

【個別報告】 将来の電力システムに向けた制度設計 —フレキシビリティ確保への期待と課題—

電力中央研究所
社会経済研究所
課題統括（電力システム・市場制度）

上席研究員 古澤 健

上席研究員 澤部 まどか

研究報告会2024

2024年11月7日

Ⓡ 電力中央研究所

© CRIEPI 2024



Ⓡ 電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

近年、欧米をはじめ、わが国においても分散型エネルギー資源（DER）によるフレキシビリティの確保が期待されている

欧州および米国では、DERによるフレキシビリティの市場取引に関する制度設計が先行している

わが国の電気事業の市場設計は、現在は欧州型である
今後は同時市場を通じた全体最適を目指す中、
米国型の取引方法も、注視しておく必要がある

DERによるフレキシビリティの確保が期待されるが、その実現のためには、更なる技術革新と制度設計の相互の発展が重要である

© CRIEPI 2024

1

報告内容

1. はじめに：
DERのレジリエンスに期待される役割
2. 欧州のレジリエンス活用に向けた制度設計
3. 米国のレジリエンス活用に向けた制度設計
4. まとめ：海外動向を踏まえた示唆

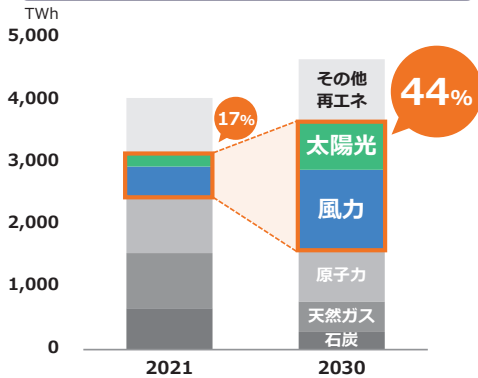
報告内容

1. はじめに：
DERのレジリエンスに期待される役割
2. 欧州のレジリエンス活用に向けた制度設計
3. 米国のレジリエンス活用に向けた制度設計
4. まとめ：海外動向を踏まえた示唆

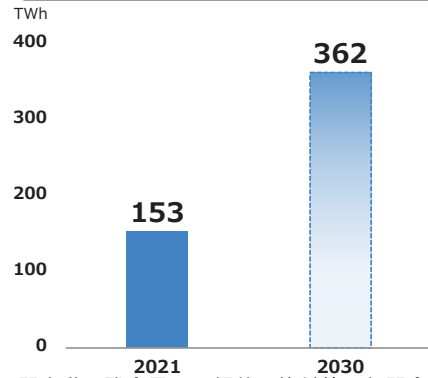
再生可能エネルギー普及に伴う 出力変動への対応の必要性（欧州）

■ 今後の変動性再生可能エネルギー（再エネ）の大量導入に向けて、欧州では、現在の約2倍の出力変動が生じると想定されている

欧州（英国も含む）のエネルギーミックス



出力変動量の規模（日間変動）



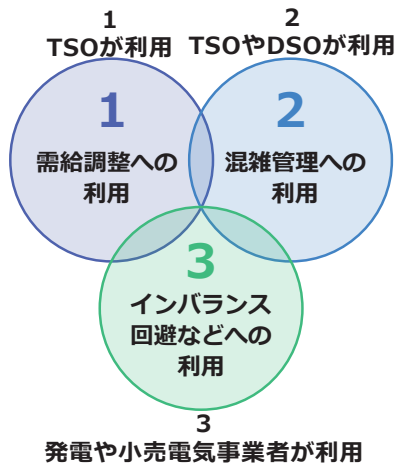
日間変動：残余需要の偏差の絶対値の年間合計量に1/2を乗じた値

※ 左図はIEAのデータベースの“Stated Policies Scenario”の値。
出典：左図 IEA（2023）“World Energy Outlook 2023”、右図ACER（2023）“Flexibility solutions to support a decarbonised and secure EU electricity system”、Ramboll（2023）“Flexibility solutions to support a decarbonised and secure EU electricity system”を参照して、電中研により作成

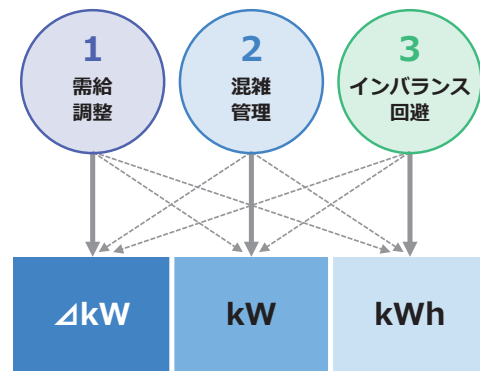
フレキシビリティの利用目的と提供価値

■ 「出力を柔軟に変化させることが可能な能力」であるフレキシビリティは、利用目的により提供する価値が異なる

フレキシビリティの利用目的



フレキシビリティが提供する価値



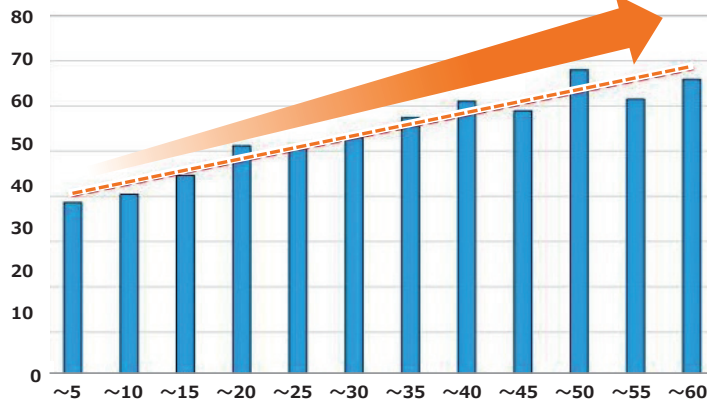
※ TSO（Transmission System Operator、送電系統運用者）DSO（Distribution System Operator、配電系統運用者）の略称を表す

再エネ普及に伴う 調整力確保の必要性（ドイツ）

① ΔkW
② kW
③ kWh

- 再エネの普及により、活用されたΔkWが増加しているとの指摘がある

ΔkWのうち活用された電力量[MWh]



→ 2021年のドイツ全体の15分単位のデータに基づく

※ LFC (Load Frequency Control、負荷周波数制御)、EDC (Economic load Dispatching Control、経済負荷配分) の略称を表す
出典：Ramboll (2023) . "Flexibility solutions to support a decarbonised and secure EU electricity system"

DERのフレキシビリティの活用への期待

① ΔkW
② kW
③ kWh

- DERのフレキシビリティを活用する枠組みがない場合、DERは所有者の便益を優先して運用され、DERが送配電事業にもたらす便益が限定される
- DERの確保と活用に関する制度設計で、活用されるフレキシビリティが増加し、DER所有者と送配電事業者の便益が調和することが期待される

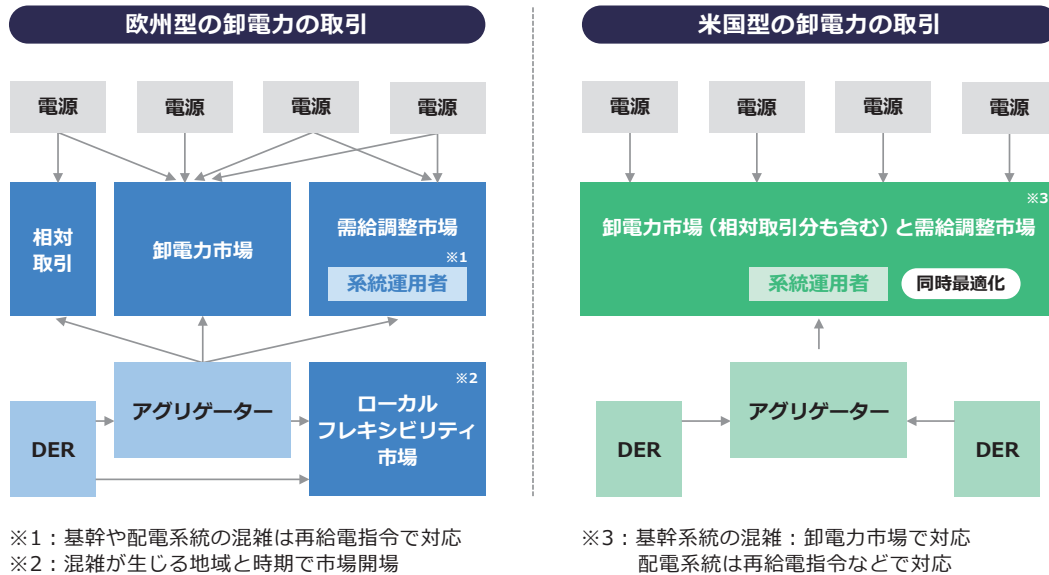


出典：IEA (2022) . "Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources"等を参照して、電力中央研究所にて作成

卸電力の取引の仕組み（欧州と米国）



■ DERによるフレキシビリティを取引する仕組みが、欧州と米国で異なる



報告内容

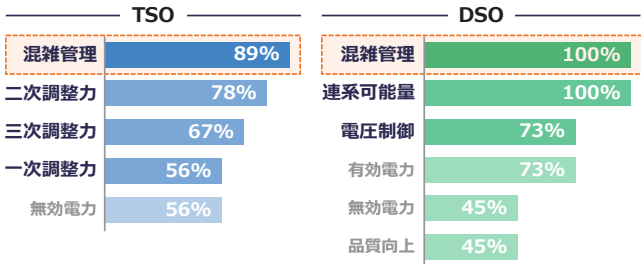
1. はじめに：
DERのフレキシビリティに期待される役割
2. 欧州のフレキシビリティ活用に向けた制度設計
3. 米国のフレキシビリティ活用に向けた制度設計
4. まとめ：海外動向を踏まえた示唆

フレキシビリティの活用への期待（欧州）



■ TSOやDSOが関与する実証プロジェクトで、混雑管理に関するサービスへの期待が最も大きい。DSOは確保手段として市場他複数の手段に期待している

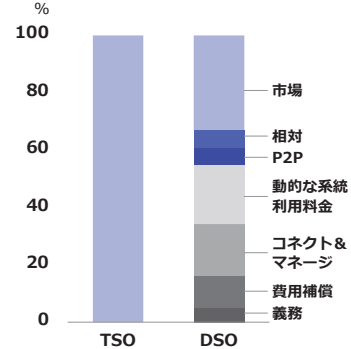
フレキシビリティへの期待 2019年アンケート



→ TSOは、需給調整に関するサービスも期待
→ DSOは、連系可能量や電圧制御に関するサービスも期待

※ TSOは主に220 kV以上、DSOは主に132kV以下を運用する。
出典：Bridge（2019），“TSO-DSO coordination,” Bridge regulation WG and Data management WGを参照して、電中研により作成

フレキシビリティの確保手段 2023年アンケート



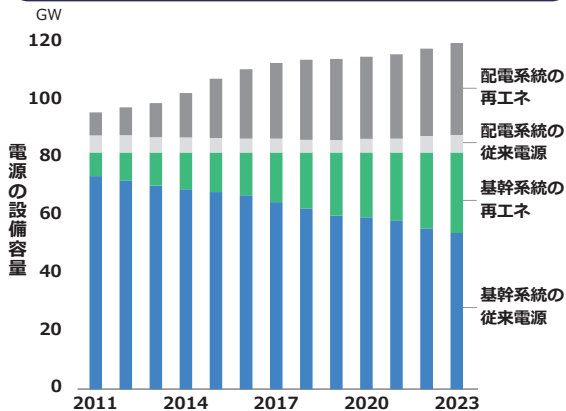
出典：Bridge（2023），“annual report 2022,” Bridge regulation WG

再エネの普及に伴う 電源構成の変化（英国）

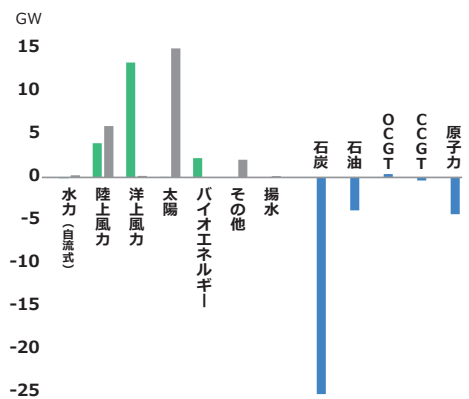


■ 英国でも再エネの普及が進む一方、火力等の出力調整可能な従来電源が減少し、システムの安定的な運用のためにフレキシビリティの確保が求められている

英国の電源構成の推移



「2023年の容量」-「2011年の容量」



出典：Digest of UK Energy Statistics（DUKES）（2024），“plant installed capacity, by connection, United Kingdom”を参照して、電力中央研究所にて作成

ローカルフレキシビリティの市場（英国）



- 英国のDSOは、主に混雑解消目的で、DERのフレキシビリティの市場取引を2019年に開始した。ただし、募集頻度は年2回程度である

英国のDSOにおけるローカルフレキシビリティ市場の取引例

取引される商品の種類		Sustain (計画的な混雑解消)	Secure (故障発生前の予防策としての混雑解消)	Dynamic (故障発生後の混雑解消)	Restore (故障発生後の供給支障からの回復)
価格例 (2023年の容量加重平均値)	契約単価	—	£ 75/MW/h	£ 16.9/MW/h	—
	活用単価	£ 194.7/MWh	£ 105/MWh	£ 1,014/MWh	£ 1,200/MWh

出典：NGED(2024). "Distribution Flexibility Services Procurement Reports", May 2024

→ 市場で取り扱うために、活用する目的に応じた商品の種類を選定

→ 市場に入札を促すような価格水準の設定

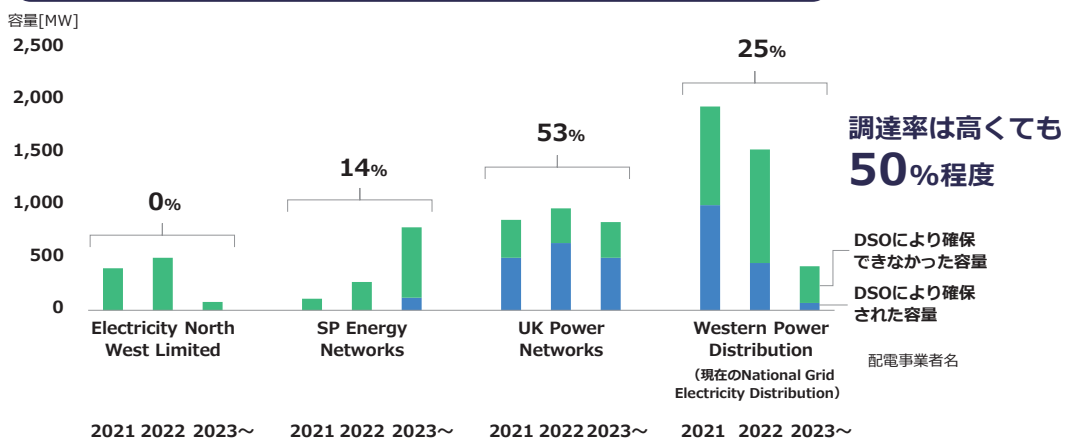
【参考価格】卸電力市場の単純年間平均単価：£ 126.82/MWh（2023年）

ローカルフレキシビリティ市場の調達の動向（英国）



- 英国のDSOが取引するローカルフレキシビリティ市場では、配電事業者により異なるが、募集量に対する調達率が高くて50%程度となっている

2021年度以降の調達率



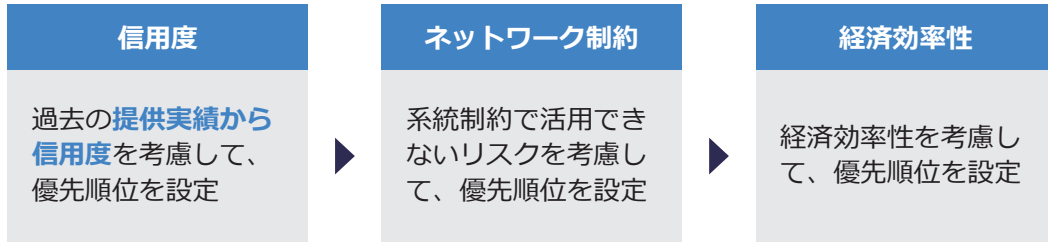
出典：OXEA（2023）. "Review of Scottish Power Energy Networks' uptake of flexibility services", April 2023

DERの活用に向けた優先順位の設定 (英国)



- DERのフレキシビリティの「提供信用度」、「系統制約での活用可能性」、「経済効率性」を英国のDSOは考慮し、活用の優先順位を設定している

英国のDSOにおけるフレキシビリティの活用に関する考え方



優先順位は、一か月前、前日、当日に更新している

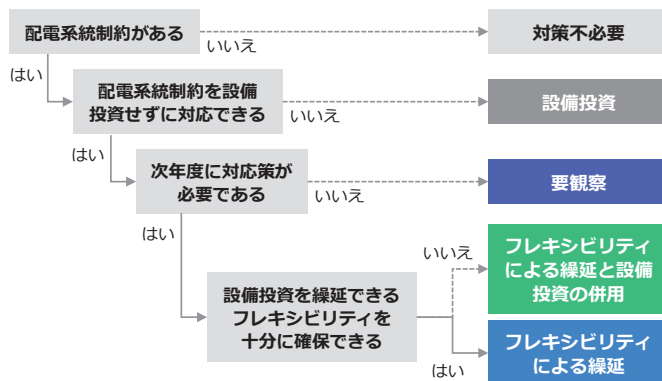
出典：SSEN distribution (2024) . "Operational decision-making"

設備投資の繰延策としての DERのフレキシビリティの活用 (英国)

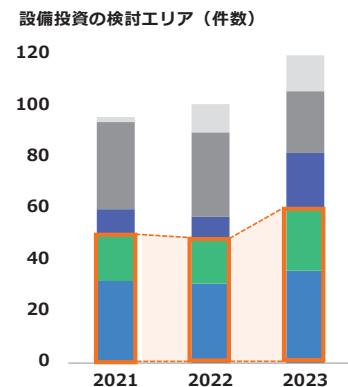


- DSOは、再エネなどによる系統制約への対応策として、従来の設備投資に加え、DERのフレキシビリティによる繰延を、選択肢として検討しはじめた

フレキシビリティを活用した設備投資繰延策



National Grid Electricity Distributionの例



設備投資の検討エリアに対して、「フレキシビリティによる繰延」や「設備投資」の選択は毎年変化する

出典：WPD (2022) . "Distribution Network Options Assessment", NGED (2023) . "Distribution Network Options Assessment"

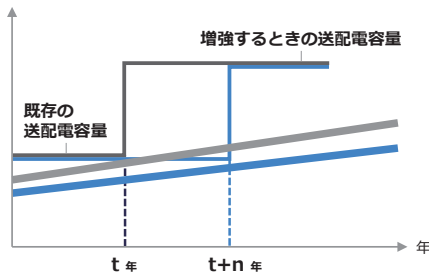
(参考) 送配電投資の繰延価値



- 再エネの大量導入による送配電投資の増加は、欧米などでも指摘されており、DERのフレキシビリティを活用した設備投資の繰延価値も検討されている

地域の最大潮流・送配電設備容量

- DA: DERのフレキシビリティを活用しないときの最大潮流
- DB: DERのフレキシビリティを活用するときの最大潮流

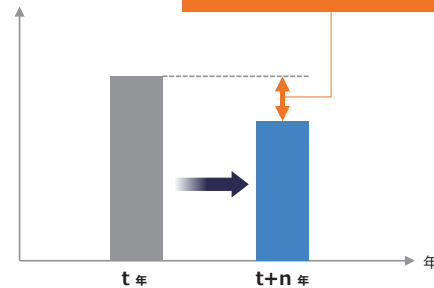


出典：澤部、服部（2021）。「米国における送配電事業の投資動向と投資抑制策に関する考察」, 電力中央研究所報告 SE21003.

送配電投資額

投資の繰延価値

(t年とt+n年の投資の現在価値の差)



小括：欧州のフレキシビリティ活用に向けた制度設計

混雑管理における利用

欧州では、DERのフレキシビリティを混雑管理に利用することが期待されている

ローカルフレキシビリティ市場における商品と価格

英国でDERのフレキシビリティを取引するローカルフレキシビリティ市場では、取引を活性化させるために以下の制度設計を実施

- DERのフレキシビリティを入札する目的に応じた商品を設定
- 取引開始時には入札を促すために、高価格でDERのフレキシビリティを確保する仕組みを設定

DERのフレキシビリティによる配電投資の繰延

DSOは再エネなどによる系統制約への対応策として、従来からの設備投資に加え、DERのフレキシビリティによる繰延を選択肢として検討しはじめた

報告内容

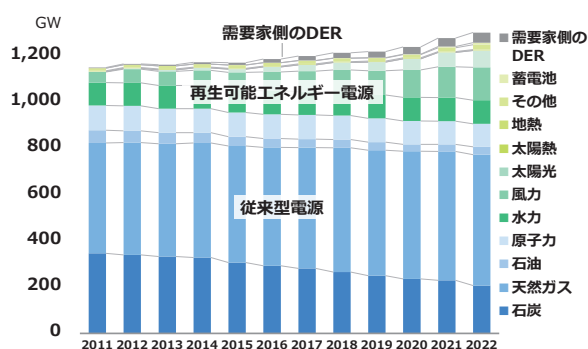
1. はじめに：
DERのフレキシビリティに期待される役割
2. 欧州のフレキシビリティ活用に向けた制度設計
3. 米国のフレキシビリティ活用に向けた制度設計
4. まとめ：海外動向を踏まえた示唆

3. 米国のフレキシビリティ活用に向けた制度設計

再エネの普及に伴う電源構成の変化（米国）

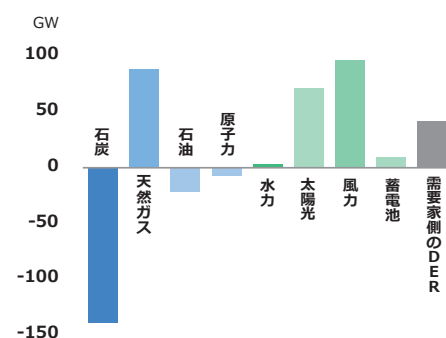
- 米国でも、フレキシビリティとして活用してきた大型の火力発電所の廃止が進む一方で、需要家所有の小規模なDERの導入が、年々増加する傾向にある
- 卸電力市場および系統の運用において、DERを活用する必要性が高まっている

米国の電源構成の推移



出典：EIA 860（各年）、EIA861（各年）を参照して、電力中央研究所にて作成

「2023年の容量」-「2011年の容量」



ISO/RTOにおいてDERを市場取引する背景（米国）



- 米国では、計算速度や通信機器の発展も背景に、DERをISO/RTOが運営する市場で取引する可能性が検討されている
- ISO/RTOにとって、DERの可視性が向上すれば、DERを活用しやすくなると期待されている

DERの可視性と制御性が課題



- ・ ISO/RTOは、系統の潮流に影響を与える可能性のある配電に接続するDERの把握が困難



- ・ 地域の最大潮流を制御するために、DERを活用せず、送配電投資が増加する

※1 ISOはIndependent System Operator、独立系統運用者、RTOはRegional Transmission Organization、地域送電機関の略称を表す。
 ※2 「可視性」はDERの場所と出力を把握する状態を表す。

DERの可視性と制御性が向上



- ・ ISO/RTOは、系統の潮流に影響を与える可能性のある配電に接続するDERの把握が可能

ISO/RTOにおけるDERの市場取引

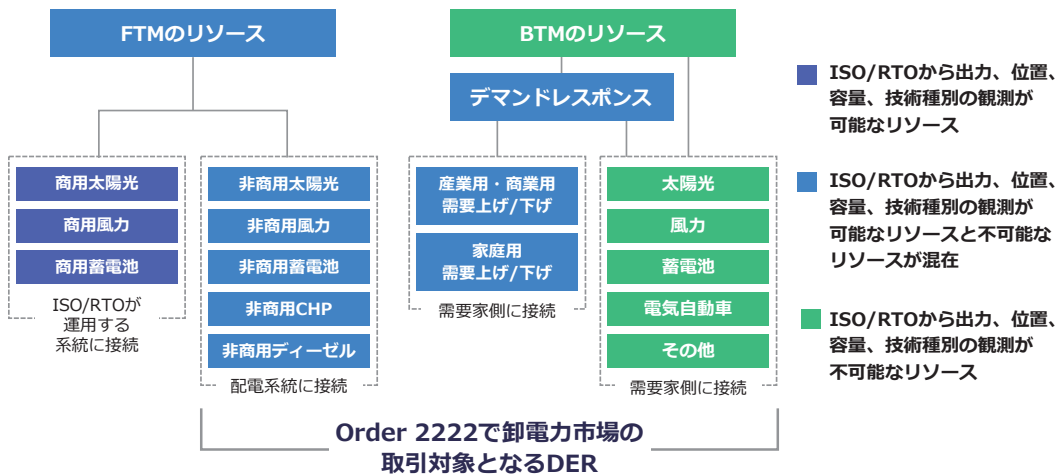


- ・ 地域の最大潮流をDERで制御し、送配電投資を抑制する

市場取引の対象になるDER（米国）



- 米国では、エネルギー規制当局が2020年にOrder2222をISO/RTOに発令し、2026年以降を目途に、小規模なDERを取引する方針を示している



- ISO/RTOから出力、位置、容量、技術種別の観測が可能なリソース

- ISO/RTOから出力、位置、容量、技術種別の観測が可能なリソースと不可能なリソースが混在

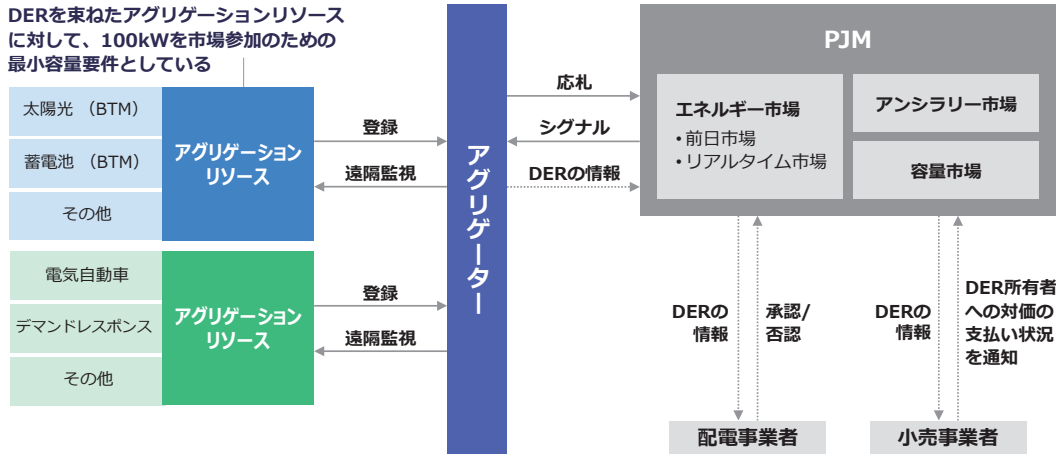
- ISO/RTOから出力、位置、容量、技術種別の観測が不可能なリソース

※:BTMはBehind The Meter、FTMはFront of The Meterの略称を表す。
 出典：澤部、古澤：「米国におけるDERの活用拡大に向けた卸電力市場の制度設計の課題」, 電力中央研究所報告 SE22004 (2023) .

DERの卸電力市場における取引（米国）



- 米国のISO/RTOは、DERも卸電力市場にて取引対象とするルールの方策を進めているが、アグリゲーターや配電事業者などの利害関係者との調整が求められている



出典：澤部、古澤：「米国におけるDERの活用拡大に向けた卸電力市場の制度設計の課題」, 電力中央研究所報告 SE22004 (2023)

アグリゲーションの地理的参加要件と送配電網の混雑管理（米国）



- 米国では、混雑管理の計算量を増加させないため、アグリゲーションリソースの集約範囲（地理的参加要件）を予め設けている
 - PJMは、各ノードに集約範囲を設定した
- リソースの作りやすさに影響を与えることにも配慮しながら、地理的参加要件の詳細設計を進める必要がある



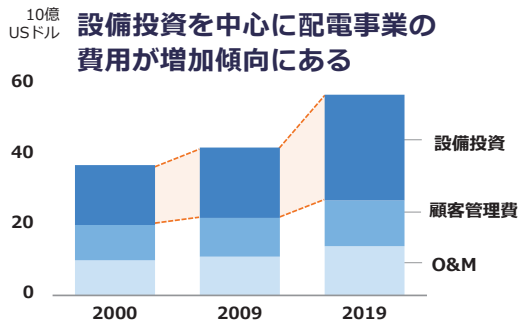
出典：澤部、古澤：「米国におけるDERの活用拡大に向けた卸電力市場の制度設計の課題」, 電力中央研究所報告 SE22004 (2023)

DERのフレキシビリティの 活用による配電投資の繰延（米国）



- 配電投資の増加が予想される中、米国でも、DERのフレキシビリティの活用による投資の繰延を検討している
- 実際に繰延策としてDERの活用可能なエリアについて、配電事業者は、技術等の信用度の観点から精査している

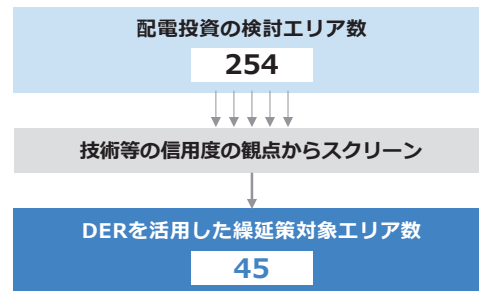
米国の配電事業の費用構造



出典：左図 IEA（2021），“Today in Energy” 2021年5月27日時点、右図 PG&E（2021），“PG&E'S 2021 Distribution Deferral Opportunity Report”。

DERの精査プロセス

カリフォルニアPG&Eの例



小括：米国のフレキシビリティの活用に向けた制度設計

DERを市場取引する背景：

米国では、需要家所有のDERの導入が、年々増加する傾向にあり、かつ計算力や通信技術の発展もあり、全体最適を目指す卸電力市場にDERを統合する必要性や意義があると考えられた

混雑管理とアグリゲーション活用の関係：

米国では、2026年以降を目途にDERを取引する方針が示されている

- PJMでは、混雑管理の計算量を増加させないため、アグリゲーションリソースの地理的参加要件を設けたが、リソースの作りやすさに影響を与えることにも配慮する必要がある

DERの信用度等の精査プロセスの構築：

米国でも配電投資の繰延を検討しており、DERのフレキシビリティの活用に向け、技術等の信用度の観点から精査プロセスを構築している

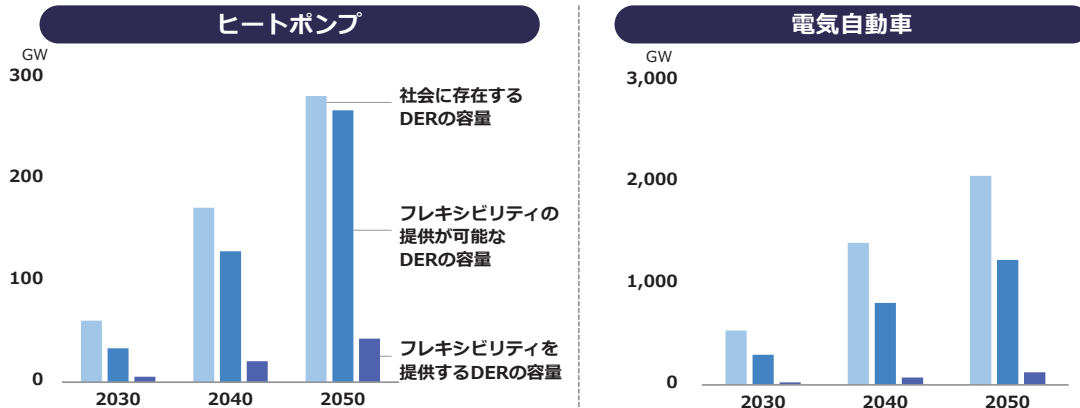
報告内容

1. はじめに：
DERのフレキシビリティに期待される役割
2. 欧州のフレキシビリティ活用に向けた制度設計
3. 米国のフレキシビリティ活用に向けた制度設計
4. まとめ：海外動向を踏まえた示唆

DERによるフレキシビリティの提供に関する見込み（欧州）



■ 欧州では、今後もヒートポンプや電気自動車等のDERの普及が期待されるが、フレキシビリティを提供する容量は、現在のところ、限定的と見込まれている



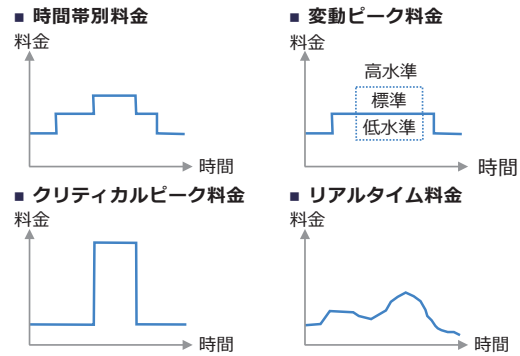
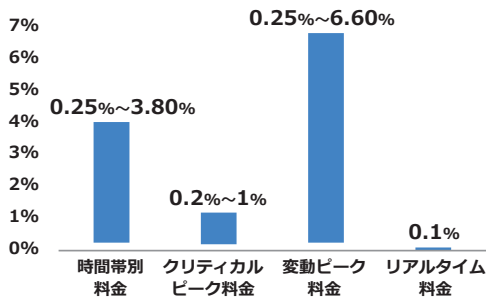
※1：図は2022年に示されたREPower EUによる変動性再生可能エネルギーおよび分散型エネルギー資源の導入促進を仮定している。
 ※2：「フレキシビリティの提供が可能なDERの容量」は通信器や自動制御機能などを備えたDERの容量、「フレキシビリティを提供するDERの容量」は市場の価格シグナル等に反応してフレキシビリティを提供するDERの容量を表す。
 出典：Eurelectric（2023）、「Decarbonisation Speedways」等を参照して、電力中央研究所にて作成

DERによるフレキシビリティの提供に関する見込み（米国）



- 米国では、料金によるデマンドレスポンスの活用可能性について実証試験を行っている
- フレキシビリティを提供した割合は、負荷全体に対して、高くても6%程度と限定的である

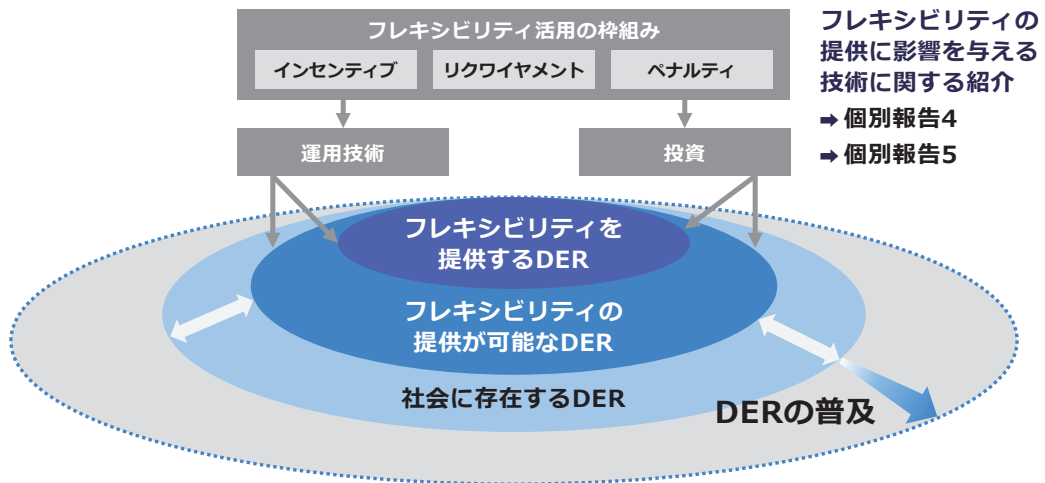
DRの料金体系別のポテンシャル（例）



※左図の縦軸は実証試験において、負荷全体に対して、実際にフレキシビリティを提供した割合を示している
 出典：Lawrence Berkeley National Laboratory（2023）. “The use of price-based demand response as a resource in electricity system planning” を参照して、電力中央研究所にて作成

フレキシビリティを提供するDERの拡大に向けて

- 今後も、適切なインセンティブ(報酬)、リクワイヤメント、およびペナルティを通じて、フレキシビリティの増加に向けた技術開発や投資が促されることが期待される



フレキシビリティ活用に向けた施策の論点

欧州および米国では、DERをフレキシビリティとして活用するための市場の制度設計が進展

- 欧州：ローカルフレキシビリティ市場の創設
- 米国：卸電力市場への統合

DERのフレキシビリティを送配電投資の繰延策として活用する場合、**システムの混雑管理の計算量の観点からアグリゲーションリソースの地理的な集約範囲を検討することが重要**

- DERの信用度等の精査プロセスの検討も必要

欧米では、フレキシビリティとして活用する制度設計が先行しているが、現時点では、**社会に存在するDERのうち、フレキシビリティを提供する規模は限定的な状況**

DERの活用に向けて、制度設計と技術革新の相互の発展が重要

ご清聴ありがとうございました

RI 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

参考文献 (1/2)

1. IEA : World Energy Outlook 2023 (2023).
2. ACER : Flexibility solutions to support a decarbonised and secure EU electricity system (2023).
3. Ramboll : Flexibility solutions to support a decarbonised and secure EU electricity system (2023).
4. IEA : Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources (2022).
5. Bridge : TSO-DSO coordination, Bridge regulation WG and Data management WG (2019).
6. Bridge : Annual report 2022, Bridge regulation WG (2023).
7. Digest of UK Energy Statistics (DUKES) : Plant installed capacity, by connection, United Kingdom (2024).
8. NGED : Distribution Flexibility Services Procurement Reports, May (2024).
9. OXEA : Review of Scottish Power Energy Networks' uptake of flexibility services, April (2023).
10. SSEN distribution : Operational decision-making (2024).
11. WPD : Distribution Network Options Assessment (2022).
12. NGED : Distribution Network Options Assessment (2023).
13. 澤部・服部 : 米国における送配電事業の投資動向と投資抑制策に関する考察, 電力中央研究所報告 SE21003 (2021).

参考文献 (2/2)

14. U. S. Energy Information Administration : EIA-860 (各年).
15. U. S. Energy Information Administration : EIA-861 (各年).
16. 澤部・古澤 : 米国におけるDERの活用拡大に向けた卸電力市場の制度設計の課題, 電力中央研究所報告 SE22004 (2023).
17. IEA : Today in Energy 2021年5月27日時点 (2021).
18. PG&E : PG&E'S 2021 Distribution Deferral Opportunity Report (2021).
19. Eurelectric : Decarbonisation Speedways (2023).
20. Lawrence Berkeley National Laboratory : The use of price-based demand response as a resource in electricity system planning (2023).

