

燃料電池プラントに関して、電池本体、改質器などの各コンポーネントはもとよりプラントとしての高性能化、コンパクト化、耐久性、コストダウン、メンテナンス性の向上が図られてきている。一方、優れた特性を備えて使いやすい燃料電池プラントを提供するためには、ハードウェアの改善・改良とともにソフトウェアの開発が重要である。当社では、プラント構成機器の特性を総合的に結び付けるシステム技術、および発生電力を需要側に供給する電力変換装置システムに注力するとともに、それらの技術を具体的な設計に適用する際に方向づけを定める設計支援技術、およびプラント運転状態の解析・診断を支援する技術の向上に努めている。

In the field of fuel cell power plants, remarkable improvements have been made in the fuel cell itself as well as the reformer and other components in terms of performance, size, durability, cost, and maintainability. However, in addition to these areas it is important to establish a system that operates all of these components in a balanced condition and supplies generated power that sufficiently responds to demand. System technologies play a major role in planning, design, adjustment and evaluation of the power plant and control system. Moreover, power conditioning system technologies such as the inverter are also a key to connecting the fuel cell power plant to the load.

1 まえがき

燃料電池プラントは、改質器によって都市ガスなどの原燃料から生成した水素と、大気中の酸素を燃料電池本体に供給し、電気化学反応によって直流電力を発生させ、需要に応じた形態に変換して送り出すシステムである。原理自体は簡単であるが、発電プラントとしての機能を発揮するうえでは空気、ガス、水、蒸気、電気、化学物質という異なる作動体に対して、温度、圧力、流量、組成、電圧、電流などのさまざまなパラメータをシステム的に調整する仕組みが必要となる。

燃料電池本体、改質器などのプラント構成要素は、性能、コンパクト性、耐久性、コスト、メンテナンス性などの面で格段の進歩を遂げている。一方、システムとしてこれら構成機器の特性を総合的に結び付け、応答性の良い安定した運転を実現するためのシステム技術、および発生した電力を負荷側へ供給する電力変換技術は、高性能で信頼性の高い燃料電池プラントの実現にとって重要である。

ここでは、制御系の開発およびシステムの評価診断を支援する技術と、電力変換技術について紹介する。

2 燃料電池プラントの構成

当社では燃料電池プラントに関して3種の標準機種を備えている。効率を重視して加圧したガスを作動させる分散電源用11 MWプラント、常圧作動のオンサイト用1,000 kW

プラント、および200 kWプラントである。

ここでは、一例として200 kWオンサイト機を取り上げ、そのシステムフローを図1に示す。200 kW機は当社がPC25_MC型という商用機種をもって販売活動を開始したものであり、標準仕様機では60°Cの温水を供給する。図1は60°Cの温水に加えて160~170°Cの蒸気をも供給するオプション例になっている。燃料電池プラントは、内部の熱エネルギーを有効に利用して、高い総合効率を達成するために、いくつかの閉ループ系から構成されること、また空気、燃料、水、蒸気とさまざまな形態のエネルギー媒体がプラント内に存在する点がシステム構成上の特徴である。

燃料電池プラントを構成するサブシステムとその主な機能は次のとおりである。

- (1) 燃料処理系 天然ガスなどの原燃料ガスを改質器やCO変成器などの反応装置によって水素リッチガスに変え、電池本体に供給する。
- (2) 空気供給系 空気ブロワまたは空気圧縮機を用いて、電池本体に空気を供給する。
- (3) 電池本体系 燃料処理系からの水素と、空気供給系からの酸素との電気化学反応で直流電力を発生する。
- (4) 電池冷却水系 燃料電池本体の作動温度を適切に維持するために、電池本体には冷却水を供給している。加熱された冷却水は汽水分離器で蒸気分が分離され、その一部が、改質反応用蒸気として利用される。
- (5) 電力変換系 燃料電池本体で発生した直流電力を所要電圧の直流または交流に変換し、外部に供給する。

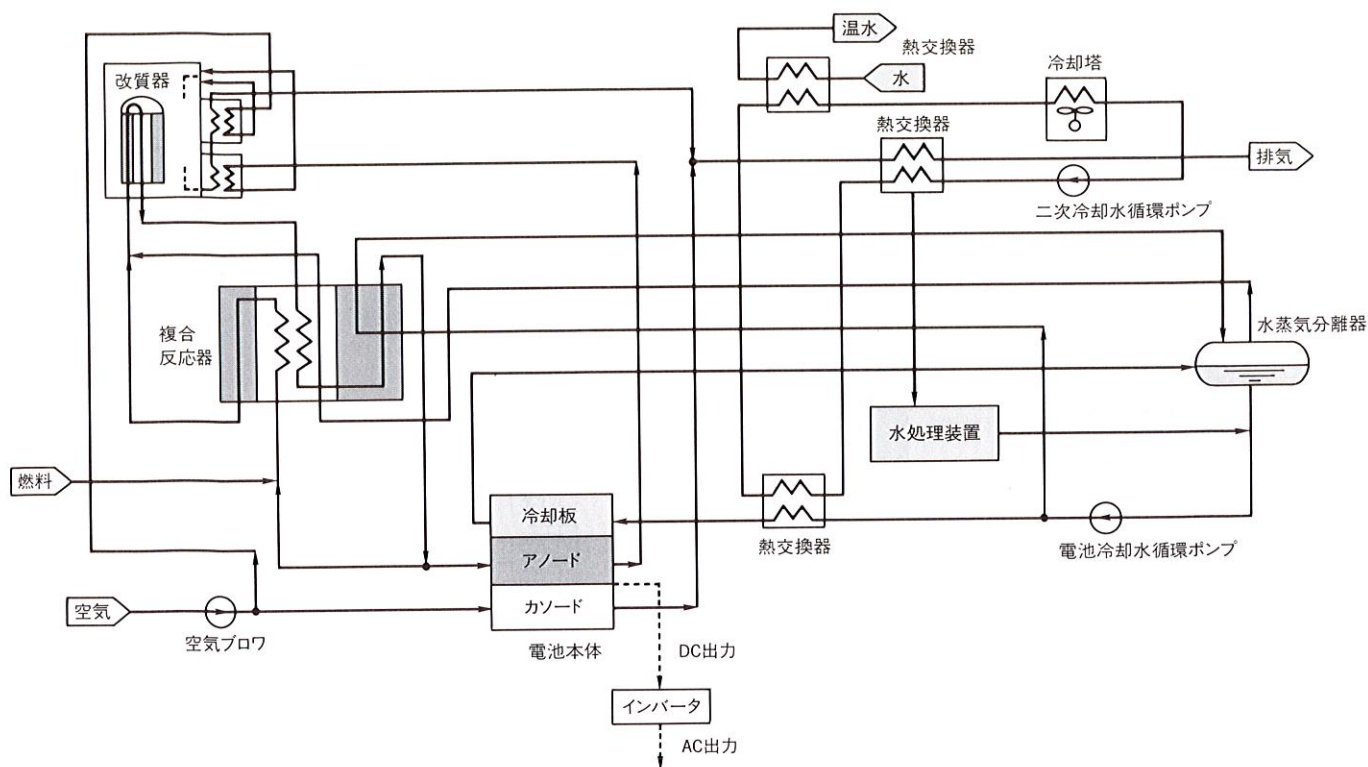


図1. 200 kW オンサイト用燃料電池プラントのシステムフロー
System flow diagram of on-site type fuel cell power plant

(6) プラント制御系 燃料電池プラントの起動から停止までの一連の運転制御および保護監視を行う。

3 燃料電池制御技術

燃料電池プラントでは、直流電力を発生させるまでの一連のプロセスをつかさどるプラント制御技術と、発生した直流電力を需要に応じて送り出す電力変換技術とが重要である。プラント制御装置は各系統の熱・物質バランスを取りつつ発電量の速やかな追従制御を行う。変換装置は直流・交流あるいは単独負荷・連系負荷などへ電力を供給する。燃料電池プラントに固有の制御内容は次のとおりである。

- (1) 化学反応プロセスに適した温度までの昇温・降温制御。
- (2) 燃料改質系、空気供給系、電池本体系、電池冷却水系など、互いに影響しあう系どうしの協調をとる。
- (3) 変換装置の起動時や負荷変動時に、電池への空気・燃料の供給量を速やかに追従させ電池電圧の変動を抑えて、電池と変換器との協調をとる。
- (4) 発生したエネルギーを電気と熱(温水、蒸気)の形で取り出し、外部へ供給する。

負荷運転中は電池出力電流によるフィードフォワード制御により、弁などの操作端を計画位置に制御し迅速な応答がなされる。同時に、各プロセス機器の温度、流量などの

実際のプロセス量のフィードバックを設定値と比較して操作端位置の修正を加えるというフィードバック制御も行われ、システムのバランスと安定が保たれる。制御系の概要を図2に示す。

図の中で、“スケジュール”と表示されている機能は広い運転範囲をカバーするためのものであり、例えば発電出力に応じて温度の設定値を自動変更するものである。制御部分の制御ゲインなどのパラメータも運転状態で自動変更される。プラント制御部は数分オーダーで変化する遅いプロセス量(例えば温度)を扱い、変換装置制御部ではミリ秒オーダーで変化する電流量を扱っている。各系統間には相互のインタロックにより動作タイミングと保護の協調を図るとともに、システム全体としてフェールセーフとなるよう配慮されている。

4 電力変換装置

電力変換装置は燃料電池で発電した直流電力を交流に変換し需要家内の単独負荷、または系統連系負荷に電力を供給する。電力変換装置は直流を交流に変換するインバータ部と、これを制御する制御部からなるが、燃料電池の発電特性および電力系統側の条件に応じた運転が必要とされる。

4.1 燃料電池プラント用変換装置の特長

燃料電池プラント用変換装置としては、次に示す燃料電

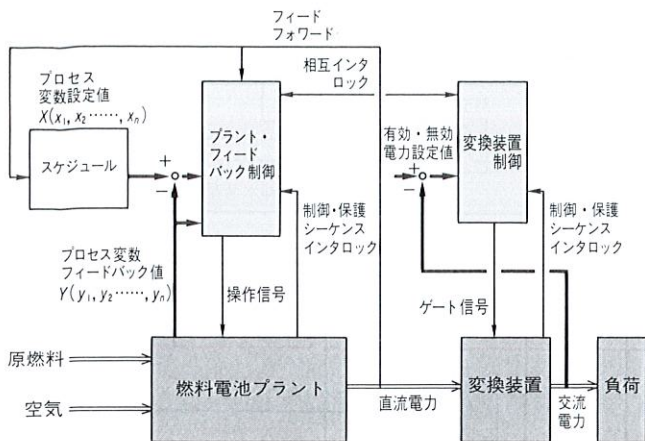


図2. 燃料電池プラントの制御系 電池電流をフィードフォワードとし各プロセスの設計動作点フィードバック制御により速応性とバランスを取っている。

Control system of fuel cell power plant

池、電力系統との間の条件、発電プラントとしての条件を満たすようにしている。

- (1) 電池側の条件
 - (a) 電池の電流-電圧特性を踏まえた安定出力の確保
 - (b) 電池電圧の経時変化を考慮した安定出力の確保
 - (c) 電池の負荷急変抑制
 - (d) 電池出力の高電流化に対応
- (2) 電力系統側の条件
 - (a) 高調波抑制と、系統変動への耐力
- (3) 発電プラントとしての条件
 - (a) 高効率化とコンパクト化

4.2 主回路構成

燃料電池プラントは、中小容量のオンサイト用から大容量の分散電源用までの機種があるが、インバータ部は、自己消弧形デバイスを使用した自励式の電圧形インバータを直列多重化して構成している。当社が納入したプラントの代表例の主回路構成を図3に示す。

- (1) 分散電源用 11 MW プラントは世界最大容量の燃料電池プラントであり、インバータには GTO (Gate Turn Off thyristor) を用いており、出力トランスによる 3 段多重構成で、6 kV 系統に接続されている。
 - (2) オンサイト用 1 MW プラントは都市部の比較的大規模なビル用電源であり、インバータに IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を使用し、出力トランスによる 4 段多重構成で、同じく 6 kV 系統に接続されている。
 - (3) オンサイト用 200 kW プラントはホテル、病院、オフィスビルなどに設置する電源として、インバータには IGBT を使用し、3 相インバータ 1 台による構成で、系統は 400 V、あるいは 200 V である。
- 最近、表 1 に示すように燃料電池二次冷却水を利用し

	(a) 11MW	(b) 1MW	(c) 200kW
系統電圧、周波数	6.9kV-3相-50Hz	6.6kV-3相-50Hz	210V-3相-60Hz
使用デバイス	GTO	IGBT	IGBT
主回路構成	3相PWMインバータ×2並列×3多重	3相PWMインバータ×1並列×4多重	3相PWMインバータ×1
制御方式	連系運転 自立運転	電力制御 電圧一定制御	電力制御 電圧一定制御

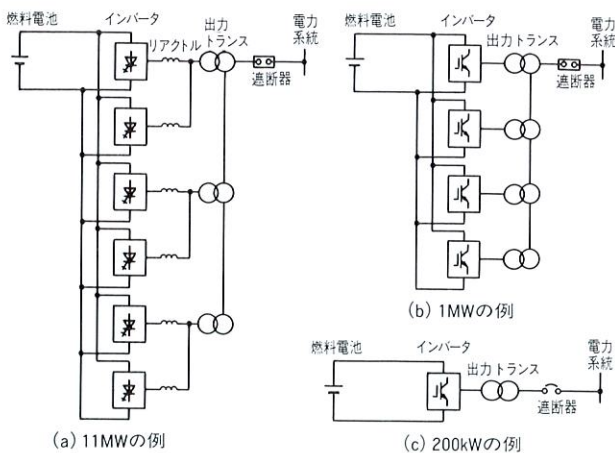


図3. 燃料電池プラント用変換装置の代表的な主回路構成 11 MW, 1 MW, 200 kW プラントなど素子の発展と用途により構成が異なる。 Typical main circuit of inverter for fuel cell power plant

表1. 200 kW オンサイト用インバータ Inverter for 200 kW on-site fuel cell power plant

	PC25 _{TM} A	東芝製1994~1995年製作	東芝製1995年製作
電池電圧	165 V~250 V	195 V~265 V	165 V~224 V
使用デバイス	GTR(1,200 V-400 A)	IGBT(1,200 V-500 A)	IGBT(600 V-800 A)
主回路構成	昇圧チョップ+3相PWMインバータ×2並列	単相PWMインバータ×3	3相PWMインバータ×1
冷却方式	風冷	風冷	水冷
効率	94%	93.5%	94%
体積比	100%	98%	44%

た水冷、電池電圧変動に対するインバータ出力電圧の最適化、大容量の IGBT デバイスの適用などインバータ最適設計・高密度実装により、大幅な小型化を図っている。

4.3 制御方式

燃料電池プラントの変換装置は、商用電力系統に連系した負荷に電力を供給する連系運転と、商用電力系統とは独立した負荷に電力を供給する自立運転を行う機能がある。図4に変換装置の制御構成を示す。

連系運転では電力指令に基づき有効電力と無効電力制御を行い、また自立運転の場合は電力制御ではなく電圧制御により、非常用電源や独立電源として一定電圧で負荷に電力を供給する。高調波に対しては、PWM (Pulse Width Modulation) 制御および多重化技術により発生高調波を抑制している。系統負荷変動に対しては、電流制御マイナーループを設けることにより追従性の向上を図っている。

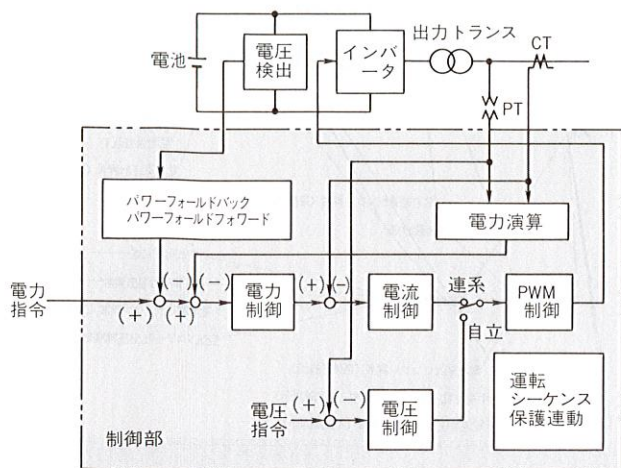


図4. 変換装置の制御構成例 単独運転のときは電圧制御，系統連系運転のときは有効電力と無効電力制御をしている。

Control block diagram of inverter

5 システム解析技術

5.1 プラント動特性解析技術

5.1.1 動特性解析の意義 当社は、制御技術開発を支援するための動特性モデルの開発とシミュレーション解析技術の構築に注力してきた。プラント動特性解析の意義を以下に挙げる。

(1) 新規プラントの制御アルゴリズム開発 燃料電池プラントを新たに開発する場合に、起動から停止に至る制御アルゴリズムを開発する必要がある。制御アル

ゴリズムやパラメータの妥当性を検証していくうえで、予測シミュレーション解析が重要な役割を果たす。

(2) 故障モード解析による保護機能の評価 プラント内でなんらかの故障が発生した場合に、機器に損傷を与えず安全に停止できることを設計過程で模擬解析する。これによって、信頼性の高い燃料電池プラントの制御と保護方式が計画できる。

(3) プラント故障時の原因究明のための支援機能 プラントになんらかの異常が発生した場合、想定される故障原因に関するシミュレーションを行い、その想定妥当性を評価することによって、プラント異常の原因を、より早く見極めることが可能である。

(4) 新しい制御方式の開発 シミュレーション技術によって多変数制御など新しい制御方式を開発し、その有効性を評価することが可能である。

5.1.2 解析モデルの機能と構成上の特長

当社がもつ燃料電池特性解析モデルは、燃料電池プラントの全系を対象とする。使用言語は、プログラムの記述および変更の容易性を考慮し、常微分モデル記述用言語を使用し、電池本体や改質器などプラントを構成する要素をモジュールモデルとして構成している。したがって、メインルーチンは、これらモジュールを結合することで、比較的容易に作成することが可能である。

5.1.3 解析の環境

起動から停止に至る一連のシミュレーション解析では、対象とする時間領域や着目する状態量が多岐にわたっている。したがって、解析の対象範囲や解析の時間領域などの目的に応じて数種のメインルーチン

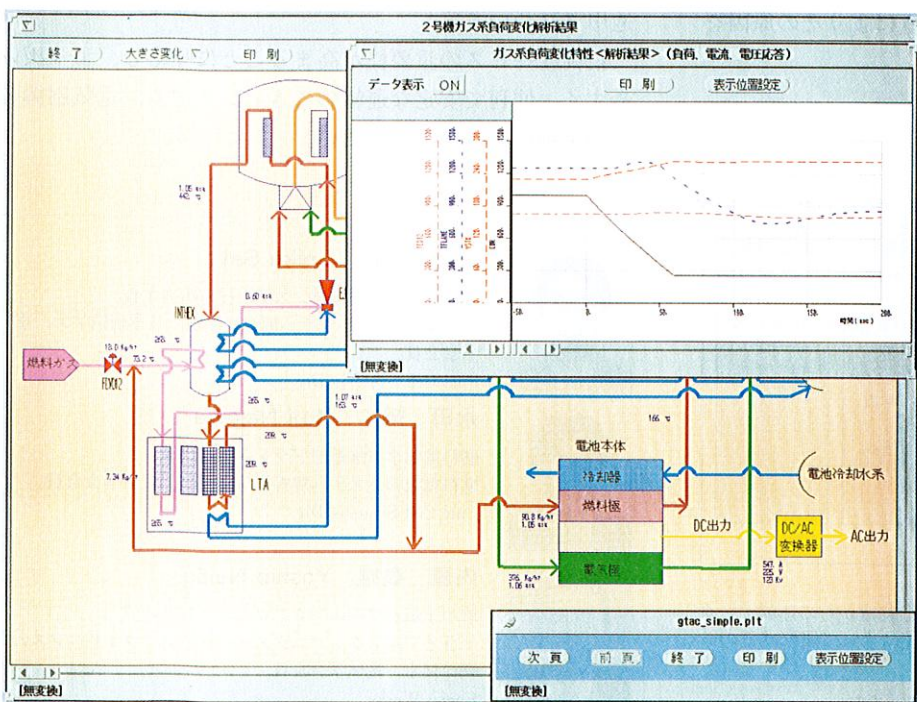


図5. 解析支援システムの表示出力の一例 解析結果は、系統図上と時系列グラフの両方で表示され、可視化に大きな効果を発揮している。

Example of simulation output of computer-aided analysis system

をあらかじめ準備し、これによって機能的な解析環境を実現している。また、当社が開発した燃料電池特性解析支援システムは、解析モデルの開発や解析結果の評価に GUI (Graphical User Interface) 機能を有効に活用したツールであり、解析環境分散化のシミュレーション解析の可視化に大きな効果を発揮している。

図 5 に解析支援システムによるシミュレーション結果の表示例を示す。

5.2 予防保全に威力を発揮するシステム解析技術

燃料電池プラントは化学プロセスを備えているため、経時的要素および非線形的要素が含まれる。燃料電池プラントに対して、十分な予防保全とそれによる高い信頼性の維持が重要である。当社は遠隔地にある多数の燃料電池プラントから伝送装置経由でデータを収集し、監視と診断が行える機能をもった支援システムの開発に取り組んでいる。

このシステムは図 6 に示すように、以下の基本機能部分から構成される。

- (1) データ収集と編集機能 リモートデータ収集装置 (RADAR) により、遠隔設置した燃料電池プラントの運転データを収集する。診断支援システムでは、収集したデータの平均化演算操作などの編集処理を行う。
- (2) データ表示監視機能 編集したデータを基に、時系列図あるいは分布図などのグラフ表示、系統図上への状態量表示などを行う。この際に、非計測点データの推定解析なども行い、多くの情報提供を行うことにより、プラント異常兆候の発見のための支援を行う。
- (3) 知的診断機能 プラントデータに対してプロセスモデルを参照して異常兆候の有無を診断する。異常が検知された場合には、さらに AI (Artificial Intelligence) 手法を用いた知的診断アルゴリズムによりその原因を

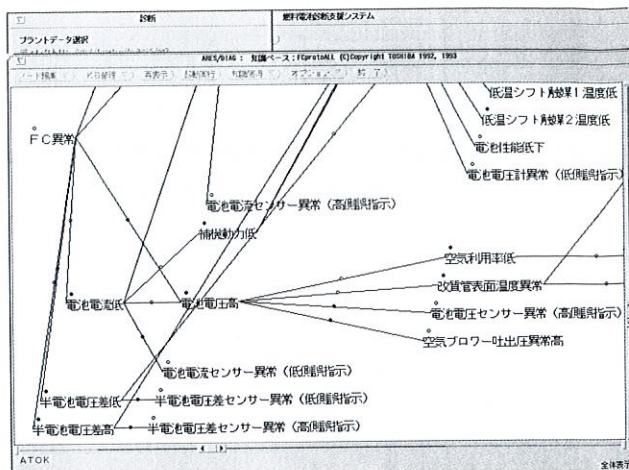


図 7. 診断支援システムの画面出力の一例 知的診断ツールを用いて診断知識を記述した表示例。ツリー構造の知識記述によって運転の異常をいち早くとらえられる。

Example of output of computer-aided diagnosis system

推定する。予防保全のための診断知識の表示例を図 7 に示す。

このような高度診断支援システムの開発が、将来の燃料電池プラントの遠隔監視および診断機能の向上につながっていくものと確信している。

6 あとがき

燃料電池プラントは商用化の時期を迎え、多数の一般ユーザーに広まっている。さらに、従来の省エネルギー発電の域を越え、災害時の非常用電源、無停電電源代替などへも適用されつつある。

技術サービスの重要性が高まることに呼応し、より扱いやすく、便利で安定な運転のできるシステム、電気制御装置の実現に向けて努力したい。

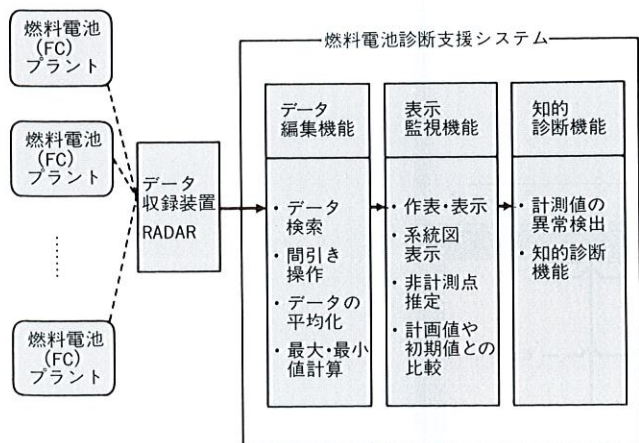


図 6. 診断支援システムの構成 データ収録装置からの運転データを基に編集、表示監視、知的診断の三つの機能によって運転状態の診断を支援する。

Configuration of computer-aided diagnosis system



佐藤 征行 Seiko Sato

燃料電池事業推進部システム技術担当主査。
燃料電池の制御システム開発に従事。日本機械学会、電気学会会員。
Fuel Cell Systems Div.



永田 裕二 Yuji Nagata

燃料電池事業推進部プラント担当課長。
燃料電池のシステム解析業務に従事。電気学会会員。
Fuel Cell Systems Div.



内藤 義雄 Yoshio Naito

府中工場パワーエレクトロニクス部主査。
ドライブエレクトロニクス・パワーエレクトロニクスの開発に従事。電気学会会員。
Fuchu Works