

特別講演

□第183回春季講演大会学会賞(西山賞)受賞記念
特別講演(2022年3月15日)

地球環境問題に向けての製鉄プロセスの ステップアップと将来課題

Step-up of Ironmaking Process towards Global Warming
Issues and Future Subjects

有山達郎 東北大学
名誉教授
Tatsuro Ariyama



*脚注に略歴

1 はじめに

今回は栄えある西山賞を頂き、身に余る光栄であります。私は研究生生活の中で31年間は日本鋼管(NKK)とJFEスチールにおいて企業研究者として、以降の7年間は東北大学多元物質科学研究所に在籍し、学における研究と教育に従事してきました。西山賞は学術分野で卓越した業績を果たしてきた方が、代々、受賞されています。私はアカデミアの世界で長い間、特定の分野を掘り下げ、業績を上げた訳ではありません。ただ、その間、鉄鋼を取り巻く周囲の変化を感じ取り、将来のあるべき製鉄プロセスの姿を描きながら研究を進め、企業研究者の立場から、また学の研究者としても、環境と調和すべき製鉄を共通のテーマとして研究を続けてきました。それらの研究が製鉄研究開発の進展に関り、今回の受賞に繋がるならば、非常にうれしく思います。企業時代は多くの方々のご支援と研究の同志にも恵まれ、大学では開かれた自由な研究環境の中で、学でしかできない製鉄の研究に従事できました。ここに至るまで諸先輩、同僚、大学時代の優秀なスタッフ、学生諸君に恵まれたことを付記し、感謝の意を表します。また、ドイツのアーヘン工科大学留学時、故H.W.Gudenau教授には公私共々、温かいご指導を賜り感謝の念に堪えません。そして、一貫して研鑽の場を与えてくれた日本鉄鋼協会には厚く御礼申し上げます。

本稿は「地球環境と製鉄」をキーワードとした題目としましたが、前半では製鉄研究を天職とも感じるようになった経緯に触れ、後半は今後への期待から、地球環境をめぐる製鉄技術のさらなる発展について、持論だけではなく、動向紹介

にもなりますが啓発の意も込めて述べたいと思います。

2 製鉄を学ぶ

製鉄は幅広い分野であり、経験の蓄積を財産とし、それらが体系的に整理された分野である。技術も多様な要素から構成され、その知見を立体的に繋げた階層構造的な性格を持つ。前例重視の経験主義的にも見えるが、他領域の吸収能力に富む柔軟性のある分野とも言える。その特質には長短もある。しかし、製鉄研究の間口は広く、初めて製鉄研究を志す者にとっては入りやすく、学びやすい分野である。

私の大学での専攻は化学工学であり、1975年に当時のNKK技術研究所に配属され初めて製鉄プロセスの研究に飛び込んだ。当時の上司は京大卒の宮下恒雄さん、現場勤務から海外留学を志し、カーネギーメロン大学のPhilbrook教授に学んだ情熱的研究者であった。私には高炉の予備知識は何もなかったが、配属直後にまず読めと渡されたのはフランスのRist教授のいわゆる高炉のRistモデルに関する論文である。半分はフランス語、残りは鉛筆書きで書かれた翻訳和文で、このRistモデルは製鉄研究者の常識であり、これを前提に議論すると言われた。今では解説論文もあるが、当時はこの原著に限られていた。いきなり手渡され、すぐに宮下さんから読み切ったかと聞かれ、君はどう評価するかとも問われた。理解だけでなく発想も学べと厳しい心構えを懇々と説かれた。答えに窮したが、Ristモデルは、RistらがMITで化学工学の単位操作の講義を聴講し、蒸留理論の基本である気液平衡のMaCabe-Thiele図を見て、向流型反応器である高炉の

* 1975年早稲田大学大学院修了、同年、日本鋼管(NKK)入社、1982年から2年間、アーヘン工科大学留学、1999年製鉄研究部長、2003年JFEスチール製鉄環境プロセス研究部長、2005年主席研究員、2006年から2013年まで東北大学多元物質科学研究所教授、2013年同大学名誉教授、2016年秋田大学客員教授。

酸素交換との共通性に関き、高炉モデルとして新たに提案したものだとも教えられた。気液平衡を固気平衡に置き換えた図式的表現、平衡とのかい離をシャフト効率（段効率）で補正する基本構造は同一である。ただRistらは酸素交換に炉下部の熱収支を加え、さらに上位のモデルに発展させている。今までの知識を幹に、さらに広げて勉強するようにとアドバイスも受け、高炉研究の入り口を見つけたように見え、緊張感が抜けるようになった。

宮下さんは当時、40才前後であったが、既に高炉の将来に危機感を持ち、高温ガス炉を利用する原子力製鉄を起案し、コークス比を極限まで下げる還元ガス吹き込みNKGプロセスの考案者でもあった¹⁾。これは後の高炉炉頂ガス循環にも繋がる先駆的研究であり、その構想力には大なる影響を受けた。

私の入社時の研究に触れると、高炉の装入物分布の研究がテーマで、地道ではあるが高炉の制御に関わる内容であった。当時は高炉解体結果に基づく炉内状況の総括期であっ

た。装入物分布制御はその一つで、高炉の炉頂はガスと装入物の相互作用のある動的な場であり、炉内は充填構造にガス流は拘束されるが、炉頂の自由空間と装入物の接点である装入表面では装入面角度によって装入物に抗力が働くモデルなどを提案した²⁾。図1は10秒程度の実験観察を元に作成した手書き図で、高炉炉頂部の鉱石装入時の過渡的な中心部のコークス流動化現象を示す。本稿では場違いの感もあるが、思い出深い図であえて入れた。発想者は上司の西尾浩明さんで、私はそれを実験と計算で検証する役割であった。流動層、粉体工学の応用である。このモデルについては入社2年目の1977年に鉄鋼協会秋季講演大会で発表したが、高炉解体の解釈とも異なるように見えたらしく、時間一杯の質問を受けた。懐疑的な質問も多々あった。しかし、すぐに反響があり、学振54から再度の詳細発表の依頼を受けた。学振54の質疑では上司の助けを仰いだが、理解者が増えた。今、この種の実験はガス流の存在下で行うことは常識である。先の研究は高炉内のガスと装入物相互作用の概念のきっかけを作ったものとも思っている。浅学であっても、現象の本質的な見方によって新しい着想も生まれることを実感し、製鉄研究に手ごたえを感じ始めたことを忘れられない。

1/10スケールの扇型冷間モデル実験観察

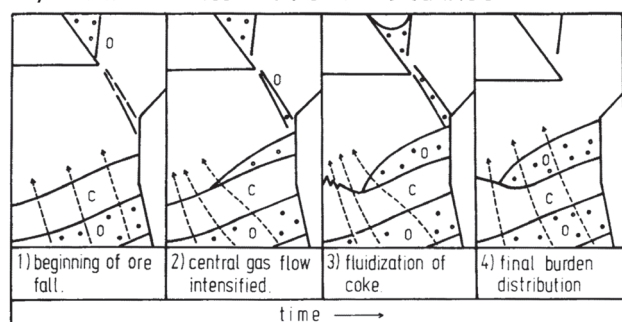


図1 高炉炉口部における鉱石装入時の過渡的流動化²⁾

3 製鉄プロセスの現状と今後の指向

次に産学を通じての共通テーマであった環境に関わる内容に戻り、まず製鉄の中心となる高炉技術開発の変遷に触れる。図2に高炉技術の進歩を総括した。1930年代まで遡った歴史になるが、技術の展開を個々に並べると、高炉の研究は漸進的に見える。巨大プロセスを扱う製鉄技術としては止むを得

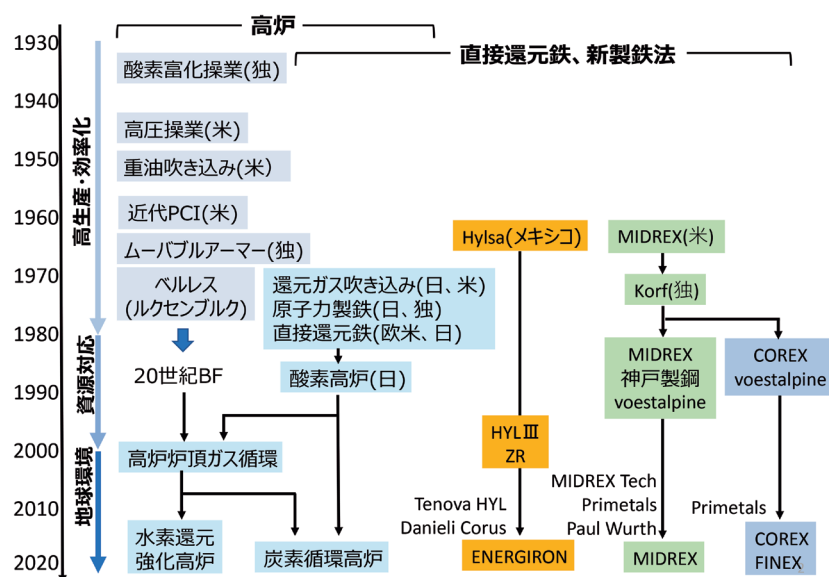


図2 高炉、直接還元鉄及び新製鉄法を中心とした製鉄技術の流れ (Online version in color.)

ない。逐次的には見えるが、マクロ的には進化を遂げている。平面図では単に流れがわかるだけだが、生産性、還元材比などの指標では飛躍的に進歩している。資源、エネルギーなど、周囲の情勢に製鉄研究は敏感に対応し、時には先取りし、進化してきたと言える。ほとんどの技術が海外発であるが、日本はこれらの技術を積極的に取り入れ、共有化し、鉄鋼界全体の進展に繋げている。昨今、地球環境問題は非常にホットな課題であるが、鉄鋼では現在に繋がる還元材低減、CO₂削減への開発は1970年代から始まっている。同図には高炉以外製の鉄法の流れも示した。今の水素製鉄に繋がる天然ガス利用の直接還元鉄プロセスは1960年代に生まれている。

現時点での高炉、直接還元鉄、スクラップ溶解プロセスを図3で示した。周知のように高炉法は世界の粗鋼生産の約7割を占め、東アジアの新鋭製鉄所でも高炉法が採用され、鉄鉱石原料への対応力、大量生産、また、あらゆる鉄製品の製造が可能など優位性に富む。現行の直接還元鉄プロセスは主として天然ガスベースであり、成立地域が限定される。スクラップは重要な鉄源であるが、供給量に制約がある。高炉法が資源弾力性、生産性などの点で優位性があり、鉄鋼発展の原動力にもなってきた。しかし、その優位性の元でもある炭素からの脱却が今、最大課題である。図4は高炉-転炉法、天然ガスベースの直接還元鉄法、スクラップ溶解を鉄源、還元

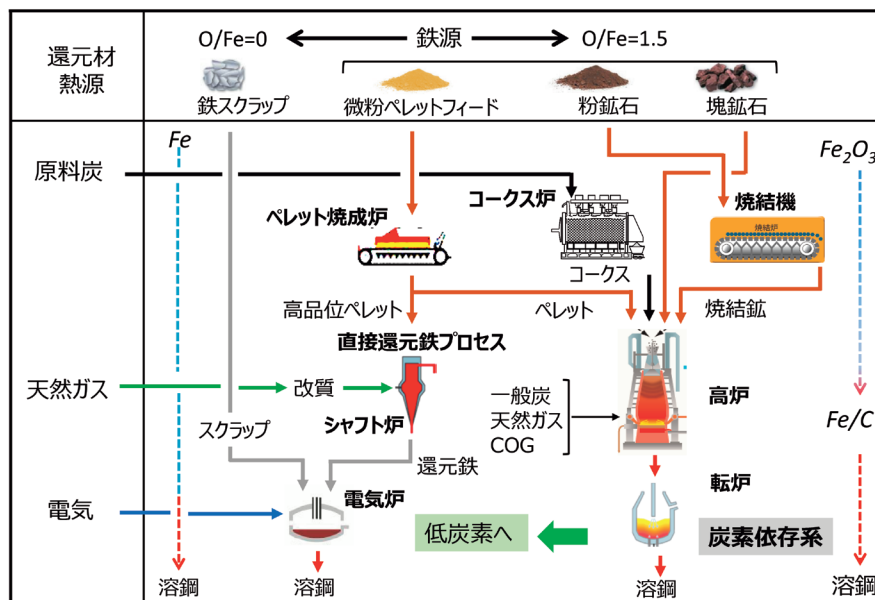


図3 現時点での各種鉄鋼プロセス (Online version in color.)

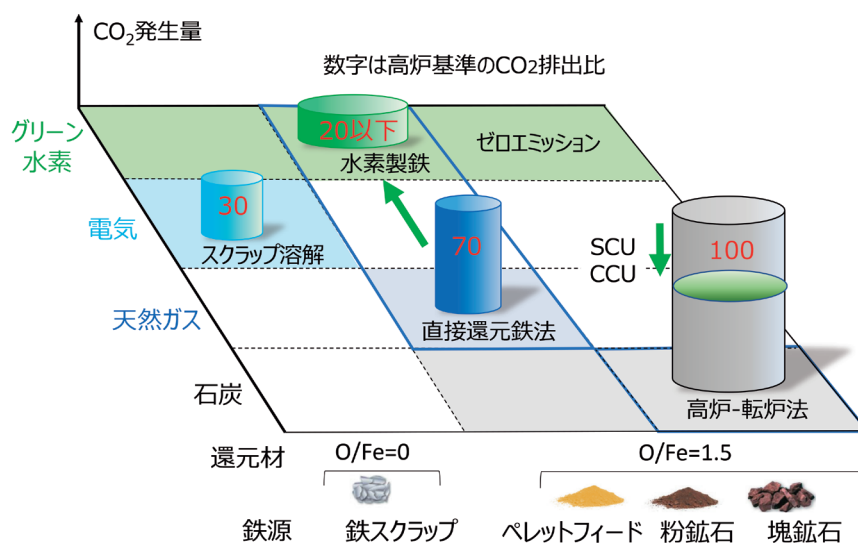


図4 各種鉄鋼プロセスとCO₂発生量比と今後の方向 (Online version in color.)

材、CO₂発生量の観点から現状と今後の方向を模式的に示したものである。CO₂発生量は高炉・転炉法を基準にすれば天然ガスベースの直接還元鉄法は約70%、スクラップ溶解の電気炉EAF (Electric Arc Furnace) では概ね30%となる。高炉法は炭素を絶妙に使いこなしていると言え、その炭素依存が問われている。2050年には高炉が消えたロードマップを公表している海外企業もある。焼結機、コークス炉も不要となる。図3の構図が一変しようとしている。そして、今、グリーン水素による水素製鉄プロセスが提唱されている。高炉に比べCO₂発生量20%以下の試算例もある。しかし、脱炭素の水素製鉄は再生可能エネルギー由来のグリーン水素の大量供給が無ければ成立しない。水素は二次エネルギーであり、水素製造法によってCO₂削減効果は変動する。水素製鉄は将来の象徴のプロセスであるが、水素供給量と鉄鋼生産との整合性も問われる。水素製鉄移行への用意はすべきだが、水素供給が律速で戦力化には時間を要する。グリーン水素供給は国のエネルギー戦略的課題でもある。まずは制約の少ない技術のさらなる掘り下げが必要である。高炉をプロセス的に改善した炉頂ガス循環、水素還元の強化などが提案されている。CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) への依存性が高い欧州のULCOS (Ultra Low CO₂ Steelmaking) プロジェクトは中止となっているが、筆者らはDown-sizingの酸素高炉を提案している^{3,4)}。炭素循環になるCO₂メタネーション高炉など発展余地がある。ただ、我が国は資源への対応力も念頭に置かねばならない。資源対応については後述するが、現状から将来への円滑な移行を前提に、新提案の結合から成る連続的なシナリオを描かねばならない。

現在、複線的 (Multi-track) に進めるという表現が多用

されているが、開発の安全策としての複数の方法の同時採用、またOptionalとしての意味ではない。TRL (Technology Readiness Levels) など技術の成熟度に基づき、円滑性に配慮した段階的な技術展開と考えるべきである。非連続的な技術思考、均衡を壊す破壊的なイノベーションが必要であるとも時として叫ばれるが、学理のない所にイノベーションは生まれない。今までの財産を活かすことにも目を向けるべきである。

4 将来へのスムーズなステップアップ

製鉄は経験主義、漸進的性格を持つと前述した。しかし、前向きに言い換えれば技術の蓄積は豊富であり、これまでの流れの中にも萌芽となるものを持つ。鉄鋼ではCO₂対策の遅れが問われがちであるが、既に個別のプロジェクトが開始されている。ただ、各技術にも特性があり、将来へのスムーズな移行指針となる統括的なロードマップが不可欠となる。

図5はCO₂大幅削減に向けてのステップアップ像を示す。各企業、組織が個別に発表しているプロジェクトも入れた。SCUとはSmart Carbon Usageの意味で、CO₂利用のCCUも含む。水素製鉄は水素の質が問われるために、直接目的である炭素削減を意味するCDA (Carbon Direct Avoidance) で表現される。残念ながら、図5のプロジェクトの大半は欧州発である。欧州では今後の資金導入と直結するEUタクソノミーの導入もあって、CO₂対策のプロジェクトを企業の経営計画として公表し、外部発信が活発であることもあるが、我が国の存在が希薄である。

炭素の更なる効率的利用を目指すSCU、ケミカルのポテ

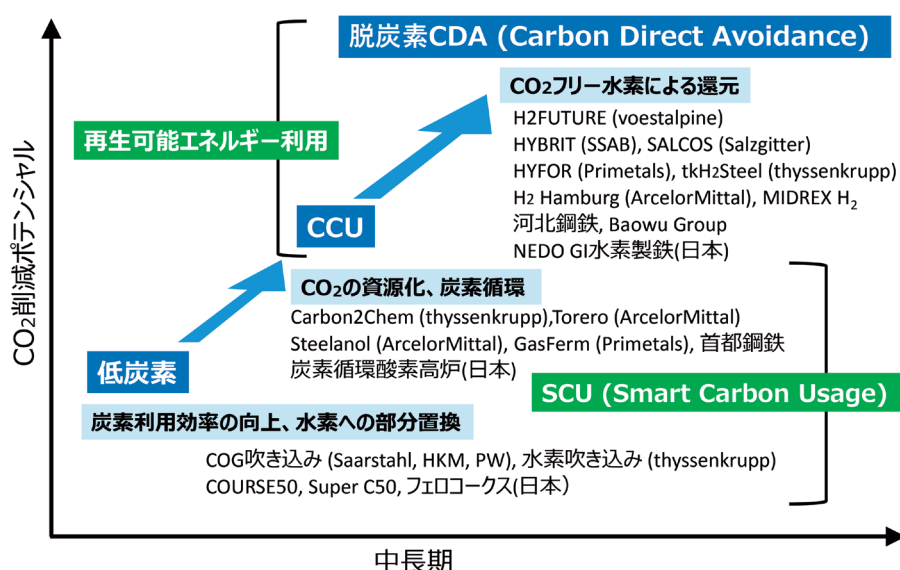


図5 CO₂大幅削減に向けてのステップアップとプロジェクト例 (Online version in color.)

ンシャルを活かし、CO₂を再資源化するCCUを挙げたが、CCUでは安定物質であるCO₂をスプリットするために水素が不可欠である。SCUでも部分的に水素が必要となる。絶対量としては水素製鉄より少なく、CO₂削減効果は低位になるが、現実的な位置にある。水素、COGの高炉吹き込みは欧州鉄鋼企業の2000m³クラスの商用高炉で既に検証されつつある。その要素技術は高炉への還元ガス吹き込みなど、製鉄の歴史の中に源泉があり、実行域に近い。水素製鉄も図4のように、直接還元鉄法における還元ガス種の水素へのスライドであってプロセスの原点は既に存在する。本格的な水素製鉄は水素供給確保が主たる課題で、それ自体を未来技術として強調すると、今までの蓄積を見失い、開発も非効率になる。現行の直接還元鉄プロセスでも水素濃度70~80%で操業し、また還元鉄プラント設計企業のパイロットプラントでは既に水素濃度90%まで検証されている。スティッキング、すなわち粒子間固着への対策は現行の商用プロセスで既に施されている。私は直接還元鉄プラントを見学した経験があるが、操業形態は高炉と全く異なる。天然ガスあるいはCOG改質からの出発でプロセス基盤を確立して技術習得し、徐々に水素転換する構想のプロジェクト構想が賢明な策と思われる。既に100万トン/年クラスのCDAねらいの直接還元鉄プラント建設計画が欧州、中国で発表されている。それらは既存の二種類のいずれかのシャフト炉プロセス導入で、要素技術は出来上がっている。既発表の数字を合わせると、2030年頃には欧州のみで新しい直接還元鉄プラント能力は計約1500万トン/年に達する。最初のステップは天然ガスからである

が、水素製鉄に向けての実質的な始動である。既に事業投資の段階である。これらの計画には政府補助もあるが、企業側が個社ごとに高炉からCDAへの転換などCO₂削減効果と生産構造の転換計画を具体的に提示していることも資金獲得に有利に働いていると思われる。また、欧州はガス源、再生可能エネルギー確保に関してMENA (Middle East & North Africa) における拠点構想も描いている。

CCUの展開はthyssenkruppの提案のCarbon2Chemが代表例でもあり⁵⁾、ハード的なCO₂削減プロセスではなく、産業間連携を活用した”Integrated CO₂ Capture”とも表現されている。製品はまずはメタノールなどケミカルの出発物質である。さらに、FT合成 (Fischer-Tropsch)、またMtO (Methanol to Olefine) を通じて高付加価値製品までつながれば発展性に富む。その手前のメタン合成ならば、鉄鋼プロセスでは炭素循環となる還元材として製鉄所内に自己完結型に組み込むことが可能になる。鉄鋼分野が慣れてきた改質反応とは逆の高圧合成反応となるが、メタン合成、FT合成は20世紀前半の技術である。鉄鋼では経験が薄く、ケミカル分野との連携が必須となるが、決して未踏技術ではない。

5 今後の展望と課題

将来へのスムーズな展開を考えれば、SCU, CCU, CDAが並列した存在となり、開発の進捗に応じて重みづけが変わる。図6は全体構図例で、水素で繋がり、またCO₂も資源として活かす連携的な構成である。スウェーデンのSSAB、オー

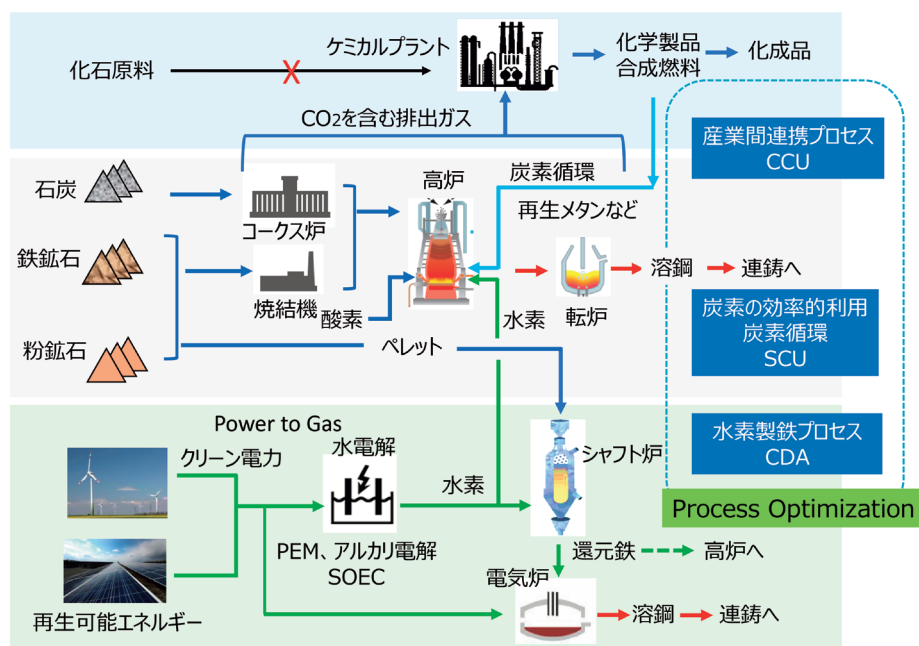


図6 CO₂大幅削減に向けた製鉄プロセスの将来像 (Online version in color.)

ストリアのvoestalpineは2045～2050年に高炉から水素製鉄への移行を宣言している。しかし、両国は既に水力発電が概ね50%を占める。エネルギー、資源事情によって、その最適構成比は変わる。全体構図を俯瞰してわかるように、姿勢としてケミカル合成、水電解による水素製造など、固有の技術を持ったセクターとの連携が不可欠である。また、初期値からの開始でなく、蓄積された既存技術の活用、国境を越えた連携などによる開発の加速化も考慮すべきである。

この構図中のCDAに関して、シャフト炉の水素還元工程のみに視線を向けがちであるが、今後の資源対応にも注目しなければならない。現在、提唱されている水素製鉄は直接還元鉄 (DRI)－電気炉 (EAF) の組み合わせで、高品位ペレット使用が前提となる。現在、還元鉄製造は年間1億トンに達し、海上輸送可能な還元鉄向けの高品位ペレット供給量は既に限界に近い。今後の水素製鉄に向けては、通常品位のペレット使用を考えるべきであるが、プロセス的にDRI-EAFの延長では対応できない。EAFの特性上、通常品位のペレット使用ではスラグ比が増加し、生成スラグもその雰囲気から製鋼スラグに近く、用途に窮する。精錬機能も弱い。鉄歩留まりは低下し、スクラップ希釈は不純物の問題を生じる。資源拡張、高級製品製造機能を考えれば、新たなプロセスルートを考える必要がある。その課題に呼応し、欧州系のエンジ企業は溶鉄経由のプロセスを提案し、一考の価値がある⁶⁾。図7にその比較を図示する。A) は既存の高炉-転炉法、B) がDRI-EAFプロセスである。C) の工程のように、還元鉄をメ

ルター経由で一旦、高炉に近い溶鉄とし、現有の転炉に繋ぎ、精錬を行う。メルターとして主に合金鉄製造に用いられているSAF (Submerged Arc Furnace) 利用が挙げられている。SAFでは自焼性電極 (Söderberg's self-baking electrode) を用い、熱発生と同時に炉内の酸素ポテンシャルを下げ還元、浸炭も一定量可能である。適正な加炭制御、生産速度が課題であるが、現存の一貫製鉄所の製鋼プロセスに直結でき、現状と同様に高度な精錬が可能である。メルターは固定炉で高炉下部と類似した機能を持ち、高炉に近い流動性に富む溶鉄、スラグを出鉄できる。スラグは高炉スラグと同等で用途が広い。高炉の上部を還元鉄シャフト炉に、高炉下部をクリーン電力利用による浸炭、溶解炉に分割したプロセスに相当し、脱炭素の次世代製鉄の原型ともなりうる (図8)。

総じて水素製鉄としては、資源対応力、還元と精錬を考慮し、また現状の製鉄所に如何に落とし込むかなど多面的なプロセス評価が重要である。特に、資源、エネルギー制約を受けやすく、かつ高級鋼指向の我が国では、現状のポジションを維持、発展させるために、立地条件も含めたグリーン水素の入手はもちろんのこと、資源弾力性、最終製品性状に関わる精錬までを視野に入れた一貫プロセスとして全体系を設計しなければならない。また、SCU, CCU, CDA共に現在は個々の開発段階に留まる。鉄鋼では生産者が実装化し、工業プロセスとしてグローバルに展開させ、初めてCO₂削減が達成される。開発から事業化への円滑な移行計画立案も極めて重要である (図9)。

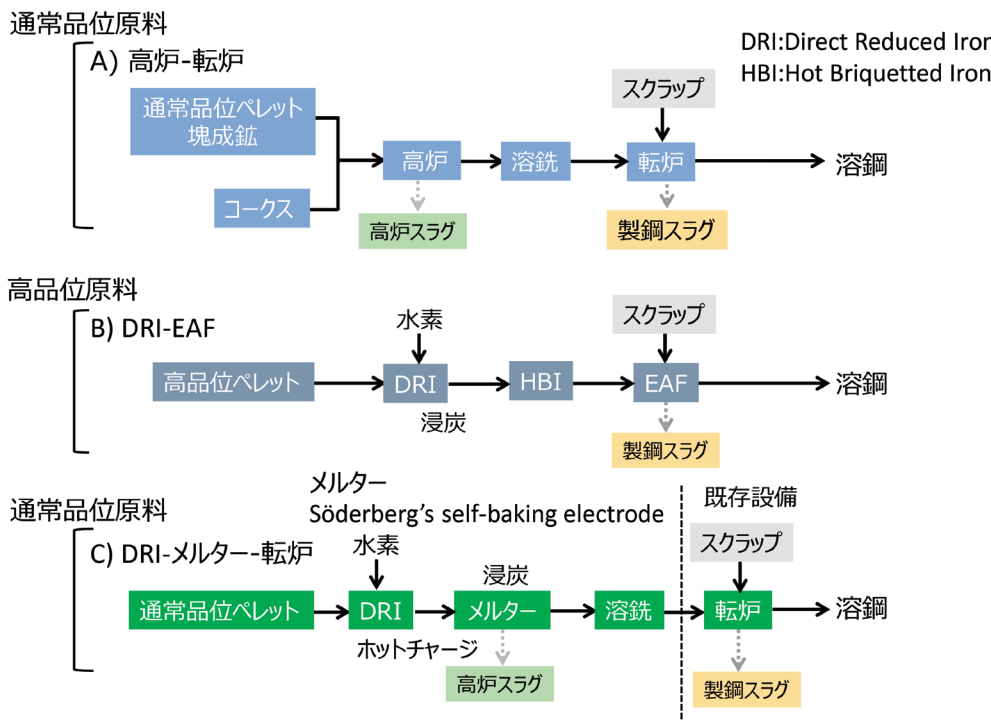


図7 鉱石原料対応を考慮した水素製鉄プロセスの指向 (Online version in color.)

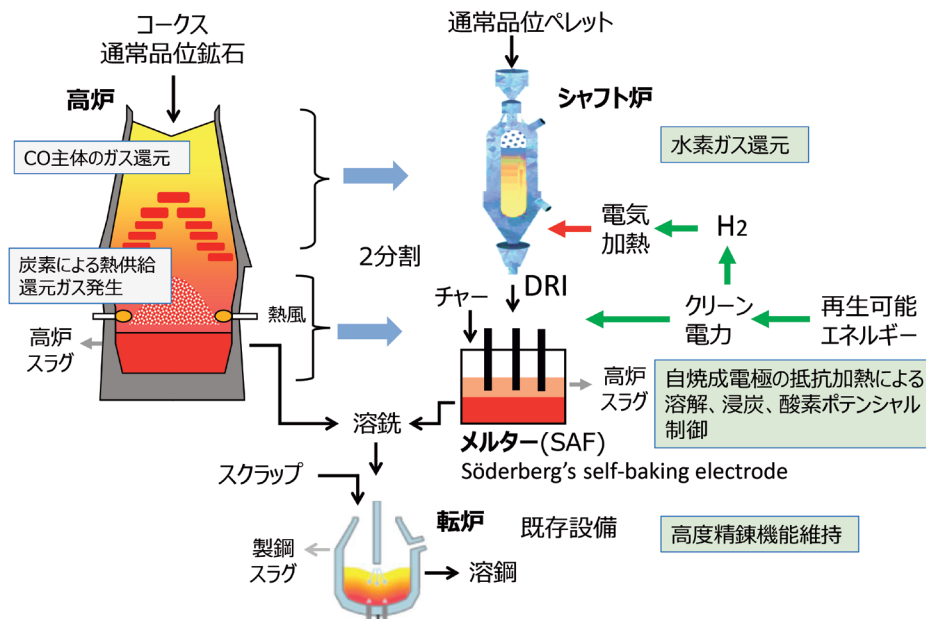


図8 今後のCO₂大幅削減、資源対応、精錬機能維持に対応した次世代製鉄プロセス (Online version in color.)

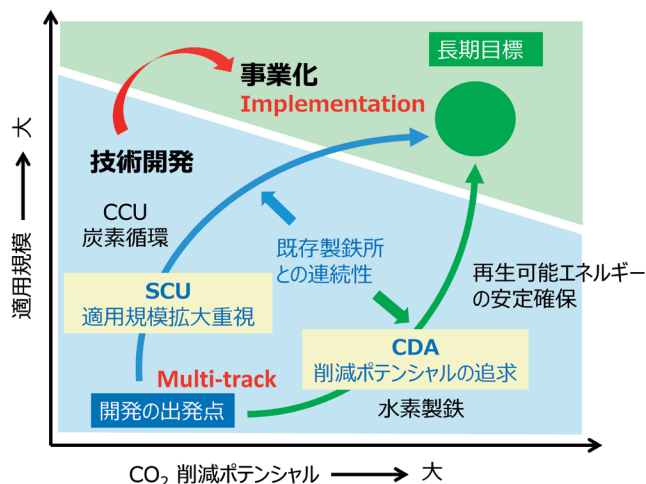


図9 将来鉄鋼プロセス実現に向けての技術開発と事業化 (Online version in color.)

6 おわりに

再生可能エネルギー導入が世界標準として叫ばれているが、我が国は資源もなく、地理的条件からも難しい条件にある。地球温暖化対策は省エネと異なり、生産者にとって直接的な利益を生む訳でなく、負荷とも解釈しがちである。しかし、これからは地球温暖化対策技術の積極的導入者は社会からの信頼を得られる高価値の製品を提供できる生産者として評価され、共感を呼び、その行動が収益に結び付くと考えべきである。残存者利益にこだわると、産業の変革からは取

り残される。変革には莫大な投資を必要とするが、学理の裏付けがあり、理解が得られる構想ならば、技術が新技術を生み、支援、投資を呼び込む。地球温暖化技術の開発はリスクではない。世界の共通課題を追求する中で競争を強調すると孤立を生む。図6の構図だけではゼロエミッションに届かない。プロセスは共通の財産である。国境を意識せず、グローバルな視点から、日本鉄鋼協会などの場を活用し、産学の一層の連携強化と更なる構想創出に期待したい。

参考文献

- 1) 宮下恒雄, 西尾浩明, 下間照夫, 山田健夫, 大槻満: 鉄と鋼, 58 (1972), 608.
- 2) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, 66 (1980), 1878.
- 3) K.Takahashi, T.Nouchi, M.Sato and T.Ariyama: ISIJ Int., 55 (2015), 1866.
- 4) T.Ariyama, M.Sato, T.Nouchi and K.Takahashi: ISIJ Int., 56 (2016), 1681.
- 5) G.Deerberg, M.Oles and R.Schlögel: Chemie Ingenieur Technik, 90 (2018), 1365.
- 6) G.Wimmer, J.Apfel and P.Örtelt: HYBRID MILL Roadmaps to net-zero carbon for the Integrated Plant, 5th ESTAD 2021, Stockholm, (2021).

(2022年3月23日受付)