

特別講演

□ 渡辺義介 受賞記念

環境調和を目指した鉄鋼技術の進歩発展と今後の展望

Development of Environmentally Conscious Steelmaking
Technology and its Vision for the Future

半明正之

Masayuki Hammyo

JFE スチール (株) 代表取締役会長
現 相談役



* 脚注に略歴

1 はじめに

この度は栄えある渡辺義介賞を戴き、まことに身に余る光栄と存じ厚く御礼を申し上げます。本日は、私が1963年に当時の日本鋼管に入社し、以降会社生活44年間の内最初の22年を製鋼技術者として過ごしたこともありまして、その間に私が取り組んでおりました事の中で、最もドラスティックに進歩があったと思われる、脱りん技術について、環境調和の視点を踏まえながらお話させていただきたいと思ひます。1957年に純酸素上吹転炉が日本に導入されて以降急速に転炉は普及してまいりました。その中でも溶銑脱りん処理技術の発展は転炉の脱りんの負荷を軽減し、転炉精錬の生産性・コスト・品質などあらゆる面を進歩させた技術開発であったといえます。一方、2000年前後からCO₂排出による地球温暖化という新たな問題が顕在化し、溶銑脱りん処理を実施することをベースとした高炉・転炉法は難題をかかえることとなりました。CO₂排出量を削減する一つの方法として、スクラップの使用量を拡大して高炉溶銑を削減し、あわせて高品質鋼の製造に必須プロセスとなっている溶銑脱りん処理を同時に実施することが挙げられます。本報告におきましては、長年製鋼技術開発として取り組んできた溶銑脱りん処理技術をレビューしますと同時に、今後の地球温暖化対策として、スクラップ利用プロセスをどう取り入れていくかについて私見をお話させていただきたいと思ひます。

2 純酸素上吹転炉精錬

1960～1970年代の溶銑脱りん法が開発される前の純酸素転炉精錬は、溶銑中のC、Si、Mn、P等のすべての不純物

を酸化精錬により除去するのが目的でありました。転炉の上吹きランスから純酸素を溶銑に吹精することによりこれらのほとんどの不純物を容易に酸化して鋼滓（以下スラグと示します。）として除去することが可能でありました。当時の転炉で容易に除去できないのは硫黄とりんでありましたが、硫黄については、転炉の前の溶銑予備処理で石灰を脱硫材として混合攪拌することにより、比較的容易に除去することができるようになりました。たとえば、機械攪拌式脱硫法などによる方法であります。しかしながら、純酸素上吹転炉における脱りんは転炉が導入された当時はそれまでの技術に比べて大変優れたものでありましたが、年々、鋼の高級化が進み必要とされる製品りんレベルは年々低下し、厳しくなってきました。そのため転炉精錬によってりんを除去するのは、非常に難しくなってきました。例えば、油田開発での硫化水素を含んだ苛酷な条件の天然ガス輸送に用いられるラインパイプ材などはその例であります。りんレベルの低下に対応するために、転炉精錬を2回繰り返したり、さらにその上に溶鋼脱りんをするなどの試みもありまして、脱りんのための精錬コストは数倍に上昇し、能率低下も著しいものがありました。また、脱りんは反応温度が低温度での処理ほど容易に除去しやすいわけですが、高纯净度鋼・極低炭素鋼など、真空脱ガス処理を必要とする鋼が増加し、その処理のための熱ロス分を転炉で確保するため、転炉出鋼温度は上昇し、この面からもますます脱りん負荷は増大していきました。当時、このような点をいかに改善開発していくかが、最大の転炉精錬課題でありまして、そのため、溶銑脱りん法が開発される前の転炉精錬においては、精錬技術者のエネルギーは脱りん技術開発一点に集中されていたといっても過言ではありません。

* 昭和38年3月東大冶金工学科を卒業後、NKKに入社。京浜製鉄所製鋼部長、同管理部長、本社技術総括部長（平成4年取締役就任）、常務取締役福山製鉄所長、代表取締役副社長、代表取締役社長を歴任、平成15年にJFEスチール（株）代表取締役会長に就任し現在に至る。平成16年3月～17年2月本会会長を務めた。

3 溶銑脱りん法

前章で述べましたように、低りん化へのニーズの高まりと共に脱りんコストが上昇し精錬能力が低下するという大変大きな課題に直面していました。これに対処するために、1980年代に転炉精錬の前に溶銑脱りんを行う溶銑脱りん処理法の開発が国内各社で進められました。脱りん反応は温度が低いほうが有利でありまして、溶銑脱りん法はこの優位な条件を活用して、溶銑でのスラグ中の酸素ポテンシャルを一定レベルまで上げてりんを酸化除去する方法であります。図1に各種の溶銑脱りん法を示します。出銑した溶銑は高炉・溶銑鍋などで、脱珪を行います。脱珪レベルは脱りんプロセスにより異なりまして、例えば出銑 $\text{Si}=0.30\sim0.50\%$ を 0.20% 程度にするものや徹底的に脱珪してほぼゼロにする方法があります。溶銑脱りんは、溶銑鍋型、トーピード型、転炉型があります。予備処理後のりんレベルを比較すると溶銑鍋・転炉型では $0.005\sim0.020\%$ 、トーピード型では $0.010\sim0.030\%$ 、であります。転炉型・溶銑鍋型は反応容器の形状や上吹き酸素条件などの違いにより、トーピード型より攪拌力が強いので脱りに有利でありまして、りん濃度を 0.005% 程度まで下げることが可能であります。一方でトーピード型は、反応容器の形状から放熱量が抑えられて、次工程の転炉に持ち込まれる熱源のロスが少なくて済みます。このような観点から各社はその操業条件に応じたプロセスを1980～1990年代にかけて次々と導入していき、これまでの製鋼プロセスを大きく変えることから、新製鋼プロセスと呼ばれていました。

4 ゼロスラグプロセス

前述の溶銑脱りん法の中で、溶銑りんを徹底的に除去するプロセスがゼロスラグプロセス（以下ZSPと示します。）で

あります。図2にJFEスチール福山で実施しております、ZSPを示します。溶銑は脱珪処理、脱硫処理、溶銑鍋型脱りん処理または転炉型脱りん処理の後に、転炉に装入されます。本プロセスでは、脱りん前の溶銑中シリコンを徹底的に低減して溶銑脱りん処理での石灰効率を向上させて、溶銑段階で製品規格まで脱りんすることにより、転炉でのスラグをゼロ化し、プロセストータルでのスラグ発生量を極限まで低減します。そのため「ゼロスラグプロセス」と称しております。転炉精錬における脱りんメカニズムを検討しました結果、溶銑シリコンを極限まで低減することで脱りん石灰効率が飛躍的に向上することを解明しまして、この結果に基づき1998年3月、JFEスチール西日本製鉄所福山地区に世界で初めてオープンレール式の脱珪ステーションを建設しました。さらに、同年5月には東日本製鉄所京浜地区にも展開しております。ZSPでは転炉型予備脱りん処理において脱りんを製品規格レベルまで下げてしまうために、次工程の転炉では、脱りんが不要となり、脱炭のみを実施します。また、多少の石灰を使えばさらにりんを徹底的に下げることが可能であります。さらに、必要な石灰が少ないことからスラグ量も少ないため、マンガニ石を容易に溶鋼Cにより還元することができるようになりました。従いまして、製品のマンガニ成分レベルに応じて溶鋼中マンガニを付加して高めることにより、高価なマンガニ合金鉄の使用量を大幅に低減することが可能となりました。図3にZSPのメリットを示します。主なメリットは以下のとおりであります。

①低コストでの脱りん

- ・溶銑での脱りん反応に有利な条件で脱りんを行い、転炉では脱炭のみを行うため、石灰原単位が大幅に低減され、脱りんコストは数分の一に削減可能となります。

②転炉でのゼロスラグ効果

- ・脱炭時のスラグがなく送酸速度を上げられるために、吹錬時間は従来の半分程度まで低減されます。

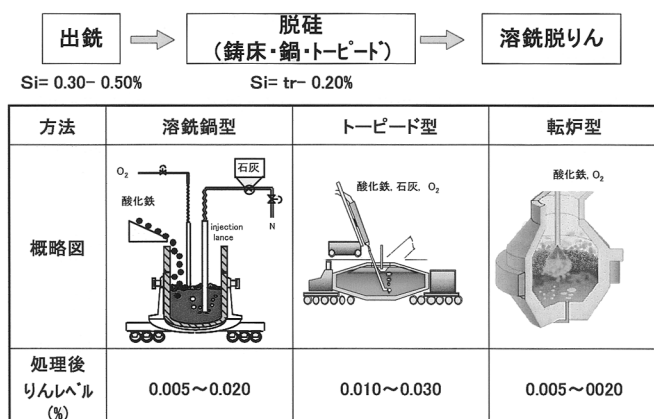


図1 各種溶銑脱りん法

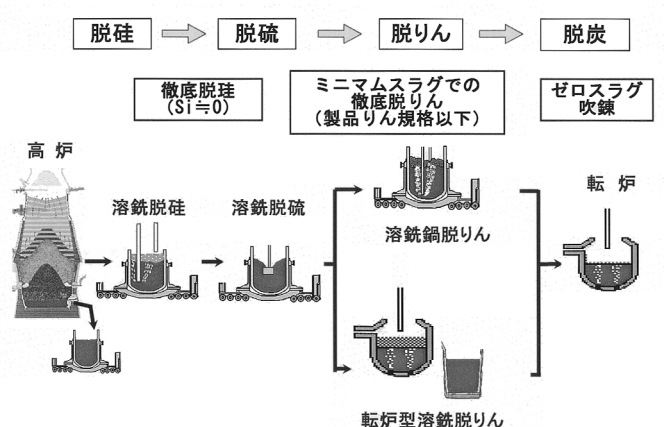


図2 ゼロスラグプロセス

- ・スラグ量の低減によりマンガン鉱石の還元が可能となり高価な合金鉄の削減、スラグ中铁ロスの低減が可能となります。
- ・吹錬時間の低減、スラグ量の低減、出鋼温度の低減により転炉耐火物寿命も大幅に向上します。

③商品への効果

- ・低りん鋼の溶製が安価で容易となったため大量製造が可能となります。
- ・転炉においてスラグが低減され、かつスラグの酸化度が低減されたことにより、転炉出鋼時に取鍋に流出するスラグによる溶鋼汚染が減少し、高纯净鋼の製造対応が可能となります。

④環境負荷への貢献

- ・脱珪、脱りん、脱炭に伴うスラグ発生量が大幅に低減されるようになり、省資源化、省エネルギー化が図れるようになりました。

ZSPの完成により生産性の大幅向上、精錬コストの大幅低減、高品質鋼製造の容易化、スラグ発生量の低減、省資源、省エネルギーなどあらゆる意味で製鋼技術者の夢とも言える新技術が完成したと考えておりました。しかしながら、現在、CO₂排出による地球温暖化という新たな問題が顕在化し、新たな取り組みが必要な段階となっております。

5 地球温暖化 (CO₂発生量削減) に対する鉄鋼業の取り組み

日本のエネルギー起源のCO₂排出量を産業分野別にみると、図4に示しますように¹⁾、エネルギー起源二酸化炭素の46%は産業部門より排出されておりまして、そのうち鉄鋼業から排出されるCO₂は35%を占めていることがわかります。従いまして、日本全体の16%は鉄鋼業からの排出であることがわかります。

CO₂問題が台頭する前から日本鉄鋼業は二度にわたる石油

危機と、プラザ合意後の円高によるエネルギー、原材料の高騰に対応するためにプロセス開発によるコストダウン技術の開発に取り組んできました。また、省エネルギーの観点からエネルギー原単位を低下させるための努力を継続して実施してきました。1970年代から80年代にかけては高炉転炉圧延の各種設備の大型化・連続化による生産性向上、および副生ガス回収・排熱回収などのエネルギー回収設備の導入によるエネルギー効率化が進められました。1990年代以降は、それに加えて廃プラスチックの高炉吹込み等のリサイクル技術の導入や自動車用鋼板の軽量化などの鋼材の省エネルギーによる社会貢献など幅広く取り組みが行われてきました。

その間に、製鉄所のエネルギー原単位はJFE スチールを例にあげますと、高級鋼への生産構成のシフトによるプロセス増などの増エネルギー要因があります中で、1973年をベースとして2005年には35%程度低減されてきました。その成果は国際的に比較しても明らかであります。図5には一貫製鉄所のエネルギー原単位の国際比較を示します²⁾。日本鉄鋼業のエネルギー原単位指数を100としますと韓国105、EU110、中国120、米国120、ロシア125となりまして、日本鉄鋼業は世界トップのエネルギー効率を達成していることがわかります。すなわち、世界トップのCO₂排出原単位を達成して

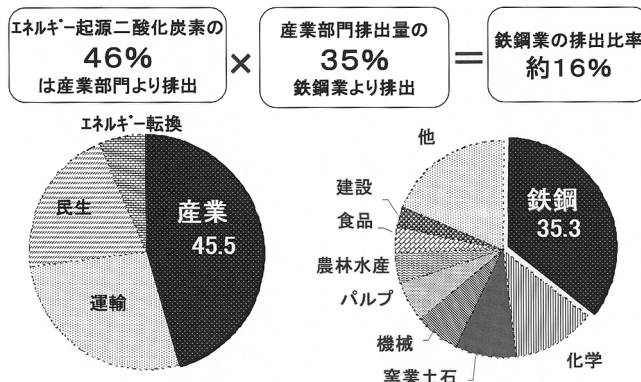


図4 日本のCO₂排出量（産業別）
出所：2005年度（平成17年度）温室効果ガス排出量速報値

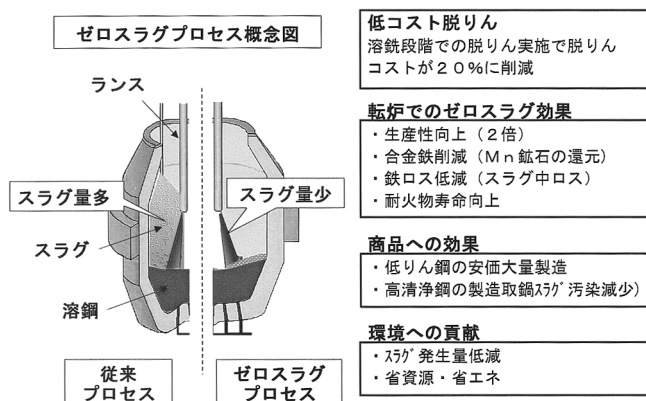


図3 ゼロスラグプロセスのメリット

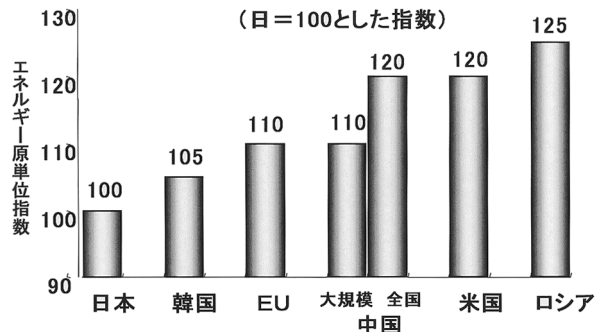


図5 一貫製鉄所のエネルギー原単位の国際比較
出所：韓国鉄鋼協会、中国鋼鉄工業協会、個別ヒアリング等の情報より作成
(注) 中国のデータについては、BOUNDARY、定義等不明

いるということでもあります。そういう中で、日本鉄鋼連盟は、地球温暖化対策と廃棄物・リサイクル対策に焦点を当てた自主行動計画を1996年に取りまとめました。図6に日本鉄鋼連盟の自主行動計画を示します²⁾。自主行動計画には①～⑤に掲げる5本の柱があります。

- ①鉄鋼生産工程における省エネルギーへの取り組み
- ②廃プラスチック等の有効活用
- ③製品・副産物による社会での省エネルギー貢献
- ④国際技術協力による省エネルギー貢献
- ⑤未利用エネルギーの近隣地域での活用

①は、製鉄所のバンダリーの中での省エネルギーで、1990年度に対し、2010年度のエネルギー消費量を10%削減するというものでありまして、エネルギー消費量を粗鋼生産1億トンレベルにするというものであります。②は地球温暖化問題と循環型社会構築課題の両方に貢献する取り組みとして集荷システムの確立を前提に廃プラスチック等を100万トン活用するというものであります。

③～⑤は、製鉄所の外側での省エネルギーへの貢献の取り組みであります。過去に十分な省エネルギーを進めてきました日本鉄鋼業にとりまして、この目標は、決して容易に達成できるものではないのは明らかであります。

6 製鉄所におけるスクラップ利用上の課題

鉄鋼資源の乏しい我が国では海外から鉄鉱石を輸入し、高炉において石炭を用いて鉄鉱石を還元することにより溶銑を製造してきました。鉄鉱石を事前処理して焼結鉱としまして、石炭も反応性の高いコークスにして用いることによりまして、高炉法は安定して高い生産性を保ってきました。さらに、高炉の炉容積を拡大して、生産性拡大も図ってきております。高炉法は生産性、コスト、品質の面から最も優れた溶銑製造プロセスでありまして、その優位性は今後とも変わっていか

① 鉄鋼生産工程における省エネルギーへの取り組み

2010年度のエネルギー消費量を1990年度に対し、10%削減目標(粗鋼生産1億トンレベルを前提)

② 廃プラスチック等の有効活用(追加的取組)

集荷システムの確立を前提に100万トン活用(1.5%削減相当)

③ 製品・副産物による社会での省エネルギー貢献

④ 国際技術協力による省エネルギー貢献

⑤ 未利用エネルギーの近隣地域での活用

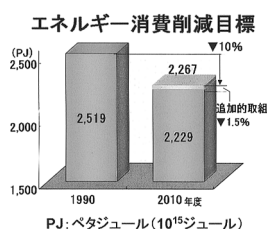


図6 日本鉄鋼連盟の自主行動計画

ないと考えられます。コークスを製造する際のコークスガスや高炉での発生ガスは製鉄所内で回収され電力となり、製鉄所内での他プロセス、例えば圧延プロセスにおける動力として使用されておりまして、高炉法は製鉄所内でのエネルギー利用の上でも進んだプロセスであるといえます。

しかしながら、図7に高炉—転炉プロセスにおけるプロセス別のCO₂発生量を示しますが、CO₂の排出源となるC源を最も大量に消費しているのはもちろん高炉でありましてCO₂発生量は製鉄所全体の60%以上を占めます。その他のプロセスの発生量は小さく、従いまして、製鉄所から発生するCO₂量は粗鋼トンあたり溶銑原単位の多少がCO₂排出量に大きく影響を与えていると言えます。いいかえれば、鉄源として溶銑を使わないで、スクラップをいかに多く用いるかがCO₂排出量削減に重要であります。粗鋼トンあたりの溶銑比率とCO₂発生量の関係を推算しますと、溶銑原単位を10%低減することで製鉄所のCO₂を6%削減することが可能であると考えられます。

溶銑脱りん処理を実施した場合(ZSP)と実施しない場合の溶銑率の差を比較します。ZSPでは予備処理脱りん段階で鋼中シリコンを徹底的に下げます。そのため転炉での溶銑C、Si、温度は当然、溶銑脱りん処理をしない場合と比較して低下します。転炉装入成分の一例を示しますとZSPではC=4.0%、Si=tr、温度1300℃、一方溶銑脱りん処理なしではC=4.5%、Si=0.40%、温度1350℃であります。この溶銑C、Si、温度の低下はすなわち溶銑として転炉に持ち込まれる熱源が少なくなることを意味します。この差分熱量を溶銑率に換算しますと10～15%あり、すなわちスクラップ使用比率が低下しCO₂排出量がその分増加することになります。その差は先ほどの溶銑原単位とCO₂排出量の関係でもわかりますように、製鉄所全体としてCO₂排出量6～9%の差に相当します。まさに、夢の技術として完成したと思われましたZSPに新たな難題を与えたということでもあります。

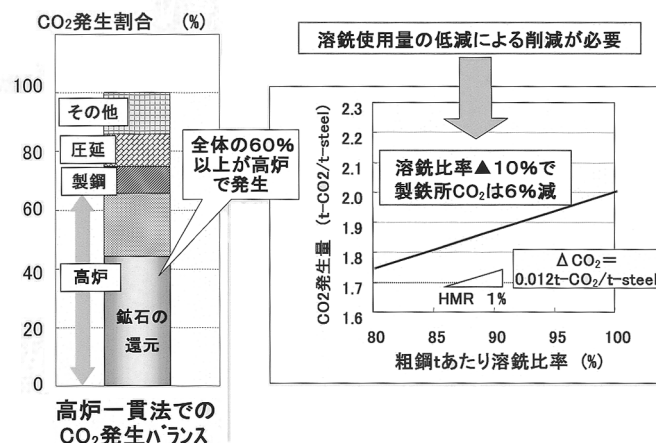


図7 製鉄所のプロセス別CO₂発生量

鋼の高級鋼化・高品質化が進んでいる今日、先に述べた各種のメリットを考えますとZSPは代用プロセスのない優れた技術でありまして、後退したり、あるいは中止したりすることのできない技術であります。一例をあげますと耐サワー鋼管の耐サワー性のニーズはさらに厳しくなっておりまして、必要りんレベルは0.005%を下回ろうとしております。こういった、低りん鋼を安価で大量に製造する上でZSPは不可欠なプロセスであります。

溶銑予備処理が主流となった1990年頃以降、偶然、時期を同じくして日本のスクラップ輸出は図8に示すように³⁾急速に拡大しておりまして、その量は2005年度実績で700万トンを超えております。仮に、溶銑予備処理のデメリットであります、C、Si、温度といった熱源の低下による転炉溶銑率のアップ（いいかえれば、スクラップ使用量の低下）を防止することが可能で、この輸出スクラップ全量を国内の高炉メーカーで使うことが可能になりましたら、さきほどの溶銑率とCO₂発生量の関係から推算しますと、日本鉄鋼連盟の自主行動計画で掲げておりますCO₂削減目標10.5%の内約4%に相当する量が削減できると推定されます。

スクラップ利用技術

ZSPを実施しながら、しかもスクラップ使用率を従来の溶銑脱りん処理なしのレベルまで低減できる方法についていくつかのプロセスが考えられます。まず第一に高炉にスクラップを投入することが考えられます。図9に高炉へのスクラップ投入の現状と課題を示します。高炉にスクラップを投入することは現在でも多少行われておりますが、使用可能なスクラップサイズは比較的小さな100mm前後のものであります。サイズ制約を現状の流通スクラップのサイズまで緩和して、多量に投入しようしますと、高炉の装入方法のエンジニアリングの問題があります。新規の高炉建設を考えると対応は比較的容易かもしれませんが、現在操業中の高炉で対応

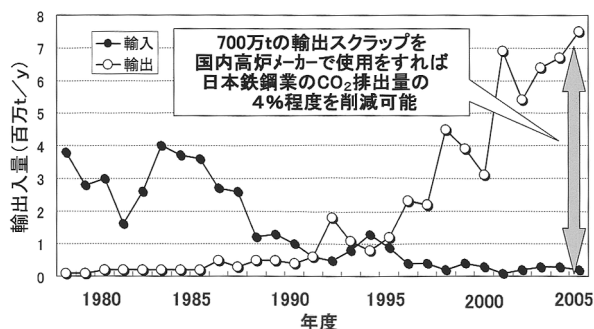


図8 日本のスクラップ輸出入
出所：財務省「貿易統計」

しようすると大変な難題ではないでしょうか。また、市中スクラップには亜鉛が付着していますが、亜鉛は沸点が907℃と低いため、スクラップを高炉に装入した場合、高炉上部の壁に亜鉛が付着し、装入物の分布が変わり炉内の通気変動が大きくなり、操業安定性が低下します。従いまして、亜鉛付着スクラップの使用は高炉では困難でありまして、亜鉛を含まない高品位のスクラップしか使用できないという大きな制約が発生してしまう難点があります。次にスクラップ専用溶解炉の適用であります。JFEスチールでは製鉄所におけるスクラップ利用を推進するために、シャフト型スクラップ溶解炉を東日本製鉄所京浜地区に建設することを決定しました。このスクラップ溶解炉は年産50万トンと日本最大規模のシャフト炉でありまして、2008年の8月に稼働予定であります。高炉法とシャフト型スクラップ溶解炉について、CO₂発生量を比較しますと、図10に示しますように、スクラップ溶解用シャフト炉では高炉法と比較して、鉱石の還元に伴うCO₂発生量がなくなるため、溶銑トンあたりのCO₂発生量を70%削減することが可能であります。また、製鉄所トータルの削減効果を考えますと、以下ようになります。従来の高炉+転炉法での製鉄所のCO₂発生量を100とした場

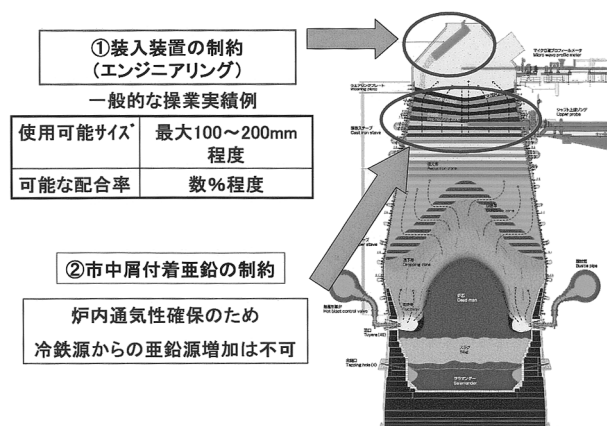


図9 高炉へのスクラップ投入

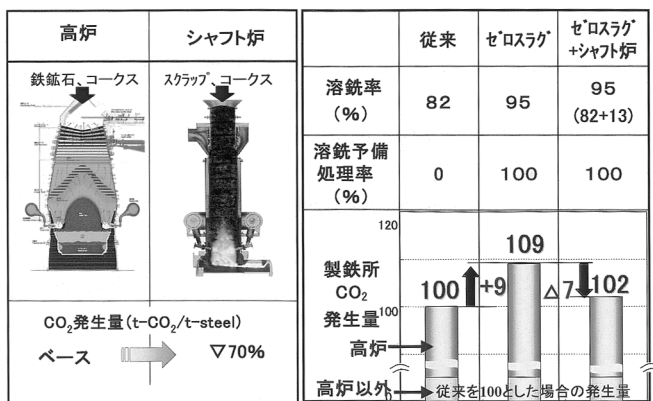


図10 シャフト炉でのスクラップ溶解

合、ZSPにおきましては、転炉での溶銑からの持ち込まれる熱源が低下するため、溶銑率を82%から95%程度までアップして、そのために製鉄所でのCO₂発生量は9%増加します。それに対して、上昇した溶銑率13%分に相当するスクラップをシャフト炉で溶解してから転炉にその溶銑を供給した場合は、ZSPにおいても転炉で溶銑予備処理比率を下げることなく製鉄所のCO₂発生量を7%削減することが可能となります。CO₂の削減量は、従来の溶銑脱りん処理なしのプロセスと同等とまではいきませんが、高級鋼の製造として必要なZSPとCO₂削減の両立がある程度可能となると考えても言い過ぎではないでしょう。

また、シャフト炉を導入した場合には、次のような付帯メリットも享受できる可能性があります。シャフト炉では鉄源としてスクラップを溶解して溶銑を製造することをベースとする一方で、石炭の代替燃料の利用や製鉄所で発生する副産物などの劣質鉄源の使用も可能になると考えられます。したがって、高炉法に比べましてCO₂発生量を低減できるうえ、リサイクルという面でも地球環境に貢献できるプロセスであると考えられます。

ここで忘れてはいけないのは、老廃スクラップにはCuやSnといった不純物がふくまれていることであります。高級鋼板の製造比率が高まると、あるいは現在においても高い製鉄所においては、その使用量は限られるかもしれません。そう考えた場合に、高炉へ装入可能な不純物の少ない鉄源として、還元鉄も考えられます。CO₂削減効果については高炉への還元鉄の装入もスクラップと同様の効果がある上、スクラップが装入方法や付着重鉛の問題があるのに対して還元鉄にはその問題がほとんどありません。HBI (Hot Briquette Iron) の使用例を図11に示します。HBIは鉄鉱石を天然ガスにより還元し、その還元鉄をホットな状態でブリケット化したものです。原料やエネルギーコストの低

い発展途上国を中心に生産されておりまして、例えば、このHBIを原単位で約200k/t高炉に使用した場合には、60K/tの高炉還元材比低減の効果があると算定されます。これは製鉄所CO₂の排出削減量に換算しますと約14%に相当します。しかしながら、一般に還元鉄は不純物が少ない反面、鉄源のコストがスクラップよりも高く製鉄所の製造コストへの負担はスクラップよりも大きくなります。また還元鉄を海外生産する時のCO₂排出量を考慮しますとそれは製鉄所発生量の9%に相当し、その分が海外で上昇することになります。したがって、日本鉄鋼業としてはCO₂削減になりますが、全世界で考えた場合は約5%程度の低減に過ぎないことになり、CO₂排出の単なる海外移転に過ぎないという見方もできるのではないのでしょうか。

8 むすびに

これまで述べてきましたスクラップ利用や各種省エネルギーなどの技術開発が全世界の鉄鋼業に適用されましてもポスト京都議定書、あるいは、100年後の地球温暖化対応としては我々のこうした取り組みだけでは、おそらく不十分であると思われます。本当にCO₂の排出増により南極の水が解けることが明確になりましたときには、30数年前に我が国でも研究された原子力エネルギーを使った製鉄業がよみがえることがあるかもしれません。

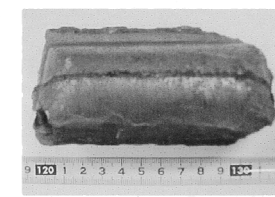
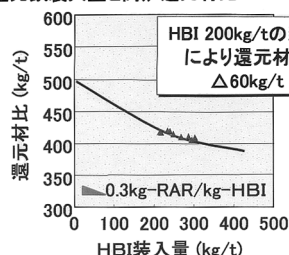
図12は1973年から6ヵ年計画で我が国の大型プロジェクトとして研究開発が進められました原子力製鉄の構想を示したものであります⁴⁾。核熱を利用して、石油精製の際に副生する減圧残査油から還元用ガスを製造します。これを使いまして、高圧シャフト炉で鉄鉱石を還元しまして、その結果、製鉄所のCO₂発生量を50%以上削減できる可能性があります。

さらに、徹底してCO₂削減を考えますと、水を原子力エ

還元鉄(HBI)成分

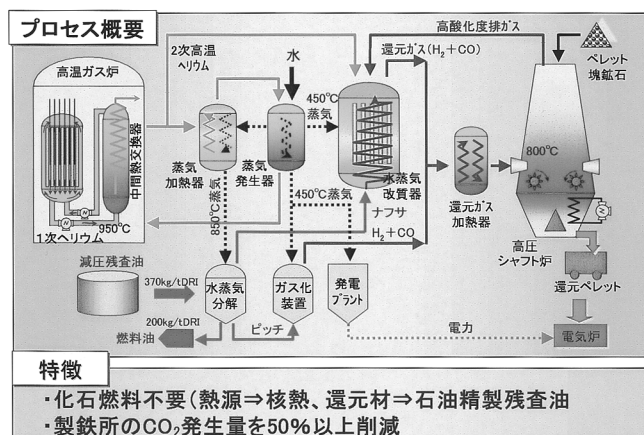
銘柄名	輸出国	成分(%)				
		Fe	C	Si	P	S
HBI	ベネズエラ リビアなど	90-95	1	<0.03	0.05-0.1	0.01-0.03

還元鉄装入量と高炉還元材比



還元鉄(例)HBI(Hot Briquet Iron)

図11 高炉への還元鉄の投入



特徴

- ・化石燃料不要(熱源⇒核熱、還元材⇒石油精製残査油)
- ・製鉄所のCO₂発生量を50%以上削減

図12 原子力製鉄システムの概念と特徴

エネルギーで分解して水素を製造して還元材として利用すれば、製鉄所のCO₂発生量はかぎりなくゼロになるかもしれません。世界の粗鋼生産量は、年々増大しており、この中でCO₂発生量を削減していくことは、非常に技術的ハードルが高いものですが、今後更なる技術開発が行われることを大いに期待いたします。

参考文献

- 1) 2005年度温室効果ガス排出量速報値
- 2) 日本鉄鋼連盟ホームページ「地球温暖化対策」
- 3) 財務省「貿易統計」
- 4) 下村敬治：日本金属学会会報，17（1978），231.

(2007年4月11日受付)