

特集記事 • 1

カーボンニュートラルに向けた日本の各産業の取り組み

カーボンニュートラルに向けた鉄鋼業の取り組み

Challenges in the Global Steel Industry toward Achieving Carbon Neutrality

星野岳穂

Takeo Hoshino

東京大学大学院 工学系研究科
マテリアル専攻 特任教授(日本鉄鋼協会カーボンニュートラル検討会議
委員長)

1 世界中が「カーボンニュートラル」を目標に大転換の動き

近年は、異常気象が毎年のように頻発し、集中豪雨による大規模水害が日本国内はもとより世界各地で頻発するようになり、今年（2023年）は、7月5日の世界平均気温が観測史上最高の17.5℃を記録し、過去12万年で最も暑い7月となった（図1）。国連のアントニオ・グテーレス事務総長が、いまや温暖化を超え「地球沸騰化」とさえ言われる時代になったと表現¹⁾し、話題を呼んだ。実際、世界各地で、高温、熱波はもとより大規模な山火事、豪雨等更なる異常気象が同時多発している。現時点では、こうした局所的な「異常気象」と広域的な「地球温暖化」は科学的には因果関係が立証されておらず、異常気象は気候の自然なリズムの一部であるとしているが²⁾、急速な世界の気象に何らかの影響を及ぼしているとい

る論調が増えている。これからも温暖化は徐々に進展していくのだ。異常気象は今後も頻発することが警告されている。今や、気候変動の進展は、人類にとって実害をもたらす「今そこにある危機」と認識されるようになり、この状況を克服するために、気候変動の原因と指摘されている人為的な温室効果ガス、特に二酸化炭素ガスの大幅な排出量削減を実現する大転換を促す政策を世界中で官民学金の英知とパワーを総動員させ、直ぐにでも実行に移していかなければならない状況、待ったなしの状況にあるというのが、世界のコンセンサスとして形成されている。

2015年11月4日にCOP21で署名された画期的な「パリ協定」の目標では、産業革命以前の気温より1.5℃に抑えるよう「努力」することであったが³⁾、その後、1.5℃以下に抑えること、これを実現するための2050年までに気候的に中立的な世界、「カーボンニュートラル」を実現することが、単なる「努力」目標でなく世界共通の確実に実現すべき目標となった。2021年末のCOP26終了時点（2021年11月）では、121ヶ国が合意、CO₂排出量17.9%のカバー率であったが、その後4～5年の間に世界規模で一気にカーボンニュートラルの機運が高まり、2021年11月時点では累計150ヶ国以上が合意しているが、これは、世界全体のCO₂排出量の88.2%を占めるカバー率である。ここ数年間で、金融の動きと政府の動きが相まって各企業への圧力が高まり、脱炭素社会の構築を目指す世界規模の大潮流が形成された。

人為的な二酸化炭素の排出源は、世界全体で現在368億tにまで達しているが、では、その起源は何であるかを見てみると、化石燃料（石油、石炭、天然ガス）をエネルギー源とする発電、自動車等の輸送機器による燃料消費等と、各国の経済を支える基盤材料（鉄鋼、セメント、石油化学製品等）の生

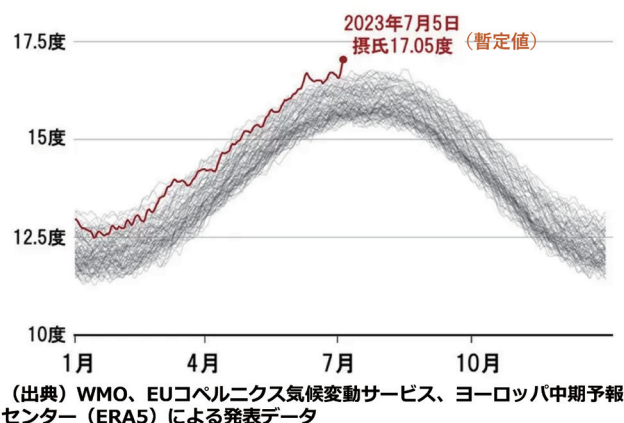


図1 1940～2023年の世界の毎日の平均気温 (Online version in color.)

産に使用する化石燃料由来のCO₂が主要な排出源となっている。2015年、基盤材料生産によるCO₂排出量は11Gt (CO₂換算t) となり、1995年の5Gtから2倍に増加し、この間、世界総排出量に占める比率は15%から23%へと高まっている⁴⁾。このうち鉄鋼生産量は世界で約16億tに達しており、鉄の製造工程で排出した二酸化炭素 (CO₂) の量は増加量の約5%を占めている。

鉄鋼生産では高炉での酸化鉄の還元反応に炭素(コークス)を使用するため、鉄生産反応で必ずCO₂が生成されてしまう。高炉で鉄鋼1t作ると、下工程も合わせると2tのCO₂が排出する計算になる。鉄鋼業は、莫大な生産量に応じてCO₂の排出量も膨大になるため、生産プロセスそのものを大転換して脱炭素プロセスに大転換しなければならないという課題に直面している。

今後も世界の人口は増加し続けると予測され、世界経済も成長し続ける見込みであり、そのために必要な鉄鋼需要量を満たすためには、高炉―転炉法をベースにして供給される品位が高く安価で大量生産が可能な鉄鋼プロセスが人類の持続的発展にとって必須である。この認識は、2022年10月3～5日、ベルギー・ブリュッセルにて開催低炭素オープンフォーラム2022において世界鉄鋼連盟から、鉄鋼材料は、各国の産業経済の発展を支える礎であり、人類に不可欠な素材であって、今後はカーボンニュートラルを達成するために、全世界での製鉄における電炉のシェア (現在は約30%) が2050年までに40%～44%まで上昇するが、高炉は2050年においても重要な役割を果たし、高炉―転炉法の脱炭素オプションは不可欠である旨が説明されている⁵⁾。

地球温暖化対策とはいえ、CO₂の排出を抑制するために、鉄鋼の生産量を減らしたり、従来の化石燃料による生産より生産性の低いプロセスを選択したりすれば、鋼材価格が急上昇し、世界経済全体の発展の足かせとなってしまう。地球温暖化を巡る世界の動き、各国鉄鋼企業の今後の戦略もまだ不透明であり、日本の鉄鋼業も、「後で後悔しない戦略」「産業の国際競争力を失わないように」という原則を忘れずに、様々な対策の組み合わせを、拙速ではなく柔軟かつ臨機応変に戦略を選択し進めて行くべきではないか。

2 世界の鉄鋼生産のカーボンニュートラル実現の戦略の方向

鉄鋼業は基礎資材として国家を支える素材を供給する産業であり、膨大な鉄鋼を生産するため、総量としてCO₂排出量が多くなるのはやむを得ない。鉄鋼1kg生産する際に発生するCO₂排出量は約2t⁶⁾で、他の金属素材、構造材料と比較すると鉄鋼は極めてエコな材料と評価できるのだが、なに

ろ世界で年間16億tも生産するため、排出総量が余りに大きくなる。では鉄鋼を他の構造材料に転換可能かという点、代替した方が、かえってLCA的にはCO₂排出量が増えてしまうし、もとより素材の機能と価格、生産量のバランスで鉄鋼を代替できる基盤材料が存在しない。そうした材料だからこそ、人類の文明を支え、数千年間も利用され続けてきた基盤材料であり、世界各国とも鉄鋼業の自国における重要性を認識しつつ、なんとか鉄鋼生産で脱炭素を実現する革新的な戦略を見出すべく、政府と産業界が協力して総力を挙げて研究開発や技術実証を進め、急ピッチで最適解を見出す努力を展開しつつある。

鉄鋼生産を維持しつつ、CO₂排出を大規模に削減するためには、要すれば、

- ①鉄鋼の生産量を削減する、
- ②素材の生産プロセスを省エネ化
- ③脱炭素プロセスへの転換 (水素還元、バイオマス利用、生産プロセス電化)、
- ④発生したCO₂を分離回収し、再利用するか地下に貯留する (CCS)

の4つの選択肢の中から対策を進めるしかない。しかし、①世界の鉄鋼需要はまだ増大する、②日本の鉄鋼業は、世界で最もエネルギー効率が高い、③還元剤を炭素以外に探すのは量の確保、価格の面で難しく、鉄鋼の生産プロセスの電化については、高炉内の温度は1600℃程度の溶鉱炉 (最高で2000℃) の中で鉄鉱石 (酸化鉄) が炭素によって化学的に還元されるものであり、こうした化学反応に必要な高温の熱需要は、特に電化することが難しい。④は工業技術的には未確立であり、高コスト化が避けられない。

それぞれに課題がある以上、今の段階から、将来戦略を「水素還元製鉄」やCCSの利用に過度に期待し、選択を絞り込んでしまうと柔軟性がなくなってしまう懸念がある幅広い選択肢をもって不確実な将来に備えてはいかがであろうか。

特に、水素やCCSが、国内の鉄鋼生産に必要な量を国内で確保できない、それでもどうしても確保するとすると、他産業との厳しい争奪戦になり、結果、高コストを負担することになり、海外インフラに依存することになってしまう。鉄鋼生産コストが高まる。日本の鋼材価格が品質と競争力を維持しつつ必要な量を供給する能力を維持しなければ、我が国の鉄鋼業や鉄鋼製品を使用する日本の自動車産業、産業機械産業等の国際競争力に大きく影響をおよぼす恐れがある。

3 世界の鉄鋼業の取り組み

鉄鋼業のカーボンニュートラル実現で直面している課題は、日本の鉄鋼業だけでなく世界の鉄鋼業全体の課題であ

る、その中で、世界の鉄鋼業はどう取り組んでいるか、その最新の動向を良く知ることは日本の戦略を検討する上で大切である。

3.1 欧米の鉄鋼業

3.1.1 世界に先行する欧州の鉄鋼業の取り組み

カーボンニュートラル実現に向けた鉄鋼業の取り組みは、世界では、欧州の初動が早く先行している感がある。実際、欧州各国の鉄鋼企業は各国政府の莫大な資金面の支援を受け、新製鋼プロセスの脱炭素化の実現に向けて色々な技術実証プロジェクトを立ち上げてきている。

現在では、①電炉+直接還元製鉄 (DRI) / 水素直接還元製鉄 (H2DRI) の方向で進めるのが主流になっていると言える。当初は水素でなく天然ガスを使用し、後にグリーン水素の十分な調達の目途が立ったところで水素に転換する計画を進めている。一時期、タタ・ヨーロッパは2021年、日本と同様の高炉+ CCUS方式を検討すると発表した⁷⁾が、本開発計画を凍結した⁷⁾。特にCCUSのコストが想定以上に高く、競争力が確保できないことが中止の理由だったようだ。それ以降、現在欧州では高炉+ CCUSの新規プロジェクトの例は見られない。

欧州で公表されているカーボンニュートラルを実現する実用炉建設の実証プロジェクトは、新規の低炭素プロジェクトとして発表された投資分の総計で、既に生産量3600万tに達している⁷⁾。(直接還元2800万t、電炉800万t)。具体例としてSSAB (製鉄)、LKAB (鉄鉱石生産)、Vattenfall (電力会社) は、直接水素還元技術の開発に向けて、2016年に共同イニシアチブである「HYBRIT」を創設した。30万tのデモプラントを立ち上げ、2026年には商業生産開始を目指す⁸⁾と表明している。

<新しい製鉄技術への挑戦：電気分解製鉄法の量産プラント>

アルセロール・ミッタルと、鉄鋼加工施設と電解装置の開発を主導するグループジョン・コッカリルは、最近、EUのHorizon 2020プログラムを通じて公的資金の技術開発費の支援を受け、2023年6月、世界初の工業規模の低温鉄電解プラントの建設計画を発表した⁸⁾。酸化鉄を鉄板に変換する革新的な電気化学プロセスの開発を進めてきた。パイロットスケールのプラントでは、標準的な鉄鉱石を使用すると非常に効率的であることが実証され、電気分解の過程でできた鉄板は、電気アーク炉で鋼に加工する。

第1段階で年間4万tから8万tの鉄板を生産する予定で、2027年に生産を開始する予定である。この規模で技術が証明されたら、プラントの年間生産能力を30万tから100万tに増やす予定としている。

直接電解は、アルセロール・ミッタルがネットゼロ製鋼を実現するために取り組んでいる3つの脱炭素化技術経路の1つとなっている。

3.1.2 米国鉄鋼業の取り組み

米国は粗鋼の電炉比率が71% (2020年) と他国と比較して高く、CO₂排出量原単位は1.21 (2020年) と主要国の中で突出して低い有利なポジションにいる。

DOE (米国エネルギー省) が2022年9月に公表した「脱炭素ロードマップ」⁹⁾によれば、米国において産業部門由来のCO₂排出量は国家全体の30%を占めているが、鉄鋼生産は、工業エネルギー関連のCO₂排出量の7%を占めるに過ぎない。世界で比較すると、相対的に鉄鋼業からのCO₂排出量が少ないが、米国の鉄鋼各社は電炉メーカーが多いため、再生可能エネルギー等によるグリーン電力の更なる利用、CCS/CCUS技術の開発など様々なアプローチをDOEの資金支援を得て進めている。米国全体としては、粗鋼生産に占めるEAF比率を更に上昇させ、今後数年間で電炉比率は75%近くになる見込みである。米国では、電炉の原料配合には、平均で約90%から95%のリサイクルスクラップが使用されているが、近年では還元鉄の利用が増加している。

こうした状況であるため、米国政府は、革新的プロセスの技術開発というより米国产の「グリーンな」鉄鋼の使用を増やし、一方で排出量の多い鉄鋼生産国からの「グリーンでない」鉄鋼輸入を抑えるよう、EUと同様に、国境調整メカニズムの導入等、制度の拡充に力を入れている。

米国は、電炉中心のため鉄鋼生産量1tあたりのCO₂排出量が世界の主要鉄鋼生産国中で最も少ない国であることから、他国 (特に中国) の高炉ベースの鉄鋼生産は、米国で生産される鉄鋼1tあたりのCO₂排出量のほぼ2倍を排出して生産されており、米国内では、強力で効果的な炭素国境調整メカニズムの確立が重要と議論されている。

また、北米のNucorやBigRiverSteel等では、特に高級鋼材製造に向けた改善として、スクラップ使用量を抑え、直接還元鉄の利用を拡大している。直接還元鉄の利用の主たる目的は、スクラップ中に含まれるCu、Sn等のトランプエレメントの希釈材としての利用、および窒素の低減である。

<新しい製鉄技術への挑戦：溶融酸化物電気分解>

DOEの「脱炭素ロードマップ」⁹⁾では、ブレイクスルーが必要な7つの技術分野として①炉内ガス回収、②大規模なDRIでの低炭素H₂の実装、③再加熱炉の電化、④電気分解による鉄の生産、⑤H₂プラズマ製鉄還元、⑥高炉ガスの回収、⑦リサイクルが挙げられている。

このうち、④の「電気分解による鉄の生産」が列挙されているのが興味深い。米国Boston Metal社は、電気を使用して原料酸化物から高純度の溶融金属製品を作り出す「溶融酸化物電気分解：Molten Oxide Electrolysis (MOE)」という方式の量産製鉄技術への応用に取り組んでいる。同社のMOE技術は、2010年のMITのDonald Sadoway教授とAntoine

Allanore教授による不活性アノード技術の研究成果に基づいている¹⁰⁾。これまでMOEによる製鉄は、電気分解の過程で発生する高熱と腐食に電極が耐えられないことから実現が困難であるとされてきたが、クロム合金の一種が電極として使用に耐えることがMITの研究の末に発見され、研究開発を重ねて同技術は実用化の可能性が見えてきたと説明されている。消耗品である陽極材料（合金鉄やチタンに使用されるグラファイト）や、陽極材料（鉄に使用されるイリジウム）を用いて実証されている¹¹⁾。ここでは、クロムを主成分とする合金からなるアノードが、MOEによる鉄の抽出と酸素の発生において安定であることを示しており、鉄鋼生産におけるMOEの大規模な評価が現実的になり、優れた冶金品質の金属を生産しながら温室効果ガス排出を緩和できる可能性を示している。鉄鋼以外の金属もCO₂を出さずに生産可能なプロセス技術であることが、世界中から注目されている。現在は未だ大量生産段階には至っておらず、商業化レベルの大規模炉を完成させるにはあと2〜3年を要するようだが、電流分布や電解液の化学的性質等の条件が適切に設定されないと陽極が直ぐに劣化してしまう傾向にあるとのことでまだ課題がありそうだ。アルセロール・ミタルが主導するシリーズC資金調達の初回クローズでは1億2000万ドルを調達し、同資金をパイロットプラントの建設費用に充てる予定と発表されており、これは研究施設のリアクターの約1000倍の規模で、商業化にはその10倍のセルを開発する計画だとされており、同研究開発にはマイクロソフトの気候イノベーション・ファンドも参加している。今後の動向を注視したいイノベティブな技術である。

3.2 アジア（中国・韓国）の鉄鋼業の取り組み

アジアの鉄鋼業界でも、環境に配慮した取り組みが進んでいる。韓国は、高炉から直接還元へ段階的に移行を進めることで、2030年までにCO₂排出量を20%削減、2040年までに50%削減、2050年までにカーボンニュートラル実現を目指すとしている。

<新しい製鉄技術への挑戦>

POSCOは、「FINEX[®]（ファイネックス）」という製鉄技術を使い、低品位原料を活用可能な「流動層還元法」を採用することで、CO₂排出量を削減する水素還元技術「HyREX」を開発している¹²⁾。将来的には、既存高炉を段階的に移行し、2030年までにCO₂排出量を20%削減、2040年までに50%削減、2050年までにカーボンニュートラル実現を目指している。

中国の鉄鋼メーカーは、「酸素高炉」を検討する¹³⁾ことで、石炭使用量を削減し、CO₂排出量を削減する方針を示している。中国には、規模の小さい、いわゆる「ミニ高炉」が多く、

これを使って中国の鉄鋼企業が水素還元の研究に相次ぎ乗り出している。2019年に宝武鋼鉄集団はミニ高炉を利用して水素還元の研究を開始した。鞍鋼集団や河鋼集団など他の大手も研究開発を始め^{14,15)}、高炉での製鉄や直接還元鉄の製造に水素を還元剤として利用し、CO₂の排出を削減する取り組みを始めている。

4 日本の鉄鋼業の取り組み

4.1 日本の戦略：国家プロジェクトで挑む高炉ベースの水素還元製鉄

世界中の多くの鉄鋼企業が、天然ガスまたは水素から直接還元鉄を作り、電炉で溶かして製鉄する方法を採用することが主流となる中、日本は高炉をベースに一部改造し、還元材の一部を水素で代替する技術を開発し、世界初の高炉ベースでの水素還元技術開発とCO₂分離回収製鉄法の組み合わせによって、政府の支援を得て「COURSE50（CO₂ Ultimate Reduction System for Cool Earth 50）」というプロジェクト名で、CO₂排出量を30%削減する先進技術の開発を進めてきた^{16,17)}。

本プロジェクトでは、CO₂排出量削減技術開発とCO₂分離・回収技術開発の2つの目標を掲げている。具体的には、①水素をコークスの一部代替として鉄鉱石を還元し、CO₂を10%削減する技術と、②高炉ガスからCO₂を分離・回収し、CO₂を20%削減する技術を開発することがプロジェクトの目的である。もともとCOURSE50はパリ協定よりもかなり前の2008年から始まったプロジェクトであり、プロジェクト開始当初はカーボンニュートラルを目標にしておらず、製鉄所内で生成される水素で還元する（水素の供給を外部に頼らない）システムを想定していたこともあるが、カーボンニュートラルビジョンの実現に向けては、CO₂排出量の削減率が30%では足りないことから、CO₂排出量50%以上の削減を目指す新プロジェクト「Super COURSE 50」¹⁸⁾をCourse 50の後継として、NEDO先導研究「ゼロカーボン・スチール実現に向けた技術開発」において、2020年度から研究開発を開始し、2021年にグリーンイノベーション基金事業に移行して推進している。プロジェクトの内容詳細は、他の文献に譲ることとしたが、日本製鉄のほか、JFEスチール、神戸製鋼所、金属系材料研究開発センターの4社がコンソーシアムを形成し、高炉への水素吹込み量を増やし、高炉に投入する炭素量を減らす挑戦を行っている。高炉法において製鉄プロセスからCO₂排出を50%以上の削減を実現する技術実証にむけて研究開発を進めている。

現在、高炉による大量生産には高度な操業技術力が必要で、世界的にも限られた企業しか実現できない。日本は、高炉操業技術水準が世界一の水準でもあり、競争力維持、国際

貢献の観点から、高炉をベースにした水素還元による製鉄法を追求している。

4.2 日本の鉄鋼業が直面する課題

しかしながら、日本の鉄鋼業が進めているプロジェクトには、開発している技術自体も挑戦的で革新的であることに加え、それ以外にも解決すべき様々な課題に直面している。

【課題1】還元剤として大量の安価な水素（グリーン水素）が必要となる。鉄鉱石から現在の国内生産量7500万t/年の鉄を生産するのに、750億Nm³（約700万t）を超える8円/Nm³以下の価格の水素が必要（東京ドーム6万個分の容積）となる。

しかしながら、日本政府が策定した「国家水素計画」¹⁹⁾では、国内の水素供給量を現在の2万t/年から2030年には300万t/年、2050年に2,000万t/年まで（現在の約1000倍）にまで拡大する計画となっている（図2）。鉄鋼業全体で700万tを要するとなれば²⁰⁾、2030年では未だ国内水素では全く足りないことになる。海外から水素を調達せねばならない。

鉄鉄1t製造に必要な水素量は、還元に601Nm³、水素還元の吸熱反応補完分67Nm³、1600℃までの溶鉄昇熱分85Nm³が必要となり、合計753Nm³（理論値）となるが、効率75%と仮定すると約1000Nm³/tが必要という試算になる。これが1t分であるから、年間8000万tの生産には約800億Nm³/tすなわち700万t/年の水素を調達しなければならない。製鋼プロセスの下工程の分のエネルギーバランスを考えるともう少し必要となるのではない。いずれにせよ膨大な水素量を工業的にマネージしなければならないことになる。

また、製鉄用コークスと等価な水素コストとして求められる水素価格水準は約8円/Nm³程度（図3）とされている。政府の「水素基本戦略」では2030年に20円/Nm³を目標に設定されており、かなり乖離がある。その上で、国内の水素では賄えないとなると（日本全体で2000万tの供給能力として）、700万tの枠を鉄鋼業が確保できるか不明である。国産水素が輸入水素より価格優位に立つことは難しいため、海外からの

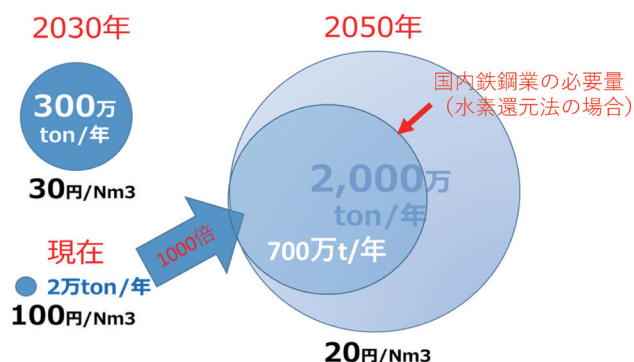


図2 日本における水素コストと導入量の目標（水素基本計画）
（Online version in color.）

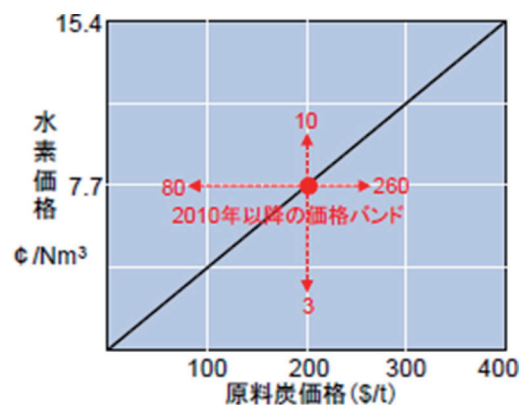
水素輸入に依存することになるが、冷却、運搬、貯蔵コストで価格は一気に跳ね上がると思われ、国内鉄鋼業の国際価格競争力がかなり弱まってしまうことが懸念される。

【課題2】結局排出されるCO₂をどう処理するか。

ゼロにはならないCO₂の排出分を回収した後、CCSの利用を前提とするならばコストとキャパシティの課題がある。二酸化炭素をアミン法で捕集する技術は実用されているが、この場合、二酸化炭素の貯留を日本国内でできると仮定して試算すれば、二酸化炭素の捕集コストは8円/kg-CO₂となり²¹⁾、高炉法で排出する二酸化炭素を全量捕集する仮定すると、高炉法では15円/kgのコスト増となり実質の鉄鉄価格は61円/kg相当となる。

CCSは、世界では実用化の段階に入っている。しかし、日本政府主導で開発・実証が進められている国内CCSの対応は、諸外国からは遅れており、日本国内では石油開発地帯がほとんどないため、CO₂貯留方式の主流であるEOR（Enhanced Oil Recovery：石油増進回収）を実施することを見込みづらく、貯留する場所として帯水層を発見することも困難であろう。IEA試算から推計すると、日本のCCSの想定年間貯留量は、国主導でCCS事業を続けても、2050年時点で約1.2～2.4億t/年が目安とされている（図4）²²⁾。鉄鋼業が1年で排出するCO₂は1.3億t程度であるが、国内でもセメント産業、石炭火力事業もCCS利用を希望・選択する可能性は高く、国内鉄鋼業のカーボンニュートラル実現に必要なCO₂貯留分を確保するには、海外のCCS事業を活用することになり、貯留費用に加え、上記試算に加えCO₂を輸送するコストとインフラ整備が必要になり、これもあり高コストになることが予想され、鋼材価格の競争力に大きな影響が出る可能性が高い。

【課題3】鉄鉱石の品質の問題もある。低品位鉄鉱石を水素還元に使うと、粉化や固着化が生じてしまうためわざわざ溶



（出典）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」

図3 パリティコスト試算（原料炭の置換）（Online version in color.）

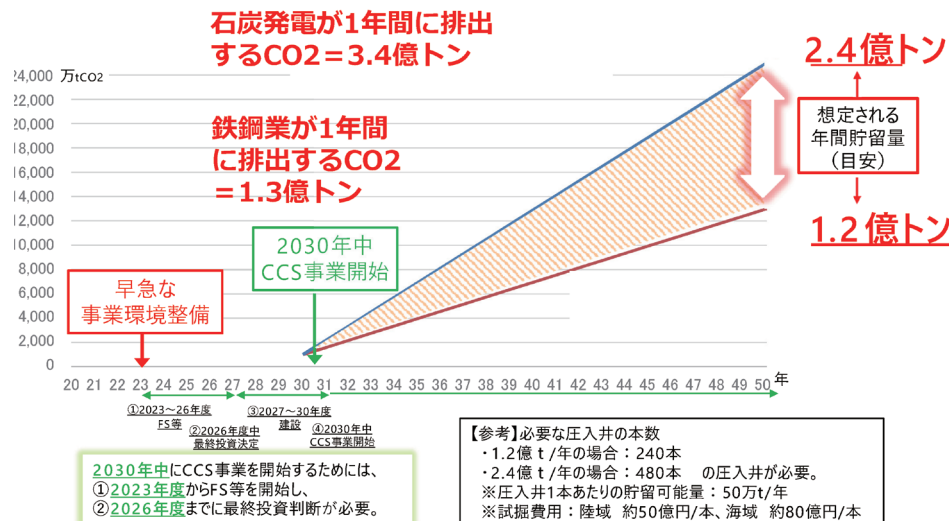


図4 2050年の日本のCCSの想定年間貯留量の目安 (Online version in color.)

融点の高い海面鉄を作りそれを溶解することになり、高炉法より効率はかなり悪くなると予測される。水素還元製鉄の原料となり得る高品位 (DRグレード) の鉄鉱石ペレットは、現在は日本では調達の実績がなく、今後確保しようとしても、主要供給元がロシアや南米であるため、安定的かつ十分な量の調達が実現できない高いリスクがある²³⁾。

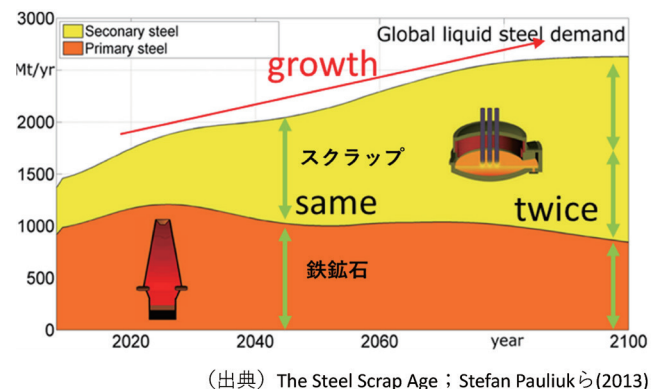
5 今後の戦略の方向

5.1 複数の選択肢を準備

日本の戦略である、高炉をベースとした水素還元製鉄法「COURSE50」プロジェクト及びその後継のSuper Course 50 プロジェクトでは、グリーン製鉄を従来の製鉄同様、高炉ベースで大量に安価に鉄鋼を生産するためには最も有効で、これからも世界全体の膨大な鋼材需要を満たすためにはスクラップだけでは需要量を満たせず、高炉での生産を継続することが間違いない状況 (図5) で、世界の鉄鋼業への貢献という観点からは日本の技術的挑戦は極めて重要かつ意義のある取り組みと評価できるが、リスクとして、上述したとおり、年間8000万tの粗鋼生産規模を維持するために必要なグリーン水素が十分に確保できるのか。次に、結局排出されるCO₂を分離回収した分の十分なCCS貯留量が確保可能か、の2点が挙げられる。

日本の鉄鋼業の産業競争力を維持するためには、高炉ベースの水素還元製鉄法1択ではなく、他の新製鉄法の技術選択肢の可能性も検討しておくべきではないかと思う。

カーボンニュートラル実現の目標期限である2030年、2050年は比較的近い将来であり、世界各社の取り組み状況もその時点でどうなっているかは不確実性がある。気候変動の



(出典) The Steel Scrap Age; Stefan Pauliukら(2013)

図5 世界の鉄鋼需要とスクラップ供給の長期予測 (Online version in color.)

科学的知見の充実に努めながら、必要に応じ、予防的な方策を、諸外国の動向、産業上の競争相手の動向を踏まえつつ、臨機応変、柔軟に講じるべきである。鉄鋼業の発展を支え、技術を進化させてきた「炭素を利用した還元」という手段を封じることが前提とする短絡的な戦略は避けなければならない。炭素を「使わない」のではなく英知を結集して「上手に使う」「循環して使う」技術を日本が世界に先駆けて開発し、国際貢献することが王道ではないか。

鉄鋼を基礎素材として利用している自動車産業、建設産業、産業機械産業等、様々な分野が負担を受け入れなければならない。鉄鋼業を失うことにより日本全体の経済力、産業力が弱ってしまう。それを避けるべく、「その戦略を進めても、後悔しない戦略」という視点を忘れずに、進むべき道を検討していくことが重要である。

Super Course 50の取り組みを戦略の主流に据えるとして、萌芽的な新技術も検討し選択肢を広げて柔軟性を持つべきで

ある。日本としては、基本に立ち返り、産業や人類の発展において、「炭素」はエネルギー、素材の原料として最も普遍的であり重要な媒体であり、人類の今後の持続的発展には炭素の一定の量の利用はむしろ不可欠であるとの認識の下、「炭素」を上手に使う技術について日本の鉄鋼業界は世界鉄鋼業界のリーダーであり、炭素を自然循環ではなく工業技術的に循環利用する能動的技術システムの構築を目指すことが望ましいのではないかと。水素を高炉に入れて鉄鉱石を還元することは、科学的にはできたとしても、工業技術的、産業としては課題・リスクが多く上手いかならないのではないかと、という政府、産業界各方面からお叱りを受けそうだが、水素に依存するのではなく、その水素を生産する際に使用する電気を製錬なり炭素循環なりに回した方が効率的ではないか。今一度初心に帰ってあらゆる可能性を検討し選択肢を拡げてはどうか。

産官学の英知を結集し、大学・公的研究機関の有する萌芽的技術にも目を向け、CNのシナリオが描けるような戦略を考えることが必要と思われる。水素還元一本足打法ではなく、複数の革新技術選択肢を「分野を超えた産学」が英知を結集して挑戦すべきである。

現在、日本鉄鋼協会に2022年に新設された「鉄鋼カーボンニュートラル研究助成制度」²⁴⁾により、萌芽的・先端的シーズ技術の掘り起こしを行っているところである。鉄鋼以外の分野も含め、アイデア段階の研究も助成対象としている。まだ、制度発足から2年間であるが、毎年90件近い応募が寄せられている。こうした多方面・他分野からの視点により、新しい刺激が得られることは極めて有意義である。

(1) 循環炭素材料技術 (CCR : Carbon Capture and Recycle)

高炉プロセスから回収したCO₂を電気エネルギーと触媒を利用してCOを生成する技術を開発し、COを高炉に戻して循環させるシステムが考えられている。特に、COは対水素エクセルギー比率が0.97 (電気とほぼ等価) であり、基底状態のCO₂からCOは種々の方法で得ることができる。電気でCOを得るのが最もシンプルな製造手法と言える。

このシステムについては、日本鉄鋼協会環境・エネルギー・社会工学部会「スマート製鉄システム研究会」で2015年から2018年にかけて検討を行った経緯がある²⁵⁾。高炉を利用する場合、還元剤として炭素を使用する場合には相当量のCO₂が排出されることは避けられない。しかし、CCSに過度に依存することも避けなければならない。そこで、排出されたCO₂を回収し電気で還元してCOを生成し、高炉内に戻して還元剤として使用するカーボンリサイクルすることでCCSに依存する量を減少させることができる。東工大の加藤之貴教授 (同研究会主査) が提唱している炭素循環エネルギーシステム、ACRES (Active Carbon Recycling Energy System) (固

体酸化物燃料電池 (SOFC) として知られているSOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) を用いたシステム)。SOECには材質がセラミックスであるため、熱応力に弱く、割れやすく、大面積化が困難という課題があるが²⁶⁾、実用化に向け、小型実証炉化を構築することを検討してみてもどうか (図6)。

なお、CO₂を電気でCOに還元する技術は、英国のバーミンガム大学においても太陽電池として開発が進んでいるペロブスカイト系材料の熱化学反応に基づく触媒機能によって、CO₂をCOとO₂に分解できることに着目し、700~800℃の比較的低温においてCO₂分解反応を可能にする「二重ペロブスカイトBa₂Ca_{0.66}Nb_{0.34}FeO₆」を選択すれば、収率良くCOを発生できることを明らかにしている。このプロセスを炉頂ガスに適用することで、イギリスの鉄鋼生産においてCO₂排出量を88%削減できるという研究成果が論文公開されている²⁷⁾。コークス使用量の低減や副産物O₂の転炉での活用などによって、脱炭素化に伴う高炉や転炉等を廃棄せずに救済し、イギリス鉄鋼産業の競争力向上に資すると期待されている。現在、提案システムに関する特許を申請しており、工業化研究についての連携先を探しているとのことである。

(2) 鉄スクラップの有効利用 (鉄鋼リサイクルによる高級鋼生産)

現実的で、悔いの残らない戦略の王道は、鉄スクラップを回収し、リサイクルをして鉄鋼材を作ることであろう。もちろん鉄スクラップを原料として再生材として鉄鋼を作るのは既に確立された方法 (電炉法) であり、米国は電炉法が主流である。金属材料はリサイクルすると製造エネルギーを大幅に節約 (したがってCO₂を大幅に削減することができるという利点がある (表1)。鉄スクラップを回収して電炉で溶解して製造する場合、鉄鉱石の採掘、輸送、および高炉プロセスに伴うCO₂排出分が削減 (回避) される。カーボンニュートラルの選択肢としては極めて有効である。

リサイクル原料である鉄スクラップは、加工スクラップのように素性が分かっている (スクラップの合金の種類が予め

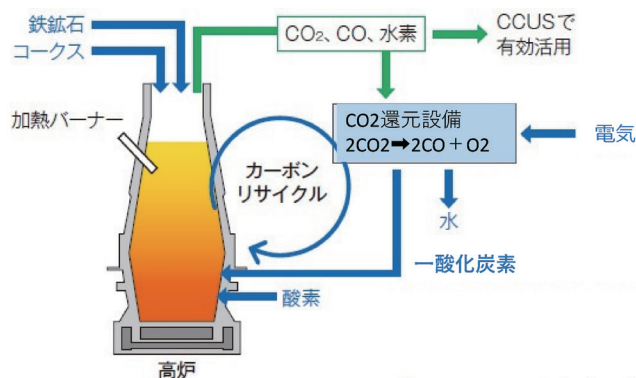


図6 世界の鉄鋼需要とスクラップ供給の長期予測 (Online version in color.)

分かっている) 場合はまだ対処できるが、そうでない老廃スクラップ等の場合、様々な種類の鉄鋼合金が混在して回収される(合金別に分別して回収するわけではない) ため、繰り返しリサイクルしていくと、トランプエレメント(不純物元素)が濃化し、やがて許容値に到達してしまう恐れがあること、不純物元素の濃度が高まると、ハイテンや電磁鋼板等の厳密な成分制御を必要とする高級鋼が作れないことである。熱延、冷延鋼板、あるいは高炭素線材では、欠陥の発生(表面の疵等の品位や割れ、破断)に対する感受性が高く、スクラップを主原料とする電炉鋼では、トランプエレメント及び窒素混入の悪影響が大きいためである。実際、北米のミニミルでは、スクラップに加え直接還元鉄を主要な原料として薄板系品種を製造している。鉄鋼のトランプエレメントの代表格であるCuは繰り返しリサイクルによる濃化によって表面赤熱脆性の原因となるが、2050年ごろには鉄鋼への混入量が許容量を超える危険性があると試算されている(図7)²⁸⁾。

近年では、鉄スクラップ解析に特化したAIを活用して画像からスクラップの等級を判定したり、混入したりする不純物を検出するシステム開発(図8)に、東大発ベンチャーの株式会社EVERSTEEL(本社:東京都文京区、代表取締役社長:田島圭二郎)社が取り組んでいる²⁹⁾。このシステム技術を鉄鋼にとどまらず、他の素材分野で展開すれば、より広範囲に素材スクラップの有効利用につながるのではないかな。

6 異業種連携の促進

カーボンニュートラルの戦略を立案する上で、日本の鉄鋼業は年間1.55億tものCO₂を排出しており、鉄鋼から出る莫大な二酸化炭素をCCSするとなると、マスマバランス的に相当なCO₂を扱う業種、企業属性の近い産業間連携でないと、効果の出る現実的でウインウインな異業種連携が成立しない。その観点からは、日本では、化学業界、ガス業界、セメント産業等が、臨海地域に集中しており、業界の枠を超えた連携は、

個別業界では思いつかないような解決の出口を見つけることができるのではないかな。

鉄鋼業からは、高濃度CO₂ガス(数十%に達する場合もある)の原料活用の供給が可能となる。化学工業では、CO₂を原料に化学製品を製造する「カーボンリサイクル」のプロセスを確立すれば、CO₂を原料として、ポリカーボネート樹脂、ポリウレタン発泡材料、メタノール、炭酸ソーダ、エタノール、メタン等を製造することができるようになり、これらの製品は、CO₂の削減に貢献するだけでなく、化学製品として市場で実需が存在する。したがって、鉄鋼業から、高濃度のCO₂ガスを化学会社に供給する(化学業界からすればCOの方が望ましいところであるが)ことで協力関係が構築できるための技術の共同開発もできる。逆に、水素還元製鉄に必要な水素ガスは、一般的にメタネーションプロセスに使用される水素ガスの純度(99.9%以上)ほどは要らない。あるいは、鉄鋼の未利用熱を化学業界に提供できないか。鉄鋼の未利用熱の他産業での有効利用もできるかも知れない。

7 日本政府の支援

2050年カーボンニュートラル実現に向けて、「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律案(GX推進法)」³⁰⁾を国会に提出し、2023年5月12日に成立した(図9)。

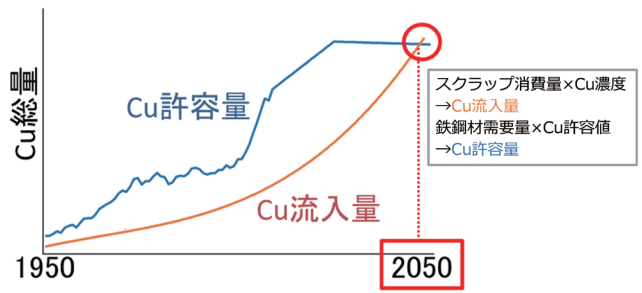


図7 将来の鋼材中のCu濃化の可能性 (Online version in color.)

表1 各種金属の二次地金製造のエネルギー比較 (Online version in color.)

(単位: GJ/t)			
	製錬エネルギー	再生エネルギー	再生/製錬
Mg	372	10	3%
AL	253	13	5%
Ni	150	16	11%
Cu	116	19	16%
Zn	68	19	28%
Fe	33	14	42%
Pb	28	10	36%

(出典) 増子、原、石田 生産研究 32巻3号(1980) UDC 669.71.004.86(1993) より

鉄スクラップ検収AIの概念図



図8 AI画像認識によるスクラップ分別システムの概念図 (Online version in color.)

- (1) **GX推進戦略**の策定・実行、
- (2) **GX経済移行債**の発行、今後10年間で150兆円を超える投資が必要
- (3) **成長志向型カーボンプライシング**の導入
 - ①炭素に対する**賦課金（化石燃料賦課金）**の導入
 - ②**排出量取引制度**
- (4) **GX推進機構**の設立、
経済産業大臣の認可により、**GX推進機構（脱炭素成長型経済構造移行推進機構）**を設立
- (5) **進捗評価と必要な見直し**を法定。

図9 脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律（GX推進法）の概要（2023年3月成立）（Online version in color.）

同法によれば、世界規模でグリーン・トランスフォーメーション（GX）実現に向けた投資競争が加速する中で、我が国でも2050年カーボンニュートラル等の国際公約と産業競争力強化・経済成長を同時に実現していくためには、今後10年間で150兆円を超える官民のGX投資が必要であり、それを促すため、①GX推進戦略の策定・実行、②GX経済移行債の発行、③成長志向型カーボンプライシング（炭素に対する賦課金（化石燃料賦課金）、排出量取引制度）の導入、④経済産業大臣の認可によるGX推進機構（脱炭素成長型経済構造移行推進機構）を設立、の4点を法定化するとしている。同法案により、国内産業の対策の流れは一層加速されることが期待される。特に、カーボンプライシング等の政府の取り組みが活発になれば、企業経営や日本経済情勢に直結する話になり、様々な動きが活発化する。日本の鉄鋼業に対しても、強力な支援をしている。

8 まとめ

日本の鉄鋼業は、国内の二酸化炭素排出総量の約15%を占め、鉄鋼業がカーボンゼロを実現することが、日本がカーボンニュートラルを実現できるかどうかの鍵を握る。このため、日本政府も鉄鋼業のCO₂排出量を大胆に削減する革新技術開発に多額の資金支援を行い、また、産業環境の整備などを精力的に進めている。

世界の鉄鋼企業が、CO₂を極力排出しない製鉄法の開発・実証に動いている。対応が先行している欧州では、天然ガスによる直接還元鉄を原料にして、電炉で溶解する。

世界の鉄鋼需要は、まだまだ増加の一途をたどり、その需要に応えるだけの鉄鋼を作るとすれば、当面は安価で大量生産に適した高炉法による製鉄は人類の発展に不可欠である。日本の高炉法の技術力は世界に誇る先端技術の結晶であり、インド等の途上国、新興国の製鉄事業の発展に寄与し得る立場に君臨してきたこともあり、日本の鉄鋼業は、欧州の直接

還元法+電炉中心の路線ではなく、高炉をベースにして炭素の代わりに水素で還元する技術の開発を目指した国家プロジェクト「Course 50」プロジェクトを経て、後継の「Super Course 50」プロジェクトに挑戦している。いずれも、政府の全面的な支援によって進められている。

しかしながら、このプロジェクトの完成には①豊富で安価な水素の大量確保、②それでも発生する二酸化炭素を回収・貯留すること（CCS）が解決すべき課題が多く、より柔軟な対応をとれるよう、水素以外の還元材の追求、電解製鉄、炭素循環システム、スクラップ有効利用による高級鋼の製造技術等、様々な技術の検討を行い、選択肢を幅広く持つべきである。

参考文献

- 1) 国連広報センター ブログ, <https://blog.unic.or.jp/entry/2023/08/25/103926>, (参照日：2023年8月1日)。
- 2) 木本昌秀：地球規模の異常気象と地球温暖化，異常気象と温暖化，その関係は？，環境省一般シンポジウム，(2022)，4。
- 3) 外務省ホームページ, https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000119.html, (参照日：2023年7月15日)。
- 4) WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate, and Water Extremes, (1970-2019)。
- 5) 小林能直：「世界鉄鋼協会「低炭素オープンフォーラム2022」の展望」講演会資料，(2023)。
- 6) 経済産業省資料，「トランジションファイナンス」に関する鉄鋼分野における技術ロードマップ，(2021)，https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition/transition_finance_technology_roadmap_iron_and_steel_jpn.pdf, (参照日：2023年7月10日)。
- 7) 自然エネルギー財団：鉄鋼業の脱炭素化に向けて，(2021)。
- 8) Global Newswire：ArcelorMittal and John Cockerill announce plans to develop world's first industrial

- scale low temperature, iron electrolysis plant, (2023), <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/06/14/2687922/0/en/index.html>, (参照日：2023年7月14日).
- 9) DOE : U. S. Department of Energy's Industrial Decarbonization Roadmap (2022). <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/Industrial%20Decarbonization%20Roadmap.pdf>, (参照日：2023年7月15日).
 - 10) 川口洋二：シリコンバレー・レポート「クリーン鉄鋼」, (2021), <https://www.kiraboshi-consul.co.jp/column/202110>
 - 11) A.Allanore, L. Yin, D.R.Sadoway : A New Anode Material for Oxygen Evolution in Molten Oxide Electrolysis, *Nature*, 497 (2013), 353.
 - 12) 経済産業省資料, 鉄鋼業のカーボンニュートラルに向けた国内外の動向等について, (2022), 12. https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/010_04_00.pdf, (参照日：2023年6月25日).
 - 13) 経済産業省資料, 「製鉄プロセスにおける水素活用」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性, (2021), https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/003_02_00.pdf, (参照日：2023年7月7日).
 - 14) 産業新聞記事, 高炉の水素還元研究 中国企業が相次ぎ着手：2021年9月4日.
 - 15) 経済産業省資料, 鉄鋼業のカーボンニュートラルに向けた国内外の動向等について, (2022), 15.
 - 16) 資源エネルギー庁, 水素を使った革新的技術で鉄鋼業の低炭素化に挑戦, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/course50.html>, (参照日：2023年5月16日).
 - 17) 野村誠治, 渡辺隆志, 宇治澤優, 杉山慎, 石渡夏生：日本鉄鋼業における水素を活用した CO₂ 排出削減の取り組み～COURSE50 プロジェクトの概要～, *日本燃焼学会誌*, 63 (2021) 206, 281.
 - 18) 日本製鉄株式会社：ニュースリリース, 高炉水素還元技術 Super COURSE50 の試験炉において 加熱水素吹込みにより世界最高水準となる CO₂ 排出量削減効果 22% を確認, (2023).
 - 19) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議：水素基本戦略, (2023), https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy_kaitei.pdf, p.7
 - 20) 日本製鉄株式会社産構審資料, 鉄鋼業における水素利用：https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/020_05_00.pdf
 - 21) 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 水素直接還元製鉄法の評価と技術課題, (2022), LCS-FY2021-PP-13.
 - 22) 経済産業省, CCS長期ロードマップ検討会最終とりまとめ説明資料, (2023). https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/20230310_2.pdf, (参照日：2023年1月10日).
 - 23) Agora Industry, 世界の鉄鋼産業の脱炭素化に関する15の知見, (2023). https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/A-EW_298_GlobalSteel_Insights_WEB_JP.pdf, (参照日：2023年7月15日).
 - 24) 産業新聞2023年7月19日記事, 脱炭素研究助成の候補者募集, 日本鉄鋼協会, <https://www.japanmetaldaily.com/articles/-/131005>
 - 25) 日本鉄鋼協会環境・エネルギー・社会工学部会, 高温プロセス部会, スマート製鉄システム研究会成果報告書, (2019).
 - 26) 能動的な炭素循環エネルギーシステム (ACRES) の可能性 (特集 次世代エネルギーシステム), *化学工学*, 77 (2013) 3, 185.
 - 27) H. Kildahl, L. Wang, L. Tong and Y. Ding : Cost effective decarbonisation of blast furnace-basic oxygen furnace steel production through thermochemical sector coupling, *Journal of Cleaner Production*, 389 (2023), 135963.
 - 28) K.E.Daehn, A.C.Serrenho and J.M.Allwood : *Environ. Sci. Technol.*, 51 (2017), 6599.
 - 29) PR Times, EVERSTEEL, 東京製鐵と鉄スクラップ自動解析 AIシステムの基幹システム連携完了, (2023年1月11日記事), <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/0000000008.000103001.html>
 - 30) 新エネルギー財団, GX推進法案の概要について, (2023), https://www.nef.or.jp/keyword/abc/articles_g_04.html, (参照日：2023年7月7日).

(2023年9月6日受付)