

FBC 調査レポートシリーズ（１）

欧州における長時間蓄電（LDES）市場の動向
鉄空気電池の商用化と日本企業の参入可能性

2025 年 9 月

FBC Business Consulting GmbH

Germany

<http://www.fbc.de>

目次

エグゼクティブ・サマリー	3
第1章 技術概要と市場性	4
第2章 研究開発プロジェクトと動向	6
第3章 社会実装とトレンド	8
第4章 メインプレイヤー	10
第5章 市場規模と将来展望	12
第6章 日本企業の参入とチャンス	14
第7章 公的支援や規制の動向	17
主な参考資料・出所（例）	19

エグゼクティブ・サマリー

欧州で加速する長時間蓄電 ― 鉄空気技術が次世代エネルギー転換を支える

欧州のエネルギー転換は、風力や太陽光の大規模導入を背景に「発電量の変動性」と「系統安定性」という課題を一層浮き彫りにしている。再生可能エネルギーの比率が 30～40%を超える国・地域では、数時間単位のリチウムイオン電池によるピークシフトでは対応が難しくなり、数十時間から数日にわたって出力を調整できる長時間蓄電（LDES：Long Duration Energy Storage）の導入が不可欠となっている。国際エネルギー機関（IEA）や LDES カウンシルの試算によれば、欧州の電力システムは今後、数百 GW 規模の LDES を柔軟性資源として確保する必要があるという。

こうした文脈の中で、鉄空気（二段酸化還元）技術が注目を集めている。鉄は地殻中に豊富に存在し、希少金属を必要としないため、資源供給リスクが小さい。さらに不燃性・低毒性で、安全性が高く、大規模設備に適する。鉄の酸化・還元、すなわち「錆び／還元」反応を繰り返すことで 100 時間規模の連続放電を実現でき、風力の無風期や太陽光の連続曇天といった「数日単位の再エネギャップ」を埋める技術として期待が高い。

実装はすでに始まっている。2025 年 7 月、オランダのスタートアップ、オレ・エナジー（Ore Energy）が TU デルフトの研究成果を基に、世界初とされる「系統連系済み鉄空気電池」を稼働させた。これはラボ実証ではなく、送電網に接続して実際に電力を供給する形態をとる、欧州内製技術による初の商用準備段階の案件だ。またアイルランドのフューチャーエナジー・アイルランド（FuturEnergy Ireland）は、10MW／1GWh 規模の鉄空気 BESS（Battery Energy Storage System）建設を計画し、将来的には 8GWh への拡張を視野に入れている。これらの動きは、欧州が北米のフォーム・エナジー（Form Energy）など国外勢に依存せず、域内技術を確立しようとする転換点を示している。

政策面でも追い風が吹く。EU は 2025 年に「Grid Investment Guidance」を公表し、蓄電を送電網投資と同等に扱う制度設計を進めている。英国は長時間蓄電向けに「Cap&Floor 制度」を導入し、投資家に最低収益を保証する仕組みを整えた。ドイツでも送電網強化用蓄電プロジェクト「Netzbooster」が進行中で、系統混雑の緩和に蓄電が活用されている。こうした政策的支援が、鉄空気を含む LDES 技術の普及を後押ししている。

一方で、日本企業の存在感は依然として薄い。欧州での参入はリチウムイオン電池、ナトリウムイオン電池、バナジウム系フロー電池、熱蓄熱分野に限られ、鉄空気電池に関しては明確なプロジェクト参画が確認されていない。しかし、参入の余地は大きい。具体的には次の分野が有望だ。

- 素材供給：鉄粉、ガス拡散電極（GDE）、触媒、バインダーなどの高機能材料
- 製造装置：電極成膜・焼結技術、粉末冶金設備

- EPC／O&M：大規模プラント建設・保守のノウハウ
- 金融スキーム：Cap&Floor 型収益モデルに対応したファイナンス・保証

今後 10～15 年で欧州の LDES 需要は急速に拡大し、特に風力依存度の高い北欧、アイルランド、英国を中心に案件が増える見通しだ。その中で鉄空気電池は「低コスト・長時間・高安全性」という特性を生かし、独自の市場ポジションを確立しつつある。日本企業が素材や製造装置といった得意分野を武器に早期参入を果たせば、欧州のエネルギー転換を支える重要なパートナーとなる可能性が高い。

第 1 章 技術概要と市場性

1.1 技術原理

鉄空気電池は、鉄の二段酸化還元反応を利用して電気エネルギーを蓄える。基本的な反応は以下の通りである。

- 放電（酸化過程）

$$\text{Fe} + 3/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$$
鉄が酸化されて水酸化鉄となり、この過程で電子が外部回路に流れ発電が行われる。
- 充電（還元過程）

$$\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe} + 3/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \quad (\text{外部電力による還元})$$
外部電力を用いて酸化鉄を金属鉄へ戻し、再び蓄電可能な状態にする。

このサイクルを繰り返すことで、数十時間から最大で 100 時間規模の放電が可能になる。従来のリチウムイオン電池が「ピークシフト」や「日内調整」に強みを持つのに対し、鉄空気電池は「マルチデー（multi-day）」のエネルギーシフトに適している。

鉄空気電池は主に以下の要素から構成される：

- 鉄アノード：粉末鉄や多孔質鉄板が利用される。
- 空気カソード：酸素を取り込むガス拡散電極（GDE）。
- 電解質：アルカリ水溶液（KOH や NaOH）など。
- 反応容器：鉄と電解質を保持し、外部から酸素を供給。

この仕組みにより、原料は鉄・水・空気という安価で豊富な資源に依存しており、希少金属や高価な電解液を必要としないことが大きな特徴である。

1.2 技術比較と市場性

以下に、鉄空気電池を他の蓄電方式と比較した。

技術	特徴	時間スケール	コスト	安全性	課題
リチウムイオン	高効率・量産済み	2～8 時間	高	発火リスクあり	希少金属依存、リサイクル課題
フロー電池	出力と容量を独立設計可能	4～12 時間	中	安全	電解液コスト、エネルギー密度低
熱蓄熱・圧縮空気	大規模向け、安価	日～週	中	安全	効率低い、立地制約あり
鉄空気	鉄・水・空気のみ、資源安価	50～100 時間	低	高い	効率改善、電極劣化対策

鉄空気電池は「長時間域」で最も経済性と安全性に優れ、リチウムイオン電池が不得意とする数十時間～数日間の需給調整を担うポジションを確立しつつある。

1.3 技術的メリットと課題

メリット

- ・ 資源が安価・豊富（鉄は地殻中で 4 番目に多い元素）。
- ・ 不燃性・低毒性で大規模化に適する。
- ・ 100 時間級の放電能力により、風力・太陽光の長期変動を補える。
- ・ 製造・リサイクルに既存の鉄鋼業の技術が応用可能。

課題

- ・ 往復効率：リチウムイオン電池の 90%前後に対し、鉄空気は 60～70%程度にとどまる。
- ・ 電極劣化：鉄の析出・溶解を繰り返すことで、粉末化やパッシベーションが進み性能が低下する。
- ・ 体積エネルギー密度：リチウムイオンに比べて低いため、同容量の蓄電に広い設置面積を要する。

- 商用化初期段階：実証事例は増えつつあるが、まだコストや寿命のデータが十分に蓄積されていない。

1.4 応用領域と市場性

鉄空気電池は以下の領域での実装が期待される：

- 再エネ平準化：洋上風力や太陽光の変動を 100 時間単位で補完。
- 系統安定化：送電網混雑解消（Storage-as-Transmission）やバックアップ電源として利用。
- エネルギーレジリエンス：災害時や非常時の長期バックアップ電源。
- 産業利用：製鉄所・化学プラントなど大量エネルギーを扱う産業の需要平準化。

欧州のエネルギーシステムにおいては、今後 10～15 年で数 GW 規模の鉄空気蓄電が導入される可能性があり、再生可能エネルギー比率の高い国（アイルランド、英国、北欧）が先行市場となる見込みである。

第 2 章 研究開発プロジェクトと動向

2.1 欧州における代表的研究プロジェクト

(1) TU デルフト / Ore Energy（オランダ）

- TU デルフトは金属空気電池の研究拠点のひとつであり、特に「鉄空気による 100 時間級蓄電」の応用に注力してきた。
- 2022 年にスピンアウト企業 Ore Energy が設立され、2025 年 7 月にはデルフトの The Green Village にて、世界初とされる「系統連系済み鉄空気電池」を稼働。
- この実証は実際の送電網に接続し、風力発電由来の電力を充電・放電する形で行われ、マルチデー蓄電が実際の電力系統運用で機能することを証明した。
- Ore Energy は、全ての主要部材を欧州域内調達で構築したことを強調しており、エネルギー安全保障と産業戦略の両面から意義が大きい。

(2) Fraunhofer UMSICHT / IFAM（ドイツ）

- ドイツのフ라운ホーファー研究機構は、鉄空気電池の電極・触媒開発に注力している。
- UMSICHT（環境・安全技術研究所）では、ガス拡散電極（GDE）の耐久性向上や、鉄の酸化還元反応における触媒反応効率の最適化に関するプロジェクトを進めている。
- IFAM（接着・界面研究所）では、鉄粉末の加工技術や多孔質金属基板の研究を行い、電極の長寿命化とエネルギー効率の改善に取り組んでいる。

- これらの研究は、商用化の鍵となる「往復効率の改善」と「電極劣化の低減」に直結する。

(3) ETH チューリッヒ（スイス）

- ETH は鉄を用いた「スチーム・アイアン・ループ（Steam-Iron Loop）」の研究を行っている。これは厳密には蓄電池ではないが、鉄の酸化還元を利用して水素や熱を長期に貯蔵する技術であり、季節間のエネルギー貯蔵を可能にする。
- この研究は鉄空気電池と直接競合するものではないが、鉄ベースの酸化還元技術の応用範囲を拡大し、欧州における「鉄系蓄エネ技術」の研究基盤を強化している。

2.2 実証・計画中のプロジェクト

(1) FuturEnergy Ireland（アイルランド）

- 2024 年、アイルランド国営の風力事業者 FuturEnergy Ireland は、Donegal 郡で 10MW/1GWh 規模の鉄空気蓄電システムの建設計画を発表。
- 将来的には 8GWh 規模まで拡張可能とされ、これは欧州で最も大規模な鉄空気電池計画となる。
- 本計画は米 Form Energy の技術導入を検討していると報じられており、欧州域内技術（Ore Energy）と北米技術の両方が市場に参入する格好となっている。

(2) 英国における制度下案件

- 英国政府は 2024 年に「LDES Cap&Floor 制度」を導入し、10 時間以上の蓄電技術を対象に収益下限保証を行う仕組みを構築。
- この政策を背景に、鉄空気電池を含む長時間蓄電案件が事業化検討段階に入りつつある。まだ案件名や規模は非公開だが、系統運用者（National Grid ESO）や複数の開発企業が Fe-Air を候補技術としてリストアップしている。

(3) 北欧地域（ノルウェー・スウェーデン）

- 北欧では風力比率の上昇と水力依存度の変動から、長期バックアップ電源としての鉄空気電池の適用が議論されている。
- 特にノルウェーの系統運用者 Statnett は、2020 年代後半に向けて新規 LDES の可能性を評価しており、Fe-Air 技術は候補のひとつとして挙げられている。

2.3 研究開発のトレンド

- 効率改善：往復効率を現在の 60～70%から 80%台に近づけるため、電極設計や触媒改良が進む。
- 長寿命化：鉄のパッシベーションや電極粉末化を抑えるため、材料工学とセル構造設計に重点が置かれている。
- スケールアップ：ラボ規模（数 kWh）から実証規模（MWh 級）、さらに商用（GWh 級）への移行が進む段階にある。
- 域内サプライチェーン確立：Ore Energy の事例のように「EU 内製」が重要視され、資源・製造・設計を域内完結させる流れが強まっている。

2.4 欧州における位置づけ

鉄空気電池に関する研究開発は、「商用初期実装」フェーズに入ったといえる。従来の基礎研究から、系統連系実証・大規模計画へと進展しており、欧州はこの分野で北米と並んで先頭に立っている。特にオランダ（Ore Energy）とアイルランド（FuturEnergy Ireland）は、欧州の鉄空気技術導入のショーケースとなりつつある。

第3章 社会実装とトレンド

3.1 初期実装の事例

オランダ：Ore Energy の実証

- 2025 年 7 月、TU デルフト発スタートアップ Ore Energy は、デルフト市内の「The Green Village」において、世界初とされる系統連系済み鉄空気電池を稼働させた。
- このシステムは 100 時間級の放電能力を備え、実際に送電網に接続して再生可能エネルギーの余剰電力を吸収・放出する形で運用されている。
- 特筆すべき点は、すべての主要構成要素（鉄、電極材、電解液、容器）が欧州域内調達であり、EU の「戦略的自立性」方針と合致していることである。
- 本件は「研究室規模」から「実運用フェーズ」へ移行したことを示す象徴的な事例と評価されている。

アイルランド：FuturEnergy Ireland の計画

- Donegal 郡における 10MW/1GWh 規模の鉄空気 BESS 計画は、欧州で初めて「GWh 級鉄空気システム」の建設を目指すものである。

- 風力依存度が高いアイルランドの電力系統は、無風期間の長期出力不足に備えたバックアップが不可欠であり、この課題解決に鉄空気が適している。
- 申請中の計画は最大 8GWh への拡張余地を有し、これは欧州蓄電市場における規模の大きな試金石となる。

3.2 地域的な実装ポテンシャル

- 英国
 - 「Cap&Floor 制度」により長時間蓄電の収益下限が保証され、投資環境が整備された。
 - 洋上風力の大規模開発が進む北海沿岸地域では、鉄空気電池が「再エネの長期変動対策」として有力視されている。
- 北欧（ノルウェー・スウェーデン・フィンランド）
 - 水力が大きな割合を占めるが、乾燥期や気候変動による変動が課題。鉄空気電池は水力不足時のバックアップとして検討されている。
 - また、産業集積（製鉄、化学プラント）における需要平準化用途でも注目されている。
- ドイツ
 - 再エネ比率の高まりに伴い、送電網の混雑（特に北部風力→南部需要地）が深刻化している。
 - 鉄空気電池は「Netzbooster（送電ブースター）」として設置され、系統混雑を緩和する可能性がある。

3.3 社会実装の推進要因

- 政策支援
 - EU「Grid Investment Guidance」（2025）により、蓄電は系統投資と同等に扱われることになった。
 - 英国は Cap&Floor 制度を導入、投資家の収益リスクを軽減。
 - ドイツでは系統安定化用途として蓄電を導入する先進事例が進展。
- 市場要因
 - 再エネカーテイルメント（出力抑制）の増加。特に風力発電比率の高い地域では数十％に達するケースもあり、余剰電力の有効活用が喫緊課題。
 - 欧州電力市場における価格変動の拡大。鉄空気のような長時間蓄電は、価格裁定の余地が大きい。
- 技術的成熟度
 - 研究室規模から MWh 級実証へ進み、今後は GWh 級へ拡大しつつある。

- 往復効率や寿命といった課題は残るが、社会実装に十分な性能が確認されつつある。

3.4 リスクと課題

- ・ 効率の低さ：現状では 60～70%程度にとどまり、投資採算性に影響。
- ・ 占有面積：リチウムイオンより低密度のため、大規模化すると敷地確保が課題。
- ・ 規制・許認可：新技術であるため、安全基準や系統連系手続きが未整備。
- ・ 収益モデルの不透明さ：容量市場・需給調整市場での位置づけが国ごとに異なる。

3.5 トレンドのまとめ

欧州における鉄空気電池の社会実装は、2025 年を境に「実証段階から商用初期段階へ」移行しつつある。オランダの実証とアイルランドの計画は象徴的であり、英国・北欧・ドイツが次の実装候補地域である。政策的支援と市場環境が整えば、2030 年代には数 GW 規模の鉄空気システムが欧州電力システムに組み込まれる可能性が高い。

第 4 章 メインプレイヤー

鉄空気電池技術の欧州展開は、スタートアップ、既存のエネルギー事業者、そして研究機関の連携によって進んでいる。以下に主要プレイヤーを整理する。

4.1 企業

Ore Energy（オランダ）

- ・ 設立年：2022 年（TU デルフト発スピンアウト）
- ・ 本社所在地：デルフト（オランダ）
- ・ 特徴：世界初の系統連系済み鉄空気電池を稼働（2025 年 7 月）。
- ・ 技術：鉄・空気・水のみを利用した 100 時間級の蓄電システム。
- ・ 強み：欧州域内での完全サプライチェーン確立（資材・製造・設計）。
- ・ 戦略：実証実績をもとに商用案件へのスケールアップを目指す。

FuturEnergy Ireland（アイルランド）

- ・ 設立：2021 年（ESB と Coillte の合併による風力発電開発会社）
- ・ 所在地：ダブリン（アイルランド）

- 特徴：Donegal 郡における欧州初の GWh 級鉄空気蓄電計画（10MW/1GWh → 最大 8GWh 拡張可能）。
- 意義：風力比率の高いアイルランドの系統安定化に直接寄与。
- 戦略：自社風力発電所との統合で、再エネと長時間蓄電をセットにした事業モデルを構築。

Form Energy（米国） – 欧州展開候補

- 設立年：2017 年（マサチューセッツ州）
- 特徴：鉄空気電池の代表的スタートアップで、北米で数百 MWh 規模のプロジェクトを推進。
- 資金調達：累計 10 億ドル超、ArcelorMittal などから出資を受ける。
- 欧州関与：FuturEnergy Ireland 計画での技術採用が検討されており、欧州市場参入の可能性が高い。

VoltStorage（ドイツ） – 近縁技術プレイヤー

- 技術：鉄系レドックスフロー電池を開発。
- 特徴：住宅用・分散型用途をターゲットとし、「鉄を使った低コスト・長時間蓄電」という点で鉄空気と親和性がある。
- 意義：鉄系蓄電市場の拡大に貢献し、鉄空気との補完関係を持つ。

4.2 研究機関

TU デルフト（オランダ）

- 役割：鉄空気電池研究の先駆。Ore Energy をスピンアウトさせた。
- 研究領域：電極設計、セル構造最適化、システム統合。
- 特徴：The Green Village にて、実際の都市環境下での実証を実施。

Fraunhofer UMSICHT / IFAM（ドイツ）

- UMSICHT：ガス拡散電極（GDE）の研究、貴金属フリー触媒の開発。
- IFAM：粉末冶金技術や鉄系多孔質電極の開発。
- 役割：効率改善・電極寿命延長に関する基盤研究。

ETH チューリッヒ（スイス）

- 研究：鉄の酸化還元を利用した「スチーム・アイアン・ループ」。
- 応用範囲：電池だけでなく、季節間エネルギー貯蔵（熱・水素）にも展開可能。

- 意義：鉄ベース酸化還元技術の応用領域を拡大。

4.3 プレーヤーの相互関係と市場展望

- スタートアップ（Ore Energy, Form Energy）が先行し、既存エネルギー企業（FuturEnergy Ireland）が商用化で後押しする構図。
- 研究機関（TU デルフト, Fraunhofer, ETH）が基礎研究を支え、実証プロジェクトを通じて産業化を促進。
- 2020 年代後半にかけて、欧州域内と北米企業が並行して市場を開拓する「二極体制」となる可能性が高い。

第5章 市場規模と将来展望

5.1 LDES 市場の全体像

欧州は「グリーンディール」や「REPowerEU」により、2030 年までに再生可能エネルギー比率を 42.5%以上に引き上げる目標を掲げている。しかし、風力・太陽光の導入拡大に伴い、電力の「日内変動」だけでなく「数日間の変動」や「季節変動」が大きな課題となりつつある。

国際エネルギー機関（IEA）、LDES Council など複数の機関は、2040 年までに世界で最大 8TW（80 億 kW）の LDES が必要と推計している。そのうち欧州は、風力依存度が高い北海・北欧・英国・アイルランドを中心に、200～250GW 規模の LDES 導入ポテンシャルを持つとされる。

5.2 欧州市場における鉄空気電池の位置づけ

- 時間スケールの適合性
 - リチウムイオン電池は日内（2～8 時間）に強みがあるが、連続した曇天や無風の 3～5 日間には対応が難しい。
 - 鉄空気電池は 50～100 時間の放電を得意とし、この「マルチデー」領域を担う唯一の低コスト選択肢と位置づけられる。
- 市場規模の初期見通し
 - 2025 年時点：欧州全体で約 5GW の LDES が導入、鉄空気のシェアはほぼゼロ。
 - 2030 年：欧州で 40GW 前後の LDES が必要とされ、鉄空気のシェアは 3～5%（1～2GW 規模）と予想。
 - 2040 年：200GW 超の LDES が必要とされ、そのうち鉄空気は 10～15%（20～30GW 規模）に成長する可能性。

5.3 成長を支える要因

- コスト優位性
 - 鉄・水・空気といった低コスト資材を利用するため、GWh 級システムでの CAPEX はリチウムイオン電池に比べ 30～50%低減できると試算される。
 - 長期稼働による LCOE（均等化蓄電コスト）は、容量市場や再エネカーティルメント対策の収益と合わせることで競争力を発揮。
- 政策的後押し
 - EU の「Grid Investment Guidance」（2025）で、送電投資の代替として LDES が認められた。
 - 英国の Cap&Floor 制度は投資収益下限を保証し、鉄空気のような新興技術に資金を呼び込む仕組みを提供している。
- 再エネ拡大との補完性
 - 欧州北部・アイルランドの風力発電比率は既に 40%超。2030 年には英国・北欧でさらに上昇が見込まれる。
 - 風況が数日間低迷する「無風期間」に鉄空気電池は最適であり、洋上風力拡大のボトルネック解消技術として期待されている。

5.4 残された課題

- 効率の改善：現状 60～70%の往復効率を、最低でも 75%以上に引き上げる必要がある。
- 信頼性の実証：大規模案件での長期稼働データが不足しており、バンクアビリティ（融資適格性）の確立が急務。
- 競合技術との比較：液化空気エネルギー貯蔵（LAES）、圧縮空気（CAES）、熱蓄熱も同じ領域を狙っており、政策・コスト動向次第で市場シェアが変動。

5.5 将来展望

- 短期（～2028 年）
 - 欧州での鉄空気電池は「実証から商用初期」段階。オランダの Ore Energy 実証と、アイルランドの 1GWh 計画が重要なマイルストーン。
- 中期（2028～2035 年）
 - 英国の Cap&Floor 制度下で複数の GW 級案件が形成され、北欧・独でも送電網混雑対策として採用が拡大。
 - 鉄空気電池は数 GW 規模の実装を達成し、LCOE が他 LDES 技術と競合可能な水準に低下。

- 長期（2035～2040 年以降）
 - 欧州において鉄空気は 20～30GW 規模の市場を形成し、LDES 市場の中核技術のひとつに位置づけられる。
 - 将来的には産業需要地（製鉄所・化学プラント）の自家発電・バックアップ用途への展開も見込まれる。

第 6 章 日本企業の参入とチャンス

6.1 現状認識（ギャップの可視化）

- 欧州での日本企業プレゼンス：リチウムイオン、Na 系、フロー電池、熱蓄熱、パワエレ（PCS）では存在感がある一方、鉄空気（Fe-Air）に直接紐づく製品・案件参画は限定的。
- 需給サイドの状況：オランダ（実証運転）、アイルランド（GWh 級計画）、英国（Cap&Floor 制度）、独・北欧（系統混雑/風力高比率）と、初期導入の“窓”が開きつつある。
- 日本側の強み：粉末冶金・焼結/表面処理、触媒・炭材料、精密成形、化学プラント EPC、信頼性評価、品質保証、長期 O&M、保険・金融の組合力。
- ギャップ：往復効率・寿命に効くガス拡散電極（GDE）・触媒・鉄粉の最適化チェーン、および長時間ストレージ特有の案件収益モデル（容量価値・系統価値・カーテイルメント回避）の統合提案。

6.2 参入機会のマッピング（バリューチェーン別）

1. 素材・コンポーネント

- 鉄粉・多孔質鉄基材：粒径分布・比表面積・酸化還元サイクル耐久の最適化。粉末冶金（PM）/アトマイズ技術の転用余地が大きい。
- GDE（空気極）：疎水/親水バランス、細孔径分布、結着剤（PTFE 系/フッ素代替）設計。炭材（カーボンブラック/アセチレンブラック/活性炭） + バインダ + 担持触媒の最適化。
- 触媒：貴金属フリー（Mn/Fe/N/C 系、スピネル型酸化物など）で ORR/OER 両立の耐久性強化。
- セパレーター/電解質：アルカリ系での化学安定性・カーボネーション抑制。

2. 製造装置・プロセス

- 電極塗工・カレンダー・焼結炉、スラリー分散・塗工のラインパラメータ最適化（粘度・固形分・乾燥プロファイル）。

- 鉄粉ハンドリング、スラリー/ペースト搬送、セル組立の自動化・品質トレーサビリティ。

3. システム/EPC・O&M

- 容器・流体・空調・防食、電解液管理（CO₂侵入・炭酸塩化対策）、安全設計（漏えい・腐食）。
- 予防保全（CBM）・IoT 監視、劣化推定モデル（インピーダンス/電位挙動）実装。
- 系統連系・保護設計、Black Start/レジリエンス要件への適合。

4. パワエレ/制御・ソフトウェア

- 100 時間級の運用を見越したスケジューリング最適化（市場/天気/風況予測×運転制約）。
- 価格裁定×容量価値×カーテイルメント回避を統合したディスパッチ最適化（データ同化、強化学習系も選択肢）。

5. 金融・スキーム

- 英国の Cap&Floor、容量市場、DS3/FFR 相当サービスのポートフォリオ組成。
- EPC + 性能保証（wrap） + 保険をパッケージ化し、融資側のバンクアビリティを確保。

6.3 優先ターゲット地域・顧客

- 英国：制度先行（Cap&Floor）、系統運用者/配電事業者/再エネデベロッパーが主要顧客。
- アイルランド：風力×弱連系の典型市場。Futura Energy Ireland など大口プレーヤーと実証→初期商用のブリッジが有効。
- オランダ：Ore Energy 周辺の実証エコシステム。共同研究/部材適合試験の拠点として有望。
- 北欧（ノルウェー/スウェーデン/フィンランド）：水力変動補完・産業需要地向けレジリエンス用途。

6.4 パートナー候補と連携様式（例）

- スタートアップ：Ore Energy（実証・製品適合テスト）、Form Energy（欧州進出時の部材供給/製造パートナー）。
- 研究機関：TU Delft、Fraunhofer UMSICHT/IFAM（材料・GDE・触媒の共同研究）、ETH（近縁技術の知見共有）。
- デベロッパー/公益：Futura Energy Ireland、欧州大手ユーティリティ（RWE, Ørsted, SSE 等）とのサイト・系統連系・PPA 連携。

- EPC/パワエレ：既存の変電・BESS EPC 企業、PCS メーカーとコンソーシアム組成。

6.5 リスクと緩和策（Bankability 視点）

- 技術リスク：効率・寿命の不確実性 → 段階的性能保証（年次劣化上限）＋補修/交換の LTA を契約化。
- 収益リスク：市場価格ボラティリティ → 容量支払い/Cap&Floor/DSR 収入の複合化。
- スケールリスク：GWh 級での量産・物流 → モジュール規格化＋現地調達比率で緩和。
- 許認可/環境：アルカリ・腐食リスク → 設計標準/安全プロトコル/材料適合認証の先行取得。

6.6 ロードマップ（90/180/360 日プラン）

- D+90：技術・市場スクリーニング完了。Ore/TU Delft・Fraunhofer と NDA/PoC 覚書。日本側部材（鉄粉/GDE/触媒）で適合性スクリーニング着手。
- D+180：英国/アイルランドでサイトスクリーニング（系統接続可否/土地/環境）。EPC・PCS・保険含む暫定コンソーシアム構成。
- D+360：MWh 級デモの実証契約締結。Cap&Floor/容量市場参加計画とタームシート確定。量産移行時の現地加工ノード（鉄粉後処理・電極ライン）方針整理。

6.7 参入モデル案（3 タイプ）

1. “部材スペシャリスト”モデル：鉄粉/GDE/触媒のスペック適合＋QA で差別化。短期収益化。
2. “EPC＋O&M”モデル：EPC・性能保証・保守を打包。保険・保証と連携して融資適格性を担保。
3. “共同事業（Co-Dev/Co-Invest）”モデル：デベロッパーと共同 SPV。素材・装置のインカインド提供＋エクイティ少額出資で上流/下流の利益を取りに行く。

6.8 日本企業の強みを生かす具体テーマ

- 鉄粉：酸化還元サイクルでの粒子凝集/微粉化の抑制設計、表面改質。
- GDE：孔構造×撥水性の経時安定、非 PFAS 系バインダの実用化。
- 触媒：貴金属フリーORR/OER の活性－耐久バランス最適化。
- 電解液管理：CO₂侵入抑制・カーボネーション対策（シール材・吸収材）。
- 品質保証：セル/スタックの出荷前 EoL 加速試験メソッドの共同確立。
- デジタル：風況・価格予測×運転計画の収益最適化エンジン。

6.9 KPIとマイルストーン（初期 2 年間の目安）

- 技術 KPI：往復効率 + 5pt、年次劣化率 $\leq$ 3%、スタック MTBF + 20%。
- 事業 KPI：実証 $\geq$ 1 件（ $\geq$ 10MWh）、サプライ契約 $\geq$ 2 件、英/愛で系統連系 $\geq$ 20MW 確保。
- 資本 KPI：EPC+保険のラップ契約ひな形確立、金融機関 2 行以上と与信枠設定。

6.10 まとめ

欧州の鉄空気市場は「実証→初期商用」への分水嶺にあり、日本企業の素材・製造・EPC・金融の総合力が生きる。英国・アイルランド・オランダを軸に、部材適合 PoC→MWh 級実証→GWh 級スケールの階段を上げる戦略が有効だ。“スピード重視の共創（共同開発/共同投資）”でポジションを確保し、2030 年代の拡大局面に向けて足場を固めるべきと考える。

第 7 章 公的支援や規制の動向

7.1 EU レベル（横串）

- 電力市場制度改革（EMD 改正：2024 年発効）
2024 年 5 月採択、7 月発効。市場設計の改正で“柔軟性（flexibility）”を正式に位置づけ、長時間蓄電を含む柔軟性資源の投資環境整備を進める狙い。長期契約（CfD/PPA）の安定化、分散資源・蓄電の系統価値の見える化が柱となる。鉄空気のような LDES は「市場時間軸を跨ぐ柔軟性」提供主体として制度上の居場所が明確化した。
- 先行投資（Anticipatory Investments）ガイダンス（2025 年 6 月）
送配電の将来需要に先んじた投資を正式にガイド。2040 年までに配電 7300 億ユーロ、送電 4770 億ユーロの投資が必要と明示し、柔軟性・蓄電を“ネットワーク投資の代替/補完”として扱う枠組みを示した。Storage-as-Transmission（系統代替）に道を開く内容で、LDES 案件のレベニュー・スタッキング設計に追い風となる。
- グリッド強化アジェンダの加速
欧州委・IEA 等は“老朽化・細連系・貯蔵不足”を課題として再提示。大規模停電事例を踏まえ、送電連系と貯蔵拡充が強調される。政策文脈としては「グリッド・パッケージ」や新たなインフラ優先案件群（Energy Highways 等）により、柔軟性投資の重要度が一段と上がった。
- ⇒ Fe-Air への示唆：
系統側ニーズ（混雑緩和・長期不足補填）を“ネットワーク価値”として正当に評価する方向性が明確化。100 時間級の Fe-Air は、再エネの数日単位のギャップ埋めと送電投資代替の双方で制度親和性が高い。

7.2 英国（制度が最も前進）

- LDES 向け Cap & Floor 制度
2025 年 3 月に技術文書を公表、同年 6 月に Window 1 の金融フレーム案を Ofgem が協議。対象 LDES に 最低収益（Floor）と上限（Cap） を設定して投資回収性を担保しつつ、コスト抑制と期日順守のインセンティブも設計。長時間域（ ≥ 10 時間）技術の“バンクアビリティ確立”が狙い。
- ⇒ Fe-Air への示唆：
100 時間級の鉄空気は制度適合度が高く、初号案件のプロジェクト・ファイナンス組成を後押し。容量市場・調整力市場との収益重ね（レベニュー・スタッキング）を前提に、Cap&Floor で“底割れ”を防ぐ設計が有効。

7.3 ドイツ（Storage-as-Transmission の実装）

- Netzbooster（グリッド・ブースター）
送電系統の有効利用を目的に 250MW/250MWh 級 BESS を TSO（TransnetBW）が建設。フリュエンスがシステム提供。系統混雑時のバックアップとして機能し、送電線増強の代替/延期効果を狙う“ストレージ = 送電”の象徴事例。今後、他 TSO にも横展開。
- ⇒ Fe-Air への示唆：
Netzbooster 自体は短時間 BESS だが、“蓄電が系統投資の代替になり得る”制度・実務が確立。風力偏在の北独→南独送電ボトルネックに対し、より長時間の Fe-Air は無風連続時の出力補填やカーテイルメント削減で補完価値を出し得る。

7.4 アイルランド（案件ドリブンの先行地域）

- 鉄空気 BESS の計画審査（Donegal 郡）
国営系デベロッパーが 10MW/1GWh（将来最大 8GWh） の鉄空気 BESS を申請。系統運用・環境影響評価・接続許認可の詳細が審査対象。高風力・弱連系の系統特性から、100 時間級蓄電の制度適合性が議論の俎上に乗った。
- ⇒ Fe-Air への示唆：
案件個別の許認可・系統接続要件（騒音、用地、化学物質管理、非常時計画）をクリアすれば、欧州初の GWh 級 Fe-Air として制度的“先例”を形成しうる。

7.5 制度トレンドの総括（実務ポイント）

1. 系統価値の明確化：EU の先行投資ガイダンスで、蓄電を送配電投資の代替/補完として評価しやすくなった。プロジェクトは “ネットワーク回避便益”の定量化 を必須化。

2. リスク配分の制度化：英 Cap&Floor で初期案件の収益下限が制度担保。Fe-Air は寿命・効率の不確実性を性能保証 + 制度下支えで補完。
3. 許認可テンプレの整備：大容量・長時間機器として安全基準・運転規程の標準化が進展中。Netzbooster 等の先行事例を参照設計に活用。
4. グリッド最優先の政策一体運用：市場設計改正 + グリッド・パッケージ + インフラ優先案件で、柔軟性投資が系統アジェンダの中心へ。

7.6 日本企業へのインプリケーション

- 案件形成：英国（Cap&Floor）とアイルランド（案件審査）で初号 Fe-Air を狙うのが最短。
- 制度対応：EU の“先行投資”文脈で Storage-as-Transmission の便益提示を用意（混雑緩和、カーテイルメント回避）。
- 金融設計：Cap&Floor×容量市場×調整力の複合収益に、性能保証（wrap） + 保険を組み合わせてバンクアビリティを確保。

主な参考資料・出所（例）

- Ore Energy プレスリリース（2025 年 7 月、TU デルフト発スタートアップによる実証案件）
- FuturEnergy Ireland 計画申請資料（2024 年、Donegal 郡 10MW/1GWh → 最大 8GWh 案件）
- Fraunhofer UMSICHT / IFAM 研究報告（電極・触媒関連、2023–2025 年）
- ETH Zürich 論文 “Steam-Iron Loop”（季節間鉄系貯蔵、2023 年）
- LDES Council 報告書（2023・2024 年版、長時間蓄電の世界導入試算）
- 欧州委員会 “Grid Investment Guidance” (2025 年 6 月)
- 欧州電力市場制度改革（EMD 改正, 2024 年発効文書）
- Ofgem “Cap&Floor for LDES” Consultation (2025 年版)
- TransnetBW “Netzbooster” プロジェクト概要資料（2023–2024 年）
- IEA “Grid Infrastructure Outlook” (2025 年)

.....

FBC Business Consulting GmbH

August-Schanz-Str. 8, 60433 Frankfurt am Main, Germany

Tel.: 0049-69-5480-950、<http://www.fbc.de>

免責・複製禁止について

本レポートの内容は信頼できる情報に基づき作成していますが、その正確性・完全性を保証するものではありません。本レポートに基づいて行われた判断や行動により生じたいかなる損害についても、当社は責任を負いかねます。

また、本レポートの一部または全部を、当社の書面による承諾なく複製、転載、配布することを禁じます。