

## ■ 研究論文 ■

## リン酸型燃料電池冷却水システムの動特性に関する検討

## Dynamic Characteristics of Phosphoric Acid Fuel Cell Stack Cooling System

三木 啓史\*・清水 顯\*\*

Hirofumi Miki Akira Shimizu

(1995年4月26日原稿受理)

## Abstract

The technical development for phosphoric acid fuel cells has advanced in the relatively small capacity ranging from kW to MW classes, and also the realization of the commercial plants is imminent. Every several cells are cooled to keep a certain temperature range by installing a cooler. From the reason for reducing the power for auxiliary machines, for utilizing recovered heat for processes, and for obtaining the uniform temperature distribution in cells, a boiling water cooling method has been generally adopted. In this paper, the results of the numerical simulation of dynamic characteristics of cell cooling water system in a phosphoric acid fuel cell, that Shikoku Electric Power Co. Inc., introduced to verify the validity of the model, and the results of applying a fuzzy control to the flow rate for cell water cooling system are reported.

## 1. はじめに

燃料電池は「高い発電効率と地球に優しい環境特性が期待できるうえに、排熱が有効利用できる」ことから、水力・火力・原子力に次ぐ第4の発電方式として大きな期待が寄せられ、実用化に向けて各方面で鋭意研究開発が進められている。その中でもリン酸型燃料電池(Phosphoric Acid Fuel Cell, 以下「PAFC」と称する)は、kW級からMW級までの比較的小容量の領域で技術開発が進み、商用機の実現も間近にまで至っている。

燃料電池は発熱反応を伴うため、電池セルが一定の温度範囲内で作動するように、電池セル数枚毎に冷却器を設けて冷却している。この冷却によって回収された熱の一部は燃料改質用の蒸気として利用され、残りの熱が外部に取り出されて空調装置等の熱源として有効活用される。

PAFCの冷却方式としては、水冷却方式や空気冷却方式、絶縁性液体冷却方式が考えられるが、補機動力の低減や回収熱の燃料改質プロセスへの利用、及び

電池セル面内の温度分布を均一にする必要性などから、一般には沸騰水冷却方式が採用されている。この方式は、電池スタック内の冷却器に導かれた冷却水(飽和水)が、冷却器を通過する間に電池セル群から熱を奪って気液二相流となることにより電池セル面を均一に冷却するものである。このため、冷却器に通水される冷却水の温度を一定に制御することが望ましい。

本論では、四国電力(株)が実証試験研究のために導入し生き小容量のPAFCをモデルとした電池冷却水系の動特性の数値解析結果と、電池冷却水系の流量制御へのファジィ制御の適用結果について報告する。

## 2. 記号

本論で使用する主な記号や添字の意味は基本的には下記に示す通りで、特殊な用い方をする場合には、その都度説明を加えてある。

P : 圧力 (Pa)                      h : エンタルピー (kJ/kg)

θ : 温度 (K)                        r : 蒸発潜熱 (kJ/kg)

ρ : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)                    C : 熱容量 (kJ/kg · K)

t : 時間 (s)                        X : 乾き度

W : 単位時間当たりの冷却水量 (kg/s)

Q : 単位時間当たりのエネルギー (kJ/s)

M : 単位時間当たりのガス流量 (kmol/s)

\* (株)四国総合研究所 エネルギー研究部副主席研究員

〒760-01 高松市屋島西町2109-8

\*\* 愛媛大学工学部機械工学科教授

〒770 松山市文京町3番

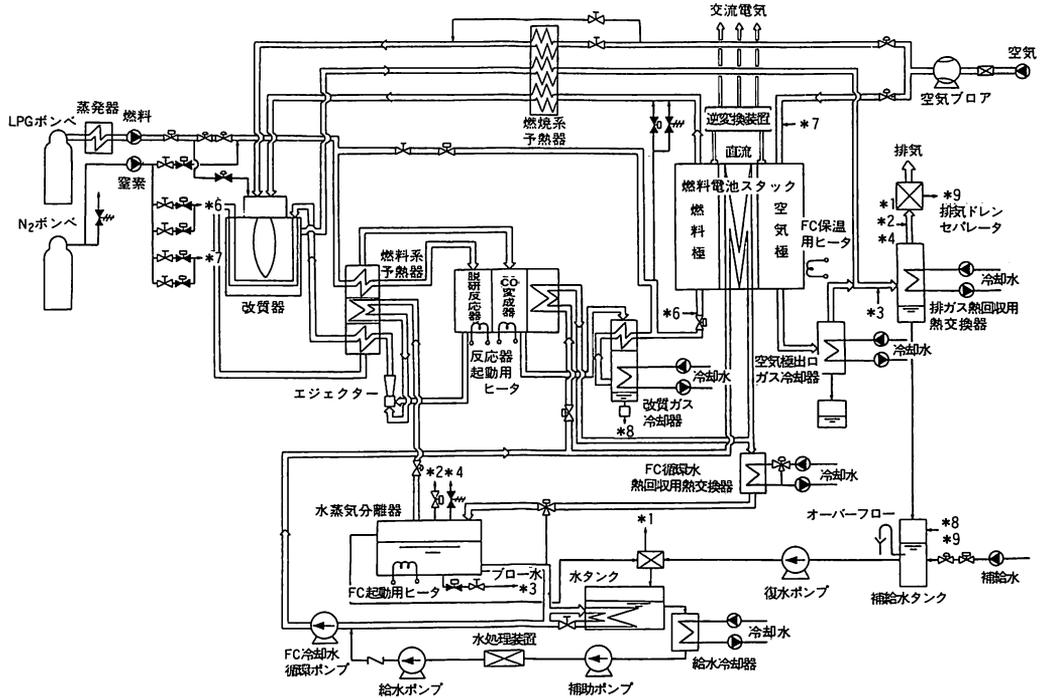


図-1 燃料電池のプロセスフロー

[添字]

- 0 : 電池スタック入口での状態
- 1 : " 出口での状態
- 2 : 熱交換器入口での状態
- 3 : " 出口での状態
- 4 : 水蒸気分離器入口での状態
- w : 熱交換器の伝熱壁
- ' : 飽和水 " : 乾き飽和蒸気 f : 燃料ガス
- a : 空気 L : 外部冷却水

なお、本論では、例えば圧力Pの定常状態からの微小変動量「 $\delta P$ 」を改めて小文字「p」と書き改めることにより、定常値と変動値を区別している。

### 3. 解析システム

解析の対象としたPAFCは液化石油ガス (LPG) を燃料とする送電端出力50kWの常圧タイプで、そのプロセスフローの概略を図-1に示す。当該PAFCでは、電池冷却水系統の電池スタック出口側に設けた熱交換器 (FC循環水熱回収用熱交換器) で電池冷却水 (気液二相流) の乾き度<sup>1)</sup>を調整し、水蒸気分離器の器内圧力を一定に保つことで電池冷却水の飽和温度を一定に制御している。なお、四国電力㈱の実証試験では、電池排熱として熱交換器で回収した85°C程度の温水で

吸収式冷凍機を運転し、隣接する植物工場に冷熱を供給する排熱有効利用システムの検証を行っている<sup>1)</sup>。

### 4. 解析方法

電池冷却水系の動特性の解析については菅原<sup>2)</sup>の報告がある。本論では制御の立場から議論するため、集中定数モデルを用いて冷却水系統を構成している電池スタックと熱交換器、水蒸気分離器のエネルギー収支と物質収支から基礎式を導出し、PAFCの設計値などをもとに基礎式を線形化した。

解析のためのモデル設定に当たり、実際の冷却水系統を忠実に模擬することは困難であるため、基本的には次の仮定を設けた。

- ①集中定数モデルで記述できる。
- ②放熱損失は考慮しない。
- ③電池セル特性の温度依存性や経年変化による特性低下は考慮しない。
- ④電池スタック出入口のガス組成やガス温度、電極反応におけるガス利用率<sup>2)</sup>は変化しない。

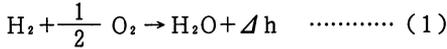
注1) 全質量流量に対する蒸気の質量流量比

注2) セル電極に供給されたガス (酵素や水素) のうち、電極反応で消費されるガスの割合

5. 解析モデルと基礎式

5.1 電池スタック

燃料電池の電極反応は結局のところ、



で表せるように、 $\Delta h$ のエンタルピー変化である。このエンタルピー変化からエントロピー損失を差し引いた量のエネルギーが、電気変換エネルギーとなる。

実際には、電子とイオンの伝導によるジュール熱損失や過電圧による損失などがあり、エントロピー損失も含めて全ての損失は熱に変換される。

図-2に電池スタックの解析モデルを示す。Sを電池スタックの熱容量とすれば、定常状態からの変動に関してエネルギー・バランスから次式が得られる。

$$S \frac{d \Theta_s}{d t} = -h - e - q_w \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- $\Theta_s$  : 電池スタックの温度変動
  - $h$  : 電気化学反応に伴うエンタルピー変化の変動
  - $e$  : 電気変換エネルギーの変動
  - $q_w$  : 電池冷却水の持ち去る熱量 (=発熱量)の変動
- エネルギー・バランスを考える場合、物質収支上の各ストリームのガス組成が異なっているため、単純に各状態でのエンタルピーを比較することができない。そこで、実際の発熱量や吸熱量を求めるためにHess則を適用した。

電池セルは電流の増加に伴って電圧が減少する特性を有している。本論では、運用上の使用電流範囲においてこの関係を線形近似した。さらに、電極反応で消費される水素や酸素の量は、燃料電池の出力電流に比例すると考えた。

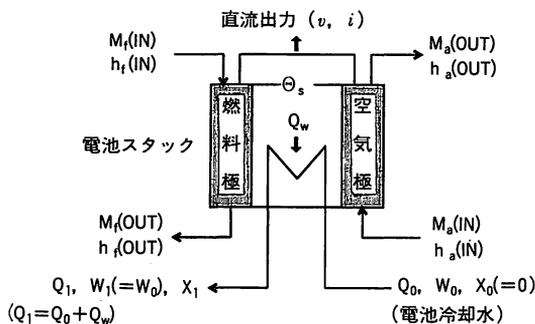


図-2 電池スタックの解析モデル

5.2 熱交換器

電池冷却水は、電池セルで発生した熱により加熱されて気液二相流となる。前述のように、水蒸気分離器の器内圧力を一定に保つため、この二相流を熱交換器で冷却することによりその乾き度を調整している。熱交換器の解析モデルを図-3に示す。

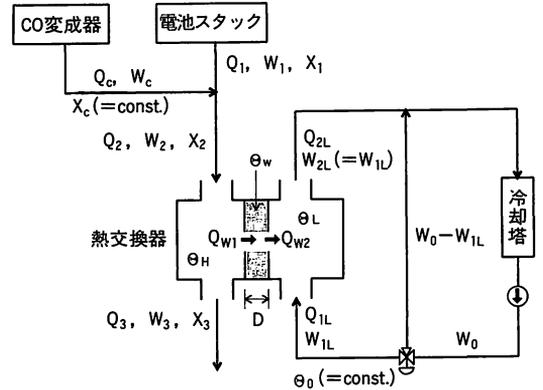


図-3 熱交換器の解析モデル

(1) 一次側 (高温側)

熱交換器チャンバー内は均一に混合されていると仮定し、チャンバー内の温度を熱交換器出口の電池冷却水温度 (=  $\Theta_H$ ) に等しいと考えれば、変動時のエネルギー・バランス式として次式を得る。

$$C_H \rho_H V_H \frac{d \Theta_H}{d t} = q_2 - q_3 - q_{wH} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

- $\Theta_H$  : 一次側チャンバー内温度の変動
- $C_H$  : 一次側チャンバー内冷却水の熱容量
- $\rho_H$  : " 密度
- $V_H$  : 一次側チャンバーの容積
- $q_2$  : 流入する電池冷却水のエネルギー変動
- $q_3$  : 流出 " "
- $q_{wH}$  : 低温側へ伝熱するエネルギー変動

(2) 伝熱部

変動時のエネルギー・バランスから次式を得る。

$$C_w \rho_w D A_w \frac{d \Theta_w}{d t} = q_{wH} - q_{wL} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

- $\Theta_w$  : 伝熱壁の温度の変動
- $C_w$  : " 熱容量
- $\rho_w$  : " 密度
- $D$  : " 厚み

$A_w$  : " 平均面積

$q_{wL}$  : 外部冷却水に持ち去られるエネルギー変動

(3) 二次側 (低温側)

一次側と同様にチャンバー内は均一に混合されていると仮定し、チャンバー内の温度は熱交換器出口の外部冷却水温度 (=  $\theta_L$ ) に等しいと考えて、変動時のエネルギー・バランス式として次式を得る。

$$C_L \rho_L V_L \frac{d\theta_L}{dt} = q_{wL} + q_{1L} - q_{2L} \dots (5)$$

ここに、

$\theta_L$  : 二次側チャンバー内温度の変動

$C_L$  : 二次側チャンバー内外部冷却水の熱容量

$\rho_L$  : " 密度

$V_L$  : 二次側チャンバーの容積

$q_{1L}$  : 流入する外部冷却水のエネルギー変動

$q_{2L}$  : 流出 "

5.3 水蒸気分離器

電池セル群を冷却して気液二相流となった電池冷却水は、水蒸気分離器の器内圧力が一定値になるよう熱交換器で乾き度を調整され水蒸気分離器に戻る。水蒸気分離器で気水分離された蒸気は主として燃料改質用蒸気として消費されるため、次第に器内の液位が低下する。このため、実システムでは給水ポンプのON/OFF制御によって器内のレベル制御が行われている。しかし、液位の変化速度は小さいことから、本解析ではレベル制御は考慮していない。更に、水蒸気分離器の器内圧力の変動分を  $\Delta P$  とした場合、電池スタックの入口/出口では各々  $\Delta P$  と  $\Delta P/2$ 、熱交換器の入口/出口では各々  $\Delta P/2$  と  $\Delta P/4$  変動すると仮定した。図-4に水蒸気分離器の解析モデルを示す。

Dを気相部分のキャパシタンスとすれば、変動時の

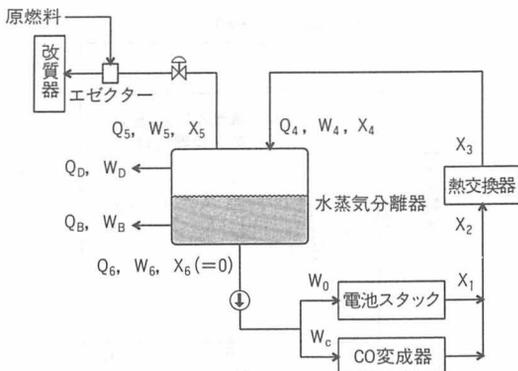


図-4 水蒸気分離器の解析モデル

エネルギー・バランスより次式が得られる。

$$r D \frac{dP}{dt} = q_4 - q_5 - q_6 - q_D - q_B \dots (6)$$

ここに、

$P$  : 水蒸気分離器の器内圧力の変動

$r$  : 器内圧力での蒸発潜熱

$q_4$  : 流入する電池冷却水の有するエネルギー変動

$q_5$  : 流出 "

$q_6$  : 燃料改質用蒸気の有するエネルギー変動

$q_D$  : 脱気用蒸気の有するエネルギー変動

$q_B$  : ブローダウン水の有するエネルギー変動

6. 解析結果

一例として、定格負荷運転時に出力電流が50アンペア減少 (電池直流出力で5kW程度の減少に相当) した場合の、水蒸気分離器の器内圧力と電池スタック温度および乾き度の変動の解析結果を図-5と図-6に示す。本結果は、電池冷却系統のトラブル等により熱交換器二次側の外部冷却水の流量制御が行われなかった場合のもので、実システムではこのような異常状態が発生すれば安全に停止するシステムになっている。なお、冷却水システムが機能して流量制御が行われた場合の結果については後述する。

出力電流の減少によって発電に要する水素量が減少するため燃料改質用の蒸気量も減少し<sup>\*)3)</sup>、放熱損失を考慮しないという仮定と相まって時間経過と共に水蒸気分離器の器内圧力は上昇する。本解析でモデルとしたPAFCはLPGを燃料としており、従来の液化天然ガス (LNG) を燃料とする場合に比べて燃料改質用蒸気の消費量が多い。このため、本モデルでは、出力電流変化時に水蒸気分離器の器内圧力の変動に及ぼす蒸気消費量の影響は、LNGの場合に比べて比較的大きいものと考えられる。

電池セルでは、発生した電力損失によってセル間に温度差が生じ、セル部材の持つ熱伝導率により熱移動が生じる。この熱の一部は未反応の水素や空気と共に系外に持ち去られるが、大部分の熱は電池冷却水によってスタック外に持ち出される。一方、水蒸気分離器の器内圧力の上昇に伴い電池冷却水温度も上昇するため電池セルとの温度差が小さくなり、次第にその冷却効果は小さくなる。このため、図-5に示すように、水蒸

注3) 水蒸気と燃料中の炭素の比がある一定値となるように、燃料に混合する水蒸気量が制御されている。

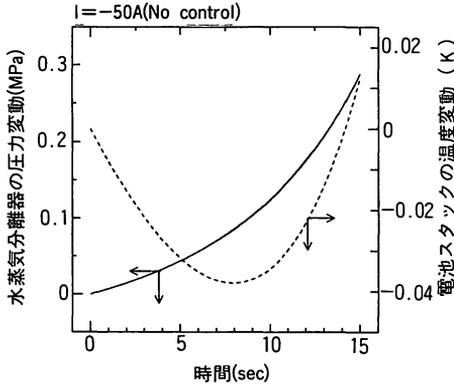


図-5 水蒸気分離器圧力と電池スタック温度の変動 (制御なし)

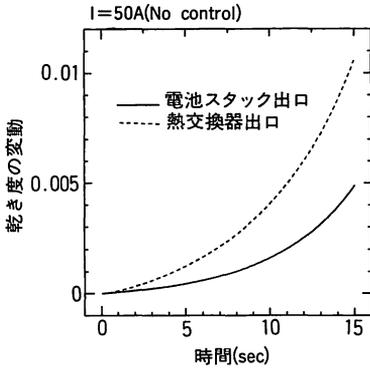


図-6 乾き度の変動 (制御なし)

気分離器の器内圧力の上昇が大きくなれば電池冷却水の冷却効果が失われ、逆に冷却水が電池セルの加熱源になることから電池スタックの温度が急激に上昇するものと考えられる。PAFCに望まれる運転温度は一般には180~210℃程度で、温度が低くなると電極反応が緩慢になるため効率が低下する。他方、温度が高くなれば、電解質の蒸発や消失が増加するほかセル部材の劣化が促進されるため、電池スタックの必要以上の温度上昇は是非とも避けるべきである。

図-6はスタック出口と熱交換器出口における電池冷却水の乾き度の変動を示したものである。水蒸気分離器の器内圧力の上昇により、飽和水のエンタルピーは増加するものの蒸発潜熱は小さくなることから、相対的に乾き度が増加していく。更に、水蒸気分離器の器内圧力の変動の影響が、熱交換器出口の乾き度の変動に大きく現れている。これは、本解析においては、定常状態での熱交換器出口の乾き度はスタック出口の乾き度と比べて相当小さい上に、先に述べたように、熱

交換器出口における水蒸気分離器の圧力変動の影響が電池スタック出口における影響の1/2と言う仮定によるものと考えられる。

### 7. ファジィ制御則の適用結果

図-7と図-8は、電池の出力電流が定格負荷運転時から50アンペア減少した場合に、PI制御により熱交換器二次側の外部冷却水の流量制御が行われた場合の解析結果の一例を示すものである。比例および積分ゲインの十分なチューニングは困難であり、振動的な応答を抑えることはできなかった。しかも、頻繁な流量調節を行うことによる流量制御弁の損傷など、システムの動作不良が懸念されることから実用的でない。

そこで、流量制御にファジィ制御を適用した場合について解析した。本解析のファジィ制御の推論法には「Max・Min 合成法」を、その推論結果から出力の確定値を導出する非ファジィ化手法には「高さ法」を用い、前件部変数に対するメンバーシップ関数の形として二等辺三角形を採用した。さらに、k時刻における

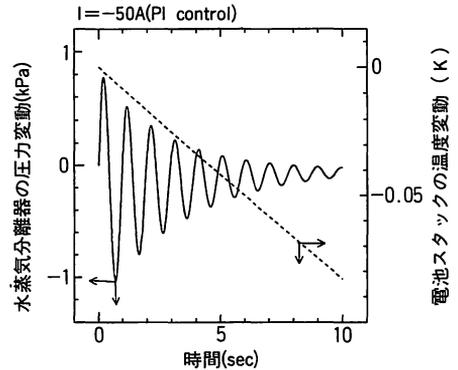


図-7 水蒸気分離器圧力と電池スタック温度の変動 (PI制御)

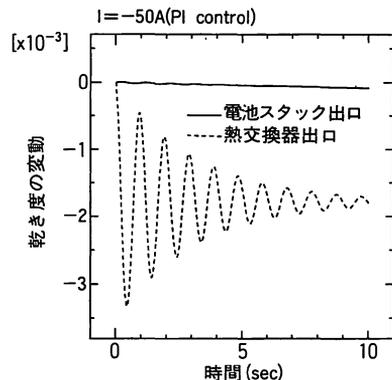


図-8 乾き度の変動 (PI制御)

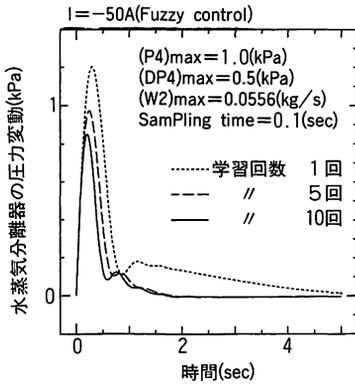


図-9 水蒸気分離器の圧力変動 (ファジィ制御)

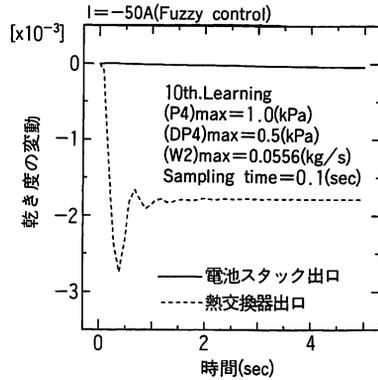


図-11 乾き度の変動 (ファジィ制御)

水蒸気分離器の器内圧力の変動を  $p_k$ 、器内圧力変動の1サンプリング当たりの変化を  $\Delta p_k$ 、 $\alpha$  と  $G$  を定数とした場合の制御規範数として

$$\omega_k^{ij} = (\alpha \cdot p_k + \Delta p_k) / G$$

を導入した。これは、水蒸気分離器内に発生した圧力変動を安定的 (非振動的) に消滅させるためである。

流量制御に関する制御則を

《If  $P_k$  is  $P_i$  and  $\Delta P_k$  is  $\Delta P_j$ , then  $\Delta \omega$  is  $\omega_{ij}(k)$ 》

と記述し、次式で表せる修正則を導入した<sup>3)</sup>。

$$\omega_{ij}(k+1) = \omega_{ij}(k) + \beta \cdot \omega_k^{ij}$$

ここに、 $\beta$  はファジィ変数  $P_i$  と  $\Delta P_j$  の各々のメンバーシップ関数値の小さい方の値を表す。この修正則を導入することによって制御則が学習により自動チューニングされ、先のPI制御でのパラメータチューニングの難しさを回避できるだけでなく、誤差信号に応じたゲイン設定を行っていることになる。図-9~11が燃料電池の出力電流が50アンペア減少した時の解析結果で、0.1秒毎に流量操作を加えている。なお、図中の  $(P4)_{max}$ 、 $(DP4)_{max}$  および  $(W2)_{max}$  は水蒸気分離器の圧力変動、圧力変動の変化および外部

冷却水流量の変動の最大値で、実際の入出力値をその変数に対するファジィ集合の区間に規格化するために導入した想定値である。

図-9は学習を1, 5, 10回行った場合の水蒸気分離器の器内圧力の変動を示すもので、5回の試行学習で速やかに定常学習状態に落ち着く。学習回数が10回の場合には目標値への到達が早い上に圧力変動も小さく、良好な制御がなされる。図-10と図-11には、学習を10回行った場合のスタック温度と乾き度の変動を示している。電池セルの発熱量の減少によりスタック出口の乾き度は減少するが、その変化は小さい。一方、熱交換器出口の乾き度は電池セルの発熱量の減少により定常時に比べて減少するも、一定値に制御されておりファジィ制御の良好な制御性能を証明している。

### 8. おわりに

実証試験研究のために導入し生き小容量のPAFCをモデルとした電池冷却水系の動特性の数値解析と、電池冷却水系の流量制御へのファジィ制御の適用性について検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) リン酸型燃料電池の冷却水系の動特性を解析するためのシミュレーションプログラムを開発した。
- (2) 電池冷却水の乾き度の調整機能の善し悪しが水蒸気分離器の器内圧力の変動、すなわち電池セル温度の変動に大きく影響している。
- (3) 例えば、熱交換器に通水する外部冷却水系統の不具合等により電池冷却水からの除熱が不十分であれば、水蒸気分離器の器内圧力の上昇に伴って電池冷却水の温度も上昇し、逆に電池冷却水が加熱源となって電池セルの温度を上昇させることも考えられる。

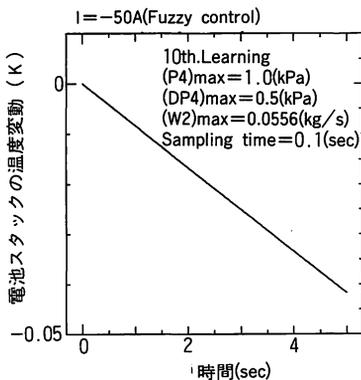


図-10 電池スタック温度の変動 (ファジィ制御)

(4) 外部冷却水の流量制御へのファジィ制御の適用の可能性が得られた。

本解析を行うに当たり設定した仮定のなかには実運用から考えれば必ずしも妥当ではないものもあるため、今後は実システムに沿うよう仮定を見直してシミュレーションプログラムを改良するなど、ユーザーとしての立場から燃料電池の特性を把握し改善案の抽出などを行っていきたい。

なお、本研究を遂行するに当たり、四国電力㈱と燃料電池メーカーから貴重な情報やデータなどを提供して頂いたことを記しておく。

参考文献

- 1) 山本博隆ほか4名；LPG用リン酸型燃料電池の実証試験研究について，第1回燃料電池シンポジウム講演予稿集(1994)，116～121
- 2) 菅野直紀ほか6名；リン酸型燃料電池冷却系の動特性に関する検討，日本機械学会論文集(C編)，60巻573号(1994-5)，1597～1601
- 3) 安平誠ほか3名；縦型空気サーボ系のオートチューニングファジィ制御，第9回流体制御シンポジウム講演論文集(1994)，58～62

付録1：特性式の導出

1.1 電池スタック

定常状態でのエネルギー・バランスから

$$-h = E + Q_w \dots\dots\dots (1-1)$$

ここに，h：電気化学反応に伴うエンタルピー変化，E：発生する電気エネルギー，Q<sub>w</sub>：電池冷却水の持ち去るエネルギーを表している。

ガス種毎の各温度におけるエンタルピーは次の関係式から算出できる。

$$h(\Theta) = a + b \cdot \Theta + c \cdot \Theta^2 + d \cdot \Theta^3 + e \cdot \Theta^4 + f \cdot \Theta^5 \dots (1-2)$$

ここに，a, b, c, d, e, fはガス種によって決まる定数で，Θはガス温度(K)を表す。

一方，電池スタック入口におけるガス組成と電極反応でのガス利用率は変化しないと仮定すれば，電極反応で消費される水素や酸素の量は電池の出力電流*i*に比例することから，スタック入口/出口のガスの有するエンタルピーを次の関係式で表すことができる。

$$h = \Sigma [h(\Theta) \cdot f(U, i, m)] \dots\dots\dots (1-3)$$

ただし，Θ：ガス温度，U：ガス利用率(=一定)で燃料極では水素利用率，空気極では酸素利用率を表す。また，mは単位出力電流を発生するのに必要な水素量である。

$$\therefore \delta h = \Sigma \left[ f \left( \frac{\partial h}{\partial \Theta} \right) \delta \Theta + h \left( \frac{\partial f}{\partial i} \right) \delta i + h \left( \frac{\partial f}{\partial m} \right) \delta m \right] \dots\dots\dots (1-4)$$

電池セル特性の温度依存性や経年変化による特性低下を考慮しない場合，δm=0と考えられることから，

$$\therefore \delta h = \Sigma \left[ f \left( \frac{\partial h}{\partial \Theta} \right) \delta \Theta + h \left( \frac{\partial f}{\partial i} \right) \delta i \right] \dots\dots\dots (1-5)$$

一方，使用電流範囲でのスタックの出力電流*i*と電圧*v*の関係を下記の直線式で近似すれば，

$$v = \alpha i + \beta \quad (\alpha, \beta = \text{const.}) \dots\dots\dots (1-6)$$

$$\therefore E = i(\alpha i + \beta)$$

$$\therefore \delta E = \left( \frac{\partial E}{\partial i} \right) \delta i = (2\alpha i + \beta) \delta i \dots\dots (1-7)$$

更に，電池冷却水の持ち去るエネルギーは，スタック温度はΘ<sub>s</sub>，冷却水の温度をΘ<sub>c</sub>とすれば，

$$Q_w = K(\Theta_s - \Theta_c) \dots\dots\dots (1-8)$$

と表せる。Kは電池スタック部材の熱通過率である。

$$\therefore \delta Q_w = \left( \frac{\partial Q_w}{\partial \Theta_s} \right) \delta \Theta_s + \left( \frac{\partial Q_w}{\partial \Theta_c} \right) \delta \Theta_c$$

$$= K(\delta \Theta_s - \delta \Theta_c) \dots\dots\dots (1-9)$$

従って，以上の関係から求めた各状態量の微小変動分を本文の(2)式に代入すれば燃料電池スタックの温度に関する特性方程式が得られる。

一方，電池冷却水の持ち去るエネルギーは，乾き度を用いれば次のように表すことができる。

$$Q_w = W(X_1 r_1 + h_1' - h_0') \dots\dots\dots (1-10)$$

ここに，W：電池スタックの冷却水量，X<sub>1</sub>：スタック出口の電池冷却水の乾き度，r<sub>1</sub>：スタック出口圧力での蒸発潜熱，h<sub>0</sub>'：スタック入口圧力における飽和水のエンタルピー，h<sub>1</sub>'：スタック出口圧力での飽和水のエンタルピーである。

$$\therefore \delta Q_w = \left( \frac{\partial Q_w}{\partial X_1} \right) \delta X_1 + \left( \frac{\partial Q_w}{\partial r_1} \right) \delta r_1 + \left( \frac{\partial Q_w}{\partial h_1'} \right) \delta h_1' + \left( \frac{\partial Q_w}{\partial h_0'} \right) \delta h_0'$$

$$= W(r_1 \delta X_1 + X_1 \delta r_1 + \delta h_1' - \delta h_0') \dots\dots\dots (1-11)$$

従って，式(1-9)と式(1-11)から，乾き度の微小変動分が次のように表せる。

$$\delta X_1 = \frac{K(\delta \Theta_s - \delta \Theta_c) - W(X_1 \delta r_1 + \delta h_1' - \delta h_0')}{W \times r_1} \dots\dots\dots (1-12)$$

1.2 熱交換器

(1) 一次側(高温側)

定常状態でのエネルギー・バランスから

$$Q_2 (= Q_1 + Q_c) = Q_3 + Q_{WH} \dots\dots\dots (1-13)$$

ここに，Q<sub>2</sub>：熱交換器に流入する電池冷却水のエネルギー，Q<sub>1</sub>：スタック出口の電池冷却水のエネルギー，Q<sub>c</sub>：CO変成器出口の電池冷却水のエネルギー，Q<sub>3</sub>：流出する電池冷却水のエネルギー，Q<sub>WH</sub>：低温側へ伝熱するエネルギーである。CO変成器から流入する冷却水については乾き度は常時一定とし，それ以外の状態量についてもスタックから流入する冷却水と共に熱交換器入口での状態量に等しいと仮定すれば，上記のエネルギーは各々次のように表せる。

$$Q_1 = W(X_2 r_2 + h_2')$$

$$Q_c = W_c(X_{c2} r_2 + h_2')$$

$$Q_3 = W_3(X_3 r_3 + h_3') \quad [W_3 = W + W_c]$$

$$Q_{WH} = U_H A_H (\Theta_H - \Theta_w)$$

ただし，U<sub>H</sub>およびA<sub>H</sub>はそれぞれ高温側伝熱壁の熱伝達係数ならびに伝熱面積を表す。この時，

$$\delta Q_2 = \left( \frac{\partial Q_1}{\partial X_2} \right) \delta X_2 + \left( \frac{\partial Q_1}{\partial r_2} \right) \delta r_2 + \left( \frac{\partial Q_1}{\partial h_2'} \right) \delta h_2' + \left( \frac{\partial Q_c}{\partial X_c} \right) \delta X_c + \left( \frac{\partial Q_c}{\partial r_2} \right) \delta r_2 + \left( \frac{\partial Q_c}{\partial h_2'} \right) \delta h_2'$$

$$= W(r_2 \delta X_2 + X_2 \delta r_2 + \delta h_2') + W_c(X_c \delta r_2 + \delta h_2') \dots\dots\dots (1-14)$$

$$\delta Q_3 = \left( \frac{\partial Q_3}{\partial X_3} \right) \delta X_3 + \left( \frac{\partial Q_3}{\partial r_3} \right) \delta r_3 + \left( \frac{\partial Q_3}{\partial h_3'} \right) \delta h_3'$$

$$=W_3(r_3 \delta X_3 + X_3 \delta r_3 + \delta h_3') \dots\dots\dots (1-15)$$

$$\delta Q_{WH} = \left(\frac{\partial Q_{WL}}{\partial \Theta_H}\right) \delta \Theta_H + \left(\frac{\partial Q_{WL}}{\partial \Theta_w}\right) \delta \Theta_w$$

$$=U_H A_H (\delta \Theta_H - \delta \Theta_w) \dots\dots\dots (1-16)$$

これらの式を本文の(3)式に代入すれば熱交換器高温側の温度に関する特性式が得られる。

更に、熱交換器チャンパー内の温度変化は微小であると仮定して本文(3)式の左辺=0とすれば、先に述べた式(1-12)と同様に、熱交換器出口における冷却水の乾き度の変動分を求める式が得られる。

(2) 伝熱部

定常状態におけるエネルギー・バランスより、

$$Q_{WH} = Q_{WL} \dots\dots\dots (1-17)$$

ここに、 $Q_{WL}$ : 低温側への伝熱量で、先の $Q_{WH}$ と同様に次式で表される。

$$Q_{WL} = U_L A_L (\Theta_w - \Theta_L)$$

$$\delta Q_{WL} = \left(\frac{\partial Q_{WL}}{\partial \Theta_w}\right) \delta \Theta_w + \left(\frac{\partial Q_{WL}}{\partial \Theta_L}\right) \delta \Theta_L$$

$$=U_L A_L (\delta \Theta_w - \delta \Theta_L) \dots\dots\dots (1-18)$$

これらの式を本文の(4)式に代入すれば熱交換器伝熱壁の温度に関する特性式が得られる。

(3) 二次側(低温側)

定常状態でのエネルギー・バランスから

$$Q_{WL} + Q_{1L} = Q_{2L} \dots\dots\dots (1-19)$$

ここに、 $Q_{1L}$ : 流入する外部冷却水の有するエネルギー、 $Q_{2L}$ : 流出する外部冷却水の有するエネルギーで、それぞれ次のように表される。

$$Q_{1L} = C_{1L} \rho_{1L} W_{1L} \Theta_0 \quad [\Theta_0 = \text{const.}]$$

$$Q_{2L} = C_{2L} \rho_{2L} W_{2L} \Theta_L \quad [W_{2L} = W_{1L}]$$

仮に、冷却水の熱容量( $C_L$ )や密度( $\rho_L$ )が圧力や温度の微小変動時にかかわらず一定と考えれば、

$$\delta Q_{1L} = \left(\frac{\partial Q_{1L}}{\partial W_{1L}}\right) (-\delta W_{1L}) = C_{1L} \rho_{1L} \Theta_0 (-\delta W_{1L}) \dots\dots\dots (1-20)$$

$$\delta Q_{2L} = \left(\frac{\partial Q_{2L}}{\partial W_{2L}}\right) \delta W_{2L} + \left(\frac{\partial Q_{2L}}{\partial \Theta_L}\right) \delta \Theta_L$$

$$=C_{2L} (\Theta_L \delta \rho_{2L} W_{2L} + W_{2L} \delta \Theta_L) \dots\dots (1-21)$$

これらの式を本文の(5)式に代入すれば熱交換器低温側の温度に関する特性式が得られる。

1.3 水蒸気分離器

定常状態でのエネルギー・バランスから、

$$Q_i = Q_s + Q_g + Q_D + Q_B \dots\dots\dots (1-22)$$

各々の項目の意味は本文に記載してある通りで、水蒸気分離器入口の状態が器内の状態(状態量に添字を付けない)に等しいと仮定すれば、それぞれの項目は次式のように表せる。

$$Q_i = W_i (X_i r_i + h_i) \quad [W_i = W_s]$$

$$Q_s = W_s h''$$

$$Q_g = W_g h' \quad [W_g = \text{const.}]$$

$$Q_D = W_D h'' \quad [W_D = \text{const.}]$$

$$Q_B = W_B h' \quad [W_B = \text{const.}]$$

ただし、改質用蒸気量(=  $W_g$ )は燃料電池の出力電流に比例するものとする。

$$\therefore \delta Q_i = \left(\frac{\partial Q_i}{\partial X_i}\right) \delta X_i + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial r_i}\right) \delta r_i + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial h'}\right) \delta h'$$

$$=W_i (r_i \delta X_i + X_i \delta r_i + \delta h') \dots\dots (1-23)$$

$$\delta Q_g = \left(\frac{\partial Q_g}{\partial i}\right) \delta i + \left(\frac{\partial Q_g}{\partial h''}\right) \delta h''$$

$$=a (h'' \delta i + i \delta h'') \dots\dots\dots (1-24)$$

$$\delta Q_g = \left(\frac{\partial Q_g}{\partial h'}\right) \delta h' = W_g \delta h' \dots\dots\dots (1-25)$$

$$\delta Q_D = \left(\frac{\partial Q_D}{\partial h''}\right) \delta h'' = W_D \delta h'' \dots\dots\dots (1-26)$$

$$\delta Q_B = \left(\frac{\partial Q_B}{\partial h'}\right) \delta h' = W_B \delta h' \dots\dots\dots (1-27)$$

一方、気相部分のキャパシタンスDは、器内に流入流出する冷却水の物質収支や気体の状態方程式から求めることができる。これらの微小変動分を表す式を本文(6)式に代入すれば、水蒸気分離器の器内圧力変動に関する特性方程式が得られる。

なお、線形化した時点での主な定常値は以下に示す通りである。①出力電流: 474アンペア②水蒸気分離器器内圧力: 0.701MPa③スタック温度: 463.15K④電池冷却温度: 438.15K⑤電池冷却水量: 0.889kg/s⑥外部冷却水量: 0.347kg/s⑦電池スタック出口での乾き度: 0.0145⑧熱交換器出口での乾き度: 0.0038

付録2: 飽和蒸気の状態量

本数値解析では、飽和蒸気の状態量を下記の近似式を用いて計算した。

2-1. 飽和温度:  $\Theta$  [K]

$$\Theta = 3795.53 / \{11.6693 - \ln(P / (9.80665 \times 10^4)) + 46.97\} \quad (\text{ただし, } P \text{ は絶対圧力})$$

2-2. 飽和水の比エンタルピー:  $h'$  [kJ/kg]

$$h' = \{-0.154410 + 2.349 \times 10^{-6} P + 1.19486 \times 10^{-13} P^2 - 5.4133 \times 10^{-20} P^3 + (\Theta - 273.15)\} \times 4.1868$$

2-3. 蒸発潜熱:  $r$  [kJ/kg]

$$r = \{606.126 - 0.75851 (\Theta - 273.15) + 1.55845 \times 10^{-3} (\Theta - 273.15)^2 - 6.7249 \times 10^{-6} (\Theta - 273.15)^3\} \times 4.1868$$

2-4. 飽和蒸気の比エンタルピー:  $h''$  [kJ/kg]

$$h'' = h' + r$$

2-5. 飽和水の比体積:  $v'$  [m<sup>3</sup>/kg]

$$v' = 0.001 - 1.5399 \times 10^{-9} (\Theta - 273.15)^2 + 1.1667 \times 10^{-11} (\Theta - 273.15)^3$$

2-6. 飽和蒸気の比体積:  $v''$  [m<sup>3</sup>/kg]

$$v'' = 0.20861 - \frac{85.5086}{\Theta - 273.15} + \frac{4.5349 \times 10^3}{(\Theta - 273.15)^2} + \frac{1.8657 \times 10^6}{(\Theta - 273.15)^3}$$