

鉄鋼中への不純物蓄積に関する調査研究

戸井 朗人*・佐藤 純一*・加根魯 和宏*²

Analysis of Tramp Element in Iron Scraps

Akito TOI, Junichi SATO and Takahiro KANERO

Synopsis : Recycle of materials is expected to reduce environmental burden which accompanies the production of materials. However, the recycle may also result in concentration of tramp elements in the materials. In order to promote the recycle of materials, we have to have clear prospect for the accumulation of the tramp elements. In this study, we have collected iron scraps from various scrap yards in Japan and analyzed the concentration of such tramp elements as copper, tin and chromium. We also estimated tramp element accumulation at shredding processes. The result shows that, although Cu and Sn concentrations in the iron scraps are close to their critical levels, the tramp element accumulation at shredding processes is currently relatively small.

Key words : recycle ; tramp element ; iron scrap ; shredding.

1. 緒言

近年、地球環境問題への意識の高まりに伴い、鉄鋼についてもリサイクルの促進が一層強く求められている。鉄のリサイクルのための鉄屑の破碎・分離等に当たっては、不純物を完全に除去することは技術的にも経済的にも困難であり、結果として電炉鋼中への銅元素等の不純物蓄積が起きていると言われている。不純物の蓄積は再生利用の障害となりかねず、今後、鉄鋼のリサイクルを一層促進していくためには、これら不純物蓄積の状況を把握することが不可欠である。本研究においては、全国のスクラップヤードから各種鉄屑の採取を行ってその成分分析を行い、不純物蓄積の現在の状況を明らかにするとともに、鉄鋼再生過程における不純物の混入についても調査・分析を行った。

2. 研究方法

まず、現存する鉄屑中の不純物の蓄積状況について調査するため、1996年9月から1997年2月にかけて全国の約20カ所の鉄屑処理工場、電炉メーカー工場等のスクラップヤードから鉄屑のサンプルの採取を行った。サンプルの採取は、主に電炉鋼を原材料とする異形棒鋼、形鋼等を中心として行った。採取に当たっては、形状や状態の異なるものが偏りなくサンプル中に含まれるように努めた。

これら得られたサンプルの成分分析は、錆や塗料を研磨により除いた後、ドリルにより切り粉を採取して実施した。

主にCu及びSnを分析の対象としたが、ステンレス鋼で汎用的に使用されるCrについても相当量のサンプルについて分析を行った。また、シュレッダー処理過程における不純物混入について調べるため、15~20kgのシュレッダースクラップと既知成分の10kgのピレットを併せて高周波炉で溶解し、この中から取り出したサンプルについて発光分光分析を行った。

採取した鉄屑のサンプル中からは高炉鋼から生産されたと思われるものが一定量見つかったが、今回はサンプルの数が限られており、我が国で発生する鉄屑の中に占める高炉鋼製品の割合を得られたデータから論じることができない。したがって、今回は電炉鋼から生産されたと考えられる鉄屑のデータを中心として分析を行うこととした。

3. 不純物蓄積の現状

3.1 分析結果

採取したサンプルの不純物成分の分析結果を今後の参考に供するため直接データとして鋼材種ごとにTable 1及びTable 2に示す。異形棒鋼、棒鋼及び形鋼については、電炉鋼と思われるもの及び高炉鋼と思われるもの両方を含めてすべての分析結果を示した。熱間圧延材については、電炉鋼と思われるもののみの分析結果を示した。電炉鋼と思われるもののサンプルの総数は50である。

採取したサンプルの電炉鋼と高炉鋼への区別はサンプル中のCu濃度により行った。平炉法により生産された可能性

平成9年6月11日受付 平成9年8月27日受理 (Received on June 11, 1997; Accepted on Aug. 27, 1997)

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

* 2 日本鋼管テクノサービス(株) (NKK Techno Service Co.)

Table 1. Tramp element concentration in iron scrap samples (deformed bars).

No.	Place	Old/New	Cu (%)	Sn (%)	Cr (%)	Profile
1	Miyagi	old	0.396	0.034	0.134	D10
2	Miyagi	old	0.441	0.054	0.17	D8
3	Miyagi	old	0.209	0.053	0.135	D22
4	Miyagi	new	0.301	0.034	0.176	D10
5	Miyagi	new	0.275	0.024	0.236	D10
6	Miyagi	new	0.233	0.027	0.09	D25
7	Tochigi	30yrs	0.37	0.039	0.16	D13
8	Tochigi	30yrs	0.346	0.115	0.146	D25
9	Ibaraki	old	0.314	0.018	0.207	D13
10	Chiba	old	0.264	0.02	0.149	D13
11	Chiba	new	0.384	0.022	-	D13
12	Chiba	new	0.248	0.022	-	D13
13	Chiba	new	0.287	0.025	-	D13
14	Chiba	new	0.394	0.022	-	D25
15	Chiba	new	0.379	0.021	-	D25
16	Tokyo	30yrs	0.281	0.022	0.225	D13
17	Tokyo	new	0.193	0.034	0.238	D13
18	Tokyo	new	0.262	0.023	-	D25
19	Kanagawa	new	0.337	0.021	-	D10
20	Kanagawa	old	0.174	0.06	-	D13
21	Kanagawa	old	0.202	0.014	-	D13
22	Kanagawa	old	0.331	0.042	-	D10
23	Aichi	old	0.265	0.017	0.164	D16
24	Gifu	old	0.286	0.033	0.159	D10
25	Gifu	old	0.226	0.021	-	D16
26	Gifu	old	0.216	-	0.179	D16
27	Gifu	old	0.295	-	-	D16
28	Osaka	old	0.323	0.067	0.177	D10
29	Osaka	old	0.326	0.017	0.193	D13
30	Osaka	old	0.391	0.044	0.134	D25
31	Okayama	old	0.175	0.013	0.077	D16
32	Hiroshima	old	0.462	0.022	0.292	D25
33	Chiba	new	0.01	0.002	0.017	D13 B
34	Kanagawa	old	0.01	0.003	0.03	D10 B
35	Osaka	old	0.008	0.002	0.032	D8 B
36	Osaka	old	0.005	0.001	0.02	D13 B
37	Okayama	old	0.012	0.003	0.019	D8 B
38	Hiroshima	old	0.007	0.002	0.055	D25 B

のあるものも少数存在したが、電炉鋼との明確な区別が困難であり、また、平炉鋼も広い意味での再生素材と考えられることから、ここでは電炉鋼と区別しなかった。電炉鋼と判定したものでCu濃度が最も低いものは0.11%、高炉鋼と判定したものでCu濃度が最も高いものは0.053%であった。

生産された時期による違いの検討のため、当該サンプルが古いものか新しいものかを推測して表中に併せて示してある。サンプルごとに生産された時期を特定することが困難であったため、目視により、推測を行った。不定形に曲がっているもの、あるいは赤く錆びているものを「古い」と、また、製造時の黒いスケールが残っており、かつ、曲がっていないものを「新しい」と判定して大別した。なお、サンプルが得られた建築物の建造年月や鋼材に張られたラベル等から生産時期がある程度分かるものは、おおよその年数を表中に記した。

Table 2. Tramp element concentration in iron scrap samples (others).

Bars						
No.	Place	Old/New	Cu (%)	Sn (%)	Cr (%)	Profile
39	Tochigi	30yrs	0.182	0.043	0.023	8 φ
40	Chiba	old	0.153	0.013	0.078	7 φ
41	Kanagawa	old	0.441	0.05	-	9 φ
42	Kanagawa	old	0.243	0.045	-	12 φ
43	Kanagawa	new	0.305	0.02	-	13 φ
44	Aichi	old	0.274	0.025	0.134	13 φ
45	Miyagi	old	0.024	0.002	0.01	12 φ B
46	Miyagi	old	0.006	0.001	-	6×9 B
47	Chiba	30yrs	0.007	0.002	0.024	9 φ B
48	Chiba	old	0.005	0.001	-	9 φ B
49	Kanagawa	new	0.006	0.003	-	6 φ B
50	Okayama	old	0.01	0.002	0.019	18 φ B
51	Okayama	old	0.038	0.004	0.015	18 φ B
52	Hiroshima	old	0.005	0.003	0.04	13×13 B
Sections						
53	Chiba	old	0.419	0.057	-	Angle
54	Chiba	60yrs	0.39	0.029	0.299	H
55	Chiba	old	0.32	0.015	0.145	H
56	Chiba	old	0.263	0.071	0.065	Angle
57	Chiba	old	0.33	0.013	0.312	Angle
58	Chiba	old	0.11	0.01	0.058	Rail
59	Kanagawa	old	0.351	0.037	-	Angle
60	Kanagawa	new	0.278	0.021	-	Angle
61	Tochigi	50yrs	0.053	0.003	0.015	H B
62	Chiba	60yrs	0.02	0	0.037	H B
63	Hiroshima	old	0.008	0.001	-	Angle B
Hot rolled steel						
64	Chiba	old	0.21	0.014	0.022	Plate
65	Kanagawa	new	0.31	0.011	-	Plate
66	Hiroshima	old	0.323	0.019	-	Plate
67	Hukuoka	new	0.361	0.019	-	Plate

* B in the profile column means the sample considered to be BF steel

Table 3. Average and standard deviation of tramp element in EF steel scrap samples.

	Cu(%)	Sn(%)	Cr(%)
Average	0.297	0.031	0.158
Standard Dev.	0.081	0.02	0.075

電炉鋼から生産されたと思われるサンプルの平均を取ると、Table 3に示すようにCu濃度は0.297%、Sn濃度は0.031%、Cr濃度は0.158%となった。また、それぞれの濃度の分布の標準偏差は、0.081%、0.020%及び0.075%であった。標準偏差を平均値で割って変動係数を求めると、Cu、Sn及びCrの濃度分布に関する変動係数は、それぞれ0.27、0.64及び0.48となり、特にSnの分布が大きくばらついていることが分かる。

3・2 不純物濃度の分布

濃度分布についてさらに詳細に検討するため、Fig. 1～Fig. 3にCu、Sn及びCrの濃度分布の分布形を示す。Cu及びCrの分布形が比較的きれいな山形を示しているのに対し、

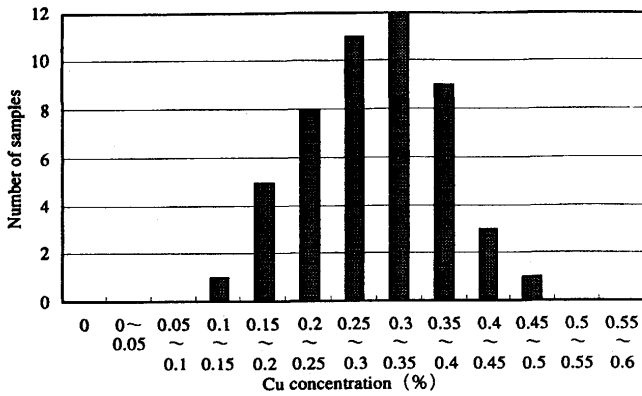


Fig. 1. Distribution of Cu concentration in EF steel scraps.

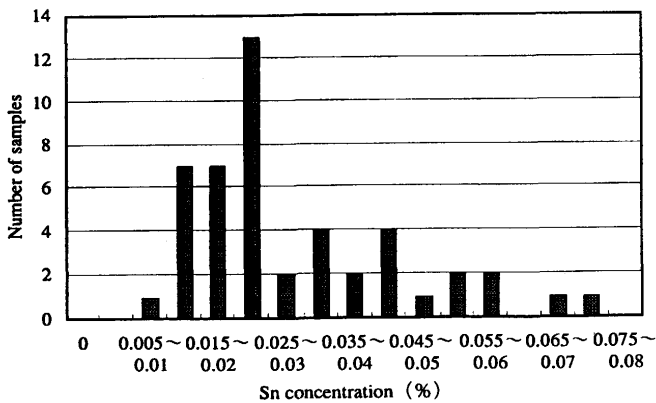


Fig. 2. Distribution of Sn concentration in EF steel scraps.

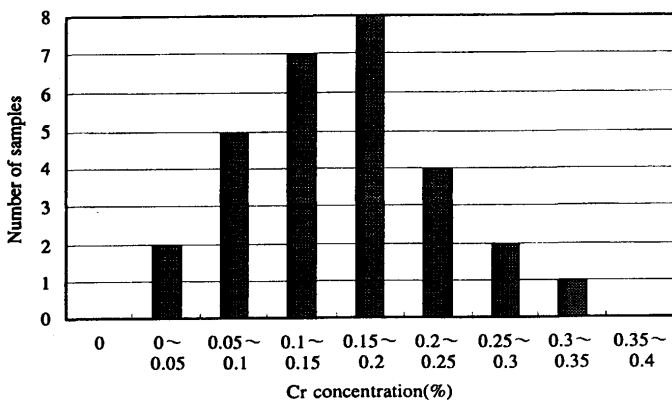


Fig. 3. Distribution of Cr concentration in EF steel scraps.

Snの分布は広くばらついており、かつなめらかな山形となっていない。この原因について検討を行うため、Snの濃度分布に関するデータを古いサンプルと新しいサンプルとで分け、それぞれの分布形を求め、Fig. 4及びFig. 5に示す。これらの図から明らかなように、新しいサンプル中のSnの濃度分布は極めて狭い範囲内に収まっている。他方、古いサンプル中のSnの分布は広い範囲にばらついており、かつ濃度レベルが高いサンプルも多い。これは、かつて多く使

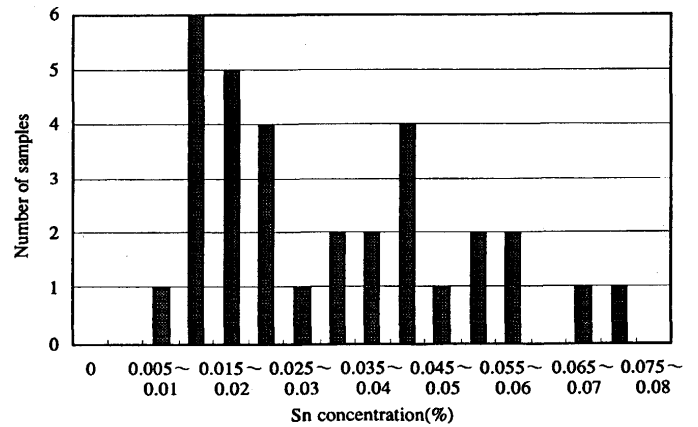


Fig. 4. Distribution of Sn concentration in old scraps.

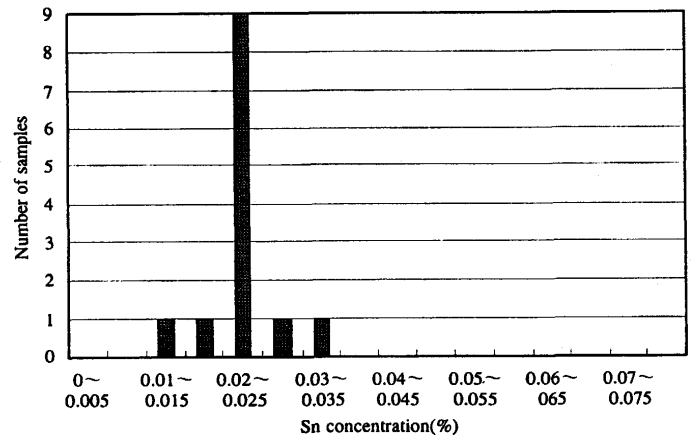


Fig. 5. Distribution of Sn concentration in new scraps.

用されていたメッキ缶が電炉鋼生産時のSnの主な発生源となっており、原材料である鉄屑中へのメッキ缶の投入割合の差によって生産される鋼材中のSn濃度に大きなばらつきが生じたことによるものと考えられる。これに対し、現在ではメッキ鋼板が主なSnの発生源ではあるが、これは薄メッキのため重量あたりのSn使用量も少なく、かつ、近年ではTFS(Tin free steel)の普及に伴いメッキ鋼板の割合が低下してきていることから、Sn分の高い鉄屑が減少し、結果として新しいサンプル中で濃度のばらつきが減少してきているものと考えられる。これに対し、CuやCrは古いものと新しいものとで濃度の分布形に大きな差は見られなかった。これはこれら成分が特定の製品を発生源とせず、様々な製品の鉄屑から平均的に混入してくるためであると考えられる。また、古いサンプルと新しいサンプルとを分けて、Sn濃度とCu濃度の相関を取ったところ、古いサンプルについては両成分の濃度の間に弱い正の相関関係(相関係数0.276)が存在するのに対し、新しいサンプルについてはやや強い負の相関関係(相関係数-0.468)が存在した。メッキは通常高炉鋼材に対して行われるものであり、この点からは両者の間に負の相関関係が存在することが予

想される。古いサンプルについて弱い正の相関関係が存在する理由としては、これらが生産された時代にはシュレッダー等が普及しておらず、缶プレス材が他の低質のプレス材と混合されて低級屑として用いられたことが考えられる。

また、Cu及びCrの濃度分布についても、濃度の高い側で急速にサンプル数が減少しているところがある。これは電炉メーカーにおける濃度調整によるものと考えられる。Table 4に文献¹⁾から得た電炉メーカーにおける成分管理目標値の例を示す。Fig. 1及びFig. 2において、Cu濃度は0.4%を境として、また、Cr濃度は0.2%を境としてサンプル数が急減しているが、これらの値は電炉メーカーの成分管理目標値とほぼ一致している。

3・3 生産時期による不純物濃度の違い

古いサンプルと新しいサンプルに分けて、Cu及びSnの濃度の平均値を求めた。Table 5に示すように、古いサンプル中のCu濃度は0.294%、Sn濃度は0.035%、新しいサンプル中のCu濃度は0.303%、Sn濃度は0.023%であった。Cuについて見ると、新しいサンプル中の濃度は古いものよりわずかに高くなっている。しかしながら、棒鋼及び熱間圧延材については、出荷後加工が加えられることがあるため、電炉メーカーはこれら鋼材の生産に当たり一般に不純物濃度の低い鉄屑を使用する傾向がある。このため分析の対象とする古いサンプル群と新しいサンプル群が棒鋼及び熱間圧延材をどれだけ含むかで結果が異なってくる恐れがある。そこで、電炉メーカーにおける成分調整が比較的少ないと考えられる異形棒鋼及び形鋼について不純物濃度の平均値を求めたところ、古いサンプル中のCu濃度は0.303%、Sn濃度は0.036%、新しいサンプル中のCu濃度は0.298%、Sn濃度は0.025%であった。この場合Cu濃度は古いサンプル中のものが新しいものをわずかに上回っている。Sn濃度はこの場合も相当程度低下している。したがって、今回の調査分析では時間の推移に伴う電炉鋼中へのCu等不純物の蓄積を確認できなかった。ただし、本研究室の研究でも示したように²⁾、

不純物濃度が一旦低下した後再び上昇過程にあることも考えられ、今回の結果から電炉鋼中へのCu蓄積が進行していないと結論づけることはできない。このような点については、鉄屑の生産時期をより正確に把握した上でさらなる検討を行うことが必要と考えられる。なお、Snの濃度の低下は、既に述べたようにメッキに用いるすずの使用量が減少していることによるものであると考えられる。

3・4 不純物蓄積の許容レベル及び他の研究との比較

鋼材中のCu、Sn等の不純物量をどの程度許容できるかは鋼種等により異なるが、片山らはTable 6のような許容レベルの例を示している³⁾。これをもとに考えると、現在のCu及びSnの平均的濃度は棒鋼類としてはかろうじて許容限度レベルであるものの形鋼としてはすでに許容限度を超えつつあり、何らかの対策が必要なレベルに達しているといえることができる。

スクラップ中の不純物蓄積状況については、現在までにほかにもいくつかの分析調査が実施され公表されているが³⁾⁻⁶⁾、これら調査は、本研究のように個々の電炉鋼スクラップ中の不純物濃度を計測して生産時期による違いや濃度分布を調査することにより、再生材である電炉鋼中への不純物蓄積の履歴を明らかにしようとするものでなく、高炉鋼及び電炉鋼を含む様々なスクラップをまとめて溶解した場合に得られる溶解物中の不純物濃度の目安を得ることを目的としていると考えられるものが多い。このため、これらにおいてはプレス屑、ヘビー屑といったスクラップの形状に基づく区分ごとについての溶解分析の結果のみが報告されており、また、分析の対象としたサンプルの採取方法・時期やサンプル数、個々のサンプルの形態等に関する情報は公表されていない。なお、これら研究におけるヘビー屑中のCu濃度の分析値はその多くが0.1~0.27%程度の範囲にある。本研究の分析結果を示すTable 1及びTable 2から電炉鋼及び高炉鋼の両方を含むサンプルのCu濃度の単純平均を求めると、異形棒鋼については0.254%、棒鋼については0.121%、形鋼について0.231%となり、上記の他の研究の結果に近いレベルとなる。

なお、電炉メーカーにおいて生産された個々の電炉鋼製品中の不純物濃度については、昭和57~58年に実施された電炉鋼メーカーへのアンケート結果をもとに異形棒鋼中のCu濃度及びSn濃度の平均をそれぞれ0.28%及び0.03%としている報告⁷⁾があるほか、電炉鋼材の製品種毎の不純物濃度の範囲についてTable 7に示すような報告がなされている⁶⁾。ま

Table 4. Examples of target for tramp element control at EF companies.

Tramp element	A	B	C
C u (%)	0.35	0.4	0.4
S n (%)	0.08	0.06	0.04
C r (%)		0.2	0.3

Table 5. Average of Cu and Sn in old and new EF steel scrap samples.

		Cu(%)	Sn(%)
All EF steel samples	Average(old samples)	0.294	0.035
	Average(new samples)	0.303	0.023
Defromed bars and sections	Average(old samples)	0.303	0.036
	Average(new samples)	0.298	0.025

Table 6. Permissible level of Cu & Sn in each type of steel products.

Type	C u (%)	S n (%)
Hot&cold rolled steel	0.10 or less	0.02 or less
Sections	0.30 or less	0.025 or less
Steel bars	0.40 or less	0.06 or less

Table 7. Tramp element concentration in EF steel products.

	Cu(%)	Sn(%)
Sections	0.20 ~ 0.35	0.010 ~ 0.020
Bars	0.25 ~ 0.50	0.015 ~ 0.025

た、特定のメーカーの電炉鋼製品の成分分析例として、Cu濃度を0.25~0.29%としている報告がある⁸⁾。これらの値は、本研究で得られた値と矛盾していない。ただし、これらのデータについても、分析を行ったサンプルの数ごく限られているか、あるいは、サンプルの形態、サンプル数、採取方法・時期等に関する情報が十分に明確になってない。

4. シュレッダー処理工程における不純物混入

全国の6カ所のシュレッダー処理場からシュレッダースクラップを入手し、シュレッダー処理工程における不純物混入について分析を行った。廃家電、廃車、廃自動販売機等様々な製品をシュレッダー処理したものを対象とした。まず、シュレッダー処理にかけられる前の製品に使用されている鉄鋼中の不純物量を調べるため、シュレッダースクラップ中の鉄片を取り出して8サンプルについて分析を行った。これらサンプルのCu濃度の平均値は0.007%、Sn濃度の平均値は0.001%であった。不純物濃度は極めて低く、いずれも予想される通り高炉鋼製品であることが確認された。ついで、シュレッダー処理工程における不純物混入について調べるため、処理後のシュレッダースクラップの山の中から15~20kgのスクラップをサンプルとして取り出し、これを高周波炉で溶解して分析した。実験は様々なシュレッダースクラップを対象として13チャージ実施した。まず、入念な手選別で銅の配線等をサンプルから除去し、残りのスクラップを溶解して不純物濃度を発光分光分析により計測した後、取り出した配線等の重量から手選別を行わない場合の不純物濃度を計算で求めた。

手選別で除去したのもも加えて計算すると、シュレッダースクラップのCu濃度の平均値は0.096%であった。不純物が混入する前の鉄片の分析では、Cu濃度は0.007%程度であり、シュレッダー処理工程において機械的あるいは合金等から0.09%程度のCu元素の混入があったこととなる。一方、シュレッダースクラップ中のSn濃度は0.016%であり、これについても0.015%程度の混入があったこととなる。ただし、今回調査を実施したシュレッダー処理場は、いずれも1000馬力以上の出力の設備を使用している。このような高出力のシュレッダーはわが国の設備総数の半分以下⁹⁾であり、これよりも低出力のシュレッダーの場合には破碎能力の限界等からより多くの不純物混入が発生することも考えられる。

他の研究においては、シュレッダー屑中のCu濃度として

は0.15~0.25%程度の範囲内の値が報告されているものが多い^{6,10,11)}。破碎・分離方法等の詳細が明らかでないため今回の結果との違いの理由は明確ではないが、モーター等の部品の適切な取り扱いや高出力の設備の使用等により、今回程度の不純物濃度を達成することは可能であると考えられる。

5. モデルに基づく解析

筆者らは、社会における素材の使用期間とその廃棄率の関係をガンマ分布で近似することにより、リサイクルを行う場合の素材中の不純物濃度や環境負荷の程度を推計することのできるモデル式を提案した¹²⁾。この中で、素材ストックが一定割合で増加していく社会においてリサイクルが行われ、素材の再生過程において一定量の不純物混入が生じる場合には、再生素材中の不純物濃度は以下の式により求めることができることを示した。

$$\frac{f_t}{S_{rt}} = \frac{g}{1 - b \left(\frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{\alpha_2}}$$

ここで、それぞれのパラメータは以下の通りである。

f_t : 再生素材中の不純物量

S_{rt} : 再生素材のストック量

r : 社会における素材ストックの増加率

b : 廃棄された素材のうち回収されて再生されるものの割合

α_2 及び λ_2 : 再生素材の使用期間のガンマ分布のパラメータ

g : 再生過程における不純物の混入割合

電炉鋼を再生素材と考え、この式を電炉鋼中のCuに対し適用すると、現状における電炉鋼ストック中のCu濃度の平均値が0.297%であることから、過去における再生過程でのCuの平均的混入割合 g は、0.25%と推計される。推計に当たって、各パラメータは、筆者らによる前述の研究中で用いたものと同様に、 r として過去25年間の鉄鋼ストック増加率の平均値5.7%、 b は業界団体の調査結果をもとに80%、 α_2 及び λ_2 としては電炉鋼の用途毎使用量等から求めた5及び0.149を用いた。

ここで推計された再生過程における不純物混入率は、今回の研究で実験的に求めたシュレッダー処理工程における混入率よりも相当程度大きなものとなっている。これは、今回の研究においては、使用した設備の出力等により不純物混入率がやや低い値となっていることによるほか、旧来使用されていた設備の不純物除去能力が現在使用されているものより相当程度低かったことによるものと考えられる。

6. 結言

(1) 全国約20カ所のスクラップヤードから採取した鉄屑

中の不純物分析を行ったところ、電炉鋼中のCu、Sn及びCrの濃度の平均値として、それぞれ0.297%、0.031%及び0.158%を得た。Cu及びCrと比較してSnは濃度分布のばらつきが大きい。ただし、近年生産された電炉鋼中のSn濃度は極めて狭い範囲内に落ち着きつつある。

(2)目視により生産時期が古いと考えられるサンプルと新しいと考えられるサンプルとを分け、それぞれのCu及びSnの濃度を比較したところ、Cu濃度は古いものと新しいものでほとんど差はなく、また、Sn濃度は相当程度低下してきていることが分かった。

(3)シュレッタースクラップのサンプル15~20kgずつの溶解実験を行ったところ、シュレッター処理工程においてCuは0.09%程度、また、Snは0.015%程度混入したものと推計された。

(4)素材のリサイクルシステムのモデルから求めた不純物濃度の推計式を今回の調査結果をもとに電炉鋼ストック中のCuに適用したところ、鉄鋼の再生過程におけるCuの混入率は0.25%と推計された。この値は今回のシュレッタープロセスでの溶解実験において得られた値約0.09%より大

きいが、この差は過去と現在のスクラップ処理設備の不純物除去能力の差等によるものと考えられる。

最後に、本研究の実施に当たり多大なご協力をいただいた中田屋(株)殿、日本鑄造(株)殿はじめリサイクル事業者、電炉メーカー等の皆様方に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 伊藤秀夫：表面技術，48 (1997)，136.
- 2) 戸井朗人，佐藤純一，片桐広貴：エネルギー・資源，18 (1997)，92.
- 3) 片山裕之，水上義正：まてりあ，35 (1996)，1285.
- 4) 鉄鋼リサイクル白書，日本鉄鋼協会編，東京，(1994)，59.
- 5) 松岡滋樹：鉄鋼界，2 (1995)，11.
- 6) JRCMニュース，金属系材料研究開発センター新製鋼技術研究推進室，東京，100 (1995)，10.
- 7) 電炉鉄筋棒鋼の研究，日本鉄鋼連盟；普通鋼電炉工業会，東京；東京，(1987)，2.
- 8) 藤井資也：第27回，28回白石記念講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1994)，89.
- 9) 鉄スクラップ加工処理工程から発生する廃棄物の処理に関する調査報告書，日本鉄源協会，東京，(1991)，9.
- 10) 坂田直起：第23回白石記念講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1992)，24.
- 11) 根岸秀光：材料とプロセス，6 (1993)，968.
- 12) 戸井朗人，佐藤純一：エネルギー・資源，18 (1997)，274.