

2.1.9 電気エネルギー利用（電力貯蔵）

（1）研究開発領域の定義

本領域は電気エネルギー利用のうち、電気を一旦貯蔵し、電気のエネルギー形態で戻す科学、技術、研究開発の領域である。電力系統、電気自動車、家庭用などで利用されるエネルギー貯蔵装置・システム（化学的、電氣的、物理的原理による二次電池、キャパシタ、CAES（圧縮空気）、熱利用など）が対象で、特に電力系統用などの大型電力貯蔵を主とする。

（2）キーワード

揚水発電、二次電池、キャパシタ、CAES、熱貯蔵、リチウムイオン電池、NAS電池、レドックスフロー電池、水素

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

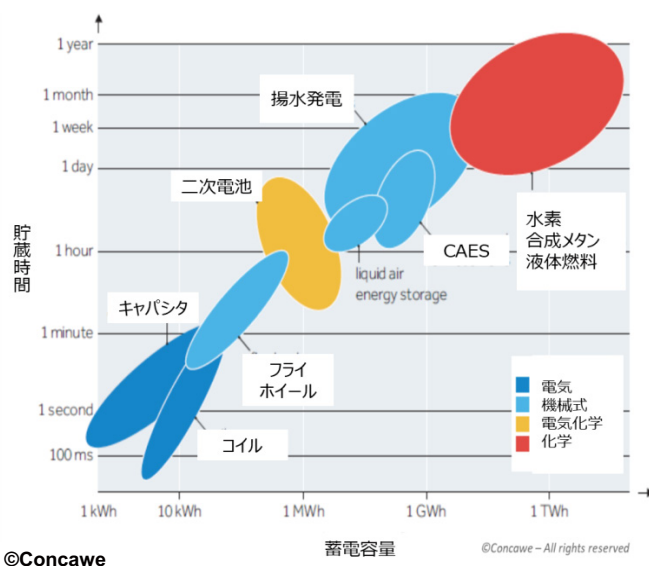
電力や水素エネルギーの貯蔵や輸送が安価に効率的に実現できれば、太陽光発電や風力発電などの出力が変動する再生可能エネルギーの電力システムにおける割合を拡大できる。これにより、石炭や天然ガスなどの化石燃料による火力発電への依存度を低減でき、電力供給の持続可能性を高められる。また、電力貯蔵装置を活用した電気自動車や燃料電池自動車の普及によって、内燃機関の排ガスに起因する環境負荷を低減できるとともに、運輸部門の石油製品への依存度の低減が期待でき、国としてのエネルギー安全保障も高められる。さらに、二次電池は無人航空機などの移動体用のエネルギー源としても炭化水素燃料に代わって利用され始めており、新しい運輸サービスや関連産業の創成も期待される。そして、エネルギーシステムにおけるエネルギー貯蔵の高度化は一般に、社会における電力などのエネルギーの供給安定性を高めることに貢献し、地震や洪水、暴風等による自然災害に対する電力システムのレジリエンスを高める効果が期待できる。

〔研究開発の動向〕

（3）-1 各種電力貯蔵方式¹⁾

電力貯蔵の方法は、様々な原理に基づき、有望なものはいくつか存在する。体積当たりや重量当たりのエネルギー貯蔵密度、貯蔵効率、貯蔵容量、入出力の大きさ、負荷応答性、貯蔵時間、経済性、安全性、環境性など、数多くの評価軸を考慮する必要がある。商用的に大規模に利用されているのは揚水発電と二次電池のみである。なお、燃料等の体積当たりのエネルギー密度は、炭化水素燃料であるガソリンで9,600 kWh/m³、液体水素で2,760 kWh/m³、700気圧の圧縮水素で1,600 kWh/m³程度であるのに対し、揚水発電は0.1 kWh/m³程度、二次電池は20～500 kWh/m³となっている。

■揚水発電：充電時は電動ポンプで下池の水を上池に汲み上げて、水の位置エネルギーの形でエネルギーを蓄える。放電時は上池の水を下池へ落下させて、水の運動エネルギーで水車を回して発電を行う。発電用水車と揚水ポンプは同じ設備が兼用され、フランシス水車が利用される。揚水発電は土木工事で対応できるため比較的大容量にできる。最高揚程はおよそ900 mであり、単機出力30万kW程度のものが一般的である。近年は、揚水ポンプ動作時に、同期電動機の界磁コイルに低周波交流電流を流すことで、電源周波数は一定のままでポンプの可変速運転ができるものもある。自然の地理的条件を利用するため立地場所は限定さ

図表2.1.9-1 各種電力貯蔵方式の貯蔵容量と貯蔵時間²⁾

（Concawe 資料を基に CRDS で追記）

れる。海水揚水、地下揚水なども検討されている。また、重力場における物質の位置エネルギーとしてエネルギー貯蔵する方法として、水ではなく、コンクリートブロックやレンガブロックなどの重量物を電動クレーンでタワー状に積み上げたり積み下ろしたりすることで充放電する方法も考えられている。

■二次電池：充電で元の状態に戻り、繰り返し使用できる電池である。鉛蓄電池が代表的な二次電池である。高性能な二次電池として、ナトリウム・硫黄電池（NAS 電池）、亜鉛・臭素電池、リチウムイオン電池、レドックスフロー電池（RF 電池）などがある。リチウムイオン電池の電解質を無機系固体に置き換えた全固体電池の研究開発も進められている。重量エネルギー密度が理論上最も高いのはリチウム空気電池である。二次電池は一般に、電力貯蔵装置としては、エネルギー密度が高く貯蔵効率も比較的良い。ただし、長時間貯蔵すると内部放電で貯蔵した電気エネルギーが自然に失われることや、充放電を繰り返すと電池内部が劣化して性能が低下することが課題となる。エネルギー貯蔵量を増やす方法として、電解液をタンクに貯蔵するフロー型の二次電池もある。

二次電池はエネルギー密度などの物理的特性の改善も望まれるが、最も重要な課題はその低コスト化である。電力システムにおいて、季節変化に起因する自然変動電源の余剰電力の有効利用を経済的に実現するには、充放電頻度が低くなるため、桁違いのコスト低下が必要とされる。

■フライホイール（弾み車）：回転エネルギーとしてエネルギーを蓄えることができる。単位体積当たりのエネルギー貯蔵密度は、20～80 kWh/m³と程度され、二次電池程度に達する場合もある。単位重量当たりの蓄積エネルギーは、材料密度に反比例するため、フライホイールの材料としては、特定方向の力に対する許容応力が高く、しかも軽量なものを用いるのが良いとされる。長時間貯蔵には、風損や軸受けの摩擦による損失を抑制する必要がある。そのため、フライホイールの本体を密閉された真空容器の中に設置し、それを非接触の磁気軸受けで保持するなどの工夫もなされる。

■圧縮空気エネルギー貯蔵：CAES（compressed air energy storage）とよばれ、充電時は地下の空洞に12～80気圧の圧縮空気の形でエネルギーを蓄え、放電時は圧縮空気を運転中のガスタービンの燃焼室に供給し、ガスタービンの空気圧縮機で消費される動力を節約する形でエネルギーを放出する。圧縮空気を貯める空洞は土木工事を主体に建設でき、大型化も比較的容易であると考えられている。当初は内燃機関であるガスタービンと組み合わせた運用が前提とされていたが、最近、10気圧程度の高圧タンクに貯めた圧縮空気で専用の膨張機（タービン）を回して発電する方式も研究されている。単位体積当たりのエネルギー貯蔵密度は、揚水発電よりも高いが2～6 kWh/m³程度である。

■超電導磁気エネルギー貯蔵：導体に電流を流すと磁界が形成され現象を利用し、電流の二乗に比例する磁気エネルギーが蓄えられる。超電導体を用いたコイルを用いると、抵抗損失がないことから、電源がなくても永続的な電流が流れ、磁気エネルギーを長期間保持できる。SMES（super-conducting magnetic energy storage）ともよばれる。ただし、超電導は一般に低温状態で発現する物理現象のため、導体を冷却し低温状態を保持しなくてはならない。熱的擾乱などで、超電導が常電導に戻るクエンチとよばれる現象が起きると、その箇所の電気抵抗による発熱で、導体の融解や冷媒の膨張による爆発などが起きる危険性がある。また、コイルに働く電磁気的な応力は規模に応じて大きくなる。単位体積当たりのエネルギー貯蔵密度は、二次電池よりも低く6 kWh/m³程度である。

■熱貯蔵：熱で間接的に電力貯蔵ができる。その一つの方法が、電気抵抗器などを用いて、電力を500～1000℃の高温の熱エネルギーに変換し、岩石や耐火レンガ、そして熔融塩などの物質に貯蔵し、必要に応じて産業や民生の熱需要を直接的に賄ったり、水素製造などの化学反応や発電用の熱機関の熱源として利用したりすることである。一部の太陽熱発電プラントで既に、曇天日や夜間など日射の得られない時間帯でも発電を可能にするために、蓄熱システムが導入されている。熱源を発電用として利用する方法は、二次電池に代わる安価な電力貯蔵装置として、米国やドイツなどでも研究開発がなされている。

単位体積当たりのエネルギー貯蔵密度は、貯蔵する熱の温度にも依存するが、高温の場合では二次電池のそれに近くなる。顕熱で蓄熱する場合は、温度変化の幅や頻度が大きくなるため、蓄熱装置の材料の耐久性が問題となる。もう一つの熱貯蔵の方法は、地中熱などとして、より環境温度に近い小さな温度差で大量の熱エネルギーを蓄熱する方法である。例えば、夏季には冬季に蓄えた冷熱を使用するとともに温熱を貯蔵し、冬季にはその逆に温熱を使用するとともに冷熱を貯蔵すれば、冷暖房用の電力需要を削減する形で間接的に季節間にわたる電力貯蔵が実現できる。熱の出し入れは井戸からの地下水の汲み上げや圧入によると考えられる。地上に設置される熱エネルギーの生成利用装置の性能だけでなく、地下水の流れなど地層の特徴にも依存して効率が決まる。

■電気二重層キャパシタ：活性炭をベースとした電極と電解質界面に形成される静電容量を利用する電力貯蔵方法もある。キャパシタは、短時間に大きな電力を必要とする際にメリットがある。貯蔵容量は大きくないが、体積エネルギー密度もオーダー的には二次電池と同程度が期待される。

■水素貯蔵：余剰電力を水分解で水素として貯蔵する方法であり、長期の電力貯蔵と言う点では優位である。しかし電気から水素、水素から電気への往復の変換損失が低いことに加え、自然変動電源利用では水分解装置の設備利用率が低くなるため、経済性に課題がある。このため電力コストが十分低いことが前提となる。ま

た再生可能電力の増大により蓄電池からの放電機会が減少し、設備利用率の低下も考えられている。このため最近では電力のセクターカップリングと呼ばれる考え方で、電気に戻すのではなく、水素あるいは水素からのメタンや液体系合成燃料製造により電力以外の熱や交通分野への利用拡大を目指す方向にある。(「2.1.12 化学エネルギー利用」領域参照)

(3)-2 二次電池の個別詳細：レドックスフロー電池、NAS 電池、リチウムイオン電池

・レドックスフロー電池^{3), 4), 5)}

レドックスフロー (RF) 電池は、1974年に米国 NASA の L.H.Thaller によって原理と基本システムが提唱され⁶⁾、国内では同時期に産業技術総合研究所によって研究が開始された⁷⁾。当時、揚水発電が環境問題等により新規建設が困難となったため、これに代わり期待された新型の電力貯蔵用電池の一つが RF 電池であった。現在、すでに需要家や電気事業用などで一部実用化されているが、再生可能エネルギーの大量導入が推進される中で、RF 電池にはさらなる高性能、低コスト化が求められており、基礎研究から実用化開発に至るまで世界中で様々な取り組みが行われている。

国内では、古く 1980 年に国家プロジェクトとして RF 電池を含めた 4 種類の電池の開発が始まり、電力会社においても独自にメーカーとの共同開発が進められた。当初、RF 電池は、正極に鉄イオン、負極にクロムイオンを使う Fe/Cr 系の開発が中心であったが、1985 年頃にオーストラリア New South Wales 大学の M.Skylas-Kazacos 教授によって、正負極共にバナジウムイオンを使う V 系 RF 電池が発明され⁸⁾、RF 電池の性能は大きく向上した。2000 年頃に、住友電気工業が V 系 RF 電池を実用化し、現在までに試験設備も含めて約 30 件のシステムを納入している。比較的大規模な設備としては、NEDO プロジェクト「風力発電電力系統安定化技術開発」において、2003 年度に電源開発の北海道苫前ウインビラ発電所 (風力出力 30 MW) に併設された 4 MW/6 MWh の設備があり、風力発電の出力変動平滑化の実証試験が行われた⁹⁾。また、経済産業省の「大型蓄電システム緊急実証事業」として北海道電力に設置された設備は 15 MW/60 MWh であり世界最大級の RF 電池設備である¹⁰⁾。2015 年から 3 年間の実証試験を終え、現在は実設備として運用されている。海外においても世界各地で数多くの実証試験、実用化が進められている¹¹⁾。

RF 電池は、大容量化に適しており、常温作動する水溶液系電解液を用いるため安全性が高く、システムの出力と容量を独立に設計できる柔軟性を有している、また原理的に長寿命などの利点があり、今後必要とされる長時間容量の用途にも適している。V 系 RF 電池は、電力系統で実運用される技術レベルにあるが、今後の大量導入に向けては経済性の観点から、さらなる高性能化、低コスト化が求められている。基礎研究の推進と共に、実用設備としての開発、導入が進む中で、国際標準化も進められている。日本が主導し、蓄電池を扱う TC21 と燃料電池を扱う TC120 との合同 JWG7 として、2015 年から活動を開始し、2020 年に国際標準が策定されている。

研究開発に関しては、国内では産総研が中心となり、2001 年に電気化学会エネルギー会議 RB 研究会が発足し、2004 年には電力貯蔵技術研究会として発展している¹²⁾。経済産業省においては、上記の実規模システムの実証事業と共に低コスト化開発を目的とした補助事業を 2013 年から実施している。近年、世界的な再生可能エネルギー導入推進の流れと共に電力系統安定化のための蓄電池が不可欠となり、2010 年頃からは、米国、中国、欧州を中心に急速に研究が活発化している。米国では、2009 年の「米国復興・再投資法 (ARRA)」の成立に伴って、再生可能エネルギー等への投資が促進され、エネルギー省 (DOE) から RF 電池等のエネルギー貯蔵技術開発に多額の支援が実施されている。米国電気化学会 (ECS)¹³⁾ の年 2 回の会議において、RF 電池セッションには毎回数十件の発表が行われている。中国では、豊富なバナジウム資源

の活用も含めて多くの研究機関、企業が活発な研究開発、実証試験を行っている。欧州では、2010年6月にRF電池に特化した学会IFBF (International Flow Battery Forum)¹⁴⁾が発足し、毎年盛況に開催されている。こうした活発な研究開発活動を受け、RF電池に関する論文発表数は、2014年には年間400報を超えるまでになっている。

• NAS電池

ナトリウム硫黄電池 (NAS電池) の原理は1967年にアメリカのフォードモータースにより発表され、電気自動車用として開発が進められたが、航続距離が短いことや充電インフラが整備されていなかったことなどから開発を停止している。一方、電力貯蔵用としては、GEやFIAMMがナトリウム硫黄電池と同じ固体電解質 (β アルミナ) を使用する熔融塩ナトリウム電池を開発した。GEについては2017年に電池製造を中国企業に移管し、熔融塩ナトリウム電池に拘らず、リチウムイオン電池も含めた電力貯蔵システムの構築にシフトしている。

国内では1984年に日本ガイシが東京電力と共同開発を開始し、固体電解質からシステムの開発、さらには事業化まで進展している。開発当初の目的は、年々増加していたピーク電力に対処するための都市型電力貯蔵であったが、1990年代後半からピーク電力の鈍化が始まったため、大口需要家の構内に電池を設置してピークシフトによる電力契約料金の低減や非常用電源/瞬低対策などのBCPとしての用途がメインとなった。近年は風力や太陽光などの自然エネルギーの普及が進められており、その出力変動や発電設備の下げ代対策などが問題になってきており、蓄電池の利用が重要視され始めている。

NAS電池は固体電解質を使用する高温作動型電池で、充放電過程においてはナトリウムイオンが固体電解質を移動するのみで、不可逆な物質や反応を阻害するような物質が生成されることがなく、SOC (State of Charge: 充電率) 100~0%までの充放電を繰り返したとしても容量の減少は少ない。開発課題としては電池定格電力の1.2~1.5倍までの高出力化である。また、これまでの15年の寿命を20年まで長寿命化が可能になってきており、これにより経済的なメリットが向上する。また、システムコストの低減策としては、コンテナ型とし、モジュール電池を工場に設置し配線を行うことで、設置場所での工期が短縮されるとともに、品質の向上が期待できる。

また2011年の火災事故を契機に安全性向上のために従来の安全機構に加え、全ての単電池ごとに区画化し、単電池が燃焼しても熱暴走に至らないように安全性を担保するという大きな設計変更を実施している。

• リチウムイオン電池

電気自動車 (EV) 等の電動化車両の用途が注目されているリチウムイオン電池であるが、蓄電用途や産業用途等への適用も進んでいる。大電流放電性能が要求される車両用途とは異なり、停電時や災害時等に電力を供給する蓄電用途では、大きなエネルギーが貯められることが要求される。また、電力のピークシフト等への用途では、充放電サイクル寿命性能として15年~20年もの長期間、毎日の充放電サイクルが可能なが求められる。リチウムイオン電池は、エネルギー密度が高く、小型軽量であることや、長寿命の特徴があるが、各用途の高機能化や高性能化に対応するために、種々の電池性能の飛躍的な向上が望まれている。

リチウムイオン電池は、正極活物質にコバルトやマンガン等のリチウム含有遷移金属酸化物を、負極活物質に炭素を、電解液には有機溶媒にリチウム塩を溶解したものを使用する。放電電圧が高いこと等から、他の電池系と比較して、単位体積当たりのエネルギー密度と単位質量当たりのエネルギー密度が高く、鉛電池の数倍程度、ニッケル水素電池の2倍以上の電力を蓄えることができる。また、充放電時の電流効率がほぼ

100%と高く、エネルギーのロスが無く、大電流放電時の電圧低下も少ないというメリットもある。サイクル寿命性能では、蓄電用途等の毎日充放電される用途でも、10年以上の長寿命が得られている。なお、電解液が可燃性の有機溶媒であることから、誤使用時や事故発生時などの安全性確保については、セルや蓄電システムに関する設計上の配慮と安全対策がおこなわれている。

日本で初めて商品化されたリチウムイオン電池は、性能改良への熱心な取り組みにより、市場が大きく拡大したが、その後の世界的な開発競争と市場のさらなる拡大において、日本国内の電池メーカーの事業は縮小の方向であり、韓国と中国の電池メーカーのシェアが拡大している。当初はコスト競争力の低いことが弱みであったが、近年は、韓国製、中国製の電池の性能向上が著しく、世界のトップレベルに近づいている。この状況を打開するためにも、日本主導でのリチウムイオン電池の改良が求められている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

- ・ RF電池においてはセルの高出力化の観点から、電極、隔膜材料の高性能化と共に、電解液を効率的に供給し反応を起こさせるセル構造の開発も重要である。2010年以降、特に米国においてPEFC（固体高分子形燃料電池）の技術をRF電池に適用して、セル出力を数倍に高出力化したことは注目に値する^{15), 16)}。電解液に関しては、RF電池には様々な活物質が使えることが期待され、これまでもFe/Cr系、V系のような金属イオンの酸化還元反応を使う系やZn/Br電池のように金属の溶解析出反応を使う系などがある。最近では、Ti/Fe系やTi/Mn系¹⁷⁾などの安価な金属イオンを適用した電解液系と共に有機化合物を使う報告が活発化している。2014年にNature¹⁸⁾、2015年にScienceに発表された米国Harvard大学の論文が注目を集めた。負極に有機化合物であるアントラキノン類を用いている。電池反応は可逆で安定であり、植物由来の安全な電解液として将来低コストに製造できると報告されている。その他、有機化合物であるTEMPOやメチルビオロゲンを活物質として用いる例など多くの提案がされている。活物質を電解液に溶解させるのではなく、有機ポリマー微粒子の形態で分散させる研究例もあり、高濃度化が期待される。こうした有機レドックス系は、官能基の選択と導入によって電位制御など分子設計の自由度が大きく、今後の大きな発展の可能性を秘めている¹⁹⁾。国内においても、2016年に上記の電力貯蔵技術研究会傘下で「新レドックス系エネルギー技術研究WG」が設立され、新規なレドックス系の研究推進を図っている。
- ・ 現行のリチウムイオン電池のエネルギー密度の向上は限界に近づきつつあると認識されており、新しい電池系の研究開発と実用化が必須である。新規の正極としては、硫黄正極や空気極、新規の負極としては、シリコン系負極や金属リチウム負極などが、研究開発の候補となっている。また、リチウムイオンは一価のイオンであり、充放電において、一個の電子しか動かないが、例えば、マグネシウムやカルシウムなどの二価イオンは二個の電子が、アルミニウムのような三価イオンは三個の電子が動くため、多価イオンの利用による高エネルギー密度化も研究開発の対象となっている。さらに、全固体電池は、エネルギー密度の増加や安全性の向上を目的とするのみならず、EV用の大容量の電池を数分以内の短時間で充電することに有効であることから、固体電解質をリチウムイオン電池に適用する研究開発も進められている。また、固体電解質は、高温で分解することなく、低温でも凍らないことから、現行のリチウムイオン電池では使用できないような低温から高温までの広い温度範囲での使用が可能になることも期待されている。車載用に開発された新規の電池系は、蓄電用途等の要求性能に合わせて、選択して使用することができる。
- ・ 余剰電力の利用に際しては、電力自体の購入費用はほぼゼロであるため、貯蔵や変換などの効率向上よ

りも、設備費低減の方が重要となる。熱としてのエネルギー貯蔵はその候補の一つである。電熱器の設備費は安価であり、また水素や電力の貯蔵と比べて、熱エネルギーの貯蔵は容易である。このような電気→熱→電気のように電力を熱に変換し蓄熱を介して発電する方法はカルノーバッテリーと呼ばれている。コンセプト自体は1922年と古い近年の蓄熱技術の進歩により実装化に向けた開発が進んでいる。プロセスはヒートポンプあるいは電熱器により電力を熱に変換し、熔融塩、潜熱蓄熱、固体顕熱蓄熱などで貯蔵し、利用時に熱を再び電気に変換するものである²⁰⁾。最近ではドイツのシーメンスによる火山岩に蓄熱するタイプの「Electric Thermal Energy Storage (ETES)」技術のプロジェクトが挙げられる。電力を熱エネルギーとして蓄熱し、電力が必要な時に熱エネルギーを用いてタービンを回し電気エネルギーに再転換して送電するものである。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・JST-ALCA次世代蓄電池 (ALCA-SPRING)：現行のリチウムイオン電池の次世代型となる高容量蓄電池の研究開発を加速する事を目的に、ALCAの特別重点技術領域として2013年に発足。全固体電池、硫黄電池、次世代電池等の種々の電池について、活物質・電解質・セパレータなどの材料や要素技術の開発、反応・劣化メカニズムの解明、さらには、蓄電池の性能が充分に発揮できるように、電池の最適化研究を推進している。
- ・NEDO「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発 (RISING2 project)」(2016～2020年度)：電気自動車 (EV) やプラグインハイブリッド自動車 (PHV) のガソリン車並みの走行距離を目指して、現行のリチウムイオン電池の性能を凌駕する革新型蓄電池の実用化を推進している。大学・国研・企業の連携により、世界最先端の解析技術を開発・活用しながら、エネルギー密度、寿命、安全性等の性能を高いレベルで両立させる革新型蓄電池の研究開発を実施している。前身の「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業 (RISING) 2009～2015年度」の成果を受けて、実際の蓄電池を試作して、実用化の促進をはかる。
- ・NEDO「先進・革新蓄電池材料評価技術開発・第2期 (SOLiD-EV project)」(2018～2022年度)：自動車・蓄電池・材料メーカーと大学・国研とが連携し、全固体リチウムイオン電池の根本的な課題を解決する要素技術を開発しつつ、試作セルを用いて新材料の特性や量産方法・電気自動車への搭載の適合性を評価する技術を開発している。安全性・耐久性の試験評価法について、日本主導による国際規格化の活動を進めている。前身の「先進・革新蓄電池材料評価技術開発 (第1期) 2013～2017年度」の成果を引き継いで、さらなる開発を進めている。
- ・NEDO委託事業として福島水素エネルギー研究フィールド (FH2R) が2020年2月に完成。20 MW 太陽光発電設備による電力と系統電力により10 MWの水素製造を行い、圧縮水素として貯蔵・供給を行う。水素製造・貯蔵とデマンドレスポンスの最適な組み合わせを実現するシステム構築の実証を目指す²¹⁾。
- ・経済産業省の「大型蓄電システムによる需給バランス改善実証事業」として2016年3月よりコンテナ型NAS電池を2段積みした大型システムとして、50 MW/300 MWhの運用を九州電力にて実施されている。
- ・NEDO「エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術の国際実証事業/独国ニーダーザクセン州大規模ハイブリッド蓄電池システム実証事業 (2017～2019年度)」において、4 MW/20 MWhのNAS電池と7.5 MW/2.5 MWhのリチウムイオン電池を組み合わせたハイブリッド蓄電池システムを構築。2種類の需給調整運転 (一次、二次調整力)、インバランス低減運転および電圧抑制のための無効電力供給

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

の4つのユースケースに対して、複数機能をマルチユースとして同時に提供可能な制御技術を構築。

- ・シーメンスガメサ・リニューアブル・エナジー (SGRE) による「Electric Thermal Energy Storage (ETES)」プロジェクト:ドイツSGREはPower to Heat (P2H) システムとして、風力発電の電力をヒーターで空気を加熱し、600℃ (最高900℃) で砕石に蓄熱し、必要時に砕石の顕熱を用いて蒸気発電を行うもので、一次電力に対する2次発電の効率50%を計画している²²⁾。この装置の利点は高価なバッテリーを用いず蓄熱コストが1/10～1/100オーダーで低減できることである。すでに原理プラントでの検証を終え、ハンブルクのアルミニウム工場に試験プラントが設置され、1週間で130MWh分の蓄電が想定されている。この蓄電設備では、火山岩1,000tを遮熱性の高い800m³の空間に閉じ込め、電気抵抗で電力を熱風に変えて火山岩を昇温させる²³⁾。
- ・蓄熱装置のエネルギー変換の高密度化において、高温化が重要である。北海道大はAl-Si 基合金系PCM マイクロ粒子への化成処理と酸化処理によるコア-シェル型マイクロカプセル PCM (MEPCM: Microencapsulated PCM) 合成法を提案し、500℃ 以上の高温領域で使用可能な MEPCM の開発に成功している²⁴⁾。MEPCM はシェルが化学的に極めて安定であり、高温高密度蓄熱材として応用展開が期待される。
- ・米国エネルギー省 ARPA-Eにおいて、定格電力で10時間以上 (最大100時間) 放電できる電力貯蔵システム開発のための DAYS プログラムが2018年9月より開始され、総額2400万米ドル (3年間)、10プロジェクトが採択された。電気に戻すことを前提に貯蔵技術には制約がなく、電気化学、熱、および機械システムなどによりコストを低く抑える技術開発を目指している²⁵⁾。
- ・IEAエネルギー貯蔵技術協力プログラムの国際共同研究活動の一つ (Annex 36) としてカルノーバッテリー (電力→熱変換・蓄熱→電力のバッテリーシステム) が2020年1月に設立された。日本からも参加予定²⁶⁾。

(5) 科学技術的課題

- ・電力システムにおける電力貯蔵という観点では、二次電池の最大の課題はコストであり、これを大幅に低減させることが重要である。従来型のリチウムイオン電池に関しては、電気自動車の普及に伴う量産効果によって、その価格低下はある程度期待できるが、太陽光発電や風力発電の季節変動などの長周期の変動対策としてはそれだけでは不十分と考えられ、桁違いのコスト低減が望まれる。全固体電池が実現できれば、その製造プロセスも大幅に変わるため、段違いの価格低下が実現できるかもしれない。現状のエネルギー密度の2～3倍が得られる活物質等の材料は多くはなく、選択肢は絞られる。さらに、高いエネルギー密度は得られても、寿命が短いことや、大電流での充放電が難しいこと、安全性の確保が難しいこと等の問題のある材料が多い。すべての性能を充足できることが重要である。また、可燃性の有機溶媒を用いる電解液系の電池では、エネルギー密度の増大に伴い、電池の活性度が高くなり、安全性の確保が難しくなるため、固体電解質等の不燃性材料による高安全化が期待される。しかしながら、全固体電池においては、固体である極板と電解質との良好な接触状態の維持が難しく、安定した性能の維持が難しい。
- ・高温熱利用については、断熱や熱交換の性能向上、材料の熱疲労対策が主な課題と考えられる。顕熱や潜熱による蓄熱のみならず、吸熱や発熱を伴う熱化学反応を組み込むことで、蓄熱利用システムとしての更なる性能向上を図ることも考えられる。

(6) その他の課題

- ・電力貯蔵装置の経済性評価は、充放電サイクルの長さや頻度、放電深度にも依存するため簡単ではない。二次電池であれば電極や電解質の材料劣化なども関係する。また、電力システムでの余剰電力貯蔵が目的の場合、自然変動電源の電源構成上の割合が大きくなれば、必要とされる充放電特性も変わる。また電力貯蔵技術には、物理的原理が全く異なるものの、互いに競合する代替技術が多種存在し、将来の主流技術やその市場規模の予想は難しく、長期的なエネルギー政策にも左右される。電力貯蔵技術の開発目標や方向性を決めるためには、経済性評価の方法論を確立する必要があると考えられる。
- ・自然変動電源による余剰電力の有効利用を実現するには、効率よりも固定費（設備費）が安価な技術が重要となる。このことは、多くの技術者にとっては、電気エネルギーは高価であるとのこれまでの常識に反している。例えば、高効率な熱供給を考え、高価なヒートポンプを用いるよりも安価な電熱器を用いる方がコスト的に有利な対策技術となることが多い。このように余剰電力の有効利用には、従来とは逆の発想も求められる。ただこれらの技術は、欧州では検討されているが、我が国では最先端の科学技術とは見えないことから、有望と考えられる割には、あまり注目を集めていないことも課題である。
- ・我が国の電池開発における研究開発のレベルは高いものの、製品の実用化や事業規模の拡大の速さ、実用化後のコストダウンに関して、日本の電池メーカーは海外メーカーに遅れを取っている。韓国や中国の電池メーカーとの競合において、技術で勝っても、事業展開で負けることの繰り返しとなっている。これは、産業構造的な要因が大きく、政府からの補助金等の事業支援、法規制の緩和、国際標準化の推進等の支援の強化も重要である。
- ・国家プロジェクトにおいては、個々の参画企業の技術レベルは世界的に高いレベルにあるものの、営業機密の取り扱い上、各社の最先端の技術情報が提供しにくく、オールジャパンでの取り組みが世界最高レベルの成果に繋がらないことがある。最先端の技術情報に関する機密の取り扱いの手法やクローズドな議論の方策を整備し、情報提供に対するインセンティブを付与すること等によって、活発な議論、密接な協力体制での研究開発が進められることを期待する。
- ・日本国内には、約27 GWの揚水発電所が存在し、大規模な電力貯蔵設備として運用されている。従前には、原子力発電による夜間オフピークの余剰電力を充電し、昼間のピーク時間帯に放電することで、燃料費の高い石油火力を代替する運用がなされ、経済的にも意義があった。しかし、昨今は太陽光発電の普及により昼間は逆に電力が余り気味になるため、昼間に充電し夜間に放電する運用がなされている。この場合、夜間の石炭火力を主に代替することになるが、石油火力ほどの燃料費は高くないことなどから、揚水発電を行うことのメリットが減少している。そのため、長期的には揚水発電設備を維持することの経済性が確保できなくなり、設備の廃止などにより、設備容量の減少も考えられることも今後の再エネ導入拡大の対応への懸念材料である。
- ・コンテナ型NAS電池についてコストメリットは実証されているものの、日本国内では建築物として扱うか工作物として扱うかにより2段階の可否が決まってくる。建築物とする場合、2段階は認められておらず、規制緩和が求められる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	・ JST ALCA-SPRING/NEDO RISING2 など次世代型電池開発進展中 ・ 熱貯蔵のための蓄熱マイクロカプセル（合金系）の開発（北大：NEDO 先導研究2020年～）。 ・ 全固体電池 トヨタ ・ 熱化学反応による高温蓄熱 東京工業大学
	応用研究・開発	◎	↗	・ NEDOにおいて二次電池の開発・評価・実証の複数プロジェクトが進行中。また大型蓄電システムに関する実証試験が実施されている。 ・ 海外での蓄電池実証試験を実施（米国カリフォルニア州、ドイツなど）。 ・ 圧縮空気貯蔵 エネルギー総合工学研究所 ・ 超電導電力貯蔵
米国	基礎研究	◎	→	・ DOE が基礎的な研究に研究費を投入しており、マテリアルゲノムとの連携による新しい成果も出ている。 ・ DOE アルゴンヌ国立研究所の主導によるイノベーションハブとしてエネルギー貯蔵研究センター（JCESR II）が活動中（2018年より5年間の更新）。
	応用研究・開発	○	↗	・ ARPA-E（DOE）：DAYS プログラムとして10～100時間の放電可能な蓄エネルギー技術開発を実施 / IONICS プログラムとして固体イオン導電体を中心に新しいタイプの二次電池セルの開発実施（フロー電池も含まれる）。 ・ Battery R&D Program：リチウムイオン電池の開発を中心に実施。 ・ 熱によるエネルギー貯蔵 MIT ・ リチウムイオン電池と太陽光発電 米国加州エランドプロジェクト ・ PNNL で系統用レドックスフロー電池の研究開発を実施。
欧州	基礎研究	◎	→	【EU】 ・ 車載用蓄電池を中心に共通基盤技術を実施。 ・ HORIZON2020・LISA：リチウム硫黄電池のプロジェクト。
	応用研究・開発	○	↗	【EU】 車両用蓄電池および電力貯蔵に関するプロジェクト（LC-BAT）を実施（2019年～）。 ・ CHESTプロジェクト（Compressed Heat Energy Storage）圧縮熱エネルギー貯蔵システム（潜熱蓄熱材等を利用（～300℃）の開発 Horizon2020（2018～2022年予定）。 ・ 自然変動電源の余剰電力を用いた水電解水素。 【英国】 ・ 蓄電池研究として Faraday Battery Challenge（£246M/4年：2017年～）。 【ドイツ】 ・ セル生産のための製造技術に生産設備への投資 ・ 高温熱を介した電力貯蔵 シーメンス
中国	基礎研究	○	↗	中国科学院物理研究所が中心となり、次世代型電池の研究開発を推進。
	応用研究・開発	◎	↗	・ 第13次5ヶ年計画/国家重点研究開発計画/新エネ車試行特別プロジェクト（2016）などで強化している。生産に関しては世界有数の企業が存在、応用・開発も進展している。電気自動車のための応用・開発が活発に行われており、素材産業も育成中である。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

韓国	基礎研究	○	→	・リチウムイオン電池に関する研究は基礎から応用まで幅広く実施されている。革新電池系はサムスンSDIが全固体電池に注力している。
	応用研究・開発	◎	↗	・車載用二次蓄電池プロジェクトが実施されている。 ・電力系統用として実証プロジェクトが進む（ピーク負荷軽減、2014-2018年）。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・電気エネルギー利用（エネルギーマネジメントシステム）（環境・エネ分野 2.1.8）
- ・熱エネルギー利用（産業熱利用）（環境・エネ分野 2.1.10）
- ・蓄電デバイス（ナノテク・材料分野 2.1.2）

参考・引用文献

- 1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）技術戦略研究センター（TSC），「電力貯蔵分野の技術戦略策定に向けて」『技術戦略研究センターレポート』20巻（2017），<https://www.nedo.go.jp/content/100866310.pdf>。（2021年1月19日アクセス）
- 2) Marta Yugo and Alba Soler, “A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050)”, *Concawe Review* 28, no. 1 (2019) : 4-22, <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/E-fuels-article.pdf>（2021年1月19日アクセス）
- 3) 重松敏夫, 「電力貯蔵用レドックスフロー電池」『SEI テクニカルレビュー』179巻（2011）：7-16, <https://dbnst.nii.ac.jp/pro/detail/2138>
- 4) 電気化学会エネルギー会議電力貯蔵技術研究会, 「大規模電力貯蔵用蓄電池」(日刊工業新聞社, 2011)
- 5) 重松敏夫, 「レドックスフロー電池 最近の開発動向」『SEI テクニカルレビュー』195巻（2019）：1-7, <https://sei.co.jp/technology/tr/bn195/pdf/195-01.pdf>
- 6) L. H. Thaller, “Electrically Rechargeable Redox Flow Cells,” *Proc. of the 9th IECEC* (1974) : 924
- 7) 野崎健他, 「レドックスフロー型二次電池による電力貯蔵の可能性」『電気学会電気化学・電熱研究会資料CH-75-3（1975）
- 8) E. Sum, M. Rychcik and M. Skyllas-Kazacos, “Investigation of the V (V) /V (IV) system for the positive half-cell of a Redox Battery,” *J. of Power Sources* 16 (1985) : 85-95, DOI : [org/10.1016/0378-7753\(85\)80082-3](https://doi.org/10.1016/0378-7753(85)80082-3)
- 9) NEDO, 『平成19年度成果報告書「風力発電電力系統安定化等技術開発」』（2008），<https://www.>

nedo.go.jp/activities/ZZ_00373.html (2021年1月19日アクセス)

- 10) 井上彬, 柴田俊和, 南早来, 「変電所大型蓄電システム実証事業について」『電気設備学会誌』4月(2019): 194-198, <https://iss.ndl.go.jp/books/R000000004-I029686578-00> (2021年1月19日アクセス)
- 11) Y. Nagaoka, “A pilot project using a VFB in a multiple-use application,” *IFBF* (2018): 92-93
- 12) 電力貯蔵技術研究会, <https://energy.electrochem.jp/index2.html> (2021年1月19日アクセス)
- 13) ECS: <https://www.electrochem.org/> (2021年1月19日アクセス)
- 14) IFBF, <https://flowbatteryforum.com/about-us/> (2021年1月19日アクセス)
- 15) D. S. Aaron, Q. Liu, Z. Tang, G. M. Grim et al., “Dramatic performance gains in vanadium redox flow batteries through modified cell architecture,” *J. Power Sources*, 206 (2012): 450-453, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.026> (2021年1月19日アクセス)
- 16) 津島将司他『第2世代レドックスフロー電池, レドックスフロー電池の開発動向』(CMC出版, 2017): 176-184, https://www.cmcbooks.co.jp/products/detail.php?product_id=5316 (2021年1月19日アクセス)
- 17) Y. R. Dong et al., “A Novel Titanium / Manganese Redox Flow Battery”, *ECS Trans.*, 69, no. 18 (2015): 59, <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/06918.0059ecst/pdf> (2021年1月21日アクセス)
- 18) B. Huskinson, et al., “A metal-free organic-inorganic aqueous flow battery”, *Nature* 505, No. 7482 (2014): 195-198, DOI: 10.1038/nature12909
- 19) 佐藤縁, 『有機レドックスフロー電池, レドックスフロー電池の開発動向』(CMC出版, 2017): 221-229
- 20) 能村貴宏, 「カルノーバッテリー技術と高温蓄熱技術の最新動向」『第8回ESIシンポジウム再エネ時代の熱エネルギーを考える』, <http://www.esisyab.iis.u-tokyo.ac.jp/symposium/20200903/20200903-02.pdf> (2021年1月19日アクセス)
- 21) 秋葉剛史, 「再生可能エネルギーを利用した対規模エネルギーシステム」『電気学会誌』140巻8号(2020), DOI: org/10.1541/ieejjournal.140.520
- 22) <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/hybrid-and-storage/thermal-energy-storage-with-etes> (2021年1月19日アクセス)
- 23) <https://www.business-people-magazin.de/business/siemens-gamesa-laeutet-die-neue-steinzeit-ein-21442/> (2021年1月19日アクセス)
- 24) Takahiro Nomura, et al., *Solar Energy Materials and Solar Cells* 193 (2019): 281-286
- 25) “Duration Addition to electricity Storage” <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/days> (2021年1月19日アクセス)
- 26) <https://www.hptcj.or.jp/tabid/275/Default.aspx> (2021年1月19日アクセス)

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分