

要旨

電力貯蔵技術と再生可能エネルギー： 2030 年に向けたコストと市場

© IRENA 2017

この報告書に掲載されている内容は、特に禁止する場合を除き、IRENA が発行元で著作権者であることを適切に記載することを条件に、自由に使用、共有、コピー、複製、印刷、保管することを認めます。この報告書に掲載されている内容で第三者に帰属するものは、別個の使用条件と制限事項のある場合があります、その使用前に内容の帰属する第三者から適切な許可を得る必要があります。

ISBN (印刷) (IRENA publications 発行物が後日記入)

ISBN (PDF)

引用：IRENA (2017)、電力の貯蔵技術と再生可能エネルギー：2030 年に向けたコストと市場、国際再生可能エネルギー機関、アブダビ。

IRENA について

国際再生可能エネルギー機関 (The International Renewable Energy Agency、IRENA) は持続可能なエネルギーの将来に向けて移行しようとする国を支援する政府間組織で、国際協力の主要なプラットフォーム、専門的知見の拠点、再生可能エネルギーを支える政策、技術、資源、金融に関する知識の集積所として機能しています。IRENA はバイオエネルギー、地熱、水力、海洋、太陽、風力エネルギーなどあらゆる形の再生可能エネルギーの広範な普及と持続可能な利用を推進しており、持続可能な開発、エネルギーへのアクセス、エネルギーのセキュリティ、低炭素経済の成長と繁栄を追求しています。www.irena.org

謝辞

この報告書は以下の方々を含む数多くの専門家の方々によるレビューとコメントを反映し作成されました。IRENA は、彼らの貴重な貢献に感謝します。

Mark Higgins (Strategen Consulting)、Akari Nagoshi (NEDO)、Jens Noack (Fraunhofer Institute for Chemical Technology ICT)、Kai-Philipp Kairies (Institute for Power Electronics and Electrical Drives, RWTH Aachen University)、Samuel Portebos (Clean Horizon)、Keith Pullen (City, University of London)、Oliver Schmidt (Imperial College London, Grantham Institute - Climate Change and the Environment)、Sayaka Shishido (METI)、Maria Skyllas-Kazacos (University of New South Wales)。

詳細をご希望の場合、または本報告書に関するご意見は、publications@irena.org までご連絡ください。

この報告書は IRENA のサイトからダウンロードできます：www.irena.org/publications

免責事項

この報告書と所収の記載内容は「現状のまま」で提示しています。IRENA ではこの文書の記載事項が信頼の置けるものであることを検証するために合理的な注意を払っています。しかし、IRENA も、その職員、エージェント、データまたはその他の第三者のコンテンツプロバイダーも、明示的か暗示的にかかわらず、なんら保証をするものではなく、この報告書または記載事項の利用によるいかなる結果にも責任を負うものではありません。

電力貯蔵技術と再生可能エネルギー： 2030年に向けたコストと市場

概要

電力貯蔵はエネルギー転換を次の段階に進めるために重要な役割を果たします。太陽光発電、風力発電の普及が大きく進むに伴い、電力貯蔵は、エネルギー市場の主要分野における急速な脱炭素化を可能にします。

2015年にパリで開催された国連気候変動会議では、壊滅的な気候変動の危険を回避するため、世界規模での持続可能なエネルギーシステムへの転換を急速に進めるための枠組みが設定されました。各国政府への課題は、何が達成可能かの議論から、どのように持続可能なエネルギーシステムの目標を共同で達成するかを策定することになりました。

この課題達成には緊急の行動を要します。世界が気候変動のもたらす費用と危険を回避するには、温室効果ガスの排出は近い将来ピークを迎える必要があります。

再生可能エネルギーによる発電コストが近年大きく、多くの場合急激に下がってきたことによって、電力業界は脱炭素化に向けて具体的な進展を遂げました。しかし、さらなる再生可能電力の導入を加速して進める必要があります。産業、運輸、住宅や商用ビルなどにおけるエネルギーの直接使用等エンドユーザー分野での脱炭素化の進展には遅れが見られるので、これらもまた加速しなければなりません。

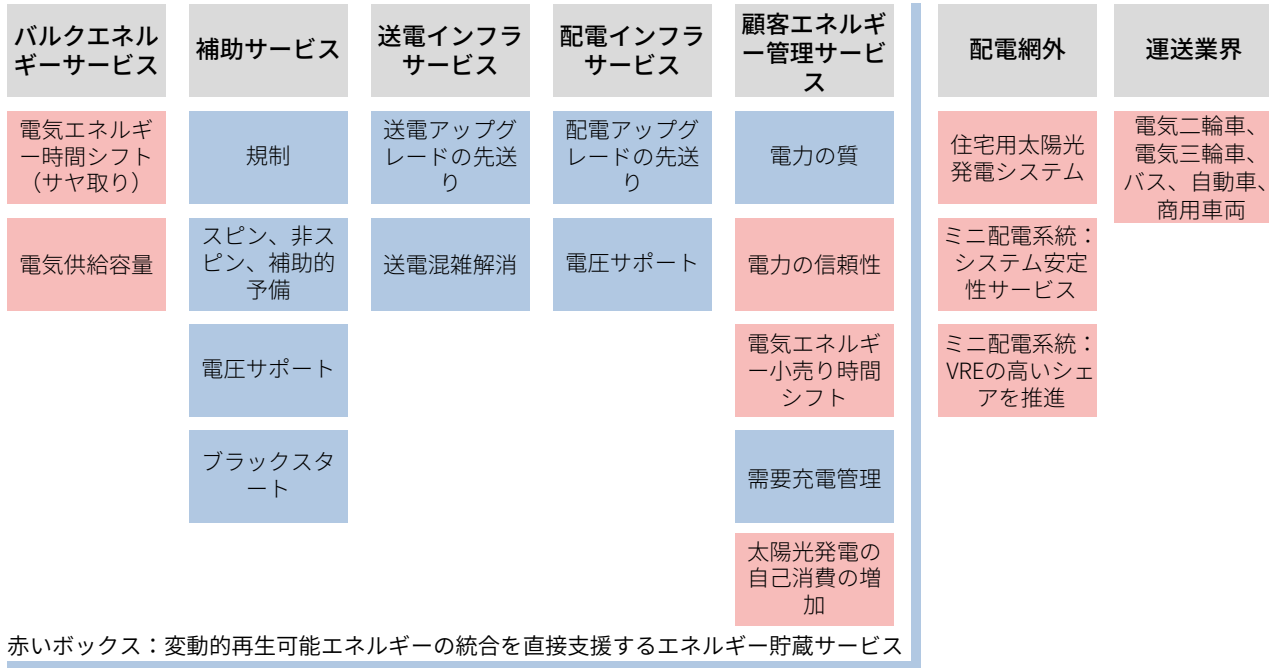
これらはすべて、脱炭素化をさらに深化させる上で、電力貯蔵の持つ大きな可能性と決定的な重要性を浮き彫りにしています。急速な進化を遂げる電池などの技術に基づく電力貯蔵は、システムの柔軟性を増大させます。システムの柔軟性は、変動的再生可能エネルギー (variable renewable electricity, VRE) の割合が増えるに従い重要な強みとなります。さらに直接的な効果としては、電力貯蔵は電気車両(EV)主体の運輸業界を実現し、24時間送電システムにたよらない効率的な住宅用太陽光発電システムを可能にするとともに、100%再生可能エネルギーのミニグリッドを可能にします。

変動的再生可能エネルギーが大きく成長するにつれて、電力システムは柔軟性を拡大させる必要があります。VREの比率が極めて高くなると、何日も、何週間も、さらに何ヶ月もわたって電力を貯蔵しなければならなくなります。電力貯蔵はこうした重要なサービスを提供することで、電力の脱炭素化を押し進め、エネルギー分野全体の変革を支援します。

電力システムは、円滑で高い信頼性をもった運用をするために、すでに様々なアンシリャリー・サービスを必要としています(図 ES1)。供給の質(一定の電圧と周波数)を確保し、電気機器への損傷を防ぎ、全使用者への供給を維持するには、需要と供給のバランスをリアルタイムで取る必要があります。あらゆる電力システムは柔軟性のサービスをある程度要し、それにより電力網運用者が予期せぬ需要変動や、大きな供給の損失(大型発電所の停止、接続の損失など)に対応することを可能にしています。柔軟性は、電力網運用者にとって電力システムの平衡を素早く回復するツールとなります。

今日の電力システムでは、太陽光発電と風力発電はまだ電力網の運用に大きな影響を持つに至っていません。しかし、VREの割合が増大するにつれて、電力システムは柔軟性のサービスをより多く必要とするだけでなく、電力貯蔵の迅速な対応能力に適した、今までとは異なったエネルギーミックスを必要とする可能性があります。この電力システム運用における主要な変革を、エネルギー計画策定過程に含めておく必要があります。国際再生可能エネルギー機関(IRENA)ではG20を対象として行った最近の研究で、2050年までのエネルギー転換の効果を分析し、世界の電力の80%以上は2050年までに再生可能エネルギー源でまかなえると結論づけました。その時点で太陽光発電(PV)と風力発電は全発電量の52%を占めます。

図 ES1：電力貯蔵が提供できる様々なサービス



電力貯蔵はエネルギー転換の核を成すもので、電力システムのバリューチェーンにわたって、またエンドユーザーの分野にまでサービスを提供します。電力貯蔵の容量は送電網の制限を低減させ、大型のインフラ投資の必要性を先送りできます。このことは、制限が再生可能エネルギーの増加によるものか、需要パターンの変化によるものかにかかわらず、配電網についてもあてはまります。「ビハインド・ザ・メーター」アプリケーションでは、電力消費者が請求書を管理し、ピーク需要時の課金を減らし、屋根の上の太陽光発電パネルからの「自己消費」を増やすことが可能になります。電力貯蔵プロジェクトは複数のサービスとユーザーへの利益をもたらすのみならず、様々なサービスの提供を通じて複数の収益源を生じさせることができます。2030年以降期待される風力発電及び太陽光発電のシェアの増加

(場合により 70～80%) に伴い、日、週、月の単位で供給の変動を平準化する、長期電力貯蔵が極めて重要になります。長期電力貯蔵はシステムの高い柔軟性の他、揚水システムのように、エネルギーコストが低くて放電速度が遅いもの、あるいは長期にわたって電力を経済的に貯蔵する新しく革新的な技術を要します。こうした課題はこの報告書の取り扱う時間軸を超えており、従ってここでの分析の範囲から外れるものですが、心にとめておく必要があります。なぜなら将来のニーズの予測は長期的市場のポテンシャルを浮き彫りにするものだからです。これは今日の電力貯蔵技術の開発に必要な推進力を与えるものです。従って、将来における解決策を見つけ、それを検証し、また必要に応じて規模拡大するために、2030年までの期間における研究開発は必要不可欠です。¹

1 より長期にわたって太陽光発電と風力発電の変動を平準化するには、電力貯蔵のみならず様々な解決策があります。例えば、バイオエネルギー発電所(固体またはバイオガス)を、現在「ピーク需要用」に使う方が経済的に現実的であることもあります。すなわち、大容量の発電所を、年間の比較的短い時間運転するのです。また別の方法としては、VREの余剰分で再生可能なガスや水素を製造し、これを貯蔵して後の使用に備える「電力をXに」というやり方があります(電力を燃料にするアプローチ)。同様に、電力は高効率のヒートポンプで熱または冷却を提供することができ、エンドユーザーへの配電前にこれを短期間または長期間貯蔵(例えば既存の季節的熱エネルギー貯蔵)することもできます。熱エネルギーの貯蔵は電力貯蔵よりもはるかに安価なため、これは理にかなっています。

電力貯蔵はエネルギー使用の主要分野で急速な脱炭素化を直接押し進めることができます。運輸分野では、電気車両での蓄電池の実用度は急速に改善しています。併せて、住宅用太陽光システムと送電網外のミニグリッドにおける電池の利用は、従来ディーゼル燃料に大きく依存していたシステムを脱炭素化するとともに、明確な社会経済的な利益ももたらしています。

電力貯蔵技術は、住宅用太陽光システムにおける太陽光発電とともに、電力へのアクセスを向上させ、ミニグリッドに安定性サービスを提供し、さらにこうした遠隔送電システムにおける電力の質の向上及び変動的再生可能エネルギーのシェア拡大を実現する解決策の中核として注目を集めています。2016年末時点で、5,500万世帯、または2億7,500万人もの人がソーランタン、家庭用太陽光発電システム、太陽光発電ミニグリッドにより提供される電力や明かりの恩恵を受けています。これは太陽光発電のコストの低下と価格の下降でこれらのシステムがより買い求めやすくなったことによります。例えばアフリカでは、小規模電池を用いた住宅用太陽光発電システムは、配電網に接続されていない住宅において、今までのケロシン灯など質の劣った明かりよりも安い年間コストでより良質のエネルギーサービスを提供しています (IRENA、2016a)。

運送業界での脱炭素化は長年困難でしたが、これも近年電気車両 (EV) の導入拡大と電池コストの低下で勢いがついてきています。EV用電池のコストは2010年から2016年にかけて73%低下しており (BNEF、2017)、電気車両総数は2015年の100万台レベルから、2016年末には200万台に達しました (OECD / IEA、2017)。より小型の二輪車、三輪車のEV数は世界で2億5,000万台を超えており、また、中国のみで現在30万台の電気バスが使われています。

この報告書では定置用途の電力貯蔵に焦点を当てていますが、運送業界のみで必要となる電池の膨大な量だけ見ても (業界が脱炭素化をするとして)、電力貯蔵の分析に全市場の数字を含めることの重要性は明らかです。一貫し、かつ統合された世界的視点を確保するため、この報告書では、すべての種類のEVについて、IRENA REmap分析における運輸部門予測を適用しています (IRENA、2016b および 2017a)。また、EVはエネルギー転換を進めるプロセスにおいて受動的な参加者にはならないと考えられるため、車両と電力系統間の柔軟性サービスの提供に係る潜在能力

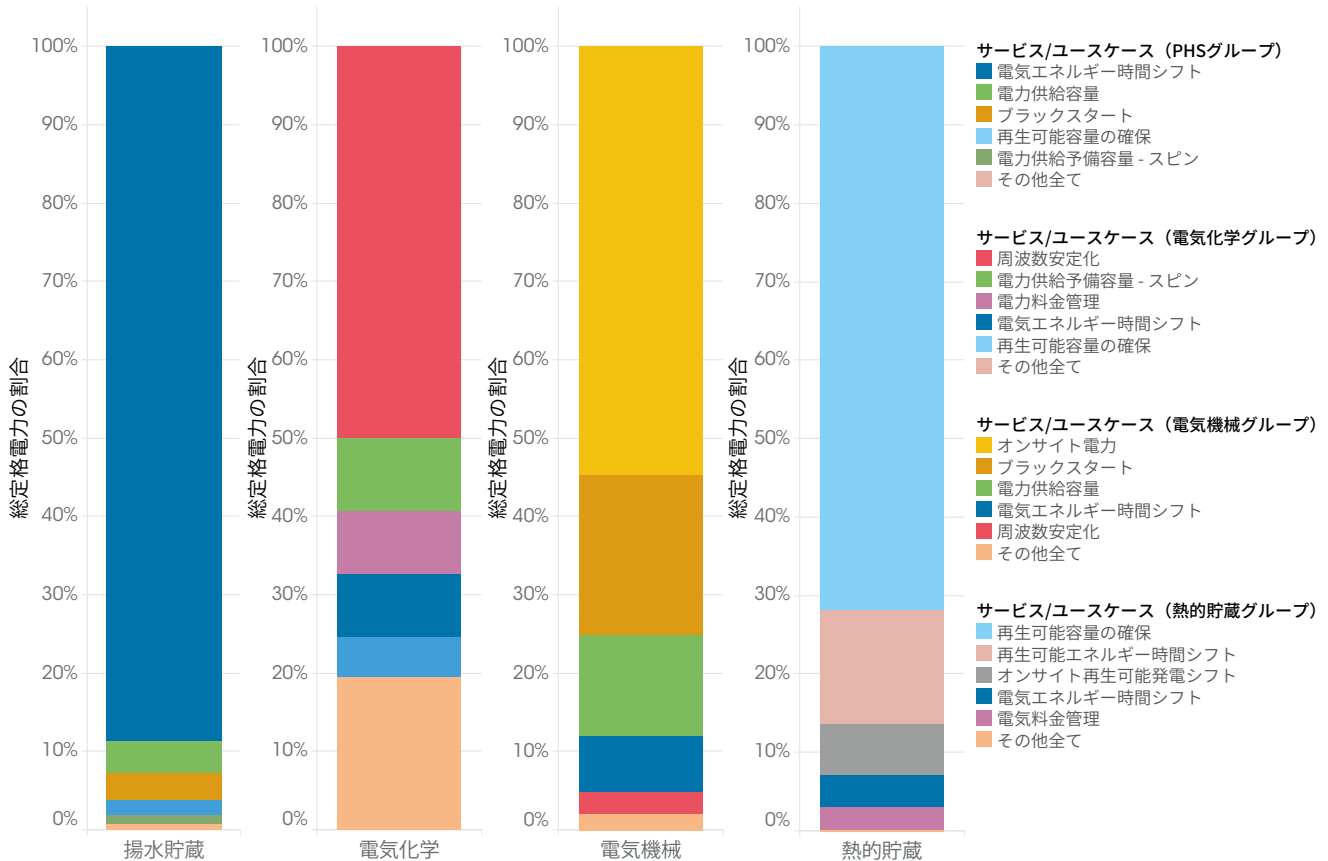
も重要な考慮事項です。需要を管理するとともに、需要のピーク時あるいは柔軟性サービスが求められるときに電力が供給できるよう、需要側管理 (デマンドサイドマネジメント) と車両・系統間サービスを統合するためのパイロットプロジェクトが数多く実施されてきました。

定置型電力貯蔵は様々な主要エネルギーサービスを手頃な価格で提供できます。新規技術のコスト低下とともに、電力貯蔵は競争力を増してきており、それが提供できる経済的なサービスの種類は増加の一途をたどると考えられます。

電力貯蔵は、配電網に接続されていない地域における住宅用太陽光システムとミニグリッドにおいて現在経済的なソリューションで、電力貯蔵技術によって再生可能エネルギーの比率を100%にまで高めることができます (IRENA、2016c)。同じことが、ディーゼル燃料による電力に依存する島やその他の孤立した電力システムにもあてはまります (IRENA、2016a および IRENA、2016d)。新規市場では、電力貯蔵と住宅用または商用の屋上太陽光発電システムを組み合わせ、太陽光発電電力の自己消費を増大し、また負荷を平滑化してピーク需要料金を回避することなどが導入されています。例えば、最近2~3年の間に設置されたドイツの小規模太陽光発電システムの約40%は電池貯蔵に対する金融的支援をいくらか得て、蓄電池システムと一緒に導入されました。オーストラリアでは、金融的支援なしで、2016年に約7千の小規模蓄電池システムが設置されました。

揚水式水力貯蔵は、電力供給を低需要時間帯から高需要時間帯に移行することで、発電コストを下げるため昔から使われてきました (図 ES 2)。蓄電池や他の機械的または熱的電力貯蔵システムが電力系統サービスを提供するにあたっては、経済性の面で大きな課題を抱えています。これらはコストが比較的高く、より低いコストで柔軟性を提供する代替オプションがあるので、その経済性は特定の市場に限られています。それにもかかわらず、蓄電池技術は現在幅広いサービスを経済的に提供しており、将来コストが下がり、性能が向上するにつれて、この傾向は増加の一途をたどることが期待されます。商用電力の規模では競争力のあるプロジェクトがますます多くなっています。最近の英国での容量オークションでは、225 MWの電力貯蔵が落札されました。テスラは南オーストラリアに100 MWの電池システムを建設する予定です。ドイツでは送配電網規模のプロジェクトが増えています。

図 ES2: 世界のエネルギー貯蔵電力容量のシェア、主用途および技術タイプ別 (2017 年)



電力貯蔵の経済性促進に係る重要な課題は、1つの蓄電システムから幅広いサービスを提供することで複数のバリュー・ストリームを導き出す能力です。これは収益の流れの「積み重ね」を可能にし、プロジェクトの収益性を向上させます。多くの国では、これには市場構造と規制の変化、あるいは補助的グリッドサービスのための新規市場の開拓を要します。また理想的には、アグリゲータが蓄電池の貢献度を最大化することを通じて、「ビハインド・ザ・メータ」アプリケーションが商用規模の市場にアクセスすることが望めます。あるいは、より規制の強い市場では、特に発電システムのアンシラリー・サービス、配送電混雑解消、投資の先送り、エネルギーに係る時間のシフト等を通じた蓄電システムの複数のコスト削減可能性について、こ

れを評価できるツールが、蓄電オプションと代替策とを比較する観点から、確実かつ容易に入手できる必要があります (IRENA、2015a)。

将来のエネルギーシステムは、効率的で経済的な電力貯蔵に基づいた多岐にわたるサービスに依存します。サービスに対するニーズはこのように幅広く、要する性能も様々なので、多くの蓄電技術が重要な役割を担うことが分かります。

2030年に向けての電力貯蔵市場の成長の中で、一人勝ちは起こりにくいものに見えます。リチウムイオン (Li-ion) 電池のEV市場での優位性は揺るぎないと思われませんが、定置型用途ではこの限りではありません。蓄電技術が提供で

きる各種サービスの非常に多様な要件、及び蓄電技術各グループの多様な性能特性を踏まえれば、蓄電技術の様々なグループが発展していくことが予想されます。

従って、様々な技術がそれぞれの性能とコストの強みを発揮できる市場を見いだすことになるでしょう。このため、定置型用途での電力貯蔵市場は、2030年とそれ以降も多岐にわたるものとなります。

主（高速）周波数安定化、二次周波数安定化、電圧サポート、予備容量、運転予備力といったアンシラリー・サービスは、VREが浸透するにつれて特に重要性を増します。こうしたアンシラリーサービスは市場と季節によって性能に関する動態が異なります。アプリケーションによっては短期間高電力を要するものもあれば（高速周波数安定応答など）、また長期にわたる電力を要するものもあります（確定供給容量など）。こうした異なるサービスは様々な充電・放電サイクルを意味します。均一な充電と放電サイクルが通常のとなる場合もありますし（電力時間シフトなど）、充電・放電パターンが大きく変動することが標準的に起こる場合もあります。

このことは、どの電力貯蔵技術が最も経済的にこうしたサービスを提供できるかに影響します。例えば、(i) アイドル時に極めて「自己放電」率が低く、長期蓄電に適した揚水式水力貯蔵と、(ii) アイドル時に放電率が非常に大きい、高電力を扱え、送電系統内で分散できて、周波数または電圧安定化などの高電力・急速放電サービスを提供するフライホイールを比べてみてください。

また実際的な事項も、何が最も適切な電力貯蔵技術かに影響を与えます。例えば、住宅用途や人口の密集した都市では専有面積が制限となり、高密度電力貯蔵の方に経済的利点があることがあります。同様に、大変暑い、または寒い環境では、電池の性能特性と寿命が影響を受けます。

電力貯蔵システムに対するこれら様々な適用要件、性能特性、及び用途に対して適切な蓄電技術を選択するにあたって考慮すべき実際のまたは環境的制約がある結果、電力貯蔵技術と用途の組み合わせには多岐にわたるエコシステムが存在し、電力貯蔵技術の将来の経済性を支えることが見込まれます。

各国が世界のエネルギーシステムにおける再生可能エネルギーの比率を倍にするならば、総電力貯蔵容量は、2030年までにエネルギー量で3倍になると思われます。

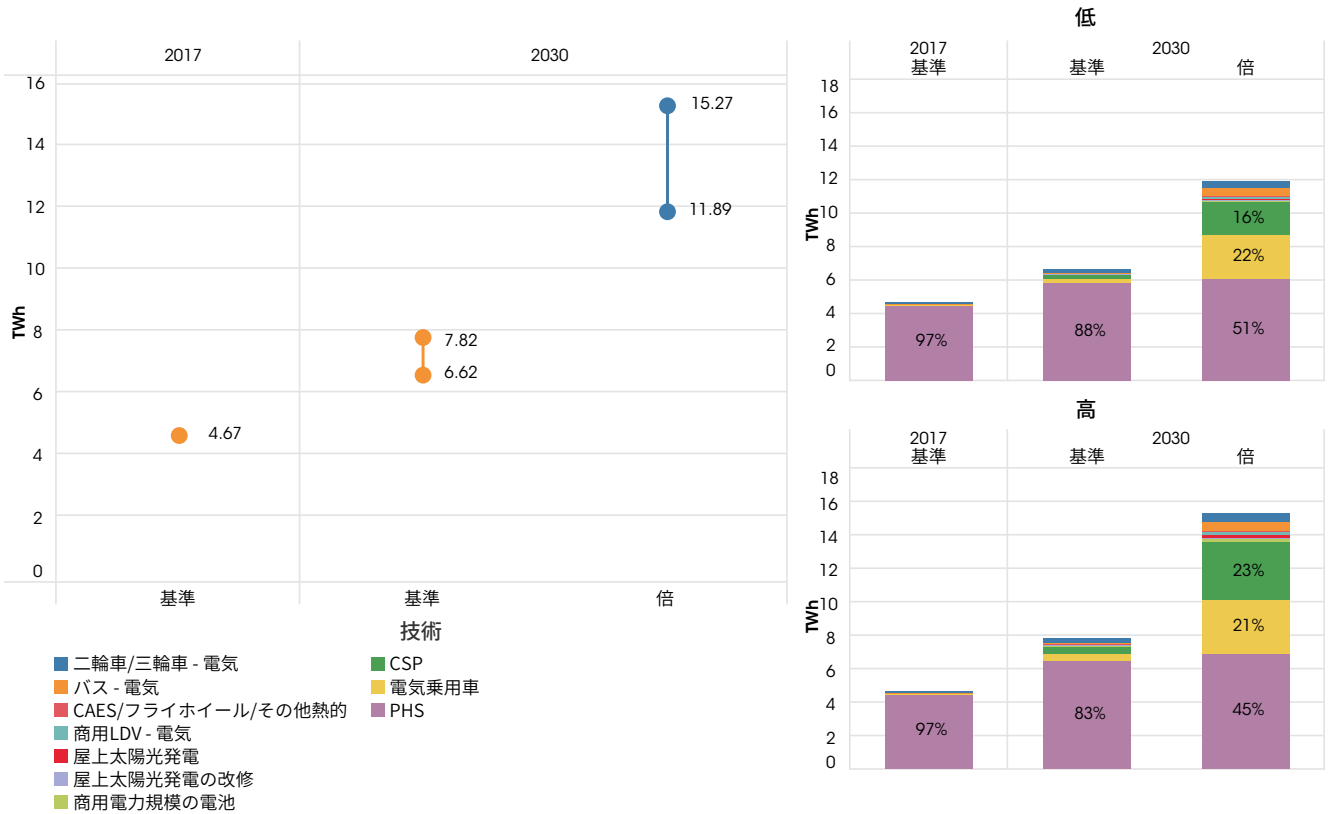
2030年までに再生可能エネルギーの比率が倍になるとすると、定置および車載用途での電力貯蔵への需要が高まるにつれて、電力貯蔵容量の総量は、エネルギー量で2017年の見積もり4.67テラワット時(TWh)から11.89～15.72TWh(2017年よりも155～227%増)となる必要があります。

今日の電力貯蔵容量は4.67TWhであると見積もられています。しかし、電力単位ではなくエネルギー単位の再生可能エネルギーの貯蔵容量の包括的な統計はありませんので、この数字は大変不確定なものです。現在見積もられているギガワット時(GWh)の蓄電容量は揚水式水力貯蔵が大部分を占めており、全体の約96%です。REMap Doubling ケースでは、2030年までに、揚水式水力貯蔵容量は2017年のレベルから1,560～2,340GWh増加します。その他の電力貯蔵源の成長はより早いので、揚水式水力貯蔵の比率は2030年までに45～51%に下がります。

世界のエネルギーシステムにおいて2030年までに再生可能エネルギーの比率を倍にするための道筋を分析したIRENAのREMap分析では、EVが運送業界を脱炭素化するにつれて電力貯蔵は増加し、太陽光集光(concentrating solar power, CSP)の導入は加速し、電力系統の柔軟性に対する必要性が高まることが示唆されています。同時に、電池コストの低下は新たな経済的機会を創出し、これは、電池技術による幅広いグリッドサービスの提供を可能にするとともに、屋上太陽光発電の自己消費を増加させる分散型電池の活用に係る経済的価値を増加させます。この結果非ポンプ式電力貯蔵は2017年見積もりの162GWhから、2030年の5,821～8,426GWhに増加します。

世界のエネルギー供給全体での再生可能エネルギーの比率を倍にする要件を満たすには、静止型用途の電池式電力貯蔵(battery electricity storage, BES)システムの容量は2030年までに見積もられている現在のレベルの最低17倍に増大する必要があります。この貯蔵容量の急増は、商用電力規模アプリケーションと、ビハインド・ザ・メーターアプリケーションの急速な成長で押し進められます。

図 ES3: 方式毎の電力貯蔵エネルギー容量の成長、2017 年～2030 年



2030年に至る静止型用途での電池式電力貯蔵市場に注目すると、特に、屋上太陽光発電からの出力自己消費率を向上させるための「ビハインド・ザ・メーター」アプリケーションに大きな成長機会があることが分かります。また配電、発電事業者が配電網への供給を管理するために提供するインセンティブによって促進される新規需要もあるかもしれません(図ES4)。現在、適切な規制構造がある場合(ドイツなど)、または電力価格が高く、優れた太陽光発電リソースがあり、配電網供給インセンティブが比較的低いエリア

(オーストラリアなど)では、新規太陽光発電の設置に付随する大きな電池式電力貯蔵施設が設置されています。

静止型用途での総電力貯蔵容量は、Referenceの場合11 GWhと見積られる現在のレベルから2030年には100 GWh～167 GWhに増加し、REmap Doublingの場合は181～421 GWhにも達する可能性があります。これはREmap Referenceの場合は現在比9～15倍、REmap Doublingの場合は17～38倍に当たります。²

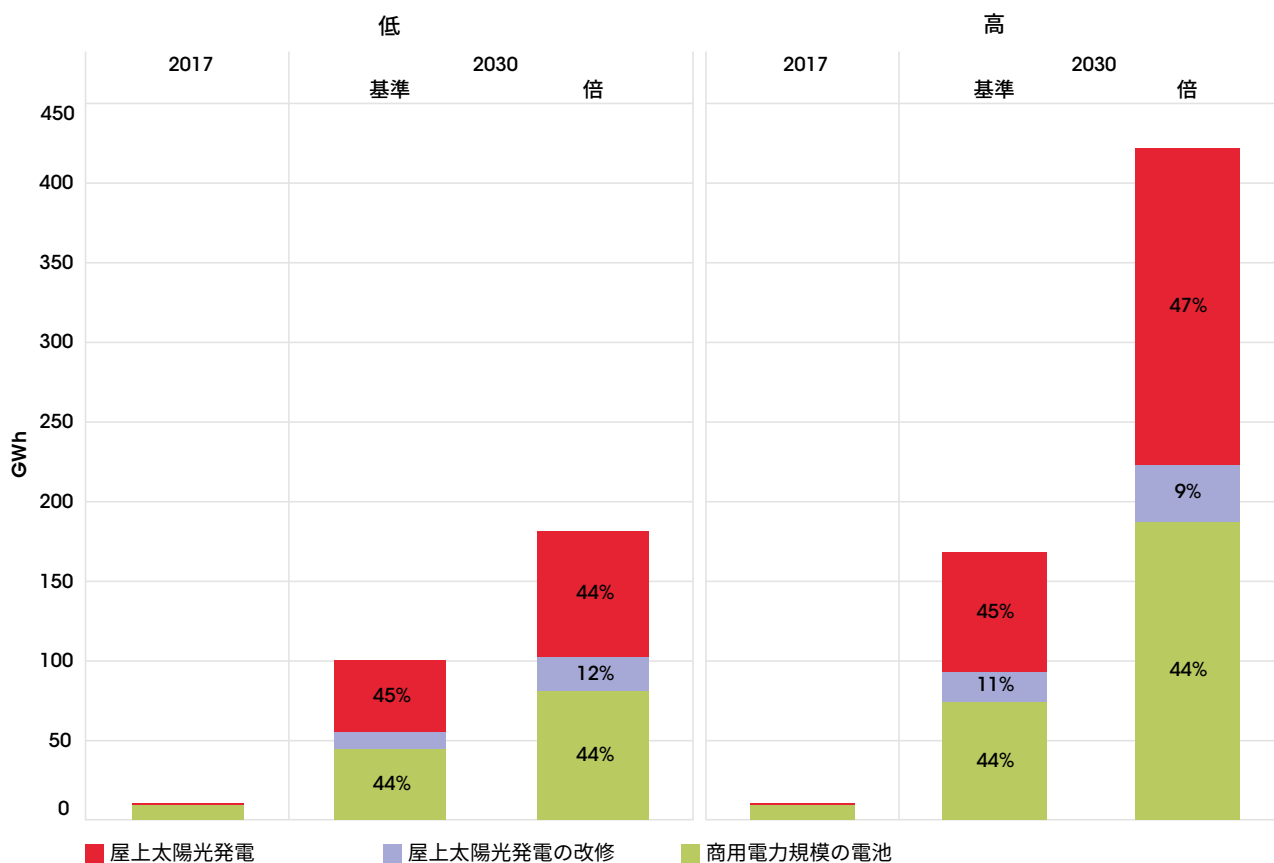
² REmap Referenceの場合とDoublingの場合の高低の差は、各用途で使われる蓄電の度合いの差から来ています。例えば、世界的に見て2030年に住宅で使用される電池パックの平均サイズが何になるかについて、大きな不確定要素があります。同様に、2030年までに実際にどのようなEVが導入されるかは不確定で、現在の売り上げが代表的なものかどうか(例えばEVクラスサイズに関して)も明確ではなく、またどの程度電池コストの減少が電池サイズの増大につながって航続距離が伸びるのかも分かりません。この不確定性が高低の場合に対応しています。

2030年までの期間におけるBESの最大の市場は、BESシステムと新規小規模太陽光発電システムとの組み合わせであるかもしれません。BESの経済性は、特にヨーロッパなどの家庭用、商用電力料金が高く、太陽光発電に競争力を与えるコスト構造があり、配電網供給に対するインセンティブが低い(多くの場合、低下している)地域では、今後数年で大きく向上する可能性を秘めています。同様に、電力料金が高く、かつさらに高騰しているオーストラリアは、太陽光発電の高いコスト競争力と豊富な太陽光資源と相まって、電池式蓄電技術の巨大市場になる可能性があります。日本も新たな重要市場として姿を現す可能性があります。日本では屋上の太陽光発電が何といても主流で、電気料金はすでに高いので、支援レベルが低くなり始めると、電力貯蔵の経済性は劇的に変化する可能性があります。

BESに対する商用電力規模の市場は強気に成長し、2017年中頃の10GWhの見積もりから、Referenceの場合に45GWh～74GWh、REmap Doublingの場合には81～187

GWhとなると思われます。市場の改革によってVREの高率化を支援しようとする国が増える中、アンシナリー・サービスに対する新しく、かつより透明性の高い市場が、細かい部分(一次、二次周波数予備、確保された容量確保など)で出現しています。蓄電技術が競争力の高いサービスをより多く提供すると見込まれることを踏まえれば、アンシナリー・サービスに係る新規市場は、BSE導入に新たな機会を提供するものと考えられます。これと同時に、電池式蓄電技術を用いた再生可能エネルギー容量確保または時間シフトサービスもまた拡大する可能性があります。

図 ES4: 2017年～2030年の静止用途の電池式電力貯蔵容量のセクターごとの成長

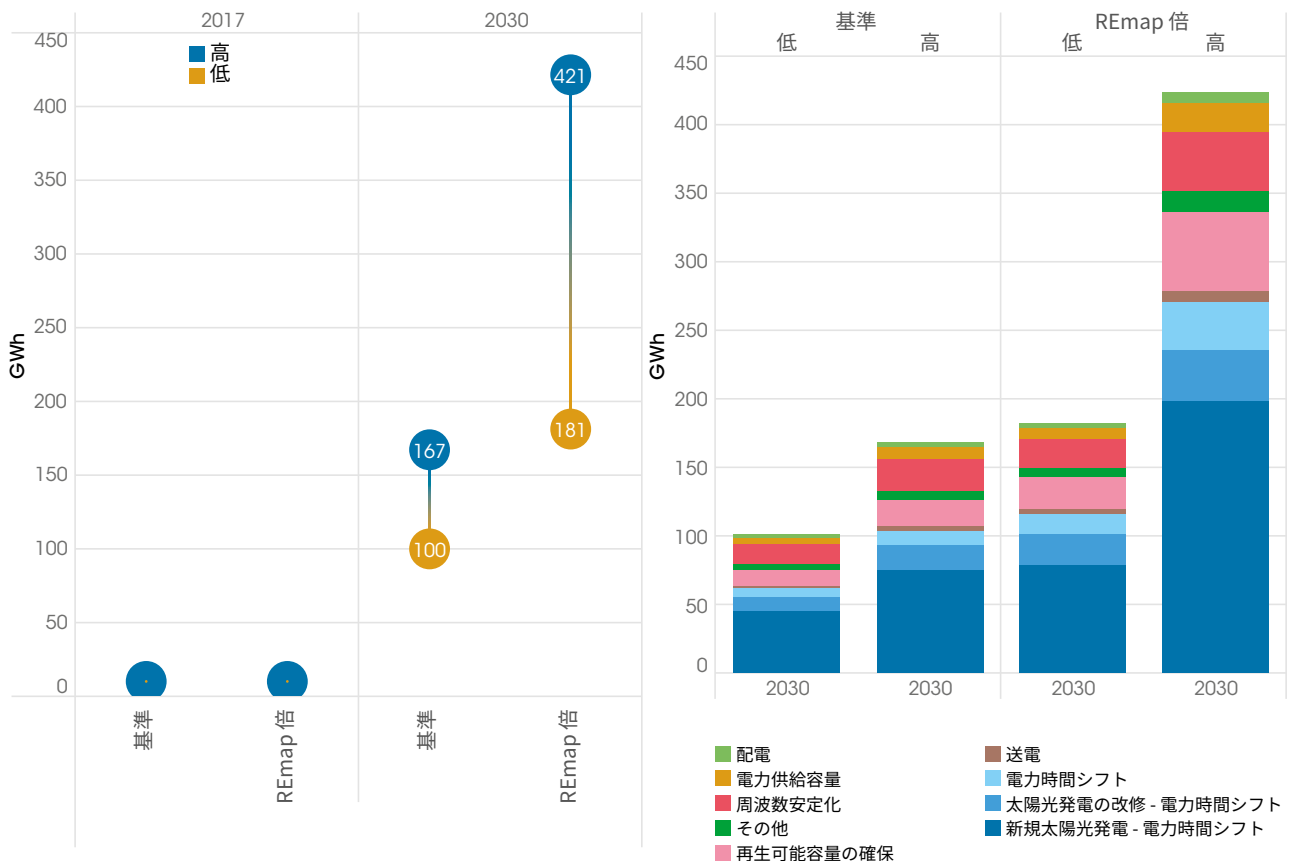


BES が提供できるサービスとしては、ビハインド・ザ・メーターの蓄電機会の経済性は、特にこれが新しい太陽光発電と組み合わせられた場合、このセグメントを電池式電力貯蔵の最大の成長要因とする可能性があります。ビハインド・ザ・メーターの電力貯蔵は、2030年の静止用途での総BESエネルギー容量の60～64%を占める主な使用事例となる可能性があります。

2030年時点での電池式電力貯蔵の主な使用事例は、電力の時間シフトサービスを提供して、住宅用や商用セクターで自己消費を増やしたり、ピーク需要料金を回避するための経済的機会に影響されると思われます。さらに、商用電力規模での再生可能エネルギー容量の確保は、場合によって、2030年時点での電池式電力貯蔵総容量の實質的に11～14%を占めます。

周波数安定化も、BESの早い対応速度からして、BESがそのコストを低減するにつれて競争力を増す市場です。2030年までに、周波数安定化を中核とする使用事例は、実装されたBES総容量の10～15%を占めるようになります。これらはBESシステムが提供する第一義的なサービスであることには注意しておいた方が良いでしょう。場合によって、複数のグリッドサービスを提供するBSEは、ある種のシステムが複数のサービスの価値を「重ね合わせる」ことを可能にし、より高い収益の流れを捉えてBESプロジェクトの経済性を向上させます。このことは、短期から中期的にコストが低下を続けてBESプロジェクトがより競争の厳しい環境で競争する時に、特に重要です。

図 ES5: 2017年～2030年の主なユースケースごとの静止用途での電池式電力貯蔵容量の成長



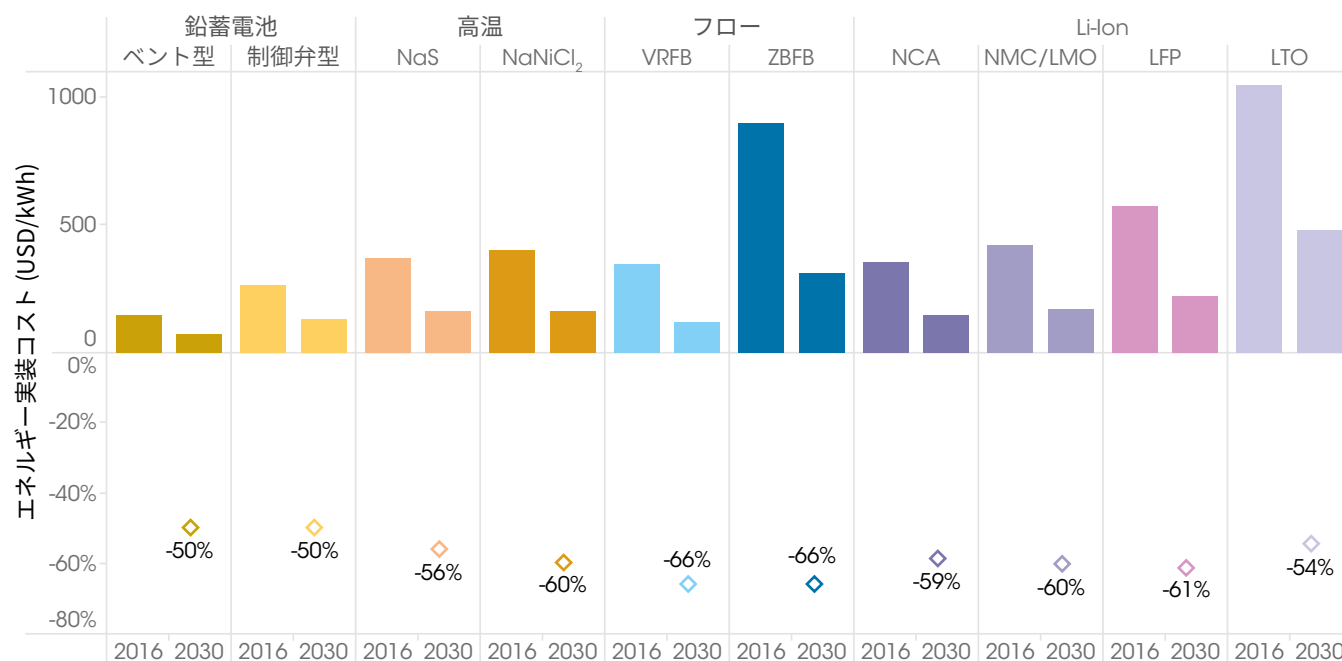
新規電力貯蔵技術にはコスト削減の大きな可能性があります。静止用途のリチウムイオン電池の総実装コストは2030年までにさらに54～61%下がる可能性があります。

現在最大の電力貯蔵容量を持つのは揚水貯蔵ですが、これは設置場所に特有のコストがかかる成熟技術です。技術的な観点から言って、総実装コストを減らす可能性はほとんどなく、プロジェクト開発時間は長くなりがちで、新規電力貯蔵技術のようにモジュール式ではないので小規模にすることもできません。

運輸用リチウムイオン電池のコストは2010年から2016年までに73%も下がりました。静止用途のリチウムイ

オン電池の実装コストは、EVで使われるものに比べて高くなりますが、これは充電・放電サイクルに課題が多く、電池管理システムとハードウェアにより費用がかさむからです。しかしドイツでは、小規模のリチウムイオン電池システムの総実装コストは2014年第4四半期から2017年第2四半期にかけて60%下降しています。EV用リチウムイオン電池製造規模の拡大に乗じて、静止用途のコストは2030年までにさらに54～61%下がる可能性があります。このため静止用途のリチウムイオン電池の総実装コストも、電池の化学物質の構成によって、145米ドル/キロワット時(kWh)~480米ドル/kWhに下がります(図ES6)。

図 ES6：2016年から2030年の、電池式電力貯蔵システムの実装エネルギーコストの動向予測

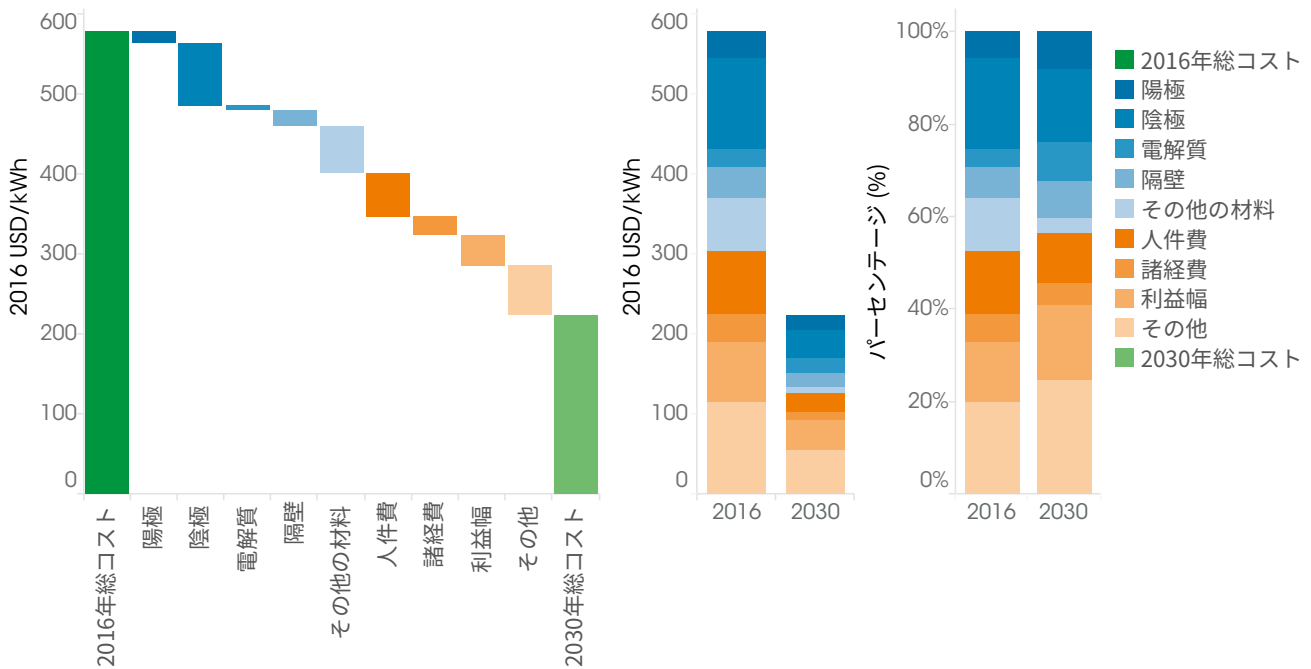


規模の経済と技術の改善で資材の必要量が減少してコスト削減を押し進める一方、リン酸鉄リチウムイオン電池の例でも見られるように、コスト削減は製造バリューチェーンを通しても起こります(図ES7)。現在の開発規模は小さく、成長は早いので、こうした数字には不確定要素が大きく、それぞれの電池式蓄電技術類に係る数値は高くも低くもなる可能性があります。

実装コストが下がるとともに、技術の継続的改良が性能の向上をもたらします。リチウムイオン電池の寿命は2030年までに約50%伸び、また可能なフルサイクル数は90%も伸びる可能性があります。同時に、充放電効率も数パーセント向上して、電池の化学物質の構成によって88%から98%になります。³

3 DC-DCの場合。DC-ACの効率はインバーターでの損失によります。

図 ES7: リチウムイオン電池使用エネルギー貯蔵システムの要素毎のコスト削減可能性、2016年から2030年



その他の電池式電力貯蔵技術も大きなコスト削減の可能性がありま。 「フロー電池」の総実装コストは2030年までに3分の2減少するでしょう。これらの電池自身は室温で動作し、電力・エネルギー貯蔵特性は独立して拡大縮小できますので、運転上大きな利点があります。

フロー電池は、電気的な活性物質の全てが電極に格納されておらず、電解液中に溶解していて、タンクに貯蔵されている(陽極側、陰極側のそれぞれ)点で、従来の再充電可能電池とは異なります。これらのタンクは主発電セルスタック(反応ユニット)とは別個にあり、その内容物はシステムの充放電中必要に応じてセルスタックにポンプで入れられます。

フロー電池はリチウムイオン電池よりもエネルギー密度は低いのですが、前述のように室温近くで動作し、エネルギー電力特性を独立して拡大縮小できます。

フロー電池の2つの主要な技術はバナジウム・レドックスフローと亜鉛臭素で、2016年の総実装コストは315米ドル/kWhから1,680米ドル/kWhの間です。このコストは2030年までには108米ドル/kWhから576米ドル/kWhに下がる見込みです。これら特定のフロー電池の充放電効率は2016年の60～85%から、電極、フロー、膜設計の改善により2030年には67～95%に向上する見込みです。

これらの電池は他の技術に比べて初期投資額は高いのですが、フルサイクル数は1万を超え、極めて長い寿命中のエネルギースループットが高い初期投資を埋め合わせてくれます。しかし、長期に渡る電解液の安定性がその長寿命を支えているため、この点が研究の重点となっています。

高温ナトリウム硫黄 (NaS) と塩化ニッケルナトリウム電池もまたはるかに安価になると考えられます。実装コストは2030年までに56～60%落ちると見られ、同時に性能も向上します。

高温電池は液体の活性物質を用い、ベータアルミニウム製の固体セラミック電極が電池電極の隔壁となります。通常、これらのシステムの陰極素材は熔融ナトリウムで、陰極は膜を通じたナトリウムイオンの通過によってエネルギーの蓄積、開放を行います。NaS電池の場合、最も広く用いられている構成の陽極材料は熔融硫黄ですが、「ナトリウム・ニッケル・塩素」のものもあります。

NaS電池は日本では1990年代から送電システムで使用されており(風力発電所の負荷平滑化など)、全国170以上のプロジェクトで300MWを越すNaS貯蔵電力があります。例えば、東京電力では1990年代から東京で負荷平滑用に6メガワット/48メガワット時のシステムを運転しています。最近では導入実績も増え、この技術はより広く使われています。NaS電池の利点には比較的高いエネルギー密度があり、これはリチウムイオン電池のエネルギー密度の低い方に該当しますが、レドックスフローと鉛酸蓄電池技術よりはるかに高いものです。無毒性の材料でできているのも利点です。

現在NaS BESシステムの総エネルギー実装コストは263～735米ドル/kWhですが、典型的なシステムは400米ドル/kWh未満で実装できるとのデータもあります。NaS電池には高サイクル寿命を比較的低コストで実現するという可能性があります。課題もあります。NaSシステムの大きな欠点は、年間の運転コストが比較的高いことで、主に暖房のため40～80米ドル/kWh/年にもなります。

腐食は高温セルの経年劣化の主な理由の1つです。生産コストを下げるためには、堅牢な材料、コーティング、接合部を開発して腐食問題に対処し、電池の長寿命化を図る必要があります。また、電池の十分な電気化学活動を実現するのに必要な、高い運転温度を引き下げる方策について、セラミック電解質におけるイオン通過を改善することによって実現しようとする研究も進んでいます。

NaS電池の実装コストは2030年までに最大75%削減して120～330米ドル/kWhとすることができるでしょう。これと平行して、ナトリウム・ニッケル・塩素高温電池のエネルギー実装コストは現在の315～490米ドル/kWhから、2030年までに130～200米ドル/kWhとすることができるでしょう。

フライホイールの実装コストは2030年までに35%削減できるでしょう。圧縮空気エネルギー貯蔵 (compressed air energy storage, CAES) は成熟した技術の組み合わせではあるものの、2030年までにそのコストが17%削減できるでしょう。

フライホイールは、質量のある物質の回転を加速、減速して、回転運動エネルギーとしてエネルギーを貯蔵します。これには高電力を扱える可能性があります。エネルギー実装コストは高く、1,500～6,000米ドル/kWhで、自己放電率は毎時15%にもなるため、短期的な電力貯蔵用途に最も適しています。フライホイールシステムのエネルギー実装コストは2030年までに1,000～3,900米ドル/kWhに下がると考えられます。摩擦損を減少させる努力が実を結び、材料の質と効率が改善することによって、サイクル寿命は伸びるでしょう(特に磁性ベアリングに関して)。

CAESシステムは圧縮空気(ポテンシャル弾性エネルギー)として貯蔵タンクにエネルギーを貯蔵し、従来のガスタービンと似た仕組みで動作します。充電時には、余剰の、あるいはオフピーク時の電力がコンプレッサー群を駆動するモーターに向けられ、貯蔵タンクに貯蔵されます。放電には、圧縮空気は貯蔵タンクから開放され(膨張)、過程で冷えた後、再度加熱される必要があります。これは圧縮空気を燃料(天然ガスなど)と燃焼室内で混合することで達成され、これがタービンシステムを駆動します。揚水貯蔵と同様に、CAESシステムのコストを正確に見積もることは極めて困難で、これはコストが設置場所によって異なり、また、貯蔵タンクに対する現地の環境制約に大きく依存するからです。典型的な実装コストは約50米ドル/kWhと見積もられていますが、既存の貯蔵タンクが使える場合、40米ドル/kWh程度に下がる可能性があります。このシステムの不利な点は、比較的低放電率が低く、ラウンドトリップ効率が悪いこと、サービスのコストが高いことです。

材料の入手性は、少なくとも 2025 年までは電池での電力貯蔵技術の成長にとって制約事項にはならないと思われます。電池パック寿命終了時のリサイクル、再使用、廃棄のための仕組みは試験されており、2020 年代に規模の拡大が必要となります。

電池式電力貯蔵(BES) 技術がより広く採用されるにつれて、原材料の入手性、特にリチウムイオン電池の BES システムで使用される原材料の入手可能性は、BES システムの規模拡大に十分な供給が可能なのかという疑問とともに近年注目を集めています。こうした懸念はしばしば言及されますが、リチウム不足が近々起こることはないようです。

最近の分析では、2025 年までにリチウムに対する総需要は年に 80,150 トン (t) に増えると思われていますが、供給の増加は総リチウム抽出が 2025 年までに控えめに見て年 88,000 トンになるとしています。控えめな供給見込みで約 8,000 トンとされる 2025 年時点での過剰供給は、より楽観的な供給見込みでは、その 5 倍の 40,000 トンになる可能性があり、これは需要予測よりも 50% 高いものです。しかし、供給と需要の伸びの不確定要素はまだあり、短期的には需要と供給の不均衡のために価格が不安定になる可能性があります。ある種の電池の化学構成に広く使われているコバルトの生産にも同様の状況が起こる可能性があり、コバルトは通常ニッケルと銅採掘の副産物として生産されるため、供給量の増加には事前の計画が必要です。

現在鉛蓄電池のリサイクルは経済的で広く行われています(ヨーロッパでのリサイクル率は 99% 超)。学术界と産業界ではリチウムイオン類を含むその他の化学物質のリサイクル経路の開拓を活発に行っています。初期の重点は携帯テクノロジーで、これは、現時点において、寿命終了プロセスに送られる電池の量が分散的拠点を正当化するには少なすぎるからです。リチウムイオンに対するリサイクル方式は進化を続け、現在実証も行われています。しかしながら、大型電池とリチウムイオン電池の化学構成の多様さはリサイクルにとって課題となっています。とはいえ、コストと材料の回収に関して異なるトレードオフを持つ有望な経路も開拓されています。これらは、大量の電池が寿命を迎える 2020 年代に商用に拡張し始める必要があります。

電力貯蔵が、いつ、経済的な機会ではなく、エネルギー転換において不可欠な技術となるのか、という質問に関しては、大きな混乱があります。揚水貯蔵は電力系統に柔軟性を付与し、現在経済的かもしれません。電池のコストは大幅に下がってきているものの現在はまだ高く、その経済的な使用は主にオフグリッド市場、運輸、また増加を見せているビハインド・ザ・メーターなどに限られています。コストがさらに下がるにつれ、電池の送電網での使用はさらに増加します。

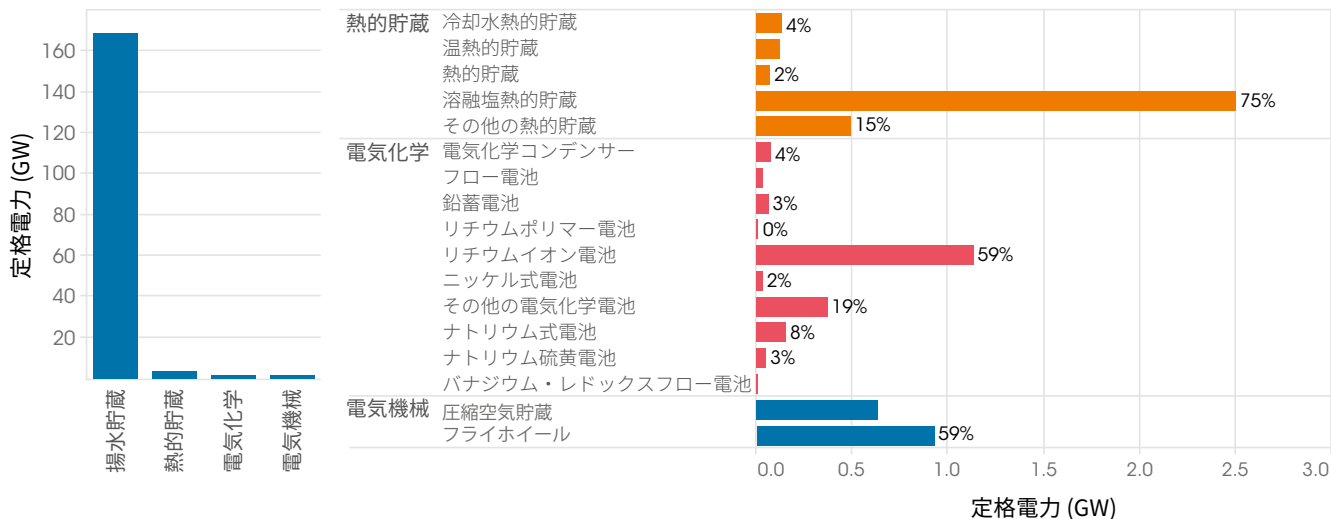
エネルギー転換での電力貯蔵の役割と必要性、特に BES についての混乱は、これらの技術は(揚水貯蔵の他) その導入に関してまだ初期段階ですので、自然なことです。このことはある意味では、陸上の風力発電と太陽光発電の役割について、これらの技術がまだ初期段階でコストが高く性能が低かった 5 年、10 年、15 年前にあった不確定性と似ています。IRENA の分析はエネルギー転換に対して電力貯蔵が果たす重要な役割を浮き彫りにし、様々な分野と用途で電力貯蔵がたどる経路を示すものです。

2017 年半ば現在、揚水貯蔵が世界の総実装蓄電容量の 96%、176 GW を占めて圧倒的優位に立っています。他の電力貯蔵技術で、すでに世界中で多く使われているものは、熱的蓄電が 3.3 GW で総実装蓄電容量の 1.9%、電池が 1.9 GW で 1.1%、その他の機械的蓄電が 1.6 GW で 0.9% となっています。

揚水貯蔵は商用的に成熟した技術で、総実装電力容量 (GW 単位) とエネルギー貯蔵容量 (GWh 単位) の両方で優位に立っています。エネルギー貯蔵電力容量の 4 分の 3 超はわずか 10 カ国で実装されており、わずか 3 カ国、中国 (32.1 GW)、日本 (28.5 GW)、米国 (24.2 GW) が世界のエネルギー貯蔵容量のほぼ半分 (48%) を占めています。これらの各国は揚水貯蔵容量を多く持っており、また新規電力貯蔵技術の重要拠点でもあります。

熱的電力貯蔵、電池、非揚水機械電力貯蔵技術は、世界で合計 6.8 GW のエネルギーを貯蔵しています (図 ES8)。現在熱的エネルギー貯蔵アプリケーションは CSP 発電所に集中しており、貯蔵したエネルギーは夜間、場合によっては丸一日電力を供給しています。溶融塩技術は今日世界

図 E58：熱的電力貯蔵、電池、非揚水機械電力貯蔵技術：世界のエネルギー貯蔵への貢献比率



で実装されている電力用熱エネルギー貯蔵の4分の3を占める、主要な商用ソリューションです。その他の機械的貯蔵は、これまでのところ比較的少数のプロジェクトのみ実現されており、フライホイールの総実装電力容量が0.9 GW、CAESは0.6 GWです。この両方で、2〜3つの大型プロジェクトが総実装容量の大半を占めています。

電気化学式貯蔵の実装済みで稼働中の電池貯蔵電力容量はわずか約1.9 GWですが、これは最も急速に成長している市場分野の1つです。これからの開発に大いに期待できる新規の電池式電力貯蔵技術は多くありますが、2017年半ば時点における運転中実装容量では、リチウムイオン電池のシェアが最大(59%)です。高温 NaS 電池、コンデンサー、フロー電池の貢献も、小さいながらも重要です。

略語一覧

AA-CAES	advanced adiabatic compressed energy storage、高度断熱圧縮エネルギー貯蔵
BES	battery electricity storage、電池式電力貯蔵
BEV	battery electric vehicles、電池式電気車両
BoS	balance of system、系の均衡
CAES	compressed air energy storage、圧縮空気エネルギー貯蔵
CO ₂	carbon dioxide、二酸化炭素
CSP	concentrating solar power、太陽光集光
DOE	Department of Energy, United States、米国エネルギー省
EP	electric power、電力
ESS	energy storage system、エネルギー貯蔵システム
EV	electric vehicle、電気車両
FES	flywheel energy storage、フライホイール式エネルギー貯蔵
GW	gigawatt、ギガワット
GWh	gigawatt hour、ギガワット時
kWh	kilowatt hour、キロワット時
LCO	LiCoO ₂ catode、陰極
LED	light-emitting diode、発光ダイオード
LFP	lithium iron phosphate、リン酸鉄リチウム
Li-ion	lithium-ion、リチウムイオン
LMO	lithium manganese oxide、リチウムマンガン酸化物
LTO	lithium titanate、チタン酸リチウム
MW	megawatt、メガワット
MWh	megawatt hour、メガワット時
NaS	sodium sulphur、ナトリウム酸硫黄
NCA	lithium cobalt aluminum、リチウム・コバルト・アルミニウム
NMC	nickel-manganese-cobalt、ニッケル・マンガン・コバルト
PHS	pumped hydroelectricity storage、揚水式水力電力貯蔵
PHEV	plug-in hybrid vehicles、プラグイン式ハイブリッド車両
PV	photovoltaic、太陽光発電
TES	thermal storage system、熱貯蔵システム
VRE	variable renewable energy、変動的再生可能エネルギー
VRFB	vanadium redox flow battery、バナジウム・レドックスフロー電池
ZBFB	zinc-bromine flow batteries、亜鉛臭素フロー電池

