

連携記事

温室効果ガス削減および高い生産性に寄与する最新電気炉技術

Latest Electric Furnace Technology that Contributes to Greenhouse Gas Reduction and High Productivity

大同特殊鋼(株) 機械事業部
設計部 溶融設備設計室
副主任部員

奥村太佑
Taisuke Okumura

大同特殊鋼(株) 機械事業部
設計部 溶融設備設計室
副主席部員

早川義昌
Yoshimasa Hayakawa

大同特殊鋼(株) 機械事業部
設計部 溶融設備設計室
主任部員

水谷航太
Kota Mizutani

大同特殊鋼(株) 機械事業部
設計部 溶融設備設計室
室長

加藤正士
Masashi Kato

1 はじめに

地球温暖化は全世界共通の喫緊の課題である。2016年11月に国連気候変動枠組条約締約国会議(COP21)は世界全体の長期目標として「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2度より十分低く保つ(2度目標)とともに、1.5度に抑える努力を追求する(1.5度努力目標)」ことを示した。また、昨年2021年11月、COP26は「温暖化による災害や食糧危機など深刻な被害を抑えるためにも、気温上昇を1.5℃までで食い止められるよう、対策強化の行動を加速すること(事実上の新たな目標)」を明記した。日本国内において、当時の菅首相は「2030年度温室効果ガス46%削減」、「2050年実質ゼロ」の目標を打ち出した。

2021年4月、大同特殊鋼(以下、当社という)は経団連が策定した「チャレンジ・ゼロ」に参加、「2030年度温室効果ガス50%削減」や「2050年実質ゼロ」を掲げ、全社を挙げて脱炭素社会の実現に取り組むことを発信した。

当社は1916年、特殊鋼の製造開始と同時に、より高品質な素材を求めて、自ら工業炉の設計・製作をスタートさせた。機械事業部はこうした素材と工業炉の豊富な技術力、操業ノウハウを背景として1960年に設立。以来60年以上にわたり、熱処理技術をベースに、真空技術、制御技術、環境技術ほか多彩な技術を結集し、同事業部のタグラインである「ともに、熱く」を心にお客様のニーズに応じてきた。地球温暖化が進み、多くの課題が顕在化した現状を技術革新のチャンスと捉え、脱炭素社会に寄与する新しい技術を開発、提供し、電気炉ユーザのお役に立ち続けることを目標に日々活動している。

当社の主な溶解プロセスである電気炉製鋼法は高炉・転炉による一貫製鉄法よりも温室効果ガス排出量が少ない特長があることから、近年、高炉各社からも注目を集めている。また、一貫製鉄法は限りある天然資源である鉄鉱石を採掘し、鋼を製造する。一方、電気炉製鋼法は廃棄物である鉄スクラップを再利用することからサーキュラーエコノミー(循環型経済)に寄与する意味でも持続可能な開発目標SDGsに貢献する技術である。

当社は令和3年度の先進的省エネルギー投資促進支援事業費補助金「先進設備・システム」に9つの技術が登録された。本稿では、その中から電気炉に関わる4つの技術(移動式炉頂スクラップ予熱設備、環境対応型スクラップ予熱設備、炉体旋回式電気炉および溶け落ち判定システム)を中心に温室効果ガス削減および高い生産性に寄与する最新電気炉技術を紹介、解説する。

2 大同が提供する最新電気炉CO₂削減技術

2.1 スクラップ予熱設備

電気炉は原料スクラップを溶解する過程で高温の排ガスを発生させるため、排ガス熱の有効活用が模索されてきた。図1に電気炉の熱収支例を示す¹⁾。

図中の数値は溶鋼1トンあたりの熱量を示し、単位はkWh/tである。電気炉の熱収支は様々な報告がある。一般的に1600℃の溶鋼含熱量は鉄鋼の物性値として385kWh/tであることが分かっている。この熱量を得るために電気炉へお

注) SKYHOUSE、DAIDO-ARMS、MSP、SSP、STARQ、E-adjustは大同特殊鋼株式会社の商標または登録商標です。

およそ倍の750 kWh/tのエネルギーが投入されている。電気炉の主要熱源は「アーク」つまり電力であるが、酸化精錬に伴う金属酸化熱や炭素の酸化熱および助燃バーナの燃料燃焼熱などもある。電力以外のエネルギーが全入熱量の5割に達する例も報告されている。よって、単純に電力原単位のみで電気炉の熱効率は評価できない。各種エネルギーの選択は使用する原料や電力事情などの条件を総合的に判断して決定されており、またエネルギー単価などの条件が変化すれば、選択するエネルギーも変更されるのが通常である。

図1の電気炉熱収支例の出熱側に着目すると排ガス損失熱が全体の33%以上を占めており、スクラップ予熱技術は排ガス損失熱を回収して有効利用する技術といえる。当社の経験から、入熱にどのエネルギーを選択したかによって出熱の傾向に影響が及ぶ。例えば、炭素の酸化熱や燃料燃焼熱を入熱に多く利用すると排ガスの発生量が増えるため、出熱に占める排ガス損失熱の割合が大きくなる¹⁾。

当初、スクラップ予熱はスクラップパケットを予熱容器としていた。このパケット式スクラップ予熱は高温度の排ガスにスクラップパケットを直接接触させるとパケットが損傷し

たり、予熱スクラップ中の油がガス化して搬送時に白煙を発生させたりと諸問題が顕在化した。1990年代に入るとパケット式スクラップ予熱に変わるものとして、コーンスチールタイプの連続装入炉やツインシェル炉などの新しい形の予熱機構を備えた炉が導入されるようになった。さらに90年代後半からは、より高温の予熱が可能な炉頂型スクラップ予熱装置を装備した炉が提案され、稼働し始めた。予熱容器が塔=シャフトのような形状であるため、世界的にシャフト炉と呼称されている。

現在世界で稼働している主なスクラップ予熱装置を予熱温度で分類するとシャフト炉に代表される高温予熱装置とダクトなどで予熱容器まで排ガスを導く従来温度の予熱装置に分別される。また、原料スクラップの電気炉への装入形態で分類すると連続装入式とバッチ装入式に分別される。表1に各種スクラップ予熱装置の特徴を比較する²⁾。

当社のスクラップ予熱設備のコンセプトは、従来のバッチ式電気炉の持つ溶解期の高い溶解効率を維持し、かつ、新たな原料制約が無いことである。原料となるスクラップは製鋼コストのおおよそ半分を占める。今後、ますます激しくなる

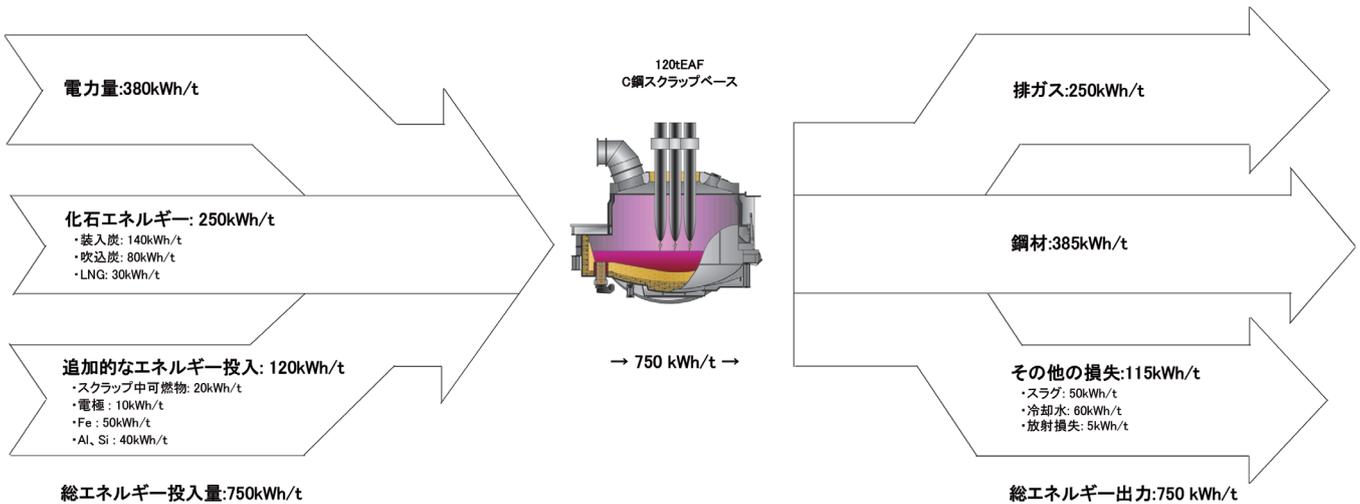


図1 電気炉の熱収支例¹⁾ (Online version in color.)

表1 各種スクラップ予熱装置の特徴比較²⁾

		予熱温度	
		高温	従来温度
装入形態	連続	①高い予熱効果 ②低フリッカ	①従来並の予熱効果 ②低フリッカ
	バッチ	①高い予熱効率 ②高い溶解効率	①従来並の予熱効果 ②高い溶解効率 ③原料制限無し

国際的なスクラップ争奪戦の影響でスクラップコストは更に高くなることが予想される。その中でグレードの選別や寸法制限を行うことは大幅なコスト増大につながるため、最小限に抑制しなければならない。

次に当社がこれまでに開発・導入した（バッチ装入機能を持つ）移動式炉頂スクラップ予熱設備と従来のバケット式スクラップ予熱を改善し、欠点を克服した環境対応型スクラップ予熱設備について述べる。

2.1.1 （バッチ装入機能を持つ）移動式炉頂スクラップ予熱設備

当社の移動式炉頂スクラップ予熱設備（MSP[®]（Multi stage Super Preheater）/SSP[®]（Single stage Super Preheater））は炉頂にあるスクラップ予熱槽が移動してスクラップを電気炉の中央にバッチ装入できる機能を有するもので、これまでに国内外3基納入した実績がある。

その特長は第一にスクラップを高温かつ高効率に予熱すること、第二にCOを異常燃焼させず安全性が高いこと、第三に予熱するスクラップ原料の制約が少ないこと、第四に電気炉の熱源がある中央へスクラップを装入できるため、高い溶解効率で炉体熱損失が少ないことである。図2にその概念図を示す。

これらの特長を実現するために当社の移動式炉頂スクラップ予熱設備は以下の能力を有している。

①高温になる炉頂部でも安定してスクラップを保持でき

るフィンガ（現在のSMS-DEMAG社（独）に合併されたKORF社（独）が開発したEOFに適用されていたものを技術導入）は製鋼用電気炉用として当社が最初に開発した。

このフィンガを用いることで電気炉の炉頂に予熱室を配置し、高温の排ガスでスクラップを直接予熱することが可能になった。

- ②電気炉と予熱室との間に溶解期に発生する大量の一酸化炭素を燃焼するために必要な空気を導入するとともに十分な燃焼空間を確保した。このスペースはいわゆる燃焼塔の役割を果たす。この顕熱を最大にした排ガスでスクラップを予熱でき、後段でCOが異常燃焼しないようにした。
- ③予熱室にバイパスダクトを設け、予熱室を通る排ガス量を制御できるようにした。
- ④予熱後の排ガスは省エネタイプの脱臭塔を設置することで安価に臭気対策できるようにした。当社の脱臭塔はバーナ火炎を直接排ガスと効率良く接触させるもので通常の燃焼脱臭よりも燃費が格段に良い。
- ⑤スクラップを電気炉内に装入する際、予熱設備を移動させ、炉の熱源がある中心に装入する。こうすることで炉壁近くの溶け残りも無くなり、高い着熱効率と炉体熱損失の低減を実現した。
- ⑥移動機能で電気炉の炉頂から待機させることもでき、その位置で予熱設備のメンテナンスや万が一の水漏れや溶着に

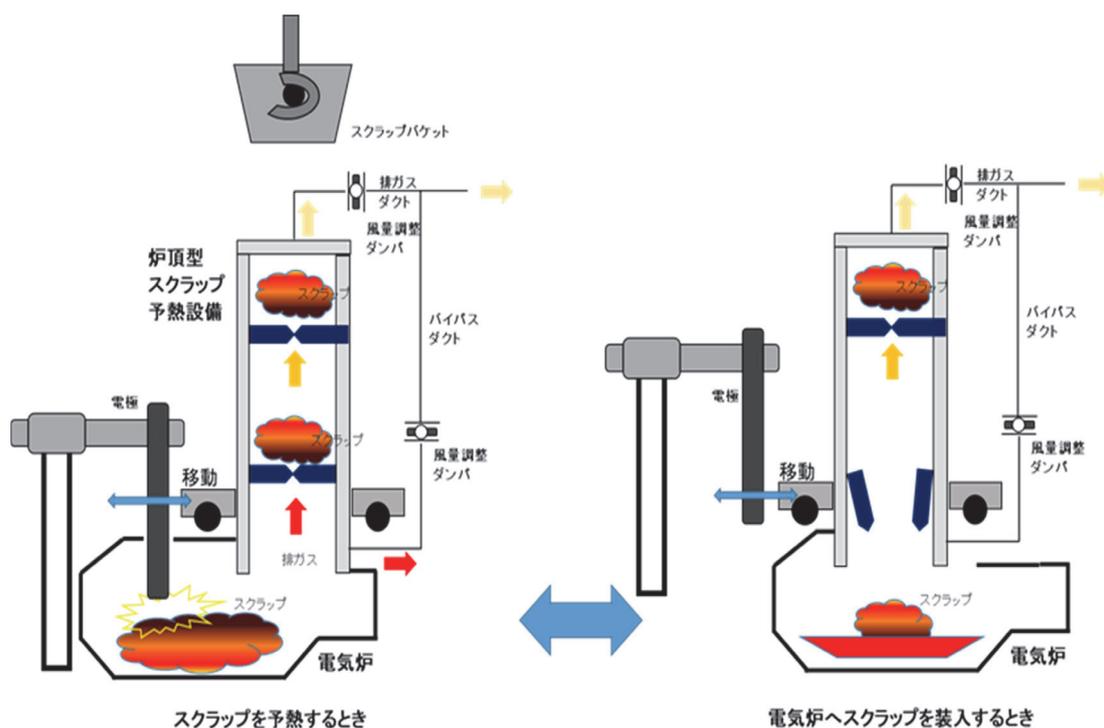


図2 移動式炉頂スクラップ予熱設備（MSP[®]/SSP[®]）概念図（Online version in color.）

安全に対処できる。

他社のスクラップ予熱技術でスクラップ連続装入式の予熱設備がある。連続装入式（スクラップを少量ずつ装入し、溶鋼だまりの中に落とし込むタイプ）は常時フラットパス（＝従来電気炉のスクラップ溶解後と同じ湯溜まりがある状態）となり、アーク放電が安定してフリッカが低く抑えられるメリットがある。一方、スクラップの着熱効率は低く、投入下の炉壁スクラップが溶け残ったり、搬送装置にスクラップが溶着したりする。また炉内壁が常時アーク熱に晒されるため、炉内耐火物の損傷が増え、水冷物の抜熱量も増大し、炉体熱損失も大きい。それを少しでも避けるために従来の電気炉昇温期のような酸素とカーボンを用いたスラグフォーミング操業を常に行わなければならない。このことは電気炉もしくはスクラップに対して酸素やカーボンによる投入エネルギーを増加させることになり、トータルでエネルギーを減らすことができない。つまり、電気エネルギーを節減する一方で、カーボン源燃焼等を含む総エネルギー原単位は低減せず、むしろ増加傾向にあるという報告もある³⁾。

これに対して、当社の移動式炉頂スクラップ予熱設備は炉内に装入するときに予熱設備を移動させ、電気炉の熱源がある中心にスクラップを装入する。こうすることで溶解期にアークをスクラップで包み込みながら溶解させるプロセスが成立し、溶解効率の向上と炉体熱損失を低減させることができるのである。

予熱効果は筆者らの経験から理想的な熱交換時間と伝熱面積が確保されれば、スクラップの酸化を抑制しつつ、排ガス顕熱の1/3程度の70～80kWh/tになる。これは排ガスを歩留まり等も考慮し制御した試算であり、カーボン他の代替エネルギーはそのままに総エネルギー原単位を低減する。

2.1.2 環境対応型スクラップ予熱設備

次に従来のバケット式スクラップ予熱の欠点を改良、克服した当社の環境対応型スクラップ予熱設備（SPH-mark II＋排気機能を有する開閉式囲い（SKY HOUSE[®]））について述べる。

この設備の特長はその名の通り、環境に配慮したスクラップ予熱を実現させたことである。第一に耐火物施工したガス漏洩し難い予熱槽を持つこと、第二に予熱槽、電気炉エリアに排気機能を有する開閉式囲いで工場内と環境を区分すること、第三にその囲いの中で予熱槽を台車で電気炉の熱源のある中央まで自動運転で移動できること、第四にスクラップの予熱量を排ガス量で制御することである。

環境対応型スクラップ予熱設備は従来のバケット予熱の課題を以下のように解決し、バケット予熱が持つ優れた省エネルギー技術を改善し、更に高効率にして実現した。

- ①スクラップバケットとは別に耐火物施工した予熱槽を持つことで、高温の排ガスでスクラップを予熱することを可能にした。
- ②予熱槽、電気炉エリアに排気機能を有する開閉式囲いで工場内と環境を区分することで予熱による白煙や悪臭を吸引するための排気機能を最小限にした（排気ファンの消費エネルギーを低減）。また、従来、スクラップ装入はバケットをクレーンで移動させており、そのため、予熱後の白煙や悪臭を場内にまき散らしていた。これを開閉式囲いが閉じた状態で、予熱槽を台車で電気炉の熱源がある中央まで自動で移動し装入できるため、開閉式囲いの外になる工場内の環境は白煙や悪臭が漏れず大幅に改善した。
- ③予熱室にバイパスダクトを設けたのは先に述べた当社の移動式炉頂スクラップ予熱設備と同様である。これによりスクラップ性状に応じた予熱コントロールが可能である。

これらは従来のバケット予熱の環境問題を当社が持つ環境技術を組合せ、改善を重ね生まれた優れたものである。

これらを実現するために改良した設備は電気炉に付帯設置する。新設の場合、新しい建屋に環境対応型スクラップ予熱設備を備えた電気炉を設置することになる。改造の場合、既存電気炉の周辺に環境対応型スクラップ予熱設備（予熱槽、台車および開閉式囲い）を追加設置し、排ガスダクトも一部修正する。

図3に先のスクラップ装入概念を示す。操業方法は①スクラップをバケットから予熱槽に装入、その際には開閉式囲いを一時的に開け、装入後に閉じる。②電気炉排ガスを予熱槽へ送り、スクラップを予熱する。③予熱後、予熱槽を電気炉の熱源がある中央まで台車で自動運転し移動させ、予熱槽下にあるゲートを開いて電気炉へ装入する。その際、開閉式囲いは閉じているため、工場内に白煙や悪臭は漏れださない。装入後に予熱槽を元の位置に戻す。また、予熱設備に流れる排ガス量を調整し、予熱量を制御する。

2.2 炉体巡回式電気炉

炉体巡回式電気炉（STARQ[®]）は自社開発した設備で2013年、当社知多工場で生産を開始した世界初の技術を有した電気炉である。製鋼用交流電気炉を対象とし、電気炉の炉体を旋回することで炉内スクラップの溶解性を均一にして、エネルギーロスを低減、熱効率の向上を図り電力量原単位削減など省エネを実現し、高い生産性に寄与する。

本技術のセールスポイントは小設置スペースにおける大幅な生産性向上であろう。一般的に従来交流電気炉の更新と合わせ生産性を高めようとした場合、スクラップ予熱、排熱回収など追加設備設置のため広大なスペースが必要で既存の建屋まで更新しなければならないことが多い。しかし、炉体旋

回式電気炉は図4⁴⁾に示すように従来電気炉の炉体とプラットフォームの間に炉体旋回機構を追加するだけで改造更新できる。プラットフォームの形状が旋回装置用に設計される程度の違いはあるが、基本構造は従来の交流式電気炉と同様である。

交流式電気炉は電極が三角形に配置されているのに対して、炉殻が円筒形状である。そのため、電極と炉殻までの距離が一定でない。このことから従来はスクラップが溶けやすい場所（ホットスポットと呼ぶ）、溶けにくい場所（コールドスポットと呼ぶ）が発生していた。これは交流式電気炉が開発された時からの課題である。電気炉の大型化や高電力操業が主流になるにつれ、その課題はより顕著になってきていた。

これまでのコールドスポットにある溶けにくいスクラップは主に補助的にバーナを使って溶解していた。しかし、次の

ような課題があった。

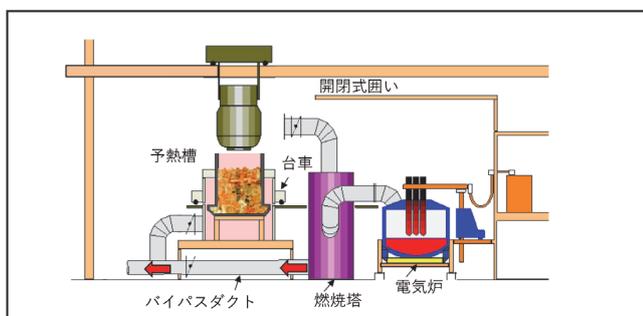
- ・ 火炎の跳ね返りなどにより、炉壁水冷パネルの破損や炉内耐火物の異常溶損の懸念が高い。
- ・ LNGや灯油など燃料代は夜間電気代と比べて高価となり、製造コストが増加する。
- ・ バーナの燃焼熱はアークに比べて温度が低く着熱効率が悪い。そのため、総使用エネルギー量は悪化する。

それに対し、炉体旋回式電気炉は電気炉の炉体自体を旋回させて、炉内の温度の高い場所と低い場所を入れ替えることで、不均一溶解を解消する。そのため、炉体旋回式電気炉は先に述べた従来のバーナ追加方式と比べ、溶解エネルギーロスを減らし、効率良く溶解できる。

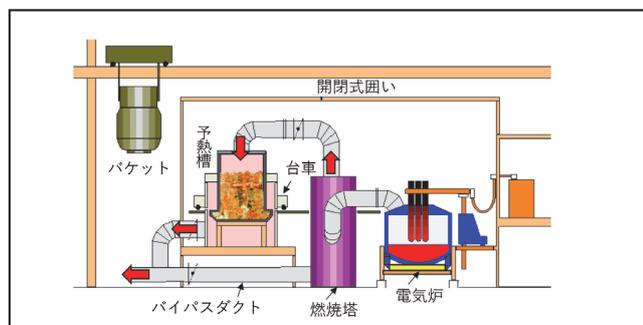
図5に従来交流電気炉と炉体旋回式電気炉のアーク放電による溶解性を比較する。

炉体旋回を用いた操業の流れを解説する。従来のバッチ式電気炉は通常2回ないしは3回に分けて炉内にスクラップを装入する。炉体旋回はこの生産に寄与していないスクラップ装入の通電停止時に行う。図6に操業時の旋回タイミングの一例を示す。追加でスクラップを装入する際に炉体を旋回させ（図中①の状態）、その後、溶解が進みホット/コールドスポットが発生してきたら（図中②の状態）先ほどとは逆方向に炉体旋回し、均一に溶解する（図中③④の状態）⁴⁾。

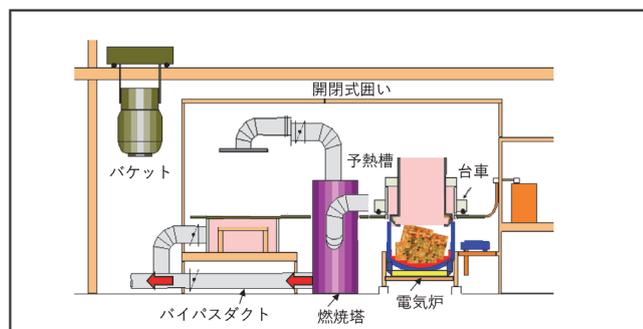
当社知多工場の実操業において、炉体旋回をした場合としない場合を比較し、次の結果を確認した。旋回による均一溶解の効果で冷却水や放散による持ち去り熱が減少し、炉壁抜熱ロス率は平均で7.8%減少した。それに伴い通電時間は約5%の短縮、また電力量原単位も4.9%低減した。その他、ホットスポットへ必要以上に入熱することを抑制することで炉内



①予熱槽：スクラップ装入 | 排ガス：バイパス | 電気炉：通電中 | 開閉式囲い：開



②予熱槽：スクラップ予熱中 | 排ガス：投入 | 電気炉：通電中 | 開閉式囲い：閉



③予熱槽：移動 | 排ガス：バイパス | 電気炉：スクラップ装入

①へ

図3 環境対応型スクラップ予熱設備のスクラップ装入概念図 (Online version in color.)

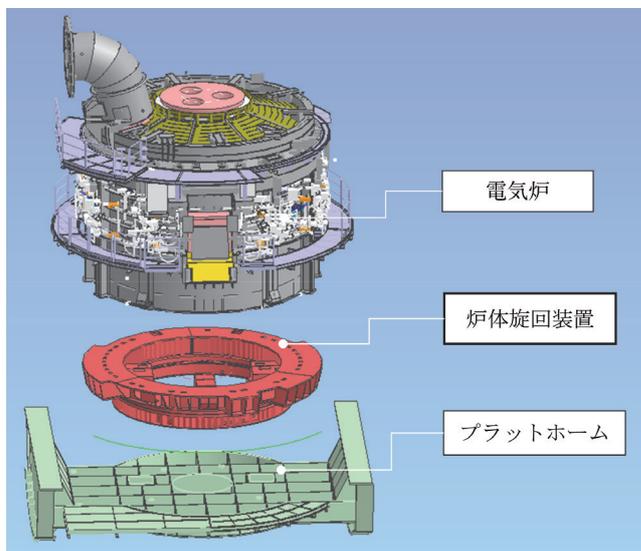


図4 炉体旋回式電気炉設備構成イメージ図⁴⁾ (Online version in color.)

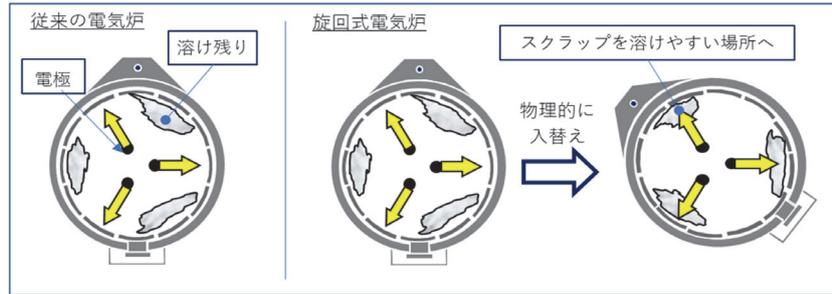


図5 従来交流電気炉と炉体旋回式電気炉のアーク放電による溶解性 (Online version in color.)

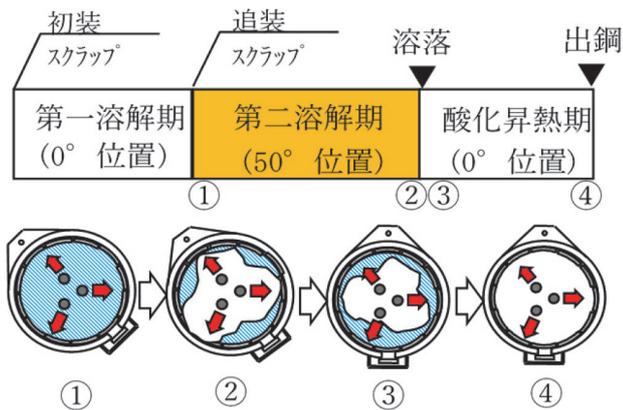


図6 炉体旋回式電気炉の操作パターン例⁴⁾ (Online version in color.)

耐火物の消耗量も減り、補修材原単位も約16%削減できた。このように炉体旋回式電気炉は炉体旋回により多岐に渡る効果が得られる。

最近では、従来電気炉と同じ場所に炉体旋回装置を追加設置し炉体旋回式電気炉に改造した実績がある。その際の現地工事は電気炉の炉容量を拡大、電源設備更新と合わせて40日弱という短い停止期間で行った。また、この炉体旋回式電気炉に環境対応型スクラップ予熱設備を融合した電気炉を新規納入した実績もある。

2.3 溶け落ち判定システム

現在のアーク炉操業では様々なプロセスコンピュータシステムを利用した自動制御が広く普及しており、当社でも1970年代にアーク炉最適電力制御装置“DAIDO-ARMS[®]” (Automatic Rapid Melting System)、1990年代にスクラップ自動配合システム“ARTS” (Automatic Receiving and Transferring system of Scrap) 等を開発し、電気炉ユーザへ提供している。

また、若年層の担い手不足および熟練者の定年退職による技能伝承や操業班ごとの異なった方法による操業のバラつき等の課題を解決する省力化やスキルフリー化技術にも取

り組んできた。そんな電気炉の自動制御機能の一つとして、炉内スクラップの溶け落ち時期を自動的に判定するシステム“E-adjust[®]” (Electric arc furnace-automatic dynamic judgment system of meltdown timing) がある。この溶け落ち判定システムは電気炉から発生する高調波と炉内発生音の解析を併用することで精度の高い溶け落ち時期を判定することができ、国内の交流電気炉ユーザに納入し、効率的な操業に活用頂いている。従来、製鋼用交流電気炉におけるスクラップの溶け落ち判定 (スクラップ追加装入時期判定、昇温期移行判定) はオペレータが判断している。そのため、時々、個々により、ばらつきが生じていた。溶け落ち判定システムは、マイクおよびCTから取得した炉内音及び高調波を測定、定量化することにより、溶け落ち判定のばらつきを解消し、それに伴い電力量原単位も削減することを実現した。

アーク電流高調波は、これまでもスクラップの溶解が進行するに従い減少することが知られていた。しかし、電源ノイズとして扱われており、スクラップの溶解状態を判断する要素として利用されることは稀であった。アーク電流高調波を細かく分析した結果、高調波はスクラップ溶解が進むにつれて低下していくことを確認した。そこで、溶け落ち判定システムはアーク電流高調波に対して閾値を設け、閾値を下回ったときに溶け落ち判定の要素の一つとして活用した。

また、オペレータがスクラップの溶解状態を推定するために炉内音を活用することは広く知られているが、経験則に基づき判断され定量的で無かった。炉内音を詳細まで分析した結果、基本周波数の偶数倍帯域の炉内音はスクラップの溶解が進行するに従い、増加する関連性を確認した。このように、高調波および炉内音2つの要素から溶け落ち時期を定量的に判定できるようにした。

また、溶け落ち判定システムをアーク炉最適電力制御装置と溶け落ち判定システムを連動させることで、アーク炉最適電力制御装置で設定した使用予定電力量を溶け落ち判定システムに反映させることができる。また、アーク炉最適電力制御装置にスクラップのかさ情報を他のシステムより取り込むことで、溶け落ち判定システムに反映させることができ、測

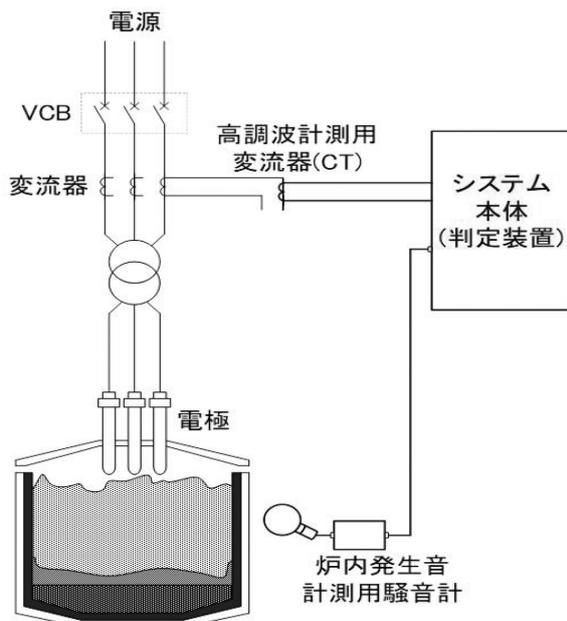


図7 溶け落ち判定システムの構成⁵⁾

定精度を高めることも可能である。

溶け落ち判定システムは製鋼用交流式電気炉を保有する工場で導入可能である。既設、新設どちらの電気炉にも導入可能であり、図7のシステム構成のように設置する⁵⁾。工事期間は1週間程度である。

このように溶け落ち判定を均一化することにより、余分な熱を投入することを抑制することで操業時間の削減および電力量原単位の削減にも寄与する。また、省力化やスキルフリー化だけでなく、経験が浅いオペレータへの教育機器としての一面も期待できる。

3 おわりに

これまでに弊社の温室効果ガス削減および高い生産性に寄与する最新電気炉技術の一部を紹介した。これら紹介した技術は単にエネルギー源を電気からカーボンや酸素吹き込みで代替するのではなく、従来電気炉の強みであるアーク放電によるスクラップへの高い着熱効率をそのまま活かしたところに改善を施すことで更なる高い生産性を実現する。そうする

ことで、電気炉に投入する総エネルギー量を減らし、温室効果ガス削減に寄与する。

現在、鉄鋼産業は脱炭素という大きなパラダイムシフト・転換期を迎えている。電炉鋼材が持つ環境優位性から電気炉製造法はますます注目され、新たな操業技術、設備技術の発展が求められている。

一つ目は一貫製鉄法から電気炉製鋼法に置き換えるための大量生産、高生産性を実現するための電気炉の大型化技術がある。これは単に電気炉の炉体を大型化するだけでなく、それに合った大型電源供給設備の開発も必要である。

二つ目は低廉スクラップ原料や還元鉄などから高品位な鉄鋼製品を製造する精錬技術である。

更に三つ目はカーボンニュートラルに向けてCO₂フリー電力の確保や再生資源などから生成されるカーボンフリー代替燃料の活用技術である。

大同特殊鋼グループのスローガン「Beyond the Special」は特別を超える価値を提供し、情熱を持って人や社会を支え続ける、世の中が必要とするイノベーションをお客様と一体となって創りあげる。そんな存在でありたいとの思いを込めたものである。

大同特殊鋼はこれらの課題解決のため、新たな電気炉製鋼法の技術を追求し続ける。そして、地球温暖化を抑制し、未来の持続可能な社会形成に貢献し続けたい。

参考文献

- 1) 亀島隆俊, 堀秀幸, 松尾国雄: 電気製鋼, 84 (2013) 2, 133.
- 2) 堀哲: 第242回西山記念技術講座, 最近の電気炉技術の進歩—平成30年を振り返る—, 日本鉄鋼協会, 東京, (2021), 87.
- 3) 山口一良, 植田滋, 長坂徹也: ふえらむ, 27 (2022) 1, 45.
- 4) 小川正人: エレクトロヒート, No.233 (2020), 10.
- 5) 奥村太佑, 中嶋規勝, 大脇智, 堀秀幸: 工業加熱, 54 (2017) 4, 3.

(2022年2月28日受付)