

# 傍からみた二次電池・蓄電システムの進化

寺田 信之\*

## 1. はじめに

歴史的に人類のエネルギー消費は産業革命以降に急激に上昇してきた。現代社会の身近なエネルギーとして、電気・ガスおよびガソリン（軽油を含む）の効能を享受している。その中でも、電気は現代生活には欠かせない社会基盤となっている。しかし、その利用期間としては130年程度の歴史しかない（表1）。電気事業の黎明期を振り返ると、日本での取り組みは明治維新から18年後であり、トーマス・エジソンの電灯事業開始から遅れること僅か5年で東京電灯が開業したことは驚嘆に値

する<sup>1)</sup>。その後、多くの電力会社がベンチャー企業として名乗りを上げたことに注目したい。電気事業は百年以上に渡る変遷を経て、2013年から電力システム改革が本格的に開始された。2016年4月には電力小売りが完全自由化され、従来の電力会社に加えて新電力と呼ばれる小売電気事業者が、2017年2月現在379件登録されている。また、ガスシステム改革も進んでおり、石油業界再編の動きも出てきている。この状況は明治黎明期を彷彿させるエネルギー産業の再編期とされている。

表1. 電気事業の黎明期（1870年代～1890年代）

1878年	虎ノ門の工部大学校で、初めて電灯「アーク灯」が点灯。「電気記念日（3月25日）」の由来
1879年	●エジソン（米）が白熱電灯を実用化。「あかりの日（10月21日）」の由来
1881年	●ゴーラル（仏）、ギブス（英）が変圧器を発明、交流配電が始まる ●エジソンによって世界初の電灯事業がニューヨークで開始される
1882年	東京・銀座にアーク灯が灯され、市民が初めて電灯を見る ●世界初の水力発電がニューヨークで始まる
1884年	●ニコラ・ステラ（米）が提唱した交流方式が電気事業の主力となっていく
1885年	日本初の白熱電灯が東京銀行集会所開業式で点灯される
1886年	初めての電気事業者として東京電灯会社（現・東京電力の前身）が開業 ●アメリカで変圧器による交流配電が成功。最初の交流発電所が設立される
1887年	名古屋電灯、神戸電灯、京都電灯、大阪電灯が相次いで設立 東京電灯が第二電灯局を建設、日本初の火力発電所が誕生（出力25kW）、家庭配電（210V直流）を開始
1888年	初めての自家用水力発電所が宮城紡績所に誕生（大日本帝国憲法発布） アメリカから交流発電機を輸入し、大阪電灯が交流式配電を開始（第1回帝国議会）品川電灯開業、深川電灯開業 東京電灯が浅草紫雲閣でエレベーターを運転。初の動力用電力を供給
1891年	帝国電灯開業【電気営業取締規則が制定】 東京電灯が電灯1万灯祝典を挙行
1892年	日本初の営業用火力発電所、京都市営蹴上発電所完成（当時の出力160kW、現存する最古の水力発電所で現在も4,500kWで稼働中）
1893年	前橋電灯設立、日光電力開業、桐生電灯設立
1894年	〈日清戦争勃発〉1895年に下関条約調印石炭の価格の高騰で水力発電企業が続々と誕生
1895年	八王子電灯設立 日本初の市電、京都電気鉄道が開業 東京電灯・浅草発電所操業開始（独 AEG 製の発電機が50ヘルツ→東日本標準50ヘルツ）
1896年	東京電灯・浅草発電所で国産初の発電機を使用【電気事業取締規則が制定】電気事業者の監督行政が全国統一化、この頃の電気事業者は火力発電23カ所、水力発電7カ所、水・火力併用3カ所、電灯数12万余
1897年	熱海電灯設立 大阪電灯がアメリカ、GE製の発電機を増設。（このGE発電機が60ヘルツ→西日本標準60ヘルツ）

【出所：電気事業連合会 HP を元に作成】

\*元 電力中央研究所

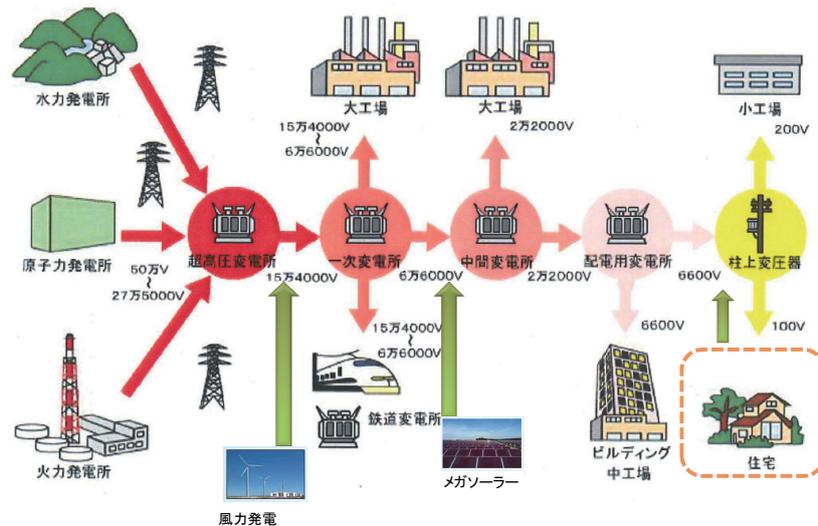


図 1. 電気事業の概念図

【出所：http://www.fepc.or.jp/enterprise/souden/keiro/index.html を基に作成】

さて、電気事業は発電・送電・配電する事業である（図1）。すなわち、スケールメリットのある大規模発電所を建設・運転する。発電所から高圧送電線（275～500 kV）を通して大規模変電所へ送り、配電線によって顧客（需要家）に配ることによって成り立ってきた。しかし、最近では太陽光発電や風力発電などの再生可能性エネルギーによる電気の導入拡大の期待が膨らんできている。特に、固定価格買取制度（FIT）が2014年7月に導入され、太陽光発電が大幅増加した。その結果、一部地域では系統連系制約、すなわち電力系統への送電を制限することも行われるようになった。これは太陽光発電や風力発電は時間帯・お天気まかせの発電量となり、ときには急激な出力変動は避けられない発電方式のためである。さらには、今までの発電所から需要家へと一方通行の送配電と異なり、地域・時間帯により電力送配電網へ逆潮流などの影響による技術的な課題も浮かんできている。このような対策として蓄電システムを利用する動きも活発化している。筆者は新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）プロジェクト等に永年にわたり参画し、電池メーカーが行ってきたリチウムイオン電池を中心とする新型二次電池技術開発について、その進歩を傍から眺めてきた。なお、経済産業省の「蓄電池戦略（2012年）」では、

エネルギー用途の蓄電池は「自動車用」「定置用」「系統用」と分類されている<sup>2)</sup>。拙稿では、主として電力系統に適用される実証段階となったMW級蓄電システムへの進化について述べ、2030年へ向かうエネルギー環境について考える種を提供したい。

## 2. 蓄電技術の必要性

二次電池を用いる蓄電技術開発は、その時々での社会的要請により期待される役割を変えてきた。すなわち、①夜間電力の有効利用、負荷平準化（LL：Load Leveling）、電気自動車（EV；Electric Vehicle）による省エネルギー、②二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出抑制に寄与するLL、EV（COP3以降）による環境対策、③再生可能エネルギー普及、高度情報化社会、分散電源対応（スマートグリッド社会）におけるエネルギー管理などである。

### 2.1 蓄電技術開発の概況

第一次石油危機を契機として、新エネルギー技術開発（サンシャイン計画）が1974年から、省エネルギー技術開発（ムーンライト計画）は1978年から、開始された。蓄電（電力貯蔵）技術については、ムーンライト計画の一環として、「新型電力貯蔵技術開発（1980年-1990年度）」が

実施された。そして、深夜電力を利用する揚水発電を上回る総合エネルギー効率70%以上が目標であった。昼夜間の電力負荷平準化を図るため、出力1 MW、寿命10年(充放電サイクル1,500回)、コストも揚水発電所なみのkW単価が目標となった。その中で、ナトリウム/硫黄(NaS)電池、レドックスフロー(RF)電池、亜鉛/臭素(ZnBr)電池、亜鉛/塩素(ZnCl)電池および新型鉛電池の技術開発が実施された。その結果をうけて、電力貯蔵用新型電池実用化電力共同研究会(1992年)ではNaS電池、ZnBr電池、新型鉛電池の3種類について100 kW~1 MW級の電池システム実証試験が行われた。その結果として、NaS電池(100 kW・400 kWh)は74.9%(4時間率)80.1%(8時間率)、ZnBr電池(100 kW・400 kWh)は66~69%(4時間率)、50万円/kW、新型鉛電池(1,000 kW・4,000 kWh)は72.5%(4時間率)、64万円/kWと評価された。

続いてニューサンシャイン計画として「分散型電池電力貯蔵技術開発(1992-2001)」が発足した。このプロジェクトでは、リチウムイオン二次電池開発に重点を置き、将来の用途もEV(移動体用)と(定置用)蓄電システムへの応用を想定した二次電池開発が実施された。その後、2000年代に入ると燃料電池自動車への開発期待が高まり、その支援技術として「燃料電池自動車等用リチウム

電池技術開発」が実施され、特にハイブリッド自動車(HEV: Hybrid Electric Vehicle)用二次電池としての高出力性能の改善が図られた。2005年代以降には再生可能エネルギーの導入拡大への期待、自動車産業・蓄電池産業の国際競争力強化などの背景から、実用化・普及のための低コスト化に重心を移した電池開発プロジェクトが、NEDO指導のもと電池メーカー等が中心となって実施されてきた。一方では、経験則などに大きく依存していた電池開発・製造技術に光を当てるため、劣化解析・不安全性機構解明を基礎的にを行い将来的にエネルギー密度500 Wh/kg級電池開発を目標とした「革新型蓄電池先端科学基礎研究」(Risingプロジェクト)が京都大学を中心として行われている。また、文部科学省でも先端的低炭素化技術開発(Advanced Low Carbon Technology Research and Development Program: ALCA)の一環として、ALCA次世代蓄電池(ALCA-SPRING: ALCA-Specially Promoted Research for Innovative Next Generation Batteries)は、特別重点技術領域として、革新的な蓄電池研究を実施中である。

電力中央研究所では家庭に設置できる規模の蓄電システム「ロードコンディショナー」を提唱し<sup>3)</sup>、それに適した高エネルギー密度のリチウム二次電池に着目して研究開発に着手した(図2)。

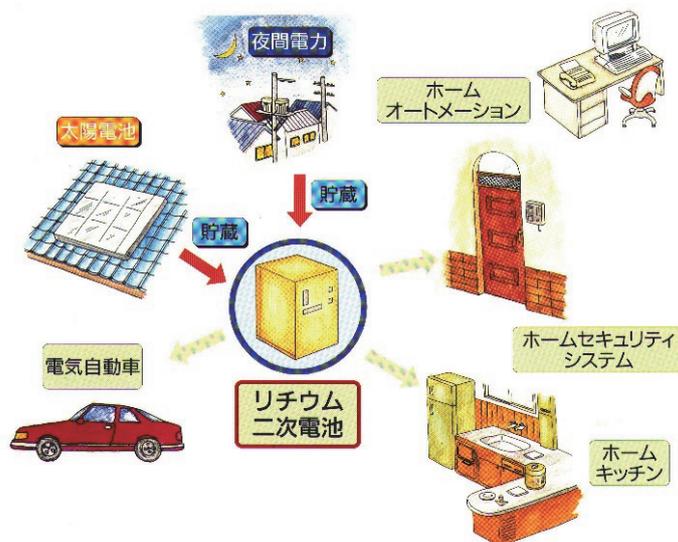


図2. 家庭用蓄電システム(ロードコンディショナー)の概念図(電中研1990年ころ)

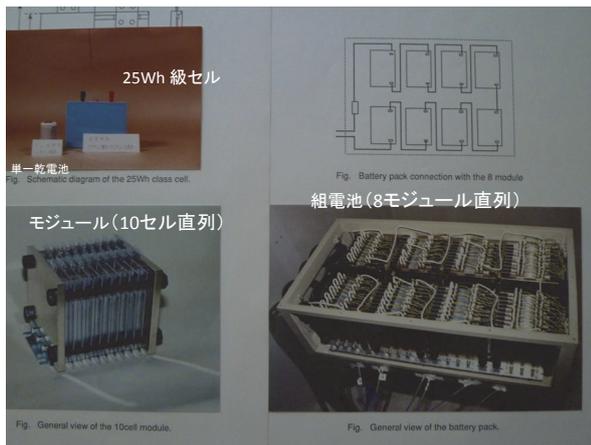


図3. 組電池 2kWh 級酸化バナジウム／リチウム電池の試作（電中研：1994年）

ユアサ電池(株)との共同研究により、25 Wh 級の酸化バナジウム／リチウム金属系の単電池(セル)を試作し<sup>4)</sup>、200V 級に直列接続を行い、2 kWh 級組電池の試作・運転を実施した(図3)。ただし、単電池性能面において負極リチウム金属デンドライト(樹枝状析出物)生成を回避することができず、寿命・安全面での課題が残った。さらには、組電池とした場合、充放電制御技術として次の課題を抽出した。①単セルの容量 OR/AND 充電状態(SOC)のバラツキに伴い、過放電側あるいは過充電側へシフトする。②放電末の温度上昇、特に高放電率では温度上昇は顕著となる。③充電に伴い電槽に必要な抑え圧は上昇する。放電により元の値に近づくが、サイクル経過に伴う累積が無視できない。このうち、電槽の抑え圧は充放電サイクルとデンドライト形成と関係が深いと推察された。

一方、民生用として1991年にソニーがリチウムイオン電池(18650型:1 Ah 級)を商品化に成功した。これは正極(コバルト酸リチウム)と負極(炭素)双方が、層間化合物としてインターカレーション(挿入)反応を利用できる活物質であることに起因している。特に電解質中のリチウムイオンから負極表面への樹枝状リチウム金属析出を回避できたことは大きな進歩であった。前述の「分散型電池電力貯蔵技術開発(1992-2001年度)」は、このような社会状況の中で開始された。

移動体(EV)用と定置型(LL)用のリチウム二次電池開発を目標とした。単電池の大きさとしては、民生用リチウムイオン電池の10倍から100倍規模のリチウムイオン電池が試作された。最終的に70~400 Wh 級の単電池を試作し、その単電池を直列接続したモジュールを構成した。定置型および移動体用それぞれの開発目標である120 Wh/kg および150 Wh/kg を達成できた。従来のコバルト酸リチウム(LiCoO<sub>2</sub>)に替わる正極活物質として、Ni-Co 酸化物混合系や、マンガン酸リチウムの実用電池材料として可能性が確認できたことも大きな成果であった。

電力中央研究所はNEDO「系統連系円滑化蓄電システム技術開発(2007-2010年)」に参画し、風力発電所や太陽光発電の併設蓄電システムについて、利用方法を考慮した充放電パターンを考案し、試作リチウムイオン電池の劣化傾向を試験した。

その後も、NEDOのプロジェクトとして、「安全低コスト大規模蓄電システム技術開発(2011-2015年度)」などリチウム二次電池技術開発が継続されてきている(図4)。

## 2.2 電気の使われ方

電気の需要は時々刻々、季節別に、さらに年代によって変化している(図5)。電気は、ガス・ガソリンなどと異なり、貯蔵することができないため、生産量(供給)と消費量(需要)を常に同じ(同時同量)とする必要がある。このため、想定される最大需要に加え、電力供給に尤度をもつ発電設備が建設されてきた。また、電力の品質を維持するため、系統制御技術が確保されてきた。例えば、周波数(東日本50 Hz、西日本60 Hz)を維持するために、GF(ガバナフリー):発電機が回転数の変動を感知し、適正周波数のための回転数を維持するように自動的かつ瞬時の回転数制御、LFC(負荷周波数制御):需給不均衡に起因する周波数変動を感知し、需給不均衡を解消するために給電システムからの自動的な発電機出力制

1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001																				
<b>新型電池電力貯蔵技術開発 (1980~1991) ... Moon Light</b> 【目標】出力:1,000kW, 充放電時間:8時間, 総合エネルギー効率>>(70%揚水発電), 充放電サイクル1,500回(10年)以上, コスト:15~20万円/kWh(揚水発電と同等)												<b>分散型電池電力貯蔵技術開発 (1992~2001) ... New Sunshine</b> 長寿命型 120Wh/kg, 240Wh/L 3500cycle E効率>90%										定置型 120Wh/kg, 240Wh/L 3500cycle E効率>90%																			
移動体用												高エネルギー密度型 180Wh/kg, 360Wh/L 500cycle E効率>85%										移動体用 150Wh/kg, 300Wh/L 400Wh/kg, 1000cycle, E効率>85%																			
2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023																				
系統連系円滑化蓄電システム技術開発('06~10) 50Wh/kg(120Wh/L), 2000W/kg(2400W/L), 寿命10年(2020年), 寿命15年(2030年), コスト:4万円/kWh(2020年), 1.5万円/kWh(2030年)												安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発('11~15) 容量:1MW級, システム効率>80%, 長周期:2万円/kWh, 短周期:7万円/寿命20年相当(2020年)																													
FCEV用Li電池技術開発('02~06) 【目標】電池/パック換算 70Wh/kg, 1800W/kg 寿命15年, E効率>96%												次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発('07~11) 100Wh/kg(120Wh/L), 2000W/kg(2400W/L), 寿命10年, E効率>96%										LIB応用・先端技術開発('12~16) 100Wh/kg(120Wh/L), 2000W/kg(2400W/L), 寿命10年, E効率>96% コスト:2万円/kWh																			
移動体用												革新型蓄電池先端科学基礎研究('09~15) 2030年に500Wh/kgを見通しうる300Wh/kg電池 (蓄電池の劣化・不安定化の機構の基礎解明)										革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発('16~20) 500Wh/kg(570Wh/L), 1500W/kg, 寿命>10年, 1000~1500CYCLE, コスト:1万円/kWh, 30分急速充																			
												ALCA										ALCA次世代蓄電池(前期)										ALCA次世代蓄電池(後期)									

図4. 国プロジェクトによる蓄電池技術研究開発

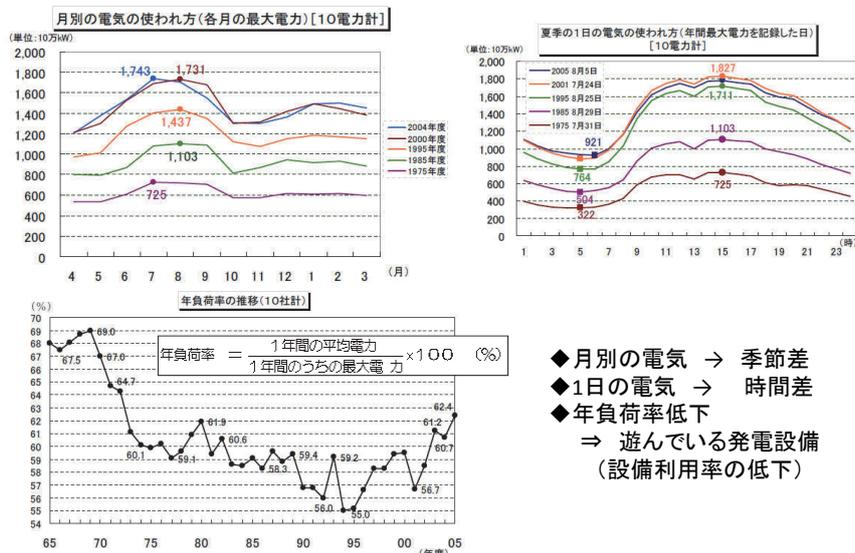


図5. 電気の使われ方 (1975~2004年)

【出所: 資源エネルギー庁 HP, <http://www.enecho.meti.go.jp/about/faq/008/>】

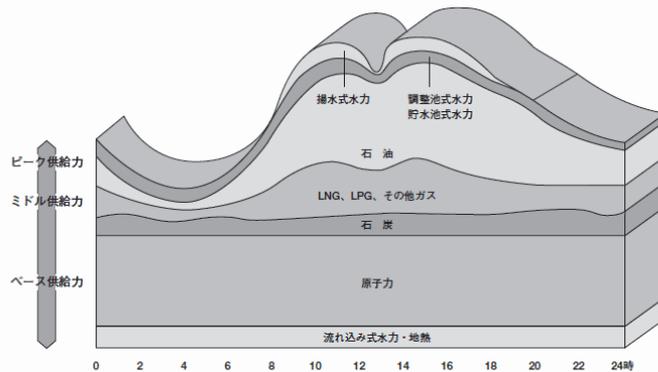
御, EDC (経済負荷配分制御): 周期の長い変動への対応は, その変動幅も大きいことから対応する発電機の経済性を考慮した負荷配分制御が行われている。

### 2.3 年負荷率と電源の組合せ

電力需給の変動に対応するため, ベース電源・ミドル電源・ピーク電源による発電が行われてきた(図6)。負荷平準化を表わす指標として負荷率がある。ある一定期間の平均電力と最大電力の比を百分率で示し, 3種類の指標がある。①期間

1日とする日負荷率, ②期間1カ月とする月負荷率, ③期間1カ年とする年負荷率

このうち, 年負荷率は年間電力需要の平準化状態を示し, 発電設備を効率的に運用しているかという尺度にもなる。平均電力と最大電力に差があまりみられない場合には, 値は高くなり, 発電設備を有効に活用している。しかし, 平均電力に比べ最大電力が非常に大きいと, 年負荷率の値は格段に低くなる。これは遊休時間の長い発電設備が多くあると判断できる。年負荷率は, 1970年度には67.1%であったものが徐々に低下し, 永年約



**揚水式水力**  
電力供給に余裕のある夜間帯に水を汲み上げ、昼間帯にその水を利用して発電。発電出力の調整が容易で、急激な電力需要の変化に対する即応性に優れている。ピーク供給力として活用。

**調整池式・貯水池式水力**  
河川の流量を調整池、貯水池で調整し発電。電力需要の変化に対応できる。ピーク供給力として活用。

**石油火力**  
燃料単価が高く、国際情勢などにより燃料価格が変動しやすい。ピーク供給力として活用。

**LNG、LPG、その他ガス火力**  
燃料単価は、石油火力に比べて安い。石炭と比べると割高である。電力需要の日間変化に応じた発電調整を行うミドル供給力として活用。

**石炭火力**  
燃料単価は他の火力に比べると安い。夜間帯の軽負荷時には出力調整を行うことがあるが、主にベース供給力として活用。

**原子力**  
火力に比べて燃料単価が安く、燃料価格が安定している。ベース供給力として活用。

**流れ込み式水力**  
河川流量をそのまま利用して発電。電力需要への変化に対応できないため、ベース供給力として活用。

**地熱**  
地中深くから取り出した蒸気で直接タービンを回して発電。火力に比べて単位発電量当たりのCO2排出量は約20分の1。ベース供給力として活用。

図 6. 時刻別電力需給と電源の組合せ概念図（東日本大震災前）  
【出所：電気事業連合会 エネルギーの基礎 2010-2011】

60%前後で推移してきた。年負荷率低下の要因としては、冷房空調需要の急増による夏季最大電力の尖鋭化、商業地区・事務所ビルなどサービス業務に伴う電力需要構造の変化、産業部門における素材型から加工組立型への構造変化などが推定できた。

### 3. 再生可能エネルギー利用と電力系統の安定化用途

太陽光発電や風力発電は、再生可能エネルギーとして期待が大きく、地熱発電・バイオマスなどを含む再生可能エネルギーのなかでも大きな賦存量が見積もられている。しかし、従来の電力系統を利用して送配電を行う場合には、厄介な発電特性を有している。すなわち、周知のとおり天気まかせ風まかせで、出力の変動が大きく、その予測も難しい発電技術である。接続問題が発生するケースとして、電力系統全体の調整力不足、接続ポイント近辺の容量不足に大別される。系統規模が小さい地域では、変動を吸収できる火力発電や水力発電の能力以上の、太陽光発電・風力発電が

接続されうる状況になっていて、その結果、需給調整・周波数調整が乱れて、地域全体の停電が懸念される事態となっている。この事態を回避するため、緊急的な措置として電力系統からの切り離し（解列）できる契約が発電事業者と電力会社（系統運用事業者）で結ばれている。また、変動型の再生可能エネルギーは立地条件によるが、設備利用率(%) ( $[年間発電量(kWh)] / [定格発電(kW) \times 8,760 \text{ hr}] \times 100$ ) が低いことが指摘されている（風力発電：約 25%，太陽光発電：約 15%）。これは太陽光発電と風力発電のみで構成される電源構成と仮定すると、年負荷率は 15～25% に止まることを意味する。なお、再生可能エネルギー、特に太陽光発電は固定価格買取制度発足（2014年7月）以降に急激に拡大された。これらの費用として、一般の需要家も 2.25 円/kWh「再エネ発電賦課金」を負担している（2016年度時点）。

このため、再生可能エネルギー普及拡大に備え、さまざまな技術開発が試みられている。そのひとつとして、蓄電池システムが期待されている。

系統の発電力が余剰となる場合には蓄電し、不

表2. 電気事業に係る二次電池の比較（原子力・保安院資料；2008年2月時点）

	ナトリウム硫黄電池	レドックスフロー電池	亜鉛臭素電池	鉛蓄電池	リチウムイオン電池	ニッケル水素電池	ナトリウム熔融塩電池
正極	硫黄	バナジウム (5価, 4価)	臭素	二酸化鉛	リチウム含有金属 複合酸化物	水酸化ニッケル	塩化ニッケル 塩化鉄
電解質	ベータアルミナ	硫酸バナジウム溶液	臭化亜鉛水溶液	硫酸水溶液	有機溶媒 電解液	水酸化カリウム 水溶液	ベータアルミナ
負極	ナトリウム	バナジウム (2価, 3価)	亜鉛	鉛	炭素	水素吸蔵合金	ナトリウム
作動温度	300℃前後	常温	常温	常温	常温	常温	300℃前後
主な用途	①負荷平準化	①負荷平準化				①負荷平準化	
	②受電電力平準化	②受電電力平準化		②受電電力平準化	②受電電力平準化	②受電電力平準化	②受電電力平準化
	③発電電力平準化	③発電電力平準化		③発電電力平準化	③発電電力平準化	③発電電力平準化	
	④非常用電源	④非常用電源		④非常用電源			
	⑤瞬低・停電補償	⑤瞬低・停電補償		⑤瞬低・停電補償	⑤瞬低・停電補償	⑤瞬低・停電補償	
主な設置箇所	変電所, 工場, ビル	工場, ビル		変電所, 工場, ビル	(研究所)	(発電所, 研究所)	(研究所)
実績台数	100台程度	数台程度	-	多数	(数台)	(数台)	(数台)
容量	中～大	中～大	中	小～中	小～中	小～中	中
出力	中～大	中～大	中	小～中	小～中	小～中	中
備考	ナトリウム, 硫黄が消防法危険物に相当		現在設置されているものはない	自動車用, UPSなど各種用途で使われる実績が多い	有機溶媒電解液が消防法危険物に相当		ナトリウムが消防法危険物に相当

足した場合には放電する。揚水発電に比べて、立地のための制約が少なく建設期間も大幅に短縮できること、さらには必要に応じた増設が可能であることが期待されている。他方では、建設コストや耐久面・安全面の信頼性に課題があり、製造技術・コストの改善が望まれている。また、分散して設置される蓄電システムを効率的に運用するための制御システムの開発が必要となる。

#### 4. 蓄電技術の比較

蓄電池に求められる性能としては、容量 (kWh)、エネルギー密度 (Wh/kg, Wh/L)、サイクル寿命 (cycle)、カレンダー寿命 (年)、出力密度 (W/kg)、効率 (放電エネルギー / 充電エネルギー : %) などが評価項目となる。また、さらに蓄電システムとしてSOC (State of Charge : 充電状態) 調整など制御特性、保守性、運転温度 (温度特性)、自己放電率、コスト、安全性 / 信頼性、補機動力の有無などがあげられる。諸性能のなかで、例えば一充電走行距離を延伸するためEV用電池ではエネルギー密度が重視される。また、HEV用電池では、出力密度とともに

減速時の回生エネルギーを有効に使うために入力密度も重要である。一方、経済性を重んじる電力貯蔵用蓄電池では効率・コスト等が重視される。

2008年当時は、電気事業法において蓄電池は少数例を除き発電所としての扱いであった<sup>5)</sup>。すなわち、電力貯蔵設備が認知されたのは10年ほど前に過ぎない。その当時の資料から、各蓄電技術の実力を伺い知ることができる (表2)。NaS電池以外には、電力系統用蓄電池としては普及にはほど遠い状況であった。その後の技術開発でも、系統用蓄電池の原理的にはリチウムイオン電池以外には大幅な進捗は認められない (図7)。

#### 【鉛蓄電池】

鉛蓄電池 (Lead/ Acid Battery) は、蓄電池として歴史も古く多数の実績を有している。性能の目安として、単セル電圧 : 1.8 V ~ 2.1 V、エネルギー密度 : 80 Wh/L, 30 Wh/kg、エネルギー効率 : 75~85%、運転温度 : -10~40℃などと考えるとよい。近年では、風力発電併設に適した3,000サイクルを越す期待寿命を有する性能改良も行われた製品も開発されている。

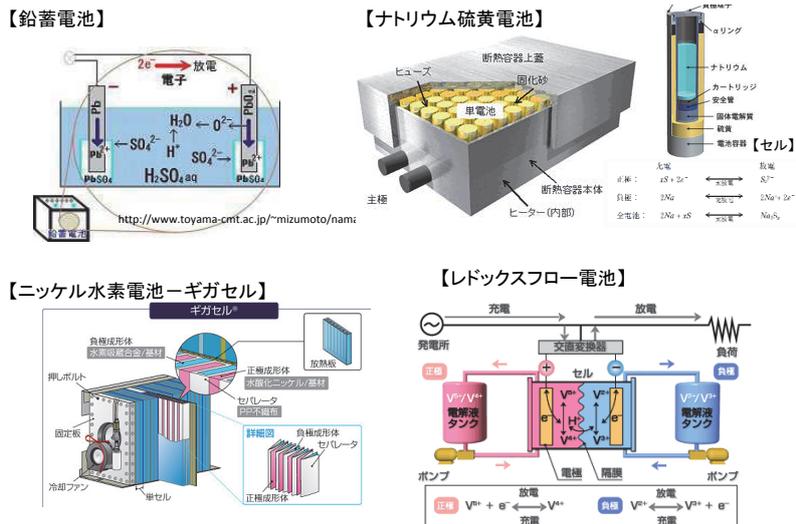


図7. 系統用電池の原理・構造

【出所：日本ガイシ(株) HP, 川崎重工(株) HP, 住友電工(株) HP】

### 【ナトリウム硫黄 (NaS) 電池】

「新型電池電力貯蔵技術開発」で開発対象であったナトリウム硫黄電池は、プロジェクト参加企業とは別の東京電力・日本碍子の共同開発により実用化された。

資源の豊富なナトリウム (Na) と硫黄 (S) を活物質として、β アルミナを固体電解質として用い、300℃前後で運転される特徴を有している。この運転温度のため加熱機を内蔵し、始動補機動力を必要とする。しかし、定常状態で使用する場合には自己発熱のため加温する必要がなく DC/DC ベースでは約 90% のエネルギー効率を示す。青森県六ヶ所村の日本風力発電・二又風力発電所 (定格出力 51 MW) に 34 MW 級 NaS 電池が併設され、風力発電出力変動を補う運転実績を重ねている。また、茨城県下で 2011 年 9 月に火災事故を起こし、大規模蓄電システムの導入中止となる事例もあった。火災発生要因として、NaS 電池施設のうち、モジュール電池を構成する単電池の 1 本に製造不良があり、当該単電池が開放破壊したことにより、高温の溶融物が流出したとされる。その後、対策・改良により豊前火力発電所などに蓄電システムが導入された。

### 【レドックスフロー (RF) 電池】

RF 電池は、「新型電池電力貯蔵技術開発」の

候補電池であった。しかし、実用化された RF 電池は異なった電池系となっている。すなわち、技術開発段階では Cr/Fe 系であったが、V 系の活物質となった RF 電池を住友電工が実証中である。反応部 (電極) と電解液貯蔵部 (タンク) が分離され、電池容量 (Wh) はタンク容量で変更可能となる特徴を有している。なお、Redox (酸化還元) と Flow (流れ) から命名された電池であり、ポンプ (補機) 動力を必要としており総合エネルギー効率が低くなる傾向がある。

### 【ニッケル水素 (NiMH) 電池】

民生用にも広くつかわれる NiMH 電池を、電力貯蔵用に大規模化に適した構造をもつ「ギガセル」として川崎重工(株)が開発した。最近の情報では、FDK (株)との共同開発により性能向上が期待されている。リチウムイオン電池と比べ、再資源化に適した材料系を使用していることから、定置用での幅広い適用が模索されているようである。

### 【リチウムイオン電池】

携帯電話 (スマートフォンを含む)、ノート型パソコン、電動工具など身の回りで広く使われている。EV をはじめ、鉄道列車や航空機など交通分野にも進出している。また、宇宙探査衛星や有人深海探査船など科学分野にも広く使われ

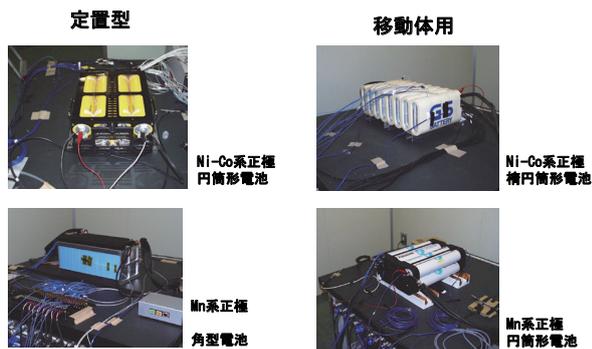


図 8. エネルギー用途のリチウム二次電池原型分散型電池電力貯蔵技術開発—2 kWh 級および 3 kWh 級リチウムイオン電池モジュールの試験状況— (2001 年ころ)

る。最近では国際宇宙ステーション (ISS) に従来の NiMH 電池と替わる蓄電池として搭載されることが報道された。リチウムイオン蓄電池 (二次電池) と呼称されるが、リチウムイオンを電荷担体として正極・電解質・負極の 3 層構造は同じでも様々な種類がある (図 8)。近年では正極材料として、Co 系, Ni 系, Mn 系, また複合化された三元系の酸化物, 鉄オリビン ( $\text{LiFePO}_4$ ) など各種材料が研究され実用化されているほか, 未だに研究開発が進められている。負極材料も多様な構造を有する炭素材料 (黒鉛など) が中心であったが, チタン酸リチウム (LTO) が実用化され, あらたに Si, Sn 系なども検討されている (図 9)。

## 5. 蓄電システムの実証例

最近, 系統用蓄電システムの実証補助事業が経

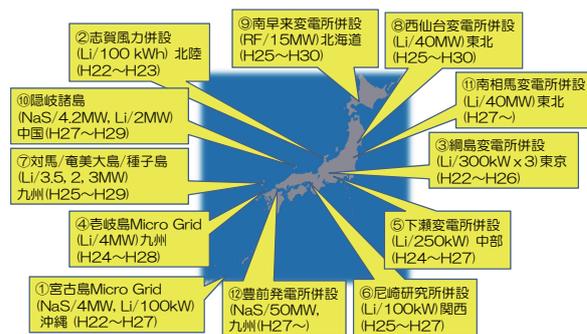


図 10. 系統用蓄電システムの実証例 (電力会社の関連)  
【注】 Li; リチウムイオン電池, RF; レッドクスフロー電池, NaS; ナトリウム硫黄電池を示す。

済産業省・環境省などにより実施されている (図 10)。その主な事業概要を以下に示す。このほか, 家庭や事業所に設置する 1 kWh ~ 数十 kWh 級の蓄電システムについて, 経済産業省から環境共創イニシアチブ (SII) を通じて「定置用リチウムイオン蓄電池導入支援事業費補助金」として蓄電システムの普及促進の一翼を担ったことを付記する。

事業名: 西仙台変電所周波数変動対策蓄電池システム実証事業 (東北電力; 2013~2017 年度)

場所: 宮城県仙台市

概要: 東北電力では周波数変動を主に火力発電により調整しているが, 火力発電により確保できる周波数調整力には限界がある。この状況で再生可能エネルギーの連系拡大のためには火力発電の周波数制御と協調した上で周波

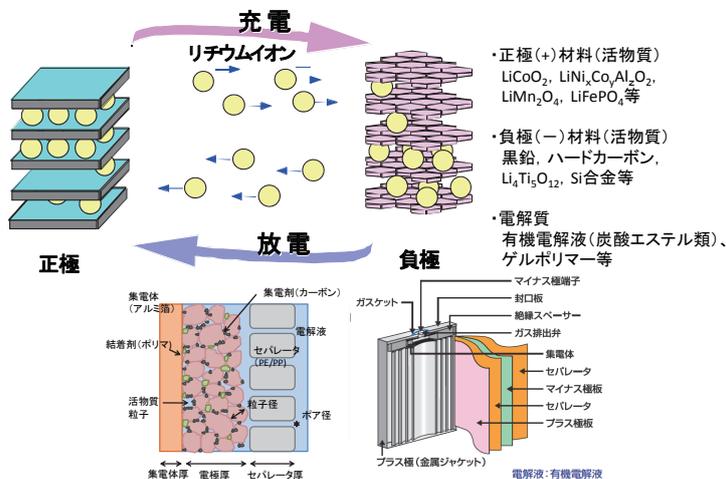


図 9. リチウムイオン (二次) 電池の原理・構造

数調整力を拡大する施策が必要となる。そこで、東北電力中央給電指令所から、充放電制御により周波数変動を調整するリチウムイオン電池蓄電システム（出力 20 MW、容量 20 MWh）を西仙台変電所に設置し、蓄電池制御による周波数調整力の拡大効果を実証する。

**事業名：**南早来変電所大型蓄電システム実証事業（北海道電力・住友電工；2013～2018 年度）

**場所：**北海道勇払郡安平町

**概要：**北海道電力の南早来変電所に RF 電池（出力 15 MW、容量 60 MWh）を設置する。蓄電池設備の性能確認および性能評価を行う。風力や太陽光発電の出力変動によって電力系統に生じる影響を緩和し、かつ効率・寿命の最大化を図るような系統用蓄電池の最適な制御・運転技術を開発し、実証を行う。

**事業名：**南相馬変電所需給バランス改善蓄電池システム実証事業（東北電力；2015～2016 年度）

**場所：**福島県南相馬市

**概要：**東北電力南相馬変電所に設置した蓄電池システム（リチウムイオン電池、出力 40 MW、容量 40 MWh）に対し、中央給電指令所からの指令による充放電制御を行い、再生可能エネルギーの出力に起因する供給余剰と需要とのバランス改善効果について実証する。

蓄電池システムにより無効電力を制御し、再生可能エネルギーの出力変動に伴うローカル系統の電圧変動の特性効果について実証する。

放電時間の違いによる蓄電池システム全体のエネルギーロスや、蓄電池システムの空調設定を検証し、エネルギーロスを最小とする運用方法について実証する。

**事業名：**豊前蓄電池変電所における大型蓄電システムによる需給バランス改善実証事業（九州電力；2015～2016 年度）

**場所：**福岡県豊前市

**概要：**大容量 NaS 電池（出力 50 MW、容量 300 MWh）の活用による再生可能エネルギー導入量拡大効果を検証する。また、系統電圧制御（電力用コンデンサ・分岐リアクトル等の代替）への適用を検証する。蓄電システムの負荷追従性を活かした周波数制御への有効性と、大容量蓄電システムの効率的な充放電パターンの確立に向けた検証を行う。

**事業名：**隠岐諸島におけるハイブリッド蓄電池システム実証事業（中国電力；2015～2018 年度）

**場所：**島根県隠岐郡西ノ島町

**概要：**特性の異なる 2 種類の蓄電池【NAS 電池：出力 4.2 MW、容量 25.2 MWh、リチウムイオン電池：出力 2 MW、容量 0.7 MWh】を組み合わせた「ハイブリッド蓄電池システム」を設置したうえで、再エネの導入拡大を図るとともに、蓄電池の効率的な充放電管理・御手法などに関する技術実証を行う。

## 6. 蓄電システム普及の課題

省エネルギー（負荷平準化）、環境問題（大気汚染）対応、再生エネルギー大量導入（系統安定化）そしてスマートグリッド（高度情報化エネルギー供給）など時代の要請に応える技術として、蓄電システムは進化してきた。今後も寿命や安全性など含む耐久性と、コストが普及促進の 2 大障壁となる可能性はある。一方、現在の技術開発に関するロードマップなどでは、電気化学的な理論容量と電池製造の実電池容量の乖離を無視した野心的な目標設定をして、研究開発費を確保している感じがある<sup>6)</sup>。それでも携帯電話がその利便性のゆえに発展し、最近ではスマートフォンが主流となってきた事実と相俟って、地球環境保全やスマートグリッド普及が必須とされるならば、その支援技術としての蓄電システムの価値は高い。例えば、安全面では電池としてリスクが残ったとしても蓄電システムとしてのハザード回避が実現

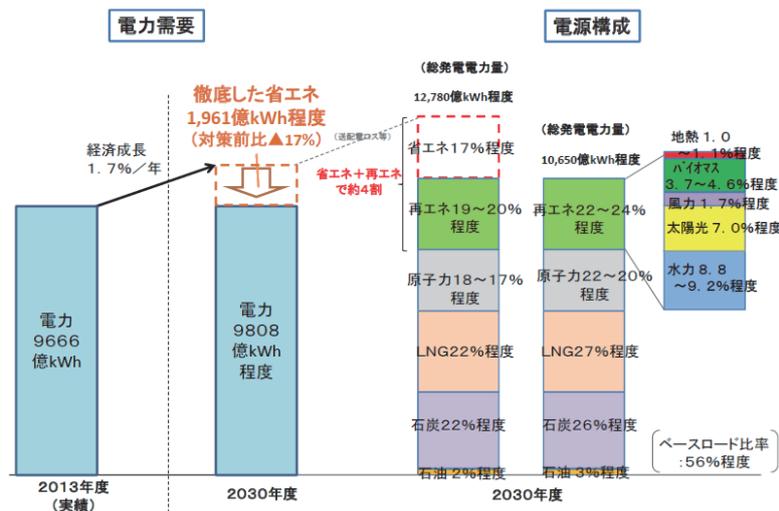


図 11. 「長期エネルギー需給見通し (2030年)」による電力需給構造  
 【出所：経済産業省, 「長期エネルギー需給見通し」, 2015年7月】

できればよいであろう。具体的には、①高率追従性として、LFC (数分~20分) 対応より高速制御への即応性、容量/出力バランス設計。②高エネルギー効率化のため、電池単体としての高効率化と低い補機電力 (保温・冷却等)、そして③長寿命化としては電力機器並の運用寿命、さらには、④コストの低減 (市場は縮小?) が求められる。コスト面について、長寿命化技術はライフサイクル的には低コスト化と省資源につながる可能性が高く、こうした地道な技術開発も続けられるべきであろう。

視点を変えて、日本の産業育成の面からは今後10年以内では、第一級の蓄電システム技術保持国として君臨できると期待される。世界をリードし国際電気標準会議 (IEC) など国際規格に日本の技術を反映させていくべき施策も始められている。その一環として、独立行政法人製品評価技術基盤機構の大型蓄電システム安全性・性能評価施設 (NLAB) が2016年大阪市住之江区に開設された。その中核である多目的大型実験棟は容量数十kW級の蓄電池盤からMW級のコンテナ搭載型蓄電システムまでの試験を想定した世界最大級の恒温型屋内試験施設である。試験機関・電池メーカーなどに共同試験の形で利用できるオープンな試験施設としての体制が整えられている。その成果に期待したい。

## 7. おわりに

蓄電池戦略【経済産業省 2012年7月】では、目的を“コスト低減等による蓄電池の普及加速化に向けた課題を整理すると共に、今後実施すべき施策を取りまとめたものである。”としている。その目標は“2020年に世界全体の蓄電池市場規模 (20兆円) の5割のシェアを日本関連企業が獲得することを本戦略の目標に掲げることとする (内訳：大型蓄電池 35%、定置用蓄電池 25%、車載用蓄電池 40%を想定).”となっている。すなわち、蓄電技術の普及と経済面の成果を期待している。さらなる将来像をみれば、2030年へのエネルギー需給見通しでは、人口減少を前提として徹底した省エネルギーの導入シナリオとなっている (図11)。この前提として、大幅な技術革新が求められている。蓄電技術をはじめ科学技術に依存する必然性は認めるものの、「科学的な進歩は無限に続くのである。しかし、利己的な人間性は社会的にはなお四千年前の哲人と比し何らの進歩も示していない。」という先人の言葉を肝に銘じたいと念じている。

## 【謝辞】

リチウム二次電池に係る業務に従事して約30年経過することができ、ご縁のあった (一財) 電力中央研究所、(国) 新エネルギー産業技術総合

機構，（国）産業技術総合研究所，各電池メーカ，電池技術委員会，そして（独）製品評価技術基盤機構など関係各位に，お礼申し上げます。また，お話の機会を与えて戴いた（公財）海洋化学研究所の皆さまに感謝いたします。なお，各種の政府公開資料と NEDO 受託研究に関する知見を利用させていただきました。

#### 参考文献

- 1) 電気事業連合会 HP「電気の歴史」(<http://www.fepec.or.jp/enterprise/rekishi/index.html>)
- 2) 経済産業省 蓄電池戦略プロジェクトチーム，「蓄電池戦略」，2012年7月
- 3) 電力中央研究所「ロードコンディショナーの開発－10kWh級ロードコンディショナーの可能性－」総合報告：T16（1990）
- 4) 寺田信之，他，「リチウム電池ロードコンディショナーの設計・試作」，（財）電力中央研究所研究報告：T94013，1995年3月
- 5) 経済産業省 原子力安全・保安部会 電力安全小委員会電力貯蔵設備規制検討ワーキンググループ，「電力貯蔵設備の規制の在り方について」，2008年2月
- 6) （独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO），「NEDO 二次電池技術開発ロードマップ2013」，2013年8月