

### 3.5.2 電力貯蔵の方法

電力を貯蔵する方法には、揚水発電、フライホイール、圧縮空気変換、および二次電池（蓄電池）があります。二次電池には多くの種類があり、それぞれ長所と短所があるので、目的に合った二次電池を選択する必要があります。主な二次電池は、ナトリウム硫黄電池、レドックスフロー電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池、鉛蓄電池、電気二重層キャパシタ、ニッケル・カドミウム電池です。

電力は「そのまま」では貯蔵できないので、「貯める」には電力を他のエネルギーに変換し、使用する時に戻さなければなりません。このエネルギー変換の形態から電力貯蔵の方法を分類すると表1になります。なお、需要側が緊急用や負荷の増大に対処する目的で発電機を所有し、その燃料を貯蔵する場合がありますが、電力の貯蔵ではないので本稿には含めません。同様に燃料電池の燃料として水素を貯蔵するのも、電力の貯蔵ではないので本稿には含めません。

表1. 電力貯蔵のためのエネルギー変換

電力貯蔵方法	変換エネルギー	主な利用目的
揚水発電	位置エネルギー	夜間の原子力発電電力の昼間利用
フライホイール	運動エネルギー	鉄道車両の回生エネルギー利用
圧縮空気貯蔵	圧力エネルギー	夜間風力発電の昼間利用
二次電池	電気化学エネルギー	工場・業務施設の非常用電源、自動車・作業車・自転車の駆動電源、携帯機器・工具・家庭電化製品・情報機器の電源

## 1. 電力貯蔵の方法

### 1.1 揚水発電

揚水発電は図1のように上部と下部に二つのダ

ムを設け、夜間の電力需要が少ないときは上部のダムにポンプで揚水し、昼間の電力需要が多いときに落下させて発電する方法です。発電所の水力タービンは、揚水時にはポンプとして働き、発電時には逆回転して発電機の動力源になります。発電量は揚水に要した電力の約70%で、約30%が損失になります。発電設備としては一般的な水力発電と同じですが、河川からダムへの自然流入水が少ないので、水力発電所というよりも一種の電力貯蔵

施設です。余剰電力の発生源は、日間の需要変動追随性が低い原子力発電です。原子力発電は、操作温度や圧力の変化が原子炉にストレスを与え、安全性を阻害する要因になります。このため一定の出力を維持するのが望ましく、需要の変動に応じて出力を追随させるのが困難です。その結果、需要の少ない夜間電力が余剰電力になるのです。

1999年の時点で日本全国に42ヶ所の揚水発電所があり、出力の合計は約2500万kWです。東京電力の最大出力が約6000万kWでしたから、

揚水発電の出力規模はかなり大きいことがわかります。図2に示した電力の時間帯別消費量から、揚水発電がピーク電力の10%程度を

担っていることが読み取れます。なお、揚水発電は適地が少ないことから、現時点で新規立地の見通しはありません。

### 1.2 フライホイール (FW: 回転体)

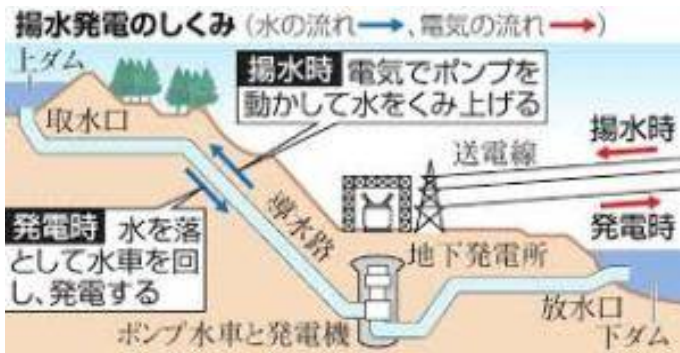


図 1. 揚水発電の仕組み

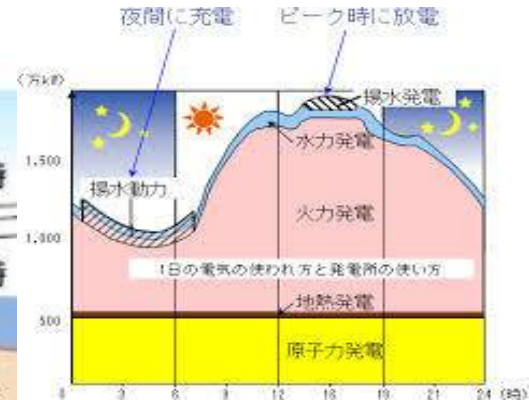


図 2. 電力の時間帯別消費量

フライホイールによる電力貯蔵を図 3 に示します。フライホイール（ローター）は、モーターを兼ねた発電機とともに、真空に保たれた格納容器に取り付けられています。容器を真空に保つのは、フライホイールの回転抵抗を少なくするためです。軸受けには非接触型の磁気軸受けを採用し、回転

時にはこれらが逆に働き、電池と同様に電気エネルギーを蓄えることができます。1988年に京浜急行電鉄が、鉄道車両の回生電力を有効利用するために採用し、12パーセントの再利用を可能にしました。ローターの回転運動エネルギーで電力を貯蔵するので、充電と発電の時間差が大きいと損失が大きくなります。このため、頻繁な加速と制動が必要な鉄道車両に積載して使用するのに適しています。

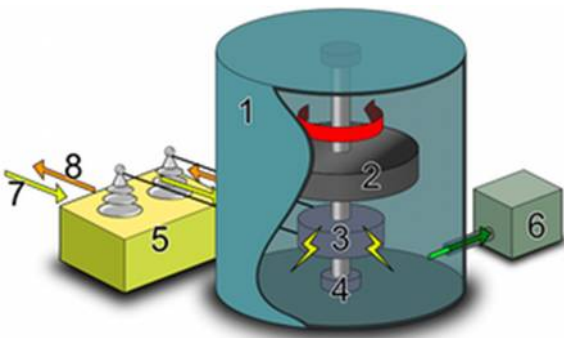


図 3. フライホイール電力貯蔵

- 1: 容器 2: フライホイール 3: 発電機/モーター
- 4: 軸受 5: インバーター 6: 真空ポンプ
- 7/8: 充電・放電

による抵抗を軽減しています。磁気軸受けには保守の手間を軽減する利点もあります。フライホイールは軽くて強度のある材料が望ましく、炭素繊維強化樹脂が広く使われています。モーター兼用の発電機には、強力な永久磁石を備えたブラシのないモーターが使われています。格納容器の外のインバーターに接続されていて、充電時と放電

### 1.3 圧縮空気貯蔵

圧縮空気貯蔵は、図 4 に示すように空気圧縮タービン、高圧空気貯蔵タンク、膨張タービン、圧縮熱の回収設備、蓄熱媒体貯蔵タンク（蓄熱槽）、発電機で構成されています。発生電力が需要を上回る時は空気を圧縮して高圧にし、需要を下回る時は膨張タービンを駆動して発電させます。欧米では岩塩採掘跡の地下空間を利用し、空気を 6MP（60気圧）程度に圧縮して貯蔵しています。ただし、欧米では圧縮空気の用途が電力ではなく、ガスタービン発電の燃焼用空気です。したがって電力エネルギーを貯蔵するのですが、電力に戻して使用してはいません。一方、日本には岩塩採掘跡のような密閉性の高い地下空間がないため、鋼製タンクを利用する設備が開発され、2015年から実証試験も兼ねて稼働しています。現在の日本での

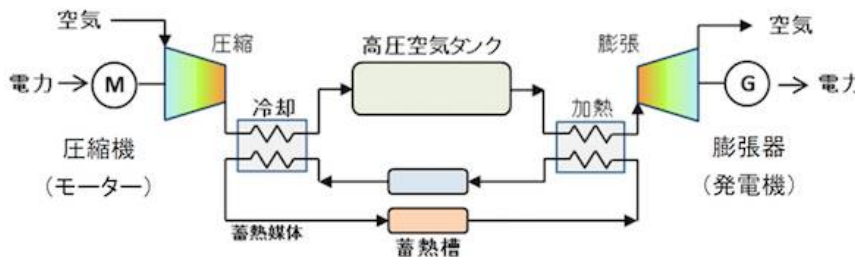


図 4. 空気圧縮による電力貯蔵設備の構成 (出典：NEDO 資料)

用途は、風力発電の需要変動への対応です。特別な機器がなく、汎用機器の組み合わせで建設できるので、太陽光発電の需要変動への対応にも適用できる方法です。なお、電力貯蔵としての効率は、約 50%程度といわれています。

#### 1.4 二次電池

二次電池は蓄電池と呼ばれるように、よく知られた電力貯蔵の方法です。電池には一次電池と二次電池があり、一次電池は化学エネルギーを電気エネルギーに変換できますが、電気エネルギーを化学エネルギーに変換することはできません。懐中電灯に使う乾電池が代表例ですが、腕時計に使うボタン電池や補聴器に使う空気電池も一次電池です。二次電池は化学エネルギーを電気エネルギーに変換し放電しますが、充電時には電気エネルギーを化学エネルギーに変換して蓄電します。「蓄電池」とか「充電式電池」と呼ばれますが、初期段階の電池は放電だけで充電機能はありませんでした。その後充電機能のある電池が開発されたので、区別するために一次電池、二次電池と呼ぶようになったものと推察されます。

二次電池の代表例は、自動車の鉛蓄電池や携帯機器に使われているリチウムイオン電池です。電動工具には出力の大きいニッケル・カドミウム電池が長く使われていましたが、今はリチウムイオン電池に代わりつつあります。ハイブリッド車に

はニッケル水素電池か、リチウムイオン電池が使われています。大容量が必要な工場の非常用電源には、ナトリウム硫黄電池 (NAS 電池)、業務用施設にはレドックスフロー電池 (RDF 電池) が広く使われています。このように二次電池には多様な方式があり、物理的な特性や性能に違いがあります。次節では電力貯蔵という観点から、主要な二次電池について概要を紹介します。

## 2. 二次電池の種類と特性

### 2.1 ナトリウム硫黄電池 (NAS 電池)

ナトリウム硫黄電池 (NAS 電池) の特徴を表 2 に示します。高温操作型で、電解質を熔融状態で使用するため、真空断熱容器に収納して使います。運転開始時はヒーターによる昇温操作が必要です。変電所に設置する場合がありますが、ほとんどは需要側が設置しています。設置目的の多くは外部電源遮断時の電源確保と、低価格の夜間電力を貯蔵して昼間の高価格時間帯に使用する電力費用の節減です。設置施設は工場が約 6 割、業務施設が約 4 割で、学校や研究機関も導入しています。標準機種 1 台あたりの定格出力は約 800kW~1200 kW、容量は約 4800~8600 kW 時になるので、大規模工場への設置が多いです。国内にある全 NAS 電池の 1 年間の放電 (発電) 実績は約 3 億 kW 時に達しており、中堅の揚水発電所 1 基分に相当しています。放電量の実績は充電量の約 75%~85% です。NAS 電池は比較的低コストで大容量を実現できますが、約 300°C の高温で操作します。このため、加熱や保温などの周辺設備も安全に維持管理できる体制が必要です。一定規模以上の製造工場や電力関連施設に適しているでしょう。

表 2. ナトリウム硫黄電池 (NAS 電池)

物理的な特徴	負極 : ナトリウム 正極 : 硫黄 電解質 : ベータアルミナ (固体)
性能的な特徴	①充電密度は鉛蓄電池の約 3 倍 ②自己放電率が低い。 ③充放電回数 : 2500~4500 回 ④部材耐久性 : 約 15 年 ⑤充放電効率が 高い (75%~85%) ⑥電解液循環などの補機が不要 ⑦構成材料が資源的に豊富 ⑧高温動作なのでヒーターが必要 ⑨遮熱と保温が必要 ⑩安全管理体制が必要 ⑪出力は標準が 800kW~1200kW
適用性	小規模需要には不向き。一定規模以上の大容量需要向きで、運転管理体制が明確な生産工場向き。

図 5 には日本碍子の HP から引用した NAS 電池の動作原理を示します。放電時には負極のナトリウム(Na)が電子を放出してナトリウムイオン (Na イオン) になり、固体電解質を通過して正極に移動します。正極の硫黄 (S) が外部回路からの電子で Na イオンと化学反応し、多硫化ナトリウム (Na<sub>2</sub>S<sub>x</sub>) に変化して、負極から回路に放出され、正極に移動する電子の流れが電力になります。充電時には外部からの電力供給で電圧が加わり、正極の Na<sub>2</sub>S<sub>x</sub> は Na イオン、S、電子に分かれ、Na イオンは固体電解質を通過して負極に移動します。Na イオンは負極で電子を受け取り、Na に戻ります。

## 2.2 レドックスフロー電池 (RDF 電池)

レドックスフロー電池 (RDF 電池) の特徴を表 3 に示します。レドックス (redox) という呼称は、還元 (reduction) と酸化 (oxidation) の造語で、

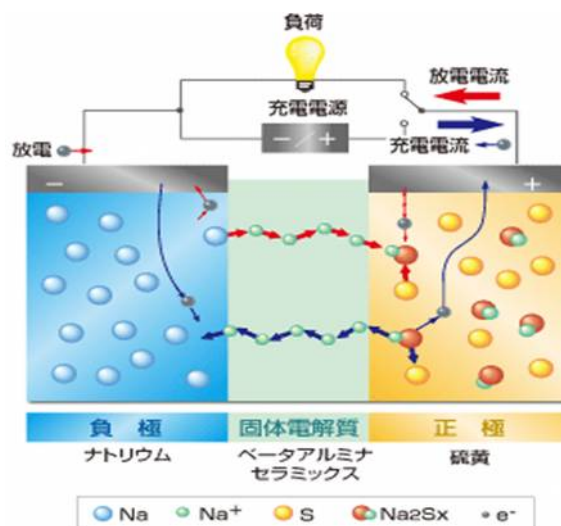


図 5. NAS 電池の動作原理

(出典 : 日本碍子 HP)

表 3. レドックスフロー電池 (RDF 電池)

物理的な特徴	負極 : バナジウム 正極 : バナジウム 電解質 : 硫酸バナジウム水溶液
性能的な特徴	①エネルギー密度は高くないので NAS 電池より重量も容積も大きい ②高い瞬間出力が得られる ③電解液の劣化がなく長寿命 ④必要な電力の容量に合わせてタンクのサイズを決められるので、経済的な設計が可能 (設計自由度大) ⑤高温・高圧部がなく安全性が高い ⑥充電状況のモニタリングが可能。 ⑦使いやすい。 ⑧繰り返しの高出力特性が優れる ⑨出力は標準が 250kW~1000kW
適用性	安全性が高く使いやすいので、商業施設、オフィスビル、大学、研究所、業務施設に向いている。需要側の負荷平準化と非常用電源に採用例が多い。

不活性電極の表面で 2 種類のレドックス系媒体が酸化・還元します。2 種類の活性物質である溶液を外部のタンクに貯え、ポンプで電解セルに供給し

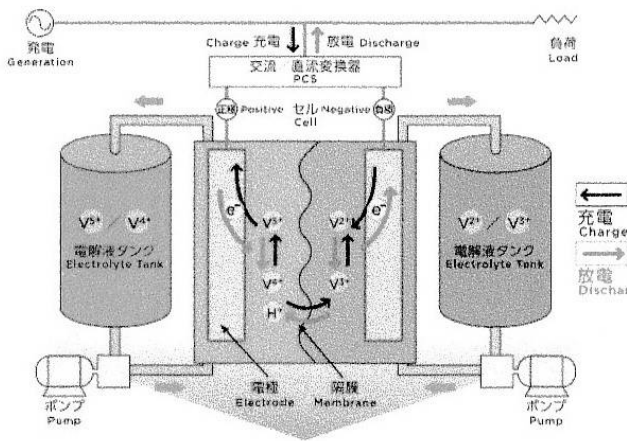


図 6. レドックスフロー電池の動作原理

出典：住友電工のエネルギーソリューション

て充放電させます。レドックス媒体としてはバナジウム系が最も多く、正極・負極ともバナジウムイオンを使用しています。バナジウム系の起電力は実用的な電解液組成で 1.4V です。レドックスフロー電池の電解槽をセル、セルを複数積層したものをセルスタックと称しますが、セルの役割は電解液中のバナジウムイオンを効率よく酸化還元反応させることにあります。単一セルでは電圧が低いので、実用的な電圧を得るために直列積層方式を採用しています。需要家の利用形態は、負荷の平準化（低価格時間帯電力の時間シフト利用）に加えて、緊急時対処（非常用電源）、および瞬間電圧低下抑制などです。太陽光発電や風力発電の出力平滑化にも有用です。NAS 電池は容量が大きく高温操作型なので、工場の導入が多いのに対して、RDF 電池は容量の選択幅が広いのが特徴です。このため、納入実績は大型オフィスビルや業務用施設が多く、大学にも納入されています。図 6 に RDF 電池の動作原理を示します。

### 2.3 ニッケル水素電池

表 4 にニッケル水素電池の物理的、性能的な特徴を示します。1990 年の実用化以来、デジタルカメラや電動工具などの民生用小型機器に使われて

きましたが、デジタルカメラはもっとサイズの小さいリチウムイオン電池に代ってきています。電動アシスト自転車とハイブリッド自動車の分野では、リチウムイオン電池と競合しており、価格は有利ですがサイズと重量では不利です。大容量化や高速充放電機能が開発され、太陽光発電や風力発電の平滑化にも利用できるようになっています。大容量適用事例には、工場や業務施設の据え置き型と鉄道用があり、負荷平準化（低価格時間帯電力の時間シフト利用）に加えて、緊急時対処（非常用電源）、瞬間電圧低下抑制などに使われています。電力供給側のニーズとして

表 4. ニッケル水素電池

物理的な特徴	負極：水素吸蔵合金（金属水素化物） 正極：ニッケル電極 電解質：水酸化カリウム主体の水溶液
性能的な特徴	①使用温度範囲が広い ②充放電で劣化が少ない ③内部抵抗が小さく急速充放電が可能 ④セルに収納する電極版のサイズと枚数を増やせるので、大容量化が容易 ⑤有害金属が使われていないので、取り扱いが容易で安全性が高い ⑥長期間放置に耐える ⑦密閉化が容易で安全性が高い ⑧信頼性が高く長寿命 ⑨構成材料の原料資源が豊富 ⑩構造がシンプルでリサイクルが容易 ⑪リチウムイオン電池より瞬間出力が大きい用途に適合（例：電動工具） ⑫リチウムイオン電池より安価 ⑬出力は標準が 50kW～500kW
適用性	小形は電動工具、中型は電動アシスト自転車やハイブリッド自動車、大型は工場や業務施設の据え置き用、風力発電や太陽光発電の平滑化用など適用性は広い。

は太陽電池や風力発電の出力平滑化があります。

## 2.4 リチウムイオン電池

表 5 にリチウムイオン電池の物理的、性能的な特徴を示します。二次電池はこれまで小型携帯機器用途で市場を拡大しましたが、多様な機能性材料の開発と、これらを使いこなす電池技術の進展によりリチウムイオン電池が登場しました。100

表 5. リチウムイオン電池

物理的な特徴	<p>負極 : カーボン系材料、天然黒鉛、人造黒鉛、非結晶炭素、シリコンや錫などの合金</p> <p>正極 : コバルト酸・ニッケル酸・リチウムマンガン酸・リチウム</p> <p>電解質 : 炭酸エステルにリン酸リチウムを溶解した有機溶媒</p>
性能的な特徴	<p>①起電力が大きくニッケル水素電池やニッケル・カドミウム電池の3倍に匹敵</p> <p>②エネルギー密度が高い</p> <p>③他の二次電池に比べて劣化が少なく、充放電効率が高い</p> <p>④メモリー効果がない(寿命が長い)。</p> <p>⑤大容量化が可能</p> <p>⑥充放電に時間がかかる</p> <p>⑦過充電熱暴走、外部短絡、電池内部短絡のリスクがある</p> <p>⑧正極材料に使われるコバルトとリチウムは資源的な制約がある</p> <p>⑨現状でリチウムは埋蔵量の約7割、生産量の約4割をチリに依存しており、資源的な制約が大きい</p>
適用性	<p>内部抵抗がニッケル水素電池より大きい(電圧降下がある)ので、パワーを要する用途より、微弱電流長時間使用に向いている。</p>

年ぶりに鉛電池やニッケル・カドミウム電池に代替できる高性能の汎用二次電池が実用化されたのです。一方、電解質が有機溶媒なので安全性に課題が残されていますが、急速な改善が進行中です。100Ahクラスの大型用途に向けては、放熱しやすい角型が開発されています(小型は円筒形が多い)。用途としては小容量から大容量まで対応できます。他の電池より高価ですがコンパクトなので、中小規模の用途に適していますが、充放電には間がかかります。高エネルギー密度を利用した小型用途や、高電圧の長所を生かした適用が望ましいでしょう。小型の用途は携帯電子機器と小型家電、中型の用途は電動工具、電動自転車、作業車です。大型の用途は電気自動車、鉄道車両、産業機械、風力発電や太陽光発電の平滑化が想定されます。

## 2.5 鉛蓄電池 (PB 電池)

表 6 に鉛蓄電池の物理的、性能的な特徴を示します。鉛蓄電池は電解液に水溶液を使用しているにもかかわらず、水の理論分解電圧である 1.23 ボルトより大きい 2 ボルトの起電力があります。電解液は酸系で、他の電池のアルカリ水溶液や有機系と異なるユニークな電池です。1859 年に発明されてから 150 年も経過していますが、経済性と信頼性に優れているので、現在も主要な二次電池です。他の新しい電池に比べるとエネルギー密度は低いのですが、安全性とリサイクル性に優れています。これまでに据え置き型では、需要変動への追従を目的(低価格時間帯電力の時間シフト利用)とした電力貯蔵用と、緊急時のバックアップ用が開発されています。太陽光発電や風力発電の出力平滑化にも用いられています。

## 2.6 電気二重層キャパシタ

表 7 に電気二重層キャパシタの物理的、性能的

表 6. 鉛蓄電池 (PB 電池)

物理的な特徴	負極 : 海綿状鉛 正極 : 二酸化鉛 電解質 : 希硫酸 電池構造 : 箱形
性能的な特徴	①起電力が大きい ②経済性に優れている ③信頼性が高い ④充放電で劣化が少ない (サイクル寿命が長い) ⑤メモリー効果が小さい (寿命が長い) ⑥密閉構造が可能でメンテナンス不要 (制御弁鉛蓄電池) ⑦過充電耐性強 ⑧エネルギー密度は小さい
適用性	信頼性が高く安価だが、重量も容積も大きいので、小容量の据え置き用と自動車などの移動体用に適している。

表 7. 電気二重層キャパシタ

物理的な特徴	負極 : 活性炭 正極 : 活性炭 電解液 : 塩水 構造 : 箱形
性能的な特徴	①重金属など有害物質を含まない ②発火の危険性がない ⑤放電効率は 90%以上 ①急速充放電が可能 ②数万回の充放電が可能 ③電圧測定だけで残量把握が可能 ④メンテナンスが容易 ⑤信頼性が高い ⑥エネルギー密度が、他の二次電池に比べて数分の一以下と小さい
適用性	安全で信頼性が高いが容量が小さいので、鉄道車両や大型自動車の回生エネルギー貯蔵に向いている (制動時のエネルギー回収)。

な特徴を示します。固体電極と電解質溶液のように、2つの異なる相が接触すると電位差が生じ、その界面には正負の電荷が非常に短い距離で配列した層が形成されます。電気化学の分野では電気二重層と呼んでおり、この界面現象を蓄電に利用したのが電気二重層キャパシタです。電気二重層キャパシタでは、充放電にともなって電解質イオンが溶液内を移動し、電極界面に吸脱着するだけです。電気エネルギーをそのまま充放電できるので、電極での化学反応をとまなう二次電池と比較して、特性の劣化が極めて少ないのが大きな特徴です。このため、寿命が長いのが大きな長所ですが、大容量化は現在のところ技術的に困難です。採用例には回生エネルギーの充放電、半導体製造装置のピーク電力カットなどがあります。装置化した製品には、瞬時電圧低下補償装置(瞬低補償装置)、電鉄用回生電力貯蔵装置、装置系統安定化装置、直流電力補償装置などがあります。

## 2.7 その他の二次電池

### 2.7.1 リチウムイオンキャパシタ

リチウムイオンキャパシタは、電気二重層キャパシタの正極とリチウムイオン電池の負極を利用した電池です。電気二重層キャパシタは充放電の速度(出力密度)が早いのですが、エネルギー密度は小さいです。そこでリチウムイオン電池の高エネルギー密度と、キャパシタの高出力密度を組み合わせ課題を改善しています。ただし容量が小さく内部抵抗損失が大きいので、これまでは限定的な分野でのみ採用されています。出力はおよそ150~250kWです。

### 2.7.2 ニッケル・カドミウム電池

ニッケル・カドミウム電池は、大電流で充放電できるので、モーターなどの大出力用途に適して

います。具体的には、電動工具などパワーが必要でタフな用途に向いています。軽量の特性を生かして、充電式シェーバー、掃除機などにも使われています。また瞬発力が高い特性を利用して、ラジコンなどホビーの分野にも使われています。利用の歴史が長いので、取り扱いのノウハウが豊富なのも長所といえるでしょう。一方、自然放電（使用しなくても蓄えていた電気の量が減少すること）が大きいので、時計など長期間稼働の機器には不向きです。なお、含有するカドミウムが有害物質なので、廃棄時に環境汚染防止の配慮が必要なことと、容量が少ないこと、およびメモリー効果が大きく管理が面倒なことが短所です。このため、近年はニッケル水素電池への代替が進行中で、需要の停滞からメーカーが減少しています。

### 2.7.3. リチウム二次電池

金属リチウムを使用したリチウム二次電池は、リチウム一次電池の充電を可能にした蓄電池です。起電力は大きいですが、充放電を多く繰り返すとリチウムが溶解して析出し、電池の寿命が短くなります。このため、リチウムをアルミなどと合金化した電池が、ボタン型やコイン型で普及してい

ます。ただし用途は小型だけで、大型用途には使われていません。

## 2.8 二次電池の特性比較

表8に、表2～表7には記載しなかった性能も含めた特性を示します。動作電圧はリチウムイオン電池が圧倒的に大きいですが、理由はリチウムのイオン化傾向が大きく起電力が高いからです。この特徴がエネルギー密度の大きさに反映され、同じ出力なら他の電池より軽量でコンパクトです。しかしリチウム資源の希少性から、他の電池より高価です。動作温度はナトリウム硫黄電池（NAS電池）が高く、運転管理に一定水準の専門能力が求められます。二次電池は充電と放電の回数が増えるにつれて劣化します。リサイクル寿命は、性能を発揮できなくなるまでの充電と放電の回数で、各電池に使われる電極や他の構成物質によって異なります。

(おわり)

参考：NEDO 技術戦略レポート（電力貯蔵技術）  
日本碍子 HP、住友電工 HP Wikipedia

表 8. 各電池の性能特性

電池の種類	NAS 電池	レドックス フロー電池	ニッケル 水素電池	リチウム イオン電池	鉛蓄電池
動作電圧	1.8	1.4	1.2	3.6	2.0
動作温度	280～350℃	常温	常温	常温	常温
貯蔵効率	75～85%	～82%	70～85%	95%	70～85%
重量エネルギー 密度 (Wh/kg)	120	～20	65	150	35
体積エネルギー 密度 (Wh/L)	160	～20	144	200～250	90
リサイクル寿命	4500 回	3000 回以上	2000 回	600～3000 回	～2500 回
システム構成 (例)	6MW×8h (48MWh)	450kW×2h (900kWh)	5.7kW×5h (28.5kWh)	6.5kW×5h (32.4kWh)	30kW×4h (120kWh)
コスト (kw 単価)	20 万円/kw	40 万円/kw	10 万円/kw	25 万円/kw	2～5 万円/kw