

技術資料

Technical Data

電気製鋼におけるプラントエンジニアリングの発展

亀島隆俊*, 堀 秀幸*, 松尾国雄*

Development of Plant Engineering for Electric Furnace
Steel Industry

Takatoshi Kamejima, Hideyuki Hori and Kunio Matsuo

Synopsis

Electric furnace steel industry has progressed around one century in Japan. Japanese electric furnace steel industry began as the government policy for enriching the nation and building up the defenses at the forefront, and has developed as quality competitive material resources for Japanese leading industries like architecture, automobile, airplane, electronics and others today. Daido Steel Co., Ltd. established with the newborn cry of Japanese electric furnace steel industry and started as a manufacturer of electric arc furnaces at the same time of steel making start. Since then, Daido has been supplying steel making plants for worldwide users. In recent years, Daido is supplying total engineering for steel making plants based on electric arc furnace plant technology integrated with arc furnaces, various refining furnaces and other necessary auxiliary equipment. And moreover, Daido is expanding into other engineering fields of steel making. In this review, we introduce development of our plant engineering technologies.

1. はじめに

我が国で初めて電気炉鉄の溶製に成功してから、一世の歳月が経過しようとしている。富国強兵の国策として始まった我が国の電気製鋼は、幾度の歴史的な転換点を経過して、現在は土木建築や自動車・航空機およびエレクトロニクスなどに代表される国内主要産業へ、良質で安価な素材を供給するという重責を担う産業へと発展した。

大同特殊鋼(株) (以下当社という) は、我が国電気製鋼の産声とともに誕生し、製鋼業を営んで来たが、電気製鋼の始まりと時を同じくして電気炉の製造にも着手しており、国内外のユーザーへ電気炉を中心とした製鋼プラントを供給して来た。近年では、電気炉設備技術を基盤とした各種精錬炉や製鋼付帯設備を統合して製鋼設備の

トータルエンジニアリングを供給しており、更に製鉄以外の分野へも鉄鋼設備で培った技術を応用したプラントエンジニアリングを供給している。

本稿では、電気炉の製造から始まった当社鉄鋼産業向けプラントエンジニアリングの技術的な進歩に注目しながら、各種製鋼設備技術の開発経緯と特徴を紹介する。

2. 電気炉製鋼技術の進歩

我が国の電気炉製鋼の発展過程を Table 1 に示す¹⁾。

1960年代前半に米国 W. E. Schwabe により UHP (Ultra-High-Power) 操業が提唱されてから、国内においても多くの UHP 炉が実用化され、投入電力量の増大により目覚ましい生産性向上を実現した。1970年代には酸素富化-C インジェクション操業などの操業技術の

2013年11月6日受付

*大同特殊鋼(株)機械事業部 (Machinery Division, Daido Steel, Co., Ltd.)

Table 1. Advance in electric arc furnace for steelmaking.

	1950~	1960~	1970~	1980~	1990~	2000~
Topic			Oil crisis		Bubble economy burst	Lehman Shock
Furnace capacity	50 t (18.75 MVA)	70 t (20 MVA) 80 t (25 MVA) 200 t (40 MVA)		130 t DC furnace	150 t DC furnace	160 t AC
UHP in transformer		Dr.W.E.Schwabe UHP proposal 120 t (0.35 MVA/t) 70 t (0.8 MVA/t)	70 t (0.6 MVA/t) 120 t (0.5 MVA/t) 60 t (1 MVA/t)	85 t (0.8 MVA/t) 80 t (0.9 MVA/t) 130 t DC furnace (0.8 MVA/t)	150 t DC furnace (1.2 MVA/t)	High impedance furnace
Structure of Furnace body	Roof swing Top-charging induction stirring AC/DC switching type of arc furnace	Water cooling box for furnace wall Three phase balancing of secondary water -cooled cable	Slant electrode water cooled roof	EBT DC furnace	Al conductive arm Con-steel type Twin-shell type Shaft furnace	
Electrode control device	Amplidyne-control	Primary voltage control by SCR eddy current coupling control		VVVF vector type of control Liquid pressure type of control		
Auxiliary equipment		Continuous casting DH degassing RH degassing Oil burner	VOD, AOD, LF, etc. Refining outside of arc furnace	Continuous casting for special steel	VCR	Coherent burner
Operation	O ₂ refining		O ₂ enrich- C injection operation	Gas stirring by bottom injection	Hot metal charging	
Labor saving & Automation	Flux & alloy feeling system	Optimum power control system Automatic flux & alloy feeding system	Automatic analyzer Automatic electrode connection device On-line computer for steelmaking	Optimum powering method	ARTS	E-adjust [®]
Environmental preservation	Direct evacuation system		Roof evacuation system	SKYHOUSE [®] flicker control (Active filter)	Dioxin prevent dust collecting system DSM process	INMETCO process

進歩に加え、LFに代表される炉外精錬法が開発・普及され、溶解と精錬の機能分離の推進など積極的な技術開発により更なる生産性向上を実現したが、第一次オイルショックを境に国内鉄鋼業は粗鋼量の拡大期から「質の追求」への変革期へ移行し、1980年代には電気炉の超高電力化により顕在化したフリッカー問題対策技術である直流電気炉や、スラグフリー操業技術である偏心炉底出鋼式電気炉が実用化された。1990年代以降は電気炉排ガス熱の回収技術である高温スクラップ予熱技術の実用化や各種オートメーション化が推進されるのに並行して、ダイオキシン対策技術や製鋼副産物のリサイクル技術などが開発・普及され、エネルギー原単位などの操業諸元の改善のみならず、環境保全を強く意識した製鋼プラントが実現されている。

次節から現在の電気製鋼技術の傾向として、「高生産性と高品質化」、「オートメーション」、「環境調和」の視点から各々の特長技術について紹介する。

3. 高生産性と高品質な製品の追求

国内経済とともにめざましい発展を遂げた我が国電気炉製鋼の歴史は、高生産性と高品質な製品実現の飽くなき追求の歴史といっても過言では無い。

電気炉の生産性向上は、換言すれば炉容量の拡大と操業時間(Tap-Tap時間)短縮を両立することであり、前述した技術の発展を経て現在に至っている。これまで実用化された施策をTable 2に示す。電気炉生産性向上に対する施策は、投入エネルギー増大、非通電時間短縮、炉容量大型化などに大別でき、投入エネルギー増大を実現する具体的施策として、UHP操業や酸素富化-Cインジェクション操業が積極的に採用されてきた。近年、更なる電気炉の投入エネルギー増大施策として、高温スクラップ予熱が注目されている。一方、製品の高品質化のために、複合精錬プロセスが実用化されており、これについても解説する。

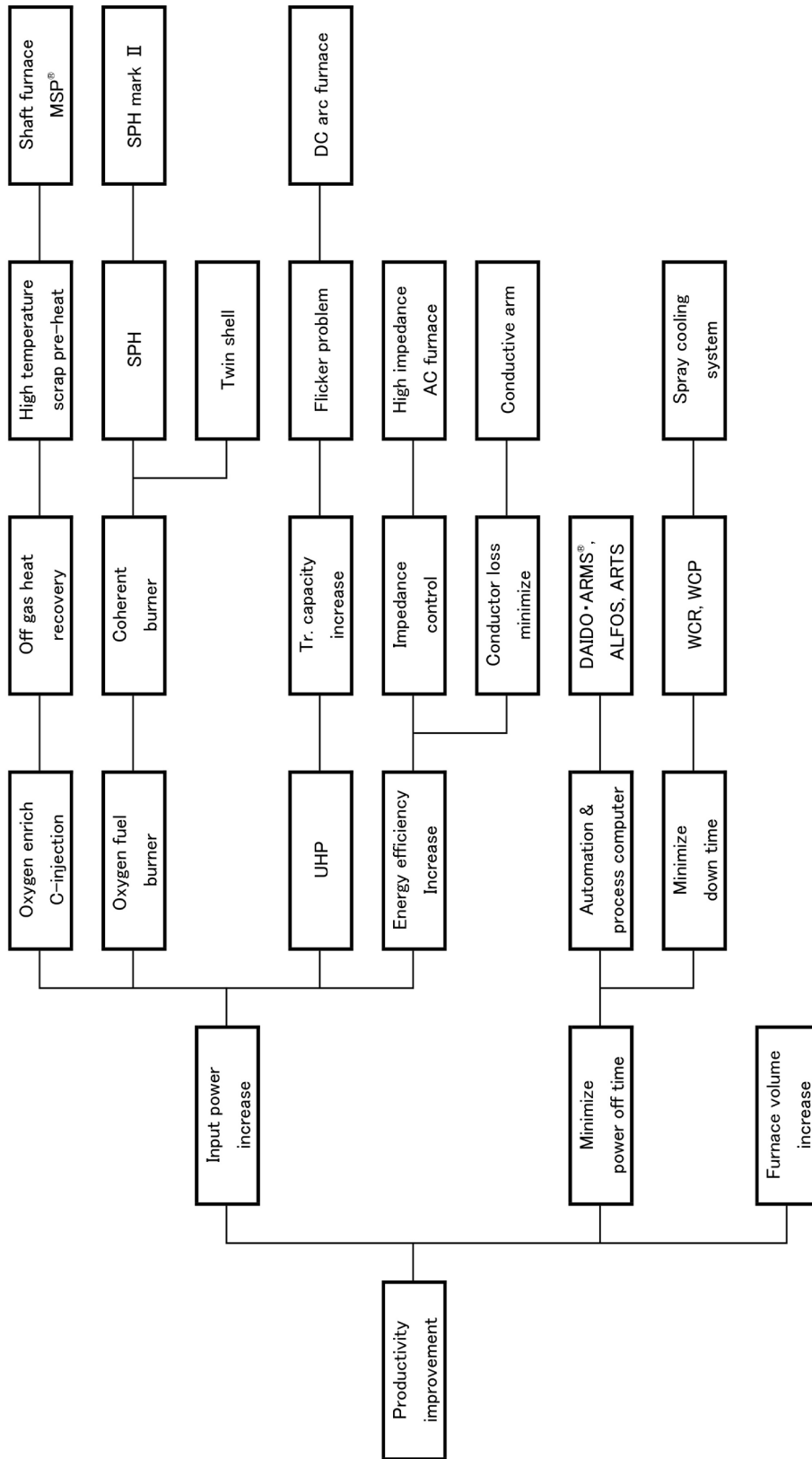
3. 1 高温スクラップ予熱～シャフト炉～

電気炉は原料スクラップを溶解する過程で高温度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。Fig. 1に電気炉の熱収支例を示す。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。電気炉の熱収支については様々な報告がされているが^{2) 3)}、1600℃の溶鋼含熱量は385 kWh/tであることが分かっており、この熱量を得るために、おおよそ倍の

750 kWh/tのエネルギーが電気炉へ投入されている。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、電力以外のエネルギー投入量が全入熱量の5割に達する例も報告されており、電力原単位のみでは電気炉の熱効率は評価できない。どのエネルギーを選択するか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。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、高温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点に着目した技術といえる。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も影響が及ぶ。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。

縦型(シャフト状)の容器にスクラップを充填し、容器下方から高温ガスを導入すると、高温ガスがスクラップ層内を通風しながら熱伝達され、十分な加熱時間や最適なスクラップ充填率が得られれば、ガス顕熱の30%以上がスクラップへ伝熱することが報告されている⁴⁾。Fig. 2にシャフト炉の実施例を示す。電気炉の直上にシャフト状のスクラップ予熱装置が設置されており、電気炉からの高温排ガスを直接導入することができる。予熱シャフトにはスクラップを保持するためのフィンガーと呼ばれる開閉可能な水冷火格子が備えられている。予熱シャフト内に保持されたスクラップを電極の真下まで搬送して投入するバッチ装入方式のため、熱源の近くにスクラップを投入でき溶解時のエネルギー効率が良い。Table 3に本設備の特長を他の予熱装置と比較する。本例以外にも、予熱シャフトから電気炉の湯溜まりへスクラップを連続切り出しする実施例が報告されており⁵⁾、フラットバスの特長である低フリッカー操業が期待できる。

Table 2. Layout of productivity improvement measures.



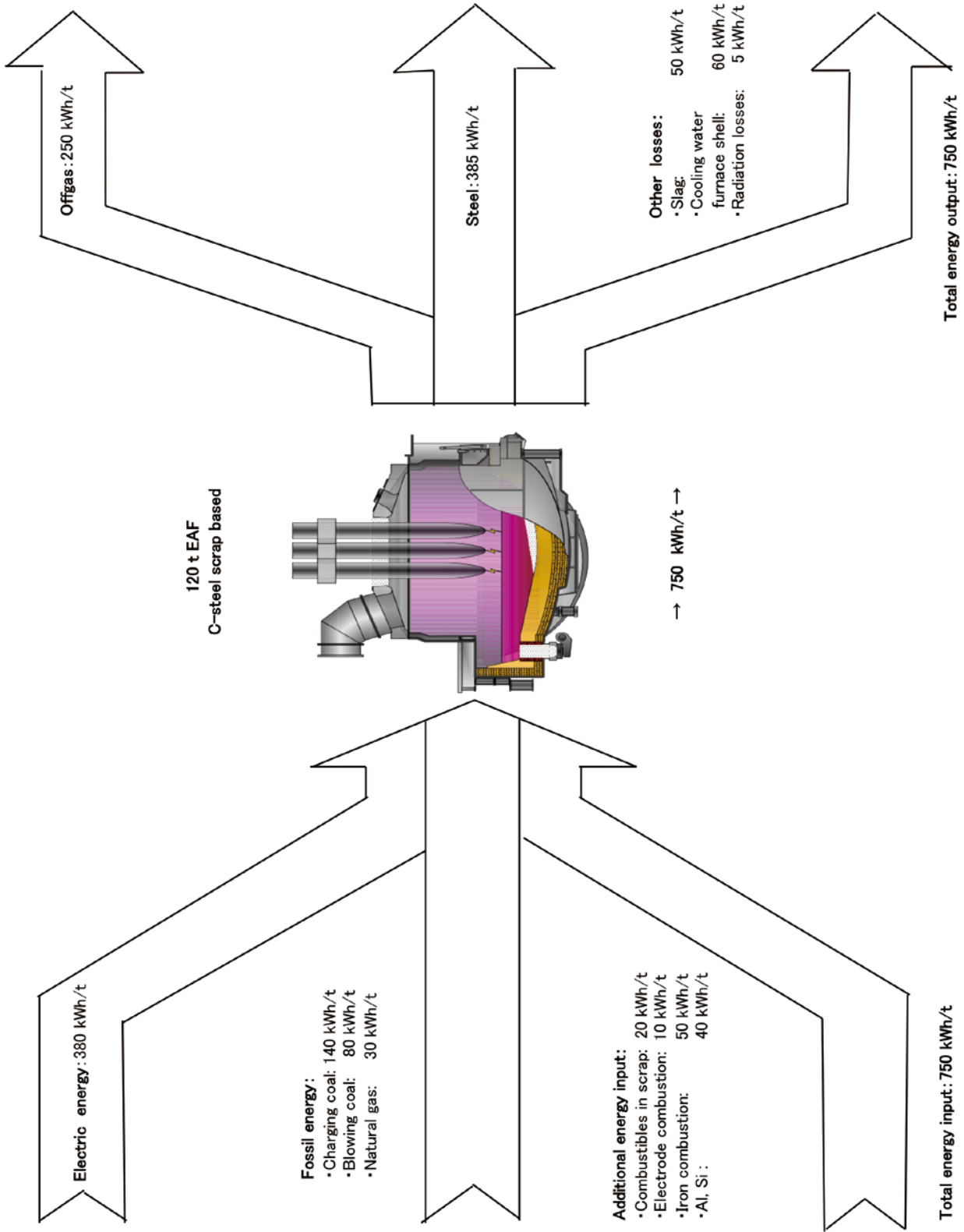


Fig. 1. Heat balance of electric furnace.

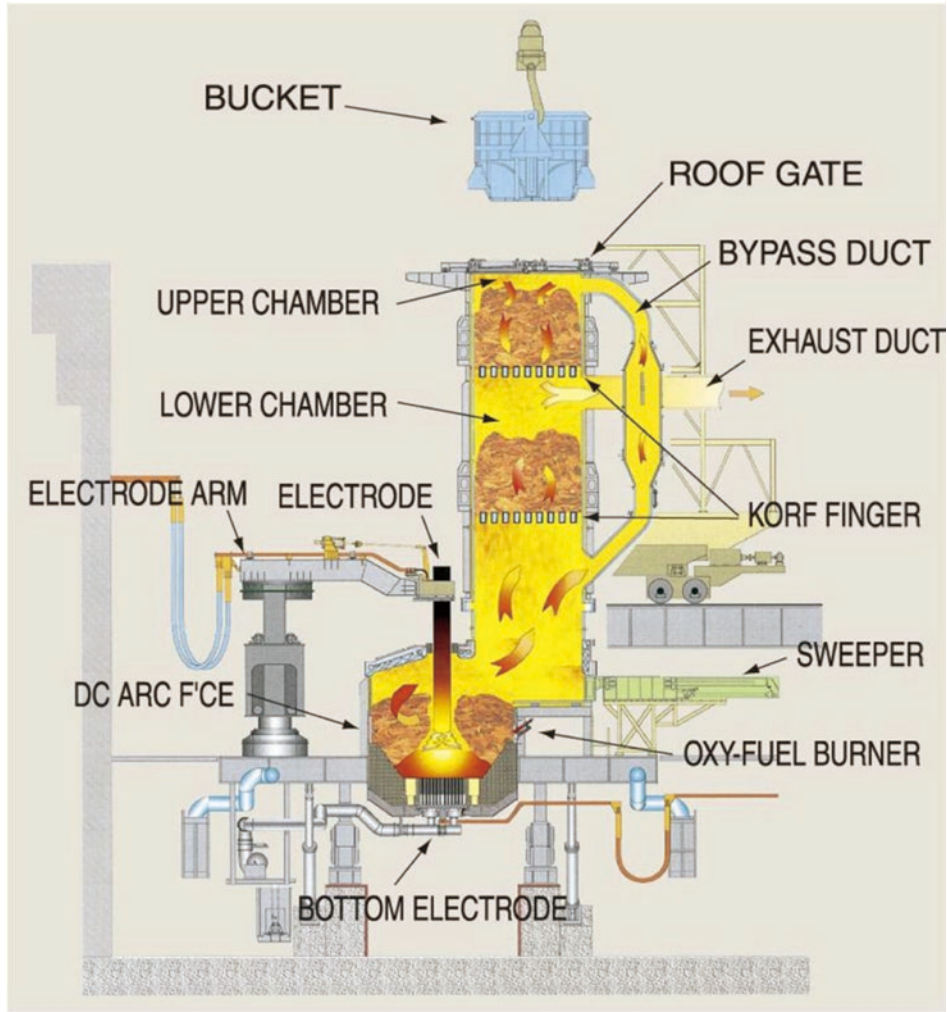


Fig. 2. Shaft Furnace.

Table 3. Comparison of scrap pre-heater.

		Pre-heater system	
		High temperature (Shaft furnace)	Conventional temperature
Scrap charge	Batch charge	1). High melting efficiency 2). High pre-heat efficiency	1). High melting efficiency 2). Conventional pre-heat efficiency
	Continuous feed	1). High pre-heat efficiency 2). Low flicker	1). Conventional pre-heat efficiency 2). Low flicker

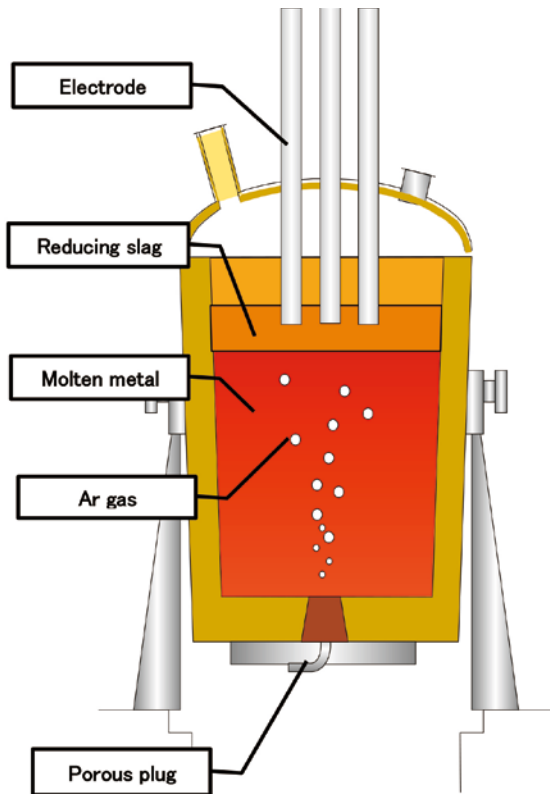
3. 2 複合精錬プロセス

当社はこれまで国内外の製鋼メーカーへ様々な精錬プロセスを供給して来た。高級鋼の大量製造プロセスであるRH脱ガス設備，ステンレス大量製造プロセスであるAOD (Argon Oxygen Decarburization) 設備，多品種小ロット特殊鋼製造プロセスであるVD (Vacuum Degasser) およびVOD (Vacuum Oxygen Decarburization) 設備などである⁶⁾。これら炉外精錬設備は，当社の操業経験に基づき様々な改良が行われており，国内外ユーザーの製品高品質化の一役を担って来た。近年はこれら精錬プロセスは複数プロセスが組合わされて，鉄鋼製品の高級化に対応することが多くなった。当社はこれらの様々な精錬プロセスを操業し製造する立場にあり，以下に当社が開発した精錬プロセスと従来プロセスとの複合プロセスの発展経緯を示す。

電気炉製鋼における精錬プロセスは当社が開発したLF (Ladle Furnace) の出現により⁷⁾大きく変化した。Fig. 3にLFの機能概要を示す。炉外精錬プロセスであるLFは単に製品品質の高級化対応を可能にしたばかりでなく，電気炉をスクラップ溶解と酸化精錬に機能特化することを可能とし，電気炉の生産性を飛躍的に向上さ

せることとなった。さらに，溶鋼の温度調節機能を有することから電気炉と連続铸造機との工程マッチングにも大きな効果を発揮することとなり，現在では特殊鋼製造プロセスのみならず，汎用量産鋼種の製造プロセスにも広く普及した精錬法となった。

LFに従来から利用されて来た真空脱ガス精錬プロセスを組み合わせることにより，温度調整機能，スラグ精錬機能に真空脱ガス機能を加えた，複合精錬プロセスへ発展させることが可能である。近年のさらなる品質の高級化ニーズの高まりにより造船や発電プラント製造業界の需要家から，鉄鋼製品中の水素を代表とするガス成分の低減が求められるようになり，複合精錬プロセスへのニーズが高まっている。Fig. 4に複合精錬プロセスの実施例を示す。電気炉から出鋼された溶鋼は隣接する複合精錬プロセスへ搬送される。この複合精錬プロセスは除滓設備とLFおよび真空脱ガス設備が一つの溶鋼搬送ラインで結ばれる構成となっており，LFV (Ladle Furnace and Vacuum degasser) と呼ばれる。LFでの精錬後に真空脱ガス処理が可能となり，必要に応じて真空脱ガス処理後の溶鋼再加熱も簡便なシステムであるため，次工程である铸造工程とのマッチングも良く，国内外の多くの電気炉工場で実用化されている。Table 4に本設備の主要スペックを示す。



Heating	Submerged arc heating →Strict control of teeming temperature High heating efficiency
Stirring	Ar gas stirring →Strict control of chemical composition
Atmosphere	Inert furnace atmosphere →Less [H] [N] pick up Low oxygen
Slag	Highly basic reducing slag →Low sulfur Reduction of metal oxides in slag

Fig. 3. Construction and functions of LF.

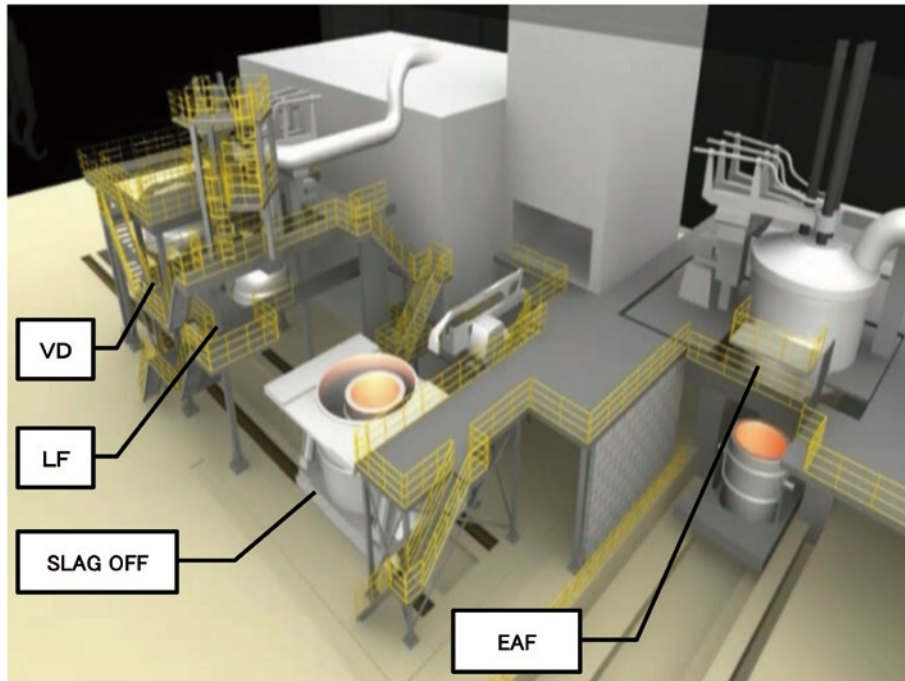


Fig. 4. Combined refining system.

Table 4. Specification of LFV.

LF phase	
Treatment capacity	60 ton
Treatment time	25 min.
Tr. capacity	12 MVA
Secondary current	28 kA
Electrode diameter	14 inch
Roof type	Spray cooled
VD phase	
Treatment capacity	60 ton
Treatment time	30 min.
Vacuum exhaust equipment	Steam ejector with mechanical pump
Ultimate pressure	Below 13.3 Pa
Extraction rate	250 kg/hr.

4. オートメーション

近年の電気炉製鋼向けプラントエンジニアリングにおける自動制御技術の発展は目覚ましい。当社はこれまで自社の操業経験に基づく操業支援システムを長年にわたり国内外の電気炉製鋼メーカーへ供給して来た。1970

年代には電気炉の電力制御を炉期にあわせて最適に自動制御する操業支援コンピュータ設備 DAIDO・ARMS[®] (Automatic Rapid Melting System) の供給を開始し、その後も様々な自動化設備を開発して来た。本章では電気製鋼向けオートメーションについて当社の特徴技術を解説する。

4. 1 スクラップ自動配合システム

近年の電気炉製鋼は受注状況から立案された生産計画に基づく工程設計がなされており、原料スクラップの供給から溶解精錬および铸造圧延に至る各生産工程が効率的に進捗する様にコンピュータ管理されている場合が多い。

当社はこうした製鋼工程の管理コンピュータシステムも国内外へ供給しているが、原料スクラップの配合作業は電気炉製鋼の工程では最も上流側に位置する工程で、これまでは生産計画に基づく原料配合レシピの作成、配合レシピに基づくスクラップ配合作業および配合後の

スクラップ搬送バケットのハンドリングなど、全てオペレーターによる操作に依存していた。また国内電気炉製鋼メーカーは諸外国に比較して割高な電気料金のハンディを最小化すべく、深夜料金を活用するために平日は夜間操業が常態化しているため、電気炉へ原料を供給し続ける原料スクラップの配合作業も、夜間の交代勤務を強いられる状況であった。

当社は製鋼原料スクラップの自動配合システム ARTS (Automatic Receiving and Transferring System of Scrap) を開発し⁸⁾、スクラップ配合作業の完全無人化に成功したので概要を解説する。

Fig. 5 にスクラップ配合フローを示す。

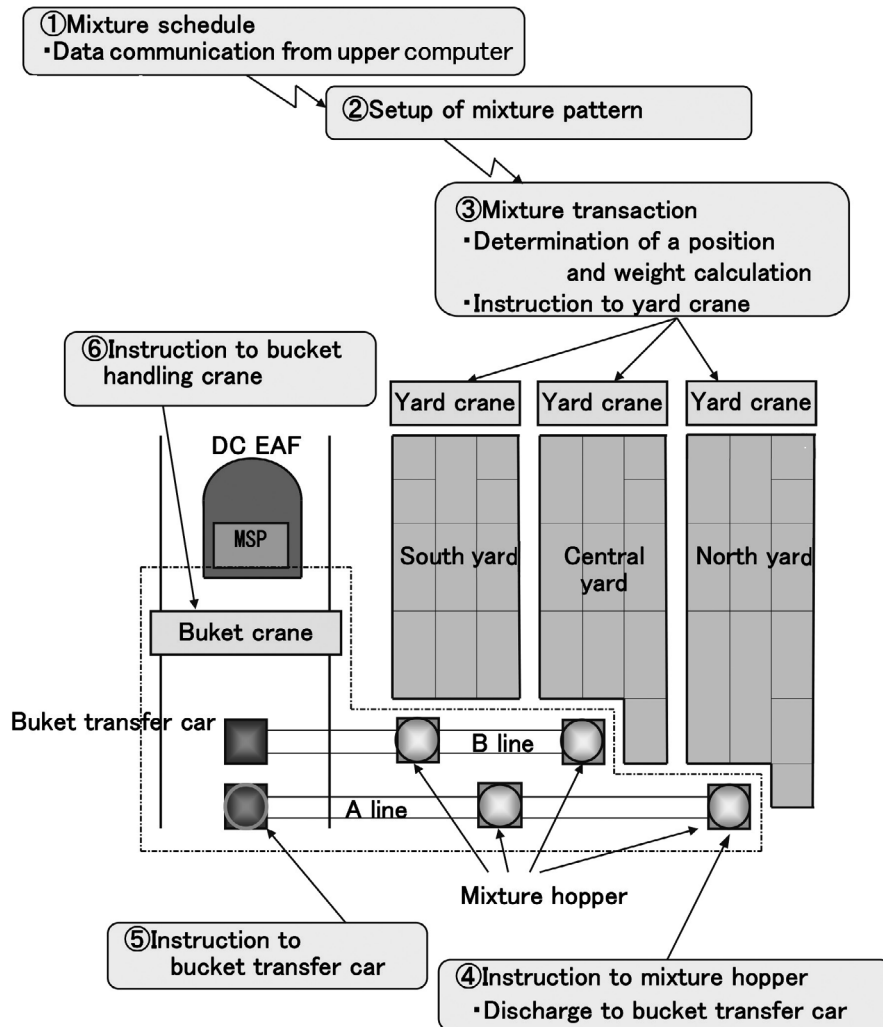


Fig. 5. Flow of automatic scrap mixture.

スクラップヤード内にはリフティングマグネットを装備した搬送クレーンと配合スクラップを集積する自動払出機能をもった配合ホoppaが設置されている。ARTSではスクラップ受入時や積み替え時の実績値からヤード内スクラップの在庫データを自動更新しており、ヤード内に保管されている原料スクラップの保管場所、在庫量、積載高さ、種類などのデータが常に最新の状態になる様に保たれている。上位コンピュータからARTSに配合計画が送信されると、計画に従って搬送クレーンに指令を出力し自動配合を行う。ARTSから搬送クレーンへは、配合対象原料の平面および高さの位置座標データ、原料スクラップの吸着量、配合先である配合ホoppaの位置座標データなどが自動算出されながら次々と出力され精度の高い配合作業を実行する。配合スクラップの搬送にはリフティングマグネットを利用しているが、配合計画を精度よく実現するためにARTSは原料スクラップの種類(Type)毎にリフティングマグネットの励磁電圧レベルによる吸着量をデータテーブルとして保持している。Table 5にスクラップ種類毎の励磁電圧レベルとスクラップ吸着量のデータテーブル例を示す。搬送クレーンで運ばれたスクラップ重量は配合ホoppaで秤量され、秤量実績値と配合計画値との差を算出して次のスクラップ吸着励磁電圧レベルを決定する。このきめ細かな制御によりオペレータのクレーン操作による配合実績と遜色ない精度を自動配合によって確保することができた。

Table 5. Scrap absorption weight table depended on scrap type and activation voltage level.

		Activation voltage level				
		5	4	3	2	1
Scrap type	A	200 kg	800 kg	1400 kg	1700 kg	2200 kg
	B	300 kg	500 kg	1000 kg	1900 kg	2500 kg
	C	300 kg	400 kg	800 kg	1200 kg	1700 kg
	D	200 kg	800 kg	1400 kg	1700 kg	2200 kg
	E	300 kg	400 kg	500 kg	1700 kg	2800 kg
	F	300 kg	600 kg	1500 kg	2300 kg	2800 kg
	G	1500 kg	2300 kg	3600 kg	4300 kg	5100 kg
	H	300 kg	400 kg	1100 kg	1500 kg	2400 kg
	I	200 kg	800 kg	1700 kg	2200 kg	2600 kg

5. 環境調和

製鋼プロセスではダスト、スケール、スラッジなどの

副産物が発生し、一部は再利用可能であるが、一部は再利用できずに埋め立てなどにより廃棄されている。しかしながら近年の環境保護意識の高まりから、副産物の廃棄は徐々に困難になってきており、副産物の有効利用のニーズが高まっている。当社はこれまでも電気炉製鋼工場向けダイオキシン対策集塵設備や電気炉ダストリサイクル設備、電気炉の技術を応用した都市ごみの焼却灰溶融設備⁹⁾などを実用化してきており、環境調和型のプラントエンジニアリングの実現に挑んできたが、ここではステンレスの副産物リサイクルシステムについて述べる。

5. 1 INMETCOプロセス

INMETCO プロセスは、米国 INMETCO 社が保有する回転床炉を利用した廃棄物リサイクル技術「INMETCO 法」を具現化したプロセスである。当社は 1996 年に INMETCO 法を技術導入し、ステンレス製鋼プロセスから発生する副産物のリサイクルプロセスとして実用化に成功した。Fig. 6 に INMETCO プロセスのフローを示す。INMETCO プロセスは、原料の受入、貯蔵および造粒といった前処理、回転床炉 (RHF) を用いた直接還元、サブマージアーク炉 (SAF) を用いた溶融還元の 3 段階で構成される。プロセスの原料となる金属酸化物は、ステンレス製鋼プロセスから発生する電気炉ダストや精錬炉ダスト、ミルスケール、酸洗スラッジなどの製鋼副産物である。これらは乾燥粉碎後に貯蔵されて、還元材となるカーボン粉とある定められた比率で混練された後に造粒されてペレットとなる。次にペレットは RHF の炉床上に 1~2 層の厚みで敷き詰められ、炉床が 1 回転する間に加熱還元されて還元鉄となる。同時にペレットに含まれる亜鉛や鉛などの重金属類は RHF 内で還元されてペレットから蒸発分離し、再酸化後排ガス処理系のバグフィルタで酸化金属粉として収集される。これは亜鉛精製工程の原料として再利用される。RHF で還元されたペレットは SAF 内に還元材となるコークス塊とあわせて投入され溶融還元される。ここではステンレス製鋼プロセスから発生する酸化 Cr を還元し、溶融状態のメタルとスラグを比重分離して炉外へ排出する。Table 6 に当社実施プラントの金属還元率を示す。鉄、ニッケル、クロムの各々が高い金属還元率を示している。また、SAF から排出されるスラグは米国環境保護庁 (EPA) の TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 法による重金属溶出規制値を満足しており路盤材などに再利用されている¹⁰⁾。

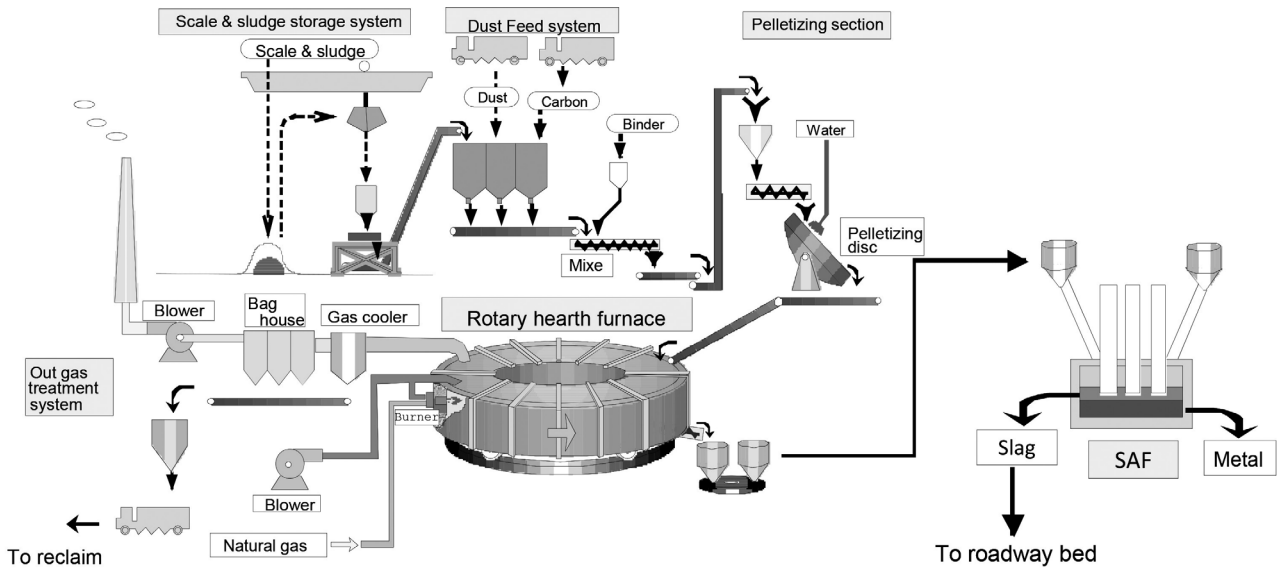


Fig. 6. Flow and equipments layout of INMETCO process.

Table 6. Recovery rate of metals.

	Fe	Ni	Cr
Recovery rate[mass%]	95	95	86

6. おわりに

電気製鋼の始まりとともに歩み始めた当社のプラントエンジニアリングは、時代のニーズに常に応えるべくこれまで様々な新技術の開発と実用化に挑み続けて来た。特に製鋼技術は操業技術と設備技術の高度な融合を求められる分野であり、操業と設備製造の両分野に立つ当社の責務は今後も大きくなるであろう。今回解説した「高生産性と高品質」「オートメーション」「環境調和」はプラントエンジニアリングの視点から今後とも当社が力点を置くべきテーマであると考えており、当社が電気製鋼の更なる発展に少しでも貢献できる様に継続努力したい。

(文献)

- 1) 畠山卓三：電気製鋼，70(1999)，17.
- 2) A. Fleischanderlら：METEC INSTEELCON，(2011)，Session13.
- 3) 福代和宏ら：空気調和・衛生工学会論文集，No.164(2010).
- 4) 本庄則夫ら：電気製鋼，68(1997)，13.
- 5) JFE技報，No.3，2004，67
- 6) 小野清雄：電気製鋼，50(1979)，145.
- 7) 矢島忠正：日本金属学会会報 Vol.30，No.12，(1991)，1010.
- 8) 亀島隆俊ら：電気製鋼，71(2000)，243.
- 9) 後藤和之ら：電気製鋼，50(1979)，280.
- 10) 松井宏司ら：電気製鋼，80(2009)，199.