

# 電気二重層キャパシタによる新蓄電システムECS

～ 何が求められどう応えるか ～

株式会社 岡村研究所 代表

岡村 廸夫

## 1. まえがき

2001年は「電気二重層キャパシタと電子回路を組み合わせた新蓄電システムECS」にとって画期的な年であった。10月ベルリンのEVS-18, 12月フロリダの第11回電気二重層キャパシタセミナーでの講演は予想以上の反応で、ECSは日本国内だけでなく世界でも充分通用するという感触を得た<sup>[1-3]</sup>。



だが世界で発表すれば競争を生み、追い越されるリスクは増大する。それでも、後述する危機的状況を放置してはキャパシタは伸びない。たとえリスクが増しても隠れている時期ではないと判断した。

正確にいうと、今回がECSの世界初登場ではない。筆者による英文論文が既に数点あり1996年大阪でのEVS-13では満員の会場で、欠席した次講演者の分まで与えられ2倍の講演をした。この時も会場の雰囲気や名刺交換の列から大成功と思ったが、実は世界のごく一部がECSに好奇心を示したに過ぎなかった。米国DOEが撤退宣言<sup>[4]</sup>した炭素系電気二重層キャパシタを、何の実績もないECS程度の方法で高エネルギー密度化できるとは信じきれなかったようだ。

論文は宣伝文ではないはずだ。しかし学会に公表された論文で欠点や課題をさらけ出したものは、欧米の率直な文献にさえ多くはない。論文やカタログを読む限りでは電池は安全で長寿命な理想の蓄電装置に見え、

キャパシタに変えようという動機は見当たらない。

景気をあおったりせず冷厳に見れば、いま世界の従来型の電気二重層キャパシタは消滅前夜の状況にある。日欧米の大部分の自動車会社はハイブリッド車には二次電池ばかりを考えている。EVS-18の論文の数で電池とキャパシタの比は288論文中84対11, その中にECSはただ一つに過ぎない。これは世間の認識、研究や技術投資の比率も意味するであろう。

欧米の電気二重層キャパシタには毒性や引火性の強いアセトニトリルが用いられている点、キャパシタ蓄電量の利用率や周辺回路のエネルギー密度への重大な影響などをなぜ問題にしないか。これを欧米の自動車会社に質問したところ、そんなことをして足を引っ張ったらキャパシタは消えるぞ、という答えが返ってきた。

欧米の著名なキャパシタ研究者の発表が、二次電池と並列にしてその効率を何パーセントか向上したとか、ISG (Integrated Starter Generator)で42V電池と併用すれば新たな市場だなどと、限られた隙間市場に辛うじて活路を求めようとしているのは悲しい。

そんな練言ではなく、キャパシタ蓄電装置のエネルギー密度を増やそう。現在の世界レベルから、もう一歩高めさえすればすぐにでも実用になるフィールドが待っている。その水準にキャパシタ蓄電システムECSはすでに到達した。



フロリダの会場に響いた盛大すぎる拍手は、小生らの講演やECS各社の成果に対してではなく、キャパシタの可能性が実証され、彼ら自身の将来が開けたことに対する喜びの表現であったと思われる。

## 2. キャパシタは何にどう使われるか

キャパシタ蓄電装置の主要な用途は車両と電力の2分野に大別される。それ以外の用途は単独では前の二つに比べて小さいが、キャパシタ蓄電が本格的に利用可能になって初めて存在価値を發揮するような、新たな応用が現れる可能性もある。

### 2.1 車両分野への応用

車両用としては商用、乗用のハイブリッド車、燃料電池車、それに電車への応用が主である。規模は必ずしも大きい必要はないが、キャパシタの普及初期の価格を左右するのは生産量なので、価格を下げ普及を促進するには大規模用途の実用化が効果大きい。

### Energy Capacitor System - ECS

- エネルギー密度がなぜそれほど重要か？
- キャパシタのエネルギー密度は増せるか？
- ECSのキャパシタはどこが違うか？
- ECSではキャパシタをどう実用するか？



Florida 2001 Okamura Lab.

3

#### 1) ハイブリッド電気自動車

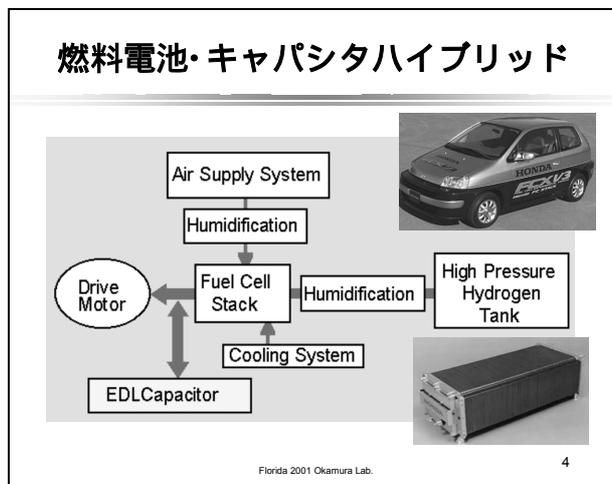
キャパシタは大きな電力を、急速に何回も出し入れする使い方でも有利で、そこが二次電池と大きく異なる。充電しただけでほとんど使わない非常用電源や、1日1回だけ放電するような電池式純電気自動車では、キャパシタの特徴が發揮しにくい。

二次電池を用いたハイブリッド電気自動車では、電池を壊してしまっただけではシステムが成り立たない。そのため電池の寿命の維持が最優先で、充放電、特に大電力の回生制動時に生じる充電をできるだけ絞ったシステムとなる。現在では電池式ハイブリッド車の設計から、米国DOEの提唱していたPNGV（2002年1月9日に中止を発表）蓄電デバイスの目標仕様まで、すべて上述した二次電池の特性を前提としている。

#### 2) キャパシタを用いる効果

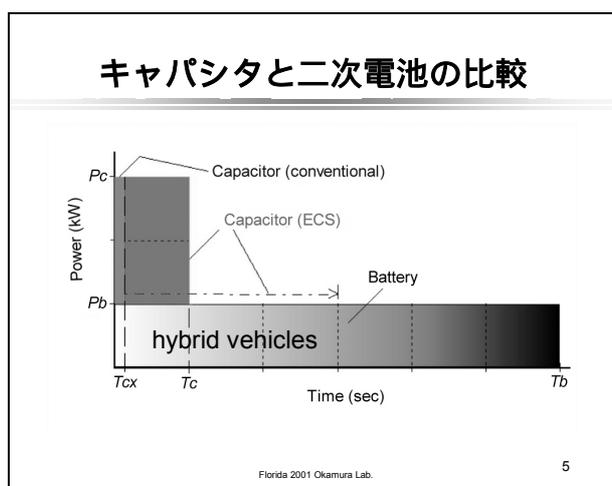
したがって、単に電池の代わりに電気二重層キャバ

シタを持ってきても特徴は出ない。もっとハイブリッドの配分を大きくした、大電力で繰り返し充放電してキャパシタの長所が發揮できる、本来のハイブリッドの効果強調したシステムを作る必要がある。



ホンダの燃料電池車FCXV3/V4の快走が伝えられると共に、燃料電池車にはキャパシタが向いているようだ、という風評が立った。実は燃料電池車に限らず、「パワーを蓄電装置から出し入れするには、キャパシタが適している」のである。燃料電池車は蓄電装置とのシリーズハイブリッドなので、非力で非効率な蓄電装置ではごまかしが利かないから目立っただけだ。

それならECS以前に皆がキャパシタに殺到しなかったか。それは従来のキャパシタシステムはエネルギー密度があまりにも小さかったからである。DOEの計画値でさえキャパシタによる全加速時間を3~4秒間としている。この程度ならスライド5に示したように、二次電池ではごく浅いパルス放電に相当するので寿命に影響が小さい。



これに対してECSでは約6（Lタイプ）~20（Bタイプ）倍の実効エネルギー密度が得られるから、二次電池でも同じ動作をするには放電深度が深くなり寿命

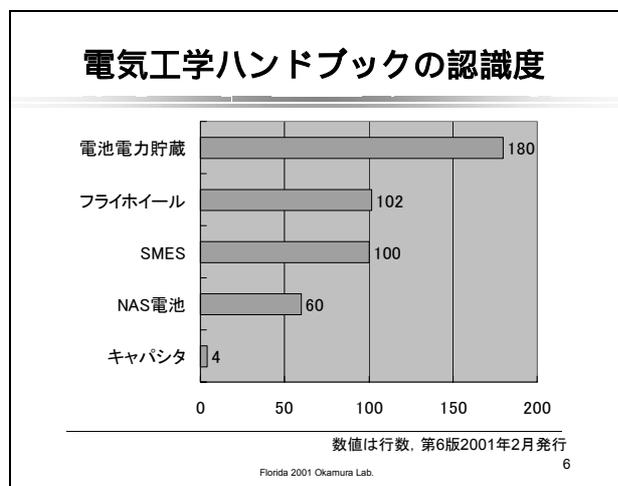
への影響を生じ、入出力電力密度の大幅な違いと共にキャパシタの有利さが明瞭となってくる。

## 2. 2 電力分野への応用

電力の分野では無停電電源、コジェネ電力の高品質化、系統の安定化、そして電力貯蔵システムなどが有望な用途だが、キャパシタにとって難関でもある。

### 1) 強電の人達に理解を

電力分野では人数では圧倒的に強電の専門家が多い。そのためか、蓄電は電気屋ではなく電池屋の仕事だと見なして除外する傾向があり、揚水発電所にフライホイールやSMESなどに比べ、電気二重層キャパシタの認識は低い。



そう断ずる根拠は昨春発行の新版電気工学ハンドブック<sup>[5]</sup>にさえ、ほかの蓄電装置に1ページ以上を充てているのに電気二重層キャパシタは3行半しか記載されていないからである。蓄電という分野、つまり電池やキャパシタは化け学の仕事だと考えているはECSには通用しない。ECSはパワエレの塊という現実を直視すべき段階にきている。

### 2) 無停電電源とその発展

出力密度が電池に比べて画期的に大きなキャパシタにとって、有利なのは、大電力を短時間に繰り返し充放電する用途である。

この性質は非常用発電機と併用するような、高級な大型無停電電源UPSに適している。大型用途では保持時間（停電補償時間）は30秒～1分間もあればよい。用途によっては1秒でも充分役立つ<sup>[6]</sup>という。キャパシタなら5分か10分ごとにずっと繰り返し停電しても平気だと威張ったところ、そんなに停電したらこっちがたまりませんと電力会社に反論された。残念なことに、UPSへの応用ではそう頻繁には停電してくれそうにない。

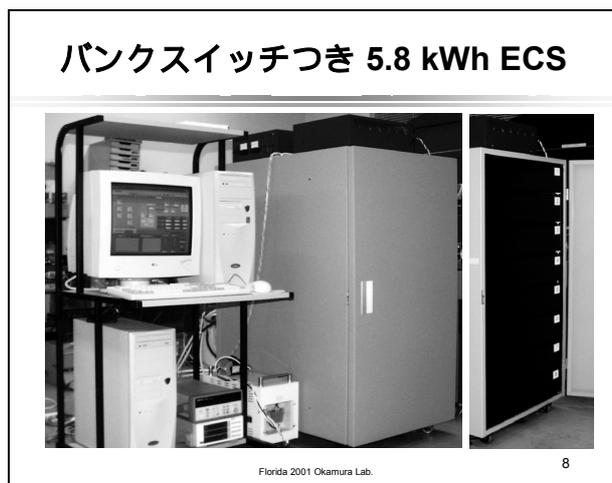
しかし、長寿命のキャパシタは寝かせておかずに使うほど得だから、キャパシタ無停電電源は停電以外のときは単に待機するだけでなく、その価値を發揮させることも可能である。



風力発電など発電や負荷電力に急激な変動のある系統の安定化、コジェネと系統連携点での電力授受の制御による系統からの受電電力を低減する手法、系統の事故時の不安定性から大きな停電へ発展することを防ぐ安定性増加手法、キャパシタ蓄電残量が正確に予測できることを利用した停電回避システムなど、キャパシタ蓄電装置であって初めて、あるいは有利に実用化できる手法がすでに提案されている。

### 3) 蓄電と発電と新エネルギー

キャパシタ蓄電も1分間ばかりではない、長時間の充放電の実例もいくつかあがっているが、文献<sup>[7]</sup>に委ねて、ここでは別の角度から見ることにしよう。いふならば「蓄電は新エネルギー」論<sup>[8,9]</sup>である。



太陽電池や風力発電などはエネルギーを作り出すから新エネルギーと総称され、補助金を出して支援している。しかし、これらは必要ときに発電できるとは限らない。風が吹いても夜なら電気は余って、最大負

荷時の昼間午後1時には曇っているかも知れない。必要なときに必要なエネルギーを供給できないと、自然エネルギー発電は規模が増すほど車の走らない道路や人の集まらない公共建築物みたいになってしまう。

それを解決するのは、充放電効率が高く、長寿命で環境負荷の小さな蓄電装置である。無駄なときに発電しても発電なら新エネルギーだというのは考えが浅い。それを蓄えて使いたいときに使えるようにするのこそ新エネルギー、いやエネルギー供給全体の最重要な鍵である事実は何故気がつかないか。

## 2. 3 その他の応用分野

自動車や変電所はほぼ大会社の仕事に限られる。しかし、蓄電という用途はそれだけに限らない。何でも手がけて自分で作ってしまうことを勧めてきた筆者が、キャパシタ・プロジェクトに限っては、巨大産業重視の姿勢をとってきたのには理由があった。

それはキャパシタの大量生産が必要だからである。ECSは研究の成果としてなら当初の見込みを十分に達成した。論文で完成ならもう大団円である。

まだECSは工業製品として一般に使われていない。それは高価だからだが、大量生産をしなくてはいくら研究してもキャパシタの値段は下がらない。月産数万個程度の生産規模でその100倍も作っている電池と競争できるだろうか。第一段階としてせめて1 Whの単セル換算で月産10万個～100万個の工場がフル操業できる状態にして、はじめて数100円/Whという価格の可能性が出てくる。



市場の小さなコードレス機器や工具、標識、照明、防犯、玩具その他でも、応用の可能性は充分にある。しかし、キャパシタ蓄電にはじめから取り組むなら、単セルの価格が高くて引き合う分野から手がけるのが得策であろう。

100F程度の小さな、いやコインセルから見れば巨大な電気二重層キャパシタが市販されたころ、価格の

目標としてファラッドあたり10円が達成できれば市場が開けるといわれた。これなら100Fで¥1000、後出の実験セットに用いている470Fでは¥4700となり達成可能な値である。だが、この価格は電池と競争する蓄電キャパシタではなくコンデンサとしての価格であろう。10円/Fでは貯蔵エネルギー当りで計算すると、耐電圧2.7Vとすれば1万円/Whに相当する。

すでにメモリーバックアップ用のコインセルでは、電池と競合して電気二重層キャパシタは立派に市場を支配した。この分野では¥10/Fより遥かに高い価格で先達各社は工業化に成功している。

コインセルとハイブリッド車の中間くらいのスケールで、¥10/Fくらいのキャパシタ価格で採算の取れる用途は、ありそうなものだ。この分野ではキャパシタの特徴の出せる応用が先で、小エネルギー長時間用途は、電池に比べて寿命で勝負となるであろう。

## 3. キャパシタの何が有利で何が不足か

現在の世間の常識は、電池の知識にひどく囚われている。それを捨てさせ、本来の定義に基づいてものを考えることがECSの第一の、そして主要な作業であった。この作業は新たにECSを理解しようとする人にとっては今も続いている。

### 3. 1 エネルギー密度と出力密度

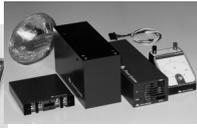
「二次電池とキャパシタの出力密度の違いは誤解されている。このこと私は屋根に上がって叫びたい…」EVS-18でDr. Burke (DOEの旧キャパシタプロジェクトのリーダー) はこう表現した。二次電池の特性は実際には使えない数値が一人歩きしている。論文のとおりなら壊れるはずのない電池が、次々に劣化し交換されている事実は既に周知とってよかろう。

### 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





10

Florida 2001 Okamura Lab.

これはキャパシタについても当てはまる。上げ底の数値を発表しそれが習慣とならないよう、測定方法や定義を明確にしよう。ユーザー側もこうした点をメー

カーに問い合わせ追求することが必要で、自分だけに都合のよい特性の表現や、根拠のない数値を扱った比較表の類が追放されれば双方の利益となる。

### 1) 静電容量密度とエネルギー密度

まず静電容量密度がエネルギー密度や出力密度の基本となる。論文等でしばしば用いられる表現は、

(a)重量当り静電容量密度 farad/gram (F/g)

(b)体積当り静電容量密度 farad/mili-liter (F/ml)

研究論文では (b)は電極の作り方による要素を含むため(a)が多用される。だが、キャパシタの性能は(b)で決まるから最終的には(b)を大きくする必要がある。静電容量密度の表現には

(c)単極容量密度

(d)端子間容量密度

の二種類がある。通常の電気二重層キャパシタでは正負極に同じ電極を使うので、等しいキャパシタが正負極に発生し、端子間ではこれらの二つの静電容量が直列になっている。

その結果、端子間容量密度(d)は電極が2個分で、静電容量は直列だから1/2となるため、単極容量(c)の約1/4の値となる。

## 静電容量密度とエネルギー密度

- 重量当り静電容量密度 farad/gram (F/g)
- 体積当り静電容量密度 farad/mili-liter (F/ml)
  
- 単極容量密度
- 端子間容量密度

$$U = CV^2/2 \dots\dots\dots (1)$$

Florida 2001 Okamura Lab.

11

研究上はしばしば単極で性能の優劣を問題にするため(c)を使う意味はあるが、論文や特許では(c)(d)どちらなのか、数値だけでは判断がつかない。黙って使うのは意図的にだまそうとしていると疑うこともできる。

静電容量密度をエネルギー密度に換算するには耐電圧が二乗で利く。水系電解液や擬似容量タイプのキャパシタでは、有機系電解液による電気二重層キャパシタに比べて静電容量密度だけなら何倍も大きいものがある。しかし、静電容量C(farad)で耐電圧V(volt)のキャパシタが蓄電できるエネルギーU(joule)は、

$$U = CV^2/2 \dots\dots\dots (1)$$

つまり耐電圧の二乗に比例する。

たとえば水系で静電容量密度が有機系の3倍でも、

有機系の耐電圧が3倍あるから、エネルギー密度では有機系が水系の3倍ほどのエネルギー密度となる。この考え方は耐電圧の異なる擬似容量タイプのキャパシタにも適用できる。

ときどき(1)をクーロンやアンペアアワーAhで、

$$Q = CV \dots\dots\dots (2)$$

計算する人がいる。電池では電圧を一定としてこういう計算をしたようだが、キャパシタでは推奨できない。

### 2) 対象は何か

出力密度やエネルギー密度を論じるには、その数値が何を対象にしているかが肝心である。たとえば、

(a)電極だけ……単電極法

(b)電極だけ……端子間、両電極を含む

(c)単セル

(d)モジュール

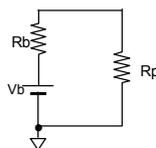
この中で(a)と(b)が4倍違うと上に述べたが、(b)～(d)の間もそれぞれ1.2～2.0倍程度の差が、作り方によって生じる<sup>[10]</sup>。

### 3) 出力密度の算定法

上の(1)式とキャパシタの重量や体積がわかれば計算できるエネルギー密度に比べて、出力密度の算定は厄介である。そのため一層さまざまな表現や数値が流通している。

ECSでも最近まで、二次電池の規格にならって50%DOD(放電深度)での出力密度で表現<sup>[10]</sup>していた。しかし世界に流通しているデータを見ると、満充電における最大出力密度(matched impedance power density)で表しているものが圧倒的に多い。満充電でも半充電でも最大出力密度値は実際に利用できる電力より遥かに大きな、架空の理論上の値である。同じ理論値ならキャパシタの場合、別に半分の充電状態で議論する必要もないので、満充電時の最大出力密度を使うよう改定する。

## 最大出力密度の考え方, 求め方



$$Pp = Vb^2/(4Rb) \dots\dots\dots (4)$$

$$kW = Wh * 1.8/\Omega F \dots\dots\dots (8)$$

Florida 2001 Okamura Lab.

12

図において電源の充電電圧 $V_b$ 、負荷抵抗 $R_p$ に発生する電圧 $V_p$ 、そのときの電流 $I_p$ とすると、負荷に得られる電力 $P_p$ は、

$$P_p = V_p \cdot I_p = V_b^2 \cdot R_p / (R_b + R_p)^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

(3)式で $R_p$ を変数とすると、 $R_p = R_b$ のとき $P_p$ は最大となる。この状態を、電池の内部抵抗と負荷の抵抗値が等しくなったという意味で **matched impedance** 状態などと呼ぶ。このときの $P_p$ の値は、

$$P_p = V_b^2 / (4R_b) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$P_p$ を電池またはキャパシタの体積、あるいは重量で割れば、最大出力密度が得られる。

最大出力密度はキャパシタも電池も同じ方法で、満充電電圧 $V_b$ と内部抵抗 $R_b$  ( $\Omega F$ でなく実抵抗)さえわかれば算出できる。ただし容量は問わないから、この出力は瞬間値で、何秒間続くか関知しない。しかも、この条件下では負荷への電力と同量の発熱が電池の内部で生じ、長く動作させることができない状態ではない。これが架空の理論値と呼んだ理由である。

#### 4) 出力密度をエネルギー密度と $\Omega F$ から求める

エネルギー密度と $\Omega F$ が与えられていれば、その数値から出力密度を容易に算出できる。もちろん逆も可能だから実用上便利なので、いささか蛇足だが導出の方法を述べる。

単位は $kg$ 当たりでも $L$ 当たりでも各変数に共通ならばよい。変数はキャパシタの最大出力密度を $W$ 、エネルギー密度を $Wh$ 、静電容量 $C$ 、内部抵抗の $\Omega F$ 値を $\Omega F$ 、内部抵抗の絶対値を $R$ 、耐電圧を $V$ で表す。対象をたとえば $1kg$ のキャパシタとすると、

$$\text{キャパシタの最大出力密度 } W = V^2 / (4R) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{内部抵抗} R \text{は} \Omega F \text{の定義から } R = \Omega F / C \quad \dots\dots\dots(6)$$

エネルギー密度と静電容量の関係は

$$C = Wh * 3600 * 2 / V^2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

(5)(6)から  $W = V^2 / (4\Omega F / C)$ 、 $C$ を(7)で置き換えると

$$W = Wh * 1800 / \Omega F \quad \dots\dots\dots(8)$$

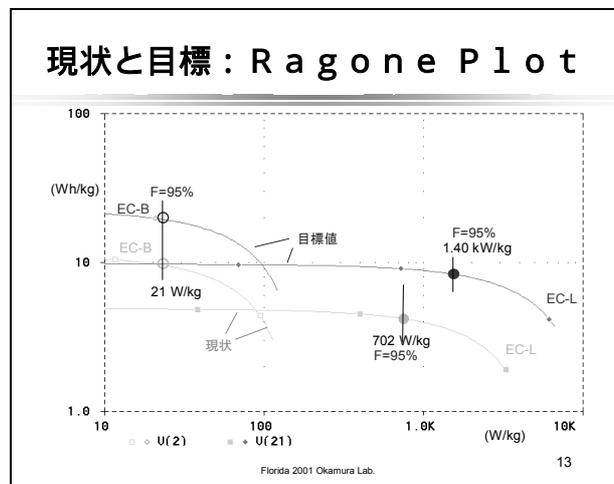
(8)により、同一重量あるいは体積のキャパシタに対して出力密度  $kW = 1.8 Wh / \Omega F$  という簡単な関係で、エネルギー密度と $\Omega F$ との間で、相互に換算が可能となる。

#### 4) ラゴーンプロット

キャパシタも二次電池も程度の差こそあれ、大出力で使えば、取り出せる総電力量は小出力の場合より小さくなる。その関係を表すには、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のようにプロットする**Ragone Plot**が有用である。

単位は重量当りで対数目盛りで表示され、**Ragone**によって提案された当初は縦軸が出力密度だったが、

目盛りの範囲が出力密度の側が広く、「エネルギー密度がいくらのもので、出力が変化するとどうなる」という見方をされる場合が多いので、図のようにエネルギー密度を縦軸に用いるのが実用的である。



**Ragone Plot**を描くには実測することが前提だが、これは設備や実測技術の点で、特にキャパシタでは厄介である。

縦軸は公称容量ではなく定電力放電した際の電力量だから、左端の低負荷側でも1/2電圧まで放電なら実容量の75%、1/4電圧まで放電しても94%となる。大負荷側では定電力制御で2.5V単セルなら0.6Vといった電圧レベルまで安定に放電する大電力の電子負荷装置は意外に少ない。

大出力大容量を唱えるキャパシタの内部抵抗は $1m\Omega$ 程度だから、精度を10%以内に保つにさえ配線抵抗の等価的な効果を $0.1m\Omega$ 以内に収めなくてはならないから実測技術も課題となる。

学問的な研究は別として、実用上は後述するように大電流時の内部抵抗を正確に測定し、その値を使って電子回路シミュレータSPICEでプロットさせると、十分に正確なデータが得られる。

それよりも留意すべきは、**Ragone**プロットのどの辺で実際にキャパシタを動作させるかにある。最近の各種文献、カタログの類によく**Ragone**プロットの掲載してあるものが増えた。特性が明瞭になって喜ばしいのだが、肝心のプロットが最大出力密度を越えて更にその先まで続いているのを内外の文献で見かける。これはいったい何に使うのか伺っておきたい。

ECSでは充放電効率の点から、効率が約95%になる点を推奨最短放電時間として、EC-Lタイプで1分間、EC-Aタイプでは10分間といった目安を提供してきた。**Ragone**プロットにも図に記したように、充放電効率の概数を目盛ると、どの辺の出力密度で使うとどの程度の効率になるかが明瞭となる。

EVS-18のベルリン会場で質問があった。「キャパ

シタハイブリッドバスが550W/kgばかりならNiMH電池でも出せる、発熱しても空冷してケースの外から見れば効率も高い…」国際会議でさえこんなことを言う人がいるので、答えておこう。

電池を550W/kgで運転すればキャパシタより最大出力密度に近い、効率の低い状態となり顕著に発熱する。それを強制空冷しても失ったエネルギーは戻らず、ファンの損失分が増すだけである。

### 3. 2 高出力でのエネルギー量

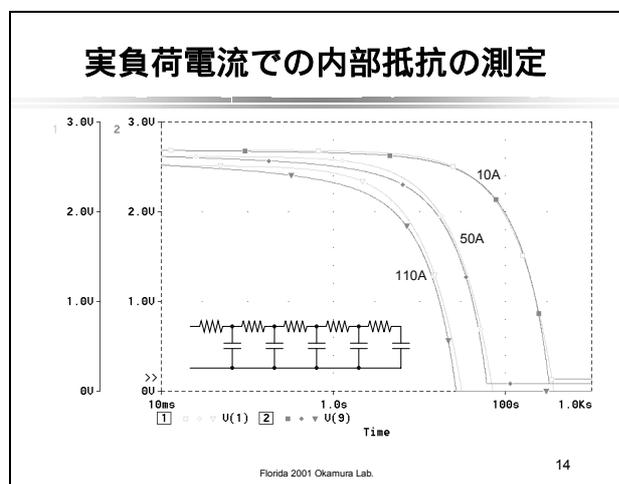
電池の公称エネルギー密度は低出力でしかも新品のときの値で、キャパシタも程度の差こそあれ新品のときの値に変わりはない。実際に高出力時にどれだけのエネルギーが使えるか、それは設計寿命の末期にどうあるべきか。これらを正確に評価し、判断しよう。

#### 1) 内部抵抗の定義と測定

キャパシタにかぎらず二次電池にもその内部抵抗をインピーダンスブリッジの類を用いて100 Hz~1 kHzで測定する慣習が、日本ばかりか欧米にも残っている。こうした方法ではキャパシタの小信号特性が測れるが、蓄電装置として必要な大電流時の特性とは無関係で、係数を乗じるといった手法で換算することも不可能な測定値が得られてしまう。

また、放電電流によってエネルギー密度も変化する。キャパシタは二次電池に比べて特性の負荷電流による変化は小さいが、それでも低負荷時の値をそのまま大負荷の設計に適用したら無視できない誤差を生じる。

変動する特性をどこで測り、どう表示するか。電気二重層キャパシタの場合は最大推奨負荷のような状態を定め、その辺電流で測定しておくのが実用的である。測定法はインピーダンスをブリッジで測るのではなく、実負荷を接続して実際に使われる時間にわたって電流を流し、その際の電圧降下から抵抗を算出し、出力できた電気量の積分値から静電容量を算出する。



#### 2) 電流による特性の変化

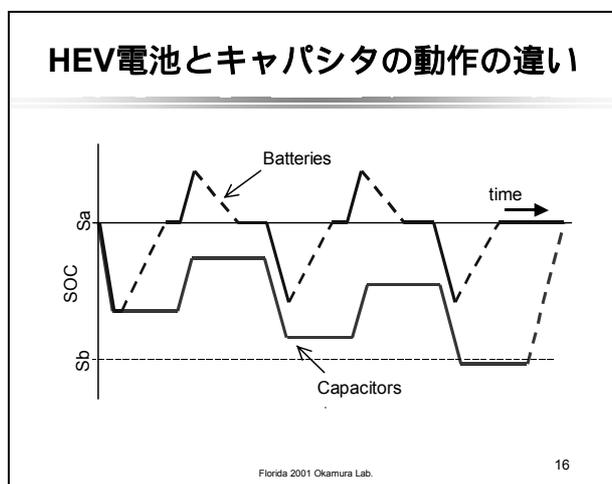
一般に電気二重層キャパシタでは放電電流を増すと、内部抵抗が減少し、利用できる電気量つまり等価的な静電容量も小さくなる。それは図の等価回路で考えるとわかりやすい。



放電、あるいは充電電流を増すということは翻訳すると充放電時間が短くなることに他ならない。充放電時間が短ければ、図のRC配列で、その時間に間に合うのは前のほうの一部となる。そのためにCは減少し、Rの平均値も小さくなる。

電流によりRCが変化する割合はキャパシタの作り方によって異なり一定ではない。しかし定性的には、電流を増せば必ず等価な端子間のRもCも小さくなるといえる。

この前提があるので、定格最大電流付近で電気二重層キャパシタの静電容量と内部抵抗を測定し、これを用いてRagone Plotを描けば、あまり実態とはなれないものが得られる。ただしグラフの左端、出力のもっとも小さい付近では静電容量が増加して、グラフのプロットはその分小さいほうに狂っている可能性はあるが、実害にはならない。



### 3) 設計寿命と性能

ECSの登場に際して、もう一つ議論があったのは終末特性(life criteria)である。10～20年といった所定の期間を経過して、もうこれで寿命というときの特性をどう設定するか。これがキャパシタの価値を大きく左右する。

ECSが世に出た1992～5年当時の電気二重層キャパシタの仕様では静電容量50%、内部抵抗200%が一つの基準となっていた。

しかし、電気自動車を一度設計してみればすぐわかるが、上の値は電子回路用コンデンサのためのもののようで、蓄電装置としては実用的でない。最近の欧米のメーカーのカタログではCは80%以上、Rは200%以内となっているが、まだ充分ではない。ECSでは暫定的なサンプル品は別として大量生産品ではCは85%以上、Rは150%以下を目指し、もうひとつ自己放電率も基準に加えようとデータの収集中である。

### 3.3 寿命と安全性

キャパシタは長寿命だというのが20年の寿命を20年待たずにどうやって保証するか。キャパシタは電池より遥かに安全だというのが確かか。欧米ではアセトニトリルが使われているが、安全性と電解液に用いる溶媒の関係はどうなっているか。



#### 1) 寿命の測定方法

寿命を判断する終末特性は前項で述べたように定めていけばよいが、問題は寿命がわかるまでに20年待つかという点にある。加速試験の方法として温度を30℃あたりから10℃上げるごとに2倍とするアレニウスの定率をもじった方法が便法として用いられているが、これでよいか。また同じ法則をセルのシールや弁機構などの寿命にも適用できるかが疑問である。

だが、今回欧米の専門家と意見を交換した範囲ではこの他に名案はないようだ。質疑の出たECSキャパシタの寿命データも時間軸をアレニウスで18年間に

換算したと説明したところ、世界の専門家の集まった会場で簡単に認められた。

現状ではこれを、やむをえない実的手法といえるべきなのであろう。生産量がまし、実績が増大するつれてより長い、外挿の比率の少ないデータが蓄積されていくことを期待するでしょう。

### 2) 安全性と電解液

電解液にプロピレンカーボネートPCを溶剤として用いたECSキャパシタは、二次電池に用いられるのと同様な各種テストを危なげなく通過した。しかし、欧米の各社はいずれも溶剤にアセトニトリルANを使用している。

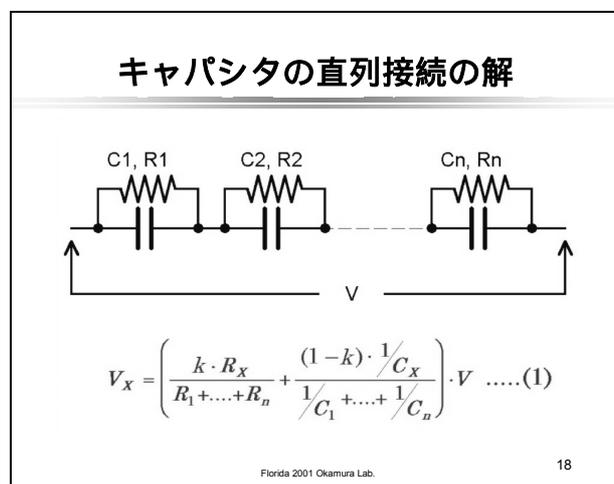
私どもの研究ではPCに代えてANで電極を最適化すれば、内部抵抗を同一にした場合エネルギー密度で約2倍、エネルギー密度を同等にした場合内部抵抗は1/3ほどに改善できることがわかっている。しかも低温特性が圧倒的に、それこそ10倍も優れている。

それほど優秀な溶剤を日本のキャパシタメーカーは一社も使わないのは、可燃性と毒性が問題だからである。キャパシタの論文を出すだけならANでよいが、量産してお客さんに使っていただくとなると、安心して推奨できない。

この問題はまだこの先、議論や進展があると予想される。

### 4. 理解されにくい技術的な課題

電子回路と組み合わせて実効的なエネルギー密度を高めるという手法は1996年にEVS-13で詳細に述べている。だが欧米に行って見てまだ世界はよく分かっていないと痛感した。専門メーカーの中には公表していない部分でコツコツやっている兆しはある。しかし、少なくとも学会、業界の流れは以下に挙げるようなECSで以前から指摘している技術的課題に手が回っていない。



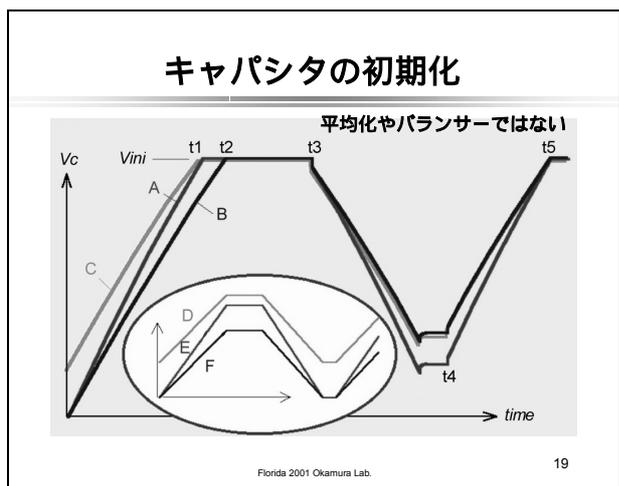
### 4. 1 キャパシタの直列接続

キャパシタは特性さえそろえれば、直列にしても使えるはずだと思込んでいる人が、世界にはとても多い。つまり、未だにそう思込んでいる人は、世界的な技術水準に達していると思なせる。

#### 1) 実験の方法

新しい、あるいは完全に放電したキャパシタを数個直列にして満充電として充電器をはずし、その後合計電圧が自己放電によって半分~1/3くらいに低下するまで放置する。キャパシタのできによるが何ヶ月かの後、各セルの電圧を正確に測定すると、何が問題かが明瞭となる。

つまりキャパシタの直列と電圧配分の問題は数日程度の実験では意味をなさない。自己放電の少ないキャパシタほど時間がかかりるので、短期間の実験だけで、結果がよかったから大丈夫といって、幸運を販売することはできない。電圧配分のばらつきは解析的手法がスライド16のように完成<sup>[11]</sup>しているから、これを用いて理論的な裏付けを持つべきである。

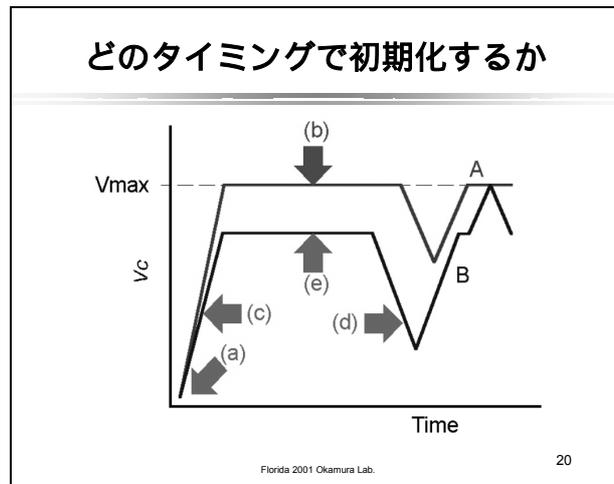


#### 2) 初期化と平均化の違い

ドイツとアメリカの会合で初期化 (initialization) は equalization や ballancingとは違うと説明したところ、そこだけはよくわかったという人が多かった。そこだけでなく次の充放電効率の件もわかってもらう必要があるのだが、初期化では図のようにキャパシタが充放電をはじめの基準電圧を一定にそろえるだけなのに対し、均等化や平均化では充放電の最中にも電圧の不均等を除こうと動作するので、効率を損なうか効果が小さいかのどちらかになりやすい。

初期化をするには、必ず満充電で行はなければならないと考えやすい。しかし、この原理はキャパシタの電圧を一定の条件で一定の値になるよう設定すればよいのだから、満充電での値を揃えるには下のほうで加減して、満充電で合うように調節することもできる。そう考えると、その調節を行う場所は図のように充放

電プロセスのどの部分で行ってもよい。一度に完全に揃えなくても、何サイクルも繰り返すうちに次第に揃っていく制御法も実用化されている。



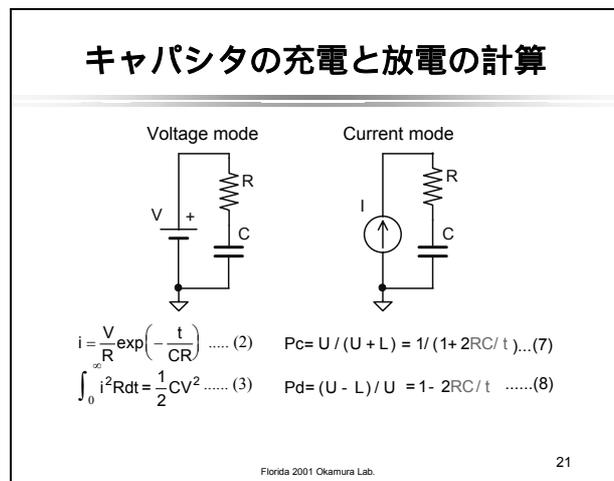
### 4. 2 出力密度と内部抵抗の関係

抵抗を大きくしたのに効率が上がり、5 kW/kgも出力密度があるのに500 W/kgで運転する。これは並列モナより遥かにわかりにくいようだ。

#### 1) 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立派な先生方はほとんどがこの点を指摘される。いうなれば、この点をスパ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。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、日常お目にかかる電源のほとんどは電圧源であるから、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。



#### 2) 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

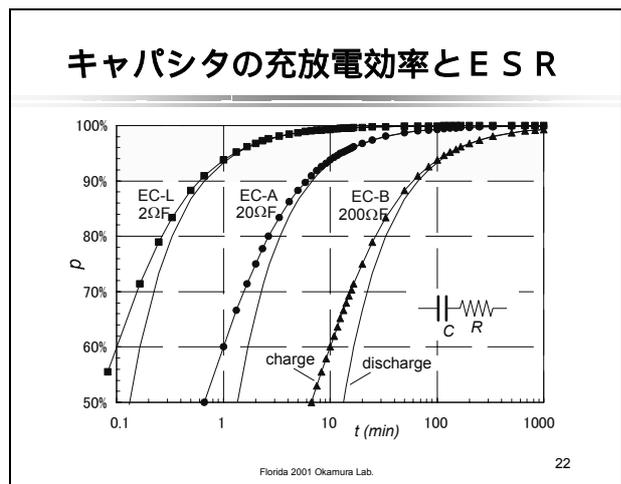
も必ずしも損失は増えない」……という。この表現はよほど消化しにくいらしい。欧米の一流の研究者の中にも、それでも地球は回っている、みたいに「そこに抵抗があれば絶対にロスが生じるはずだ」と未だに疑念を呈する人がいる。そこに充放電効率を示す次式、

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

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

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。そういう感情的な奴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。



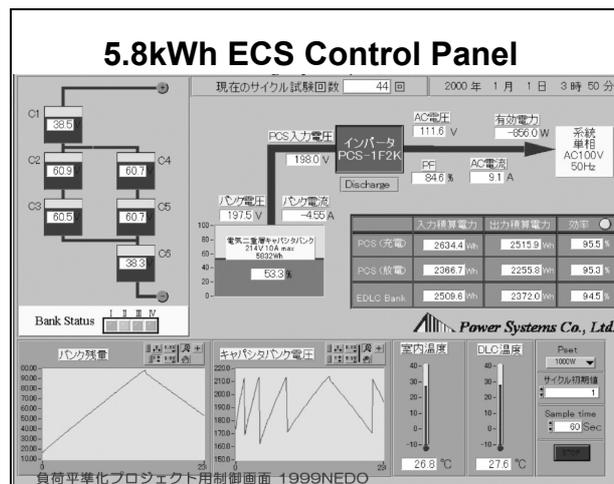
2) 出力密度5kW/kgを500W/kgで使う理由

むしろ、なぜそうしないかを、電池やキャパシタを強制冷却で使う流派に質問すべきであろう。前出の表1に明らかなように、95%の充放電効率を望むならば、最大出力密度の1割ほどで使うべきと計算されてしまう。

二次電池の場合、そのような出力密度で運転するように電池を積載すると重量が増え、エネルギー密度ばかりがいたずらに大きくなる。積載量を減らせば効率が下がり化学反応に伴う発熱まで加わるから、強制冷却が欠かせなくなった。

内部抵抗の低いいわゆるDOEタイプのキャパシタを強制冷却がないと触れないほど熱くなる使い方は、キャパシタの積載量がよほど少ないか、エネルギー密度が小さいからであろう。そういう設計も充放電効率

が低いのは覚悟の上で、加速時間数秒を狙えば有り得ないことではない。



4. 3 キャパシタは果して高価か

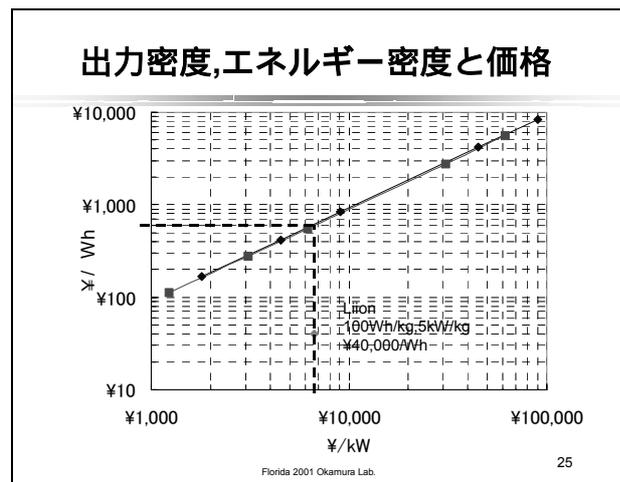
電気二重層キャパシタは本質的に、エネルギー密度が上がらない、自己放電率が大きい、価格が高いといった説が横行した。そのほとんどは誤りだが事実無根というわけではない。



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、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いってよからう。

最後に残った「値段が本質的に高い」という点はどうだろうか。白金族の材料を使う擬似容量はいくらでも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、クーロン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1000g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。

### 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

Florida 2001 Okamura Lab. 26

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、どう控えめに計算しても重量当りでLiイオン電池と同等、NiMH電池の2~3倍程度にはなる。

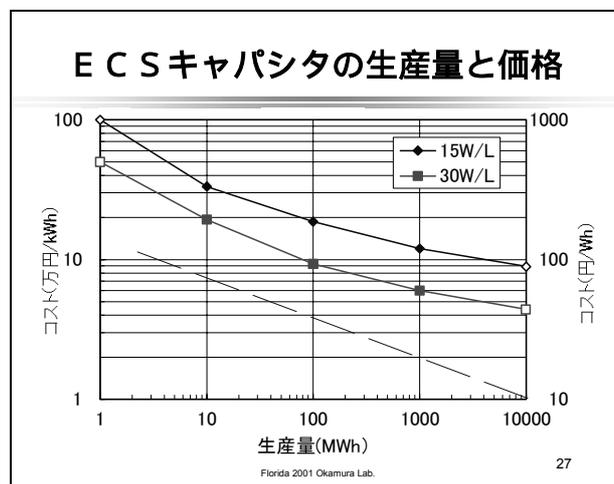
つまり出力密度当りで比較すれば、電気二重層キャパシタは明らかに電池より安価に量産できるはずだ。

#### 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……。

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

それでも現にキャパシタは高い。それは研究所が手作業で僅かずつ作っているか、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。

## キャパシタ蓄電の輝ける将来

- 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**

Florida 2001 Okamura Lab. 28

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: "A Progress Report of the Capacitor Hybrid System -ECS" EVS-18, 5D (2001)
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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.
- [5]電気学会, 電気工学ハンドブック, 第6版, 2001, 2月
- [6]スライド7の写真とも, 指月電機(株), 私信, 2002, 1月
- [7] 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。
- [8] 岡村勉夫: キャパシタ蓄電システムによる新エネルギー創成の提案, 北見工業大学地域共同研究センター研究成果報告書第8号(2001)
- [9] 岡村勉夫: キャパシタによる負荷平準化とパソコン内蔵型UPSの考察, 電子技術, vol.43,No11(2001-9)
- [10] 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)

[11] 近藤潤次, 私信, 2000.6.

上記に加えスライドに以下の資料を引用した

[12]佐々木正和, 他: キャパシタ式CNGハイブリッドバスシステムの開発, 日産ディーゼル工業(株),自動車技術会2000年春季学術講演会前刷集(2000-5-24)

[13] 野津育郎,他: キャパシタ式蓄電装置搭載中型ハイブリッドトラックの開発,日産ディーゼル工業(株),自動車技術会2000年秋季学術講演会前刷集(2000-10-19)

[14] 岡村勉夫: 実験セットで学ぶ新蓄電システムECS, トランジスタ技術, 2001年2月~5月号.

実験セット: (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

[15]新山信一郎, 他: 新型電力貯蔵装置ECSを用いたPV-ECSシステムの開発, 電気学会論文誌B, Vol.120-B, No.2, 2000.

[16]本田技研工業(株): 私信, Dec., 2001

— ■ —