Iron Fuel Vision 2035

鉄を、素材からエネルギーインフラへ

2026 年 11 月 第 1 版 発行: 株式会社 Ferruvia

要旨

本書は、再生可能エネルギーを鉄に載せて世界に運び、繰り返し使う仕組みを提案する。 目的は、100 年後の世代に、有限の燃料を使い切る仕組みではなく、循環するエネルギーの基盤を渡すことである。

新しいエネルギーキャリアは、これまでも産業と国際関係の形を変えてきた。そして今、人類は太陽と風という尽きないエネルギーを手にしつつある。残る問いは、それを海を越えて届け、季節を越えて貯め、必要な熱に戻す手段である。

鉄はその有力な答えの一つである。豊富で、扱い慣れており、常温常圧の固体として運び、貯めることができる。燃やした後は回収して、再びエネルギーを蓄えられる。

鉄が変えるのは、脱炭素だけではない。資源の使い方、環境、エネルギー安全保障、価格の安定、エネルギーの地図、既存の資産と人材の活用、新しい産業の創出に及ぶ。経済面では、燃料のコストを決めるものが、化石燃料の市況から再エネと設備のコストへ移る。量産時には熱 1kWh あたり約 10 円を目標とし、脱炭素の選択肢で有力な水準に達し、LNG の価格帯に入ることを目指す。これは現在の公開水準より先にある目標であり、再エネ、水電解、還元、循環、物流の開発を戦略的に進めて実現を目指す。

この産業には、還元、物流、燃焼、回収、取引、規格、金融など、数多くの担い手が必要である。日本には LNG の市場を切り拓いた経験と、必要な能力の多くがある。2035 年には、多くの企業が共通のルールで取引する最初の市場を立ち上げ、アジア、そして世界へ広げていく。

1. 100 年後の世代に、どのようなエネルギーの仕組みを渡すか

本書の問いは、次の世代にどのようなエネルギーの仕組みを渡すかである。 燃料の選択は、一企業のコストの問題にとどまらず、国の安全保障、産業の競争力、そして地球環境を左右する。

現在の経済は、地中から掘り出した燃料を一度使って終わる仕組みの上に成り立っている。この仕組みは産業の発展を支えてきたが、4 つの限界を抱えている。

- **資源:** 化石燃料は有限であり、使えば失われる。
- **環境:** 燃焼のたびに CO_2と大気汚染物質が出る。
- **安全保障:** 産地が偏っており、供給は国際情勢に左右される。

- **価格:** 市況によって大きく変動し、企業の計画を不安定にする。

日本はこの限界の影響を最も強く受ける国の一つである。2024 年度のエネルギー自給率は 16.3%、一次エネルギーの化石燃料依存度は 80.1%である[1]。2025 年の鉱物性燃料の輸入額は約 22 兆円で、輸入全体の約 2 割を占めた[2]。

目指す姿

本書が描くのは、エネルギーを「掘って燃やして終わるもの」から「つくって運び、繰り返し使うもの」へ変える姿である。世界の再生可能エネルギーの適地でつくられたエネルギーが、物質に載って海を渡り、備蓄され、工場で使われる。使い終えた物質は回収され、再びエネルギーを蓄える。

なぜ 100 年の視点か

エネルギーの基盤は、一度つくられると長く使われる。日本が 1969 年に輸入を始めた LNG[26]は、50 年以上たった今も経済を支えている。港湾、船、設備、規格、契約は、それを築いた世代の後も残る。

したがって、今の選択は数十年先の産業の姿を決める。本書は 100 年先を構想の起点に置き、その最初の到達点として 2035 年を描く。

2. 新しいエネルギーキャリアは、産業と国際関係を変えてきた

エネルギーを運ぶものが変わるたびに、産業の立地、国際貿易、国と国の関係が変わってきた。 変化を生んだのは、物質そのものだけではない。大量に運び、安定して供給する仕組みが整ったことである。

キャリア	つくられた仕組み	もたらした変化
石炭	鉄道、蒸気船、積出港	工場制工業と工業地帯が生まれた
石油	油田、タンカー、製油所、給油網	自動車と航空機が普及し、エネルギーが外交の中心課題になった
LNG	液化設備、専用船、受入基地、長期契約	遠隔地のガスが国際商品になり、パイプラインのない国も利用できるようになった

石炭は蒸気機関とともに産業革命を支え、工場が炭田や港の周辺に集まった。石油は液体で運びやすく、タンカーと給油網によって世界中に届くようになり、交通と国際政治の形を変えた。ガスは長く地域の燃料だったが、液化と専用船によって海を越えた。

この歴史から分かることは 3 つある。

1. **運べるようになると、市場は世界に広がる。** 生産地と消費地が切り離され、新しい貿易が生まれる。
2. **仕組みをつくる過程で、標準と契約の形が定まる。** 関わった企業と国の知見が、その後の産業の土台になる。
3. **多くの仕組みが揃って、初めて産業になる。** 技術に加えて、設備、船、港、契約、規格、金融、顧客が必要である。

では、次の時代のエネルギーは、何が運ぶのか。

3. 尽きないエネルギーを、どう世界に届けるか

人類は、太陽と風という尽きることのないエネルギーを手にしつつある。残る問いは、それをどう世界に届けるかである。

再生可能エネルギーの広がりは速い。世界の大規模太陽光の平均発電コストは 2010 年から 2024 年にかけて約 90%下がり[3]、2024 年に新設された大規模再エネの 91%は、最も安い新設の化石燃料発電を下回った[4]。2025 年の世界の再エネ設備の増加は過去最大の 800GW で、発電量は石炭にほぼ並んだ[5]。

一方で、エネルギーは生まれる場所と時間を選べない。

- **生まれる場所と、使う場所が違う:** 日射や風に恵まれた地域と、工業地帯は離れている。中東や豪州の電気を、電線で日本へ送ることは難しい。
- **生まれる時間と、使う時間が違う:** 発電量は天候と季節で変わるが、産業は 24 時間、冬にも熱を必要とする。
- **電気のままでは届かない需要がある:** 送電網の増強には時間と投資を要する。日本では 2025 年 1〜6 月に約 1.74TWh の太陽光・風力が出力制御された(送配電事業者の速報値)[6]。熱は世界の最終エネルギー消費のほぼ半分を占めており[7]、高温の熱や蒸気を必要とする産業も多い。

手段は一つではない

エネルギーの未来は、一つの技術では支えられない。それぞれに得意な領域がある。

手段	得意な領域	鉄との関係
直接電化、ヒートポンプ	低〜中温、受電余力のある拠点	電気を直接使えるところでは電化が最も効率的である
蓄電池、蓄熱	数時間の調整、敷地内	時間軸と場所が異なり、補完する
水素パイプライン	大規模で集約された需要	接続できる大規模需要では水素が合理的である
アンモニア、合成燃料	大規模輸送、原料用途	用途に応じて使い分ける

手段	得意な領域	鉄との関係
バイオマス	既存の固体燃料設備	手に入る拠点で有力である

その上で、大量のエネルギーを海を越えて運び、季節を越えて貯め、高温の熱として使う領域には、まだ決定的な手段がない。

再生可能エネルギーの時代にも、エネルギーを運び、貯めるための「燃料」は必要である。

4. その答えの一つが、鉄である

文明の骨格をつくってきた素材が、次はエネルギーを世界へ運ぶ。 鉄は建物、船、鉄道、機械を支えてきた。その鉄が、エネルギーを蓄えて運ぶ役割を担う。

仕組みは単純である。再生可能エネルギーなどで酸化鉄を鉄に戻し、エネルギーを蓄える。その鉄を粉体として運び、必要な場所で燃やして熱を得る。燃えた後の酸化鉄を回収し、再び鉄に戻す。鉄はエネルギー源ではなく、エネルギーを運ぶキャリアである。

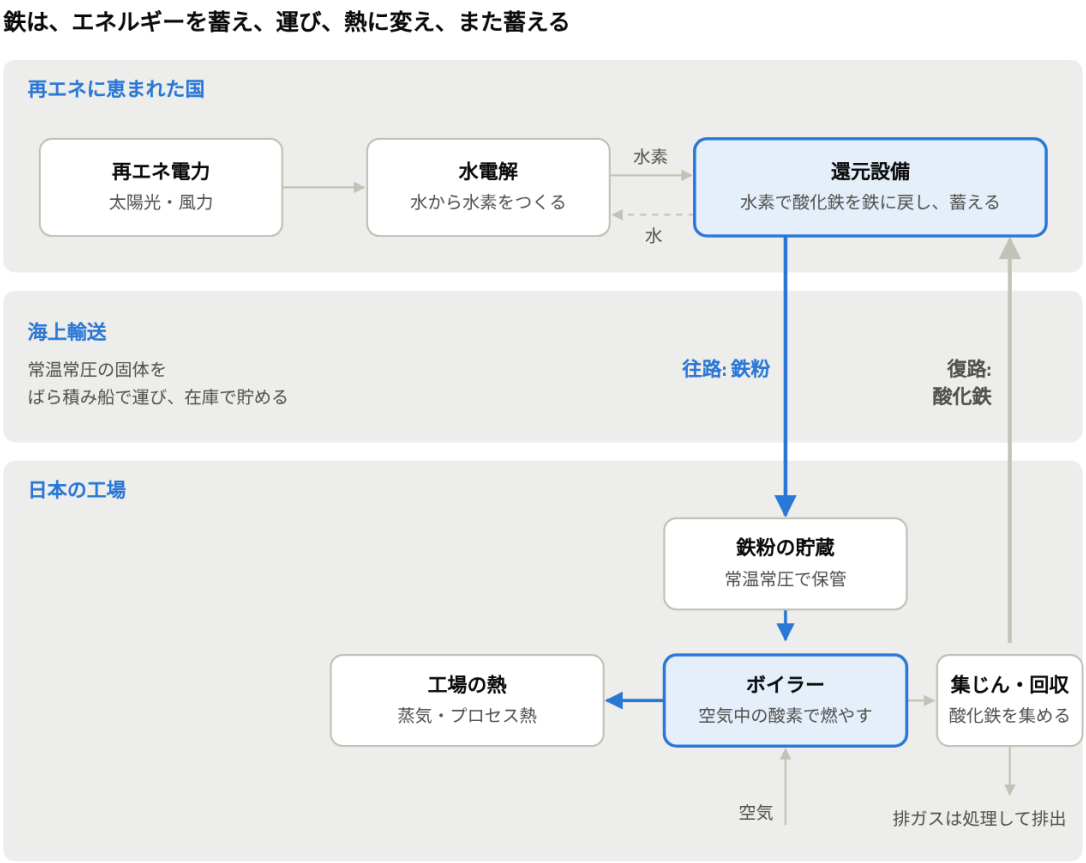


図 1 鉄によるエネルギーの循環

再エネに恵まれた国で還元し、海上輸送で日本の工場に届ける例。国内の余剰電力で還元する形も成り立つ。還元で出る水は水電解に再利用できる。

鉄が備える 6 つの条件

条件	内容
豊富である	鉄は地球の質量の約 3 割を占める元素であり[8]、地殻にも豊富に存在する。資源の制約を受けにくい
扱い慣れている	人類は数千年にわたって鉄を扱ってきた。製鉄、粉末冶金、海運に大きな産業基盤がある
運べる	常温常圧の固体である。鉄鉱石は 2024 年に 16.8 億トンが海上輸送された、世界最大のばら積み貨物であり[9]、バルク物流の知見を活かせる。還元された鉄粉は鉄鉱石と性状が異なるため、水分管理と粉じん対策を前提に基準を整備する
貯められる	蒸発や自己放電がなく、乾燥して保管すれば長期間在庫として持てる
高温の熱に戻せる	高温の火炎が得られる[10]。燃料供給や回収の設備を加えれば、既存の蒸気・熱利用設備を活かせる可能性がある
循環できる	燃えた後の酸化鉄は次の燃料の原料になる。燃料の役目を終えた鉄には、製鉄原料という出口もある

他のキャリアとの比較

鉄の特徴は、体積あたりのエネルギーが大きく、特殊な温度や圧力を必要としないことである。重いため、船舶や自動車の燃料よりも、工場などの固定された設備に向いている。

キャリア	体積あたり(kWh/L)	重量あたり(kWh/kg)	保管の条件
鉄粉	**9.68**	**2.05**	**常温常圧の固体**
液化メタン	6.08	13.50	極低温
メタノール	4.38	5.53	常温の液体
アンモニア	3.52	5.17	液化、毒性あり
液化水素	2.37	33.33	−253℃

出典: Schuler et al. (2025)[11]。鉄粉は空隙率 40%。同研究は、鉄を長距離エネルギー輸送の有望な選択肢と評価している。

研究と実証の現在地

燃焼技術は、単一の粒子の研究からバーナー、そして MW 級へと進んできた。アイントホーフェン工科大学は、燃焼と還元の 10 回の循環を実験室規模で実証し、再生した鉄粉の燃焼効率が約 85%と、新品の約 86%に近いことを報告した。NO の排出も 2.5mg/MJ 未満と低い[12]。

商用化に向けては、実機での長期の循環と回収を確かめていく段階にある。その取り組みは第 6 章と第 10 章で述べる。

5. 鉄が変える 7 つのこと

鉄がもたらす価値は多面的である。 政策や炭素価格は変わり得るが、資源、安全保障、価格の安定、産業の育成といった価値は、どの時代の経営者と政府にも必要とされる。

1. 資源を使い切らない

化石燃料は一度燃やすと失われるが、鉄は循環する。熱出力 1GW の需要を石炭で賄うと、毎年約 100 万トンを掘って燃やすことになる。鉄の場合は、在庫を繰り返し使い、補うのは損耗分と寿命を迎えた分(40 回循環の前提で年約 10 万トン)である。

2. 環境負荷を減らす

燃焼時に燃料由来の CO_2や硫黄酸化物を出さない。窒素酸化物と微粒子は、燃焼と集塵の設計で抑える。還元拠点の電力と往復の海上輸送を含めても、再エネで還元すれば石炭比で約 9 割の減少が見込める(Ferruvia 試算)。熱は世界のエネルギー起源 CO_2の 37%を占めており[7]、影響の大きい領域である。

3. エネルギー安全保障を高める

再生可能エネルギーを、備蓄できる物質として輸入できるようになる。次の表は、熱出力 1GW を定格で 30 日間運転する分の燃料を比べた概算である。

燃料	重量(万 t)	体積(万 m³)	保管の条件
鉄粉	**約 39**	**約 8〜13**	**常温常圧、乾燥した設備**
石炭	約 12	約 14	常温常圧
LNG	約 6	約 13	−162℃、蒸発あり
アンモニア	約 16	約 23	冷却または加圧
液化水素	約 2	約 34	−253℃、蒸発あり

鉄粉の体積の幅は、空隙率 40%と、かさ密度 3t/m³の場合を示す。日本の大手電力の発電用 LNG 在庫は 2026 年 3 月 1 日時点(経済産業省調べ)で 219 万トンであり、輸入が全面的に止まった場合の単純計算で約 3 週間分にあたる[13]。常温で長く持てる鉄は、戦略的な選択肢となり得る。在庫の金利負担も小さい。30 日分を 10 万円/t と仮定すると約 390 億円で、資本コスト 5%なら熱 1kWh あたり約 0.3 円である(サイロなどの設備費は別)。還元拠点を複数の地域に持てば、調達先も分散できる。輸入に頼る部分は残るが、備蓄、調達先の分散、国内の余剰電力での還元によって、供給途絶への耐性を高められる。

4. 価格を安定させる

化石燃料の価格は世界情勢で大きく動く。LNG を使う工場の熱コストは、観測された範囲で約 7〜11 円/kWh の間を動き、2026 年 10 月のスポット最高値では約 19 円相当に達した(Ferruvia 試算)。鉄のコストは主に再エネと設備で決まり、化石燃料の市況に左右されにくい(電力、物流、鉄粉の価格の変動はある)。長期の投資計画を立てやすくなる。

5. エネルギーの地図を広げる

これまで燃料の輸出国となれるのは、地下資源を持つ国に限られていた。鉄に載せて運べれば、日射や風に恵まれた国や地域も輸出国になれる。輸入国にとっては調達先が増え、輸出国にとっては新しい産業が生まれる。世界最安水準の太陽光と風力の落札価格は、1kWh あたり約 2 円以下に達している[14]。中東は既に世界の直接還元鉄の約 4 割を生産しており[15]、還元の産業基盤も世界に広がっている。

6. 今ある資産と人材を活かす

船、港、製鉄所、ボイラー、そしてそれを運用する人材を、次の時代にも活かせる。工場を一から建て直すのではなく、燃料側を変えていく道が開ける。工業地帯と港湾の雇用を守ることにもつながる。

7. 新しい産業を生む

還元、粉体製造、物流、燃焼、回収、取引、規格、金融に至る一連の事業が生まれる。日本は輸入国にとどまらず、設備、技術、運用、標準を世界に届ける存在になれる。

政策がなくても選ばれる価値をつくることが、鉄を本当の産業にする。

6. 化石燃料の市況ではなく、主に再エネと設備のコストに連動する燃料へ

化石燃料のコストは資源の市況で決まる。鉄のコストは、主に再生可能エネルギーと設備のコストで決まる。 太陽光の発電コストが大きく下がったのと同じ論理が、燃料にも及ぶ。

脱炭素の選択肢で有力な水準を目指す

燃料の製造から輸送、配送、工場側の設備まで、同じ範囲でコストを比較した。鉄は初期に熱1kWh あたり約 17 円、成熟期に約 12 円、量産時に約 10 円を目標とする。

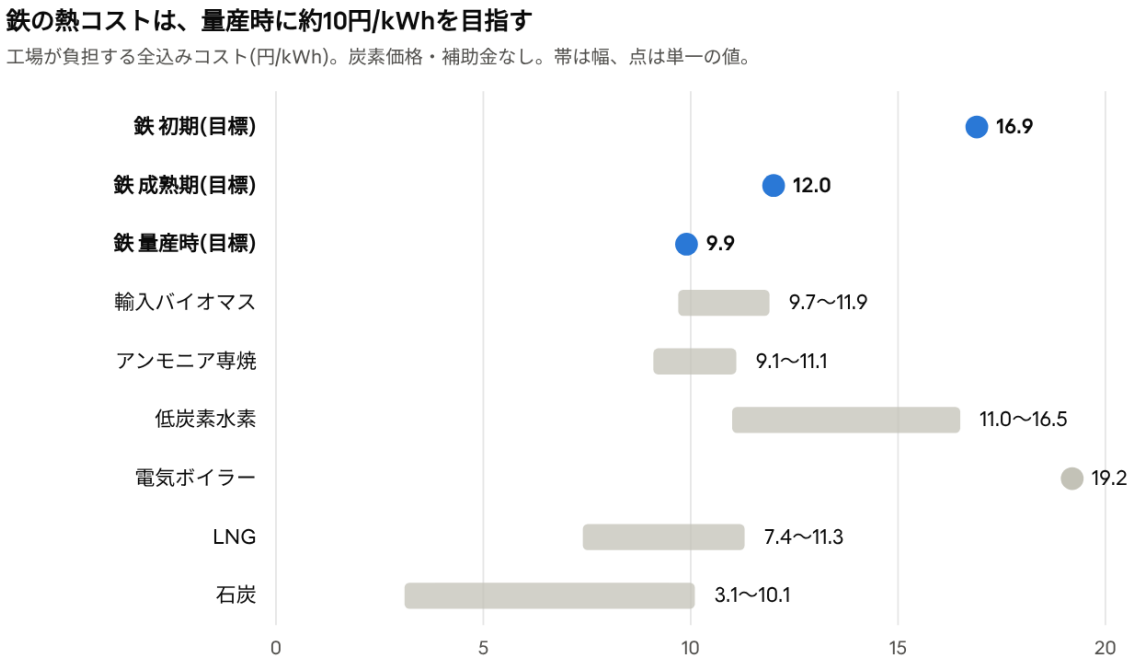


図 2 工場が負担する熱コストの比較

鉄は開発の達成を前提とした会社目標、石炭・LNG・バイオマスは観測された市場価格の幅。水素とアンモニアは政府が示す価格水準[37]に受入・配送と設備を加えた幅で、アンモニアの燃料価格は低下を見込んでいない。電気ボイラーはモデルの想定で、低温域ではヒートポンプが安い場合がある。比較対象の値は成熟期・量産時の前提による。出典: Ferruvia コストモデル(2026 年 11 月版)

石炭の高値は 2022 年の危機時のもので、直近は約 4 円である(Ferruvia 試算)。比較から、次の 3 点が読み取れる。

- **脱炭素の選択肢の中で:** 量産時の鉄は、水素(基準値約 13 円)や電気ボイラー(約 19 円)を下回り、バイオマスやアンモニア(いずれも約 10 円)と並ぶ水準を目指す。
- **LNG との比較で:** 量産時の目標を達成すれば、LNG の価格帯(約 7〜11 円)に入る。
- **炭素価格を考慮すれば:** さらに有利になる。IEA 公表政策シナリオの日本の電力向け CO_2 価格(2050 年に 1 トンあたり 105 ドル、約 1.6 万円)[16]を工場の燃料にも適用すると、LNG に約 3 円、石炭に約 6 円が上乗せされる(Ferruvia 試算)。鉄には上乗せされない。

コストの内訳

量産時の目標の内訳を丸めて示す。約半分は水素と電力であり、再エネと水電解のコスト低下は、鉄のためだけに進むのではない。世界の再エネと水素の産業への投資は、鉄のコスト低下にもつながる。

項目	割合の目安
水素と還元の電力	約 5 割
往復の物流と保管	約 2 割
還元設備	約 1 割
工場側の設備と電力	約 1 割
鉄粉と燃料事業	約 1 割

目標の前提

会社目標は、次の前提に基づく。いずれも現在の公開水準より先にある目標であり、現状の延長で自然に届くものではない。次の節に示す開発を戦略的に進めることで、実現を目指す。初期の値は、最初の商用案件ですべての前提を揃えた場合の目標である。初期と量産時の時期は、開発と市場の進み方によって決まるため、特定の年を示していない。

前提	初期	成熟期	量産時
熱コスト(円/kWh)	約 17	約 12	約 10
再エネ電力(適地の変動電源、円/kWh)	2	2	2
水素製造コスト(ドル/kg)	約 1.8	約 1.3	約 1.1
水電解の電力(kWh/kg)	50	48	45
水電解設備(ドル/kW)	900	700	500
還元工程の補機電力(MWh/t)	0.45	0.38	0.35
鉄の循環回数(回)	25	40	40
有効熱効率	90%	95%	95%

再エネ電力から工場で使える熱までの効率は、初期の想定で約 6 割、量産時で約 7 割である。

量産時の熱コスト約 10 円/kWh を目指すための技術・事業条件

約 10 円は、現状の延長ではなく、開発によって実現を目指す目標である。 主要な項目ごとに、現在の公開水準、目標、開発の内容を示す。

開発項目	現在の公開水準	目標(量産時)	開発の内容
再エネ電力	最安水準の落札で太陽光約 1.7 円、風力約 2 円/kWh(いずれも単独の電源)[14]	約 2 円/kWh、水電解の稼働率 70%	太陽光と風力を組み合わせられる適地の開発、長期の電力契約、水素の貯蔵を含む運転の最適化
水電解設備	2030 年の見通しで中国以外 1,500〜1,900 ドル/kW、2025 年の中国内で 500〜1,100 ドル/kW(据付込み)[17]	500 ドル/kW	還元に使う水素に専用化し、圧縮や液化、長距離輸送のための設備を省く。設計の標準化、大量調達、低コスト設備の海外据付
水電解の電力	2022 年の実績 55kWh/kg、米国エネルギー省の最終目標 46kWh/kg(PEM 型)[18]。新型システムで 41.5kWh/kg という企業の発表もある[40]	45kWh/kg	新しいセルと補機の高効率化。最も挑戦的な項目の一つ
還元設備	鉄鉱石を原料とする製鉄向けの水素直接還元で約 400 ドル/年産 t(RMI の前提である設備 337 ドル/t-DRI にエンジニアリング 10%と用地整備 11%を加えた計算値)[19]。微粉の連続還元は大型化の前段階にある	約 140 ドル/年産 t 相当	鉄鉱石ではなく、循環して戻る酸化鉄の還元に特化した簡素な設計、流動層の大型化、粉の付着を抑える制御
鉄の循環	実験室で 10 回[12]、産業調査の前提で 20 回[20]	40 回	MW 級の設備での長期循環、粒子の管理、回収率の向上
有効熱効率	RIFT の発表値として報じられた最大 95%[21]	年間平均で 95%	実機での運転データの蓄積、燃焼と回収の最適化
工場側の設備	RIFT の発表値として報じられた約 50 万ユーロ/MW(約 8,300 万円)[21]	3,000 万円/MW	改造内容の標準化、既存のボイラーへのレトロフィットの確立、シリーズ生産

開発項目	現在の公開水準	目標(量産時)	開発の内容
往復の物流	豪州～中国の鉄鉱石の大型船運賃で片道 14.15～15.30 ドル/t(2026 年 8 月 21～28 日)[22]	海上、港湾、国内配送の往復で約 3,000 円/t-Fe	中長期の最適化。現在のスポット運賃を下回る水準を、長期傭船と往復積載の船隊運用で目指す。港に近い工場からの導入、粉体の輸送基準の整備

目指すのは、鉄を石炭やガスのようなコモディティにすることである。 石炭やガスの価格も、燃料そのものだけで決まったのではない。大量の物流、標準化された設備、共通の規格と契約が整うことで、国際的に取引される商品になった。鉄でも、還元、設備、物流をそれぞれ専用に最適化し、標準化して量を重ねることで、コストを下げていく。

開発は、次の順序で進める。

- **工場で確かめる:** まず実機で、熱効率、回収、循環回数を確かめる。これらは、その後の投資判断の前提となる。
- **還元と物流をつなぐ:** 微粉の還元設備を大型化し、往復の物流を一つの流れにする。ここは鉄の産業が自ら開発する領域である。
- **世界の進歩を取り込む:** 再エネと水電解のコスト低下は、世界の産業投資で進む。適地の選定、長期契約、設備の調達によって、その成果を取り込む。
- **量と標準で下げる:** 市場の拡大に合わせて設備を標準化し、長期契約によって資金コストを下げる。

各指標は実証の結果で確かめ、必要に応じて目標と計画を見直す。

前提が変わるとどうなるか

量産時の目標から主要な前提を一つずつ不利な方向へ動かすと、熱コストは次のように変わる(Ferruvia コストモデル)。一つの項目の影響は 1 円未満だが、影響は積み重なる。主要 11 項目がすべて目標の近くで同時に不利に振れると、約 14 円となる。だからこそ、複数の項目を並行して開発する。

変化	熱コストへの影響(円/kWh)
再エネ電力 2 円 → 2.5 円	+約 0.7
水電解設備 500 ドル → 700 ドル	+約 0.7
水電解の電力 45kWh → 50kWh	+約 0.5
有効熱効率 95% → 90%	+約 0.5
往復物流の費用 約 2 割増	+約 0.3
鉄の循環 40 回 → 30 回	+約 0.1

公開研究との違い

公開研究では、2030 年時点の条件で高めの値が示されている。Roland Berger と Iron Power コンソーシアムの 2023 年の評価は、水素 3 ドル/kg、循環 20 回などの前提で、工場に届く熱を約 144 ユーロ/MWh(約 24 円/kWh)とした[20]。Schuler らの査読論文は、輸入地までの鉄の供給コストを 179 ユーロ/MWh(約 30 円/kWh)とした[11]。同じ条件で、水素は 188 ユーロ、アンモニアは 188 ユーロ、メタノールは 170〜204 ユーロであり、鉄は他のキャリアと同等の水準にある。

主な違いは前提にある。これらの研究は、より高い水素や電力の価格(Schuler らは再エネ電力 40 ユーロ/MWh[11])、保守的な製法、少ない循環回数を想定している。本書の目標は、再エネの適地と量産を前提に、前述の開発を達成した場合の将来の到達点である。公開研究の値は、開発の出発点として読むことができる。

価格以外の経済価値

コストだけが判断の基準ではない。化石燃料の市況に左右されにくいこと、在庫を持てること、既存設備を活かせることも、企業にとっての経済的な価値である。

7. 鉄のエネルギーには、数多くの産業が関わる

鉄をエネルギーとして使うには、還元から物流、金融まで、数多くの産業が必要である。 次の表は、領域ごとに必要なものと、これから整えていくことを整理したものである。

領域	必要なもの	これから整えていくこと
エネルギー	再生可能電力、水素	安価で安定した還元エネルギーの確保
還元	還元炉、反応制御	微粉のまま低コストで還元するプロセス
燃料製造	粉砕、粒度の制御、品質保証	粒径や純度の規格、再生した鉄の品質
取引	価格指標、長期供給契約	重量建てか熱量建てかなどの価格の決め方
海運・港湾	バルク輸送、荷役、港湾設備	国際輸送での貨物分類と安全要件
貯蔵・搬送	サイロ、搬送、計量	粉体の安全基準、湿気の管理
燃焼	バーナー、ボイラー、制御	大型化、負荷変動への対応、長期の耐久性
熱の利用	蒸気、高温熱、発電	既存設備の改造範囲、新しい用途
回収	酸化鉄の捕集、再処理	実機での回収率と循環回数、酸化鉄の所有と責任

領域	必要なもの	これから整えていくこと
標準・認証	品質、安全、計測、炭素強度	共通の試験法、ライフサイクル評価の方法
金融・保険	事業資金、在庫金融、保険	評価に必要なデータ、リスクの分担
情報管理	来歴の追跡、在庫と需給の管理	環境価値の記録と共有の仕組み

表の右の列は、これから産業が取り組むテーマである。多くはまだ決まっておらず、今は関係者が一緒に形をつくることができる。

規模の目安

導入の規模に応じて、次の量が動く。これは見通しではなく、規模感を示す試算である。

導入規模(熱出力)	年間の熱(TWh)	循環する鉄(万 t)	水素(万 t、最小値)	CO_2削減(万 t)
20MW(ボイラー1 基)	0.13	7	0.4	2〜5
100MW(初期の案件群)	0.65	35	1.9	11〜23
1GW(地域のハブ)	6.5	352	19	111〜234
3GW	19.5	1,057	57	332〜701

1GW の場合、循環する鉄は日本の鉄鉱石輸入約 9,600 万トン(2024 年)[23]の約 3.7%で、17 万トン積みの大型船で片道年約 21 航海にあたる。水素は政府が掲げる 2040 年の水素等の導入量 1,200 万トン程度[24]の約 1.6%である。既存の産業が扱ってきた規模の中で、大きな事業が成立する。

必要になる役割

担い手	担う役割
鉄鋼、粉末メーカー	還元と燃料品質をつくる
商社	世界の供給網と長期契約を組む
海運、港湾	新しいエネルギー物流とハブをつくる
電力、エネルギー、水素	還元エネルギーと燃料事業を担う

担い手	担う役割
重工、ボイラー、機械	燃焼・回収設備をつくり、世界に展開する
化学、製紙、食品、素材	最初の市場をつくり、安定した熱を確保する
金融、保険	資金とリスクの仕組みをつくる
認証機関、大学	品質と安全の基準をつくる
政府、自治体	制度、実証拠点、国際連携を整える

8. エネルギーキャリアは、産業としてつくっていくものである

エネルギーキャリアは、自然には生まれない。多くの関係者が仕組みを一つずつつくり、産業に育てていくものである。 日本企業は、LNG でその経験を持つ。

1967 年、東京電力と東京ガスは三菱商事の輸入代行のもとでアラスカ LNG の購入契約を結び[25]、1969 年 11 月に初の輸入を実現した[26]。当時の LNG は当たり前の商品ではなかった。タンク、専用船、受入基地、ボイラーの設計変更[27]を一つずつ解決し、市場を拡大していった。

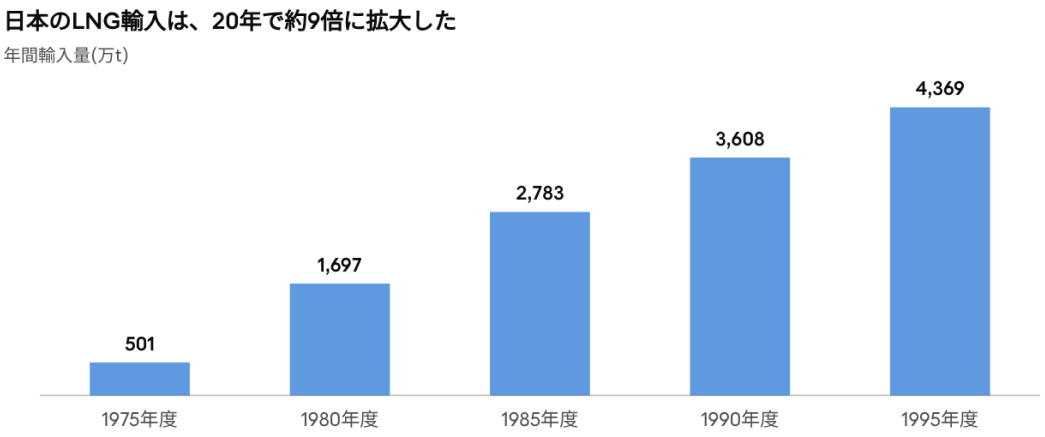


図 3 日本の LNG 輸入量（出典: 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2018」[39]）

LNG で起きたこと	鉄への示唆
インフラがない段階で需要家が長期契約を結んだ	最初の需要家の決断が、供給側の投資を支える

LNG で起きたこと	鉄への示唆
電力とガスが共同で購入し、基地を共用した[25]	大きなインフラは拠点ごとに共同で持つ
商社が供給国と需要国をつないだ	還元拠点と需要の間にも同じ機能が要る
大気汚染対策が導入を後押しした[27]	脱炭素以外の理由も力になる
導入国の企業が、受入の技術と契約の形をつくった	参加国がルールづくりに関われる

鉄が LNG と同じ規模になるという意味ではない。学ぶべきは、市場のつくられ方である。

必要な能力の多くは、日本にある

- **鉄鋼:** 鉄鉱石、還元、品質管理を知っている。
- **重工・ボイラー:** 大規模な燃焼、蒸気、制御を知っている。
- **粉体・産業機械:** 微粉体の製造、搬送、集塵、安全を知っている。
- **海運・港湾:** 数百万トンの物資を国際的に動かす方法を知っている。
- **商社:** 資源国と需要国を結び、長期契約を組み立ててきた。
- **金融・保険:** 巨大な産業設備に資金とリスク引受を提供してきた。
- **需要家:** 化学、製紙、食品、素材に大きな熱需要がある。

足りないのは、これらを一つの産業としてつなぐことである。

日本でつくるのは、産業の「型」である

すべての鉄を国内で還元する必要はない。長期的には、再エネが安い海外で還元する形が重要になる。日本でつくるべきなのは、産業として成立させる次の仕組みである。

- 実際の産業設備で安定して燃やし、回収する技術
- 需要家が安心して購入できる燃料規格
- 設備メーカーが設計できる共通条件
- 燃料事業者と需要家を結ぶ契約モデル
- 金融機関と保険会社が評価できる事業と安全の基準
- 政府と自治体が許認可できる規制の体系

9. アジア、そして世界へ

日本で成立した仕組みは、アジアと世界に広げられる。 2030 年までの世界の産業熱需要の増加の半分超は、中国とインドが占める見通しである[7]。日本が主導する AZEC には 11 か国が参加し[28]、各国の事情に応じた多様な道筋を共有している。

電力網、燃料価格、再エネ資源、産業構造は国により異なる。だからこそ、一つの技術をすべての国に当てはめるのではなく、それぞれの国に合う選択肢を増やす意味がある。

その先には、再エネの適地と世界の産業を結ぶ姿がある。豪州、中東、南米などの還元拠点でエネルギーを蓄えた鉄が国際商品として流通し、酸化鉄は再び還元拠点へ戻る。

日本は、設備、技術、運用、標準を世界に届ける存在になれる。

10. Vision 2035: 最初の市場が生まれている

2035 年に目指すのは、多くの企業が共通のルールで鉄のエネルギーを取引する、最初の市場である。

再生可能エネルギーが豊富な地域で、酸化鉄が鉄へと還元される。その鉄は船に積まれて海を越え、日本の港で受け入れられ、工業地帯へ運ばれる。ボイラーや炉で生まれた熱と蒸気が、化学、製紙、食品、素材の工場を動かす。燃焼後の酸化鉄は回収され、再び還元される。

港には受入と貯蔵の設備があり、複数の工場が同じ供給網につながっている。燃料には品質規格があり、原産地や炭素強度が記録されている。需要家は長期の供給契約を結び、商社が国際的な供給網を組み、海運会社が輸送し、金融機関と保険会社が事業を支える。

電化が最適な場所では電気が使われ、水素が合理的な場所では水素が使われる。その中で、大量に運ぶこと、長く貯めること、高温の熱に戻すことに価値がある場所で、鉄が使われている。

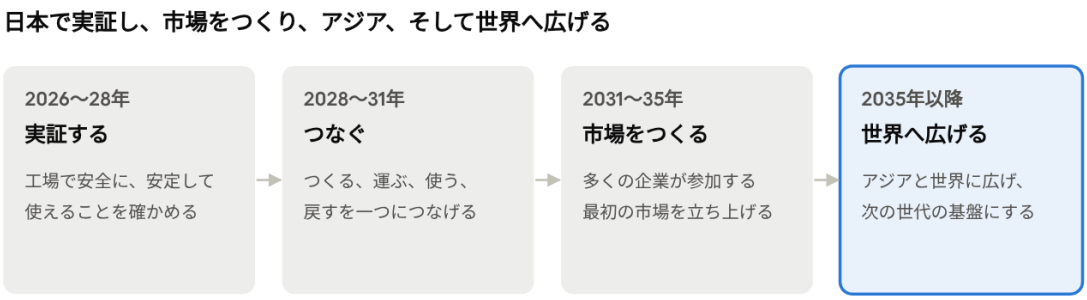


図 4 2035 年への道のり。時期は目安。

一つのプロジェクトから、市場へ

観点	最初のプロジェクト	2035 年の市場
燃料	特定の製造者から特定の顧客へ	規格で取引され、供給者を選べる
物流	専用の少量輸送	港のハブから複数の工場へ
還元	1 か所の設備	複数地域の拠点、国内と海外の併用

観点	最初のプロジェクト	2035 年の市場
契約	個別の長期契約	標準的な契約と価格指標
金融	補助金と株式が中心	プロジェクトファイナンスと保険が成立
証明	事業者の自己申告	第三者による炭素強度の認証

11. 欧州では、事業として動き出している

鉄のエネルギーは、研究室の構想を越えつつある。欧州では、商用の契約と長期の資金が集まり始めている。

- **商用契約:** 2025 年 6 月、オランダの RIFT と Kingspan Unidek がボイラーと長期燃料供給を含む商用契約を結んだ[29]。
- **資金:** 2026 年 3 月、RIFT は年金基金系投資家 PGGM の主導によるシリーズ B 8,310 万ユーロと、EU イノベーション基金 3,070 万ユーロを合わせ、計 1 億 1,380 万ユーロを確保した[30]。同基金の選定は 359 件の応募に対し 61 件であった[31]。
- **製造拠点:** アントワープの Alpha One は、年 12 万トンの鉄燃料で最大 244GWh の熱を供給し、10 年間で約 68 万トンの CO_2回避を見込む[32]。2029 年の稼働を目標に[38]、2026 年 7 月に基本設計に入った[33]。
- **地域の実証:** Metalot は、鉄粉チェーンの全工程を確かめる概念実証 Holon 0 を公開した。ArmanTech のモデルでは、160 世帯の村で 1.4MW のバーナーを想定している[34]。
- **国境を越えた実証:** オランダとベルギーの間では、還元、物流、貯蔵、燃焼、熱電供給までの全工程を検証する MPH2 が 2026 年 4 月に始まった[35]。
- **共通の基準づくり:** 欧州 8 か国で、安全特性の共同試験が行われた[36]。

これらは、この分野が研究段階を越えつつあることを示す例である。大規模な商用化はこれからであり、日本やアジアの実情に合う仕組みをつくる余地は大きい。欧州の経験は、そのための土台にもなる。

12. 市場の土台は共に整え、その上で各社の強みを活かす

この市場は一社では完成しない。 燃焼の技術、還元の技術、物流、需要家、基準がそれぞれ揃って初めて成り立つ。一方で、すべての技術や知的財産を共有する必要はない。

共に整える領域	各社の強みを活かす領域
共通の安全評価と測定方法	バーナーの性能と制御
基礎的な燃料規格	還元プロセスと粉体製造
ライフサイクル評価の考え方	回収の技術

共に整える領域	各社の強みを活かす領域
規制当局との対話、国際標準化	コストと契約条件
共通の実証インフラ	顧客と事業モデル

13. 100 年後の世界へ

100 年後、世界の産業を支えるエネルギーが、鉄に載って海を渡っている。

太陽と風に恵まれた国が新たな輸出国となり、日本で生まれた仕組みが世界の産業を支えている。掘って燃やして終わるのではなく、同じ鉄が繰り返しエネルギーを運んでいる。

石炭も、石油も、LNG も、物質だけで産業になったのではない。多くの人と企業が仕組みをつくって、初めてエネルギーキャリアになった。鉄の産業は、これからつくられる。

日本には、鉄を扱う技術があり、エネルギー設備をつくる技術があり、世界と結ぶ商社と海運があり、大きな産業需要がある。その最初の一歩を、今、踏み出します。

本書について

発行者の立場: 本書は、鉄粉エネルギーの開発を進める株式会社 Ferruvia が発行する構想である。発行者は本テーマに経済的な利害を持つ。本書に記載の第三者は、本書を検証または承認したものではない。

本書の性格: 100 年の展望と 2035 年の姿は、予測ではなく、これからつくる未来の構想である。商用規模の実現には、実機での長期運転と循環の実証が必要であり、本書はその実現を約束するものではない。特定の投資を勧めるものでもない。

数字の位置づけ: 鉄の熱コストは、Ferruvia コストモデル(2026 年 11 月版、150 円/ドル、約 165 円/ユーロ)に基づく会社目標であり、実績値ではない。第三者の検証を経た値でもなく、前述の開発の達成を前提とする。比較対象の石炭、LNG、バイオマスは観測された価格の幅、水素とアンモニアは政府目標を中心とした幅である。物量と CO_2削減は、年 6,500 時間運転、鉄の熱量 2.05MWh/t、熱利用率 90%で試算した。水素量は反応式上の最小値で、コストモデルは未反応水素の再循環を前提に鉄 1 トンあたり 55kg としている。CO_2削減はガス(下限)と石炭(上限)からの燃料転換で、量産時の還元拠点の電力と往復の海上輸送の排出を差し引いた値であり、低炭素の水素と電力で還元する場合に限る。

出典は巻末の一覧を参照されたい。記載情報は 2026 年 11 月 5 日時点のものである。

用語

用語	意味
エネルギーキャリア	エネルギーを蓄えて運ぶ物質
再エネ	太陽光や風力などの再生可能エネルギー
還元	酸化鉄から酸素を取り除いて鉄に戻すこと。エネルギーを蓄える工程にあたる
水電解	電気で水を分解して水素をつくること
循環回数	同じ鉄が燃焼と還元を繰り返す回数
有効熱効率	鉄の発熱量のうち、工場で使える熱として取り出せる割合。第 4 章の研究が示す燃焼効率とは定義が異なる
レトロフィット	既存の設備を改造して、新しい燃料に対応させること
コモディティ	規格化され、国際的に取引される商品

出典

[1] 資源エネルギー庁「令和 6 年度(2024 年度)におけるエネルギー需給実績(確報)」(2026 年 4 月) https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/honbun2024fykaku.pdf

[2] 経済産業省「通商白書 2026」第 2 部第 2 章第 1 節、第 2-2-1-4 表 https://www.meti.go.jp/report/tsuhaku2026/pdf/2-2-1.pdf

[3] IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2024: Summary (2025) https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_Summary_2025.pdf

[4] IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2024 (2025) https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024

[5] IEA, Global Energy Review 2026, Key findings https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026/key-findings

[6] Japan Energy Hub, Japan Jan–June 2025 renewable curtailment hits H1 record, sets fiscal Q1 highs in four areas (2025 年 7 月 3 日) https://japanenergyhub.com/news/h1-2025-solar-wind-curtailment/

[7] IEA, Renewables 2025, Renewable heat https://www.iea.org/reports/renewables-2025/renewable-heat

[8] Guinness World Records, Most common element of the Earth (by mass) https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/106272-most-common-element-of-the-earth--by-mass

[9] AXSMarine, Record-Breaking Year for Dry Bulk Trade: 2024 Recap & Beyond (2025 年 2 月 5 日) https://public.axsmarine.com/blog/another-record-year-for-dry-bulk-flows-in-2024

[10] IEEE Spectrum, Iron Powder Passes First Industrial Test as Renewable, Carbon Dioxide-Free Fuel (2020 年 11 月 13 日) https://spectrum.ieee.org/iron-powder-passes-first-industrial-test-as-renewable-co2free-fuel

[11] Schuler et al., Metals and hydrogen derivatives for long-distance energy supply: A techno-economic comparison, Energy Conversion and Management 342 (2025) https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000182909/161942242

[12] Prasidha et al., Exploring consecutive cycles of iron powder combustion for sustainable thermal energy, Combustion and Flame 283 (2026) https://research.tue.nl/en/publications/exploring-consecutive-cycles-of-iron-powder-combustion-for-sustai/

[13] LOGISTICS TODAY「LNG 争奪、電気代が倉庫を直撃」(2026 年 3 月 14 日) https://www.logi-today.com/924310 。最新の値は経済産業省「発電用 LNG の在庫状況」(随時更新) https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electricity_measures/pdf/denryoku_LNG_stock.pdf

[14] Enerdata, Saudi Arabia awards 4.5 GW solar and wind capacity in latest auction (2025 年 10 月 29 日) https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/saudi-arabia-awards-45-gw-solar-and-wind-capacity-latest-auction.html

[15] Wood Mackenzie, Metalmorphosis: how decarbonisation is transforming the iron and steel industry (2023 年 10 月 19 日) https://www.woodmac.com/horizons/metalmorphosis-how-decarbonisation-is-transforming-the-iron-and-steel-industry/

[16] IEA, Global Energy and Climate Model Documentation 2025, Table 2.4 (CO2 prices for electricity) https://iea.blob.core.windows.net/assets/bccc3753-6330-444e-bc62-356f104ed251/GlobalEnergyandClimateModelDocumentation2025.pdf

[17] Argus Media, Green H2 electrolyser sector enters consolidation: IEA (2026 年 6 月 19 日。IEA Global Hydrogen Review 2026 を引用) https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2841836-green-h2-electrolyser-sector-enters-consolidation-iea

[18] U.S. Department of Energy, Technical Targets for Proton Exchange Membrane Electrolysis https://www.energy.gov/eere/fuelcells/technical-targets-proton-exchange-membrane-electrolysis

[19] RMI, Green Hydrogen Catapult, Green Iron Corridors: Transforming Steel Supply Chains for a Sustainable Future (2024 年 9 月)、Exhibit A5 https://rmi.org/app/uploads/dlm_uploads/2024/09/green_iron_corridors_steel_supply_chain_report.pdf

[20] Roland Berger, The potential of Iron Power technology in the energy transition(2023 年の評価) https://metalot.org/images/knowledge/8/20241thepotentialofironpower.pdf

[21] ioplus, RIFT raises €114 million for energy from iron (2026 年 3 月 3 日)
https://ioplus.nl/en/posts/rift-raises-114-million-for-energy-from-iron

[22] Advanced Shipping & Trading S.A., Market Report Week 35 (2026 年 8 月 21〜28 日、Hellenic Shipping News 掲載) https://www.hellenicshippingnews.com/wp-content/uploads/2026/08/ADVANCED-MARKET-REPORT-WEEK-35.pdf

[23] Western Australia Trade Commission, WA Iron Ore Profile (2026 年 5 月)
https://www.watc.wa.gov.au/media/vwynvtpr/wa-iron-ore-profile-may-2026.pdf

[24] 資源エネルギー庁 水素・アンモニア課「水素社会実現に向けて」(2026 年 3 月)
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai3/smartenergy_4/siryo6-3.pdf

[25] 三菱商事「LNG(液化天然ガス)の導入から 50 周年」(2019 年 11 月 1 日)
https://www.mitsubishicorp.com/jp/ja/news/release/2019/0000038503.html

[26] 東京ガス、東京電力「LNG の導入から 40 周年」(2009 年 11 月 4 日)
https://www.tepco.co.jp/cc/press/09110401-j.html

[27] 東京ガス「LNG 導入と挑戦の軌跡」(2022 年 4 月 18 日、水素政策小委員会等 合同会議 第 2 回資料) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/002_02_00.pdf

[28] 経済産業省, Minister Muto Visits Malaysia and Co-hosts the Third AZEC Ministerial Meeting (2025 年 10 月 18 日) https://www.meti.go.jp/english/press/2025/1018_001.html

[29] RIFT, Kingspan Unidek プレスリリース(2025 年 6 月 17 日)
https://www.prnewswire.com/nl/persberichten/rift-en-kingspan-unidek-tekenen-allereerste-commerciele-overeenkomst-voor-iron-fuel-technology-302481856.html

[30] PGGM, RIFT raises €114 million for the world's first commercial iron fuel project (2026 年 3 月 3 日)
https://pggm.nl/en/press/rift-raises-114-million-for-the-world-s-first-commercial-iron-fuel-project

[31] Metalot, RIFT raises EUR 113.8 million (2026 年) https://www.metalot.org/news/rift-raises-eur1138-million-breakthrough-for-iron-fuel/

[32] chemXplore, RIFT secures EU Innovation Fund grant for Alpha One (2026 年 3 月 25 日)
https://chemxplore.com/news/rift-alpha-one-eu-innovation-fund

[33] chemXplore, RIFT's Alpha One enters FEED (2026 年 7 月 6 日)
https://chemxplore.com/news/alpha-one-enters-feed

[34] Metalot, Metalot@Work september 2025 Recap (2025 年 10 月 10 日)
https://www.metalot.org/news/metalotwork-september-2025-recap-holon-0-ignites-the-iron-powder-revolution/

[35] Heatpower, Reference projects https://heatpower.nl/?page_id=247

[36] Semenova et al., Towards standardized safety protocols for iron-based energy carriers, Open Research Europe 2026, 6:54 https://doi.org/10.12688/openreseurope.22839.1

[37] 資源エネルギー庁「水素・アンモニアを取り巻く現状と今後の検討の方向性」(2022 年 3 月 29 日) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/001_03_00.pdf

[38] 欧州委員会, InvestEU Scoreboard https://webgate.ec.europa.eu/circabc-ewpp/d/d/workspace/SpacesStore/dadeb075-a354-44ba-a537-ee543b759283/download

[39] 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2018」第 1 部第 1 章第 4 節 https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018html/1-1-4.html

[40] Engineering News, New electrolyser technology 20% more efficient than counterparts, says Hysata (2023 年 4 月 5 日) https://engineeringnews.co.za/article/new-electrolyser-technology-20-more-efficient-than-counterparts-says-hysata-2023-04-05