

CIVIC Hybrid 用高出力エネルギーストレージの開発

Development of High Power Energy Storage for the CIVIC Hybrid

大 園 一 也* 茅 野 守 男*
Kazuya OHZONO Morio KAYANO

要 旨

車両重量の大きな車の限られたスペースにハイブリッドシステムを搭載するにあたり、従来のニッケル水素化物電池に対して出力密度の向上を試みた。極板の12%延長、負極集電体のタブ廃止、および極板と集電体との溶接点数増加により、内部抵抗を19%低減した。これにより回生時の出力密度が27%向上し、搭載エネルギーストレージの体積を増加させることなく回生エネルギーの増加に対応することができた。

ABSTRACT

An attempt was made to improve the power density of a conventional nickel metal-hydride battery for installation of a hybrid system in the limited space available in a heavier vehicle. The plates were extended by 12%, the negative collector tab was eliminated, and the number of welds joining plate and collector was increased. These measures reduced the internal resistance by 19%. As a result, the power density during regeneration improved by 27%, making it possible to deal with increased regeneration energy without increasing the cubic volume of energy storage installed.

1. まえがき

今日、地球温暖化など環境への関心の高まりもあり、二酸化炭素をはじめとした排出ガスの低減が自動車に求められている。この課題に対応するためホンダでは VTEC (Valuable Valve Timing and Lift Electrical Control)⁽¹⁾を中心としたガソリンエンジンの改良に加え、更なる可能性をもつハイブリッドの開発を行い、独自の技術である IMA (Integrated Motor Assist)システム⁽²⁾を完成し、1999 年に INSIGHT に搭載し市販した。

今回、ハイブリッド車の普及拡大のため、量販車をベースに大幅に車体を変えることなく IMA システムを搭載することを基本コンセプトに CIVIC Hybrid の開発を行った。INSIGHT に比較して車両重量が増加したことおよび気筒休止システム⁽³⁾の追加により、エネルギーストレージへの入出力電力は増加し更なる性能向上が求められた。

本論文では、CIVIC Hybrid用に新たに開発されたエネルギーストレージ(以下、D2と呼ぶ)の開発のねらいと得られた性能について説明する。

*栃木研究所

2. 開発のねらい

D2の開発に際しては INSIGHT のエネルギーストレージ(以下、D1 と呼ぶ)と同様ニッケル水素化物電池(以下 Ni-MH)を用いた。その理由として Table 1 に示すように Ni-MH は従来車両用に使用されている鉛電池に比較して、単位重量あたりの出力密度が高く⁽⁴⁾、またその他にもエネルギー密度が高い、寿命が長いなどの特徴があることがあげられる。

Table 1 Constitution and power density of secondary batteries

	Positive electrode	Negative electrode	Electrolyte	Power density
Ni-MH	NiOOH	MH	KOH	Over 500W/kg
Li-ion	LiMnO ₄	C	Organic electrolyte	Over 1 000W/kg
Ni-Cd	NiOOH	Cd	KOH	170W/kg
Pb-acid	PbO ₂	Pb	H ₂ SO ₄	300W/kg

CIVIC Hybrid では車重増加と気筒休止システムにより、特に回生時の電力増加が顕著でエネルギーストレージの入力は Fig. 1 に示すように約 80%も INSIGHT から増加している。D1 を CIVIC Hybrid に用いると、増加した回生エネルギーをすべて吸収しきれない可能性があり IMA の燃費向上の効果を減少させることになる。

対応手段としては、

①バッテリー搭載数を増やす。

②バッテリーの単セルの最大充電電力を向上させる。

の二つがあるが、①を選択した場合、搭載セル数の増加により重量増加、搭載体積の増加につながり基本コンセプトに合致しなくなる。また電圧が上昇し IMA システムに含まれるその他のコンポーネントの設定電圧を変更する必要も発生することから②の対応をとることとした。

具体的な最大充電電力の目標は、車重増加と気筒休止による回生電力増加のシミュレーションを行い 27%とした。

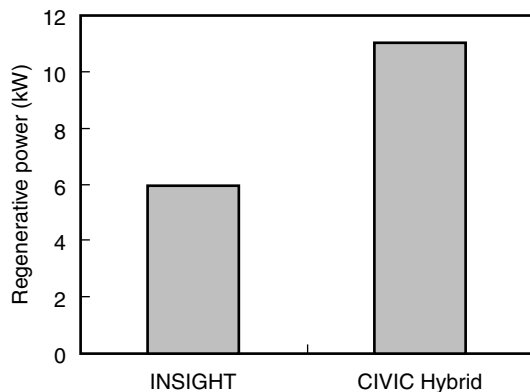
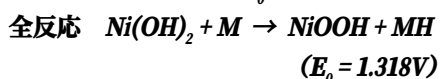
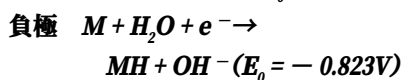
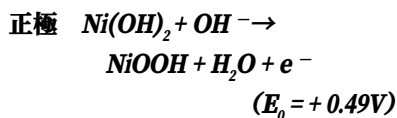


Fig. 1 Regenerative power

3. バッテリーについて

Ni-MH の負極は水素吸蔵合金 (Metal-Hydride) で、バッテリーの充放電に際し水素を吸収、放出している。水素吸蔵合金としては大まかに希土類系の LaNi_5 をベースとしたものとラーベス系の $\text{TiMn}_{1.5}$ や ZrMn_2 をベースとしたものがあるが、現在は寿命の観点から希土類系のものが主流で IMA 用の Ni-MH にも希土類系のものが使用されている。

Ni-MH の充電時の反応は以下で表される。



E_0 : 平衡電位

このように Ni-MH は充放電の際の反応に水が直接関与しないため電解液の消費が抑えられ鉛電池やニッケルカドミウム電池にくらべ長寿命となる。また Li-ion 電池と異なり、電解液に有機溶媒を使用しないため極端に過充電や過放電したときでも自己発火せず安全上優位である。

4. 出力の向上

4.1. 出力低下の要因

バッテリーが充放電されるときは電極が平衡状態から過渡状態へ移っているためセルの電圧は平衡状態の電圧と異なる。この現象を分極といい、ある電流を流したときに現れる分極の大きさを過電圧という。過電圧の主なものとしては電極反応に関与する物質 (Ni-MH の場合は水素イオン) が電極表面の電気二重層 (Fig. 2 参照) と呼ばれる溶媒の吸着層を横切って電極まで移動するのに必要な過電圧で活性化過電圧と呼ばれるものと、電極の表面近傍の反応で生じる濃度勾配により発生する濃度過電圧の二つがある。

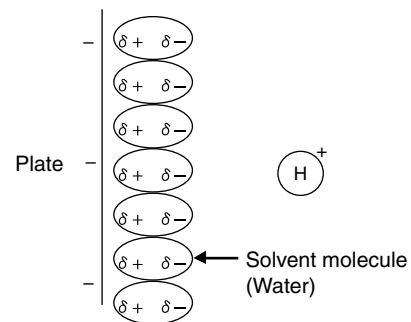


Fig. 2 Electrical double layer

これらの過電圧と充放電している時のセルの電圧 (セル開回路電圧) E との関係は

$$E = E_0 - [(\eta_{ct})_a + (\eta_c)_a] - [(\eta_{ct})_c + (\eta_c)_c] - I \cdot R_i \quad (1)$$

E_0 : セル開回路電圧

η_{ct} : 活性化過電圧

η_c : 濃度過電圧

a : 負極 (アノード)

c : 正極 (カソード)

I : セル負荷電流

R_i : セル内部抵抗

と表せる。この中で η_{ct} と η_c を合わせた過電圧 η は通常の電池系の場合、Butler-Volmer の式として知られる以下の式から求められる。

$$i = i_0 \left[-\exp(-a \cdot n \cdot F / (R \cdot T) \cdot \eta) + \exp((1-a)n \cdot F / (R \cdot T) \cdot \eta) \right]$$

R : 気体定数
 T : 絶対温度
 n : 電極反応に関与する電子数
 α : 移動係数
 F : ファラデー定数
 i_0 : 交換電流密度
 i : 電流密度

過電圧が小さい場合は上記の指数項を展開して三項目以降が無視できるため、その二項までをとると、

$$\eta = R \cdot T / (i_0 \cdot F) \cdot i \quad (2)$$

となり、式(1)は以下の様に簡易化される。

$$E = E_0 - (R_\eta + R_i) \cdot I \quad (3)$$

この R_η は分極抵抗といい以下の式で表される。

$$R_\eta = R \cdot T / (i_0 \cdot F \cdot A) \quad (4)$$

A : 電極面積

実際 IMA で使用している Ni-MH の場合、式(3)で表されるように使用範囲内の電流に対して電圧は直線的に変化することが確認されている。その例を Fig. 3, Fig. 4 に示す。

ある電流を流したときのセル電圧が式(3)で求められることからそのときの出力 P は

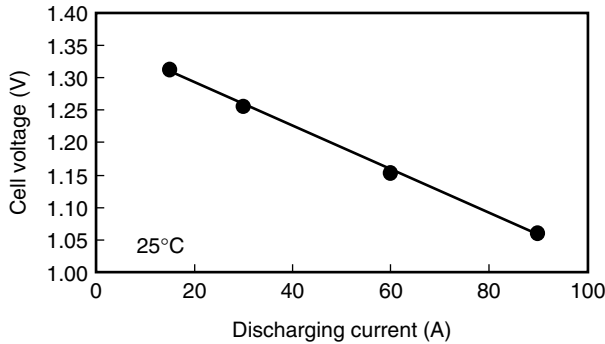


Fig. 3 Cell voltage and discharging current

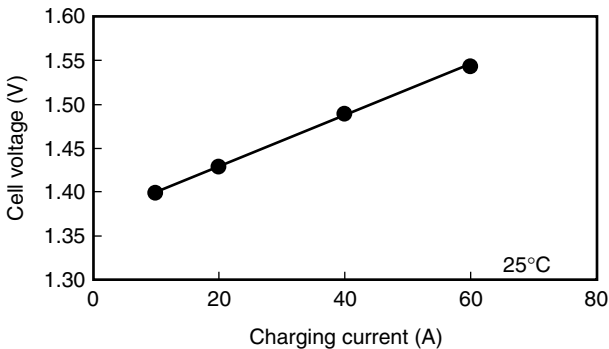


Fig. 4 Cell voltage and charging current

$$P = E \cdot I = E_0 \cdot I - R_T \cdot I \cdot I \quad (5)$$

$$R_T : R_\eta + R_i$$

と表せる。以上より電池の直流抵抗成分である R_η と R_i を低下させることで電池の出力を向上できることがわかる。

4.2. 電池の出力計算方法

ある電力を充電または放電しているときの P , E , I の関係は式(5)で示される。これを式(3)を用いて P と E で整理すると、

$$P = E \cdot I = E \cdot (E_0 - E) / R_T \quad (6)$$

となる。この P と E の関係を模式図で示すと Fig. 5 のようになる。ただしこの関係は過電圧が小さく、式(2)が当てはまる範囲内でのみ成立する。

また、Ni-MHを使用する場合、過充電したり、過放電すると、水の分解反応や添加剤の反応などの副反応が起きて Ni-MH の劣化につながることから、過充電防止のための上限電圧 E_U と過放電防止のための下限電圧 E_L を設定している。この設定値は通常、式(2)が成立する過電圧の範囲内で設定するので式(6)が適用できる。

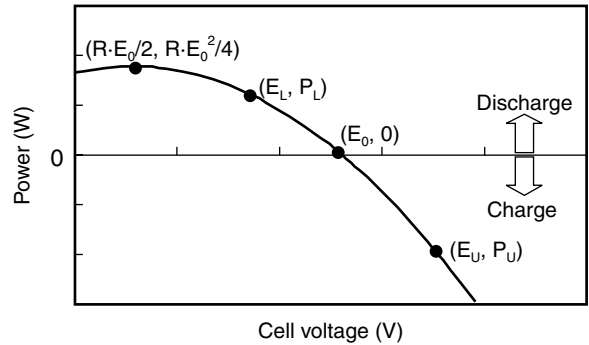


Fig. 5 Change of the electric power by cell voltage

このように上下限電圧を設定すると放電電力と充電電力の絶対値の最大は Fig. 5 からあきらかなようにそれぞれ E_L の時の値 P_L 、 E_U の時の値 $|P_U|$ となる。充電を例にとり P_U を R_T の関数として表すと、

$$E_U = E_0 - R_T \cdot I_U \quad (7)$$

$I_U : E_U$ となる時の電流

$$\therefore I_U = (E_0 - E_U) / R_T \quad (8)$$

$$|P_U| = |E_U \cdot I_U| = |E_U \cdot (E_0 - E_U) / R_T| \quad (9)$$

となり最大充電電力は式(9)で求められる。 P_U を 27% 向上させることに必要な R_T の低減目標を求めるため、 E_U は副反応抑制の上限電圧、 E_0 は電池の系固有の値であるので固定値とし式(9)から R_T の低減率に対する $|P_U|$ の変化率を求めた。ここで D1 の R_T , P_U をそれぞれ R_{T0} , P_{U0} と

し、D2 の R_T , P_U をそれぞれ R_{T1} , P_{U1} とすると、 R_{T1}/R_{T0} と $|P_{U1}/P_{U0}|$ の関係は Fig. 6 で示すようになる。

以上により最大充電電力を27%向上させるために R_{T1} の低減目標を 19%以上とした。

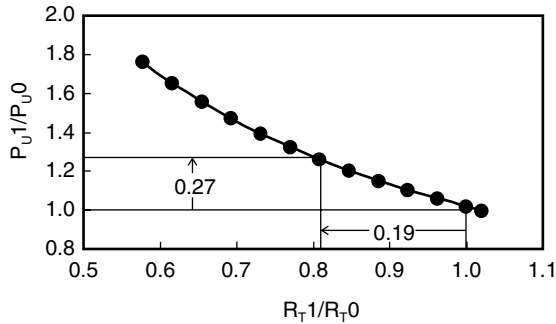


Fig. 6 Relation of regenerative electric power and cell resistance

4.3. R_{T1} 低減の具体的な手法

R_{T1} を構成する要素としては先に述べたようにセル内部抵抗 R_i と過電圧による分極抵抗 R_η の2つがある。 R_i はセル内の導電部を電流が流れる場合の抵抗で、Fig. 7で示されるように正・負極の極板の導体抵抗と正・負極集電板の導体抵抗、およびその接続抵抗などで構成される。一方 R_η は式(4)で示され、変更が可能な要素は交換電流密度 i_0 と電極面積 A の2つである。ところが i_0 は

$$i_0 = n \cdot F \cdot A \cdot k \cdot C_O^{(1-\alpha)} \cdot C_R^{\alpha} \quad (10)$$

k : 速度定数

C_O : 酸化体濃度

C_R : 還元体濃度

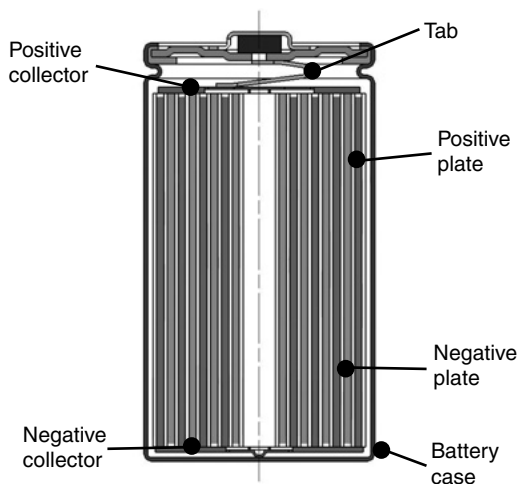


Fig. 7 Structure of cell

と表すことができ、電極面積 A に依存しているため、結局 A の増加が R_η の低下につながる事がわかる。

そこで今回は最大充電電力向上のための手法として

1) R_i の低減

2) 電極面積の拡大

の二つに的を絞り検討することとした。

R_i の低減手法としては通電部の抵抗を低減するために

i) 正・負極集電体の通電抵抗低減

板厚の増加

形状見直し

ii) 正・負極極板の通電抵抗低減

板厚の増加

極板長さの増加

iii) 集電体と極板の接続抵抗低減

溶接接合部のスポット面積増加

溶接点数の増加

iv) タブの通電抵抗低減

板厚の増加

タブ長さの増加

があげられるが、iv)のタブ通電抵抗の低減については寄与が少ないことが分かっているので i) ~ iii)の項目について検討した。

まず i)の正・負極集電体の通電抵抗低減については iii)の集電体と極板の接続抵抗低減もかねて形状を変更した。集電体の板厚増加については、正極集電体と電槽間のすきまが不足することから、正負極間のショートの恐れが出てくるため見送っている。

形状変更の内容を Fig. 8 に示す。

変更点のポイントとしては正・負極集電体のスリットを長くすることでそれぞれ溶接点数を27%, 55%増加させ極板と集電体の接触面積を増加したこと、負極集電体のタブの廃止により電流の回り込みをなくして電流密度の低下を

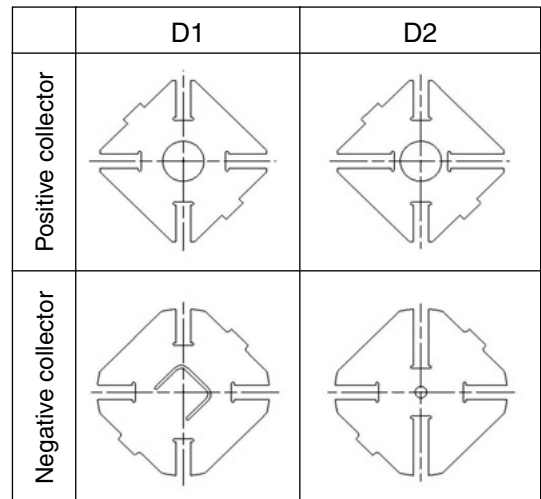


Fig. 8 Form of collector

図ったことがあげられる。以上によりセルの内部抵抗を14%低減することができた。

次にii)の極板の通電抵抗低減であるが、板厚を増加すると反応物質である水酸化ニッケルや水素吸蔵合金のための容積が著しく減少してしまい、容量低下につながる。一方、極板長さ変更は、②の電極面積の向上にもつながり、 R_{η} の低減にもなることから極板長さの延長を検討した。

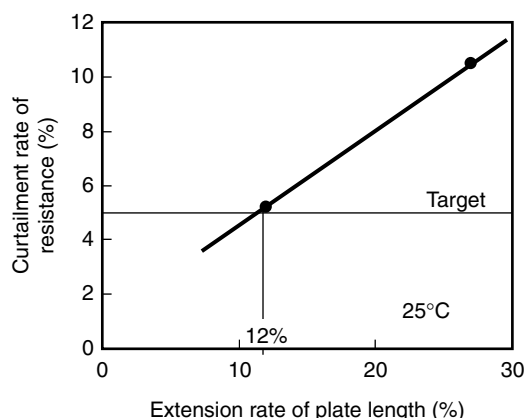


Fig. 9 Effect of plate length on resistance

Fig. 9 に極板延長による抵抗低減の効果を示す。最終的な抵抗の低減目標19%に対し、集電体の形状変更によりすでに14%の抵抗低減ができているため、極板延長による抵抗低減の目標は残りの5%である。この目標を達成するために Fig. 9 から極板の延長を12%とした。

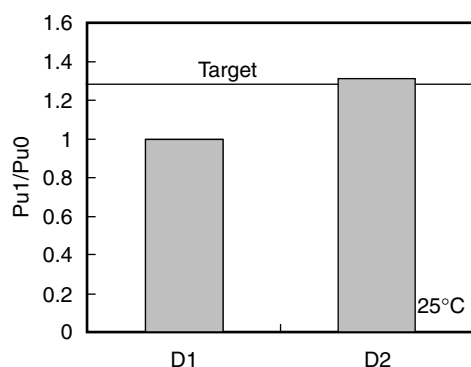


Fig. 10 Ratio of charging power

4.4. 対策の効果

以上の対策による効果を Fig. 10 に示す。

ねらい通り内部抵抗が19%低減できたことから最大充電電力は27%の向上させることができ、目標を満足できた。

また放電出力についても抵抗が低減できたことから Fig. 11 に示すように約10%の向上がみられた。

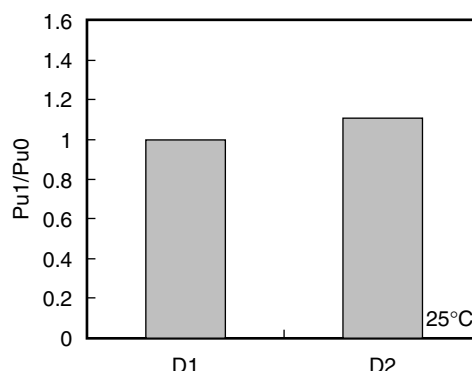


Fig. 11 Rate of discharging power

4.5. 温度の影響

以上バッテリーの出力を向上させるための考え方とその対応および効果について述べた。これらの方法はセル内部抵抗の出力に対する影響が大きい常温付近では有効な手段だが、温度が低下すると式(11)で示されるように交換電流密度の速度定数が指数関数的に低下する。

$$k = C_o^a / C_R^a \cdot k_f^0 \cdot \exp((-anFE_e)/(R \cdot T)) \quad (11)$$

k_f^0 : 標準速度定数

E_e : 平衡電位

それに伴い式(4)および式(10)から分かるように分極抵抗が大幅に上昇して R_T 中の大部分を占めるようになり出力低下の支配的な要因となる。このため低温では極板長さ延長、溶接点数増加、集電体形状変更の抵抗低減効果が相対的に低下しその結果として-25°Cでは Fig. 12 に示すように最大充電電力の向上効果がほとんどみられなくなる。

このように今回の手法は低温での出力の向上には効果が少ないため、従来と同様に温度制御用のファンを用いてバッテリーを加熱することで出力を回復させている。低温の出力を向上させるためには速度定数の低下を補えるレベルまで電極面積を増加させることが必要であり、その手法としては

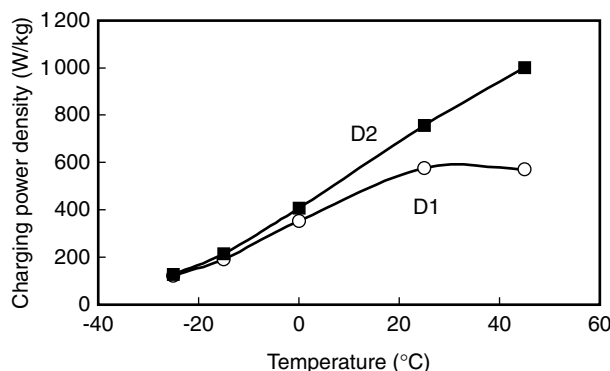


Fig. 12 Characteristic of charging power density by temperature

- a. 電極をシタ式から発泡ニッケルに変更する。
- b. 水素吸蔵合金の粒径を小さくするか表面を荒らす。
などが考えられる。

5. まとめ

CIVIC Hybrid の IMA システム用に、負極集電体タブ廃止による電流密度低下、極板長さの 12%延長、および正・負極極板とそれぞれの集電体との溶接点数増加により抵抗を 19%低減し回生時の最大充電電力を 27%向上したバッテリーを開発した。

同時に本研究を通じて以下の知見が得られた。

- (1) セル内部抵抗の低減は常温の最大充電電力向上に効果が大きい。
- (2) しかし低温では分極抵抗の増大による上限電力の低下が支配的となることから効果が少なくなる。

参考文献

- (1) 大浦秀二, 三浦啓二: 可変機構を用いたガソリンエンジンの高効率化について, 自動車技術, Vol.45, No.8, p.93-98 (1991)
- (2) 落合志信, 内堀憲治, 原一広, 鶴見隆史, 鈴木実: ハイブリッドカー「インサイト」用モータアシストシステムの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.1, p.7-14 (2000)
- (3) 松木正人, 若城輝男, 神山敏宏, 佐藤利行, 賀来嘉昭, 神田正浩: ハイブリッドカー「Civic Hybrid」用パワートレインの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.39-48 (2002)
- (4) 電池応用製品開発動向, 電池と構成材料の市場 1999, ~一次電池, 二次電池, 燃料電池, 太陽電池, キャパシタおよび電池構成材料の市場動向~, 東京, 株式会社シーエムシー, 1999, p.180

■ 著 者 ■



大園 一也



茅野 守男