

日本国内におけるステンレス鋼のマテリアルフロー解析 および循環利用促進によるCO₂削減効果の評価

五十嵐 佑馬*・醍醐 市朗*・松野 泰也*・足立 芳寛*

Dynamic Material Flow Analysis for Stainless Steels in Japan and CO₂ Emissions Reduction Potential by
Promotion of Closed Loop Recycling

Yuma IGARASHI, Ichiro DAIGO, Yasunari MATSUNO and Yoshihiro ADACHI

Synopsis : Stainless steels are corrosion resistant alloys which are widely used in consumer goods and industrial equipments. Stainless steels contain scarce and energy intensive elements such as Ni, Cr, Mo, etc. So, closed loop recycling is preferable for sustainable production of stainless steel. However, some parts of stainless steel are not separate from ordinal steel scraps in recycling processes and not recycled as “stainless steel”. The objective of this study is to analyze the dynamic material flow of stainless steels in Japan and assess CO₂ emissions reduction potentials by promotion of closed loop recycling of stainless steels in the future. First, the authors analyzed material balance of input elements, i.e. Fe, Ni and Cr, in the production of stainless steels in 2002 to figure out the material flow of stainless steel which can not be obtained from statistics. The amount of post-consumer stainless steel that would come into society in the future was estimated by PBM (Population Balance Model). It was found that only 2% of post-consumer stainless steel of Fe–Cr alloys was collected as stainless steel scraps and the rest was collected as ordinal steel scrap. On the other hand, approximately 95% of post-consumer stainless steel of Fe–Ni–Cr alloys was collected as stainless steel scraps. CO₂ emissions reduction potential by the increase of 1% in closed loop recycling of stainless steel scraps of Fe–Cr alloys was estimated at 75000 t/year by using LCA.

Key words: alloying element; Substance Flow Analysis; Population Balance Model; Life Cycle Assessment; collection ratio.

1. 緒言

これまでの大量生産、大量消費、大量廃棄型の社会経済活動に起因する、エネルギー・資源の枯渇や、地球温暖化に代表される地球環境問題を緩和するために、循環型社会を構築することが不可欠となっている。

Crを10.5%以上含むことが条件であるステンレス鋼は、添加する合金元素の種類や量を変化させることにより耐食性、耐熱性、優れた機械的性質などの様々な特性を得ることのできる非常に有用な材料である。現在、日本におけるステンレス鋼の生産量は350万トン/年¹⁾であり、増加の一途を辿っている。ステンレス鋼は、冷間加工性を向上させる目的でNiを添加した、SUS304やSUS316に代表されるNi系ステンレス鋼と、Niを含まないSUS410やSUS430に代表されるCr系ステンレス鋼の2つに大きく分類することができる。これらステンレス鋼の主要合金元素であるCr、Mn、Ni、Moは、可採年数がそれぞれ116年、37年、56年、50年の枯渇性資源であり²⁾、さらに、合金元素添加のための原料であるフェロニッケル、フェロクロムの精錬には多大なエネルギーを必要とする³⁾。しかしながら、Cr系ステンレス鋼は磁性を有することから、現在、Cr系ス

テンレス鋼の一部は普通鋼材と混在して回収されており、添加元素であるNiやCrが有効に使われているとは言い難い。これらのことから、ステンレススクラップをステンレス鋼にリサイクルする閉ループリサイクルを促進し、環境負荷を削減することができると考えられる。循環利用促進による環境負荷削減効果を導出するためには、循環利用に関わるすべてのマテリアルフローの把握が必要である。

醍醐らは、鋼材のリサイクル促進を目的に、対象となる素材の動的なマテリアルフローを解析するモデルを提案している⁴⁾。ステンレス鋼では、今までマテリアルフロー解析をされた例は少ない¹⁾。また、ステンレス鋼においては先述のように、Cr系ステンレススクラップの一部が普通鋼材と区別されていないため、特に廃棄・リサイクル工程の詳細なマテリアルフローは明確になっていない。マテリアルフローの解析において、一般に、元素のフローを解析することが助力とも言われている⁵⁾。これまで、元素のフローの解析はPb⁶⁾やHg⁷⁾などの毒性のある物質や重金属の拡散を把握するために行われてきたが、ステンレス鋼のマテリアルフローの解析において、添加元素であるNiやCrの元素のフローを解析することは有用であると考えられる。

平成17年6月20日受付 平成17年8月17日受理 (Received on June 20, 2005; Accepted on Aug. 17, 2005)

* 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 (Department of Material Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

Table 1. Missing flux data and methods for obtaining the data.

Missing flux data	Methods
Generation of in-house SS scraps of Fe-Cr alloys	Estimation from Statistics and hearings with experts
Generation of in-house SS scraps of Fe-Cr-Ni alloys	
Generation of industrial SS scraps of Fe-Cr alloys	
Generation of industrial SS scraps of Fe-Cr-Ni alloys	
Generation of obsolete SS scraps of Fe-Cr alloys	
Generation of obsolete SS scraps of Fe-Cr-Ni alloys	
Generation of post-consumer SS products of Fe-Cr alloys	Population balance model(PBM)
Generation of post-consumer SS products of Fe-Cr-Ni alloys	
Consumption of Ferronickel	Material balance analysis
Consumption of Ferrochromium	

本論文では、用途の違い、添加元素の違い、回収工程の違いから、ステンレス鋼をNi系ステンレス鋼とCr系ステンレス鋼に分けた上で、国内のステンレス鋼のマテリアルフローを明確にすることを目的とする。その上で、ステンレス鋼の循環利用促進による環境負荷削減効果のポテンシャルを解析することを目的とする。

2. 解析方法

2.1 動的マテリアルフローの構築

素材のリサイクルの現状を把握し、促進による環境負荷削減効果のポテンシャルについて検討するには、対象とする素材のマテリアルフローを把握することが必要となる。系別に分類しないステンレス鋼全体としてのマテリアルフローは、統計⁸⁻¹¹⁾、文献¹⁾から把握できる。ただし、使用済みステンレス鋼材排出量については、実測できないため統計値や既往論文にデータがなく、推計する必要がある。そこで、本論文では、PBM (Population Balance Model)^{12,13)}を適用した動的分析をおこない、使用済みステンレス鋼材排出量を推計した。また、本論文で必要なNi系、Cr系別のマテリアルフローも、統計や既往論文では把握できないため、物質収支を考慮した解析により、推算を行った。本論文で推計をおこなった値とその推計手法をTable 1にまとめて示し、以下に推計手法と仮定やデータについて説明する。

2.2 Fe, Ni, Crの物質収支解析

Table 1に示したように、一部のマテリアルフローは、統計や既往研究からは得られないため、ステンレス鋼の主な化学成分であるFe, Ni, Crの含有量に着目し、その物質収支を解析することにより推計した。本解析では、ステンレス鋼生産プロセスに投入される原料を、銑鉄、フェロニッケル、フェロクロム、Ni系とCr系別自家発生スクラップ、Ni系とCr系別加工スクラップ、Ni系とCr系別老廃スクラップ、普通鋼スクラップの10種類に分類した。

生産物は、13Cr系ステンレス鋼、18Cr系ステンレス鋼、Ni-Cr系ステンレス鋼、Ni-Cr-Mo系ステンレス鋼、耐熱鋼の5種類に分類した。このような区分に分類したのは、それぞれのFe, Ni, Cr含有率が異なるためである。物質収支の解析では、まず、ステンレス鋼生産段階における10種類の原料の投入量とそれらの化学成分からFe, Ni, Crの純分の供給量を求めた。次に、5種類の生産物の生産量とそれらの化学成分からFe, Ni, Crの純分の必要量を求めた。最後に、Fe, Ni, Crの必要量と供給量の物質収支が一致することから、フェロニッケル、フェロクロムの原料投入量を求めた。用いたデータをTable 2にまとめて示す。なお、生産段階における原料の投入量は、既往論文¹⁾や統計資料¹¹⁾から得て、Ni系、Cr系別の投入量は複数の統計値から推計し、製品の生産量は、統計値¹⁴⁾から得た。また、製品の化学成分は既往論文^{15,16)}や規格値¹⁷⁾から得て、スクラップの化学成分は平均値として推計し、原料の一部の化学成分はヒアリングより得た。収集したデータは、2002年の生産量と投入量、2002年時点での規格値とした。また、複数の統計値から推計されたデータや仮定をおいたデータに関して、データごとについて以下に詳述する。

フェロクロムのFe含有率、Cr含有率は、ヒアリング調査から得た。自家発生スクラップ投入量は、統計値¹⁴⁾から得られたステンレス鋼材生産量のNi系とCr系の構成割合によって、Ni系とCr系に分解した。加工スクラップ投入量は、国内需要量のNi系とCr系の構成割合によって、Ni系とCr系に分解した。Ni系とCr系別の国内需要量の導出方法については、次節において詳述する。老廃スクラップのNi系、Cr系別投入量は、スクラップ業者におけるヒアリング調査から得られた老廃スクラップと加工スクラップの投入量比率(Ni系70:30, Cr系95:5)から算出された。なお、ここで算出されたNi系、Cr系別投入の合計が、文献¹⁾から得られたデータとほぼ等しくなったため、ヒアリング値の妥当性が確認できた。Cr系スクラップの組成は、13Cr系ステンレス鋼、18Cr系ステンレス鋼の組成を2002

Table 2. Production of stainless steel and resource consumption in 2002 in Japan.

		Amount [1,000 ton]	Fe contents [%]	Ni contents [%]	Cr contents [%]
Consumption of resources	Pig iron	978 ¹⁾	94.0% ¹⁵⁾	-	-
	ferro-nickel	Analysis	Analysis	22.5% ¹⁶⁾	-
	ferrochromium	Analysis	40%	-	55%
	In-house SS scrap	553 ¹⁾	-		
	Fe-Cr alloys	209	84.5%	-	15.5%
	Fe-Ni-Cr alloys	344	73%	8.13%	18.87%
	Industrial SS scrap	260 ¹⁾	-		
	Fe-Cr alloys	81	84.5%	-	15.5%
	Fe-Ni-Cr alloys	179	73%	8.13%	18.87%
	Obsolete SS scrap	422 ¹⁾	-		
	Fe-Cr alloys	4	84.5%	-	15.5%
	Fe-Ni-Cr alloys	418	73%	8.13%	18.87%
	Ordinal steel scrap	445 ¹⁾	97.5%	-	-
	Export of SS scrap	121 ¹⁾	73%	8.13%	18.87%
	Import of SS scrap	131 ¹⁾	73%	8.13%	18.87%
Production of stainless steel	13Cr hot rolled SS	316 ¹⁾	87.5%	-	12.5%
	18Cr hot rolled SS	632 ¹⁾	83.0%	-	17.0%
	Ni-Cr hot rolled SS	1980 ¹⁾	73.0%	8.0%	19.0%
	Ni-Cr-Mo hot rolled SS	170 ¹⁾	73.0%	10.0%	17.0%
	Hot rolled heat resistant steel	355 ¹⁾	86.25%	-	13.75%

年における生産量により加重平均した値とし、Ni系スクラップの組成は、Ni-Cr系ステンレス鋼、Ni-Cr-Mo系ステンレス鋼の組成を2002年における生産量により加重平均した値とした。各種ステンレス鋼のNi、Cr含有率については後述する。普通鋼の汎用鋼材である一般構造用圧延鋼材の使用済み鋼材には、文献により鉄分以外が2.5%入っていると^{18,19)}、普通鋼スクラップ中の鉄分は97.5%とした。輸入スクラップと輸出スクラップは、流通の実態から全量Ni系とした。ステンレス鋼のNi、Cr含有率についてはJIS G 4304 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯の規格¹⁷⁾の化学成分から決定した。Crのステンレス鋼材中の含有率は、規格に記された値域の中間値をとった。13Cr系ステンレス鋼のCr含有率は12.5%とし、18Cr系は17%とし、Ni-Cr系は19%とし、Ni-Cr-Mo系は17%とした。一方、Niのステンレス鋼材中の含有率は、Niが高価なことより規格に記された値域の下限値をとることとした。Ni-Cr系ステンレス鋼のNi含有率は8%とし、Ni-Cr-Mo系は10%とした。また、ステンレス鋼において、Ni成分、Cr成分以外は全てFe成分であるとした。耐熱鋼はヒアリング調査より、Cr系のシェアが大きいとわかった。耐熱鋼の生産全体に占める割合は、非常に小さいため、全量Cr系と仮定した。そして、耐熱鋼のCr含有率は、JIS²⁰⁾記載の全鋼種の平均値である13.75%とした。

2・3 PBMを用いた使用済みステンレス鋼材排出量の導出

本論文では、PBMを用い、使用済みステンレス鋼材排出量を導出した。PBMとは、用途によって一意に決まる寿命分布と、過去に遡った年毎の需要量から特定の年の廃棄量を推計する手法である^{12,13)}。本論文では、実際に回収され、原料として投入されたスクラップ量を老廃スクラップ投入量とし、社会から排出されると予測されるスクラップの量を使用済みステンレス鋼材排出量とする。

まず、Ni系とCr系別の用途別国内需要量を1951年から2003年について把握した。Ni、Cr系別に、鋼種は8鋼種（鋼板、磨帯鋼、鋼線、溶接鋼管、継目無管、形鋼、棒鋼、平鋼）に、用途は8用途（建設用、産業機械用、電気機械用、家庭業務用機器用、自動車用、他輸送用、容器用、その他用）に区分し、合計128種類に分類した。

系別用途別のデータの無い1975年以前の国内需要量は、当該年の熱間圧延鋼材生産量に、1976年の熱間圧延鋼材生産量に占める1976年の系別用途別国内需要量の割合を乗じることにより求めた。1976年から2003年までは、鋼板、磨帯鋼、鋼線、溶接鋼管の4鋼種についてはステンレス鋼需給資料⁹⁾から系別用途別国内需要量を得た。残りの継目無管、形鋼、棒鋼、平鋼の4鋼種については、2001年から2003年までの系別用途別国内需要量はヒアリング調査から得て、2000年以前の系別用途別国内需要量は、当該年の熱間圧延鋼材生産量に、2001年の熱間圧延鋼材生

Table 3. Lifetime distribution functions for each product.

Product category		Distribution functions	Mean life time[year]	Variance
Construction		Gamma	30	112.5
Industrial machines			30	12.5
Electrical equipment			12	4.5
Machines for house or office			30	28.125
Automobiles ^{*1}	(1)Cars		9.6-13	4.4-8.0
	(2)Trucks		8.5-13	9.4-22
Other transportation			40	21.125
Containers			3	1.125
Others			15	12.5

*1 Lifetime distribution of automobiles was obtained by $0.9 \times (1) + 0.1 \times (2)$

産量に占める2001年の系別用途別国内需要量の割合を乗じることにより求める。

次に、2002年から2030年までの使用済みステンレス鋼材排出量は、系別用途別国内需要量にPBMを適用して、経年変化を予測する。この時、2003年以降の系別用途別国内需要量は一定と仮定した。また、本論文において設定した各用途の寿命分布関数をTable 3に示す。建設用、自動車用ステンレス鋼の寿命分布関数は、文献⁴⁾から得た。産業機械用のステンレス鋼は、主に、プラントの熱交換器や、原子力機器に使われている。それらの運転年数は60年程度と言われているが²¹⁾、実際には機械の寿命ではなく、新機械の導入や、工場の閉鎖などの外的要因によって廃棄されることが企業へのヒアリング調査からわかったため、60年の半分の30年を平均寿命とした。企業へのヒアリング調査から、電気機械用ステンレス鋼は平均寿命を12年とした。家庭業務用機器用ステンレス鋼は、流し台、調理台などの厨房器具が主な用途であることがヒアリング調査から得られたため、建設用ステンレス鋼と同じく平均寿命30年とした。他輸送用ステンレス鋼に関しては、その主用途である鉄道車両において、1962年に作られたステンレス鋼車両第一号が現在も使用されていることから²²⁾、平均寿命を40年とした。容器用、その他用ステンレス鋼については、それぞれ「金属製のコンテナ、その他の容器の大型以外のもの」、「金属製の器具および、備品その他」の減価償却資産の耐用年数²³⁾を用い、それぞれ平均寿命を3年、15年とした。なお、すべての用途について、分布関数はガンマ分布を用い、分散は寿命の2倍において99%の製品が廃棄されるように設定した⁴⁾。

2・4 使用済みステンレス鋼材の閉ループリサイクル促進による環境負荷削減ポテンシャルの算出

我が国では、2005年から自動車リサイクル法が施行されている。それにより、今後、自動車のリサイクルルートが確立し、自動車に用いられたステンレス鋼がステンレススクラップとして回収される（閉ループリサイクルされる）ことも期待できる。そこで、2005年以後の各年において、

把握したステンレス鋼のマテリアルフローに基づいて、使用済みステンレス鋼材の閉ループリサイクルを促進した場合の、環境負荷削減ポテンシャルを評価した。

具体的には、2002年について、PBMから得られる系別の使用済みステンレス鋼材排出量と、統計から得られる系別の老廃スクラップ投入量から、Ni系ステンレス鋼、Cr系ステンレス鋼それぞれのステンレススクラップとしての回収率を求めた。そして、2005年においてCr系ステンレススクラップ回収率を1ポイント向上させたときに回避される原料投入量を算出し、自動車リサイクル法により自動車用からの使用済みステンレス鋼の回収が原料投入を回避することによるCO₂排出量削減ポテンシャルを導出した。この時、Cr系ステンレススクラップの回収率は、2002年から2005年まで一定と考えた。フェロニッケル、フェロクロム、銑鉄の原料のCO₂排出量原単位には、それぞれ4.88, 5.41, 2.27 t-CO₂/t²⁴⁾を用いた。

3. 解析結果および考察

3・1 ステンレス鋼のマテリアルフロー

統計データとともに、NiとCrの物質収支解析から得られた2002年のNi系およびCr系別スクラップ量、ならびにPBMから得られたNi系とCr系別の使用済みステンレス鋼材排出量から、2002年におけるステンレス鋼のマテリアルフローが作成された。Fig. 1に示す。

Ni系ステンレス鋼のステンレススクラップとしての回収率は95%程度、Cr系ステンレス鋼のステンレススクラップとしての回収率は2%程度であることがわかった。Ni系ステンレス鋼は、Ni系ステンレススクラップとしてのスクラップ回収ルートが確立されており、Cr系ステンレス鋼はCr系ステンレススクラップとしてのスクラップ回収ルートが確立していないことが定量的に示された。Ni系のステンレス鋼は磁性が無いことから、磁力選別により普通鋼と分離され回収されているが²²⁾、磁性を有するCr系ステンレス鋼の多くは、普通鋼スクラップとして回収されていることを示唆している。また、Ni純分単価（Ni分1 kgの値段）では、フェロニッケルとNi系ステンレススクラップは242円の価格差がある¹⁶⁾。それに対して、フェロクロムとCr系ステンレススクラップのCr純分単価の差は67円であり¹⁶⁾、集荷、選別、配送のコストに見合わないため、Cr系使用済みステンレス鋼のCr系ステンレススクラップとしての回収ルートは確立していないとも考えられる。

3・2 我が国の将来の使用済みステンレス鋼材排出量とCr系使用済みステンレス鋼材の閉ループリサイクル促進によるCO₂削減ポテンシャル

我が国の2002年から2030年における使用済みステンレス鋼材排出量を、Ni系、Cr系別に求めた結果をFig. 2(a)、

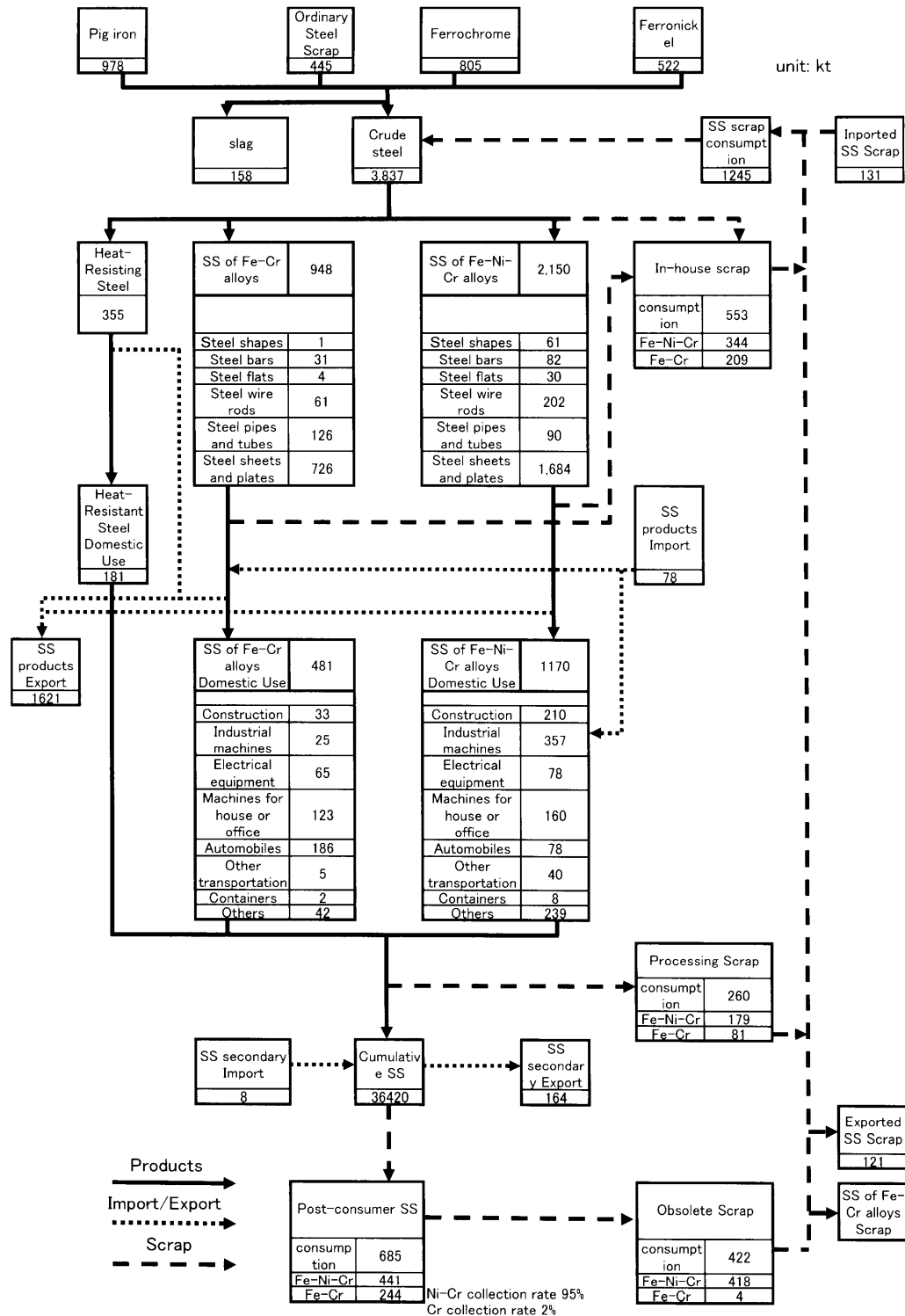


Fig. 1. Stainless steel material flow in Japan.

(b)に示す。Ni系使用済みステンレス鋼材排出量は、総量が大きく伸びており、Cr系使用済みステンレス鋼材排出量は、自動車用からの排出量が35%から40%程度と非常に大きな割合を占めているということが分かる。

PBMの結果から、2005年における使用済みステンレス鋼材排出量はCr系ステンレス鋼が272千トンである。Cr系ステンレス老廃スクラップの回収率を2%から3%に1ポ

イント向上させると、Cr系老廃スクラップ投入量は2.7千トン増加する。これは、Cr系老廃スクラップから投入される原料としてCr純分で0.42千トンの増加、Fe純分で2.3千トンの増加に相当するため、フェロクロム0.77千トン、銑鉄2.0千トンのバージン原料投入回避に相当する。しかしながら、Cr系老廃スクラップを分離回収すると、普通鋼原料としての普通鋼スクラップが同量減少することとな

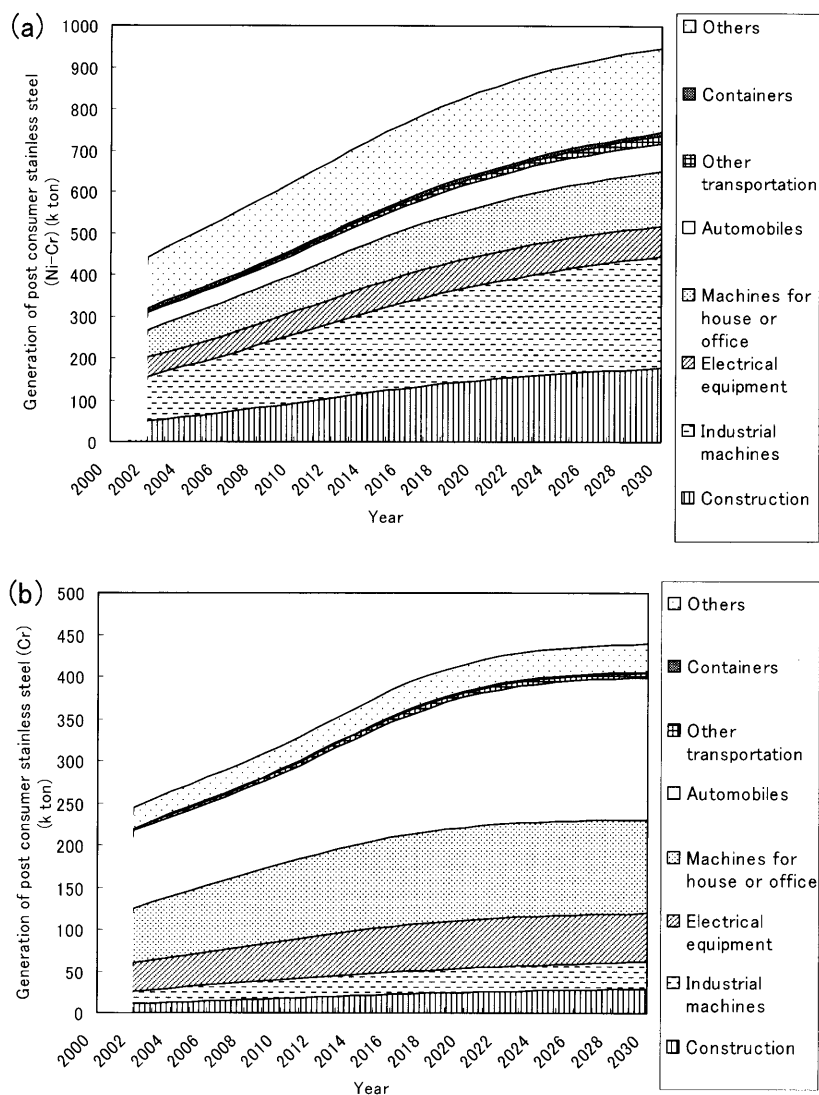


Fig. 2. Generation of post-consumer stainless steels from each product category during 2003–2030 in Japan, (a) Ni-Cr and (b) Cr.

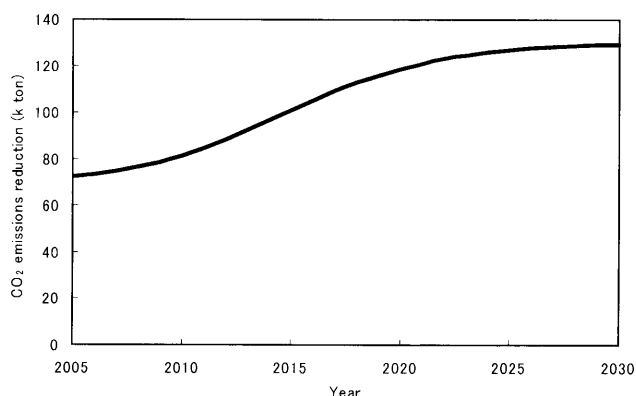


Fig. 3. CO₂ emissions reduction by promotion of closed loop recycling in Japan during 2005–2030.

る。この普通鋼スクラップの減少分がすべて銑鉄で代替されると、Cr系老廃スクラップの回収率1ポイント増加によるCO₂削減効果は2.1千トンであると導出された。

Cr系使用済みステンレス鋼材排出量全体に占める自動

車用からの排出量は、およそ40%であり、自動車用から排出されるCr系使用済みステンレス鋼材が全量回収されると、2005年において7万5千トンのCO₂削減効果があることがわかった。同様の仮定において2005年から2030年までのCO₂排出削減量の経年変化をFig. 3に示す。経年に従って削減効果が増加するのは、使用済みステンレス鋼材排出量のうち自動車用からの排出量の占める割合が増加するためである。

4. 結言

物質収支による解析とPBMから2002年におけるステンレス鋼のNi系、Cr系別のマテリアルフローを作成した。これにより、Ni系老廃スクラップの回収率は95%、Cr系老廃スクラップのステンレススクラップとしての回収率は2%と導出され、Ni系ステンレスのリサイクルルートが確立されている一方、Cr系老廃スクラップは普通鋼スク

ラップと混在する為、ステンレススクラップとしてほとんど回収されていないことが分かった。

2005年においてCr系老廃スクラップのステンレススクラップとしての回収率を1ポイント向上させると、2100トンのCO₂削減効果があると導出された。さらに、2005年において使用済みの自動車から排出されたCr系スクラップの回収ルートの確立が、Cr系ステンレス鋼のステンレススクラップとしての回収率を約40%に上昇させたとき、7万5千トンのCO₂削減効果があることがわかった。

本研究の遂行にあたり、新日本製鐵（株）の古山輝夫氏、（株）日鉄技術情報センターの林誠一氏ならびに玉城わかな氏、ステンレス協会の加藤明彦氏ならびに池原康允氏には、情報提供などの面で多大な支援を頂きました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) T.Furuyama, S.Hayashi and S.Matsuo: *CAMP-ISIJ*, **17** (2004), 889.
- 2) 久保田宏、松田 智：廃棄物工学、培風館、東京、(1995).
- 3) 産業環境管理協会：ソフトウェアJEMAI-LCA, ver. 1.1.5、産業環境管理協会、東京 (2003).
- 4) I.Daigo, D.Fujimaki, Y.Matsuno and Y.Adachi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 174.
- 5) T.E.Graedel: *Ecological Economics*, **42** (2002), 5.
- 6) V.Thomas and T.Spiro: *Industrial Ecology and Global Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., (1994), 297.
- 7) R.U.Ayres: *J. Ind. Ecol.*, **1** (1997), 81.
- 8) ステンレス鋼板用途別受注統計（昭和51年～平成15年）、ステンレス協会調査統計委員会、東京、(1976-2003).
- 9) ステンレス鋼需給資料（昭和51年～平成15年）、ステンレス協会調査統計委員会、東京、(1976-2003).
- 10) 第3版ステンレス鋼便覧、ステンレス協会、日刊工業新聞社、東京、(1995), 32.
- 11) 財務省HP 貿易統計 <http://www.customs.go.jp/toukei/info/index.htm>
- 12) K.Yokota, Y.Matsuno, M.Yamashita and Y.Adachi: *Int. J. Life Cycle Assess.*, **8** (2003), 129.
- 13) K.Kakudate, M.Kawamura, Y.Adachi, T.Suzuki: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 425.
- 14) 鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報、経済産業省経済産業政策局調査統計部、東京、(2004), 62.
- 15) G.V.Vinokurov, B.N.Katenin, L.A.Smirnov, S.M.Chelpan and A.K.Deiko: *Steel USSR*, **7** (1977), 149.
- 16) Y.Ikehara: *Bosei Kanri*, **47** (2003), 272.
- 17) JIS ステンレス鋼ハンドブック、ステンレス協会、東京、(2003), 156.
- 18) JISハンドブック鉄鋼、(財)日本規格協会、東京、(1993), 473.
- 19) A.Toi, J.Sato and T.Kanero: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 851.
- 20) JISハンドブック鉄鋼、(財)日本規格協会、東京、(1993), 1404, 1412.
- 21) N.Soneda and T.Takao: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **59** (1993), 2085.
- 22) M.Abe, M.Hashimoto and S.Hirakawa: *Nippon Steel Tech. Rep.*, **371** (1999), 113.
- 23) 高岸秀俊：減価償却資産の耐用年数表とその使い方15年版、日本法令、東京、(2003).