

系統安定化に向けた蓄電池技術の動向と課題

平成 20 年 8 月 8 日

独立行政法人 産業技術総合研究所
ユビキタスエネルギー研究部門

辰巳 国昭

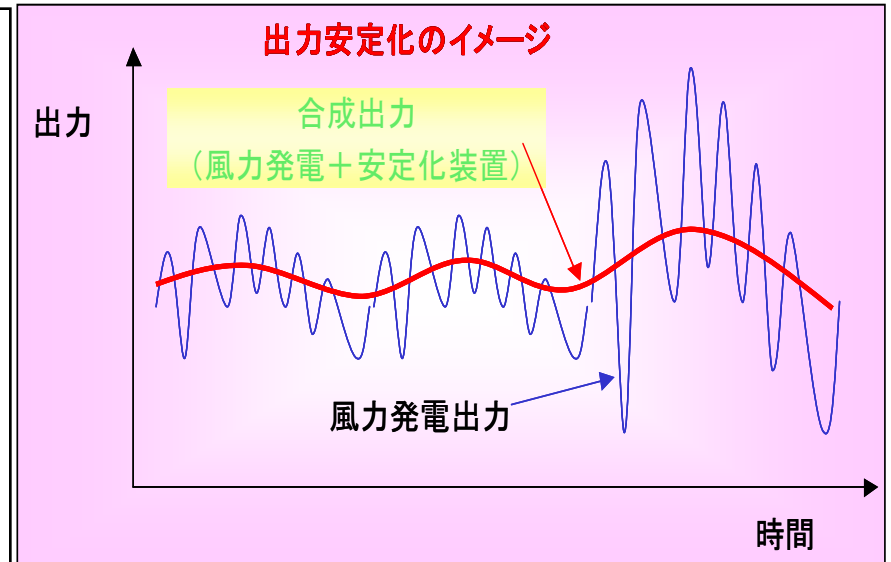
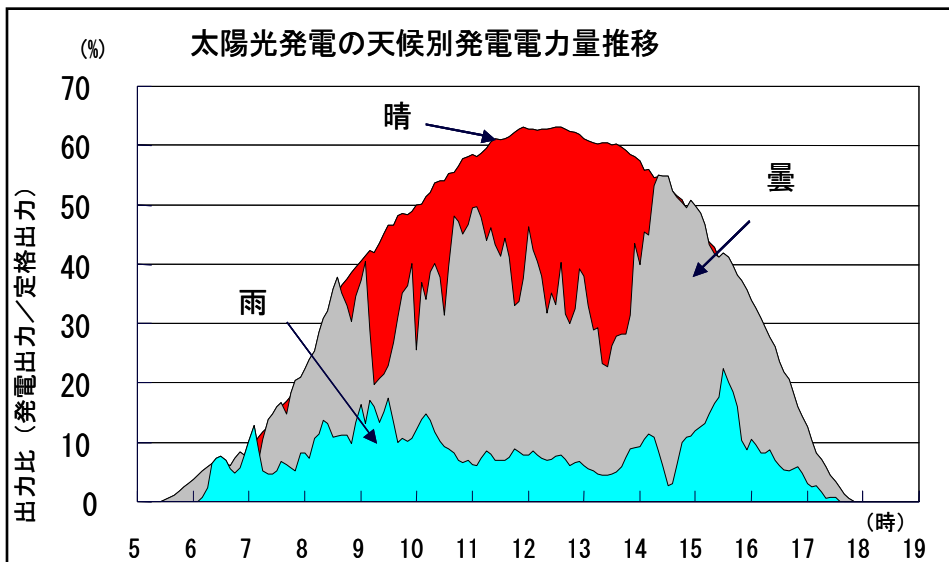
目次

1. 再生可能エネルギー発電への蓄電技術の必要性 2
2. 系統安定化に期待される蓄電池の概要と課題 6
3. 系統安定化蓄電システムに向けた蓄電池の動向 15

1. 再生可能エネルギー発電への蓄電技術の必要性

蓄電池の必要性

- 少資源の我が国において、蓄電技術は電力（エネルギー）の有効利用および品質維持、さらには災害対策という観点から、必要かつ重要な技術である。
- 新エネルギー発電の出力不安定性を解決できる1つのツールであり、新エネルギー導入普及の加速に寄与する。



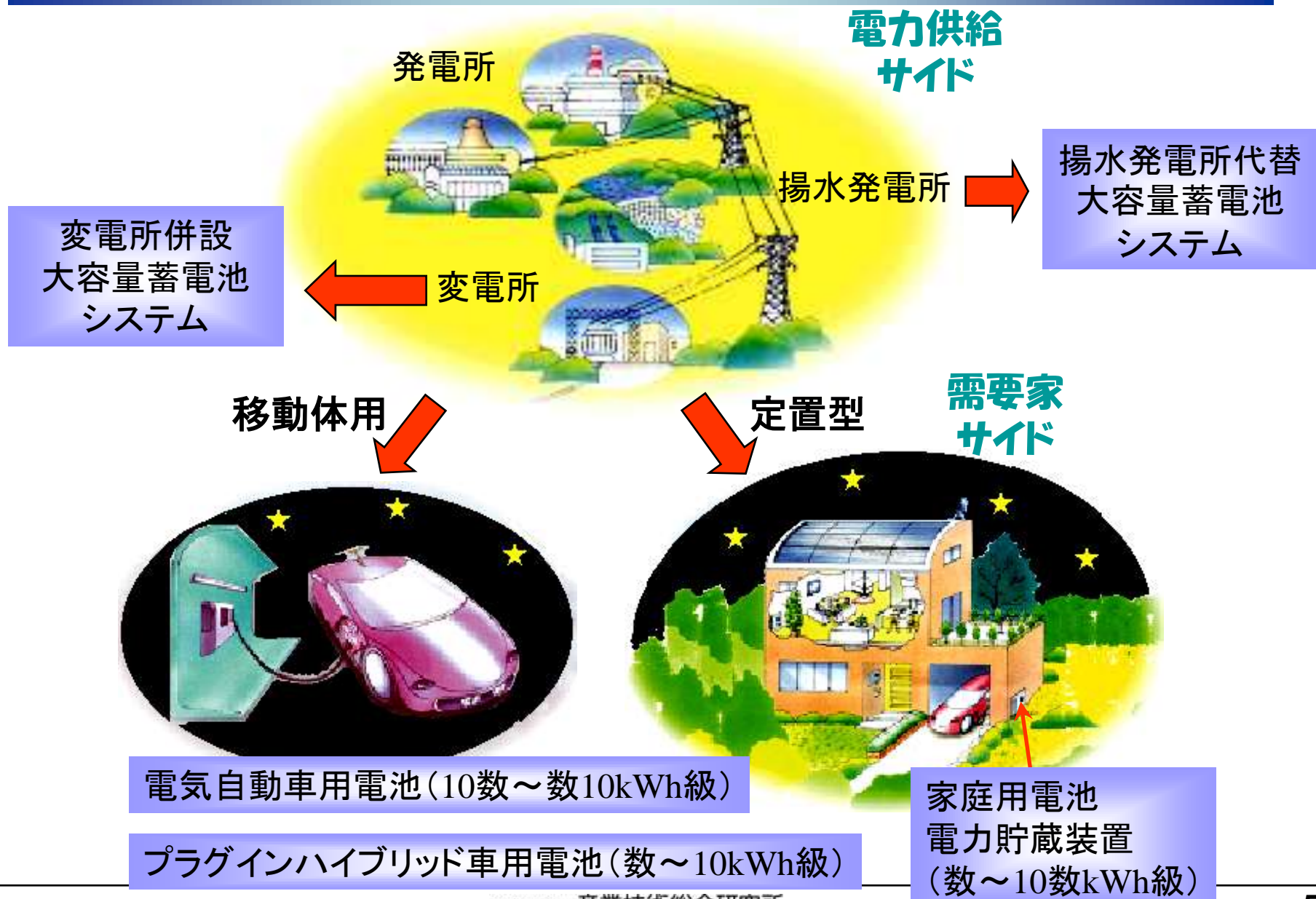
再生可能エネルギーによる発電と蓄電技術

- 発電量と需要の時間的及び所在地的ミスマッチの対応
- 太陽光発電と蓄電技術
 - 低圧配電系統での付設量が増えると、電圧保護のため逆潮を抑制する可能性が生じるので、逆潮以外の方策の確保。
 - 太陽光発電の導入量が拡大した状況で、悪天候により太陽光発電出力が急減した場合、供給力調達が必要。
 - さらに太陽光発電が導入されると、太陽光発電の出力変動を吸収するために必要な火力発電等の調整力（下げ代）が不足することも考えられる。
- 風力発電と蓄電技術
 - 風力エネルギーは変動幅の大きなエネルギー源（風速の3乗に比例）であり、また、上限風速を超えた際の風車のカットアウト制御と復帰制御等に伴う大幅な出力変動などへの対応が必要【短周期対応】
 - 電力需要の低い夜間での発電電力の有効活用【長周期対応】



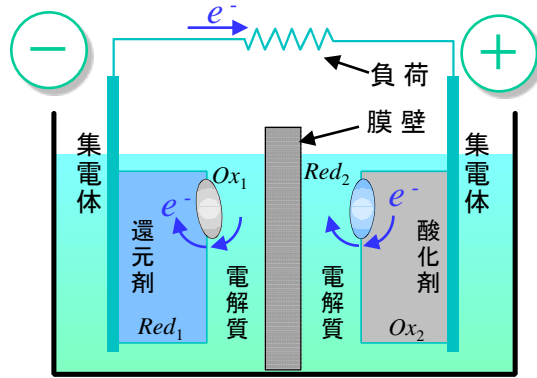
発電量の増大とともに、蓄電技術併設の必要性が高まる。

「再生可能エネルギーとの系統安定化用途」以外の 電力貯蔵用電池の開発ターゲット



2. 系統安定化に期待される蓄電池の概要と課題

電池の原理と系統安定化に期待される蓄電池の電極



電池のエネルギー F は
「負極－正極間の電位差 (起電力, E)」と、
「電気容量 Q 」の積

$$F = E \times Q$$

負極反応: 還元剤の酸化反応
 $Red_1 \rightarrow Ox_1 + n e^-$

正極反応: 酸化剤の還元反応
 $Ox_2 + n e^- \rightarrow Red_2$

表1. 負極の例

	電位* ¹ (V)	比容量	
		(mAh/g)	(Ah/l)
Pb	-0.36	259	2920
Cd	-0.83	477	4120
MH	-0.86	300~400	2200~3200
Na	-2.71	1165	1083
C (LiC ₆)	-2.9	372	840
Li	-3.04	3861	2062

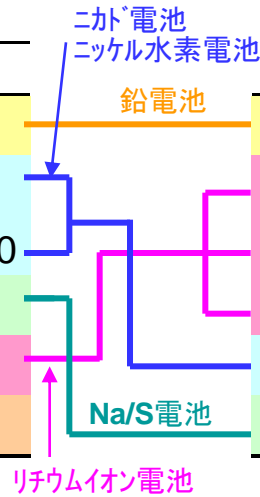
*1) 標準水素電極基準値

表2. 正極の例

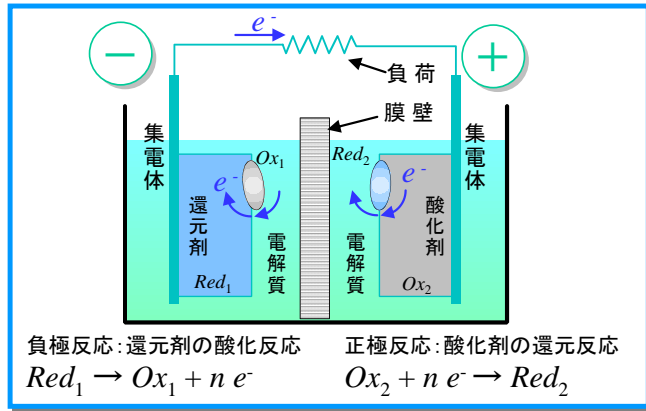
	電位* ¹ (V)	比容量	
		(mAh/g)	(Ah/l)
PbO ₂	1.69	224	2100
LiMn ₂ O ₄	1.0	110 * ²	470 * ²
LiCoO ₂	0.9	160 * ²	808 * ²
LiNi _{0.8} Co _{0.2} O ₂	0.8	190 * ²	921 * ²
NiOOH	0.49	292	2032
S	-0.63	1672	3460

*1) 標準水素電極基準値

*2) 実効値



蓄電池システム導入コストに影響を与える電池性能の例



□ **電池のコスト**は、電極の使用量で決まるエネルギー(Wh)と、その他の電池構成部材使用量(電極使用量に相関)、製造コストなどで算出されるため、基本的にエネルギー(Wh)当たりのコストが議論のベース。

- **最小充放電時間率**: 系統連系用途では、エネルギー(Wh)当たりのコストだけでなく、蓄電システムの出・入力(W)当たりのコストも重要。時間率の小さな(急速な)充放電ができる電池は、電池のエネルギー量(Wh)は小さくても大きな出力・入力(W)に対応できる。
 - ☞ 蓄電システムのエネルギー量(Wh)が小さくて済む可能性がある。

短周期での 1 kW に対応するための 1 kW あたりコストは・・・

- ✓ 4 時間率の能力の電池では、4 kWh の電池が必要。
- ✓ 1 時間率の能力の電池では、1 kWh の電池で対応可能。→ コスト1/4

- **実用充電(SOC)範囲**: サイクル寿命への影響などから決まる実用充電状態(SOC)範囲の狭い電池は、結果的に初期コストが高くなる。
- **サイクル寿命**: 設備耐用年数時点で劣化により性能不足が予想される場合、不足分に対応する蓄電池を予め増設しておくことが必要となり、初期コスト増の要因となる。

風力発電に併設する蓄電システム所要容量(発電設備MWあたり)の試算例

制御方法	平均化時間 (分)	所要MW容量 (MW)	所要MWh容量 (MWh)	必要な最小充放 電時間率性能	備 考
短周期変動 対策	10	① 0.77	0.077	0.1	<ul style="list-style-type: none"> ・終日平滑化運転 ・平均化時間10分での最大値縮小率を最大にするための所要容量 ・平均値縮小率47.6%、累積出現頻度100%を蓄電池で制御
		② 0.16	0.032	0.2	<ul style="list-style-type: none"> ・①の容量削減ケースで、平均化時間10分での平均値縮小率を40%程度にするための所要容量 ・平均値縮小率40.4%、累積出現頻度84.7%を蓄電池で制御
	20	③ 0.17	0.068	0.4	<ul style="list-style-type: none"> ・①の容量削減ケースで、平均化時間20分での平均値縮小率を50%程度にするための所要容量 ・平均値縮小率49.9%、累積出現頻度83.7%を蓄電池で制御
長周期変動 対策	120	④ 1.00	12.3	12.3	<ul style="list-style-type: none"> ・夜間8時間完全充電 ・昼間は、平均化時間120分での短周期変動対策運転を実施 ・昼間時間帯の平均値縮小率は82.0%

[出典：経済産業省「平成 17 年度新エネルギー等電力市場拡大促進対策基礎調査等（風力発電導入拡大のための周波数変動対策としての蓄電池システムの導入に関する調査）」（平成 18 年 6 月）]

- 風力発電の場合でも、「制御方法」・「平均化時間」の設定で、所要蓄電容量(MWh)に約100倍の開き。
 - ✓ 風力発電容量(MW)当たりの系統安定化蓄電システムのコスト目標が見定めにくい。
 - ✓ 併設蓄電容量(MWh)が小さくてすむと、蓄電システムのコスト目標が緩和される反面、市場規模がコスト低減を生む量産規模に至らず、蓄電システム製造への投資意欲が高まらない恐れもある。



「短周期変動 or 長周期変動」、「平均化時間」など、平均的なシステム要件を検討する必要有り。

風力発電の特徴から見た蓄電池システムへの要求性能(例)

- 低い充電状態 (State of Charge, SOC) の待機状態においても、寿命劣化や効率の低下が少ないこと。
 - 風力発電の設備利用率は必ずしも高くないことから、蓄電池システムの設備利用率も低くなる傾向がある。
 - 長周期変動対応としての下げ代対応運転の場合、電力需要の少ない深夜に先立ち SOC を下げておく必要があるが、深夜に高い SOC まで必ずしも充電されるとは限らない。

- SOC の的確な管理が可能であること。
 - 積算電流計などによる計測では、徐々に誤差が蓄積し、電池の実際の SOC とのずれが生じる恐れがあり、校正のために、満充電リセットを行い、容量計リセットを行う必要がある。低い SOC にある電池には、商用電力を用いて満充電する必要が生じる。

[出典：NEDO委託業務成果報告書（財団法人電力中央研究所）「系統連系円滑化蓄電池システム技術開発に関する調査」（平成18年7月）]

鉛電池

□ **原理**: 負極に鉛(Pb)、正極に二酸化鉛(PbO₂)、電解液に希硫酸(H₂SO₄)を用いた電池で、1.5世紀の歴史を持つ常温作動電池。

○ **特徴①**: 比較的安価で、使用実績が多く、比較的広い温度範囲で動作しかつ過充電にも強い。短い時間率の放電も可能。

○ **特徴②**: 産業的にもリサイクル体制も確立している。

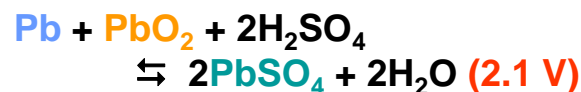
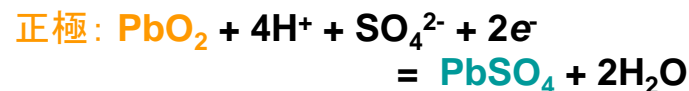
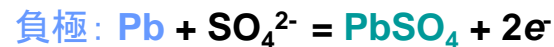
➤ **動向**: MW級～数 100kW 級の大容量システムとしての実績あり。電気自動車用にはエネルギー密度が不十分。

✓ **課題①**: 低い充電状態(SOC)では、電極の劣化が進行し充放電サイクル特性に加え、出入力が低下。

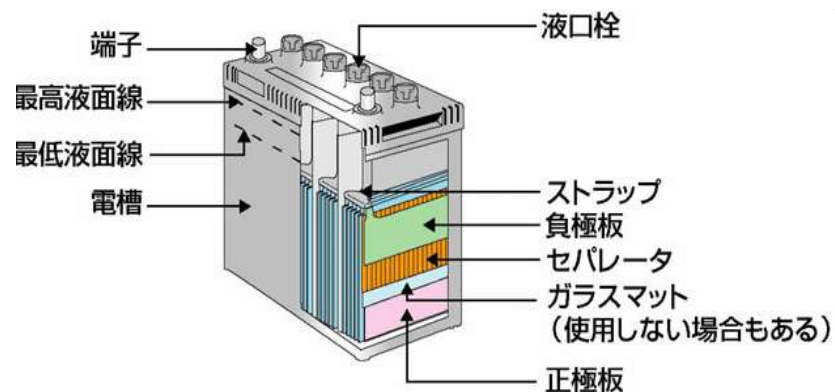
✓ **課題②**: 誤差の小さい SOC 管理手法が確立されておらず、過充電による満充電によって各電池の SOC 均等化を行う必要があり、再生可能エネルギー連系では、商用電力による SOC 均等化の頻度を減らす技術が必要。

✓ **課題③**: 充放電エネルギー効率が、他の電池系よりも低く、75～85%程度。

• **大容量形量産に向けて**: 量産化技術が確立。資源制約顕在化のリスクは大きくない。



鉛電池の反応式



鉛電池の構造(例)

[出典: 社団法人電池工業会
<http://www.baj.or.jp/knowledge/structure.html>]

ナトリウム硫黄電池



固体電解質
β-アルミナ (Na⁺イオン伝導体)
ナトリウム硫黄電池の反応原理図

□ **原理**: 負極に Na、正極に S、固体電解質に酸化アルミニウム (βアルミナ) を用いた電池で、全電極が熔融する約300°Cで運転。

○ **特徴①**: 構成材料が資源的に豊富で、量産によるコストダウンが可能。理論エネルギー密度も高い。

○ **特徴②**: 充放電時の副反応がなく(自己放電もない)、充放電エネルギー効率も高い。長寿命。利用SOC範囲も広い。

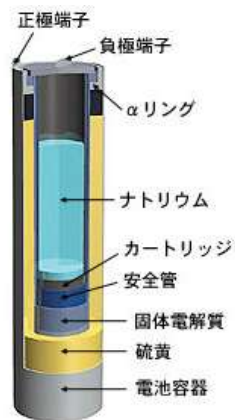
➤ **動向**: 電力貯蔵用として実用化済みで、34MW (2MW × 17) もの大規模蓄電システムも実現 (青森県六ヶ所村)。

✓ **課題①**: 比較的長い時間率 (7.2~6 時間) での運転を前提に電池構造が開発されている。

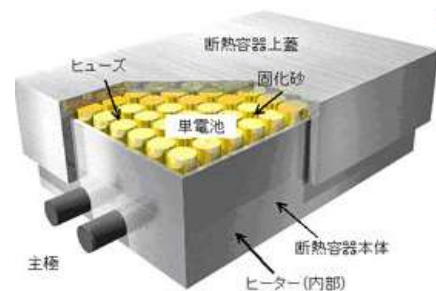
✓ **課題②**: 連続充電・放電時の発熱 (電池内部抵抗に基づく) で温度保持されるよう設計されており、蓄電システムの利用率が下がると、温度保持のためヒーター電力が必要。

✓ **課題③**: 充電状態管理のため、現状では、一定期間内に満充電リセットする必要があり、再生可能エネルギー連系では、商用電力によるリセットの頻度を減らす技術が必要。

• **大容量形量産に向けて**: 量産化技術が確立。資源制約顕在化のリスクは大きくない。



ナトリウム硫黄電池の単電池構造(例)



ナトリウム硫黄電池のモジュール電池構造(例)

[出典: 日本ガイシ(株)]

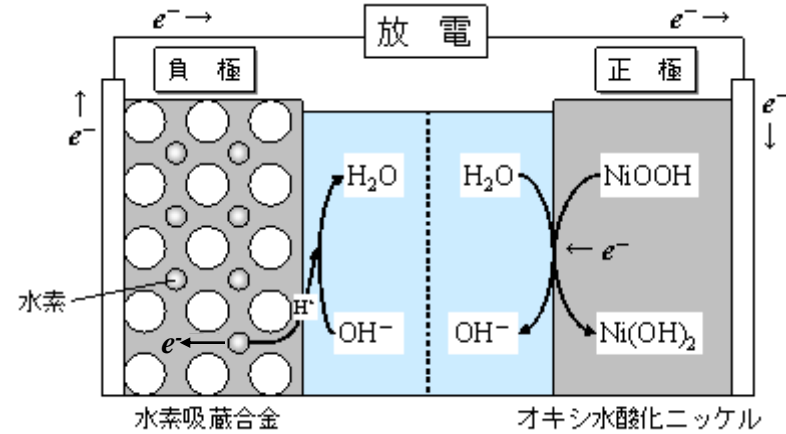
<http://www.ngk.co.jp/product/insulator/nas/index.html>



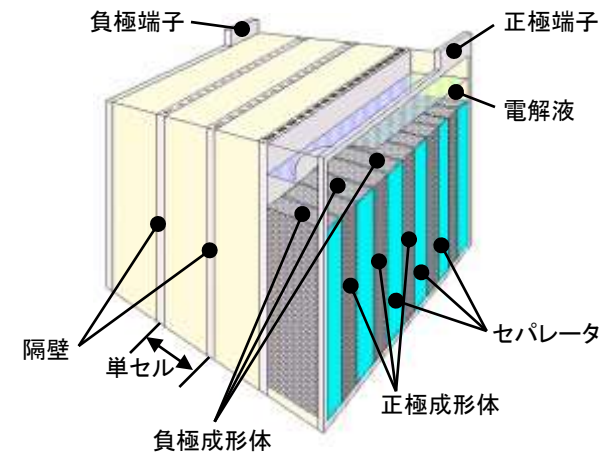
産総研つくばセンター設置のナトリウム硫黄電池システム(上左 2MW × 8時間; 下右は変換器盤)

ニッケル水素電池

- **原理**: 負極に水素吸蔵合金、正極にオキシ水酸化ニッケル、電解液に水酸化カリウムなどのアルカリ水溶液を用いた電池で、常温作動電池。
- **特徴①**: 溶解析出反応を伴わないので、長寿命が期待しうる。
- **特徴②**: 過充電、過放電に強いいため、利用 SOC 範囲も極めて広い。電池設計によっては、急速充放電が可能で、使用温度範囲も広い。理論エネルギー密度も高く、エネルギー効率も比較的高い。
- **動向**: 中容量レベルでは、EV 用・HEV 用に実用化済みで、NEDO プロジェクト等で、電力貯蔵用として大容量化に取り組まれている。
- ✓ **課題①**: 自己放電が比較的大きい。しかも、電池電圧が SOC に依らずほぼ一定のため、商用電力による満充電での SOC リセットを週1回程度の頻度で行う必要がある。
- ✓ **課題②**: 満充電時に大きな発熱を伴うため、電池の温度管理が重要。さらに、密閉形ニッケル水素電池では、大容量化の障害(100Ah 級が限界)となっている。
- ✓ **課題③**: 水素吸蔵合金が鉛よりも高い。ただ、鉛電池と比較して実用 SOC 範囲が格段に広いため、製造コストや運用上のやりくりによって、結果的にトータルコストを抑制できる可能性はあり。
- **大容量形量産に向けて**: 中容量については量産技術確立。大容量に向けて国プロでも開発中。資源制約顕在化のリスクは大きくない。



ニッケル水素電池の放電反応模式図

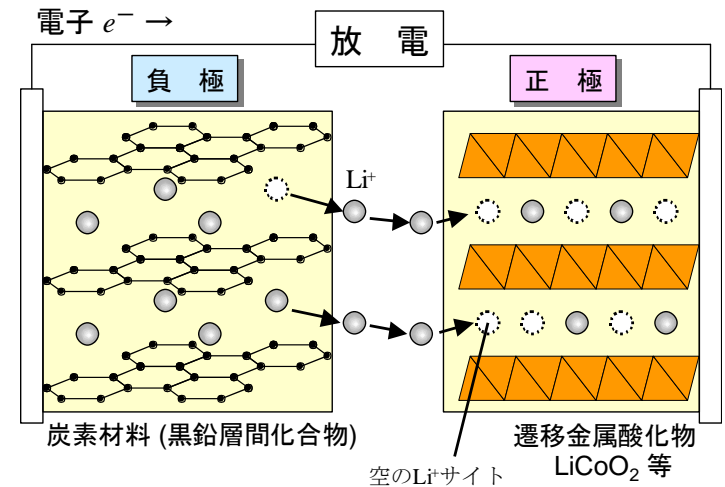


川崎重工業(株)開発の新型ニッケル水素電池の構造

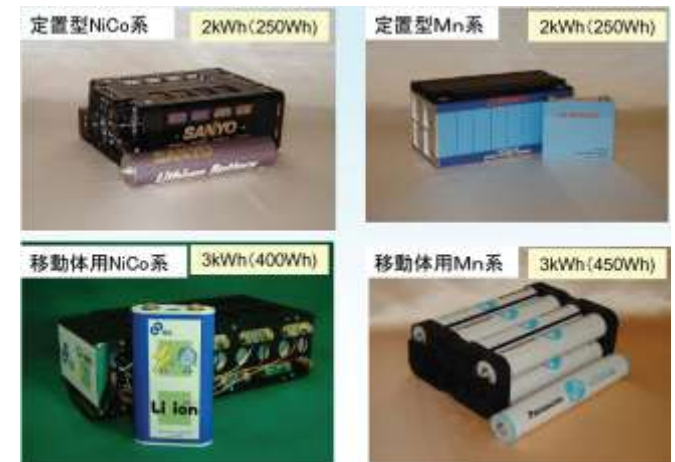
[出典: NEDO 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発「系統連系円滑化蓄電システム技術開発」平成19年度成果報告会要旨集]

リチウムイオン電池

- **原理**: 充電反応に課題のあるリチウム金属に替わり炭素材料を負極に、正極にリチウム含有金属酸化物、電解液に有機電解液を用いた常温作動の高エネルギー密度電池。
- **特徴①**: 高いエネルギー密度をもち、充放電エネルギー効率も極めて高く、自己放電も小さい。溶解析出反応を伴わないので、長寿命が期待しうる。
- **特徴②**: 電池設計の変更で急速充放電も可能。電池電圧でSOC監視可能。低いSOCは寿命に全く問題を与えない。
- **動向**: 民生小形用としては、国内だけでも年間3,151億円(10億個;約500万kWh)の生産規模。HEV用、プラグインHEV用及びEV用としても主要電池系となると期待されている。NEDOプロジェクト等で、電力貯蔵用として大容量化や革新的な低コスト化の研究開発が取り組まれている。
- ✓ **課題①**: 有機電解液を用いる電池系であるため、コストパフォーマンスの高い安全性確保策が必要。
- ✓ **課題②**: 現状では過充電・過放電いずれにも弱く、単電池毎の電圧管理が必要で、制御機器が高コスト化しやすい。
- ✓ **課題③**: 高いSOC・保存温度は、電池の劣化を加速するため、管理が必要。ただし、系統安定化用途では、実際には両者の状況は起こりにくいとも言える。むしろ、低コスト材料の開発による電池の低コスト化が極めて重要。
- **大容量形量産に向けて**: 量産技術の開発が必要。資源制約顕在化のリスクは大きくない。



リチウムイオン電池の放電反応模式図



NEDO「分散型電池電力貯蔵技術開発('92-'01)」
で
開発された大容量リチウムイオン電池

[出典: NEDO「二次電池等技術開発シンポジウム」資料, 2006]

3. 系統安定化蓄電システムに向けた蓄電池の動向

系統安定化用蓄電池の現状と研究開発による解決の将来性

		鉛電池	ナトリウム硫黄電池	ニッケル水素電池	リチウムイオン電池	
①高エネルギー密度化	現状	40~80 Wh/L	140~170 Wh/L	40~100 Wh/L	140~210 Wh/L	
	将来性	×	×	○	△	
②大容量化実績	現状	MWh 級	数 100MWh 級	数 100 kWh 級	数 10 kWh 級	
③-1 コスト ダウン	kW 単価	現状*	15~25 万円/kW	24 万円/kW	10 万円/kW	5~150 万円/kW
	kWh 単価		5 万円/kWh	2.5 万円/kWh	10 万円/kWh	10~200 万円/kWh
	本体価格	将来性	△	△	○	◎
③-2 高出力対応	現状	1 時間率(但し容量 50%)	6~7 時間率	1 時間率	0.5 時間率	
	将来性	△	△	◎	◎	
③-3 実用 SOC 範囲	現状	比較的狭い	極めて広い	極めて広い	広い	
	将来性	△	—	—	△	
④-1 長寿命化	現状	3000 サイクル	4500 サイクル	2000 サイクル	3500 サイクル	
	将来性	△(サルフェーション)	△	○	○	
④-2 低 SOC の寿命への低影響	現状	×	○	○	○	
	将来性	△	—	—	—	
④-3 過充電・過放電耐性	現状	過充電○・過放電×	△	○	×	
	将来性	△	△	—	△	
⑤-1 充放電エネルギー効率	現状	75~85%	90%	80~90%	94~96%	
	将来性	△	△	△	△	
⑤-2 SOC 監視の容易さ	現状	△	×	×	○	
	将来性	△	△	△	—	
⑤-3 低稼働率時の高効率性	現状	△ (リセットロス)	△~× (ヒータロス・リセットロス)	○~△ (リセットロス)	◎	
	将来性	△	△	△	—	

※本表中のコストはシステム規模・構成等による変動があり得る参考値で、現状値も出典資料時点(2006年)の値。

[出典：NEDO委託業務成果報告書 (財団法人電力中央研究所)「系統連系円滑化蓄電システム技術開発に関する調査」(平成18年7月)に一部加筆]

経済産業省－NEDO技術開発機構プロジェクト
「燃料電池自動車等用リチウム電池技術開発 (FY2002-6)」

	目標	ニッケル系	複合系	マンガン系
エネルギー密度 (Wh/kg)	70	70.7	72	75
出力密度 (kW/kg)	1.8	1.9-2.1	2.2-2.5	2.3
充放電エネルギー効率 (%)	96	>93.4	91.4	94
寿命 (年)	15	16	>15	>15 (容量) 12 (出力)
コスト (千円/kWh)*1	50	44.0	39.8	38.0

*1) 年産40～60万kWhの量産規模を想定した値。

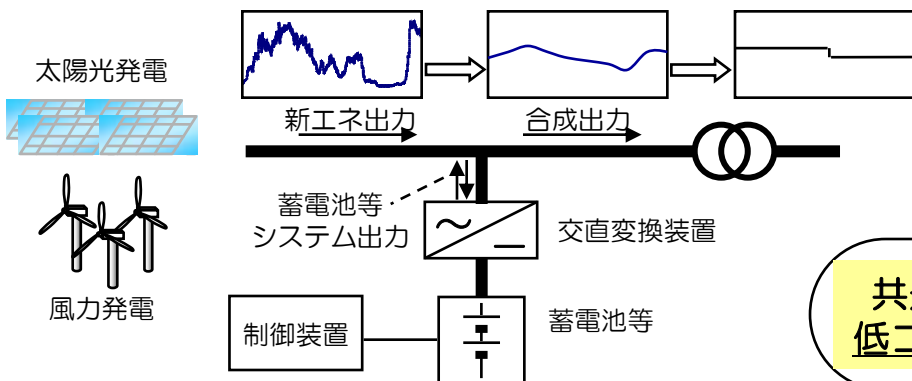
※ 上述の性能値・コストは、実用上の観点から3kWh電池パックとしての換算値であり、単セルやモジュールでの値よりも悪い値であり、他の報告値や発表値と比較する際には注意が必要

[出典：NEDO研究評価委員会 第1回「燃料電池自動車等用リチウム電池技術開発」(事後評価)分科会
<http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/19h/jigo/35/1/index.html>]

低コスト・高性能な蓄電システムの実現により、新エネルギー（太陽光・風力発電等）の出力安定化及びハイブリッド自動車・電気自動車・燃料電池自動車等の普及を促進

系統連系円滑化蓄電システム技術開発

蓄電池併設による出力安定化イメージ



個別課題：大型化、長寿命化等

次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発



個別課題：高エネルギー密度化、高出力密度化等

共通課題
低コスト化

1. 実用化技術開発・要素技術開発

メガワットアワー級蓄電池システムの確立と低コスト化、長寿命化のため、数千個の単電池のシステム化に伴う熱対策、残量制御、高電圧化とモジュール製造プロセス技術開発、メンテナンスフリー構造等の開発

2. 次世代技術開発

新エネ併設の要求スペックに対して、現状の技術レベルの延長線上にない、経済性、性能面でのブレークスルーが期待できる新しい材料（正極、負極、電解質等）や新しい電池系の技術開発

3. 基盤技術開発

新エネ併設用蓄電池における寿命予測、耐久性、安全性試験方法の確立や規格化、技術開発の効率化につながる反応メカニズムの解析手法の確立等、基盤的な技術開発

1. 要素技術開発

高性能リチウムイオン電池とその構成材料並びに周辺機器（モーター、電池制御装置等）の技術開発。

2. 次世代技術開発

新規の概念に基づく革新的な電池の構成とそのための材料開発、および電池反応制御の技術開発。

3. 基盤技術開発

加速寿命試験法の開発、劣化要因の解明、電池性能向上因子の抽出、並びに、安全性基準および電池試験法基準の策定等。

経済産業省 新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会提言と NEDO技術開発機構「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」

- 研究開発戦略を ①改良 ②先進 ③革新 の3フェーズに分け、本格的電気自動車用電池の開発の目標を明確化。

＜パッケレベルでの電池の性能目標＞

	現状	改良型電池 (2010年)	先進型電池 (2015年)	(2020年?)	革新的電池 (2030年)
	電力会社用 小型EV	用途限定 通勤用EV 高性能HV	一般通勤用EV 燃料電池自動車 Plug-in HV自動車	高性能 Plug-in HV自動車	本格的EV
性能*	1	1	1.5倍	3倍	7倍
EV用					
重量エネルギー密度[Wh/kg]	100	100	150	—	700
重量出力密度[W/kg]	400	1000	1200	—	1000
HV用					
重量エネルギー密度[Wh/kg]	70	70	100	200	—
重量出力密度[W/kg]	1900	2000	2000	2500	—
コスト	1	1/2倍	1/7倍	1/10倍	1/40倍
	20万円/kWh	10万円/kWh	3万円/kWh	2万円/kWh	0.5万円/kWh
開発体制	民主導	民主導	産官学連携		大学・研究機関

※重量エネルギー密度で比較

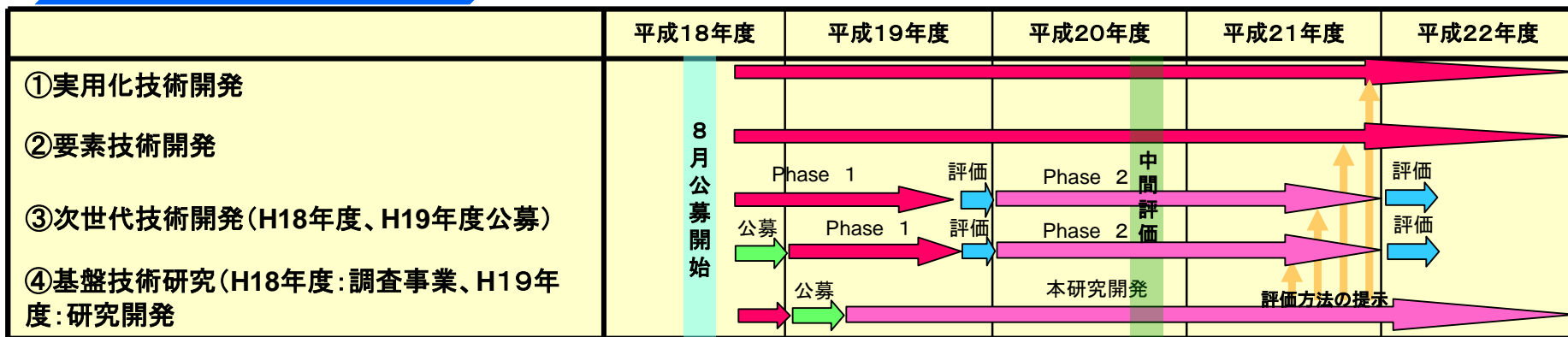
NEDO技術開発機構「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」(' 07-1

(出展：経済産業省 新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会 (座長 石谷慶應義塾大学大学院教授) 報告

「次世代自動車用電池の将来に向けた提言(産業2006年8月研究所)

NEDO技術開発機構「系統連系円滑化蓄電システム技術開発」

プロジェクトの位置づけ



中間評価

事業の目的と達成目標

高性能・低コスト蓄電池等本体技術開発

○目的

- ・ウインドファームレベルの風力発電、MW級の太陽光発電に対応するMW級の蓄電システムの開発。
- ・新エネルギーの出力変動の極小化、低コスト、長寿命、安全、高性能なシステムの実用化。
- ・上記を達成するため、実用化技術開発、要素技術開発、次世代技術開発、基盤技術開発を実施する。

研究内容

(1) 実用化技術開発 (50%共同研究)

1MW級の蓄電システムを構築し、試験設備等において6ヶ月以上の実証試験を行い、安全性、運転効率等の条件の確保を確認し、コスト見通し、寿命を評価する。

(2) 要素技術開発 (委託研究)

2010年度末に、5~20kW程度のモジュールにおいて、寿命10年、量産時のコスト4万円/kWhを達成する。

(3) 次世代技術開発 (委託研究)

2030年時点での量産時コスト1.5万円/kWh、寿命20年を目指す。

(3) 共通基盤研究 (委託研究)

安全性、寿命等の性能評価・標準化の検討など、共通基盤的調査、研究を実施する。

まとめ

- 系統安定化のための蓄電池としては、いくつかの特性で従来の鉛電池よりも優れた特長を示す電池が開発されてきているものの、系統安定化用の蓄電池として特性・寿命・コスト等の全て要件を満足するためには、蓄電池の得手を伸ばし、不得手を抑えるシステムの構築に加え、可能性のある蓄電池系の系統安定化用途に向けた技術開発も引き続き必要と考えられる。
- コスト目標を検討するに当たり、風力及び太陽光発電の定格出力に対する最適な所要蓄電容量(Wh)については、ユーザー主導のもと、産学官が協力して引き続き検討する必要があると考えられる。
- コスト見通しとしては、ニッケル水素電池・リチウムイオン電池とも、2010年頃に5~4万円/kWhレベルを達成すべく国の技術開発プロジェクトが推進されている。さらに2030年頃に向けて、1.5~0.5万円/kWhを目指しており、特に、系統安定化用途ではエネルギー密度向上への優先度が低いことに注目し、電極や電池構成部材、電池構造設計など全てにおいて低コスト化を優先した技術の選択を進めることが重要と考えられる。