

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

Development of Electric Double-layer Capacitor System for Fuel Cell Vehicle

為 乗 浩 司*
Koji TAMENORI
田 口 剛*
Takeshi TAGUCHI

山 本 康 一*
Koichi YAMAMOTO
久保田 真 也*
Shinya KUBOTA

姉 川 彰 博*
Akihiro ANEKAWA
川 原 誠*
Makoto KAWAHARA

要 旨

燃料電池乗用車 Honda FCX 用の電気二重層キャパシタシステムを開発した。このキャパシタを用いることにより、同システム電圧で HEV 用ニッケル水素化物電池比 30% 以上、出力密度比 2 倍以上の高出力を達成し、車両側の要求出力を満足することができた。またキャパシタ電圧の監視、均等化と故障検知を行う保護システム、および放置時と走行時に温度上昇を抑制する遮熱、冷却システムの効果により、単体テストおよび実走テストにおいて耐久信頼性を満足することが出来た。

ABSTRACT

An electric double-layer capacitor system has been developed for the Honda FCX fuel cell vehicle. This high-power capacitor system offers more than 30% higher output power and more than twice the power density of the nickel-metal hydride batteries used in hybrid electric vehicles (HEV) at an equivalent system voltage, and satisfies automotive power requirements. The new system is equipped with a capacitor cell protection system which monitors capacitor voltage and provides equalization and fail detection functions, and heat insulation and a cooling system control temperature increase both when the vehicle is parked and when it is running. The effectiveness of these systems has enabled the new capacitor to satisfy durability and reliability requirements in unit tests and running tests.

1. まえがき

近年、環境問題や地球温暖化への関心が高まっており、二酸化炭素を含む排出ガスの低減が重要な課題として挙げられる。その一つの回答として、ホンダはIMAシステムを搭載したハイブリッドカーを販売している。今回は排出ガスの更なる低減を目指し、有害物質を排出しない燃料電池乗用車 Honda FCX を開発した。キャパシタシステムは主電源の燃料電池をアシストする働きをしており、減速時に発生したエネルギーを電気として蓄電し、加速時にパワーが必要な時には、ここから電力をアシストする。一般的な二次電池とは違い重金属を含まないため、環境にやさしい蓄電システムとして燃料電池(Fuel cell, 以下 FC と略記)同様、将来に向けた新しい環境技術として期待が大きい。本稿では蓄電システムのコンセプト及びキャパシタの適用技術について報告する。

*和光基礎技術研究センター

2. エネルギーストレージの比較

蓄電システムに求められる特性としては、FCの不得意な瞬時応答性を補助する事が挙げられる。FCXで求められるアシスト出力は CIVIC Hybrid の約3倍であり、軽量化と両立するには高い出力密度が必要となる。Table 1に示すように出力密度は、Li-ion 電池とキャパシタが優れている。CIVIC Hybrid に用いられるニッケル水素化合物電池は、同一重量ではキャパシタの半分程度のアシスト出力となる。ニッケル水素化合物電池、Li-ion電池は共に化学反応による起電力によって安定した電圧を発生するが、反応を伴わないキャパシタは安定電圧がなく、エネルギーの状態によって電圧が変動する。この特性によって FC の電圧と同期することが可能であるため、FCと並列直結が可能であり、電圧調整ユニットを経由しないで良い分、燃費向上にも効果がある。

Table 1 Power density and voltage of secondary batteries

	Power density (W/kg)	System voltage* (V)	OCV (V)
Ni-MH	Over 500	400 ~210	320
Li-ion	Over 1000	400 ~285	340
Capacitor	Over 1000	400 ~0	—

※ Upper voltage fixed 400V

キャパシタはニッケル水素化物電池より内部抵抗が低く全出力域で優れた充放電効率を示しており、充放電時のエネルギー損失も少ない(Fig. 1)。

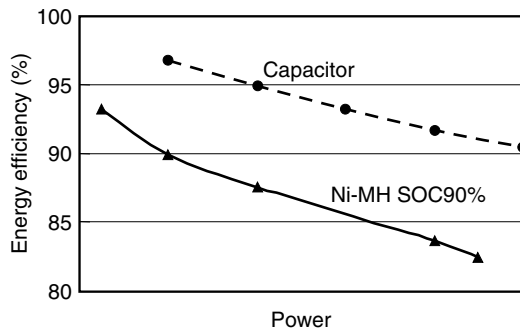


Fig. 1 Energy efficiency

さらに、キャパシタは充放電の繰り返しによる性能低下が小さいため、FC寿命末期まで安定したエネルギーと出力の提供が可能である。メモリー効果が無く、電圧で充電状態が把握できることから制御システムのシンプル化も可能である。このように、高出力、高信頼性を備えたキャパシタはFCの蓄電システムとして最もふさわしい。

3. 開発のねらい

キャパシタシステムを世界で初めて乗用車に搭載するにあたり、車載スペースをできる限り抑える事が必要である。コンパクトかつ高信頼性であるキャパシタシステムにするための条件として、以下の点に絞り開発を行った。

- (1) 直列接続はキャパシタ保持と必要電圧を確保し、コンパクトであること
- (2) 遮熱、冷却システムは最小スペースであること
- (3) キャパシタ保護制御は、キャパシタの性能安定に寄与するだけではなくシステムの信頼性も高めること

4. キャパシタモジュールと車両への搭載検討

4.1. キャパシタモジュール構造

キャパシタモジュールはFig. 2に示すように80本のキャパシタ及びそれらの挙動を監視する保護回路、冷却構造から形成されている。この直列接続構造を開発した事により、キャパシタ正負極が同一側面に配置され、高電圧となるキャパシタと保護回路間接続構造は電気絶縁も確保した上で厚さ11.5mmの樹脂プレート内にコンパクトに収めることが可能となった。また機能集中部上下にモジュール固定用ステーを取り付けることにより、モジュール前方部分の保持強度が向上し、キャパシタ保護及び冷却流路確保を主機能とするキャパシタボックスは、板厚0.8mmのアルミ材で成立させることができた。

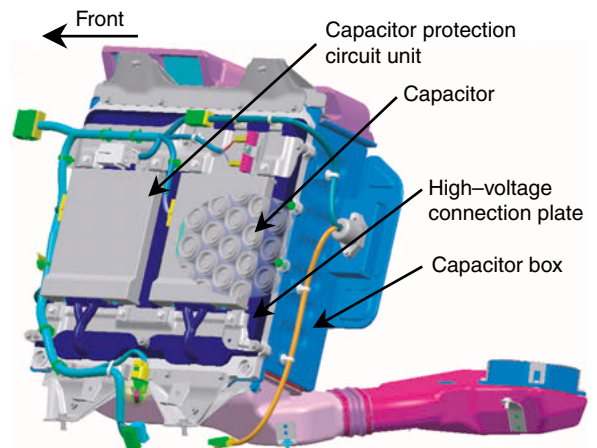


Fig. 2 Structure of capacitor module

4.2. 接続構造

CIVIC Hybridのバッテリー接続に代表されるように、従来バッテリー間の接続には溶接が用いられている。キャパシタの接続に溶接を用いた場合はYAGレーザ溶接を用いなければならない。YAGレーザ溶接は溶接部の部品公差管理が極めて重要であり、複数のキャパシタを接続するにはキャパシタセル自身の寸法公差および組み付け誤差まで考慮した上で溶接品質の確立を行わなければならないため実現が困難であった。多数のキャパシタセルを直列接続し、組み立て性に優れ、低抵抗で軽量コンパクトな接続を実現するための構造を検討した。

キャパシタセルの直列接続構造をFig. 3に示す。特徴は、ネジ方式による保持構造とコンタクトワッシャを用いた低抵抗通電構造を両立させたことである。またキャパシタの個別電圧監視を容易に行うために、接続構造部の片端集中化も実現した。

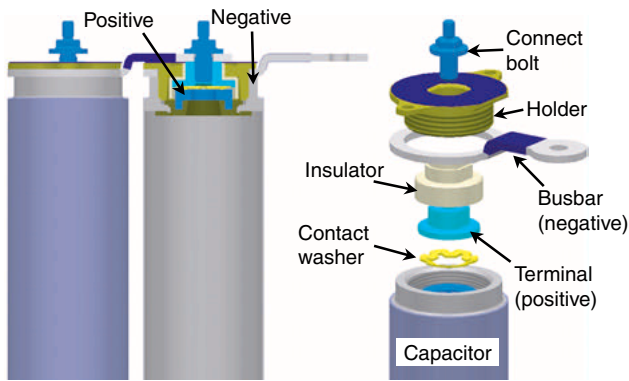


Fig. 3 Structure of capacitor series connection

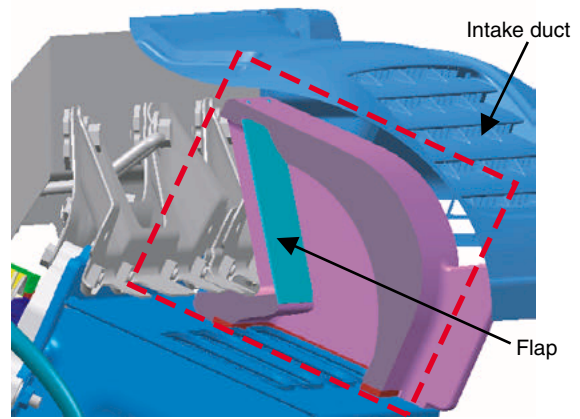


Fig. 5 Structure of upper capacitor box

締結管理としてはトルク法を検討した。規定のトルクで抵抗値が安定領域に入ることを確認でき、これにより抵抗値自体も目標値をクリアできた(Fig. 4)。

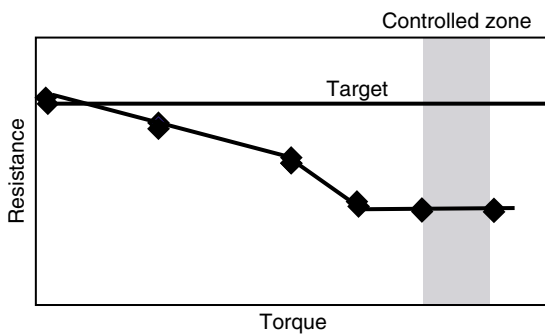


Fig. 4 Torque and electrical resistance

4.3. 炎天下放置時の温度上昇抑制

キャパシタボックスは Fig. 2 に示すようにリアシート背面に縦置き搭載されているため炎天下ではボックス上段側から熱を受け、その上段キャパシタが過度に熱せられる懸念が有る。FCX 車載においては以下の内容に重点をおいて開発を行った。夏期日中放置時の車内温度は、自然換気もほとんど行われないため、直射部で 100℃以上、遮光部でも 80℃以上になる。キャパシタは電圧 0V であれば 80℃でも保管上問題ないが、電圧条件によっては劣化が促進される。キャパシタ温度を 60℃程度の環境に保持すれば、電圧影響による劣化も考慮する必要がないため、60℃を目標管理温度に設定し、遮熱の検討を行った。上部ダクトには CIVIC Hybrid で実績のある発泡ポリプロピレン成形品を用い断熱性を確保し、また同ダクト開口部にはゴム製のフラップを取付け、冷却時以外は開口部を塞ぐ構造とした(Fig. 5)。またキャパシタモジュールを取り囲む内装にも断熱材を使用しており、ダクト部とあわせて遮熱に貢献している。

キャパシタモジュールに断熱材およびフラップを用い、車載状態で温度測定した結果を Fig. 6 に示す。前述の断熱構造により、キャパシタ温度は炎天下放置下においても 60℃を超えることがなく、高温に対する保護対策が十分であることが確認できた。

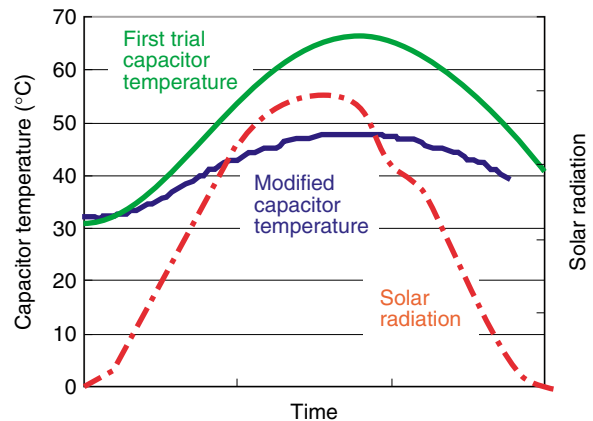


Fig. 6 Effect of heat insulator

4.4. 走行時の温度上昇抑制

走行時の温度上昇は、放電・回生時の(電流)²×抵抗に依存する。温度上昇抑制には電流値の低減が効果的だが、走行状態に依存するため蓄電システム側での対応はできない。次に有効なのが内部抵抗、接続抵抗の低減となる。キャパシタは HEV 用ニッケル水素化物電池の SUS 製電槽と異なり、熱伝導性の高いアルミニウム製を採用しており冷却効率を高めている。またキャパシタセル接続構造は上述したように発熱レベルは低く、アルミニウム電槽の効果と合わせると、同システム電圧では HEV 用ニッケル水素化物電池比 1/2 程度の発熱量となる(Fig. 7)。発熱量の低減はファン部の小型化と低騒音化にも寄与している。

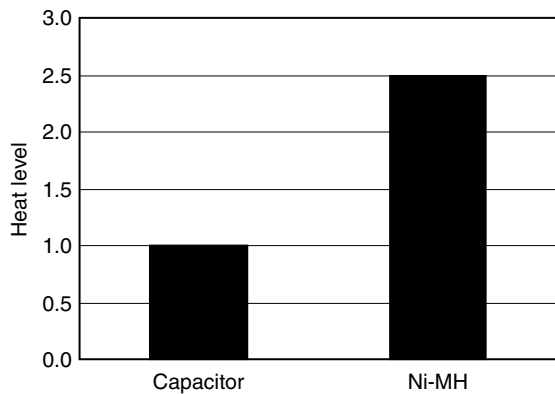


Fig. 7 Heat balance of energy storage

Fig. 8 に冷却風の流れを示す。モジュール上部からの冷却風は、下部に取り付けられたダクトを介して軸流ファンにより排出されている。

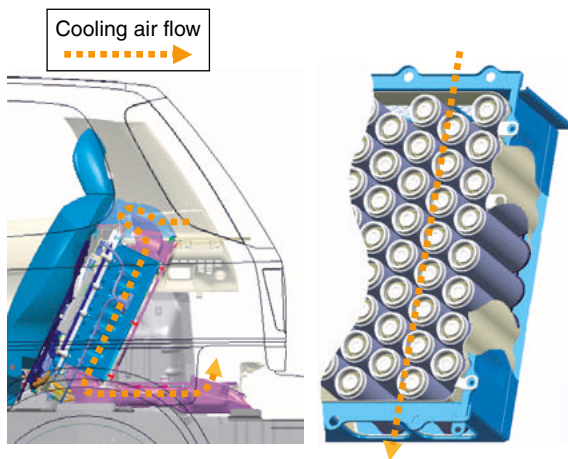


Fig. 8 Cooling air flow

キャパシタボックス冷却構造検討においては、走行データの中から最も発熱量が大きい走行モードを選定し、更にこのモードから1走行当たりの発熱量が高い部分を抽出して評価モードとした(Fig. 9)。

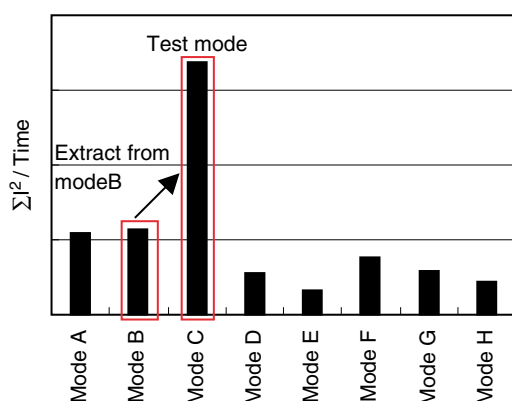


Fig. 9 Heating value in various modes

FCX では走行時におけるキャパシタの温度測定を行い、熱解析を試みた。試験の結果を Fig. 10 に示す。キャパシタおよび雰囲気温度を 35℃ に設定後走行を開始した。評価モードを連続走行した場合でも、45℃ を上限として推移している。これはキャパシタの発熱が小さいことと冷却システムとのバランスが良好であることによるものである。

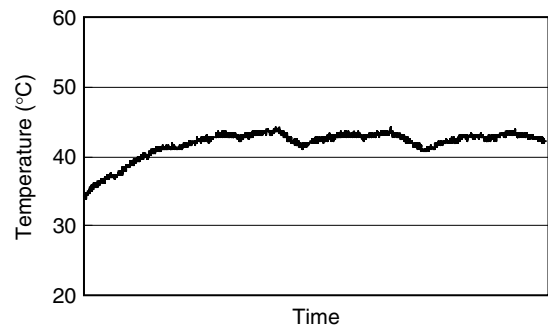


Fig. 10 Temperature transition in continuous mode C

5. キャパシタ保護回路

5.1. 保護回路構成

キャパシタシステムの電気系統は、高圧系のキャパシタとそれらを制御する 12V 系から成り立っており、両者間には絶縁部を設け搭載されている。キャパシタの制御回路は、電圧検知回路と個々の電圧ばらつきを均等化させる回路から構成されており、高圧系回路で検出された信号処理及びシステム電気制御ユニット (ECU) との通信を行う機能を有する。

システム構成図を Fig. 11 に示す。

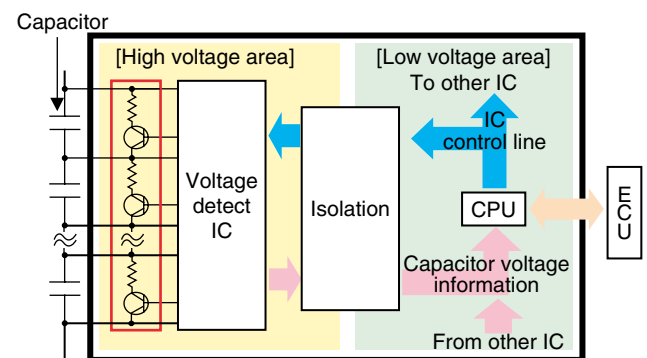


Fig. 11 Capacitor voltage detect system schematic

キャパシタ性能を最大に引出すための主要機能は、

- ・キャパシタ電圧検知機能
- ・キャパシタ電圧ばらつき均等化機能
- ・キャパシタ故障検知機能

であり、その必要性を以下に示す。

5.2. 電圧検知機能

キャパシタのエネルギーは、システム電圧内の上限付近で使用した時に最大となる。そのため、個別セルの電圧検知精度の向上が必要であり、電圧検知部分の IC 化を行った。これにより、電圧検知精度 $\pm 1.5\%$ ($0^{\circ}\text{C}\sim+80^{\circ}\text{C}$)という高精度化を実現できた。

検出電圧として3つの基準を定めた。

- 1) 上限検知電圧 = キャパシタ最大絶対定格電圧
- 2) 均等化開始電圧 = キャパシタ定格電圧
- 3) 故障検知電圧 = $0.7V$

なお IC 化により、回路消費電流を車両停止中(イグニッション Off)において約 $1\mu\text{A}$ と低くする事ができ、1か月の車両放置においてもキャパシタは電圧維持率98%以上を保持している。

5.3. 電圧ばらつき均等化機能

キャパシタ性能を引出すためには、複数キャパシタの電圧ばらつきを無くすことが、エネルギーロス、性能低下を低減する上で必要である。キャパシタに並列接続された電圧ばらつき均等化回路によるキャパシタ電圧収束イメージを Fig. 12 に示す。

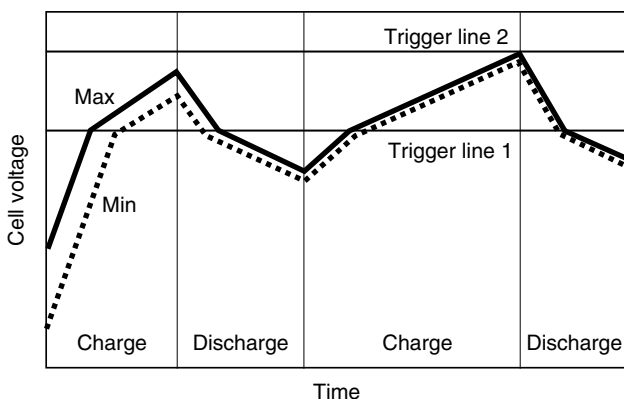


Fig. 12 Image of convergent capacitor voltage

均等化開始電圧から上限検知電圧までの間が均等化回路の動作領域である。キャパシタ電圧が均等化開始電圧に達すると、並列に接続された均等化回路が動作し、電流を一部バイパスすることによってキャパシタ電圧を揃えるという働きをする。前述の高精度電圧検知回路とこの均等化回路とにより、キャパシタ電圧ばらつきを $0.1V$ 以下に抑えることができ、ばらつきによるエネルギーロスを低減させた。

5.4. 故障検知機能

電圧検知回路を IC 化し、直列接続されたキャパシタの合計電圧を電源電圧とした。これにより IC に接続されたキャパシタの電圧が何かの理由で下限設定値を下回ると故

障を検知する。その他キャパシタ内部短絡、接続構造短絡および断線の検知も可能にした。

6. キャパシタの耐久性証明

6.1. 電圧、温度による耐久性変化

キャパシタはバッテリーとは異なり充放電に化学反応を伴わないため、物質変化が小さく耐久性に優れている。しかしながら温度と電圧が耐久性を左右する要因であるから、安定した性能を発揮するには前述したように遮熱、冷却、電圧制御が必要である。Fig. 13は温度、電圧が異なる条件下での抵抗の変化率を示す。温度、電圧が高くなると、耐久性が変化することが分かった。

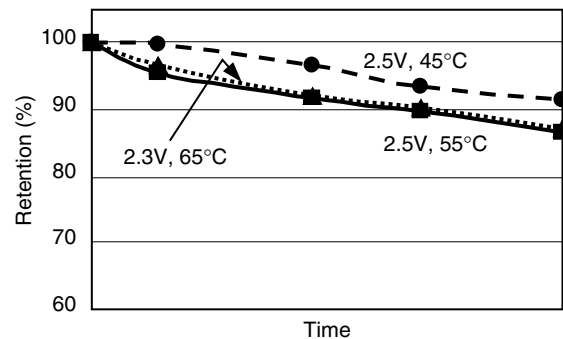


Fig. 13 Energy dependence by temperature and voltage

6.2. 耐久テストモードの設定

キャパシタの劣化要因としては、電圧および温度が挙げられる。印加電圧が高く、温度が高いほど劣化は加速する。そのため法規モード、実走モード走行データを検証し、走行時のキャパシタ平均電圧と充放電による発熱が最大となるモードを耐久モードとして抽出した(Mode A)。さらに市場データを反映したアイドル時間を耐久モードに加える事で FCX 使用状況を十分に踏まえた耐久モードを設定した(Fig. 14)。

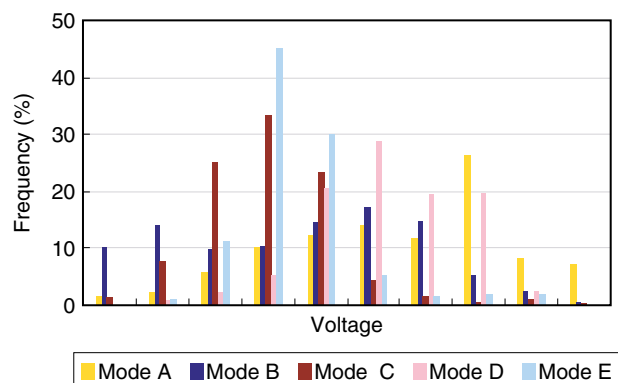


Fig. 14 Voltage frequency

耐久テスト時の性能推移をFig. 15, Fig. 16に示す。FCX搭載キャパシタは厳しい使用を考慮した耐久モードであるが、耐久テスト中急激な性能低下も無く、耐久テスト終了後も90%以上のエネルギー保持率、80%以上の出力時間保持率を示している。

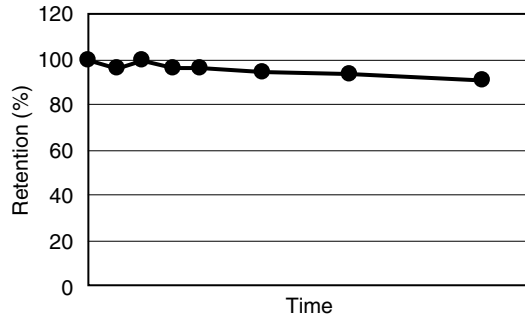


Fig. 15 Energy retention

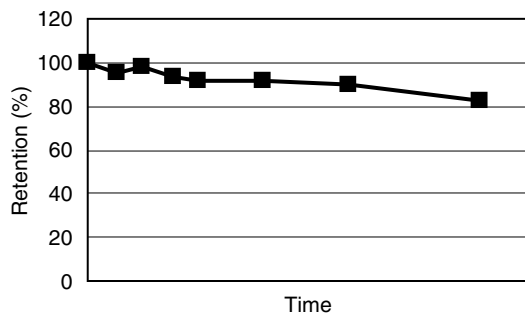


Fig. 16 Assist time retention

7. キャパシタ搭載時の電流および電圧挙動

キャパシタ電圧は、反応を伴わないため安定電圧がなく、エネルギーの状態によって電圧が変動する。このためFCの走行時の電圧変化に同期した電圧推移が可能のため、走行時は並列直結となっている。

下記に FC、キャパシタの出力推移を示す(Fig. 17)。

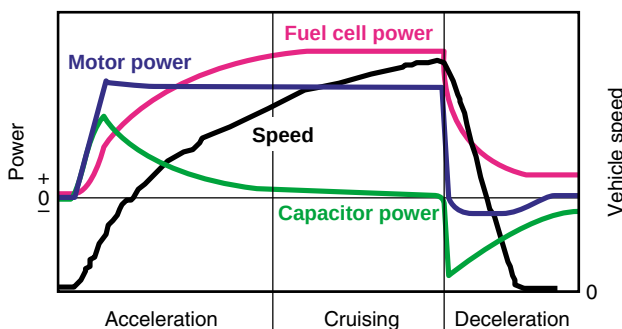


Fig. 17 Fuel cell and capacitor power characteristics

・加速時

キャパシタは、FCの不得意な瞬時出力応答を補い要求通りの車両出力を実現している。

・回生時

減速時のエネルギーの一部回収をキャパシタで行っており、減速移行時の瞬時回生を実現している。

8. まとめ

燃料電池乗用車 Honda FCX の蓄電システムとして、電気二重層キャパシタシステムを乗用車では世界で初めて実用化した。実用化においては、FC 要求に最適なキャパシタを選定し、保持と低抵抗を両立させた直列接続により高電圧化するとともに、放置時、走行時でもキャパシタの温度上昇の抑制を可能にする遮熱、冷却構造を確立した。また、蓄電システムの信頼性を確保する保護回路システムを開発した。

これらを組み合わせた蓄電システムは、FCの弱点である瞬時応答性をキャパシタの出力で補うことができ、FCXの発進時及び加速性能の魅力の実現に貢献することができた。

キャパシタシステムは出力、効率面で優れるだけではなく、同一充放電での発熱量は HEV 用ニッケル水素化物電池比で約 1/2 となり、熱管理の面でも自動車用システムとして最良な蓄電システムである。

謝 辞

本開発にあたり、社内外で多大なご協力、ご支援を頂いた方々に、心より感謝いたします。

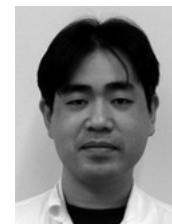
参考文献

- (1) 大園一也, 茅野守男: CIVIC Hybrid 用高出力エネルギーストレージの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.2, p.31-36(2002)

■ 著 者 ■



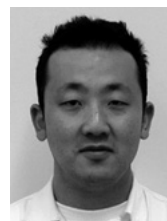
為乗 浩司



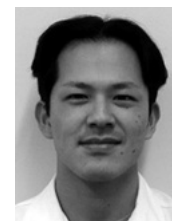
山本 康一



姉川 彰博



田口 剛



久保田真也



川原 誠