

## 特集記事 5

## 鉄のスクラップリサイクル

(財)金属系材料研究開発センター 山内 秀樹 Hideki Yamauchi  
 新製鋼技術研究推進室 室長  
 同 上 三輪 守 Mamoru Miwa  
 新製鋼技術研究推進室 主任研究員  
 同 上 小林日登志 Hitoshi Kobayashi

## Recycling of Ferrous Scrap

## 1 はじめに

最近、環境問題が社会的に重要視される中、リサイクルへの関心が日に日に高まっている。鉄はリサイクルの容易な産業素材であり、現在国内で発生する約4千万トンの鉄スクラップ(以下スクラップと呼ぶ)は全量再利用されている。

鉄の製造は、鉄鉱石を還元して作る方法とスクラップをリサイクル溶解する方法に大別されるが、スクラップを再溶解する方法は鉄鉱石を還元する方法に比べ還元エネルギーを要しないため、鉄1トン当たりの製造エネルギーは約1/3ですみ、炭酸ガス発生量もそのぶん減少する<sup>1,2)</sup>。1997年の国内粗鋼生産量が1億3百万トンであったが、その約4割はスクラップを原料として製造されたことになる。

このように、スクラップのリサイクルは資源の有効活用や地球環境の改善にとって好ましいことではあるが、近年スクラップの品質が劣化してきており現在のように発生スクラップの全量をリサイクルすることが困難になりつつある。

本稿では、まずスクラップの量的、質的実態に触れ、続いてこれらのスクラップをリサイクルする場合の技術的問題点ならびに問題解決に向けての研究開発状況を紹介する。

## 2 スクラップの発生量と品質

## 2.1 スクラップの種類と発生量

スクラップはその発生源から、「自家発生スクラップ」、「市中スクラップ」、「輸入スクラップ」に分類される。

自家発生スクラップは鉄鋼製造会社の製造工程で発生するもので、成分等の素性がはっきりしているのではほとんどが自工場内でリサイクルされている。自家発生スクラップの発生量は、鉄鋼生産量が横ばい状態にあることと鉄鋼生

産技術の改善により漸減しており、最近では1,200万トン／年程度となっている<sup>3)</sup>。

市中スクラップはその名のとおりに市中で取引、回収されるスクラップであり2種類に分けられる。すなわち、鋼材中間加工・組立業界で最終製品に加工する工程で発生する「加工スクラップ」と、鋼材製品が最終需要家に渡りある期間使用された後に廃品として回収される「老廃スクラップ」とに分けられる。このうち加工スクラップは、製造業における鋼材加工歩留り向上や海外移転の進展によりスクラップ発生量が減少傾向にあり、最近の発生量は700万トン／年程度にとどまっている<sup>3)</sup>。

一方、老廃スクラップの発生量は国内の鉄鋼蓄積量との相関が強い。図1に国内鉄鋼蓄積量と老廃スクラップ発生量の過去の推移を示したが、鉄鋼蓄積量の約2.5%に相当する量が老廃スクラップとして発生、回収されており、最近では約2,700万トン／年に達している<sup>3)</sup>。この量は国内で発生するスクラップ総量の約7割にも及ぶ膨大な量であるが、将来はさらに増加することが確実で、現在の傾向すな

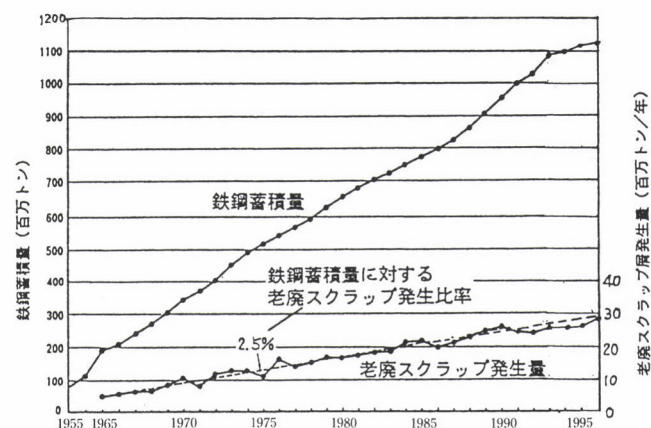


図1 日本の鉄鋼蓄積量と老廃スクラップ発生量

わち鉄鋼蓄積量の約2.5%が毎年スクラップ化となるのが今後も変わらないとすれば、2010年の鉄鋼蓄積量は約15億トンと見込まれるので老廃スクラップは約3,700万トン／年発生すると予測される。この量に自家発生スクラップ発生見込み量1,200万トンと加工スクラップ発生見込み量700万トンを合計すると、2010年のスクラップ発生総量は5,700万トン／年ということになる。前述したように現在のスクラップ発生総量は4,000万トン／年であるから、今後は毎年150万トンずつ増加する計算になる。

## 2.2 スクラップの規格と不純物

市場で取引されるスクラップについては、普通鋼電炉工業会と日本鉄屑工業会で制定した「鉄屑検収統一規格」があり、表1にその概要を示した<sup>4)</sup>。これから分かるように、スクラップの分類は主として外観形状によるものであり必ずしも品質(不純物)を規定したものではない。例えばヘビー屑は大きく4種類に分類されてはいるが、同じヘビー屑であっても品種的には電炉製品と高炉製品が混在しているのが実態である。

一般に、スクラップを原料とする電炉製品は鉄鉱石を原料とする高炉製品にくらべて製造工程では除去できない不純物、例えばCu、Sn、Ni等の含有量は高いレベルにある。スクラップは電炉で再生(製品化)されるが、ある期間後再びスクラップとなって電炉に戻って再生される。この再生工程を繰り返すと、前記の除去不能な不純物は循環の度にその濃度が漸増する。試算によれば、今後発生する老廃スクラップをリサイクルし続けた場合、約30年後にはスクラップ中のCu、Sn濃度は現状の1.3～1.5倍になると予測されている<sup>5)</sup>。

ところで、鋼中の不純物濃度が高くなると鋼材の製造工程や製品品質に悪影響を及ぼすことはよく知られている<sup>6)</sup>。例えばCu、Pbは鋼材の製造過程で熱間加工性を阻害して表面疵の原因となり、P、Snは冷間加工性を低下させてプレス製品等の割れを引き起こしたり、低合金鋼の熱処理能を悪化させる。これらの不純物の中で、現在の酸素製鋼技術では除去不能かつ外部混入しやすい元素はCuとSnである。Cuはモーターや電気配線類として、Snはめっき鋼板やハンダの形態でスクラップに混入することが多い。

不純物としてのCuとSnの鋼中許容量は製品品種によって異なるが代表例を表2に示す<sup>6)</sup>。現在、素性のはっきりしない、いわば不純物濃度が高い可能性をもつ老廃スクラップが、Cu、Sn許容度の緩い棒鋼製品や形鋼製品の原料として使われる理由がここにある。すなわち、現在のスクラップリサイクルはカスケード型のリサイクルであり、これによって不純物汚染による材質上の問題発生を回避してき

表1 スクラップ検収統一規格<sup>4)</sup>

| 分類    | 品 種    | 等級         | 規格等                                  |
|-------|--------|------------|--------------------------------------|
| 老 廃 屑 | ヘ ビ ー  | H S        | 6mm 厚以上 厚板、形鋼、棒鋼 等                   |
|       |        | H I        | 6mm 厚以上 厚板、形鋼、棒鋼 等                   |
|       |        | H 2<br>H 3 | 3～6mm 厚 鋼板、丸棒、重機解体 等<br>1～3mm 厚 薄板 等 |
|       | シュレッダー | A          | 自動車ボディー 等                            |
|       |        | B          | 亜鉛メッキ鋼板 等                            |
|       |        | C          | 錫メッキ鋼板 等                             |
|       | プ レ ス  | A          | 自動車ボディー 等                            |
|       |        | B          | 亜鉛メッキ鋼板 等                            |
|       |        | C          | 錫メッキ鋼板 等                             |
| 加 工 屑 | 新 断    | バ ラ<br>プレス |                                      |
|       | 鋼グライ粉  |            | パーム状、粉状のもの                           |

表2 製品鋼種別不純物の許容量<sup>6)</sup>

| (%)   |         |          |
|-------|---------|----------|
| 鋼 種   | Cu      | Sn       |
| 深絞り鋼板 | 0.06 以下 | 0.010 以下 |
| 熱冷延鋼板 | 0.10 以下 | 0.020 以下 |
| 形 鋼   | 0.30 以下 | 0.025 以下 |
| 棒 鋼   | 0.40 以下 | 0.06 以下  |

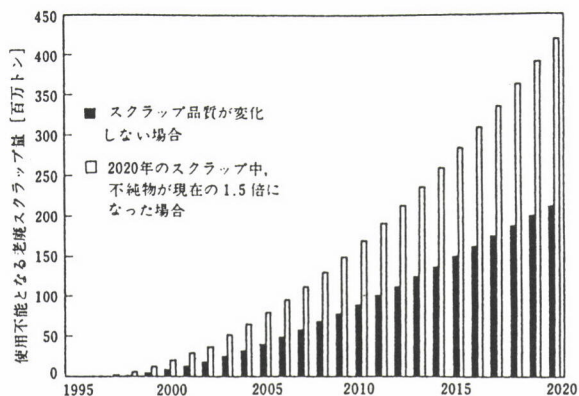
た。換言すれば、スクラップから不純物規格の厳しい鋼板類を製造する場合には、発生源や成分の分かったスクラップだけを使用し、さらに銑鉄や還元鉄などのパージンメタルを配合して対応している。

## 2.3 使用不能スクラップ量の予測

今後は老廃スクラップが増加することを前述したが、その老廃スクラップ中の不純物量も次のような理由で増加すると考えられる。

- ①Cuを素材とした電気部品の使用量が増加したことに加えて部品の小型化によりFeとCuの分離が困難になった。
- ②鉄鋼材料の機能向上のために合金元素添加鋼や表面処理鋼、クラッド鋼などが増加した。

将来においてもスクラップ中のCu、Snを除去する有効な技術が開発されず、希釈法に頼る現在の状況が継続とした場合、表2の製品別不純物許容値を超えない範囲内で最大限まで老廃スクラップをリサイクルしたとしても、増加する老廃スクラップ量を全量消化しきれない可能性が生じることが考えられる。この場合、余剰スクラップは再利用不能と扱われ廃棄物と見なされる。このような再利用不能なスクラップが何時、どれ位発生するのかについてシミュレーションで予測した結果が報告されている<sup>7)</sup>。図2は予測結果の一例であるが、これによれば21世紀の初頭には使用不能な老廃スクラップの発生が顕在化しはじめ、2015年には累計で約2億トンのスクラップがゴミ化して国

図2 再利用不能スクラップ量の推定<sup>7)</sup>

内に堆積するというショッキングな内容になっている。その一方で本報告<sup>7)</sup>では、このような結果を防いで最低限現状並みの不純物混入レベルを維持してスクラップのリサイクルを可能とするために、スクラップ中のCu濃度を55%、Sn濃度を30%各々低減させる技術開発の必要性を強調している。

### 3 スクラップリサイクルのための技術課題

#### 3.1 不純物除去

スクラップ中の不純物の存在形態を大別すると表3のようになる<sup>8)</sup>。これら不純物の除去技術については過去に多くの研究が行われており、例えば日本鉄鋼協会の「循環性元素分離研究会」で詳細にまとめられている<sup>9)</sup>。ここでは前項で述べたように、通常の製鋼技術では除去が精錬原理上不可能で今後のスクラップリサイクルに大きな影響を及ぼすと考えられているCuとSnについて除去技術の開発状況を紹介する。

##### (1) 付着不純物としてのCuの除去技術

Cuは主に付着不純物および合金不純物としてスクラッ

プ中に存在している。付着不純物の除去に対してはシュレッター処理が一般的であるが、現状のシュレッター処理では鉄と非金属との単体分離が不十分で、Cuがスクラップに付着したままの状態になっていることがよくある。特に、スクラップ中の電気部品材料の量が増加し、その部品が小型化しているためCuの混入は増加する傾向にある。このようなCuの混入量を減らす方法として、シュレッター処理を繰り返した上に人手などを使って丁寧な選別分離を行う方法があるが経済性に問題がある。この問題を解決するのが「低温破碎技術」と「自動識別分離技術」である。低温破碎技術は、スクラップ原料を液体窒素で鉄の脆化温度まで冷却し、スクラップを10mm程度まで細かく破碎する方法である。この方法で実廃車を破碎処理した後、磁気選別したところスクラップ中の付着Cuは95%分離除去することができた<sup>10)</sup>。

また、自動識別分離技術は鉄鋼以外の分野、例えば空きビンの選別分離などに利用されているが、スクラップの場合はCuと鉄錆などの色の差が微妙であること、形状が不揃いであること、高速の搬送速度に対応しにくいなどの困難さがあった。これらの問題を解消すべく開発されたのが、光の三要素である色相、彩度、明度を高速画像処理で解析して鉄と非鉄を分離するもので、図3にその概要を示した<sup>11)</sup>。

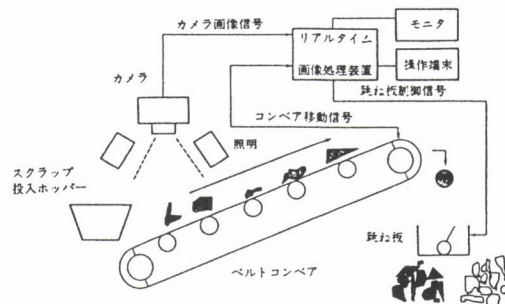
##### (2) 表層不純物としてのSnの除去

Snの大半はSnめっき鋼板としてスクラップ中に混入する。Snめっき鋼板からSnを除去する方法として海外ではアルカリ電解法で処理する技術が確立しているが、電気代の割高な日本では実用化には至っていない。このためアルカリ電解法に代わって通常のスクラップ再処理工程の中で可能な脱Sn方法が研究され、次のことが明らかになった。すなわち①Snの酸化物は靱性が低いので、このような化合物を作ればめっき鋼板の表層を剥離することによって脱Snが可能となる。②弱酸化性雰囲気で予熱・溶解をする段階でSnSやSnOが生成し、めっき鋼板からSnが分離する。

①の特性を利用した脱Sn法として、Snめっき鋼板を大気雰

表3 スクラップ中不純物の存在形態<sup>8)</sup>

| 分類      | 不純物の存在形態                                   | 具体例(おもな金属種)                                   |
|---------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| ①付着不純物  | ある程度の質量をもつ非鉄金属の単体が鉄と共存するもの                 | モータ類(鉄と銅)<br>自動車エンジン・ブ<br>ロック(鉄とアルミニ<br>ウム)   |
| ②表層不純物  | 鉄の表面に薄い非鉄金属相として共存するもの                      | 亜鉛めっき鋼板(鉄と<br>亜鉛)<br>錫めっき鋼板(鉄と錫)              |
| ③合金系不純物 | 鉄鋼製品の性能を上げるために合金成分として意図的に鉄鋼中に添加された元素に基づくもの | 耐候性鋼板(鉄と銅)<br>ステンレス(鉄とニッ<br>ケル、クロム、モリブ<br>デン) |

図3 鉄・非鉄自動識別分離システム<sup>11)</sup>

囲気で加熱して表面層のSnを $\text{SnO}_2$ とし、これに機械的な衝撃を与えて $\text{SnO}_2$ を剥離する方法が提案された。実験によれば、Snめっき鋼板を剥離材である塊状スクラップとともに回転炉に装入し、 $950^\circ\text{C}$ に加熱したところ約50%の脱Sn率が得られている<sup>12)</sup>。

一方、②の特性を応用した脱Snの例として、キューボラにSnめっき鋼板を装入したところ最高90%の脱Sn率が得られたとの報告<sup>13)</sup>がある。

### (3) 合金不純物としてのCu、Snの除去

合金(溶湯)中のCu、Snを経済的に除去するのは極めて困難である。ただCuやSnはFeよりも蒸気圧が高いため原理的には蒸発分離の可能性はあり、実験室規模の真空誘導炉を用いた脱Cu、脱Sn実績が報告されている<sup>14)</sup>。しかしながら、高真空度で長時間の処理が必要なため実用化には問題があった。そこで、商業規模の真空下でも高い蒸発速度の得られる方法を検討した結果、図4に示したように減圧下の溶鉄に弱酸化剤粉末を上吹きすることで脱炭反応に伴って生じるCOガスの微細気泡が蒸発反応界面積の増大につながり、Cu、Snの蒸発を促進させるという方法が考案された。1.5トンの真空誘導炉を用いた実験では、約1Torrの真空度で高C溶鉄(0.4%Cu、0.06%Sn)に $\text{SiO}_2$ 粉末を上吹きしたところ、約30分の処理で脱Cu率~15%、脱Sn率~10%の結果を得た<sup>15)</sup>。なお図4中にあるプラズマトーチは溶鉄表面を加熱して反応の促進を図ったものである。ただし本法の実用化には、例えば反応速度の更なる向上やプラズマトーチの大型化等の課題が残されている。

## 3.2 溶解エネルギーの低減

現在のスクラップ溶解プロセスは電気炉法が主体である。電気炉法はこれまでに種々の技術改善、例えば炉の大型化、投入電力の増大、酸素使用量の増大とカーボンインジェクション技術の開発、取鍋精錬炉(LF)導入による精錬

機能の分離、直流(DC)電気炉の導入などにより図5に示すように溶解エネルギー、生産性は大幅に向上した<sup>16)</sup>。そして近年、より一層のエネルギー削減と生産性の向上を目的に様々なプロセスが考案され一部は既に実用化されている。それらのプロセスの概要を図6に示す<sup>17)</sup>が、これからも分かるように電気炉の排ガスでスクラップを予熱してエネルギー削減を目指した方法が数多く開発されている。その他に注目すべきプロセスとして、スクラップの一部を溶鉄に置換してエネルギーの削減と製品品質の向上(=不純物濃度の低減)を目的にした「溶鉄合併法」や電気炉と転炉の利点を組み合わせた「電気炉・転炉型プロセス」がある。いずれにしてもこれらのプロセスがどのような発展をたどるのか、さらに新しいプロセスが開発されるのか今後の動向には目を放せないものがある。

## 3.3 排ガスの高浄化

市販スクラップ中にはCu、Sn、Zn、Pbなどの非鉄金属以外に、プラスチック、オイル、タイヤなどの種々雑多な非鉄金属物質も混入しているのが普通である。このような非鉄

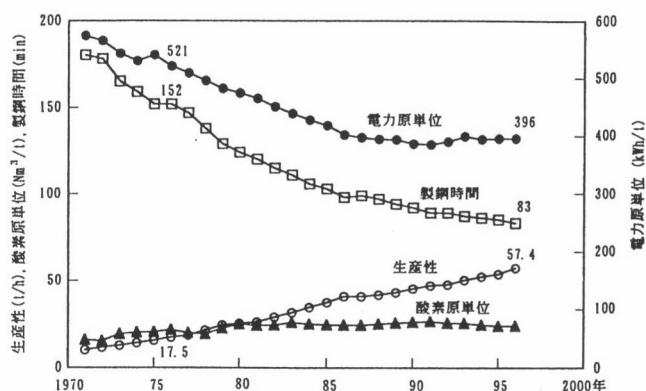


図5 国内電気炉の能率および各種原単位の推移<sup>16)</sup>

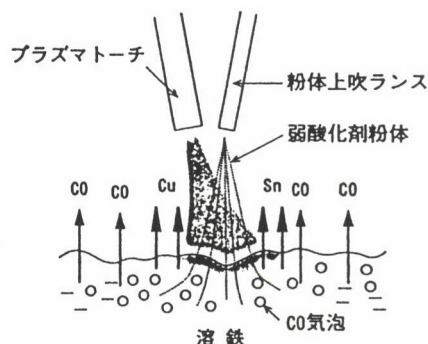


図4 減圧下プラズマ加熱による脱銅、脱錫法の概念図

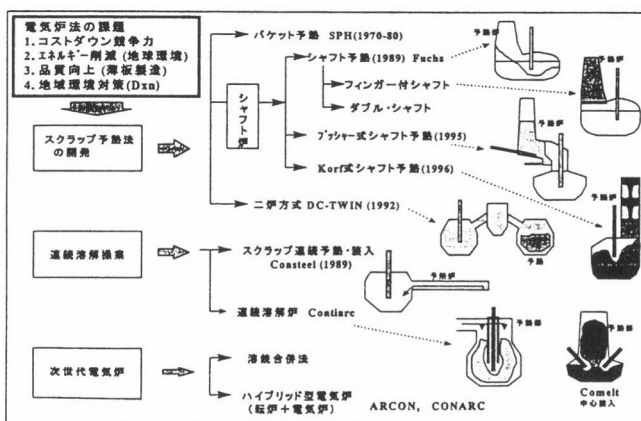


図6 最近の電気炉プロセスの発展<sup>17)</sup>

属物質の混在したスクラップを加熱・溶解すると、ダイオキシンに代表される有害物質が生成して、これらが排ガス中に混入して環境を汚染する恐れがある。これを防止するには、有害物質の発生源となる非金属類を電気炉に持ち込まないことが一番であるが、実際の生産現場の状況を考えるとスクラップから非金属類を完璧に除去するのは不可能といえる。そこで、現実的な対策として排ガスを清浄化、無害化する技術の開発が必要となる。

電気炉排ガス中の有害有機物質の除去方法としては、ごみ焼却の分野で開発、実用化されている技術、すなわち排ガスを高温燃焼して有害有機物質を分解し、その後急速冷却することにより再合成を防止すること、さらに、微量に残留する有害有機物質を活性炭などに吸着させる方法が検討されている。

環境問題が日増しに厳しくなる昨今、電気炉排ガスの高浄化はスクラップを有効にリサイクルするためには不可欠の条件であり、今後より一層の技術開発が望まれる。

## 4 新製鋼プロセス・フォーラムの取り組み状況

前項までに述べてきたように、スクラップリサイクル処理は回収したスクラップの分別工程に始まり、不純物除去工程、予熱・溶解工程、排ガス処理工程に至る多面的な取り組みが必要となる。こうした観点からスクラップを総合的に研究する場として、1990年に国家プロジェクト、通称「新製鋼プロセス・フォーラム」が発足した。本プロジェクトの目的は、鉄鋼製品の高級化(合金化、表面処理など)に伴って品質の低下した老廃スクラップからCu、Sn等の不純物を除去してスクラップの回生処理を行い、このスクラップを溶解炉から発生する排ガスで予熱して炉に装入し、使用エネルギーの少ない溶解法を確立するとともに、排ガスを無害化して安定したスクラップリサイクルシステムを開発することにある。本プロジェクトは通商産業省の補助金を受け、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)と(財)金属系材料研究開発センター(JRCM)が日仏の鉄鋼メーカー12社と共同で活動している。

図7は新製鋼プロセス・フォーラム研究開発の技術構成を示したもので<sup>18)</sup>、ブロックA、ブロックB、ブロックCの3分野から構成されている。ブロックAはスクラップの事前処理技術で、低温破碎と自動識別分離によるCuの除去を主眼としている<sup>19)</sup>。ブロックCは、溶鉄中のCu、Snの除去技術であり具体的には減圧・プラズマ加熱下での弱酸化剤粉体吹きつけ法の研究<sup>15)</sup>である。ブロックBは回生したスクラップを前提とした予熱・溶解と排ガス清浄化に関する

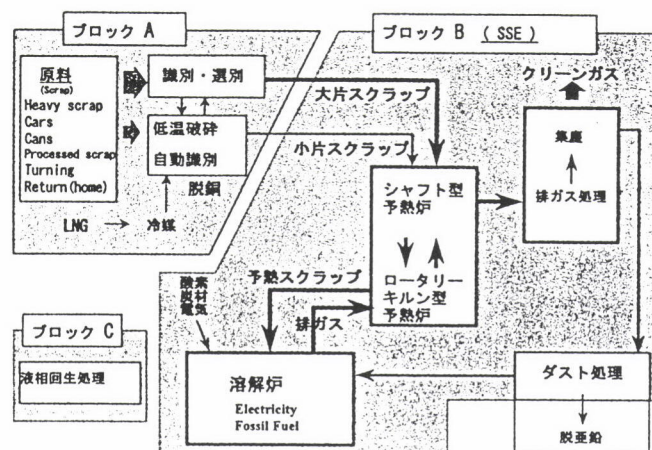


図7 新製鋼プロセス・フォーラム研究開発の技術構成<sup>18)</sup>

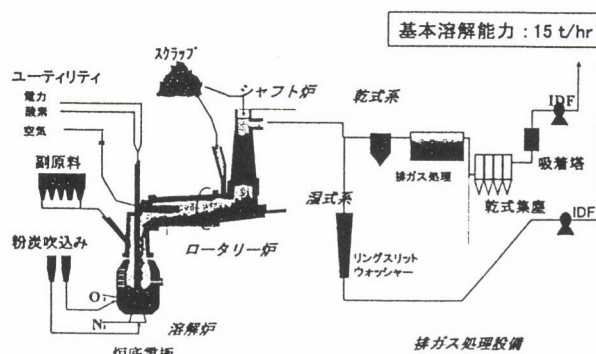


図8 新製鋼プロセス・フォーラム予熱・溶解炉の概要<sup>18)</sup>

技術で、現在、新日本製鐵(株)技術開発本部(君津製鐵所構内)に設置した研究設備を用いて研究中である。図8にその研究設備の概要を示す<sup>18)</sup>。溶解炉は電気炉型、転炉型、充填層型の3方式からなり、スクラップ予熱炉はシャフト炉とロータリー炉を備えている。この設備を用いて排ガスによる最適スクラップ予熱法、溶解炉における電力/化石燃料の最適バランス、排ガス中の有害物質の抑制などの研究を行う計画である。

## 5 おわりに

以上、鉄スクラップの実態とリサイクル技術の現状、課題について述べたが、スクラップのリサイクルシステムを完璧なものとするには本稿で紹介した技術の確立以前にスクラップの回収、再利用に対する社会的認識を高め、廃棄・収集段階での分別が徹底されるような社会体制の整備が不可欠である。勿論、スクラップの発生を抑制する諸対策、例えば鋼材製品の寿命を延長させたり使用済みの製品が再利用できるような方策も重要である。

また、リサイクルしやすい材料設計技術、不純物元素の影響を軽減できる鋼材設計技術などもリサイクルを支えるもう一方の重要な技術になる。これらの諸対策が実施されれば安定したスクラップリサイクル社会が確立し、将来にわたって発生するスクラップの全量再利用が可能となり、鉄資源の有効活用となるだけでなく炭酸ガス削減にも貢献できる。このような効果を享受するためにも、その基盤体制の確立と技術の一刻も早い普及が強く望まれるところである。

#### 引用文献

- 1) 森寺弘充：リサイクル工学，鈴木 胖 編著，エネルギー・資源学会，(1996)
- 2) 茅 陽一：地球環境工学ハンドブック，オーム社，(1991)
- 3) 鉄源年報，日本鉄源協会，9 (1998)
- 4) 鉄リサイクル事業のマニュアルブック，日本鉄リサイクル工業会，(1992)
- 5) 松岡滋樹：鉄スクラップの発生と利用，鉄鋼界，2 (1995)，11.
- 6) 柴田浩司：トランプエレメントの鉄鋼材料科学，日本鉄鋼協会，(1997)
- 7) 鉄鋼界報，日本鉄鋼連盟，1659 (1995)
- 8) 水上義正：計測と制御，36 (1997)，10，691.
- 9) 佐野信雄：鉄スクラップ中のトランプエレメント分離法に関する基礎的検討，日本鉄鋼協会，(1996)
- 10) JRCM NEWS，金属系材料研究開発センター，132 (1997)
- 11) 赤木俊夫，長谷川昇，田中富三男：CAMP ISIJ，10 (1997)，1031.
- 12) 田村史彦，小川兼広，松本 洋：CAMP ISIJ，9 (1996)，806.
- 13) 山本高郁，石田博章，池宮洋行，伊藤義起，小川兼広：CAMP ISIJ，10 (1997)，986.
- 14) 例えば出向井登，池田雅宣，杉浦三朗：日本金属学会シンポジウム 金属スクラップからの不純物除去 予稿集，1 (1990)
- 15) 西 隆之，深川 信，眞目 薫，松尾 亨：CAMP ISIJ，11 (1998)，816.
- 16) 森 広司：第165，166回西山記念講座，日本鉄鋼協会，(1997)，119.
- 17) 武内美継：第165，166回西山記念講座，日本鉄鋼協会，(1997)，151.
- 18) JRCM NEWS，金属系材料研究開発センター，143 (1998)
- 19) 山名 寿：鉄鋼工学セミナーテキスト，日本鉄鋼協会，23 (1997)，184.

(1999年1月25日受付)