

令和３年度産業経済研究委託事業

カーボンニュートラルを踏まえた我が国金属産業の
持続的発展に向けた調査事業

報告書

令和４年２月

日鉄総研株式会社

内容

I. 事業目的	4
II. 調査結果	7
1. 電炉法による高級鋼製造における技術的課題に関する調査	7
1-1. スクラップ電炉での高級鋼製造における技術的課題	7
1-2. トランプエレメントの概念とその成分のバラツキ	9
1-3. トランプエレメント及び窒素の影響	12
(1) トランプエレメントの鉄鋼材料への影響	12
(2) 窒素の鉄鋼材料への影響	17
1-4. 溶鉄、固体鉄からのトランプエレメント除去技術	20
(1) 気化蒸発	21
(2) フラックス精錬	22
(3) 固相分離	24
(4) その他	24
(5) まとめ	24
1-5. トランプエレメントの影響緩和・無害化・利用技術	24
(1) Cuによる高温脆化割れ対策	24
(2) 影響緩和・無害化技術と課題	27
(3) 熱処理、合金元素としての利用例	28
1-6. 電炉による高純度鋼製造技術の現状	31
(1) 電炉技術の進歩	31
(2) 電炉における低窒素鋼製造技術	33
1-7. 北米電炉ミニミルによる高級鋼製造技術の発展	36
1-8. 電炉法による高級鋼製造における技術的課題に関する総括	37
2. 日本におけるスクラップ需給並びに高品位化の方向性に関する調査	40
2-1. 日本におけるスクラップの発生の実態	40
(1) スクラップ取引の概要	40
(2) スクラップの加工処理	41
(3) スクラップの呼称	42
2-2. スクラップのハンドリング	43
(1) 発生源ごとのスクラップのハンドリング	44
(2) スクラップの高度利用	45
2-3. 日本のスクラップの発生量の実績	51
(1) 種類別スクラップ発生量の推移	52
(2) 部門別・等級別スクラップ発生量の推移	53
(3) 輸出入の状況	54
2-4. 日本のスクラップ需給の予測（2030年、2050年）	54
(1) 粗鋼生産量シナリオ	55
(2) スクラップ発生量予測の考え方	56

（３）スクラップ発生量予測結果	59
（４）スクラップ消費とのバランスの考察	62
2－5．日本におけるスクラップ需給並びに高品位化の方向性に関する総括.....	64
3．中国におけるスクラップの需給見通しに関する調査	66
3－1．中国におけるスクラップの発生とハンドリング状況	66
（１）中国の電炉操業状況	66
（２）中国のスクラップ発生と活用状況	69
3－2．スクラップ産業の現状と政策動向	71
（１）スクラップ産業の現状	71
（２）スクラップ関連政策動向	73
（３）スクラップ輸出入動向	77
3－3．2030 年、2050 年におけるスクラップ発生量の予測	78
（１）人口、国内需要、粗鋼生産量予測	78
（２）スクラップ発生量試算設定	80
（３）2030 年、2050 年におけるスクラップ発生量の予測	81
3－4．中国におけるスクラップの需給見通しに関する総括	83
Ⅲ．政策に関する提言	84
Ⅳ．今後の課題.....	85

I. 事業目的

鉄鋼業は、国内の社会インフラはもとより、外貨獲得の大きな源泉となっている自動車等我が国製造業の競争力を支える基幹産業である。世界の粗鋼生産量 19.5 億トン（2021 暦年、worldsteel 公表値[1]、以下同）のうち、我が国は 9630 万トンと、中国、インドに次ぐ生産量を誇っている。我が国鉄鋼業の特徴は、世界 3 位の生産量に加え、高張力鋼板や電磁鋼板に代表されるいわゆる「高級鋼*1」の比率が高いところにある。我が国の高級鋼は、主として天然資源ルートの転炉によって生産されており、鉄鉱石の還元に伴う大量の CO2 排出が避けられない。一方国内電炉では、比較的不純物の影響を受けにくい棒鋼や線材、形鋼などが、スクラップを主原料として生産されている。

気候変動問題への対応強化の気運の一層の高まりから、我が国も昨年、2050 年に向けた長期戦略[2]、並びに 2030 年 NDC[3]の目標を大幅に引き上げた。また鉄鋼需要家からも、カーボンフットプリントの低い鉄鋼製品を求める声が高まった。かかる状況変化を受けて、これまで転炉において高級鋼を生産していた高炉一貫メーカーに、電炉への転換の動きがみられるようになった[4]。

一般に電炉では、スクラップを主原料とするため、鉄鉱石還元に伴う CO2 排出を回避することができ利点がある一方、特に老廃スクラップに混入する不純物、特に Cu や Sn など、通常製鋼プロセスで除去できない元素（トランプエレメント）の影響で、これらの不純物の影響を受けやすい高級鋼の製造は困難とされてきた。スクラップベースの電炉で、現在転炉で生産されているような高級鋼を製造するには、スクラップの品位向上*2や、電炉における精錬技術の向上が求められると考えられる。また、将来の国内粗鋼生産や見掛粗鋼消費、鉄鋼蓄積の変化は、スクラップ発生量や構成など供給側に変化をもたらすと考えられ、一方需要側のスクラップ消費量や要求品位も変化すると考えられる。

将来の電炉による高級鋼製造の実現に向けては、これらの現実や課題を正確に把握し、それらの課題を技術的、あるいは制度的手段を用いて、解決していく必要がある。

本調査では、上記のような状況を踏まえ、まず電炉法による高級鋼製造における課題やそれらを解決する技術的手段の開発状況を明らかにする。次に、電炉法における原料となるスクラップの発生量の見通しを想定することにより、我が国鉄鋼業の持続的な発展に向けた将来像や課題について調査・分析を行う。また、世界粗鋼生産の半分以上を占め日本とアジア市場を共有することから、我が国のスクラップ輸出入に与える影響が大きい中国を対象にスクラップの発生想定や政策動向について調査・分析を行う。

*1 高級鋼

「高級鋼」に対する学術的、定量的な定義は存在しない。この調査では、高級鋼として、現在国内で一般的に転炉によって生産されている「需要家に対して性能を保証した上で供給される鋼材」と定義する。即ち、この場合、製造者側で需要家における使用環境、設計施工までを考慮し、ばらつきを含めた材料特性を保証する鋼材商品、ということになる。このような鋼材は、製造者側の責任において、トランプエレメントと称される Cu や Sn 等の成分も含めた化学成分の設計から製造プロセス設計を経て性能保証を行うことになるが、この場合、予期せぬ不純物の混入による性能低下は許容できない。

一方、規格材として、例えば JIS 規格に適合する材料を商品とする場合は、一般にはこのような性能保証は行われず、あくまで記述された規格を満足するもの、との位置づけになる。下表の

ように、例えば、鉄筋コンクリート用棒鋼[5]や一般構造用軽量形鋼[6]等の電炉材の代表鋼種にはCu、Sn、Cr、Ni、Moといったトランプエレメント成分について特に定めが無い。

表 0- 1 構造用棒鋼等の鋼種の JIS 規格と化学成分への規制[7]

構造用 棒鋼・形鋼・鋼板・鋼帯に関するJIS規格一覧					Cu		Sn		Cr		Ni		Mo		その他の 化学成分
					下限	上限	下限	上限	下限	上限	下限	上限	下限	上限	
JIS	G	3101	2015	一般構造用圧延鋼材	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3105	2004	チェーン用丸鋼	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3106	2015	溶接構造用圧延鋼材	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3108	2004	みがき棒鋼材用一般鋼材	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3109	2008	PC鋼棒	—	0.30	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3112	2010	鉄筋コンクリート用棒鋼	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3114	2016	溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材	0.30	0.50	—	—	0.45	0.75	0.05	0.30	—	0.15	有
JIS	G	3117	2017	鉄筋コンクリート用再生棒鋼	—	0.10	—	—	—	0.50	—	0.30	—	0.35	有
JIS	G	3123	2004	みがき棒鋼	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	無
JIS	G	3125	2015	高耐候性圧延鋼材	0.25	0.55	—	—	0.30	1.25	—	0.65	—	—	有
JIS	G	3128	2009	溶接構造用高降伏点鋼板	—	0.50	—	—	—	1.20	—	—	—	0.60	有
JIS	G	3129	2018	鉄塔用高張力鋼鋼材	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3136	2012	建築構造用圧延鋼材	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3137	2008	細径異形PC鋼棒	—	0.30	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3138	2005	建築構造用圧延棒材	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3140	2011	橋梁用高降伏点鋼板	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3350	2017	一般構造用軽量形鋼	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有
JIS	G	3353	2011	一般構造用溶接軽量H形鋼	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	有

各鋼種規格にて複数の品種の化学成分の定めがあり、上表は各鋼種規格の代表品種の成分値だけを抽出したもの

なお、鋼材品種を電炉・転炉比率で比較すると、一般に形鋼、棒鋼は電炉比率が高く、熱延鋼板、冷延鋼板では高炉比率が高い。また、線材については高炭素線材（一般には、スチールコードやピアノ線のような高強度鋼）は転炉鋼比率が高く、その他は電炉鋼比率が高い。

表 0- 2 主要鋼材品種の電炉・転炉比率

普通鋼鋼材		鋼材生産高		
		うち電炉	うち高炉	計（万トン）
	形鋼	71.8%	28.2%	521
	棒鋼	98.0%	0.6%	870
	線材	28.6%	71.4%	153
	うち高炭素線材	0.4%	99.6%	50
	熱延鋼板	3.5%	96.5%	4027
	冷延鋼板	0.3%	99.7%	1700

各種データより日鉄総研作成

*2 スクラップの品位

スクラップ電炉で上述のような高級鋼を製造する場合、スクラップの分別段階で不純物を除去してトランプエレメントのばらつきを抑えるなど、成分が一定保証できるようなスクラップを使用する必要がある。このようなスクラップは図 0- 1 のように一般市中にて高級スクラップと称されるスクラップとは少し異なるため、図 0- 2 のように定義を整理する。

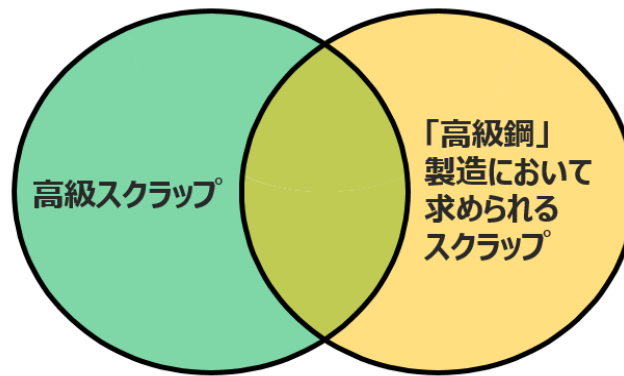


図 0- 1 定義のイメージ

名称	高級スクラップ	「高級鋼」製造において求められるスクラップ
定義	上級スクラップ、品質の良いスクラップ等。需要家ごとの品質要件に関係なく、市中で一般的に高値で取引されているもの	パフォーマンスギャランティーを行う鋼材を製造する上で求められるスクラップ
要件	一般に、 ①嵩比重が高い ②出自が明らか ③不純物（ダスト）の混入が無い	成分が保証できるスクラップ
該当するスクラップ	新断、HS、場合によってはH1スクラップ	①加工スクラップ全般 一般に低級スクラップと言われるダライ粉も、分別管理が徹底され、成分が把握できる場合には該当し得る。 ②老廃スクラップの一部 例 1：事前に需要家と合意した手順で解体されたAプレス 例 2：細かく破碎して丁寧な分別回収を行い、独自の成分規格を付与したシュレッダー

図 0- 2 「高級スクラップ」と、高級鋼製造上求められるスクラップの定義

「高級スクラップ」は一般に上級スクラップ、品質の良いスクラップ等様々な呼称があるが、その定義は定まっていない。一般には①嵩比重が高く、②出自が明らか、③不純物（ダスト）の混入が無いものを指し、新断、HS が該当する。

H1 も HS と同じ厚さ（6mm 以上）の寸法で、嵩比重が高いスクラップではあるが、H2 以下のスクラップと分別管理されていない場合もあり、その場合は「高級スクラップ」とは見做されない。なお、新断、HS は一般に他の等級のスクラップと分けて管理されている。

高級鋼の製造において求められるスクラップは、不純物が少ないスクラップであり、発生源が明白であり成分値を把握することが容易な加工スクラップ、また高度な分別管理をして成分を一定担保できる一部の老廃スクラップが該当し、本報告書ではこれらを「高品位スクラップ」として定義している。なお、中国のスクラップについては国家標準 GB/ T4223-2017 の品質的要求を満たすものを高品位スクラップと定義する。

参考文献

- [1] worldsteel Association: “December 2021 crude steel production and 2021 global crude steel production totals” 25 Jan. 2022
- [2] パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略
- [3] 環境省: 日本のNDC (国が決定する貢献)
- [4] 例えば、「日本製鉄カーボンニュートラルビジョン 2050 ゼロカーボン・スチールへの挑戦」、日本製鉄、2021年3月30日
- [5] 日本規格協会: JIS G 3112 (2010) 鉄筋コンクリート用棒鋼
- [6] 日本規格協会: JIS G 3350 (2017) 一般構造用軽量形鋼
- [7] 日本規格協会: JIS ハンドブック
- [8] 日本鉄鋼連盟: 鉄鋼工場別生産実績 2019 年度計

Ⅱ. 調査結果

1. 電炉法による高級鋼製造における技術的課題に関する調査

1-1. スクラップ電炉での高級鋼製造における技術的課題

現在の鉄鋼製造法については、主として2種の製造法、すなわち、スクラップを主原料とし、電炉（製鋼用アーク炉、誘導炉等）を用いて鋼を製造する電炉法と、鉄鉱石を主たる原料とし、高炉において炭素による還元・溶解を行ない、転炉により鋼を製造する高炉－転炉一貫製鉄法がある。また近年は、天然ガスを用いて固体状の直接還元鉄を製造する製鉄法も拡大している。本調査ではスクラップを主原料として電炉にて高級鋼を製造する場合の課題について検討する。

需要家に対して性能を保証する高級鋼の製造においては、不純物の混入は性能低下につながるため、成分設計の段階から不純物元素を含めた緻密な設計を行う。従って、想定しない不純物はできるだけ低いことが高級鋼製造においては肝要である。また、P、S等の不純物は一般に製錬過程で除去されるが、Cu、Sn等一部の化学成分は鉄鋼精錬過程で除去することが困難で、そのような除去が難しい不純物をトランプエレメントと称する。トランプエレメントは赤熱高温脆化による割れ発生や、鋼材特性の劣化の原因となるため、トランプエレメントをコントロールすることが高級鋼製造における一つの課題となる。

また、電炉製鋼法では、大気中でのアーク溶解の際に窒素が溶鋼中に取り込まれやすい。鋼材の窒素濃度が高くなると、薄板鋼板のひずみ時効や、大入熱溶接部の低温靱性低下を生じる等の問題が発生するため、電炉製鋼法での低窒素化も高級鋼製造における課題となる。

更に、根源的な課題として、上述したトランプエレメントの鋼材特性への悪影響については、現時点で判明していない点が多い。そのため、上記トランプエレメントの濃度が不可避免的に高まるスクラップを主原料とし、窒素の濃度が高い電炉で高級鋼を製造するには、トランプエレメントの混入抑制や窒素の低減、あるいは許容範囲の明確化が課題となる。

スクラップ電炉での高級鋼製造における課題

課題	具体的な悪影響
トランプエレメント 対策	鋼材製造上のトラブル（例：CuやSnが原因となって赤熱高温脆化現象による割れ） 材質設計上予期しない濃度での元素混入による品質変化
低窒素化	ひずみ時効（プレス成型後のしわ発生） 溶接靱性低下

→上記の影響は一例。トランプエレメント、窒素が及ぼす影響は不明点が多い。

図 1- 1 スクラップ電炉での高級鋼製造における課題

世界の粗鋼生産の製鋼法別構成比を、図 1- 2 に示す。転炉鋼が全体の 70%以上を占めるが、電炉鋼の比率は徐々に上昇する傾向にあり、25～30%弱の範囲で推移している。

再掲となるが、鋼材品種の中で電炉と転炉比率が明確に差があるものについて言えば、一般に形鋼、棒鋼は電炉比率が高く、熱延鋼板、冷延鋼板では転炉鋼比率が高い。一方、線材については、高炭素線材（一般には、スチールコードやピアノ線のような高強度鋼）は転炉鋼比率が高く、その他は電炉鋼比率が高い。これは型鋼、棒鋼に比べ、熱延、冷延鋼板、あるいは高炭素線材では、欠陥の発生（表面の疵等の品位や割れ、破断）に対する感受性が高く、スクラップを主原料とする電炉鋼では、トランプエレメントの悪影響が大きく、製造が困難なためと思われる。実際、北米のミニミルでは、スクラップではなく、直接還元鉄を主要な原料として薄板系品種を製造している（1-7に説明）。

一方、電炉メーカーであっても、北米の Nucor や BigRiverSteel 等で、特に高級鋼材製造に向けた改善が行われている。ここでは主に、スクラップ使用量を抑え、直接還元鉄を利用している。世界的には、直接還元鉄自体の生産量は増加傾向にあり、2021 年は 1 億 t を超えた。直接還元鉄の利用の主たる目的は、スクラップ中に含まれる Cu、Sn 等のトランプエレメントの希釈材としての利用、および窒素の低減である。

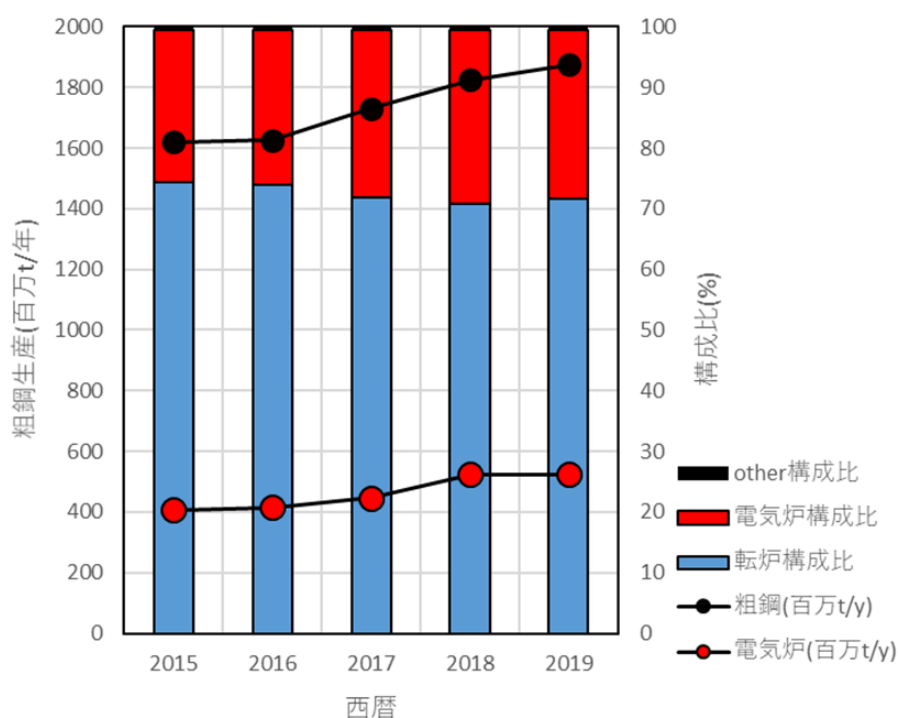


図 1- 2 世界の粗鋼生産量、製鋼炉構成比の推移
(World Steel Association の公開データ [1] に基づき作図)

表 1- 1 主要鋼材品種の電炉・転炉比率 [2]

普通鋼鋼材		鋼材生産高		
		うち電炉	うち高炉	計 (万トン)
形鋼		71.8%	28.2%	521
棒鋼		98.0%	0.6%	870
線材		28.6%	71.4%	153
うち高炭素線材		0.4%	99.6%	50
熱延鋼板		3.5%	96.5%	4027
冷延鋼板		0.3%	99.7%	1700

1-2. トランプ元素の概念とその成分のバラツキ

本報では、製鋼プロセスにおける精錬では除去し難いため、トランプ元素として、スクラップ中に濃化し易く、かつ鋼材製造プロセスや材質への影響が大きい元素として、Cu、Sn、Ni、Cr、Mo の 5 元素を取り上げる。更に、電炉鋼で一般に低減するのが困難とされてきた窒素を加え、これら 6 元素について調査、検討を行うこととする。

一般に、鉄鋼精錬においては、酸化精錬により不純物を除去するが、鉄より貴な金属は、一旦鉄中に取り込まれると、鉄に比べて酸化し難いため酸化精錬で除去することが困難であり、所謂、トランプ元素と称される。その代表例は、Cu、Sn、Ni である。また、酸化物の生成自由エネルギーが鉄に近い元素である Cr、Mo も低濃度までの酸化除去が困難となる。Cu、Sn は硫化精錬により除去でき

る可能性はあるが、溶鉄中の S 濃度を高める必要があり、実用化された例は無い。一方、Sn、Cu は蒸気圧が鉄より大きいので、蒸発分離も原理的には可能であるが、実用化された例はない。

スクラップの発生量の増加とリサイクルの繰り返しによるトランプエレメントの濃化が懸念され、1991 年から 1998 年にかけてスクラップ利用に関する国家プロジェクト「新製鋼フォーラム」が実施され多くの研究が大学・企業で行われた。溶鋼中に残存した本報告で取り上げる 5 つの元素について、鋼材特性に及ぼす影響が表 1-2 のように整理されている。

表 1-2 トランプエレメントの鋼材への悪影響（文献[3]に基づき一部引用）

成分	除去の難易度	鋼材への悪影響
Cu	かなり困難	0.2%程度以上で熱間加工性に悪影響
Sn	かなり困難	・ 0.04%程度で熱間加工性に悪影響 ・ 0.2%程度で冷間加工性や焼き戻し脆性に悪影響
Ni	困難	鋼材を硬くするので薄板などで問題
Cr	低濃度の除去はかなり難しい	冷間加工性に悪影響。鋼材を硬くするので薄板などでは問題
Mo	特殊条件での蒸発	鋼材を硬くするので薄板などでは問題

普通鋼電炉工業会では 1987 年から数年おきに電炉鉄筋棒鋼中のトランプエレメント濃度を調査してきている。その結果 2013 年調査までの期間では Cu, Sn の濃度はあまり変化がなかったと報告している[4]。一方、醍醐ら[5]は、将来に渡って濃化抑制を維持できるかを検証するために、スクラップに混入する Cu の由来（合金として意図的に投入される Cu、鋼材製造に使用されるスクラップに内在する Cu、リサイクル時に混入する Cu など）別に物質フロー分析（MFA）の予測モデルをたてて検証した。その結果、1980 年から 30 年間で老廃スクラップ中 Cu 濃度は約 0.05%上昇しているとし、それが製品の Cu 含有量に現れてこなかったのは、Cu を多く含む雑品スクラップの多くが輸出されたことと、自動車リサイクル法の施行の影響ではないかとしている。シミュレーション結果を受けて、今後も雑品スクラップの輸出規制の動向や、スクラップ処理における Cu 分離次第では Cu 濃度が許容を超える可能性があるかと警鐘している[5]。

醍醐ら[6]は、日本と中国で棒鋼スクラップを試料採集しトランプエレメント（Cu, Cr, Ni, Sn）を分析して、日本と中国のトランプエレメントの混入挙動を比較している。日本でのサンプル数は 107 本、中国は 26 本が採取され、その分析結果を 0.01%きざみでヒストグラム化した（図 1-4）。

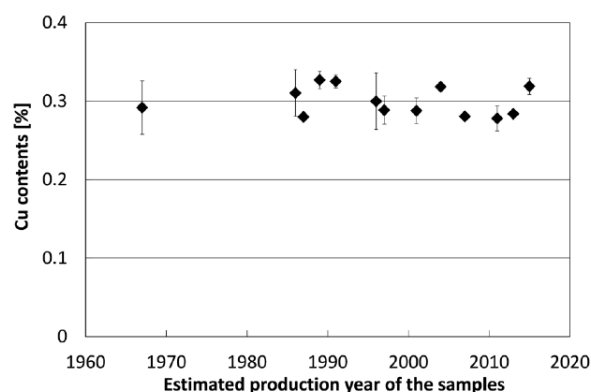


Fig. 2. Time-series Cu contents in EAF steel bars in Japan.

図 1-3 国内電炉材鉄筋の Cu 濃度推移[5]

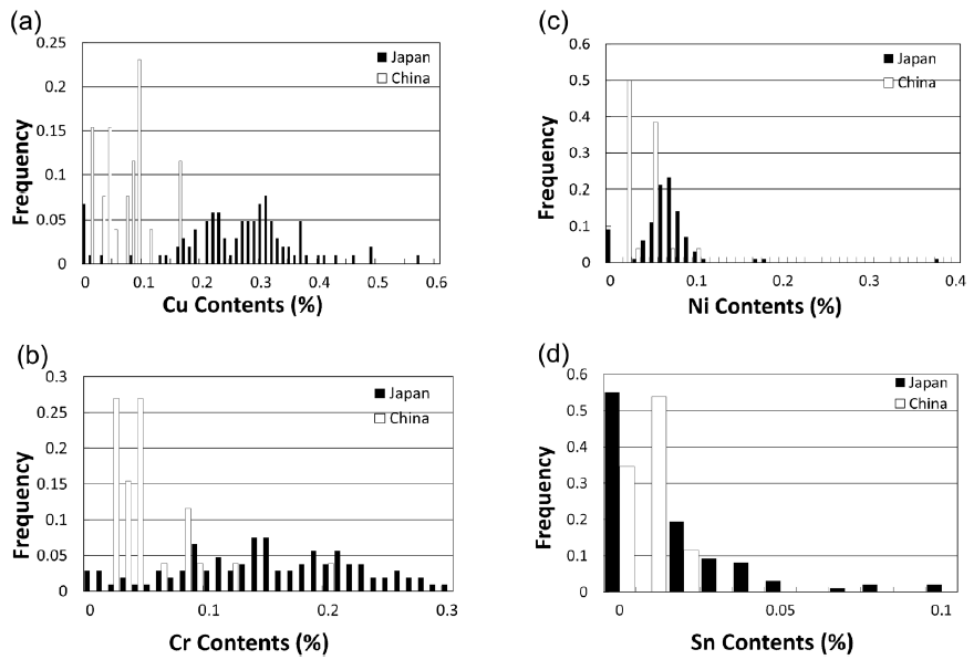


Fig. 1. Histograms of (a) Cu, (b) Cr, (c) Ni and (d) Sn compositions in steel bars specimens obtained in Japan and China.

図 1- 4 日本、中国における市販鉄筋材中のトランプ元素含有量の比較[6]

棒鋼中のトランプ元素を日中で比較すると、4 元素とも日本の方が平均値・最大値ともに高く、バラツキも大きい。その理由として

- ・中国では日本より粗鋼生産量に占める高炉比率が高く老廃スクラップの使用比率が低い。
- ・日本の電炉はスクラップを殆ど原料としているのに対して、中国では溶銑ないしは DRI で希釈する工場が多い（平均的なスクラップ比率は 50%とされている）。
- ・スクラップ処理方法が日本は機械分離であるのに対して中国はまだ手解体が多く Cu の回収率が高いことが挙げられている。

Daigo ら[7]は更に、日本の電炉製鉄メーカーのスクラップヤードから回収した棒鋼 100 本について成分分析を行い、トランプ元素および幾つかの成分について、含有量およびばらつきを評価した。結果は図 1-5 に示されている[7]。

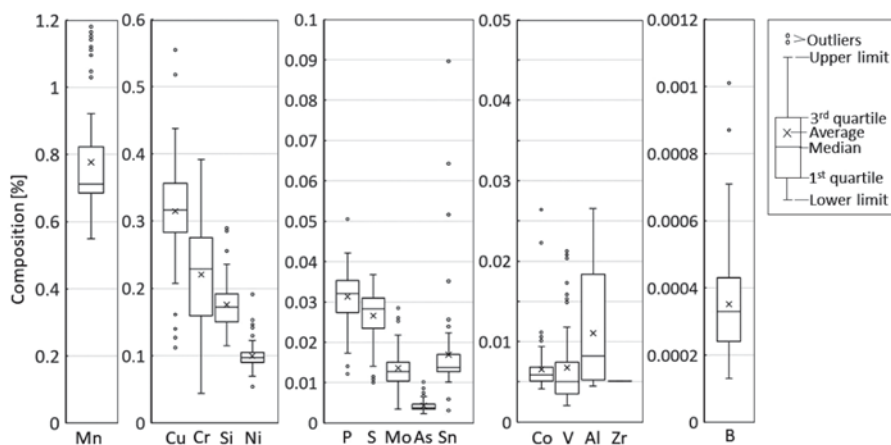


Fig. 3. Box and whisker chart of the impurity element content in the samples, where only samples containing the impurity were considered.

図 1- 5 サンプル中の不純物元素含有量の箱線図[7] (不純物を含むサンプルのみ考慮)

図 1-5 では、各元素において統計的な上下限範囲を大きく超えた点がある。スクラップ 100%を原料として製造する場合、予期せぬ大きなトランプエレメントの混入が起きる可能性があることを示しており、製造工程、あるいは鋼材特性に予期せぬ影響が及ぶ可能性がある。また、品質・材質のバラツキの原因になる。高級鋼としてスペックを保証する場合は、平均値的なトランプエレメントの影響のみならず、ばらつきも含めた成分設計、スペック保証が必要となる。

1-3. トランプエレメント及び窒素の影響

本章ではトランプエレメント及び窒素が鉄鋼材料へ及ぼす影響について各種文献から調査を行い、既存知見の整理を行った。トランプエレメント及び窒素の影響は、Cu や Sn が原因となって赤熱高温脆化現象による割れのように鋼材を製造する生産プロセス上の影響と、材質設計では予期できない濃度で混入する元素が及ぼす材質・品質の指標となる諸特性値への影響（製品への影響）に大きく 2 分される。表 1-3 に各成分ごとの生産プロセス上の影響と製品への影響をまとめた。

表 1-3 鋼材製造プロセスおよび製品に及ぼすトランプエレメントの影響まとめ（悪影響のみ）
（文献に基づき、日鉄総研にて作成）

元素	基礎物性への影響	生産プロセス上の影響	製品への影響					許容限 最も厳しい
			線材	薄板	厚板	溶接	加工	
N	・時効ひずみ ・溶接靱性低下		-伸線性低下	-ストレッチャーストレイン	-低温靱性低下	-溶接HAZ靱性低下		<0.003% 歪時効
Cu	・高温(900~1200℃)、酸化雰囲気での金属Cu析出脆化 ・冷間加工性低下(伸び、絞り減少) ・鍛接性減少	・連続铸造、加熱炉での高温脆化割れ(表面) ・表面研削等(増工程、歩留まり低下)最終製品への欠陥残留 ・成形性低下(深絞り)	-伸線性低下	-性形成低下	-焼戻し脆化	-HAZ靱性低下		<0.06% 深絞り性
Sn	・Cuとの共存により高温脆化を助長 ・冷間加工性低下(伸び、絞り減少)	・Cuによる高温脆化割れ著しく助長	-伸線性低下	-性形成低下	-対ラメラティア低下	-HAZ靱性低下		<0.010% 深絞り性
Ni	・0.5%までの範囲で引張強さ上昇、降伏点、伸び、絞りの低下、加工性、鍛接性低下 ・冷間加工性低下(伸び、絞り減少)		-伸線性低下	-性形成低下			-鍛接性低下	<0.5%
Cr	・0.5%までの範囲で引張強さ上昇、降伏点、伸び低下、加工性 ・炭化物形成 ・冷間加工性低下(伸び、絞り減少)	・製鋼スラグCr(VI)安定化対策	-伸線性低下	-性形成低下				<0.5%

(1) トランプエレメントの鉄鋼材料への影響

トランプエレメントの影響は、前述の新製鋼フォーラムなどこれまで多くの研究者により研究されており、表 1-4 に代表例を示す。

表 1- 4 トランプエレメントの鉄鋼材料への影響に関する主要な文献

元素	鋼種	報告年	概要	文献
Cu	炭素鋼	1995	Cuによる高温脆化に関しては多くの研究がある。その脆化機構は以下。高温での鉄の選択酸化により、鋼の表面付近のCu濃度がオーステナイト中のCuの固溶限を超え、液体Cuがオーステナイトスケール間に析出。そのCuがオーステナイト粒界に侵入して粒界から割れが発生する。本論文では、Cuによる高温脆化割れの機構を検討。	[8]
Cu, Sn等	—	1997	トランプエレメントの鋼材への悪影響および許容度(%)についての記載あり。Cuは0.2%程度以上で熱間加工性に影響を与え、Snは0.2%程度で冷間加工性は焼き戻し脆性に悪影響を与える。	[3]
Cu, Sn等	—	1997	Cuは概ね0.2%以上で悪影響がある。特に、薄板の成形性に対しては悪影響が大きいとされる。一方で、固溶強化による強化にも利用される場合がある。Snに関してはCuより低濃度で悪影響が顕在化することが知られている。	[9]
Cu, Sn等	—	1998	ECSCの後援のもと欧州鉄鋼業界が推進している「高品質製品のためのスクラップ・リサイクル」に関する多国籍プロジェクトの成果。鋼の特性に及ぼすトランプエレメントの影響を明確に定量的に評価することを目的とした。	[10]
Cu, Sn等	—	2006	トランプエレメントの影響について、悪影響と良影響に関して従来知見のレビューがなされている。悪影響については、結晶粒界の析出と、表面析出によるものがあり、量影響については、固溶によるものと析出によるものがある。	[11]
Sn	機械構造用鋼	2020	構造用鋼の機械的性質に及ぼすSnの影響について、ラボ溶解材による評価を行った。Snの添加により硬さ、強度は増加するものの、特に溶接部の対ラメラ特性に影響の大きい板厚方向の靱性低下が顕著であり、延性脆性遷移温度の上昇、吸収エネルギーに顕著な靱性低下が見られた。従って、構造用鋼に対して、Sn含有量に対しては十分な配慮が必要である。	[12]

表 1- 4 の文献の中で、スウェーデンの鉄鋼生産者協会（JERNKONTRET）が 2006 年に公開した文献[11]では、トランプエレメントを含む残留元素による生産プロセス、最終鋼材への影響について、詳細な文献レビューを行っている。

①Cu、Sn による高温脆化割れ

トランプエレメントによる悪影響については、Cu、Sn による高温脆化による割れの問題が重要であり、これまでに、非常に多くの報告がある。

この現象は、鋼中に Cu が含まれると、例えば、連続 casting 時に铸片表面温度が 1100℃付近で脆化が起き、铸片表面に割れが発生する現象である。含有する Cu、Sn の濃度や歪速度によって、割れの深さが変化する。このような割れが铸片表面に発生すると、製品表面疵の原因となるため、铸片表面の切削手入れが必要となり、歩留まり低下やコスト増の原因となる。また、疵が完全に除けない場合は、製品の表面欠陥として重大な結果を招く。

この Cu による高温脆化現象のメカニズムは、かなり解明がなされている。即ち、高温下で铸片表面にスケール（酸化鉄）が生成すると、Cu の溶解度が無くなり、鋼と固体スケール界面に溶融金属 Cu が析出し、溶融 Cu の鉄粒界への侵入が起き、粒界強度が低下して割れが生じることが主な機構である。Sn がわずかでも共存すると著しく助長される。これは、より低融点の金属 Cu-Sn 合金が析出することによる。

高温脆化割れは最悪の場合、铸造中のブレークアウトなど、操業トラブルの原因になるため、スクラップを原料としている電炉製鉄所ではトラブルを回避するために溶鋼中の Cu や Sn 濃度に対する管理基準を定めて操業している。

図 1-16 は高温脆化割れを模擬するため、試験片の高温引っ張り試験を行った際の試験片外観および表面付近のミクロ組織写真である。不活性雰囲気 Ar では割れは生じていないが、空気中では激しく割れが生じている[13]。また、ミクロ組織には、金属 Cu が観察される。1-16 [13]に示すように、この現象は、1000～1200℃の限られた温度範囲に現れることが一つの特徴であるが、これは、1080℃が純銅の融融温度であり、1000℃以上で溶融 Cu が生成すること、1200℃以上ではスケールが溶融酸化鉄状態となるため、生成した溶融 Cu が溶融酸化鉄に取り込まれ、遊離することから、スケール—鋼界面に溶融 Cu が生成するのがこの温度域に限られるため、との説明がなされている。

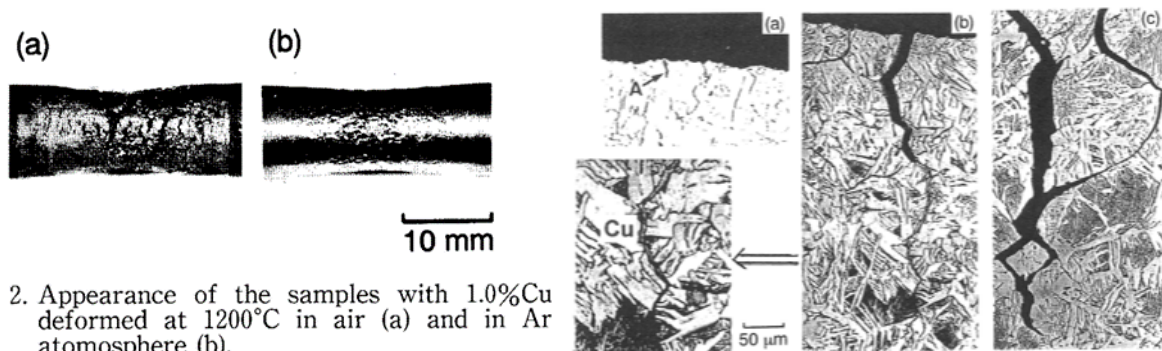


Fig. 2. Appearance of the samples with 1.0%Cu deformed at 1200°C in air (a) and in Ar atmosphere (b).

図 1- 6 Cu による高温脆化の模擬実験（高温引っ張り試験） [13]

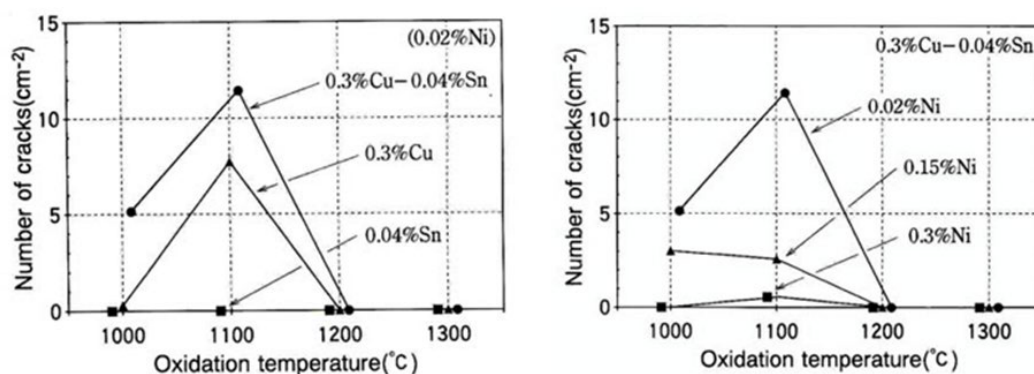


図 1- 7 高温引っ張り試験の温度と試験片の熱間割れ数の関係 [14]

また、Cu による高温脆化割れは、Sn の僅かな共存により、著しく助長されることが知られている（図 1-7 左図） [15]。これは、純 Cu より融点の低い Cu-Sn 合金が生成するためとの説明がされている。なお、Sn 単独では、高温脆化割れは生じない（図 1-7 左図）。

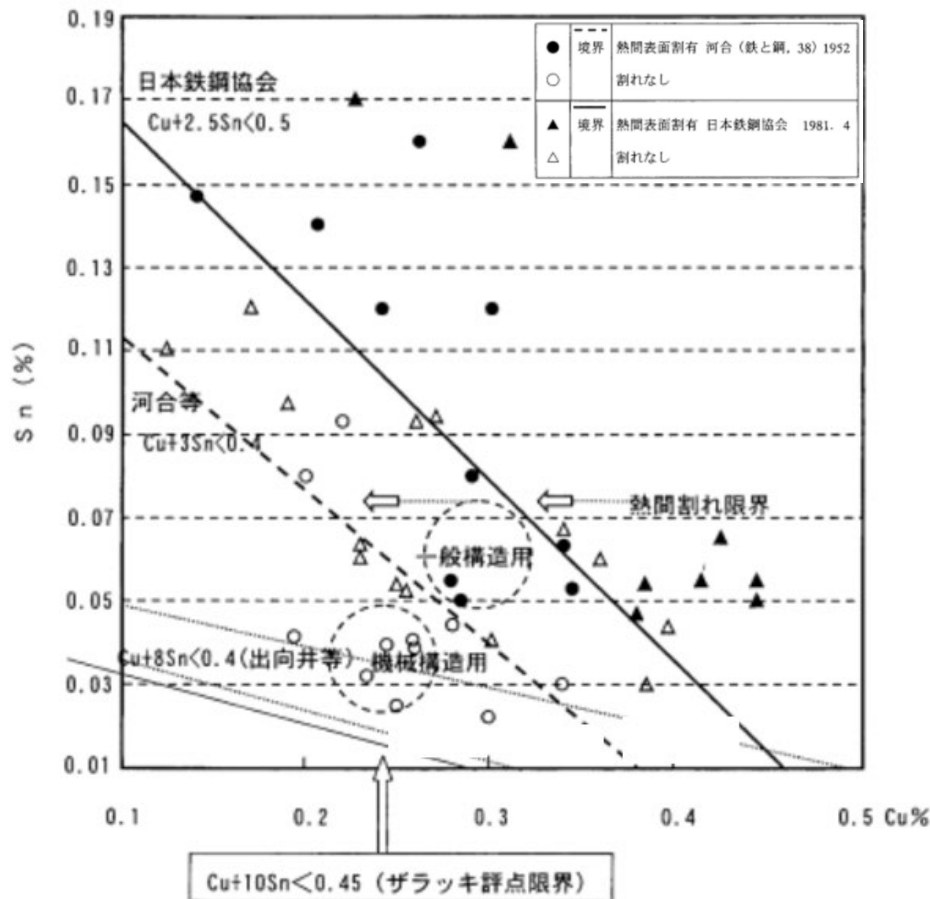


図 1- 8 熱間加工・表面割れの Cu・Sn の感受性[15]

②鋼材の加工性に及ぼすトランプ元素の影響

鋼材の製造工程においては、板材の圧延、線材の引き抜き加工等の熱間加工、冷間加工が行われる。また、焼入れ、焼き戻し、焼きなまし、あるいは焼ならし等の熱処理が行われる。これら製造工程において、トランプ元素による影響が報告されている。

熱間加工

上述の様に、主に Cu の熱間脆化割れに関する問題が研究されているが、Sn の粒界偏析も研究されている。熱間圧延時の変形抵抗についての研究では、Sn の存在により、熱間変形抵抗が増加することが報告されている。これは、Sn の粒界偏析に起因すると報告されている。この現象は、熱延における圧延設備負荷に繋がり、電力原単位の増加、あるいは、ロール寿命への影響が考えられる。Yuan ら [16]によれば、Sn が 0.061%含まれる [%C] ≤ 0.061%の低炭素鋼では、750℃付近に延性の最小値が表れる。また冷却速度が 10K/s で最も延性が低下する[16]。

Marique らによると、低炭素鋼において、熱間変形抵抗に及ぼすトランプ元素濃度の影響を評価した結果において、Sn が最も影響が大きく、Mo、As の順に影響が大きく、Cr はむしろ、低下傾向を示す[10]。

冷間加工&焼鈍

伸びと絞り性において、トランプ元素は主にマトリックスの硬化に寄与する (Ni、Cr、Cu、Mo、

Sn、As)。一般には低炭素系薄板や深絞り鋼板においては、これらのトランプエレメントは伸びを減少させ、r 値の減少と深絞り性の低下に繋がる、といった悪影響が報告されている。厚みが 0.8～1.0mm の冷延、焼鈍後の低炭素薄板 Al キルド鋼の降伏点強度、引っ張り強度、r 値に及ぼす Sn、As の影響についての報告[10]では、いずれの場合も降伏点強度、引っ張り強度が増加し、深絞り性の上で重要な指標である r 値が低下している。また、その影響は焼鈍条件（バッチ焼鈍 BA、連続焼鈍 CA）に依らない[10]。

一方、銅は、適切な加工と熱処理を行うと、成形性にプラスの効果を与える場合があることも示されている。

線材の引き抜き加工

スチールコード材等、高強度で強い伸線加工を施す材料で、合金元素の影響が調査されている。基本的には、パーライト組織の作り込みが重要な因子となるが、Cu の添加は、悪影響がもたらされるとの報告がある[17]。

スチールコード用線材の成分系として、以下のような例がある。Cu、Ni、Cr は各々 0.08%、0.06%、0.05% 以下に制約を課している[18]。

焼入れ性

ほとんどのトランプエレメントは、フェライトやパーライトの反応を遅らせることで焼入れ性を向上させる[11]。

低温靱性

使用環境の厳しい海洋構造物や LNG タンク材等では、しばしば、低温靱性が重要な鋼材特性として要求される。元来、鉄鋼材料の欠点ともいえる低温での脆化に対するトランプエレメントの影響は大変重要な問題と予想される。

C-Mn-Nb 高強度厚板の引張強度および延性脆性遷移温度に及ぼす Sn の影響については、特に、0.01% 程度の Sn が含まれると、引張強度は若干増加するが、延性脆性遷移温度の著しい上昇が報告されている[10]。また、Cu が含まれるとその傾向は助長される[10]。

③溶接性への影響

トランプエレメントの溶接性への影響については、殆どの場合、熱影響部（HAZ）の焼入れ性に悪影響を及ぼすとの報告が多い。

Inujima と Ichikawa[12]は、電炉鋼を模した表 1-5 に示す構造用鋼成分系で、溶接部の靱性に及ぼす Sn の影響について検討している。なお、供試材はラボ溶解にて作製したが、Sn の他に、微量の Cr、Ni が含まれ、窒素も 0.01% レベルと高いが、これは、スクラップを利用して製造することを想定し、意図的に添加、調整しているためである。

表 1-5 試験材の化学成分値[12]

Code	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Sn	N	O
SN1	0.15	0.28	1.20	0.0030	0.015	0.096	0.097	0.18	0.020	<0.0003	0.0102	0.0014
SN2	0.15	0.30	1.22	0.0029	0.016	0.097	0.099	0.18	0.021	0.019	0.0097	0.0014
SN3	0.15	0.30	1.19	0.0031	0.015	0.097	0.099	0.19	0.020	0.050	0.0101	0.0016
SN4	0.16	0.29	1.17	0.0030	0.015	0.097	0.098	0.19	0.019	0.100	0.0104	0.0016
SN5	0.16	0.30	1.20	0.0032	0.014	0.100	0.100	0.21	0.020	0.300	0.0103	0.0018

V<0.003, Nb<0.003, Mo<0.003, Ti<0.002, B<0.0003, Zn<0.002.

試験材は全て真空溶解にて溶製した鋼塊より作製した。圧延後、靱性を評価した。その際、圧延方向（L 方向）、断面（C 方向）、板厚方法（Z 方向）について実施した。図 1-9 に試験結果の一部を示すが、シャルピー衝撃試験の吸収エネルギーが、Sn の僅かな増加で著しく低下している点、また、Z 方向（耐ラメラティア）が特に影響が大きい点が注目される。大型構造用鋼でのこのような靱性低下は、構造物の安全性に大きく関わる。

この例より、使用環境が厳しく、重要な部材や大型構造物に用いられる鋼材の成分設計については、トランプエレメントの混入が予想される場合には、細心の注意が払われるべきであると言える。

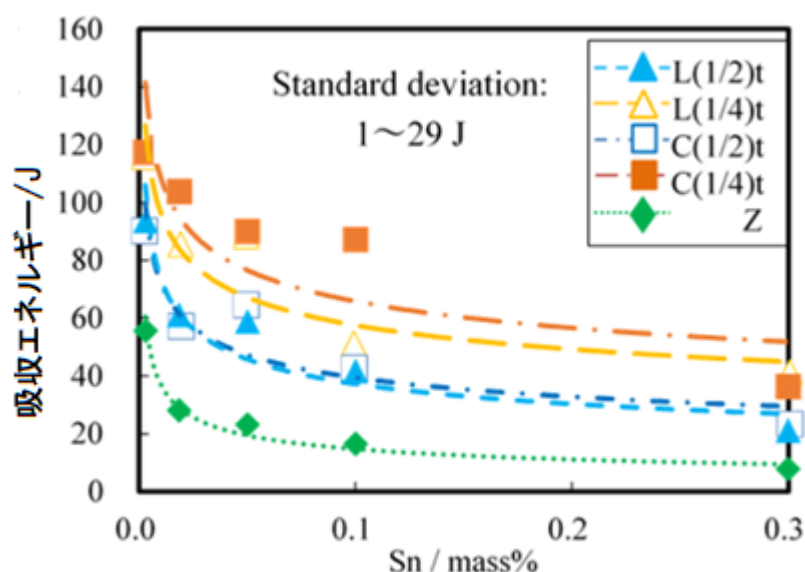


図 1- 9 シャルピー衝撃試験における吸収エネルギー (20℃) [12]
(試験片採取方向： L：圧延方向、C：板幅方向、Z：板厚方向、t：板厚)

(2) 窒素の鉄鋼材料への影響

N は、C と同様に、固溶窒素として存在すると、ひずみ時効の原因となるため、自動車用冷延鋼板など鋼種によっては、低 N が要求される。最近の電炉鋼では、スラグフォーミング等の技術により、溶解中の N ピックアップは低減傾向にはあるが、一般には高炉・転炉鋼と比べると電炉鋼の窒素量は高く、高 N が高級鋼製造時の課題となっている。本節では、窒素の鉄鋼材料の影響について、時効性への影響と溶接 HAZ 靱性への影響をまとめた。表 1-6 に窒素の鉄鋼材料への影響に関する主要な文献を示す。

表 1-6 窒素の鉄鋼材料への影響に関する主要な文献

影響	材料	報告年	内容	文献
歪時効	低炭素鋼	1965	C 0.01%、N 0.003~0.018%鋼についてひずみ時効による降伏応力の変化を調べた結果、ひずみ時効が2段に生じ、第1段ではN量が多くなるほど、時効速度が速く、硬化量も大きい。また、ひずみ時効は衝撃値にも大きな影響をもち、N量とともに衝撃値の低下が著しい。	[19]
歪時効	自動車用冷延鋼板	1987	ひずみ時効による降伏点伸びの増加は、結晶粒径が小さいほど、固溶Nが多いほど大きくなる。	[20]
溶接	Cr-Mo 系 80 キロ級高張力鋼	1974	熱影響部の粗粒化部（ボンド部）の靱性にNは悪影響を及ぼす。その影響度合は入熱の大きさによって異なり、小入熱サイドでは極端に高Nなものを除けばボンド部の靱性は全体的に高靱性レベルである。逆に、大入熱になるとN量とは無関係に全部低靱性となる。また、中間の入熱量（48Kj/cm）でNの影響が最も顕著である。Nが90ppm超になると急激な脆化が認められる。含B鋼でボンド部が大きく脆化する要因は、B析出物がオーステナイト粒界に連鎖状に出て粒界破壊が起こるためと考えられる。他に固溶N自体も脆化要因と考えられるが、どの程度影響しているかは不明。	[21]
溶接	大入熱溶接用HT80	1981	Bの焼入れ効果は共存するAl、N量によって影響される。冷却時間 Δt が60sより小さい場合には全B量5-10ppmでかつ、 $N \leq 32$ ppmのもので高靱性が得られる。焼入れに有効なBは焼入れ前の γ 粒界に偏析しているものだけであり、粒界のBNまたはBorocarbide Fe_2B (B, C) 6などは逆に変態を促進し、焼入れ性を低下させる。	[22]

①時効性への影響

窒素の影響が懸念される鋼材の一つに、深絞り用薄板鋼板の時効問題がある。焼鈍後の冷却中に固溶CやNが存在すると、転位が固着され、可動転位が減少することにより、降伏点伸びが発生し、ストレッチャー・ストレインというひずみ模様が現れる。プレス成形後にしわがよるため、特に自動車用外板等では致命的な欠陥につながる。一般的に調質圧延を行うことでストレッチャー・ストレインを防止しているが、鋼中の固溶C、Nが多いと調質圧延後、長時間放置しておく間に転位が再びC、Nで固着され、降伏点伸びが再れ、ストレッチャー・ストレインが発生する[20]。

図 1-10 に、40℃ひずみ時効後の降伏点伸びに及ぼすN (ppm) と結晶粒径 d (mm) の影響を示す[20]。ひずみ時効による降伏点伸びの増加は、結晶粒径が小さいほど、固溶Nが多いほど大きくなる[20]。例えば、N が 20ppm の場合、結晶粒径が 30~60 μm の範囲では、時効性は問題になりにくいですが、図 1-10 で N が 40ppm のケースでは、時効性が問題となる可能性が高い。

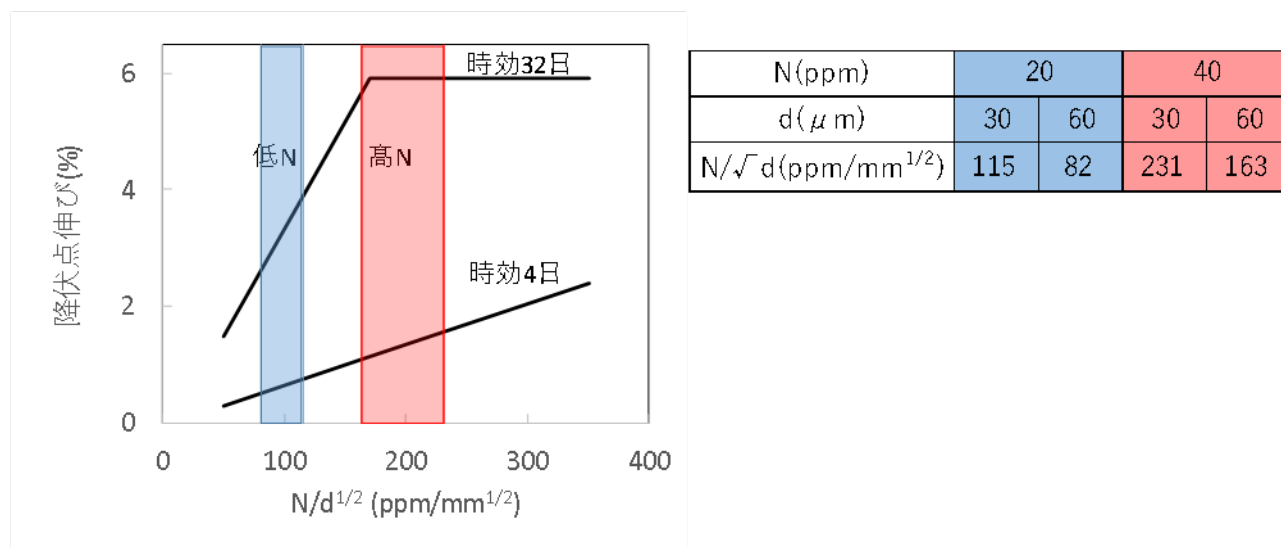


図 1- 10 40℃ひずみ時効後の降伏点伸びに及ぼす N (ppm) と結晶粒径 d (mm) の影響
[20]の図に基づき、日鉄総研にて N (ppm)、d (μm) を仮定したときの結果を追記

②溶接 HAZ (Heat Affected Zone : 熱影響部) 靱性への影響

窒素は、溶接 HAZ 靱性に悪影響を及ぼす。船舶、海洋構造物の大型化に伴う板厚の拡大と、溶接作業のパス数省略のニーズから、大入熱溶接を必要とするケースが増えている。この場合、HAZ の靱性改善のため、B を添加して焼入れ性の向上を図ることが多い。しかし、有効な B は焼入れ前の γ 粒界に偏析しているものだけであるが、フリーな窒素が存在すると、ほう化窒素 (BN) が生成する。粒界の BN は逆に変態を促進し、焼入れ性を低下させ [22]、溶接部の靱性を低下させる。

十河ら [21] は、B を含有する Cr-Mo 系 80 キロ級高張力鋼に対する N の溶接 HAZ 靱性への影響を検討した。30~110KJ/cm の範囲では、溶接入熱量の増加とともに 0°C における破壊試験の吸収エネルギーは低下するが、中間の入熱量 (48KJ/cm) で N の影響が顕著となり、N が 90ppm 超になると急激な脆化が認められる [21]。[21] では、含 B 鋼でボンド部が大きく脆化する要因は、B 析出物がオーステナイト粒界に連鎖状に出て粒界破壊が起こるためと考えられるほか、固溶 N 自体も脆化要因と考えられるが、どの程度影響しているかは不明である、と述べられている。

N による溶接 HAZ 靱性の低下は、坪井らも報告している [22]。

1-4. 溶鉄、固体鉄からのトランプエレメント除去技術

一般に、鉄から分離が困難な元素をトランプエレメントと称している訳であるが、フラックス精錬や真空蒸発により溶鉄から分離する方法、あるいは固体鉄から分離する方法が、従来、基礎研究として多く実施されている(表 1-7、1-8)。しかし、現状、実用化に至った例は無いと思われる。

表 1-7 溶融鉄からの脱 Cu、Sn に関する研究例

	報告者	年	フラックス、条件等	対象溶湯	対象元素	文献
1	Langenbergs ら	1955	Na ₂ S、Na ₂ SO ₄	炭素飽和	Cu	[23]
2	Harry ら	1969	Na ₂ SO ₄ +α	炭素飽和	Cu	[24]
3	Topkaya ら	1974	Na ₂ SO ₄	炭素飽和	Cu	[25]
4	H. Salomon ら	1977	真空蒸発	低炭素	Cu	[26]
5	Sofiah ら	1982	Na ₂ S	炭素飽和	Cu	[27]
6	Liu ら	1985	Na ₂ S-FeS	炭素飽和	Cu	[28]
7	Okazaki ら	1985	Na ₂ S-FeS、CaF ₂ -FeS、 CaS-FeS-FeO CaS-Na ₂ S-FeS	炭素飽和 低炭素	Cu、Sn	[29]
8	今井、佐野	1986 1987	Na ₂ S-FeS、K ₂ S-CaS	炭素飽和	Cu	[30]
9	白川、森、川合	1986	Na ₂ SO ₄ 、Na ₂ SO ₄ -FeS、 Na ₂ O-SiO ₂ 、CaO-CaF ₂ - Al ₂ O ₃	炭素飽和	Cu	[31]
10	松尾ら	1987	Na ₂ SO ₄ 、K ₂ SO ₄ 、 CaSO ₄ 、BaSO ₄	C : 2~5%	Cu	[32]
11	長坂、日野、萬谷	1991	FeS-Na ₂ SO ₄	炭素飽和	Cu	[33]
12	片山、佐野、雀部	1997	解説		Cu 他	[34]
13	長坂、日野	1997	減圧下蒸発	炭素飽和	Sn	[35]
14	丸山、片山(室工大)	1998	尿素吹き付け	低炭素鋼	Cu	[36]
15	西ら	1998	減圧下プラズマ粉体 上吹き脱炭	高炭素鋼	Cu、Sn	[37]
16	松尾ら	2000	蒸発(脱炭反応)	低炭~飽和	Cu、Sn	[38]
17	小野、碓井他	2003	蒸発	Fe-C、Fe-Si	Cu	[39]
16	Zaitsev, A. I., Zaitsev, N. E.,	2004	真空蒸発	純鉄	Cu	[40]
17	Zaitsev, A. I., Zaitsev, N. E.,	2004	真空蒸発	純鉄	Cu、Sn	[41]

18	小野、碓井	2006	Fe-Cu-B 二相分離	Fe-B	Cu	[42]
19	小野、碓井	2010	Fe-Ag-Cu	Fe-Ag-Csat	Cu	[43]
20	小野、碓井	2010	Fe-Ag-Sn	Fe-Ag-Csat	Sn	[44]
21	松浦、月橋ら	2013	FeO-SiO ₂ -CaCl ₂	低炭素	Cu	[45]
22	内田、松井、岸本、三木 (JFE)	2014	Na ₂ CO ₃ -FeS	炭素飽和	Cu	[46]
23	佐々木、内田他 (JFE)	2014	アンモニアガス吹き付け	炭素飽和	Sn	[47]
24	小野、竹内	2015	Fe-Ag-S	Fe-Ag	Cu	[48]

表 1-8 固体 Fe からの脱 Cu、Sn に関する研究例

	報告者	年	条件等	対象元素	文献
1	岩瀬	1995	溶融 Al への浸漬	Cu	[49]
2	真目ら	1995	アンモニア液への浸漬	Cu	[50]
3	須佐、永田	1996	Cl ₂ +O ₂ 混合ガス	Cu	[51]
4	西、長尾、小川 (神鋼)	1997	Sn めっき鋼板をロータリーキルン中で酸化	Sn	[52]

(1) 気化蒸発

鉄に比べ、Cu、Sn は蒸気圧が高い。この差を利用して気化させることで脱 Cu、Sn を試みた研究がある。そのうち、松尾ら[38]は、図 1-11 に示す真空溶解炉を用い、溶鉄からの気化反応による脱 Cu、Sn の実験を行っている。この場合、溶鉄中の C 濃度は 0.4~4% (炭素飽和) とした。

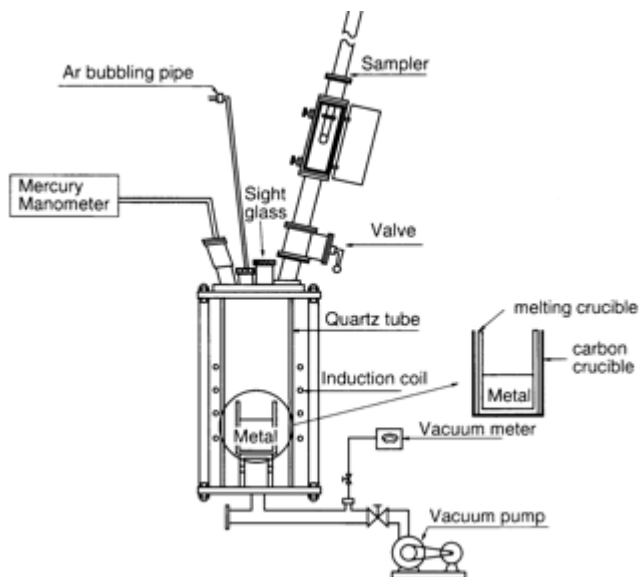


図 1-11 真空溶解装置 (松尾ら) [38]

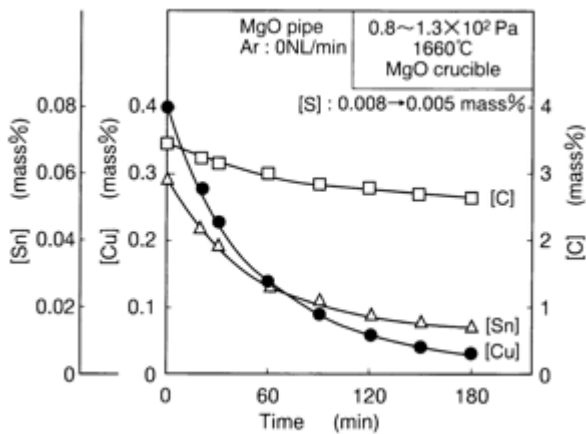


図 1- 12 処理中の溶鉄中 Cu、Sn、C 濃度変化 [38]

0.8~1.3×10²Pa の圧力下では、明確な溶鉄中 Cu、Sn 濃度の減少が認められる(図 1-12)。また、脱炭反応を同時に行うことで、CO 気泡生成に伴う反応界面積の増加により、反応は促進される、とした。

実際の製鋼プロセスにおいて、二次精錬に導入されている真空脱ガス設備の到達圧力は、この実験での圧力より 1 桁程度高く、反応を如何に促進するか（更に低圧化するか反応界面積の増大等）が課題となる。

(2) フラックス精錬

フラックス精錬の原理としては、酸化還元精錬での Cu、Sn の分離は困難であるため、硫化精錬を利用することが考えられている。硫化物フラックスを用いる最大の問題は、溶鉄中の硫黄濃度を必要以上に高めてしまうため、過大な脱硫処理が必要になることである。その点を改善するためには、反応生成物である CuS_{0.5} の活量を低下して安定化するフラックス組成を見出すことが重要である。代表的な例は、佐野らによる FeS-NaS_{0.5} 系硫化物フラックスによる検討である。この系での基礎研究は、他にも多数報告がある。また、炭素飽和溶鉄（溶鉄）を対象とすれば、溶鉄中の C-S、C-Cu の相互作用により、硫黄、Cu の活量は純溶鉄に比べて高くなり、純溶鉄に比べて有利になり得る。

図 1-13 は、佐野らによる実験結果 [53] を示す。横軸は、FeS-NaS_{0.5} 系硫化物フラックス中の NaS_{0.5} の濃度、左縦軸は、処理後の溶鉄中硫黄濃度、右縦軸は、処理後の溶鉄とフラックス中の Cu の分配比を示す。FeS 中の硫黄ポテンシャルは NaS_{0.5} を増すと減少するため、平衡する硫黄濃度は低下するが、Cu₂S と FeS 間の相互作用方が、NaS_{0.5} との相互作用より強いいため、分配比は低下する結果となっている。

処理後の溶鉄中 Cu 濃度 [Cu]_f フラックスと溶鉄の量比 F_v (kg-flux/kg-Fe) と、Cu 分配比 L_{Cu} と初期 Cu 濃度 [Cu]_i の関係は、単純な処理前後の Cu の物質バランスより、次式で計算できる。

$$[\%Cu]_f = [\%Cu]_i / (1 + F_v \cdot L_{Cu})$$

となる。この結果のケーススタディとして、初期溶鉄中 Cu 濃度が 0.5% と仮定した場合の溶鉄と F_v と処理後 Cu 濃度、脱 Cu 率 (= ([%Cu]_i - [%Cu]_f) / [%Cu]_i × 100%) の関係を図 1-14 に、F_v = 0.03 の下で、L_{Cu} と [%Cu]_f、溶鉄中硫黄濃度 [%S] の関係を図 1-15 に示す。

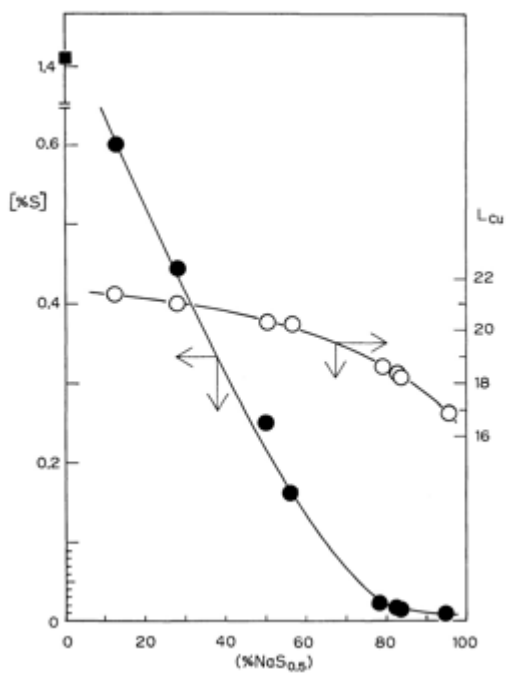


図 1- 13 FeS-Na₂S_{0.5} フラックス中 Na₂S_{0.5} 濃度と Cu 分配比 L_{Cu} 、溶鉄中 S 濃度の関係 (炭素飽和鉄、1200°C) [53]

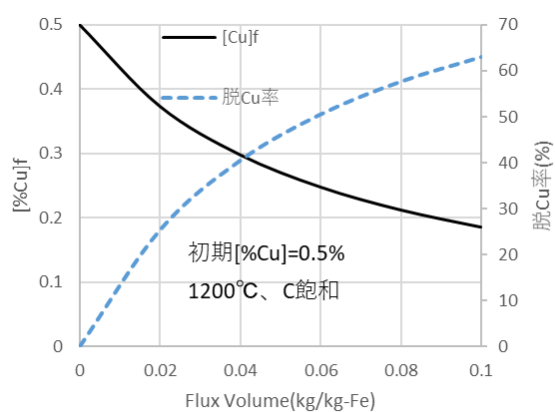


図 1- 14 フラックス/溶鉄量比と処理後 Cu 濃度、脱 Cu 率の関係

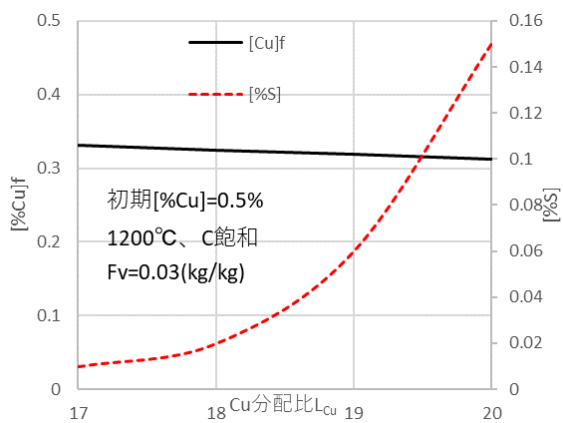


図 1- 15 Cu 分配比と処理後 Cu 濃度、溶鉄中硫黄濃度の関係

溶鉄中硫黄濃度は高炉溶銑で凡そ 0.02%程度であるが、脱 Cu 率を大きくするためには、溶銑中の硫黄濃度 [%S] を 1 桁程度大きくする必要があることになる。従って、脱 Cu 後には、高濃度硫黄溶銑の脱硫処理が必要であり、その精錬負荷（石灰等の精錬剤の量、および熱ロス）が相当大きくなると想定される。更に、使用後の硫化物フラックス、脱硫処理スラグの処理も大きな負荷となると予想される。硫化物フラックスによる脱 Cu 処理が実用に至っていない理由は、これらの点にある。

（３）固相分離

固体鉄からの Cu や Sn の分離法として、Fe との Cu、Sn の化学ポテンシャル差を利用した方法について基礎実験が成されているが、実用上は、固体鉄中での Cu や Sn の拡散は非常に遅く、速度的に、可能性は低い。

（４）その他

溶鉄からの他の脱 Cu、Sn 法として、アンモニアガスを吹き付ける[47]、減圧下でプラズマを利用する[37]等の方法が基礎実験として行われているが、実用化に至った例は無い。

（５）まとめ

トランブエレメントの除去方法として、基礎実験の報告は相当数存在するが、実用化に至った例は無い。気化、硫化物利用、固相分離等の方法について、各々実用化には困難を伴う。実際には、スクラップ状態で破碎、分別等の方法で分離する方が現実的であり、容易であると思われる。

１－５．トランブエレメントの影響緩和・無害化・利用技術

（１）Cu による高温脆化割れ対策

トランブエレメントの影響として最も大きな影響をもたらす Cu による高温脆化割れ対策として、緩和・無害化する技術の研究は、現象の解明と、影響を緩和する対策が検討されてきた。その主なものを以下に示す。

- ①Ni, Si, B 等の合金元素添加による物理冶金的な抑制効果
- ②高温保持による脆化抑制
- ③ショットピーニングによる割れ抑制
- ④連鑄二次冷強冷化による割れ温度域回避
- ⑤急冷凝固&無酸化鑄造

表 1-9 に代表的な文献を示す。

表 1-9 Cuによる高温脆化割れ対策に関連する文献

対策	発表年	タイトル	文献
①	1997	Cu含有鋼中のNi, Snによる熱間割れの変化に対する合金状態図からの定量的研究	[54]
①	2001	Effects of C and P on surface hot shortness of steel due to Cu mixed from steel scrap	[55]
①	2002	Suppression of Surface Hot Shortness due to Cu in Recycled Steels	[56]
①	2002	Effect of Boron on Copper Induced Surface Hot Shortness of 0.1% Carbon Steel	[57]
③	2009	Cu鋼の表面赤熱脆性に及ぼすショットピーニングの影響	[58]
④	1996	最近の電気炉操業と新鉄源の展望	[59]
⑤	2008	双ロール式ストリップキャスターの開発と商用化	[60]

イ) Ni 添加による Cu 脆化割れの抑制

Cu による高温脆化割れ対策として、Ni 添加によりかなり低減が可能であることが従来から知られており、実際に行われている。このメカニズムについて、赤松らはFe-Ni-Cu 三元計算状態図を用いて説明した[54]。

①鋼-スケール界面に熔融 Cu が析出した場合、Ni の添加量を増してゆくと、 γ -液相(L) 共存領域の固相側成が図 1-16 の $a \rightarrow b \rightarrow c$ と変化して Ni リッチ側に変化する。その時、図 1-17 に示すように、液相量は減少する。そのため、Fe の γ 粒界に浸潤し難くなる。

②Cu が Ni と合金になることで融点が高くなり、粘性が上がるため、 γ 鉄粒界に浸透しにくくなる。

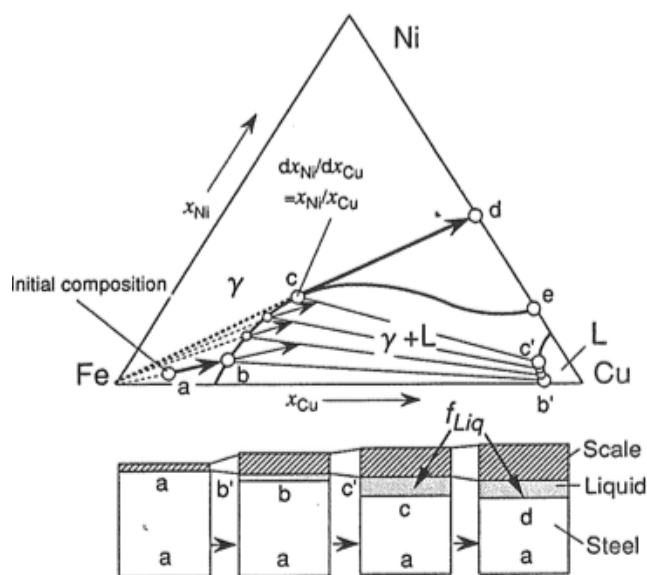


図 1- 16 Fe-Ni-Cu 系計算状態図と Ni 添加による Cu 高温脆化割れ低減機構 [54]

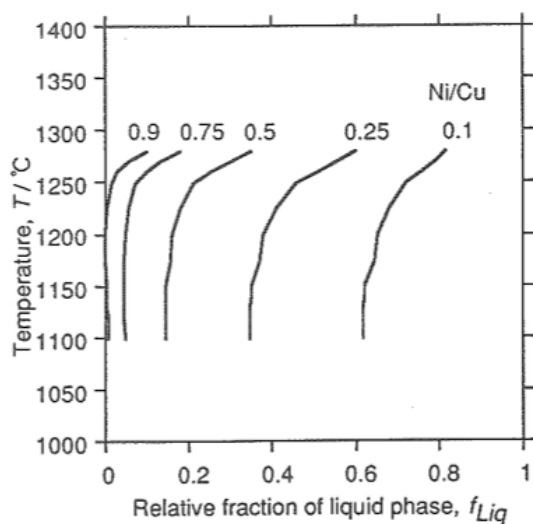


図 1- 17 Ni/Cu 比と液相量（相対値）の関係[54]

ロ）連続鋳造における二次冷却強冷化による割れ防止

Cu による高温脆化割れの問題は連続鋳造工程で顕在化することが多い。この現象は、例えば、図 1-7 左図に示されているように、温度域が 1000～1200℃の範囲に限られているため、連続鋳造においてこの温度域を避けるため、二次冷却を強化し、鋳片表面温度を 1000℃以下に早期に低下させる対策が考えられる。

図 1-18 にトピー工業から報告された例[59]を示すが、冷却水量を通常の 0.25ℓ/kg-s から 1.44ℓ/kg-s と 6 倍程度に増加することで、割れ深さが軽減されている。ただし、皆無に出来る訳では無い。

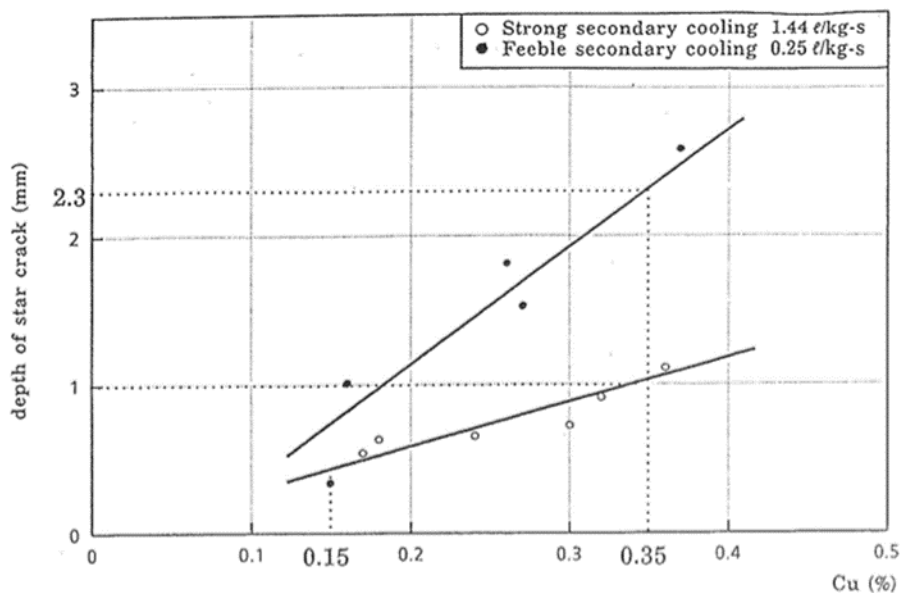


図 1- 18 Cu 濃度と鋳片表面のクラック深さの関係[59]

ハ) 無酸化 casting

北米の電炉メーカーである Nucor と IHI が共同で開発した、双ロール法による薄板を直接 casting するストリップキャスターについての報告がある[60]。0.85~1.5mm の薄板を直接 casting 込む際には、歩留上、スケール生成は重大な問題である。そのため、図 1-19[61]に示すように、圧延機に至る casting パス全体を不活性雰囲気としている。その結果、Cu による高温脆化割れも、低減あるいは、防止出来ている可能性がある。

図 1-19 に示す様に、Nucor、IHI、BlueScpoe の 3 社共同でこれに関連するものと思われる特許が出願されている。タイトルは、「High strength high ductility high copper low alloy thin cast strip product and method for making the same」となっており、Cu ハイテンを直接製造する内容となっている。

その発明の概要を以下に示す。

「本発明の高 Cu 含有炭素合金鋼板は、(i) 重量比で、炭素が 0.15~0.50%、クロムが 1.0%未満、マンガンが 3.0~9.0%、ケイ素が 0.2~3.5%、Cu が 0.5%以上、アルミニウムが 0.01%未満、少なくとも 50 または 100ppm の総酸素量、(ii) Ni が 0.5%未満、(iii) 残りの鉄および溶解により生じた不純物を含む casting 時の炭素合金鋼板を製造する溶融物を準備し、溶融物を固化して冷却することにより製造される。非酸化性雰囲気中で厚さ 10mm 以下の板状にし、1000~2000℃の冷却速度で 1080℃以下に冷却する。その後、熱間圧延を行い、10~50%の圧下率で、900MPa 以上の引張強度と 15%以上の伸びを有する組織を形成する。」

即ち、Cu が高く、Ni を含まない成分で casting 可能ということを示している。

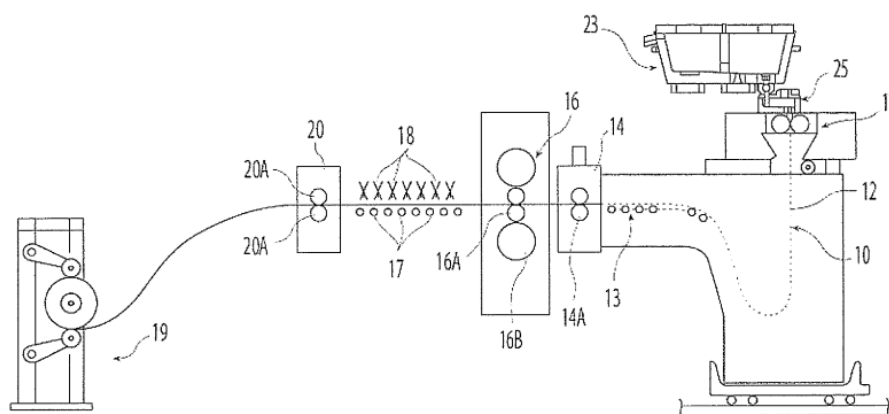


Fig. 1

図 1-19 Nucor 出願特許中の図面[61]

(2) 影響緩和・無害化技術と課題

Cu による熱間脆化割れ対策について、(1) では、Ni 添加について記したが、新製鋼フォーラム当時から物理冶金的な関連する研究論文を多数執筆されていた東大の長崎先生にヒアリングを行った際、当時 Ni 以外の元素による対策を研究したが 1 つだけの方法で抑制する事には無理があり抜本的な解決策は開発されていなかった、との見解を示された。現在、実際に行われている Ni 添加は有効な方法ではあるが、Ni 自体が高価な合金元素である点から、コストアップの問題がある。また、薄板の深絞り用鋼板等に適用することは成形性を悪化させることから難しいと思われる。ショットピーニングについても、

工業規模で大量に行うには、設備、処理コスト生産性の面で相当な困難が予想される。また、ストリップキャスターによる無酸化 casting も、1基あたりの生産能力は限定的であるため、大量生産には向かず、むしろ、急冷凝固による微細凝固組織の利用等、特殊な用途には利用可能であると思われる。

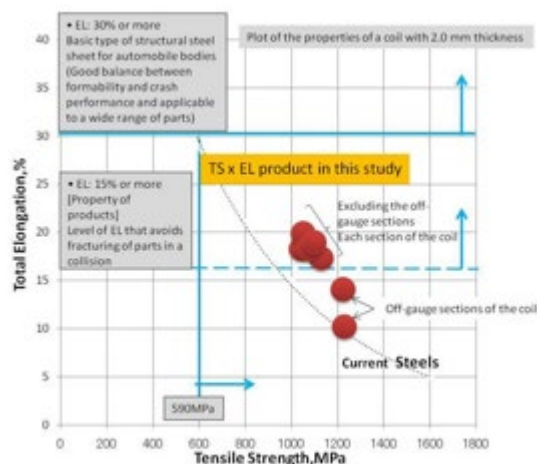
その他のトランプエレメント Cr、Ni、Mo については、具体的な対応策についての従来知見は見当たらない。

(3) 熱処理、合金元素としての利用例

基本的には強化元素として、トランプエレメント成分を、製造する鋼中の目標濃度にコントロール出来れば、有効に利用できる。

東京製鐵は、環境省からの委託事業として、平成 24、25 年にスクラップから製造した電炉鋼による薄板ハイテンの製造を検討し、高炉鋼と同等の品質が得られたと報告している。

以下、東京製鐵によるレポート[62]の概要を示す。



要旨図 1 2012 年度調査事業成果：試作鋼板の強度-伸び特性

図 1-19 試作鋼の強度－延性バランス図[62]

表 1-10 に試作鋼の組成を引用して示す。また、Cu、Ni、Cr、Mo も高く、その他、Sn、V などが含まれる。実際に試作した成分は、下段の FY2013 のもの。上段の FY2012 の成分は、2012 年の原料構成が、新断ち比率が 50%と高かったのに対し、2013 年は 10~20%と低く、そのため Cu 等の濃度が異なっている。

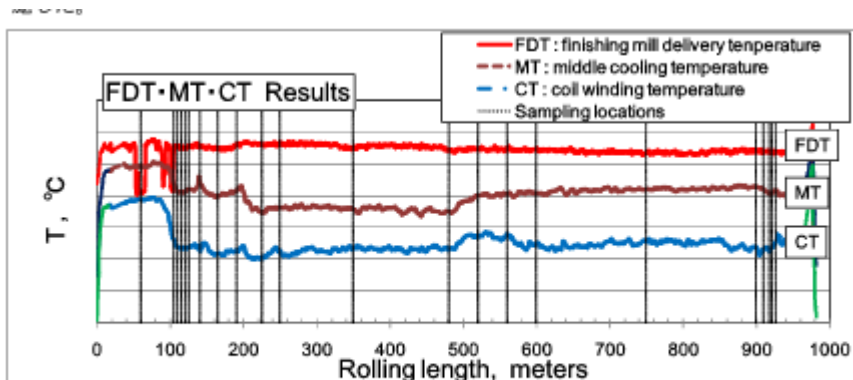
表 1-10 試作鋼材組成[62]

要旨表 1 材料組成

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
	%								
Targeted	0.19-0.20	≥0.10	0.40	0.015	0.003	0.30	0.10	≥1.00	>0.30
FY2012 results	0.18	1.108	0.53	0.029	0.005	0.16	0.11	1.01	0.30
FY2013 results	0.20	1.001	0.43	0.032	0.007	0.24	0.11	1.01	0.30

	V	Nb	Al	Sn	Pb	B	Ca	Ti	O	N
	%								ppm	
Targeted	-	-	0.030	0.015	-	-	-	-	20.00	40
FY2012 results	0.017	0.007	0.023	0.018	0.010	0.0016	0.0020	0.008	36	78
FY2013 results	0.013	0.009	0.009	0.019	0.000	0.0026	0.0017			67

熱延温度条件については、温度履歴の傾向は記載されているが絶対値は示されていない。また途中（圧延長 500m 以降）から目標温度に変えた、との記述がある。



要旨図 2 圧延温度実績 (t=1.2mm コイル)
(FDT: 仕上げ圧延温度、MT: 中間冷却温度、CT: コイル巻き取り温度)

図 1- 20 熱延温度パターン

（前半は通常の温度パターン、後半に材質改善の温度パターンに変更したとの記述があるが、絶対値は示されていない。）

薄板ハイトン製造には、むしろ微量元素（特に Mo や Cu、Ni）が有効に作用している可能性がある。その機構は、

- 1) 熱延での加工熱処理による結晶粒微細化 (γ 粒径: $10 \mu\text{m}$)、
- 2) 微細 γ 粒からの微細ベイナイト組織と微細 MA 組織、
- 3) 高 CT 化による巻取り後のベイナイト変態

によると述べている。また、今後の課題についての記述を以下に引用する。

今後の課題

材料特性として、そのばらつきを更に低減するための課題としては、以下が必要である。

- ・異方性を低減すること。（仕上げ圧延温度制御範囲の明確化）
- ・コイル幅方向においてエッジ部の温度制御方法の検討（板厚 1.2mm クラスの場合）

但し、これらは試作を通じて十分解決可能と考えられる。

製造性については、圧延の安定通板性については検討を重ねる必要はあるが、今回の試作を通じて制御目標の参考情報を得ることが出来た。今回の試作において、

- ・車体実用領域での板厚を量産設備で試作出来たこと、
- ・機械的特性は、現行の高炉材と比較しても十分に優れたものが得られたこと、
- ・車体性能上の重要特性についても満足出来る結果を得たこと、

が確認された。今後、自動車鋼板として仕上げていく観点と適用範囲を拡大していくために、以下の課題に取り組む必要があると考える。

1) 自動車用鋼板が建材向け等と最も大きく異なる特性は表面品質であり、極めて平滑な表面性状と防錆性能にリンクする均一で安定的な表面機能である。電炉鋼特有のトランプエレメントは製造プロセスを通じて表層濃化するなど表面品質への影響が指摘されており、電炉鋼表層品質制御技術として構築していく必要がある。

2) 表層品質制御技術を通じて、表面処理鋼板化を計り、車体の防錆鋼板仕様への適用を図っていきたい。

1-6. 電炉による高純度鋼製造技術の現状

(1) 電炉技術の進歩

電炉製鋼法は、1889年にエルーによって発明されたとされる。電炉製鋼法は次の3点を中心に開発・改良が行われてきた。

- 1) 高炉－転炉に匹敵する生産性への向上
- 2) エネルギー原単位の削減（特に電気エネルギー）
- 3) 製造品種の拡大、特に高炉－転炉が得意とする普通鋼への適用拡大

特に、エネルギー原単位の削減は、投入エネルギーコストの削減のみならず、製鋼時間の短縮による生産性向上に直結するため、製鋼用電炉にとって重要な因子である。

図1-21 [63]に、電炉の平均的な電力原単位、製鋼時間の変化、および新技術の開発・導入時期を示す。ヒートサイズは、1970年代は約60tであったが、最近では約400t（Danieli製、東京製鐵 田原工場）の電炉の導入例もあり、電炉の大型化が進んでいる。また、製鋼時間（tap-to-tap time）は、180分から40分レベルに低減されており、最近の大型酸素転炉の製鋼時間である300tで20分のレベルに近づいている。また、600kwh/t以上を要していた電力原単位は、300kwh/tレベルに半減している。電力原単位の低減には、スクラップ予熱への排ガス顕熱利用や、バーナー、炭材、酸素のインジェクションによる補助エネルギー投入や溶解時間の短縮が寄与している。

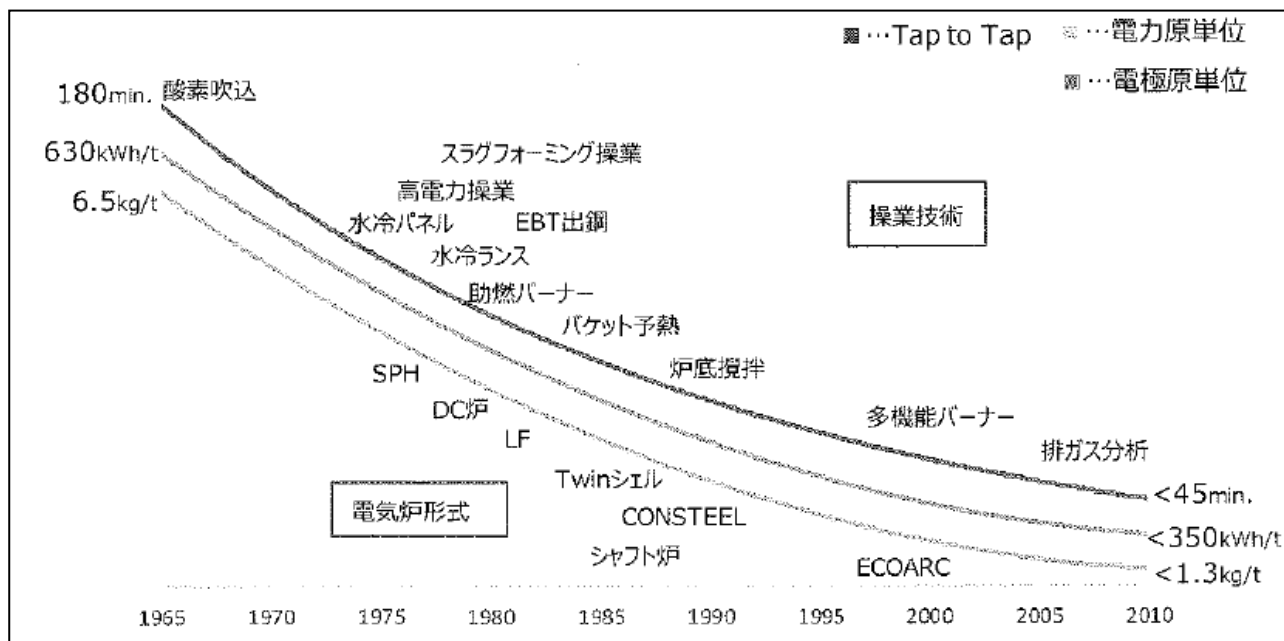


図1-21 電炉の平均的な操業指標の推移と操業技術および電炉形式の開発時期[63]

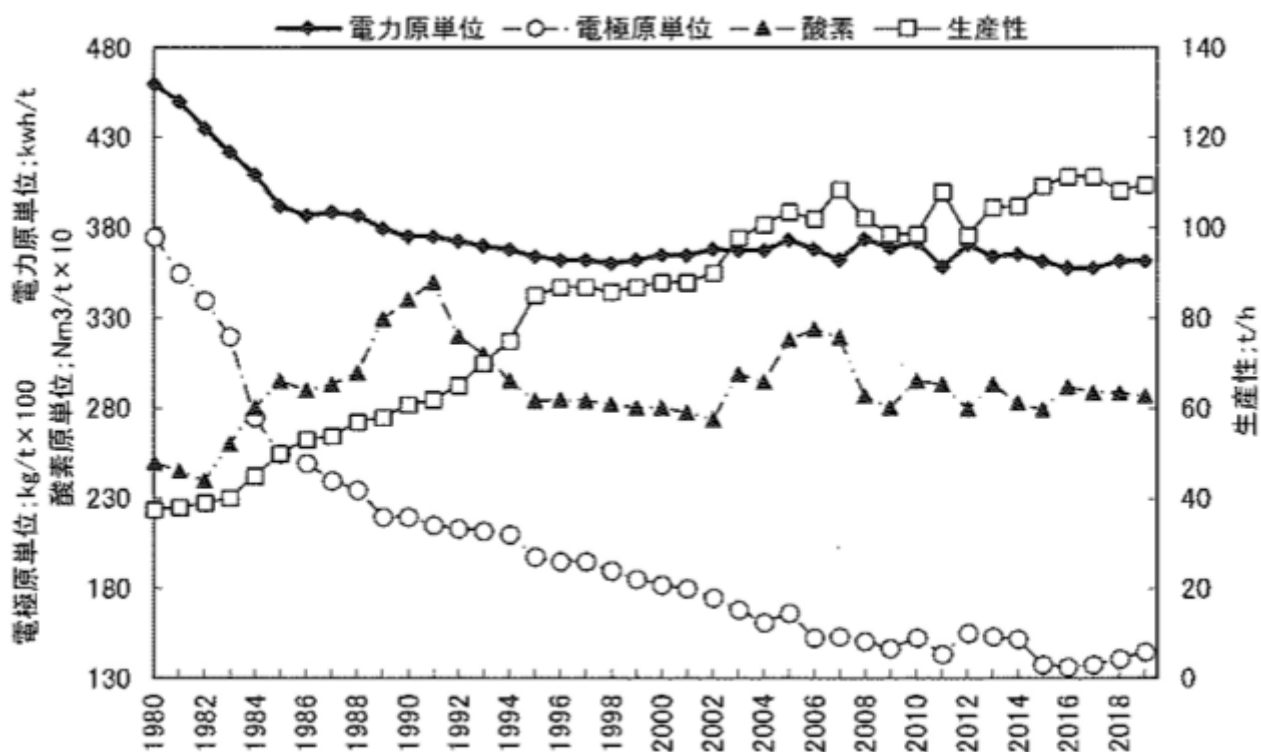


図 1- 22 国内電炉溶解における生産性、電力、酸素原単位、および製鋼時間の推移[64]

初期の電炉は長い製鋼時間を必要とし、特殊鋼製造が主として行われてきたが、炉の大型化と超高電力（UHP：Ultra High Power）化により、生産性の向上が図られた。また、電炉では、主原料のスクラップをバケットで複数回に分けて装入することが一般的であったが、電炉をフルパワーで操業できない、装入時間がかかること等による製鋼時間の延長、窒素ピックアップ等の問題があった。電炉では電気エネルギーがメインではあるが、酸素と炭素源吹込みや天然ガスのバーナーも活用し、スクラップの解け落ち時間を短縮したり、エネルギーを集中して投入することにより電力原単位の削減や製鋼時間の短縮が図られた。例えば、VAI FUCHS GmbH の出鋼量 120t の最新鋭電炉では、1 バケット装入や、複数の酸素燃焼用ランスにより、スクラップが未溶融の段階で集中的にエネルギーを投入することにより、製鋼時間を 30 分程度に短縮可能としている[65]。

電炉製鋼におけるエネルギーバランスにおいて、エネルギー消費側の排ガス顕熱の寄与分が 20% かなりの部分を占めている[66]。また、酸素やバーナー導入による加熱技術の普及により、排ガスの高温化が進み、エネルギー効率向上の上で排ガスを利用した装入物予熱が重要となった。さらには溶解時間短縮による生産性向上の点でも有効な手段である。そのため、様々な予熱技術が開発され、特殊な形式の電炉も開発・導入されている。例えば、Consteel はスクラップの予熱および水平連続装入ができるため、炉蓋を開ける必要がないため、フルパワーでの操業が常に可能となり、製鋼時間の短縮ができる。また、安定したスラグフォーミング状態を維持できるため、アークの輻射による熱ロスを減らせるほか、大気の侵入が防止でき、通常より鋼中窒素濃度を 15ppm 程度下げることができる。

更に、排ガスによるスクラップ予熱ではシャフトタイプの予熱槽を設けたタイプの電炉が普及しつつある。スチールプラントック、Primetals、大同特殊鋼、SMS、Daneili 等がサプライヤーであるが、これらの炉でも連続装入が可能となっている。

このように、電炉で課題であったエネルギー原単位や生産性が向上している。その結果、1985 年までに、生産性が向上した電炉製鋼と、連続鋳造技術の組み合わせにより、高い生産性を持つ一貫プロセス

が成立するに至り、普通鋼製造への電炉プロセス適用拡大が図られた。更に、当初は、棒鋼、線材製品を目的とするブルーム、ビレットの製造が主であったが、電炉と薄スラブ鑄造、直接圧延を組み合わせた所謂、ミニミルが出現し、電炉による鋼板製造技術が開発され、特に北米で発展した[67][68]。このプロセスはその後、欧州、中国にも建設され、世界の鉄鋼生産において重要な役割を果たすに至っている。

北米の Nucor に代表される電炉メーカーは、1980 年代後半以降、自動車用鋼板に代表される薄板など、比較的グレードの高い鋼板の製造も可能とした。その背景には、電炉鋼で製造が困難であった低窒素鋼、低トランプエレメント鋼の製造を可能とする変革があった[69]。薄板製造の上で、鋼材中の窒素は、時効性を悪化させる有害元素であり、良成形性薄鋼板の製造に低窒素化が欠かせない。しかし、従来の電炉製鋼法では転炉製鋼法に比べ、低窒素鋼の製造が困難であった。後の節で詳細に述べるが、炭材添加+酸素ガス供給、スラグフォーミング促進、炉内大気侵入防止、直接還元鉄利用による窒素、直接還元鉄利用によるトランプエレメントの希釈等により、低窒素、低トランプエレメント鋼の製造が可能となった。電炉製鋼法においては、例えば、電磁鋼板のような高級鋼品種にも製造範囲を拡大しつつある。

（２）電炉における低窒素鋼製造技術

1-3.（２）で述べたように、N は時効性や溶接 HAZ 靱性に悪影響を及ぼすが、高炉・転炉鋼と比べると電炉鋼の窒素量は高く、高 N が高級鋼製造時の課題の一つとなっている。現在、還元鉄利用、二次精錬における脱ガス能力向上による低窒素化や、フラットバス化による吸窒防止等の電炉技術進歩による改善によって、高 N の課題を解決しつつある。本節では、低窒素鋼製造技術について述べる。

①還元鉄の利用

成型性の良い薄板の製造において、電炉鋼の最大の難点は、窒素が高いことであった。また、トランプエレメント（Cu、Sn、Cr、Ni）が高く、表面疵や割れといった欠陥が出やすいことも難点であった。しかし、これらの点については、北米のミニミルでは、還元鉄を利用することにより、克服されてきた経緯がある。

北米では Nucor などのミニミルが、スクラップの一部、あるいは大部分を DRI や HBI、銑鉄を使うことによりトランプエレメント、および窒素のインプットを減らし、かつ溶解中に酸素ガスを従来に無く大量に使用して脱炭反応を促進し、CO ガス発生を行って吸窒防止（炉内への大気侵入防止、または溶鋼からの脱窒）を行うことにより出鋼後の窒素は転炉鋼に匹敵するようなレベルも報告されている。

McMaster 大の Irons ら[69]は、豪州の CSIRO と共同で、米国 DOE に対して詳細な報告を行っている。その中では、Ispat Hamburg（当時、現在の Arcelor Mittal Hamburg）製鉄所の 135t 電炉における操業データに基づいた解析を行っている。データのソースは、2504 ヒート分の 6 つの原料条件に基づく。

1. 市販スクラップのみ
2. 市販スクラップ+自家発生スクラップ（rescued）+塊状の DRI を加えたもの
3. 市販スクラップ+塊状の DRI のみを加えたもの
4. 市販スクラップ+DRI 混合品（塊状+粉）
5. スクラップ無、100%塊状 DRI
6. スクラップ無、塊状 DIR+粉 DIR

その結果、ばらつきは大きいものの、DRI 比率が高くなると溶鋼中の窒素濃度が低下する傾向がある。スクラップ 100% の場合の窒素は 68.2ppm、DRI 100% 場合の窒素を 20.1ppm とし、その間を直線で結んだ線と回帰式とがほぼ一致していることから、これは、スクラップ中の窒素が DRI によって希釈されたと解釈できる、とした。

他の可能性は、還元鉄は炭素分が高く (2%~4%)、脱炭素のため多くの酸素ガスを使用するため、鋼浴から多量の CO ガスが発生するため、脱窒素反応が促進される、というものである。同報告書中で、Irons らが種々の炭素濃度を含む還元鉄、および Iron carbide を原料として操業した North Star Steel の電炉データを解析した結果が示されている。 η_{CO} は、発生した CO ガス気泡による脱窒素反応効率を示すが、操業データは $\eta_{CO}=0.1$ から 1 の間にあり、マクロには CO ガス発生量が多い程、脱窒率は高くなる。ただし、溶鋼中の硫黄の存在により脱窒反応速度は低下する [70] ため、高硫黄 DRI では脱窒効果が小さくなる。

発生 CO ガスによる脱窒効果は、酸素転炉と同様の機構であるが、純酸素転炉の場合には、脱炭吹錬の終点の炭素濃度と溶鋼中窒素濃度の関係は、一般に、図 1-24 に示すように、炭素濃度との関係でミニマムがある。この理由は、転炉内では、炭素濃度が 4% 以上の溶銑の状態から酸素供給とともに脱炭反応が進行するが、大量の CO ガス気泡発生に伴い、気体-液体反応の界面積が著しく増大し、溶鋼からの脱窒反応が進行する。そのため、窒素濃度は低くなる。しかし、更に炭素濃度が低下すると CO ガスの発生量が少なくなり、むしろ、炉外からの空気侵入量が増大し、窒素のピックアップが起きるため、窒素濃度と炭素濃度の関係にミニマムがある、と一般に考えられている。

一方、スクラップのみ原料とし、電炉で溶解を行う場合を想定すると、原料中には殆ど炭素は含まれていないため、CO ガスの発生は殆ど無く、脱窒素反応は起きない。むしろ、炉内に侵入する大気が溶鋼と接触する機会が多く、窒素ピックアップが生じ易い。そのため、電炉で低窒素粗溶鋼を得るためには、スクラップ装入の回数を減らし、常に溶鋼とそれをカバーするスラグが存在する状態 (フラットバス) にして吸窒防止をはかるとともに、原料からのインプットを抑制し、更には CO ガス発生を伴う炭材+酸素添加を行って積極的に電炉内への大気侵入の防止、及び脱窒促進を行う必要がある。

いずれにせよ、DRI を用いることが低窒素化に有効であることは明らかとなっている。上記、Irons らの報告では 100%DRI 使用の条件では、転炉鋼に十分匹敵する 20ppm 前半の濃度となっている。

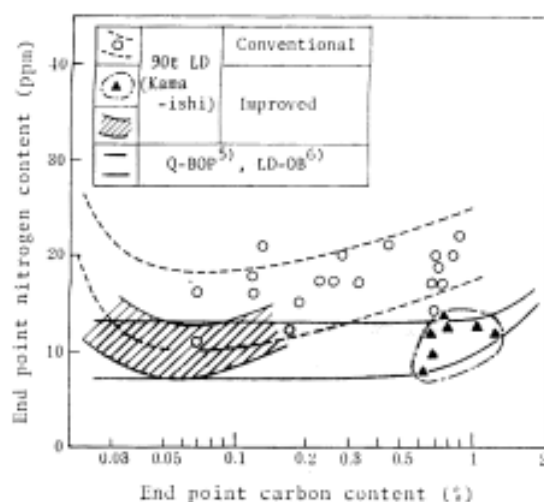


図 1-23 吹止め炭素濃度と窒素濃度の関係 [71]

次に、Trotter ら[72]も同様の報告を行っている。電炉鋼と転炉鋼の窒素濃度は、一般的には各々、40～110ppm、10～40ppm のような値である。また、主要原料中の窒素濃度についても報告している。例えば、スクラップものにも 30～120ppm の窒素濃度の値が示されている。電炉鋼の主要窒素源は、スクラップと溶解中のピックアップであるとされる。しかし、コークスには 5000～10000ppm と高濃度の窒素を含む。多くの炭材を用いると、使用量によっては溶鋼への窒素インプット源として無視できない場合がある。

更に、Troter らは欧州における 9 か所の電炉における HBI 使用率と窒素濃度の関係を示しており、先の Irons[69]らと同様の結果が得られている。即ち、鉄原料中の HBI 使用比率(最大 80%)増加とともに窒素濃度が低下する傾向が明瞭である。

HBI 使用の効果はトランプエレメント低減効果もあり、欧州の複数のミルにおける結果として、低窒素化とともに、トランプエレメントの Cu 濃度も低くなり、Si キルドワイヤー鋼の引っ張り試験における絞り値 (ROA、延性を表す指標) がスクラップ 100% (Cu0.20%) で ROA が 83%であるのに対し、100%DRI (Cu0.05%) では 95%に改善している。

②二次精錬における脱ガス能力向上による低窒素化

従来、電炉メーカーでは鋼中の成分要求が厳しくないことから、溶鋼の脱ガス (脱 C、脱 H、脱 N) 設備として、設備費が比較的安価な VTD (Vacuum Tank Degasser : 溶鋼を収容した取鍋ごと真空容器内に収納して脱ガスを行う設備) が多用されてきたが、溶鋼にスラグが乗った状態であり、脱ガス能力は RH (Rehinstal Heraus) 脱ガス設備[82]に比べて劣る。また、VTD は処理サイクルタイムが長く、量産鋼への適用は難しい。

しかし、北米のミニミルである Nucor、Big River Steel、Steel Dynamics、Cleveland Criff は、電炉での高級鋼製造を目指しているが、最も先進的な Big River Steel (最近、US スチールが買収) は、脱ガス設備に、高炉メーカーが多く導入している脱ガス性能に優れた RH 脱ガス装置を導入しており、高級鋼である EDDS 鋼 (超深絞り鋼)、IF 鋼 (Interstitial Free steel : 極低炭素鋼)、AHSS (Advanced High Strength Steel : 先進高張力鋼)、電磁鋼板を製造している。電炉はヒートサイズ 165t で、還元鉄比率が 20～80% (設備能力上は 100%も可能) の範囲とし、tap-to-tap 時間は 38 分以下で操業している、と対外報告している。

このように、脱ガス性能に優れた RH 脱ガス設備を導入することで、低窒素鋼の製造ができる可能性がある。

③フラットパス化による吸窒防止

Memoli ら[73][74]によると、スクラップ予熱を伴う Consteel 式の電炉を導入することにより、低窒素化と歩留まり向上を果たした。その理由は、電炉の側壁から連続的に原料を装入するので、電炉内が常にフラットパス化され、炉内には常に溶鋼および溶鋼上に泡立った状態 (フォーミング) のスラグが存在する。このことにより炉内への大気の進入が減少すること、また、アークを発生する電極がスラグに埋没した状態 (サブマージ) となるため、オープンアークが無く、オープンアークの強い輻射熱で局所的に溶鋼が高温となり、高い窒素吸収速度となる反応界面が生じないことにより、窒素ピックアップが少ないと推定される。このような状態は、バケットを用いて原料を数回に分けてバッチ装入を炉蓋を開放して行う旧来型の電炉では、最後のバケット装入が終わって溶解した段階でのみ実現する。

1-7. 北米電炉ミニミルによる高級鋼製造技術の発展

北米は、粗鋼生産に占める電炉比率は 70%を超えている。その中で、電炉鋼ながら、薄板の深絞り用鋼板、電磁鋼等の薄板系の高級鋼を製造する技術が確立されつつある。なお、一般に、ミニミルとは、高炉一貫製鉄所の高炉に始まり、最終製品製造に至る長い工程に対する用語として、電気炉を用い、連続 casting と熱延が直結された薄スラブ連铸機を導入することで比較的短い工程で最終製品が製造されるコンパクトなミルを指す。具体的には、Nucor、BigRiverSteel、ClevelandCliff、SteelDynamic 社があるが、これまで述べたように、スクラップを主要原料とする電炉では、トランプエレメントの影響が課題となる。それに対し、これらのミルでは、直接還元鉄 (DRI、HBI)、あるいは銑鉄を利用してトランプエレメントの影響を軽減ないし排除している。直接還元鉄 (DRI : Direct Reduced Iron)、銑鉄、スクラップ中のトランプエレメント含有量については以下のような値が報告されている (CU+Sn+Ni+Cr+Mo) [75]。

- A) DRI : 約 0.02%
- B) 高炉銑 : 約 0.06%
- C) スクラップ (新断及び切削) : 0.1~0.2%
- D) スクラップ (シュレッダー及びヘビー) : 0.35~0.60%

北米のミニミルである Nucor は、既に 1989 年に薄スラブ連铸機を導入して電炉鋼による板の製造を開始した。2006 年から、南米のトリニダードトバコで Midrex による直接還元鉄の製造を行い、北米のミルで使用している。その生産能力は、1.6 百万 t/年である。更に、2014 年には、米国内のルイジアナに Energeion による 2.5 百万 t/年の生産能力を持つ直接還元鉄製造工場を建設した。従って、Nucor は、年間約 4 百万 t の直接還元鉄を自ら製造し、原料として利用していると思われる。Nucor の粗鋼生産量は約 24 百万 t であり、その 33%は薄板であり [77]、年産 8 百万 t 程度と推定される。そのうち、トランプエレメントが問題となる品種がどれ程含まれているかは不明であるが、少なくとも数百万 t のレベルで還元鉄を利用していると推定される。また、Nucor の資料によると、薄板を主力品種とする Hickman 製鉄所の電炉では装入原料の 20~60%は DRI を、10%程度は pig iron (銑鉄) を使用している、との情報がある [76]。

また、Nucor をスピンアウトしたメンバーと投資家により創業された BigRiverSteel は、厚板を含む高級鋼製造への進出を明確に表明しているが、用いる原料は 直接還元鉄 HBI を 80%以上使用、としている。二次精錬には脱ガス能力の高い RH 真空脱ガス設備を導入しており、深絞りクラスの薄板極低炭素鋼や低窒素鋼、電磁鋼製造を可能とする意図がうかがわれる。RH 真空脱ガス設備は、脱ガス能力は高いが、多くの電炉ミルでは、脱ガス処理が必要な場合でも設備費の安価な VTD (Vacuum Tank Degasse) を導入するのが一般的であった。

還元鉄を利用する北米ミニミルの方向性は今後も継続すると思われるが、直接還元鉄の生産量は漸く世界全体で 1 億 t を超えたところに過ぎない。また、今後予想される鉄鉱石の低品位化 (特に豪州産鉄鉱石の高脈石化) において、還元鉄を利用するためには、現在の電炉製鋼では脈石 (主に SiO₂、Al₂O₃、P) 由来の大量スラグ生成が予想され、その対応策等の課題が予想される。また、還元鉄製造は還元ガスの立地条件に大きく左右されるため、地域性、経済性を含めた課題がある。これらの課題が解決されれば、還元鉄を一定程度利用した電炉による高級鋼製造は可能になると思われる。

DIVERSIFIED PRODUCT MIX
Total Tons Sold to Outside Customers in 2020

■ Sheet
■ Bar
■ Structural
■ Plate
■ Tubular Products
■ Rebar Fabrication
■ Other Downstream
■ Raw Materials

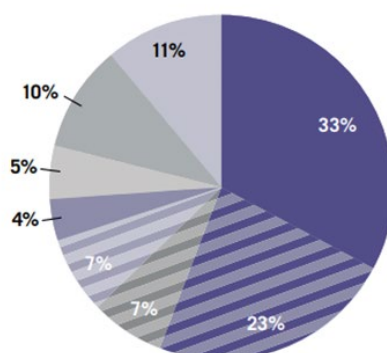


図 1- 24 Nucor のプロダクトミクス [77]

1 - 8. 電炉法による高級鋼製造における技術的課題に関する総括

本調査では、まず、スクラップを主原料とした電炉における高級鋼製造における課題について文献調査を行い、スクラップに混入する不純物、特に Cu や Sn など、通常の酸化製錬では除去不可能な元素（トランプエレメント）が、製造段階に及ぼす影響（連続鋳造における高温脆化割れなど）や溶接加工に及ぼす影響（熱影響部の靱性低下）、製品品質に及ぼす影響（加工性低下、低温靱性低下など）について、定量的/定性的に整理した。その結果、鋼材特性に及ぼすトランプエレメントの影響や、鋼材に対する混入限界などについて、これまでの研究では不確定要素が多く、成分規格などに落とし込むことはできないことがわかった。これは、高級鋼の製造をこれまで高炉一貫メーカーが主として行っており、銑鉄を主原料とするプロセス上、トランプエレメントの混入を想定する必要がなかったためと考えられる。今後電炉での高級鋼製造の重要性が増してくる中、当該分野において産学官連携による重点的な研究開発が期待される。

トランプエレメントの影響排除に向けては、鉄からのトランプエレメント分離法として、気化蒸発やフラックス製錬、固相分離などについての研究が行われてきたが、反応速度や経済性など多くの課題が存在し、いずれも実用化には至っていない。従って、現在の電炉オペレーションにおけるトランプエレメント対策としては、炉前ヤードにスクラップを品位別に配置し、生産鋼種の要求レベルに応じて、品位の異なるスクラップをブレンドし、トランプエレメントを一定範囲に管理する方法などが取り入れられている。また、欧米電炉では、直接還元鉄や型銑を大量に投入することによる、トランプエレメントの希釈が一般的に行われている。

また、電炉製鋼の場合、スクラップ溶解時の大気からの窒素ピックアップが生じやすいため、窒素の製品品質等への影響（歪時効による品質影響など）や、窒素低減対策を調査した。近年の電炉では、連続装入化による溶鋼フラットバス形成と電極が泡立ちスラグ内に浸漬状態となるサブマージアークによる窒素侵入の防止が図られているが、依然として転炉鋼よりも鋼中窒素濃度は高く、一部の高級鋼の品質要求を満たすには、溶解精錬時の更なる低窒素化対策と二次製錬における脱窒素の強化が求められる。最近の Danieli からの報告 [80] [81] では、電炉での低窒素化対策と真空脱ガス処理の効率化で窒素 30ppm 代が達成できている、との報告がある。ばらつきも含めてどの程度達成できているか、技術的に不明な点もあるが、本技術が普及すれば、窒素が高い故に製造が困難であった薄板の深絞り鋼や低温靱性鋼、溶接 HAZ の脆化問題はかなり解決し得るものと思われる。

近年の電炉自体は、排熱を利用したスクラップ予熱技術や、酸素インジェクション技術を導入し、電

力原単位を低減するとともに、連続装入化や大型化により、生産性についても、転炉プロセスに肉薄しつつある。

一方で、北米ミニミルの戦略は、明確に還元鉄の積極利用に向かっているが、これはトランプ元素の低減および低窒素化対策にもつながる。しかし、直接還元鉄の生産量は漸く世界全体で1億tを超えたところに過ぎない。また、今後予想される鉄鉱石の低品位化（特に豪州産鉄鉱石の高脈石化）において、還元鉄を利用するためには、現在の電炉製鋼では脈石（主にSiO₂、Al₂O₃、P）由来の大量スラグ生成が予想され、その対応策等の課題が予想される。更に、還元鉄製造は還元ガスの立地条件に大きく左右されるため、地域性、経済性を含めた課題がある。これらの課題が解決されれば、還元鉄を一定程度利用した電炉による高級鋼製造は可能になると思われる。

発生するスクラップを有効利用する観点からは、今後、トランプ元素の材料設計上の許容範囲の見極めと、低下対策としてのスクラップ処理法、希釈材の利用（溶鉄、銑鉄、還元鉄）が課題となる。

参考文献

- [1] World Steel Association, Statistical Year Book,
<https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-Statistical-Yearbook-2019-concise-version.pdf> 最終閲覧日：2022年2月19日
- [2] 各種データより日鉄総研作成
- [3] 水上義正：計測と制御、36(1997)No10, p. 691.
- [4] 電炉鉄筋棒鋼品質調査委員会：電炉鉄筋棒鋼品質報告書、普通電気炉工業会、東京、(2013)p. 91
- [5] 醍醐ら：鉄と鋼、104(2018)p. 461.
- [6] 醍醐ら：鉄と鋼、100(2014)p. 756.
- [7] Daigo et al：ISIJ-Int., 61(2021)p. 498.
- [8] 梶谷ら：鉄と鋼、81(1995)p. 185.
- [9] 片山ら：島根大学総合理工学部要紀シリーズA、30(1997)p. 99
- [10] C. Marique：La Revue de Metallurgie-CIT, Avril(1998)p. 433
- [11] JERNKONTORET(The Swedish Steel Producer's Association) Report D819(2006)
- [15] Ichikawa et al：International Journal of Mining, Materials, and Metallurgical Engineering (IJMMME) Volume 6, Year 2020 Journal ISSN: 2562-4571.
- [13] 梶谷ら：トランプ元素の鉄鋼材料科学、日本鉄鋼協会、1997年、p. 147
- [14] Imai et al：ISIJ-Int., 37(1997)p. 217.
- [15] 経済産業省「自動車リサイクルに係る処理技術等の調査報告書」(2004).
- [16] Yuan ZX et al：Acta metallurgica sinica, vol. 16(2003)No. 6, p. 478-482.
- [17] 田代ら：日本金属学会誌、55(1991)p. 1078.
- [18] 富田 弘：日本機械学会誌、78(1975)p. 962.
- [19] 今井：鉄と鋼、vol. 51(1965)13, p. 2336-2358.
- [20] 武智ら：軽金属、vol. 37(1987)8, p. 563-572.
- [21] 十河ら：溶接学会全国大会講演概要、15(1974), p. 94.
- [22] 坪井、平井：溶接学会誌、50(1981)p. 38.
- [23] F.C. Langenberg ら：Blast Furnace and Steel Plant, 43(1955)p. 1142

- [24] H.V. Makar, B.W. Dunning Jr. : Journal of Metals, 21(1969)7. p. 19–22
- [25] Y. A. Topkaya, W-K. Lu : International Symposium, Metal-Slag-Gas Reaction and Process, The Electrochemical Society, Princeton, N. J. (1975)p. 111
- [26] H. Salomon-de-Friedberg ら : Canadian Metallurgical Quartely, 16(1977)1, p. 16
- [27] AA. Safiah ら : J. Iron Steel Inst., 22(1982)p. 52
- [28] X. Liu ら : Ironmaking and Steelmaking, 12(1985)6, p. 293
- [29] T. Okazaki ら : Ironmaking and Steelmaking, 12(1985)p. 295
- [30] T. Imai and N. Sano : Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 28(1988)12, p. 999
- [31] 白川ら : 鉄と鋼、71(1986)S. 961
- [32] 松尾ら : 鉄と鋼、73(1987)S. 962
- [33] 長坂ら : 鉄と鋼 77(1991)5, p644
- [34] 片山ら : 島根大学総合理工学部紀要、シリーズ A、1997
- [35] 長坂ら : 資源と素材、113(1997)p. 1101
- [36] 丸山ら : 鉄と鋼、84(1998)4, p. 243
- [37] 西ら : 材料とプロセス、11(1998)S816
- [38] 松尾 享 : 鉄と鋼、86(2000)11, p. 741
- [39] H. Ono-Nakazato ら : ISIJ-Int., 43(2003)11, p. 1691
- [40] A. I. Zaitsev ら : ISIJ-Int., 44(2004)4, p. 639
- [41] A. I. Zaitsev ら : ISIJ-Int., 44(2004)6, p. 957
- [42] K. Taguchi、H. Ono、T. Usui : ISIJ-Int., 46(2006)1, p. 29
- [43] 山口、小野、碓井 : 鉄と鋼、96(2010)9, p. 531
- [44] 小野ら : 鉄と鋼、96(2010)11, p. 641
- [45] Tsukihashi ら : ISIJ-Int., 53(2013)3, p541
- [46] 内田ら : 鉄と鋼、100(2014)6, p. 769
- [47] N. Sasaki ら : ISIJ-Int., 54(2014)8, p. 1807
- 佐々木ら : 鉄と鋼、102(2016)1, p. 17
- [48] 小野ら : 鉄と鋼、101(2015)12, p. 636
- [49] 岩瀬正則 : 電気製鋼、66(1995)1, p. 20
- [50] 周、真目、姉崎 : 資源と素材、111(1995)p. 49
- [51] 松丸、永田 : 鉄と鋼、82(1996)10, p. 799
- [52] 西ら : 神戸製鋼技報、47(1997)3, p. 21
- [53] 佐野信雄 : 日本金属学会報、30(1991)p. 905.
- [54] 赤松ら : : トランプエレメントの鉄鋼材料科学、日本鉄鋼協会、1997 年、p. 126.
- [55] Uchino ら : Journal of Adv. Sci., 13(2001)p. 260.
- [56] Shibata 他 : Materials Transactions, Vol. 43, No. 3 (2002) p. 292.
- [57] Nagasaki 他 : ISIJ International, Vol. 42 (2002), Supplement, S57.
- [58] 竹村ら : 鉄と鋼、95(2009)p. 369.
- [59] 花田裕司 : 日本鉄鋼協会第 132 回講演大会シンポジウム、「新鉄源の最近の動向」予稿集、p. 17.
- [60] 松下ら : IHI 技報, vol. 48, No2(2008)p. 77.
- [61] 国際特許出願 W02015095913A1、「High strength high ductility high copper low alloy thin

cast strip product and method for making the same」、出願人：Nucor、IHI、BlueScope Steel

- [62] 環境省：平成 24、25 年度鉄スクラップの高度利用化調査報告（東京製鐵）
- [63] 上出研二：日本鉄鋼協会、第 242 回西山記念技術講座、2021 年、p. 21.
- [64] 中村 毅：日本鉄鋼協会、第 242 回西山記念技術講座、2021 年、p. 1.
- [65] Narholz ら：la metallurgia italiana, 5(2005)p. 72
- [66] 例えば、森井 廉：電気炉製鋼法、日本鉄鋼協会編、2000 年.
- [67] 林 高朗：第 114・115 回西山記念技術講座、日本鉄鋼協会、1986 年.
- [68] 川本正幸：第 217・218 回西山記念技術講座、日本鉄鋼協会、2014 年.
- [69] G. A. Irons et al:DOE Report, 2004, "Nitrogen Control in EAF Steelmaking by DRI Fines Injection"
- [70] 例えば、Byrne ら：Metallurgical Transactions B, 14B(1983)p. 441.
- [71] 阿部ら：鉄と鋼、68(1982)p. 1955.
- [72] D. Trotter et al：International Iron Metalics Association, (2010).
- [73] F. Memoli et al：Iron & Steel Technology, (2010)p. 56.
- [74] F. Memoli et al：AISTech 2009 Proceedings, Vol. I, p. 499.
- [75] 金子伝太郎：鉄と鋼、73(1987)p. 2116.
- [76] Nucor Steel 社：私信による。
- [77] Nucor Steel 社：Annual Report 2021 年
- [79] BigRiverSteel 社：私信による。
- [80] DaNews:No181(2019)p. 18 <https://www.danieli.com/en/news/da-news.htm>
最終閲覧日：2022 年 2 月 20 日
- [81] Vucinic ら：MPT International, Nov., 2020, p. 14.
- [82] 鉄と鉄鋼が分かる本：新日本製鉄、日本実業出版社、2004 年、p. 74

2. 日本におけるスクラップ需給並びに高品位化の方向性に関する調査

2-1. 日本におけるスクラップの発生の実態

（1）スクラップ取引の概要

国内のスクラップの流通経路の概要を図 2-1 に示す。スクラップは発生源によって大きく 3 つに分けることが出来る。

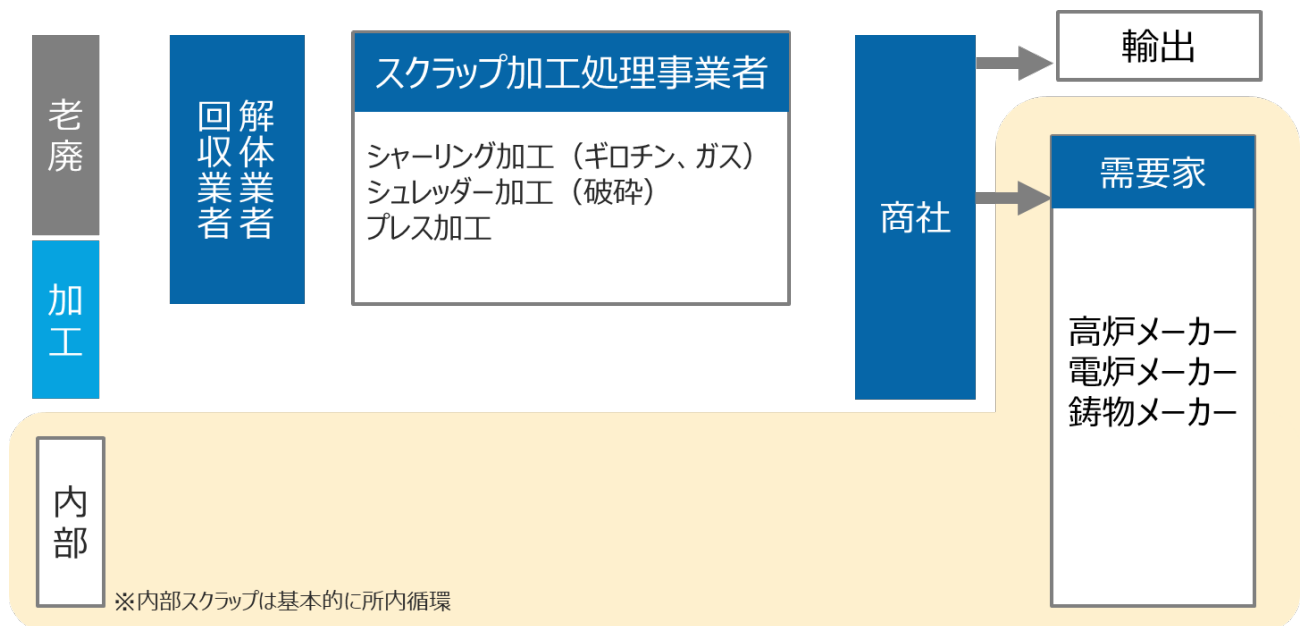


図 2-1 スクラップの流通経路の概要

① 内部スクラップ

内部スクラップ（自家発生スクラップ）は鉄鋼メーカー（転炉、電炉、鋳物）の製造過程で発生するスクラップで、基本的には事業所内で再利用されるため、市中にはほとんど流通しない。例えば、連続鋳造における異鋼種継目や鋼片圧延時の端部、連続圧延の接合部などが内部スクラップとなる。

② 加工スクラップ

加工スクラップは、鉄鋼材料を使った最終製品の製造段階で発生するスクラップを言い、切削くずや打ち抜きくずを指す。加工スクラップは常に特定の場所から発生し、異物混入が少ないため鉄スクラップの不純物の混入割合のばらつきが少ない。加工スクラップの流通時には新断、鋼ダライという等級がつく。中でも新断は不純物の混入割合のばらつきが少ないことから使い勝手が良く、他のスクラップに比べて高値で取引されており、加工スクラップの発生工場と特定のスクラップ需要家との間でひも付きの契約が結ばれることもある。

③ 老廃スクラップ

廃車、廃船、廃構造物など、寿命を終えた最終製品から回収されたスクラップ。老廃スクラップには、形鋼や鋼管、薄板や線材など、様々な形状やサイズがあり、また、配線などの非鉄金属やプラスチックなどが付着したままの場合が多いため、老廃スクラップを鉄源として使用する場合には丁寧な選別や加工が必要となる。老廃スクラップの流通時には形状によってヘビースクラップ、シュレッダースクラップ、プレススクラップなどの等級がつく。

（2）スクラップの加工処理

老廃スクラップは、回収業者や解体業者によって回収され、スクラップ加工処理事業者のもとへ運ばれる。スクラップ加工処理事業者はスクラップの特性に応じて加工を行う。

スクラップの加工方法には一般にスクラップの特性に応じてシャーリング加工（切断）、シュレッダー加工（破碎）、プレス加工が存在する。

例えば、解体構造物から発生する鋼材類などの長尺物は、ギロチンシャー処理にて均一なサイズに切り揃える。また、廃車は解体業者によって特定の部品を除去された後（ガラと称される）に、シュレッ

ダー処理によって 10cm 以下の大きさに破碎して鉄分と非鉄、ダストに分別される。自動車ガラや薄物の場合、輸送時の減容化のためにプレス加工されたのち、シュレッダー処理、またはそのまま鉄源として利用されるものもある。

加工スクラップは、老廃スクラップと異なり異物の混入がないため、加工処理事業者においては主として裁断等によるサイジング処理がなされる。

(3) スクラップの呼称

スクラップにはスクラップ加工処理の前段階のものと後段階のものが存在する。

加工処理されたスクラップは、一般に日本鉄源協会の鉄スクラップ検収統一規格の等級(HS や H2 等)に基づいて取引される。また、日本鉄源協会の鉄スクラップ検収統一規格以外にも、東京製鉄などのスクラップ需要家が独自の検収規格を用意している場合もあり、それぞれの取引に応じて規格が選択されている。一方で、加工処理される前のスクラップには規格に基づく呼称は存在せず、本報告では、図 2-2 のように加工処理前のスクラップを「加工前スクラップ」、加工処理後のスクラップを「炉前スクラップ」と定義する。

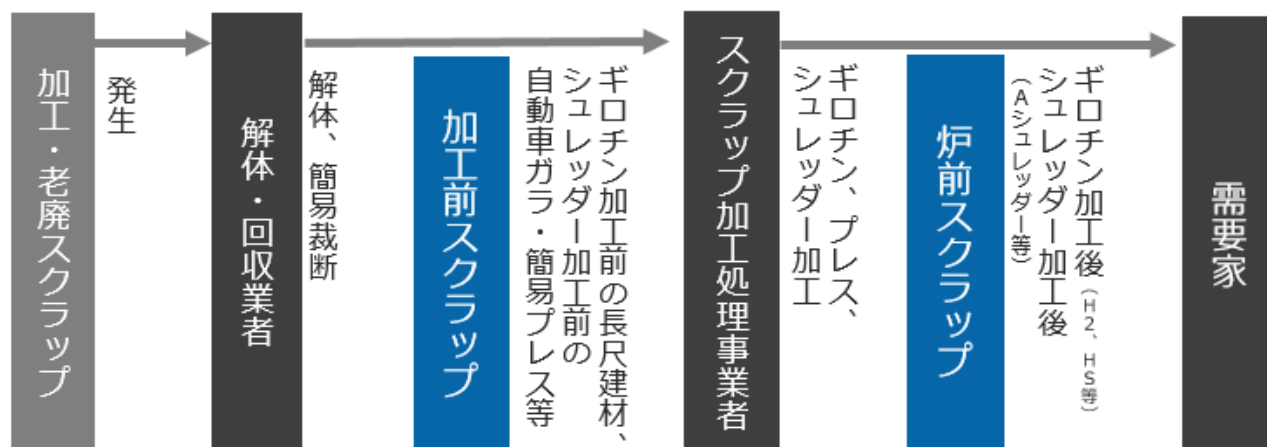


図 2-2 加工前スクラップと炉前スクラップ

本調査における炉前スクラップの等級は日本鉄源協会の鉄スクラップ検収統一規格の等級を用いる。なお、日本鉄源協会の鉄スクラップ検収統一規格では、スクラップは寸法と重さ、母材によって等級が定められている(図 2-3)。

鉄スクラップ検収統一規格

(社)日本鉄源協会
2008年6月改訂

分類	品名	等級	寸法 (mm)		単重 (kg)	注 記
			厚さ	幅又は高さ X 長さ		
炭 素 鋼 ス ク ラ ッ プ	ヘビ	ギロチンシャー、ガス溶断、重機などでサイジングしたもので、厚み、寸法、単重により以下に区分する。				
		HS	6 以上	500以下 x 700以下	600以下	
		H1	6 以上	500以下 x 1200以下	1000以下	
		H2	3 以上 ~ 6 未満	〃	〃	
		H3	1 以上 ~ 3 未満	〃	〃	
		H4	1 未満	〃	〃	
	プレス	主として鋼板加工製品を母材にしてプレス機により圧縮成形した直方体状のもので、母材により以下に区分する。				
		A	3 辺の総和1800以下、最大辺800以下			主に使用済み自動車をプレスしたもの
		B	〃			Aプレス、Cプレスでないもの
		C	上限寸法は同上、下限は3 辺総和600以上			飲料缶をプレスしたもの
	シュレッダー	主として鋼板加工製品を母材にしてシュレッダー機により破碎したあと磁気選別機で選別された鉄スクラップで、母材により以下に区分する。				
		A				主に使用済み自動車を破碎したもの
		B				上記以外の混合品
	新 断	鋼板加工製品を製造する際に発生する切りくず及び打ち抜きくずで、形状、酸化の程度により以下に区分する。				
		シュレッダー				新断をシュレッダー処理したもの
		プレスA	3 辺の総和1800以下、最大辺800以下			表面処理していない薄鋼板で酸化していないもの
		プレスB	〃			多少酸化している薄鋼板又は鋼材材質に影響を及ぼさない表面処理鋼板
		ハラA	幅又は高さ500以下 x 長さ1200以下			表面処理していない薄鋼板で酸化していないもの
		ハラB	〃			多少酸化している薄鋼板又は鋼材材質に影響を及ぼさない表面処理鋼板
	鋼ダライ粉	ネジ、機械部品などを製作する際に発生する切削くず及び切り粉で、形状、酸化の程度により以下に区分する。				
		A				普通鋼切削くずで酸化の少ないもの、チップ状のもの
		B				普通鋼切削くずで多少酸化しているもの、バーマ状のもの
		プレス	3 辺の総和1800以下、最大辺800以下			普通鋼切削くずで酸化の少ないものをプレスしたもの
鉄スクラップ	故 鉄	使用済み鋳物製品を細かく打ち砕いたブロック状のもので、母材により以下に区分する。				
		A	1辺1200以下		1000以下	機械鉄、道具鉄等の上鉄、モーターアロウ完全解体
		B	〃		〃	並鉄、モーターアロウ未解体(油ぬきもの)
	鉄ダライ粉	鋳物製品を生産する際に発生する切削くずで、酸化の程度により以下に区分する。				
		A				鋳物切削くずで酸化の少ないもの
		B				多少酸化した鋳物切削くず

図 2- 3 鉄スクラップ検収統一規格

出典：(社)日本鉄源協会 鉄スクラップ検収統一規格

2-2. スクラップのハンドリング

スクラップはその発生源ごとに様々な流通フローがあり、それぞれのスクラップの特性に応じた加工処理が施され、炉前スクラップとして出荷される。以下では廃自動車、解体構造物、家電、スチール缶のスクラップのハンドリングを説明する。

（１）発生源ごとのスクラップのハンドリング

①廃自動車

図 2-4 に廃自動車から発生するスクラップの流通フローを示す。

廃車は、引取業者によってオークションにかけられ、自動車解体事業者に落札されたものがスクラップとなる。

使用済となった自動車は解体事業者によって エアバッグやフロン類等の自動車リサイクル法に基づく回収対象物や、モーターやハーネス、エンジンやラジエター等の非鉄金属部品が取り除かれる。解体処理後の構造体は、構造体のまま（ガラ）、あるいは輸送のための減容化を目的としたプレス加工後、加工処理事業者に引き取られる。

加工処理事業者では、ガラのまま、あるいはプレスして減容化されたたAプレスをシュレッダー設備により破碎し、非鉄金属やプラスチック等を成分とするシュレッダーダストを分級したのち、「Aシュレッダー」として需要家へ出荷する。

一部の「A プレス」も、シュレッダー処理を経ることなく、製鋼原料として利用されることがあるが、これは、プレス内には異物混入の可能性があるため、プレス事業者（多くの場合は自動車解体事業者）と製鉄会社との間で、解体品質等に関する合意が行われた一部のケースで行われている。

（廃自動車のリサイクルでは、エアバックやフロン、ASR の回収が自動車リサイクル法によって義務付けられており、解体事業者、プレス・破碎事業者はそれぞれの回収量に応じてリサイクル費用を受領する仕組みとなっている。一方で鉄スクラップは経済合理性の中で取引されているものであるから、鉄スクラップの分別・回収に伴うコストは自り法ではなく、市中取引の中で回収されている。）

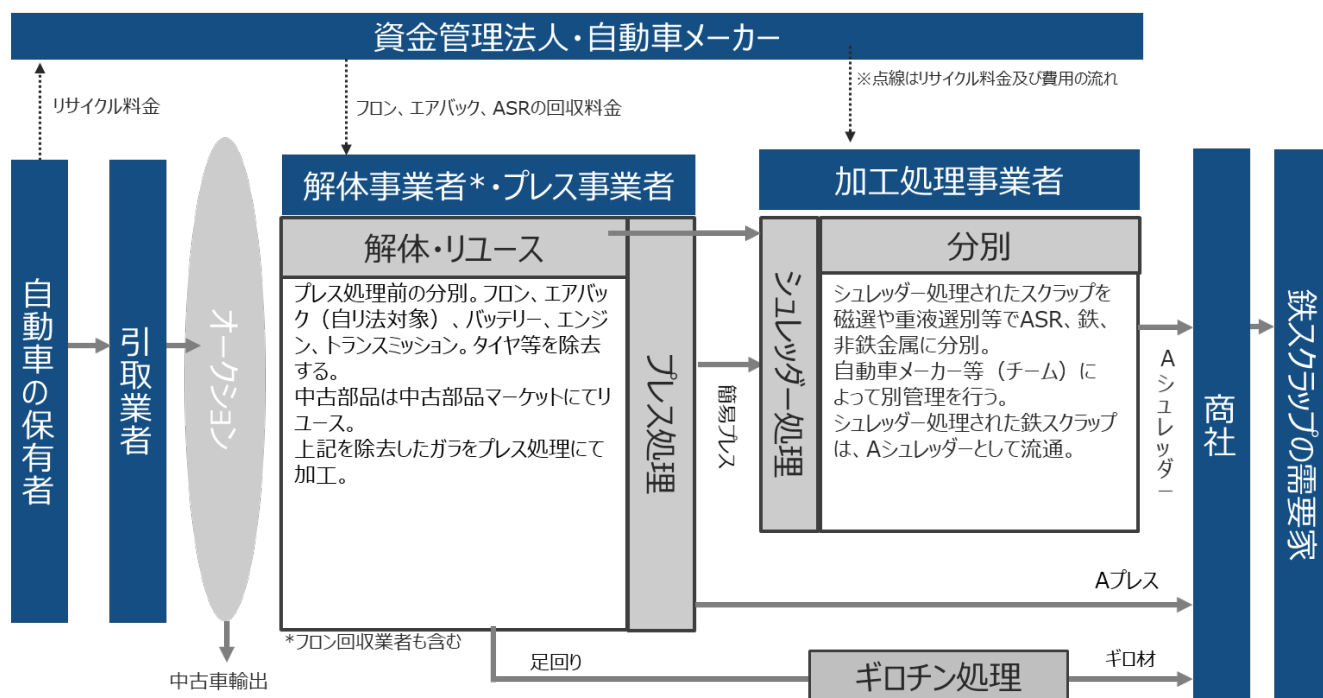


図 2- 4 廃自動車のスクラップ流通フロー

③ 解体構造物

図 2-5 にビルや工場建屋等の解体構造物から発生するスクラップの流通フローを示す。構造物は、解体現場で解体事業者によって一定の裁断や銅線の分別が行われた後、スクラップ加工処理事業者へ引き

渡される。解体建造物のスクラップは主にシャーリング（ギロチン）加工されて、ヘビースクラップとして市中にて取引される。（なお、一般に建造物の解体には解体費用が発生し、解体建造物の所有者が解体事業者へ費用を支払うが、鉄スクラップ価格分が控除される。）

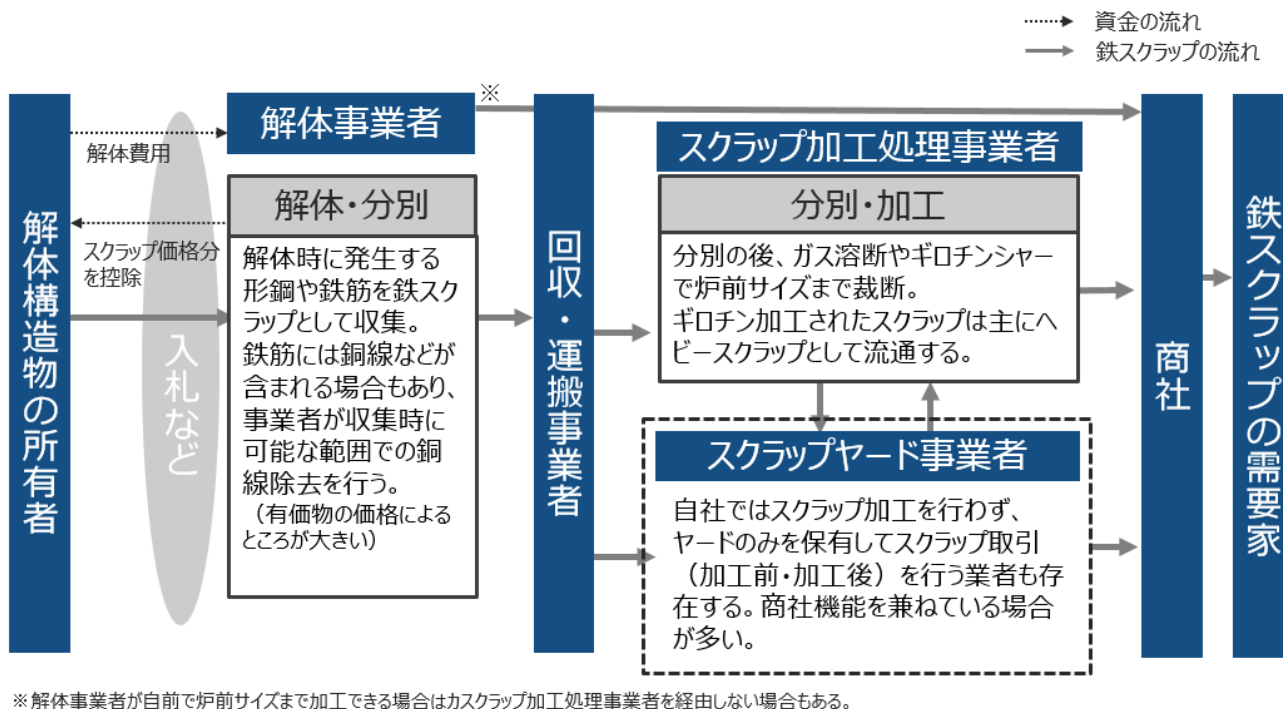


図 2- 5 解体建造物のスクラップ流通フロー

（２）スクラップの高度利用

スクラップ電炉でパフォーマンスギャランティーを行っているような高級鋼を製造する場合、スクラップの分別段階で不純物を除去してトランプエレメントのばらつきを抑えるなど、成分が一定保証できるようなスクラップを使用する必要がある。このようなスクラップは図 2-6 のように一般市中にて高級スクラップと称されるスクラップとは少し異なるため、図 2-7 のように定義を整理する（「I. 事業目的」における整理の再掲）。

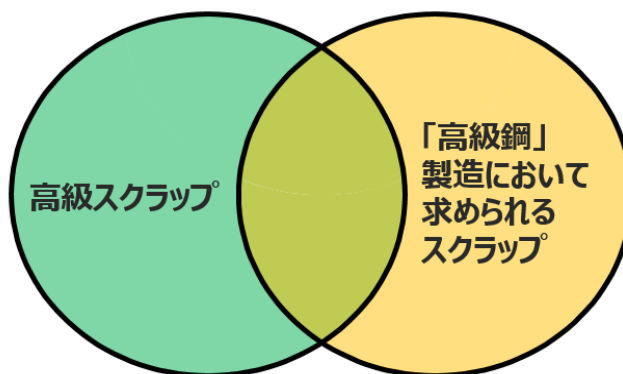


図 2- 6 定義のイメージ

名称	高級スクラップ	「高級鋼」製造において求められるスクラップ
定義	上級スクラップ、品質の良いスクラップ等。需要家ごとの品質要件に関係なく、市中で一般的に高値で取引されているもの	パフォーマンスギャランティーを行う鋼材を製造する上で求められるスクラップ
要件	一般に、 ①嵩比重が高い ②出自が明らかな ③不純物（ダスト）の混入が無い	成分が保証できるスクラップ
該当するスクラップ	新断、HS、場合によってはH1スクラップ	①加工スクラップ全般 一般に低級スクラップと言われるダライ粉も、分別管理が徹底され、成分が把握できる場合には該当し得る。 ②老廃スクラップの一部 例1：事前に需要家と合意した手順で解体されたAプレス（例：東日本資源リサイクル） 例2：細かく破碎して丁寧な分別回収を行い、独自の成分規格を付与したシュレッダー（例：ハリタ金属）

図 2- 7 「高級スクラップ」と、高級鋼製造上求められるスクラップの定義

「高級スクラップ」は一般に上級スクラップ、品質の良いスクラップ等様々な呼称があるが、その定義は定まっていない。一般には①嵩比重が高く、②出自が明らかな、③不純物（ダスト）の混入が無いものを指し、新断、HS が該当する。

H1 も HS と同じ厚さ（6mm 以上）の寸法で、嵩比重が高いスクラップではあるが、H2 以下のスクラップと分別管理されていない場合もあり、その場合は「高級スクラップ」とは見做されない。なお、新断、HS は一般に他の等級のスクラップと分けて管理されている。

高級鋼の製造において求められるスクラップは、不純物が少ないスクラップであり、発生源が明白であり成分値を把握することが容易な加工スクラップ、また高度な分別管理をして成分を一定担保できる一部の老廃スクラップが該当する。

以下、スクラップの高度な分別管理を実施している事例を説明する。

① 電炉メーカー（トピー工業）

グループ企業のスクラップ加工処理プラントに国内最大級の大型シュレッダー（4000 馬力）及びダスト再資源化プラント（金属高度選別ライン）を導入。電炉メーカーの製造所に隣接するスクラップ加工処理プラントで廃自動車や雑品スクラップ等を大型シュレッダーで破碎し、鉄及び非鉄金属に分別する。同時にプラスチック等の非金属を主成分とするシュレッダーダストを得ている。

更にその後、ダスト再資源化プラントの金属高度選別ラインを経由することで、シュレッダーダスト中の金属類の含有率を従来の約 8 % から約 1 % 未満まで低減することができ、非鉄金属の高度分別回収

を行うとともに、高純度化されたシュレッダーダストを固化し、電炉におけるスクラップ予熱の熱源として活用している。なお、ダスト固化体が炭材として利用されることによって、電力原単位や炭材原単位の大幅な低減が実現されている。

シュレッダー処理された鉄スクラップ	ダストを固化した炭材代替品
	

出典：明海リサイクルセンターパンフレット

② スクラップ加工処理事業者（ハリタ金属）

品質がコントロールされたスクラップを求める需要家向けに、加工前スクラップから丁寧な分別管理を行い、シュレッダー処理後の炉前スクラップに自社独自の規格を付与して出荷している。鉄スクラップ検収統一規格に化学成分の定めは無いが、自社規格では品質の参考値として化学成分のデータを出している。スクラップは簡単に溶解できず無作為なサンプリングが難しいため、出荷するスクラップの化学成分を完全に保証することはできないが、需要家との取引実績を重ねることで品質に関する信頼関係を構築している。保有設備はギロチン2基（1250t、1000t）、シュレッダー3基（845馬力、1500馬力、2000馬力）であり、シュレッダーラインは屋内に配置されている。

加工前スクラップ（家電）	屋内の縦型シュレッダー
	

ハリタ金属見学时 写真

③スクラップ加工処理事業者（影島興産）

H2の一般的な切断長さは50～90cmであるのに対し、D社ではH2の切断長さを30cmと短尺化するで、

付帯する不純物の除去を容易にした。全国中小企業団体中央会「鉄スクラップの新たな需要家への小ロット販売に向けた調査研究」にて H2 の短尺化の実証実験を行った結果では、参加した 4 事業所全てにおいて H1 と遜色のない品位向上が認められた。

また、その他にも短尺化により電炉へのスクラップ装入が容易となる他、嵩比重を大きくして荷役効率を上昇させることも可能となる。一方で、短尺化すると作業時間が長くなるためその分コストが増え、処理能力も低下する。そのため、一般の事業者はコストや能力の観点から短尺化を行うことは少ないが、D 社が導入したリンデマン製のギロチンは国内製のギロチンより切断スピードが速く、短尺化によるコスト影響が少ない。

ギロチン	短尺化された HS
	

影島興産見学时 写真

③ スクラップの分別・分析に関する技術開発状況

スクラップの分析・分別技術については様々な技術が開発されているが、本格的な商用化レベルに至る技術は現時点では存在しない。表 2-1 にて、主なスクラップの分析・分別法を整理した。

表 2- 1 スクラップ分析・分別法のまとめ

方式	長所	短所	実用化レベル
蛍光 X 線	・ 比較的簡便	・ 小型装置は分析精度低い ・ 軽元素不可	・ Sc 片ごとの分析・分別はデモ機レベル (産業機械工業会海外レポート 2011 年 IARC) ・ ハンドヘルド機として実績多
LIBS	軽元素を含めて分析精度高い	・ 装置が大規模、高価 ・ 1 点計測では分析範囲が狭く、代表性問題あり	・ Sc 片ごとの分析・分別はデモ機レベル (R. Noll ら : Jour. of Laser Applications, (2003) p. 402.) ・ 最近、特許情報多い。
中性子	バルク内部まで分析可	・ 安全性 ・ 大型、高価	・ 実用レベルではない。 ・ 鉄鋼では分析用標準試料の分析に応用

イ) 蛍光 X 線分析 (産業機械工業会 (JSIM) 海外レポート 2011 年 IARC (International Automobile Recycling Congress 2011))

蛍光 X 線分析とは、分析対象物に X 線を当てた際に発生する蛍光 X 線を分光分析することで、その物体内に存在する元素の含有量を分析する最も一般的な物理測定手法であるが、ここでは、鉄、ステンレス、アルミ、銅、ニッケル、クロムなどの金属スクラップを非破壊の蛍光 X 線分析で判別するもので、現在ではハンドヘルド機として、スクラップ加工処理事業者に多く導入されている。しかし、ソーティングマシンとしての導入についてはまだデモ機レベルだと推察される。

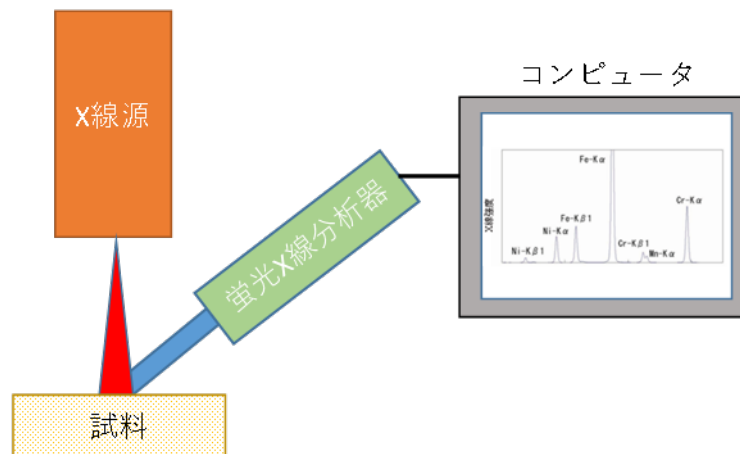


図 2- 8 TITECH 社製蛍光 X 線分析装置の概念図

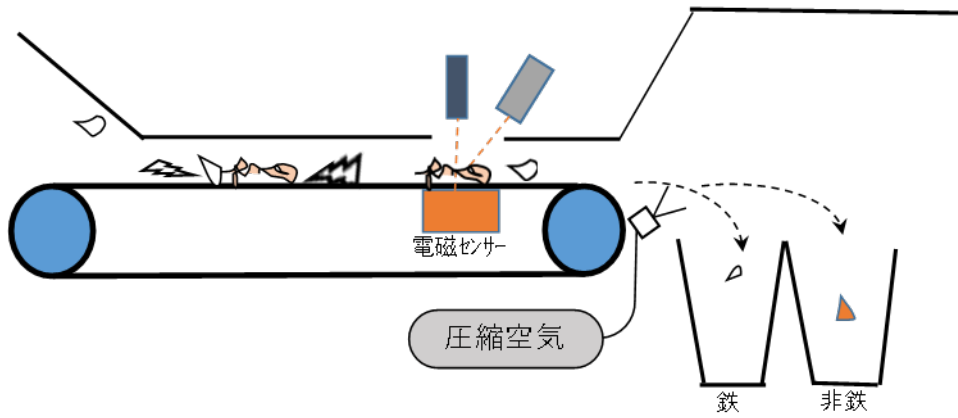


図 2- 9 蛍光 X 線式スクラップ選別装置の概要

ロ) レーザー誘起プラズマ発光分析法 (LIBS : Laser Induced Breakdown Spectrometry) 利用

LIBS 分析とは、分析対象物にレーザーを当てた際に発生するマイクロプラズマを分光分析することで、その物体に存在する元素の含有量を分析する方法であり、蛍光 X 線に比べて軽元素に対する感度が高い、という特徴を持つ。最近では、ハンドヘルドタイプの装置も開発されている様である。

論文 : Journal of Laser Applications (Archen 大学)

Online multi-elemental analysis using laser-induced breakdown spectrometry (LIBS) - research fields, industrial applications and future perspectives (402)、

本論文には LIBS の応用として幾つかの例が示されている。その中に、非鉄（アルミニウム）のスクラップ分別システムの例がある。

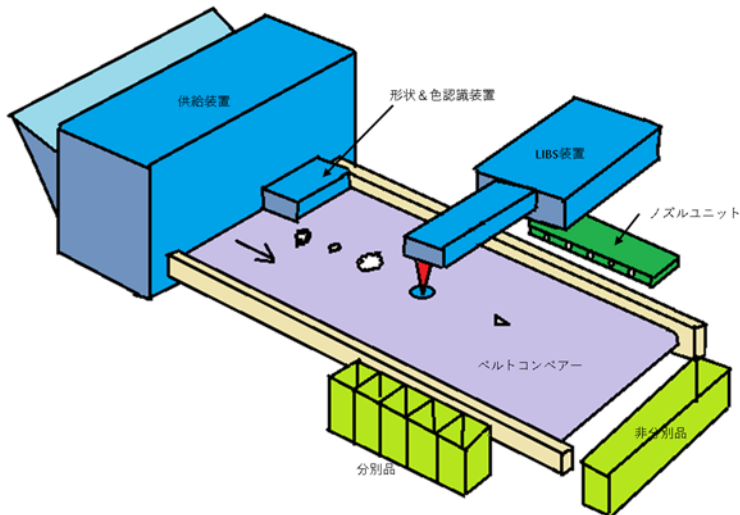


図 2- 10 LIBS を用いた軽金属スクラップの分別装置概要

ハ) 中性子による放射化分析

一般に、中性子が物質に当たると、その原子核との相互作用により、特有のエネルギーを持つ放射線が発生するので、その放射線のエネルギーと強度を分析することにより、元素と濃度を分析することが可能である。中性子は、他の放射線に比べて物体の奥深くまで透過する能力が高いため、バルク試料の内部まで分析が可能ということになる。しかし、人体へのダメージ等、安全面の問題、あるいは装置が大がかりであり、コスト、管理面でのハードルが高い。

国際特許公開番号：W02000005423 [16]

出願元：The David J. Joseph Company (USA)

秤量した後のスクラップに中性子線を当て、即発 $n(X, Y) \gamma$ 反応で生じる γ 線を測定して不純物濃度を測定。ただし、本特許中では、特にトランプエレメントを対象としたという記述は無く、電炉に装入する原料を分析することを目的とする。中性子を使った分析に関しては、他にも類似例がある。中性子は、分析対象物バルクの内部まで浸透し、分析できるため、原理的には目的に適していると思われる。

図 2-11 で、左図は重量測定装置で、右図は中性子源 52 と γ 線検出器 48 からなる分析装置。元素の特性 γ 線の強度と重量から特定の元素の含有率を求める。

なお、本特許は、米国、豪州、欧州に出願されているが、いずれも権利化はされていない。

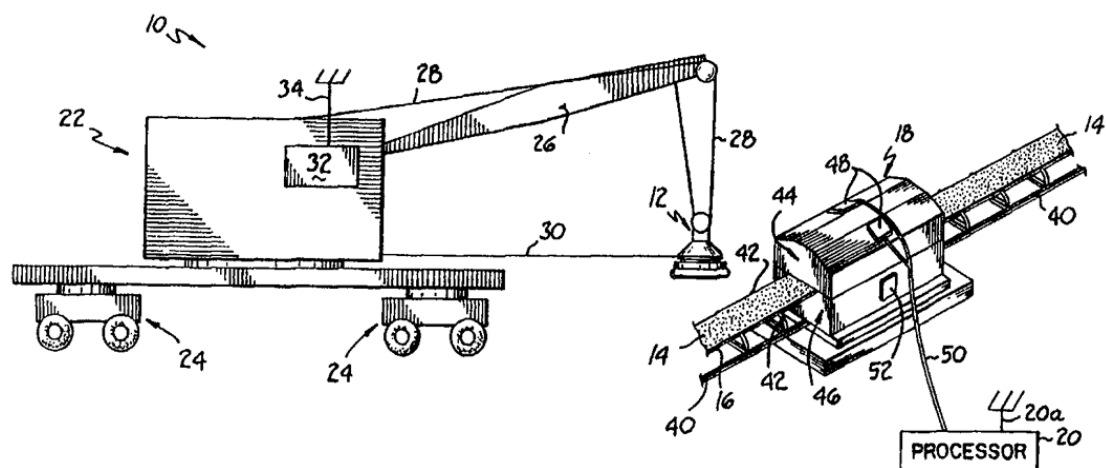


図 2- 11 中性子による原料の分析装置

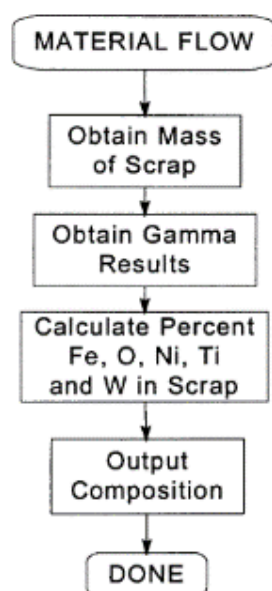


図 2- 12 中性子線を利用した原料分析のフロー[16]

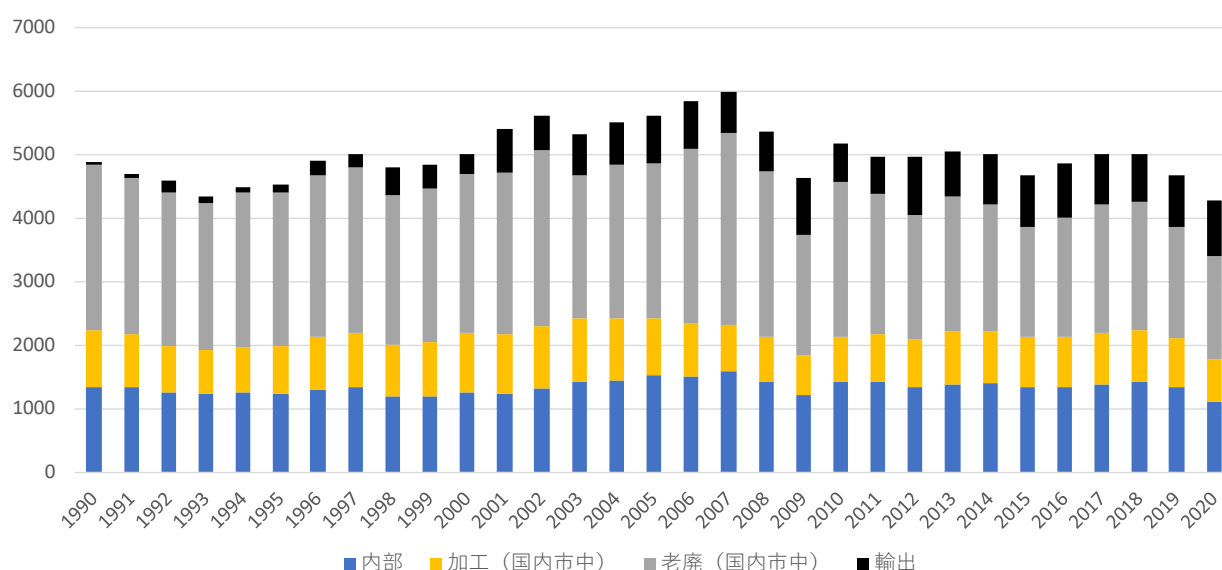
2-3. 日本のスクラップの発生量の実績

スクラップ発生量予測においては、日本鉄源協会による鉄源年報による内部スクラップ、加工スクラップ、老廃スクラップの発生量および鉄鋼蓄積量の過去実績に基づいて推計を行った。表 2-2 に各種スクラップ発生量の実績値として使用したデータの出典を整理する。

表 2-2 各種スクラップ発生量実績の出典

種類	出典・考え方
内部	以下の統計値を引用 鉄源年報 第Ⅱ-3表 鉄スクラップの国内需給（年度）における「自家発生」

加工	加工＝国内加工スクラップ 国内加工スクラップは以下の統計値を引用（①または②） ①鉄源年報 第Ⅱ－４表 国内購入市中スクラップ・内訳推計（年度） ②鉄源年報 第Ⅱ－３図 我が国の鉄スクラップ国内需給（年度） ※①を優先、①でデータが無い年度は②のデータを採用
老廃	老廃＝国内老廃スクラップ＋スクラップ輸出量×0.8 国内老廃スクラップは以下の統計値を引用（①または②） ①鉄源年報 第Ⅱ－４表 国内購入市中スクラップ・内訳推計（年度） ②鉄源年報 第Ⅱ－３図 我が国の鉄スクラップ国内需給（年度） ※①を優先、①でデータが無い年度は②のデータを採用
その他 （未分類）	その他（未分類）＝スクラップ輸出量×0.2 鉄源年報 第Ⅱ－３表 鉄スクラップの国内需給（年度）の輸出量における「その他」



出典：鉄源年報データを基に日鉄総研作成

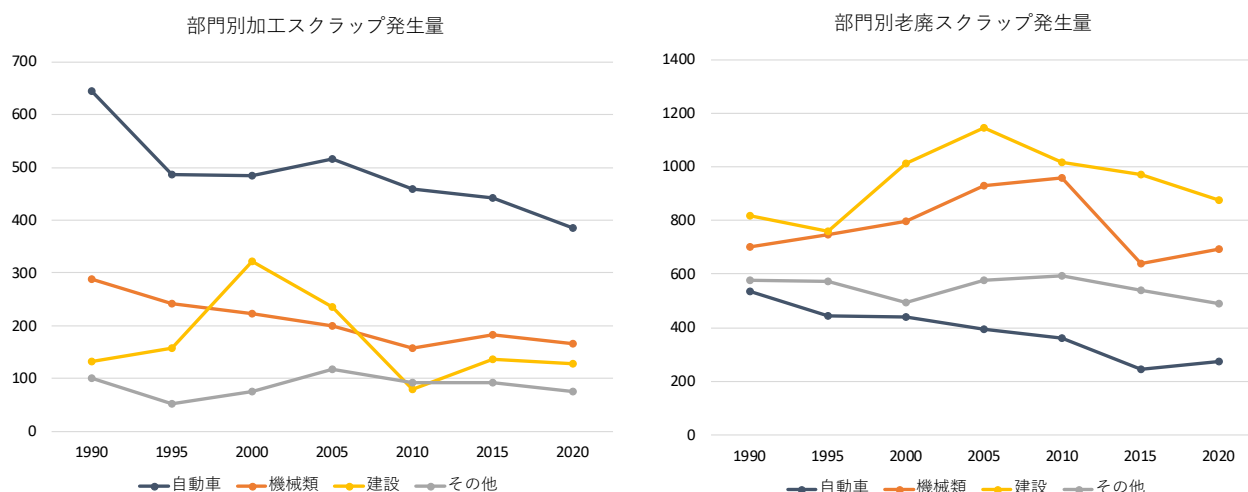
図 2- 13 スクラップ発生量の推移（単位：万トン）

（１）種類別スクラップ発生量の推移

日本におけるスクラップ発生量の推移を図 2-13 に示す。発生量全体は 1990 年から 2007 年まで増加傾向にあったものの、リーマンショックがあった 2008 年以降は減少傾向を続けている。また、1990 年以降スクラップ発生量における輸出スクラップの比率は増加傾向であり、2020 年時点のスクラップ発生量に占める輸出スクラップの比率は 20.75%（約 883 万 t）となっている。

（２）部門別・等級別スクラップ発生量の推移

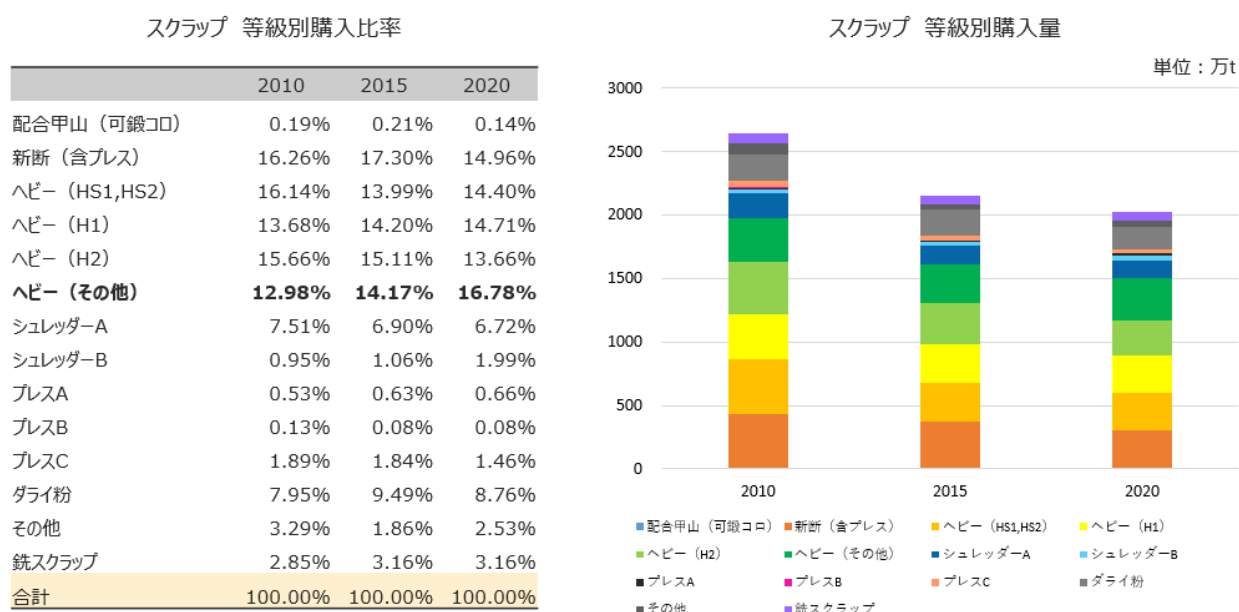
加工・老廃スクラップの、発生源ごとに分類した場合の発生量の推移を図 2-14 に示す。加工スクラップの主な発生源は自動車であり、自動車生産における鋼材消費が加工スクラップの発生に大きく影響する。また、老廃スクラップの主な発生源は建設部門で、建設部門で発生するスクラップは主にヘビースクラップである。



出典：自動車部門の加工スクラップ発生量は日鉄総研推計、その他は鉄源年報のデータを引用

図 2- 14 部門別スクラップ発生量の推移（単位：万トン）

等級別スクラップの発生量の推移を図 2-15 に示す。スクラップの等級比率はほぼ一定で推移しているものの、ヘビー（その他）の比率がやや上昇傾向にある。ヘビー（その他）は H2 以下の薄手のスクラップを指す。

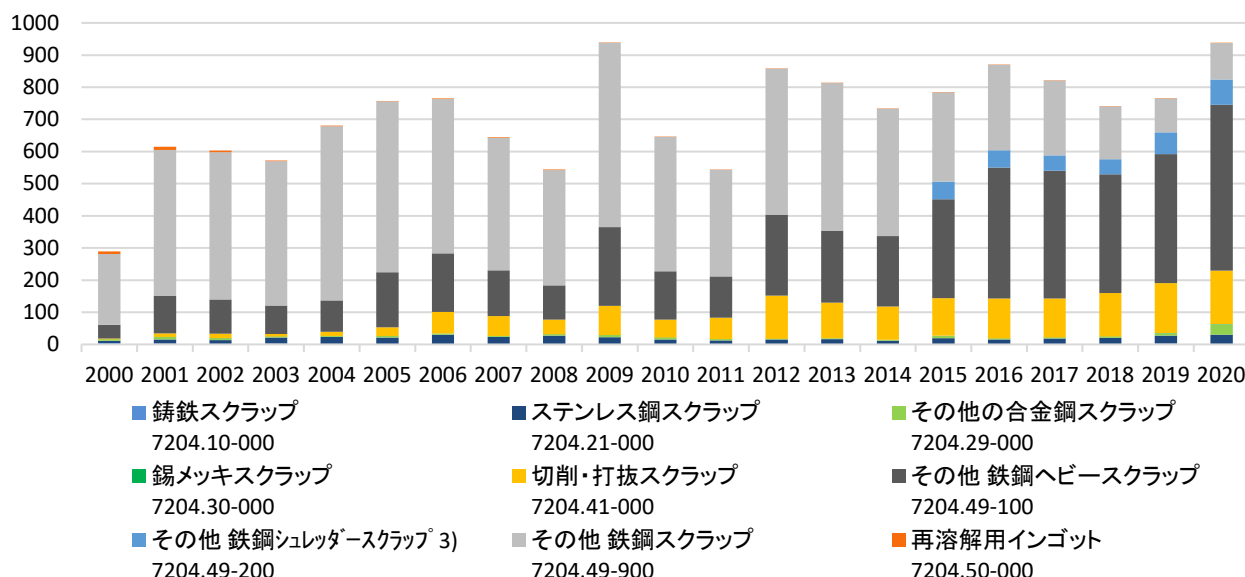


出典：鉄源年報データより日鉄総研作成

図 2- 15 等級別スクラップの発生量の推移（単位：万トン）

（３）輸出入の状況

スクラップの品種別輸出量を図 2-16 に示す。スクラップの国内消費量が頭打ちとなり、輸出量は増加傾向にある。2020 年（暦年）のスクラップ（HS コード 7204 の合計）輸出量は 938 万 t（前年比 22.4%増）であった。スクラップ輸出量の増加に伴い、加工スクラップである切削・打抜スクラップの輸出量も前年比 7.3%増の 167 万 t と増加傾向にある。



出典：財務省 貿易統計

図 2-16 日本の鉄スクラップ輸出の推移（単位：万トン）

主な輸出先は韓国で、次にベトナム、台湾が続く。2021 年からは中国がスクラップの輸入規制を見直し、政府規格に適合するスクラップを「再生鋼鉄原料」として自由に輸入することが可能となったため、中国向けのスクラップ輸出が再開している。

日本のスクラップ輸入量は輸出量に比べて少なく、2020 年の輸入量は 4.8 万 t であった。主にアメリカ、韓国からの輸入が多く、品目はステンレス鋼スクラップ（7204.21-1000）またはその他スクラップ（7204.49-000）が多い。

2-4. 日本のスクラップ需給の予測（2030 年、2050 年）

本調査では、内部スクラップ、加工スクラップ、老廃スクラップの 3 種類のスクラップについて将来の発生予測を行った。鉄源年報の考え方を踏まえると、これらのスクラップ発生量は、国内での粗鋼生産量や鋼材消費量に連動しているため、将来の粗鋼生産量や鋼材消費利用について、高位シナリオ（現状維持）、中位シナリオ（第 6 次エネルギー基本計画の前提とされる生産量）、低位シナリオ（輸出大幅減）の 3 つのシナリオを立て、シナリオごとに発生量予測を行った。なお、今回の予測はいずれも年度でのデータを採用している。

（１） 粗鋼生産量シナリオ

2030 年、2050 年のスクラップ発生量の将来予測に当たり、以下の 3 つの鋼材生産量のシナリオを設定した。

- ・ 高位シナリオ：自動車、鋼材輸出競争力を現状のまま維持できるシナリオ
 - ・ 中位シナリオ：2030 年の粗鋼生産量が 9000 万トン（第 6 次エネルギー基本計画の前提とされる生産量）となるシナリオ
 - ・ 低位シナリオ：自動車、鋼材輸出競争力が大幅に減少するシナリオ
- 表 2-3 にそれぞれのシナリオの前提を整理する。

表 2-3 粗鋼生産量シナリオの前提整理

		高（現状維持）	中（エネ基）	低（輸出大幅減）
国内向け先鋼材出荷量	建築・土木	人口と同率で減少	人口と同率で減少	人口と同率で減少
	自動車（国内向け）	一人当たり生産台数、一台あたり鋼材使用量維持	一人当たり生産台数維持、一台あたり鋼材使用量減少	一人当たり生産台数、一台あたり鋼材使用量ともに減少
	自動車（輸出向け）	輸出台数現状並み、一台あたり鋼材使用量現状並み	2050 年に 3 割減直線的に減少	2050 年にゼロ直線的に減少
	産機	現状維持	現状維持	現状維持
	船	現状維持	現状維持	現状維持
	その他	人口と同率で減少	人口と同率で減少	人口と同率で減少
鋼材輸出		現状並み	2050 年に 3 割減直線的に減少	2050 年にゼロ直線的に減少

表 2-4 にそれぞれのシナリオにおける部門別鋼材消費量（国内）、輸出量、鋼材消費量（国内鋼材消費量の合計＋輸出量）、および粗鋼生産量の値を示す。

表 2-4 各シナリオにおける鋼材消費量と粗鋼生産量（単位：万トン）

	2019	高位		中位		低位	
	実績	2030	2050	2030	2050	2030	2050
建築・土木	2,080	1,969	1,685	1,969	1,685	1,969	1,685
自動車（国内向け）	892	844	722	784	578	728	462

自動車（輸出）	895	895	895	799	626	577	0
産機	725	725	725	725	725	725	725
船	425	425	425	425	425	425	425
その他	907	858	735	858	735	858	735
輸出	3,521	3,521	3,521	3,146	2,465	2,271	0
鋼材消費	9,445	9,237	8,707	8,707	7,238	7,554	4,031
粗鋼生産	9,843	9,600	9,049	9,049	7,522	7,851	4,190
粗鋼対 2019 差		-2%	-8%	-8%	-24%	-20%	-57%

出典：2019 年度実績部分のみ粗鋼生産量については経済産業省「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計月報」、
鋼材消費量内訳については日本鉄鋼連盟データより日鉄総研作成

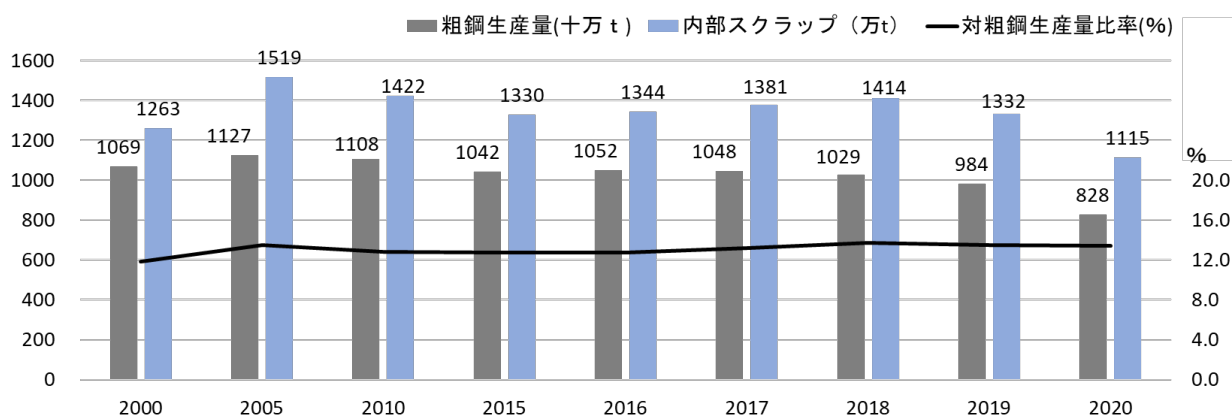
（２）スクラップ発生量予測の考え方

表 2-5 各種スクラップ発生量将来推計の考え方

種類	考え方
内部	内部スクラップ＝粗鋼生産量×内部スクラップ発生率 内部スクラップ発生率：13.53%（2019 年度実績）
加工	加工スクラップ＝部門別加工スクラップ発生量の合計（自動車、建材他） 部門別加工スクラップ発生量＝部門別鉄鋼加工量×部門別加工スクラップ出荷率 部門別鉄鋼加工量＝部門別鋼材消費量（普特）＋部門別鋳物銑鉄生産量 部門別加工スクラップ出荷率は 2014 年度日本鉄源協会「加工スクラップ発生実態調査」による
老廃	老廃＝鉄鋼蓄積量×老廃スクラップ発生率 鉄鋼蓄積量は 2020 年以降、毎年 891 万トン（2003 年から 2019 年の蓄積量増分の年平均）のペースで増加すると仮定。 鉄鋼蓄積量：2030 年 15.0 億トン、2050 年 16.8 億トン 老廃スクラップ発生率：2030 年 1.56%、2050 年 1.11%（過去傾向から外挿）

内部スクラップは製鉄所の生産段階で発生するスクラップであるため、図 2-17 に示す通り、粗鋼生産に連動して推移している。

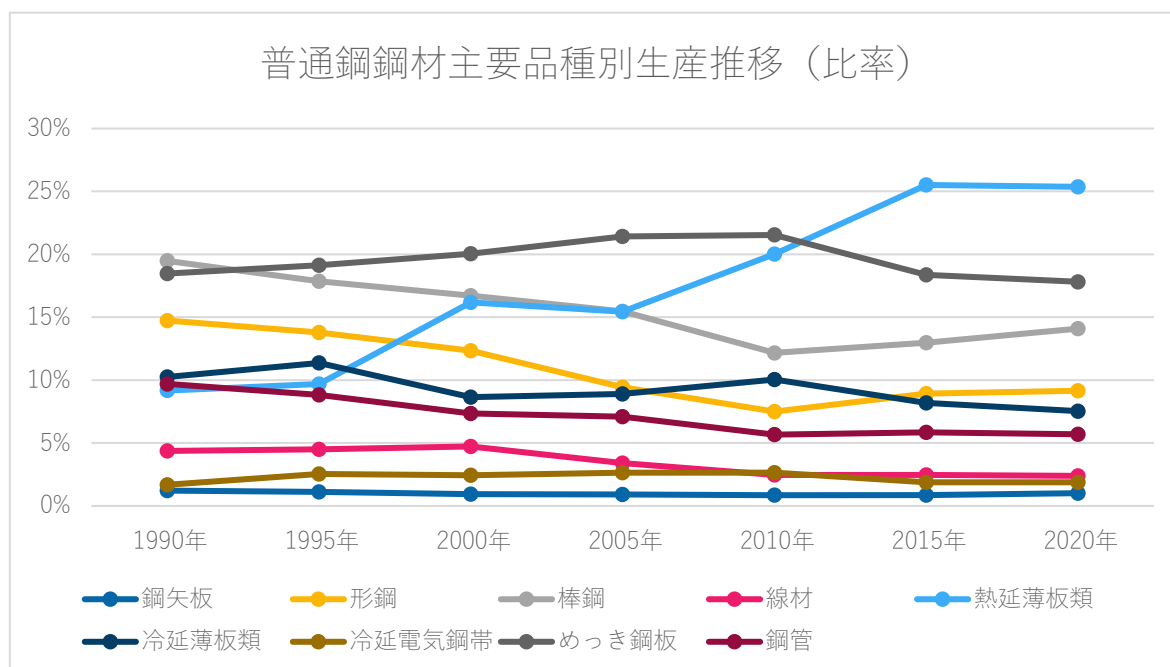
	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020
粗鋼生産量	10690	11272	11079	10423	10517	10483	10289	9843	8278
内部スクラップ	1263	1519	1422	1330	1344	1381	1414	1332	1115
対粗鋼生産量比率(%)	11.8	13.5	12.8	12.8	12.8	13.2	13.7	13.5	13.5



出典：経済産業省「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計月報」「生産動態統計月報」を基に日鉄総研作成

図 2- 17 粗鋼生産量と内部スクラップ発生量の実績推移

内部スクラップの発生率は11.8～13.5%で推移しており、2000年以降上昇傾向にある。熱延比率増加や多品種小ロット化等のプロダクトミックスの変化に伴う歩留まりの悪化が一因と考えられる。例えば図 2-18 では、普通鋼鋼材の品種別生産量推移において、熱延薄板類の比率が増加傾向にあることが示されている。



出典：鉄鋼統計要覧データを基に日鉄総研算出

図 2- 18 普通鋼鋼材主要品種別生産量推移(%)

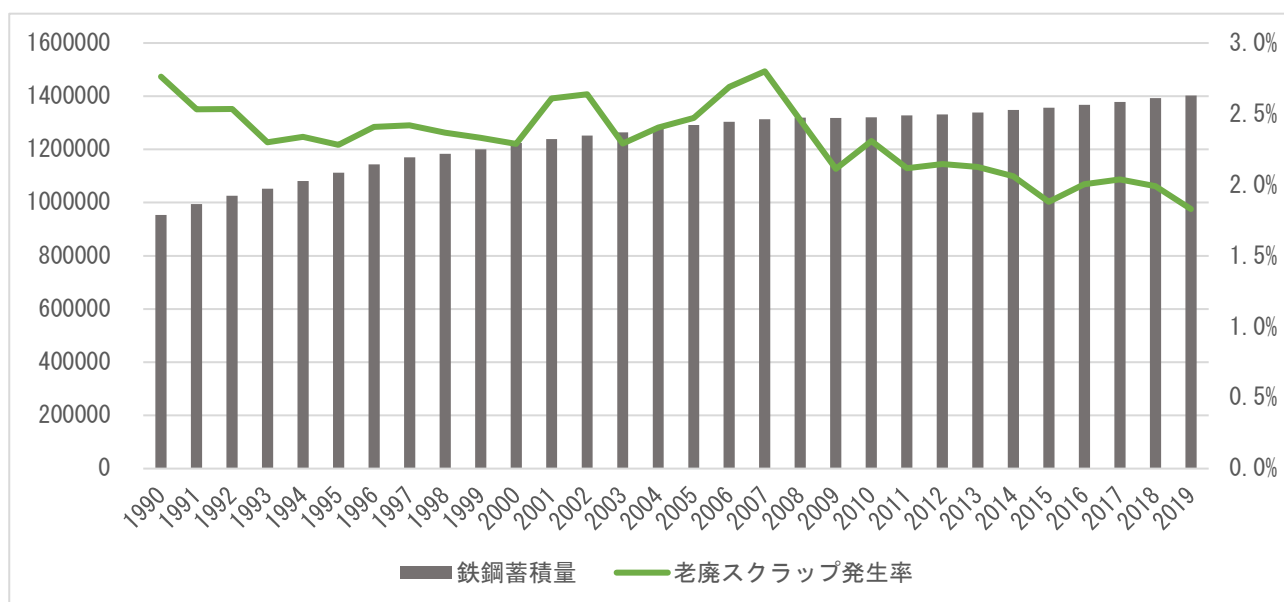
このような傾向から、発生量の将来予測に当たっては、最新の実績である 13.53%を対粗鋼生産量内部スクラップ発生率として採用した。

加工スクラップについては、各シナリオにおける部門別鉄鋼加工量に最新の部門別加工スクラップ出荷率（出典：2014 年度日本鉄源協会「加工スクラップ発生実態調査」）をかけることにより、各部門から発生する加工スクラップの量を予測し、その合計を加工スクラップ発生量として推計した。

老廃スクラップの発生量については、鉄鋼蓄積量に老廃スクラップ発生率をかけることで推計した。

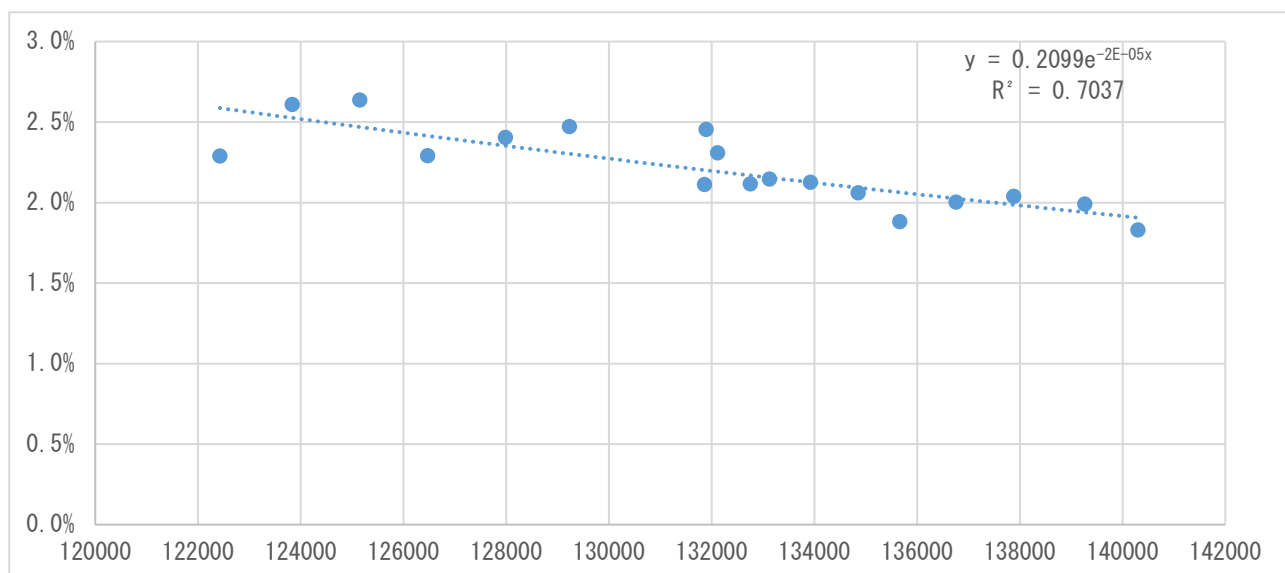
鉄鋼蓄積量の推移については、一人当たり鉄鋼蓄積量が 10 トンを超えた 2003 年から 2019 年の 17 年間に増加したペースが将来も維持されると想定し、毎年 891 万トン鉄鋼蓄積が増加していくと仮定した。

老廃スクラップ発生率の将来推移については、過去の鉄鋼蓄積量に対するスクラップ発生率の関係から得られた指数回帰曲線を用いて予測した。図 2-19 に示すように、鉄鋼蓄積量の増加に伴い、それに老廃スクラップの発生率は徐々に低下傾向にある。特に今回は 2000 年以降～2019 年までのデータのうち、スクラップ価格の高騰によりスクラップ回収率が高騰した 2006 年、2007 年のデータを外れ値として除外したデータを用いて、図 2-20 の指数回帰曲線が得られた。指数回帰を選択した理由としては、鉄鋼蓄積量の増加に伴い老廃スクラップ発生率は減少するもゼロになることはないと考えられたためと、指数回帰による一番高い決定係数（R²）が得られたため。なお、本推計においては、過去実績におけるその他（未分類）は老廃スクラップ発生量に含有されるとして老廃スクラップ発生率を計算した。



出典：鉄源協会データを基に日鉄総研作図

図 2- 19 鉄鋼蓄積量と老廃スクラップ発生率の推移（単位：万トン）



出典：鉄源協会データを基に日鉄総研作成

図 2-20 鉄鋼蓄積量に対する老廃スクラップ発生率の指数回帰曲線

(3) スクラップ発生量予測結果

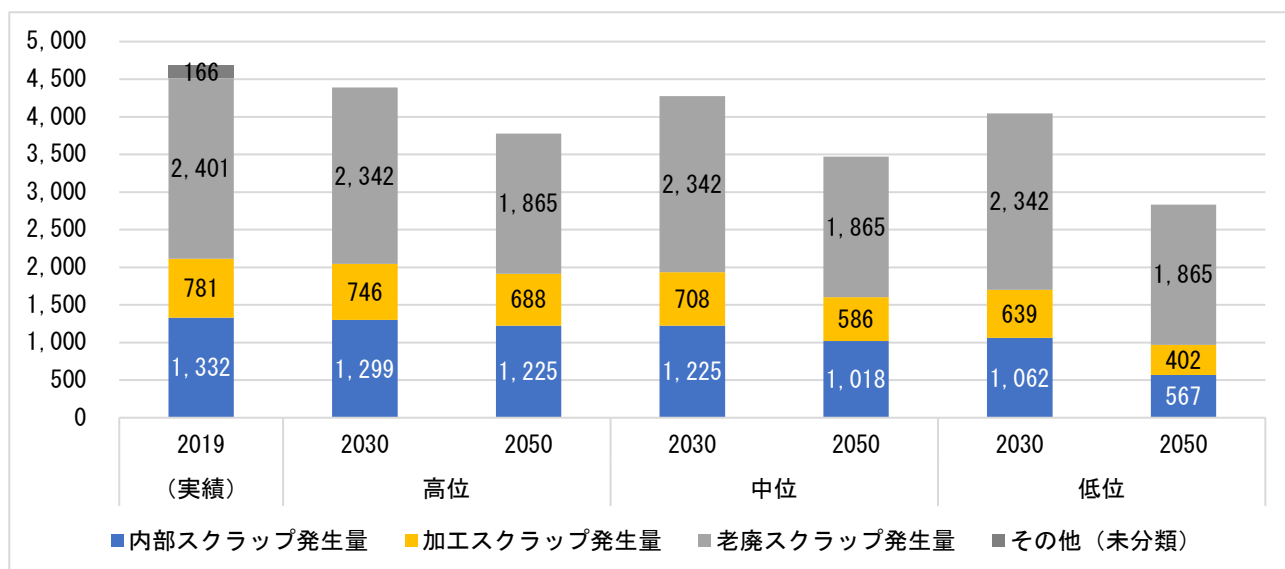
2030 年及び 2050 年のスクラップ発生量予測の結果の概要を表 2-6 に示す。参考として、それぞれのシナリオにおける粗鋼生産量も同表に示す。

表 2-6 スクラップ発生量予測結果概要（単位：万トン）

	(実績)	高位		中位		低位	
	2019	2030	2050	2030	2050	2030	2050
内部スクラップ発生量	1,332	1,299	1,225	1,225	1,018	1,062	567
加工スクラップ発生量	781	746	688	708	586	639	402
老廃スクラップ発生量	2,401	2,342	1,865	2,342	1,865	2,342	1,865
その他（未分類）	166						
合計	4,680	4,388	3,778	4,275	3,469	4,044	2,834
粗鋼生産量（参考）	9,843	9,600	9,049	9,049	7,522	7,851	4,190

出典：2019 年度実績は鉄源年報より。推計は日鉄総研作成。

同様の結果を、図 2-21 のグラフに示す。粗鋼生産量のシナリオによって、スクラップ発生量の予測に差が出てくることがわかる。また、いずれのシナリオにおいても、スクラップ発生量は 2019 年度を下回っている。



出典：2019 年度実績は鉄源年報より。推計は日鉄総研作成

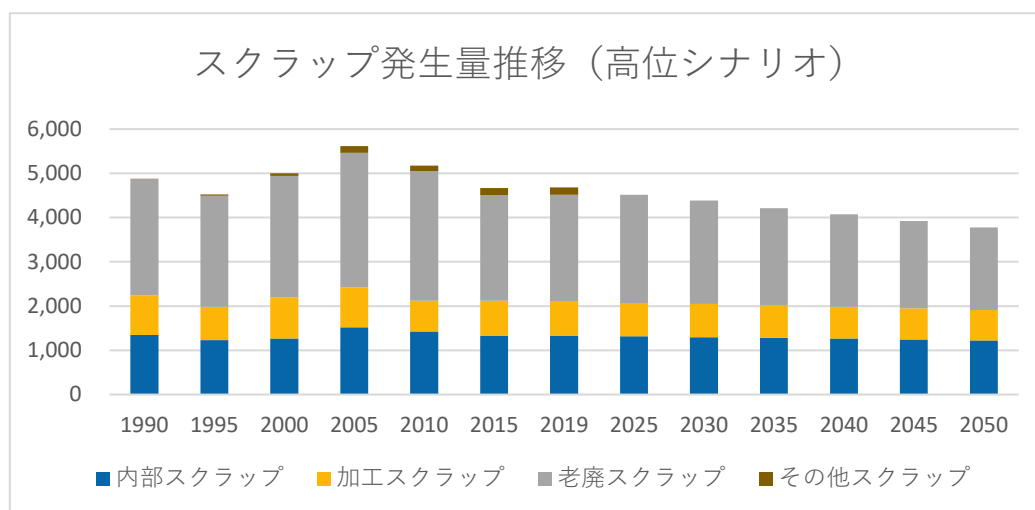
図 2- 21 2030 年、2050 年のスクラップ発生量予測（単位：万トン）

2030 年のスクラップ発生量は、高位シナリオで 4,388 万トン、中位シナリオで 4275 万トン、低位シナリオで 4044 万トンであった。2030 年の段階では、一番低い結果となった低位シナリオでも、2019 年度比 636 万トン減（14%減）であるのに対し、2050 年度には予測の差が広がり、高位シナリオでは 2019 年度比 900 万トン減（19%減）、低位シナリオでは 1846 万トン減（39%減）という結果となった。

スクラップ発生量の内訳を見ていくと、シナリオ別のスクラップ発生量の予測の差が、内部スクラップと加工スクラップの発生量の減少率の差によるものであることがわかる。内部スクラップの発生量は粗鋼生産量に連動しているため、必然的に想定粗鋼生産量が多い高位シナリオでは一番高く、低位シナリオでは一番低い結果となった。加工スクラップ発生量についても、鋼材加工量に連動しているため、鋼材加工量が多く想定されている高位シナリオで一番高く、低位シナリオで一番低い結果となった。老廃スクラップ発生量については、鉄鋼蓄積量の増加傾向を全てのシナリオで同等と見ているため、シナリオによる結果の差異はない。これは、各シナリオにおける生産量の差異のほぼ全量が輸出向け鋼材の生産量の差異であり、国内における鉄鋼蓄積量の増加量についてはほぼ同等と見られることと矛盾しない結果となっている。

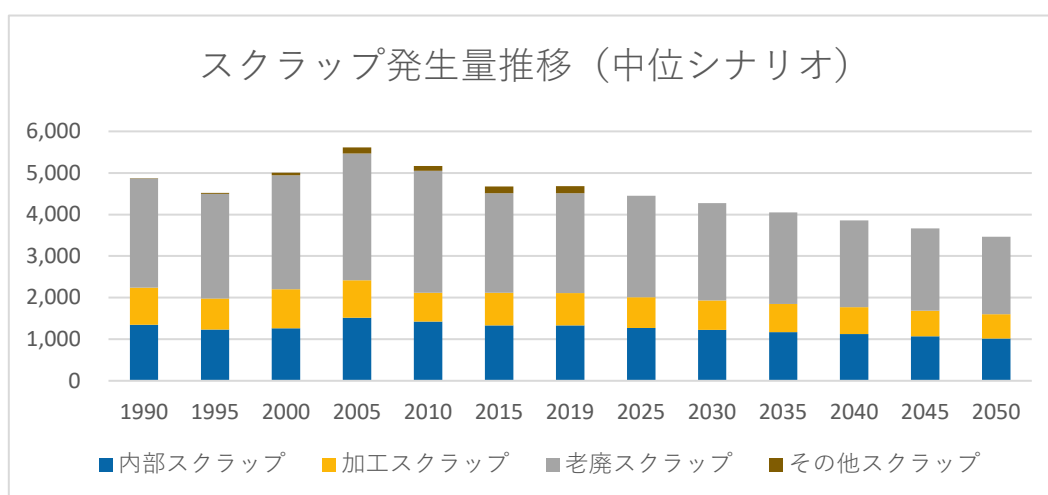
いずれのシナリオにおいても、内部スクラップおよび加工スクラップの発生量は低下していくと想定され、高級鋼製造においても品質にばらつきのある老廃スクラップを使いこなすことが重要となることが想定される。

参考として、過去の各種スクラップ発生量の推移および 2050 年に向けた各シナリオの発生量予測の推移を図 2-22、図 2-23、図 2-24 に示す。



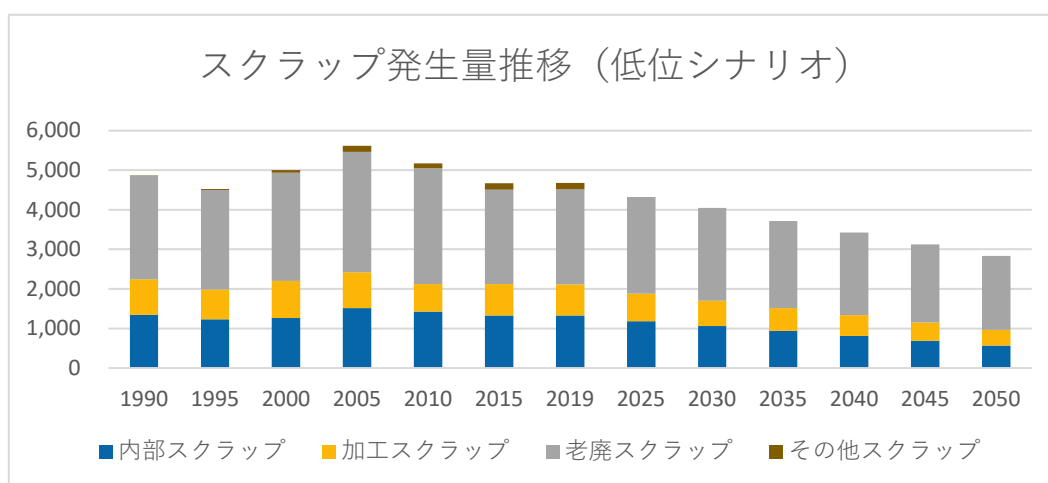
出典：2019 年度以前の実績は鉄源年報より。推計は日鉄総研作成。

図 2- 22 スクラップ発生量推移（高位シナリオ）単位：万トン



出典：2019 年度以前の実績は鉄源年報より。推計は日鉄総研作成。

図 2- 23 スクラップ発生量推移（中位シナリオ）単位：万トン



出典：2019 年度以前の実績は鉄源年報より。推計は日鉄総研作成。

図 2- 24 スクラップ発生量推移（低位シナリオ）単位：万トン

（４）スクラップ消費とのバランスの考察

上述のスクラップ発生量予測結果に対して、国内のスクラップ消費量はどの程度となるのか、複数の仮定をおいて推計を行った。推計の考え方を表 2-7 に整理する。

表 2-7 スクラップ消費量将来推計の考え方

消費部門	考え方
転炉	転炉スクラップ消費＝転炉粗鋼生産量×転炉スクラップ消費原単位 転炉粗鋼生産量＝粗鋼生産量－電炉粗鋼生産量 転炉スクラップ消費原単位＝20%（2019 年の 11.9%から、将来 CO2 対応ニーズにより 20%まで上昇すると想定）
電炉	電炉スクラップ消費量＝電炉粗鋼生産量×電炉スクラップ消費原単位 電炉粗鋼生産量＝普通鋼電炉粗鋼生産量＋特殊鋼電炉粗鋼生産量 普通鋼電炉粗鋼生産量：各シナリオの建築・土木部門の鋼材消費量に連動 特殊鋼電炉粗鋼生産量：各シナリオの自動車部門の鋼材消費量に連動 電炉スクラップ消費原単位：101%（2015～2019 年度実績平均）
鋳物	鋳物スクラップ消費量＝鋳物生産量×鋳物スクラップ消費原単位 鋳物生産量：各シナリオの粗鋼生産量に連動 鋳物スクラップ消費原単位：137%（2015～2019 年度実績平均）
その他	各シナリオの粗鋼生産量に連動
新設電炉	新設電炉スクラップ消費量＝新設電炉粗鋼生産量×電炉スクラップ消費原単位 新設電炉粗鋼生産量：2030 年度 776 万トン、2050 年度 1,176 万トンと想定 電炉スクラップ消費原単位：101%（2015～2019 年度実績平均）

上述の前提を置いた場合の 2030 年度、2050 年度における転炉、電炉、鋳物、新設電炉による生産量の内訳は表 2-8 の通りとなる。

表 2-8 スクラップ消費量予測における生産量の想定（単位：万トン）

	2019	高位		中位		低位	
	実績	2030	2050	2030	2050	2030	2050
転炉	7,490	6,578	5,900	6,089	4,537	5,001	1,498
電炉	2,353	2,246	1,972	2,184	1,809	2,074	1,515
（普通鋼電炉）	1,645	1,557	1,332	1,557	1,332	1,557	1,332
（特殊鋼電炉）	707	688	640	627	477	517	183
新設電炉	0	776	1,176	776	1,176	776	1,176

粗鋼生産量	9,843	9,600	9,049	9,049	7,522	7,851	4,190
鋳物	350	341	321	321	267	279	149

出典：2019 年度実績は鉄源年報より。推計は日鉄総研作成。

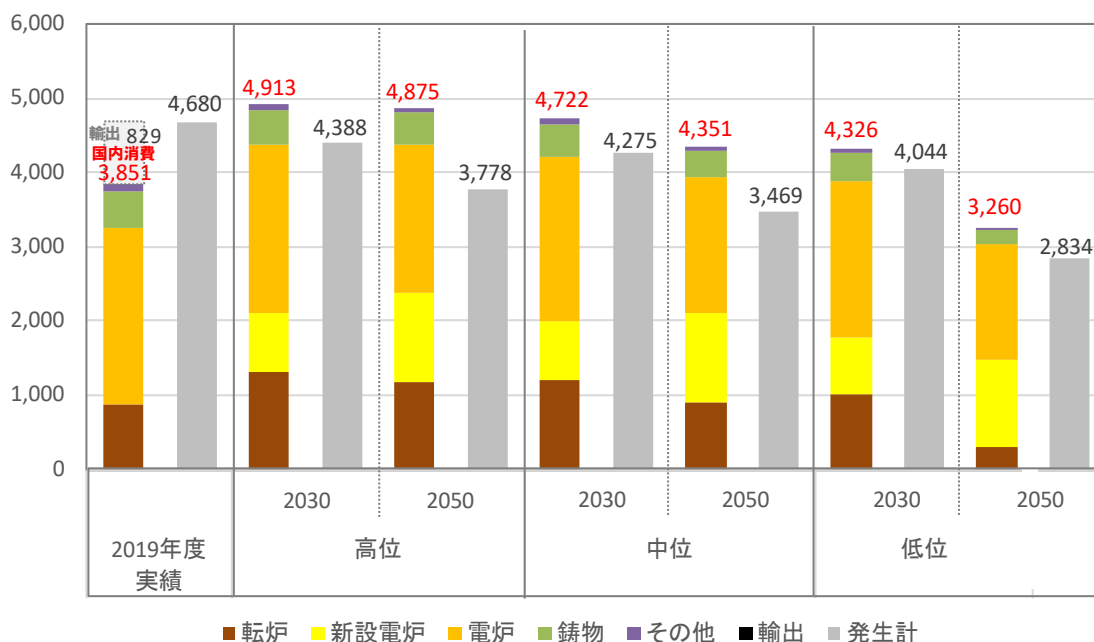
上述の前提で推計した 2030 年、2050 年のスクラップ消費量推定結果を表 2-9 にまとめる。

表 2-9 スクラップ消費量推定結果（単位：万トン）

	2019 年度	高位		中位		低位	
	実績	2030	2050	2030	2050	2030	2050
転炉	889	1,316	1,180	1,218	907	1,000	300
電炉	2,368	2,275	1,998	2,213	1,833	2,101	1,535
鋳物	486	466	439	439	365	381	203
その他	108	70	66	66	55	57	31
輸出	829	0	0	0	0	0	0
新設電炉	0	786	1,191	786	1,191	786	1,191
消費計	4,680	4,913	4,875	4,722	4,351	4,326	3,260
発生計	4,680	4,388	3,778	4,275	3,469	4,044	2,834
発生－消費		-525	-1,097	-447	-882	-282	-426

出典：2019 年度実績は鉄源年報より。推計は日鉄総研作成。

表 2-7 のような前提を置くと、全てのシナリオにおいて、2030 年度、2050 年度ともにスクラップ消費量が発生を上回る結果となった。この場合、国内発生量では需要を賄うことができないため、スクラップの輸入が必要となることが考えられる。ただし、表 2-7 の前提では、転炉のスクラップ消費原単位が現在の 12%から 20%まで増加すること、新設電炉のスクラップ消費原単位は現状の電炉並みと想定しており、DRI 等スクラップ以外の鉄源の活用については織り込まれていない点、留意が必要である。図 2-25 にスクラップ消費量推計結果と、比較のためにスクラップ発生総量推計値をグラフで表示する。



出典：2019 年度実績は鉄源年報より。推計は日鉄総研作成。

図 2- 25 スクラップ消費量推計結果（単位：万トン）

2-5. 日本におけるスクラップ需給並びに高品位化の方向性に関する総括

従来転炉で生産されていた高級鋼を電炉での生産にシフトするという、一貫製鉄メーカーの長期戦略が、昨年相次いで公表された。電炉における高級鋼製造の実現に向けては、前述のスクラップに混入されるトランプエレメントの問題と、将来に向けたスクラップの需給バランスについて検討する必要がある。

将来の粗鋼生産量や国内鋼材消費量については、第 6 次エネルギー基本計画の前提となった 2030 年粗鋼生産量を 9000 万 t とする「基本（中位）シナリオ」に加え、将来にわたり現在の我が国製造業の国際競争力が維持されるものとする「高位シナリオ」、2050 年に自動車および鋼材の輸出がなくなる「低位シナリオ」の 3 つのシナリオを設定した。それぞれのシナリオにおけるスクラップ発生量を試算した結果、いずれのシナリオにおいてもスクラップ発生量は現状を下回るという結論を得た。

スクラップ需要側については、上記 3 シナリオに対して、さらに、鉄鋼各社の公表ベースでの電炉化の進展と、温暖化対策強化のための転炉でのスクラップ最大利用を加味して試算を行った。その結果、いずれのシナリオにおいても、スクラップ発生量を超える需要が想定された。将来はスクラップ輸出余力がなくなることに加え、さらにスクラップまたは直接還元鉄等の輸入が必要になると考えられる。

スクラップの品位に関しては、電炉における高級鋼製造ニーズに応えるべく、高品位化が求められる。それを実現するためには、スクラップの回収、加工段階での分別強化が必要となる。なお、本調査における高品位スクラップとは、市中で一般的に高級スクラップと呼称されるスクラップ（新断、HS）ではなく、高級鋼製造に適したスクラップ（不純物混入の少ないスクラップに加え、高度な加工や分別によって不純物混入割合を保証できるスクラップ。シュレッダーも含む）となる。今回の加

工事業者等からの聞き取り調査の結果、シュレッダーでの破碎サイズの小粒化、ギロチンシャーでの切断長の短尺化により、不純物分離性が改善されるとの感触を得た。しかし、これらのオペレーションには、生産性の低下やコストの上昇を伴うため、加工能力拡大のための支援やコスト上昇に見合った価格プレミアムの付与が必要となると考えられ、政策的な支援として、こういった高度マテリアルリサイクル事業に対する設備投資、実証事業などへの補助は効果的と考えられる。また、トランプエレメントは、混入率の多寡のみならず、ばらつきや予測精度なども重要な評価項目となる。このため、特に高級鋼製造を目指す製鉄会社においては、信頼できる事業者とのひも付き契約や、調達源の囲い込みなども想定される。

参考文献

[10] 国際会議情報：産業機械工業会（JSIM）の海外レポート 2011 年 IARC（International Automobile Recycling Congress 2011）における報告に関する記事。

3. 中国におけるスクラップの需給見通しに関する調査

3-1. 中国におけるスクラップの発生とハンドリング状況

(1) 中国の電炉操業状況

① 中国の電炉操業の実態

中国政府は、2025 年に電炉粗鋼生産量比率 15%以上を目指すとしているが、足元は 10%程度である。2017 年に地条鋼が淘汰され、2018 年に電炉粗鋼生産量が急増したが、鉄スクラップ価格が上昇し、電力料金も高いことから、2020 年の電炉粗鋼生産は転炉鋼ほどは伸びなかった。ゆえに、地条鋼企業が消費していたスクラップは高炉一貫製鉄所で溶銑を配合して消費されていたことが示唆される。

地条鋼とは、成分調整などを行わず、単に鉄を溶かして固めただけの低品質の鋼材を指す。スクラップ電気溶解法の 1 つに IF 炉（Induction furnace：中周波炉）があるが、2010 年前半、中国で鉄源を持たないリロールメーカーが中周波 IF 炉でスクラップを溶解し、鉄製品を生産するようになり、その生産規模は 1 億 t を超えると言われた。しかし、一部の企業が品質不良問題を出しことから、中国政府は中周波炉を持っている企業を「地条鋼」企業と位置付け、2017 年上期までに淘汰した。しかし、実態は多くの旧地条鋼企業は電炉を導入し復活している。

2021 年の中国の電炉能力は 1.89 億 t で、そのうち独立電炉の能力は 1.1 億 t を占める。中国では多くの高炉メーカーが電炉を保有しており（表 3-1）、コスト低減のため溶銑を配合して電炉を操業している。中国の電炉では主に AC 炉（Alternating Current：交流電気炉）が採用されており（図 3-2）、経験則的に、溶銑 35%：スクラップ 65%の操業が AC 炉のフリッカーの問題も解消でされるため、安定性が高いといわれているが、実態は溶銑比率が 80%に達するところも存在する（表 3-2）。

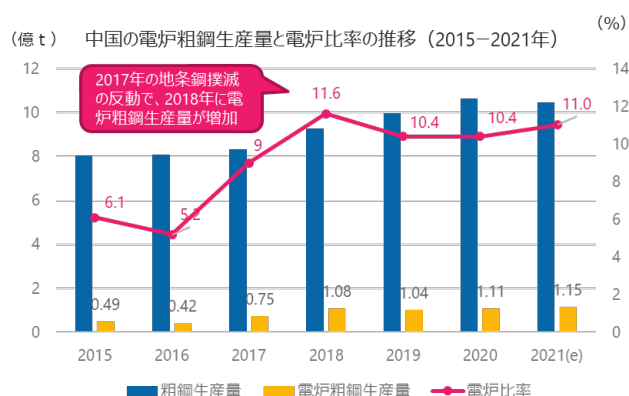


図 3-1 中国の電炉粗鋼生産量と電炉比率の推移
出典：各種情報より日鉄総研作成

表 3-1 中国の電炉能力上位 10 社 (2021 年 11 月時点)

順位	企業名	電炉能力 (万t)	設備	
			高炉	電炉
1	江蘇沙鋼	1,060	○	○
2	中国宝武集団	1,015	○	○
3	青山鋼鉄集団	760	-	○
4	河鋼集団	630	○	○
5	中信泰富特鋼集団	543	○	○
6	湖北丹福鋼鉄集団	389	-	○
7	河南亜新鋼鉄集団	373	○	○
8	山東鋼鉄集団	356	○	○
9	湖南華菱集団	275	○	○
10	北京建龍重工集団	231	○	○

* 報道によると、2020 年末時点の中国の電炉能力は 1 億 7,375 万 t

出典：各種情報より日鉄総研作成

表 3-2 中国各社の溶銑配合率と電力消費

企業名	電炉容量	溶銑比率	電力消費量
	t	%	kWh/t-s
宝鋼股分鋼管条鋼事業部電炉廠		81	69
中天鋼鐵集團公司電炉廠	90	73-82	電極撤去
南京鋼鐵聯合有限公司特鋼事業部第3煉鋼廠	100	63	128
沙鋼	100	?	162

出典：各種情報より日鉄総研作成

※集計時期 2017 年

プラントタイプ	50	100	150	200	250	合計
ヒートサイズ (T)	1-50	51-100	101-150	151-200	201-250	
AC-ELECTRIC ARC FURNACE	75	38	11	4	1	129
DC-ELECTRIC ARC FURNACE		6	2			8

<AC炉200所有企業>

- ・広州聯衆不銹鋼／広東省広州市
- ・太原鋼鐵（太原-SMP No.4 2基）／山西省
- ・福建福欣特殊鋼／福建省漳州市

<AC炉250所有企業>

- ・江蘇飛達板材／江蘇省丹陽市

<DC炉8基所有企業>

- ・宝山鋼鐵／上海市
- ・宝鋼八一鋼鐵（2基）／ウイグル自治区
- ・大冶特殊鋼／湖北省黄石市
- ・広州鋼鐵／広東省広州市
- ・蘇州鋼鐵／江蘇省蘇州市
- ・江陰興澄特種鋼鐵／江蘇省江陰市
- ・杭州鋼鐵／浙江省杭州市

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

図 3-2 中国の AC 炉、DC 炉基数

② 中国の電炉ミニミル導入状況

ミニミルは米国発祥で電炉ミニミル（CSP¹）が出発点となっており、ミニミルプロセスの上工程は基本的に電炉である。主原料がスクラップのため、トランプエレメント等の原料的制約があることから、主要な製品は棒線などである。中国では製造工程が省略できるというミニミルのメリットに着目し、海外からミニミルを導入を開始したが、ミニミルを導入する際、高級鋼を製造することを目的として、高炉一貫製鉄所にて転炉ミニミルを導入し、その後高級鋼製造を実現した。例えば、武鋼の CSP では無方向性電磁鋼板や自動車用鋼を量産化している。

現状、中国では CSP や ESP²など、主に海外のミニミル設備を導入しており、上工程は高炉・転炉プロセスが主流であるため、高級鋼製造が可能である。一方、2018 年以降は主に民営の独立系電炉製鋼企業で電炉ミニミルも導入されてきており（表 3-3）、スクラップ 100 %で操業する独立系電炉における高級鋼製造にはトランプエレメントの問題解決が必要となる。

¹ casting, heating, rolling combined in a single manufacturing line to produce hot strip. Developed by SMS.

² casting and rolling integrated in a continuous casting-rolling process (endless mode) to produce hot strip. Developed by Arvedi.

表 3-3 中国における独立電炉のミニミル納入実績

納入先	設備	エンジニア	製造製品	能力(万 t)	情報時期	備考
河南亞新鋼鉄	ESP (EAF Quantum)	Primetals	鋼板 (炭素鋼板、低合金高張力鋼板、二層鋼板の生産 予定)	160 (将来的には250万 t)	2018.03.	- EAF Quantum とESPを組合せた世界初のミニミル 2020年に稼働開始 予定
河源德潤 (旧地条鋼)	ESP (EAF QUANTUM)	Primetals	鋼板	-	2018.10.	2019年度の第 3 四半期に稼働予定 130億元を投入し6台の電炉、高速棒材3ライン、高速線材2ライン、ESP1ラインを導入し、年産600万tの製鉄会社に
福建鼎盛鋼鉄	ESP (EAF QUANTUM)	Primetals	鋼板	200	2019.05.	2018年3月着工115tQuantum電炉2基 2020年2月稼働予定
山東九羊集団 山東富倫鋼鉄	ESP (EAF QUANTUM)	-	鋼板	-	2020.03.	- 東北大学が自主開発 - 中国重慶汽車集団などへの自動車鋼板供給を目指す
桂林平鋼 (旧地条鋼)	MIDA QLP® TWIN	Danieli	棒線	-	2021.08.	- エンドレス鋳造 2020年12月稼働 - 中国で最初の長尺製品用のグリーン製鉄所

出典：報道情報を基に日鉄総研作成

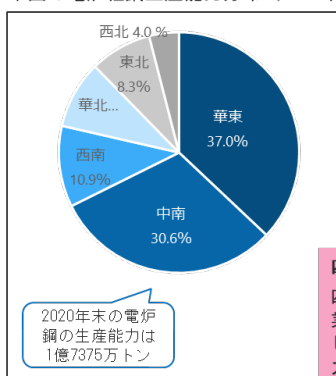
③ 中国の電炉建設の政策と実態

中国政府としては、電炉鋼発展はスクラップを使用することを前提としており、環境対策や脱カーボンという観点から、棒鋼や線材のようにスクラップ 100%で生産できるものは、電炉でスクラップを使用すべきとの考えを示している。また、政策として電炉建設を推奨しているが、転炉から電炉への能力置換による電炉建設は、焼結機・コークス炉などの高炉・転炉プロセス関連設備を完全に撤廃する必要があり、また、コスト（スクラップ、電極等の副資材、昼間の電気代など）が高いため、なかなか踏み切れず、電炉への置換はハードル高いものとなっている。

一方、鉄スクラップの発生量が比較的多い地域（華東、中南）や水力発電が豊富な四川省においては電炉導入が進められている（図 3-3）。

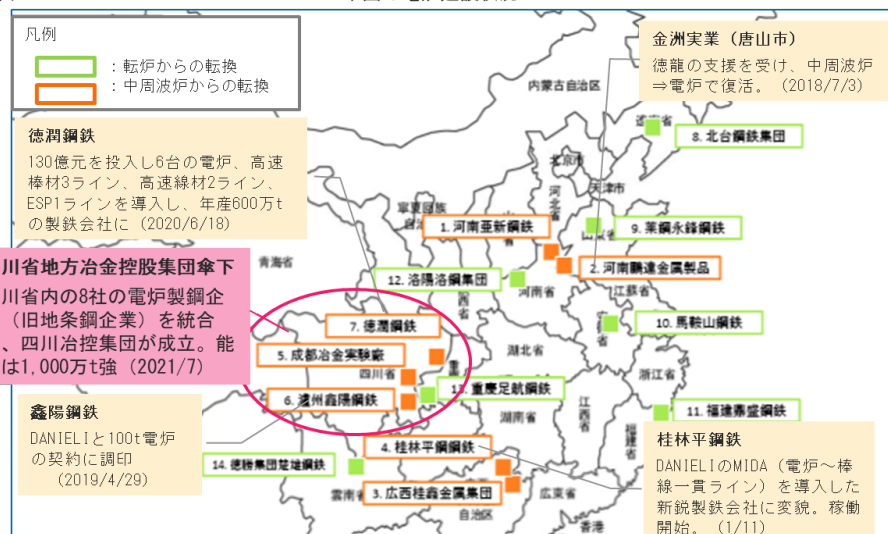
図 3-3 中国の電炉生産能力分布と電炉建設状況

中国の電炉粗鋼生産能力分布（2020年末）



* 成都冶金実験廠や四川都鋼鋼鉄集団、成都市長峰鋼鉄集団、四川盛泉鋼鉄集団、四川德潤鋼鉄集団航達鋼鉄など

中国の電炉建設状況



出典：各種情報より日鉄総研作成

④ 今後の予測

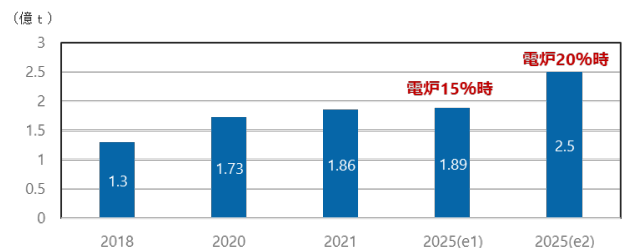
足元の電炉粗鋼生産量比率は10%程度であるが、中国政府としては、2025年に電炉比率15%以上を目指しており、それが可能であるのかを考察する。ここで、電炉稼働率を80%と仮定したが、これは『3-1. (1) ①中国の電炉操業の実態』でも述べたように、電炉能力1.89億tのうち約半分が独立系電炉であり、電炉稼働率は高炉一貫での電炉で100%、中国の各種報道によると独立系電炉で60%前後であるため、その間の80%と仮定した。

2025年の粗鋼生産量を10億tと仮定した場合、電炉比率15%（1.5億t）を達成するためには、電炉稼働率80%の場合、2025年に電炉能力2億tが必要であるが、現状約1.9億tのためほぼ現状の電炉能力で達成することが可能である。一方、電炉比率20%（2億t）を生産するためには、電炉稼働率80%の場合、電炉能力は2.5億t必要となる。現状約1.9億tの能力しかないため、2025年までにあと0.6億tの能力増強が必要となり、単に電炉能力の新規増強だけでなく、高炉・転炉から電炉への置換が必要である。

表 3-4 中国の電炉新增設・淘汰状況（万t）

年	建設電炉	淘汰電炉	電炉新增	電炉生産能力
2019	1,380	500	880	17,003
2020	2,311.5	1,090	1,221.5	18,225
2021	830	422	408	18,663
2022	246	35	211	18,844

出典：各種情報より日鉄総研で整理



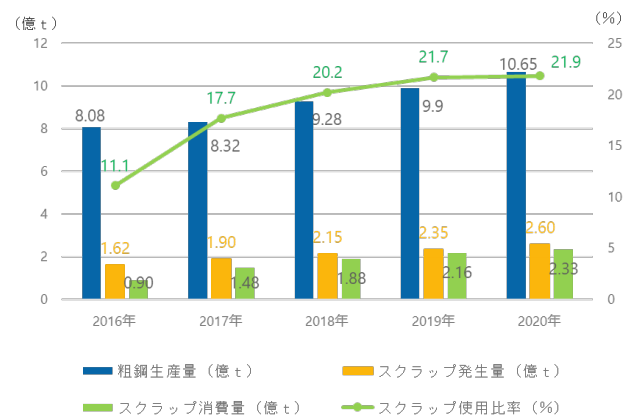
出典：各種情報より日鉄総研で作成

図 3-4 電炉能力実績と所用能力予測

（2）中国のスクラップ発生と活用状況

①スクラップの発生量と消費量

2020年の鉄スクラップ発生量は2.6億tであるが、そのうち、内部スクラップ量は約6,000万t、市中スクラップ量が約2億tである。また、鉄鋼業における鉄スクラップ消費量は2.3億tで、残りの3,000万tは鋳物用に消費されている。なお、2018年～2020年にスクラップが禁輸であったため、輸入分のスクラップは含まれていない。



出典：各種データより日鉄総研作成

図 3-5 中国における鉄スクラップ発生量と消費量

スクラップの三大発生地域としては、渤海湾、長江デルタ、珠江デルタ地区の大都市圏で、大型鉄鋼企業が集中している渤海湾、長江デルタ地区で消費している。

渤海沿岸地区では、遼寧省、河北省、天津市、内モンゴル自治区などの省と市が含まれる。このエリ

アには、国内準大手の鉄鋼メーカーの河北鋼鉄、鞍鋼集団及び唐山地区所在の多くの民営鉄鋼メーカーらが集中しているため、鉄スクラップの大量発生地域であり、大量消費地域でもある。

長江デルタ地区は、蘇省南部を中心に、江蘇省、浙江省、山東省、上海市などの省と市が含まれる。このエリアには、中国最大手の鉄鋼メーカーの宝武鋼鉄、沙鋼集団、馬鋼集団と、最多の鉄スクラップ回収業者が集中している。

珠江デルタ地区は、広東省、広西省、福建省が含まれる。このエリアは中国で経済が最も発展している地域であり、鉄スクラップ資源の発生量が多い。域内に大型製鉄所がないことから、スクラップ資源が余剰であり、通常、長江デルタ地区の鉄鋼メーカーへ供給している。

上記沿海の大都市圏に加え、四川省や重慶市もスクラップ発生量、消費量が多い地域である。四川省ではもともと、原料や製品の輸送に際し、沿海から内陸への輸送費がかかるため、地場発生のスクラップを使って電炉（中周波誘導炉）を操業してきた歴史がある。また、四川省や重慶市では自動車メーカーも多数存在するため（表 3-5）、加工スクラップも大量発生する。さらに、鞍鋼集団（攀鋼）、宝武集団（重慶鋼鉄、昆明鋼鉄など）などの大型鉄鋼企業も存在することから（内部スクラップ・自社消費）、四川省や重慶市もスクラップの大量発生・消費地域の一つとなっている。



出典：各種情報より日鉄総研作成

図 3-6 地域別スクラップ発生分布

表 3-5 西南地域の自動車メーカー

西南地区の自動車メーカー

No.	省・直轄市	市	自動車メーカー
1	四川省	成都市	一汽-大衆汽車有限公司成都分公司
2	四川省	成都市	中国重汽集团成都王牌商用车有限公司
3	四川省	成都市	成都高原汽車工業有限公司
4	四川省	成都市	成都大運汽車集团有限公司
5	四川省	成都市	四川一汽豐田汽車有限公司
6	四川省	成都市	四川野馬汽車股份有限公司
7	四川省	成都市	沃爾沃汽車公司成都工場
8	四川省	成都市	跑詩達新能源汽车有限公司
9	四川省	成都市	中植一客成都汽車有限公司
10	四川省	成都市	一汽解放汽車有限公司成都分公司
11	四川省	成都市	神龍汽車有限公司成都分公司
12	四川省	資陽市	四川南駿汽車集团有限公司
13	四川省	資陽市	現代商用汽車(中国)有限公司
14	四川省	綿陽市	綿陽華瑞汽車有限公司
15	四川省	德陽市(什邡市)	四川騰中福田專用汽車有限公司
16	四川省	南充市	四川比速汽車有限公司
17	四川省	南充市	吉利四川商用車有限公司
18	四川省	宜賓市	宜賓凱翼汽車有限公司
19	重慶市	-	重慶長安汽車股份有限公司
20	重慶市	-	長安福特汽車有限公司
21	重慶市	-	重慶鈴鐘汽車有限公司
22	重慶市	-	重慶鈴鐘汽車有限公司 第一工場
23	重慶市	-	重慶鈴鐘汽車有限公司 第二工場
24	重慶市	-	重慶長安跨越車南有限公司
25	重慶市	-	慶鈴汽車(集团)有限公司
26	重慶市	-	慶鈴汽車股份有限公司
27	重慶市	-	五十鈴(中国)発働機有限公司
28	重慶市	-	力帆科技(集团)股份有限公司
29	重慶市	-	重慶力帆乘用车有限公司
30	重慶市	-	上汽依維柯紅岩商用車有限公司
31	重慶市	-	上汽菲亚特紅岩動力總成有限公司
32	重慶市	-	重慶長安跨越商用車有限公司

No.	省・直轄市	市	自動車メーカー
33	重慶市	-	北汽銀翔汽車有限公司
34	重慶市	-	上汽通用五菱汽車股份有限公司重慶分公司
35	重慶市	-	華晨鑫源重慶汽車有限公司
36	重慶市	-	重汽(重慶) 輕型汽車有限公司
37	重慶市	-	北京現代汽車有限公司重慶分公司
38	重慶市	-	重慶金康新能源汽车有限公司
39	重慶市	-	湖南江南汽車製造有限公司重慶分公司
40	重慶市	-	東風小康汽車有限公司重慶分公司
41	重慶市	-	重慶瑞馳汽車実業有限公司
42	重慶市	-	重慶恒通客車有限公司
43	重慶市	-	長城汽車股份有限公司重慶分公司
44	重慶市	-	北汽嘉慶(重慶)新能源汽车技術有限公司
45	貴州省	安順市	貴航青年蓮花汽車有限公司
46	貴州省	遵義市	貴州航天成功汽車製造有限公司
47	貴州省	貴陽市	奇瑞万達貴州客車股份有限公司
48	貴州省	貴陽市	貴州長江汽車有限公司
49	貴州省	貴陽市	貴安新区新特電動汽車工業有限公司
50	貴州省	貴陽市	貴州吉利新特電動汽車有限公司
51	雲南省	昆明市	東風雲南汽車有限公司
52	雲南省	昆明市	江西江鈴集团新能源汽车有限公司昆明分公司
53	雲南省	昆明市	雲南五龍汽車有限公司
54	雲南省	曲靖市	一汽紅塔雲南汽車製造有限公司
55	雲南省	大理市	雲南力帆駿馬車兩股份有限公司

- ・ 四川省ではもともと、沿海經由原料や製品の輸送費がかかるため、地場発生のスクラップを使って電気炉（中周波誘導炉）を操業
 - ・ 四川省や重慶市では自動車メーカーも多数存在（加工スクラップ）
 - ・ 鞍鋼集団（攀鋼）、宝武集団（重慶鋼鉄、昆明鋼鉄など）などの大型鉄鋼企業も存在（自家発生スクラップ）
- ⇒ 西南地区もスクラップの大量発生・消費地域の一つ

出典：各種情報より日鉄総研作成

②製鋼プロセス別スクラップ消費

転炉・電炉の両方でスクラップ消費量は 2017 年以降上昇傾向となっている。プロセス別にみても

と、転炉でのスクラップ消費割合が多い。プロセス別のスクラップ装入比率は、転炉で 15%、電炉で 60%となっており、製鋼スクラップ比率は約 20%である。

表 3-6 高炉一貫製鉄所における鉄鋼プロセス別鉄スクラップ使用量（2011～2019 年）

年	粗鋼生産 量	スクラッ プ消費量	転炉				電炉				スクラッ プ総合原 単位	総合スク ラップ装 入比
			生産量	スクラッ プ消費原 単位	スクラッ プ消費量	スクラッ プ装入比	生産量	スクラッ プ消費原 単位	スクラッ プ消費量	スクラッ プ装入比		
	万 t	万 t	万 t	kg/t-steel	万 t	%	万 t	kg/t-steel	万 t	%	kg/t-steel	%
2011年	70,151	9,336	63,056	80	5,044	8	7,095	605	4,292	60.5	133.1	13.3
2012年	73,104	8,494	66,619	69	4,597	7	6,485	601	3,897	60.1	116.2	11.6
2013年	82,200	8,330	76,463	67	5,123	7	5,737	559	3,207	55.9	101.3	10.1
2014年	82,270	8,862	75,791	67	5,078	7	6,479	584	3,784	58.4	107.7	10.8
2015年	80,383	8,318	74,521	66	4,918	7	5,862	580	3,400	58.0	103.5	10.3
2016年	80,837	9,005	74,993	72	5,399	7	5,844	617	3,606	61.7	111.4	11.1
2017年	83,173	14,776	75,424	128	9,654	13	7,749	661	5,122	66.1	177.7	17.8
2018年	92,826	18,782	83,683	152	12,720	15	9,143	663	6,062	66.3	202.3	20.2
2019年	99,630	21,593	89,270	144	12,832	14	10,360	846	8,761	84.6	216.7	21.7

※地条鋼復活分は含まれていない

出典：各種情報より日鉄総研作成

3-2. スクラップ産業の現状と政策動向

(1) スクラップ産業の現状

①スクラップ事業者

2012 年 9 月に工信部が「鉄スクラップ加工業参入基準」を發布したが、スクラップ業界の管理をさらに強化するために 2016 年末に同基準の改定を行った。現行の基準は、業界発展の現状に基づき参入する鉄スクラップ事業者に対し、8 項目（土地確保、環境保全、省エネ・廃棄物の排出削減、安全生産、設備体制、製品品質、加工能力、エネルギー消耗）の基準を設けた。主な内容は図 3-7 参照。

《74 号公告》参入認可業者

工業情報部 2016 年第 74 号公告：“スクラップ加工業参入認可条件”及び“スクラップ加工業参入認可”に関する管理弁法。

主な内容：

- 企業の設立が国の産業政策に適合していること；
- 環境評価に合格していること；
- 土地使用が合法であること（借地期間は15年以上）；
- 年間生産能力が15万 t 以上であること；（ステンレススクラップは5万 t 以上）
- 加工ヤードの面積が3万㎡を下回らず、床面積が1.5万㎡を下回らないこと；
- 加工設備を備えていること：包装機設備、剪断設備、破碎ライン及び関連の積卸輸送設備；
- 製品が環境保護基準に適合していること；業者はISOの品質・環境マネジメントシステムの認証を取得しているものとする；
- 地方政府の経済情報化委員会を通じて工業情報化部に申請し、中国廃鋼鉄応用協会の専門家グループが論証と審査を行うこと；
- 供給先管理を強化し、スクラップは工業情報部が認可した鉄鋼メーカーに販売するものとし、“地条鋼”メーカーには販売してはならない。

出典：各種情報より日鉄総研作成

図 3-7 参入許可基準

2021 年現在、中国の資源リサイクル業者は 9 万社以上、スクラップ事業者（加工拠点）は 6 万か所以上存在し、総加工能力は 4.1 億 t あり、小規模スクラップ加工処理事業者が散在している。2020 年末時点での参入基準許可企業の総加工能力は 1.3 億 t あるが、基準を満たしている企業だけでは加工能力が

不足しているのが現状である。今後スクラップ発生量がさらに増加するため、加工能力増が必須である。

2020年のスクラップ発生量は2.6億tで、うち10%の0.26億tが鋳物用とすると、鉄鋼用は約2.3億t。ゆえに、認可すべき不足分の能力は約1億t（鉄鋼用スクラップ：2.3億t－認可企業加工能力：1.3億t）となる。

2021年は113社が参入基準をクリアし（計39社が取消）、2021年現在で参入基準許可企業は合計584社ある（図3-8）。スクラップ加工処理事業者は、スクラップ発生地域と同様に東部地域に集中している（表3-7）。

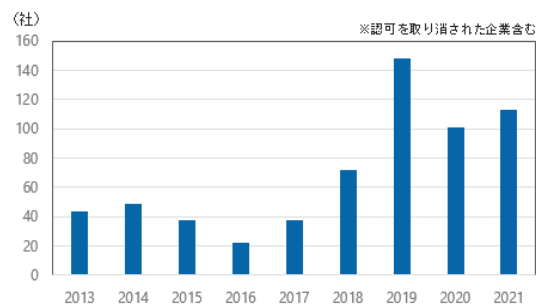


図3-8 2013-2021年参入認可スクラップ事業者数

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

表3-7 認可スクラップ事業者の地域別分布（2021年時点）

No.	省	地区	企業数	比率(%)
1	江蘇	華東	44	7.5
2	山東	華東	40	6.8
3	遼寧	東北	37	6.3
4	湖北	華中	34	5.8
5	河北	華北	33	5.7
6	河南	華中	28	4.8
7	安徽	華東	27	4.6
8	江西	華東	22	3.8
9	広東	華南	22	3.8
10	浙江	華東	18	3.1
	その他		279	47.8
	計		584	100

中国におけるスクラップ加工処理事業者の発展傾向としては、大型高炉メーカーがスクラップ加工・配送整備を早期に着手してきた（図3-9）。高炉メーカーが自社でスクラップ加工・配送整備し、スクラップを消費することで、安定供給に加え自社加工によりスクラップコストを下げていることが示唆される。

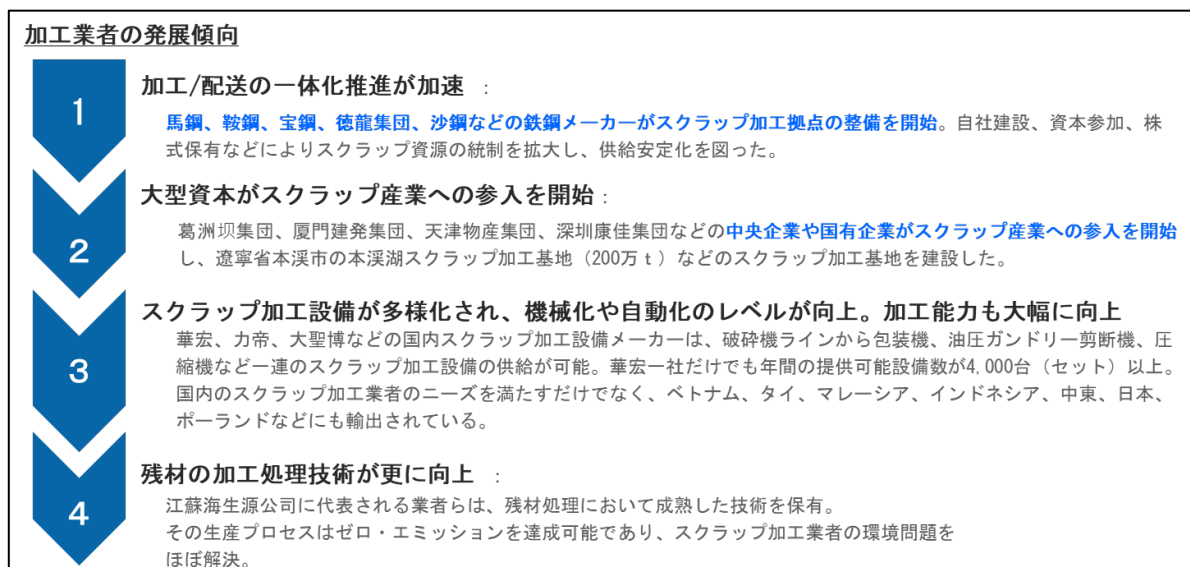


図3-9 スクラップ加工処理事業者の発展傾向

出典：各種情報より日鉄総研作成

中国のスクラップ事業者の課題として挙げられるのが、中国のスクラップ回収・加工企業は小規模企業が多く、産業の集約度が低いことである。一部の大手企業は比較的高い設備と技術レベルを持っているが、全体的には加工処理技術が低レベルである（参入基準未達の企業が大多数）。また、中国のスクラップ加工拠点は6万か所以上存在し、総加工能力は約4.1億tあるが、それらの膨大な数の中小企業

を取りまとめる大手企業が必要であり、スクラップ加工、流通システムを構築していかなければならない（スクラップの回収/加工/配送/利用の一体化を推進）。

以上のように、中国のスクラップ産業システムは不完全なため、電子商取引（e コマース）などを活用することでスクラップ流通（販売ルート）を向上させる必要がある。

② 廃棄自動車リサイクル

廃棄自動車の回収業者については資格認証制度を実施している。また、5 大アッセンブリ部品の再利用が禁止されていたが、資源節約と環境保護の観点から、2019 年 6 月に国务院が「廃棄自動車回収管理法」を正式に発表し、廃車の 5 大アッセンブリ部品の再利用制限が解除された。安全性が確認できたものは再利用し、日本のような精緻なリサイクルをせず、中古製品をリユースする動きになっている。

表 3-8 中国の自動車リサイクルに関する主な法案

	施行年	法案	内容
規制（禁止）	1990	廃棄自動車回収施行弁法	回収解体の管理部門と事業主体の義務、廃車回収証明の発行、廃車買取価格の変動幅及び5大アッセンブリ部品（エンジン、ステアリング装置、トランスミッション、アクスルシャフト、フレーム）再利用の禁止等について規定している。
	1997	廃棄自動車回収（解体）企業資格認証実施管理暫行弁法	通常の企業設立条件に加え、使用済自動車回収解体企業に対して 資格認定制度を導入した。
	1997	自動車廃棄標準	耐用年数や走行距離等運行安全面を中心に廃車基準について規定されている。その目的は、安全面と環境面を配慮し、中古部品を再利用して違法な車両組立を防止し、自動車の更新を加速させること。
規制緩和	2001	廃棄自動車回収管理弁法（307号令）	廃車回収解体の監督管理等の関連部門、廃車回収解体企業の設立条件と資格認定制度、認定企業の行為義務、廃車の手続きと廃車買取価格、及び違法行為に対する罰則等について規定している。
	2008	自動車部品再製造モデル管理弁法	自動車製造企業3社と部品製造企業11社をモデル企業として14社が選定され、政府の認定を受けた再製造企業に5大アッセンブリ部品を供給することは許可され、2010年、「再製造産業の発展の促進に関する意見」の公布によって、ドライブシャフト、エンジンオイルポンプ、ウォーターポンプ等のリビルト試行が始まり、規制を緩和する動きが見られた。
	2013	リビルト製品「以旧換再」推進モデル実施案	2008年にモデル企業が14社選定されたが、2013年にはさらに28社が許可されるとともに、「リビルト企業の品質管理規範（試行版）」に関する通知が発行され、リビルト事業に参入する企業に求められる要件等が定められた。また、リビルト部品の購買者に対し、最大2,000元（31,584円）の補助金を交付するという「以旧換再」政策の実施を明記している。
規制解除	2019	廃棄自動車回収管理法	廃車の5大アッセンブリ部品（エンジン、ステアリング装置、トランスミッション、アクスルシャフト、フレーム）の再利用制限が解除された。

出典：各種情報より日鉄総研作成

③ スクラップ加工設備

中国の鉄スクラップ加工方法は、主にガス切断、剪断、圧縮梱包機、シュレッダーがある（表 3-9）。アメリカや欧州には 1 万馬力のシュレッダーがあり、中国にも 1 万馬力のシュレッダーが設置されている。一方、現在の日本の大型シュレッダーの平均は 1, 200 馬力であり、日本には 1 万馬力のシュレッダーはない。

表 3-9 スクラップ加工設備

種類	方法
ガス切断	主に重機、ロール、スチールレール、パイプパイル、大型構造部品、ワイヤーロープなどを処理して、中型および大型のスクラップに適合させるために使用される。
シャー（剪断加工）	主にアリゲーターシャー、移動式シャー、ギロチンシャーを使用して、中小規模材、板材、チューブ、棒材などを切断材料に加工する。
圧縮梱包機	圧縮機を使用して、軽薄な材料、小さいスクラップ、その他の薄い材料を圧縮して加工する。
シュレッダー	シュレッダー（破砕機）を使用して、小型材、軽薄な材料、自動車のシェル、家電製品のシェルを破砕材料に加工する。

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

（2）スクラップ関連政策動向

①税制上の課題

税制の変化を図 3-10 に示す。かつては、廃棄物回収経営会社が回収した廃棄物を販売する際、増値税³が免税されていたが、2008 年から増値税免税が取り消されることになった。一般納税人⁴は、2009 年は

³ 増値税とは日本の消費税に相当する付加価値税のこと

⁴ 一般納税人とは年間売上が 500 万元を超える企業を指し、500 万元以下は小規模企業に分類される。

増値税 17%納付後、70%の還付を受けられたが、その後、次第に還付率や還付対象企業が制限され、2010 年は増値税 17%納付後に 50%の還付、2015 年には一般納税人で「スクラップ加工業界の加入条件」を満たす企業のみ 30%の増値税還付を受けることが可能となった。

これまで、従来営業税+増値税により、二重課税（仕入れ控除が出来なかった）となっていたが、営業税を廃止し、中国全土で増値税で一本化することによって税負担の軽減を実現した（2012 年より段階的に実施し、2016 年 5 月 1 日より施行された）。営業税が増値税に移行したことから、建築業が鉄鋼会社に対し増値税伝票を求めるようになり、増値税を逃れていた地条鋼に対する打撃となり、地条鋼の撲滅を促進する結果となった。

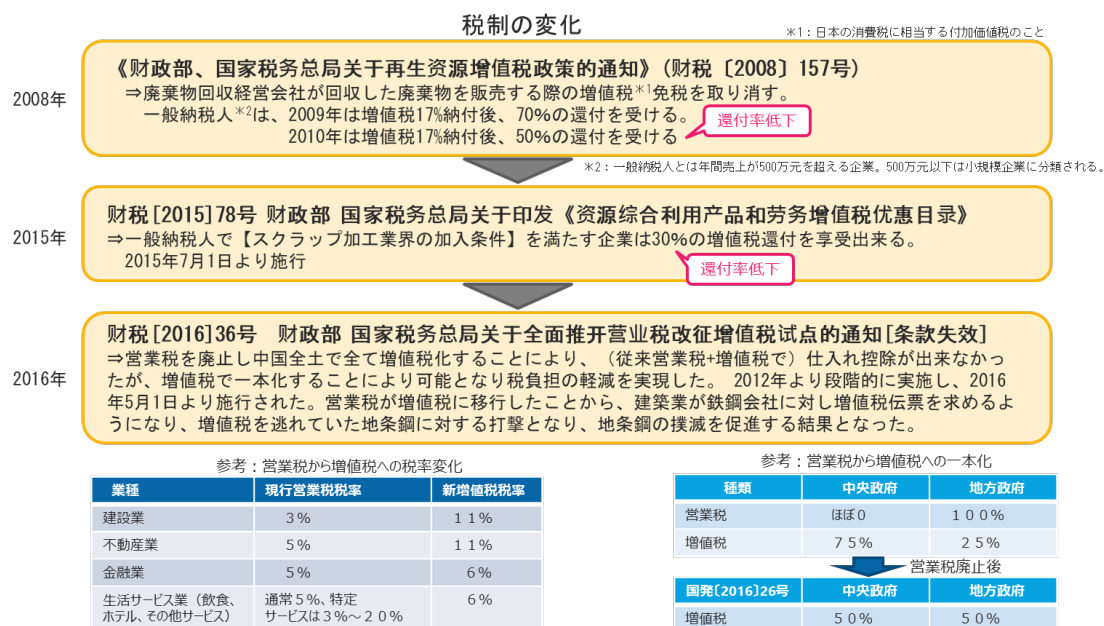


図 3-10 中国スクラップ産業に関する税制の変化

出典：中国政策動向より日鉄総研作成

税制に関連したスクラップ加工処理事業者の 4 大問題を図 3-11 にまとめた。1 つ目に、スクラップ回収企業の大部分が（仕入れ控除できる）増値税伝票を入手できないことである。伝票（發票）⁵には専用伝票と普通伝票の二種類あるが、小規模企業は仕入れ控除がきかない普通伝票のみしか発行できず、スクラップ回収事業者の多くは経営規模が小規模な企業が散在している。2 つ目に、企業が税制優遇政策を享受するためのハードルが高いことである。国家財税【2015】78 号文によると、工業信息部がスクラップ加工処理事業者として認定した企業は増値税の還付が 30%受けられるとの優遇政策がある。しかしながらその認定を受けるためには煩雑な手続きが必要である。3 つ目に、増値税伝票の信憑性である。下流企業が受け取る（上流企業の）増値税伝票が合法的な専用伝票なのか、期日や金額が正しいものかどうかというリスクがある。もし増値税伝票が虚偽のものでそれを仕入れ控除で使用した場合で税務検査で発覚した場合は、上流企業だけでなく下流企業も連帯責任を問われる。（軽い場合で増値税伝票の発行停止、重い場合は公安当局に送られ刑事事件として立件）。4 つ目は、加工企業の税制優遇が回収企業（正規企業）まで行き渡らず、再生资源業界の税制優遇政策は、加工メーカーに対してのみ適用していることが問題となっている。

⁵ 専用伝票は、主に有形製品に、普通伝票はサービス業（飲食、通信費等）に対して発行される。金額が 100 万円未満は普通伝票、100－500 万円未満は専用か普通かを選択できる。

1. スクラップ回収企業の大部分が（仕入れ控除できる）増値税伝票を入手できない：

伝票（発票）^{*1}には専用伝票と普通伝票の二種類があるが、小規模企業は仕入れ控除がきかない普通伝票のみしか発行できない。スクラップ回収業者の多くは経営規模が小規模な企業が散在している。

2. 企業が税制優遇政策を享受するためのハードルが高い：

国家財税【2015】78号文によると、工業情報部がスクラップ加工業者として認定した企業は増値税の還付が30%受けられるとの優遇政策がある。しかしながらその認定を受けるためには煩雑な手続きが必要。

3. 下流企業が（上流企業の）増値税伝票の信憑性を疑う：

下流企業が受け取る（上流企業の）増値税伝票が合法的な専用伝票なのか、期日や金額が正しいものかどうかというリスクがある。もし増値税伝票が虚偽のものでそれを仕入れ控除で使用了らば税務検査で発覚した場合は、上流企業だけでなく下流企業も連帯責任を問われる。（軽い場合で増値税伝票の発行停止、重い場合は公安当局に送られ刑事事件として立件）。

4. 加工企業の税制優遇が回収企業（正規企業）まで行き渡らない：

再生資源業界の税制優遇政策は、加工メーカーに対してのみ適用している。政策設計段階では、回収企業にも波及することを期待されていた。しかしながら回収業者の多くは個人零細企業であり、そもそも税を納める必要がなく^{*2}回収コストも低い。これにより増値税伝票のない価格と増値税伝票のある価格の2重価格体系が出来、正規の回収業者の存続問題となり多くが生産停止や転業に追い込まれている。

^{*1}：専用伝票は、主に有形製品に、普通伝票はサービス業（飲食、通信費等）に対して発行される。金額が100万円未満は普通伝票、100～500万円未満は専用か普通かを選択できる。

^{*2}：厳密に納税する必要があるが、取引の際に伝票の提出を求められない。（普通伝票は仕入れ控除がきかないため）

図 3-11 スクラップ加工処理事業者の 4 大問題

出典：各種情報より日鉄総研作成

②スクラップ輸入に関する政策

生態環境部、発展改革委員会、税関総署、商務部、及び工業部と情報化部が共同で、「再生鋼鉄原料輸入の規範化に関する事項の公告」（公告 2020 年第 78 号）を公布した。2021 年 1 月 1 日より実施されている。鉄スクラップなど再生鋼鉄原料を中国に輸入するには、下記の要求を満たさなければならない。

2020年《78号公告》—再生鋼鉄原料輸入規範

- 「再生鋼鉄原料」（GB/T 39733-2020）の規格を満たす再生鋼鉄原料であれば、固体廃棄物に属せず、中国に自由に輸入することができる。
- 「中華人民共和國輸入出税則」、「輸入出税則商品及び品目の注釈」に則り、再生鋼鉄原料の税関商品コード（HSコード）は、7204100010、7204210010、7204290010、7204410010、7204490030。
- 「再生鋼鉄原料」（GB/T39733-2020）の規格を満たさない場合は、中国に輸入することができない。

出典：中国政策動向より日鉄総研作成

図 3-12 再生鋼鉄原料輸入規範

中国ではかつて、雑品スクラップを輸入し、解体して銅を回収するという動きが 2000 年初めくらいから展開したが、中国での解体時の水質汚染や土壌汚染問題などから、2018 年 12 月に輸入禁止になった（国家標準「GB/T 4223-2017」）。その後、固定廃棄物（2018 年 12 月から輸入禁止）と切り離し、有用な資源として活用するために名称をスクラップではなく『再生鋼鉄原料』と改め、新たな国家標準（GB/T 39733-2020）として 2020 年末に制定し、2021 年 1 月より再生鋼鉄原料（高品位スクラップ）の輸入が可能になった。以前のスクラップ標準と異なる点は、再生鋼鉄原料は鉄生産用の資源として直接

炉（転炉、電炉等）に入れられる品質のものであり、分類、加工処理し、環境技術標準を満たすものを指すと明確に定義された点である。また、加工方法や混入物・化学成分の定義や量に関しても規定されることになった（表 3-10）。再生鋼鉄原料国家標準の制定は、輸入スクラップに対する標準設定という側面だけでなく、中国国内のスクラップ加工処理にも適用され、スクラップ全体の品質向上に資するものと位置づけられている。またスクラップ品質向上と利用の拡大を通じ、鉄鉱石依存が過度に高い状況を緩和するというのが目的の1つとなっている。

しかしながら、新国家標準により再生鋼鉄原料（スクラップ）の輸入再開可能になったが、再生鋼鉄原料に対する品質的な要求が高い（表 3-10 国家標準 GB/ T4223-2017 の品質的要求 10）。

表 3-10 国家標準 GB/ T4223-2017 の品質的要求

サイズ、混入物、加工方法						属特性及び化学成分規制							
分 類	グレード	サイズ規定	混入物 %	加工方法	再生原料のソースの例示	分 類	T Fe %	P %	S %	Cu %	As %	Ni %	Cr %
重型再生鋼鉄原料	HRS101	厚み≧6mm,長さ≦1500mm,幅≦600mm,単重≦1500kg	≦0.8	分類、解体、剪断 分類、剪断	廃棄する鉄鋼製品、大型設備構造物、船舶、加工成型時発生屑等	重型再生鋼鉄原料	≧93	≦0.05	≦0.05	≦0.3	≦0.05	—	—
	HRS102		≦0.3										
中型再生鋼鉄原料	MRS201	厚み≧4mm,長さ≦1500mm,幅≦600mm,単重≦1500kg	≦0.8	分類、解体、剪断 分類、剪断	廃棄する鉄鋼製品、中型設備構造物、船舶、加工成型時発生屑等	中型再生鋼鉄原料	≧93	≦0.05	≦0.05	≦0.3	≦0.05	—	—
	MRS202		≦0.3										
小型再生鋼鉄原料	LRS301	厚み≧2mm,長さ≦1500mm,幅≦600mm,単重≦1500kg	≦0.8	分類、解体、剪断 分類、剪断 分類、剪断	廃棄する鉄鋼製品、小型設備構造物、バイク、加工成型時発生屑等	小型再生鋼鉄原料	≧92	≦0.05	≦0.05	≦0.3	≦0.05	—	—
	LRS302		≦0.3										
	LRS303		≦0.3										
	LRS303		≦0.3										
破砕型再生鋼鉄原料	SRS401	体積密度≧0.8t/m ³	≦1.0	分類、解体、破砕 分類、破砕 分類、破砕	廃棄する自動車、家電、機械部品、塗装鋼板等	破砕型再生鋼鉄原料	≧92	≦0.05	≦0.05	≦0.3	≦0.05	—	—
	SRS402		≦1.0										
	SRS403		≦1.0										
	SRS403		≦1.0										
プレス梱包型再生鋼鉄原料	BRS501	高さ≦1000mm,長さ≦1500mm,幅≦1000mm,単重≦2000kg	≦0.3	分類、梱包 分類、梱包 分類、袋詰	自動車、家電などをプレス後に残る屑、鉄筋構造物から出る異形棒鋼、線材廃品等	プレス梱包型再生鋼鉄原料	≧93	≦0.05	≦0.05	≦0.3	≦0.05	—	—
	BRS502		≦0.8										
	BRS503		≦0.3										
	BRS503		≦0.3										
合金型再生鋼鉄原料	ARS601	長さ≦1500mm,幅≦1000mm,単重≦1500kg	≦0.3	分類、剪断、梱包 分類、剪断、梱包 分類、剪断、梱包、袋詰	ニッケル/クロム系ステンレス廃品、屑等	合金型再生鋼鉄原料	-	≦0.05	≦0.05	≦0.3	≦0.05	≧7.0	or ≧11.5
	ARS602		≦0.3										
	ARS602		≦0.3										
	ARS603		≦0.3										
鑄鉄再生鋼鉄原料	CRS701	厚み≧2mm,長さ≦1500mm,幅≦1000mm,単重≦1500kg	≦0.8	分類、解体、剪断 分類、剪断	鑄鉄廃品	鑄鉄再生鋼鉄原料	≧92	≦0.05	≦0.05	≦0.3	≦0.05	—	—
	CRS702		≦0.3										
						* 国家標準には強制標準（GB）と推奨標準（GB/T）があり、今回は推奨標準。Tは推荐(tuijian)の略。							

* 国家標準には強制標準（GB）と推奨標準（GB/T）があり、今回は推奨標準。Tは推荐(tuijian)の略。

出典：各種情報より日鉄総研作成

国家標準には強制標準（GB）と推奨標準（GB/T）があるが、今回発表された新国家標準「GB/T 39733-2020」は推奨標準であり、Tは推荐(tuijian)の略を意味する。今回発表された新国家標準「GB/T 39733-2020」は、ヘビー、ミドル、ライト、シュレッダー、プレス梱包、合金、鑄鉄の7種類から構成されており、サイズ規定、混入物の範囲、加工方法並びに再生原料ソースが例示されている（表 3-10）。サイズに関しては、長さ≤1500mm、幅≤600mm～1000mm、重量≤1500kg という範囲に統一されており、混入物も 0.3～1.0%の範囲に集約されている。金属特性（Fe, Ni, Cr）や化学成分（P, S, Cu, As）規制に関しても詳細に規定されている。また、グレード毎にスクラップの写真が掲載されており、可視的に判断できるようになっている。

前述した通り、新国家標準「GB/T 39733-2020」でスクラップ基準について、成分も規定されているが、スクラップ売買における成分表記に関して、輸出入スクラップと中国市場のそれぞれのスクラップについて記述する。

まず、輸出入スクラップに関しては、輸出側は、特定有害廃棄物等に該当しないことの証明書の提出が必要であるが、成分表までは提出されていない模様である。輸入側（中国）も分類検査（大きさ）や危険物検査などを実施しているが、成分測定まではされていない。

一方、中国市場のスクラップについて、加工スクラップに関しては、インターネットで販売されており、そのグレードを表示し、写真付きで販売されている。老廃スクラップに関しては、恐らく成分測定はせずに現物を確認して判断していると思われるが、実態は不明である。廃棄自動車の回収についても

成分検査までは実施していないが、各部品ごとに回収している。

(3) スクラップ輸出入動向

① スクラップ輸入量

中国は2018年までは雑品スクラップを輸入していたが、スクラップ禁輸により2019～2020年は急速に減少した（図3-13）。2021年のスクラップ輸入は当初目標50万t/月に対し、2021年1～5月実績は累計で約25万tのみであった（表3-11）。主な輸入先は日本だが、2017年まで日本から年間200万t程度輸入していたスクラップは「雑品」であり、2021年1月から高級スクラップに限って輸入を解禁したが、今回再開された「再生鋼鉄原料」としての製鉄用スクラップは日本でも高品位資源として利用され、輸出余力はない。加えて、中国の望む高品位スクラップは各国で需要増であるため、輸入による供給増は期待できない。ゆえに、国内のスクラップ流通システムの整備が急務となっている。

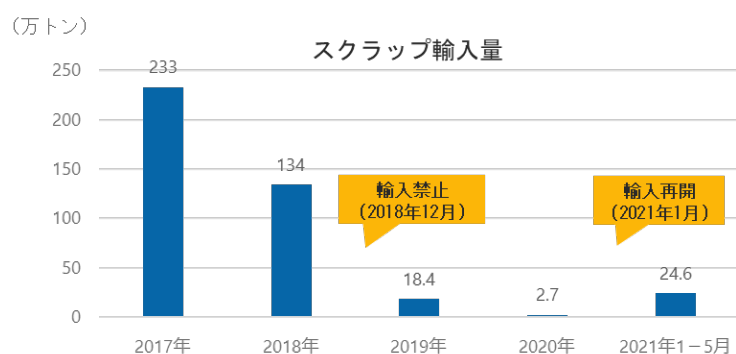


図3-13 スクラップ輸入量

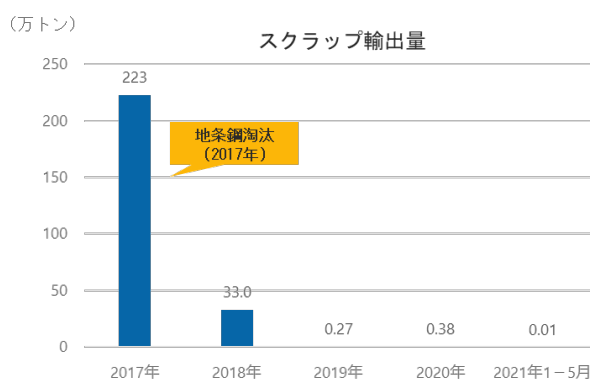
表3-11 スクラップ輸入先（2021年1～5月）

	輸入量 (万 t)	比率 (%)
日本	16.6	67.5
韓国	5.2	21.1
マレーシア	1.5	6.1
香港	0.7	2.8
台湾	0.2	0.8
その他	0.4	1.6
計	24.6	100

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

② スクラップ輸出量

2017年、地条鋼の淘汰によりスクラップ輸出量は増加したが、その後減少し、近年はほぼ輸出せず、自国で発生スクラップを消費している。輸出先は主にベトナムなど東南アジア諸国であるが、輸出関税40%、付加価値税13%が課せられ、スクラップ輸出は国レベルで制限されている。



出典：各種情報を基に日鉄総研作成

図3-14 スクラップ輸出量

③ スクラップ価格

2018年、固定廃棄物の輸入禁止に伴い、スクラップも禁輸対象となった。その結果、中国国内のスクラップは高騰し、海外スクラップ価格と乖離した。その後、2020年後半以降の世界のスクラップ価格は概ね上昇し、海外の上昇率は中国よりも高くなった。

2021年現在、中国の6mmを超える鉄スクラップの価格は3,000元/t以上で、5月中旬の最高価格は4,000元/t以上であったスクラップ資源不足が一因となり、2021年より「再生鋼鉄原料」の輸入を解禁し、需要増&鉄鉱石価格に連動して10月まで高止まりしていたが、粗鋼減産に伴い11月にスクラップ

価格が下落した。その後、鉄スクラップの在庫減により購入価格が再び上昇傾向となった。

3-3. 2030 年、2050 年におけるスクラップ発生量の予測

中国については今後鋼材需要が大きく変化し、粗鋼生産量も大幅に減少することに鑑み、マクロ的な視点から粗鋼生産量やスクラップの発生量を予測する手法を採用した。

粗鋼生産量については、2050 年までの中国の人口と鋼材消費量予測に基づいて、2050 年までの中国の粗鋼生産量を予測した。この中で鋼材消費量については、1995 年以降の中国の粗鋼消費量が 40 年前の日本の伸び方と酷似していることから、日本モデルを置いて中国の 2050 年の鋼材消費量を予測した。

スクラップ発生量に関しては、中国の各専門機関の予測データを参考にし、鉄鋼蓄積量の 2.0%で発生すると設定してスクラップ発生量を試算した。設定根拠としては、今後中国の粗鋼生産量が減少すると仮定すると、粗鋼生産量の減少に伴い、内部スクラップ及び加工スクラップは減少し、一方で、鉄鋼蓄積量から発生する老廃スクラップの発生比率は上昇すること、及びスクラップ多消費地域の実情に鑑み、スクラップ発生量を鉄鋼蓄積量の 2%と設定した。

(1) 人口、国内需要、粗鋼生産量予測

① 人口予測

2020 年の中国の人口は 14.4 億人であるが、国連の予測によると 2050 年の中国の人口は高位推計で 15 億人、中位推計で 14 億人、低位推計で 113 億人である（表 3-12 中国の人口予測 2）。この予測に加え、中国国内の各種報道や人口減少傾向から、2050 年には 13 億人まで減少すると予測した。

表 3-12 中国の人口予測

	2020年	2030年	2050年
高位推計	14.4	14.9	15.1
中位推計	14.4	14.6	14.0
低位推計	14.4	14.4	12.9

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

② 国内需要

2020 年の中国の一人当たりの鋼材消費量は、内需約 9 億 6 千万 t（表 3-13）、人口 14.4 億人（表 3-12）から、約 665kg/人である。一方、欧米やロシアの消費量を見てみると、コロナの影響がない 2018 年で、米国や EU の大国では消費量は約 300kg/人（表 3-14）である。世界の各専門機関の 2050 年の粗鋼生産量予想は 6~8 億 t のため、2050 年の人口 13 億人と仮定すると、中国一人当たりののが 300kg/人まで減らない（表 3-15）。中国も将来的には一人当たりの鋼材消費量は国土が同程度の米国レベルに落ち着くと予想されるが、各専門機関が予測する粗鋼生産量範囲（6~8 億 t）では、2050 年時点ではまだ米国と同じレベルにはならず、その数値まで落ち着くのは 2050 年よりもさらに先になると予想される。

表 3-13 中国の鋼材内需・外需（2013—2020 年）

単位：万 t

項目	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
内需計 A	76,819	77,849	74,310	76,230	79,381	86,954	94,092	95,789
鋼材外需 B (輸出－輸入)	4,826	7,935	9,961	9,528	6,212	5,617	5,199	3,344
内需+外需 (A+B)=C	81,645	85,784	84,271	85,758	85,593	92,571	99,291	99,133
統計上の粗鋼 生産量E	81,313	82,230	80,382	80,760	87,074	92,903	99,541	105,300
実際の粗鋼生 産量EC±0.95 D	85,942	90,299	88,706	90,271	90,097	97,443	104,516	104,350
統計外 D-E (地条鋼)	4,629	8,069	8,324	9,511	3,023	4,540	4,975	(▼950±0) ⇒統計内へ
イベント		新常態を提 起			地条鋼撲滅 る	中周波炉⇒電炉化によ る 旧地条鋼の復活		旧地条鋼を 統計組込 み？

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

表 3-14 米国、EU の一人当たりの見かけ消費量

国	2018年鋼材見かけ消費 量(億 t)	2018年人口 (億人)	一人あたりの鋼材消費 量(kg/人)
北米	0.998	3.271	305
EU-28	1.677	5.120	328
ロシア	0.414	1.457	284

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

表 3-15 2050 年粗鋼生産量 6～8 億 t の場合の中国

の一人当たりの鋼材消費量予測

粗鋼生産量 (億 t)	鋼材生産量*1 (億 t)	鋼材輸出-輸入*2 (億 t)	内需 (億 t)	人口 (億人)	鋼材消費量 (kg/人)
6	5.7	0.4	5.3	13	408
8	7.6	0.4	7.2	13	554

*1：粗鋼生産量±0.95

*2：2019～2020年の間の数値を使用（前頁参考）

出典：日鉄総研作成

③ 粗鋼生産量予測

1995 年以降の中国の粗鋼見かけ消費量推移を 40 年前の日本の推移と比較すると、1995 年以降の中国の粗鋼見かけ消費量の伸び方が日本の高度経済成長期の伸び方と酷似している（図 3-15）。40 年前の 1980 年から 2010 年の 30 年で約 450kg/人まで落ち着いた。仮に中国も 2020 年から 30 年後の 2050 年に日本と同様に 450kg/人まで落ち着くには、2050 年の人口が 13 億人と仮定した場合、粗鋼内需は 6.2 億 t まで下がらなければいけない。これに加え、直近の鋼材輸出入分（3,000～5,000 万 t）を考慮すると、粗鋼生産量は 6.6 億 t となる。ゆえに、中国の 2050 年の粗鋼生産量を 6.6 億 t と設定した。

参考情報として、中国の専門機関 A の予測によると、2030 年 8 億 t、2060 年 6 億 t と予測している。

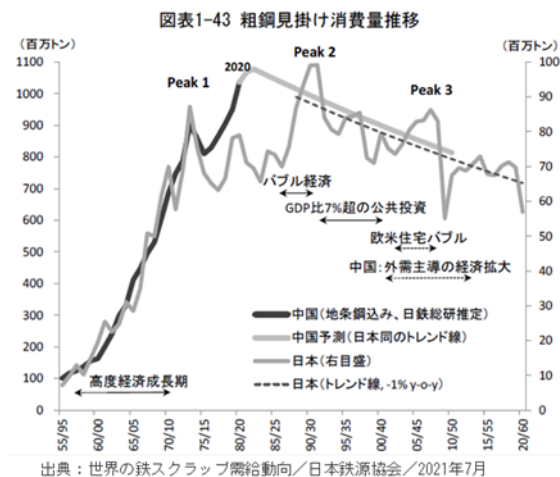


図 3-15 日本と中国の粗鋼見かけ消費量推移

表 3-16 日本（2010 年時実績）と中国（2050 年予測）の鋼材消費量予測

赤字：仮定値
青字：仮定値からの計算値

項目	日本・2010年 (実績)	中国・2050年 (NSRI 予測)
粗鋼生産量(億 t)	1.11	6.6 ^{*2}
鋼材内需(億 t)	0.57	5.9 ^{*1}
人口(億人)	1.29	13.0
一人あたりの鋼材消費量(kg/人)	440	450

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

(2) スクラップ発生量試算設定

① スクラップ発生比率

中国の専門機関 A による中国のスクラップ発生量予測は、鉄鋼蓄積法⁶とライフサイクル法⁷ともに鉄鋼蓄積量に対するスクラップの発生比率は 2.0～2.3%となっている（表 3-17）。一方、中国以外の鉄鋼蓄積量トップ 3 に関しては（2018 年）、対鉄鋼蓄積量のスクラップ発生比率（回収量）は各国で異なる（表 3-18）。スクラップを多用している地域においては、（粗鋼生産量における）スクラップ利用率約 6 割に達すると、それ以上スクラップ需要がなくなることが示唆される。従い、スクラップの発生量（回収量）も地域によっては 2%を下回っている。

表 3-17 中国の専門機関 A による中国の鉄鋼蓄積量とスクラップ発生量予測（2015—2020 年）

年	鉄鋼蓄積量 (億 t)	スクラップ発生量			
		鉄鋼蓄積法 *1 (億 t)	鉄鋼蓄積量に対する割合 (%)	鉄鋼製品 ライフサイクル 法 *2 (億 t)	鉄鋼蓄積量に対する割合 (%)
2015	72.4	1.58	2.19	1.55	2.14
2016	78.5	1.71	2.17	1.69	2.15
2017	84.6	1.96	2.32	1.87	2.21
2018	90.2	2.00	2.21	1.90	2.11
2019	95.3	2.04	2.14	1.98	2.08
2020	100.2	2.14	2.14	2.10	2.09

表 3-18 各国の鉄鋼蓄積量とスクラップ発生量（2018）

国	2018年粗鋼生産量 (億 t)	鉄スクラップ発生（回収） (億 t) A	鉄鋼蓄積量 (億 t) B	A/B (%)
米国	0.866	0.73	48	1.5
ロシア	0.717	0.34	38	0.9
EU28	1.677	1.04	44	2.4

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

また、中国の専門機関 B による予測においても、鉄鋼蓄積量に対するスクラップの発生比率は 2.2～2.5%となっている（表 3-19）。ゆえに本調査においてもスクラップ発生比率は鉄鋼蓄積量の 2.0～2.5%と仮定した。

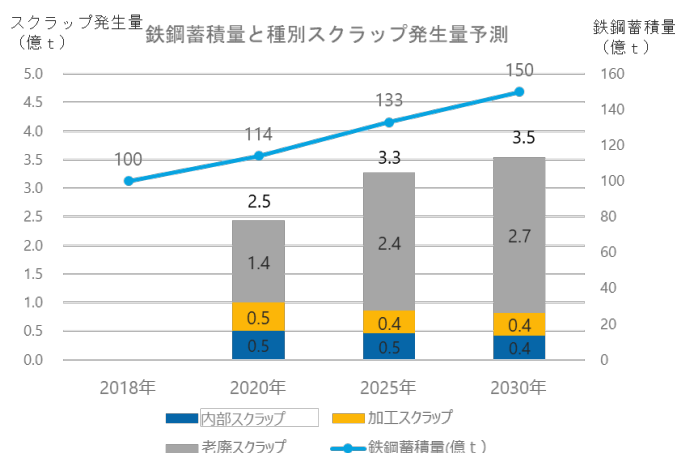


表 3-19 鉄鋼蓄積量とスクラップ発生量の予測

年	鉄鋼蓄積量 (億 t)	スクラップ資源量 (万 t)	スクラップ発生比率 (%)	内部スクラップ (万 t)	加工スクラップ (万 t)	老廃スクラップ (万 t)
2020年	114	25,407	2.2	5,013	4,980	14,400
2025年	133	32,669	2.5	4,559	4,063	24,048
2030年	150	35,479	2.4	4,226	3,982	27,271

出典：各種情報より日鉄総研作成

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

図 3-16 中国の専門機関 B によるスクラップ発生量の予測（～2030 年）

⁶ 鉄鋼蓄積法...社会的な鉄鋼在庫量にスクラップ生成係数を掛けて算出する方法。一般的に鉄鋼蓄積量の 2～3%で推移している。

⁷ 鉄鋼製品ライフサイクル法...各鉄鋼製品の廃棄周期（製品寿命）や廃棄率（回収率）などを考慮し、スクラップの発生量を算出する方法。

② 内部スクラップ発生率と加エスクラップ発生率

内部スクラップと加エスクラップの発生比率は、過去の実績より内部スクラップ発生率は粗鋼生産量の5%、加エスクラップ発生率は鋼材生産量の5%と設定した。

表 3-20 内部スクラップと加エスクラップの発生比率

内部スクラップの発生率				加エスクラップの発生率						
年	粗鋼生産量 (億 t)	内部スクラップ (億 t)	比率 (%)	年	粗鋼 生産量 (億 t)	鋼材生産量※ (億 t)	鋼材輸出 量(億 t)	鋼材輸 入量 (億 t)	加エス クラップ (万 t)	比率 (%)
2010	6.39	0.358	5.6	2010	6.39	6.07	0.426	0.164	0.336	5.8
2011	7.02	0.400	5.7	2011	7.02	6.67	0.489	0.156	0.372	5.9
2012	7.31	0.413	5.6	2012	7.31	6.94	0.557	0.136	0.381	5.8
2013	8.22	0.435	5.3	2013	8.22	7.81	0.623	0.141	0.427	5.8
2014	8.22	0.472	5.7	2014	8.22	7.81	0.938	0.144	0.426	6.1
2015	8.04	0.465	5.8	2015	8.04	7.64	1.124	0.128	0.387	5.8
2016	8.08	0.511	6.3	2016	8.08	7.67	1.085	0.132	0.411	6.1
2017	8.71	0.460	5.3	2017	8.71	8.27	0.754	0.133	0.425	5.6
2018	9.29	0.472	5.1	2018	9.29	8.83	0.693	0.132	0.445	5.4
2019	9.95	0.425	4.3	2019	9.95	9.46	0.537	0.202	0.470	5.2
2020	10.6	0.501	4.7	2020	10.6	10.12	0.374	0.074	0.498	5.1

※一般的に公表されている中国の鋼材生産量はリロールメーカー分も含まれており、重複した数値のため、正確なデータではない。鋼材生産量は粗鋼生産量に鋼材歩留り0.95をかけて算出した。

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

③ 老廃スクラップ発生率

鉄鋼需要が成熟すると粗鋼生産量が減少するため、内部スクラップや加エスクラップの発生量も減少する。一方、鉄鋼蓄積量から発生する老廃スクラップの発生比率は上昇するため、このことを考慮し、総スクラップ発生量は鉄鋼蓄積量の2.0～2.5%の範囲で発生するとした。ゆえに、老廃スクラップは「総スクラップ発生量－（内部スクラップ＋加エスクラップ）」から算出した。

表 3-21 老廃スクラップの発生率

年	鉄鋼蓄積量 (億 t)	老廃スクラップ 発生量(万 t)	老廃スクラップ 率*1 (%)	スクラップ発生 量(億 t)	スクラップ比率*2 (%)
2018年	100	12,618	1.26	2.15	2.2
2020年	114	14,400	1.26	2.54	2.2
2025年	133	24,048	1.81	3.27	2.5
2030年	150	27,271	1.82	3.55	2.4

*1:老廃スクラップ÷鉄鋼蓄積量 *2:スクラップ発生量÷鉄鋼蓄積量

出典：各種情報を基に日鉄総研作成

(3) 2030 年、2050 年におけるスクラップ発生量の予測

① 計算前提

計算前提を以下のように設定し、2030 年 2050 年のスクラップ発生量を算出した。

1. 粗鋼生産量 6.6 億 t と仮定；

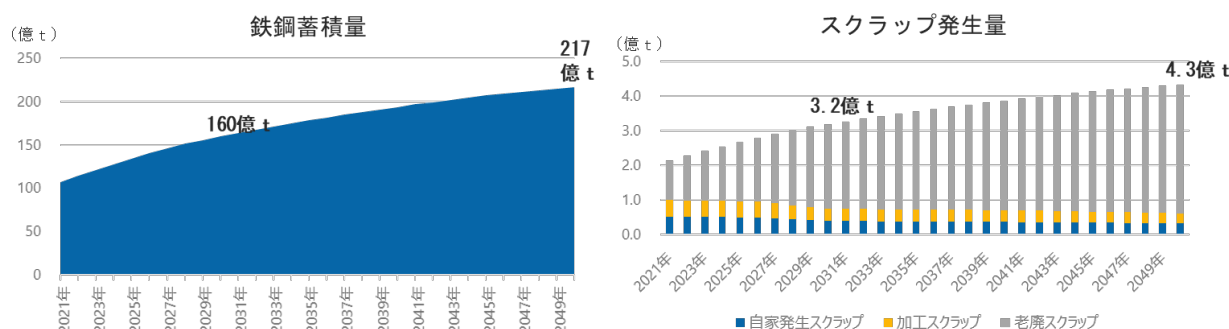
- ・ 内需：6.2 億 t
- ・ 鋼材の純輸出量：4,000 万 t で一定と仮定（2019 年の約 5,000 万 t と 2020 年の約 3,000 万 t の中間値を使用。カーボンニュートラルの観点から、自国で炭素排出を負担してまで輸出しないと思われ、輸出製品は高級鋼のみにシフトする。）

- 各種情報より、鉄鋼蓄積量は2020年100億tを基準とし、2021年以降の鉄鋼蓄積量を「前年の鉄鋼蓄積量＋鋼材生産量－（鋼材輸出－輸入）－前年スクラップ発生量＋加工スクラップ＋前年の鋳物用スクラップ」から算出した。
- スクラップ発生量は過去の実績、および将来的にも鉄鋼需要が成熟すると粗鋼生産量が減少し、内部スクラップや加工スクラップの発生量は減少する。一方、鉄鋼蓄積量から発生する老廃スクラップの発生比率は上昇することを考慮し、およびスクラップを多用している地域を考慮し（表3-18参照）、総スクラップ発生量は鉄鋼蓄積量の2.0%で発生すると仮定した。

② 計算結果

2050年の粗鋼生産量を6.6億t、2020年の鉄鋼蓄積量を100億t、スクラップ発生率を鉄鋼蓄積量の2%とした場合、スクラップ発生量は2030年に3.2億t、2050年に4.3億tとなった。

スクラップをより多く消費するには電炉化生産を推進するための各種対策が必要であり、スクラップを大量に買い漁るようなことは近い将来に於いては起きないと想定される。一方、新断などの高品位スクラップは（中国内スクラップ市況対策も兼ねて）少量輸入する可能性はある。



項目	2020年	2030年	2050年
粗鋼生産量（億t）	10.65	8.0*1	6.6
鉄鋼蓄積量（億t）	100.2	159.6	216.5
スクラップ発生量（億t）	2.6	3.19	4.33
内部スクラップ	0.60	0.40	0.33
加工スクラップ	0.49	0.36	0.29
老廃スクラップ	1.51	2.43	3.71
スクラップ消費量*2（億t）	2.3*2	2.87	3.9

*1：最近の報道等から2030年の粗鋼生産量は8億tと置いた

*2：スクラップ発生量の約10%は鋳物用で消費されるため、スクラップ発生量と消費量に差がある

出典：日鉄総研作成

図3-17 日鉄総研試算による2050年までのスクラップ発生量予測

③ 2050年の鉄鋼生産構造予測

試算値から、2050年の粗鋼生産量6.6億t、鉄鋼用スクラップ3.9億t（スクラップ発生量4.3億tのうち10%は鋳物用）、またWSDの公開予測データから、2050年のDRI（or溶鉄）は1億のため、金属化率90%をかけて9,000万tとした。これらの数値を用い、下記に示す手順で鉄鋼生産構造表を作成した（表3-22）。その結果、日鉄総研見通しに基づけば、2050年の電炉粗鋼生産量は4.2億tとなる。しかし、『3-1. 中国のスクラップの発生と活用の現状（1）章』で述べた通り、現在の電炉能力は約2億

t であり、2050 年に 4.2 億 t の電炉生産が必要であるため、能力の大幅増強が求められる。

今後、粗鋼生産量減や、スクラップ発生量増に伴い、中国も将来的には米国と同様の鉄鋼生産方式に変化（電炉ミニミル主流の生産プロセス）すると予想される。

表 3-22 2050 年の中国の鉄鋼生産構造予測

【数値前提】

粗鋼生産量：6.6億 t、鉄鋼用スクラップ：3.9億 t（試算結果）、DRIor溶鉄：0.9億 t *

黒字：スクラップ発生量試算による仮定値

赤字：計算値

*: WSD公開予測データより引用。
1億 t のうち金属化率90%と仮定。

鉄鋼生産構造予測

	金属投入量 (億 t)	内 スクラップ (億 t)	溶鉄orDRI (億 t)	粗鋼 (億 t)	プロセス別粗 鋼比率 (%)
転炉	2.5 ⁷⁾	0.4 ⁵⁾	2.1 ⁴⁾ (溶鉄)	2.4 ⁸⁾	36 ⁹⁾
電炉	4.4 ⁷⁾	3.5 ⁶⁾	0.9 ¹⁾ (DRI・溶鉄)	4.2 ⁸⁾	64 ⁹⁾
合計	6.9 ²⁾	3.9 ¹⁾	3.0 ³⁾	6.6 ¹⁾	

【計算過程】

- 1) 仮定値（試算値）を入力
- 2) 良塊歩留を0.95とし、6.6÷0.95から算出
- 3) 金属投入量6.9－スクラップ量3.9より算出
- 4) 3.2－0.9より算出
- 5) 転炉のスクラップ利用率を15%とし、
溶鉄orDRI量2.3×0.15÷0.85から算出
- 6) 3.9－0.4より算出
- 7) スクラップ量＋溶鉄orDRIから算出
- 8) 良塊歩留を0.95とし、金属投入量×0.95より算出
- 9) 各工程の粗鋼生産量÷計粗鋼生産量から算出

出典：日鉄総研作成

3－4. 中国におけるスクラップの需給見通しに関する総括

中国の粗鋼生産量は 10 億 t を超え、世界生産の過半を占める。鉄源の 9 割以上は鉄鉱石を起源とする銑鉄であるため、鉄鋼業が中国国内の環境や GHG 排出に及ぼす影響は極めて大きい。環境負荷低減の観点から中国政府は国内鉄鋼業に対して電炉比率の拡大を求めており、その政策方針がスクラップ輸出入にも影響を与えている。

現在、スクラップの輸出には増値税の還付が無く、輸出関税も課せられているため、実質的には輸出されていない。中国は将来に向けても電炉化推進を継続すると想定されることから、中国からのスクラップ輸出は将来においても抑制的と考えられる。一方スクラップ輸入に関しては、2018 年にいったんスクラップ輸入を禁じたものの、2021 年より、国家標準 GB/ T4223-2017 の品質的要求を満たす高品位スクラップに限って輸入を再開した。これは電炉化推進の方針に基づく政策変更と考えられ、将来においても同様のスクラップ輸入政策が継続される蓋然性が高い。高品位スクラップは、日本をはじめ、アジア周辺国においても需要が拡大すると考えられることから、中国の政策強度によっては、高品位スクラップの市況に影響が及ぶ可能性がある。

Ⅲ. 政策に関する提言

将来スクラップベースの電炉での高級鋼製造に円滑に移行するための政策的支援についての提言を以下に示す。

1) 理論的（熱力学、冶金学、材料科学など）研究分野に対する人的資源や研究資金面の強化

高度な機能保証が求められる高級鋼の特性に及ぼすトランプエレメントの影響について、鋼材の成分規格などに落とし込むまでの、定量的な評価には至っていない。このため、当該分野の、産学両面からの研究促進についての政策的支援が必要と思慮する。なお、これらの研究成果が得られれば、次のステップとして、鋼材規格におけるトランプエレメントの限界値や新たな材料規格につなげることができる。

2) スクラップ加工能力増強に関する支援

高級鋼製造のためには、スクラップからトランプエレメントをはじめとする不純物の除去の強化は必須となる。このためには、加工段階でのシュレッダー小粒化、切断材短尺化、分別強化が有効であるが、これらの対策は加工能力の低下をもたらす。このため、高品位スクラップ加工のための設備整備に対する補助金等経済的誘導策が必要と思慮する。

なお、オペレーションコストの上昇については、需要側ニーズの高まりと相まって、市場メカニズムによるプレミアムの発生が想定される。

3) スクラップ回収等に関する規制の強化

スクラップの品質は、加工段階だけでなく、自動車や建築構造物解体段階の対応でも大きく影響を受ける。例えば自動車については、自動車リサイクル法において、主として環境規制や廃棄物減容の観点から、エアバッグ類、フロン、シュレッダーダストの回収については規定されている。鉄や非鉄金属についても、同法で認定されるコンソーシアムにて自主的な銅含有率低減のための取組が行われている。今後はさらに、分別対象範囲の拡大や分別徹底に向けた取組が期待される。また、建築構造物の解体においても、事業者によっては、電線管から電線を分離することなく切断し、内部の電線が取り出せないような解体も行われている。建築物の解体についても、資源リサイクルの観点から、解体方法に関するガイドラインの制定や、場合によっては事業認可条件へのリサイクル視点の強化なども有効と考えられる。最近、一部のヤード事業者等による近隣住民や地元自治体への迷惑行為や違法行為が問題となっている。これらの行為は一部の事業者によるものではあるが、鉄スクラップをはじめとするマテリアル資源のリサイクル全体に対して、社会的受容や正しい理解にネガティブな影響を与え、円滑なリサイクルに悪影響を及ぼす可能性がある。このため、ヤード事業に関する規制が適正に整備、運用されることが必要と考えられる。

IV. 今後の課題

将来スクラップベースの電炉での高級鋼製造に円滑に移行するための課題および更なる検討が必要と考えられる分野について、以下に整理する。

技術分野での課題および更なる検討が必要と考えられる分野

1) 電炉における高級鋼製造について、北米等では還元鉄や銑鉄を使用することでスクラップのトランブエレメント影響を薄めて製造品種を広げていることが分かった。今年度の調査に加えて、次のような技術調査が有益と考えられる。

- ① 還元鉄活用時の技術課題
- ② 次世代電気炉技術（多様な鉄源に対応できる電炉技術等）の調査
- ③ 電炉の省エネ技術（エコアーク、コンスチール等）

2) スクラップ加工・分級技術について、シュレッダーの粒度向上、2度掛け、シュレッダーのタイプの使い分け、ギロチンの短尺化等でスクラップ品位が向上するという定性的な情報が得られたが、定量的なデータは存在しない。このため、スクラップ加工・分級技術による品位向上の実証実験調査が必要と考えられる（例えばシュレッダーの粒度に応じて、どの程度の成分値が担保できるか、実証実験を行う。スクラップ事業者による協力が必要）。

3) スクラップの検収は目視で判断される部分が多く、検収員により評価のばらつきがある。Eversteel やメタルワンによる AI 活用事業など、検収をサポートする技術の調査が必要と考えられる。

政策・制度分野での課題および更なる検討が必要と考えられる分野

1) 電炉メーカーの主製品である鉄筋コンクリート用棒鋼等の JIS 規格には、トランブエレメントの基準が無く、電炉メーカーによる自主規制、生産上の抑制のみとなっている。かかる背景により、鋼材及びスクラップでは長期的なトランブエレメントの濃化問題が懸念される。このため、下記のような Cu 濃化問題の対抗措置としての JIS 規格における Cu 値規定の可能性調査が必要と考えられる。

- ① どういう鋼材にトランブエレメントの規定値が存在するのか（JIS 規格の現状整理）
- ② 他国の規格における Cu 値規定など調査
- ③ 導入にあたっての課題調査

2) 今年度の調査では、内部スクラップ、加工スクラップ、老廃スクラップに分けた将来予測を行ったが、老廃スクラップについては多岐にわたる発生源と、それぞれの発生源について独自の流通ルートが存在し、発生源ごとにスクラップ品位のコントロールのアプローチが異なる可能性が示唆された。このため、発生源別（自動車、船、産機、建材等）のスクラップ発生量予測とそれぞれの流通フローの実態および高級鋼製造用のスクラップ母材としての課題調査等による予測精度向上が必要と考えられる。

3) 本調査におけるヒアリングの中では、スクラップの品位等にも基準を設けた新しい規格が必要ではないかという意見も聞かれた。スクラップによる鉄鋼製造が盛んな米国等における米国、欧州等におけるスクラップの分類、品位規格や、米国の電炉事業者、スクラップ事業者がスクラップの品位確保にどう取り組んでいるのかといった実態を把握することは、今後の日本におけるスクラップ活用の戦略を検討する上で有益であると考えられる。

以上

謝 辞

本調査は、「令和3年度産業経済研究委託事業（カーボンニュートラルを踏まえた我が国金属産業の持続的発展に向けた調査事業）」として日鉄総研株式会社が受託し、実施したものである。

本調査に当たっては、以下の組織及び大学の方々（順不同、敬称略）の全面的な協力を頂き、貴重な情報、ご助言を頂いた。この場を借りて心より感謝を申し上げる。

一般社団法人 日本鉄リサイクル工業会

一般社団法人 日本鉄源協会

草野産業株式会社

ハリタ金属株式会社

日本製鉄株式会社

産業振興株式会社

東日本資源リサイクル株式会社

影島興産株式会社

トピー工業株式会社

株式会社鉄(スチール)リサイクリングリサーチ

SMS group 株式会社

ダニエリ エンジニアリング ジャパン株式会社

東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻

星野岳穂 特任教授

森田一樹 教授

松浦宏行 准教授

長崎千裕 助教

東京大学 先端科学技術研究センター

醍醐市朗 准教授

東京大学生産技術研究所

井上純哉 教授

吉川健 准教授

八木俊介 准教授

東京工業大学科学技術創成研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所

小林能直 教授

東北大学大学院工学研究科

市川和利 特任教授