

特集記事・5

鉄鋼業を取り巻く独創的な発想に基づく
研究・技術開発

革新的スクラップ予熱型電気炉の開発

Development of Innovative Scrap Preheating
Electric Arc Furnace

元 NKK エンジニアリング研究所

水上秀昭

Hideaki Mizukami

スチールプランテック(株)

(元 NKK 制御技術部)

青 範夫

顧問 Norio Ao

スチールプランテック(株) プラントエンジニアリング本部

製鋼エンジニアリング部 電気炉グループ

グループマネージャー

(元 NKK プラントエンジニアリング本部 製鋼圧延部)

佐藤靖浩

Yasuhiro Sato

1 はじめに

日本国内の鉄スクラップ溶解電気炉において、NKKプラントエンジニアリング本部は1989年に東京製鐵九州殿に初号機を納入した直流電気炉の開発により永らく十分なシェアを確保してきたが、1996年になって、国内ではIHI、大同特殊鋼、また海外ではFuchs等の競合他社の予熱シャフトを備えた新型電気炉の前に、受注競争で遅れをとるようになってきた。Fuchsのシャフト電気炉に対抗して開発し、1995年にトースチール(現JFE条鋼) 鹿島製造所に納入したNKK独自の、炉高が高く1チャージ分のスクラップを初装の1回でのみで行う1回装入炉も革新的な効果が得られず、またプラントエンジニアリング本部で開発中のシャフトキルンタイプの予熱槽を持つ電気炉も先行他社の電気炉の前に十分な優位性を見出すことができない状況であった。

このような状況の中、電気炉に関して定期的交流があり、当時独創的研究テーマ提案を使命とされてその提案に苦しんでいたエンジニアリング研究所SEチームとの間に、他社を圧倒する高効率(電力原単位~150kwh/t)で、かつ当時問題視されてきたスクラップ溶解時のダイオキシシン(新設炉では0.5ngTEQ/Nm³以下)対策にも対応した環境対応型高効率電気炉開発のためのワーキンググループ「新鉄源溶解炉検討ワーキンググループ(以下、WG)」が自然発生的に誕生した。WGには研究所から製鋼研究経験の研究者、プラントエンジニアリング本部からは電気炉の設計、計画、営業、さらに制御部門から等総勢およそ10名が参加した。

週1回のペースでWGは開催されたが、出てくるアイデアは先行他社のものに類似したものが出てくるだけで、1996

年も終わろうとしていたが、初心に帰り、今までの電気炉のスクラップの予熱技術の開発の流れを整理した。これを図1に示す。一般的な電気炉はスクラップの嵩比重の問題から1チャージ分の溶湯を得るには初装1回では足りず、初装分が溶解した時点で不足分を装入するバッチ式2回装入炉(場合によっては3回)だった。これに対し登場したのがスクラッププレヒーター(SPH)で、排ガスをスクラップの入った槽に通し、ここで予熱されたスクラップを電気炉に装入するというものであった。このSPHでのハンドリングを簡素化する目的でツイン炉が出てきた。炉を2基設置し、操業中の炉からの排ガスをもう一方の炉に導き、次のヒートのスクラップを予熱するタイプの電気炉である。また一方でFuchsやVAI、NKKのトースチール(現JFE条鋼) 鹿島製造所の電気炉のような炉高が高く1チャージ分を初装1回で行うバッチ式のシングルメルティング炉に開発は進んだ。その後更なる効率化のため、IHI、Fuchs、大同特殊鋼等で開発の次チャージのスクラップを炉に連結した予熱槽で予熱するタイプの電気炉が開発され、既に実機化されていた。ここで、これらの次チャージのスクラップを炉に連結した予熱槽で予熱するタイプの電気炉では、予熱槽が溶解室とは離れており、溶解室で発生する高温の排ガスが予熱するスクラップに到達する前に、スクラップを保持する部分までの空間および保持する部分の水冷構造等で排ガスの顕熱が失われてしまっていた。

2 新予熱型電気炉の提案

以上のような整理の中で、メンバーの一人から「予熱される次チャージのスクラップを溶解室内の溶湯から連続して存

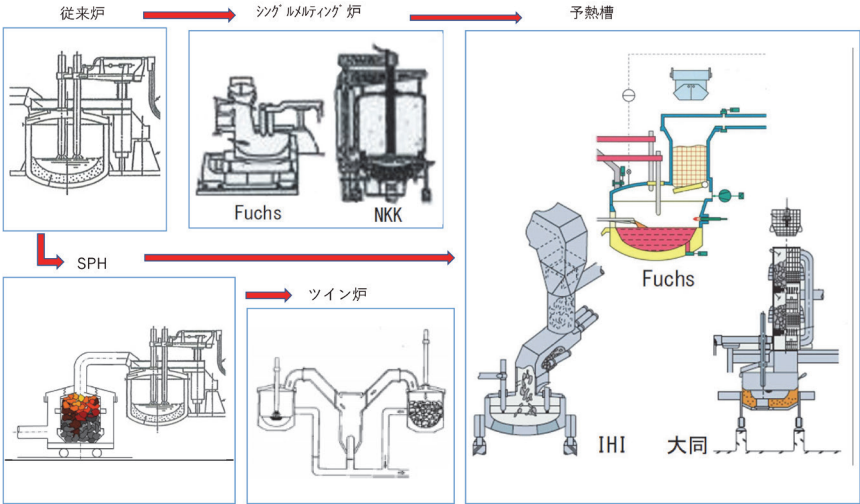


図1 アーク炉開発の流れ

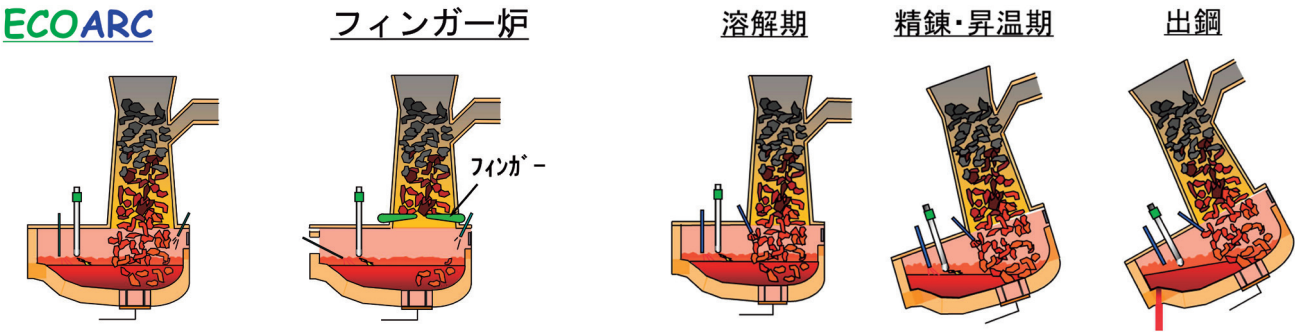


図2 他の予熱方式(フィンガー等)との比較

図3 エコアークの操作パターン

在させるというのはどうか？」という提案がなされた。この発想が新予熱型電気炉の原点となった。炉内で発生する排ガスで最大のスクラップ予熱効率を得るためには、予熱シャフトと溶解炉が直結しており、溶解中はもちろん、昇温(精錬)、出鋼時も常にスクラップが溶解炉からシャフト内に連続して存在させるというものである。図2に他社の電気炉との比較を模式的に示す。他社の電気炉では溶解炉から離れた位置に予熱槽があるが、新予熱型電気炉では溶解の進行に追従してスクラップを常に予熱シャフトから装入する。図3のように溶解期から1チャージ分の溶湯が生成されて昇温、精錬期さらには出鋼時においてもスクラップが溶解室に直結した予熱シャフトに連続して存在する。従来のバッチ炉に対して炉蓋を開閉することがなく、その際の熱放散もない。電気炉の熱源にはアーク熱、酸素利用による金属酸化熱、炉内発生ガス(CO、CO₂) などがあるが、例えばCO₂のスクラップへの予熱効率を従来の2回装入バッチ炉と模式的に比較すると図4のようになる。これにより新予熱型電気炉では溶解初期から出湯にまで常に高い着熱効率が得られ、究極のスクラップ予熱方式であるとメンバー全員が確信した。

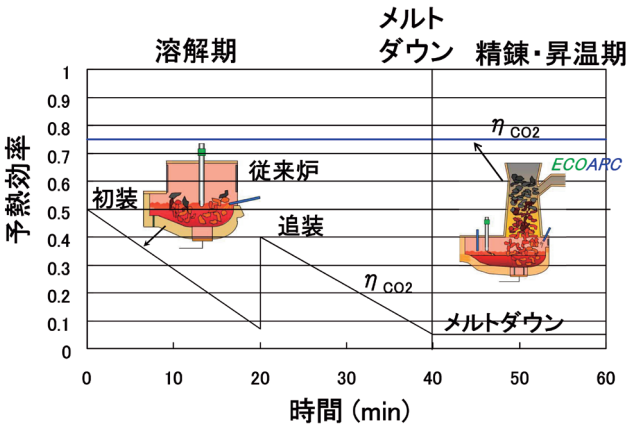


図4 着熱効率(ηCO₂)の比較

WGでの検討と並行して新予熱型電気炉の基本特許を提案した。基本特許の請求項を以下に示す。(1997年2月出願、特許；3204202)

「溶解室とその上方に直結する予熱シャフトを有するアーク溶解設備を用いて冷鉄源を溶解する方法であって、冷鉄源が溶解室と予熱シャフトに連続して存在する状態を保つように予熱シャフトへ冷鉄源を連続または断続的に供給しながら

溶解室内の冷鉄源を溶解し、溶解室に所定の溶鋼が溜まった時点で溶解室および予熱シャフトに冷鉄源が連続して存在する状態で溶湯を出湯する。」というものである。また、炉内に所定の溶湯が生成した時点で炉を傾動（図3）し、溶湯とシャフト下部のスクラップとの接触面積を低減して昇温する方法も提案した（特許3521277）。さらに、予熱時に発生するダイオキシシンについては、当時NKKのゴミ焼却プラントの実績をもとに、炉から出たあとの排ガスを二次燃焼室で900℃に、その後200℃以下に急冷するという排ガス処理システムを採用し、溶解室内のコークス吹込み、酸素吹込みにより発生するCOガスを一部（30％）未燃焼で二次燃焼室に導きそこで未燃のCOを二次燃焼させることで排ガス温度900℃を達成する方法を提案した（特許；3329248、図5）。

電気炉ではアーク以外の熱源として、酸素付加による鉄の酸化熱、およびコークス添加による酸化鉄の還元で発生するCO、CO₂ガスによるスクラップの予熱などが熱源であるが、新予熱型電気炉での酸素原単位と期待されるスクラップの予熱温度および電力原単位の関係を図6に示す。新予熱型電気炉では、通常の電気炉で使用されている33Nm³/tの酸素原単

位における電力原単位は210kWh/t程度となり、今までの2回装入のバッチ式電気炉では同じ酸素原単位での電力原単位380～400kWh/t程度と比較すると実に40％以上の電力原単位低減が可能と推定できた。

WGでは、至急5トン規模の試験炉の設置検討に着手した。当時のNKKマテリアル富山製造所に1MVAの有休設備があることを確認し、試験炉設置の提案を技術開発本部長報告会で行った（1997年6月）。そこで5,000万円程度の予算を申請したが、本部長からは「アイデア先行でイメージできてない。」ということで却下された。特に前述の図3で、メンバーの中でも懸念されていた「出湯時に炉と直結しているシャフトを傾動するとスクラップが溶湯中に崩れてくるのでは」という大きな問題点を指摘された。

本部長報告の後、本プロセスに全般に対してWGメンバー全員で本プロセスでの課題、心配事の提案とそれに対する解決策の検討を徹底的に行った（Q&Aの作成）。この中で本部長に指摘された「傾動時のスクラップの崩れ」の問題点に対しては、以下の解決策がまたメンバーの一人から提案された。炉と予熱シャフトと出湯口を図7のように配置、すなわ

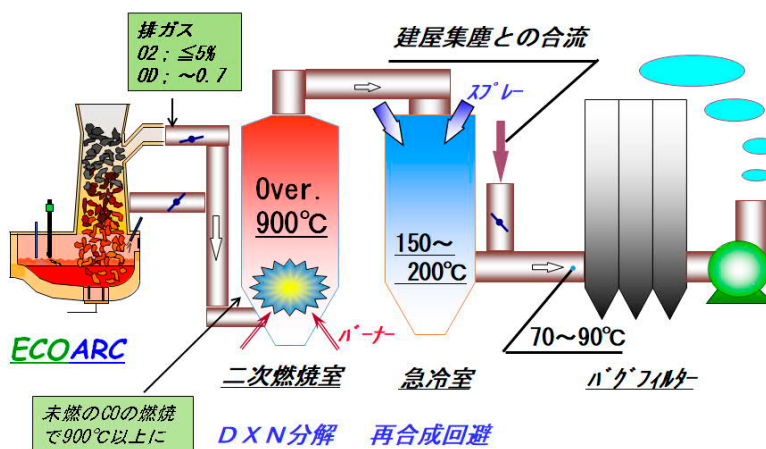


図5 排ガス処理システム

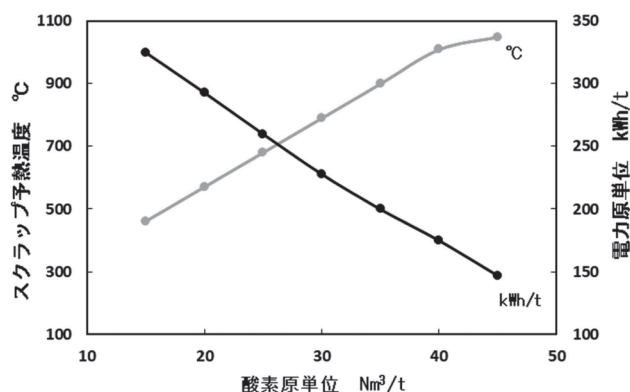


図6 酸素原単位と電力原単位

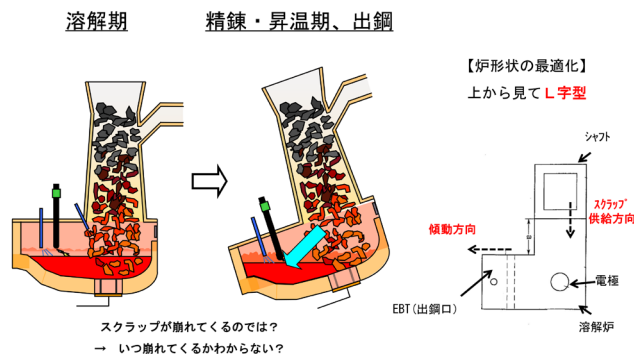


図7 炉形状の最適化

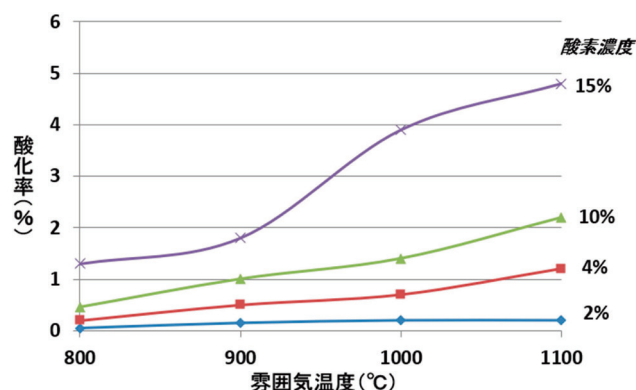


図8 予熱中のスクラップの酸化

ち「予熱シャフト内の冷鉄源は溶解中に溶解室の予熱シャフトが設けられている側から他方側に向けて供給され、出湯部はその冷鉄源の供給方向とは異なる直角方向に設ける(特許; 3114713)」というものである。これについては厚紙で作成した紙モデルで傾動時に崩れないことを確認した。また、ウッドメタルを用いた低融点モデル実験、スクラップの酸化に対するガス組成、予熱温度の関係調査のラボ試験(図8)等を並行して行いながら本プロセスでの問題点、開発課題の整理を行った。ウッドメタル実験では傾動により昇温が可能であることを確認した。また図8より溶解炉からシャフトに入る排ガスの酸素濃度は5%以下に保つ必要があり、そのためには炉とシャフトは直結して炉全体が半密閉状態を保持し、操業中炉蓋を開閉せずにシャフト上部から半連続装入することにより大気の入りを抑え、排ガス組成をコントロールすることが重要で、さらに排ガス処理システムで二次燃焼塔での排ガス温度900℃を保証するための熱源としてシャフト出口のODが0.7以下であることが必要であることを確認した。

本プロセスでの課題、すなわち5トン試験炉での確認事項を図9に示す。

1. 昇温、出鋼時の傾動によるスクラップの崩れ
2. シャフト内でのスクラップの機械的棚釣り
3. シャフト内でのスクラップの融着
4. 出鋼時に十分な温度(1560℃)まで昇温
5. 溶鋼成分のコントロール
6. シャフト出口の排ガスの酸化度(OD)、0.7以下、酸素濃度を5%以下
7. 排ガス処理でDXNを0.5ngTEQ/Nm³

WGの事前検討の一方で、オンリーワン技術、商品開発に繋がる独創的研究を重点的に採択していた技術開発本部技術企画部はWG提案の新型電気炉に注目していて、2度目の本部長報告会を設定した。(1997年8月)。前回指摘された傾動時のスクラップの崩れに関しては、紙モデルを持参し崩れを

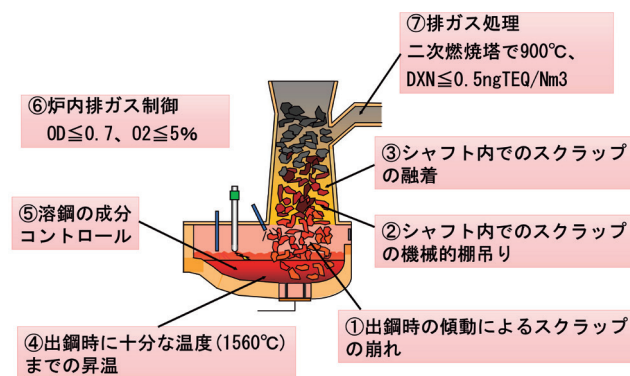


図9 開発課題

起こさない炉形状について説明した。また開発課題の整理も評価され、本部長の「やってみろ、期待してる。」との言葉で試験炉設置が許可された。開発は技術開発本部とプラントエンジニアリング本部の共同開発となった。

NKKマテリアル富山製造所に設置した5トン試験炉の完成はWG発足からおおよそ2年後、先の本部長報告会から1年3か月後の1998年9月であった。

3 5トン炉実証試験¹⁾

3.1 試験概要

試験開発にはNKK京浜地区からエンジ研の研究者3名と作業員6名(3名×2シフト)およびプラントエンジ、制御の担当者が数名長期出張で対応した。

試験炉の外観を写真1に、試験炉での出鋼時の様子を写真2示す。酸素およびコークスのインジェクション設備も備え、スクラップの装入はシャフト上部から400kgの装入バケットにより間欠的に装入した。使用したスクラップは市中から購入したAシュレッターで、試験炉のシャフトサイズが実機の1/4サイズであることから30cmを使用できる最大長とした。シャフト内スクラップの位置計測のためマイクロ波レベル計と溶解室およびシャフト内の排ガス分析計(CO, CO₂, O₂)を備えている。なお、当初はシャフトを出たあとに二次燃焼塔と急冷塔は備えておらず、シャフト内の排ガスの酸化度と酸素濃度を所定の範囲にコントロールできるかどうかを問題にした。この排ガス処理プロセスの確認(開発課題-7)は、後に新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託研究として、1999年度の「ダイオキシン類排出削減促進技術の開発/製鋼工程におけるダイオキシン類削減技術開発²⁾」で行った。

なお、週1回の試験頻度であるため毎回冷炉からのスタートであり、試験終了時点での溶湯温度の降下が3~3.5℃/min.と炉体耐火物への放熱ロスが実機に比較して非常に大きかつ

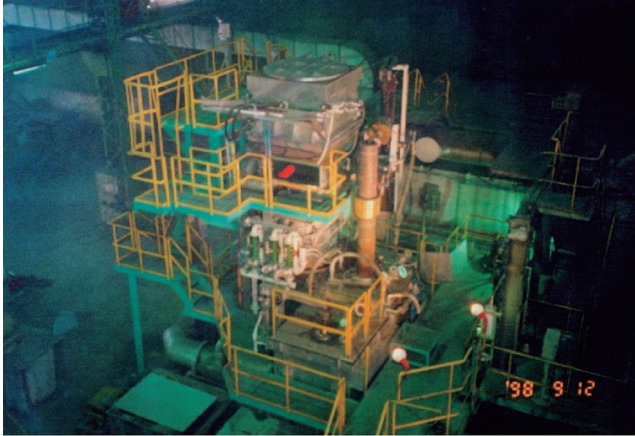


写真1 5トン炉

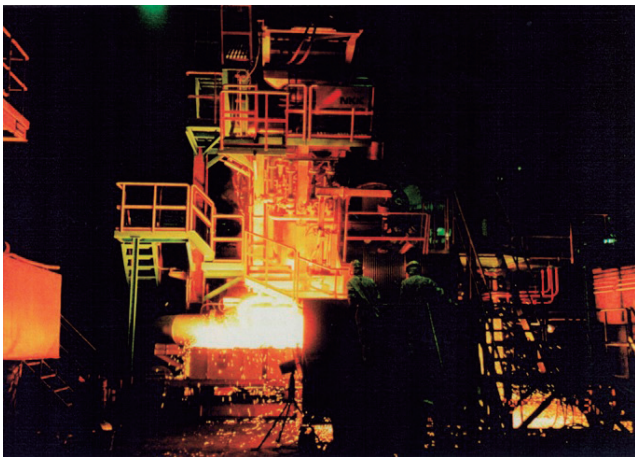


写真2 5トン炉出鋼状況

た試験であることは言うまでもない。したがって熱効率の評価は課題の一つにはしなかった。前述の開発課題がクリアできれば本プロセスで予測した高い熱効率は自ずと達成されると考えた。

3.2 試験結果のまとめ

約1年間の試験により、開発課題1から6について以下のような結果が得られた。

前述の図7に示したスクラップ供給方向と出湯方向を直角に配置した炉形状、構造により傾動時のスクラップの崩れは生じなかった。

間欠的に15パケットの半連続装入ができた。機械的棚崩りが発生することもあったが、酸素カッティングにより解消できた。しかしながらより安定した連続溶解を達成するために、シャフト下部にプッシャーを設け定期的にスクラップを溶解室内に押し込むことが有効と判断し、試験期の後半ではプッシャーを設置してその効果を確認した。

溶解炉の半密閉構造によりシャフト内への排ガスの酸素濃

度は5%以下に保持することができ、スクラップの融着は起こらなかった。

溶解期に所定の溶湯が生成した時点で炉を傾動し、図3のように溶湯を出鋼口側に寄せ、シャフト下部のスクラップと溶湯の接触面積を減少させることにより溶湯温度を1560℃以上に昇温させることができた。なおこの時の炉傾動でも当然スクラップの溶解室方向への崩れは発生しないことは言うまでもない。

C濃度は溶解期と昇温期に酸素とコークスの吹込み量のバランスで0.03～0.1%のC組成の溶湯を安定して製造することができた。

吸引ダンパーの開度調整により、排ガスの酸化度 (OD) 0.4～0.5にまたO₂も5%以下にコントロールできた。

開発課題一7については別途実施した新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託研究で、電気炉から発生し大気放散する排ガス中のダイオキシン類濃度を0.2 ngTEQ/Nm³以下に制御することができた。現状の規制値 (新設炉で0.5 ngTEQ/Nm³以下) と比較しても低い数値であった²⁾。

電力原単位については、酸素45Nm³/tで215kWh/tが得られた。炉体放熱ロスが実操業に比較して大きいこと、一方、使用したスクラップ中のアルミ缶からのアルミの酸化熱が実操業に対して大きかったが、これらを実機に合わせると、酸素45Nm³/tで150kWh/tに近い電力原単位が得られると推定できた。

4 初号基受注から現状

その後、国内電炉メーカー、商社、新聞社を対象とした新予熱型電気炉見学会 (1999年10月) を経て、5トン試験開始から1年8か月後の2000年5月、WG発足から3年9か月後に岸和田製鋼殿より70トン規模の1号機を受注した。ECOARC™と命名された新予熱型電気炉は、現在国内外で7基が稼働しており、中国で更に2基が稼働予定である (表1)。初号機となった岸和田製鋼殿では、仕様達成までに長期間がかかったが、岸和田製鋼殿の全面的な協力のもと設備の完成、仕様達成に漕ぎつけた。いずれのECOARC™も順調に稼働を続けており、WGで当時予測した図6に示す原単位がまさに達成できていることは注目したい³⁾。

2003年には当時の自動車リサイクル法で認定された「全部再資源化技術」として、シュレッター工程を経由せずに直接廃車プレス屑を溶解する技術についても検討した⁴⁾。

また、現在新予熱型電気炉を販売しているスチールプランテック社は、中国金属学会との間で環境対応型高効率アーケ炉の普及、拡販のための協力を行うことで合意、2017年

表1 エコアーク設置状況

	岸和田製鋼 大阪	JFE条鋼 姫路	JFE条鋼 仙台	Dongkuk Steel Incheon	UMC Metals	トビー工業 豊橋	中山鋼業 大阪	BENKI
立上(年)	2001	2005	2008	2010	2012	2014	2018	-
国	日本	日本	日本	韓国	タイ	日本	日本	中国
電気炉容量	70 ton	140 ton	130 ton	120 ton	70 ton	200 ton	100 ton	(2基)
AC/DC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	DC	AC
電気容量	41 MVA	88 MVA	75 MVA	80 MVA	50MVA	115MVA	86MVA	75MVA
電極サイズ	20 インチ	24 インチ	24 インチ	22 インチ	22 インチ	28 インチ	28 インチ	24 インチ
生産製品	異形棒鋼	H鋼、L鋼、 平鋼	自動車向け 棒鋼、線材	異形棒鋼	異形棒鋼、 ビレット	形鋼、棒鋼	異形棒鋼	特殊鋼



写真3 集合写真

連続して存在する状態を保つという原理原則から考えて究極の予熱方式であり、そのため、本プロセスはオンリーワン技術で成功すれば必ず売れるという確信があり、本プロジェクトに参加するすべてのメンバーにとって魅力ある開発テーマとなり、全員が一つになったことが上げられる。また、デザインレビュー、Q & Aを徹底して行い、開発課題を事前に明確化し、「できる」という安易なプラス思考でプロジェクトが進みがち部分を、「問題点が指摘されたらそれに対して素直に対応し答えを出す」という方針を貫いたこと、さらに、上層幹部へのプレゼンで、一度は却下されたが、諦めず、粘り強く提案し続けたことも理由の一つである。

最後に1998年9月、5トン試験炉の1チャージ目出湯後の炉前でのメンバーの集合写真を示す。

には同学会と「ECOARC™生態電弧炉普及促進協定書」を締結し、中国での拡販に力を入れている。さらに現在では、ECOARC™-light、ECOARC™-FITといった既存炉の改造タイプやシャフトの代わりに水平の予熱槽を備えた改良型の提案も行っている。

5 新予熱型電気炉開発が成功した理由

まず、本部、研究所のメンバーがそれぞれの立場で革新的電気炉開発、独創的研究テーマ提案ということに対し危機感を持ってこのWGに参加したことが上げられる。次に提案された本新予熱型電気炉プロセスが、溶解から出湯まですべての時期において常にスクラップが溶解室から予熱シャフトに

参考文献

1) 水上秀昭, 山口隆二, 中山剛, 牧敏道, 青範夫, 佐藤靖浩: NKK技報, No.170, (2000), 1.
2) 水上秀昭, 山口隆二, 中山剛, 牧敏道: NKK技報, No.176, (2002), 1.
3) T. Nagai, Y. Sato, H. Kato, M. Fujimoto and T. Sugasawa: the Most Advanced Power Saving Technology in Eaf, Introduction to Ecoarc™, METEC & 2nd ESTAD, (2015).
4) 水上秀昭, 中山剛, 山口隆二, 岩崎克博, 牧敏道, 久保博嗣: CAMP-ISIJ, 17 (2004), 93.

(2021年9月1日受付)