

銅の混入を制約要因とした循環型社会における 鉄スクラップリサイクルの定量化モデル

角館 慶治*・足立 芳寛*²・鈴木 俊夫*²

A Quantitative Macro Model of Steel Scrap Recycling Considering Copper Contamination for the Sustainable Society

Keiji KAKULATE, Yoshihiro ADACHI and Toshio SUZUKI

Synopsis : The macro model for analysis of the steel mass flow in Japan is proposed and the problems for realizing the environmentally sustainable society are analyzed. In the model, the steels are classified into four types; converter steel for machinery, converter steel for construction, electric furnace (EF) steel for machinery and EF steel for construction and they are assumed to be discharged from the society in accordance with lifetime distributions. The promotion of recycling increases the production of EF steel and its impurity concentration. Consequently, the amount of the EF steel supplied for machinery use is limited by the increase of copper concentration and it becomes necessity to reduce the copper contamination in post-consumer scraps in order to promote recycling. The goal contamination ratio is estimated from the calculation result on the scenario in which recycling ratio is assumed to be 100%. The reduction amount of CO₂ emission by introducing the new technology to reduce copper contamination is calculated and it is converted to the cost assuming the CO₂ international emission trading, which could be invested to the development of the new technology. It is shown that the investable cost is in the range from 8.3 to 30 billion yens per year.

Key words : steel; recycling; copper contamination; population balance model; CO₂ emission; international emission trading.

1. 緒言

気候変動枠組条約締約国会議など近年の地球環境問題へ具体的な取り組みの中、循環型社会への移行の必要性が増している。循環型社会の実現のためにはリサイクルの促進が必要である。しかし、一般的に素材のリサイクルにおいては、回収時の不純物混入による品質劣化が問題となる。古くからリサイクルされてきた鉄鋼については、トランプエレメントと呼ばれる難分離性の不純物がよく知られている。中でも銅は代表的な元素で、加工性などを劣化させる¹⁾。近年ではスクラップ鉄を主原料とする電炉鋼中銅濃度の上昇が懸念されている。リンやケイ素などの他元素の添加により、銅混入にも耐えられるタイプの鉄鋼材料についての研究がされている²⁻⁴⁾。しかし実用にはいたっておらず、今のところスクラップ回収時の分離が現実的であろう。鉄鋼はその蓄積量に比例して社会から排出される仮定によるマクロモデルが戸井ら⁵⁾により構築され、電炉鋼中の銅濃度が解析されている。しかし、製品の排出量はその蓄積量ではなく、使用年数や使用パターンに依存している。加えて、銅混入の度合いは鉄鋼の用途に依存する。それゆえ社会内部で使用年数を変数として含み、鉄鋼用途の違いが区別される正確なモデルが鉄鋼リサイクルの問題を明らかにするために必要である。

著者らは、前々報において、鋼材は寿命分布に従い社会から排出されるとした日本鉄鋼産業のマクロフローモデルを提案し、社会中蓄積量、リサイクル量、電炉鋼中銅濃度を予測した⁶⁾。また、リサイクル率の向上がCO₂排出量を削減することも示した。前報⁷⁾では、銅の混入経路を詳細に追跡するため、用途と製法の違いから鋼材を4種類に分類し、銅混入率を推定した。また、主に建設用に用いられる電炉鋼の生産量増加による建設用への供給過剰と機械用鋼の許容銅濃度の点から、建設用に供給過剰な電炉鋼を機械用に供給可能な年数とリサイクル率および銅混入率の関係を求め、その結果から、リサイクル率向上のためにはリサイクル時に混入する銅の削減が必要不可欠であることを示した。

銅混入削減のためには新たな技術やエネルギーの投資が必要となる。これらの新規投資によるCO₂発生量がリサイクル率上昇によるCO₂削減量以下であれば、新規投資にはメリットがある。前報におけるモデルを元に、リサイクル率100%を想定した循環型社会シナリオと現状を維持するシナリオについて計算を行い、その計算結果の比較から新技術投資に許されるCO₂排出量について検討する。また、排出権取引によるCO₂価格を導入した場合の銅混入削減技術に投資可能な費用について議論する。

平成12年7月17日受付 平成12年8月29日受理 (Received on July 17, 2000; Accepted on Aug. 29, 2000)

* 東京大学大学院生 (Graduate Student, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

*² 東京大学大学院工学系研究科 (Graduate School of Engineering, The University of Tokyo)

2. 解析モデル

鉄鋼はその製法によって鉄鉱石から製造される転炉鋼と、スクラップから作られる電炉鋼の2つに大別される。また、平均寿命の点から2つのグループに大別される。ひとつは約10年で排出される機械用鋼で、自動車、容器、鉄道車両、船舶、電気機械、家庭・事務電気機械などが含まれる。もうひとつは平均寿命が約35年の建設用鋼で、建築物や橋などに用いられる形鋼などである。上述の分類により、本モデルでは鋼材を機械用転炉鋼、建設用転炉鋼、機械用電炉鋼、建設用電炉鋼の4種類に分類する。転炉鋼は加工性に優れ、主に機械用に用いられる。一方、電炉鋼はリサイクル過程において不純物が混入するため加工性に劣り、主に建設用に用いられる。日本では近年老廃スクラップ発生量が増加し、今後、電炉鋼生産量は増加すると予想される。その結果、電炉鋼は建設用に供給過剰となり、機械用に転用されることになる。しかし、機械用鋼の加工性を保証するため、電炉鋼の銅濃度には上限が存在する。それゆえ、機械用に転用される量と機械用鋼の許容銅濃度を満たす電炉鋼量のバランスを調べる必要がある。

日本の鋼材マスのフローの模式図を Fig. 1 に示す。転炉鋼と電炉鋼は鋼材として輸出入された後、製造業で消費される。電炉鋼の一部は機械用に使用され、のこりは優先的に建設用に使用される。機械製品の製造時に出る加工スクラップは転炉鋼材からなるとし、すべてリサイクルされる。さらに、自動車などの機械製品に含まれる形で転炉鋼は輸出入される。寿命により社会から排出された製品中の鉄鋼は、解体・回収などを経てリサイクルされる。ここで、リサイクル率、 $r_{re}(t)$ は社会から排出された鋼材量に対して回収される老廃スクラップ量の割合と定義される。輸出入スクラップは老廃スクラップ加工スクラップとともに電炉鋼原料となる。自家発生屑のほとんどは社内循環するので、ここでは考慮しない。銅は主に使用済み製品からの鉄回収時に混入する。建設材に混ざる銅線などは比較的容易に分離できるのに対し、電気モーターなどの機械製品に含まれ

る銅は分離処理後も残留する。そこで、Fig. 1 のように銅は機械スクラップにのみ混入するとした。なお、輸出入スクラップと全老廃スクラップの銅濃度は等しいとした。

製品は使用年数、 α 、がその寿命を超えると社会から排出されるとする。製品の寿命は製造時に寿命分布、 $g(\alpha)$ 、により与えられる。鉄鋼の使用形態に時間変化がなければ、寿命分布は鋼材の全排出量を使用年数に対して整理、規格化することにより得られる。寿命分布は製品の使用パターンにより決まり、機械用と建設用の鋼材の平均寿命は大きく異なるので、両者の寿命分布は区別する必要がある。

ここでは、ある時点での社会への鋼材流入出の収支と社会における使用年数を考慮するので、解析にはポピュレーションバランスモデル^{8,9)}を用いる。ポピュレーションバランスモデルは、外部座標（時間）と内部座標（使用年数）からなる空間内の物質分布の収支を取る手法である。なお、本解析モデルでは、製品の使用年数は社会流入時に0であり、時間の経過につれ大きくなる。その結果、製品群は使用年数に対して分布し、寿命分布に従って排出される製品群は、社会中と同様に分布をもって排出されるとする。

3. 解析方法

3.1 ポピュレーションバランスモデル

ポピュレーションバランスの式を導くために、入力である国内消費量と出力である排出量を各種鋼材について求める。粗鋼生産量、 $Q_{bs}(t)$ 、に対する鋼材輸出を差し引いた製造業消費量の割合を製造業消費率、 $r_{manu}(t)$ 、製造業消費量に対する加工スクラップ発生量の割合を加工スクラップ発生率、 $r_{ms}(t)$ 、として定義する。電炉鋼の原料是老廃スクラップ、加工スクラップおよび輸出入スクラップ、 $Q_{Elscrap}(t)$ 、からなるので、電炉鋼生産量、 $Q_f(t)$ 、は以下の式により与えられる。

$$Q_f(t) = r_{re}(t)Q_0(t) + Q_{Elscrap}(t) + r_{ms}(t)r_{manu}(t)Q_{bs}(t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで $Q_0(t)$ は社会からの鉄鋼総排出量である。加工ス

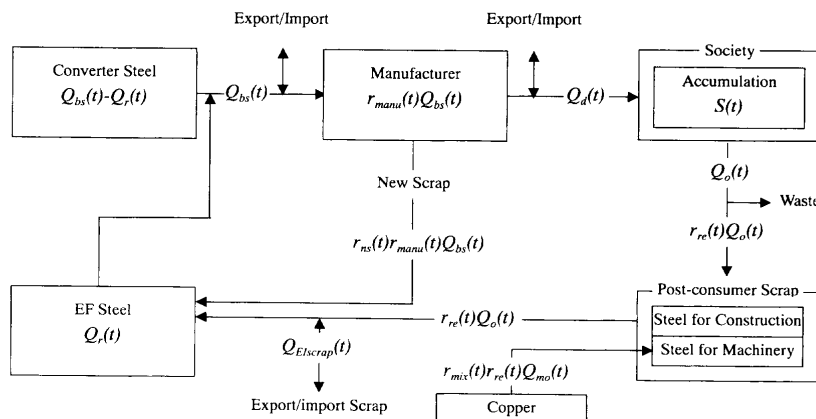


Fig. 1. Schematic diagram for macro flow of steel in Japan.

クラップを除いた製造業消費量に対する国内消費量の割合を国内消費率、 $r_d(t)$ 、として定義すると、社会中に流入する正味の製品量、すなわち国内消費量、 $Q_d(t)$ 、は次のようになる。

$$Q_d(t) = r_d(t)(1 - r_{ns}(t))r_{manu}(t)Q_{bs}(t) \dots\dots\dots(2)$$

ここでは、前報にしたがって、簡単に機械用転炉鋼に対するマスフローの導出過程を示す。まず、機械用転炉鋼の国内消費量、 $Q_{vmd}(t)$ 、を計算する必要がある。これは建設用鋼が電炉鋼によって占められるか否かにより場合分けされる。建設用電炉鋼が供給過剰とならなくても、電炉鋼の一部は機械用に消費される。この国内消費電炉鋼に対する機械用電炉鋼の割合および全国消費量に対する全建設用鋼の割合をそれぞれ機械率、 $r_{rm}(t)$ 、建設率、 $r_c(t)$ 、と定義すると、 $Q_{vmd}(t)$ は、電炉鋼が建設用鋼を占有しない場合 $(r_c(t)Q_d(t) - (1 - r_{rm}(t))r_{manu}(t)Q_r(t))$ 、

$$Q_{vmd}(t) = (1 - r_c(t))Q_d(t) - r_{rm}(t)r_{manu}(t)Q_r(t) \dots\dots\dots(3)$$

電炉鋼が建設用鋼をすべて占める場合 $(r_c(t)Q_d(t) < (1 - r_{rm}(t))r_{manu}(t)Q_r(t))$ 、

$$Q_{vmd}(t) = Q_d(t) - r_{manu}(t)Q_r(t) \dots\dots\dots(3')$$

となる。なお、上式中の下付添字 v, r, m, c, d はそれぞれ、転炉鋼、電炉鋼、機械用、建設用、国内消費を示す。

ここで、ある時刻 t における社会の可能蓄積量、 V 、に対する使用年数 α の機械用転炉鋼蓄積量の割合を鉄鋼蓄積率、 $n_{vm}(\alpha, t)$ 、と定義すると、時刻 t における使用年数 α の機械用転炉鋼蓄積量は、 $Vn_{vm}(\alpha, t)$ となる。社会中の製品はその寿命が終わると排出されるので、時刻 t における使用年数 α の機械用転炉鋼の排出量は機械用転炉鋼の蓄積量 $Vn_{vm}(\alpha, t)$ に排出率分布 $h_m(\alpha)$ をかけることにより得られる。ここで排出率分布は使用年数 α の鉄鋼蓄積量に対する排出量の割合であり、寿命分布、 $g_m(\alpha)$ 、から以下の式により導出される。

$$h_m(\alpha) = \frac{g_m(\alpha)}{1 - \int_0^\alpha g_m(x) dx} \dots\dots\dots(4)$$

社会内部で生成消滅は無いので、機械用転炉鋼蓄積量の時間変化は排出量と国内消費量の差に等しい。よって、機械用転炉鋼に対するポピュレーションバランス式は次のようになる。

$$V \frac{\partial n_{vm}(\alpha, t)}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{d\alpha}{dt} n_{vm}(\alpha, t) \right) = Q_{vmd}(t)n_{vm}(0, t) - h_m(\alpha)Vn_{vm}(\alpha, t) \dots\dots\dots(5)$$

社会から排出されるまで鉄鋼製品の使用パターンは変化

しないので、 $d\alpha/dt=1$ となる。社会流入時における鉄鋼の使用年数は 0 とみなされるので、 $n_{vm}(0, t) = \delta(0, t)$ 、($\delta(0, t)$ はディラックのデルタ関数) となり、式(5)は

$$V \frac{\partial n_{vm}(\alpha, t)}{\partial t} + V \frac{\partial n_{vm}(\alpha, t)}{\partial \alpha} = Q_{vmd}(t)\delta(0, t) - \frac{g_m(\alpha)}{1 - \int_0^\alpha g_m(x) dx} Vn_{vm}(\alpha, t) \dots\dots\dots(6)$$

となる。同様にして、建設用転炉鋼、機械用電炉鋼、建設用電炉鋼に対するポピュレーションバランス式が導出できる。

$$V \frac{\partial n_{ij}(\alpha, t)}{\partial t} + V \frac{\partial n_{ij}(\alpha, t)}{\partial \alpha} = Q_{ijd}(t)\delta(0, t) - \frac{g_j(\alpha)}{1 - \int_0^\alpha g_j(x) dx} Vn_{ij}(\alpha, t) \dots\dots\dots(6')$$

($i=v, r, j=m, c$)

時刻 t での機械用転炉鋼の全排出量、 $Q_{vmo}(t)$ 、は、排出量を使用年数 α に関して $\alpha=0$ から $\alpha=t$ まで積分することにより得られる。

$$Q_{vmo}(t) = V \int_0^t h_m(\alpha)n_{vm}(\alpha, t) d\alpha \dots\dots\dots(7)$$

社会からの総排出量は式(7)から得られる各種鋼材の排出量の合計であるので、

$$Q_o(t) = \sum_{i,j} \left(V \int_0^t h_j(\alpha)n_{ij}(\alpha, t) d\alpha \right) \quad (i=v, r, j=m, c) \dots\dots\dots(8)$$

となる。また、社会の総蓄積量、 $S(t)$ 、は各種鋼材の蓄積量の使用年数 α に関する積分すべての合計となり、

$$S(t) = \sum_{i,j} \left(V \int_0^t n_{ij}(\alpha, t) d\alpha \right) \quad (i=v, r, j=m, c) \dots\dots\dots(9)$$

で表される。初期条件 $n_{ij}(\alpha, 0) = 0$ ($\alpha > 0$) および $n_{ij}(0, t) = Q_{ijd}(t)/V$ で、入出力の $Q_o(t)$ が等しくなるように繰り返し計算を行い、(6')式を解くことにより蓄積量と各鋼材流量が求められる。

3.2 銅混入

電炉鋼中の銅濃度を計算するためには、リサイクルにより新たに混入する銅の量と電炉鋼中にすでに含まれている銅の量を考慮しなければならない。機械老廃スクラップに対して混入する銅の割合を混入率、 $r_{mix}(t)$ 、とすると、新たに混入する銅の量、 $I_n(t)$ 、は

$$I_n(t) = r_{mix}(t)r_{re}(t)(Q_{vmo}(t) + Q_{rmo}(t)) \dots\dots\dots(10)$$

で与えられる。なお、転炉鋼の銅濃度はゼロ、電炉鋼は銅が混入したスクラップから製造されるのでその濃度は時間により変化することに注意する必要がある。そこで、使用年数 α の電炉鋼の平均銅濃度、 $c(\alpha, t)$ 、を定義し、時刻 t における使用年数 α の電炉鋼のすべてに含まれる銅量を求める必要がある。結果として、時刻 t における排出された電炉鋼中に含まれている銅の量、 $I_s(t)$ 、は

$$I_s(t) = r_{re}(t) \int_0^t c(\alpha, t) V(h_m(\alpha) n_{rm}(\alpha, t) + h_c(\alpha) n_{rc}(\alpha, t)) d\alpha \dots \dots \dots (11)$$

となる。機械スクラップに新たに混入した銅と電炉鋼にすでに含まれている銅の合計を、リサイクルされる老廃スクラップで割れば、リサイクルされる老廃スクラップ中の平均銅濃度が得られる。輸出入スクラップの銅濃度は老廃スクラップの銅濃度に等しいとしたので、新たな電炉鋼の平均銅濃度、 $c(0, t)$ 、は以下の式により得られる。

$$c(0, t) = \frac{I_n(t) + I_s(t)}{r_{re}(t) Q_0(t)} \times \frac{r_{re}(t) Q_0(t) + Q_{Elscrap}(t)}{Q_r(t)} \dots \dots \dots (12)$$

なお、不純物濃度は電炉鋼生産量に比べ十分小さいので計算簡略化のため分母に加えていない。

3.3 機械用電炉鋼の要求量と供給可能量

電炉鋼は主に建設用に使用される。しかし、生産量の増加により、電炉鋼は建設用に供給過剰となり機械用に転用される。この転用される量を機械用途への要求量、 $Q_{required}(t)$ 、とする。これは電炉鋼国内消費量から建設用鋼国内消費量を差し引くことにより得られる。

$$Q_{required}(t) = (1 - r_{rm}(t)) r_{manu}(t) Q_r(t) - r_c(t) Q_d(t) \dots \dots \dots (13)$$

また、電炉鋼を機械用に転用するには、その銅濃度は許容限界銅濃度、 c_{allow} 、以下である必要がある。この条件を満たす電炉鋼量を供給可能量とする。これまで、電炉鋼中の銅濃度を平均値として扱ってきたが、実際には銅濃度は分布している。そこで、濃度分布の確率密度関数を濃度、 x 、の関数として $f(x)$ と定義すると、供給可能量、 $Q_{available}(t)$ 、は以下ようになる。

$$Q_{available}(t) = r_{manu}(t) Q_r(t) \int_0^{c_{allow}} f(x) dx \dots \dots \dots (14)$$

循環型社会を実現するためには、供給可能量を要求量より大きくする必要がある。

4. 統計値と推測値

粗鋼生産量、輸出入スクラップ量、製造業消費率、国内消費率は統計^{10,11)}から求めた近似式を用いる(Table 1)。機

Table 1. Approximated equations for the statistics of basic steel production, manufacturer consumption ratio, domestic consumption ratio, and export/import scrap amount.

Statistics	Year	Approximated equation
Basic steel production $Q_n(t)$	1945~	$0.2 \cdot 10^7 \exp(0.2t) / (1 + 0.2 \cdot 10^{13} \exp(0.2t))$
	1945~1995	$1232 - 1.247(t + 1945) + 3.156 \cdot 10^{-4}(t + 1945)^2$
Manufacturer consumption ratio $r_{manu}(t)$	1945~	0.837
	1945~1955	1.0
Domestic consumption ratio $r_d(t)$	1955~1985	$1.0 - (t - 10) / 150$
	1985~	0.8
	1945~1960	$2.0 \cdot 10^t$
Export/import scrap $Q_{Elscrap}(t)$	1960~2000	$4.0 \cdot 10^6 - 6.0 \cdot 10^3(t - 20) / 35$
	2000~	$-2.0 \cdot 10^6$

械用鋼の許容銅濃度は熱冷延鋼板の0.1%¹⁾を用いた。機械老廃スクラップへの銅混入率には0.4%⁷⁾を用いた。機械率と国内消費率はそれぞれ15%¹²⁾、61%¹⁰⁾を用いた。また、1945年を $t=0$ とし、このときの社会蓄積量は0とした。転炉鋼生産、廃棄処理、電炉鋼生産にかかるCO₂発生量のインベントリー係数はそれぞれ0.458、0.013、0.136 C-ton/Fe-ton¹³⁾を用いた。転炉鋼生産のインベントリー係数には採鉱などにかかるCO₂発生量も考慮されており、電炉鋼生産のそれにはスクラップ処理にかかるCO₂発生量も考慮されている。総CO₂排出量は各流量とこれらインベントリー係数から計算される。

寿命分布はガンマ分布により近似し⁵⁾、機械用鋼と建設用鋼の平均寿命をそれぞれ10.06年⁵⁾、35.0年⁷⁾とし、分散をそれぞれ12.50、153.5とした⁷⁾。濃度分布の確率密度関数、 $f(x)$ 、は正規分布として近似し、期待値に電炉鋼の平均銅濃度を取り、その分散を期待値の4分の1とした⁷⁾。

5. 結果と考察

5.1 電炉鋼生産量と蓄積量

本モデルでは、建設用鋼材の国内消費量は2000年以降一定としているので、優先的に建設用に用いられる電炉鋼は生産量の増加により建設用に供給過剰となる。この供給過剰になった電炉鋼は機械用に転用する必要が生じる。この転用量を機械用途への要求量とする (Fig. 2の Required)。一方、許容銅濃度以下の電炉鋼のみが機械用に供給可能である。これを可能量とする (Fig. 2の Available)。Fig. 2のように可能量が必要量を満たせない場合、リサイクル率を下げた必要量を減らすか、混入率を下げた可能量を増す必要がある。そこで、可能量が必要量を満たすようにリサイクル率もしくは混入率が変化するとして、現状を維持することを想定した標準シナリオとリサイクル率100%を想定した循環型シナリオについて解析を行った。

標準シナリオでは、銅混入率は前報⁷⁾で推定した0.4%一

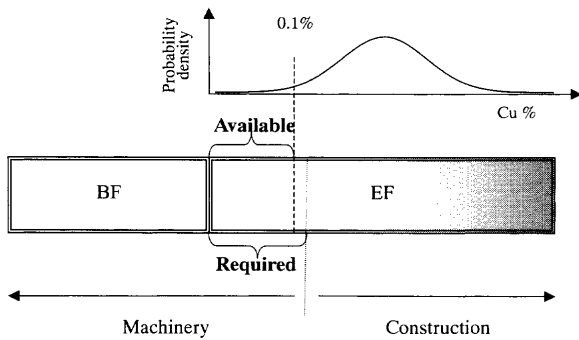


Fig. 2. Schematic diagram for the required and available amounts of recycled steel for machinery.

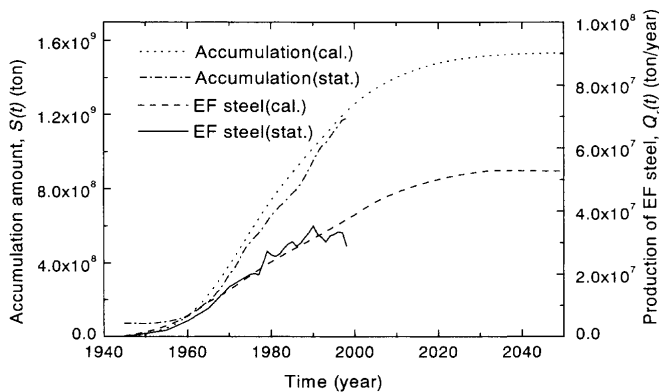


Fig. 3. Time change of the amount of accumulation and production of electric furnace steel in Japan. Solid and dash-dotted lines represent statistics and broken and dotted curves represent calculation results.

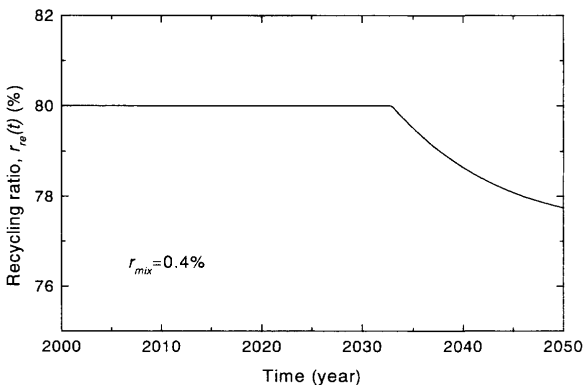


Fig. 4. Time change of recycling ratio on the standard scenario in which contamination ratio is kept to be 0.4%.

定、リサイクル率は80%¹²⁾で推移するとした。ただし、リサイクル率は可能量が必要量を満たすように変化するとした。標準シナリオによる国内蓄積量(点線)と電炉鋼生産量(破線)の計算結果を、統計値^{10,11)}(実線と一点鎖線)とともにFig. 3に示す。蓄積量の増加速度は時間の経過とともに緩やかとなり、最大蓄積量は約16億トンに達する。電炉鋼生産量は2000年以降も増加しつづけ、2050年において約5200万トンとなる。リサイクル率の時間変化をFig. 4に示す。2033年までリサイクル率は80%を保つことがで

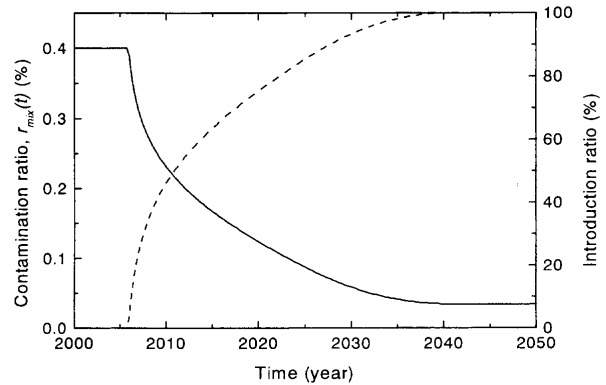


Fig. 5. Time change of contamination ratio and introduction ratio on the environmentally sustainable society scenario in which recycling ratio is 100%. Solid and broken curves represent contamination ratio and introduction ratio, respectively.

きるが、それ以降は77%に減少する。つまり2033年以降については、現状のままでは可能量が要求量を満足できない。したがって、リサイクル率を現状のまま保つためにも銅混入率削減の努力が必要となる。

循環型シナリオでは、リサイクル率は2000年から直線的に変化し、5年後に100%となるようにした。この時、銅混入率は可能量が必要量を満たすように変化するとした。銅混入率の時間変化をFig. 5に示す。2006年までは0.4%で推移するが、以降急激に減少し2040年には0.034%となりその後は一定となる。この時点で電炉鋼生産量は6500万トンに達する。ここで、従来の処理技術(ギロチン、シュレッダー、磁気分離など)に代替する新技術を想定し、従来処理技術における銅混入率を0.4%、新技術を0.034%とする。機械用鋼スクラップ量に対する新技術で処理するスクラップ量の必要割合として、新技術導入率が求められる(Fig. 5)。導入率は2006年から急激に上昇し、2040年にはすべての機械用鋼スクラップを新技術で処理することが必要になる。

5.2 CO₂排出量

1997年の気候変動枠組条約第三回締約国会議(COP3)において採択された京都議定書では、CO₂排出量削減目標達成のコストを抑えるために、共同実施、クリーン開発メカニズム、排出権取引の3つの京都メカニズムが導入された。排出権取引はCO₂排出量を価格に変えるので、リサイクル促進によるCO₂削減効果を経済的に見積もることが可能である。ただ、排出権取引の具体的な方式や、炭素トンあたりの価格はいまだ議論中である。具体的な方式としては、大きく分けてbase & credit方式とcap & trade方式が検討されている¹⁴⁾。前者はベースラインを設定してそれより削減された排出量をクレジットとして認めるもので、後者は政府により割り当てられた排出権をトレードするものである。一般に国内制度として検討されているのは後者であるが、割り当て方法と量がわからないので、ここでは前者に

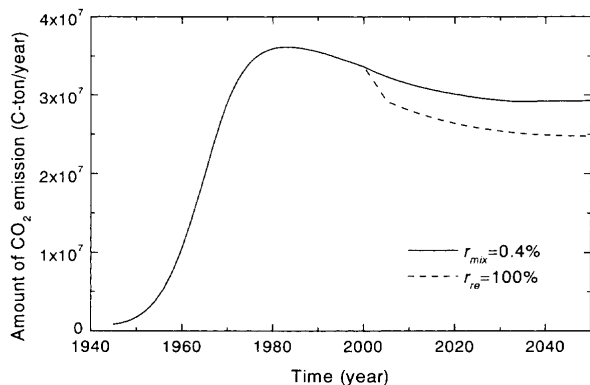


Fig. 6. Time change of the CO₂ emission amounts on standard and environmentally sustainable society scenarios.

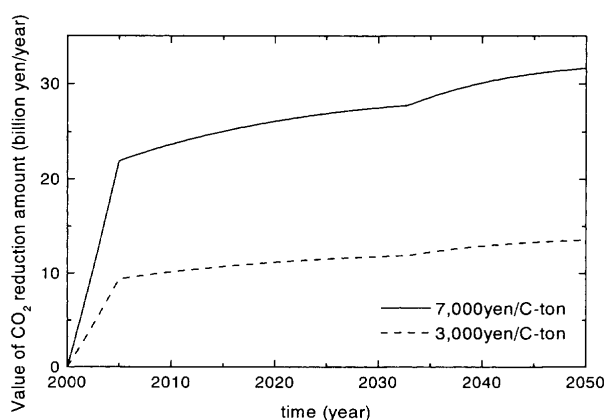


Fig. 7. Time change of the value of the CO₂ reduction amount by international emission trading. Solid and broken curves represent the values in case that trading for 7,000 yen/C-ton and 3,000 yen/C-ton, respectively.

よる算出方法を用いる。炭素トンあたりの価格は、文献¹⁵⁾ およびすでに炭素税を実施している各国（オランダ、スウェーデン、デンマーク、ノルウェー、フィンランド）のデータから、3,000円と7,000円の2パターンを想定した。標準シナリオと循環型シナリオにおけるCO₂排出量の計算結果をFig. 6に示す。循環型シナリオのリサイクル率上昇に伴いCO₂排出量は削減される。この削減量は2050年には450万トンに達する。この削減量を価格にしておいて算出した結果をFig. 7に示す。2050年には3,000円/C-tonで約135億円/年、7,000円/C-tonでは約310億円/年になる。

このモデルにおいては、スクラップ処理技術の向上が循環型社会を実現可能にするので、CO₂削減による利益をすべて処理技術向上に充てると仮定する。上述のCO₂削減量とその価格は混入率減少のための新技術導入にかかるCO₂発生量を考慮していない。電炉鋼生産のインベントリー係数には従来のスクラップ処理にかかるCO₂発生量が考慮されているので、新技術と従来技術のCO₂発生量の差が削減量以下ならば循環型社会によるCO₂削減が可能となる。新技術のCO₂発生量のほうが大きいと、価格は先ほどの見積

Table 2. The average amount of annual CO₂ reduction and its value by international emission trading.

Year	2000~2015	2015~2025	2025~2035	2035~2045
CO ₂ reduction amount (million C-ton/year)	2.78	3.72	3.94	4.29
Case 1: trading for 3,000 yen/C-ton (billion yen/year)	8.34	11.2	11.8	12.9
Case 2: trading for 7,000 yen/C-ton (billion yen/year)	19.5	26.0	27.6	30.0

Table 3. The maximum allowable CO₂ emission amount per scrap management for the new technology and its value by international emission trading.

Year	2000~2015	2015~2025	2025~2035	2035~2045
Allowable CO ₂ amount per scrap management (C-ton/Fe-ton)	0.428	0.208	0.179	0.181
Case 1: trading for 3,000 yen/C-ton (yen/Fe-ton)	1284	624	646	543
Case 2: trading for 7,000 yen/C-ton (yen/Fe-ton)	2996	1456	1510	1267

もりよりも小さくなる。ここでは、両技術の設備投資やエネルギー消費によるCO₂発生量が等しいとする。機械用鋼の平均寿命が約10年であることから、10年ごとのCO₂削減量とその価格の平均値を算出した結果をTable 2に示す。ただし、処理が開始されるのは2006年からなので、当初は2000年から2015年までの15年間の平均として計算している。この結果によれば、年間の価格（利益）は数百億円のオーダーとなる。また、10年ごとの総削減量を導入率と機械スクラップ量から得られる総処理量で割り、単位処理量あたりのCO₂削減量とその価格を算出した。これらの結果をTable 3にまとめた。電炉鋼生産のインベントリー係数よりも大きいので、新技術で消費するエネルギーは十分確保できると考えられる。

6. 結言

これまで提案してきた新規製造、リサイクル、蓄積、廃棄からなる日本の鉄鋼産業マクロフローモデルをもとにCO₂排出量を予測した。リサイクル率100%を想定した循環型社会シナリオと、現状の銅混入率で推移する標準シナリオのCO₂排出量を求め、その結果を比較した。循環型社会シナリオの実現にはCO₂排出量を削減する一方、用途面から許容できる銅混入率を0.034%に下げることが必要であることを示した。これには銅混入率を下げる新技術開発が必要となる。その費用を見積もるために、新技術は従来技術と同じCO₂排出量であると仮定した。また、排出権取引によるCO₂削減利益がすべて投資されると仮定し解析を行った。その結果、新技術に投資可能な費用総額は、年平均で80億~300億円、単位処理あたり費用ではトンあたり500円から3,000円となることを示した。以上の結果は、本解析モデルの有効性を示しており、このようなマクロモデル

を用いることにより、循環型社会を実現した場合に起こりうる問題点を明らかにし、そのための施策の検討も可能となる。

文 献

- 1) H.Katayama and Y.Mizukami: *Materia Jpn.*, **35** (1996), 1285.
- 2) K.Shibata: *Netsu Shori*, **40** (2000), 55.
- 3) S.Seo, K.Asakura and K.Shibata: *Iron Steelmaker*, **24** (1997), 51.
- 4) S.Seo, K.Asakura and K.Shibata: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 240.
- 5) A.Toi and J.Sato: *Energy and Resources*, **18** (1997), 272.
- 6) K.Kakudate, Y.Adachi and T.Suzuki: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 425.
- 7) K.Kakudate, Y.Adachi and T.Suzuki: *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **1** (2000), 105.
- 8) D.M.Himmelblau and K.B.Bischoff: *Process Analysis and Simulation: Deterministic Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1968), 56.
- 9) V.W.Uhl and J.B.Gray: *Mixing Theory and Practice*, Academic Press, New York, (1966), 41.
- 10) 鉄鋼統計要覧, 日本鉄鋼連盟, 東京, (1961~1998).
- 11) 鉄源年報, 日本鉄源協会, 東京, (1977~1999).
- 12) 平成9年度機械材料の構成とリサイクル性に関する調査研究報告書, 日本機械工業連合会, 日鉄技術情報センター, 東京, (1997), 18.
- 13) A.Toi and J.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 536.
- 14) 福西隆弘: 第1回地球温暖化対策オープンフォーラムサマリー, (財)地球環境戦略研究機関, 神奈川, (2000), 2.
- 15) D.Gusbin, G.Klaassen and N.Kouvaritakis: *Energy Policy*, **27** (1999), 833.