

リチウムイオンキャパシタとその活用例

The Lithium Ion Capacitor and its useful application

中島 武*

1. はじめに

リチウムイオンキャパシタ (Lithium Ion Capacitor : LIC) は、図 1 に示すように正極に電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor : EDLC) と同じ活性炭を、負極にリチウムイオン電池 (Lithium Ion Battery : LIB) と同じ炭素を使用したハイブリッド構造を特徴とする¹⁾。本構造にプレドープ技術を組み合わせることで EDLC と LIB の長所を併せ持つ新しい蓄電デバイスが作製される²⁾。

弊社ではリチウムイオンキャパシタをハイブリッドスーパーキャパシタ (Hybrid Super Capacitor : HSC) と呼んでおり、以降は HSC と表現する。

2. HSC の特徴

HSC の代表的な特徴として、

- (1) 高入出力密度
- (2) 高エネルギー密度
- (3) 高い安全性
- (4) 長寿命

などが挙げられる。図 2 に各蓄電デバイスの出力密度とエネルギー密度の関係を示す¹⁾。図 2 に示すように HSC は高い出力密度とエネルギー密度を両立する蓄電デバイスとなっており、従来の蓄電デバイスでは適用が困難であった分野などでの活用が期待されている。

HSC と LIB の比較を表 1 にまとめる¹⁾。LIB は使用する正極材料などで特性が大きく異なるが、表 1 ではモバイル機器などで最も普及が進んでいる酸化物系の正極材料を採用した LIB と比較している。

表 1 に示すように、エネルギー密度では LIB に劣るものの、出力密度や充放電性能で LIB を凌ぐ特性を有している。特に、充放電性能では秒単位での充放電が可能であり、急速充電、大電流放電などで LIB よりも優れた特性を示す。加えて、LIB よりも使用温度範囲が広く、長寿命、高い安全性なども特徴として挙げられる。

3. HSC の作動原理

2 章で示した HSC の特徴は HSC の作動原理を知ることによって理解できる。以下では HSC の作動原理を

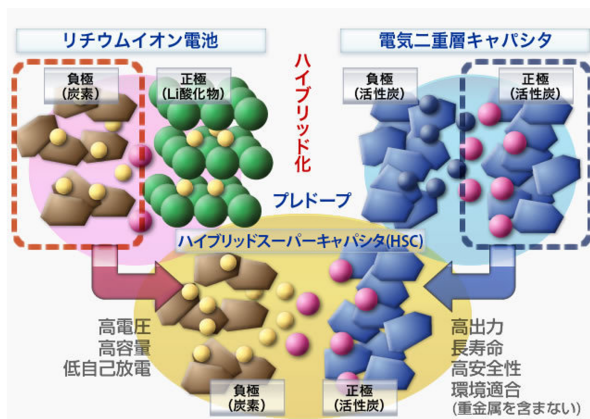


図 1 HSC のハイブリッド構造

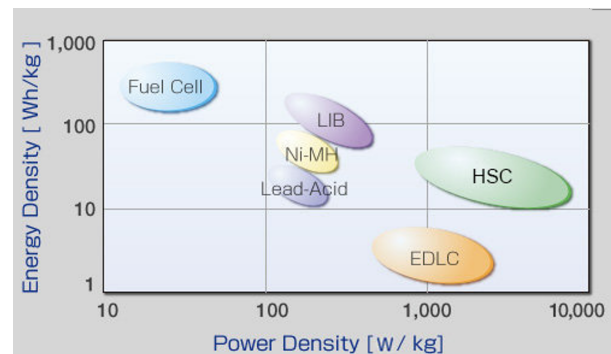


図 2 蓄電デバイスのラゴンプロット

* 武蔵エネルギーソリューションズ株式会社 開発部

表1 HSC と LIB の比較

	HSC	LIB (酸化物系)
エネルギー密度	△	◎
出力密度	◎	○
充放電性能	秒単位での充放電可能	急速充電が苦手
低温特性	○	△
高温特性	◎	△
寿命	◎	△
安全性・可燃性	◎	△

説明すると共に2章に挙げた特徴とどのように結びつくか触れることとする。

HSCでは①プレドープ技術、②負極の利用容量設計技術、③集電体への多孔箔活用技術という従来の蓄電池には用いられていない3つの独自技術が採用されている^{3)~5)}。これらの独自技術を用いて、HSCの負極には適切な設計に基づいて算出された所定のリチウムイオン量がプレドープされた炭素材料が使用されている。

HSCの充放電原理を図3に示す¹⁾。放電状態では図3(a)に示すように正極側にリチウムイオンが吸着し、負極側にはプレドープされたリチウムイオンが吸蔵されている状態となっている。

充電を行うと、正極側に吸着していたリチウムイオンが電解液内に放出され(図3(b))、さらに充電が進むと電解液中のアニオンが正極側に吸着するようになる(図3(c))。負極側は充電が進むにつれ、電解液内のリチウムイオンが負極内へ吸蔵される。放電時には、上記と逆の反応が起こる。

この作動原理におけるポイントは大きく2つ挙げられる。1つ目は、正極側では活物質表面とリチウムイオンまたはアニオンとの吸脱着というように物理的な反応となっていることである。

2つ目は、リチウムイオンがプレドープされた負極の利用である。

HSCは満充電時に負極に吸蔵されているリチウムイオンの総量が満充電時のLIBの負極内に吸蔵

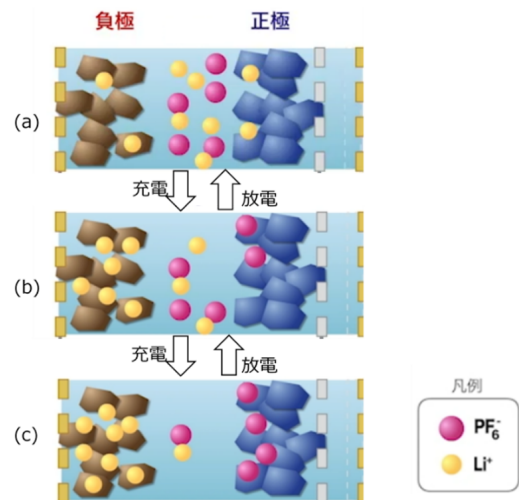


図3 HSCの充放電原理

されているリチウムイオンの総量と同程度になるように設計されている。LIBでは満充電状態で負極内に吸蔵されているリチウムイオンは基本的に充電に伴い正極活物質から負極側に供給されたリチウムイオンからなる。HSCでは満充電時に負極内に吸蔵されているリチウムイオンは負極内にプレドープされていたリチウムイオンと充電に伴い電解液中から供給されるリチウムイオンからなる。

このため、HSCの充放電に伴い負極に出入りするリチウムイオンの数はLIBの充放電に伴って負極に出入りするリチウムイオンの数よりも少なくなっている。負極に吸蔵されるリチウムイオンの量により、負極の構造が収縮・膨張するが、上述したようにHSCでは負極内に出入りするリチウムイオンの数がLIBに比べ非常に少ない。そのため、充放電に伴う負極の構造変化がLIBに比べて小さくなる。

このように、HSCの正極側は活物質表面でイオンを吸脱着する物理反応であり、また負極側では負極の構造変化を伴わない範囲での充放電となっており入出力特性に優れる。一方で、LIBは正極・負極共に活物質の内部からの化学反応によりリチウムイオンを出し入れする。そのため、リチウムイオンの出し入れが遅くなり、入出力特性がHSCよりも劣ることになる。

また、HSCでは負極の構造変化が小さいため容量劣化の原因と言われている表面被覆(Solid Electrolyte Interphase:SEI)の破壊が抑制される^{3)~5)}。これが、HSCが長寿命である要因の1つとなっている。LIBでは正極・負極共に活物質内部へのリチウムイオンの出し入れによる構造変化が伴うため、HSCより

も劣化しやすい。

酸化物系正極材料を用いる LIB は、何らかの要因で熱暴走が発生すると、最終的に正極の脱酸素反応が起こり、発火に至ることが知られている⁶⁾。HSC では正極材料が炭素材料であり、かつ、化学反応ではなく物理反応であるイオンの吸脱着となっている。そのため、LIB に比べて発火リスクは非常に小さいものとなっている。

このように、HSC の構成上の特徴の結果、LIB よりも優れた性能を示している。

4. HSC の活用例

HSC の大電流充電・高サイクル寿命などの特徴を活かして、トラムや昇降機用の蓄電デバイスとして広く活用されている。その他、燃料電池との相性がよく採用実績も増えつつある。ここでは HSC の活用例を紹介する。

4.1 瞬低・短時間停電補償装置

HSC の瞬間的に大電力を供給可能な特徴を活かした活用例となる。鉛蓄電池などよりも省スペースであり、かつ、HSC の長寿命を活かしメンテナンスなどの管理コストを抑制できることなどの利点がある。特に、最近ではデータセンター向けの電源装置用の蓄電デバイスとしても注目を浴びてきている。

4.2 架線レストラム

HSC の高エネルギー密度や急速充電性などを活かした活用例になる。

トラム上に搭載した HSC に、駅間を走行するために必要な電力の蓄電が可能である。また、急速充電性を活かし、減速時の回生充電が可能であり、さらに乗客の乗降の間(約 20 秒間)に充電が完了する。

加えて、HSC の採用によって架線が不要となるため、景観を損なわないことも高く評価されている。



図4 架線レストラムの一例

4.3 昇降機

上昇時に大電力が必要となり、また、下降時の回生充電が可能な蓄電デバイスが望まれる。HSC では人の乗降の間に充電が可能であり、小容量の HSC で稼働させることが可能である。

4.4 AGV 自動搬送機

HSC は一回の航続距離は短くこまめに充電をする用途で好適である。サイクル寿命に優れており、一日に何回も充電し、走行が可能となるため、AGV (Automatic Guided Vehicle) に採用されている。

4.5 燃料電池フォークリフト・燃料電池車

リフトの上昇時や加速時の出力アシストおよびリフト下降時や減速時の回生エネルギーの吸収にも HSC は好適である。

また、燃料電池式の場合、回生エネルギーを活用できないこと、負荷変動に対する応答性が低く燃料電池に用いられる触媒の劣化が加速されることがデメリットとして挙げられる。補助電源として HSC を併用することでこれらのデメリットの補完が可能となる。このように、燃料電池との組み合わせについても活用例が増えてきている。

4.6 ハイブリッドレーシングカー

瞬間的な大電力出力を活かして、加速時および最高速時のアシスト用に HSC を活用している。また、大電力充電に強く回生エネルギーの活用も可能である。

その他、HSC と LIB を組み合わせ、加速用に HSC を用い、走行用に LIB を用いるという検討もなされている。

5. ミックス電源システムへの応用

本章では、HSC の新たな活用方法として、再生



図5 垂直式搬送システムの一例

可能エネルギー分野への応用に関する検討状況について紹介する。

5.1 ミックス電源システム開発の背景

2020年10月、政府から2050年までにカーボンニュートラルを目指すことの宣言がなされた。本宣言を受けて、各所でカーボンニュートラルへの取り組みが進められており、太陽光発電システムの導入を検討する事業所が増えてきている。

2012年に導入されたFIT制度下では、優位な売電電力価格を理由とし、主に売電を目的とした太陽光発電システムの急激な普及が進んだ。一方で、急激な太陽光発電システムの普及に伴い、電力系統への悪影響が顕著になってきている。そのため、現在は太陽光発電システムから電力系統への逆潮流を行う場合には、出力抑制（出力制御）の実施や大幅な売電電力価格の下落などを考慮しなければならない。

そのため、カーボンニュートラルへの取り組みにおいては太陽光発電システムの導入目的に大きな変化が生じている。具体的には、太陽光発電システムで発電した電力の自家消費を主な目的として導入を検討するケースが増えており、自家消費率を上げるために太陽光発電システムに加え、蓄電池システムの導入を検討することも増えてきている。

その有力な導入手段の1つとして太陽光発電システムと蓄電池システムを組み合わせたハイブリッド型の蓄電システム（以下、ハイブリッド蓄電システム）が各社より発売されている。

しかし、ハイブリッド蓄電システムでは充放電電力に制約があり、一般的に充放電レートが0.5C程度に抑制されることが多い。そのため、回転系負荷など、起動時に大電力が必要になる負荷に対して、ハイブリッド蓄電システムの使用が推奨されない場合がある。ここで、CはCレートを表しており、「Cレート＝充放電電力／蓄電池容量」で算出される値である（例えば、20kWhの蓄電池容量の場合、充

放電電力10kWであれば0.5Cとなる）。

弊社の親会社である武蔵精密工業株式会社など多くの加工業では、主な加工用工作機器が回転系負荷であることが多く、起動時に大電力が必要となることが多い。そのため、ハイブリッド蓄電システムの導入の検討が難しいケースがある。

加工用工作機械の電力負荷パターンの一例を図8に示す。図8に示すように定格電力に対して、瞬時電力は4～5倍程度の電力が必要になっている。一方で、その継続時間は短時間であり、瞬時電力として必要な電力量はあまり大きくないことが予想される。また、瞬間的な再生電力も観察されている。これらは、まさにHSCの得意分野であると推測される。

そこで、弊社は瞬間的な大電力を供給可能とする蓄電システムの開発に着目し、ハイブリッド蓄電システムにさらにHSCを組み合わせたミックス電源システムの開発を進めてきた。

5.2 ミックス電源システムの概要

開発したミックス電源システムの外観を図9に、ミックス電源システムのブロック図を図10に示す。

図10に示すようにAC/DC変換された系統電力と、DC/DCコンバータを介して太陽電池（以下、PV）および蓄電池（LIB）、さらにHSCの各電力源をDCバス部で接続している。DCバス部に接続されたこれらの電力をDC/AC変換して加工用工作機械などの負荷に給電する構成としている。

本構成において、DCバス部の電圧を一定に保つ



図7 燃料電池フォークリフトの一例



図6 AGV 自動搬送機の一例

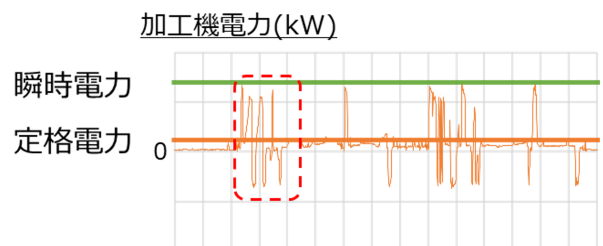


図8 加工用工作機械の想定した負荷パターン例



図9 ミックス電源システム外観写真

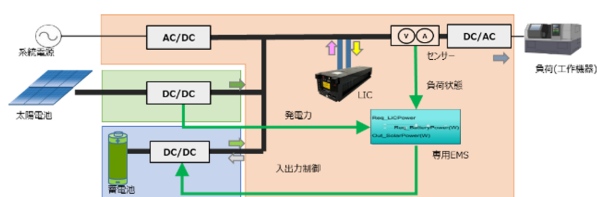


図10 ミックス電源システムブロック図

ことが重要であり、AC/DC コンバータまたは LIB 用 DC/DC コンバータのいずれかを電圧制御で動作させることで DC バス電圧を保つ仕組みとした。

それぞれの電力変換器の定格電力は 10kW (10kVA) とし、負荷に対する瞬間的な大電力供給に対応するため、DC/AC インバータは最大 3 秒間まで 45kVA を許容可能とした。なお、AC 部は三相三線式である。

LIB 容量は 16.8kWh, HSC は約 400Wh (モジュールの最大・最小電圧からの換算値) とした。

5.3 HSC 効果検証結果の例

5.2 節で紹介したミックス電源システムを用い、HSC の効果を検証するため、簡単な検証評価を行った。なお、本検証評価では負荷に実際の加工用工作機械ではなく、約 3kW の抵抗器と、約 4kW の回転系負荷（ファン）を接続して評価を行った。また、LIB の充放電状況に着目するため、PV や系統電力からの電力供給をしないように設定した（停電時の夜間の状態に相当する）。

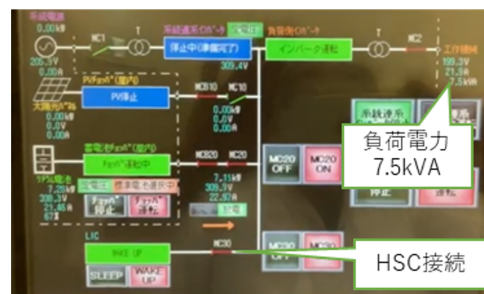
図 11 はその時のミックス電源システムの動作状況の表示画面を撮影したものである。

図 11(a) は HSC を接続した状態で抵抗器のみ接続した場合である。蓄電池から約 3kW の放電があり、抵抗負荷に約 3kW の給電がなされている。なお、写真は載せていないが HSC 接続なしの場合でも同様の状態であった。

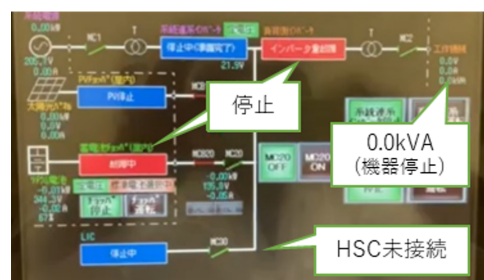
次に、抵抗器を接続したまま、ファンを起動させ



(a)抵抗器接続時



(b)ファン接続時(HSCあり)



(c)ファン接続時(HSCなし)

図11 運転状態表示画面

た。図 11(b) は HSC 接続あり、図 11(c) は HSC 接続なしのときのシステムの動作状況を撮影したものである。

HSC 接続ありの場合、図 11(b) に示すように LIB から約 7.5kW の放電がなされ、2つの負荷に合計約 7.5kVA の給電が行われている。すなわち、回転系負荷を追加で起動させた場合でも負荷への電力供給が継続されていることを示している。

HSC 接続なしの場合は、図 11(c) に示すように LIB 用 DC/DC と負荷側 DC/AC が異常状態となり停止している。このため、LIB からの放電および負荷への電力供給が断たれている状態となっている。

5.4 考察

検証結果より、ハイブリッド蓄電システムに HSC を組み合わせることで、回転系負荷に対しても安定して電力を供給できたことが分かった。

蓄電池の定格電力は 10kW であり、抵抗器と回転系負荷の合計の定格容量約 7kW に対する電力供給源としては十分なスペックである。しかし、HSC

がない場合に回転系負荷を起動させた際にシステムが停止している。これは、回転系負荷の起動時に発生した瞬時電力を供給することができなかったためである。

ここで図 11(c) に示した LIB 用 DC/DC および負荷側 DC/AC の異常は、DC バス部分の電圧が大きく低下したことに起因するエラーであることが確認できている。これは LIB だけでは DC バス部の電圧制御が十分に機能しきれなかったことを意味している。HSC を接続することで DC バス部の電圧制御機能の補完ができたものと考えられる。

図 12 に試作機を用いて加工用工作機械への電力供給を行った際の LIB および HSC の充放電電力と負荷電力の測定結果を示す。回転系負荷の負荷電力パターンには多数の瞬時電力が見られている。一方、LIB の充放電電力には負荷の瞬時電力に対応する放電が観察されておらず、HSC から負荷の瞬時電力に対応する電力が供給されていることが分かった。この HSC による充放電によって、DC バス電圧の変動を抑制したものと考えられる。

これらの試作機およびミックス電源での評価結果から、ハイブリッド蓄電システムに HSC を組み込むことにより、回転系負荷の瞬時電力に対応が可能となる蓄電システムが作製可能となることが分かった。

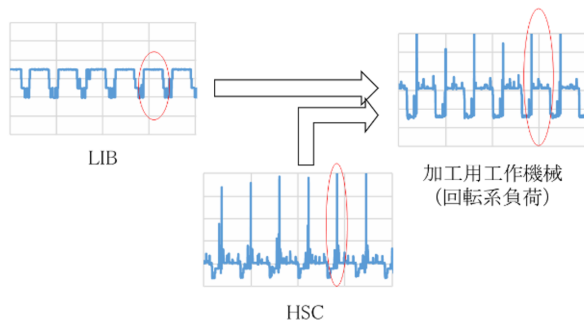


図 12 HSC/LIB の充放電および負荷電力パターン

た。また、時定数の短い回転系負荷向け瞬時電力供給を HSC が分担し、時定数の長い電力供給を LIB が担うというように電力供給源の使い分けができていたことが分かった。

今後、HSC を併設したことによる LIB への影響など HSC の効果をさらに検証していく予定である。

参考文献

- 1) 武蔵エナジーソリューションズ, 投稿論文資料ダウンロード (accessed Oct.11 2024), <https://www.musashi-es.co.jp/lithium-ion-capacitor>
- 2) 澁谷 秀樹 SUBARU TECHNICAL REVIEW 2005 No.32 p148-
リチウムイオンを用いた新しい大容量キャパシタの開発
- 3) N. Ando and M. Taguchi, Electrochemistry, 77, 477 (2009)
- 4) N. Ando, M. Taguchi, and C. Marumo, 2010 International Conference on Advanced Capacitors (JCAC2010) (2010)
- 5) 電気化学 90 巻 (2022) 3 号, <https://doi.org/10.5796/denkikagaku.22-OT0040>
- 6) 鳶島ら:「最新リチウムイオン二次電池」, 情報機構, 2008

著者略歴



中島 武 (ナカシマタケシ)

1997 年三洋電機(株)入社。アモルファス系シリコン太陽電池、HIT 型太陽電池の研究開発に従事。2010 年より蓄電池システムの開発・商品企画を担当。2021 年 10 月より現職。