

2.2 産業・運輸部門のゼロエミ化・炭素循環利用

2.2.1 蓄エネルギー技術

(1) 研究開発領域の定義

本領域はエネルギーを一旦貯蔵して、電気エネルギーの形態で戻す科学、技術、研究開発の領域である。電力系統、電気自動車（EV）、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、圧縮空気エネルギー貯蔵（compressed air energy storage：CAES）、熱利用など）を対象とし、特に電力系統用などの大型電力貯蔵を主とする。

エネルギーとして水素を貯蔵・利用する技術については、「2.2.2 水素・アンモニア」領域で扱う。熱利用については「2.2.4 産業熱利用」、「2.3.1 地域・建物エネルギー利用」の領域で扱う。

(2) キーワード

二次電池、リチウムイオン電池（LIB）、NAS電池（ナトリウム・硫黄電池）、レドックスフロー電池（RF電池）、キャパシタ、CAES、熱貯蔵、水素、再エネ吸収、揚水発電、多目的活用（マルチユース）

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

再生可能エネルギーを主力電源とするカーボンニュートラルなエネルギー社会を構築する上でエネルギー貯蔵の技術は不可欠である。蓄電システムは太陽光発電や風力発電の変動性を吸収して電力の平準化を行う。分散型電源が需要側に多く設置される状況では、電力の流れが双方向となる複雑な電力システムとなるが、その制御にも蓄電システムの貢献が期待される。自然災害に対する電力システムのレジリエンス向上、運輸部門との連携（EVの充放電）、蓄電システムのマルチユースの観点なども重要である。実現のためには、高容量で信頼性が高く、社会に受け入れられるコストの蓄電デバイスの開発が求められる。

[研究開発の動向]

(3) -1 蓄電に求められる機能

- ・機能として、①負荷平準化 ②非常用 ③デマンドレスポンス（需要側の対応） ④変動性の再エネの余剰電力吸収に分類される。電力を取り巻く環境により求められる機能が大きく変化してきたが、主な変遷を図表2.2.1-1にまとめた¹⁾。右肩上がりの需要増の時代は電力供給側の電源の負荷平準化が蓄電の命題であったが、2000年以降の電力自由化により自家発電設備との競合・代替として需要側での活用が始まった。東日本大震災以降は停電対策・需要抑制対策が必要となるとともに、FIT制度導入に伴う再生可能エネルギーの増加が始まり、電力系統側の調整とともに需要サイドの対応としてデマンドレスポンス（DR）やバーチャルパワープラント（VPP）の活用検討が求められるようになった。さらに、風水害や地震等による大規模停電、昨今のロシアのウクライナ侵攻に伴う世界的なエネルギー情勢不安での電源価格高騰や電力需給ひっ迫等に対する懸念など、周期的に用途が変遷・繰り返してきた経緯がある。平時のみならず非常時にも対応できる多用途な蓄電システムの構築が望まれている。
- ・日本においても電力システム改革により、卸電力市場、容量市場、需給調整市場が立ち上がっている。それぞれ、発電された電気量（kWh）、発電能力・供給力（kW）、需給調整能力（ Δ kW）が問われる。再エネの導入が進むと、短時間での出力変動、日照等の時間帯や天候の影響などによる発電量の変動に伴い、種々の時間スケールで周波数を安定させる Δ kWがより強く求められる。図表2.2.1-2に需給調整市場の主な要件仕様を示す。需給調整市場としては、現在三次調整力①・②が取引・運用されているが、

主に揚水発電、火力発電（石油、LNG）が担っており、需要側の蓄電池（二次電池）も一部用いられている。今後、より短時間での制御が求められる状況においては、蓄電池の果たす役割は相対的に大きくなるであろう。厳しい周波数制御が問われない用途（図表2.2.1-2の電源I'）では、二次電池の他、蓄熱方式など電力に変換可能な種々の蓄エネルギー方法が候補となり得る。現在の電力システムは最終的には送電事業者の調整に委ねられているが、将来再エネ電源が需要側に多く配置される状況においては需要側の調整機能も求められるようになり、需給連携の高度な次世代電力システム（スマートグリッド）に変貌していくと考えられる。

図表 2.2.1-1 取り巻く情勢変化と蓄電池に求められる機能

時期	時代の主な背景	蓄電技術に求められる機能 ①負荷平準化 ②非常用 ③DR(デマンドレスポンス) ④再エネ吸収				
		概要	①	②	③	④
1987年頃	急激な経済発展(バブル)により供給力不足	負荷平準化(揚水発電所代替)	○			
1995年～	不景気による需要低迷	非常用/瞬低対策の用途中心		○		
2000年～	特別高圧/高圧の自由化により自家発電の進展(競争)	負荷平準化(電気料金削減)	○			
2011年～	東日本大震災後の電力供給力不足	ピークカット, 非常用電源	○	○		
2012年～	FIT制度導入による再生可能エネルギーの増加	出力変動抑制, 余剰電力吸収			○	○
2016年～	電力システム改革による電力市場自由化	デマンドレスポンス(DR)			○	
2018年	風水害・地震による大規模停電、PV出力調整発生	非常電源・ピークカット、PV余剰吸収	○	○		○
2019年	胆振東部地震により北海道全域でブラックアウト	非常電源・系統安定化		○	○	
2020年～	カーボンニュートラル宣言により再エネ増大加速	負荷平準化, 再エネ吸収, 調整力	○		○	○
2022年～	世界的エネルギー情勢不安に伴う電力需給ひっ迫	負荷平準化, 再エネ吸収, 非常電源, DR	○	○	○	○

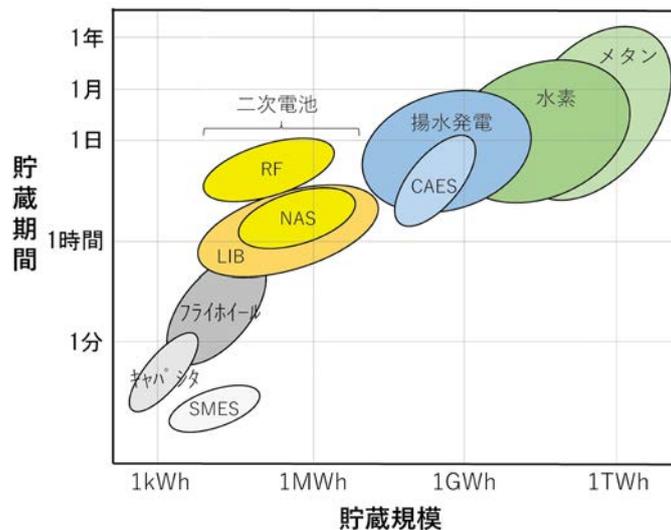
図表 2.2.1-2 需給調整市場の主な要件仕様²⁾

	需給調整市場					調整力公募(参考)
	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②	電源 I' (2017年度～)
対応する事象	平常時の時間内変動や、電源脱落(GF機能)	平常時の時間内変動や、電源脱落(LFC機能)	平常時予測誤差(EDC機能)	平常時予測誤差や、電源脱落(EDC機能)	FIT特例制度を利用している再エネの発電予測誤差	10年に1度程度の猛暑や厳冬などの場合の需要の急増
応動時間	10秒以内	5分以内	5分以内	15分以内	45分以内	3時間
継続時間	5分以上	30分以上	30分以上	商品ブロック時間(3時間)	商品ブロック時間(3時間)	3時間
供出可能量(入札量上限)	10秒以内に出力変化可能な量	5分以内に出力変化可能な量	5分以内に出力変化可能な量	15分以内に出力変化可能な量	45分以内に出力変化可能な量	年間契約で3時間以内に削減可能な量、年間で12回の発動を上限
最低入札量	5MW(監視がオフラインの場合は1MW)	5MW	5MW	専用線:5MW 簡易指令システム:1MW	専用線:5MW 簡易指令システム:1MW	1MW
上げ下げ区分	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	下げ

注) GF: ガバナフリー LFC(Load Frequency Control): 負荷周波数制御 EDC(Economic load Dispatching Control): 経済負荷配分制御 (経済産業省資料「需給調整市場について」(2020年10月13日)を基にCRDS作成)

(3) -2 各種電力貯蔵方式³⁾

電力貯蔵のルーツは揚水発電である。国内での揚水発電のさらなる設置には限界があること、蓄電に求められる機能の多様化などから、様々な原理に基づく蓄電方式が開発されている。現在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である。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。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。化学物質、特に液体の化学物質はエネルギー密度が高い優位性がある。二次電池は高効率に充放電できるメリットがあるが、密度は20～500 kWh/m³であり、密度の向上が常に開発課題となっている。揚水発電は0.1 kWh/m³程度である。



図表 2.2.1-3 各種電力貯蔵方式の貯蔵規模と貯蔵期間のスケール

(経済産業省資料⁴⁾等を基にCRDS作成)

■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、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れる。海水揚水、地下揚水なども検討されている。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重力蓄充電⁵⁾も検討されている。

■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。鉛蓄電池は代表的な二次電池である。高性能な二次電池として、LIB、NAS電池、RF電池（バナジウム系、亜鉛・臭素系など）などがある。これらの詳細は(3)-3で後述する。二次電池は一般に充放電のエネルギーのロスが小さく貯蔵効率が良い。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から比較的短い時間スケールの蓄電に適している。

- **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られる。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。回転系の機器であるため慣性力の維持に貢献できる。
- **CAES**：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、近年は10気圧程度の高圧タンクに貯めた圧縮空気で専用の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**：SMES (super-conducting magnetic energy storage) とよばれる。導体に電流を流すと磁界が形成される現象を利用して、電流の二乗に比例する磁気エネルギーを蓄える貯蔵方式である。超電導体のコイルを用いると、抵抗損失がなく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。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もよりも低く6 kWh/m³程度である。
- **熱貯蔵**：太陽熱などの熱、あるいは電力から電気抵抗器などを用いて変換した熱を蓄熱材に蓄える。蓄熱材の種類としては、熔融塩や岩石の比熱を利用する顕熱蓄熱、材料の相変化を利用する潜熱蓄熱、化学反応のエネルギー差を利用する化学蓄熱がある。蓄えた熱は、再び熱として利用できるほか、熱で蒸気タービンを回転させれば電力に戻せる。一部の太陽熱発電プラントで、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。
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特にカルノーバッテリーと呼ばれる。コンセプト自体は1922年と古いが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。最近ではドイツのシーメンスによる火山岩碎石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。熱を用いたエネルギー変換はカルノー効率が入上限となり効率は二次電池に劣るものの、設備費を低く抑えられるメリットがあり、安価な余剰電力の利用に際してはコストで特長を出せる可能性がある。
- **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**：余剰電力を用いて、水分解により水素を製造する方法であり、長期のエネルギー貯蔵が行える。電力に戻すには燃焼による発電や燃料電池を用いる。しかし、電気から水素、水素から電気への往復の変換損失に加え、自然変動する電源の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が課題となる。

水素は電力としての利用だけでなく、メタンや液体系合成燃料製造のエネルギー源として用い、電力以外の熱需要や運輸分野へ利用することも検討されている（「2.2.2 水素・アンモニア」「2.2.3 CO₂利用」参照）。

(3) -3 二次電池の個別詳細：LIB、NAS 電池、RF 電池

• LIB

EV等の電動化車両用途が注目されているが、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特に高容量が要求される。電力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である性能が求められる。LIBはエネルギー密度が高く、小型軽量、長寿命の特長があるが、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。LIB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。放電電圧が高く、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られる。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。電解液が可燃性の有機溶媒であるため、誤使用時や事故発生時などの安全性確保について、セルや蓄電システムでの設計上の配慮と安全対策が行われており、可燃性溶媒を使わない全固体化の研究開発も進められている。全固体化の研究開発は、安全性、充電の短時間化を目的にEV用が主に行われており、電力用の大型蓄電システムへの適用には時間を要すると考えられる。

• NAS 電池

固体電解質を使用する高温作動型電池で、充放電過程で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は生成されない。SOC（State of Charge：充電率）100～0%までの充放電を繰り返しても容量の減少が少ない特長を持つ。原理は1967年にアメリカのフォード・モータ社から発表され、EV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た。一方、電力貯蔵用としては、GE社やFIAMM社がNAS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社は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、LIB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年に日本ガイシ株式会社が東京電力株式会社（現東京電力ホールディングス株式会社）と共同開発を始めた。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（事業継続計画）用途が主となった。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しる対策、需給調整用途での利用が増加している。

システムコストの低減策として、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、品質の向上も期待できる。2011年の火災事故を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大きな設計変更が行われている。

• RF 電池^{6), 7)}

イオンの酸化還元反応を溶液のポンプ循環によって進行させる電池であり、蓄電容量を溶液タンクの容積で変えられるため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、大容量化にも適している。1974年に米国航空宇宙局（NASA）のL.H.Thallerによって原理と基本システムが提唱され⁸⁾、国内では同時期

に産業技術総合研究所で研究が開始された⁹⁾。当時、国内ではエアコン普及に伴い電力負荷率が50%台に低下しており、電力貯蔵用電池開発の目的は、夜間に余剰電力を貯蔵し、昼間に放出させ、電力負荷率を向上させることにあった。揚水発電所がその役割を担っていたが、環境問題等により新たな建設は困難であり、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。

国内では、古くは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大学で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¹⁰⁾、RF電池の性能は大きく向上した。2000年頃に、住友電気工業株式会社がV系RF電池を実用化し、現在までに試験設備も含めて30件を超えるシステムを商業化している。比較的大規模な設備としては、経済産業省「大型蓄電システム緊急実証事業」として北海道電力株式会社に設置された設備は15 MW/60 MWhであり、当時としては世界最大級のRF電池設備であった¹¹⁾。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。2022年4月から北海道電力株式会社は新たに17 MW/51 MWhのRF電池設備も実運用している¹²⁾。RF電池は、大規模化に適し、常温作動する水溶液系電解液を用いる安全性の高い電池であり、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電池はすでに電力系統で実運用される技術レベルにあるが、今後の大量導入のために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る。

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2月にRF蓄電池に関する国際標準が策定されている。同国際規格を基に2021年2月にJIS（日本産業規格）化され、フロー電池の性能、安全性に関する客観的評価が可能となっている。

2.2 (4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

- ・米国の蓄電設備の単年度設置量は、2019年0.5 GW、2020年1.5 GW、2021年3.5 GWと増加している。2021～2026年の米国の合計設置量は63 GWと予想されている。これらの大半が系統用蓄電池となっており、地域としてはテキサス州やカルフォルニア州など太陽光発電が進む南部の地域が中心となっている¹³⁾。
- ・ドイツのエネルギー大手RWEはドイツ西部ノルトライン・ウェストファーレン（NRW）州における220 MW規模の蓄電池電力貯蔵システムへの投資を決定したと発表した。合計690台のLIBブロックを設置し、2024年に運転開始を予定している。同社は現在、ドイツ国内で合計約150 MW/160 MWh、全世界で800 MW/1,800 MWh以上の蓄電池電力貯蔵システムを運営している¹⁴⁾。
- ・中国は電解液のバナジウム資源を多く保有しており、大連に100 MW/400 MWhのRF電池が2022年5月に系統連系された¹⁵⁾。2023年には湖北省に500 MW級のV系のRF電池製造工場を稼働させるとの発表もある。
- ・「国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業（NEDO/住友電気工業株式会社、2015～2022年）」¹⁶⁾において、米国カルフォルニア州でのRF電池を用いてのマイクログリッド構築の実証試験が行われ、平常時と非常時の併用運転（マルチユース）が可能なが確認されている。
- ・「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）」¹⁷⁾において、4 MW/20 MWhのNAS電池および7.5 MW/2.5 MWhのLIBを組み合わせたハイブリッド蓄電池システムを用い、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が構築されている。
- ・ドイツのシーメンスガメサ・リニューアブル・エナジー（SGRE）社は電熱変換技術（Electric Thermal Energy Storage：ETES）の試験設備をハンブルグに立ち上げ2019年から運転している¹⁸⁾。

風力などの余剰電力で空気をヒーター加熱し、火山岩の碎石に蓄熱し（顕熱蓄熱）、必要時に熱を取りだし蒸気発電を行う方式で、今後商業化を目指すとしている。その他にも、スウェーデンのアゼリオ社が潜熱蓄熱による小型機の製造を開始し¹⁹⁾、米国ではAlphabet社から独立したMALTA社が溶融塩による顕熱蓄熱で商業化を目指すとしており、日本では愛知製鋼株式会社/株式会社豊田中央研究所/近江鋳業株式会社が化学蓄熱方式のスケールアップを検討している²⁰⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

【国内】

• JST ALCA「次世代蓄電池」(ALCA-SPRING)²¹⁾(2013-2022年度)

ALCAプロジェクトの特別重点領域として2013年に開始している。次世代蓄電池の実現のため、全固体電池（硫化物系、酸化物系）、金属空気電池、中期目標の電池、長期目標の4チーム体制で推進されていた。2021年度から新体制となり、全固体電池チーム（硫化物型サブチーム、酸化物型サブチーム）、正極不溶型リチウム-硫黄電池チーム、次々世代電池チーム（金属-空気電池サブチーム、Mg金属電池サブチーム）、Li金属負極特別研究ユニットを横断的に存在させ、3機関（物質・材料研究機構、産業技術総合研究所、早稲田大学）に拠点を置き運営している。

• NEDO（グリーンイノベーション（GI）基金）「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」²²⁾(2022～2030年度、予算1510億円)

研究開発項目として、高性能蓄電池・材料の研究開発、蓄電池のリサイクル関連技術開発、モビリティ向けモーターシステムの効率化。800 Wh/Lの高容量化、高い金属回収率（リチウム70%、ニッケル95%、コバルト95%）の目標を挙げている。

• NEDO「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発（SOLiD-EV）」²³⁾(第1期：2013-2017年度、第2期：2018-2022年度、第3期：2021-2025年度)

技術研究組合リチウムイオン電池材料評価研究センター（LIBTEC）を拠点とし、全固体LIBの課題解決、試作セルによる新材料評価、量産プロセスの適合性の評価を行っている。安全性の評価法についても日本主導による国際規格化を進めている。

• NEDO「電気自動車用革新型蓄電池開発（RISING）I, II, III」²⁴⁾(2009-2015、2016-2020、2021-2025年度)

RISINGII（2016-2020年度）：フッ化物電池、亜鉛負極電池、多硫化物電池、コンバージョン電池。

RISINGIII（2021-2025年度）：資源制約が少ない安価な材料を使用した革新型電池としてフッ化物電池、亜鉛負極電池に特化し、実際の蓄電池での実証を行う。

• NEDO エネルギー・環境新技術先導研究プログラム²⁵⁾(2020年度～)

「バナジウム代替新型レドックスフロー電池」、「電力貯蔵用高安全・低コスト二次電池」などの研究開発課題が採択されている。

• 文科省 元素戦略プロジェクト（2012-2021年度）

産業力に直結するテーマを設定して実施された。その中で、触媒・電池材料研究拠点²⁶⁾の電池グループでは、ナトリウム電池やカリウム電池の開発に向けた研究が行われた。

【国外】

[米国]

• 100日レビューおよびリチウム電池国家計画 (2021年6月)

バイデン政権は主要4分野に関するサプライチェーンの脆弱性の評価と、強化に向けた政策案を提言するよう指示し、EV用バッテリーを含むバッテリー分野について米国エネルギー省 (DOE) が「リチウム電池のための国家の青写真」を発表。国内サプライチェーン確保 (パートナー国との連携含む)、2030年までのEVパック製造コスト半減、コバルト・ニッケルフリーの実現、90%リサイクル達成の目標等が挙げられている。

• 超党派インフラ法 (2021年11月)、インフレ抑制法 (気候変動対策法、2022年8月)

気候変動対策を目的に米国の産業活性化、インフラ整備を進める。EV、電池製造も対象に含まれる。

• 米国DOE「DAYS (Duration Addition to electricitY Storage) プログラム」²⁷⁾ (2018年9月～、第1期3年総額2400万米ドル予定)

傘下のエネルギー高等研究計画局 (ARPA-E) による、電力網に10～100時間放電できる電力貯蔵システム開発のためのプログラムで、11プロジェクトが採択されている。フロー電池、熱、高圧水、過酸化水素を利用した可逆燃料電池など貯蔵方法は様々で、最終的に電気に戻す技術が取り上げられている。

• 米国DOE「Long Duration Storage Shot」²⁸⁾ (2021年7月～、総額1790万米ドル予定)

2番目のEnergy Earthshotとして2021年7月に公表された。グリッド規模のエネルギー貯蔵において、コスト90%削減、10時間以上の貯蔵を10年以内を実現する目標を掲げている。

• 米国DOE「Vehicle Technologies Program」²⁹⁾ (2008–2013、2014–2021年)

車載用蓄電池として2008–2013はLIBに集中して検討。2014年から、LIBのほか、Li-S、リチウム空気、ナトリウムイオン電池、全固体電池が検討対象に入っている。

• 米国DOE「Battery500コンソーシアム」³⁰⁾ (2016–2021年)

国立研究所4つと大学5つからなるコンソーシアム活動。LIBを超える重量密度達成のためリチウム金属負極に注目し、特にリチウム硫化物電池の開発に取り組んでいる。

• 米国DOE「JCESR (Joint Center for energy Storage Research)」³¹⁾ (2012–2017年、JCESR 2: 2018–2022年)

アルゴンヌ国立研究所が主導 (2009年より研究開始、2015年JCESR設立)。EV、エネルギー貯蔵用の蓄電池の開発を目的に、多価イオン電池、リチウム硫黄電池、有機RF電池、硫黄を用いた空気呼吸電池等の開発が行われている。

[欧州]

• 欧州バッテリーアライアンス (EBA)³²⁾ (2017年10月～、仏1,200億円、独3,700億円など計8,000億円規模の補助)

欧州域内におけるバリューチェーンの創出のために設立、電池・材料工場支援や研究開発支援を行っている。この枠組みをもとに12のEU加盟国が「欧州バッテリー・イノベーション」のプロジェクトを承認、最大で総額29億ユーロの補助 (2022年1月)。バッテリーの原材料から部品・製品、リサイクルまでのバリューチェーンに関わる計46の研究開発プロジェクトに対し、2028年にかけて補助を行う。

・欧州バッテリー指令

EU理事会と欧州議会は2006年発効のバッテリー指令を大幅に改正するバッテリー規則案の暫定的な政治合意に達したと発表した(2022年12月)。カーボンフットプリントの申告義務、厳しい原材料のリサイクル義務が設定されている³³⁾。

- ・ASTRABAT(All Solid-state Reliable BATTERY for 2025)³⁴⁾(2020~2023年、予算総額780万ユーロ) EV用の全固体電池の開発を行うとしている。

[韓国]

・K-バッテリー発展戦略(2030二次電池産業発展戦略)(2021年7月)

2030年の二次電池分野での世界首位を目指し、官民による大規模R&Dの推進、安定的なサプライチェーン構築のため海外からの原材料の確保と国内でのリサイクル技術の強化、使用済み二次電池のリサイクル市場の創出といった戦略を掲げている³⁵⁾。韓国電池メーカー3社と素材・部品企業は30年までに合計40兆ウォン(約3.8兆円)を投資する計画。これに合わせ半導体・二次電池など5大素材・部品・装備(素部装)特化団地育成のため、最大2兆6,000億ウォン(約2,500億円)が投入される³⁶⁾。

(5) 科学技術的課題

(LIB)

- ・車載用や大規模蓄電用途では主に体積エネルギー密度の向上(単位体積当たりの容量増加)が求められる。セルあたり、またバッテリーパックあたりの容量(Wh)が増加すれば結果的にWh単価が下がりコストダウンにもつながる。対策としてはニッケル比率の高い正極材料やシリコン系負極の採用が挙げられる。また将来の航空機や無人航空機用途などでは重量エネルギー密度の飛躍的な向上(単位重量当たりの容量増加)が求められており、対策として上記に加え、金属リチウム負極の採用などが挙げられる。

(NAS電池)

- ・高出力放電時は電池内部の発熱量が増加するため、電池からの放熱量を増加させたいが、NAS電池は高温動作型電池であるが故に高断熱の容器に収納して保温電力を抑制する必要がある。そのため、通常時は高断熱を維持し、高出力放電時のみ放熱量を増加させる機構の開発が求められる。またNAS電池の劣化は、硫黄と多硫化ソーダによる部品の腐食に起因しており、防触材料の改良が検討されている。これにより従来の15年の寿命から20年まで長寿命化が期待される。

(RF電池)

- ・セルの高出力化のためには、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が重要となる。2010年以降、米国等において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報告がある^{37), 38)}。
- ・バナジウムを電解液に用いるRF電池は、バナジウムの資源が限られるという課題があるため、新規活物質を適用する研究が活発に行われている。Fe/Cr系、金属の溶解析出反応を伴うZn/Br系やFe/Fe系のようなハイブリッドフロー電池が検討されている。
- ・有機化合物を使うフロー型の電池は有望であると考えられる。2014年に発表された米国Harvard大学の報告では負極にアントラキノン類を用いており、電池反応は可逆で安定であり、安全な電解液として将来低コストで製造できるとしている³⁹⁾。その他、有機化合物としてTEMPO(テトラメチルピペリジノキシル)⁴⁰⁾やメチルビオロゲン⁴¹⁾の例が報告されている。活物質を電解液に溶解させるだけでなく、有機レドックス

系は、官能基の選択と導入による電位制御など分子設計の自由度が大きく、今後の発展の可能性があると考えられる⁴²⁾。

(電力システム)

- ・回転系の発電機からパワーエレクトロニクスを用いた電源（太陽光や風力とパワーコンディショナーの組み合わせによるインバータ電源）へ移行が進むと、系統安定に必要な慣性力も少なくなっていく。このことにより電源や送電線の事故等で電力系統が不安定になる場合がある。このため、背後に電圧を有する蓄電池に同期発電機能を有する交直変換装置を組み合わせた同期発電機付き蓄電システム（Virtual Synchronous Generator：VSG）を組み入れる検討が行われている⁴³⁾。

(6) その他の課題

- ・LIB技術者の海外流出、ならびに国家戦略で国家費用を受けた大規模なLIB工場が現在市場の多くを占めている現状がある。生産規模を大きくすれば製造コストは下がりまた原材料の調達力も強くなるため、これら大規模工場を持つ海外メーカーとの競争は厳しいものとなっている。政府からの支援や規制の緩和、国際標準化の推進支援が望まれる。
- ・蓄電システムの導入が進まない要因の一つとしてシステムのコストが高いことが挙げられる。蓄電池はトラブルになっても火災に至らない安全性が必須だが、安全性を維持しつつも蓄電システムのコストを下げていく取り組みが必要である。例えばコンテナ型NAS電池について2段積みの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する場合2段積みは認められておらず、規制緩和が求められる。
- ・蓄電池は民生用、車載用を中心に開発が進められきたが、系統用などの定置型の研究開発は国内においては研究者も少なく産業界の参入も少ないのが実情である。国内の学会活動としては電気化学会傘下の電力貯蔵技術研究会などに限られている。現在研究開発の主流は海外であり、特に米国ではEarthshotプログラムの中で長期貯蔵システムが取り上げられ、強力な産学連携体制で研究が進められている。
- ・今後蓄電池の活用が広がれば、使用済み電池のリユース、リサイクルの対応も重要になる。使用後の車載用蓄電池を定置用にカスケード利用することも一つの方法と考えられるが、用途間で安全性の要求が異なるため最初の製造時から転用先の安全性を考慮した製品設計でないとカスケード利用は難しい。サイクル寿命特性も定置用の方が長寿命が求められるケースが多く、寿命と安全性の観点で車載用と定置用（大型発電所・変電所用含む）は異なる仕様となっているのが現状である。
- ・安価な、場合によっては価格がゼロの再エネ余剰電力を利用する場合、変換効率で劣っていても固定費（設備費）が安価であることがトータルのコストで有利になる場合がある。例えば熱供給を考えた時、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。このことは、電気エネルギーは高価であるとのこれまでの火力発電の常識とは異なるものである。こういった低コスト技術は、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做されないことからあまり注目を集めていない。
- ・中国や欧州など海外と日本国内でのEV普及の速度が全く違っており、LIBの研究開発戦略も注意を要する。日本はこれまでの実績からLIBの安全性やエネルギー密度を高める特許、全固体電池など次世代電池の研究論文では存在感をもつが、EV市場等では製品投入が遅れ、国内市場がまだ小さく、顧客の反応やその技術対応といった経験が蓄積されていない。中国のEV市場や台湾の電動二輪車市場では、充電センターの待ち時間の長さという欠点を補うものとして、電池交換式車両とその電池交換サービスが既に立ち上げられている。それに特化した特許網も構築されている。先に普及が進んだ国に後発での参入は難しく、事業化で後塵を拝する懸念がもたれる。基礎研究段階から、用途に応じて、国内市場の事業化だけではなく世界市場をみた研究戦略が必須である。

2.2

産業・運輸部門のゼロ エミッション・炭素循環利用

(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のALCA-SPRINGやNEDOのRISINGII,IIIなどで次世代型電池開発を進めている。
	応用研究・開発	◎	↗	●NEDO (GI基金)「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」が開始している。 ●海外での電力用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)。 ●LIB全体の特許出願数がトップクラスである。
米国	基礎研究	◎	→	●DOEアルゴン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 (JCESRII) 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)。 ●Long Duration Storage Shot (2021年7月) ●Vehicle Technologies Program (2008-2013, 2014-2021) ●Battery500コンソーシアム (2016-2021年)
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。 ●FLORES:EUが資金提供するRF電池の13のプロジェクトのネットワーク、89の参加機関 (4,100万ユーロ)。 【ドイツ】 ●FestBatt (BMBF:ドイツ連邦教育省) 2018年~ 【フランス】 ●RS2E (フランス電気化学エネルギーデバイス研究ネットワーク)
	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 (2018~2020)。 ●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°C) の開発 (Horizon2020, 2018~2022年予定)。 ●EUバッテリーアライアンス ●ASTRABAT (All Solid-state Reliable BATtery for 2025) ●Horizon 2020、欧州グリーンビークル・イニシアチブ (EGVI: The European Green Vehicles Initiative) 【英国】 ●蓄電池研究としてFaraday Battery Challenge (£246M/4年: 2017年~) 【ドイツ】 ●ドイツ連邦教育省 (BMBF) ARTEMYS (2017~2021年) などが行われた。
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年) などで強化している。 ●生産に関してはCATLやBYD等世界有数の企業が存在、応用・開発も進展している。EV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。普及が進んでいるEV用途では、充電センターではなく、バッテリー交換サービスとその対応車両といった事業が立ち上げられている。その特許を集中的に出願しており、引き続き動向を注視する必要がある。
韓国	基礎研究	○	→	●LIB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。

2.2 産業・運輸部門のゼロエミッション・炭素循環利用

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●K-バッテリー発展戦略 (2021年7月) ●車載用二次蓄電池は中国とシェアを二分。定置用は首位。 ●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レベル。

「応用研究・開発」：技術開発 (プロトタイプの開発含む)・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国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。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・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」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・太陽光発電 (環境・エネ分野 2.1.3)
- ・風力発電 (環境・エネ分野 2.1.4)
- ・水力発電・海洋発電 (環境・エネ分野 2.1.6)
- ・太陽熱発電・利用 (環境・エネ分野 2.1.8)
- ・水素・アンモニア (環境・エネ分野 2.2.2)
- ・産業熱利用 (環境・エネ分野 2.2.4)
- ・地域・建物エネルギー利用 (環境・エネ分野 2.3.1)
- ・エネルギーマネジメントシステム (環境・エネ分野 2.5.1)
- ・エネルギーシステム・技術評価 (環境・エネ分野 2.5.2)
- ・蓄電デバイス (ナノテク・材料分野 2.1.1)

参考・引用文献

- 1) 田中晃司「電力貯蔵設備の最近の動向」『電気設備学会誌』39 巻 4 号 (2019) : 190-193., <https://doi.org/10.14936/ieiej.39.190>.
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁「需給調整市場について (2020年10月13日)」経済産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/043_04_01.pdf, (2023年3月1日アクセス) .
- 3) 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) 『技術戦略研究センターレポート：TSC Foresight』20 巻 (2017)., <https://www.nedo.go.jp/content/100866310.pdf>, (2023年3月1日アクセス) .
- 4) 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 燃料電池推進室「第1回CO2フリー水素WG事務局提出資料 (平成28年5月13日)」経済産業省, https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/co2free/pdf/001_02_00.pdf, (2023年3月1日アクセス) .
- 5) 小森岳史「古くて新しい「重力蓄電」は日本でも普及する? : ベンチャーが新発想で参戦」EnergyShift, <https://energy-shift.com/news/59859468-eb2c-4600-b512-3accfea5176c>, (2023年3月1日アクセス) .
- 6) 重松敏夫「レドックスフロー電池：最近の開発動向」『住友電工テクニカルレビュー』195 号 (2019) : 1-7.

- 7) Toshio Shigematsu and Toshikazu Shibata, “Vanadium FBESs installed by Sumitomo Electric Industries, Ltd,” in *Flow Batteries: From Fundamentals to Applications*, vol. 2, eds. Christina Roth, Jens Noack and Maria Skyllas-Kazacos (Wiley-VCH GmbH, 2023)., <https://doi.org/10.1002/9783527832767.ch47>.
- 8) Lawrence H. Thaller, “Electrically Rechargeable Redox Flow Cells,” in *Proceedings of the 9th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)* (New York: American Society of Mechanical Engineers, 1974), 924-928.
- 9) 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」『電気化学・電熱研究会資料』(電気学会, 1975), CH-75-3.
- 10) E. Sum, M. Rychcik and Maria Skyllas-Kazacos, “Investigation of the V (V) /V (IV) system for use in the positive half-cell of a redox battery,” *Journal of Power Sources* 16, no. 2 (1985) : 85-95., [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(85\)80082-3](https://doi.org/10.1016/0378-7753(85)80082-3).
- 11) 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』 39 巻 4 号 (2019) : 194-198., <https://doi.org/10.14936/ieiej.39.194>.
- 12) 住友電気工業株式会社 「北海道電力ネットワーク (株) 向けレドックスフロー電池設備が竣工」 <https://sumitomelectric.com/jp/press/2022/04/prs036>, (2023年3月1日アクセス) .
- 13) 山家公雄 「風力・太陽光・蓄電池で新規電源の8割、米国は再エネと蓄電の時代に：米国で離陸する蓄電事業 (第1回)」日経XTECH, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/07258/>, (2023年3月1日アクセス) .
- 14) ベアナデット・マイヤー, 作山直樹 「エネルギー大手RWE、220MWの蓄電池電力貯蔵システムへの投資を決定 (ドイツ)」独立行政法人日本貿易振興機構 (JETRO), <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/11/48b5e0ec7b708855.html>, (2023年3月1日アクセス) .
- 15) 李莉 「大連市で国家級蓄電システム実証プロジェクトが試運転開始 (中国)」独立行政法人日本貿易振興機構 (JETRO), <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/04/bdf5da267bafdc23.html>, (2023年3月1日アクセス) .
- 16) 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), 住友電気工業株式会社 「日米初の蓄電池による実配電網でのマイクログリッド構築・運用に成功：電力インフラのレジリエンス (回復力) 強化を実現」 NEDO, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101508.html, (2023年3月1日アクセス) .
- 17) 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) 「「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」個別テーマ/事後評価委員会」 https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/ZZAT09_100004.html, (2023年3月1日アクセス) .
- 18) SIEMENS Gamesa Renewable Energy GmbH & Co. KG, “ETES - Electric Thermal Energy Storage -Technology and Commercial Proposition,” <https://www.siemensgamesa.com/en-int/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/hybrid-power-and-storage/etes/siemens-gamesa-etes-general-introduction-3d.pdf>, (2023年3月1日アクセス) .
- 19) Azelio, “The Solution: Technology,” <https://www.azelio.com/the-solution/technology/>, (2023年3月1日アクセス) .
- 20) 愛知製鋼株式会社, 株式会社豊田中央研究所, 近江鋳業株式会社 「地球温暖化抑制に貢献する蓄熱システム：世界で初めてカルシウム系蓄熱材を用いた工場実証に成功」愛知製鋼株式会社, https://www.aichi-steel.co.jp/news_item/20191025_news.pdf, (2023年3月1日アクセス) .
- 21) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 「ALCA-SPRING：先端的低炭素化技術開発-次世代蓄電

- 池]、<https://www.jst.go.jp/alca/alca-spring/>, (2023年3月2日アクセス)。
- 22) 石塚博昭「グリーンイノベーション基金事業、「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」に着手：自動車産業の競争力強化、サプライチェーン・バリューチェーンの強じん化を目指す」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), https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101535.html, (2023年3月2日アクセス)。
- 23) 技術研究組合リチウムイオン電池材料評価研究センター (LIBTEC)「NEDO project (SOLiD-EV project):委託事業」<https://www.libtec.or.jp/consignment-business/>, (2023年3月2日アクセス)。
- 24) RISING3, <https://www.rising.saci.kyoto-u.ac.jp>, (2023年3月2日アクセス)。
- 25) 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)「2020年度「NEDO先導研究プログラム/新技術先導研究プログラム」追加公募に係る実施体制の決定について」https://www.nedo.go.jp/koubo/CA3_100270.html, (2023年3月2日アクセス)。
- 26) 京都大学「実験と理論計算科学のインタープレイによる触媒・電池の元素戦略研究拠点 (ESICB)」<http://www.esicb.kyoto-u.ac.jp>, (2023年3月2日アクセス)。
- 27) Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E), “Duration Addition to electricity Storage (DAYS),” U.S. Department of Energy (DOE), <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/days>, (2023年3月2日アクセス)。
- 28) Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, “Long Duration Storage Shot,” U.S. Department of Energy (DOE), <https://www.energy.gov/eere/long-duration-storage-shot>, (2023年3月2日アクセス)。
- 29) Will Joost, “Energy, Materials, and Vehicle Weight Reduction,” National Institute of Standards and Technology (NIST), https://www.nist.gov/system/files/documents/mml/acmd/structural_materials/Joost-W-DOE-VTP-NIST-ASP-AHSS-Workshop-R03.pdf, (2023年3月2日アクセス)。
- 30) Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), “Program: The Innovation Center for Battery500 Consortium,” <https://www.pnnl.gov/innovation-center-battery500-consortium>, (2023年3月2日アクセス)。
- 31) U.S. Department of Energy Office of Science, “Joint Center for Energy Storage Research (JCESR),” <https://www.jcesr.org>, (2023年3月2日アクセス)。
- 32) EIT InnoEnergy, “European Battery Alliance (EBA250),” <https://www.eba250.com>, (2023年3月2日アクセス)。
- 33) European Commission, “Green Deal: EU agrees new law on more sustainable and circular batteries to support EU’s energy transition and competitive industry,” https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_7588, (2023年3月2日アクセス)。
- 34) European Commission, “HORIZON 2020: All Solid-state Reliable BATTERY for 2025,” <https://cordis.europa.eu/project/id/875029>, (2023年3月2日アクセス)。
- 35) 当間正明「政府が二次電池産業発展戦略を発表 (韓国)」独立行政法人日本貿易振興機構 (JETRO), <https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/07/502cb8eefa9c27b1.html>, (2023年3月2日アクセス)。
- 36) コリア・エレクトロニクス「韓国政府、5大素材・部品・装備の特化団地育成に2兆6,000億ウォン投入」<https://korea-elec.jp/post/21102904/>, (2023年3月2日アクセス)。
- 37) Douglas S. Aaron, et al., “Dramatic performance gains in vanadium redox flow batteries through modified cell architecture,” *Journal of Power Sources* 206 (2012) : 450-453., <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.026>.
- 38) 津島将司, 鈴木崇弘「第2世代レドックスフロー電池」7章3『レドックスフロー電池の開発動向』野崎健,

2.2

産業・運輸部門のゼロ
エミッション・炭素循環利用

- 佐藤縁 監, (東京:シーエムシー出版, 2017), 176-184.
- 39) Brian Huskinson, et al., “A metal-free organic-inorganic aqueous flow battery,” *Nature* 505, no. 7482 (2014) : 195-198., <https://doi.org/10.1038/nature12909>.
- 40) Takashi Sukegawa, et al., “Expanding the Dimensionality of Polymers Populated with Organic Robust Radicals toward Flow Cell Application: Synthesis of TEMPO-Crowded Bottlebrush Polymers Using Anionic Polymerization and ROMP,” *Macromolecules* 47, no. 24 (2014) : 8611-8617., <https://doi.org/10.1021/ma501632t>.
- 41) Tobias Janoschka, et al., “An aqueous, polymer-based redox-flow battery using non-corrosive, safe, and low-cost materials,” *Nature* 527, no. 7576 (2015) : 78-81., <https://doi.org/10.1038/nature15746>.
- 42) 佐藤縁「有機レドックスフロー電池」9章『レドックスフロー電池の開発動向』野崎健, 佐藤縁 監, (東京:シーエムシー出版, 2017), 221-229.
- 43) 大原尚, 他「仮想同期発電機機能付き蓄電池用インバータ (VSG - PCS) の開発」『明電時報』4 巻 373 号 (2021) : 14-18.