

# 産業連関表を用いた製鉄プロセスの環境負荷分析

戸井 朗人\*・片桐 広貴\*<sup>2</sup>・中村 達生\*・佐藤 純一\*

Analysis of Environmental Burden of Steel Making Process by the Use of I/O Table

Akito TOI, Hirotaka KATAGIRI, Tatsuo NAKAMURA and Junichi SATO

**Synopsis :** Recycle of steel is expected to conserve natural resources, such as ores, and reduce environmental burden which accompanies steel production. However, the difference of environmental burden caused by blast furnace process and electric furnace process, which are used for steel recycling, is not quantitatively clear. In this study, we combine monetary data from I/O table and quantitative data from steel statistics, and estimate total CO<sub>2</sub> emission from each steel making process. According to the result, total CO<sub>2</sub> emission is 458kgC/t for BF process and 136kgC/t for EF process. We also evaluate the change of CO<sub>2</sub> emission from EF process in the case where more pig iron is added to EF process in order to lower the concentration of impurities. The result shows that the difference in CO<sub>2</sub> emission between both methods disappears when pig iron input exceeds 75% of the total charge of iron materials to EF process.

**Key words :** environmental burden ; recycle ; steelmaking ; I/O table.

## 1. はじめに

鉄鋼は現在主として鉄鉱石、石炭等から高炉・転炉を用いた一貫製鉄法により生産されるほか、社会から廃棄される鉄スクラップから電炉法により生産されている。電炉法は、鉄鉱石等の限りある天然資源の保存に役立つのみならず、鉄鉱石のコークスによる還元過程等を含まないことから生産工程からの環境負荷も一貫製鉄法に比べて大幅に小さいと一般にいわれている。近年、地球環境問題への意識の高まりに伴い資源再利用の一層の促進が求められており、電炉法による鉄リサイクルへの期待が高まっているが、一貫製鉄法と電炉法の総合的な環境負荷については必ずしも十分な分析・比較は行われていない。本研究においては、産業連関表を用いるとともに鉄鋼関係の各種統計データを併せて考慮することにより、それぞれの製鋼法の関連産業への波及効果も含めた総合的な環境負荷を二酸化炭素排出量として求める<sup>1)</sup>。

## 2. 産業連関表

産業連関表<sup>2)</sup>、それぞれの産業部門間の財・サービスの流れを取引金額で表したものである。産業連関表のひとつである投入係数表は、ある産業部門において単位額の生産増加を行う際に必要となる各産業部門から当該産業部門への直接的な投入を表している。また、投入係数表から求められる逆行列係数表は、ある産業部門に対する最終需要が

単位額増加した場合に、産業間の取引関係を通じてすべての産業部門に波及していく生産増加分の総和を表している。したがって、逆行列係数表からCO<sub>2</sub>を発生させるものとしてエネルギー関連部門に対応する係数を取り出し、これを金額から物量に変換することにより、単位量の製品生産に必要なエネルギーの量を求め、これから関連産業への波及効果も含めた総合的なCO<sub>2</sub>排出量を推計することが可能となる。

しかしながら、産業連関表を用いた環境負荷推計にはいくつかの問題がある。まず、産業連関表は比較的大きな産業区分に基づいて作成されており、このため区分のあり方が製造プロセスごとの環境負荷の推計には適さない場合がある。本研究の対象である製鉄プロセスについては、最も詳細な基本分類においては転炉法と電炉法による粗鋼生産に対する投入係数がそれぞれ粗鋼(転炉)部門及び粗鋼(電気炉)部門として区分して記載されているが、統合中分類では両部門が銑鉄・粗鋼部門として統合されたかたちで記載されている。基本分類は正方向行列でないため逆行列係数表はこれに対応したかたちで掲載されておらず、産業連関表から直接両製鋼法の比較を行うことはできない。このため、基本分類、統合大分類のデータ等をもとに粗鋼(転炉)部門と粗鋼(電気炉)部門が区分された投入係数表を正方向行列となるように新たに作成し、これをもとに逆行列係数表を計算することが必要となる。

また、産業連関表は産業部門間の取引金額を表すものであるが<sup>3)</sup>、取引相手によって同種の製品でも価格が異なる場合等には金額が製品の流れを正しく表しておらず<sup>3)</sup>、結果と

平成9年3月24日受付 平成9年6月3日受理(Received on Mar. 24, 1997; Accepted on June 3, 1997)

\* 東京大学工学部 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113)

\* 2 東大大学院生 (Graduate Student, The University of Tokyo)

して使用エネルギー量の計算に誤差が生じることとなる。また、統計作成の区分上、異なる原材料から製造される類似の製品が同じ部門に入れられ、このため実際には特定の原材料の流れがないにもかかわらずあたかも当該部門へ投入が行われているように見える場合もある。これらについても、鉄鋼製品流通の実態や他の鉄鋼関係統計等のデータをもとに修正を行うことが必要となる。

### 3. 新たな投入係数表の作成

本研究では、統合大分類をベースとしつつ、基本分類中のデータをもとに、鉄鋼業の環境負荷分析に必要な鉄鋼関連部門及びエネルギー関連部門を詳細に分割して転炉法及び電炉法に対応した部門を設ける一方、鉄鋼業に関連の薄い産業部門を取りまとめることにより、28行28列の投入表を作成した。行及び列の統合に当たっては、単純に加算を行った。従って、例えば第*m*部門から第*n*部門まで及び第*p*部門から第*q*部門までを統合した場合には、新たに作成した投入表における*m*~*n*部門から*p*~*q*部門への投入額 $a_{mnpq}$ は以下のように表せる。

$$a_{mnpq} = \sum_{i=m}^n \sum_{j=p}^q a_{ij}$$

一般に、産業連関表上の産業部門を統合すると、産業部門ごとの連関関係が大きな区分のもとで平均化されてしまい、結果として、産業連関表に基づく波及効果分析の精度が低下する恐れがあるといわれている。本研究においては、この問題をなるべくさけるため、一貫製鉄法及び電炉法の環境負荷推計に特化した産業連関表を作成することとし、食料品、繊維製品、電子・通信機器等鉄鋼業の波及効果がほとんどない産業部門を統合する一方、鋳業、鉄鋼、電力・ガス等の鉄鋼業の波及効果の大きな産業に関連する部門は詳細な区分のままとした。新たに作成した投入係数表の産業区分をTable 1に示す。

また、基本分類には鉄屑部門が存在するものの、鉄屑部門への他産業部門からの投入を表す列が存在しない。これは、「鉄屑の需要が増えることにより鉄屑の生産が増加する」という存在しない連関を断ち切る意味があると考えられるが、一方、廃棄された鉄を再利用可能なかたちまで処理するためには相当なエネルギーが投入されており、環境負荷の評価のためにはこれら鉄屑の処理に係る投入も考慮することが必要となる。そこで、本研究においては、各産業部門から鉄屑部門への投入額のうちエネルギー消費に関連するものをシュレッダー処理コストに関するデータ等から推計して投入表の列に加えた。ヘビー屑等については平均的な処理コスト構成が明確に得られなかったことから、シュレッダー処理コストのうちダスト処理費を0、償却費を半分としたものをコスト構成として用いた。Table 2にここで用いたシュレッダー処理コスト及びヘビー屑等処理コス

Table 1. Classification of industries in the modified I/O table.

Mining	Coal
	Crude petroleum
	Natural gas
	Other mining
Petroleum refinery products	
Coal products	
Pig iron & crude steel	Pig iron
	Crude steel (converter)
	Crude steel (electric furnace)
	Ferro-alloys
Scrap iron	
Steel & other products	Hot rolled steel (converter)
	Hot rolled steel (electric furnace)
	Steel pipes and tubes
	Cold-finished steel
	Coated steel
	Cast and forged steel
Machinery	
Miscellaneous manufacturing products	
Construction	
Electric power	
Self-power generation	
Gas supply	
Steams and hot water supply	
Water supply and waste disposal services	
Transport	
Commerce and other services	
Others	

Table 2. Cost structure for shredding and other processes.

Item	(Yen/t)	
	Shredder	Others
Dust disposal	7,000	0
Administration	1,600	1,600
Transportation	4,500	4,500
Maintenance	1,100	1,100
Wage	600	600
Energy	1,200	1,200
Depreciation	3,400	1,700
Total	19,400	10,700

トの構成を示す<sup>4)</sup>。鉄屑全体のうち、シュレッダーによるものが20%、それ以外のヘビー屑等が80%と設定し、我が国のスクラップ総供給量をもとに鉄屑部門へのエネルギー消費に関連する産業部門からの投入額を推計した。具体的には、Table 2に示した鉄屑処理コストの構成項目ごとの金額を要素とする列ベクトルをそれぞれ $C_s$ (シュレッダー処理のコストベクトル)及び $C_h$ (ヘビー屑等処理のコストベクトル)とすると、鉄屑処理への各項目の総投入額を要素とする列ベクトル $A_k$ を以下の式により推計した。

$$A_k = C_s x_s + C_h x_h$$

ここで、 $x_s$ 及び $x_h$ はシュレッダーにかけられる鉄屑及びそれ以外のヘビー屑等の量であり、1990年度の総鉄屑発生量

Table 3. Total cost structure for scrap treatment.

(million yen)		
Item	Classification in I/O Table	Total cost
Dust disposal	Water supply and waste disposal service	68,831
Administration	Others	78,664
Transportation	Transportation	221,243
Maintenance	Others	54,082
Wage	Value added sectors	29,499
Energy	Electric power	58,998
depreciation	Machinery	100,297

49,165千トンの<sup>5)</sup>それぞれ20%及び80%として、9,833千トン及び39,332千トンとした。結果をTable 3に示す。同Tableに示すように、それぞれの投入額を新たに作成した投入表中の鉄屑部門に対応する列の各部門に割り振った。

#### 4. 製品の流れに関する補正

産業連関表は各産業部門間の取引を金額で表している。しかしながら、環境負荷の評価のためには、産業部門間の製品の量的な流れを正しく捉えることが必要となる。製品が同一の価格で取引されている場合には取引金額は製品の量に比例することとなるが、実際には同一製品でも同一価格で取引されない場合も多い。修正を行わずに単純に産業連関表から商品の流れを計算すると、鋼材1トンを生産するのに粗鋼等が1トン未満しか投入されないなど矛盾が生じる。これは、鉄鋼の取引価格が企業内で取引される場合と外部に販売する場合で異なっていることによるものと考えられる。また、原材料が異なっているにも関わらず同種の製品としてまとめられている場合には、粗鋼(電気炉)部門の製品が熱間圧延鋼材部門を通して冷間仕上げ鋼材部門に投入されているように見えるなど、実際の製品の流れと異なる結果が生じてしまう。このような問題に対応するため、本研究においては、以下のような修正を行った。

(1) 鉄鋼及び熱間圧延鋼材のような中間加工製品については、自社内の一貫製鉄プロセス中へ投入される場合と他企業へ販売される場合では価格が異なると考えられる。これに対処するため、総生産額から営業余剰を引きこれを鉄鋼年鑑<sup>6)</sup>から得られた生産量で割ることにより内部価格及び外部価格を推計し、これらの値をもとに投入金額が投入量と比例するように産業部門ごとのこれら製品の投入係数表を修正した。具体的には、鉄鋼部門については粗鋼(転炉)部門へ投入されるものは内部価格、粗鋼(電気炉)部門へ投入されるものは外部価格で取引されているものとした。また、熱間圧延鋼材部門については、冷間仕上げ鋼材部門等の他の鋼材部門へ投入されているものは内部価格、鉄鋼以外の産業分野の各部門に投入されているものは外部価格と

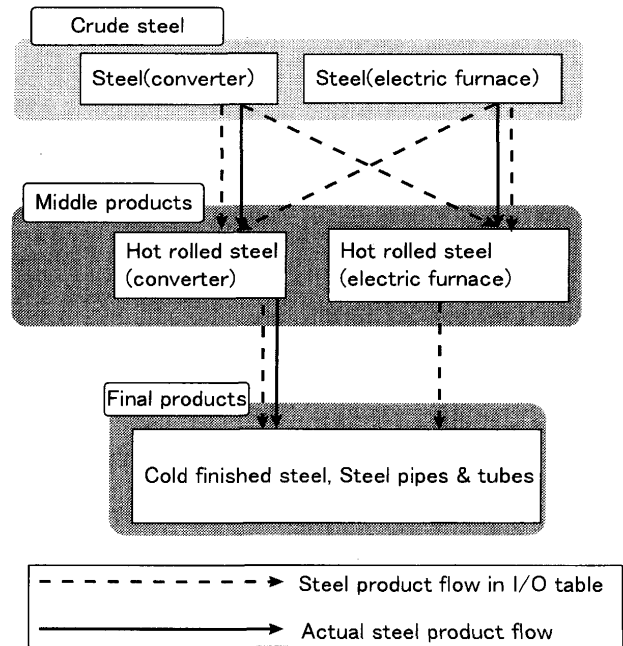


Fig. 1. Actual steel flow and implied steel flow in the I/O table.

した。

(2) 冷間仕上げ鋼材部門及び鋼管部門は原料として主に熱間圧延鋼材部門の製品を使用している。投入表上、熱間圧延鋼材部門には粗鋼(転炉)部門及び粗鋼(電気炉)部門からの投入があるが、実際には冷間仕上げ鋼材部門等には粗鋼(電気炉)部門の製品が熱間圧延鋼材部門を経て投入されることはほとんどない。このため、産業連関表をそのまま用いた場合には、Fig. 1に示すように実際と異なる製品の流れがあるように見えるという問題が生じる。この問題に対処するため、以下の考え方に基づき投入表の熱間圧延鋼材部門を粗鋼(転炉)部門からの投入による熱間圧延鋼材(転炉)部門と粗鋼(電気炉)部門からの投入による熱間圧延鋼材(電気炉)部門に分割した。

a) 非エネルギー部門については、生産比率で投入額をそれぞれの部門に分配する。

b) 石炭製品部門からの投入は一貫製鉄の上工程で発生した副産物が使用されていると考え、熱間圧延鋼材(転炉)部門に分配する。

c) 自家発電は電炉ではほとんど行われていないので、当該部門からの投入は熱間圧延鋼材(転炉)部門に分配する。

d) 事業用電力部門からの投入については、本社使用分等として5%を熱間圧延鋼材(転炉)部門に分配し、残りを熱間圧延鋼材(電気炉)部門に分配する。

以上の修正を行った上で産業連関表から推計した各鋼材への粗鋼投入量と修正を行う前の結果をTable 4及び5に示す。修正を行うことにより、量ベースでの誤差が減少してきていることが分かる。

Table 4. Quantity of steel input to steel products calculated from original I/O table.

	(ton)		
	Hot rolled steel	Steel pipes and tubes	Cold-finished steel
Pig iron	0.000	0.000	0.000
Crude steel (converter)	0.726	0.001	0.000
Crude steel (electric furnace)	0.408	0.001	0.000
Hot rolled steel	0.004	0.577	0.549
Steel pipes and tubes	0.000	0.092	0.000
Cold-finished steel	0.000	0.003	0.000
Coated steel	0.000	0.022	0.000
Summation	1.138	0.695	0.549

Table 5. Quantity of steel input to steel products calculated from corrected I/O table.

	(ton)		
	Hot rolled steel	Steel pipes and tubes	Cold-finished steel
Pig iron	0.000	0.000	0.000
Crude steel (converter)	0.796	0.001	0.000
Crude steel (electric furnace)	0.356	0.001	0.000
Hot rolled steel	0.006	1.018	0.934
Steel pipes and tubes	0.000	0.088	0.000
Cold-finished steel	0.000	0.004	0.000
Coated steel	0.000	0.024	0.000
Summation	1.158	1.136	0.934

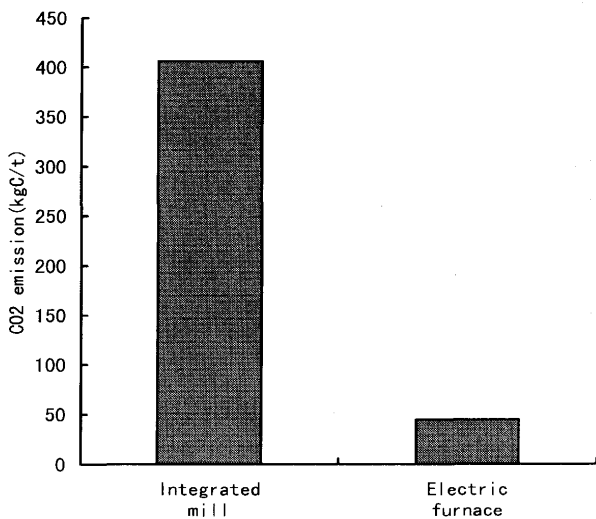


Fig. 2. CO<sub>2</sub> emission directly discharged by production of crude steel in integrated mill and electric furnace (I/O table).

Table 6. Figures and coefficients used in the calculation.

Steel production(1990FY)		
Integrated mill	ton	76,565,848
Electric furnace	ton	35,335,598

Energy cost(1990FY)		
Coal	yen/ton	8,655
Oil	yen/kl	20,326
Natural gas. LNG	yen/ton	28,729

Coefficients for calory calculation		
Coal	kcal/kg	7,600
Oil	kcal/l	9,250
Natural gas. LNG	kcal/kg	13,000

Coefficients for CO <sub>2</sub> calculation		
Coal	kgC/10,000kcal	0.996
Oil	kgC/10,000kcal	0.804
Natural gas. LNG	kgC/10,000kcal	0.574

## 5. 二酸化炭素排出量の推計結果

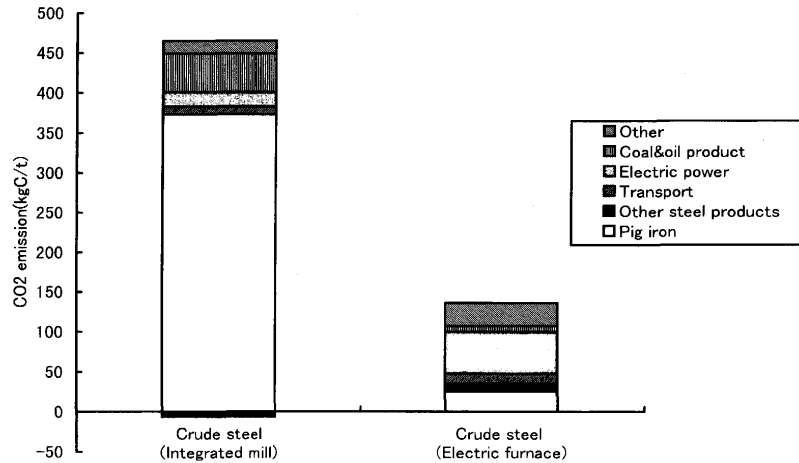
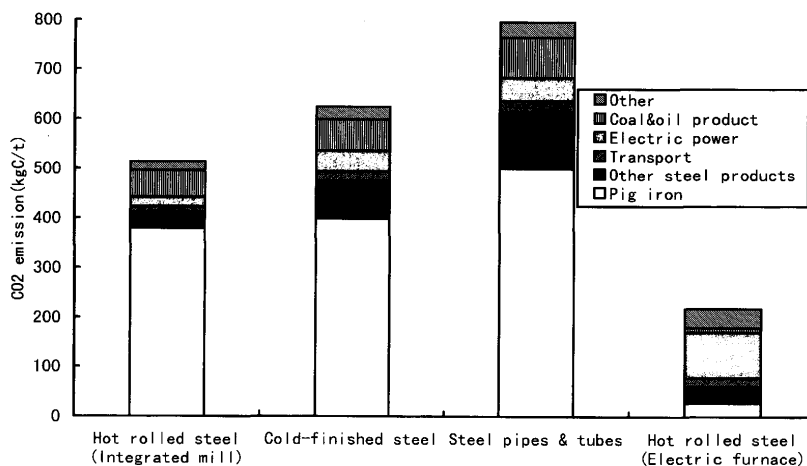
### 5・1 直接投入されるエネルギーによる二酸化炭素排出量

製鋼プロセスにおいて直接投入されるエネルギーにより発生するCO<sub>2</sub>量を産業連関表から推計した結果をFig. 2に示す。この値は、粗鋼(転炉)及び粗鋼(電気炉)部門へのエネルギー関連産業部門からの投入係数を、Table 6に示す係数等をもとにエネルギー量に変換しCO<sub>2</sub>排出量を算出したものである。併せて、鉄鋼統計年報<sup>7)</sup>の鉄鋼生産時のエネルギー

原単位から求めた結果及び当研究室において積み上げ法により求めた結果をTable 7に示す。各データは比較的良く一致している。直接投入によるCO<sub>2</sub>発生量は、一貫製鉄法と電炉法の比が約10対1となっている。一般に一貫製鉄法と電炉法の消費エネルギーの比は4対1程度といわれている。CO<sub>2</sub>排出量の比がエネルギー使用量の比と較べて大きなものとなっているが、これは電炉で使用される主要エネルギーである電力に水力や原子力によるものが含まれていることによるものと考えられる。

Table 7. CO<sub>2</sub> emission directly discharged from integrated mill and electric furnace.

	CO <sub>2</sub> emission(kgC/t)	
	Integrated mill	Electric furnace
Yearbook of iron and steel statistics	382	32
I/O table	406	45
Our laboratory	335	41

Fig. 3. Comprehensive CO<sub>2</sub> emission discharged by production of crude steel in integrated mill and electric furnace.Fig. 4. Comprehensive CO<sub>2</sub> emission discharged by production of steel products in integrated mill and electric furnace.

## 5・2 他産業への波及効果も含めた総合的な二酸化炭素排出量

前章までに示した修正を行った投入係数表から逆行列係数表を求め、このうち石油製品、石炭製品等のエネルギー関連産業部門に対応する係数から製鋼により発生する総合的なCO<sub>2</sub>排出量を計算することができる。本研究では、逆行列係数表の各産業部門の係数に、各産業部門の総中間投入金額に占めるエネルギー関連部門からの投入金額の割合を乗じることにより、各産業部門ごとの鉄鋼業CO<sub>2</sub>排出への寄与度についても求めた。結果をFig. 3に示す。粗鋼(転炉)部門における製品生産による総合的なCO<sub>2</sub>排出量は458kgC/t、

粗鋼(電気炉)部門における製品生産によるものは136kgC/tとなり、電炉法のCO<sub>2</sub>排出量は高炉・転炉を用いた一貫製鉄法の約30%となっている。直接投入されるエネルギー源によるCO<sub>2</sub>排出量を比べた場合に比べて両者の差は小さくなっているが、これは電炉に投入される銑鉄の生産時や鉄屑の処理時におけるCO<sub>2</sub>排出量が含まれることによるものと考えられる。

ついて、下工程までを含む鋼材生産に係るCO<sub>2</sub>排出量を推計した結果を鋼材種ごとにFig. 4に示す。熱間圧延鋼材部門における製品生産による総合的なCO<sub>2</sub>発生量は、一貫製鉄では514kgC/t、電炉では218kgC/tと算出された。電炉法によ

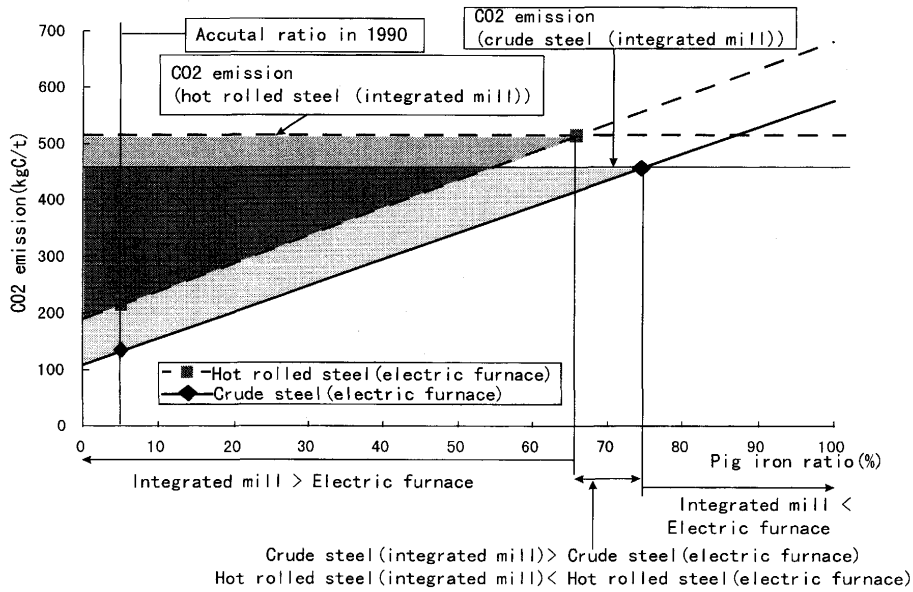


Fig. 5. Change of CO<sub>2</sub> emission from electric furnace process by the addition of pig iron to electric furnace and comparison with integrated mill.

る排出量は一貫製鉄法による場合の約42%であり、製鋼工程だけの比較を行った場合の約30%に比べて差が小さくなっている。これは、一貫製鉄法においてはコークス炉や高炉で発生した熱を回収して下工程において利用していること等によるものと考えられる。また、冷間仕上げ鋼材部門における製品生産によるCO<sub>2</sub>排出量は624kgC/t、鋼管部門における製品生産による排出量は795kgC/tと算出された。

### 6. 電炉への銑鉄投入の影響

現在、鉄スクラップからの電炉鋼の生産に際しては銑鉄が平均で約10%程度投入されている。今後、鉄鋼のリサイクルが進むにつれ銅等の不純物の蓄積が進むことが予想されているが、これら不純物の完全な除去は技術的又は経済的に困難であることから、電炉鋼の品質維持のため将来的により多くの銑鉄が電炉に投入されることが予想される。この場合、電炉鋼生産に係る総合的なCO<sub>2</sub>発生量は銑鉄投入の影響により相当増加するものと予想される。そこで、電炉プロセスへの銑鉄の投入量が今後増加した場合のCO<sub>2</sub>発生量の変化についてシミュレーションを行った。鉄鋼年鑑から得られる現時点での電炉へのスクラップ及び銑鉄の投入量をもとに、投入量の比率の変化に合わせて投入係数表中の銑鉄部門及び鉄屑部門の電炉への投入係数を変化させ、前節までと同様の手法で関連産業への波及効果までを含むCO<sub>2</sub>排出量を算出した。結果をFig. 5に示す。これから分かるように、製鋼工程のみの比較では電炉への銑鉄投入割合が約75%となった時点で一貫製鉄法と電炉法のCO<sub>2</sub>排出量は同一となるが、熱間圧延工程までを含めて比較した場合に

は、この割合は約66%まで低下する。

### 7. 結言

(1)産業関連表のデータをもとに、鉄屑処理に係る費用等不足するデータを補うことにより、他産業への波及効果まで含めて一貫製鉄法と電炉法の環境負荷をCO<sub>2</sub>排出量として求めた。

(2)実際の物量データも併せて考慮することにより、産業関連表の金額データが物量の流れをより正しく表すように修正することができた。

(3)以上の方法により推計を行ったところ、粗鋼まででは電炉法による製鋼時のCO<sub>2</sub>排出量は一貫製鉄法の約30%に、また、熱間圧延工程まででは約42%となった。

(4)今後電炉プロセスにより多くの銑鉄が投入される場合についてシミュレーションを行ったところ、粗鋼まででは銑鉄の投入割合が約75%となった時点で、また、熱間圧延工程までを考えると約66%となった時点で、一貫製鉄法と電炉法のCO<sub>2</sub>排出量の差はなくなることが分かった。

### 文 献

- 1) 片桐広貴, 佐藤純一, 戸井朗人: 材料とプロセス, 10 (1997), 255.
- 2) 平成2年度産業関連表, 総務庁他.
- 3) 堂野前等, 徳永庸夫: 第2回エコバランス国際会議講演集, 未踏科学技術協会他, 東京, (1996), 218.
- 4) 日刊市況通信, 日刊市況通信社, 東京, (1996.1.1), 58.
- 5) 坂田直起: 第23回白石記念講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1992), 19.
- 6) 鉄鋼年鑑(平成5年度版), 鉄鋼新聞社, 東京, (1993), 486.
- 7) 鉄鋼統計年報(平成2年版), 通商産業省, (1991), 90.