論 説

UDC 621.365.2 : 669.187.2

製鋼用アーク炉大電力操業のための 工学的ならび技術的前提条件

市 川 真 人*

 What should be done before carrying out High Power Operation
of Steelmaking Electric Arc Furnaces

Mahito Ichikawa

【概 要】

Schwabe らが製鋼用アーク炉の大電力操業から超大電力操業へと発展をたどる過程で公表した数値資料にふれ、他方、その努力の歴史的経過をも一般的に回想しつつ、いまだ残されている問題点があることを指摘し、さらに、わが国情下での問題点をも明らかにして、これらを合わせ列挙、論説し、その解決手段にもふれ、特に大電力操業を意図するアーク炉メーカーないしユーザが、今後対処すべき電気工学上のポイントを筆者の考えにしたがって整理し、その努力を要望喚起したものである。

最後にわが国において大電力操業を成果あらしめるためには、炉メーカーないしユーザ、周辺機器材メーカー、電力会社三者の協力が必須の前提条件であると結んでいる。

1. ま え が き

1965年、W. E. Schwabe らによって提唱された製鋼用アーク炉の超大電力操業はその後も着実な歩みを進めていることが、誌上ないし見学者の口を通じて報ぜられている^{1)~3)}。そしてわが国においても、積極的にこの大電力操業の方向へ追従する動きが現われている。

残念なことであるが後塵を拝する者として、彼らが事ここにいたつた経過を再度ここに思い浮かべてみることは、われわれの今後の心構えを作る上において参考に値するだけでなく、そこに、まだなされなければならない問題が残されていることを浮彫りさせてくれる。また、特にわが国情に照らし解決されねばならない問題も指摘されねばなるまい。

大電力操業へ、そして更に超大電力への道をたどるためには、周到な計画と準備、そして果敢な断行の必要性が痛感される。

以下、主として電気工学の立場から、これらの問題点を整理して読者のご参考に供したく思う。

2. 超大電力操業への経過

よく知られているように、Schwabe らは古くから各種の実炉ならびにモデル装置について一連の実験を重ねてきた。特に1962年代には計算機IBM 7090を使って、多くの実炉実験資料に統計処理を施し、アーク炉の生産性(出鋼t/経過時間)が炉への操業投入電力(MW)に比例するという実験式を作りあげ、アーク炉生産性の飛躍的向上への期待に心をおどらしたかに伺われる。超大電力にいたる予備段階としての大

昭和42年10月25日受付

* 名古屋大学工学部電気工学科教授、工博
日本電熱工学委員会運営委員、同ホットスポット
小委主査

電力大電流操業に関する基礎実験のために、共著者、Robinson が勤務している Northwestern Steel & Wire Co., の150 t 炉2基が充当されており、1基の炉用変圧器容量を45 MVA に格上げ改修している。

他方、高速度カラーフィルムによるアークの撮影にも成功し、その解析結果から炉内大電力アークの動態に関する一見識を誘導し、大電流アーク操業の理論上の卓越性、すなわち、低電気効率をカバーして余りある全熱効率の向上、炉壁ライニング・ホットスポット溶損への緩和効果などに対する実験的裏づけを与えることも試みた。

以上の結果を確信に満ちた口調で述べた大電流操業に関する論文は、一連のアークカラーフィルムのごく一部（と彼は称していた）と共に1963年10月、西独（Wiesbaden）における第5回国際電熱工学会議の席上で発表された。これら大電力操業に関する基礎実験は、事実は1963年当初既に終了しており、引きつづき超大電力への準備期間を経て、同年暮、すなわち、彼が国際会議の席上発表の直後には、既に超大電力第1号を操業開始している（その際、前記炉用変圧器の他の一つを80 MVA に格上げ充当）。

その後の経過については文献^{11)~13)}に述べられているとおりである。その特徴的な点を要約列挙すると、

- (1) 旧公称150 t 炉1基で、最高82.5〔USt/時〕（日産1980〔USt/時〕、普通鋼）の生産性を記録。
- (2) 電力原単位=480~490〔kWh/USt〕。
- (3) 超大電力超大電流アークの形態上の特異性、その溶解用熱源としての優秀性（炉壁ライニング寿命など、ほとんど変化せず）、(4) アーク電流の安定性（フリッカ緩和効果）。
- (5) 新しい24吋電極材の開発、水および水蒸気の炉内噴射。
- (6) 実験例における膨大な炉変1次回路進相電気設備容量。

などである。

他方、ヨーロッパでは、オランダのケーブル製造会社が線材鋼用の35 t アーク炉2基（旧設備）に各8 MVA 炉変を採用していたが、同じく35 t の第3号炉ではこれを15 MVA とし、旧炉1基当り年産4万t から新炉では6~6.5万t と著しい生産性向上に成功したことを1963年に報じている⁹⁾。

そして第4号炉（35 t）また15 MVA 炉変設置を計画している。この場合、電力密度増大にともなう激しい煙塵害防止のために、新炉では吸塵装置を新設しているが、その他特に本質的な変化などについては何も述べていない。

Schwabe らの表現³⁾にしたがえば、このオランダの例は通常電力（Regular Power）を越えれば大電力

（High Power）に相当するが、炉容量がそれほど大きくない場合の、少なくとも超大電力（Ultra High Power）にはいたらない大電力の範囲では、大容量炉における超大電力操業とはかなり本質的に異なるものがあり、電力系統との相互干渉問題の点でも、また一般的に考えてみても、現技術の外挿の延長で事が済むように見受けられる。相対値が大きいということ、絶対値が大きいということでは、工学的にも技術的にも、大きな相異があることを心にとめる必要があろう。

3. 製鋼用大形アーク炉における基礎的な問題点

3.1 炉回路の3相電氣的不平衡

炉容量が小さく30 t 程度以下の場合には、正弦波ならびに3相平衡回路を仮定した理論と計算のもとに炉電力などを推定し、炉体および周辺機器の設計を行い格別の配慮なく炉操業を行ってもおおむね支障なく順調に事が運ばれてきたように見受けられる。炉が70 t 級になるにおよんで、ライニングのホットスポットにおける異常局部溶損の問題が発生し、関係者はいや応なしに3相不平衡の事実を認識させられるにいたったように見受けられる。

われわれは、いま大容量炉の超大電力・超大電流アーク操業という大目標を前にして当然行われるべき平衡化対策とは別に、アーク炉が元来3相不平衡装置であるという事実を再認識し、その上に立って半頭一歩を進める必要を痛感する。

あらかじめ検討を必要とすることが予想されるポイントとして、

- (1) 各相操業電流と各相アーク電力との関係→各相操業適正電流に関する設計上の推定。
- (2) 電力系におよぼす電圧および電流不平衡の影響の程度の予測、中性点電位上昇程度のチェック、同一母線につながる3相大形回転機逆相電力分のチェック。
- (3) 電圧降下対策。
- (4) 炉用変圧器設計における不平衡電流ならび電力に対する格別の配慮の要否。

などが考えられる。

上記の多くは炉が負荷される系統ごとに影響の程度が異なり、したがって、一般的な理論解析のほか、わが国における多くの電力系の場合、ケース・バイ・ケースに数値的検討を行って予測確認する必要がある。

具体的に示唆すれば、理論的検討のためには先人の業績⁶⁾などの活用、その発展的展開と具体的適用化のための考察；数値的検討のためには、3相型交流計算盤などによる数値解析的検討、さらにディジタル計算

機により予測数値解を各場合に依じて直ちに得られるよう、アプリケーションプログラムの開発とその確立などが考えられる。上記につき、既に関係者の間で一部予備的検討が開始されていることは、正鵠を射ているものというべく、力強く思われる。

ここで更に上記(1)に関連し一言触れてみたい。

従来製鋼用アーク炉は目覚ましい大容量化の道をたどってきた。しかるに、「大形炉になるにともなう、炉が設置され操業が開始されてから、かなり長期間にわたる試行操業期を経たのち、はじめて安定した操業に入り得ることがある」ということをしばしば聞かされた。そして、この時期は現場作業者の長い経過に基づく判断と努力とで、新大型炉の操業指針が確立されるという調子であつたらしい。しかも、各相の適正操業電流値に対する設計上の見通しないう指針というようなものが設計側から与えられるというようなことは無かつたように伺われる。これら操業初期における困難さは、不平衡回路に基づく不平衡電圧降下、その反作用に基づく電気諸量の不平衡動作に大きな一因が存在することが十分予想される。更に並列運転される他の不平衡アーク炉の影響もからみ合せて、アーク炉の不平衡動作はいよいよ複雑なものとなってくることが予見されるのである。これらは炉の電気容量が大きくなるにつれ顕著に現われ、安定した炉操業を会得する事をいよいよ困難にするものであるから、十分な検討を設計の段階において行い、あらかじめ一つの見通しと見識とを持つ程度に少なくともなっていなければならないと思われる。

3.2 炉2次回路の電流指示計

大形炉の2次回路には、各相に電流計と切換え式の線間電圧あるいは対地相電圧の指示計が備えられているのが一般である。電圧計については、対地相電圧と対溶湯相電圧とは一般的に異なることが考えられ、対地電圧測定にいかほど意味があるか、観測者にはかえって誤った印象を与えることが恐れられる。この点は別として、特に溶解末期にいたるまでの激しい電流計指針のゆれからアーク電流値を知ることは事実上できない。炉操業状態に密接に関係する2次電気諸量のうち、最も正確な測定を期待できるものは現在の所電流だけである。作業員が操業状態を知る目安として参考にすべき電流値の測定が、このような状態に置かれたままでは誠に心細いといわざるを得ないであろう。

幸にして日本電熱工学委員会のホットスポット小委員会が、ホットスポットによる異常溶損対策の一つとして、電子式の記録式積分電流計を開発し、70t炉に

ついて現在データが積まれつつあることは大電力操業への一つの準備作業としても資する所があるものと思う。

今後更に簡便で堅ろうな記録式積分電流計が開発されれば、大電力操業の大型炉にはこれらが設置されて、作業者に操業上の目安を与え得るようになるであろう。

3.3 アーク電流波形

元来非線形であるアークの特性に基づいてアーク電流波形はひずむ。

モデル炉ならび実炉について、古くから沢山のアーク電流ならび近似アーク電圧の観測波形オシログラフが発表されている。このアーク電流波形は炉操業期の相異、すなわち、ボーリング期か、溶解期か精錬期かなどにもなつて著しく変化すること、更に炉の大きさ、すなわち、大電流アークか、比較的小さい電流アークかなどもによつても波形状態の異なることが知られている。

したがって大形炉の通常電力から大電力、更に超大電力へと進める過程においては、単なる類推で糊塗することなくそのつもりになって実測をくり返し、正確な認識把握に努める必要がある。そこから得られた炉アーク電流に関する一般的データは、炉用変圧器設計者に設計基礎資料を提供するにとどまらず、前記積分電流計の具備すべき周波数特性を決定する見地からも有益な資料となるであろう。

アーク電流波形のオシログラフを見ると、明らかに顕著な直流分ならび第5調波分を認め得る。直流分ならび第3調波分については、元来零相回路の開放しているアーク炉2次回路では、各相アークが平衡状態にある限り、これらは存在し得ないはずであるが、各相アークが常時3相平衡状態にあることは当然期待し得ず、したがって第3調波分ならび直流分存在についても詳しく調べてみる必要があろう。この機会に具体的な操業状態ごとの代表電流波形について調波分析を行つて、認識を新たにすることも無駄なことではあるまい。

また Schwabe は超大電力操業の場合、ボーリング期および溶解初期において、アーク電圧(電極降下を含む近似アーク電圧)波形はほぼ方形波状をなすと述べている³⁾が、これは小型の3相モデル炉における詳細な観測実験波形の報告⁷⁾⁸⁾と奇しくも一致している。他方、Schwabe はまた、その他の操業期間においては新開発電極材の性質との関連において、アーク電圧波形が通常電力操業の場合に比し、正弦波形に近いものになっている、とも述べている。

3. 4 ライニングホットスポット対策

Schwabe は大電流操業の段階でもまた超大電流操業でも、いわゆる激動相(wild phase)に起因するライニングの異常溶損をほとんど問題にしていな。事実彼が挙げているライニング寿命は常に 150 ヒート程度以上に達しており、その理由づけとして低電圧大電流アークの短小性(超大電力の場合には、合わせて蒸気噴射の効果をも)を高らかに歌っている。

しかし、わが国における大形炉通常電力操業の実例では、本問題に関する深刻な経過もあり、いたずらに樂觀することは許されないように思われる。本問題解決のため、前記ホットスポット小委員会が炉壁ライニングの溶損状態の実例を行うべく、新しい計測法にとり組み地道な基礎研究に従事しているが、いまだ見通しを得るにいたっていない事は残念なことである。本問題に関連し溶損しつつある炉壁表面温度の連続測定のため、Schwabe は黒鉛棒による新しい測温法を開発実用化しており⁴⁾、その意欲的な研究態度には学ぶべきものがあることを身にしみて感じさせられる。

3. 4 フリッカ

Schwabe は超大電力操業(80MVA 炉変)の場合、これを大電力操業(45MVA 炉変)の場合に比べて電流動揺記録回数(それぞれ基準電流値を超過した電流状態の発生回数)を実測している^{1),2)}。その結果によれば、予想に反し、前者は後者の0.6~0.2倍程度におさまっていることが示されている。

上記測定実験は、特に高速リスポンスでもないごくありふれた測定器によったものではあるけれども、より大きな電力アーク操業であるほど、動揺頻度が少ないことを示すものとして、フリッカの見地からも、特筆に値する記録資料である。しかも、この記録値がそれぞれの場合、1 ヒートごとの比較測定値でなく(もしそうであるとすれば、超大電力の場合はより短い時間期間の発生回数を数えていることになる)操業 1 時間当りの比較測定である事が注目になる。すなわち、ある意味では、この値をそのままフリッカ対応量としてよさそうに受けとれる。

しかしここで注意を要することは、通常電力、大電力、超大電力、いずれの場合も電力系統の方が同一であるならば、超大電力の場合、動揺頻度は低下しても各動揺ごとの苛烈度絶対値は当然大きくなる。したがって一概にフリッカが減少すると思込む事はきわめて危険であり、系統容量、ないしその増大変更計画に応じて

ケース・バイ・ケースに事前の検討を必要とするであろう。

フリッカ問題に関しては、国内外を通じ基礎研究、測定法ならび対策実施例にわたる膨大な量の報告が積みまわつた。そのなかでも、日本電熱工委、フリッカ小委主査神宮司武雄氏(電力中研)を中心とする活躍の成果は世界的讃辭にたてえ得るものであり、近く報告書の形でとりまとめられ公表公刊が予定されている。これの有力な参考資料を関係者は活用すべきであろう。

フリッカは産業の発展ならびこれに見合うべき電力需要の増大にともなう一つの必要と見なされる。今後新しい巧妙な防止対策法が工夫発表されるかも知れないが、本問題が公害問題として大きく表面化するにさきだって、アーク炉ユーザも同メーカも、また電力会社も、この対策手段必須の附随投資として積極的にとりあげるべき段階に達しているのではなからうか?

3. 5 電圧降下対策

超大電力操業が予期した大きな生産性を確保するためには、予期の超大電力が炉に投入され得るよう、炉変 1 次側電圧が強固に維持され得ることを前提とする。

事実、文献¹⁾は 3 号炉が並列大電力操業を行うことによって、超大電力操業 4 号炉の生産性がその単独操業時に比し著しく低下することにふれている。そのため上記設備(上記 2 炉の他ミルが並列負荷されている)には、第 2 章中、(6)項で既に指摘したように、計 150MVA に達する進相容量を炉変 1 次側に設備している。明らかにこれは力率改善設備ではなく電圧維持設備である。実験設備としてならば話は別であるが、この様に膨大な進相設備を必要とする系統ないし、主変圧器構成の場合には、超大電力操業も初期投資上の経済の見地から画餅に墮す可能性があるといわざるを得まい。この点ならび 2 次最高タップ電圧の設計上の選択においても、予備的数値検討を行うために、既に 3・1 節で示唆した計算手法が有効にいかされる得るはずである。

4. アーク炉熱系の解析

3 相不平衡回路であるアーク炉 2 次系について、各相等電流操業を仮定した計算のもとでは、よく知られているように第 3 相が激動相となり、第 2 相たる中央相のアーク電力は中間の大きさとなる事が示される。しかるに公表されているほとんどすべての実例が、中央相対向炉壁面に最も激しいホットスポットの生じることを報じている。実際の操業では必ずしも等電流操業となっているわけではないから、計算の前提は既に崩れ

去っているわけであるが、少なくとも電気工学の立場から各相アーク電力が各相操業電流状態に応じてどのようになり得るか、3.1節に述べた計算手法によって明らかになし得るはずであり、ホットスポット対策の見地からも重要な研究課題としてとりあげられねばならない(本問題を系統的にとり扱った文献を寡聞にして知らない)。

炉壁などホットスポットの問題を論ずるためには、上記電気工学上の解析と並行して、元来中心対称構造となっていないアーク炉熱系の熱的解析を行う必要がある。しかるに、アーク炉の様に複雑な境界条件を持つ3次元構造の熱系解析を行うことは、現在知られているデジタル計算機あるいはアナログ計算機に訴えても事実上不可能である。そのためには一般熱系解析専用的一种のハイブリッド計算機に訴えざるを得ない事が予想され、その開発研究に各方面の理解が期待される次第である。この方面の計算がある程度でも可能となれば、大電力ないし超大電力操業時の炉壁ホットスポット対策に有力な資料を提供する事が可能になるものと期待される。

5. む す び

大電力大容量のアーク炉群がスクラップ処理および同装入設備から出鋼設備にいたるまで一つの大きなシステムを構成しようとしている今日、自動制御化の問題も当然ここにとりあげられてしかるべきであろう。わが国においても既に一部でその緒につき始めていることは喜ばしいことであるが、紙面も既に尽き叙述を割愛することをご寛容いただきたい。

最後に一言して結びの言葉とする。

大電力ないし超大電力操業アーク炉の開発を強力に押し進めその成果を期するためには、筆者が超大電力操業を初めて紹介した当時²⁾既に指摘したように、炉

メーカーないしユーザ、周辺機器メーカーならび電力会社三者間の相互信頼と協力が前提必要条件として確立されなければならない。そしてこれは幸にして各三者の利益にそれぞれ合致するものであるから、当然、成立可能であると信ぜられる。なお本文は筆者のかなり独断的な思考をあからさまに述べたものであり、将来あやまる所あることをおそれているが、浅学非才の業としてご寛容を得る事ができれば幸である。

〔文 献〕

- 1) C.G. Robinson & W.E. Schwabe : J. Metals, 17(1965) 1, 75
- 2) 市川 : 電気炉, 2 (1965) 6, 2 (1) の和文紹介
- 3) W.E. Schwabe & W.E. Robinson : J. Metals, 19 (1967) 4, 67
- 4) W.E. Schwabe : Principles of high-production electric steel furnace operation, 5th UIE Congress Paper No. 123 ; [曾々木訳, 電気炉, 1 (1964) 3] ; 市川 : ライニング摩損問題 (電気炉, 2(1965) 3 参照]
- 5) B. Ulrich : Wirtschaftlichkeit mittelgrosser Lichtbogenöfen in der Stahlindustrie mit hoher Transformatorleistung in nichtintegrierten Stahlwerken, 5th UIE Congress Paper No.111 (Oct. 1963)
- 6) 本田 : 電学誌, 86 (1966) 929, 227
- 7) J. Schiffarth : Ein Beitrag zur Bekämpfung der scharfen Phase bei Lichtbogenöfen unter Berücksichtigung der nicht sinusförmigen Lichtbogen-Spannung, 5th UIE Congress Paper No.136 (Oct. 1963)
- 8) 市川 : 電気炉, 2 (1965) 9