

技術資料

UDC 669.187.2 : 669.18

アーク炉における省エネルギー*

福 本 行 男**

Energy Conservation for the Arc Furnace

Yukio FUKUMOTO

1. 緒 言

日本でアーク炉の操業が始まったのは 1909 年であるが¹⁾、特に第 2 次世界大戦後の進歩発展が著しい。終戦から朝鮮動乱終了 (1953 年) までの復興期における鉾石法から酸素法への転換、それから 1964 年までの成長期における炉容量の大型化や付帯設備の合理化、その後の超大電力 (UHP) 操業を基盤とした助燃技術・炉外精錬技術・炉操業の自動化や省力化など、多くの技術的変革があつた²⁾。これらの技術革新は、戦後の急速な経済成長や労働力不足を背景としていたために、生産性の向上や省力をおもな狙いにしてきたが、同時に、各種の原単位低減などコスト改善の役割も果たしてきた。中でもアーク炉の場合、電力は原価構成の割合が原料について高く、その原単位推移は常に関係者の注目の的であつた。

さて、1973 年の石油危機で世界のエネルギー情勢は一変した。当面の供給不安は比較的短期間の内に解消したものの、価格は以前の何倍という水準になつた。エネルギーコストの製造原価に占める割合は大幅に増大し、前にも増して格段の節減努力が要請される時代となつた。アーク炉操業面においても従来のような高能率化を基盤としての電力原単位低減といったことだけでなしに、多方面からの省エネルギー技術の研究・開発が必要となつてきた。

ここでは、そうした情勢の中で発表された最近の研究事例をもとに、アーク炉の省エネルギー技術について考察する。

2. 熱精算結果と省エネルギーの方向性

2.1 熱精算結果

表 1 は、最近発表されたアーク炉の熱精算結果の一例である^{3)~5)}。アーク炉の熱精算方式は日本工業規格 G 0703 で定められており、これらのデータも基本的には JIS 方式によつて求められたものである。備考欄に示すように対象炉ごとの測定条件が異なつているので、これ

によつて炉容量の変化に対応した熱効率の傾向を論じることができないが、現在のアーク炉の熱効率水準を伺い知ることができる。JIS G 0703 で定義されている熱効率は、表 1 の溶鋼の保有熱比率とスラグの保有熱比率を加えたものであり、この場合溶解サイクルで 61~68% の水準ということになる。

2.2 省エネルギーの方向性

省エネルギーの方向性についてその基本となるのはアーク炉熱効率の向上である。アーク炉の熱効率は JIS G 0703 で、(1) 式のように定義されている。

$$\text{熱効率} = \frac{\text{溶鋼保有熱} + \text{スラグ保有熱} + \text{分解反応熱} - \text{溶銑保有熱}}{\text{入熱の合計} - \text{溶銑保有熱}} \times 100(\%)$$

..... (1)

ただし、入熱の合計 = 出熱の合計

この式より、アーク炉熱効率向上策として最初に考えられるのは、総出熱から溶鋼保有熱などの有効出熱を除いた残りの無効出熱の減少を図ることである。表 1 よりそれら無効出熱を大きい順に列記すると、排ガス・炉体放散熱などの損失熱 → 冷却水損失熱 → 二次導体・電極・変圧器などの電氣的損失熱ということになる。この内、冷却水損失熱は耐火物寿命との関連性が強く、単純にその低減を指向できる段階には至っていないが、排ガス・炉体放散熱などの損失熱や電氣的損失熱は、極力その減少を推進できる性質のものである。

無効出熱の減少について、その出熱の有効利用を図るということもまた有効な省エネルギー対策である。利用の仕方としては、アーク炉の入熱としてフィードバックする方法と他の用途に使う方法に大別される。前者の場合はアーク炉の熱効率を直接的に高めることになるし、後者の場合は事業場全体からみてトータルエネルギーの減少につながる。

その他アーク炉省エネルギーの考え方として、他工程の排熱をアーク炉入熱として利用する方法やコストの高い主入熱源である電力の一部を石油系燃料に置換する方

* 昭和 53 年 3 月 14 日受付 (Received Mar. 14, 1978) (依頼技術資料)

** 大同特殊鋼(株) (Daido Steel Co., Ltd., 1-11-18 Nishiki Naka-ku Nagoya 460)

表1 アーク炉熱精算結果の一例

対 象 炉		100 t AF ³⁾		70 t AF ⁴⁾		50 t AF ⁵⁾		30 t AF	
項	目	熱量/溶鋼 t (10 ³ kcal)	比率 (%)	熱量/溶鋼 t (10 ³ kcal)	比率 (%)	熱量/溶鋼 t (10 ³ kcal)	比率 (%)	熱量/溶鋼 t (10 ³ kcal)	比率 (%)
入	電力の熱量	452.6	68.8	438	76.3	465.9	87.9	305.3	51.9
	その他の燃料発熱量	—	—	—	—	—	—	—	—
	電極の酸化熱	29.6	4.5	22	3.8	22.2	4.2	30.0	5.1
	元素の酸化熱	169.1	25.7	103	17.9	37.3	7.0	251.8	42.8
	スラッグの生成熱	6.6	1.0	11	1.9	5.0	0.9	1.2	0.2
熱	合 計	657.9	100.0	574	100.0	530.4	100.0	588.3	100.0
出	溶鋼の保有熱	353.3	53.7	326	56.8	324.5	61.2	345.1	58.7
	スラッグの保有熱	48.0	7.3	51	8.9	31.8	6.0	56.2	9.5
	冷却水の持ち去る熱	63.2	9.6	34	5.9	48.4	9.1	20.7	3.5
	変圧器・電極損失熱	21.1	3.2	6	1.0	—	—	4.7	0.8
	二次導体・電極損失熱	—	—	—	—	—	—	4.9	0.8
	その他排熱損失熱 (排ガス, 炉体放散熱など)	172.3	26.2	157	27.4	125.7	23.7	156.7	26.7
熱	合 計	657.9	100.0	574	100.0	530.4	100.0	588.3	100.0
備 考				中炭素構造用鋼の3 連続溶解サイクル		溶解期のための測定 結果		ステンレス鋼の1 溶解サイクルの測 定結果	

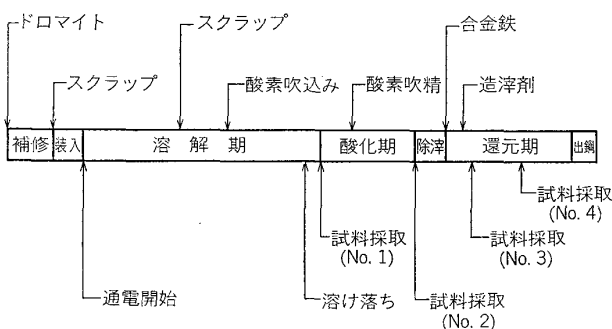


図1 アーク炉溶製作業の標準サイクル

法などがある。後述するホットリターン屑の装入や助燃法などがそれらの具体的事例となる。

以上、アーク炉省エネルギーの方向性についてその基本となる考え方を述べてきたが、アーク炉での溶製作業は図1に示すように基本的には溶解期・酸化期・還元期の3ステップから成り立っている。次章以下で溶製作業のステップ別に紹介する具体的な省エネルギー技術はいずれもこれらの考え方のどれかに沿ったものである。実際の省エネルギー技術と基本的な考え方の関連性を理解しやすくするために整理すると図2のように表現できる。

3. 溶解期における省エネルギー技術

3.1 スクラップ銘柄の影響

スクラップの品質（不純物成分・溶解歩留・形状など）は銘柄によつて相当異なるが、それらによつてアーク炉の電力原単位は大きく左右される。たとえば、PやSなどの不純物成分の高い銘柄を使用した場合、それに応じた精錬が必要になり、時間延長による放熱損失増加分とこの精錬に必要な造滓剤（生石灰、ホタル石など）の溶解熱増加分に相当する電力量が必要となる。また溶解歩留の悪い銘柄の場合には、スラッグやダストになる分を余分に加熱することになる。一方、スクラップ形状と電力原単位の関係については、多くの報告がなされているが形状を小さくする程アークが安定して電力投入密度が上昇し、その結果熱効率の向上が図られて電力原単位の低減することが知られている。

表2はこれらスクラップの品質がアーク炉の電力原単位に及ぼす影響を把握するために行なつた特殊な実験溶

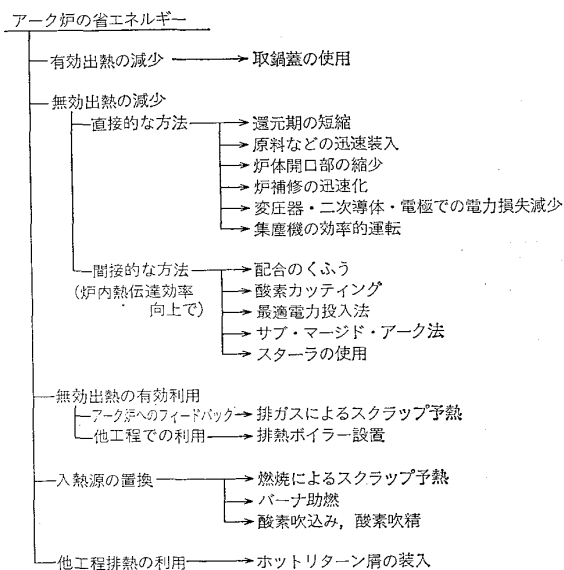


図2 アーク炉省エネルギーの考え方

表 2 スクラップ銘柄別単独溶解試験結果

銘 柄	溶解ヒート数	溶け落ちまでの時間 所要時間 (min)	溶解歩留 (%)	溶け落ちまでの電力原単位 (kWh/装入 t)	(kWh/溶鋼 t)
新 断 プ レ ス	3	73	99.0	615	621
ダ イ プ レ ス	2	71	86.9	676	778
A プ レ ス	2	90	90.2	753	835
プ ロ ー ラ	2	50	94.1	475	505
甲 山	2	58	93.6	537	574

注) 新断プレス: 自動車メーカーのプレス工場で発生する薄板のプレス加工屑をスクラッププレスで加工したもの。

ドライプレス: 機械切削された薄いドライ屑をプレスしたもの。

A プ レ ス: 厚さ1~3mmの鉄板(自動車解体ボディ主体)をプレス加工したもの。

プ ロ ー ラ: プローラースチール社が開発した高速回転ハンマーにて細かくひきちぎった屑である。

甲 山: 市中で一般に「鉄屑」と呼ばれる老廃屑。

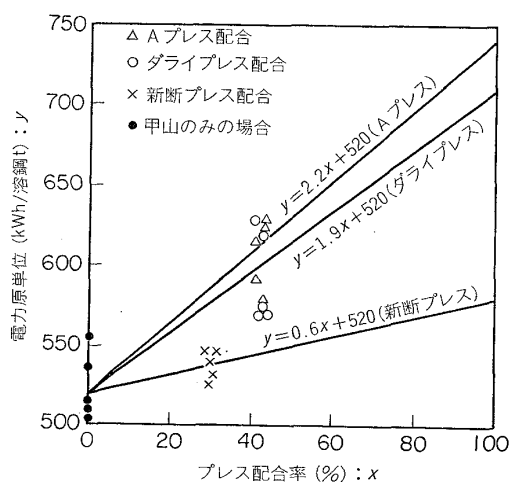


図 3 甲山屑にプレス屑を配合した場合の電力原単位変化⁶⁾

解の結果である。実験は2tアーク炉を用いて、スクラップ銘柄別に単独溶解を行なったものである。また図3は甲山をベースにAプレス、ドライプレス、新断プレスの配合比率を変えた場合の消費電力量への影響を示している⁶⁾。

一般的にいつてプレス品は形状が大きくて熱伝達が悪く溶解時間が伸びるので、多量の電力量を必要とする。しかし、同じプレス品でもその種類により熱伝達に影響を与えるプレス性が異なりまた歩留にも差異があるため、種類間で所要電力量に差がでてくる。表2と図3は新断プレス・ドライプレス・Aプレスという順で電力原単位が悪化するという一致した結果を示している。形状の小さいプローラ屑の原単位が良好なのは、前述したように装入時の充填性や鋼浴への落下性がよく、溶解が円滑に進行するためと推定される。

3.2 ホットリターン屑の装入

造塊工程で発生する余り湯や熱間圧延工程で発生する切断屑などを、冷却されない内にアーク炉の原料として装入できれば、当然その温度に上昇させるまでの熱量が省かれることになり、それに必要なアーク炉電力量が節約できる。

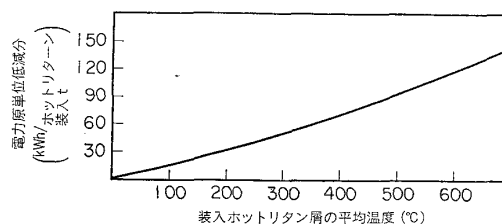


図 4 ホットリターン屑装入による節電効果 (アーク炉熱効率=0.8)

たとえば、常温 T_0 °C、ホットリターン屑の平均温度 T °C とした場合の節約電力量 ΔE kWh/ホットリターン装入 t

$$\Delta E = \frac{1000}{860} \times \frac{C_T}{Q_T} \times (T - T_0) \dots\dots\dots (2)$$

Q_T : 装入リターン屑を常温から T °C まで昇温させるまでの平均アーク炉熱効率

C_T : 装入リターン屑を常温から T °C まで昇温させるまでの平均比熱

という形で算出もできる。

ここで $T_0=20$ °C、 C_T には中炭素鋼の数値⁷⁾を採用し、 $Q_T=0.8$ とした場合の ΔE と T の関係は図4のようになる。

この方法は、他工程の排熱をアーク炉の入熱として利用するということで、きわめて合理的な省エネルギー対

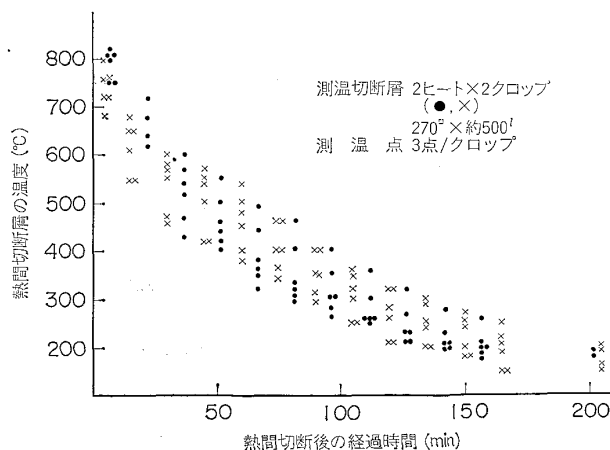


図 5 熱間切断屑の温度降下状況

策であるが、問題は熱間のリターン屑をいかにして短時間の内にアーク炉に装入するかということである。ホットリターン屑は図5にも示すように時間の経過とともに急速に温度降下をきたすので、タイミングよくアーク炉に戻すことが必要であり、ハンドリングの方法にもくふうを要する。

3.3 スクラップ予熱

通常スクラップ予熱と称されているのは、アーク炉装入前のスクラップに対して電力以外のエネルギー（おもに石油系燃料）を使って行なわれる予熱のことである。本来はアーク炉の排熱で予熱したいところであるが実用化には種々の問題があり、結局石油系エネルギーや天然ガスを投入して予熱するというのが、現在までの趨勢となつていゝ。当然のことながら、電力は発送配電の過程で約 65% のエネルギー損失を生じながらユーザーに供給されており、ユーザーで使用できる単位熱量あたりのコストはそれだけ高くなつていゝ。したがつて、燃焼加熱でも比較的熱効率の高い被加熱物温度の低い領域では、電力にかえて石油系燃料で加熱したほうが総合的なエネルギー節減になる。

しかし、この方法は日本ではほとんど実用化されていない。節減エネルギー量が少ない割に、予熱装置などに投資が必要となり、トータルメリットが出にくいためであらう。一方海外ではかなり実用化が進んでいるようである。特に北欧では冬場における雪や氷による爆発防止のために、盛んに採用されている。

図6はノルウェーの Elkem-Spigerverket A. S. の開発によるスクラップ予熱装置の原理図である⁸⁾。スクラップバケットの上に燃焼カバーを装架し、スクラップの上から下方にバーナ燃焼させる構造となつていゝ。バケット外壁の内側に燃焼カバーから冷却用空気を供給して

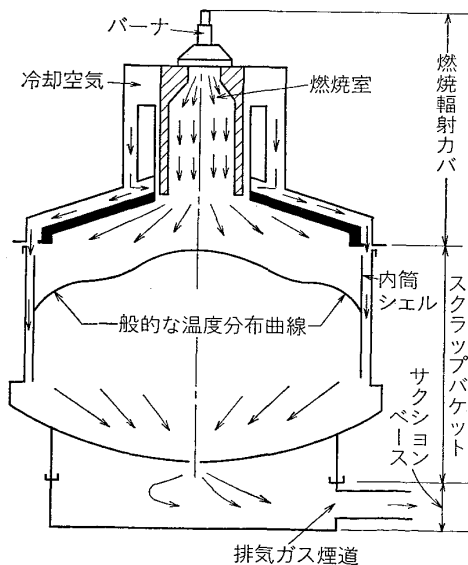


図6 Elkem-Spigerverket A. S. 開発のスクラップ予熱装置⁸⁾

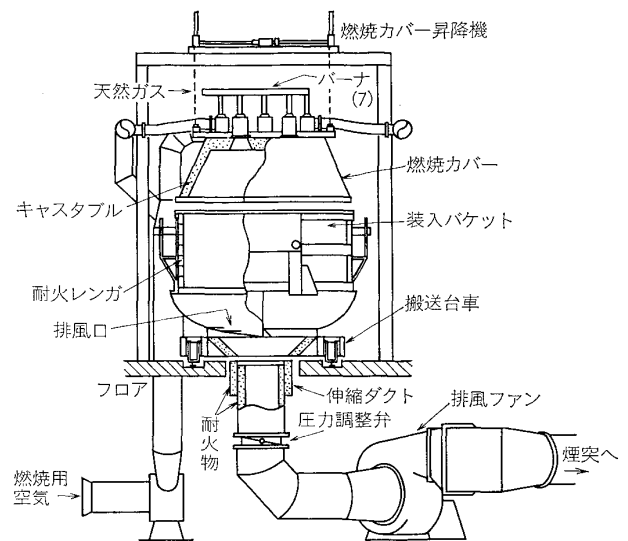


図7 Bethlehem Steel Co. で実用化されたスクラップ予熱装置⁹⁾

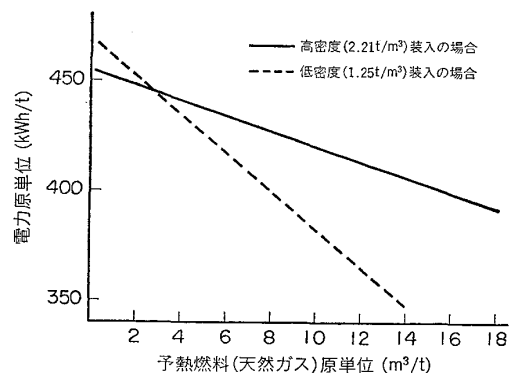


図8 スクラップ予熱における予熱燃料・電力原単位の関係⁹⁾

カバーとバケット上縁との間のシール機能果させていゝことやバケット内面に耐火ライニングをしてないことが特徴的といゝ。この方式によるスクラップの予熱温度は最高 430°C 程度である。500°C 以上に上昇させると予熱時の熱効率が下がることやバケット内面への耐火ライニングが必要となることなどマイナス面が多くなつてくる⁸⁾。

図7は米国の Bethlehem Steel Co. 社で実用化されている予熱装置の略図である⁹⁾。予熱燃料として天然ガスが使われ装入バケットには耐火粘土のライニングがなされていゝ。この装置における予熱用天然ガス原単位とアーク炉電力原単位の関係は図8のように報告されていゝ⁹⁾。

スクラップの予熱温度とアーク炉の節電量の関係は前項のホットリターン屑の場合の図3と同じになる。理論上スクラップ予熱で省エネルギーを達成するための基本的な前提条件は予熱時の熱効率>アーク炉熱効率(低温域)×発送配電効率ということである。しかも予熱装置のために設備投資が必要となるので、実用化にあつて

表 3 酸素吹込み強化による操業実績への影響¹⁰⁾

酸素原単位 (m^3/t)	装入始～出鋼完 (min)	電力原単位 (kWh/t)	能 率 (t/h)	銑鉄比 (%)	良塊比 (%)
1.9	160	561	27.84	4.8	94.2
5.0	150	551	30.26	5.7	94.2
13.7	129	519	34.68	11.9	93.0
21.0	119	473	37.76	18.7	93.0
27.0	112	463	39.75	26.3	91.3
37.3	105	485	39.4	37.5	89.2

は、極力安価な予熱装置を考案し、予熱時の熱効率を高めるべくふうをする必要がある。しかし、今後のエネルギー情勢を考慮した場合、こうした総合的な熱効率を高める技術への取り組みも重要視されてくると思われる。

3.4 酸素吹込みおよびカッティング

アーク炉では、通電開始後ある時間経過すると電極直下近傍にスポット的に湯溜りが形成されるが、この時点より、その湯溜りに向けて酸素吹込みを行なうと、溶解が著しく促進される。Fe、Si やCなどの酸化による酸化熱が発生するとともに、溶解時間の短縮による放熱損失が減少するため、電力原単位の低減を図ることができる。この低減量は、一般的には、酸素 $1\text{Nm}^3/\text{溶鋼 t}$ あたり $5 \sim 10\text{kWh}/\text{溶鋼 t}$ とされているが、表3の実験例¹⁰⁾でも明らかなように、酸素吹込み量が極端に多くなると歩留の低下をもたらす、さらには電力原単位の悪化をまねく場合もある。

酸素吹込みは、酸化反応による発熱を利用するので、酸素吹込み量と炉内の炭素量の関係は重要な意味をもつ。この方法による電力節減を期待する場合には装入材料中の炭素含有量が多くなるよう配合をくふうしたり、コークスブリーズを装入材料と一緒に先入れする。酸素吹込みによる酸化反応の主体がCの酸化にあるところから、吹込み酸素がすべてCとの酸化反応に使われたと仮定すると、酸素吹込みの電力原単位低減効果は約 $4.2\text{kWh}/\text{Nm}^3(\text{CO}_2:\text{CO}=2:1 \text{ の場合})$ となる。しかも通常の炉操業に酸素吹込みを加味すると、CのほかにFeやSiなどの酸化熱発生もあり時間あたりの投入エネルギーが増大して溶解時間の短縮が図られ、実際にはそれ以上の効果が得られる。たとえば、70t UHP 炉での一例として平均約 $6\text{kWh}/\text{Nm}^3$ の節電効果が得られている。

溶解期における酸素吹込みの利点には、前述の酸化による発熱効果のほかに、炉内未溶解物のカッティング効果、溶け落ち前後における溶鋼攪拌による熱効率向上やCO反応ガス発生によるアークのサブマージド化などがある。特に、カッティングは未溶解スクラップの切断→溶鋼中への早期落下→スクラップへの熱伝達率の大幅向上といった過程をつうじて溶解を著しく促進させる効果を示す。現在ほとんどのアーク炉において酸素吹込みが行なわれているのは、酸素 1Nm^3 (電力換算で 1kWh 弱に相当) でもつて数 kWh の溶解電力節減が果せること

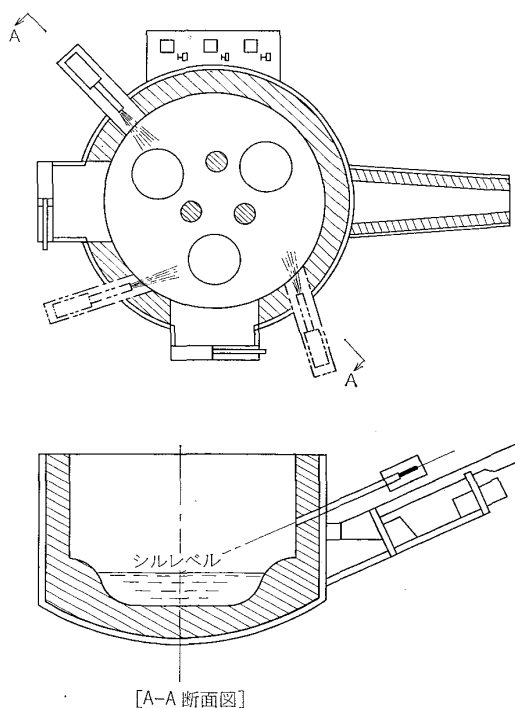
など全般的にその効果が大きいためである。省エネルギーへの要求が高まっていくにつれ、この酸素吹込みは強化の方向に進むであろう。

3.5 バーナ助燃

アーク炉バーナ助燃には、主に石油系燃料が使われている。スクラップ予熱の場合と同じように、アーク電力による加熱の一部を燃焼加熱に置き換え、総合的な意味でのエネルギー節減を図ろうというのが、目的のひとつになっている。しかも、これは炉体にバーナを取付けるだけですみ、スクラップ予熱に比較して投資費用が少ないので、わが国でも相当多く採用され普及している技術である。

助燃法としては、石油と酸素の混合燃焼・石油と空気の混合燃焼・石油と酸素および空気の混合燃焼などに大別されるが、石油と酸素の混合が主流である。この場合助燃用として供給される酸素量は燃料の燃焼に必要な理論酸素量よりかなり多く (約3～5割増)、その過剰酸素は溶鋼中の元素酸化に寄与していると考えられる。

バーナは通常アーク炉側壁よりコールドスポット部に

図9 助燃バーナ取付法の一例¹¹⁾

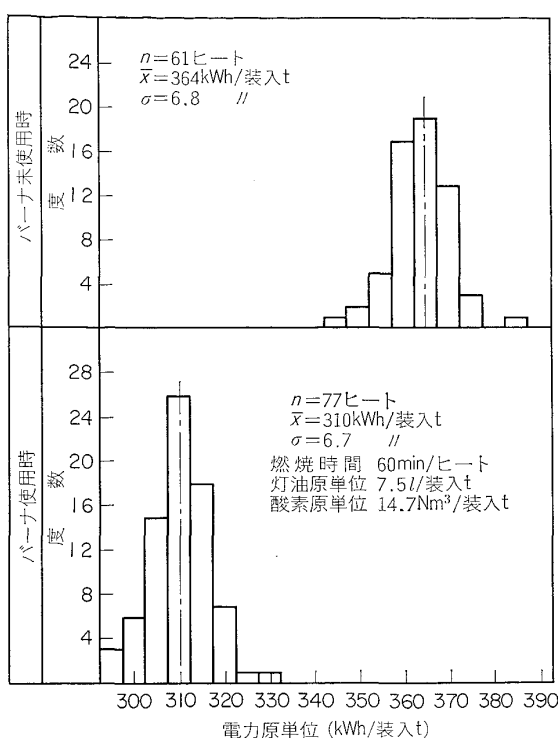


図10 バーナ助燃前後における電力原単位比較¹²⁾

向けて配置されている。全体として速度の遅れがちなコールドスポットの溶解が助熱によつて促進され、全体的な溶解速度の均一化がはかられるためである。また図9のようにバーナノズルを電極サークル付近のシルレベルと炉中心軸との交叉する点に向けて噴射し、それによつて溶解初期における鋼浴の形成を促進させるとともに、材料の落ち込みをスムーズにして、アークエネルギー投入の早期安定化を図る助燃法も提案されている¹¹⁾。

図10は助燃の未実施の場合と実施の場合の電力原単位の比較の一例である¹²⁾。灯油 7.5 l/装入 t 酸素 14.7 Nm³/装入 t で助燃して、54kWh/装入 t の電力原単位低減をはかったということであるが、一般的に用いられる計算法でエネルギー節減量を算定すると

$$\begin{aligned} \text{エネルギー節減量(kcal/装入 t)} &= 54\text{kWh/装入 t} \\ &\times 2450\text{kcal/kWh} - (7.5\text{ l/装入 t} \times 8716\text{kcal/l} \\ &+ 14.7\text{ Nm}^3/\text{装入 t} \times 1700\text{kcal/Nm}^3) \\ &= 41940\text{kcal/装入 t} = 17.1\text{kWh/装入 t} \dots\dots(3) \end{aligned}$$

となり、実質的に 17.1kWh/装入 t 相当のエネルギー節減を図ったことになる。

その他バーナ助燃についての報告はいろいろあるが、必ずしもすべての事業場で実施しているわけではない。前項の酸素吹込みを重点的に行なつて助燃を実施していない事業場もある。助燃量と熱効率の関係や歩留への影響などの総合的な検討を行ない、メリットの出る方法を十分把握の上適用すべき技術である。

3.6 最適電力投入法

通常、アーク炉操業においては、その使用電力量や操

業時間の大半が溶解期に費される。したがつて、溶解期の通電は可能な限り迅速にかつ効率よく溶解できるような方法で行なうことが必要である。そのため、通電初期の炉蓋の損傷やアーク不安定を防ぐための投入電力を抑えた期間を極力短かくして、少しでも早い時期から変圧器容量いっぱい最大電力を投入して溶解時間の短縮をはかるのが一般的である。UHP 炉の登場は、変圧器の大容量化で最大投入電力を倍以上増加させ、溶解時間の大幅短縮とそれに応じた生産性向上を狙つたものであることはいうまでもない。

しかし溶解時間を短縮することが、いつも電力を有効に使用する方向につながっているかという点必ずしもそうではない。確かに、溶解時間の短縮が熱放散時間を短くするのでその分だけ熱効率を高めることになるが、炉内の熱吸収力にも限度があるはずである。最近の省エネルギー推進の方向に沿つて、アーク炉においても能率最重点の操業姿勢から電力原単位低減を狙つた操業法への転換が必要となつてきている。そのためには、通電法の電力原単位におよぼす影響を定量的に把握することが前提となるので、電気的・熱的操業特性の解析が進められるようになってきた。

アーク炉操業時の操業特性を把握するうえで、従来最大の問題になつていたのは、操業中のリアクタンスの変化である。電極を溶鋼で短絡して行なう短絡テストの結果から演算されたものと異なることは、関係者の間で認められており、その特性解析の研究が続けられてきた。最近の報告例に 70 t UHP 炉を使つてこれら操業時の特性解析を行ない、結論として(4)式のようなリアクタンス拡大率 (X/X_s) と対短絡電流比アーク電流 (I/I_s) の近似式を発表したものがある¹³⁾。

$$\frac{X}{X_s} = 2.86 \left(\frac{I}{I_s} \right)^2 - 4.90 \left(\frac{I}{I_s} \right) + 3.09 \dots\dots(4)$$

ここで、 X : 操業時リアクタンス

X_s : 短絡テスト時リアクタンス

I : 操業時アーク電流

I_s : 短絡テスト時アーク電流

まだ一般化されてはいないが、少なくともこの式を使つて、電気的熱的特性の数式化を行なえば、通電パターンと電力原単位との関係をより明瞭化することができる。計測技術の発達とあいまつて、今後こうした研究が進みさらに新しい通電法の開発がなされていくと思われる。

4. 精錬期における省エネルギー技術

精錬期は大きく酸化期と還元期(仕上げ期)に大別できる。酸化期は通常、材料が溶け落ちて分析用試料が採取された時点から酸化スラグが除滓されるまでの期間とされている。以下、酸化期と還元期に分けて精錬期における省エネルギー技術について述べる。

4.1 酸化期における省エネルギー技術

酸化期作業の役割は所定の脱炭を行なうと同時にHなどのガスを除去することと、除滓前に溶鋼を必要な温度にまで昇温させることである。一般的に酸化期にはいると溶鋼面は平滑となり、熱放散が多くなつて熱効率は低下する。したがつてこの時期の省エネルギー対策はいかにして熱効率を高めるかに重点がおかれる。

4.1.1 サブ・マージド・アーク法

この方法はスラグ厚みを増加させ、電極先端をスラグ中に浸漬させた状態でアークを発生させて、アークの輻射放散を防止する方法である。そのためには、スラグ成分であるCaO(生石灰)を増量し、かつスラグ性状をフォーミィな(泡立つた)状態にすると同時に、低電圧で操業してアーク長を短くする方法がとられる。この方法は、操業上炉壁耐火物の溶損防止にも効果があり、アーク炉操業法としてかなり一般化されつつある通電法である。またW. E. SCHWÄBEが報告した¹⁴⁾ところによると、溶鋼温度上昇には力率を下げてもショートアークにするのがよいとされており、表4のようなデータも提示されている。

4.1.2 溶け落ちC量と酸素吹精の最適化

図11は脱炭量(溶け落ちC量とスラグオフ後C量の差)とエネルギーコスト指数の関係である¹⁵⁾。エネルギーコストとは電力および酸素に要した費用であり、脱炭量が0.50%近辺で最低になることを示している。この値は炉容量により変化する可能性はあるが、エネルギー面からみて最適脱炭量があることは明らかである。たとえば溶け落ちCが極端に低い場合、鋼中酸素やスラグ中のFeOが高くてスラグ性状が悪化し、泡立つたスラグが生成できないため、前述のサブ・マージド・アークに

表4 力率と溶鋼温度上昇速度の関係¹⁴⁾

力 率 (%)	アーク長	溶鋼温度上昇速度 (°C/min)
75~80	ロングアーク	8.8
69~72	ミディアムアーク	13.9
65~67	ショートアーク	17.3

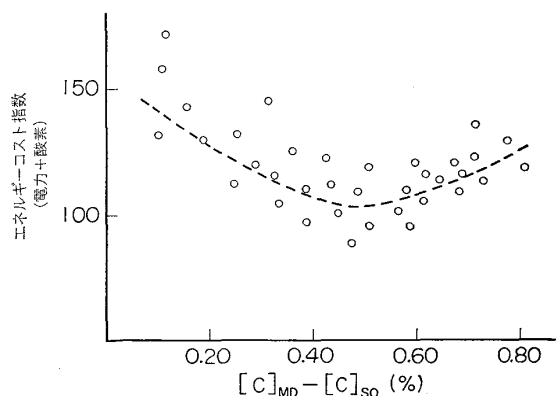


図11 脱炭量とエネルギーコストの関係¹⁵⁾

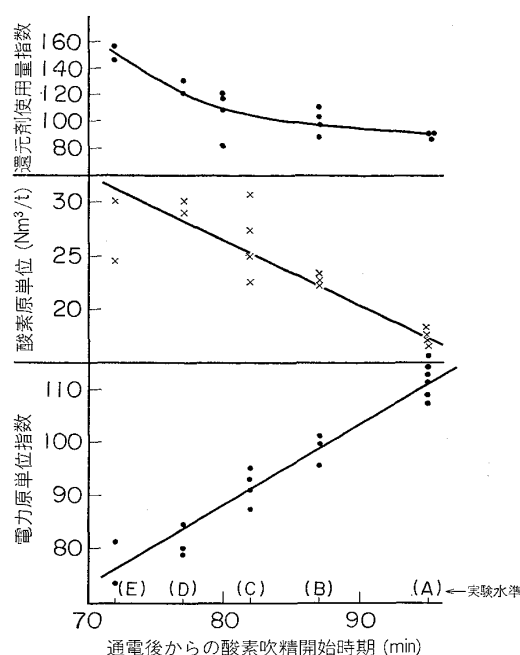


図12 酸素吹精開始時期と操業実績(ステンレス鋼溶製時)¹⁶⁾

ならず熱効率が悪くなる。また必要以上に溶け落ちCが高いと、酸素吹精を大量に実施しなければならずコスト的にマイナスとなる。

次に酸素吹精のスタート時期が電力原単位にどのような影響を与えるか、ひとつの典型的な事例としてステンレス鋼について紹介する。

ステンレス鋼の酸化期はCr共存下で酸素吹精を実施するため、Cr酸化に伴う酸化熱で溶鋼温度が上昇し、酸化期そのものの必要電力量は溶解期のそれに比べきわめて少ない。したがつてステンレス鋼の電力原単位低減にはどの時点から酸素吹精に入るべきかが重要なポイントになる。この事例¹⁶⁾は図12のように酸素吹精開始時期を5水準とつてテストしたものである。AからEになるにつれて酸素吹精開始温度が低くなっていることを意味しており、それにつれて電力原単位の確実に低下することが判る。一方、酸素吹精開始温度が低くなるにつれて、Cr酸化が増加するため酸素の脱炭効率が低下し、所定のC値まで脱炭するに要する酸素使用量は増加していつている。

また当然のことながら酸素使用量の増加につれてCr還元剤使用量も増加していく。このように、ステンレス鋼の電力原単位を低減するためには、低温からの酸素吹精が有効であるが、O₂使用量・還元剤使用量の増大が生ずるので、これらデメリットをも考慮した最適酸素吹精開始温度を見い出す必要がある。

4.1.3 スターラの使用

スターラ(電磁攪拌誘導装置)は、鋼中成分の均一化スラグ・メタル反応の促進を図るため利用されている。

表5 8t アーク炉の炉仕様とスターラ仕様¹⁷⁾

項 目		仕 様			
炉仕様	能力・型式	8t サイドチャージ・エルー式			
	トランス容量	3 000 kVA			
スターラ仕様	炉殻直径	3 778 mm			
	溶製鋼種	ステンレス鋼主体			
メカ電気	定格容量	東京芝浦電気(株) 200 kVA			
	定格電圧	300 V			
	周波数	0.3~0.6~1.5 Hz (基準 0.6)			
	冷却方式	2 空冷式 (测温抵抗付)			
主変圧器	容量	一 次	400kVA	二 次	282kVA
	電 圧	一 次	3 300V	二 次	440V
付 帯 設 備		攪拌方向自動切換装置			

スターラの電磁攪拌作用は均一溶解の促進による熱効率の向上など、溶解期末期における効果が期待される。

そこで、ここでは8t アーク炉において溶解期末期からスターラを稼働させた実施例¹⁷⁾について紹介する。

表5にアーク炉仕様とスターラ仕様を示す。本炉では従来電力を438~450kWh/装入t消費した時点で溶解期から酸化期に移行していたが、313kWh/装入t消費時点からスターラを稼働させ、400~425kWh/装入tで酸化期に移行するようにした。その結果を図13に示す。

この図から判るように、電力原単位は10~15kWh/t減少することができる。また、熱効率の増加に伴い生産能率も向上している。なお、スターラ稼働のための電力使用量は3~5kWh/t程度である。この一例に見るごとく、アーク電力を効率よく熱エネルギーに変換するためには鋼浴上面層の過熱化を避け温度分布を極力均一にしておくことが、有効な手段であることがわかる。

4.2 還元期における省エネルギー技術

還元期における電力使用量は、全体の使用量に対してその占める割合が少ないことや精錬作業の目的などから節減はあまり期待できないと思われてきた。しかし、最近造滓剤の銘柄や粒度変更などのきめ細かな改善による節減努力が払われるようになってきた。

たとえば、図14は15t アーク炉でのSUS 304溶製で造滓剤を粗粒(20~30mm)の生石灰と石灰石から1~3mmの生石灰に切り替えた場合の電力原単位低減例¹⁸⁾である。滓化しやすい造滓剤の使用が、原単位低減に有効なのが端的に示されている。

一方、還元期そのものを短縮する努力も行なわれている。溶け落ち時の含S量が少なくなるように材料配合を変えて、操業パターンを変更する方法などである。この方法の場合、還元期は3~5minに短縮され還元期のみの電力原単位は約40%向上する。また出鋼時の取鍋内におけるスラグと溶鋼間の反応による脱硫機能を強化さ

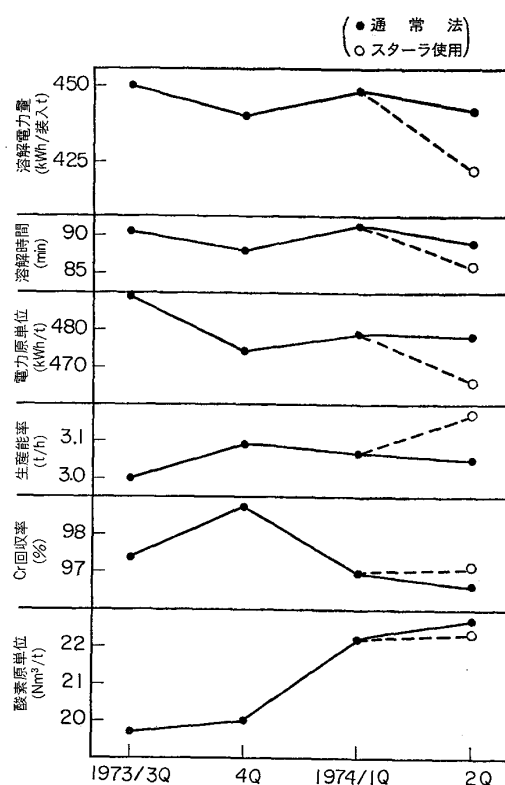


図13 スターラ使用による操業実績変化¹⁷⁾
(SUS 304 溶製時)

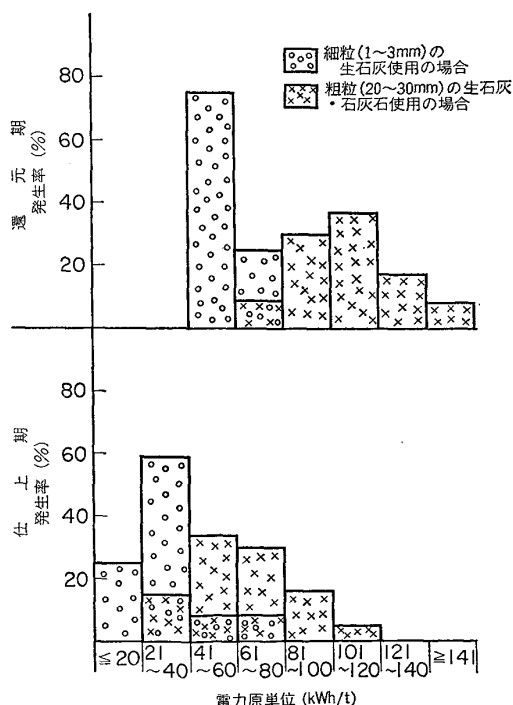


図14 造滓剤粒度変更による還元期・仕上期電力原単位への影響¹⁸⁾

せて、できるだけ還元期作業の短縮をはかるようなことも行なわれている。

5. 設備管理改善による省エネルギー技術

5.1 放熱損失抑制技術

5.1.1 原料・副原料投入時の放熱抑制

アーク炉における原料や副原料の投入は通常炉蓋や炉扉を開放して行なわれる。原料（スクラップ）は大部分炉蓋を旋回して炉頂部からクラムシェルにて投入されるが、ヒートあたり2～3回の分割投入が普通である。一方、副原料は炉扉から投入される場合が多いが、その他にも酸素吹精や出滓などで炉扉は頻繁に開閉される。いずれにしても、高温炉内壁や溶鋼を直接大気にさらすことになり、表6の計算例¹⁹⁾にもあるように、単位時間当りの放熱量は大きい。しかも、こうした放散熱は回収が事実上全く不可能であり、その抑制は省エネルギーを進める上で非常にたいせつなことである。

さて具体的な放熱損失抑制の手段であるが、基本的には投入時における炉蓋や炉扉の開放時間を極力短くすることと、開放面積を最小に押えることに尽きる。現実的な方法として最も好ましいのは、コンベアタイプの炉頂からの連続投入装置を設置することであろうが、スクラップに対しては適用不可能である。実際には、起重機との連携性を強めたり、副原料投入箱などをくふうして、できるだけ迅速な投入を心掛けるといった場合が多い。いずれ、副原料については連続投入装置の使用に切り替わっていくであろうが、原料については、現行の投入方法で精一杯短縮を図っていくということになるであろう。

5.1.2 炉体開口部起因の放熱抑制

アーク炉は通常その炉体側壁に、出滓口や操業口などの開口部を有している。これらはいずれも扉開閉機構を備え、使用時以外は閉止されているが、シールは必ずしも十分ではない。したがって、そこから集塵ブロワーの吸引による炉内への冷風侵入が起こり、排ガス損失の源のひとつとなっている。省エネルギーの立場でいえば操業口は全閉し出滓口のみ操業が好ましいわけであるが、作業性との兼ね合いでそうもいかず、ある程度放置されてきたというのが実態である。

しかし、ある事業場ではAODの設置でアーク炉の精錬作業が不要になったのを機会に、思い切つて操業口を完全閉鎖することを試みた²⁰⁾。その結果表7に示すように約20kWh/tの電力原単位の低減が達成された。

エネルギーコストの上昇や溶製方案の改善とあいまつて、こうした操業口閉鎖などの傾向は今後増加していくであろう。

5.1.3 炉修時の放熱抑制

アーク炉では毎回出鋼後の炉内を点検し、炉床部など溶解時に溶損された箇所の補修を行う。この補修は、その時間が長くなればかかるほど、生産性低下や炉体蓄熱の放散をもたらすことは明らかであり、その時間短縮

表6 炉蓋開放時の損失熱計算例¹⁹⁾
(40 t AF, 4 min/回開放の場合)

区 分	損失熱量
輻射による損失熱	395 094 kcal/回
対流による損失熱	23 208
排ガス放散損失熱	1 704
合 計	420 006 kcal/回

表7 操業口閉鎖による節電効果²⁰⁾
(2炉とも同仕様の50 t AF)

	電力原単位	溶製時間
操業口閉鎖炉	556.1 kWh/t	182.2 min/ヒート
操業口非閉鎖炉	576.1	182.3

表8 取鍋蓋設置による効果²¹⁾

蓋の有・無	脱ガス処理終了時点と casting末期の温度差	casting初期と末期 の温度差
有	-11.3 °C	-4.3 °C
無	-37.5	-15.8

は必須の課題である。特に最近炉容量が大型化していることや超大電力操業に伴う溶損箇所の拡大など、従前の人力作業のみでは追いついていけない状態となっている。

そこで当然作業の機械化ということになるわけであるが、近年吐出量の大きい吹付け補修機が市販されるに及んでこの補修時間の短縮は急速に進んだ。現在は、大半の事業場で何らかの機械化が図られている状況にある。

5.1.4 取鍋からの放熱抑制

特にアーク炉製鋼の場合に限られるわけではないが、出鋼後の取鍋内溶鋼温度の低下を極力防止することは、省エネルギーの面からきわめて重要なことである。通常 casting時の溶鋼には品質面の制約からある一定温度を確保することが必要であり、 casting中の温度降下が少なければその分だけ出鋼温度の低下が可能となる。従来から、出鋼後の取鍋への保温剤には靱殻や市販の保温剤が使用されてきたが、これら保温剤のみでは出鋼直後から casting末期迄の間に60°C程度(所用時間35 minの場合)の温度降下を避けることはできなかつた。この対応策としては取鍋への保温蓋載置などの常識的なアイデアがすぐ想起されるが、実際上は作業性や安全上のマイナス面がやすく実施例は少ない。

表8はその数少ない実施例の効果の一例²¹⁾である。脱ガス処理終了時点から casting末期までの温度降下は蓋の有・無で25°Cの差となっており、出鋼温度を15～20°C低下させることが可能という報告がなされている。アーク炉の場合出鋼温度が10°C下がれば約7kWh/装入tの電力節減というデータもあり、取鍋蓋でもつて10～15 kWh/装入tの原単位低減が見込めることになる。

また、取鍋は通常溶鋼の温度低下や鋼中への水素の侵入防止をはかるため、受鋼前に耐火物表面温度が 600～700°C まで加熱される。铸造・排滓後すぐまた受鋼するという連続使用を行なえば、取鍋に相当の蓄熱があるので加熱は省略できる。ノズル取替や排滓の問題があるので、無制限に連続使用というわけにはいかないが、各事業所とも極力適用の拡大に努めている。特に最近は超大電力操業によつて溶解サイクル短縮の方向にあり、この対策にとつては、有利な情勢にあるといえる。

5.2 変圧器損失と二次導体・電極での電力損失

アーク炉用電力は普通高電圧でアーク炉用変圧器に給電され、溶解操作に必要な低電圧大電流に変換される。変圧器は電圧の変換に伴つて電力損失が生じるが、そのことを変圧器損失という。通常この損失は変圧器容量の 1% 以下であるが、変圧器容量が増大すると損失電力量の絶対値は大きくなるので、変圧器選定時に注意を要する。

変圧器損失には変圧器に電圧をかけておくだけで発生する無負荷損失と電流が流れることによつて発生する負荷損失とがある。既設の変圧器の負荷損失低減は難しいが、無負荷損失についてはアーク炉休止時の給電ストップの徹底によつて低減は可能である。

次に二次導体損失についてであるが、図 15 のように変圧器と電極の間に二次側母線（銅板製または水冷管）や可とうケーブル（裸ケーブルまたは水冷ケーブル）および母線管が導体として存在する。これらの導体に電流が流れるといずれも抵抗熱が発生して発熱するが、周囲の空気や冷却水に吸収され持ち去られてしまう。抵抗損失の減少のためには断面の大きい導体の採用や導体の並列本数を増やすことが最も効果的であり、導体長さについても機構の許すかぎり短くする努力をすべきである。

さらに通電部における導体とともに考慮すべきものとして、各々の導体の接続部における接触抵抗損失の発生がある。2 個の導体が接続される箇所には導体中央部と異なつた高抵抗の部分が生じている。したがつて導体接続箇所が多くなれば、それだけ電力損失箇所が多くな

る。この接触抵抗を減らすにはできる限り一体化した導体を使用したりまた溶接することで一体化を図ることである。なお、機構的にさけられない接続部にはその接触面を平滑にして、銀やハンダでメッキする方法がある。

一方、電極との接続部である電極把持器については、高温の電極と直接接する関係上前述のような対策をとり難いので、接触面を常に清浄に保つよう心掛け、無用の電力損失を少なくするよう努めるべきであろう。接続部における有害な接触抵抗は、各導体の接触圧力によつても大幅に変化する。通常この締付圧力が大きくなるほど接触抵抗は低くなるが、機構上の制約もあるため適正值が存在する。特に既設炉の場合、使用後の熱膨脹や振動などで圧力が低下している傾向にあるので、定期的な点検が望まれる。

電極の発熱は導体部全体の内で最も大きい、そのすべてが損失熱となるわけではなく、炉内部における発生熱は入熱としての働きをする。一般に電極における熱損失は電極が太いほどまたその炉外部長さが短いほど少なくなるが、これらは設計時点に熱損失・作業性・機構など総合的なバランスをはかつて決められており、設置後に電極熱損失軽減のために改良されるというようなことはない。ただ電極自体の絶対抵抗値は電極メーカーにおける原料の選定法や製造方法によつて差がでてくるのでその低いものを選択・購入することは電極熱損失の低減につながる。

5.3 集塵機の省エネルギー技術

5.3.1 風量制御

アーク炉集塵装置で必要とされる風量は図 16 のよう

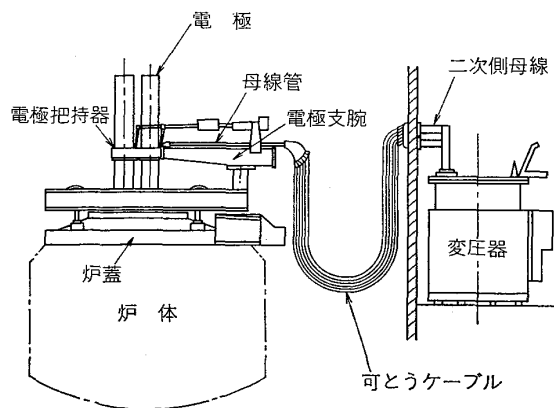


図 15 アーク炉変圧器・電極間の構造

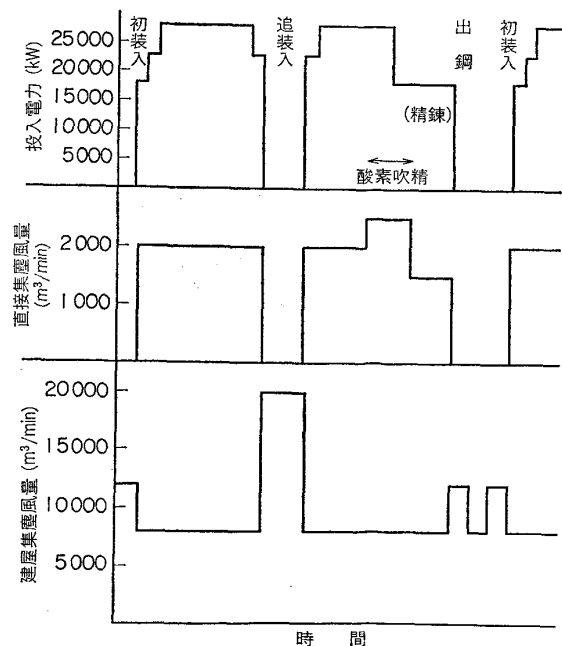


図 16 溶製サイクルと所要集塵風量の関係 (60 t AF の場合)

にアーク炉の操業期によつて著しく変動する。直接集塵装置でも建屋集塵装置でも多くの風量を必要としない時期（直接集塵装置では止電期、建屋集塵機では通電期）には主として送風機入口または出口にダンパーを設けて風量を調節し節電を行なつてきた。

近年、送風機などのように2乗で減負荷トルクを有する設備では駆動機を可変速することで、大きなエネルギー節減の可能性が注目され始めた。そして電気技術の著しい発展に支えられて送風機モーターのon-off制御巻線形モーターの二次抵抗変更による回転数制御、カゴ形モーターの電磁接手や流体接手による回転数制御、モーターの極数変更による回転数制御、セルビウス方式やインバーター駆動による回転数制御などモーターの回転数制御法が提唱され採用されつつある。これら各風量制御方法における風量と電氣的入力との関係を図17に示す。

図からみられるように、風量が比較的多い領域で制御する場合はダンパー制御と回転数制御に大きな差はないが、風量が低下すると回転数制御の省エネルギー効果の著しくなることが判る。実際の集塵装置の試算では無制御のときの必要電力に対して、ダンパー制御で10~20%巻線形モーターの二次抵抗制御やカゴ形モーターの電磁接手によつて回転数制御をする場合15~35%、セルビウス方式・インバーター駆動の場合20~55%節電できる。

省エネルギー対策を施す場合、集塵装置の運転パターンやモーターの入力特性さらには設備費を考慮しなければならないが、既設備や遊休設備を利用する場合はその現況をも併せて加味する必要がある。実施された興味ある例として、遊休モーターを巻線替えによつて6P/12

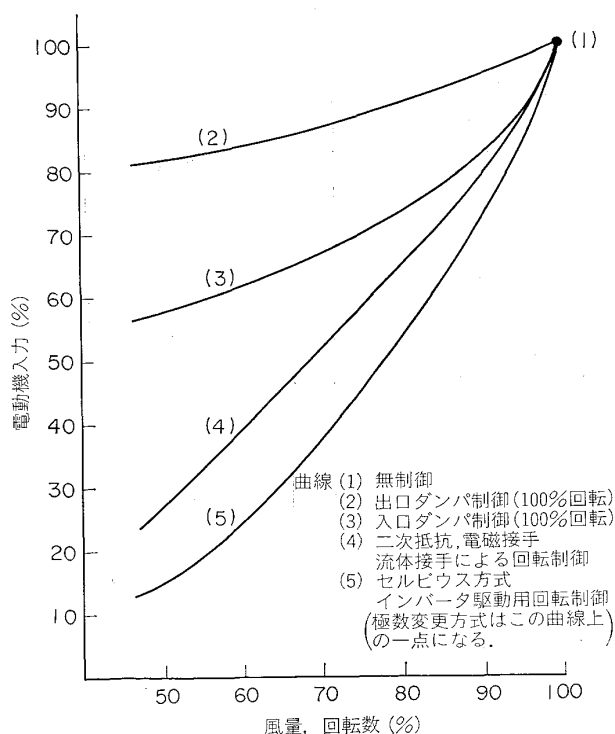


図17 送風機、電動機入力電力特性

Pの極数変更モーターにし、従前ダンパー制御によつて低風量時650kW必要とした電力を150kWに低減したことが報告されている²²⁾。

その他操短時や排煙が少なく、直接集塵のみで十分な時は建屋集塵を運転休止することによつて、3~7kWh/tの電力原単位の向上がなされたとの報告もある²³⁾。

5.3.2 集塵方式

集塵方式には大別して、バグフィルター方式と電気集塵方式の2種類がある。バグフィルター方式の場合、フィルターの圧力損失分だけ送風機圧力を高くする必要があり、その分送風機入力電力を多く必要とする。いま10000m³/min 80°Cの含塵ガスを集塵する場合（設置条件を同一にして）バグフィルター方式で送風機は1760kW、電気集塵方式では1310kWと試算される。これらを風量が少なくてすむときには、モーターの回転数制御（セルビウス、インバーター制御）で4500m³/minまで風量低下させた場合バグフィルター方式で211kW、電気集塵方式で175kWとなる。いまこれらを10000m³/min 25%の割合で1年間運転したときの電力量の差は17×10⁶kWhとなり、バグフィルター式より電気式のほうが使用電力量は少ない。しかし現実には、電気式の場合含塵量変動の大きい排ガスに対して安定した集塵効率を得ることが難しいので、バグフィルター方式の方が多く採用されている。

5.4 排熱回収

アーク炉は前記の表1でみられるように総入熱分に対し排ガスから約25%、スラグから数%、冷却水から数%都合約40%が排熱される。

これら排熱の有効利用のため、いろいろの方案が提言されている。すなわち排ガスの所有する熱でスクラップを予熱をする、排ガス熱を空調設備に利用する、スラグ熱によつて蒸気を発生させたタービンを作動させるなどである。しかし現実にはこの排熱の回収は排出される温度がアーク炉操業時期によつて著しく変動し、利用のための制御が困難であるなどの理由で実施されている例は少ない。

図18は有名なBrown Boveri CompanyのBBC/Brusaシステムである²⁴⁾。連続装入装置とアーク炉の間が回転ドラムで接続されており、その中でアーク炉排ガスと装入材との熱交換が行なわれる。このドラムには軸方向に天然ガスのバーナが設置され、予熱能力を補っている。Villodossolaで設置された36tユニットの場合

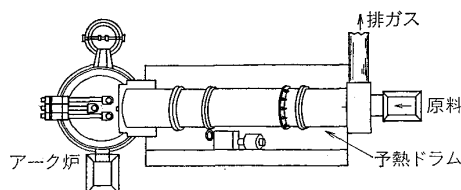


図18 BBC/Brusa システム²⁴⁾

表9 BBC/Brusa システムの熱収支²⁴⁾

区 分	項 目	熱 量 (10 ³ kcal/t)
予熱ドラム入熱	アーク炉からの排ガス顕熱	105.1
	天然ガスの燃焼熱	279.5
	合 計	384.6
予熱ドラム熱効率	スクラップ予熱顕熱	172.0
	熱 効 率	45%
システム全体の原単位	電 力 原 単 位	284.3
	天 然 ガ ス 原 単 位	279.5
	電 極 原 単 位	19.1
	合 計	582.9

耐火物で内張されたドラムの内径は 1800 mm, 外径は 2200 mm, 長さは 13.36m, ドラム回転数は 1rpm である。このドラム内での熱バランスは表9のように報告されており²⁴⁾, 天然ガスの予熱に果たす役割の大きいことがわかる。この場合ドラム入口でのアーク炉排ガス温度は 1050°C, 出口では天然ガスによる燃焼ガスとの混合で 650°C, そして装入材はこのドラム内で 1000°C まで予熱されると報告されている²⁴⁾。この装置の場合, 問題は装入材形状の制限を受けることである。細片化したスクラップや還元ペレットのような回転ドラム内の進行がスムーズなものしか装入できない。一般的に普及するところまで進まない最大の理由であろう。

このほかにSKF複式アーク炉などいろいろな排熱の利用結果が報告されているが²⁴⁾いずれも決定的に普及できる段階にまではいたっていない。含塵量の点などあまりにも悪条件が重なっているためであろうが, アーク炉は工業炉の中で排熱回収の最も遅れている分野であり, そのための技術開発が期待されている。

6. 結 言

以上, アーク炉の省エネルギーのために今までに開発され適用されてきた技術の紹介と若干の考察を行なってきた。これらの中には, 炉の設計時点で折り込むべき性質のものや日常の操業管理の中できめ細かく実施していくべき性質のものも含まれているが, 技術的には生産性向上を目的とした酸素吹込みやバーナ助燃が最も多く採用され中でも酸素吹込みは省エネルギー面でも有効な技術であるということが出来る。最近になつて, ホットリターン屑の装入や集塵機の効率的運転への関心が高まってきたが今はまだ適用範囲拡大への努力が続けられている段階である。スクラップ予熱や排熱利用については, 少なくともわが国ではまだほとんど実用化が図られておらず, 今後の技術ということになるであろう。

排熱回収技術, とくに中低温排熱回収技術は今や産業

界全般にわたる省エネルギー技術の目玉テーマになつていいる。アーク炉の場合でも, 将来的にエネルギー原単位をどの程度の水準まで引き下げることができるかはアーク炉自体の排熱をどのくらい回収できるかにかかっているといえよう。

文 献

- 1) 高梨省吾: 鉄鋼製造法第1分冊(日本鉄鋼協会編)(1972), p. 630 [丸善]
- 2) 60周年記念号「鉄鋼技術の進歩」編集委員会: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 530
- 3) 日本鑄鍛鋼: 提供 (未発表資料)
- 4) 大同特殊鋼: 第5回電気炉部会第2分科会資料(電Ⅱ-5-21), (1974)
- 5) 日本鋼管: 第3回電気炉部会第2分科会資料(電Ⅱ-3-22), (1973)
- 6) 中部鋼板: 第3回電気炉部会第1分科会資料(電Ⅰ-3-15), (1974)
- 7) 鉄鋼便覧(日本鉄鋼協会編), (1962), p. 1770
- 8) 斎藤竹春・吉岡 勉: 金属, 43 (1973) 7, p. 53~55
- 9) E. M. RUDZKI, R. J. REINBOLD, and B. K. PEASE: J. Metals, 25 (1973) 2, p. 38~39
- 10) 中山製鋼所: 第3回電気炉部会第1分科会資料(電Ⅰ-3-13), (1974)
- 11) 特公昭 50-16727
- 12) 中山鋼業: 第3回電気炉部会第1分科会資料(電Ⅰ-3-12), (1974)
- 13) 大同特殊鋼: 第7回アーク炉技術委員会資料(No. 88), (1977)
- 14) W. E. SCHWABE: 第8回国際電熱会議 (UIE) 資料 (No. 8), (1976)
- 15) 日本製鋼所: 第10回電気炉部会第2分科会資料(電Ⅱ-10-9), (1977)
- 16) 日本鋼管: 第49回特殊鋼部会資料(特49-22-共9), (1974)
- 17) 住友金属工業: 第5回電気炉部会第2分科会資料(電Ⅱ-5-18), (1974)
- 18) 日本ステンレス: 第7回電気炉部会第2分科会資料(電Ⅱ-7-2), (1975)
- 19) 日新製鋼: 第9回電気炉部会第2分科会資料(電Ⅱ-9-16), (1976)
- 20) 日本金属工業: 第10回電気炉部会第2分科会資料(電Ⅱ-10-8), (1977)
- 21) 川崎製鉄: 第60回熱経済技術部会資料(熱 60-4-11), (1977)
- 22) 川崎製鉄: 第11回電気炉部会第2分科会資料(電Ⅱ-11-6), (1977)
- 23) 住友金属工業: 第6回電気炉部会第2分科会資料(電Ⅱ-6-2), (1975)
- 24) A. T. SHERIDAN: Ironmaking and Steelmaking, 2 (1975) 4, p. 267~268