

6. 8 エネルギー貯蔵 (energy storage)

6. 8. 1 電力貯蔵

エネルギーに関する最近の重要な技術は、3つの要素、エネルギー変換技術（創エネ）、エネルギー利用技術（省エネ）、エネルギー貯蔵技術の（蓄エネ）から成り立っている。

エネルギーそのものは、作られることも消滅することなく、貯めることもできないが、エネルギー資源やエネルギーそのものは形態を変えることができる。

創エネ、省エネ、蓄エネは、基本的に全てエネルギー変換技術に含まれるが、エネルギーを使い勝手のよい形態で貯めておいて、これを必要な時に取り出すということは、社会システム上極めて重要な技術であり、蓄エネルギー技術が単独で議論されることが増えている。

蓄エネルギーは、エネルギーの貯蔵技術とそれを取り出す技術、貯めたエネルギーを運ぶ技術、インフラ整備などからなる。広い意味では石油などのエネルギー資源の備蓄も蓄エネルギーに含まれ、これから大いに期待される技術である。

表 6-8-1-1 蓄エネルギーの方法

エネルギー	内容
①電力貯蔵	電気（電荷）を直接保存する。キャパシタを用いると短時間、少量だけ蓄電できる。
②化学電池	電気を化学物質として蓄える。製造時に充電する一次電池と繰り返す充電できる二次電池がある。二次電池には、鉛蓄電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池などがよく知られる。
③化学物質	水素、アンモニアなどの化学物質としてエネルギーを運搬・貯蔵する。
④揚水発電	水の位置エネルギーで電気を貯めるシステム。余剰電力で水を高いところに汲み上げ、その水を落とすことによって水力発電を行う。大出力の発電ができる。
⑤熱媒体	潜熱、顕熱によって蓄熱を行う。低温の場合は冷媒によるエクセルギーを蓄冷する。
⑥CAES/G-T	圧縮空気エネルギー貯蔵システム。余剰の電力を用いて圧縮空気を貯蔵し、電力が必要な時にその空気を用いて火力発電を行うシステム。米国とドイツに商業機があり。日本は実証実験を完了。
⑦UGS	高圧ガスの地下貯蔵システム。地下タンクに天然ガスを貯蔵し、季節による

需要変動に対応できる。欧米のパイプラインで発達している備蓄技術。

特に、「電気は貯められない」と言われ、送電網（グリッド）においては、発電量と消費量は常に均衡させておかなければならない。小さなキャパシタを除くと「電気＝電荷」そのものを大量に貯蔵する技術は確立されおらず、電力を他の形態で貯め、使用時に電力を発生させる「電池」が開発されている。

電気を貯める技術は、2つの用途によって分けられる。①パワー用途：携帯電話、パソコン、自動車、無停電電源装置など、いわゆる電池としての貯蔵であり、軽量でコンパクトであること、安全性が高く手軽にエネルギーの出し入れができることが重要で、エネルギーの総合効率よりも優先される。②エネルギー用途：揚水発電など、大きな電力を貯蔵する、いわゆるエネルギーストレージとしての貯蔵がある。電力の平準化や安定化の目的で利用され、大規模であり、高効率、低コスト、長寿命であることが重要となる。蓄エネルギーには、化学、ガス、電気など様々な技術要素が含まれ、大きなビジネスチャンスも存在する。

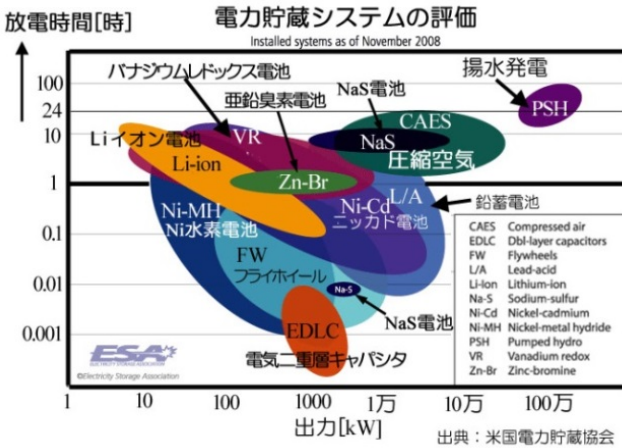


図 6-8-1-1 電力貯蔵システムの評価
出典：米国 Energy Storage Association

図 6-8-1-1 は、Energy Storage Association（米国電力貯蔵協会）が評価した電力貯蔵システムの評価（2008 年）である。技術の進歩によって電力貯蔵システムのマップは変わるが、それぞれの貯蔵技術の適用範囲を大まかに示している。横軸は出力（kW）、縦軸は放電可能な時間（時間）を表わしており、左下が短時間放電・低出力の貯蔵システム、右上が長時間放電・高出力の電力貯蔵システムである。

現在の技術で最大出力のシステムは、揚水発電である。揚水発電は、水力発電所を利用するものであり、原子力や火力の発電所と同等の規模となる。一般的には、原子力発電のベースロードが余剰となった時間帯（特に夜間）に水をポンプアップして昼間の電力需要の大きい時に発電するサイクルを繰り返す。したがって、放電時間は数時間から半日程度となる。揚水発電の次に出力が大きいのは、CAES（圧縮空気）である。続いてNaS電池、鉛蓄電池の出力が大きい。ニッカド電池、バナジウムレドックス電池、リチウムイオン電池、ニッケル水素電池などの化学二次電池がこれに続き、出力範囲は比較的広い。なお、リチウムイオン電池などの化学電池は、1kW以下の小電力の電池として非常に広く利用されているが、ここでは、比較的規模の大きな貯蔵システムとして評価されている。フライホイール、EDLC（キャパシタ）は放電時間が短く、短時間の出力変動に対応するシステムとなっている。これらの貯蔵システムの評価は技術の進歩によって変わる可能性はある。

表 6-8-1-2 電力貯蔵システムの比較

貯蔵技術	長所	短所・課題	パワー	エネルギー	用途など
揚水発電	大容量・低コスト	特殊な立地条件		◎	余剰夜間電力の蓄電
高圧空気貯蔵	大容量・低コスト	特殊な立地条件		◎	CAES-G/T、空気分離など
フロー電池	大容量・独立稼働	低エネルギー密度		◎	災害用予備電力など
金属-空気電池	大容量	充電が困難		◎	リチウム空気電池など次世代大容量電池
Na-S電池	大容量・高効率	製造コスト 安全性の確立	◎	◎	風力発電、非常用電源
Liイオン電池	大容量・高効率	高い製造コスト 安全性	◎	△	携帯機器、HEV、EV（電気自動車）
Ni-Cd電池	大容量・高効率、安全性	容量はLiイオン電池に劣る	◎	○	携帯機器
Ni-H電池	大容量・高効率、安全性	容量はLiイオン電池に劣る	◎	○	携帯機器、HEV
鉛酸電池	低コスト	過放電時の寿命	◎	△	自動車、UPS
フライホイール	ハイパワー	低エネルギー密度	◎	△	輸送機械の回生など
SMES	ハイパワー	高コスト、低エネルギー密度	◎		送変電設備
キャパシタ	長寿命、高効率	低エネルギー密度	◎	○	自動車、電子機器

6. 8. 2 電池

電池には、製造時に充電し一度だけ放電できる「一次電池」と繰り返し充電・放電ができる「二次電池」がある。

似たような材料を用いても、充電ができるものとできないものがあり、たとえば、リチウム電池は一次電池であるが、リチウムイオン電池は二次電池であり、仕組みと利用方法が異なる。

次のような一次電池が実用化されている。

① 乾電池：

- a. マンガン電池 (Zinc-carbon battery)：世界的に広く持ちいられている乾電池。日本での呼称は単1形～単六形、006P形/9V形。
- b. アルカリ・マンガン電池 (Alkaline Manganese Battery)：マンガン電池と同様の種類を持ち、エネルギー密度が大きい。日本ではマンガン電池の上位互換電池とされる。充電可能であるが、危険を伴うため日本では一次電池として位置づけ、充電を禁止している。
- c. リチウム乾電池 (二酸化マンガンリチウム電池など、CR123A、CR-V3 など)
- d. オキシライド電池 (パナソニックの商標、ニッケル系一次電池、2004年)：従来の乾電池が初期電圧1.6Vであるのに対して初期電圧が1.7Vとやや高い。
- e. 塩化チオニルリチウム電池 (東芝)：正極に塩化チオニル、負極に金属リチウムを使用するリチウム電池。電圧が3.6Vあり、主に機器組み込み用。

② ボタン型電池

ボタン電池の記号は先頭のアルファベットが電池のタイプを表し、直径(mm)＋高さ(×10mm)を示すので、たとえば、CR2032は、C(二酸化マンガンリチウム電池、3V)＋円形＋20mm＋3.2mmという電池であることを表す。

- a. 空気亜鉛電池 (zinc-air battery)：燃料電池であり、封印を外すと再度保存はできない。電圧変動が少なく大容量、安価であるため補聴器などに用いられる。二酸化炭素に非常に弱いため、暖房機や締め切った室内での使用が難しい。記号はP
- b. 酸化銀電池：アルカリ型ボタン電池の2倍の容量がある。数十年の保存にも耐えるため時計、補聴器、人工衛星などに用いられた。酸化銀を用いるため比較的高価。記号はS。

c. リチウム電池：様々な種類のリチウム電池（ボタン電池）が実用化されている。記号は、B（フッ化黒鉛リチウム電池、3V）、C（二酸化マンガンリチウム電池、3V）、E（塩化チオニルリチウム電池、3.6V）、F（硫化鉄リチウム電池、1.5V）、G（酸化銅リチウム電池、1.5V）。

次のような二次電池が実用化されている。

- ① 一般型二次電池
 - a. 鉛蓄電池
 - b. リチウムイオン電池（LIB）
 - c. リチウムイオン・ポリマー電池
 - d. ニッケル・水素電池（Ni-MH）
 - e. ニッケル・カドミウム（Ni-Cd、ニッカド電池）
 - f. ニッケル・鉄電池
 - g. ニッケル・亜鉛電池
 - h. 酸化銀・亜鉛電池
 - i. 充電式アルカリ電池
- ② 液循環型二次電池：1970年代にNASAが開発したフロー電池。
 - a. レドックス・フロー・バナジウム電池（住友電工などが実用化）
 - b. 亜鉛・塩素電池
 - c. 亜鉛・臭素電池
- ③ メカニカルチャージ型二次電池（充電専用電極または負極と電解液を交換する）
 - a. アルミニウム-空気電池（技術課題が多く主に軍用）
 - b. 空気-亜鉛電池（燃料電池、補給に難）
 - c. 空気・鉄電池
- ④ 高温動作型二次電池
 - a. ナトリウム・硫黄（NaS 電池）
 - b. リチウム・硫化鉄（熔融塩電池）
 - c. ナトリウム-ニッケル塩化物電池（別名ゼブラバッテリー、昭和飛行機工業が電気自動車を製造販売）

6. 8. 3 二次電池

一次電池は、電力の供給源であり、エネルギーの輸送形態としての意味合いが大きいが、二次電池は、繰り返し充放電を行うように作られているため、エネルギーの一時的な貯蔵装置として用いられることが多い。

様々な二次電池が実用化され、新たな二次電池の開発が進められているが、ここでは、いくつかの代表的な二次電池を取り上げる。

(1) 鉛蓄電池 (lead-acid battery)

鉛蓄電池は非常に古くから実用化されている二次電池であり、最も普及している湿電池である。

正極に二酸化鉛、負極に海綿状の鉛、電解液として希硫酸を用い、充電時は、正極・負極の双方から電解液中に硫酸イオンが移動する。放電は、電解液中の硫酸イオンが正極・負極の双方に移動する。全体では、 $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ という化学変化が起こり、たとえば、負極では放電時に、 $\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$ と電子が移動する。

比較的安価であり、二次電池の中では世界でも最も生産量が多い。ひとつのセルの電圧は約 2V であり 6~12 セル合わせたものが、自動車のバッテリーとして広く利用されている。

特性としては、過放電で使用不能に陥ることがあるため「バッテリー上がり」に注意が必要である。逆に他の二次電池に多くみられるメモリー効果（継ぎ足し充電による見かけの充電量の低下）が無いため、常に満充電にしておくことができる。安価であり、自動車用バッテリーなどに広く普及している。

欠点としては、他の二次電池に比べて、大きく重いという点があげられる（60~110Wh/L、33~42W/kg）。また、湿式電池であるため破損時に希硫酸の漏洩の危険がある。

劣化の機構としては、負極の海綿状鉛がサルフェーションによって表面積が低下し、正極板の二酸化鉛は使用していくにつれて徐々にはがれて脱落する。一定時間使用すると性能が低下し充放電ができなくなるが、使用済みの電池を回収リサイクルするシステムが確立しており、使用済み電池のほぼ全量が回収されている。

日本の主要なメーカーは、GS・ユアサ、古河電池、パナソニック、日立化成、電星など

(2) ニッケル-水素充電電池 (nickel-metal hydride battery, NiMH)

正極:水酸化ニッケルなどのニッケル酸化化合物、負極:水素または水素化合物、電解液:水酸化カリウム水溶液などのアルカリ溶液を用いる。負極の水素源に水素ガスを用いるニッケル水素電池 (Ni-H₂) と、水素吸蔵合金を用いるニッケル金属水素化物電池(Ni-MH) がある。

水素を用いるニッケル水素電池は 1970 年代に宇宙機用に開発され、高圧の水素タンクを持っている。

一般に知られているニッケル-水素充電電池は、1990 年代に開発されたもので、正極にニッケル、負極に水素吸蔵合金を用いる。水素吸蔵合金にはミッシュメタルが使用され、電極と水素の供給源を兼ねており、高圧の水素タンクを必要としない。形状としても乾電池と同じ単一形～単四形などを作ることができ、互換性が高い。それまで小型二次電池として主流であったニッカド電池よりも 2.5 倍の充電量があるため置き換えが進んだ。

鉛蓄電池よりもコンパクトで軽量である (140～300Wh/L、60～120W/kg) ため、ハイブリッドカーの動力用電池としても使用された。

その後、より高性能のリチウム-イオン電池が現れ、携帯電話やデジタルカメラなどの機器などでの置き換えが進んだため 2000 年をピークに大幅に生産量が低下した。

しかし、安全性が重視される乾電池互換タイプでは、単純な充放電回路が可能で安全性が確立されているニッケル-水素充電電池のみが使用されている。現在は、乾電池→ニッケル-水素電池、携帯機器用専用電池→リチウム-イオン電池、ハイブリッドカー→ニッケル-水素電池/リチウム-イオン電池、電気自動車→リチウム-イオン電池、という棲み分けが行われている。

(3) リチウム-イオン二次電池 (lithium-ion rechargeable battery)

リチウム-イオン二次電池は、比較的新しいタイプの二次電池であり、近年ノートパソコン、携帯電話、デジタルカメラ、自動車などに広く用いられるようになった。電池の正極と負極の間をリチウムイオンが移動することで充・放電が行われるためこの名前がつけられた。

一次電池であるリチウム電池とは、仕組みも使われ方も異なるため、リチウムイオン電池、リチウムイオンバッテリー、Li-ion 電池など、「イオン」を省略せずに呼ばれる。LIB、LiB などと書かれることもある。また、リチウムポリマー電池 (LiPo 電池)、リン酸鉄リチウムイオン電池 (LiFe 電池) は、リチウムイオン電池 (LIB) の一種であるが、通常の LIB とは別の電池として取り扱われることが多い。

LIBの主な歴史は、吉野彰（旭化成）らが、リチウムイオン二次電池の基本概念を確立（1985年）、ソニーと旭化成が実用化（1991年）、サンヨー電機が黒鉛負極のLIBを実用化（1994年）、リチウムイオンポリマー電池が登場（ゲル状電解質、1998年）して、携帯電話やデジタルカメラ（デジカメ）の電源として普及、2010年には、1兆円市場となった。

最大の特徴は、ニッケル水素電池よりもさらにコンパクトで軽量・大容量であるということである（250～670Wh/L、100～240W/kg）。

他の電池に比べて高価であるが、現在は、携帯機器だけでなく、電気自動車（EV）の動力源、スマートグリッドのための電力平準化装置、災害時の緊急用電源など、より大型の用途が検討されている。

リチウムイオン電池は、現在も開発が進められている発展途上の技術であり、電極の組み合わせだけでも様々なタイプのものがある。

正極/負極として、コバルト酸リチウム/黒鉛（ソニー、パナソニックなど多数）、マンガン酸リチウム/黒鉛（NEC、サムスンなど）、リン酸鉄リチウム/黒鉛（ソニー、BYD）、三元系（NMC系）/黒鉛、ニッケル系（NCA系）/黒鉛、マンガン酸リチウム/チタン酸リチウム（東芝）などが実用化されている。

リチウムイオン電池の化学反応は、電極と電解液によって異なるが、電極の中にリチウムイオンが入ることができ、電解液の中をリチウムイオンが移動するという点は同じである。

リチウムイオンが入る時（インターカレーション）とリチウムイオンが出てくる時（デインターカレーション）に、外部の回路に対して電子が流れ、充放電が行われ、電池として働く。

主な利点として次のようなことが知られている。

①エネルギー密度が高い。重量比、体積比では鉛蓄電池の5倍②電解液に水溶液を使用しないため、高い電圧が得られる。電解液の中に水分子があると水の電気分解が起こるため、電池内部で高い電圧を得ることが難しいが、リチウムイオン電池ではこれがなく3.6Vの電圧が得られる。高電圧を得るために直列につなぐセルの数を少なくできる③メモリー効果が比較的小さい④自己放電が少ない⑤充放電効率が高くロスが少ない⑥充放電サイクルの寿命が長い⑦高速充電が可能⑧大電流の放電が可能⑨使用可能温度範囲が比較的広い。水溶液を用いないため凍結しにくい。

一方、欠点としては次のようなものがある。①過放電すると二次電池として機能しなくなる。②エネルギー密度が高いためショートすると過熱の危険が大きい③

保存特性が他の電池より劣り、満充電状態で保存すると劣化が急激に進行する。
④常に微小電流を与えて自然放電分を補充するトリクル充電ができないため、無停電電源装置や非常用電源には向かない⑤電圧が高いため従来の乾電池の代替には使用できない⑥高価である⑦安全上の課題がある⑧充電システムには高度な制御技術が必要。

様々な利点があるリチウムイオン電池であるが、項目によっては、従来の二次電池に劣る部分もあり、使い分けが行われている。

リチウムイオン電池は、携帯機器では普及が進み、ほぼ安定した市場が形成されたが、自動車用途としては、まだ発展途上の技術である。

「NEDO 次世代自動車用蓄電池技術開発 2008 (2009年6月)」では、これからの自動車用二次電池の開発ロードマップをまとめている。自動車用の二次電池は大きな市場であり、これからの技術の進歩が鍵を握っている。

2009年の時点では、ほとんどのハイブリッド電気自動車(HEV)がニッケル水素電池を採用、電気自動車(EV)がリチウムイオン電池を採用していた。このレポートでは、次世代の自動車用電池は、リチウムイオン電池が主力になると予想している。

次世代自動車の電池には2種類のタイプが想定されている。①出力密度重視型蓄電池：ハイブリッド(HEV)とプラグインハイブリッド(PHEV)用。内燃機関を持つため、長時間の放電よりも短時間の出力が重視される②エネルギー密度重視型蓄電池：コンピューター型と本格的電気自動車(EV)用。長距離を走行できるための大電力の貯蔵が必要。

次世代の自動車には出力を重視したリチウムイオン電池、都市交通用電気自動車には充電量の大きいリチウムイオン電池と2種類の電池の開発が必要とされ、本格的な電気自動車時代のためには、さらに高性能(出力、充電量、重量など)の電池開発が必要とされている。

現在の二次電池は、実際に充放電可能な容量の他に、安全性や寿命を考えた充電深度(SOC、state of charge)が設定されており、電池の性能を全て使い切らないようにしている。出力重視型の電池では、SOCを50%以下にして、前後20%程度のところで充放電を行うという安全重視の設計が行われている。長期間性能を維持するためにSOCを狭くし、電池の性能を使い切らないため、搭載される電池はその分、大きくなってしまふ。

これに対して、完全な電気自動車の場合は、このような使い方をすると走行可能距離が非常に短くなるため、SOCをできる限り大きくして電池の性能を使いきるようにして、航続距離を長くする、あるいは搭載電池の量を減らすなどの技術開

発が必要となる。電気自動車用の電池には、今後も何度かの大きな技術革新が必要とされている。現在の技術水準のリチウムイオン電池を電気自動車に用いると、重く(乗用車1台あたり300kg)、高価(約300万円)、小容量(~30kWh)であるため、さらに実用化を進めるためには革新的な電池開発が必要である。

NEDOのロードマップでは、2015年に先進LIB、2020年には革新LIB、2030年には革新的ブレークスルー(これには、LIB以外の電池の可能性も含む)とされている。

リチウムイオン電池は、日本発の技術であり、2000年時の主要なメーカーは、三洋電機、ソニー、東芝、NECトーキン、日立マクセル、BYD、LG化学、サムスンSDIと上位は全て日本メーカーであったが、2005年頃より韓国、中国のメーカーのシェアが大きくなり、2012年には、サムスンSDI、パナソニック(松下・三洋)、LG化学、ソニーATL(香港)、BYD、天津力神の順になっている。

新しい技術が導入される時には、常に克服すべき安全性の課題があるが、リチウムイオン電池も安全上の課題を抱えている。

化学電池は、どのような電池であっても本質的には完全に安全ではないが、リチウムイオン電池は、熱暴走などを起こす可能性があり、何度か大きな社会問題を起こした。

基本的には、次のようなリチウムイオン電池の特性による。

- 充電時に電圧が上昇する際に材料が不安定化しやすい。
- 常用領域と危険領域が非常に接近しているため、充放電を監視する保護回路が必要であり、取扱いに注意を要する。
- 水溶液ではなく有機溶媒を使用しているため、高温で発火する危険がある。

リチウムイオン電池は、高容量であるため、内部で短絡するとそれだけ危険であり、水溶液を使わないため高い起電力が得られる反面、有機溶媒の発火の危険がある。実際の製品は、十分な安全設計と品質管理が行われて普及したが、製造過程の品質管理や使用時の安全管理が不十分であると危険な電池となる。

リチウムイオン電池は、急速に普及したため、事故が起こったときに、大きな影響があった。

2006年には、携帯電話やノートパソコンに搭載されたリチウムイオン電池で事故が多発した。事故の発生率は、20ppm(100万台に20台)程度であったが、社会的影響が大きい事故となった。ソニーと三洋電機で2000万台以上を回収された。同年には、電動スクーターや電動車いすの電池が充電中に発火、回収された。

2006年9月に、経済産業省・消費経済審議会・製品安全部に「ノートパソコン用リチウムイオン電池安全確保ワーキンググループ(WG)」が作られた。リチウムイオン電池の安全性を確保していくための技術基準、基準への適合義務化のための検討が行われ、2007年4月には答申がまとめられ、

2007年には、パナソニックで携帯電話用の電池パックが4600万台回収された。大きな事故にならずとも、携帯電話の電池パックが膨らむ事象が多発、リチウムイオン電池の信頼性がゆらいだ。

2008年に、国の「電気用品安全法」に「リチウムイオン蓄電池の規制対象化」が追加され、不具合が発生した場合に被害が拡大する可能性が大きいエネルギー密度が高い電池(400Wh/L以上)が規制の対象とされた。

2011年には、中国や米国で、リチウムイオン電池を搭載する電気自動車やプラグインハイブリッド車の火災事故や爆発事故が発生、特に事故時の衝撃が問題とされた。携帯電話の電池パックのトラブルも続いた。

2013年には、ボーイング787型旅客機のリチウムイオン電池から発火事故が発生した。787型機は、重い電機油圧系統を持たず、制御系が全て電動機器で構成されるという革新的な旅客機であり、そのバックアップ電源としてリチウムイオン電池が採用された。高性能電池の代替が利かず、原因究明と対策のために、787型機そのものの運航停止となり、大きな影響が生じた。航空機へのリチウムイオン電池の大量搭載は前例がなく、難しい調査となった。バッテリーシステムと充電器の見直し、不具合が生じた場合の対策、機体への影響対策などが行われた。

2013年には、三菱自動車の電気自動車とプラグインハイブリッド車の電池から発火、一時的に発売中止となった。電池パックに強い衝撃が与えられたことが原因であった。

現在は、より安全な材質・構造などの研究・開発が進められ、リチウムイオン電池の事故や大規模な回収騒ぎは減っているが、本質的には危険性の高い電池であるため、製造上の欠陥や間違った取り扱いによっては、事故が起こる可能性がある。

リチウムイオン電池は、携帯電話、スマートフォン、ノートパソコン、デジタルカメラなど非常に多くの機器に採用されいつために、危険物の持込を禁止している航空機であってもこれを全面的に禁止することはできない。

航空機への危険物の持ち込みに関する細かなルールは、国土交通省が、航空法、国際民間航空機関(ICAO)の規則などをもとに定めている。電池の場合、乾電池、

ニッケル水素電池、ニッカド電池には特に規制がないが、リチウムイオン電池、リチウム金属電池、および鉛蓄電池については規制がある。

たとえば、リチウムイオン電池で 100Wh 以下の場合、携帯電話などの本体に内蔵する場合はひとり 10 台まで、予備バッテリーは 20 個まで、予備バッテリーの受託手荷物は基本的に不可。100Wh~160Wh（プロ用の映像機器）の場合は、本体に内蔵で 1 台、予備バッテリーは 2 個までとされ受託手荷物は不可である。

携帯電話やノートパソコン用の電池は、基本的に機器に内蔵されているものとし、短絡のおそれがある予備バッテリーやモバイルバッテリーは、荷物室で発火した場合の影響を考えて、受託荷物でなく機内持ち込みが基本とされている。機内持ち込み 10 台と言うと多いように思うが、携帯電話、ノートパソコン、タブレット、モバイルバッテリーなど、数えてみるとかなりの数のリチウムイオン電池が、カバンや服のポケットに入っている時代である。

電動乗物や電動アシスト自転車などの大型の電池は、本体に組み込まれて入れも持ち込むことができないが、車椅子用のバッテリーは、航空会社と別途相談することになっている。

非常に利点が多く、様々な機器に利用されるリチウムイオン電池であるため、より安全な構造のものが研究されている。従来型の主流は、コバルト酸リチウム系であったが、リン酸鉄リチウムイオン電池（Li-Fe）は、熱暴走の危険性は少なくなっている。リチウムイオンポリマー二次電池（LiPo）では、電解液をゲル化して引火しにくいようにしておりスマートフォンなどの携帯機器に利用されている。チタン酸リチウム系では内部短絡が起こっても熱暴走しにくいとされている。

（4）ナトリウム・硫黄電池

負極にナトリウム、正極に硫黄、電解質にファインセラミックス（ β -アルミナ）を利用した高温作動型二次電池である。

なお、「NAS 電池」は、日本ガイシの登録商標である。大規模の電力貯蔵用であり、風力発電や太陽光発電の出力・負荷平準化用電池（スマートグリッドへの対応が可能な電池）として期待されている。

次のような特徴がある。

- 鉛蓄電池に比べて体積・重量が 3 分の 1 程度である。
- メガワット級の貯蔵が可能で、出力変動の大きな風力発電・太陽光発電と組み合わせ出力を安定化させることができる。
- 需要家に設備を設置して、割安な夜間電力の利用とともに、停電時の非常時電源を兼用できる。

- 構成材料が資源的に豊富かつ長寿命である。
- 自己放電が少ない、充放電の効率が高い。
- 作動温度は 300°C を維持する必要がある。
- 量産化に成功しているのは日本ガイシだけである。

NAS 電池は、新しい技術であるため、技術的な課題がある。

高岳製作所小山工場(2010 年)と三菱マテリアル筑波製作所(2011 年)の 2 カ所で「NAS 電池」が発火事故を起こした。原因は、製造不良セルが溶融して延焼したことによるもので、内部に短絡防止、延焼防止の措置を講じて、2012 年 6 月に再開した。NAS 電池はナトリウムを使用するため、火災時に水による消火ができないことに注意が必要である。

6. 8. 4 水素エネルギー

水素は、次世代のエネルギー利用形態として期待されている。

原油から作られるガソリンや軽油は、どちらかという一次エネルギーに近いが、水素は、地下資源としての水素の鉱脈がある訳ではなく、石炭あるいは石油を原料として作られる「二次エネルギー」である。したがって「水素エネルギー」というのは石炭、石油、天然ガス、原子力などのエネルギー源の代替エネルギーになることはなく、これらの一次エネルギーを貯蔵・運搬するためのものである。

他の方法で発電した余剰電力や不安定な電力を一旦水素に変えて貯蔵、これを電力が必要な時に、燃料電池に使用して発電するという水素を利用した蓄エネルギー技術が期待されている。一部の報道では、水素エネルギーが普及すると原子力や火力依存から脱却できるかのような論調もみられたが、水素を作り出すための莫大なエネルギーをどこから持ってくるかが重要であって、一次エネルギーと二次エネルギーを比較することはできない。水素は原子力や火力の代替エネルギーにはならない。水素は資源ではなく、有望な貯蔵形態のひとつとしてあり、発電所ではなく送電線の代替になるものである。

水素を貯蔵・輸送する時に、最も大きな問題は、水素がほとんどの場合、気体であるということである。

水素の標準沸点は、33.14K、融点 13.95K と非常に低い。ここまで冷却し、液化するためには大きなエネルギーを必要とし、長期保存も容易ではない。

1960年代の米国の宇宙開発では、宇宙船に液体水素と液体酸素を搭載、燃料電池によって電力が供給されたが、これは特殊な条件であって、一般的な液体燃料の代替として液体水素を利用することは、エネルギー経済的に成り立たない。水素を圧縮・液化・貯蔵するために必要なエネルギーは莫大であって、割りに合わないのである。

したがって、燃料電池用の水素を貯蔵・輸送する実用的な方法は、気体の水素あるいは、気体の水素を発生する別の物質に置き換える 2 通りの方法ということになる。気体の圧縮にどの程度のエネルギーを必要とするのかガス屋なら、その計算方法や実状をよく知っている。ここでは、圧縮以外の方法を検討することにする。

図 6-8-2-1 に水素吸蔵材料と水素密度の関係を示す。横軸は、水素を吸蔵する材料や容器の重量あたりの水素の吸蔵量をパーセントで表したものの、縦軸は貯蔵システムの体積当たりの吸蔵量である。右にいくにしたがって、軽い容器で水素

を貯蔵でき、上にいくにしたがって、よりコンパクトに水素を貯蔵できるということになる。

液体水素は水素を貯蔵できる性能が圧力によって少し変わるためグラフ上に点ではなく線で示されている。高压になると容器が重くなるため貯蔵量が減る。圧力は、具体的な値を示していないが、図の左の方が高压である。液体水素の場合、低压の方が有利であるが、体積当たりの貯蔵量はあまり変わらない。

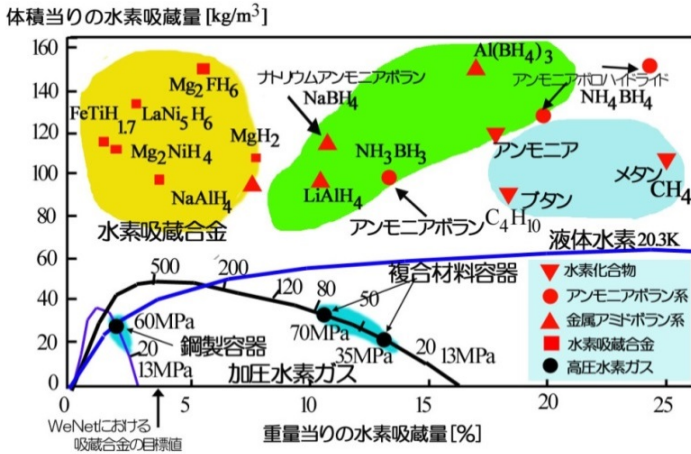


図 6-8-2-1-水素吸蔵材料の水素密度
(参考：シグマアルドリッチ社の技術資料より抜粋)

液体水素の下の二本の線は、高压ガスの水素である。複合材料容器と、鋼製容器では、重量当たりの水素貯蔵量がかかなり異なる。複合材料の線の上に 35MPa と 70MPa の点を示しているが、これは FCV に搭載する高压水素容器の代表的な 2 つの値である。鋼製容器に比べて、重量当たりの充填量がかかなり多い。気体を圧縮して充填するため、超高压の 70MPa の場合でも、液体水素に比べると容積当たりの充填量がかかなり少ない。現在は、他に適当な積載方法が利用できないため、35MPa あるいは 70MPa の高压水素タンクを搭載し、これに外から供給する方法（水素スタンド、通称水素ステーション）が主流である。

図の左上は、水素吸蔵合金である。ニッケル、マンガン、ランタンなどの金属（合金）に水素を吸蔵・放出させるシステムが研究されているが、金属を使用するため、どうしても重くなり、グラフの左の方に偏っている（体積あたりの吸蔵量は大きい、重量あたりの吸蔵量はかなり小さい）。

現在、考えられている FCV は、従来のガソリンエンジン車と同等の航続力を得るために約 5kg の水素搭載量が必要とされている。水素吸蔵合金の重量あたり水素吸蔵量の目標値は約 3%であるが、現実的には 1%程度にとどまると考えられているため、吸蔵材料だけでも 500kg ほどの重量となる。容器、水素ガスの供給機器なども必要であるから、一般的な乗用車としては、ほぼ成立しないと考えられている。

メタンなどの炭化水素、アンモニアは、化学反応による水素供給源となる。図の右上に分布しており、軽量・コンパクトな水素の貯蔵・輸送方法となる。水素の貯蔵方法としては非常に優れているが、化学反応によって、反応速度、反応条件（温度、圧力）、劣化、使用できる材料、安全性など様々な解決すべき課題がある。

図の中央付近の材料は、アンモニアボラン系の吸蔵材料である。重量当たりの吸蔵量、容積当たりの吸蔵量とも優れており、比較的取り扱い易い固体材料であるが、実用化のために克服すべき課題が多く、欧米や日本の研究機関等で研究・開発が進められている。

アンモニアボラン系の化合物は、錯体系の化合物であり NH_xBH_x ($x=1,2,3,4$) の化学式で示される。特に $x=3$ のアンモニアボランは、分解温度が $70\sim 110^\circ\text{C}$ と適当な温度であり、水素放出速度も速いため FCV 用にも使いやすいと考えられているが、水素放出後の反応生成物が非常に安定しているため、水素を再吸蔵させるプロセスが容易ではなく、車載設備では困難と考えられている。

高性能の錯体水素化物の研究が各国で行われているが、現在までに実用化レベルに達したものはない。

水素を貯蔵する技術は、古くから様々な方法が研究されてきたが、現在も多くの技術が研究・開発の途上にある。大規模な貯蔵では、コストや材料資源の課題、FCV のような移動手段の場合は、重量、信頼性・安全性の課題が大きい。これらの課題が、大きな技術的ブレークスルーによって解決されると、水素は次世代のエネルギー源になると考えられている。

6. 8. 5 燃料電池 (fuel cell)

「燃料電池」は、言葉通りのバッテリーではなく、補充可能な活物質（水素など）と酸素の反応によって電気と熱を発生する「発電機」である。燃料電池による発電は、化学エネルギーから電気エネルギーへの変換過程で、熱サイクルのロスや機械的なロスがないため、熱機関を利用する一般的な発電方式よりも効率が高いのが特徴である。ソーラーセルを日本語で太陽電池と呼ぶように、フューエルセルも燃料電池と呼ぶ。機能としては水素を燃料とする発電機なので、充電はできない。

燃料電池の作動の仕組みは、19世紀初頭には見出されていたが、実際に使用されるようになったのは、米国の宇宙開発（ジェミニ計画、1965年）からである。その後、アポロ計画やスペースシャトル計画でも電源と水の製造のために燃料電池が使用され、1980年代には民生用の燃料電池が開発されるようになった。宇宙船用は、酸素ガスの供給を必要とするが、地上用は空気中の酸素を利用するため、燃料だけを補給する。

現在、4種類の燃料電池が実用化されている。

①PEFC：固体高分子形（携帯端末、家庭電源、自動車）②PAFC：りん酸形（定置発電用）③MCFC：溶融炭酸塩形（定置発電用）④SOFC：固体酸化物形（家庭電源、定置発電用）

発電所で発電を行う場合、電力は送電線で送られるが、石炭や天然ガスを燃焼した時の大量の廃熱はそのまま捨てられることが多い。これに対して、地産地消型の燃料電池であれば、電熱併給型のシステムを構成することができるため非常に効率が高い。コージェネレーションのひとつの方式として大きく期待されている（熱電併給は、英語では、combined heat and power (CHP) と呼ぶことが多いが、日本ではコージェネと呼ぶことが多い）

①固体高分子形燃料電池（polymer electrolyte fuel cell, PEFC）は、日本では1990年代に開発が進んだ。燃料には、水素、都市ガス（改質器）、メタノール（メタノール直接または改質器）、ガソリン（改質器）などが用いられる。

反応温度が低い（100℃）ため、電極に白金触媒が用いられる。この触媒が、一酸化炭素に被毒されて失活するため、供給される水素の純度管理が必要である。

電解質が固体高分子膜であるためこの名前があるが、反応によって膜中の水分が失われるため、燃料から水分を補給する必要があり、また、水を使うため 0℃～

100°Cの範囲で使用する。自動車用として試験運用が始まっている（トヨタ自動車、ホンダ技研工業など）。

②りん酸形燃料電池（PAFC）は、電解質としてリン酸水溶液をセパレーターに含浸させて用いる。PEFC より温度が高い（200°C）が、白金を触媒としているため、一酸化炭素による被毒対策は同じである。天然ガスを燃料とするコージェネレーション（100～200kW 級）で実績が多い。

③熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）は、熔融炭酸塩をセパレーターに含浸させて用い、水素、天然ガス、石炭ガスを燃料とすることができる。動作温度は600～700°C。高温で動作するため、白金触媒を用いず一酸化炭素による被毒の問題がない。燃料電極側に高濃度のCO₂（80%）が発生するため、CO₂回収システムが検討されている。

④固体酸化物形（SOFC）は、全て固体で製造され、高温（約1000°C）で作動し、高価な触媒を必要とせず、効率が最も高い。

燃料電池自動車にもエタノールを用いる SOFC 燃料電池の開発が進められている。車載の改質器でエタノールから水素を製造する時に CO₂ が発生するが、パイオエタノールを用いてカーボンニュートラルにすることが検討されている（日産自動車）。

SOFC は、効率が高い、高価な触媒を必要としない、改質器で CO が発生しても燃料として使用できる、CO の除去装置が不要、エタノールが液体燃料であるため高圧水素供給のインフラ整備の問題がない、車載用の高圧水素タンクを必要としない、などの利点があるが、作動温度が高いという点が最大の課題である。

6. 8. 6 CAES/G-T

電力平準化技術として余剰エネルギーを空気圧で蓄える CAES/G-T (Compressed Air Energy Storage/Gas Turbine)システムが実用化されている。

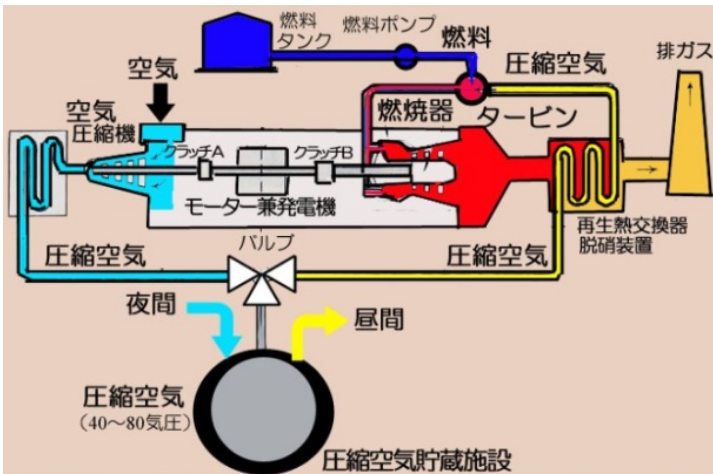
ただし現在稼働している商業プラントは、ドイツと米国でそれぞれ1基ずつしかなく、その他の国では、試験的な運用が行われている。

これは、余剰電力で空気を圧縮・貯蔵し、電力需要の多い時にガスタービンの燃焼用空気として使用、発電量を通常時の3倍に増やすシステムである。

発電用のガスタービンでは、燃焼によって得た動力のおよそ $1/2 \sim 2/3$ を燃焼用空気の圧縮に使用されるため、残りの $1/3 \sim 1/2$ の軸動力だけが発電機の駆動に使用される(ブレイトンサイクル)。空気の圧縮動力は非常に大きい。

そこで、電力需要の少ない時間帯に、燃焼に必要な空気以上の圧縮空気を貯槽に蓄めておき、電力需要の多い時間帯にこの空気を利用して燃焼を行えば、出力の全てを発電に使うことができるため、大幅に発電量を増やすことができる。

ガスタービンによる火力発電において、空気を貯蔵することによって電力を平準化するシステムがCAES/G-Tである。



CAES/G-T 発電システム概念図

図 6-8-5-1-CAES/G-T による電力貯蔵の概念

(参考：沢田隆、電気学会誌、116-11,1996)

発電に必要な燃焼用圧縮空気は、膨大な量を必要とするため、空気の貯蔵には、地下貯蔵システム（UGS）が考えられている。

欧米やロシアでは、高圧の天然ガス地下貯蔵貯蔵が行われており、空気の貯蔵にも同じ技術が使用できる。

大電力を貯蔵する技術として最も広く知られている揚水発電は、適地がかなり限定される。

揚水発電のための上池とした池の落差も必要となるため地形の制限があり、余剰電力を生み出す発電所（主に原子力発電所）と揚水発電を行う揚水発電所（急峻な山岳地）の間をつなぐ送電網も必要である。たとえば、英国では揚水発電に適した地形が得られないため、揚水発電所のあるノルウェーまで海中ケーブルで接続するというも行われている。これに対して、CAES/G-Tは、地下の空洞にエネルギーを蓄えるため、適用可能範囲は比較的広く、長距離の送電によるロスも軽減できる。また、小規模であれば地上式の貯槽も可能であり、基本的にはどこでも建設が可能である。

最も安価な地下貯槽は、岩塩層を水で溶かして地下に貯槽を作る工法によって建設される。ヨーロッパには、夏場に生産した天然ガスを地下に貯蔵して、需要の多い冬場にこれを消費するという季節間のエネルギー平準化システムが広く普及しており、地下高圧ガス貯蔵技術が確立している。

1990年の内山洋司らの報告（電力中央研究所 研究報告 Y90002）によると、

西ドイツフントルフ発電所

（290MW、岩塩層）が運転中、

米国アラバマ電力のマッキントッシュ発電所（110MW、岩塩層）、ソ連のドンバス発電所

（1050MW、岩塩層）が建設

中であり、その他にイタリア

（帯水層）、米国（帯水層、岩塩層、岩盤空洞）、フランス（岩盤空洞）、ルクセンブルク（岩盤空洞）、北海道（岩盤空洞）などが計画・検討中となっている。

表 6-8-8-3 稼働中の CAES 発電所の概要

CAES 発電所	フントルフ (西ドイツ)	マッキントッシュ (米国)
運転開始	1978 年	1991 年
発電出力	29 万 kW	11 万 kW
発電時間	2 時間	26 時間
貯蔵時間	8 時間	41 時間
貯槽容積	30 万 m ³	56 万 m ³
貯槽深さ	650m	488～732m
貯蔵圧力	50～70atm	～80atm

表 6-8-8-3 は稼働中の CAES 発電所の概要である。

写真は米国の実施例、マッキントッシュ発電所の概観である。巨大な空気貯槽は地下にあるため、上空からは見えない。

日本における、その後の CAES 関連の開発の経緯は、電中研の幸田栄一が 2012 年に報告している。(日本機械学会 動力エネルギーシステム部門 NEWS Letter44 「圧縮空気エネルギー貯蔵技術 (CAES) の新しい展開」2012 年 6 月 30 日、幸田栄一)。

1990 年代までは CAES は、火力発電技術の応用として研究が進められてきた。大容量化が容易で、経済性が高い有力技術と考えられた。

2000 年代になり、昼夜の負荷平準を主目的としたために大容量の空気貯槽の建設コストが課題となり CAES の研究は停滞した。

その後、再生可能エネルギーの負荷変動に対応させるという目的で、再び CAES の開発が行われるようになった。米国では、新規の再生可能エネルギーの多くが制御の難しい風力発電である。風力発電の電力とガス火力発電を CAES/G-T でつなぐシステムが検討されている。

日本には CAES の商業装置の実施例はないが 30 年ほど前から電力中央研究所を中心に研究が行われている。日本の研究は、概略次のようになっている。

日本国内には、ドイツのような岩塩ドームがないため岩塩層を利用した貯槽は日本では採用できないため、ゴムライニング方式の研究が行われた(1990~2001 年、通産省)。三井砂川炭鉱跡で 2 千 kW の実証実験が行われた。

ゴムライニング方式よりも安価な方法として、水封式貯槽の研究が電中研で行われた。水封式の実証研究は、石川島播磨重工(現 IHI)と電源開発によって北海道の炭鉱跡を利用して行われた。この他にも神岡鉱山(1987~2001 年)などでも基礎実験が行われた。水封の技術があれば、割れ目の存在する岩盤であってもライニングなしに気密性が保てることが実証されている。CAES 用の貯槽の基本技術はほぼ完成しているようである。

貯槽の研究と同時に発電システムの効率化の研究も行われ(ACC: Advanced Combined Cycle 併設 CAES)、揚水発電よりも高い効率が見られている。さらに AHAT (Advanced Humid Air Turbine、圧縮空気を加湿して流量を増加する方式)を用いた AHAT-CAES も検討されている。

深冷空気分離装置も圧縮空気を使用するため、CAES/G-T と組み合わせるシステムのアイデアはあるが、現時点では実例は見当たらない。



図 6-8-8-4 マッキントッシュ発電所、
ESPC 社 (Energy Storage Power
Corporation)

日本では、大成建設とエア・ウォーターが2002年に共同出願した特許が成立している。これは、CAES/GTの高圧空気を空気分離装置と発電装置に送るシステムであり、実施例では、空気は20気圧、空気圧縮機、酸素圧縮機などが不要でありプラントのコストも安価になるとされている。夜間電力を利用した昼間の酸素製造が可能になり、ランニングコストが低減されるとされている。