



特集記事・2

地球環境を考慮した排出ガス削減への鉄鋼業の取り組み

製鉄プロセスにおける二酸化炭素削減に向けての課題と将来展望

Subjects and Future Prospects on the Ironmaking Process toward the Long-term Global Goal for Carbon Dioxide Mitigation

有山達郎

Tatsuro Ariyama

東北大学
名誉教授

1 はじめに

地球温暖化問題が大きく取り上げられようになって久しい。1997年に京都議定書が採択されて以降、温室効果ガス削減の重要性が共通認識され、2016年11月にはパリ協定が発効し、2050年の長期目標設定とそこに至るNDC (Nationally Determined Contribution) による温室効果ガス削減への具体的な手順、進め方が決定、合意に至っている。すなわち、2050年における世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃以下に抑える努力をする取り決めがなされ、公平かつ実効性を高めるために2020年以降、5年毎の国別の目標設定が課せられ、過渡的な削減目標を各国が提示し、Pledge & Reviewの原則のもとにその進捗を互いにチェックすることになる。我が国は、パリ協定を踏まえ、地球温暖化対策と経済成長を両立させながら、2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指すことを長期目標に挙げている。他国の目標もそれに近いが、欧州には2050年に排出量実質ゼロを掲げる国も現れている。米国の離脱表明もあるが、具体的な数値目標が掲げられ、全ての国の参加による大幅な低炭素化を達成に向けての実行段階へと移りつつある。

我が国において、温室効果ガスの大半を占めるCO₂排出量は2017年度において11億9000万トンである¹⁾。鉄鋼業はその約15%を占める。素材産業の代表でもある鉄鋼業は炭素を主たる還元材として活用し、炭素を利用しつくした結果、不可避免的にCO₂が発生する。エネルギー産業など他の業種とは本質的に発生要因が異なるが影響度は大きい。素材産業として健全な活力を維持し、安定供給責任を果たしつつ、長期目標達成へのシナリオ作成は、それ故に容易ではない。

筆者は約30年間、高炉メーカーの研究所に在籍し、以降は

大学で研究生生活を経験した。製鉄分野の研究に従事し、基礎と応用の面から鉄鋼のプロセス開発の難しさも理解しているが、長期目標の達成に向けては鉄鋼プロセスを原理的に見直し、新たな着想で取り組む必要がある。国のプロジェクトの至近の開発動向については別稿での紹介もあり、本稿では鉄鋼プロセスにおけるCO₂削減の本質的課題、将来への技術展望について述べる。なお、CO₂削減は世界の鉄鋼業において共通するグローバルな課題であり、その海外動向にも触れる。そして、将来対策を踏まえ、CO₂の利用を目指したCCU技術 (Carbon dioxide Capture and Utilization)、再生可能エネルギーとリンクした脱炭素の水素製鉄など新たな視点での技術開発が始動しつつあり、その動きについても紹介する。

2 鉄鋼プロセスとCO₂発生

今後のCO₂削減の方向と課題を俯瞰するために、現状の生産動向と鉄鋼プロセスについて触れる。生産設備過剰とされているが、東アジアにおいて新鋭製鉄所が次々に建設され、近年のアジアを中心とした旺盛な鉄鋼需要に応えるために粗鋼生産量は年々、増加している。図1は世界の粗鋼生産量の推移を示す²⁾。2018年では18億800万トンに達している。本図には鉄鋼生産プロセスの識別も示す。2018年においては高炉-転炉法が粗鋼生産の71%を占める。日本では75%が高炉-転炉法である。図中の電気炉法とは天然ガスベースの直接還元プロセスと電気炉、あるいはスクラップを鉄源とする電気炉の組み合わせのプロセスから成る。図2は各プロセスの粗鋼ベースの概ねのCO₂発生量比較を示す。高炉-転炉法は粗鋼トン当たりのCO₂発生量は約1.8~2.0トン/tである。直接還元プロセスは天然ガスを改質した還元ガスを用

いるために、石炭依存の高炉-転炉法の約7割のCO₂発生量、またスクラップ-電気炉法では還元が不要であるため、約3割となる。共に電気のCO₂排出係数によるが、高炉-転炉法より少ない。一方、高炉-転炉法は高級鋼を含むあらゆる鉄製品の製造が可能で、大量生産に向き、至近のアジア地域の新鋭製鉄所は高炉-転炉法を採用し、今後も対応力に富む製造技術の観点から、主流のプロセスと位置付けられている。直接還元プロセスは最大約200万トン/年規模で、立地は天然ガス採掘地域に限定され、従来はミニミル向けとされてきた。しかし、至近、米国においてシェールガスを利用した200-250万トン/年の大型直接還元プロセスが建設されているなど立地条件は拡大し、天然ガス価格も変化し、その活用にも目を向ける必要がある。スクラップ利用はCO₂抑制の観点からは好ましいが、市中からの老廃スクラップ、自所発生スクラップを鉄源とし、前者は既に成分調整された鉄源でトランプエレメントの問題もあって一般に汎用鋼など製品に限られる。また、スクラップの発生量自体、鉄鋼の蓄積量に制約され、安定確保が困難で主たる鉄源とはならない。

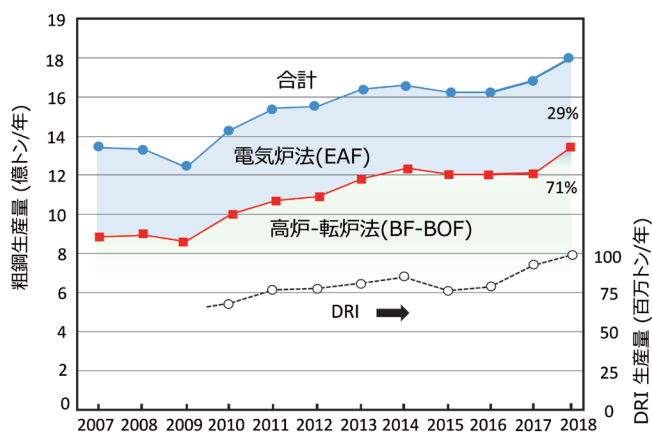
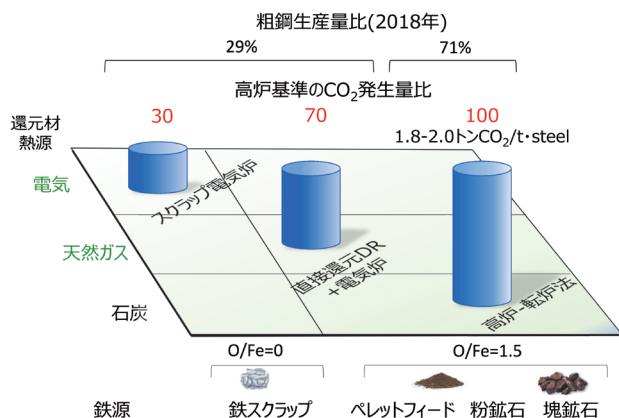


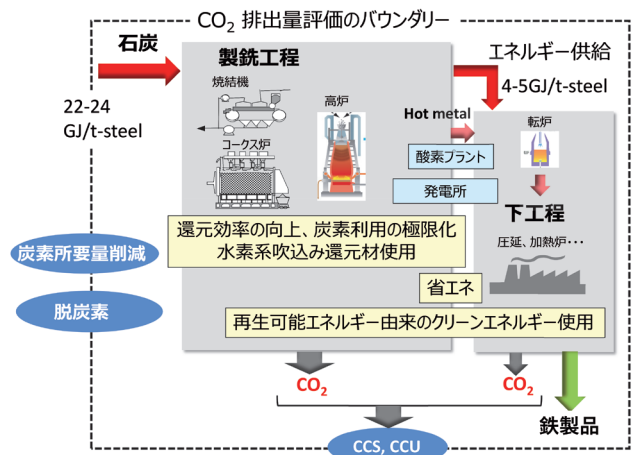
図1 鉄鋼プロセス別の粗鋼生産量の動き

図2 各種鉄鋼プロセスとCO₂発生量比

今後の鉄鋼需要の伸びに対応し、高品質の鉄製品を安定的に大量供給しつつ、当面のCO₂削減を進めるには第一には高炉-転炉法をいかに改善するかにかかると。あるいは他の方法の特徴を活かし、複合的生産構造の最適形態探索が検討候補となる。直接還元プロセスに着目すると、天然ガスに限らず製鉄所から発生するコークス炉ガス (COG : Coke Oven Gas) を還元ガス源に用いるプロセスなど、高炉-転炉法との組み合わせによる複合的なプロセスも検討されており、柔軟に考える必要がある。

③ 低炭素・脱炭素化へのアプローチと技術課題

高炉-転炉法から成る一貫製鉄所における炭素、エネルギーのマクロなフローと同時に低炭素、脱炭素の原理的方策を図3に示す。一貫製鉄所は主に製鉄工程と下工程から構成され、主として石炭から成る22-24GJ/tのエネルギーが製鉄工程に投入される。製鉄工程は溶銑を製造するだけでなく、高炉、コークス炉などから発生する4~5GJ/t相当のガスを下工程に供給することによって一貫製鉄所はエネルギー的に自己完結している。図3にはCO₂削減を考える上でのバウンダリーも示す。鉄鋼は多量にエネルギーを消費するプロセスでもあって、エネルギーの自立を考えると、図3に示したバウンダリー内でCO₂削減を考えることになる。その方策として、高炉を中心とする炭素所要量の削減と脱炭素、そして出口側のCO₂を隔離、輸送、貯蔵するCCS (Carbon dioxide Capture and Storage)、CO₂を再利用するCCUが挙げられる。ただし、輸送、貯蔵を含むCCSは周囲の地理的条件に依存することが大きく、適用性を見通しにくい。入り口側の低炭素、脱炭素技術、そしてCO₂を再利用するCCUが鉄鋼分野の主な開発の対象となる。

図3 一貫製鉄所のエネルギーフローとマクロなCO₂削減方策

既に提案されている高炉を中心としたCO₂削減プロセスの全体像を図4に示す。本図の左は現行の高炉ベースで入力炭素の低減に繋がる原料面からのアプローチを示す。炭素の高炉内利用率を高めるために炉内を低温化して還元平衡を制御する方法、あるいは還元負荷を減らす金属鉄投入などが挙げられる。金属鉄は天然ガスあるいはCOGで製造される。還元平衡制御の手段としては高反応性コークスが具体的な形態であり³⁾、我が国ではフェロコークスプロジェクトとしてNEDOの支援によって開発が進行中で、30t/dのパイロットプラントを経てJFE福山に300t/dの中間プラントが建設中である。高炉への金属鉄投入とは直接還元プロセスとの連結である。これらは共に付加設備を必要とするが、現行高炉をそのまま利用できる。図4の右には還元ガスの流れの再構成、また水素系吹き込み還元材による方法を示す。具体的には高炉から排出される炉頂ガスにCO₂分離を施し、還元ガスとして再生して高炉に循環し、入力炭素量を減らす方法、あるいはCOG、天然ガスを改質して還元ガスに転換し、高炉に循環する方法が挙げられる。共に高炉内のガス還元機能強化によって、コークスを消費する高炉内の直接還元反応を抑制し入力炭素としてのコークス比を低下させることができる。ガス改質は炉頂ガス中のCO₂によるドライリフォーミングあるいは水蒸気改質でも良い。前者は炭素循環にもなる。また、羽口から天然ガスなど水素系還元材、バイオマスなどを吹き込む方法なども挙げられる。ベース技術として、送風から還元には不要な窒素を排除して還元効率を向上させ、水素系還元材の多量吹き込みなど低炭素化の自由度を増すことのできる酸

素高炉プロセスが挙げられる。還元ガスを高炉下部に吹き込み技術は1970年代初期に日本で開発され、当時の新日鐵広畑で部分的な商用炉試験まで行われている⁴⁾。COGのドライリフォーミング法はNKK (現JFEスチール) によって、NKGプロセスとして試験高炉で効果が実証されている⁵⁾。低炭素高炉の基本となる窒素フリーの酸素高炉は日本で1980年代に試験高炉で検証されているなど⁶⁾、この分野では日本が歴史的に先鞭をつけている。なお、現在、日本では国のプロジェクトとしてCOURSE50 (CO₂ Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 50) が進行中である⁷⁾。COURSE50の50とは2050年の目標年を指し、COGに水蒸気改質を施した還元ガスの吹き込みで10%、CCSを加えることで計30%のCO₂削減を目標としている。日本製鉄の君津に建設された試験高炉を用いて検証中であり、2022年度には商用高炉の実証試験を実施予定で、2030年以降の商用化が計画されている。

欧州の鉄鋼企業は、EU支援の下にエンジ企業を含めて2004年から、酸素高炉ベースで高炉炉頂ガスからCO₂を分離した還元ガスを再循環するULCOS (Ultra Low CO₂ Emission Steelmaking) プロジェクトを2004年から実施した⁸⁾。分離したCO₂はCCSで隔離される。溶融還元によるHIsarnaプロセス開発もULCOSプロジェクトに含まれるが、プロジェクトの主体は高炉炉頂ガスの循環である。スウェーデンのLKABの試験高炉で検証し、高炉段階で約25%の入力炭素の削減効果を報告している。しかし、本プロジェクトは開始直後には注目されたにもかかわらず、高炉炉頂ガス循環の商用炉試験の

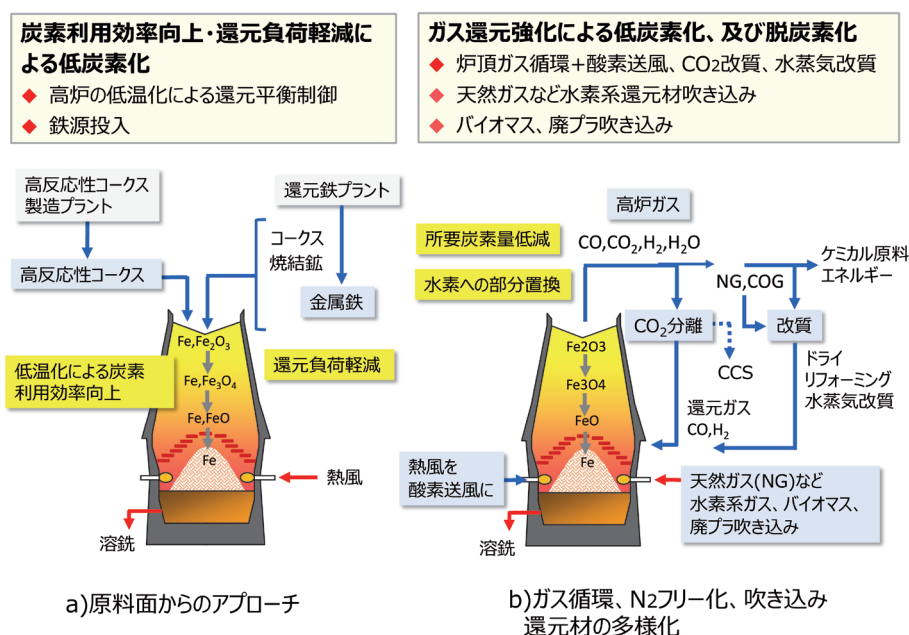


図4 高炉を中心とした低炭素・脱炭素化方策

次ステップは実施に至らず中止になっている。試験費用の問題が根底にあったとされているが、今後の展開力、波及性についての判断も影響したと推測される。大きなプロジェクトでは参加組織の共感を持続できることも重要な要素である。

これらの従来提案技術のCO₂削減ポテンシャルと長期目標との対比を図5に示す。既に様々な技術提案がなされ、出発点としての技術構築は形成され、評価も進んでいる。一方、一貫製鉄所のエネルギー整合性からの逸脱、また炭素利用効率の原理的な定量的限界も見えてくる。炉頂ガス循環は下工程へのエネルギー供給量は不足するために、その補填も併せて評価しなければならない。ULCOSの炉頂ガス循環もホットコイル基準では15%削減に戻る。図4に示した高炉ベースの改善技術はCCSを除けば概ね10～15%のCO₂削減に留まる。原理的な重複もあって各技術の加減性は成立しにくい。現状プロセスの技術改善の延長では、2050年の長期目標達成には大きなかい離がある。目標設定としてバックキャスト的な思考も用いられるが、鉄鋼のような既に大型設備を抱える素材産業ではフォアキャスト的な検討も考える必要がある。図5に示したように、目標設定優先のスローガンだけでなく、技術展望のあるプロセス提案が必要で、そのかい離を埋めるイノベーション技術が期待される。

欧州鉄鋼協会EUROFER (The European Steel Association) は様々な新技術の積み上げで、2050年に向けてどこまでCO₂削減ができるかの見解を2013年に示している⁹⁾。仮想的なプロセス検討であるが、還元鉄プロセスの積極的利用によって最大40%のCO₂削減、高炉頂ガス循環とCCSの組み合わせで57%の数字を示している。一方、同時にコスト試算も行い、設備改造、転換などCO₂削減設備の導入に伴うコスト上昇が大きいことをCAPEX (Capital Expenditure)、OPEX (Operating Expense) の具体的な数値で示している。そのコスト試算から、特定地域でのCO₂削減実施は製品価格の格差を

生じるなど整合性に欠き、CO₂削減の実施はグローバルな展開が不可欠であることを強調している。また、CCSは大きな効果を持つが、地域環境などCCSの社会的受容性の問題、大規模投資を伴うためにその負担など実現性に関する疑問も呈している。目標設定に應えるだけでなく、今後の課題、論点にも言及したロードマップである。

CO₂削減は鉄鋼生産国の全てが関わる課題であり、Commodityである鉄製品は国際商品であって、特定国での実施は地球規模的に効果が薄い。鉄鋼はこれからも成長する産業である。開発されたプロセスが生産設備に普及して初めて効果が現れるなど、需要家のニーズに応えつつ生産設備を抱える素材産業としての実行計画立案の難しさもある。鉄鋼生産に関わる企業が足並みを揃えて新プロセスを採用して初めて効果が表れる。また、CO₂削減は利潤追求ではない。CO₂削減への開発努力が評価され、CO₂削減に伴う増分コストの負担について公平性のある社会的なシステムの整備が不可欠である。鉄鋼生産に携わる全ての国が同一の価値観で、技術をグローバルに展開しなければ実効性はない。

4 抜本的なCO₂削減を目指した技術開発の始動

大型製鉄所を一望すると、巨大な高炉、石炭運搬船、原料ヤードに山積みされた石炭の山、コークス炉、Bガスホルダーが目に入る。長期目標のCO₂大幅削減を現実の製鉄所に落とし込むと、その石炭から離れて生産プロセス、設備を大きく変えるのか、あるいは排出されるCO₂を隔離するのか、様々な形態を考えることになるが、想像は難しい。日本の製鉄所は徹底的に省エネを推進し、炭素依存であるが一つの完成形に近い。一方、高炉の寿命は20年を超え、製鉄所の設備更新から見れば2050年と言っても遠い未来ではない。長期目標に向けて理想形を描けたとしても、鉄鋼は我が国の活力の源泉となる素材産業であり、高品質な鉄製品を需要家に円滑な供給責任も果たしつつ、現実に見る大型製鉄所をどのように変えていくのか、将来への道筋を描くのは容易ではない。今後の設備更新計画にも関わる。この現実感と将来像を繋ぐことは難題であるが、視点を拡大し、周囲の産業との関り、国全体のエネルギー利用の姿なども含め、従来の鉄鋼技術の枠を超え、一步下がって全体を俯瞰するような立ち位置から長期目標達成を考えていくことが将来展望構築の糸口になると思われる。

現在、従来と異なる視点での技術開発の新しい流れが芽生え始めている。進行中のプロジェクトと併せて、世界における技術開発の動向を図6に示す。詳細は別稿に記載した¹⁰⁾。既存のプロジェクト、将来指向プロセスなど全てを記した

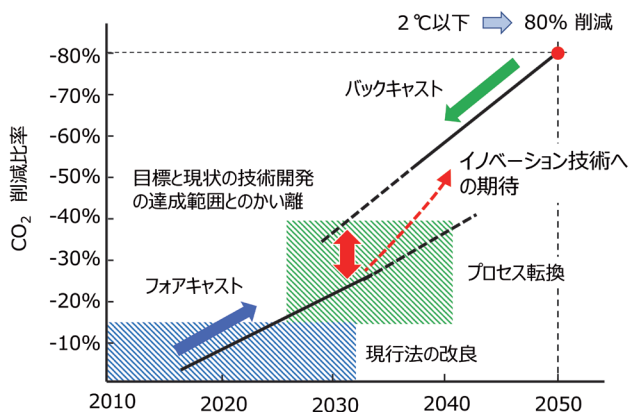


図5 長期目標へのバックキャストとフォアキャストのかい離及び革新技術への期待

が、世界の新しい潮流としては、図6の左下に示したように、高炉の炭素利用の改善からCO₂を再利用するCCUへの転換、そしてCO₂フリー水素を利用した脱炭素プロセスへの移行が挙げられる。それらの将来に向けての展開概念を図7に示す。CO₂を廃棄物ではなく、利用価値のある資源として捉え、ケミカル原料の一つとして組み込む発想のCCU、そして再生可能エネルギー利用による水電解で製造したクリーンな水素を還元材、エネルギー源として利用し、脱炭素を目標とするCDA (Carbon Direct Avoidance) へと、CO₂削減ポテンシャルをステップアップする展開である。

ドイツのthyssenkrupp社はCCUとしてCarbon2Chemの名称のプロジェクトを開始している¹¹⁾。CarbonとはCO₂を、ChemはChemical productを指す。現状の化学産業は化石原料依存であるが、製鉄所からのCO₂を含む排ガスを原料としてメタノールなど様々な化学製品を製造する構想である。化学産業も含めた産業間連携であり、Cross-industrial Network、また産業全体でのCO₂削減を講じる概念でIntegrated CO₂ Captureとも称している。Carbon2Chemの化学転換では水素添加が不可欠であるが、ドイツでは不安定で貯蔵できない再生可能エネルギーを貯蔵可能な水素、メタンに転換し、国内に安定的に供給するPower to Gasの構想があり、それとも連動している。thyssenkrupp社はDuisburg製鉄所内にCarbon2Chemの要素技術を開発する研究センターを国の支援も仰ぎ建設した。さらに同社は本技術を2030年には実用化し、2050年には水素利用も加えてCO₂を80%削減する具体的な計画を発表している。水素製造研究はAir Liquid社と共同で行うとしている。ArcelorMittal社はバイオ技術によって、製鉄所排ガスをエタノールなど合成燃料に転換するSteelanolの名称のプロジェクトを開始している¹²⁾。米国のLanzaTech社による発酵技術が核心的技術で、遺伝子組み換えによって改良された発酵菌の利用とされている。同社のGhent製鉄所に47000トン/年のエタノール

ル製造中間プラントを建設中である。以前から、本技術に注目している中国の首都鋼鉄グループもほぼ同規模のエタノールプラントを既に稼働させている。いずれもLCA的評価が必要ではあるが、既存製鉄所の機能を活かした発展系プロセスで、化学産業で現状、化石原料から製造されている燃料、化学製品を製鉄所からの排ガスから製造した製品で置換する新しい流れである。

さらに、抜本的な脱炭素を目指す方法として、スウェーデン、オーストリア、ドイツでは、再生可能エネルギー由来のCO₂フリー電力による水電解で水素を製造し、水素を還元材、エネルギー源として鉄鉱石を還元する水素製鉄プロセスが提案されている。還元にはシャフト炉による直接還元プロセスを応用する。スウェーデンのSSAB、LKABはHYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology)¹³⁾、オーストリアのvoestalpineはSiemensと共にH2FUTURE¹⁴⁾、ドイツのSalzgitterはSALCOS (Salzgitter Low CO₂ Steelmaking)¹⁵⁾のプロジェクト名称でパイロットプラント規模の研究に向けて動き始めている。いずれもEUあるいは政府の公的資金を仰いでいる。直接還元プロセスは既存のMIDREX、あるいはTENOVA-HYL系のENERGIRONプロセスの利用で、電気炉で溶解精錬を行う。水素製鉄プロセス例として図8に現行の高炉法と対比させたHYBRITプロセスを示す¹³⁾。ペレット製造設備は要るが、焼結機、コークス炉は不要である。シャフト炉の水素製鉄では粗鋼ベースで高炉法に比べて80%以上のCO₂削減効果の試算も紹介されている¹⁶⁾。ArcelorMittalもCCUと並行して、ドイツのHamburgにある既存のMIDREX還元鉄プラントを活用し、年間10万トン鉄製造の水素製鉄の開発に着手している。Primetals社も水素による微粉鉄の流動層還元の開発を開始し、2020年にはパイロットプラントを稼働させると公表している。上記の再生可能エネルギー由来の電力を利用した水素製造の水電解プロセスにはアルカリ電解、PEM (Proton Exchange Membrane)、固体酸化物



図6 世界のCO₂削減プロジェクト動向

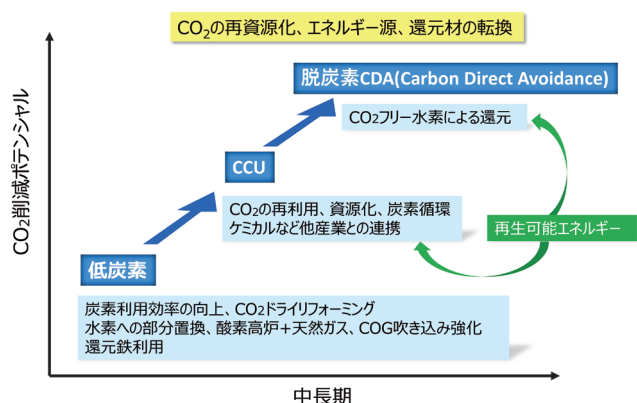


図7 CO₂大幅削減に向けてのステップアップ

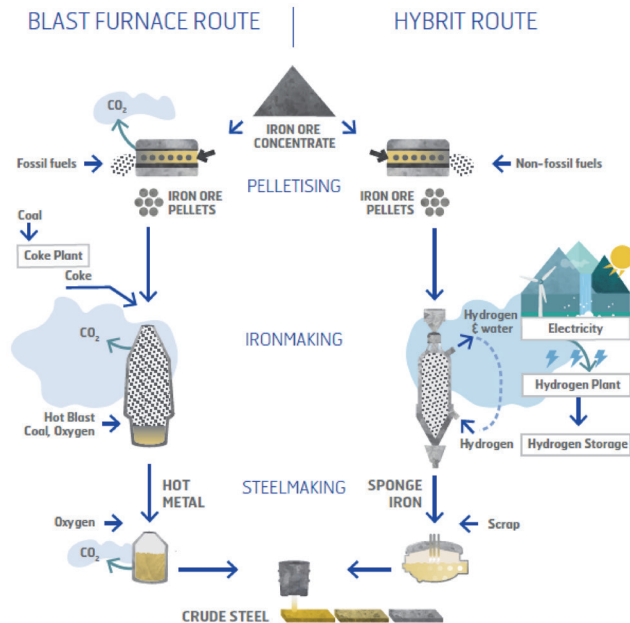


図8 高炉法と対比させた水素製鉄プロセス例 (HYBRIT)

SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) などの方法が提案されているが、H2FUTUREに加わっているSiemensはPEMに着目し、voestalpine社のLinz製鉄所内に6MWの水電解試験設備を建設している。SalzgitterはSOECの開発でドイツのSunfire社と組んでいる。どのプロジェクトも鉄鋼企業だけでなく、水素製造に関して高いポテンシャルを持つエネルギー関連の企業、エンジニアリング企業とのコンソーシアムで構成され、還元炉自体は既存プロセスをベース技術として活用し、この数年内のパイロットプラントの建設、運転で、開発の動きは速い。一方、いずれも検証プロジェクトの段階で、水素供給との整合性、既存製鉄所への適用性など不安要素は多々ある。技術的視点からも、浸炭していない還元鉄の溶解精錬、水素還元による大きな吸熱反応を制御できるシャフト炉設計など課題もあるが、新しいステージの技術として注目される。

日本鉄鋼連盟は2018年11月に「長期温暖化対策ビジョン」を策定し、長期目標に対応した「ゼロカーボン・スチール」の構想を発表している¹⁷⁾。これは2030年以降、2100年までをスコープとした挑戦的な目標感の設定で、将来に至るまでのシナリオ、具体的なプロセス構想の提示はないが、キーワードとしては海外と共通するCO₂フリーの水素利用、CCU、CCSが含まれている。

5 将来鉄鋼ビジョン構築と今後の展望

今まで製鉄の主要課題は資源対応力、省エネなど、製鉄プロセスの範疇で研究開発が完結した。今後の鉄鋼のCO₂削

減に関しては、従来型の鉄鋼プロセスの改善研究、逐次的改善技術のみでは目標達成に到達しない。その限界認識もあって、地球環境問題の長期目標達成からその枠組み、技術対象を拡大し、多角的に鉄鋼プロセスを捉える方向に開発が移行しつつある。CO₂を含む製鉄所から排出されるガスのケミカル原料への転換など、産業間全体でCO₂削減を進める産業間連携の推進、クリーンなエネルギーの製造から鉄製造プロセスの設計を考えるなど、ケミカル、エネルギー分野も含めた大きな枠組みへの組み換えである。CCU、水素製鉄プロセスも含めた鉄鋼プロセスの全体像を図9に示す。具体的構想を公表しているプロジェクトの対応も同図に示した。SCU (Smart Carbon Usage) とは最近使われ始めた呼称で、CCU、還元鉄利用、炭素循環などを含めた新しい炭素利用の総称である。再生可能エネルギー、水電解による水素製造は他部門の領域で鉄鋼とは離れる感もするが、それなしでは抜本的な脱炭素製鉄は成立しない。炭素依存の現行プロセスは、炭素を還元材とし、製鉄工程からの生成エネルギーを下工程のエネルギー源とした系で、自己完結性があるが、そのために制約も生じる。水素製鉄は還元材、エネルギー源自体の転換である。製鉄工程からのエネルギー供給機能はなく、水素、電気を消費し、下工程においてもエネルギーの利用形態が変わることに注意を払う必要がある。大きな枠組みで考えることになるが自由度は増す。CCUは化学製品への転換過程で生じる合成還元材など中間物質の鉄鋼プロセスへの還流など、ケミカルとの関係による炭素循環の考えも有用で、複合的な展開もあり得る。

なお、水素は二次エネルギーであり、再生可能エネルギー由来のCO₂フリーの水素利用が理想であるが、水素はその製造から輸送、貯蔵工程などを含めて総合的にグリーン度を評価しなければならない。欧州ではその検討が先行し、CertifHyプロジェクトでグリーン水素の定義を行い、定量的評価の方法を示している¹⁸⁾。

我が国の事情に戻ると、前述のように鉄鋼産業は主に大型製鉄所から構成され、高品質の鉄鋼製品を製造し、ユーザーに供給する役割を考えると、製造工程の転換は容易でない。特に、我が国の製鉄所は臨海製鉄所のコンセプトで1960年代に建設され、その改善に次ぐ改善を施してきたが、既に50年以上経過し、基本インフラは老朽化しつつある。中国では宝山鋼鉄グループの湛江製鉄所に代表されるように、東アジアでは大型の新鋭製鉄所が次々に建設され、製鉄所の姿が変わりつつある。日本では普及の進んでいない省エネ設備も標準仕様として積極的に採用されている。RITE (地球環境産業技術研究機構) の集計では国別の粗鋼のエネルギー消費は日本が最も少ないと報告されているが¹⁹⁾、中国の最新鋭の製鉄所のみと比較すれば、その優位性も危うい。従来の延長では

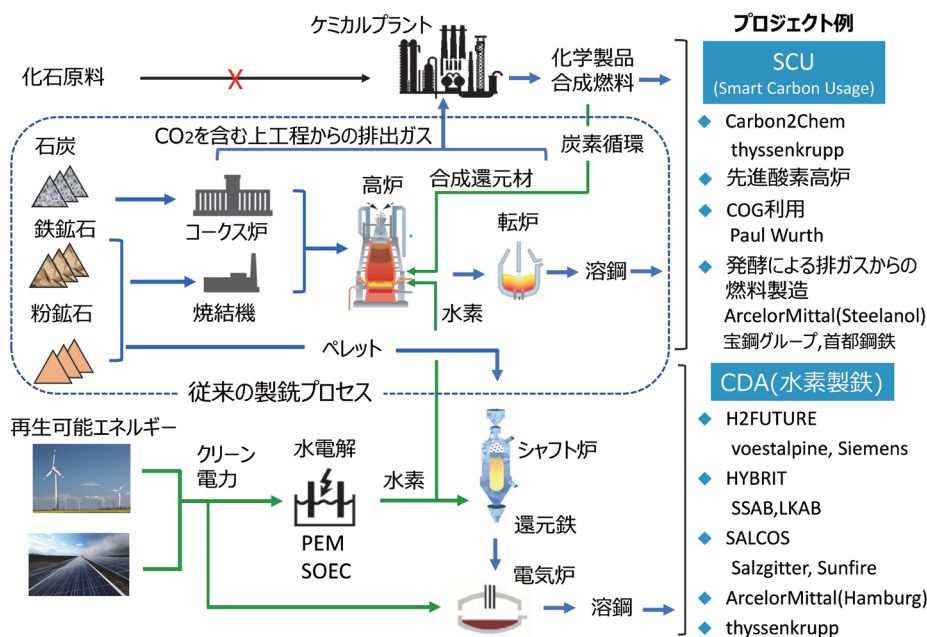


図9 CO₂大幅削減に向けての製鉄プロセス再構成

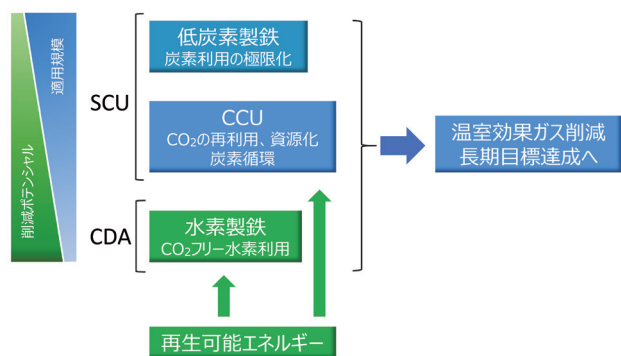


図10 鉄鋼におけるCO₂大幅削減に向けての総括的方策

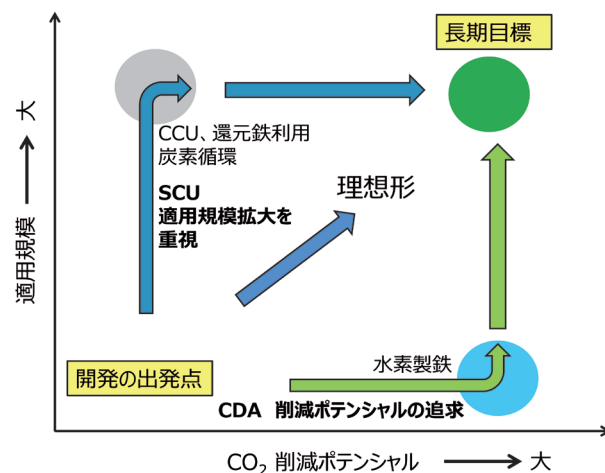


図11 将来鉄鋼プロセス実現に向けての選択肢

基礎競争力を失う可能性もある。2050年以降も見据えて、地球環境問題は制約とも捉えがちであるが、新技術への転換を促す機会でもある。

鉄鋼のCO₂排出量は生産量とCO₂排出原単位の双方で決まる。今後の長期目標達成に向けての総括的な方策を図10に、マクロな方向感を図11に示した。将来目標に対してはCO₂排出原単位のみに目を向けがちであるが、図11に示したように適応規模感を重視するのか、最初から理想的形態を目指し、CO₂削減ポテンシャル優先で進むのか、基本的な方向の選択肢があり得る。水素製鉄はCO₂削減ポテンシャルの追求に近い。開発を進めているスウェーデンの粗鋼生産量は470万トン/年、オーストリアは690万トン/年である。両国の規模感からは実現不可能でない。一つのベンチマーク的な存在には成り得る。SCUは現状プロセスが原点で道筋がわかりや

すい。利用技術が追い付くにしたがって適用拡大性は増す。各々、適用する地域、条件によって最適な姿が変わる。我が国は資源輸入国であり、地理的条件から欧州のPower to Gasのように広範な地域での再生可能エネルギーの利用などエネルギー相互利用は図りにくい。製鉄所は大型一貫製鉄所から構成され、多品種生産である。我が国の国情に合った独自のロードマップが必要とされる。各選択肢の性格は異なるが、規模の拡大と削減ポテンシャルの双方の推進が理想形になる。本来、CO₂削減技術は全ての部門、また世界の鉄鋼産業に共通するグローバルな課題であり、技術開発においては業界を超えた連携、国際連携、役割分担の実現が望ましい。一

国のみのプロジェクト推進では実効性に欠ける。地球温暖化に関する技術情報の相互利用、融合に国境はない。

2019年6月、Düsseldorfにてドイツ鉄鋼協会主催によるESTAD2019 (European Steel Technology and Application Days) が3日間開催され²⁰⁾、出席した。鉄鋼全分野をカバーする大きな国際会議であるが、全体の基調講演はLow Carbon Europe 2050のロードマップ紹介から始まり、最後も“Low Carbon Future”の名称のCO₂削減長期目標達成に向けてのワークショップが開催された。本ワークショップは水素製鉄、CCUなど欧州の各プロジェクトリーダーが一堂に会した討論の場であった。個々に具体的な将来プロセスの提示があるがゆえに、水素製鉄実現の技術的確度、再生可能エネルギー供給との整合性などについて議論は活発化している。CO₂削減技術も新しいフェーズに入ろうとしている。欧州鉄鋼協会EUROFERのロードマップ更新版も2019年後半に出る。低炭素高炉の出発点となり、以降の研究開発の流れに大きな影響を与えた高炉への還元ガス吹き込み、酸素高炉は1970年、1980年代にいずれも日本で本格的に提案、研究開発されたプロセスである。その成果は以降の各国の関連プロジェクトの進展に大きなインパクトを与えている。研究ポテンシャルは高い。今後の展開においても我が国はより新しい構想の提示など、指導的役割を發揮すべきと思われる。

謝辞

水素製鉄の例として挙げたHYBRITプロセス図の掲載にあたっては、同プロジェクトリーダーのDr.Martin Pei氏の許可を得た。またCDAなどの用語についてはSALCOSプロジェクトのリーダーであるDr.Volker Pei氏の助言を得た。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省資料：令和元年度環境白書
- 2) World Steel Association：World Steel in Figures 2019.
- 3) 山本哲也, 佐藤健, 藤本英和, 庵屋敷孝思, 深田喜代志, 佐藤道貴, 武田幹治, 有山達郎：鉄と鋼, 97 (2011), 501.
- 4) 八塚健夫, 中山一之, 大森和夫, 原義明, 井口正昭：鉄と鋼, 58 (1971), 624.
- 5) 西尾浩明, 宮下恒雄：鉄と鋼, 59 (1973), 1506.
- 6) 大野陽太郎, 堀田裕久, 松浦正博, 光藤浩之, 斉藤汎：鉄と鋼, 75 (1989), 1278.
- 7) S.Tonomura, N.Kikuchi, N.Ishiwata, S.Tomisaki and Y.Tomita：J. Sustain Metal, 2 (2016), 191.
- 8) J.van der Stel, G.Louwerse, D.Sert, A.Hirsch, N.Eklund and M.Pettersson：Ironmaking Steelmaking, 40 (2013), 483.
- 9) EUROFER：A Steel Roadmap for a Low Carbon EUROPE 2050, (2013)
- 10) 有山達郎：鉄と鋼, 105 (2019), 567.
- 11) G.Deerberg, M.Oles and R.Schlögel：Chemie Ingenieur Technik, 90 (2018), 1365.
- 12) Website of steelanol, <http://www.steelanol.eu/en>, (accessed 2019-07-15)
- 13) Website of HYBRIT, <http://www.hybritdevelopment.com/>, (accessed 2019-07-15)
- 14) Website of H2FUTURE, <https://h2future-project.eu/>, (accessed 2019-07-15)
- 15) V.Hille and A.Redenius：Stahl Eisen, 138 (2018), 95.
- 16) T.Buergler：METEC & 4th ESTAD 2019, Steel Institute VDEh, Düsseldorf, (2019), Plenary session 1：Trends in CO₂ mitigation.
- 17) 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」, (平成30年11月19日)
- 18) Website of CertifHy, <http://www.certifhy.eu/>, (accessed 2019-07-15)
- 19) 地球環境産業技術研究機構 (RITE)：2015年時点のエネルギー原単位の推計 (鉄鋼部門-転炉鋼), (2018年1月31日)
- 20) METEC & 4th ESTAD 2019, Steel Institute VDEh, Düsseldorf, (2019)

(2019年8月26日受付)