

脱炭素に向けたエネルギー貯蔵の役割 ～柔軟性とセクターカップリング～

The role of Energy Storage Systems from the viewpoint of Power Systems
—Flexibility and Sector Coupling—

安田 陽*

1. はじめに

2020年10月に菅義偉内閣総理大臣（当時）の国会所信表明演説において「2050年までにカーボンニュートラルをめざす」¹⁾ という文言が明記され、日本でも急速にカーボンニュートラルの議論が活性化している。国際的にも2021年5月には国際エネルギー機関（IEA）から“Net Zero by 2050”という報告書が公表され²⁾、脱炭素の議論が急ピッチで進展している。

本稿では、脱炭素に向けた将来のエネルギー転換として、必然的に再生可能エネルギーの超大量導入が進む中、エネルギー貯蔵システムがどのように貢献するかについて、エネルギーシステムや電力システム全体の観点から俯瞰する。

第2章では、まずエネルギー貯蔵システムの役割について述べる前に世界の脱炭素の議論の動向を概観し、続く第3章で変動性再生可能エネルギー（VRE）、すなわち風力・太陽光を大量導入するための重要な概念である「柔軟性」と「セクターカップリング」について紹介する。第4章では柔軟性の文脈の中でエネルギー貯蔵の位置付けを確認し、第5章ではエネルギー貯蔵を含む諸技術の優先順位を合理的に意思決定する手法としての「費用便益分析」について解説する。

2. 世界の脱炭素議論の動向と日本の立ち位置

本章では、脱炭素の国際動向を俯瞰するために、IEAが2021年5月に公表した“Net Zero by 2050”の概要を紹介する。また、日本国内での脱炭素関連の政策や議論も紹介し、世界と日本の動向の相違点を指摘する。

図1はIEAの同報告書で提示された「ネットゼロ排出シナリオ」における一次エネルギー供給の見

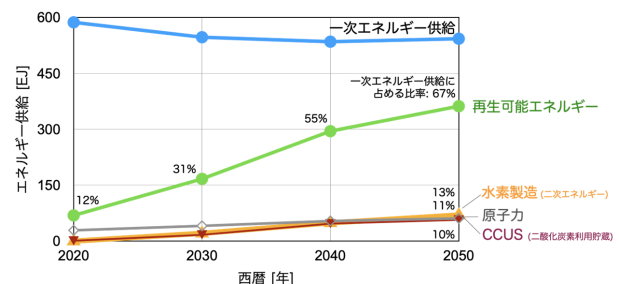


図1 IEAによる一次エネルギー供給および各種エネルギーの見通しの推移（文献2）のデータより筆者作成

通しと、各種技術の内訳である。IEAの見通しによると、世界全体の一次エネルギー供給は人口やGDPの伸びも関わらずエネルギー効率化のために減少することが予想されているが、その中で再生可能エネルギーは2050年に約7割を占め、最大のエネルギー源となることがわかる。

一方、日本において脱炭素の文脈で議論が盛んになりつつある二酸化炭素再利用・貯留（CCUS）付き火力、原子力はそれぞれ1割程度であり、二次エネルギーとしての水素利用も同じく一次エネルギーに対して1割程度と見積もられており、これらの比率はあまり大きくないことがわかる。

また図2は、IEAの同報告書で提示された「ネットゼロ排出シナリオ」における電源構成（発電電力量）の将来見積もりの推移を円グラフで示したものである。電源構成に占める再生可能エネルギーの比率は、図に示す通り2030年に61%、2040年に84%、2050年には88%という見通しが試算されている。その中でも特に風力と太陽光がそれぞれ約35%となり、最大電源となることが予想されている。

このように、再生可能エネルギーは文字通り脱炭素を達成するための「主役」であり、それは決して

* 京都大学大学院経済学研究科 再生可能エネルギー経済学講座 特任教授

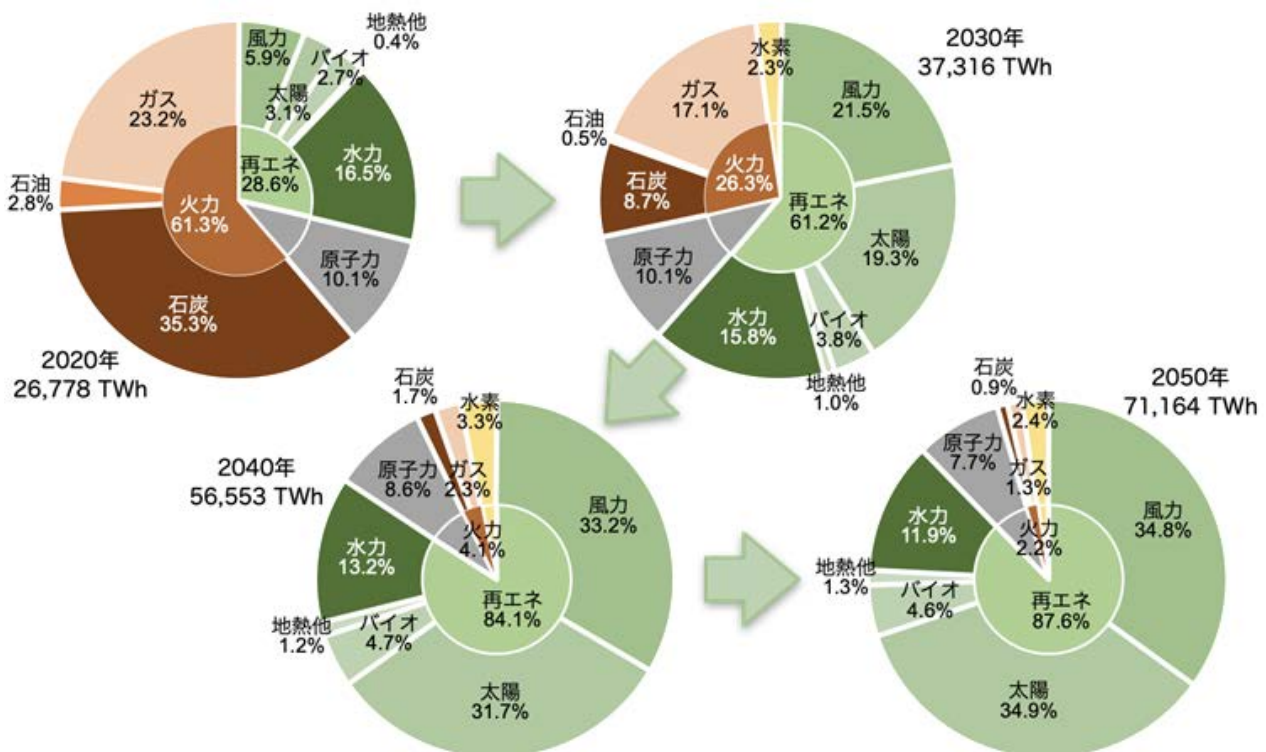


図2 IEAによる将来の電源構成の見通し (文献2) のデータより筆者作成

象徴的な意味ではなく、定量的な科学的方法論に基づき、国際機関である程度合意形成された世界共通の認識であると言える。

なお、本節ではIEAの“Net Zero”報告書を中心に紹介したが、同時期に別の国際機関であるIRENAからも同様の報告書が発表されている³⁾。複数の国際機関が競い合うように異なるモデルや分析手法を用いて将来見通しを算出しながらも、ほぼ同じような結論に到達していることは非常に興味深い。

一方日本では、2020年10月の菅元首相の「カー

ボンニュートラル宣言¹⁾後、同年12月25日には経済産業省から『グリーン成長戦略』が公表され、2050年に「再エネ (50～60%)」という数値が明記された⁴⁾。また、2021年10月には『第6次エネルギー基本計画』が閣議決定され⁵⁾、そこには2030年度の電源構成に占める再生可能エネルギーの比率が36～38%が明記された。この日本政府が公表した将来見通しと前項で紹介したIEA報告書の見通しを比較すると、図3のようになる。

この図から明らかな通り、日本の2030年および2050年の再生可能エネルギーの導入率の見通しは、IEAなど国際機関が公表したシナリオに対して低い値となっている。

3. 再生可能エネルギー大量導入時代の系統運用

前章で示したように、電源構成に占める再生可能エネルギーの比率が約9割にも達し、そのうち風力・太陽光といったVREが約7割にも上るVRE超大量導入時代が2050年までにやってくることが予想されている。

このようなVRE超大量導入時の電力システムの運用はチャレンジングではあるが、その課題に対する段階的解決方法は比較的早い段階から国際的に議論さ

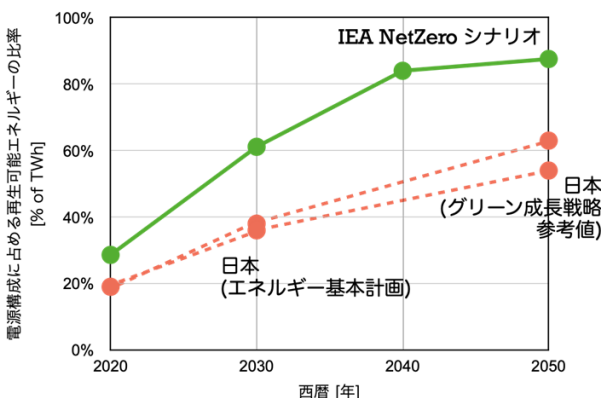


図3 IEA“Net Zero”報告書のシナリオと日本の見通しの比較 (文献2, 4, 5) から筆者作成

れている。

3.1 系統柔軟性

VREの大量導入を支える技術として、例えばIEAは既に2011年の段階で「柔軟性 (flexibility)」に関する報告書を公表している⁶⁾。柔軟性は、従来の「調整力 (regulation power)」や「予備力 (reserve)」の上位概念にあたる新しい用語であり、図4に示すように柔軟性の供給源として、以下のものが挙げられる。

- ①ディスパッチ可能 (制御可能) な電源
- ②エネルギー貯蔵
- ③連系線
- ④デマンドサイド

柔軟性は多種多様な系統構成要素から供給でき、ディスパッチ可能 (制御可能) な電源も火力発電だけでなく水力やバイオコジェネからも質の高い柔軟性を得ることができる。エネルギー貯蔵も蓄電池や水素だけでなく熱貯蔵 (温水貯蔵) や揚水発電など既に技術が確立された低コストの設備を用いることができる。

更に、連系線は発電設備ではないため従来の考え方に基づく供給力や予備力として計上されずその能力が見落とされがちであるが、隣接エリアと連系することにより他エリアの柔軟性供給源を広域で管理することができ、結果的に柔軟性の選択肢を広げることになる。

デマンドサイドの柔軟性も、現時点では国や地域レベルで十分に信頼性の高い設備や方法論が大規模に確立されているとは言えないが、例えば空調や冷蔵・冷凍設備、更には電気自動車 (EV) の電力市場価格に連動した応答など、価格弾力性の高い将来技術が期待される。

上記のような手順で柔軟性供給源を合理的に選択し組み合わせることにより、既存の設備から順番に柔軟性を最適利用することが可能となる。柔軟性供給源の選択の優先順位として、図4では以下のような手順を踏むことが推奨されている。

- ・ステップ1：対象となる国や地域の電力系統の中で、柔軟性を供給可能な電力設備がどこにどれくらいあるかを把握する。
- ・ステップ2：当該系統における利用可能な柔軟性がどれくらい存在するかを計上する。
- ・ステップ3：今後その地域にどのくらいのVREが導入されるかを予測する。
- ・ステップ4：必要となる量と利用可能な量を比較する。

このような他種多様な柔軟性供給源を既存のものからコストが安い順に使っていくのが国際的に議論の進む柔軟性のコンセプトである。

日本では「再エネは不安定で火力によるバックアップが必要」「再エネ導入には蓄電池が不可欠」という発想が巷間に流布しており、研究者ですらそれを無省察に受け入れてしまう傾向にあるが、国際的に議論が進む「柔軟性」という概念の下では火力発電や蓄電池は柔軟性供給源の選択肢の一部に過ぎない。そもそも国やエリアごとに多様な種類の柔軟性のポテンシャルが存在し、それを如何にコスト効率よく有効活用するかが、ここ10年で世界で盛んに議論されている。

3.2 VRE 導入の6段階

前節で柔軟性の概念について簡単に紹介したが、本章では柔軟性供給源を選択する上での方法論をより詳細に議論する。ある技術をいつどのようになぜ選択するかは、その技術の技術的優位性だけでなく建設コストや運用コストなどの経済性も考慮して意思決定しなければならない。

表1および図5に、IEAが文献8)で提案したVRE導入の6段階と移行への主な課題を模式的に示した図表を示す。

図5に見る通り、IEAの分類に従うと現段階で「水素の利用」が必要となる第5～6段階に到達した国・エリアは地球上で存在せず、最もVRE導入率が高いデンマークでもまだ第4段階に留まっていることがわかる。

現在、欧州を中心に水素技術の研究開発が盛んなのは、現在第3～4段階にある国やエリアが明確な政策目標を持っているからである。あと10年以内に確実に第5～6段階に到達するための布石である

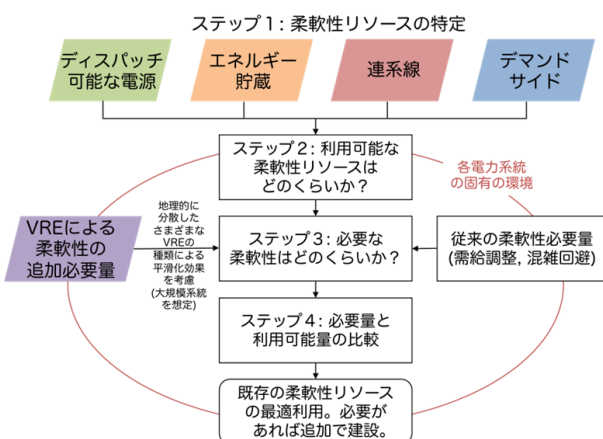


図4 IEAによる柔軟性の概念図 (文献6)の図を筆者翻訳

表1 IEA による VRE 統合の6段階
(文献7)より筆者翻訳してまとめ

段階	説明	移行への主な課題
1	VRE は電力系統に顕著な影響を及ぼさない	既存の電力系統の運用パターンの僅かな変更
2	VRE は電力系統の運用に僅かなもしくは中程度の影響を及ぼす	正味負荷および潮流パターン変化の変動がより大きくなる
3	電力系統の運用方法は VRE 電源によって決まる	VRE 出力が高い時間帯での電力供給の堅牢性
4	電力系統の中で VRE の発電が殆ど全てとなる時間帯が多くなる	発電超過および不足の時間帯がより長くなる
5	VRE の発電超過(日単位~週単位)が多くなる	季節間貯蔵や燃料生成あるいは水素の利用
6	VRE 供給の季節間あるいは年を超えた超過または不足が起こる	

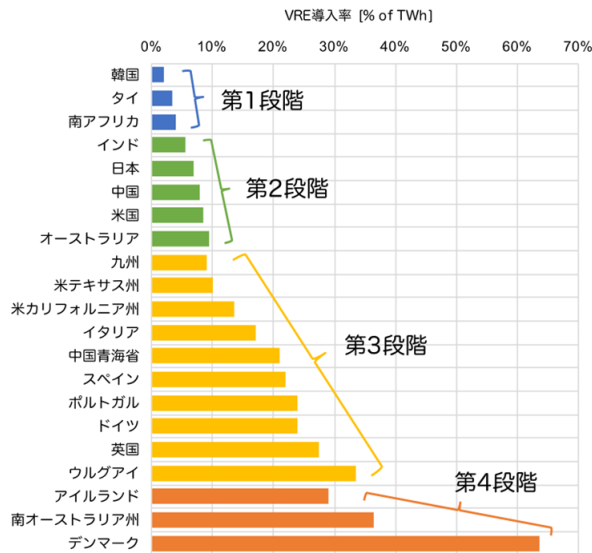


図5 IEA の分類による主要国・エリアの VRE 導入率 (2018年、文献7)のデータより筆者作成)

ということを認識しないと、エネルギー政策と産業政策のミスマッチを起こしてしまうことになりかねない。

日本で盛んに議論されている蓄電池に関しても同様で、本来、蓄電池が必要になるのは第4～5段階であり、現在第4段階にある国やエリアの中で系統用蓄電池を大規模に導入しているのは南オーストラリア州のみである。日本の北海道とほぼ同等の面積・人口・消費電力量の規模をもつアイルランドでも、大規模な蓄電池の導入なく風力発電の導入率30%を達成している点は興味深い。

南オーストラリアはテスラ社が2018年当時世界最大の100MW/129MWh大容量蓄電池システムを導入したため、日本でも注目されたことは記憶に新しい⁸⁾。しかし、この背景には過去10年間で石炭火力をほぼゼロにしつつ風力発電の導入率を40%

近くに上昇させ、かつ水力発電がほとんどないという、南オーストラリア州独自のユニークな自然環境や政策があることは無視できない。

図4によると、日本はまだ「VREは電力システムの運用に僅かなもしくは中程度の影響を及ぼす」第2段階に過ぎず、日本の中でも太陽光発電の導入が先行している九州でも第3段階に到達したばかりである。

前章図3で議論した通り、電源構成における再生可能エネルギーの比率に関する日本政府の公式な見通しとしては、2030年に36～38%、2050年に50～60%であり、既に導入されている水力発電やバイオマスの分を除けばVREとしては2030年に30%程度、2050年に40～50%程度に過ぎない。これらの数値を図5に照らし合わせると、日本は2030年になってもまだ第3段階を抜け出す、2050年でも第4段階に留まっていることになる。

このように再生可能エネルギーの「低い」将来見通しにも関わらず、本来第4～第6段階で必要となる蓄電池や水素の必要性が過度に強調され、補助金などで導入が進んだとしても、結果的に再生可能エネルギー大量導入や脱炭素に貢献しないばかりか、国際市場で競走できないガラパゴス技術を再生産してしまう可能性すらある。

このエネルギー政策と産業政策のミスマッチは、将来の日本の蓄電池産業や水素産業に深刻な影響を及ぼすリスクもあり、早急にこのミスマッチを解消させる議論が必要である。具体的には、政府の公式な将来見通しをIEAなどの国際水準並に早期に引き上げることなどが挙げられる。

このように、VREの導入の諸段階に応じて必要な対策を講じることは、世界のさまざまな国やエリアで蓄積された知見・経験に基づく合理的方法論である。低い段階のうちに高い段階の方策を補助金などで蓄電池や水素を市場投入してもコスト効率が悪くなる可能性が高い。また反対に、高い段階での課題を理由にして、低い段階でのVRE導入が妨げられたり導入を先送りしたりすることないように注意が必要である。

3.3 柔軟性の優先順位

図6はIEA風力技術協力プログラム(TCP)第25作業部会(Task25)が作成した柔軟性の選択肢の優先順位を示す概念図である⁹⁾。

この図が示唆するところによると、風力・太陽光の導入率が低い段階から高い段階に推移するに従って、低コストで実装が早い柔軟性供給要素から導入

していくことが望ましい。これは VRE 導入が先行する各国・各エリアで蓄積された経験から得られた世界共通の知見であり、前項で紹介した IEA による VRE 導入の 6 段階に整合する考え方である。

例えば、VRE の導入率がまだ低い段階では柔軟性の高い既存電源の活用もしくは既存電源の柔軟性の向上が優先である。この柔軟性の向上も電力市場の市場シグナルによって促されることが望ましく、その好例はデンマークの電力系統および電力市場の歴史的経緯について書かれた報告書に詳しい¹⁰⁾。

エネルギー貯蔵も既に技術が確立され国やエリアによっては十分な容量が実装されている揚水発電や熱貯蔵（温水貯蔵）が有効である（詳細は次項で後述）。日本で盛んに議論される蓄電池は、国際議論としては柔軟性の最後の手段であり（さらにその後には水素が待っているが）、最初に取りうる選択肢とはならないことに留意が必要である。

また、出力抑制は日本ではネガティブなものとして解釈されやすいが、他の手段との経済価値と比較した上で 5～10% 程度であれば寧ろコスト効率のよい柔軟性供給手段として用いることも可能である（ただし、公平性や透明性など十分に法制度や市場設計が整っている場合）。日本では現在、九州エリアで出力抑制が発生しているが、2019～2021 年の出力抑制率（年間 VRE 発電電力量に対する抑制電力量）はそれぞれ 2.8%、3.8%、4.2% であり（文献 11）から筆者集計）、VRE 導入が進む諸外国と比較して際立って高い水準ではない。この段階で出力抑制の緩和のために蓄電池を導入することが経済的正当性を持つかどうかは、より詳細な定量的議論が必要である（風力および太陽光の出力抑制の国際動向と国際比較に関しては、IEA Wind Task25 による国際調査¹²⁾を参照のこと）。

更に、単に要素技術の追加だけでなく系統運用や市場設計などの制度面の改革も必要であることがこ

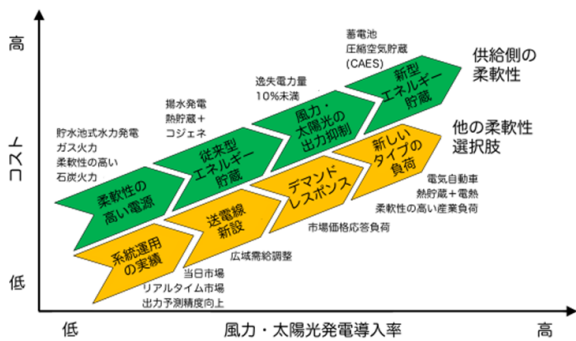


図 6 IEA Wind Task25 による柔軟性導入の優先順位⁹⁾

の図から示唆される。例えば当日市場（日本では時間前市場）の活性化や広域需給調整、デマンドレスポンス、電気自動車の充放電の能動的活用など、要素技術開発ではなく制度設計や市場設計によって新たな柔軟性供給源の発掘や活用が進む場合もある。これらの一部は既に、幸い日本でも電力広域的運営推進機関や経済産業省の審議会・委員会等において議論が進展している。

3.4 セクターカップリング

第 2 章で紹介した IEA の“Net Zero”報告書に立ち戻ると、再生可能エネルギーは電力部門以外に部門（熱部門、運輸部門）でも利用が進み、2050 年には一次エネルギー供給の 67% にも達するとの見通しが立てられている。太陽光や風力などの再生可能エネルギーは電力に変換しやすいため、電力セクターでの再生可能エネルギー化が最初に進むのはもちろんであるが、他の部門でも電化（electrification）が進み、再生可能エネルギーによる電力を利用することによって間接的に再生可能エネルギー化が進むことになる。このことを視覚的に表したものが図 7 となる。

図 7 は各部門（電力・ビル冷暖房・産業熱利用・陸運）の各年代におけるエネルギー源の見通しを示したものであり、図から電力分野で 2030 年代以降に再生可能エネルギーの大量導入が進むことが伺える（このことは本稿図 1 の円グラフでも示されている）。一方、他の分野は電力分野に遅れて再生可能エネルギー化が進むことになり、間接利用の比率も多い。これはこの分野で電化（による再生可能エネルギー化）が進むことを意味している。

「電化」と言うと、日本でも一時期「オール電化」

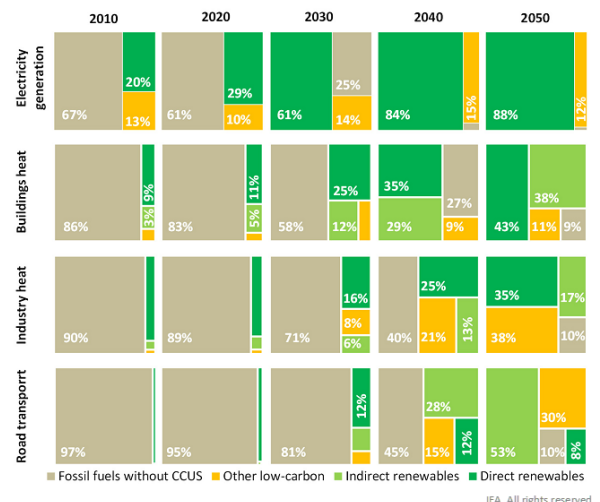


図 7 各部門の各年代におけるエネルギー構成¹⁾

という言葉が流行ったが、現在国際議論が進む電化は決して電力のみにエネルギー利用を頼るのではなく、むしろ他の部門とのエネルギーの授受や協調が進むことを意味する。このような考え方は「セクターカップリング」と呼ばれる。

セクターカップリングの定義は、以下のように、欧州議会が2018年に公表した文書に見ることができる（筆者仮訳）。

- ・セクターカップリングの広義の定義はエネルギーシステム統合に極めて近く、「複数の方法及び/又は地理的スケールを通じて環境影響を最小にしながらか信託性のあるコスト効率の良いエネルギーサービスを供給するためのエネルギーシステムの計画・運用の協調プロセス」と定義されている。
- ・欧州委員会は、セクターカップリングのこの広義の解釈を用い、「よりコスト効率の高い方法で脱炭素化を達成するために、エネルギーシステムにより大きな柔軟性を提供するための戦略」と理解している。

ここで「エネルギーシステム統合」や「脱炭素」「柔軟性」というキーワードが含まれている点は注目すべきで、これまでで紹介した国際動向に合致した考え方であると解釈できる。

上記の欧州委員会の定義に見る通り、セクターカップリングは「柔軟性を提供するための戦略」である。したがって、柔軟性の概念なくセクターカップリングを理解することは難しく、セクターカップリングを想定せずに柔軟性供給源を探しても資源は限られてしまう（その結果、本来必要のない高コストな選択肢を不合理に選択する結果となる）。

セクターカップリングの代表例は、熱部門との協調という点では、地域熱供給や温水貯蔵・冷熱貯蔵が挙げられる。特にエネルギー貯蔵システムとしての温水貯蔵は既に技術的にも成熟しており、低コストであることが世界的にも知られている。例えばピット式の温水貯蔵は他のエネルギー貯蔵システムと比較して最も低コストであるとされている^{13,14)}。また、家庭用の温水貯蔵に至っては、そのコストは他のエネルギー貯蔵技術と比べ「無視できるほど小さい」ものである¹³⁾。

また、運輸部門との協調という点では、やはり電気自動車（EV）の車載蓄電池とのインテリジェントな協調が挙げられ、これはV2G（Vehicle to Grid）として知られている。EVが増えることで電力需要も増加し、ピーク時の供給信頼度（アデカ

シー）を懸念する声もあるが、寧ろV2Gは学術レベルでは1990年代から提唱され、理論的には既に20年以上の歴史を持つ。確かに無対策なEVの充放電は電力系統に負の影響を与える可能性もあるが、近年EVの急速な拡大に伴い、価格弾力性の大きいデマンドレスポンスとしてますます期待が高まっている。近年の国際議論は行動経済学なども応用したV2G技術の社会実装や市場取引が主流であり¹⁵⁾、研究開発は要素技術やソフトウェア開発のレベルからプラットフォーム作りや制度設計の段階に進んでいると言える。

4. エネルギー貯蔵の役割

前章で「柔軟性」という新しく国際的に議論が進む概念について解説したが、本稿のテーマであるエネルギー貯蔵はこの柔軟性の選択肢の一つとしてどのような役割を担い、どのように期待されているのであろうか。

4.1 再生可能エネルギーとエネルギー貯蔵

再生可能エネルギーとエネルギー貯蔵に関する国際議論としては、例えば下記のようなものを挙げるができる。

- ・エネルギー貯蔵は最初に検討する選択とはならない。なぜならば、20%までの適度な風力発電導入レベル（筆者注：発電電力量に対する導入率）では、系統費用に対して経済的な影響は限定的だからである。¹⁶⁾
- ・エネルギー貯蔵装置は系統全体に対して経済的便益を最大にするために用いる場合に最も経済的になるものであり、単一の電源に対して用いられることはほとんどない。¹⁷⁾
- ・この結果（筆者補足：エネルギー貯蔵の検討）は系統の柔軟性や電源構成、電源の変動性によって決まるが、導入率が20%以下では小さな離島の系統を除いた全ての系統で経済的に妥当となるとは言えず、導入率50%以上ではほとんどの系統で電力貯蔵が経済的に妥当となる。¹⁷⁾
- ・風力発電の導入率が電力系統の総需要の10～20%であれば、新たな電力貯蔵設備を建設するコスト効率はまだ低い。¹⁸⁾
- ・集合化によっていかなる負荷および電源の変動性も効果的に低減できるような大規模な電力系統において、風力発電専用のバックアップを設けることは、コスト効率的に望ましくない。¹⁸⁾

- ・将来的には、電力貯蔵の選択肢も需給調整に役立つ可能性がありますが、その利用は、他の選択肢と比較して費用対効果が高いかどうかによります。¹⁹⁾
- ・電力貯蔵の利点は、そのコストと比較しなければなりません。(中略) 燃料や水を容器や貯水池に貯蔵することは、現在の貯蔵の中で最も費用対効果の高い形態です。熱貯蔵もまた、蓄電池よりも費用対効果が高い方法です。¹⁹⁾

これらの言説は、前節図5の柔軟性の優先順位の考え方に呼応するものである。上記に挙げたもののうちいくつかはまだ蓄電池のコストが高かった数年前の言説ではあるが、その後蓄電池のコストが如何に低下したとしても、他の既存の設備を有効活用せずに新規設備を導入するのは、依然としてコスト効率が悪いことは明らかである。

4.2 エネルギー貯蔵の役割と用途

一方、再生可能エネルギーに限らず電力系統におけるエネルギー貯蔵の役割と用途を考えると、例えば表2のようにまとめることができる。この表から、エネルギー貯蔵は再生可能エネルギーの変動対策にも用いることができるが、それ以外の用途も多種多様であり、むしろそちらの方が多岐にわたることがわかる。

これは米国電力中央研究所 (EPRI) が2010年に公表した白書²⁰⁾でまとめられた知見であり、今から10年以上前と技術的には若干古い情報である。しかし、現在でもそのまま通用する考え方であり、

電力市場が発達した欧米では当時からこのような議論が始まっていたという点は興味深い。

日本では「再エネ導入には蓄電池が必要」と無省察に喧伝される一方、エネルギー貯蔵が再エネ以外の用途に積極的に用いる議論が相対的に少なく、更にそれを市場取引で活用するという概念も希薄なようである。これらのサービスの価値を明示的に価値付けできるような市場設計と、エネルギー貯蔵システムを所有する市場プレーヤーが参入障壁なく市場に参加できるルールづくりが日本でも望まれる。

5. 技術選択の意思決定手法としての費用便益分析

前章までに議論した通り、エネルギー貯蔵システムは再生可能エネルギーの大量導入を進める点でも最初に取りうる選択肢ではなく、逆に再生可能エネルギーの変動対策以外の用途も多岐にある。それでは、どのような種類のエネルギー貯蔵システムをどのようなタイミングでどのような合理的判断に基づき選択すればよいのだろうか？

5.1 費用便益分析

その答は、工学の分野でなく経済学の分野に解を求めることができる。費用便益分析 (CBA: Cost-Benefit Analysis) は日本でも比較的古くから特に土木部門や公共建築部門で発達している定量評価手法であるが、欧米ではエネルギー部門にもこの手法を用いて政策決定・意思決定することが法令レベル

表2 電力用エネルギー貯蔵システムの用途とその性能要件 (文献20)の表より抜粋して筆者翻訳

用途	詳細説明	容量	時間スケール
小売サービス	裁定取引	10~300 MW	2~10 時間
	アンシラリーサービス	ブラックスタートやランプサービスなど市場の要求する機能による	
	周波数制御	1~100 MW	15 分
	瞬動予備力	10~100 MW	1~5 時間
再エネ系統連系	風力発電: ランプ (出力変化) 対応および電圧制御	分散型: 1~10 MW 集中型: 100~400 MW	15 分
	風力発電: オフピーク貯蔵	100~400 MW	5~10 時間
	太陽光発電: タイムシフト, 瞬時電圧降下, 急峻な需要に対する対応	1~2 MW	15 分~4 時間
変電所での送配電支援	都市部および地方の送配電網建設遅延対応, 送電混雑	10~100 MW	2~6 時間
移動式の送配電支援	同上	1~10 MW	2~6 時間
分散型エネルギー貯蔵システム	電力会社所有: 電力計や配電線, 変電所の系統側	1 相: 25~200 kW 3 相: 25~75 kW	2~4 時間
産業用電力品質	瞬時電圧降下および短時間停電対策	50~500 kW	15 分未満
産業用信頼度		1000 kW	15 分以上
産業用エネルギーマネジメント	エネルギーコストの軽減, 信頼度向上	50~1000 kW	4~10 時間
家庭用エネルギーマネジメント		1 MW	3~4 時間
家庭用バックアップ	効率, コスト軽減 信頼度	2~5 kW	2~4 時間
		2~5 kW	2~4 時間

で義務付けられていることが多い²²⁾。CBAの目的は例えば下記のように

- ・CBA（費用・便益分析）の広義の目的は、社会的意思決定を支援することである。²²⁾
- ・費用便益分析の目的は、政策の実施についての社会的な意思決定を支援し、社会に賦存する資源の効率的な配分を促進することである。²³⁾

とされ、根拠に基づく政策決定（EBPM：Evidence-based Policy Making）や規制影響分析（RIA：Regulatory Impact Analysis）の基礎を成すものである。

エネルギー貯蔵システムを選択する際は（もしくは他の柔軟性供給源と比較してエネルギー貯蔵を選択しない場合も）このCBAを行うことが望ましい。逆にCBAのような定量的評価なしに安易に「エネルギー貯蔵ありき」「蓄電池ありき」で技術導入や補助金付与を決定してしまうと、その地域や国の便益が損なわれたり、諸外国に通用しないガラパゴス技術を再生産してしまうことになりかねない。

例えば文献24)では、固定価格買取制度（FIT）の買取期間が終了した住宅用太陽光の活用方法について蓄電池とヒートポンプによる蓄熱の経済的分析を行っている。その結果、条件によっては蓄電池導入による太陽光余剰電力を直接消費しても、需要家にとって経済的でなくCO₂排出削減や省エネルギーにもつながらないケースもあることが明らかになっている。

5.2 エネルギー貯蔵システムの便益

表3は国際電気標準会議（IEC）が2012年に公表したエネルギー貯蔵システムに関する白書²⁵⁾から抜粋したものであり、各種エネルギー貯蔵システムの再生可能エネルギーに対する便益がまとめられたものである。

前章で紹介した通り、エネルギー貯蔵システムは再生可能エネルギーの変動対策のためだけにあるのではなく、また、再生可能エネルギーの大量導入を支える用途であったとしても、さまざまな目的や利用方法により便益は異なる可能性がある。これらの導入効果を、可能であれば系統シミュレーションなどを用いて定量化し、貨幣価値に換算することが望ましい。

また、エネルギー貯蔵システムがもたらす便益の多くがアンシラリーサービスに関わるものであるが、現時点での日本ではこのアンシラリーサービスの価値（便益）が十分可視化されていないのが現状である。需給調整の責務を「(大規模火力発電所を持つ)旧一般電気事業者がボランティアベースで肩代わりしている」「新電力はフリーライドしている」と言った表面的な荒れた議論になりがちなのは、ひとえにアンシラリーサービスが市場で価値付けされていないからだと言える。これを解決するには、現在議論が進む需給調整市場の整備や、北米のようなアンシラリーサービス市場の設立など、市場での価値付けを透明性高く行えるような制度設計のあるべき姿の議論を進めることが望ましい。

表3 系統側に設置する大容量エネルギー貯蔵システムの用途
(文献25)の表より抜粋して筆者翻訳)

用途	時間スケール	再生可能エネルギーに対する便益	エネルギー貯蔵システムの種類
時間シフト/裁定取引/負荷準化	数時間～数日	日中の負荷曲線との不一致に対する対応	NaS電池, 空気圧縮貯蔵, 揚水発電, レドックスフロー電池
季節間シフト	数ヶ月	年間を通じた再エネの利用, 低日照期などにおける従来型電源依存度の軽減	水素貯蔵, ガス貯蔵
負荷追従/出力変化(ランプ)対応	数分～数時間	需要逼迫時の再エネ出力の予測困難性を緩和	各種蓄電池, フライホイール, 揚水発電, 空気圧縮貯蔵, レドックスフロー電池
電力品質および安定度	1秒未満	再エネの制御困難な変動性に起因する電圧安定性の低下や高調波の緩和	鉛蓄電池, NaS電池, フライホイール, 揚水発電
周波数制御	数秒～数分	再エネ出力の時々刻々とした制御困難な変動性の緩和	リチウムイオン電池, NaS電池, フライホイール, 可変速揚水発電
瞬動予備力	～数十分	予測誤差発生時に出力を加減することにより, 再エネ出力の予測困難性の緩和	揚水発電, フライホイール, 各種蓄電池
二次予備力	数分～数時間	深刻かつ長時間持続する再エネ出力の低下の際に一定の電力を供給	揚水発電
送電網の有効利用	数分～	送電コストの減少, 再エネ電源の地域偏在の緩和	リチウムイオン電池
孤立系統支援	数秒～数時間	再エネ電源の変動性および予測困難性を緩和するための時間シフトおよび電力品質改善	鉛蓄電池
緊急時の電力供給/ブラックスタート	数分～数時間	再エネ電源に対する便益はないが, ブラックスタート容量を提供可能	鉛蓄電池

更に、ある便益を得るためにどのような技術を選択すべきかは、エネルギー貯蔵システム同士の比較だけでなく、他の柔軟性供給源とのコスト比較を行うことが望ましい。

5.3 レジリエンス、リスクマネジメントと費用便益分析

昨今はレジリエンスの名の下、災害対策用と称した蓄電池の導入促進や補助金の付与も見られるが、本来、災害対策といったリスクマネジメントこそ、災害の発生確率や規模、対策効果（便益）などを定量化することが望まれる。事実、リスクマネジメントに関する日本産業規格 JIS Q 31000-2020（原典は国際規格 ISO 31000：2019）にも、

- ・最適なりリスク対応の選択肢の選定には、目的の達成に関して得られる便益と、実施の費用、労力又は不利益との均衡をとることが含まれる。²⁶⁾

と、便益の評価が明記されていることは、エネルギー分野ではあまり知られていない。災害対策だけでなく気候変動も今や人類全体のリスクマネジメントの一部であり、来るべき将来のリスクに備える時こそ、冷静な定量評価による合理的意思決定が望まれる。

6. まとめ

本項では、脱炭素を目指すエネルギー転換に際してエネルギー貯蔵システムがどのような役割を持つかについて解説した。まず、再生可能エネルギー大量導入に向けて国際的に議論が進む「柔軟性」と「セクターカップリング」の概念を紹介し、柔軟性の選択肢の一つとしてエネルギー貯蔵の位置付けと優先順位を概観した。また、エネルギー貯蔵システムを含む技術一般の優先順位や要否の意思決定手法について、「費用便益分析」を紹介した。本項で紹介した「柔軟性」「セクターカップリング」「費用便益分析」の概念なきエネルギー貯蔵システムの安易な導入推進は、例え脱炭素や防災を名目としたとしても全体最適設計にはなり得ない。日本でも国際議論に合致した議論が望まれる。

日本は長らく「ものづくり」国家として要素技術の研究開発を得意としてきた。しかし、それらの技術をどのタイミングで何を目的として導入すべきかは、必ずしも開発者側の都合や熱意だけでなく、全体最適設計を志向した合理的な社会的意思決定が必要であり、科学的根拠に基づく定量評価が望ましい。本稿が、技術開発の優先順位と科学的な意思決定の方法論を理解する上での一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 首相官邸：第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説（2020.10.26）
- 2) International Energy Agency (IEA)：Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector (2021).
- 3) International Renewable Energy Agency (IRENA)：World Energy Transitions Outlook：1.5° C Pathway (2021).
- 4) 経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略，2020年12月25日
- 5) 日本政府：第6次エネルギー基本計画（2021）
- 6) IEA：Harnessing Variable Renewables (2011)
- 7) IEA：Status of Power System Transformation 2019 – Power system flexibility (2019).
- 8) エネルギー経済研究所：豪州：再エネ+エネ貯蔵の導入が拡大，蓄電池価格の低下も追い風 (2018)
<https://eneken.ieej.or.jp/data/7509.pdf>
- 9) IEA Wind Task25：ファクトシート No.1 風力・太陽光発電の系統連系，NEDO (2021)，
<https://www.nedo.go.jp/content/100923371.pdf>
- 10) Danish Energy Agency：デンマークの電力システムにおける柔軟性の発展とその役割，State of Green (2021)，
<https://stateofgreen.com/jp/uploads/2021/11/DEAレポート日本語版.pdf>
- 11) 九州電力送配電：エリア需給実績（2022年1月31日更新）
https://www.kyuden.co.jp/td_service_wheeling_rule-document_disclosure
- 12) Y. Yasuda *et al.*：C-E (Curtailment – Energy Share) Map: An Objective and Quantitative Measure to Evaluate Wind and Solar Curtailmen, Renewable & Sustainable Energy Reviews Vol.160 (2022) 112212, doi.org/10.1016/j.rser.2022.112212
- 13) IEA：Technology Roadmap of Energy Storage (2014)
- 14) Energinet & Danish Energy Agency: Technology Data for Energy Storage, ver.0002 (2019)
- 15) B. K. Sovacool *et al.*: Actors, business models, and innovation activity systems for Vehicle-to-

- Grid (V2G) technology: A comprehensive review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 131 (2020) 109963. doi.org/10.1016/j.rser.2020.109963
- 16) European Wind Energy Association (EWEA) : 風力発電の系統連系 ～欧州の最前線～, 日本風力エネルギー学会 (2012), <http://www.jwea.or.jp/publication/PoweringEuropeJP.pdf>
- 17) T. Ackermann 編著: 風力発電導入のための電力系統工学, オーム社 (2013).
- 18) IEA Wind Task25: 風力発電が大量に導入された電力系統の設計と運用」第1期最終報告書, 日本電機工業会 (2012), <http://jema-net.or.jp/Japanese/res/wind/shiryo.html>
- 19) IEA Wind Task25: ファクトシート No.7 風力発電と電力貯蔵, NEDO (2020), <https://www.nedo.go.jp/content/100923377.pdf>
- 20) Electric Power Research Institute (EPRI) : Electricity Energy Storage Technology Options – A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits (2010).
- 21) 安田陽: 世界の再生可能エネルギーと電力システム ～経済・政策編, インプレス R&D (2019).
- 22) A. E. ボードマン他: 「費用・便益分析 – 公共プロジェクトの評価手法の理論と実践」, ピアソン (2004).
- 23) T. F. ナス: 「費用便益分析 – 理論と応用」, 勁草書房 (2007)
- 24) 高橋雅仁他: 卒 FIT の住宅用太陽光発電の活用方策に関するユースケース分析 – ヒートポンプ給湯機を用いた PV 自家消費の有用性 –, 電力中央研究所報告, C19001 (2019).
- 25) International Electrotechnical Commission (IEC): White Paper on Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage (2012).
- 26) 日本産業規格: リスクマネジメント – 指針, JIS Q 31000 (2020).

著者略歴



安田 陽 (ヤスタ ヨウ)

1989年3月, 横浜国立大学工学部卒業. 1994年3月, 同大学大学院博士課程後期課程修了. 博士(工学). 同年4月, 関西大学工学部(現システム理工学部)助手, 専任講師, 准教授を経て2016年9月より現職. 専門分野は風力発電の耐雷設計および系統連系問題. 現在, 日本風力エネルギー学会理事, 日本太陽エネルギー学会フェロー, IEC/TC88/MT24(国際電気標準会議 風力発電システム第24作業部会(風車耐雷))議長など, 各種国際委員会専門委員. 主な著作として「世界の再生可能エネルギーと電力システム」シリーズ(インプレスR&D), 翻訳書(共訳)として「風力発電導入のための電力系統工学」(オーム社)など