
世界の鉄鋼産業の 脱炭素化に関する 15の知見

議論への一石

Agora
Industry



世界の鉄鋼産業の 脱炭素化に関する 15の知見

出版物の詳細

議論への一石

世界の鉄鋼産業の脱炭素化に関する15の知見

著者

Agora Industry
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-industry.org
info@agora-industrie.de

ヴッパータール 気候・環境・エネルギー研究所
Döppersberg 19 | 42103 Wuppertal - Germany
T +49 (0)202 2492-0
F +49 (0)202 2492-108
https://wupperinst.org/
info@wupperinst.org

プロジェクトリーダー

Wido K. Witecka
wido.witecka@agora-energiewende.de

Ole Zelt
ole.zelt@wupperinst.org

執筆者

Wido K. Witecka, Oliver von Eitzen Toni
Julian Somers, Dr. Kathy Reimann (all Agora
Industry); Ole Zelt, Alexander Jülich,
Clemens Schneider, Prof. Dr. Stefan
Lechtenböhmer (all Wuppertal Institute)



本研究はCC BY-NC-SA 4.0の下
でライセンスされている。

翻訳監修

西田 裕子、大久保 ゆり、相川 高信
(自然エネルギー財団)

タイトル画像 : Adobe Stock | yuliachupina

304/03-I-2023/JP

初版, 2023 年 8 月

謝辞

下記の皆様の多岐にわたるご協力に感謝致します :

Helen Burmeister, Dr. Oliver Sartor,
Aylin Shawkat, Frank Peter (all Agora Industry);
Anja Werner, Alexandra Steinhardt, Dr. Jahel
Mielke, Kinita Shenoy (all Agora Energiewende);
Saerok Jeong (NEXT group); Prof. Dr. Max Åhman
(Lund University)

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

このレポート翻訳は、ドイツ連邦
経済・気候保護省の支援を得まし
た。



この出版物はこのスキャンコード
でダウンロード可能である。

引用方法 :

*Agora Industry and Wuppertal Institute (2023):
15 insights on the global steel transformation*

www.agora-industry.org

序文

読者の皆様

「我々は全力疾走すべきであるのに歩いている」。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）議長 Hoesung Lee は、この言葉を持って、最新の IPCC 統合報告書の発表についてコメントした。IPCC 報告書は、現在実施されている政策では、2100 年までに世界は 3.2° C 温暖化すると推定している。温室効果ガスの排出量をより早く削減するためには、さらなる努力が必要である。

鉄鋼セクターはこれに重要な役割を果たすことができる。削減が困難なセクターとよく言われる鉄鋼セクターは、急速に削減が進むセクターに変わる可能性がある。我々の研究は、2040 年代初頭までに鉄鋼セクターを実質ゼロのセクターにすることが技術的に可能であることを示している。鉄鋼セクターの脱炭素化を加速させる新たな重要な要

素として、直接還元製鉄技術の速やかな展開、国際的なグリーン鉄貿易、製鋼における石炭利用の段階的廃止、そして何よりも国際協力と適切な規制枠組みが挙げられる。

本研究は、世界の鉄鋼セクターに関する我々の調査から得られた主要な知見をまとめたものである。今後の出版物では、低炭素技術、2050 年脱炭素化への排出削減経路、国際的なグリーン鉄貿易、負の排出量を実現する鉄鋼セクターの役割について、より詳細な分析結果を公開して行く予定である。

本研究がお役に立てれば幸いである。

Frank Peter
Agora Industry ディレクター

Prof. Dr. Manfred Fischeidick
Wuppertal Institute プレジデント

主な知見の概要：

1

2040年代初頭までに鉄鋼セクターの排出を実質ゼロにし、石炭を段階的に廃止することは技術的に可能である。これにより、鉄鋼セクターは排出削減が困難なセクターから排出削減が急速に進むセクターに変わり、地球規模の気候変動対策目標を引き上げる重要なセクター要素となる可能性がある。このような鉄鋼セクターの脱炭素化を加速するための鍵となる戦略は、材料効率の向上、スクラップと水素ベース製鋼の推進、および炭素回収・貯蔵付きバイオエネルギー（BECCS）である。

2

グリーン鉄（iron）貿易は、鉄鋼業の世界的な脱炭素化へのコストを下げることができ、グリーン鉄輸出業者と輸入業者にとってウィン-ウィンの解決策となりうる。グリーン鉄として水素を内包した形で輸送することは、水素とその誘導体を船で輸送するよりも大幅に安価になる。自然エネルギーにより製造する水素コストが高い国にとって、グリーン鉄の輸入は低炭素製鋼の競争力を高めることができ、その結果として鉄鋼産業における地元の雇用を守るのに役立つ。グリーン鉄の輸出国にとって、これは新しい雇用と付加価値を生み出す可能性がある。

3

石炭ベースの高炉-転炉法（BF-BOF）と炭素回収・貯蔵（CCS）の組み合わせは、世界の鉄鋼産業の脱炭素化において重要な役割を果たすことはないであろう。BF-BOF法でのCCSによるCO₂直接排出量の削減は73%が限度であると考えられ、さらに上流での排出量（炭鉱からのメタン漏洩）に対処することはできない。他の主要技術と比較すると、鉄鋼メーカーのこの技術の商用化への取り組みは現状では非常に低い。BF-BOF CCSが実現しなければ、石炭ベースの新規の製鉄所はカーボンロックインと、座礁資産の高いリスクに直面する。

4

鉄鋼産業の脱炭素化のスピードを最大限に加速するには、各国政府が適切な規制枠組みを構築し、国を越えて戦略的パートナーシップを構築する必要がある。主要なボトルネック（すなわち、直接還元鉄プラント技術、適切な鉄鉱石品質、水素製造）に対処し、座礁資産を最小限に抑え、グリーン鉄貿易の普及を支援するには、国際協力が必要となる。

目次

知見1	鉄鋼セクターは、削減が困難なセクターから急速に削減が進むセクターに変わる可能性がある。2040年代初頭までに鉄鋼セクターの排出を実質ゼロにすることは技術的に可能である	8
知見2	世界の鉄鋼産業の加速的な脱炭素化は、世界的な気候変動対策を推進する重要な要素となり得る	11
知見3	鉄鋼セクターにおける1.5°C対応の脱炭素化排出削減経路を実現するための重要な対策は、材料効率の向上、スクラップベースの製鋼、水素ベースの製鋼、炭素回収・貯蔵付きバイオエネルギー（BECCS）の増加である	14
知見4	2040年代初頭までに鉄鋼セクターの石炭利用を段階的に廃止することは技術的に可能である	18
知見5	国際的なグリーン鉄貿易は世界の鉄鋼産業の脱炭素化コストを下げるができる	21
知見6	国際的なグリーン鉄貿易は、輸入国と輸出国にとってウィン-ウィンとなりうる。グリーンスチールの脱炭素化のスピードと規模を最大限に引き出すには、国際的な公平な競争の場と戦略的パートナーシップが必要である	24
知見7	直接還元鉄（DRI）プラントのエンジニアリングおよび建設能力が現在の主要なボトルネックであり、世界の鉄鋼産業の脱炭素化のペースを決めるため大規模なスケールアップが必要である	27
知見8	鉄鋼セクターは、CCS付きバイオエネルギー（BECCS）を活用して負の排出（ネガティブ・エミッション）に貢献できる	30
知見9	BF-BOF（高炉-転炉法）でのCCSは、世界の鉄鋼業の脱炭素化において重要な役割を果たすことはないであろう	33
知見10	2040年までに90%を上回る既存の高炉を早期閉鎖なしに段階的に廃止できる	36

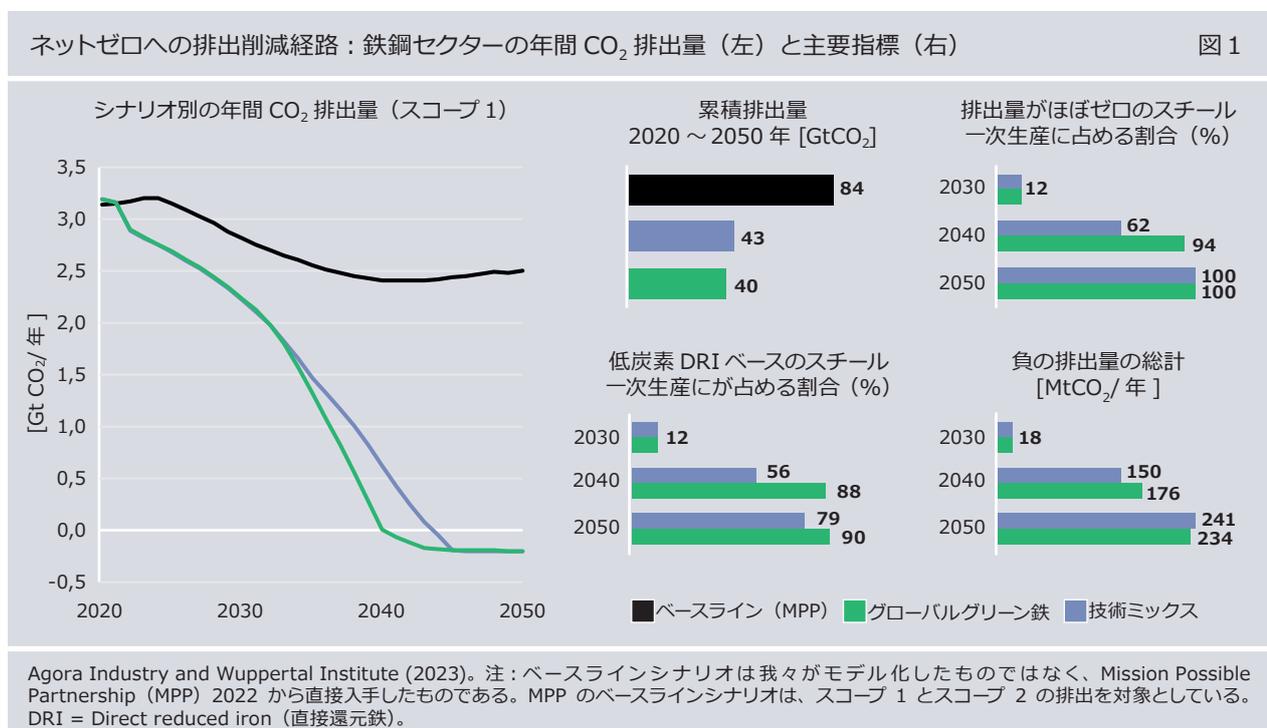
知見11	現時点での新興国における石炭ベースの高炉の2030年までの新規設備パイプラインは、大規模な炭素ロックインと座礁資産リスクに直面している	39
知見12	低炭素水素の限られた供給が「後悔のない用途」に振り向けられれば、低炭素水素の供給は世界的な鉄鋼セクターの脱炭素化の大きなボトルネックにはならないであろう	42
知見13	DRグレードの鉄鋼石ペレットの入手可能性は、世界の鉄鋼業の脱炭素化の主要なボトルネックとなる可能性がある。解決策は存在するが、積極的な取り組みが必要である	45
知見14	1.5°C目標に沿って鉄鋼セクターを脱炭素化していくこと課題は対応可能であるが、これには政府と産業界の協力が必要である	48
知見15	鉄鋼セクターの排出実質ゼロを達成するには、バリューチェーン全体に対応する包括的な政策枠組みを各国政府が採用する必要がある。この点では国際的な調整と協力が鍵となる	51
参考文献		54

用語集

AEL	Alkaline Iron Electrolysis：アルカリ鉄電解
ASEAN	東南アジア諸国連合
BAU	現状維持・現状政策
BECCS	CCS（炭素回収・貯蔵）付きバイオエネルギー
BF-BOF	石炭ベースの高炉－転炉（法）
BF-BOF-CCS	炭素回収・貯蔵付き高炉－転炉（法）
CAPEX	設備投資
CBAM	炭素国境調整メカニズム
CCfDs	差額決済炭素契約
CCGT	コンバインドサイクルガスタービン
CCS	炭素回収・貯蔵
CDR	二酸化炭素の除去
CS	粗鋼
DACCS	直接大気炭素回収・貯蔵
DR	直接還元
DRI	直接還元鉄
DRI-EAF	直接還元－電炉（法）
DRI-SMELT-BOF	直接還元－溶解装置－転炉（法）
EAF	電炉（電気アーク炉）
EJ	エクサジュール
EV	電気自動車
Fe content	鉄含有量
FIDs	最終的投資決定
GHG	温室効果ガス
GtCO ₂	ギガトンの二酸化炭素
H ₂	水素
H ₂ -DRI	水素直接還元（法）
HBI	熱間圧縮還元鉄（ホットブリケットアイアン）
IEA APS	国際エネルギー機関の公表された（削減目標）誓約をベースとするシナリオ
IEA NZE	国際エネルギー機関のネットゼロ排出シナリオ
IEA STEPS	国際エネルギー機関の既に公約された政策をベースとするシナリオ
kgCO ₂ e	二酸化炭素換算キログラム
kWh	キロワット時
LOHC	液体有機水素キャリア
MOE	溶融酸化物電解
Mt	百万トン
MtCO ₂	100万トンの二酸化炭素
Mtpa	百万トン/年
NDCs	国が決定する貢献（削減目標）

NG	天然ガス
NG-DRI CCS	炭素回収・貯蔵付き天然ガスベースの直接還元（法）
NZE-scrap EAF	排出量がほぼゼロのスクラップ利用の電炉（法）
OECD	経済協力開発機構
OPEX	運用コスト
PCI	微粉炭噴射
RES	自然エネルギー
ROW	その他の地域
SOGDC	Sabah 石油ガス開発公社
t	トン
TCO	総保有コスト
tCO ₂	二酸化炭素トン
TRL	技術成熟度レベル
UN	国際連合
USD/kg H ₂	水素 1 キログラムあたり米ドル
WI	Wuppertal Institute：ブッパタール研究所
WV Stahl	ドイツ鉄鋼協会

1 鉄鋼セクターは、削減が困難なセクターから急速に削減が進むセクターに変わる可能性がある。2040年代初頭までに鉄鋼セクターの排出を実質ゼロにすることは技術的に可能である



世界の鉄鋼セクターの温室効果ガス (GHG) 排出を 2040 年代初頭に実質ゼロにできるとしたらどうだろうか。それでも削減が困難なセクターと呼ぶだろうか。

鉄鋼の実質ゼロ目標は大きく前進した ...

国際エネルギー機関 (IEA は 2020 年 10 月に鉄鋼技術ロードマップを公表し、その主要シナリオ (Sustainable Development Scenario: 持続可能な開発シナリオ) において、鉄鋼セクターが 2070 年ま

でに 90% の温室効果ガス排出削減¹を達成するための道筋を示した (IEA 2020)。その後、2021 年 4 月に IEA の「Net Zero by 2050」報告書が発表された。そこでは、2050 年までに全セクターの CO₂ 排出実質ゼロをいかに達成し、2100 年までに地球温暖化を 1.5°C に抑えるかが示された (IEA 2021)。

その後、石炭ベースで 500Mt を上回る鉄鋼一次製品生産をしている鉄鋼メーカーは、2050 年あるいはそれ以前にカーボンニュートラルを達成すると

1 IEA によると、持続可能な開発シナリオにより、2100 年までに地球温暖化を 2°C をはるかに下回るようにすることができる。

いう目標を発表した。しかし、ほとんどのカーボンニュートラル目標と鉄鋼の脱炭素化シナリオでは、2050年までは鉄鋼セクターの残留排出量はなくなることが予測されている。例えば、IEA Net Zero by 2050 (IEA 2021) の報告書では、鉄鋼セクターの2050年の排出量は200 MtCO₂であり、依然として残留排出量が存在する数少ないセクターの一つであるとしている(IEA 2021)²。今日、最新の1.5°C目標に対応した鉄鋼業の脱炭素経路では、2050年までに鉄鋼セクターでそれぞれ300 MtCO₂ (MPP 2022) と180 MtCO₂ (IEA 2022aで更新されたIEA NZE)の残留排出量が依然として存在し、そのため2050年までに実質ゼロに到達するには他のセクターの二酸化炭素除去(負の排出量)が必要とされることが示されている。

2 IEA NZE 2021では、2050年における様々なセクターの残留排出量は、直接大気炭素回収・貯留(DACCS)およびCCS付きバイオエネルギー(BECCS)による負の排出量で補われるとしている。

...しかし、さらなる可能性がある

このような状況の中で、2050年よりもずっと前に鉄鋼産業の実質ゼロを実現することはできないだろうか。簡単に言えば、答えはイエスである。我々の二つの1.5°C目標を達成する排出削減経路は、2040年代初頭までに鉄鋼セクターで実質ゼロを実現することが技術的に可能であることを示している。

迅速に転換していくための中核となる戦略には、次のものがある：主要技術の迅速な普及(知見3)、鉄鋼セクターにおける石炭廃止の加速(知見4、9、10、11)、グリーン鉄(green iron)貿易(知見5)およびCCS付きバイオエネルギー(BECCS)(知見8)の発展、主なボトルネックへの対策(知見7、12、13、14)、適切な規制枠組みの確立(知見15)、強力な国際協力(知見6、11、15)である。

「削減が困難」から「急速な削減」へ：鉄鋼セクターの役割はどのように変化しているか

図2

	従来の説明： 鉄鋼業は「削減が困難」なぜなら…	新しい説明： 鉄鋼業は「削減が急速に進む」なぜなら…
技術	…低炭素技術が商用化されていない	…脱炭素化に向けた転換を開始するための重要な主要技術がすでに利用可能であり、ネットゼロに到達するために必要な主要戦略とさらなる有望な技術が解っている。
コスト	…グリーンスチールは高価すぎる	…グリーンスチールは従来のスチールよりも最大30~60%コスト高となる可能性があるが、ほとんどの最終製品におけるコスト上昇は1~2%である。スマート政策でコストの問題に対処できる。
ゼロカーボン電力	…大量のゼロカーボン電力を必要とする	…鉄鋼セクターは、ゼロカーボン電力の最も優れたユースケースの一つである。石炭から電力へ、および石炭から自然エネルギー・水素燃料への切り替えは、単位ゼロカーボン電力あたり最大級のCO ₂ 削減手段となる。
速度	…脱炭素化が最も遅いセクターの一つである	…鉄鋼セクターはネットゼロに最も早く到達するセクターの一つになり得る。もし脱炭素化の変革が最大限に加速されれば、2040年代初期までにネットゼロの鉄鋼セクターは技術的に実現可能である。

Agora Industry and Wuppertal Institute (2023)。注：グリーンスチールとは、排出量がほぼゼロの一次スチールを指す。ここで示されているグリーン鋼の追加コストの幅は、2030年代におけるCO₂価格を考慮しない石炭ベースの高炉-転炉(BF-BOF)法と、熔融酸化物電解(MOE)および自然エネルギー・水素ベースの直接還元(H₂-DRI-EAF)との比較に基づいて計算されたものである。

鉄鋼セクターは排出削減が困難という レッテルはもはや相応しくなく、むしろ 急速に削減が進む

鉄鋼セクターでの温室効果ガス排出削減が困難というレッテルを剥がす時期に来ている主な理由が四つある。第一に、脱炭素化に向けた転換を開始するための一連の低炭素化技術が現在利用可能であり、鉄鋼セクターで実質ゼロを達成するために必要な鍵となる戦略と技術が何であるかがすでに分かっていることである。また、それらに迅速に取り組まなければならないことも理解されている（知見 3）。例えば、直接還元鉄（DRI）技術は既に商業的に利用可能であり、鉄鋼メーカーには、さまざまな燃料（天然ガス、低炭素水素、バイオマス）やオプションとしての CCS など柔軟性が高い選択肢が未だ残されている。

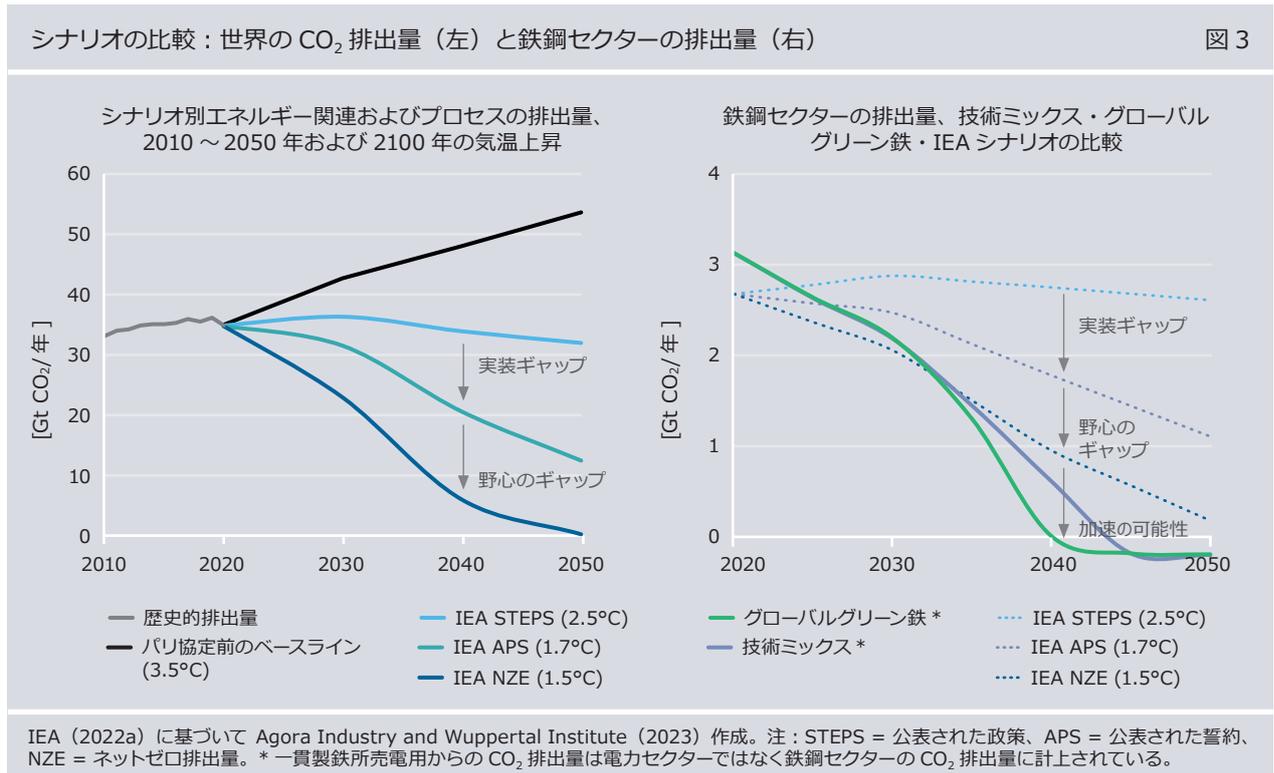
第二に、排出量がゼロに近い製鋼のコストは、CO₂ コストを考慮しない従来の石炭ベースの製鋼よりも

30%～60% 高くなると予測されているが、最終製品（自動車、ビル、家電製品など）のコストの増大は1～2%に過ぎない（IEA 2023、MPP 2022）。さらに、賢明な政策手段や適切な規制枠組みにより、コスト高の問題に対処できる（知見 15）。

第三に、鉄鋼セクターはゼロカーボン電力の最も優れたユースケースの一つであることである。石炭から電気へ、または石炭から自然エネルギー水素への燃料切り替え（知見 12 を参照）は、ゼロカーボン電力単位あたり最大の CO₂ 削減効果をもたらす対策の一つとなる。

最後に第四の理由は、我々のシナリオにより、鉄鋼セクターが 2040 年代初頭までに GHG 排出量を実質ゼロにすることが技術的に可能であることが示されていることである。これにより、鉄鋼セクターは世界で最初に脱炭素化を実現するセクターの仲間入りを果たすことになる。つまり、鉄鋼業は急速に削減が進むセクターになり得るのである。

2 世界の鉄鋼産業の加速的な脱炭素化は、世界的な気候変動対策を推進する重要な要素となり得る



世界は地球温暖化を2°Cを大幅に下回る水準に抑える軌道に乗っていない

2015年のパリ協定以来、大きな進展があったにもかかわらず、世界は現在、地球温暖化を2°Cを十分に下回るように上昇幅に制限できる軌道に乗っていない (IPCC 2023、IEA 2022a)。IEAによると、現在表明されている政策 (STEPS) では、世界は2100年までに2.5°Cの温暖化に向かう³。政府や企業によるネットゼロのコミットメントを含む公表された (削減目標) 誓約シナリオ (APS) では、世界の気温上昇の予測値は2100年までに1.7°Cに達

する (IEA 2022a)。STEPSとAPSの間には、実装までにまだ大きなギャップがある。また、APSと1.5°C対応のネットゼロ排出削減 (NZE) 経路との間には、まだ野心のギャップがある (図3参照)。

3 最新のIPCC統合報告書によると、実施された政策では、2100年までに3.2°C (2.2°C～3.5°Cの範囲) の温暖化につながる予測排出量となることが判明した (中程度の確信度)。

鉄鋼セクターは世界的な気候変動対策の推進に貢献可能

鉄鋼セクターは現在、算定方法にもよるが、GHG排出量の7～8%を占める⁴。発展途上国および新興経済国のニーズに対応するために鉄鋼需要がさらに増加すると予想されることを考えると、適切な対策がなければ鉄鋼セクターの排出量は2030年まで増加し続けることになる（鉄鋼についてのIEA STEPSを参照）。鉄鋼セクターが「排出量がほぼゼロ」の鉄鋼の生産の割合を増やすことで、CO₂排出量曲線をどれだけ早く下降させることができるかが、世界の気候変動対策にとって重要な問題である。

我々のモデルによる鉄鋼セクターの排出削減経路は、実装と野心のギャップを埋めるのに大きく貢献する可能性を示している（図3参照）。最善のケースでは、IEAによる鉄鋼産業の最新の1.5°C対応のネットゼロ経路（IEA 2022a）を上回り、さらに加速する可能性も示している。ただし、この可能性を現実のものとするには国際協力が不可欠で、政府と産業界が重要なボトルネックに迅速に対処することが絶対的に必要である。

1.5°C目標に対応して鉄鋼セクターを脱炭素化していくことは可能

我々が経験する地球温暖化の規模は、世界の温室効果ガス累積排出量に左右される。したがって、各セクターの温室効果ガス累積排出量と炭素予算は、常に変化するものであるが、企業の気候への取り組みの進捗状況を測定し評価するための

4 IEA 世界エネルギー見通し 2022 (IEA World Energy Outlook 2022) によると、2021年に鉄鋼セクターは2.76 GtCO_{2e}を排出しており、これは2021年に排出された40.8 GtCO_{2e}の7%を占めている (IEA 2022a)。ただしIEAの算定方法では、一貫製鉄所の産業用発電所からのCO₂排出量は、電力・熱セクターのCO₂排出量に計上されている。これらのCO₂排出量を鉄鋼セクターに計上した本研究のシナリオの方法論では、鉄鋼セクターは2021年に3.15 GtCO₂を排出し、したがって世界のGHG排出量の8%を占めたことになる。

重要な指標である。例えば、多くの鉄鋼会社がScience-Based Targets Initiativeと協力して、自社の気候目標が1.5°C対応であることを証明している (SBTi 2022)。セクター横断的な最初の試みとしてMPP 2022は、2020年から2050年までの鉄鋼業の1.5°C対応の累積炭素予算を56 GtCO₂と導き出した。我々の1.5°C対応の二つのシナリオ（それぞれ40 GtCO₂と43 GtCO₂）は、もし鉄鋼産業が世界的にその潜在力を最大限に発揮し脱炭素化への変革を加速させれば、1.5°C対応の炭素収支の閾値56 GtCO₂を大幅にクリアできることを示している（図4）。

鉄鋼セクターの排出削減加速能力をより野心的な気候変動対策に振り向けることが鍵 – 目標の更新が最初の一步

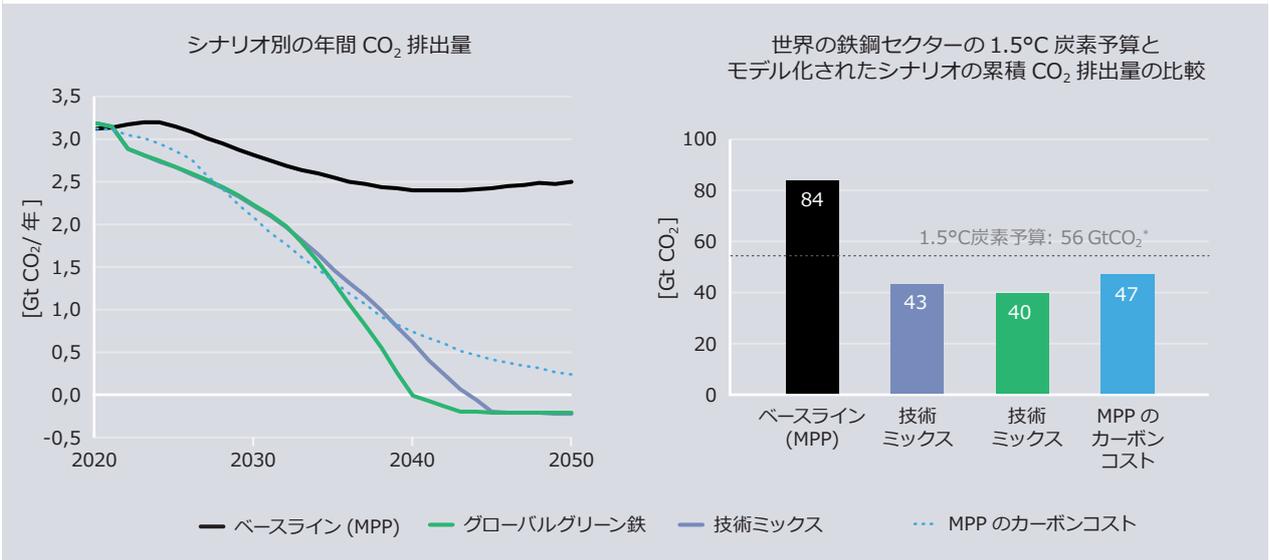
今日、一次鉄鋼を生産する企業の中で、2050年以前に実質ゼロ目標を達成しようとする企業は世界の一次鉄鋼生産の5%にしかない。他に23%が2050年までの実質ゼロ目標を掲げているが、70%を上回る一次鉄鋼生産企業はまだ2050年のカーボンニュートラルへの取り組みを行っていない。世界の鉄鋼セクターにおける加速への能力を、より野心的な気候目標と行動に振り向けることが鍵となるだろう。

そのため、先進国の鉄鋼メーカーは、ネットゼロの到達目標年を2050年よりかなり前倒しにすることを考え始める必要がある。2040年代初頭の鉄鋼セクターの実質ゼロは技術的に実現可能であり、過去の排出量の負担も考慮すると、先進工業国の鉄鋼メーカーの2050年のネットゼロ目標は1.5°Cとはいいいがたい。

新興国の鉄鋼メーカーにとっては、1.5°C対応を目標とするのであれば、実質ゼロ目標を2050年より前に前倒しにする必要がある。これらの野心的な目標とそれに伴う実施戦略は、将来の座礁資産を生み出すことを避けるために、今すぐ設定する必要がある（知見11を参照）。

シナリオの比較: 鉄鋼セクターの年間CO₂排出量 (左) と鉄鋼セクターの累積 CO₂ 排出量 (右)

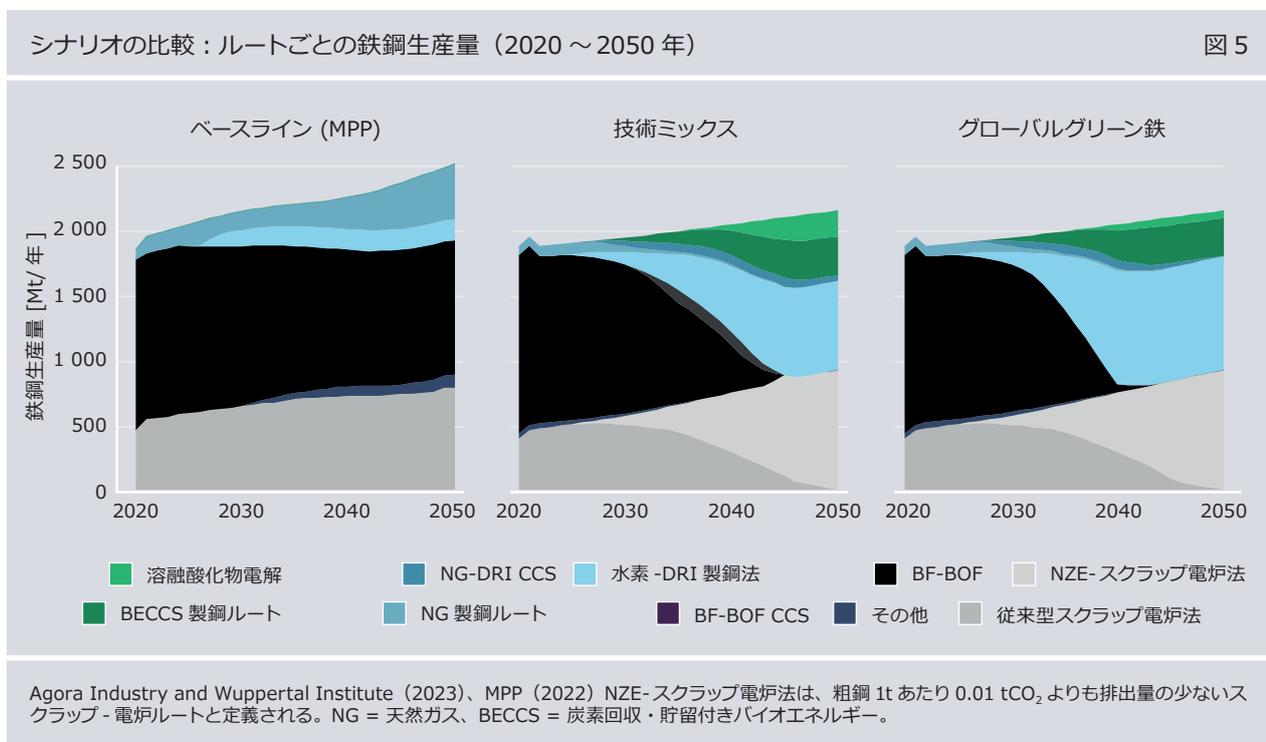
図 4



Agora Industry and Wuppertal Institute (2023)。*鉄鋼セクターの1.5°C対応炭素予算はMPP (2022) による。注: IEA NZEシナリオは、一貫製鉄所の産業用発電所からのCO₂排出量を電力セクターのCO₂排出量に計上するという異なるCO₂算定方法を使用しているため、炭素予算の比較には含まれていない。

鉄鋼セクターは排出削減が困難なセクターから排出削減が急速に進むセクターに変わる可能性があるという事実に照らして、各国政府は、十分なクリーンエネルギーを供給し、化石燃料ベースの資産を段階的に廃止することによる社会的・地域的影響に対処するための措置を含め、明確な支援政策を採用する必要がある。さらに各国政府は、この野心の高まりを反映して、国が決定する貢献 (NDCs) を見直さなければならない。

3 鉄鋼セクターにおける 1.5°C 対応の脱炭素化排出削減経路を実現するための重要な対策は、材料効率の向上、スクラップベースの製鋼、水素ベースの製鋼、炭素回収・貯蔵付きバイオエネルギー (BECCS) の増加である



鉄鋼業における化石燃料の削減を急速に加速させる脱炭素化手段は十分に存在する。それらは迅速に実装する必要がある。

1.5°C 対応の鉄鋼セクターの脱炭素化のための排出削減経路

本研究では、鉄鋼セクターの 1.5°C 対応脱炭素化シナリオを二つモデル化した。MPP 2022 ベースラインシナリオ (MPP 2022) を参照点として、これ

らのシナリオとの比較を行う。我々の 1.5°C シナリオは、主要なボトルネックへの迅速な対応が実施され、主要な技術とインフラ強化が遅滞なく行われ、主要な政策と規制の枠組みが予定通りに整備されれば、技術的に実現可能である。我々のシナリオは予測ではなく、技術的な観点から理想的な条件下で何が可能かを示すものである。これらのシナリオは、世界の鉄鋼変革に関する技術的なボトルネック (知見 7、12、13、14) と可能性のある技術動向 (知見 4、5、7、8、9) に特に注意を向けることを目的としている。

しかし、我々が選択したアプローチには限界もある。例えば、鉄鋼生産の地域的な詳細は考慮していない。さらに、いくつかの世界地域で、排出量がほぼゼロの製鋼に関する規制枠組みが整備され、排出量がほぼゼロの生産能力が技術的に実現可能な最大量構築できるようになることを想定している。現在、そのような枠組みはまだ導入されていない。ただし、そのような規制枠組みの主要な構成要素はすべてすでに知られており（知見 15 を参照）、国際協力（知見 6 を参照）により、さらに多くの世界地域で排出がほぼゼロの製鋼プラントへの投資意欲が強く喚起される可能性がある。

我々のシナリオは、次の主要な仮定に基づいている。

- **ベースライン (MPP, 2022)**：ベースラインシナリオでは、材料効率は想定されていない。鉄鋼資産は、主要な再投資決定のたびに、ネットゼロ目標の制約なく、総保有コスト (TCO) が最も低い技術に切り替わる。
- **技術ミックス**：材料効率の緩やかな向上を仮定する。これは世界の鉄鋼需要の伸びを緩和する。主要な低炭素技術は、商業的に利用可能になれば普及する。これらの技術の採用は野心的な普及速度で推進される。普及には技術コストが重要な役割を果たすが、唯一の決定要因とはならない。
- **グローバルグリーン鉄**：このシナリオには、技術ミックスシナリオと同じ仮定がなされているが、国際的なグリーン鉄貿易が世界的に活発化した場合に破壊的なシナリオとなる可能性を示すために、直接還元鉄の普及速度が 2030 年以降に倍増する点で異なる。

1.5°C に対応した二つのシナリオの主要な目的達成手段は次の通りである：

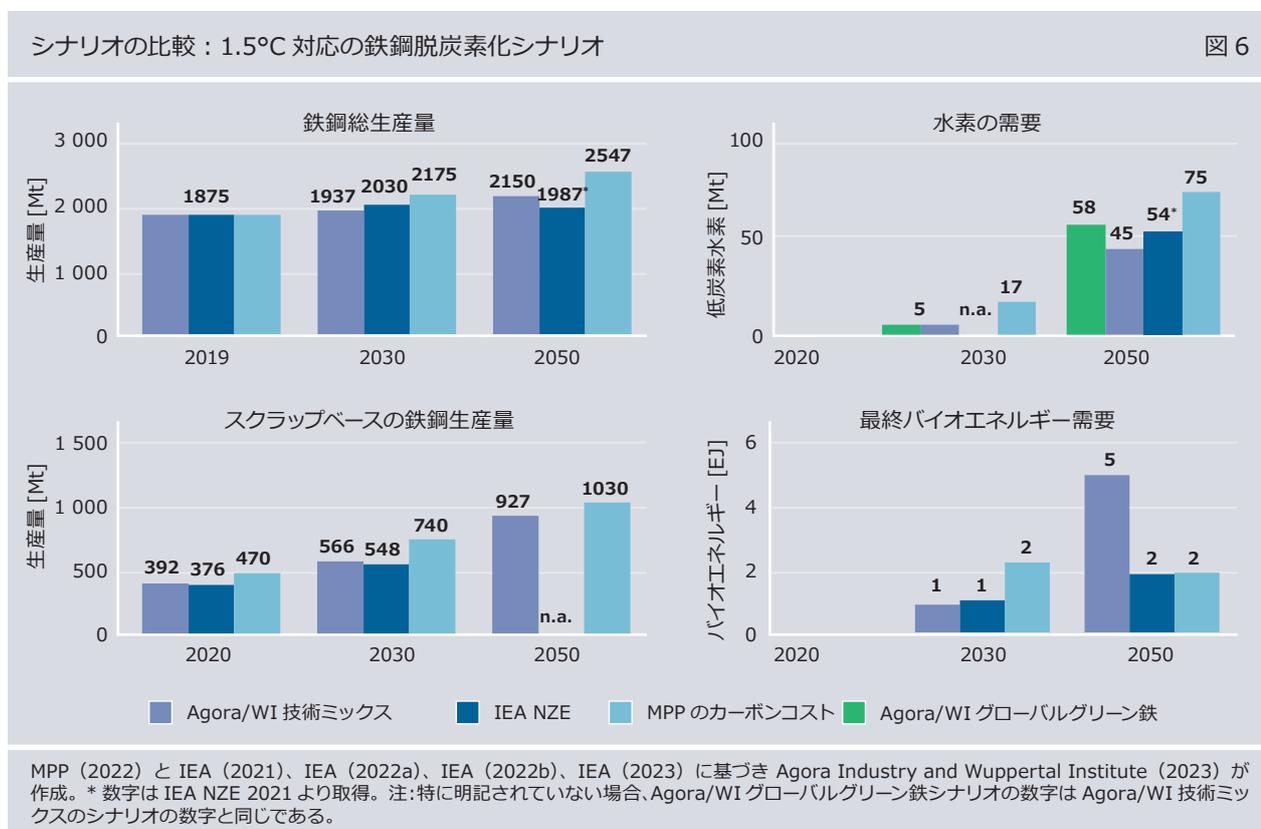
材料効率：ベースラインシナリオでは鉄鋼生産が 2050 年までに 2550 Mt 前後まで持続的に成長することを想定しているが、これと比較して我々がモデル化した二つシナリオでは、2050 年までに到達する鉄鋼生産は 2150 Mt とした。製造歩留まりの向上、ニアネットシェイプ casting、建築設計と施工

方法の改善、建築物の長寿命化、車両の軽量化などの対策により、2050 年の鉄鋼需要は、同じサービス提供しながら最大 20% 減少する可能性がある (Agora Industry 2022, IEA 2020a)。我々の材料効率の仮定 (2050 年ベースラインに対して -16%) は、他の 1.5°C 対応シナリオと比較して中間的なアプローチを提供する (図 6 を参照)。建築基準法を改正して構造用鋼の過剰仕様を回避したりすることや、輸送のモーダルシフトへのインセンティブなどの政策は、材料効率の向上を促進できる例である (IEA 2020a)。

スクラップベースの製鋼の増加：二次製鋼は一次製鋼に比べて 5～7 倍のエネルギーを削減できるため、スクラップベースの製鋼を増やすことも重要な戦略である。ただし、これにはスクラップの入手可能性という制約がある。我々のシナリオでは、スクラップの入手可能性は 2020 年の 710 Mt から 2030 年の 880 Mt、2050 年の 1240 Mt に増加する。これにより、鉄鋼二次生産の世界シェアは 2020 年の 21% から 2050 年には 43% に増加する。入手可能性とは別に、スクラップの品質が重要な要素となる。二次鉄鋼がダウンサイクルされて一部の市場セグメントに限定されるのではなく、多くの用途に使用できるようにするためには、スクラップフローをクリーンに保つ政策が必要である (知見 15 を参照)。

水素ベースの製鋼：直接還元法を用いる水素製鋼は、我々のシナリオにおける一次製鋼の脱炭素化の主要戦略である。2030 年までに 96 Mt の鋼が、100% 水素⁵ または低炭素水素と天然ガスの混合ガスを用いる水素ベースの直接還元プラントで生産される。2050 年までに、技術ミックスシナリオとグローバルグリーン鉄シナリオで 683 Mt と 873 Mt の粗鋼が水素ベースの直接還元法で供給され、それぞれ一次製鋼の 56% と 72% を占めることになる。MPP 炭素コストシナリオと比較して、我々のシナリオの低炭素水素需要は大幅に低いが、これは主に材料効率化対策による全体的な鉄鋼生産量の減少に起因すると考えられる。

5 本研究では、低炭素水素は自然エネルギーまたは CCUS 付きの化石燃料ベースの水素と定義している。



BECCS ベースの製鋼：我々のシナリオでは、CCS 付きバイオエネルギー（BECCS）が、鉄鋼産業において負の排出を生み出す重要な役割を果たす（知見 8 を参照）。DRI 法または HISarna® のような製錬還元法は、持続可能なバイオマスで運用が可能で、CCS を装備することができる⁶。バイオマスの持続可能な供給は、土地利用競争（すなわち、植林と食糧生産との競合）のために非常に限られることを考えると、BECCS ベースの製鋼は限定的であり、システムの観点からのバイオマスの効率的な配分が、今後の議論の対象となるであろう（知見 8 を参照）。技術ミックスのシナリオでは、2050 年までに BECCS ベースのルートが一次製鋼の 25%（300 Mt）を占める。

6 原理的には BF-BOF ルートでの BECCS も考えられるが、このプロセスでは DRI ベースのルートや HISarna BECCS と比較して、バイオマス単位あたりの負の排出量を生成する際の効率が著しく低いため、鉄鋼セクター内では、バイオマスは BF-BOF ルートに使用するために割り当てるべきではない（知見 8 を参照）。

直接電化ベースの技術は一旦利用可能になればゲームチェンジャーになる可能性

溶融酸化物電解（MOE）やアルカリ鉄電解（AEL）などの直接電化の技術は、排出量がほぼゼロの製鋼技術の中で最も CO₂ 削減コストが低い（知見 15 を参照）⁷。しかし、技術開発のレベルが比較的低いため、これらには依然として高い不確実性がある（Agora/WI/Lund 公表予定）。本格的な規模のプラントが利用可能になるのは、早くても 2030 年から 2035 年（MOE）および 2040 年（AEL）の間と予想し、我々は MOE の普及について非常に保守的な仮定を用いて、技術ミックスシナリオでは 2050 年までの鉄鋼生産量を 200 Mt とした。今日ではまだ商業化の準備ができていない技術にあまり依存したくなかったためである。純粋なコストの観点

7 これら二つの技術の大きな違いの一つは、MOE が 1,500°C 以上の高温を必要とするのに対し、アルカリ電解は 110°C 前後の温度で可能なことである（Agora/WI/Lund 公表予定）。

からは、水素ベースの DRI 法よりも経済的になる可能性があるが、商業的に利用可能になるかどうか、またいつ利用可能になるかという大きな不確実性を考慮すると、今日の水素ベースの製法の普及は遅らせるべきではないと考えられる⁸。

CCS と組み合わせた石炭ベースの技術が我々のシナリオで果たす役割はわずか

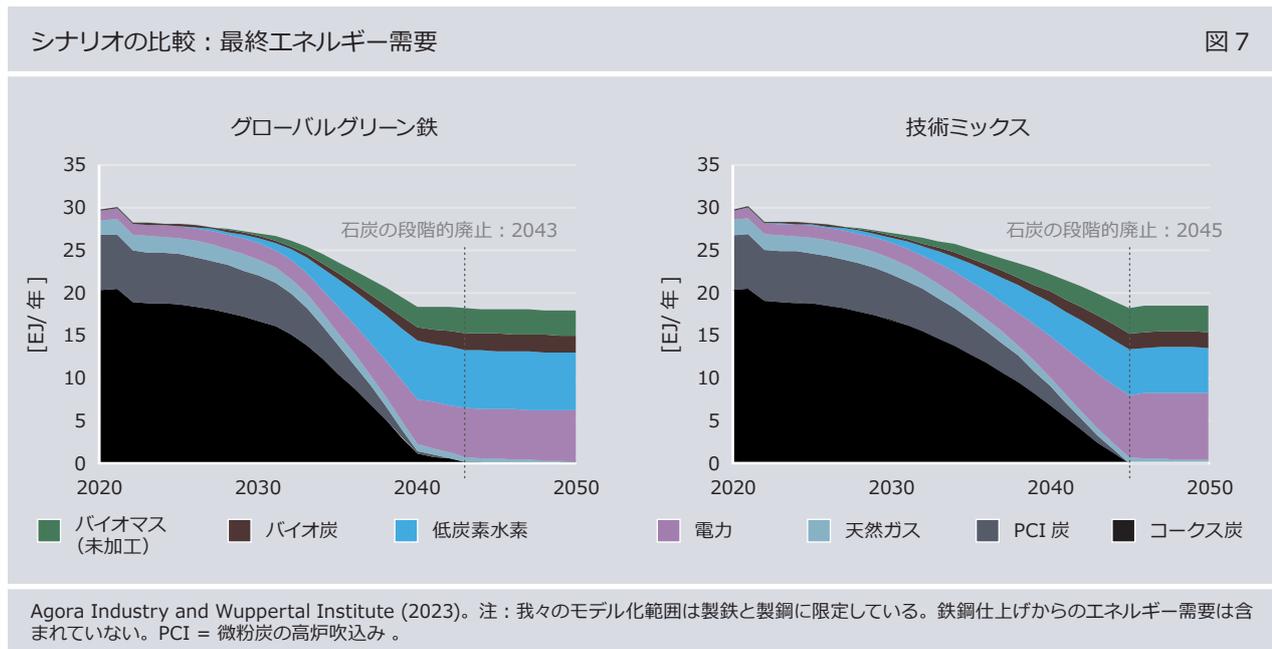
他の多くのシナリオとは異なり、BF-BOF CCS は我々の技術ミックスシナリオではわずかな役割しか果たしておらず、グローバルグリーン鉄シナリオではまったく利用されない。これには多くの理由がある：BF-BOF 法の CCS は、直接残留排出量がかかなり残る可能性が高く、原料炭の採掘に関連する上流のメタン排出量に対処できず、他の技術の破壊的なコスト削減の進展の影響を受けやすい例えば、MOE のような直接電化技術が商業的に利用可能になった場合などである（知見 4 および 9 を参照）。

直接還元（DRI）ベースの製法は鉄鋼メーカーに大きな柔軟性をもたらす

DRI プラントの利点の一つに、鉄鋼メーカーに大きな柔軟性をもたらすことがある。新しい最先端の DRI プラントは、天然ガス、低炭素水素、100% 水素に移行する前の天然ガスと水素の混合物、CCS を併用する天然ガス、さらには負の排出を生み出す CCS 付きのバイオエネルギーにより稼働させることができる。我々のシナリオでは、主に水素ベースの DRI 法および DRI ベースの製法上の BECCS に焦点を当て、CCS を用いる天然ガスベースの製法は中程度しか利用されないとしている。水素ベースの DRI 法に関しては、直接的な残留排出量および天然ガスからの上流のメタン排出量を最小限に抑えることが理論的根拠である。BECCS の場合、その理論的根拠は、負の排出を生み出す技術がいくつかあることである（詳細は知見 8 を参照）。しかし、これらの開発は確実ではない。持続可能なバイオマスが多く入手できない場合、より多くの DRI 法で低炭素水素を使用する可能性がある。同様に、低炭素の水素が不足したままであれば、より多くの DRI 法が CCS を用いる天然ガスとなる可能性がある。いずれの場合も、新規に DRI を導入する生産能力が重要である（知見 7 を参照）。

8 MOE の技術開発レベルが低いことを考えると（TRL 4）、商業規模のプラントのコスト評価には高い不確実性がある。我々の技術評価によると、MOE ルートでは、粗鋼 1 トンあたり約 14.8 GJ の電力が必要になる。これは、自然エネルギー水素ベースの DRI-EAF ルートよりもわずかに高いエネルギー需要となり、電気分解効率を 70% と仮定すると、粗鋼の 1 トン当たり 14.3 GJ が必要となる（Agora Industry/Wuppertal Institute/Lund University 近日発表予定論文）。しかし MOE ルートでは、再生可能な H₂ を生産するために追加のプロセスステップなしで直接電力が使用されることを考えると、全体として、これは自然エネルギー水素ベースの鉄鋼生産ルートよりも依然として安価である可能性がある（図 30 参照）。

4 2040年代初頭までに鉄鋼セクターの石炭利用を段階的に廃止することは技術的に可能である



製鋼において化石燃料を2050年まで使用継続すれば、回避できたはずの残留排出が発生する

他のほぼすべての1.5°C対応鉄鋼脱炭素化シナリオでは、石炭も天然ガスも2050年までに完全に廃止されていない（IEA 2022aのIEA NZEおよび、MPP 2022のCarbon Costを参照）。前述のどちらのシナリオも化石燃料と組み合わせてCCSを使用することを想定しているが、2050年まで化石燃料を使用し続けると、CO₂回収率が不完全であるために、それぞれ年間180 MtCO₂と300 MtCO₂の残留排出量となる。これらの排出のほとんどは回避できなかったはずである。

鉄鋼業による石炭利用の段階的廃止は可能

我々のシナリオは、鉄鋼業における石炭の段階的廃止が2050年よりかなり前に技術的に実現可能であることを初めて示している⁹。グローバルグリーン鉄と技術ミックスのシナリオでは、石炭はそれぞれ2043年と2045年までに段階的に廃止される。

9 モデリング範囲には製鉄と製鋼が含まれるが、鉄鋼仕上げは含まれない。最終エネルギー需要の集計は、さまざまな製鉄・製鋼技術の最終エネルギー消費のボトムアップアプローチに基づいている。これらについては、後日公表予定の技術分析の中で詳述する。我々のモデリング範囲とボトムアップアプローチにより、我々の数値は他の情報源のものとは一致しない可能性がある。

化石燃料と共に使用する CCS 技術では残留直接排出量と上流排出のポテンシャルが残る

我々が評価したさまざまな低炭素技術のうち、CCS ベースの技術はすべて、水素ベースの技術や熔融酸化物電解（MOE、図 8 参照）のような直接電化技術と比べて、大幅に高い残留排出量を示す。さらに、石炭と天然ガスはいずれも、現時点では、CCS 技術では対処できないメタン漏出によるかなりの量の上流における排出と関連している。例えば 2021 年には、鉄鋼業で使用された石炭による炭鉱からのメタン漏出は年間 384 MtCO₂e に達した。この量は鉄鋼業からの CO₂ 排出量を～12% 増加させることになる¹⁰。メタンの漏出を減らすための対策は存在するが、どのような方法で、どのような規模で実施できるかは不確実である。製鋼プロ

10 この計算は、メタン排出による 100 年間にわたる地球温暖化係数（GWP100）に基づいたものである。

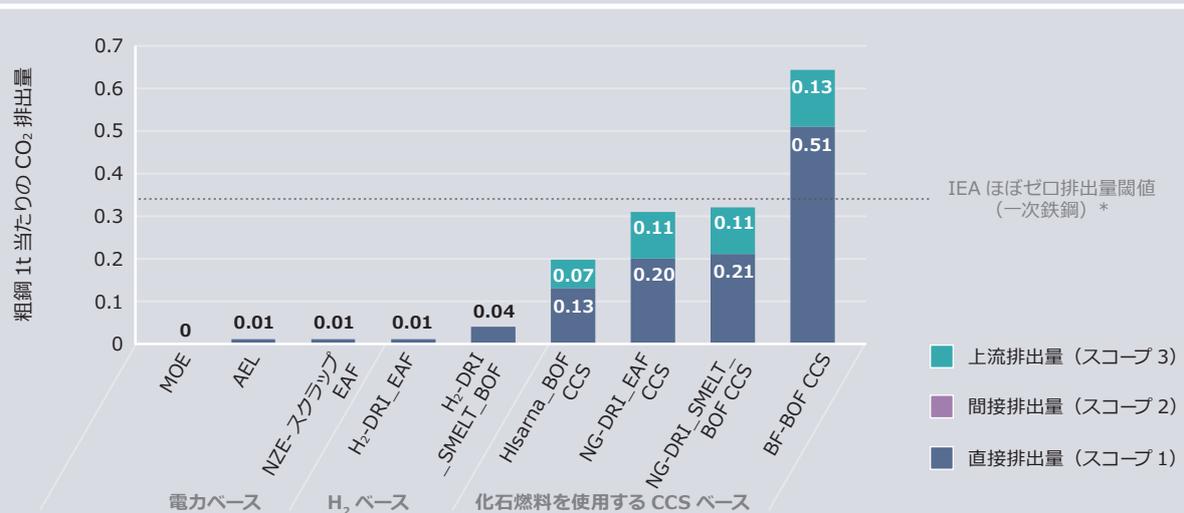
セスにおける石炭の代替は、これらの排出も合わせて排除することにつながる。

回避可能な残留排出量を負の排出量で相殺するには機会費用がかかる

残留排出を真に避けられないものにまで削減する最も重要な理由は、残留排出量をネガティブエミッション（負の排出）で相殺するには必ず機会費用がかかるからである。これは、回避可能な残留排出量を相殺する代わりに、負の排出を使って実際に大気から CO₂ を吸収することができるためである。気候変動の最悪の影響を回避するためには二酸化炭素の除去が重要視されており、世界はこのために奔走しているが（知見 8 を参照）、石炭やその他の化石燃料の使用による回避可能な多くの残留排出量が、とりわけ経済的に実行可能な代替手段が存在する中で、依然として許容されるとは考えにくい。

ブレイクスルー技術の残留 CO₂ 排出量（スコープ 1 および 3）と、IEA 提案の一時鋼の排出量ほぼゼロの閾値

図 8



独自の分析および IEA (2022a) に基づいて Agora Industry and Wuppertal Institute (2023) が作成。注：この図の一次鉄鋼生産技術はすべてスクラップの割合を 16.5% として計算されている。* スクラップの割合の調整のため、一次鉄鋼に対する IEA の排出量ほぼゼロの閾値は粗鋼 1 トンあたり約 0.34 tCO₂/t となる。CCS 技術の上流排出量は、「化石燃料の間接排出量」の 2050 年の値に基づいて IEA (2022) から求めた。現在と比較してメタン排出量がすでに大幅に削減されていると想定されている。ゼロカーボン電力のみを使用する場合、間接排出量（スコープ 2）は 0 と仮定される。MOE = 熔融酸化物電解、AEL = アルカリ鉄電解、NZE-scrap EAF = 排出量がほぼゼロのスクラップ電炉、DRI-EAF = 直接還元鉄—電炉、DRI-SMELT-BOF = 直接還元鉄—電気製錬—転炉、BF-BOF CCS = 炭素回収・貯留付き高炉—転炉。

座礁資産を最小化するには一連の対策が必要になる

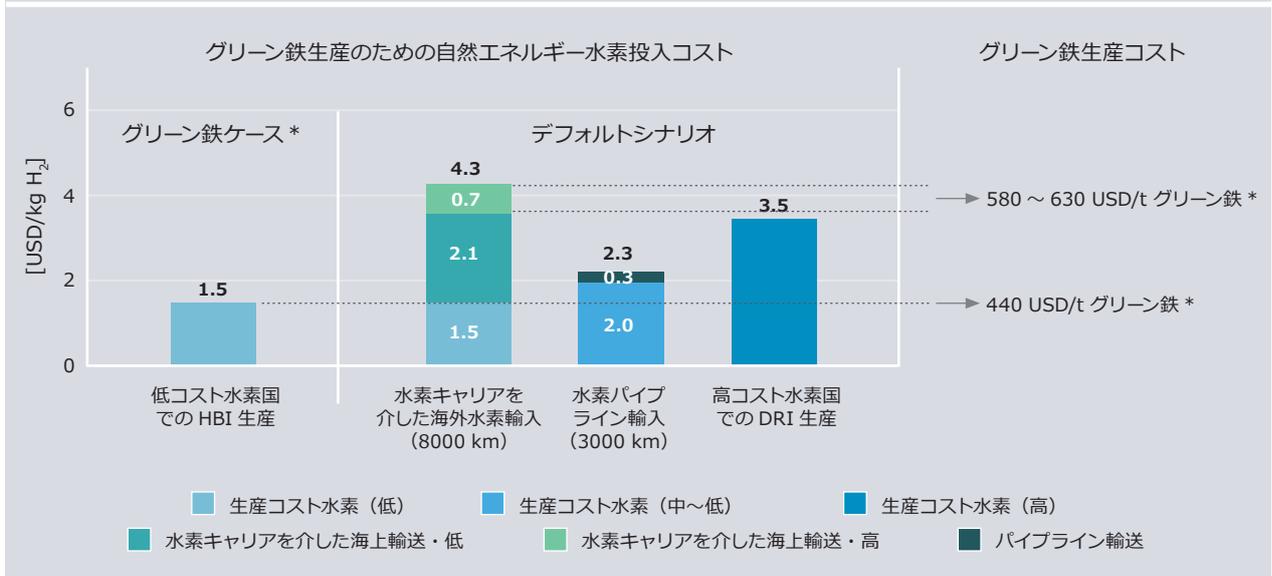
我々のシナリオでは、座礁資産は最小限に抑えられる。既存の石炭ベースの高炉の座礁資産リスクは限定的であるが（知見 10 を参照）、新興経済国で 2030 年までに多数計画されている石炭ベースの新規 BF-BOF プラントについては、2040 年代における炭素ロックインと座礁資産リスクは非常に高い（知見 11 を参照）。多くの鉄鋼脱炭素化シナリオでは、座礁資産を回避するために BF-BOF CCS を導入することとしているが、その逆となることが考えられる。すなわち BF-BOF 法における後付

の CCS では、そのようなプラント自体を座礁資産とならないようにすることはできない（知見 9 を参照）。鉄鋼会社や各国政府にとって、石炭の段階的廃止目標と同時に、代替戦略¹¹や排出量がほぼゼロに適合する技術を構築するための制度の枠組み（知見 15 を参照）を策定することで、既存のネットゼロ目標の実現性を高めることができ、石炭ベースの鉄鋼生産ルートからの回避可能な残留排出量を確実になくすことにつながる。これは、カーボンロックインや座礁資産リスクを最小化し、他の要因（知見 11 を参照）を含めて、ネットゼロに適合する投資のための信頼できる環境を整えることにつながるであろう。

11 これらの代替戦略を定義することは、本研究の範囲を超えているが、将来の研究と議論の対象になるであろう。

5 国際的なグリーン鉄貿易は世界の鉄鋼産業の脱炭素化コストを下げることができる

様々なシナリオにおける自然エネルギー水素投入コストがグリーン鉄生産コストに及ぼす影響 2030年 図9



Agora Industry and Wuppertal Institute (2023)、IEA (2022c) に基づいた独自分析。注：自然エネルギー水素の生産コストは BNEF (2022a) および IEA ETP (2023) から得たものであるが、図の説明のみを目的としている。モデリングにおける実際の仮定は異なる可能性がある（ネットゼロ鉄鋼産業の主要テクノロジーに関する今後の出版物を参照のこと）。*IRENA (2022a) によると、グリーン鉄の輸送コストは 15 ~ 50 USD/t の範囲となる可能性がある。McKinsey (2022) によると、熱間ブリケット鉄 (HBI) の形のグリーン鉄の輸送コストは鉄鉱石ペレットの輸送コストと同程度である。製鋼に使用するために HBI を再加熱するには、100 ~ 150 kWh が必要である。

海外輸送用に、水素とその誘導体¹²ではなく、エンボディド水素として水素グリーン鉄の形で出荷したらどうなるであろうか。より安価な世界の鉄鋼業界の脱炭素化が可能である。

自然エネルギーおよび低炭素水素のコストは国や地域によって異なる

自然エネルギーによる発電予想コストと安価な天然ガスの利用可能性によって、自然エネルギー水素あるいは CCS を用いる化石燃料ベースの水素のコストは、国や地域によって大きく異なる。自然

エネルギー水素の場合、最もコストの低い国（約 1.50 USD/kg H₂）と最もコストの高い国（3.50 ~ 4 USD/kg H₂）の間では、自然エネルギー水素の生産コストギャップは最大 1.50 ~ 2.50 USD/kg H₂ であることが様々な研究で示されている（例えば、BNEF 2022a、IEA 2023）。そのため、高コストが予測される国の多くは、自然エネルギー水素や低炭素水素の大量輸入に積極的に取り組んでいる。

水素とその誘導品の船舶輸送はコストがかかる

水素をどのように輸入するかは、水素の配送コストに大きな影響を与える。3,000km を超えるガス

12 本研究では、水素とその誘導体とは、船舶による水素の輸送を可能にする液体水素、液体有機水素キャリアおよびアンモニアを指す。

パイプラインの再利用による輸入では、輸送のために約 0.30 USD/kg H₂ の追加となるが、アンモニアや液体有機水素キャリア (LOHC)、液体水素などの船舶経由の主要な水素輸入オプションはすべて、輸送だけでも 2030 年までに 2.10 ~ 2.80 USD/kg H₂ が追加される (IEA 2022c)。今日、石炭ベースの BF-BOF 法から水素ベースの製鋼への転換を目指すほぼすべての鉄鋼生産国では、自然エネルギー水素を国内で生産するか、パイプラインや船舶で水素を輸入するかが公の議論の中心となっている (図 9 の既定のシナリオを参照)。

海外輸送の場合、水素をグリーン鉄の形で輸送する方がはるかに安価 ...

見過ごされがちな選択肢として、水素をグリーン鉄の形で、例えばホットブリケット鉄 (HBI) として、エンボディド水素として輸送する方法がある。これはバルク材料であるため、水素とその誘導体を船で輸送するのは対照的に、輸送中のエネルギー損失は生じない。これに対して、水素とその誘導体の場合、輸送中のエネルギーと変換損失のために、輸送前の水素の初期量の 76% (液体水素)、64% (アンモニア)、および 58% (LOHC) のみが輸送後に利用可能である (IEA 2022c)。したがって、HBI の輸送の方がはるかに安価になる。

...そしてこのコスト優位性は構造的である

注目すべきは、コスト優位性が構造的なことである。換言すると、グリーン鉄輸送のプロセスチェーンでは、水素を別に輸送する必要がないため水素とその誘導体を船で輸送するコストは発生しないだけであり、これらのコストが将来どれだけ削減できるかを考える必要はない (図 10 参照)。さらに、HBI の輸送コストは、水素ベースの DRI-EAF 法で必要となる鉄鉱石ペレットの輸送コストとほぼ同じである (McKinsey 2022)。したがって、HBI の輸送コストは、鉄鋼生産国が鉄鉱石を輸入せず国内で産出する場合にのみ追加される。

世界的なセクターの脱炭素化にとって、これは二つの大きな意味を持つ：

- 水素とその誘導体の船での輸入は、水素ベースの製鋼にとって決して競争的な選択肢にはならないであろう
- HBI が船で輸送され、グリーン鉄生産者間の競争のある流動的な世界市場が存在する場合、世界の製鉄国は世界で最も安価な自然エネルギー水素コストの恩恵を受けることができる

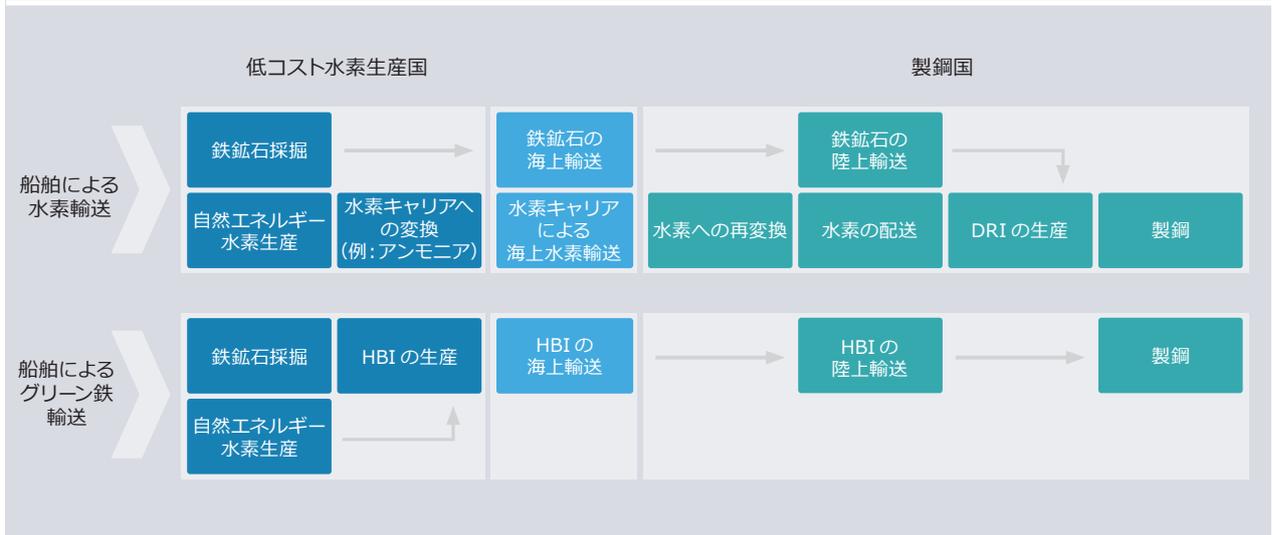
グリーン鉄貿易は水素関連インフラ費用を減らすことができる

さらに、水素とその誘導体の代わりにグリーン鉄を輸送すれば、必要となるプロセスステップは大幅に少なくなり、また新規水素関連インフラストラクチャも少なくてよい。例えば、アンモニアを介した船舶による水素輸送では、輸出国にアンモニアプラントが必要で、輸入国に水素に再変換するアンモニア分解プラントを建設し、水素を製鉄所に輸送する水素配送パイプラインが必要となるのに対し、グリーン鉄輸送では、輸出国に HBI プラントを一つ建設するだけで済む (図 10 参照)。それ以外にも HBI は、基本的に鉄鉱石と同じ既存のインフラを利用でき、船・内航船・列車で輸送することができる。これは今日すでに実践されている。2021 年には、天然ガスを原料とする HBI プラントで生産された HBI 8 Mt が海外に輸送され、15 Mt が鉄道や内航船で陸送された (Midrex, 2022a)。

船による海外の水素輸送と比較した場合のグリーン鉄輸送のケースは、純粋な経済的観点からは強力であるが、さらに、グリーン鉄の輸入と製鉄所での統合的に DRI 生産する場合と比較する際には、戦略的自律性、技術革新、市場力、一貫製鉄所での DRI のホットチャージの利点などの要因を考慮する必要がある。もう一つの重要な問題として、グリーン鉄貿易がグリーン鉄輸入国の雇用にどのような影響を与えるかがある。これについては知見 6 で議論する。

二国間の低炭素製鋼プロセスチェーンの比較

図 10

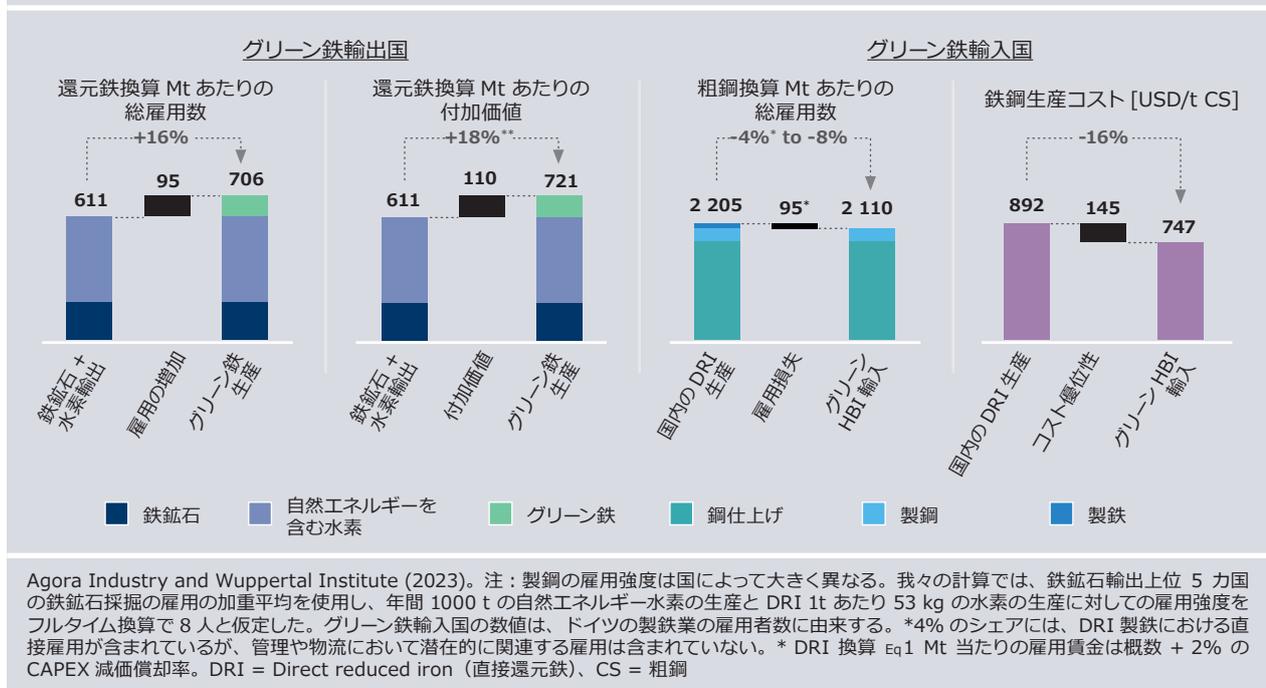


Agora Industry and Wuppertal Institute (2023)。HBI = ホットブリケット鉄、DRI = 直接還元鉄。

6 国際的なグリーン鉄貿易は、輸入国と輸出国にとってウィン-ウィンとなりうる。グリーンスチールの脱炭素化のスピードと規模を最大限に引き出すには、国際的な公平な競争の場と戦略的パートナーシップが必要である

グリーン鉄貿易は、輸入国と輸出国にとってウィン-ウィンとなりうる

図 11



将来の水素輸出国にとって、グリーン鉄貿易は新たなビジネス機会と雇用を提供するだろう

グリーン鉄の輸出は、自然エネルギー水素や低炭素水素の輸出を計画している国に新たな機会を提供する。すなわち、国内で新たな雇用が創出され、各国は製鋼バリューチェーンの付加価値部分を享受できるようになる。今日の主要な鉄鉱石輸出国の多くでは、自然エネルギー水素の生産コストが比較的低いと予測されている (図 12 参照)。これ

らの国が鉄鉱石と水素およびその誘導体を船で輸出するシナリオと比較して、グリーン鉄の輸出は、現地の雇用を約 16% 増加させ、付加価値を 18% 増加させる可能性がある (図 11 参照)。国内に鉄鉱石資源を持たない低コスト水素輸出国にとっても、鉄鉱石の輸入とグリーン鉄の輸出はビジネスケースとして成立する可能性が高い。グリーン鉄輸出国にとっての機会 は明らかであるが、グリーン鉄貿易は輸入国にどのような影響を与えるだろうか。大きな雇用喪失につながるのではないだろうか。

将来のグリーン鉄輸入国にとって、グリーン鉄貿易の増加は環境価値が指導的な市場 (green lead market) における鉄鋼産業の競争力を高めることができ、それによって90%を上回る雇用を守ることができる

やや驚くべき結果であるが、グリーン鉄の輸入は輸入国の雇用にわずかな悪影響しか及ぼさない。これは、製鋼バリューチェーン全体の雇用の分布が不均等であるためである。ドイツの雇用データに基づくと、鉄鋼セクターの直接雇用のうち、製鉄が約4%、製鋼が11%、鉄鋼仕上げが85%を占めている (WV Stahl 2021)。自然エネルギー水素コストが構造的に高い国にとって、これは水素ベースの製鋼への転換戦略に重要な意味を持つ。水素ベースのDRIプラントを建設し、他の国よりも比較的高い再生可能エネルギー水素コストで稼働させるだけでは、競争力がリスクにさらされる。最悪の場合、これは製鉄における直接雇用に影響を与えるだけでなく、製鋼バリューチェーン全体の

雇用を危険にさらすことになる。多様化した戦略の一つの柱として、グリーン鉄の輸入は、排出量がほぼゼロの製鋼コストを低下させることにより、製鋼バリューチェーンの競争力を高める重要な手段となり、結果的に90%を上回る雇用を守ることになる (図11参照)。

グリーン鉄の輸入国：バリューチェーンにおける適切なレベルの自律性を見つける

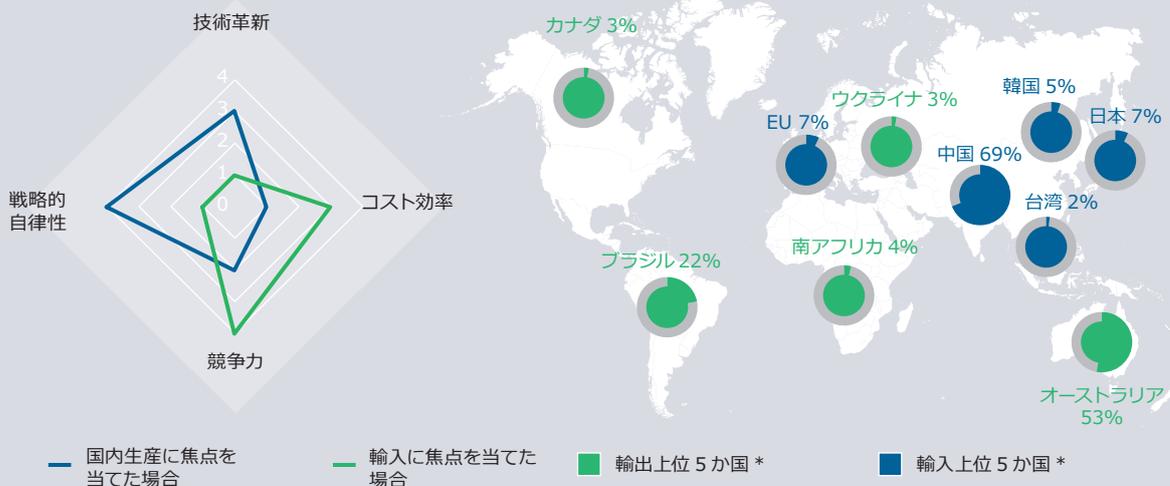
換言すると、低炭素水素コストが比較的高い国にとって、グリーン鉄の輸入は、低炭素水素のコスト高および供給不足の両方の可能性に対する重要なヘッジ戦略となり得る。このような背景から、グリーン鉄を輸入することになる可能性がある国は、様々な要因をバランスさせた多様なアプローチを追求することが重要である。国内でのグリーン鉄生産を支持する主な論点は、戦略的自律性と、世界の鉄鋼産業の脱炭素化をもたらす水素ベース

グリーン鉄輸出国と輸入国：潜在的な市場支配力リスクのため、多様な戦略が鍵

図 12

グリーン鉄輸入国：適切な輸入シェアを見出すこと

2021年の世界の鉄鉱石輸出国および輸入国の上位5か国



左のイラストは Agora Industry and Wuppertal Institute (2023) が作成。右のイラストはオーストラリア政府の Resources and Energy Quarterly (2022)。レーダーチャートの例は説明のみを目的としている。自然エネルギーが安価で豊富な国におけるグリーン鉄の生産コストとグリーン鉄輸入国の購入コストにあまり差がないため、コスト優位性はある程度転嫁され、コスト効率を高めることができると想定されている。現実には必ずしもそうである必要はない。*2021年世界貿易データの世界輸出入に占める割合。

のプロセスの技術革新への貢献である。対照的に、グリーン鉄の輸入を支持する主な議論は、グリーン鉄がよりコスト効率に高く寄与し、それによって全体的な競争力にも貢献する可能性があることである（図 12 参照）。しかし、これらの高いレベルの議論を超えて、さらに考慮すべきことがある。すなわちグリーン鉄市場は当初は小規模で高い市場支配力に左右される可能性があるため、輸入国の購入コストが、低コスト水素諸国におけるグリーン鉄の生産コストよりも大幅に高くなる可能性がある。国内の DRI は高温でチャージできるが、輸入されたグリーン鉄は輸出国でホットブリケットのために追加のエネルギーを必要とし、再加熱する必要があり¹³、エネルギーペナルティにつながる。したがって各国と各企業は、最善の方法を見つけるために、これらの要素や生じ得るその他の要素を比較検討する必要がある。

グリーン鉄貿易の可能性を最大限に活用するには、国際的な協力と戦略的パートナーシップが必要

経済性が良好であるにもかかわらず、流動性が高いグリーン鉄の世界市場はそれ自体で成り立たず、国際的な協力と国際的に公平な競争の場を必要とする。グリーン鉄の輸出国にとって、次のような重要な側面がある：資金へのアクセス、先進国のグリーンな市場へのアクセス、自然エネルギー・電気分解装置・水素関連インフラ・HBI プラントの建設のための資本コストを下げるリスク回避手段、そして地域社会の賛同と参画である。グリーン鉄輸入国にとって重要な面は、信頼できる長期オフテイク契約と公正な輸入価格である。

民間セクターのみでこの多様で複雑な一連の要件に対処できる可能性は低い。公平かつ持続可能な方法で国際的なグリーン鉄貿易の可能性を引き出すには、各国政府の関与と対等な立場での戦略的パートナーシップの確立が必要である¹⁴。

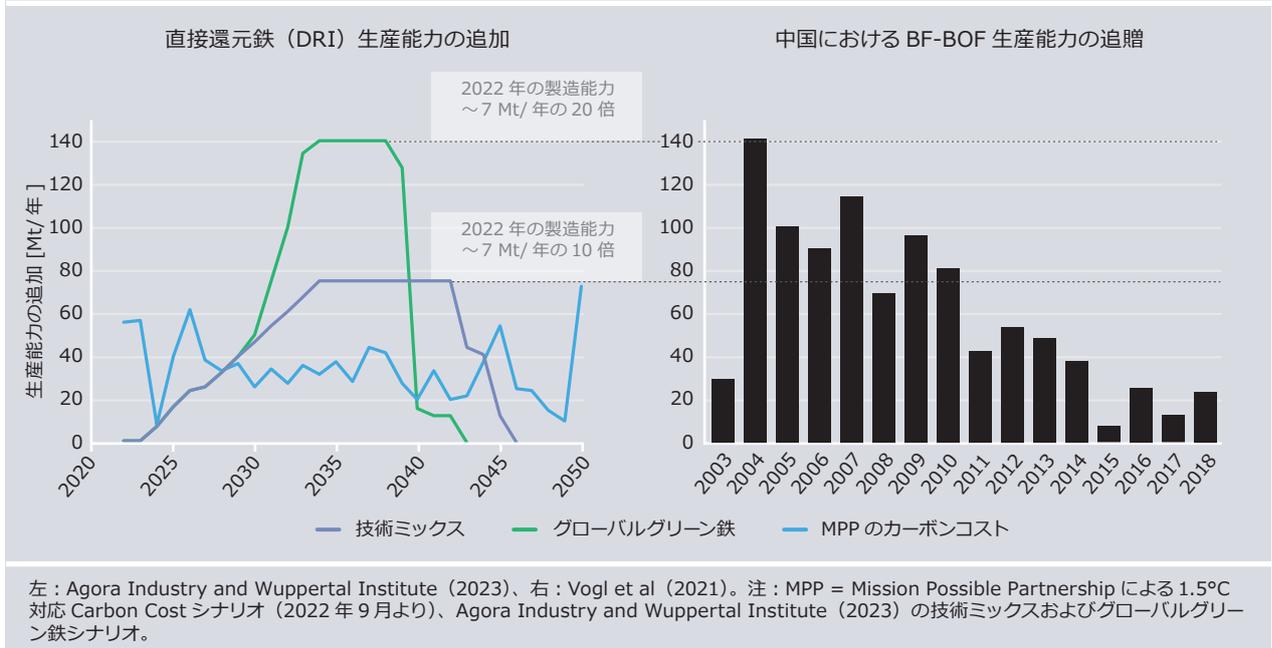
13 McKinsey (2022) によると、製鋼で使用する HBI の再加熱には、ホットチャージが可能な統合 DRI 生産と比較して 100 ~ 150 kWh が必要となる。

14 先進国二国間の戦略的パートナーシップの既存の例としては、韓国とオーストラリアの間の低排出ゼロ技術パートナーシップがある（オーストラリア政府 2021）。両国は、水素供給、低排出鉄鋼、鉄鉱石、さらには炭素回収・利用・貯蔵の分野で、既存および革新的低・ゼロ排出技術に関する協力を合意した。

7 直接還元鉄（DRI）プラントのエンジニアリングおよび建設能力が現在の主要なボトルネックであり、世界の鉄鋼産業の脱炭素化のペースを決めるため、大規模なスケールアップが必要である

世界の鉄鋼業の変革を加速させるには DRI の大規模なスケールアップが必要

図 13



DRI の普及が世界の鉄鋼産業の脱炭素化のペースを決める

DRI プラントの普及速度が、世界の鉄鋼産業の脱炭素化の大幅な加速を実現する重要な要因となる。我々のシナリオが他の 1.5°C 対応シナリオと異なる点の一つは、野心的な市場拡大の後に、DRI の生産能力が大幅に増強されることである（図 13 参照）。グリーン鉄貿易のメリットを考えると、経済的観点からは理にかなっている。しかし、これも実現可能なのだろうか。

今日の DRI 技術の市場は小さく、非常に局所的である

現在、ガスベースの DRI プラントの市場は 97% が二社の技術プロバイダーのみで占められている : Midrex® (80%) と Tenova HYL (17%) である (Midrex 2022a)。DRI プラントを建設するエンジニアリング会社に関しては、Tenova HYL は DRI プラントの設計・建設も行っており、Midrex® は SMS グループおよび Primetals とのライセンスモデルを採用している。そのため現在、ガスベースの DRI プラントを建設できる定評のある主要な技術サプライヤーは三社しかない。2011 年～2020 年にかけて、50 Mt の

ガスベース DRI の生産能力が構築されたが、これは年平均 5 Mt の建設能力であることを示している (Midrex 2022a)。

DRI のエンジニアリングと建設能力が変革の加速における最大のボトルネック

専門家へのインタビューに基づくと、今日の DRI のエンジニアリングと建設の能力は年間 6 ~ 8 Mt と推定される。野心的な基本ケースでは、2030 年までに約 70 Mt の水素対応 DRI 生産能力を追加構築できると推定している。水素対応の DRI プラントの現在の 2030 プロジェクトパイプライン (開発計画) は 84 Mt で、すでに推定の 70 Mt を超えており、これ以上の措置なしに現在のプロジェクトパイプライン (開発計画) を実現できるかが疑問視されている (Agora Industry, Global Steel Transformation Tracker)。さらに、これは 1.5°C 対応経路において 2030 年までに必要とされる 120

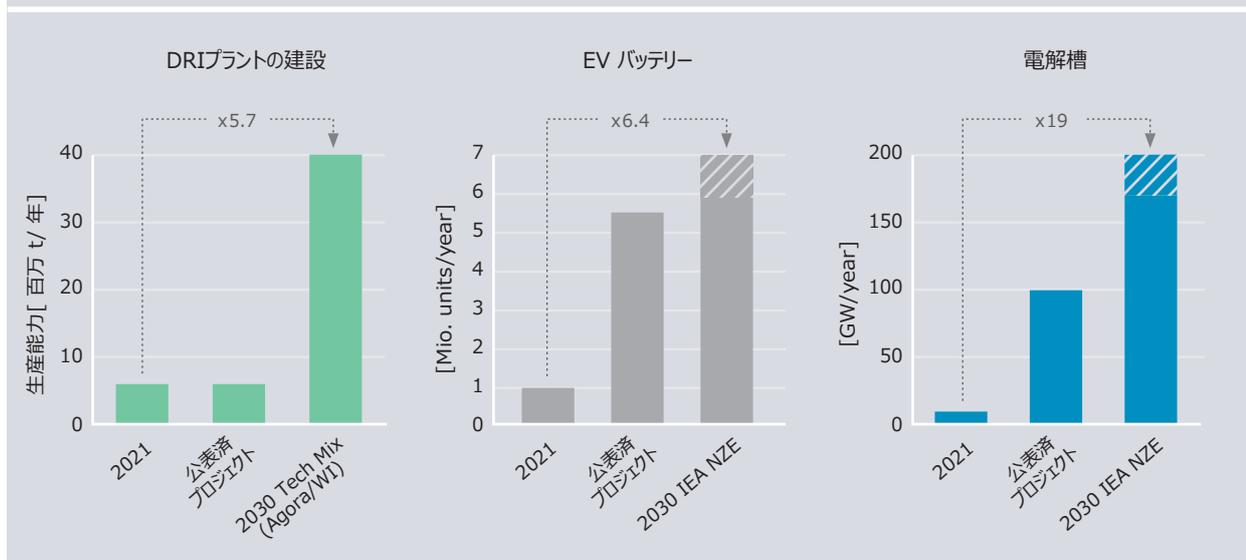
~ 150 Mt の追加 DRI 生産能力のおよそ半分に過ぎない (知見 14 を参照)。このように、既存事業者による生産能力増強により、2030 年までに最大 100 Mt の DRI 増設が可能になると試算しているが、急増する DRI プラント需要の動向に対応するためには、さらなる解決策が必要となるであろう。

DRI の普及を進めるためのソリューションが利用可能

この生産能力のボトルネックを解消する鍵となる解決策の一つは、DRI プラントを建設するためにエンジニアと建設作業員を再訓練することである。全体として、世界の鉄鋼産業は、専門的なエンジニアリングや建設能力を欠いているわけではない。さらに、DRI プラントは設計と建設において、BF-BOF プラントと比べて必ずしも複雑であるわけではない。再訓練を行い、現在 BF-BOF の構築とリライニングに特化しているエンジニアリング

我々のシナリオにおける直接還元鉄の普及：IEA NZE シナリオで選択されたグリーンエネルギー技術の普及との比較

図 14



自らの分析およびIEA (2023) に基づきAgora Industry (2023) が作成。注：この比較では、潜在的な技術採用S 字曲線の初期段階にあるクリーンテクノロジーを選択した。2030 年技術ミックス= 鉄鋼セクターの技術ミックスシナリオ。IEA NZE = IEA (2023) に基づくIEA ネットゼロ排出シナリオ。2030 年IEA NZE 目標範囲は、需要変動の可能性に対応するためある程度の余力を示している。

と建設能力を、DRI プラントの設計と建設に利用できるようにする必要がある。例えば、2004 年に中国だけで 140 Mt の BF-BOF 生産能力が増強されたが、これは我々のグリーン鉄シナリオにおける 2030 年代半ばの世界の年間 DRI 生産能力増強量に相当する（図 13 参照）。もう一つ鍵となるソリューションは、水素ベースの DRI 技術の分野における新規市場参入者である¹⁵。

1.5°C 対応シナリオにおける DRI の普及速度は他の主要テクノロジーと同様

技術採用曲線の初期段階に位置する DRI 技術に関しては、その長期的な普及速度を予測することは難しい。ただし、2050 年までの IEA のネットゼロエミッション（IEA NZE）シナリオと比較すると、我々のシナリオの普及速度は、EV バッテリーなどの他のクリーン エネルギー技術と同様であり、電解槽よりも遅い（IEA 2023、図 14 を参照）。これらの技術は完全に比較できるものではないかもしれないが、EV バッテリーや電気分解装置の例は、産業界と政府が協力して主要技術の普及に取り組んだ場合に何が可能かを示している。

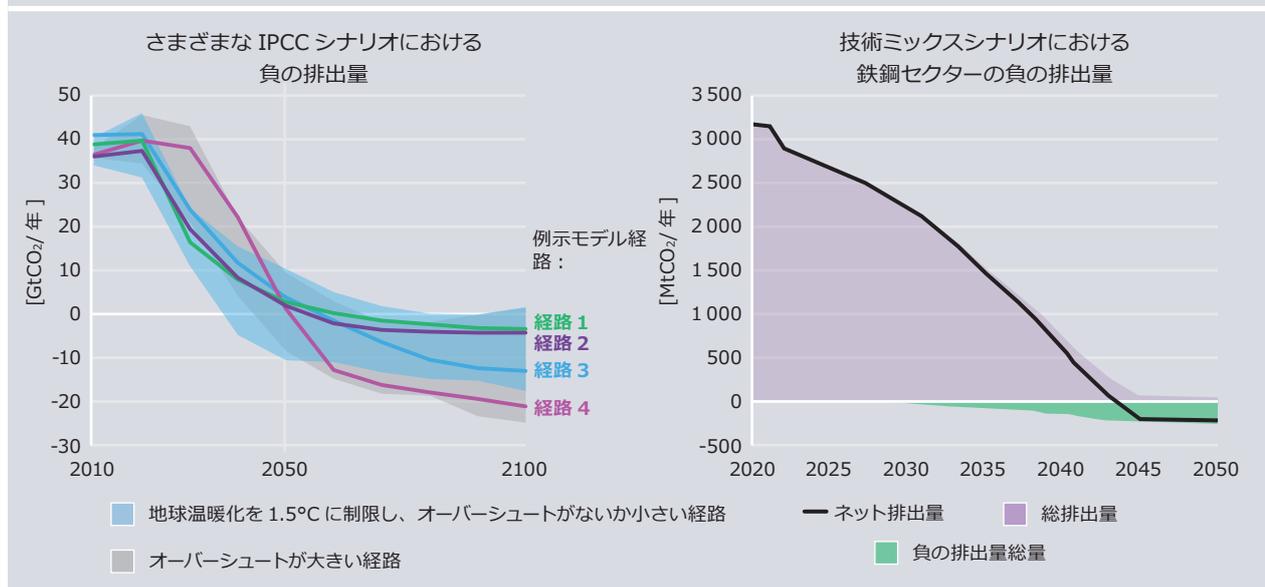
国際的なグリーン鉄貿易と DRI の加速的普及の組み合わせは、大きな破壊的可能性を秘めている。我々の技術ミックスのシナリオでは、現在から 2035 年までの年間 DRI 導入が 10 倍となり、世界の鉄鋼セクターは 2044 年までに実質ゼロに到達する。我々のグローバルグリーン鉄シナリオでは、2035 年までに DRI の年間普及が 20 倍に増加し、2040 年までに実質ゼロに到達する。現在、実際の普及速度を予測することは困難であるが、すでに明らかになっているのは、これに近い普及速度が実現すれば、化石由来のレガシーテクノロジー（知見 4、9、11 を参照）が座礁資産になってしまう大きなリスクがあることである。

15 例えば、Circored、POSCO、Primetals は、流動層反応器を用いる革新的な水素ベースの DRI プラントの商業化に取り組んでいる。この技術は 2030 年までの商業化が期待されている。

8 鉄鋼セクターは、CCS付きバイオエネルギー（BECCS）を活用してネガティブエミッション（負の排出）に貢献できる

さまざまな IPCC シナリオ（左）と我々の技術ミックスシナリオ（右）における負の排出量

図 15



IPCC 2018 に基づく（左）および Agora Industry and Wuppertal Institute (2023)（右）

地球温暖化を抑えるにはネガティブエミッション（負の排出）が必要

地球温暖化をパリ協定に適合したレベルに抑えるためには、何よりもまず温室効果ガス排出の迅速な削減が必要である。さらに大気からの二酸化炭素の除去による負の排出も求められる。これには主に次の二つの理由がある：(1) GHG 排出量を実質ゼロにするために、削減できない最後の残留排出量（畜産、セメント・石灰生産など）¹⁶を相殺すること、および (2) 事実上すべての 1.5°C 対応

16 避けられないこれらの残留排出には、畜産からのメタン排出や、回収率が不完全な CCS によって完全には軽減できないセメントや石灰の残留プロセス関連排出がある。

シナリオで予測されているように、大気中の CO₂ 排出量のオーバーシュートを補正すること（IPCC 2018 を参照）である¹⁷。

二酸化炭素除去方法の幅広いポートフォリオが必要

主要な 1.5°C 対応シナリオにおける二酸化炭素除去（CDR）の規模はかなり異なり、2050 年までの除去量の範囲は年間 1.9 GtCO₂（IEA 2021）および 4.5 GtCO₂（IRENA 2022b）から 3.5 ~ 16.5

17 2°C を大きく下回る経路では、前述の理由により二酸化炭素の除去も必要となる。

GtCO₂ (IPCC 2018) である¹⁸。植林のような自然に基づく CDR の解決策は、土地の不足が深刻化していることや、著しい炭素の蓄積と隔離機能を持つ生態系に地球温暖化が悪影響を及ぼすことから、限定的である。そのため、直接大気炭素回収・貯蔵 (DACCS) や BECCS などの技術的な CDR 解決策が自然による吸収を補完するために必要とされる。鉄鋼セクターは、BECCS を活用した負の排出で寄与できる可能性がある (図 15 参照)。

実質ゼロを超えて—鉄鋼セクターは BECCS を介して負の排出に貢献できる

BECCS の基本的な機能は単純である：バイオマスは成長段階で大気から CO₂ を吸収する。鉄鋼業が還元剤として、または熱を発生させるために生物起源の炭素を使用し、その後に発生した CO₂ を貯蔵すれば、負の排出となり、大気や炭素循環から CO₂ を効果的かつ恒久的に除去できることになる。しかし、BECCS が負の排出にできるかどうかは、鉄鋼セクターに関係なく、二つの主要要因によって制限される。すなわち、バイオマスの世界的な

供給が限られていることと、バイオマスが様々な最終用途に最も効率的にいかにかに配分されるかということである。

競合する土地利用オプションのため、持続可能なバイオマス利用は限られる

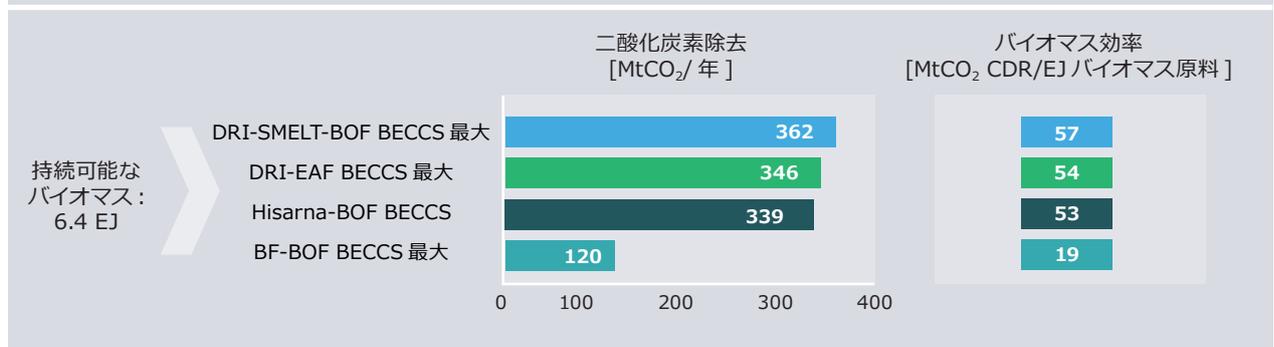
土地は希少な資源であり、世界人口の増加、動物性タンパク質の継続的な消費、都市化、気候変動による生産性への悪影響、そして生物多様性の損失の傾向を逆転させる必要性により、土地利用競争は将来的に激化することが予想される (Agora/WI 発表予定)。バイオマスの採取は、それが何に使用されるかにかかわらず、生態系や炭素循環に有害な影響を及ぼすべきではないと仮定すると、BECCS のためのバイオマス利用可能性は限定的であろう。厳格な持続可能性基準を適用した材料およびエネルギー用途の 2050 年までのバイオマス供給量の推定例は、44 ~ 64¹⁹ (ETC 2021) から 102 EJ を上回る (IEA 2021)、さらには 153 EJ (IRENA

18 IEA NZE 2021 のような CDR が最も少ないシナリオでは、2050 年まで最も急激な排出削減を想定している。

19 これは、ETC 2021 (30 ~ 50 EJ) の慎重なケースに基づいたものであるが、材料として使用される林業からの木質バイオマス 10 EJ とリサイクル材料からの 4 EJ を含んでいる。

鉄鋼セクターにおける様々な BECCS 技術の二酸化炭素除去能力
6.4 EJ の持続可能な一次バイオマス利用をする場合

図 16



Agora Industry and Wuppertal Institute (2023)。この図の能力は理論上の最大能力であり、現実には完全に達成することは困難である。バイオマスのライフサイクル排出量は 0 と仮定している。バイオマスからバイオ炭への変換効率は、Hisarna と BF-BOF BECCS ルートでは 60% と仮定した。すべてのバイオマスが一つのルートで使用された場合の BECCS の能力を示すため、それぞれの能力は非累積的である。ETC 2021、IEA 2021、IRENA 2022b をはじめとする文献レビューに基づいて、2050 年までに 64 EJ の持続可能な生バイオマスが利用可能になり、鉄鋼セクターがこのバイオマスの最大 10% を使用すると仮定している。

2022b) の範囲に及ぶ²⁰。我々は保守的で中間的なアプローチを選択し、2050年までに64 EJの持続可能なバイオマスが利用できると仮定している。

最も効率的なユースケースに割り当てられるべき

材料とエネルギーの需要を満たすバイオマスの供給が限られていることを考えると、最も効率的なユースケースへの配分が不可欠である。このためには、エネルギー使用よりも材料使用を優先する、可能な限りバイオマスのカスケード的な利用をする、実行可能な脱炭素化の代替手段が存在する温室効果ガスに中立な操業よりも負の排出を可能とするユースケースとする、という三つの基本原則が重要である。特定の直接材料利用（閉じられた炭素循環における木製品や、紙パルプ、バイオプラスチックなど）はBECCSのユースケースよりも優先されるべきであるが、今日のバイオマス利用のうち直接電化が可能な建物の暖房や道路輸送などの分野における利用分を、BECCSアプリケーションに回すことで負の排出を実現できる可能性がある。

鉄鋼産業が2050年までに6.4 EJの持続可能な一次バイオマス（エネルギーおよび材料利用のためのバイオマス供給全体の10%）を使用するとすれば、年間最大360 Mtの負の排出を生み出せる可能性がある（図16）。しかし現実には、この能力を完全に実現することは難しい²¹。我々の技術ミックスシナリオでは、BECCSベースの鉄鋼生産製法の最終バイオエネルギー消費量の5 EJに相当する6.2 EJの一次バイオマスの使用を想定しており、これは2050年までに年間約240 MtCO₂の負の排出を可能にする。DRIベースのBECCS法またはHIsarna-BOF BECCSと比較して、バイオマス単位あたりの負の排出の生成効率が大幅に低いため、我々のシナリオではBF-BOF法にBECCSは用いない。

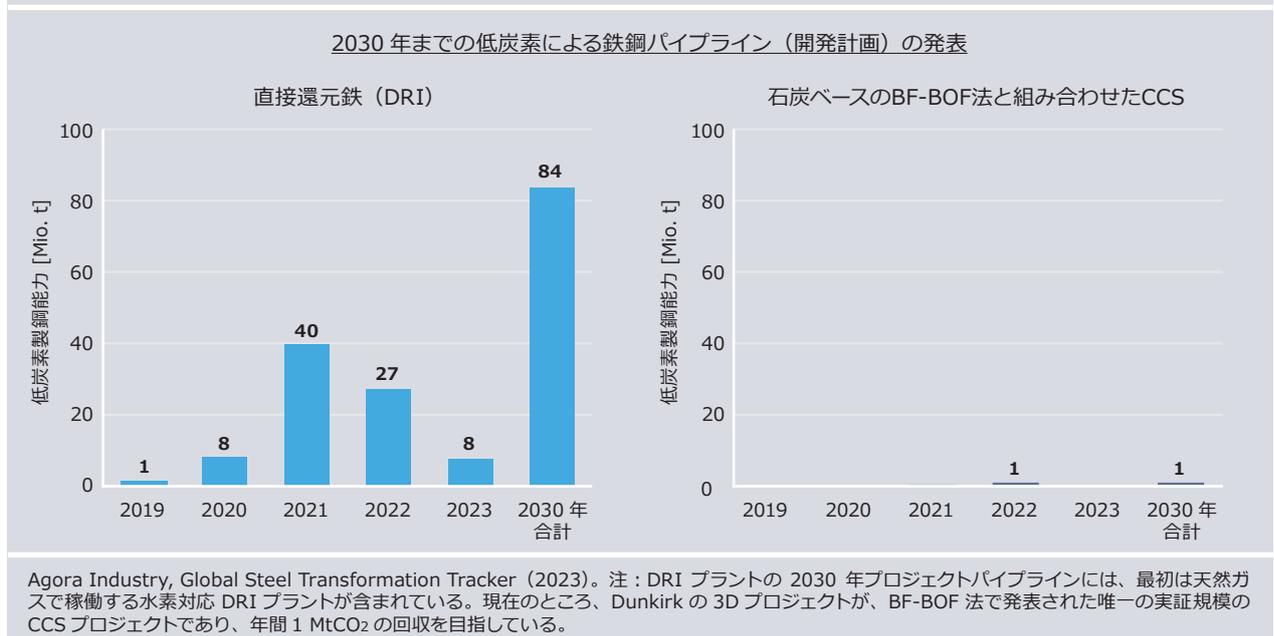
20 詳細については、レポート「Bioresources within a Net-Zero Emissions Economy（実質ゼロ排出経済における生物資源）」（ETC、2021）を参照されたい。

21 これには、バイオマスのライフサイクル排出量がゼロであることが必要であるが、実際にはそうなる可能性は低い。

9 BF-BOF（高炉－転炉法）でのCCSは、世界の鉄鋼業の脱炭素化において重要な役割を果たすことはないであろう

世界の鉄鋼産業はどこへ向かっているのか：2030年までの低炭素による製鋼プロジェクトパイプラインの発表

図 17



BF-BOF法のCCSは夢物語なのだろうか

2020年、IEAの鉄鋼技術ロードマップは、100%自然エネルギー水素ベースの直接還元とBF-BOF CCSに同じ技術準備レベル(TRL 5)を割り当てた。どちらの技術も2030年までに実用化されると予想された(IEA 2020a)。しかし2020年以降、商業規模のプロジェクト発表は二つの技術で著しく異なっている。現在までに、低炭素製鋼能力の構築を計画しているほぼすべての鉄鋼会社が、水素ベースまたは水素対応のDRIプラントを選択している。水素対応のDRIプラントの2030年プロジェクトパイプライン(開発計画)は84 Mtにまで成長し

たが、BF-BOFルートの商業規模のCCSのパイプラインはわずか1 Mtにすぎない(図17参照)。

BF-BOF法での燃焼後CCSでは高い残留直接排出量が生じる

多くの鉄鋼の脱炭素化シナリオでは、BF-BOF CCSは従来のBF-BOF法に比べてCO₂排出量を90%削減できると想定されている(Bataille et al. 2021, MPP 2022, IEA 2022a)。詳細かつ綿密な技術評価(発表予定)に基づくと、理論的には実現可能な技術であるが、この仮定は楽観的過ぎる

ことがわかる²²。詳細かつ綿密な技術評価（発表予定）に基づく、理論的には実現可能な技術であるが、この仮定は楽観的過ぎることがわかる。第一に、BF-BOF 法の中に点在する多くの CO₂ 源を CCS に接続するのは、経済的に実現不可能である可能性が高い。第二に、焼結プラントの廃ガス流中の CO₂ 濃度は 4% から 5% に過ぎず、非常に低い。これら二つの理由により、我々の技術評価（発表予定）では、BF-BOF CCS は、削減対策のない BF-BOF 法と比較して、73% の排出削減（デフォルトケース）しか達成できない可能性が高いと結論付けられている。これは、比較的高い CO₂ 濃度を持つ大きな CO₂ 排出源（コークス炉の燃焼室、

熱風炉、発電所）は炭素回収に接続されるが、焼結プラントや小さな CO₂ 排出源排出は接続されないのが最適であることを表している。これらの設備でも CO₂ 回収は技術的に可能であるが、回収コストが指数関数的に増加する。

BF-BOF CCS プラントは他の技術の破壊的なコスト低下に勝てないであろう

BF-BOF CCS のコストは、電力価格や陸上または海上の CO₂ 貯蔵設備へのアクセスなど、さまざまな要因によって異なる。しかし将来的には、BF-BOF CCS は他の革新技術との競争に敗れるであろう。例えば我々の計算によると、MOE が商業規模で利用可能になり、供給電力価格が 60 USD/MWh になれば、最高の BF-BOF CCS ロケーションよりも競争力を持つことになる（Agora/WI/

22 MPP 2022 では、BF-BOF ルートでの CCS の回収率が 50% しか実現されていないケースが提示されており、90% の回収率が現実的かどうかは疑問である。しかし、彼らのシナリオモデリングでは、90% の CO₂ 削減を想定している。

リスク要因が重なって、BF-BOF ルートと組み合わせた CCS は魅力的ではない 図18

BF-BOF CCS...

... 大量の残留排出量が残る

- BF-BOF CCS は直接 CO₂ 排出量を、BF-BOF 法と比較して73%しか削減できない可能性が高い
- より多くの排出量削減が技術的には可能であるが、経済的に実行可能かどうかは疑問である

... 破壊的な技術コスト開発に勝ち目がない

- 熔融酸化物電解のような直接電化技術が 2030 年代に商業的に利用可能になれば、より安価になる可能性が高い
- コスト要因 (CO₂ の輸送・貯留・残留排出のオフセット) が組み合わさって、BF-BOF CCS は競争力を失うリスクがある

... 上流の排出に対応できない

- 現在、上流の炭鉄メタン漏出による排出量を考慮すると、鉄鋼業の直接 CO₂ 排出量* は約 12% 増加する。
- BF-BOF CCS は上流からの排出に直接対応できず、将来鉄鋼業に規制が導入されれば、BF-BOF CCS のビジネスケースを悪化させる恐れがある

... 環境価値が先導するグリーン市場で長期契約を得られないリスクに直面する

- サプライチェーン (自動車、家電製品など) の脱炭素化に努め、これを顧客へのアピールポイントにしようとする進歩的な企業は、石炭ベースの技術と関わりたくない可能性がある

Agora Industry and Wuppertal Institute (2023). BF-BOF CCS のコストは、どの CO₂ ポイント発生源を回収に含めるか、CO₂ を陸上に貯留するか海上に貯留するかによって大きく異なる。海洋の CO₂ 貯留は、陸上の CO₂ 貯留よりも高価になる傾向がある。*この図は、CO₂ 回収のうち、技術的には可能だが経済的には実行不可能な、焼結工場からの回収も図示している。*現在、GWP 100 の測定に基づくと、原料炭からの上流のメタン排出量は 384 MtCO₂e と推定されている（独自の計算、IEA Methane Tracker 2022）。

Lund 発表予定)。国際的なグリーン鉄貿易が勢いを増せば、自然エネルギーが豊富な国で水素投入コストが比較的安価となり、コスト面で BF-BOF CCS 生産と競合し始める可能性がある。

BF-BOF CCS は炭鉱のメタン漏出による上流での排出に対処できない

もう一つのリスクは、BF-BOF CCS が炭鉱でのメタン漏出に関連する排出に対処できないことである。原料炭に関連する炭鉱メタン排出量は 2021 年に 12 Mt となっており、このメタン排出量を考慮すると、鉄鋼セクターの GHG 排出量は 384 MtCO_{2e} となり約 12% 増加する (Ember 2023、IEA 2020b、2022d)²³。メタン排出量の一部は削減可能であるが、完全に削減することはできない (IEA 2023)。上流からの排出がグリーンスチールの定義に含まれるようになると、後付けの CCS に依存する鉄鋼メーカーにとって大きなリスクとなり、BF-BOF CCS の経済性を悪化させる可能性が高い。

BF-BOF CCS 法の鉄鋼は環境価値が先導するグリーン市場で長期契約を得られないリスクに直面する

加えて、サプライチェーンの脱炭素化を目指す鉄鋼消費企業が、石炭ベースの技術との関わりを全く望まないというリスクもある。最終消費者にグリーン製品をより高い価格で販売したい企業（例えば自動車や家電製品）は、石炭ベースのプロジェクトに関連していることによる評判の低下を懸念する恐れがあり、自社のブランドアイデンティティや脱炭素戦略と相容れないと考える可能性がある。

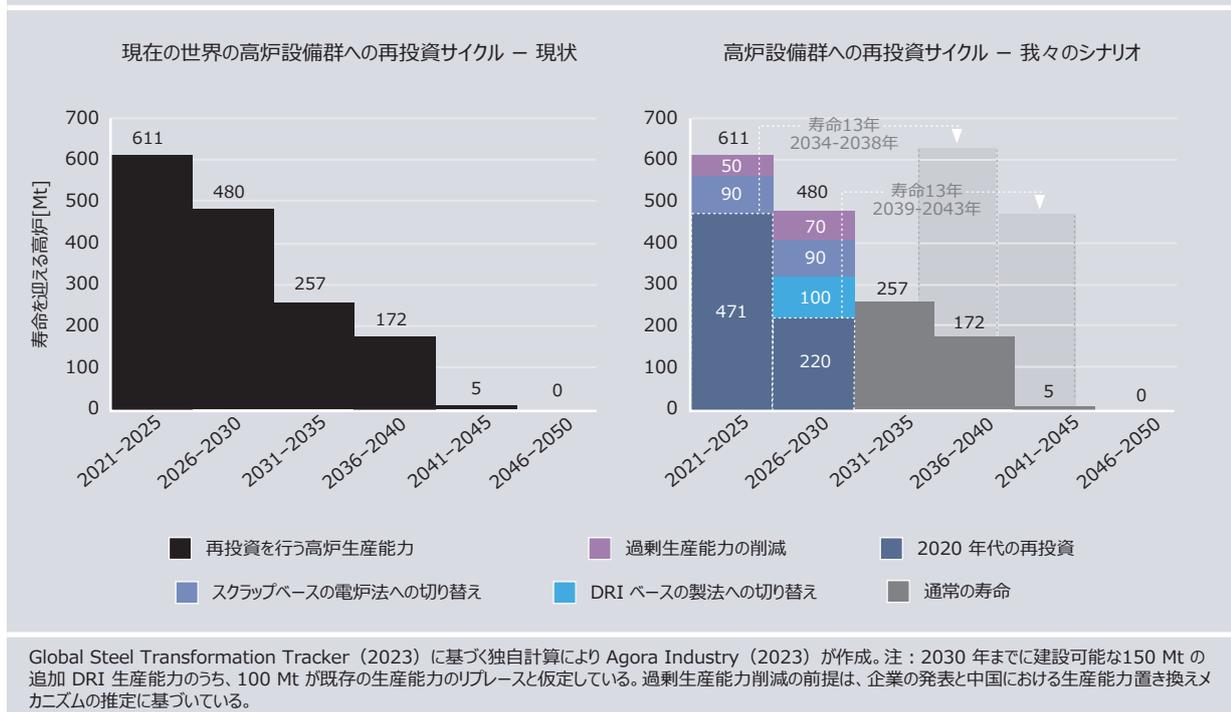
結論として、BF-BOF CCS の将来の可能性を詳細に評価するためには、さまざまなリスク要因を組み合わせる必要がある。将来 BF-BOF CCS が実現しない場合、これは高炉が座礁資産となるリスクに重要な影響を及ぼす (知見 10 および 11 を参照)。

23 この計算は、100 年間のメタンの平均地球温暖化係数、メタン 1 トン当たり CO₂ 32 トンに基づいている (IEA 2020b 参照)。

10 2040年までに90%を上回る既存の高炉を早期閉鎖なしに段階的に廃止できる

2040年までに90%を超える既存の高炉を早期閉鎖なしに段階的に廃止できる

図19



2030年までに70%を上回る既存の高炉に再投資が必要

2020年代は、既設の高炉設備の多くにとって分岐点となる。70%を上回る高炉（生産能力1090 Mt）は設備寿命を迎え、再投資が必要になる。これらの高炉の事業者は、高炉を再整備してその高排出量を10年を越えて固定化するか、あるいは寿命を迎えた高炉を低炭素技術で代替するかの選択を迫られる。理想的には、すべての高炉操業者が後者のオプションを選択することが望ましい。しかし、それは可能なのだろうか？

低炭素技術のスケールアップでは、2030年までに寿命を迎える全ての高炉を代替することはできない

2030年以前に寿命を迎える高炉のリプレイスには主な選択肢が二つある。DRI技術への切り替え、あるいは電炉でのスクラップベースの製鋼である²⁴。しかし、これらの技術を急速にスケールアップさせたとしても、2030年までに1090 Mtの高炉生産能力を置き換えることは現実的に不可能である（図19参照）。

24 詳細な技術評価（発表予定の分析）に基づくと、2030年以前に他の低炭素製鋼技術の商業的な準備が完了し、大幅にスケールアップすることはないと予想される。

最良のシナリオでは、2030年までに建設可能な最大150 MtのDRI生産能力（知見14を参照）のうち、100 MtのDRIが既存の高炉の代替となり、スクラップ供給の増加により、2020年と比較して2030年までに約180 Mtのスクラップベースの製鋼を増やすことができると推定している²⁵。さらに世界の一部の地域では、高炉の生産能力が過剰であるため、リプレースされずに閉鎖される可能性がある。我々は、これによる生産能力の削減は2030年までに120 Mtと見積もっている。全体としては、2020年代に改修が必要な高炉の生産能力約690 Mtが残ることになる。これは、排出量をさらに20年から25年にわたって固定するか、座礁資産を生み出すような大きな問題となるであろうか。答えは簡単に言うとノーである。これは、現実のデータによると、高炉の改修後の耐用年数（平均約13年）が、広く考えられているよりもはるかに短いからである。

高炉改修の寿命は従来の想定よりも短い

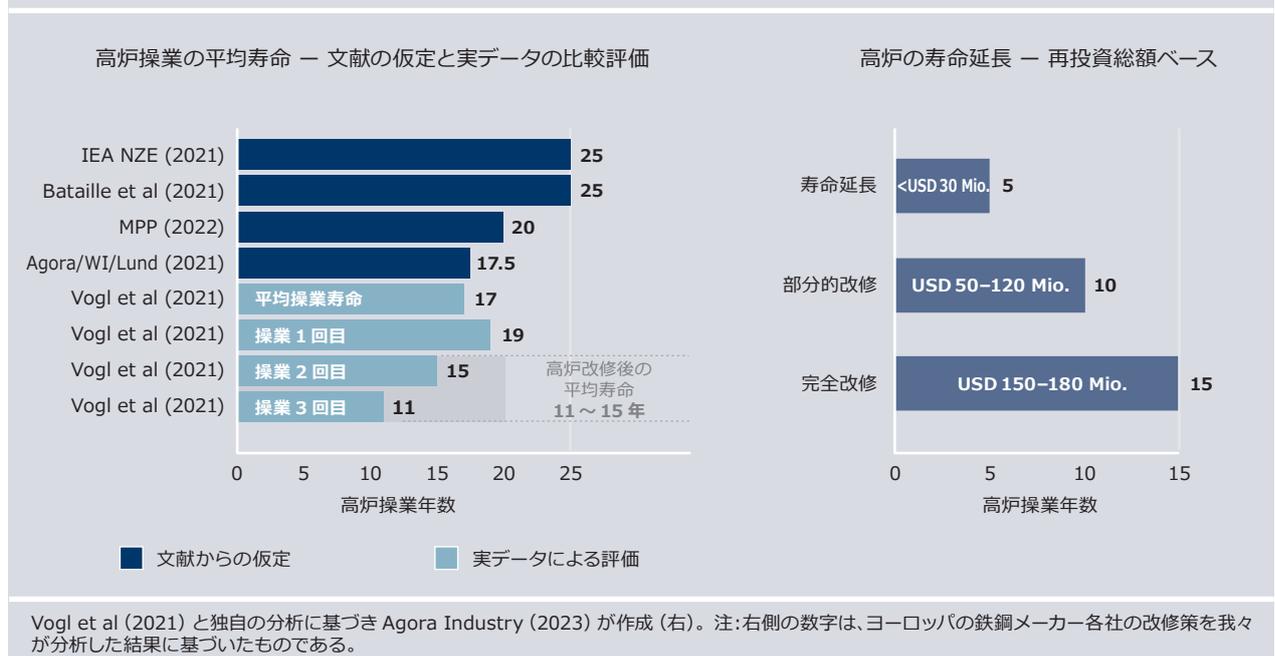
既存の鉄鋼脱炭素化シナリオではほぼすべて、平均的な高炉の操業寿命は20年（MPP 2022）～25年（IEA 2021 および Bataille et al. 2021）の範囲であると仮定している。しかし我々の知る限り、高炉の操業寿命に関するこれらの仮定はすべて文献値に基づいている。

高炉操業の実際のデータセットを評価した唯一の研究によると、高炉の平均操業寿命は17年であると結論づけている（Vogl et al. 2021）。さらに、改修後の高炉の操業寿命は1回目で15年、2回目で11年であり、ほとんどの鋼の脱炭素化研究ですべての高炉寿命に関して一律に想定されている20年～25年よりも大幅に短いことが多い。

25 その他の50 Mtの追加DRI生産能力は新興国で、新規のBF-BOFプラントの代わりに建設されると想定されている（知見11を参照）。

高炉操業の寿命と各種高炉改修方法

図 20



さらに高炉操業者は、異なる寿命の様々な改修手段を選択できる

他にも、耐用年数の延長が短い改修（最長5年）、部分的なリライニング（8年～12年）、全面的なリライニング（15年）など、様々な高炉改修工事がある。改修工事への投資総額は、寿命の延長期間と直接関連している（図20参照）。

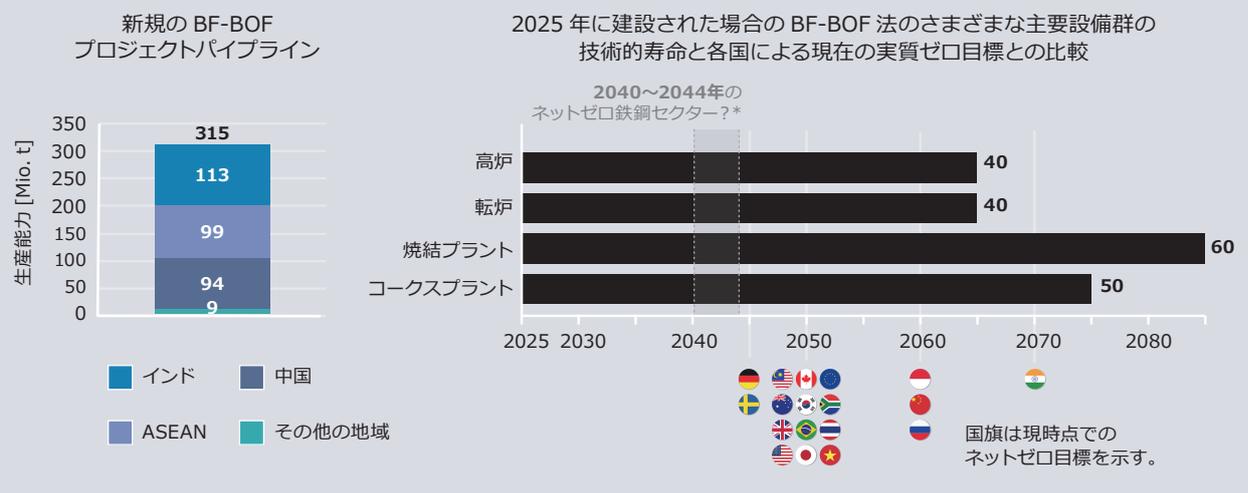
したがって2040年までに90%を上回る高炉が早期停止なしに段階的に廃止される可能性がある

したがって、低炭素技術ではすべての高炉を置き換えるほど迅速にスケールアップできないため、高炉の生産能力のかなりの部分を2020年代に改修しなければならないとしても、より短い寿命と、さまざまな改修措置を選択できることから、2040年までに90%を上回る既存の高炉を早期停止せずに段階的に廃止することができる可能性がある。2043年までに、既存の高炉がすべて早期停止なしに段階的に廃止される可能性がある。世界的な観点からは全般的に、既存の高炉の座礁資産リスクは低い。

11 現時点での新興国における石炭ベースの高炉の2030年までの新規設備パイプラインは、大規模な炭素ロックインと座礁資産リスクに直面している

新規の石炭ベース BF-BOF プラントの現時点でのプロジェクトパイプラインは、大規模な炭素ロックインと座礁資産リスクに直面している

図 21



Agora Industry (2023) の独自の評価と IEA (2020a)、Paul Wurth (2022)。注：現在の高炉-転炉 (BF-BOF) の建設計画は、インドでの発表 (IBEF 2022、GEM 2022、各種プレスリリース) の分析に基づいたものである。東南アジアについては、東南アジア鉄鋼協会のデータに基づく OECD (2022) のデータを使用した。中国については、四半期ごとの地方政府の公的統計を分析した。それ以外の地域のデータは GEM (2022) を出典とする。*2040年と2044年は、グローバルグリーン鉄および技術ミックスシナリオの実質ゼロ達成目標期限である。

今日の新規石炭ベースの製鉄所への投資は、明日の座礁資産になる可能性が高い

2020年代に、温室効果ガス排出実質ゼロにむけた世界の鉄鋼産業の変革により座礁資産がどの程度生み出されるかが決まるであろう。これは、石炭ベースの BF-BOF 法の主要な設備群の技術的寿命が 40 年 (BF および BOF) ~ 50 年 (コークスプラント) または 60 年 (焼結プラント) に及ぶためである。もし BF-BOF CCS が将来実現しなければ (その可能性は現在の観点から高いように思われる (知見 9 を参照))、BF-BOF 法のこれらの主要設備

群は、技術的な寿命が終わる前に早期廃止されるという大きなリスクに直面する。国別の実質ゼロ目標とは別に、鉄鋼セクター全体がどれだけ早く脱炭素化するかという問題もある。国際的なグリーン鉄貿易 (知見 5) や MOE の普及のような破壊的な進歩があると、2020年代に入って建設される新規石炭ベースの BF-BOF プラントは、2040年になると強い社会的圧力と炭素ロックインおよび座礁資産リスクにさらされることになる。

新興経済国における BF-BOF 新工場の 2030 年プロジェクトパイプラインの規模は大きい

主要新興経済国の鉄鋼需要は、増加する人口によるインフラ・開発ニーズを満たすために、依然として伸びると予測されている (IEA 2022a, MPP 2022)。我々は、現時点での新興経済国における石炭ベースの新 BF-BOF プラントのプロジェクトパイプラインを約 315 Mt と推定している。現在まで、インド (113 Mt)、ASEAN²⁶ 諸国 (99 Mt)、中国 (94 Mt) がプロジェクトパイプラインの 97% を占めている (図 21 参照)²⁷。

2020 年代は世界の鉄鋼産業としての岐路

2020 年代は新しい製鉄所への投資の岐路となる。2020 年代は、何十年にもわたって大量の CO₂ 排出量を継続し、カーボンロックインと座礁資産の高いリスクを負う経路か、あるいは将来性のある雇用を生み出す実質ゼロ対応の投資の経路かの選択を迫っている。しかし、BF-BOF 法での後付けの CCS の役割に関する過度に楽観的な仮定のために、このことはまだすべての 1.5°C 対応鉄鋼脱炭素化シナリオで一般的な常識にはなっていない。2050 年までに実質ゼロを目標としている国や鉄鋼企業にとって、BF-BOF パイプラインの CCS が実現しない場合、カーボンロックインと座礁資産が大きなりリスクとなる。また、2050 年以降の実質ゼロ実現を目標としている国の鉄鋼企業にとっては、政府の実質ゼロ目標が今後数年間前倒しされたり、世界の他の地域で鉄鋼産業の脱炭素化が大幅に加速したりした場合、カーボンロックインと座礁資産のリスクが増大する。

長期的なリスクとは別に、鉄鋼生産資産の世界的な過剰生産能力に関連する短期的なリスクもある。例えば、東南アジア鉄鋼協会 (SEAISI) によると、ASEAN-6 諸国の設備利用率はすでに比較的 low、特に古くからの鉄鋼生産国では低調である (OECD 2022)。このような背景から、石炭ベースの製鉄所の新設は、過剰設備の問題に対処しない限り、短中期的な収益性に関するリスクにも直面する恐れがある (OECD 2022)。

2030 年までに石炭からクリーンへの投資先変更を開始するための解決策が必要

新興経済国の新規製鉄所プロジェクトパイプラインを石炭からクリーンに移行させることは非常に大きな課題であるが、得るものは大きい。自然エネルギー、低炭素水素、および関連インフラへの大規模な投資をはじめとするさまざまな実現要因を導入する必要がある。

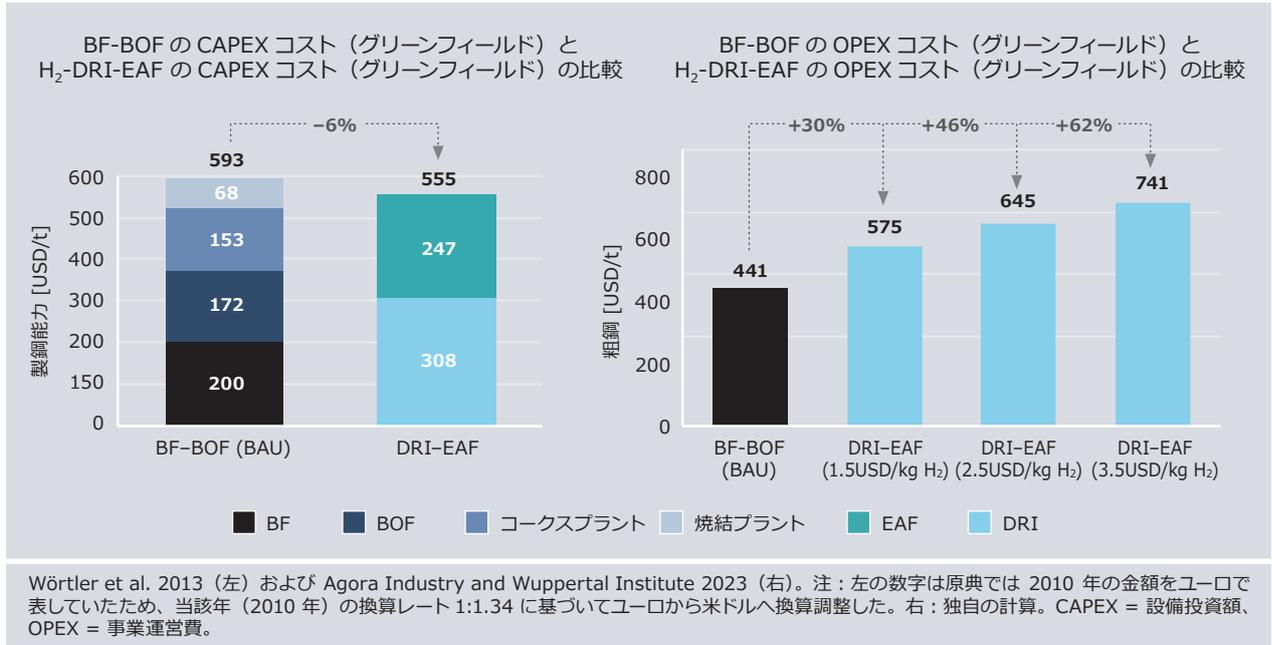
もう一つの重要な問題はコストであろう。投資面では、インド・東南アジア・中国の新規 BF-BOF プラントに割り当てられる設備投資 (CAPEX) を DRI プラントに充てることが考えられる。支出は同様であるため、追加費用は必要ない。真の課題は、水素ベースの DRI プラントのための追加的な事業運営費 (OPEX) に対処することであろう。その範囲は 30% ~ 62% であり、低炭素水素の将来のコストに大きく依存する (図 22 参照)。OPEX のコストギャップに対処する適切な解決策がなければ、コストは引き続き重要な問題となる。

26 ASEAN は東南アジア諸国連合の略である。

27 インドと東南アジアの新規 BF-BOF プラントは純製鉄能力が増加することを意味するが、いわゆる生産能力スワップメカニズムの結果、中国は近年、能力追加分よりも多くの高炉能力を廃止している (公開されている中国の地方政府のデータに基づく著者らの分析)。

新興経済国への投資を石炭からクリーンなものへシフトするには、高い OPEX コストの解決への対応が必要

図 22



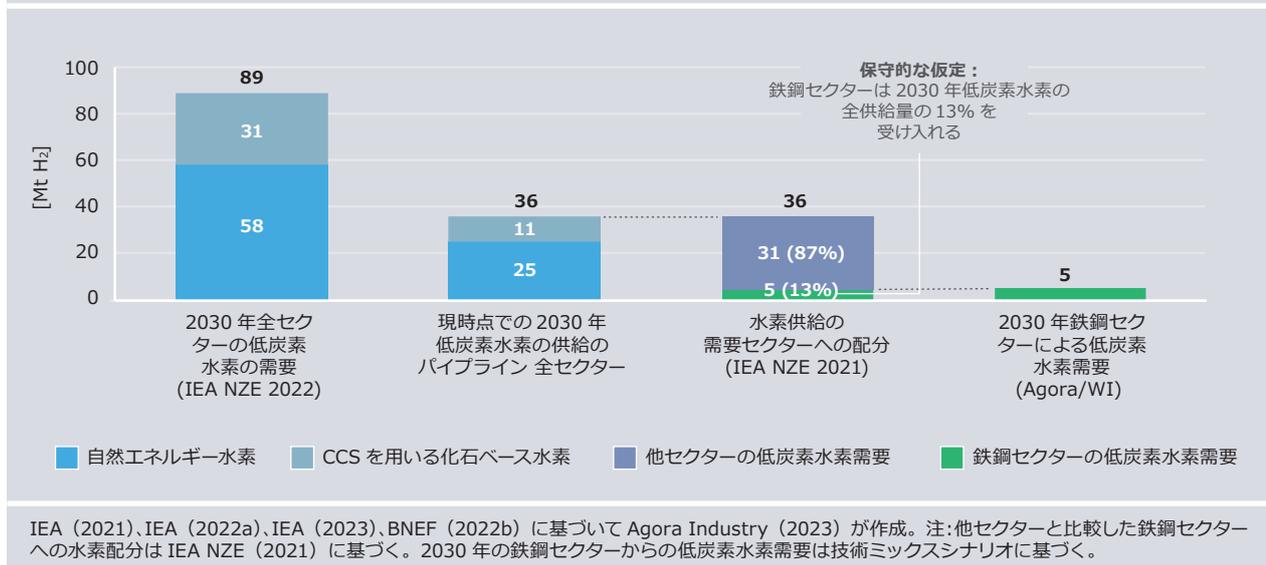
国際協力が鍵

投資割合を増やして実質ゼロ対応の投資にシフトさせるためには、国際協力が必要である。協力の重要な分野には例えば、新興経済国を対象とした気候資金の大幅な増額、資本コストを低下させるリスクの排除政策、歪のない貿易協定、共同技術開発などがある。課題は膨大だが、2030 年以前に新興経済国へのネットゼロ対応投資が可能であることを示す野心的な関係者がすでに現れている。例えば、SOGDC は 2022 年に、2025 年までにマレーシアに水素対応 DRI ベースの一貫製鉄所を新たに建設すると発表した。この製鉄所は最初は天然ガスで稼働し、低炭素水素が利用可能になればそれを使用する (Borneo Post 2022)。鉄鋼プラント投資のより多くを石炭からクリーンへシフトさせることは、国際協力によって確かに可能である。

12 低炭素水素の限られた供給が「後悔のない用途」に振り向けられれば、低炭素水素の供給は世界的な鉄鋼セクターの脱炭素化の大きなボトルネックにはならないであろう

2030年低炭素水素供給パイプラインと、我々のシナリオにおける2030年までの鉄鋼セクターからの低炭素水素需要の比較

図 23



低炭素水素の供給は鉄鋼セクターの脱炭素化にむけた変革の大きなボトルネックになるか

DRI法での水素ベースの製鋼には、低炭素水素が必要である。現在まで、低炭素水素の生産量は1 Mtに満たない (IEA 2022e)。このことは、低炭素水素の供給不足が世界の鉄鋼業の脱炭素化を遅らせたり、減速させたりする可能性があるのかという疑問を投げかける。簡単に言えば、必ずしもそうではない。

2030年の低炭素水素プロジェクトパイプラインは急速に進展しているが、最終的な投資決定は未だ少ない

2030年の低排出水素の需要は大きいと予測されているが、プロジェクトパイプラインも急速に増大している。IEAは最新のIEA NZEで、2030年までにすべてのセクターで89 Mtの低炭素水素供給が、1.5°C対応経路のために必要になると予測している。このうち自然エネルギー水素で約2/3、CCS付き化石燃料由来水素で約1/3が供給されるとIEAは予測している (IEA 2022a)。

低炭素水素プロジェクトの現時点での2030プロジェクトパイプラインは36 Mtに達する。現在発表されている自然エネルギー水素は2030年までに25 Mt (BNEF 2022b)、CCSによる化石燃料由来水素は11 Mt (IEA 2023)になる。これは必要な89 Mtの40%しかカバーしていないが、低排出水素プロジェクトのパイプラインは急速に成長している。例えば、36 Mtというパイプラインの数値は、低排出水素パイプラインが24 Mtであった2022年9月から50%増加したことになる。これは前年と比べてすでに40%の増加を記録している (IEA 2022e)。しかし、2022年10月までのIEAの水素プロジェクトデータベースに基づく、最終投資決定の段階に達しているのは、合計4 Mtの水素プロジェクトのみである (IEA 2022f)。

世界レベルでは、低炭素水素供給は世界の鉄鋼業の変革のボトルネックにはならないかもしれない

やや驚くべきことであるが、2030年までの低炭素水素の供給は、世界の鉄鋼業の脱炭素化のボトルネックにはならないかもしれない。我々の二つの鉄鋼脱炭素化シナリオでは、鉄鋼セクターの低炭素水素需要は2030年までに5 Mtに達する。これは、すべてのプロジェクトが完全に実現された場合、現在の低炭素水素プロジェクトパイプラインの13%に相当する。偶然にも、13%はIEA NZE 2021が2030年に鉄鋼セクターに割り当てた低炭素水素の割合であり、後述するように非常に保守的な仮定である。

鉄鋼セクターの石炭から水素への切り替えは、相対的に最大のCO₂削減手段となりうる

低炭素水素は、直接電化という代替手段が可能であり、現在すでに利用可能な分野では使用すべきではないという科学的コンセンサスができつつある (例えば Liebreich 2022、Agora Energiewende 2022)。しかし、効率性の考慮はそこでやめるべき

ではない。実際これは、「後悔のない (no-regret)」用途に低炭素水素をどのように割り当てるかという問題にも関連している。石炭から水素燃料への切り替えが (鉄鋼のように) 可能な場合は常に、天然ガスから水素への切り替え (肥料)、あるいは石油から水素への切り替え (海運におけるアンモニアやメタノール) に比べて、はるかに大きなCO₂削減効果がある (図24)。

確かに、気候緩和への影響だけが水素の割り当てに関する基準ではない。海運・航空・化学用の合成燃料を製造し、これらのセクターにおける気候中立性を可能にする技術革新も重要である。しかし鉄鋼産業は、利用可能な低炭素水素供給量の13%強しか使用しない、非常に効果的な用途なのである。鉄鋼産業にとって、主なボトルネックは水素供給ではなく、それを利用できるDRIプラントの迅速な普及になる可能性が高い (知見7と14を参照)。

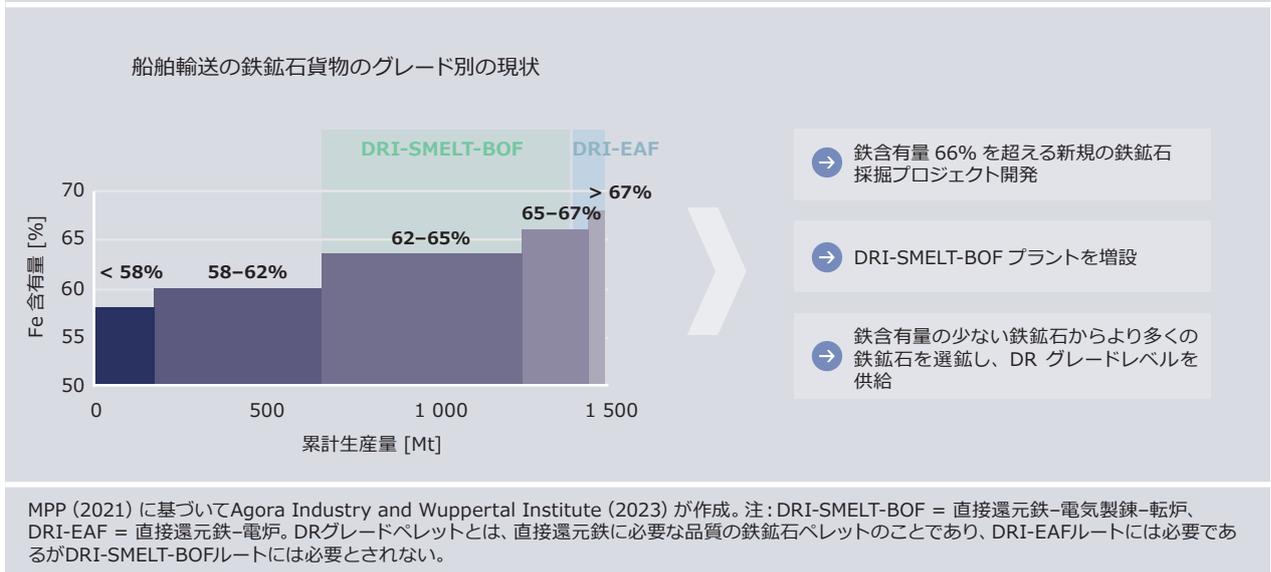
鉄鋼メーカーには脱炭素化にむけた移行を開始するにあたって2030年までに実施できる幅広い選択肢がある

世界レベルでは、低炭素水素の供給は鉄鋼産業にとって大きなボトルネックにはならない可能性が高いが、これは特定の地域の状況によって、特に短期的には異なることがあるだろう。水素供給とは別に、水素インフラへの製鉄・製鋼拠点の接続が極めて重要である。しかし、そのような接続が困難な場合でも、鉄鋼の脱炭素化に向けた変革を今すぐ開始するための選択肢がいくつか存在する。水素を必要としない第一の選択肢は、高炉を電気アーク炉で代替することである。鉄鋼メーカーが特定のユースケースで一次鋼の代替となる高品質の二次鋼を生産する場合、これは、クリーンなスクラップフローを確保するスクラップリサイクルのより良い実践の動機づけとなり、その結果循環性を向上させると同時に、二次鋼の新しい市場セグメントの開拓につながる。Algoma Steel、Voestalpine、Liberty Steelなどのいくつかの鉄鋼メーカーはすでに、さまざまなサイトでこ

13 DRグレードの鉄鋼石ペレットの入手可能性は、世界の鉄鋼業の脱炭素化の主要なボトルネックとなる可能性がある。解決策は存在するが、積極的な取り組みが必要である

直接還元製鉄用の品質（DRグレード）のペレットのボトルネックにどう対処するか

図 25



DRグレード（水素直接還元法の原料となる鉄鋼石の品質）のペレットの供給が世界の鉄鋼業の脱炭素化にむけた変革の主要なボトルネックになる可能性

DRグレードのペレット供給は、水素ベースの製鋼への転換における主要なボトルネックとしてしばしば言及される（McKinsey 2021、Midrex 2022b、IEEFA 2022a）。現在の状況はどのようなものであり、この問題を解決する策はあるのだろうか。

水素ベースのDRI-EAF法への切り替えには、いわゆるDRグレードのペレットが必要

短期的には、水素ベースのDRI-EAF法は、一次製鋼のCO₂排出量を大幅に削減する最も有望な選択肢となるであろう。DRI-EAF法には、いわゆるDRグレードのペレットが必要である。低不純物(脈石)と高鉄含有量(>66%)というDRグレードに対するペレットの要件は、低品位の鉄鉱石の選鉱を行わない場合、高品質の鉄鉱石しか適さないことを意味する（Midrex 2022a、IEEFA 2022a）。

しかし今日、DRグレードのペレットは鉄鉱石出荷の3～4%のみである

今日、海上輸送される鉄鉱石の3～4%のみが、DRI-EAF法に適したDRグレードのペレットである（MPP 2021、Vale in IEEE 2022a）。この問題を解決しない限り、これはDRI-EAFプラントの普及と運用にとって主要なボトルネックとなるリスクがある（知見14も参照）。

DRグレードの鉄鉱石の供給は、DRグレードのペレットの需要に応えることができるか

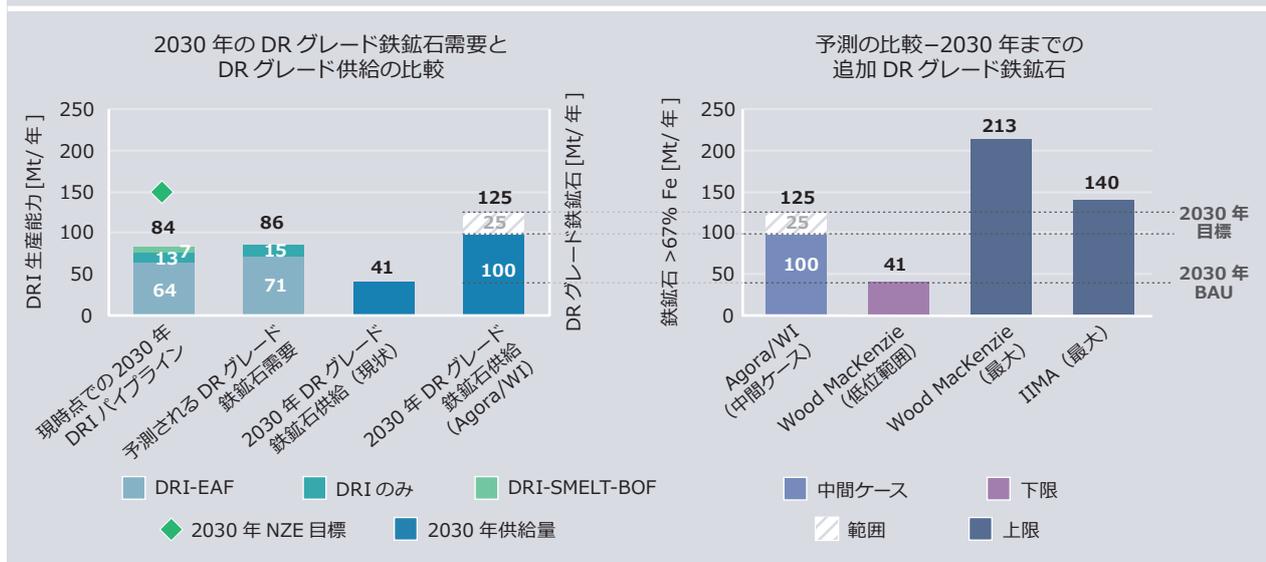
重要な問題の一つは、急速に増大するDRグレードペレットの需要を満たすために、2030年までにどれだけDRグレードの鉄鉱石を追加供給できるかということである。現在発表されている2030年DRI-EAFプロジェクトパイプラインでは、64～

77 MtのDRI-EAFの追加生産能力が見込まれているが²⁸、それには年間71～86 MtのDRグレードのペレットが適切な鉄鉱石から取り出されることが必要となる。これは、現時点での2030年の新しい鉄鉱石採掘プロジェクトパイプラインで供給可能なDRグレード品質の鉄鉱石の量をすでに超えており、主要なボトルネックである（図26参照）。このボトルネックを解消する策は存在するが、積極的に取り組む必要がある。

28 これらの数字は、DRI-EAFおよびDRI専用に必要な量のみを指しており、DRI-SMELT-BOFでの必要量はDRグレードのペレットを必要としないため、除外されている。

緊急に対策がとられない限り、2030年のDRグレード鉄鉱石の需要はDRグレード鉄鉱石の供給を大幅に上回る

図 26



IEEFA (2022a) に基づいた独自分析、Agora Industry and Wuppertal Institute (2023) が作成。注：我々の想定では、DRI 設備の利用率は80%で、DRI-EAF法では1.4 tのDRグレードペレットと粗鋼1 tあたり0.2 tのスクラップが必要になるが、DRI-SMELT-BOF法ではDRグレードペレットは必要ない。「DRIのみ」のプラントはDRI-EAFと想定。さらに、既存のDRグレードのペレット供給はすべて既存のDRIプラントで使用されると想定。

DRグレードの鉄鉱石を供給できる鉄鉱石採掘プロジェクトをさらに進める必要がある

Wood MacKenzie による 2021 年の鉄鉱石プロジェクトレビューに基づき IEEFA は、2030 年までに DR グレードの品質を供給できる鉄鉱石採掘プロジェクトの現時点でのプロジェクトパイプラインは年間 41 ~ 213 Mt であると結論付けている (IEEFA 2022a)。下限の 41 Mt は、2030 年までに実現する可能性が非常に高いかまたは可能性が高いプロジェクトに基づいているが、推定値の上限は可能性のあるプロジェクトも含まれる。他の予測では、最大供給量を 2030 年までに 140 Mt (IIMA 2021) としているものもある。新しい鉄鉱石採掘プロジェクトのリードタイムが長いことを考えると、可能性のあるプロジェクトが 2030 年までにすべて実現する可能性は低い。したがって我々は、2030 年までに DR グレードの品質の鉄を年間 100 ~ 125 Mt 供給することは野心的な目標であるが、積極的に追求すれば達成可能であると推定している。

革新的な水素ベースの製鋼法により、DRグレードペレット供給というボトルネックの緩和は可能

DRI-EAF 法が、水素ベースの製鋼の唯一の選択肢ではない。DR グレードのペレットを必要としない革新的な水素ベースの DRI ルートがある。例えば DRI-SMELT-BOF 法では、62% ~ 65% の鉄含有量の鉄鉱石による従来の BF グレードのペレットが使用可能である。DRI-SMELT-BOF

初の商業規模プラントの受注が成約に至っている (Thyssenkrupp 2023)。現在の 2030 年パイプラインは年間 7 Mt である。鉄鋼メーカー以外にも、BHP や Fortescue などの鉄鉱石採掘会社が Primetals と提携して、より幅広い鉱石品質を DRI ベースの製鋼法で利用できるようにするための電気製錬ソリューションの開発とテストを現在行っている (BHP 2023、Primetals 2022)。公表済の DRI-EAF 投資を DRI-SMELT-BOF 投資に一部シフトすれば、DR グレードペレット供給というボトルネックを緩和するのに役立つであろう。

さらに、より広範な鉄鉱石を使用できる流動層反応器に基づく革新的な水素ベースの DRI 法が開発されている (Metso Outotec 2021、POSCO 2022、Primetals 2022)。この技術ルートの商業利用可能性は、現在のところ 2030 年頃になると予想されている。

鉄鉱石選鉱が DR グレードペレット供給を増やすもう一つの重要な選択肢

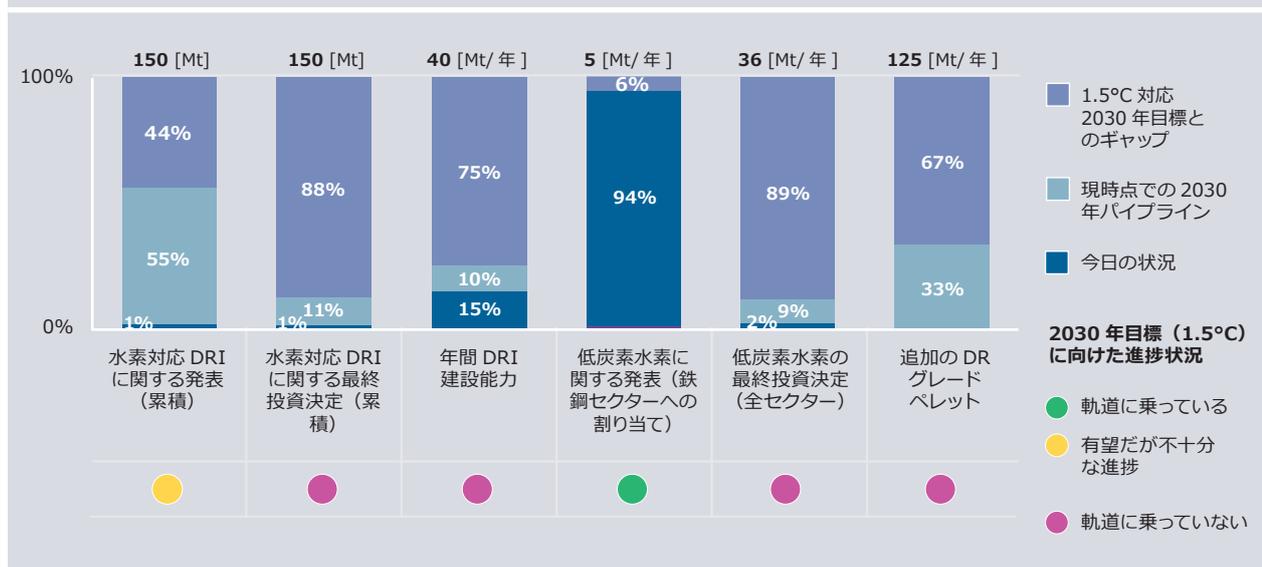
DR グレードの品質に適した鉄鉱石の供給を増やすもう一つの主要な解決策は鉄鉱石選鉱である (IEEFA 2022b)。鉄鉱石の採掘会社が、低品位の鉄鉱石を DR グレードの品質にアップグレードできる鉄鉱石選鉱施設を建設することが考えられる。

今日の視点では、このボトルネックを解消するために三つの解決策すべてが必要になる可能性が高い。

14 1.5°C目標に沿って鉄鋼セクターを脱炭素化していくことは可能であるが、これには政府と産業界の協力が必要である

2030年目標に向けた進捗状況：主要ボトルネックへの対応状況

図 27



Agora Industry Global Steel Transformation Tracker (2023)、IEA (2022a)、IEA (2023)、BNEF (2022b)、IEEFA (2022a) に基づいて Agora Industry (2023) が作成。注：120～150 Mt の水素対応 DRI の生産能力の目標は、我々のモデリングと、「2030年までに100 Mtを上回る排出量がほぼゼロの一次鉄鋼」を求める最新の Breakthrough Agenda Report 2022 に基づいている。この図は、水素対応 DRI に関する発表 (120～150 Mt) と追加の DR グレードのペレット (100～125 Mt) の2030年目標数値の上限範囲を示している。最終投資決定に関しては、今日の状況とは2021年以降に操業を開始したプラントを指し、現時点での2030年パイプラインとは最終投資決定を指す。BNEF 2022b と IEA ETP 2023 に基づき、現在の低炭素水素プロジェクトパイプラインは2030年までに36 Mtになると我々は推定している。我々がモデル化したシナリオでは、鉄鋼セクターは2030年までに約5 Mtの低炭素水素を必要とし、現時点での低炭素水素プロジェクトパイプラインがすべて実現された場合、これは総低炭素水素供給量の13%を占める。

1.5°C対応の鉄鋼脱炭素化経路は可能であるが、主要なボトルネックに対処するためには政府と産業界の協調的な活動が必要である。具体的には、世界の鉄鋼産業が1.5°C対応の鉄鋼脱炭素化経路に乗るためには、技術的課題（すなわち、DRIの普及、低炭素水素供給、DRグレードのペレットの供給など）の解決策の開発と、低炭素製鋼に資する適切な規制枠組みの導入の両方に並行して取り組む必要がある。我々の推定では、2030年までに「100 Mtを上回る排出量がほぼゼロの一次鉄鋼」を生産するためには、120～150 Mtの追加的なDRI生産能力が必要になり、これは最近のブレイクスルー・アジェンダ報告書 (IEA/IRENA/UN High

Level Champions 2022) で2030年の1.5°C対応目標の可能性として示されている²⁹。図27は、この目標に向けた進捗を測定する最初の試みである。

²⁹ 2022 Breakthrough Agenda 報告書では、どの技術がその目標に貢献するかは示されていない。我々の技術分析 (発表予定) に基づくと、DRIプラントは、2030年以前に大幅にスケールアップ可能で一次製鋼の脱炭素化に利用可能な唯一の主要技術になる可能性が高いと考えられる。

いくつかのボトルネックは、1.5°C 対応の 2030 年目標を達成するために緊急のアクションを必要とする

水素対応 DRI プラント開発の計画発表：これまで鉄鋼会社は 2030 年までに 84 Mt の水素対応 DRI 生産設備の開発を発表しており、これは 2030 年の目標上限の 56% の達成に相当する。DRI プロジェクトの発表がこれまでと同様に進展し続けるなら（2021 年と 2022 年は年平均 33 Mt）、このカテゴリーにおける 2030 年の目標は 2020 年代半ばまでにすでに達成される可能性がある。

現状：有望だが不十分な進捗。

水素対応 DRI – 最終的投資決定 (FID)：低炭素製鋼技術に対する FID は、実際の鉄鋼セクターの脱炭素化の進行状況を追跡するための最も重要な指標の一つである。鉄鋼会社と投資家が、低排出の製鉄所の操業を可能にする条件が整っていることに対して十分に信頼を置くようになることが必要である。可能とする条件は、低炭素製鋼の割高なコスト（知見 15 を参照）とその他の前述のボトルネックに対処する規制枠組みの確立に少なからず依存する。現在までに、中国では商業規模の水素対応 DRI プラントが一基建設されており、2023 年には水素対応 DRI プラントの FID がいくつか発表される見込みである。これらの FID をカウントすれば、2030 年目標の 12% が達成であろう（図 27 および 28）。したがって、適切な規制の枠組みおよび更なる FID を可能にするために必要なインフラを提供する緊急の取り組みが必要である。

現状：軌道に乗っていない。

年間 DRI 建設能力：DRI のエンジニアリングと建設能力は、鉄鋼業の脱炭素化を実現する重要な要素であるが、同時に主要なボトルネックでもある。現在の 2030 年 DRI プロジェクトパイプライン（2030 年までに 84 Mt）は、既存のエンジニアリングおよび建設能力で可能なプラント開発能力に関する我々の推定（2030 年までに 70 Mt）をすでに大幅に上回っている。これは現在、最大ではないにせよ、主要なボトルネックである。この問

題に早急に対処しなければ、2030 年目標の達成が危うくなる（知見 7 参照）。

現状：軌道に乗っていない。

低炭素水素供給の計画発表：低炭素水素の供給は、水素ベースの DRI プラントにおける排出量がほぼゼロの製鋼を可能にする重要な要素である。今日、自然エネルギー水素の 2030 年プロジェクトパイプラインは 36 Mt と推定されており、これは IEA NZE の 2030 年における水素需要である 89 Mt の 40% をカバーする（IEA 2022a）。我々のシナリオでは、2030 年までの鉄鋼産業における低炭素水素需要は約 5 Mt であり、36 Mt の 13% を占める。たとえ現在の 2030 年プロジェクトパイプラインだけが実現したとしても、水素が「後悔のない用途」に優先利用されれば、これは世界の鉄鋼業の脱炭素化の大きなボトルネックにはならない（知見 12 を参照）。ただし、水素を「後悔のない用途」に使用することを奨励する政府の政策、例えば水素対応の DRI プラントにおける水素の使用を野心的に増加させる政策に加えて、鉄鋼会社はいつまでにどの程度の低炭素水素を使用する予定であるのかについて、はるかに明確な目標を示すべきである³⁰。そうしなければ、世界の低炭素水素の十分な供給が、鉄鋼産業の 2030 年低炭素水素需要を満たすことにつながらない恐れがある。**現状：**軌道に乗っている。

低炭素水素の最終投資決定：現在、0.6 Mt の低炭素水素が生産されている（IEA、2022e）。IEA 水素プロジェクトデータベースによると、2022 年 10 月までに約 4 Mt が最終投資決定または建設中の状態である。低炭素水素のための強力な規制枠組みの導入を加速することが、最終投資決定の数を増やすのに重要である。

現状：軌道に乗っていない。

30 多くの鉄鋼メーカーは、水素対応の DRI プラントを建設する意向を表明しており、将来的には低炭素の水素に転換できるとしているが、具体的な時期は明らかにしていない。低炭素水素使用の具体的な目標は、水素と関連インフラの増強のバランスがとられ、ネットゼロ目標に向けた計画通りに進捗し、排出量がほぼゼロの鉄鋼の生産者と潜在的な購入者を結びつけるのに貢献することである（IEA 2023）。

2030年パイプライン：排出量がほぼゼロの一次製鋼能力に関する発表と最終投資決定

図 28

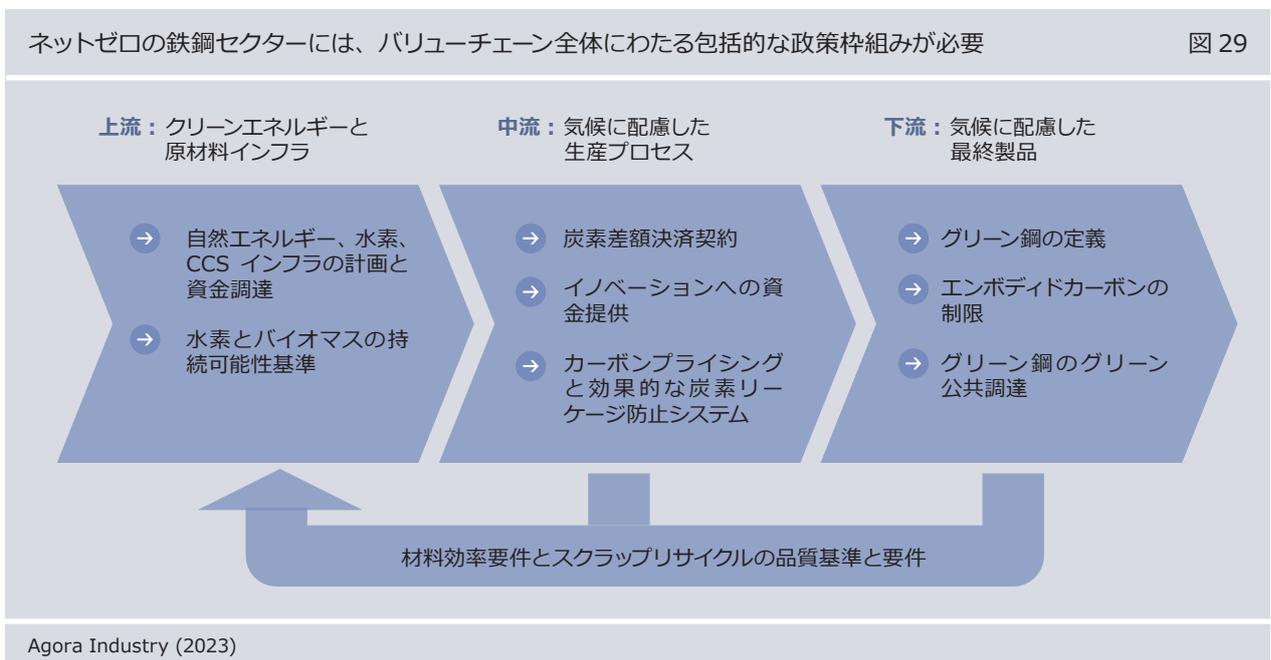


Agora Industry (2023)、Global Steel Transformation Tracker (2023)。注：発表されたプロジェクトはすべて、原則として水素対応 DRI プラントである。ただし現時点では、プロジェクトパイプラインの約 25% のみが最初から自然エネルギー水素で稼働することを意図している。他の DRI プラントはすべて、天然ガスまたは天然ガスと水素の混合ガスで稼働し、ほとんどの企業が、利用可能になったら最終的に 100% 低炭素の水素に切り替えることを表明している (Agora Industry、Global Steel Transformation Tracker を参照)。*2030 年目標とは、IEA、IRENA、UN 2022 および我々自身のシナリオの 1.5°C 対応経路に沿うために必要となる排出量がほぼゼロの一次製鋼能力を指す。

DR グレードのペレット供給：DR グレードのペレットの供給が、水素ベースの DRI プラントへの切り替えの重要な要件としてしばしば言及される (McKinsey 2021、Midrex 2022b、IEEFA 2022a)。ただし、これは DRI-EAF 法にのみ当てはまり、いわゆる DRI-SMELT-BOF 法には当てはまらない。

このボトルネックに対処するための選択肢は存在するが、DR グレードのペレット供給の現在の計画は、我々の推定 2030 年需要の 33% しかカバーしておらず、したがって 2030 年までに必要な量を大幅に下回っている (知見 13 を参照)。
現状：軌道に乗っていない。

15 鉄鋼セクターの排出実質ゼロを達成するには、バリューチェーン全体に対応する包括的な政策枠組みを各国政府が採用する必要がある。この点は国際的な調整と協力が鍵となる



鉄鋼業の脱炭素化は単独では起こらない — 包括的な政策枠組みが必要

鉄鋼業の脱炭素化にむけた変革を始動するには、特定の条件を素早く整える必要がある。これらの条件は、製鋼バリューチェーン全体を見渡した包括的な政策枠組みを通じて実現することができる（図 29 参照）。上流では、クリーンエネルギーと原材料インフラの構築が必要になる。中流では、排出量がほぼゼロの製鋼のビジネスケースを可能にするための政策手段が必要である。そして下流では、環境価値が先導するグリーン市場の可能性を最大限に活用するために、マーケットプル型の政策手段が必要である。

上流：クリーンエネルギーと原材料インフラ

- **自然エネルギーと水素、CCS インフラの計画と資金調達**：鉄鋼業の脱炭素化には、大量のクリーンエネルギーと、電力・水素・CO₂に必要なグリッドと輸送インフラが必要になる。
- **水素とバイオマスの持続可能性基準**：自然エネルギーにより低炭素の水素と真に持続可能なバイオマスのために一般的に合意され厳格な持続可能性のルールが、国際的に公平な競争の場を作るために必要である。

中流：気候に配慮した生産プロセス

- 炭素差額決済契約 (CCfD)：CCfDにより、CO₂集約的な生産方法と比較して、ほぼ排出量がゼロの製鋼技術の追加コスト（特にOPEX）に対処することができる。これらの設計は、炭素価格設定や炭素国境調整メカニズム (CBAM) を補完するように調整することができるが、単独でも機能できる (Agora/WI/Futurecamp 2022)。
- イノベーションへの資金提供：排出量実質ゼロに対する投資を支援する追加資金は、排出量がほぼゼロの製鋼技術の実用化と普及の支援に役立つ。
- カーボンプライシングと効果的な炭素リーケージ防止システム：CO₂プライシングは、CO₂集約型の生産方法のコストを内部化するのに役立つため、ポリシーミックスの重要な要素である。これは、排出量がほぼゼロの鉄鋼生産とCO₂集約的な方法との間のコストギャップを埋めるのに役立つ。炭素価格が低い、または炭素価格が設定されていない他の国と比較して、鉄鋼会社が炭素リーケージに晒されるのを避けるためには、CBAMのような炭素リーケージ防止システムまたは同等の措置が必要である。

下流：気候に配慮した最終製品

- グリーンスチールの定義：何がグリーンスチールであるかについて合意された共通の定義は、グリーン市場の可能性を最大限引き出す鍵である (例えばIEA 2022gを参照)。民間企業や政府は明確に定義されたルールに基づいて、より高いプレミアムでグリーンスチールや低排出鋼を調達することができ、継続的な補助金に依存しないグリーンスチールのビジネスケースを作り出すことが可能である。
- 内包炭素制限：排出量がほぼゼロの物質の義務化のような最終製品への炭素制限は、排出量がほぼゼロの製品市場を創出するもう一つの重要な政策オプションとなり、特定の閾値を超えるCO₂集約型最終製品を段階的に廃止するのに貢献できる。

- グリーンスチールのグリーン公共調達：政府をはじめとする公的機関は、公共インフラプロジェクトや公共交通機関などに大量の鉄鋼を調達している。政府はその調達力を使ってグリーンスチールの購入比率を高めることが考えられる。
- スクラップリサイクルの材料効率要件と品質基準：材料効率のポテンシャルはバリューチェーン全体に影響を及ぼす。材料効率を高めるのに役立つ政策手段には例えば、建築基準法を改正し構造用鋼の過剰仕様を軽減する、建物の寿命の延長にインセンティブを与える、輸送セクターのモーダルシフトを奨励するなどがある。

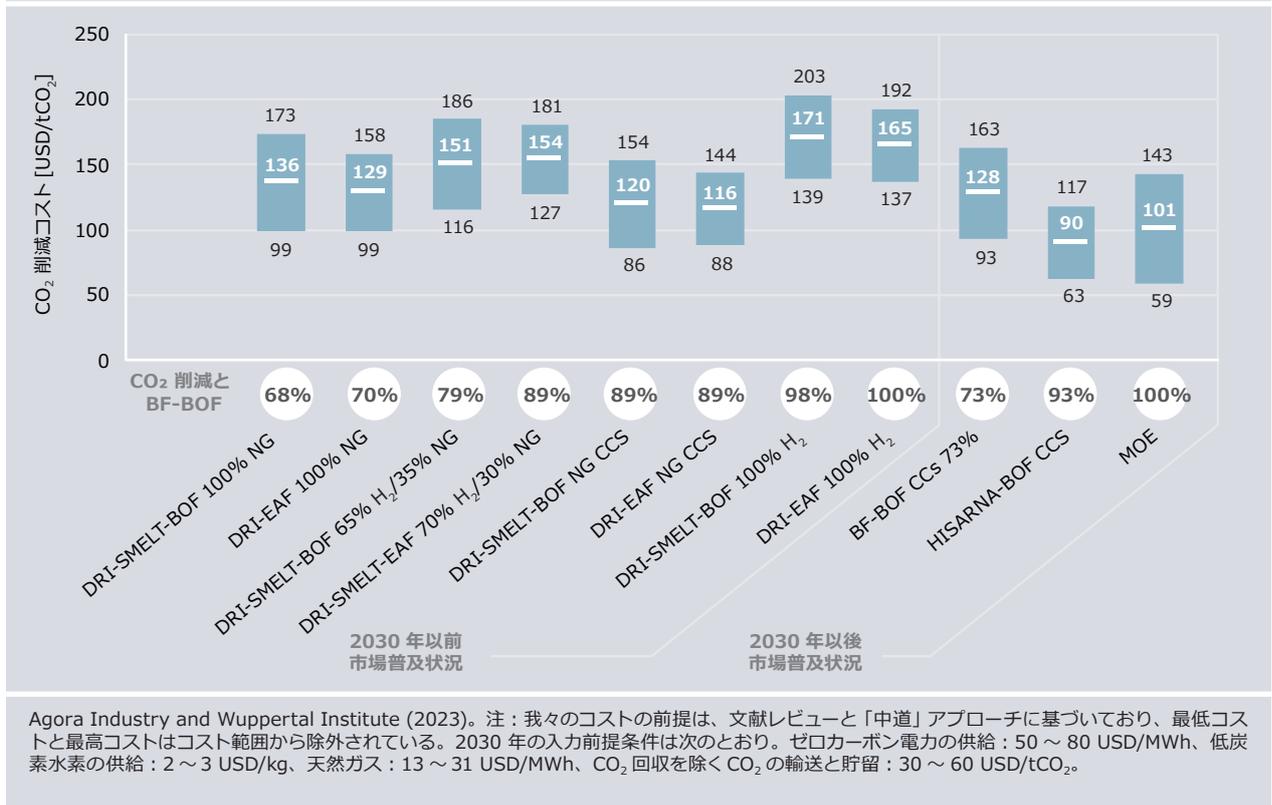
スクラップのリサイクルに関しては、鉄スクラップは銅のような不純物元素で汚染されていることが多い。このため、スクラップベースの鋼は低品質で用途が限定されてしまう (ダウンサイクリング)。リサイクル中の鉄鋼含有製品の耐用年数終了時のスクラップの分別と細断に関する明確な要件を設ければ、これを回避することができる (Agora Industry 2022)。

国際的な調整と協力が鍵

さまざまな低排出製鋼技術におけるCO₂削減にかかる平均コストは2030年までで、110～160 USD/tCO₂の範囲になると予想されている (Agora/WI/Lund 発表予定)。2030年までにこのようなCO₂価格水準になると予想される国はほとんどない。包括的な政策枠組みがなければ、2030年以前に排出量がほぼゼロの製鉄所への最終投資決定はありそうにない。国際的な調整と協力が決定的に重要である。このような調整と協力が、国際的に公平な競争の場を作るのに役立ち、世界の鉄鋼業の脱炭素化のコストを下げ (知見5)、ウィン-ウィンの機会を生み出し (知見6)、主要なボトルネックを協力して除去することを支援し (知見14)、座礁資産を最小化し (知見11)、そして公正な移行を確実にする。IEAのトップであるBirol氏は、2023年1月のIEA Energy Technology Perspectives Report (エネルギー技術展望報告書)の発表時に次のように述べている：「協力しあうことで、国はそれぞれの能力を合計したよりも大きな力を発揮することができる」。

2030年における主要技術のCO₂削減コストと、未対策の高炉-転炉法の比較

図 30



16 Bibliography

Agora Energiewende (2022). *12 Insights on Hydrogen*. Online available at: https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_H2_Insights/A-EW_245_H2_Insights_WEB.pdf

Agora Energiewende, Wuppertal Institute, Future-camp (2022). *Transforming industry through carbon contracts (Steel)*. Online available at: <https://www.agora-energie-wende.de/en/publications/transforming-industry-through-carbon-contracts-steel/>

Agora Energiewende (2023). *Breaking free from fossil gas*. Online available at: https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_07_EU_GEXIT/A-EW_292_Breaking_free_WEB.pdf

Agora Industry, Wuppertal Institute, Lund University (2021). *Global Steel at a Crossroads*. Online available at: <https://www.agora-energie-wende.de/en/publications/global-steel-at-a-crossroads/>

Agora Industry (2022). *Mobilising the circular economy for energy-intensive materials*. Online available at: https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_02_EU_CEAP/A-EW_254_Mobilising-circular-economy_study_WEB.pdf

Agora Industry (2023). *Global Steel Transformation Tracker*. Online available at: <https://www.agora-energie-wende.de/en/service/global-steel-transformation-tracker/>

Australian Government (2021). *New low emissions technology partnership with the Republic of Korea*. Online available at: <https://www.dceew.gov.au/about/news/new-low-emissions-technology-partnership-with-the-republic-of-korea>

Australian Government (2022). *Resources and Energy Quarterly*. Online available at: <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/minisite/static/ba3c15bd-3747-4346-a328-6b5a43672abf/resources-and-energy-quarterly-september-2022/documents/Resources-and-Energy-Quarterly-September-2022-Iron-Ore.pdf>

Bataille et al (2021). *Global facility level net-zero steel pathways*. Online available at: http://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf

BHP (2023). *BHP and Hatch commence design study for an electric smelting furnace pilot*. Online available at: <https://www.bhp.com/news/media-centre/releases/2023/03/bhp-and-hatch-commence-design-study-for-an-electric-smelting-furnace-pilot>

Bloomberg New Energy Finance (BNEF) (2022a). *2H 2022 Hydrogen Levelized Cost Update*.

BloombergNEF (BNEF) (2022b). *A Breakneck Growth Pivot Nears for Green Hydrogen*. Online available at: <https://about.bnef.com/blog/a-breakneck-growth-pivot-nears-for-green-hydrogen/>

Borneo Post (2022). *Green Steel Project to be built in Sipitang*. Online available at: <https://www.theborneopost.com/2022/11/30/green-steel-project-to-be-built-in-sipitang/>

Carbon Brief (2018). *In-depth Q&A: The IPCC's special report on climate change at 1.5C*. Online available at: <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-ipccs-special-report-on-climate-change-at-one-point-five-c/>

Ember (2023). *Why the steel industry needs to tackle coal mine methane.* Online available at: <https://ember-climate.org/insights/research/why-the-steel-industry-needs-to-tackle-coal-mine-methane/#supporting-material-downloads>

Energy Transitions Commission (ETC) (2021). *Bioresources within a Net-Zero Emissions Economy.* Online available at: <https://www.energy-transitions.org/publications/bioresources-within-a-net-zero-economy/>

Global Energy Monitor (GEM) (2022). *Global Steel Plant Tracker.* Online available at: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/>

Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA) (2022a). *Iron ore quality a potential headwind to green steelmaking – Technology and mining options are available to hit net-zero steel targets.* Online available at: <https://ieefa.org/resources/iron-ore-quality-potential-headwind-green-steel-making-technology-and-mining-options-are>

Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA) (2022b). *Solving iron ore quality issues for low-carbon steel.* Online available at: <https://ieefa.org/resources/solving-iron-ore-quality-issues-low-carbon-steel>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). *Global Warming of 1.5°C.* Online available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023). *AR6 Synthesis Report (SYR).* Online available at: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

International Energy Agency (IEA) (2020a). *Iron and Steel Technology Roadmap.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>

International Energy Agency (IEA) (2020b). *Methane Tracker 2020.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2020>

International Energy Agency (IEA) (2021). *Net Zero by 2050.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

International Energy Agency (IEA) (2022a). *World Energy Outlook 2022.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

International Energy Agency (IEA) (2022b). *Iron and Steel Tracking Report.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel>

International Energy Agency (IEA) (2022c). *Global Hydrogen Review.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>

International Energy Agency (IEA) (2022d). *Global Methane Tracker 2022.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022/overview>

International Energy Agency (IEA) (2022e). *Hydrogen Tracking Report.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

International Energy Agency (IEA) (2022f). *Hydrogen Projects Database.* Online available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>

International Energy Agency (IEA) (2022g). *Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-heavy-industry-sectors-in-g7-members>

International Energy Agency (IEA) (2023). *Energy Technology Perspectives 2023*. Online available at: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>

International Energy Agency (IEA), International Renewable Energy Agency (IRENA), UN Climate Change High Level Champions (2022). *Breakthrough Agenda Report 2022*. Online available at: <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2022>

International Iron Metallurgy Association (IIMA) (2021). *Global Iron Ore – Outlook for DR grade iron ore: issues and challenges for the industry*. Online available at: https://www.metallurgy.org/assets/files/Public-Area/Presentations/FM-IO_210318.pdf

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022a). *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*. Online available at: <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>

International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022b). *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. Online available at: <https://www.irena.org/publications/2022/mar/world-energy-transitions-outlook-2022>

Iron Brand Equity Foundation (IBEF) (2022). *Iron & Steel Industry in India*. Online available at: <https://www.ibef.org/industry/steel>

Liebreich (2022). *The Clean Hydrogen Ladder*. Online available at: <https://www.linkedin.com/pulse/clean-hydrogen-ladder-v40-michael-liebreich>

McKinsey & Company (2021). *The DRI dilemma: Could raw material shortages hinder the steel industry's green transition?* Online available at: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-dri-dilemma-could-raw-material-shortages-hinder-the-steel-industrys-green-transition>

McKinsey & Company (2022). *Closing Europe's green-metallics gap*. Online available at: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/closing-europes-green-metallics-gap>

Metso Outotec (2021). *Circored Fine Ore Direct Reduction – a proven process to decarbonize steel-making*. Online available at: <https://www.mogroup.com/insights/blog/mining-and-metals/circored-fine-ore-direct-reduction-a-proven-process-to-decarbonize-steelmaking/>

Midrex (2022a). *World Direct Reduction Statistics*. Online available at: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2021.pdf>

Midrex (2022b). *The Iron Ore Challenge for Direct Reduction On Road to Carbon-Neutral Steelmaking*. Online available at: <https://www.midrex.com/tech-article/the-iron-ore-challenge-for-direct-reduction-on-road-to-carbon-neutral-steelmaking/>

Mission Possible Partnership (MPP) (2021). *The Net Zero Steel Sector Transition Strategy*. Online available at: <https://www.energy-transitions.org/publications/the-net-zero-steel-sector-transition-strategy/>

Mission Possible Partnership (MPP) (2022). *Making Net Zero Steel possible*. Online available at: <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-Net-Zero-Steel-possible.pdf>

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2022). *The ASEAN Steel Industry Development: Investment and Green Industry Challenges*. Online available at: https://search.oecd.org/industry/ind/Item_6.3_SEAISI.pdf

Paul Wurth (2022). *Coke Oven Batteries*. Online available at: <https://www.paulwurth.com/en/technology/cokemaking/coke-oven-batteries/>

POSCO (2022). *POSCO starts to design the HyREX demonstration plant*. Online available at: <https://newsroom.posco.com/en/posco-starts-to-design-the-hyrex-demonstration-plant/>

Primetals (2022). *Primetals Technologies, Fortescue und voestalpine evaluieren gemeinsam eine bahnbrechende Anlage für grüne Eisenerzeugung*. Online available at: <https://www.primetals.com/de/presse-medien/news/primetals-technologies-fortescue-und-voestalpine-evaluieren-gemeinsam-eine-bahnbrechende-anlage-fuer-gruene-eisenerzeugung>

RMI (2022). *Hydrogen Reality Check: We Need Hydrogen – But Not for Everything*. Online available at: <https://rmi.org/we-need-hydrogen-but-not-for-everything/>

Science Based Targets (SBTi) (2022). *Steel science-based target setting guidance*. Online available at: <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTi-Steel-Guidance-draft.pdf>

Thyssenkrupp (2023). *thyssenkrupp Steel awards a contract worth billions of euros to SMS group for a direct reduction plant: one of the world's largest industrial decarbonization projects gets underway*. Online available at: <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/thyssenkrupp-steel-awards-a-contract-worth-billions-of-euros-to-sms-group-for-a-direct-reduction-plant--one-of-the-worlds-largest-industrial-decarbonization-projects-gets-underway-163184>

Vogl et al (2021). *Phasing out the blast furnace to meet global climate targets*. Online available at: [https://www.cell.com/joule/pdfExtended/S2542-4351\(21\)00435-9](https://www.cell.com/joule/pdfExtended/S2542-4351(21)00435-9)

Wörtler et al (2013). *Steel's Contribution to a Low-Carbon Europe 2050*. Online available at: <https://www.bcg.com/publications/2013/metals-mining-environment-steels-contribution-low-carbon-europe-2050>

WV Stahl (2021). *Employment in the Steel Industry*.

Publications by Agora Industry

IN ENGLISH

Levelised cost of hydrogen

Making the application of the LCOH concept more consistent and more useful

Chemicals in transition

The three pillars for transforming chemical value chains

Levelised cost of hydrogen

Making the application of the LCOH concept more consistent and more useful

15 Insights on the Global Steel Transformation

12 Insights on Hydrogen – Argentina Edition

Argentina as a hub for green ammonia

A forward-looking development strategy for addressing the global energy and climate crises

Transforming industry through carbon contracts (Steel)

Analysis of the German steel sector

Power-2-Heat

Gas savings and emissions reduction in industry

International climate cooperation for energy-intensive industry

A (realistic) proposal

12 Insights on Hydrogen

Mobilising the circular economy for energy-intensive materials (Executive Summary)

How Europe can accelerate its transition to fossil-free, energy-efficient and independent industrial production

Mobilising the circular economy for energy-intensive materials (Study)

How Europe can accelerate its transition to fossil-free, energy-efficient and independent industrial production

Getting the Transition to CBAM Right

Finding pragmatic solutions to key implementation questions

Global Steel at a Crossroads

Why the global steel sector needs to invest in climate-neutral technologies in the 2020s

Publications by Agora Industry

IN GERMAN

Chemie im Wandel

Die drei Grundpfeiler für die Transformation chemischer Wertschöpfungsketten

Power-2-Heat

Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Stahl) – Update

Aktualisierte Analyse zur Stahlbranche

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Zement)

Analyse zur Zementbranche

12 Thesen zu Wasserstoff

Mobilisierung der Kreislaufwirtschaft für energieintensive Materialien (Zusammenfassung)

Wie Europa den Übergang zu einer fossilfreien, energieeffizienten und energieunabhängigen industriellen Produktion vollziehen kann

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Gesamtstudie)

Kurzfristige Schritte auf dem Pfad zur Klimaneutralität der deutschen Grundstoffindustrie

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Stahl)

Analyse zur Stahlbranche

All publications are available on our website: www.agora-energiewende.org

Agora Industryについて

Agora Industry は Agora Energiewende の 1 部門で、ドイツ、EU、そして世界で、気候中立的な産業転換のための戦略と手段の開発に取り組んでいる。Agora Industry は経済的利益や党派的利益から独立して活動している。唯一のコミットメントは気候変動対策である。



この出版物はこのスキャンコード
でダウンロード可能である。

Agora Industry

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin, Germany

P +49 (0)30 700 14 35-000

F +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-industry.org

info@agora-industrie.de

