

# システム統合を反映した限界費用の試算

2021年4月26日

東京大学生産技術研究所  
日本エネルギー経済研究所

荻本和彦  
松尾雄司

# 検討の目的

- **LCOE（均等化費用）**により算出される電源コストは、電源ごとの固有の費用に基づいて、資本費や燃料費といった電源のコスト構造の比較に使用することができる。  
LCOEは、理解しやすい反面、それによる表現には限界がある。
- 具体的には、各電源から生産される電力が、需要に対してどのように有効に使われるかは、エネルギーミックスや地理的・時間的な需要の構造に依拠するが、LCOEはそういった電力需給の変化に伴うコストを考慮することができない。
- また、現実的に、すでに電力システムは存在しており、今後の電源構成を検討していくにあたって、ゼロからの設備形成を想定するわけではないため、ある電源を導入した際に、電力システム全体として追加的にかかるコストも評価していく必要がある。

本検討で取扱う、

- **電源別限界費用**では、あるエネルギーミックスに対し各種の電源を一定量（限界的に）増加させたとき、電力システム全体で変化する費用をとらえ、これを当該電力を増加させた正味の発電電力量で除した費用を、当該電源の追加によって発生するコストと定義することができる。
- 本検討では、電力需給解析を用いて電源別限界費用を計算し、一定の条件のもとで、電力システムへの**系統安定化費用（統合費用）**を考慮した**電源別の費用評価**を行う。
- この評価によって、例えば、現状のエネルギーミックスに、さらに太陽光を追加した場合に発生する、火力の起動停止や揚水損失などのコストを反映した、電源別のコスト比較を行うことができる。

## システムコスト・電源別限界費用から得られる示唆

※ システムコストを考慮した評価指標の多く（VALCOE, Enhanced levelized cost, System LCOE\_HUE, 相対限界System LCOEなど）は、「電源別限界費用」の評価を試みるものと整理される。これらの指標の評価により、以下のような理解が得られる。

- 各電源のコスト（経済性）は単一の値によって示されるものではなく、**それが存在するエネルギーミックスの状況に応じて変化する**。
- ある電源の限界費用が他電源よりも低い場合にはその導入量を拡大させることが経済合理性をもち、高い場合には経済合理性を失う。換言すれば、「最適なエネルギーミックス」においては理論上、全ての電源の限界費用が同じ値をもつ。
- ある電源の導入量が小さい場合にはその限界費用は比較的安く、**導入量が大きくなるにつれて限界費用は上昇する**。特に、均衡点（＝最適なエネルギーミックスにおける導入量）を超えて導入を進めると限界費用が著しく上昇し得るため、**単一の電源に過度に依存するシナリオは多くの場合、総コストの上昇を招く**。
- 資源制約や社会的要因等によって導入が均衡点以前で抑えられている電源は、他電源よりも低い限界費用をもつ。逆に、政策的理由により均衡点を超えて導入が進められている電源は、他電源よりも高い限界費用をもつ。
- 電源別限界費用の評価は、建設費や運転維持費、最大設備利用率といったLCOEと共通する要素に依存する。このため、電源別限界費用の評価を行うためにも、**まずはLCOEを正確に評価することが重要**となる。

# LCOEの限界を越える電源評価法「システム価値」

IEAの“System Integration of Renewables, An update on Best Practice”

(2017) (翻訳は、NEDOより公開中:[https://www.nedo.go.jp/library/system\\_integration\\_of\\_renewables.html](https://www.nedo.go.jp/library/system_integration_of_renewables.html))

では、LCOEの限界とそれを越える方法について、次のように述べられている。

- LCOEを指標にすると、いつ、どこで、どのように発電したかが分からない。「いつ」は、達成可能な発電の時間的プロファイル、「どこで」は発電所の位置、「どのように」は発電技術の種別による電力システムとの関係を意味する。いつ、どこで、どのようにという点で各技術が異なる場合、**LCOEに基づく比較は十分でなく、誤解を招く可能性もある**。LCOEのみに基づく比較は異なる供給源から発電された電気が同じ価値を持つことを暗に仮定している。
- 電力の価値は、いつ、どこで発電されるかによって決まり、VRE(変動再生エネルギー)の割合が高い電力システムでは特にそうである。豊富な発電量が比較的低い需要と同時に発生すると、その時点の電力の価値は低くなる。逆に、発電量があまり得られず、需要が高い時間では、電力の価値は高くなる。**システム全体の電力の価値を考慮することで、VRE統合と電力システム改革の課題についての新しい展望が開かれる**。  
「システム価値」は、任意の発電技術の追加によって得られる正味の利益として定義される。

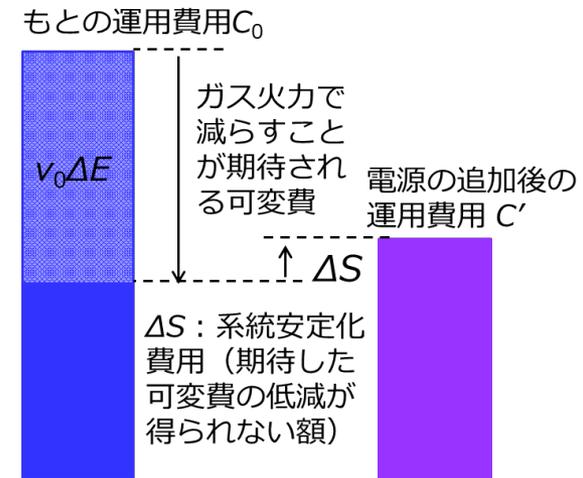
# システム統合を反映する電源別限界費用の考え方

電源別限界費用は、各電源から生産される電力が、需要に対してどのように有効に使われるかをより正確に把握するため、想定されるエネルギーミックスや、より実態に近い地理的・時間的な需要の構造を反映する電力需給解析により計算される。

すなわち、あるエネルギーミックスにおいて、対象の電源が微小容量追加された前後の解析を行い、（期待される燃料費が高いガス火力の発電電力量を低減した場合を基準とした）系統安定化費用 $\Delta S$ と、有効活用できる発電電力量を計算し、固有のLCOEに対する修正量を計算する。

PVを追加した場合の系統安定化費用 $\Delta S$ は、次の様な状況を反映して計算される。

- 火力の発電電力量は、燃料費の高いガス火力ばかりではなく、燃料費が安い石炭火力でも減少する。
- 揚水を活用した場合は揚水と発電の運転で損失が生じ、その分は火力の発電電力量を減らせない。
- PVの出力の一部は、火力・揚水・連系線などを活用しても、出力制御されることにより利用出来ない分（出力抑制）が生じる。
- ベースのミックスでの運用費用 $C_0$ から期待される天然ガス火力の燃料費削減額（ $v_0\Delta E$ ）を除いた額に対し、PVを追加した場合の運用費用 $C'$ の差が系統安定化費用となる（ $C_0$ と $C'$ は電力需給解析で計算される）。

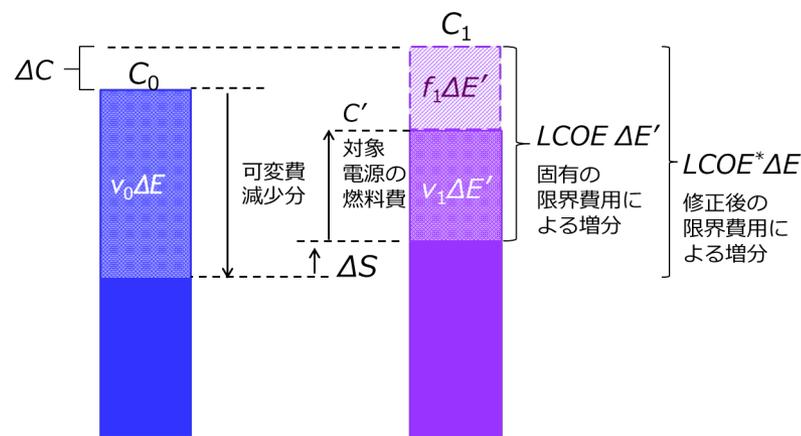


# システム統合を反映した電源別限界費用と修正されたLCOE(LCOE\*)の計算方法

- 前ページの説明の通り、ベースのエネルギーミックスにおける年間運用費用 $C_0$ に対し、対象とする電源追加後の固定費を含めた年間総費用 $C_1$ を計算する。ただし2030年のエネルギーミックスにおける発電設備は既設分・計画分のみと想定し、電源追加前の資本費分はモデル計算で考慮しない。
- 数理モデルで計算される運用費用 $C_1 - f_1\Delta E'$ から固有の可変費 $v_1\Delta E'$ を引いた値と、本来減少したはずの費用 $C_0 - v_0\Delta E$ との差 $\Delta S$ が系統安定化費用となる。
- 運用上の損失（貯蔵損失、出力制御など）がある場合、火力発電電力量の減少 $\Delta E$ は、追加電源の本来の発電電力量 $\Delta E'$ より小さくなる。
- 追加電源の修正された限界費用LCOE\*は、 $(LCOE \Delta E' + \Delta S) / \Delta E$ で与えられる。

## 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                 |
| $\Delta S$              | : 系統安定化費用                       |
| $\Delta E$              | : 電源追加による火力発電電力量減少分             |
| $\Delta E'$             | : 追加電源の本来発電量                    |
| $v_0$                   | : ベースのエネルギーミックスにおける<br>限界運用費の単価 |
| $f_1, v_1$              | : 追加電源固有の固定費・可変費の単価             |
| LCOE, LCOE*             | : 固有および統合を考慮した限界費用              |



## 原子力の場合のイメージ

(PV、風力の場合は、 $v_1\Delta E'$ はゼロとなる)

# 解析条件

## 対象電源

- PV、風力、原子力
- ガス火力、石炭火力

## 前提とするエネルギーミックス

- 2015年長期エネルギー需給見通しの2030年ミックス
- PV, 風力の分布：電力広域的運営推進機関:広域系統長期方針<参考資料>(2017)のシナリオ①
- 同上に対し、PVと風力の導入容量2倍（64GWx2、10GWx2）

## 設備増加の設定

- 発電設備容量を一定量（ベースシナリオのPV発電電力量の2%）増加させてLCOE\*を試算（5%増加を検算済み）
- PVと風力は、資源分布を反映した電力広域的運営推進機関の検討結果の2030ミックスのエリア分布およびそれに基づく比例分布
- 原子力発電、火力発電については、各エリアの年間の需要電力量に比例

## システム運用

- PVと風力は優先給電、火力は経済負荷配分、原子力はマストラン
- 連系線の運用容量の制約を考慮
- 二次調整力（LFC:負荷周波数制御）の確保を考慮

# 解析条件（続き）

## 解析条件

- 2013年度の需要曲線、PV・風力出力パターン
- 2030年度を想定した電源容量データ
- 燃料費：発電コスト検証WG(2015)相当
  - 原子力：1.5 円/kWh
  - 石炭：5.1円/kWh (2.46円/Mcal)、ガス：10.0円/kWh (5.60 円/Mcal)
- CO<sub>2</sub>対策費：固有LCOEに反映（石炭火力4.0円/kWh、ガス火力1.8円/kWh）
- 固有LCOE：発電コスト検証WG(2015)の2030年モデルプラント値（政策経費含む）
- 調整力 必要量：需要の2%
  - 供給量：石炭火力±2%、ガス火力：±8%など

注1) 燃料費は各ユニットの平均コストであり、個別のユニットの発電コストは発電効率により異なる。

2) 再エネを需要側エリアに分布させることで、系統安定化費用の値は変化する可能性あり。

## 今回反映されていない要素

- 再エネの短周期変動による二次調整力の必要量
- 再エネの予測誤差による三次調整力②の必要量
- 地内送配電損失

## 電力需給解析手法

MR（広域需給調整プログラム）, (株)J-POWERビジネスサービス

# 解析条件（続き）

## 風力発電の導入量

単位：万kW

|     | 連系可能量を考慮しない導入見込量※1<br>a | 既導入量※2<br>b | 未開発分<br>c=a-b | 風力シナリオ①<br>未開発分比率で按分<br>$b+(1,000-301) \times c/952$ | 風力シナリオ②<br>東京から九州に最大限、北海道は連系可能量まで導入したうえで、東北に重点的に導入 |
|-----|-------------------------|-------------|---------------|--|--|
| 北海道 | 約300                    | 32          | 268           | 229  | <u>56</u>  |
| 東北  | 約587                    | 95          | 492           | 456  | 579  |
| 東京  | 約47                     | 25          | 22            | 41   | <u>47</u>  |
| 中部  | 約45                     | 25          | 20            | 40   | <u>45</u>  |
| 北陸  | 約19                     | 15          | 4             | 18   | <u>19</u>  |
| 関西  | 約37                     | 16          | 21            | 31   | <u>37</u>  |
| 中国  | 約67                     | 30          | 37            | 57   | <u>67</u>  |
| 四国  | 約51                     | 15          | 36            | 41   | <u>51</u>  |
| 九州  | 約97                     | 47          | 50            | 84   | <u>97</u>  |
| 沖縄  | 約2.5                    | 1.6         | 0.9           | 2.3  | <u>2.5</u>   |
| 計   | 約1,250                  | 301         | 952           | 1,000  | 1,000  |

## 太陽光発電の導入量

注：四捨五入の関係で合計が一致しない。 単位：万kW

|     | 導入量       |                | 新規認定量<br>b | 太陽光シナリオ①<br>新規認定量比率で按分<br>$a+(6,400-496) \times b/7,993$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>東京・中部・関西エリア※1<br/>接続済み+接続契約申込量</li> <li>その他エリア<br/>接続可能量（系統WG2015.11.10）</li> </ul> | 太陽光シナリオ②<br>東京・中部・関西エリアは接続申込量、その他エリアは接続可能量まで導入し、未達分を需要比率で按分 |
|-----|-----------|----------------|------------|--|--|---|
|     | 移行認定<br>a | 新規認定<br>(bの内数) |            |  |  |   |
| 北海道 | 8         | 92             | 250        | 192  | 117  | 151   |
| 東北  | 30        | 222            | 1,369      | 1,041  | 552  | 640   |
| 東京  | 129       | 703            | 1,998      | 1,605  | 1,424  | 1,732   |
| 中部  | 96        | 431            | 956        | 802  | 843  | 985   |
| 北陸  | 8         | 49             | 114        | 92   | 110  | 142   |
| 関西  | 65        | 311            | 674        | 563  | 608  | 766   |
| 中国  | 45        | 217            | 622        | 504  | 660  | 727   |
| 四国  | 23        | 149            | 281        | 231  | 257  | 287   |
| 九州  | 86        | 530            | 1,673      | 1,322  | 817  | 911   |
| 沖縄  | 6         | 24             | 56         | 47   | 49.5   | 58  |
| 計   | 496       | 2,727          | 7,993      | 6,400  | -  | 6,400   |

# 解析条件（続き）

## 連系線の運用容量

電力広域的運営推進機関による2030年度の計画値を使用した。

### 4. 2023～2030年度の連系線の運用容量（長期）

12  
(万kW)

| 連系線        | 潮流方向   | 2023年度             | 2024年度             | 2025年度             | 2026年度             | 2027年度                           | 2028年度              | 2029年度              | 2030年度              |
|------------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 北海道本州間連系設備 | 北海道向   | 90(①)              | 90(①)              | 90(①)              | 90(①)              | 90(①)                            | 90(①)               | 90(①)               | 90(①)               |
|            | 東北向    | 90(①)              | 90(①)              | 90(①)              | 90(①)              | 90(①)                            | 90(①)               | 90(①)               | 90(①)               |
| 東北東京間連系線   | 東北向    | 236(①)             | 236(①)             | 236(①)             | 236(①)             | 236(①) <sup>1)</sup>             | 631(①)              | 631(①)              | 631(①)              |
|            | 東京向    | 565(②)<br>【460(②)】 | 565(②)<br>【460(②)】 | 565(②)<br>【460(②)】 | 565(②)<br>【460(②)】 | 565(②) <sup>2)</sup><br>【460(②)】 | 1028(②)<br>【460(②)】 | 1028(②)<br>【460(②)】 | 1028(②)<br>【460(②)】 |
| 東京中部間連系設備  | 東京向    | 210(①)             | 210(①)             | 210(①)             | 210(①)             | 210(①)                           | 300(①)              | 300(①)              | 300(①)              |
|            | 中部向    | 210(①)             | 210(①)             | 210(①)             | 210(①)             | 210(①)                           | 300(①)              | 300(①)              | 300(①)              |
| 中部関西間連系線   | 中部向    | 250(④)<br>【200(④)】 | 250(④)<br>【200(④)】 | 250(④)<br>【200(④)】 | 250(④)<br>【200(④)】 | 250(④)<br>【200(④)】               | 250(④)<br>【200(④)】  | 250(④)<br>【200(④)】  | 250(④)<br>【200(④)】  |
|            | 関西向    | 134(④)<br>【35(④)】  | 134(④)<br>【35(④)】  | 134(④)<br>【35(④)】  | 134(④)<br>【35(④)】  | 134(④)<br>【35(④)】                | 134(④)<br>【35(④)】   | 134(④)<br>【35(④)】   | 134(④)<br>【35(④)】   |
| 北陸フェンス     | 北陸向    | 150(④)<br>【70(④)】  | 150(④)<br>【70(④)】  | 150(④)<br>【70(④)】  | 150(④)<br>【70(④)】  | 150(④)<br>【70(④)】                | 150(④)<br>【70(④)】   | 150(④)<br>【70(④)】   | 150(④)<br>【70(④)】   |
|            | 中部・関西向 | 190(②)<br>【140(④)】 | 190(②)<br>【140(④)】 | 190(②)<br>【140(④)】 | 190(②)<br>【140(④)】 | 190(②)<br>【140(④)】               | 190(②)<br>【140(④)】  | 190(②)<br>【140(④)】  | 190(②)<br>【140(④)】  |
| 中部北陸間連系設備  | 北陸向    | 30(①)              | 30(①)              | 30(①)              | 30(①)              | 30(①)                            | 30(①)               | 30(①)               | 30(①)               |
|            | 中部向    | 30(①)              | 30(①)              | 30(①)              | 30(①)              | 30(①)                            | 30(①)               | 30(①)               | 30(①)               |
| 北陸関西間連系線   | 北陸向    | 150(④)<br>【70(④)】  | 150(④)<br>【70(④)】  | 150(④)<br>【70(④)】  | 150(④)<br>【70(④)】  | 150(④)<br>【70(④)】                | 150(④)<br>【70(④)】   | 150(④)<br>【70(④)】   | 150(④)<br>【70(④)】   |
|            | 関西向    | 190(②)<br>【140(④)】 | 190(②)<br>【140(④)】 | 190(②)<br>【140(④)】 | 190(②)<br>【140(④)】 | 190(②)<br>【140(④)】               | 190(②)<br>【140(④)】  | 190(②)<br>【140(④)】  | 190(②)<br>【140(④)】  |
| 関西中国間連系線   | 関西向    | 425(③)             | 425(③)             | 425(③)             | 425(③)             | 425(③)                           | 425(③)              | 425(③)              | 425(③)              |
|            | 中国向    | 278(①)             | 278(①)             | 278(①)             | 278(①)             | 278(①)                           | 278(①)              | 278(①)              | 278(①)              |
| 関西四国間連系設備  | 関西向    | 140(①)             | 140(①)             | 140(①)             | 140(①)             | 140(①)                           | 140(①)              | 140(①)              | 140(①)              |
|            | 四国向    | 140(①)             | 140(①)             | 140(①)             | 140(①)             | 140(①)                           | 140(①)              | 140(①)              | 140(①)              |
| 中国四国間連系線   | 中国向    | 120(①)             | 120(①)             | 120(①)             | 120(①)             | 120(①)                           | 120(①)              | 120(①)              | 120(①)              |
|            | 四国向    | 120(①)             | 120(①)             | 120(①)             | 120(①)             | 120(①)                           | 120(①)              | 120(①)              | 120(①)              |
| 中国九州間連系線   | 中国向    | 278(①)<br>【162(④)】 | 278(①)<br>【162(④)】 | 278(①)<br>【162(④)】 | 278(①)<br>【162(④)】 | 278(①)<br>【162(④)】               | 278(①)<br>【162(④)】  | 278(①)<br>【162(④)】  | 278(①)<br>【162(④)】  |
|            | 九州向    | 23(④)<br>【0(④)】    | 23(④)<br>【0(④)】    | 23(④)<br>【0(④)】    | 23(④)<br>【0(④)】    | 23(④)<br>【0(④)】                  | 23(④)<br>【0(④)】     | 23(④)<br>【0(④)】     | 23(④)<br>【0(④)】     |

【 】内の数字は、最大需要時以外など空容量が小さくすると予想される値を示す。（東北東京間（東京向）は、2022年度における最小値を参考記載）

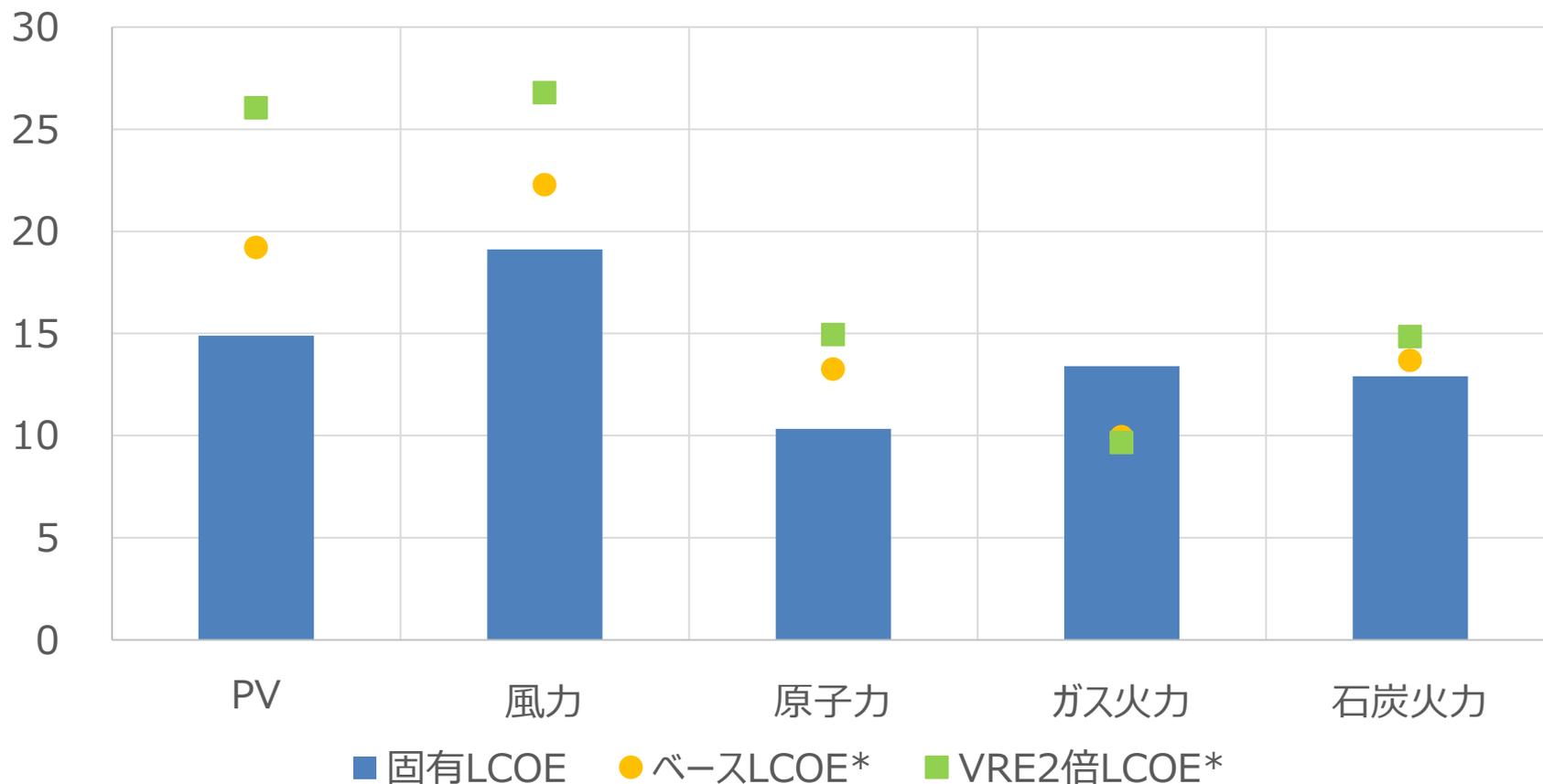
( ) 内の数字は、運用容量決定要因（①熱容量等、②同期安定性、③電圧安定性、④周波数維持）を示す。

1) 2027年第二連系線運用後は、631万kW（相馬双葉幹線1回線熱容量相当）になる見込み。

2) 2027年第二連系線運用後は、1028万kW（「東北東京間連系線に係る広域系統整備計画」(2017.2.3策定)に基づく）になる見込み。

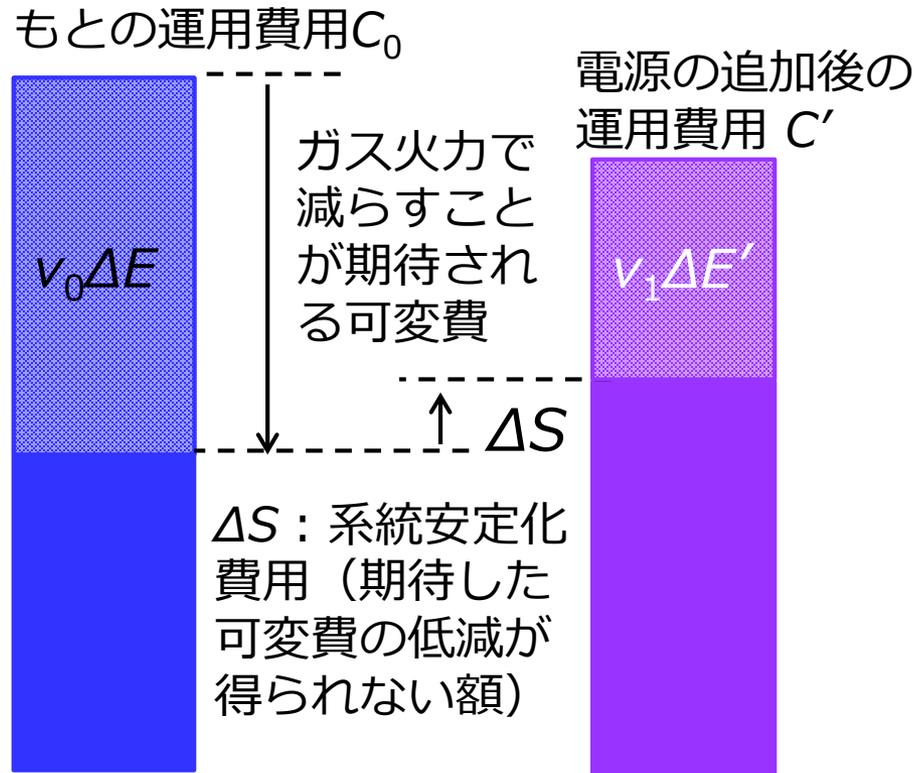
# 解析結果：システム統合を反映したLCOE\*

固有LCOEとシステム統合を反映したLCOE\*（円/kWh）

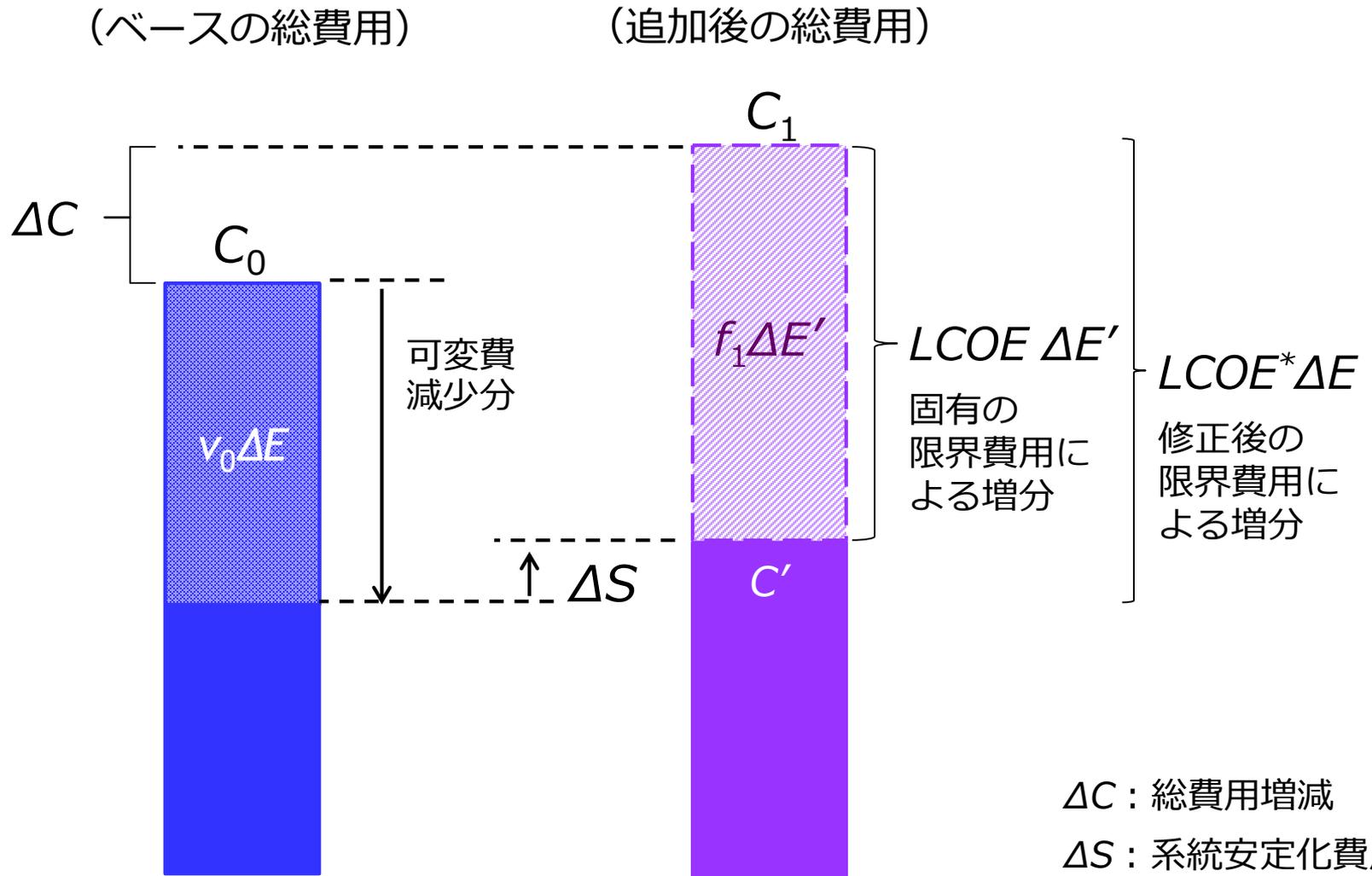


ベース: 前回2030年ミックス(2015年試算)、VRE2倍: PV・風力2倍

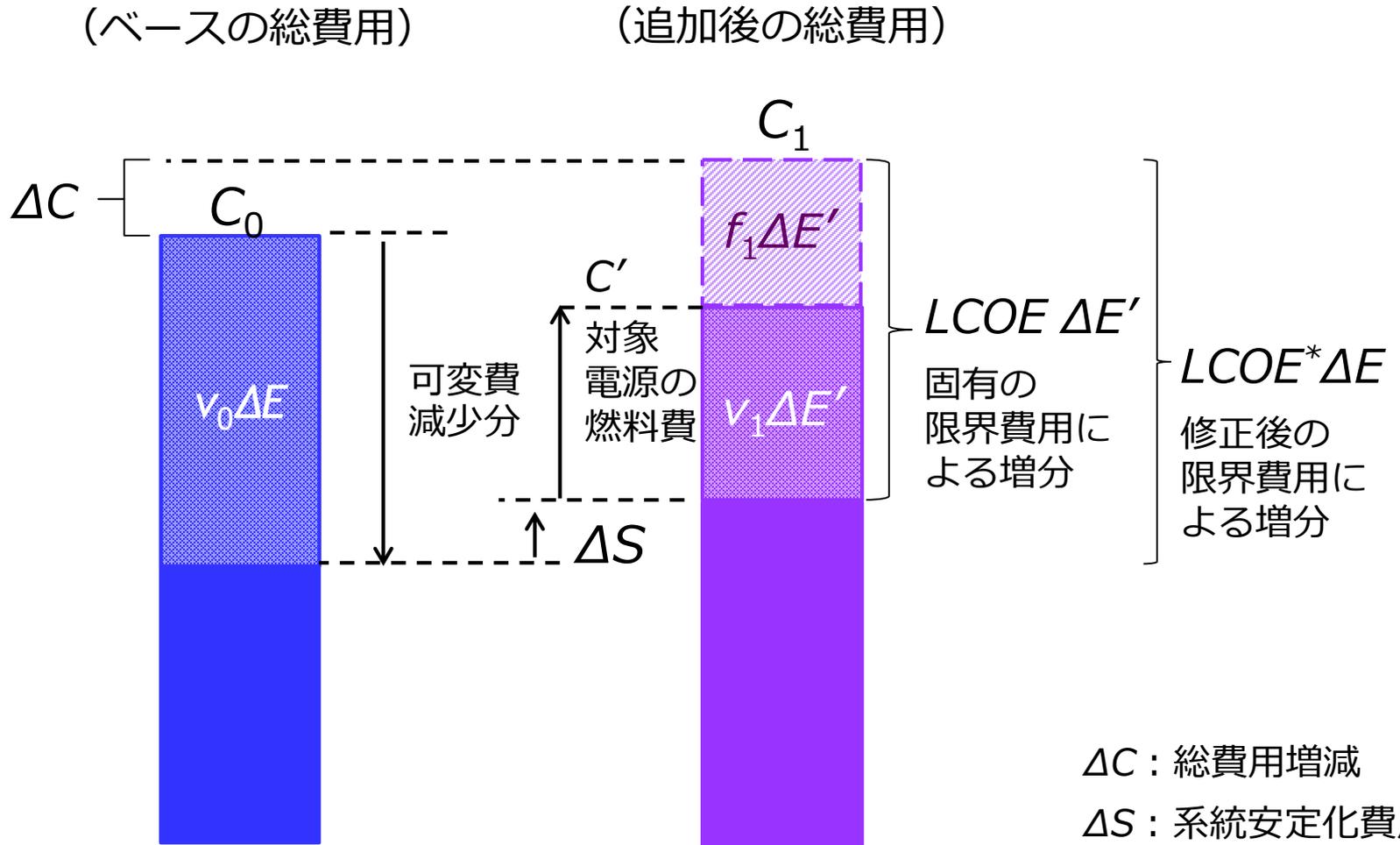
# 参考 システム統合の限界費用のイメージ 太陽光・風力の場合



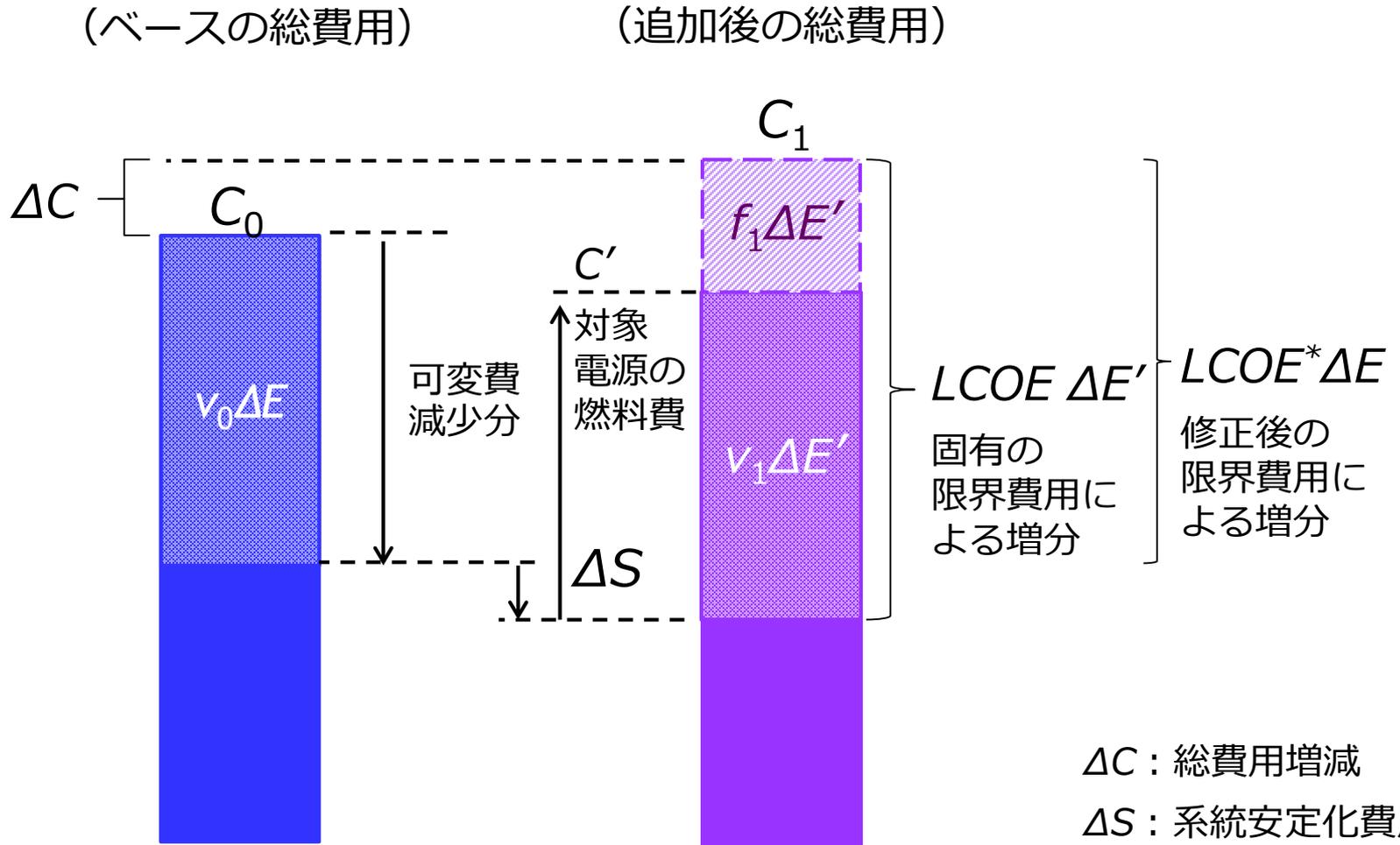
# 参考 システム統合の限界費用のイメージ 太陽光・風力の場合



# 参考 システム統合の限界費用のイメージ 原子力の場合



# 参考 システム統合の限界費用のイメージ ガス火力の場合



# 参考 システム統合の限界費用のイメージ 石炭火力の場合

