

再生可能エネルギーの普及拡大に向けた 系統におけるフレキシビリティの確保

産業調査部 村松 周平

要旨

- 電源構成における変動型再生可能エネルギーのシェア拡大によって供給量の変動や不確実性が増す一方で、火力・揚水発電のシェアは相対的に低減するため、デマンドレスポンス(DR)や蓄電池、長期エネルギー貯蔵技術(LDES)、疑似慣性パワーコンディショナー(PCS)などを活用してフレキシビリティを確保する必要がある。
- 蓄電池に関しては、製造コスト下げ止まりの打破や安全性の向上などを目的とした技術開発が進んでおり、短期的な時間軸では安価なリチウム・鉄・リンを正極材に用いるリン酸鉄リチウムイオン電池(LFP)が注目される。中長期的に本格的な普及が見込まれるLDESに関しては、レドックスフロー電池、NAS電池、蓄熱技術、鉄空気電池などが期待される。また、系統安定化に向けて慣性および同期化力の確保も重要であり、疑似慣性PCSやMGセットなどの活用も想定される。
- 産業競争力の強化に向けて、日本メーカーの国際競争力向上が期待される領域でもあり、官民合わせた導入促進や海外展開に向けた政策支援などの然るべき対応が求められる。

電力系統における経済合理的な脱炭素化に向けて再エネの果たす役割は大きく、2024年12月に公表された第7次エネルギー基本計画の原案でも、40年に総発電電力量に占める再生可能エネルギーの割合が4～5割に達することが示された。再エネの中でも発電コストや導入容易性の観点から期待の集まる太陽光発電や風力発電は、時間や天候などによって発電量が大きく変化する変動型再生可能エネルギー(VRE: Variable Renewable Energy)であり、その導入拡大は電力需給の時間的・地理的ミスマッチや慣性の低下といったさまざまな課題を生む。

こうした中、今後もS+3Eにのっとり電力系統を維持・運用するには、DBJ Research No.427「デマンドレスポンスによる経済合理的な電力系統の実現 ～低圧リソース活用に向けた標準化と自動化を目指して～」で取り上げたデマンドレスポンス(DR)に加え、蓄電池や経済的に6時間以上の電力充放電が可能な技術の総称である長期エネルギー貯蔵技術(LDES)、さらには疑似慣性パワーコンディショナー(PCS)などを活用し、需給の変動や不確実性に対応する「フレキシビリティ」を確保する必要がある。本稿では、フレキシビリティの全体像や有力視される技術について、エネルギー安全保障や産業競争力強化などGXの観点を含めて考察する。

1.再エネ大量導入を見据えたフレキシビリティ確保の重要性

フレキシビリティとは、さまざまな時間単位(ミリ秒～季節)で生じる電力需給の変動や不確実性を、信頼性と経済合理性を維持しながら管理するために電力系統が有しておくべき機能の総称である。電力系統では、電気の品質確保や停電防止のために需要量・発電量を常に一致させる必要がある(同時同量の原則)ため、例えば供給が需要を上回る場合には、発電設備の出力抑制を行うか電力消費量を引き上げるなど、需給を一致させる対応が必要となる。こうした対応を可能にするのがフレキシビリティであり、従前は主に火力発電や揚水発電がその担い手であった。

今後は、電源構成におけるVREのシェア拡大によって供給量の変動や不確実性が増す一方で、火力・揚水発電のシェアは相対的に低減するため、フレキシビリティをいかに確保するかが大きな課題とな

る。火力発電は、幅広い時間単位のフレキシビリティを提供する優れた電源である一方で、電力系統におけるCO₂の主たる排出源であり、電源構成におけるシェアの低減が見込まれる。また、揚水発電はCO₂を排出せずに調整力などを提供できる電源だが、国内の適地はおおむね開発済みであり、収益性や環境アセスメントの観点からも新規開発を行うことは難しい。

このような状況のため、費用便益分析に基づく送配電網の戦略的な整備や、DRの実施、蓄電池・LDESの導入などを、各々の技術的な特性や経済性を踏まえて総合的に実施する必要がある(図表1-1)。

図表1-1 時間単位別の対応技術

送配電網	送配電網の増強と系統ルールの見直し							
需要側	デマンドレスポンス(DR)							
需給調整技術	火力発電・揚水発電							
	蓄電池				長期エネルギー貯蔵技術(LDES)			
その他	疑似慣性PCSなど							
	ミリ秒	秒 (10 ⁴ ミリ秒)	60秒 (1分)	60分 (1時間)	360分 (6時間)	24時間 (1日)	30日 (1ヶ月)	12カ月 (1年)

(備考)IEA「Status of Power System Transformation 2018」により日本政策投資銀行作成

VREの導入量とフレキシビリティの必要性には明確な相関関係が存在する。この相関関係について、国際エネルギー機関(IEA)は六つのフェーズに分けて分析している(図表1-2)。

図表1-2 VRE割合によるフェーズの変化と求められるフレキシビリティ

フェーズ	総発電量に占めるVRE割合	送配電網	短期調整力	長期調整力	慣性・同期化力	2024年時点での各国・地域の動向	2030年時点での各国・地域の動向
1	5%以下					タイ	-
2	5~10%程度					米国、インド、ケニア	タイ、米国
3	10~25%程度					日本、豪州、ベトナム、チリ	インド、ケニア、ベトナム
4	25~60%程度					アイスランド、英国、デンマーク、九州	日本、英国、チリ
5	60~90%程度					南オーストラリア州	アイスランド、デンマーク
6	90~100%程度					-	-

■ 必要量大 □ 必要量小

(備考) 1. IEA「Integrating Solar and Wind」により日本政策投資銀行作成
 2. 総発電量に占めるVREの割合は各国再エネ比率などを踏まえた想定値
 3. 短期調整力は6時間未満、長期調整力は6時間以上の充放電と定義

今後のVRE導入量を踏まえると、30年に日本全体ではフェーズ4に達すると予想され、天候や電力需要次第で長期間にわたって電力需要が余剰もしくは不足する可能性が生じる。そのため、これまでに実施してきた送配電網の増強や火力・揚水・蓄電池などを用いた短期調整力の確保だけでなく、LDESなどによる長期調整力や、疑似慣性PCSなどを用いた慣性・同期化力の確保が求められる。

(1) 送配電網の戦略的な整備と系統ルールの見直し

発電所と需要地を結ぶ送配電網の戦略的な整備は、VRE導入拡大を見据えた重要なフレキシビリティ確保策である。そもそも日本では、電力の大消費地は主に太平洋ベルトに集中する一方、VREの導入適地は余剰地や日射量・風況の観点から北海道・東北・九州が主であるため、今後VREのウエートが高まる中では電力需給の地理的なミスマッチが生じる。また、送電網がメッシュ状かつ広域に展開する欧州や中国とは異なり、南北に長い島国である日本では送電網がくし型状かつ他国と連系されていないことから、現状では大規模な需給変動が生じた際に国内他地域との柔軟な電力融通によりフレキシビリティを確保することも難しい。

こうした状況を踏まえて、電力広域的運営推進機関(OCCTO)が23年3月に作成した「広域連系系統のマスタープラン」は、再エネの主力電源化と送配電網の強靱化を目的として、北海道本州間を海底でつなぐ高圧直流送電線(HVDC)など、50年に向けた広域系統整備の長期展望を示した。送電線の空き容量が足りない場合、再エネ出力抑制の増加や再エネ導入自体の遅延が発生するため、マスタープランに沿った計画的な送電網の増強が期待される。さらに、日本では小規模な分散型電源が配電系統内にも多く分布していることから、ローカルフレキシビリティ¹の活用も視野に入れつつ、投資対効果を勘案しつつ配電網増強・DRなどを組み合わせて対応する必要がある。

送配電網の増強に加えて、系統利用ルールの見直しによる既存送配電網を最大限に活用することも重要である。国内では「日本版コネクト&マネージ」として18年より順次、想定潮流の合理化やN-1電制などの取り組みのほか、23年より調整電源以外も含め一定の順序により各電源を出力制御する再給電方式(一定の順序)を開始させた。

(2) 需給調整技術の導入

数秒以上のフレキシビリティ確保に必要な調整力を担う技術としては、火力・揚水発電やDRに加えて、蓄電池やその他幅広いLDESなどが重要となる(図表1-3)。

蓄電池は、電気自動車(EV・HEV)向け(車載用蓄電池)の普及が先行するが、足元では①発電所への併設、②送配電網への接続、③電力需要家のオンサイト設置など、電力関連用途(定置用蓄電池)の導入も進む。①については、22年度から開始されたFIP制度において、FIT制度と異なりインバランス特例が存在しないため、発電事業者は発電計画と発電量との乖離時に関してインバランス精算が必要になる上、FIP制度では発電プロファイルによって事業の収益性が大きく変わるため、再エネ発電所への蓄電池併設が進む。②については、VRE導入率の高い北海道・東北や九州などを中心に系統用蓄電池の接続契約が相次いでおり、23年の第1回長期脱炭素電源オークションでは、蓄電池・揚水の募集上限が100万kWのところ、蓄電池を中心に約540万kWが応札されるなど、注目の高さが伺える。③についても、オンサイト太陽光発電の有効活用や事業継続計画(BCP)の観点から家庭・産業で普及しつつある。

より長期間・大規模の需給調整に向けては、従来型の蓄電池のみならず、より幅広いLDESに期待が集まる。蓄電池は出力(kW)当たりのコストが安価な一方で、容量(kWh)当たりのコストは高いため、大容量

(参考)

1. ローカルフレキシビリティ: 地域への電力供給を主体的に行うローカル系統および配電系統における混雑緩和や電圧上昇回避を目的に発電量・需要量を柔軟に調整する能力

図表1-3 調整力を提供する各種技術の概要

	LNG火力発電	揚水発電	蓄電池	長期エネルギー貯蔵技術(LDES)	デマンドレスポンス(DR)
概要	液化天然ガス(LNG)を用いる火力発電	水の位置エネルギーを利用した設備(LDESの一種)	化学エネルギーによって電力貯蔵	長期間エネルギーを貯蔵する技術の総称	電力需要の制御
導入余地	CNへの道筋が示せれば新設も可能	日本での追加導入可能先は限定的	導入可能	一部を除き導入可能	ポテンシャルは大きい
短期調整	ガバナフリー運転などにより対応可能	可変速発電機により対応可能	一般的に対応可能	応答速度が遅い、技術が多い	供給信頼度の関係で一般的に行わない
長期調整	燃料があれば上げ調整力を供給可能	降水量や運用計画に依存するが対応可能	並列接続が必要でコスト高の可能性	大規模かつ長期間の蓄電・放電が可能	需要家負担などを考えると難しい
コスト	限界費用は燃料価格次第	限界費用は汲み上げ時の電力調達価格に大きく影響される	短期調整で安価	長期調整で安価	CAPEX不要のため安価になりうる
サステナビリティ	CO ₂ を排出するため、水素への燃料転換などが求められる	CO ₂ を排出せず	CO ₂ を排出せず	CO ₂ を排出せず	CO ₂ を排出せず

- (備考) 1. 各種資料により日本政策投資銀行作成
 2. 短期調整は1次調整力相当の充放電、長期調整は6時間以上の充放電と定義
 3. 青色部分は各技術の優位点

が求められる長時間・大規模の需給調整には向かない。そのため、kWh当たりのコストが安価で長期間・大容量のエネルギーを貯蔵可能な技術が必要となり、さまざまなLDESの研究開発・社会実装が進む。第7次エネルギー基本計画では、40年時点でVREを中心とした再エネ比率が4~5割に達する見通しであることなどから、30年までは蓄電池やDRで対応しつつ、40年さらには50年を見据えた場合にはLDESの導入を進める必要があると考えられる(図表1-4)。

図表1-4 2030、50年の日本における必要な調整力と対応技術

	2030年前後					2050年				
	LNGなど	揚水	蓄電池	LDES	DR	LNGなど	揚水	蓄電池	LDES	DR
負荷特性										
1次調整力										
2次調整力										
3次調整力										
時間の調整										
日の調整										
週の調整										
月の調整										

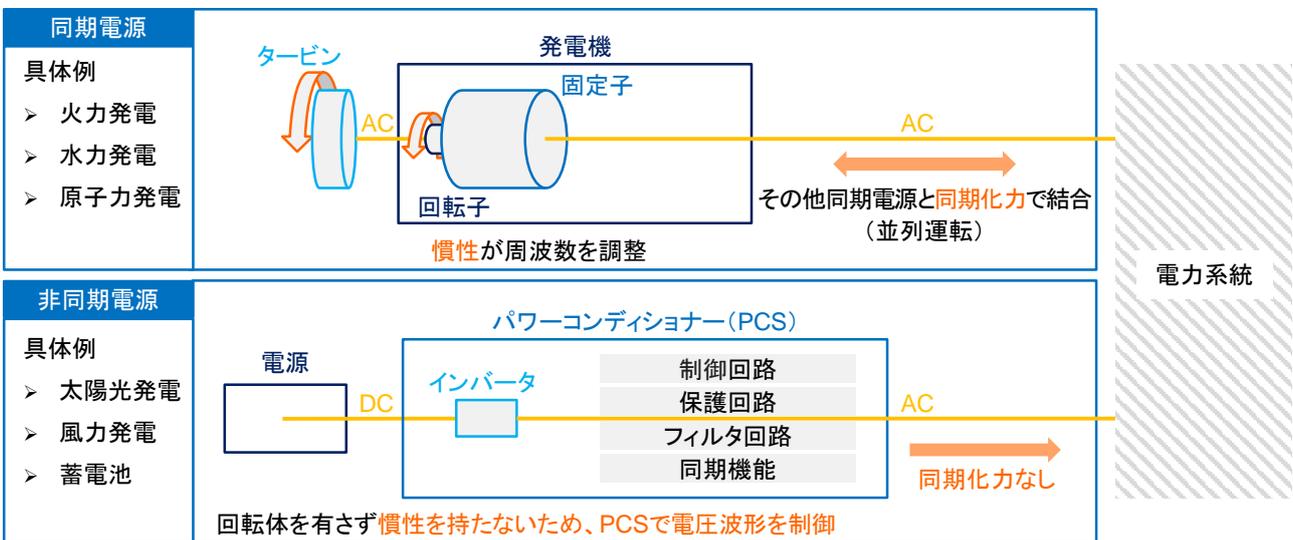
- (備考) 1. 各種資料により日本政策投資銀行作成
 2. オレンジ色が濃い部分ほど調整力の必要性が高いことを示す

(3) 安定供給に貢献する慣性・同期化力の確保

極短時間のフレキシビリティ確保においては、慣性と同期化力が重要となる。慣性とは発電機やモーターといった回転機械が有する運動エネルギーの総量、同期化力は同一の交流系統(同期エリア)内に接続されている発電機が同じ周波数で動作する特性であり、いずれも系統事故時などにおける周波数の急激な変動を抑え、電力系統の安定性確保に大きな役割を果たしている。

火力・水力・原子力発電など回転磁界を用いる電源は同期電源と呼ばれ、他の同期電源と同期化力で結合されることで並列運転を行うほか、回転体が持つ慣性によって電力系統の周波数を維持する。その一方で、VREは直流出力の電力をPCSなどによって交流に変換した上で電力系統に放電する非同期電源であり、慣性や同期化力を有さない(図表1-5)。

図表1-5 同期電源と非同期電源の違い



(備考) 各種資料により日本政策投資銀行作成

VRE比率が40~50%に達すると、電力系統全体として慣性・同期化力が不足する上、PCSの保護機能によって再エネなどの連鎖的な脱落も生じるため、系統の周波数変化率(Rate of Change of Frequency, RoCoF)は上昇する。事故発生時などに周波数が低下限度を超えた場合に一部需要側を切り離す周波数低下リレー(UFR)が作動するが、RoCoFの上昇によってUFRが間に合わない場合には、広域な停電(ブラックアウト)や機器の損傷が発生する(図表1-6)。

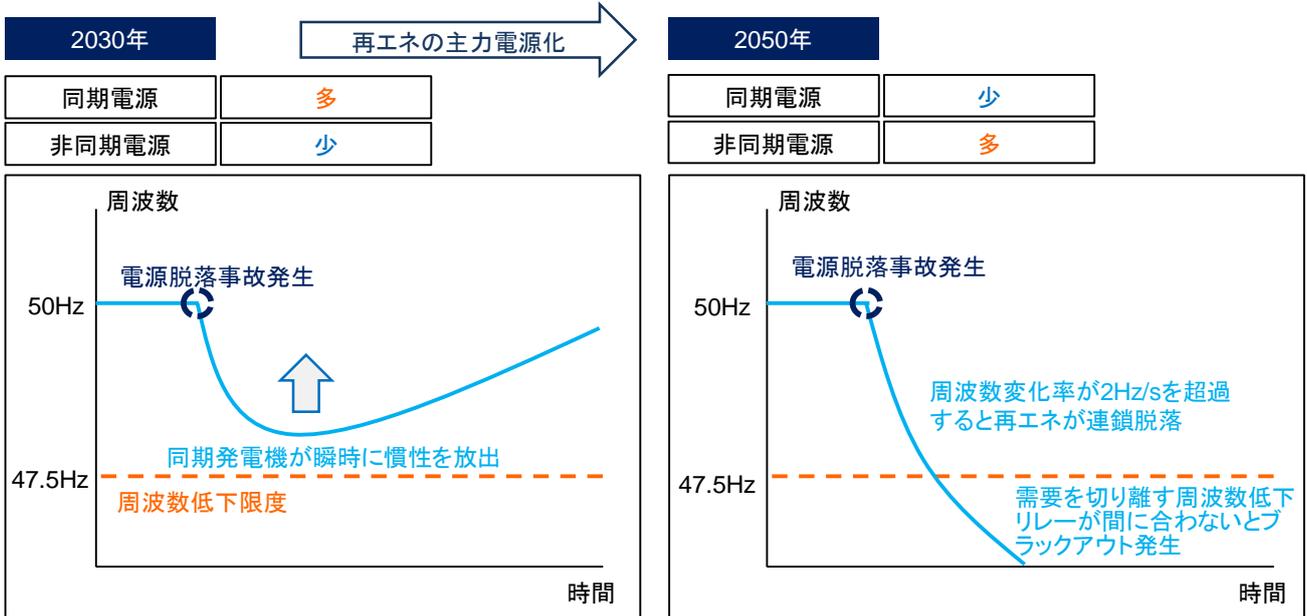
RoCoFが2Hz/sを超過するとブラックアウトの発生確率が高まるとされる中で、第6次エネルギー基本計画で示された30年の電源構成では、RoCoFが2Hz/sを超過するエリアは存在しないと試算される。その一方、OCCTOの広域連系系統のマスタープランにおける50年CN実現を見据えたベースシナリオ²では、東日本エリア・中西日本エリアのRoCoFが2Hz/sを超過する見通しであることから、50年に向けては慣性・同期化力の確保が重要課題となる。

このほかにも、同期電源は短絡発生時に瞬時に高電流(故障電流)を流すため、系統システムが故障箇所を検出できる一方、VREに併設されるPCSは高電流や急激な電流変化に弱い半導体部品を使用しているため故障電流による対応が制限されることから、別途保護リレーシステムの強化などの対応が求められる。

(参考)

2. 政策的議論のもとにCN実現に資する将来電力需要および電源構成などを試算したもの。発電電力量に占める再エネ比率は約5~6割を見込む。マスタープラン内において、主に広域連系系統における電力潮流を分析し、混雑発生箇所を抽出するのに用いられた

図表1-6 慣性不足による安定供給における懸念



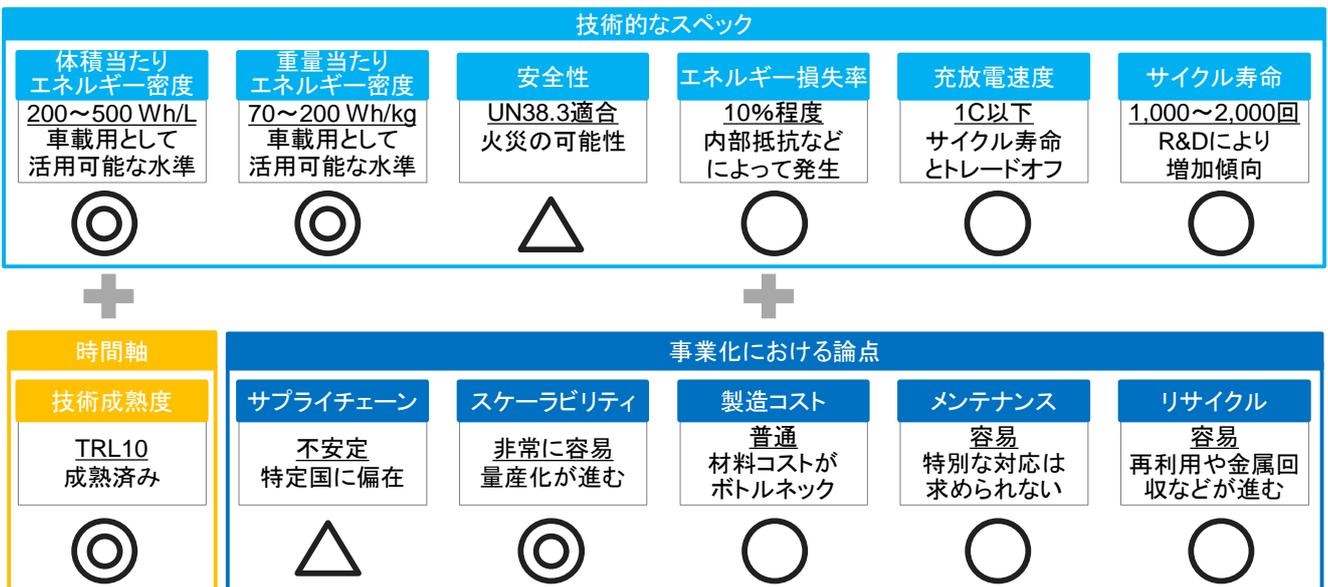
(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

2.2030年における蓄電池への期待と方策

(1) 蓄電池概要と注目技術

CN実現に重要な役割を果たすEVや再エネの導入拡大に向けて、蓄電池市場は足元で急拡大している。蓄電池は使用する素材などの違いにより多くの種類が存在し、実際の導入にあたっては、技術的特徴、成熟度および事業化に向けた論点などを総合的に勘案する必要がある。車載・定置用の領域においては、高いエネルギー密度や長いサイクル寿命といった特長を有し、量産効果による価格低減を実現した三元系リチウムイオン電池(LiB)が主流である。しかし、三元系LiBは希少金属を多く用いているため、サプライチェーンが不安定かつ理論上のコスト削減に限界が存在するほか、電解液が引火性液体であることから、火災発生防止に向けて適切な対応が必要である(図表2-1)。

図表2-1 蓄電池に求められるスペックと三元系LiBの状況



(備考)1. 各種資料により日本政策投資銀行作成

2. その他電池との比較において、非常に優れている点は◎、優れている点は○、課題があると考えられる点は△としている

製造コスト下げ止まりの打破や安全性の向上などを目的として、正極材・負極材などに工夫を凝らしたさまざまな蓄電池の開発が進む(図表2-2)。

図表 2-2 主要な蓄電池の技術成熟度と概要

名称	TRL (2023)	概要
鉛電池	11	正極に酸化鉛、負極に鉛を用いた蓄電池であり、重量当たりのエネルギー密度は低いが、製造コストの安さを生かして定置用などで使用される
ニッケル水素電池	11	正極に水酸化ニッケル、負極に水素吸蔵合金を用いた蓄電池であり、長いサイクル寿命や高速充放電を生かして、HEVやモバイルデバイスなどに広く活用される
リチウムイオン電池 (LiB)	10	正極材料は三元系(NMC)やリン酸鉄リチウム(LFP)などさまざま。LiBは現在主要な電池技術だが、IEAは30年以降は新しい技術に代替される可能性が高いと分析する
ナトリウムイオン電池 (NiB)	8	基本設計はLiBと同様だが、安価に調達できるナトリウムを正極・触媒に用いることが特長。コスト低減が見込まれるものの、急速な充放電が難しいことなどが課題
シリコン含有リチウムイオン電池	6	黒鉛の10倍程度の高いエネルギー密度を有するシリコンを負極に用いたLiB。シリコンの膨張や短いサイクル寿命などが課題
全固体LiB電池	5	電解液の固体化によってエネルギー密度や安全性の大幅な向上が期待される。固体特有の課題があるが、IEAは20年代後半までに市場に導入されると見込む
リチウム硫黄電池 (Li-S電池)	4	安価に調達できる硫黄を正極に用いる蓄電池で、エネルギー密度が高いことが特長。短いサイクル寿命や、硫黄とリチウムによる化合物の発生などが課題
亜鉛酸化マンガン電池	4	安価に調達できる酸化マンガン・亜鉛を用いる蓄電池で、水性電解質による安全性の向上が期待される。低いエネルギー密度や短いサイクル寿命などが課題
カリウムイオン電池	3	リチウム・ナトリウムと同様にアルカリ金属に属するカリウムを用いており、コスト低減が見込まれる。短いサイクル寿命や急速な充放電が難しいことなどが課題
多価イオン電池	2	複数のイオン価数を有するマグネシウム・カルシウム・アルミニウムなどを用いる蓄電池。電解質における安定性と導電性の両立や短いサイクル寿命の克服などが課題

(備考)1. 各種資料により日本政策投資銀行作成

2. TRLとは、IEAが公表している各エネルギー技術の成熟度レベルのこと。数字が大きいほど成熟しており、1~3がコンセプト段階、4~6がプロトタイプ、7,8が実証、9,10が商業稼働、11が成熟の段階にある技術

定置用蓄電池の選択においては、図表2-1で示した評価項目のうち特に①安全性、②技術成熟度、③価格競争力の三つの観点が必要と考えられる。①安全性に関しては、定置用蓄電池が基幹インフラである電力系統に接続する上、住宅地などに隣接する可能性もあるため、火災などの事故発生確率をできる限り低減する必要がある。また②技術成熟度の観点では、30年代の量産化・社会実装を見据えた場合、現時点で実証段階以上(TRL7以上)にあることが望ましい。さらに、普及拡大に向けて重要な要素である③価格競争力は、単純化すれば総コストを総放電量で割ることで算出される均等化蓄電コスト(LCOS)を用いて評価できる(図表2-3)。総コストの低減に向けては安価な原材料の使用やメンテナンス・リサイクルの平易化、総放電量の増加に向けてはサイクル寿命の向上やエネルギー損失率の低下が有効であり、LCOSに与える影響の大きさを踏まえると、特に原材料価格とサイクル寿命に注目して評価すべきといえる。

図表2-3 均等化蓄電コスト(LCOS)の概算方法と影響の大きい項目

$$\text{LCOS} = \frac{\text{製造コスト (円/kWh)} + \text{メンテナンスコスト (円/kWh/年)} \times \text{使用年数 (年)} + \text{設置・廃棄コスト (円/kWh)}}{\text{1サイクル当たりの充放電量} \times \text{エネルギー効率 (\%)} \times \text{サイクル数 (回)}}$$

(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

なお、車載用蓄電池では走行距離向上のために体積および重量当たりのエネルギー密度の高さが求められるが、定置用蓄電池ではこのような高いスペックがあまり要求されないため、コストの重要性がより高い。

これらの観点を総合的に勘案すると、三元系LiB以外では、すでに技術として成熟し、安価なリチウム・鉄・リンを正極材に用いるリン酸鉄リチウムイオン電池(LFP)が注目される。LFPの特長として、サイクル寿命は2,000~4,000回と三元系と比べて長く、希少金属の使用量も限定的で原材料コストも低い点が挙げられる。ただし、安全性については、正極材が三元系に比べて安定的な一方で、電解液には三元系と同様の引火性溶媒が用いられており、LiBにおける安全性に関する課題を完全に払拭できたとはいえない。近年、重量当たりのエネルギー密度が向上したことで、車載用途におけるLFPの利用も増え、国内外メーカー各社の研究開発や量産化を加速していることから、一層の性能向上・コスト削減が期待される。

(2) 普及拡大に向けた取り組みの方向性

日本における定置用蓄電池の普及拡大に向けては、S+3Eの原則や、GX戦略の指針にのっとった対応を検討する必要がある。各技術の中でLFPに関しては、世界全体で用いられるセルの約9割が中国で製造されており、中国企業は技術力・コスト競争力ともに高い水準にある。こうした状況下では、中国製電池の活用も完全には排除し難いものの、エネルギー安全保障や産業競争力強化の観点で可能な限り中国への依存度を引き下げるために、①車載用蓄電池の定置用としての2次利用、②LFP国内製造能力の拡充、③次世代電池の開発・量産化といった取り組みが必要となる。

国内におけるリサイクルシステム確立による①車載用蓄電池の2次利用は、中国依存の低減だけでなく、希少金属の確保や循環経済の促進、製造工程におけるGHG排出量削減などさまざまなメリットが存在する。ただし、日本におけるEV導入拡大のタイミングや平均的なEV使用年数に鑑みると、国内の中古LFP市場は40年以降に立ち上がると考えられ、短期的にはLFPではなく2000年代からハイブリッド車などで使用されているニッケル水素電池の2次利用が現実的である。ニッケル水素電池は電解液が不燃性で安全性が高いため、2次利用にも適した蓄電池といえ、トヨタ自動車やJERAは使用済みニッケル水素電池などを用いた蓄電システムの構築に向けて動きを進める。

②LFPの国内製造に関しては、リチウムなどの資源確保と並行して、蓄電池産業戦略で示された国内基盤拡充のための政策パッケージを活用し、車載用・定置用双方での活用を見据えた国内でのLFPの量産化が期待される。なお、すでにパワーエックスはLFPセルの組み立てを行うモジュール工場を岡山県に建設し、25年半ばから本格的にLFPの出荷を行う見通しである。

③次世代電池の開発・量産化については、20年代後半にトヨタ自動車・日産自動車・ホンダ技研工業・GSユアサなどが高いエネルギー密度や安全性、長いサイクル寿命など優れた特長で主に車載用として注目を集める全固体電池の実用化を行う見通しであり、本技術の定置用としての活用にも期待が集まる。また、需給調整技術全体で一定の国産シェアを確保するという観点では、次章で説明するLDESにおける国産技術の育成も重要である。

3.2050年に向けたLDESへの期待

(1) LDESの概要と注目技術

LDESは、VRE導入率が3割程度(IEAの定義するフェーズ4)を超えたタイミングで必要性が増す技術であり、日本全体としては30年以降に本格的な普及が期待される。LDESは従前から開発・実証・実装が進められてきたものや既存のローテクノロジーを組み合わせることで応用したものが多く、揚水発電を中心として一定程度成熟した技術も多い(図表3-1)。

図表 3-1 主要なLDESの技術成熟度と概要

名称	TRL (2023)	概要
揚水発電 (PSH)	11	すでに広く活用されている技術。下部貯水池の地下化(落差拡大)や海水の活用、小規模なモジュール化などの検討が進む
レドックスフロー電池 (RF電池)	9	電解液をポンプで循環させ、イオンの酸化還元反応によって充放電を行う。バナジウムレドックス電池(VRB)が現在最も成熟
水電解装置・燃料電池	9	水電解装置(SOEC)を用いて電力から水素を製造し、逆反応である燃料電池(SOFC)を用いて水素から電力を生成する
フライホイール蓄電	8	空気摩擦や回転摩擦を最小限に抑え、回転慣性として電気エネルギーを真空中のホイールに蓄える
熔融塩電池 (NAS電池)	8	300~350℃程度の熔融塩を電解液として使用する電池。日本ガイシがナトリウム硫黄電池(NAS電池)を実用化済み
顕熱蓄熱	8	金属・レンガ・熔融塩などの耐火性を有する物質を加熱することでエネルギーを貯蓄
液体空気エネルギー貯蔵 (LAES)	7	極低温(<-196℃)まで圧縮した液体空気を保管することでエネルギーを貯蓄。液体空気を再加熱・膨張させることでタービンを回し発電
重力蓄電	7	コンクリートブロックなどの物体を持ち上げることで、電力を位置エネルギーに変換。揚水発電と原理は同じだが、地理的制約が少ない
潜熱蓄熱	7	特定の温度において、固体・液体・気体の間で状態変化(相変化)する物質の潜熱を利用してエネルギーを貯蔵
鉄空気電池	7	正極に大気中の酸素、負極に鉄を用い、鉄の酸化還元反応によって充放電を行う
圧縮空気蓄電 (CAES)	6	地下空洞などに圧縮した高圧空気を圧入することでエネルギーを貯蔵。LAESと比較してコストは安い、地理的制約が存在

(備考)1. 各種資料により日本政策投資銀行作成

2. 鉄空気電池はIEAがTRLを公表していないため、現状を踏まえて7(実証中)として記載

LDESは多様な方法で電力を貯蔵しており、コストや出力規模・放電時間などが大きく異なるが、技術評価にあたってはLDESも蓄電池と同様に安全性や価格競争力が重要になる。LDESでは技術ごとにエネルギー損失率が大きく異なるが、電力市場価格が安価なタイミングで適切に電力貯蔵がなされれば、エネルギー損失率がLCOSに与える影響は軽微になるため、技術評価にあたってエネルギー損失率を過度に考慮する必要はない。また、日本はLDESの技術開発や導入で先行する米国などと異なり、余剰地や設置適地が少なく、揚水発電や重力蓄電、CAESなど原理的にLCOSが安価になると想定される技術の導入は容易でないため、設置先の柔軟性についても考慮する必要がある。

これらを総合的に勘案し、日本において今後導入が期待される技術として、①レドックスフロー電池(RF電池)、②熔融塩電池(NAS電池)、③蓄熱技術(顕熱・潜熱蓄電)、④鉄空気電池の4技術に注目し次節で取り上げる。ただし、立地制約などによって導入可能な技術は異なること、今後の技術革新や新たなアプローチの登場も期待される分野であることなどから、日本全体としては現時点で特定の技術に絞り込まず多様な選択肢を持つことが求められる。

(2)レドックスフロー電池(RF電池)

RF電池は電解液をポンプで循環させ、イオンの酸化還元反応によって充放電を行う技術であり、実用化されているのは住友電工などが開発するバナジウムRF電池(VRF電池)と呼ばれるバナジウムを電解液として用いたものである。不燃性のバナジウムをはじめ、その他材料も難燃性のものが用いられるため火災発生の可能性が非常に低い点や、電解液は半永久的、製品自体も20年程使用可能である点が特長と

して挙げられる。また、電解液タンクの大きさによって容量を調整できるため、設置先の敷地面積や市場動向を踏まえた柔軟な設備導入が可能な点も強みである。一方で製造コストは現状比較的高いため、LCOS低減に向けて電解液タンク・セルスタックのモジュール化や安価な原材料を用いた電解液の開発に期待が集まる。電解液の見直しについては、希少金属であるバナジウムに代わり、正極負極で異なる元素を用いるチタン-マンガン系や、エネルギー密度も高く、低コストで生成できる有機化合物系が注目される。

(3) 熔融塩電池(NAS電池)

熔融塩電池は高温で熔融した塩を電解質として使用する電池であり、現在商業化ベースで稼働するのは日本ガイシの開発するナトリウム・硫黄電池(NAS電池)のみである。NAS電池はエネルギー密度が高く、導入先における設置面積などの制約を受けづらいほか、正極および負極に希少資源が不要で、サイクル寿命は7,300回程度と蓄電池と比べて長いことから、理論的にはコスト競争力を有すると考えられる。一方で、安全性の観点では、消防法上ナトリウムは禁水性物質、硫黄は可燃性固体に規定されており、危険物取扱者の任命や保有空地の確保などが必要となる。11年には火災事故が発生したが、その後セル間の延焼防止対策などが施されており、また長年にわたる運転実績や各種認証を踏まえれば、安全性は確保されていると考えられる。なお、NAS電池の作動温度は300℃程度であり、待機時には保温電力が必要となるため、充放電頻度を高め、充放電時に発生するジュール熱によって保温電力を低減するなど運用の高度化が一層のLCOS低減に向けた一つの鍵となる。

(4) 蓄熱技術

蓄熱技術は、安全性やLCOSなどの観点で優れる上、電気のみならず熱の供給を行える点からも注目を集める。実際、気候変動の緩和に資する有望スタートアップを選出する「Global Cleantech 100」においても蓄熱関係企業が多く選出されており注目度の高さが伺える。蓄熱技術は物質の温度差を利用した顕熱蓄電、相変化を利用した潜熱蓄電、化学反応や吸着熱を利用した化学蓄電の大きく3種類に分類される(図表3-2)。これらの中では、相対的に技術難易度の低い顕熱発電の開発に取り組む企業が多く見受けられる。

図表 3-2 蓄熱技術の分類

名称	技術概要	概要図(一例)	メリット	デメリット
顕熱蓄電	物質の温度差を利用する技術であり、太陽熱発電で実用化済み		<ul style="list-style-type: none"> シンプルかつ安価な材料で製造可能 すでに商業化 	<ul style="list-style-type: none"> 熱の貯蔵・放出時に熱損失が発生
潜熱蓄電	固体・液体間などの相変化を利用する技術		<ul style="list-style-type: none"> エネルギー密度が高い 熱損失が少なく、熱の長期貯蔵が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 相変化時の形状変化に対応する格納容器などが必要
化学蓄電	物質の化学反応や吸着熱を利用する技術		<ul style="list-style-type: none"> エネルギー密度が最も高い 熱損失が少なく、熱の長期貯蔵が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 安全性の懸念 化学物質の劣化によるサイクル寿命の制限

(備考) 各種資料により日本政策投資銀行作成

日本の消費エネルギーのうち約4割がガスなどを用いた熱供給に使用されており、CN実現に向けた熱の脱炭素化が今後の大きな課題となる。150℃程度の低温域はヒートポンプ(HP)を用いた電化が解決策となる一方で、中高温熱源に関してはいわゆるHard to Abate領域であり、水素・アンモニア・e-メタンに加えて、このような蓄熱技術も有望技術であるといえる。蓄熱技術の場合、再エネ余剰時の電力価格が安価な時間帯に蓄熱を行えば、熱供給で相応のコスト競争力を持ち得ると考えられる。

(5) 鉄空気電池

鉄空気電池は正極に空気中の酸素、負極に鉄を用い、鉄の酸化反応によって充電、還元反応によって放電を行う技術である。構造がシンプルかつ地球上に豊富に存在する鉄を利用するため高いコスト競争力が見込まれる一方で、リチウムなどその他原材料と比べて鉄の電気抵抗が大きい点や、酸化還元反応による電極の劣化がサイクル寿命を短命化させる点などが課題であり、今後の実用化に向けた技術的な進展が期待される。

(6) 普及拡大に向けた取り組みの方向性

既述の通り、日本全体におけるLDESの本格普及は30年以降と想定されるが、九州エリアなどではVRE導入率が急速に高まっている中で、足元から中長期的な目線で開発・実証・実装の実績を積み上げていくことが求められる。LDESは、蓄電池と比べてイニシャルコストが大きい技術や、建設期間が長期にわたり資材費高騰などのリスクを抱える技術も多いため、当面の間は政策的支援が必要となる。

すでに政府はGX経済移行債を活用し、蓄電池だけでなくLDESを含む系統用蓄電システムの導入に関して国庫債務負担金を含め400億円の予算を措置している(図表3-3)が、中長期的なVREの導入率や電力需給ギャップの見通しなどが見極め難い中で、事業者がLDES導入にかかる採算性を予見することは容易ではないため、本補助金の交付対象事業は現状LiB案件が中心である。

図表 3-3 経済産業省の系統用蓄電システム導入支援の概要

	区分	補助率	補助上限 (1申請)	
蓄電システム	LDES導入に関わる設計費・設備費・工事費	2/3以内	20億円	
	車載用蓄電池のリユースによる蓄電施設導入に関わる設計費・設備費・工事費	1/2以内	20億円	
	上記以外の蓄電システム (LiB, NAS電池, RF電池)	定格出力: 1MW以上10MW未満	1/3以内	10億円
		定格出力: 10MW以上	1/2以内	40億円
水電解装置	定格消費電力が250kW以上の水電解装置導入に関わる設計費・設備費・工事費	2/3以内	20億円	

- (備考) 1. 経済産業省「系統用蓄電池など電力貯蔵システム導入支援事業」により日本政策投資銀行作成
 2. 本表におけるLDESとは、6時間以上の充放電が可能であり、国内での商業事例が限定的な新規技術のことであり、すでに商業事例が多く存在するRF電池やNAS電池は該当しない

事業者としては、20年間にわたって容量収入を固定化する長期脱炭素電源オークションの活用も有効だが、23年度入札にかかる制度設計では、「揚水・蓄電池」というカテゴリーで既存のLiBなどと競争する必要がある中、事業報酬が税引前WACC5%で一律であったため、建設期間が長くリスクの大きいLDESは仮に応募しても落札は難しい状況であった。24年度に開催される本オークションの第2回では公募要領

において、「揚水・蓄電池」カテゴリーが運転継続時間6時間未満と6時間以上に区切られたものの、一律の事業報酬設定は不変であるため、LDESの中でも技術成熟度の高い揚水、もしくは蓄電池が有利な状況にある。経済安全保障や技術多様性の観点も踏まえ、導入実績が乏しいLDESの社会実装を行うことが重要であり、リスクに応じた利益率の確保など事業者がLDESの採算性を予測できる制度的枠組みの設立も必要となろう。

また、GX実現の観点では、日本メーカーの国際競争力の向上が期待される。例えば、上記技術のうちレドックスフロー電池では住友電工、NAS電池では日本ガイシが長年にわたって研究開発を行っており、国際比較の観点でも高い技術力を有する。米国・欧州・中国などでも、蓄電池・LDESなど電力貯蔵技術のR&Dや生産・普及拡大に向けた制度設計や補助金・税額控除が多数実施されており、LDESベンチャーによる資金調達や商業プラントの立ち上がりが見られる。日本としても、R&D、実装・量産化の各フェーズで、需要・供給両サイドにわたる補助や制度設計が求められよう。

企業が量産化投資に踏み切り、コスト削減を実現するには、長期的・安定的な需要の確保が必要であり、国内では先に述べた脱炭素電源オークションなどの手当てが重要となるほか、早期の事業化に向けては海外展開も見据えた取り組みが求められる。VRE導入率の想定を踏まえると米国カリフォルニア州・テキサス州や豪州南オーストラリア州などが初期の有望市場と考えられるが、海外展開やそれを見据えた早期の量産化投資については相応のリスクが存在するため、政府間交渉を通じて現地政府・企業との協力を取り付けることや、潜在的ユーザー企業・金融機関などを含めた座組みでの取り組みによってリスクシェアを図ることも一案となろう。

4.2050年に向けた慣性・同期化力確保の必要性

(1) 注目技術

慣性や同期化力の確保に向けても、火力や水力など既存の同期電源のみに頼らない対応を実現すべく、さまざまな技術を用いた検討が進む(図表4)。

図表4 慣性・同期化力を改善する技術の概要

	概要	慣性	同期化力	技術成熟度
同期発電機	火力発電・水力発電などの総称。同期発電機が一定程度発電すれば再エネの出力抑制が発生しやすくなる	○	○	社会実装
同期調相機	無負荷の同期発電機。既存同期発電機は、同期調相機として無負荷で系統接続できるが、保守コストが継続的に発生	○	○	社会実装
MGセット	モーターと同期発電機を組み合わせた技術。追加設備が必要かつ、同期発電機を介することでエネルギー効率が落ちる	○	○	社会実装
フライホイール	真空中で高速回転するディスクを用いたLDES。同様に回転体を用いる揚水・蓄熱なども慣性・同期化力を提供可能	○	○	実証～社会実装
疑似慣性PCS	インバータに同期発電機の動きを再現する制御を組み込み、疑似慣性を提供するPCS	○	○	実証～社会実装
系統増強	系統増強によってインピーダンスが減少すれば同期化力が改善するが、コスト負担が重たく、慣性不足の課題は改善しない	×	○	社会実装
STATCOM	システムの要求に応じて半導体スイッチを用いて無効電力を提供する自動式静止型無効電力補償装置のこと	×	○	社会実装

(備考) 1. 送配電網協議会「同期電源の減少に起因する技術的課題」などにより日本政策投資銀行作成

2. インピーダンスとは、交流系統における抵抗とリアクタンス(コイルやコンデンサによって生じる電流と電圧の位相差)の総称のこと

具体的には、モーター(Motor)と同期発電機(Generator)を組み合わせたMGセット、インバータに同期発電機の動き再現する制御を組み込む疑似慣性PCS、LDESの一種で回転体を有することから慣性・同期化力を提供できるフライホイールのほか、系統増強や半導体スイッチを用いた自励式静止型無効電力補償装置(STATCOM)などが研究されている。NEDOが実施する2022~2026年度を事業期間とした「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた次々世代電力ネットワーク安定化技術開発(STREAMプロジェクト)」では、多くの大学や民間企業が慣性低下に伴う周波数変動対策として疑似慣性PCSとMGセットの開発を行っている。

疑似慣性PCSについては、従来型PCSに機能を追加することで導入可能な電流制御方式(GFL: Grid Following)と、新規導入が必要となる電圧制御方式(GFM: Grid Forming)の2種類が存在する。GFMは、応答速度が瞬時かつオフグリッド運転が可能であり、また高度な慣性応答による復元力も有するなど同期発電機に近い特性を持っており、順次GFLからGFMに移行する必要がある。各種特性やコスト感を踏まえれば疑似慣性PCSとMGセットが注目技術と考えられるが、世界的な需要の拡大によるさらなる技術革新も見込まれる領域であることから、さまざまな技術の活用可能性を検討する必要がある。

(2) 普及拡大に向けた取り組みの方向性

今後、VREの導入拡大が進む中で慣性・同期化力を確実に維持するには、電力系統で遵守すべき一連のルールを網羅したグリッドコードにおける周波数変化の抑制対策義務化、もしくは、調整力市場における慣性や同期化力の調達が必要である。実際、英国では発電システムに最低限の慣性維持を義務付けるほか、北米電力信頼性公社(NERC)はテキサス州を中心としたERCOTや米国北東部などが含まれるNPCCにおける周波数変動対策を要求している。一方で、23年にドイツ連邦ネットワーク庁(BNetzA)は、慣性を提供する事業者に固定プレミアムの支払いを行う形での市場支援型慣性調達モデルについて協議を行っており、豪州で電力市場運営を行うAEMOは、23年に高速周波数応答市場補助サービスを開始している。

日本でも、OCCTOが5段階³に分けてグリッドコードの見直しを進める。30年前後に容量ベースの再エネ比率が50~60%程度に達することを想定し、調整力・慣性や系統の保護・制御に貢献する制度変更を実施する見通しである。具体的には低圧帯に接続される太陽光や風力も含めてRoCoF耐量⁴が定められ、慣性の供給も義務化される予定となっており、数年後の要件化を見据えた技術開発や実証実験などが求められる。

おわりに

日本を含む世界各国では、政策的支援や発電コストの低減を背景にVREの導入が急速に進んでおり、電力系統において昼間の出力抑制や夕方の需給ひっ迫に代表されるさまざまな課題が生じている。今後CN実現に向けて太陽光発電を中心としたVREの導入拡大が見込まれるため、フレキシビリティの確保に向けて今回示した各種技術の開発や社会実装が急がれる。また、VREの導入で日本に先行する米国や中国を中心に、蓄電池やLDESの技術開発並びに量産化に関する競争が激化している状況にあり、日本としても脱炭素分野における産業競争力の強化やエネルギー安全保障の高度化に向けて、官民合わせた導入促進や海外展開に向けた政策支援などの然るべき対応が求められる。

(参考)

3. 具体的には、23年に実施したフェーズ1、25年に実施するフェーズ2、30年を待たずに要件化するフェーズ2⁴、30年前後に行うフェーズ3、現状要件化時期は定めていないフェーズ4と分類が行われている
4. RoCoF耐量: 周波数変化率に対する耐性を示し、周波数が変動した際に安定して運転を続けられるかを示す指標

©Development Bank of Japan Inc.2025

本資料は情報提供のみを目的として作成されたものであり、取引などを勧誘するものではありません。本資料は当行が信頼に足ると判断した情報に基づいて作成されていますが、当行はその正確性・確実性を保証するものではありません。本資料のご利用に際しましては、ご自身のご判断でなされますようお願い致します。本資料は著作物であり、著作権法に基づき保護されています。本資料の全文または一部を転載・複製する際は、著作権者の許諾が必要ですので、当行までご連絡下さい。著作権法の定めに従い引用・転載・複製する際には、必ず、『出所：日本政策投資銀行』と明記して下さい。

お問い合わせ先 株式会社日本政策投資銀行 産業調査部

Tel: 03-3244-1840

e-mail(産業調査部): report@dbj.jp