

キャパシタ蓄電技術とスイッチング回路

(株)岡村研究所 岡村 逸夫

まえがき

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。しかしエネルギー密度つまり体積や重量当りの蓄電量があまりに小さかったので、現在の技術者、科学者はキャパシタは電子回路部品としてごく一時的な蓄電や、リップルの平滑といった用途だけに使うものだと思い込んでしまっている。

前稿で世界のキャパシタ情勢は風前の灯といったが、それは漫然と統計をとればの話で、事実はいままでに述べたようにキャパシタによる蓄電技術は今や実用一歩手前まで来ている。それが実現していないのは工業的な大規模生産が始まっていないためだが、それを展開するには世間的な理解が、ほんのもう一歩進めばよいと言えるほど普及の段階に迫っている。いや、もう動き始めたといつてよいかもしれない。

以下では ECS(Energy Capacitor System)の考え方によるキャパシタ蓄電装置の、電力の制御やパワースイッチングの部分を中心にみていくことにしよう。

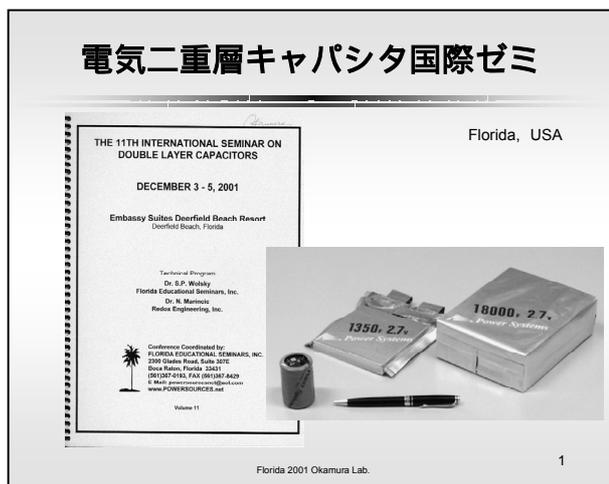
1. キャパシタの実効蓄電量を増やせば車や蓄電に理想的

1. 1 新技術と新分野そして新しい考え方

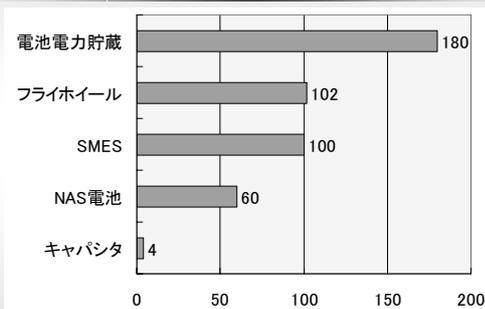
1) 強電分野での認識を

昨年 12 月のフロリダの電気二重層キャパシタ国際ゼミ(図 1)では ECS は初登場^[1,2]で好評を博したものの、日本ではそれより遥かに前から、電気学会誌を含む国内の諸学会にいくつも論文が掲載された。しかし、どうも広く正当な理解を得ているとは思えない節がある。

それは、この分野に最も関係のある当事者であるはずの強電やパワーエレクトロニクスの専門家が、何となく自分の仕事だと考えていないように見えるからである。蓄電は電気屋では



電気工学ハンドブックの認識度



数値は行数、第6版2001年2月発行

Florida 2001 Okamura Lab.

2

なく電池屋の仕事だと見なして除外する傾向があり，揚水発電所やフライホイールあるいは SMES などには理解を示す一方で，電気二重層キャパシタの認識は低い。

そう判断した根拠の一例として昨春発行の新版電気工学ハンドブック^[3]を挙げよう。この電気工学分野で最も信用のある書籍が，図 2 に示したように他の蓄電装置に 1 ページ以上を費やしているのに電気二重層キャパシタは 3 行半しか当てていない。これでは出版の時期から見て認識不足といわざるを得ない。多数の尊敬に値する著者が集まって最近の論文を読まない，周知でないものは扱わない姿勢となってしまうのは，わが国の工業の先進性や積極性の欠如でなければよいがと危惧する。いやそんな重大なことではなく，単にこのように大部な書籍を誤りなく出版するための工程の所産かもしれない。もしそれが原因なら，我々はこの類の書籍は歴史書として読むべきなのであろう。

蓄電という分野，つまり電池やキャパシタは化学の仕事だけではない。電子回路やパワーエレクトロニクスの技術を複合したからこそ，ECS はここまで来た。いったん出発点に戻って，どうしてこんなことになったか概略を述べよう。

2) 出発点

キャパシタ蓄電装置のエネルギー密度を増すには，キャパシタだけ研究していてもダメだ，何か他の手があるはずだ，と考えていた。

当初の目標は鉛電池だった。エネルギー密度は公称 40Wh/kg だが，寿命保証値の放電深度は 60% で，直列にする場合の係数などがあるので実力値を約 20Wh/kg と見込む。これに対して当時のキャパシタは 1Wh/kg ほどだから，約 20 倍の改善が必要であった。

当時電気二重層キャパシタでは既に先達のメーカー，特に松下グループや日本電気(株)，旭硝子グループ，いすゞ自動車(株)，大阪ガス(株)などの諸社で優秀な研究員が世界をリードする成果を挙げていた。後で知ったのだが，米国でも既に DOE (Department of Energy) がキャパシタ国家プロジェクトを発足させていた。どう頑張ってもそれ等の数倍ができれば大得意で，20 倍のエネルギー密度にはなりそうもない。

突然変なことを思いついたのは，1992 年の元旦だった。「変数分離型を二つ持ってくればよい，相互に無関係な，一時独立な要素を二つ……」ちょっと気障だが思いついたとおりに書くところなる。つまり，キャパシタを 5 倍に改良し，周辺にその利用率を高める電子回路を置き，それで 4 倍にする。そうすれば等価的なエネルギー密度は $5 \times 4 = 20$ 倍になるのではないか。

当時のキャパシタの使い方では，キャパシタは充放電の回路が簡単なのが特徴だ，と各社のカタログに述べてあった。当時のキャパシタのエネルギーの利用率は低く，多くの問題を含んでおり 4 倍くらいの改善の余地は十分に存在していた。

図 3 は ECS が完成した後になってまとめた要約である。はじめの二つは電子回路，三つ目はその影響でキャパシタの設計上に起こる変化を示している。

ECS の鍵はどこにあるか

大きな実効エネルギー密度を得る方法は，

- キャパシタを定格電圧いっぱいまで充電する
- 充放電を最大限の効率となる条件下で行う
- キャパシタを最適な内部抵抗になるよう設計する



Florida 2001 Okamura Lab. 3

2. 蓄電量を増す～キャパシタ電圧は等化でなく初期化

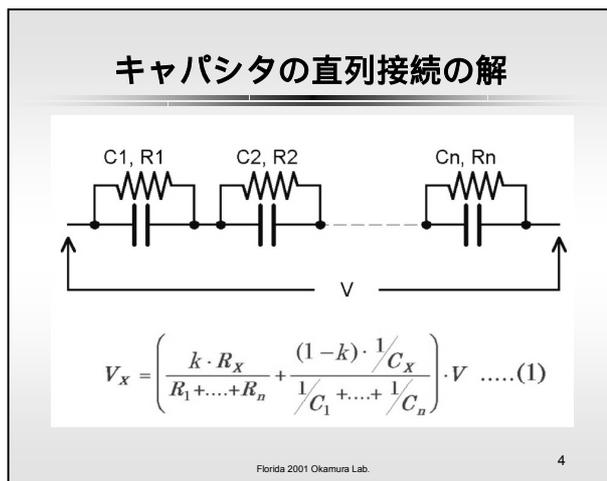
2. 1 キャパシタの直列接続の問題

1) 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、すべてのキャパシタを耐電圧一杯まで充電する必要がある。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。同じ定格のキャパシタを多数直列にして長期間使うと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。

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4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^[4-7] と図の中に示した式(1)が得られる。

これ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 $\pm 10\%$ とすれば、使用電圧を約 70% にする必要があり、蓄電容量は 49% つまり約半分に低下する。これを 100% で使えるように工夫すれば、実効エネルギー密度で約 2 倍の改善は堅い。

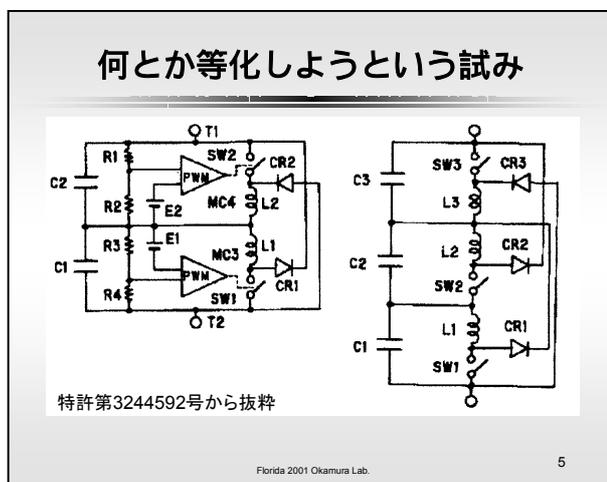


2) 直列接続法を研究する効果

キャパシタの電圧を耐電圧の 7 割に下げるのは極端だと見えるかもしれないが、実は 7 割でもまだ危ない。根拠は、上の計算では漏れ電流のバラツキを $\pm 10\%$ と仮定したが、電気二重層キャパシタで漏れ電流の分布を $\pm 10\%$ 以内に保証できるメーカーはおそらく世界中に存在しない。キャパシタは長寿命なのでその間の特性変化まで考慮すると、将来も困難であろう。この状況は「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を絶対に耐電圧以上にしない、という制御がキャパシタを長持ちさせる最善の使い方である。そこで何とかキャパシタを等化しようとして図5のような試み^[8]がなされた。

これは二次電池にも共通で、セル間の電圧のバラツキを、電力をスイッチングコンバータによって移動して平均化する方法である。自分達の特許をこき下ろしても仕方がないが、これを等化あるいは平均化に使う意味は薄い。どう頑張っても等化回路が扱いは消費する電力が充放電のたびに発生するので充放電効率に影響し、回路のコストも無視できない。



2. 2 キャパシタの初期化

1) 初期化と均等化の違い

電気が専門の人には容易だが、専門外の人にとっては、「初期化」という概念は非常にわかりにくいらしい。懸命に説明すると終わりごろになって、要するに balancer だろうなどといわれてがっかりしたことが再三ある。

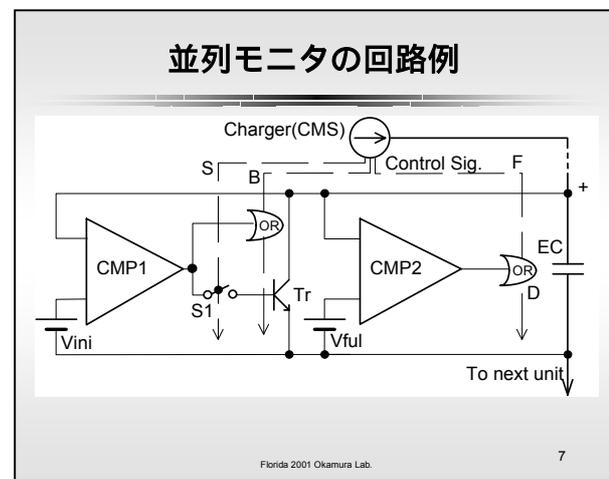
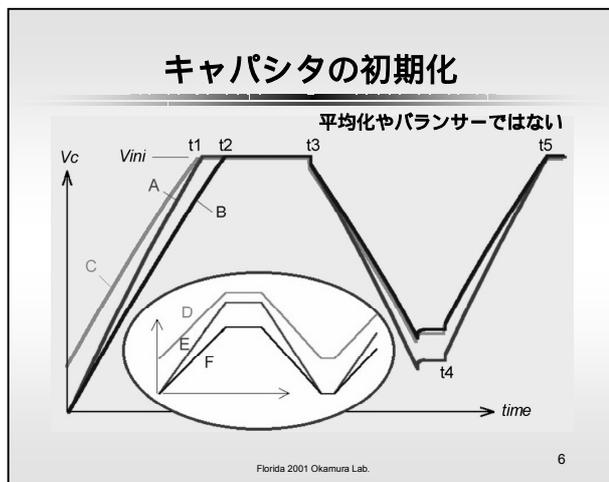
EC S では並列モニタと呼ぶ電子回路と充電制御を組み合わせる。並列モニタは基本から複雑なものまであるが、基本動作は共通で「キャパシタを初期化して用いる」方式で、原理を図 6 に示した。通常の使い方では円内のように静電容量と、自己放電によって生じる初期電圧のバラツキから、直列に充電したキャパシタは D, E, F のように異なる電圧に達する。それに対して EC S ではキャパシタを何らかの手段によって満充電電圧 V_{ini} に一旦揃える。キャパシタの初期化 initialize と呼ぶこの動作は、電子回路の計算の際にコンデンサに初期電圧を与えるのと同じである。

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。放電した t_4 やそこまでの途中では、静電容量の小さなキャパシタは他のトレースから離れるが何もせず放置しておく。初期化と平均化あるいは等化が違うのはこの点である。

平均化や均等化の動作は上述とは異なり次のようになる。放電に際して他のセルから離れたキャパシタの電圧を調節するため容量の小さい A に電力を与えて、 t_4 で揃えたとしよう。すると次の充電のとき A は容量が小さいから早く上昇し他のキャパシタから離れるので、今度は A の電荷を他に移す必要が生じる。それは図 5 のようなパワーエレクトロニクスを用いなければ不可能ではない。損失型の回路も利用できるであろう。しかし 1セル当り 100A も流れる動作中に、こういうことをする回路の規模とコストとエネルギー損失は、キャパシタのコストを押し上げ、10~30%も充放電効率を下げてしまう。そのため、この種の検討を行った結果、やはりキャパシタのバラツキの少ない物を作るに限ると結論付けている文献は珍しくない[9]。

2) 並列モニタの回路と動作

初期化をすれば、こうした問題はすべて解消する。実用の並列モニタの回路例を図 7 に示すが、ここで用いるバイパス用トランジスタ Tr には多くの場合、専用の放熱板さえ不要である。この程度の回路であれば集積化するとアナログ IC の耐電圧が許す程度の 4~10 個のキャパシタを直列にした状態を一つの IC で制御する構成にまとめることができる。



このように付加する電子回路の簡素化を特に強調するのは理由がある。電気二重層キャパシタの信頼性はきわめて高いので、巨大な蓄電倉庫を作った場合などの全体に信頼性は、付加した電子回路によって大きく損なわれる。マイクロコンピュータを用いて各キャパシタの電圧や電流をスキャンするといった手法を誰でも思いつくが、そうした回路は増加する配線も含めて、電気二重層キャパシタより遥かに信頼性が低いことを忘れてはならない。

ECS では並列モニタ関連の電子回路とその配線を極力シンプルに、IC パッケージ数を少なくすることにより、付加した電子回路による蓄電システムの信頼性の低下を食い止めることが可能となる。

並列モニタを用いる方法のもう一つの特徴は、キャパシタの直列個数に上限がない点である。単にキャパシタを選別し、厳重な品質管理で直列接続を作ると、性能がランダムに経年変化するなら、直列にするセルの個数が増えるほど統計的に「大きな偏差のセルを1個以上を含む確率」が増す。したがって、こういう手法でキャパシタ直列セットを作ると、25個までできた、50まで動いた、などと積み木の積み上げに成功したようなスリルを味わい、ユーザーに幸運を販売しなければならなくなる。

これに対して並列モニタでは、製品の信頼性……不良品を含まないこと……さえ確実にすれば、800V 程度までは既に実績があり、3000V でも 10kV でも絶縁さえ注意すれば不可能な理由はない。

3) 初期化の場所と利かせ方

キャパシタの電圧がばらつくのは、主として自己放電電流によって、長時間かけて起こる。したがって、それを補うのに元来数十アンペアもの電流は必要ではないはずだ。朝、車庫から走り出す前に完璧にキャパシタを初期化して、100%の蓄電性能になって居なくてもよい。少しずつ初期化して、性能を上げていけばよい。そう考えると始業時に急いで初期化する必要もなく並列モニタの電流容量は小さくてすむ。そうした動作を実際に行わせた例がいくつか公表されている。

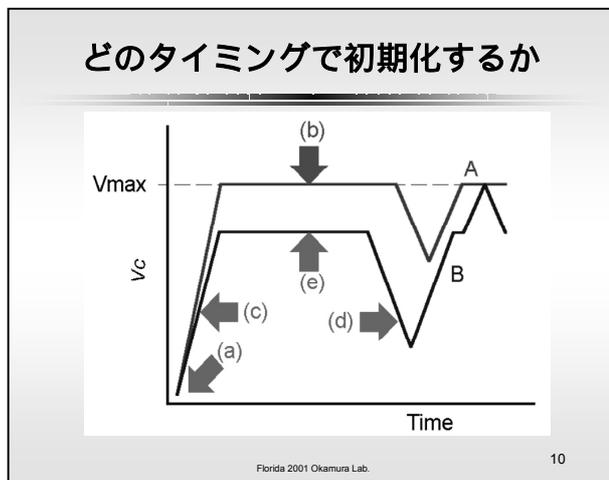
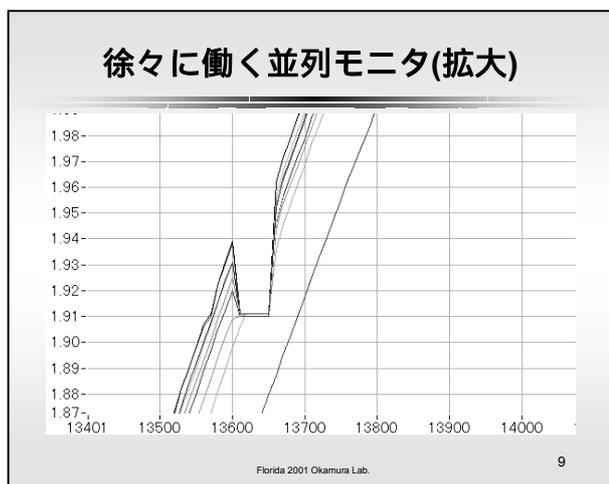
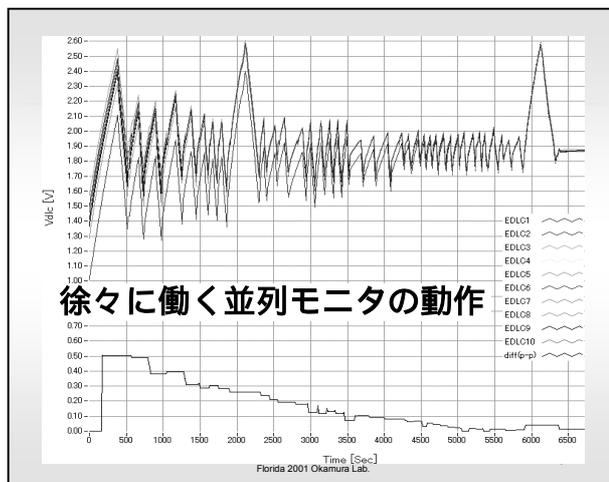


図8はその実測データ^[10]の一部で、故意に特性のばらついたキャパシタ10個を直列にして、充放電を繰り返し、並列モニタが少しずつ動作してバラツキが自動的に解消していく様子を示している。図9にその一部を拡大した。

初期化の位置は図10のように、系の動作に応じて任意の場所、電圧、タイミングを選べる。その設定した電圧やタイミングを充放電プロセス中に通過しないと、初期化動作が起こらないから、なるべく自然な使用中、運転中に通過する場所を選ぶ。

3. 利用率と効率を増す～電流ポンプやバンク切り換え

3. 1 キャパシタの充電と放電の技術

1) オーム・ファラッドという単位

キャパシタの内部抵抗をこのキャパシタは2mΩなどと値で呼んでいたのでは、キャパシタの大きさや直並列数が変わると変化して不便なので、正規化した表現法はないか考え「静電容量1F当りの電気抵抗」からΩF (ohm-farad) という単位^[4]を作った。

1Fあたりの電気伝導率 S (Siemens) はS/Fで、SはΩの逆数だからS/F = 1/(ΩF)。したがって1Fあたりの内部抵抗はそのまた逆数でΩFとなる。

ΩFはRCの積なので時定数と呼ばれることがあるが、1F当り内部抵抗が何Ωあるかを表す正規化内部抵抗と考えると利用価値が高い。

“Ohm-Farad”という単位

静電容量当りの ESRを表現すると

- Conductivity/Capacity = (Siemens)/(Farad)
- (Siemens) = 1/(Ω)
- (Siemens)/(Farad) = 1/(ΩF)
- Resistivity/Capacity = 1/(1/(ΩF)) = (ΩF)

$$P_c = 1/(1+2RC/t) \dots (7)$$

$$P_d = 1-2RC/t \dots (8)$$

Florida 2001 Okamura Lab. 11

2) コンデンサは充電効率50%

電気工学の泰斗と呼ばれるような学識豊かな先生方に、コンデンサで蓄電装置を作りましたと報告すると、それは実用にはならないよ効率が50%だからね、としばしば指摘される。こうした点をスバリと指摘できるのは電気工学に通じた勉強家に違いない。

しかし幸いなことに、そうなるのは電池でキャパシタを充電するような、電圧源からの充電の場合である。電圧源から電圧ゼロに完全放電したキャパシタがなぜ充電できるかは、ちょっとしたクイズに好適である。

充電電源を電流源にすれば、充電効率は100%近くまで行く。ただし、日常お目にかかる電源のほとんどは電圧源で、自然に初めから電流源になっているような電源にはめったに

出会わない。だから、普通にやれば効率50%になるという点で、上述の指摘は正しい。

キャパシタの充電と放電の計算

Voltage mode

Current mode

$$i = \frac{V}{R} \exp\left(-\frac{t}{CR}\right) \dots (2)$$

$$\int_0^{\infty} i^2 R dt = \frac{1}{2} CV^2 \dots (3)$$

$$P_c = U / (U + L) = 1 / (1 + 2RC/t) \dots (7)$$

$$P_d = (U - L) / U = 1 - 2RC/t \dots (8)$$

Florida 2001 Okamura Lab. 12

3) 抵抗があってもロスが減る理屈

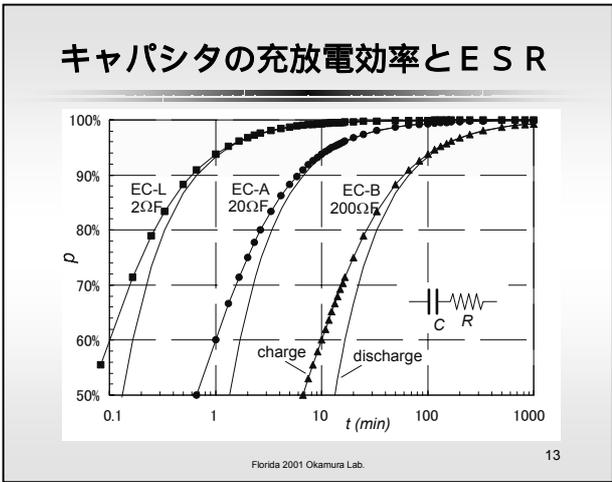
電流源から充電するのは ECS の特徴の一つだが、もう一つの飛躍がある。それは「内部抵抗が大きくても必ずしも損失は増えない」……という。この表現はよほど消化しにくいらしい。欧米の一流の研究者の中にも、それでも地球は回っている、みたいに「そこに抵抗があれば絶対にロスが生じるはずだ」と未だに疑念を呈する人がいる。そこに充電効率 P_c と放電効率 P_d を示す次式^[4],

$$P_c = 1 / (1 + 2CR/t) \quad \dots\dots(7)$$

$$P_d = 1 - 2CR/t \quad \dots\dots(8)$$

を示して、効率は R の絶対値ではなくて CR/t で決まるぞといくら言っても「感覚的」に納得しない。そういうロマンチックな人は科学者の風上に置けないなどと思わずに、直感的な説明を試みよう。

DOE タイプの内部抵抗の低いエネルギー密度の小さなキャパシタ A を積んだハイブリッド車は、全放電まで 4 秒間の最大加速ができたとする。ECS の内部抵抗の高いキャパシタ B は 20 秒間加速できる実効容量がある。もし両者が等しい容量当り内部抵抗(ΩF)であったら、容量が 5 倍ある B は A の $1/5$ の内部抵抗絶対値(Ω)だから損失は $1/5$ となる。したがって、同じ 4 秒間の最大加速の損失を等しくするには、キャパシタ B の容量当り抵抗値は A の 5 倍あってよい。



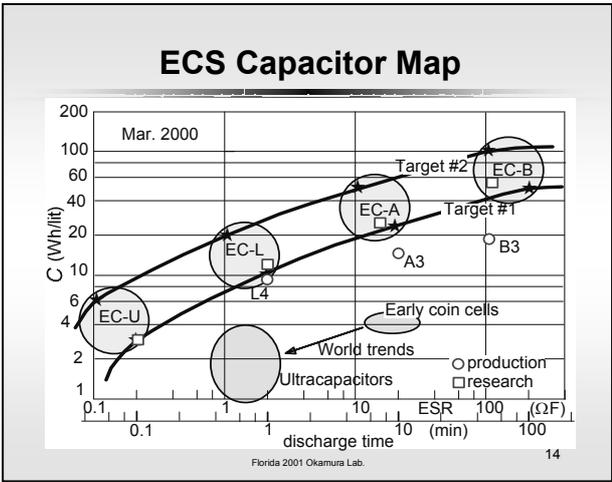
3. 2 キャパシタ設計への影響

1) 内部抵抗の大きなキャパシタの可能性

こういうことを筆者が言い出したとき、「 I^2R を消す魔法はないぞ」と多くの方々からアドバイスをいただいた。だが、その魔法は存在した。効率は前出の(7)(8)式だから、実際のキャパシタに適用すると、図 1 3 のように内部抵抗の 1 桁大きなキャパシタも充放電時間を 1 桁長くすれば同じ値が得られる。

図 1 3 に示したのは内部抵抗の 1 桁ずつ異なる 3 種のキャパシタの効率曲線で、これらは同じ曲線を時間軸上を平行移動したものに過ぎない。

キャパシタの充放電は瞬時に終わることで知られていたが、蓄電装置としては瞬時に充放電されては極端に大電力な充電器が必要となるなど迷惑な用途も少なくない。図 1 3 で 94% の効率になる点に注目すると、3 種のキャパシタの定電流源からの EC-L(内部抵抗 $2\Omega F$),



EC-A(20ΩF), EC-B(200ΩF)タイプの充放電時間はそれぞれ約 1, 10, 100 分間となる。

2) 典型的な ECS 用キャパシタ

キャパシタは作ろうと思えば、かなり広い範囲で任意の静電容量、任意の内部抵抗の組み合わせでさまざまな特性のキャパシタを作ることができる。だが、あまり多種類のキャパシタを作っても非効率なので、図 1 4 に示す標準タイプを設定^[4]した。

グラフの横軸は内部抵抗ΩF だが、第二軸には効率 94%となる充放電時間を目盛った。縦軸はエネルギー密度で、この場合は Wh/liter であらわした。図で明らかなように、Target と記した目標ラインはいずれも右上がり、研究や生産実績のポイントも含めて「内部抵抗の大きなキャパシタはエネルギー密度を大きく作ることが可能」である実情を示している。

3. 3 電流源の作り方

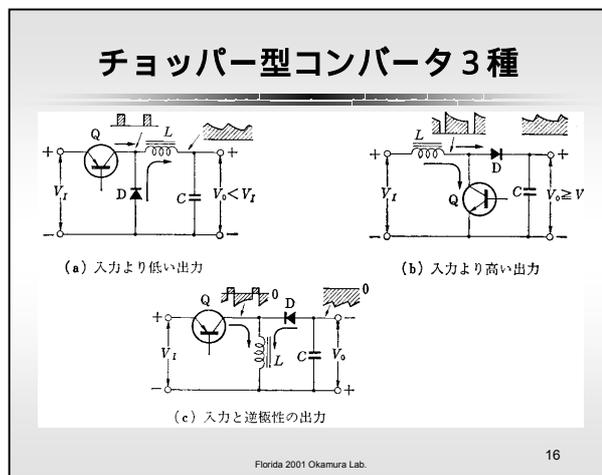
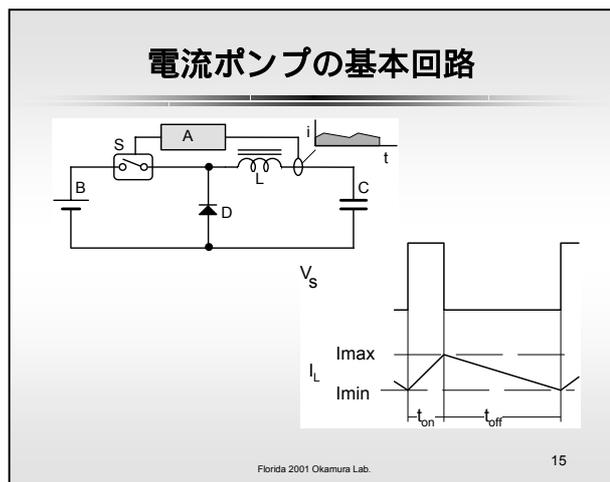
1) 電流ポンプの登場

「キャパシタへの電気の出し入れを電流で行う」これを実現するにはパワーエレクトロニクスの技術が不可欠である。Helmholtz による電気二重層の発見が 1879 年、GE 社による電気二重層キャパシタ特許が 1954 年なのに、なぜ今日まで ECS のような考えが出なかったか。その原因は、半導体素子やそれに伴う電子技術がなかったからだと断定できる。本稿に登場する並列モータ、電流ポンプ、バンク切り換えなどを真空管で作れば、ヒーターの電力消費と装置の重量体積だけで絶望的な結果を招くに違いない。

並列モータは大した電力を扱う必要がなかった。しかし、ここで登場する電流ポンプはキャパシタに入出するすべての電力、正確に言えば電流量がここを通過する。バケツに水を入れるホースのようなもので初めは「電気ホース」などと呼んでいたが、使っているうちに「電流ポンプ」に定着した。

キャパシタを高効率に使うには電流源から充電する必要があると前に述べたが、あいにくなことに、電池、発電機、交流を整流した電源、三端子型などドロップ型定電圧電源、要するに世間に存在するほとんどの電源は「電圧源」なのである。

幸いなことに一部のスイッチングコンバータが電流源の性質を持っているので、これを利用してキャパシタの充放電の出入り口に用いた。図 1 5 はパワエレ分野ではよく知られている降圧チョッパーで、その動作を見るとパワー



スイッチ S をオンオフしてチョークコイル L の出力側の電流を制御して、通常は出力の（電気二重層キャパシタではない通常の）コンデンサ C のところで定電圧を得ている。そこを図示したように改造して定電流あるいは定電力制御を行えば、電源 B と充電されるキャパシタとの間に、効率の良い電流源を挿入したことになる。

チョッパ型スイッチングコンバータは図 1 6 に示した三つの基本形、降圧、昇圧、極性反転のどれも、出力として L を通過する電流の形で取り出せる性質を備えているので電流ポンプとしての応用に適している。

これらのチョッパ型はスイッチングコンバータが現在のように普及する以前にもよく知られていた。図 1 6 はスイッチング電源がはじめて掲載された単行本といわれるほど古い 1974 年発行の小著^[11]からの転載である。

2) 電流ポンプの巧拙

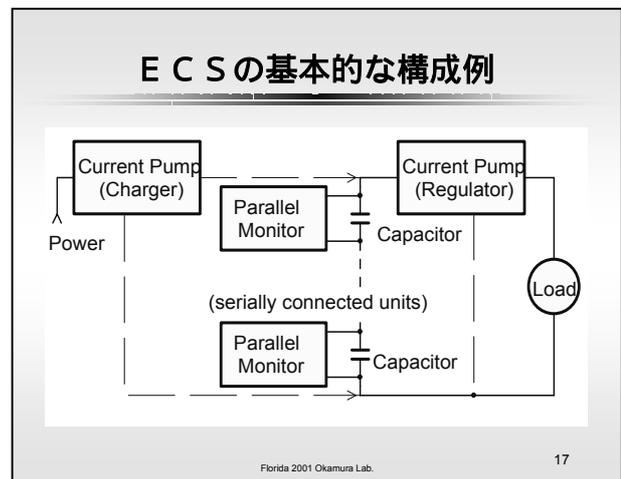
キャパシタと電源、あるいはキャパシタと太陽電池の間には DC/DC コンバータを入れるのは、最近では当然のことに言われる。しかし、その性能は腕前次第でどのようにでもなる。

まず重要なのは効率である。電流源としての動作が正確に行われていないと定格出力付近で 60~70% の効率という報告も珍しくないが、電流ポンプとしての効率は 95% くらいほしい。

その理由はキャパシタ蓄電では電流ポンプを行き帰りの 2 回通るので効率は 2 乗で効くからである。それを認識するために、蓄電用ではコンバータや交直変換機の効率を往復で呼ぶことを推奨する。片道 95% の電流ポンプは往復で 90% だが、片道 70% なら往復では 49% だから、蓄電システムの性能への影響は甚大であることが、誰の目にも明瞭になる。

電流ポンプの設計の秘訣は、入出力電圧の広範囲の変化に、効率を落とさず動作できるようにやってパワースイッチの動作を確保するか、無駄な補助電源を使わないかにある。図 1 7 に挙げた ECS の基本構成で、Charger から見れば負荷であるキャパシタ群は電圧ゼロから満充電までの広範囲に変化する。また出力側の電流ポンプは単なる Regulator ではなく、キャパシタの電圧が満充電から 1/4 電圧くらいまで、負荷も全負荷から軽負荷まで変化しても、全体として高効率を維持する必要がある。

このことは、現在の発達したスイッチングコンバータの技術を持ってしても、いくつものチャレンジが必要である。ほとんどのスイッチングコンバータの性能は定格負荷のときの特性で定義されている。しかし、電流ポンプとして蓄電システムの出入り口に立つとすれば、軽負荷や無負荷を検出して自動的に対応した動作をするくらいの工夫をしないと、蓄電装置の運転状態によっては、コンバータ部の総合効率はマイナス（ゼロ以下）などという笑えない事態が起こる。同様な課題は電流ポンプに限らず交直変換機やモータードライバーにも適用される。



3) 実験セット

並列モニタや電流ポンプ、そして残量計など世の中に売っていない、ポピュラーでない回路技術をたくさん使っているので、ECS は化学や物理の人ばかりか電気の専門家にまでわかりにくいといわれる。それを解消しようと、ノウハウが漏れると洩る ECS 専門メーカーを口説いて、主要な回路やキャパシタを実際に動かしてみることでできる「ECS 評価ボード」とでも言うべき「ECS 実験セット」^[12]を通信販売で発売してもらい、雑誌の連載講座^[13]で解説した。

装置は図 1 8 のような一枚の基盤に左から、残量計、充電用電流ポンプ、キャパシタ 470F が 4 個、並列モニタ、昇圧および降圧電流ポンプがあり、キットではない完成品だから、難しいといわれる ECS の完全な動作を体験できる有効なツールといえよう。



4) 無停電電源

大きな電流ポンプを用いて、キャパシタをごく短時間に放電させるという実例もある。高効率な蓄電装置というジャンルからは外れるが、無停電電源の場合はそう頻繁に停電するわけではないから、充放電サイクル寿命や高効率というキャパシタ蓄電の特徴はセールスポイントにならない。

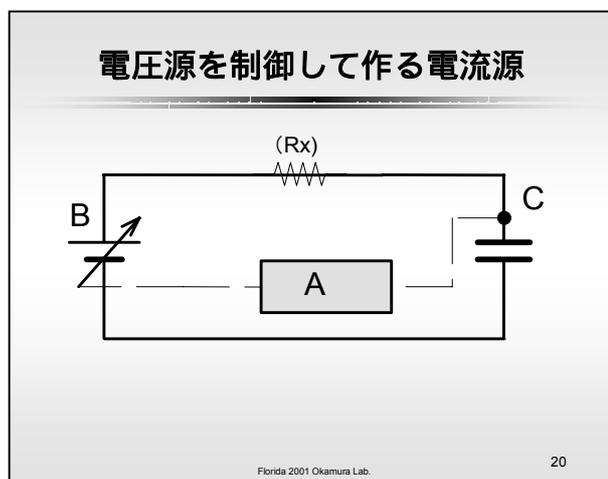
そこで、放電時間 60 秒で効率 94% が得られる 2ΩF EC-L タイプキャパシタを 1 秒間で放電させて、その際の効率が下がるのは承知で、経済的な大型無停電電源にまとめた図 1 9 が製品として発表^[14]された。単セル 20 個入りのキャパシタモジュール 8 個を用いて、100kVA を 1 秒間保持する。キャパシタの搭載量を増せば 30 秒間でも 1 分間でも保持するタイプが作れるのは承知の上で、キャパシタの使用量を極端に減らして、実用上要請の多い比較的短時間の瞬断をカバーし、しかもキャパシタの寿命と信頼性を提供する意図である。



3. 4 もう一つのアプローチ

1) 電圧制御による電流源

電流ポンプを使わなくても電流源と同等な効率でキャパシタを充電する方法がある。



それは電圧源 B の電圧をキャパシタ C の電圧より僅か高めに、制御装置 A によって自動制御すればよい。僅かというのはどれほどかというはキャパシタの電圧と回路の潜在抵抗 R_x によって定まる B からの電流が、予定している充放電電流とその誤差範囲に収まればよい。

つまり、電圧 B を上下してキャパシタ C に流れ込む電流が一定になるよう、定電流制御をするのである。

それなら前項と同じことだ、と思われるかもしれないが、実用上はまったく異なった効果がある。

2) キャパシタのバンク切り換え

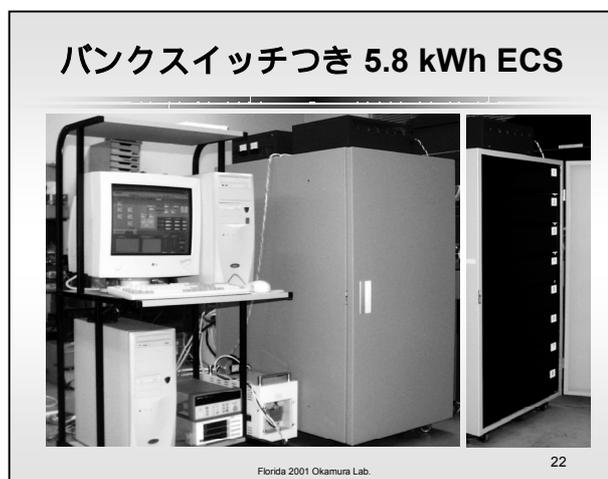
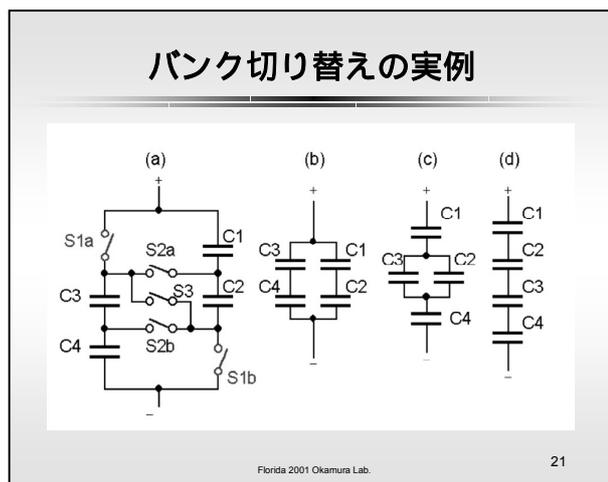
キャパシタ全体を四つのブロックに等分しておく。それを図 2 1 (a) のようにスイッチで切り換えて使う方法を考案^[4]した。電圧の低いときは (d) のように全直列の状態から充電をスタートする。充電の進行にともなって全端子間の電圧が上昇するから、(d) → (c) → (b) のように並列接続に切り換えていく。

接続する相手が電流型の交直変換機やモータードライバーであれば、ある程度の電圧変動は受け入れられるから、バンク切り換えで残った電圧変動幅がたとえば ±15% あっても問題は起こらない。電流ポンプはスイッチングコンバータだから広い負荷や電圧変動範囲で 94% を維持するのは困難があるが、バンク切り換えの損失はほとんどスイッチのオン抵抗だけなので、系の平均電圧が 200V 以上であれば 99% の効率さえ実現可能となる。

実際の応用では交直変換機やモータードライバーとの効率の積が、パワーエレクトロニクス部の責任範囲となる。それでもバンク切り換えは、電圧変動が大きなキャパシタにスイッチングコンバータを追加することによって、効率や装置の体積重量に生じるマイナスをほとんど解決したといえよう。

3) バンク切り換えの実例

その好例は前稿で図 3～8 に挙げたキャパシタハイブリッドバスである。この車のモータードライバーの許容入力範囲が狭かったので、初めは電流ポンプを積むことを検討した。しかし最大 110kW を磁心を飽和させずに動作するチョークコイルを積むとなると水冷型としても後部エンジンルームに入らず、車室の座席一組を取り払う必要があった。それを解決するために電圧振幅の浅い、一段のバンク切り換えが用いられた。これによって、乗車定員を元の CNG バスより減らさずにすんだ。完成したハイブリッド車の重量も原型車両よりむしろ軽くなった。



もう一つの実施例は負荷平準化用キャパシタ電力貯蔵システムである。1998年から3年間ECSによる蓄電システムの実証調査として国家プロジェクトとして行われたキャパシタの生産を含む実験^[15]は図22のシステムを完成した。もともと欧米では、キャパシタを二次電池の代わりに使えるほどエネルギー密度を高めようという発想がなく、国内でもECS以外ではこうした例がないため、比較の対象になる競争相手が存在しなかったから新記録づくめになった。

図23(右の写真)はこの装置の制御用コンピュータの画面である。左上の部分にキャパシタバンクの接続状態と各バンクの充電レベルが表示されており、バンクの切り換えによって接続の変化する状況が表示される。

この装置は研究用なので、各部の損失や効率が時々刻々と表示され、これらのデータは記録されるようになっている。この装置は約3年間運転され、キャパシタの劣化の状況やその外挿を含めた予測値などが公表されている。前稿の図24に示したデータはこの実験で得られた結果である。

図23左下の二つのウィンドウに左は任意の部分の拡大図、右は充放電の全容を示す電圧トレースの実測データが表示されている。

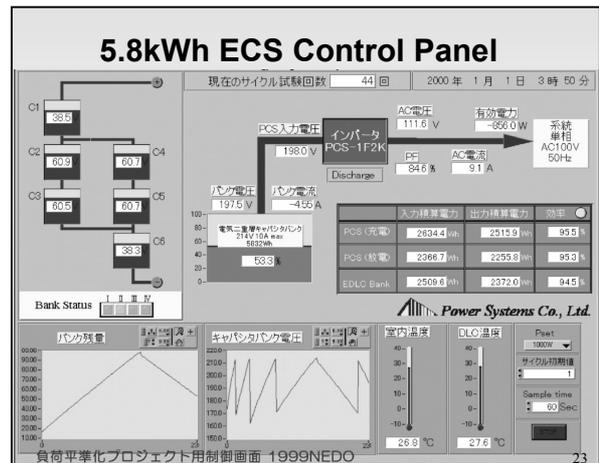
図24では2001年までの論文から各種電力貯蔵技術の実績効率を取り出して比較してみた。週間効率とは土日を休んで週日は昼夜一回の充放電をするスケジュールでの実用効率である。AC-ACは交流から交流までの意味で、交直変換機の効率を含み、DC-DCは含んでいない。

キャパシタの例は前出のバンク切り換えを用いて電圧変動を±15%に抑えたため、電流ポンプを用いることなく交直変換機に直結し、交流-交流端の実測値で84%という記録的な高効率を得た。この値は調べた限りでは世界最高の数値だが、装置が約1kWと小さいので、大型化するとさらに2~3%の向上を見込むことも可能である。

結びに代えて……キャパシタは果して高価か

電気二重層キャパシタは本質的に、エネルギー密度が上がらない、自己放電率が大きい、価格が高いといった説が横行した。そのほとんどは誤りだが、事実無根というわけではない。

謙虚に振り返れば、確かにエネルギー密度は、ECSといえどもようやくBタイプが研究レベルで鉛電池に追いついたかというとき、新型二次電池のエネルギー密度はその3~5倍にも達している。自己放電率も典型値で1%/day程度だから、電池では大きい部類のNiMHにやっと並



電力貯蔵技術の実績効率

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)

Florida 2001 Okamura Lab.

24

ぶかというレベルである。しかし、どちらも本質的にそれが理由で使えないとか、キャパシタ本来の特徴を打ち消してしまう、という状況は卒業したとってよからう。

最後に残った「値段が本質的に高い」という点はどうか。白金族の材料を使う擬似容量はいざ知らず活性炭を用いた電気二重層キャパシタは、これ以上はないといえるほど安い、ありふれた材料を使っている。それが何故、本質的に高いとまで言われるか。

1) 出力密度での比較

電気二重層キャパシタの価格が高くなる第一原因は生産量だが、それは後に廻すと、第二はエネルギー密度である。

物の値段を何を基準に表現するか。蓄電装置だから蓄電電力量、ジュールとかワットアワー当りで比較すると、キャパシタは旗色が良くない。

リチウムイオン電池のエネルギー密度が 100Wh/kg あれば、1Wh 当り 10g ですむところを、1Wh/kg のキャパシタでは 1,000g 必要になる。これがキャパシタが割高だといわれる根拠である。そこを改善しようと ECS ではエネルギー密度の増倍に挑んできた。それで 25Wh/kg ができたとしても 40g 必要である。この先の議論は次項で続けよう。

値段を出力電力、キロワット当りで比較するとどうなるか。ハイブリッド車や 1 分間程度の UPS の場合、それだけの時間に何 kW 充放電できるかが問題である。電気二重層キャパシタの場合、前に述べた計算を用いて効率 95%あたりでの出力密度を比較すると、ずいぶん控えめに計算しても重量当りで Li イオン電池、NiMH 電池の 1.5~2 倍程度にはなる。

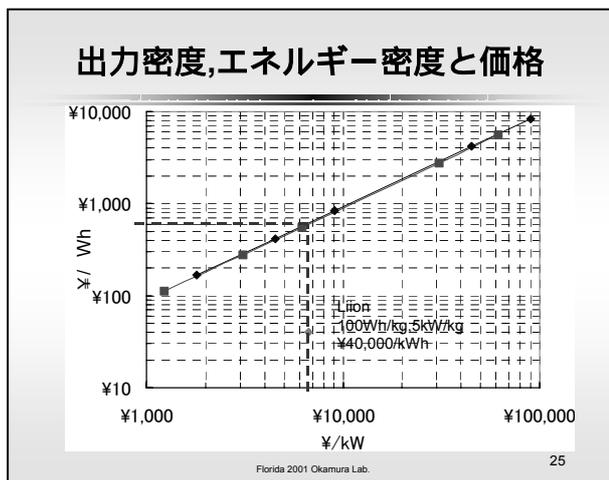
つまり出力電力当りで比較すれば、電気二重層キャパシタは明らかに電池より安価に量産できるはずだ。

2) 蓄電量での比較

蓄電性能を比較するのに、出力密度で評価するというのは我田引水、ご都合が良すぎる。それでは盾の一面だけをとった評価だから、やはり蓄電装置の本来の性能でコストを比較すべきだ……という意見はもっともであろう。

それを言うなら一回だけの蓄電量 Wh ではなく、蓄電装置が壊れるまで、何 Wh*cycles の電力を供給できるかで比較するのが妥当である。

前項の計算でキャパシタが 40g だったが、寿命が 4 倍ならこれは帳消しとなる。二次電池でも放電深度 7.5%で充放電サイクル試験すると



ECS用キャパシタの仕様例

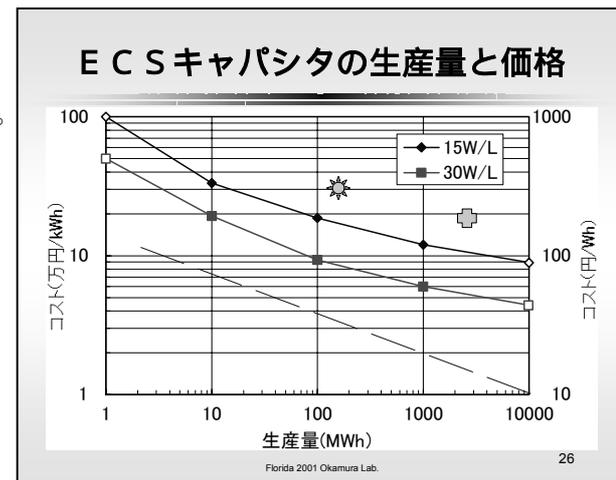
Model (by Power System)	PSLP-H2A (EC-L)	PSBP-H3N (EC-B)
Size (mm)	120*105*12 (0.15 L)	125*160*52(1.04 L)
Weight (g)	210	1500
Capacity (F)	1350 (1.35 kF)	18000 (18 kF)
Max. Volt. continuous (V)	2.7	2.7
Internal Resistance (mΩ)	1.5	5.5
ESR (ΩF)	2.0	100
Energy Density (Wh/kg)	6.5	12
Energy Density (Wh/L)	9.1	17
Power density* (kW/kg)	5.9	0.22
Power density* (kW/L)	8.2	0.31

何万回も持つが、キャパシタは放電深度 75%でも平気だから、そこで比べるなら事実上キャパシタのエネルギー密度は 10 倍あるに等しい。

3) 生産量による変化

それでも今、現にキャパシタは高い。それは研究所が手作業で僅かづつ作っているか、ごく小規模な工場しか動いていないからである。

揚水発電所や鉛電池と同じだけ作らせ比較すれば、これまでに述べてきたような理由で、電気二重層キャパシタは高くはなくなる。大規模な工業化には種々の困難が付きまとうが、



これまでに立ち上がった各種の工業に比べて格別に難しいとは考えられない。

おわりに

欧米での講演で、正直なところ筆者としては少しほっとしている。ECS というシステムを吹聴して、小社のクライアントの各社はもちろん、世間を騙していたのではないぞということを、欧米の専門家諸氏が追認してくれた形だからである。いや、日本の各社が既に実物を作って証明していたのだから、そんな心配はもともと不要だったのかも知れない。

研究発足当初の心細い状態から見れば、現在 ECS の実用化を目指す企業は約 20 社となり、ほかに北見工業大学、エネルギー総合工学研究所など公益法人の応援を受け、横浜市、神奈川県、NEDO など国民の血税からの支援もいただき、現在進行中の国家プロジェクトも受託している。

世情は不景気というが、流行におぼれずエネルギー問題や地球環境にもっとも有効な技術として、一日も早く産業化を実現して、上述の応援に報いたい。

参考文献

- [1] M.Okamura: "Energy Capacitor System - Part 1: Principles and Applications" The 11th international seminar on double layer capacitors and similar energy storage devices. Dec. 3-5, 2001
- [2] M.Okamura and H.Nakamura: "Energy Capacitor System - Part 2: Capacitors and their Control" The 11th international seminar on double layer capacitors and similar energy storage devices. Dec.3-5, 2001
- [3]電気学会, 電気工学ハンドブック, 第6版, 2001, 2月
- [4] 岡村勉夫: 電気二重層キャパシタと蓄電システム, 改訂2版, 日刊工業新聞社, (2001-2)
- [5] 岡村勉夫: 電気二重層キャパシタを用いた蓄電装置, 電学誌 Vol.120, No.10, p610-613 (2000)
- [6] 岡村勉夫: 電気二重層キャパシタを用いた蓄電装置の課題と展望, 電学論 B, Vol.120B, No.10, p1219-1222 (2000)

- エネルギー密度は実用レベルに達した
- 放電時間別キャパシタの生産で各種用途に
- 価格は量産さえすれば、充分下がる
- 周辺回路で性能向上, 付加価値をふやせる

ECS・キャパシタ蓄電は量産を待つばかり

- [7] 近藤潤次, 私信, 2000.6.
- [8] 山岸政章, 岡村迪夫: キャパシタ電圧等化回路, 特許第 3244592 号
- [9] たとえば: S. Buller, E. Karden et al “Simulation of Supercapacitors in highly dynamic Applications (pp056), EVS-18, Oct.,2001
- [10] 三井克司: PSM-240 所載, 私信, (2000-7)
- [11] 岡村迪夫: 電源回路, 日刊工業新聞社, (1974-4)
- [12] 実験セット: (株)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
- [13] 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.
- [14] 指月電機(株), 私信, 2002, 1 月
- [15] 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。

— ■