

燃料電池乗用車 Honda FCX 用 電力供給システムの研究

Research on Electric Power System for Honda FCX Fuel Cell Vehicle

竹 中 秀 和*
Hidekazu TAKENAKA

要 旨

燃料電池乗用車において、従来の乗用車に匹敵する加速性能を実現するために、補助電力源としてウルトラキャパシタを搭載した。システム起動時やアイドル停止からの発進時に生じる2つの電力源間の電圧差を解消するために、電圧電流制御ユニット(VCU: Voltage and current Control Unit)を、燃料電池と駆動モータ用高電圧デバイスを電気的に接続する経路に設置した。燃料電池の出力電流をチョッピング制御することによって、ウルトラキャパシタに徐々に充電し、燃料電池とウルトラキャパシタ間に生じた電圧差を解消するVCUの機能により、システム起動時やアイドル停止からの発進時における燃料電池とウルトラキャパシタの電圧差に起因する過電流の発生を阻止することができた。また、ウルトラキャパシタに減速エネルギーを回生充電する時、VCUが燃料電池の出力電流をチョッピング制御することによって、燃料電池とウルトラキャパシタを電氣的に分離し、燃料電池からの充電を制限して、その分減速エネルギーから回収されるエネルギー量を増やすことができた。

ABSTRACT

An ultra capacitor has been utilized as a back up power source to give the Honda fuel cell vehicle acceleration performance rivaling that of a conventional vehicle. To control the difference in voltage between the two power sources at system start-up or takeoff from idling stop, a VCU (Voltage and current Control Unit) has been set between the fuel cell and the high-voltage device for the traction motor. The VCU charges the ultra capacitor gradually by chopping control of the current from the fuel cell equalizing the voltage of the fuel cell and the ultra capacitor. This prevents the occurrence of over-current at system start-up or takeoff from idling stop. When the ultra capacitor is being charged with regenerated braking energy, chopping control of the current from the fuel cell by the VCU electrically separates the fuel cell and the ultra capacitor, and the current from the fuel cell is restricted. This enables the energy provided by regeneration to be utilized for charging the ultra capacitor.

1. まえがき

2002年12月に日米で世界初の納車を達成することができた Honda FCX 燃料電池乗用車は、将来の石油資源の枯渇に対応した代替エネルギーの利用を目指し、純水素を燃料とした。また、純水素を燃料とすることでCO₂フリーとゼロエミッションを達成することができた。このように環境汚染につながる物質を一切排出しない燃料電池を電力源とする自動車は、将来の自動車技術の本命と目されており、その意味でFCXは到達すべきゼロエミッション自動車のあるべき一つの形を提案できたものといえる⁽¹⁾。

今回の開発では、このような環境性能の達成のみならず、

環境性能追求により犠牲にされがちな加速性能や、ハイレスポンスで、かつスムーズなドライバビリティといったユーザが自動車に求める商品性に関しても、従来の自動車に劣らない性能を実現することを目指した。

燃料電池は出力の過渡特性がガソリンエンジンの出力特性ほど俊敏ではない。したがって、電力供給を燃料電池のみに依存したシステムでは、ガソリンエンジン車同等の加速性能を獲得することはできない。加速性能向上のため、電力供給システムとして燃料電池とHonda内製のウルトラキャパシタを組み合わせた方式を採用した。

燃料電池とウルトラキャパシタを併用する場合、2つの電力源間に生じる電圧差が問題となる。この電圧差を解消

するために、燃料電池の出力を調整する電圧電流制御ユニット (VCU: Voltage and current Control Unit) を燃料電池と駆動モータ用高電圧デバイスを電氣的に接続する経路に設置した。

本稿では、VCUの動作原理、および実際の使用時における電力制御機能について報告する。

2. パワートレインシステムの検討

モータを駆動する電力供給システムの構成を検討した結果を Table 1 に示す⁽²⁾。電力供給システムとして最もシンプルなのは、燃料電池からの出力のみを駆動力に利用する方式である。その他に、バッテリーやウルトラキャパシタといったエネルギーストレージを組み合わせて出力アシストや減速エネルギーの回生を行う機構を備える方式がある。

燃料電池の出力のみを駆動力とする場合、駆動特性は燃料電池の出力応答特性に完全に依存することになる。燃料電池は、出力の過渡特性が従来のガソリンエンジンよりも劣るため、特に加速時の駆動力を従来のガソリンエンジン車並みに確保することは困難である。加えて、システム停止状態から発電を開始するシステム起動時には、補助電源などのスタータ機構が別途必要となる。

次に、バッテリーやウルトラキャパシタといったエネルギーストレージを組み合わせた方式について検討する。ここでは、バッテリーとして高電圧用に現在一般的に利用されているニッケル水素 (Ni-MH) バッテリーを想定した。Ni-MH バッテリーとウルトラキャパシタの特性を比較したものを Fig. 1 に示す。Fig. 1 からわかるように、ウルトラキャ

シタはNi-MHバッテリーに比べて出力密度が非常に高いという性質をもつ⁽³⁾。このような出力特性は、短時間に大きな加速駆動力が必要とされる自動車の動力性能にとって非常に有利である。

さらに、燃料電池と Ni-MH バッテリーを組み合わせる場合、それぞれの電圧が異なる点が問題となる。燃料電池と Ni-MH バッテリーはそれぞれ固有の電流-電圧特性を有している。したがって、燃料電池の電流-電圧特性に合わせて出力アシスト、および減速エネルギーの回生充電を行うには、Ni-MH バッテリーの電圧を常に燃料電池の電圧と等しく保つ高電圧制御機構が必要となる。これに対して、ウルトラキャ

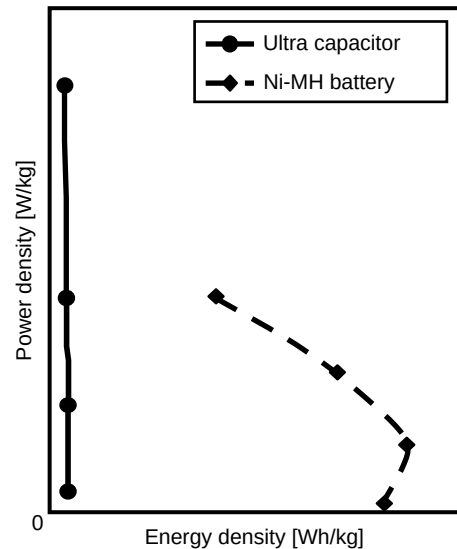


Fig. 1 Comparison of power density of Ni-MH battery and ultra capacitor

Table 1 Comparison of system configurations

	Basic configuration	High-voltage distribution system	Transmission efficiency	Braking regeneration	Power performance
Capacitor-assisted system		Not required	High	Yes	Instantaneous high-power assist
Battery-assisted system		Required	Medium (Losses of high-voltage controllers)	Yes	Power assist
Fuel cell direct-supply system		Not required (Startup device required)	High	No	Power and responsiveness depend on fuel cell stack

パシタは燃料電池の電流－電圧特性に追従して電圧を変化させることができ、なおかつその時の出力電流特性も非常に安定している。したがって、燃料電池と電氣的に接続されていれば、常に燃料電池と等電圧を保持することができる。このような点から、ウルトラキャパシタを使用する場合、高電圧制御機構は不要である。

以上のように比較検討した結果、

(1)瞬時に大きな出力アシストが可能である。

(2)高電圧制御機構が不要である。

という点で優れた特徴を持つウルトラキャパシタを採用した。

3. VCU による電力制御の原理

システム停止時、燃料電池とウルトラキャパシタが高電圧デバイスに接続されたまま保持されると、車両全体では少しずつではあるが暗電流による電力消費が進行する。この時、水素タンクバルブが閉じたまま水素供給用配管内に残った水素が消費されて発電が進行するため、配管内が負圧となり、燃料電池スタックに悪影響を及ぼす恐れがある。また、ウルトラキャパシタでは放電が進行する。ウルトラキャパシタ電圧が一定値以下になった場合、システムの起動ができなくなる。

このような事態を避けるため、燃料電池、ウルトラキャパシタそれぞれについて、高電圧デバイスに接続される途中にリレー機構が設置されている。このリレー機構によって、燃料電池とウルトラキャパシタが電氣的に分断されると、両者の間には電圧差が生じる。電圧差が生じた状態でそれぞれのリレー機構を接続した場合、燃料電池とウルトラキャパシタを接続している電流経路に過電流が流れる可能性がある。そこで、燃料電池の出力電流をチョッピングすることによって調節しながら、ウルトラキャパシタとの電圧

差を徐々に取り除く VCU が必要となる。本システムでは VCU を、燃料電池と駆動モータ用高電圧デバイスを電氣的に接続する経路に設置した。VCU および高電圧デバイスのシステム概要を Fig. 2 に示した。

VCU の回路動作と電流電圧波形の模式図を Fig. 3 に示した。IGBT に入力される制御信号が IGBT をオン、オフにすることで、燃料電池からの出力電流をチョッピングすることができる。すなわち、IGBT がスイッチの役割を担っている。IGBT がオンの時、燃料電池からの電流 I_{FC} は出力側の高電圧デバイスに流れ込む電流 I_{OUT} となる。出力側高電圧デバイスを通った電流 I_{OUT} は IGBT を流れる電流 I_{SW} となり、燃料電池のマイナス側に戻る。すなわち、この時 $I_{FC} = I_{OUT} = I_{SW}$ である。

次に IGBT がオフの時、燃料電池の電流経路は遮断されるので、燃料電池からの電流 I_{FC} は流れない。その代わり、経路中に存在するコイルがそのインダクタンスによって電磁エネルギーを蓄えているので、この電磁エネルギーを放出することによって、オフ時の電流を補う。この時の電流は、ダイオード 2 を流れる電流 I_D となり、出力側の高電圧デバイスに流れ込む。すなわち、 $I_D = I_{OUT}$ である。コイルのインダクタンスは IGBT がオフ時に補う必要のある電気エネルギーに合わせて設計されている。結果、全体として出力側の高電圧デバイスに流れる電流は、 $I_{OUT} = I_{SW} + I_D$ となる。このような制御機構を使うことにより、IGBT のオン状態とオフ状態の割合を変化させることで燃料電池の出力電流を連続的に変化させることができる。

同時に、燃料電池の出力電流はウルトラキャパシタの充電にも利用される。充電が進むにつれて、ウルトラキャパシタの電圧 V_{CAP} は上昇し、燃料電池の出力電圧 V_{FC} に近づく。 V_{FC} は I_{FC} が大きくなるのに応じて小さくなっていく。そして、 $V_{FC} = V_{CAP}$ となった段階で VCU はチョッピングをやめて、常時オンの状態に移行する。

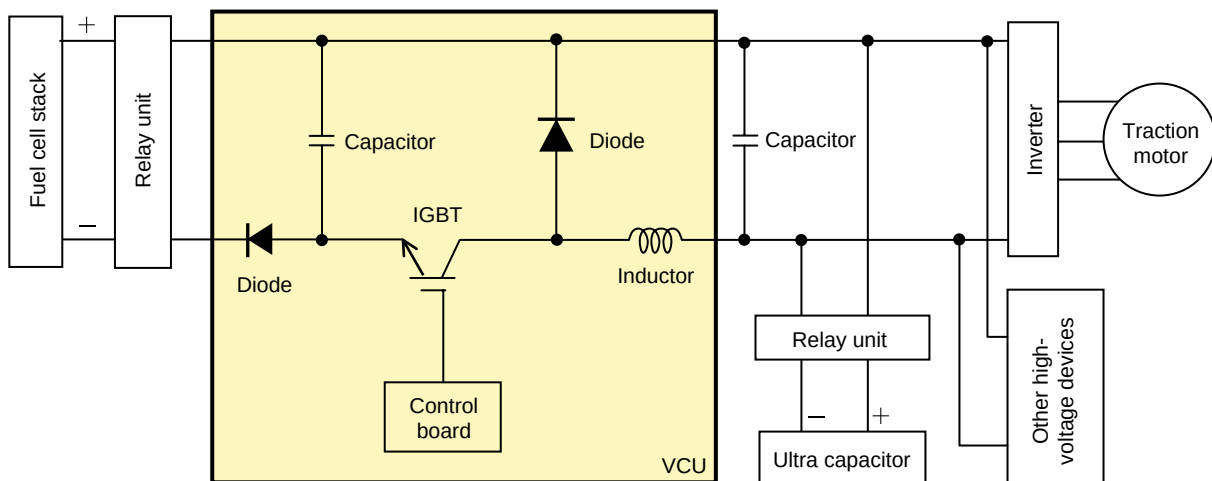


Fig. 2 System diagram of VCU and high-voltage devices

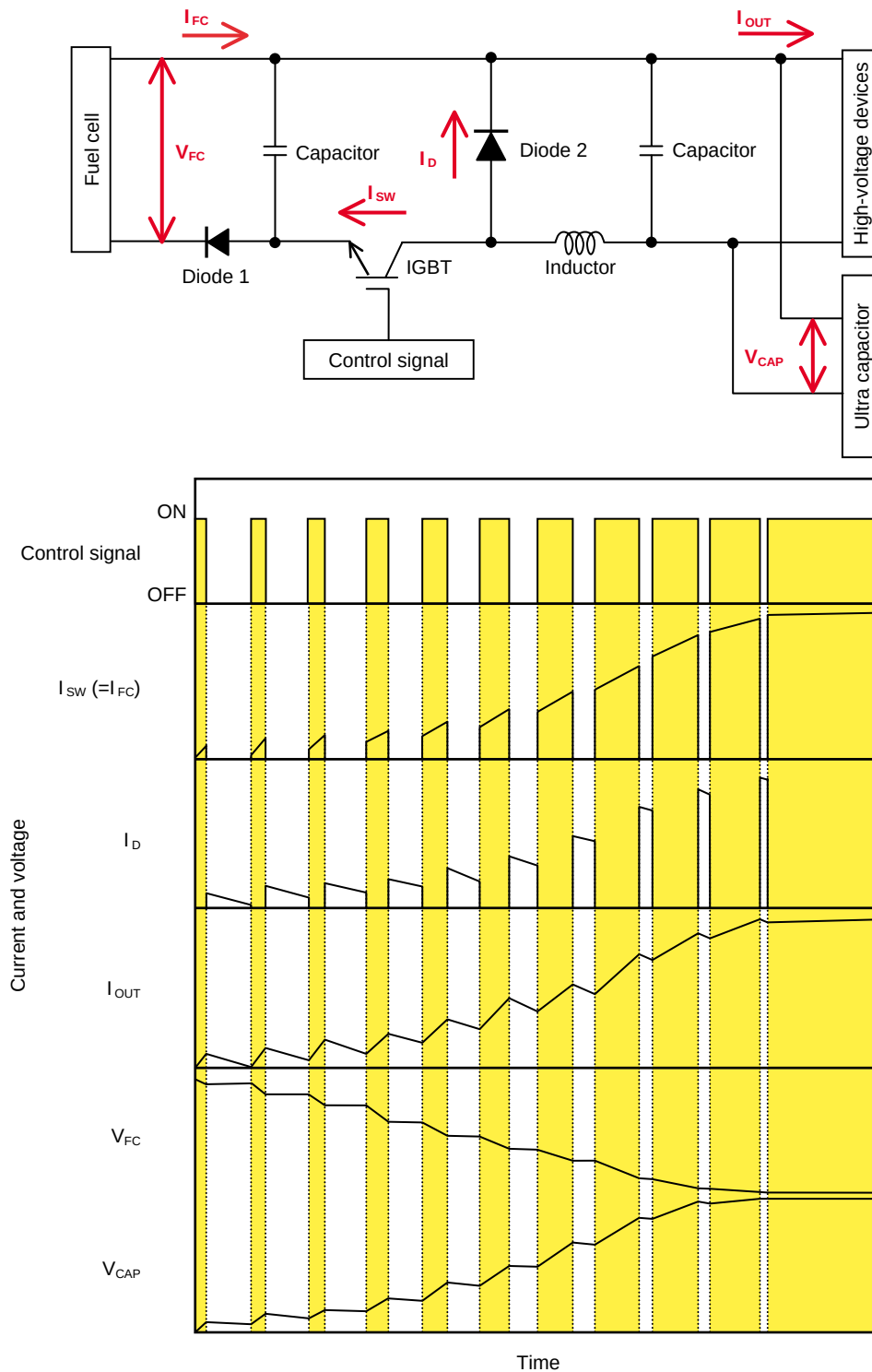


Fig. 3 Diagram of VCU current control mode

4. VCU 動作の実機確認

4.1. システム起動時の動作

システム停止状態から燃料電池が発電を開始するシステム起動時における、燃料電池の電圧 V_{FC} 、電流 I_{FC} 、ウルトラキャパシタの電圧 V_{CAP} 、電流 I_{CAP} を Fig. 4 に示した。システムを起動することによって、まずウルトラキャパシタ

のリレー機構が作動し、続いて燃料電池のリレー機構が作動する。この時、燃料電池とウルトラキャパシタには電圧差が生じている。VCUがチョッピング動作することによって、燃料電池の出力電流がウルトラキャパシタに充電され、ウルトラキャパシタの電圧が徐々に燃料電池の電圧に近づいていく。そして、両者の電圧が等しくなった時点でVCUはチョッピング動作をやめ、常時オンの状態に移行する。

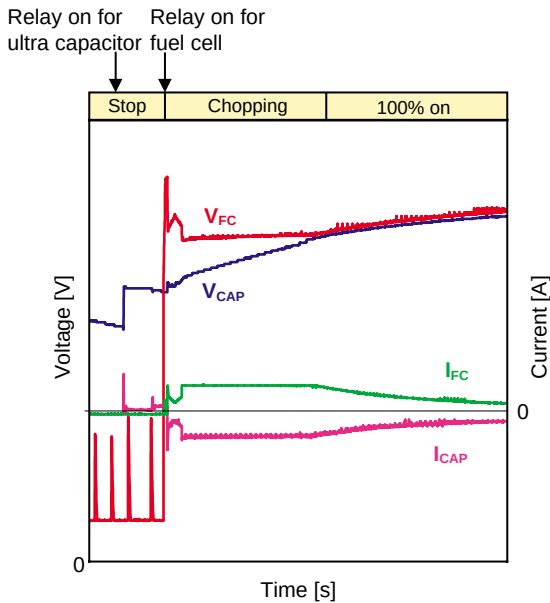


Fig. 4 Voltage and current profiles of fuel cell and ultra capacitor at start-up

4.2. アイドル停止からの発進動作

本車両では電力消費を抑制するため、ある一定時間モータ駆動指令信号が入力されない時、燃料電池のアイドルングを停止する機能がある。アイドル停止中、VCUのIGBTは100%オフの状態になっているため、燃料電池の電圧とウルトラキャパシタの電圧には差が生じる。このようなアイドル停止状態から再び走行を開始する時の燃料電池とウルトラキャパシタの電圧、電流を Fig. 5 に示した。アイドル停止状態にある車両のモータへ駆動指令信号が入力されると、VCUはチョッピング動作を開始する。チョッピング動作によって燃料電池とウルトラキャパシタの電圧は等しくなる。等電圧になった時点でVCUはチョッピングをやめ、常時オンの状態に移行する。

発進加速時におけるウルトラキャパシタの出力アシストの様子も Fig. 5 から読み取ることができる。燃料電池は駆動指令信号にしたがってモータに電流を出力しようとするが、アイドル停止状態から再び発電を開始するまでに、わずかな遅れが生じる。この遅れを補うためにウルトラキャパシタから電流が出力される。燃料電池から電流が出力され始めても、加速に必要な電力量に対して発電量が不足するため、ウルトラキャパシタからも電流が出力され続ける。燃料電池の発電量が增大するのに伴い、ウルトラキャパシタからの出力電流は徐々に減少し、燃料電池の発電量が必要な電力量に到達したところで出力アシストを終了する。

4.3. 減速時の回生動作

本車両は減速時、減速エネルギーを回生してウルトラキャパシタに充電する機能を有している。減速回生時の燃料電池とウルトラキャパシタの電流、電圧を Fig. 6 に示した。車

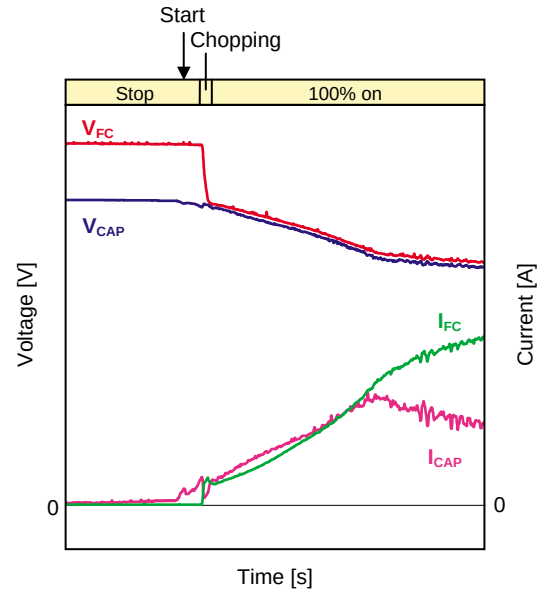


Fig. 5 Voltage and current profiles of fuel cell and ultra capacitor when driving from idling stop mode

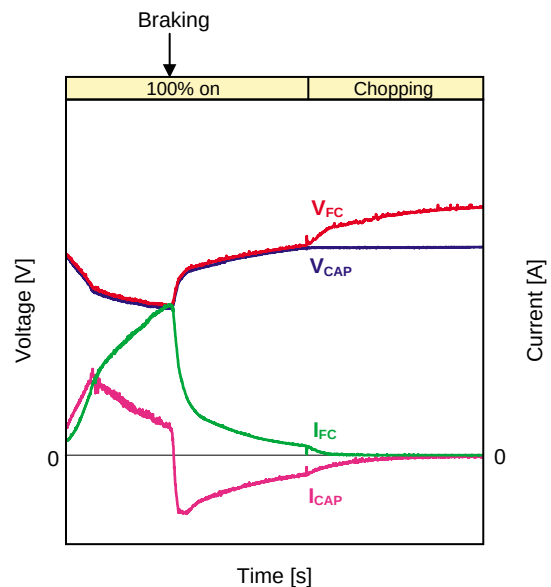


Fig. 6 Voltage and current profiles of fuel cell and ultra capacitor in regeneration mode

両が減速を始めると、燃料電池の発電が最低限に抑えられると同時に、モータが減速エネルギーを回生し始める。その結果、ウルトラキャパシタの電流がマイナスになり回生電力の充電が始まるが、減速開始時、VCUは常時オンの状態にあるため、ウルトラキャパシタには回生電力だけでなく、燃料電池の電力も充電される。そこで少しでも燃料電池からの充電量を減らし、減速エネルギーからの回生電力を多く充電できるようにするため、VCUがチョッピング動作を行なって燃料電池とウルトラキャパシタを電氣的に切り離す。これにより、燃料電池からの充電は制限され、その分回収される回生電力量を増やすことができるようになった。

5. まとめ

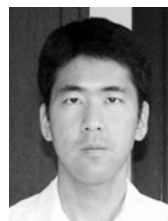
電力源として燃料電池とウルトラキャパシタを併用する燃料電池乗用車において、電圧電流制御ユニット(VCU)による燃料電池の出力制御を行なうことで、以下の結果を得た。

- (1) システム起動時、あるいはアイドル停止からの発進時、VCUのチョッピング動作で、電流制御をすることにより、燃料電池とウルトラキャパシタ間の電圧差を解消することができた。
- (2) 減速エネルギーの回生時、VCUのチョッピング動作で燃料電池とウルトラキャパシタを電氣的に分離することにより、燃料電池からウルトラキャパシタへの充電を制限し、その分減速エネルギーから回収されるエネルギー量を増やすことができた。

参考文献

- (1) 川崎聡志, 小椋正己, 小野徹, 加美陽三: 世界初の燃料電池乗用車 Honda FCX の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p.1-6 (2003)
- (2) 小川隆行, 木村顕一郎, 内堀憲治, 藤本幸人, 清水潔: 燃料電池乗用車 Honda FCX 用パワートレインの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p.7-12 (2003)
- (3) 為乗浩司, 山本康一, 姉川彰博, 田口剛, 久保田真也, 川原誠: 燃料電池自動車用電気二重層キャパシタシステムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, p.25-30 (2003)

■ 著 者 ■



竹中秀和