

フルスタック用燃料電池評価装置の開発

田中 宏一^{*1} 松井 邦雄^{*2}
Tanaka Koichi Matsui Kunio

自動車搭載用燃料電池の評価装置は、①電池内部での化学反应用ガスの供給、②電池からの排出ガスの大気放出、③発電中の電池冷却のための循環水供給、といった機能を有しており、燃料電池の出力容量（最大サイズは“フルスタック”と呼ばれ、出力 100kW 超程度）に合わせた装置を揃えている。この装置では、ガスの流量、露点、温度、圧力といった制御を行うとともに、循環水の流量、温度、圧力の制御を行っている。その制御特性は、試験途中での安定性や再現性ととも、条件変更における速応性という両面を持つ。これらの制御を実現している装置の特長を紹介する。

キーワード：燃料電池、フルスタック、評価装置

1. 緒言

自動車メーカ各社では低炭素社会の実現に寄与する燃料電池自動車の開発が進んでおり、2014 年 12 月 15 日には、トヨタ自動車株式会社が世界で初めて燃料電池自動車「MIRAI」を発売した⁽¹⁾。これに引き続き、各社からも燃料電池自動車が販売される模様である⁽²⁾。

当社では、これらの自動車に搭載されるような燃料電池の開発に対し、評価装置を提供してきている⁽³⁾。この装置では、燃料電池へ供給する水素ガスおよび空気に対して、流量、温度、湿度（露点）、圧力を制御している。また、燃料電池が発電している最中の発生熱を回収・排熱するための冷却水を循環供給している。さらに、この反応によってできる水分を回収するための仕組みを持っている。

当社では、従来から、配管設計を軸とした流体の流量、温度、圧力を制御する装置を開発してき

ており、燃料電池評価装置もその一つである。また、この装置が対象としている燃料電池は 100kW 超程度の自動車搭載型から数百 W 程度の単セルタイプと複数種類あり、その出力に応じて、装置の専用設計を行ってきている。

本稿ではフルスタック用燃料電池評価装置の特長とその技術を中心に紹介する。

2. フルスタック用燃料電池評価装置とその役割

2.1 燃料電池の区分

燃料電池はその種類により、固体高分子形 (PEFC)、熔融炭酸塩形 (MCFC)、りん酸形 (PAFC)、固体酸化物形 (SOFC) 等がある。その中で、PEFC は運転温度が 80 ~ 100℃ と他の形式と比較し低温型であり、燃料電池自動車への搭載型として、自動車メーカで開発が進められている。

2.2 燃料電池評価装置が持つ機能

本装置は燃料電池の評価試験において、燃料ガ

*1：ジャプス事業部 技術部 次長

*2：ジャプス事業部 事業部長

スや冷却水の供給を行うといった試験条件を提供する装置である。その機能は、水素ガスおよび空気を、アノード極、カソード極に対して、それぞれ独立して供給することである。これらのガスは流量制御された後、加湿により露点制御され、さらに、加熱により温度制御され、前述の各極へ供給される。また、燃料電池から出たガスが制御弁を通過することにより、圧力制御を行っている。この排出ガスから電池内部での反応により発生した水分を取り除き（気液分離）、最終的には大気へと放出している。

一方で、燃料電池が発電運転すると熱が発生する。この熱を取り去り、運転温度条件を調整するために、冷却水を供給している。この冷却水につ

いては、ヒータや工業用水にて温度制御し、さらに、ポンプ吐出流量や制御弁にて圧力および流量を制御した後、燃料電池へ供給している。また、この冷却水は循環方式としており、燃料電池から出たこの水は、再度ポンプへ送られる。

図1には燃料電池に流入／流出するガスや水の各系統と、本装置が持つ制御機能との関連を示す。

上述の機能を持つ評価装置は、供試品となる燃料電池の出力容量に合わせて装置仕様を設定している。例えば、フルスタックと呼ばれる100kW超程度の自動車搭載型の燃料電池や、ハーフスタックと呼ばれるその半分程度の出力容量のもの、また、数kW程度の燃料電池まで対応可能である。

表1にはこれらの装置仕様を代表例として示す⁽⁴⁾。

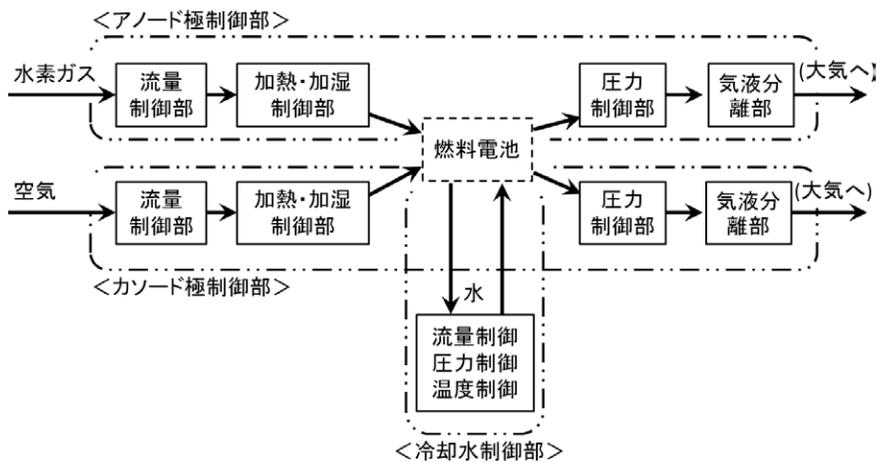


図1 本装置が持つ制御機能と燃料電池との関連

表1 装置仕様（代表例）

項目	単位	単セル	モジュール (低出力)	モジュール (中出力)	モジュール (高出力) 定常試験用	フルスタック
水素ガス流量	L/min(normal)	0.16~15	0.1~60	0.2~120	2~220	20~3800
空気流量	L/min(normal)	0.39~40	0.2~150	0.4~300	5~600	50~9500
ガス温度	°C	40~120	40~120	40~120	40~90	40~120
ガス湿度(露点)	°C	40~85	40~75	40~75	40~90	40~70
ガス背圧	kPa(G)	10~200	30~300	30~300	30~200	40~300
冷却水温度	°C	30~110	40~120	40~120	40~90	40~120
冷却水流量	L/min	0.1~2	0.5~20	0.5~30	1~20	20~250

注：normal とは 0.0°C、101.3kPa(abs)とする。

フルスタック向けについては、3章で紹介する特長を持つ装置仕様としている。

また、当社製作実績の装置外観を図2（フルスタック用評価装置）、および図3（モジュール用評価装置）に示す。

表1の各範囲に対する制御特性としては、評価試験途中での安定性や再現性が求められるとともに、条件変更といった際には短時間での変化が求められる。そこで当社では、熱容量、配管径やバルブ容量、さらには装置サイズ等に関する最適化設計を行うとともに、フィードバック制御を軸とした制御システムを構築し、より良い方式へと発展させてきた。

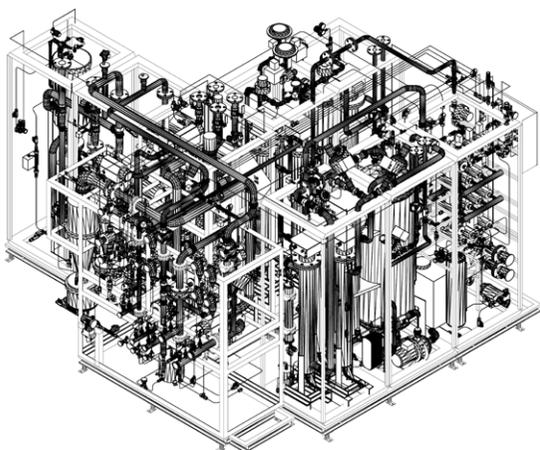


図2 フルスタック用評価装置外観（製作実績例）



図3 モジュール用評価装置外観（代表例）

3. 燃料電池評価装置の特長

前述の通り、本装置は多数の制御項目を持っている。この中でも、特長となる技術について、以下に紹介する。

① ガス流量制御での指令値変化に対する追従特性

燃料電池の試験には、ガス流量のステップ状変化や、制御指令値が一定割合で変化する運転が求められる。前述のようなフルスタックサイズを対象とした装置では、1000L/min(normal)程度の最大流量制御レンジを持つマスフローコントローラ（制御弁、以降MFCと略す）を10台程度備えており、装置出力では190倍となる広い流量範囲をカバーしている。

この制御指令値が一定割合で変化する運転に対しては、複数台のMFCを使い、小流量から大流量までの連続した流量制御を、MFCの切り替え運転とともに、偏差に合わせたフィードバック制御との組み合わせで行っている。これにより、MFC切り替え点での突然の流量の落ち込みといった偏差を小さくし、そして滑らかな流量出力特性を実現している。その代表例を図4に示す。

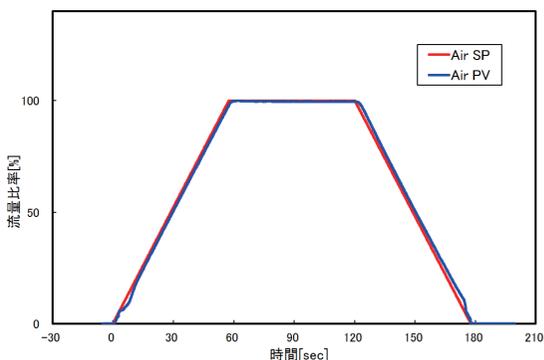


図4 ガス流量制御における応答波形（代表例）

② 露点制御におけるドライ／ウェット混合方式の採用

露点温度が試験条件となることの多い燃料電池試験向けに、表1に示す露点温度40～70℃を主な制御範囲として開発している。この露点制御には、目標値変化の無い定常状態において変動を抑えるといった安定性や、一方では、試験条件の変更といった場面での短時間での応答といった2つの制御特性が必要となる。

このために、本装置では、図5に示す通り、乾燥ガス（ドライ）と加湿ガス（ウェット）という2つの管路を備え、その混合を利用した加湿状態の制御、つまり露点制御を行っている。この加湿ガスは一部の乾燥ガスを温調された水の入った加湿用タンクに通過させることで作り出している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この露点応答に関する代表例を図6に示す。

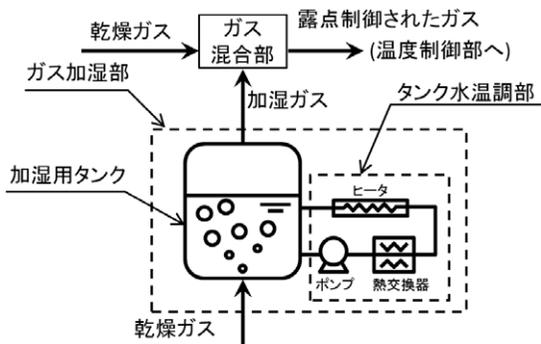


図5 露点制御されたガスを作り出す仕組み

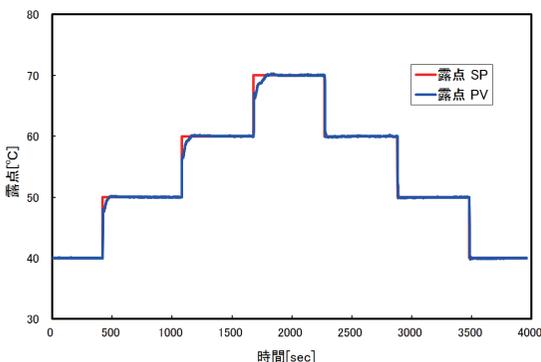


図6 露点制御における応答波形（代表例）

この露点制御は本装置の中でも重要な制御機能である。当社では本評価装置の開発に着手して以来、加湿用タンクや、そのタンク水を温調するためのポンプ、ヒータといった配管システムを設計し、また実績を重ねた制御技術とを融合させるものづくり技術を追及してきた。これが、図6に示すような露点制御での安定性と速応性の両立という技術へとつながっているものと考えている。

③ ガス温度制御における2段加熱

加湿用タンクを出たガスはそのタンク内である程度加熱されるものの、目標温度はそれ以上であることが多く、その後の加熱は欠かせない。一方、同タンク入口での温度を露点付近まで加熱しておくことは、そのタンク内での熱交換容量を小さくすることができ、タンク内部での水の温度維持に有効である。

そこで、流量調整されたガスに対して、加湿用タンク上流にてヒータで加熱（1段目）し、その後加湿用タンク内部で露点付近へと加熱、最後に、もう一度ヒータで加熱（2段目）することで目標温度とし、供試品入口へと供給している。この2段階での加熱の様子を図7に示す。

本装置では、この供試品入口での温度を40～120℃にて制御している。

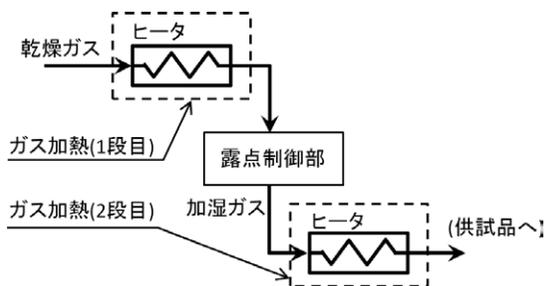


図7 露点制御部前後でのガス温度制御

④ 加湿ガスの露点を安定して燃料電池へ搬送するための配管加熱

本装置では、加湿ガスを供試品まで搬送する過程で、露点温度以下とならないよう、加湿用タンクを出た後、すぐに加熱している（前項の通り）。一方で、装置を構成する金属製配管は放熱性が高い。この影響でガス温度が低下し、ガス中の水蒸気が結露するという懸念への対応として、配管には断熱材の設置とともに、管路を直接加熱している。さらに、配管分岐部といった外気にさらされやすい箇所や継手部については、重点的に温度低下を防止する対策を行っている。

このように、加湿によって露点制御されたガスを、供試品まで結露させずに供給する技術についても、実績の積み重ねによって得られた技術であり、本装置における主軸をなしている。

⑤ 流量倍率が 190 倍となる制御範囲での圧力制御

燃料電池の出口圧力を制御するために、その出口側流路に制御弁を設置している。その制御範囲は大気圧近傍から 300kPa (G) である。また、190 倍となる広い流量範囲が制御条件となっている。この流量範囲に対して目標圧力へと制御するために、装置内に複数の配管系統を持ち、それらを切り替えながら、前述の制御弁を駆動している。こうすることで、単一の制御弁では不可能な広範囲な圧力制御を行っている。

4. 今後の装置仕様の予測

自動車用燃料電池については、乗用車クラスにおいて市販車が登場した。そして、今後の登場が予想される大型自動車向けの燃料電池が、次の本装置での供試品候補になるものと想定しており、この燃料電池は最大出力が大型化するものと予測される。

この場合、現在の装置仕様と比較して、ガス流量の上限値拡大が必須となる。また、それに伴うガス加熱や露点維持のための各種ヒータ容量、熱交換器容量等の増大もあわせて必要となる。

ある程度の装置仕様拡大に対しては、現在の管路システムを発展適用し、それによって前述の加熱や加湿といった運転を行うことができるのではないかと考えている。一方で、安定性や速応性といった制御特性については、機器単位レベルでの大型化により制御性能が低下することも考えられる。その場合には、あらためて管路システムの見直しが必要となってくる。

このように、評価試験条件、つまり装置への要求変化に合わせ、さらに装置開発をすすめ、仕様拡大を図っていこうと考えている。

5. まとめ

当社では、自動車に搭載される燃料電池の開発に対し、評価装置を提供してきている。

本装置は燃料電池の評価試験において、燃料ガスや冷却水の供給といった試験条件を提供するものである。例えば、ガスに関しては、流量・温度・露点・圧力を制御し、冷却水に関しては、流量・温度・圧力を制御し、燃料電池へ供給している。また、燃料電池の出力容量によって、装置仕様を変更し、最適な制御運転を行えるように配管設計や機器選定を行っている。これらにより、試験条件の安定性や再現性ととも、条件変更時の速応性にも対応できる装置へと発展させてきている。

さらに、今後の燃料電池出力の大型化による本装置仕様の拡大を想定し、引き続き、装置開発を進めていく。

参考文献

- (1) <http://toyota.jp/mirai/>
- (2) <http://www.honda.co.jp/FCX/>
- (3) 松井邦雄、佐浦毅、泉哲男、稲吉宏光：ジャプス事業部の紹介、IIC REVIEW、No.44、2010/10、pp.3-10
- (4) <http://www.iic-hq.co.jp/services/N/index.html>
- (5) 泉哲男：燃料電池評価装置～水素ガスへの加湿制御～、IIC REVIEW、No.46、2011/10、pp.64-67
- (6) 燃料電池自動車の普及を支える、IHI 技報、Vol.51、No.2、2011、pp.14-15



ジャプス事業部
技術部
次長
田中 宏一
TEL. 0565-86-1501
FAX. 0565-86-1502



ジャプス事業部
事業部長
松井 邦雄
TEL. 0565-86-1501
FAX. 0565-86-1502