

高炉への微粉炭吹込み技術のライフサイクルインベントリ分析

草道龍彦*・尾上俊雄(工博)**

*技術開発本部・生産技術研究所 **神鋼リサーチ部

Life Cycle Inventory Analysis of Pulverized Coal Injection into Blast Furnace

Tatsuhiko Kusamichi・Dr. Toshio Onoye

The prevention of global warming has become an international matter of concern. The steel industry which is a major consumer of energy, especially fossil fuels, is attempting to make energy savings in the iron and steel processes. At Kobe Steel, a pulverized coal injection (PCI) technology into a blast furnace had been developed and implemented since 1983. In this report, the life cycle inventory analysis on the technology shows that PCI contributes to a decrease in the CO₂ emissions from steel production processes.

まえがき = 近年の環境問題は、産業公害、都市型環境問題から地球規模の問題に発展し、国際的な取組みが活発化している。なかでも、1992年、国連において、“今世紀末の温室効果ガスの排出量を1990年レベルにまで戻す”，といった「気候変動に関する枠組み条約」が採択され、各国の責務が明確にされた。1997年12月には京都において第3回の締約国会議(COP3)が開かれ、21世紀に向けての新たな目標が設定される予定である。

温室効果ガスとして、炭酸ガス(CO₂)、メタン(CH₄)、フロン(CFC)などがあるが、経済活動に必要なエネルギーの主体を化石燃料に頼っている現状では、炭酸ガスの影響がきわめて大きい。とりわけエネルギー多消費型産業の一つである鉄鋼業では、これまでも効率改善、排熱利用など、省エネルギーに積極的に取り組んできたが、なお、国内の最終エネルギー消費の約11%を占め、CO₂排出量は産業部門の約30%を占めている¹⁾。当社においては、このような省エネルギー対策とともにエネルギーコストの低減を狙いに、1983年以降、高炉への微粉炭吹込みを実施しており、装入物分布制御技術と相まって世界最高水準の200kg/t-銑鉄の吹込みを達成している。

いっぽう、環境影響を定量的に評価する手法として、ライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)が注目され、各国で研究開発がおこなわれるとともに、ISOによる国際規格化が進められている。これは、ある製品の環境負荷を、原料採取から製造、使用、廃棄にいたるライフサイクル(いわゆる、ゆりかごから墓場まで)にわたって集計し、分析・評価する手法である。目標および範囲の設定、インベントリ分析、インパクト評価、および結果の解釈からなるが、インパクト評価については、手法そのものがまだ開発段階にあり、また、必要な環境負荷データも十分とはいえない。現在、LCAとして実施されているものの大半がインベントリ分析に終わっているのが現状である。しかしながら、インベントリ分析でも十分に目的を果たす場合が多い。

本報では、加古川製鉄所の高炉への微粉炭吹込み技術について、ライフサイクルインベントリ(LCI: Life Cycle

Inventory)分析の観点から考察した結果について述べる。

1. 方法

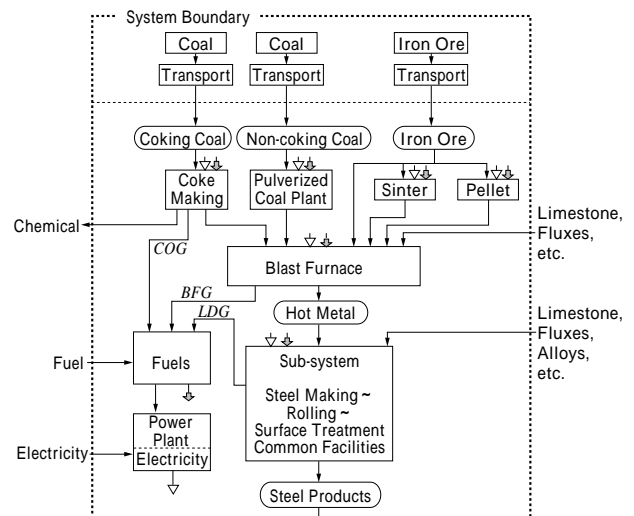
1.1 目的および調査範囲の設定

1.1.1 目的

高炉における微粉炭吹込み(PCI)技術の環境負荷、とくにCO₂排出を定量的に評価し、地球環境負荷低減への指針とする。

1.1.2 システム境界

LCAでは対象とするシステム境界を設定する必要があるが、比較の対象がプロセスであるため、当該プロセスおよびそれらの影響が及ぶ範囲をシステムと考えればよい。そこで第1図に示す原料採取から鋼材製品製造段階までを範囲とした。データの収集にあたっては、原料採取～輸送までを原料システムとし、製鉄所を一つの製造システムと考えた。後者はさらにPCIの影響が直接及ばない製鋼以降の工程に対してはサブシステムとして処理した。したがって、ここでいう鋼材製品とは加古川製鉄所の平均的な品種構成に相当するものである。なお、石炭は、コークス用は原料炭、PCI用は一般炭とした。



第1図 プロセスフローとシステム境界
Fig. 1 Process flow and system boundary

第1表 鉄鉱石および石炭の採取・輸送時のエネルギー消費および環境負荷
Table 1 Energy consumption and environmental loads on mining and transport of iron ore and coals

Raw Materials	Mining				Sea Transportation			
	Energy Consumption Mcal/t	CO ₂ Emission kg-CO ₂ /t	NO _x Emission kg-NO _x /t	SO _x Emission kg-SO _x /t	Energy Consumption Mcal/t	CO ₂ Emission kg-CO ₂ /t	NO _x Emission kg-NO _x /t	SO _x Emission kg-SO _x /t
Iron Ore	80	24.9	0.09	0.08	342	101.9	1.89	0.98
Coking Coal	32	3.19	0.02	0.01	192	57.0	1.06	0.55
Non-coking Coal	23	4.24	0.09	0.09	173	51.3	0.95	0.49
Source	Ref.3) For coal : surface mining data of Ref.2)		Calculated on data Ref.3) using emission factors of Ref.4)		Ref.3)		Calculated on data Ref.3) using emission factors of Ref.4)	

1.1.3 データ要件

システムへの入力項目としては、鉄鉱石、石炭、重油、石灰石などの原燃料、および電力、ならびに一部の製鉄所での購入品である。工業用水、海水などの用水については、その運転に関わるエネルギーなどのみを含めた。

出力項目としては、製鉄所における鋼材製品、銑鉄、スラグなどの製品・副製品、一部の外販エネルギーとし、大気排出物はCO₂、NO_x、SO_xについてのみを対象とした。

1.1.4 前提条件

インベントリ分析は、以下のような前提でおこなった。

- ・製鉄所のデータは年度あるいは年間の実測データを使用。
- ・原料システムについては、文献値あるいはそれらをもとに算出。
- ・環境負荷データは排出係数をもちいて算出。
- ・化成品以外の副製品(スラグ、酸素、アルゴンなどの外販品)へのアロケーション(配分)は0(すべて鋼材製品に配分)。
- ・化成品のうち、タール、石炭系軽油、アンモニア液は便宜上、それぞれ重油(高炉吹込み)、軽油、化学薬品として等価評価。
- ・外部購入となる合金材(社内製造のマンガン系を除く)、副資材などの製造時の環境負荷は考慮しない。
- ・製鉄所構内での発電所、酸素プラント、輸送、事務所などのエネルギー消費およびその環境負荷は、共通部分として処理。
- ・インベントリ分析には、積み上げ法を採用。ただし、一部のデータには産業連関表のデータを使用。

なお、高炉へのPCIに着目したため、便宜上、溶銑トンあたりの環境負荷として算出したが、鋼材製品までの環境負荷を含んでいる。

1.2 データ

1.2.1 原料採取および輸送

原料採取および輸送については、主原料の鉄鉱石、石炭(原料炭、一般炭)のみを対象とした。種々の報告があるが、採取についてはBUWAL²⁾の値、輸送については、わが国の輸入実績をもとに算出した電力中央研究所のデータ³⁾をもちいた。NO_x、SO_xは電力中央研究所のデータをもとにそれぞれの排出係数に「アジアのエネルギー利用と地球環境」⁴⁾の値をもちいて算出した。これらを第1表に示す。ここで、石炭、重油、軽油のS分をそれぞれ実績平均⁴⁾の0.61%、1.38%、0.4%とした。

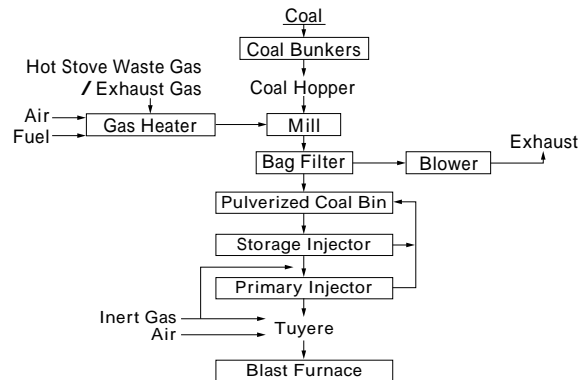
1.2.2 鋼材製造

加古川製鉄所では、1983年より第2高炉にてPCIを実施しており、オールコークス操業のデータを含むPCI導入前後の1982~84年、および最近の1993~95年の年

第2表 高炉における主要原燃料原単位

Table 2 Material inputs into blast furnace		kg/t-hot metal
Lump Ore	282 ~ 362	Coke 322 ~ 506
Sinter	657 ~ 750	Pulverized Coal 0 ~ 201
Pellet	495 ~ 587	BF Gas 1 427 ~ 1 668Nm ³ /t

Data of 1982-84 and 1993-95 at Kakogawa Works



第2図 微粉炭吹込みシステムのフロー

Fig. 2 Flowchart of pulverized coal injection system

間あるいは年度平均データを使用した。

高炉における主要原燃料の溶銑tあたりの原単位のデータ範囲を第2表に示す。ここで、石炭の原単位には、原料炭はコークス相当分、一般炭では高炉PCI用のほかペレット、発電所での使用分を含めている。なお、微粉炭製造のフローは第2図に示すとおりであり、乾燥は熱風炉の排熱と高炉ガス(BFG)を利用し、粉碎、圧送には電力、空気、窒素などをもちいている。これらのエネルギーは90kcal/kg-PC程度であり、高炉のインベントリの中に含まれている。

製鉄所におけるエネルギーの利用形態は、石炭がコークスやコークス炉ガス(COG)、高炉ガス、転炉ガス(LDG)など種々の形になり、熱や電気エネルギーに変換されて使用されており、きわめて複雑である。したがって、環境負荷データについては、個々の使用形態に応じて評価すべきであるが、ここでは便宜上、石炭は最終的には燃焼してしまうものとしてその使用量に対して第3表に示す排出係数³⁾⁵⁾から求めた。

なお、原料炭(コークス用)および一般炭(PCI、ボイラ用)のCO₂排出係数については、石炭のC分析値より算出した。NO_xおよびSO_xは単純に石炭が燃焼するときの発生量であり、実際の排出量とは異なる。

1.3 モデル化

上記実績データとは別に、1993年のデータをもとに微粉炭(PC)比を変数としてモデル化をおこなった。すなわち、第1図のフローにしたがって、ユニットプロセス間の物質収支およびエネルギー収支をとり、PCIの影響を調

第3表 各種燃料燃焼時のCO₂, NO_x およびSO_xの排出係数

Table 3 Emission factors of CO₂, NO_x and SO_x during combustion of various fuels

Fuels	Unit	CO ₂ Emission Factor	NO _x Emission Factor	SO _x Emission Factor
		g-CO ₂ /unit	g-NO _x /unit	g-SO _x /unit
Coking Coal	kg	2 860*	7.50	15.5 × S%
Non-coking Coal	kg	2 713*	7.50	15.5 × S%
Heavy Oil C	/	2 909	5.84 / kg	20.0 × S% / kg
Light Oil	/	2 644	9.62 / kg	20.0 × S% / kg
LPG	kg	3 007	2.63	0.014
Coke	kg	3 247	2.50	2.97 × S% + 1.55
COG	Nm ³	810	0.589 / Mcal	0.38 × S% / Mcal
BFG	Nm ³	877	0.318 / Mcal	0.001 / Mcal
LDG	Nm ³	1 534		
Electricity (domestic)	kWh	547	0.17	0.2
Source		Ref. 3) Ref. 5)	Ref. 4) Ref. 5)	Ref. 4) Ref. 5)

* Calculated from carbon content of coals used

査した。

2. 結果および考察

2.1 PCI と環境負荷

高炉では、微粉炭とコークスを熱量等価として扱い操業しているが、当然のことながら炉況の安定化のために装入物分布制御 酸素富化操業など 種々のアクションをとっている。PC 比とBFG 発生量およびコークス比の関係は第3図に示すように一定の関係があり、1kgのPCは、コークス0.85kg、石炭に換算すると1.13kgに相当し、PCIは石炭使用量の低減につながっている。

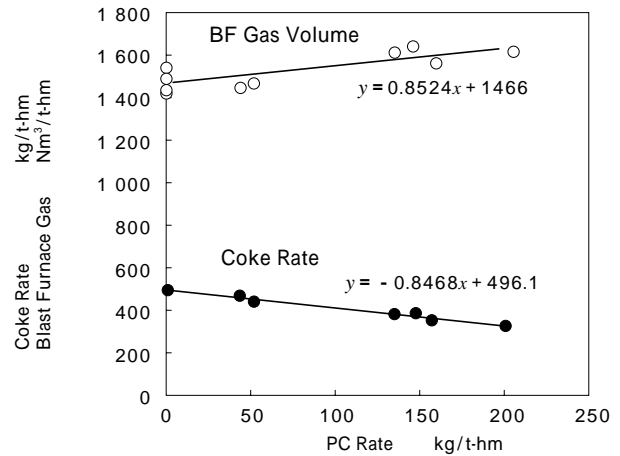
高炉へのPC比と消費エネルギーおよびCO₂発生量の関係を示すと第4図のとおりである。第4図から200kg/t-hmの吹込みみではオールコークス操業に対して、溶銹あたり約34kgのCO₂排出低減がえられていると考えられる。これは、全CO₂排出量の約1.4%にも相当する大きな量である。また、その傾きから約0.17kg-CO₂/kg-PCIがえられる。CO₂発生量の内訳の1例は第5図に示すとおりであり、鉄鉱石および石炭の輸送中に約10%、石炭の燃焼により約85%、石灰石の分解により約4%、その他(重油、電力など)約1%からなっている。

NO_x およびSO_x 発生量はいずれも9~10g/t-hmの範囲でばらついており、PCIとの間に明確な相関は見られなかった。なお、前述のようにこの数値は単に石炭燃焼時の排出係数をもちいて求めた環境対策を施さない場合の想定発生量であり、実際の排出量とは異なる。

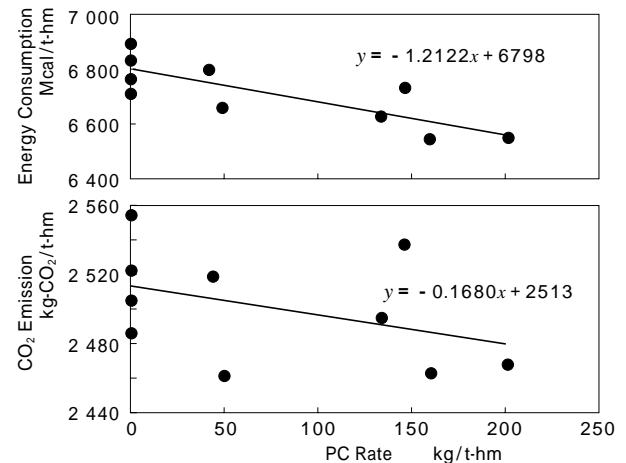
2.2 モデル計算

高炉でのPCIのコークス比への影響としては、前述の統計データからは-0.85kg/kg-PCがえられたが、いっぽうでは、熱収支モデルからの計算により-0.92kg/kg-PC、加古川製鉄所の最近の実績⁶⁾として-0.95~-0.98kg/kg-PC(200kg-PC/t-hm吹込み時)、神戸製鉄所の実績⁷⁾として-0.90kg/kg-PC(同160kg-PC/t-hm)と、統計データよりは大きい値がえられている。これらは、石炭の直接使用により、コークス炉での熱ロス低減に加え、石炭のもつエネルギーおよび還元力を効率的に活用できたと見ることができる。

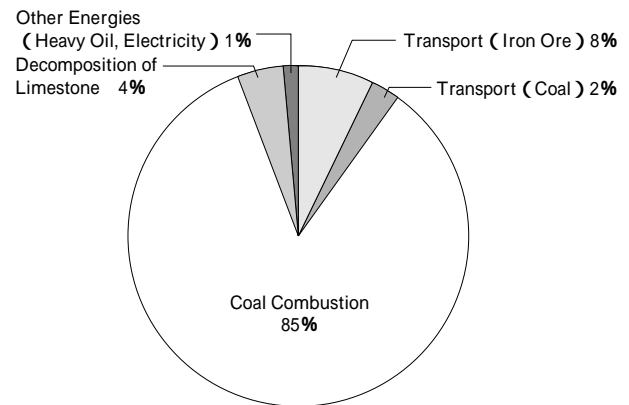
しかしながら、いっぽうではPCIにともないBFGは増加するもののCOGが減少し、単に高炉だけでなく、製鉄所全体のエネルギーバランスに影響を与えている。そこ



第3図 高炉へのPC吹込み量とコークス比およびBFG発生量の関係
Fig. 3 Effect of pulverized coal injection on coke rate and blast furnace gas volume



第4図 高炉への微粉炭吹込み量とエネルギー消費量およびCO₂発生量
Fig. 4 Effect of pulverized coal injection into blast furnace on energy consumption and CO₂ emissions of steel production



第5図 CO₂発生量の内訳
Fig. 5 Details of CO₂ emissions of process

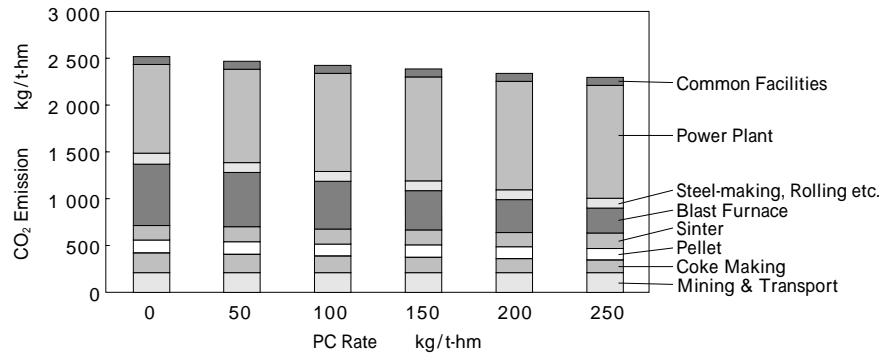
で物質収支およびエネルギー収支をもとにモデル計算を実施した。コークス比への影響として、上記-0.85および-0.95kg/kg-PCのケースについて計算した。

本モデルは、原田ら⁸⁾の表計算ソフトによるLCA汎用計算手法に準じ、第1図に示したフローにしたがってユニットプロセス(工程)間の物質収支をとり、さらにエネルギー収支式を組込んだ。

ある工程(X_i)における単位産出量を1、その製造に必要な原料(i)の投入量を a_{ij} とおくと、前工程(X_{j-1})との間には式(1)の物質収支式をたてることができる。

第6図 PC吹込み増大にともなうCO₂発生量のシミュレーション結果

Fig. 6 Simulation of CO₂ emission at various PC rate



$$X_{j-1} - a_{ij} \cdot X_j = 0 \dots\dots\dots (1)$$

エネルギー収支については、COG、BFG、LDGなどを燃料として使用する発電所において、不足する熱量を燃料で補充するとし、式(2)を導入した。

$$Q_g - (Q_{COG} + Q_{BFG} + Q_{LDG} + Q_{Coal} + Q_{Heavy\ Oil} + \dots) = 0 \dots (2)$$

ここで、 Q_g は発電に必要な熱量、 Q_x はCOG、BFG、LDG、石炭、重油などによる発熱量である。本モデルでは、PC比増大にともなう製鉄所のエネルギー不足に対しては、発電所での石炭(一般炭)の使用で調整すると仮定した。

本モデルでもちいた未知数は、原料39、製造工程29、製品22、工程内での選択項目(スクラップ配合率など)3、発電所の熱収支計算のための項目7、電力収支の項目3、の計103個であり、103元の一次連立方程式で構成されている。鋼材などの生産量、発電所での外販電力などを与えてこれを解き、各工程、原料、製品の量を溶銹1tあたりの量に換算した。

物質収支計算結果に対して、石炭(原料炭、一般炭)、重油、軽油、コークス、COG、BFGなどのCO₂排出係数を持ちて、各工程におけるCO₂排出量を計算し、さらに石炭・鉄鉱石の採取・輸送におけるCO₂排出量も計算した。

高炉におけるコークス比への影響を-0.95kg/kg-PCとした場合の結果を第6図に示す。PC比の増大とともに、発電所での石炭使用増大によるCO₂発生量は増加するが、高炉における石炭(コークス用石炭+微粉炭)使用量低減によるCO₂発生量の減少が大きく寄与し、全体としてCO₂発生量は低減しており、PCIがCO₂削減に有効なことがわかる。この場合、200kg/t-hmのPCIで約190kgのCO₂排出低減となり、全CO₂排出量の約7.5%に相当する。

2.3 インベントリデータ

今回の調査では、一部の副原料、資材、エネルギーなどの製鉄所に入るまでの環境負荷については考慮しなかったが、それらはたかだか数%以下であり、PCIの解析結果には直接影響しない。ちなみに、その製造時の環境負荷が大きいと考えられる耐火物について、年間使用量に対して既存のデータをもとに環境負荷を求めた結果は、全体の1%以下であった。

いっぽう、原材料、エネルギーの環境負荷のデータのばらつきが問題となるが、第5図にも見られるように石炭(コークス、微粉炭)の燃焼にともなう負荷が非常に大きく、

支配的である。製鉄所では鋼材に固定されるC以外は最終的にはCO₂として排出されるため、多少データにばらつきはあったとしても、PCIにより石炭の使用量の減少がCO₂排出量の低減をもたらすことに変わりはないと考えられる。換言すると、CO₂低減に対しては、いかにコークスをPCで置き換えるかにかかっている。

環境負荷のうち、NO_x、SO_xについては、CO₂以上にデータの欠落、ばらつきがあり、発生量の推定の域を出ない。実際には、脱硫・集塵・排水などの環境設備、燃焼制御によるNO_x抑制技術などにより、排出量の低減がはかれており、環境規制値を満たしている。

むすび = 高炉への微粉炭吹込み技術について、ある前提のもとにLCI分析を試みたが、PCIのコークス比への影響-0.85 ~ -0.95kg-coke/kg-PCに対し、溶銹tあたり100kgの微粉炭吹込みにより鉄鋼製造時の約0.7~3.7%に相当する炭酸ガス排出量を削減できるという試算結果がえられた。

地球環境問題を解決するためには、社会システムの整備といった広域的な施策はもちろんのこと、個々人の意識改革、企業における省資源・エネルギーなど、地道な積み上げが必要であろう。多量の資源・エネルギーを消費する鉄鋼製造においては、省資源・省エネルギー、リサイクルの推進などが地球環境的課題であり、いっそうの技術開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) 環境庁編：「環境白書」平成9年版、(1997)。
- 2) Swiss Federal Office of Environment, Forests and Landscape：「Ecobalance of Packaging Materials State of 1990」、(1991)。
- 3) 本藤祐樹ほか：電力中央研究所報告、「産業連関分析による財・サービス生産時のエネルギー消費量とCO₂排出量」、(1996)。
- 4) 科学技術庁科学技術政策研究所編：「アジアのエネルギー利用と地球環境」、(1992)。
- 5) 未踏科学技術協会環境負担性評価調査委員会：「環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究」調査報告書、(1994)、p.112。
- 6) 私信
- 7) Y. Yoshida et al.：Ironmaking Conf. Proc., AIME, (1991)、p.517
- 8) 原田幸明：「環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究」調査報告書、未踏科学技術協会、(1996.3)、p.59。