

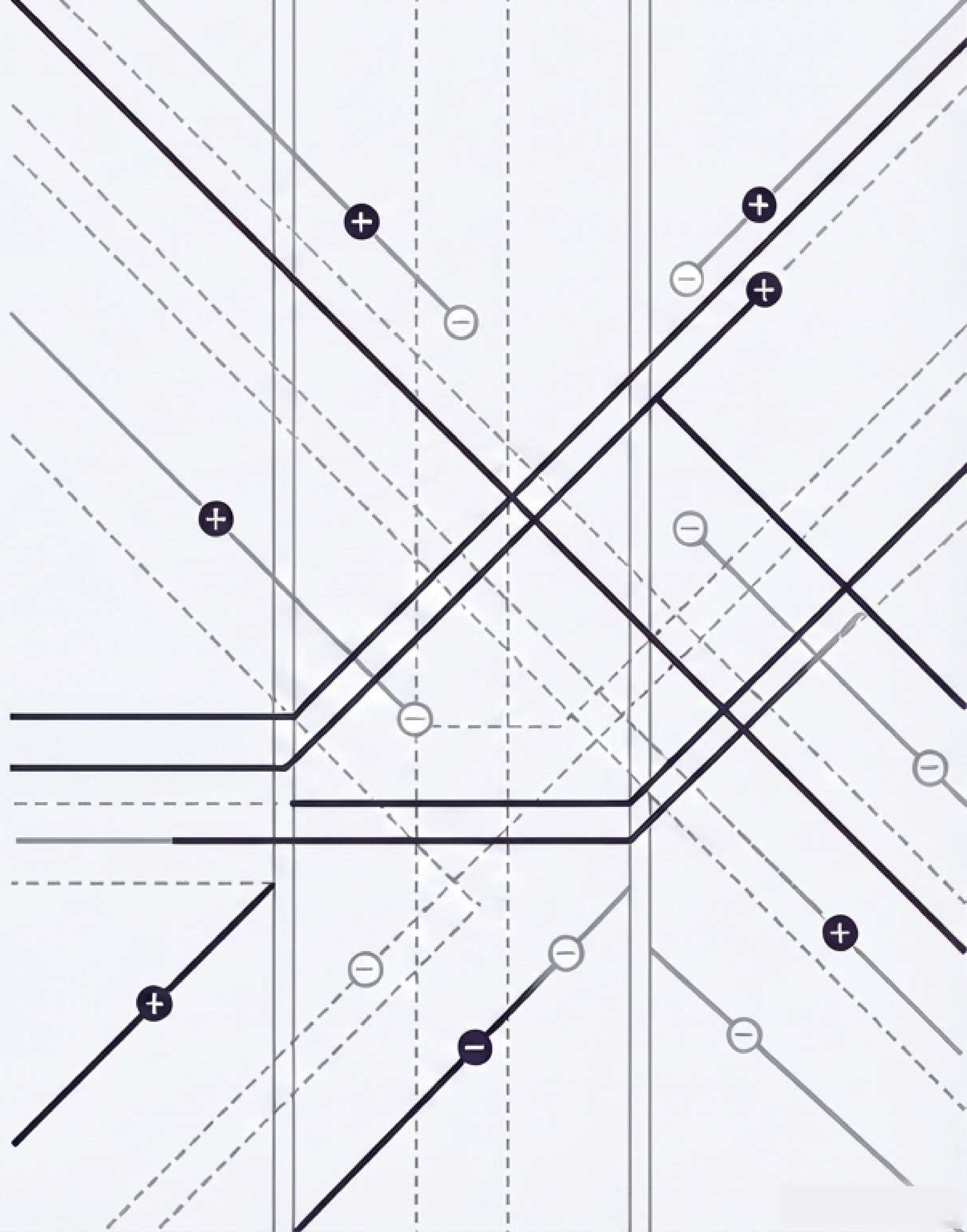
戦略的イノベーション創造プロジェクト「SIP」 成果報告会報告

逆電気透析（RED）発電の 実装と将来展望

戦略的イノベーション創造プログラム （SIP） 成果報告と塩分濃度差エネルギー の商業化ロードマップ

本報告書は、塩分濃度差を利用した次世代ベース
スロード電源「逆電気透析（RED）発電」のメカ
ニズム、グローバル動向、およびSIP（戦略的イ
ノベーション創造プログラム）における最新の実
証成果を定量的に総括するものである。

2026年3月13日第3回SIPマテリアルシンポジウム「成果報告会」



エグゼクティブ・サマリー



【ポテンシャル】 天候依存性の克服

太陽光や風力とは異なり、昼夜・天候に依存しない**24時間365日稼働**の革新的再生可能エネルギー。設備利用率**約90%**を誇り、分散型ベースロード電源として機能。



【SIP成果】 世界最高水準の出力密度とパイロット実証

山口大学およびBlue Water Energy等を中心とするSIPプロジェクトにより、低面積抵抗のイオン交換膜を開発。自然海水利用時に従来比**2.3倍 (2.3 W/m²)**の出力密度を記録。長崎での下水処理場パイロット稼働を開始。



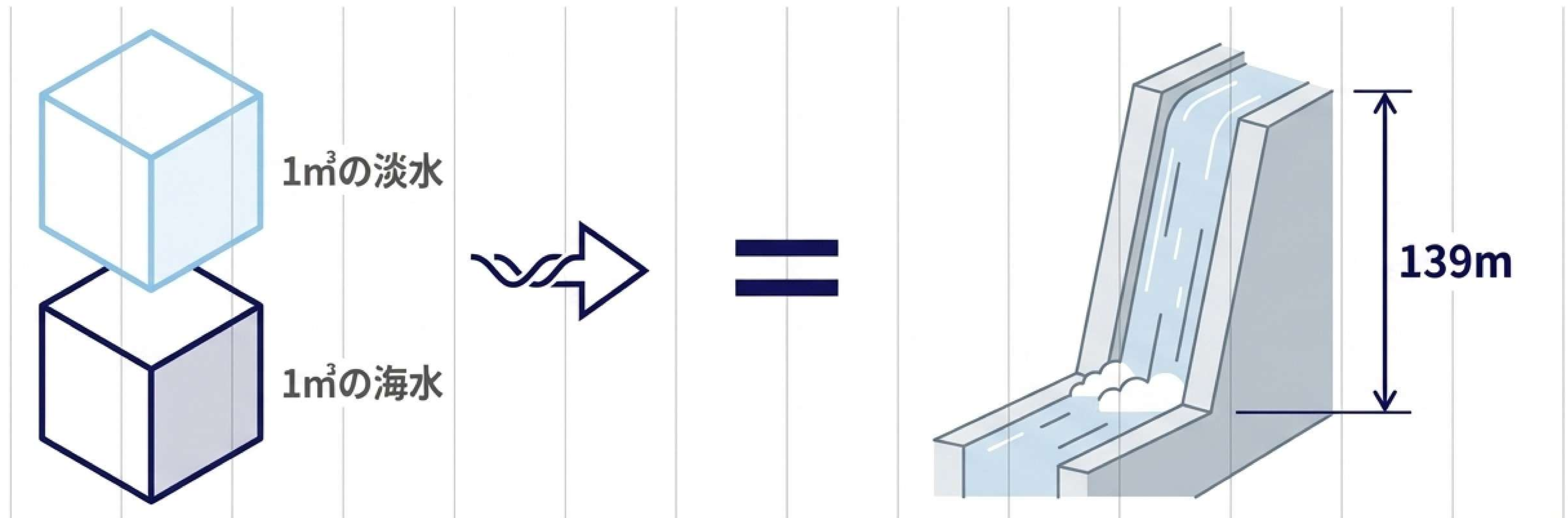
【商業化の鍵】 膜コスト低減とLCOE8円/kWhへの道程

総発電コストの過半を占めるイオン交換膜の大幅なコスト低減（目標**10ユーロ/m²以下**）が進行中。システム最適化と組み合わせることで、既存再エネと競合する**LCOE 8円/kWh**の達成が視野に。

背景：未利用の巨大なエネルギー資源

塩分濃度差発電（SGE）は、海水と淡水が混合する際の熱力学的なギブス自由エネルギーを電力へ変換する技術。

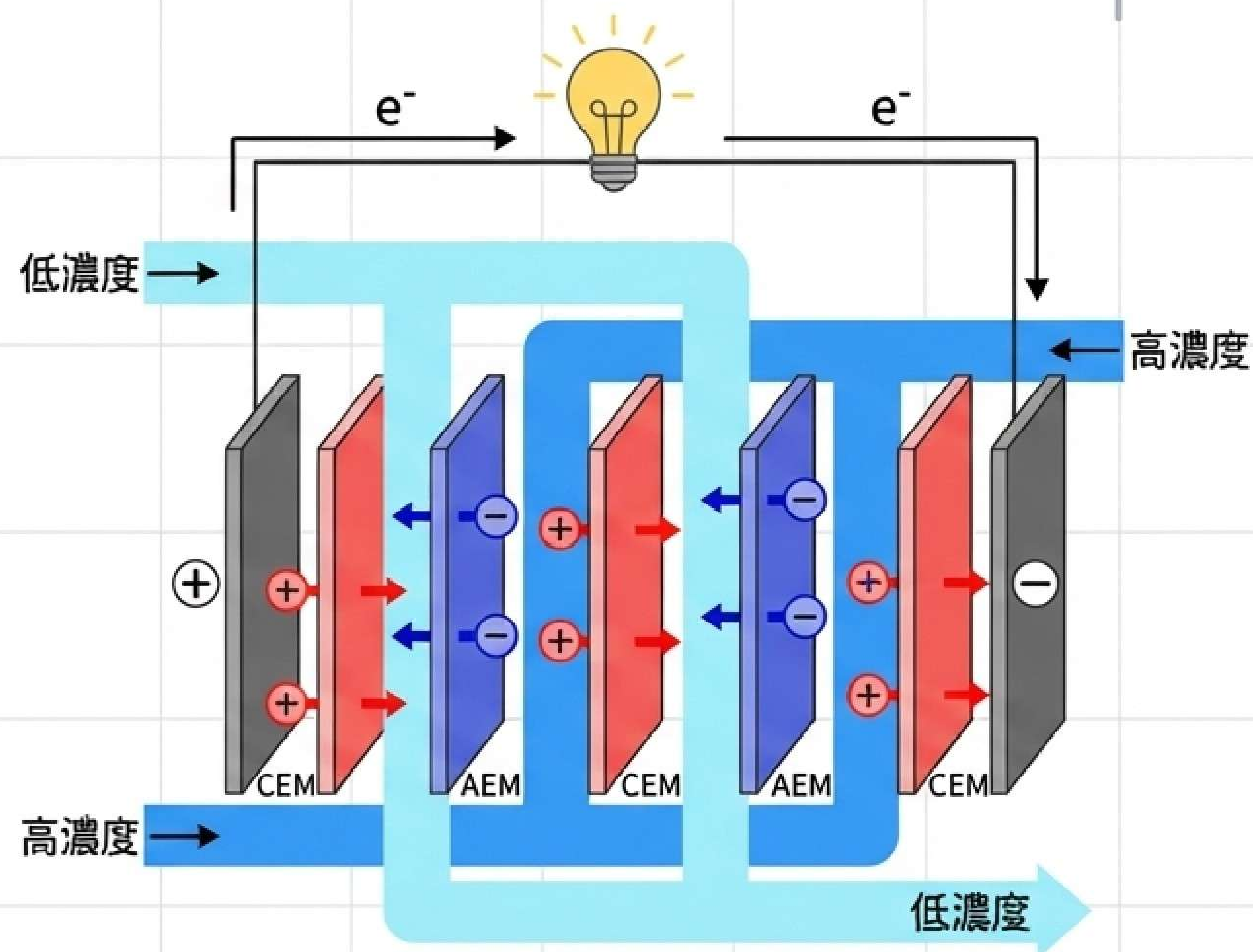
- ・ **莫大な賦存量:** 河川水が海に流入する河口域において、世界的なエネルギー賦存量は年間約1.4~2.6 TWh（テラワット時）と推定。
- ・ **高密度のエネルギー:** 1m³の淡水と海水が混ざり合う際に放出されるエネルギーは、落差139mの滝から落下する水量と同等。
- ・ **安定した供給源:** 海流や河川の流れは常時存在し、無尽蔵かつ安定したクリーンエネルギー源として利用可能。



逆電気透析（RED）の作動原理

濃度差によるイオンの選択的移動から、直接直流電力を抽出。

- **スタック構造**: 陽イオン交換膜（CEM）と陰イオン交換膜（AEM）を交互に積層。
- **イオン拡散と膜電位**: 各層に海水（高濃度）と淡水（低濃度）を交互に供給。塩分濃度の差によりイオンが拡散。
- **選択的透過**: Na^+ はCEMを、 Cl^- はAEMを選択的に透過。この一方向へのイオン輸送により電位差（膜電位）が生じる。
- **電力変換**: 多数のセルペアを直列接続し、両端の電極における酸化還元反応によって電子の流れ（直流電流）へと変換。



比較分析：RED方式 vs PRO方式

塩分濃度差発電における2大技術の比較。現状の海水・淡水濃度差環境においては、REDが明確な優位性を持つ。

評価項目	逆電気透析 (RED)	圧力遅延浸透 (PRO)
駆動原理	イオンの選択的拡散 (膜電位)	水分子の浸透 (浸透圧)
出力形態	直流電流 (直接変換)	タービン駆動 (間接変換)
システム構造	モジュール化・可動部なし	大規模機械装置・可動部あり
最適条件	海水 vs 河川水 (低濃度差)	高濃度ブライン vs 海水 (高濃度差)
スケーラビリティ	小～中規模・分散型に最適	大規模集中型プラント

結論: タービン等の機械的な可動部を介さないREDは、モジュール化が容易であり、メンテナンスコストや騒音・振動の面で圧倒的に有利。

RED発電がもたらす4つの核心的価値

【安定性】 24時間365日の継続稼働

90%

天候・昼夜に一切依存しない。設備利用率は約90%に達し、太陽光や風力の変動性を補完する真のベースロード電源。潜在力は原発約1,000基分に相当。

【省スペース】 太陽光の1/50の設置面積

1/50

極めてコンパクトな設備設計。同一の発電量を得るための占有面積が極端に小さく、都市部や既存インフラの遊休地への設置が容易。

【低環境負荷】 排出ゼロ・ノイズレス

ゼロ

化石燃料不要、二酸化炭素 (CO₂) 排出ゼロ。機械的タービンを持たないため熱や騒音の発生がなく、周囲の生態系や住環境への影響が最小限。

【災害耐性】
自立型分散電源としての機能



水流さえ確保できれば発電が可能。広域停電時にも稼働を継続する災害時自立電源としての機能。雨水貯留施設等との連携も視野。

グローバル動向と用途の拡張

欧州を中心とする先行実証により、REDの適用範囲は自然水系から産業インフラへと拡張している。

オランダ (Afsluitdijk)

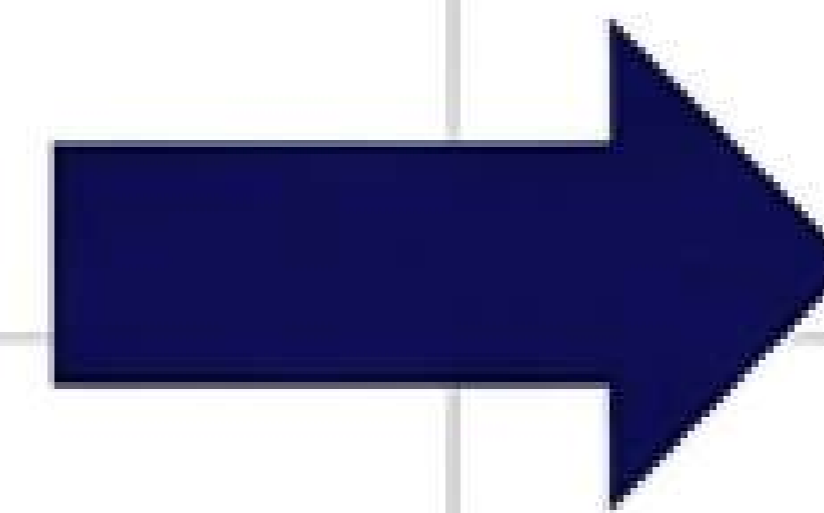
REDstack: 世界初のREDパイロットプラント。海水と淡水を利用した基礎的実証を牽引。

イタリア (Trapani)

REAPower: シチリア島トラパニにおける製塩所の超高濃度ブライン（濃縮廃塩水）と海水を活用した実証。

技術的シフト

河川水 × 海水



海水 × 高濃度ブライン

出力の大幅向上・内部抵抗低下

SIP成果（1）世界最高水準の出力密度達成

山口大学・Blue Water Energy等を中心とするSIPプロジェクトによる技術的ブレイクスルー。

・低抵抗イオン交換膜の開発

低面積抵抗のイオン交換膜（IEM）および専用スペーサーの開発により、スタック内の内部抵抗を大幅に削減することに成功。

従来型イオン交換膜

・従来比2.3倍の出力密度

自然海水を利用したラボスケール実証（40対、有効膜面積7040 cm²）において、標準的なIEMと比較して2.3倍の出力密度を達成。粗出力密度2.3 W/m²という世界最高水準の数値を記録。REDの経済合理性の壁を突破する核心的技術の確立。

新規開発膜
(SIP成果)

2.3 W/m²
(2.3倍)

SIP成果（2）長崎下水処理場での実証稼働

既存インフラを「エネルギー生産拠点」へと転換するパイロットスケールの実証実験が進行中。

・実証環境の構築

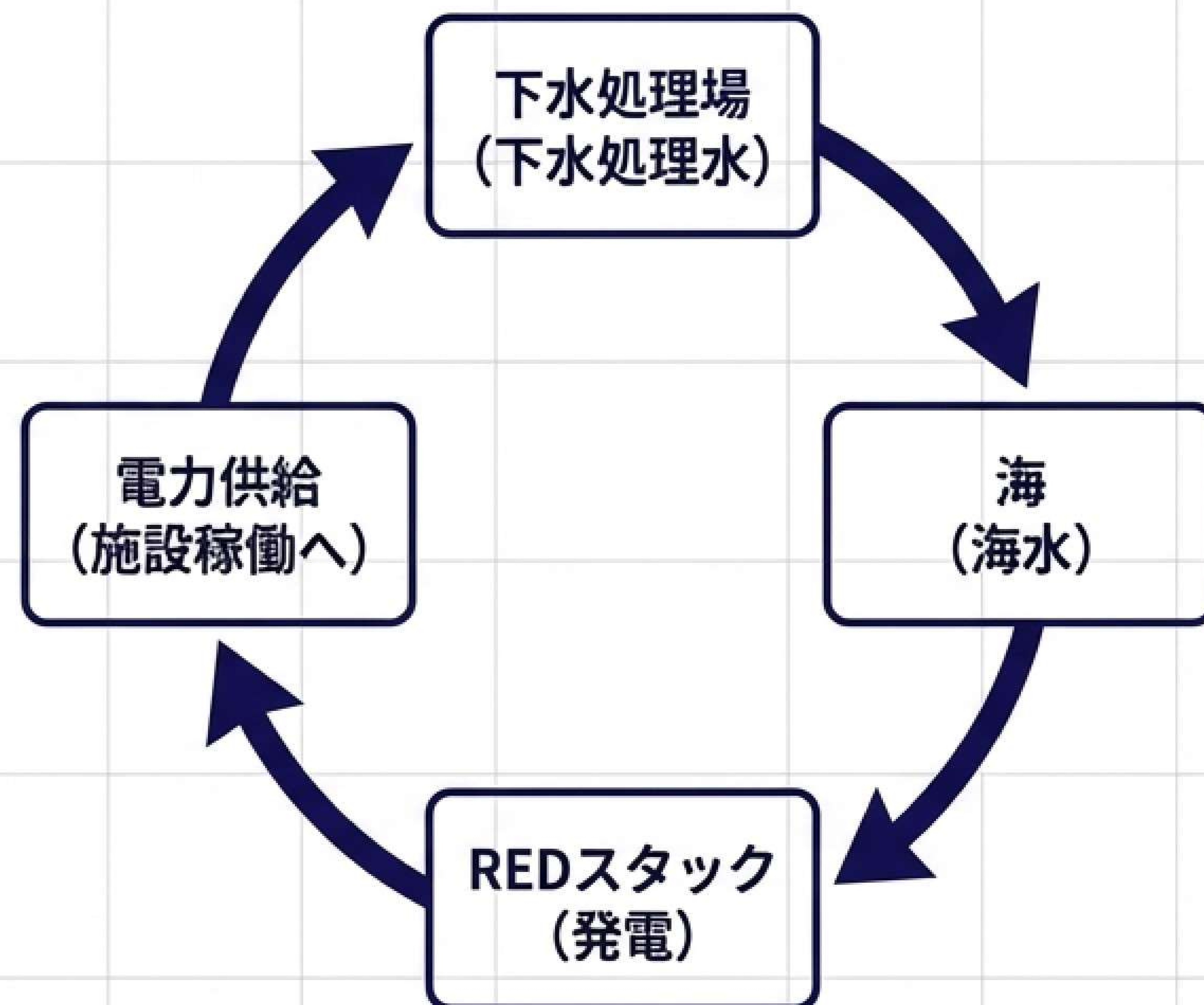
長崎市の下水処理場において、下水処理水（淡水）と海水を活用したREDプラントを併設。インフラへの直接組み込みプロセスを検証。

・パイロットスケールの稼働データ

セルペア299対、有効膜面積179.4m²のスタックにおいて、約230Wの純出力を確認。数ヶ月単位の長期稼働により、実環境下でのファウリング（汚れ）耐性と安定性を検証中。

・今後のスケールアップ

現在の稼働データを基に、2025年度には50kW級への大幅なスケールアップを計画。



商業化への最大課題：膜コストと内部抵抗

技術的成立の確認から、経済的自立（商業化）へと移行するための阻害要因。

▶ 1. イオン交換膜（IEM）の初期コスト

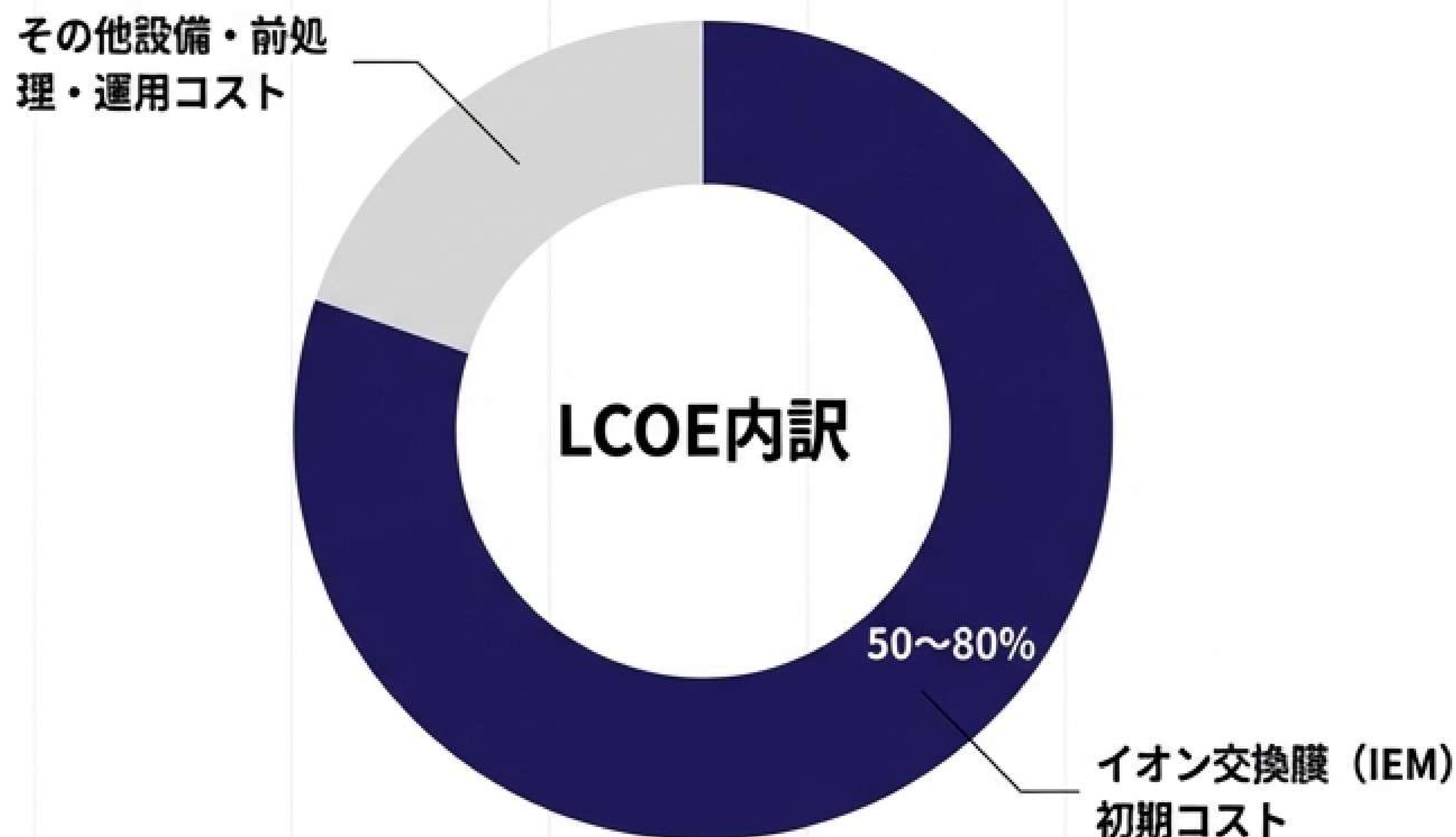
システム総発電コスト（LCOE）の50～80%を膜部材が占有。
現状の価格水準ではグリッド・パリテイ到達が困難。

▶ 2. 多価イオンによる出力低下

実際の海水や排水に含まれる多価イオン（ Mg^{2+} や SO_4^{2-} 等）が、膜電位を低下させ、出力増強の阻害要因となる。

▶ 3. ファウリング（膜の汚染）

有機物や微生物による汚れがスタック抵抗を上昇させる。低コストな前処理技術と、効果的な洗浄プロセスの最適化が必須。



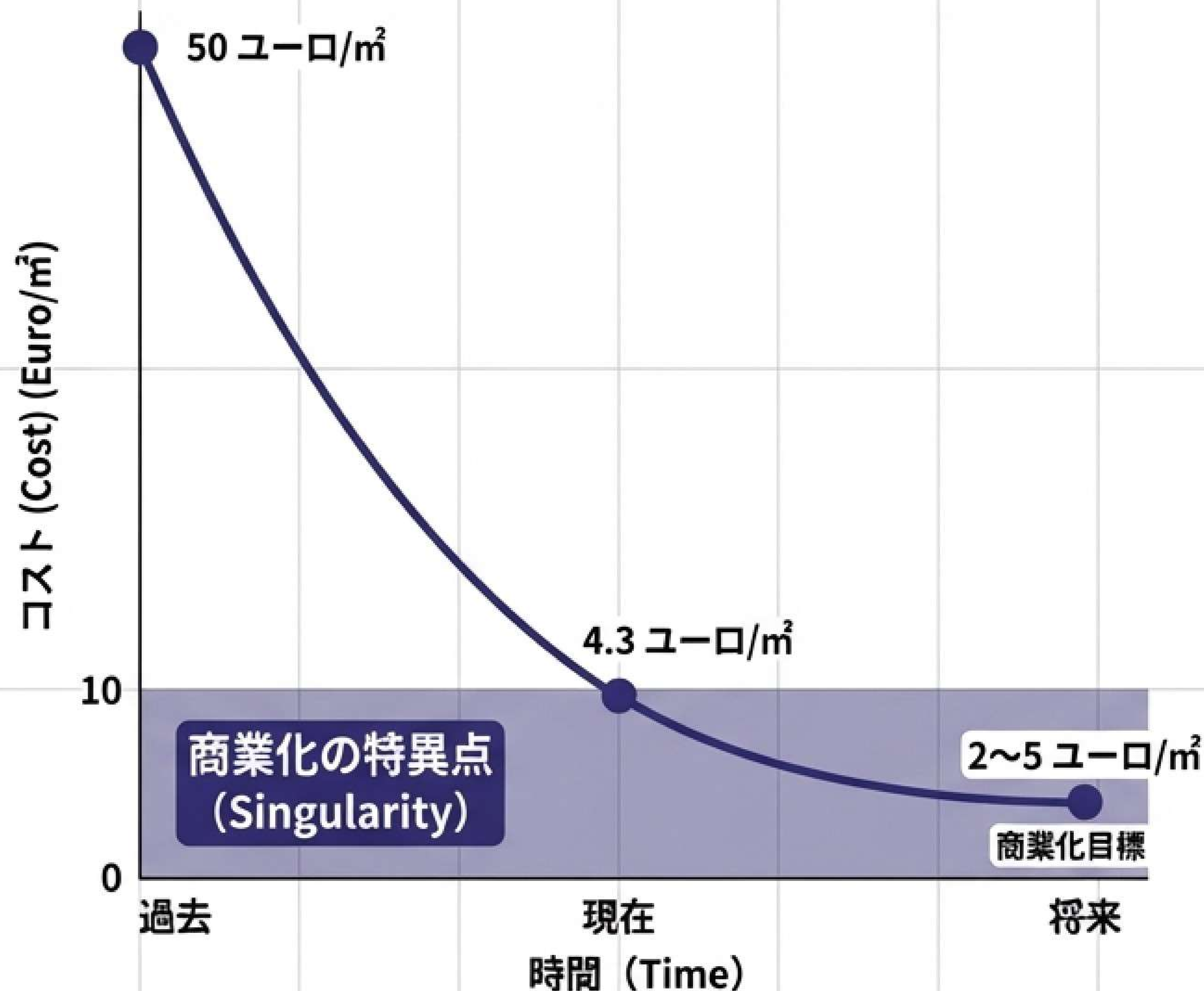
イオン交換膜のコスト低減シナリオ

膜コストの抜本的低下が、RED商業化の「特異点 (Singularity)」となる。

- 過去 (約10年前) : 約50ユーロ/m²。経済的成立は不可能とされていた水準。
- 現在 (到達可能水準) : 安価な原料と製膜法の進化により、約4.3ユーロ/m²での製造が視野に入る。
- 商業化の目標値: 2~5ユーロ/m²未満 (長期的には1ドル/m²以下)。膜価格が10ユーロ/m²前後に到達した時点で、LCOEの大幅な低下が実現する。

日本の競争優位性:

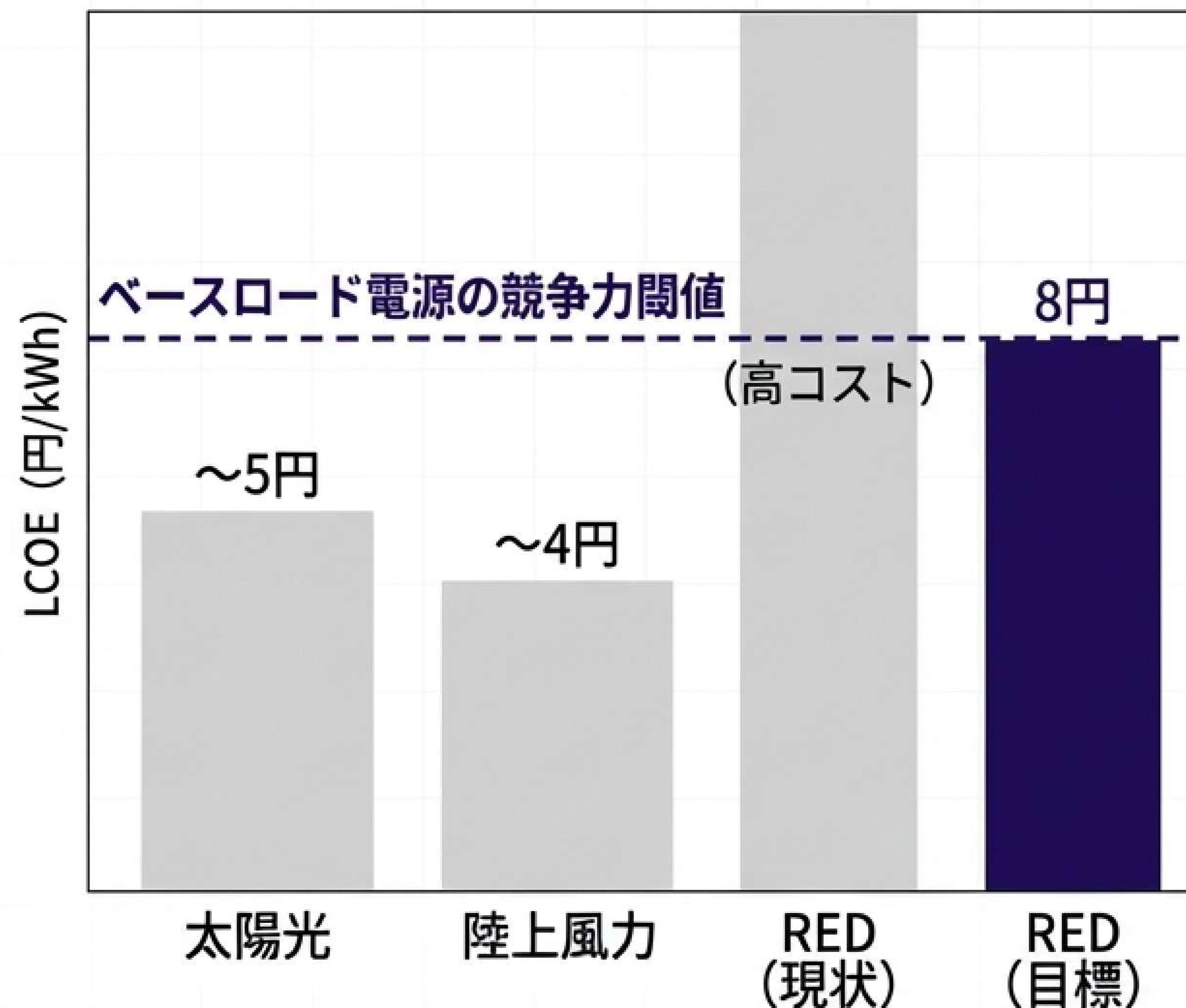
ASTOM、AGC、富士フィルムなど、電気透析や水処理向けイオン交換膜の量産において世界トップレベルの技術を持つ国内メーカーの存在が強み。



LCOE（均等化発電原価）の目標と競争力

既存の再生可能エネルギーと伍するコスト競争力の獲得。

- **究極の目標LCOE: 8円/kWh**
ドル換算で約0.05~0.08 USD/kWh。この水準に達することで、単なる環境技術ではなく、経済合理性を伴う基幹電源となる。
- **変動性電源への優位性**
太陽光（約4~5円/kWh）や陸上風力（約4円/kWh）は安価だが「発電の変動性（間欠性）」という致命的弱点を持つ。REDはLCOE 8円/kWhで「24時間で」で「24時間安定供給可能なベースロード電源」を提供するため、高価な蓄電池インフラを不要とし、社会全体でのエネルギーコスト最適化に寄与する。



サーキュラーエコノミーとの統合モデル

単独の発電プラントではなく、既存の産業施設とのハイブリッド統合が早期商業化の最適解。

- **ブライン・マイニングとの融合**

海水淡水化プラントや工業用水排出施設から発生する「高濃度廃塩水（ブライン）」の処理問題と、エネルギー回収を同時に解決。

- **パラサイト電力の相殺**

プラントから排出されるブラインを利用してRED発電を行い、得られた電力を施設の稼働電力として還元。試算では、施設全体の消費電力の約8%を相殺可能。インフラへの付帯設備として導入することで、実質的なLCOEを商業レンジまで押し下げる。



2040年に向けた中長期ロードマップ

基礎研究フェーズを終え、実社会への大規模実装へ向けたフェーズへと移行。

2025 - 2028年:

実装とスケールアップ

ナノチャンネル膜等、低抵抗・低コストな次世代高性能膜の市場投入。長崎等の実証拠点において50kW級のパイロット稼働を達成。

2030年:

商業化のブレイクスルー

10MW規模の商用デモンストレーション・プラントの稼働開始。ターゲットLCOE (8円/kWh) の達成。海水淡水化施設等への標準的な付帯設備としての普及。

2040年:

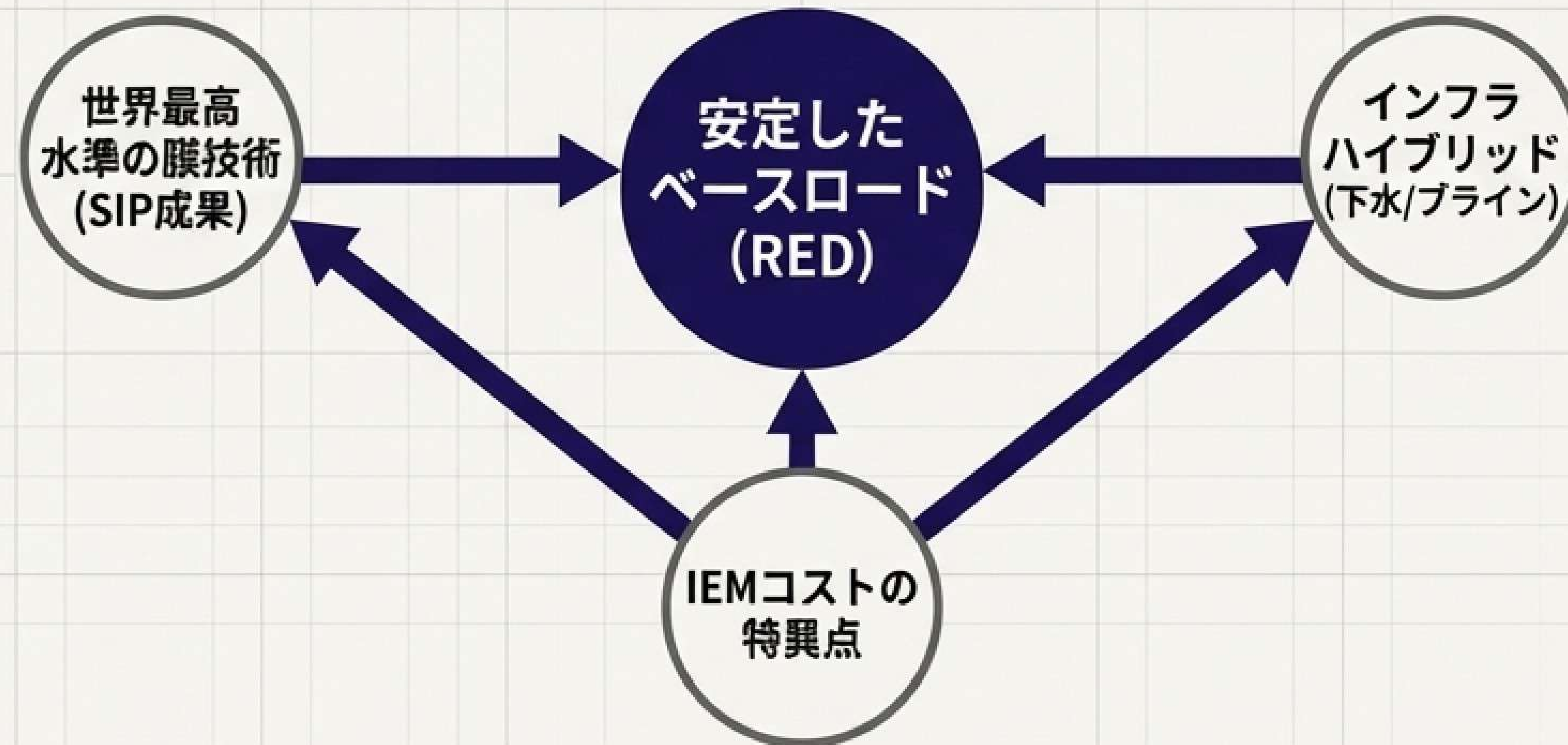
グリッドスケール展開

数十MW~GW規模の「ブルーエネルギー・ファーム」の本格展開。日本の脱炭素化を支える主要な分散型ベースロードインフラとしての標準化。

結語：天候依存を克服する次世代クリーンエネルギー

RED発電は、再生可能エネルギー最大の弱点である「天候依存・間欠性」を克服する確実な解である。

- 予測可能で安定した電力供給能力。
- 日本が世界をリードするイオン交換膜技術と、SIPを通じた実装研究の結実。
- 水インフラとの高度な統合によるサーキュラーエコノミーの実現。



SIPから生まれた成果は、技術的限界を突破し、経済合理性に基づく社会実装のフェーズに入った。政策的支援と産業間連携を加速させることで、REDは日本のエネルギー自立と脱炭素化を牽引する中核インフラへと進化する。