

〔第Ⅱ編 総論〕

電気二重層キャパシタによる蓄電システムの進展

小型蓄電装置からハイブリッドバスまでキャパシタ蓄電の応用を紹介

●岡村研究所 岡村 逸夫

最近の科学は進歩し尽くして、身の回りには新しい発見はないと思っている人も多いそうだがとんでもない。21世紀のブレイクスルーとして本誌1月号¹⁾で採り上げた「電気二重層キャパシタと電子回路による蓄電システム-ECS」の現状を、本稿以下4人の筆者によってそれぞれの角度から掘り下げて紹介する。

世界の人達が元気になるような発明や発見、新しい産業はIT以外にもいくらでもある。新しいことが出ないのは誰もが失敗をおそれて隣と同じことをやる「隣り百姓」になったからとも見える。

ただし、独自のことはアイデアから工業化まで長い苦難の道程となる。それはこの仕事に従事する諸君の人生と費用の無駄遣いではないか。新方式は本当に役に立つか。新製品は同時に多数のバグや新たな問題を伴ってはいないか。普及を図るための記述はともすると誇大に走り、必要以上の期待を読者に持たせてはいまいか。こうした自戒を含めて電気二重層キャパシタによ

る蓄電システムの現況と展望を述べよう。

●一般の蓄電への応用

(1) キャパシタ蓄電は本当に役に立つか

これまでの化学電池は実によくできている。たとえばアルカリ乾電池、使って捨てるつもりならエネルギー密度の点でもコストでも新型二次電池でさえまったく歯が立たない。

だが、乾電池で走る電気自動車を作るとどうなるか。出勤すると向こう側、帰宅すればこちら側に中途半端に使った乾電池の山ができる。それを知っているから、エネルギー密度が最高で安価にもかかわらず、乾電池で実用の電気自動車を作ろうという人はいない。

それでも携帯電話やパソコンのように、使用する電力量が小さくて、捨てても回収しても大した量にならない用途には、電池は理想的な蓄電装置である。こうした電池の得意な用途では、キャパシタ蓄電は何か特別な条件がな

い限り勝ち目はない。

それではキャパシタ蓄電の出番はないのか。いや、大きな電力を何度も、あるいは大量に出し入れする用途ではキャパシタの特徴が現れる。つまり、大電力で充放電を何度も繰り返すほどキャパシタは有利となる。

蓄電装置である限り、使わないでただ置いておくのが得意だというのは実用性が薄い。したがって、キャパシタが使うほど有利なのは、蓄電装置が本来望まれる最高の特性に違いない。

(2) キャパシタは何に使えるか

可能性の大きな分野は2つある。

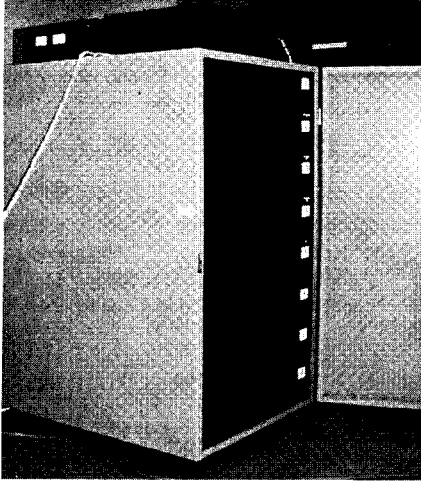
①一般蓄電電力応用

②ハイブリッド自動車

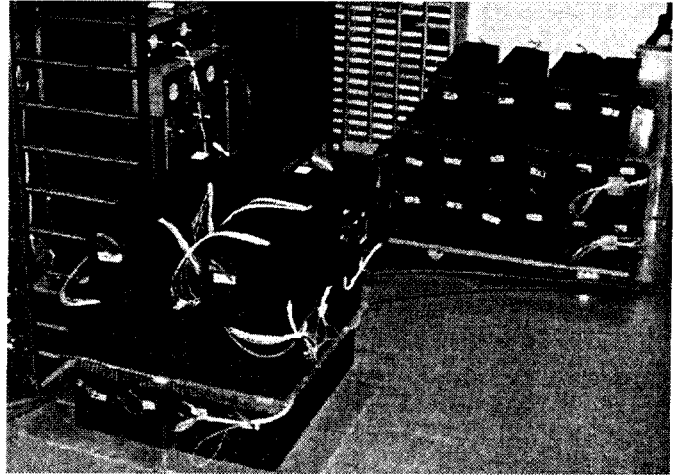
まず①をここで述べ、②は次項で扱う。

①の電力分野で誰でも思いつくのは(a) 負荷平準化と(b) 無停電電源である。負荷平準化とは短時間に大きな電力を必要とする負荷に対し、ローカルに蓄電装置を設けて尖頭電力を供給する。これにより給電設備も、エネルギー損失も節約が可能となる。特に小

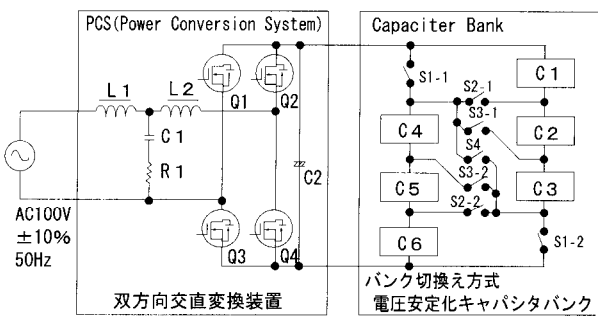
◎写真1 5.8kWh ECS 電力貯蔵システム²⁾



◎写真2 18kF 2.7V 1lit セル10個入り180Wh モジュール



◎図1 ECS 電力貯蔵システムの系統図³⁾



◎表1 実用化または開発中の電力貯蔵技術の実績値²⁾

電力貯蔵技術	効率 AC-AC	システム規模	備考
キャパシタ	84%	1 kW* 4 h	週間効率、DC-DC94%
ナトリウム硫黄	76%	2 MW* 8 h	週間効率、待機電力含む
レドックスフロー	72%	450kW* 2 h	週間効率、補機電力含む
鉛電池	77.7%	30kW* 4 h	週間効率、DC-DC86%
超伝導フライホイール	52.6%	0.3kWh	充電2190秒、放電1100秒、待機時間なし
揚水発電	約70%	実用規模	日間効率 (≒週間効率)

規模の電力系統、コジェネレーション、大電力系統でも局部的に見れば設置効果大きい。

しかし問題は蓄電装置である。充放電の損失が大きかったり、発火や爆発の危険があったり、コストが高すぎると普及できない。キャパシタ蓄電装置をこの目的に用いるのは特にコストの点で、現状は未だ実証試験の段階にある。

(3) 負荷平準化の実例

現在どこまで進んだか、実証試験の例を写真1に示した。この大きなキャビネットは5.8kWhのキャパシタが入っている。箱の外寸で計算するとエネルギー密度は10kWh/m³と未だかさ張

っているが、以前の同系のシステム⁴⁾に比べて密度は約3倍になった。中身のキャパシタは写真2に示した180Whモジュールで、その中には本誌1月号で紹介¹⁾した18kF、1lit単セル、エネルギー密度17Wh/litが10個ずつ入っている。

システムは図1に示した構成で、キャパシタは4段シフト型バンク切換え⁵⁾で電流ポンプを省き直接に双方向交流変換器PCSを経て系統に接続している。

写真1のキャビネットの上に見える2つの箱のうち計器のついているのがPCS、他方がMOSFETによるバンク

切換えスイッチである。

問題の充放電効率は表1に示したように、これまでに知られている限りでは最良となった。表でDC-DCとあるのはバンクスイッチを含むキャパシタブロックの直流での充放電効率で、それに交流変換器の往復の効率を掛けたのがAC-ACつまり交流で充電し、交流で出力するまでの全効率である。

週間効率とは土、日曜日を含む1週間の積算効率で、土日は充放電がないものとして補機などの消費を含めて計算する。キャパシタに補機はないが、金曜日に全放電して週末を過ごすとき自己放電の分だけ、1%弱ほど効率が向

上する。

(4) キャパシタ蓄電コストは引き合うか

キャパシタの蓄電コストは、出力密度が大きい充放電時間の短いものほど電池に対して有利で、上の例のような2~4時間充放電は二次電池と直接競合する。

現在の生産規模では買い方にもよるが、価格が1万円/Wh程もしているから電池とWh当りで比べれば勝負にならない。しかし、「蓄電装置の価格は何回使えるかによってWh・cycle当たりで比較すべき」とか、「現在の高価格は生産規模が原因だから」意味のある用途から使いはじめれば量産規模の増大に伴って価格は必然的に低下する」と予測されている。

●ハイブリッド電気自動車

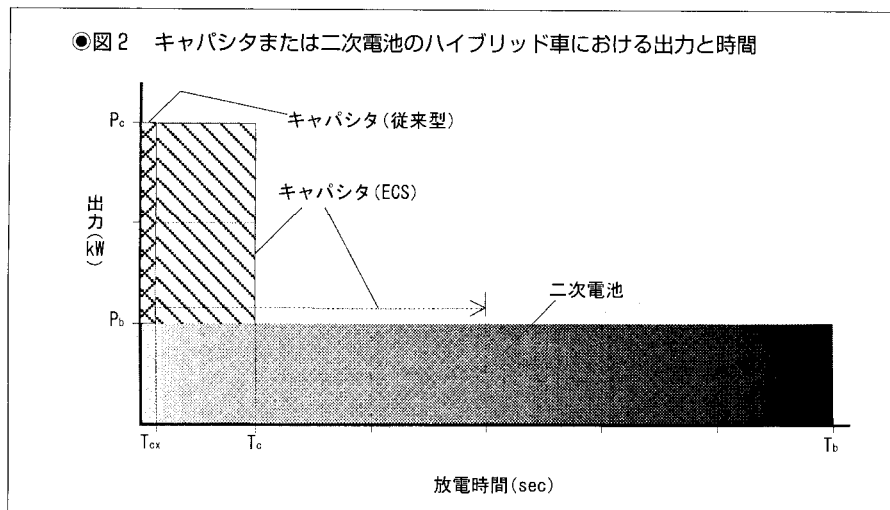
(1) キャパシタと二次電池の長短

今後しばらくの間、キャパシタと二次電池のどちらがハイブリッド車に適するか、議論が盛んになるであろう。車を製造販売している関係者は、実はあっちが良いとは言えず製品を擁護せざるを得ない。また、原理が勝っていても、それをういた車種が優秀とは限らない。ここでは純技術的に見て、どういう長短があるか論じてみよう。

キャパシタは出力密度が大きいが電池に比べてすぐなくなるといわれる。その状況を図2に示した。描画の条件は従来のキャパシタとECSの実効エネルギー密度の差は5倍、キャパシタの出力密度は二次電池の3倍、二次電池の実効エネルギー密度はECSの2倍とした。

ECS以前のキャパシタはエネルギー密度が1~3kW/kgで、それを有効に使いこなす電子回路もなかったため、フルパワー P_c での加速時間は図で T_{α} と記した3~4秒間⁶⁾であったという。

●図2 キャパシタまたは二次電池のハイブリッド車における出力と時間



これに対してNiMHやLiイオンなど新型二次電池は、取り出せるパワーは小さく P_b に過ぎないが、その出力レベルでなら図の T_b まで長時間の走行ができる。ただし、二次電池は深い充放電サイクルで寿命が短くなるので、できるだけ浅い充放電で済ませたい。この性質をキャパシタと同じ扱いをしたのでは公平でないから、図ではそれを表すために電池の放電時間が長くなる右の端ほど黒く塗った。

さらに最近注目されているECSでは、電子回路を併用しキャパシタから取り出せる実効電力量は従来型の5~10倍、フルパワー P_c での加速時間 T_c は22秒~1分間に達しているのを図示した。

(2) エネルギー密度の評価と誤解

二次電池を用いたハイブリッド車の関係者は「キャパシタはエネルギー密度が二次電池に比べて小さい」ことによる不利を指摘する。ECSを経験していない方々は、キャパシタとは在来型で図2の T_{α} までの容量を考えるか、あるいはECSの加速時間の公表値から、二次電池のパワー P_b で T_c までしか加速できないと誤解しやすい。それに比べて二次電池は図2でいえば6倍も長く走れる、と思込みがちである。

他方、二次電池のエネルギー密度は T_b までであるはずだが、図の黒い領域まで充放電を繰り返すと寿命が持たないという不安がある。そのため実際の

車では放電した電池はできるだけ細かく充電し、図の左端で使う。つまり、せっかくのエネルギー密度は電池が壊れるから極力使わないように制御している。

確かに、どうしても使わなければならない時だけ二次電池のエネルギーに頼るなら、寿命への影響も少ないから、これも賢明な利用法に違いない。

(3) 出力密度と回生制動

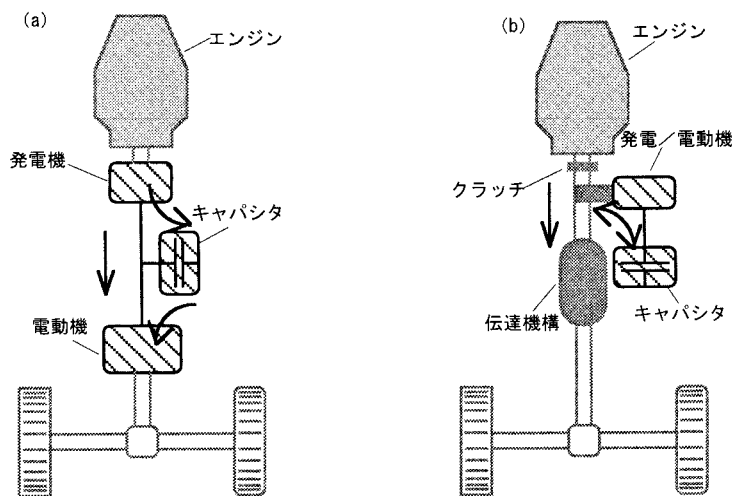
図2を見てすぐ分かるのは、キャパシタでは P_c だけの電力を回生できるが、電池ではその1/3の P_b に制限される点である。

二次電池を前提としたシステムを考えた場合、これ以上入れても電池を壊すだけだから、 P_c だけの回生電力を発生させずに機械ブレーキに分担させ、モータを1/3の大きさで済ませる。その代わり小電力でなら蓄電量の大きくなる特徴を利用して、電池の寿命を縮めない範囲で有効に使う……これはこれで巧みな設計といえよう。

キャパシタを前提としたシステムでは、回生制動電力を完全に効率よく回収し、キャパシタはできるだけ深く、何回でも充放電する使い方がよい。電池は使わない方が長持ちするが、キャパシタは正常な使い方なら自動車より寿命が長いので、使うほど有利である。

しかし、 P_c だけの電力を回収するにはそれだけの大きさのモータが要る。

●図3 シリーズ (a) およびパラレル (b) ハイブリッド方式



シリーズハイブリッドや燃料電池車なら必ず大きなモータがあるからよいが、パラレルハイブリッドでもキャパシタを有効に使うには、ある程度のパワーのあるモータと電気系が必須である。

環境も CO₂も大切だが、コスト競争の激しい自動車業界で 1W でも余分なモータを積みたくない節約に走ったとしても、我々ユーザーが高価になっても環境に良い車を、といわない限り無理からぬところかも知れない。

(4) シリーズハイブリッドでは

エンジンとのハイブリッド電気自動車には、すでに何度も出てきたシリーズとパラレルの2方式がある。その折衷型や各社独自の工夫も見られるが図3の2つが基本である。

シリーズ・ハイブリッド方式はエンジンで発電機を回し、後はすべて電気で動く。エンジンによる発電は効率が最大になる回転数範囲でオンオフ動作させ、キャパシタを充電する。出力の増減は最大出力を100%とすると0~50%で使う際はキャパシタからの放電量で制御し、それで不足する50~100%の出力範囲では発電機の50%を加えて用いる。したがって変形もあり得るが、もっともオーソドックスに考えると走行用電動機の最大出力に対し発電機が

50%、キャパシタが50%の電力を供給できればよい。

ところが回生制動では、電動機が発電動作を行うから効率を無視すれば、加速と同じ減速度のブレーキをかけると100%の電力が戻ってくることになる。だが、実際にはモータドライバーや伝達機構、転がり抵抗、空気抵抗などの損失を差し引いても70~80%の電力でキャパシタが充電される。

シリーズハイブリッドの蓄電装置は加速時に100kWなら、前述した理由から回生時には160kWの充電電力を扱うので、「回生時が設計のピーク値」となる。これがハイブリッドで蓄電装置がむずかしく、高速からの制動エネルギーを捨ててしまいたくなる原因である。

エンジンの動力をいったんすべて電気に変換するので、シリーズハイブリッド車は効率が悪そうに思える。確かにエンジンのもっとも効率のよい回転数だけで走り続ける車で比べれば、効率が100%でない発電機と電動機が入る分だけ損をする。しかし、都市部を運行する車では、エンジンを低速で用いることが大部分なので、走行平均のエネルギー効率が極端に低くなり、そこで比べるといつも最高効率でエンジンが回るシリーズハイブリッドの方が

遙かに有利となる。

その上、十分なキャパシタ量を積んでいるので高い回生効率が得られ、後にシリーズハイブリッド・バスの実例で述べるように、これまでのところ、公表されたエネルギー効率の改善率では後述する ECS を搭載した写真3の日産ディーゼル工業(株)製シリーズハイブリッドバスがチャンピオンとなっている。

あえて課題を挙げれば、50%出力を発電する発電機に100%出力を負担する電動機と、50%出力に80%の回生電力を負担できるキャパシタを積載することが必要な点であろう。発電用エンジンは小さくて済むものの、比較的高価な電動機とキャパシタが共に大きいことがコスト競争では不利に働く。

しかし、それでも完全な低公害と低燃費、つまり CO₂排出量の削減を目指して燃料電池車に進むのと比べれば、低公害エンジンとキャパシタによるシリーズハイブリッドは同等の燃費と安全と低公害をより安価に、しかもすでにほぼ完成された技術で実現が可能である。

(5) パラレルハイブリッドでは

パラレル・ハイブリッド方式は図3(b)のようにエンジンに並列に、それを補助する動力として入る。しかし、ここでは「エンジンの駆動力が電動機の力と並列に駆動輪に伝えられる」という以上の違いを指摘すべきであろう。それはパラレルでは電動機側をいくらでも小さく設計できる点である。

もちろん、電動機を小さくするほどその特性はエンジンそのものに近づく。だがその代わり、ハイブリッドでもっとも問題となる蓄電装置、従来なら二次電池の負担を軽くすることが可能なのである。いうなれば、格好だけのハイブリッドからフルに働く設計までお好み次第、どの段階のものでも作れる。

ただし重要な問題が一つ残る。それは回生制動の吸収である。上述の方針で小さくした電動機と蓄電装置では高速

からのブレーキは機械式に頼るほかはなく、制動エネルギーは回収しきれない。

ほかに細かなことをいえば、回生エネルギーで電動機が回された時、エンジンも一緒に回ってしまうとこれがブレーキになって回生効率が低くなる。それを防ぐには図3 (b)に示したようにエンジンとモータの間にクラッチを入りたい。こうしてハイブリッドのいろいろな運転のモードを考えると、あちこちにクラッチや無段変速機を入れたくなり、下手な工夫をすればするほど複雑で高価で厄介なシステムになってしまう。

パラレルハイブリッドは細工が利く代りにこうしたファクタが多いから、素人の論評の域を越えている。この辺は優れたプロフェッショナル設計者の腕前に待つべきなのであろう。

〔6〕 燃料電池による乗用車では

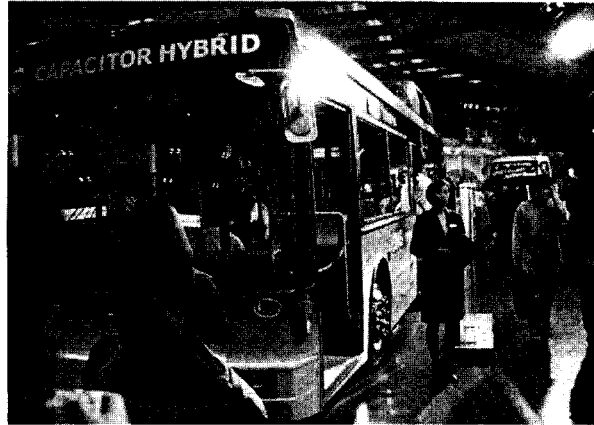
燃料電池の出力は電気だから、図3 (a) のシリーズハイブリッドのエンジンと発電機の部分が燃料電池に置き換わる。走行用の全出力を出せる大きな電動機が必ず存在する。

キャパシタがなくても車は走るが、回生制動で生じた電気を燃料電池を逆にして水素に戻すのは無理だから、エネルギー効率を目指すなら、図4に示したキャパシタによるシリーズ・ハイブリッド構成が合理的である。図の場合、回生電力は60kWの駆動モータが発電するのでごまかしが利かないから、後の稿で述べる商用車と同様にキャパシタの利点が明白となる。

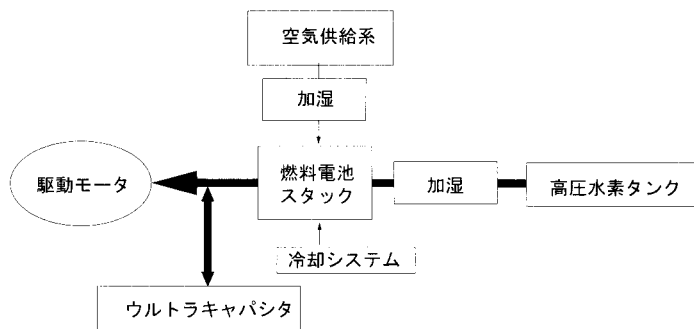
キャパシタを積んで燃料電池とハイブリッドにするなら、第一の目的は回生制動の蓄電にあるが、即応性の利かない燃料電池の発電ギャップを埋めピーク負荷を負担するなどにも活用できる。

写真4は図4とともに本田技研(株)が公表した、キャパシタを補助電源に用いた燃料電池電気自動車(FCX-V3)で、2000年11月から米国での官民合同プロジェクト「カリフォルニア

●写真3 東京モーターショーでのキャパシタハイブリッドバスとトラック



●図4 ホンダFCX-V3のシステム構成⁷⁾(概念図)



●写真4 キャパシタとのハイブリッドにした燃料電池車⁷⁾



FCパートナーシップ」に出発前の写真である。

【参考文献】

- 1) 岡村勉夫：電気二重層キャパシタと電子回路を組み合わせた蓄電装置 ECS、電子技術、Vol. 43, No. 1, p14-17, 2001.
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：負荷平準化新手法実証調査 最終報告書、2000年3月。
- 3) 伊久美早利、他：電気二重層キャパシタを用いた高効率電力貯蔵システムの可能性、エネルギーシステム・経済・環境コファレンス、

- 2001年1月。
- 4) 新山信一郎、他：新型電力貯蔵装置 ECS を用いた PV-ECS システムの開発、電学論、Vol. 120-B, No. 2, p264-270, 2000.
- 5) 岡村勉夫：電気二重層キャパシタと蓄電システム、日刊工業新聞社、(1999-3)
- 6) 藤泰志、他：低燃費コンセプトカー搭載のバワートレーンシステム、自動車技術、Vol. 51, No. 9, 1997
- 7) 本田技研工業(株)：Press Information, Sept. 28, 2000.

●おかわら みちお
(株)岡村研究所 所長