The Japanese Political Economy 掲載原稿の日本語版

グリーンスチール競争における日本鉄鋼メーカーの技術経路

川端　望

要旨

本稿は，日本の鉄鋼メーカーが環境に配慮した鉄鋼生産，すなわちグリーンスチールを追求するために選択した技術経路を検証した。この経路は、国際エネルギー機関（IEA），日本政府，公的機関，経済団体，鉄鋼メーカーの文書を分析することによって特定される。分析結果は，高炉・塩基性酸素転炉（BF-BOF）技術を利用する日本の銑鋼一貫メーカーは，グリーンスチールのための技術開発と設備投資で遅れをとっていることを示している。これらの企業は，自社の固定資本の価値や，高級鉄鋼メーカーとしての評判を維持するために，CO_2排出量の多い高炉技術に固執してきた。その結果，CO_2排出量の少ない電気炉（EAF）方式への移行が遅れ，またゼロエミッションが期待できる水素直接還元法の開発で遅れを取っている。しかし，パリ協定や日本政府によるカーボンニュートラル宣言によって，こうした姿勢の見直しが迫られている。このケースは，環境の政治経済学の理論や，大企業の新技術に対する保守的なアプローチに関する理論が，グリーンテクノロジーの出現の時代にも通用することを物語っている。

キーワード：環境の政治経済学，地球温暖化，日本鉄鋼業，カーボンニュートラル，技術経路

Subject classification codes: L52, L61, Q55, Q58

I　はじめに

鉄鋼業は地球温暖化防止のカギを握る産業であり，その生産過程は脱炭素化を求められている。この産業において繰り広げられているグリーンスチールをめざす競争の現状を評価し，帰趨を予測することは重要な社会的意義がある [1]。本稿の目的は，日本の鉄鋼メーカーが，脱炭素化を目指すイノベーションにおいてどのような地位にあるかを評価することである。このイノベーションの帰趨はまだオープンであるため，評価は日本の鉄鋼メーカーがどのようなテクノロジーパスにあるかを解明することによって行う。

本稿のリサーチクエスチョンは以下の 2 点である。

第一のクエスチョンは，資本蓄積を追求する鉄鋼メーカーの姿勢と，地球温暖化防止のための環境規制はどのような関係にあるか，というものである。今日の鉄鋼メーカーは，地球温暖化防止のための国際的・一国的政策により，CO_2 排出を削減する技術の採用を迫

られている。鉄鋼メーカーは，これを，自らの利潤追求と両立させようとする。この時，日本鉄鋼メーカーは，どのような技術を，どのような理由で採用しようとするだろうか。それは，地球温暖化を防止するために十分なものだろうか。

第二のクエスチョンは，既存技術を体化した固定資本投資や無形資産投資が，巨大企業としての日本鉄鋼メーカーの行動を制約していないか，というものである。銑鋼一貫の生産設備に対する巨額の投資や，顧客の継続的な満足という無形資産は，企業のイノベーション戦略を保守的なものにする可能性がある。グリーンスチールを目指す日本メーカーの技術開発や設備投資にもそのような傾向が表れているだろうか。

グリーンスチールをめざすイノベーションの成否はまだオープンであるため，評価は一貫企業がどのような技術経路を歩んでいるかを同定することによって行う。京都議定書から現在に至る鉄鋼業界の政策を把握するために，三つの領域の資料を用いる。

第一に，鉄鋼技術に関する国際エネルギー機関（IEA）の文書である。IEA はゼロエミッションに向かって鉄鋼業のテクノロジーマップを作成し（IEA 2020），また採用する技術ごとにゼロエミッションに向けたシナリオを作成している(IEA 2022)。これらを用いて，種々の鉄鋼技術を，グリーンスチールを目指す技術経路上に位置づける。

第二に，地球温暖化防止のための行動計画に関する経団連と日本鉄鋼連盟（鉄連）の資料である。経団連は，日本政府の地球温暖化防止政策を受けて，企業の行動計画を組織してきた。また鉄連は日本鉄鋼業の業界団体であり，政府の目標と経団連の行動計画を具体化するとともに，政策に対する鉄鋼企業の意見の取りまとめを行ってきた [2]。日本では銑鋼一貫メーカーの生産シェアが高いために，鉄連の政策には一貫メーカーの意向が強く反映されていた。経団連と鉄連の政策と行動の記録はドキュメントに蓄積されている。

第三に，鉄鋼技術開発に関する政府プロジェクトに関する政府，公的機関，参加企業の文書である。次世代技術の開発は政府の支援を必要とするとみなされたため，技術開発の経過は公的機関のドキュメントに記されている。

第 2 節では，先行研究を検討する。第 3 節では，鉄鋼業の現存技術と次世代技術の性格を，技術経路の観点から論じる。第 4 節では，鉄連と BF-BOF メーカーの地球温暖化防止政策実施の経過を明らかにする。第 5 節では，日本鉄鋼業の技術経路についての評価を述べる。併せて，残された課題を指摘する。

II　先行研究の検討

1 環境の政治経済学

CO_2 排出をめぐる鉄鋼メーカーの行動は，資本主義企業のそれとして把握されねばならない。日本の政治経済学における環境分析のパイオニアである庄司光と宮本憲一は，高度

成長期日本の公害を，資本主義企業が設備投資を直接生産過程に集中し，公害防止設備のような間接生産過程への投資を節約する傾向の産物ととらえた（庄司・宮本 1975, 13, Shoji and Miyamoto 1977, 12-13）。また彼らは，この資本制蓄積の傾向は技術体系そのものにも反映されることも指摘していた。技術開発そのものが営利を優先し，安全・環境を軽視する方向を向くことを指摘したのである（庄司・宮本 1975, 13-14）。

庄司・宮本(1975)は二つの行動原理を指摘していた [3]。一つは，一定の生産技術の下で，企業が環境防止費用を節約するが故に公害が発生するというものであった。もう一つは，企業がより大きな利潤を求めて，より汚染の激しい生産技術を選択してしまうというものであった。直接生産過程での生産技術選択そのものが，環境保護費用を回避する傾向に影響されるのである。本稿が重視するのは，この二番目の原理である。

今日，鉄鋼業においては，CO_2 排出削減を実現する手段として，生産技術そのものの刷新か，それとも既存技術の改造かという争点が提起されている。地球温暖化防止政策が企業を規制している下では，グリーンスチールに向かっての投資を全く行わないという選択肢はもはやあり得ない。このとき，資本主義企業は，低汚染の新生産技術が旧技術よりも高い利潤を生みだす場合には，それを採用するインセンティブを持つだろう。逆に，利潤が減少する場合には，新技術を採用しようとはせずに，現存技術の改良ですませようとするかもしれない。本稿の第一のリサーチクエスチョンは，環境の政治経済学から得られるこのような視点を引き継いでいる。

2 イノベーションと巨大鉄鋼メーカー

独占ないし寡占的な地位にある大企業が，新技術の採用に際して後発企業や新規参入者よりも消極的な姿勢をとる傾向は，政治経済学において古くから指摘されてきた。独占企業の姿勢は独占資本主義全体を代表するものであるのか（Baran and Sweezy 1966, 97-111），それとも戦後アメリカ独占企業の一時的な特徴づけであるか（Brenner 2006 32-37, 53-56）については意見の相違がある。しかし，いずれも，確立された地位を持つ巨大企業が新技術への投資に対して消極的となる傾向を持つことを指摘していたし，1950-1970 年代のアメリカの銑鋼一貫メーカーをその典型的な事例としていた。

より事例に密着した政治経済学，産業組織論やイノベーションマネジメント研究においても，アメリカの大型一貫メーカーはイノベーションに消極的であり，保護貿易に依存しながら撤退を繰り返し，国際的な競争優位を失ったと指摘されてきた(Adams and Dirlam 1966; Baldwin and Clark 1994; Dertouzos et al. 1989, 14-15, 278-287; Scheuerman 1986)。その結果，日本や西欧からの輸入品が増加し，また設備投資に前向きな電炉(EAF)メーカーが市場シェアを拡大した（Adams 1995; Lester 1998, 85–107）。EAF メーカーがローエンドセグメントから業界を破壊していったのに対して，一貫メーカーはより利益率の高い顧客に対する

高級品の供給に自らの事業を絞り込み，ついにほとんどのセグメントでシェアを奪われたのだと評価されている（Christensen 1997, 87-93）。これらの研究において注目されたのは，大企業が，生産設備に体化された莫大な固定資本や，高級品を購入する顧客向けの製品開発によって築いた無形資産の価値を防衛するために，新技術採用に消極的になる姿勢であった。

アメリカの寡占企業とは対照的に，第二次世界大戦以後の日本鉄鋼業は，競争的な環境のもとで行った積極的な新技術採用と設備投資競争を通して成長したことが指摘されている（Baba and Takai 1997; Hasegawa 1996; Yonekura 1994）。この産業は高度成長期には鉄鋼業は大気や水の汚染源となったが，鉄鋼メーカーは，第一次大戦後から積み重ねてきた熱管理技術，省エネルギー技術を応用して公害を低減させた（Kobori 2017）。ただし，汚染防止設備については，企業は自発的に採用したのではなく，住民運動や地方自治体からの圧力を受けて採用した（上園 1997; Kobori 2017）。

1980 年代以後，鉄鋼業は発展途上国によるキャッチアップと，先進諸国におけるリストラクチャリングを構成要素とする，激しいグローバル競争に突入した（D'Costa 1999;Sato 2016）。アメリカではミニミルが生産の過半を占めるようになり，また韓国，中国といったアジアの新興国メーカーが台頭した（Sato 2009）。日本メーカーは高級鋼材に生産を集中するようになった（Kawabata 2003; 2012）。加えて，地球温暖化の課題が浮上し，鉄鋼技術は転換を迫られるようになった。ここで検証すべきは，このグリーンスチールという新たな目標をめぐる競争において，日本メーカーのイノベーティブな性格が維持されているのかどうかである。本稿の第二のリサーチクエスチョンは，このようにして導き出される。

III　鉄鋼業における現存技術と次世代技術

1 現存技術としての高炉・転炉法，スクラップ・電炉法，直接還元法

鉄鋼業は，世界の重工業における最大の CO_2 排出源であって，エネルギー起源の世界排出量の 7%を占めている。日本においても，2019 年度の CO_2 排出のうち 14%が鉄鋼業によるものである [4]。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）によれば，世界的な平均気温上昇を産業革命以前から 1.5℃以内に抑えるというパリ協定の目標を実現するためには，2050 年までに，CO2 の排出は 2019 年比で 99%削減されねばならない(IPCC, 2023)。したがい，鉄鋼業についても 2050 年時点でのゼロエミッションが求められる。

現存する主要な鉄鋼生産技術を世界での生産量が多い順に並べると，高炉・転炉法(BF-BOF)，スクラップ・電炉法(EAF)，直接還元・電炉法（DRI-EAF）となる。この他に，高炉・電炉法（BF-EAF）が主に中国で行われている。このうち BF-BOF 法と DRI-EAF 法は鉄鉱

石を原料とする一次生産であり，スクラップ・EAF 法は鉄スクラップを原料とする二次生産である。

BF-BOF 法は 2019 年に世界の粗鋼生産の 71.7%を占めた（worldsteel 2020）。現代の銑鋼一貫メーカーは BF-BOF 法を採用している。BF-BOF 法においては，まず高炉を主要設備とする製銑工程で，鉄鉱石をコークスや石炭を用いて還元して銑鉄を製造する。続いて塩基性酸素転炉を主要設備とする製鋼工程で，溶銑に酸素を吹き付けることによって炭素分を調整し，あわせて燐などの不純物を取り除き，成分を調整する。BF-BOF ルートでの鉄鋼生産の排出原単位は 2.95CO_2t/t である(IEA 2022, 109)[5]。この高い原単位は，還元剤や熱源として炭素を消費することによるものである。

EAF 法は，2019 年に世界の粗鋼生産の 27.8%を占めた [6]。EAF の主原料は，スクラップである場合と，直接還元鉄である場合，銑鉄である場合がある。正確な内訳は不明であるが，直接還元鉄の生産量が銑鉄の 8.7%であることから，DRI-EAF 法によって生産される粗鋼のシェアは，6%前後と考えられる。中国における BF-EAF 法とスクラップ-EAF 法の比率を明らかにする資料はないが，大きく見積もって中国の EAF 法の半分が BF-EAF 法による仮定すれば，BF-BAF 法の世界シェアは約 3%となる。そして，スクラップ・電炉法が 19%前後と推定できる。

EAF において，スクラップはアーク熱によって溶解製錬される。スクラップ・EAF 法においては鉄鉱石の還元が省略されるので，エネルギー必要量が非常に小さくなる。CO_2 の排出原単位は 0.29CO2t/t に過ぎない(IEA 2022 110) 。このうち最大の割合を占めるのは，電力を使用することによる 0.22t/t の間接排出である。

DRI-EAF 法は，鉄鉱石を還元する点では BF-BOF 法と同じであるが，比較的低温で固体のまま還元する。固体の還元鉄は不純物を含んでいるので，EAF で製錬される必要がある。還元と熱源に天然ガスを用いる場合には，CO_2 排出原単位は BF-BOF 法より低く，1.49t/t である（IEA 2022, 109）。

炭素価格を抜いた生産コストは，それぞれの原料とエネルギー価格の変動に左右されるために，どの生産方法が有利とは一概に言えない。しかし，CO_2 排出の上限規制やカーボンプライシングが強まれば強まるほど，BF-BOF 法は優位性を失っていく。BF-BOF 法はもっとも CO_2 集約な生産方法だからである。

2 次世代技術としての改良型高炉法と水素直接還元法

鉄鋼生産における脱炭素のために，四つのコア技術グループが IEA から提案されている。炭素回収・利用・貯蔵（CCUS），水素還元，直接電解製鉄，バイオマスによるコークスの代替である（IEA 2020, 90-92）。このうち実用化に近く，かつ大量生産に適用可能で効果が

大きい主要な次世代技術は，水素と CCUS による高炉のリノベーションと，水素直接還元法（水素 DRI）である。

高炉のリノベーションの一つは，高炉における炭素による還元を水素還元に置き換えることである。水素還元では CO_2 は発生しない。ただし，高炉では水素還元は部分的にしかできない（IEA 2020 87-88）。高炉においては，炉内を降下する鉄鉱石を支え，還元ガスの通路を確保するために固体のコークスが不可欠だからである。もう一つは，高炉から排出される CO_2 を水素によってメタンガスなどに改質し，再び燃料として吹き込む方法である。この場合，CO_2 の排出自体をなくすことはできない。いずれにせよ，BF-BOF 法のリノベーションは，鉄鋼技術の範囲内ではゼロエミッションには到達することができない。

したがって，高炉における水素利用は，排出された CO_2 を処理する CCUS による補完が不可欠である。CCUS での CO_2 排出削減率は 83%が上限とされている(Agora Industry et al. 2021, 11-12)。

もう一つの次世代技術は水素直接還元法である。これは，直接還元法において還元剤を天然ガスから水素に置き換える技術である。高炉法と異なり，100%水素のみを還元剤に用いることが可能である。これによって，CO_2 の直接排出がなくなる。そして，水素の製造と還元炉・電気炉運転のための動力にゼロエミッションの電力を用いれば間接排出もゼロとなる（IEA 2020, 93-94）。現在の天然ガスによる DRI 法においても部分的には水素還元が行われており，100%水素還元への改造は，直接還元設備の設計を大きく変えずに可能とされている(Mimura 2023)。

3 ニアゼロエミッションへの技術経路

様々な鉄鋼技術が持つ以上の特徴を踏まえて，2050 年におけるニアゼロエミッションへの技術経路を検討しよう。ここでニアゼロエミッションという用語を用いるのは，現在の諸技術に対する知識に基づく限り，2050 年の鉄鋼業からの排出量は正確にはゼロにはならないからである。IEA(2022)が用いているニアゼロエミッションの閾値は，鉄鉱石からの鉄鋼生産について 0.4t/t，鉄スクラップからの鉄鋼生産について 0.05t/t であり，本稿でもこれを用いる。

既存技術のうち，もっとも排出原単位が低く，また 2050 年にニアゼロエミッションに到達できるのは，スクラップ・EAF 法だけである。達成に最も貢献する要因は，発電の脱炭素化である。BF-BOF 法や DRI-EAF 法の排出原単位は，既存の技術的構造と燃料のままではニアゼロエミッションに達せず，スクラップ・EAF 法の 2020 年時点での水準さえも下回ることもできない(IEA 2022, 114, 130)。

次世代技術は，いずれも 2050 年にニアゼロエミッションに達する可能性があるが，その条件と到達水準は異なる。BF-BOF 法は部分的水素還元を行うだけではニアゼロエミッシ

ョンに達することができず，CCUS が加わった場合に初めて閾値を満足する。ただし，この最良のシナリオでも 2050 年の排出原単位は 300CO2t/t を上回るので，他の技術より大規模なオフセットが不可欠となる。100%水素 DRI-EAF 法は，発電の脱炭素化を前提に 2050 年に排出原単位 100CO2t/t 未満でニアゼロエミッションに達する(IEA 2022, 114)。

以上のことから，ゼロエミッションへの技術経路は以下のようになる。BF-BOF 法から出発するならば，当初の排出原単位が大きいために，最も大幅な削減が求められる。そして，ゼロエミッションに到達するには部分的水素還元と CCUS がいずれも不可欠である。また 2050 年にも大規模オフセットが必要とされる。スクラップ・EAF 法から出発した場合，当初の原単位は小さく，製鋼技術には大きな転換は不要である。ゼロエミッションに必要とされるのは電力の脱炭素化である。DRI-EAF 法から出発した場合，当初の原単位は BF-BOF 法よりは小さく，スクラップ・EAF 法よりは大きい。還元剤の天然ガスから水素への転換と電力の脱炭素化によりゼロエミッションに到達できる。

鉄鋼メーカーがどの時点で，どの技術経路を選択するか，選択した技術経路上でいかにゼロエミッションを目指すかが，グリーンスチールを目指す競争の焦点となる。

IV　日本高炉・転炉メーカーの CO_2 排出削減政策

1 日本鉄鋼業の概要

図 1 は日本における鉄鋼需給の推移を示している [7]。日本の粗鋼見掛消費は，1991 年にピークに達して以来，緩やかに下降を続けてきた。しかし，粗鋼生産は 2007 年まで成長し続け，2008 年の世界金融危機を契機として下降傾向に転じた。消費と生産の傾向に差があったのは，輸出が 2014 年まで増加し続けていたからである。しかし，2010 年代後半からは輸出が低下し始めた。国内消費も世界金融危機以前の水準には戻らず，さらに COVID-19 下での不況によって急減した。

その結果，日本鉄鋼業は，国内市場の縮小と国際競争力の減退に直面している。日本は 1995 年までは世界最大の製鉄国であり，1996-2017 年は中国に次いで 2 位であったが，2018 年以降はインドに抜かれて第 3 位となった。COVID-19 流行直前の 2017-2019 年平均の粗鋼生産高は 1 億 275 万トンであり，世界の 5.6%を占めていた。

日本では BF-BOF 法が主要な鉄鋼生産技術である。京都議定書における CO_2 排出削減の基準とされた 1990 年には，粗鋼生産の 68.6%が BF-BOF，31.4%が EAF によって担われていた。2017-19 年には 75.4%が BF-BOF，24.6%が EAF となり，BF-BOF 法のシェアが

図 1　日本における鉄鋼需給の推移
注：輸入と輸出は粗鋼換算。鉄鋼見掛消費＝生産＋輸入－輸出。
出所：鉄連(各年)より著者作成。

拡大した。この 2017-19 年の日本のシェアは，世界全体の BF-BOF 法のシェアである 70.0%より高かった（worldsteel 2019,2020）。

1990 年代には，日本に 6 社の BF-BOF ベース一貫メーカーがあった。その後，いくつかの統合が行われ，日本製鉄，JFE スチール，神戸製鋼所の 3 社だけが残っている。EAF メーカーは約 40 社あり，うち約 30 社が普通鋼，約 10 社が特殊鋼を主要製品としている。このほかに多数の圧延・加工のみを行う企業がある。2019 年にこの産業には 4015 の事業所が存在し，22 万 3524 人が働いていた（経済産業省 2020）。

日本鉄鋼業，とくに BF-BOF メーカーは高級鋼材に製品を集中してきた。自動車メーカーのような主要顧客との長期的関係を保ちながら，鋼材の共同開発を実施してきた(Baba and Takai 1997; Kawabata 2012; Kipping 1998)。2019 財政年度における日本の鉄鋼需要のうち 26%が建設用，30%が自動車用であった [8]。建設業からの需要は中低級品を，自動車産業からの需要は高級品を代表している。厳密に比較可能ではないが，2008 年における世界の鉄鋼消費のうち 55%が建設用，10%が自動車用であり，2018 年における中国の鉄鋼消費のうち 57%が建設用，8%が自動車用であった [9]。日本市場は高級品比率が高く，鉄鋼メーカーもまた高級鋼材にフォーカスしているのである。

鉄鋼業の CO_2 排出削減政策は三つの時期に区分できる。それは，地球温暖化防止の国際的枠組みに対応して経団連が実施した計画の区分によるものである。第一に，京都議定書

の実行を目指した「経団連自主行動計画」の時期（1997-2012 年度）である。第二に，ポスト京都の枠組み不在の下で実施された「低炭素社会実行計画フェーズ 1」の時期（2013－2020 年度）である。第三に，パリ条約の実行を目指す「カーボンニュートラル実行計画フェーズ 2」の時期（2021 年度以降）である。以下では時期ごとにこれらの対策を分析する。

2 京都議定書と「自主行動計画」: 原単位低減とセクトラルアプローチ

1997 年 12 月, 第 3 回気候変動枠組み条約締約国会議（COP3）が京都において開催され，京都議定書が締結された。京都議定書において，日本は 2008-2012 年の温室効果ガスの排出を，1990 年比で 6%削減する義務を負った。これに先立ち 1997 年 6 月，経団連は環境自主行動計画を発表した [10]。その一部として，鉄鋼業界を代表する鉄連は 2008-2012 年度平均のエネルギー消費量を 1990 年度比で 10%削減する目標を設定した。省エネ目標は CO_2 排出では 9%削減に相当すると換算された。

結果として，エネルギー消費量は 10.7%削減，CO_2 排出量は 10.5%削減され，目標は達成された。この時期の特徴は，生産活動（粗鋼生産量）は基準年比で 3.8%減少していたものの, 排出原単位をそれ以上に低下させたことであった（図 2）。鉄鋼業界は(1)排熱回収増強・設備効率化, (2)石炭のクリーン利用技術の確立, (3)工場内の副生ガスや排エネルギー回収・活用によるエネルギー効率化，(4)廃棄プラスチック，廃棄タイヤ等の資源リサイクルとい

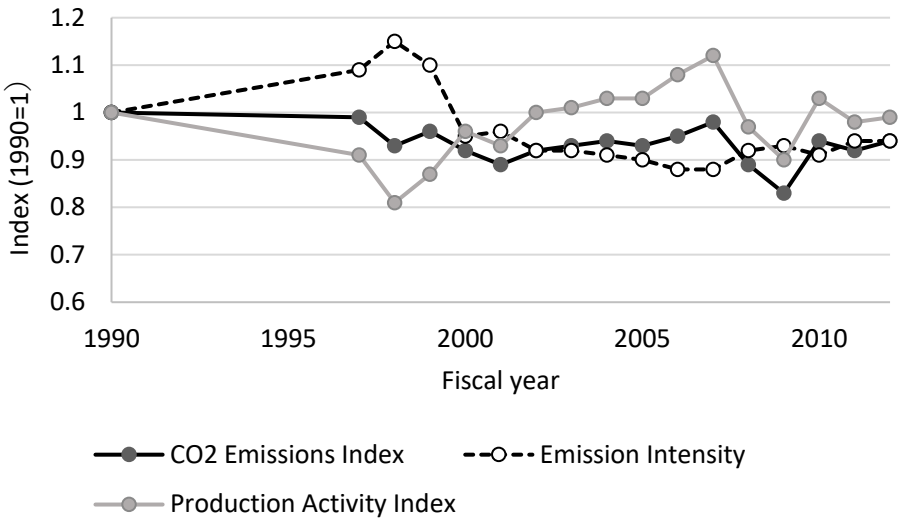

図 2　自主行動計画期における日本鉄鋼業の CO_2 排出量，排出原単位，生産活動指数
出所:「環境自主行動計画〔温暖化対策編〕2009 年度フォローアップ結果<2008 年度実績>」経団連，2009 年 11 月。「環境自主行動計画〔温暖化対策編〕 2013 年度フォローアップ結果」経団連，2013 年 11 月,「経団連カーボンニュートラル行動計画　2050 年カーボンニュートラルに向けたビジョンと 2022 年度フォローアップ結果 総括編」経団連, 2023 年 3 月。

った取り組みによって，CO_2 排出削減に成功した。しかも，それは京都メカニズムによるクレジットを使用することなく実現した。

しかし，この時期，鉄連は京都議定書の方法に不満を表明していた。競争相手である中国，インド，韓国，米国に目標が設定されない一方で，もともと省エネルギーが進んでいる日本鉄鋼業に削減が義務付けられることへの不満である [11]。そして，国別排出総量に代わる，セクトラルアプローチを主張した。

セクトラルアプローチとは，2005 年に発足したクリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ（APP）で採用されたものであり，セクターごとに BAT の国際移転を促進することで，省エネと GHG 排出削減を進めようとするものである [12]。鉄連は，IEA や地球環境産業技術研究機構（RITE）の調査結果をもとに，日本の鉄鋼メーカーが世界で最もエネルギー効率が高く，CO_2 排出削減のポテンシャルは日本よりも他国にあること，したがって日本から利用可能な最善の技術（BAT）を移転することが効果的であることを繰り返し強調した [13]。

ここで注意すべきは，IEA や RITE の CO_2 排出削減ポテンシャルやエネルギー効率の計算は，BF-BOF 法と EAF 法のそれぞれについて行われていたということである。これらの調査結果から論じられるのは，同一技術での削減ポテンシャルだけであった。確かに日本メーカーのエネルギー効率は BF-BOF 法では世界最高であったが，BF-BOF 法から EAF 法に切り替えることで効率を上げ，CO2 排出を削減する余地はあったのである。鉄連はその可能性については，一切触れなかった。

3 高炉法リノベーションをめざす技術開発：COURSE50 とフェロコークス

2008 年から，独立行政法人新エネルギー･産業技術総合開発機構（NEDO）の支援を受けて，鉄連による「環境調和型製鉄プロセス技術開発」がスタートした [14]。このプロジェクトの中心は COURSE50 と呼ばれる技術であった。COURSE50 は大きく二つの技術からなる。一つは，コークス炉ガスを改質して水素を生成し，高炉で部分的に水素還元を行うものである。もう一つは，高炉ガスから CO_2 を分離・回収し，貯留するものである(CCS) [15]。CO_2 排出を前者により 10%，後者により 20%削減することが目標とされた。2030 年に実用化が想定されていた。

また，フェロコークスの開発も 2008 年から開始された。フェロコークスとは，石炭と鉄鉱石を事前に粉砕・混合・成型し，加熱することで生成される複合塊成物である。高炉内で起こっている鉄鉱石還元反応の効率の改善が期待できる。フェロコークスの適用によって，製銑工程でのエネルギー消費を 10%削減することが目標とされた。やはり 2030 年に実用化することが想定された。

COURESE50 もフェロコークスも BF-BOF 法を前提として技術であった。日本鉄鋼業は，BF-BOF 法をリノベーションし，現存する銑鋼一貫製鉄所を保持したままでの次世代技術を開発しようとしていたのである。

4 ポスト京都期における削減目標の曖昧化と「低炭素社会実行計画」: 総量規制の拒絶

2010 年代前半は，ポスト京都議定書の国際的スキームが定まらず，日本の GHG 排出削減目標もあいまいになった。そのような状況下で，経団連は 2013 年 1 月に 2020 年までの「低炭素社会実行計画」を定めた。そこでは排出削減目標は各業界の自主的設定に任せられた [16]。

ポスト京都の枠組みの不在の下，鉄鋼業界は CO_2 排出総量の目標を拒否し，BAU 比削減目標を設定した。具体的には，鉄連は 2020 年度の粗鋼生産量を何種類か想定し，それぞれの生産量において想定される CO_2 排出量を Business as usual(BAU)とした。そして，最先端技術の最大限の導入により BAU から一定量を削減するという目標を設定した。2020 年の目標は，省エネ等による削減が 300 万トンであった。BAU 比削減目標が達成されても，粗鋼生産量が大きくなれば，CO_2 排出総量の減少は保証されなかった。

BAU 比の目標設定は，鉄連が，BF-BOF 法の粗鋼生産量を維持・拡大しながらでも達成しやすい目標を設定したことを意味していた。また鉄連は，日本鉄鋼業の優れた省エネ技術・設備の鉄鋼業への移転・普及によって国内よりも海外で CO_2 排出削減に貢献できると主張した。この計画では，日本国内での BF-BOF 法から EAF への技術転換の必要性は，まったく想定されていなかった。

2020 年には，この取り組みの思わぬ結果が明らかになった。COVID-19 の影響で高炉を一時休止するなど非連続的な操業が行われたため，BAU 生産量が合理的に算出できなくなる一方，目標から外した CO_2 排出総量は低下したのである（図 3）。その原因は，2008 年の世界金融危機以降，国内需要が縮小し，さらに 2014 年以降は新興国との競争により，輸出も減少し始めたことにあった。鉄鋼業界は総量規制を課せられなかったにもかかわらず，生産量減少を余儀なくされたのである。しかも，排出原単位は 2013 年度以降，ほとんど改善しておらず，排出削減はもっぱら生産量低下によるであった。

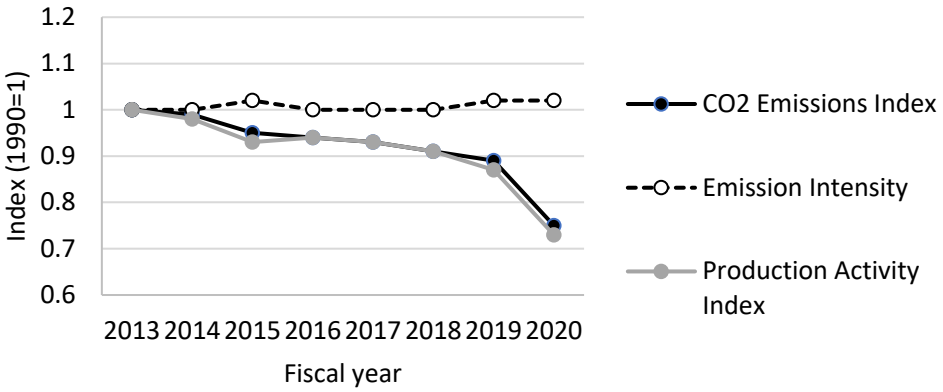

図 3　低炭素社会実行計画期における日本鉄鋼業の CO_2 排出量，排出原単位，生産活動指数

出所：図 2 に同じ。

５ パリ協定と「カーボンニュートラル行動計画」：総量削減の受容と技術転換

2015 年 12 月, COP21 においてパリ協定が締結され, 2016 年に発効した。パリ協定では，世界共通の目標として，世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求することが設定された。日本政府は，当初 GHG を 2030 年度に 2013 年度比で 26%削減するという目標を掲げたが，2020-21 年にこれを上方修正した。まず菅義偉首相が 2050 年にカーボンニュートラルを実現することを宣言し，続いて 2030 年までの GHG 排出削減目標が，2013 年度比 46%削減，さらに 50%に向けて挑戦を続けると修正されたのである。

鉄連はパリ協定を受けて 2018 年 11 月に長期温暖化対策ビジョン「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」を発表した（鉄連 2018）。そこでは，COURE50 が実用化したとしても，パリ協定の求める水準には達しないことが明らかにされ，超革新技術として外部から水素供給を受けて還元剤に用いる Super COURSE50，さらに水素直接還元製鉄技術，そして CCUS の必要性が強調された。また，鉄連はこのビジョンにおいて，世界的には BF-BOF 法の比率が低下していくことを初めて予想した。しかし，日本国内での EAF 法への転換の必要性には言及しなかった。

しかし，政府のカーボンニュートラル宣言は，日本国内での GHG 総量削減を迫るものであったため，経団連や鉄連にとっても方針転換が不可避となった。鉄連は 2021 年 2 月に自らもカーボンニュートラルを目指す基本方針を発表した。そして 2030 年目標を 2022

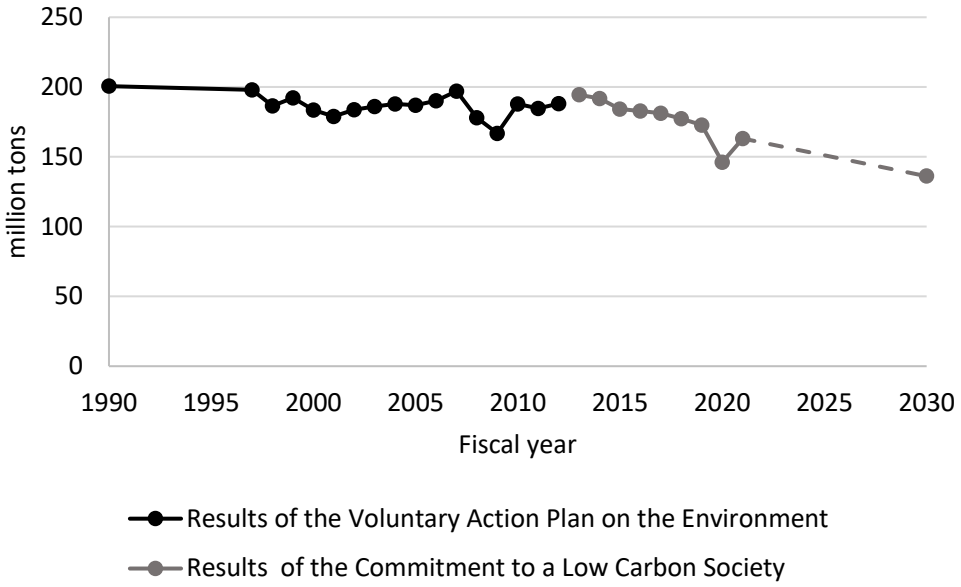

図 4　鉄連行動計画参加企業の CO_2 排出量
注：2021-2030 年度は目標値。
出所：図 2 に同じ。

年 3 月の経団連「カーボンニュートラル行動計画」に反映させた [17]。高炉メーカー3 社もすべて 2050 年カーボンニュートラルを宣言した。

新たな目標は，2030 年度のエネルギー起源 CO_2 排出量を，2013 年度比で 30%削減するというものであった。行動計画に参加している鉄鋼企業の過去の CO_2 排出実績と 203 年の目標を図示したのが図 4 である。30%とは 5790 万トンの削減に相当した。この目標達成に最も貢献する要因は，2030 年度までに予想される粗鋼生産量縮小であり，それだけで 3400 万トンを削減することが計画された。また，初めて原材料における冷鉄源（スクラップと DRI）の利用拡大方針が明記され，これにより 850 万トン減することが想定された。COURSE50 とフェロコークスの実用化も削減に貢献するとされたが，その貢献度は上記の二つよりも小さく，260 万トンとされた。

６ 水素 DRI 技術と EAF による高級鋼製造技術開発への着手

パリ協定とカーボンニュートラルは，次世代技術開発の方針の転換も促した。ここでも BF-BOF 法の枠を超えて，水素 DRI 法と EAF 法が対象となったのである。

2021 年 12 月，経済産業省はグリーンイノベーション基金事業により，NEDO に 2 兆円の基金を造成し，カーボンニュートラルに向けたグリーン成長戦略に寄与するプロジェク

トを支援することとした[18]。そして，高炉メーカー各社の参加する「製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクト」が採択された。研究開発項目は二つあり，一つは高炉を用いた水素還元技術の開発であり，2030 年に SuperCOURESE50 の中規模試験高炉で実証を行うことを目標としている。もう一つは水素だけで低品位の鉄鉱石を還元する直接水素還元技術の開発である。これは，直接水素還元技術それ自体と，直接還元鉄を活用した EAF の不純物除去技術開発を含む。直接水素還元技術の開発目標も 2030 年の実証である。

次世代技術への取り組みにも，メーカーごとの相違が現れ始めた。日本製鉄は COURESE50，SuperCOURE50 をそのまま採用する計画である。JFE スチールは高炉への酸素吹込み法と，排出ガスを水素を用いてメタンに改質し，最後高炉に装入するカーボンリサイクル技術を開発している。いずれにおいても，CCUS による補完が必要とされる。神戸製鋼所はより差別化した行動をとっている。同社は日本国内では BF-BOF ベースの生産を行っているが，アメリカの DRI エンジニアリング企業 MIDREX を子会社としている。神戸製鋼は天然ガス DRI のエンジニアリング事業を拡大しており，水素 DRI 技術の開発も公的資金に依拠せずに行っているのである。

7 各社の投資行動と国際競争

BF-BOF メーカーは次世代技術の実用化は 2030 年と見込む一方, EAF の適用拡大に着手した[19]。日本製鉄はすでに広畑地区の製鋼炉を EAF に切り替えており，八幡地区でも EAF 法への転換について検討を開始した。いずれも EAF で高級鋼の生産を行うものである。さらに，海外での企業買収を進める中で，インドにおいては DRI-EAF 法を主力とするメーカーを Arcelor Mittal と共同で買収し，スウェーデンとタイでも EAF メーカーを買収した。またアメリカにおける Arcelor Mittal との合弁企業にも EAF を導入した。JFE スチールは倉敷地区で 2028 年前後に高炉を 1 基休止して大型 EAF を設置すると発表した。さらに EAF の導入，拡張を他の製鉄所でも進めている。またアメリカでは最大手 EAF メーカーの Nucor と合弁事業を行い，EAF からの母材供給を増やしている。神戸製鋼所も電炉での高級鋼製造技術を開発中であり，またオマーンにおいて直接還元鉄事業を検討している。

しかし，海外のライバル企業は，すでに EAF のみならず，DRI 法による製鉄所の建設を進めている[20]。世界では 2017-22 年に，EFA5750 万トン，DRI6610 万トンの新規建設プロジェクトが発表された。このうち日本は EAF400 万トンのみである。EAF プロジェクトの主要実施国は 1500 万トンのアメリカ，それぞれ 700 万トンの中国とイラン，それぞれ 400 万トンのカナダと日本であり，DRI プロジェクトの主要実施国は 1400 万トンのドイツ，1200 万トンのスウェーデン，それぞれ 700 万トンのフランスとロシア，それぞれ 500 万トンの，オーストラリア，サウジアラビア，中国である。DRI は，当面は天然ガスで操業を開始するが，やがて水素製鉄に切り替えることを予定されている。対して BF-BOF 法と

CCUS を組み合わせた技術の実機プロジェクトはまったくない。日本の BF-BOF メーカーは，次世代技術の開発と実用化において先頭を走っておらず，ライバルたちに後れを取っているのである。

V　ディスカッションと結論

1 BF-BOF 法に固着した技術経路

京都議定書期からパリ協定期までの日本鉄鋼業の CO_2 排出削減対策の特徴を表 1 にまとめておこう。

日本の鉄鋼業界は，省エネルギー技術の蓄積を生かすことと部分的水素還元技術の開発によって，CO_2 排出削減を試みてきた。その際に置かれていた前提は，日本メーカーが BF-BOF 技術の最高峰にあることと，また今後も BF-BOF 技術を堅持すべきことであった。少なくとも京都議定書とポスト議定書期において，グリーンスチールを目指す日本メーカーの技術経路は，BF-BOF 技術の改良とリノベーションに固着していた。

日本鉄鋼業がこの姿勢を取った理由は，BF-BOF 法による一貫製鉄所と，高級鋼生産技術への投資であり，それによって顧客を獲得してきた実績であった。他の製造方法に切り換えることは，固定資本投資が大きいのみならず，高級鋼生産技術を再確立するために時間がかかるものであった。洗練された BF-BOF 技術と，それによる世界第 3 位の生産能力を持っていたことが，鉄鋼メーカーにその延長線上の技術経路を選択させたのである。既存技術である EAF への転換はなされず，粗鋼生産における BOF 比率はむしろ上昇した。そして，次世代技術開発も BF-BOF 法のリノベーションに集中した。日本の BF-BOF メー

表 1　日本鉄鋼メーカーの CO_2 排出削減対策の特徴

＋	京都議定書期	ポスト京都期	パリ協定期
総量規制	実行	無	実行約束
排出原単位低減の効果	進展	停滞	実行約束
生産量減少の効果	無	有	有りと計画
BF-BOF 法の技術開発	実行	実行	実行
EAF 法拡大	無	無	開始
水素 DRI 法開発	無	無	開始

出所：著者作成。

カーは，京都議定書期には排出総量規制の目標を実現したが，ポスト京都期にはこれを忌避し，BF-BOF 法での生産量を維持しようとした。

この固執を解消させたのは，地球温暖化をめぐる国際政治力学であり，その成果としてのパリ協定であった。パリ協定は，日本政府と BF-BOF メーカーにカーボンニュートラルに達するための厳しい総量規制を課した。この目標を BF-BOF 法のリノベーションだけで達成することは不可能であった。こうして，日本鉄鋼業界は EAF の適用拡大と水素 DRI 法の開発に乗り出したのである。

しかし，もう一つの要因がここに作用していた。BF-BOF メーカーは，CO_2 排出規制が緩和されていた「ポスト京都」期にも，国内需要低迷と新興国メーカーとの競争激化によって市場の一部を失った。BF-BOF メーカーは，今後も国内生産が縮小すると認めざるを得なくなり，それ故に CO_2 排出の総量規制を受け入れたのである。

2 インプリケーション

グリーンスチールをめぐる競争の行方は，まだオープンである。しかし，本稿の考察から理論的示唆と歴史的評価，そして新たに発見された論点を引き出すことができる。

第一に，この事例は，環境の政治経済学と，巨大企業の新技術に対する保守的態度に関する理論が，グリーンな次世代技術についても有意義であることを示した。市場で確立した地位にある大企業は，既存技術を体化した固定資本と無形資産を保有するために，生産技術の方式を転換させるようなグリーンイノベーションに抵抗する傾向を持つのである。

第二に，この研究は，日本鉄鋼業の歴史について新たな 1 ページを加えることができた。かつて革新的企業行動で高い評価を得た日本の BF-BOF メーカーは，グリーンスチールを目指す技術開発と設備投資においては，もはやフロンティアに立っていない。BF-BOF 技術への固着によって，行き止まりの技術経路に入りつつあり，EAF 法の適用拡大と水素 DRI 法の開発に遅れを取ってしまったのである。BF-BOF メーカーは，パリ協定と日本政府のカーボンニュートラル宣言の下で，この固着からようやく転換し，競争力を取り戻そうと努力しているのである。

第三に，グリーンスチールを目指す競争が国内生産の空洞化とともに進行する可能性が明らかになった。ポスト京都期の実績が示すように，鉄鋼メーカーは規制が厳しくなったために生産量を減らしたのではなかった。国内市場が成熟し，新興国企業がキャッチアップするという条件の下で，国内生産量を維持することが困難になったのである。そして，この傾向が近い将来も続くと鉄連は想定している。国内生産の縮小は，CO_2 排出削減目標を達成しやすくする。しかし，生産の縮小はまた雇用の喪失をもたらすおそれがあるし，そもそもグリーンな生産が国内で行われる見通しを危うくするのである。

3 残された課題

日本の鉄鋼メーカーが，次世代技術の開発を進める一方で，生産拠点を海外に移動させることが，社会的緊張を引き起こす可能性がある。

日本製鉄と JFE スチールはすでに国内の BF-BOF 能力を縮小しつつある。2020 年以後，高炉を日本製鉄は 5 基，JFE スチールは 2 基休止すると発表した。日本製鉄は粗鋼生産の 60%を海外に配置する計画を持っている [21]。また神戸製鋼所は，エンジニアリングメーカーとして DRI 技術を保有しているため，グローバルなエンジニアリング事業や，海外での DRI 生産に事業の重点を移す可能性がある。

オフショアリングの推進は，以下のような論点を提起する。

第一に，次世代技術開発支援と，それを実用化する立地の問題である。BF-BOF メーカーは，グリーンな生産技術の開発に成功した場合も，それを最も利潤を生みやすい場所に配置する動機を持つし，その場所が日本国内であるという保証はない。しかし，次世代技術による生産のオフショアリングは政治的摩擦を引き起こしうる。というのは，これらの技術開発には日本の公的資金が投入されているからである。

第二に，オフショアリングは汚染の輸出か，グローバルな環境規制の下での比較優位の反映かという問題である。これは進出先の CO2 排出規制の強度に依存する。BF-BOF メーカーが，CO2 排出規制の弱い発展途上国に高炉を建設するならば，それは汚染輸出とみなされるだろう。しかし，途上国でも 2050 年のカーボンニュートラルに向かっての政策が執行されるならば，スクラップ・EAF 法や DRI-EAF 法を用いたオフショアリングは，グリーンな規制の下での，比較優位を持つ生産立地の追求を意味する。

これらの研究は残された課題である。

※本研究は JSPS 科研費 JP20K01905 の助成を受けたものである。

※この原稿は，The Japanese Political Economy 誌に公表された論文 Evaluating the Technology Path of Japanese Steelmakers in Green Steel Competition (https://doi.org/10.1080/2329194X.2023.2258162)の日本語原稿である。著者が研究者，学生の間で非営利的に使用するためのものであり，Taylor & Francis の許諾を受けたものではない。

[1] 本稿が取り扱うのは，鉄鋼業の生産過程からの CO_2 排出削減を目的としたものである。本稿はこれを「脱炭素化」と呼ぶ。また，生産過程における CO_2 排出を，温暖化防止策において求められる水準まで低減した鉄鋼を「グリーンスチール」と呼ぶ。「ゼロエミッション」はより厳格に，生産過程から CO_2 をまったく排出しないことを意味する。

[2] 経団連の行動計画は，政府の政策と整合するように策定されている。例えば，2021 年に日本政府が策定した「地球温暖化防止計画」は，その一部として経団連の行動計画を推進することを含んでいる。

ただし，経団連，業界団体，構成企業にとって，目標は自主的なものであり，その達成を法的に義務づけられているわけではない。

[3] Shoji and Miyamoto(1977)は，庄司・宮本（1975）の第 2 章のみを英訳したものであった。ここで紹介する二つの行動原理は，原著の第 1 章に記されていた。

[4] 国立環境研究所の公表データから著者が計算した。

[5] 粗鋼 1 トンを生産したときの CO_2 排出量を排出原単位と呼ぶ。IEA の原単位算出法では，製鉄・製鋼，鉄鉱石事前処理，還元剤（コークスや水素）の製造，造滓剤製造，コークス炉や高炉ガスからのオフガスの燃焼，移入する電力，熱，水素の生産，供給される化石燃料の生産がバウンダリーの内部にある。これらの過程で排出される CO_2 が計算に含まれる（IEA, 2022, 104-108）。

[6] この段落の数値は worldsteel (2020)から算出したものである。

[7] この段落と次の段落の数値は，特に断らない限り鉄連(各年)によるものである。

[8] Calculated by the author based on 鉄連 (2020). Final use base.

[9] Calculated by the author based on Cullen et al. (2012); Yang et al. (2023).

[10] 環境自主行動計画 Voluntary Action Plan on the Environment については，特に記した場合を除き，以下に掲載されている経団連公式文書を参照した。日本鉄鋼連盟の報告もここに含まれている（https://www.keidanren.or.jp/policy/vape.html#vape）。

[11] 京都議定書では，発展途上国は GHG 排出削減を義務づけられていなかった。アメリカ合衆国は 2001 年に京都議定書を離脱した。

[12] APP は 2005 年にオーストラリア、カナダ、中国、インド、日本、韓国、米国によって設立された。その後，カナダが 2007 年に加盟した。APP は 8 つのタスクフォースを設立し、気候変動を緩和するためのクリーンな技術と手法を開発した。2011 年に正式に終了した。

[13] 例えば，“Energy Efficiency in the Japanese Steel Industry”, JISF, Feb. 25, 2008 (https://www.jisf.or.jp/en/activity/warm/efficiency/index.html). “IEA Report States that Japan Has the World’s Most Energy Efficient Steel Industry,” JISF, Oct.29, 2008 (https://www.jisf.or.jp/en/activity/warm/iea/index.html). IEA(2008)と RYTE システム研究グループ(2008)が引用されている。

[14] この項については，NEDO「環境調和型プロセス技術開発」のページに登載された文書を参照した（https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100050.html）。

[15] CCS とは CO2 を分離・回収・貯留する技術であり，CCUS とは，回収した CO2 を再利用することを含む。

[16] 低炭素社会実行計画については，特に記した場合を除き，以下に記載の経団連公式文書を参照した。日本鉄鋼連盟の報告もここに含まれている(https://www.keidanren.or.jp/policy/vape.html#lcs)。

[17] カーボンニュートラル行動計画については，特に記した場合を除き，以下に記載の経団連公式文書を参照した。日本鉄鋼連盟の報告もここに含まれている (https://www.keidanren.or.jp/policy/vape.html#cnap)。

[18] グリーンイノベーション基金事業「製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクト」については，以下に掲載されている経済産業省，NEDO，および参加各社提出の資料を参照した（https://green-innovation.nedo.go.jp/project/utilization-hydrogen-steelmaking/）。

[19] この段落に記した事実関係は，以下を参照。”Start of Studies to Shift from Blast Furnace Steelmaking Process to Electric Arc Furnace Steelmaking Process,” Nippon Steel, News Release, May 10, 2023(https://www.nipponsteel.com/common/secure/en/news/20230510_400.pdf): JFE Steel Corporation Carbon Neutrality Strategy Briefing, Sep. 1, 2022(https://www.jfe-holdings.co.jp/en/investor/climate/presentation/index.html): Kobe Steel to accelerate feasibility study of Low-CO_2 Iron Metallics Project in Oman, Kobe Steel Ltd., Apr. 10, 2023(https://www.kobelco.co.jp/english/releases/1211747_15581.html).

[20] この段落の数値は，Global Steel Transformation Tracker, Agora Energiewende website(https://www.agora-energiewende.de/en/service/global-steel-transformation-tracker/) (Accessed on May 11, 2023)による。

[21] Nippon Steel Corporation Announces Medium- to Long-term Management Plan, Nippon Steel Corporation, May 5, 2021(https://www.nipponsteel.com/en/ir/library/pdf/20210305_100.pdf). JFE Steel to Optimize Domestic Production Operations through Structural Reforms, JFE Steel Corporation News Release, March 7, 2020(https://www.jfe-holdings.co.jp/en/investor/zaimu/g-data/2019/March2020-200327-release03.pdf). FY2022 Earnings Summary, Nippon Steel Corporation, May 10, 2023(https://www.nipponsteel.com/en/ir/library/pdf/20230510_600.pdf).

※インターネットリソースは，別途注記したものを除き，2023 年 8 月 20 日に最終点検した。

参照文献

Adams, W. 1995. “Steel.” In *The Structure of American Industry 9th edition*, edited by W. Adams and J. Brock, 93–118. Hoboken, New Jersey: Prentice Hall.

Adams, W., and J. B. Dirlam. 1966. “Big steel, invention, and innovation.” *The Quarterly Journal of Economics* 80 (2): 167–189.

Agora Industry, Wuppertal Institute and Lund University. 2021. *Global Steel at a Crossroads. Why the global steel sector needs to invest in climate-neutral technologies in the 2020s.* Berlin, Germany: Agora Industry. アゴラ・インダストリー，ヴッパータール研究所，ルンド大学編，自然エネルギー財団訳 2021.『岐路に立つ世界の鉄鋼：世界の鉄鋼セクターが 2020 年代に気候中立的な技術に投資すべき理由』自然エネルギー財団。

Baba, Y., and S. Takai. 1997. “Metallic Materials Industry.” In *Made in Japan: Revitalizing Japanese Manufacturing for Economic Growth*, edited by Japan Commission of Industrial Performance, 97–121. Massachusetts: The MIT Press.馬場靖憲・高井紳二 1994. 「金属系素材産業」日本インダストリアル・パフォーマンス委員会（JCIP）編『メイド・イン・ジャパン：日本製造業変革への指針』（pp. 133-161）ダイヤモンド社。

Baldwin, C. Y., and K. B. Clark. 1994. “Capital-Budgeting Systems and Capabilities Investments in US Companies After the Second World War.” *Business History Review* 68 (1): 73–109.

Baran, P. A., and P. M. Sweezy. 1966. *Monopoly Capital: An Essay on the American Economic and Social Order*. New York, NY: Monthly Review Press. P. バラン&P. スウィージー（小原敬士訳） 1967. 『独占資本： アメリカの経済・社会秩序にかんする試論』岩波書店。

Brenner, R. 2006. *The Economics of Global Turbulence*. New York: Verso Books.

Christensen, C. M. 1997. *The Innovator’s Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail*. Boston, MA: Harvard Business School Press. C. クリステンセン（玉田俊平太監修・伊豆原弓訳）2001.『イノベーションのジレンマ : 技術革新が巨大企業を滅ぼすとき 増補改訂版』翔泳社。

Cullen, J. M., J. M. Allwood, and M. D. Bambach. 2012. “Mapping the Global Flow of Steel: From Steelmaking to End-use Goods.” *Environmental Science & Technology* 46 (24): 13048–13055.

D’Costa, A. P. 1999. *The Global Restructuring of the Steel Industry: Innovations, Institutions and Industrial Change*. London: Routledge.

Dertouzos, M. L., R. M. Solow, and R. K. Lester. 1989. *Made in America: Regaining the Productive Edge*. Cambridge, MA: The MIT Press. M. L. ダートゥゾス・R. M. ソロー・R. K. レスター（依田直也訳）1990. 『Made in America：アメリカ再生のための米日欧産業比較』草思社。

Hasegawa, H. 1996. *The Steel Industry in Japan: A Comparison with Britain*. London and New York: Routledge.

International Energy Agency (IEA). 2008. *Energy Technology Perspective: In Support of the G8 Plan of Action*. Paris, France: International Energy Agency.

International Energy Agency. 2020. *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking*. Paris, France: International Energy Agency.

International Energy Agency. 2022. *Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members*. Paris, France: International Energy Agency.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Geneva: IPCC.

Kawabata, N. 2003. "Competitive Strategy of the Japanese Integrated Steel Firms in Mature Stage." Paper presented at the 27th International Conference of Business History (The Fuji Conference), Susono, Japan, January 2003.

Kawabata. N. 2012. "A Comparative Analysis of Integrated Iron and Steel Companies in East Asia." *The Keizai Gaku, Annual Report of the Economic Society* 73(1/2): 23–42.

経済産業省 2020. 『工業統計調査』東京，経済産業省。

Kipping, M. 1998. "Co-operation between Steel Producers and Steel Users." In Vol. 1 of *The Steel Industry in the New Millennium,* edited by R. Ranieri and J. Aylen, 215–234. London: IOM Communications.

Kobori, S. 2017. "The Development of Energy-Conservation Technology in Japan, 1920–70: An Analysis of Energy-Intensive Industries and Energy-Conservation Policies." In *Economic Development and Environmental History in the Anthropocene: Perspectives on Asia and Africa*, edited by G. Austin, 219–243. London: Bloomsbury.

Lester, R. K. 1998. *The Productive Edge: How U.S. Industries Are Pointing the Way to a New Era of Economic Growth*. New York: W. W. Norton & Company. R. K. レスター（西村隆夫・田辺孝二・藤末健三訳）2000. 『競争力：「Made in America」10 年の検証と新たな課題』生産性出版。

三村毅 2023.「直接還元製鉄法の進化と脱炭素製鉄への展望－MIDREX プロセスを中心としてー」日本鉄鋼協会 Web 講演会～鉄鋼技術最前線シリーズ～，1 月 11 日。

日本鉄鋼連盟. 1991-2022.『鉄鋼統計要覧』東京，日本鉄鋼連盟。

日本鉄鋼連盟. 2018.「日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン『ゼロカーボン・スチールへの挑戦』」東京，日本鉄鋼連盟。

Sato, H. 2009. "The Iron and Steel Industry in Asia: Development and Restructuring." *IDE Discussion Papers* 210: 1–35.

Sato, H. 2016. "Advantages of Backwardness and Linkage Effects: The Steel Industry in Asia." In *Varieties and Alternatives of Catching-up: Asian Development in the Context of the 21st Century*,

edited by Y. Sato and H. Sato, 153–181. London, UK: Palgrave Macmillan. 佐藤創 2014.「キャッチアップ型工業化論と鉄鋼業―「ガーシェンクロン vs. ハーシュマン」をめぐって―」『アジア経済』*55*(4), 8-38.

Scheuerman, W. 1986. *The Steel Crisis: The Economics and Politics of a Declining Industry.* New York, NY: Praeger.

庄司光・宮本憲一 1975.『日本の公害』東京，岩波書店。

Shoji, H., and K. Miyamoto. 1977. "Environmental Pollution in Japan." *Japanese Economic Studies* 5 (4): 3–40.

Systems Analysis Group, Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE). 2008. *International Comparisons of Energy Efficiency (Sectors of Electricity Generation, Iron and Steel, Cement)*. Kyoto: Research Institute of Innovative Technology for the Earth.

上園昌武 1997.「石油危機を契機とした日本鉄鋼業の省エネルギー対策」『経営研究』*48* (1): 135–152.

World Steel Association (worldsteel). 1991-2022. *Steel Statistical Yearbook*. Brussels: World Steel Association.

Yang, H., L. Ma, and Z. Li. 2023." Tracing China's Steel Use from Steel Flows in the Production System to Steel Footprints in the Consumption System." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 172, 113040.

Yonekura, S. 1994. *The Japanese Iron and Steel Industry, 1850-1990: Continuity and Discontinuity*. New York: St. Martin's Press.