

電源別発電コスト評価について

令和6年7月22日

立命館アジア太平洋大学/日本エネルギー経済研究所

松尾 雄司

電源別発電単価（均等化発電原価：LCOE）評価の基本的な考え方

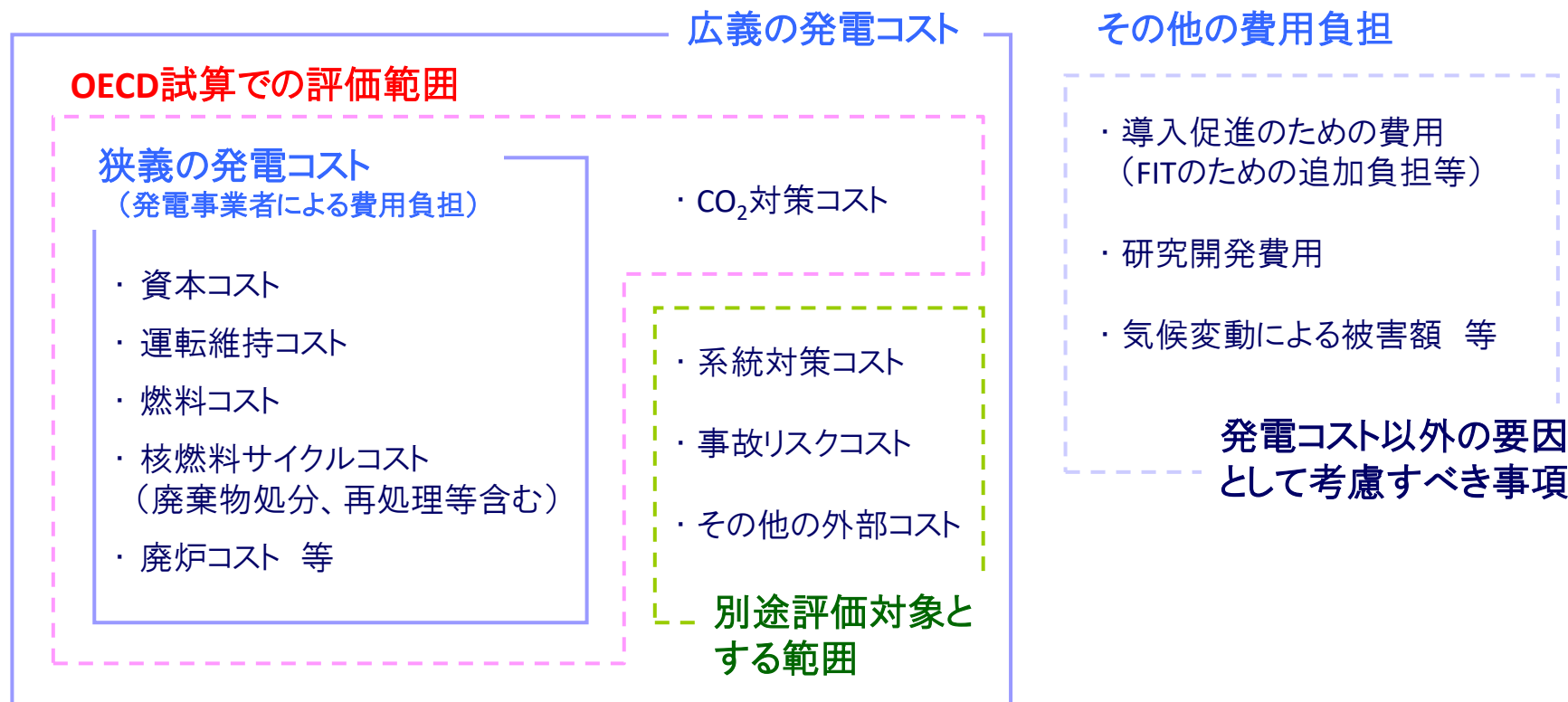
※ 基本的な考え方について、前回から大きく変えるべき点はないものと理解。

- **各種の技術自体のパフォーマンスを評価。**
 - 火力発電の効率等、技術データを正確に設定する。
 - 社会的、政策的、法的な要因等については別途の考慮とする。
- **各電源の稼働年数や設備利用率は、通常の運転で可能な最大値とする。**
 - 太陽光や風力等、自然条件によって設備利用率の最大値が決まる場合にはその値を用いる。
 - 天然ガス火力等、低い設備利用率で運転されることが多い電源は、あくまでも参考まで、その低い値を用いた計算を行うこともある。

前提条件例（OECD/NEA, IEA, “Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition”）

	石炭火力	天然ガス 火力	原子力	水力	風力	太陽光
稼働年数	40年	30年	60年	80年	25年	25年
設備利用率	85%	85%/30%	85%	（国ごとに設定）		
廃止措置費用 （建設費に対する比）	5%	5%	15%	5%	5%	5%

コスト評価の範囲（OECD/NEA, IEA）



- 基本的に「狭義の発電コスト」、即ち電気事業者の費用負担分に相当するものを対象として評価。但し例外として、より広義の発電コストのうちCO₂対策コストのみ加算されている（2020年試算では30ドル/tCO₂）。
- その他の「広義の発電コスト」（外部コスト・系統対策コスト等）については、別途詳細に評価することを想定（OECD内外の諸機関等において評価を実施）。
- 技術以外の要因（社会的・政策的等）によって変動する費用負担は、「発電コスト」の評価の対象外と位置付けられる。

発電コストの評価にあたって考慮すべき点

評価の公平性・網羅性

- 再生可能エネルギーのコスト低下や原子力の追加的安全対策費用など最新の状況を十分に踏まえた上で、**新たなデータのもとに、全ての電源について偏ることなく**評価を行うべき。
- 今後のエネルギーミックスを考える上で重要となる**新たな技術について評価**することも有用。

LCOE評価の範囲

- 基本的に電気事業者の費用負担分に相当するものを対象**として評価。但し例外として、それ以外のもののうちCO₂対策コストのみ加算されることが多い。
- 本来は発電量に応じて変化する費用、即ち「分母（発電量）が大きくなると分子（費用）も大きくなる」ような費用のみをLCOE評価の対象とすべき。

システムコストの評価

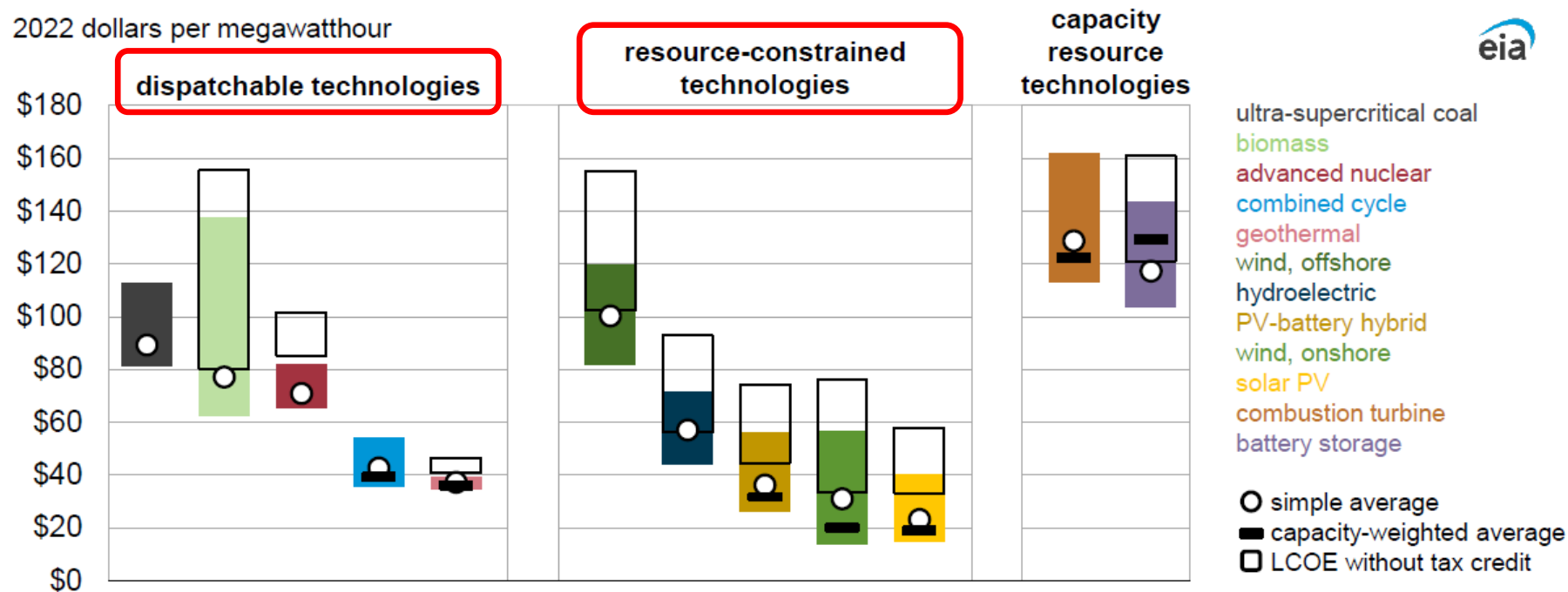
- 変動性再生可能エネルギー（VRE）の大量導入に伴い、電源単体のLCOEのみではなく、**電力システム全体にかかる費用**に関する評価が重要となる。
- 但し、その前提としてまずはLCOEの評価を正しく行うことは必要。

結果の示し方

- 各電源の経済性が**前提条件の違いによってどのように変化するか**、また（必ずしもLCOEのみで表されない）**どのような特性を有するか**を示すことも重要。

LCOEの示し方：米国EIA

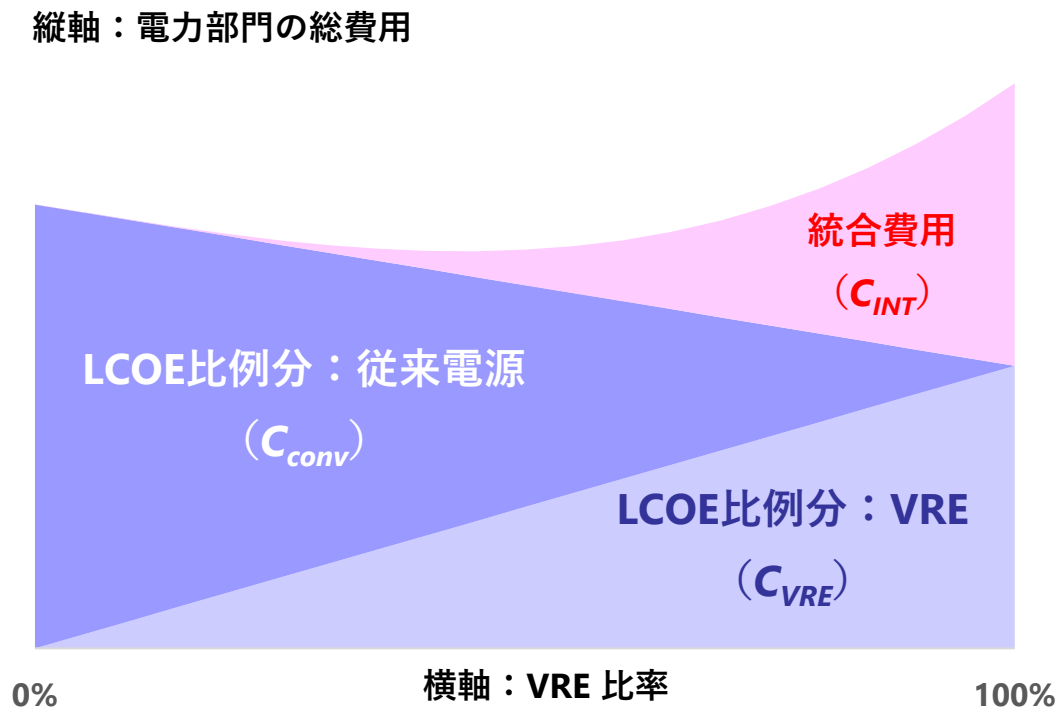
(出所) U.S.EIA, "Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2023."



Data source: U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2023

- 米国エネルギー省・エネルギー情報局（EIA）によるコスト評価では、LCOEの他に後述の Levelized Avoided Cost of Electricity（LACE）を用いて電源の経済性を評価。
- LCOEについては上図のように「**負荷配分可能（Dispatchable）な技術**」と「**資源制約のある（Resource-constrained）技術**」とに分け、**エネルギーミックスの中での役割の違いをより明確に示している。**

VRE大量導入時の統合費用の概念



- 従来電源のLCOEよりもVREのLCOEの方が安くなった場合、LCOEに比例する費用（従来の発電コスト：図中 $C_{conv}+C_{VRE}$ ）のみで比較すると、VRE導入比率が高くなるほど総費用は小さくなる。
- 但し実際には、VREの大量導入に伴い出力抑制や蓄電システムの設置、グリッドの増強などに係る追加的な費用が発生する。LCOE分以外の追加費用（何に起因するものであれ、全て含めたもの：図中 C_{INT} に相当）を、VRE大量導入に係る**統合費用（Integration cost）**と呼ぶ。

システムコストを考慮した評価指標 (1)

1) 統合費用 (Integration cost, System cost)

電力部門の総費用からLCOE比例分を差し引いたもの。各地域につき多数の評価例あり。

2) System value

IEAによる概念（例えば“Next generation wind and solar power” (2016)）。

3) Value-adjusted LCOE (VALCOE)

IEAによる限界電源別費用の評価指標。LCOEを市場価値で補正することによって算出。

4) Levelized avoided cost of electricity (LACE)

米国エネルギー省（DOE/EIA）による指標。Annual Energy Outlookで用いられている。

5) Enhanced levelized cost/Wider system impact

英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）による評価指標。限界電源別費用。

6) Marginal system LCOE (Ueckerdt et al., 2013; Reichenberg et al., 2018)

限界電源別費用。2技術系にのみ適用される。

システムコストを考慮した評価指標 (2)

7) System LCOE (Hirth et al., 2016)

限界電源別費用。電源の価値単価と需要の価値単価の差をLCOEに加算して推計。

8) Total system cost (Bongers et al., 2021)

電力システムの総費用。

9) 相対限界System LCOE (Matsuo and Komiyama, 2021; Matsuo, 2022)

限界電源別費用。

10) 平均System LCOE (Matsuo and Komiyama, 2021; Matsuo, 2022)

平均電源別費用。

11) Levelized full system costs of electricity (LFSCOPE) (Idel, 2022)

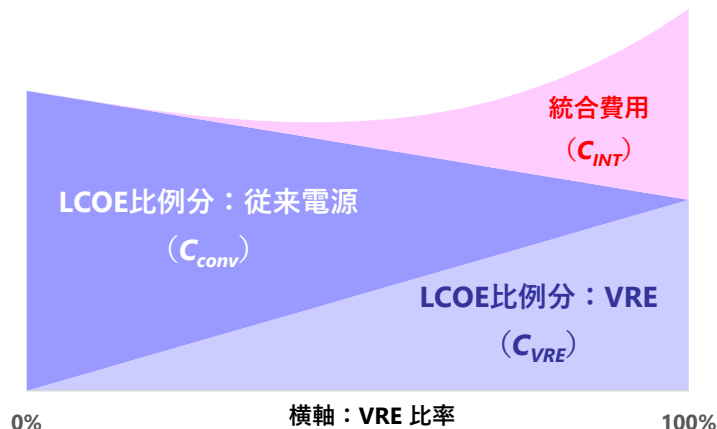
単一電源のみの仮想的なシステム内において各電源の費用を推計したもの。

システムコストを考慮した評価指標の類型 (1)

電力部門の総費用・統合費用 (1, 8など)

- 右図の赤い部分 (C_{INT}) を直接評価しようとするもの。
- 既存の多くの研究において様々な方法で試みられており、政策立案上非常に重要。
- あるシステムにおいて**エネルギーミックスが決まった場合、 C_{INT} が一意に定まる。**
- 電源別の経済性は評価できない。**

縦軸：電力部門の総費用



平均電源別費用 (10など)

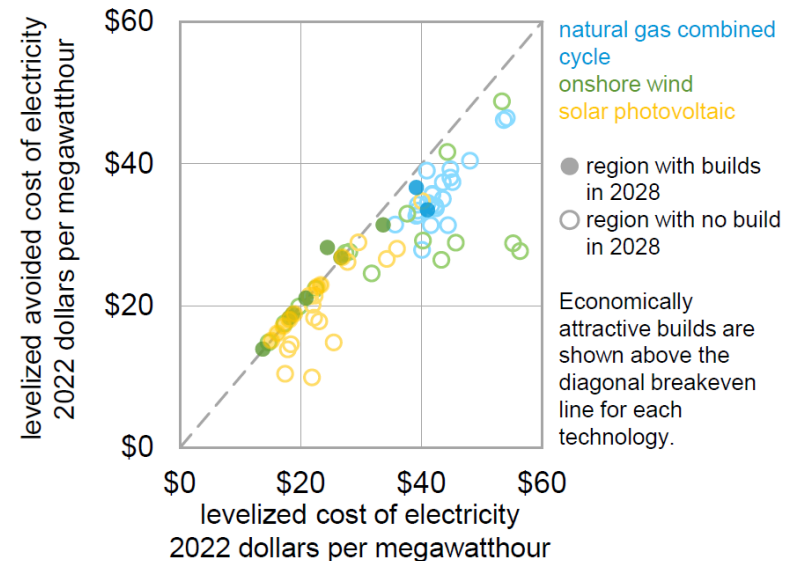
- 何らかの方法により**図の C_{INT} を電源別に切り分け**、その値を発電量で除することにより、各電源にかかる平均的な統合費用を評価するもの。
- 例えば太陽光発電の場合、導入が進むにつれて、加速度的にバッテリー等の導入が必要となる。そのバッテリー等の費用を、それまでに導入された全ての太陽光発電設備に均等に割り振るイメージ。

システムコストを考慮した評価指標の類型 (2)

(出所) U.S.EIA, "Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2023."

コストと価値の比較 (4など)

- あるエネルギーミックスの中で、コスト (LCOE) と比較可能な形で**電源の価値を評価**する (たとえば米EIAによるLACE)。
- もし価値がコストを上回るなら、その電源を更に追加することが経済合理的であり得る。逆に下回るのであれば、経済合理性はない。



縦軸：価値 (LACE)、横軸：コスト (LCOE)

限界電源別費用 (3, 5, 7, 9など)

- あるエネルギーミックスの中で、**当該電源の発電量を微少量増加させたときに、電力部門の総費用がどの程度増減するか**を評価し、それによってそのエネルギーミックスの中での各電源の経済性を評価するもの。
- 例えば、太陽光発電設備を新たに導入することによって必要となったバッテリーの費用を、導入された設備分のみによる発電量で割るイメージ。

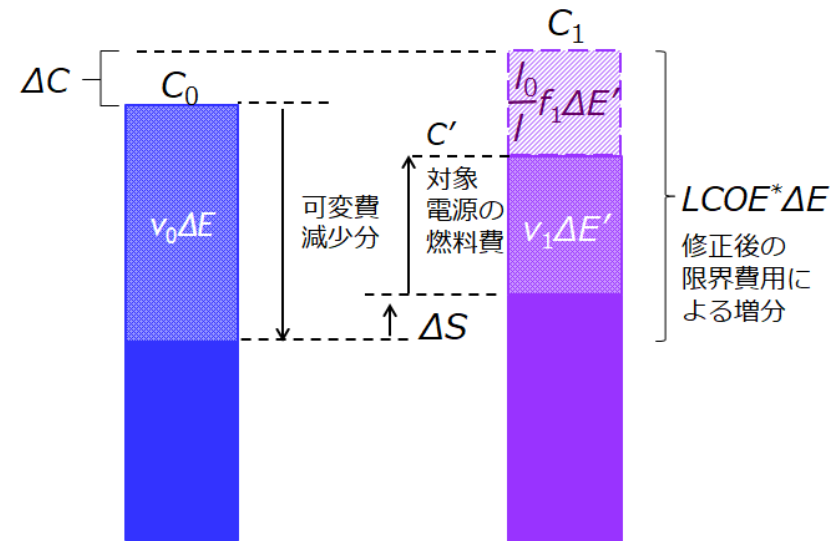
「電源立地や系統制約を考慮したモデルによる分析・試算」
(LCOE*) として評価 (前回)

LCOE*の評価方法

- エネルギーミックス内に微小電源を追加した場合の、追加前後の運用費用（下図 C_0 および C' ）と、追加電源による火力発電電力量の減少分（下図 ΔE ）を評価。
- C に追加電源の資本費である $l_0/l f_1 \Delta E'$ を加えた値が追加後の総費用 C_1 となるため、これを C_0 と比較してLCOE*を評価。
- 下図より $C_1 - LCOE^* \Delta E = C_0 - v_0 \Delta E$ となり、両辺を ΔE で除して $LCOE^* = (C_1 - C_0)/\Delta E + v_0$ と計算される。
- 電源追加時の火力発電減少量 ΔE は、一般的には追加電源の発電量 $\Delta E'$ よりも小さいことに注意（出力抑制や送電ロス・揚水損失に相当）。
- v_0 の選択に任意性があり、LCOE*の絶対値は厳密には固定されない。

記号

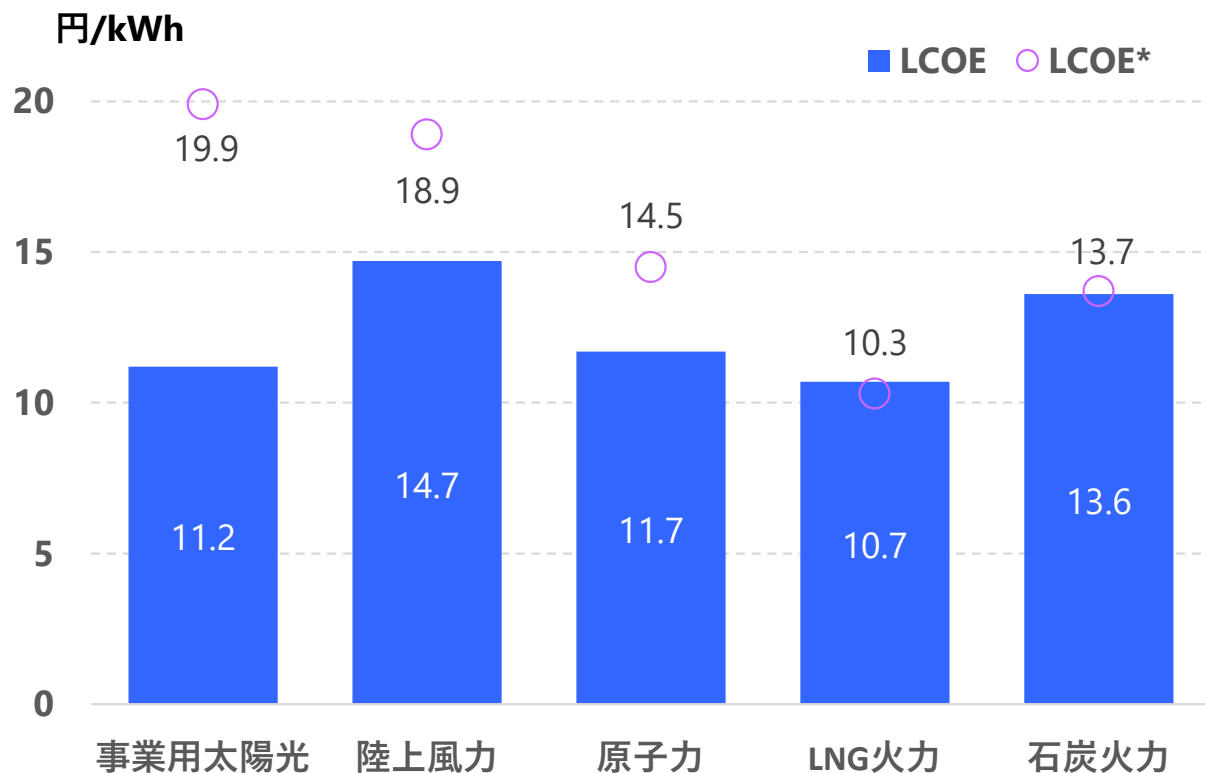
C_0, C_1	: ベースの運用費用、電源追加後の総費用
C'	: 電源追加後の運用費用
$\Delta C (=C_1 - C_0)$	: 電源追加による総費用の変化
ΔS	: 系統安定化のためのディスパッチ等費用
ΔE	: 追加電源の有効な発電電力量 (火力の発電電力量減少分)
$\Delta E'$	: 追加電源の本来の発電電力量
v_0	: ベースのエネルギーミックスにおける 限界運用費の単価
f_1, v_1	: 追加電源の固定費・可変費の単価
l	: モデル計算時の追加電源の設備利用率
l_0	: 均等化費用LCOE算出時の想定設備利用率
$LCOE, LCOE^*$	: 均等化費用と統合を反映した限界電源別費用



燃料費がある場合の年間の総費用のイメージ
(PV、風力の場合は、 $v_1 \Delta E$ はゼロとなる)

LCOE*の評価結果：前回試算

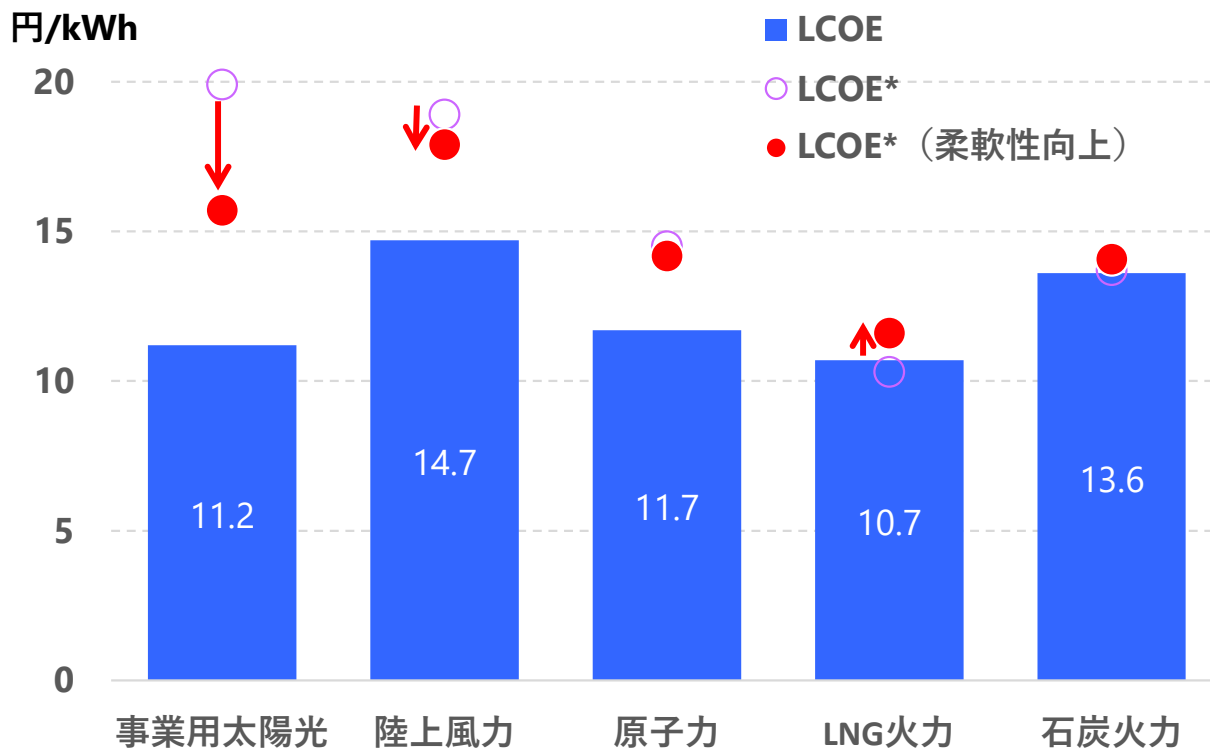
(出所) 前回試算



- 太陽光・風力・原子力はLFC調整力を出せないと想定しているため、これらを導入した際には、エネルギーミックスの中で石炭火力からLNG火力への代替が生じ、コストが上昇する。
- 太陽光・風力では更に電力ロス拡大によりLCOE*が上昇する。
- 一般的に、ある特定の電源の導入量が最適点を超えて進むとLCOE*が急速に上昇する。

電力システムの柔軟性向上によるLCOE*の変化

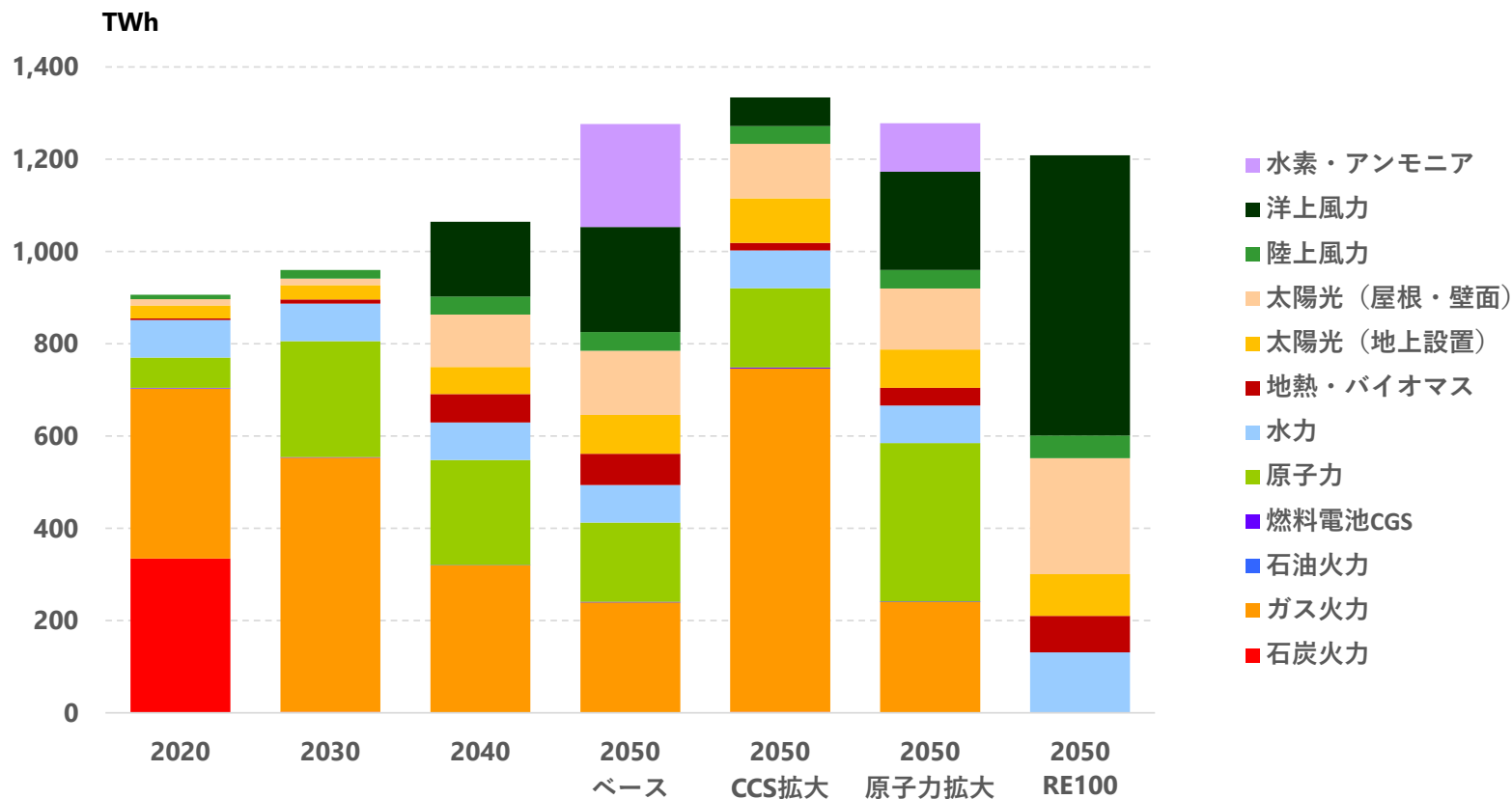
(出所) 荻本, 松尾, 岩船, 礪永, 東, 福留, (2022). 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 9-3.



- 電気自動車やヒートポンプ給湯器が大量に普及し、それによって電力システムの柔軟性が高まる状況下では、特に太陽光発電のLCOE*が大きく低下する。
- どのような場合にLCOE*が上昇し、どのような場合にその上昇を抑え得るかについて評価することは、政策立案上非常に重要であると言える。

電源の価値の評価例

(出所) 第44回基本政策分科会 (2021年6月30日) における日本エネルギー経済研究所発表資料

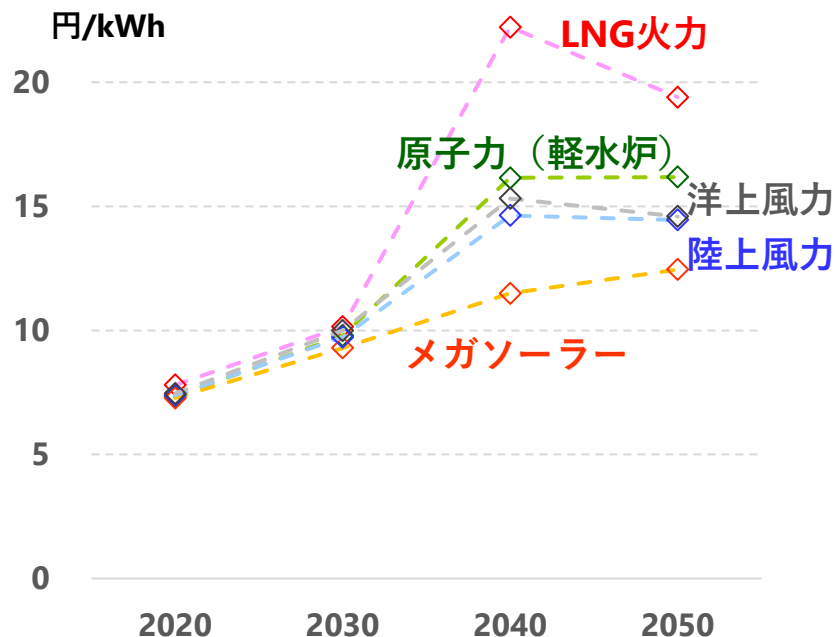


- 第44回基本政策分科会 (令和3年6月30日) での発表資料では、2050年の脱炭素化を想定し、標準 (ベース) ケースの他、CCS拡大ケース (CCS導入上限を2倍)、原子力拡大ケース (原子力設備容量を2倍)、RE100ケース (再エネ100%) などについて定量分析を実施。前提条件によって最適なエネルギーミックスは大きく異なり得る。
- 標準 (ベース) ケースとCCS拡大ケースについて、各電源の価値を示すと次頁の通りとなる。

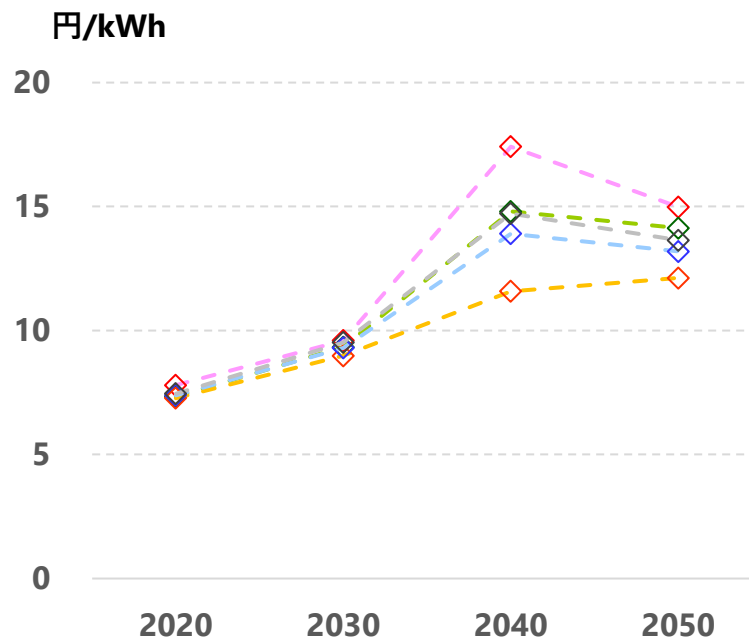
電源の価値の評価例

※第44回基本政策分科会（2021年6月30日）における日本エネルギー経済研究所発表資料に基づき試算

標準（ベース）ケース



CCS拡大ケース



- エネルギーミックスの中における**価値**は当該発電設備によって卸電力市場、容量市場等のマーケットから得られる収益として計算できる。
- 線形計画モデルでは、需給制約式のシャドウプライス（≒卸電力価格）にその時点の発電量を乗じ、年間にわたって合計することで卸電力市場の、供給予備力制約のシャドウプライス（≒容量市場価格）に設備容量を乗じることで容量市場の収益を計算できる。
- 標準（ベース）ケースとCCS拡大ケースにおける各電源の価値単価（＝年間収益を年間発電量で除した値）は上図の通り。**2050年に野心的な目標を設定すればするほど各電源の価値は高くなる。**

まとめ

- 変動性再生可能エネルギー（VRE）の大量導入に伴い、その**自然変動性等によって生じる統合費用**を考慮した分析を行うことは極めて重要である。
- 統合費用の評価指標には様々なものが考えられる。前回試算を行った**LCOE*（限界電源別費用）の評価は、現状でも政策立案上有用**であると思われる。
- 但し、その評価のためにも、**まずはLCOEを正確に評価**することが必要。
- LCOE、LCOE*ともに、**種々の条件によって結果が大きく変化する**ものであり、特定の値のみが独り歩きをしないよう注意することが必要。
- LCOE*の他にも有用な指標は存在する。これらを適切に用い、電源ごとの経済性の変化や、各指標の比較などを行うことにより、**将来のエネルギーシステムの中での各電源の特性や役割を把握し、正しく国民に伝える**努力が求められる。