

# キャパシタ・パルスパワーセッションの概況および E C S の現状

(株)岡村研究所 岡村 勉夫

〒232-0006 横浜市南区南太田 2-19-6

## まえがき

電気二重層キャパシタと電子回路を組み合わせた蓄電システム E C S (Energy Capacitor System) に関しては、日本では学会誌掲載の解説や 200 ページ余の書籍まで多数の文献があるが、英文のものは学会発表の 3 件<sup>[2-4]</sup>にすぎない。このため、あらかじめ座長と折衝して 30 分間に延長して、テキストと本講演の過半を「E C S の原理と考え方」の説明に充てた。その論文テキストを全訳して掲載するよりは日本語の書籍<sup>[1]</sup>を参照して頂くのが完全なので、ここではテキストの邦訳でなく実際の講演内容をまとめ、セッションの概要や反響を報告する。

## 1. 会場の状況と参加者

筆者の発表は 3 日目、24 日の早朝からのパルスパワーセッションだが 8 時の著者ミーティングで顔合わせと欠席者の連絡があった。日本からの不参加が多い、という声が出たので筆者が Here I am と立ち上ったほどキャンセルが目立っていた。この席では日本人は筆者 1 人であったようだ。

講演には立派な 4 ホールが使われた。筆者らのセッションは小さな方から 2 番目の No. 14.2 だが、500 人ほど入れる。最初の発表の米国 DOE のキャパシタプロジェクトでリーダーだった、この分野で最も著名な A.Burke さんの講演の直前 08:45 では 40 人程度でどうなるかと思っただが急に入場者が増え、中ほどでは倍以上になった。次の小生の講演に入る直前でようやく 120 人程度、これでもこの部屋では会期を通じて平均くらいであった。

## 2. 論文の内容と技術レベル

電気二重層キャパシタによる蓄電装置を「パルスパワー」というセッションで発表するという事態が、世界のキャパシタ蓄電に関する考え方と技術の水準を表している。1996 年に DOE が PNGV の計画のうち Burke さんがリーダーであったキャパシタ蓄電のプロジェクトを目標未達のまま中止して以来、世界のキャパシタ蓄電への熱意は徐々に衰えつつあると聞いていたが、それを実感した。

そこに私達は、電池を補強するのではなく、キャパシタだけでバスやトラック、燃料電池車のハイブリッドを作ったと発表したのだから特に欧州の自動車会社の注目を集めた。連日の個別ミーティングとなったため、筆者としては興味の深かったキャパシタのポスターセッションも、盛大だったはずのガラディナーも出席できなかった。各社の電気二重層キャパシタの応用例はほとんどが電池との併用でマーケットの拡大に悩んでいる。世界は広いという認識もあったが、技術の細部では鼻の差、首の差の程度ではない大差があり、キャパシタ技術では我々だけが反対向きに走っているのではないかと思うほどの危惧さえ覚えた。

### 3. いくつかの技術要素

著名な欧州の自動車会社のポスターセッションで、なぜ電池でハイブリッドを研究するのかと質問したところ、「全部キャパシタ？ そういうオールソリッドステートのがあれば素晴らしいと思うが現実を見る、電気が溜まらないよ」と答えた。それをいうならと、翌朝の小生の講演に引っ張り出すことに成功した。ISG(Integrated Starter Generator or Alternator)では二次電池の損耗が激しいので、この新規市場をリチウム電池や NiMH など新型電池に混じって、キャパシタで補強しようと日本、韓国、欧米の各社が試作品を並べていた。

欧州の数社共同で 2~3 両を連結した大型軽量化車体に 1 トン余りの電池を積んだハイブリッド・バスが完成寸前という報告があった。こういうものに日産ディーゼルのキャパシタハイブリッドバスのようなのを積むと、素晴らしい効果が出そうに見える。

ディーゼルといえば、欧州の主要空港たとえばフランクフルト、ベルリン、アムステルダムなどでは 1 両~2 両連結の瀟洒な大型ディーゼルバスが盛んに走っているが黒煙は見えず、成田や羽田のように車体や周囲が真っ黒になっていない。関係者に聞くと、技術の差ではなく政策の違いだというのが、そうとすれば舵の切り方を何とかならないものか。

### 4. 筆者による講演の要約

プログラム委員会からは講演時間は 20 分間とあらかじめメールがきていたが、時間に関しては座長と相談せよとあったので、筆者の場合は新しい原理から応用まで話すので 15 分間の講演では忙しいと頼んだところ、簡単に 30 分間を割り当ててくれた。ただでさえ英語でアドリブを言うと時間が遅れるので、この延長は非常に有り難く、約束した時間にピッタリ終わった。

前の講演で Burke 先生が「電池の公称出力密度とキャパシタの実力値を混同している人が実に多い、私はこの点を屋根に上がって叫びたいくらい……」と表現していたが、小生への質問は、そっくりそのままのが出た。要約すると「このキャパシタの出力密度は 5.5kW/kg だがというが、200kg 積んで 100kW の出力では 550W/kg 程度で、こればかりで使うなら電池と大差ないぞ」というのである。キャパシタは最大出力密度の 1/10 くらいの点で使えば効率 95%で強制冷却は不要だが、電池は寿命の点は忘れても効率が遥かに低く発熱が大きいから強制冷却が欠かせない、このことを先ほど Burke さんが強調したのではないかと厳しく答えた。

ところが質問者は引っ込まず「電池も冷却付で考えればケース外の温度は上がらない」とマイクの外で叫んでいた。座長は取り上げなかったが、小生はなるほどこんな風に考える人も居るのかと思い、一旦発熱した電池をいくら冷やしても効率は上がりはしないことを納得させたくて、講演後の名刺交換の行列にその人の姿を求めたが、見当たらなかった。

= 参考文献 和文および英文 =

- [1] 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)
- [2] M. Okamura, H. Hasuike, M. Yamagishi and S. Araki: "A Status Report on the Power Storage System of Capacitor-Electronics" Electrochemistry, Vol.69, No.6 (2001)
- [3] M. Okamura: "A Progress Report of the Capacitor Hybrid System -ECS" EVS-18, 5D (2001)
- [4] M. Okamura and H. Nakamura: "Energy Capacitor System - Part 1 and 2: Capacitors and their Control" The 11th international seminar on double layer capacitors and similar energy storage devices. Dec.3-5, 2001

## タイトル：ECS-キャパシタハイブリッドシステムの現況（講演内容記録）

電子回路と電気二重層キャパシタを組み合わせた蓄電システムを 1992 年に考えついで以来、その研究開発、実用化に多くの企業の参加を得て進めてきました。この EVS 世界電気自動車会議にも大阪で開かれた EVS-13 で発表したのですが、当時の来場者の多くは私が嘘か夢を語っていると解釈なさったようです。本日の講演では、その後の新しい展開と実物によって、きちんと動くという証拠を御覧いただきましょう。

これから、次の四つの質問に答えていきます。

1. ECS はどのようにして生れたか
2. どうすればキャパシタのエネルギー密度が増えるか
3. ECS キャパシタはどこが違うか
4. キャパシタは実際の自動車にどう使われるか

まず第一の質問に答えます。画面に映っている自動車は ECS の適用を示す日産ディーゼルとホンダ両社による実例です。これらの車輛はシミュレーションやモデルでなく実際に試作され、目標通りの性能で走っています。

ECS は電気二重層キャパシタに電子回路を組み合わせ、相互の設計を改良することによりシステム全体としての「実効エネルギー密度」を従来の 5 ～ 20 倍にする方法を採用しました。ハイブリッド車に使う出力に限定すれば、10 Wh/kg 相当を目指したのです。


因みにこの性能は電子回路とキャパシタを総合した値です。キャパシタによる蓄電というと皆さんは直ぐに、評価したいからキャパシタだけを売ってくれといわれますが、それではサンドイッチを評価しようとパンだけ食べてみるのと同じです。ECS を知りたいならキャパシタだけでなく、必ず全部を理解してください。

そこで第二の質問です。それなら、いったいどうすればキャパシタにそれほどのエネルギーが溜められるのでしょうか。そこには三つの鍵があります。

1. 全部のキャパシタを最大電圧まで充電する
2. 全部のキャパシタを最大の効率で

### Capacitor Hybrid System -ECS

- How was ECS born?
- How can capacitors increase energy density?
- How are ECS capacitors different?
- How are capacitors used in actual vehicles?




EVS-18 Okamura Lab. 1

### ECS Key Features

to get larger effective energy density

- Charge capacitors to max. voltage
- Charge/discharge at max. efficiency
- Design capacitors at optimum ESR



EVS-18 Okamura Lab. 2

充放電する

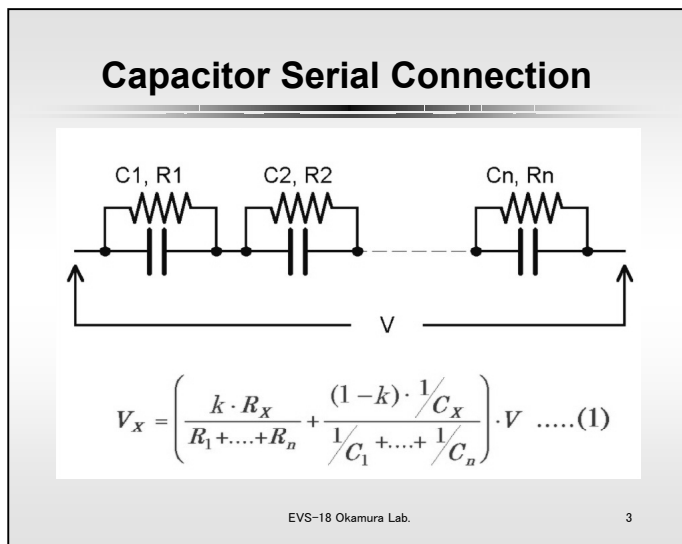
これら二つの鍵はすべて電子回路が受け持ちます。

3. 内部抵抗を最適化してキャパシタのエネルギー密度を最大にする

これはもちろんキャパシタの設計の問題です。

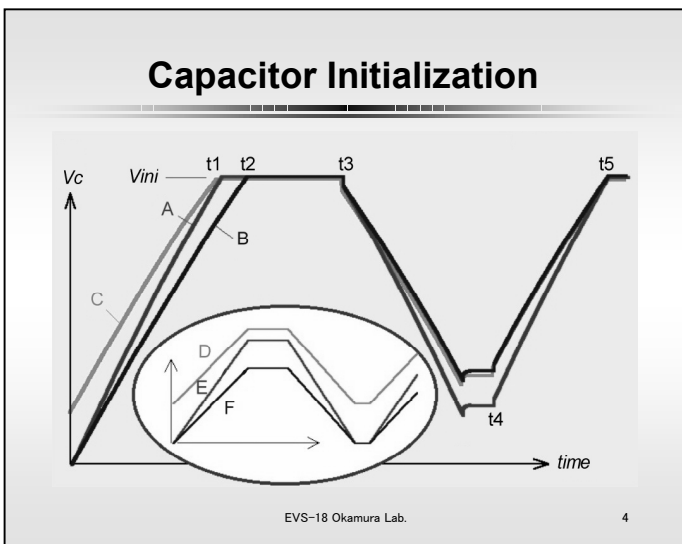
第一の電子技術の課題は、直列に接続したキャパシタの電圧分担についてです。画面に出たような漏れ電流のあるキャパシタを直列にすると、電圧は均等には配分されません。そこで印加電圧  $V$  を下げて 70% で使うなどが通例ですが、これでは蓄電量はその二乗の 49% に減ってしまいます。

ただいまの **Burke** 先生のお話でも、何もしないで直列につないただけで各キャパシタの電圧は均等にうまく行ったとおっしゃいました。短期間の実験ではこうした経験を持つ方は多いのですが、キャパシタメーカーは 10~15 年にもわたって、漏れ電流と静電容量を 1~2% 以内に保つと保証はできませんし、幸運を販売することも不可能です。



直列につないだキャパシタの典型的な電圧推移を図をご覧ください。キャパシタ F に比べて E は小さな静電容量、D は大きな残留電圧を持っています。キャパシタを許容電圧範囲で使うには、これ等キャパシタの最大電圧を規格内に入れなくてはなりません。

我々はキャパシタの電圧を 0V でなく最大電圧  $V_{ini}$  に初期化する方法を考案しました。それには「並列モニタ」と名づけた小さな電子回路を用います。



初期化の考え方は平均化や均等化とは

違います。図のトレース A~C で並列モニタを使った典型的な動作をご覧ください。キャパシタ C は時間  $t1$  で電圧  $V_{ini}$  に初期化、つまりクランプされます。A と B も少し遅れますが  $V_{ini}$  に初期化され、時間  $t2$  までには全部の直列キャパシタは  $V_{ini}$  に揃います。

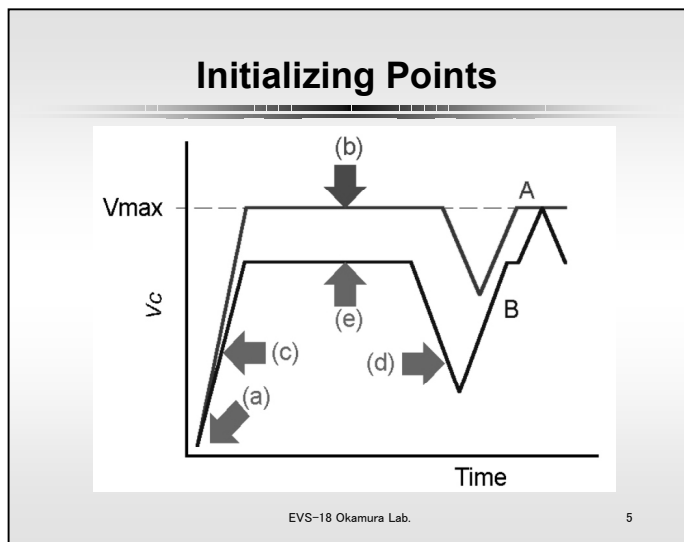
直列キャパシタ全体は  $t3$  で放電を開始し、 $t4$  で充電されますが、その基準電圧は 0V でなく  $V_{ini}$  ですから、 $t5$  で満充電  $V_{ini}$  に戻ったときは全部の電圧が揃っています。こうすればキャパシタを壊す心配なく全部のキャパシタを 100% の電圧で運転できます。

均等化や平均化でしたら、そのための電力を消費し効率が低下しますが、満充電電圧で初期

化する方法では基準電圧を揃えるだけでその後はバラついたまま放置しますから、損失は特性の微細な変化や漏れ電流を補正するだけの、ごく微量で済みます。

キャパシタの初期化は、運転をはじめる前に、100%の電圧  $V_{max}$  の(b)点で行う必要はありません。上と原理は同じですが、図の(a)から(e)のような種々のタイミングと電圧で類似の効果を持たせることができます。

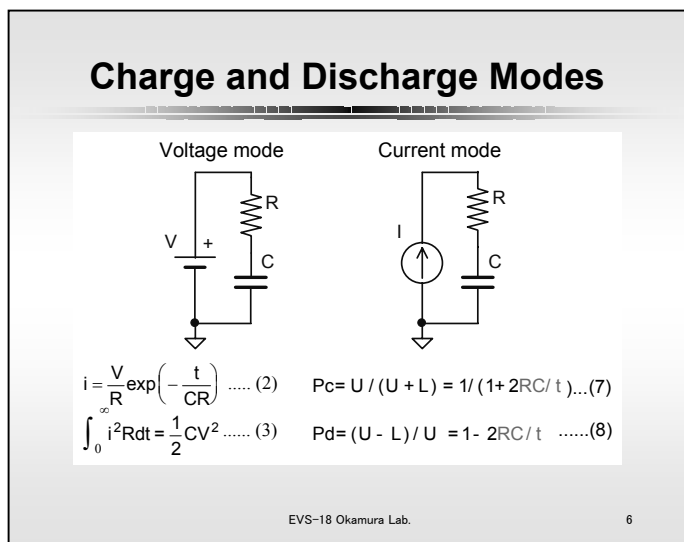
たとえばハイブリッド自動車の運転手がまったく気づかないように、充放電サイクルのたびに少しずつ初期化することも可能です。



次にエレクトロニクスが受け持つ第2の分野、キャパシタの高効率な充放電に進みます。

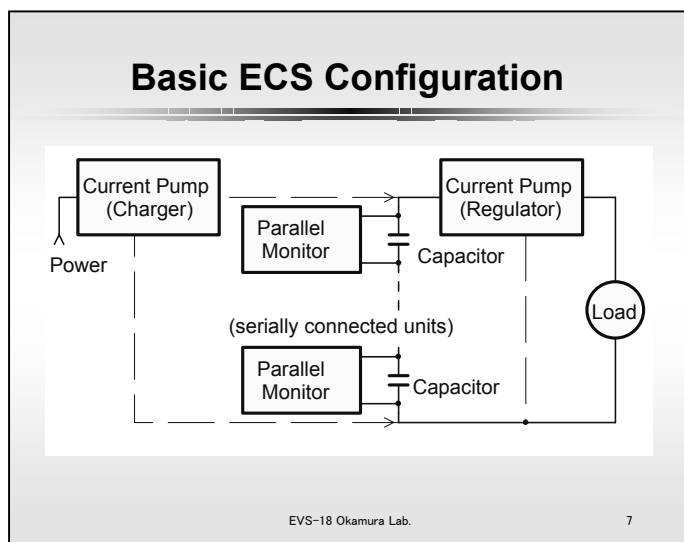
キャパシタを電圧源から充電し、あるいは電圧源に放電すると効率(2)(3)式は50%に収斂することが知られています。

しかし、電流で充放電すると充放電効率は式(7)と(8)のように書けます。この式は非常に重要なことを表しています。それは充電放電の効率がどちらも、内部抵抗“Rの絶対値”で決まるのではなく、“ $RC/t$ ”つまりRC積と充電時間tとの比で決まるという点です。この事実がECSの一つの鍵となっています。



ECSの典型的な構成例を図で示します。ご覧のようにECSでは電気の出し入れのあらゆる部分、充電と放電に電流ポンプと呼ぶ高効率で作動電圧範囲の広い、電流入出力型のスイッチングコンバータを用いています。実はECSにはもう一つの方法「バンクスイッチング」があるのですが、これについてはテキストを御参照ください。

電子回路の部分はこゝで終り、キャパシタの技術に入りましょう。



さて第三の質問は、「ECS キャパシタはどこが違うか」でした。

そこに入る前にキャパシタ内部抵抗を正規化して表す方法に触れておきます。

キャパシタの抵抗を絶対値で何mΩと  
いったのでは、キャパシタの大きさに左  
右されるので内部抵抗は低いか高いかわ  
かりません。電極の面積からΩcm で表し  
た例がありますが、電極の面積を知る必  
要があるので、実用上不便です。

そこで私は 1F あたりの抵抗で表す方  
法を考えました。

### The “Ohm-Farad” Unit;

to normalize ESR per capacitance

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

$P_c = 1/(1+2RC/t) \dots (7)$   
 $P_d = 1-2RC/t \dots (8)$

EVS-18 Okamura Lab. 8

静電容量あたりの導電率は  
Siemens は 1/Ω なので

Siemens/Farad  
S/F = 1/(ΩF)

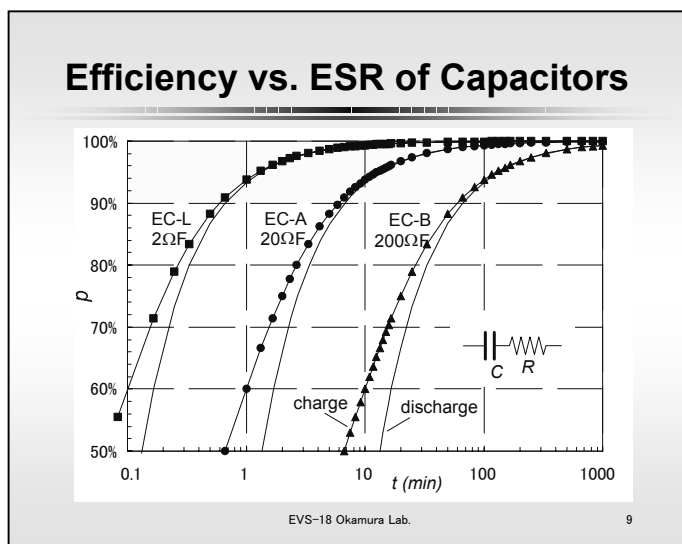
したがって静電容量あたりの内部抵抗は 1/(1/(ΩF)) = ΩF

こうして得たΩF は式(7)(8)の RC と同じものなので、有効に利用できます。キャパシタの内  
部抵抗はそのΩF で評価してください。

実例を挙げましょう。図はΩF 値の異  
なる典型的な ECS 用キャパシタが三つ、  
EC-L, EC-A そして EC-B について 0V ま  
での定電流放電で、放電時間と充放電時  
間の関係がプロットしてあります。

式(7)(8)からも、また見ただけでもすぐ  
分かるように、これらのどのプロットも  
他のプロットを水平移動した形になっ  
ています。

つまり、損失はキャパシタの内部抵抗  
R そのものの絶対値で定まるものではな  
く、内部抵抗の高いキャパシタで R が増  
しても t を同じだけ変えれば、RC/t は変わらないので



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

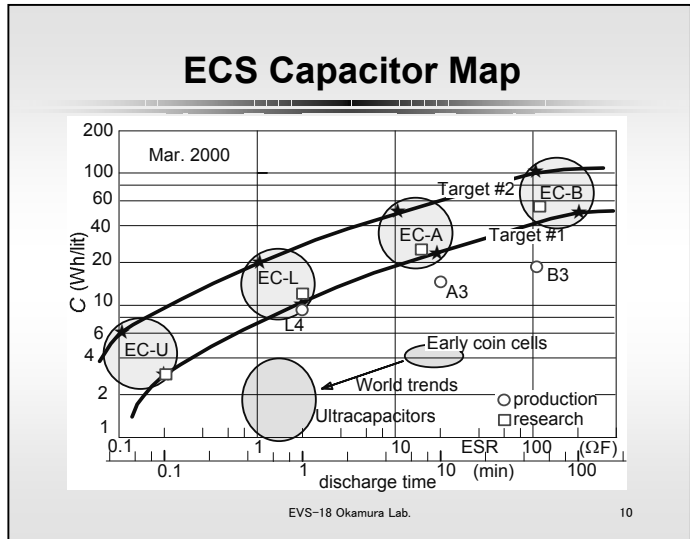
$$P_d = 1-2RC/t \dots (8)$$

の充放電ともに、内部抵抗が高いキャパシタでも同等な効率が得られることを示しています。

次はECSキャパシタの全体を示す図です。標準設計ではキャパシタの種類が増えすぎないように、 $\Omega F$  で目盛った横軸上に一桁置きに 4 種の標準品を設定しました。二重になっている第二の X 軸は 94% の効率を与える推奨最短放電時間です。

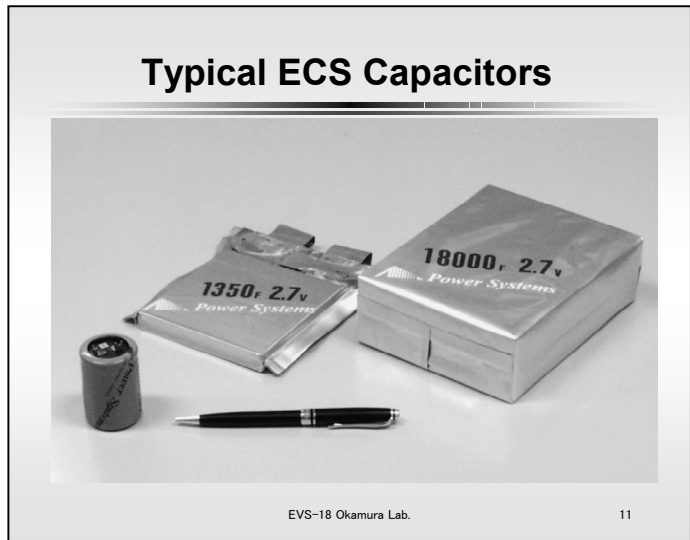
四つの円内はタイプ名で EC-L は  $2\Omega F$  で 1 分間程度の充放電に適しハイブリッド自動車や無停電電源に用いられます。EC-A タイプは  $20\Omega F$  で 10 分程度, EC-B タイプは  $200\Omega F$  で 100 分あるいはそれ以上の時間のかかる充放電に適します。

図では研究試作的なもの、数 100~数千個程度の生産を行ったもの、とをマークで区別して表示しました。



そのなかから三つのセルを写真でご覧ください。左端の円筒形セルはほぼ単一乾電池のサイズで工業標準とも言われる  $100F$  電気二重層キャパシタの約 5 倍、 $470F$  です。これは製造技術が優秀なためではなく、内部抵抗を大きく  $20\Omega F$  としたため、内部抵抗を増やせばエネルギー密度が増すという適切な証拠といえるでしょう。

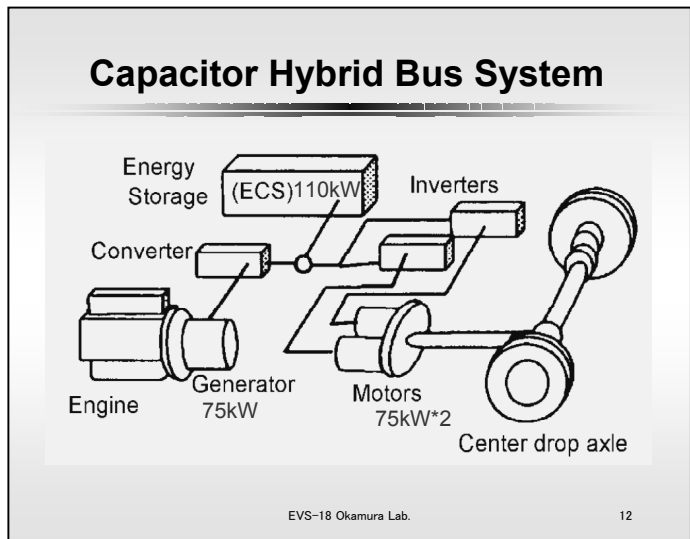
中央のセルは  $150\text{ mL L-type } 2\Omega F 6.5\text{ Wh/kg, } 10\text{Wh/L}$  出力密度最大値で  $6\text{ kW/kg}$  右のセルは 大きさ  $1\text{ L}$  の B-type  $100\Omega F 12\text{ Wh/kg, } 17\text{ Wh/L}$  です。



最後の質問に進みましょう。「キャパシタは実際の自動車にどう使われるか」です。

ECS にとって  $15t$  のシリーズハイブリッドバスを、電池を使わずキャパシタだけで走らせるというのは良い経験であり、手法の健全性を証明する最善の機会でもありました。

システムは図のように  $75\text{ kW}$  の発電機を CNG エンジンで駆動し、キャパシタ

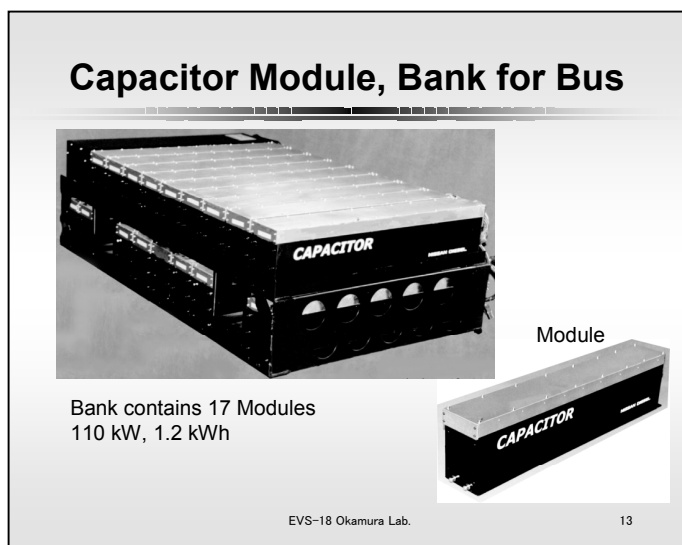


の出力を合わせて二つの 75kW を並列にして 150kW の走行馬力を供給します。回生制動時には 100kW 余がキャパシタに充電される構成です。

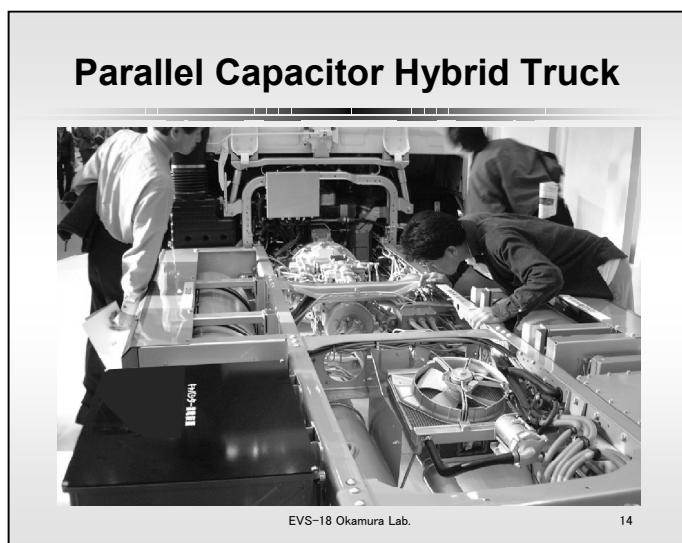
ここで使用されたキャパシタセルは前に示した EC-L タイプに類似したもので、写真のモジュールケースに収め、17 モジュール総計 840 セル、1.2kWh 約 200kg が搭載されています。

充放電効率は現状で片道約 93%、ハイブリッドシステムとしてこの値は悪くはありませんが、単セルの性能から見て、もう少し良くなるはずだと研究中です。

この段階での M15 モードでの燃費改善率はベースの CNG バスに比べて約 2.4 倍が得られています。



8 t の中型トラックが EC S によるパラレルハイブリッドで作られました。150kW の希薄燃焼 CNG エンジンに、写真の中央で誰かが食いつきそうにしている 55kW の同期モータの組み合わせです。キャパシタは EC-L タイプ 256 個で約 60kg、蓄電容量 380Wh です。



電池を用いたパラレル・ハイブリッド電気自動車では電池の出力とエンジンの馬力をどんな割合にでも設計することができます。電池の出力や使用電力を小さく選べば電池は決して壊れないようにすることは可能ですが、ハイブリッド車にした効果は上がりません。キャパシタで蓄電システムを構成すれば、効率が高く、大きな電力を何回出し入れしても壊れない点が明らかに有利といえるでしょう。

(この部分に関連して、電池とキャパシタの安全性の比較、電解液の選択と可燃性の問題、キャパシタの安全評価の結果について、質問に備えて用意はしたのですが、講演では触れませんでした。)



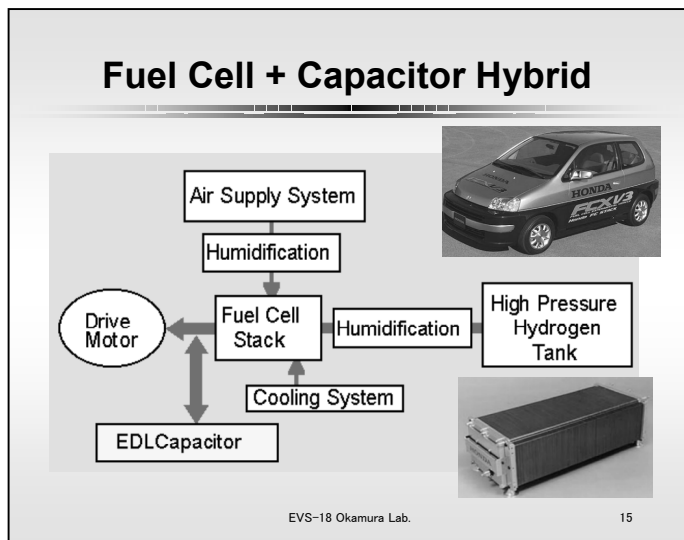
次の写真はホンダによる燃料電池車で総重量 1.75 トン 4 人乗り最大巡航速度 130km/hr です。ホンダ製の 70kW 燃料電池と 60kW の同期電動機を積んでいます。

電気二重層キャパシタは加速と回生制動に貢献するとして図のようなシリーズハイブリッドの構成で搭載されています。

これまでの内燃機関とのキャパシタ・ハイブリッド車ではモーターと発電機、それにモーターをドライブするパワーエレクトロニクスなどをキャパシタの他に

積載することが必要です。しかし燃料電池車ではモーターもドライバも発電機も既に存在するので、大電力を出し入れできるキャパシタとのハイブリッドを構成するには有利です。

(なお上の写真は FCVX3 ですが、現在は FCVX4 が発表されています。)

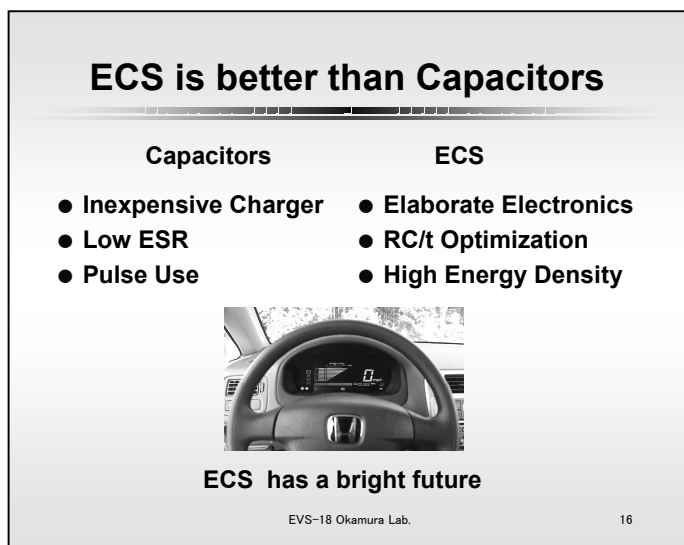


まとめとして、従来のキャパシタの使い方と ECS を比較しておきましょう。

従来のキャパシタが比較的簡単な充電器で済ませようとしたのに対して、ECS では思い切り凝った電子回路を用います。考えたからといってコストが上がるわけではないので心配は要りません。

従来の方法では低い内部抵抗 ESR が狙いなのに対し、ECS は RC/t で最適化します。

また、従来のキャパシタはパルス的な使い方が主な用途ですが、ECS では高エネルギー密度化して自動車用に限らず蓄電用途の全般を対象にします。



ECS では現在のエネルギー密度を来年中にさらに 1.5 倍にしようという計画が進行しています。キャパシタ蓄電システムには豊富な機会と輝かしい未来が開けているに違いありません。

御傾聴を感謝します。御質問をどうぞ。