

戦後半世紀の製鉄技術のあゆみと将来展望

今野乃光
出野 正
古牧育男

Norimitsu Konno
Tadashi Deno
Ikuo Komaki

新日本製鐵(株)技術開発本部 プロセス技術研究所 部長
新日本製鐵(株)技術開発本部 プロセス技術研究所 主幹研究員
新日本製鐵(株)技術開発本部 プロセス技術研究所 主幹研究員

Retrospect of Ironmaking Technology

1 はじめに

今年は戦後50年の節目の年に当たる。太平洋戦争で壊滅的打撃を受けた日本経済も、この半世紀の間に世界をリードする先進的工業国へと急速な変貌成長をとげた。この成長は国策としての産学振興、基幹産業優遇等の行政的な措置があったにせよ、鉄鋼業の発展がその支えとして大きな役割を果たした事は言を待たない所である。特に、この戦後の動乱期における鉄鋼業の急成長は、先ずは西欧の先進技術に追いつけ、追い越せ、の合言葉の下に進められた先駆的プロセス技術の導入による処が大きい。その後これを根柢とした、生産性の向上、コストの削減、品質の更なる高付加価値化に加え、耐環境技術創出等諸施策が着実に展開された。創意工夫を積み上げたプロセス技術改善、改良に加えて地道な研究開発が各要素技術の更なる高度化をなし遂げたと言う事が出来る。本報告は日本鉄鋼業の急速成長の原動力となった、大型臨海一貫製鉄所の建設・設備の大型化、連続化、自動化の推進・製品の高付加価値化等の推進・技術開発、研究開発の積極的推進等についての経緯をまとめたものである。

2 生産拡大期の製鉄・コークス技術のあゆみ

2.1 戦後復興から一貫製鉄所建設、米国からの技術導入

図1に戦後から現在迄の粗鋼生産量と経済情勢・技術動向を示す。図2に鉄鉱石の地域別輸入量推移を示す。図3に原料炭の地域別使用量推移を示す。

戦後の石炭不足により、八幡の高炉3基からスタートした日本鉄鋼業も、復興超重点産業としての石炭・鉄鋼業選定、冷戦開始による米国の対日政策修正で、重油、石炭、鉄鉱石等の原燃料輸入が再開し、原燃料ネックが解消され鉄鋼増産のスタートをきった。更に昭和25年の朝鮮動乱とその後の大幅な鉄鋼需要もあり、川鉄千葉の一貫製鉄所(昭和28年)建設を皮切りに、臨海製鉄所の建設が続ぎ、量拡大と操業合理化を推進していった。さて日本近代鉄鋼

業の基礎は米国鉄鋼関係者の努力に負う所が大きいのは周知の事実であるが、昭和25年頃には米人技術者による指導、米国への視察等から大々的に技術導入が実施された。中でも「ジョセフの勧告」¹⁾で知られている、総指令部特別顧問 T. L. Josephの製鉄技術全般に関する調査報告書「Iron Ore Preparation and Blast Furnace Practice in Japan」が出され(昭和26年)、高水分・高粘性鉱石篩い分け法、焼結鉱の製造条件、原料の事前処理と高炉の通気性向上等々理論的かつ具体的に我が国製鉄技術の課題を指摘した。この勧告は原燃料の重要性とその利用技術開発の必要性を説いた

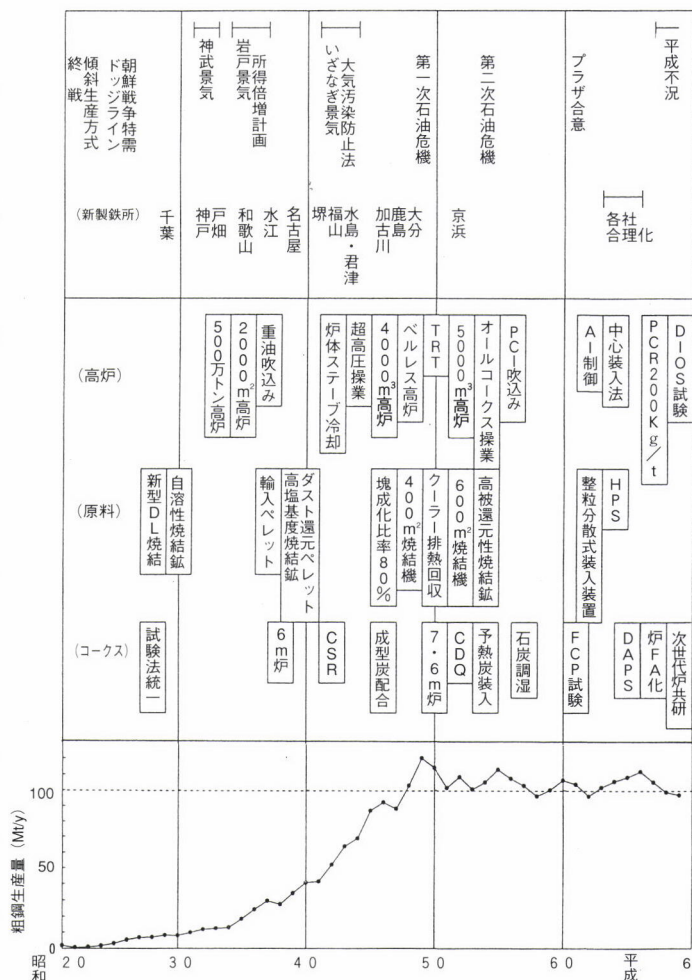


図1 鉄鋼業および製鉄技術の推移

もので、実行に各社が全精力を傾注していく事になる。

2.2 製鉄設備の拡大

八幡戸畑、鋼管水江、等の新一貫製鉄所の建設と同時に高炉の大型化も進展した。第2次合理化後（昭和35年）迄には30基の高炉が新設改修され、1500m³を越える高炉も建設された。大型高炉の稼働と高生産性のニーズには原燃料サイドの対応が重要な課題と認識された時期である。石炭については、戦後米国炭の優秀さが広く認識され輸入の殆どは米国炭となったが昭和35年頃迄は国内炭が原料の過半を占めていた。この間、国家による石炭産業保護育成の立場から国内炭による高強度コークス製造技術の研究が盛んにおこなわれている。鉄鉱石については戦後ウェートの高かった米国鉱から、東南アジアの近距離ソースに移行した。また海外原燃料の安定使用のために昭和27年には「海外製鉄原料委員会」が設立され、海外資源の長期開発の取り組みが始まった時期であった。

高炉生産量拡大の中で、高炉通気性と炉内ガス利用率向上のために焼結鉱が主原料となっていたが、その被還元性向上を課題とした「自溶性焼結鉱」製造研究につながった。この頃の高炉技術は昭和36年の鋼管川崎の重油吹込み、高温送風、酸素富化送風の「複合送風」の開始等で積極的に低コークス比技術を推進した。また高圧操業が始まり出銑比が2.0を越える高炉が出現し、昭和44年のソ連から導入した高性能の炉体冷却方式であるステープ冷却と炉頂圧2.0～2.5kg/cm²の超高圧操業によって高出銑比、低コークス比操業に拍車をかけた時期でもあった。大型化技術は数多くの設備技術の進歩をもたらした4000m³級高炉の基礎となったと言える。

大型臨海製鉄所の建設に伴い、多数のコークス炉が建設された。コークス大量生産は主として加熱均一化により炉高、炉長を拡大したものであるが、一部を除き独からの導入技術によりその建設はなされている。

この時期には、将来的な粘結炭供給不安から2つの大きな技術の流れが発生している。一つは、石炭事前処理技術であり、大きくは粒度調整技術、装入密度向上技術、粘結性補填技術に分けられる。粒度調整については、フランスより紹介されたSOVACO法（石炭組織学的選択破碎法）に基づく設備が和歌山、鹿島に設置された。装入密度向上については、装入炭へのオイル添加法が先ず実施され、続いて装入炭部分成型による成型炭配合法が昭和46年八幡において実用化された。この技術は品質改善効果の大ききから国内に広く普及し、その後約5年で高炉用コークスの40%が本法により製造されるにいたった。もう一つの流れは、成形コークス技術であり非微粘結炭による高炉用コークス製造を目的に精力的に研究開発がおこなわれた。その後、

昭和53年から昭和61年まで国家補助のもとに鉄連によるパイロットプラント操業と高炉使用試験がなされ開発が完了している。

2.3 原燃料事前処理技術

日本経済は昭和35年の「所得倍增政策」以降飛躍的な「高度経済成長」を遂げ、高炉転炉の大型化、原燃料資源の確保、圧延部門の強化等の積極投資を実施し粗鋼生産は昭和45年には9200万トンとなった。鉄鉱石の輸入依存率は98%までになり、東南アジア資源の枯渇から、豪州系が急増し昭和45年には36%に達し、昭和41年からはブラジル系の輸入が増えた。海外資源の共同開発と長期契約による輸入ソースの多角化、専用船と大型化等による輸送合理化等で鉄鉱石価格が顕著に低下した。鉄鉱石の事前処理技術については「ジョセフ勧告」のとおり、整粒設備の設置、ドワイトロイド（DL）式焼結機への切替、ペレット工場新設（川鉄）、輸入原料の多銘柄依存のためのオアベッティング設備の設置（川鉄）が実施された。また整粒比率増に伴い焼結鉱配合率が上昇し、焼結鉱の高炉配合率は50%を越えるようになった。焼結鉱が高炉の主原料を占めるにつれ、その品質の評価と管理が重要な課題となり学振製鉄54委で各種試験法を制定した。この時期に於ける最大の進歩は、自溶性焼結鉱への移行である。被還元性が良く、通気性も良好で、融点も低い焼結鉱を用い、コークス比を著しく下げる事が出来た²⁾。また焼結機の大型化も進み昭和45年には八幡戸畑で300m³焼結機が建設されたのを始めとして焼結生産量が急激に増えていった。高塩基度の自溶性焼結鉱の有利さが提唱され普及した。高炉内の装入原料の軟化溶け落ち挙動の研究も進んだ。ただ被還元性の向上が還元粉化を惹起する事となりそのバランスが重要な課題となった。

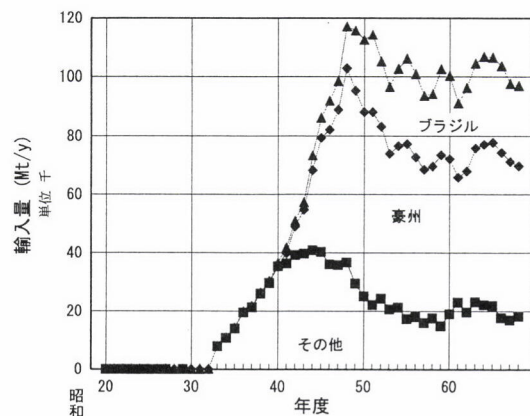


図2 鉄鉱石輸入の推移

鉄鋼生産増大によるコークス需要の急増により輸入炭拡大が昭和25年頃より必須となった³⁾。高品位米国炭は高コストの問題があり、豪州ニューサウスウェールズ州炭が昭

和30年から輸入を開始された。その後北部のクィーンズランド州に大規模な強粘結炭層が発見されたが、この炭層の存在こそが我が国製鉄業の大規模化を可能とした要因であると言える。その後豪州炭比率は昭和48年には輸入炭の40%に達した。また、昭和34年にはカナダ炭の輸入が開始され、豪州、カナダ、米国という現在の原料炭構造の基幹が構築された。このような原料構成の変化に対応し、この時期最も進展したのは石炭の多銘柄配合による高強度コークス製造技術であった。城等は石炭を繊維質成分と粘結成分に分け、良質コークス製造には粘結成分を過不足なく配合することが必要であると提唱した⁴⁾。宮津等は石炭を石炭化度と粘結性（流動性）の2つの指標で評価し、コークス強度は両要因の支配領域が各々存在することを証明した⁵⁾。石炭の活性成分の反射率分布と不活性成分量からコークス強度を推定する石炭組織分析法が米国で開発され、昭和35年代に新しいコークス強度推定法として導入された。これら技術により、高イナータ低流動性の豪州、カナダ炭等多様な石炭によるコークス製造が可能となっている。また一連の高炉解体調査に伴うコークスの高炉内での劣化挙動調査によりコークスの熱間性状の重要性が認識され、今日では熱間反応後強度が冷間強度とともに管理指標として広く採用されている。

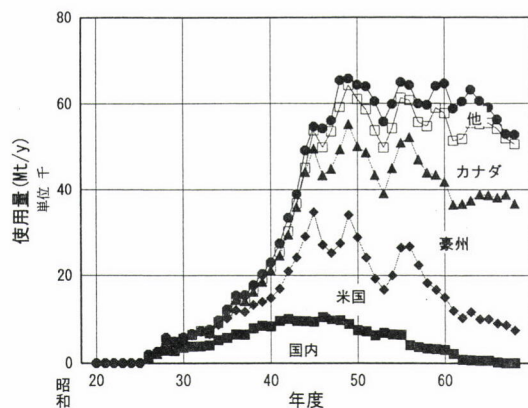


図3 原料炭使用の推移

3 合理化期の製鉄・コークス技術のあゆみ

3.1 低成長への移行

昭和46年のニクソンショック、昭和48年の粗鋼1.2億トン（史上最高の粗鋼生産）達成、OPECによる原油価格の4倍引き上げ（オイルショック）等、国内外とも激しい変動の時期であった。結果として昭和53年まで長期停滞、減産操業を余儀なくされたが、この時期以降、重要課題と認識されたのは、環境汚染問題、資源・エネルギー問題であった。

高度成長のひずみともいえるべき環境問題については昭和43年大気汚染防止法、昭和45年水質汚濁防止法、昭和47

年労働安全衛生法が施行された。焼結製造については脱硫設備の建設（昭和49年戸畑、水島、昭和51年若松、和歌山、鹿島）、脱硝設備の建設（昭和51年千葉、昭和54扇島）が積極的に行われた。コークス炉周辺の環境対策も大きな問題となった。主要な対策として、高圧安水による発生ガス吸引、装入時集塵、COG脱硫、活性汚泥排水処理等が実施された。これらの努力により、製鉄工程の作業環境および汚染物質の排出は飛躍的に改善されているが、将来的には更なる改善が望まれよう。

3.2 省エネルギーの進展

図4に2度のオイルショックをへてのエネルギー価格の推移を示す。トータルエネルギーの節約、特にエネルギー消費の大半を占める製鉄部門の期待は大きいものであった。鉄鋼業はこの課題に積極的に取り組み、粗鋼t当たりで10%の削減と石油依存率を20%から14%迄低下させる事が出来た。従来、高炉の省エネルギー対策は低燃料比が主であったが、石油ショックにより高ガス発生 of 操業に移行し、更にエネルギー価格の高騰に対して廃棄エネルギーの回収を目指し炉頂圧発電（昭和49年）、熱風炉廃熱回収、炉頂排圧ガス回収等が採用されていった。特に炉頂圧発電は20～40kWh/tの電力が得られ、最近では回収エネルギー増を狙った乾式集塵機も開発実機化されている。また石油ショックにより一時オールコークス操業を余儀なくされたが、高炉炉況の安定化と石炭系燃料使用増を狙った微粉炭吹込みが開始され、その後の多量吹込みに発展していった。

焼結機的大型化も進み新設焼結機のうち11基が400m²以上であった。省エネ設備として、昭和52年にはクーラー廃熱回収、廃熱ボイラーが設置された。点火炉の燃料削減、主ブロワーの回転数制御、漏風防止対策等々により焼結の省エネルギーも進展した。コークス分野では、コークス乾式消火設備（CDQ）がソ連から技術導入され昭和51年八幡にて第1号機が稼働した。コークス炉出熱の約40%を占める赤熱コークスの顕熱を不活性ガス冷却により回収するものであり、製鉄所省エネルギーの切札的技術として広く普及している（鉄鋼5社装備率86%）。この時期コークス炉乾留熱量低下に大きく貢献したものがコークス炉燃焼制御技術である。コークス炉情報をセンサーにより収集し計算機による加熱の自動制御化が可能となったものであり、昭和48年福山において最初の実機化された。現在、国内のほぼすべてのコークス炉に装備がなされている。この燃焼制御を更に進歩させたものが、乾留の進行に応じ最適加熱をおこなうプログラムヒーテング技術であり、三菱化成黒崎で昭和60年に実機化され、その後平成3年八幡第5コークス炉に装備されるにいたっている。本技術はコークス炉の乾留制御の究極の姿を提示するものと考えられている。

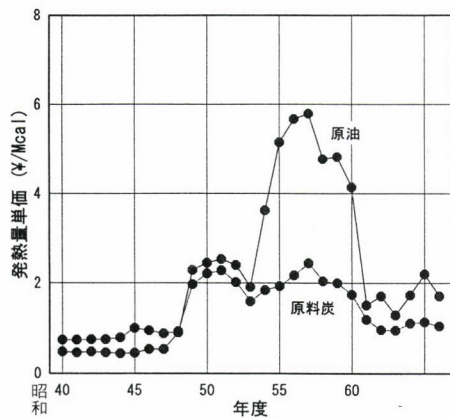


図4 エネルギー価格の推移

3.3 安価鉄鉱石類使用技術

鉄鉱石は、輸入先が豪州（45%）と南米（特にブラジル18%）、インドで大半を占める状況である。専用船の大型化が進み、大分に25万トン着岸可能なシーバースを建設し輸送コストの低減を図っていった。また鉄鉱石価格は資源ナショナリズムの影響を受け高騰したが、円建て価格は約30%増であった。

またこの時期は、出鉄量、出鉄比、燃料比について輝かしい金字塔を打ち立てた時期であり、高炉の解体調査によって融着帯の存在とガス分配機能が認識された原燃料性状の重要性も再認識された。この燃料比低減、出鉄比向上には原燃料の処理技術が大きく貢献した事は言うまでもなく、焼結鉱比増、ペレット使用、スラグ比低減、整粒強化等々によってなされたと言える。昭和57年日本で初めて大分にてアームコから導入した微粉炭吹込みを開始した⁶⁾。当初の60kg/tp吹込みから10年強をへて高炉によっては神鋼加古川のように200kg/tpに近づいている高炉も出現している⁷⁾。全国の微粉炭設備保有状態は、27/30基、平均吹込み量は、80～90kg/tpとなっている。当初は高炉の操業安定を優先していた微粉炭吹込みも、原燃料コスト低減の観点から安価炭種の使用量の拡大に向けて技術開発が進んでいる。

鉄鉱石資源は、高品位ヘマタイトの枯渇、粒度の低下、褐鉄鉱系鉄石使用比率の増加へと劣質化の方向に進んでいる⁸⁾。これらの資源対応技術の開発が要請され、現在迄にNKKの新塊成化法（HPS法）⁹⁾による高品位ペレットフィードの使用技術、蛇紋岩と褐鉄鉱の選択造粒法（自己緻密化焼結法）、CaOの分割添加法等による事前処理技術と高歩留、高生産性を狙った焼結ベッドの通気改善対策が実施されている。特に焼結機への装入技術は、コークス偏析強化技術、整粒分散式装入装置（ISF）等に代表される様に大きな効果を上げている。

いずれにしても、鉄鉱石資源の動向把握と安価な資源の使用技術を常に開発する事が、資源小国の我が国の鉄鋼業にとって最大課題であると言える。

3.4 非微粘結炭増使用技術

石炭事前処理による安価石炭使用のニーズの高まりと共に、成型炭配合法に続く新事前処理技術が開発された¹⁰⁾。これら技術の特徴は、コークス品質の向上効果による安価非微粘結炭の増使用と省エネルギーの複合効果をもつことである。

まず、予熱炭装入法が昭和54年室蘭第6コークス炉において稼働した。コークス炉装入炭を気流乾燥機により200～230℃に加熱するものであるが、約40%といわれる生産性向上効果が特徴である。

石炭調湿法（CMC）は、装入炭を原炭水分の8～10%から5～6%へ低下させコークス炉へ装入する技術である。石炭を過度に乾燥し疑似粒子を崩壊させた場合、微粉炭による深刻な発塵問題が発生する。この問題を回避できる水分迄乾燥することにより、コークス炉への持ち込み水分の低減と装入密度の向上による省エネルギーとコークス冷間強度向上および約10%の生産性向上効果が得られる。設備の簡便さから最近広く普及しており、鉄鋼5社ベースの普及率は45%に達した。

このCMC法を更に進めた技術が微粉炭塊成化法（DAPS）であり、平成2年大分にて稼働した。装入炭水分を2%迄低下させ発生する微粉炭を塊成化することにより、微粉炭の発塵問題をなくす一方石炭乾燥効果を大幅なものとしている。この方法により装入炭tあたり110Mcalの省エネルギーと3～4%のコークス冷間強度向上および約20%の生産性向上効果が得られる。本技術は既設コークス炉へ適用できる最も効果の大きい事前処理法であると言える。

これら技術の普及とともに新しい合理化技術の開発が大きな課題であろう。図5に鉄鉱石および原料炭の価格推移を示す。

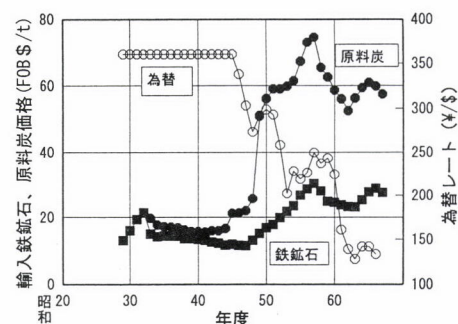


図5 鉄鉱石および原料炭の価格推移

4 将来展望

以上述べた様に、高炉機能の拡大、劣質原料・劣質石炭等の使用拡大に努力してきており、コスト面・操業技術面で高炉法の極限を追求中であるが、将来的には以下に述べる問題をクリアする必要がある。

4.1 資源環境問題

長期的な鉄鉱石動向では、優良ヘマタイト鉱石の枯渇（ブラジル）と粉率の増、ゲーサイト比率上昇（豪州）、国策による高品位鉱石比率減（インド）により塊鉱石の需給はタイトになると予測されている。ペレットについても電気炉DRI活況と欧州焼結機休止方向のため需給はタイトになると考えられる。このため粉鉱石の使用技術開発が重要になる。高炉法では、焼結機的能力アップをめざした通気改善対策、焼結機以外の塊成化プロセスの開発、粉鉱石の高炉羽口吹込み、非高炉法では粉鉱を原料とした還元鉄製造や溶融還元法等の研究を促進させる必要がある。

同時にコークス炉寿命問題、コークス炉環境問題、CO₂問題から、如何にコークス使用量を低減させるかの技術開発も重要であり、微粉炭の多量吹込みもこの観点で精力的に推進する必要がある。微粉炭多量吹込みに伴って焼結鉱の品質改良も必要であり、問題の全体解決のためには、資源対応力のある技術開発を系統的に推進する必要がある。焼結機自体の排ガス対策も環境規制の強化に伴って推進する必要がある。脱硫・脱硝、排ガス循環技術の進展も期待される。環境面では埋立て余裕の無くなった日本沿岸の事情に対し、非鉄金属（Zn等）を含んだ製鉄所発生ダストの処理技術も重要である。これは資源小国としての発生物リサイクルの必要性和環境問題の課題に同時に答える事になる。高炉機能拡大のため、羽口前高温部利用をめざした微粉炭、鉱石、フラックス吹込み、廃棄物処理も研究課題となる。これらの課題は全製鉄関係者、鉄鋼関係者の努力で必ずや解決出来ると信じている。

4.2 コークス炉リプレース対応

コークス技術における最大の課題はきたるべきコークス炉リプレースへの対応である。昭和40年代から昭和45年にかけて建設された我が国コークス炉は炉命が40年としても2005年頃よりリプレース時期を迎える。

中期的には、既存炉の延命が課題である。現在迄、炉体診断技術や炉壁観察技術が実機化されており、補修についても各種熱間溶射補修技術と熱間煉瓦積替技術が従来から蓄積されている。今後は、炉体状況の変化をオンラインで監視し、状況に応じ操業条件を変更する等の緻密な延命技術の展開が必要とされよう。

長期的には、次世代コークスプロセスの開発が課題である。21世紀に稼働する新プロセスはコスト、環境、資源、生産弾力性が飛躍的に改善されたものとすべきである。前述した成形コークスプロセスも一つの有力な選択肢であり、海外においても超大型コークス炉（JCR）が独において開発されつつある。我が国においては石炭高度転換コー

クス製造プロセス（SCOPE-21）研究が鉄鋼連盟の下で着手されており、鉄鋼協会新コークスプロセス工学研究会においても大学を含めた活発な議論が展開されている。今後数年内に最先端のコークス製造プロセスが開発段階に到達すると期待される。

5 おわりに

戦後50年の製鉄を中心とした技術の歴史を概括した。前半25年は戦後の復興から急激な高炉の生産量と操業成績のアップの時期であり、輸入資源である鉄鉱石と石炭の有効な使用技術と設備の大型化のハード技術によるものである。後半の25年は低成長時代におけるコスト低減技術と環境対策がメインとなっているがこの時期もまた安価原燃料の使用技術が鍵を握っていたと言えよう。将来の25年も高炉法に限らず、資源小国の我が国にとって、過去50年と同じく輸入資源の選択幅を技術開発によって拡大し戦略的利用を図る事が必要である。

文献

- 1) 原燃料からみたわが国製鉄技術の歴史, 日本鉄鋼協会編 p.46~47
- 2) 1)同上, p.244~252
- 3) 川崎勉:「日本鉄鋼業—その軌跡—」, 鉄鋼新聞社 (1992)
- 4) 城博:製鉄研究, 253 (1965), p.6159
- 5) 宮津隆:日本鋼管技報, 67 (1975), p.125
- 6) 和栗真次郎:鉄と鋼, 70 (1984), p.S804
- 7) 矢場田武:材料とプロセス, 8 (1995), p.321
- 8) 野坂庸二:鉄と鋼, 66 (1989), p.1957
- 9) Seiki Nagano: Proc. 6th Intn. Iron and Steel Cong., (1990), p.64
- 10) 第146回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編 (1993)

参考文献

1. 第116回西山記念技術講座 「最近の製鉄技術の進歩」, 日本鉄鋼協会編
2. 美浦義明:「戦後我が国における高炉用コークスに関する研究開発の変遷」, 鉄と鋼, 75 (1989), p.1093
3. 鉄鋼年鑑, 鉄鋼新聞社
4. 鉄鋼統計要覧, 日本鉄鋼連盟
5. エネルギー経済統計要覧, (財)省エネルギーセンター (1993)

(1995年11月6日受付)