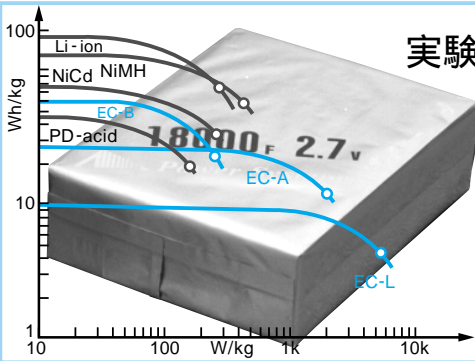


実験セットで学ぶ新蓄電システム ECS! ①

# 電気二重層キャパシタに充電する

岡村 迪夫  
Michio Okamura



### プロローグ...エネルギーに注目!

総理大臣までがITと言出す時代、携帯電話もインターネットも結構、けれども皆が同じことをやりすぎてはいませんか?

パソコン、プログラミング、スイッチング・コンバータ、ノイズ対策そしてOPアンプなど...、確かに私も今日の情報通信ブームの基をかついできました。でも世の中がこう偏ると「情報だけでは生きていけないよ、エネルギーがなくなっちゃ」と心配になります。

本稿では、情報通信とは直接には縁のない新しい蓄電技術<sup>16)</sup>を全4回の連載で御覧いただきます。本誌には取り上げられることの少ない研究最前線の話です。ただし話だけではなく、写真1-1に示す実際に使えるキャパシタを含む電子回路一式を含んだ実験セットを

準備したので実体験もできます。図1-1に実験セットのブロック図を示します。

### 新蓄電システムの登場

我々の日常で「電気をためる」といえば蓄電池(2次電池)と決まっています。いや、電子回路のコンデンサは蓄電装置の一種で、図1-2に示す理科の実験に使うライデンびん(Layden Jar, 1746)も静電気を蓄えます。でも、ノート・パソコンや携帯MDを働かせたり、電気自動車を動かすような本格的な、つまりエネルギー量の大きな蓄電をするには、化学反応を利用した2次電池のほかにはありませんでした。

日ごろ目には触れなくても、じつは表1-1のようなエネルギーの蓄積法が研究され、実用になったものもあります。しかし新技術は難関の山で、どれもそう簡単に電池に取って代わるといいうわけにはいきません。

図1-1 ECS(Energy Capacitor System)実験セットのブロック図

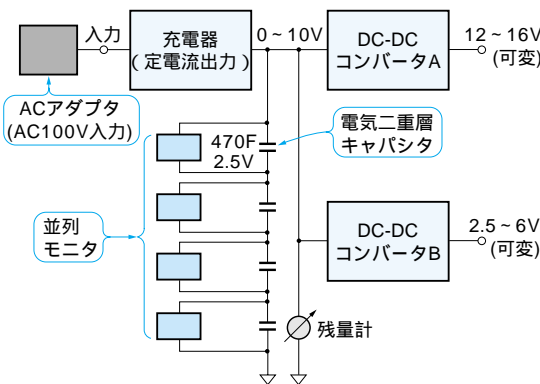


図1-2 ライデンびん

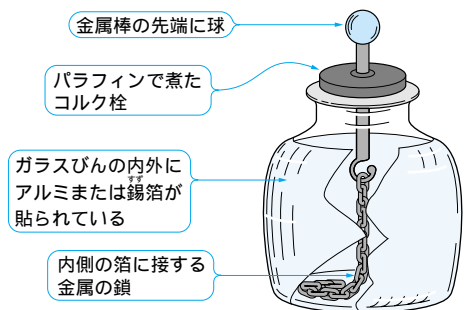


表1-1 実用化または開発用の電力貯蔵技術の実績値<sup>14)</sup>

電力貯蔵技術	効 率 AC-AQ(DC-DC)	システム 規模	備 考
キャパシタ	84%(94%)	1kW×4h	週間効率
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%(86%)	30kW×4h	週間効率
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)

レドックス・フロー：電  
解液をポンプで循環させ  
るタイプの2次電池

そのなかから電気を電子のまま蓄えるキャパシタによる蓄電法がついに実用レベルで登場します。後で紹介しますが、2000年10月の東京モーターショー2000ではキャパシタ・ハイブリッド式の大型バス<sup>(15)</sup>と中型トラック<sup>(17)</sup>が出品され大好評でした。

## なぜ、キャパシタによる蓄電か？

### 2次電池の頭痛のたね

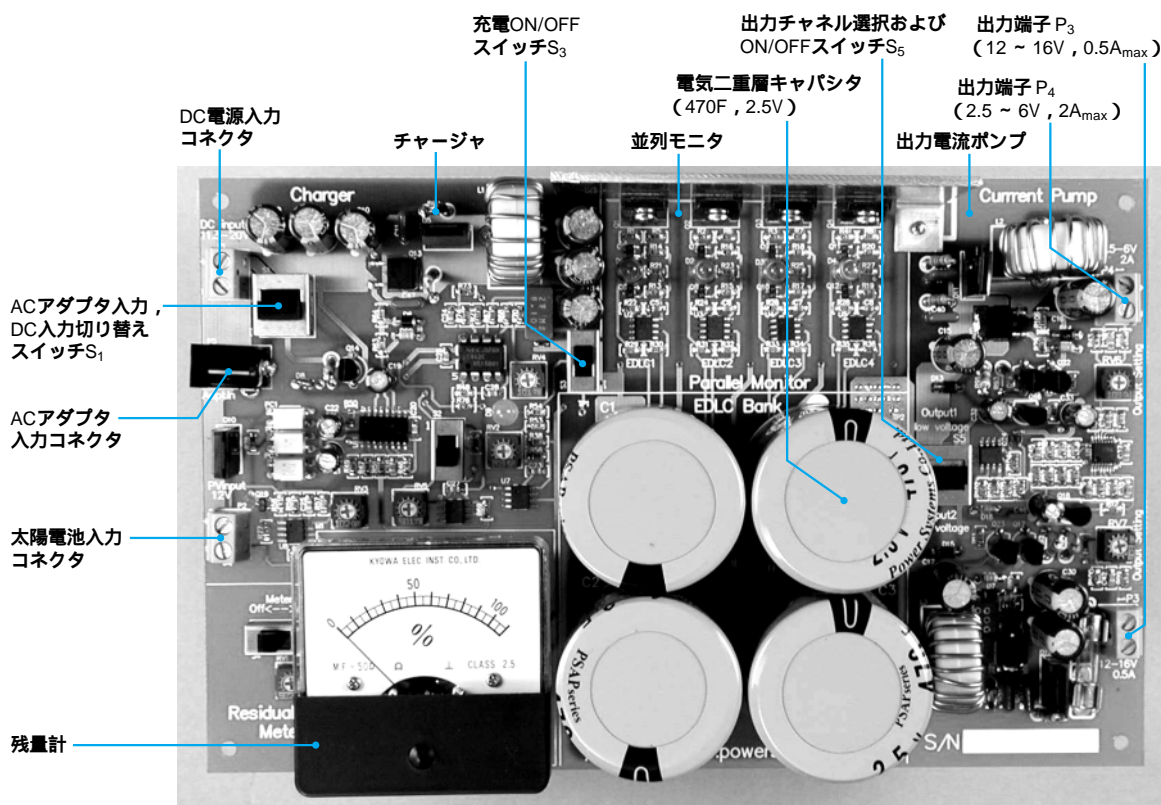
従来の化学電池は十分に考えられ、ものすごくよくできています。これらは先人の努力と長い年月に磨き抜かれた成果です。別の方式で問題を改良しようと深く追及すればするほど、現在までに登ってきた道や、

昔の人がどれほどよく考えたかがわかってきます。

とくに、蓄えにくい電気エネルギーを鉛のようなありふれた安い材料に生じる化学変化のエネルギーに変えて蓄電し、それを元に戻して放電するという2次電池の方式はすばらしく、表1-1に挙げたほかの方式では届かない高いエネルギー密度(体積や重量当たりに蓄えら

表1-2 2次電池の課題

時間	急速な充電は困難で性能低下の原因となる
効率	充電効率率が低い、とくに大出力で低下する
寿命	性能が劣化した状態が長く続く
安全	高エネルギー品は発火や爆発の危険がある
環境	環境汚染物質のため廃棄物として回収する必要がある



使い方の例...S<sub>3</sub>をON、S<sub>5</sub>をOFFにして、付属のACアダプタを接続すると自動的に四つの電気二重層キャパシタに充電が始まり、8~20分で満充電になる。キャパシタの充電電圧は残量計に表示される。付属のハロゲン・ランプ(12V, 5W)または豆電球(2.5V, 約1W)をそれぞれ出力端子P<sub>4</sub>とP<sub>3</sub>に接続してP<sub>3</sub>をOFFにする。次にS<sub>5</sub>をONにすると選ばれた出力チャンネルに接続された負荷が点灯する

写真1-1 電気二重層コンデンサの充放電を試せる ECS スターターセット [株]パワーシステム]

## ECS 実験セット ECS スターターセット 頒布のお知らせ

価格 53,550円(消費税, 国内郵送料込み)

問い合わせ先 (株)パワーシステム スターターセット 係 ☎:(045)786-4990 FAX:(045)786-4991

〒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 e-mail: st3@powersystems.co.jp

ホームページ: <http://www.powersystems.co.jp/>

発送開始日 2001年1月20日(代金振り込み確認後, 約3週間後に発送します)

振り込み先 住友銀行 横浜駅前支店 普通 959191 (株)パワーシステム

れるエネルギー量)を得ています。

ところが2次電池には困った性質があります。充電放電を繰り返すと完全には元の状態に戻らず、思ったほど長くもちません。しだいに弱ってきて、でも捨てるにはもったいない、という状態がかなり長く続くのは皆さんもすでに体験済みでしょう。こうした化学変化のエネルギーにして蓄えることから起こる、ほとんど本質的な2次電池の問題点を表1-2にまとめました。

### 新方式は数々あれど

こうした課題を解決するには「化学反応に依存しない蓄電方法に限る」と多くの研究者が考えました。実際に運動のエネルギーにしてフライホイールに蓄える方式も実機が作られています。

根本的に、電気を電気のまま蓄えようという方式は二つあります。一つは超伝導磁石のコイルにいったんエネルギーを与えると電流が流れ続けるのを利用するもの、もう一つはキャパシタに充電して蓄える方法です。これらの研究論文はいずれも将来は栄光に満ちているように述べていますが、実際は化学反応を使わなくても、それぞれ固有の短所や問題を抱え、論文は書いて、補助金は給付されても、製品化されて我々が買って使えるというレベルにはなかなか到達しません。

これらの研究が競われているなかで、最近になって

キャパシタを使う方式<sup>(16)(18)</sup>が抜きん出てきました。

### キャパシタ蓄電がなぜ普及しなかったか

キャパシタつまりコンデンサが電気を蓄えるのは本誌の読者なら誰でも知っています。問題はその量で、ライデンびんやフィルム・コンデンサはパチンと放電するので一見多そうですが、体積や重量あたりに蓄えられる電気の量(エネルギー密度)としては電池より何桁も低いのです。

メモリのバックアップ用として市販されている電子部品に「電気二重層キャパシタ」があります。これは耐電圧は低いけれど、ほかの電解コンデンサなどでは考えられないF(ファラド)オーダの容量をもっています。表1-3に示すようにこのキャパシタを蓄電用におおうという研究は世界ではずっと以前から、日本でも私などが手をつける前に数社で始まっていました。すでに何千もの特許がこの分野で出願され、基本的なものの大部分は特許の有効期限がすでに切れています。これらの研究成果はむだではなく、私たちの研究や製品に役立ちました。言い換えれば現在の成功はこれら先行技術のおかげですから、足を向けて寝られませんが、

数年前までに研究の結果作られた電気二重層キャパシタはエネルギー密度にして1~2 Wh/kgで、鉛電池の実力値(公称値40 Wh/kgに実用放電深度60%を掛けて24 Wh/kg)の1/20程度でした。これを小型の電気自動車の鉛電池400 kgと積み替えるとキャパシタは20倍で8トンです。このエネルギー密度の低さが致命的で、ほかがいくら良くてもキャパシタ蓄電装置は普及しませんでした。

## 新蓄電システム ECS 誕生!

エネルギー密度さえその当時の20倍にすれば「夢のキャパシタ蓄電装置」ができるはずですが、しかし何によらず20倍もの改善は困難に違いありません。

ところが1992年の元日の朝、できるはずがないと思っていた20倍にする方法を2段階に分けて考えれば良いということをおぼろげに思いつきました。

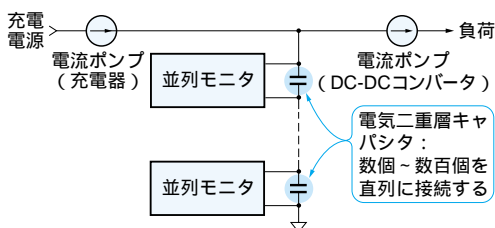
第一のステップは、エネルギー密度の構成要因を1次独立型の伝達関数、つまり相互に関係しない二つの要素に分けて、その積を20倍にする手段です。具体的には蓄電装置をキャパシタと電子回路の組み合わせで考え、**キャパシタを5倍に、電子回路で4倍にすれば乗算して20倍も無理ではありません**。けれど「電子回路でエネルギーは増幅できないぞ」と言われそうです。それは正しいのですが、電子回路を使って蓄電量を増やす方法は実在するので、後で詳しく述べましょう。

ECS(Energy Capacitor System)と名づけた新方式の基本構成を図1-3に示します。主要部分は直列に接

表1-3 電気二重層キャパシタの年表

1879年	H. L. F. Helmholtz, 電気二重層分子容量 <sup>(1)</sup>
1910年	M. G. Gouy, 拡散二重層理論 <sup>(2)</sup>
1924年	H. O. Stern, 特異吸着を含めた二重層 <sup>(2)</sup>
1954年	GE社, 電気二重層キャパシタ特許 <sup>(3)</sup>
1972年	Standard Oil社のペースト電極の特許 <sup>(4)</sup>
1978年	松下電器産業(株), 有機電気二重層キャパシタ発売 <sup>(5)</sup>
1979年	日本電気(株), 水系電気二重層キャパシタ発売 <sup>(6)</sup>
1986年	エルナー(株), 有機電気二重層キャパシタ発売 <sup>(7)</sup>
1990~98年	USDOEによるSupercapacitor Project <sup>(8)</sup>
1993年	新蓄電システムECS提案, (株)岡村研究所 <sup>(9)</sup>
1996年	東京電力(株)他による太陽光ECSの実証研究 <sup>(10)(11)</sup>
1997年	本田技研(株), キャパシタ・ハイブリッド車出展 <sup>(12)</sup>
1997年~	北見工大, EDS太陽電池プロジェクト <sup>(13)</sup>
1997~99年	NEDO, キャパシタ負荷準化実証調査 <sup>(14)</sup>
2000年	日産ディーゼル(株), ハイブリッド・バス発表 <sup>(15)</sup>

図1-3 新しい蓄電装置ECSの基本構成<sup>(16)</sup>



## 2次電池の誕生からこれまで

2次電池の歴史は1859年フランスのG. Plantéによる鉛蓄電池の発明に始まります。この発明の鉛と希硫酸の組み合わせがあまりに素晴らしかったため、今日までなんと140年にわたって原理的な変更なく、蓄電装置の王者であり続けました。

もちろんその間に、「もっと電気を多くためたい、つまり重量や体積当たりの蓄電量を増したい」という要求は出ました。充放電の回数で寿命が決まるので、さらに長もちさせたいという希望も切実でした。それを解決しようと、1899年にW. Jungnerの苛性カリ電解液によるニッケル・カドミウム蓄電池が現れ、これに対抗してT. A. Edisonは1901年に苛性カリを使った鉄・ニッケル蓄電池を発明し量産に進出しました。しかし、40歳の発明王が人生の後半

を注ぎ込んだ研究は、製品化の後も液漏れと短いサイクル寿命に悩まされ続け<sup>19)</sup>、エジソン電池の名は歴史に残るだけに終わります。

その後長い間変化の少なかった蓄電池分野で水面下の努力の成果が1990年に現れます。ニッケル水素電池が日本の松下電池工業(株)、三洋電機(株)、東芝電池(株)によって相次いで発売されました。さらに旭化成(株)の吉野彰らによってリチウム・イオン電池が発明されました。一方、同年2月にソニーエナジーテック(株)が一早く製品化(外販は1992年)しました。その後30社余りが参入し、携帯機器用小型電池の急速な普及と、利益が出ないほどの価格競争に突入しています。

続したキャパシタで、それに「並列モニタ」と呼ぶ制御回路がつき、充放電は「電流ポンプ」と呼ぶスイッチング・コンバータを通して行うというのが要点です。

第二のステップとして、必要なのはキャパシタのエネルギー密度を数倍にする手段でした。それまでに一流メーカーが何社もかかって当時の容量に達していたのですから、それを1割越えるのもたいへんです。

ところが、キャパシタの容量を何倍にもする方法を意外に身近なところで発見しました。

### キャパシタのエネルギー密度を増す方法

ここからしばらくは、世界や日本の専門家にも、なかなか理解してもらえなかった内容です。なるべく丁寧に書きますが、少し歯ごたえがあるでしょう。でも、いったん理屈がわかってしまえば、あとはパワー・エレクトロニクスの技術で使いこなせます。

#### 内部抵抗が大きくても容量のアップを優先

当時のパワー用電気二重層キャパシタの研究は、世界中がエネルギー密度はそっちのけで内部抵抗を下げようと競っていました。これには立派な理由があります。

コイン型の電気二重層キャパシタを試みにパワー用として扱ってみると、確かにその内部抵抗を無視できません。これまで電子部品に使われてきたコンデンサでは、マイカやフィルム・コンデンサはもちろん、比較的内部抵抗の高い大容量セラミックや電解コンデンサも内部抵抗を無視できる状態で使うのがあたりまえでした。このため「パワー用電気二重層キャパシタの内部抵抗が無視できない状態なのは、製品として不完

全であり、理想のキャパシタは内部抵抗が無視できるほど低くあるべきだ」とほとんどの研究者が考えたのは当然だったといえるでしょう。

そのようすは米国DOE( Department of Energy ; エネルギー省 )が主宰した電気二重層キャパシタの研究プロジェクトで、リーダのA. Burke氏の論文やDOEの報告<sup>8)</sup>を読むとわかります。彼に限らず当時の世界の論文では「AとBとのキャパシタができた。後者はエネルギー密度は大きいけど内部抵抗は高いから劣っている」といった表現が常識として通用していました。

それと正反対に、ECSではキャパシタの内部抵抗を大きくしてでもエネルギー密度を高める方向に進もうと考えました。パワー用の電気二重層キャパシタを作ったことのある人なら誰でも、内部抵抗を高くしてよいならもっと大きな容量が詰め込めることは実感していたはずですが、なぜそれをやらなかったかということ、内部抵抗の大きなキャパシタは、Qの低いtan の大きなコンデンサの印象から「損失の大きい劣悪なキャパシタになるに違いない」と思い込んだからでしょう。

でもECSではQの高い純粋な回路部品を作る必要はありません。目的は蓄電で、いくら電子回路で応援してもトランジスタに電気はたまりませんから、キャパシタの蓄電量を増やすのが絶対条件です。そうはいっても、内部抵抗の大きなキャパシタに充放電したら損失が出るでしょう。実際「 $i^2R$ を取り除く魔法はないよ」といったアドバイスをいくつもいただきました。

ところが $i^2R$ は除けなくても、内部抵抗の大きなキャパシタを低損失で充放電する方法があったのです。



### オーム損を取り除く魔法

図1-4は、内部抵抗の10倍ずつ異なる3種類のキャパシタを定電流で充放電したときの時間と効率の関係を示したものです。効率とは内部抵抗による損失分を100%から差し引いた値です。三つのトレースはちょうど1桁ずつ横にずれているので、**内部抵抗が10倍大きなキャパシタは時間を10倍かけて充放電すれば同等な効率が得られる**ことが見て取れます。

キャパシタは図1-5に示す電圧源でも充電できますが、充電効率が50%以下となるので、効率などはどうでもよい用途以外には使えません。

実用的な蓄電には電流源を使うと高い効率が得られます。正確な計算をしておきましょう。定電流 $I$ で $t$ 時間充電または放電を行ったときの電荷を $Q$ とすると、

$$Q = It \quad \dots\dots\dots (1)$$

キャパシタに蓄えられる電力量 $U$ は、

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad \dots\dots\dots (2)$$

です。抵抗 $R$ で失われる電力量 $L$ は、

$$L = I^2 R t = R \frac{Q^2}{t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(2)(3)からキャパシタの静電容量 $C$ と内部抵抗 $R$ の充放電時間 $t$ で全容量を定電流充電や放電した場合のエネルギー効率を計算すると、

$$P_C = \frac{U}{U + L} = \frac{t}{t + 2RC} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$P_D = \frac{U - L}{U} = 1 - \frac{2RC}{t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となります。式(4)(5)を内部抵抗が10倍ずつ異なる3種類のキャパシタについてプロットすると前出の図1-4が得られます。このように、内部抵抗のオーム損による効率は、充放電時間でコントロールできます。

### 充電時間は短いほどよいか

ECSの原理を聞いた人から「充電時間は短いほどよくて、長いのは短所ではないか」と反問されることがあります。いいえ、**大容量の実用蓄電装置では充電時間はある程度長くすることが不可欠なのです。**

例を挙げましょう。フォークリフトに積まれた6kWhの電池を10分間で充電するためには36kWの充電器が要ります。しかし、10時間充電なら充電器は同じ計算だと600Wですみます。

そのうえ、後述のように推奨最短放電時間の長いキャパシタのほうがエネルギー密度が高くなるというメリットもあるので、使い方が許す限り小電流で長い時間をかけて充放電するほうが有利です。

### F(オーム・ファラド)という単位

以上からおわかりのように、ECSではキャパシタの内部抵抗というパラメータがとても重要です。しか

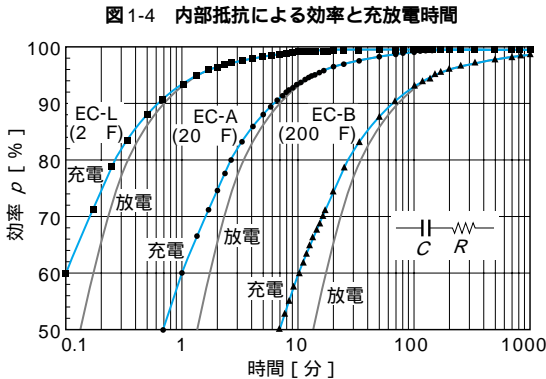


図1-4 内部抵抗による効率と充放電時間

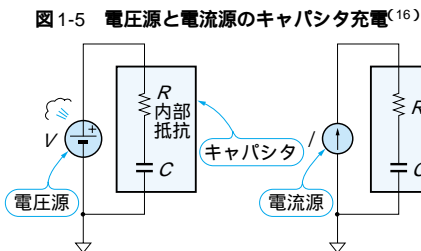
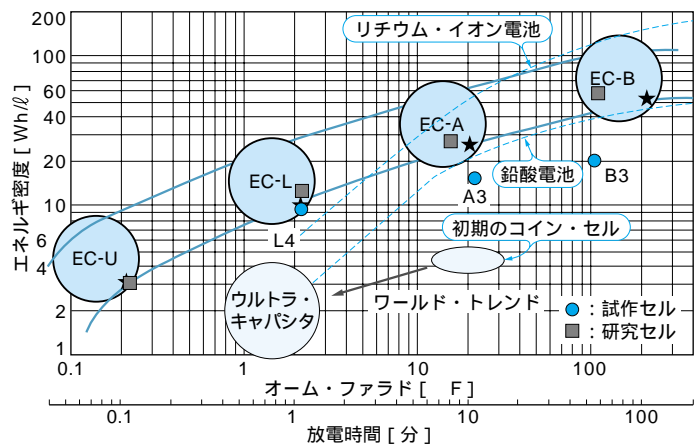


図1-5 電圧源と電流源のキャパシタ充電<sup>(16)</sup>

キャパシタは電流源のほうが効率良く充放電できる！

図1-6 キャパシタのエネルギー密度と内部抵抗



注 ウルトラ・キャパシタ：電気二重層キャパシタの米国の方言

し、キャパシタの内部抵抗はキャパシタ自体の大きさや直並列にしてその数が変わると変化するため、ECS用キャパシタの材料、構造などを比較し検討を進めることができません。内部の電極の面積当たりの抵抗などで表したのでは、キャパシタの細部がわからないと決められず、汎用性がありません。

そこで、キャパシタの内部抵抗の正規化した表現法はないか考えた末、内部抵抗を静電容量1F当たりで表すことにして  $F(\text{ohm-farad})$  という単位を作りました。これは学会で制定されたものではなく、学術用語にもない、ECSと同じく私の提案です。

1F当たりの電気伝導率 $\chi$ (Siemens)は $S/F$ で、 $S$ は逆数だから、 $S/F = 1/(F)$ です。したがって1Fあたりの内部抵抗はそのまた逆数で  $F$  となります。これを使えば大きさが異なる大小のキャパシタ間で静電容量当たりの内部抵抗の値が直接比較できます。複数のキャパシタを直列や並列にした場合にも適用できます。

例を挙げましょう。1F当たり1  $F$ 、つまり1  $F$ のキャパシタを2個直列に接続すると、合成値は0.5  $F$ で2  $F$ です。したがって、0.5  $F$ と2  $F$ を乗じると元どおり1  $F$ です。また、このキャパシタを1000個並列に接続すると1000  $F$ で1/1000  $F$ ですから、やはり1  $F$ です。

もっとも、発熱のカロリー計算などで、 $F$ がわかっているキャパシタの内部抵抗の絶対値が知りたい場合もあるでしょう。そんなときは逆算して、例えば1000  $F$ で2  $F$ なら  $2/1000 = 2 \text{ m}$  が得られます。後述するバンク切り替えなどで複雑な直並列接続をしても、それを構成する単セルがすべて  $X \text{ F}$ であれば、合成したキャパシタも  $X \text{ F}$ となります。

先ほどの式(4)(5)を見てください。充放電効率はキャパシタの  $RC$ つまり  $F$ の値と充放電時間  $t$ の比だけで決まります。これでキャパシタの  $F$ というものがどんなに重要な特性かがおわかりでしょう。

図1-4に示した3種類のキャパシタの標準モデル名の下に、EC-L(2  $F$ )などと、それぞれのキャパシタの内部抵抗が  $F$ 単位で表してあります。

### どんなキャパシタが作られたか

キャパシタは、電池のように化学物質で決まる耐電圧もなく、静電容量も内部抵抗も設計次第ですから、好き勝手な定格のキャパシタを作ることができます。しかしそれではかえって検討し難いので、図1-6に円で示した4種類の目標値を置き、それを目指して研究開発をすることに決めました。

EC-AとEC-Bを初めに作り、その後もっと内部抵抗の低いEC-L(Low)、2000年にはもっと低いEC-U(Ultra-Low)を作りました。図の  $\square$ は研究レベルの試作セルの性能、 $\bullet$ は数百~数千個ほど生産したセル

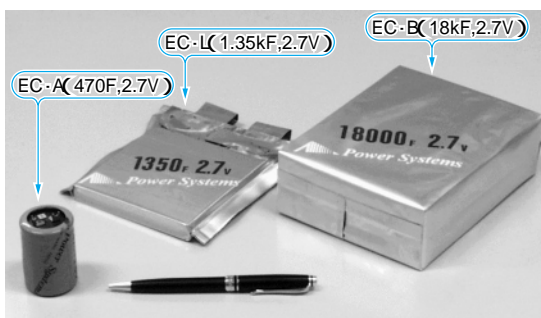


写真1-2 電気二重層キャパシタの外観

の性能です。

これら実物の外見がどんなものか数例を写真1-2に示します。ようかんかレトルト食品のようなのが、左からEC-L型1.35 kFおよびEC-B型18 kF単セルです。このタイプは、裸で単セルのまま扱うものではなく、数個~数十個をモジュールに組んで使います。

手前に立っている小さな円筒がEC-A型470F、電解コンデンサのように単セルで扱えるタイプです。本連載で扱うECS実験セットではこれを4本使います。「何だ、一番小さい奴か...」と言われそうですが、単1乾電池ほどの大きさ(体積48 ml)の従来の市販品は100  $F$ 程度しかありません。蓄電量も1本で0.4 Wh、4本全部では約1.6 Whあります。ただし、内部抵抗も1桁くらい大きい20  $F$ ですから、下手に使うと思うように働きません。ECS流の使い方をマスターするには絶好の材料です。

### キャパシタの価格について

実際に装置に組み込んだりして商品化するとするとキャパシタの価格が問題になります。ECSの初期から現在に至るまで、「こんな使い方があるよ」と教えていただいた用途のほとんどが、キャパシタの値段が高すぎて実用化できませんでした。

研究の過程では、鉛電池と同じ規模で量産したとき、いくらにできるかを目標に据えています。しかし、製品化の初期段階では鉛電池の生産量どころか、月産1000個も容易ではありません。特に電極や電解液に新材料を使う場合は、それが量産されていなければ高くつきます。大量生産されれば安くなるはずというキャパシタも初めから安くできるわけではないのです。

もう一つ大きな課題は、コンデンサと蓄電装置の価格に対する考え方の違いです。

現状では電気二重層キャパシタの値段は1F当たり約10円、小売ではその1.5~2倍ぐらいといわれます。これだと100  $F$ のキャパシタは1~2千円で、コンデンサとしては相場より高くはないそうです。

でも蓄電装置として見るとどうでしょう。蓄電装置

をファラド当たりでいうのは変ですから、蓄電量に換算すると、

1000 F, 2.7 V 1 Wh

これがちょうどよい目安になります。1000 Fで1万円とすると1 Wh当たり1万円です。これは蓄電装置としてはとんでもなく高価です。

例えばヤマハPASのような電動アシスト自転車は160～200 Whくらいの2次電池を積んでいます。ECSは効率が高く、充電された電荷を使いきれるので、およそ100 Whも積めばほぼ類似の走行ができます。

でも1万円/Whでは、100 Whのキャパシタ・バンクは100万円です。いくらキャパシタが優秀でもこの値段では誰が買うでしょうか。つまり、コンデンサと電池とは蓄電量に換算した生産規模のコンセプトがまったく異なります。コンデンサは蓄電量当たりのコストが高くては通用しましたが、蓄電が目的なら蓄電量当たりのコストで電池と競争する必要があり、コンデンサの考えから脱皮しないと普及しません。

現状ではなく、はるか先を見越すと、生産量が十分大きくなったときの価格は、その原材料と生産に必要なエネルギーで決まります。現状はニッケルどころかコバルトより高価な活性炭と化学研究用試薬を電解液に使っていますが、大量生産が展開した将来には60円/Whまで下がるという見通しが提示<sup>14)</sup>されています。

そこまで届くのはいつのことかわかりませんが、ECSがハイブリッド電気自動車に搭載されて世の中に目だつという効果によって、当面は1000円/Whに向かって、何年もかかって下がっていくと思われます。

### ECSの応用

写真1-3は国家プロジェクトで試作された負荷平準化用、つまり夜間の電力を昼間のピーク時に使う本格



写真1-3 5.5 kW 負荷平準化用 ECS 電力貯蔵装置

的なものです。この実用化にはコストがどこまで下がるかが重要で、前述の60円/Whという見通しはこのプロジェクトで検討されました。

しばらくの間は数千円/Whで何ができるかというところから実用化が広がるでしょう。なんといても最初の量産はハイブリッド電気自動車で、商用車と乗用車のスケジュールがすでに公表されています。

もう一つ展開しそうなのは電力分野の応用です。例えば無停電電源UPSの信頼性は電池が制約条件になっているのが現状なので、1分間程度の給電を絶対確実に保証できるキャパシタUPSが有利でしょう。電解液の調整も均等充電も不要で劣化する恐れのないキャパシタは、電力システムにつながっていない島や山の上などでは利用価値があることから、多少高価でも太陽電池や風力発電と連携して使われようとしています。

電動自転車やシニア・カー、各種の医療・介護機器などの電源にも有望と見られ、研究が始まっています。

そんな大きなものばかりでなく、写真1-4のような街路灯、庭園灯やガレージの照明、盗難防止機の電源など、本稿の実験セットがそのまま利用できるように小規模な応用がはるかにたくさんあるはずで

## キャパシタの考え方

### 電気二重層キャパシタの性質

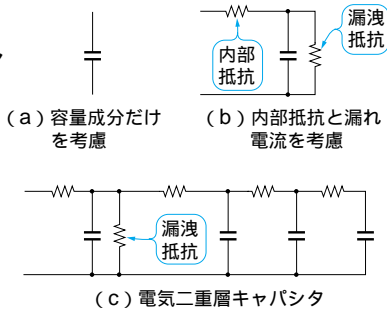
電子回路でコンデンサを扱うときは、図1-7(a)のようなものを思い浮かべるのが普通です。よほど慎重に内部抵抗や漏れ電流を考えるなら図1-7(b)でしょう。

ところが、ECSではキャパシタは図1-7(c)のようなものと定義したほうが実情に合います。もちろん簡単に考えるなら(a)や(b)でもよいのですが、キャパシタ固有の特性、例えば静電容量や内部抵抗、充放電効率や自己放電率など、蓄電装置として必須の特性



写真1-4 LEDによる街路灯への応用<sup>20)</sup>

図1-7 キャパシタの等価回路



を研究したり測定する場合には、(a)や(b)で考えたのでは理解できない現象に次々と出会うでしょう。

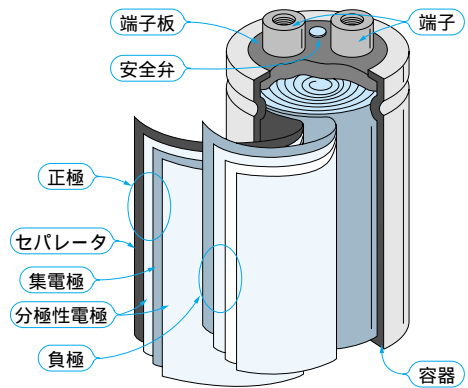
したがって、ここでは「電気二重層キャパシタでは(c)の形で特性を考えるのが本来で、(b)や(a)は簡略に考えたいときのツールにすぎない」としておきます。

この考え方は、これから電気二重層キャパシタを扱う際のとても重要なノウハウで、多くの誤りに落ち込むことを救ってくれるに違いありません。

### 電気二重層キャパシタの構造

電気二重層キャパシタの等価回路がこんな形になってしまう原因は、その構造と巨大な静電容量にあります。ECS実験セットに付属しているキャパシタは円筒形でアルミ電解コンデンサと同じ外見で、図1-8に示すように内部の構造もよく似ています。ただし、巻いてあるのは分極性電極、つまり薄く延ばした活性炭のシートで正負各1枚の間にセパレータが挟んであり

図1-8 円筒型電気二重層キャパシタの構造



ます。分極性電極の後ろには電流を取り出すための集電極、通常は薄いアルミ箔があり、その後ろは次の面の分極性電極が重なり、集電箔の両面に分極性電極を貼り付けた形で巻いていきます。

外見はともかくですが、内部がもっと重要です。分極性電極(イオンになって溶け出さないで分極現象を生じる電極)にはいろいろな作り方があり、活性炭粒を樹脂に混ぜて焼結したものや、繊維をそのまま焼いて活性炭の織物にしたものがあります。実験セット用の電気二重層キャパシタは、テフロンをつなぎに使ううどんやパスタを作る工程のように活性炭粒子をよく捏ねて延ばして、集電極に挟んで巻きあげています。

その電極が電解液に浸された状態を拡大すると図1-9のようになっています。アルミの集電極にくっついて一番左の活性炭は、その周りをしみ込んでき

## 電気二重層とは

電解液に導体を浸すと、導体に接する界面に導体に押しつけられた分子による内層とその外、つまり電解液側に、充電電荷によって引き寄せられるが拡散運動をしている外層が生じます。この現象を Helmholtz が 1879 年の論文<sup>(1)</sup>で述べ電気二重層 (Electric Double Layer) と名づけました。

電気二重層の内層は電気分解が起こる電圧より低い範囲では電流は流れず、ほぼ完全な絶縁状態です。実用の電気二重層キャパシタはこれを絶縁膜として、図1-Aの下に示したように、正負極の計2個が直列になった状態のキャパシタを得ます。二つのキャパシタの間を電気的につないでいるのは電解液だという点に注意が必要です。

電気二重層によって得られる絶縁膜は通常的人工的なフィルムなどと異なり、自然に発生するものなので膜厚は極限である1分子まで薄く、ピン・ホー

ルなどの欠陥は皆無です。そのため巨大な面積を使って作った大静電容量キャパシタの絶縁膜の信頼性は極めて高く、耐電圧以下で使う限り絶縁膜自体がパンクした例は知られていません。

図1-A 電気二重層キャパシタの原理

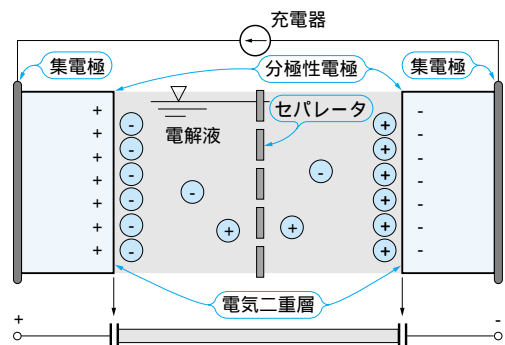
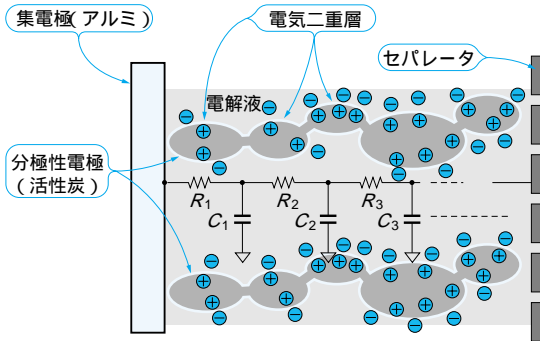




図1-9 電気二重層キャパシタの等価回路<sup>16)</sup>



た電解液に囲まれてその間に電気二重層を生じますが、この活性炭粒子は集電極に炭素自体の抵抗も接触抵抗も含んだ抵抗  $R_1$  でつながっていて、周辺の電解液との間には電気二重層による静電容量  $C_1$  が発生します。その隣の活性炭粒子は前の粒子に  $R_2$  の抵抗でつながり、電解液との間には  $C_2$  という電気二重層容量が生じます。これがセパレータまで続きます。

電気二重層キャパシタの構造は正負ほぼ同じですから、図ではセパレータの向う側は省きました。この説明では活性炭1粒のラインを糸のようにたどりませんが、実物ではこれがたくさん並列になっています。その同じ時定数のノードを縦に結んでいくと、図1-9に示す  $R_1, C_1, R_2, \dots$  の等価回路ができていきます。

図1-9では省きましたが、それぞれの電気二重層容量には電解液中や活性炭に含まれる不純物や、端子間の漏れ電流に起因する漏洩抵抗があります。これを抵抗1本で代表すると、以上を総合して電気二重層キャパシタの等価回路は前出の図1-7(c)の形で表すことができます。

### 電気二重層の性質

今回出てきた範囲で電気二重層の特徴的なことをいくつか挙げておきましょう。

#### 水系と有機系

世の中のほかの文献や特許などを参照するとき、電気二重層キャパシタがそうでないか、電気二重層であれば電解液が水系か有機系かで性質が大きく異なる点に注意してください。特許公開情報などで水系と有機系の兼用で書かれているのを見かけますが、例えば同じ活性炭電極が水系にも有機系にも高性能だということとはほとんどあり得ません。

#### 電気二重層の発生

電解液に導体を浸すと、好むと好まざるとにかかわらず必ず界面に電気二重層が発生します。分極性電極つまり活性炭の表面に限らず、アルミ集電極や引き出し線と電解液の間にも電気二重層が生じるので、表面

を絶縁する必要はありません。

それならなぜセパレータを置くかということ、正負の電極が電解液を介さずに直接触れて導通になれば、ショートしてしまうからです。セパレータのことをスペースと呼ぶ人がいますが、スペースはできるだけ空けないよう薄い材料を選びます。この部分は電解液の通路で、これが長くなるのはむだに抵抗が増えるから(p.319コラム参照)です。

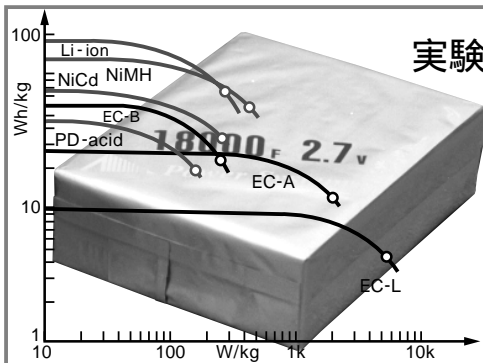
### ◆参考・引用\*文献◆

- (1) H. L. F von Helmholtz, Ann. Physik, 89,211( 1853 ), ditto, 7,377( 1879 )
- (2) A. J. Bard et al.; Electrochemical Methods, John-Wiley, 1980 .
- (3) Low Voltage Electrolytic Capacitor, USP 2,800,616( 1957-7 ), General Electric .
- (4) Electrochemical Capacitor having Carbon Paste Electrode, USP 3,634,736( 1972-1 ), Standard Oil .
- (5) 関戸 聡ほか; 湿式電気二重層キャパシタ " ゴールド・キャパシタ ", National Technical Report Vol. 26, No. 2, 1980年4月 .
- (6) 真田 茎; 電気二重層を利用して小型・大容量のコンデンサを実現, 日経エレクトロニクス, 1979年, 3-10 .
- (7) 平塚和也, 森本剛ほか; 有機溶媒系電気二重層コンデンサ用活性炭電極の特性評価, 電気化学59, No. 7, ( 1991 ), p. 607 .
- (8) T. C. Murphy et al.; Performance of Electrochemical Capacitors : DOE Program, 6th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, Deerfield Beach, Florida, 1996年 .
- (9) 岡村迪夫; 電力用蓄電装置の研究 ~ その概要, 日本原子力学会秋の大会, ( 1993 ) H60, p.466 .
- (10) 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, pp.504 ~ 510, 1995年 .
- (11) 山岸政章ほか; 新しい物理電池 ECS と太陽電池による独立型電力貯蔵システムの研究, 信学技報 Vol. 96, No. 32, 1996年 .
- (12) 本田技研(株)ホームページ, <http://www.honda.co.jp/home/hpr/press-info/97/c97091-ima.html>, 1997年10月 .
- (13) 新山信一郎ほか; 新型電力貯蔵装置 ECS を使った PV-ECS システムの開発, 電学論B, Vol. 120-B, No. 2, 2000年 .
- (14) 負荷平準化新手法実証調査 最終報告書, 2000年3月, 新エネルギー・産業技術総合開発機構 .
- (15) 佐々木正和ほか; LNG エンジン搭載ハイブリッドバスの開発, 高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発成果発表会前刷り集, 2000年3月22日, NEDO/自動車研究所 .
- (16) 岡村迪夫; 電気二重層キャパシタと蓄電システム, 1999年3月, 日刊工業新聞社 .
- (17) 野津育郎ほか; 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, 自動車技術会 2000年秋季学術講演会前刷集, 200005566, 2000年10月19日 .
- (18) 岡村迪夫; 電気二重層キャパシタを使った蓄電装置, 電学誌 Vol. 120, No.10, pp.610 ~ 613, 2000年 .
- (19) N. Baldwin; Edison-Inventing the century, Hyperion, 1995年 .
- (20) \* 棚モリテウ, 埼玉県工業技術センタ南部研究所, (株)パワーシステム他, ECS街路灯, 1999年 .

実験セットで学ぶ新蓄電システム ECS! ②

# ECS の動作原理と 実験セットの運転

岡村 迪夫  
Michio Okamura



早い人はもう ECS 実験セット<sup>1)</sup>(写真 2・1)を入手したかもしれません。でも本稿は、実験セットをもっていることを前提にはしないで、実物がなくてもわかるように解説していきます。

初回は理屈ばかりで頭が痛くなった人もいるようですから、今回は実験から入ることにしましょう。

## ECS 実験セットの概要と使い方

### 実験セットのあらまし

#### 構造

図 2・1 に実験セットの基板のシルク面を示します。

基板は表面実装ですが、わかりやすいように実装密度をあまり上げず、機能別に配置してあります。基板上のシルク・スクリーン印刷をたどると、左上から充電器 (Charger)、下に残量計 (Residual Meter)、真ん中の上から並列モニタ (Parallel Monitor)、電気二重層キャパシタ・バンク (EDLC Bank)、右端が 2 出力の電流ポンプ (Current Pump) となっています。

これと同様な、ただし大容量で自動車のヘッド・ライト 50 W を負荷にしたものが 1996 年から現在まで一

式 250 万円で販売されています。今回の実験セットははるかに小型で安価ですが、ECS を知るための実験用にはこれで十分です。表 2・1 に実験セットの主な電気的仕様を示します。

#### 基本回路構成

前回示した実験セット全体の系統を図 2・2 にもう一度示します。

交流を直流に変換する小型 AC アダプタ (スイッチングによるスイッチング電源) をコネクタ P<sub>1</sub> に接続すると、充電電源が充電器に入力されます。充電器は一種のスイッチング・コンバータで、電圧源である整流回路の出力を電流源に変換します。

中央のコンデンサの記号は電気二重層キャパシタで、470 F/2.5 V を 4 個直列で使います。キャパシタの直列は何でもなさそうですが意外に難しく、単に接続しただけでは電圧が均等に負担されません。後で詳しく述べますが、キャパシタを壊さずしかも容量いっぱいまで使うために「並列モニタ」と呼ぶ均圧回路、つまり電圧負担を均等化する回路が各キャパシタに並列に設けられており、これが ECS の重要なかぎ<sup>2)</sup>です。

出力電力は、キャパシタの端子からそのまま取り出してもかまいません。ただし、静電容量が C [F] あるキャパシタの蓄電量を U [Ws または J] とすると

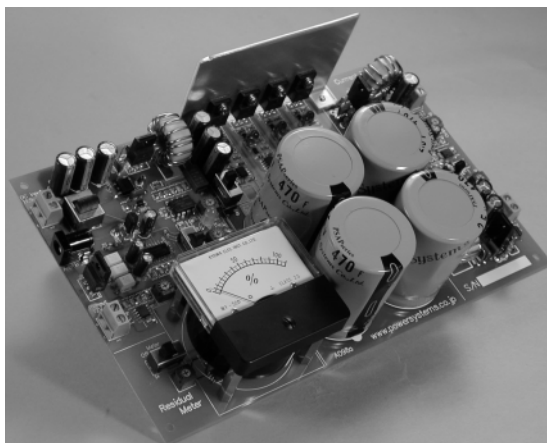


写真 2・1 ECS 実験セットの外観

図 2・2 ECS 実験セットの系統図<sup>1)</sup>

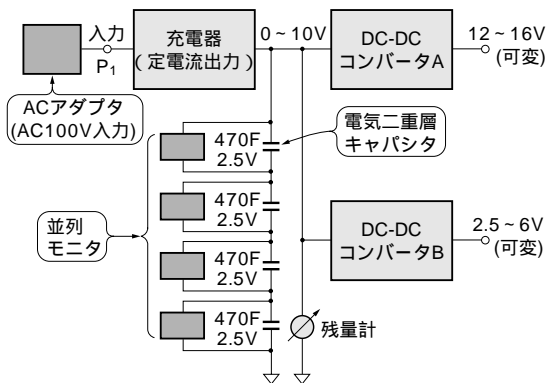
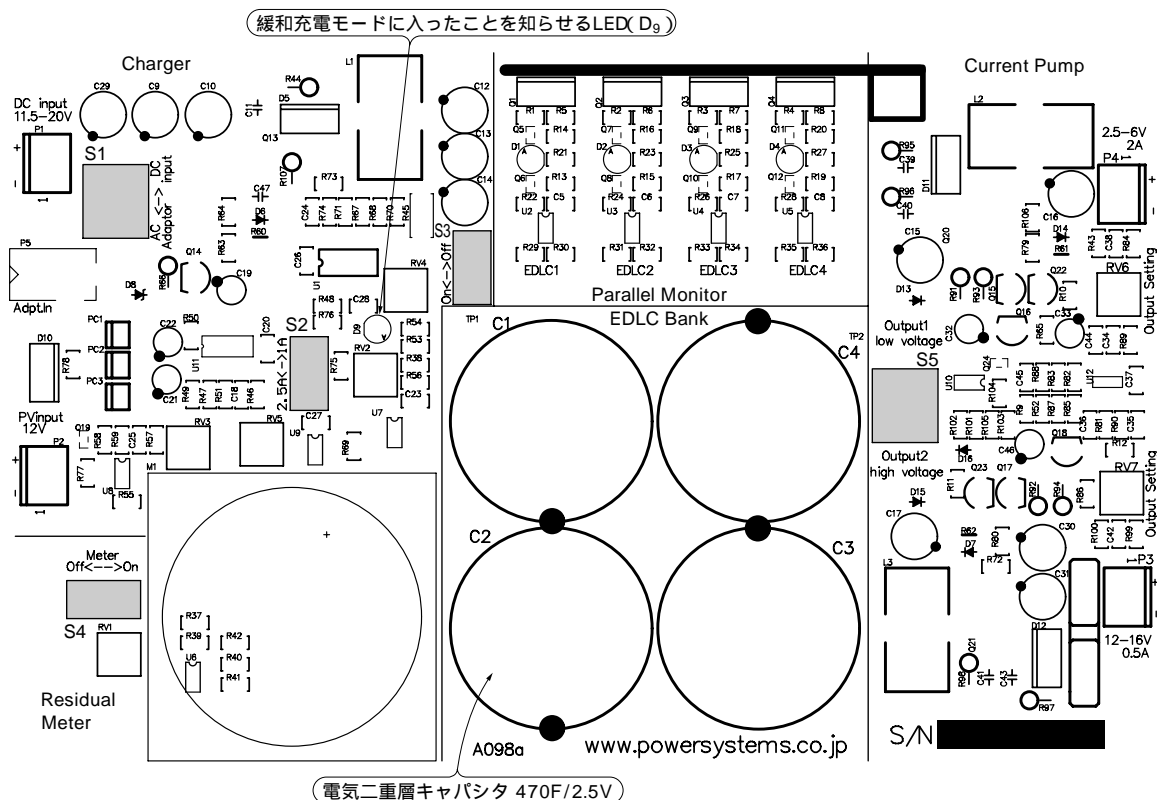


図2・1 (1) ECS 実験セット基板のシルク図



その端子電圧  $V$  [V] の関係は、

$$U = \frac{CV^2}{2} \dots\dots\dots(1)$$

電圧から見ると、

$$V = \sqrt{\frac{2U}{C}} \dots\dots\dots(2)$$

となるので、残量の平方根に比例してキャパシタの電圧が低下します。これでは使いにくいという、蓄電量をゼロ近くまで有効に利用できません。そこで、出力電圧を一定にし、蓄電された電力量を利用する割合(利用率)を増すため、出力側にも図2・2にDC・DCコンバータと記した電流ポンプを入れます。この辺の動作や問題点は実験セットで体験することが可能です。

### 使い方

#### 運転を始める前に

実験セットは(株)パワーシステムで完成品として検査した後に出荷されていますが、輸送などの過程で破損しているところなどが無いか最初の通電前に外見を調べてください。ECSは通常の電子回路より危険なものではありませんが、通常の電子回路と同じく交流電源につなぐので、破損したまま使うと**感電の恐れがあります**。

本稿は実験セットの説明書ではないので、注意書きの類は述べません。新しい装置は常識で片付かないところがあるので、添付の説明書をよく読んでおくと時間の節約になるでしょう。

試用して気づいたのですが、この実験装置はスイッチがたくさんあります。一つの使い方を指すなら、こんなにスイッチは要りませんが、実験をするとなると切り離したり、接続したりすることが多いので、こうなったようです。

#### 負荷を切り離して充電する

では初めにスイッチの設定を確認してください。

$S_1$ は、充電電源を選択するスイッチです。ACアダプタか任意の直流電圧源(11~20V)のどちらかを選択できます。同梱のACアダプタを使うならAdpt.inにアダプタの出力プラグを挿入して、 $S_1$ を下に倒します。

残量計の左にあるMeterスイッチ $S_4$ は、必ずONにしてください。OFFにするのは残量計の約1mAも節約して自己放電を最小にしたい場合だけです。

$S_3$ もいつもONです。充電器側に逆流する電流をゼロにして自己放電を最小にしたい場合には、充電後このスイッチをOFFにして充電器を切り離します。

表2-1 ECS 実験セットの主な電気的特性

項目	仕様
<b>充電器</b>	
電流ポンプの構成	降圧チョップ電流出力
入力電圧	DC10.8 ~ 21 V
出力電流	2.5 A/1 A 切り替え
出力電圧	0 ~ 10 V(制限電圧)
動作モード	定電流, 電圧制限
表示機能	電圧制限中はLEDが点灯する
<b>キャパシタ</b>	
型名	PSAP2R5・470RD02A
単セル容量	470 F
定格電圧	2.5 V
内部抵抗	約20 F
使用個数	4セル, 直列
バンク容量, 電圧	118 F, 10 V
バンク貯蓄エネルギー	1.6 Wh
<b>並列モニタ</b>	
方式	1コンバータ, 基本型
定格電圧	2.5 V
バイパス電流	5 A <sub>max</sub>
表示機能	バイパス・オン時にLED点灯
<b>出力コンバータ1</b>	
電流ポンプの構成	降圧チョップ定電圧出力
入力電圧	10 V ~(出力電圧+0.5 V)
出力電圧	2.5 V(2.5 ~ 5 V可変)
出力電流	2 A <sub>max</sub>
<b>出力コンバータ2</b>	
電流ポンプの構成	昇圧チョップ定電圧出力
入力電圧	3 ~ 10 V
出力電圧	12 V(12 ~ 16 V可変)
出力電流	0.5 A <sub>max</sub>
<b>残量計</b>	
方式	折れ線近似式
精度	± 10 %以内
<b>実験用負荷</b>	
名称	12 V, 5 W ハロゲン電球
	2.5 V, 1.3 W 豆電球

Output スイッチ  $S_5$  は二つの出力コンバータを切り替えます。初めは中央位置(OFF)にして負荷を切り離しておいたほうがわかりやすいでしょう。

確認と設定ができたら、ACアダプタを家庭用の交流100Vに挿し込むと充電が始まります。このとき残量計の表示に注目してください。電池と違って残量がハッキリと正確に読めるのでとても重宝します。エネルギーが時々刻々とたまっていくようすがありありと見えるでしょう。いっぱいまで充電される時間は、この充電器では20分ほどですが、初めての充電ではとても待ちきれないでしょうから、残量計の指示で50%ほどまで充電したところで負荷のスイッチを上か下に入れてみてもかまいません。

### 負荷を接続する

実験セットには、負荷として12Vハロゲン球と、2.5V豆電球が同梱されています。電流ポンプの出力電圧は、工場でそれぞれの負荷に合うように調節されているはずですが、正確な電圧計をもっているなら、念のため負荷を接続する前にそれぞれの出力端子で電圧を測り、 $VR_6$ と $VR_7$ で調節してください。

12V出力( $P_3$ )にハロゲン電球を接続して、 $S_5$ を下に下げると、強い光が目射ります。直視すると目を傷める強力な光源なので、私はボール紙で衝立てを作り手前に立てて実験しました。乾電池の電源などと違って強力ですから、電球に燃えやすい物やプラスチック類が触れないようにしてください。

ハロゲン電球は約5Wで、この容量のキャパシタ・バンクの負荷としては重いほうで放電が早いため、実験が早く進んで好都合です。それにしても、残量計の指示は思ったほど下がりませんが、充電しながらなのであたりまえです。

### 負荷を接続したまま充電を止める

ハロゲン電球を灯したままで充電のスイッチ $S_1$ をOFFにしてください。今度は残量計が下がりはじめたでしょう。残量が低下しても電球の明るさはまったく変わりません。精度の良い電圧計があれば、測ってください。電気二重層キャパシタが満充電状態から動作下限まで放電しても、出力電圧は数10mVしか変化しません。テストなどでは変動はまったく確認できず、定量的に測るには精度の良いディジボルが必要です。

残量が10%ほどになると電球の光が突然消えます。これは電気二重層キャパシタの電圧が下がりにすぎ、電流ポンプが働かなくなったからです。

### 負荷を切り離して再充電する

ここまで確めたら、もう一度充電してみましょう。満充電までは負荷を切り離した状態で約20分と、けっこう時間を要しますが、充電器は満充電の電圧に達すると自動的に緩和充電に切り替わるので、充電状態のまま放置して差し支えありません。その瞬間をじっと見ていると、緑のLED  $D_9$ が点灯します。これが緩和充電に入った動作状態を示す表示灯となっています。

電気二重層キャパシタは2次電池と違って、いくら充放電しても、定格電圧以内で使いさえすれば、消耗や劣化という現象は基本的には起こりません。満充電状態や充電の途中や全放電で放置しても、それが原因で壊れる心配はありません。いうなれば、この蓄電装置は充放電をすればするほど得なのです。

コンデンサに充電するといえば、電球を点灯してもピカッと光って、スーッと消えていくのがあたりま



えでした。このように長時間、まるで電池のようにキャパシタが動作するのは、初めて成功したときは私にとっても感激で、天井に映る眩しい光を飽きずに眺めていました。キャパシタ蓄電の新時代の光を皆さんはどうご覧になるでしょう。

## ECS の電気回路

### どんな技法が使われているか

実験セットの出力は、大きいといってもハロゲン電球でしたが、同じ原理はすでに大きな実績を上げています。写真2-2はECSを積んだ巨大な新型キャパシタハイブリッド・バスで、発電機や回生制動から平均93%以上の効率でキャパシタを充放電し、従来に比べて燃費が約2倍改善<sup>4)</sup>されています。

このキャパシタによる蓄電を実用レベルまで高めたECSで使われている主な技術は次の三つです。

高効率な充電と放電

キャパシタを直列にする方法

電子回路と併用する専用キャパシタ

#### 高効率な充放電技術

従来、電圧源から充電するケースが多かったところを充電用の電流ポンプ、つまり電流源に変換するスイッチング・コンバータを挿入し、電流をできるだけ絞って充電することにより効率を高め、キャパシタの容量を増し、しかも充電器の容量を節約する方法です。

#### キャパシタを直列にする技術

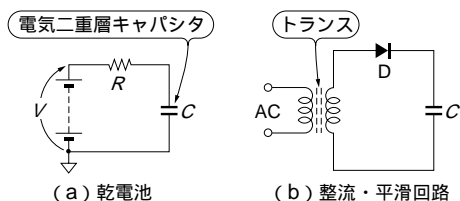
キャパシタの静電容量と漏れ電流がばらつくと、直列にして一斉に充電した場合、個々のキャパシタが分担する電圧が不均等になります。そのずれが例えば±15%あれば、キャパシタの充電電圧は定格の70%で使う必要が出てきます。もし定格で使うと、電池やキャパシタでほとんど常識となっている「直列にすると寿命が短い」という現象を起こします。これを防ぐため満充電電圧を70%まで下げて使うと、蓄電量は電圧の2乗に比例するので49%、つまり蓄電量が半分になってしまいます。

したがって、この方策が成功すれば、これだけで蓄電量を2倍にする効果があります。実際には電圧の



写真2-2 ECSを搭載したキャパシタ・ハイブリッド・バス<sup>(3)</sup>

図2-3 電圧源によるキャパシタの充電



均一は70%に下げてもまだカバーしきれないので、均一にできるなら2倍以上の効果があります。

#### 専用キャパシタの設計技術

やのような電子回路と組み合わせて使うことで、併用するキャパシタの設計法はコペルニクス展開といわれるほど変化しました。つまり、の技術によって充放電電流を小さくできる、の技術によって過大な電圧を心配しなくてよい、という二つの条件を利用してキャパシタの材料や電極の構造を変えることができました。特にエネルギー密度、つまり体積や重量当たりの蓄電量を大きくすることが可能となりました。

ECS用のキャパシタは、こうした電子回路と併用するという条件下で初めて性能を発揮するように作られているのです。

#### 充電効率を上げる技術

##### 定電流源で充電する

図2-3に示す世の中で普通な電源は、ほとんど電圧源です。電気二重層キャパシタを使ったおもちゃの自動車や飛行機が売られていますが、これらはたいてい図2-3(a)のように乾電池をキャパシタに並列にして充電するようになっています。

交流電源からの簡単な充電器を作ろうとすると、図2-3(b)のように整流回路で充電したくなります。また太陽電池から充電するケースや手回しや自転車の発電機などから充電したい場合もあるでしょう。

これらの電圧源ではキャパシタへの充電はうまくいきません。充電は不可能ではないのですが効率がなんと50%、つまり乾電池が消耗する電力量の半分しか蓄電されないのです。「ホントかな?」と思っている人のために、正確に計算しておきましょう。定電圧源Vと静電容量Cのキャパシタとの間で充放電を行う場合[図2-3(a)], t秒後に回路に流れる電流iは次式で与えられます。

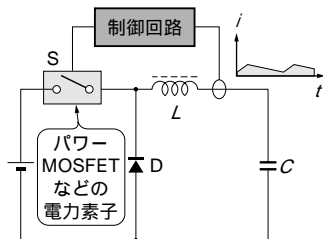
$$i = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{CR}} \dots\dots\dots (3)$$

抵抗Rで消費される電力を求めると、

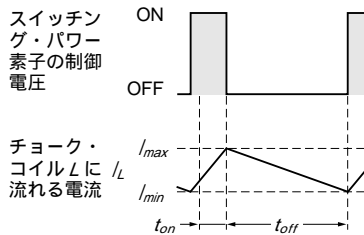
$$\int_0^{\infty} i^2 R dt = \frac{1}{2} CV^2 \dots\dots\dots (4)$$

これは電圧Vまで充電された容量Cのキャパシタに蓄えられる電力(CV<sup>2</sup>/2)に等しくなります。定電

図2-4 チャージャの基本構成とスイッチング波形



(a) 電流ポンプの構成



(b) スwitching波形

圧源を使ってゼロから満充電まで充電すると効率は50%、同様に定電圧への放電も50%、充電と放電で往復すると25%となります。おもちゃの自動車ならエネルギー効率を問題にしません、大規模な太陽電池ステーションや電気自動車ではそのままでは困ります。

充放電効率を高める方法としてECSでは次に挙げる二つを考えました。

電流ポンプにより電流に変換する

電源とキャパシタの電圧差を小さくする

これらは二つとも同時に行う必要はなく、用途によってどちらかを採用します。例えば本誌の実験セットではセル数が少く、で使うバンク切り替えの技術は使いにくいので、の電流ポンプを使っています。バンク切り替えについては第4回で述べます。

### 電流ポンプの動作

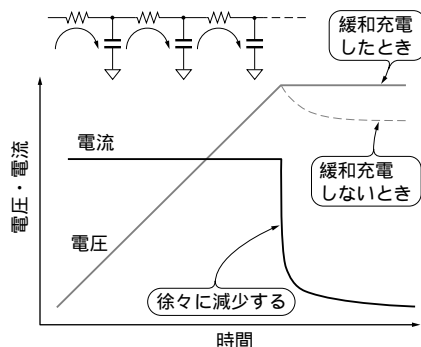
電圧源から充電しないで、電流源から行うと充電効率は高くなるといっても、実際にはどうやって電源を電流源にするかが問題です。

電源に直列に高い抵抗を入れれば、すべての電源は簡単に近似的な電流源になりますが、抵抗によって生じるオーム損が大きくて、キャパシタの充電効率が高くても全体として非効率で役に立ちません。

そこで、図2-4に示すようなスイッチング・コンバータを使います。これは降圧チョップと呼ばれるタイプで、通常ならチョーク・コイルLの出口で出力電圧を検出してパワー・スイッチング素子Sのデューティ・サイクルを制御します。ここでは、図2-4(b)に示すようにLの出力で電流を検出し、電気二重層キャパシタCに流れ込む電流 $I_L$ が $I_{min}$ より大きく、 $I_{max}$ より小さくなるように制御します。図2-4(b)では、電流がたいへん波立っているように見えますが、少しぐらい変動しても全体として定電流になっていれば、充放電効率には影響しません。

この回路だけでは、いつまでも定電流充電が継続しますから、監視して必要な電圧に達したら充電をやめなければなりません。実験セットの充電器には、出力電圧を見張るループがあり、電圧が満充電の10Vに達したらそれ以上にならないようスイッチ動作を制御

図2-5 満充電直後の電圧と電流



して一定電圧に維持する機能が付けてあります。この機能を「緩和充電」と呼びます。なぜこんなことをするかというと、前回説明したようにキャパシタの等価回路は図2-5の上を示すようなRC配列状になっているため、充電電圧が満充電に達した直後には後段のCへの充電電流がまだかなり流れています。その電流は、図に示すように次第に減少しますが、端子電圧が満充電に達した直後に充電をやめてしまうと、後段のCへの電流は前段のCから供給されるので「緩和充電のないとき」と記した曲線のように端子電圧が急速に低下します。この現象を防いで後段のRCまで電流を供給し続けるのが緩和充電の役割です。

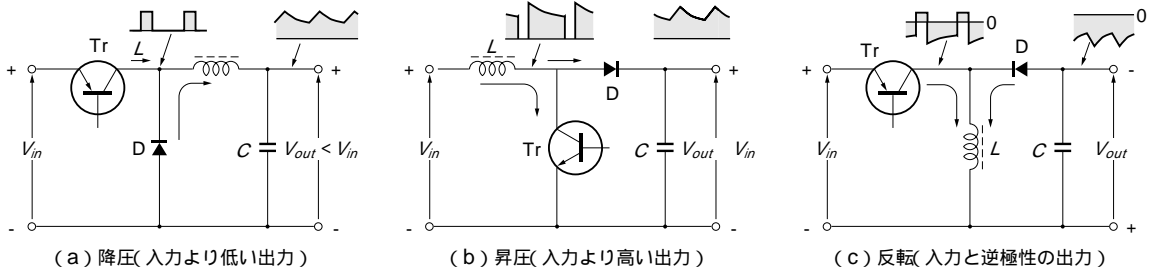
### 放電効率を上げる技術

#### 出力スイッチング・コンバータの要件

以上のように、充電器には電流出力型、電圧制限付きのスイッチング・コンバータを使って、ちょうどバケツからゴム・ホースで水を出し入れするようにECSのキャパシタとの間で電気をやり取りします。そこで、初めは電気ゴム・ホースなどと呼んでいましたが、かっこうが良くないので後に「電流ポンプ」と変更し、現在ではその名で通っています。

キャパシタの出力側に置いてECSの出力電圧を一定に保つ出力コンバータも一種の電流ポンプです。電流ポンプに使うスイッチング・コンバータは、何でもよいわけではありません。後述するように、システムの設計によっては図2-4の降圧型ばかりでなく、図

図2-6 チョップ型コンバータの構成<sup>5)</sup>



2-6に示す古くから知られている昇圧型や反転型も利用できます。それらに共通する要求は「広い動作範囲で高効率なこと」です。

「動作範囲が広い」には二つの意味があります。一つは入力電圧範囲で、次項で述べるようにキャパシタの性質上、蓄電電量の利用率を高めようとするなら広い電圧範囲で使用することが必須だからです。もう一つは負荷の範囲です。電気ゴム・ホースの例えどおり、電流は定格値いっぱいが常に流れるわけではありません。定格では効率が良くても、その1/10の電流でロスが大きいと、軽負荷で長時間使う用途では、使える電気がどうも少ないよ、ということになります。

電気二重層キャパシタに蓄えた電気を出し入れするには、必ず電流ポンプの世話になり、この効率が90%なら往復で81%、つまり初めに存在した電気量の19%は熱になって消滅します。

これはパワー・エレクトロニクスのエンジニアにとっては、近年格好の目標ですから、皆で腕を振るって優秀な電流ポンプを作ってはどうでしょう。現在までに写真2-3のように100Wクラスで効率95%程度のものが作られています。

**キャパシタの利用率と出力電圧の関係**

ECS実験セットでは、2.5Vの電気二重層キャパシタが4個直列なので満充電電圧は10Vとなります。通常は10Vでは使えませんが、ECSでは後述する並列モニタの働きで単セルの個数倍の電圧で使えます。ここで出力電圧を決めると、キャパシタの利用率が定まります。例えば満充電電圧  $V_0$  が10V、出力電圧  $V_1$  を5V、使える電力の電気二重層キャパシタの全エネルギー  $U_0$  に対する割合  $U/U_0$  は、

$$U/U_0 = 1 - (V_1/V_0)^2 = 1 - (5/10)^2 = 75\%$$

1/2電圧まで使えば利用率は75%、1/4電圧まで使えば15/16 94%となります。実験セットでは、出力電圧2.5Vで使ったほうが、5Vで使うより、約27%ほど使える電力量が多くなります。

出力電圧5Vで使いたい場合、降圧チョップを使ったのではキャパシタ電圧が5.5Vくらいまで下がると降圧コンバータは動作できなくなります。実験セット

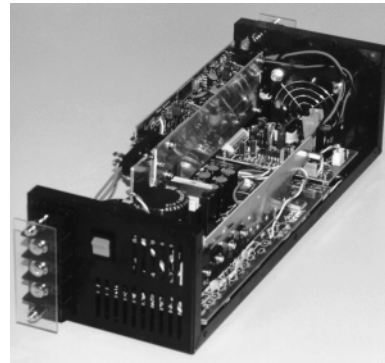


写真2-3 高効率240W昇圧電流ポンプの例<sup>6)</sup>

とは別に新しく設計するなら、キャパシタの直列個数を8個にして20Vまで充電すれば、1/4電圧まで放電することになるので利用率が94%まで上がります。

実験セットは、降圧型だけでなく昇圧型も実験できるように二つの出力コンバータを内蔵しています。キャパシタに隣接するスイッチ  $S_5$  を Output2 に切り替えれば、出力端子  $P_3$  に12~16Vが得られます。

昇圧型なら出力電圧が満充電電圧10Vより上なら何Vでも作れ、キャパシタ電圧のどこまででも使えそうですが、そうではありません。例えば出力電圧を12Vとしたとき、キャパシタが放電して端子電圧が3Vまで下がると、負荷に流れる電流の4倍の電流がコンバータのスイッチとキャパシタに流れることになります。2Vなら電流は6倍、1Vでは12倍となり、負荷電流が大きいほど、その何倍もの電流に達するので、化け物のように容量の大きなスイッチング素子などが必要となり、効率は下がり価格は上がります。このためコンバータの設計上どこかであきらめざるを得ません。

通常のスイッチング・コンバータの設計では入力電圧の変化範囲は2倍、つまり定格の約±50%あれば十分なので、この程度のもので多いのですが、キャパシタ用の電流ポンプでは上述のように4倍くらい、それも全範囲で高効率で動作するものがほしいので、不細工にせずこれを達成するのが、エンジニアの腕の振るいどころといえるでしょう。

図2-8 並列モニタによるキャパシタの初期化の原理

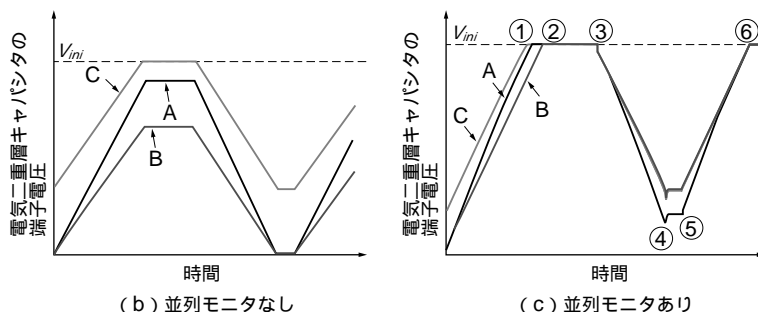
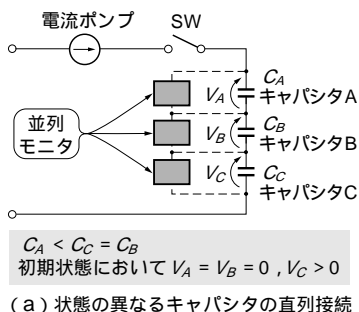
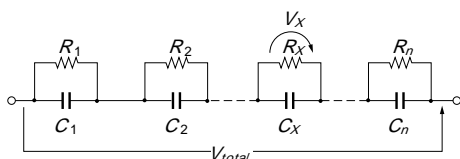


図2-7 直列接続したキャパシタの電圧配分



実用装置を設計する場合にはキャパシタの直列数や、スイッチング・コンバータの昇圧、降圧、それにここで述べなかったバンク切り替え法などを使い分けて、さまざまな設計が可能です。そのあたりの手法は第4回で述べる予定です。

### 直列接続したキャパシタに均等に充電する技術

#### キャパシタを直列にする問題

電気二重層キャパシタの耐電圧は1セル当たりせいぜい3V程度ですから、実用にはこれを何個も直列にして必要な耐電圧をもたせます。でも100個を直列にしてそのまま300Vで使えるかということ、そうはいきません。

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接続して電圧 \$V\_{total}\$ に充電した図2-7のキャパシタ \$C\_X\$ の任意の時間の負担電圧 \$V\_X\$ は、定数を \$k\$ (\$0 < k < 1\$) と置くと<sup>(2)(7)</sup>、次のように表されます。

$$V_X = \left( \frac{kR_X}{R_1 + \dots + R_n} + \frac{1-k}{C_X} \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \dots + \frac{1}{C_n}} \right) V_{total} \dots (5)$$

式(5)の結果は電圧配分が、静電容量の逆数と、漏れ抵抗のばらつきの和になることを示しています。キャパシタのばらつきとして静電容量 \$\pm 5\%\$、漏れ抵抗 \$\pm 10\%\$、それらの温度と経時変化 \$\pm 5\%\$ 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%に減少します。

キャパシタを安全に直列に接続する方法としては、昔から均圧抵抗法、つまり電圧負担を均一にするために全コンデンサに並列に同じ値の抵抗を入れる方法が

知られています。電池の場合は単電池を選別して容量を合わせています。しかし、漏れ電流の10倍を流す均圧抵抗を並列接続しても、漏れ電流の1/10の影響と静電容量のばらつきは残ります。静電容量を選別した新品でも劣化が均等に進むとは限らず、容量が減ったセル、漏れ電流の小さいセルほど高電圧を負うので「直列にしたキャパシタは劣化が早い」という現象を生じます。

#### 並列モニタとその原理

前述のように実験セットでは同容量の四つのキャパシタを直列にして、電流ポンプつまり定電流電源から充電しています。こうした使い方でキャパシタの電圧分担はなぜ、そしてどのようにばらつくのでしょうか。

図2-8に示すように、容量 \$C\_A, C\_B, C\_C\$ の三つのキャパシタA, B, Cが直列接続されたキャパシタ・バンクを充電する場合を考えてみましょう。静電容量は、キャパシタBとCはほぼ等しいですが、Aはそれより小さく、キャパシタAとBの初期電圧はゼロですが、Cには電荷が残っていたとします。

図2-8(b)は、並列モニタがないときの各キャパシタの端子間電圧の変化のようすです。キャパシタBを基準にすると、それより容量の小さなAは早く充電されてBより高い電圧に達します。Cの静電容量はAと同じですが前に充電したときの電圧が残っているので、その残存電圧から充電が始まり、充電が終了して緩和充電に入ると、三つの中で最高の電圧になります。

電気工学を習った人ならよく知っているように、電気回路の計算をするときキャパシタには必ず初期電圧を設定します。キャパシタには電池のような固有の起電力というものが無いので、初期電圧を設定しないと電圧が定まらず、設定すれば始点をそこにして充放電が行われます。

図2-8(c)は並列モニタを設けたときの動作例です。\$V\_{ini}\$ を初期電圧として期間 でキャパシタの初期化の動作を行い、いったん電圧をそろえます。そしてから放電を開始し、で放電を終了し、から充電すると、ではこの間にキャパシタ特性の変化がない



## 出力コンバータの設計要件

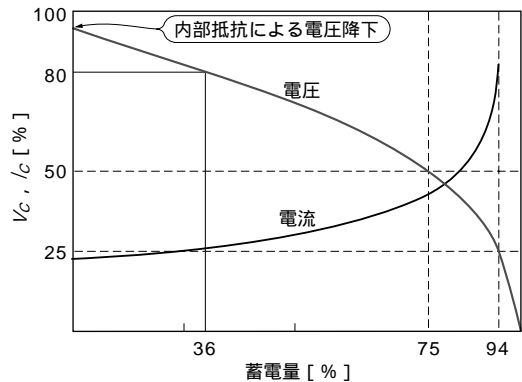
満充電状態にある実験セットのキャパシタ・バンクの出力(約10V)に、負荷を直接接続して一定電力で放電させると、電圧と電流は図2-Aのように変化します。図からわかるように、電圧が20%下がるまで使ったとすると、内部抵抗による電圧降下分を無視しても、利用できる電力量は蓄電量の36%にとどまります。世間でよくある「鉛電池をキャパシタで補強した」使い方ではキャパシタが活かないのは、単純に並列にすると利用率がたいへん低くなるからです。

もっとも、これが普通で、利用率を75~95%にしようというECSの考え方が例外かもしれません。確かに利用率を大きく得ようとすると回路設計も難しくなります。第一は、電圧の広い変化範囲で効率の良い充電器と出力コンバータが必要です。

実験セットから離れて、ほかに応用する際の留意点を挙げておきましょう。定格負荷だけで効率が良いのでは駄目で、軽負荷のときの効率を忘れやすいのです。出力に出す以外の電気はできるだけ使わな

いよう軽負荷では冷却ファンも、ランプの類も一切消して、節約を徹底した設計が必要です。軽負荷時の運転が長時間に渡る応用では、軽負荷専用の電流ポンプを用意し、切り替えて使ったほうが効率が良い場合もあります。

図2-A 定電力放電時のキャパシタの電圧と電流の変化



限り、改めて初期化の必要はなく、三つのキャパシタは同時に に戻ります。

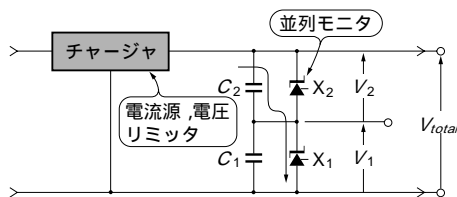
もし漏れ電流の違いなどによって で多少ずれても、 の場合に比べてわずかな初期化動作で、以後常にキャパシタの満充電電圧を  $V_{ini}$  に保つことができます。その精度を数十 mV 以内にするには、並列モニタに内蔵した基準電圧とコンパレータを組み合わせた小さな電子回路、または専用 IC で容易に実現できます。

並列モニタによって、電気二重層キャパシタは事実上、定格電圧を下げることなく無制限に直列にすることが可能となりました。その効果はエネルギー密度に換算して2倍余りの増加に相当します。

### 並列モニタの動作

図2-9に実験セットの充電器と並列モニタの関係を簡単に示します。実験セットではキャパシタが四つ

図2-9 簡単な並列モニタと充電回路



直列ですが、原理は2個でも100個でも同じです。

充電器(チャージャ)は、電圧が一定値に達すると定電圧制御に切り替わるスイッチング方式の定電流源です。キャパシタ  $C_1$  と  $C_2$  は充電電流によって電圧が次第に上昇し、どちらかのキャパシタ例えば  $C_1$  が先に初期化電圧  $V_{ini}$  つまり2.5Vに達します。すると、並列モニタ  $X_1$  がONになって充電電流はそちらにバイパスされ、並列モニタに電流が流れていることを示すLEDが点灯します。その間、 $C_2$  のほうは充電が続きます。合計の電圧  $V_1 + V_2$  がこの例では5V、実験セットでは10Vのごくわずか手前で充電器を定電流モードから定電圧モードに切り替わるように充電器を設定しておきます。そうすると  $C_2$  が2.5Vになる直前で充電電圧の上昇は止まり、緩和充電の状態に入ります。

そのまましばらく放置すると、 $C_1$  内部の配列の後段のキャパシタが充電されるため電圧  $V_1$  が下がって並列モニタのLEDは消えます。こうして充電が完了した状態ではすべてのLEDが消えた状態となります。

もし、満充電状態時にすべてのLEDが灯った状態になるようなら、充電器の出力電圧設定が高すぎます。満充電状態になってからも全部の並列モニタが電流を流し続けるのはむだです。反対に充電器の設定電圧が満充電電圧より低すぎると、全部のキャパシタがいっぱいまで充電されないで、蓄電容量がそれだけ小さくなります。

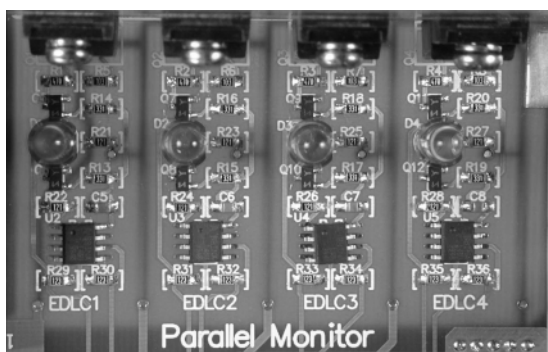


写真2-4 実験セットの並列モニタ部

## 並列モニタの動作

### 実験セットによる動作の観察

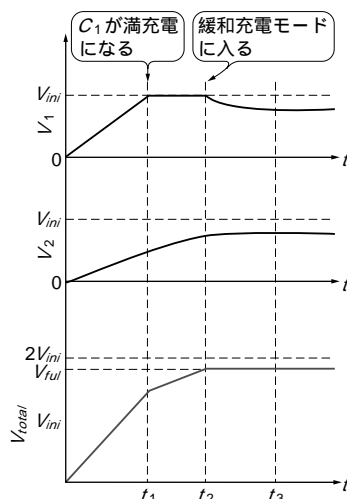
本当にそんなにうまく均等に充電されるのか、実験セットで試してみましょう。並列モニタの動作はキャパシタの特性や充電状態がばらついているほどよくわかります。すでに何回か満充電にしてしまうと、並列モニタが初期化レベル  $V_{ini}$  をそろえてしまいます。そのときはキャパシタの電圧を故意に変えます。

現象がよく見える可能性があるのは、最初の充電のときか、例えば1週間以上も長く使わずに放置した後の充電の場合です。少し薄暗いところのほうが観察しやすいでしょう。最初の充電が進んで残量計が80%を越えたら、実験セットの並列モニタのブロックに四つ並んだ赤いLED  $D_1 \sim D_4$  (写真2-4)に注目してください。そこから長くても2分間で満充電に達しますが、その直前にどれかが赤く光りませんでしたか。点灯したLEDは対応するキャパシタが満充電に達し、それ以上の充電電流をバイパスしていることを表します。その間、点灯していないキャパシタは充電が進み電圧が上昇しているの、順次満充電に達してLEDが点灯するはずで

充電器の電圧リミットはキャパシタが四つとも満充電にはならないように、10Vよりわずかに低く、例えば9.9Vに設定しておきます。すると4番目のキャパシタはLEDは点かず満充電の手前2.4Vで緩和充電モードに入るはずで

他方、2.5Vまで充電されてLEDが点いていたキャパシタは充電器が定電圧(緩和充電)モードに入ると、それ以上は充電電流が増えません。ところがキャパシタのRC配列の後段のCへの自己充電電流があるため、端子電圧は2.5Vから下がり始めます。緩和充電が進むにつれ、先に点灯していたLEDは次々に消えて、最後には全部のLEDが消灯した状態となります。このとき各キャパシタの電圧は対応する並列モニタのオン電圧のわずかに下になっています。これは並列モニタ

図2-10 並列モニタ動作中の満充電付近の電圧推移



の誤差の範囲内で、全部のキャパシタの端子電圧がそろったことを意味します。

### 未満充電における電圧均等化のメカニズム

並列モニタを使うと全部のLEDが消えた状態に落ち着く理由がわかりにくいので、図2-10でもう一度考えてみましょう。

$V_1$ と $V_2$ がそれぞれ図2-9の二つの直列キャパシタ $C_1$ と $C_2$ の端子間電圧、 $V_{total}$ がその合計つまり充電器の出力です。ここでは電圧値は $V_{ini}$ を基準に変化分だけを時間軸を揃えて並べてあります。

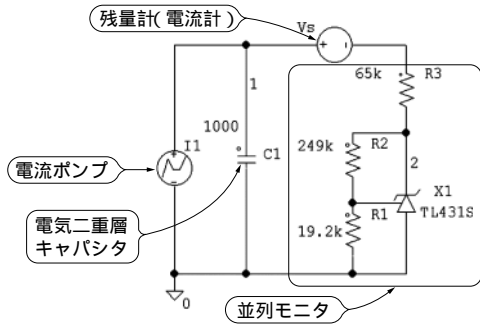
$V_1$ は、 $t_1$ で $V_{ini}$ に達し $t_2$ まで並列モニタが動作して電流をバイパスしています。 $V_{total}$ は $t_1$ で $V_1$ の上昇が止まるので勾配は半分に減りますが上昇を続け、 $t_2$ で満充電 $V_{ful}$ に達します。 $V_{ful}$ は $2V_{ini}$ よりわずかに低くあらかじめ設定されています。

$t_2$ で $V_{total}$ の上昇が止まると、充電電流が減少するため $C_1$ の端子電圧が後段のRC配列への充電によって下がりはじめます。 $V_{total}$ は一定値 $V_{ful}$ になるよう充電器が自動制御するので、 $V_2$ は $t_2$ からゆっくりとわずかに上昇して $V_1$ と電圧を分け合う形になり、その結果図2-10のように $V_1$ 、 $V_2$ ともに $V_{ini}$ つまりLEDが点灯するレベルのすぐ下に落ち着きます。

この状態になるには充電器と並列モニタの電圧設定が、 $V_{ful}$ がキャパシタの直列数  $nV_{ini}$  よりわずかに低くなるよう設定するのが肝心で、高すぎると全部の並列モニタが電流をバイパスする状態で充電を続けることになり、低すぎるとキャパシタの充電がいついにならず蓄電容量を損してしまいます。

**キャパシタの充電電圧を故意にばらつかせる実験**  
実験セットをいったん満充電にして時間が経過する

図2-11 折れ線近似法による残量計のシミュレーション用回路



と緩和充電が進み、各キャパシタは正確に初期化されます。この状態ではキャパシタはそろって2.5 Vから下向きに充放電をするため、何回繰り返しても並列モニタはほとんど動作しません。

ECSとしては、これは望ましい状態なのに、並列モニタの動作を見たい人には不都合です。そこで装置を壊さずに、故意にバラつかせる方法を考えてみました。

実験セットに添付の12 Vのハロゲン球で実験しているときは遊んでいる2.5 Vの豆球を使います。そのリードの先にテスト棒に口のついたクリップ・コードをつないでください。残量計で80%くらいまで充電したところでいったん充電を止め、キャパシタを直接短絡しないように注意して、どれか一つのキャパシタ例えばC<sub>2</sub>の両端に電球を接続します。豆球がかなり明るく灯るでしょう。20～30秒も灯せば十分ですから、配線を外して先ほどの充電の続きを行い、満充電の手前でのLEDの点灯を観測してください。

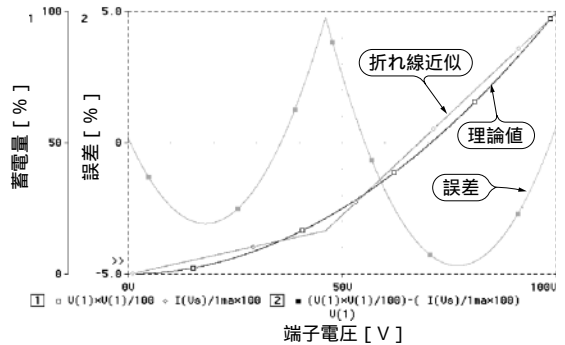
今度は、D<sub>2</sub>以外の三つのLEDが点灯する状態がかなりの時間にわたって見られるはずですが、長く満充電にしておくと、せっかく作ったばらつきが初期化されてしまいますから、この状態で放電したり充電したりすれば、LEDの点灯具合つまり並列モニタがキャパシタを初期化しようとして奮闘するようすを観察できます。

### 並列モニタを自作する場合の留意点

本稿の主題が設計と製作ですから、実験セットを動かして理解するだけでなく、自作するならどう考えるべきか、という点にも触れておきます。

そのうちにIC化されるでしょうが、それまでは並列モニタの設計と充電器の設定値の関係が重要なポイントです。並列モニタとしてツェナ・ダイオードは適しません。というのは、並列モニタのターン・オン電圧の精度は設定値の±20 mVくらい、つまり2.5 Vに対して1%以内である必要があるからです。図2-11のようにTL431などのシャント・レギュレータを可

図2-12 SPICEシミュレーションによる残量計の誤差



変抵抗で設定して使うのが実用的です。ただし、電圧設定する際の抵抗その他がキャパシタに並列に入るので、等価的にキャパシタの放電を促進します。特にキャパシタの静電容量が小さい場合、自己放電率を良くしようと思ったら注意が必要です。自己放電率と漏れ抵抗の関係は第3回で述べます。

並列モニタのもう一つのポイントは、電流量と放熱です。実験セットのような簡易型では、並列モニタがONして、図2-5で示すキャパシタの充電電流がバイパスされます。並列モニタに流れる電流は、初めは小さいのですが時間が経つに連れて増加し、最終的には全充電電流が流れます。これに耐えるには、並列モニタの電流量は最大充電電流、最大損失は最大電流と満充電電圧の積となるように設計する必要があります。この最大損失に見合うだけの放熱容量をもった並列モニタを作るとかなり巨大なものとなります。実験セットでいえば充電電流の最大は2.5 Aですから最大損失は、

$$4 \times 2.5 \text{ A} \times 2.5 \text{ V} = 25 \text{ W}$$

と求まり、かなり大きな放熱板が必要なのがわかります。それどころか、大型のハイブリッド・バスで再生制動のときの充電電流が400 Aも流れたら、並列モニタの損失は1セル当たり1 kWで、バス全体ではモータ・ドライバより大きな、数百kWの並列モニタが必要となります。もちろん、そんなことにしない方法は考えてあります。実験セットでは、どう使っても差し支えが起りにくいよう簡潔な設計になっていますが、電子回路を経済的にする方法は第4回で述べます。

### キャパシタの電荷残量を正確に知る技術

#### 残量計の構造と動作

蓄電装置では電気がどのくらい溜まっているかを示す計器「残量計」が必要ですが、2次電池の正確な残量計を作るのはたいへんで、電動バイクや電気自動車に付いているものもあまり当てにできません。

ECSでは実に正確な残量計を安価に実現できます。前出の式(2)からわかるように蓄電量は電圧の平方根

## 電解コンデンサのエネルギー密度

実験セットのキャパシタと同じ大きさ 50 × 35 mm( 48 cc )の三つのアルミ電解コンデンサのエネルギー密度を計算してみます。

10 V , 82000 μF

$$E = \frac{10^2 \times 82000 \times 10^{-6}}{2 \times 3600} \times \frac{1000}{48}$$

0.024 Wh/ℓ

80 V , 10000 μF

$$E = 0.19 \text{ Wh/ℓ}$$

450 V , 470 μF

$$E = 0.28 \text{ Wh/ℓ}$$

以上から、電解コンデンサの場合は耐圧の高いもののほうがエネルギー密度が大きく、などはいい線まで来ています。同サイズの二つの電気二重層キャパシタ市販品のエネルギー密度を求めてみましょう。

2.5 V , 100 F

$$E = 1.8 \text{ Wh/ℓ}$$

2.5 V , 470 F (実験セットに付属)

$$E = 8.5 \text{ Wh/ℓ}$$

電解コンデンサ と比べると、電気二重層キャパシタの体積当たりエネルギー密度は で6.7倍、は約32倍大きいことがわかります。

に比例するので、図2-12の理論値として示すような特性になります。キャパシタ両端の電圧を測ってアナログ乗算機やコンピュータを使って平方根に開いてもよいのですが、実用的には図2-11に示すような、折れ線近似回路<sup>(8)</sup>を使うと簡単にできます。変曲点を定める基準電圧源はツェナでは電圧がばらつき温度特性も悪いので、並列モニタにも使った市販のシャント・レギュレータICを使うと、温度補償された精度も安定度も良い折れ線近似回路が得られます。

図の例では1か所しか曲げていないので、どの程度の精度になるか図2-11の回路で $v_s$ は1mA計を想定してシミュレーションを行ってみました。その結果を図2-12に示します。

真ん中に大きくうねっているのが誤差で、±5%にかるうじて入ります。満タンとゼロの付近は合わせ込むので誤差は小さく、この程度の精度で実用上は十分なはずです。もっと精度を上げる必要があるなら、折れ線近似回路をもう一つ直列に入れて2段にすると、全範囲で±2.5%以内にもすることも可能です。

### 自己放電を考慮した残量計の回路設計

蓄電装置の残量計は、蓄電量が小さくなるほど消費電力を低減する必要があります。実験セットの容量で自己放電率、つまり時間の経過とともに無負荷でも電圧の下がっていく割合がキャパシタだけで1%/日とすると、満充電時に流れる漏れ電流は500F当たり約150μAです。ということは残量計をつないだまま使うには、これより十分小さい電流で動作しなくてはなりません。

実験セットの残量計は1mAフル・スケールで動作しています。というのは、半導体による基準電圧源例え

ばツェナ・ダイオードやシャント・レギュレータICは10μ~20μAでは正確に動作しないからです。残量計にON/OFFスイッチがある理由もここにありません。

同じ理由から並列モニタの電圧検出抵抗が問題になります。こちらはまさか、スイッチでON/OFFするわけにはいかないの、感度が狂わない範囲でできるだけ高抵抗を使っています。もちろんコンパレータにOPアンプを使えばもっと小さなバイアス電流にすることは、現在の技術で実現可能です。したがって専用の回路を組むか、ICを製造するつもりなら条件を満たすことができるでしょう。

一般的な応用例でみると、正確な残量計が必要なのは大型な用途に多く、その場合はキャパシタが大きいので1mAくらい残量計が食ってもなんともありません。キャパシタが1000F以下という、ごく小さな用途では、これまでは正確な残量表示などあまり問題ではありませんでした。

### ◆参考文献◆

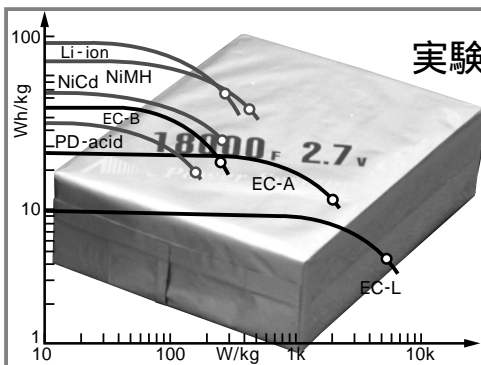
- (1) ECS実験セット取り扱い説明書、(株)パワーシステム、2000年。
- (2) 岡村迪夫；電気二重層キャパシタと蓄電システム、日刊工業新聞社、1999年3月。
- (3) 佐々木正和ほか；キャパシタ式CNGハイブリッドバス・システムの開発、自動車技術会2000年春季学術講演会前刷集、日産ディーゼル工業(株)、2000年5月24日。
- (4) 佐々木正和ほか；LNGエンジン搭載ハイブリッドバスの開発、高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発成果発表会前刷り集、NEDO/自動車研究所、2000年3月22日。
- (5) 岡村迪夫；電源回路、日刊工業新聞社、1974年。
- (6) 清水雅彦ほか；新しい物理電池ECSを使った蓄電式エアコンの研究、信学技報Vol.97、No.173、pp.17~24、1997年。
- (7) 近藤潤次；私信、2000年6月。
- (8) 岡村迪夫；定本OPアンプ回路の設計、CQ出版(株)、1999年。



実験セットで学ぶ新蓄電システム ECS! ③

# ECS 用電気二重層 キャパシタの特性

岡村 迪夫  
Michio Okamura



これまでのコンデンサとはずいぶん違う電気二重層キャパシタの性質を詳しくみておきましょう。このキャパシタの奇妙な性質がわかっていないと、出る性能も出なくなってしまいます。

「コンデンサの扱い方くらいよく知ってるよ。電気を何年やってると思っているんだ！」なんて声が聞こえてきそうです。でも、従来のコンデンサと本稿で扱う電気二重層キャパシタ、それもコイン・セルではないECS用はだいぶ違うのです。

## 電気二重層キャパシタの基本特性

### 電気的特性

#### ▶ とても大きな静電容量

ECS用の電気二重層キャパシタは、静電容量がものすごく大きいのが第一の特徴です。

実験セットの中央に四つ取り付けてあるのは一つ当たり470 F、つまり470  $\mu$ F電解コンデンサ100万個分の静電容量をもつキャパシタです。これでもECS用キャパシタのなかでは最小の部類に属します。

#### ▶ 低い耐電圧

耐電圧はわずか2.5 V、短時間なら3 Vくらいまでですが、サージに強くスイッチング・ノイズなどの過渡現象で破損することはありません。実験セットには並列モニタが付いているので、2.5 Vを越えると自動的に充電電流をバイパスします。

キャパシタ蓄電装置では「感電」に注意が必要です。実験セットではセルが4個直列、最大10 Vなので心配ありませんが、一般のECSのシステムでは100個以上ものキャパシタを直列に使うのがほとんどなので、数十V以上では「感電」の危険があります。電気で経験を積んだ人は、電源を切る、ブレーカを落す、という安全策に慣れています。キャパシタの電気は止めるわけにはいきません。ブロックに分けてブレーカを入れるなど対策はありますが、どうぞご用心ください。

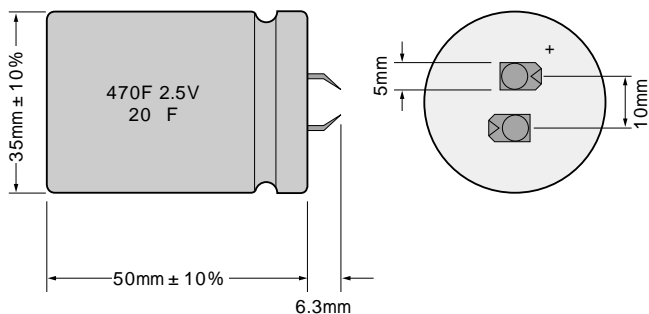
#### ▶ 大きな電気エネルギー

一般に、ECS用の電気二重層キャパシタは、短絡させない注意が必要です。実験セットではそれほどのことはありませんが、後出のEC-L型バンクの短絡実験では3000 ~ 7000 Aもの電流で、電極箔や端子が飛んだり、逆に短絡棒と端子が熔接して取れなくなるなど激しい現象が起りました。ECS用の大型キャパシタには、誤接続したスイッチング・トランジスタを跡形もなく蒸発させてしまうものすごいパワーが含ま

表3-1 実験セットに使った電気二重層キャパシタの仕様

項目	数値	単位
静電容量	470 $\pm$ 10 %	F
定格電圧	2.5	V
定格電流	0.5	A
ピーク電流	20	A
正規化ESR	20 typ	F
ESR(直流)	45 typ	m
蓄電容量	0.4 typ	Wh
	1450 typ	Joule
出力密度	260 @ 1.76 V	W/kg
エネルギー密度	8.5 $\pm$ 10 %	Wh/ $\ell$
	6.2 $\pm$ 10 %	Wh/kg
重量	66	g
容積	48	cc
寸法	35 $\times$ L50	mm
動作温度範囲	- 20 ~ + 60	
保存温度範囲	- 20 ~ + 70	

図3-1 実験セットに付属する470Fキャパシタの外形



れています。

### 内部のあらまし

実験セットのキャパシタの外形は図3-1に示すように電解コンデンサそっくりですが、特性は表3-1のようにまるで違います。

第1回の図1-8に示したように、電極は活性炭シートでアルミ箔に貼ってありますが、電解コンデンサと違ってアルミは電極ではなく、引き出し線の働きしかしていません。

電解液は4級アンモニウム塩をプロピレン・カーボネートに溶解した有機系で、類似のものがアルミ電解コンデンサの一部にも使われています。万一、漏れて手についても直ちに皮膚が荒れるとか火傷するなどの過激な反応はありませんが、食品ではなく、発ガン性の検証もされていないので、手に付いた場合などはよく洗ってください。

このキャパシタは有機電解液にしては燃えにくく(沸点290℃)、たき火の上に乗せてもなかなか発火しません。常温では引火性はなく、パーベキューのようにたき火で焼いたり、火炎放射器で燃焼させても爆発はしませんでした。従来の電池やコンデンサと比べて、明らかに安全性は優れています。ただし、無理に燃焼させると薄緑色の炎とともに有毒なフッ酸の発生が認められるので、燃焼ガスを吸わないよう注意してください。フッ酸の中和には炭酸カルシウムが効果が高く、急速に不溶性のフッ化カルシウム(CaF<sub>2</sub> 蛍石)となることが知られています。大量生産されるようになれば、回収と再利用や処分そして再資源化の道があるはずです。

## キャパシタの選定と扱い方

どういう目的にどのキャパシタが良いのか、話の順序としてはそうなるのですが、現在のところ市場で入手できるキャパシタは限られており、特定の大会社が

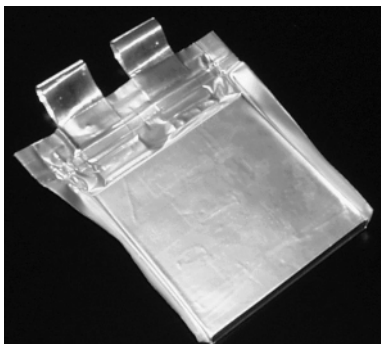


写真3-1 (1) 高出力密度型ECS用電気二重層キャパシタ EC-L, 150 ml 単セル)の外形

自社用に研究開発から製造まで行うという状況にあります。それでも、本稿が出版されるころには、キャパシタを積んだハイブリッド車や、キャパシタ量産のニュースが飛び交っているでしょう。供給状態も年々改善されていくはずです。

### 単セル・キャパシタ

ECS用キャパシタは第1回の図1-6で示したように、内部抵抗によって、EC-U, EC-L, EC-A, EC-Bの四つのタイプに分類できます。

#### EC-L

もっとも有利なECS用キャパシタの用途は、全放電時間に換算して1分間程度の充放電を頻繁に繰り返す分野です。20秒~5分間ほどで全容量を使い切ってしまう用途では、2次電池は発熱し、深い充放電を繰り返すとたちまち寿命がきてしまうので、キャパシタの競争相手ではありません。この分野では、少しくらい価格が高くても写真3-1に示す内部抵抗2 F程度のEC-Lタイプを使ったほうが有利です。1200 F, 2.7 V, 2 F, 約150 mlの体積に約1.2 Whのエネルギーを70 Aの電流で効率良く充放電できます。これと類似の単セルがハイブリッド・バス<sup>(2)</sup>やトラック<sup>(3)</sup>に実際に使われています。

#### EC-A

充放電時間が10分~1時間で、充放電を頻繁に繰り返す用途には内部抵抗20 FのEC-Aタイプが適しています。AタイプはLタイプよりも内部抵抗が1桁大きく、その代わりエネルギー密度が2倍近く大きくなっています。

実験セットに付いているのはこのAタイプです。蓄電用としてはもっとも一般的ですが、急速充放電型の2次電池と競合します。2次電池でもできることをキャパシタでどうか、という状況ですから特徴が発揮できないと採用する意味がありません。

#### EC-B

2~5時間くらいの充放電時間が取れる用途には、エネルギー密度の特に大きい、内部抵抗100 F台のEC-Bタイプが適しています。鉛電池の標準的な充放電時間は10時間率、つまり充放電時間が10時間ですから、EC-Bタイプは通常の2次電池と直接競争になります。写真3-2に示すのがその実例で、18 kF, 2.7 V, 100 F, 約1 lの体積に約18 Whを蓄えます。

EC-A, EC-Bともに、現状ではキャパシタは価格とエネルギー密度が電池にかないません。その代わり「高い充放電効率に長い寿命」「残量が正確にわかる」などが特徴です。



写真3-2 (4) 高エネルギー密度型 ECS 用電気二重層キャパシタ (1ℓ, 単セル) の外観

### 単セル・キャパシタの組み合わせ

#### キャパシタ・モジュールとキャパシタ・バンク

実験セットのキャパシタは単セルを四つ、別々に取り付けています。写真3-1や写真3-2に示すような単セルは素手では扱わないくらい慎重に扱って、写真3-3(a)のようなモジュールの形に組み立てます。このようなセルは、将来、自動車用鉛電池のように複数のセルを組み合わせたモジュールの形で売買されます。

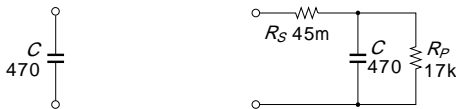
このモジュールをさらに複数個組み合わせて、写真3-3(b)に示すようなキャパシタ・バンクを作ります。写真は最終的にハイブリッド・バス<sup>(5)</sup>に積まれた形で、EC-Lタイプ200kg、約1.2kWhの容量で、100kWの入出力を93%以上の効率で扱えます。

#### キャパシタからの配線

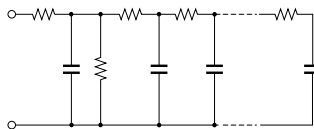
キャパシタを組み合わせていく際に、電池とは違う重要な問題点がある一つあります。それはキャパシタからの配線の抵抗です。

キャパシタは高出力の電池よりも、出力当たりでおよそ1桁ほど低い内部抵抗になっています。そのため、充放電効率は高いのですが、電池のときと同じ配線を使ったのではキャパシタの高効率特性が生まれません。

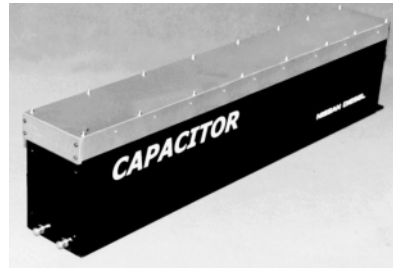
図3-2 ECS用電気二重層キャパシタの等価回路



(a) 内部抵抗を考慮していない 使えない等価回路 (b) 実用的な簡略等価回路



(c) 精度を上げた等価回路



(a) モジュール



(b) バンク

写真3-3 (5) ハイブリッド・バス用の電気二重層キャパシタ

電池のときのおよそ1/10の抵抗にしたいのです。

例えば、写真3-1のEC-Lタイプが1200Fで2Fですから、実抵抗は2F/1200F 1.7mΩですが、配線や接続部などの抵抗をセル当たりその1/10である0.17mΩ以下にする必要があります。

逆に、配線の抵抗が2mΩでその先に1000Fのキャパシタがあったとすると、2mΩ × 1000F = 2Fとなり、キャパシタの内部抵抗がそれだけ増えたのと同様な効果となります。

### 電気二重層キャパシタの入出力特性

#### 充電特性

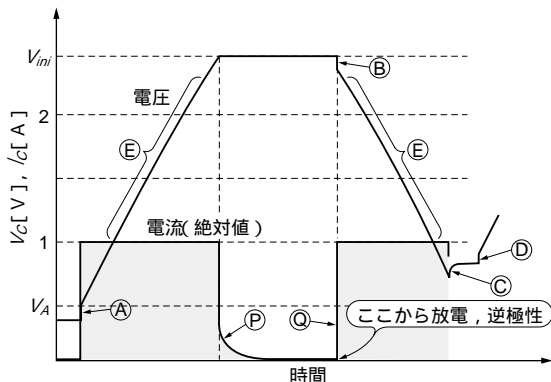
##### 定電流充電モード

第1回の図1-7でも述べましたが、ECS用キャパシタの特性を再現できる等価回路は、図3-2(a)のように静電容量だけでは片付きません。(b)のように静電容量C、直列抵抗RSそれに漏れ抵抗RPで表すのもまだ便宜的なもので、(c)のようなCR配列にエネルギーを蓄えるのだ、と考えないと説明のつかない現象に出会います。

実験セットでキャパシタの電圧を測りながら充放電すると、役に立つデータが得られます。

まず、充電モードでスイッチを入れると図3-3の左端(A)に示すようにストンとステップ状に電圧が上がって、それから充電が始まります。実験セットのキャパシタでいうと、図3-2(b)の内部抵抗RSが1個45

図3-3 ECS用電気二重層キャパシタの充放電カーブ



m で、その四つ分とすれば、1 A の定電流充電の開始時の①部のステップ電圧は約 0.2 V ですから、おおよそ図 3-3 に描いたような電圧の変化が観測できるはずですが、実験セットの残量計ではステップ①の変動は、残量ゼロ%の付近ではよほど気を付けないと確認できません。

いろいろな充電レベル(SOC: Status Of Charge)で充電スイッチを ON/OFF してみましょう。充電電流は 1 A の定電流ですから、ステップ①は同じですが、残量計の指示は 0% 付近ではわずかにわかるくらいの小さい 0.04% の振れ、10% 付近では 0.4%、100% に近づくと 4% と明瞭に大きく見えます。

この理由は残量計が電圧ではなく、蓄電量を表示しているからです。「電圧の 2 乗に比例する」これがキャパシタのエネルギーのたまり方なのだとことを実験を通じてよく味わってください。電池などでは経験できないこの性質を体験しておく、キャパシタ蓄電を扱う限り役に立つはずですが。

記録計で、電圧の上昇と時間との関係を正確にプロットすると、定電流充放電のトレース(②部)は直線ではなく、図 3-3 のようにわずかに上に膨らむはずですが、これは充電電圧が増加すると電気二重層の等価的な厚さが少し薄くなり、静電容量が増えるためと考えられます。

### 定電圧充電モード

充電を続けて、 $V_{ini}$  つまり満充電電圧に達すると充電器は自動的に定電圧充電に切り替わり、電圧一定で緩和充電の状態になります。そのときの電流の変化を見ると点 P のようにとともゆっくり減少します。実験中に目で見ていてもなかなか減らないと思うくらいです。

本当にこれ以上減らないところまで行くには EC-L タイプで 12 時間ほど、実験セットに付属の EC-A タイプでは緩和充電状態で 24 時間放置しても、まだ充

電流は減り続け、本当に底まで達するには 100 時間くらいかかります。

この現象は、図 3-2(c) に示したキャパシタの CR 配列構造に基づくもので、このときの充電電流は配列の前段、つまり端子に近いキャパシタから後段のキャパシタに向かって、長大な CR 時定数を経由して充電が進行するために生じる現象です。

### 等価回路の定数の算出

現象はそうであっても、いつもこの長い時定数を扱うのはやっかいなので、CR 配列の後ろのほうは存在が特に意味をもつ以外は無視して、図 3-2(b) の簡単にした等価回路で扱います。実用上はほとんどこれで間に合います。その定数をキャパシタの充放電カーブから取り出す方法をみておきましょう。

#### ▶ C の値

満充電電圧  $V_{ini}$  から 0 までの放電カーブを積分して、(三角形の面積を算出) 全放電エネルギー Q を求めます。正確な値を算出するには、内部抵抗による最初のステップ状の電圧降下分  $V_A$  分を差し引き、次のように実電圧  $V_C$  を求めます。

$$V_C = V_{ini} - V_A$$

これから等価静電容量 C は、

$$C = \frac{2Q}{V_C^2}$$

で得られます。これをエネルギー換算法と名づけて ECS では標準的な静電容量の算出法<sup>6)</sup>としています。

ほかの文献を参照すると、特定の電圧範囲で放電カーブに接線を引いてその微係数から計算する微分法や、インピーダンス・ブリッジで CR を測定する方法が広く使われています。しかし、放電カーブがうねっていて、曲がり方が放電電流や電圧で変化するので、測り方によって異なった値が出ます。インピーダンス測定では、キャパシタの小信号特性を測っている、パワーを要する用途では実際の特性と異なってしまいます。

#### ▶ 内部抵抗 $R_S$

インピーダンス測定ではなく充放電カーブ(図 3-3)のステップ電圧を電流で割って求めるのが実際の<sup>6)</sup>です。ちょっと考えると図 3-3 の①, ②, ③, ④のステップ電圧はすべて等しくなりそうですが、実際に細かく測ると①と④は同じものですが、②と③はそれぞれ少しずつ異なった値が出るので、もっとも厳しい結果の出る②を使います。

### 出力特性

#### 出力密度

エネルギー密度と並んでよく使われる出力密度もキャパシタの特性を表す重要なパラメータです。



図3-5 ▶  
ECS用電気二重層キャパシタから取り出せる出力とエネルギー密度の関係...ラゴーン・プロット

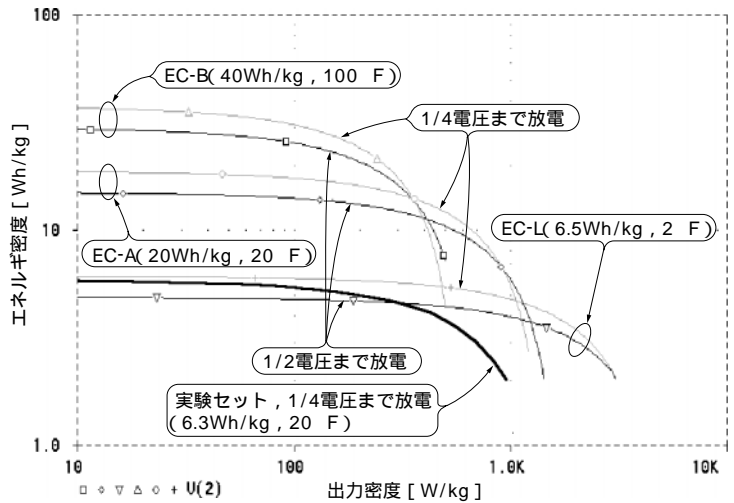


図3-4 最大電力が得られる内部抵抗と負荷抵抗の関係は？

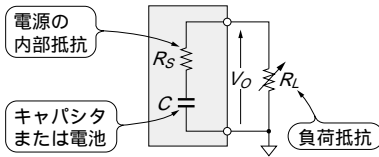


図3-4に示すように、電源つまりキャパシタまたは電池が電圧  $V$  をもち、その内部抵抗が  $R_S$  であるとき、負荷抵抗  $R_L$  を任意に変化できるとした場合、負荷に取り出せる電力  $W$  が最大となる条件は、 $R_S = R_L$  のときで、

$$W_{\max} = \frac{V^2}{4R_S} \dots\dots\dots(1)$$

と求まります。この  $W_{\max}$  をキャパシタの重量または体積で割って、重量や体積当たりの出力、つまり出力密度と定義します。ただしSOCによって、電池では内部抵抗、キャパシタでは電圧が変化するので、満充電のときの値か、50%充電の値かを断る必要があります。

式(1)は瞬間的に取り出せる電力を計算しただけで、この際に取り出された  $W$  と同量の電力が電池やキャパシタの内部で熱になるため、このような出力で運転し続けられることを意味しません。

$W_{\max}$  はキャパシタの場合には、耐電圧と内部抵抗から式(1)を使って求めることもできます。例えば、写真3-1の単セルは、1200 F、2 Vなので  $R_S = 2/1200 = 1.67 \text{ m}\Omega$ 、 $V_0 = 2.7 \text{ V}$  から  $W_{\max} = 1.1 \text{ kW}$  と求まります。セル重量は210 gと公表<sup>(1)</sup>されているので、満充電状態での出力密度は5.2 kW/kgです。

50%充電、つまり電圧が満充電の70.7%での出力密度は半分の2.6 kW/kgとなります。

理屈をいえば、内部抵抗と出力密度と両方を仕様に表示するのはキャパシタの場合、同一パラメータを二重に表示しているといえます。しかし、従来の2次電池と比較する場合、電池は内部抵抗の値が一定でなく、実測しない限りこのように明快には算出できないので、こうしたパラメータが使われています。

### ラゴーン・プロット...出力密度対エネルギー密度

キャパシタも2次電池も程度の差こそあれ、大きな出力で使うと蓄電容量が小さくなります。その関係を表すため、出力密度とエネルギー密度をそれぞれ  $X$ 、 $Y$  軸にとって両者の関係を図3-5のようにプロットする方法をラゴーン・プロット(Ragone plot)と呼びます。

外国の文献に多く使われるこの方法は、縦軸横軸ともに対数目盛りで重量当たりのエネルギー密度と出力密度を表しています。測定は定電力放電で行う必要がありますが、低い電圧までの定電力放電は困難です。測定時の配線の抵抗などが含まれやすいうえ、大型の充放電試験器では安定に動作しないものが多いからです。定電流で放電し、電力に換算してプロットする測定法もあります。

苦労してラゴーン・プロットを測定する理由は、2次電池などに使われている軽負荷時の公称容量ではなく「実際に負荷をどれだけ取ったとき、どれだけ容量があるか」という値が得られるからです。プロットのもっとも左の端が、軽負荷時のエネルギー密度つまり重量当たりのエネルギー量で、それを右にたどり出力密度を増すとエネルギー密度が少しずつ下がってきます。トレース上に矢印をつけたところでエネルギー密度が半分まで低下し、この辺が最大出力です。そこでは出力と同量のエネルギーで猛然と発熱しますから、実用はこれよりずっと手前で使います。

図3-5はECS用の典型的なキャパシタ、上から順にEC-B、EC-A、EC-Lのラゴーン・プロットをSPICEシミュレーションで描かせたものです。

実験セットのキャパシタはどうかというと、こうした小型キャパシタは、充填率つまり容器の大きさや重量に占める内部電極の割合が小さく、470 Fの例で約6割なので、どうしても不利になります。

## 負荷電流による静電容量の変化

キャパシタも充電電圧によって静電容量が変わり、負荷電流によっても静電容量と内部抵抗が変化しますが、その変化の量は2次電池に比べて小さく、寿命の影響も予測できます。

充電電圧が増すと静電容量が増える傾向のあることは前の図3-2のところで述べました。もう一つ注目すべきは負荷電流が増えると静電容量が減り、内部抵抗も減少する性質です。例えば写真3-1のLタイプの場合、ラゴーン・プロットの左側、つまり小さな電流で測ると静電容量は1350 Fくらいあります。ところが内部抵抗2 Fは電流70 Aでの値で、このときの静電容量は1200 Fに減少しています。

これは実は予測できます。大電流で充放電するのは、短時間で充放電するというところにほかなりません。図3-2(c)の等価回路で見ると、短時間で充放電すると、左端の1~2組のCR配列が関与し、長時間ならずと右まで何段ものCRが充放電に参加します。そうなれば当然、長時間のほうが合計のCの容量は大きく、平均の直列抵抗は高くなるというわけです。

実用上、内部抵抗が与える影響がもっとも大きい性能は最大出力、つまり最大電流のときですから、キャパシタの内部抵抗は使用する最大電流の状態で測っておくのが実状に合います。

## 蓄電エネルギーの保持

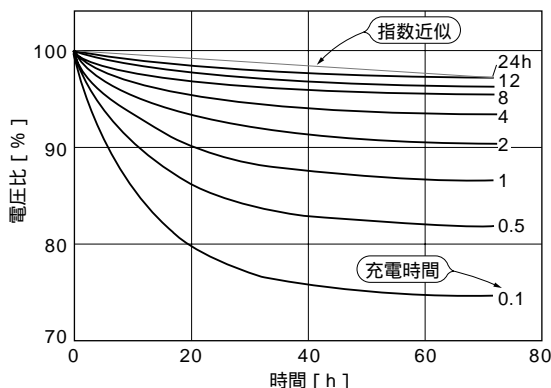
### キャパシタの自己放電特性

当初、電気二重層キャパシタはためた電気が漏れる量が多く、2次電池並みにするのは不可能という意見さえ出ていましたが、原理的にそういう証明はありません。現在では、実際のキャパシタで72時間後の自己放電率を3%程度にできる見通しはついていました。この水準はまだ新品の鉛電池にはかないませんが、ニカドやニッケル水素電池とは並ぶ程度になっています。2次電池は古くなると自己放電も増加するので、そうした現象がほとんどないキャパシタは実用上ほぼ同水準にできるはずと考えてよいでしょう。

「できるはず」と書いたのにはわけがあります。実験セットに添付したキャパシタも含め、現在生産されているパワー用電気二重層キャパシタは、私が知る限り漏れ電流の品質管理があまりうまく行われていません。どうしても静電容量、内部抵抗そして耐電圧や劣化特性が優先されて、自己放電率のばらつきの管理まで手が回らないのが実情といえるかもしれません。

電気二重層キャパシタの自己放電率の測定は、それ以前にどれだけの時間充電しておいたかによって、図3-6に示すように大きな違いが出ます。短時間の充電ではCR配列の前のほうしか充電されず、後段を充

図3-6 ECS用電気二重層キャパシタ( EC・L )の充電時間による見かけの自己放電率の変化



電するための自己充電ともいべき電流が流れ続けるので、見かけの自己放電が大きく現れます。

図3-2(b)の $R_p$ の値を算出するため、典型的な例として72時間で電圧で3%低下する1kFのキャパシタで試算してみましょう。満充電時の初期電圧を $V_0$  [V]、充電電圧を $V$  [V]、キャパシタの容量を $C$  [F]、放電時間を $t$  [s]とすると、

$$\frac{V}{V_0} = e^{-\frac{t}{CR_p}} \dots\dots\dots (2)$$

が成り立ちますから、

$$\frac{t}{CR_p} = \ln \frac{V}{V_0} = \ln 0.97 = 0.0305$$

$$R_p = \frac{72 \times 3600}{1000 \times 0.0305} = 8498 \quad 8.5 \text{ k}$$

と求まります。この値(8.5 k)はなかなか利用価値があります。例えば、キャパシタが470 Fなら1kFとの比で割って17 k、そして自己放電率が6%なら半分で8.5 kです。

漏れ抵抗とキャパシタの静電容量で生じる時定数の大きいのは驚かれるでしょう。例えば、最初の1kFで、

$$= CR_p = 1 \text{ kF} \times 8.5 \text{ k} = 2361 \text{ h} = 98 \text{ days}$$

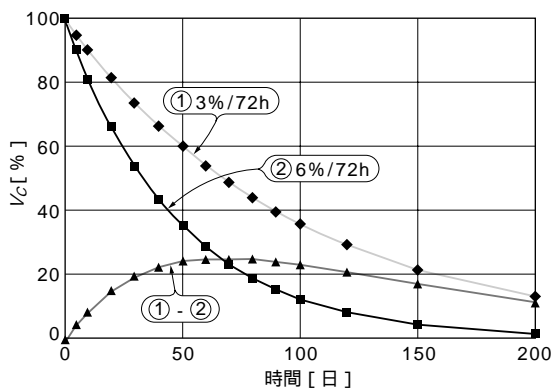
と求まります。漏れ電流が関係する測定、例えば直列にしたキャパシタの電圧配分の実験には年オダの時間がかかりとてもたいへんです。

これはSPICEでシミュレーションするのに限りません。比較のために自己放電率が上記の2倍、つまり72時間で電圧が6%低下するキャパシタとその差とを図3-7にプロットしました。電圧の差が最大となるのは70日後で26%に達します。

## キャパシタ周辺の電子回路設計

実際に装置を作ると、周辺の電子回路もキャパシタの漏れ電流相当の電流を消費します。

図3-7 ECS用電気二重層キャパシタの自己放電による電圧の変化と時間の関係



前出の72時間後に3%電圧が低下する1000 F, 8.5 k のキャパシタの漏れ電流は2.5 Vなら  $2.5 \text{ V} / 8.5 \text{ k} = 300 \mu\text{A}$  です。実験セットのキャパシタの漏れ電流は、500 F で計算して  $2.5 \text{ V} / 17 \text{ k} = 150 \mu\text{A}$  に過ぎません。

実験セットでは残量計は1 mA フル・スケールで、これをつないでおくと、無視できない自己放電になるので、スイッチ  $S_4$  を設けています。

充電器側がOFFになっても逆流する電流があり、これも装置としての自己放電率に影響するので、ここにもスイッチ  $S_3$  が設けてあります。これらのスイッチは自己放電を気にしないならONのままでも差し支えありません。しかし、用途によっては誰が設計しても、並列モニタの検出抵抗や半導体の逆方向電流のようなものが、自己放電率に影響を与えます。少し大型のものなら容量があるので設計は楽ですが、表示灯や冷却ファンなどのつけっぱなしは避けましょう。

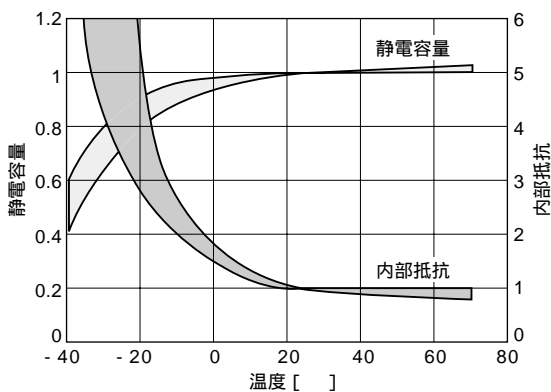
### 温度特性

電気二重層キャパシタの特性は温度によって変化します。その割合は化学反応を利用する2次電池に比べると原理的に少ないのですが、それでも静電容量や内部抵抗の変動は特に低温側では無視できません。

詳細な特性は製品によって異なりますが、大まかな傾向を図3-8に示します。高温側は使用限界の70まで問題になるような変化はありませんが、低温側で特に内部抵抗が増大する傾向が強く現れ、-20 で3~5倍、-35 では6~10倍となります。こうした特性だということは、用途によっては承知しておく必要があります。

ほとんどの応用では最低温時に静電容量が80%になってもあまり問題ないでしょうが、電力貯蔵など供給責任のある場合は、後述する寿命による劣化も加えて、設備容量に余裕をみっておく必要があるでしょう。

図3-8 ECS用キャパシタ静電容量と内部抵抗の典型的な温度特性 (25 を1とした変化率)



EC-LやEC-Uタイプを使って大電流の出力をとする用途では、内部抵抗が何倍にも増大すると、充放電効率が低下したり出力が取れない状況に陥ります。しかし、その結果としてキャパシタ内部では常温の何倍もの発熱を生じるので、極端な低温状況からは半ば自動的に脱出する傾向があります。

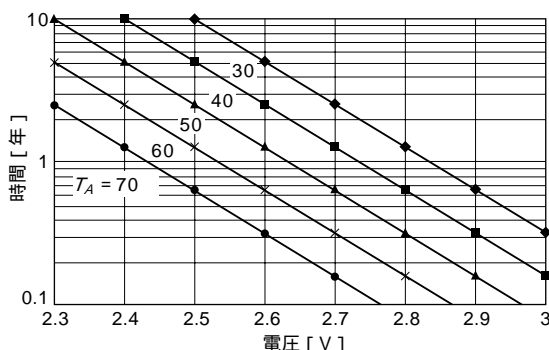
### 使用電圧と温度と寿命

電気二重層キャパシタの寿命はほとんど永久的だといえますが、電気二重層が作られる条件が満たされなければキャパシタは壊れてしまうので、寿命が半永久だというのは過大評価です。

電気二重層キャパシタがどう壊れるかというところ、もっとも可能性が高いのは水分の侵入です。例えば容器が破れたりシールが漏れたりすると、そこから空気中の水分が入ります。有機電解液だからこそ耐電圧が2.5V以上もあったのですが、水は1.2Vほどで電気分解を生じるだけでなく、有機電解液の成分と加水分解と呼ばれる反応を起こしてキャパシタの劣化は急進します。

電気二重層キャパシタが作られた時点でも、実は極微量の水分が残っていたり、活性炭に含まれた微量成分から充放電サイクルで水分が生成されます。その結果キャパシタは徐々に劣化し、内部には電解液が分解して生じた炭酸ガスがたまります。ガスの発生過程で活性炭電極内部の微細な表面を覆うので、キャパシタとしては静電容量が減少し、内部抵抗が増加します。こうした劣化現象は化学反応ですから、電気二重層キャパシタには本来必要のないものです。しかし、実際に製造された電極も電解液も無限に純粋というわけにはいかないのです。上述の微量な副反応が進行し長い年月の間にキャパシタの劣化となって現れます。その劣化のスピードは温度が高いほど、電圧が高いほど促進されます。

図3-9 ECS用電気二重層キャパシタの温度および使用電圧と寿命の関係



促進される割合をアレニウスの定律をはじめ化学のさまざまな理論や経験則を利用して算定しようとしていますが、こうした手段はオームの法則のようにピッタリとはいきません。そうかといって「温度は低いほど長もち、電圧も低いほど長もちします」では定量性がなくて設計の役には立ちません。

ここでも私の独断で図3-9に示すような温度と電圧を組み込んだ寿命の換算図表を作りました。原理は簡単で、温度は30～70の範囲で10上昇するごとに2倍の加速、電圧は2.3～3.0Vの範囲で0.1V上昇するごとに2倍の加速率で図表にただけです。温度と電圧の影響がどの程度のウエイトでキャパシタに影響を与えるか見当をつける道具になるでしょう。

### キャパシタの劣化と偏差の範囲

電源の平滑やバイパス用のコンデンサなら、2～3倍の余裕をもった容量を投入しておけば多少劣化して容量や内部抵抗が変わっても動作に支障はありません。しかし、蓄電用となると話が違います。2倍の容量をもたせるとコストも、体積も重量もすべて2倍になってしまうので、それほど薦揚<sup>あつやう</sup>にはいきません。容量や内部抵抗のばらつきの要因は製造時のばらつきと使用中の劣化によるものがあります。設計上はその両方をカバーしておくことが必要です。

図3-10は実験セットに付けたキャパシタを  $T_A = 70$  で加速した劣化試験の実測データです。複数のサンプルが類似の特性を示しているため代表値とみてよいでしょう。これは実用の電気二重層キャパシタとしてはすばらしい特性です。70, 1000時間(42日間)はアレニウス則を適用して30に換算すると2年間ほどですが、このきれいな劣化特性から外挿法で推定すると常温で20年間くらいはもちそうで、その間の劣化は静電容量 - 15%、内部抵抗 + 15%の枠に十分収まりそうです。新品時のばらつきも容量で - 0 ~ + 10%、抵抗で - 20 ~ + 0%くらいには品質管理できそうです。

図3-10 寿命加速試験データの一例(実験セットのキャパシタ)

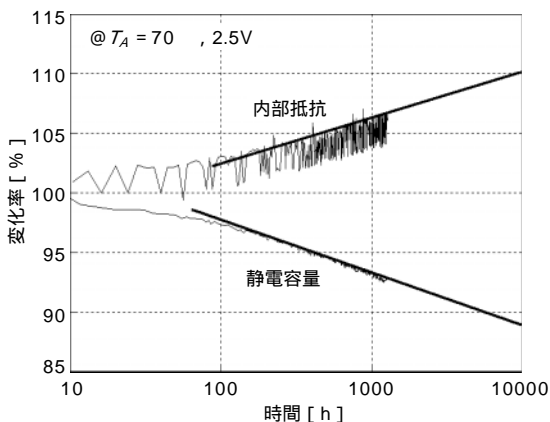
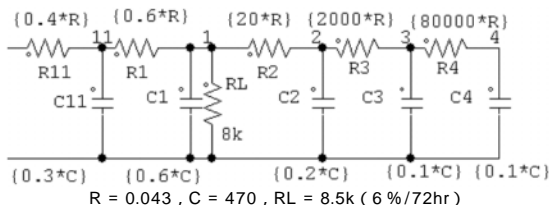


図3-11 実験キットの470Fキャパシタ・モデル



全部のキャパシタがこんな特性なら、使用電圧を3Vくらいまで高めても良さそうですが、まだ製品のばらつきなどで自信がありません。電解コンデンサでも電池でも今日の性能に達するまで長い改良の道程を経てきました。その点、ECSもキャパシタも生れたばかりで、製造の経験を積むのはこれからです。

## もう一步詳しいSPICEモデル

### 実験セットのキャパシタのモデリング

これまで電気二重層キャパシタをかなり詳しく述べてきました。通常の電子部品、例えばアルミ電解コンデンサならば、これほど勉強はしなくても使いこなせます。しかし、ECS用の電気二重層キャパシタではまだ序の口です。その証拠に図3-2(b)の等価回路で考えたのでは説明のつかない現象に直面するでしょう。

図3-3の充放電カーブを詳しく見ると、ステップ⑥は垂直に下がっているわけではなく、⑦では放電した電圧から時間の経過とともに電圧が上昇しています。電流も満充電に達した後⑧のようにゆっくりと低下していくのも奇妙です。こうした現象は図3-2(b)に示す等価回路ではどう考えても理解できません。

この特性を理解するには、図3-2(c)や第1回で述べた電気二重層キャパシタの等価回路をもっと正確に作っておけば役に立ちます。実験セットに付属のキャパシタのシミュレーション用に作ったモデルを図3-11に示しました。これでわかることは、CRがこんな

図3-12 SPICEによる放電開始部と放電終了部の電圧変化

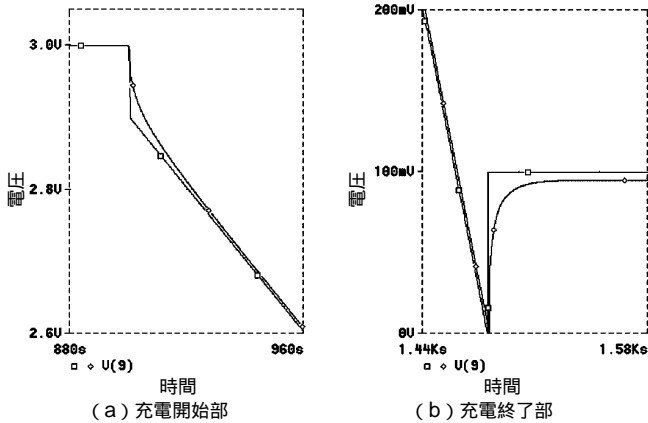
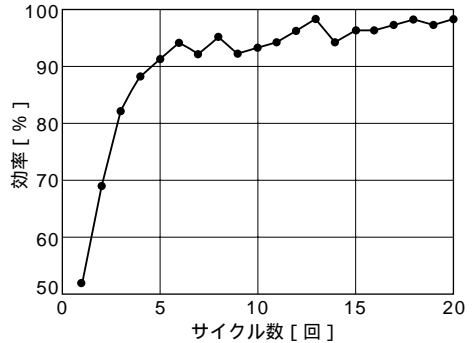


図3-13 充放電の繰り返し回数と効率



配列になっていることによる影響です。

(a) 充放電カーブの形

図3-12に示すように、図3-3の(A), (B)の丸く曲がった形、(C)の電圧が復旧する傾向、(D)の電流がゆっくり減少するようすなどが再現できます。

(b) 充放電効率

最初の充放電サイクルでは充放電効率が低く、何回も繰り返すと次第に効率が高くなっていく図3-13に示すような現象も再現できます。

(c) 内部抵抗

大電流で測るほど低めに出ます。大電流で充放電すると必然的に充放電時間が短くなります。すると図3-2(c)で時定数の長い後段のCRは間に合わず、前段だけで動作することになり、関与するCは少なくRも小さくなります。反対に小電流で長時間の充放電を行うと、CR配列の後者のほうまで関与し、合計のCは大きくRも大きくなります。

(d) 自己放電率

自己放電率を測定すると、それ以前の満充電にしている時間の長さによって、図3-6に示すように異なった特性が得られます。図3-2(c)のモデルで見ると当然で、充電時間が短いと後段のCRは充電が完了していません。自己放電率の測定中、後段のCは前段から充電され続けるので、キャパシタ端子に現れる電圧は自己放電と後段への自己充電の加わった状態となります。その結果、図3-6に示すように充電時間によって異なった電圧推移が観測されます。

モデルに含まれない特性

図3-11のSPICEモデルは実用上使いやすい大きさに制限しているため、含まれていない特性もいくつかあります。その決定的な点は段数で、CRをもっと細かく多段にするとより正確に模擬できます。

(a) 静電容量の電圧係数

電気二重層キャパシタの充放電カーブを本物らしく描くには、わずかに上に凸にするのがコツです。これは電気二重層キャパシタの静電容量にはわずかな正の電圧係数があって、0~2.5Vで数%ほど増加します。これを模擬するにはキャパシタにアナログ・ビヘービア・モデルで電圧係数をもたせれば実現できます<sup>(7)</sup>が、形を似せる以外あまり利点がないので、平生は利用していません。

(b) 劣化特性

電圧をある程度以上高くすると、微少な電気分解が盛んになって漏れ電流が増加し、キャパシタ内部のガスの発生や劣化が早まります。ガスや劣化をモデル化するのはSPICEでは困難ですが、漏れ電流は可能ですから、電圧で制御する電流源などを追加すれば、複雑にはなりますがモデル化できます。しかし、劣化特性は実物での試験を優先すべきでしょう。

◆参考・引用・文献◆

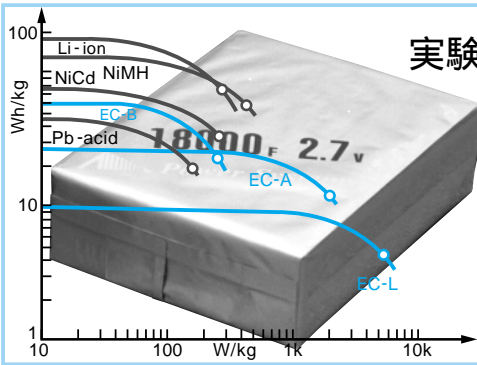
- (1) PSLH2カタログ, 1999年, (株)パワーシステム.
- (2) 佐々木正和, 野津育朗, 荒木修一, 山田良昭, 菅野裕之; キャパシタ式CNGハイブリッドバス・システムの開発, 自動車技術会2000年春季学術講演会前刷集, 2000年5月24日, 日産ディーゼル工業(株).
- (3) 野津育朗, 西川吾吾, 荒木修一, 佐々木正和; キャパシタ式蓄電装置搭載中型ハイブリッドトラックの開発, 自動車技術会2000年秋季学術講演会前刷集, 20005566, 2000年10月19日, 日産ディーゼル工業(株).
- (4) 負荷平準化新手法実証調査 最終報告書, 2000年3月, 新エネルギー産業技術総合開発機構.
- (5) 荒木修一, 佐々木正和, 野津育朗, 山田良昭, 川治孝之, 小野秀夫; ハイブリッド車用電気二重層キャパシタの開発, 自動車技術会2000年秋季学術講演会前刷集, 20005567, 2000年10月19日, 日産ディーゼル工業(株).
- (6) 岡村迪夫; 電気二重層キャパシタと蓄電システム, 1999年3月, 日刊工業新聞社.
- (7) 岡村迪夫; SPICEによるOPアンプ回路の設計, CQ出版(株), 1993年.



実験セットで学ぶ新蓄電システム ECS! ④  
(最終回)

充放電回路の最適化

岡村 弼夫  
Michio Okamura



実験セットを動作させてみると、キャパシタ蓄電の特徴や問題点がずいぶんはつきりしてくるはずですが、今回は、その問題点とさらに充放電性能を上げる方法について、私の経験からいくつかの手掛かりを提供しましょう。

充放電特性向上のための具体策

動作電圧範囲の設定

降圧チョッパを使う場合

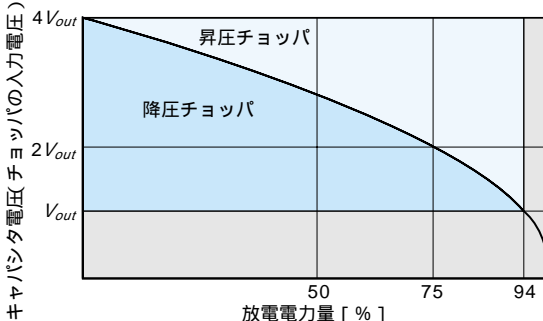
ECSシステムを設計するときは、どんなに小出力であっても、キャパシタの使用電圧範囲と出力コンバータの出力電圧との関係を初めに設定しておくことが重要です。

ECS実験セットでは、2.5Vの電気二重層キャパシタが4個あるので、直列に接続すると満充電電圧は10Vになります。ここで出力コンバータの出力電圧を設定すると、キャパシタの利用率が一義的に決まってしまう。コンバータの出力電圧  $V_{out}$  を5V、入力電圧  $V_{in}$  を10Vとすると、総蓄電エネルギーの何%を利用できるかという点、

$$1 - \frac{V_{out}^2}{V_{in}^2} = 1 - \frac{5^2}{10^2} = 75\%$$

この計算で降圧チョッパを使ったときの任意の出力

図4-1 昇圧チョッパと降圧チョッパの入出力電圧とキャパシタに充電された電荷の利用効率



電圧での利用率が求まります。

出力電圧を満充電電圧の1/4(2.5V)に設定すると、利用率は、

$$1 - 1/16 = 94\%$$

となるので、先ほどの試算(75%)に比べて25%も多く電気を利用できます。しかし、2.5Vという出力電圧は、一般用途には少し低すぎるかもしれません。もし、5V出力で利用率の高い装置を作りたいのであれば、キャパシタの電圧のほうを出力電圧に合わせて、4個ではなく8個を直列にすれば実現できます。

昇圧チョッパを使う場合

実験セットでは、昇圧と降圧を試せるように出力用電流ポンプに降圧チョッパと昇圧チョッパの二つを用意しており、12Vのハロゲン・ランプの駆動には昇圧チョッパの出力を使っています。

図4-1に、満充電時のキャパシタの電力量を100としたときの放電電力量とキャパシタの充電電圧の関係を示します。出力電圧  $V_{out}$  の降圧チョッパを使って、キャパシタの電圧が  $4V_{out}$  から  $V_{out}$  に低下するまで放電した場合と、出力電圧  $4V_{out}$  の昇圧チョッパを使って、キャパシタの電圧が  $4V_{out}$  から  $V_{out}$  に低下するまで放電した場合の放電電力量を示しています。

降圧チョッパの場合、キャパシタの満充電電圧を  $4V_{out}$  に設定すると、 $V_{out}$  まで放電したとき電力の利用率は約94%になります。

\*

実際の装置を作ってみると、スイッチ用のトランジスタやICの選択、補助電源の使い方で、動作電圧の範囲に制限が出てきます。この制限の度合いはキャパシタではなくチョッパ回路の設計に依存し、効率も大幅に変わります。実験セットでは、たまたま昇圧型が降圧型に比べて高効率なので、昇圧型のほうが有利という印象をもつかもしれませんが、通常的设计では降圧型のほうが高性能が得やすいものです。

反転チョッパや、トランス付きのスイッチング・コンバータも利用できますが、なかなか昇圧チョッパや

降圧チョッパほどの効率は得られません。いずれにしても、広いキャパシタ電圧範囲において負荷変動も含めてチョッパ回路の効率を落さないことが肝心です。

## バンク切り替え回路の最適化

### バンク切り替えの考え方

ECSにバンク切り替えという考え方が適用された時期は、電力や大型のハイブリッド・バスへの応用が現実的になったころです。電流ポンプは常に電力を出し入れするため、小型なポンプなら問題ありませんが、扱う電力が大きくなるにつれて体積や重量の増大が課題になりました。

そこで、まず電流ポンプの電力負担を減らそうと考えました。図4-2に示すように、満充電時は $S_1$ をOFFにしてキャパシタ $C_1$ と $C_2$ を並列にして使います。充電電圧が半分まで下がったら $S_1$ をONにして、 $C_1$ と $C_2$ を直列に接続します。図4-3に満充電電圧 $2V_{out}$ のキャパシタから一定電圧 $V_{out}$ を出力したときの電力の利用効率を示します。バンク切り替えがある場合(94%)は、ない場合(75%)に比べて約25%効率が改善されます。

### 実際のバンク切り替え回路

バンク切り替え方式としては、タップ型やシフト型などいろいろな構成<sup>1</sup>が考えられましたが、これまでの実用機には、ほとんど図4-4に示すシフト型かその段数を変更したタイプが使われており、良い成果をあげています。

この型のバンク切り替えは図4-5に示すようにキャパシタとスイッチを接続します。まず、全放電からの充電は $S_3$ だけをON、ほかのスイッチは全部OFFにすると(a)に示す全直列接続となります。電圧がしかるべきレベルまで上昇したのち $S_3$ をOFF、 $S_{2a}$ と

$S_{2b}$ をONにすると(b)の接続となります。そのまま充電を進めてさらに電圧が上がったところで、 $S_{2a}$ と $S_{2b}$ をOFFにして、 $S_{1a}$ と $S_{1b}$ をONにすると(c)の形となります。こうして全放電から満充電までの間を3段階に切り替えると、キャパシタの出力電圧変動を25%程度に納めることができます。

シフト型バンク切り替えは、キャパシタに直列に入る切り替えスイッチの数が少ない点も特徴です。上の例ではそれぞれのバンクに1個しか入りません。しかもスイッチング・コンバータのようなスイッチング・ロスや、ドライバ段や補助電源による損失はほとんど生じず、オン電圧による損失だけなので、スイッチング・コンバータに比べ、負荷や電圧が広い範囲で変動しても低損失、高効率が得られます。特に負荷がモータ・ドライバや交直変換器などのように、ある程度の電圧変動を受け入れられる組み合わせでは、重量も大きさもかさばらないという利点があります。

図4-6に、切り替えなしと1段切り替え、4段切り替えの回路を使った場合のキャパシタ電圧の変化を示します。

### バンク切り替えのときの心配事.....横流とスイッチ

電気二重層キャパシタを使ったバンク切り替えの第一の課題は、キャパシタの充電レベルにバンクごとのばらつきを生じさせないことです。しかし、多くの人はその点には注意しません。それよりも直列から並列

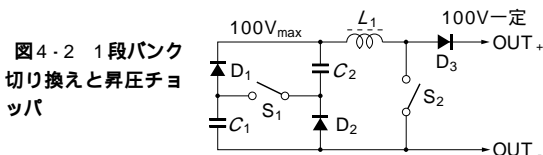


図4-2 1段バンク切り換えと昇圧チョッパ

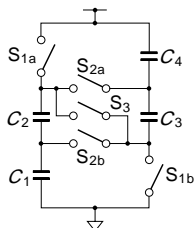


図4-5 動作モード

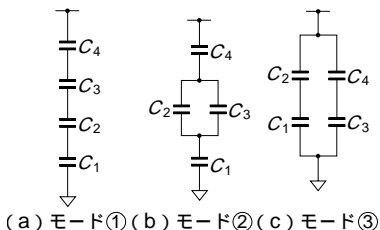


図4-3 バンク切り換えによる利用効率の向上

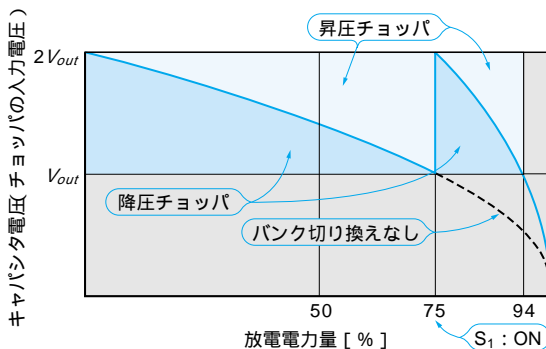
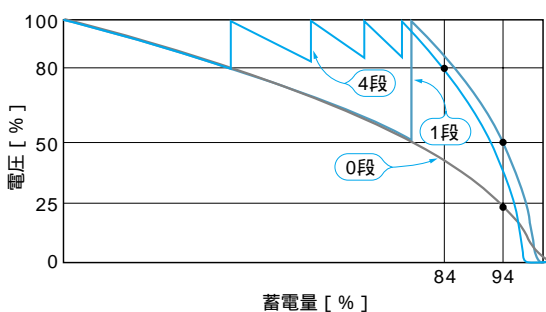


図4-6 バンク切り換え段数とキャパシタの出力電圧の推移



に切り替えた直後に、キャパシタの充電電圧が異なることによって生じる電流（横流）が心配だと言います。

この問題は、スイッチがパワー・MOSFETのようなアナログ型なら電流制限回路を設けたり、サイリスタのようなON/OFF型なら電圧平衡を監視して投入するなどパワー・エレクトロニクスの技術でなんとでも解決できます。

主電流回路に大きなスイッチを入れて、回路をON/OFFするという構造の信頼性を心配する人も少なくありません。でも、スイッチング・コンバータやモータ・ドライバの中では、同じスイッチが1秒間に数万回もON/OFFしているのです。

## 並列モニタの問題点と対策

### 満充電時の充電電流の処理

満充電時の第一の課題は充電をそれ以上は絶対にさせないよう、流れ込んでくる電流はすべてバイパスすることです。しかし、ハイブリッド・バスの回生制動時に発電される何百Aという電流をまともに受けたら並列モニタはたいへんな規模になるでしょう。

この問題は設計配慮で解決します。どんなシステムに使っても、いつかはキャパシタが一杯になるので、満充電に近づいた際の制御はCMS (Capacitor Management System) とブレーキ・コントロールで受けもちます。ただし故障時にブレーキが利かなくなると危ないので、それも含めて嚴重なバックアップを考慮します。

キャパシタは、満充電を含め充電状態 SOX (Status Of Charge) の検出が容易で正確なので、この辺の制御にはとても有利です。

### 初期化の処理

#### 初期化完了までの時間

第二の課題は、キャパシタを使い始めるときに初期化を求めている点です。

車が走り始めてから、ゆっくりと満充電まで上げて

いって初期化する暇はないでしょう。かといって「始業点検のときにも、発電機を回して初期化してください」というやり方では評判が悪いのです。車のユーザは誰でもエンジンをかけたらすぐに走り出したくて、本当はエンジンをかける前に走り出したいくらいなのだそうです。それならと、初期化はやらないで走り出して、使っている間に少しずつ初期化することにしました。実はこの方法はECSの初めから存在した考え方です。当初の並列モニタは、シャント・レギュレータのように満充電電圧の制御をするのではなく、キャパシタの状態をCMSと呼ぶ制御装置、つまり充電器に知らせる機能をもっていました。これを安価に簡単にしたのが、前回で述べた並列モニタの簡易型です。

### 2コンパレータ式並列モニタによる解決策

本格的な並列モニタの回路の一例を図4-7に示します。簡易型との大きな違いは、初期化と満充電の検出に別々の設定電圧  $V_{ini}$  と  $V_{ful}$  をもっている点です。これによって、満充電よりも低い任意の電圧  $V_{ini}$  でキャパシタを初期化できます。

図4-8に、2コンパレータ式並列モニタの初期化動作によるキャパシタの充電電圧の時間変化を、AとBの2種類の蓄電装置について示しました。この方式では初期化は満充電電圧で行う必要はないので、図に示すように、～の種々の場所で初期化することができます。

AとBの二つのパターンを示したのは蓄電装置の使い方でこのように大別できるからです。例えば通常の無停電電源では、Aの使い方となり、ほとんど常に満充電の状態に置かれます。他方、ハイブリッド電気自動車では、満充電状態が維持されることはほとんどありません。充電制御レベルは、いつでも回生制動も急な加速も受け入れることができるBのパターンとなります。

図4-7に示すようにこの方式の並列モニタでは、初期化はコンパレータで検出する電圧レベルのほかに、スイッチSでON/OFFできるので、一度に完了する

図4-7 2コンパレータ式並列モニタ

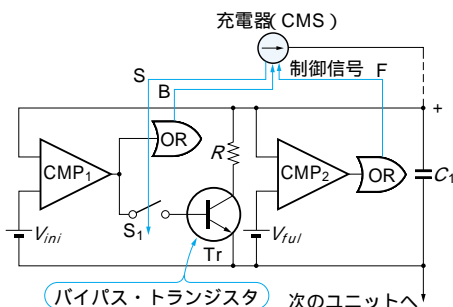
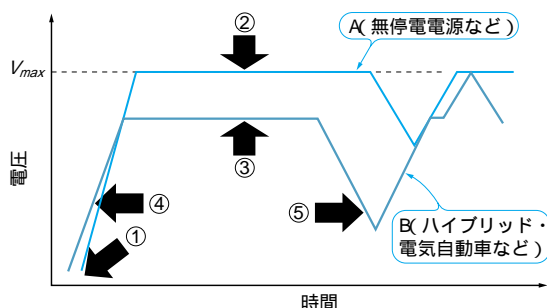


図4-8 2コンパレータ式並列モニタの初期化動作によるキャパシタの充電電圧の時間変化



まで初期化動作を行わず、Sを短時間だけONにするよう制御すれば、少しずつ初期化することも可能です。これならキーを入れればすぐ、文字どおりエンジンをかける前に走り出すことができ、走りながらゆっくり初期化すればOKです。

満充電よりも低い電圧で初期化を行うのは初期化電力量が小さくてすむ点は有利です。ただし、図4-9に誇張して示すように、 $C_1$ および $C_2$ のようにセル間の静電容量差が大きいと、aとbの電圧差つまり満充電電圧の誤差が大きくなります。したがって、初期化電圧 $V_{ini}$ の設定は、使用中に頻繁に通過する電圧レベルであって、なるべく満充電電圧に近いところに決めるのが効果的です。

### キャパシタ間の漏れ電流のばらつき

各キャパシタの電圧分担がなぜずれてくるか。その原因は「静電容量と漏れ電流がセルによって異なるから」と前に述べました。

その中で、静電容量は10%以内といった比較的小さなばらつきで管理できますが、漏れ電流は、条件によっては2倍くらいの差がいくらかでも生じます。例えば72時間で充電電圧が6%低下するセルを基準にしたとき、3%しか低下しないセルを不良品として捨ててしまうわけにはいけません。

こうした漏れ電流のばらつきを抑えるため、十分大きな電流を流す均圧抵抗を並列に接続する方法は古くから知られていました。すべてのキャパシタの利用率が72時間で60%低下しますが、これが我慢できる用途には一つの解決法です。

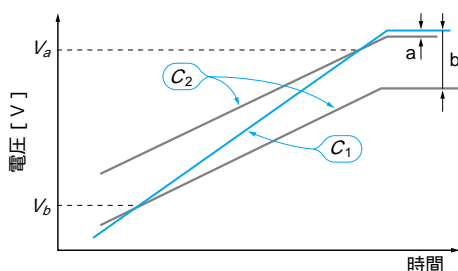
並列モニタを使えば、直列接続の頭痛の種は鮮やかに解決できますが、並列モニタの動作は次の二つの課題を残します。

全キャパシタの実効的な漏れ電流が増大する

蓄電量に大差があると並列モニタが過熱する

並列モニタは、漏れ電流を自動的に補償するので、は結果として直列に接続されたすべてのキャパシタの中で、一番漏れるキャパシタの漏れ電流と同じ電流が流れることとなります。これでも、漏れ電流は1倍ですむわけで、均圧抵抗を追加して10倍にするより

図4-9 静電容量のばらつきによる初期化電圧誤差の変化



は効率が良く、現時点では最良の選択です。

は満充電電圧で、流れ込む全電流を食い止めようとしていた基本型と異なり、並列モニタに流す電流も時間もCMSで制御できます。長時間システムを使わなかったためセル間の蓄電量に大差が生じた場合、一度に均等にしないで、時間を掛けて少しずつ初期化を繰り返せば、並列モニタの放熱容量などを心配しなくて済みます。

## 2コンパレータ式 並列モニタの実際の動作

### 実験条件

図4-10に示すシステムで2コンパレータ式並列モニタの動作実験を行いました。以前に製作した公称容量700F、125cc(円筒型)のキャパシタPSLP-2を10本直列にして使いました。計測は各電気二重層キャパシタの端子間電圧をスキャナ付きデジタル・ボルト・メータで自動測定し、GP-IBを経由してコンピュータに取り込みます。サンプル・レートは5サンプル/secです。回路は図4-7に示した現在の標準型というべき2コンパレータ型で、

満充電電圧  $V_{ful} = 2.6V$

初期化電圧  $V_{ini} = 1.91V$

に設定しました。

制御のシーケンスは、初期化つまり $S_1$ をONにする時間を3秒間固定とし、いったんONにした後30秒間はこの機能をディセーブルとし、初期化動作中に放電モードや急速充電が行われた場合は初期化動作を中止します。この3秒および30秒という値は、 $V_{ini}$ をONにした際の電流を定める並列モニタのバイパス・トランジスタのコレクタ直列抵抗 $R$ の値とともに、設計上任意に設定できます。

### 実験結果

図4-11の下段にキャパシタ電圧のばらつきの最大値をプロットしました。このトレースと全キャパシタのトレース(上段)が次第に重なっていくことから明らかですが、充放電サイクルを繰り返す間に微小時間

図4-10 2コンパレータ式並列モニタの動作実験システム

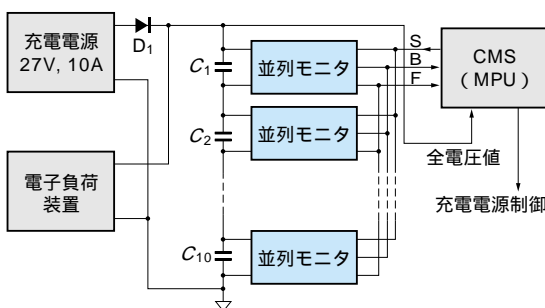
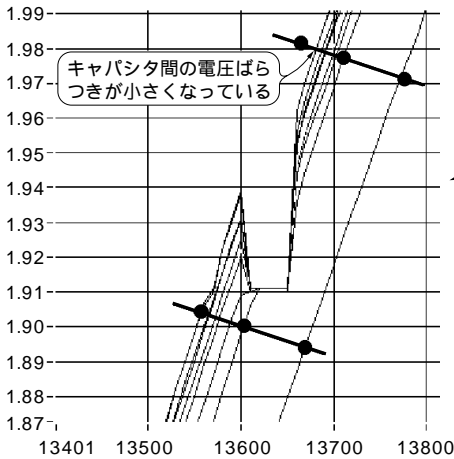


図4-12 初期化の瞬間を拡大



ずつ行われる初期化によって、全キャパシタの電圧分担はきれいにそろっていきます。この部分を拡大したプロットを図4-12に示します。V<sub>ini</sub>がONになるのは3秒間だけなので、そのときに電圧がV<sub>ini</sub>を越えていたキャパシタではバイパス回路がONになり、この例では1個を除いてすべてオン電圧の1.91 Vまで下がっています。この電圧降下はキャパシタの端子部で生じているだけで、キャパシタ内部のRC配列のすべてのCが1.91 Vになるわけではありません。その証拠に初期化信号がOFFになると、もともと電圧の高かったキャパシタは高く、低かったキャパシタは低いという順序はそのまま、充電が継続されます。

初期化回路にかからなかったトレース右端の1個は初期化の際の放電はゼロ、初期化にかかったセルでも電圧の低かったセルは浅く、高かったセルは深く放電されるため、わずか3秒に1回でも初期化の前より後のほうがばらつきの幅が細くなっています。

### 各種入力源との接続

#### 太陽電池との接続

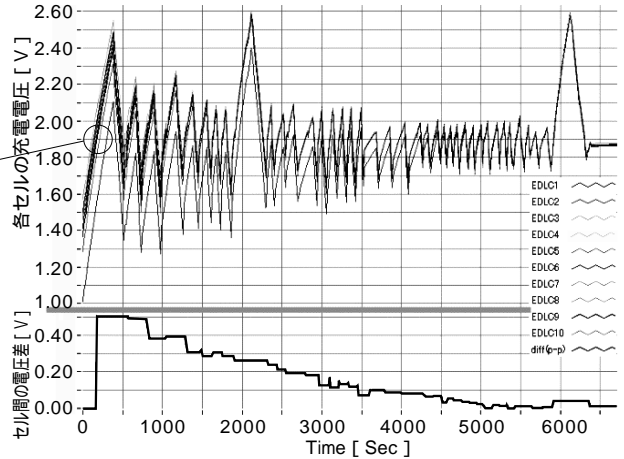
##### 問題点

実験セットの入力源として太陽電池を接続する場合、2次電池と違って特別な配慮が必要です。

高い充電効率が要求される用途や、キャパシタの満充電付近だけで充放電するケースではあまり問題はありません。しかし、大規模で本格的に高効率なシステムを狙うようなら、次の現象に注意してください。

図4-13は太陽電池の出力電圧・出力電流特性です。太陽光の強さが、例えば80%に下がると出力電流が破線のように低下します。温度でもシリコンの場合、約-0.4%/°Cの係数で起電力が低下します。

図4-11 図4-10のシステムで初期化したときのキャパシタ・セルの電圧の時間変化



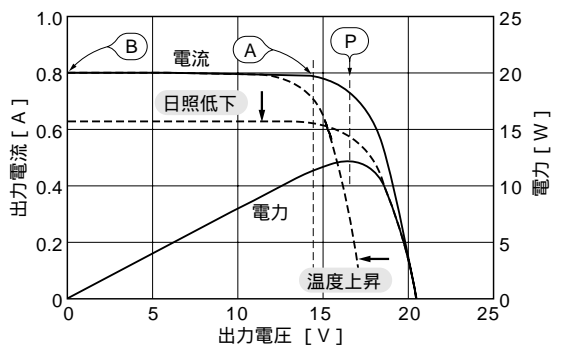
この太陽電池に公称電圧12Vの鉛電池を接続すると充電電圧は約14Vですから、図のA点に太陽電池の動作点にくるので、単につなぐだけで比較的良い効率で充電できます。ところが完全に放電した電気二重層キャパシタを接続すると、動作点はBとなり太陽電池から得られる電力はゼロ、したがって充電効率もゼロとなります。

幸いなことに、電荷の流入によってキャパシタは次第に充電され電圧は徐々に上昇するので、太陽電池の動作点は充電に伴ってゆっくりB点からAへ向かい、充電効率も少しずつ上昇します。それでもキャパシタを単に太陽電池に接続したのでは、太陽電池の最高効率であるP点で動作する期間はほとんどありません。

##### 解決策

太陽電池から最大の電力を取り出すには動作点が図のP点にくるよう負荷の調節が必要です。日照や温度が変化しても、常に最大出力のP点に相当する位置に動作点、つまり太陽電池の電圧・電流特性を制御すればよいわけです。このような制御を自動的に行うスイッチング・コンバータをMPPT(Maximum Power

図4-13 太陽電池の出力電圧・出力電流特性





Point Tracker)と呼び、高効率な太陽電池システムに不可欠ことが知られています。

太陽電池にキャパシタを併用して高効率な蓄電を行うには、太陽電池とキャパシタの間に、太陽電池側から見るとMPPTの動作、キャパシタ側からは定電流源に見えるようなスイッチング・コンバータを置けば、最良の充電効率が得られます。これを最初に実証した1996年3月発表の研究<sup>(4)</sup>では、MPPTと電流ポンプを兼ねたパワー・スイッチ1個だけの回路を作って、太陽電池からキャパシタ・バンクを自動的に高効率に充電することに成功しています。その後も写真4・1や図4・14に見られるように、太陽電池からECSへの高効率な充電の研究はいくつか発表されています。

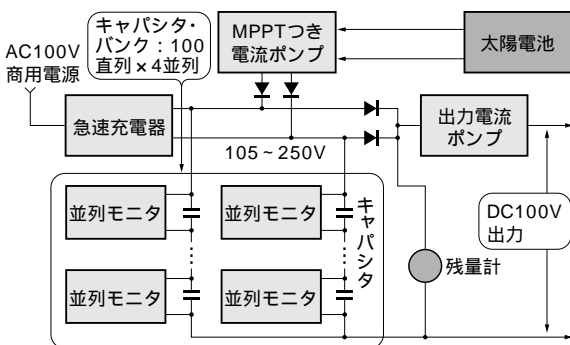
### モータや発電機との接続

#### 問題点

自然エネルギーは電力発生量の変動が大きいため、太陽電池だけでなく風力や波力などによる発電も蓄電装置と併用することが多くなります。特に変動の大きい風力発電では、電力系統の全容量に比べて風力発電機の容量が大きい場合には発電電力の山や谷で系統の安定性に問題を生じます。この種の大きな電力の急激な変動を埋めるには、出力密度の大きな電気二重層キャパシタを使った短時間の蓄電装置が有効です。

風力やエンジンなどで駆動する発電機から電気二重層キャパシタを充電する場合、発電機が電圧源であるため、出力が直流であっても、そのままキャパシタに接続したのでは太陽電池と似た問題が生じます。この現象は、市販されている小型の手回し直流発電機の出力に、大容量の電気二重層キャパシタを接続して充電を試みると体験できます。キャパシタがゼロまで放電した状態で充電を始めると、手回し発電機は発熱し、盛んに回すと温度が急上昇するのが、本体を手で握っていると感じられるでしょう。この状態は発電機側から見れば負荷短絡の状態だから過電流により発熱するのは当然で、キャパシタの静電容量が大きいと、この状態が長く続くので発電機を焼損します。

図4・14<sup>(3)</sup> 太陽電池とECSを接続したシステム



### 解決策

この問題を解決するには、キャパシタへの充電を電流源から行えばよいのです。具体的には、発電機の出力にスイッチング・コンバータを入れ、その出力が電流型になるよう制御します。

風力発電やハイブリッド電気自動車の発電機の出力はほとんどが交流ですから、その出力を整流する部分のスイッチング回路を制御して、キャパシタへの充電電流が定電流になるようにします。これによりキャパシタへの充電効率は、使用するキャパシタが適正なら95%程度の高効率が得られるでしょう。もう一つの方法は、バンク切り替えのところで述べたように、キャパシタの電圧よりわずかに高くなるように電圧源の電圧を自動制御し、擬似的に電流源を作ります。既製の発電機の場合には発電機の出力電圧リミッタや電流リミッタを制御して類似の状態を作ることが可能です。

### 電池との接続

大容量キャパシタの放電したものを大型の電池、例えば自動車に内蔵された始動用鉛電池に接続するのは危険です。これは、電池を短絡するのと同じことです。接続の際生じるエネルギーのほとんどは電池と電線で消費されるのでキャパシタは平気な顔をしています。電池を壊したり、配線で火傷する可能性があります。

必要がある場合は、充電器が抵抗を通してキャパシタをある程度充電しておき、それから極性を間違えないように接続します。

## ハイブリッド電気自動車の蓄電システム

### ハイブリッドにおけるECSの価値

ハイブリッド電気自動車の蓄電部は何のために設けられているかが重要な鍵です。

ハイブリッド車であると主張するため

エンジンを停止した状態で、長時間電気で徐行するため

制動エネルギーを回生し加速に使うため

2次電池は、エネルギーの出し入れ量の小さいとの動作に対してキャパシタより長所が現れます。弱点は充放電サイクル寿命で、電池メーカーがハイブリッド車用で何万回などといっている試験データは放電深度2~5%の条件下での結果です。2次電池のエネルギー密度は、比較的小さいハイブリッド用でも60Wh/kgくらいは公称していますが、これは小出力時の値で、大電流充放電時には1/2程度に下がるうえ、実用の放電深度が5%ならさらにその1/20、2~3Wh/kgしか使えないことになります。

そういう電池をいたわって保護して、あれだけ実用価値のある自動車にまともあげ、量産発売までもって

いったのは、世界で初めてHIMR(Hybrid Inverter Controlled Motor and Retarder)を商用車に適用した日野も、続いて乗用車プリウスで成功させたトヨタも立派であると賞賛されるべきでしょう。恐らくこれら自動車会社がハイブリッド車用にキャパシタを検討した時期は、「エネルギー密度は1 Wh/kg程度で、直列に接続するときは電圧を下げないと壊れる」という状況だったに違いありません。

しかし、ECSが登場した現在では状況がまったく変わり、キャパシタのエネルギー密度は内部抵抗の十分低いPS-L型でさえ6.5 Wh/kgを量産できるレベルに達しました。これにより、ハイブリッドにする目的は前出の、より重要なを100%回生制動で実現できるようになりました。その成果はすでに図4・15に示すような巨大な15トンのバスの事例で報告されています。ハイブリッドの電源は大型車ほど厳しく、軽い小型乗用車はもっとも楽なので電池でも使えないことはありません。純技術的にいえば、乗用車も徐々にキャパシタの方向へ向かうでしょう。

#### 今後の展開

燃料電池とキャパシタのハイブリッド電気自動車(写真4・2)も発表されました。燃料電池車では、図4・16に示すように初めから走行用の全馬力を出せるモータ(図の例では60 kW)を積んでいます。そこから回生される全電力を蓄電し、加速用のエネルギーに回す

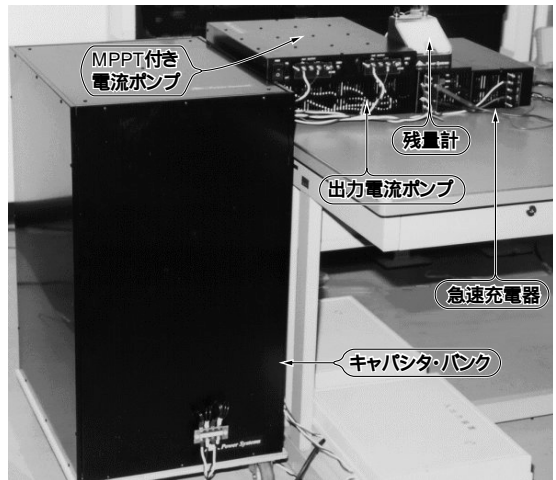


写真4・1 (3) 太陽電池と接続した1 kWhのECS(北見工大)

には大電力を扱えるキャパシタが好適です。燃料電池が実用に供されるにはかなりの道程が予測され、その前にハイブリッド車の世紀が入るのでしょうか。

#### 結びに代えて

4回の連載で約40ページにわたり、近ごろ例を見ない、ずいぶんわかりにくい話を続けてきました。それでも、実験セットまで経験された諸氏には特に、新しい蓄電装置ECSとの最初の付き合いの機会になっていれば幸いです。

### オナジナリティ

日本では独創的なものが育ちにくいそうです。私もECSの研究でそれを感じました。でも、そうなる原因は自分と関係のない遠くにいる人達だけにあるのでしょうか。

一つの原因は電気、電子に限らず専門家の評価力、判断力の不足だと思います。新しいものの評価が自分の頭でできず、世間の風評を根拠にしがちなのです。米国で特許が取れ実物ができ、新聞や雑誌が掲載した後になって、ようやく専門家の中に賛意を示す人が出始め、学会が取り上げる...。この順序はまったくあべこべではないでしょうか。こういうことでは発芽したての新アイデアが、正当に評価され育てられるとは思えません。

もう一つの原因は、独創が生れても尊重しない我が国の習性にあるようです。成功すると見るとオリジナルに無断で、似たような物を作ってしまう。キャパシタの内部抵抗を高めエネルギー密度を増す方法も、効果がありそうだとわかると「内部抵抗の高いのなら俺達もできるぞ」と類似品が出始めました。

でもそれはECSの手法なしでは損失が多くて使えないはず。この間まで「キャパシタは秒速充電で充電回路が不要なのが特徴」と宣伝していたのに、いつの間にか内部抵抗の高いエネルギー密度型キャパシタが当然のように売られるでしょう。これは今まで社会やユーザがそうした行動に、寛大すぎたことにも関係があるかもしれません。

さらに一つの原因は冒険心の欠如です。従来の鉛電池を使った無停電電源が故障しても、最高級品で壊れたのだからといいわけが立つけれど、キャパシタを使って壊れたら「実績がないものをなぜ使った」と叱られたとき、言いわけができないそうです。それはハイブリッド自動車でも同じだといえます。

これらの原因に共通する成分は「オナジナリティ」です。この特有な匂いを嗅ぎ分け、この成分がはびこらないように廃絶し、脱皮していくことが必要です。それは遠くの他人の仕事ではなく、我々個人の自覚によると思うのですが。

図4-15 (5) キャパシタ・ハイブリッド・バスの構造 キャパシタ：200 kg, 1.2 kWh, 100 kW, 発電機：75 kW, 走行モータ：75 kW × 2

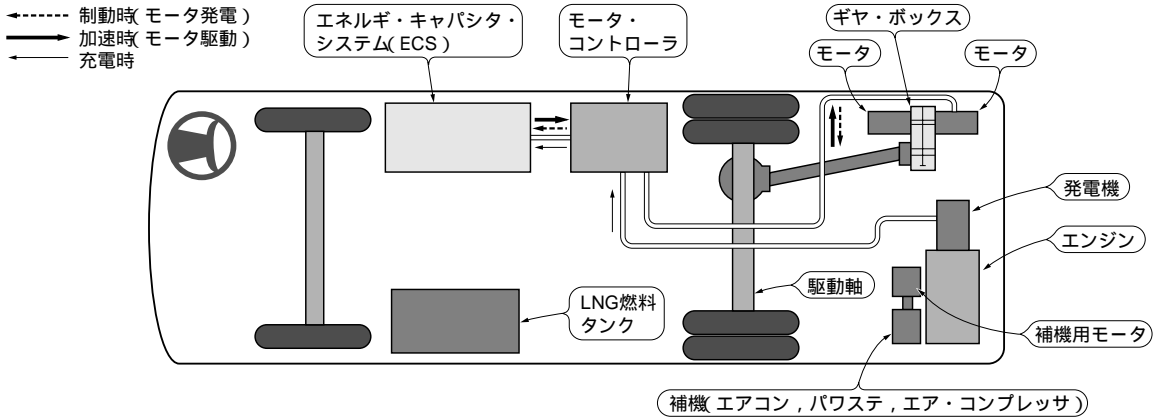


図4-16 (6) 燃料電池車ホンダFCX-V3のシステム概念

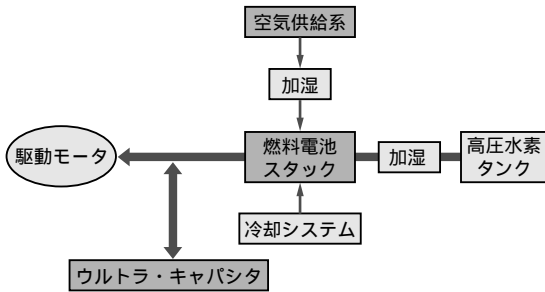


写真4-2 (6) 試走前のハイブリッド電気自動車FCX-V3(カリフォルニアにて)

これで卒業か、すぐ使えるか、というところではないでしょう。この稿では本誌の性質もあって、大型の電力貯蔵装置や自動車の問題を扱うというよりは、意図的に手作りで使える小規模な応用のための予備知識となるよう述べてきました。

大規模なシステムへの応用や、もっと基礎的な事項など、本稿の40ページで足りないテーマは小著<sup>(1)</sup>で補ってください。実物の入手や工業化の進行状況を知るには、ECSの研究開発で活動中の各社の広報やホームページなどが参考になるでしょう。

◆参考文献◆

(1) 岡村 勉；電気二重層キャパシタと蓄電システム，2001年2月，日刊工業新聞社。

- (2) 三井 克司；私信，1999年，(株)パワーシステム。
- (3) 新山 信一郎ほか；新型電力貯蔵装置ECSを使ったPV・ECSシステムの開発，vol.120・B，No.2，pp.264～270，2000年，電学論。
- (4) 山岸 政章，三井 克司，岡村 勉，大島 正明；新しい物理電池ECSと太陽電池による独立型電力貯蔵システムの研究，信学技報 vol.96，No. 32，pp.17～24，1996年。
- (5) 佐々木 正和，野津 育朗，荒木 修一，山田 良昭，菅野 裕之；キャパシタ式CNGハイブリッド・バス・システムの開発，自動車技術会2000年春季学術講演会前刷集，2000年5月24日，日産ディーゼル工業(株)。
- (6) Press Information，Sept.28，2000年，本田技研工業(株)。

ECS 実験セット ECS スターターセットのお知らせ  
問い合わせ先

(株)パワーシステム 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  
☎ 045 786-4990 FAX :(045)786-4991  
e-mail : st3@powersystems.co.jp  
ホームページ : http://www.powersystems.co.jp/  
価格 53,550円(消費税，国内郵送料込み)

