流路の水素がガス拡散層を介して触媒層へと均一に伝えられ、水素が水素イオンと電子に分かれる。水素イオンは電解質膜の中を通ってカソードの方へ移動し、電子は外部回路へ流れる（Fig.1.1 アノード側の化学式)。一方、カソードにおいては、セパレータ流路の酸素、アノードから電解質膜を通ってきた水素イオン、外部回路からの電子が結びついて水になる（Fig.1.1 カソード側の化学式)。

こうした燃料電池の発電においては、ガス流量、温度、湿度、圧力等、様々なパラメータが発電特性に影響を及ぼす。例えば、発電時にはガスを加湿して供給する場合が多い。電解質膜は、湿分量が低下すると水素の移動抵抗が高くなり、発電効率が悪くなってしまう。そのため、適切な加湿量を調整する機能が必要になる。また、湿分量が必要以上に高

くなると電池内で結露が生じやすくなり、生じた水がガスの供給を阻害し、発電性能が低下する。このように、発電システムを整備する際、前述のパラメータを適切に制御・調整することが重要となる。

1.3 TNRF の概要

TNRF の外観及び模式図を Fig.1.2 に示す。TNRF はポリエチレンや鉄鋼の遮へい体で密閉された構造であり、炉心から近い順に第 1 撮影室、第 2 撮影室で構成されている [4)]。第 1 撮影室には中性子ビーム用コリメータ等が設置されている。一方、第 2 撮影室には、撮像システム（シンチレータ型コンバータ、暗箱、CCD カメラ）、回転ステージ、カメラ架台などが設置されており、熱流体 [5)]、植物研究 [6)] 等の様々な実験が行われている。第 2 撮影室には遮へい扉が設置されており、試料のハンドリング、撮像機器の交換などの際に開放されるが、中性子ビーム照射の際はその扉が閉じられ、遮へい体として機能する。なお、本遮へい扉にはインターロック機構が設けられ、扉が開いている状態ではビームを照射することはできない。撮影室内の試料への配管・配線は、天井に設置されたプラグ孔（模式図ではプラグで閉じられている）を介して行う。

一般的な中性子ラジオグラフィは、試料を透過した中性子を中性子検出器によって可視光に変換し、フィルムや各種カメラを用いて撮像する。TNRF では通常、シンチレータ型コンバータと冷却型 CCD カメラが用いられることが多い。また、試料や実験に応じて中性子イメージインテンシファイア [7)] や中性子用イメージングプレート [8)] 等の中性子検出器を用いる場合がある。Fig.1.2 ではシンチレータ、暗箱、CCD カメラによって構成された一般的な撮像システムを示す。シンチレータ型コンバータを暗箱に取付け、シンチレータからの可視光を暗箱内の 2 枚のミラーを介して CCD カメラで撮影する。

2. 発電システムの仕様

2.1 発電システムの構成

発電システムは主に、制御装置本体、配管部、排圧制御装置などのガス供給や燃料電池の発電・制御に係る機器に加え、使用水素の希釈システム、配管内や各機器内から水素を除去する窒素パージシステム、運転中に水素リークをモニターする水素検知システム（吸引式、拡散式）等の機器によって構成される。

発電システムのフロー模式図を Fig.2.1 に示す。水素ライン（アノードライン）においては、ガス供給源からの水素ガスを流量調節器（Mass Flow Controller; MFC）で流量制御し、制御装置本体の飽和槽でガスの加湿を行う。水素ガスは、制御装置本体により温度制御された配管を通り、ミストトラップを介して燃料電池セルへ供給される。燃料電池から排出されたアノードガスは、排圧制御装置へと流れ、配管を介して接続した水素希釈システム内で窒素ガスを用いて水素を希釈し、排気ブロアへと流れる。空気ライン（カソードライン）については、排圧制御装置から直接排気ブロアへ接続する点以外はアノードラインと同様である。ガスの加湿に関しては、バルブ操作により飽和槽を通す加湿ラインと飽和槽を通さない無加湿ラインを選択することができる。さらに、窒素パージラインを設置しており、窒素ガスを用いてそれぞれの流路をパージすることにより残留水素ガスや生成水を排出することができる [9]。排圧制御装置は、燃料電池のガス排出側を加圧制御するために設けられ、制御装置本体のガス流入部から排圧制御装置までの系を加圧できる。可燃性ガスである水素ガスの使用における安全性を担保する機器として、TNRF の各撮影室内や水素ボンベ付近に各機器からの水素リークをモニターする水素検知器を取り付けている。

以下に、発電システムを構成する主な機器についての詳細を記す。

2.1.1 制御装置本体

制御装置本体には MFC や飽和槽等が整備されている。制御装置本体の模式図及び外観写真を Fig.2.2(a)、(b) に示す。

小型の燃料電池やスタック型の燃料電池等、サイズや形状により必要となるガス流量が異なるため、カソード側・アノード側にガス流量のレンジが異なる 2 系統の MFC（東京計装 HM1000）をそれぞれ並列に設置した。アノードラインでは最大流量が 0.5L/min 及び 5 L/min の MFC を、カソードラインでは最大流量 2L/min 及び 20L/min の MFC を並列に設置し、各ガスラインでバルブ操作により条件に合う MFC を選択することで、比較的広範囲のガス流量の条件下で発電できる仕様とした。

飽和槽は供給ガスの加湿量（湿度）を制御する機器である。飽和槽は純水の液相部と空気の気相部で別れたタンクから構成される（Fig.2.1 及び Fig.2.2 (a)中の飽和槽参照）。加湿ラインのガスは液相部から気相部を通過し、その過程で加湿される。加湿はバブラー方式を採用し、発生ガスの露点が液相部の水温と等しくなるように構成されている。液相部及び気相部にはヒータを独立に設置し、それぞれの温度制御を行うことにより露点・湿度を容易に制御可能な仕様とした。アノード側及びカソード側のタンクの全容量

はそれぞれ 9.6 L 及び 3.0 L、最大水量は 5.0L 及び 1.6L、最大液面位置は 360mm 及び 300mm とした。液相部及び気相部に取り付けられたヒータ容量は、アノード側で 750W 及び 200W、カソード側で 2000W 及び 500W とし、ヒータ温度は K 熱電対によりモニターされる。

その他、制御装置本体内のガス配管出口近傍に圧力計（KELLER　PAA-23）を装荷しており、電池の入口側に相当する圧力をモニターすることができる(Fig.2.1 参照)。モニター可能な圧力範囲は 500 kPa (絶対値)以下である。さらに、制御装置本体には燃料電池を発電するための電子負荷装置が設置されている（本章 2 項参照)。

配管や燃料電池などの温度調節、ガス流量調節やバルブ開閉等は、制御モジュール (理化工業 Z-TIO）及び PLC（Power Line Communications, 三菱電　FX2N-MR64）で制御し、接続されたコンピュータにより簡便に遠隔操作できる（4 章参照)。Fig.2.3 に制御システムの模式図を記す。ヒータ、MFC や比例弁等の燃料電池の発電パラメータ及び発電中の異常を検知する水素検知器等の各種センサは、制御モジュールを介してモニター及び制御される。各バルブの開閉操作や警報信号の受信及び警報発信は、PLC を介して制御される。

2.1.2 ガス供給系

カソードガス供給源（空気ガス供給源）としては、ガスボンベ及び Air コンプレッサ（PUMA　MB0204C) を併用できる仕様とした。制御装置本体には、Air コンプレッサ、ガスボンベを接続するためのポートがそれぞれ設けられており、バルブ操作により簡便に切り替えできる構造となっている。Air コンプレッサのポートには、燃料電池へのカソードガス供給を行うことを考慮し、オイルミスト等の不純物を吸着させるためにフィルタを設けた。

アノードガス供給源（水素ガス供給源）としては、水素吸蔵ボンベ（JSW MHCh-450L）を使用している。このボンベによる水素貯蔵は、水素分子がボンベ内壁の水素吸蔵合金（ミッシュメタル-NiMnCo 合金）に原子の状態で固溶し、周りの金属原子と水素結合する原理を利用している。この反応は発熱反応であり、ボンベを冷却した状態（10~30℃）で水素ガスを注入すれば、整備した高さ 270mm、高さφ81mm の水素吸蔵ボンベの場合、常圧環境下において 450 NL の水素が充填可能である。一方、水素ガスの取出しは水素吸収過程とは逆の反応（発熱反応）により行うことができる。水素吸蔵合金を加熱（約 40℃）することによって合金中の水素原子が表面まで移動し、そこで水素原子同士が結合して水素ガスとなる。この方式のボンベを使用することで、ボンベに取り付けたヒータの加熱制御により比較的緩やかな水素放出を行うことができる。水素吸蔵合金ボンベを 40℃で加熱・保持された状態で、水素放出流量は空気中 25℃においておよそ 0.5～0.6L/min である（ただしボンベ内の水素吸蔵量で放出流量は変化する)。

水素吸蔵ボンベ及びガス供給系の模式図及び外観写真を Fig.2.4 に示す。水素吸蔵ボンベは制御装置本体裏に格納されており、2 本収納可能な設計とした。ガス供給を中断

することなく双方のボンベと切り替え可能な接続方式とし、長時間の発電実験においても連続的な水素供給を可能とした。水素ガス使用時は、水素吸蔵ボンベは 300W のヒータにより 40℃に加熱・保持される。温度は K 熱電対を使用してモニターされる。水素吸蔵ボンベから放出されたガスはレギュレータで加圧された後、MFC で流量制御され燃料電池に供給される。アノードガス配管のバルブは、水素ガスの使用を考慮してエアコントロールバルブを使用した。水素ガスを使用しないその他の配管のバルブには電磁バルブを使用した。

2.1.3 配管部

制御装置本体と TNRF 撮影室内の燃料電池セルのガス配管は、中性子照射による放射化を低減させるため 1/4 インチのテフロンチューブ（Swagelock　PFA チューブ）を使用した。リボンヒータや断熱材で配管を覆い、配管内部のガスは制御装置本体により温度制御される。

配管を通過する過程で加湿ガスが結露する可能性があるため、結露水の除去を目的とし、本体と電池の間にミストトラップを設けた（Fig.2.1 参照）。本ミストトラップも制御装置本体部により加熱・温度保持され、温度は K 熱電対を用いてモニターされる。配管各部のヒータ容量は、制御装置本体内部側は 50W、制御装置本体外からミストトラップ入口まで及びミストトラップ出口から電池入口までは 300W、ミストトラップ部は 100W である。

2.1.4 排圧制御装置

排圧制御装置の外観及び模式図を Fig.2.5 (a) 及び(b) に示す。燃料電池セルのガス排出側までの系を加圧できるように、燃料電池セルの後に排圧制御装置を設けた。本制御装置のガス出口へバイパス弁（アノード側：エアコントロールバルブ、カソード側：電磁バルブ）と比例弁（コガネイ　FKPV050-2-20-FM-S4-02-39）を並列に接続し、さらに本制御装置内の圧力をモニターする圧力センサを取り付けた。バイパス弁を閉じることによって比例弁が作動し、タンク内の圧力を制御可能な仕様とした。排圧は常圧から 200 kPa まで制御することができる。また本機器は、燃料電池からの排出ガスの水分を除去するミストトラップの役割も果たす。それぞれのタンクの容量は約 1L とした。

2.1.5　水素希釈システム

原子炉施設内において排出される水素の濃度が爆発濃度範囲（空気中 4.0～75vol%）とならないように、アノードラインからのガスを窒素で希釈し、水素濃度を適切に制御するための希釈システムを設けた。水素希釈システムの外観写真及び模式図を Fig.2.6 に示す。燃料電池から排出されたアノードガスは、検知ガスとして水素希釈システムへ入り、ガス混合用バッファータンク（リキッドシステム　SFV シリーズ）内で窒素ガスと混ざり希釈される。希釈されたガスは発火伝播防止装置を経由しブロアへ排出される。排出ガスの水素濃度をモニターするため、バッファータンクの直後に吸引式水素検知器

（新コスモス電機　PE-2CC）を設置した。スタック型燃料電池等、多量の排出ガスが発生する場合を想定し、本希釈システムには希釈ガス（窒素）側に最大流量 20 L/min の MFC を設けた。アノードガスが高い水素濃度のまま排出されることを防ぐため、希釈用窒素ガスの MFC が停止の間はアノードガス用 MFC へのロックが作動するインターロックを設けた。

2.1.6　窒素パージシステム

発電システム使用後及び緊急時において、各機器や配管内の残留水素を除去するため、不活性ガスである窒素ガスによるパージシステムを設けた。Fig.2.1 のフロー模式図のように、バルブ操作によってアノードライン、カソードラインを各ガス供給源から窒素ガス供給源に切り替えることができ、残留水素を排出することができる。また、発電直後における電池・配管内の残留水素が多量に希釈システムに流れ込まないようパージ系配管部にニードルバルブ（KOFLOC RK-1650）を設け、手動による微少な流量制御を可能とした。ニードルバルブの最大流量は 1 L/min である。

2.1.7　水素検知システム及び非常停止機器

燃料電池や配管等からの水素リークをモニターするため、TNRF 第 2 撮影室内部、水素吸蔵ボンベ室内及び水素希釈システムに拡散式の水素検知器（新コスモス電機 KD-3A）を設置した。ビーム使用時は第 1 撮影室もビーム孔を介して第 2 撮影室と空間的につながるため、吸引型の水素検知器（新コスモス電機　PE-2DC）を第 1 撮影室に設置した（Fig.2.7 参照）。発電実験中は常に水素濃度をモニターし、設定値以上になった場合、水素警報器により警報音が吹鳴するシステムとなっている。また、発電中に異常事象が起こった際に発電システムを緊急停止、窒素パージをするための非常停止装置を設けた。

2.1.8 発電システムの TNRF への設置

発電システムを TNRF に設置した状態の模式図を Fig.2.7 に示す。酸素/空気ボンベ、窒素ボンベや窒素パージ用ニードルバルブは TNRF 撮影室外に設置し、さらに制御装置本体、Air コンプレッサユニット、水素希釈システムや水素警報器は TNRF 天上に設置した。ミストトラップ、排圧制御装置、水素検知器や試料である燃料電池セルは TNRF 撮影室内に設置した。ガス配管や電気配線は、TNRF に設けられているプラグ孔（Fig.1.2(b)参照）を通して TNRF 内外の機器を接続する。配線や配管を通すために使用した TNRF のプラグ孔は、放射線が外部に漏れないようにパラフィンブロックや鉛ブロックで隙間を覆う。

実験者は制御用パーソナルコンピュータ（以下、制御用 PC)、窒素パージシステム、非常停止ボタンを用いて発電システムの運転を行う。発電システムを TNRF へ設置した状態の写真を Fig.2.8 に示す。

2.2 発電システムの制御

発電システムは、接続した制御用 PC によりガス流量の設定、加熱温度の調節、バルブの開閉や電子負荷装置による発電を遠隔で制御できる。以下に、測定に関わる事項についての詳細を記す。

2.2.1 制御画面

制御用 PC 上の制御画面を Fig.2.9 に示す。画面上に、ガスの流路や機器の構成を示したシステムフロー図が映し出され、各機器等における温度などのパラメータをそれぞれの機器ごとに設定できる。MFC や燃料電池用ヒータなど、流量や温度を設定できるものには、その模式図付近にボックスが 2 段存在し、上の段では指示値が表示され、下の段には設定値を入力できる。また、バルブ等の開閉や各装置の異常の有無等が色分けして表示されるため、視覚的にシステム全体の稼働状況を容易に把握できる。

2.2.2 トレンドグラフによるモニタリング

温度、流量、電圧、電流等の測定データは、自動的に制御用 PC へ取り込まれる。運転中のこれらのパラメータは、トレンドグラフ上に、横軸に時間、縦軸に各測定値としてそれぞれ表示され、複数のパラメータの時間経過を同時に確認することができる。トレンドグラフの例を Fig.2.10 に示す。グラフの右側に測定パラメータがボックスで表示されており、選択及び設定することで中央のグラフに任意の表示レンジで表示させることができる。測定のサンプリング時間は 1～60 秒の周期（1 秒刻み）で設定を行うことができる。

2.2.3 運転中の異常検出

各測定値において、制限値を個別に設定することができ、設定値を超えた場合は警報を知らせるウインドウ（システム異常ウインドウ）がコンピュータ画面上に表示される(Fig.2.11)。ウインドウには異常の内容が赤字で記載されており、異常発生原因の特定に寄与できる。

2.2.4 電子負荷装置

電子負荷装置は、スタック型の燃料電池の発電を考慮して、PLZ664WA（菊水電子工業）を用いた。本装置は、測定モードを選択することにより、定電流モード、定電圧モード、I-V モードで接続した燃料電池セルの発電特性を得ることができる。定電流モードは一定値の電流を流し電圧値の変動を測定する方法であり、定電圧モードは一定値の電圧を印加させ得られる電流値の変動を測定する方法である。I-V モードは開始電流、電流変化点、終了電流及び電流値の刻みを設定し、自動で測定を行う方法である。それぞれの測定モードにおいて、電流値は最大 135A まで設定・測定可能である。

3 特性試験

本発電システムを TNRF で使用する前に、炉外において（財）日本自動車研究所（JARI）標準セルを用いて性能を評価した [10]。その詳細を以下に述べる。

3.1 試料

JARI 標準セルは燃料電池の研究用に開発され、既に様々な研究や実験に使用されている。JARI 標準セルの模式図、外観及びその構成部材の一部であるセパレータの外観を Fig.3.1 に示す。図中の膜/電極接合体（Membrane Electrode Assembly；MEA）は、膜厚約 50μm の固体高分子膜とその両側に白金を担持させたカーボンブラックを約 30μm 塗布した 5×5cm^2 の電極層により形成されている（Nafion NR-212）。その両側には約 200μm のカーボンペーパー製のガス拡散層（東レ TGP-H-60）が配置される。MEA、ガス拡散層、合わせて約 500μm の膜が、空気と水素を供給する 1mm^2 の単一蛇行形状のガス供給流路を設けたセパレータ 2 枚にはさみこまれている。その両側に金メッキ銅板の集電板 2 枚が配置され、2 枚の締付板を使用して固定することにより燃料電池セルが形成される。標準仕様の締付板は、部材を SUS としているが、中性子ラジオグラフィを用いて撮影することを考慮して、中性子が透過しやすいアルミ材を採用した。それ以外の材料は JARI 標準電池の仕様に準拠している [10]。

3.2 試験条件及び方法

発電条件は水素流量（アノード側）100 cc/min、空気流量（カソード側）200 cc/min とし、両者ともに温度 85 ℃・加湿条件（飽和槽において液相 80℃、気相 85℃）の下ガス供給を行った。また、燃料電池本体及び出口側ガス配管の温度も、入口側と同様に両者とも 85℃とした。排圧は絶対圧 200kPa で加圧制御した。電池の I-V 特性の評価は、定電流モード（電流値 5A)で行い、発電開始とともに電圧変化を 1 秒間隔でモニターした。

3.3 試験結果

発電システムを用いて取得した発電試験の、定電流モード（電流値 5 A）における電圧値の測定結果及び発電中の各パラメータを Fig.3.2 及び Fig.3.3 に示す。ガス流量、システム各部の温度や排圧の値を設定値に対し 8%（アノード側の排圧値）以内で正常に制御可能であることが確認された。さらに、発電開始 1625 秒後に生じた急激な電圧降下を検出し、発電中の燃料電池に生じた電池内部の事象（滞留水分によるフラッディング等）を検知することができた。

4. 中性子ラジオグラフィ実験

本発電システムを用い TNRF で中性子ラジオグラフィによる発電中の燃料電池セルの内部可視化実験を行った。本章においては、発電中における単セルの連続撮影及び 3 連スタックの CT 撮像試験の結果について、以下に述べる。

4.1 発電中における単セルの内部可視化

4.1.1 実験方法

試料は、燃料電池内のセパレータ流路に発生する水の検出能を向上させるため、JARI 標準セルの締付板及びセパレータに、中性子が透過しやすいアルミ材を採用した。アルミ製セパレータ（厚さ 10mm）には防食のための金メッキを施した。

用いた撮像システムの模式図を Fig.4.1 に示す。試料を透過した中性子ビームをシンチレータ型コンバータにより可視光へ変換し、高感度カメラを用いて撮像した。シンチレータは LiF・ZnS（Ag）を使用し、高感度カメラは EM-CCD（Electron Multiplying CCD）カメラ（浜松ホトニクス C-9100-02）及び 85mm レンズ（Nikon Nikkor）を使用した。EM-CCD カメラは、画素数 1000×1000、階調 14bit の画像を取得できる。今回使用した撮像システムにおいて得られた 1 ピクセルの画素サイズは 80μm×80μm であった。

発電条件は水素流量（アノード側）100 cc/min、空気流量（カソード側）200 cc/min とし、両者ともに温度 85 ℃・加湿条件（飽和槽において液相 80℃、気相 85℃）下でガス供給を行った。また、燃料電池本体及び出口側ガス配管の温度も、入口側と同様に両者とも 85℃とした。排圧は絶対圧 200kPa で加圧制御した。負荷電流密度は、発電開始時 200 mA/cm^2 で、最終的に 280 mA/cm^2 まで上昇させ、発電開始とともに電圧変化をモニターした。試料配置を Fig.4.2 に示す。試料に専用の冶具を装着させ、TNRF に設置されている試料台に乗せ、カソード側をシンチレータ型コンバータに接触させた状態で固定した（Fig.4.2 の模式図）。撮影するカメラ側からみた JARI 標準セルのカソード側のガス流路を Fig.4.3 に模式図で示す。水は本流路内に生成する。

4.1.2 実験結果

定電流モードにおいて取得した燃料電池の発電特性を Fig.4.4 に示す。約 50 分間の発電実験において、電圧は安定して推移し、大きな電圧降下は生じなかった。Fig.4.4 中の A 点（発電開始一分後の点）、B 点（負荷を 280 mA/cm2 へ設定後に電圧が極値となった点）及び C 点（安定発電時の点）で得られた燃料電池の内部透過画像を Fig.4.5 に示す。モノクロ画像で濃淡が濃く表わされている部分が水である。これらの図から、流路内部の水分布が時間とともに変化していることが分かる。

本発電システムにより、TNRF 内及びその周辺の限られた空間において安全に燃料電池を発電することができ、発電中の燃料電池内部の水の動きをその場観察できるようになった。

4.2 発電中における3連スタックの内部可視化 [11) 12)]

本発電システムを用いて、3つの単セルを直列に積層させた3連スタックの発電中における内部可視化実験をTNRFで行った。前節の2次元的な可視化実験方法では、3連セルスタックを構成する各セルの水分布を計測することは不可能であるため、CT (Computed tomography)計測を行い、3次元可視化実験を行った。

4.2.1 実験方法

試料は、中性子が透過しやすいアルミ製の締付板及びセパレータを採用したJARI標準セルの3連スタックを用いた。後述する撮像システムを用いて発電前に取得した3連スタックの中性子透過画像を Fig.4.6 に示す。この図から、3 つの単セルが電気的に直列に積層されている様子が分かる。

発電条件は、電池温度を常温とし、水素流量（アノード側）210 cc/min、空気流量（カソード側）620 cc/min とし、それぞれのガスは無加湿とした。ステップ状に負荷を増加させ、電流密度を 200 mA/cm^2 まで上昇させたのち一定とした。燃料電池の温度条件は常温であるため、今回用いた3連スタック中における温度制御用の冷却流路（Fig.4.6 右図参照）は使用していない。

中性子ラジオグラフィによる撮像システムについて、中性子検出器は中性子を高感度、高解像度、広ダイナミックレンジで画像化可能な中性子イメージインテンシファイア（東芝 Ultimage）を用い、高速度カメラ（Basler Vision Technology A500k）で撮像した。高速度カメラはC-MOSタイプのセンサを有し、画素数1280×1024、階調8 bitのデータを1秒間に500フレーム撮像できる。実験配置を Fig.4.7 に示す。計測は、試料を透過した中性子を中性子イメージインテンシファイアで検出し、高速度カメラを用いてCT用撮影した。取得した画像からCTを再構成し、画像解析した電池内における水分布の3次元画像を Fig.4.8 に示す。CT再構成することにより、スタックを構成する各セルの水分布を独立に可視化することができる。

4.2.2 実験結果

定電流モードによって取得した燃料電池の発電特性を Fig.4.9 に示す。ここで、スタックを構成する3つのセルをについて、アノード側のセルをセル1、中央のセルをセル2、カソード側のセルをセル3と呼ぶ。電流密度を一定にした後，発電開始9～15分後までは各セルともに比較的安定して発電していたが，15分を過ぎた後から各セルともに電圧が大きく変動し，21分を経過した時点でセル3が発電停止に至った。ある時間に Fig.4.9 の発電データの時刻A、B（セル1電圧が回復した後）、C（セル2電圧が回復した後）それぞれの時点における各セルの可視化した水分布を Fig.4.10 に示す。時刻Aにおける可視化画像から、各セル内に水が分布している様子が分かり、時刻B及びCにおける可視化画像から、セル内の水が多く排出されたことがセル電圧回復に起因したと示唆された。本実験より、3 連スタックを構成する各セルを独立に可視化することができ、それぞれのセル内部の水の動きをその場観察することができた。

5 まとめ

JRR-3 に設置されている熱中性子ラジオグラフィ装置（TNRF）において、発電時の燃料電池内部可視化実験を行うために、燃料電池発電システムを整備した。原子炉施設で使用するために　水素検知器及びインターロック等の機器を装備し、安全に実験ができる仕様とした。また、ガス流量、温度及び湿度などの発電に必要な各種パラメータを遠隔かつ簡便に操作できるシステムとなっている。

JARI 標準セルを用いた特性試験の結果から、本発電システムの運転において水素ガスの導入から排出までの取扱を適切に制御し安全に燃料電池の発電を行えることを確認し、各発電パラメータを数%以内で制御可能であることを実証した。さらに本システムを中性子ラジオグラフィ実験に供し、発電中の燃料電池内部の水を可視化することができた。

謝辞

本整備は独立行政法人新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）の助成によって行うことができました。株式会社自動車部品総合研究所の塩澤方浩様には発電システムを設計する際助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) J. J. Gagliardo, et al., “Neutron radiography characterization of an operating proton exchange membrane fuel cell with localized current distribution measurements,” Nucl. Instr. and Meth. A **605** p.115-118 (2009)

2) K. T. Cho, et al., “Probing water transport in polymer electrolyte fuel cells with neutron radiography," Nucl. Instr. and Meth. A **605** p.119-122 (2009)

3) E. H. Lehmann., “Fuel cell studies with neutrons at the PSI's neutron imaging facilities," Nucl. Instr. and Meth. A **605** p.123-126 (2009)

4) M. Matsubayashi, et al., “Design and characteristics of the JRR-3M thermal neutron radiography facility and its imaging systems,” Nucl. Tech. **132** p.309-324 (2000)

5) N. Takenaka, et al., “Liquid metal flow measurement by neutron radiography,” Nucl. Instr. and Meth. A **377** p.156-160 (1996)

6) H. Nishiyama, et al., “Water gradient profiles at bean plant roots determined by neutron beam analysis,” J. Radioanal. Nucl. Chem.**264 (2)** p.313-317（2005）

7) K. Nittoh, et al., “New feature of the neutron color image intensifier,” Nucl. Instr. and Meth. A **605** p.107-110 (2009)

8) N. Niimura, et al., “An imaging plate neutron detector,” Nucl. Instr. and Meth. A**349** p.521-525 (1994)

9) 植田 忠伸 博士論文「中性子ラジオグラフィによる固体高分子形燃料電池内及び細管内気液二相挙動に関する研究」神戸大学大学院自然科学研究科(2008)
10) 英和株式会社 「JARI 標準セル-レファレンスガイド」
11) I. Sakata, et al., “Three-dimensional observation of water distribution in PEFC by neutron CT,” Nucl. Instr. and Meth. A **605** p.131-133(2009)
12) 橋本迪矩「中性子ラジオグラフィを用いたダイナミック CT 計測による固体高分子形燃料電池内水挙動の三次元可視化」 第 51 回電池討論会(2010)

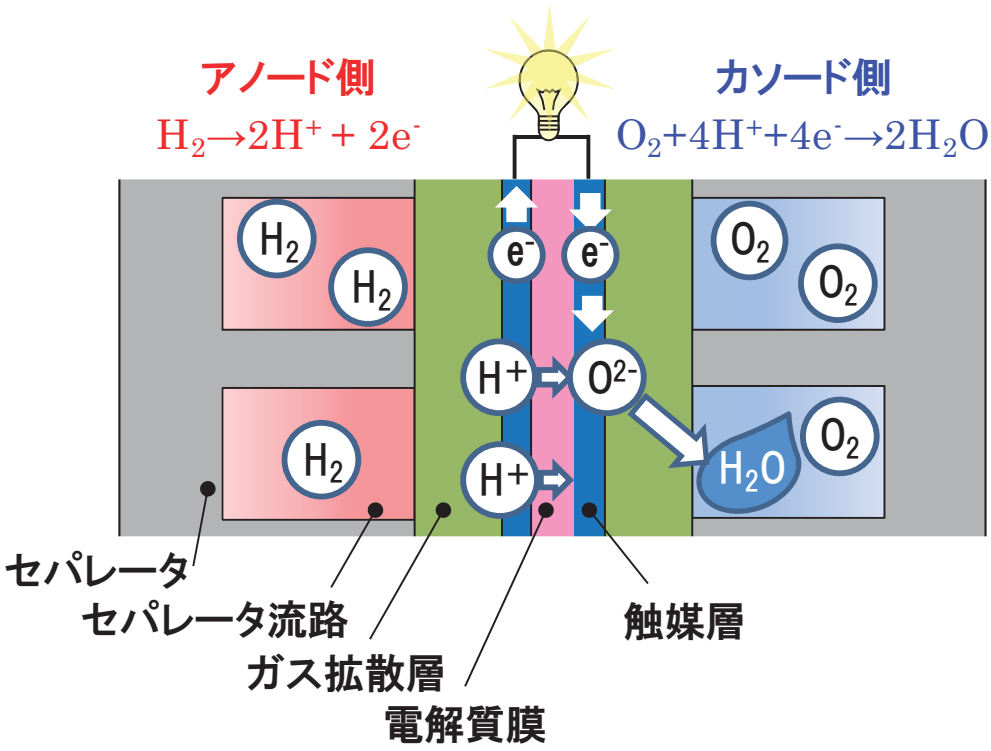
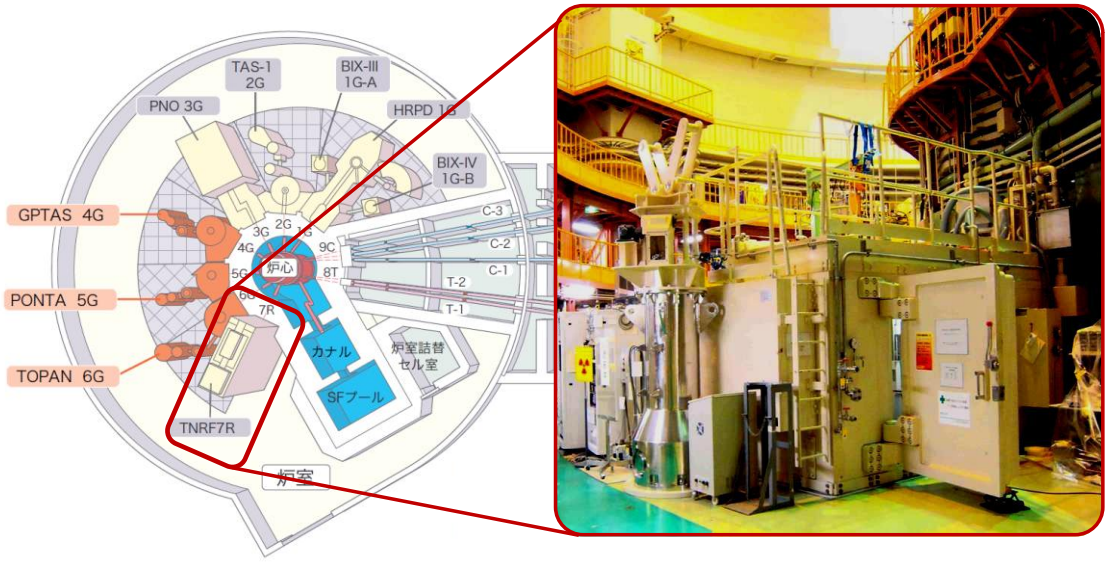
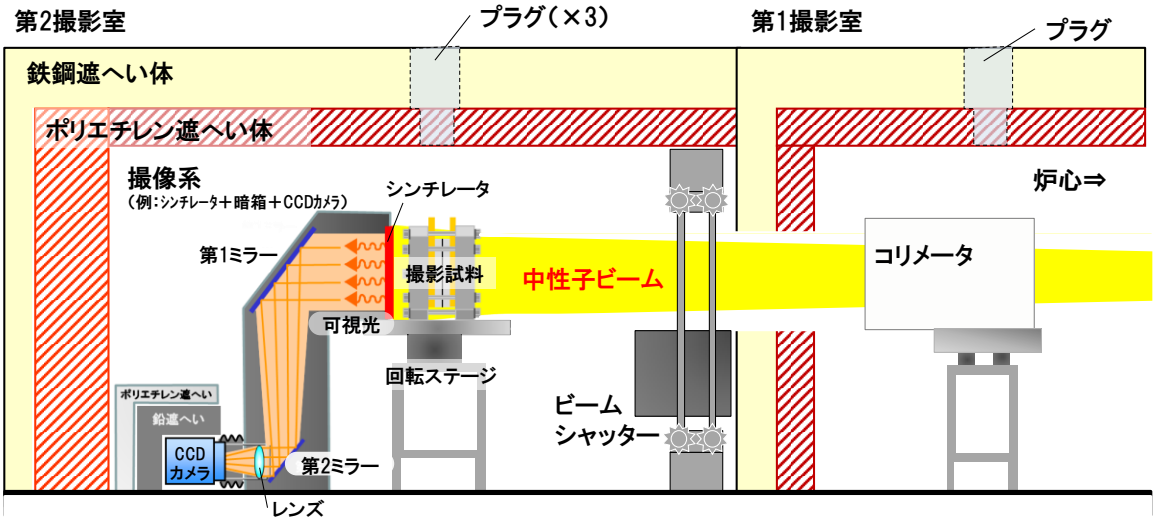


Fig.1.1 燃料電池発電原理の模式図



(a) JRR-3 炉室における位置(左)と外観(右)



(b)TNRF の模式図

Fig.1.2　JRR-3 炉室における TNRF の設置位置・外観及び模式図

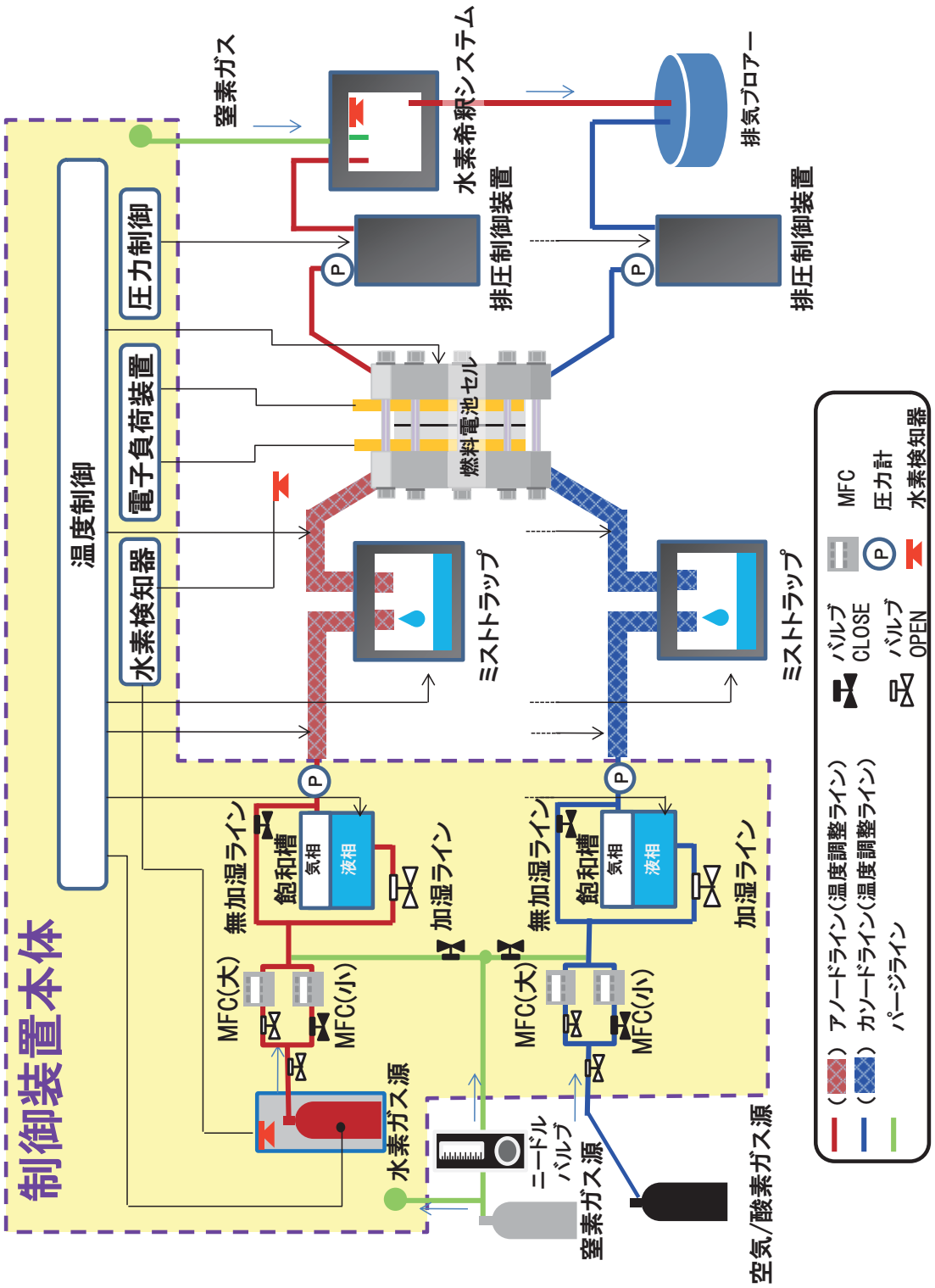
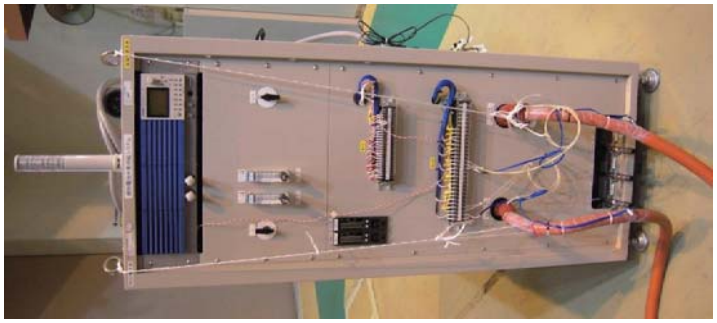
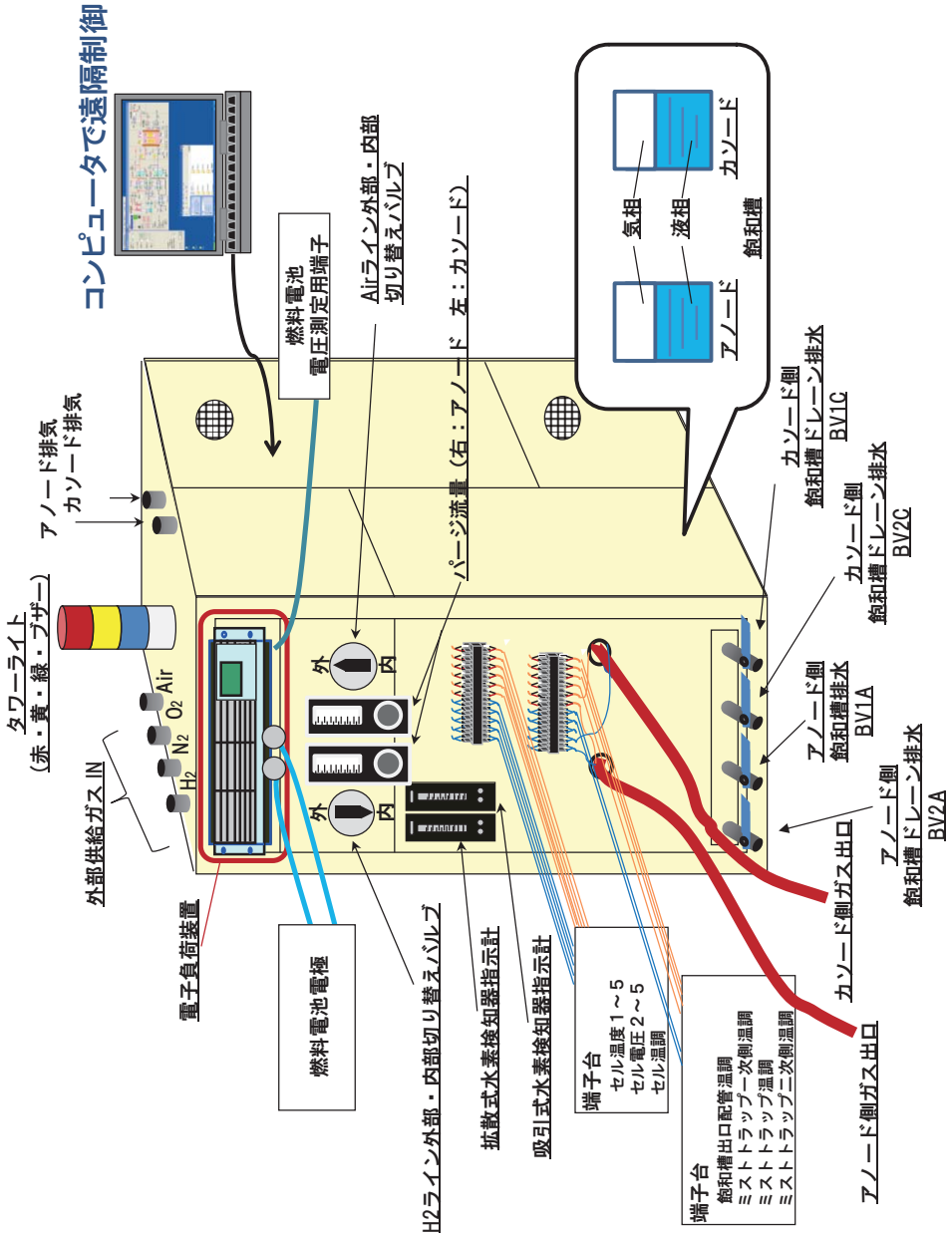


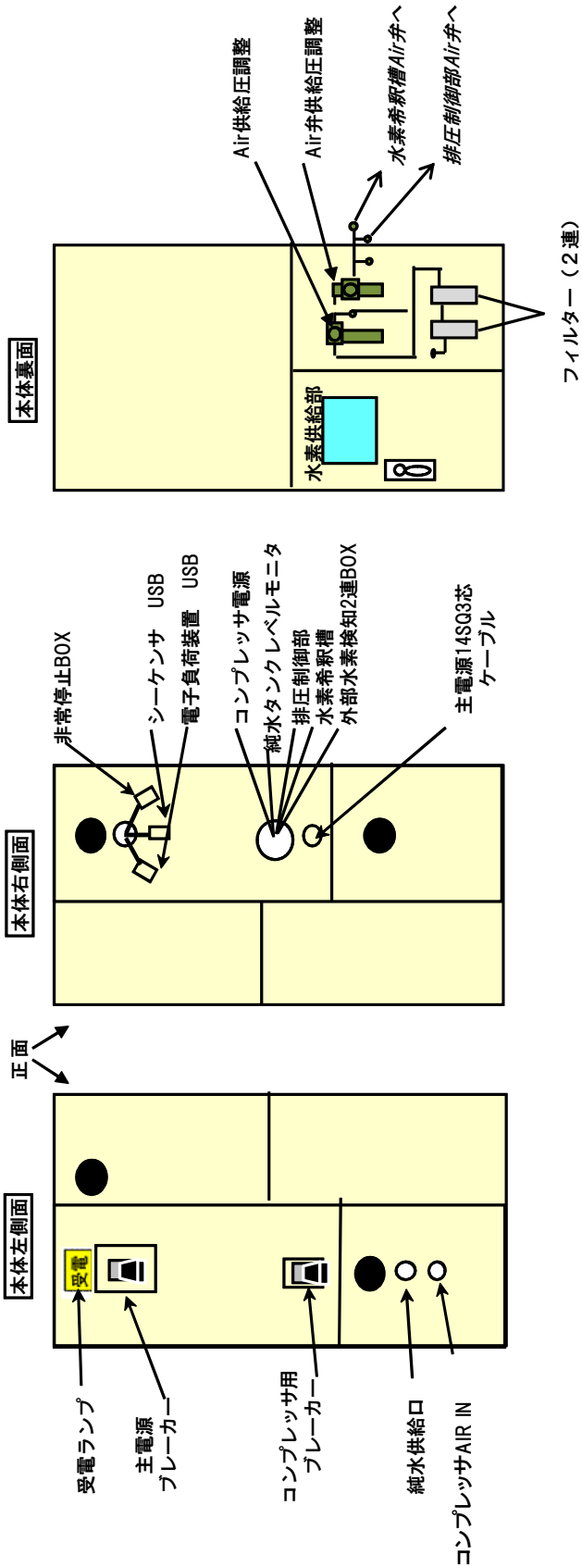
Fig.2.1 発電システムのフロー模式図





(a) 正面の模式図及び写真

Fig.2.2 制御装置本体(1/2)



(b) 側面及び裏面の模式図

Fig.2.2 制御装置本体(2/2)

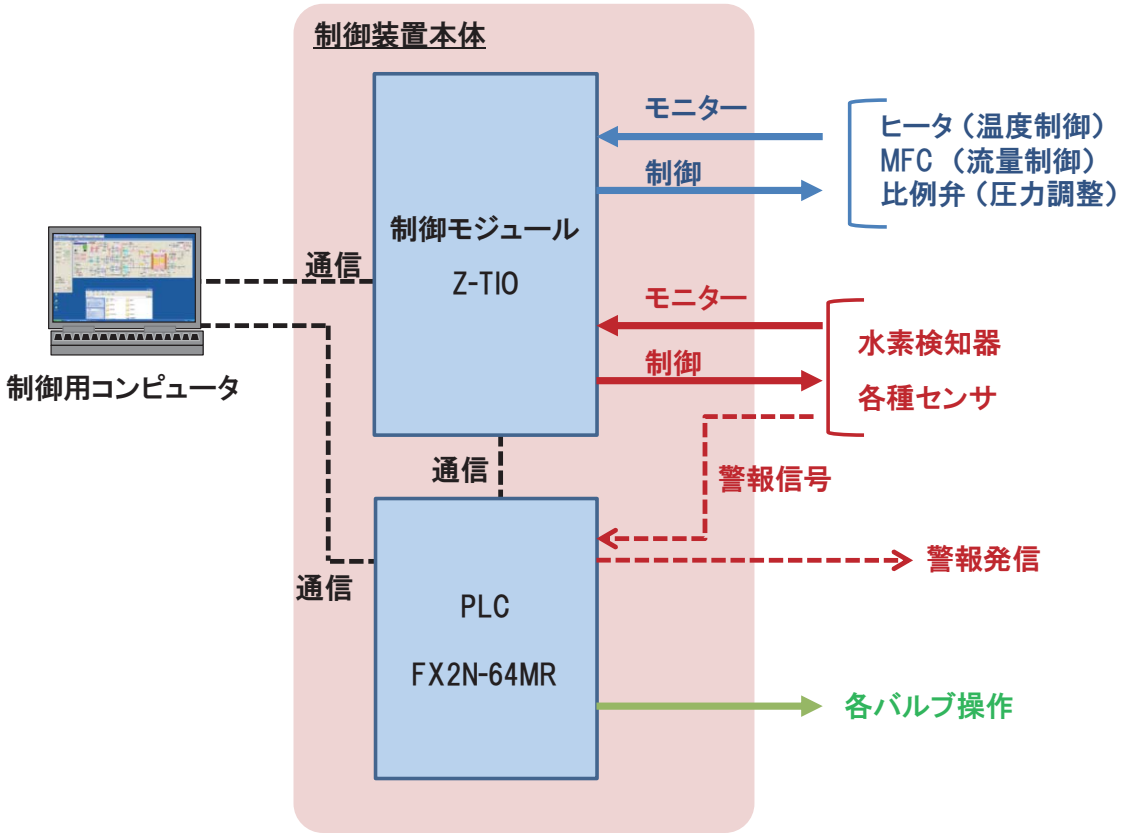


Fig.2.3 制御装置本体の制御システム模式図

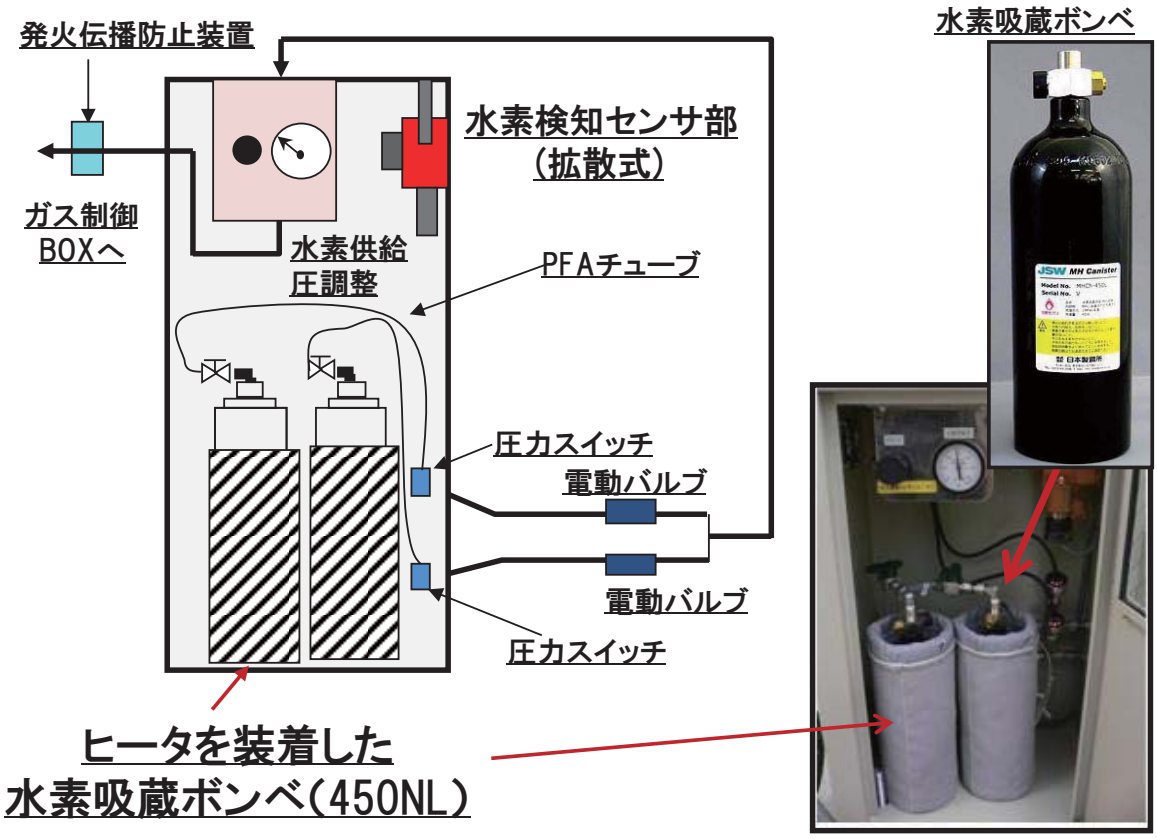
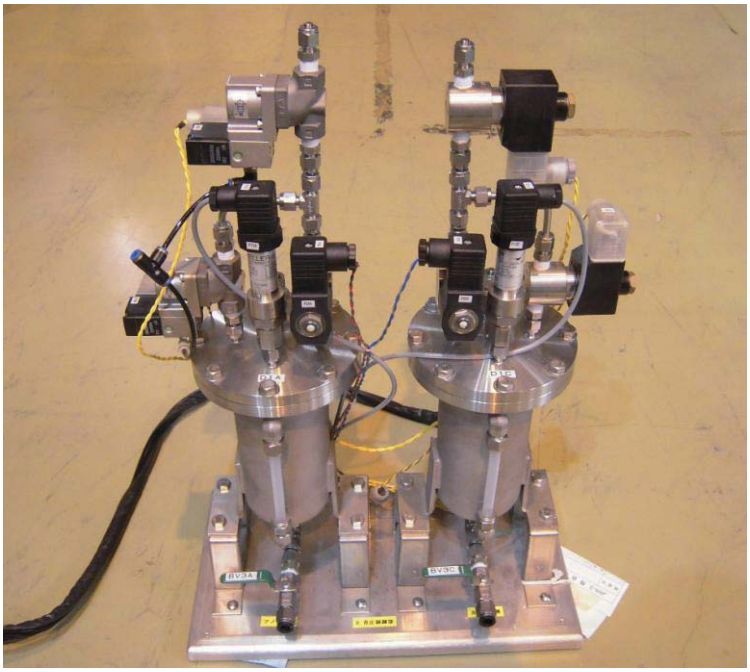
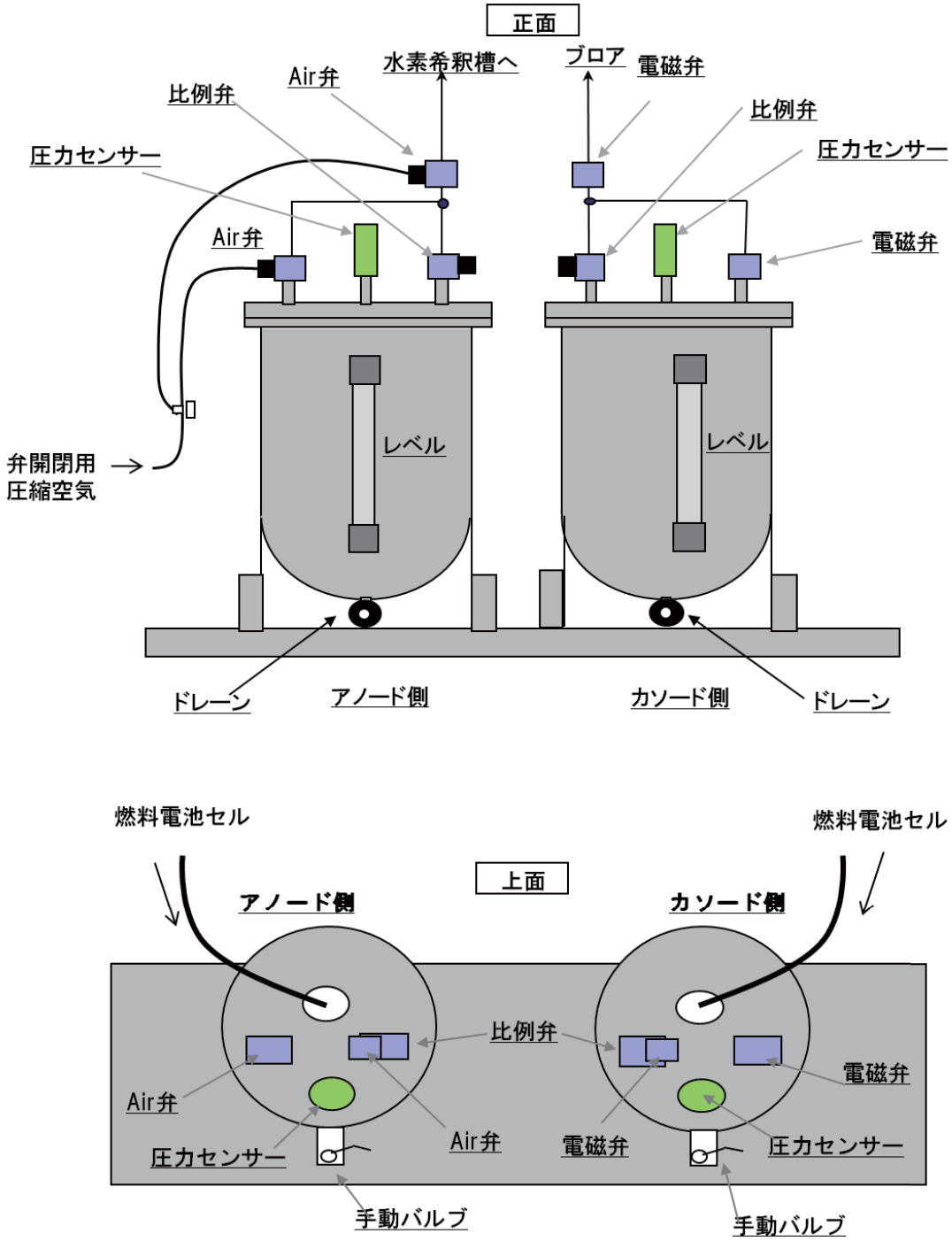


Fig.2.4 水素ガス供給源の模式図及び外観



(a) 外観写真

Fig. 2.5 排圧制御装置(1/2)



(b)模式図

Fig. 2.5 排圧制御装置(2/2)

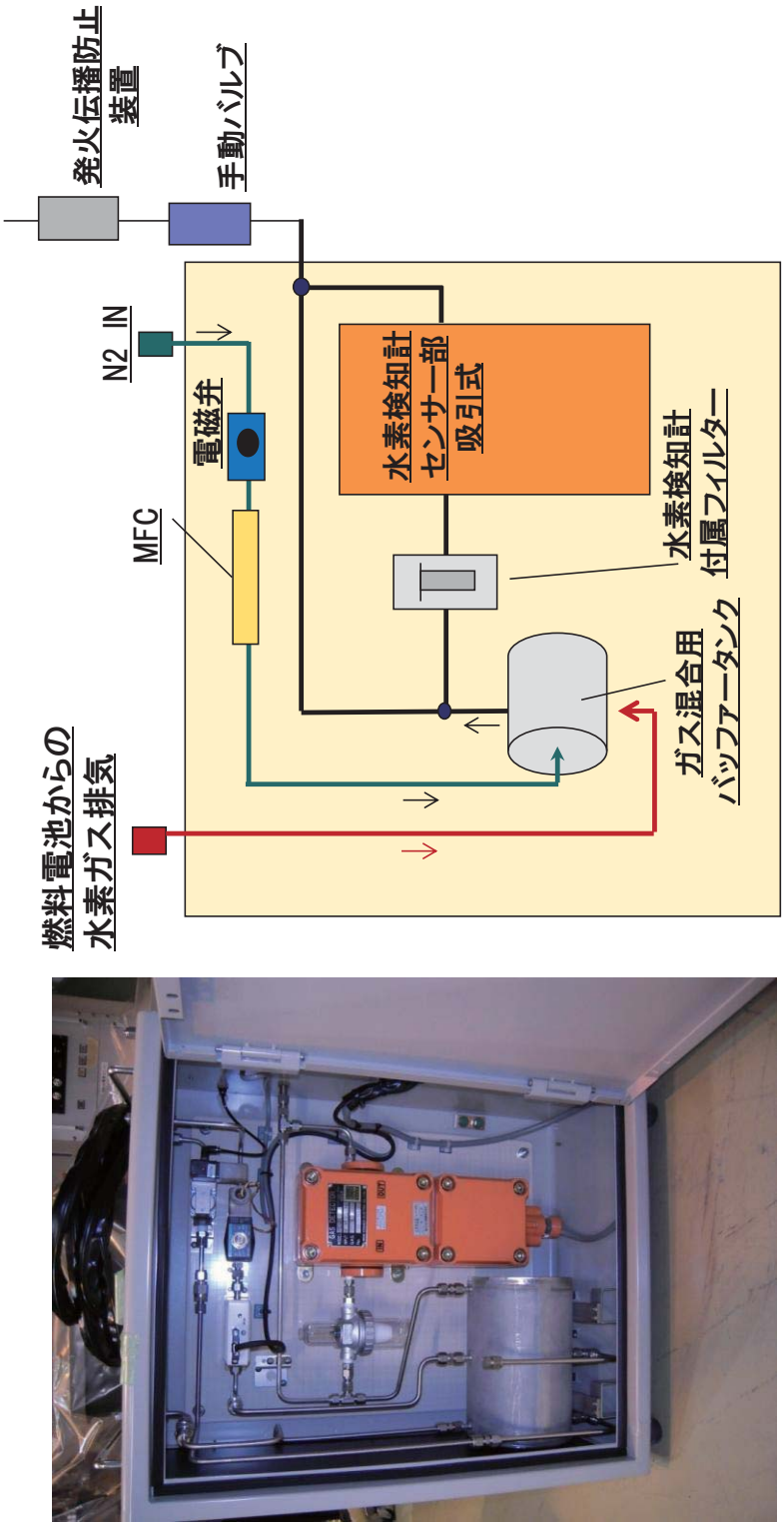


Fig.2.6 水素希釈システムの外観及び模式図

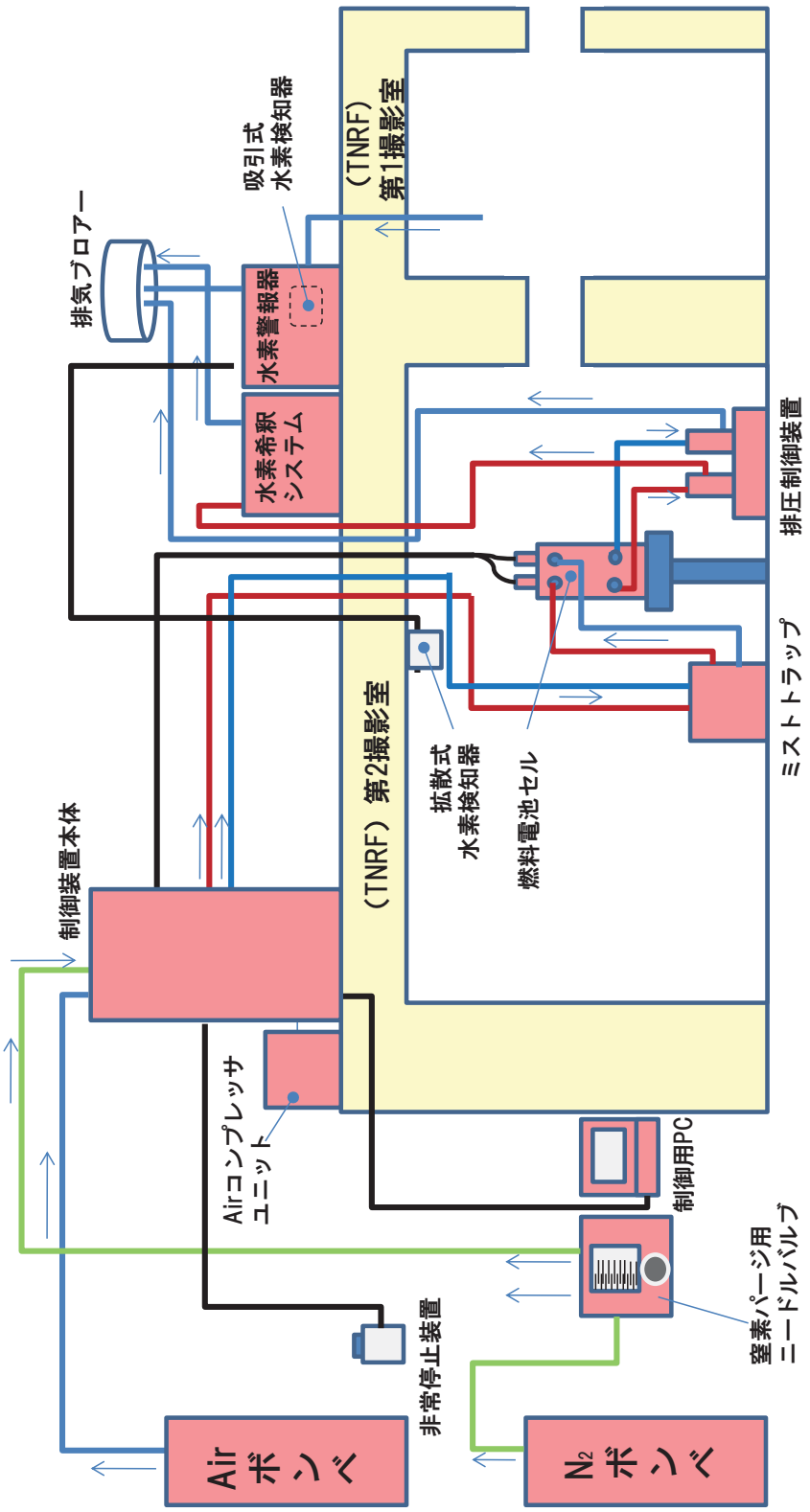


Fig.2.7 TNRFに設置された発電システムの模式図

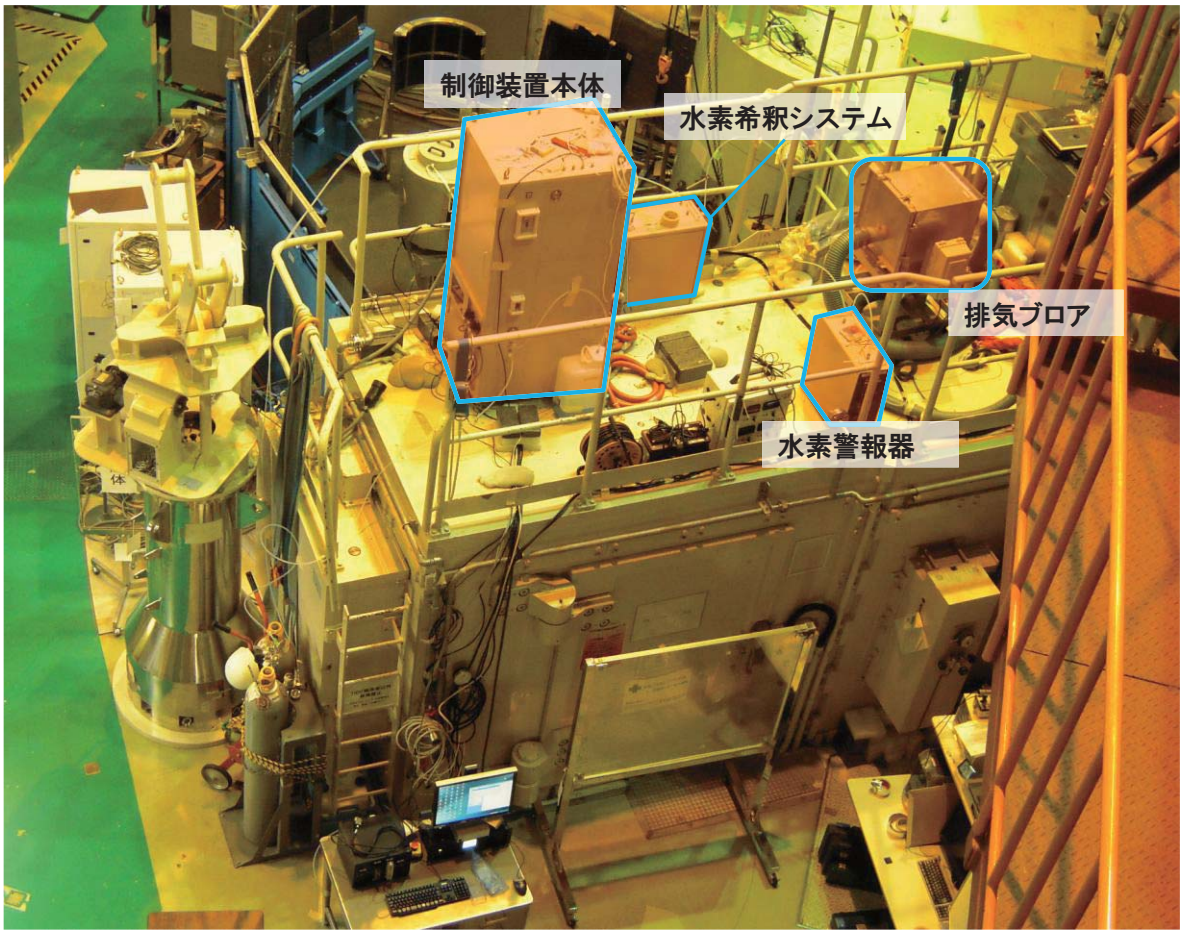


Fig.2.8 TNRF に設置された発電システムの状態

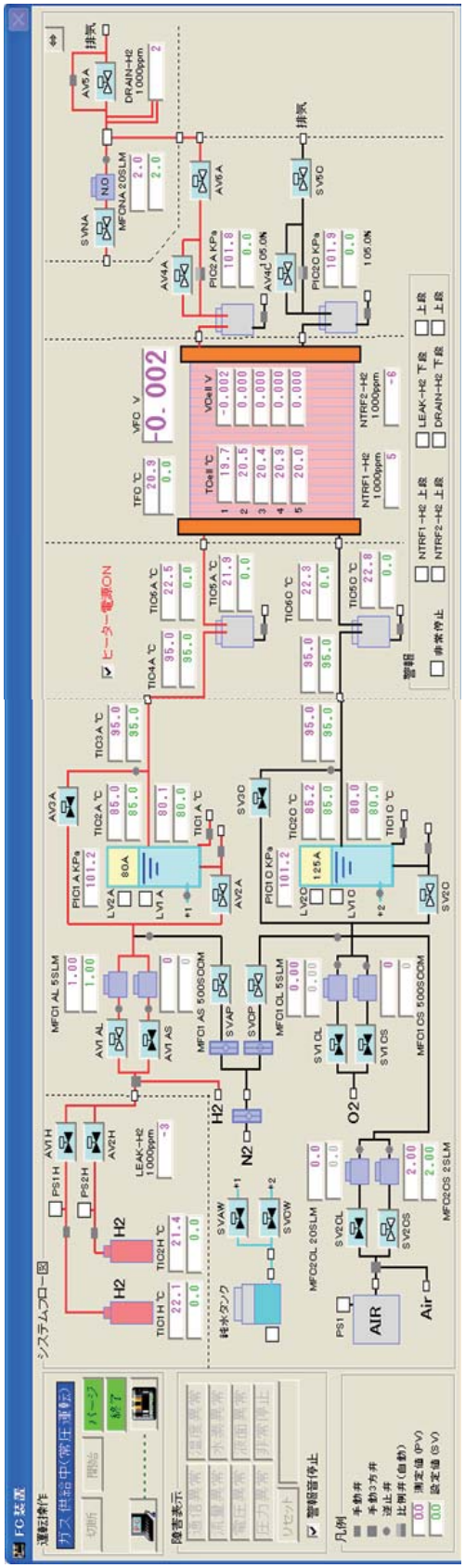


Fig.2.9 コンピュータ制御画面

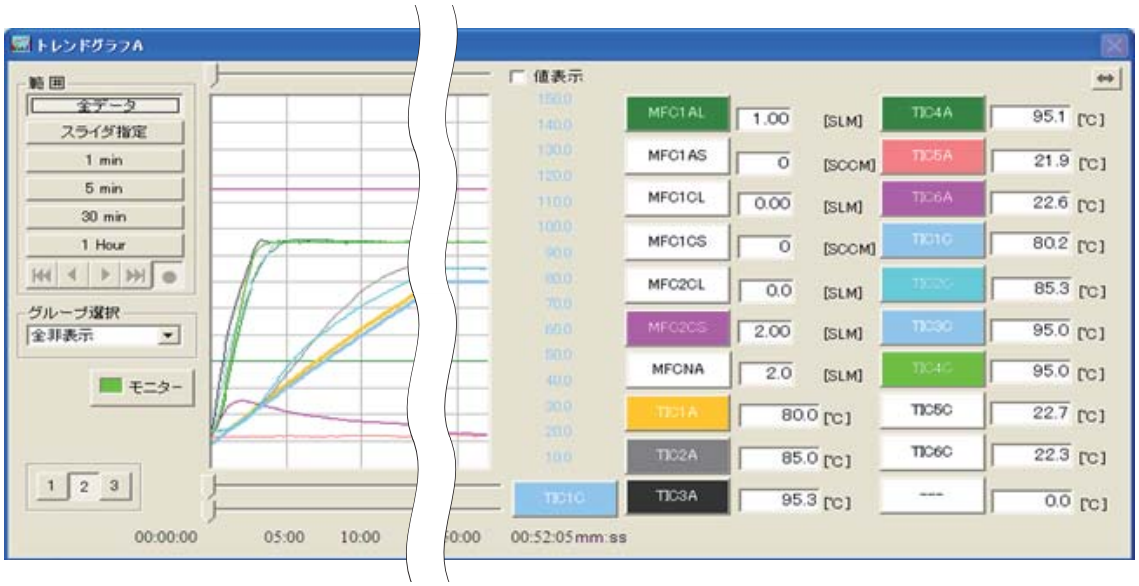


Fig.2.10 トレンドグラフ

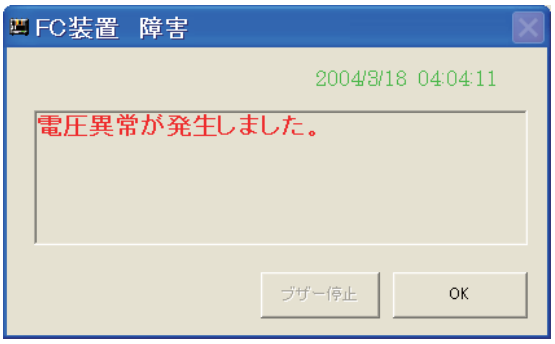
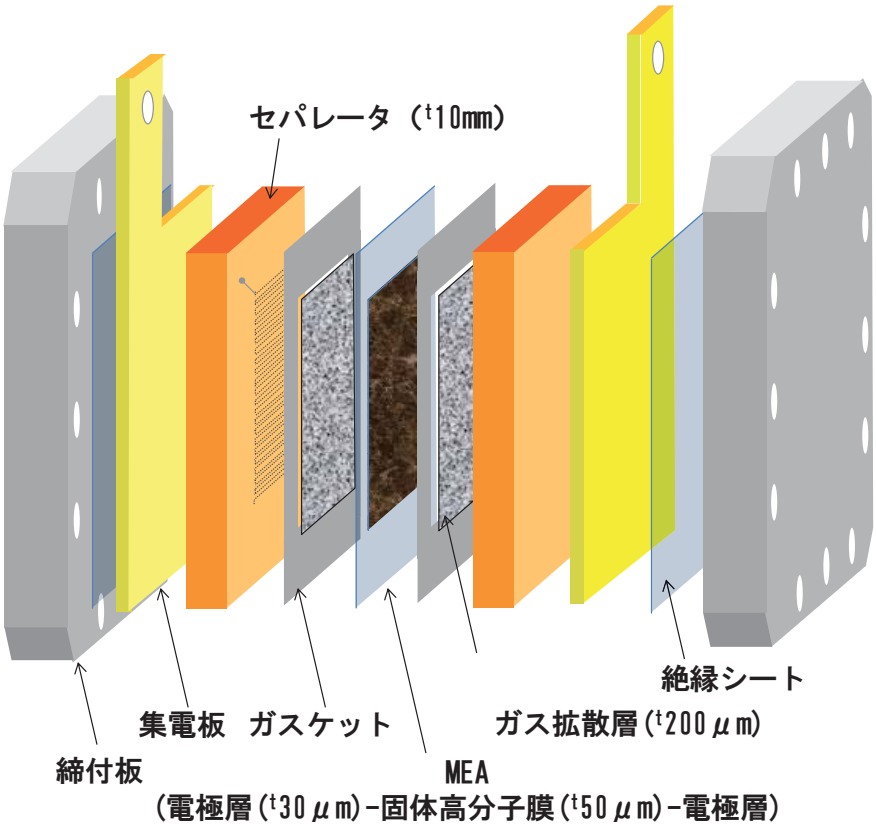
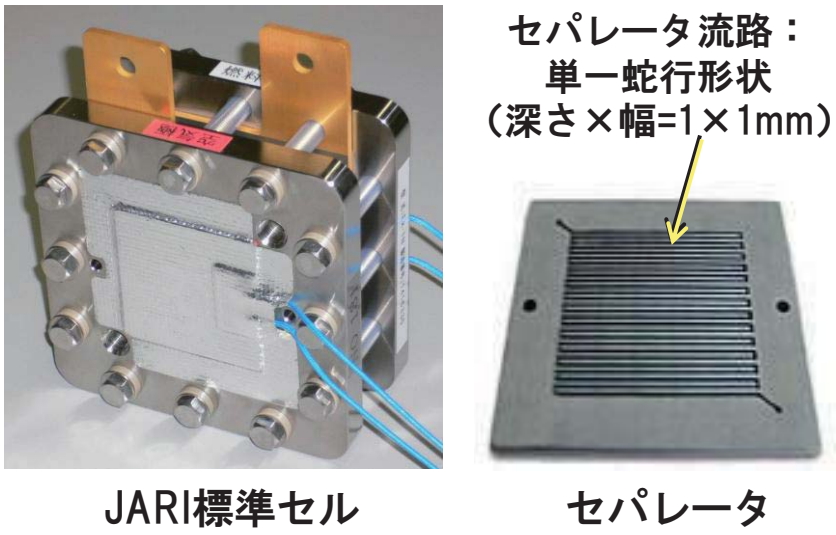


Fig.2.11　システム異常ウインドウ



(a) JARI 標準セルの模式図



(b) JARI 標準セル及びセパレータの外観

Fig.3.1 JARI 標準セルの模式図、JARI 標準セル及びセパレータの外観

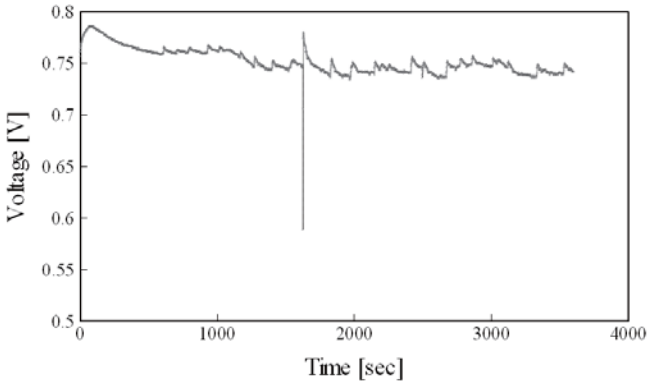
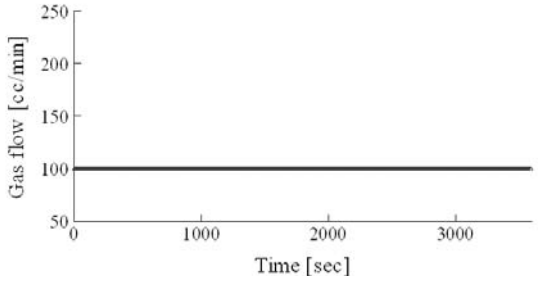
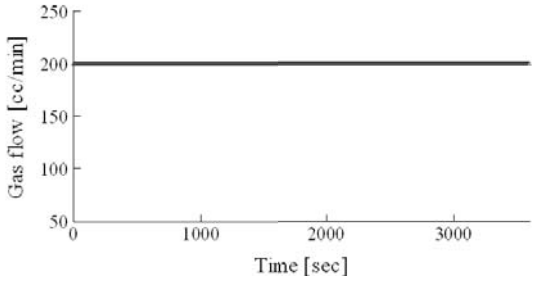


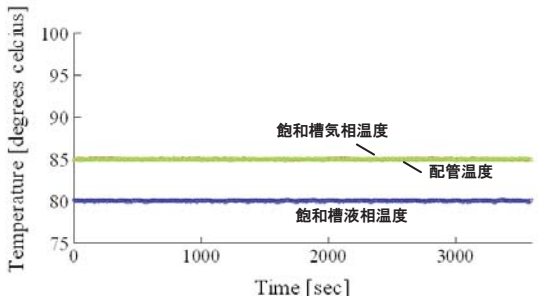
Fig.3.2 本システムを用いた JARI 標準セルの発電特性（定電流モード：電流値 5A）



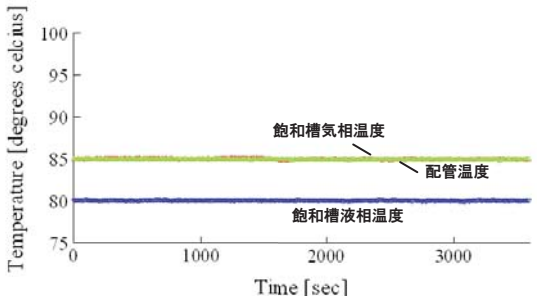
(a) アノードガス流量



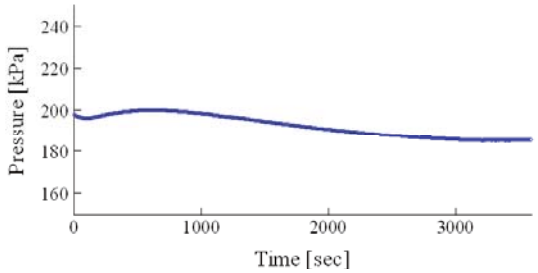
(d) カソードガス流量



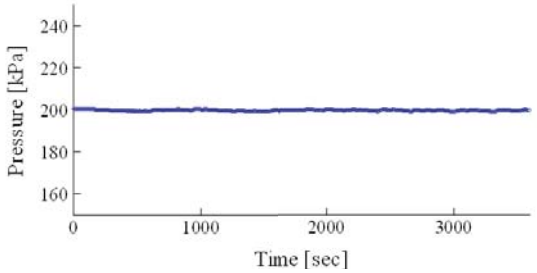
(b) アノード側システム各部の温度



(e) カソード側システム各部の温度



(c) アノード側の排圧



(f) カソード側の排圧

Fig.3.3 発電中の各パラメータ（ガス流量、温度、排圧値）

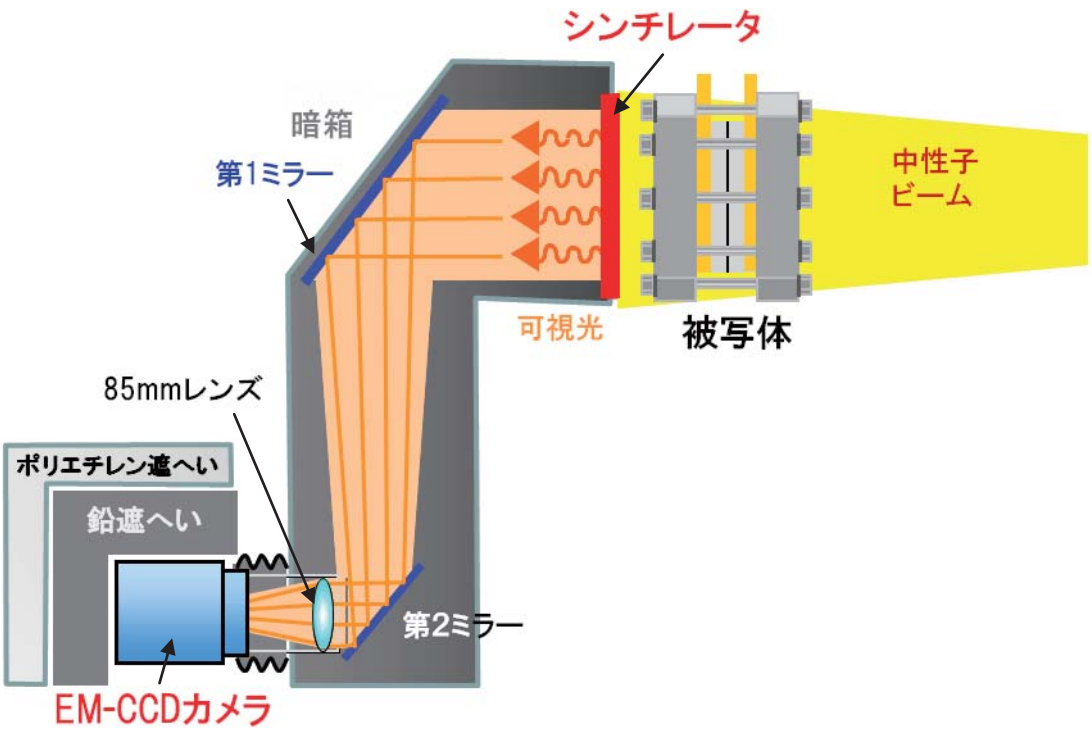


Fig.4.1 撮像システムの模式図

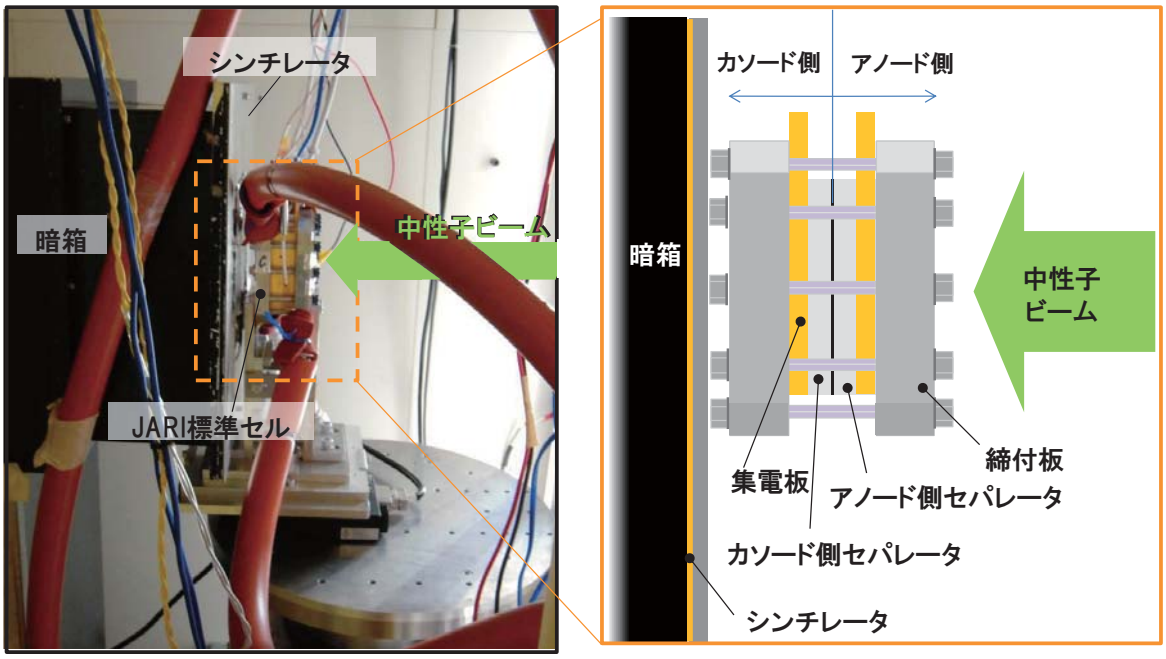


Fig. 4.2 試料配置

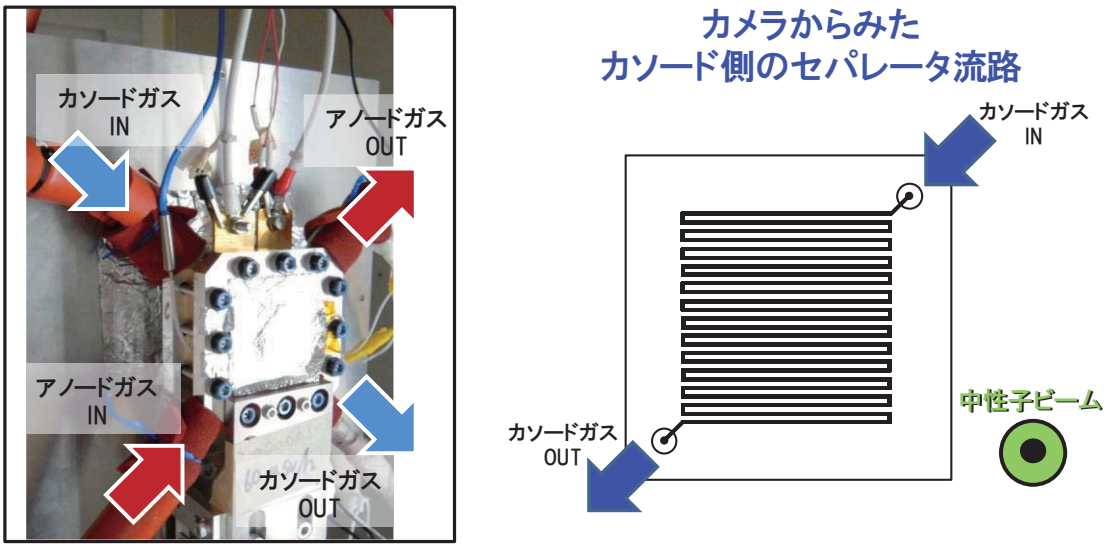


Fig.4.3 JARI 標準セルのガス供給方向

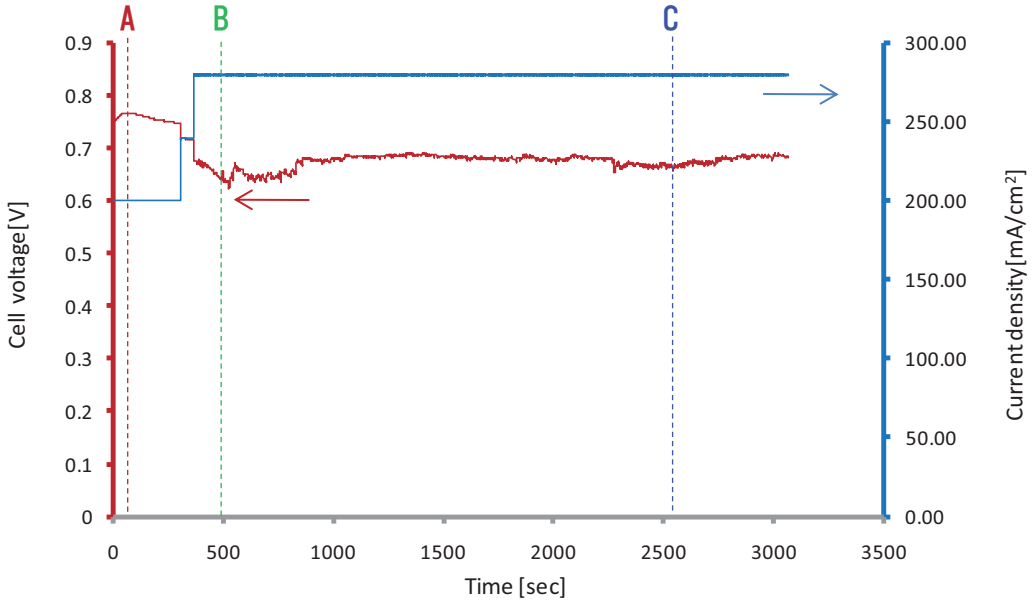


Fig.4.4 実験で得られた JARI 標準セルの発電データ

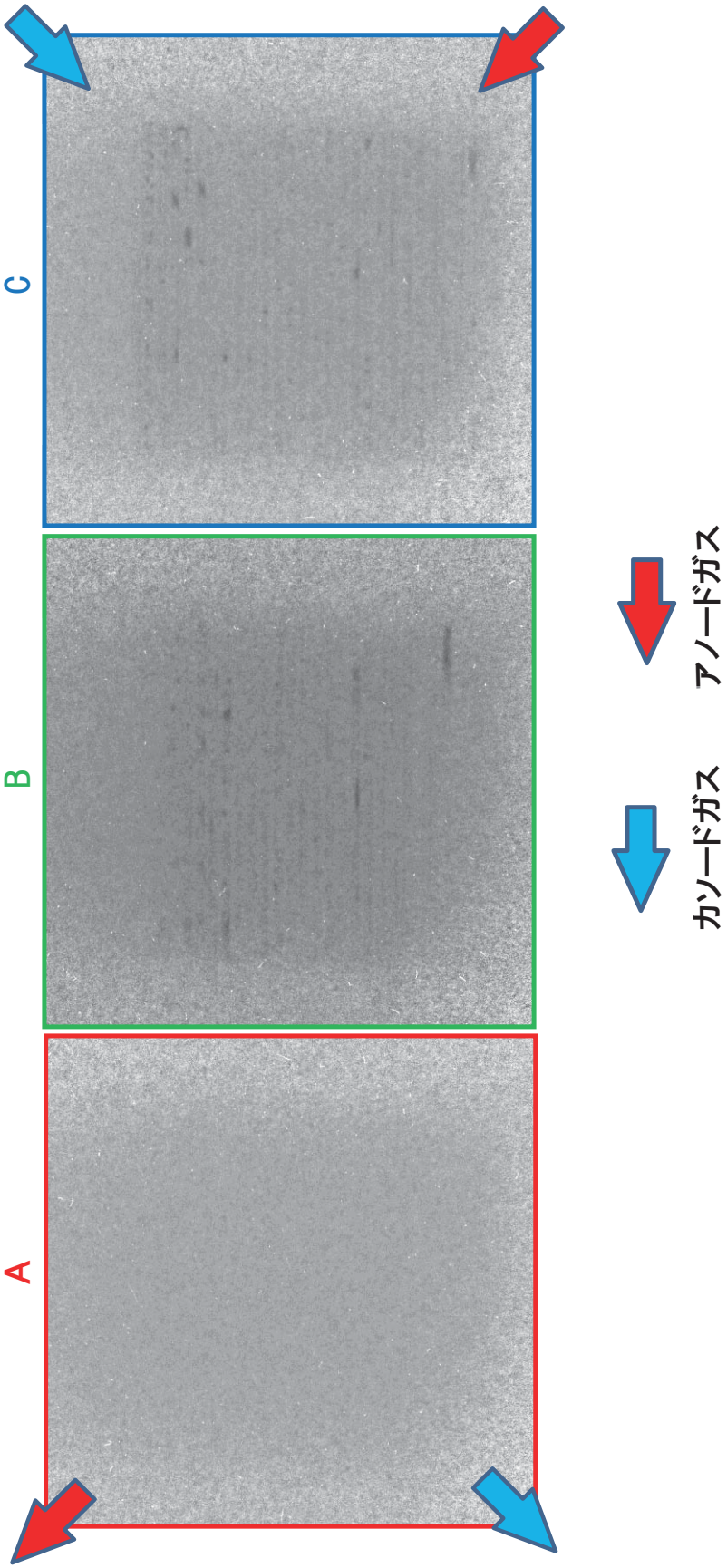
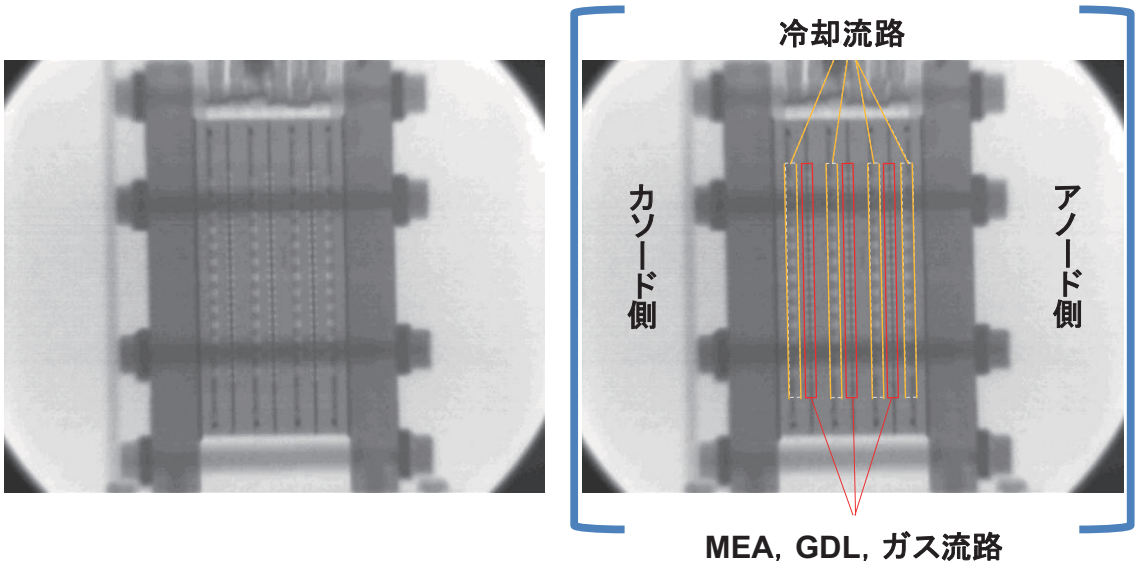


Fig.4.5 発電中の燃料電池セル内の水分布画像



(左)中性子透過画像　(右)左図における MEA,GDL,ガス流路,冷却流路の位置

Fig.4.6 発電前における JARI 標準セル 3 連スタックの中性子透過画像

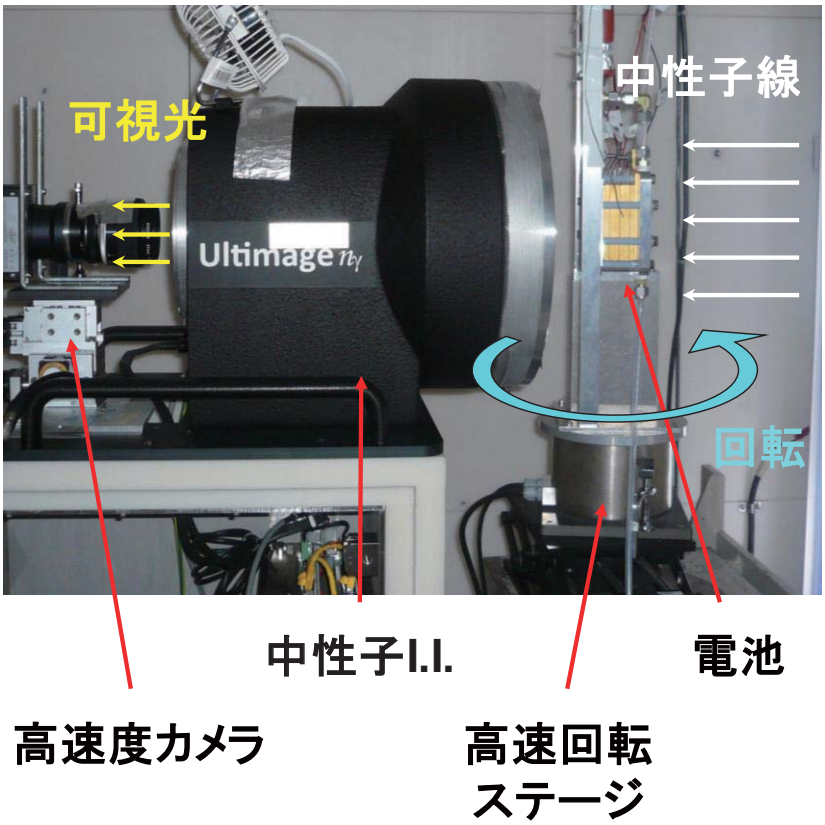


Fig.4.7 JARI 標準セル 3 連スタック内部可視化の実験配置

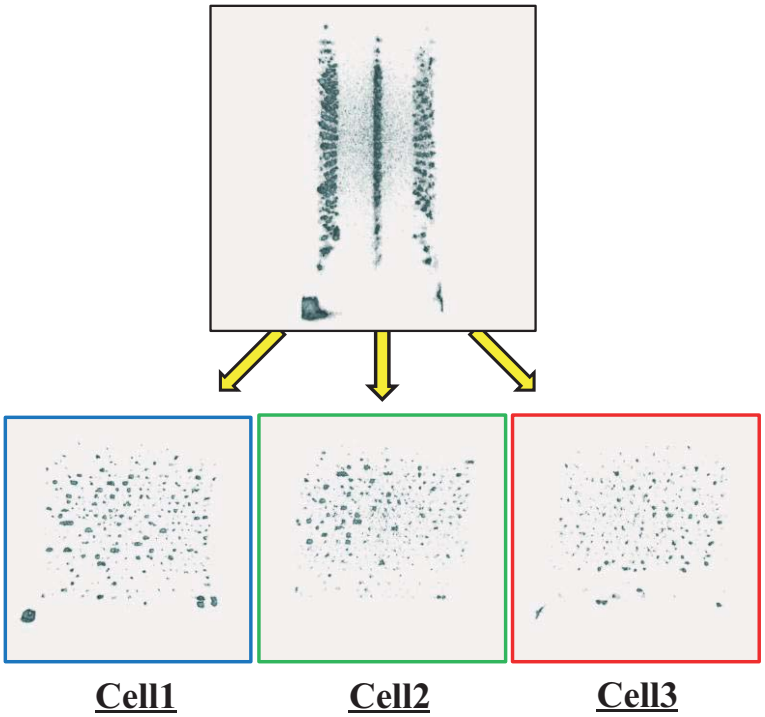


Fig.4.8 電池内部 3 次元水分布画像の例

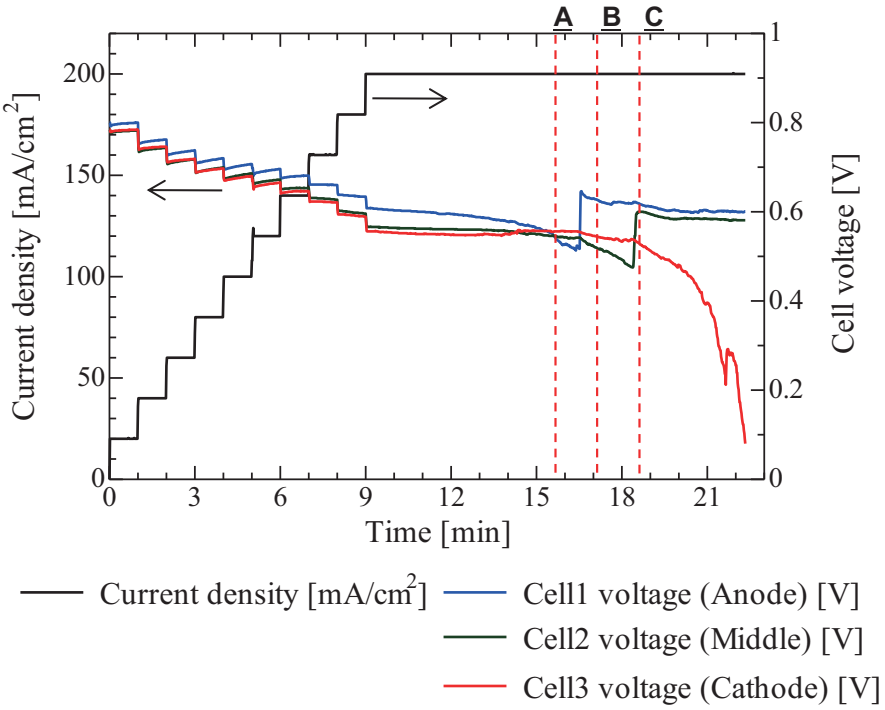


Fig.4.9 JARI 標準セル 3 連スタックの発電データ

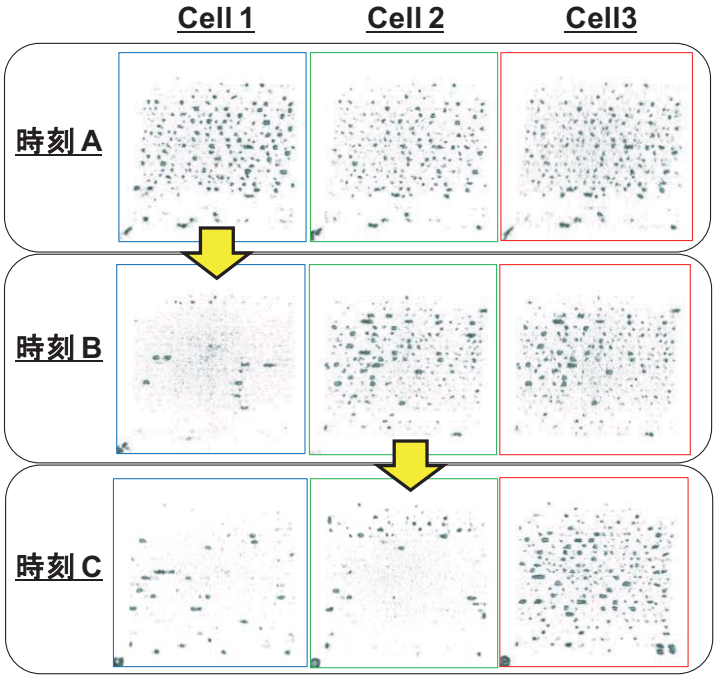


Fig.4.10 発電中の各時刻における JARI 標準セル 3 連スタックの内部可視化画像

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています