

新しい電気二重層キャパシタと蓄電システム

株式会社 岡村研究所 代表

岡村 勉夫

1. まえがき

電気二重層の原理やキャパシタの性質などは省き、何が新しい電気二重層キャパシタで、蓄電システムのどこが新規かについて、既に御存知の方も居られることを意識して少し変わった角度から述べる。

エネルギーを高効率で蓄えるメンテナンスフリーで長寿命な蓄電装置を目指し、1992年に着手したECSプロジェクト^{(*)1}は現在までに約20企業の参加と公のサポートを得て大きく発展した。

しかし現状は研究成果こそ上がったが、事業としては未だ出発前夜である。“研究は商業化によって完成する(T.A.Edison)”なら、ECSはやっとスタートラインに立ったというべきであろう。

2. キャパシタもECS方式で変る

2.1 エネルギー密度の増強が鍵

キャパシタが蓄電装置として理想的なことは昔からわかっていた。難点はただ一つ、エネルギー密度が小さいことである。しかしエネルギー貯蔵装置にとっては他の何が優れていても、肝腎のエネルギー密度が小さくては実用にならない。これこそが二次電池や揚水発電所に先を越された原因であった。

キャパシタの蓄電装置を研究した日本および欧米の

先学は、キャパシタとしてのエネルギー密度の増強に見切りを付け、内部抵抗の低いパルス負荷専用を狙うか、化学反応を容認する擬似容量や電気化学キャパシタに向かった。

しかしECSでは内部抵抗を取って許容し用途別に標準設計を定め、それぞれを最適な電子回路と組み合わせる方法により、従来の4倍～25倍のエネルギー密度を得ることに成功した。種々の試作や実証試験も好結果を挙げ、図1に掲載したECSを積んだハイブリッドバスは画期的な成果^{(*)2}を示し、ハイブリッドトラックも発表^{(*)3}された。

以下ではECSの電子回路部、キャパシタ部、応用例の順に要点を述べよう。電気、物理、機械、化学などの多分野に渡るので説明の至らない点は末尾の参考文献と成書^{(*)4}で補強して頂きたい。

2.2 キャパシタに多量の電気を蓄える方法

キャパシタに最大限の電気を蓄えるには、総てのキャパシタを耐電圧一杯まで充電するに限る。だが従来は直列にしたキャパシタではそれが不可能だった。同定格のキャパシタを何個も直列にして長期間使うと例外なくキャパシタの劣化を生じる。原因はキャパシタが分担する電圧が不均一になり、特定のキャパシタに過大な電圧が加わるためであった。



日産ディーゼル工業(株)

図1 世界初のECS搭載15トン低床式シリーズ・ハイブリッドバス^{(*)2}

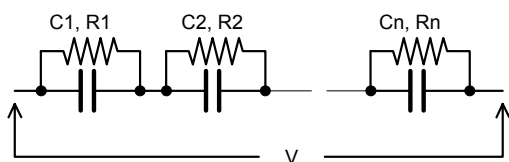


図 2 直列にしたキャパシタの電圧配分の計算^(*4)

静電容量 $C_1 \sim C_n$ 漏れ抵抗 $R_1 \sim R_n$ のキャパシタを直列にして電圧 V に充電した図2のキャパシタ X の任意の時間の負担電圧 V_x は、定数 k ($0 \leq k \leq 1$)と置く^(*4,5),

$$V_x = \left(\frac{k \cdot R_x}{R_1 + \dots + R_n} + \frac{(1-k) \cdot \frac{1}{C_x}}{\frac{1}{C_1} + \dots + \frac{1}{C_n}} \right) \cdot V \quad \dots(1)$$

この結果は電圧配分が静電容量の逆数と、漏れ抵抗のバラツキの和になることを示す。キャパシタのバラツキとして静電容量 $\pm 5\%$ 、温度と経時変化 $\pm 5\%$ 、漏れ抵抗 $\pm 10\%$ と見積もれば、使用電圧を約70%にする必要があり、蓄電できる容量は49%となる。

直列キャパシタの電圧負担を均等にする課題は電解コンデンサの使い方として昔から研究されていた。現在知られている実用的な手法は各キャパシタに、その漏れ電流の10倍程度を流す均圧抵抗を並列に入れ、全体の電圧を耐圧の70%程度で用いる。

同じ方法を電気二重層キャパシタに用いると、漏れ電流が最大のキャパシタの10倍になり、蓄電容量が49%に低下する。それは我慢できるか。

2.3 キャパシタを長持ちさせる方法

キャパシタの電圧を耐電圧の7割に下げるのは極端と見えるかもしれない。だが上の計算では漏れ電流のバラツキを $\pm 10\%$ と仮定した。電気二重層キャパシタで漏れ電流の分布を $\pm 10\%$ 以内に保証するメーカーは1社もない。キャパシタは長寿命だからその間の環境

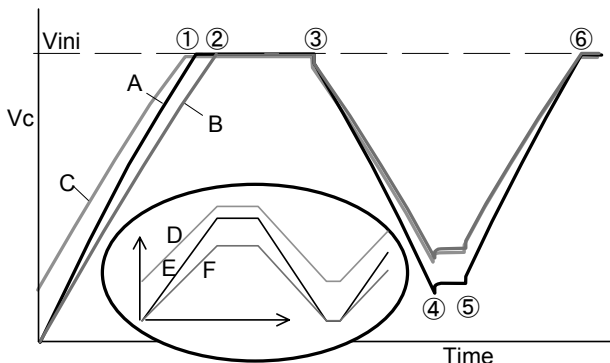


図 3 キャパシタ初期化の原理

変化まで考慮すると、無理であろう。つまり7割に下げても未だ危ない。それが「直列にした電池やキャパシタは寿命が短い」という現場での経験に裏付けされている。何個のキャパシタをどう接続しても、個々のキャパシタの電圧が絶対に耐電圧以上にならない、という制御を確実にすることがキャパシタを長持ちさせる最善の使い方である。

ECSではその実現に並列モニタと呼ぶ電子回路と充電制御を用いる。並列モニタは基本型から複雑なものまで3種類あるが、基本動作は共通で「キャパシタを初期化して用いる」という方式である。

その原理を図3に示した。通常の使い方では円内のように静電容量のバラツキ、自己放電の差によって生じる初期電圧の違いから、直列に充電したキャパシタはD,E,Fのように異なった電圧に達する。それに対してECSではキャパシタを何らかの手段によって電圧 V_{ini} に一旦揃える。これをキャパシタの初期化initializeと呼ぶ。これは電子回路の計算の際、キャパシタに初期電圧を与えるのと同じである。

初期化されたキャパシタは初期電圧 V_{ini} を基準にして図のように充放電される。したがって、特性の変化がない限り、満充電状態では V_{ini} を超えることはない。経時変化などによってバラツキが生ずれば再び初期化して、満充電に戻る正常な状態を維持する。上述の方法を基にして、初期化時の電力損失を軽減したり、使いながら徐々に初期化していくなど、いくつかの手法が開発・実用化された。

2.4 キャパシタを効率よく充放電する方法

キャパシタの電圧はゼロから耐電圧一杯まで変化する。それを従来の二次電池の感覚で充電すると奇妙なことが起る。たとえば電池を充電するための手回し発電機で大容量のキャパシタをゼロから充電すると、発電機がたちまち熱くなる。キャパシタの電圧ゼロでは、発電機からの電流が流れ込んでも電力はゼロ、発電効率0%で発電したエネルギーはすべて発電機を暖めてしまう。

同じ現象は電源が乾電池や太陽電池でも起る。つまり電源が一定電圧の電圧源である場合、キャパシタへの充電は初期に大電流が流れ、効率は極めて低い。キャパシタが充電されて電圧が上がってくると条件は改善されるが、電圧源の電圧に等しくなるまでの全範囲を積分すると効率は50%となる^(*4)。これでは玩具ならともかく、省エネルギーや環境問題には立ち向かえない。解決法は充電電源に電流源を用いればよい。電圧源たとえば太陽電池に電流ポンプと名づけたスイッチングコンバータを挿入し、そこからキャパシタに充電する。

図4が電流ポンプの一例で降圧チョップ型と呼ぶ、スイッチングコンバータの基本回路である。電池Bから接続されたスイッチSはトランジスタやパワーMOSFET, IGBTを用いる。最初スイッチがオンになった瞬間は電流はゼロだが、時間の経過とともにチョークコイルLを経てキャパシタCへの充電電流 I_L が立ち上がってくる。その電流をAで検出して一定値に達したらSをオフにする。すると電流 I_L は代わってDから供給され続けるが、次第に減少していく。定常状態では図(b)のチョークコイルLを流れる電流 I_L の最小値 I_{min} と最大値 I_{max} の間を往復するよう、ヒステリシス特性を持たせたコンパレータAを用いると簡単に電流源型のスイッチング電源が得られる。

電流ポンプが電流出力である他、通常のスイッチングコンバータと異なる点は、入出力電圧の範囲を広く求められ、全負荷時ばかりでなく軽負荷時の効率も高い必要があることで、その性能はECS全体の効率を大きく左右する。

2.5 電流ポンプを補完する技術

ECSの応用が広がるにつれ、新たな要求が起こった。電流ポンプは小型装置では十分な機能を発揮するが、kWオーダー以上の大型機となるとその効率、重量や体積が邪魔になる。大型のモータードライバや交直変換器の前に、同じ容量のスイッチングコンバータを置く代りにもっとスマートな解決方法はないか。

その答えがバンク切換え^(*)である。これは負荷側を切換えても同じことができるが、通常はキャパシタを切換えるのが便利である。その原理を図5に示した。2段～4段以上も可能だが、3段切替えが特に有利なので3段を例に動作を述べる。

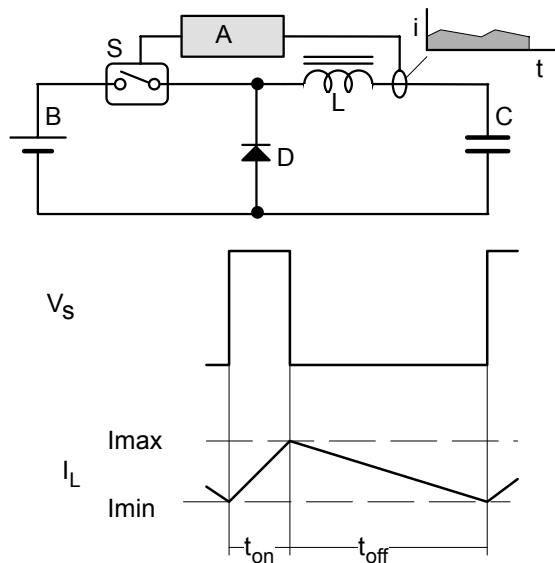


図4 降圧チョップ(a)とスイッチング波形(b)

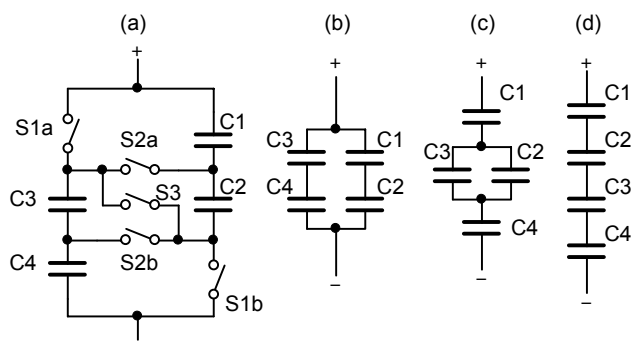


図5 シフト型3段バンク切換え^(*)

スイッチとキャパシタバンクの構成は図5(a)だが、切換え状態を示す(b)～(d)がわかりやすい。満充電からの放電はS1aとS1bを同時にオンにした(b)の状態ではじめる。電圧が設定値を割り込むとS1a,bをオフにしてS2aとS2bを同時にオン(c)の状態にする。さらに放電が進むとS2a,bをオフにしてS3をオン、(d)の全直列接続にする。

いずれの状態でもスイッチの接点は電源に直列に1個しか入っていない。S1とS2のスイッチはそれぞれ二つあるが電流を半分づつ分担する。したがって見かけのスイッチの数は5個だが、半導体スイッチなどで設計する場合のスイッチの電流容量まで考えると3個分に相当する。こうした切換えは図6のように何段でもできる。

バンク切換えは、スイッチングコンバータではある程度は避けられない「軽負荷時や広い電圧範囲における効率の低下」がほとんどない。しかも小型軽量で信頼性も高い。誰でも心配をする点は、

- ①主電流をスイッチで切換えて大丈夫か
- ②スイッチの信頼性が低くないか
- ③切替え時の横流で素子が破壊しないか

などだが、①②はスイッチングコンバータに比べれば遥かに問題は少なく、③は制御回路の工夫で解決されている。

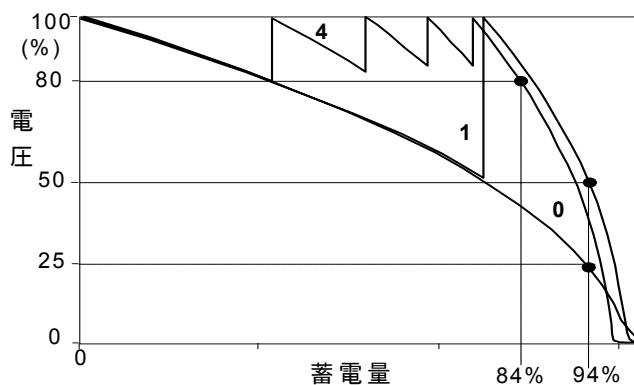


図6 バンク切換え時の電圧変化 (0, 1, 4段)

3. キャパシタのエネルギー密度を増す

3.1 電流源による充放電に適したキャパシタ

従来の電子部品のコンデンサと比べると市販のコイン型電気二重層キャパシタは、内部抵抗の高いのが目立つ。たとえば低圧大容量のアルミ電解コンデンサを2.5Vに充電して小出力の豆電球につなぐと、瞬間ではあるが明瞭に点灯する。だがコイン型の電気二重層キャパシタでは静電容量が遥かに大きいはずなのに、同じ電球が点かない。ましてパワー用に使うなら、邪魔な内部抵抗を除かなくてはと考えるのが当然で、我が国のキャパシタ各社も、米国DOEによる国家プロジェクトも一斉に内部抵抗の低減を目指したのはもったもな方針であった。

それなのに、世界の大勢を知らない筆者は一人で逆方向に進んだ。キャパシタ蓄電の最弱点はエネルギー密度だから、内部抵抗などは犠牲にしてもエネルギー密度の改善を最優先と考えたのである。

電気二重層キャパシタを作ったことのある人なら良く分かるが、内部抵抗を下げるのとエネルギー密度を高めるのは、ほとんど正反対の設計となる。むやみに内部抵抗を低くしようとしたら、大きなエネルギー密度が得られる筈はない。しかし、内部抵抗を大きくするとオーム損が増えて、充電効率は低下し大出力電流は得られず、キャパシタの特徴が消失してしまう……と誰でも思っていたようだ。

3.2 内部抵抗と放電時間と効率

だがキャパシタの充放電効率は内部抵抗で定まるのではなく、内部抵抗と放電時間の比で決まる。その関係は静電容量 C 、内部抵抗 R とすると、時間 t で全容量を定電流充電した効率 p は式(2)、放電は式(3)で得られ、効率90%以上で2式はほとんど重なる。

$$p = t / (2CR + t) \dots\dots(2)$$

$$p = (t - 2CR) / t \dots\dots(3)$$

これをプロットしたのが図7である。(従来の"PS"-LなどキャパシタのECS標準モデル名が糊パワーシステムの商品名と誤解されるのでEC-と変更した。) 図と(2),(3)式で明らかかなように、キャパシタの内部抵抗が高くても、 ΩF の大きさに比例して充放電時間を変えれば、同一な充放電効率が得られる。そして実用上十分な時間で充放電できるキャパシタの内部抵抗は、当初考えられていたものより遥かに高くてもよいとわ

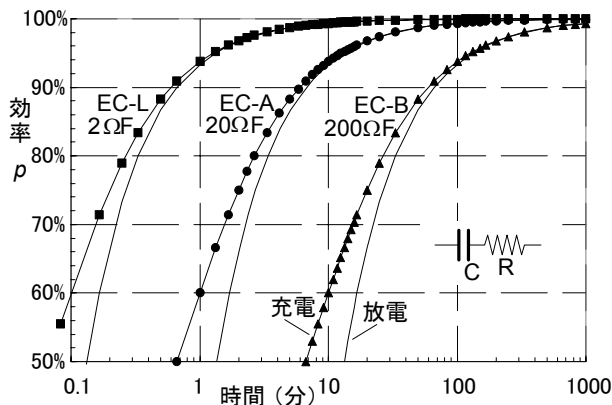


図7 キャパシタの内部抵抗、効率 ρ と充放電時間 t

かった。

3.3 高エネルギー密度キャパシタの構造と設計

ECSでは上に述べてきたような考え方で、キャパシタの設計を根底から見直した。何度か改訂された現状が図8である。黒い四つの丸が標準仕様の目標値で、ECSのキャパシタは総てこの標的として設計を行う。図には研究レベルと製造の実績を付記した。

現在のところ市場で最も有望なのはEC-Lタイプで、ハイブリッド自動車に既に実績があり、その他の応用も数多い。研究上では高エネルギー密度のEC-Bタイプが非多孔性炭素を用いて世界記録を出しているが、量産には達していない。

キャパシタ自体の構造と設計は可能性としては擬似容量や非多孔性炭素があるものの、コストと時期との兼ね合いで水蒸気賦活の活性炭を、圧延または塗布して電極を形成する手法で、ECS用キャパシタは工業

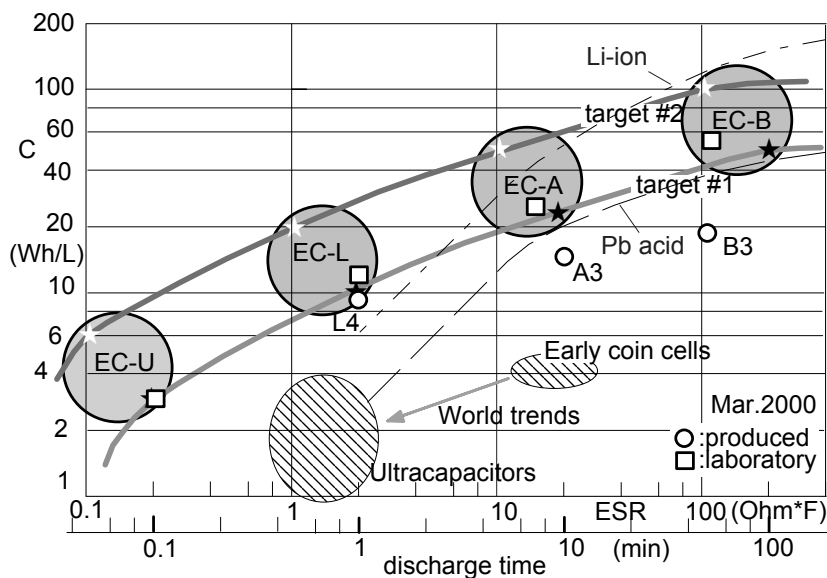


図8 ECS用キャパシタのエネルギー密度と内部抵抗

化が進行するであろう。ただしアメリカMaxwell社は活性炭繊維を用い、ロシアESMA社はニッケル電極と活性炭電極を組み合わせた単極電気二重層キャパシタで量産に入ると聞く。

3.4 円筒型か角型か、その利害得失

電気二重層キャパシタの大容量化が進むに当たってアルミ電解コンデンサの製造技術や容器を利用するのは必然であった。特にコンデンサのメーカーが当事者であれば、多くの技術や経験、それに製造機器まで転用できる利点があった。

しかし筆者は何回かの試作経験と試行錯誤の末、アルミ電解コンデンサの製造技術の延長線から脱皮しなくては、ECS用電気二重層キャパシタは目的を達しないと考えた。ごく小型なものは別で、エネルギー密度や内部抵抗を問題にせず単セルを部品として扱うには円筒型が有利である。しかし、エネルギー貯蔵装置として本格的に使うと、箱を箱に入れそれをまた箱に入れる状況となり、その充填率の積は30%台と、貴重なキャパシタのエネルギー密度を損なってしまう。そこを脱皮するにはどうしても角型だと考えるに至った。

角型の難関は製造コストである。作り方によって容器が厚く重くなりエネルギー密度でも有利とは限らない。それを解決するのが研究であり、製造技術であるはずだ。現状は諸問題とくにコストの点を解決したとは言いがたいが、図9に示すキャパシタが各位の協力で量産できる状態になった。

3.5 キャパシタは永久か……その劣化特性

電気二重層の寿命はほとんど永久といってよい。だが、電気二重層が発生する環境が壊れるとキャパシタとしての機能は損なわれる。したがって、電気二重層キャパシタの寿命は作り方次第で長くも短くもなる。

18 kFの電気二重層キャパシタは電気二重層面積が大きいから、1 μ Fのアルミ電解の 18×10^9 倍壊れると思うのは杞憂である。静電容量をもたらす電気二重層の不良率はアルミ酸化皮膜とは比較にならず容器やシールの劣化率で評価する方が当を得ており、18 kFと1 μ Fは大差ない不良率と考えてよい。

4. 新方式ECSの実施例と課題

4.1 キャパシタはパルス用という認識に挑む

今年の世界電気自動車会議EVS-18のプログラムを見て驚いた。電気二重層キャパシタのセッションが消



図9 左からEC-A 470F/48ml, EC-L 1350F/150ml, EC-B 18kF/1l

えた……いや、そうではなくて「パルス電源」という区分ができ、そこにフライホイールなどと一緒に入っている。キャパシタはパルス電源だと世界の学会で定義されてしまった。

確かに欧米の研究では、キャパシタの用途は短時間用、ECSの標準型ではEC-L程度の内部抵抗のものに限られ、二次電池と直接競合するようなエネルギー密度のものは全く現れていない。

世界の隅の方に居て黙っていたのでは、せっかくここまで来た技術が世界に認識されないのでは、このEVS-18にECSの論文を出すことにした。採択されればベルリンまで出かけて行って、エネルギー密度を5~20倍にする方法、キャパシタはパルス用に限りなことをPRしようと考えている。

4.2 ECS実験セットの実例

ECSの特性をいくら詳しく書いても、実物ができるまではなかなか信用してもらえなかった。これを応用する立場では、実物を試して実感をつかまないと利用法も浮かんでこない。それを解決する一助にもと、ECSの原理で動作する図10のような小さな装置を作

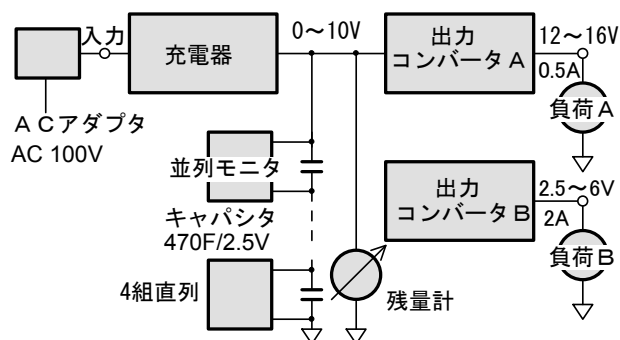


図10 ECS実験セット

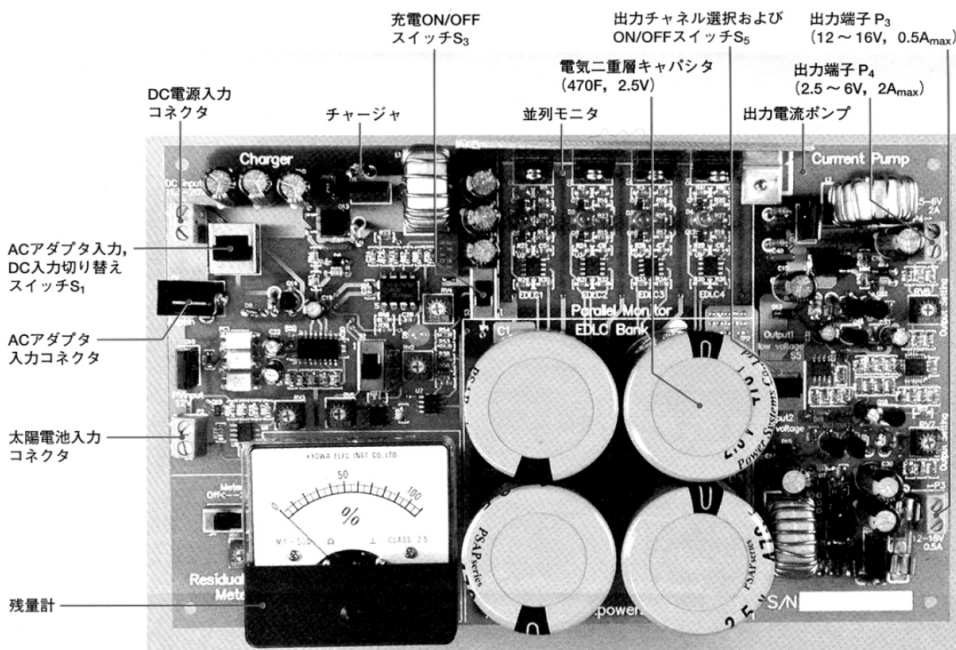


図 11 ECS実験セットの外観^(*6)

り通信販売で購入，実験できるようにした。以前のスターキットも同じ目的だが，大型で1式約250万円と高価だから誰でも使うには無理があったしかし，今回発表されたものはB5版のプリント基板に図10に示した構成で，左からACアダプタを介してスイッチングコンバータを用いた電流源型の充電器，470Fのキャパシタ4個のそれぞれに並列モニタを設けその動作が見られるようにLED表示がつけてある。出力コンバータは昇圧型と降圧型と二つあって，切り換えスイッチで選択して用いる。残量計は折れ線近似型でキャパシタの端子電圧を蓄電量に変換して満充電を100%としてリニア目盛りで表示する。図11は基板の写真である。

間電力で充電して昼間の負荷ピーク時に放電する1日1サイクルで2~4時間充放電といったBタイプが適する用途に分かれる。

短時間需要のタイプはハイブリッド自動車の項で述べるが，長時間の電力貯蔵は現在どこまで進んだか，

中央に見える4個のキャパシタは図9の左端にあるEC-Aタイプ470F，20ΩF，体積48mℓで，従来市販されている同サイズが100~150Fだから，エネルギー密度は5~3倍大きい。

4.3 電力貯蔵と負荷平準化

電力分野への応用は，UPS無停電電源や電力系統安定性の改善，コジェネレーション系での尖頭負荷の吸収などEC-Lタイプが適する1分間ほどの短時間需要と，夜

表1 実用化または開発中の電力貯蔵技術の実績値^(*8)

電力貯蔵技術	効率 AC-AC	システム 規模	備考
キャパシタ	84%	1kW*4h	週間効率，DC-DC 94%
ナトリウム硫黄	76%	2MW*8h	週間効率，待機電力含む
レドックスフロー	72%	450kW*2h	週間効率，補機電力含む
鉛電池	77.7%	30kW*4h	週間効率，DC-DC 86%
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)



図 12 ECS 5.8 kWh 電力貯蔵システム^(*8)

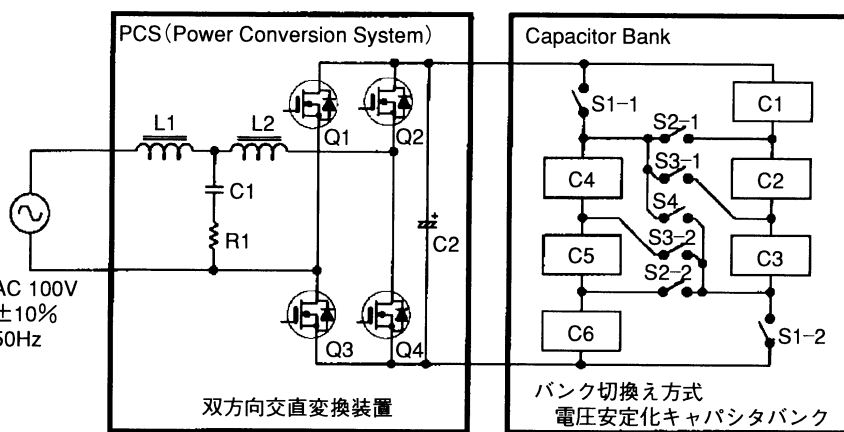


図 13 ECS電力貯蔵システムのブロック図^(*9)

実証試験の例を示そう。

図12の大きなキャビネットは5.8 kWhのキャパシタが入っている。筐体の外寸から算出するとエネルギー密度は10kWh/m³と未だ嵩張っているが、以前の同系のシステム^(*)7)に比べれば約3倍になった。内部のキャパシタは1本あたり180Whのモジュールで、1モジュールには図9の18kF、約1ℓの単セル、エネルギー密度17Wh/ℓが10個づつ入っている。

システムは図13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^(*)4)を用い電流ポンプを介さずに直接に双方向交直変換器PCSを経て系統に接続している。図12のキャビネットの上に見える二つの黒い箱のうち計器のついているのがPCS、他方がバンク切換えスイッチである。

問題の充放電効率は現在までに発表されている各種の方式との比較を表1に示したが、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に対する直流での充放電効率で、それに交直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、交流で出力するところ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。

4.4 キャパシタ・ハイブリッド車の実例と特徴

1) キャパシタと二次電池の長短

今後しばらく、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人や関係者は、実はあちらが良いとも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、それを用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電池に比べてすぐ無くなるといわれる。その状況を図14に図解した。図を描く条件は、従来のキャパシタとECSの実効エネルギー密度の比は7.5倍(5倍と10倍の間)、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存在しなかったためフルパワーPcでの加速時間は図でTcxと記した3～4秒間^(*)10)であった。

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図のPb、つまりキャパシタの1/3ほどに留まるが、その出力レベルでならTb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は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Pcでの加速時間Tc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を評して「エネルギー密度が二次電池に比べて小さい」と不利を指摘する。ECSを経験していない方々は、キャパシタとは在来型で図14のTcxまでの容量を考えたり、あるいはECSの加速時間の公表値から二次電池の出力PbでTc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なら図14でいえば6倍も長く走れる、と思いがちである。

他方、二次電池のエネルギー密度はTb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。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、浅い放電深度～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ぬ時だけ二次電池のエネ

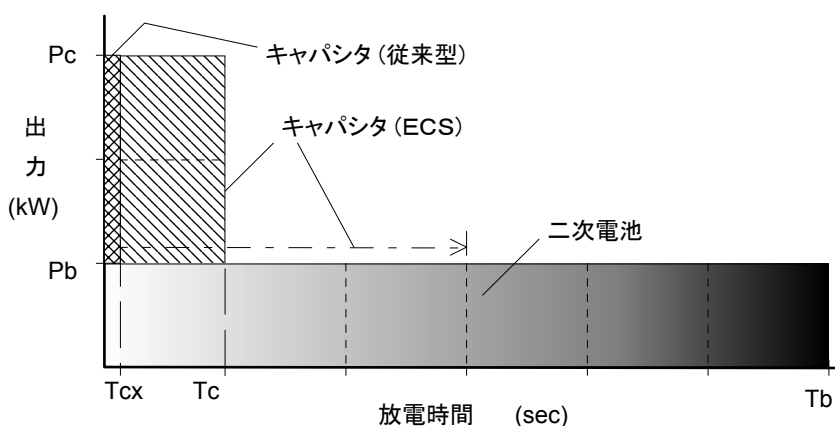


図 14 キャパシタと二次電池のハイブリッド車における出力と時間

ルギーに頼るなら、寿命への影響も少ないから、二次電池の賢明な利用法に違いない。

3) 出力密度と回生制動

図14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、モーターを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……これは電池を使う限り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、キャパシタは自動車より寿命が長いので、「使えば使うほど有利」である。

だが電力 P_c を回収するには、それだけ大きなモーターが要る。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ーがあるからよいが、パラレルハイブリッドでもキャパシタを有効に使おうと思えば、 P_c を出し入れできる程度のパワーのあるモーターと電気系が必須である。

環境も CO_2 も大切だが、コスト競争の激しい自動車業界で1Wでも余分なモーターを積むまいと節約に走るのは、我々ユーザーが高価でも環境に良い車を、と考え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、既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15の二つが基本である。

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。加速時には、最大出力を100%とすると、出力0~50%で使う際はキャパシタからの放電量だけで走行し、その先はキャパシタの出力に発電機の50%を加えて50~100%の出力範囲をカバーする。変形もありうるが、最もオーソドックスに

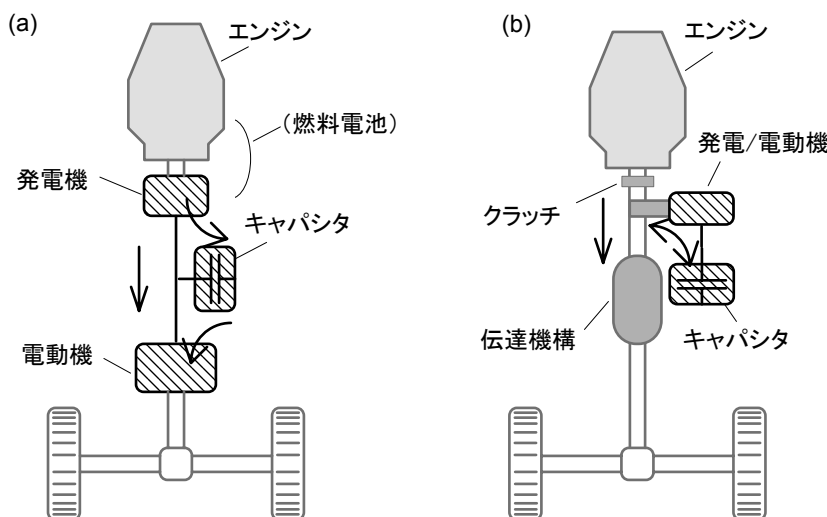


図 15 シリーズ(a)およびパラレル(b)ハイブリッド方式

は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。

回生制動時には電動機が発電し、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。実際にはモーター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かれるが、それでも加速時最大の50%より大きい、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、上述した理由から回生時には160kWと2倍弱の充電電力が入り「回生時がピーク値」となる。これがハイブリッドで蓄電装置が難しく、高速からの制動エネルギーを捨てたくなる原因である。

エンジンの動力を一旦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。確かにエンジンの最も効率のよい回転数だけで走り続ける車と比べれば、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、都市を走る車は、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い。それに比べて常に最高効率でエンジンが回るシリーズハイブリッド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、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冒頭に掲げた図1のECSを搭載した日産ディーゼル工業㈱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。

搭載されたキャパシタは図9のEC-Lタイプと同種の自社製で840セル、1.2kWh、約200kg、2段のバンク切換えを含むECSシステムを用いた。最大仕様では発電機75kW、走行用電動機150kW、キャパシタ出力電力95kW、回生電力100kWで、M15半積載走行では



日産ディーゼル工業(株)

図 16 ECS搭載キャパシタ・ハイブリッドトラック^{(*)3}

発電機50kW，キャパシタ出力電力85kW，回生電力80kW程度で運転され，90%を超える充放電効率と，同等なCNGバスとの比で約2倍の燃費改善，そして40%という燃料電池バス同等の走行効率が報告^{(*)2}されている。

シリーズ方式のキャパシタハイブリッドバスで今後の課題を挙げれば，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が，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，しかも既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15(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か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車の特性はエンジン車に近づく，だがその代わりハイブリッドで最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，形だけのハイブリッドからフルに働く設計まで，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他はなく，制

動エネルギーは回収しきれない。

他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とき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15(b)に示したようにエンジンとモーターの間にクラッチを入れたい。こうしてハイブリッドのいろいろな運転のモードを考

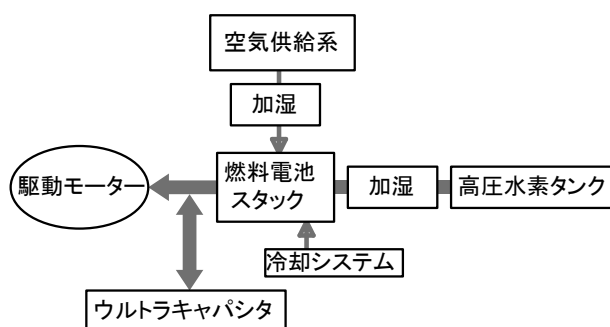
えると，あちこちにクラッチや無段変速機を入れたくなり，下手な工夫をすればするほど複雑で高価で厄介なシステムになってしまう。

東京モーターショー2000で発表された図16のキャパシタハイブリッドトラックは約60kg，380WhのEC-Lタイプキャパシタを積み，55kW同期型モーターを備えたECSによるパラレルハイブリッド方式である。エンジンはCNG燃料を用いる154 kWリーンバーン型で電子制御のトランスミッションを介して後輪を駆動する。モーターはクラッチを介してトランスミッションのエンジン側に結合されている。

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15(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17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の駆動モーターが発電するのでごまかしが利かないから，既に述べた商用

図 17 ホンダFCX-V3のシステム構成概念^{(*)11}

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。

図18は図17と共に本田技研㈱による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4人乗り、PEFC型Ballard燃料電池62kW、電動機60kW、高圧水素100ℓを積み、車重1750kg、最高速度130kmと公表された。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FCパートナーシップ」に出発前の写真である。



図 18 キャパシタとのハイブリッドにした燃料電池車^(*11)

4.5 工業化と今後の展望

さて残った課題は何か。それは第一に価格だといってよい。大容量電気二重層キャパシタの価格は¥10/Fが一つの目安だった。エネルギー貯蔵装置としてはファラッド当たりというのはおかしいから、耐電圧2.7Vとすると1,000Fが約1Whだから、¥10/F → ¥10,000/Whに相当する。もっとも価格競争力のあるEC-Lタイプでも、普及には上の1/10になって欲しい。

キャパシタは本質的に高価かという、そんなことはない。現在高いのは生産規模に起因する。まず原料を見ると、二次電池でコバルトが高価で¥4,000～6,000/kgなどというが、現在使っている活性炭はコバルトより高い。電解液も変圧器用絶縁油と比べると数十倍である。なぜこんなに高いかという、専用の生産工場が稼動するほど量がないからである。仮にキャパシタ用に活性炭や電解液を各10kg使う自動車が月産1,000台として、月に10トンの売上となる。¥1,000/kgで販売すると月に1千万円の売上にしかならず、工場として採算が取れるにはこの10倍が要る。類似の問題が電極の製造や組立工程にもある。

これらは生産量が増えれば鶏と卵で改善されていく。キャパシタの価格さえ下がれば、製品や応用の競争も賑やかになるであろう。

ここまで来た現状では、研究してさらに高いエネルギー密度を目指すのも必要だが、順序としては、現在の性能に類似のレベルで良いから、大量生産と低価格化と普及へのループを回すことに邁進すべき段階に入ったと思われる。

参考文献

- 1) 岡村迪夫：電力用蓄電装置の基礎的研究，電気学会，論文誌 Vol.115B No.5, p504-510, 1995.
- 2) 佐々木正和，他：キャパシタ式CNGハイブリッドバスシステムの開発，日産ディーゼル工業㈱，自動車技術会2000年春季学術講演会前刷集（2000-5-24）
- 3) 野津育郎，他：キャパシタ式蓄電装置搭載中型ハイブリッドトラックの開発，日産ディーゼル工業㈱，自動車技術会2000年秋季学術講演会前刷集(2000-10-19)
- 4) 岡村迪夫：電気二重層キャパシタと蓄電システム，日刊工業新聞社，Mar., 1999.
- 5) 近藤潤次，私信，2000.6.
- 6) 岡村迪夫：実験セットで学ぶ新蓄電システムECS，トランジスタ技術，2001年2月～5月号。
実験セット：㈱パワーシステム 〒236-0004 横浜市金沢区福浦1-1-1 横浜金沢ハイテクセンター・テクノコア6F, Tel:(045) 786-4990 Fax:(045) 786-4991 価格，消費税国内郵送料込み：53,550円
- 7) 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，電気学会論文誌B, Vol.120-B, No.2, 2000.
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 伊藤泰志，他：低燃費コンセプトカー搭載のポワートレーンシステム，自動車技術，Vol.51, No.9, 1997
- 11) 本田技研工業㈱：Press Information, Sept. 28, 2000

— ■ —