

CO₂ 電解と膜分離の公開データにみる工程評価の境界

期間積分と流量基準の監査から分離負荷と最終適合量の測定へ

山崎哲央 Norio Yamazaki

2026 年 10 月 4 日 第 6 稿

選択的批判的総説と公開データの記述的二次解析

要旨

CO₂ 電解と膜分離を工程として比較するには、運転期間、電圧と流量の測定基準、後工程の負荷、最終適合量を対応付ける必要がある。本稿は選択的批判的総説と公開データの記述的二次解析として、CO₂ 電解の独立研究 3 報から経時変化を読める 3 系列と、膜分離 1 系列を検討した。CO 生成の共通期間の前後半では、原著電圧に基づく電力原単位が約 3.5–7.1% 増加し、電圧とファラデー効率の寄与は系列ごとに異なった。Sun の報告抵抗を加える条件付き感度では原単位が約 7.65% 増加し、電圧の測定範囲が比較に影響した。一定表示の Wei 小面積系列は経時変化の判定から除いた。PAN 膜の透過度は 28 日目に初日の 72.6% となったが、沸点分布の重なりは分画性能の維持を定性的に支持した。さらに、低い CO 生成炭素利用率から生成 CO 以外へ向かう供給炭素量を求め、分離・再循環負荷の仮定を検討した。学術的寄与は、既知の収支関係の多事例適用と測定基準の追跡可能な監査にある。実務面では、後工程の負荷がセル改善を相殺する条件と、未測定値による比較保留条件を示す。実設備での費用削減と判断改善は今後の検証対象である。

キーワード CO₂ 電解 膜分離 公開データ 炭素収支 最終適合量 工程評価

Process evaluation boundaries in public CO₂ electrolysis and membrane separation data

Abstract

Comparing CO₂ electrolysis and membrane separation requires consistent observation periods, voltage and gas-flow bases, downstream loads and final conforming output. This selective critical review and descriptive secondary analysis examines three informative CO-producing durability traces from three independent reports and one membrane-permeance trace. Published-voltage electricity intensities increase by approximately 3.5–7.1% between the two halves of a common observation window, with different voltage and Faradaic-efficiency contributions. Conditionally adding Sun’s reported external resistance increases its intensity by approximately 7.65%, illustrating the effect of voltage boundaries. The constant-display small-area Wei trace is excluded from temporal-change evidence. PAN membrane permeance reaches 72.6% of the first-day value on day 28, while overlapping boiling-point distributions qualitatively support maintained fractionation. A feed-carbon balance further connects low CO utilization to conditional separation and recycle loads without double counting anode carbon transfer. The academic contribution is a traceable multi-case application of established balances and an audit of measurement bases. Practical results include downstream-load break-even conditions and explicit comparison holds for missing inputs. Causal technology rankings, plant cost savings and improved decisions remain unvalidated.

1 研究目的と検討範囲

工程の採用順位を定めるには、用途に適合した機能の達成量、原料変動、履歴、回収・再処理と残留物に対応付ける必要がある。本稿は、CO₂ 電解の複数研究と膜分離の公開データを再解析し、期間と測定範囲をそろえた比較、追加測定の優先順位と比較を保留すべき条件を検討する。

定量的な中心は CO₂ 電解と膜分離である。CO₂ 電解は 3 報の 4 公開系列を監査し、そのうち経時変化の情報を持つ 3 系列を主解析に使う。Wei の 4 cm² 系列は一定表示の参考値として別扱いにする。自律実験と樹脂循環は工程境界の補助例へ縮め、詳細を補足資料に移した。PFAS 処理は

全相の物量収支と電力測定範囲の補助例とする。中心文献の証拠範囲を表 1、CO 系列の選択手順を第 2.1 節に示す。

研究問いは、公開された研究性能と工程性能の隔たりをどの条件が説明するか、既存の TEA・LCA と適合判定を使って性能の優劣をどのように比較するか、原料と履歴の相互作用を検証するために何を追加測定すべきか、である。TEA は技術経済評価、LCA はライフサイクル評価を指す。

研究形式は選択的批判的総説であり、主たる 4 系列の記述的二次解析、一定表示系列の監査、仮定計算、追加検証の設計を含む。原著の実験結果、原著の工程モデル、本稿の再計算と未実証の仮説を区別する。同一条件の独立な実験再現は実施しておらず、限界を第 11 節にまとめる。

2 文献の選定と証拠の扱い

調査基準日は 2026 年 10 月 4 日である。2026 年にオンライン公開された六文献を起点に、出版社、著者所属機関、公開リポジトリ、補足情報、元データを照合し、別方式の PFAS 研究と評価方法の先行研究を追加した。採用基準は対象との直接の関連、一次の公表主体への追跡可能性、引用する主張と条件の確認可能性である。中心七文献の年は初回オンライン公開年を指す。先行研究 [15] は初回オンライン公開が 2025 年、巻の年が 2026 年であり、中心七文献とは別に扱う。

論文タイトル・DOI、技術名と benchmarking、techno-economic、defluorination、uncertainty 等の組合せ、訂正情報を検索した。検索語、照合箇所、取得先と未解決事項を補足検証資料に記録した。追加解析では既引用の Sun ほか [25] と酸性 MEA の Wei ほか [30] を選び、適格性と共通期間の規則を明示した。第 5 稿の内部ファイルの更新時刻は保存するが、計算前の登録を独立に証明する記録はないため、事前登録とは主張しない。検索は目的選択であり、系統的総説としての網羅性は主張しない。

証拠は、公開された実験報告、原著の工程モデル、本稿の二次解析、仮定計算、未検証の提案に分ける。引用値ごとにアクセス範囲と日時を記録し、訂正がある先行研究は訂正版と対応付ける [16,17]。

表 1 中心文献の証拠範囲

文献	公開日・種類	照合した資料	採用理由	評価対象
Pilon ほか [1]	2026 年 4 月 13 日 原著	著者公開稿 本文 コード 案内	自律化と人の関与を 比較	運転方式・探索の論点
Zheng ほか [2]	2026 年 2 月 10 日 原著	本文 補足 時系列 XLSX	電圧と効率を時間積 分できる	CO ₂ 電解の再解析
Biemolt ほ か [3]	2026 年 6 月 5 日 展望	公開要旨 書誌	水・イオンと工業負 荷の境界	輸送・炭酸塩の論点
Choi ほか [4]	2026 年 6 月 24 日 原著	要旨 図 3 凡例 補足 98 頁 図 3・4 元データ	透過度と分画・工程 モデルを分けられる	膜の再解析と分画証拠
Schmuck ほ か [5]	2026 年 6 月 3 日 原著	公開本文 採取・品質指 標	実際の回収原料の品 質差	樹脂循環の論点
Durak ほか [6]	2026 年 9 月 1 日 原著	公開本文 補足 50 頁	除去と脱フッ素化の 境界	光駆動処理の論点
Yu ほか [21]	2026 年 8 月 22 日 原著	公開要旨 補足 71 頁	別方式と実排水・電 力指標	パルス電解の論点

表 1 のアクセス範囲は引用箇所について示す。Biemolt ほか [3] は公開要旨と書誌、Choi ほか [4] は公開要旨、図 3 の公開凡例、補足情報 98 ページ、図 3・図 4 の元データ、工程モデルの表を照合した。中心文献の役割は相補的であり、研究の質や世界的順位のランキングとして選定していない。

表 2 補助事例を含む比較機能と証拠

領域	主な課題	比較すべき解決案	採否を判断する証拠
自律実験	目的関数の不足と分析誤差	全面自律化と人が分析する方式	失敗を含む記録と調製規模での再現
CO ₂ 電解	輸送の偏りと選択性低下	前処理強化と耐性を高める設計	実原料での適合量と総電力
膜分離	原料変動と堆積と洗浄	膜単独と膜蒸留の組合せ	選択性と回収率と洗浄後の性能

領域	主な課題	比較すべき解決案	採否を判断する証拠
樹脂循環	汚染物と再生材の用途	物理的再生と原料別の化学的経路	用途適合性と炭素の行先
PFAS 処理	相間移動と生成物の未把握	全量処理と濃縮後の処理	出口濃度とフッ素収支と残渣

2.1 追加再解析の選択と統一手順

追加対象は、CO を主要製品とし、本文・補足情報で定電流条件を確認でき、全セル電圧と CO ファラデー効率の公開時系列に重なる期間がある研究とした。Sun ほか [25] は既引用の 100 cm² MEA を長期系列として検討できるため、Wei ほか [30] は酸性電解質と二つの電極面積を含み、異なる運転構成へ適用できるため採用した。Yang ほかの酸耐性 MOF 研究 (DOI 10.1038/s41467-024-51475-7) はギ酸を対象とするため、CO の数値比較へ採用しなかった。採否は成果値の大小で決めていない。

統一手順は、列と図の対応、電圧の測定点、定電流値、時間の順序、単位、効率範囲を確認し、各系列の電圧・効率の観測期間が重なる範囲に限って式(1)を適用する。開始・終了時点の外挿は行わない。電圧と効率を別々に線形補間して積分する。定電流では分離した積分が同じ収支を与える。元値は保持し、同時刻の連続電圧値は零時間の跳躍として台形積分する。

共通期間は、公開 4 系列の重なりを開始を時間単位で切り上げ、終了を切り下げ、上限 60 h を置く解析規則とした。得られた 2–60 h を等長の 2–31 h と 31–60 h に分ける。経時変化を読む 3 系列では、後半/前半の原単位比を電圧平均の比と効率平均の逆比に分解する。各系列の観測全期間も併記する。一定表示系列を除いても共通期間は同じである。期間をそろえる操作は化学条件の交絡を除かない。

効率の左値保持・線形補間・右値保持を数値処理の感度として計算する。Sun には CO と H₂ の効率合計による規格化の感度を加える。時間点を統計的反復と扱わず、独立研究 3 報の主解析 3 系列と参考 1 系列を区別する。選択規則、抽出 CSV、計算結果、ハッシュ、独立検算を補足資料へ含める。

3 自律実験から得られる補助的論点

Pilon ほかの RoboChem-Flex は、限定した実験空間で探索・実行・分析を連携できることを示す [1]。工程評価への接続では、探索回数の減少に加え、校正、分析待ち、停止と再現確認を含む条件獲得費用を測る必要がある [14,15]。これは本稿の期間と境界をそろえる考え方に対応する。

収率だけでなく分離負荷、規格不適合量と資材量を定義し、安全上許可された範囲で候補を比べる。成功、反応不成立、分析不能と装置停止を区別して記録し、同じ課題・予算・停止条件で人による探索等と比較する。運転方式と目的関数の詳細は補足資料 S1 へ移した。

4 CO₂ 電解における課題と解決策

4.1 界面改良と性能劣化の併存

Zheng ほかは、触媒層ヘイオノマーを直接成膜する PIM 界面を用い、純水供給の膜電極接合体で CO ファラデー効率と電圧を改善した [2]。小型セルの補足図 s29 は 200 時間超で効率 93.9% から 79.1% への変化を記し、別の拡大セルの図 3i は 3.2 A で 200 時間超、CO ファラデー効率 80% 超を報告する。本稿の時系列再解析は後者に対応する。

拡大セルの Methods には膜電極 10×10 cm²、対極 8×8 cm²、水流量 640 ml/min、CO₂ 流量 300 sccm が記載されている [2]。3.2 A を各面積で割る名目電流密度は 32 および 50 mA/cm² である。これは面積基準の二つの表示であり、有効反応面積の測定値ではない。電圧は iR 補正なしであり、再解析にもこのセル端子電圧を使う。

Biemolt ほか [3] は工業条件を意識した電流密度として 200 mA/cm² 超を挙げる。再解析した耐久運転の名目電流密度はこれより低く、小型セルで報告された 50–400 mA/cm² の性能とは運転を分けて扱う。面積抵抗が同じならオーム電圧損失は電流密度に比例するため、約 6.95 kWh/kg を高電流密度へ外挿するには抵抗、輸送、温度、効率の再測定が必要である。水・イオン輸送と炭酸塩の連成は文献 [3,18] の主要論点である。

4.2 不純物と再循環を含む設計

排ガス由来の CO₂ や循環水へ移る際は、原料規格を定義し直す必要がある。硫黄成分、窒素成分、酸素、微量有機物など、対象工程で検出された不純物を測定し、触媒、膜、再循環時の蓄積への影響を調べる。許容濃度は、対象物質と運転条件に対応する検証から設定する。

解決案は二つある。前処理を強化する案では電解槽を保護しやすいが、吸着材、圧縮、交換作業、廃棄物の負担が増える。不純物への耐性を高める案では前処理の負担を減らせる可能性があるが、複合不純物と長期劣化の検証に時間を要する。実装時は、前処理とセル改良を同じ製品原単位で比較し、片方の費用を評価範囲から外さない。

未反応 CO₂ や副生物の再循環も、見かけの回収率だけで決めない。再循環に伴う不純物の濃縮、パージ量、圧縮電力、排出先を測定する。パージを減らして原料損失を抑えた結果、劣化や規格不適合が増えるなら、工程全体の性能は改善したとは限らない。

第 4.4 節の期間平均効率から、CO 生成速度は約 0.842 mmol/min となる。供給 300 sccm を 0 °C・1 atm 基準と仮定すると単通過炭素利用率 u は 6.29%、24.5 L/mol を供給流量にも適用する別の仮定では 6.88% となる。sccm の基準温度は確認できないため条件付き推計である。生成 CO 以外へ向かう供給炭素の CO₂ 換算質量は $(44/28)(1/u-1)$ より、生成 CO 1 kg あたり 21.3–23.4 kg となる。この量には陰極の未反応 CO₂、アノードへの移行、他生成物と期間内の在庫変化が含まれ得るため、アノード CO₂ を別に加えてはならない。陰極・陽極の出口流量と炭素収支を測り、実際に分離・再循環する流れごとの負荷を算定する [2,18]。

FE の流量基準について、Zheng の Methods は FE 式の v を GC 出口流量と定義し、石けん膜流量計による校正を記す [2]。入口 300 sccm を FE 計算へ代入したと断定する根拠はなく、本稿は報告 FE を保持する。GC 出口と電解槽出口の接続・測定条件、各時点の出口流量の原記録は別途確認を要する。イオン輸送による CO₂ 移行は電流だけでは確定せず、膜を通る炭酸塩・重炭酸塩・OH⁻等の割合と炭素収支を測る。

4.3 製品量に結び付く耐久性指標

提案として、耐久性は運転時間に加え、累積した規格適合製品量で報告する。期間中のセル電圧、ファラデー効率、出口濃度、回収率、品質判定を同じ時刻へ対応付ける。ファラデー効率は投入した電荷が目的生成物へ使われた割合であり、製品ガスの純度や原料炭素の利用率とは異なる。

ファラデー効率の期間平均は、目的物へ使われた電荷の総量を投入電荷の総量で割って求める。停止、洗浄、再始動と品質判定を含む期間を併記し、加速試験では劣化機構と通常運転との対応を検証する。

4.4 公開時系列によるセル電力の再解析

文献 [2] の Source Data [23] にある Fig 3 シートを対象とし、BR・BS 列の時間とセル電圧、BU・BV 列の時間と CO ファラデー効率を抽出した。0–200 h の電圧 1,201 点と効率 41 点を使用し、200 h を超える電圧値と数値でないセルを除いた。列見出し BQ1 は Fig. 3h と重複するが、公開本文の図 3i の凡例、時間軸、3.2 A の条件と対応を照合した。効率の測定点の間と電圧点の間は線形補間し、共通期間に台形則を適用した。

$$e_{DC} = \frac{nF}{3.6 \times 10^6 M} \times \frac{\int_0^T V(t) I(t) dt}{\int_0^T \eta_F(t) I(t) dt} (kWh/kg) (1)$$

式(1)で $n=2$ 、 $F=96,485$ C/mol、CO のモル質量 $M=0.028$ kg/mol とした。 η_F は割合、積分の時間単位は分子・分母でそろえる。原著図 3i と Methods が報告する定電流 3.2 A を用いると、0–200 h の電圧平均は 3.0705 V、効率平均は 84.636%、セル直流電力量は 1.9651 kWh、電荷と効率から推定した生成 CO 量は 0.28295 kg となる。その比は 6.9451 kWh/kg であり、本文では約 6.95 kWh/kg とする。公開表の対象列に電流の時系列はなく、電流の独立な測定確認は追加課題に残る。

期間原単位と開始点の値 6.0386 kWh/kg との比は、 $6.9451/6.0386 = (3.0705/2.973) \times (94.251/84.636) = 1.0328 \times 1.1136$ となる。電圧変化が単独で与える倍率は 3.28% 増、効率変化の逆数が与える倍率は 11.36% 増であり、効率低下が主因である。積の交差項は 0.37 ポイントで、全体の増加は 15.0% となる。開始点は運転内の要因分解に使う内部参照点として位置づける。

本稿の e_{DC} はセルの全直流電力量を CO 生成量で除し、副生 H₂ への配分や回収便益を差し引いていない。H₂ の市場価値を測定した結果ではなく、配分前の物理的な指標である。複数製品を利用する TEA・LCA では、総収支を示した上で物理的配分、経済的配分、またはシステム拡張の基準と感度を記載する [13]。

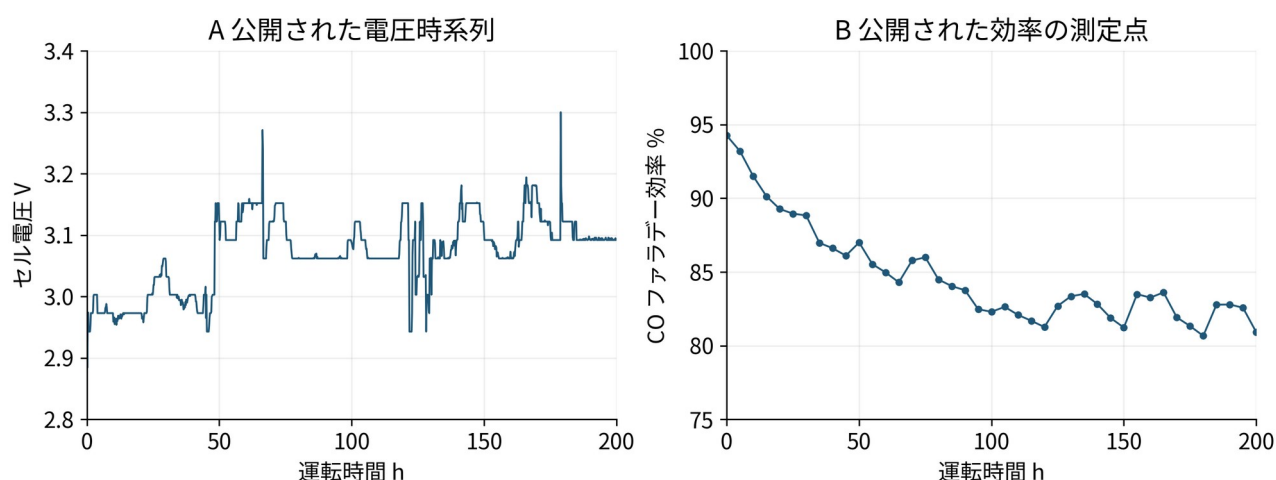


図1 Zheng ほか [2,23] の 3.2 A 運転の公開時系列を再描画した。電圧は iR 補正なしで、一時的な上昇を含む。効率の点は測定時点、線は補間を表す。1,201 電圧点と 41 効率点は一つの時系列を構成する。

効率の左側値保持、線形補間、右側値保持による原単位は、それぞれ 6.9314、6.9451、6.9588 kWh/kg となる。電圧の最大値は 179 h の 3.300 V であった。感度計算として 3.20 V 超の 3 点を残りの隣接点から線形補間で置換すると 6.9442 kWh/kg、主解析から -0.0125% となり、3.25 V 超の 2 点の置換では -0.00646% となった。これらは処理方針の感度であり、外れ値の認定や信頼区間を与えるものではない。主解析ではすべての電圧点を保持する。

本稿の参照電圧 1.33 V は、Sun ほか [25] の式(4)の平衡電位差 $-0.10 - 1.23 = -1.33$ V の絶対値と同じ値である。これを用いた CO のみの期間エネルギー効率は $1.33 \int \eta F I dt / \int V I dt = 36.7\%$ となる。Zheng 原著の小型セル PIM-Q では $25^\circ\text{C} \cdot 50 \text{ mA/cm}^2$ で $43.0 \pm 1.6\%$ を報告する [2,23, 図 3d]。ただし、照合した本文・補足情報から原著 EE の参照電圧と算出基準を特定できず、同一基準の効率差とは断定しない。別面積・別負荷・測定点と期間積分の違いもあり、この並記から性能の改善率を計算しない。本稿の 36.7% はセル DC と CO 生成の指標で、分離・補機と副生 H₂ のエネルギーを含めない。

4.5 複数研究への適用と電圧の測定範囲

独立研究 3 報の主解析 3 系列と参考 1 系列の電気条件を表 3a、化学条件を表 3b、期間原単位を表 4 に示す。Zheng [2,23] の 3.2 A、Sun [25] の 2 A、Wei [30] の 100 mA/cm^2 を用いた。Wei の電流は有効面積から $0.4 \text{ A} \cdot 10 \text{ A}$ と計算する。Sun の 10 A における CO 効率 86.8%・単通過利用率 40.4% は別の運転点であり、2 A 耐久系列へ代入しない。

表 3a CO 公開系列の電気条件と電圧範囲

系列・原著	電流・名目面積	電流密度 mA/cm ²	電圧・観測範囲
Zheng [2,23]	3.2 A; 100/64 cm ²	32/50	全セル iR 補正なし; 0–200 h
Sun [25]	2 A; 100 cm ²	20	公開値は外部損失除外値に近い; 2–60 h
Wei [30] 4 cm ² 参考値	0.4 A; 4 cm ²	100	全セル iR 補正なし; 1–200 h
Wei [30] 100 cm ²	10 A; 100 cm ²	100	全セル iR 補正なし; 1–120 h

表 3b CO 公開系列の化学条件と供給流量

系列	陰極触媒	膜・分離層	アノード液	温度	供給流量
Zheng [2]	Ag 触媒	PIM-Q QAPPT 陰イオン交換層	純水	拡大耐久系列は未確認	CO ₂ 300 sccm 水 640 mL/min
Sun [25]	Co-CNTs-MW	Sustainion x37-FA AEM	0.1 M KHCO ₃	耐久系列は未確認	CO ₂ 80 sccm を仮定 液 20 mL/min
Wei 4 cm ² [30] 参考	スパッタ Ag	ナイロン多孔膜 0.22 μm	0.25 M Cs ₂ SO ₄ 、 H ₂ SO ₄ で pH 2	耐久系列は未確認	CO ₂ 20 sccm (標準条件) 液 5 mL/min
Wei 100 cm ² [30]	スパッタ Ag	ナイロン多孔膜 0.22 μm	0.25 M Cs ₂ SO ₄ 、 H ₂ SO ₄ で pH 2	耐久系列は未確認	CO ₂ 300 sccm 液 20 mL/min

耐久系列に対応する温度が明記されない場合は未確認とした。Zheng の 25 °C は小型セルの一般条件であり、拡大耐久系列の実測温度記録ではない。Sun の 80 sccm は 1–5 A の説明から 2 A へ適用する仮定である。アノード液の実測導電率はいずれもこの耐久系列の対応値を確認できない。

同じ電荷収支の計算法 $u = I \eta F / (2F n \text{CO}_{2,\text{in}})$ (入口モル流量は mol/s) で観測全期間の平均を使うと、Sun 2 A は 80 sccm を仮定して 16.4% (22.414 L/mol)、17.9% (24.5 L/mol) となる。Wei 100 cm² は 300 sccm と原著 FE/SPCE 式の 24.0 L/mol で 24.0%、4 cm² 参考値は 20 sccm

の標準条件を仮定して 14.9%となる。sccm の基準と耐久流量の対応が十分でないため、これらは条件付き推計であり、原著の別負荷での最高利用率とは区別する。

Sun の Source Data の Figure 4g は電圧 217,805 点と効率 30 点を含む。同時刻の隣接電圧値 4 組は順序を保ち、零時間の跳躍として扱う。本文は耐久電圧を約 3.10 V、外部抵抗除外値を約 2.88 V と説明するが、公開表の平均 2.876 V は後者に近い。外部配線・電源内部抵抗 0.11 Ω を一定と仮定して 0.22 V を加えると、原単位は 5.85 から 6.30 kWh/kg へ約 7.65%増える。未補正電源時系列がないため、これは条件付き感度である。

Sun の Methods は 1・3・5 A と 8・10 A の入口・出口流量を併記するが、FE 式の G を室温・常圧の CO₂ 流量と記しながら T=273.15 K を用い、2 A 耐久時の出口流量系列も示さない [25]。報告 FE を入口流量による値と断定して補正はしない。仮に FE 計算に使った流量に対する実際の出口流量比 δ が 0.90 なら、FE と u は 0.90 倍、eDC は 1/0.90 倍 (11.1%増) となる。これは基準不一致の条件付き感度である。Wei は Methods の式(7)に陰極出口流量と石けん膜流量計を明記する [30]。酸性系でも出口流量の確認を省略しない。

Sun では 30 効率点すべてで CO+H₂ の合計が 100%を超え、最大 104.6%となる。主解析は報告値を保持する。二種だけが生成し、共通の乗法的な分析偏りがあるという仮定の下で $\eta_{\text{CO}}/(\eta_{\text{CO}} + \eta_{\text{H}_2})$ へ規格化すると、期間平均 CO 効率 91.46%、原単位 6.02 kWh/kg となり、主解析 5.85 から 2.84%増える。さらに 0.22 V を加えた感度は 6.48 kWh/kg となる。規格化は測定値の訂正でも GC 不確かさの推定でもなく、物質収支を閉じる仮定の影響を示す。

表 4 原著電圧を用いた生成 CO あたりの期間原単位

系列	観測期間 h	全期間 kWh/kg	2-60 h kWh/kg	後半/前半の変化
Zheng	0-200	6.95	6.53	+6.49%
Sun 公開電圧	2-60	5.85	5.85	+7.05%
Sun +0.22 V 仮定	2-60	6.30	6.30	電圧境界の感度
Wei 4 cm ² 参考値	1-200	6.32	6.32	判定不能 公開値が一定表示
Wei 100 cm ²	1-120	6.80	6.55	+3.52%

共通期間の後半/前半の倍率は、Zheng の電圧 1.0176 と逆効率 1.0465 の積が 1.0649、Sun の 1.0014×1.0691 が 1.0705、Wei 100 cm² の 1.0122×1.0227 が 1.0352 となった（図 2）。3 系列では原単位が増加するが、変化の大きさと要因は異なる。この結果は観測窓内の記述であり、時間に対する共通の劣化則や材料・方式の因果的順位を与えない。

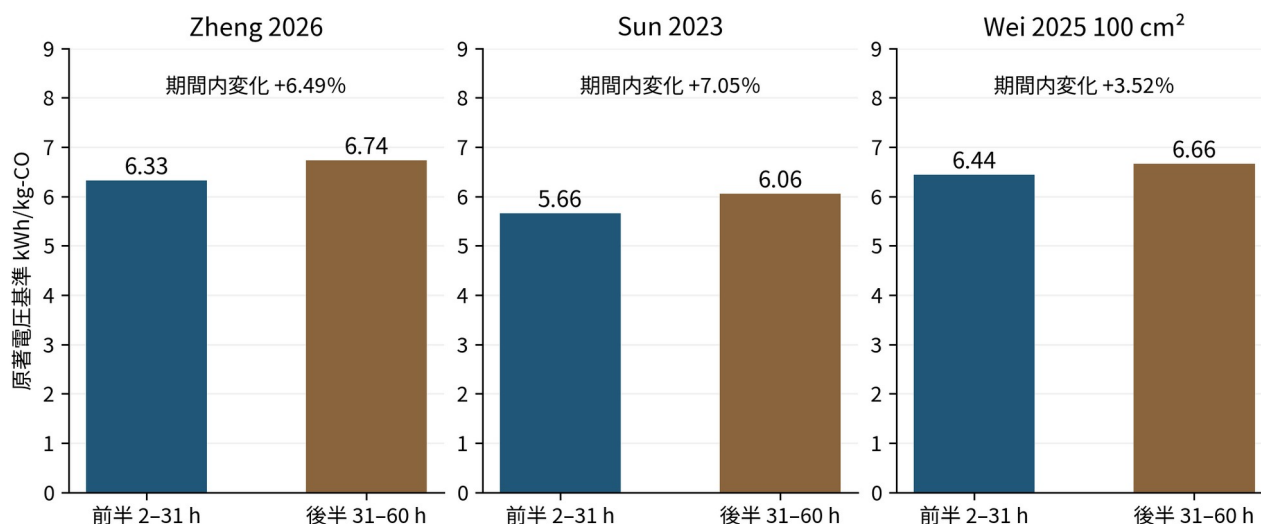


図 2 経時変化を読める 3 系列の共通 2-60 h の前半・後半。棒は区間電力量/生成 CO 量を表す。Sun は公開電圧基準であり、電圧と効率規格化の感度は本文に示す。Wei 4 cm² は一定表示のため除いた。独立な耐久運転反復が未確認であり、誤差棒は付していない。

効率補間の感度範囲は Zheng が 6.50–6.55、Sun が 5.84–5.87、Wei 100 cm² が 6.548–6.553 kWh/kg であり、測定不確かさの範囲ではない。Wei 4 cm² は共通 2-60 h に 99.99%・3.30 V の一定表示が続くため、表 4 の経時変化を「判定不能」とし、要旨・結論・図 2 の根拠から除いた。全 1-200 h では効率表示に 99.97–99.99% の微小な段階差があるが、丸め方や元の測定記録は確認できない。生データ、模式値のいずれかとは断定しない。

次に必要な情報は、同期間の購入電力、出口 CO/H₂/CO₂ の組成・流量・圧力、再循環、アノード炭素流と最終適合量である。表 3b の触媒、膜、アノード液と流量の違いは電圧・輸送へ影響する。液の実測導電率と耐久運転中の温度記録は不足し、化学系の違いと電圧の測定範囲の違いを一つの因子へ帰属できない。工業負荷へ外挿する際は、同じ規格・負荷でセルと後工程を測る。

5 膜分離における課題と解決策

5.1 膜と蒸留を組み合わせる根拠

Choi ほかは、初期にメソ孔を持つ PAN 膜に原油成分が堆積して選択層を形成し、軽質成分を分離する事例を報告した [4]。4 週間の運転と、膜・蒸留のハイブリッド工程の定常モデルにおける負荷削減を示している。本稿では、透過度の時間変化と分画性能の証拠を並べて評価する。

膜の透過度（パーミアンス、permeance）は透過流束を駆動圧力差で除した量であり、本研究の単位は $\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{bar}^{-1}$ 、すなわち LMH/bar である。膜厚で正規化する permeability とは区別する。原油混合物では透過度に加え、透過液の沸点分布、成分別の分離係数、回収率を評価することが製品機能との対応に必要である。

5.2 洗浄と立上げによる性能変化

考察として、堆積が分離機能の一部である場合、強い洗浄が望ましい状態を失わせる可能性がある。逆に、堆積の進行が圧力損失を増やすなら、洗浄を遅らせることも不利になる。本稿の提案は、透過流束、選択性、差圧、供給組成を同時に記録し、立上げ、安定運転、洗浄後を別の状態として評価することである。

膜単独で製品規格を満たす案と、膜で予備分画し蒸留で仕上げる案を、同じ原料・規格・回収量で比較する。前者は規格の維持と回収率、後者は送液・洗浄と蒸留の残存負荷が主要な制約となる。

費用には膜モジュール、圧力に必要な動力、膨潤・洗浄・交換と残留物を含める。原著の補足 Note 9 は定常 TEA で年間 8,000 時間、膜寿命 5 年を仮定し、原料依存の堆積と長期安定性を範囲外とする [4]。実験期間とモデルの利用期間を区別して比較する。

5.3 公開された透過度と分画性能の照合

公開データ [24] の Source Data Fig. 3.xlsx、Fig. 3g シートにある PAN (10) の 18 測定時点を再解析した。初日の正規化値 1 に対して 28 日目は 0.726 で、27.4% 低い。測定点の間を線形とした 1–28 日の時間平均は 0.760 となる。同じ 14 日目の PAN (10) は 0.806、oNF-2 は 0.400 である。後者の記録は 14 日で終わる。監査用ファイルは公開値の桁を保持し、本文の表示はおおむね有効数字 3 桁とする。

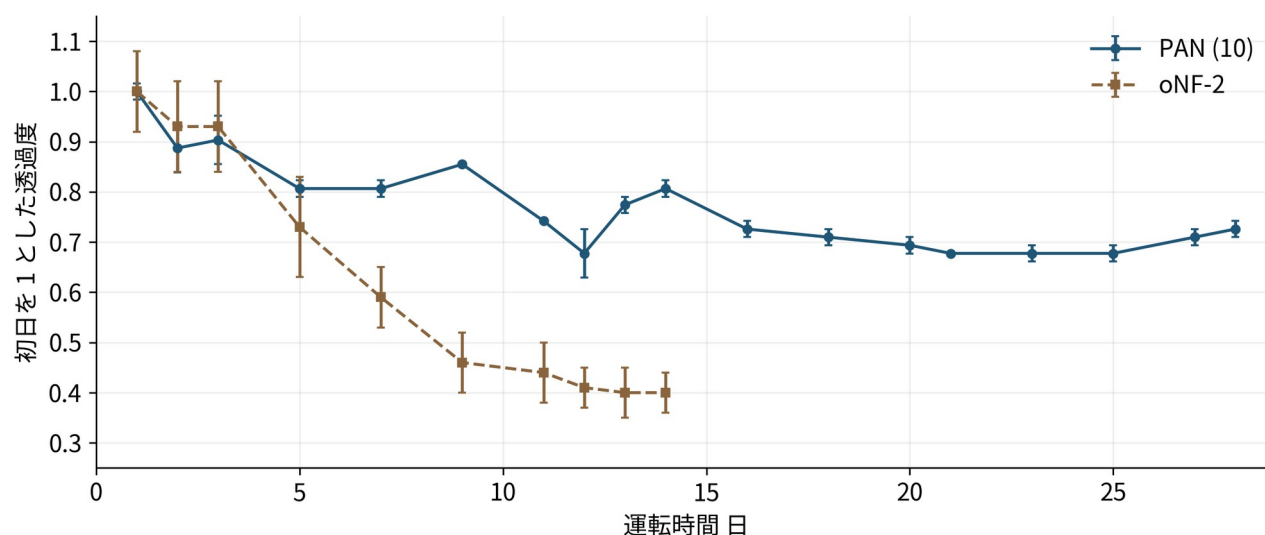


図3 Choi ほか [4,24] の正規化透過度。誤差棒は公開表の標準偏差をそのまま用いたもので、原著図 3g は平均±標準偏差、N=3 と記す。比の伝播不確かさを再推定した表示ではない。Arabian light 原油 batch #2、クロスフロー 40 bar・50 L/h、室温。線は視認の補助である。

正規化比 $z=P_t/P_1$ の概略の相対分散は、 $\text{Var}(P_t)/\mu_t^2 + \text{Var}(P_1)/\mu_1^2 - 2\text{Cov}(P_t, P_1)/(\mu_t\mu_1)$ に依存する。公開表の標準偏差をそのまま表示し、共分散を仮定した再推定は行わない。初日にも非零の誤差棒がある。初日平均 μ_1 で各測定を割る方法なら表示は $\text{SD}(P_t)/\mu_1$ に相当し、分母の不確かさまで伝播させた比の標準偏差とは異なる。原著の反復ごとの正規化手順は確認できないため、この解釈を条件付きとする。正規化値の近似的な一致から生の透過度を復元しない。

補足図 43・44 の透過液の沸点分布は、同じ原油 batch #2 で分画性能が維持されたという原著の解釈を定性的に支持する [4]。根拠は図の曲線の重なりを目視照合であり、統計的な同等性や規格合格率の検証ではない。透過度の低下を選択性の低下へ読み替えず、輸送能力と分離機能を併記する。照合した元データにこれらの経時沸点曲線の数値表は確認できず、定量的な比較には沸点分布、成分別分離係数、回収率とその不確かさの時系列が必要である。

補足表 14 では、加熱炉と凝縮器の負荷の合計が従来 2.35×10^5 kW からハイブリッド 1.61×10^5 kW となる。表示値だけからの削減率は 31.49% である。各値が表示の最終桁で四捨五入されたと仮定した計算範囲 31.13–31.85% には原著の 31.6% が含まれ、丸め差を数値誤りと判定しない。この範囲は統計的信頼区間ではない。

原著の 31.6% は加熱・冷却負荷の合計についての定常モデル値である。冷却水 20.7%、CO₂ 排出 37.6% の削減も、補足表 14–17 の境界と仮定に対応する [4]。購入電力・熱供給源、膜輸送、交換、洗浄と残留物を加えた評価では、同じ製品範囲と品質を満たす工程インベントリが必要である。

6 樹脂循環から得られる補助的論点

Schmuck ほかは、同じ産業選別ラインを異なる時期に用いて、分別回収と混合廃棄物の後選別の原料品質を比較した [5]。対象樹脂の割合が近くても水分・汚れ・金属・ハロゲンが異なるという結果は、回収重量だけでは用途適合量を定められない例となる。原料品質から推論する製品性能と、直接の用途試験を区別する。

機械的再生、精製、解重合等の順位は樹脂・用途・機能単位に依存する [19]。本稿の最終規格への合格割合は、文献上の相対物性指標とは異なる。工程炭素の行先と再処理後の適合量に対応付ける考え方を CO 回収の収支にも用いる。経路選択と炭素配分の詳細は補足資料 S2 へ移した。

7 PFAS 処理における課題と解決策

7.1 低温脱フッ素化の成果の範囲

Durak ほかは、アミン修飾メソポーラスシリカに Pd または Pt を担持し、PFOA・PFOS の脱フッ素化を室温で示した [6]。図 2 の条件は PFAS 10 mg/l、触媒 400 mg/l、UVC 254 nm・2.6 mW/cm²、pH 4.2–4.5、24–72 時間を含む。原著は測定可能な酸化短鎖生成物の蓄積が少ないとし、補足の機構検討には部分脱フッ素化種と低強度の短鎖種も記載する。処理完了の検証には対象 PFAS、生成物と全相のフッ素収支を組み合わせる。

MeOH 量の記載は再現条件の未解決点である。図 2 凡例と結論は 20 ppm と記す一方、Methods の Photocatalytic reactions は 100 ml 石英容器と MeOH 2.5 ml を記す [6, 本文 p.1173]。最終液量を仮に 100 ml、密度を約 0.79 g/ml [26] とすると、2.5 ml は約 2.0×10^4 mg/L、約 2.0% w/v に相当し、20 ppm を 20 mg/L と解した値より約 10^3 倍大きい。原著が指定した 100 ml は容器容量であり、最終液量・ppm 基準・試験の対応は確認できない。桁差を明記し、原著者の確認を必要とする事項として残す。原著では MeOH を OH ラジカル捕捉剤とするため、役割を正孔捕捉剤に読み替えず、添加・消費・残存量を試薬収支の重要項目とする。

Yu ほか [21] は Co/Ni を用いたパルス電解を報告し、公開要旨は実排水中の複数 PFAS について最大 96.9% の除去を示す。Durak ほかとは原料、方式、終点が異なる。親化合物の濃度低下と脱フッ素化は、それぞれの測定を示して比較する。

Yu ほかの補足資料 pp.2–4 では、陰極電荷を陰極・陽極電荷の合計で割った $Q_c/(Q_c+Q_a)$ が 96.9% であり、前段落の PFAS 除去率と別の指標である。原著の呼称は cathodic energy

efficiency だが、式(1)の定義に従い本稿では陰極電荷割合とする。補足資料の電力計算は-1.419 V vs. RHE、1.492 Ah とこの電荷割合を用いる。対極を含むセル端子電圧と購入電力を測定し、整流器・ポンプ・再循環を加えて工程比較へ接続する必要がある。

EPA の 2026 年暫定指針は、新しい処理技術の安全性・有効性を評価する枠組みを含む。公式ファクトシートは法的な処分義務を設定する文書ではなく、2025 年 9 月までに検討した情報を用いると明示する [7]。処理施設の評価では、この指針の情報範囲と適用する国内制度を対応付ける。

7.2 除去と分解を測定で区別する

水中濃度の低下を、触媒・吸着材への相間移動と化学的分解に分けて検証する。水相、固相、必要な気相について対象 PFAS、無機フッ化物と有機フッ素を対応付ける。脱フッ素化率は、背景・試薬・触媒と空試験を補正した無機フッ化物生成量を、対象物質の初期結合フッ素量で除して求める。炭素生成物と毒性はフッ素収支に加えて評価する。

pH 4.2–4.5 では、アミンのプロトン化を介した F⁻保持と、シリカとの反応によるフルオロケイ酸種形成を、固相フッ素が残る候補機構として検証する。寄与の大きさは未測定の仮説である。触媒と未担持のアミン修飾シリカへのフッ化物添加回収、洗液と固相の分別分析、触媒からの抽出・脱着回収率試験を提案する。抽出前後の全フッ素、遊離 F⁻と化学種を照合し、抽出で新たなシリカ反応が生じる影響も空試験で評価する。

全フッ素 (TF) 収支は、各相に対応する測定法と試料回収の検証から構成する。CIC (燃烧イオンクロマトグラフィー) では燃烧・捕集の回収率、液相の無機フッ化物には IC を確認する。EPA Method 1621 の AOF は吸着された有機フッ素、EOF は抽出された有機フッ素を扱い、それぞれ吸着・抽出で回収できる範囲の指標である [27,28]。水用 AOF 法を固相へ適用する場合は別途マトリックスと燃烧回収を検証する。TF から無機フッ素を差し引く有機フッ素推計では、差の不確かさが大きくなる場合も評価する。

¹⁹F NMR は無機・有機フッ素の化学種同定を補い、検出限界、ピークの重なり、内部標準と定量条件を示す。TOP アッセイは酸化可能な前駆体を末端 PFAS へ変換して測る補助指標として用いる [27]。AOF/EOF、¹⁹F NMR、TOP、対象 LC-MS/MS の結果は測定対象が異なるため、同じ量として加算しない。全収支では方法ごとの回収損失を示し、未回収分を未同定のフッ素として残す。

希薄な全流量の処理と濃縮・回収残渣の処理を、入口、出口、移送先をそろえて比較する。UV 入射強度と低温条件に加え、電源を含む購入電力、試薬、触媒回収・再使用、濃縮廃液と他相への移行を測定する。

7.3 処理の完了条件

処理完了は、出口濃度、フッ素収支、生成物、触媒残留と残渣処理の要件を組み合わせで定義する。分析の対象範囲、検出・定量下限と添加回収率を示し、定量下限未満の値の扱いによる収支の感度も報告する。実排水と長期運転への適用範囲は第 11 節にまとめる。

8 工程比較の境界と追加検証

8.1 同一境界で比較する

比較する機能、基準工程、期間 T、境界と配分を先に固定する [13,16,19]。製造工程では Q_{spec} を、同じ期間と物量収支の範囲で最終的に回収し、事前に定めた用途規格の判定ルールに適合した製品の質量と定義する。品質閾値、測定不確かさと採否ルールも示す [20]。

再循環・再加工品は最終適合量として一度だけ数え、開始・終了在庫、期間内の未処理量と追加エネルギーを同じ収支へ含める。ロット合否を使う場合には、測定対象、採取方法と合格扱いする質量を定義する。CO/H₂ 混合ガスは分離・再循環の物量収支から最終的な適合 CO 量を求める。

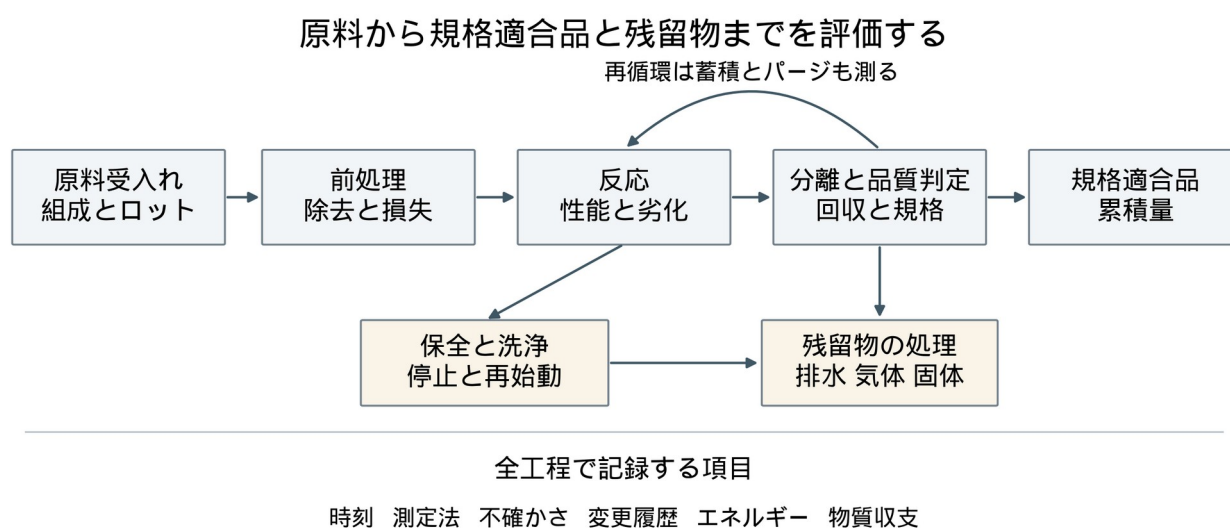


図 4 製造工程における比較境界。前処理から回収、品質判定、再循環、残留物処理を同じ期間で記録し、再加工品は最終量として一度だけ数える。水処理と実験探索には第 8.1 節の別の機能単位を用いる。

$$e_{spec} = \frac{E_{total}}{Q_{spec}} (kWh/kg) \quad (2)$$

式(2)の E_{total} は境界内の購入電力量[kWh]、 Q_{spec} は適合製品量[kg]、 e_{spec} は kWh/kg である。熱・蒸気は供給源と単位を別に記録し、複数製品では配分前の総収支と配分後の値を併記する。

$Q_{spec}=0$ の場合は消費量と未達の機能を報告する。期間 T の適合量、定格能力、停止と保全を合わせて供給能力を評価する。

PFAS 処理では、出口濃度、生成物と残渣の要件を満たした処理水量あたりの負荷を求め、自律実験では独立な再現試験を通過した条件探索あたりの総時間・資材・分析費を測る。これらは製造品の最終適合質量とは異なる機能単位であり、補助例から工程横断の一律順位を作らない。

安全性、法令への適合、用途に必要な品質は、平均費用や電力と交換可能な得点にしない。これらの条件を満たす候補の間で費用・環境負荷・供給能力を比較する。フッ素収支を閉じるだけで毒性要件を満たしたとみなすことも避ける。

用途の上限規格を L 、測定値を x とすると、 $x \leq L$ だけで合格とする方式と、測定不確かさに応じた幅 w を設け $x \leq L - w$ で合格とする方式では Q_{spec} が変わり得る。JCGM 106 はこの適合判定と誤採用・誤棄却のリスクを既に扱う [20, 第 8・9 節]。 w をすべての測定へ固定の倍数で適用せず、規格、測定モデル、受容するリスクで決める。ルールを技術ごとに都合よく変えた原単位を比較しない。

8.2 不純物と運転履歴の連成を研究する

検証すべき仮説は、不純物と運転履歴の相互作用を加えることで、未観測の原料ロットの規格不適合や性能劣化を予測しやすくなる、というものである。水・イオン輸送 [3]、堆積による膜機能 [4]、回収原料の汚染 [5] が動機となる。領域別の機構と測定項目を定め、予測改善の有無を独立な運転データで確かめる。

相互作用の識別では、不純物水準と使用履歴を交差させた比較を計画する。新品と履歴のある触媒・膜、清浄原料と実原料を組み合わせる際は、目的成分の組成、前処理の影響、運転負荷をそろえるか別に測る。使用履歴には事前の不純物接触、温度、累積処理量、停止・洗浄を含める。触媒・膜ロット、担当者、分析日をブロック化し、可能な順序は無作為化する。不可逆な劣化がある同一装置の前後比較だけでは、時間経過と不純物の効果を分離できない。

履歴のある装置での不純物による性能差と、新品での同じ差の隔たりを主な比較とし、効果量と不確かさを報告する。実原料では複数成分が変わるため、原料ロットを単位とする差と特定不純物の効果を区別する。試験回数・期間は狙う差、独立運転のばらつきと故障頻度から設計し、収支の合格範囲も測定不確かさに対応させる。

解析モデルの例として、対数透過度などの連続応答に混合効果モデルを用いる [29]。不純物水準 c 、事前履歴 H とその交互作用を固定効果、原料ロットと運転系列を変量効果とし、時間の項 $g(t)$ を加える。運転系列 k がロット l 内なら、次の入れ子のモデルを例示できる。

$$y_{lkt} = \beta_0 + \beta_1 c_{lkt} + \beta_2 H_{lkt} + \beta_3 c_{lkt} H_{lkt} + g(t) + u_l + v_{lk} + \varepsilon_{kt}$$

u_l はロット、 v_{lk} は運転系列の変量効果、 ε_{lkt} は残差であり、系列内の時間相関と分散不均一も検討する。可否の二値応答には、適切なリンク関数を持つ一般化混合効果モデルを用いる。新ロット・新運転の検証では未知の変量効果を観測済みの値で補わず、対応する予測不確かさを示す。これは検証設計の例であり、本稿の時系列に当てはめた結果ではない。

予測の比較では、原料組成と運転負荷による基準モデル、履歴の主効果を加えたモデル、さらに相互作用を加えたモデルを用意する。評価項目は規格不適合率や期間内適合量へ事前に絞る。原料ロット・独立運転系列・時間を単位に学習用と検証用を分け、同じ試料の反復分析や隣接時点を両側へ置かない。これは構造化データの検証で既知の問題である [22]。新設備への予測と同じ運転中の補間では検証課題が異なる。モデル選択は学習側だけで行い、保留したデータで誤差と不確かさを比較する。

実装判断の改善は予測誤差だけでは判定しない。同じ品質・安全条件と意思決定時点の情報を用い、誤採用・誤棄却、追加測定費用、判断までの時間を比較する。採否の正否を照合する独立の追跡運転データがない場合は、判断一致率までしか報告できない。性能改善が認められない場合や測定費用が便益を上回る場合も公表し、提案を採用しない条件とする。

8.3 既存方法の適用としての寄与

先行研究との対応を表5に示す。TEA・LCAの境界統一、自律実験の性能評価、品質と費用の併用、適合判定、構造化データの検証には既存方法がある [13-20,22,29]。本稿はCO₃報の主解析3系列へ同じ収支計算を適用し、期間内の変化と電圧・流量基準の影響を監査した。膜では透過

度と分画機能を別々に評価した。手順、取得先、ハッシュと解析規則を補足資料へ収録し、追加負荷・適合量の条件を測定計画へ結び付ける。式(5)は定義から得られる恒等式として用いる。

表 5 先行研究と本稿の分析範囲

先行研究	既に扱われている内容	本稿への適用・確認
Cremonese ほか [13]	機能単位 境界 不確かさ 意思決定	引用条件を公開データと対応付け
Volk ほか Adesiji ほか [14,15]	SDL の性能指標と基準探索の比較	再現確認までの費用と失敗記録
Jouny ほか 訂正 [16,17]	CO ₂ 電解の工程費用と性能感度	CO 3 報の主解析 3 系列、電圧・流量基準、後工程の対応
Uekert ほか [19]	再生材の品質 費用 環境指標	用途規格の合否と物性指標の区別
JCGM 106 [20]	不確かさと適合判定のリスク	判定ルールを分母の適合量へ反映
Roberts ほか [22]	構造化データの検証と分割	ロット 運転系列を単位とする設計
Bates ほか [29]	固定効果・変量効果の混合モデル	履歴と不純物の交差試験の解析例

検証設計は、既存のブロック化、交差、混合効果モデルと独立なデータ分割を、実装課題へ対応付けた提案である。適用後の判断改善と追加測定費用の便益を比較し、効果が小さい場合や費用が上回る場合も採否の根拠として公表する。

9 電力原単位と品質による順位逆転

9.1 計算の条件と単位

第 9 節は、回収・最終適合量と補機負荷の感度を示す仮定計算である。n=2、V=3.0 V、F=96,485 C/mol、M=0.028 kg/mol、 η_F =0.90、整流器効率 κ =0.95、補機比率 α =0.20、回収率 r =0.95、合格割合 p =1 を基準 A とする。全図表と価格・排出計算でこの基準を共通に用いる。定常かつ在庫変化なしを仮定する。

$$e_{cell} = \frac{nFV}{3.6 \times 10^6 M \eta_F} (kWh/kg) \quad (3)$$

式(3)は生成 CO 量を分母とするセル直流電力であり、基準条件で 6.3813 kWh/kg となる。n は電子数、 η_F は割合、V はセル端子電圧[V]、F は C/mol、M は kg/mol で、 3.6×10^6 J/kWh により電

力量を換算する。回収・合格品量を分母とする基準 A の購入電力は 8.4141 kWh/kg、本文の報告値は約 8.41 kWh/kg である。

補機の 20% は例示仮定である。表 6 は基準 A の境界を示し、式(4)では補機をセル直流電力に比例させる。未反応 CO₂ の再循環、アノードの CO₂/O₂（検索表記 CO₂/O₂）分離、製品ガス分離は、流量・組成・圧力・回収率に依存する [18]。この比例仮定の感度と適用範囲を第 9.3 節で示す。

表 6 仮定計算の入力と境界

項目	基準 A	値の性質・境界
セル電圧 V	3.0 V	仮定 セル端子電圧
CO ファラデー効率 η_F	90%	仮定 電荷基準
整流器効率 κ	95%	仮定 セル DC/整流器入力
補機比率 α	0.20	仮定 補機/セル DC 分離も比例近似
回収率 r	95%	仮定 再処理を含む最終回収
回収後の最終合格割合 p	100%	仮定 最終適合質量/回収質量
セル直流電力 e_{cell}	6.38 kWh/kg	計算 生成 CO あたり
購入電力 e_{spec}	8.4141 kWh/kg	計算 適合 CO あたり 全図表の基準

9.2 電力価格と排出係数への感度

電力単価を 10、20、30 円/kWh と仮定すると、基準 A の電力費は約 84、168、252 円/kg となる。単価は感度の入力であり、費用の範囲は電力だけである。設備償却、原料 CO₂、触媒・膜、工賃、保全、処理、物流を加えることが全製造原価の評価に必要である。

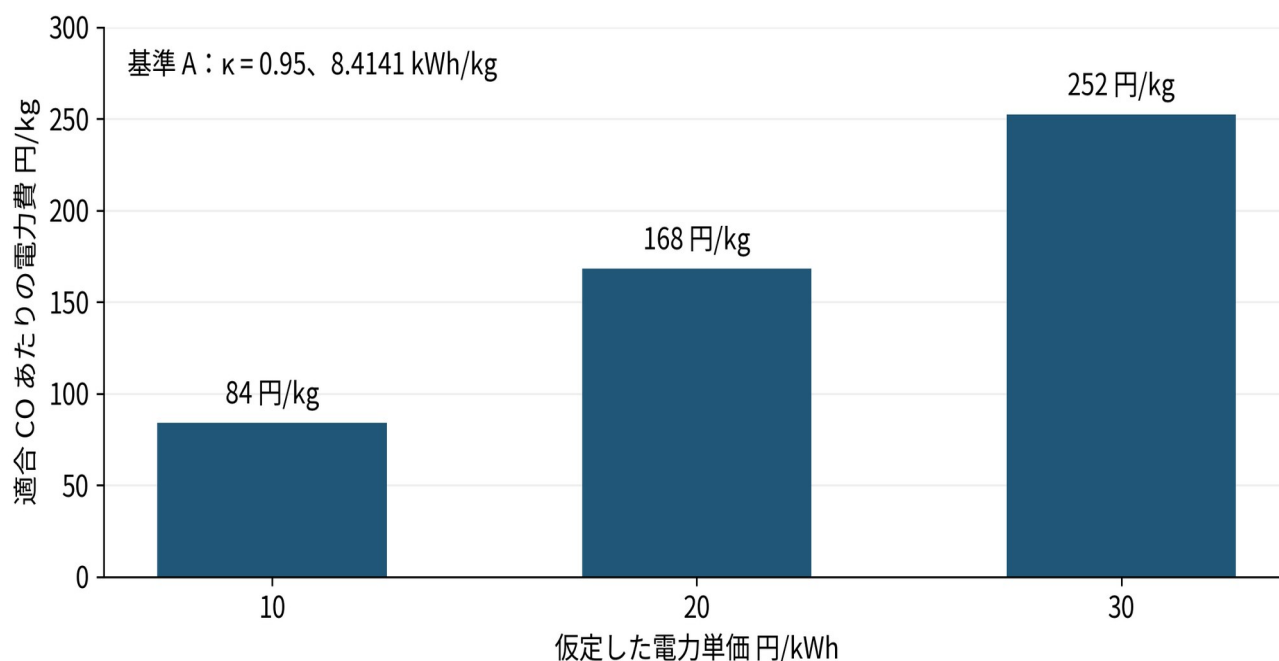


図 5 基準 A ($\kappa=0.95$, 8.4141 kWh/kg) における仮定電力単価と電力費。図 6・図 7・表 7 と同じ基準を用いる。

排出係数を 0.30 kg-CO₂e/kWh と仮定すると、基準 A の電力由来排出量は約 2.52 kg-CO₂e/kg-CO となる。LCA では原料回収・精製、設備製造、触媒、残留物、CO の使用・燃焼等を加える。生成 CO 一 kg に化学量論上対応する CO₂ は $44/28 \approx 1.57$ kg であり、原料消費や回避排出を評価するには、未反応分、回収損失、原料の由来と従来製法の代替を定義する必要がある。

TEA には設備、原料、交換、分析、保全、残留物等のインベントリを用いる。Jouny ほか [16] の減価償却列の符号と NPV には 2020 年の訂正 [17] があるため、先行研究の採算図は訂正版と対応付ける。本稿は収支と境界の比較に引用し、採算モデル全体の再推定は追加課題に置く。

9.3 回収と品質の定義を保った式

定常で回収率 r を回収 CO 質量/生成 CO 質量、 p を最終適当 CO 質量/回収 CO 質量とする。再加工はこの最終収支と電力に含める。 p は回収品を条件とした質量割合であり、 r との統計的独立性を要しない。 κ はセル直流電力/整流器の購入電力、 α は補機電力/セル直流電力と定義する。

κ 、 α 、 r 、 p を固定した式(4)の単位は kWh/kg である。

$$e_{\text{spec}} = \frac{e_{\text{cell}}(\kappa^{-1} + \alpha)}{r p} (\text{kWh/kg}) \quad (4)$$

CO/H₂ 混合ガスの規格外流れを分離・再循環で回収できる場合、初回の合格割合の低下は最終製品の廃棄と等価ではない。再処理後の r 、 p 、追加電力と期間末の未処理在庫を測定する。表 7 の

C は、指定期間の最終適合量の減少を仮定する例であり、ガス流れの初回判定をそのまま損失率へ代入するための例ではない。

電圧や生産負荷を変える比較では、分離・再循環を独立な購入電力として扱う。生成 CO あたりの分離・再循環電力を e_{sep} 、その他の変動電力を e_{var} 、期間 T の固定負荷を E_{fixed} と置くと、次の収支が使える。

$$e_{spec} = \frac{\frac{e_{cell}}{\kappa} + e_{sep} + e_{var} + \frac{E_{fixed}}{Q_{gen}}}{r_p} (kWh/kg)(4a)$$

e_{sep} と e_{var} の単位は kWh/kg-CO、 E_{fixed} は kWh である。分離電力は入口・出口の流量、組成、圧力と回収条件から測定またはモデル化し、セル電力との比例を事前に固定しない。補機比率 α は、この全負荷を一つの運転点でセル電力へ換算した近似と理解する。生成量に比例する分離負荷や固定負荷を持つ場合、電圧を下げて α は同じ値に保たれない。

基準 A の他の入力を保ち、 α を 0、0.20、0.50、1.00 へ変えると、電力原単位は 7.07、8.41、10.43、13.79 kWh/kg となる。この幅は比例近似の影響を可視化する例示であり、実設備の補機負荷の推定区間ではない。

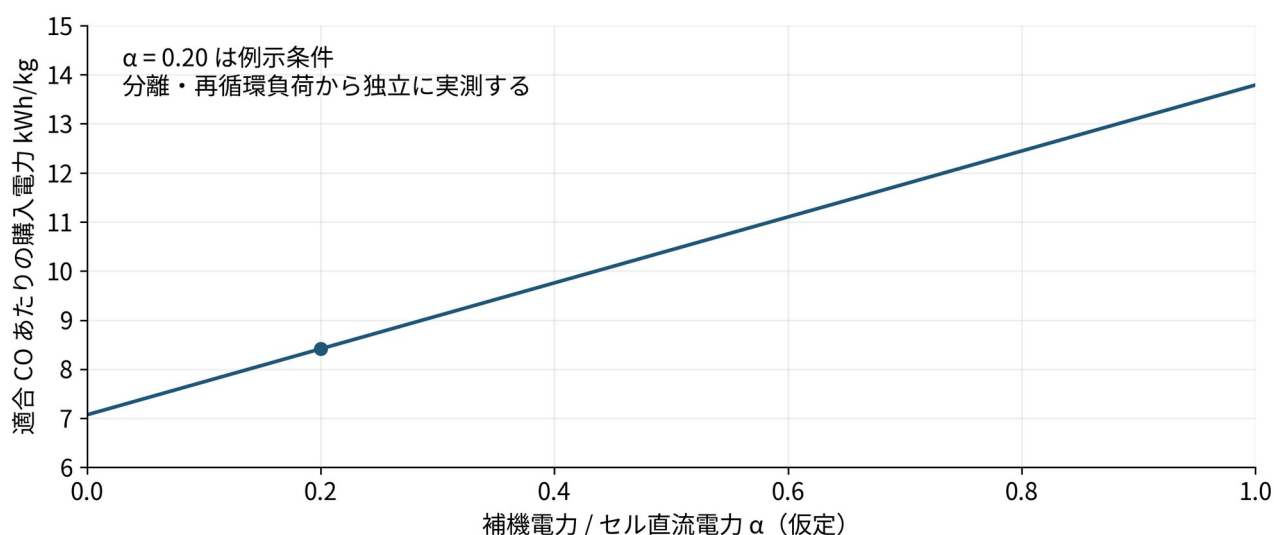


図 6 基準 A における補機比率 α の例示感度。他の入力とは表 6 と同じ。 α の 0-1 は描画のための範囲で、実設備の補機消費には個別の測定・工程モデルを用いる。

9.4 技術の優劣が逆転する条件

生成量基準の購入電力を $h = E_{total}/Q_{gen}$ 、最終適合量の割合を $q = Q_{spec}/Q_{gen}$ と定義すると、 $e_{spec} = h/q$ は恒等式である。式(5)は同じ関係を候補 A と B の比較へ適用したものを示す。 Q_{gen} と Q_{spec} が正

で、製品機能、配分、期間、境界が比較可能であることを前提とする。h、e の単位は kWh/kg、q と式(5)の比は無次元である。

$$\frac{e_B}{e_A} = \frac{\frac{h_B}{h_A}}{\frac{q_B}{q_A}} \quad (5)$$

候補 B の電力原単位が低くなる収支条件は $q_B/q_A > h_B/h_A$ となる。同じ効率、整流器効率と補機比率の下で電圧を 10% 下げる仮定では $h_B/h_A = 0.90$ である。固定負荷や分離・再循環が変わる実工程では、測定・モデル化した h の比を使う。

表 7 セルの改善と品質損失を分けた仮定例

ケース	セル V	最終回収 r	最終合格 p	電力 kWh/kg
A 基準	3.0	0.95	1.00	8.4141
B セルだけ改善	2.7	0.95	1.00	7.5727
C 最終適合量も減少	2.7	0.85	0.90	9.4040

表 7 は $\eta F = 0.90$ 、 $\kappa = 0.95$ 、 $\alpha = 0.20$ を固定する。C の最終適合量の割合 $q_c = 0.85 \times 0.90 = 0.765$ は、A の $q_A = 0.95$ に対して同等となる境界 0.855 を下回り、電力原単位は 11.8% 高くなる。用途規格と再加工後の収支を固定することで、この例を実工程の測定へ対応付けられる。

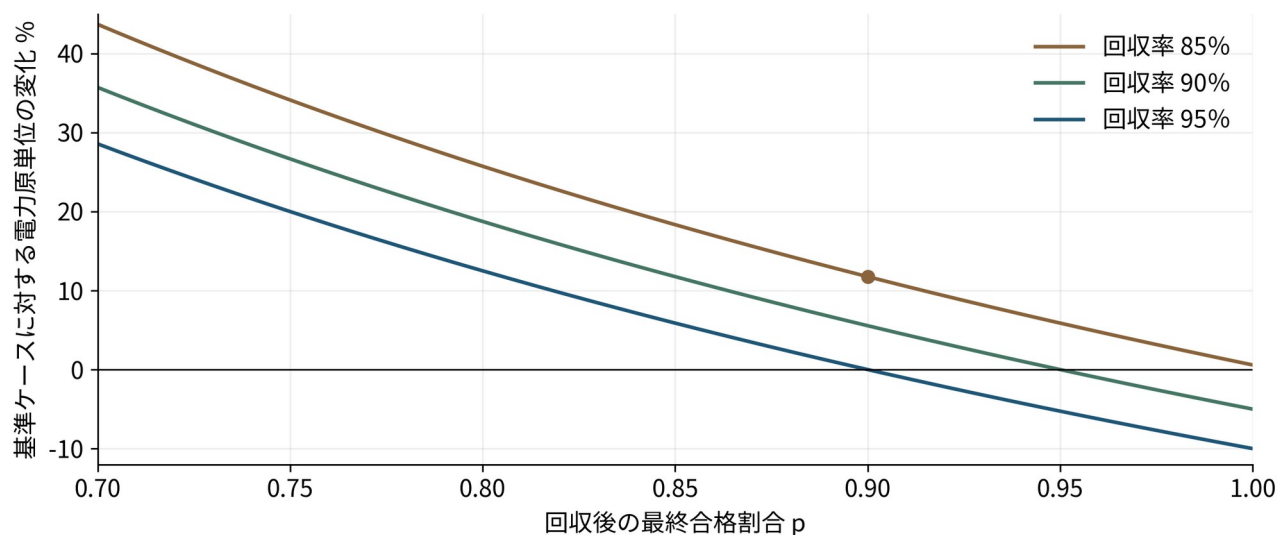


図 7 3.0 V から 2.7 V への電圧低下を仮定した感度。基準 A からの変化が 0 より上で原単位が高くなる。丸印は最終回収率 85%・最終合格割合 90% のケース C。固定値は表 7 と共通である。

比較条件は、生成量あたりの電力低下が、最終適合量の低下を補えるかを示す。費用、毒性、安全、供給能力は各指標と要件をそろえて追加評価し、原因と頻度を実工程のデータで確かめる。

9.5 追加測定を数量で選ぶ実務用評価

式(4a)の $c=e_{\text{cell}}$ 、 $s=e_{\text{sep}}+e_{\text{var}}+E_{\text{fixed}}/Q_{\text{gen}}$ 、 $q=rp$ と置くと、 $e_{\text{spec}}=(c/\kappa+s)/q$ である。 s は生成量基準の購入電力、 q は同じ期間の再処理後の最終適合割合である。比較では、期間末の未処理在庫と貯留量を明示して Q_{gen} と Q_{spec} を対応させる。同じ最終規格・配分・期間にそろえた候補について、セルの差を後工程が相殺する境界を計算できる。

$$s_B < \left(\frac{c_A}{\kappa_A} + s_A \right) \times \frac{q_B}{q_A} - \frac{c_B}{\kappa_B} \quad (\text{kWh/kg}) \quad (6)$$

式(6)は B が A より低い原単位となるための s_B の上限である。A に Zheng の期間セル DC $c_A=6.9451$ を置き、その他は工程の感度を調べる仮定とする。 $\kappa_A=\kappa_B=0.95$ 、 $q_A=0.95$ 、 $s_A=2.50$ kWh/kg、 $c_B=0.90c_A$ の場合、 $q_B=0.95$ では $s_B<3.231$ 、すなわち追加負荷差 <0.731 kWh/kg となる。 $q_B=0.85$ では $s_B<2.198$ 、A より約 0.302 kWh/kg 小さい追加負荷を要する。 $s_A=2.50$ は Zheng 型工程の実測値や予測値ではなく、以下の炭素収支感度と桁を合わせた例である。

第 4.2 節の 21.3–23.4 kg-CO₂ 換算/kg-CO をすべて一度ずつ処理し、単位負荷 k を仮定する単純な収支感度では、 $s_{\text{CO}_2}=k(44/28)(1/u-1)$ となる。 $k=0.05 \cdot 0.10 \cdot 0.20$ kWh/kg-CO₂ なら、それぞれ 1.06–1.17、2.13–2.34、4.26–4.68 kWh/kg-CO である。 k は実測や文献から同定した範囲ではなく、処理流量・圧力・純度・回収方式を省略した感度入力である。実際の s には流れ別の分離と圧縮、ページ、反復通過、その他補機と固定負荷を加える。炭素移行量を二重加算せず、この感度を普遍的な下限とは扱わない。

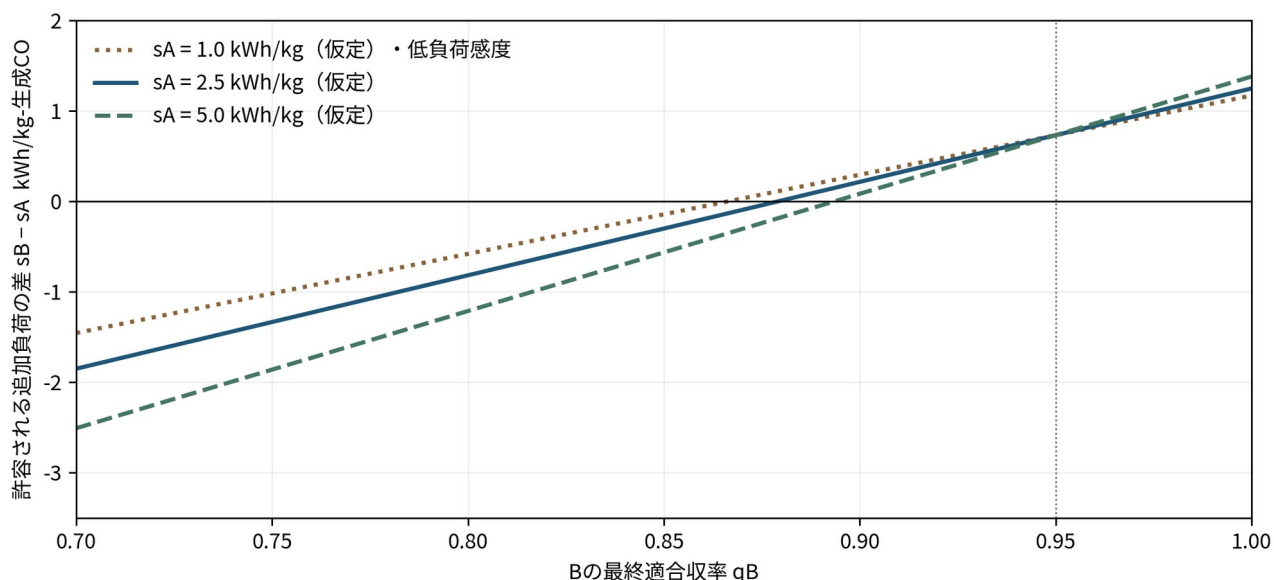


図8 セルDC10%改善を仮定した追加負荷の許容差。cA=6.9451 kWh/kgのみ公開系列の再計算。

$\kappa_A = \kappa_B = 0.95$ 、 $q_A = 0.95$ 、 $s_A = 1.0 \cdot 2.5 \cdot 5.0$ kWh/kg は仮定である。 $s_A = 1.0$ は低負荷感度であり、低利用率系の代表値とは扱わない。線より小さい $s_B - s_A$ で B の原単位が低くなる。同じ最終規格・配分・期間を前提とする。

実測または工程モデルで κ 、 s 、 q の上下限を得た場合、正值の範囲で原単位の保守的な外側範囲を計算する。c にも幅がある場合は下限に c_L 、上限に c_U を代入する。本稿の Excel 評価表は c を指定値として扱い、セル原単位自体の不確かさは別の入力変更で評価する。

$$e_L = \frac{\frac{c}{\kappa_U} + s_L}{q_U}; e_U = \frac{\frac{c}{\kappa_L} + s_U}{q_L} \text{ (kWh/kg)} \quad (7)$$

式(7)で $\kappa_L > 0$ 、 $0 < q_L \leq q_U \leq 1$ 、 $s_L \geq 0$ を要する。入力幅は工学的な範囲であり、信頼区間や確率分布ではない。入力に相関や物理的制約がある場合、この外側範囲は同時に実現しない組合せも含み得る。候補 B の上限が A の下限より小さいとき、指定範囲の全体で B の原単位が低い。範囲が交差する場合は、電力による採用順位を保留し、判断が変わる入力を測定する。

追加測定では電圧と FE の流量基準を照合し、 q 、各流れの分離・再循環負荷、固定負荷と期間生成量を測る。入力幅だけを動かした原単位の変動幅は、順位を変え得る測定候補の選定に使える。測定費用、停止時間と工程要件を加えて順序を決める。この手順の情報価値や費用便益は実設備では未検証である。

付属 Excel 評価表は版 1.1.0 とし、同期間の c 、 κ 、分離・変動・固定負荷、生成量、最終回収と合格割合を入力する。未入力ゼロへ置換せず、範囲外、適合量ゼロ、期間・規格・境界の不一致を表示する。公開系列の参照値と現場入力を分け、初期状態の比較は保留となる。再検証資料にセル番地付きの入力・期待出力、検算コードとハッシュを収録した。恒久的な公開 DOI は未取

得、ライセンスは未指定であり、公開済み研究ソフトウェアとは主張しない。投稿時は補足成果物として提出し、著者が公開先と利用許諾を確定する必要がある。

10 安全と規制とデータ管理を接続する

10.1 研究から商業利用へ移る時点の確認

経済産業省の化審法 Q&A は、新規化学物質と試験研究用途の取扱いを説明する [8]。商業利用へ移る時点で、中間体、生成物、副生成物の同一性、既存収載、製造・輸入数量と用途を確認し、該当する制度を判断する。

厚生労働省のリスクアセスメント及びラベル・SDS の Q&A には 2024 年 2 月 28 日更新の表示があり、対象や実施体制の説明を参照した [9,10]。2026 年 3 月作成の業種・作業別資料と同年 9 月 1 日付の周知資料も公開されている [11]。資料の作成・更新日と法令の施行日は異なるため、対象物質と濃度等に応じた現行要件は別に確認する。実験室の手順を拡大する際は、採取、洗浄、触媒回収、保全、廃棄物移送のばく露も確認する。

物質、用途、最大保有量、設備、排出・廃棄経路を管理表へ対応付け、変更前後で確認する。消防法、高圧ガス保安法、毒物及び劇物取締法、廃棄物処理法、自治体条例等は条件別に適用を確認し、許可、届出、事前相談、検査をそれぞれの手続へ対応付ける。

10.2 AI を制御へ接続する際の境界

NIST SP 800-82 Rev. 3 は OT に固有の性能、信頼性、安全性を考慮したセキュリティを扱う。公式ページは 2026 年 9 月 21 日の注記で Rev. 4 の初期公開草案を案内している [12]。本稿は確定版の Rev. 3 を参照し、Rev. 4 を確定した要件として扱わない。

実験条件を提案する AI、通常制御、独立した安全機能、品質判定と記録保管の役割を明示する。OT セキュリティの指針は、その範囲に合わせて参照し、工程危険性と機能安全を別に検証する。通信断時は工程ごとに検証した安全状態への移行を定め、必要な冷却・封じ込め等を含める。

クラウドを使用する場合には、接続断時のデータ保持、時刻の整合、取得漏れ、権限、変更者、モデルと設定の版を記録する。生データ、分析結果、解釈、許認可資料を区別し、生成 AI による説明文を計測記録の代わりに保存しない。データの保存場所だけで、処理される場所、委託先、利用範囲が確定するわけではないため、契約と実際の設定を対応付ける。

10.3 現場で確認する証拠

受入原料、触媒・膜、解析モデル、設備と排水経路の変更に合わせ、影響する測定、責任者と再評価結果を対応付ける。電子記録にはセンサーの校正と分析の妥当性を確認した記録も含める。

導入判断に必要な証拠は、①原料と製品の規格、②測定法と不確かさ、③実原料を用いた運転履歴、④工程全体の収支、⑤異常・復旧時の検証、⑥規制と変更管理の確認である。導入の目的に合わせて必要範囲を定め、記録作業だけがが増えて判断を改善しない項目は見直す。

10.4 導入前試験の実行と記録

試験計画には、同期間の AC 購入電力量と DC 電力量、校正した出口組成・流量、回収・再処理後の製品量、最終規格の判定、停止・洗浄・交換と在庫を記録する。炭素・電力収支の閉鎖の許容値は測定不確かさと工程目的から試験前に定める。未閉鎖量は未測定流れまたは在庫として調査し、説明なしに残差を製品へ割り当てない。

評価表の文献初期値を現場値に置き換え、測定方法・期間・単位・データ所在を入力ごとに残す。比較保留の理由を解消する測定を担当者・期限・完了条件へ対応付ける。回収や追加負荷の範囲を縮めても順位が変わらない場合は、試験費用と目的に照らして追加測定を打ち切れる。実測の費用・供給能力、安全・制度の確認を終えた後に導入判断へ接続する。

11 解釈の限界、対抗見解と今後の研究

11.1 触媒や材料の革新を先行させる見解

初期研究へ工場の完成度を要求すれば、未知の反応や材料の発見を妨げるという反論には理由がある。研究の段階に合わせて、機構と再現性、実原料と分離、保全と安全の証拠を順に加えることが適切である。

本稿は全公開データを網羅した系統的レビューではない。初回選定の完全な検索履歴がなく、言語、地域、出版社と公開アクセスの偏りが残る。七文献は相補的な選択事例であり、世界的な技術順位や化学全体への代表性は示さない。未取得の全文や反復データを検証済みとして扱わない。

11.2 統合評価はデータ費用が高いという見解

全収支や長期データを取得する費用が導入規模に見合わない場合、採否を変え得る不確実性から減らす。例えば回収率が評価を支配するなら分離試験を、実原料での急速な劣化が懸念されるなら不純物試験を先に行い、追加測定費用と得られる判断改善を比較する。

CO₃ 報の主解析 3 系列と参考 1 系列は、触媒、膜、電解質、面積、電流密度、電圧・流量基準と観測期間が異なる。共通期間は条件差を除かない。Wei の一定表示系列から時間変化や寿命を推定しない。Sun の外部抵抗と効率規格化は条件付き感度であり、測定値の訂正ではない。出口流量の原記録、独立耐久反復、電流時系列と共分散が不足するため、信頼区間や因果的順位を求めている。膜の N=3 の独立性と正規化手順も未確定である。CO₂ の出口・陽極・在庫収支と後工程電力が不足し、セル原単位を最終 CO の購入電力へ転用できない。第 9 節の入力幅は仮定の工程範囲であり、実測に基づく下限や統計的信頼区間ではない。

11.3 独立運転による検証とデータ公開

次の実証では、同一製品規格・原料・負荷の対照運転について、現行の単点指標による判断と、本稿の期間収支による判断を比較する。事前に評価期間、許容損失、収支閉鎖率、測定費用と判断誤差の定義を固定し、独立ロットまたは別設備を保留する。交差試験と混合効果モデルは第 8.2 節に対応させる。不成功、停止、洗浄、交換、再加工、在庫と不確かさを公開し、実行した測定計画が保留判断の解消や運転費用に与えた影響を評価する。

PFAS の未解決項目は MeOH 量と試験の対応、固相を含むフッ素回収、非標的生成物と毒性、参照電極電位による電力計算の境界である。CIC を用いた AOF/EOF と TOP は測定範囲が限られ、単独で全フッ素収支を保証しない。実排水の多年運転、日本での総費用・施設の適法性、工程横断モデルの予測改善は本稿では確認できない。これらの主張には追跡運転、対象制度の確認、原著者の説明等の追加証拠が必要である。

12 結論

CO₂ 電解の主解析 3 系列と膜分離 1 系列へ既知の収支関係を適用し、期間と測定基準の影響を具体化した。CO の共通期間では前後半の原単位が約 3.5–7.1% 増え、電圧と効率の寄与は異なった。Wei 小面積の一定表示から「変化ゼロ」とは結論しない。Sun の電圧境界・効率規格化の感度は、測定基準の確認を優先する根拠となる。低い CO 生成炭素利用率からは、陰極・陽極・在

庫の炭素収支と分離負荷の測定が必要となる。膜の透過度低下と沸点分布の定性的な維持は、輸送能力と分離機能の別々の評価を要する。

実務では、セル DC、整流器、分離・再循環、変動・固定負荷と最終適合量を分ける。後工程の追加負荷がセル改善を相殺する条件と、入力範囲による比較保留を示した。付属評価表はこの計算を補助する版管理された提出用成果物であり、恒久公開とライセンスの確定は残る。入力と期待出力による計算確認を、独立設備での判断改善の実証へ接続する。

学術的な価値は、複数の公開系列の記述的再解析、電圧・流量基準とデータ構造の監査、再実行可能な解析資料にある。実務的な価値は、未測定の負荷と最終適合量が順位に与える影響を試験前に数量で確認できる点にある。独立な運転、総費用と現場の判断を用いた検証は今後の課題である。

参考文献

引用する数値・条件・公的資料の照合日は 2026 年 10 月 4 日。全文、公開要旨、補足情報、元データのアクセス範囲は表 1 と補足検証資料に示す。公開日、号の刊行日、資料更新日、制度施行日を区別する。

[1] Pilon S, Savino E, Bayley OM, et al. A flexible and affordable self-driving laboratory for automated reaction optimization. *Nature Synthesis*. オンライン公開 2026 年 4 月 13 日. DOI 10.1038/s44160-026-01053-0. <https://www.nature.com/articles/s44160-026-01053-0>

[2] Zheng Z, Bi S, Zhou X, et al. Permeable intimate membrane electrode interface with optimized micro-environment for CO₂ electroreduction in pure water. *Nature Communications*. 2026;17:2570. 公開 2026 年 2 月 10 日. DOI 10.1038/s41467-026-69259-6. <https://www.nature.com/articles/s41467-026-69259-6>

[3] Biemolt J, Pelzer HM, Filippi M, Strasser P. Understanding interconnected ion and water transport in anion exchange membrane zero-gap CO₂ electrolyzers. *Nature Energy*. 2026;11(7):955–961. オンライン公開 2026 年 6 月 5 日. Perspective. DOI 10.1038/s41560-026-02052-3.

<https://www.nature.com/articles/s41560-026-02052-3> 公開要旨・書誌

<https://research.tudelft.nl/en/publications/understanding-interconnected-ion-and-water-transport-in-anion-exc/>

[4] Choi J, Seo H, Lee M, et al. Crude oil fractionation by means of mesoporous polyacrylonitrile membranes. *Nature*. 2026;654(8120):955–962. オンライン公開 2026 年 6 月 24 日、号刊行 6 月 25 日.

<https://doi.org/10.1038/s41586-026-10677-3> 公開図 3 凡例、補足 Note 9、図 43・44、表 14–17、図 3・図 4 元データを照合。

- [5] Schmuck A, Belé TGA, Withoeck D, Van Geem KM, Ragaert K, De Meester S. Analysis of trade-offs of post-sorting plastic packaging. *Nature*. 2026;654:383–390. 公開 2026 年 6 月 3 日. DOI 10.1038/s41586-026-10606-4. <https://www.nature.com/articles/s41586-026-10606-4>
- [6] Durak O, Lee SSS, Watt LM, et al. Plasmon-enhanced reductive defluorination of PFAS in water under ambient conditions. *Nature Water*. 2026;4:1166–1176. 公開 2026 年 9 月 1 日. DOI 10.1038/s44221-026-00690-1. <https://www.nature.com/articles/s44221-026-00690-1>
- [7] US Environmental Protection Agency. Fact Sheet for the 2026 Interim Guidance on the Destruction and Disposal of PFAS. ページ最終更新 2026 年 4 月 23 日. 検討情報の基準は 2025 年 9 月まで.
<https://www.epa.gov/pfas/fact-sheet-2026-interim-guidance-destruction-and-disposal-pfas>
- [8] 経済産業省. 化審法 Q&A 回答一覧. ウェブページの更新日は確認できない.
https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/kasinhou/qa/answer.html 関連法令
<https://laws.e-gov.go.jp/law/348AC0000000117/>
- [9] 厚生労働省. 化学物質対策に関する Q&A リスクアセスメント関係. ページ表示の更新日 2024 年 2 月 28 日.
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_11389.html
- [10] 厚生労働省. 化学物質対策に関する Q&A ラベル SDS 関係. ページ表示の更新日 2024 年 2 月 28 日.
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_11237.html
- [11] 厚生労働省. 化学物質のリスクアセスメントについて 業種 作業別マニュアルと解説テキスト. 2026 年 3 月作成資料および 2026 年 9 月 1 日付周知資料の掲載を確認. https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_55176.html
- [12] Stouffer K, Pease M, Tang CY, et al. Guide to Operational Technology OT Security. NIST SP 800-82 Rev. 3. 確定版 2023 年 9 月 28 日. <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/82/r3/final> Rev. 4 初期公開草案は 2026 年 9 月 21 日付. <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/82/r4/ipd>
- [13] Cremonese L, Olfe-Kräutlein B, Strunge T, et al. Making Sense of Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Studies for CO₂ Utilization Version 2. IASS Potsdam. 2022 年 3 月. DOI 10.7302/4202.
https://publications.rifs-potsdam.de/pubman/item/item_6001685_7 確認箇所 A.4–A.7.
- [14] Volk AA, Abolhasani M. Performance metrics to unleash the power of self-driving labs in chemistry and materials science. *Nature Communications*. 2024;15:1378. 公開 2024 年 2 月 14 日.
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-45569-5>
- [15] Adesiji AD, Wang J, Kuo CS, Brown KA. Benchmarking self-driving labs. *Digital Discovery*. 2026;5:14–27. 出版社初回公開 2025 年 10 月 9 日. <https://doi.org/10.1039/D5DD00337G> 著者公開稿
<https://arxiv.org/abs/2508.06642> 最終版と公開稿の版を区別.
- [16] Jouny M, Luc W, Jiao F. General Techno-Economic Analysis of CO₂ Electrolysis Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2018;57:2165–2177. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03514> 公開著者稿
<https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1712664>

- [17] Jouny M, Luc W, Jiao F. Correction to General Techno-Economic Analysis of CO₂ Electrolysis Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020;59:8121–8123. 公開 2020 年 4 月 2 日.
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c01513> 公開された訂正版計算表
<https://acs.figshare.com/articles/dataset/12061518>
- [18] Rabinowitz JA, Kanan MW. The future of low-temperature carbon dioxide electrolysis depends on solving one basic problem. *Nature Communications*. 2020;11:5231. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19135-8>
- [19] Uekert T, Singh A, DesVeaux JS, et al. Technical, Economic, and Environmental Comparison of Closed-Loop Recycling Technologies for Common Plastics. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2023;11:965–978. 公開 2023 年 1 月 12 日. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05497> 公開補足資料
https://acs.figshare.com/articles/journal_contribution/21878873
- [20] Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data The role of measurement uncertainty in conformity assessment. *JCGM 106:2012*. 2012 年 10 月. <https://doi.org/10.59161/JCGM106-2012> 確認箇所 第 8・9 節.
- [21] Yu Y, Wang S, Liu Y, Duan X, Guan X. Pulsed Electrolysis Unlocks Non-Noble-Metal Catalysis for Per- and Polyfluoroalkyl Substance Defluorination in Water. *Journal of the American Chemical Society*. 2026;148:37034–37045. オンライン公開 2026 年 8 月 22 日 号刊行 9 月 2 日.
<https://doi.org/10.1021/jacs.6c10422> 公開補足資料
https://acs.figshare.com/articles/journal_contribution/33314144
- [22] Roberts DR, Bahn V, Ciuti S, et al. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography*. 2017;40:913–929. <https://doi.org/10.1111/ecog.02881>
- [23] Zheng Z, Bi S, Zhou X, et al. Source Data accompanying Permeable intimate membrane electrode interface with optimized micro-environment for CO₂ electroreduction in pure water. 2026. Fig 3 シート BR・BS、BU・BV 列、比較用の AM–AR 列. 文献 [2] の Source data 欄から公開 XLSX を取得.
- [24] Choi J, Seo H, Lee M, et al. Source Data for Crude Oil Fractionation via Mesoporous Polyacrylonitrile Membranes. *Figshare*. 2026. Source Data Fig. 3.xlsx Fig. 3g シート、Fig. 3a・3b および Source Data Fig. 4.xlsx の構成も照合. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.32164371>
- [25] Sun JW, Wu X, Liu PF, et al. Scalable synthesis of coordinatively unsaturated metal-nitrogen sites for large-scale CO₂ electrolysis. *Nature Communications*. 2023;14:1599. 公開 2023 年 3 月 23 日.
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-36688-6> 確認箇所 Evaluation of full-cell energy efficiency, 式(4).
- [26] Centers for Disease Control and Prevention, NIOSH. Methanol: Systemic Agent. 公的物性資料.
https://www.cdc.gov/niosh/ershdb/emergencyresponsecard_29750029.html 確認箇所 Chemical and Physical Information: 液体密度約 0.79 g/cm³. 照合 2026 年 10 月 4 日.

[27] US Environmental Protection Agency. Frequent Questions about PFAS Methods for NPDES Permits. <https://www.epa.gov/cwa-methods/frequent-questions-about-pfas-methods-npdes-permits> 確認箇所 Questions 7, 10, 12, 13: AOF・EOF・TOP 等の測定範囲. 照合 2026 年 10 月 4 日.

[28] US Environmental Protection Agency. Method 1621: Determination of Adsorbable Organic Fluorine (AOF) in Aqueous Matrices by Combustion Ion Chromatography (CIC). EPA 821-R-24-002. 2024 年 1 月. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-01/method-1621-for-web-posting.pdf>

[29] Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. Journal of Statistical Software. 2015;67(1):1–48. 公開 2015 年 10 月 7 日. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

[30] Wei S, Hua H, Zhao Y, et al. Porous membranes enable selective and stable zero-gap acidic CO₂ electrolyzers. Nature Communications. 2025;16:9299. 公開 2025 年 10 月 21 日. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64342-w> 公開本文、Fig. 4E、Methods、Source Data の Fig. 4E シートを照合.

開示事項

利益相反に関する開示

著者は行政手続及びクラウド技術支援の業務を提供しており、本稿の実装支援・データ管理に関する議論と業務上の関連がある。本稿に特定サービスの性能評価や推奨順位は含まれない。

データの利用可能性

再解析対象は文献 [23,24,25,30] の公開データである。補足検証資料には取得先、SHA-256、抽出 CSV、解析規則、コード、感度、計算結果、照合記録と改訂差分を収録し、第 4・5 稿の記録を履歴として保持する。第三者の論文・補足 PDF・元 XLSX は原典から取得する。評価表 1.1.0 の入力・期待出力と検証結果も提出用補足資料へ含める。付属成果物の恒久公開 DOI と利用ライセンスは未確定である。

執筆支援ツールの利用

生成 AI を文献探索の補助、論点整理、文章の推敲、解析コードと図の作成、投稿前の検討に利用した。原典との照合、条件付き再計算、未解決事項の記録を行い、原著の結果と本稿の二次解析・提案を区別した。学術誌の外部査読、新たな追試、採択判定は含まれない。