

UPS 機能の電子機器への内蔵化動向と技術課題

～蓄電技術の新しい時代～

岡村研究所 岡村 迪夫

2002年4月15～17日にサンフランシスコで開催されたEESAT2002(図1)は米国を主とした世界の電力分野の蓄電技術が発表されたが、本誌が主題とする電子技術、エレクトロニクスや電気自動車とは隔絶した、しかし立派な市場と要求があることを改めて知った。本稿ではその新鮮な驚きを含めて、蓄電に関する最近の考え方を要約してみよう(表)。

蓄電新時代の夜明け

無停電電源(Uninterruptible Power Supply)には蓄電装置が欠かせない。蓄電技術そのものが今、新時代を迎えようとしている。一つはニッケル水素、リチウムイオンなど新型二次電池の進歩である。さらに一回り大きい概念として、“電池以外の蓄電技術”の登場とその実用化がある。圧縮空気、フライホイール、超伝導コイルなど従来か

ら営々と研究されてきた技術に加えて、電気二重層キャパシタを用いた蓄電システム¹⁾が急速に力をつけてきた。

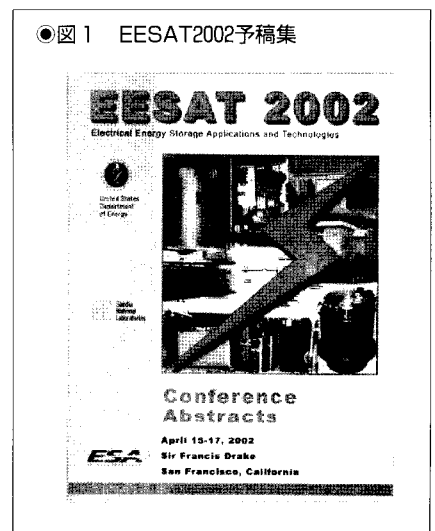
電気二重層キャパシタの市場は未だ成長していないため生産量が少なく割高だが、キャパシタの価格は量産によって間違いなく下がる。

これまでは電子雑誌で蓄電の特集をすれば、電池がすべてであった。通常はフライホイールや揚水発電所は電子技術の興味の対象でないから、はじめから蓄電の特集というより電池の特集になるのが当たり前であった。

しかし、これからは違ってくる。蓄電は電子回路技術に組み込まれ、不可欠な要素となり、使われるのは電池より電気二重層キャパシタであろう。交換が前提の二次電池では考えられなかった永続的な蓄電動作を電気機器がもつのが当然となる日は、そこまで来ている。

筆者はこれまでにOPアンプ²⁾やス

●図1 EESAT2002予稿集



イッチングコンバータ³⁾の発展を予告し、その普及にいくらか協力してきた。「蓄電」は上の二つより大きな効果を電子技術ばかりでなく地球環境に与えるだろう。それがなぜキャパシタで?と思われる向きは、51ページ(日産ディーゼル工業の記事)をご覧ください。キャパシタ蓄電はすでにトラックを動かすほど力をつけた。

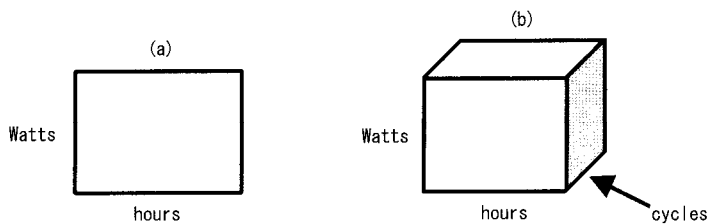
外部に置く無停電電源

電子機器や生産設備が停電しては困る。紙や鉄板を製造する工程などでは昔から、近年では半導体工場などで、停電による膨大な損害を防ぐため、専

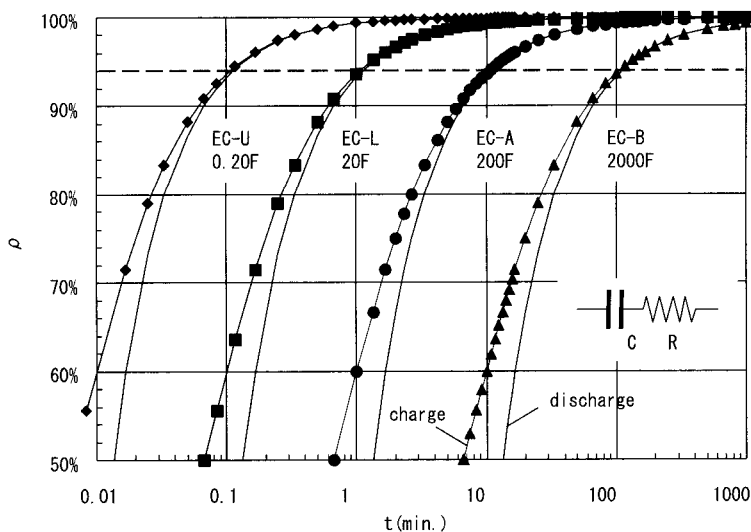
●表 本稿で扱う重要な課題

- ・我々は今、蓄電技術の新時代への節目を迎えつつある
- ・蓄電器の性能やコストはWh当りではなく、Wh・cycleで評価すべき
- ・“蓄電は電池”という考え方は“増幅は真空管”というくらい古い
- ・短い停電、瞬断に耐える電子機器、電気機器は常識になる
- ・スイッチングコンバータ、OPアンプ、次はキャパシタ蓄電が普及か
- ・電解液の種類で左右される電気二重層キャパシタの安全性

●図2 蓄電装置の容量の表し方：(a)では何回使えるかは問題でない



●図3 ECaSS™の標準的な4種のキャパシタの効率/放電時間プロット



用の独立した高級かつ高価な無停電電源が多数用いられてきた。

この分野での課題は信頼性の向上である。そもそもバックアップ装置は電源でもコンピュータでもソフトでも、いざというときは働かないものだ…などと野次る人がいるが、無停電電源で信頼性を突き詰めると二次電池に行き当たる。

二次電池の改善の余地は

二次電池と書いたが無停電電源では実態はほとんど鉛電池である。鉛電池の信頼性は従来の電気品の中では極めて高い方に属する。それに比べると新型電池、たとえばLiイオン電池は満充電に放置するな、過放電にするな、低温では容量の低下が激しいなどと、電池そのものの特性では鉛電池がはる

かに安全で安定でしかも安価である。

それならなぜ、鉛電池を問題にするか。

科学の黎明期、プランテ、ユングナーやエジソンが蓄電池を発明し製品化を競ったころは電気が蓄えられるというだけで、立派な成果であった。

電池の技術は当時の手法を今でも引きずっている。たとえば容量をアンペアアワー (Ah) で表すが、これは蓄電池が電極材料に用いる活物質に固有な電圧の電圧源であったため、電圧を言う必要がなかったからである。

古い技術が今も温存されている例はこれだけではない。当初は電気を溜める技術はそれだけで驚異であったため蓄電池の寿命は、定量的な議論の対象ではなかった。そこで蓄電池の性能を当初の蓄電量ワットアワー (Wh) で表した。これだと図2 (a)のように Wh

当りで表したのでは300回充放電できる電池も30000回使えるものも区別がつかない。

今でも電池や電気二重層キャパシタの値段がWh当りいくら、などというが、これは蓄電池の寿命など議論する余地がなかった昔の手法である。これからは、たとえば100Whの蓄電池が生涯に何サイクル充放電できるかを問題にして、図(b)のように10回なら1000Wh・cycleと表現しなくては蓄電装置の働く総容量にならずディメンションが合わない。

フローティングの寿命

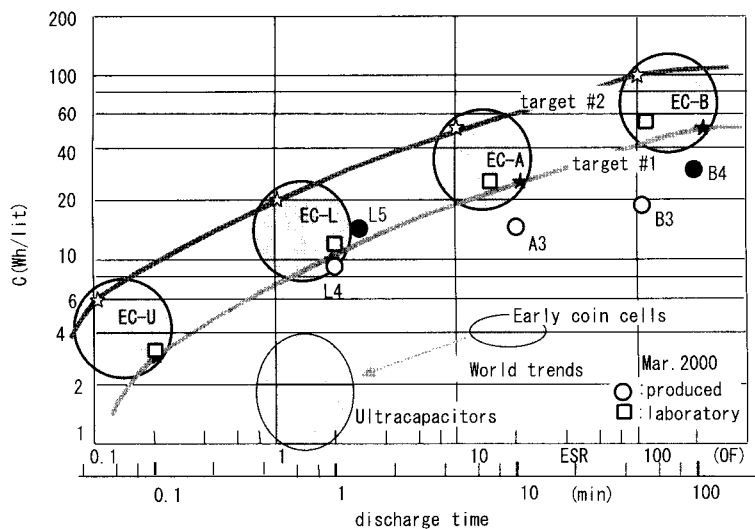
しかし無停電電源の電池には特別な事情がある。電力事情のものすごく悪く瞬断が頻発する米国でさえ、サイクル寿命は要求されない。電池は常時満充電に維持され、停電を待ち受けるフローティングという使い方が一般的だからである。電池の劣化の原因となる充放電を行わず満充電に保つという、この使い方はLiイオン電池以外の二次電池にとって、寿命の点でもっとも有利で、フローティング専用設計された10年使える鉛電池も製造販売されている。

電池の都合とキャパシタの都合

それでも近年になって電気二重層キャパシタが実用に供された結果、蓄電に関する考え方が大きく変化しつつある。これまでの無停電電源や電子機器などの設計は、蓄電といえば電池しかないと決め込んでいた。蓄電のスペックも電池の都合で決まっていたところが多い。そこが電気二重層キャパシタが使えることで大きく変わりつつある。

電気二重層キャパシタの場合には

●図4 ECaSS™のキャパシタの標準的エネルギー密度／内部抵抗プロット



ECaSS™ (Energy Capacitor System : 略称 ECS を正規の商標に改訂した) の手法を用いると図3に示したように、各種の放電時間に対応した設計ができる。

内部抵抗がR、静電容量Cのキャパシタをt時間で満充電とゼロ間を放電または充電する定電流で充電、放電した場合の効率 P_c 、 P_d は、

$$P_c = 1 / (1 + 2RC/t) \dots \text{式(1)}$$

$$P_d = 1 - 2RC/t \dots \text{式(2)}$$

図3では P_c 、 P_d を効率として縦軸にとりtとの関係を標準的な4種のキャパシタについてプロットした。

これを見ると、内部抵抗のもっとも低いEC-Uタイプが0.1分つまり6秒より長い充放電時間で94%以上の高効率を示すから、このタイプをどこにでも使えば、よさそうである。

だが、もう一つ考えるべき要素がある。図4は縦軸に体積(リットル)当りのエネルギー量、つまりエネルギー密度を横軸の内部抵抗(ESR)で前出の4種のキャパシタについてプロットした。

discharge timeの目盛りは図3の94%効率を得る放電時間である。内部抵抗の低い、図の左へ行くほどキャパシ

タのエネルギー密度はかなり急激に低下している。したがってキャパシタのエネルギー密度を大きく使うには、巨大な放電電流を誘って無駄に内部抵抗を下げないこと。許されるだけ内部抵抗の大きなキャパシタを選び、実用上できるだけ小さな電流で充放電するのが、性能のよいキャパシタ蓄電装置を得る鍵である。

無駄に内部抵抗を下げてはいけませんが、キャパシタは必要に応じて、6秒で全放電しても95%ほどの効率を得る設計も可能である。したがって、二次電池では原理的に達し得ない範囲の充放電を利用した設計ができる。

停電補償時間の設定

無停電電源が何分間保持できるか、およそ10分間が相場などといわれるこの補償時間も電池の都合から決まった値である。鉛電池では放電時間を10分以下の値、たとえば5分間にしても必要な電池の量はほとんど減らない。しかしキャパシタなら半分ですみ、1分間なら1/10になる。

そうすると一体、本当に必要な停電補償時間はいくらかというのが重大な

問題となる。絶対に停電されては困る用途では電池の容量が10分間あっても危ないから、非常用の発電機をもつのが普通である。その整定時間(出力が設定値に安定する時間)は最悪値で40秒と規格化されており、実用上30秒があれば十分という意見もある。また特別高圧送電系の停電時間は、電力会社や変電所によって異なるが、1秒間あれば十分に補償可能という。

もっと短いとどうか、数十ミリ~300ミリ秒の瞬断を抑えることを目的とした電解コンデンサを用いて工夫を凝らした装置があり、かなり前から実用に供され成功している。ただし、電解コンデンサでは秒のオーダーまで補償時間を延ばすのは蓄電部のエネルギー密度の関係で巨大となり、コストの両面で困難であった。

ここでも本命は電気二重層キャパシタである。ただし、用途にもよるが1分間、30秒間、までは図3、4のキャパシタでよいとして1秒間などというのは図の左側に飛び出してしまふ。

これには説明が必要である。無停電電源は、そう頻繁に停電するわけではないから、放電時の高い効率は必要ない。大電流で短時間放電すると発熱を生じるが、1サイクルでキャパシタを壊すほど激しくない限り、かなり大出力で実用することが可能である。その好例は本誌の別稿¹⁾に詳述されている。しかも、こうした大電流つまり高出力密度で使うと出力電力当りのキャパシタ搭載量が少なくて済む。これは普及の端緒である現在の段階で、単価の高いキャパシタを使っても製品の値段を低く抑えることができ競争力を確保できるというメリットにつながる。

このほか、種々の補償時間をもった高信頼性キャパシタによる無停電電源の可能性があり、各社が開発に入っている。

電気二重層キャパシタの直列

電解コンデンサでは作られていたのに、電気二重層キャパシタの無停電電源がなぜこんなに遅くなったか。その原因の一つは大容量タイプの生産量が少なくコストが下がらなかったことによる。だが、そのもう一つ前の原因は電気二重層キャパシタの耐電圧がわずかに2~3Vで、それを500Vや1000Vで使う際に4~500個も直列にして用いる際の信頼性が確保できない点にあった。

この問題は未だ欧米では解決できていないとする最近のペーパー³⁾さえ見られるが、ECaSSTMのグループ各社では並列モニタ⁴⁾の使用によって、実績をあげている。

蓄電ということの考え方

電池がキャパシタに変わると考え方の変化する。

その一つは、従来なら無停電電源のバッテリーはフローティングにしてそつと使うのが常識だった。だが停電していないときの無停電電源は、いくらか電気を食いながらただ寝ているに過ぎない。それでも従来の電池は下手にこき使うと寿命に響いたからそつとしておくのが最良であった。

だが、キャパシタはいくら使っても寿命に影響がないから、寝かしておく法はない。暇なときにはいくらかでも働いて家計を助けるというわけで、力率や波形の改善、電力系の安定性の向上、コジェネなどの連携点での節電、負荷のピークシェイピングなど、いろいろな目的で利用する研究が進められている。ただし、ここであまり詳細に説明すると開発に取り組んでいる人たちに叱られそうなので、典型的な例と

考え方を一つだけ次に述べよう。

ピークシェイバー

人が使う電気の需要は一定不変なものではない。しかし必要ときに停電されたのでは絶対に困る。つまり好き勝手に、いつでも制約なく使いたいというのだから厄介なものである。

キャパシタに蓄えた電力で、その尖頭的な負荷を平らにするという考え方は日本でも早くからあり「負荷平準化」load leveling と呼ばれる。しかし、EE-SATでは向こうの人たちは皆 peak shaver といっていた。つまり、髭のように生えた尖頭負荷を平らに剃ってしまうというので、状況をスマートに表している。この手法についてはもう少し詳しく、本誌2001年9月号⁵⁾に述べた。

電子機器に内蔵しては

ここまで来ると次のステップは「電子機器に内蔵ではどうか」と考えるべきである。昔は蓄電といえば電池だったから、それを電子機器に内蔵するというのはよほどの場合であった。なによりも、電池を内蔵した装置はその電池をほかの部品とは区別して、取り外し可能になるよう設計していた。

しかし、電気二重層キャパシタと電子回路を組み合わせた蓄電が、通常の電子部品、たとえばアルミ電解コンデンサと大差のない扱いができるとなると、数十ms くらいの停電で誤動作するような製品は設計が悪い、とみなされる時代に入りつつある、とはいえないだろうか。

実際に、乾電池で動作する多くの機器で電池の交換の際に、装置に設定しておいたメモリが皆消えてしまうのを防ぐ目的で、すでにコインセル程度の

小さな電気二重層キャパシタが使われている。

あれをもう一回り、ふた回り発展させれば、パワー用まで含めて電子機器はかなり進歩するはずだ。

電気二重層キャパシタと安全性

電池と比べて電気二重層キャパシタは安全で地球にやさしいという。しかし、普及を図るからには責任を持つと考えると、そんなに安全なはずはない。

第一は電気の危険性で、電圧が高ければ感電する上、短絡すると内部抵抗が低いから導体が溶けたり蒸発するほどの大電流が流れる。これは、電気を使う限りやむを得ず当然のことともいえよう。

第二は電解液の可燃性と毒性である。アルミ電解コンデンサでは、比較的燃えにくいガンマブチロラクトン (GBL) が多用されており、日本の電気二重層キャパシタメーカーは各社ともプロピレンカーボネートか類似の溶媒を使っているようだ。これだと溶媒だけの開放引火点が132℃とGBLよりさらに燃えにくく、強制的に燃焼させたとき塩に含まれるフッ素から生じる猛毒の弗酸も、化合力が強く発生量が少なく、もっとも危険の少ない部類に属する。

しかし、電気二重層キャパシタでも外国製の中には、電解液に性能はよいが有毒で引火点が2℃と燃えやすく、燃えると青酸ガスを発生するアセトニトリルを用い、それが明示されていないものや容器が破れない限り安全だと書かれているものがある。

Liイオン電池の材料のあるものはさらに危険でそれに比べるとアセトニトリルはまだ安全だという論議もある。しかし、自動車や電気機械への応

用でもその辺を電池やキャパシタ製造者に任せてブラックボックス扱いせず周知をはかり、将来の危険回避のために製品の安全性向上に積極的な貢献をしたいと考えている。

【参考文献】

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) 岡村勉夫：“OPアンプ回路の設計”CQ出版社、初版1973年
 3) 岡村勉夫：“電源回路”日刊工業新聞社、初版1974年
 4) 六藤孝雄：“大容量電気二重層キャパシタを採用した瞬時電圧低下補償装置開発技術”本誌 pp.52~58
 5) S. Buller, E. Karden et al “Simulation of Supercapacitors in highly dynamic Applica-

- tions”, EVS-18 (2001)
 6) 岡村勉夫：“無停電電源を根本から考える”電子技術、2001年9月号

●おかむら みちお
 (株)岡村研究所 所長
<http://www.okamura-lab.com/>

特集コラム

日産ディーゼルがディーゼルエンジンと組み合わせたキャパシタハイブリッドトラックを発売

本誌4月号特集記事「電気二重層キャパシタ応用高効率ハイブリッドバス・トラック」で紹介、反響を呼んだ日産ディーゼル工業のキャパシタハイブリッドトラックがついに発売された。世界で初めて電気二重層キャパシタを応用した車が発売されたことで、電気二重層キャパシタ (Energy Capacitor Systems) への評価はさらに高まっている。

本誌4月号で紹介したのはCNGハイブリッドバス・トラックだったが、その原稿の中で「実用性を重視のシンプルなハイブリッドシステムについても開発を進めている」と述べていたのが、このほど発売されたディーゼル車(中型トラック)のハイブリッドシステム。既存のディーゼルエンジンと駆動系を応用したシンプルな構造のパラレル方式ハイブリッドシステムである(図1)。試乗したところ、快適な乗り心地を体感することができた。とくに発進時における振動の少ないスムーズな加速感(モータ走行)、およ

びアイドルストップ付きによる停車時の静かさは期待以上。加速時、減速時はモータ/エンジン併用により、静かでパワフルな走りを実現していた。

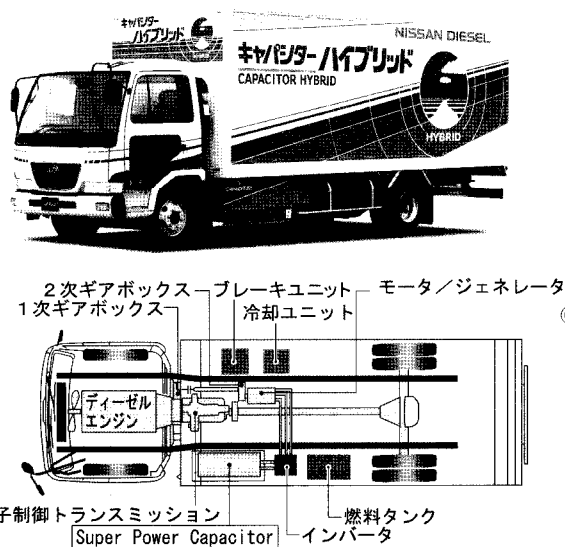
このシステムのポイントはブレーキエネルギーの回生。乗用車に比べて3倍以上も走行距離が長く、回生制動回数も多いトラックなどの商用車の場合、蓄電池(リチウムイオン二次電池など)では寿命、とくに充放電サイクル数増加による劣化特性が問題となる。そこで、電気二重層キャパシタの特性を活かした回生効率のよい、実用的なシステムを開発した。同社従来車比で燃費1.5倍、CO₂33%削減を達成している(低排出ガスにおける新短期規制に対してNO_x△25%、PM△50%も実現)。とくに日本の道路事情のように発進・停止が多い走行ではよりその効果を発揮する仕組みである。

その専用キャパシタ(Super Power Capacitor)を同社は、岡村研究所の協力のもとで自社開発した。セルは積層角形で、

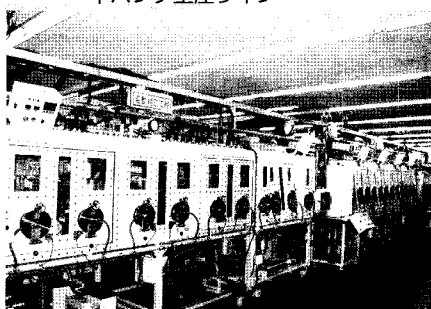
高エネルギー密度型の活性炭電極を使用している。モジュールはそのセルを3並列64直列でつなげたものを2つ直列接続して使用する。モジュールユニットとしての最大電圧は346V、最大容量は583Wh。キャパシタの充電制御技術の最適化(セル間電圧の平準化など)などにノウハウが詰まっている(図2)。キャパシタの製造ラインも上尾工場内で内製化した(写真)。これは、社内で生産ノウハウを蓄積するとともに、将来的にはセルやモジュールの外販も見据えた対応である。

同社は当面年間30台の販売目標を立てているが、CNGエンジンの普及スピードと照らし合わせて、近いうちに普及のターニングポイントとなる年がくると期待している。今後はシステムのベースとなるディーゼルエンジンの改良を進めるとともに、Super Power Capacitorの他車種への展開、自動車以外への応用の可能性を追求していくという。

●図1 日産ディーゼル工業の開発したキャパシタハイブリッドトラック



●写真 日産ディーゼル工業上尾工場内のキャパシタ生産ライン



●図2 スーパーパワーキャパシタのセル(左)とユニット(右)

