

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

電気炉操業技術の変遷と今後の課題

Transition of EAF Operation Technology and
Coming Themes

小 松 喜 美
Yoshimi KOMATSU

品川技報

電気炉操業技術の変遷と今後の課題

Transition of EAF Operation Technology and Coming Themes

小 松 喜 美*
Yoshimi KOMATSU

要 旨

限られたページ数と不特定読者を対象としてこの報告書は構成されている。冒頭で電気炉が誕生した時代背景を紹介し，続章において多くの先人達による独創的な電気炉開発の歴史を記載するだけでなく，読者に理解してもらえるように技術用語の解説も含めた。後章において電炉業界に期待される項目や業界連携の重要性についても触れてみた。

Abstract

This report is composed for unspecified readers within the limited amount of page. The historical situation around the birth of EAF (Electric Arc Furnace) is to be mentioned firstly. The history of the creative developments done for EAF by many pioneers and the technical explanations for good understanding are to be mentioned afterwards. Finally, the expected items of EAF industry and the importance of the connection among the surrounding industries are also to be tried to be mentioned.

1. はじめに

アーク放電を持続的に発生させ，その3000℃以上にも達する超高温のアーク熱を利用して，主原料である鉄スクラップを溶解して鉄のリサイクルを推進しつつ鉄鋼製品を生産しているのがここで記載する製鋼電気炉である。その内容は，電気炉の誕生からの歴史や開発経緯，主原料である鉄スクラップの実態，その溶解エネルギーである電気炉の特性，溶解後の溶鋼の受け皿となる耐火物，さらには最近の革新技術や今後の課題まで，電気炉全体の技術解説を試みた。

2. 電気炉誕生とその時代背景

<初期の転炉>

18世紀後半の紡績機械や蒸気機関などの一連の発明から産業革命が起こり，その後，石炭業，鉄

1. Introduction

EAF melts metal scrap by using electrical power with the arc reached more than 3000℃ and contributes to society with the big work of metal scrap recycling. Here in this report, the birth of EAF, that development, the scrap description as raw materials for EAF, electrical characteristics, refractories as molten steel handling, and the recent various innovations are described.

2. Birth of EAF and Its Historical Situation

<Birth of converter>

Cotton-spinning industry, steam engine and so on were invented at UK at the latter half of 18th and its current spread to the coal industry and iron-making later. So, UK was called as

*JFE条鋼株式会社 主監 技術部長 Fellow, General Manager of Technology Dept., JFE Bars & Shapes Corporation

鋼業などにも波及し、19世紀中頃にはイギリスは「世界の製鉄所」と言われていた。その最中の1856年にHenry Bessemerがベッセマー転炉を、さらに1879年にSidney G. Thomasがベッセマー転炉の弱点を克服したトーマス転炉を、それぞれ発明した。ベッセマー転炉の炉壁は酸性煉瓦で構築されていたため、炉内に塩基性スラグを作ると、このスラグで炉壁が損傷される問題があった。ドロマイト高温焼成煉瓦で炉壁を構築したトーマス転炉では、熱源でもある燐を酸化除去・固定するため塩基性スラグを炉内に作っても炉壁損傷は回避できた。このためトーマス転炉はイギリスからドイツ、スウェーデンをはじめ欧州全体に広まった。

<平炉>

転炉よりはるかに時間がかかり燃料も必要であるが、脱燐、脱硫などの精錬作業に問題はなく、鉄スクラップの溶解もできる平炉は、効率化や大形化が図られ、転炉と勢力争いをする位に発展し、米国、ソ連、イギリスでは主流の製鋼炉としての地位を占めるようになっていった。

<電気炉>

電気炉はこれらの動きよりは遅れて発明、開発されてきたがその理由は2点ある。その一つは、電気炉の主原料である鉄スクラップは他の製鋼炉によって鉄鋼製品が製造され、流通されて以降にしか供給されないことである。もう一つは、エネルギー源である電力のインフラが十分でなかったことである。

1900年、Paul L. Heroutがフランスにて電気炉を発明し、その後、実用炉として操業開始した¹⁾。

その後、特殊鋼や合金鋼や、超高温処理が必要な合金鉄の製造に電気炉はその活路を見出す。

<LD転炉の開発と平炉の衰退>

第2次世界大戦後のオーストリアのLinz（1952年）、Donawitz（1953年）で純酸素上吹き転炉（LD転炉）が開発、実用化された。このオーストリア発祥の転炉の技術を、日本は他の先進国よりも早く導入（1957年）し、普及に努めた²⁾。

一方、鉄スクラップを原料とする電気炉は戦後の20年ほどは原料難で銑鉄をも原料にできる平炉

“Ironworks of the world”. In 1856, Henry Bessemer invented converter (Bessemer Converter) and still more in 1879 Sidney G. Thomas invented Thomas Converter overcoming the weak point of Bessemer's one. Furnace wall of Bessemer's was constructed with acid-system brick. Therefore the generated basic slag for fixing P_2O_5 in slag after dephosphorization attacked severally acid-system wall brick. On the other hand, as Thomas's was constructed with “Dolomite brick sintered at high temperature”, the severe brick erosion could be cancelled even if the basic slag was formed in furnace with the purpose of dephosphorization and its heating effect. By this big innovation, Thomas Converter was spread to all Europe from UK.

<Open hearth>

Much Longer steelmaking time than converter and fuel were needed for open hearth operation, but there were not any problems upon the refining processes such as dephosphorization and desulfurization. Furthermore, even metal scrap also could be melted by open hearth. From these points of views, open hearth had been developed with its expanding capacity and efficiency, and had reached to the rival of converter. In America, Russia, UK, open hearth had been the main steelmaking furnace at that time.

<EAF>

EAF appearance was delayed on comparison with converter and open hearth due to following two reasons. Metal scrap as raw materials is to be supplied after the steel product being produced by other steelmaking process and circulated. And energy infrastructures for EAF were not enough at that time.

In 1900, Paul L. Herout invented EAF in France, and a little later EAF started its operation practically¹⁾. EAF was managed to be used for producing special steel of high alloy and for producing metal alloys.

<Development of LD converter and open hearth

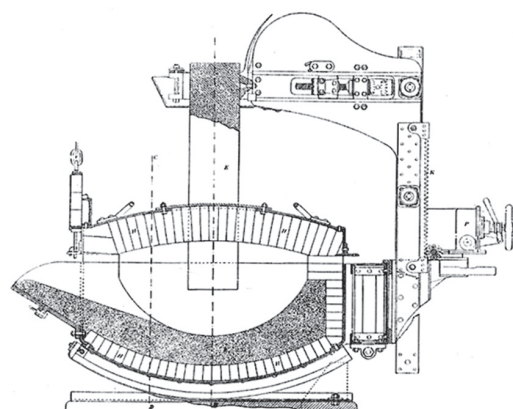
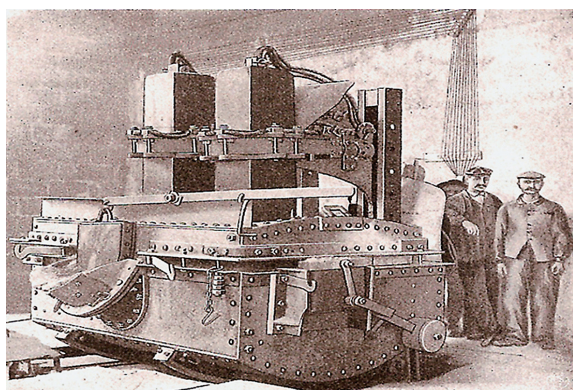


Fig.1 Birth of Heroult Furnace at PrazRe.

の後塵を拝していた。その後は鉄スクラップが安定して供給されたことと、生産能力拡大やコスト削減の技術革新を重ねたことの結果、1966年に平炉を追い抜き、日本では全粗鋼の2～3割を担う鉄リサイクルに貢献する製鋼炉へとその地位を確立していった。このような過程の中で、平炉は全世界的にLD転炉と電気炉に置き換わっていった。

3. Dr. SchwabeのUHP操業

戦後の復興景気の中で、3時間以上も製鋼時間のかかる電気炉はその生産効率の低さに喘いでいた。単純に高電力を進めると炉壁の耐火物損傷が激しく操業が成立しなかったのであるが、このような時に米国のDr. W. E. Schwabeが1964年に超高電力Ultra-High-Power (UHP) 操業を提唱した。内容を一言で言うと「大電流化によりアーク長を短くすることで耐火物への影響を抑制し、高電力操業を実現」である。この操業への転換により、生産性は飛躍的に向上し、電気炉は転炉製鋼

downfall>

Pure oxygen top blowing converter (LD converter) was developed and applied after World War II in Linz (1952) and Donawitz (1953), in Austria. Japan installed this LD converter, which had been innovated in Austria, sooner than other countries (1957) and tried to spread in Japan²⁾.

On the other hand, EAF performance had been delayed from open hearth whose raw material was not only scrap but also pig iron, for about 20 years after World War II. After that, EAF got ahead of open hearth in 1966 due to metal scrap enough supplying and many innovations for cost saving and efficiency, and got the position of contributing steel recycling with the 20～30% steelmaking share in Japan.

3. Dr. Schwabe's UHP Operation

At the reconstruction prosperity after War, EAF steelmakers were annoyed by EAF's low efficiency taking more than 3 hours for 1 heat. Only just high power applying caused the severe wall brick erosion and got no normal operation result. Around those days, Dr. W. E. Schwabe in USA proposed Ultra-High-Power (UHP) operation. His UHP operation is "to achieve the operation loaded high power with the effect of overcoming the brick erosion by means of short arcing derived from big current" in one phrase. By this sensational proposal, EAF operation's efficiency was remarkably progressed and EAF came to be a representative modern steelmaking process along together with converter.

Nevertheless, UHP operation had weak points such as higher energy consumption and higher electrode consumption. After around 1980, various countermeasures were developed one after another with the result of opening the new age of EAF. Outline of newly developed technologies after UHP operation might be stated as follows.

To apply water-cooled panel in wall where

法と並ぶ現代の代表的製鋼法になっていった。

しかし、一世を風靡したこの画期的な生産性の高いUHP操業にも、エネルギーコストや電極コストが高いという大きな課題があった。1980年代に入り、これらの問題に対する技術が次々と開発され、電気炉はさらに新たな時代を迎える。UHP操業の提唱以降の開発は以下のように概説できる。

溶鋼が直接接触しない部分には水冷パネル配置、浸食に強いMgO-C煉瓦の開発適用、トランス容量の増大、酸素富化とそれに伴う粉体Cインジェクションによるスラグフォーミング操業などの技術集約によって、Schwabe提唱と逆の高電圧化によるロングアークでのUHP操業を受容できる条件を整備したことである。これらにより、前述の課題は克服され、新しいUHP操業の時代を迎えることになった。ちなみに、この革新は日本電炉業界主体で行われ、世界に広がっていった。この内容は7章で記述するが、後述する技術内容を理解し易いように先に、4章(製鋼プロセス)、5章(電気特性の基礎)、6章(原料)を解説する。

4. 製鋼プロセス

電気炉による一般的な製鋼工場のプロセスフローを、Fig.2に記載する。当該電気炉工場におい

ては、溶鋼が直接接触しない部分に、さまざまな侵蝕に強い耐火レンガを設置し、変圧器の容量を増大させる、スラグ発泡技術を開発し、酸素豊富な操作と炭素注入、などを行う。これらの技術を開発することによって、UHP操作は短弧ではなく長弧に切り替えられた。その結果、UHP操作の弱点は解消され、新しいUHP操作の時代が始まった。

上記の基本的なUHP操作の考え方は、主にスラグ発泡によるUHP操作が日本に革新された。詳細は第7章で述べられる。また、第4章(製鋼プロセス)、第5章(電気特性)、第6章(原料)は、後述の技術的な章のためにあらかじめ述べておく。

4. Steelmaking Process

Figure 2 shows the typical steelmaking process with EAF. Purchasing amount and brands of metal scrap are to be determined from production amount and steel grade. According to those informations, metal scrap are carried into

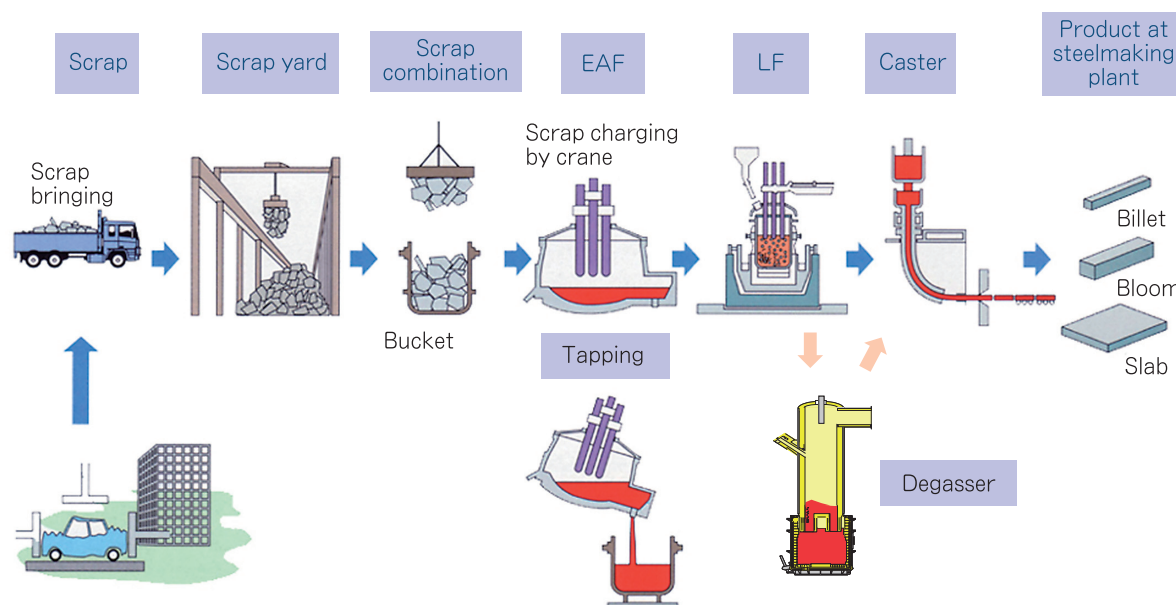


Fig.2 Process flow of steelmaking plant by EAF.

る、生産量や生産品種により、スクラップ購入量と銘柄が決まり、それに応じて陸上、あるいは海上ルートでスクラップが入荷される。工場入荷段階で秤量するとともに、スクラップ品位を精査して検収するが、危険なものは受けない。

製造鋼種の品位に応じ、電気炉へスクラップ所定量を専用バケットにて装入されアーク熱によって溶解される。温度と成分を整えたら、電気炉下に準備された取鍋の中に溶鋼を取り出す。これを出鋼作業と呼ぶ。スクラップが新たな鋼に生まれ変わる瞬間であり、電炉工場の中で最大のシンボリックなイベントである。

出鋼された溶鋼は取鍋精錬炉と呼ばれる2次の精錬炉に回ることもあり、ここでは昇熱、脱硫処理や高合金鋼溶製などを行う。また、鋼中の水素や窒素などのガス成分の低減や、深絞り用途などの極低炭素鋼などの溶製には脱ガス工程を通ることもある。これらの2次精錬が終われば、連続鋳造機において溶鋼を所定サイズの铸片に凝固成型される。

特に、電気炉操業は最もエネルギーのかかる工程なので、省エネや生産能率には常に研究、開発が集中する。電炉操業サイクルをFig.3に掲載し

steelworks by way of sea or land. Scrap are to be scaled and evaluated, and harmful one is to be rejected.

Corresponding scrap to steel grade are to be charged into EAF by scrap bucket and melted by arc heat. After adjusting the temperature and composition, molten steel in EAF is to be brought out into the ladle waiting just under EAF. And this work is called tapping and the symbolic time when metal scrap reborn to new steel. Tapped molten steel is transported to various ladle refining processes such as LF and degasser according to steel grade. Heating, Desulfurization and alloying are done at LF, and decreasing of hydrogen, nitrogen and carbon (before killing) for deep drawing specification are done at degasser. After these ladle refining processes, the molten steel in ladle is to be transported to caster and be casted and formed to prescribed size and shape of steel semi-product.

As EAF operation needs the biggest energy in Steel Works, energy saving and production efficiency of EAF have been studied and developed always. Cycle of EAF operation is shown

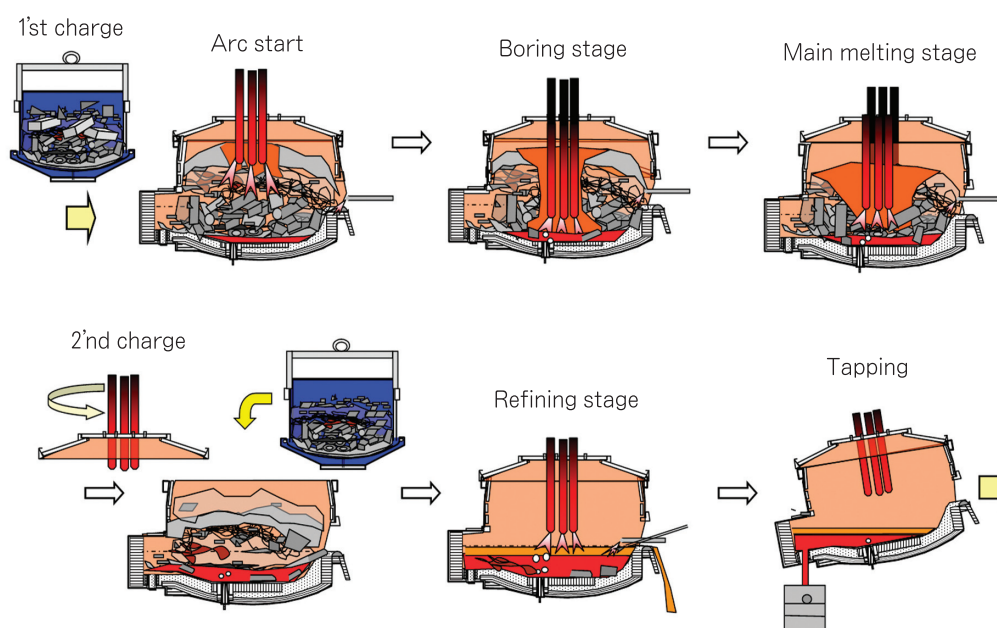


Fig.3 EAF operation cycle.

た。スクラップバケットにより電気炉内がスクラップで充填されると通電開始。ついで電極回りのスクラップを溶解しながら電極が下降するボーリング期があり、その後は壁際のスクラップが崩落しながら炉内溶鋼がたまっていく主溶解期を迎え、さらに溶解を進める。あらかじめ溶解が終わると、スクラップ溶解でできた空間に、スクラップを追加装入する。同じようにさらに溶解を進めて、炉内のスクラップがほぼ溶解した時点は溶け落ち（Melt Down）と呼ばれ、そこから溶鋼Cの調整と昇熱をする精錬期となる。溶鋼Cと温度の調整が終わると、出鋼作業となる。この一連の作業は電気炉形式や製造鋼種で異なるが、概略は60分である。

5. 電気特性の基礎

製鋼用電気炉はアーク炉（電弧炉）とも言われるが、その由縁はアーク溶接を思い出しってもらうと理解し易い。電極間に電圧を印加して両極を短絡（接触）させ電流が流れた後に、電極を引き離すとアークができる。そのアークの形状は弓なりになることから電弧（アーク）³⁾と名づけられたが、正体は、電流の流れている電離気体のことである。

アークを発生させてその超高温のアークエネルギーによって炉内に装入されたスクラップを溶解していくアーク炉、つまり電気炉の作業中の典型的な模式図をFig.4に示す。図はちょうど炉内のス

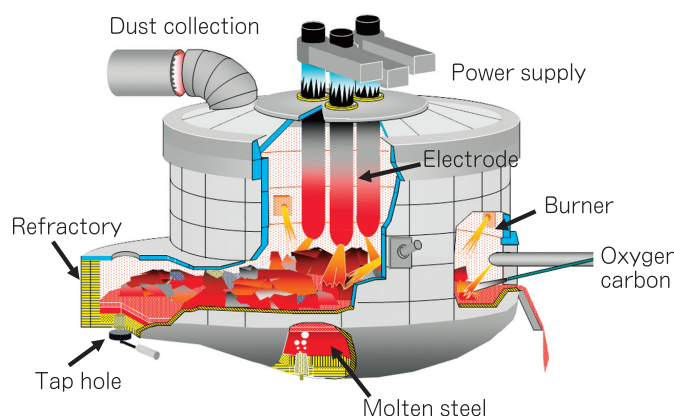


Fig.4 Schematic view of EAF operation.

in Fig.3. Just after furnace filled by charged scrap, arcing is to be started. Next boring stage, when the scrap being melted around electrodes, comes with the motion of electrodes descending. And main melting stage follows with wall side scrap falling and molten steel level ascending. After melting almost all scrap in furnace, scrap in second bucket is to be charged to the space in furnace. Melting is being proceeded in same way as abovementioned, and the time where almost all scrap in furnace being melted is called melt down (MD). After melt down, Refining stage is to be started, when carbon content and temperature being adjusted. Tapping is to be started just after adjusting. Although this serial cycle time depends on EAF type and steel grade, it can be said to be around 60 minutes.

5. Electrical Characteristics

Steelmaking EAF is often called arc furnace, and it may be well understood by reminding the arc welding as derivation. At the time of both electrodes being deviated, “arc” is generated and arc shape looks like bow. And naming also comes from its shape³⁾. Its true character is “ionized gas flowing current”.

Typical schematic view of EAF is shown in Fig.4. Shown figure is the time of melt down.

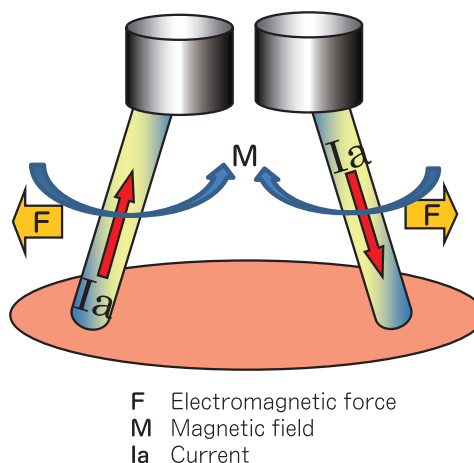


Fig.5 Electromagnetic force between two electrodes with current flowing opposite side.

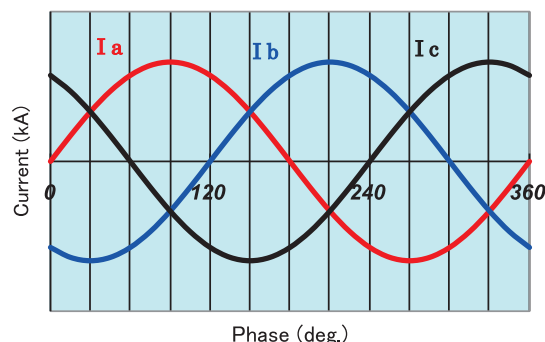


Fig.6 Current change according to each current phase change.

クラップがほぼ溶解した段階、4章で記述した溶け落ち (Melt Down) 時期の模式図である。炉内の電極先端からアークが出ているが互いに反発している。まずこれをFig.5で解説する。

アーク電流が対向している時にはアーク柱には電磁力 (斥力) が働きアークは外側に偏向される。これは一方のアークに流れる電流が作る磁場は、他方のアーク柱に流れる電流に作用し、フレミング左手の法則からアーク柱間に斥力が働くためである。

三相交流アークの場合は複雑なので各電流位相に分解して考える。電極は3本なので電磁力はベクトル合成する。Fig.6は各電流位相と電流値を示すが、A相位相が0度では電流がゼロになり、A相電極のアークは消滅し、B相とC相のアークは反発する。A相の位相が30度になると、B相電流が最大になり、A相とC相は同レベルの力でB相と反対方向に力が作用する。その後も同様にアークには相回転の方向に旋回する電磁力が働き、結局各相が炉壁に向かう時に最大電流となる⁴⁾。この様子をFig.7に示す。

こうした電気特性から交流アーク炉は3本の電極の背面でのスクラップ溶解が進みやすいが、同時に耐火物損傷もこの部分が大きくなる。(Fig.8参照) 他にも不均等溶解を加速する要因はあるが、この不均等溶解を抑制することが、電力原単位や耐火物損傷の改善につながるので、電炉各社はあらゆる視点から様々な技術開発を進めてきた。

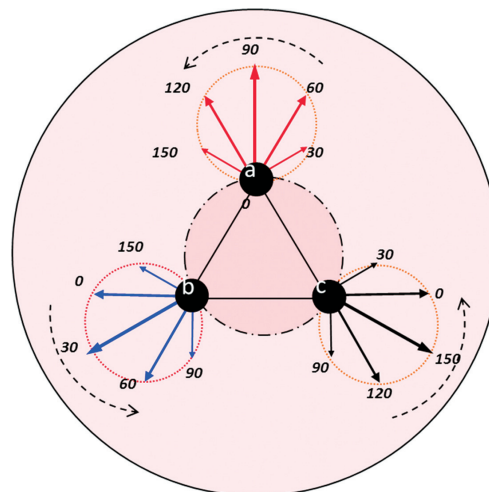


Fig.7 Schematic view of electromagnetic force rotating according to each current phase change.

Arc from the electrodes in this figure looks to be repelled each other, and this phenomenon is to be explained in Fig.5. When arc current flows to opposite direction each other, arc pillars are inclined to outer direction by electromagnetic force. That situation can be described as follows. Magnetic field generated by current flowing in one arc operates the other side current flowing in arc, and electromagnetic force works according to Fleming's left hand rule.

As the situation is complicated in case of three-phase alternating current, each current is to be decomposed by each phase. Each electromagnetic force is to be composed as shown in Fig.6 and there shown the current phase and current value. If the A phase is zero, current of A phase comes to be zero, arc of A phase disappears, and arc of B and C are repelled each other. When the A phase comes to be 30 degree, current of B phase comes to be maximum and current A and C phase come to be same level and be received the force just opposite direction to B phase. After that, electromagnetic force operates to the same direction as phase rotation as shown in Fig.7. As the results, it is known to be clear that the current comes to

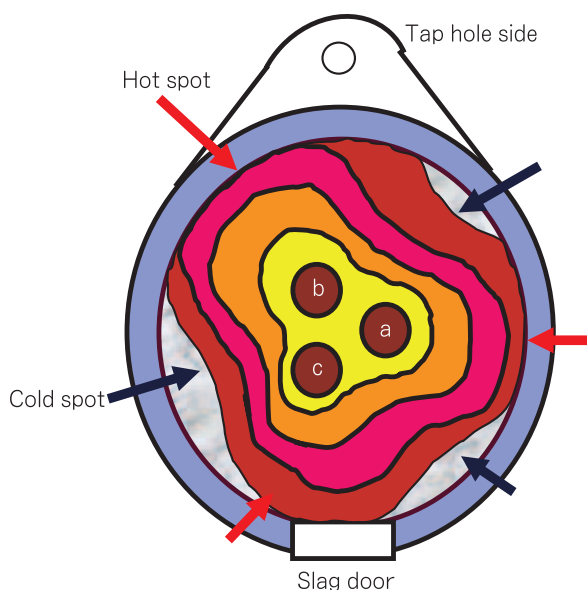


Fig.8 Position image of hot spot and cold spot.

次に電力特性図の事例を解説する。Fig.9では、横軸にアーク電流、縦軸に電力と力率をとり、種々の電力特性項目を記入してある。有効電力 (MW) はアーク炉で熱となって消費されるもので、アーク電力や回路損失を含む。無効電力 (MVAR) は熱にはならないが、交流回路に磁気エネルギーとして蓄えられ、アーク切れ防止に働く。アーク電力は有効電力から回路損失 (ジュール熱) を引いたもので、実際に溶解に寄与する電力である。ま

be the maximum when the arc of each phase encounters to the nearest furnace wall side⁴⁾. Figure 7 shows these situations. From these electrical characteristics, metal scrap is melted well behind three electrodes. That means refractories is also eroded well at the same position as shown in Fig.8. Though there are other causes of accelerating unbalance melting, power consumption and refractories consumption can be improved by avoiding the unbalance melting. So, EAF steelmaker had developed the various melting technology from the many points of views.

Next, an example of power characteristic figure is shown in Fig.9. The horizontal axis shows arc current and the vertical axes show power and power factor, and several power curves are written there. Active power (MW) is to be consumed for heating in furnace, and contains arc power and circuit loss. Reactive power (MVAR) is not to be consumed for heating, but is to be stored in alternating current circuit as the magnetic energy, and works for avoiding “arc cut” effectively. Arc power is the value of subtracting circuit loss (joule’s heat) from active power and is the real working energy for melting. Power factor shows the ratio of active

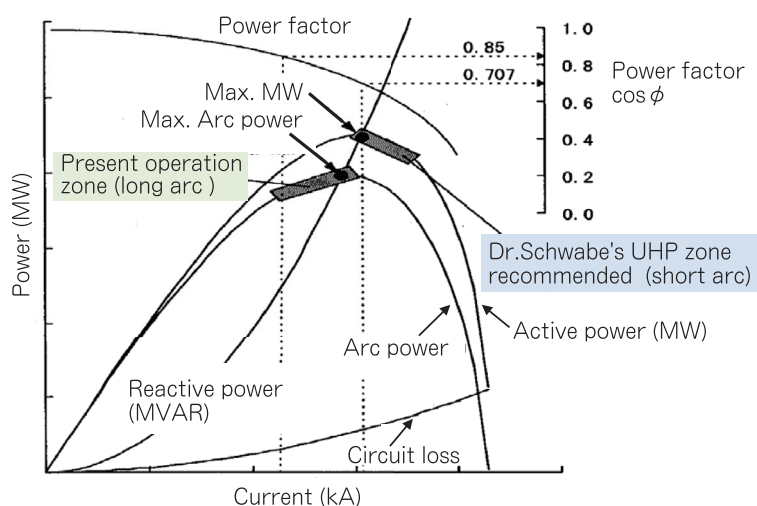
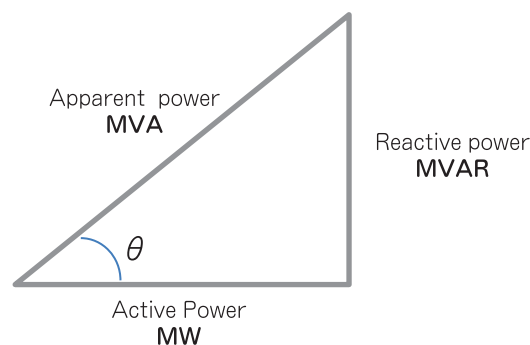


Fig.9 Power characteristics curve.



Note :

- Power factor
 $\cos \theta = MW / \sqrt{(MW^2 + MVAR^2)}$
- Active power = Arc power + Circuit loss

Fig.10 Power characteristics curve.

た、力率は、Fig.10に記載したように、有効電力の割合を示す。

1964年にDr.Schwabeが提唱したのは、Fig.9において有効電力（MW）が高い領域、即ち同一電圧では大電流側にマーキングしたゾーンで高電力を投入する操業だった。このゾーンでのショートアーク操業により、炉壁耐火物の損傷で操業維持ができない問題は克服されたために、この溶解法は世界中に広がったのは3章で記載したとおり。このように高電流化により有効電力を増やすと無効電力も増えるので、有効電力には最大値を与える点がある。この時の力率が70.7%であり（ $\theta = 45^\circ$ ）である。

また回路損失（circuit loss）も電流とともに増加するので、アーク熱として実際に炉内に入る熱量（アーク電力）は有効電力よりも低電流側で最大値がある。

ここで、ロングアークとショートアークのアーク形態とその特色を比較したのがTable 1である。これから想定できるように、Schwabe提案の弱点を回避するためにはロングアーク操業とUHP操業の両立を達成する必要があった。

6. 原料

国内原料スクラップは、鉄鋼生産工程で発生する社内屑、鉄鋼製品加工会社で発生する加工屑、

Table 1 Comparison of long arc and short arc

Items	Long arc	Short arc
Arc image		
Voltage Current	higher voltage lower current	lower voltage higher current
Heat transfer	mainly transfer to surrounding wall	mainly transfer to molten steel
Good effects on operation	lower power consumption lower electrode consumption	lower refractory consumption quicker heating up
Effective application	application to melting stage occupied by scrap	application after MD

power as shown in Fig.10. The zone proposed by Dr. Schwabe in 1964 is in the higher power side and marked in the side of larger current in Fig.10. The problem that the practical operation was not realized due to wall brick erosion was canceled by this proposal as mentioned in the former chapter. As active power is increased to the side of larger current, reactive power is also increased. So, it follows that active power has the maximum value, and the power factor at that condition is to be 70.7% ($\theta = 45^\circ$). Furthermore, circuit loss is also increased with the increase of current and arc power has the maximum value in the smaller current side than the active power.

Table 1 shows the comparison of long arc and short arc regarding to their shapes and features. As understanding from this table, long arc operation shall be compatible with UHP operation for the purpose of avoiding the Schwabe's weak points.

6. Raw Materials

Metal scrap are classified into three categories

Table 2 Scrap classification

Steel scrap	Heavy melting scrap	general sizing scrap by guillotine shear etc. (classified by thickness & size)
	Bundles	compressed scrap by pressing machine (Classified by base scrap kinds)
	Shredder	shredding scrap by shredder machine
	Punched scrap	punched scrap from sheet steel etc.
	Steel turnings	machining & cutting scrap from sheet steel
Iron scrap	Pig iron	cast iron
	Iron turnings	machining & cutting scrap from iron steel

市中から回収される市中屑の三つに分類される。このうち、社内屑以外の原料スクラップはその形状や品質から、Table 2に示すように分類され、検収はこの分類の中で、サイズや素材などによって等級づけられる。例えば、ヘビー屑は、厚みがあるほど等級は高く、最上級HSからH1, H2, H3, H4などの等級がある。主な原料スクラップの外観をFig.11に示す。

such as return scrap in the same plant, partial scrap from processing or machining factory, and collecting scrap from civil market. Especially scrap except return one are classified as shown in Table 2 from its shape and quality, and its evaluation is to be done by size and material. For instance, as the thickness of heavy scrap is very important point of evaluation, they are ranked in the order of descending thickness, and classified into HS as highest rank, H1, H2, H3, H4, and so on. General surveys of main scrap are shown in Fig.11.

From the view point of quality, scrap is classified from Cu content. Cu contents of some scrap are as follows. Heavy scrap / 0.20~0.40%, punched scrap / less than 0.05% due to the main source coming from BF (blast furnace) process, press of ELV / 0.3% after removing harness, press of used can / 0.15%, shredder scrap / 0.20% depending upon material source, and so on.

By using these Cu values, scrap blending is to be planned according to steel grade. And furthermore, bulk density and ferrous component



1) HMS



2) Punched scrap



3) Steel turnings



4) Pig iron



5) Bundles (can steel)

Fig.11 Examples of scrap.

品位レベルは、製鋼精錬工程で除去できないCuで主として分類される。ヘビー屑は等級が高いほどCu値は低いが0.20～0.40%，新断屑は高炉製品主体なのでCu値は0.05%以下，Aプレスは廃自動車屑でありハーネスやコイルなどの除去率で変動するが概ね0.30%，Cプレスは0.15%，シュレッダーは原料によって異なるが0.20%前後が一般的である。これらの数値を使い，製造鋼種の品位に応じたスクラップ銘柄配合を決めている。

しかしながら，Cu品位確保だけではなく，スクラップ銘柄毎の高比重と鉄純分なども勘案されるのが一般的である。それは，所定のバケット装入回数で，所定の出鋼量を1チャージで確保することも生産効率上重要だからである。この勘案がなされてないと，バケット装入後にスクラップが高張り炉蓋が閉まらない事態や，出鋼した際に計画出鋼量が不足する事態などを招くことがある。参考までに，一般的なヘビースクラップの高比重は0.7 t/m³前後であり，銑鉄やクロップ屑などは3.0 t/m³以上，プレス屑は0.5 t/m³以下とされる。また，各種スクラップはその必要溶解熱量も微妙に異なり，当然ながら値段も異なる。つまり，スクラップは，品質要求，コスト影響，生産効率など全てに影響するので重要管理項目なのである。

なお，日本ではほとんど使われることはないが，直接還元製鉄炉から製造される直接還元鉄DRI (Direct Reduced Iron), HBI (Hot Briquette Iron) なども主原料である。(Fig.12) 直接還元鉄DRIは鉱石ペレットを天然ガスを改質して得られ

is also to be counted on, generally due to the importance of reserving the amount of tapped steel by one heat with fixed charging buckets size. If being ignored these concepts, following troubles may be happened such as an unable closing furnace roof due to full heaping of scrap in furnace vessel after scrap charging, an insufficient steel amount in ladle after tapping, and so on. For references, examples of several scrap general bulk density are as follows. Heavy melting scrap / around 0.7 t/m³, pig iron and crop metal / more than 3.0 t/m³, pressed scrap / less than 0.5 t/m³, and so on. Melting energy and purchasing price are also different on each scrap as known generally. Finally, it must be understood that metal scrap is very important managing item as it effects on quality, production cost, production efficiency and so on.

Though not used in Japan generally, DRI (Direct Reduced Iron) and HBI (Hot Briquette Iron) shown in Fig.12 are also raw materials having special features. DRI is to have been reduced from Oxide pellet by reducing gas reformed from natural gas. And HBI is to be produced by being pressed with briquetting machine from hot DRI just after production⁵⁾.

7. Improving Melting Efficiency

To achieve high voltage operation under the condition of high power factor (long arc) had been necessary for cancelling the weak points of UHP operation, and the various developments have been done upon facilities and operations. Just here the position of term “UHP” is to be clarified in the diagram figured in the relation of transformer capacities and nominal heat size, and is as shown in Fig.13.

1) Oxygen-rich Operation

As already mentioned in chapter 5, oxygen cutting operation is adopted to melt efficiently by way of cutting scrap at the lower part of wall side and making scarp slip down into molten steel in the bottom of furnace. At this

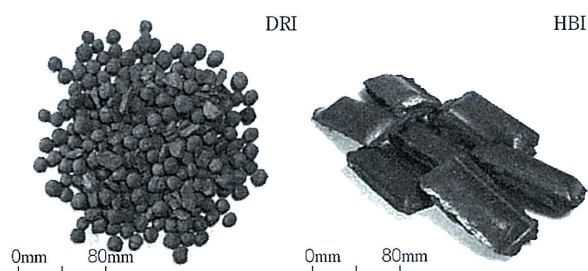


Fig.12 Appearance of DRI & HBI⁵⁾.

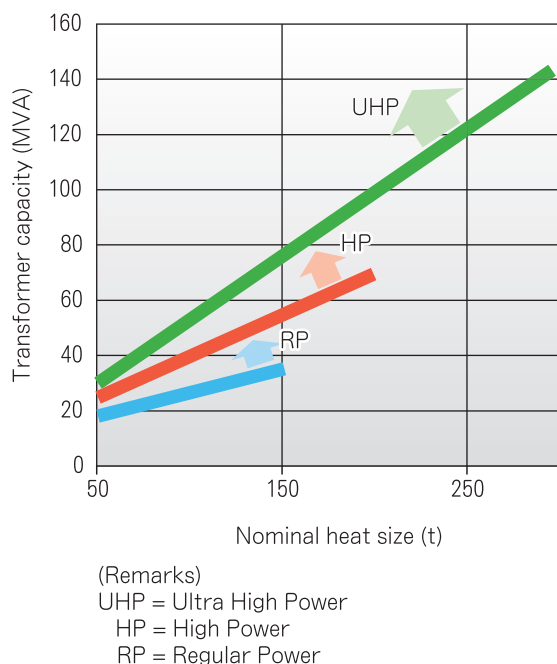


Fig.13 Position of UHP in the relation between furnace size and transformer capacity.

る還元ガスによって固体還元して製造される。なお、HBIはDRIを熱間圧縮成型して製造したものである⁵⁾。

7. 溶解効率向上

UHP操業の課題克服のため、高電圧低電流の高力率（ロングアーク）下での高能率操業実現が必須であり、この目的のため、様々な設備、操業技術が開発された。なお、ここでUHP操業の位置づけをトランス容量と公称容量の関連で提示する。(Fig.13)

1) 酸素富化

5章で記述したが、壁際のコールドスポットなどに残存するスクラップの下部を酸素溶断し炉心に溜まっている溶鋼の中に早く引き込んで溶解促進するのがカッティング操業である。この際、鉄の酸化熱自体も溶解促進に寄与したわけであるが、鉄酸化ロスも同時に起こり歩留影響の課題が残る。なお、カッティング効率を高め、スクラップを早く溶鋼の中に引きこむためには炉体形状の維持が有効である。工場によって呼称は違うかも

oxygen cutting, oxidization calorie of Fe is also contributing to melt scrap efficiently, but to lead to yield down of steel. This is to be noted here. Additionally, to keep good shape of refractories of furnace is very effective for scrap slip down into steel bath as quickly as possible. On this point, mounting “bank” or “leg” at the wall bottom, which is called variously in plant, is important paralleling with controlling of hearth level.

2) Submerged Arcing

Carbon injection technology into slag for suppressing Fe oxidizing due to oxygen cutting and oxygen-rich operation had been spread since in the 1980s. As the necessary calories for reducing iron oxide by carbon is as high as the calories gotten from iron oxidization, to avoid heat radiation from arc pillar with covering foaming slag is to have been expected by carbon injection. This slag foaming was caused by CO generation from deoxidization by injected carbon or reduction of iron oxide in slag. But there are many noteworthy control points such as injection period of carbon and oxygen, injection position, shape of wall bottom refractories and so on. Anyway, oxygen-rich operation and submerged arcing with slag foaming have been the key-technology supporting long arc operation. Installation of reactor is known to be effective for high power operation with long arc because the stability of arc at high power factor can be increased by supplying reactance in the alternating current circuit.

3) Water-cooled Panel

However refractories erosion by UHP operation was lightend by short arc or long arc with slag foaming, its erosion was not so small. So, refractories not touched directly with molten steel had been replaced with water-cooled panel for avoiding refractories erosion. And the water-cooled panel also came to have been the technology supporting UHP operation.

4) Minimizing Unbalanced Melting

There are cold spots (also hot spots) at the

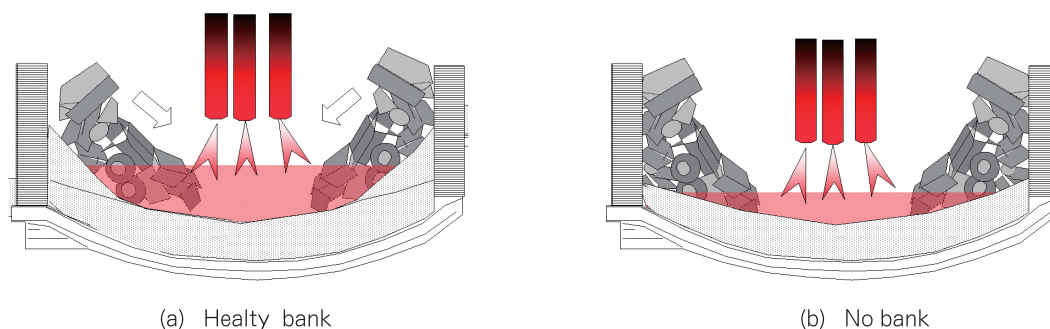


Fig.14 Effect of bank situation on melting efficiency.

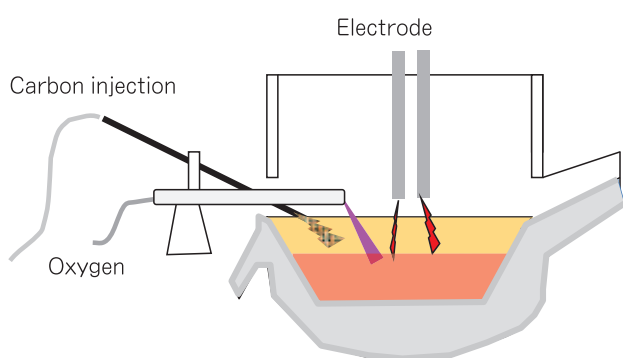


Fig.15 Image of carbon injection into steel bath.

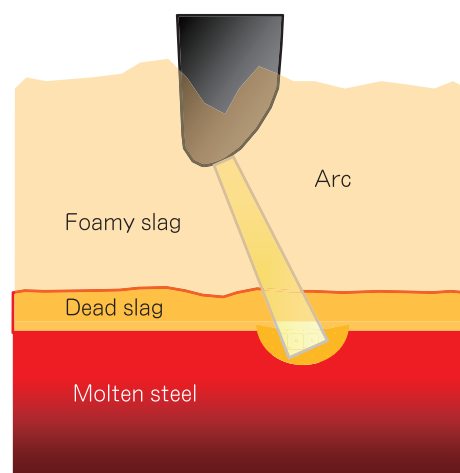


Fig.16 Submerged arcing due to slag foaming.

しれないが、Fig.14に示した「バンク」、あるいは「あし」の構築は、炉心深さ管理と合わせて重要である。

2) サブマージドアーク

酸素カッティングや酸素富化などによる鉄酸化を抑制するためにスラグ中への炭材吹込みが1980年代頃から広がっていった。カーボンによる単純な酸化鉄還元だけではその必要熱は大きいので、Fig.15, Fig.16に示すように、吹き込んだ炭材による脱酸、あるいは酸化鉄還元で発生するCOによるスラグフォーミングを実現してアーク柱からの放熱を回避することが狙いであった。これによる熱効率を高位維持するためには、酸素や炭材の適用時期、壁際の耐火物の形状（バンク）、炭材の吹込み位置など、注意すべき点は少なくない。

いずれにせよ、酸素富化とサブマージドアーク操業はロングアークをサポートする技術の一つとなった。また、高電圧でロングアーク志向ではリ

alternating current furnace as shown in chapter 5. In order to melt scrap at the cold spot, the calories is to be consumed more than necessary amount at the hot spot, and the refractories consumption and operational cost results are to be worse. For minimizing these worse results, combustion burners had been mounted at the cold spots. Furthermore, the technology of oxygen atomized burner had been advanced and cutting operation came to be more efficient.

5) Eccentric Bottom Tapping (EBT)

As shown in Fig.17, tapping spout was conventional tapping equipment, but recently Eccentric Bottom Tapping (EBT) have been installed to almost all EAFs. In conventional EAF, double slag refining had been practiced according to steel grade. After making desulfurization slag at the refining stage, desulfurization had been

アクトルを設置するのも有効とされるが、これは交流回路にリアクタンスを付与し、力率が高い時期のアークの安定性を増す狙いである。

3) 水冷パネル化

UHP操業ではアーク長によらず、超高電力であるには違いなく耐火物修理負荷は小さくなかった。炉壁耐火物への包括的改善として、溶鋼が直接接触しないところは耐火物に替えて水冷パネルを配したことはUHP操業を支えるベース設備技術となった。

4) 不均一溶解の抑制

5章で説明したように必然的に交流炉ではコールドスポットが存在し、この部分にある材料を溶解するためには、ホットスポットには必要以上の熱がかかり耐火物損傷と諸原単位の悪化に直結する。そのため、炉殻のコールドスポットに相当する部分に助燃バーナーなどを設置することが広まった。さらに酸素アトマイズバーナー化技術が進み、カッティングも効率化されるようになってきた。

5) 炉底出鋼 (EBT)

出鋼に関し、Fig.17に示すように従来は出鋼樋

done by using the big mixing energy at tapping, accelerating slag-metal reaction. On this point, tapping spout was effective shape for flowing molten steel and slag at the same time.

But, recently the installation of ladle furnace has been spread, and slag free tapping came to be more expected than slag-metal reaction from the view point of avoiding inclusions. So, EBT has been spread widely due to its feature of slag free tapping. Although the motive of EBT application was the quality needs as being mentioned, several improvements have been confirmed such as higher efficiency, less power consumption, higher alloy yield, lower flux consumption due to hot heel in furnace, slag free tapping and quick tapping. Details are to be handed over the other books.

6) Bottom Blowing

Generally speaking, non-homogeneity in alternating current furnace can be said as weak point from the structural point. Since in 1990s after spread of bottom-blowing converter completed, bottom-blowing operation had been tried in several EAF plants. Though the several merits

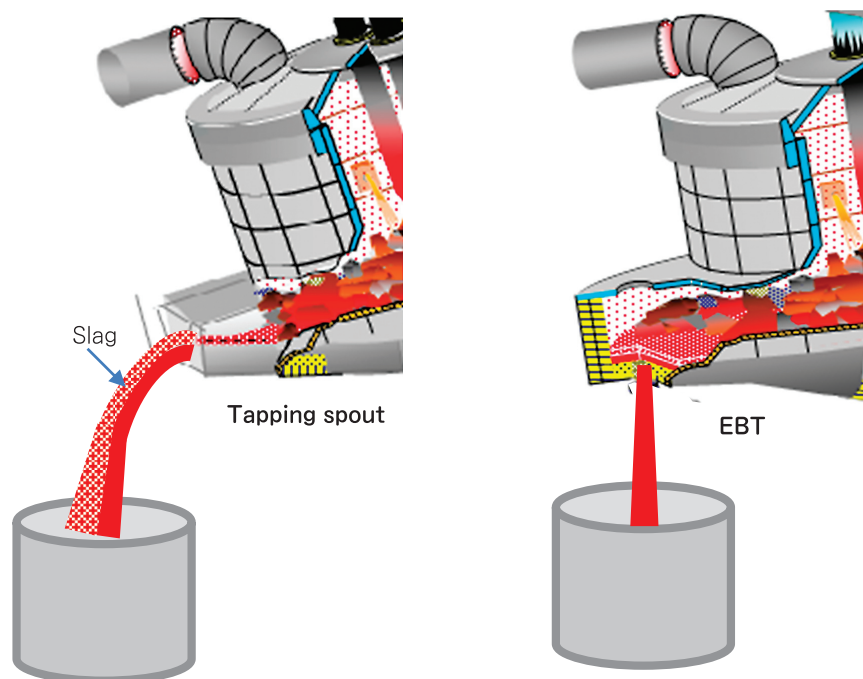


Fig.17 Difference of steel stream at tapping between tapping spout and EBT.

方式であったが、現在はほとんどの電気炉がEBT方式を採用している。従来の電気炉では鋼種によってはダブルスラグ処理をすることもあり、還元期で脱硫スラグを作り、出鋼時の攪拌エネルギーでスラグメタル反応を促進して脱硫をしていた。そのために溶鋼とスラグが同時に出湯できる出鋼樋が有効であった。現在では取鍋精錬炉が普及してきたので、介在物低減の考えからスラグフリー出鋼がむしろ望まれるようになり偏芯炉底出鋼（Eccentric Bottom Tapping）が通常になる。このように品質ニーズからの炉底出鋼への転換であったが、炉内残湯（ホットヒール）で次チャージの初期溶解促進やスラグフリーで短時間出鋼などの効果により、生産性向上、電力原単位削減、合金原単位削減、石灰削減などが図られた。詳細は他の書物に譲る。

6) 底吹き攪拌

交流電気炉は構造的に炉内溶鋼の不均一性は弱点である。転炉での底吹き攪拌が普及後の1990年以降から電気炉各社で導入トライアルが進められた。重量屑の溶解や、スラグ酸化度の低減などからその効果は確認されたが、電気炉鋼浴のようなシャローバスでは攪拌ガスは吹抜けし易く、その効果は限定的である反面、その維持コストが見合わないことなどから、あまり進展はなかった。電気炉炉底に未溶解物や残スラグなどが残り易くノズル詰まりが多いことも一因。ただし、ステンレス製鋼などの相対的に出鋼歩留、合金歩留などの効果が大きい製造鋼種の場合は、適宜ノズル交換してでも底吹き効果が見合うので適用されている。

8. 電気炉の革新技術

ここでは7章までに記載した電気炉技術開発経緯に対して、全く異なる新たな視点での最近の革新技術事例を紹介する。

1) 直流炉（DC炉）

負荷電流の急激な変動による瞬間的な電圧変動（フリッカー）に対する一つの設備対応として1980年代に直流炉が登場した。これは陽極側の炉

of bottom-blowing such as efficient melting for crop metal scrap and less oxidization of slag were confirmed, its application has not been spread so much. Because blowing-gas was to get away through EAF's shallow bath easily with the several management costs. Even the nozzle clogging often happened due to the remaining scrap and slag at the bottom. Nevertheless, bottom-blowing has been applied for special steel grade such as stainless steel and so on because of the appropriate merits of steel yield and alloy yield for its management costs.

8. Recent Technology Innovation

Instances of recent technology innovation for EAF with the entirely new and different point of view from the contents shown in former chapters are to be introduced on this chapter.

1) Direct Current Furnace (DC furnace)

From the view point of correspondence of facilities for instantaneous voltage change (flicker), direct current furnace (DC furnace) was published and its operation was started in 1980s. In DC furnace, arc is to be generated between hearth electrode as anode and upper graphite electrode as cathode and the fatal hot spot (also cold spot) is to be cancelled. Furthermore, as stirring in molten steel came to be performed, DC furnace have surpassed AC furnace in the point of “homogeneity” and enabled the efficient melting. In Fig.18, as the magnetic field B is generated around current flowing line, the magnetic field operates on the current flowing line each other. Accordingly the electromagnetic force is to be generated always towards the center axis from to the Fleming's left hand rule⁶⁾. And as the current density is to be higher at the upper zone than at the hearth zone, stirring direction of molten steel is to be as shown by arrows in Fig.18. That is to say that the molten steel is to be stirred downward flow at the center of vessel and upward flow near the wall.

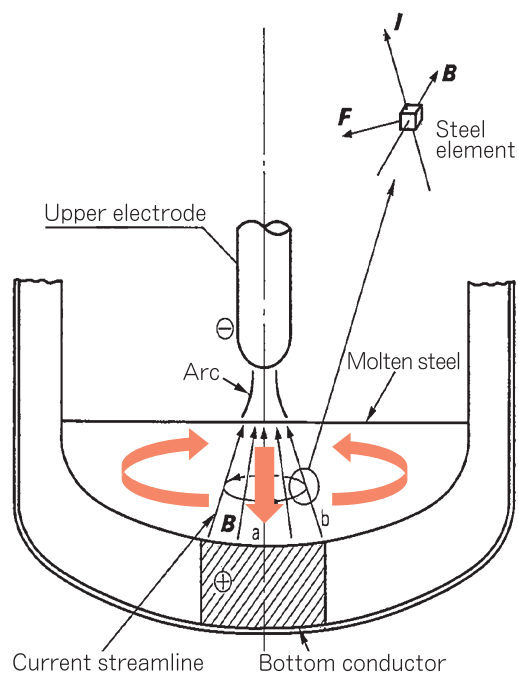


Fig.18 Electromagnetic force model in molten steel.

底電極と、陰極側の上部黒鉛電極一本の間でスクラップや溶鋼を介しアークを発生させるものであり、その通電特性から、宿命的なホット（コールド）スポットは解消され、鋼浴の攪拌も良好であり、“均一性”の面で完全に交流炉を凌駕することになり、効率的溶解が可能となった。Fig.18において、電流流線の周りに右ネジ方向に磁場Bが発生するので、それぞれの電流流線上に対しては互いの磁場がかかる。従ってフレミング左手の法則から電磁力は常に中心軸方向に向かう⁶⁾。さらに電流密度は炉底電極の位置から上部がより密になるので、結果的に図中に矢印で記載したような溶鋼攪拌、即ち、炉心では下向き溶鋼流で周辺では上向き溶鋼流となる。

2) スクラップ予熱

Fig.19は電気炉の熱精算のイメージ表示である。総熱量に対する溶鋼熱量（あるいはスラグ熱量も加える）の比率を熱効率と一般に定義され、総熱量を抑制できれば熱効率は高くなり、必要入熱量の低減が図られる。ここで出熱量の中で溶

2) Scrap Pre-heating

Fig.19 shows just the image of EAF heat balance, and the ratio of calorie of molten steel towards total calorie is to be generally defined as thermal efficiency. And the efficiency can be improved and amount of heat source can be reduced by managing to decrease total calorie. Values of calorie of molten steel and slag in input item can be determined by knowing tapping temperature and slag ratio (kg/t). Here, fundamental procedure for making heat balance is to be mentioned as follows.

At first, total calorie is to be calculated by summing up ① (power consumption) + ② (the other heat sources). ④ (heat loss) is calculated as the remaining by deducting ③ (calorie of molten steel and slag) from total calorie. And heat loss should be divided by measuring data of cooling water and exhausted gas because of the importance of contents in heat loss.

After that, this balance sheet is to be used for decreasing total calorie and saving input calorie especially for power supply. Furthermore, another total analysis should be done using gas analysis and materials balance.

By submerged arc heating described at chapter 7, it seems to have decreased much heat loss to exhausted gas in ④. But, still much more than 100kwh/t is to have been lost to exhausted gas. Scrap pre-heating by exhausted gas containing much energy was a new view point. At first in 1980s, SPH (scrap pre-heating) operation was tried by making exhausted gas with high temperature passing through scrap bucket. Next, EAF with the scrap pre-heating vessel near the furnace was designed and practiced its operation, and pre-heated scrap could be charged into furnace.

In 2000, the high efficient EAF with the pre-heating vessel (or shaft) directly connected to furnace was designed and practiced its operation as shown in Fig.20. In this new type of furnace, scrap is to be charged into furnace

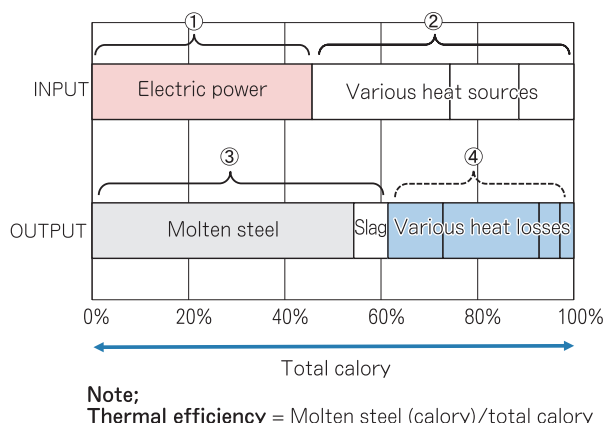


Fig.19 Image of EAF heat balance.

銅やスラグにかかる含熱量は出鋼温度やスラグ比 (kg/t) が決まればほぼ確定できる数値であるが、ここで熱精算表の作成基本手順を補足する。Fig.19で、① (消費電力量) + ② (バーナーなどその他の補助熱量) からまず総熱量を求める。その値から③ (溶鋼とスラグの含有熱量) を差し引いた残りが④ (熱ロス) となるが、熱ロスの中身が重要なため通常冷却水や排ガスデータを計測して、熱ロスの中身を仕分けする。個別に見た熱ロスの削減対応をすることで、総熱量を下げて、①や②の入熱を減らしたり、ガス成分分析や物質収支も参考にして総合的な解析をしたりもする。

さて、サブマージドアークにより④中の排ガス熱ロスを抑制し①の低減は大いに進んだはずである。しかしながら、それが基本ベースの現在の電気炉ではあるがなおその排ガス熱量は大きく100kwh/tは軽く超えているところが多い。

この高温排ガスによるスクラップ予熱はこれまでになかった視点であり、まず1980年頃からこの高温排ガスを待機中のスクラップバケットを通過させるSPH (scrap pre-heat) 操業が試みられた。その後、電気炉本体近くにスクラップ予熱槽を設置しスクラップはその予熱槽から直接炉内投入できるような予熱型電気炉が登場した。

2000年になり、さらにその予熱槽が電気炉と直結されスクラップが連続的に装入できるタイプの高効率電気炉が登場した (Fig.20)。この電気炉

continuously without turning off the power and the scrap is always to be heated up by “continuous countercurrent heat exchange” (scrap of room temperature is charged into vessel one after another). Furthermore, the pre-heated scrap is to be melted quickly just after entering arcing area (furnace) as scrap being pre-heated to more than 800°C at pre-heating vessel. As a result there is no scrap in arcing area (furnace). So, just after scrap charging finished and some heating up of molten steel, tapping can be done promptly. Also, the effect of controlling “flicker” is higher than DC furnace due to continuous arcing on “flat bath” kept continuously in furnace and without turning off. And more, low noise due to arcing only on molten steel and low dust ratio due to screening effect in shaft scrap can be achieved⁷⁾.

3) Rotating of Furnace Body

In 2013, epoch-making furnace was developed having the effect of cancelling the term of cold spot and hot spot in normal AC furnace. As shown in Fig.21 and Fig.22⁸⁾, the position of cold spot part is changed to hot spot part compulsorily by furnace body rotating equipment mounted under furnace body at the time of appearance of cold spot during melting stage. Fatal non-homogeneous melting of AC furnace was cancelled by this innovation, and the several concrete results such as less heat loss to cooling water, less refractories damage were also reported⁹⁾.

4) HDRI Feeding & HBI

Melting energy of DRI which contains gang and rest iron oxide is comparatively bigger than that of scrap. But the melting energy has been decreased remarkably by applying the hot DRI continuous feeding into furnace, especially in case of EAF lying next to DR plant. Where, hot DRI continuous feeding means the operation of feeding DRI into furnace just after being produced at DR plant with high temperature.

It was said that DRI had the micro space

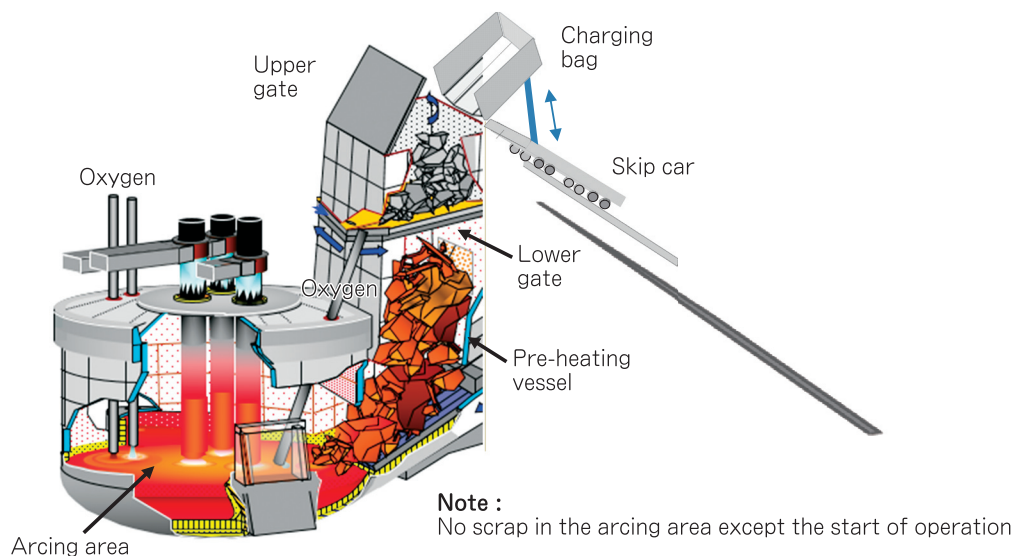


Fig.20 Schematic view of pre-heating vessel directly connected with EAF.

の特徴は従来のバッチ型スクラップ予熱とは異なり、高温排ガスとスクラップが常時対向流熱交換（常温スクラップが次々予熱槽に入る）するので高効率熱交換が維持されることと、スクラップ投入中に通電が途切れないことである。さらに、予熱槽下部でスクラップは800℃以上に予熱されていて炉室に入ると短時間で溶解するので炉室にはスクラップは存在せず、所定スクラップ装入が終

formed during direct reduction at DR plant and might cause firing by re-oxidizing in the space with moisture. From this reason, DRI was generally prohibited from carrying by ship. But the development of HBI, which has no space in it due to being pressed by briquetting machine as shown in chapter 6, made marine transportation of DRI (HBI) possible⁵⁾.

9. Quality Improvement

Application of EBT has minimized the carrying over slag at tapping which might cause inclusion defect. And as ladle furnace (LF) has been spread over, desulfurization and producing high alloy steel have been possible. Furthermore, degasser has been installed to EAF plant of special steel maker and degassing and inclusion floating-up refining by steel circulation in vessel of degasser are to be done.

Essential difference of quality level between BF-converter steelmaker's process and EAF steelmaker's can be said only 2 points as follows.

One is tramp elements coming from scrap and another one is higher Nitrogen content due

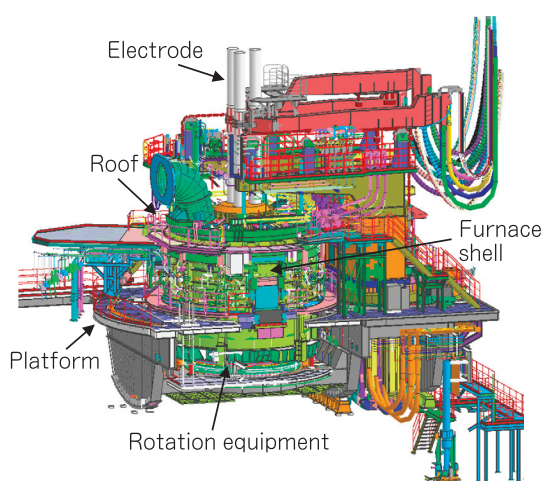


Fig.21 General survey of EAF with the rotation equipment of furnace body⁸⁾.

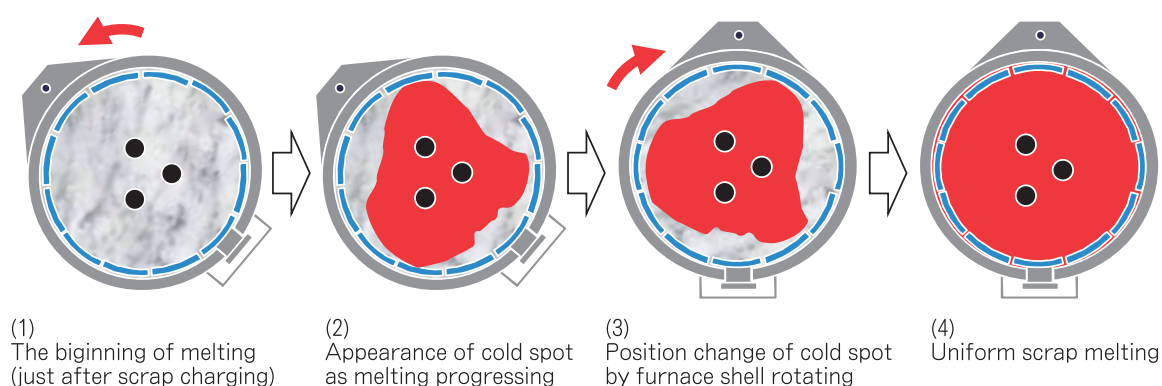


Fig.22 Rotation schedule for scrap melting uniformly⁸⁾.

われは昇熱して即出鋼となる。なお、炉室では常時フラットバスでの通電に加え連続通電のため、直流炉以上のフリッカー抑制効果がある。さらに、当然だが騒音の低減、シャフトでのスクリーニングによるダストの低減効果もある⁷⁾。

3) 炉殻回転

ここで、通常交流炉においてコールドスポットやホットスポットという言葉そのものがなくなる画期的な設備開発がなされ、2013年に操業開始された。Fig.21, Fig.22に示すように⁸⁾、溶解進行でコールドスポットが出現するタイミングで炉下に設置された炉殻旋回装置で強制的にコールドスポットをホットスポットに入れ替えるのである。これにより交流炉の宿命的な不均一溶解は抑制されたのである。また、冷却水熱ロス低減や炉壁補修材低減などの具体的効果も報告されている⁹⁾。

4) HDRI連装とHBI

スクラップと比較して、脈石分や残存酸化鉄などを含むためにDRIの溶解エネルギーは相対的に大きい。ところが還元鉄工場と隣接する電気炉においては、Fig.23に示すように熱間連装操業技術によりその溶解エネルギーは格段に低減してきている¹⁰⁾。ここで、熱間連装というのは製造直後の還元鉄を高温のまま電気炉頂から連続的に装入溶解する操業であり、この時のDRIをhot DRIと称している。

また、DRIは固体還元段階で発生する微細空隙があるため、湿度などを契機に再酸化から火災発

to not so active CO reaction as converter.

Suitable scrap selecting is to be done for the former one, and submerged arcing for the purpose of avoiding nitrogen gas dissociating in arc of ultra-high temperature is to be done for the latter one. There are not any quality differences between two processes except abovementioned points, and only there are different specifications of product and different facilities suiting to specification.

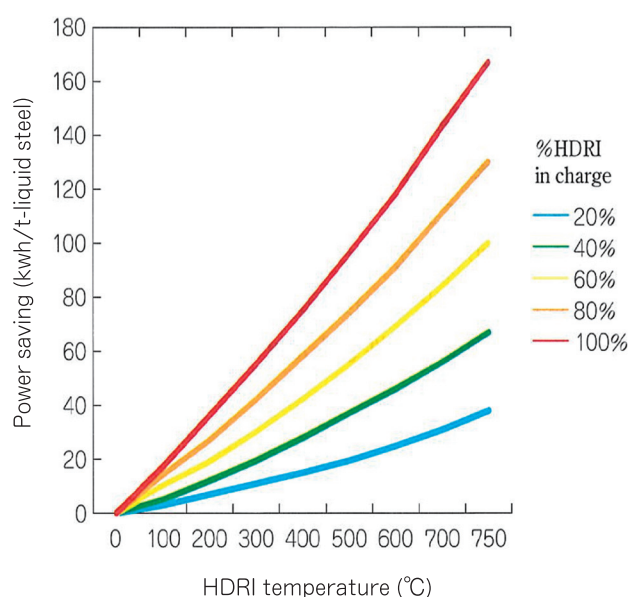


Fig.23 Correlation between HDRI temperature and power savings¹⁰⁾.

生することがあり海上輸送は不可とされていた。しかしながらDRI製造直後に圧縮成型したHBIとすることで当該問題は回避できる技術開発がなされた⁵⁾。

9. 品質向上

介在物に欠陥をひきおこす可能性のある出鋼時のキャリーオーバースラグについてはEBT導入により抑制されてきた。さらに取鋼精錬炉 (LF) も普及しているので、脱硫処理や高合金化のニーズにも対応できる。また、特殊鋼電炉ではニーズに応じて脱ガス装置も備えており、脱水素、脱窒素や溶鋼環流による介在物浮上促進なども対処可能である。

高炉転炉プロセスに対しての品質面の格差は、スクラップ中から入るトランプエレメントと、転炉のような酸素吹錬でのCO反応による窒素希釈がないため出鋼段階の窒素が高めであること、この2点と言える。前者は鋼種に応じたスクラップ選別、後者は3000℃を越す超高温アークで空気中の窒素解離から鋼中窒素が上昇するのをサブマージドアークで抑制、などの対応をとっている。

この2点以外に基本的に電気炉製鋼と高炉転炉製鋼には品質格差はなく、あるのは製造鋼種の製品仕様とそれに見合う設備対応の有無だけである。

10. 耐火物

トーマス転炉の発明は、高温焼成ドロマイト煉瓦の発明であった。膨大な耐火物の開発というのは、その時代の鉄鋼業のニーズとともに発展してきたのであり、耐火物開発に従事されてきた先人の尽力に敬意を表する。最近の事例のいくつかを紹介する。

1) 超緻密質MgO-C煉瓦

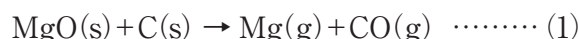
ホットスポット側の耐火物には負荷がかかり易く、製造鋼種によっては溶解温度やスラグ酸化度が高い場合もありその負荷はさらに大きくなる。この観点から、激傷部用耐火物の開発が進められてきた。Fig.24は電気炉スラグドア近傍の炉壁に

10. Refractories

To tell the truth, the invention of Thomas Converter was the invention of Dolomite brick sintered at high temperature. A lot of development of refractories have been done according to needs of steelmaking at that period, and respects are to be paid to many pioneers. Recent some instances of development are to be introduced here.

1) Ultra high Density Brick

Refractories situated at hot spot is comparatively suffered from effect of arc flare, and its load may be accelerated by higher slag oxidation or higher temperature of molten steel depending on steel grade. From this point of view, several refractories for the part receiving high load have developed. For an instance the test result of "MgO-C brick with ultra-high density" is shown in Fig.24, where the developed refractories show the life more than the twice of the conventional. The estimated cause of higher life seems to be its higher density and lower carbon content with the aim of suppressing magnesia carbon reaction, as follows.



This type of brick can be applied not only for EAF but also for ladle, converter.

2) Unburned Alumina-Magnesia Brick

Generally casting work method of castable refractories is often applied for ladle and its purpose is to be said the cost saving by minimizing the overhaul repair. But it seems to be more important for its characteristic of keeping warm of molten steel due to its lower heat conductivity and heat capacity caused by lower porosity. But application of casting work method may be hard for EAF plant due to its intermittent operation and for the plant having no casting work equipment.

From considering these important points, "unburned alumina-magnesia brick" (ALTIMA)¹¹⁾

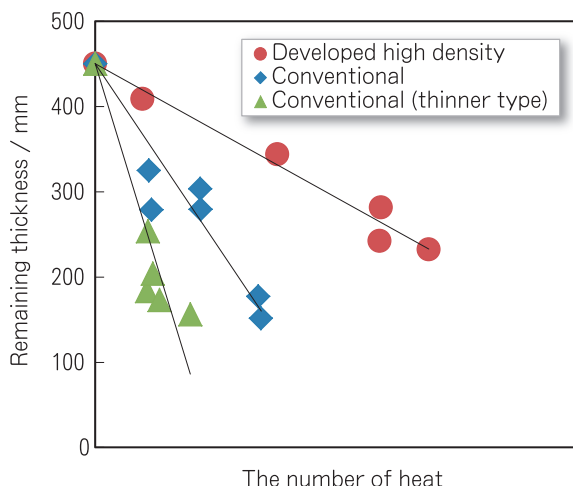
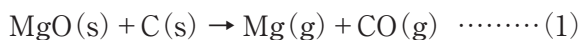


Fig.24 Effect of “super high density” on brick erosion speed.

における“超緻密質MgO-C煉瓦”の実験結果例であるが、従来品の2倍以上の耐用を示している。当該煉瓦の高耐用要因は、マグネシアカーボン反応（式(1)）を抑制するために配慮した緻密化とカーボン量抑制の成果と思われる。



当該煉瓦は電気炉の激傷部だけでなく、取鍋その他にも適用できる。

2) 低熱伝導アルミナマグネシア不焼成煉瓦

一般に鍋用耐火物などで流し込み施工を採用されることが多いがその目的は大修理頻度低減などの合理化と言われている。しかしながら、その低い気孔率に起因する低熱伝導率や低熱容量などによる保温効果がより重要である。ところが電炉のような間歇操業や、流し込み施工設備のないところでは適用できないケースもある。しかしながら、同様素材を成型した不焼成煉瓦品であれば、制約がなくなりどこでも使用できる可能性があり、省エネ観点での使用が期待される。Table 3に基本特性を示す¹¹⁾。

簡単な記述に留めたが、製鋼工場が耐火物に求める要望は今後も極めて高いことから、耐火物メーカーと工場の連携を高め、安定操業、省エネ

Table 3 Properties of ALTIMA¹¹⁾

	ALM-F001	ALM-F007	Conventional
Chemical composition / mass %			
Al ₂ O ₃	88	77	65
MgO	7	13	18
C			10
Apparent porosity / %	11.6	10.0	6.4
Bulk density / g・cm ⁻³	3.28	3.10	3.27
Compressive strength / MPa	42	60	34
Thermal conductivity at 600°C / W・m ⁻¹ ・K ⁻¹	2.8	1.5	13.2

has been developed with the same materials as casting method of castable refractories. And this material can be used for every plants without any restrictions and is especially expected for energy saving as well as cost saving. Fundamental properties are as shown in Table 3.

Although being minimized to simple description, steelmaker's demand to refractories will be in very high level from now on. Various developments such as stable operation, energy saving operation, high quality steel etc. are expected to be practiced by building up closer connection between refractories makers and steelmakers.

11. Graphite Electrode

As the electrode is suffered from arc higher than 3000°C and molten steel around 1600°C, it has to have the special characteristic of thermal shock resistance, high strength, less oxidation loss, and carrying large current. For that needs, electrode makers had accumulated the technologies on its production processes such as raw materials careful gathering as needle cokes, molding, calcining, graphitization, QA etc. for the purpose of supplying high quality artificial graphite. Schematic view of graphitization process¹²⁾ is shown in Fig.25 as reference. Electrode discussion is to be situated at the final position of this technical report due to writer's intensity of feeling coming from following three

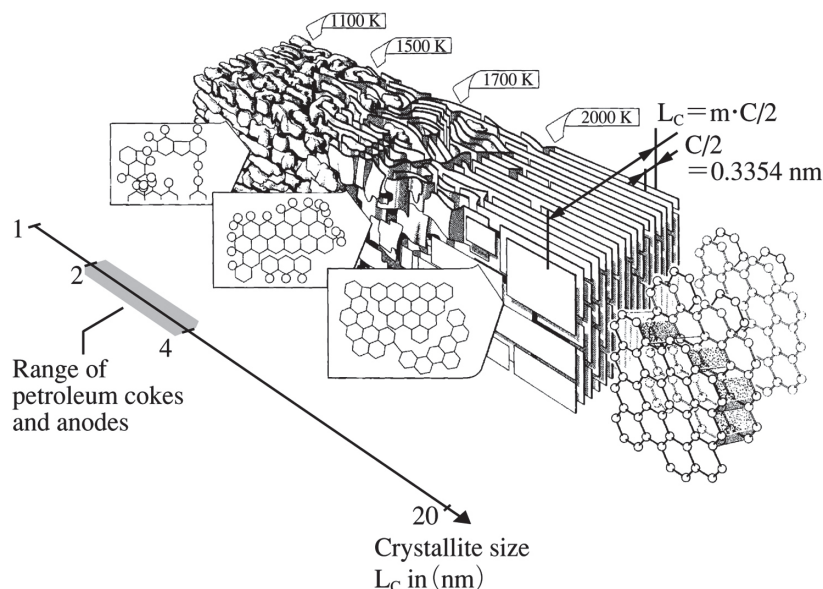


Fig.25 Schematic view of graphitization process (marsh-griffith model)¹²⁾.

操業，品質対応などの追求を一緒に進めたい。

11. 黒鉛電極

電極は3000℃以上のアークと1600℃の溶鋼にさらされるので，熱衝撃に強く，強度があり，酸化消耗に強く，大電流を流せることが必要となる。そのため，電極各社は高品質の人造黒鉛電極を供給するために，ニードルコークスなどの原料手配，成形，焼成，黒鉛化などの工程に技術を集中させてきた。参考までに黒鉛化工程での結晶成長モデルをFig.25に示す¹²⁾。

今回の報告の最後に電極を持ってきたのは以下の3点からの筆者の思い入れからである。

- 1) 電気炉はアークを発生させて始まるプロセスだが，その根幹が電極であること。
- 2) UHP炉も直流炉も電極成型技術の開発がなければ実現できなかったこと。
- 3) 電極原単位の推移から，電気炉と電極の総括的進歩をみることができること。

Fig.26に戦後1960年頃からの電極原単位の推移を，主要開発項目とともに示す¹³⁾。なお，予熱型の国内電気炉では既に0.7kg/t近傍の実績が出ていることを注記し，本章を終える。

reasons.

i :EAF process starts from arcing, and its starting point is electrode.

ii :UHP operation and DC furnace could not have been realized without the development of electrode manufacturing.

iii :Progress of electrode and EAF can be shown objectively in the transition of electrode consumption.

Transition of electrode consumption since around 1960 is to be shown in Fig.26 with the various developments and technical events¹³⁾.

And this chapter is to be closed noting finally that the recent result of around 0.7kg/t is confirmed in pre-heating furnace in Japan.

12. Expected Items of EAF as Conclusion

As the total theme hereafter countermeasure for global warming-up can't be removed. Thorough actions for avoiding wastes are to be executed towards limited global sources. It is essential attitude of marking and avoiding the waste of time, waste of calorie and waste of steel. Accordingly as the fuel should not be wasted, carbon also not be wasted. Carbon

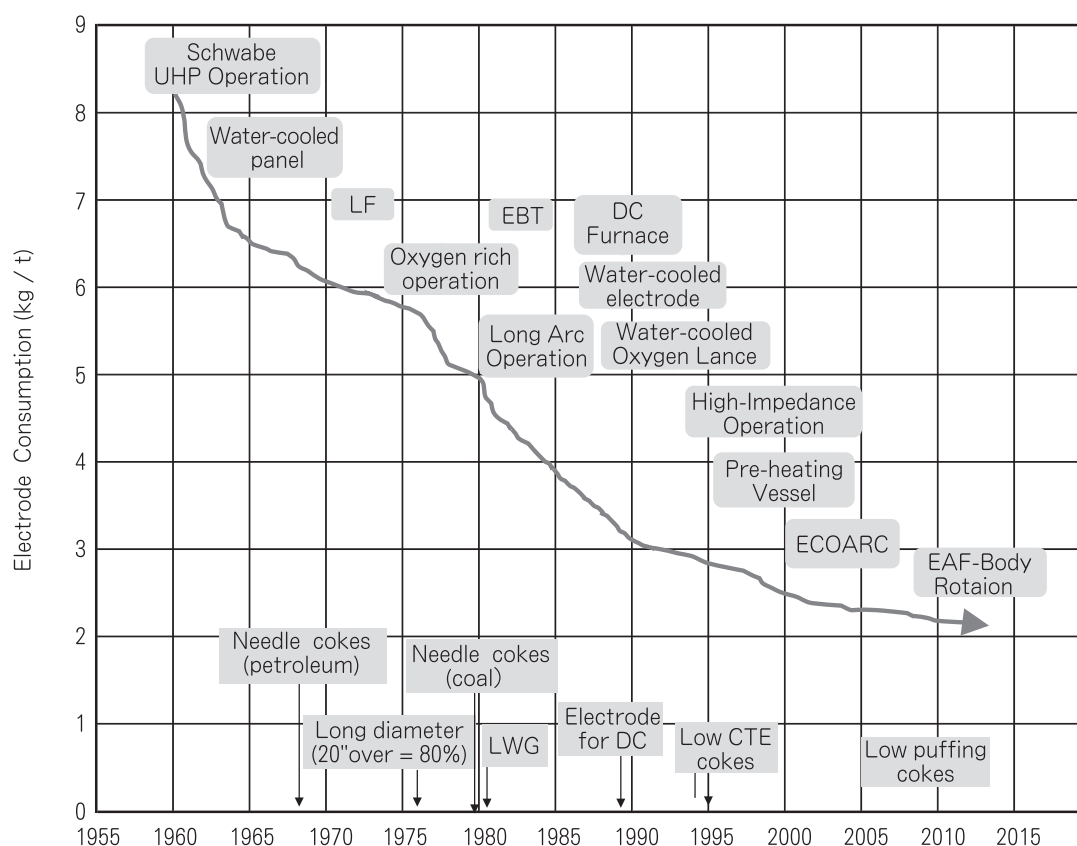


Fig.26 Progress of electrode consumption achieved by both efforts of suppliers and users.

12. 結言としての電気炉の課題

今後の総合的な課題として地球温暖化対策は外すことはできない。限りある地球資源に対し徹底した無駄の排除が肝要であり、時間の無駄、熱の無駄、鉄の無駄を常に追い求める姿勢が基本である。温暖化対応だと諸燃料も無駄にできないから炭材も同じである。炭材を無駄にせず、その上で電気も下げる。そうすると銑鉄などの固体中炭素利用は有用かもしれない。溶解過程で鋼中に入る炭素効率が高いからである。海外でもDRI (HBI) 中のカーボン利用による省エネの事例も紹介されている¹⁴⁾。電炉操業に有用な炭材の研究はこれからも大きな課題である。

日本は現在、13億トンの国内スクラップ潜在備蓄量を持っているが、世界をみても同様に、電気炉の原料は世界中に潤沢に蓄積されつつある。そ

should not be wasted, but power consumption also should be decreased. In this hard demand, carbon utilization in solid as pig iron may be effective because the carbon in solid can be into molten steel easily during melting process without loss. Instances of energy saving by using DRI(HBI) is being introduced overseas¹⁴⁾. Study and investigation of carbon utilization in EAF operation is to be a big theme from now on.

Though there is 1.3 billion tone of latent scrap stock in Japan, there is not big difference situation of scrap all over the world. That is to say that raw material for EAF has been accumulating too much. Accordingly, coping with tramp elements will be the more important theme than present. From this view point, avoiding "improvident" Cu contamination at the stage of scrap mixing and melting is very important

れゆえ、トランプエレメントの対応は従来にも増して重要な課題になっていくだろう。この意味から、鉄再利用溶解段階での鉄鋼製品の“不意な”Cu汚染の回避は貴重な鉄鋼資源の健全化を維持する上で極めて重要である。今後増大してくるであろう特殊な回収鉄鋼製品の精緻解体（主にCuの除去）は、より拘束力のある法制化が望まれるが、精緻解体の研究調査資料は少ない¹⁵⁾。また、規格の厳しい特定鋼種には現状の新断屑などの市中屑だけでなく還元鉄も適用しCuを薄める指針も将来はあるだろう。銑鉄はその含有Cが高いことと形状制約から、高配合では不安定溶解が想定される。

鉄のリサイクルを社会使命としながら諸開発を進めてきた電炉業であるが課題は多い。将来に亘り潤沢に続く鉄資源を有効にリサイクルしつつ地球温暖化対策を進め、超高温アークをもつ電気炉の特徴を生かして、産廃物などを適正溶解する開発なども期待される。社会に貢献できる新規開発や、安定操業を担保するための研究を含め、鉄鋼以外の多くの業界と連携していくことも肝要だと筆者は考える。

in order to keep our precious steel resources healthy. Detailed dismantling (especially Cu removal) of the special recovered scrap, which is being increased hereafter, is expected to be controlled by the legal force. At present, there is not many open document regarding to detailed dismantling¹⁵⁾.

On the other hand, for the lower Cu spec. of special steel, direct reduced iron may be used for lowering Cu content in charged scrap instead of newly punched scrap in near future. Pig iron application for the same purpose seems to be hard due to unstable melting from its high carbon content and its thickness.

There is not a little theme in EAF industry having advanced various developments with the social mission of iron recycling. Counter-measures for global warming-up are to be executed, and the development of safety and complete melting industrial waste by utilizing of ultra high temperature arc is also expected.

For all these developments, correspondence to expectations and study of guaranteeing stable operation, it seems to be vital for EAF steelmakers to build up the close connection with other industries, as writer's opinion.

References

- 1) B. Neumann: Stahl und Eisen, Nr. 13, s.763 (1904).
- 2) T. Nakamura: Journal of Tokyo Keizai University, Economics, 253, 177 (2007).
- 3) N. Ao: ELECTRO-HEAT, No.206, serial lecture, 62 (2016).
- 4) N. Ao: (Steel Plantech Co.), Private communication.
- 5) M. Atsushi, H. Uemura, T. Sakaguchi: Kobe Steel Engineering Reports, vol.60, No.1, April, 5 (2010).
- 6) T. Nanjyo, H. Yoshida: Industrial Heating: Vol. 29, No.3, 31 (1991).
- 7) N. Ao: ELECTRO-HEAT, No.206, serial lecture, 69 (2016).
- 8) Non-Integrated Steel Producers' Association (Japan): Forum of EAF steel Product, 7 (2016).
- 9) N. Tomita, M. Ogawa, Y. Tanaka, T. Yamauchi: Industrial Heating, Vol.52, No.3, 5 (2015).
- 10) M. Atsushi, H. Uemura, T. Sakaguchi: Kobe Steel Engineering Reports, vol.60, No.1, April, 10 (2010).
- 11) E. Maeda: Shinagawa Technical Report, Vol.54, 73 (2011).
- 12) H. Marsh, J. Griffith, Ext. Abs. Int., Symp. on Carbon, Toyohashi, Japan, Nov., 81 (1982).
- 13) K. Yoshikawa (SEC carbon), Private communication.
- 14) S. Hornby, J. Madias, F. Torre: IRON & STEEL TECHNOLOGY AISTORG, MAR, 81 (2016).
- 15) K. Togawa: JRCM NEWS, No.226, 1 (2005).