

第25回 ESIシンポジウム

CO₂をどう計算するか：脱炭素時代の評価手法を考える

時刻別・エリア別電力CO₂排出原単位の 算定方法に関する検討

東京大学生産技術研究所 エネルギーシステムインテグレーション社会連携研究部門
岩船 由美子

2026年3月5日

01 なぜ時刻別CO₂排出原単位が必要か

GHG Protocol改定動向・需要側管理との関係

02 海外における時刻別CO₂排出原単位の提供事例

英国・米国・欧州・豪州の動向

03 AEF（平均排出原単位）の算定手法

揚水原資考慮・連系線潮流考慮

04 MEF（限界排出原単位）の算定手法

ユニット別発電実績を活用した推計

05 算定結果と応用事例

東京・関西・九州エリア比較、PV+蓄電池評価

06 AEF vs MEF : 何を評価すべきか

政策・制度設計への示唆

01

なぜ時刻別CO₂排出原単位が必要か

GHG Protocol改定動向・需要側管理との関係

GHG Protocol Scope 2 改定動向

「電力消費のタイミングにより近いタイミング、かつ電力消費がなされる地域によりふさわしい排出係数の利用を必須とする」

→ **時刻別・エリア別原単位が国際標準へ**

需要側管理・CO₂削減シグナルとして

デマンドレスポンス (DR) や蓄電池活用のCO₂削減価値を正確に評価

発電・需要双方の調整シグナルとして再エネ安定利用に貢献
EVやヒートポンプ等の最適運用タイミング判断に活用

課題認識

現状の年間平均原単位では「いつ・どこで使ったか」を区別できず、DR・蓄電池・EV等の需要側技術の環境価値を正確に示せない

時刻別・エリア別の高解像度原単位が、脱炭素時代の適切な評価指標として不可欠

AEF 平均CO₂排出原単位

定義：対象期間・空間の需要あたりのCO₂排出量

用途：需要家に帰属するCO₂排出量の算定
再エネ多い時間帯を示す長期的シグナル
都市計画・自治体政策の評価

算定方法：各時刻の火力発電量×CO₂原単位÷発電量合計

本研究の提案：揚水原資・連系線潮流を考慮した高精度算定

MEF 限界CO₂排出原単位

定義：需要が1単位変化した場合のCO₂排出量変化

用途：DRや蓄電池の運用効果の短期評価
EV充電最適化のシグナル
追加的介入のCO₂削減量算定

算定方法：稼働電源の特定が理論上必要
→ユニット別発電実績から推計

海外の活用例：カリフォルニア州（CA）でDR評価の標準手法

02

海外における時刻別CO₂排出原単位の提供事例

英国・米国・欧州・豪州の動向

GB 英国 National Grid ESO

Carbon Intensity API

指標: AEF (平均)
解像度: 30分値 範囲: 全国+14地域
予測: 48時間先

us 米国 WattTime (RMI)

MOER API

指標: MEF (限界)
解像度: 5分値 範囲: 各電力市場
予測: 24時間先

欧米50+ Electricity Maps

Electricity Maps

指標: AEF (消費ベース)
解像度: 1時間値 範囲: 50カ国以上
予測: 24時間先

EU 欧州 ENTSO-E

Transparency Platform

指標: 燃料別発電量
解像度: 15~60分値 範囲: 欧州全域
予測: なし

DE ドイツ Fraunhofer ISE

energy-charts.info

指標: 燃料別発電量
解像度: 15分値 範囲: ドイツ
予測: なし

AU 豪州 OpenNEM / AEMO

OpenNEM

指標: 燃料別発電量
解像度: 5分値 範囲: NEM各州
予測: なし

提供機関 : National Grid ESO (電力系統運用者)

データ種別 : 30分値、全国 + 14地域ゾーン別

指標 : 平均CO₂排出原単位 (gCO₂/kWh)

予測値 : 48時間先まで提供 (機械学習ベース)

公開形態 : 無償API (carbonintensity.org.uk)

活用例 : EV充電最適化・スマートホーム・CO₂予測による機器制御の実証実績あり

特徴・研究上のポイント

- 地域別 (Regional) 提供が世界でも先進的
- 再エネ比率・燃料種別内訳も同時公開
- carbonintensity.org.uk (無償)

us WattTime (RMI傘下)

指標：MOER (Marginal Operating Emission Rate)

時間解像度：5分値

対象エリア：CAISO・PJM等 米国主要グリッド

予測値：24時間先まで

公開形態：有償API（非営利団体）

活用事例

- ・ Google（データセンター負荷シフト）
- ・ Apple（iCloud充電最適化）
- ・ スマート充電インフラ多数

Electricity Maps

指標：AEF（消費ベース、gCO₂eq/kWh）

時間解像度：1時間値（一部リアルタイム）

対象エリア：50カ国以上

予測値：24時間先まで

公開形態：無償/有償API・Webダッシュボード

特徴

- ・ 電力輸出入を考慮した消費ベース算定
- ・ ENTSO-E等を一次データとして活用
- ・ 多数の企業がScope 2報告に採用

EU ENTSO-E Transparency Platform

欧州全域の15~60分値発電量データ。原単位の直接提供はないが基礎データとして活用。公式統計として信頼性高い。

DE energy-charts.info (Fraunhofer ISE)

ドイツの15分値発電ミックス・CO₂排出量を無償公開。研究利用に適している。

AU OpenNEM / AEMO

オーストラリアNEMの5分値。州別燃料構成から原単位算定可能。オープンソースで提供。

国際比較

| 提供機関 | 国・地域 | 時間解像度 | 指標種別 | 公開形態 | 予測値 |
|-------------------|-------|--------|-----------|-------|-------|
| National Grid ESO | 英国 | 30分 | 平均（地域別） | 無償API | ✓ 48h |
| WattTime | 米国等 | 5分 | 限界（MOER） | 有償API | ✓ 24h |
| Electricity Maps | 50力国+ | 1時間 | 平均（消費ベース） | 無償/有償 | ✓ 24h |
| ENTSO-E | 欧州 | 15~60分 | 燃料別発電量 | 無償 | ✗ |
| energy-charts | ドイツ | 15分 | 発電ミックス | 無償 | ✗ |
| OpenNEM | 豪州 | 5分 | 燃料別発電量 | 無償 | ✗ |

03

AEF（平均排出原単位）の算定手法

揚水原資・連系線潮流を考慮した提案手法

時刻別 AEF [t] =

$$\frac{(\text{火力発電量 [t]} - \text{揚水動力用火力発電量 [t]}) \times \text{時刻別火力平均CO}_2\text{原単位 [t]} + \text{揚水発電用火力発電量 [t]} \times \text{揚水動力用平均CO}_2\text{原単位}}{\text{揚水以外の発電量合計 [t]}}$$

揚水以外の発電量合計 [t]

① 火力CO₂排出量の算定

LNG・石炭・石油別に基準CO₂原単位を乗じて算定。火力総発電量で除して火力平均CO₂排出原単位を得る。

② 揚水動力用CO₂排出量の算定

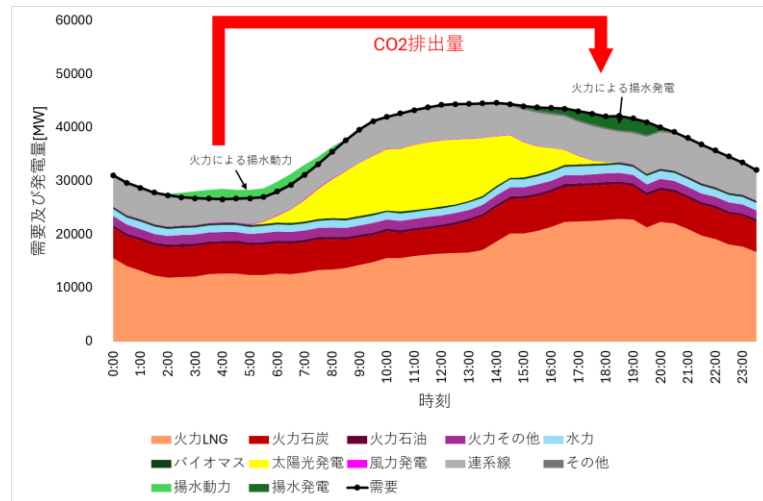
揚水動力が再エネ発電量を上回る分を火力発電によるものとみなし、火力平均CO₂原単位を加重平均して算定。

③ 揚水発電時へのCO₂の配分

揚水発電が発生する時間帯に、日内の揚水発電量比率に基づいてCO₂を配分。

④ AEFの算定

火力CO₂から揚水動力用CO₂を引き、揚水発電用CO₂を加えた値を揚水以外の発電量で除してAEFを算定。



【先行研究との違い】 揚水原資を考慮しない手法では、揚水発電所の多い地域で深夜帯のAEFが過大、夕方のAEFが過小に推計される問題が生じる。

方法論

- 電力広域的運営推進機関の5分毎の連系線潮流データを活用し、30分毎に積算
- 連系線潮流の流入元エリアのAEFを連系線潮流のAEFとして代替（電源特定情報が現状非公開のため）
- 各エリアのAEFの加重平均で連系線AEFを算定

連系線潮流考慮AEF =

$$\frac{(\text{需要} - \text{連系線潮流}) \times \text{自地域AEF} + \text{連系線流入量} \times \text{連系線AEF}}{(\text{需要} - \text{連系線潮流}) + \text{連系線流入量}}$$

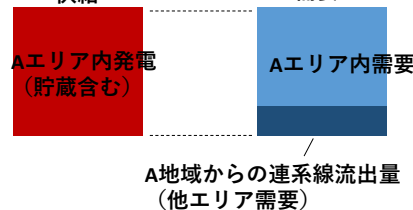
九州エリア（流出側）

連系線流出がある場合、他エリアの需要分も含めた原単位となる。
連系線考慮AEF = 自地域AEF

東京エリア（流入側）

連系線流入がある場合、流入元エリアのAEFで補正。流入元エリアと自エリアのAEFが異なる場合に差異が生じる。

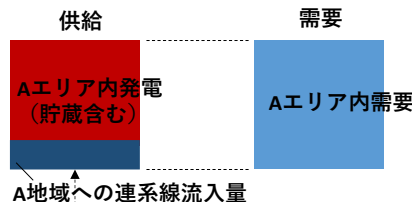
例：九州エリア
供給



$$\text{AEF}_A = \frac{\text{■からのCO2排出量}}{\text{■} + \text{■}}$$

連系線考慮済みAEF = AEF_A

例：東京エリア



$$\text{AEF}_A = \frac{\text{■からのCO2排出量}}{\text{■} - \text{■}}$$

連系線考慮済みAEF_A =

$$\frac{\text{AEF}_A \times (\text{■} - \text{■}) + \text{AEF}_B \times \text{■}}{\text{■}}$$

供給



$$\text{AEF}_B = \frac{\text{■からのCO2排出量}}{\text{■} + \text{■}}$$

B地域からの連系線流出量
(他エリア需要、この場合A)

旧データセット（2016年度～2023年12月）

- 一般送配電事業者のエリア需給実績データ（1時間単位）
- 火力は燃料内訳なし → 年度ごとの発電量比率で内訳推計

新データセット（2024年1月以降）

- 10電力のデータフォーマット統一（30分単位）
- 燃料種別火力発電所の内訳が公開される
- 蓄電池データも追加（揚水と同様の扱い）

火力発電所CO₂排出原単位

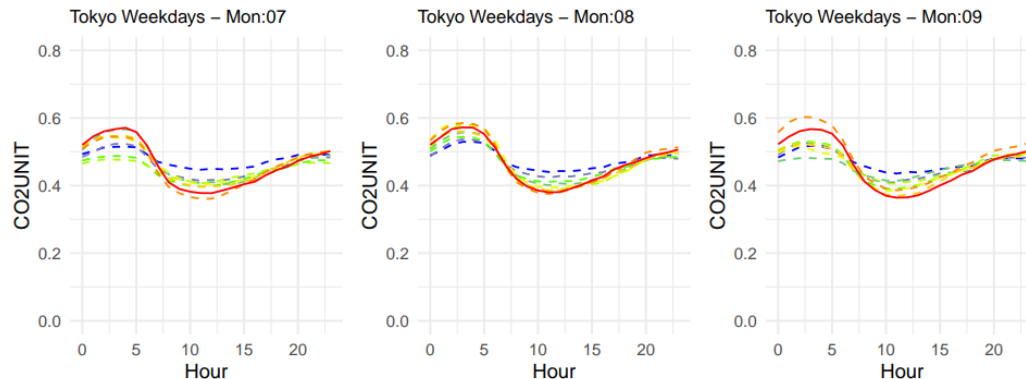
- LNG火力、石炭火力、石油火力、その他別に設定
- 「火力その他」はLNG火力のCO₂排出原単位を適用

電力広域的運営推進機関の連系線潮流データ（5分毎）

- 30分単位に集約（11連系線）

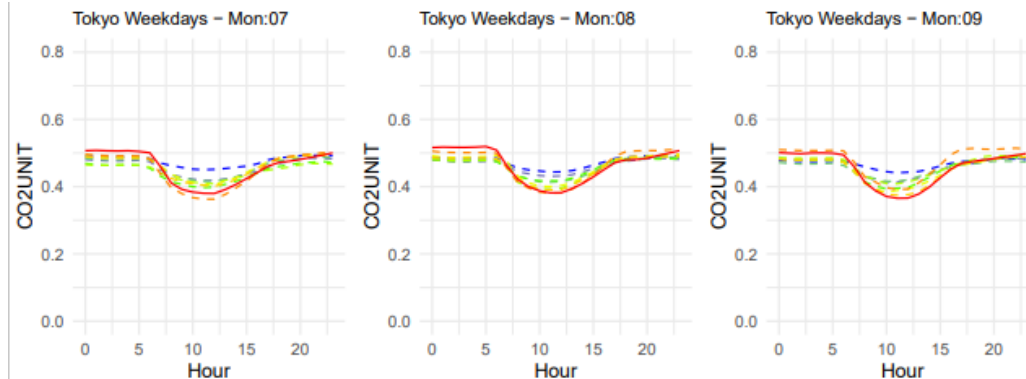
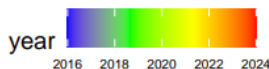
揚水原資 非考慮（先行研究）

- ・ 深夜に揚水動力の時間帯 → AEFが過大に推計
- ・ 揚水発電の夕方時間帯 → AEFが過小に推計
- ・ 揚水発電所の多い東京エリアで特に影響大



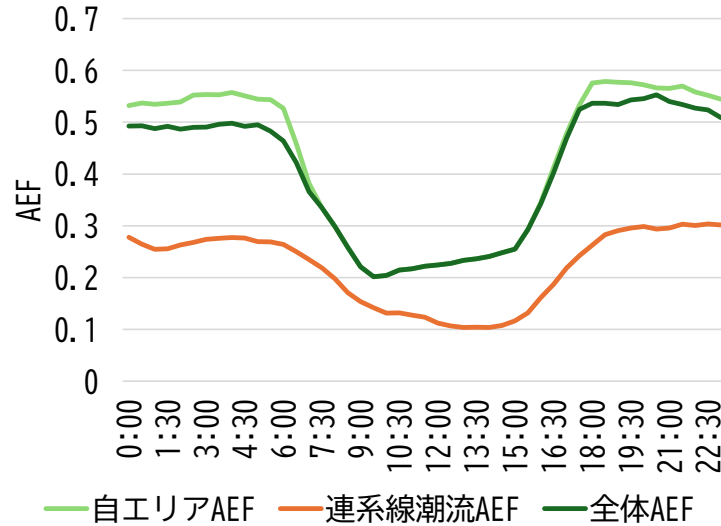
揚水原資 考慮（提案手法）✓

- ・ 揚水動力の原資が火力か再エネかを分離
- ・ 火力由来の揚水動力分のCO₂を揚水発電時に配分
- ・ DRやPV・蓄電池活用のシグナルとして信頼性向上



中国エリア（2024年4月1日）

- ・夜間関西からの流入潮流により全体AEF（連系線考慮後のAEF）低下



04

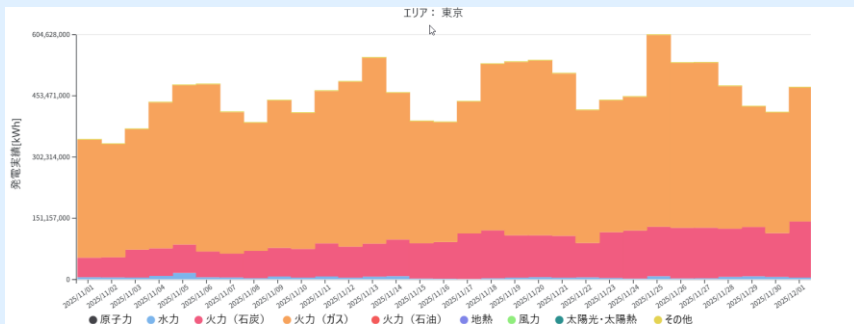
MEF（限界排出原単位）の算定手法

ユニット別発電実績を活用した推計方法

データソース：ユニット別発電実績公開システム (10万kW以上のユニット、30分刻み、323基)

前提 限界電源は火力と想定

MEFの算定において、追加的な電力需要に応じるのは火力発電であると想定。再エネは出力変動・優先給電ルールがあるため、通常は限界電源として機能しないことを前提とする。



Step 1 各ユニットの発電量変化・CO₂排出量変化の算定

前時刻からの発電量変化量を算定。東大MRモデルから定格容量・最低出力・所内率・効率（最低出力時・定格時）等の情報を取得。負荷率と発電効率の関係を線形と仮定し、各発電量に対する効率を推計。CO₂排出量を算定。

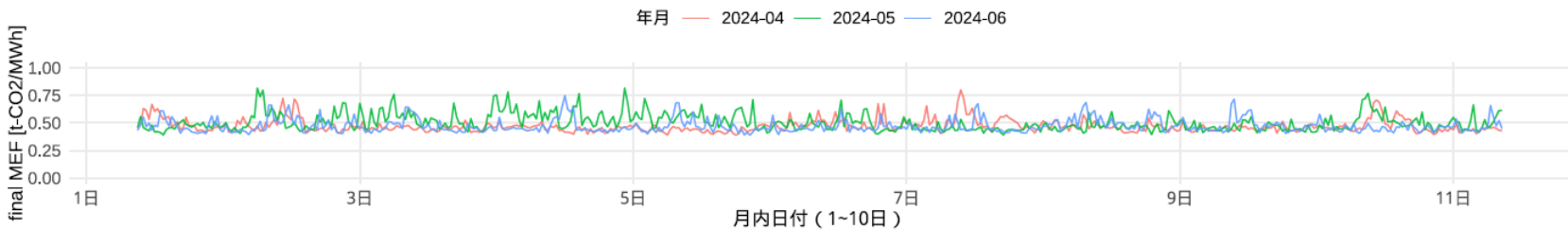
Step 2 限界CO₂排出原単位の加重平均

発電量変化量の絶対値（増加・減少の両方）でその時刻の各電源のCO₂排出原単位を加重平均。変化が0の場合は前々時刻基準。当該時刻で発電量が0になる電源のみ変化する場合は前時刻のCO₂原単位を採用。

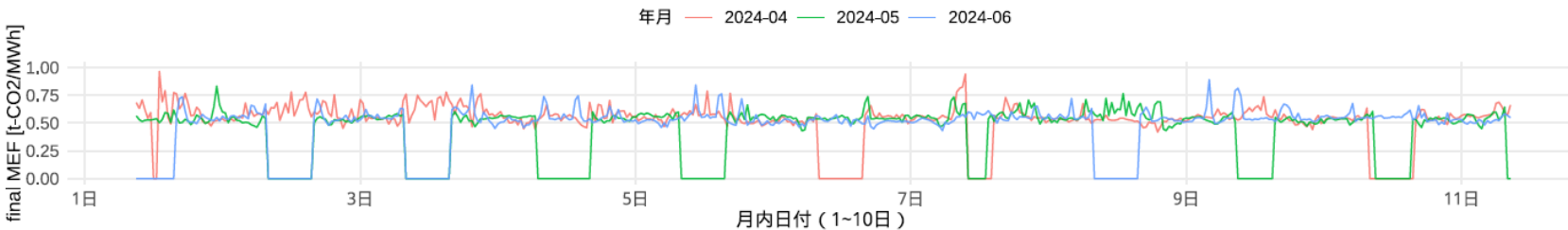
Step 3 再エネ抑制時の処理

再エネ抑制がある時間帯は限界電源が再エネとみなし、MEF = 0 とする。これにより「抑制を解消した場合の効果」を正しく評価可能。

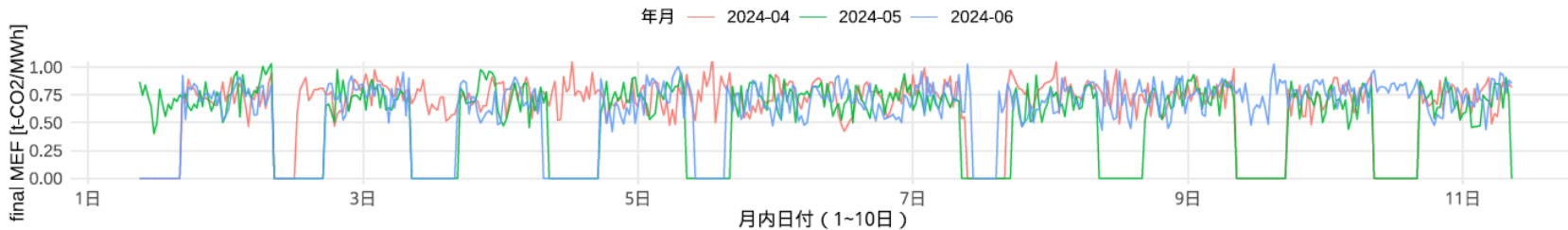
東京



関西



九州





05

計算事例

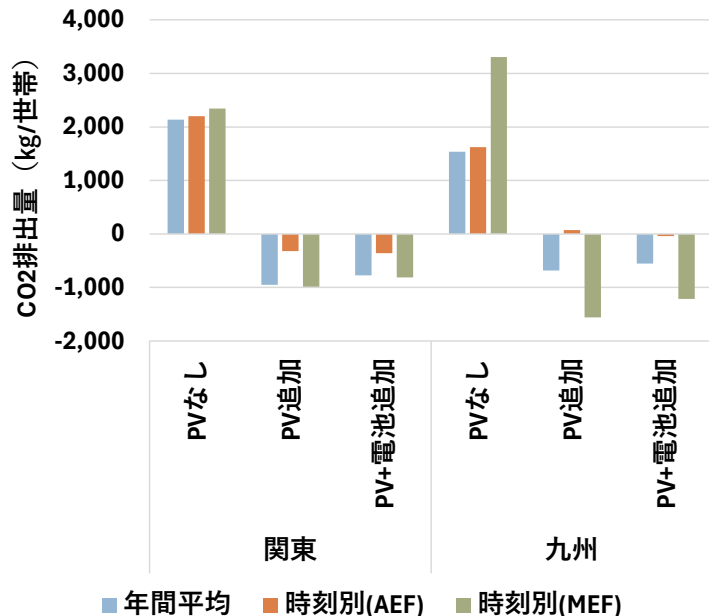
PV+蓄電池導入効果評価

| | | |
|--------------|--|---|
| 東京エリア | AEF (平均) 昼間の再エネ比率低く、AEFの時刻変動は比較的小さい。。 | MEF (限界) MEFは 逆潮抑制がなくLNG系火力が多くほぼ均一 (~0.5 kg/kWh) → DRの価値をMEFだけでは表現困難 |
| 関西エリア | AEF (平均) 原発の稼働状況によってAEFが大きく変動。昼間のAEFが比較的小さい傾向。 | MEF (限界) MEFは石炭・LNGの混在で変動あり。DRの価値評価に有効。 |
| 九州エリア | AEF (平均) PV導入量が多く昼間のAEFが低い。AEFの時刻変動が最も大きい。 | MEF (限界) PV余剰時間帯にMEF = 0 (435時間超)。それ以外は石炭系で~0.75 kg/kWh。 |

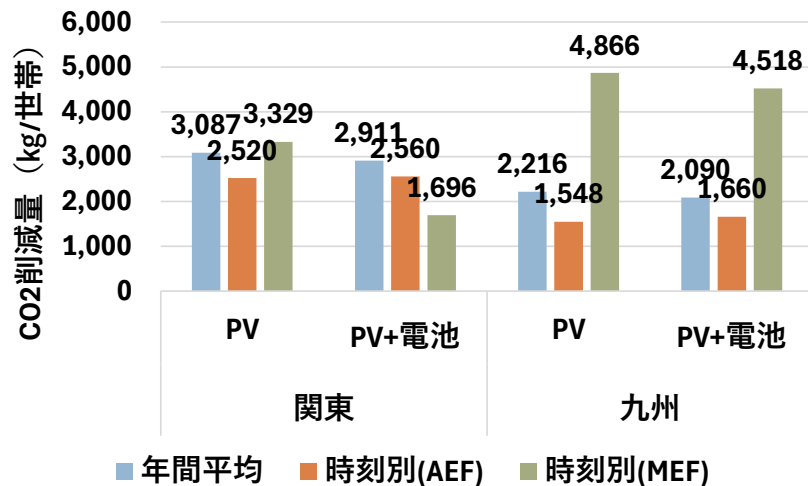
「平均原単位の公開」 → <https://www.iwafunelab.iis.u-tokyo.ac.jp/sip2025/> (月次・平日休日別・時刻別AEF、東京電力エリア FY2023)

PV+蓄電池導入のCO₂削減効果 — 原単位の選択による違い

想定条件：一般家庭（電力需要 4,903 kWh/年）、PV 5.9kW、蓄電池 8.6kWh/3kW 評価期間：2024/6～2025/5
 （蓄電池はPV余剰発生とともに充電開始し、不足すれば放電開始、売電のCO₂排出量はマイナスカウント）



CO₂排出量



CO₂削減量

想定条件：一般家庭（電力需要 4,903 kWh/年）、PV 5.9kW、蓄電池 8.6kWh/3kW 評価期間：2024/6～2025/5

① 年間平均原単位

PV効果：PVの価値が大きく表れる

蓄電池効果：蓄電池の追加価値 → 表現できない X

🚩 時刻別変動がないため充放電タイミングの効果が見えない

② AEF（時刻別平均）

PV効果：蓄電池によるCO₂削減効果が表れる ✓

蓄電池効果：九州の蓄電池効果 < 関東の蓄電池効果
(昼間AEFが低い九州では蓄電池の放電タイミングに注意)

🚩 需要側蓄電池の価値評価に有効

③ MEF（時刻別限界）

PV効果：九州：PV削減価値 > 関東（抑制なし時間帯が多い）

蓄電池効果：関東：MEFが一定 → 蓄電池の価値は表れにくい
九州：放電タイミングに依存

🚩 DRや充放電の運用最適化評価に有効。長期評価には不向き。

06

AEF vs MEF : 何を評価すべきか

海外事例を踏まえた政策・制度設計への示唆

AEF 平均排出原単位

✓ 長期的・構造的評価

- 再エネ導入促進効果の評価
- EV・蓄電池の長期（10年）環境価値評価
- 都市計画・自治体政策の評価
- GHG Protocol Scope 2 報告（改定案対応）

✓ 時刻別AEFの活用

- 単なるエリア平均ではなく時刻別で評価
- 需要側DRを引き出す適切なシグナルに

MEF 限界排出原単位

✓ 短期的・運用系の評価

- DR・電池の短期運用効果（1kWhシフトの価値）
- EV充電の最適タイミング判断
- 限定エリア・期間の政策評価

✓ 海外事例（カリフォルニア）

- DR評価にMEF（MOER）がデフォルト
- Avoided Cost CalculatorでMEFを金銭価値換算
- EV長期評価は依然として平均値（AEF）を基準

💡 東京のように逆潮抑制が少ない地域では、MEFだけを使うとDRの価値を顕在化できない（ほぼ一律LNG）→ AEF時刻別との組み合わせが有効

カリフォルニア（CAISO）の制度的背景

需要側対策（DR・省エネ・EVシフト）のCO₂評価にMEFがデフォルト。Avoided Cost Calculatorで「追加的削減量」を金銭価値に変換する制度であるため、政策目的と整合するのはMEFのみ。CAISOの市場設計自体がMarginal Heat Rate・Marginal Emission Rateに基づき、CO₂評価もmarginal-basedに統一。（ただし、EV導入時のベースの燃料CO₂として平均値（California Average Grid Electricity CI）を設定。時刻別のsmart charging 価値を評価する場合にのみ MEF ベースの時間帯CO₂を利用する。）

日本とカリフォルニアの比較

| 比較項目 | カリフォルニア（CAISO） | 日本（提案手法） |
|--------------|-------------------------|---------------|
| DR・電池評価の標準指標 | MEF（MOER） | MEF・AEF 両方を提案 |
| 長期EV評価の指標 | AEF（CA Average Grid CI） | 時刻別AEFの活用を推奨 |
| 時間解像度 | 5分値（WattTime） | 30分値（ユニット別実績） |
| 予測値の提供 | 24時間先（WattTime） | 未整備（今後の課題） |
| 地域差の反映 | グリッドゾーン別 | エリア別（10エリア） |
| 電源特定 | 稼働電源をほぼ特定可能 | ユニット別実績から推計 |

データ・手法

- 連系線潮流の電源特定情報の公開整備（現状は連系先エリアAEFで代替）
- 30分値での全エリアAEF・MEFのリアルタイム算定・公開基盤の整備
- MEF算定精度向上（負荷率モデルの高度化・ユニット情報の更新）

活用・制度設計

- 電力消費者への時刻別CO₂原単位の分かりやすい提供（スマートメーターとの連携）
- AEF・MEFを用いた需要側技術（DR・蓄電池・EV・ヒートポンプ）の環境価値評価制度の整備
- GHG Protocol Scope 2 改定動向を踏まえた企業の排出量報告への活用

海外との連携・比較

- 英国Carbon Intensity APIや米国WattTimeとの手法比較・ベンチマーク
- 国際的な方法論の統一・IEAやIPCC等との整合

| | | |
|---|-----------------------------------|---|
| 1 | 時刻別・エリア別CO ₂ 排出原単位の必要性 | GHG Protocol改定動向や需要側管理の観点から、時刻別・エリア別の高解像度な原単位算定が不可欠。年間平均では電力消費タイミングの差異を評価できない。 |
| 2 | 海外では先進的な提供体制が整備済み | 英国のCarbon Intensity API (AEF・30分値・無償)、米国WattTime (MEF・5分値・有償)、Electricity Maps (AEF・消費ベース・50カ国+) 等が実装されており、DR・EV充電最適化等に活用されている。 |
| 3 | 提案手法：揚水原資・連系線潮流の考慮 | 先行研究では揚水発電所の存在が算定精度に影響。提案手法では揚水原資を火力・再エネに分離し、より正確なAEFを算定。連系線潮流も考慮した拡張も実施。 |
| 4 | AEFとMEFの適切な使い分け | MEFは短期・運用系 (DR・電池の1kWh効果)、AEFは長期・構造系 (EV10年評価、都市計画)。両者を組み合わせることが重要。東京のように逆潮抑制が少ない地域ではAEFも不可欠。 |
| 5 | 応用：PV・蓄電池の環境価値評価 | 時刻別AEFを用いることで蓄電池導入のCO ₂ 削減価値が初めて表現可能に。九州と関東のエリア差も定量評価でき、地域の電源構成の特性を反映した政策設計が可能になる。 |

本研究の公開データ

時刻別平均CO₂排出原単位 (AEF) 公開サイト (岩船研究室)

<https://www.iwafunelab.iis.u-tokyo.ac.jp/sip2025/>

パシフィックパワー提供 (国内参考)

<https://pacific-power.co.jp/cdef-graph/index.php>

主要海外データソース

National Grid ESO (英国)

carbonintensity.org.uk (無償API)

WattTime (米国、RMI)

watttime.org (有償API、MEF専門)

Electricity Maps

electricitymaps.com (50カ国+、消費ベースAEF)

ENTSO-E Transparency Platform (欧州)

transparency.entsoe.eu (欧州燃料別発電量)

energy-charts.info (ドイツ・Fraunhofer ISE)

energy-charts.info (無償)

ご質問・ご議論をお待ちしております

ご清聴ありがとうございました

Thank you for your attention

岩船 由美子

東京大学生産技術研究所 エネルギーシステムインテグレーション社会連携研究部門

<https://www.iwafunelab.iis.u-tokyo.ac.jp/>