

# 3Rシステム化可能性調査事業

—自動車用部品的高度化に資する鋳鉄用原材料  
リサイクルシステム構築可能性調査—

## 報告書

平成21年3月

経済産業省 東北経済産業局



# 目次

## 概要編

## 本編

I.	調査の背景と目的	1
I-1.	調査の背景	1
I-2.	調査の目的	1
I-3.	調査内容	2
II.	高度自動車部品向け鋳物を取り巻く環境	4
II-1.	自動車部品向け鋳鉄鋳物の概要	4
II-2.	自動車産業における高張力鋼の導入動向	13
II-3.	鋳鉄鋳物向け鉄スクラップの流通動向	20
III.	溶湯中マンガン制御技術の動向	22
III-1.	鋳鉄鋳物メーカーにおけるマンガン等の問題発生状況	22
III-2.	鋳鉄鋳物メーカーにおけるマンガン対策状況	26
III-3.	溶湯中マンガン制御技術の種類と課題	27
IV.	溶湯中マンガン制御技術の実証	30
IV-1.	実証試験の目的	30
IV-2.	実証対象とする溶湯中マンガン制御技術	31
IV-3.	実証対象技術の概要	32
IV-4.	実証方法	37
IV-5.	実証試験結果	43
IV-6.	採算性試算結果	81
V.	溶湯中マンガン制御技術の導入可能性	87
V-1.	溶湯中マンガン制御技術を取り巻く状況および有望技術	87
V-2.	有望技術の導入拡大に向けた課題	88
V-3.	今後の方向性	91

「自動車用部品の高度化に資する鋳鉄用原材料リサイクルシステム構築可能性調査」

委員会 委員名簿

委員長	麻生節夫	秋田大学工学資源学部材料工学科	教授	
委員	及川勝成	東北大学大学院工学研究科	金属フロンティア工学専攻	准教授
	小島昌治	社団法人自動車技術会材料部門委員会		委員
	高橋文一	社団法人日本鉄リサイクル工業会東北支部		支部長
	竹内純一	社団法人日本鋳造協会		技術グループリーダー (現在：新東ブレーター株式会社 技術顧問)
	千田晋	社団法人日本鉄鋼協会	学会・生産技術部門事務局	ゼネラルマネージャー代理
	山田享	山形県工業技術センター	置賜試験場	場長
アドバイザー	千田昭夫	日本ダクティル鋳鉄協会		会長
アドバイザー	佐藤良司	経済産業省東北経済産業局	資源エネルギー環境部循環型産業振興課	課長
	佐竹義美	同		技術係長
	安倍優香	同		総括係
事務局	村岡義治	特殊メタル株式会社福島工場	生産技術課	課長
	杉目信博	同		技術一係 係長
	吉田亨	同		技術二係 係長
	櫻井仁	三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社	環境・エネルギー部	主任研究員
	佐々木創	同		副主任研究員
	清水孝太郎	同		副主任研究員
	柏井典子	同		アシスタントリサーチャー

## 本報告書における用語の定義

本報告書で使われる用語の定義は、以下のとおりである。原則として関連JISに定める定義に従うが、一部、説明の便宜を考慮して本調査に限定している定義がある。また、業界等で慣習的に用いられている用語の存在を考慮し、政府統計における用語とは必ずしも一致していない場合がある。

用語	定義
鋳物	砂、耐火粘土又はその他の耐火物製の鋳型、時には金属又は黒鉛製の永久鋳型にそそいだ溶鋼が凝固することによって、機械加工を行わなくても製品の形状及び最終寸法が直接得られる仕上げ製品のこと（JIS G0204）。
鋳鉄	鋳物向けに使用される鋳鉄。炭素を2.0%以上含み、湯流れをよくするためにけい素を多く含む。硫黄などの不純物を除去している。 （参考：JIS G0204） 鋳鉄：炭素含量が2%以上の、本質的には鉄である製品。
ねずみ鋳鉄	鋳鉄のうち、特に鋳鉄組織中の黒鉛が片状（断面が三日月状）で破断面がねずみ色をなすもの。黒鉛の形状が片状であるため、応力の集中によってクラックが広がりやすく、大きな塑性変形に弱い。日本工業規格（JIS G5501）では、機械的性質に応じたねずみ鋳鉄（ねずみ鋳鉄品）の基準を定めており、いずれも「FC」の記号を冠して記載される。
球状黒鉛鋳鉄	鋳鉄のうち、特にマグネシウムやセリウムなどを加えて黒鉛を球状化したもの。ノジュラー鋳鉄およびダクタイル鋳鉄とも称する。黒鉛の形状が球状であるため、応力集中の度合いが小さく、ある程度の塑性変形に対応できる。日本工業規格（JIS G5502）では、機械的性質に応じた球状黒鉛鋳鉄品の基準を定めており、いずれも「FCD」の記号を冠して記載される。
銑鉄	高炉等で鉄鉱石を還元して取り出した鉄。純鉄の融点（1535℃）より低い温度で鉄を取り出すため、高い炭素含有量を有する（4.25%以上）。
セメントタイト	鋳鉄を構成する成分の一つであり、 $Fe_3C$ の化学式で示される鉄炭化物。硬く、脆かつ加工性に劣り、機械的強度は低い。 （参考：JIS G0201） セメントタイト： $Fe_3C$ の化学式で示される鉄炭化物。
フェライト	鋳鉄を構成する成分の一つであり、1種以上の元素を含む $\alpha$ 鉄又は $\delta$ 鉄固溶体のこと。軟質で機械的強度に劣るが、ケイ素を含むことで硬度を増す。 （参考：JIS G0201） フェライト：1種以上の元素を含む $\alpha$ 鉄又は $\delta$ 鉄固溶体。 $\alpha$ 鉄：911℃よりも低い温度での純鉄の安定な状態。 $\delta$ 鉄：1392℃から融点（1535℃）までの温度範囲での純鉄の安定な状態。その結晶構造は、体心立法で、 $\alpha$ 鉄と同じである。 固溶体：2種以上の元素によって形成される均一な固体の結晶質の相。
パーライト	セメントタイトとフェライトの層状集合体。鋳鉄鋳物では、硬くて強度が高いパーライトと軟らかく伸びに優れたフェライトの組織割合を調整することで、用途に応じた特性を引出してい

	<p>る。</p> <p>(参考：JIS G0201)</p> <p>パーライト：オーステナイトの共析分解によって形成されるフェライトとセメンタイトの層状集合体。</p>
溶湯	溶けた状態にある鑄鉄。湯（ゆ）と称することもある。
球状化	<p>鑄鉄中の黒鉛粒子を安定な球状の形態へ発達させること。</p> <p>(参考：JIS G0201)</p> <p>球状化：セメンタイト板のような炭化物粒子を、安定な球状の形態へ発達させること。</p>
接種	鑄鉄溶湯に少量の特殊な物質を添加することで、黒鉛核物質を生成させること。鑄鉄中に黒鉛が晶出することで、組織が安定化かつ均一化し、機械的性質が向上する。
溶湯中マンガン制御技術	溶湯中に含まれるマンガンを除去ないしは無害化する技術。マンガンの影響を排することで、延性等の低下を抑制する。無害化には、銑鉄添加によるマンガン希釈なども含まれる。
高張力鋼	合金成分の添加および組織の制御によって一般鋼材よりも機械的強度を向上させた鋼材。ハイテン (High-Tensile Steel)、高抗張力鋼と称されることもある。
鑄鉄鑄物メーカー	鑄鉄鑄物を生産する事業者。
鑄造業界	鑄鉄鑄物メーカーおよびその他鑄物メーカーの集まり・社会。本調査では特に鑄鉄鑄物メーカーを中心に想定している。

## 概要編

### ○自動車業界の高張力鋼導入により鉄スクラップの成分に変化

自動車業界では、地球温暖化対策としての車体軽量化（車体軽量化による燃費向上）および衝突安全性の向上を目指した高張力鋼（High Tensile Strength Steel：ハイテン）の導入が拡大している。高張力鋼には高強度化を図るため、マンガンやケイ素等の合金元素が添加されるものも少なくない。自動車業界で高張力鋼の導入が進むにつれ、自動車工場で発生する裁断くずや自動車リサイクル工場から発生するシュレッダーくずでも高張力鋼スクラップの割合が増加すると推定される。

### ○鋳鉄鋳物産業では鉄スクラップに由来するマンガン等の制御が課題

自動車エンジンブロック等の部品は、銑鉄や鉄スクラップを溶かして鋳造されるが、コストダウンを図るため、銑鉄よりも概して安価な鉄スクラップを一定割合で使用する。鋳鉄鋳物は、マンガン、ケイ素、リンといった元素の含有量によって機械的性質が変化する。そのため、鋳鉄鋳物メーカーにおける高張力鋼スクラップの消費が増えるにつれ、溶湯成分の影響を制御する必要性が高まる。マンガン等の溶湯中濃度が規定値を超えているとわかった場合、銑鉄で希釈することが今日では一般的である。しかし、銑鉄の価格は鉄スクラップよりも相対的に高価であるため、溶湯中のマンガン等を酸化物や硫化物として除去する技術のほか、特殊な接種や球状化处理等によってマンガン等の影響を無害化する技術などの溶湯中マンガン制御技術が求められている。

### ○銑鉄希釈に代わる有望なマンガン制御技術として酸化鉄添加技術

溶湯中マンガン制御技術は複数存在するが、いずれの技術も量産体制にある現場での適用は確認されていない。量産ラインを用いたこのたびの実証試験では、酸化鉄添加の技術が最も有効であることを確認した。酸化鉄添加の技術は、高度自動車部品向け鋳物のJIS規格であるFCD450-10を十分に満足し、従来の銑鉄希釈よりも実施コストの面で優れていることを確認した。さらにFCD450-10を得るためには、通常、溶湯中のマンガン濃度を0.4%程度に抑えるのが一般的であるところ、本実証試験では0.6%程度でも十分に基準を満たすことを確認した。

### ○酸化鉄添加によるマンガン制御は再現性の向上が普及のカギ

現状では、酸化鉄による溶湯中マンガンの反応状況を確認しながらの作業となっているため、一定の製品品質を確保することは容易ではない。特に作業時間が通常作業時よりも長くなってしまいう上、作業時間の予測が難しいため、前後工程との連続性が損なわれ、生産性を損なうおそれがある。また、酸化鉄等の資材投入量も予め確定することが難しいため、チャージ（1回の溶解）ごとに資材消費量および資材コストが

変化してしまう可能性もある。特に必要以上の酸化鉄添加は、スラグの発生量増加に直結することから、廃棄物処理費の増加を招くおそれがある。酸化鉄の添加が過剰である場合、溶湯中の酸素量も過剰となってしまう、十分に球状化が進まないことも想定されるため、酸化鉄の添加量を管理することが重要である。酸化鉄の添加量や反応・除滓に必要な作業時間を一定の範囲内に管理するため、再現性の高い標準的な作業手順を確立できるようにすることが望ましい。

### ○炉壁侵食の抑制／スラグの発生抑制・再資源化促進も課題

酸化鉄添加によって溶湯中マンガンを制御しようとする場合、シリカを炉壁とする溶解炉は侵食を受ける。そのため、連続した溶解作業を実施する際には、炉壁の交換が必須となる。侵食に強い炉材の開発や、侵食されにくい材料を用いた溶解炉製品の情報提供、侵食抑制技術の開発および提供が求められる。また、侵食速度を最小化させるための化学組成や温度・攪拌条件を検討し、標準作業手順として組み込むことも望まれる。

通常時と比較して相対的に大量のスラグが発生するため、酸化鉄や除滓剤の添加量が必要最低限となるような標準作業手順の確立も望まれる。3R促進や希少資源の有効利用促進という観点からは、発生したスラグをリサイクルできるようにすることが良く、マンガンを含む鉄合金としてのリサイクル、スラグ成分を保持したままリサイクルできる用途の模索、より安価な資材を用いて還元する技術の開発等が重要である。

### ○東北地域の実績を活かした鋳鉄鋳物産業の高度化を

酸化鉄添加による溶湯中マンガンの制御は、品質面では自動車向け鋳物の主な基準であるFCD450-10を満足し、コスト面でも現在主流である銑鉄希釈を上回る。ただし、再現性の乏しさ、設備制約の大きさ、スラグ発生量の多さなどといった課題を有することから、これらの課題を解決し、今後、銑鉄希釈と同程度の成熟技術とすることが重要である。今後は、コスト的メリットを広くアピールすることで、東北地域等の鋳鉄鋳物メーカー、大学、公設試等による自発的なコンソーシアム形成を促すことが望まれる。また、学会、シンポジウム等の機会を積極的に捉えて情報発信していくことが重要である。

鋳鉄鋳物産業は、わが国における鉄スクラップのリサイクルを担う重要な存在であり、今後も継続的な発展が期待される場所である。酸化鉄添加の技術は、溶湯中マンガンを制御技術として有望であり、今後、鋳鉄鋳物産業を高度化させる取り組みの一つとして位置づけることが重要である。



# 1. 調査の背景と目的

## 1-1. 調査の背景

自動車業界では、地球温暖化対策としての車体軽量化（車体軽量化による燃費向上）および衝突安全性の向上を目指した高張力鋼（High Tensile Strength Steel：ハイテン）の導入が拡大している。高張力鋼は、構造合理化による車体軽量化の手段として注目されている。世界各国で燃費規制が強化されつつあり、わが国の自動車メーカーは軽乗用車などを中心に高張力鋼の導入を拡大させている。高張力鋼では高強度化を図るために、マンガンやケイ素などの合金元素の添加が行われる。強度は合金元素の添加量に依存するため、近年の高強度高張力鋼への需要増加に伴って、合金元素の添加量も増加の傾向にある。

自動車業界で高張力鋼の導入が進むにつれ、自動車工場で発生する裁断くずや自動車リサイクル工場から発生するシュレッターくずでも高張力鋼スクラップの割合が増加しつつあると言われる。自動車エンジンブロック等の部品は、銑鉄や鉄スクラップを溶かして鋳造される。鋳造業界では、鋳物のコストダウンを図るため、銑鉄よりも概して安価な鉄スクラップを一定割合で使用している。鉄スクラップに含まれる高張力鋼スクラップが増加することで、溶湯中のマンガン含有量も増加することになるが、マンガン等の含有率が高まることで鋳物の強度が増加する一方で延性は低下するため、品質維持のためにマンガン含有量を一定量以下に抑える必要がある。

## 1-2. 調査の目的

本調査は、東北地域の鋳鉄鋳物メーカーをケーススタディとして、高度自動車部品向け鋳物の安定供給に資する鉄スクラップのリサイクルシステム構築に必要な溶湯中マンガン制御技術（除去技術および希釈による無害化技術）の比較検証を目的とする。比較検証に際しては、高張力鋼スクラップの発生および流通フローに関する整理、各種マンガン制御技術の特徴および課題の把握、採算性の検討、既存設備への導入や関係企業との連携可能性についての検討を実施する。

### 1-3. 調査内容

#### 1. 動向調査

本項では、自動車業界における高張力鋼の導入動向、高張力鋼中に含まれるマンガンの推移、国内における高張力鋼スクラップの発生・回収・再生処理動向、鑄造業界における製品生産およびスクラップ需要動向等を調査した。また、これらから鑄鉄鑄物向け鉄スクラップの流通動向を検討した。本項の成果は「II. 高度自動車部品向け鑄物を取り巻く環境」で記載している。

#### 2. マンガン除去及び無害化技術各手法による課題や問題点の整理

本項では、鑄鉄鑄物メーカーが抱える溶湯中マンガンの制御に関する問題を整理した上で、主要な溶湯中マンガンの制御技術として、溶湯からスラグ等としてマンガンを除去する技術（以下、除去技術）および銑鉄の追加等によってマンガンを含有率を低下させる技術（以下、希釈による無害化技術）について調査した。各技術に関する調査では、それぞれの利点および課題を整理した。本項の成果は「III. 溶湯中マンガンの制御技術の動向」で記載している。

#### 3. 各技術における処理量・生成物再資源化の検討

本項では、東北地域における鑄鉄鑄物メーカーの現状、また溶湯中マンガンの制御技術の導入可能性を考慮しつつ、同技術を利用した鑄物生産の実証試験を実施した。また、副産物の発生状況およびその再資源化可能性についても検討した。本項の成果は「IV. 溶湯中マンガンの制御技術の実証」で記載している。

#### 4. 原料調達・処理コスト試算

本項では、「各技術における処理量・生成物再資源化の検討」における実証対象技術の結果を踏まえ、溶湯中マンガンの制御技術（マンガンの除去技術、希釈によるマンガンの無害化技術）を適用した場合の生産コストを試算し、通常時コスト等と比較した。また、銑鉄および鉄スクラップの相場変動による生産コストの優位性変化についても検討を行った。本項の成果は「IV-6. 採算性試算結果」で記載している。

## 5. 今後の方向性の提示

本項では、鋳物向け原材料のリサイクルシステム構築に向け、東北地域の鋳鉄鋳物メーカーにおける溶湯中マンガ制御技術を導入時課題を検討した。また、この課題を解決し、更なる導入拡大、波及を目指した今後の方向性についても検討した。本項の成果は「V. 溶湯中マンガ制御技術の導入可能性」で記載している。

## II. 高度自動車部品向け鋳物を取り巻く環境

### II-1. 自動車部品向け鋳鉄鋳物の概要

#### 1. 自動車部品向け鋳鉄鋳物の生産動向

鋳物は、溶かした金属を型に注ぎ込んで自由自在に造形できるという特徴を活かし、複雑な形状の製品分野などで活用されている。特に銑鉄を材料とする鋳鉄鋳物は、鋳物の代表である。

わが国における鋳鉄鋳物の生産量は、年間4.48百万トン（2007年値）であり、自動車用が最大である（図表1）。このほか、産業機械器具用、その他の一般・電気機械用等の鋳鉄鋳物がこれに次いでいる。

鋳鉄鋳物の主力である自動車用製品は、自動車産業における2001年以降の好況を受けて生産額も増加傾向にある（図表2）。しかし、2008年に発生した米国金融危機の余波を受け、自動車産業をはじめとするわが国の製造業は2008年11月頃より減産を余儀なくされており、今後は自動車用製品を中心に鋳鉄鋳物の生産額減少が懸念される。わが国の景気動向を示す指数のうち、景気動向に先行するとされている指数は、2008年9月以降減少しつつある（図表2：2009年1月段階における景気動向CI先行指数（2005年平均＝100.0）は、77.2までに低下）。

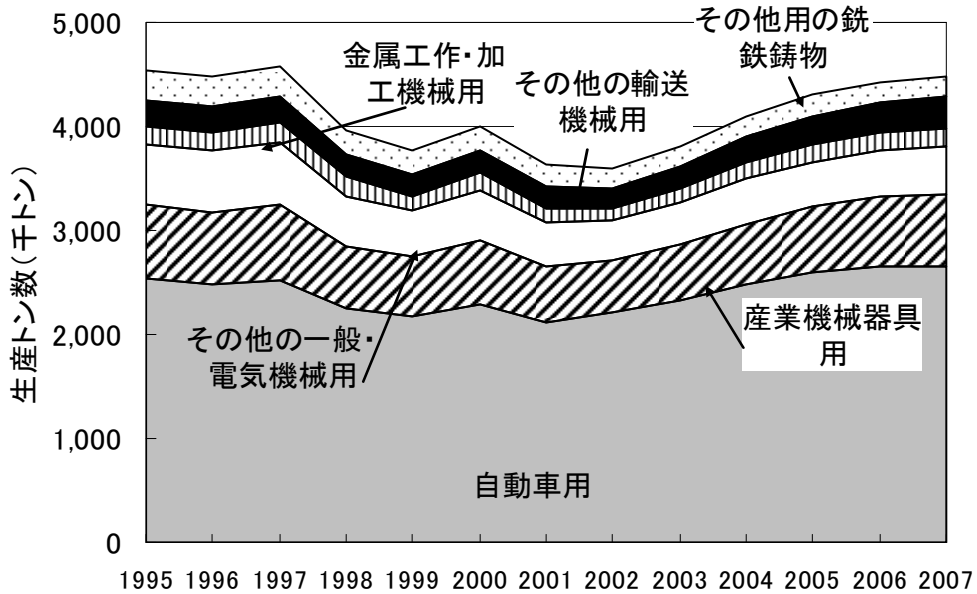
鋳鉄鋳物には、引張強さ等の各種物性を定めた日本工業規格が存在し、自動車用にはFC200やFC250（以上、ねずみ鋳鉄）、FCD400-15やFCD450-10（以上、球状黒鉛鋳鉄）の基準を満たす製品が主に生産されている（図表3、図表4）。強靱性が要求される鋳鉄鋳物には、特に球状黒鉛鋳鉄が用いられる（図表5）。鋳鉄鋳物の特徴として、Mn（マンガン）、Si（ケイ素）、P（リン）といった特定元素が混入することで、引張強さが大きく変化するため、溶湯成分を制御することが高品質の製品を生産する上で重要となる。特に球状黒鉛鋳鉄においてMn含有量が増加すると、引張強さや硬さは増加するが、伸びは低下するという特徴を有している（図表6）。

自動車用鋳鉄鋳物製品は、自動車重量の1割前後を占めると言われており<sup>1</sup>、鋳鉄鋳物が用いられる部品として、シリンダーブロック、クランクシャフト、カ

<sup>1</sup>（社）日本鋳造協会ホームページデータ（シリンダーブロックが鋳鉄製の場合）

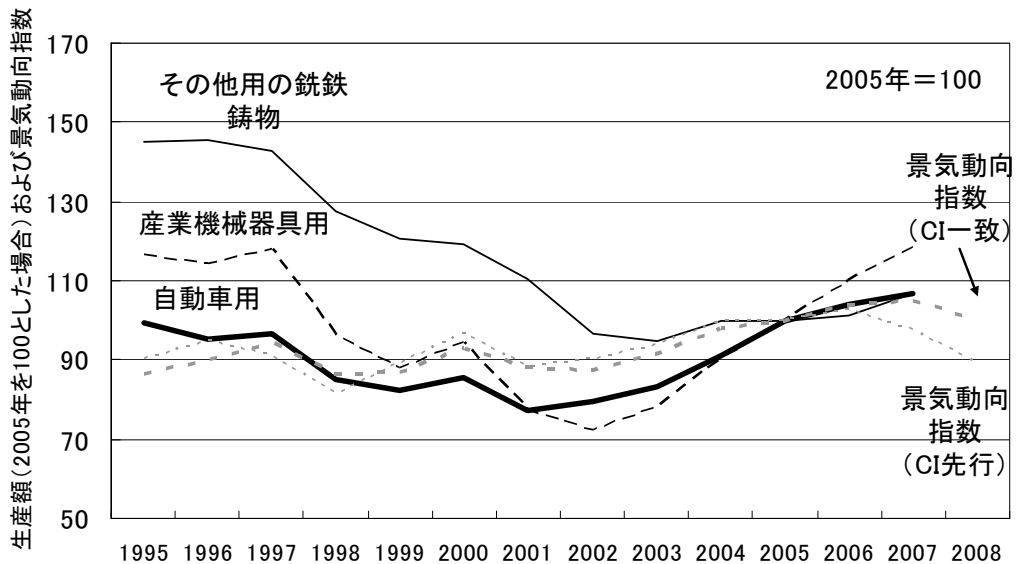
ムシャフト、エキゾーストマニホールド、オイルポンプハウジング、ブレーキロータなどがある。

図表 1 鋳鉄鑄物の生産量推移（暦年）



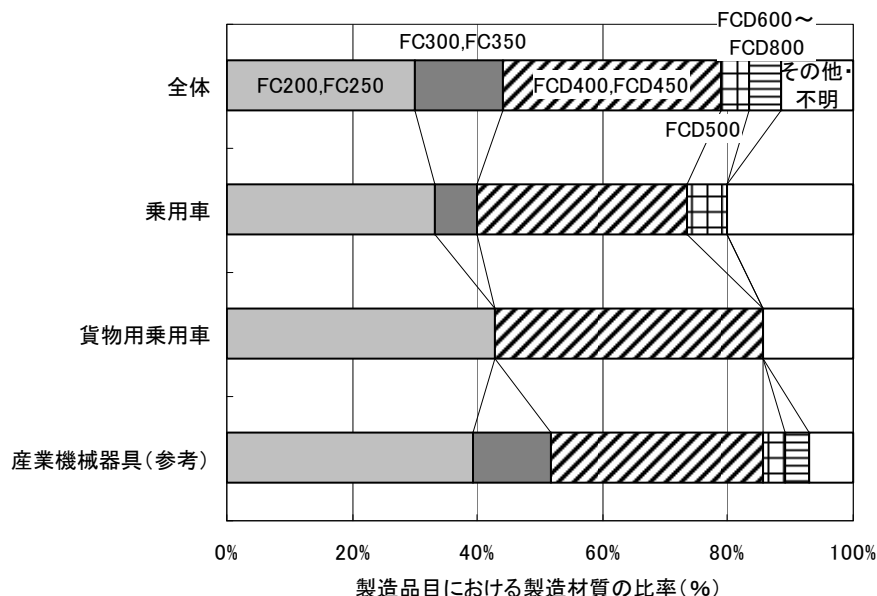
(注) 全従業員数20人以上の工場を対象に集計  
 (資料) 経済産業省「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計月報」

図表 2 主な鋳鉄鑄物の生産額推移（暦年）



(注1) 2005年値を100とした場合の指数表示  
 (注2) 景気動向指数 (CI一致) : CI指数 (Composite index : 景気に敏感な指標の量的な動きを合成した指標) のうち景気動向に一致すると考えられる指数。景気動向指数 (CI先行) : CI指数のうち景気動向に先行すると考えられる指数。  
 (資料) 経済産業省「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計月報」および内閣府「景気動向指数」

図表 3 鋳鉄鋳物メーカーにおける製造材質の比率



(注1) 「乗用車」に示す比率は、乗用車を製造品目とする鋳鉄鋳物メーカー（アンケート回答者）における製造材質の比率を示す。「貨物自動車」に示す比率も同様に貨物自動車を製造品目とする鋳鉄鋳物メーカーにおける製造材質の比率を示す。

(注2) FCはねずみ鋳鉄鋳物製品の物性を規定した日本工業規格。FCDは球状黒鉛鋳鉄品の物性を規定した日本工業規格。

(注3) 全国のスクラップ処理業者（928社）および鋳鉄鋳物製造業者（367社）を対象として平成20年3月7日～3月14日にアンケート調査を実施した結果。スクラップ回収業者からの回答が54件、鋳鉄鋳物製造業者からの回答が41件。

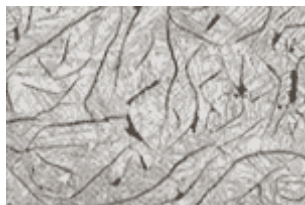
(資料) (財) いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鋳鉄用原材料調査報告書」（平成20年3月）

図表 4 鋳鉄鋳物製品に関する主な日本工業規格

JIS規格		引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	(参考) ブリネル硬さ (HB)
ねずみ鋳鉄	FC200	200以上	—	—	223以下
	FC250	250以上	—	—	241以下
	FC300	300以上	—	—	262以下
	FC350	350以上	—	—	277以下
球状黒鉛鋳鉄	FCD450-10	450以上	280以上	10以上	140～210
	FCD500-7	500以上	320以上	7以上	150～230
	FCD600-3	600以上	370以上	3以上	170～270

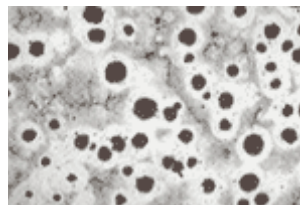
(資料) JIS G5501 (ねずみ鋳鉄品) およびJIS G5502 (球状黒鉛鋳鉄品)

図表 5 主な銑鉄鑄物（ねずみ鑄鉄・球状黒鉛鑄鉄）の特徴



ねずみ鑄鉄

通常銑鉄のほか、ケイ素等の元素を含む。銑鉄中に含まれる炭素が片状であり、破断面がねずみ色。



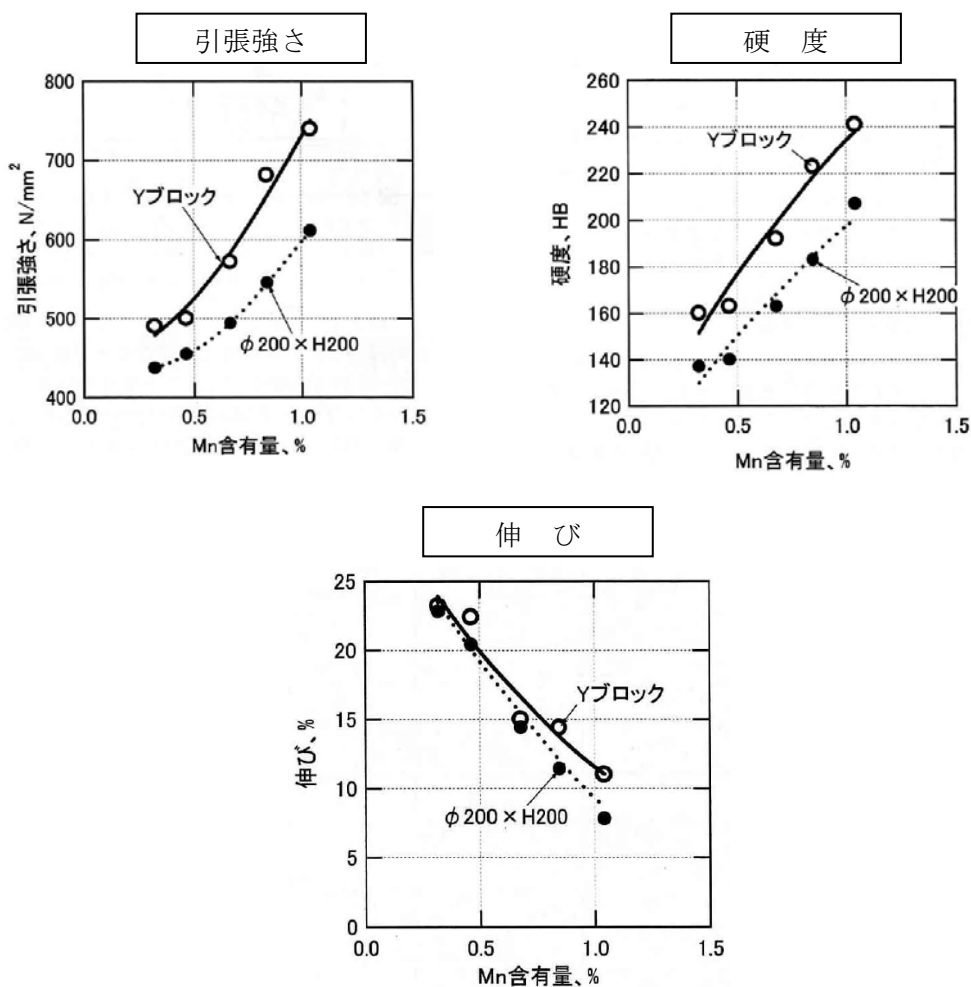
球状黒鉛鑄鉄

片状黒鉛に応力が集中して脆いというねずみ鑄鉄の欠点を補うべく、黒鉛を球状にて強度や延性を改善したもの。セリウムやマグネシウムの接種（添加）を行う。

(注) 上記写真は各銑鉄鑄物製品の顕微鏡組織写真の一例  
(社団法人日本鑄造協会提供)。

(資料) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 6 球状黒鉛鑄鉄の各種物性に及ぼすMn含有量の影響



(注) N/mm<sup>2</sup>=MPa

(資料) (財)いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鑄鉄用原材料調査報告書」(平成20年3月)

## 2. 鑄鉄鑄物向け原材料の需要動向

鑄鉄鑄物は、銑鉄を主原料とする製品であるが、製品価格の上昇を抑制するため、一部を鋼スクラップで代替している（図表 7）。このほか、鑄鉄鑄物の不良品や鑄型の湯道や押湯等を形成した端材なども戻り材として、鑄鉄鑄物の主原料として活用されている。わが国の銑鉄需要に占める鑄物向け割合は近年低下傾向にあるが（図表 8）、鉄屑（鉄スクラップ）需要に占める鑄物向け割合は横ばい傾向にあり（図表 9）、鑄鉄鑄物に占める鉄スクラップの重要性が相対的に増しつつある。特に自動車向け鑄鉄鑄物ではその傾向が強い（図表 7）。

鑄物製品用の銑鉄は、2004年以降は世界的な資源高騰の流れを受けた価格上昇が見られ、トンあたり 8 万円前後の価格で取引されているところである（図表 10）。

鑄鉄鑄物製品では、不純物の混入による規格不良などを避けるため、一般に「可鍛コロ<sup>2</sup>」や「新断<sup>3</sup>」と呼ばれる非鉄成分等の含有が少なく、かつキュボラ等への投入が容易な小型スクラップが選好される<sup>4</sup>。新断には、シュレッター、プレス A、プレス B、バラ A、バラ B という鉄スクラップの分類がある（図表 11）。

これらのスクラップは2006年以降より市場の品薄感を反映した価格上昇が見られるものの、2008年夏に入ってからには下落している（図表 10）。特に2008年夏以降の下落は著しく、新断バラ相場を例にすると、6月頃にはトンあたり 7 万円前後だったものが11月頃には同 2 万円前後にまで下落している<sup>5</sup>。

自動車部品向け鑄鉄鑄物製品は、主たる原材料として鉄スクラップへの依存を強めているところであるが、著しい相場の乱高下にさらされているほか、近年は環境配慮等の社会的ニーズに応じた製品設計により、発生する鉄スクラップの内容も変わりつつある。「可鍛コロ」や「新断」といった鉄スクラップは、工場等での加工時に発生するものであり、市中で取引されている加工くず（加工スクラ

<sup>2</sup> 関西用語で配合甲山と同格のものを可鍛コロ（かたんころ）という。コロは小さいという意味で転がるという意味ではない。関東では単にコロともいうが配合甲山の上質のものを指しているようである。なお、配合甲山（単に配合とも）とは、主としてシャーリング向上から切断、打ち抜きによって発生する炭素分、クロム分の含有量の少ない 3mm 以上の軟鋼スクラップで可鍛鑄鉄向けの原料となるものをいう。（社団法人日本鉄源協会「鉄スクラップ検収ハンドブック」から）

<sup>3</sup> 新断プレス（しんだちぷれす）及び新断バラ（しんだちばら）とは、薄板の加工生産工場が発生する薄板の端板及び打ち抜きのスクラップをプレスしたものをいう。新断プレスは酸化もなく品質も良いことから、需要家から評価を受けている。プレスしないものを新断バラという。表面処理をしていないもの（新断プレス A）としたもの（新断プレス B）とに分かれる。（社団法人日本鉄源協会「鉄スクラップ検収ハンドブック」から）

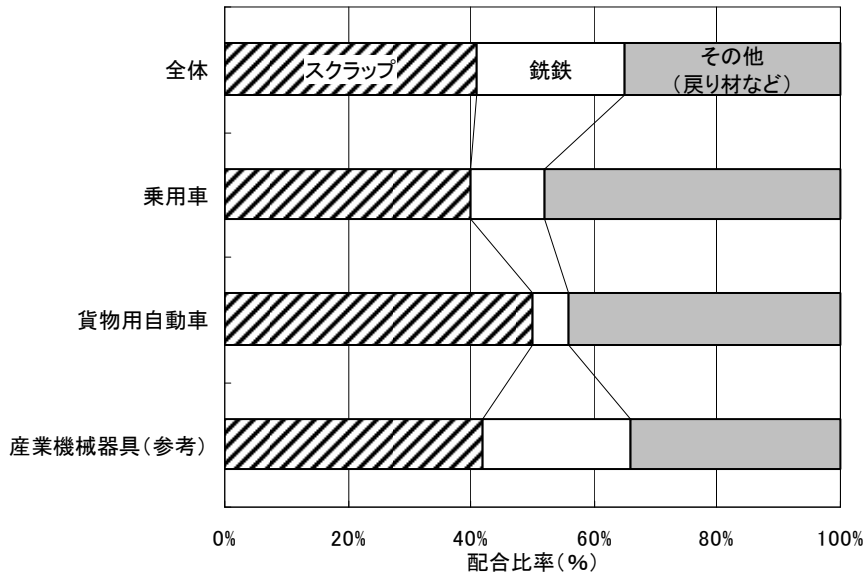
<sup>4</sup> 関係者ヒアリングから

<sup>5</sup> 日刊市況通信社記事など



ップ)の大半は自動車産業に由来するものであることから(図表12)、一般的に自動車産業における鋼材利用動向と鑄鉄鑄物向け鉄スクラップとは密接な関係にあると言える。

図表7 鑄鉄鑄物部品向け鉄スクラップの需要動向

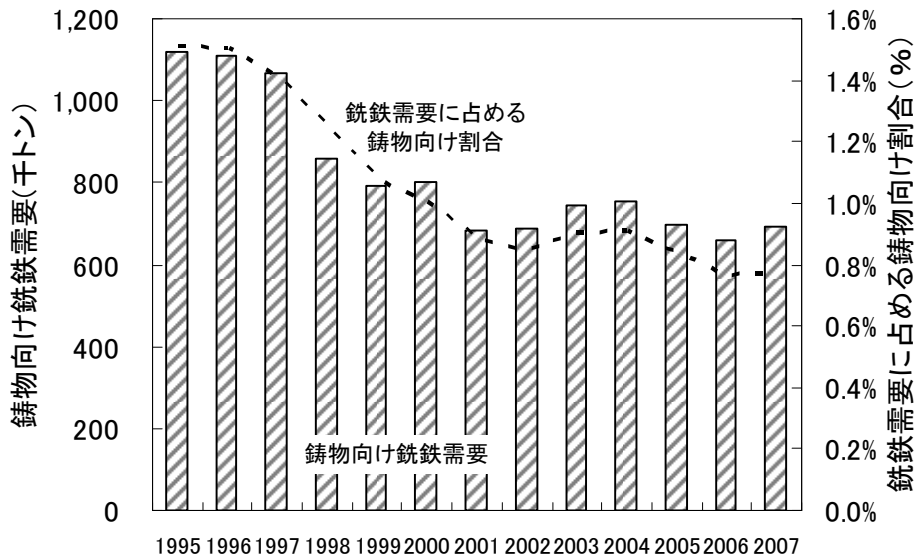


(注1)「乗用車」に示す比率は、乗用車を製造品目とする鑄鉄鑄物メーカー(アンケート回答者)における製造材質の比率を示す。「貨物自動車」に示す比率も同様に貨物自動車を製造品目とする鑄鉄鑄物メーカーにおける製造材質の比率を示す。

(注2)全国のスクラップ処理業者(928社)および鋳鉄鑄物製造業者(367社)を対象として平成20年3月7日~3月14日にアンケート調査を実施した結果。スクラップ回収業者からの回答が54件、鋳鉄鑄物製造業者からの回答が41件。

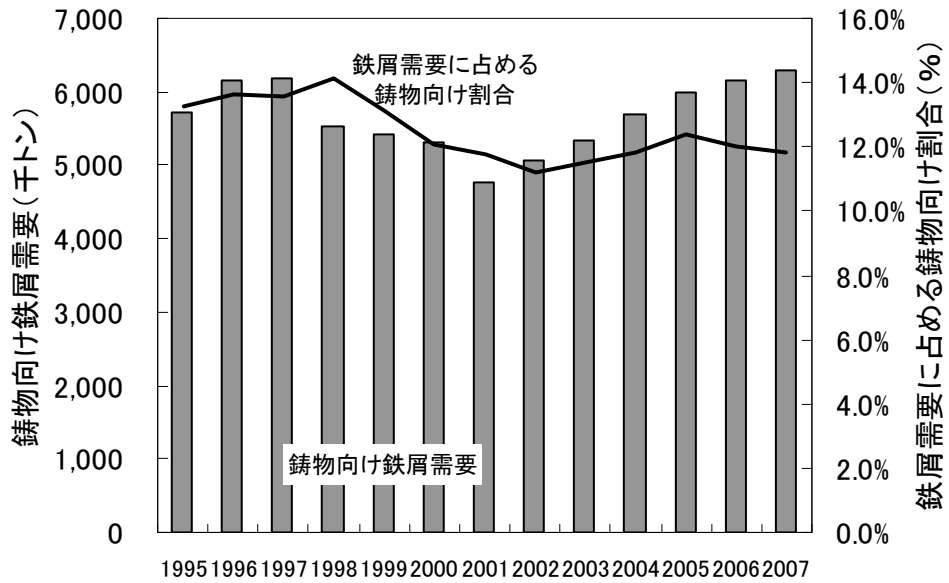
(資料)(財)いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鑄鉄用原材料調査報告書」(平成20年3月)、図3-3-3

図表8 鑄鉄鑄物向け鉄需要の推移(年度)



(資料) 経済産業省「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計」

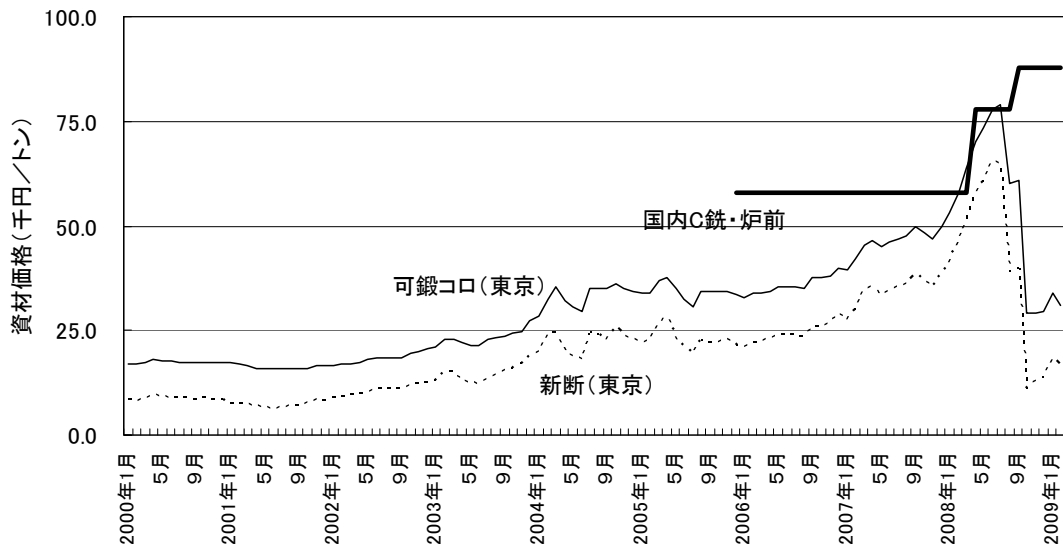
図表 9 鑄鉄鑄物向け鉄スクラップ（鉄屑）需要の推移（年度）



(注) 鑄物向け鉄屑需要は、統計中の銑鉄鑄物用、可鍛鑄鉄用、鑄鉄管用、再生鋼材用を合計したもの（鑄物用他）。






(資料) 経済産業省「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計」

図表 10 鑄物銑鉄・鉄スクラップ（可鍛コロ・新断）相場の推移



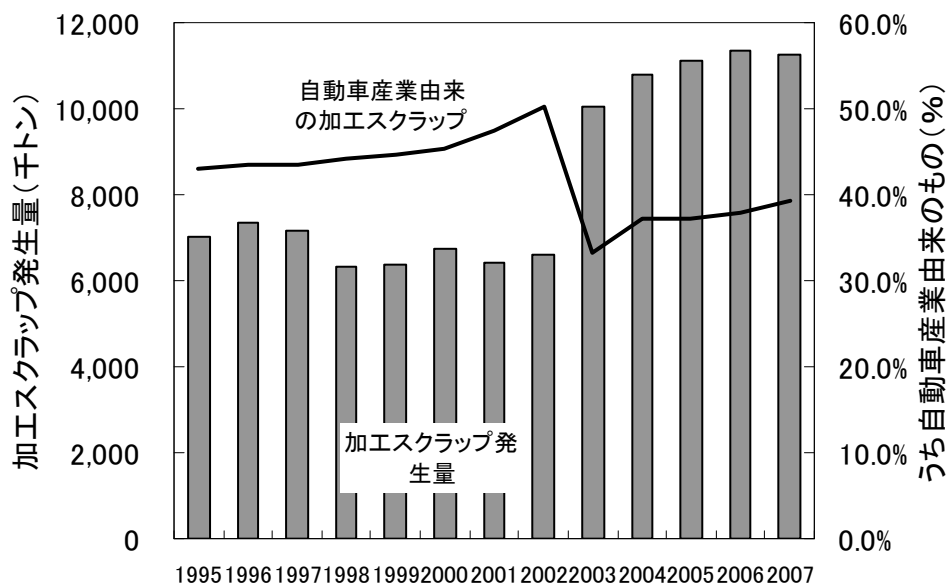
(資料) 日刊市況通信社

図表 11 新断スクラップの種類

等級	寸法	注記	主な発生源	形状と外観の代表例	実例
シュレッダー	—	新断をシュレッダーで処理したもの	自動車製造業、鉄鋼製品製造業	新断をシュレッダー処理したもの。こぶし大かそれよりも小さい塊状。	
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たもの	コイルセンター、鋼板加工品製造業	表面処理していない薄鋼板で酸化していないものを、輸送及び溶解効率面から直方体にプレスしたもの。	
プレス B	3辺の総和1800以下、最大辺800以下	多少酸化している薄鋼板又は鋼材材質に悪影響を及ぼさない表面処理鋼材		多少酸化している薄鋼板または鋼材材質に悪影響を及ぼさない表面処理鋼板を直方体にプレスしたもの。	
バラ A	幅または高さ500以下×1200以下	表面処理していない薄鋼板で酸化したもの		表面処理していない薄鋼板で酸化していないもの。	
バラ B	幅または高さ500以下×1200以下	多少酸化している薄鋼板又は鋼材材質に悪影響を及ぼさない表面処理鋼材		多少酸化している薄鋼板または鋼材材質に悪影響を及ぼさない表面処理鋼板のもの。	

(資料) 社団法人日本鉄源協会「鉄スクラップ検収ハンドブック」より作成

図表 12 加エスクラップの発生量に占める自動車産業由来の割合推移（年度）



(注1) 加エスクラップ発生率（過去5年毎に日本鉄源協会にて調査を実施）に当年の鋼材部門別投入量を乗じて推定。

(注2) 2003年度より2004年度調査結果の加エスクラップ発生率が反映されている。

(資料) 社団法人日本鉄源協会「鉄源年報第19号（2008）」

## 11-2. 自動車産業における高張力鋼の導入動向

自動車業界では、地球温暖化対策としての車体軽量化（車体軽量化による燃費向上）および衝突安全性の向上を目指した高張力鋼（High Tensile Strength Steel：ハイテン）の導入が拡大している。高張力鋼は構造合理化による車体軽量化の手段として注目されており（図表 13）、近年は引張強さで1,000（MPa）を超えるものも出ている（図表 14）。世界各国で燃費規制が強化されつつあり、わが国の自動車メーカーは乗用車などを中心に高張力鋼の導入を拡大させている。

自動車メーカーに対するアンケート結果（2012年への期待感を回答したもの。2002年現在の回答。）<sup>6</sup>によれば、パネル類といくつかの骨格部材を除き、骨格部材と補強部材のほとんどについて、大幅な高強度化が望まれている（図表 15～図表 17）。2,000cc乗用車と軽自動車の場合、「軽量化」と「安全性」を重視する姿勢が見られる（図表 15、図表 16）。一方、中型トラックでは原価低減が比較的強いニーズとして表れている（図表 17）。高張力鋼板の導入（ハイテン化）の阻害要因として、2,000cc乗用車および軽自動車の場合は成形性、溶接性が問題視されており、中型トラックの場合は原価上昇が問題視されている。

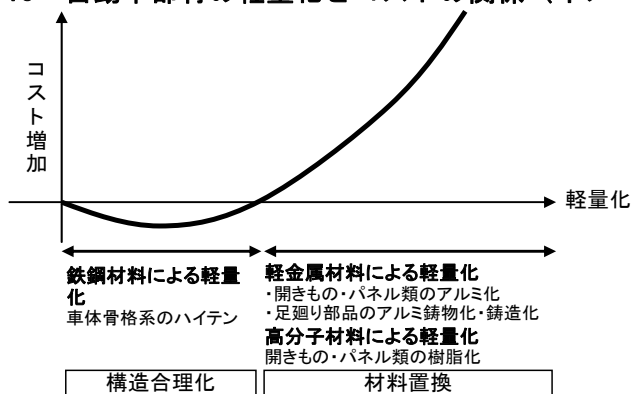
高張力鋼には高強度化を図るため、マンガンやケイ素等の合金元素が添加されるものも少なくない（図表 18）。高張力鋼の引張強さとマンガン含有量に必ずしも相関はないが、少なくとも1～2%程度<sup>7</sup>のマンガンを含有することがわかる（図表 18、図表 19）。

自動車における高張力鋼の需要は、従来の小型車の需要だけでなく大型車へと拡大している。CO<sub>2</sub>排出への世界的な規制に対応するための軽量化と安全性の向上衝突安全性という相反する性能を両立した素材として、980MPaを越える超高張力鋼が採用されてきている（図表 20）。

<sup>6</sup> 社団法人日本鉄鋼協会「社団法人日本鉄鋼協会・社団法人日本自動車技術会、自動車用材料共同調査研究会編：高張力鋼板WG活動報告書（平成13・14年度）」（2003）

<sup>7</sup> 関係者ヒアリングによれば、中には3%近いマンガン含有率を有する高張力鋼も存在する。

図表 13 自動車部材の軽量化とコストの関係 (イメージ)



(資料) 三部隆宏 (2008) 「自動車の軽量化への取組み」ア  
ルトピア, 2008. 1 より三菱UFJリサーチ&コン  
サルティング作成

図表 14 自動車用部品で用いられる高張力鋼の例

<熱延高張力鋼の例>

種類 (呼称)	引張強さ (MPa)	強化機構	適用部材	部品例
一般加工用 高降伏比型	490~980	固溶強化 析出強化	構造部材 補強部材	フレーム・メンバ類 ホイールリム
高穴広げ型 高バーリング型 (ハイナイト単相鋼板 フェライト・ハイナイト鋼板)	490~980	固溶強化 析出強化 組織強化 (ハイナイト)	構造部材 補強部材 足回り部材	フレーム・メンバ類 ホイール、 サスペンション部品
低降伏比型 (DP鋼、複合組織鋼)	540~780	組織強化 (マルテンサイト)	構造部材 補強部材	メンバ類、 ホイールディスク
高延性型 (TRIP鋼板、 残留オースナイト鋼板)	590~780	組織強化 (ハイナイト)	構造部材 補強部材	メンバ類 サスペンション部品
高耐食型	490~780	固溶強化 Cu-P 組織強化 (ハイナイト)	構造部材 足回り部材	シャーシ部品

<冷延高張力鋼の例>

種類 (呼称)	引張強さ (MPa)	強化機構	適用部材	部品例
一般加工用 高降伏比型	340~1470	固溶強化 析出強化 組織強化 (マルテンサイト)	構造部材 補強部材 内板部品	ピラー・メンバ類 バンパー
深絞り用	340~440	固溶強化	外板パネル 内板部品 構造部品	外板パネル、 ダッシュボード、 ピラー、サイドシル
焼付け硬化型 絞り用	340~440	固溶強化	外板パネル 内板部品	ドアアウター フードアウター
低降伏比型 (DP鋼板)	440~1270	固溶強化 析出強化 組織強化 (マルテンサイト)	構造部品 補強部品	メンバ類 バンパー ドアガードバー シート部品
高穴広げ型 (高バーリング型)	440~1180	固溶強化 析出強化 組織強化 (ハイナイト、 マルテンサイト)	構造部品 補強部品	ピラー・メンバ類 サイドシル シート部品
高延性型 (TRIP鋼板)	590~780	組織強化 (ハイナイト)	構造部品 補強部品	ピラー・メンバ類 サイドシル

(資料) 社団法人日本鉄鋼協会・社団法人自動車技術会「ハイテンハンドブック 2009」

図表 15 乗用車における部位毎のハイテン化ニーズと阻害要因

軽量化と安全性への  
ニーズが主な背景

成形性と溶接性を  
問題視

区分	部位名	ハイテン化のニーズ						ハイテン化の阻害要因									
		軽量化	安全性	原価 低減	耐デ ント 性	部材 強度	疲労 強度	成形性	溶接性	溶接部疲 労強度	耐食性	部材 剛性	音、振 動問題	寸法・形 状制約	原価 UP	海外 調達	
外板	フード・アウト	17	7	6	21			16	3			8	3		9	7	
	F.フェンダ	13	2	7	24			21	3			8	3		4	7	
	ルーフ	9	6	3	8			12	3			18	3		5	3	
	ドア・アウト	8	2	7	20			16	3			8	3	5	4	7	
内板	ピラー/ レール類	F.ピラー	22	22	6		4		20	10			3	3		7	13
		C.ピラー	22	22	3		7		15	15			3	3		7	14
		R.ピラー	8	8	5		5		7	3			8	3		4	7
		F.レール	8	10	6		2		8	3			13	3			3
		サイドレール	22	22	3		7		20	10			6	3		7	13
		R.レール	4	5	7		5		3	3			8	3		5	3
		サイシル	17	18	6		6		19	13	3		6	3		6	11
	フロア	F.サイドメンバ	21	22	3		8		20	14	3		5	6		7	10
		R.サイドメンバ	22	22	3		7		20	14	3		9	6		7	6
		ダッシュパネル		5	4				8	3			8	17			3
		同クロスメンバ	17	18	6		4		15	13	3		8	6		3	6
		F.フロア	5	5					11	3			17	16		4	3
		同クロスメンバ	13	18	3		4		10	10			8	7		3	6
		R.フロア	4	4	5		4		14	3			16	15		3	6
補強材	同クロスメンバ	18	17	7		9		17	3			3	3		4	7	
	ドア・ガード・バー		9	13		5		9	8						8	13	
床下 部材	バンパ・リインフォースメン	23	13	11		5		14	8						8	13	
	ディスク・ホイール	12	0	3		5	9	3	3	17	3	13	4			3	
	サス・アーム類	17	0	8		5	9	8	3	11	6	7			7	6	
	フレーム・メンバ類	7	0	3		5	9	8	3	8	7	9	4		4	3	
	アクスル・ハウジング	7	0	3		5	9	8	3	3	3				4	3	

(注1) 自動車メーカー5社を対象として、2,000CC乗用車(小型車)について回答を整理したもの。

(注2) 各項の数値は、優先順位1位から順に5点、4点、3点、2点、1点と回答してもらい、それを合計した数値。優先順位がなく、2個選択されている場合にはどちらにも5点を与え、3個選択されている場合にはどれにも4点を与えて合計している。

(資料) 社団法人日本鉄鋼協会・社団法人自動車技術会「ハイテンハンドブック 2009」

図表 16 軽自動車における部位毎のハイテン化ニーズと阻害要因

軽量化と安全性への  
ニーズが主な背景

成形性と溶接性を  
問題視

区分	部位名	ハイテン化のニーズ						ハイテン化の阻害要因								
		軽量化	安全性	原価 低減	耐デ ント 性	部材 強度	疲労 強度	成形性	溶接性	溶接部疲 労強度	耐食性	部材 剛性	音、振 動問題	寸法・形 状制約	原価 UP	海外 調達
外板	フード・アウト	15		4	5			8				9			4	3
	F.フェンダ	15		4				13				9			4	3
	ルーフ	10		4	8	5		8				9			4	3
	ドア・アウト	10		4	8	5		8				9			4	3
内板	ピラー/ レール類	F.ピラー	14	15					13	9	5				7	2
		C.ピラー	13	14	4				13	9	5				5	2
		R.ピラー	5	5					5						5	
		F.レール	5						4				4		4	
		サイドレール	10	15					13	9	5				5	2
		R.レール	5						4				4		4	
	フロア	サイシル	9	10					10	4					5	
		F.サイドメンバ	14	15					12	9	5		4		4	2
		R.サイドメンバ	14	15					12	9	5		4		4	2
		ダッシュパネル	5	5					3	5	5					2
		同クロスメンバ	5	10					5						5	
		F.フロア														
		同クロスメンバ	5	5					4				4		4	
		R.フロア														
補強材	同クロスメンバ	10	10					7	5	5		4		4	2	
	ドア・ガード・バー	9	5	5												
床下 部材	バンパ・リインフォースメン	4	5	5				5								
	ディスク・ホイール	10				4	5	8	4	8		9		4	4	
	サス・アーム類	10		5		4	10	12	4	12	3	9		4	4	
	フレーム・メンバ類	15				4	8	8	4	8		9		4	4	
	アクスル・ハウジング	5				4	3									

(注1) 自動車メーカー3社を対象として、軽自動車について回答を整理したもの。

(注2) 各項の数値は、優先順位1位から順に5点、4点、3点、2点、1点と回答してもらい、それを合計した数値。優先順位がなく、2個選択されている場合にはどちらにも5点を与え、3個選択されている場合にはどれにも4点を与えて合計している。

(資料) 社団法人日本鉄鋼協会・社団法人自動車技術会「ハイテンハンドブック 2009」



原価低減へのニーズが主な背景。他に軽量化と安全性も。

図表 17 中型トラックにおける部位毎のハイテン化ニーズと阻害要因

原価UPを問題視。他に成形性も。

区分	部位名	ハイテン化のニーズ						ハイテン化の阻害要因								
		軽量化	安全性	原価低減	耐震性	部材強度	疲労強度	成形性	溶接性	溶接部疲労強度	耐食性	部材剛性	音、振動問題	寸法・形状制約	原価UP	海外調達
外板	フード・アウト	5		4	3			9							5	3
	F.フェンダ	3		5	4										5	
	ルーフ	8		10	4			4				5			15	3
	ドア・アウト	3	4	9	8			9							10	3
内板	ピラー/レール類	F.ピラー	7	3	8		6	2	12				8		13	3
		C.ピラー	3	3	8		5	3				10			10	
		R.ピラー							4						5	3
		F.レール			10		3	4	8				4		14	3
		サイドレール			10		3	4	8				4		14	3
		R.レール			10		3	4	4				4		9	
		サイシル	3	3	6		5	5	4				10		15	
	F.サイドメンバ	2	5	4		3		4				5		10		
	R.サイドメンバ							4						5		
	ダッシュパネル	7	4	8			5	8				9		14		
	同クロスメンバ	10	5	4		3		3	4					10		
	フロア	F.フロア	8	4	9			4	9				5		15	3
		同クロスメンバ	5	5	5		3	4	4	3					10	2
		R.フロア	4	4	4				9						10	
同クロスメンバ		5	5					4	3					5		
補強材	ドア・ガード・バー	13	14	7				5				5		5		
	バンパ・リインフォースメン	6	3	8		3	4		5			5		5		
床下 部材	ディスク・ホイール	12	3	3		5	4	10	6	11	3	6		3	6	
	サス・アーム類		5	10			5				5			5		
	フレーム・メンバ類	12	3	8		6	5	8	2	5	2	10	4	2	11	
	アクスル・ハウジング	12	3	3		3	6	4	7	13		3	3	3	6	

(注1) 自動車メーカー3社を対象として、中型トラックについて回答を整理したもの。

(注2) 各項の数値は、優先順位1位から順に5点、4点、3点、2点、1点と回答してもらい、それを合計した数値。優先順位がなく、2個選択されている場合にはどちらにも5点を与え、3個選択されている場合にはどれにも4点を与えて合計している。

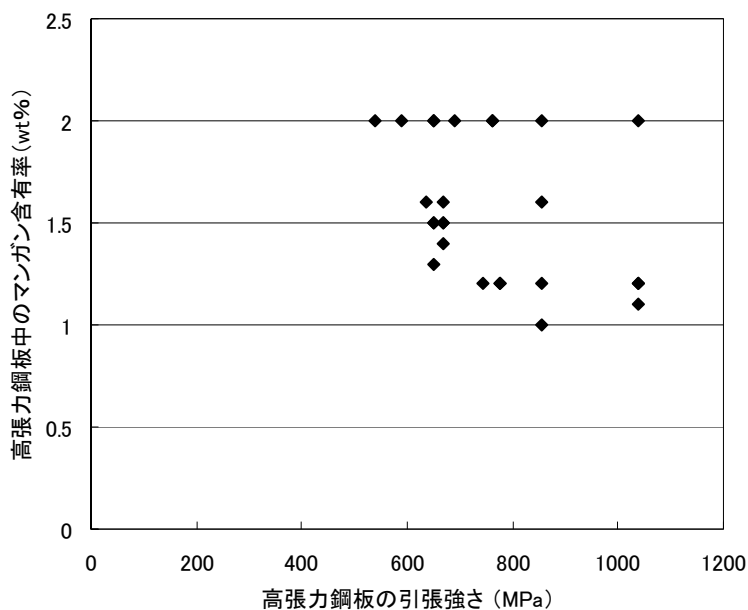
(資料) 社団法人日本鉄鋼協会・社団法人自動車技術会「ハイテンハンドブック 2009」

図表 18 高張力鋼中の成分例

引張り強度 (MPa)	化学成分(wt%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cu	B
540 ≤	≤0.15	≤1.50	≤2.00	≤0.025	≤0.010		
570/700	≤0.09	0.15/0.55	≤1.6	≤0.025	≤0.010	≤0.30	-
590 ≤	≤0.15	≤1.50	≤2.00	≤0.025	≤0.010		
590/710	≤0.16	0.15/0.55	≤1.50	≤0.025	≤0.015	≤0.3	-
590/710	≤0.09	0.15/0.55	1.00/1.60	≤0.020	≤0.010	≤0.30	-
590/710	≤0.18	≤0.55	≤2.00	≤0.030	≤0.020	必要に応じて合金元素を添加	
590/710	≤0.16	≤0.55	≤1.50	≤0.025	≤0.010	必要に応じてNi, Cr, Mo, Vなどを添加	
590~710	≤0.12	≤0.55	≤2.00	≤0.030	≤0.025	-	-
610/730	≤0.16	0.15/0.55	≤1.50	≤0.025	≤0.015	≤0.3	-
610/730	≤0.09	0.15/0.55	1.20/1.60	≤0.025	≤0.010	≤0.30	-
610/730	≤0.16	≤0.55	≤1.50	≤0.025	≤0.010	必要に応じてNi, Cr, Mo, Vなどを添加	
610/730	≤0.08	0.15/0.55	≤1.60	≤0.025	≤0.010	≤0.30	-
690 ≤	≤0.23	≤2.20	≤2.00	≤0.025	≤0.010		
690/800	≤0.15	≤0.55	≤1.20	≤0.025	≤0.010	≤0.50	≤0.005
690/830	≤0.15	≤0.55	≤2.00	≤0.030	≤0.015	必要に応じてNb, V, Ti等の合金元素を添加	
690~830	≤0.14	≤0.55	≤2.00	≤0.030	≤0.025		
710/840	≤0.16	≤0.35	≤1.20	≤0.025	≤0.015	≤0.4	≤0.005
710/840	≤0.15	≤0.55	≤1.20	≤0.025	≤0.010	≤0.50	≤0.005
780/930	≤0.25	≤0.55	≤1.60	≤0.030	≤0.015	-	≤0.005
780/930	≤0.15	≤0.35	≤1.20	≤0.025	≤0.010	≤0.50	≤0.005
780/930	≤0.16	≤0.60	≤1.00	≤0.025	≤0.010	0.15/0.50	≤0.005
780~930	≤0.16	≤0.55	≤2.00	≤0.030	≤0.025	-	-
950/1130	≤0.18	≤0.35	≤1.20	≤0.020	≤0.015	≤0.70	≤0.005
950~1130	≤0.16	≤0.35	0.60~1.60	≤0.012	≤0.008	0.15~0.50	≤0.005
950~1130	≤0.16	≤0.55	0.90~1.50	≤0.025	≤0.008	-	≤0.005
950~1130	≤0.16	≤0.55	≤2.00	≤0.025	≤0.020	-	≤0.005

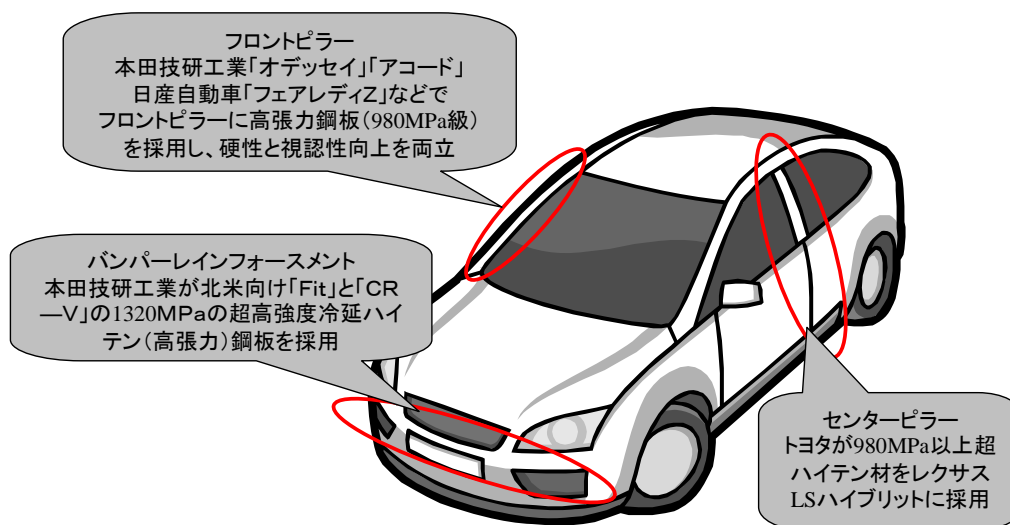
(資料) 各社ホームページより三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 19 高張力鋼中におけるマンガン含有率と引張強さとの相関



(注) 上記の相関係数は-0.38である。相関は弱い。  
(資料) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 20 自動車部品における超高張力鋼の採用動向



(資料) 各種報道より三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

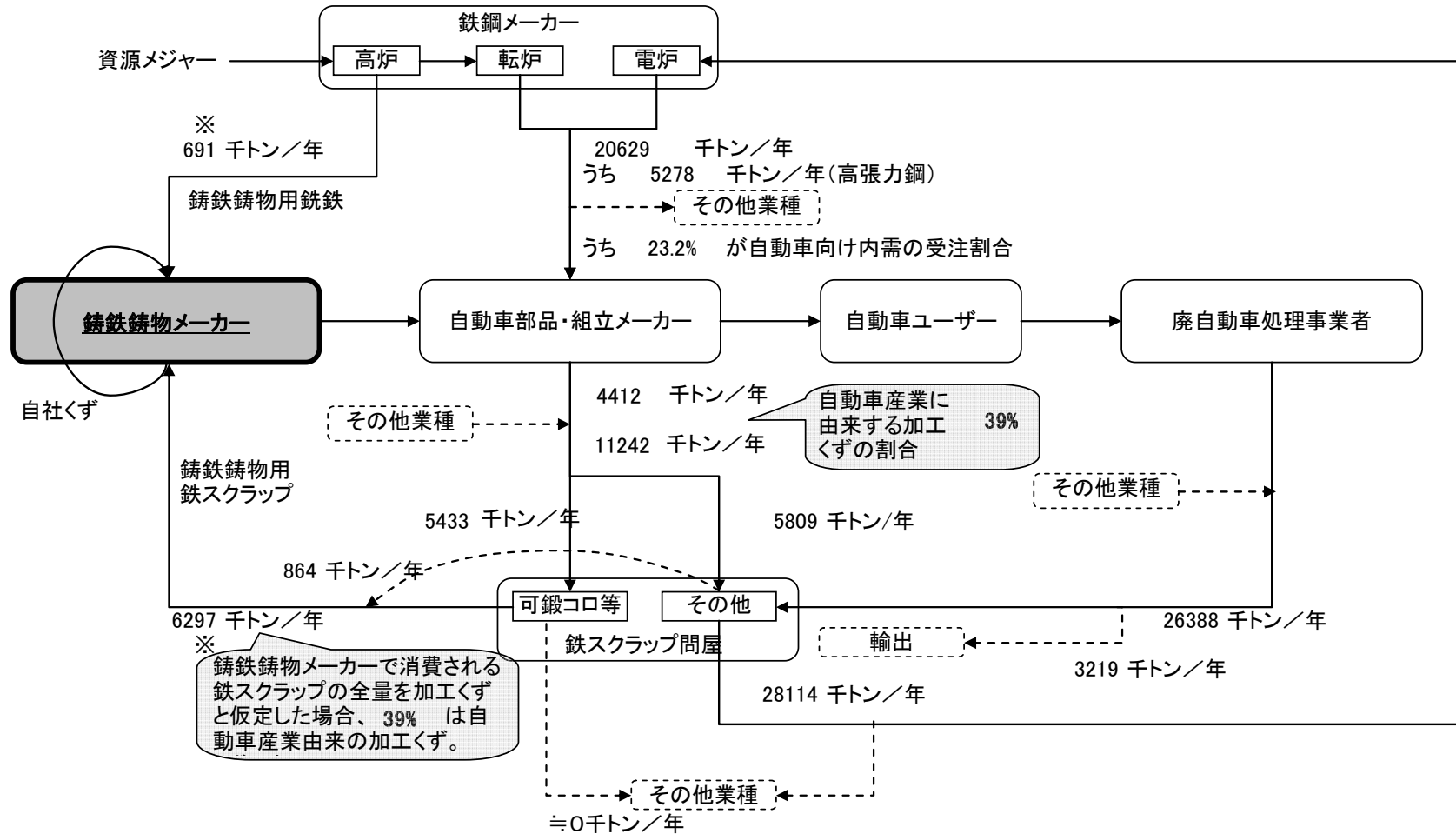
### 11-3. 鑄鉄鑄物向け鉄スクラップの流通動向

わが国の鑄鉄鑄物向け鉄スクラップの流通動向（推計含む）を図表 21に示す。加工くずの大半は自動車部品などの工場から排出されており（図表 12）、これらのうち「可鍛コロ」や「新断」といった不純物をあまり含まない鉄スクラップが鑄鉄鑄物向けに消費されていると推定されることから、鑄鉄鑄物向けに消費される鉄スクラップは、自動車産業における鋼材の採用動向に強く影響されることがわかる。

自動車業界では、地球温暖化対策および衝突安全性向上のため、各種部品において高張力鋼の導入を進めているところであり、部品の加工時に発生する加工くずには、今後、マンガン等の各種非鉄金属を含む高張力鋼スクラップが多く含まれるようになることが想定される。鑄鉄鑄物製品は、マンガン、ケイ素、リンといった元素の含有量によって引張強さが大きく変化することから、今後は溶湯に含まれるマンガン等の元素濃度を制御する必要性が次第に高まる。

一方、構造材や部品として自動車に残る高張力鋼は、一定の使用を経た後に自動車リサイクル工場でシュレッダー処理等を受けて老廃スクラップとなる。この老廃スクラップにも高張力鋼スクラップの混入増加が想定されるが、シュレッダー処理等によって様々な不純物を含むため、そもそも鑄鉄鑄物用として不適であり、電炉メーカーへの影響が将来的に想定される。

図表 21 鑄鉄鑄物メーカーを取り巻く鉄の流通動向



(注1) 「※」のついてる数値は消費ベースの数値。それ以外は全て供給ベースの数値。(ストック分は表示せず。自家消費分は消費フローに含まれる)

(注2) 2007年度データをもとに推計。

(資料) 経済産業省「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計」、社団法人日本鉄鋼連盟「2008年10月鉄鋼受注統計」および社団法人日本鉄源協会「鉄源年報第19号(2008)」より三菱UFJリサーチ&コンサルティング推計

### III. 溶湯中マンガン制御技術の動向<sup>8</sup>

#### III-1. 鑄鉄鑄物メーカーにおけるマンガン等の問題発生状況

鑄鉄鑄物メーカーでは鑄鉄鑄物におけるマンガン含有量の規定値を設定しており、自動車向け鑄鉄鑄物の場合、「0.3%以上0.5%未満」や「0.5%以上1.0%未満」との回答が主流である（図表 22）。特に「FCD400-15、FCD450-10」を満たす鑄鉄鑄物に限った場合、マンガン濃度を0.2~0.4%まで下げることが一般的である<sup>9</sup>

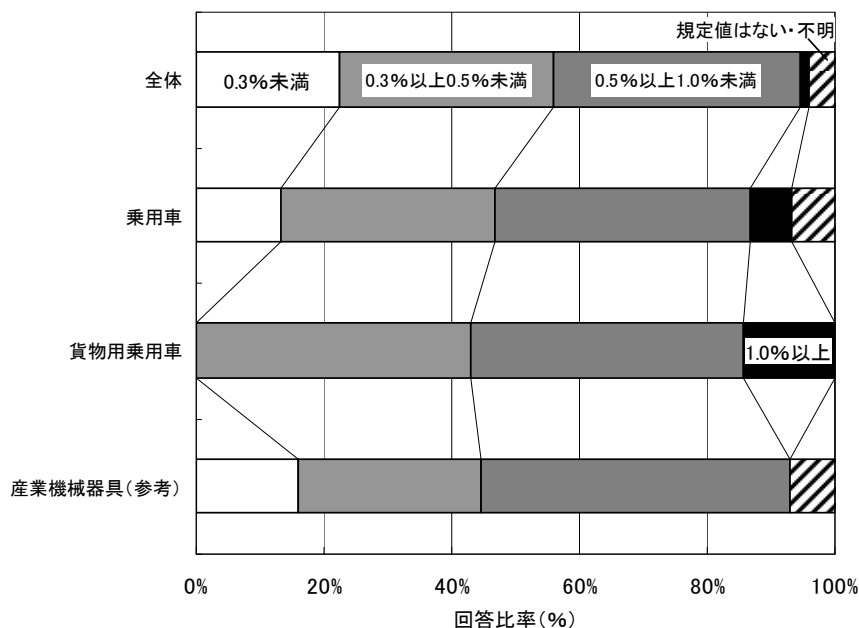
鑄鉄鑄物メーカーにおける問題意識として、溶湯中マンガンが「問題になった」や「今後問題になりそう」との回答が過半数を占めている（図表 23）。溶解方法別に溶湯中マンガンの問題発生状況をみると、炉壁材の違いなどを背景として、「高周波炉」を使用している鑄鉄鑄物メーカーで問題視する向きが強い（図表 24）。月間溶解量別にみると、月間溶解量の大きい鑄鉄鑄物メーカーで問題視する向きが強い（図表 25）。材質別にみると、ねずみ鑄鉄ではFC200、FC250、球状黒鉛鑄鉄ではFCD450~500などといった需要量の大きな材質で問題視する向きが強い（図表 26）。

---

<sup>8</sup> 溶湯中マンガン制御技術を実証するに当たっての参考とするため、財団法人いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鑄鉄用原材料調査報告書（2008年3月）」を主に整理した。

<sup>9</sup> 業界関係者ヒアリングなどから

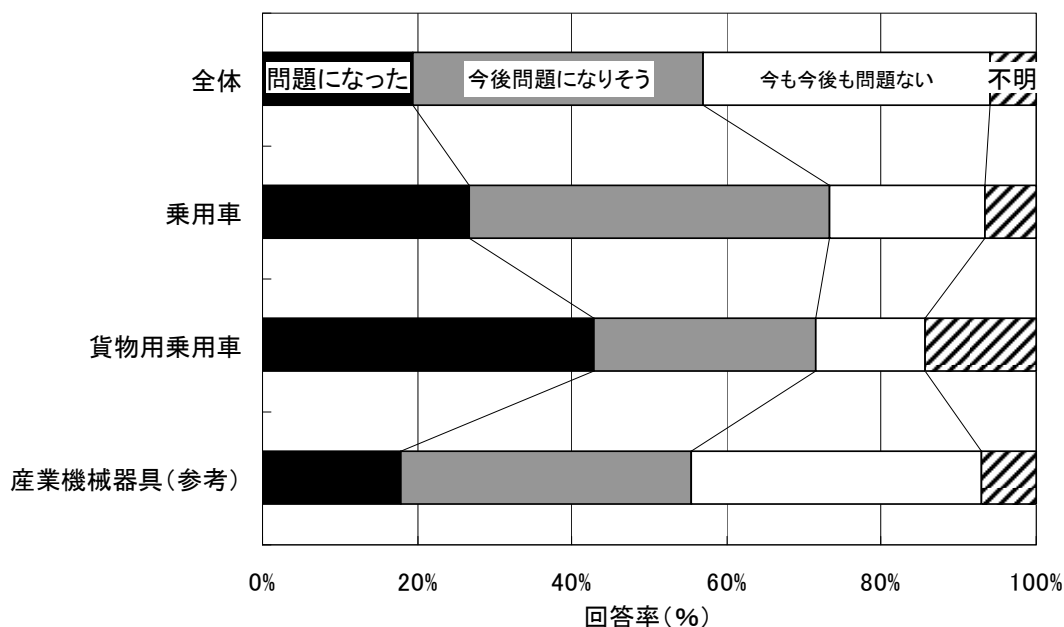
図表 22 鋳鉄鋳物に対するマンガン含有量規定値の状況（用途別）



(注) 全国のスクラップ処理業者（928社）および鋳鉄鋳物製造業者（367社）を対象として平成20年3月7日～3月14日にアンケート調査を実施した結果。スクラップ回収業者からの回答が54件、鋳鉄鋳物製造業者からの回答が41件。

(資料) (財) いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鋳鉄用原材料調査報告書」（平成20年3月）

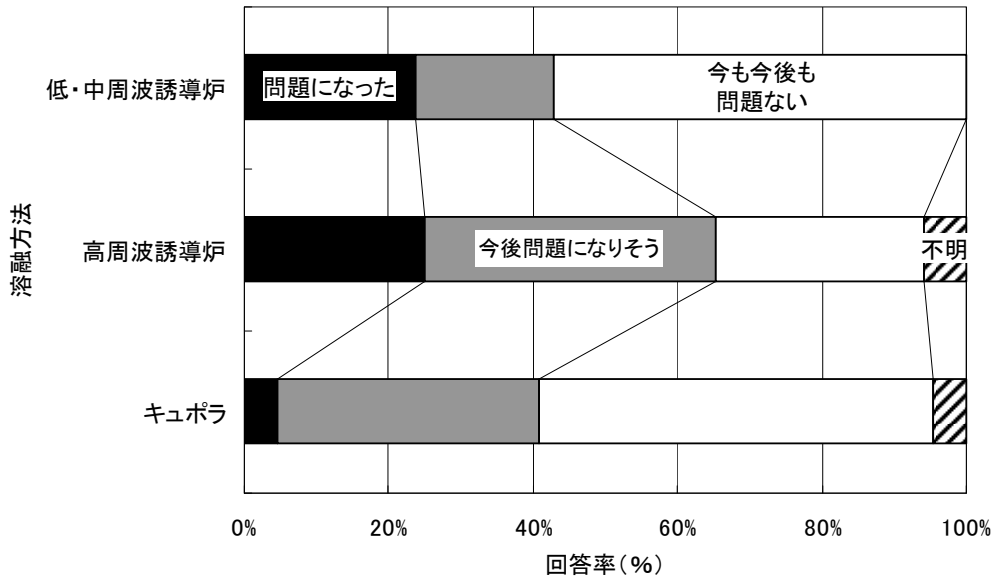
図表 23 鋳鉄鋳物の製造におけるマンガンの問題発生状況（用途別）



(注) 全国のスクラップ処理業者（928社）および鋳鉄鋳物製造業者（367社）を対象として平成20年3月7日～3月14日にアンケート調査を実施した結果。スクラップ回収業者からの回答が54件、鋳鉄鋳物製造業者からの回答が41件。

(資料) (財) いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鋳鉄用原材料調査報告書」（平成20年3月）

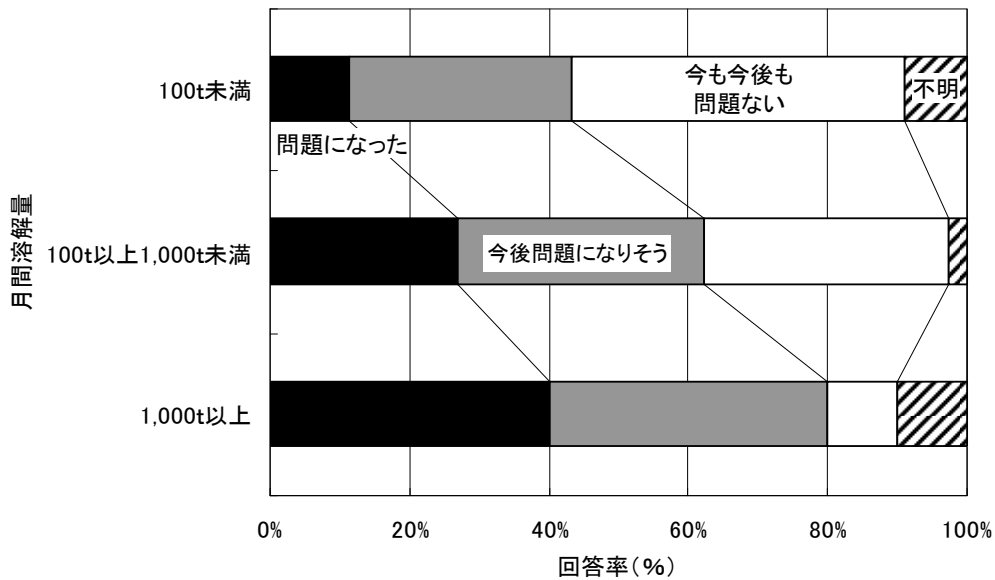
図表 24 鋳鉄鋳物の製造におけるマンガンの問題発生状況（溶解方法別）



(注) 全国のスクラップ処理業者（928社）および鋳鉄鋳物製造業者（367社）を対象として平成20年3月7日～3月14日にアンケート調査を実施した結果。スクラップ回収業者からの回答が54件、鋳鉄鋳物製造業者からの回答が41件。

(資料) (財) いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鋳鉄用原材料調査報告書」（平成20年3月）

図表 25 鋳鉄鋳物の製造におけるマンガンの問題発生状況（月間溶解量別）

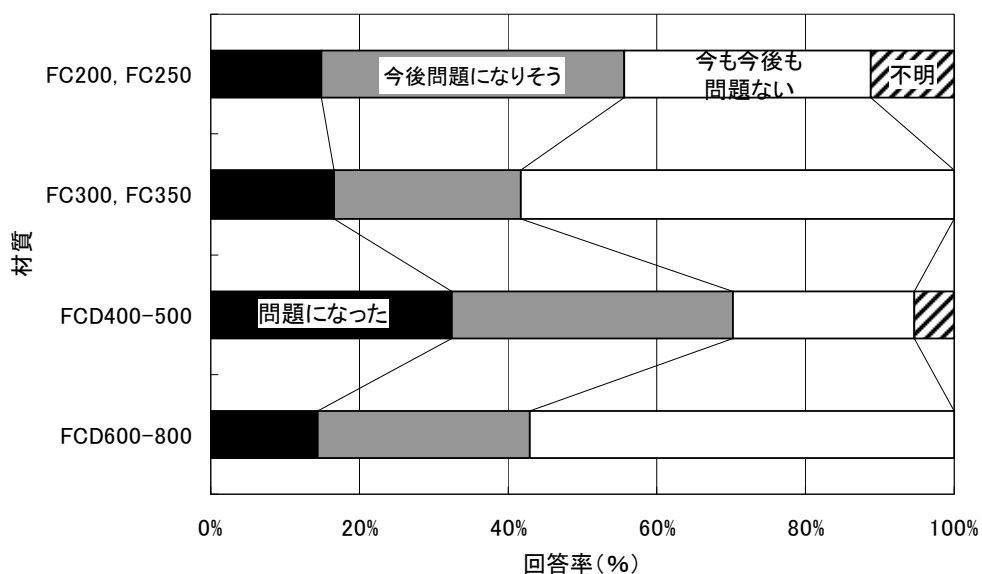


(注) 全国のスクラップ処理業者（928社）および鋳鉄鋳物製造業者（367社）を対象として平成20年3月7日～3月14日にアンケート調査を実施した結果。スクラップ回収業者からの回答が54件、鋳鉄鋳物製造業者からの回答が41件。

(資料) (財) いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鋳鉄用原材料調査報告書」（平成20年3月）



図表 26 鋳鉄鋳物の製造におけるマンガンの問題発生状況（材質別）



(注) 全国のスクラップ処理業者（928社）および鋳鉄鋳物製造業者（367社）を対象として平成20年3月7日～3月14日にアンケート調査を実施した結果。スクラップ回収業者からの回答が54件、鋳鉄鋳物製造業者からの回答が41件。

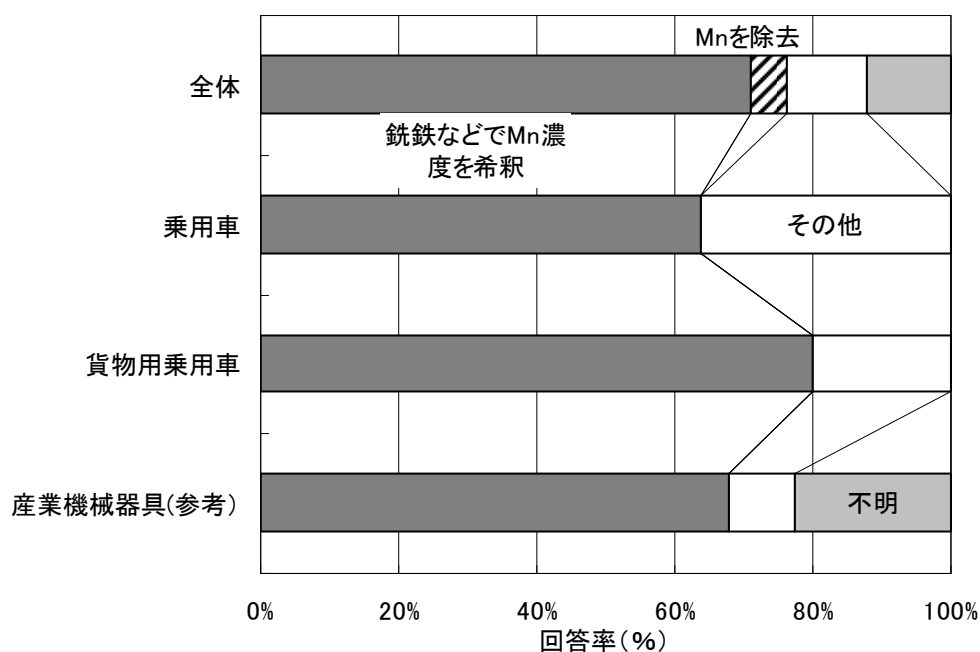
(資料) (財) いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鋳鉄用原材料調査報告書」（平成20年3月）

### 111-2. 鋳鉄鋳物メーカーにおけるマンガン対策状況

鋳鉄鋳物メーカーでは、通常、受け入れるスクラップから試料を抜き取り、分析を行っている。スクラップの形状が同じものについては、成分もだいたい同じと判断し、形状ごとに抜き取って分析を行う。マンガン含有量の多いスクラップと同じ形状のスクラップが積荷に多く含まれると判断される場合には、受け入れない場合がある。

溶解時には、受け入れたスクラップの形状（成分の目安としている）および成分を把握した上で、必要に応じて別の種類の鉄スクラップや銑鉄による成分調整を行う。特に溶解後にマンガン含有量が過多であると判明した場合、元素成分が厳密に把握されている銑鉄を用いて希釈することが多い。鋳鉄鋳物メーカーを対象にしたアンケート調査でも「銑鉄などでマンガン濃度を希釈」するとの回答が多く得られている（図表 27）。しかし、銑鉄等による希釈は容易であるが、鉄スクラップに比して高価であるため、生産コストの上昇に結びつくという課題を抱えている。

図表 27 マンガンが問題になったときの対処方法



(注1) 溶湯中のマンガンを「問題になった」と回答した事業者の中での割合

(注2) 全国のスクラップ処理業者（928社）および銑鉄鋳物製造業者（367社）を対象として平成20年3月7日～3月14日にアンケート調査を実施した結果。スクラップ回収業者からの回答が54件、銑鉄鋳物製造業者からの回答が41件。

(資料) (財) いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鋳鉄用原材料調査報告書」（平成20年3月）

### 111-3. 溶湯中マンガンの制御技術の種類と課題

溶湯中マンガンの制御技術は、大きく溶湯中からマンガンを除去する「除去技術」および溶湯中のマンガンを無害化させる「無害化技術」に整理することができる。いずれもマンガンの除去ないしは無害化によって、目指す鋳鉄鋳物の材質規格を満たすことが目的である。

主な除去技術としては、硫化物系フラックスを用いて溶湯中マンガンを硫化させ、浮上してきた硫化マンガンを除去（除滓）するもの、溶湯中マンガンを何らかの方法で酸化させ、浮上してきた酸化マンガンを除去（除滓）するもの、塩化物等を用いて溶湯中のマンガンを塩化マンガンとし、これを蒸発させるものがある<sup>10</sup>（図表 28）。

硫化物系フラックスを用いる除去技術には、硫化カリウムを用いるもの、硫化鉄を用いるもの、硫化鉄および硫化ナトリウム（もしくは硫酸ナトリウム）、硫黄末を用いるものがある。溶湯中硫黄成分の増加が課題である。酸化による除去技術としては、溶湯中に直接酸素ガスを吹き込むもの、また酸化鉄を添加するものがある。いずれも酸化マンガンとしてスラグ化させ、これを除去（除滓）する点は同じであるが、酸素ガスを吹き込む場合には新たな設備を整備する必要性が発生する。また、マンガンだけではなくケイ素も同時に除去してしまうため、ケイ素の補充が課題である。塩化マンガンとして蒸発させる技術については作業手順や生産効率（除去反応に数10分以上の長時間を要する）の面から改善余地が残されている。

一方、主な無害化技術としては、希土類（レアアース）の添加によって強度を確保するもの、特殊な接種剤を用いた二次接種によって球状化を促進させるものがある（図表 29）。

希土類添加による無害化技術は、硫黄との反応に必要とされる希土類を予め計算の上、これを添加することで、黒鉛化を促進させ、チル（炭化物）の晶出を抑制させるものである。これにより鋳鉄の硬度上昇を抑える。二次接種による無害化技術は、二次的な接種を行うことで接種効果をさらに高めるものである。これにより黒鉛化の向上を図る。

<sup>10</sup> 財団法人いわて産業振興センター（2008）

図表 28 溶湯中マンガ制御技術の種類と課題（除去技術）

技術の種類		原理	作業概要	課題	備考
硫化物添加	硫化カリウム添加	硫化カリウムを溶湯中に添加することで、マンガンを硫化マンガンとして除去するもの。	鑄鉄溶湯（1.5%Mn）に $K_2S$ （約3%）添加することにより、マンガンを硫化マンガンとして浮上させる（50%のマンガ除去率）。カリウムはガス化させる。	溶湯中の硫黄含有量は僅かに増加する。	堀江皓、小綿利憲、福井克彦、石川佳樹：「硫化物処理による高炭素溶鉄中の脱マンガンについて」鑄物、62（1990）643
	硫化ナトリウム／硫酸ナトリウム・硫化鉄添加	硫化ナトリウム（硫酸ナトリウム）と硫化鉄を溶湯中に添加することで、マンガンを硫化マンガンとして除去するもの。	鑄鉄溶湯に $Na_2S$ （ $Na_2SO_4$ ）および $FeS$ を添加することにより、マンガンを硫化マンガンとして浮上させる。硫化作用を担うのは主に硫化鉄。硫化ナトリウムは浮上してきた硫化マンガンのトラップが目的。	$FeS$ 添加量に対して $Na_2S$ 添加量が少ないと、溶湯中の硫黄含有量は増加する。	高川貫仁、勝負澤善行、茨島明、池浩之：「鑄鉄溶湯からの脱マンガン技術の開発」岩手県工業技術センターHP、平成9年度研究報告5（1998）
	硫化鉄添加	硫化鉄を溶湯中に添加することで、マンガンを硫化マンガンとして除去するもの。	鑄鉄溶湯に $FeS$ を添加することにより、マンガンを硫化マンガンとして浮上させる。	溶湯中の硫黄残留を防ぐため、 $FeS$ の添加方法を工夫する必要がある。	新日本製鐵株式会社：特開2003・105420「鑄鉄の脱マンガン処理方法」
	硫黄末・ケイ酸添加	硫黄末を溶湯中に添加することで、マンガンを硫化マンガンとして除去するもの。	鑄鉄溶湯に $S$ 粉末を添加することにより、マンガンを硫化マンガンとして浮上させる。ケイ酸（軟質ガラスも可）は浮上してきた硫化マンガンのトラップが目的。	—	堀江皓、旭テック株式会社：特開2005・290411「鑄鉄溶湯中のマンガ除去方法」
酸化	酸素ガス吹き込み	溶湯中に酸素ガスを吹き込むことで、マンガンを酸化マンガンとして除去するもの。	鑄鉄溶湯にランスパイプで酸素ガスを吹き込んでマンガンを酸化させ、 $MnO$ のスラグとして浮上させるもの。	マンガンのほか、ケイ素も同等に減少するため、ケイ素の添加が必要である。	日立金属株式会社吸収工場：素形材技術フォーラム「銑鉄鑄鉄溶解における不純物と不良対策（財団法人素形材センター主催）」テキスト、平成14年12月
	酸化鉄添加	酸化鉄を溶湯中に添加することで、マンガンを酸化マンガンとして除去するもの。	鑄鉄溶湯に酸化鉄（II）粉を添加することにより、マンガンを $MnO$ のスラグとして浮上させるもの。酸化鉄粉には鋼伸線工場などの熱処理工程で発生する酸化鉄を用いることが可能。	—	高川貫仁、勝負澤善行、池浩之、茨島明：「鑄鉄溶湯からの脱マンガン・脱クロム技術の開発」岩手県工業技術センターHP、平成15年度研究報告11（2004）
塩化	塩化鉄添加	塩化鉄を溶湯中に添加することでマンガンを塩化マンガンを蒸発させて除去するもの。	鑄鉄溶湯（50g）に $FeCl_2$ （4%）を添加することにより、 $MnCl_2$ を生成させ、蒸発をさせる（Mn含有率=1.5%→0.5%、約70%の除去率）。	蒸発した塩化マンガンを回収する必要がある。	田湯善章、高橋弘行、桃野正、片山博、勝負澤善行、高橋貫仁：「塩化鉄による溶融鑄鉄からの脱炭素除去法」（社）日本鑄造工学会北海道支部平成10年度支部大会講演概要集（平成10年6月）

（資料）（財）いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鑄鉄用原材料調査報告書」（平成20年3月）より三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 29 溶湯中マンガ制御技術の種類と課題（無害化技術）

技術の種類		原理	作業概要	課題	備考
無害化	希土類添加	<p>希土類元素を添加することで、黒鉛化を促進し、マンガンの無害化を図るもの。</p> <p>【FCの場合】 硫化物（<math>RE_2S_3 + MnS</math>）が黒鉛晶出の核となり、チル晶出を防止する。</p> <p>【FCDの場合】 硫化物（<math>RES + MgS</math>）が黒鉛晶出の核となり、チル晶出及びパーライト析出を抑制する。</p>	<p>【FCの場合】 高マンガ（1.5～3.0%）の溶湯でも、希土類元素と硫黄を化学量論的に添加することにより、チル化傾向を著しく改善するとともに、FC200相当の硬さで300MPaを超える引張強さが得られる。</p> <p>【FCDの場合】 希土類元素を球状化処理前に添加すると、マンガ含有量0.9%でも伸び17%と高延性を示す。</p>	—	<p>【FCの場合】 小綿利憲、堀江皓、平塚貞人、王上均、鶴田直己：「片状黒鉛鑄鉄の黒鉛化と機械的性質に及ぼす希土類元素及びマンガ添加の影響」鑄造工学、68(1996)963.</p> <p>【FCDの場合】 小綿利憲、堀江皓、平塚貞人：「高マンガ鋼スクラップをリサイクルした球状黒鉛鑄鉄の機械的性質」鑄造工学、79(2007)481.</p>
	二次接種（注湯流接種）	<p>ビスマスを含む接種剤を用いて2次接種することにより、黒鉛化を促進し、パーライトの析出を抑制する。</p>	<p>一次接種だけではなく、鑄型への注湯直前に二次接種を行うことで高い接種効果を得る（0.55%Mnであっても本処理を行うことで、0.30%Mnと同等の特性を得ることができる）。特にビスマス系接種剤で効果を得ることができる。</p>	—	<p>齋藤弘典：「球状黒鉛鑄鉄用の高Mnスクラップ対応の為の最適鑄込み成分について」（社）日本鑄造工学会東北支部支部大会講演概要集、26(2006).</p>

（資料）（財）いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鑄鉄用原材料調査報告書」（平成20年3月）より三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

## IV. 溶湯中マンガン制御技術の実証

### IV-1. 実証試験の目的

本実証試験は、市中の鉄スクラップを主原料とする鑄鉄鑄物製品について、各種の溶湯中マンガン制御技術を適用し、脆性向上等に対する改善効果を、量産規模（実際の生産ラインを使用）で客観的に実証することを目的とした。

溶湯中マンガン制御技術には、銑鉄を添加することによる希釈技術、酸化剤等の添加によるマンガン等の除去（ノロ取り）技術、固結後の熱処理等による組織構造の変化技術およびこれらの複合技術が含まれる。なお、いずれに技術についても、自動車部品向け鑄鉄鑄物の主流であるFCD450-10（図表 30）を満たすことを前提とした。なお、伸びが必要な球状黒鉛鑄鉄は、一般にマンガンの濃度を0.2～0.4%まで下げることが必要とされる<sup>11</sup>ことから、マンガン除去の場合には、これを一つの目安とした。

本実証試験では、以下事項について実証を行うこととした。

- 主な溶湯成分に関する含有率およびその変化（対象技術の適用前／後）
- 機械的性質（引張強さ、耐力、伸び、硬さ）
- 組織（顕微鏡観察）
- 技術利用に必要な費用および労力、製品1個あたり作業時間
- 消費電力量
- 作業者の安全性
- その他（二次生成物の発生状況、設備に関する制約、原材料に関する制約等）

図表 30 球状黒鉛鑄鉄品の機械的性質

種類の記号	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)	(参考) ブリネル硬さ(HB)
FCD400-15	400以上	250以上	15以上	130～180
FCD450-10	450以上	280以上	10以上	140～210
FCD500-7	500以上	320以上	7以上	150～230

(資料) JIS G5502 (球状黒鉛鑄鉄品)

<sup>11</sup> 業界関係者ヒアリングなどから

## IV-2. 実証対象とする溶湯中マンガ制御技術

本調査では、既往調査を参考としつつ<sup>12</sup>、東北地域等の中小鑄鉄鑄物メーカーで導入可能性が高い溶湯中マンガ制御技術について、以下の観点から実証対象の候補を検討した。

- 理論的段階から実証段階にまで進んでいる技術
- 実証に必要な作業手順等の情報を得ることができる技術
- 鑄鉄鑄物の品質、付帯設備の必要性、環境負荷や労働安全等の面から比較的高い導入可能性を見込める技術

上記観点に基づき、本調査ではまず4技術を小型炉（最大溶解量100kg）での実証対象技術とし（図表 31）、この中から特に優れた成績を収めた1技術を大型炉（最大溶解量1,500kg）での実証対象技術とした。

図表 31 本調査で実証対象とした溶湯中マンガ制御技術

技術の種類	技術の原理	実証対象技術の内容	
除去技術	酸化鉄添加 (A)	酸化鉄 (FeO) を溶湯中に添加することで、マンガ等を酸化させ、酸化マンガ等として除滓するもの。	溶湯に酸化鉄を不純物の酸化に必要と計算される量だけ添加する。酸化物を主体とするスラグの除滓を容易にするため、スラグ粘性を向上させるためのシリカ (SiO <sub>2</sub> )、アルミナ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) などを適量添加する（添加時の溶湯温度は1,500℃程度）。鑄造に係るその他の手順は通常と同様とする
	硫酸ナトリウム添加 (B)	硫酸ナトリウム (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) を溶湯中に添加することで、マンガ等を硫化させ、硫化マンガ等として除滓するもの。	溶湯に硫酸ナトリウムを不純物の硫化に必要と計算される量（マンガ含有量を0.4wt%程度とする量）だけ添加する。（添加時の溶湯温度は1,300～1,500℃）。鑄造に係るその他の手順は通常と同様とする。
無害化技術	特殊接種・球状化剤添加 (C)	球状化黒鉛粒数を増加させる特殊な接種剤（球状化剤に同様の効果をもたらす成分を添加して代用することもあり）を用いることで、十分な黒鉛化を図り、パーライト率を低下させるもの。	出湯直前の溶湯にビスマス等を含む接種剤（球状化剤に同様の効果をもたらす成分を添加して代用することもあり）を必要量だけ添加する。鑄造に係るその他の手順は通常と同様とする。
	ケイ素添加 (D)	伸びが低下したマンガン濃度の高い溶湯へフェロシリコンを添加することで、伸びの低下を抑制するもの。	溶湯にマンガン濃度に応じたフェロシリコンを添加する。鑄造に係るその他の手順は通常と同様とする。

（注）技術の種類におけるA～Dの記号は、後述する技術の説明と対応している。

（資料）各種資料から三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

<sup>12</sup> (財)いわて産業振興センター「自動車用部品の高度化に資する鑄鉄用原材料調査報告書」（平成20年3月）

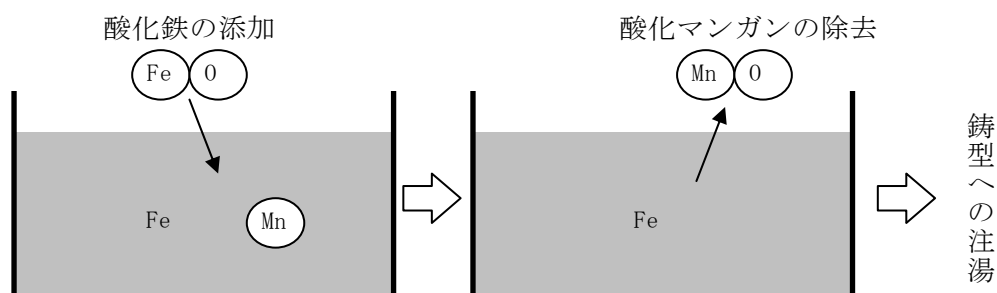
## IV-3. 実証対象技術の概要

### 1. 酸化鉄添加（A）

#### （1）技術の原理

酸化鉄（FeO）を溶湯中に添加することで、マンガン等を酸化させ、酸化マンガン等として除去する技術である。

図表 32 技術イメージ（酸化鉄添加）



（資料）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

#### （2）実証対象技術の内容

作業手順は、高川ほか（2006）<sup>13</sup>を参考にした。

鑄鉄溶湯の化学組成が目標とする組成となるように銑鉄、鉄スクラップ、フェロマンガン（Fe-Mn合金）および黒鉛粒を配合し、高周波誘導炉にて溶解する。小型炉（最大溶解量：100kg）を用いた試験の場合、鑄鉄溶解量の目安を70kgとし、大型炉（最大溶解量：1,500kg）を用いた試験の場合、鑄鉄溶解量の目安を1,200kgとする。

業界関係者等のヒアリング調査を参考にしながら、溶湯にフェロマンガンを添加することで、高張力鋼スクラップが混入した場合のマンガン濃度を擬似的に再現する。高張力鋼に含まれるマンガン量は、最大3.0%になる可能性があると仮定した上で<sup>14</sup>、この高張力鋼スクラップが鑄鉄溶湯の40%を占める場合<sup>15</sup>を想定し、溶湯中マンガン濃度が1.2%となるように調製する。

<sup>13</sup> 高川貫仁、池浩之、岩清水康二、瀬川晃児「鑄鉄溶湯から取り除きやすい脱マンガンスラッグの開発」、岩手県工業技術センター研究報告第13号（2006）

<sup>14</sup> 本報告書13ページ参照。

<sup>15</sup> 本報告書9ページ参照。



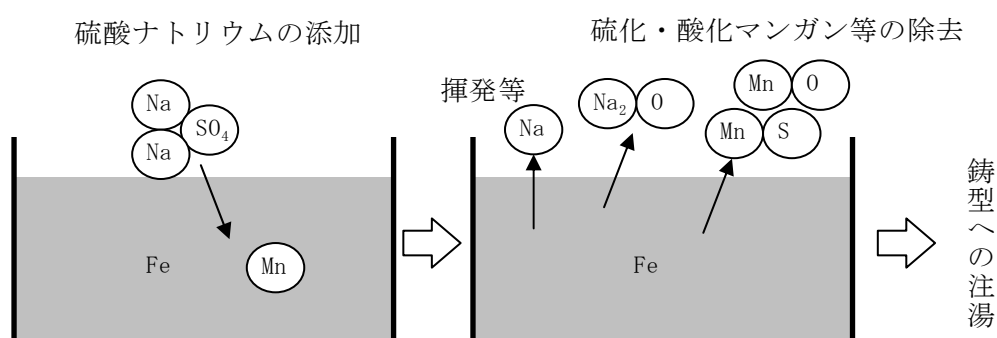
鑄鉄溶湯を溶製後、元湯の分析試料を採取して再度加熱を行う。溶湯温度が1450℃に達した後、ミルスケール（FeOを主成分とする鉄酸化皮膜）を4.0%添加する。酸化物を主体とするスラグの除去を容易にするため、スラグ粘性を向上させるためのシリカ（SiO<sub>2</sub>）、アルミナ（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）などを適量添加した上で（添加時の溶湯温度は1,500℃程度）、除滓作業を行う。その他の作業は通常時と同様に実施する。

## 2. 硫酸ナトリウム添加（B）

### （1）技術の原理

硫酸ナトリウム（Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>）を溶湯中に添加することで、マンガン等を硫化させ、硫化マンガン等として除去する技術である。

図表 33 技術イメージ（硫酸ナトリウム添加）



（資料）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

### （2）実証対象技術の内容

作業手順は、特開昭61-266515<sup>16</sup>および特開2005-290411<sup>17</sup>を参考にした。

鑄鉄溶湯の化学組成が目標とする組成となるように銑鉄、鉄スクラップ、フェロマンガン（Fe-Mn合金）および黒鉛粒を配合し、高周波誘導炉にて溶解する。小型炉および大型炉における溶解量の目安は、酸化鉄添加時と同様である。また、

<sup>16</sup> 発明の名称：含銅溶鉄より低銅鉄を製造する方法

<sup>17</sup> 発明の名称：鑄鉄溶湯中のマンガン除去方法

高張力鋼スクラップの混入を擬似的に再現した溶湯中マンガン濃度についても酸化鉄添加時と同様に設定する。

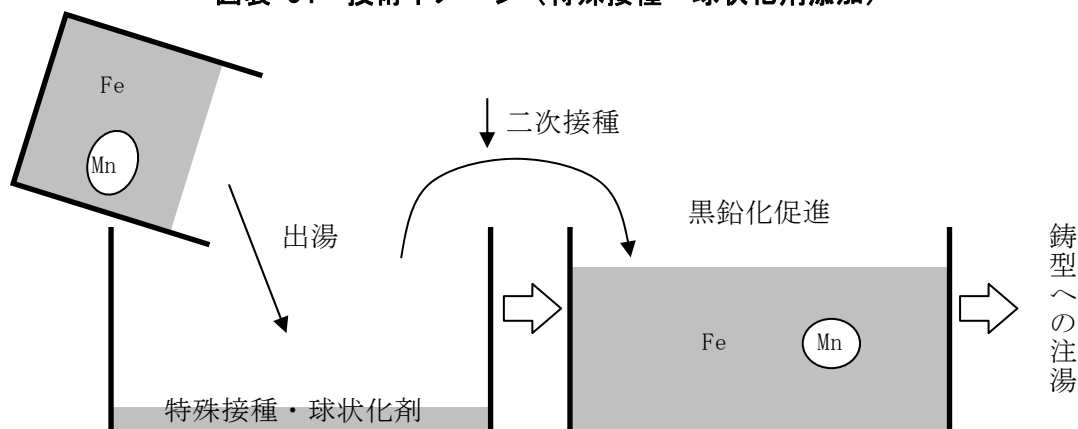
鑄鉄溶湯を溶製後、元湯の分析試料を採取し、硫酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) を5.0% 添加する（溶湯温度は1300～1500℃）。その後、再度加熱を行う。硫化物を主体とするスラグの除去を容易にするため、スラグ粘性を向上させるためのシリカ ( $\text{SiO}_2$ )、アルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) などを適量添加した上で、除滓作業を行う。その他の作業は通常時と同様に実施する。

### 3. 特殊接種・球状化剤添加（C）

#### （1）技術の原理

球状化黒鉛粒数を増加させる特殊な接種剤（球状化剤に同様の効果をもたらす成分を添加して代用することもあり）を添加することで、十分な黒鉛化を図り、フェライトを析出させ、パーライト率を低下させる技術である。

図表 34 技術イメージ（特殊接種・球状化剤添加）



（資料）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

#### （2）実証対象技術の内容

作業手順は、特開2003-171729<sup>18</sup>を参考にした。

<sup>18</sup> 発明の名称：鋼板スクラップの再利用方法

鑄鉄溶湯の化学組成が目標とする組成となるように銑鉄、鉄スクラップ、フェロマンガ（Fe-Mn合金）および黒鉛粒を配合し、高周波誘導炉にて溶解する。この際に硫黄含量が0.02～0.2%となるように硫化鉄を適量添加する。小型炉および大型炉における溶解量の目安は、酸化鉄添加時と同様である。また、高張力鋼スクラップの混入を擬似的に再現した溶湯中マンガン濃度についても酸化鉄添加時と同様に設定する。

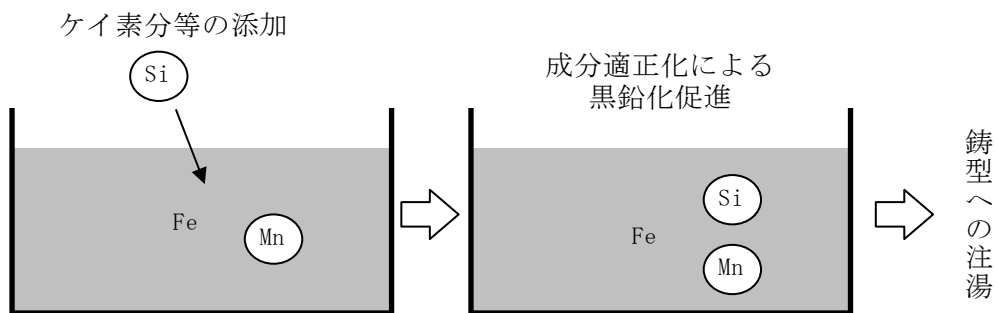
鑄鉄溶湯を溶製後、元湯の分析試料を採取し、希土類金属またはミッシュメタルを硫黄分量の倍量だけ添加する。この添加に際しては、特殊接種・球状化剤に含まれる希土類金属またはミッシュメタルの含有量を硫黄分量の倍量となるように調整する。マンガン及び希土類金属またはミッシュメタルを含む複合硫化物が生成することで、その複合硫化物を黒鉛晶出の有効な下地とさせ、黒鉛晶出を促進させ、その後、ビスマスを含有する接種剤を用いて二次接種を行う。その他の作業は通常時と同様に実施する。

#### 4. ケイ素添加（D）

##### （1）技術の原理

マンガンの影響力（パーライト化）を抑制させるために接種及び球状化処理等に成分調整を行い、十分な黒鉛粒数を晶出させる技術である。

図表 35 技術イメージ（ケイ素添加：成分適正化）



（資料）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

## (2) 実証対象技術の内容

作業手順は通常どおりである。

鑄鉄溶湯の化学組成が目標とする組成となるように銑鉄、鉄スクラップ、フェロマンガ (Fe-Mn合金) および黒鉛粒を配合し、高周波誘導炉にて溶解する。小型炉および大型炉における溶解量の目安は、酸化鉄添加時と同様である。また、高張力鋼スクラップの混入を擬似的に再現した溶湯中マンガ濃度についても酸化鉄添加時と同様に設定する。

鑄鉄溶湯を溶製後、元湯の分析試料を採取し、以下式<sup>19</sup>を満たすようにフェロシリコン等を適量添加する。以下は、マンガおよび銅の含有量を変化させた場合のパーライト化率の変化状況を表す表である。この式から $F=-0.9$ 前後となる場合にFCD450-10相当材が得られると想定される。本実証では、以下式で $F=-0.9$ となるような溶湯中の炭素含有量、ケイ素含有量、マンガ含有量、銅含有量の調整を行う。その他の作業は通常時と同様に実施する。

$$F = 0.024 - 0.118C - 0.226Si + 0.123Mn + 0.639Cu$$

$C$ :炭素含有量 (重量%)       $Si$ :ケイ素含有量 (重量%)       $Mn$ :マンガ含有量 (重量%)

$Cu$ :銅含有量 (重量%)

$F = 0$ のとき完全パーライト       $F = -1$ のとき完全フェライト

(参考:実測値とF値の関係)

例:  $C = 3.60$        $Si = 2.60$        $Mn = 0.40$        $Cu = 0.05$ の場合 $F = -0.907$       (FCD450相当材)

---

<sup>19</sup> J.A.Sikora et al.: The British Foundryman, 79 (1986) 180.

## IV-4. 実証方法

### 1. 実証手順

実際に稼動している生産ラインを用いて実証試験を行うため、溶解炉に与える影響を入念に確認した上で実証試験を行った。また、小型炉を用いた実証試験を事前に行うことで、生産ラインに悪影響を及ぼす可能性がある技術や実用見込みの低い技術を事前に除外し、効率的な実証試験を目指した。

図表 36 実証試験の流れ



(資料) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

#### ○高マンガンスクラップ溶解による溶解炉への影響確認（第1ステップ）

通常に使用される低マンガン鉄スクラップを全てないしは相当量の高張力鋼スチールスクラップに置き換え、溶解時の作業、溶解炉内壁に対する悪影響の有無等を確認した。特に実証試験に関する実現性の観点から確認を実施した。

#### ○小型炉による実証試験（第2ステップ）

最大溶解量100kgの小型炉を用いて、各対象技術について実証試験を行った。原料についてはFCD450-10相当の自家発生くずを30kg程度、市中購入の高張力鋼スクラップを35kg程度投入した。第3ステップで実証対象とする技術の選定を入念に行うため、4種の技術について予備試験を実施し、有望な2技術について本試験を実施した。本試験で優秀な成績を収めた技術を第3ステップの実証対象技術の候補とした。

### ○大型炉による量産的実証試験（第3ステップ）

最大溶解量1,500kgの大型炉（通常の生産に用いている溶解炉）を用いて、小型炉による実証試験で最も良い成績をおさめた対象技術1技術について、量産規模による実証試験を行った原料についてはFCD450-10相当の自家発生くずを500kg程度、市中購入の高張力鋼スクラップを550kg程度投入した。

## 2. 実証試験に用いた設備

### （1）小型炉

マグネシアスピネル系のライニングを有する富士製高周波誘導炉を使用した。最大溶解量は100kgである。

図表 37 小型炉の全貌・炉内状況

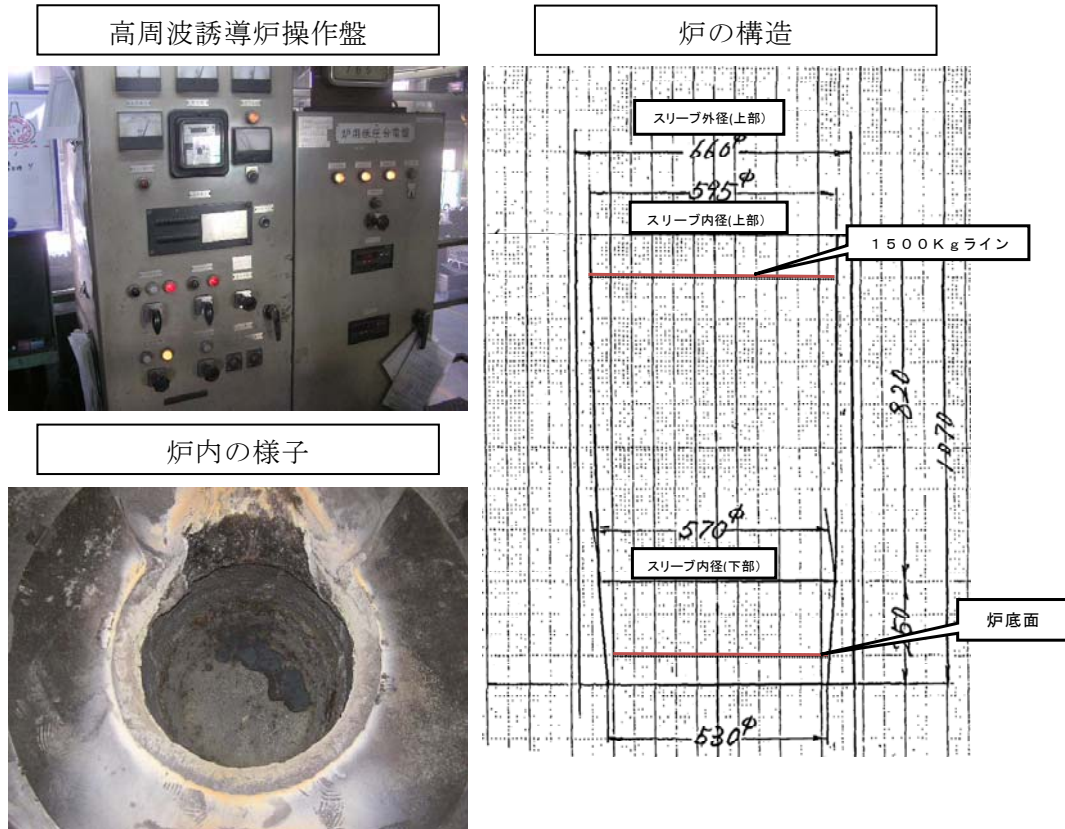


（資料）特殊メタル撮影

(2) 大型炉

シリカ系のライニングを有する東芝製高周波誘導炉を使用した。最大溶解量は1,500kgである。

図表 38 大型炉の概要



(資料) 特殊メタル撮影・提供

(3) 分析器具

温度測定には浸漬温度計を用いた。

図表 39 浸漬温度計



(資料) 特殊メタル撮影

#### (4) 試験片・供試材

溶湯成分分析（スパーク放電発光分光分析）のために、金型を用いて試験片を作成した。また、機械的諸性質の測定を行うため、ノックオフ供試材、Yブロック供試材、A F S カメノコ試料、くさび型試験片を作成した。

図表 40 試験片・供試材の鑄込み作業



(資料) 特殊メタル撮影



図表 41 試験片・供試材

発光分析用試験片金型



発光分析用試験片



ノックオフ供試材



Yブロック供試材



A F S カメノコ 供試材



くさび型試験片



(資料) 特殊メタル撮影

### 3. 実証試験項目および方法

小型炉および大型炉における実証試験では、溶湯成分、機械的性質、組織、費用・労力、作業安全性等について測定および評価を行った（図表 42）。

図表 42 実証試験項目および測定・評価方法

実証項目	実証内容	測定・評価方法	実施項目			
			影響確認	小型①	小型②	大型
溶湯成分	対象技術の適用前後におけるC、Si、Mn、P、S、Mg	関連JISに従った。 (JIS G1253:スパーク放電発光分光分析方法)	○	○	○	○
機械的性質	引張強さ	関連JISに従った。 (JIS Z2201:金属材料引張試験片、JIS Z2241:金属材料引張試験方法)	○		○	○
	耐力		○		○	○
	伸び		○		○	○
	ブリネル硬さ	関連JISに従った。 (JIS Z2243:ブリネル硬さ試験-試験方法)	○		○	○
組織	フェライト・パーライト化、球状化の状況	顕微鏡にて組織観察を行った。黒鉛粒の形状分類は関連JISに従った（JIS G5502:球状黒鉛鉄品）。	○	△	○	○
費用・労力	対象技術の適用に伴って発生する追加的労力および費用	対象技術の適用に伴って発生する追加的労働人数および時間、薬剤の添加による薬剤コスト、電力・燃料の追加的消費量、追加的に必要となる資材コストなどを定量的に評価した。				○
作業安全性	対象技術の適用に伴って作業者が受ける影響	対象技術の適用に伴って作業者が強いられる危険作業の有無（人体に対する物理的損傷の可能性、呼吸器系に対する悪影響の可能性、視覚に対する悪影響の可能性など）、防護の必要性を定性評価した。				○
その他	二次生成物の発生状況	対象技術の適用によって発生するノロ等の二次生成物の発生有無、（発生する場合）除去方法を確認する。また、関係者ヒアリングにより処理方法および再利用の可能性を確認した。				○
	設備に関する制約	対象技術の適用を限定してしまう設備要件を定性的に評価した（客観的な論証ができないものは除く）。				○
	原材料に関する制約	対象技術の適用を限定してしまう原材料や含有成分の要件を定性的に評価した（客観的な論証ができないものは除く）。				○
	その他	対象技術の適用によってもたらされる物理的特性の変化等の副次的正/負効果を定性的に評価した。				○

（注）実証項目の列における記号は、各試験で実施した実証項目を示す。影響確認：第1ステップ試験、小型①：第2ステップ予備試験、小型②：第2ステップ本試験、大型：第3ステップ試験

（資料）三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

## IV-5. 実証試験結果

### 1. 第1ステップ

#### (1) 試験手順

小型炉にて溶解を行い、各種供試材の鋳込みを行うと共に製品の成分分析、機械的性質試験および組織観察を実施した。

使用材料には、リターン材（自社発生くず）、鉄スクラップ、カーボン、フェロシリコン、フェロマンガ、除滓材、球状化剤、接種剤を用いた（図表 43、図表 45）。2回に分けて試験を実施した（図表 46：2回目はマンガ含有量に乏しいスクラップだったため1回目と同等の含有量となるようにフェロマンガを添加）。

溶解材料を投入してから30分後に鉄スクラップを投入し始め、75分後には各種副資材も投入し終えた。その段階で元湯の成分分析を行った。その後、再度、溶湯を加熱し、95分後から成分調製、球状化处理、接種剤添加を行い、99分後に鋳込みを行った（図表 47）。

組織観察は、いずれもYブロックから採取したサンプルにて行った。エッチングにはナイトール液にてパーライトの腐食を行っている。いずれも100倍にて観察した。また、高張力鋼スクラップの溶解に関する作業上の問題、また溶解による溶解炉（小型炉）への影響を確認した。なお、実証試験に用いた溶解炉の構造上、球状化处理はサンドイッチ法にて実施している。

図表 43 使用材料一覧

	名称	主要構成成分					
		C	Si	Mn	P	S	Mg
溶解主原料	リターン材	3.7	2.6	0.3	0.02	0.01	-
	鉄スクラップ	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	-
溶解副資材	カーボン(C)	99.5	-	-	-	0.0	-
	フェロシリコン (Fe-Si:50-100)	0.2	75.2	-	0.0	0.0	-
	フェロマンガン (Fe-Mn)	6.6	0.0	73.7	0.1	0.0	-
	除滓剤	SiO <sub>2</sub> :73.5%、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :13.9%、K <sub>2</sub> O:3.84%、 Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :3.26%、CaO:1.45%、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :1.21%					
球状化処理	球状化剤	1.3	46.9	-	-	-	5.5
	カバー材	0.1	75.1	-	0.0	0.0	-
	カバー材	ほぼスチールスクラップと同様					
接種処理	接種剤	0.0	75.1	-	0.0	0.0	-

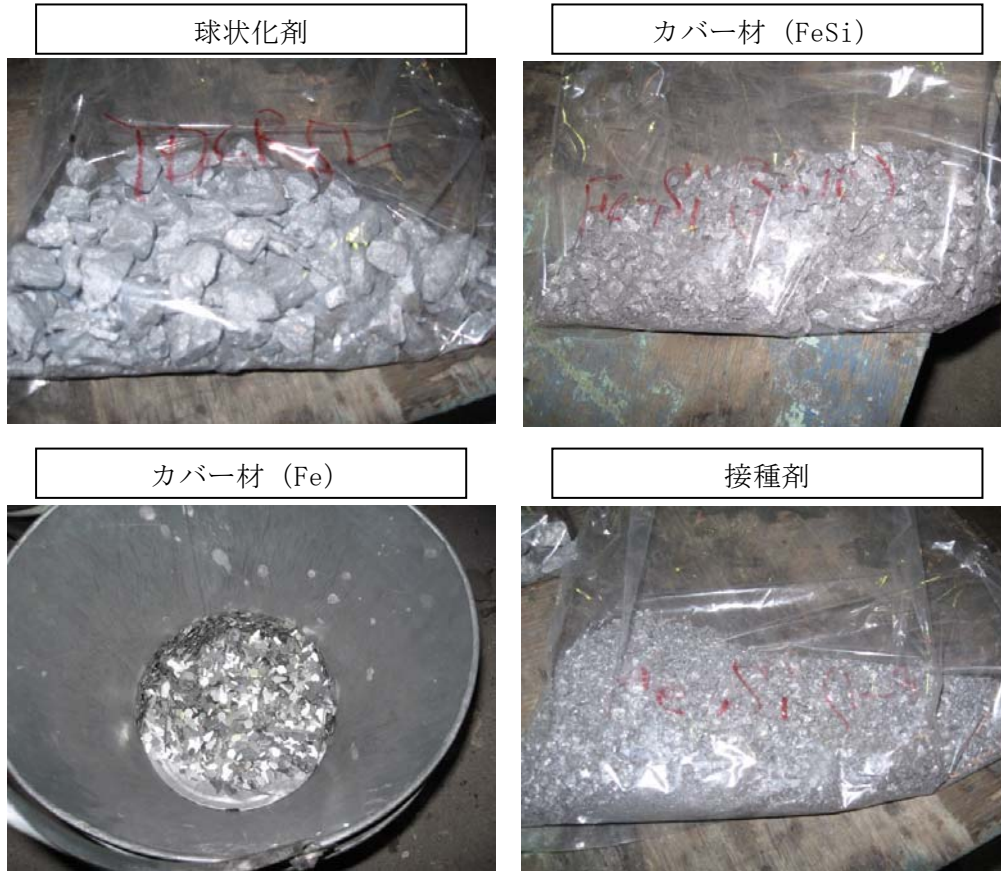
(資料) 特殊メタル作成

図表 44 使用材料の状況 (1)



(資料) 特殊メタル作成

図表 45 使用材料の状況 (2)



(資料) 特殊メタル作成



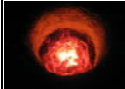




図表 46 投入材料一覧

第 1 回目		第 2 回目			
		重量 (kg)			
材料	FCD450 リターン材	30.0	FCD450 リターン材	30.0	
	高張力鋼 スクラップ	35.0	高張力鋼 スクラップ	35.0	
	カーボン(C)	1.5	カーボン(C)	1.7	
	フェロシリコン (Fe-Si:50-100)	0.2	フェロシリコン (Fe-Si:50-100)	0.2	
球状化剤	FeSiMg	0.9	フェロマンガン (Fe-Mn)	0.5	
	フェロシリコン (Fe-Si:3-10)	0.3	FeSiMg	0.9	
	カバー材	3.0	フェロシリコン (Fe-Si:3-10)	0.3	
接種剤	フェロシリコン (Fe-Si:1-3)	0.4	カバー材	3.0	
合計		71.3	接種剤	フェロシリコン (Fe-Si:1-3)	0.4
			合計		72.0

(注) 2回目はマンガン含有量に乏しいスクラップだったため1回目と同等の含有量となるようにフェロマンガンを添加

(資料) 特殊メタル作成

図表 47 実証試験のタイムテーブル (ステップ 1)

経過時間 (分)	0	10	20	30	40	50	60	70	75	90	95	97	98	99
電力ボリューム0→10	5→10	10	10	10	10	10	10	0	5	10	10	0	0	0
電力 (KW)	300 440 (MAX)	50	52	50	57.5	51	75	60	20	60	60	0	0	0
電圧 (V)	500 600 (MAX)	500	520	500	500	490	470	500	290	500	500	0	0	0
温度							1300°C	1417°C			1450°C	1510°C		1354°C
作業内容	溶解材料 (R材) 挿入、通電開始	余熱終了、電力ボリューム上げる		鉄スクラップ (SS材) 挿入開始、加炭材添加	加炭材添加	SS材挿入終了、加炭材添加	加珪材添加	溶け落ち	元湯分析、温度保持	再昇温	成分調整 FeMn0.5kgFeSi0.4kg	出湯、球状化処理	接種剤添加	鑄込み
詳細	リターン材全量挿入			C添加0.5kg	C添加0.5kg	C添加0.5kg	Fe-SiO <sub>2</sub> 2kg添加	分析・クサビ試験片を採取	ノロ取り	ノロ取り	電源ON Vol.10	電力OFF	接種剤を入れ棒でかき混ぜてからノロ取り、分析試料採取、温度測定	Yブロック、ノックオフ 供試材鑄込み
炉内状況	およそ8分目挿入	炉内リターン材全体が赤色化	炉下部のリターン材が溶け出し始める	炉内がほぼSSIに一杯になる、下部にR材が若干残っている状況	R材溶け落ち	SS挿入完了	湯面がサラツとし中央が膨れる、湯面に酸化膜が張っている状態	湯面の酸化膜がきれた。一度電源を落とすCの溶け残りをチェックする						
周辺状況				油付着のため大量の煙			周辺にノロ・Cの溶け残りが見える	このころになると煙も収まる			取鍋準備、球状化材等準備			
作業状況等														

(資料) 特殊メタル作成

## (2) 試験結果・考察

試験の結果、特に高張力鋼スクラップの溶解に関する作業上の問題は特に発生せず、また溶解炉への影響も特に認められなかった。高張力鋼を溶解材料としており、溶湯注のマンガン含有量が高くなるため、いずれの球状黒鉛鑄鉄も硬度が上昇している（図表 48、図表 50）。いずれも十分に黒鉛球状化が進んでいる（図表 50、図表 51）。

なお、参考として熱処理による機械的性質への影響を確認したところ、明らかにパーライトを分解していることが確認された（図表 52）。このことから機械的性質の改善に熱処理が一定の効果を有することが確認された。高張力鋼スクラップには、マンガン以外にもクロム等の成分混入も実際の場面では想定されるため、仮に後述するマンガンの除去技術を適用できない場合などには、こうした熱処理が鑄物の機械的性質を改善するために一定の効果を有すると考えられる。

図表 48 実証試験結果（第 1 ステップ：溶湯成分）

第 1 回目				第 2 回目			
	目標値 (%)	予想含有量 (%)	元湯結果 (%)		目標値 (%)	予想含有量 (%)	元湯結果 (%)
C	3.70	3.62	3.54	C	3.70	3.86	3.77
Si	2.60	2.61	1.10	Si	2.60	2.58	1.18
Mn	0.70	0.73	0.21	Mn	0.70	0.72	0.26
Mg	0.05	0.07	-	Mg	0.05	0.07	-
Cr	-	-	0.27	Cr	-	-	0.04

(資料) 特殊メタル作成

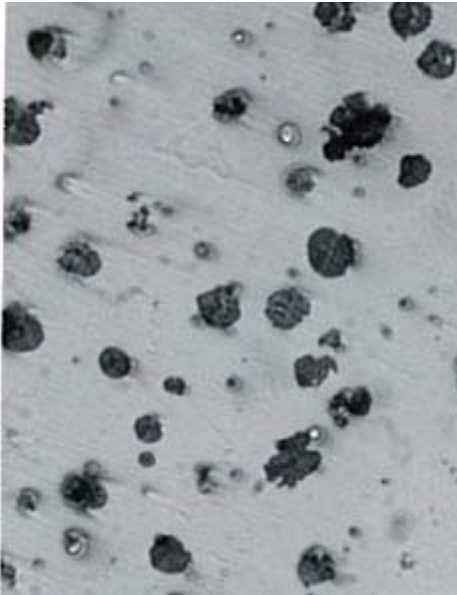
図表 49 実証試験結果（第 1 ステップ：機械的性質）

試験回数	熱処理有無	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	硬度 (HB)	シャルピー吸収エネルギー (J)			
						1	2	3	平均
第 1 回目	なし	409	857	12	229	2.9	3.8	3.6	3.4
	920℃ ×3hr	389	585	17	187	5.0	4.7	4.5	4.7
第 2 回目	なし	325	515	17	167	6.3	6.8	6.1	6.4
	920℃ ×3hr	312	464	21	156	15.7	13.3	16.5	15.2

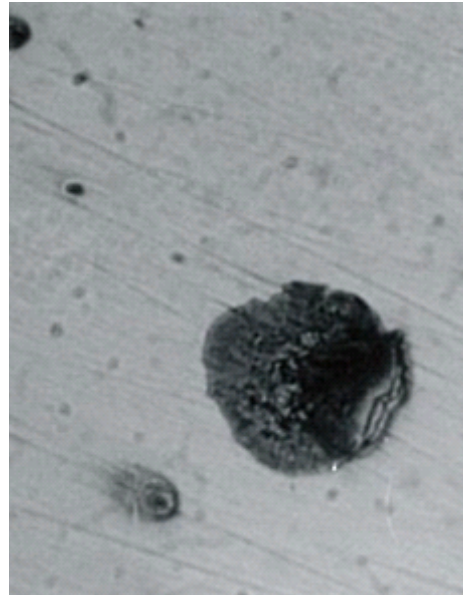
(資料) 特殊メタル作成

図表 50 実証試験結果（組織観察：第1回目）

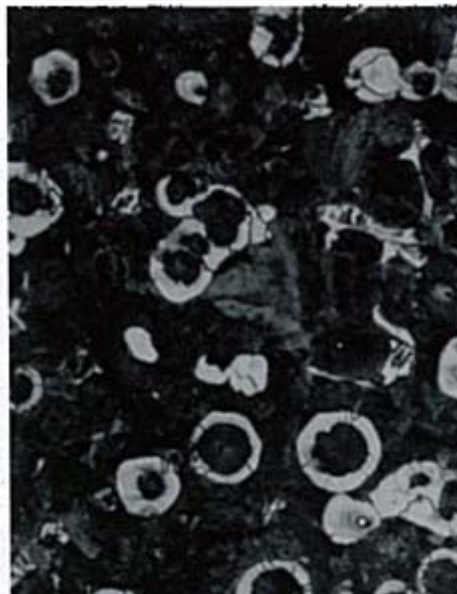
×100 ノーエッチング



×400 ノーエッチング



×100 エッチング



×400 エッチング

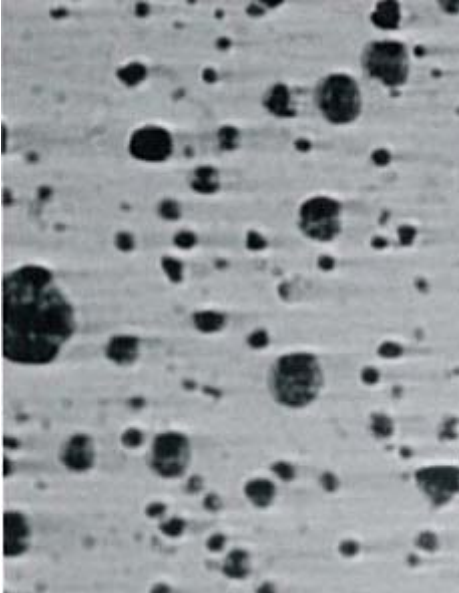


(注) AFSカメノコ供試材にて確認  
(資料) 特殊メタル撮影

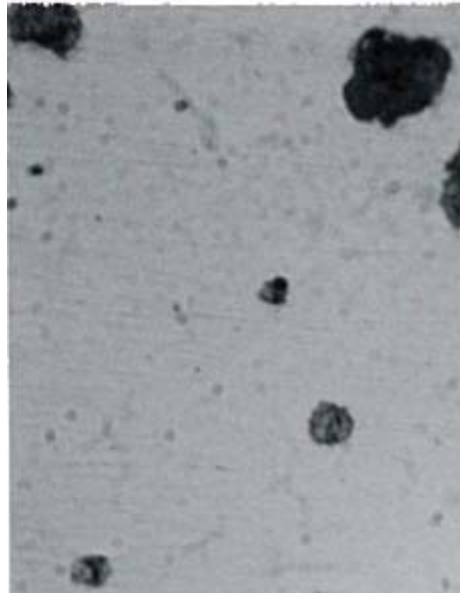


図表 51 実証試験結果（組織観察：第2回目）

×100 ノーエッチング



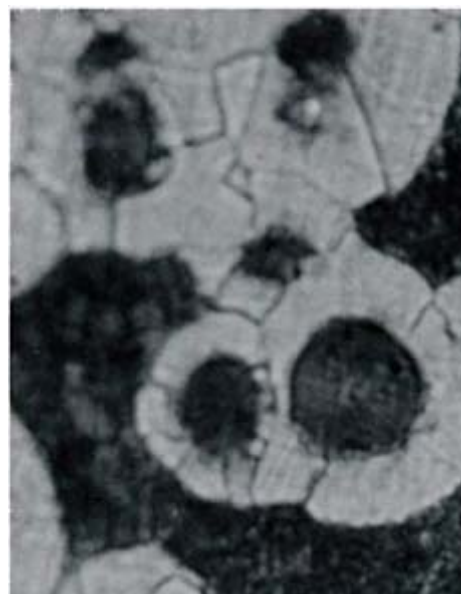
×400 ノーエッチング



×100 エッチング



×400 エッチング



(注) AFSカメノコ供試材にて確認  
(資料) 特殊メタル撮影

図表 52 実証試験結果（組織観察：熱処理有無による比較＝参考）

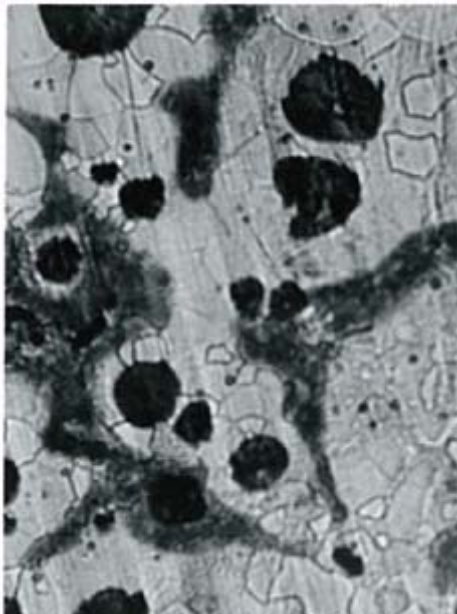
×100 エッチング熱処理なし



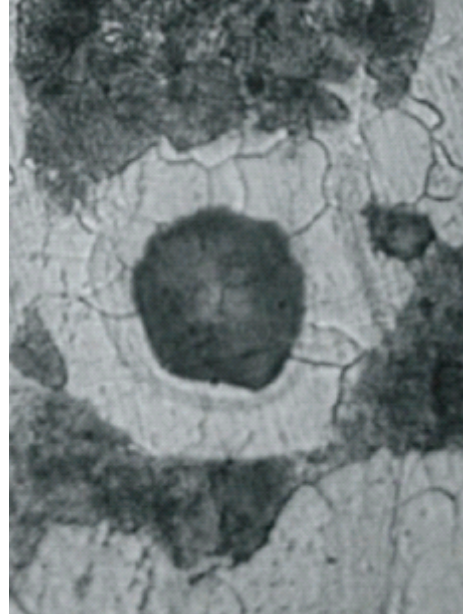
×400 エッチング熱処理なし



×100 エッチング熱処理あり



×400 エッチング熱処理あり



（注1） AFS カメノコ 供試材にて確認

（注2） 熱処理は920℃×3時間。炉冷により焼き鈍し実施。

（資料） 特殊メタル撮影

## 2. 第2ステップ（小型炉による試験）

### （1）全体概要

第2ステップでは小型炉を用いて実証試験を行った。まず実証候補とされた溶湯中マンガ制御技術4技術について試験を行い（予備試験）、そのうち有望と判断した2技術について改めて試験を行った（本試験）。

予備試験では、A：酸化鉄添加、B：硫酸ナトリウム添加、C：特殊接種・球状化剤添加、D：ケイ素添加の4技術を対象に試験を実施した。試験の結果、目標とするFCD450-10を満たす可能性があるのは、一部が球状化しているA：酸化鉄添加とD：ケイ素添加と判断された（図表 53）。

B：硫酸ナトリウム添加は、球状化していないことから球状黒鉛鑄鉄とみなすことは難しい上、別途、作業中に腐乱臭を感知していることから、有害な硫化水素を発生させている可能性もあり、第3ステップで実施する実証試験の候補から外した。なお、D：ケイ素添加は、黒鉛が球状化しているものの、パーライト率が高いことから、成分調整（炭素およびケイ素）が十分ではなかった可能性もあり、C：特殊接種及び球状化剤添加の要素も取り入れた複合技術とすることで、十分な黒鉛化を狙うこととした。

本試験では、A：酸化鉄添加、C+D：ケイ素添加及び特殊接種・球状化剤添加を対象に試験を実施した。試験の結果、目標とするFCD450-10を満たす可能性があるのは、A：酸化鉄添加と判断されたことから（図表 53）、本技術を第3ステップの実証対象技術の候補とした。

C+D：ケイ素添加及び特殊接種・球状化剤添加の場合、FCD500相当と考えられ、マンガ濃度の高さが引張強さ等の機械的性質に影響を与えている可能性がある。

図表 53 実証試験結果（第2ステップ）

		成分 (%)								物理的特性				状況	考察	
		C	Si	Mn	P	S	Mg	Bi	Ce	耐力 (MPa)	引張 (MPa)	伸び (%)	硬度 (HB)			
A	酸化鉄添加	元湯1	3.91	1.27	1.25	0.03	0.03	0.00							酸化鉄添加前	酸化鉄を添加することによりMn値も低下するが、CおよびSiも低下するため、予めCおよびSi成分を高めにする必要がある。また、添加するものが多いために各成分を薄めてしまうことにもなる。これは酸化鉄の酸化物の懸濁が球状化剤のMgに対して影響があることも考えられるため、球状化剤を多く添加する必要があるのではないかと考えられる。
		元湯2	3.78	0.60	0.75	0.04	0.03	0.00							酸化鉄2.8kg添加後	
		元湯3	3.65	0.19	0.44	0.03	0.03	0.00							酸化鉄1.4kg追加添加後	
		処理後	3.40	2.58	0.47	0.04	0.02	0.03							球状化くずれ (CV黒鉛化)	
B	硫酸ナトリウム添加	元湯	3.65	1.67	1.12	0.03	0.02	0.00							—	溶湯中にかなりS分が含まれているため完全に除去することは難しい。硫酸ナトリウムが低融点のため溶湯よりも上部で反応して液状化しているようである。
		処理後	3.54	1.79	0.39	0.03	0.58	0.02							球状化していない、片状黒鉛化していた	
C	特殊接種・球状化剤添加	元湯	3.97	1.45	1.16	0.03	0.16	0.00							—	効果は不明、当初Bi入りの球状化剤としていたか入手できないためBi入り接種剤を一次接種として同じ効果を狙った。S分の影響で球状化していない可能性がある。
		処理後	3.78	2.37	1.16	0.04	0.05	0.01							球状化していない、片状黒鉛化していた	
D	ケイ素添加 (成分適正化)	元湯	3.87	1.71	1.12	0.03	0.02	0.00							—	成分の調整 (CおよびSi) が十分でなかったため再度行う。①の試験とミックスした方法にて行うこととする。
		処理後	3.52	2.87	1.20	0.04	0.02	0.07							黒鉛は球状化しているが、パーライトが多い	

2. 本試験結果 (2技術を対象)

		成分 (%)								物理的特性				状況	考察	
		C	Si	Mn	P	S	Mg	Bi	Ce	耐力 (MPa)	引張 (MPa)	伸び (%)	硬度 (HB)			
A	酸化鉄添加	酸化鉄4.3kg添加	元湯1	4.28	1.72	1.22	0.01	0.10	0.00						元湯分析—社内分析による	ほぼFCD450相当材であると考えられる。前回との比較ではMnがやや高い数値であるが機械的性質および組織観察上はFCD450であると確認できる。
		酸化鉄0.7kg再添加	元湯2	4.10	0.94	0.71	0.01	0.06	0.00						元湯分析—社内分析による	
			処理後 (成分調整後)	3.95	2.74	0.69	0.02	0.02	0.05						外部依頼	
			実体分析 (参考)	3.80	2.74	0.68	0.02	0.01	0.05		317	482	16	167	外部依頼	
C + D	ケイ素添加及び特殊接種・球状化剤添加		元湯	4.15	1.63	1.17	0.08	0.02	0.00						元湯分析—社内分析機による	
			処理後 (成分調整後)	3.96	3.15	1.21	0.02	0.02	0.03	<0.0001	0.04				外部依頼	
			実体分析 (参考)	3.57	3.18	1.22	0.02	0.01	0.03	<0.0001	0.03	389	558	10	179	

(資料) 特殊メタル作成

## (2) 試験手順

小型炉にて溶解を行い、各種供試材の鋳込みを行うと共に製品の成分分析、機械的性質試験および組織観察を実施した。なお、機械的性質および組織観察は、予備試験で2技術に絞り込んだ後、本試験において実施した（簡易的な組織観察は予備試験にても実施）。

### <使用材料>

使用材料には、リターン材（自社発生くず）、高張力鋼スクラップ、カーボン、フェロシリコン、フェロマンガン、炭化ケイ素、硫化鉄、ミッシュメタル、硫酸ナトリウム、酸化鉄（ミルスケール）、除滓材、球状化剤、接種剤を用いた（図表 54）。

### <作業手順：予備試験>

#### A：酸化鉄添加

溶解材料を投入してから53分後に鉄スクラップの投入が終了し、65分後に元湯分析を実施した。75分後に酸化鉄を投入し、スラグの除去を行った上で、溶湯成分の分析を実施した。マンガン濃度の減少具合を確認の上、95分後に再度、酸化鉄を投入し、改めてスラグの除去を行った上で、溶湯成分の分析を実施した。108分後に成分調整を行い、110分後から接種、球状化処理を行い、115分後に鋳込みを行った（図表 55）。

#### B：硫酸ナトリウム添加

溶解材料を投入してから35分後に鉄スクラップの投入が終了し、45分後に元湯分析を実施した。50分後に硫酸ナトリウムを投入し、スラグの除去を行った上で、溶湯成分の分析を実施した。なお、スラグの粘性が低く、十分な除滓を実施することは困難と判断し、77分後に作業を中止し、溶湯の分析を実施した。95分後に成分調整を実施し、97分後から接種、球状化処理を行い、99分後に鋳込みを行った（図表 56）。

#### C 特殊接種・球状化剤添加

溶解材料を投入してから69分後に鉄スクラップの投入が終了し、硫化鉄を添加後、90分後に元湯分析を実施した。成分調整の上、120分後にミッシュメタル等を添加し、130分後から一次接種および球状化処理を行い、135分後に注湯に対する二次接種および鋳込みを行った（図表 57）。

#### **D：ケイ素添加**

溶解材料を投入してから35分後に鉄スクラップの投入が終了し、45分後にフェロシリコンを添加、50分後に元湯分析を実施した。成分調製の上、65分後から接種および球状化処理を行い、67分後に鋳込みを行った（図表 58）。

#### **<作業手順：本試験>**

#### **A：酸化鉄添加**

溶解材料を投入してから40分後に鉄スクラップの投入が終了し、55分後に元湯分析を実施した。73分後に酸化鉄を投入し、スラグの除去を行った上で、溶湯成分の分析を実施した。マンガン濃度の減少具合を確認の上、97分後に再度、酸化鉄を投入し、改めてスラグの除去を行った上で、溶湯成分の分析を実施した。114分後に成分調整を行い、120分後から接種、球状化処理を行い、125分後に鋳込みを行った（図表 59）。

#### **C+D：ケイ素添加及び特殊接種・球状化剤添加**

溶解材料を投入してから64分後に鉄スクラップの投入が終了し、75分後にフェロシリコンを添加後、78分後に元湯分析を実施した。成分調製の上、99分後から接種および球状化処理を行い、102分後に注湯に対する二次接種および鋳込みを行った（図表 60）。

図表 54 投入材料一覧

重量(kg)		予備試験				本試験	
		酸化鉄添加 (A)	硫酸ナトリウム 添加(B)	特殊接種・球状 化剤添加(C)	ケイ素添加 (D)	酸化鉄添加 (A)	ケイ素添加及び 特殊接種・球状 化剤添加(C+D)
材料	リターン材	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
	高張力鋼 スクラップ	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0
	カーボン(C)	1.8	1.2	1.2	1.8	1.8	1.7
	フェロシリコン (Fe-Si:50-100)	0.2	0.2	0.2	1.6	0.5	0.5
	フェロマンガ (Fe-Mn)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	炭化ケイ素(SiC)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	硫化鉄(FeS)			0.2		4.3	
	ミッシュメタル			0.008			
	硫酸ナトリウム (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )		3.5				
	酸化鉄 (ミルスケール)	4.3					
球状化剤	FeSiMg	0.9	0.9	0.9	0.9	1.1	0.9
	フェロシリコン (Fe-Si:3-10)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	スフェリックス			0.1			0.2
	カバー材	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
接種剤	フェロシリコン (Fe-Si:1-3)	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4
	ミッシュメタル			0.0			0.1
合計		77.3	75.9	72.6	74.4	77.8	73.5

(資料) 特殊メタル作成

図表 55 実証試験のタイムテーブル（ステップ2 予備試験/A：酸化鉄添加）

経過時間 (分)	0	7	15	20	50	52	45	60	69	72	80	90	100	110	120	130	133	135
電力ボリューム0→10	5	10	10	10	10	10	10	10	10	5	5	5	10	5	10	0	0	0
電力(KW)	300 440 (MAX)	50	52	50	57.5	55	55	51	60	20	20	20	60	20	60	0	0	0
温度																		
作業内容	溶解材料 (R材)挿入、通電開始	余熱終了、電力ボリューム上げる	SS材挿入	R材溶け落ち	SiC添加	C添加	C添加	FeMn添加	SS材挿入完了、RE添加	硫化鉄添加	硫化鉄添加	元湯分析	成分調整	再元湯分析	RE添加	出湯	1次接種剤、球状化剤添加	2次接種剤添加
詳細		SiC添加			SiC:0.3kg	Cおよそ半分添加	C残分添加	FeMn:0.8kg添加	ミッシュメタル:0.001% (およそ8g)添加	FeS:0.1kg	FeS:0.1kg				ミッシュメタル:0.001% (およそ8g)添加		Bi入り接種剤、球状化剤	FeSi添加
炉内状況																		
周辺状況																		
作業状況等																		

(資料) 特殊メタル作成



図表 56 実証試験のタイムテーブル（ステップ2予備試験／B：硫酸ナトリウム添加）

経過時間 (分)	0	10	20	28	30	35	40	45	50	53	55	57	77	80	85	95	97	98	99
電力ポ リューム0→ 10	5→10	10	10	10	10	10	10	10	5	5	10	5	5	5	10	10	0	0	0
電力(kW) 300 440 (MAX)		50	52	55	50	55	60	60	20	20	60	20	20	20	60	60	0	0	0
温度																			
作業内容	溶解材料 (R材)挿 入SS材 挿入、通 電開始	余熱終 了、電力 ポリュー ム上げる	R材溶け 始め	SiC添加	加炭材添 加	SS材挿 入完了、 加炭材添 加、FeMn 添加	溶け落ち	元湯分析	硫酸ナト リウム添 加	硫酸ナト リウム添 加完了	昇温	除滓作業 開始	除滓作業 終了	元湯分析	C値調整 のため添 加	成分調整 FeMn0.5k gFeSi0.4k g	出湯、球 状化処理	接種剤添 加	鑄込み
詳細				SiC:0. 3kg添加	C:0.6 kg添加	C:0.6kg 添加、 FeMn: 0.8kg添 加			Na2SO 4:3.5 kg			イシカワ ライトに て除去	除滓困難 のため途 中にて中 止						
炉内状況											低粘性の 生成物の 発生あり		溶湯にか なりの懸 濁物が見 られる		S値がか なり高い				
周辺状況																			
作業状況 等																			

(資料) 特殊メタル作成

図表 57 実証試験のタイムテーブル（ステップ2予備試験／C：特殊接種・球状化剤添加）

経過時間 (分)	0	10	20	35	40	43	53	60	65	75	80	83	88	90	95	99	102	105	108	110	112	115	
電力ホ リウム0→ 10	5→10	10	10	10	10	10	10	10	0	5	5	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	0	
電力(KW) 300 440 (MAX)		50	52	50	55	55	55	60	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	60	0	0	0
温度										1430													
作業内容	溶解材 料(R 材)挿 入、通 電開始	余熱終 了、電 力ホ リウム 上げる	R材溶 け始め	R材溶 け落ち	SiC半 分添加	C添加 完了、F eMn添 加	SS材挿 入完了	溶け落 ち	分析	酸化鉄 添加	酸化鉄 添加完 了	除滓作 業開始	除滓作 業完了	分析	再度酸 化鉄添 加	除滓作 業	除滓作 業完了	分析	成分調 整	出湯	接種、 球状化 処理	鑄込み 完了	
詳細					SiC: 0.3kg 添加	C:1.6 kg、Fe Mn:0. 8kg添 加				酸化鉄 2.8kg		スラグ クリン にて 除去			酸化鉄 1.5kg	スラグ クリン にて 除去			C:0.1 kg、Si: 1.2kg 添加				
炉内状況														Mn、 Si、C値 が低く なった					Mn、S i、C値 が低く なった				
周辺状況																							
作業状況 等																							



(資料) 特殊メタル作成

図表 58 実証試験のタイムテーブル（ステップ2 予備試験／D：ケイ素添加）

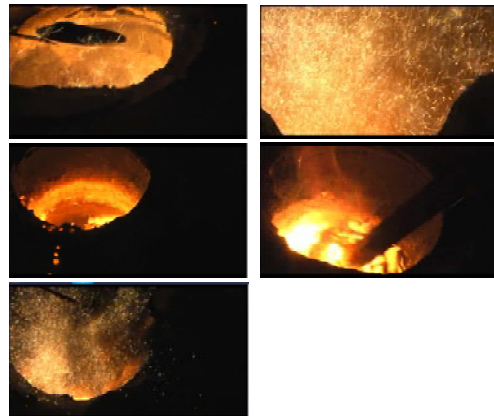
経過時間 (分)	0	5	20	25	30	35	40	45	50	55	62	65	67
電力ボ リューム0→ 10	5→10	10	10	10	10	10	10	0	5	10	10	0	0
電力(KW)	300 440(MAX)	50	50	55	55	55	60	60	20	60	0	0	0
温度									1420				
作業内容	溶解材料 (R材)SS 材挿入、通 電開始	余熱終了、 電力ボ リューム上 げる	スチールス クラップ(S S材)挿入 開始、加炭 材添加	加炭材添加	Mn添加	SS材挿入 終了	溶け落ち	Si添加	元湯分析、 温度保持	成分調整、 昇温	出湯	接種、球状 化処理	鑄込み
詳細			SiC:0.2 kg添加	C:1.4kg 添加	FeMn:0. 8kg添加		FeMn:0. 8kg添加	FeSi:0.2 kg添加		C:0.1kg、 FeSi:0.2 kg添加			
炉内状況													
周辺状況													
作業状況 等													

(資料) 特殊メタル作成

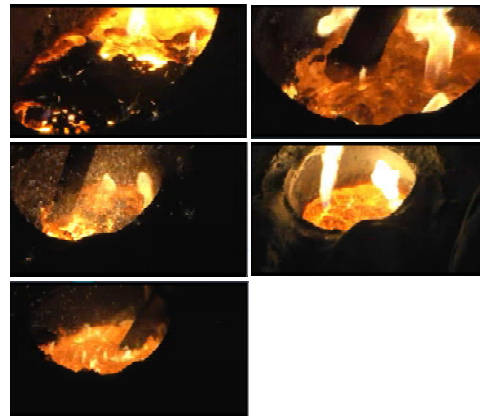
図表 59 実証試験のタイムテーブル（ステップ2本試験/A：酸化鉄添加）

経過時間 (分)	14:53	15:00	15:23	15:25	15:30	15:33	15:35	15:38	15:43	15:48	16:01	16:06	16:07	16:15	16:20	16:23	16:30	16:35	16:40	16:47	16:52	16:53	16:58
	0:00	0:07	0:30	0:32	0:37	0:40	0:42	0:45	0:50	0:55	1:08	1:13	1:14	1:22	1:27	1:30	1:37	1:42	1:47	1:54	1:59	2:00	2:05
電力 リュ-Δ0→ 10	5→10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	5	5	10	10	10	5	5	5	10	0	0	0
電力(KW)	50	50	52	50	55	55	55	55	55	60	20	20	20	20	20	20	20	20	20	60	0	0	0
温度												1430											
作業内容	溶解材 料(R材) 挿入、通 電開始	余熱終 了、電 力ボ リューム 上げる	R材溶 け落ち	SiC添 加、C添 加	FeMn 添加	SS材挿 入完了	C残分 添加完 了	C溶け 残りを 攪拌す る	FeSi添 加	分析	成分調 整	酸化鉄 添加	酸化鉄 添加完 了	除滓作 業開始	除滓作 業完了	分析	酸化鉄 再添加	除滓	再分析	成分調 整	出湯	接種、 球状化 処理	鑄込み 完了
詳細				SiC: 0.6kg 添加、 C:約 0.9kg 添加	FeMn: 0.8kg 添加		C: 0.9kg、F eMn: 0.8kg 添加		FeSi: 0.5kg 添加			酸化鉄 4.3kg		スラグク リンにて 除去			0.7kg 添加				C、Si分 添加		
炉内状況																							
周辺状況																							
作業状況																							

①酸化鉄添加直後



②酸化鉄反応時



③酸化鉄反応生成物除去作業



(資料) 特殊メタル作成

図表 60 実証試験のタイムテーブル（ステップ2本試験／C+D：シリコン添加及び特殊接種・球状化剤添加）

時刻	13:13	13:23	13:25	13:50	13:59	14:05	14:10	14:17	14:25	14:28	14:31	14:40	14:51	14:52	14:55
経過時間	0:00	0:10	0:15	0:37	0:46	0:48	0:57	1:04	1:12	1:15	1:18	1:27	1:38	1:39	1:42
電力ボリューム0→10	5→10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	10	10	0	0
電力(KW)	300 440(MAX)	50	50	50	50	50	55	55	60	60	20	60	0	0	0
温度											1420				
作業内容	溶解材料(R材)SS材挿入、通電開始	余熱終了、電力ボリューム上げる	スチールスクラップ(SS材)挿入開始	加炭材添加	加炭材添加	加炭材、炭化ケイ素添加	Mn添加	SS材挿入終了	溶け落ち	Si添加	元湯分析、温度保持	成分調整、昇温	出湯	接種、球状化处理	鑄込み
詳細							FeMn:0.8kg添加		FeMn:0.8kg添加	FeSi:1.5kg添加		C:0.1kg、FeSi:0.2kg添加			
炉内状況															
作業状況等	①参照						②参照		③参照	④参照		⑤参照		⑥参照	



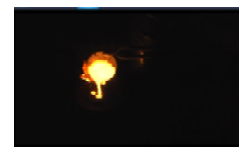
①



②



③



④



⑤



⑥

(資料) 特殊メタル作成

### (3) 試験結果・考察

#### ① 予備試験

##### A：酸化鉄添加

本技術の適用によって、溶湯中マンガンの濃度は低下し、組織観察では一部で球状化黒鉛を確認した。また、本技術の適用によって溶湯中ケイ素濃度も併せて低下することを確認した。本技術の適用によって、球状黒鉛鑄鉄を得られる可能性があるかと判断した。

酸化鉄の添加によりマンガンの濃度の低下を確認することができたが、目的外のケイ素まで濃度を低下させてしまうため、ケイ素濃度を調整するための追加的措置が必要になる。予めケイ素分を添加するなどの対応が必要になる。

マンガンの濃度およびケイ素濃度の低下は、酸化鉄による酸化が原因と考えられる。また、炭素濃度の低下は、酸化鉄の添加によって鉄分が溶湯に補給され、溶湯が希釈されたと考えることができる。

##### B：硫酸ナトリウム添加

本技術の適用によって、溶湯中マンガンの濃度が低下したものの、逆に硫黄濃度が上昇した。組織観察では片状黒鉛を確認した。本技術の適用によって球状黒鉛鑄鉄を得ることは難しいと判断した。

硫酸ナトリウムを添加し、硫化マンガンの除去することを想定していたが、反応生成物の粘性が極めて低く、除滓作業性が極めて低い。結果として、溶湯中に硫黄分が残留してしまい、球状化処理時に（球状化剤の主成分である）マグネシウムと優先的に反応することで、球状化が十分に進行しなかった可能性がある。また、炉材（小型炉では、マグネシアスピネル系炉材を使用）を一部侵食している上、作業時には硫化水素と思われる腐乱臭を感知していることから、実用的な溶湯中マンガンの制御技術にはなりにくいと判断した。

##### C：特殊接種・球状化剤添加

本技術の適用による溶湯中マンガンの濃度の変化は認められないが、組織観察では片状黒鉛を確認した。本技術単独で球状黒鉛鑄鉄を得ることは難しいと判断した。

作業プロセスで硫化鉄を添加するが、この効果はあまりなく、むしろ悪影響を与えている可能性がある。硫黄分の影響により、黒鉛の球状化が妨げられ、片状化している可能性がある。

硫化鉄の添加により、黒鉛球状化に対して悪影響を与えている可能性があることから、本試験時には硫化鉄の添加をせず、黒鉛粒数を増やし、かつフェライト率を高めることを目的として、別途、ケイ素を添加することとした(本試験では、D：ケイ素添加との複合技術として実証)。

#### D：ケイ素添加

本技術の適用による溶湯中マンガン濃度の変化は認められないが、組織観察では球状化黒鉛を確認した。本技術の適用によって球状黒鉛鑄鉄が得られる可能性があるかと判断した。

組織観察では高いパーライト率が確認され、成分調整が円滑に進まなかったことによる影響も想定される。このように黒鉛の球状化を確認することができたが、パーライト率が高いため、黒鉛粒数を増やすことを目的として、C：特殊接種及び球状化材を添加する技術との複合技術として実証することとした。

## ② 本試験

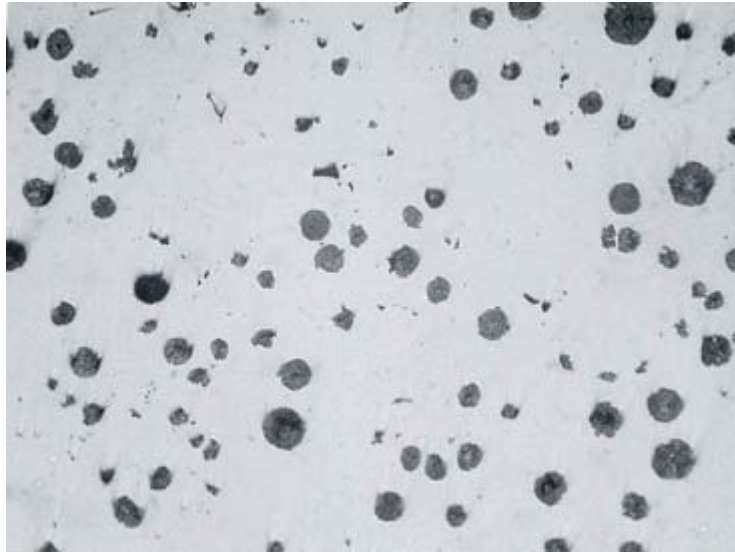
#### A：酸化鉄添加

本技術の適用によって、溶湯中マンガン濃度は低下し(図表 53)、組織観察で十分な黒鉛球状化を確認した(図表 61)。また、本技術の適用によって溶湯中ケイ素濃度も併せて低下することを確認した(途中段階で成分調製のためのフェロシリコンを添加)。また、機械的性質に関する試験結果は、耐力が317MPa、引張強さが482MPa、伸びが16%との結果が得られたことから、FCD450-10相当材であると判断した。また、FCD450-10相当材を得るためには、マンガン濃度を0.4%程度に制御することが一般的であるが、本試験でマンガン濃度が0.6%であってもFCD450-10相当材を問題なく作成できることを確認した。

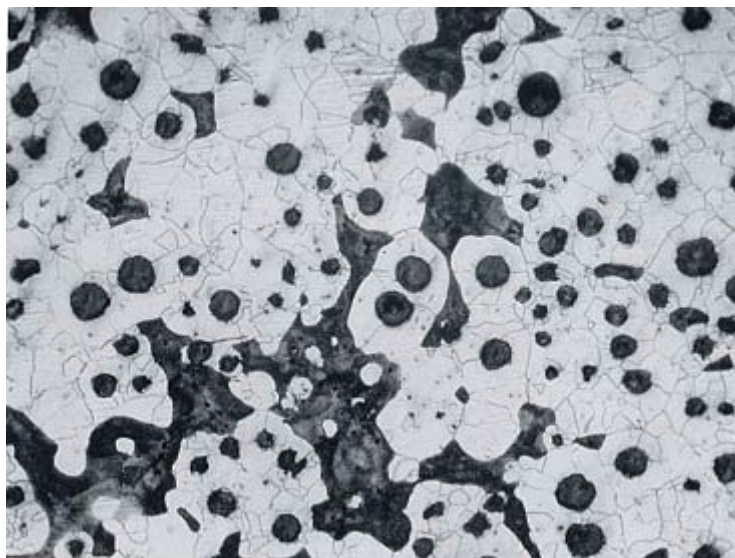
予備試験と同様、酸化鉄の添加によりマンガン濃度の低下を確認することができたが、目的外のケイ素まで濃度を低下させてしまうため、ケイ素濃度を調整するための追加的措置が引き続きの課題となっている。

図表 61 Yブロック組織観察（A：酸化鉄添加）

エッチングなし（×100）



エッチングあり（×100）



（資料）特殊メタル撮影

**C+D：マンガン／ケイ素比を調整しつつ特殊接種及び球状化処理を行う技術**

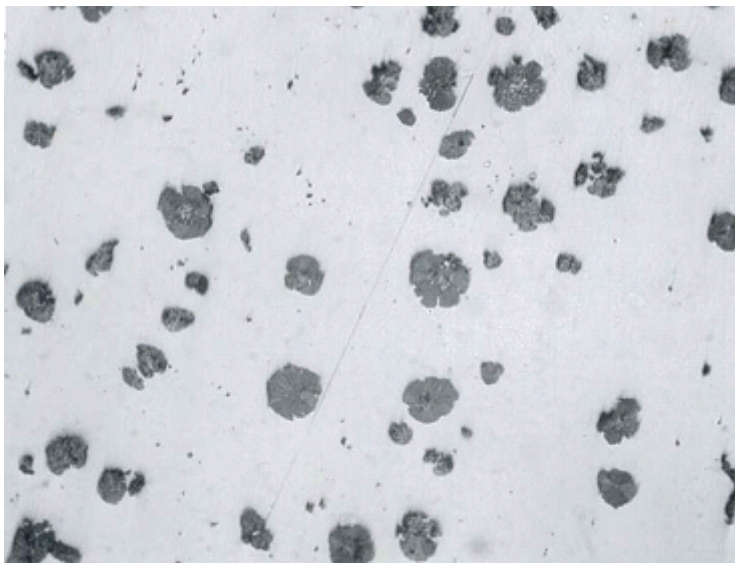
本技術の適用による溶湯中マンガン濃度の変化は認められないが（図表 53）、組織観察では球状化黒鉛を確認した（図表 62）。また、機械的性質に関する試験結果は、耐力が389MPa、引張強さが558MPa、伸びが10%との結果が得られたことから、FCD500相当材であると判断した。



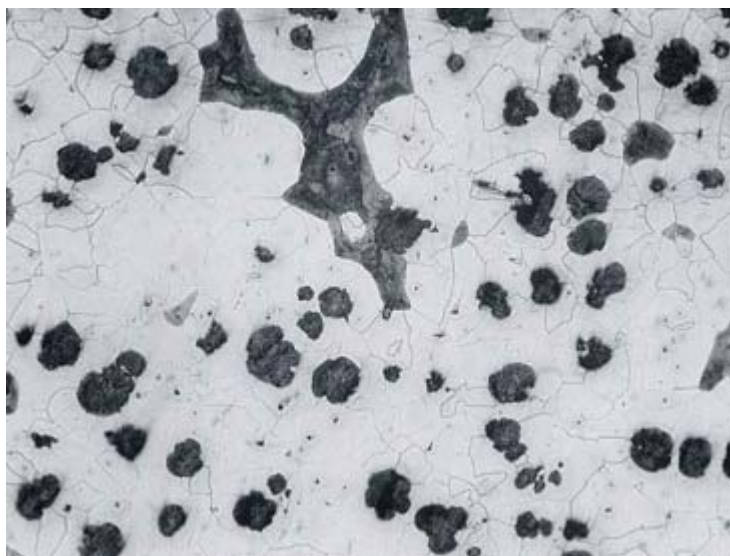
酸化鉄添加の技術と比較し、作業時間は当技術が短くて済むが、目標材質とするFCD450-10を再現することができなかった。そのため、第3ステップでは、酸化鉄添加を実証対象技術の候補とした。

図表 62 Yブロック組織観察（C+D：ケイ素添加及び特殊接種・球状化剤添加）

エッチングなし（×100）



エッチングあり（×100）



（資料）特殊メタル撮影

### 3. 大型炉による試験

#### (1) 試験手順

大型炉にて溶解を行い、各種供試材の鋳込みを行うと共に製品の成分分析、機械的性質試験および組織観察を実施した。

使用材料には、リターン材（自社発生くず）、鉄スクラップ<sup>20</sup>、カーボン、フェロシリコン、フェロマンガン、炭化ケイ素、硫化鉄、酸化鉄（ミルスケール）、除滓材、球状化剤、接種剤を用いた（図表 63）。

溶解材料を投入してから10分後に予熱を終了し、46分後に鉄スクラップの投入を、52分後には各種副資材も投入し終えた。その段階で元湯の成分分析を行った。その後、62分後に酸化鉄を添加し、72分後から随時除滓作業を開始した。80分後に再度の成分分析を実施し、88分後に酸化鉄を改めて添加した。98分後から再度の除滓作業を開始し、103分後に終了した。その時点で成分分析を実施した。107分後から3度目となる酸化鉄の添加を実施し、112分後から除滓作業を開始、113分後に終了した。成分分析を経た後、126分後に第1回目の出湯、接種及び球状化処理を実施した。10分程度で鋳込み作業を終了させ、140分後から第2回目の出湯、接種及び球状化処理を実施した。同様に10分程度で鋳込み作業を終了させた（図表 64）。

成分分析、機械的性質に関する試験および組織観察のほか、第3ステップでは、量産規模で溶湯中マンガン制御技術を適用した場合の費用・労力、作業安全性、二次生成物の発生量等について評価を行った。費用・労力については、対象技術の適用に伴って発生する追加的労力、対象技術の適用に伴って発生する追加的労働人数および時間、薬剤の添加による薬剤コスト、電力・燃料の追加的消費量、追加的に必要となる資材コストを定量的に評価した。作業安全性については、酸化鉄添加技術の適用に伴って作業者が受ける影響、また作業者が強いられる危険作業の有無（人体に対する物理的損傷の可能性、呼吸器系に対する悪影響の可能性、視覚に対する悪影響の可能性など）、防護の必要性を評価した。このほか、二次生成物の発生状況、スラグ等の再利用可能性、設備に関する制約等を確認、検討した。

---

<sup>20</sup> 入手の関係から高張力鋼スクラップではないものを使用。マンガン不足分はフェロマンガンにて調整

図表 63 投入材料一覧

		重量(kg)	小計(kg)	合計(kg)
材料	リターン材	500.0	1178.9	1214.0
	鉄スクラップ	550.0		
	カーボン(C)	27.0		
	フェロシリコン (Fe-Si:50-100)	13.0		
	フェロマンガ (Fe-Mn)	17.5		
	炭化ケイ素(SiC)	1.2		
	硫化鉄(FeS)	0.2		
	酸化鉄 (ミルスケール)	70.0		
球状化剤	FeSiMg	15.5	29.1	
	フェロシリコン (Fe-Si:3-10)	3.6		
	カバー材	10.0		
接種剤	フェロシリコン (Fe-Si:1-3)	6.0	6.0	

(資料) 特殊メタル作成

図表 64 実証試験のタイムテーブル (ステップ3)

実際(時間)	0:00	0:21	0:26	0:27	0:29	0:31	0:33	0:34	0:35	0:37	0:46	0:52	0:56	1:01	1:02	1:09	1:12	1:18	1:19	1:20	1:28	1:31	1:38	1:43	1:44	1:45	1:47	1:49	1:52	1:53	1:54	2:01	2:05	2:06	2:07	2:08	2:10	2:16	2:20	2:21	2:22	2:24	2:30							
電力(ボルト)	5→10	10	10	10	10	0	0	10	10	10	10	10	5	0	2	2	0	0	5	5	2	2	0	0	5	5	3	3	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
電力(KW)																																																		
温度															1428	1426		1426																																
作業内容	溶解材(R材)挿入、通電開始	余熱終了、電力ボルト上げる	R材溶け始め	FeMn添加	C添加	R材溶け落ち、FeMn残分添加	パワーオフ	FeSi添加	SS材挿入開始、C残分添加	パワーオン	SS材挿入完了	溶け落ち、SiC添加	成分分析	ノロとノロ	酸化鉄添加	酸化鉄追加完了	除滓作業開始	除滓作業完了	ガス分析サンプリング	成分分析	酸化鉄再添加開始	酸化鉄再添加完了	除滓開始	除滓完了	成分分析	ガス分析	酸化鉄再々添加開始	酸化鉄再々添加完了	除滓開始	除滓完了	ガス分析、成分分析	成分調整	ガス分析	1回目出湯	球状処理	接種処理	鑄込み開始	鑄込み完了	2回目出湯	球状処理	接種処理	鑄込み開始	鑄込み完了							
詳細		C:7kg添加		FeMn:9kg添加	C:13kg添加	FeMn残分添加		FeSi:13kg	C7kg添加						酸化鉄60kg添加			除滓材およそ10kg使用			酸化鉄30kg添加			除滓材およそ7kg使用				酸化鉄10kg添加			除滓材およそ4kg使用																			
炉内状況																																																		
周辺状況																																																		
作業状況																																																		

(資料) 特殊メタル作成

## (2) 試験結果・考察

### <溶湯成分>

溶湯注マンガン濃度は低下した（図表 65）。また、第2ステップ試験で確認されていたケイ素濃度の低下も同様に確認され、試験時にはフェロシリコンを添加することで成分調製を行った。本技術の課題として、マンガンのみならず、ケイ素も同時に除去してしまう点が課題となっている。

また、酸化鉄を添加することで、溶湯中の酸素濃度（全酸素量なので酸化鉄状態の酸素も含む）は上昇することが確認された。溶湯中の酸素は、マンガンやケイ素等と結合することで消費され、スラグとして除去されることになる。なお、接種・球状化処理の際には、接種・球状化剤に含まれるマグネシウムと優先的に反応してしまい、黒鉛球状化を阻害してしまう可能性があるため、過剰な酸化鉄の投入には注意を要する。

図表 65 実証試験結果（第3ステップ：成分分析）

	成分分析(%)							備考
	C	Si	Mn	P	S	Mg	O	
元湯分析	3.66	1.92	1.28	0.02	0.02	-	-	54分後
酸化鉄添加後①	3.60	1.22	0.87	0.02	0.02	-	0.02	1時間19分後
酸化鉄添加後②	3.55	0.85	0.66	0.02	0.01	-	0.01	1時間45分後
酸化鉄添加後③	3.57	0.70	0.58	0.02	0.01	-	0.00	1時間54分後
酸化鉄添加後④	3.59	1.46	0.61	0.03	0.02	-	0.01	2時間5分後、出湯直前
接種・球状化処理後 (1回目／取鍋2回分)	3.47	2.61	0.62	0.03	0.01	0.06	-	球状化剤添加量1.4%
接種・球状化処理後 (2回目／取鍋2回分)	3.46	2.54	0.61	0.03	0.01	0.05	-	球状化剤添加量1.15% (通常時と同様の添加量)
通常(FCD450相当元湯)	-	-	-	-	-	-	0.00	出湯直前

(資料) 特殊メタル作成

### <機械的性質>

耐力は324.9～358.2MPa、引張強さは474.6～522.6MPa、伸びは14.0～24.0%である（図表 66）。目標材質であるFCD450-10の基準から外れる値も得られているが、概ね基準範囲内に収まっており、FCD450-10相当材をみなすことができる。

また、第2ステップの実証試験同様、マンガン濃度が0.6%であるにも関わらず、FCD450-10相当材を問題なく作成できることを確認した。

図表 66 実証試験結果（第3ステップ：機械的性質）

チャージ No.	サンプルNo.	供試材 状態	耐力(MPa)	引張(MPa)	伸び(%)	硬度(HB)	備考
参考	FCD400 JIS規格		>250	>400	>18	130~180	フェライト
参考	FCD450 JIS規格		>280	>450	>10	140~210	フェライト
参考	FCD500 JIS規格		>320	>500	>7	150~230	フェライト+パーライト
C237 (1回目出湯分)	1	Yブロック	325	484	18	156	注湯開始前(出湯後4分)
	2	ノックオフ	339	523	19	170	注湯開始前(出湯後4分)
	3	ノックオフ	335	479	18	159	7枠目(出湯後7分)
	4	ノックオフ	358	481	15	159	16枠目(出湯後9分)
C238 (2回目出湯分)	5	Yブロック	336	482	18	156	注湯開始前(出湯後4分)
	6	ノックオフ	326	509	24	163	注湯開始前(出湯後4分)
	7	ノックオフ	333	477	15	163	7枠目(出湯後7分)
	8	ノックオフ	349	475	14	159	16枠目(出湯後9分)

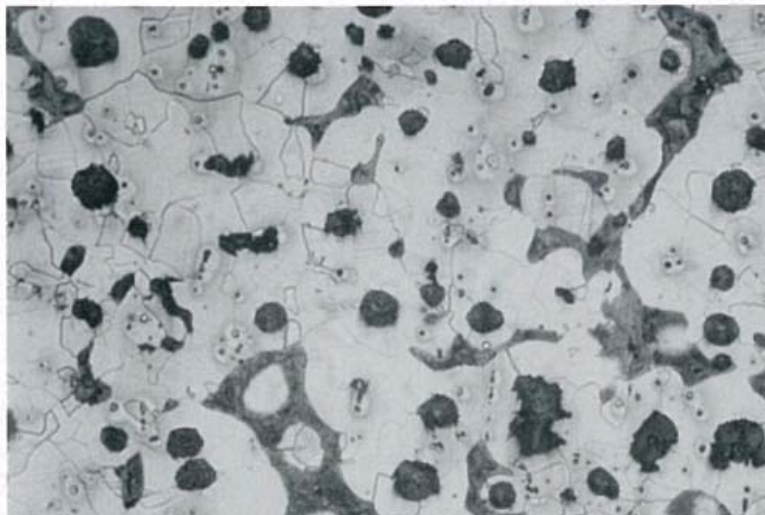
(資料) 特殊メタル作成

#### <組織観察>

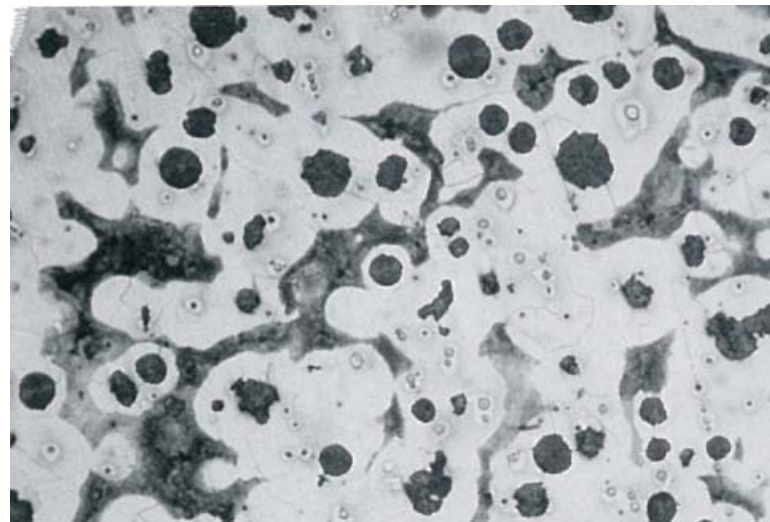
いずれのサンプルについても十分な黒鉛球状化を確認できた（図表 67、図表 68）。鋳型の形状によっては、肉厚部と薄肉部とで組織に違いが出てくる可能性あることから、実際にバルブ部品の鋳型に鋳込み、2ヶ所の組織を観察したが、共に十分な黒鉛球状化を確認することができた（図表 69）。

図表 67 試験結果 (第3ステップ: 組織観察1)

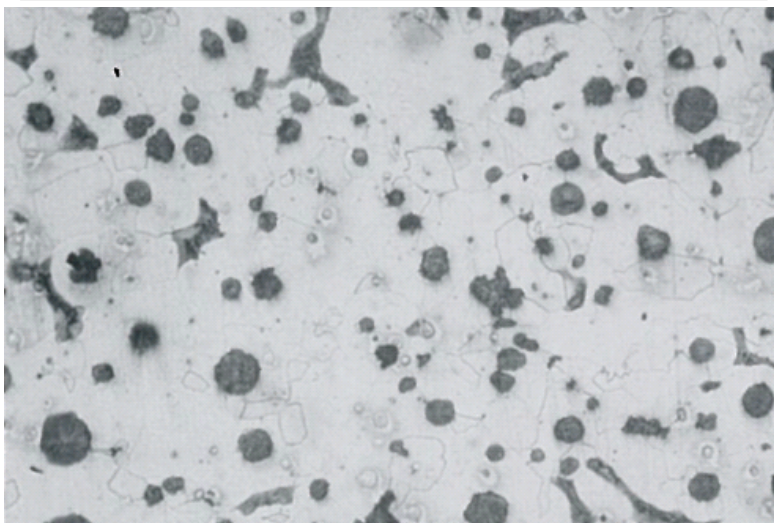
1 サンプル(×100、ナイトールエッチング)



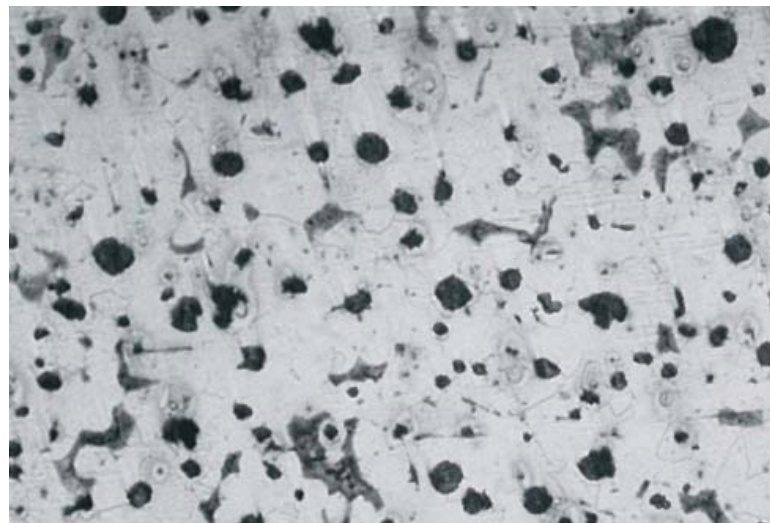
2 サンプル(×100、ナイトールエッチング)



3 サンプル(×100、ナイトールエッチング)



4 サンプル(×100、ナイトールエッチング)

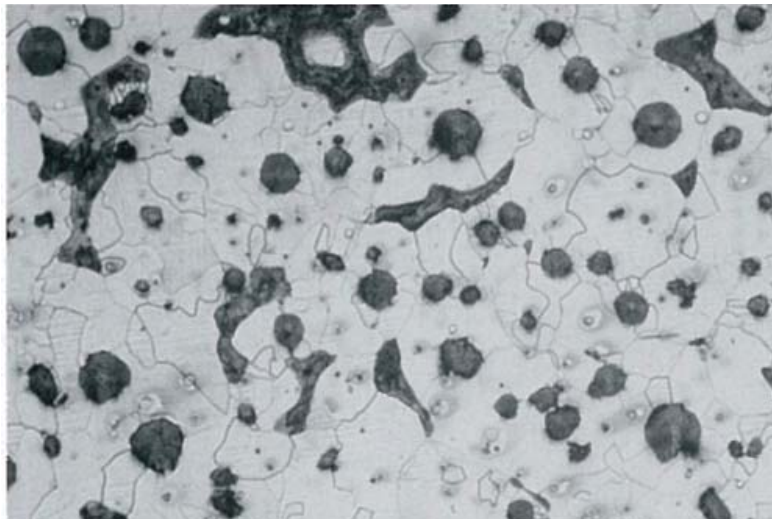


(注) サンプル番号は図表 66と一致。

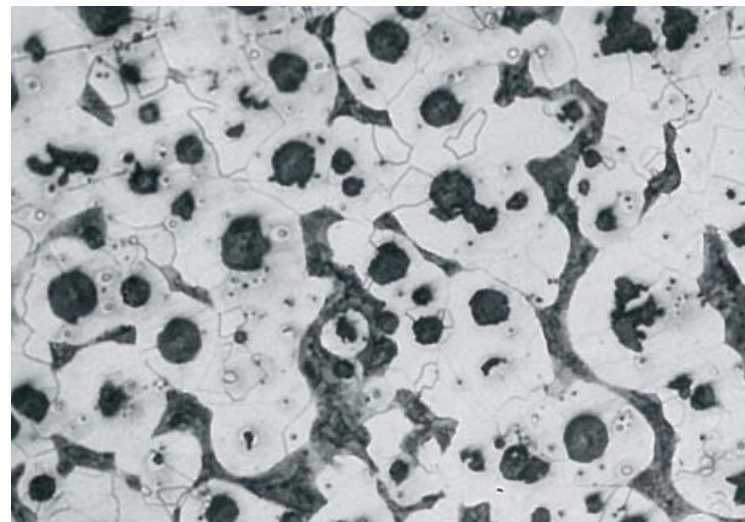
(資料) 特殊メタル撮影

図表 68 試験結果 (第3ステップ: 組織観察2)

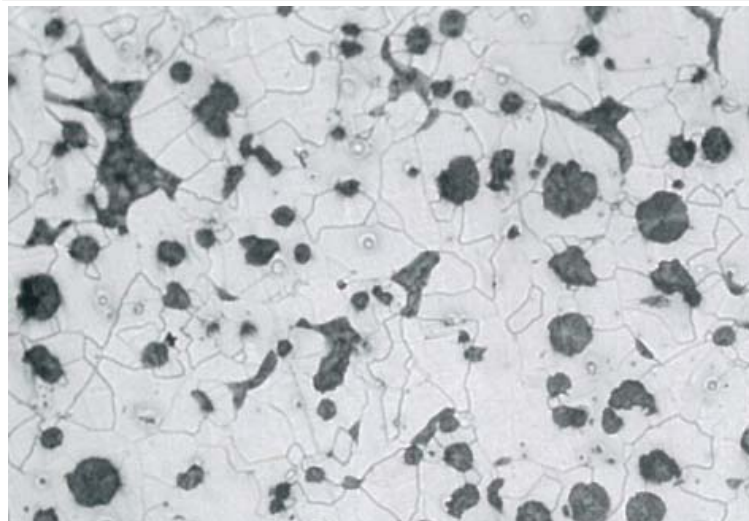
5 サンプル(×100、ナイトールエッチング)



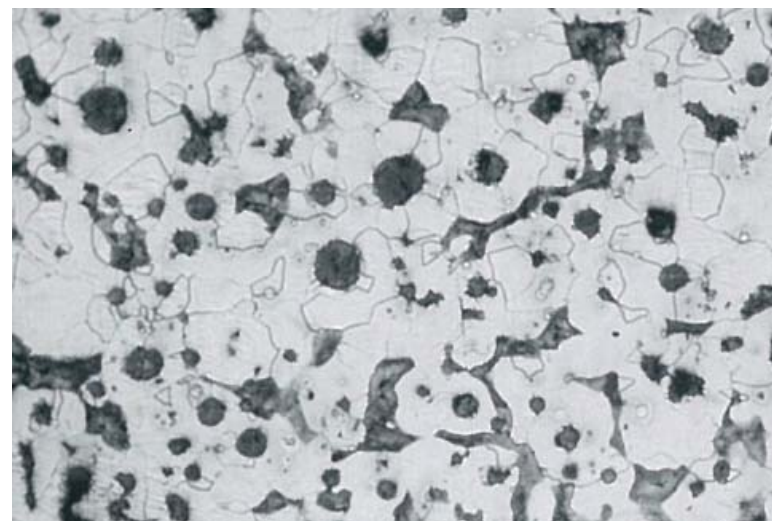
6 サンプル(×100、ナイトールエッチング)



7 サンプル(×100、ナイトールエッチング)



8 サンプル(×100、ナイトールエッチング)

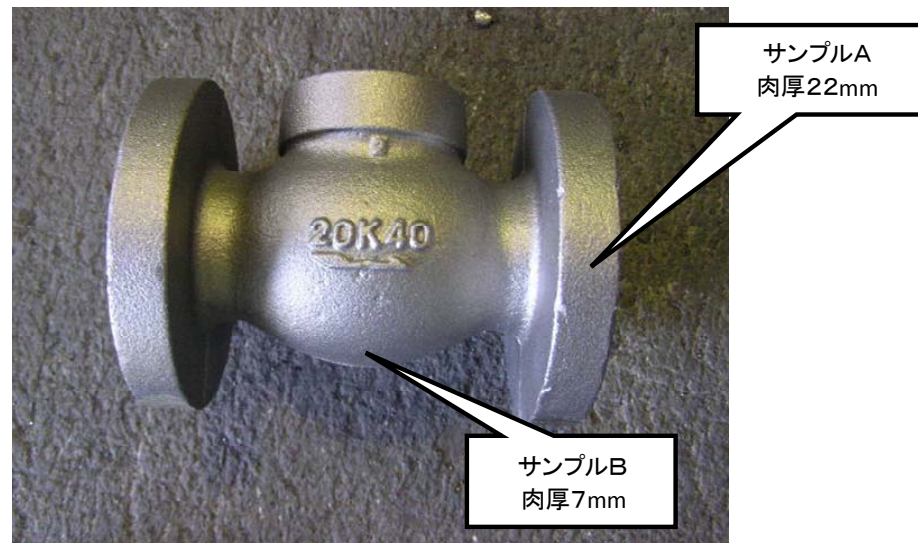


(注) サンプル番号は図表 66と一致。

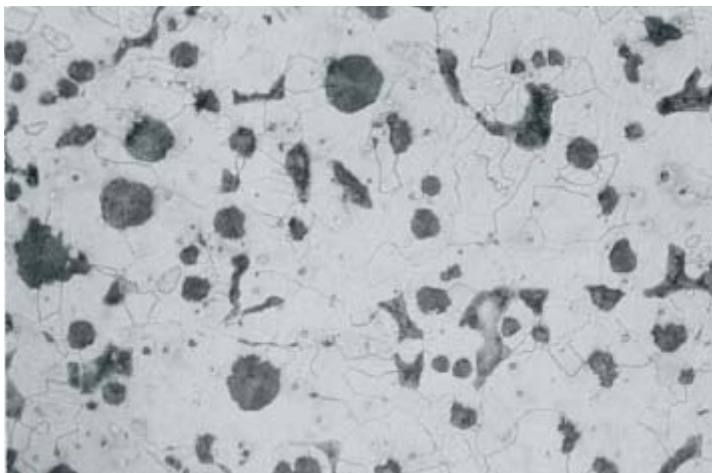
(資料) 特殊メタル撮影



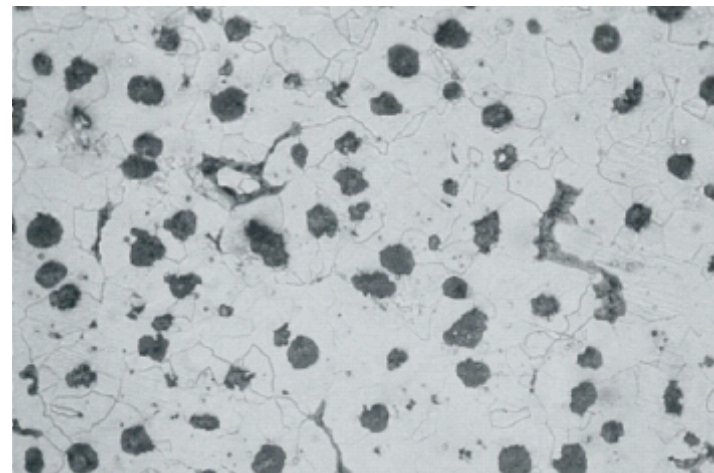
図表 69 試験結果 (第3ステップ: 組織観察3)



サンプルA組織 (×100、ナイトールエッチング)



サンプルB組織 (×100、ナイトールエッチング)



(資料) 特殊メタル撮影

## <費用・労力>

通常時（繁忙期および閑散期）と比較して、酸化鉄添加時の作業時間は倍近く増えている（図表 70）。しかし、本試験時には溶湯中のマンガン濃度を確認しながらの試行錯誤を伴う作業であったことから、真に必要と考えられる作業時間のみを対象に計上した場合、通常時が73～81分程度（1回の溶解作業あたり）であるのに対し（図表 70、図表 72）、107分程度となる（図表 71）。通常時平均と比較して、1.4倍ほどの時間増となる。30分ほどの増加に相当する。酸化鉄添加および除滓作業の追加が、作業時間の増加要因になっていると考えられる。

また、溶湯1トンあたりの消費電力でみた場合、通常時は5.9～6.1kWhであるのに対し、7.4kWhとなる（図表 70）。通常時平均と比較して、1.2倍ほどの消費電力量増となる。作業時間の増加が溶解炉の稼働時間を増加させ、消費電力の増加に結びついていると考えられる。

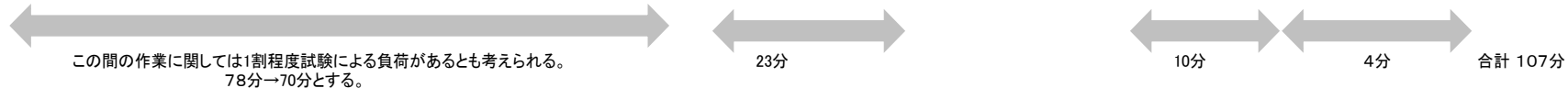
**図表 70 実証試験結果（第3ステップ：作業時間・消費電力）**

	作業時間			消費電力量	
	時間 (1回目出湯)	時間 (2回目出湯)	合計時間	消費電力量 (×100kwh)	1トン当たりの 消費電力量
2008年2月繁忙期	56.2	16.8	73.0	9.6	6.1
2009年2月現状	64.5	16.3	80.8	9.1	5.9
試験チャージ(酸化鉄添加3回)	126.0	14.0	140.0	8.9	7.4
試験チャージ(酸化鉄添加1回の想定)	93.0	14.0	107.0	—	—

- (注1) 時期によって生産状況が異なることから繁忙期（2008年2月）及び閑散期（2009年2月）時点の消費電力および所用時間を整理
- (注2) 酸化鉄添加時には試行錯誤しながら作業であったため、真に必要と考えられる時間のみを対象として計上している（酸化鉄添加1回の想定）。
- (資料) 特殊メタル作成

図表 71 実証試験結果（第3ステップ：酸化鉄添加技術を適用した場合の作業時間）

時刻	0:00	0:21	0:26	0:27	0:29	0:31	0:33	0:34	0:35	0:37	0:46	0:52	0:56	1:01	1:02	1:09	1:12	1:18	1:19	1:20	1:28	1:31	1:38	1:43	1:44	1:45	1:47	1:49	1:52	1:53	1:54	2:01	2:05	2:06	2:07	2:08	2:10	2:16	2:20	2:21	2:22	2:24	2:30				
電力(ボルト)	5→10	10	10	10	10	10	0	0	10	10	10	10	5	0	2	2	0	0	5	5	2	2	0	0	5	5	3	3	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
電力(KW)																																															
温度												1428			1426																																
作業内容	溶解材料(R材)挿入、通電開始	溶解終了、電力ボルトアップ	R材溶け始め	FeMn添加	C添加	R材溶け落ち、FeMn残分添加	パワーオフ	FeSi添加	SS材挿入開始、C残分添加	パワーオン	SS材挿入完了	溶け落ち、SiC添加	成分分析	ノロと	酸化鉄添加	酸化鉄添加完了	除滓作業開始	除滓作業完了	ガス分析サンプルング	成分分析	酸化鉄再添加開始	酸化鉄再添加完了	除滓開始	除滓完了	成分分析	ガス分析	酸化鉄再々添加開始	酸化鉄再々添加完了	除滓開始	除滓完了	ガス分析、成分分析	成分調整	ガス分析	1回目出湯	球状処理	接種処理	鑄込み開始	鑄込み完了	2回目出湯	球状処理	接種処理	鑄込み開始	鑄込み完了				
詳細		C:7kg添加	FeMn:9kg添加	C:13kg添加	FeMn残分添加			FeSi:13kg添加	C7kg添加						酸化鉄60kg添加				除滓材およそ10kg使用		酸化鉄30kg添加				除滓材およそ7kg使用			酸化鉄10kg添加				除滓材およそ4kg使用															
炉内状況																																															
周辺状況																																															
作業状況																																															



(資料) 特殊メタル作成

図表 72 実証試験結果（第3ステップ：通常時の作業時間）

経過時間 (分)	0:00	0:05	0:10	0:20	0:25	0:30	0:31	0:45	0:50	0:53	0:58	1:00	1:01	1:02	1:03	1:05	1:10
電力ボリューム 10→10	0	3	7	10	10	10	10	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0
電力(KW)																	
温度																	
作業内容	溶解材料R材 (押し湯)挿入、通電開始	余熱終了、電力 ボリューム上げる	C添加	R材溶け 始め	R材挿入 開始	R材(湯 道)挿入 完了	SS材挿 入開始	SS材挿 入完了	分析	成分調 整、除滓 作業	出湯温 度調整	出湯	球状化 反応	反応取 鍋から 注湯取 鍋あけ かえ	接種及 び除滓 作業	注湯作 業	注湯作 業完了
詳細					C半分添 加、FeS i添加	C残分添 加											
炉内状況						溶湯面 が確認 できる			ノロが浮 いてくる								
周辺状況																	
作業状況等																	

(資料) 特殊メタル作成

<作業安全性>

酸化鉄添加時には、激しく火花が飛び散るものの、通常時と比較して特に大きく安全性が損なわれるということはない（図表 73）。また、特に人体に悪影響を与えるようなガス等の異臭も確認するには至っていない。

図表 73 実証試験結果（第3ステップ：作業環境の様子）

酸化鉄添加時の様子①



酸化鉄添加時の様子②



除滓作業の様子（試験時）



除去されたスラグの様子



除滓作業の様子（通常時）



（資料）特殊メタル撮影

## <二次生成物>

通常時と異なり、酸化鉄添加時には極めて大量のスラグが発生する(図表 74、図表 75)。通常時は1～3kg程度(溶解1回あたり)であるのに対し、除滓剤による増分を除いたとしても試験時には80kg弱のスラグが発生している(図表 76)。作業員の作業負担を増大させると共に廃棄物処理費用の増加を招くおそれがある。

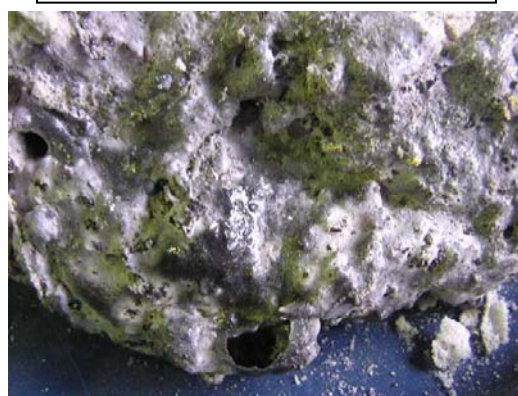
試験時には、除滓剤による増分を含めて100kg近いスラグが発生しており、このスラグ中の酸化マンガン濃度は約11%であることから、11kgほどの酸化マンガンがスラグ中に含まれることになる。金属マンガンを換算すると7kg程度となる<sup>21</sup>。鉄スクラップ中にクロムなどが混入している場合、鉄との分離が難しいことから、スラグからフェロマンガン(FeMn)等を得ようとする場合、その不純物除去は容易ではないことが予想される。

**図表 74 実証試験結果(第3ステップ:発生スラグの外観)**

通常時FCD450-10のスラグ



通常時FCD450-10のスラグ(拡大)



試験時FCD450-10のスラグ



試験時FCD450-10のスラグ(拡大)



(注) 「試験時のFCD450-10のスラグ」はドラム缶に入っていることに注意。

(資料) 特殊メタル撮影

<sup>21</sup>仮に金属マンガンの価格を300円/kgと仮定した場合、ここから金属マンガンを取り出す費用を2,100円に収めることができれば、リサイクルの採算を確保することができることになるが、現状の精錬コストおよび金属マンガンの相場等を勘案すれば、採算性の確保は極めて困難である。

図表 75 実証試験結果（第3ステップ：通常時との発生スラグ比較）



(資料) 特殊メタル撮影

図表 76 実証試験結果（第3ステップ：スラグ発生状況）

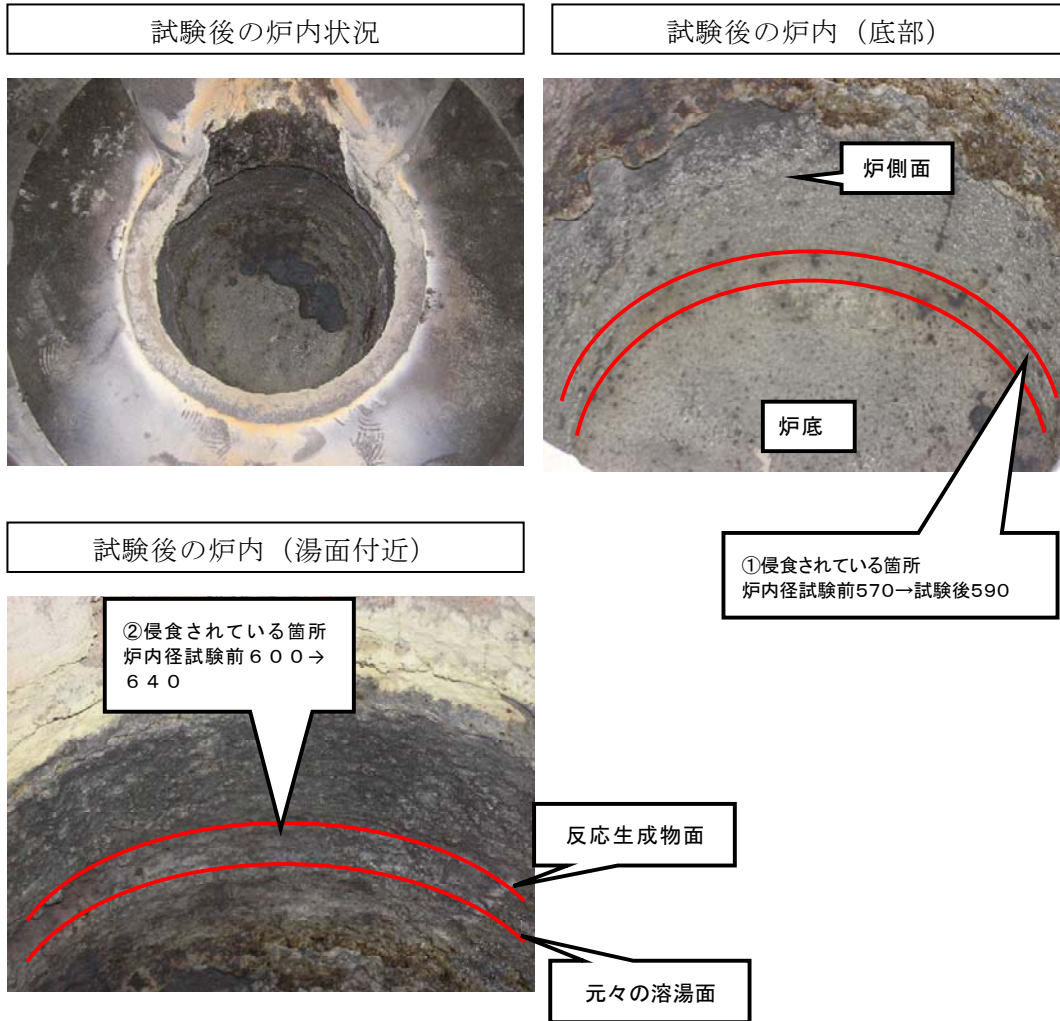
		除滓材使用量(kg)	除滓量(kg)	純粋なスラグ量(kg)	作業時間	備考	成分(%)			
							Fe	SiO <sub>2</sub>	MnO <sub>2</sub>	
通常時	2009.2.24	炉内	0.4	3.5	3.1	2分	1回にて除去	4.30	56.20	1.46
		注湯取鍋	1.5	3.4	1.9	2分程度	2回に分けて除去			
本試験時	2009.2.25	炉内	20.0	96.0	76.0	30~40分程度	20~30回程度にて除去	33.30	39.20	11.60
		注湯取鍋	1.5	3.6	2.1	2分程度	2回に分けて除去			

(資料) 特殊メタル作成

### <設備制約>

シリカ（二酸化ケイ素）を主成分とする大型炉では、酸化鉄添加時に炉底部および湯面部で侵食が確認された（図表 77）。マンガンとケイ素の酸化物標準生成自由エネルギーを比較すると、マンガンよりもケイ素が酸化しやすいため、シリカを炉壁材とする溶解炉では、溶湯にマンガンが含まれることで侵食を受けることになる。

図表 77 実証試験結果（第3ステップ：溶解炉の侵食状況）



（資料）特殊メタル撮影

<原材料制約・その他>

特に原材料に関する制約は確認されなかった。



## IV-6. 採算性試算結果

### 1. 試算の考え方

本調査では、銑鉄希釈によらない溶湯中マンガ制御技術として、酸化鉄添加によるマンガ除去技術に注目しており、量産規模実証試験では十分に品質基準を満たすことを確認した（自動車部品に多いFCD450-10をほぼ満たす）。しかし、本技術が銑鉄希釈よりも採算性に劣っている場合、生産コストの上昇を抑えるという当初目標を達成することができず、溶湯中マンガ制御技術としての有用性にも乏しいことから、本技術の採算性を確認し、その有用性および今後の改善事項を検討する。

本試算では、マンガン濃度の高いスクラップを利用せざるを得ない場合があると仮定し、労力および資材を追加的に投入することで、通常と同様の鑄鉄鑄物を得られるケースを想定した。

### 2. 試算の方法

鑄鉄鑄物の生産に必要なランニングコストを対象として、生産原価に相当するコストを試算した。他技術との比較を容易にするため、鑄鉄鑄物トンの生産に必要なコストとして試算した。ランニングコストには、各種の鉄源購入コスト、溶湯成分の調整の用いる各種資材コスト、除滓材コスト、球状化剤および接種剤のコスト、誘導炉の稼動に必要な電力コスト、作業員の作業コスト（人件費）が含まれる。

試算の対象には、酸化鉄の添加による溶湯中マンガ制御技術のほか、参照値として通常作業および銑鉄希釈の場合も含めた。なお、本調査の前提から外れるが、仮にマンガン含有量が既知であり、また含有率が低いスクラップを入手することができた場合のコストについても参考までに試算している。

試算に用いたデータの前提を図表 78に示す。

図表 78 試算の前提データ（各種原材料関連）

項目		機能単位	単価 (円)	投入量(kg)				
				通常 1500Kg	銑鉄希釈 1500Kg	SS鉄希釈 1500Kg	脱マンガン試験溶 解1200Kgより想 定する溶解1200	
原材料費	材料	高張力鋼 スクラップ	40	0.0	100.0	100.0	550.0	
		鉄スクラップ	40	600.0	0.0	500.0	0.0	
		銑鉄	90	0.0	500.0	0.0	0.0	
		リターン材	40	900.0	900.0	900.0	500.0	
		カーボン(C)	170	28.0	9.0	28.0	28.0	
		フェロシリコン (FeSi)	190	2.5	2.0	2.5	25.3	
		フェロマンガ (FeMn)	600	0.0	0.0	0.0	0.0	
		酸化鉄 (ミルスケール)	7	0.0	0.0	0.0	72.0	
		炭化ケイ素 (SiC)	313	0.0	0.0	0.0	1.2	
		硫化鉄 (FeS)	145	0.2	0.2	0.2	0.2	
	除滓剤		55	2.0	2.0	2.0	10.0	
	球状化剤	FeSiMg		322	17.0	17.0	17.0	13.6
		FeSi		188	4.6	4.6	4.6	3.6
カバー材			60	10.0	10.0	10.0	10.0	
接種剤	FeSi		225	7.4	7.4	7.4	6.0	
光熱費	消費電力	kWh	12	9.3	9.3	9.3	8.9	
処理費	スラグ処理	kg	20	6.9	6.9	6.9	99.6	
人件費	作業人員	人時間	3000	1.3	1.3	1.3	1.8	

(注1) 高張力鋼スクラップ：マンガンを多く含む高張力鋼スクラップ、銑鉄：希釈用に用いる銑鉄、リターン材：自社で発生する鉄スクラップ

(注2) 消費電力量単価：東北電力における低圧電力単価。夏季およびその他季節の中値を想定、スラグ処理単価：通常の産業廃棄物処理費の平均的単価を想定、作業人員単価：求人情報等から一般的な労働単価を想定。

(資料) 実証試験データを参考にしながら三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

### 3. 試算結果

#### (1) 静的試算結果（銑鉄=90千円/t・鉄スクラップ=40千円/tの場合）

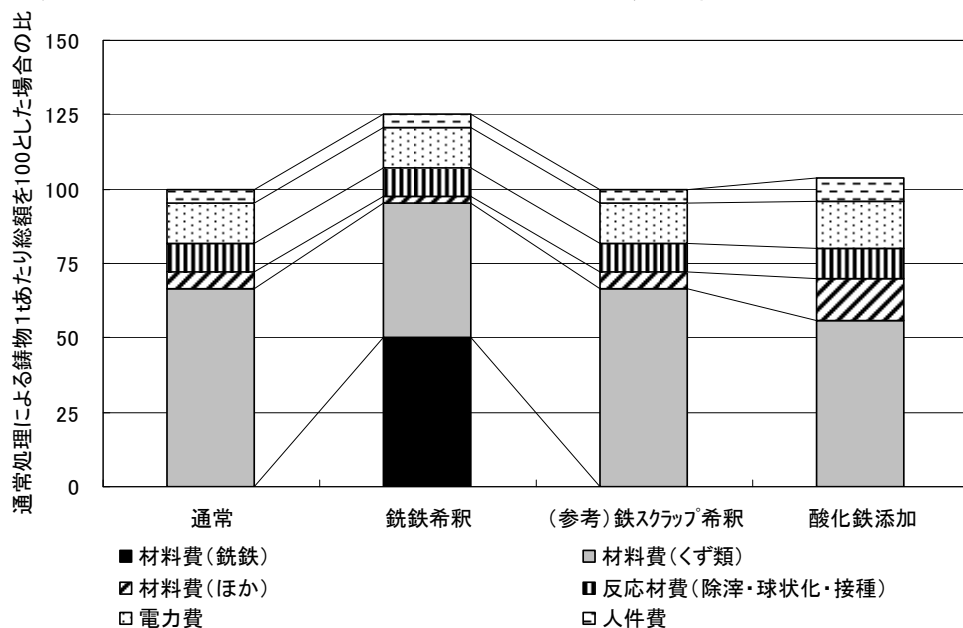
試算の結果、鑄鉄鑄物1トンを生産するために要するコストは、通常時合計を100（約57,000円/トン）とした場合、銑鉄希釈時で125、酸化鉄添加技術の適用時で107となった。なお、マンガン含有率の低い鉄スクラップでの希釈が仮に可能であるとした場合、通常時と同じく100と試算された（図表 79）

通常時の1.1倍弱のコスト負担で、そのままでは利用の難しい高マンガン溶湯を酸化鉄添加技術の適用によって利用できるようになる。現在のところ、最も一般的な溶湯中マンガン制御技術として銑鉄希釈があるが、実証試験結果に基づく試算から判断する限り、酸化鉄添加技術がコスト的にも有利な結果が得られている。

通常時の生産コストに占める原材料コストは、全体の8割近くを占める。特に鉄スクラップの購入費用が全体の7割弱を占めており、原材料単価の違いが生産原価に大きな影響を与えることがわかる。銑鉄希釈の場合、鉄スクラップの購入費用が4割強まで減少するものの、銑鉄を新たに購入することになるため、全体コストは2割強増加する。反応材の購入コストや光熱費、人件費に大きな違いはない。全体に占める銑鉄購入コストの割合は、4割に達する。

一方、酸化鉄添加技術の適用時には、全体コストが1割弱増加する。反応材として酸化鉄を添加することにより、補助的な鉄源となるため、鉄スクラップの購入費用は通常時と比較していくぶん減少する。酸化鉄を含む反応材の購入コスト、また作業時間が長引くことによる光熱費および人件費の増加が、全体的なコスト増加に影響を与えている。全体コストに占める鉄スクラップ購入コストの割合は、5割程度となる。

図表 79 鑄鉄鑄物 1 トンあたりの生産コスト試算結果（通常時=100）



		項目	1トンあたり金額(通常時合計=100とした場合)			
			通常時 (1,500kg溶解)	銑鉄希釈 (1,500kg溶解)	(参考) 低Mnスクラップ 希釈(1,500kg溶解)	脱マンガン 試験溶解 (1,200kg溶解)
原材料費	材料	高張力鋼スクラップ	0.0	4.5	4.4	29.3
		鉄スクラップ	26.6	0.0	22.2	0.0
		銑鉄	0.0	50.5	0.0	0.0
		リターン材	39.9	40.4	39.9	26.6
		カーボン(C)	5.3	1.7	5.3	6.3
		フェロシリコン(FeSi)	0.5	0.4	0.5	6.4
		フェロマンガ(FeMn)	0.0	0.0	0.0	0.0
		酸化鉄(ミルスケール)	0.0	0.0	0.0	0.7
		炭化ケイ素(SiC)	0.0	0.0	0.0	0.5
	硫化鉄(FeS)	0.0	0.0	0.0	0.0	
	除滓剤		0.1	0.1	0.1	0.7
	球状化剤	FeSiMg	6.1	6.1	6.1	5.8
		FeSi	1.0	1.0	1.0	0.9
		カバー材	0.7	0.7	0.7	0.8
接種剤	FeSi	1.8	1.9	1.8	1.8	
	小計	81.9	107.3	81.9	80.0	
光熱費	消費電力	13.4	13.4	13.4	16.0	
処理費	スラグ	0.2	0.2	0.2	2.9	
人件費	作業人員	4.5	4.5	4.5	7.8	
合計		100.0	125.3	100.0	106.7	

(注1) 1トンあたり金額(通常時合計=100とした場合)

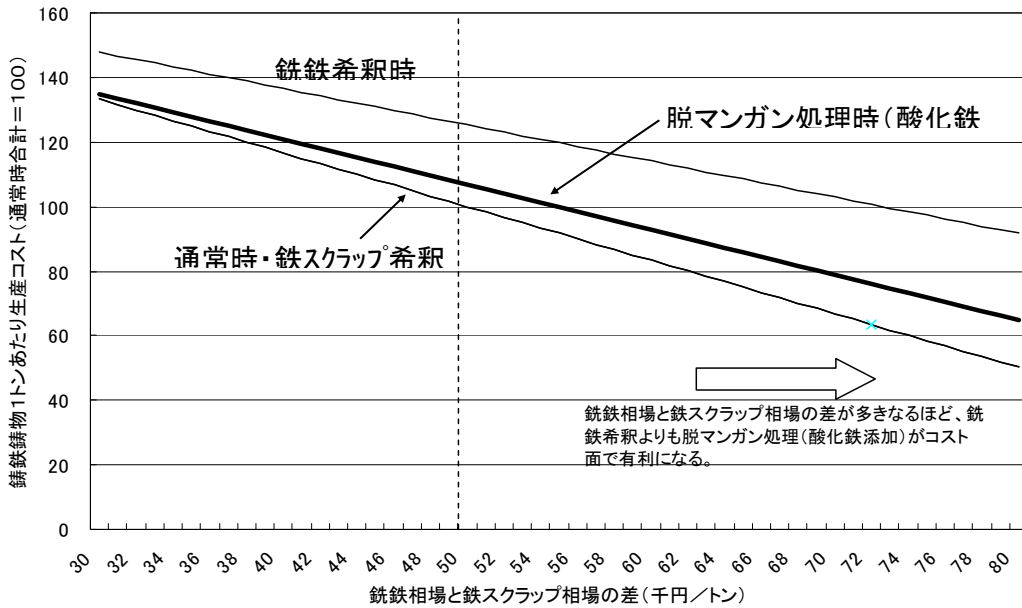
(資料) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

## (2) 動的試算結果（鉄スクラップ価格＝可変）

静的試算結果を基準に鉄スクラップ価格を可変として、試算を行ったところ、銑鉄希釈時のトンあたり生産コストと酸化鉄添加技術の適用時におけるトンあたり生産コストは、常に酸化鉄添加の適用時に有利との結果が得られた（図表 80）。銑鉄相場と鉄スクラップ相場の差が拡大するほど、酸化鉄添加による溶湯中マンガ制御技術は通常時よりもコスト負担が大きくなるが、銑鉄希釈による対応よりもコスト面での有利性は拡大する。差額が大きいほど酸化鉄添加技術は、銑鉄希釈よりも有利になる。

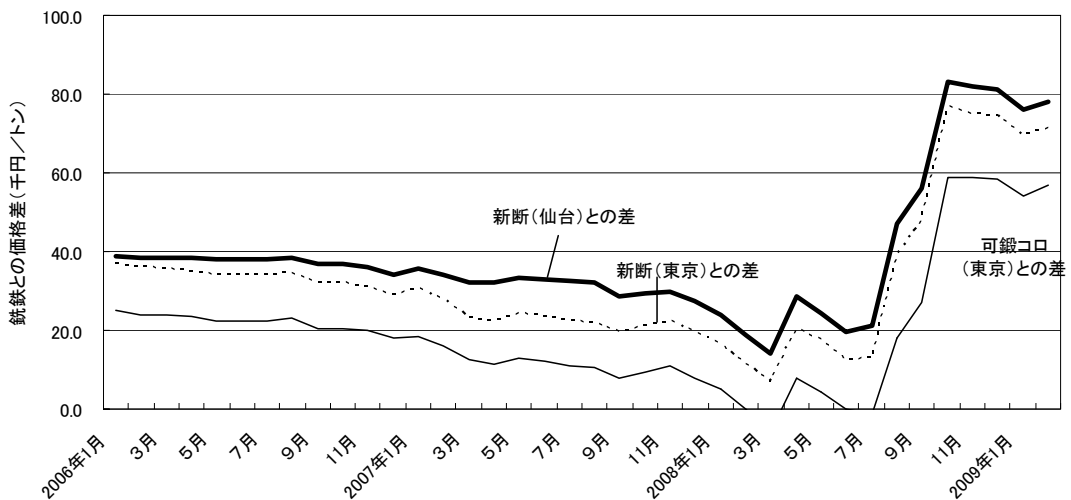
2007年後半より急騰した鉄スクラップ（可鍛コロ、新断）であるが、2008年後半には急落した（図表 10）。地域によっても差が出てくるが、可鍛コロの場合、2009年2月現在で25～35千円／トン、新断バラの場合、同じく10～20千円／トンの相場がついている。鋳物用銑鉄の価格は、近年高止まりしたままであり、約90千円／トンである。価格変動が小さい時期には、銑鉄と鉄スクラップの価格差が小さいものの、価格が乱高下する時期においては、大きな価格差が発生する。2008年10月以降、銑鉄および鉄スクラップの価格差は、50,000円／トン（静的試算の前提に同じ）を上回っている状況である（図表 81）。

図表 80 銑鉄価格と鉄スクラップ価格の差額による試算結果



- (注1) 当初試算 (銑鉄：90千円/t、鉄スクラップ：40千円/t、銑鉄と鉄スクラップの価格差=50千円/t) をベース (縦破線位置) としつつ、銑鉄価格と鉄スクラップ価格の差額が拡大した場合 (グラフ右側方向) の鑄鉄鑄物1トンあたりの生産コストを比
- (注2) 差額50千円/tのときの通常時生産コスト (トンあたり) を100とした場合の相対表示
- (注3) 銑鉄相場と鉄スクラップ相場の差が拡大するほど、酸化鉄添加による溶湯中マンガ制御技術は通常時よりもコスト負担が大きくなるが、銑鉄希釈による対応よりもコスト面での有利性は拡大する (差額が大きいほど酸化鉄添加技術が銑鉄希釈よりも有利)。
- (資料) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

図表 81 銑鉄と鉄スクラップの差額推移



- (注1) 銑鉄 (国内C銑・炉前) 価格と鉄スクラップ (可鍛コロ (東京)、新断 (東京)、新断 (仙台)) の差額を整理
- (注2) 2008年10月以降、新断 (東京・仙台) と銑鉄との価格差は7~8万円程度である。
- (資料) 日刊市況通信社より三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

## V. 溶湯中マンガン制御技術の導入可能性

### V-1. 溶湯中マンガン制御技術を取り巻く状況および有望技術

わが国の鑄鉄鑄物メーカーは、原材料コストを圧縮する目的から鉄スクラップを主原料の一つとしており、鉄スクラップのリサイクル促進に大きく貢献をしている。東北地域の鑄鉄鑄物メーカーは、東北地域を中心とする鉄スクラップのリサイクルシステムを構成する重要な一員である。

鑄鉄鑄物向け鉄スクラップとしては、不純物をあまり含まない「可鍛コロ」や「新断」といった種類の鉄スクラップがある。わが国全体でみた場合、これらスクラップの主要発生源は自動車産業であり、自動車部品工場や組立工場などから排出される加工くずが、鑄鉄鑄物向け鉄スクラップの4割程度を占めると推定される（日本全体の平均）。そのため、鑄鉄鑄物メーカーは、自動車産業における材料採用動向の影響を強く受けることになる。特に最近は、地球温暖化対策および衝突安全性向上のため、各種部品で高張力鋼の導入が進み、今後はマンガン、ケイ素、リンといった合金元素を相対的に多く含む鉄スクラップの排出増加が予想される。

鑄鉄鑄物は、マンガン、ケイ素、リンといった元素の含有量によって機械的性質が変化する。そのため、鑄鉄鑄物メーカーにおける高張力鋼スクラップの消費が増えるにつれ、溶湯成分の影響を制御する必要性が高まる。マンガン等の溶湯中濃度が規定値を超えているとわかった場合、銑鉄で希釈することが今日では一般的である。しかし、銑鉄の価格は鉄スクラップよりも相対的に高価であるため、溶湯中のマンガン等を酸化物や硫化物として除去する技術のほか、特殊な接種や球状化处理等によってマンガン等の影響を無害化する技術などの溶湯中マンガン制御技術が求められている。

溶湯中マンガン制御技術は複数存在し、主なものには、酸化鉄等を添加することで溶湯中のマンガンを酸化マンガンとして除去する技術、硫化物を添加することで溶湯中のマンガンを硫化マンガンとして除去する技術、特殊な接種剤・球状化剤で十分な黒鉛化を図り鑄物組織を制御する技術、溶湯中の化学組成を調整することで鑄物組織を制御する技術がある。いずれの技術も量産体制にある現場での適用は確認されていないが、量産ラインを用いたこのたびの実証試験では、酸化鉄添加の技術が最も有効であることを確認した。酸化鉄添加の技術は、高度自動車部品向け鑄物の一般的規格であるFCD450-10を十分に満足し、従来の銑鉄希釈よりも実施コストの面で優れていることを確認した。

## V-2. 有望技術の導入拡大に向けた課題

### 1. 再現性の向上

酸化鉄添加による溶湯中マンガンの制御は、自動車向け鋳物の主な基準であるFCD450-10を満たすことから、品質面での大きな課題は現在のところ認められない。溶湯中マンガンの制御技術として十分に適用できることを確認した。また、現在主流となっている溶湯中マンガンの制御技術として銑鉄希釈があるが、この技術よりもコスト的に有利であることも確認することができた。さらにFCD450-10を得るためには、通常、溶湯中のマンガンの濃度を0.4%程度に抑えるのが一般的であるところ、本実証試験では0.6%程度でも十分に基準を満たすことを確認している。溶湯中マンガンの制御とは直接関係しないものの、マンガンの濃度0.6%の溶湯でもFCD450-10に適用できる可能性が見えただけでなく、FC200相当の溶湯としても活用できる可能性が見えつつある。

一方、現状では、酸化鉄による溶湯中マンガンの反応状況を確認しながらの作業となっているため、一定の製品品質を確保することは容易ではない。特に作業時間が通常作業時よりも長くなってしまいう上、作業時間の予測が難しいため、前後工程との連続性が損なわれ、生産性を損なうおそれがある。また、酸化鉄等の資材投入量も予め確定することが難しいため、チャージ（1回の溶解）ごとに資材消費量および資材コストが変化してしまう可能性もある。特に必要以上の酸化鉄添加は、スラグの発生量増加に直結することから、廃棄物処理費の増加を招くおそれがある。酸化鉄の添加が過剰である場合、溶湯中の酸素量も過剰となってしまう、十分に球状化が進まないことも想定されるため、酸化鉄の添加量を管理することが重要である。

このことから、酸化鉄添加による溶湯中マンガンの制御技術が中小鋳鉄鋳物メーカーで導入されるようにするためには、酸化鉄の添加量や反応・除滓に必要な作業時間を一定の範囲内に管理する必要がある。具体的には、溶湯中成分等の前提データを得ることができれば、それらを説明変数として、反応に必要な酸化鉄の添加量や反応時間、また除滓時間などを目的変数として、おおよそ予想できるようにすることが求められる。ここから標準的な作業手順を確立できるようにすることが望ましい。

なお、中小鋳鉄鋳物メーカーの多くは、設備費用の点などからシリカを炉壁材とする高周波誘導炉を導入しており、酸化鉄添加による侵食被害の拡大が懸念される場所である。可能であれば、非シリカの炉壁を有する溶解炉を用いること



が望ましいが（マグネシア系など）、こうした対応が容易ではない場合、溶解炉の侵食を最小限に抑えるための温度や時間管理の基準も検討することが重要である。標準的な作業手順を確立する際には、マンガンおよびその他元素の酸化物標準自由エネルギー、ある温度条件下で化学平衡に達するまでの時間等を考慮することが望まれる。溶解炉の侵食速度および酸化鉄とマンガンの反応速度は、溶湯温度および保持時間に比例すると想定されることから、これらを両立させる温度域および時間幅の設定を行うことが必要である。現在のところ、経験則的に以下の温度域および時間幅がその候補として考えられる。

- 反応温度：1400～1450℃
- 反応時間：5～10分

このほか、酸化鉄と溶湯中マンガンの反応を速やかに進めるため、溶湯中に酸化鉄が速やかに分散することをねらった手法の確立も望まれる。酸化鉄の添加を湯面ではなく、鉄パイプを通して溶湯内へ添加するなど（この場合、鉄パイプも同時に溶解）の手法がその例として考えられる。

## 2. 設備制約に対する汎用性の向上

酸化鉄添加によって溶湯中マンガンを制御しようとする場合、シリカを炉壁とする溶解炉は侵食を受ける。そのため、連続した溶解作業を実施する際には、炉壁の交換が必須となる。

一般にマンガンよりも酸素と結びつきやすい元素が炉壁の主成分となっている場合（ケイ素など）、強い侵食を受ける。そのため、炉壁交換の頻度が高くなり、1日の間に何度も炉壁を交換するようなことになれば、生産コストを上昇させるだけでなく、作業中断による著しい生産性の低下も招いてしまう。

炉壁の交換頻度を抑制する方向性として、侵食されにくい材料を用いた溶解炉を用いることのほか、侵食抑制技術の適用が考えられる。侵食されにくい材料を用いた溶解炉の製品情報を整理し、鋳鉄鋳物メーカーに対して情報提供を行うとともに、代用炉を準備できない場合を想定して、侵食抑制技術の開発および提供を行っていくことが重要である。一般に炉壁の侵食速度は、溶湯温度、溶湯の攪拌速度（誘導炉の周波数）、溶湯中成分などによって変化すると想定されることから、侵食速度を最小化させるための化学組成（必要に応じてカーボンなどを添

加するなど) や温度・攪拌条件を今後検討していく必要がある。この検討は、前述の標準作業手順の確立と併せて実施することが望ましい。

このほか、現状よりも安価で、かつ侵食に強い新炉材を開発し、その普及を図っていくことも重要である。既存の炉材に追加的な加工を施したりする技術のほか、廃棄物等の安価な材料を活用した新規炉材の開発などが望まれる。

### 3. スラグの発生抑制・再生利用促進

通常時と比較して、大量のスラグが発生することを確認した。スラグ発生量の増加は廃棄物処理費の増加に直結するため、酸化鉄の添加量を必要最低量とする必要がある。具体的には、スラグ発生量を極小化するため、必要最低限の酸化鉄添加、除滓剤の添加で済むような標準作業手順の確立が必要である。特に除滓剤中のケイ素が酸化鉄と優先的に反応してしまい、スラグの発生を促進させている可能性もあるので、除滓剤を投入するタイミングおよび数量についての検討も重要になる。これらは、前述した標準作業手順の確立と併せて検討することが望ましい。

また、3R促進の観点からは、発生したスラグを有効利用できるようにすることが望ましい。特に酸化鉄添加で得られたスラグには、レアメタルであるマンガンが含まれるため、この再生利用が望まれる。しかし、スラグ中にはマンガンのほか、鉄スクラップに由来するクロム等の元素、また除滓剤に由来するケイ素等の混入が想定される。鉄と化合してしまったクロム等の分離は容易ではないことから、純度の高い元素単体としてのリサイクルは困難である。

マンガン等を含む鉄合金としてリサイクルすることのほか、スラグ成分を保持したまま(鉄、マンガン、クロム、ケイ素など)リサイクルできる用途の模索や(鉄鋼スラグ等の既往事例を精査しつつ、応用の可能性を検討)、より安価な資材を用いて金属マンガンを還元するような方法の開発が必要である。

### V-3. 今後の方向性

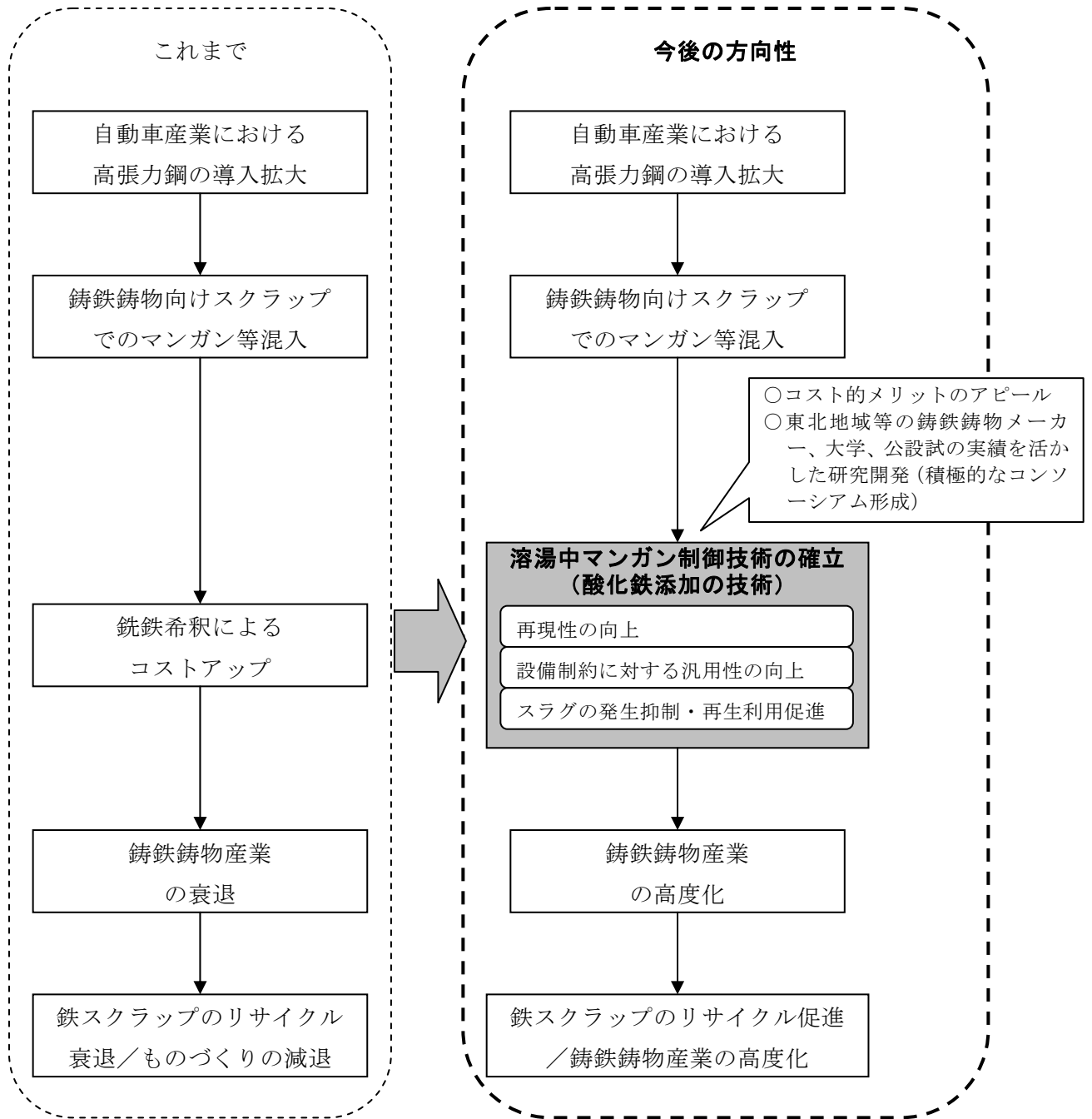
酸化鉄添加による溶湯中マンガン制御は、品質面では自動車向け鋳物の主な基準であるFCD450-10を満足し、コスト面でも現在主流である銑鉄希釈を上回る。ただし、再現性の乏しさ、設備制約の大きさ、スラグ発生量の多さなどといった課題を有することから、これらの課題を解決し、今後、銑鉄希釈と同程度の成熟技術とすることが重要である。

コスト的メリットがあれば、鋳鉄鋳物メーカー等による自発的な研究開発を期待することができるので、本実証試験の成果を広く公表し（本実証成果に関する積極的な公表、発表）、東北地域等の鋳鉄鋳物メーカー、大学、公設試等による自発的なコンソーシアム形成を促すことが望まれる（図表 82）。東北地域には、自動車部品向け鋳鉄鋳物事業者が複数存在し、またこの分野での研究開発の実績も豊富に存在することから（大学、公設試）、学会、シンポジウム等の機会を積極的に捉えて情報発信していくことが重要である。

なお、スラグ発生量の増加という課題は、溶湯中マンガ制御の高度化とは別に、3R促進や希少資源の有効利用という観点からも、引き続き課題解決のための積極的な取り組みが望まれる。スラグの有効利用を目指した取り組みは、これまで多数実施されていることから、既に実績を有する関係者との連携により、この問題を解決することが望ましい。

鋳鉄鋳物産業は、わが国における鉄スクラップのリサイクルを担う重要な存在であり、今後も継続的な発展が期待される場所である。酸化鉄添加の技術は、溶湯中マンガ制御技術として有望であり、今後、鋳鉄鋳物産業を高度化させる取り組みの一つとして位置づけることが重要である。

図表 82 今後の方向性イメージ



(資料) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング作成

(以上)

平成20年度3Rシステム化可能性調査  
自動車用部品の高度化に資する  
鋳鉄用原材料リサイクルシステム構築可能性調査  
調査報告書

平成21年3月

発行： 経済産業省 東北経済産業局 資源エネルギー環境部 循環型産業振興課  
〒980-8403 仙台市青葉区本町三丁目3番1号  
電話：022（263）1111（代表） FAX：022（263）0757

調査委託先： 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社

※無許可の転載・掲載を禁じます。