

# 誘導炉導入によるライフサイクルから見た環境性と経済性の評価

発表者	*小田 秀充	岡島 敬一	内山 洋司
会社名	筑波大学大学院 システム情報工 学研究科	筑波大学大学院 システム情報工 学研究科	筑波大学大学院 システム情報工 学研究科
役職	リスク工学専攻		

## 1. はじめに

金属のリサイクルはわが国の環境政策である「地球温暖化防止」と「循環型社会の構築」を達成していく上で重要な課題である。鋳鉄製造業は鉄スクラップや自社戻り材を主な原材料とする代表的なリサイクル産業の一つである。また自動車、工作機械など、基幹産業への部材の供給産業として重要な役割を担っている。

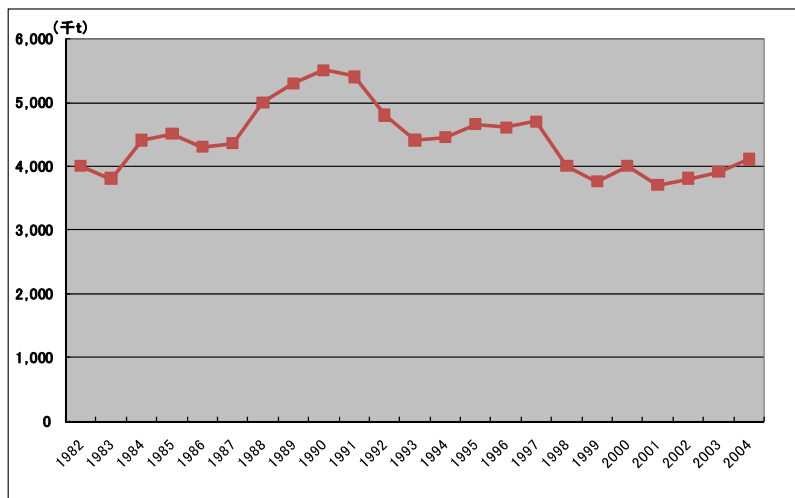


図1 鋳鉄鋳物生産量の推移 ((財) 産業研究所『鋳物用原材料問題への対応に関する調査研究』より)

キュポラで代表される鋳鉄製造業はものづくりの基盤産業であるが、原材料の不足や高騰による経営難、後継者不足など、抱えている問題も少なくない。最近では、職場環境の改善や温暖化抑制の視点から誘導炉がキュポラに代わって注目されている。

コークスに比較して、電気料金の価格変動幅が小さいために (図2、図3)、鋳鉄製造業の製造プロセスにおいてキュポラを誘導炉 (電気加熱) に置き換えていくことは、経営におけるエネルギーコストの安定といった面でプラスとなると考えられる。また、温室効果ガスである CO<sub>2</sub> 排出量削減を通して地球温暖化防止に寄与していくことも期待される。

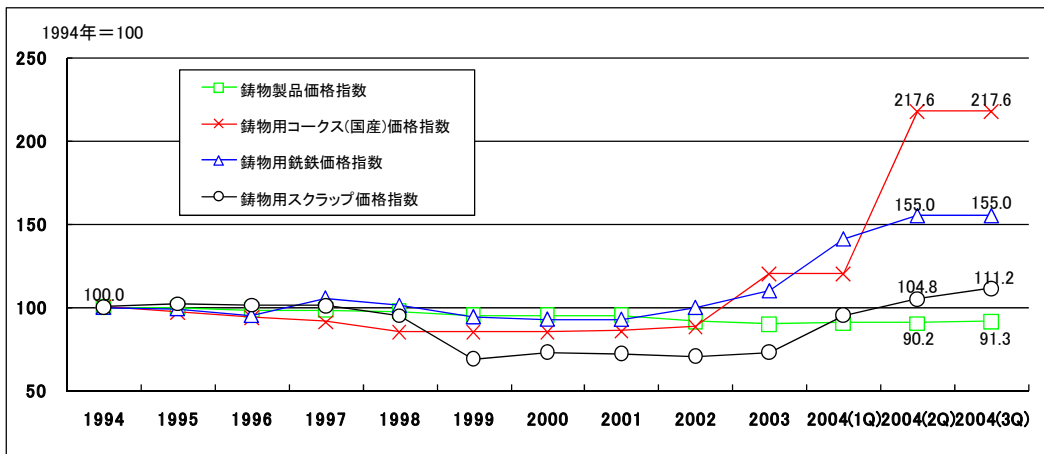


図2 鋳物製品価格と鋳物原材料価格の推移 (指数)

(財) 産業研究所『鋳物用原材料問題への対応に関する調査研究』より)

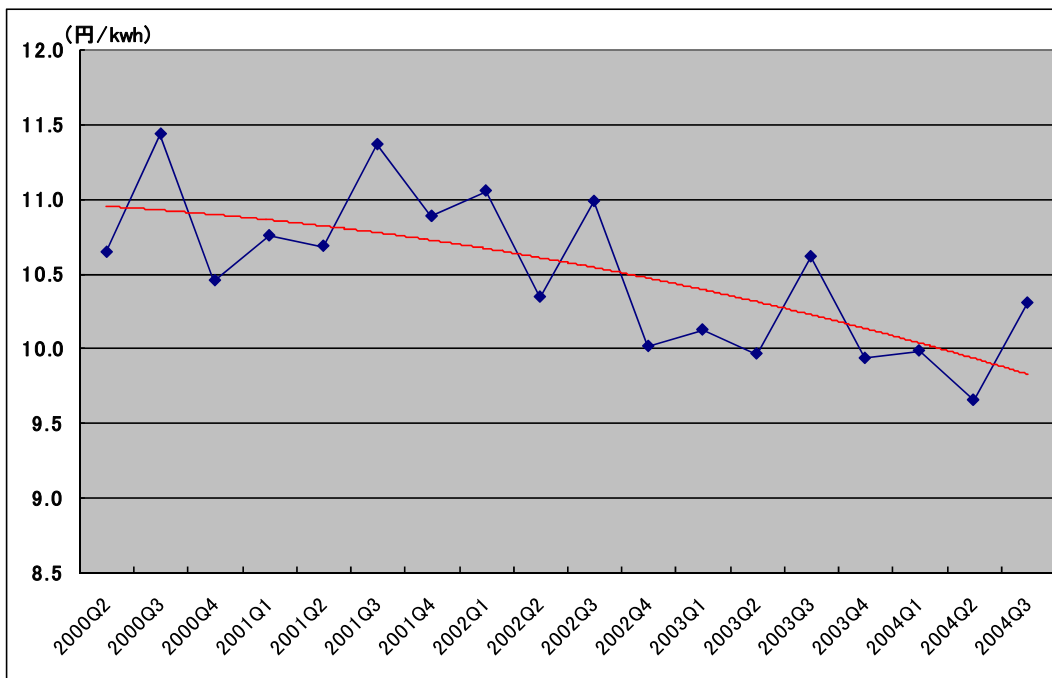


図3 産業用電気料金の推移

(資源エネルギー庁「平成15年度電力需要調査(価格調査分)の概要」より)

本研究は、電気加熱により鉄スクラップをリサイクルする誘導炉利用が、キュポラに比べて環境性と経済性においてどの程度まで優位であるのかを定量的に明らかにすることを目的とする。具体的には積上げ法と産業連関分析法をハイブリッドにしたLCA手法を用いてキュポラと誘導炉により鋳鉄を製造するプロセスを対象に分析する。

## 2. 研究方法

本研究の分析法であるLCA法は、資源採掘、製造、使用、廃棄といったライフサイクルの各工程について、資源消費と環境負荷を定量的に分析し、製品や技術のライフサイクル

にわたる社会への環境影響を科学的に評価する環境診断法である。

## 2.1 範囲の定義

LCA は「目的と範囲の定義」、「インベントリ分析」、「影響評価」、「結果の解釈」といった手順で進められる。本稿では「インベントリ分析」を軸に進める。

## 2.2 インベントリ分析

インベントリ分析は、LCA の中心的な評価である。インベントリ分析には積み上げ法と産業連関分析法の 2 種類があり、それぞれ長所と短所がある。本稿ではこの 2 方法を組み合わせて分析を行う。

### 2.2.1 積み上げ法

積み上げ法とは、ひとつひとつのプロセスや素材に対してその環境影響をボトムアップ式に足し合わせながら評価を行う手法である。製造時の要素  $l$ 、利用時の要素  $m$ 、廃棄・リサイクル時の要素  $n$  からなる製品の環境負荷の総和  $E$  は、(1)式のように個々の要素の物理量に環境負荷原単位を乗じて求められる。

$$E = \sum_l^l mp_l \cdot em_l + \sum_j^m mc_j \cdot ec_j + \sum_k^n mr_k \cdot er_k \quad (1)$$

$mp_l$ : 製造時における  $l$  要素の物理量

$em_l$ : 製造時における  $l$  要素の環境負荷原単位

$mc_j$ : 利用時における  $j$  要素の物理量

$ec_j$ : 利用時における  $j$  要素の環境負荷原単位

$mr_k$ : 廃棄・リサイクル時における  $k$  要素の物理量

$er_k$ : 廃棄・リサイクル時における  $k$  要素の環境負荷原単位

### 2.2.2 産業連関分析法

産業連関分析法とは産業連関表と産業に係る統計資料、環境負荷データを利用して、財の直接・間接の投入エネルギーや環境負荷をトップダウンで求めていく方法である。

ここで、 $i$  部門で直接排出された  $CO_2$  量を  $C'_i$  として  $i$  部門の生産額あたりの  $CO_2$  排出量 (以下、排出原単位) を  $C_i = C'_i / X_i$ 、レオンチェフ逆行列の各要素を  $B_{ij}$ 、 $j$  部門の最終需要を  $F_j$ 、とすると、 $F_j$  による直接・間接的な  $CO_2$  排出量  $G_j$  は、

$$G_j = \sum_{i=1}^n C_i B_{ij} F_j \quad (2)$$

で求められる。

### 2.2.3 分析方法

積み上げ法は精度が高い詳細な分析が可能であり、環境負荷の度合いが各プロセス毎に明確で、その後の改善方法を検討することが簡単であるなどの長所がある。しかし、調査方

法によってデータのばらつきが大きい。また調査項目に限界があり、各プロセスを全て把握するのは現実的には不可能である。

一方、産業連関分析法は、産業連関表を用いた経済計算であり、各プロセスのエネルギー・環境負荷を全てで求めることができる。短所としては新製品やリサイクルのように現在の産業連関表の部門に含まれていないものを分析することが難しいこと、得られた値はある部門で生産されたすべての財についての平均値であるため市場の個々の商品进行分析することが困難であることなどが挙げられる。しかし複雑に関連する全産業間の取引関係を網羅しているため、1プロセスを超えて、積み上げ法では追い切れない他のプロセスや産業にまで遡る間接的な影響を原理的には全て把握することができる。

以上を踏まえ、本稿では、ヒアリング調査により、可能な限り詳細なデータ入手に努めるものとし、積み上げ法を分析方法の柱とする。そして積み上げ法で把握しきれない部分について産業連関分析法を用いて補うものとする。

### 3. キュボラ・誘導炉の経済性比較

#### 3.1 ヒアリング調査と分析の前提条件

2回にわたる現地調査と数回にわたるヒアリング調査を実施し収集した情報とデータをもとに、経済性の比較を行った。本章ではその結果について述べる。なお、調査内容は下記のとおりである。

##### (1) 設備の基本的な事項

生産能力、製品、操業状況

##### (2) 設備も含めたCO<sub>2</sub>、エネルギー消費、コストを算出するための情報

1) 炉の素材構成(鋼板、耐火煉瓦等)とそれぞれの素材の重量

2) 製品を製造する際の原料、エネルギーの投入、製品、副次生成物(スラグ)など、マスバランスとエネルギーバランスに関する情報

3) 設備費、原料費、エネルギー費、人件費、修繕費

4) 設備の耐用年数、償却期間

5) 一般的電力料金契約形態(夜間電力利用のケースがあるか)

調査を踏まえ、分析の前提を下記のとおり定めた。

##### (1) キュボラ

###### 1) 炉種(溶解能力)

・ 2 t キュボラ (2基) 交互溶解 (2t/h)

・ 年間出湯量 4480 t /年

###### 2) 電力費

・ 契約電力 250 kW (高圧電力 A)

基本料金：1233.75 円

電力量料金：(夏季) 11.84 円、(その他季) 10.76 円

・ 電力生産原単位 22kWh/ t

・ 年間電力使用量 = 電力生産原単位 × 年間出湯量

$$= 98,560\text{kWh/年}$$

3) 炉材費用：280 万円/年

(2) 誘導炉

1) 炉種（溶解能力）

- ・ 1 t /600 kW 高周波炉（2 炉 2 電源）同時溶解
- ・ 年間出湯量 4480 t /年

2) 電力費

- ・ 契約電力 1400 kW（高圧電力）

基本料金：1732.5 円

電力量料金：（夏季）10.69 円、（その他季）9.72 円

- ・ 電力生産原単位 570kWh/ t
- ・ 年間電力使用量＝電力生産原単位×年間出湯量  
＝ 2,553,600kwh/年

3) 炉材費用：540 万円/年

(3) キュボラ・誘導炉共通

1) 年間操炉費：16,128,000 円

- ・ 人員 3 名、時間単価 2,400 円

2) 電力契約

力率 99%、補機電力 200 kW、力率割引 0.86

契約基本料金＝基本料金× 0.86（力率割引）

3) 夜間運転はなし

4) 1 日 8 時間、年間 280 日操業（8h/日、280 日/年）

5) 耐用年数：12 年間

前提条件設定にあたり、特記事項を以下に記す。

溶解能力（年間出湯量）をキュボラと誘導炉で同一とした。炉材費用は耐火物交換などの補修費である。電力費は東京電力の電気料金体系（平成 19 年時点）を適用した。夜間運転を行っている鋳物工場もあるが、メーカーの大工場など、近隣の騒音に配慮する必要のない炉であり、炉の大部分を占める中小工場は昼間操業であることから夜間運転はなしとした。コークス単価は近年、上昇が大きい、ヒアリング調査を行った時点では 70 円台で推移していた。キュボラのコークス比はそれぞれの工場や操業状況等で 12%～18%とばらつきがあるがこの規模の炉で多い 15%を基準と定めた。以上より、キュボラ操業におけるコークス比 15%、コークス単価 70 円/kg のケースを基本パターンとして設定した。

キュボラのコークス比を 15%とし、コークス単価 70 円/kg のケースについて 12 年間のライフサイクルコストを誘導炉と比較した結果を表 1 に示す。

表 1 ライフサイクルコスト一覧

ライフサイクルコスト(12年)		キュボラ①	誘導炉②	①－②
①	イニシャルコスト(円)	24,000,000	38,000,000	-14,000,000
②	ランニングコスト(円)/年	78,539,368	71,999,400	6,539,968
③	12年分ランニングコスト(円)	942,472,419	863,992,800	78,479,619
①+③	ライフサイクルコスト(円/12年)	966,472,419	901,992,800	64,479,619

### 3.2 資本コスト化後の経済性比較分析

次にこれまで得られた結果を資本コスト化して比較する。

#### 3.2.1 現在価値換算

将来の時点で発生する費用や便益は、現時点で発生するものに比べ価値が小さいため、割引率を使って、現在価値に割り引く必要がある。耐用年数が 12 年の場合、現在価値 NPV は式(3)によって換算することができる。

$$NPV = \sum_{i=1}^{12} (c_i - c'_i) / (1 + r)^i \quad (3)$$

r : 割引率

c : トータルコスト

トータルコスト c は式(4)で表わされる。

$$c = CC \cdot a + OC_t + MC_t + COK_t + EC_t \quad (4)$$

CC : 設備（建設）費

a : 年経費率

OCt : 操炉費

MCt : 修繕費

COKt : コークス費

ECt : 電力費

最初に固定費（CC）に係る部分であるが、年経費率 a は、減価償却費 8.3%、金利 3%、固定資産税率 1.4%の合計で 12.7%とした。固定資産税率において保険代、諸費は今回除いている。次に可変費（OCt、MCt、COKt、ECt）に関してであるが、操炉費および修繕費のエスカレーション率は 2%、コークス費、電力費の物価上昇率は 0%として算定した。割引率を 3%としてキュボラと誘導炉の 12 年間の総費用を現在価値換算し、コークス比 15%の場合について単価別に比較すると図 4 のようになる。

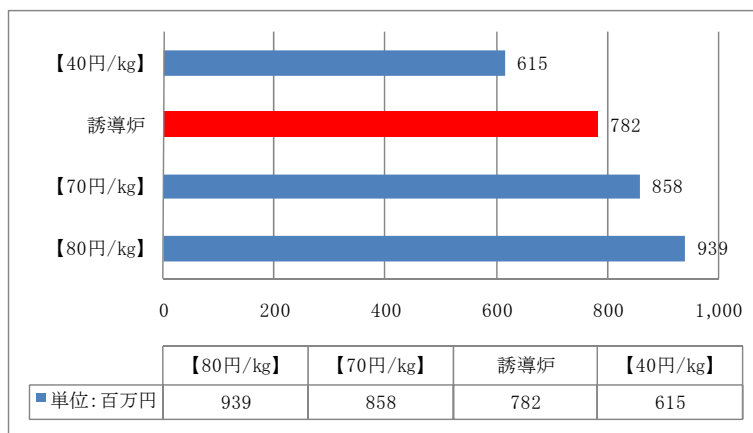


図 4 コークス単価変動による経済性比較（12 年間：コークス比 15%：現在価値換算後）

### 3.2.2 キュポラと誘導炉の損益分岐点

コークス単価が変化した場合について、経済性の比較をまとめたものが図5である。誘導炉とキュポラで損益が分かれる分岐点はコークス比12%のキュポラでコークス単価70円台、同15%のキュポラで60円台、同18%のキュポラで40円台という結果が得られた。

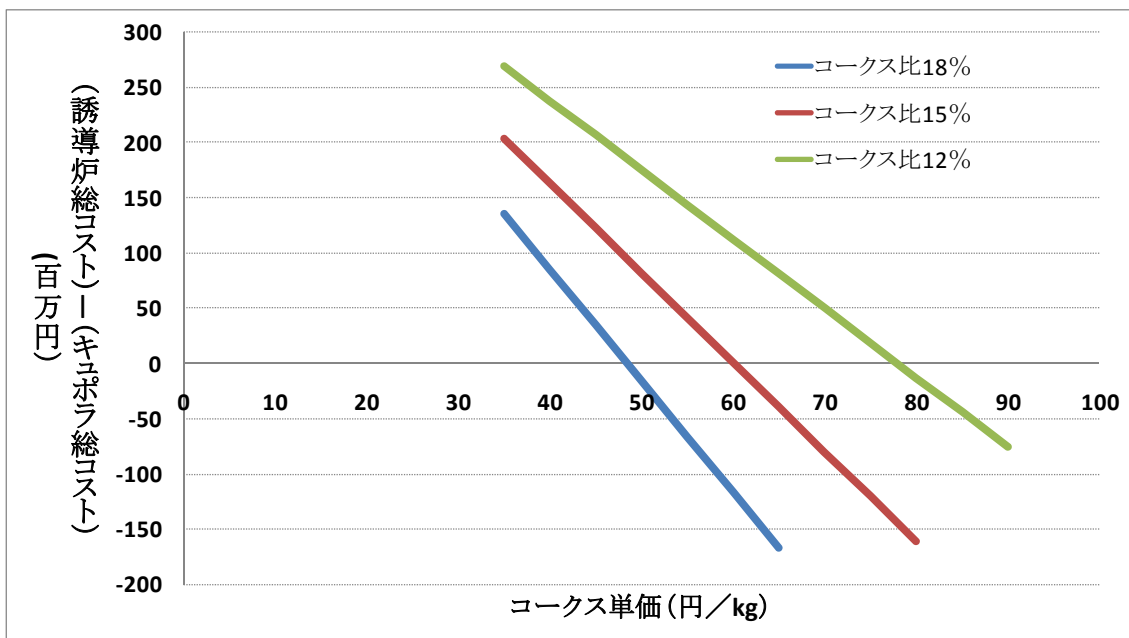


図5 コークス単価と損益分岐点

## 4. 積み上げ法によるキュポラ・誘導炉の環境性比較分析

### 4.1 設備起源のCO<sub>2</sub>発生量

環境性の比較は、CO<sub>2</sub>の排出量を比較検討の対象とする。CO<sub>2</sub>の排出は設備起源と運転起源に大別できる。最初に設備起源のCO<sub>2</sub>排出量であるが、ヒアリング調査により得られたキュポラ・誘導炉の素材構成に関わるデータに環境負荷原単位を乗じてそれぞれの設備起源のCO<sub>2</sub>発生量を求めた。

### 4.2 運転起源のCO<sub>2</sub>発生量

次に運転起源のCO<sub>2</sub>排出量であるが、運転の様々な過程からCO<sub>2</sub>は発生する。それらはキュポラと誘導炉で大差ないと仮定し、比較の中にもめないものとした。キュポラと誘導炉について1年間および12年間運転した際のCO<sub>2</sub>発生量をコークス比別に求めたものを表2に示す。なおCO<sub>2</sub>排出原単位は12年間変化しないと仮定した。

表 2 運転起源の CO<sub>2</sub> 発生量

キュボラ						
コークス		電力量	1年間 CO <sub>2</sub> 排出量	12年間 CO <sub>2</sub> 排出量		
コークス比	使用量				CO <sub>2</sub> 排出量	CO <sub>2</sub> 排出量
%	t	kWh	t-CO <sub>2</sub>	t-CO <sub>2</sub>		
12	538	98,551	1,784	21,402		
15	672	98,551	2,220	26,643		
18	806	98,551	2,657	31,884		

誘導炉						
コークス		電力量	1年間 CO <sub>2</sub> 排出量	12年間 CO <sub>2</sub> 排出量		
コークス比	使用量				CO <sub>2</sub> 排出量	CO <sub>2</sub> 排出量
%	t	kWh	t-CO <sub>2</sub>	t-CO <sub>2</sub>		
-	-	2,553,372	945	11,337		

※CO<sub>2</sub>排出原単位 電気 0.37kg-CO<sub>2</sub>/kWh 電力生産原単位 誘導炉 570kWh/t  
 " コークス 3.25kg-CO<sub>2</sub>-t/t " キュボラ 22Wh/t

※環境省「平成14年度温室効果ガス排出量算定方法検討会」  
 および電気事業連合会「電気事業における環境行動計画」(2007)より

#### 4.3 キュボラコークス比変化による環境性の比較

図 6 はコークス比別に設備起源、運転起源トータルで CO<sub>2</sub> 排出量を誘導炉と比較したものである。設備起源、運転起源ともにキュボラの CO<sub>2</sub> 排出量は誘導炉より多い。耐用年数 12 年間で比較すると比較すると、同一規模の炉において、誘導炉はコークス比 12% のキュボラに対し、47%、同 15% のキュボラに対し 57.3%、同 18% のキュボラに対し 64.3% の CO<sub>2</sub> 削減効果がある。

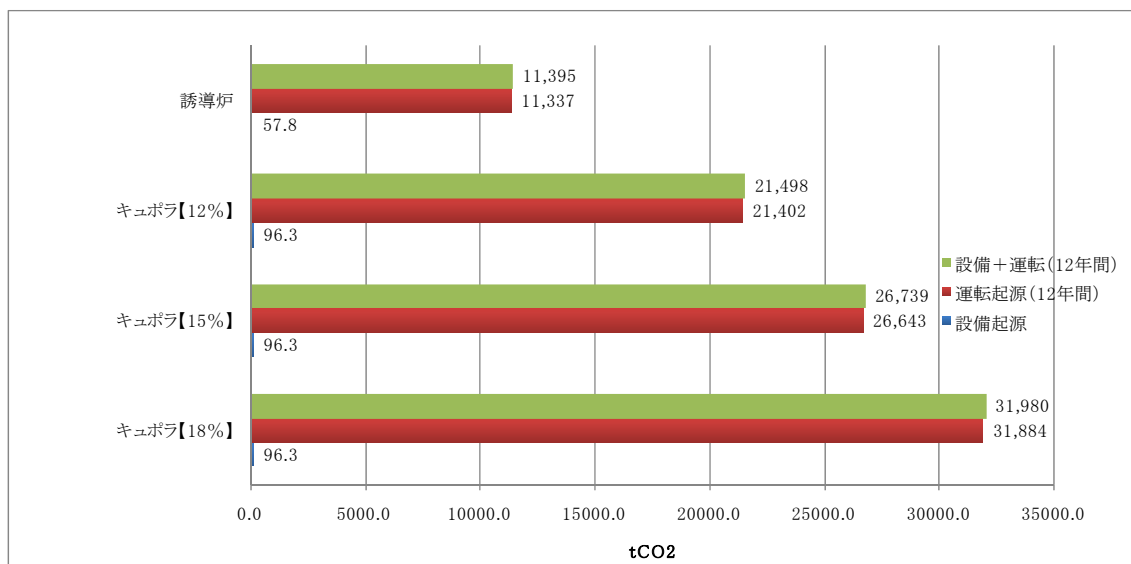


図 6 キュボラのコークス比変化による CO<sub>2</sub> 排出量の比較 (12 年間：設備＋運転)



## 5. 産業連関分析法によるキュポラ・誘導炉の間接影響分析

本章では産業連関分析法により鑄鉄造品の環境負荷分析を行い、積み上げ法で評価しきれなかった環境負荷を算出し、可能な限りの環境負荷を推計することを試みる。

### 5.1 積み上げ法と産業連関分析法の組み合わせによる環境負荷の推計

産業連関分析法で求まる環境負荷を  $Y_i$ 、積み上げ法で求まる環境負荷を  $Y_p$ 、 $Y_i$  に対応する積み上げ法の部分（直接投入）を  $Y_p^*$  とすれば、積み上げ法の評価に入っていない環境負荷  $Y^*$  は式(5)のように表わされる。

$$Y^* = Y_i - Y_p^* \quad (5)$$

そして求めるべき最終的な環境負荷を  $Y$  とすると

$$Y = Y_p + Y^* \quad (6)$$

である。

### 5.2 鑄鍛造品全体の環境負荷

産業連関分析法による直接・間接的な  $CO_2$  排出量は前出の式(2)により求められるが、これは最終財としての環境負荷である。鑄鍛造品は中間財であり、二次加工段階の「自動車部品・同付属品部門」や「その他の一般機械器具及び部品部門」等で多くが最終消費され、最終財としての環境負荷は大きくなる。本稿では鑄鍛造品部門への産業連関表各部門からの投入金額でウェイト付けした原単位を用いることにより、中間財としての実態を反映させた環境負荷を推計することを試みる。すなわち各部門からの投入金額で加重平均した鑄鍛造品の原単位を  $C_i^2$  とすれば中間財としての実態を反映した鍛造品の  $CO_2$  排出量  $G_j^2$  は式(7)で表わされる。

$$G_j^2 = \sum_{i=1}^n C_i^2 B_{ij} F_j \quad (7)$$

### 5.3 キュポラ・誘導炉による $CO_2$ 排出量の導出

#### 5.3.1 積み上げ法による環境負荷の除外

5.2 で求めたものには積み上げ法で求めた環境負荷が含まれているため、その部分を除かなくてはならない。産業連関表では鑄鍛造品は93の項目から構成されている。キュポラはそこから積み上げ法で推計された9項目、誘導炉は11項目の環境負荷を差し引いた。

#### 5.3.2 キュポラ・誘導炉の環境負荷の配分

産業連関表の鑄鉄造品には、5品目が分類されているが、キュポラ・誘導炉で生産されるのは鑄鉄管、鑄鉄品の2品目である。この2品目の鑄鉄造品における割合を産業連関表

の付表である物量表から63%と推計し、積み上げ法で推計した要素を差し引いた後の環境負荷（Y'）に対し、0.63を乗じた。さらにキュポラと誘導炉の生産の割合は6:4であることからキュポラは0.6、誘導炉は0.4を乗じキュポラと誘導炉の環境負荷を配分、推計した。

### 5.3.3 積み上げ法評価部分を除いたキュポラ・誘導炉の環境負荷の算出

5.3.2で得られた値は1年間の環境負荷である。積み上げ法の生産規模（4480t）と合わせるために、生産量（t）当たりのCO<sub>2</sub>原単位に4480を乗じた。さらに12倍し耐用年数分のCO<sub>2</sub>発生量を推計した。これが積み上げ法で求めたCO<sub>2</sub>発生量分を除いた産業連関分析法によるCO<sub>2</sub>排出推計量である。

### 5.3.4 キュポラ・誘導炉によるCO<sub>2</sub>排出量の推計

キュポラと誘導炉における積み上げ法と産業連関分析法を組み合わせ導かれたCO<sub>2</sub>排出量を図7に示す。これは式(6)のYの値に相当する。

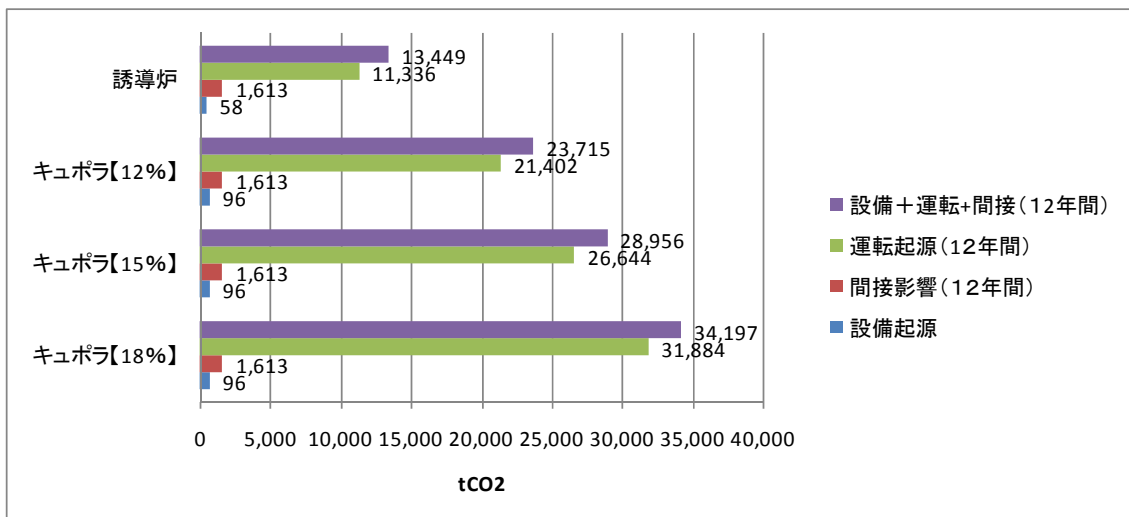


図7 積み上げ法と産業連関分析法の組み合わせ（ハイブリッド法）で導かれたCO<sub>2</sub>排出量（12年間、設備・運転・間接全て含む）

## 6 おわりに

溶解能力が同規模のキュポラと誘導炉で比較すると、初期投資（イニシャルコスト）で約1,400万円の差がある。しかし、耐用年数12年間でみると、初期投資（設備費）の占める割合は少なく、コストのほとんどを占めるのはランニングコストである。コークスの単価が長期的に上昇傾向で推移している現状では、誘導炉はキュポラに対して経済性で優位になってきている。価格変動が大きいコークスに比較して、電気料金の変動は小さいため、長期に亘り燃料価格の影響を受けにくい安定した操業も可能である。

環境性では、誘導炉の明確な優位性が得られた。環境性について、設備起源は大きな差はない。環境性の差異は運転起源の部分によるところが大きい。

誘導炉の環境の優位性（外部経済）を市場メカニズムに織り込む制度の普及・拡大が望まれる。

#### 参考文献

- 1) 総務省編『平成 12 (2000) 年産業連関表』、全国統計協会連合会、2004 年。
- 2) 内山洋司『エネルギー工学と社会』、放送大学教育振興会、2003 年。
- 3) 内山洋司, 萩原啓太『コージェネレーションシステムの環境負荷と限界コストの分析』  
Journal of the Japan Institute of Energy, 84, p. 760-766, 2005 年。
- 4) (財) 産業研究所『鋳物用原材料問題への対応に関する調査研究』・同参考資料『高周波誘導炉操業の現状』2007 年。
- 5) 日本鋳物協会編『キュポラハンドブック新版』1968 年。
- 6) 資源エネルギー庁「平成 15 年度電力需要調査 (価格調査分) の概要」  
[www.meti.go.jp/kohosys/press/0004823/0/031224denryoku.pdf](http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0004823/0/031224denryoku.pdf)
- 7) 環境省「平成 14 年度温室効果ガス排出量算定方法検討会」  
[www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/h1408/index.html](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/kento/h1408/index.html)
- 8) 電気事業連合会「電気事業における環境行動計画」[www.fepc.or.jp/env/report/2007.pdf](http://www.fepc.or.jp/env/report/2007.pdf)