

# 展望

## 一貫製鉄プロセスにおける二酸化炭素排出理論値に関する調査報告

西野 誠

国際鉄鋼技術委員会委員

(新日本製鐵株) 技術開発企画部 マネジャー

Makoto Nishino

### Theoretical Evaluation of CO<sub>2</sub> Emission by Integrated Steelmakers

#### 1 はじめに

わが国の部門別エネルギー最終需要量に対する鉄鋼業の比率は約12%で、個別の業種としては最も高い割合を占めている。これに化学、紙・パルプ、セメント・窯業などの素材関連産業が次ぐ。つまり加工や組み立てを主体とする製造業種では、熱や動力源としてエネルギーを消費するのに対し、素材製造業では天然資源を社会に有用な素材に変換するのに多くのエネルギーが必要とされると言える。一貫製鉄プロセスの場合、製鉄所で消費される全エネルギー量の70%以上が鉄源製造工程で消費されており、数十億年に亘って酸化された状態にある鉄鉱石を還元して有用な鉄鋼素材に変換する過程で、多くのエネルギーが必要であると言える。

19世紀の英国において一貫製鉄法が構築されたのは、その前時代の木炭高炉における森林資源の枯渇というエネルギー危機を、コークス熔鉱炉の発明によって克服したことを出発点とする。これ以降の製鉄技術の歴史も、エネルギーの有効利用を追求する歴史でもあったと言える。戦後の日本に目を転じた場合でも、大型化・高速化・連続化という技術の流れは生産性の追求と同時にエネルギー有効使用の追求でもあった。特に1970年代の石油危機以降、設備投資総額の20%以上が省エネルギーや環境保全に充てられてきた。1979年以降の省エネルギー関連の設備投資の累積額は2兆円を越える規模となっている。この具体的な設備技術として、連続 casting と熱間圧延機との直結化・連続焼鈍設備・高炉への微粉炭吹き込みなどの革新的な設備技術の他、コークス乾式消火・焼結排ガス顕熱回収・高炉炉頂圧タービン・転炉ガス回収などの排エネルギーの回収技術や、各種加熱炉での高燃焼効率バーナーの採用・コンピュータを活用した燃焼制御・炉体断熱性能の向上などの燃料低減対策技術などの多様な事例を挙げることができる。

しかしながら、これらの経済的効果の大きな主要省エネルギー対策設備の設置は、図1に示すように今日殆ど全て完了していること、そして表1に示すように特殊鋼・表面処理鋼板・電磁鋼板などの付加価値の高い高級鋼材、すなわちより多くの製造エネルギーを要する鉄鋼製品が市場から求められていること、また市場要請の多様化を受けて生産が多品種小ロット化し、生産の効率性が阻害されていること、などの理由から、図2に示すように、1980年代後半以降、省エネルギー設備対策の継続的な実現にも関わらず、エネルギー消費の実績値は横這い傾向となっている。

このような状況下、昨今の最大課題である地球温暖化防止対策を推進すべく、1996年12月に日本鉄鋼連盟から「鉄鋼業の環境保全に関する自主行動計画」が提示された。その骨子とするところは次のような点である。

- ①導入可能な最高水準の省エネルギー対策技術の継続的な導入により、2010年の生産量を現状並みと仮定した場合、1990年時点と比較して10%の省エネルギーを達成する。

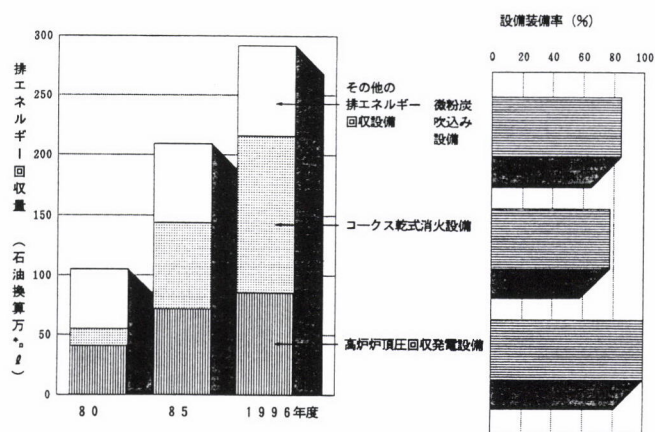


図1 一貫製鉄所における排エネルギー回収量の推移と省エネルギー設備の設備率 (出典：日本鉄鋼連盟資料)

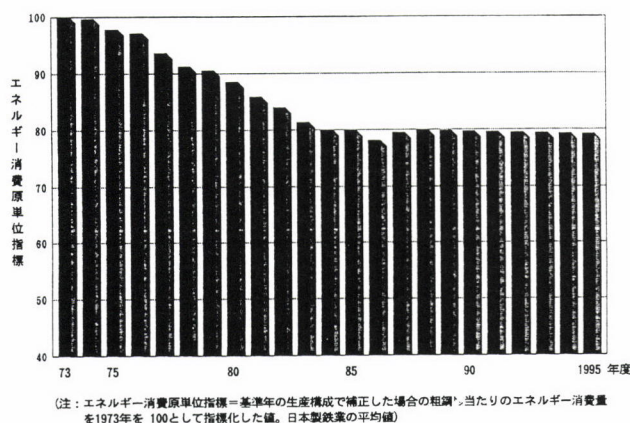
表1 鋼材生産に占める高級鋼材の割合

(単位:1,000t)

|         | 1975年  |       | 1985年  |       | 1995年  |       |
|---------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|         | 生産量    | 比率(%) | 生産量    | 比率(%) | 生産量    | 比率(%) |
| 特殊鋼     | 7,826  | 9.3   | 15,881 | 16.5  | 15,329 | 16.5  |
| 高張力鋼    | —      | —     | 4,399  | 4.6   | 2,712  | 2.9   |
| ステンレス鋼  | —      | —     | 1,935  | 2.0   | 2,916  | 3.1   |
| その他     | —      | —     | 9,547  | 9.9   | 9,701  | 10.5  |
| 表面処理鋼板  | 6,724  | 8.0   | 11,782 | 12.2  | 14,686 | 15.8  |
| 亜鉛めっき鋼板 | 4,549  | 5.4   | 8,388  | 8.7   | 11,045 | 11.9  |
| その他     | 2,175  | 2.6   | 3,394  | 3.5   | 3,641  | 3.9   |
| 電磁鋼板    | 710    | 0.8   | 1,213  | 1.3   | 1,939  | 2.1   |
| 高級鋼材合計  | 15,260 | 18.1  | 28,876 | 30.0  | 31,954 | 34.5  |
| 一般鋼材合計  | 69,088 | 81.9  | 67,504 | 70.0  | 60,738 | 65.5  |
| 全鋼材合計   | 84,348 | 100.  | 96,380 | 100.  | 92,692 | 100.  |

(注:最終鋼材ベース)

(出典:日本鉄鋼協会調査検討部会、大競争時代に向けた鉄鋼業の新たな挑戦、1996.8)

図2 日本製鉄業のエネルギー消費量の推移  
(出典:日本鉄鋼連盟資料)

- ②廃プラスチックや都市ごみ等をエネルギー資源として活用する。また未利用エネルギーの製鉄所近隣地域における有効活用を図る。
- ③エネルギー消費の観点から有用な鉄鋼製品を社会に供給することによって、社会トータルとしてのエネルギーの有効活用を図る。またスラグなどの鉄鋼製造プロセスから生まれる副産物の有効活用を図る。
- ④世界最高水準を誇るわが国の省エネルギー技術を海外鉄鋼業に対して積極的に技術協力する。

これらによって地球温暖化対策を進めると共に、スチール缶や副産物のリサイクル使用によって、循環型経済社会の構築に積極的な貢献を果たす、というものである。今後も更に省エネルギーを進めて地球環境の保全に貢献せねばならない使命を担っているが、同時に安価で有用な高品質鋼材を安定して市場に供給することもまた鉄鋼業が果たさねばならない役割である。

以上を背景として、「一貫製鉄プロセスの過程で発生する二酸化炭素量の最小値」を理論的に求めることは、エネルギー消費と二酸化炭素排出に関する今日の製鉄技術の位置

付けを明確化するためにも、それらの削減目標を定量的に設定するためにも、更には社会が鉄鋼製品を必要とすることによって不可避な地球環境への負荷を明確化するためにも、基礎的な数値として重要な量である。また国際的な場で二酸化炭素排出量の理論最小値と実績値を比較検討することは、日本の製鉄技術の実態を検証するためにも重要な意義を持つ。

平成9年4月に京都で開催された国際鉄鋼協会(IISI)理事会にて環境問題の集中的な検討がなされ、この場で技術委員会(TECHCO)から各国の二酸化炭素排出量の最小値と実績値を骨子とする、Review of Technical Possibilities to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions と題する報告がなされた。本報告の準備に際し、IISI-TECHCOの国内対応委員会である鉄鋼協会国際鉄鋼技術委員会は、一貫製鉄プロセスにおける二酸化炭素排出量の最小値に関する理論的検討を東北大学素材工学研究所、八木順一郎教授、秋山友宏講師(現、国立宮城工業高等専門学校助教授)に依頼した。本報告はその検討結果の概要およびIISI-TECHCO報告に基づく国際的な比較結果の概要である。理論的検討の詳細については八木らの報告<sup>1)</sup>を参照されたい。

## 2 二酸化炭素排出量の最小値 についての理論的検討

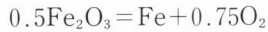
### 2.1 検討の前提条件と手法

一貫製鉄プロセスにおける二酸化炭素排出量の理論的な検討に際して、現行の高炉法での工業的な生産を前提として、銑鉄生産反応を熱力学的な平衡関係から考察する手法(；熱力学的理論最小値とする)、および現行の一貫製鉄法の各プロセスが理想的に操業された場合を想定して考察する手法(；工業的半理論最小値とする)の二通りの前提条件と手法に拠った。

### 2.1.1 熱力学的理論最小値

現状の工業的な銑鉄の生産を前提とした現象を以下に示すように近似する。

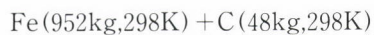
酸化鉄（鉄鉱石）の還元反応



炭素の燃焼（完全燃焼および不完全燃焼）

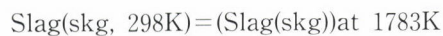


浸炭（C=4.8%）および昇温（1510℃）



スラグ（43%CaO-35%SiO<sub>2</sub>-15%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-7%MgO）

(skg)の溶解（1510℃）



これらで記述される現象は、熱力学の第一法則（エネルギー保存則）および第二法則（エクセルギー減少則）の関係式が満足されなければならない。またガス利用率と必要炭素量の関係は反応温度に依存するが、平衡状態図における鉄-ウスタイトの境界線とソリュションロス反応の境界線の交点を平衡論的な還元反応の最低温度として求めた。詳細は割愛するが、これらの熱力学的・平衡論的な手法によって、溶銑1tを生産するのに必要な炭素量の最小値がスラグ量に応じて求められる。

### 2.1.2 工業的半理論最小値

現状の一貫製鉄各プロセスでの操業技術レベルを以下のように仮定する。

焼結機：焼結銑1tの生産につき、CaOを112kg、粉コークスを46.6kg、コークスガスを0.43kg使用し、必要電力量を30kwhとする。

コークス炉：コークス1tの生産につき、コークスガスの発生量を430 Nm<sup>3</sup>、発熱量を4,450kcal / Nm<sup>3</sup>、成分をH<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/CO/CO<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>=56.7/0.2/3.4/27.0/7.8/2.2/2.2/0.5%とする。必要電力量を7.5kwhとする。

高炉：溶銑1t当たり、コークス量を302.6kg、微粉炭量を150kgとする。また操業条件は、重油=0、スクラップ装入量=0、ダスト発生量=12kg、熱風量=851Nm<sup>3</sup>、富化酸素=28Nm<sup>3</sup>、酸素富化率=2.5%、熱風温度=1250℃、湿度=15g/Nm<sup>3</sup>、炉頂温度=119℃、炉頂ガス量=1348Nm<sup>3</sup>-dry、熱損120,000kcal、ウスタイト-鉄平衡温度=950℃、シャフト効率=1、ガス利用率=54.2%と仮定した（いずれも溶銑1t当たり）。高炉送風に要する電力量を100kwh、酸素製造に要する電力量を10.4kwhとする。

製鋼：酸素製造に要する電力を0.37kwh/Nm<sup>3</sup>、酸素使

用量を1チャージ当たり13,320Nm<sup>3</sup>、1チャージ当たり粗鋼量を280tとする。

一次圧延およびその他の部門：電力消費の実績値を使用する。圧延工程を47.5kwh、ポンプ運転動力を15.1kwh、補機運転動力を22.8kwhとする。

これらを理想的な操業として、これによって発生する温室効果ガス（GHG）の総量から炭素量を換算することによって求めた。

## 2.2 検討結果

### 2.2.1 熱力学的理論最小値

熱力学的・平衡論的な手法によって求めた二酸化炭素排出量の最小値は、溶銑1t当たりにスラグ250kgを必要とすると仮定した場合、炭素量換算で382kg（二酸化炭素量換算で1.4t、エネルギー量換算で12.9GJ）となる。この内訳は鉄鉱石の還元に必要な量が約72%、鉄の溶融および浸炭のために必要な量が約25%、およびスラグの溶融のために必要な量が約3%である。尚、スラグを必要としない場合には同じく炭素量換算で361kgとなる。

### 2.2.2 工業的半理論最小値

現行の一貫製鉄プロセスによる理想的な操業をベースとした手法によって求めた二酸化炭素排出量の最小値は、製銑部門から溶銑1t当たり炭素量換算で489kg、全プロセスを対象とした場合には粗鋼1t当たり同じく531kgとなる。前者に対する後者の増加分はいずれも電力消費によるものであり、一貫製鉄プロセスではコークスガス・高炉ガス・転炉ガスを使用して製鋼工程以下に必要な電力を賄うことが可能である。従って工業的半理論最小値として溶銑1t当たり炭素量換算で489kg（二酸化炭素量換算で1.8t、エネルギー量換算で16.5GJ）と考えることが適切である。

## 3 一貫製鉄プロセスの二酸化炭素排出実績値

今日の日本の一貫製鉄各社の二酸化炭素排出量の平均値は、粗鋼1t当たり炭素量換算で625kg（二酸化炭素量換算で2.3t、エネルギー量換算で21.1GJ）となっている。最も低い値の会社で574kg（二酸化炭素量換算で2.1t、エネルギー量換算で19.4GJ）、最も高い値の会社で735kgの変動がある。但し、これは省エネルギー対策設備・操業技術の差だけでなく、スクラップ消費量や電力構造の相違にも依存するものである。

先に求めた二酸化炭素排出理論値の、実績値に対する比率を表2に示す。

表2 炭素排出量の実績値に対する理論最小値の比率

|                       | 熱力学的理論最小値<br>(C換算382kg/t) | 工業的半理論最小値<br>(C換算489kg/t) |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 平均実績値<br>(C換算625kg/t) | 0.611                     | 0.782                     |
| 最小実績値<br>(C換算574kg/t) | 0.666                     | 0.852                     |

(注：実績値には、スクラップ鉄の消費や余剰エネルギーの外販などを含むため理論値と同一条件で算出されたものではない)

ここで上述したように、実績値には数%から10%程度のスクラップ鉄を鉄源として含んでいることや余剰エネルギーを電力として外販していること、さらには理論最小値は溶鉄製造をベースとする値であるのに対して、実績値は表面処理材や特殊鋼材などの高級鋼材の製造エネルギーを含んだ粗鋼生産量をベースとするものであることなどの相違があり、単純な比較は必ずしも適切なものでないことに留意する必要がある。

これらを踏まえた場合でも、二酸化炭素排出量から見た、現行の一貫製鉄プロセスにおけるエネルギー使用効率は、天然資源を還元・溶融する熱力学的な理論最小値に対して60%以上、現行の製鉄プロセスが理想的に操業された値に対して80%程度の、かなり高い値を実現していると言える。

## 4 製鉄プロセスから排出される二酸化炭素量に関する国際比較

IISI理事会にて報告された、一貫製鉄プロセスでの二酸化炭素排出量の理論最小値の検討結果について検討する。理論値の算出条件については明確化されていないが、ベルギーのCRM(金属研究所)やドイツのVDEh(ドイツ鉄鋼協会)などの信頼できる機関による検討結果に基づく、溶鉄1t当たりの理論最小値はエネルギー換算値で12-14GJであり、上述した熱力学的理論最小値の12.9GJにほぼ近い値である。熱力学的理論最小値の検討では地域条件による相違が発生する要因はなく、鉄鉱石から鉄を得るために必要な理論的な最小値として国際的な認知が可能な数値であると言える。これに加えて熱延工程までを含んだ理論的最小値として16-17GJのエネルギー量が必要であると報告

されている。

また同報告に示された二酸化炭素排出量の現実的な削減可能限界の考察に拠れば、鉄源として100%鉄鉱石をベースとする熱延工程までの値は2.289t、鉄スクラップに100%依存する場合は0.526tとなっている。従って鉄スクラップを10%含む場合には2.11tとなる。前節で示した日本の実績値を再掲すると、鉄源としてスクラップを含み、熱延以降の工程を含んだものではあるが、2.1-2.3tとなっている。

## 5 まとめ

一貫製鉄プロセスの仮定で発生する二酸化炭素の最小値を理論的に求めることによって、社会が鉄鋼製品を必要とすることによって不可避な環境負荷量を把握することができる。またこれに対する現在の製鉄技術の位置付けと、今後の環境負荷削減努力の方向を認識することが可能になったと言える。現行の製鉄プロセスはエネルギーの有効利用の観点から考えた場合、他の工業的なエネルギー変換プロセスと比較してかなり高い効率を実現しているプロセスであると言える。また日本の一貫製鉄プロセス技術は世界的にも高いレベルの省エネルギーを達成しており、技術的には限界に近い状況にあることを確認することができた。

一貫製鉄プロセスは高いエネルギー効率を実現しているのみならず、保有する港湾などの設備は貴重な社会インフラであり、発電設備や廃棄物処理、中低温排熱の周辺地域やプラントでの有効利用の点でも大きな可能性を有するものである。今後はトータルコストミニマムおよびトータル環境負荷ミニマムの視点から、社会が求める鋼材供給のあり方や設備の有効活用の方策を求めていくことが、一貫製鉄ミルが果たさねばならない社会的使命の方向であることが明らかである。

## 引用文献

- 1) 八木順一郎, 秋山友宏: 国際鉄鋼技術委員会資料 (ISIJ International) に投稿予定)

(1997年8月26日受付)