

「温室効果ガス低減に向けた長期発展戦略の策定のための
情報と視点の整理と方法論」シンポジウム
令和元年8月21日

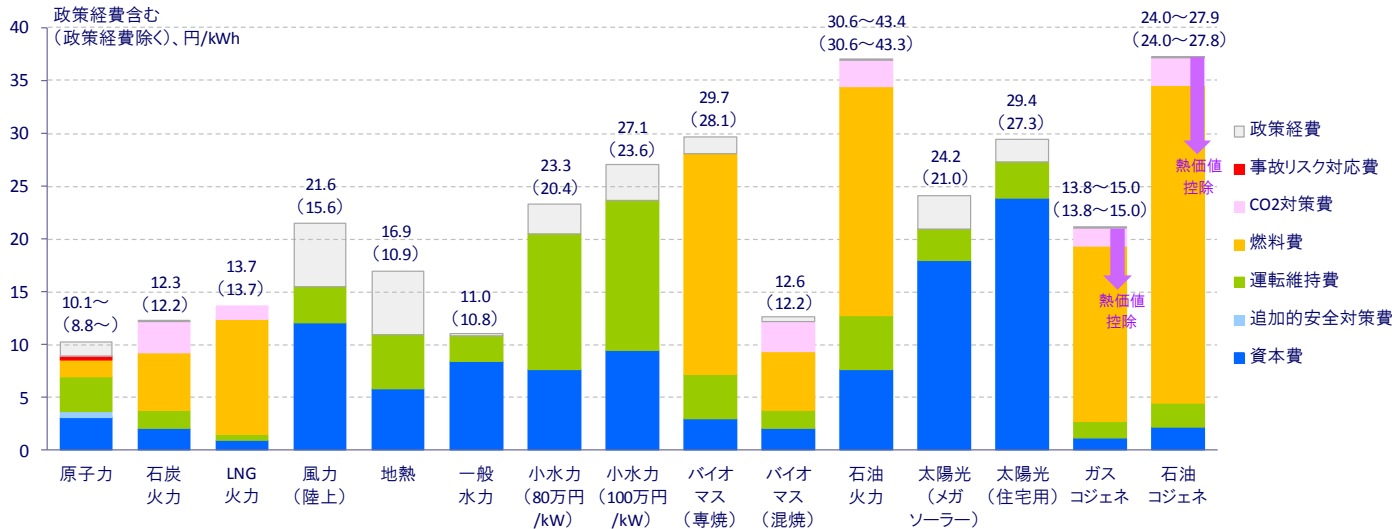
再生可能エネルギー大量導入時の 電力部門の経済性評価

日本エネルギー経済研究所

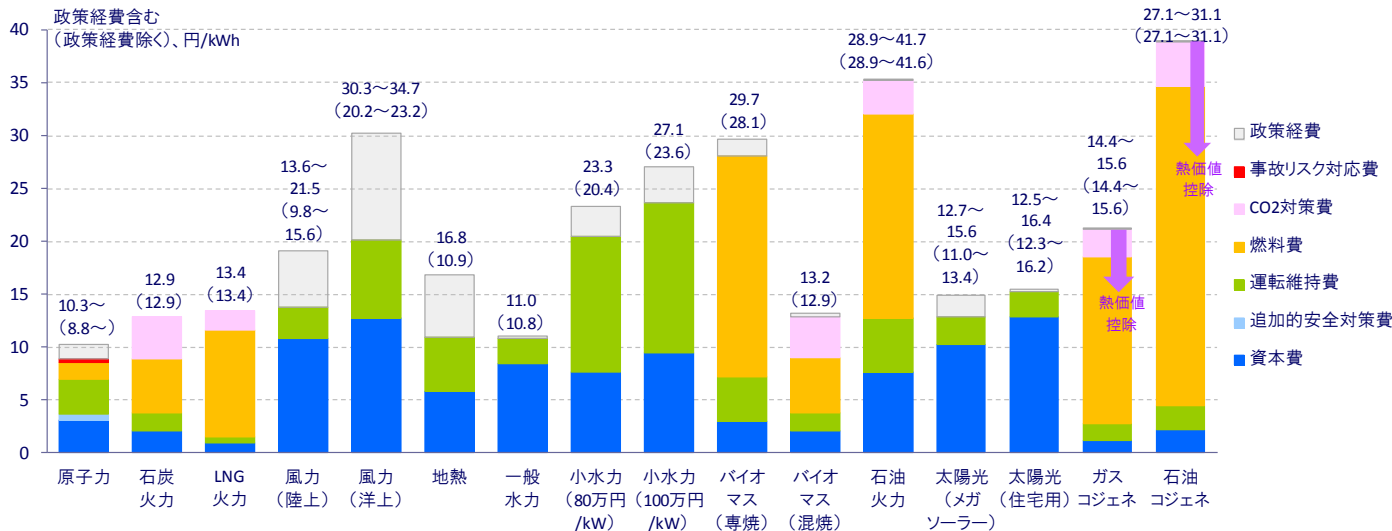
松尾 雄司

政府による発電コスト(平準化発電原価:LCOE)の評価例(2015)

2014年モデルプラント



2030年モデルプラント



※ 実質割引率3%と想定

・ 2015年2月~5月に行われた発電コスト検証ワーキンググループでは、幅広いデータに基づき電源別の発電コストを詳細に評価。

・ 2014年現在、風力発電・太陽光発電等の再生可能エネルギー発電のコストは原子力・火力等に比べて高い水準にある。但し、将来的には量産効果等により大幅なコスト低減が見込まれる可能性もある。

・ 一方で風力・太陽光等の「自然変動電源」が大量に導入された場合には、別途系統安定化やバックアップに伴う費用負担が発生する。

LCOEと新たな評価指標

$$\sum P_{MWh} * MWh * (1+r)^{-t} = \sum (Capital_t + O\&M_t + Fuel_t + Carbon_t + D_t) * (1+r)^{-t} \quad (1)$$

where the different variables indicate:

P_{MWh} = The constant lifetime remuneration to the supplier for electricity;

MWh = The amount of electricity produced in MWh, assumed constant;

$(1+r)^{-t}$ = The discount factor for year t (reflecting payments to capital);

$Capital_t$ = Total capital construction costs in year t;

$O\&M_t$ = Operation and maintenance costs in year t;

$Fuel_t$ = Fuel costs in year t;

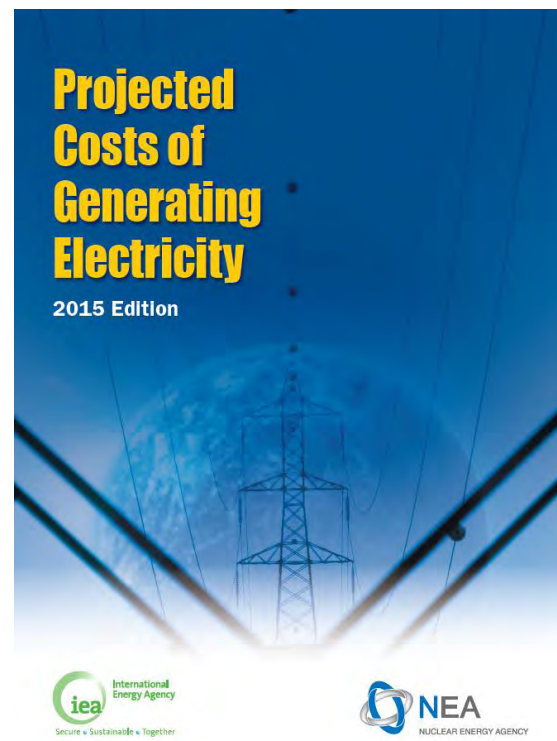
$Carbon_t$ = Carbon costs in year t;

D_t = Decommissioning and waste management costs in year t.

Because P_{MWh} is a constant over time, it can be brought out of the summation, and equation (1) can be transformed into

$$LCOE = P_{MWh} = \frac{\sum (Capital_t + O\&M_t + Fuel_t + Carbon_t + D_t) * (1+r)^{-t}}{\sum MWh (1+r)^{-t}} \quad (2)$$

where this constant, P_{MWh} , is defined as the levelised cost of electricity (LCOE).



OECD/NEA (2015) “Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition”

- ・ **LCOE (Levelized Cost of Electricity: 平準化発電原価)**はOECD/NEA, IEAにおいて全ての電源のコストを統一的に評価するために用いられている計算手法。これは、**電源の代替による総費用の変化を線形近似したものと理解される。**
- ・ 変動性再生可能エネルギー (Variable Renewable Energy: **VRE**)が大量に導入された場合、電力システムの経済性は**強く非線形的な応答**を示す(蓄電池、出力抑制、系統増強の必要性など)。
→ 今後、「**LCOEを超える指標**」の評価が重要となる。

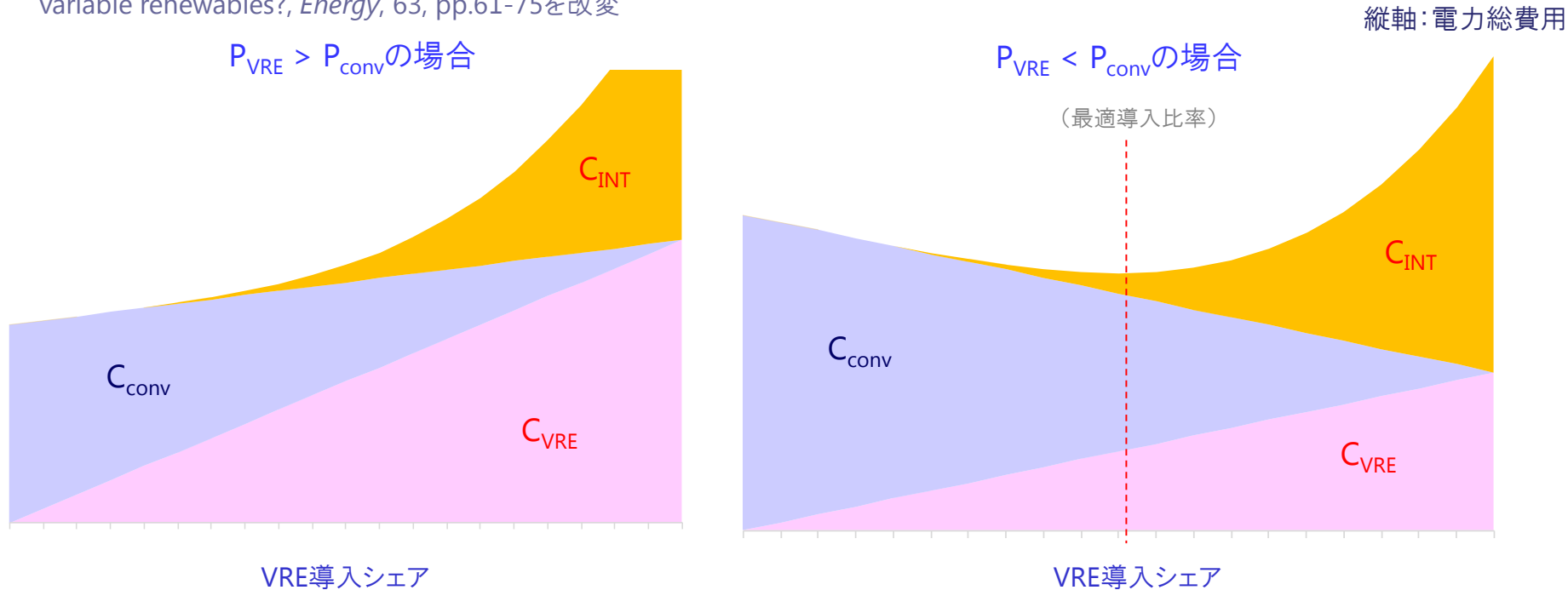
「LCOEを超える」新たな評価指標

- | | |
|---|---|
| 1) 統合費用(Integration cost, system cost) | 評価例多数あり。
ある特定の電源構成に対応して1つの数字があるのみであり、電源別の割り振りはなされない。 |
| 2) System LCOE (2013) | Ueckerdt et al., (2013)による2技術系での指標 |
| 3) System value | IEAによる概念(例えば“Next generation wind and solar power” (2016))。 |
| 4) Levelized avoided cost of electricity (LACE) | 米国DOE/EIAによる指標。Annual Energy Outlookで用いられている。 |
| 5) System LCOE (2015) | Hirth et al., (2015)。上記2)を改良したもの。 |
| 6) 価値調整済み(Value-adjusted)LCOE (VALCOE) | IEA, “World Energy Outlook 2018”で用いられた指標。 |

3)と4)、5)と6)はそれぞれ概念上、概ね同一のものと考えられる。

①「統合費用」とは？

※ Ueckerdt et al., (2013). System LCOE: What are the costs of variable renewables?, *Energy*, 63, pp.61-75を改変



- ・ 従来評価されてきたLCOE分(図中青・赤の領域)の他に、**統合費用分 C_{INT} (橙色部分)**がかかる。
 C_{INT} は一般的にはVRE導入比率 x が拡大するとともに上昇。但し、 x が低い領域では逆の傾向を示すこともある。
- ・ 最適導入点(総費用が最小となる点)は、以下の条件を満たす。

$$(\text{従来電源のLCOE}) = (\text{VREのLCOE}) + dC_{INT}/dx$$

この右辺の値を**System LCOE**と呼ぶ。

[参考] 統合費用の区分

※ Ueckerdt F. et al., (2013). System LCOE: What are the costs of variable renewables?, *Energy*, 63, pp.61-75. などより作成

1. バランスコスト: Balancing cost

- ・主に短期の予測誤差に伴って追加的に生じるコスト。

2. グリッド増強コスト: Grid cost

- ・発電設備と電力需要の空間的な乖離に伴って生じるコスト。
- ・発電設備から系統までの接続線と、グリッド自体の増強の2種類が必要となる。
(前者は発電単価(LCOE)の中に含まれることもあり、ダブルカウントしないよう注意が必要)

3. プロファイルコスト: Profile cost

- ・発電設備と電力需要の時間的な乖離に伴って生じるコスト。以下の項目に細分される。

3-1. 適合コスト(バックアップコスト): Adequacy costs / Backup costs

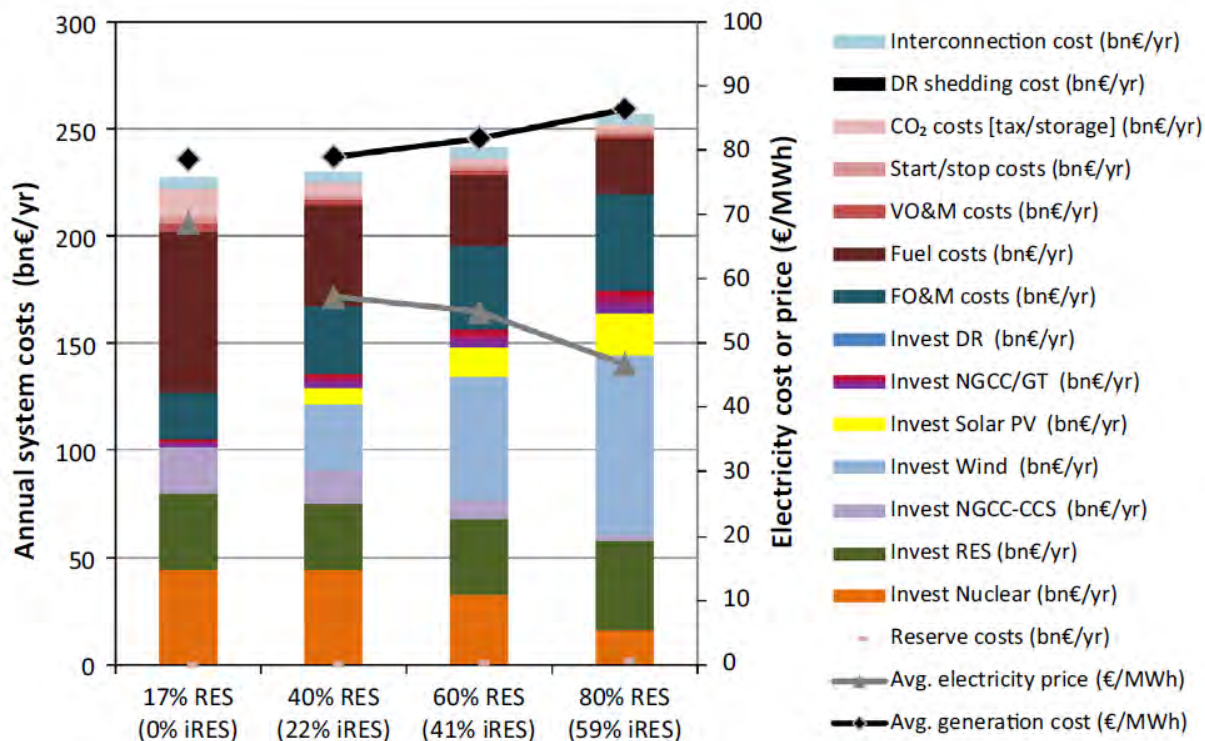
3-2. 出力抑制コスト: Overproduction costs

3-3. 設備利用率低下に係るコスト増加分: Full-load hour reduction

3-4. 計画内の起動・停止回数増加に係るコスト増加分: Flexibility effect

1) 統合費用(欧州の試算例)

Brouwer et al., (2016). Least-cost options for integrating intermittent renewables in low-carbon power systems. *Appl. Energy*, 161, 48-74.



(註)iRES:VRE比率

- ・ 統合コストの評価は従来、欧州及び米国を中心に行われていたが、最近(2017年～)は世界のほぼ全ての地域を対象とした評価の試みがなされている。
- ・ また、50%を超える(再生可能エネルギー100%に至る)高いVRE比率の評価例が増えているのも最近の特徴。
- ・ 典型的には上記の欧州の例のように、「最適点」(コスト最小となる電源構成)は比較的VRE比率が低いところに存在し、VRE比率が上るにつれて総システム費用は緩やかに上昇する。

1) 統合コストの評価例：日本の再エネ100%の評価(2050年)

	対象年	地域分割数	電力需要, TWh	蓄電容量, TWh	電力単価, 2014 JPY/kWh
Matsuo et al. (2018)	2050	9	1,044	3.5	22.0
Ogimoto et al. (2018)	2050	1	949	12.0	134
WWF Japan (2017)	2050	10	627	0.4	8.4
Energy Watch Group (2017)	2050	2	1,150	>20	8.3
Esteban et al. (2018)	2050	1	594-1,400	1.5-13.7	-
Esteban et al. (2012)	2100	1	1,400	41.0	-
Actual	FY2015	-	1,035		11.3

註：Ogimoto et al., (2018)は(再エネ100%ではなく)VRE 100%ケースの値。

- ・ 電力部門で再生可能エネルギー100%を達成する場合のコスト評価には多くの試算例があり、「再生可能エネルギー**100%**」を達成するためのコストにも大きな幅が見られる。
- ・ 今後、評価手法や指標に関する知見の共有化を通じた客観的な評価の蓄積が望まれる。

「市場価値」とは何か？

- ・ ある電源の「市場価値」は、「発電量」×「市場価格」の合計値として定義される。

$$V_i = \sum_t E_i(t)P_i(t) \quad E_i: \text{電源 } i \text{ の発電量、} P_i: \text{時刻 } t \text{ における市場価格}$$

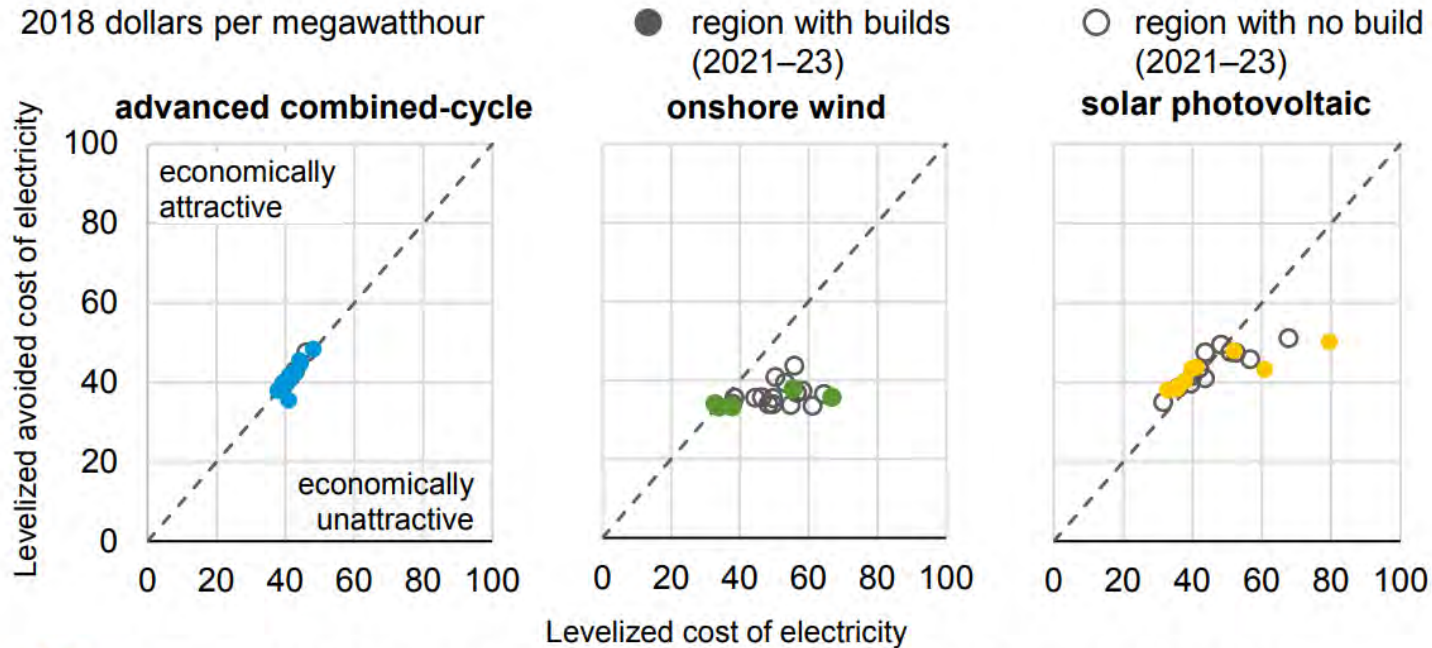
$$v_i = \sum_t E_i(t)P_i(t) / \sum_t E_i(t) \quad (\text{価値単価})$$

- ・ P_i としては卸売電力価格、容量市場価格などが考えられ、線形計画モデルの上では需給バランス式、供給予備率制約式などのシャドウプライスとして表現される。
- ・ 電力システムの経済性を考える上で、以下の2点が特に重要。

① ある電源1kWhの「市場価値」は、その電源を1kWh追加的に導入した場合の電力システムの残りの部分の費用減少分(**avoided cost**)と等しい。

② 均衡点(コスト最小となるエネルギーミックス)では、各電源の「市場価値」は「コスト」(**LCOE**)と一致する。

Levelized avoided cost of electricity (LACE) : 米エネルギー省

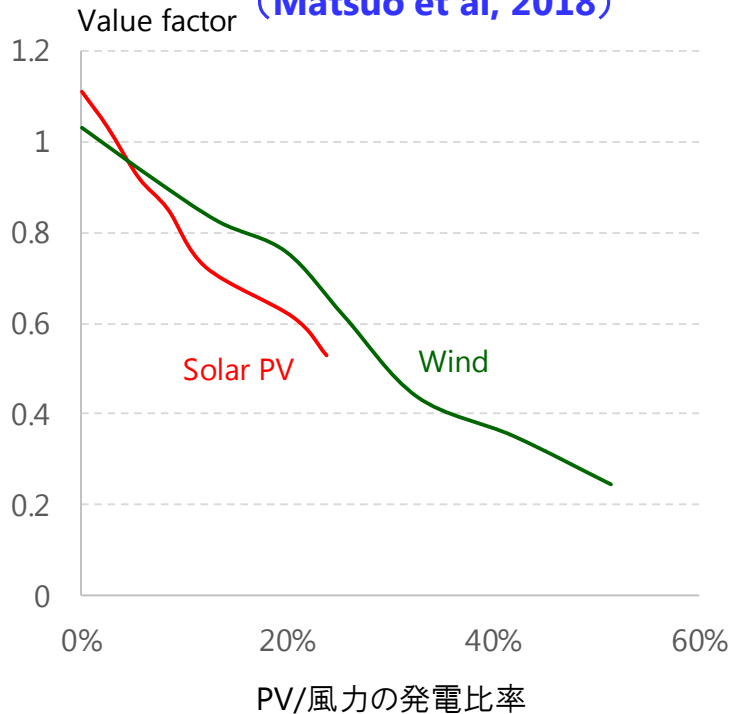


Source: U.S. Energy Information Administration, *Annual Energy Outlook 2019*

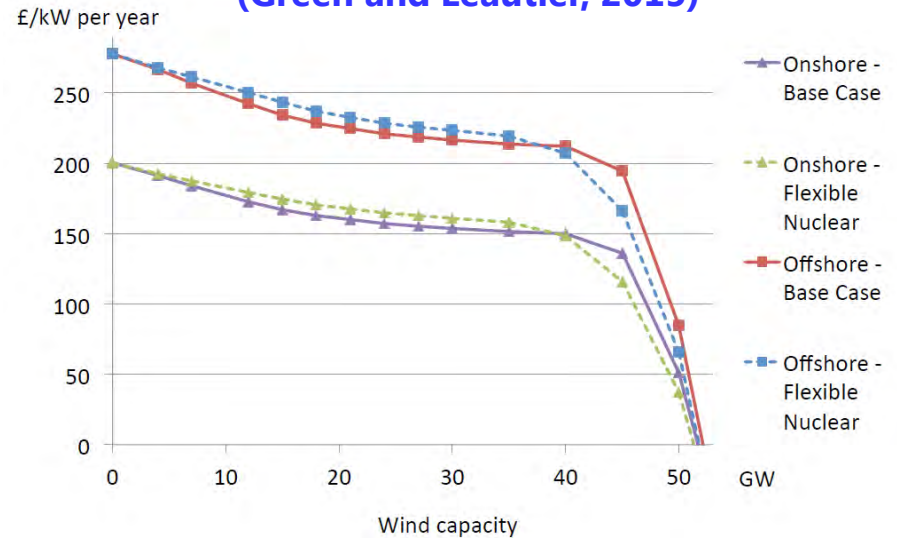
- ・ 米エネルギー省は各電源の市場価値(卸売電力市場価値と容量市場価値の合計値)を **Levelized avoided cost of electricity (LACE)** と呼称、分析に用いている。
- ・ **LACEがLCOEを上回るときに、その電源を追加的に導入することが経済合理性を有し得る。** このように、「価値」と「コスト」を比較することにより、コストのみの比較よりも多くの情報を得ることができる。

VREの市場価値の低下(カニバリズム効果)

日本を対象とした評価
(Matsuo et al, 2018)



英国における風力発電の限界価値
(Green and Léautier, 2015)

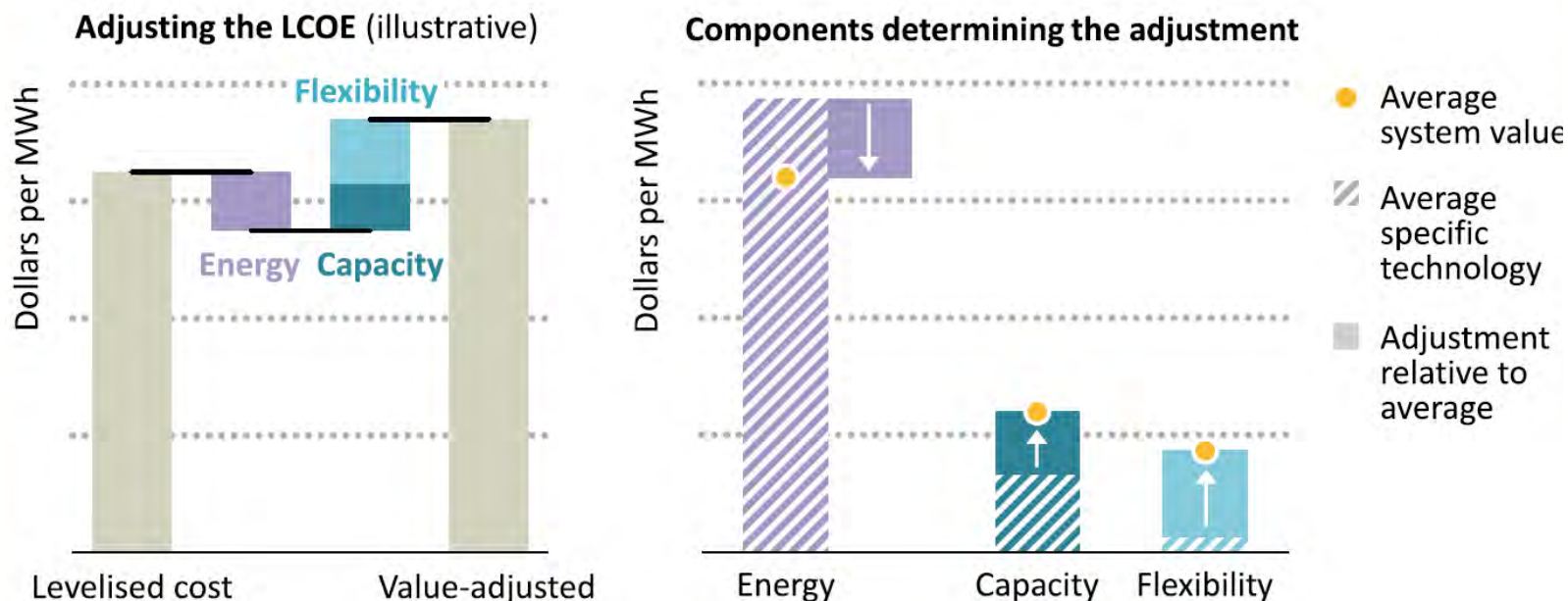


Green R J and Léautier T-O, (2015). Do costs fall faster than revenues? Dynamics of renewables entry into electricity markets. SE Working Papers 15-591, Toulouse School of Economics (TSE).

- ・ 太陽光発電量は晴れた昼間に大きいため、電力需要と正の相関が見られる。しかし発電機どうしの出力の相関が非常に高いため、導入が進むにつれて市場価値が急速に低下する。
- ・ どのような電源であれ、均衡点を越えて導入を進める場合には必ず価値の低下が生じる。特にVREに対しては、この効果は「共食い効果」(カニバリズム効果)として知られる。

Value-adjusted LCOE (VALCOE)もしくはSystem LCOE_HUE

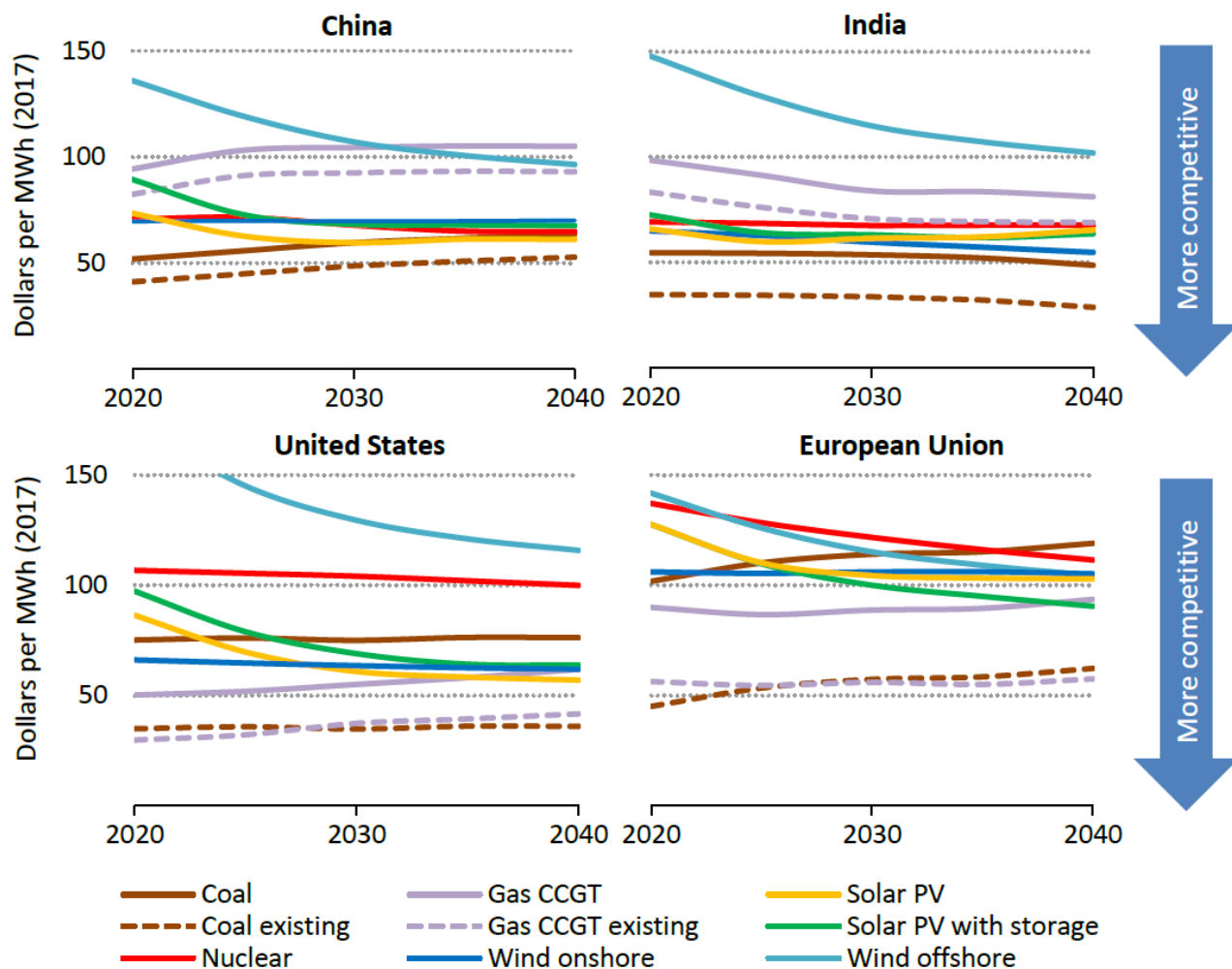
(出所)IEA, "World Energy Outlook 2018"



- ・ **VALCOEもしくはSystem LCOE_HUEは、市場価値をLCOEから差し引くことにより算出される。** 但し同時にある定数を足すことにより、VALCOEの加重平均値がLCOEの加重平均値と一致するようにする。
- ・ ここでは、「**価値が高い**」電源を「**相対的にコストが安い**」電源と見做すことで、コストと価値とを統合した指標となることが想定されている。
- ・ 但し、この手法では①**地域間連系線の効果を取り入れることができない、**②**結果として「コスト」ではなく「均衡点からの偏り」を示すに過ぎない、**ことなどが課題として挙げられる。

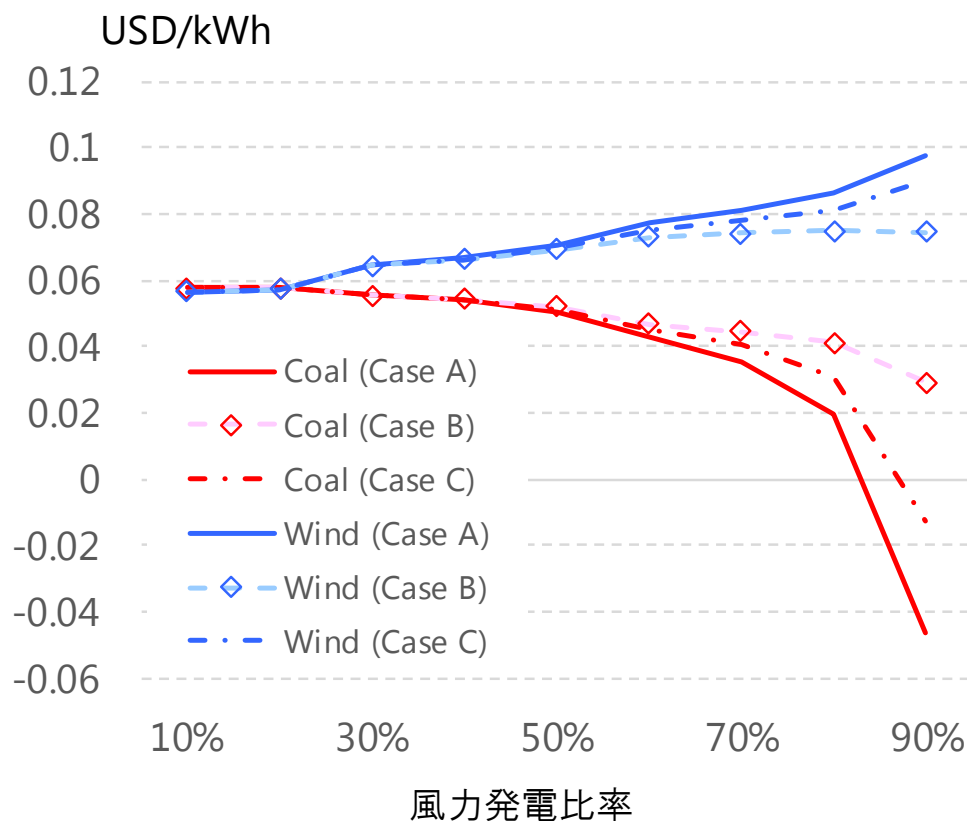
VALCOEの例(IEA, WEO2018)

(出所)IEA, "World Energy Outlook 2018"



・ 例えば中国では、PVのLCOEは低下する一方で2030年以降PVのエネルギー価値も低下するため、VALCOEは緩やかに上昇し、2040年時点ではほぼ原子力と同等になる。

System LCOE (≒ VALCOE) : 単純な2技術系での試算



- 石炭火力と風力(+蓄電池)のみからなる単一地域モデルの線形計画問題で試算。風力発電比率10%~90%に対しSystem LCOE_HUEを計算(制約の入れ方でケース分け: A 石炭火力発電量で制約、B 風力発電量で制約、C シェアで制約)。
- VRE比率90%になると火力の価値が急上昇し、そのSystem LCOE_HUEは負の値となる。また、ほぼ同じVRE比率90%ケースでも、制約式の入れ方によって値が大きく変化する。

まとめ

- ・ 変動性再生可能エネルギー（VRE）の大量導入に伴い、世界各国・地域の電力部門は大きな変革を迎えつつある。これに対応するため、従来の平準化発電原価（LCOE）の評価のみでなく、「**統合費用**」を評価することの必要性が高まっている。
- ・ 更に、統合費用を考慮に入れた新たな評価指標の検討も進められている。
 - ・ System LCOE (2013, 2015)
 - ・ Levelized avoided cost of electricity (LACE)
 - ・ System Value
 - ・ Value-adjusted LCOE (VALCOE)
- ・ これらの指標にはそれぞれ利点・欠点がある。しかし「コスト」のみでなく「**市場価値**」も含めた評価を行うことで、より多くの情報を用いて意思判断を行うことが可能となると言える。
- ・ 最近数年間の研究を通じて、電力部門の経済性に関する評価手法も次第に整備されつつあると言える。「**統合費用**」と「**システム価値**」ないし「**市場価値**」の双方を見つつ、適切な評価を行うことが望まれる。