

特別講演

□学術功績賞受賞記念特別講演

2050年に向けて期待される 低炭素高炉の姿と課題

Future Perspective and Subjects for Low Carbon Blast Furnace in 2050

有山達郎

東北大学 多元物質科学研究所
教授

Tatsuro Ariyama



*脚注に略歴

1 緒言

2050年は周知のように地球環境問題において長期的観点からの目標年である。約40年先の未来であり余裕があるように思えるが、地球環境は徐々に変化する時定数の大きなシステム系であり、変化、前兆が短期では見えにくく、観測データとして現れた時は遅い。今からが大切であり、緊張感を持たねばならない。高炉など鉄鋼の主要設備は高温反応装置である故、長期の連続運転を前提にし、今後の高炉寿命は30年以上になることを考えると、今、2050年に適用しうる鉄作りのグランドデザインを考え、そこに至るシナリオを作り、実行にとりかかる必要がある。鉄は社会資本、消費財の根幹を成す重要な素材であり、世界的にはこれからも成長しつづける産業である。しかし、その製造原理を炭素に大きく依存しているため、現在進行形で低炭素化への努力を進めなければならない。

この地球環境は緊急的課題であり、その解決に向けた低炭素製鉄を具体化しなければならないが、他にも資源対応など今後、考えるべき課題は多い。我が国の鉄鋼産業に目を向ければ、近年、アジア各国で新鋭製鉄所が稼働し始め、日本のポジションはどうなるのか、日本の鉄鋼に成長戦略はあるのかなど、今後は不透明なようにも見える。この状況は一見、課題だらけの危機にも思えるが、いずれの国も直面するものである。我が国が他国に先んじてその課題を突破でき、新しい鉄作りのビジョンを具現化できれば、一步、リードできるチャンスでもある。本稿では、私の専門である製鉄を中心に低炭素製鉄の姿について記してみたい。

2 日本の鉄鋼業のポジションと役割

今後の我が国のポジションなどを考えるために、世界の粗鋼生産量予測を整理する必要がある。図1にIEAによる2050年における地域別の粗鋼生産量予測を示す¹⁾。経済成長が低め (low) と高め (high) の予想値があるが、いずれも経済成長と一人当たりの鉄鋼消費から換算された数値である。年間約23～28億トンと予測されている。2050年において、鉄鋼生産主要国は中国、インドなどに移る。至近の中国の鉄鋼生産動向を見ると、この予測を上回りそうである。日本は、概ね1億トンに留まる。量に関しては世界の中で埋没しかねない状況が予測される。これは地域別の数字であり、企業の趨勢を示すものではないが、消費国と生産国、鉄鋼企業の主要生産拠点は、今後、一変する。企業の経営戦略としては海外での生産、海外企業との連携強化などの方策が取られるであろうが、日本企業はこの手の戦術は得意でない。それでは、緒言で述べたように、我が国の鉄鋼産業の存在意義、どうし

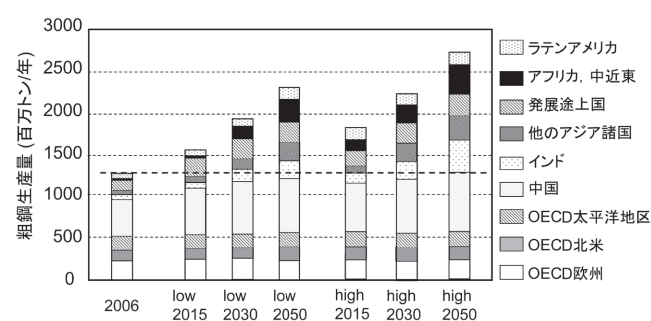


図1 今後の地域別粗鋼生産量の予測 (IEA資料)¹⁾

* 昭和50年に早大大学院を修了し、日本鋼管(現 JFEスチール)に入社、高炉、溶融還元の研究に従事する。その後、廃棄物リサイクル、地球温暖化など環境に関連する研究を行い、平成18年4月から東北大学多元物質科学研究所教授の任につき現在に至る。

たら鉄鋼の成長戦略が描けるのか様々な疑問も生じる。

先の引用で挙げたIEAの報告書では、2050年における温室効果ガス排出量を2005年比で半減するためにブルーマップシナリオと称している案を提示している¹⁾。図2に鉄鋼分野で必要なCO₂削減目標を示す。これからの生産量の伸びを考慮すると、原単位当たりのCO₂削減率は約1/3になる。これは技術的に達成不可能な数字にも見える。今後は成長に伴う責任も同時に生じることも意味しているのであろう。鉄の作り方の質も問われる。地球環境に適合しなければ、継続的成長はありえない。よりクリーンに鉄鋼生産を持続できることが最大価値となる。現在、これを満足できるに近い国とえば、優れた技術開発力、現場の実行力、それを支える資質の高い研究者、技術者を有する我が国をおいてないであろう。これからのキーになる環境先進技術を発信できる国として、我が国の鉄鋼の展望を描くことも可能と思われる。

3 鉄鋼プロセスにおける炭素の流れ

3.1 二酸化炭素発生機構

そもそも二酸化炭素とは何かを知るために、図3に二酸化

炭素の生成熱を示す。二酸化炭素の生成熱は低位にあり、炭素化合物として安定物質である。炭素を熱、還元を利用しつつ炭素の最終形態に近い。排出された二酸化炭素を吸収、吸着などで分離、隔離する方法はCCS (CO₂ Capture and Storage) として検討され、大幅削減の決め手になっている。しかし、技術的には、希釈されたCO₂を対象とし、隔離行程に付加的エネルギーを要し、安定的に貯蔵する方法、その場所の探索など未解決課題も多く、現状では戦力化できない。水素への転換も取り上げられることが多いが、水素は自然界になく、主に化石燃料から製造する。その過程でエネルギーを消費しCO₂発生を伴い、全体系での評価が要る。基本的に鉄鋼プロセスでその削減を図るためには、炭素の利用ルートを解析し、利用効率向上を図り、入り口の所要炭素を削減するのが第1の策となる。図4は炭素の流れに沿って鉄鋼プロセスを構成するユニット毎に二酸化炭素の排出量を計算した例である²⁾。製鉄と製鉄以降の下行程に二分すると、概ね7:3となる。本図では最終的なCO₂の排出箇所を表示した。様々な箇所から分散してCO₂は排出される。高炉における還元反応の結果、CO₂が発生するが、製鉄工程はエネルギー供給の機能も持ち、以降は、高炉ガスに含有される未利用のCOガス、コークス炉ガス、あるいは炭材の熱利用の結果として排出されたCO₂である。後者の対策として熱利用効率向上、省エネが重きをなすが、技術的に改善の余地は少ない。プロセスの機能自体を見直した一つ高いレベルの技術革新が必要になる。バイオマス利用も候補になる。ただし、バイオマスはエネルギー密度が低く、鉄鋼では使用しにくい。これに対し、私の研究室の植田滋先生が新たな提案をしている³⁾。個々にこのような対策を進めるにしても、メイン設備の高炉は物質収支、熱収支を通じて、熱風炉、コークス炉など周辺設備と全てリンクしているために、高炉への投入カーボン削減が優先課題となる。すなわち低炭素高炉が実現できれば、全体のCO₂排出削減に繋がる。

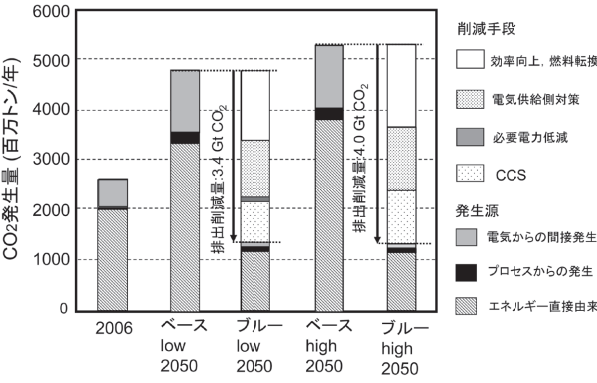


図2 鉄鋼分野における温室効果ガス削減の目標感 (IEA資料)¹⁾
(ベース：現状技術、ブルー：半減目標)

生成熱 ΔH_f⁰ (kJ/mol)

C	0
CH ₄	-74
CO	-110
CH ₃ OH	-239
H ₂ O	-285
CO ₂	-393
(CaCO ₃)	-1207

図3 炭素化合物の生成熱

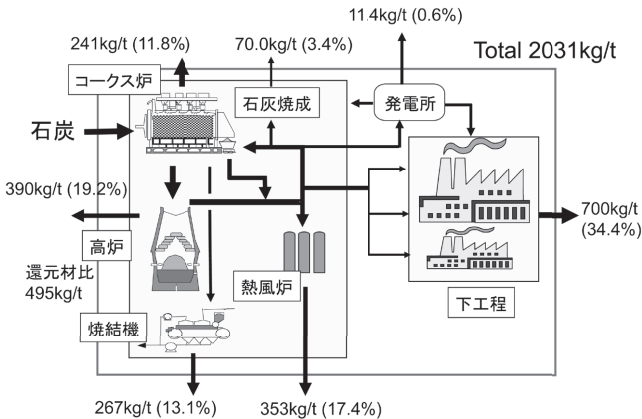


図4 一貫製鉄所のプロセス別CO₂発生量の例

3.2 低炭素高炉の概念とシーズ

高炉への投入カーボンと還元材比は意味が異なるが、概ね連動している。今までの高炉還元材比を見ると、この数十年、図5に示すように約500kg/t前後で推移して変化がない。欧州の主要鉄鋼生産国も同様である。高炉の還元反応条件は既に還元平衡の限界に近いところにある。高炉の還元材比を下げるためには、還元平衡自体の制御が必要になる。その案として、1980年代にフランスのRistらによって、高炉を低温化する方法が提唱されている⁴⁾。反応性の高いコークスを用いて低温からコークスのガス化反応を促進すれば炉内のガス酸化度は上昇し、炭素の利用効率が改善され、還元材比は低下するという考えである。しかし、高炉内温度を大きく制御できる高反応性コークスについては、製造法も含めて具体的な提案は今までになかった。原料配合で変更しうる高反応性のコークスより、超高反応性のコークスが望ましい。有力なアイデアとして鉄を含有したフェロコークスが提案されている⁵⁾。図6にその概念を示す。本図中に示したように、Fe/FeOの還元平衡付近でフェロコークス中の微粒の鉄は酸化、還元を繰り返し、すなわちREDOX反応によって低温から炭素のガス化を加速する。コークス中の鉄は高炉の鉄源にもな

る。基盤技術は1980年代に日本のナショナルプロとして進められた成型コークスにある。成型コークスは資源対応力に優れているが、反応性が高い。これは欠点とされていたが、そこを逆手に鉄触媒を用いてさらに反応性を上げ、高炉平衡温度を制御しようとする発想である。石炭と粉鉱石を混合して乾留するが、珪石レンガからなる既存の室炉コークス炉ではレンガを損傷させる。成型コークス炉と同様に珪石レンガを用いない堅型炉を用いれば、レンガの問題は生じない。このアイデアは2000年頃に当時、NKK（現 JFE スチール）にいた板垣省三氏らと共に考案した。当初は賛同者が少なかったが、新日鉄の研究部長であった内藤誠章さん、加藤健次さん、その後亡くなられた古牧育男さんが後押しをしてくれ、今では革新製鉄プロセスとして国のプロジェクトになっている。コークス炉を今後の更新と共に新しい炉形式に部分的に変更していけば成立する。還元材比を約10%削減できる。ただし、このアイデアを欧州勢に話すと必ずしも賛同してくれない。彼らは伝統的に反応性の低いコークスの方が高炉内の通気性を保つことができると考えており、それに反するからである。全量をフェロコークスに置換ではなく、高炉内でガス化する量に相当する1/3で良く、他のコークスには通気性を保つ役目の高強度のコークス使用と機能分化の構想であるが、やはり実証が不可欠である。スウェーデンのLKAB 試験高炉借用の提案も以前からしているが進展していない。さらに日本はほとんどが大型高炉で、そこに至るまでに小型高炉での確認が必要である。我々がイニシアチブを取り、実証段階では小型高炉を多数有する中国などと国際的フォーメーションを組めれば良い。

もう一つは高炉のガス利用率向上にこだわらず、高炉内でコークスが担っている還元ガス製造機能を外部からの還元ガス吹き込みで代替する方法がある。高炉下部ではコークスが直接還元として酸化鉄を還元し、同時にCOガスを生成する。さらにそのCOがガス還元として働き、効率的に還元が進行している。これに反することであるが、外部から高温還元ガスを導入し、ガス還元と直接還元率を置換すれば、投入カーボン量を大きく減少できる。現行高炉との比較を酸素高炉ベースで図7に示す。ただし、1000℃以上の高温還元ガスの製造方法が課題で、コークス炉ガス中のCH₄を高炉から排出されるCO₂で改質して還元力を高めて高炉に吹き込む、あるいは高炉ガスからCO₂を選択的に除去して還元力を再生し、加熱後、高炉に吹き込み方法が挙げられる。前者は既に1970年代に日本でNKKがNKG法として提案、試験高炉で実証している⁶⁾。CO₂濃度の高い高炉周辺ガスとコークス炉ガス中のCH₄を高温場で反応させ、高温還元ガスを炉内に吹き込むアイデアである。当時、コークス用粘結炭確保に不安があり、コークス比を減らすために本技術が開発され

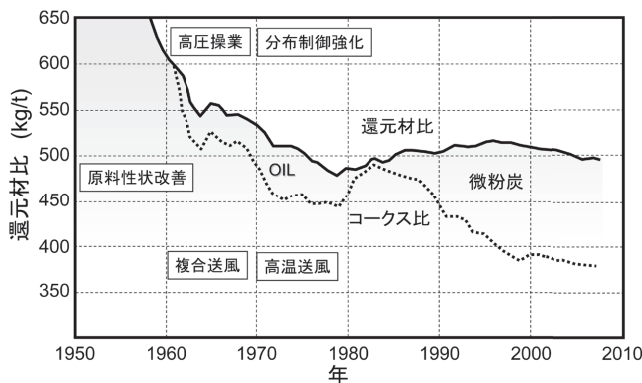


図5 我が国の高炉還元材比の推移

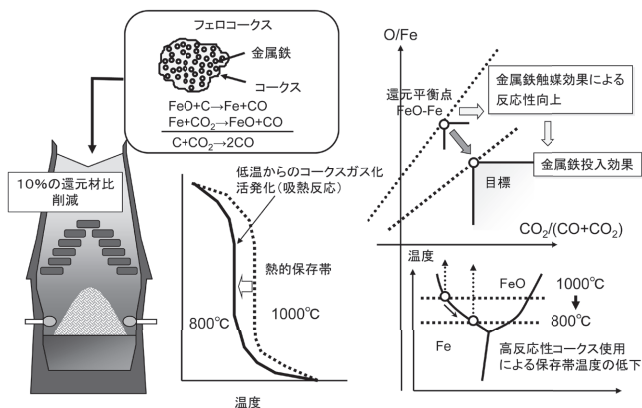


図6 フェロコークス使用時の高炉内現象と効果

た。私のNKK入社当時、上司であった宮下恒雄さんの斬新な案で、今にも通じる技術である。後者は欧州でULCOSプロジェクト (Ultra Low CO₂ Steelmaking) として推進されている⁷⁾。ULCOSでは熱風高炉から離れ、酸素送風に切り替えている。いわゆる酸素高炉を採用している。炉内は窒素フリーであり、ガス還元の一層の強化、並びに炉頂ガス中のCO₂濃度を濃化させ、CO₂分離の効率向上を図っている。ベースにある酸素高炉の考えは歴史的に古いが、初めて試験高炉で検証し、体系化したのは日本の大野陽太郎さんらである⁸⁾。ULCOSの開発担当者とは何度も意見交換をしているが、基本概念は日本の影響を受けている。

CO₂削減は新しいテーマのように見えるが、その削減に向けた優れた基本技術は既に存在し、しかも、そのシーズは我が国にあることに改めて気づく。その中には約40年前に生まれたものがある。それをつないでいくと、将来の低炭素高炉の姿が見えてくる。

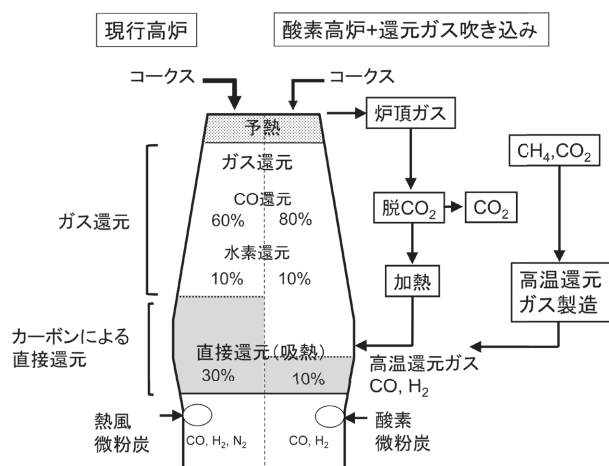


図7 現行高炉と還元ガス吹き込み酸素高炉の還元機構比較

4 低炭素高炉への道と課題

図8に今後の展開ルートを示す。近未来では現行の高炉がベースになり、原料の改善からのアプローチが主体になる。低温高炉につながるフェロコックスは今後、予想しうるコークス炉更新と連動して適用できる。劣質炭の多量使用が可能で資源対応力も強化できる。しかし、還元平衡温度800℃の低温高炉は限界に近い。

次の展開としては、プロセス的な炭素の流れの見直しが不可欠になる。図8の右に示すように、還元ガス吹き込みによってコークス比の大幅削減が可能である。ここで高炉炉内の状況は大きく変わる。高炉内還元はガスによる間接還元としてCOガス還元、水素還元、そして直接還元に分けられる。図9はモデル計算で求めたその還元分配を示す²⁾。標準的操業条件ではCO還元60%、水素還元10%、直接還元30%となる。高炉上部と下部の物質収支、熱収支から、この近傍が現状高炉における還元材比低減の最適点に近い。還元平衡制御の場合、直接還元率が減少し、CO還元は増加するが、ベース点近傍のわずかな動きに留まる。炉頂ガス循環など還元ガス吹き込みの場合には、このポイントから大きく離れる。間接還元率が大きく増加し、代わりに直接還元率が減少する。図9中の右上に向かう矢印はその動きを示す。極限までいけば、高炉下部はCOまでの炭材燃焼によるメルター的な機能のみになる。図8右のプロセス、及び図9の直接還元10%の条件では、インプットカーボンの25%削減が可能となる。CCSには依存しない。いかに少量の吹き込みガスでこのポイントを動かすかが決め手になり、窒素フリーが望ましい。酸素高炉では自動的にガス還元が強化される。還元ガス供給方法として、炉頂ガスにCO₂分離を施すか、改質ガスを製造する二つの方法が考えられるが、軽いCO₂分離と、そのCO₂によるメタン改質によるCO再生的方法もあり得る。エクセルギー

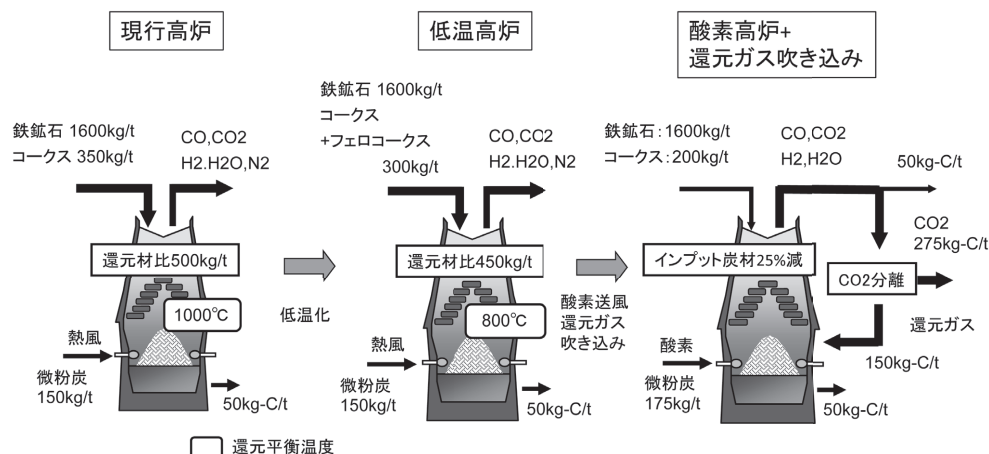


図8 CO₂削減に向けての高炉の展開ルート

的な解析を行えば興味深い解が出るが、研究半ばで答えは出ていない。図9には水素系ガスの羽口吹き込みの例も示したが、この場合には水素還元と直接還元が入れ替わる。CH₄などCを含んだガスが熱収支的に有利になる。ただし、水素還元が吸熱反応であり、操業設計の限界も生じる。

上記のように低炭素高炉の方向が見えてくるが、すべてバラ色ではない。課題もいくつかある。それを見据えて開発シナリオを描く必要がある。高炉では一般炭利用促進のために微粉炭吹き込みを多用している。羽口から吹き込まれた微粉炭はレースウェイの燃焼帯で100%燃焼する訳でなく、残りは未燃チャーとなって高炉下部に流入する。高炉下部のソリューションロス反応で消費される。図10は高炉内における炭素の消費機構変化を示す。フェロコックス装入量はソリューションロスによる消費分を想定している。微粉炭量を増加させた場合、未燃チャーの消費と装入されたフェロコックスのソリューションロス反応が競合する可能性がある。高炉内における反応部位が異なるが、高炉内のカーボンバランスからソリューションロス消費量には限界がある。微粉炭由来のチャー

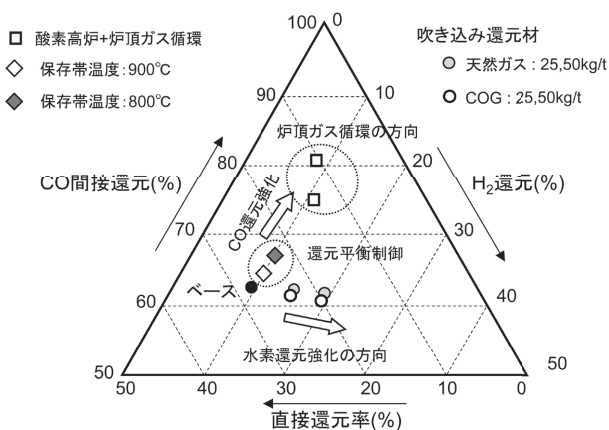


図9 インプットカーボン削減に向けての高炉内還元機構の変化

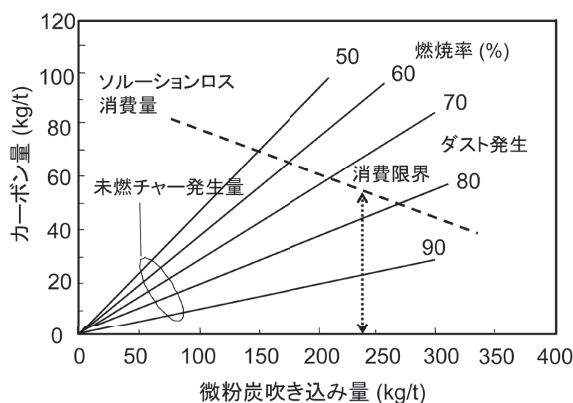


図10 高炉内における炭素の消費機構変化

が消費されずに、炉内に蓄積する可能性がある。フェロコックス使用量の適正な設定が必要になる。同時に微粉炭のレースウェイ内燃焼率向上を図らねばならない。燃焼強化を目的とする酸素富化の延長に酸素高炉化の必然性も見えてくる。

図11は製鉄プロセス全体を対象に、酸素高炉ベースで供給エネルギーとCO₂削減率の関係をモデル計算で求めた結果である。炉頂ガス循環量を増やせばCO₂削減率は上昇するが、下工程への供給エネルギーは減少し、下工程はエネルギー不足になる。低炭素指向時のエネルギーバランスは重要な課題であり、10年ほど前から、私がJFEスチール在職時、共同研究者であった佐藤道貴さんがモデルを作成し、種々のシミュレーションを行っている。今でも指針として活用できる⁹⁾。供給エネルギーを限りなく小さくすれば、約25%のCO₂削減になる。欧州のULCOSでは、この条件を目標にしている。欧州の製鉄所などではスラブなどの半製品が最終製品であったり、下工程が軽いことが多く、供給エネルギーの問題は大きくはない。一方、日本では様々な製品を製造する一貫製鉄所が大半を占めるため、適切なバランス設計が重要となる。下工程の一層の省エネ、あるいはエネルギーのmake-upが必要になる。エネルギー補填のエネルギーとして原子力発電由来の電気エネルギーも思い浮かぶが、昨今の実情では難しい。製鉄所のエネルギーバランスの設計をどうするかは難問で、天然ガスなど水素系の高発熱量ガスを持つてくるのが現実的であるが明確な答えはない。

図11には、さらに高炉から排出されるCO₂を隔離した場合の計算結果を出口側ベースとして示す。CCSの実現には課題も多いが、もしCCSが安定的に実行できれば、出口基準のCO₂削減率として削減効果は非常に大きくなる。ただし、CCSの工業化はEOR (Enhanced Oil Recovery) を除くと研究段階であり、斬新なアイデアが必要である。井上亮先生が熱力学を駆使して、新しい吸収体の模索をしている¹⁰⁾。これらが実用化できれば、50%前後の削減も可能になる。

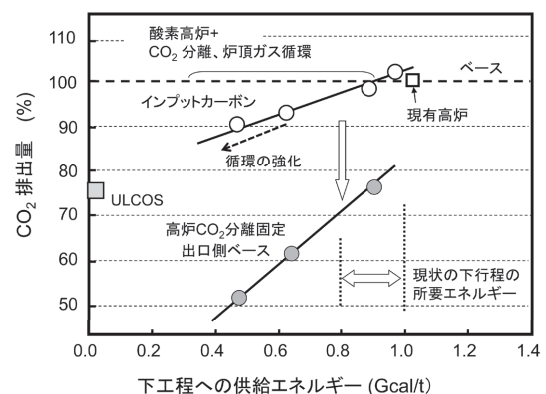


図11 酸素高炉を主体にした製鉄プロセスにおけるCO₂削減と供給エネルギー

5 今後のシナリオ

我が国では5000m³を超える大型高炉が稼働高炉の半数近くを占める。生産量を保障するに都合が良いが、良質な原料を必要とし制約もある。酸素高炉では窒素フリーでガス原単位が小さいため、出銑比を飛躍的に向上できる。試験高炉の実績から1.5倍以上に向上できる。言い換えると、同じ出銑量であれば、2/3の高炉内容積で生産量を保障できる。高炉を小型化できる。高さも含めて小型化できれば、原料強度の条件も緩和でき、資源対応力も向上できる。いわば、高炉のdownsizing、それも一つの方向と思われる。2008年にドイツのThyssenKrupp社を訪問した時に、前年に火入れした2120m³の新8BFを見学した。計測設備を充実させた小型高炉が看板高炉になっている。同社のブラジルのtwin高炉のモデルになっている。今、日本では拡大指向であり、絶えず良質な原料が必要となる。視点を変えることも必要と思われる。さらに、シャフト吹き込みを実施する場合、大型高炉では、ガス吹き込み領域は壁近傍に限定される。高炉をコンパクト化できれば、ガス吹き込みの効果を享受しやすい。私の研究室の夏井俊悟君がすでに、この問題をDEM-CFDモデルを駆使して解析している¹¹⁾。ガスの運動量収支からの予測で、その計算結果を図12に示す。炉内ガス量の30%をシャフトガス吹き込みに分配した条件である。5800m³の大型高炉では壁周辺のガスベクトルはシャフトガス吹き込みの影響を受けているが、その影響範囲は壁近傍に限定される。径を縮小した小型高炉では、炉中心近くまで影響範囲は拡大し、シャフトガス吹き込みは効果的になる。

低炭素高炉に向けた今後の流れを総括すれば、図13のように表される。酸素高炉では高炉上部が熱不足になりやすいが、軽いガス吹き込みで調整できる。元々窒素フリーであり、これだけでもガス還元強化は可能である。将来的にCCS技術が現実的になれば酸素高炉ベースでCCSとの連携を図れ

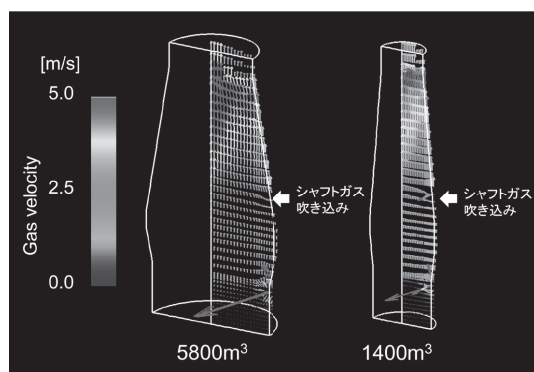


図12 シミュレーションによる大型高炉と小型高炉におけるシャフトガス吹き込みの効果比較

ば良い。現状高炉よりCO₂濃度が高く、CO₂分離が効率的になる。発電分野でも、同様な意図からIGCC (Integrated Coal Gasification Combined Cycle) など、純酸素指向にある。

現在、日本ではCOURSE50プロジェクトが進行中である。おそらく、予算規模などからは世界で最も潤沢なプロジェクトであろう。ULCOSと共通点があるが、COURSE50ではコークス炉ガス中のCH₄の水蒸気改質をねらっている。水蒸気改質ではカーボンデポジションを避けるために、過剰の水蒸気投入を行う。そして水蒸気除去をほどこすためにガス冷却が必要になる。ガス加熱を施すか、冷還元ガスの吹き込みになるが、高炉の操業条件を狭くする。還元鉄分野で、CO₂改質のMIDREXが主流であるのもうなずける¹²⁾。また、熱風高炉前提であり、CO₂分離の負荷を増大させているようにも思える。課題の連鎖になっているようで、世界の潮流の中で方向感が気になる。

6 結言

2050年といえども、製鉄の原理、本質は変わることはなく、今でも将来の低炭素プロセス像を描くことは可能である。その将来と現在とをいかに早くつないで、世界をリードしていくかが我々の課題と思われる。

学術功績賞受賞記念として本稿を書いた。私に関わってきたテーマを主題にしたが、一連の研究について、文中に記したように、多くの諸先輩から知恵を授かり、また研究の仲間の支援を受けた。改めて謝辞を表したい。

参考文献

- 1) Energy Technology Transitions for Industry (Strategy for the next Industrial Revolution), International Energy Agency, (2009)
- 2) 有山達郎：ふえらむ, 14 (2009), 781.

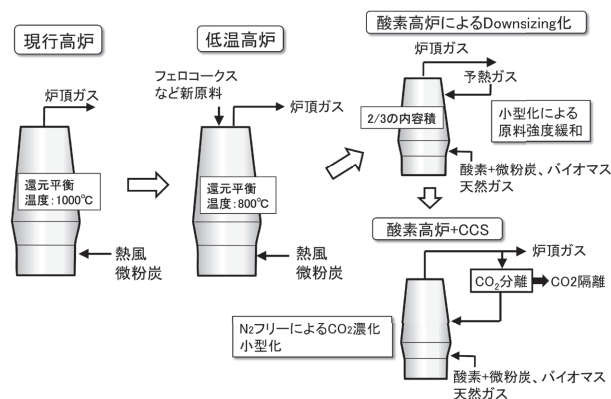


図13 低炭素高炉への今後の展開

- 3) 植田滋, 井上亮, 有山達郎 : 鉄と鋼, 94 (2008) , 468.
- 4) R.Nicole, R.Caperani, J.B.Guillot and R.Rist : Int.Symp. on Blast Furnace., (1980) , Arles, III -2-1.
- 5) 深田喜代志, 下山泉, 浅沼稔, 庵屋敷孝思, 藤本英和, 山本哲也, 有山達郎 : CAMP-ISIJ, 17 (2004) , 842.
- 6) 宮下恒雄, 西尾浩明, 下間照男, 山田健夫, 大槻満 : 鉄と鋼, 58 (1972) , 608.
- 7) K.Müller : 13th ISIJ-VDEh-Seminar, 19-20 Nov., (2008) , 41.
- 8) Y.Ohno, M.Matsuura, H.Mitsufuji and T.Furukawa : ISIJ Int., 32 (1992) , 838.
- 9) T.Ariyama and M.Sato : ISIJ Int., 46 (2006) , 1736.
- 10) R.Inoue, S.Ueda, K.Wakuta, K.Sasaki and T.Ariyama : ISIJ Int., 50 (2010) , 1532.
- 11) S.Natsui, S.Ueda, H.Nogami, J.Kano, R.Inoue and T.Ariyama : ISIJ Int., 51 (2011) 9, in press.
- 12) 根上卓也 : 金属, 79 (2009) , 145.

(2011年5月11日受付)