

鑄片表層改質による循環元素無害化技術の開発 プロジェクト評価（事後）報告書

平成21年4月
産業構造審議会産業技術分科会
評 価 小 委 員 会

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成17年3月29日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成17年4月1日改定）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

経済産業省において実施した「鋳片表層改質による循環元素無害化技術の開発プロジェクト」は、最近発展してきたプラズマ技術や電磁気利用技術を応用し、今まで行われてこなかった、鉄スクラップ溶鋼の凝固プロセスおよび鋳片処理（手入れ）段階で、鉄スクラップリサイクルの過程で混入・蓄積する有害元素の無害化を図るため、平成15年度から平成19年度まで実施したものである。

今回の評価は、この「鋳片表層改質による循環元素無害化技術の開発プロジェクト」の事後評価であり、実際の評価に際しては、省外の有識者からなる「スラグ利用に係る研究開発プロジェクト等」事後評価検討会（座長：中村 崇 東北大学 多元物質科学研究所 資源変換・再生研究センター 教授）を開催した。

今般、当該検討会における検討結果が評価報告書の原案として産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（小委員長：平澤 冷 東京大学名誉教授）に付議され、内容を審議し、了承された。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成21年4月

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会
委員名簿

委員長	平澤 冷	東京大学 名誉教授
	池村 淑道	長浜バイオ大学バイオサイエンス学部 教授
	伊澤 達夫	東京工業大学 理事・副学長
	大島 まり	東京大学大学院情報学環 教授 東京大学生産技術研究所 教授
	菊池 純一	青山学院大学法学部・大学院法学研究科ビジネス法務専攻 教授
	鈴木 潤	政策研究大学院大学 教授
	辻 智子	日本水産株式会社 顧問
	富田 房男	放送大学北海道学習センター 所長
	中小路 久美代	株式会社S R A先端技術研究所 主幹 東京大学先端技術研究センター 特任教授
	山地 憲治	東京大学大学院工学系研究科 教授
	吉本 陽子	三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 経済・社会政策部 主任研究員

(委員敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省産業技術環境局技術評価室

スラグ利用に係る研究開発プロジェクト等事後評価検討会
委員名簿

座長 中村 崇 東北大学 多元物質科学研究所 資源変換・再生研究センター
教授

一柳 朋紀 株式会社 鉄鋼新聞社 鉄鋼部長

奥村 博昭 鉄鋼スラグ協会 技術部長

小紫 正樹 財団法人 金属系材料研究開発センター 専務理事

宗像 鉄雄 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
環境技術開発部長

(敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省製造産業局鉄鋼課製鉄企画室

鑄片表層改質による循環元素無害化技術の開発プロジェクトの評価に係る省内関係者

【事後評価時】（平成20年度）

製造産業局 鉄鋼課製鉄企画室長 覚道 崇文（事業担当室長）

産業技術環境局 技術評価室長 長濱 裕二

【中間評価時】（平成18年度）

製造産業局 鉄鋼課製鉄企画室長 阿部 聡（事業担当室長）

産業技術環境局 技術評価調査課長 柴尾 浩朗

【事前評価時】（事業初年度予算要求時）

製造産業局 鉄鋼課製鉄企画室長 喜多見 淳一（事業担当室長）

鋳片表層改質による循環元素無害化技術の開発プロジェクト事後評価

審議経過

第1回事後評価検討会（平成21年3月18日）

- ・評価の方法等について
- ・プロジェクトの概要について
- ・今後の評価の進め方について
- ・質疑応答

第2回事後評価検討会（平成21年3月31日）

- ・評価報告書(案)について
- ・質疑応答

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（平成21年4月23日）

- ・評価報告書(案)について
- 審議の結果、原案のとおり了承された。

目 次

はじめに

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会 委員名簿

スラグ利用に係る研究開発プロジェクト等事後評価検討会 委員名簿

鋳片表層改質による循環元素無害化技術の開発プロジェクトの評価に係る省内関係者

鋳片表層改質による循環元素無害化技術の開発プロジェクト事後評価 審議経過

ページ

事後評価報告書概要	
第1章 評価の実施方法	
1. 評価目的	1
2. 評価者	1
3. 評価対象	2
4. 評価方法	2
5. プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準	2
第2章 プロジェクトの概要	
1. 事業の目的・政策的位置付け	5
2. 研究開発等の目標	10
3. 成果、目標の達成度	13
4. 事業化、波及効果について	32
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等	38
第3章 評価	
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	48
2. 研究開発等の目標の妥当性	50
3. 成果、目標の達成度の妥当性	51
4. 事業化、波及効果についての妥当性	52
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	53
6. 総合評価	54
7. 今後の研究開発の方向等に関する提言	55
第4章 評点法による評点結果	56
参考 今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針	

事後評価報告書概要

事後評価報告書概要

プロジェクト名	鋳片表層改質による循環元素無害化技術の開発
上位施策名	社会基盤材料関連技術開発施策
事業担当課	鉄鋼課製鉄企画室

プロジェクトの目的・概要

鉄スクラップ中に含まれる銅等の有害な循環元素を無害化するため、凝固プロセス及び鋳片処理工程で、プラズマ及び電磁気技術を用いて鋼材表層を均一かつ安定に溶融するとともに、熱間加工割れを起こす銅の影響を無害化する元素を溶融部に添加する技術を開発する。

予算額等

(単位：千円)

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成 15 年度	平成 19 年度	平成 17 年度	平成 20 年度	新日本製鐵株式会社
H17FY 予算額	H18FY 予算額	H19FY 予算額	総予算額	総執行額
390,000	279,000	250,000	1,104,000	1,104,000

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

目標・指標	成果	達成度
最大2m幅の鋳片(スラブ)の表層(熱間加工割れを抑制する条件で決まる鋳片の表層深さ3mm程度)を均一かつ安定に溶解し、溶融部を安定保持するとともに所定濃度の無害化元素を溶融部へ最適に添加することを可能とする技術を確立する。	電磁誘導加熱による鋳片表層予熱溶融技術、無害化元素であるニッケルの添加装置を組み込んだ複数プラズマによる広幅溶融・改質(Ni合金化)技術、溶融範囲拡大のための扁平プラズマ溶融・電磁誘導複合化技術等の要素技術開発、ベンチスケール試験、これらを踏まえたフィージビリティスタディを行い、最終的に、割れ防止に必要な銅含有量に見合う所定量の無害化元素を目標である鋳片表層3mm程度に均一に添加でき、圧延後の品質も満足していることを確認した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

変更なし。

< 共通指標 >

論文数	特許等件数 (出願を含む)
7 件	25 件

評価概要

1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性

本研究開発は、銅などの循環元素による鋼材の脆化を防ぐことにより、老廃鉄スクラップの積極的なリサイクルの実現を目指す技術開発であり、国民・社会のニーズに合致し、事業の目的は非常に重要で、政策的位置付けは極めて明確である。鉄スクラップは、日本が保有する唯一の資源とも言え、主原料を海外に頼っている鉄鋼メーカーにとって、この活用拡大は大きな課題と考えられる。また、開発リスクが高く民間のみでは実施が困難であることから国の支援が必要である。

なお、本事業の経済性は、鉄鋼需要のほか、鉄スクラップやニッケル等の市場価格や鋳片への加熱方法等に影響されることから、実用化に当たっては見極めが必要である。また、社会システムの整備状況に応じ、本技術がどの程度の銅含有スクラップに有効なのかを想定しておくべきであるとの意見があった。

2．研究開発等の目標の妥当性

目標達成のための目標設定は妥当であり、技術課題に対してそれぞれ手順を踏んで着実に進めている。なお、実用性をかんがみリサイクルに必要なエネルギーの目標値も設定すべきであった。

3．成果、目標の達成度の妥当性

プラズマ溶融技術と電磁誘導技術を複合させた表層溶融技術を確立し、鉄スクラップ中に含まれる銅の無害化技術を開発した成果・達成度は妥当と評価できる。学術的にも優れており、技術的な達成度が高く、想定する規模のプロトタイプで運転ができることを示している。

なお、実用化に当たっては、設備費を圧縮できる設備技術開発などにより、原料やエネルギーの価格変動を吸収するレベルで投資回収できる目途をつけることが課題と考えられる。また、最適加熱方法の探査、現象の物理的把握等についても期待される。

4．事業化、波及効果についての妥当性

本事業成果により従来の社会システムで対応できない鉄スクラップが排出されたときの技術として使用できることを見出したのは大きい。設備費が高いため、今後の世界的資源問題の深刻化の進展度合い、スクラップの収集プロセスの検討等によって、事業化の見通しが高まると考えられる。また、本技術が普及した場合の波及効果は、高炉・電気炉メーカー双方にとって大きいものと考えられる。

なお、事業化に際しては、どのレベルの銅含有スクラップに対して有効かを明らかにする必要があるとともに、原料コストに依存して投資回収年数が4.8～22.6年と大きく変動するため、加熱方法を最適化して省エネ型プロセス技術を確立することが望まれる。

5．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

本プロジェクトの研究開発計画、実施体制・マネジメントは概ね適切であったと考えられる。また、大学との共同研究など産学連携も機能していると評価できる。費用対効果も妥当である。

なお、実用化に向けては、電気炉メーカーも体制に組み入れるなど円滑な技術移転がなされるよう配慮すべきとの意見があった。

6．総合評価

銅などの循環元素による鋼材の脆化を防ぐことにより、老廃鉄スクラップの積極的なリサイクルの実現を目指した本技術開発は、国が関与する事業として政策的位置付けも極めて明確であり、妥当であった。目先はニーズが低いかもしれないが、中長期的には大きな果実が期待できるテーマであり、本事業の意義は大きいと評価できる。

プラズマ溶融技術と電磁誘導技術を複合させた表層溶融技術を確立し、鉄スクラップ中に含まれる銅の無害化技術を開発し、プロトタイプで装置で運転ができることが示され、技術的な達成度が高く、学術的にも優れた成果が得られた。

なお、事業化にあたっては採算性がネックになると見られることから、設備コストや、省エネルギーの観点から加熱方法最適化についての検討が望まれる。

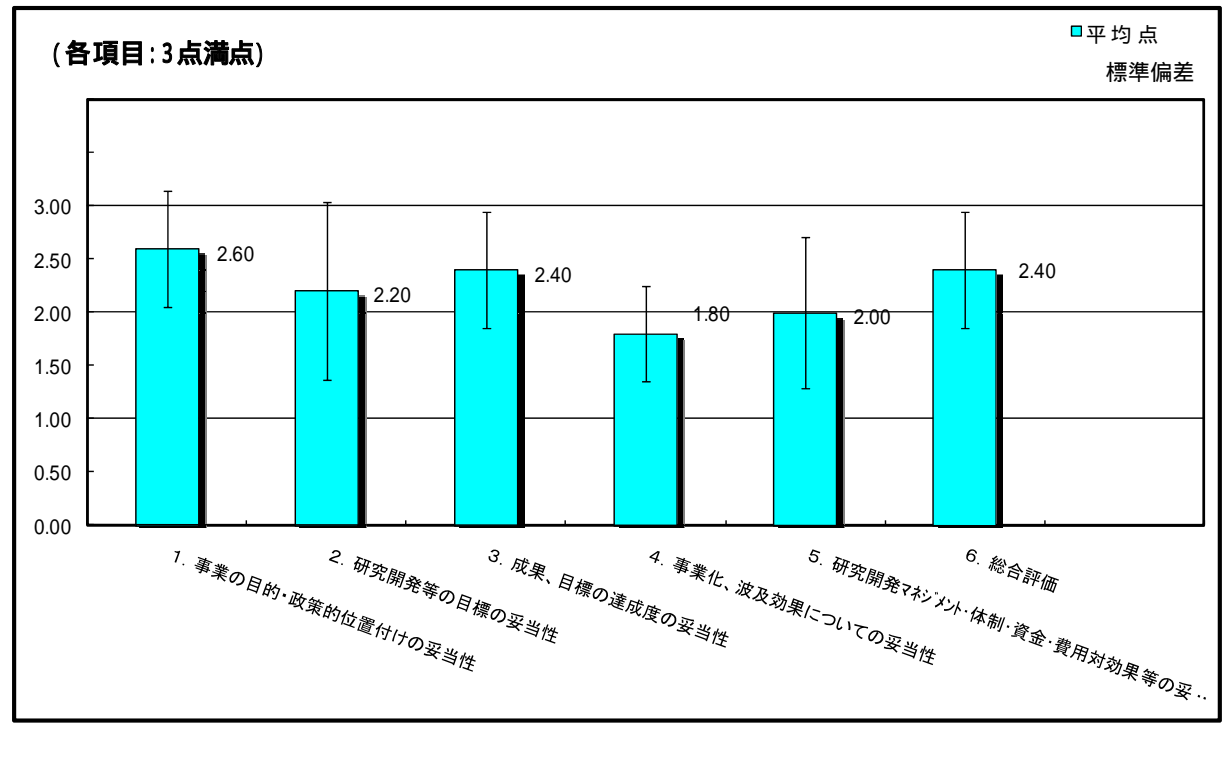
7．今後の研究開発の方向等に関する提言

資源の乏しいわが国においては、資源の再利用が重要であり、今後もコスト削減を目指した研究を継続してもらいたい。研究継続に際しては、高炉メーカー・電気炉メーカーなど広範な関係者による体制を組み、社会から発生する鉄スクラップ中の銅濃度と、鉄スクラップの高度利用の需要との関係を明らかにしつつ、実用化検討を進めることが望まれる。

また、実用化検討に当たっては、開発手法の適性評価や、表層溶融のための省エネ型加熱手法を開発する必要がある。

さらに、有害性の克服に必要な表層の溶融厚さの最適化や溶融層中での各種元素の挙動把握等、基礎的な物理機構の解明も未だ残された課題であり、これらの課題を克服した上で事業化を行う必要がある。

評点結果



第 1 章 評価の実施方法

第1章 評価の実施方法

本プロジェクト評価は、「経済産業省技術評価指針（平成17年4月1日改定、以下「評価指針」という。）に基づき、以下のとおり行われた。

1. 評価目的

評価指針においては、評価の基本的考え方として、評価実施する目的として

- (1) 研究開発に対する経済的・社会的ニーズの反映
- (2) より効率的・効果的な研究開発の実施
- (3) 国民への施策・事業等の開示
- (4) 資源の重点的・効率的配分への反映
- (5) 研究開発機関の自己改革の促進等

を定めるとともに、評価の実施にあたっては、

- (1) 透明性の確保
- (2) 中立性の確保
- (3) 継続性の確保
- (4) 実効性の確保

を基本理念としている。

プロジェクト評価とは、評価指針における評価類型の一つとして位置付けられ、プロジェクトそのものについて、同評価指針に基づき、事業の目的・政策的位置付けの妥当性、研究開発等の目標の妥当性、成果、目標の達成度の妥当性、事業化、波及効果についての妥当性、研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性の評価項目について、評価を実施するものである。

その評価結果は、本プロジェクトの実施、運営等の改善や技術開発の効果、効率性の改善、更には予算等の資源配分に反映させることになるものである。

2. 評価者

評価を実施するにあたり、評価指針に定められた「評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価者の導入等により、中立性の確保に努めること」との規定に基づき、外部の有識者・専門家で構成する検討会を設置し、評価を行うこととした。

これに基づき、評価検討会を設置し、プロジェクトの目的や研究内容に即した専門家や経済・社会ニーズについて指摘できる有識者等から評価検討会委員名簿にある5名が選任された。

なお、本評価検討会の事務局については、指針に基づき経済産業省鉄鋼課製鉄企画室が担当した。

3．評価対象

「鋳片表層改質による循環元素無害化技術の開発プロジェクト」(事業期間：平成15年度～平成19年度)を評価対象として、研究開発実施者(新日本製鐵株式会社)から提出されたプロジェクトの内容・成果等に関する資料及び説明に基づき評価した。

4．評価方法

第1回評価検討会においては、研究開発実施者からの資料提供、説明及び質疑応答、並びに委員による意見交換が行われた。

第2回評価検討会においては、それらを踏まえて「プロジェクト評価における標準的評価項目・評価基準」、今後の研究開発の方向等に関する提言等及び要素技術について評価を実施し、併せて4段階評点法による評価を行い、評価報告書(案)を審議、確定した。

また、評価の透明性の確保の観点から、知的財産保護、個人情報で支障が生じると認められる場合等を除き、評価検討会を公開として実施した。

5．プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準

評価検討会においては、経済産業省産業技術環境局技術評価調査課において平成19年6月1日に策定した「経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準について」のプロジェクト評価(中間・事後評価)に沿った評価項目・評価基準とした。

1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性

(1) 国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。

- ・国民や社会のニーズに合っているか。
- ・官民の役割分担は適切か。

(2) 事業目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。

- ・ 事業の政策的意義（上位の施策との関連付け等）
- ・ 事業の科学的・技術的意義（新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等）
- ・ 社会的・経済的意義（実用性等）

2 . 研究開発等の目標の妥当性

(1) 研究開発等の目標は適切かつ妥当か。

- ・ 目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

3 . 成果、目標の達成度の妥当性

(1) 成果は妥当か。

- ・ 得られた成果は何か。
- ・ 設定された目標以外に得られた成果はあるか。
- ・ 共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。

(2) 目標の達成度は妥当か。

- ・ 設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

4 . 事業化、波及効果についての妥当性

(1) 事業化については妥当か。

- ・ 事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

(2) 波及効果は妥当か。

- ・ 成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。
- ・ 当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

5 . 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

(1) 研究開発計画は適切かつ妥当か。

- ・ 事業の目標を達成するために本計画は適切であったか（想定された課題

への対応の妥当性)。

- ・採択スケジュール等は妥当であったか。
- ・選別過程は適切であったか。
- ・採択された実施者は妥当であったか。

(2) 研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

- ・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。
- ・全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。
- ・目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携/競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。
- ・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。

(3) 資金配分は妥当か。

- ・資金の過不足はなかったか。
- ・資金の内部配分は妥当か。

(4) 費用対効果等は妥当か。

- ・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
- ・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。

(5) 変化への対応は妥当か。

- ・社会経済情勢等周辺の状況変化に柔軟に対応しているか(新たな課題への対応の妥当性)。
- ・代替手段との比較を適切に行ったか。

6. 総合評価

第2章 プロジェクトの概要

1 . 事業の目的・政策的位置付け

1 - 1 事業の目的

1 - 1 - 1 事業の科学的・技術的意義

鉄スクラップの利用についての問題点は、鉄スクラップ溶解時の熱効率の向上および必然的に混入し、加工特性等に決定的な悪影響を与える有害元素(銅、錫、亜鉛等)の無害化である。今までに、鉄スクラップのリサイクル技術については、熱効率の向上では、一次エネルギーの有効利用の観点から溶解法が、混入有害元素については、溶解処理前の事前処理での選別技術が中心に開発されてきた。しかしながら、飲用缶や一部廃車屑等の低級鉄スクラップの利用においては、有害成分が十分に除去しきれない、あるいは除去のためのコストが高くなる等の問題点、さらには鉄スクラップリサイクル率向上のための高級鋼生産への適用の問題が残されてきた。

今回行う技術開発では、最近発展してきたプラズマ技術や電磁気利用技術を応用し、今まで行われてこなかった、鉄スクラップ溶鋼の凝固プロセスおよび鋳片処理(手入れ)段階で、鉄スクラップリサイクルの過程で混入・蓄積する有害元素の無害化を図るものである。

鉄スクラップをリサイクルした溶鋼を連続鋳造にて鋳片にする際、混入した銅や錫等の有害元素による脆化現象のため、鋳片表面には微小な表面疵が発生する。このため、この鋳片表面疵の除去が必要となる。また、その後の圧延段階でも表面疵が発生・拡大しやすく、高級鋼への適用が阻まれてきた。

銅等による鋼材の脆化は、以下のメカニズムによって起こる。まず、鋼の熱間圧延前の加熱炉内での鋼の酸化スケール発生と鋼界面への銅の濃化、次いで、濃化液相銅の結晶粒界への侵入、粒界脆化、最終的には、鋼材表面での割れ発生に到る。(図 1-1-1)これは銅の鋼中への溶解度が低いことが引き金となっており、錫はこの溶解度をさらに下げる作用を持つことが知られている。銅の鋼中への溶解度を上げる有効な元素としては、ニッケルのみが知られており、一般に、銅を一定比率以上含有する鋼を製造するには、無害化のためにニッケルを溶解段階で添加する方法がとられるが、ニッケルは高価な元素であり鋳片全体に添加するためかなりのコストアップになる。したがって、鋼の特性を高めるために銅を添加するような場合にのみ、やむを得ずニッケルを併せて鋼全体に添加し加工割れを抑制する手段がとられている。また、基礎研究レベルでは、熱間脆化メカニズムや鋼の組成・雰囲気などの影響などの研究がなされてきたが、脆化の積極的な防止技術に関する研究はほとんどないのが現状である。

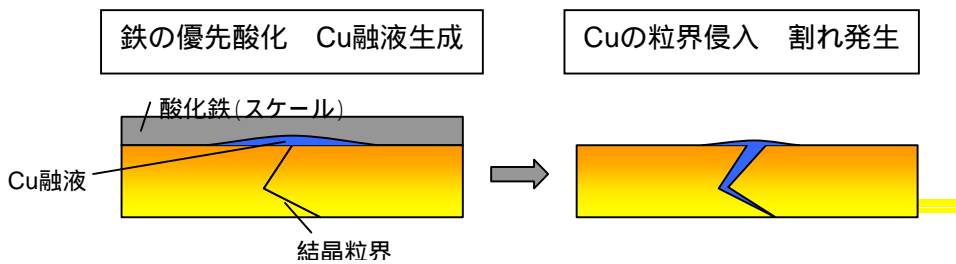


図 1-1-1. 銅(Cu)による鋼材表面割れ発生の概念図

今回の開発では、プラズマ技術や電磁誘導技術等の方法を用いて鋳片表層部に限定してニッケルなどの無害化元素を添加することにより、安価に銅等の循環元素を無害化することを狙った。鋼材表層を溶融するには大きな熱エネルギーを集中させて投入する必要があるが、この熱源としては、電子ビーム、レーザー、プラズマ、誘導加熱などが考えられる。このうち、前 2 者は効率的な入熱源ではあるが、処理雰囲気真空にする必要があることや大出力が可能かなど、本プロセスで対象とする幅 2m、長さ 10m 以上に及ぶ実機鋳片(スラブ)に適用するには、設備コストの面で難がある。研究開発実施者は、本開発に着手するまでに、プラズマ溶融や誘導溶解による鋳片表層溶融技術の可能性を探索してきた。図 1-1-2 に示すように、通常プラズマは断面が円であるが、電磁場をかけて形状を制御することで扁平化する。これによって、溶融ゾーンを楕円形に拡大することができ、さらにプラズマトーチもしくは鋳片を長手方向に移動させることにより、順次鋳片表層を溶融し、その後再凝固させることが可能となる。図 1-1-3 は鋳片表層溶融の試験例であるが、横しわが見られる鋳片表面に扁平化したプラズマをあて、表面を順次溶融再凝固させた部分は、鋳片表層が再溶融され修復されていることがわかる。また、再凝固部の横断面でも健全な性状を示している。

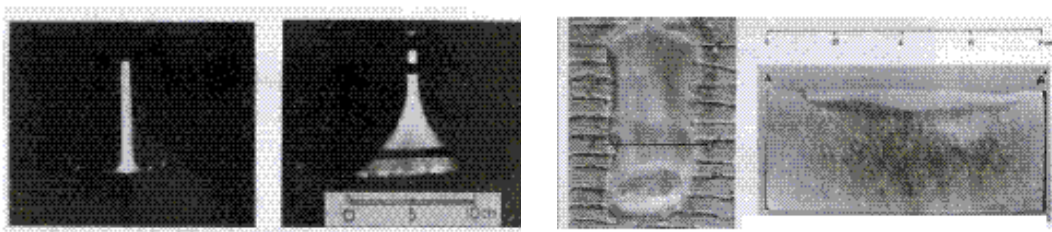


図 1-1-2. 交流磁場による直流プラズマの扁平化 図 1-1-3. 鋳片表層溶融処理の試験例

以上のことから、本研究開発では、前記技術シーズを活用して、実機で最大 2m 幅に及ぶ鋳片を想定し、均一安定に表層のみを溶融する技術、および溶融部への所定濃度の無害化元素添加技術を確立することとした。

1 - 1 - 2 社会的・経済的意義

本事業の中で、老廃鉄スクラップの発生量予測と課題に関する調査研究を行った。その結果によれば、我が国の鉄鋼蓄積量は 2003 年で既に 12 億トンを強に及び、今後約 1,600 万トンが毎年増分として蓄積され、2030 年には約 16 億トンに達するものと予想される。蓄積された鋼材は、鋼構造物、自動車、家電製品などの鉄鋼製品として存在することから、これらは耐用年数を過ぎたものから順次老廃鉄スクラップとして市場に流通していくことになるが、この老廃鉄スクラップの発生量は 2003 年ですでに約 3,000 万トンに達しており、2030 年には約 3,400 万トンに増加するものと予測される。このうち、老廃鉄スクラップ自体の輸出や使用済み自動車・機械としての輸出分を除けば、国内流通量は 2003 年で約 2,100 万トン、2030 年で約 2,400 万トンと見積もられ、この膨大な量を何らかの形で処理していくことが必要である。なお、このうち、銅等有害元素の含有率が高く本技術の対象となる老廃鉄スクラップは、約半量の 1,000 万トン強になるものと予測される。

老廃鉄スクラップは、現状、国内の製鉄メーカーで溶解時に使用されることになるが、鉄スクラップに混入する銅等の有害元素のため、再生鋼材の品質、特に表面品質が劣化する問題から、その再利用には限界がある。従来、有害元素の事前分別あるいは溶解時に高純度の鋼で希釈する方法が採られてきたが、コスト的な限界や再生鋼材の品位低下などの課題があった。

本技術開発は、上記課題を解決するため、鋼材の表面品質劣化機構に着目し、溶解・凝固後に表面のみを改質し熱間加工割れを起こす銅等有害元素の影響を無害化することを狙ったものである。これにより溶解時の老廃鉄スクラップ利用量・品質の制約を取り除くことが可能となる。

鉄スクラップのリサイクル促進は、その発生量の大きさからも資源の有効活用の観点から極めて重要であるが、また、鉄鋼材料の溶解原料としての使用可能量を拡大することで、鉄鉱石からの製造に比べて大幅な省エネルギー化が図れることになる。したがって、本技術開発は、資源のリサイクル、省エネルギーへの寄与という観点から、社会的・経済的に大きな意義を有するものである。

1 - 2 国の関与の必要性

近年、環境問題（地球温暖化問題、リサイクル等）への対応がますます重要になっている。地球温暖化を巡る国際交渉を受け、2005 年 4 月に閣議決定された京都議定書達成計画に基づき、我が国は 2008～2012 年度の温室効果ガスを 1990 年度比で 6%削減しなければならない。鉄鋼業は我が国の最終エネルギー消費の約 1 割を占めるため、製鉄プロセスにおける省エネルギーの成否は、我

が国全体のエネルギー消費量に大きなインパクトを与える。また、循環型社会構築のためには、重要資源のリサイクルを積極的に進める必要がある。

本事業は、鉄スクラップのリサイクル拡大を阻害している銅等有害循環元素の無害化を実現するため、プラズマ技術や電磁気利用技術を活用して鋼材表面を溶融・改質することで、有害元素起因の表面割れ性欠陥等品質劣化を無害化できる技術を開発することを目的としている。

本技術を適用すれば、高炉・転炉法による一貫製鉄メーカーでは、鋼材製造時の原料として鉄スクラップを多量に使用することが可能となるため、鉄鉱石からの鋼材製造法に比べ、エネルギー消費を大幅に削減することができる。また、転炉・電気炉法いずれの製造法による製鉄メーカーにおいても、従来、有害元素が原因で使用が困難であった鉄スクラップを有効資源として再活用できることにもなる。したがって、本技術開発は、社会基盤材料である鉄鋼材料の生産活動での省エネルギー、リサイクルの促進に資するという公共性を有するものである。また、我が国の鉄鋼業の国際競争力を確保するためにも、こうした新技術を開発することで技術的優位性を維持していくことができる。

しかしながら、現状、国内で流通する鉄スクラップは、主に製鉄メーカーが原料として再利用しているが、スクラップという資源の性質上、含有成分は一定ではなく、また、銅など有害化元素を含む場合が多い。このため、製鉄メーカーでは、鉄スクラップ種類毎の市場価格、形状・重量等溶解原料としての使いやすさ、および有害元素含有率などに応じてその使用を決めている。本技術は将来の資源リサイクル促進に寄与するものであるが、先端技術を鉄鋼製造分野に適用するという新規性から、現時点では基礎的研究段階にあるに過ぎず、これを実現するには開発リスクが高く、市場原理に委ねた民間のみの自主的な活動ではその達成は困難である。よって国の関与の下、産官学が連携して技術開発を実施することが必要不可欠である。官民の役割分担については、基礎的研究段階までは、技術シーズを保有する製鉄メーカーが、公的研究機関の先端技術を活用しつつ、国の支援・補助のもと開発することが適切である。

1 - 3 政策的位置付け

2005年2月に発効した京都議定書において、日本は二酸化炭素等の温室効果ガスの排出量を2008年から2012年までの期間中に1990年比で6%削減する義務を負っており、その実施には省エネルギー技術が必要不可欠である。

「エネルギーの使用の合理化に関する法律」（昭和54年制定）及び「エネルギーの使用の合理化に関する基本方針」（平成18年閣議決定）において、「エネルギー消費効率の向上及び効率的な使用」が事業者に求められている。また、「新・国家エネルギー戦略について」（平成18年経済産業省）において、2030

年までにエネルギー効率を少なくとも30%改善するとの目標が示されている。

また、製鉄業等は、資源有効利用促進法における「特定省資源業種」に指定され、事業者は、原材料等の使用の合理化による副産物の発生抑制、及び副産物の再生資源としての利用の促進に取り組むことが求められているところである。

本技術開発は、これらの要請に対応するもので、経済産業省が取りまとめた「技術戦略マップ 2008」にも「総合エネルギー効率の向上」に寄与する技術の1つとして具体的に「鑄片表層改質による循環元素無害化技術」があげられている。また、研究開発実施時、経済産業省の研究開発プログラムのうち、エネルギー分野の「省エネルギー技術開発プログラム」の超燃焼システム技術の1つとして位置付けられていた。以上のように本研究開発の政策的位置付けは明確になっている。

本研究開発によって、毎年 2,000 万トンの規模で発生する上記の国内流通老廃鉄スクラップを鉄鋼製造原料として有効活用することで、鉄鉱石からの製造法に比べ、大幅な省エネルギーが期待できる。本技術開発成果に基づくプロセスで上記老廃鉄スクラップの半量进行处理するとすれば、原油換算で約 470 万 kl の省エネルギー量に相当する。

また、資源リサイクルに関わる新技術を担保することで、資源の有効活用に資するとともに、社会基盤材料の製造業である鉄鋼業の国際競争力維持に寄与するものである。

エネルギー分野における技術ロードマップ

No.	エネルギー技術 個別技術	2010	2015	2020	2025	2030 ~
1101	省エネ型産業プロセス	省エネ性の向上 21% 生産性向上 従来の3倍 コークス製造コストダウン -18%			23%	
	次世代コークス製造法		既存コークス炉のリプレイス	-20%	多目的転換炉	
1102	省エネ型産業プロセス					CO2分離・回収技術 排熱回収技術
	製鉄プロセス	熔融還元製鉄法(DIOS)	次世代圧延技術(難加工性特殊鋼等)	創資源・創エネルギー型高炉		
		電磁力利用鑄造技術 電気炉ダスト回生技術 新焼結プロセス	革新的電磁鋼鉄技術 事前炭化式ガス化溶融プロセス	高温耐熱耐食鉄鋼材料 鑄片表層改質による循環元素無害化技術 超微細粒熟延鋼製造技術、回転炉床有用金属回収技術		劣質原料使用技術(石炭・銲) 水素鉄鉱石還元技術 金属回収技術 熱・冷延統合プロセス

図 1-3. 技術戦略マップ 2008 / 技術ロードマップ (経済産業省)

2 . 研究開発目標

2 - 1 研究開発目標

鉄スクラップリサイクルは、省エネルギー及び資源有効活用の点から極めて重要である（原料として鉄スクラップを用いて鉄鋼製品を作る方が、鉄鉱石から作るよりエネルギー消費が少ない。）が、鉄スクラップに混入する銅、錫等の有害元素により、再生鋼材の品質、特に表面品質が劣化する問題があった。

このため、本研究開発は、凝固プロセス及び鋳片処理工程での有害元素の無害化を実現するため、プラズマ及び電磁気技術を用いて鋼材表層を均一かつ安定に溶解するとともに、熱間加工割れを起こす銅の影響を無害化する所定濃度の無害化元素を溶融部に添加する技術を開発したものである。

研究開発の実施に際しては、表 2-1 に示すとおり、具体的な目標を設定して行った。

表 2-1 . 全体目標

目標・指標	設定理由・根拠等
最大 2m 幅の鋳片(スラブ)の表層(熱間加工割れを抑制する条件で決まる鋳片の表層深さ 3mm 程度)を均一かつ安定に溶解し、溶融部を安定保持するとともに所定濃度の無害化元素を溶融部へ最適に添加することを可能とする技術を確立する。	<ul style="list-style-type: none">・最大 2m 幅： 実用化の際のスペックを想定。・鋳片の表層深さ 3mm 程度： 銅、錫による脆化は、そのメカニズムから、表面のみの問題であり、熱間圧延前に加熱炉で表面が酸化されてしまう深さ 1mm から 2mm までの部分をカバーでき、ニッケルなどの無害化元素を極力少ない量で添加・改質できる 3mm とした。

2 - 2 研究開発項目

本技術開発は、図 2-2 のプロセス構成のイメージに示すように、プラズマ溶融等の方法を用いて鋳片表面の改質を行い、低コストで鉄スクラップリサイクルの促進を狙ったものである。本開発では、凝固完了直後の高温状態で再度少ないエネルギー供給により加熱溶融し、ニッケルなどの無害化元素を鋳片極表面から数 mm 内に添加する。加熱・溶融ならびにニッケル添加方法、さらに電磁場制御方法について、種々のシーズ技術を開発し、それらの組合せを含めた最適な方法を選択することとした。

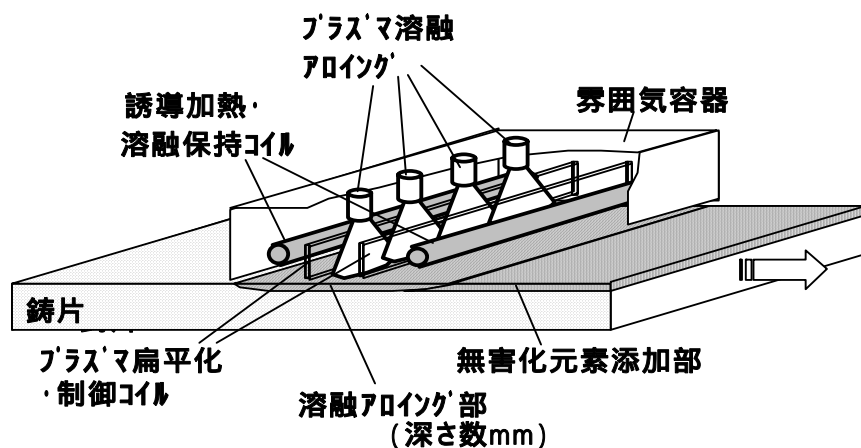


図 2-2 有害元素無害化のための鋳片表面溶融改質処理プロセスイメージ

技術開発の成否は、割れ防止に必要な銅含有量に見合う所定量の無害化元素を、目標である鋳片表面 3mm 程度に均一に添加できるか、さらには、上記シーズ技術開発に関する試験結果とフィージビリティスタディにより実機広幅スラブへのサイズアップが実現可能なプロセスであるか、という 2 点から判定する。

研究開発は、具体的に下記の 5 項目で構成し、各々をリンクしつつ進める、こととし、中間評価までに、以下の(1)～(3)の各要素技術の達成レベルを評価し、広幅鋳片溶融処理プロセスの基本システムを確立する。この結果から、連続処理プロセスとして総合化した小断面スラブによるベンチスケール試験への移行可否を判断する。その後、ベンチスケール試験設備を製作し、試験を実行し、連続処理プロセスとしての技術確立を実施すると共に、最終年度には実機設備設計、設備検討、投資効果等について数値解析モデルによる予測も援用してフィージビリティスタディを実施し、以下の(4)の要素技術の達成レベルを判定することとした。

(1) プラズマ溶融改質技術開発

まず、プラズマトーチ 1 本での小型鋳片サンプルの表層溶融技術を確立する。そのため、新たに小鋳片サンプルを対象とした試験装置（ホットシミュレータ）を製作し、プラズマ安定溶融条件を確定するとともに、鋼中の銅を無害化するニッケル等の添加元素を溶融プール内に添加する技術を確立し、その有効性を確認する。

次ステップでは、上記プラズマトーチを複数並列型とした試験装置を製作し、広幅鋳片への適用性を検証する。

（ 2 ）電磁誘導制御技術開発

プラズマを扁平化させることを狙った電磁場の印加機能を、上記ホットシミュレータに併設することで、プラズマトーチ 1 本で広い面積を溶融する基本システムを確定する。

また、溶融処理技術として、プラズマ以外に、誘導加熱・溶融単独で活用する方法も考えられることから、本技術の適用可否についても判断する。

さらに、電磁誘導技術の利用として、高周波磁場による溶融プール表面の形状や流動の乱れを抑制できる機能を確認する。

（ 3 ）複合溶融改質技術開発

上記プラズマ溶融技術と電磁気力による加熱・溶融技術の複合による、効率的な鋳片表層溶融技術を構築する。本技術開発については、ホットシミュレータ試験、並列プラズマトーチ型試験およびベンチスケール試験の各ステップにおいて、上記（ 1 ）（ 2 ）の各単独での技術との比較を行うことで総合的に評価する。

（ 4 ）鋳片溶融改質ベンチスケール試験

上記（ 1 ）～（ 3 ）の各要素技術を総合化した、小断面スラブによるベンチスケール試験設備を設置する。ベンチスケール試験によって得られた知見に基づき、工業化を前提としたフィージビリティスタディを実施し、広幅実機スラブへの適用可否を判断する。

（ 5 ）銅無害化調査研究

銅、錫による脆化挙動および表層溶融部への上記無害化元素添加の有効性について、各ステップにおける試験と並行して調査研究する。併せて、鉄スクラップの発生量やその品位に関する将来動向についても調査する。

3 . 成果、目標の達成度

3 - 1 成果

3 - 1 - 1 成果

省エネルギー及び資源有効活用の観点から極めて重要である鉄スクラップのリサイクルに当たり、鉄スクラップに混入する銅、錫等の有害元素が連続鋳造・加熱圧延工程で引き起こす表面品質劣化が課題であった。

本開発では、有害元素の無害化を実現するため、凝固完了直後の品質劣化が未だ生じない高温の状態のエネルギー供給が少ない条件のもとで、プラズマ及び電磁気技術等を用いて、鋳片表層を均一かつ安定に溶解しつつ、同時にニッケルなどの無害化元素を鋳片極表層から数 mm 内に添加することを狙い、要素技術（電磁誘導加熱による鋳片表層予熱溶融技術、無害化元素であるニッケルの添加装置を組み込んだ複数プラズマによる広幅溶融・改質（Ni 合金化）技術、溶融範囲拡大のための扁平プラズマ溶融・電磁誘導複合化技術等）の開発、ベンチスケール試験、これらを踏まえたフィージビリティスタディを行った。

最終的に、割れ防止に必要な銅含有量に見合う所定量の無害化元素を目標である鋳片表層 3mm 程度に均一に添加でき、圧延後の品質も満足していることを確認した。さらに、これらの試験結果とフィージビリティスタディにより、実機広幅スラブへのサイズアップが実現可能なプロセスであることも確認した。一方、実機化の為には、処理速度向上の為の高出力プラズマ発生装置の改良、鋳片端部処理技術の開発、予熱電力低減方策の検討等が、今後、必要であることが明らかになった。

研究開発の個別項目ごとの成果は、以下のとおりである。

(1) プラズマ溶融改質技術開発

ホットシミュレータ試験

まず、平成 15 年度にプラズマトーチ 1 本による試験装置（ホットシミュレータ）を製作した。本装置を逐次改良しつつ、小鋳片サンプル表層の溶融試験を実施した。また、プラズマアークの基本特性把握を目的に、鋳片サンプルではなく静止した水冷銅板を用いた、溶融を伴わない基礎実験装置による調査試験も加え、種々の制御条件の探索試験を実施した。その結果、プラズマトーチ 1 本による溶融処理で狙いとした 80mm 幅、3～4mm 深さの溶融処理技術を確立した。



図 3-1-1. プラズマによる鋳片表層溶融状況

さらに、溶融部への無害化元素添加挙動を調査し、銅無害化元素であるニッケルを狙いの濃度に添加可能であることを確認した。すなわち、処理部のニッケル濃度を鋳片サンプルの幅・長さ・深さ方向に分析した結果、幅 80mm に及ぶ広い溶融プール内であっても、狙いとしたニッケル濃度からの偏差が 10%程度のみならず均一な分布になるという、従来知られていなかった知見を得た。添加方法については、まず、ニッケルワイヤー添加装置を設置しその適用性評価試験を行うことから、添加設備技術開発に着手した。

また、プラズマ溶融処理部は通常連続鋳造材と同等以上の健全な凝固組織となっており、本処理によって新たに割れなどの欠陥が生じていないことが確認された。さらに、溶融処理部の非金属介在物を調査したところ、処理前に比べその個数は減少しており、清浄化の効果もあることが確認された。これは、溶融プール内の流動によって、非金属介在物が鋳片最表層へ浮上分離したことによるものと推定される。これらの結果は、本開発の目的である銅の無害化による割れ性欠陥の解消以外に、製品段階で有害となる非金属介在物の減少など、鋳片表層部の特性向上にも役立つ可能性を意味し、革新的な鉄鋼製品製造技術シーズとしても期待が持てる知見である。

並列プラズマ実験装置製作および試験

複数本のプラズマトーチを並列させた広幅鋳片表層を処理するプロセス構築

に着手し、試験設備である並列プラズマ実験装置を導入した。上記ホットシミュレータでの試験結果及び装置機能を踏まえ、設備設計・製作を経て主要な設備機能確認を終え、平成16年度末にまず2本のプラズマトーチから試験に着手した。隣接したプラズマアーク間には互いに引き合う力が働くことが知られており、アークの扁平化・広幅化の障害となる。この問題に対して、両端のアークの外側にこれを打ち消す電流を流すことで、アークの相互干渉の補償方法を考案した。平成17年度にプラズマトーチを5本に増強し、初めて複数プラズマによる同時処理が実現できた。試験設備の開発として側面からは、処理雰囲気のシール性向上等の改良を行い、本技術開発での目標最終幅である400mm幅鋳片サンプル表面の溶融が可能となった。溶融処理後の鋳片はほぼ平坦な表面となっており、これにより、複数プラズマを並列に配置することで広幅鋳片の均一溶融処理が可能であることを示すことができた。

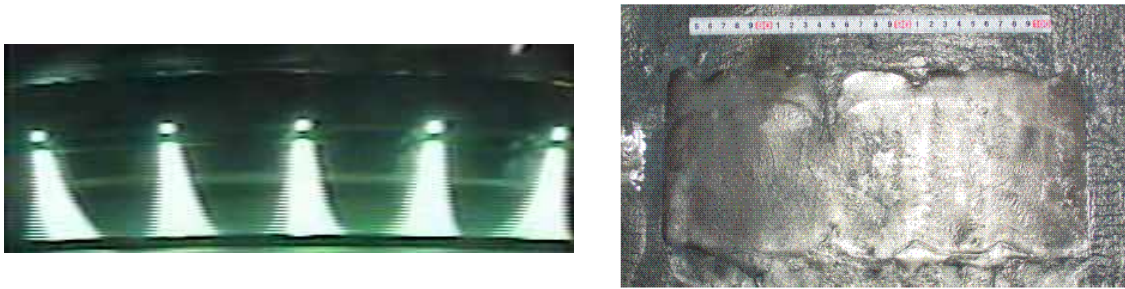


図3-1-2. 複数プラズマトーチによる広幅溶融状況および溶融処理後鋳片

安定プラズマアーク生成法の研究（秋田県立大学共同研究）

- 1) 円周上に等間隔で観察孔が並んでいる円盤を適当な一定速度で回転させ、アークを見ることにより、アークの高速振動運動を、ほぼ停止しているように観察できる装置を考案した。本装置を用い、プラズマアーク扁平化のための交流磁場の周波数が100Hz以下であれば、アークは予測された通り追従して振動・扁平化することが明らかになった。
- 2) プラズマトーチノズルから噴出するプラズマジェットが旋回速度成分を持つ場合と持たない場合とを比較した。旋回運動成分を持たせるとプラズマアークの太さは絞られエネルギー密度は大きくなるが、広幅化されにくくなることが明らかになった。したがって、小さな磁場強度でより広幅化された熱源を得るためには、旋回速度成分は与えないほうが良いとの知見を得、本プロセスに最適なプラズマトーチの設計指針を提示できた。
- 3) 交流磁界の強度と波形の変化による陽極面上の入熱分布変化を調査した。交流磁界の波形を正弦波、三角波、矩形波と変化させた結果、アークの入熱を幅方向に均一にするには矩形波状の交流磁場を作用させることが有利であると判

明した。

4)交流磁場の強度と波形により、陽極面上のアーク圧力分布がどのように変化するか調査した。アークを振動させ広幅化することにより、圧力は幅方向に分散され減少していくことが確認された。この圧力は、アークにより溶融した溶鋼を飛散させたり、窪みなどの溶融プールの乱れを起こすほどの大きさにはなっていないことが明らかになった。

数値解析

シングルプラズマトーチの挙動をシミュレートできる数値解析モデルを開発した。実験結果との対比を含めて逐次改良し、プロセス解析および試験装置設計に反映した。さらに、並列プラズマの数値解析モデルの構築について、基本モデルを作成、実験で観察される基本的な挙動のシミュレーションが可能であることを確認した。複数プラズマの系では解析メッシュ数が増え解析時間が延長するという課題があるが、計算機ハード・ソフトを更新し解析迅速化を図るとともに、実験との比較を行いつつモデルの改良を進めた。

(2) 電磁誘導制御技術開発

プラズマアークの扁平化制御

プラズマアークの交流磁界による振動・扁平化制御については、試験装置ホットシミュレータおよび並列プラズマ実験装置にそれぞれ専用電源・コイルを設置し、鋳片サンプル表層の溶融試験に供した。上記プラズマアークの安定化生成に関する研究成果に基づき、振動周波数を 50Hz、制御波形については入熱が各アーク端部に有効に働くよう矩形波が選択できる先進的な制御電源を設計・製作した。

電磁誘導加熱単独溶融試験

ホットシミュレータに加熱・溶融用の電磁コイルを設置して、鋳片表層の溶融処理をプラズマ加熱に依らずに誘導加熱単独で行う試験を実施した。熱的には溶融状態を得るのに十分であり、移動するサンプル表面の 60mm 幅、60mm 長、数 mm 深さの部分溶融を行えたものの、誘導単独では、熱と同時に発生する電磁力の溶融プールへの作用分布を均等化することが困難であり、溶融部表面は滑らかであるものの、処理部全体が窪む現象が見られた。この現象は電磁力による変形と判断され、その結果変形を抑制しつつ電磁誘導を利用する手段として、誘導加熱とプラズマ加熱を併用し、双方の利点を生かした複合処理技術へ展開することとした。

溶融プール安定化制御法の研究（名古屋大学共同研究）

本研究で対象とする浅い溶融プールを模擬した水モデル装置を作製し、表面にアルゴンガスを吹きつけ、水表面の変位を計測することで、ガス流量等の変位に与える影響について評価した。一方、無限に広がっている液体を対象として自由表面安定性解析（ケルビン - ヘルムホルツの安定性解析）を行い、自由表面を安定保持するための臨界ガス流速を導出した。その結果と上述の水モデル実験系とを比較したところ、自由表面を安定保持可能な臨界ガス流速が一致した。すなわち、安定性解析では液体を無限深さと仮定して理論解を求めたにもかかわらず、有限深さの溶融プールに適用可能であることが明らかとなった。鋳片表層改質プロセスにおいて自由表面を安定保持可能な臨界プラズマガス流速を計算したところ、21m/sec となった。ガス流速をこれ以下とすれば溶鋼プールを安定保持可能である。

一方、磁気浸透深さ（スキンデプス）と溶融プール深さがほぼ等しくなるような装置を作製した。交流磁場を印加しつつ溶融金属表面に振動を生成させ、その減衰挙動をレーザ変位計で計測した。その結果、磁場強度が強いほど減衰定数が大きくなることを明らかとした。これは、磁場印加を積極的に活用することで、溶融プール表面の安定化制御ができるという新技術シーズを見出したことを意味する。

数値解析

3次元有限要素法を用いた電磁場解析による電磁場およびジュール加熱場の解析モデルを構築した。使用する電磁コイルは上方印加型であるため、試験装置で同種のコイル形式としている予熱コイルの数値解析モデルの検討を実施した。ジュール加熱分布から想定されるサンプル温度分布となっており、電磁場解析についてはインピーダンス解析含めて手法は確立された。確立したモデルを、その後のプラズマ処理との組み合わせ下での誘導加熱コイル設計へ適用し活用した。

(3) 複合溶融改質技術開発

前記のように電磁誘導加熱のみによる単独溶融では、電磁力の溶融プール形状へ及ぼす影響が大きくなる課題があった。プロセス構成として、誘導加熱による急速加熱は溶融にいたる直前までの昇温機能とし、直後のプラズマ加熱溶融の入熱エネルギー節約あるいはプラズマ処理直前の温度調整機能とする、誘導加熱とプラズマ溶融とを複合させた方法が考えられる。まず、本プロセス構成の有効可否を判断するため、ホットシミュレータの誘導加熱コイル等を改造し確認試験を実施した。

なお、高周波電磁誘導場によるプラズマアークの偏向など相互干渉の懸念があったが、試験の結果影響がないことを確認でき、併用したプロセス構成が選

択できることを検証した。

(4) 鋳片溶融改質ベンチスケール試験および実用化フィージビリティスタディ ベンチスケール試験設備による長尺鋳片処理試験

事業開始から逐次開発してきた要素技術を統合して、(400mm 幅×7m 長)鋳片の連続溶融・改質処理ができるベンチスケール試験設備を開発・設置した。本試験設備を用いた連続長時間運転試験により、広幅鋳片表層の均一溶融・改質技術を確立した。

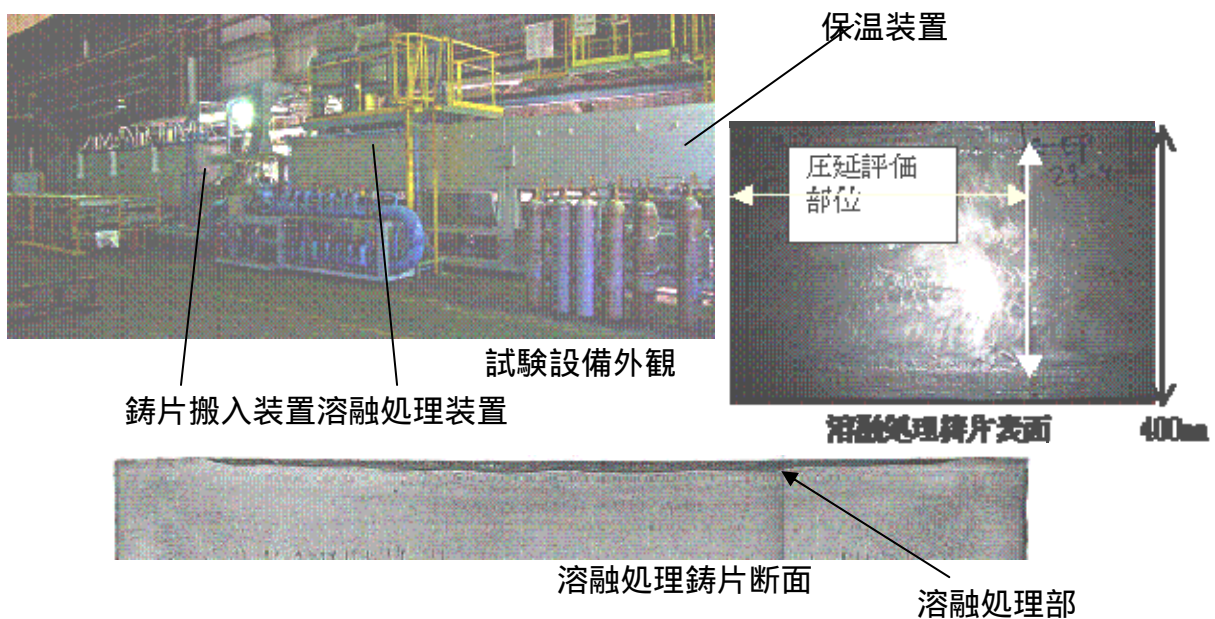


図 3-1-3. ベンチスケール試験設備外観および溶融処理後鋳片

平成 18 年度末に設置した長尺(400mm 幅×7m 長)鋳片処理用ベンチスケール試験設備を用いて、平成 19 年 4 月より本格試験を実施した。以下の各機器の性能確認および改善を経て、連続長時間運転試験を行い鋳片表層の均一溶融・改質条件を把握した。

・今回採用した誘導加熱設備は高電圧・高電流仕様であり、これまで工業的に実績のないものであったため、水冷ケーブルの耐圧性等に課題があったが、順次出力を上げ鋳片加熱能力を確認しつつ適正な昇温パターンを決定した。その結果、プラズマ溶融直前の表面温度で当初の狙いの 1200～1300 を確保できるまでとなった。ただし、7m 長鋳片の連続処理とはいえ、バッチ処理であるため実機想定とは異なり、鋳片の先端及び後端に加熱不十分な部位が残らざるを得ないこととなった。

・プラズマトーチ 5 本による幅方向均一溶融については、プラズマトーチ、相互干渉補償電流コイルおよびプラズマアーク振動扁平化コイルの相対位置の適正化や電流値、アークガス(Ar)流量等プラズマ運転条件の選定により、幅方向

に均一な溶融深さが安定して得られるまでとなった。

・合金ワイヤー方式による Ni 添加法については、ワイヤー供給用添加ノズルの鋳片幅方向への揺動さらには各ノズルへの振動付与といった新技術を導入するとともに、添加位置・添加速度とプラズマ溶融側条件との相互関係を実験的に調査することで、Ni 添加量の高範囲にわたり、均一添加・混合ができることを確認した。

・プラズマ溶融・改質にあたっては、低酸素濃度雰囲気での処理が必要であり、ガスノズルを使ったシール方式を開発し、その効果を確認した。

上記の試験で得られたデータは、数値解析モデルによるシミュレーションと合わせ、実機設備構成・仕様の検討や実機操業諸元の検討など実用化フィージビリティスタディに活用した。

安定プラズマアーク生成法の研究（秋田県立大学との共同研究）

磁気駆動アークの入熱分布を調査するために、熱量分布測定方法について検討し、測定装置を設計・製作した。さまざまな磁界をアークに作用させ、理論計算と実測入熱を比較し、理論予測がほぼ妥当であることを確認した。この研究成果は鋳片の表層を均一に溶融するための最適磁界設計の指針となる。

また、プラズマトーチの陰極損耗速度の測定実験を行った。400A での長時間連続運転から陰極損耗速度： $3 \cdot 10^{-13}$ kg / Coulomb の値が得られた。この値から陰極の寿命を推定すると 400A 運転で少なくとも 1000 時間の連続操業が可能であることが分かった。

溶融プール安定化制御法の研究（名古屋大学との共同研究）

新規機能の付与を目的として、溶融プール凝固層の組織を交流磁場の外部印加によって制御可能か否かについて検討した。その結果、磁場印加により 1 次デンドライトアーム間隔が減少することを明らかにした。その凝固組織微細化メカニズムについては完全に解明できていないので今後の検討課題であるが、本成果は実用化開発に向けての新技术シーズとして有用である。

数値解析モデルの構築・活用

本プロセスでは、プラズマアーク挙動、電磁誘導加熱および鋳片の溶融といった複雑な現象を扱うことが必要である。これらを統合して解析できる数値解析モデルを新たに開発した。これまで行ってきた小型・中型試験結果のシミュレーションに加え、今回大型試験設備を使ったベンチスケール試験結果と照合することで、大鋳片サイズの 3 次元・非定常現象をシミュレートできるまでとなった。本モデルは、ベンチスケール試験設備の基本設計や運転条件の最適化および実用化フィージビリティスタディのための重要なツールとしての意義を持つ

とともに、複雑な現象を解析できる数値解析法として学術的にも価値あるものである。

実用化フィージビリティスタディ

ベンチスケール試験設備をスケールアップすることで実機設備仕様・構成を提示した。また、既存製鉄所に本プロセスを導入する際の操業イメージについても検討した。高生産性設備を前提とする場合などには、投資効率向上を目指した設備費のさらなる低減など、実機設備開発課題が抽出された。本検討結果は、対象処理量や投資効果の前提条件をどう置くかによって評価は異なってくるものではあるが、今後実用化開発を進める上での 1 つの基本ケースとして有意義である。

ベンチスケール試験設備の構成および運転条件を参考に、実用化イメージを検討した。実用連続鑄造鑄片（250mm厚×1000~2000mm幅）を対象に、処理量 10 万 t / 月の実機設備仕様検討・概略設計を行った。設備費用についても概略試算し、Ni 合金添加量削減によるメリット等と対比することで、設備投資効率についていくつかのケースを想定して検討した。投資効率のさらなる向上には、誘導加熱設備の軽減等が有効であり、そのためプラズマ大出力化などが実機設備開発課題であることが抽出された。また、本プロセスを既存製鉄所に導入する場合のレイアウトや物流についても検討し、既存連続鑄造機の生産量に対応した上記対象量 10 万 t / 月の操業イメージについて提示した。

さらに、本事業の期待効果として開発開始時に想定した省エネルギー効果についても、既存プロセスと本プロセスでの必要エネルギー量について、文献調査および理論的検討により妥当なものであったことを再確認した。

(5) 銅無害化調査研究

銅無害化調査

産業部門別の老廃鉄スクラップ発生量と製造法別生産履歴の過去から現在に至る統計値をシミュレートできるモデルを構築し、老廃鉄スクラップ発生履歴と将来予測を行った。老廃スクラップ総量では、調査評価時点(2003 年)での約 3,000 万トに対して、2030 年には約 3,400 万トに増加するとの予測結果となった。

次に、これら増大する老廃スクラップ中の有害元素として銅に着目し、過去の鉄スクラップ品種別成分規格等を参照し、その濃化程度を予測した。これによれば、純粋な鉄スクラップ由来であれば、全鉄スクラップ品種平均で、調査評価時点(2003 年)で 0.18% であるものが、2030 年には 0.197% に上昇すると予測された。しかしながら、現実には上述の平均銅値は現状で 0.3~0.4% と言われており、このずれは、種々の銅源がスクラップに付着・混入することが原因と推

定される。特に、2010年までの銅濃化率が急激であり、これは1980年代の鉄鋼高生産時代を反映したものと考えられ、上記実態銅値をベースとすれば、直近10年程度に銅濃化が顕著となるものと予測される。

また、銅による高温脆化挙動や添加元素の影響に関する研究については、社団法人日本鉄鋼協会の研究会「鋼材表面特性に及ぼすスケール性状の影響」での成果をレビューするとともに、他の過去の文献も含め広範な調査を行った。現時点では、鋼材表面の熱間脆化メカニズムや鋼の組成・加熱条件などが脆化に及ぼす影響に関する研究はあるものの、銅の無害化に有効な元素はニッケル以外に見つかっておらず、本技術開発開始時に着眼した高価なニッケルの使用量の大幅な削減法としての本技術の意義に変化はない。

表層溶融改質後鑄片の圧延評価調査

鑄片表層溶融改質後の鋼材としての問題点の有無を抽出するため、熱間圧延試験を実施した。その結果、改質後の鋼材表面および改質部・母材部境界等に割れや剥離などの欠陥はなく、圧延等後工程においても悪影響を及ぼさず、新たなプロセスとして成立し得ることが確認された。

また、表層部をさらに深く溶融・改質することができれば、本事業の狙いである銅の熱間脆性回避以外に、耐食性や耐摩耗性を向上させた低廉型新機能鋼材創出技術として活用できる可能性があるといった波及効果も期待できると思われる。

3 - 1 - 2 特許出願状況等

研究開発成果の公表については、5カ年の事業全体で、論文発表7件、国内学会、国際会議等の場での発表12件を行った。事業終了後の次年度にも4件の国際会議等の場での発表をエントリーしており、今後も継続して広く開発成果を公表し、PR・普及活動を推進して行く予定としている。

また、特許については、事業終了後の次年度の3件も加えて25件の出願を行い、開発成果の知的財産化を図った。なお、うち3件の基本特許は登録されているが、その他の周辺特許を含め審査請求を実施中である。

表 3-1-1. 論文リスト

	題目・メディア等	時期
論文	ISIJ-International: Magnetohydrodynamic Simulation of DC Arc Plasma under AC Magnetic Field	H18.3
	High Temperature Material Processes: Theoretical Consideration on Pressure Distribution of Oscillating Motion	H18.10
	High Temperature Material Processes: Investigation on Magnetically Driven Transferred Arc : Experiment and Numerical Analysis	H18.10
	Thin Solid Films: Distribution of the Heat Flux transported by the Magnetically driven Arc	H19.3
	ISIJ-International: Characterization and reduction of interactive forces among magnetically driven arcs	H19.7
	ISIJ-International: Plasma behavior under an alternating magnetic field both the perpendicular and parallel magnetic field	H19.7
	日本実験力学学会誌「電磁浸透厚みと同程度の熔融金属浴への交流磁場印加による自由表面安定化」	H19.9

表 3-1-2. 発表リスト

	題目・メディア等	時期
発表	CAMP-ISIJ: 有限深さの溶融金属への高周波磁場印加による自由表面安定化	H16.9
	4 th Int. Conference on Computational Fluid Dynamics in the Oil and Gas, Metallurgical& Process Industries Magnetohydrodynamic Simulation in Steelmaking Process by 3D Finite Volume Method	H17.6
	17 th Int. Symposium on Plasma Chemistry Production of Broad Arc by Alternating Magnetic Field	H17.8
	9 th Int. Conference on High Technology Plasma Process Theoretical Consideration on Pressure Distribution of Oscillating Motion	H18.5
	9 th Int. Conference on High Technology Plasma Process Oscillatory Motion of Arc Driven by the Non-uniform Magnetic Field	H18.5
	9 th Int. Conference on High Technology Plasma Process Investigation on Magnetically Driven Transferred Arc : Experiment and Numerical Analysis	H18.5
	5 th Int. Symposium on Electromagnetic Processing of Materials Application of DC Plasma driven by AC Magnetic Field to the Surface Remelting Treatment of Steel	H18.10
	平成 19 年度(第 17 回) 日本素材物性学会年会「磁気駆動アーク複数本運転時の相互作用とその低減法についての理論的考察」	H19.6
	Int. Conference on Phenomena in Ionized Gasses XXVIII Improvement of Uniformity in Heat Flux Transported to Anode by Magnetically Driven Arc	H19.7
	18 th Int. Symposium on Plasma Chemistry Theoretical consideration on the interactive forces among magnetically driven arcs and their reduction	H19.8
	18 th Int. Symposium on Plasma Chemistry Investigation on magnetically driven transferred arc experiments and numerical analyses	H19.8

表 3-1-2. 発表リスト (続き)

	題目・メディア等	時期
	CAMP-ISIJ 交流磁場で振動させた扇状プラズマアークによる鉄の表面溶融	H19.9
	5 th Korea-Japan Workshop on Science And Technology in Ironmaking and Steelmaking: Application of DC Plasma Driven by AC Magnetic Field to the Surface Melting of Steels.	H20.1
	溶接学会秋季全国大会「磁気駆動プラズマによる鋳片表層の改質技術に関する研究」	H20.9
	CAMP-ISIJ「交流磁場で振動させた扇状プラズマアークを利用した鋳片表層改質」	H20.9
	4 th Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking: Application of DC Plasma Arc to the Surface Melting of Steels	H20.10

表 3-1-3. 特許リスト

	題目・メディア等	時期
特許	特願 2002-367197 銅を含有する鋼鋳片の表層改質方法、改質鋳片および加工製品	H18.2 登録
	特願 2002-367196 鋼鋳片の表層改質方法、改質鋳片および加工製品	H19.1 登録
	特願 2002-367198 鋼鋳片の表層改質装置	H18.2 登録
	特願 2004-129409 部分的に成分の異なる鋼材の製造方法および加工製品	H20.3 審査中
	特願 2004-129410 鋼鋳片の手入れ方法	H20.3 審査中
	特願 2004-129411 連続鋳造鋳片の表面手入れ方法及び装置	H20.3 審査中
	特願 2004-244729 金属材料の表層溶融処理方法	H20.3 審査中
	特願 2004-313303 金属材料の表層溶融処理方法	H20.3 審査中
	特願 2004-313304 強磁性体金属材料の表層溶融処理方法	H20.3 登録中

表 3-1-3. 特許リスト（続き）

	題目・メディア等	時期
特許	特願 2005-287451 溶融亜鉛めっき用鋼材の製造方法および溶融亜鉛めっき用鋼材	H20.3 審査中
	特願 2005-287453 複合鋼材の製造方法、複合鋼材のおよび該複合鋼材を用いて得られる軌条鋼	H20.3 審査中
	特願 2005-292016 加熱装置	H20.3 審査中
	特願 2006-302526 鋳鋼片の表層処理装置及び表層処理方法	H20.3 出願済
	特願 2006-302561 鋳鋼片の表層処理装置及び表層処理方法	H20.3 出願済
	特願 2006-302531 鋳鋼片の溶融深さ測定方法および鋳鋼片の表層処理方法	H20.3 出願済
	特願 2007-046515 鋳鋼片の表層改質方法、表面改質鋳鋼片及び加工製品	H20.3 出願済
	特願 2007-131258 鋳鋼片の表層処理装置及び鋳鋼片の表層処理方法	H20.3 出願済
	特願 2007-219726 連続鋳造鋳片の熱処理装置及び熱処理方法	H20.3 出願済
	特願 2007-271995 表層溶融処理装置及び表層溶融処理方法	H20.3 出願済
	特願 2007-271998 鋳鋼片の表層溶融処理装置及び表層溶融処理方法	H20.3 出願済
	特願 2007-272002 鋳鋼片の表層溶融処理装置及び鋳鋼片の表層溶融処理方法	H20.3 出願済
	特願 2007-219726 連続鋳造鋳片のプラズマ表層加熱装置及びプラズマ表層加熱方法	H20.3 出願済
	特願 2008-108550 鋳鋼片の表層改質方法	H20.4 出願済
	特願2008-226193鋳鋼片の表層改質方法	H20.9 出願済
	特願 2008-226194 鋳鋼片の表層改質方法	H20.9 出願済

3 - 2 目標の達成度

以下のとおり、全体目標を達成した。

表 3-2-1 全体目標とその達成度

目標・指標	成果	達成度
<p>最大 2m幅の鋳片（スラブ）の表層（熱間加工割れを抑制する条件で決まる鋳片の表層深さ 3mm 程度）を均一かつ安定に溶解し、溶融部を安定保持するとともに所定濃度の無害化元素を溶融部へ最適に添加することを可能とする技術を確認する。</p>	<p>電磁誘導加熱による鋳片表層予熱溶融技術、無害化元素であるニッケルの添加装置を組み込んだ複数プラズマによる広幅溶融・改質（Ni 合金化）技術、溶融範囲拡大のための扁平プラズマ溶融・電磁誘導複合化技術等の要素技術開発、ベンチスケール試験、これらを踏まえたフィージビリティスタディを行い、最終的に、割れ防止に必要な銅含有量に見合う所定量の無害化元素を目標である鋳片表層 3mm 程度に均一に添加でき、圧延後の品質も満足していることを確認した。</p>	<p>達成</p>

プラズマ技術および電磁気利用技術を用いた、鋼材表層の均一かつ安定溶融、および熱間加工割れを起こす銅を無害化する元素の溶融部添加技術を開発することを目標に、これを達成するための種々のシーズ技術開発を行った。その結果、交流磁場によって扁平化されたプラズマアークにより広い面積の鋳片表層を均一に溶融処理する技術を確認した。また、この溶融部に添加したニッケルは、熱間加工割れを起こす表層部全域に均一に混合することを確認した。

上記処理条件を反映させ、複数プラズマトーチを並列した試験装置を製作し、広幅鋳片の溶融処理試験を行うことで、実用化を想定したプロセスとして成立し得るとの判断を得、中間目標を達成した。

さらに中間評価後、並列プラズマ型で鋳片表層を広幅にわたり均一に溶融す

る条件の確定とニッケル添加装置を開発・付加し、最終段階である長尺鋳片の連続処理を目的としたベンチスケール試験設備の設計・製作を実施し、試験連続鋳造機と連動した試験を実施し、実機の 1/2.5 規模のベンチスケールにて技術を確立した。また、実験ならびに平行して確立した数値解析モデルを援用し、実機モデルケースでのフィジビリティスタディを実施し、実用化時の設備及び操業条件、投資規模及び投資回収評価を行った。実用化に際しては投資環境や処理対象量など勘案すべき要素があり特定ケースでの精査が必要であるものの、技術的には実機サイズのプロセス構築が可能であるとの結論を得た。

研究開発項目ごとの実施結果は、次のとおりである。

表 3-2-2 研究開発項目ごとの実施結果

研究開発項目	目標・指標	成果	達成度
(1) プラズマ溶融改質技術開発	<p>プラズマトーチ 1 本での小型鋳片サンプルの表層溶融技術を確立する。そのため、新たに小鋳片サンプルを対象とした試験装置（ホットシミュレータ）を製作し、プラズマ安定溶融条件を確定するとともに、鋼中の銅を無害化するニッケル等の添加元素を溶融プール内に添加する技術を確立し、その有効性を確認する。</p> <p>次ステップでは、上記プラズマトーチを複数並列型とした試験装置を製作し、広幅鋳片への適用性を検証する。</p>	<p>プラズマトーチ 1 本による溶融処理原理を確認できる試験装置（ホットシミュレータ）を製作し、交流磁場によりプラズマアークを扁平化させることで、狙いとした 80mm 幅、3～4mm 深さの鋳片表層溶融処理技術を確立した。さらに、溶融部へのニッケルの添加挙動を調査し、無害化に必要な濃度での均一混合が可能であることを確認した。</p> <p>並列させた複数のプラズマトーチで処理する試験装置を設置し、400mm 幅鋳片サンプルの溶融処理試験を実施した。今後、本装置による試験を継続し、最適なプロセス処理条件の確立を目指す予定であるが、本装</p>	達成

		置構成を基本に鋳片幅方向に並列させるプラズマトーチを増やすことで、実用化を想定した広幅（最大 2m）鋳片処理へ適用できるとプロセスであると判断された。	
(2) 電磁誘導制御技術開発	<p>プラズマを扁平化させることを狙った電磁場の印加機能を、上記ホットシミュレータに併設することで、プラズマトーチ 1 本で広い面積を溶融する基本システムを確定する。</p> <p>また、溶融処理技術として、プラズマ以外に、誘導加熱・溶融単独で活用する方法も考えられることから、本技術の適用可否についても判断する。</p> <p>さらに、電磁誘導技術の利用として、高周波磁場による溶融プール表面の形状や流動の乱れを抑制できる機能を確認する。</p>	<p>プラズマアークに交流磁場を印加することでアークを扁平化させ、広い面積の鋳片表層を溶融できる技術を確立し、溶融プロセスの基本システムを確定した。</p> <p>また、アーク端部での入熱効率の向上を可能とする印加磁場波形矩形制御法も開発した。</p> <p>電磁誘導加熱・溶融単独処理の可能性を検討したが、入熱的には十分であるものの、誘導単独では熱と同時に発生する電磁力の溶融プールへの作用分布を均等化することが困難であり、処理部全体が窪む現象が発生するという解決すべき課題が明らかとなった。</p> <p>高周波磁場による溶融プール表面の形状や流動の乱れを抑制できる機能として、プラズマガスと溶融プール表面乱れの関係、および交流磁場強度と乱れの減衰挙動の関係について調査</p>	達成

		<p>した。前者では、無限に広がっている液体を対象として行った自由表面安定性解析手法を用いて、溶融プール自由表面を安定に保持するための臨界プラズマガス流速推定法を見出した。</p> <p>また、後者では、溶融プール深さとスキndeプスがほぼ等しくなるような交流磁場を印加した場合、磁場強度が強いほど自由表面上に発生した振動は速く減衰することを明らかにした。本知見は、プラズマ溶融処理時のさらなる溶融プール安定化の機能として利用できる。</p>	
<p>(3) 複合溶融改質技術開発</p>	<p>上記プラズマ溶融技術と電磁気力による加熱・溶融技術の複合による、効率的な鋳片表層溶融技術を構築する。本技術開発については、ホットシミュレータ試験、並列プラズマトーチ型試験およびベンチスケール試験の各ステップにおいて、上記(1)(2)の各単独での技術との比較を行うことで総合的に評価する。</p>	<p>誘導加熱とプラズマを併用し、双方の利点を生かした複合処理技術の検討を行った。当初、高周波電磁場とプラズマの相互干渉が、懸念されたが、名古屋大学と秋田県立大学の技術と装置を活用した実験研究およびホットシミュレータでの併用実験で問題はないことを確認した。また、各ステップ試験における単独と複合での比較試験により、誘導加熱とプラズマの機能分担や温度制御方法が明確になり、各プロセスの総合的な評価ができた。</p>	<p>達成</p>

<p>(4) 鋳片溶融改質ベンチスケール試験</p>	<p>上記(1)～(3)の各要素技術を総合化した、小断面スラブによるベンチスケール試験設備を設置する。ベンチスケール試験によって得られた知見に基づき、工業化を前提としたフィージビリティスタディを実施し、広幅実機スラブへの適用可否を判断する。</p>	<p>ベンチスケール試験機を用いて、100mm厚、400mm幅、7m長の連続鋳造鋳片を使用した試験を行い、処理サンプルの一部を熱間圧延し、溶融改質処理面と未処理面の圧延後の表面状態調査を実施した。その結果、溶融改質未処理面には脆化割れが存在するが、処理面には存在しないことを確認した。また、得られた試験結果に基づき、工業化を前提としたフィージビリティスタディを実施したが、本開発プロセスは、広幅実機スラブへの適用の可能性があることが、わかった。</p> <p>実機規模設備化にあたっての留意事項・課題を明確化した。留意事項・課題として(a)処理速度向上の実証、(b)シール技術の実証、(c)処理対象材の選択がある。</p>	<p>達成</p>
<p>(5) 銅無害化調査研究</p>	<p>銅、錫による脆化挙動および表層溶融部への上記無害化元素添加の有効性について、各ステップにおける試験と並行して調査研究する。併せて、鉄スクラップの発生量やその品位に関する将来動向についても調査する。</p>	<p>老廃鉄スクラップ量の発生予測と鉄スクラップ中有害元素である銅の濃化予測モデルを構築した。過去、定性的には、老廃鉄スクラップ発生量の増大と品位の劣化が懸念されていたものの、定量的かつ精緻な予測が行われたことは稀少であり、本技術開発の必要性を検証する意味で、今回の調</p>	<p>達成</p>

		<p>査結果の意義は大きい。</p> <p>また、銅による高温脆化挙動や添加元素の影響に関する研究について行った調査では、銅の無害化に有効な元素はニッケル以外に見つかっておらず、本技術のような低コスト型のニッケル利用法の必要性を確認する結果となった。</p>	
--	--	---	--

4 . 事業化、波及効果

4 - 1 事業化の見通し

(1) 実用化への展開

本研究開発後も、研究開発実施者（新日本製鐵（株））において継続研究が行われている。

その後、他の製鉄所への普及が想定される。その場合の、諸条件等について以下のとおり、検討中である。

実用化研究で必要な開発課題は、(a)処理速度向上の実証、(b)シール技術の実証、(c)処理対象材の選択等であり、夫々の開発課題に対応して、効率的な実用化試験が可能なよう、プロセス条件の検討、高出力プラズマ発生装置、鋳片端部処理機能を具備した装置、消費電力低減型電力誘導加熱コイル方式鋳片予熱装置、ガスシール装置等の試験装置の開発並びに試験装置の仕様・方式の決定が、必要であり、これらを加味して、代表製鉄所の選定、処理対象材の選定等を行い、効率的な実用化試験が可能なよう、検討中である。

フィージビリティースタディーの結果、想定ケースの前提におけるエネルギーバランスでの設備条件、設備、処理条件は技術的に可能であるとの結論を得たが、実機展開に際しては、留意事項・課題として(a)処理速度向上の実証、(b)シール技術の実証、(c)処理対象材の選択があること等も明らかとなった。

当初の見込み通り、実用化見通しが得られる前提の下に、まず、スクラップ使用比率が高い製鉄所での実機サイズ試験への移行を行う。実用化開発期間は2年程度と考える。その後は次項の導入普及予測に占めるような展開へと進める。

(1) 実用化への展開

当初計画では、5年間の本開発後、フィージビリティースタディーの結果に基づき、技術の成否を判断するとしていた。フィージビリティースタディーの結果、想定ケースの前提におけるエネルギーバランスでの設備条件、設備、処理条件は技術的に可能であるとの結論を得たが、実機展開に際しては前述の実証課題があることも明らかとなった。

以下の記述は、中間評価時の見通しにフィージビリティースタディーの結果を勘案して数値の見直しを行ったものである。但し、開発、普及年度の予測については前述の将来的開発課題の対処所要見通しに依存して遅れるものと推察されるが、不確定であることから仮置きとして従来2年の実用化開発見込みとし、年度の見直しを行う。また、原料単価は現在大きな変動下にあり不確実

であるために当初の値を据え置き、現在の価格の場合の回収年を参考に記述するに留める。技術的に詳細検討を実施したエネルギー消費等については、従来値の見直しを実施した。また、設備費についてもフィージビリティースタディ-内で設計及び概算見積もりを実施した値への見直しを実施した。

当初の見込み通り、実用化見通しが得られる前提の下に、まず、スクラップ使用比率が高い製鐵所での実機サイズ試験への移行を行う。実用化開発期間は2年程度と考える。その後は次項の導入普及予測に占めるような展開へと進める。

(2) 導入普及予測

今回の技術開発(2003~2007年度)の結果、有害元素のためその使用に制約があった低価格の老廃鉄スクラップを積極的に利用できることになることから、本技術の普及は円滑に進むものと予測される。実用化開発期間2年を経て、2010年度に本技術の導入が開始され、10%/年の割合で、全国の20の鋳片製造工程に導入されていくと仮定すると、2014年度においては50%(10基)、2019年度において100%(20基)の普及が見込まれる。

(3) コスト見直し

イ：Niを溶鋼の段階で添加する場合

(a) ランニングコスト

電力費 = $50 \text{ kWh/t} \times 14.4 \text{ 円/kWh} = 720 \text{ 円/t}$

電源：誘導加熱 9,000 kW + 動力源 300 kW + 制御電源 30kW = 9,330 kW

生産量：10万 t、必要時間：22.5 day

t 当たり必要電力量： $9,330 \text{ kW} \times 22.5 \times 24 / 100,000 \text{ t} = 50 \text{ kWh/t}$

電気代 = 全部原価 14.4 円/kWh

ガスコスト

- 1：Ar ガス

稼動時の Ar 使用量

スラブ $0.24 \text{ m} \times \text{幅} 1.4 \text{ m} \times \text{長さ} L \text{ m} \times 7.8 = 100,000 \text{ t/M}$

長さ L = 38,200 m/M

表面改質全時間 = $38,200 / (1.6 \text{ m/min}) = 23,900 \text{ min /M}$

Ar $1,400 \text{ L/min} \times 23,900 \text{ min/M} = 335 \times 10^5 \text{ L/M}$

t 当たり Ar = 335 L/t

t 当たり Ar = $335 \text{ L/t} \times 52 \text{ 円/Nm}^3 = 17.4 \text{ 円/t}$

定修後の稼動前の充填に使う Ar 使用量

パージガス $3,545 \text{ L/min} \times 5 \text{ min} \times 7 \text{ 回} \times \text{月} 2 \text{ 回} / 100,000$

パージガス = $2.5 \text{ L/t} = 0.2 \text{ 円/t}$

Ar ガス使用 17.6 円/t

- 2 : H₂ ガス

水素ガスを Ar ガスに対して、3.5 %添加する

$$t \text{ 当たり水素} = (\text{Ar} : 335 \text{ L/t}) \times 3.5\% = 11.7 \text{ L/t}$$

$$t \text{ 当たり水素} = 11.7 \text{ L/t} \times 81.2 \text{ 円/Nm}^3 = 0.95 \text{ 円/t}$$

冷却水費は、循環水使用であり、ポンプ稼働の電気代に含まれている。

(b) 添加合金コスト

250 mm 厚みに片面 3 mm (両面 6 mm) に、Ni 0.3 %添加

$$\text{合金コスト} = 600,000 \text{ 円/t} \times (0.3/100) \times (6 \text{ mm}/250 \text{ mm}) = 43.2 \text{ 円/t}$$

(c) 処理 t 当たりの総ランニングコスト = (a) + (b)

$$(\text{電気代 } 720 \text{ 円} + \text{ガス代 } 19 \text{ 円} + 44 \text{ 円}) = 783 \text{ 円/t}$$

(d) 要員 1 名増加の労務費は織り込まない。

(e) 処理 t 当たりの合金添加費用

$$\text{合金コスト} = 600,000 \text{ 円/t} \times (0.3/100) = 1,800 \text{ 円/t}$$

(f) 処理 t 当たりの合金添加費用 = (e) - (d) - (c)

$$= (1,800 \text{ 円} - \text{労務費 } 0 \text{ 円} - 783 \text{ 円}) = 1,017 \text{ 円/t}$$

(g) 年間効果額の総計 = (e) - (d) - (c)

$$(1,800 \text{ 円} - 783 \text{ 円}) \times 100 \text{ 千 t/月} \times 12 \text{ ヶ月} = 1,220,400 \text{ 千円/年}$$

$$\text{効果総額 } 1,220,400 \text{ 千円/年} = 12.2 \text{ 億円/年}$$

(h) 設備費用

2 基 (片面の表面処理装置 × 2 基) 29.4 億円/基 × 2 基 = 58.8 億円投資

(誘導加熱 17.4 + プラズマ関連 4.6 + 搬送装置 2.7 + 設計・工事 4.7) 億円/基

従って、投資回収年数 = 58.8 億円 / (年間効果総額 12.2 億円) = 4.8 年

□ : Cu 含有率の低い低品位、低価格の老廃スクラップを使用する場合

(a) ランニングコスト

$$\text{電力費} = 50 \text{ kWh/t} \times 14.4 \text{ 円/kWh} = 720 \text{ 円/t}$$

$$\text{電源} : \text{誘導加熱 } 9,000 \text{ kW} + \text{動力源 } 300 \text{ kW} + \text{制御電源 } 30 \text{ kW} = 9,330 \text{ kW}$$

生産量 : 10 万 t、必要時間 : 22.5 days

$$t \text{ 当たり必要電力量} : 9,330 \text{ kW} \times 22.5 \times 24 / 100,000 \text{ t} = 50 \text{ kWh/t}$$

$$\text{電気代} = \text{全部原価 } 14.4 \text{ 円/kWh}$$

ガスコスト

- 1 : Ar ガス

稼働時の Ar 使用量

$$\text{スラブ } 0.24 \text{ m} \times \text{幅 } 1.4 \text{ m} \times \text{長さ } L \text{ m} \times 7.8 = 100,000 \text{ t/M}$$

$$\text{長さ } L = 38,200 \text{ m/M}$$

$$\text{表面改質全時間} = 38,200 / (1.6 \text{ m/min}) = 23,900 \text{ min /M}$$

$$\text{Ar } 1,400 \text{ L/min} \times 23,900 \text{ min/M} = 335 \times 10^5 \text{ L/M}$$

t 当たり Ar = 335 L/t

t 当たり Ar = 335 L/t × 52 円/Nm³ = 17.4 円/t

定修後の稼働前の充填に使う Ar 使用量

パージガス 3,545 L/min × 5 min × 7 回 × 月 2 回 / 100,000

パージガス = 2.5 L/t = 0.2 円/t

Ar ガス使用 17.6 円/t

- 2 : H₂ ガス

水素ガスを Ar ガスに対して、3.5 % 添加する

t 当たり水素 = (Ar : 335 L/t) × 3.5 % = 11.7 L/t

t 当たり水素 = 11.7 L/t × 81.2 円/Nm³ = 0.95 円/t

冷却水費は、循環水使用であり、ポンプ稼働の電気代に含まれている

(b) 添加合金コスト

250 mm 厚みに片面 3 mm (両面 6 mm) に、Ni 0.3 % 添加

合金コスト = 600,000 円/t × (0.3/100) × (6 mm/250 mm) = 43.2 円/t

(c) 処理ト当たりの総ランニングコスト = (a) + (b)

(電気代 720 円 + ガス代 19 円 + 44 円) = 783 円/t

(d) 要員 1 名増加の労務費は織り込まない

(e) 処理ト当たりの低価格老廃スクラップ使用コスト

老廃スクラップ使用コスト = 1,000 円/t

(f) 年間効果額の総計 = (e) - (d) - (c)

(1,000 円 - 労務費 0 円 - 783 円) = 217 円/t

(g) 年間効果額の総計 = (e) - (d) - (c)

(1,000 円 - 783 円) × 100 千 t/月 × 12 ヶ月 = 260,400 千円/年

効果総額 260,400 千円/年 = 2.6 億円/年

(h) 設備費用

2 基 (片面の表面処理装置 × 2 基) 29.4 億円/基 × 2 基 = 58.8 億円投資

(誘導加熱 17.4 + プラズマ関連 4.6 + 搬送装置 2.7 + 設計・工事 4.7) 億円/基

従って、投資回収年数 = 58.8 億円 / (年間効果総額 2.6 億円) = 22.6 年

プロジェクト開始当初のスクラップ値差 1,000 円/t-Scrap と Ni 単価 60 万円/t-Ni を使用すると上記のような投資効果および回収年となる。一方、最近のスクラップ値差と Ni 単価差は 3 倍以上となっており、仮に共に 3 倍となっているとすると、効果額は約 3 倍となり、投資回収年は上記両ケースで、それぞれ 1.6 年および 7.5 年となる。このように市場動向依存性が高いので投資にあたってはその時点での事業環境の詳細検討が必要となろう。

4 - 2 波及効果

(1) 省エネルギー効果

本技術開発の省エネルギー効果は、鉄鉱石による高炉還元法よりも鉄スクラップを鉄源として利用した鋳片製造工程の方が単位重量当たりの生産エネルギーを削減できることから、次式で示すことができる。

ここで、2010年から2030年に国内で流通する老廃鉄スクラップ量は約2,000万ト/年規模と想定される。そのうち、今後予想される老廃鉄スクラップ量の増加および含有される銅濃度の上昇により、その有効利用・無害化対策として、高炉法メーカーおよび電炉法メーカーを含めた国内全体の鉄鋼メーカーに本技術開発成果が適用・普及されていくものと想定し、これらの処理量が対象量となる。特に、銅等不純物の濃化が懸念される低品位老廃鉄スクラップ品目においては、銅濃度は現状でも0.3%~0.4%であり、これがさらに悪化していくものと推定され、棒鋼や形鋼など銅濃度制限が比較的緩やかな鋼材品種を主に製造にしている電炉法メーカーにおいても、今後ますますその原料鉄スクラップの選択・配合には制約が出てくるものと予想されることから、本技術の適用によりその制約をなくすことができるものと考えられる。これら低品位老廃鉄スクラップの国内流通量は約1,000万ト/年と推定される。なお、当該約1,000万ト/年の低品位老廃鉄スクラップ国内流通量の全量処理に本技術を適用する導入普及（現在、老廃鉄スクラップを主たる原料として処理している電炉法メーカーに対し、いかに導入していくか等）については、今後の経済環境や研究開発の動向やこれらを踏まえた実施者の転炉設備や系列電炉メーカーでの導入努力によるものであり、現段階では具体的な目処に立ったものではない。

（省エネ量）

$$= \{ (\text{鉄鉱石から鋳片製造エネルギー}) - (\text{鉄スクラップからの鋳片製造エネルギー}) - (\text{プラズマ溶融アロイングエネルギー}) \} \times \text{鉄スクラップ量}$$

$$\text{鉄鉱石からの鋳片製造エネルギー量} \quad : \quad 4,828\text{Mcal/ト}^{(*)}$$

$$\text{鉄スクラップからの鋳片製造エネルギー量} \quad : \quad 518\text{Mcal/ト}^{(*)}$$

プラズマ溶融アロイングエネルギー量（銅等を無害化するためにニッケルを注入する）

$$: \quad 43\text{Mcal/ト}$$

* 製造エネルギー量については、以下の文献を参照して試算した。

「NEDO 地球環境産業技術開発事業（新製鋼プロセスフォーラム）」（平成10年度委託研究開発成果報告書，1999年）、「粗鋼生産プロセスと鉄源」（鉄鋼界，1995年2月）、「原燃料の需給動向と技術」（西山記念講座，1997年9・10月）

したがって、原油が9,126kcal/lであることから、

(年間当たりの省エネ量)

$$= (4,828\text{Mcal/ト} \times 10,000,000 \text{ト} - 518\text{Mcal/ト} \times 10,000,000 \text{ト} - 43\text{Mcal/ト} \times 10,000,000 \text{ト}) \div 9,126\text{Mcal/kl} = 467.6 \text{万 kl}$$

将来の普及率を、2010年度10%、2020年度以降100%と仮定した場合の省エネ量は以下の通りと試算される。

2,010年度 : 46.8 万 kl

2,020年度 : 467.6 万 kl

フィージビリティスタディーの結果、これまでの開発成果から推算されるプロセス消費エネルギーが増加したために当初見込んだ省エネルギー量 2,020年度 471.4 万 kl がわずかに減ずる結果となったが依然として大きな省エネルギー効果を生むと推算される。なお、前述のようにさらなる技術開発により処理中の放出熱を抑制することが可能となれば、処理投入エネルギーを現状開発技術レベルからの類推量より減ずることも期待される。

(2) 民間需要創出効果

本プロセスによる鋳片表層改質工程での鉄スクラップ処理能力を50万ト/年・基と仮定すると、鋳片表層改質設備が全国で20の鋳片製造工程に導入されれば対象量として想定した約1,000万ト/年が処理できる。

鉄スクラップ価格は、需要によって大きく変動し、最近でも8,000円~20,000円/トの値動き(上昇傾向)があるが、新たに使用可能となる鉄スクラップの価格を20,000円/トとして仮定すると、需要創出効果は以下となる。

2010年度 : 1,000万ト/年 × 2万円/ト × 10% = 200億円

2014年度 : 1,000万ト/年 × 2万円/ト × 50% = 1,000億円

2019年度以降 : 1,000万ト/年 × 2万円/ト × 100% = 2,000億円

設備設置に係る費用は、1ライン60億円とすると、連続鋳造機は通常2ラインであるため、1つの鋳片製造工程に対し、1基120億円の費用が必要。したがって、2014年度の普及率50%の中間段階までに、120億円 × 10箇所 = 1200億円(累計) 2019年以降の普及率100%段階で2400億円となる。なお、設備費はフィージビリティスタディーの結果当初想定した5億円/基より増加したが、主に事前予熱の誘導加熱設備の増分によるものであり、その費用増分の抑制は前述のようにさらなる技術開発により処理中の放出熱を抑制することにより可能となる。

5 . 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5 - 1 研究開発計画

研究開発計画（5ヶ年計画）策定に当たっては、技術ニーズに応える、より実行可能で効率的な手段として、次のスケジュール管理の上で行った。1)基礎実験により個別要素技術を評価・確立する。2)複数の要素技術の組み合わせを評価する。3)前記 1)および 2)の技術を総合化したベンチスケール試験に取り組む。これらの理念の下、要素技術の選定（共同研究大学の選定も含む）、資金配分等を行っており、過不足ない事業計画とした。

研究開発は、具体的に下記の5項目で構成し、各々をリンクしつつ進めた。

(1) プラズマ溶融改質技術開発

まず、平成15年度から16年度に、プラズマトーチ1本による小型鋳片サンプル溶融試験装置であるホットシミュレータ等を用いて、安定溶融条件、元素添加方法、処理速度などの調査を行い、適正処理条件を固めた。これらの結果を基に、平成16年度に、複数プラズマトーチ並列型試験装置を製作し、広幅鋳片の溶融処理へ展開した。これらの開発に際しては、最新のトーチ設計技術を秋田県立大学との共同研究において検討し、プラズマアーク形状制御技術とあわせて高効率で安定なプラズマ技術を取り込み、平成17年度までにプラズマ処理プロセスの目途をつけた。

銅等有害元素の無害化元素であるニッケル等の添加技術については、ワイヤー添加方式などいくつかの技術シーズを上記溶融試験装置に適用し有効性を評価した。

また、数万度に及ぶ超高温の現象制御のために高度な3次元電磁場解析と電磁流体解析技術を用いて、数学モデル開発とそれによる制御条件検討を併せて行った。

(2) 電磁誘導制御技術開発

プラズマアークを扁平化させるための交流磁場印加用電磁コイルを、平成15年度から平成16年度に前記ホットシミュレータおよび並列プラズマ試験装置に組み込み、溶融試験を実施した。さらに、平成16年度より、併設した電磁コイルで高周波磁場を印加する試験を開始した。これは、誘導加熱機能を利用した鋳片表層の高温化、さらには溶融プールの形状や流動を安定化する制御機能を活用して、処理の安定化と効率化を目指したものである。理想的には、1つの高周波コイルで加熱と流動制御を両立し得ると考えられることから、これを視野

において進めている。なお、制御のための電磁場設計に際しては、各種の電磁場利用技術の研究開発シーズを保有している名古屋大学と共同で研究するとともに、3次元電磁場解析を使用した設計や実験評価を行った。

また、溶融処理技術として、プラズマを用いない誘導加熱・溶解単独でのプロセスも考えられ、これについても平成15～17年度に探索研究を行い、そのフィージビリティに応じて、中間評価後の研究開発への取り込みを検討した。

(3) 複合溶融改質技術開発

プラズマと電磁気力（誘導加熱含む）の複合による、鋳片表層溶融処理技術を構築した。各々単独での技術開発と試験評価の上、平成17年度から複合溶融技術として開発を行う。開発にあたっては、ホットシミュレータ試験、並列プラズマ試験、ベンチスケール試験と3つのステップの中で開発を進めた。

(4) 鋳片溶融改質ベンチスケール試験およびフィージビリティスタディ

中間評価までに目途をつけた鋳片表層溶融改質プロセス技術を、連続処理プロセスとして構築し、平成18年度に小断面スラブを用いたベンチスケール試験設備を設置する。平成19年度に、本設備を用いた試験結果とそれまでに確立した数値解析モデルを援用して、フィージビリティスタディを実施し、最大幅2mに及ぶ実機スラブの表層溶融処理技術の目途を得た。

(5) その他（銅無害化調査研究）

銅、錫による脆化挙動の基礎調査、溶融処理時の無害化状況などを、試験片調査によって把握する。評価は、鋳片の未処理・処理サンプルの組織・成分分布等の調査に加え、熱処理・加工試験による脆化挙動の調査を含めた。

また、鉄スクラップを巡る環境に関し、国内の老廃鉄スクラップの発生量や銅等有害元素含有率等の品位について現状把握と将来予測を行った。

研究開発スケジュール

研究開発全体の進め方は、以下のステップと評価を行うことで実施した。

最初のステップとして、鋳片表層の溶融アロイング処理を行う上で、熱供給技術として選択したプラズマ加熱と誘導加熱の単独試験を、小サイズ鋳片サンプルを対象としたプラズマトーチ1本での試験装置であるホットシミュレータを用いて評価し、溶融処理プロセスの基本技術を確認した。（平成15～17年度）各個別試験結果を評価した上で、これらを組み合わせたプラズマ加熱と誘導加熱との複合化処理技術開発を行った。（平成17～18年度）

次ステップとして、サンプルサイズを大きくし、複数プラズマトーチを並列させた処理試験により、広幅鋳片処理の基本システムを開発した。（平成16～17

年度)

さらに最終的に、実用サイズへのスケールアップ予測が可能な小断面スラブを用いたベンチスケール試験を行い、実機向けのフィージビリティスタディを行った。(平成17~19年度)

年度別の各研究開発項目の実施スケジュールは表5-1に示す通りである。

表5-1. 研究開発項目と年度別実施内容

項目	15年度	16年度	17年度	18年度	19年度	計
(1) プラズマ溶融改質技術開発	----->					事後評価
1) ホットシミュラータ製作・試験						
2) 並列処理製作・試験						
3) 共同研究(秋田県立大学)						
4) 数値解析						
(2) 電磁誘導制御技術開発			中			
1) 試験・ホットシミュラータ製作			間			
2) 並列処理製作・試験			評			
3) 共同研究(名古屋大学)			価			
4) 数値解析						
(3) 複合溶融改質技術開発						
複合試験・調査						
(4) 鋳片溶融改質						
ベンチスケール試験						
1) 製作・試験・調査						
2) F/S解析・調査						
3) 共同研究(名古屋大学)						
4) 共同研究(秋田県立大学)						
(5) 銅無害化調査研究						
試験・分析調査						
研究開発費(単位:百万円)	60	125	390	279	250	1,104

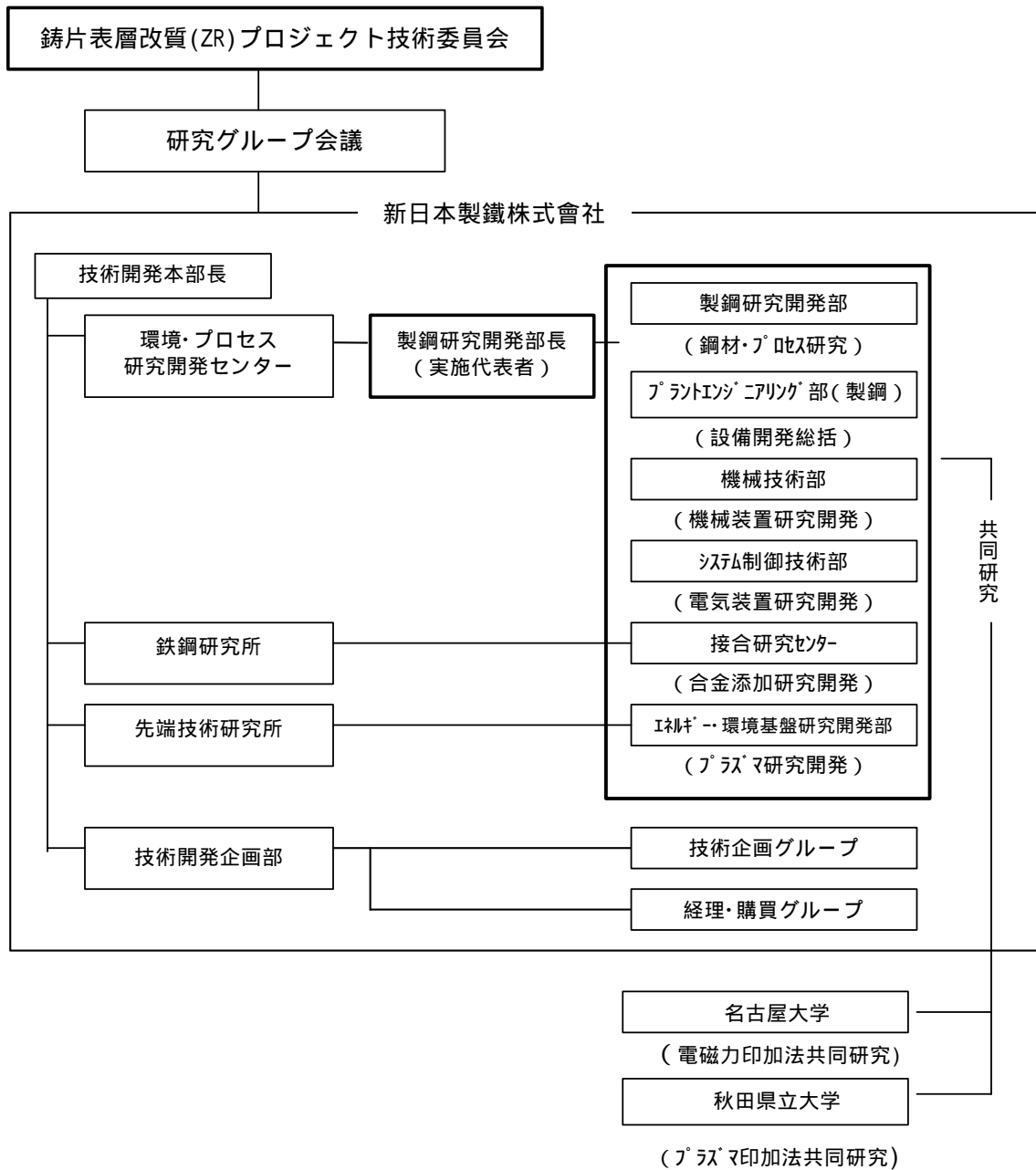
なお、当初、小規模試験装置であるホットシミュレータを使った研究は、平成 16 年度までに終了し、中規模試験装置である並列プラズマ実験装置での研究に移行する予定であった。しかしながら、並列プラズマ試験は、試験装置が大型であり、準備・運転等の時間および運転コストがかかるため、これを多数回行って適正条件を探索していくことは、迅速な開発および開発リソースの有効活用の面で効率的ではないと判断された。そこで、並列プラズマ試験の結果発掘された改良すべき課題や原因の明確化が必要な現象解析のため、小規模試験装置を併用し処理条件を絞り込み、並列プラズマ試験にフィードバックする方が、試験回数や試験コストの面からも効率的であることから、平成 17 年度も継続して両試験装置を並行して活用することに試験計画を変更した。また、フィージビリティースタディーの実行に際して、プラズマの出力向上ニーズがあることが判明したため、平成 19 年度に高出力プラズマトーチ及び電源を調達し、出力アップ時の課題抽出研究を行うための改造をホットシミュレータに施し、試験を実施した。

研究開発を効率的に実施するため、上記開発期間内での柔軟な運営も含め、5 ヶ年開発の中で要素技術の見極めに最初の 3 ヶ年を充当し、後半 2 ヶ年で最終的なベンチスケール試験に総合化する計画とした。

5 - 2 研究開発実施者の実施体制・運営

5 - 2 - 1 研究開発実施者の事業体制

本事業は、経済産業省から新日本製鐵株式会社への補助事業（補助率 2/3）であり、同社内に「鋳片表層改質プロジェクト（略称 ZR : Zone Refining）技術委員会」を組織し、名古屋大学および秋田県立大学と共同で実施した。



「技術委員会」は、研究開発実施メンバーからなる研究開発方針・計画および研究開発成果・進捗の審議を行う決定機関であり、その下に「研究グループ会議」を設け、技術委員会への答申内容や研究実務レベルでの計画・進捗の討議を行う機能を持たせた。

5 - 2 - 2 研究開発実施者の運営

研究開発方針と年度実施計画の策定および研究開発成果・進捗評価は、研究グループ会議にて検討、原案を作成した上、技術委員会へ答申し、本内容を審議・承認することで決定した。技術委員会では、5ヶ年全体の当初基本計画と研究開発目標に基づき進捗を評価し、見直しの必要性等を審議した上で、各年度の開発計画へ反映させた。なお、技術委員会等の事務局機能は、実施会社の開発企画部門および実施メンバーに持たせ、会議運営の補佐、補助金の運用管理、設備資産の管理などを行った。

プロジェクトリーダー（実施代表者）は技術委員会委員長を兼ねることで、研究開発全体の運営・管理を行うとともに、個別の要素技術など研究開発内容についても、本技術分野に関する専門性と広い知見・視野から研究開発を推進した。

本事業は、民間企業1社単独の実施であり、緊密な連携の下で実施することができた。また、開発の進め方としては、種々の要素技術を評価した上で、最終的にベンチスケール試験へ総合化する計画としている。要素技術シーズの発掘段階では、広く新技術や先端技術を適用評価する必要があることから、名古屋大学および秋田県立大学との共同研究においては、こうした技術シーズに関わる試験・評価を行うため、相互に研究者を派遣しての共同実験や研究装置を相互に持ち込み活用するなど、分担研究テーマに関し有機的な連携を取りつつ実行ができた。

本事業成果の実用化時には、製鉄メーカーの既存ラインに本プロセスによる処理ラインを新規に付設することになる。本事業実施者は製鉄メーカーであり、成果の実用化想定者と同一であることから、成果の実用性評価や受け渡しを円滑に行うことができる。なお、本事業成果の受け取り手としては、低価格の老廃鉄スクラップを利用できるという観点の他、高炉一貫メーカーでは、自動車用鋼板など現状銅等の含有率が厳しく制限されている製品製造にも、有害元素を含有した鉄スクラップの利用が可能となるという期待もある。一方、電炉メーカーでは、原料のほぼ全量を鉄スクラップに依存していることから、選択の自由度が大幅に拡大することになる。

5 - 3 資金配分

補助金として交付された資金は、試験設備の調達および試験設備の運転・実験に主として投入された。試験設備の設置にあたっては、実施者が本事業開始前に既に保有していた電源設備やユーティリティ供給設備等を有効活用することで、調達費用を最小限に抑えることができた。その結果、プラズマトーチ 1 本の小規模試験装置から複数プラズマトーチによる中規模試験装置へとスケールアップすることができ、当初計画通りの試験を実行することができた。

資金の内部配分については、各要素技術開発の進捗に合わせ加速すべき課題等に優先して投入するため、各年度内に見直し、変更申請・承認を受けることで柔軟な運用を行った。また、プラズマアーク安定化および電磁気力利用技術に関する基礎研究では、秋田県立大学および名古屋大学と共同研究を行い、各々が保有する試験設備の活用や研究費を相互負担することで資金の投入を極力抑えることができた。

表 5-3 . 資金年度配分

(単位：百万円)

費目・項目 / 年度	平成 15	16	17	18	19	合計
試験設備費	30	85	255	215	114	699
ホットミュータ	30	10	42		24	
並列プラズマ実験装置		65	91	13		
ベンチスケール試験設備			122	202	90	
解析機器他		10				
労務費・消耗品・経費	30	40	135	64	136	405
うち、大学共同研究費	6	6	6	6	6	
合計	60	125	390	279	250	1104
うち、補助金 (平成 14～16 年度は補助率 100%、平成 17,18 年度は補 助率 2/3)	60	125	390	186	167	928
累計	60	185	575	761	928	

5 - 4 費用対効果

本技術開発は、新規技術シーズの原理確認からベンチスケール規模試験までの要素技術開発を行うものである。実用化技術としての可否評価を行うためには、プラズマ技術や電磁気利用技術などのプロセス開発・ハード開発的要素が高いことから、そのための試験設備を新たに開発・設置し研究開発を進めることが必要である。実用化時の期待効果として、設備投資規模だけでも約 600 億円（普及率 50%時）から約 1200 億円（普及率 100%時）と想定される。開発期間 5 ヶ年での総開発費用はこの 1%程度であることから、設備開発を伴う研究開発資源投入規模として期待効果に見合ったものである。

一方、効果を省エネ効果のみを計算すると、2,010 年度で、46.8 万 kl、2,020 年度で、467.6 万 kl と、見込める為、直近の原油価格推移を考慮すると、例えば、原油価格 40\$/B ~ 80\$/B、為替レート 110 円/\$とすれば、省エネ効果は、2,010 年度時点で、130 億円 ~ 259 億円/年、2,020 年度時点で、1,294 億円 ~ 2,588 億円/年と、想定されることから、同様に、開発期間 5 ヶ年での総開発費用はこの 1%以下であることから、設備開発を伴う研究開発資源投入規模として期待効果に見合ったものである。

以下、省エネルギー効果の算定根拠を再度、示す。

省エネルギー効果

（省エネ量）

$$= \{ (\text{鉍石から鑄片製造エネルギー}) - (\text{鉄スクラップからの鑄片製造エネルギー}) - (\text{プラズマ溶融アロイングエネルギー}) \} \times \text{鉄スクラップ量}$$

鉍石からの鑄片製造エネルギー量 : 4,828Mcal/ト

鉄スクラップからの鑄片製造エネルギー量 : 518Mcal/ト

プラズマ溶融アロイングエネルギー量（銅等を無害化するためにニッケルを注入する） : 43Mcal/ト

したがって、原油が 9,126kcal/l であることから、

（年間当たりの省エネ量）

$$= (4,828\text{Mcal/ト} - 518\text{Mcal/ト} - 43\text{Mcal/ト}) \times 10,000,000 \text{ト} \div 9,126\text{Mcal/kl} = 467.6 \text{万 kl}$$

将来の普及率を、2010 年度 10%、2020 年度以降 100%と仮定した場合の省エネ量は以下の通りと試算される。

2,010 年度 : 46.8 万 kl

2,020 年度 : 467.6 万 kl

フィージビリティースタディーの結果、これまでの開発成果から推算されるプロセス消費エネルギーが増加したために当初見込んだ省エネルギー量

2,020年度 471.4万kl がわずかに減ずる結果となったが依然として大きな省エネルギー効果を生むと推算される。なお、前述のようにさらなる技術開発により処理中の放出熱を抑制することが可能となれば、処理投入エネルギーを現状開発技術レベルからの類推量より減ずることも期待される。

5 - 5 変化への対応

本研究開発では、研究開発と併せて、鉄スクラップの発生量やその品位に関する将来動向についても調査を実施し、本技術の普及の際の諸条件について分析を行った。

鉄スクラップを取り巻く環境については、本事業開始時から大きな変化はなく、老廃鉄スクラップ多量使用の制約となっている有害元素の無害化へのニーズは依然強いままである。また、鉄鋼生産は、中国向け等を中心に堅調な需要に支えられて好況が続いているが、鉄鉱石等原料費の著しい高騰は、鉄鋼製造メーカーの収益に悪影響を及ぼすことが懸念されている。製造コスト削減の観点からも、多量の老廃鉄スクラップを使用できる技術の開発・実用化が望まれている。

老廃鉄スクラップ中の不純物として含まれる銅等有害元素の事前分離除去に関連して、自動車や家電ではリサイクル促進の観点から多くの試みが行われるようになってきた。例えば自動車においては、廃車の精緻な解体への取り組みがあり、これはモーターやハーネスなどに含まれる銅分の除去にもつながることから、鉄スクラップのリサイクル利用には好ましい動向である。しかしながら、解体業者も含めた処理コストや鉄スクラップ買取価格などの市場動向に依存することから、その普及には不透明な面もあると思われる。一方、近年急速に商品化が進展しているハイブリッド・カーなどエコ・カーは、ガソリン車と材料構成が異なることから、その解体後リサイクル時の有害元素混入防止については注意を要するものと考えられる。

なお、上記廃車の解体法そのものの変更による分離除去は別として、鉄スクラップ中から銅分等を低コストで分離除去する技術やニッケル以外の低価格の金属で無害化する方法など未だ見つかっていない現状である。

第3章 評価

第3章 評価

1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

本研究開発は、銅などの循環元素による鋼材の脆化を防ぐことにより、老廃鉄スクラップの積極的なリサイクルの実現を目指す技術開発であり、国民・社会のニーズに合致し、事業の目的は非常に重要で、政策的位置付けは極めて明確である。鉄スクラップは、日本が保有する唯一の資源とも言え、主原料を海外に頼っている鉄鋼メーカーにとって、この活用拡大は大きな課題と考えられる。また、開発リスクが高く民間のみでは実施が困難であることから国の支援が必要である。

なお、本事業の経済性は、鉄鋼需要のほか、鉄スクラップやニッケル等の市場価格や鋳片への加熱方法等に影響されることから、実用化に当たっては見極めが必要である。また、社会システムの整備状況に応じ、本技術がどの程度の銅含有スクラップに有効なのかを想定しておくべきであるとの意見があった。

【肯定的意見】

スクラップは、日本が保有する唯一の資源とも言える。主原料を海外（輸入）に頼っている鉄鋼メーカーにとって、この活用拡大は大きな課題と考えられる。また、鉄鋼原料に占める鉄スクラップの割合を高めていくことはCO₂排出削減の観点からも有用だと考えられる。

老廃鉄スクラップの利用は、循環型社会構築のためには重要なことである。本研究は種々のスクラップを効率的に資源化する研究であり、社会的なニーズは高いが、企業が開発するには費用的な負荷が大きすぎ、国のサポートが必要と思われる。

今後拡大していく鉄スクラップの利用拡大は大きな社会ニーズであり、政策意義は大きい。助成事業であり、官民の役割分担は適切である。事業の科学的・技術的困難度は高く、実施の意義は大きい。

鉄スクラップの高度利用は、循環型社会構築の大きな課題であり、国のプロジェクトとして意義がある。また、本技術開発は科学的に新規性に富んでいる。

今後増大が見込まれるスクラップ鉄のリサイクル技術を確立することは国の事業として重要であり政策的位置付けも明確である。

【問題点・改善すべき点】

目先は鉄鋼需要が減退し、鉄スクラップの需要が減少する見込みであること。

鉄鉱石や石炭といった鉄鋼主原料の需給が緩和し、価格が下落する可能性もあることなどから、実用化のタイミングをよく見極めていく必要があると考える。

本成果の事業経済性は、ニッケルの市場価格に大きく左右される。
鉄スクラップ中の銅の無害化技術であるが、社会システム並びに回収技術として鉄スクラップ中からの銅の除去法と比較してどのように有効か記述すべきである。
比較的大きなエネルギーを消費する誘導加熱予熱を用いる手法については、今後他の加熱方法の可能性も含め、最適化を検討すべきである。

2. 研究開発等の目標の妥当性

目標達成のための目標設定は妥当であり、技術課題に対してそれぞれ手順を踏んで着実に進めている。

なお、実用性をかんがみりサイクルに必要なエネルギーの目標値も設定すべきであった。

【肯定的意見】

世界初の技術を開発するとの目標、それも日本が是非ともやるべき開発テーマ、との捉え方には大いに賛同できる。

わが国鉄鋼業が目指す高級鋼の製造で、老廃鉄スクラップを効率的にリサイクルする技術を確立する目標は妥当である。

目的達成のための研究開発目標が具体的である。

目標は、妥当である。技術課題に対してそれぞれ手順を踏んで着実に進めている。鉄スクラップをリサイクルして使用する上で要求される目標は設定されている。

【問題点・改善すべき点】

それぞれの部分で具体的な数値目標が適切に表現されていない。特にエネルギー使用量など。また、どのくらいの銅の混入に効果があるのか記述すべきで、初めに示した鉄スクラップからの銅除去の技術と対立するものか補完するものか明確にすべき。

本文の目標の中に「省エネルギー」の視点が書かれているが、省エネルギー性については具体的な目標値の記載がない。エネルギーをかければどのようなものも必要な性能は得られるため、リサイクルに必要なエネルギーの目標値も設定すべきであったと思われる。

3. 成果、目標の達成度の妥当性

プラズマ溶融技術と電磁誘導技術を複合させた表層溶融技術を確立し、鉄スクラップ中に含まれる銅の無害化技術を開発した成果・達成度は妥当と評価できる。学術的にも優れており、技術的な達成度が高く、想定する規模のプロトタイプで運転ができることを示している。

なお、実用化に当たっては、設備費を圧縮できる設備技術開発などにより、原料やエネルギーの価格変動を吸収するレベルで投資回収できる目途をつけることが課題と考えられる。また、最適加熱方法の探査、現象の物理的把握等についても期待される。

【肯定的意見】

技術的には画期的な成果が得られたと評価できる。

ベンチスケールの試験で満足できる成果を得られたことは、技術的な達成度は高いと思われる。

事業化に向けた課題も明確になった。

良い成果が得られている。学術的にも優れており、それなりの規模のプロトタイプの装置で運転ができることを示している。

プラズマ溶融技術と電磁誘導技術を複合させた表層溶融技術を確立し、鉄スクラップ中に含まれる銅の無害化技術を開発した成果・達成度は妥当である。

【問題点・改善すべき点】

設備費を圧縮できる設備技術を開発するなどして、原料やエネルギー価格の変動を吸収できるレベルで投資回収できるメドをつけることが課題と考えられる。

スクラップ中の銅含有量に対するコメントが少ない。

物理的な現象把握と加熱方法の最適化（省エネルギー化）を期待する。

4. 事業化、波及効果についての妥当性

本事業成果により従来の社会システムで対応できない鉄スクラップが排出されたときの技術として使用できることを見出したのは大きい。設備費が高いため、今後の世界的資源問題の深刻化の進展度合い、スクラップの収集プロセスの検討等によって、事業化の見通しが高まると考えられる。また、本技術が普及した場合の波及効果は、高炉・電気炉メーカー双方にとって大きいものと考えられる。

なお、事業化に際しては、どのレベルの銅含有スクラップに対して有効かを明らかにする必要があるとともに、原料コストに依存して投資回収年数が4.8～22.6年と大きく変動するため、加熱方法を最適化して省エネ型プロセス技術を確立することが望まれる。

【肯定的意見】

合理的な投資額で実現した場合の波及効果は、高炉・電気炉メーカー双方にとって大きいものと考えられる。

技術的には事業化は可能と思われるが、設備費が高いため銅含有スクラップを集中的に集めて、効率的な操業ができれば、事業化は成功すると思われる。

事業化のための課題は明確になっている。今後の世界的資源問題の深刻化の進展度合いによって、事業化の見通しが高まると考えられる。

このような技術が開発できたことでこれからの社会システムで対応できない鉄スクラップが排出されたときの技術として使用できることを見出したのは大きい。

廃鉄スクラップの約半量を本プロセスで処理する等の前提条件が確実であれば、事業化・波及効果は妥当であると思われる。

【問題点・改善すべき点】

事業化に向けては、設備費を圧縮できる設備技術を開発することが大きな課題と考えられる。

銅を無害化する必要があるスクラップが、今後どの程度発生し、処理必要量を設定するのが可能なのか。

事業化する場合、どのレベルの銅含有スクラップに対して有効かを明らかにする必要がある。

依然として原料コストに依存して投資回収年数が4.8～22.6年と大きく変動するため、加熱方法を最適化して省エネ型プロセス技術を確立する必要がある。

5 . 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

本プロジェクトの研究開発計画、実施体制・マネジメントは概ね適切であったと考えられる。また、大学との共同研究など産学連携も機能していると評価できる。費用対効果も妥当である。

なお、実用化に向けては、電気炉メーカーも体制に組み入れるなど円滑な技術移転がなされるよう配慮すべきとの意見があった。

【肯定的意見】

産学連携がうまく機能したと考えられる。

今後大量に発生する老廃鉄スクラップを効率的に処理するには、先端技術を必要とし、かつ高コストの試験が必要である。2 大学との共同研究により、最適な方法を開発できたと思われる。

研究開発計画、費用対効果、変化への対応等妥当である。

計画・実施体制には問題ない。資金的にも無駄はなかったと思われる。

当初の目標は達成されているため、研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等は妥当であったと判断する。

【問題点・改善すべき点】

電気炉メーカーも本研究開発に参加できれば、より望ましかったように思われる。社会システムで鉄スクラップ中の銅濃度が低下する傾向にある。それに対してどのような対応が可能か、特に経済的な観点から検討すべき。

6 . 総合評価

銅などの循環元素による鋼材の脆化を防ぐことにより、老廃鉄スクラップの積極的なリサイクルの実現を目指した本技術開発は、国が関与する事業として政策的位置付けも極めて明確であり、妥当であった。目先はニーズが低いかもしれないが、中長期的には大きな果実が期待できるテーマであり、本事業の意義は大きいと評価できる。

プラズマ溶融技術と電磁誘導技術を複合させた表層溶融技術を確立し、鉄スクラップ中に含まれる銅の無害化技術を開発し、プロトタイプの装置で運転ができることが示され、技術的な達成度が高く、学術的にも優れた成果が得られた。

なお、事業化にあたっては採算性がネックになると見られることから、設備コストや、省エネルギーの観点から加熱方法最適化についての検討が望まれる。

【肯定的意見】

目先はニーズが低いかもしれないが、中長期的には大きな果実が期待できるテーマであり、国の資源政策としても鉄スクラップは最大限有効活用する方策を探るべきだと考える。そうした考えに沿った本テーマの意義は大きいと評価できる。

本研究は循環型社会構築には重要なものであり、今後も増え続ける老廃鉄スクラップを日本の鉄鋼業が目指す高級鋼に効率的な使用に寄与するものである。

技術的な成果は十分達成している。

技術として大変面白い、有効な技術開発がなされている。学術的にも成果が上がっている。

主として銅を起因として発生する有害性を克服する技術を確立した点は評価できる。

【問題点・改善すべき点】

事業化にあたっては採算性がネックになると見られ、設備費を如何に抑えることができるかが大きな課題となろう。

今後の実用化は、世界の資源問題の推移によると考えます。

経済合理性をどのように考えるのが、これからの課題。

当初の目標は達成されているが、比較的エネルギー消費量の大きい誘導加熱の適用に関しては、溶融帯での物理現象を十分に把握した上で他の加熱方法の適用性を含め省エネの観点から最適化を図るべきであったと思われる。

7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

資源の乏しいわが国においては、資源の再利用が重要であり、今後もコスト削減を目指した研究を継続してもらいたい。研究継続に際しては、高炉メーカー・電気炉メーカーなど広範な関係者による体制を組み、社会から発生する鉄スクラップ中の銅濃度と、鉄スクラップの高度利用の需要との関係を明らかにしつつ、実用化検討を進めることが望まれる。

また、実用化検討に当たっては、開発手法の適性評価や、表層溶融のための省エネ型加熱手法を開発する必要がある。さらに、有害性の克服に必要な表層の溶融厚さの最適化や溶融層中での各種元素の挙動把握等、基礎的な物理機構の解明も未だ残された課題であり、これらの課題を克服した上で事業化を行う必要がある。

【各委員の提言】

高炉メーカー・電気炉メーカーなど、より広範な関係者のニーズを組んだ形で、国家プロジェクトとして実用化に向けた取り組みが進展することを期待したい。

設備費が高いため、投資回収年で事業化を慎重にならざるを得ないが、資源の乏しいわが国においては、資源の再利用が絶対必要である。今後も継続して、コスト削減を目指した研究をしてもらいたい。

技術的には十分な成果をあげていると考えます。

これまで指摘したことであるが、これからの社会から発生する鉄スクラップ中の銅濃度と、鉄スクラップの高度利用の需要との関係を明らかにして、どのような形で実用化が可能か検討して欲しい。

現状では、省エネの観点からは開発された手法が最適とはいえない状況にあるため、有害性の克服に必要な表層の溶融厚さの最適化や溶融層中での各種元素の挙動等、基礎的な現象を把握した上で表層溶融のための省エネ型加熱手法も検討し、事業化を進めていてもらいたい。

第4章 評点法による評点結果

第4章 評点法による評点結果

「鍍片表層改質による循環元素無害化技術の開発」に係るプロジェクト評価の実施に併せて、以下に基づき、本評価検討会委員による「評点法による評価」を実施した。その結果は「3. 評点結果」のとおりである。

1. 趣旨

評点法による評価については、産業技術審議会評価部会の下で平成11年度に評価を行った研究開発事業(39プロジェクト)について「試行」を行い、本格的導入の是非について評価部会において検討を行ってきたところである。その結果、第9回評価部会(平成12年5月12日開催)において、評価手法としての評点法について、

(1)数値での提示は評価結果の全体的傾向の把握に有効である、

(2)個々のプロジェクト毎に評価者は異なっても相対評価はある程度可能である、との判断がなされ、これを受けて今後のプロジェクト評価において評点法による評価を行っていくことが確認されている。

また、平成17年4月1日に改定された「経済産業省技術評価指針」においても、プロジェクト評価の実施に当たって、評点法の活用による評価の定量化を行うことが規定されている。

これらを踏まえ、プロジェクトの中間・事後評価においては、

(1)評価結果をできる限りわかりやすく提示すること、

(2)プロジェクト間の相対評価がある程度可能となるようにすること、

を目的として、評価委員全員による評点法による評価を実施することとする。

本評点法は、各評価委員の概括的な判断に基づき点数による評価を行うもので、評価報告書を取りまとめる際の議論の参考に供するとともに、それ自体評価報告書を補足する資料とする。また、評点法は研究開発制度評価にも活用する。

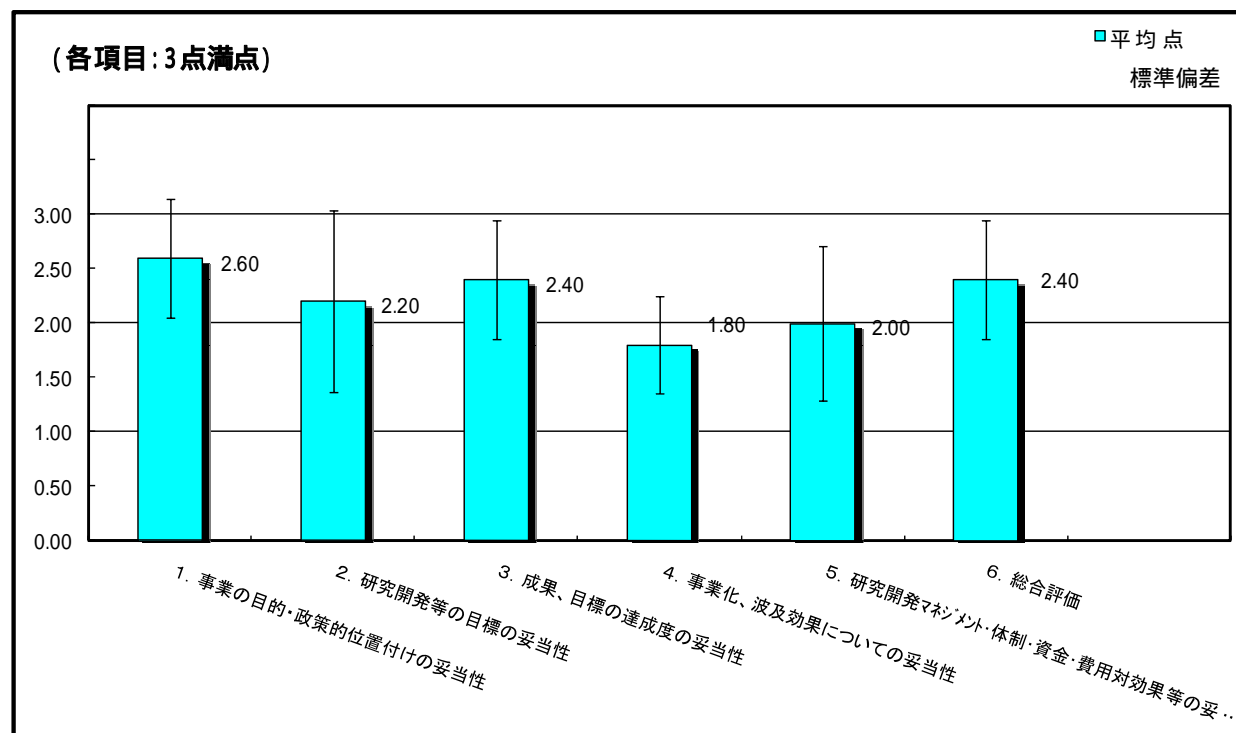
2. 評価方法

- ・各項目ごとに4段階(A(優)、B(良)、C(可)、D(不可)<a, b, c, dも同様>)で評価する。
- ・4段階はそれぞれ、A(a)=3点、B(b)=2点、C(c)=1点、D(d)=0点に該当する。
- ・評価シートの記入に際しては、評価シートの《判定基準》に示された基準を参照し、該当と思われる段階に を付ける。
- ・大項目(A, B, C, D)及び小項目(a, b, c, d)は、それぞれ別に評点を付ける。
- ・総合評価は、各項目の評点とは別に、プロジェクト全体に総合点を付ける。

3. 評点結果

評点法による評点結果 (鋳片表層改質による循環元素無害化技術の開発)

評価項目	平均点	標準偏差
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.60	0.55
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.20	0.84
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.40	0.55
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.80	0.45
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.00	0.71
6. 総合評価	2.40	0.55



「鑄片表層改質による循環元素無害化技術」プロジェクト評価(事後)

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

提 言	対 処 方 針
<p>資源の乏しいわが国においては、資源の再利用が重要であり、今後もコスト削減を目指した研究を継続してもらいたい。研究継続に際しては、高炉メーカー・電気炉メーカーなど広範な関係者による体制を組み、社会から発生する鉄スクラップ中の銅濃度と、鉄スクラップの高度利用の需要との関係を明らかにしつつ、実用化検討を進めることが望まれる。</p> <p>また、実用化検討に当たっては、開発手法の適性評価や、表層溶融のための省エネ型加熱手法を開発する必要がある。さらに、有害性の克服に必要な表層の溶融厚さの最適化や溶融層中での各種元素の挙動把握等、基礎的な物理機構の解明も未だ残された課題であり、これらの課題を克服した上で事業化を行う必要がある。</p>	<p>製鉄用原料を輸入に頼る我が国において、鉄スクラップの利用拡大は大きな課題の一つであり、本事業成果もその選択肢の一つとして実用化できるよう、実施者において引き続き研究を継続していくこととしている。その際、流通する鉄スクラップ中の循環元素と鋼材利用との関係を整理しつつ、広範な関係者による展開を検討する。</p> <p>また、本プロセスで発現が確認された現象については、学術的に物理機構の解明も進め、更に完成度を高められるよう、一方、低品位原料への対応については、本技術の汎用性を広げる観点から、実施者において技術開発を継続し、完成度を高めることとしている。</p>