新 VAR・ESR の制御技術について

笹山新一*, 谷山強臣*, 野口 宏*, 竹鶴隆昭*, 佐藤明彦*

The Control System of The New VAR and ESR Furnaces

Shin-ichi Sasayama, Tsuyomi Taniyama, Hiroshi Noguchi,
Takaaki Taketsuru and Akihiko Satoh

Synopsis

A new vacuum arc remelting furnace and electro-slag remelting furnace have been installed at Shibukawa Plant of Daido Steel in 1991.

The control systems of those furnaces are discussed in this report.

The furnaces are equipped with automatic melting systems which possess distinct sub-systems each other.

For both the systems, the sub-systems to keep the melt rate constant and to keep the distance between the tip of the electrode and the molten pool surface constant are very important.

For these reasons, "Drip short control system" to keep the arc gap constant is provided for the VAR and "Resistance swing control system" to keep the immersion depth of the electrode tip into the molten pool constant is provided for the ESR.

And the Melt rate control system by which melting rate is controlled to the preset point by the sensitive measurement of melting rate via the load cell systems are also provided.

The conception of the control is remarkably improved compared to the existing systems.

Both the existing control systems, Arc Gap Control for VARs and Immersion Depth Control for ESRs, are based on the change of voltage. However the change of voltage by the change of distance between the electrode tip and molten pool is too small to use it for the control in both cases.

Drip short control is based on the phenomena that occurrence of the drip short follows to the Poisson Distribution, and Resistance Swing Control system is based on the phenomena that the resistance fluctuates very widely when the immersion depth of the electrode tip in the slag is small.

These systems give optimum heat transfer from arc heat or joule heated slag to the molten bath and then segregation free ingots of good surface can be produced.

1. 緒 言

大同特殊鋼(株)渋川工場(以下当工場という)は、航空機・発電機用材料に代表される付加価値の高い製品の製造を行っているが、近年材料に対する品質要求がますます高まっており、そのニーズに対応するため、溶解～鍛造～加工と続くプロセスに最新鋭の装置を導入し、能力増強とともに品質改善及び安定品質の確保を図ってきた。

その一環として、再溶解炉として Leybold 社(ドイツ)より最新鋭の 7t VAR と ESR を導入し、世界最大級の生産能力を確保するとともに、コンピュータを駆使した高度な制御技術による品質のプロセス保証が可能となった。以下に、これら 2 基の新鋭炉について、制御技術を主体にその設備概要を報告する。

2. 7t VAR 設備概要

2.1 VAR 制御におけるこれまでの問題点

VAR 溶製の最大の目的は、積層凝固によって凝固過程における偏析の発生を軽減することにある。このためには、凝固界面への溶湯供給が十分になされることや局部凝固時間(Local Solidification Time:LST)を小さく一定にすることが必要であるが¹⁾、これらの条件を安定して満たすためには、均一かつ一定速度で凝固を制御することが必須である。VAR は溶解と凝固が同時に行われるプロセスであるから、均一かつ一定速度の凝固を得るためには、入熱源である真空アークエネルギーを、溶解速度が一定になるようにコントロールしなければならず、特にアークギャップコントロールとメルトトレイトコントロール(溶解速度制御)が重要となる²⁾。

電極先端と鋼塊最上部の溶湯プール間の距離(アークギャップ)の変動は、溶解に使用されるアークエネルギーが銅炉ツボ壁に輻射分散されるなどの熱バランスの変化を誘発し、その結果メタルプールの形状を変化させ、マクロ偏析や鋼塊の表面肌不良などの品質トラブルを発生させる³⁾。ゆえにこのアークギャップは、VAR における品質管理上重要な因子である。従来はアークギャップをコントロールする方法として電圧制御方式が用いられてきたが、Fig. 1 に示すとおりアークギャップの変化に対する電圧の変化はほとんど認め

Fig. 1. Relationship between arc gap and arc voltage in A 286.

られないことから、電圧の変化で電極位置を一定に制御することは困難であり、高まるユーザーニーズに対応するには、電圧制御方式に代わる精度の高い制御方法が必要である¹⁾。また、VAR プロセスは真空誘導炉(VIM)で溶製された長尺の消耗電極を使用するが、電極内部に存在するキャビティーや溶解中に発生する CO ガスなどによるアークゾーンの圧力変化の影響を受けるため、その変化に対応し、精度良く適切な制御が行われることが品質要求に対し必要不可欠である。

2.2 7t VAR 設備の特徴

当工場に導入された 7t VAR の設備外観を Photo. 1 及び Fig. 2 にまた既存炉との比較を Table 1 に示す。本炉の設計思想として、高度な制御性の達成に重点が置かれており、数種類のコンピュータによる自動制御に加え、この信頼性を高めるための炉体構造を有している。

以下に、従来の VAR 設備に対し充実化された項目を示す。

- (A) 冷却水量コントロール
- (B) 完全同軸(Full coaxial)
- (C) 電極 X-Y 軸調芯
- (D) モニターでの湯面監視
- (E) He ガス冷却システム
- (F) ロードセルシステム(メルトトレイトコントロールシステム)
- (G) アークギャップコントロールシステム
- (H) グロー放電検知システム
- (I) オペレーターインターフェイスパーソナルコンピュータ
- (J) プログラマブルロジックコントローラー

これらの中で、特に重要なのが前述のとおり、アークギャップコントロールシステムとメルトトレイトコントロールシステムであり、以下にその概要

- 1.Ram drive system
- 2.Vacuum chamber
- 3.Tranceformer
- 4.Water cooled cable
- 5.Electrode ram
- 6.Water cooled Cu mold
- 7.Duct of vacuum pumping system
- 8.Pivoting column
- 9.Load cell system
- 10.Drive column
- 11.Vent valve

Fig. 2. Schematic view of 7t VAR furnace.

Table 1. Comparison between the new VAR furnaces and the existing furnace.

	Item	The new furnace	The existing furnace
Furnace	Furnace	1 mast 2 station (Gantry pivoting)	1 mast 2 station
	Melt current feeding system	Full coaxial	Full coaxial
		Saturable reactor	Saturable reactor
	Max. operating voltage	35V	45V
	Melting current	20kA	20kA
	Vacuum pumping system	RP : 250m ³ /h×2 MB : 2 000m ³ /h×1 7 000m ³ /h×1	RP : 450m ³ /h×1 MB : 150m ³ /h×1 DP : 29 000m ³ /h×1
	Max. mold size	φ660	φ660
Control system	Meltrate control	Load cell system	Current program system
	Electrode feeding system	Drip shot control Arc voltage system Basic speed control	Arc voltage system
	Automatical melt control	Full automatic	Only during melt phase

Photo. 1. Figure of 7t VAR furnace.

を述べる。

2.3 アークギャップコントロールシステム

前述のとおり、アークギャップを電圧変化で一定に保持することは困難であり、新しい制御システムの開発が望まれていたが、F. J. Zannerにより Fig. 3 に示すドリップショート（溶鋼液滴が電極先端とメタルプール間で短絡する現象）の発生頻度がアークギャップとの間にポアソン分布を示すことを見出され、かつその発生頻度に影響を及ぼす因子としてアークギャップの他に電流値とCO分圧があり、それらが(1)式によって近似されることが示された。これによりドリップショート数を測定し、ドリップショート数が一定となるように電極を下降させれば、アークギャップを一定に保持することが可能となり、この知見に基づいた制御技術が開発された。

$$f_{ds} = (g_e)^{-K} \cdot (P_{co})^{-L} \cdot (I_m)^{-M} \dots\dots\dots(1)$$

f_{ds} : ドリップショート数 g_e : アークギャップ

P_{co} : CO分圧

I_m : 電流値

K, L, M : 定数

Fig. 3. Figure and mechanism of drip short.

A. Shorted column on the electrical waveform.

B. The column approximately at 2ms after arc reignition.

The column is separated from the ingot and being supported by cathode spots (as shown by arrows).

C. The column approximately at 14ms after arc reignition.

At this point the column is still supported by cathode spots.

Note the thickening at the bottom and pinching at the top of the column.

D. At 18ms after arc reignition the column is completely pinched off and starts to settle into the ingot and cathode spots move away from the separated column.

本炉においてもドリップショートを使用した Fig. 4 に示すアークギャップコントロールシステムの導入により、アークギャップ一定の安定した操業が得られている。本炉においてアークギャップとドリップショートとの関係を調査した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 1 に示したアークギャップの変化に対するアーク電圧の変化と比較して、ドリップショート数の変化が著しく大きいのが明確である。

2.4 メルトレイトコントロールシステム (溶解速度制御)

VAR における溶解速度は電流値に比例することが知られているが、電極に起因した外乱条件によって一定に保持することが困難な場合がある。インコネル718のような Ni 系の超合金では電極内部に大きなクラックが存在することによって、電極先端から内部にかけて温度分布が不均一となり、同一エネルギーを投入しても溶解速度の変動を発生させる原因となる。参考までに、鑄造電極を使用した場合と、電極内部のキャビティー対策として鑄造後鍛伸し内部のキャビティーを圧着した電極を使用した場合の操業データを Fig. 6 に示す⁴⁾。鍛伸電極を使用した溶解においては、溶解速度が一定であるのに対し、内部に欠陥が点在している鑄造電極を使用した溶解においては、電極が一定速度で送られているにもかかわらず溶解速度が変動している。このように電極の内部欠陥を始めとして外乱因子を取り除き溶解速度を一定に保持するために、本炉においては精度の高いロードセルにより電極重量を測定し、その重量変化によ

り溶解速度を演算し、設定した溶解速度になるようにパワー（電力）を増減させるシステムを備えているこのコントロールシステムの概要を Fig. 7 に示す。

3. 7t ESR 設備

3.1 ESR 制御におけるこれまでの問題点

ESR も VAR と同様に積層凝固を利用し、偏析のない清浄な鋼塊を溶製することが最大の目的であるが、ESR は CaO 、 Al_2O_3 などの酸化物と CaF_2 などのフッ化物のスラグを介して溶製を行うプロセスであり、このスラグの存在により溶解・凝固

Fig. 5. Relationship between arc gap and drip short frequency.

Fig. 4. Arc gap control system.

Fig. 6. Influence of defect in electrode.

① To determine the melt rate, the computer reaches every second a new weight datun into Random-Access-Memory

② A new value of the melt rate is calculated taking the weight data measured within the time window of the moving average filter into account to achieve sufficient accuracy

③ The computer calculated by set /actual value comparison, the melting power reference signal by using a digital algorithm with a PI-characteristic

Fig. 7. Meltrate control system.

の運動は VAR と比較してやや複雑である。ESR におけるスラグの役割は重要で、(A)電気的な抵抗体であり溶解・精錬の熱エネルギー発生源、(B)大気からの汚染防止のための溶解金属被覆、(C)スラグ精錬による溶解金属の精錬及び清浄化などとされており、積層凝固に加えて均質、清浄な鋼塊の溶製が可能とされている⁵⁾。ESR も VAR と同様に凝固界面への溶湯の補給が十分になされること、かつ LST を小さくすることが重要である。

VAR 溶解における入熱源が真空アーク熱によるものである一方、ESR 溶解におけるそれはスラグのジュール熱によるものであるから、スラグ温度の確保と安定化は重要な品質因子である。しかし、スラグ浴中における電極先端位置の変動が、スラグ浴の温度及びその分布を変化させるため⁶⁾、VAR と同様に溶解速度の安定化を図るためには、スラグ浴内の熱バランスを安定化させることが必要である。すなわち、電極先端をスラグ浴内の一定の位置に保持することが必要となる。溶解速度の変動は、メタルプールの形状変化を伴って偏析・介在物品位に悪影響を与えるが^{7),8)}、電極位置の変動についても、特に電極位置がスラグ浴中に深く浸漬した場合、電極先端形状が鋭角化し、溶鋼液滴がメタルプール中心方向に集中する結果メタルプールは中心部でさらに深くなり⁹⁾、スラグ浴の熱分布が変化する。そのため温度変化の影響でスラグスキンの厚さが変化し、ESR 鋼塊の表面品質を劣化させる原因になっている⁴⁾。

このような鋼塊内質及び外観不良の発生を防止するためには溶解速度安定化と同様に電極位置を一定に保持することが必要であり、その電極位置制御の方法とし従来は電圧制御方式が用いられてきたが、溶解の進行に伴うスラグ組成の変化による電気伝導度の変化、スラグボリューム（厚さ）の変化、電極とインゴット長さ変化による抵抗の変化など種々の電圧変動要因が発生するため、VAR での電圧によるアークギャップコントロール同様、電圧制御では精度良く電極位置を一定に保持することは困難である。

3.2 7t ESR 設備の特徴

VAR と同様に ESR もコンピュータライズされた制御機能とその信頼性を高めるための炉体構造を有している。その設備諸元を Photo. 2, Fig. 8, Table 2 に示す。

Photo. 2. Figure of 7t ESR furnace.

以下に従来設備に対して充実化された項目を示す。

- (A) 冷却水量コントロール
- (B) 電極位置制御
- (C) ロードセルシステム（メルトレイトコントロールシステム）
- (D) 完全同軸（Full coaxial）
- (E) オペレーターインターフェイスパーソナルコンピュータ
- (F) プログラマブルロジックコントローラー

この内で、VAR と同様に電極位置制御とメルトレイトコントロールシステムが特に重要であるため、以下にその概要について述べる。

3.3 電極位置制御

電極位置（スラグ中への電極浸漬深さ）と見掛けの抵抗値には一定の関係があり、Fig. 9 に示すとおり電極先端位置がスラグ表面に近づくに伴い急激に抵抗値が増大する^{10),11)}。これは電流の伝わる面積の変化によるものであるが、この浸漬深さの変化は溶解の進行に伴い、また電極の送り速度の相対差により常に生じている。すなわち Fig. 10

- 1 Ram drive system
- 2 Electrode ram
- 3 X-Y adjustment
- 4 Load cell system
- 5 Sliding contact
- 6 4 bus tubes
- 7 Pivoting drive
- 8 Electrode
- 9 Mold assembly
- 10 Coaxial bus tube
- 11 Base plate
- 12 Multi contacts

Fig. 8. Schematic view of 7t ESR furnace with stationary mold.

Table 2. The comparison between new and existing ESR furnaces.

	Item	New ESR	Existing ESR
Furnace	Melt station	Stational type	Withdrawal type
	Furnace head	1 mast 2 station (Gantry pivoting)	2 mast 2 station (Mast pivoting)
	High current feeding system	Full coaxial	Full coaxial
		Saturable reactor	Saturable reactor
	Transformer rating	1 650kVA	2 200kVA
	Open circuit voltage	80V	110V
	Rated output current	23kA	20kA
	Max. mold size	$\phi 700\text{mm}$	$\phi 700\text{mm}$
Control system	Meltrate control	Load cell system	Voltage and current program system
	Electrode immersion depth control	Resistance swing control	Voltage control
	Melt power	Power control	Voltage, current control individually
	Automatic melt control	Full automatic	Only during melt phase

Fig. 9. Relationship between the depth of electrode immersion and the resistance of slag.

Fig. 10. Relationship between electrode position and change of resistance.

に示すとおり、電極先端がスラグ界面上にある場合、抵抗の振幅は大きく、逆にスラグ中に深く浸漬した場合は振幅が認められない。この現象を利用して、適度な抵抗の振幅を設定することにより、電極先端の位置をガス/スラグ界面で精度良くコントロールするシステムがスイングコントロールである。Fig. 11に本炉のスイングコントロールによる電極位置制御システムの概要を示す。このシステムでは抵抗の振幅を測定・演算し、電極昇降

用DCモーターにより電極の送り速度へフィードバックし、電極位置をスラグ界面に保持した溶解が可能となっている。

3.4 メルトレイトコントロール

溶解速度の変動は溶湯プールの形状を変化させ、LSTに影響を与え、さらには表面欠陥をもたらすことはVARと同様であり、ESRにおいても溶解速度を一定に保持することが必要である。ESRにおける溶解速度の変動要因として、前述の

Fig. 11. Concept of electrode position control system.

Fig. 12. Influence of pipe in electrode.

スラグ組成・量など電圧変動因子の他、鑄造電極のキャビティーも電極－スラグ間の熱バランスを崩す要因となっており、Fig. 12に示すとおり、電

極内部1次パイプが存在した場合、溶解速度は大きく変動する。これらの変動要因を軽減し、安定した操作を行うために、本炉においては Fig. 13

Fig. 13. Automatic meltrate control system (AMC).

Drip short control

Arc gap control

Photo. 3. Surface of VAR ingot.

に示すメルトレイトコントロールシステムが装備されており、精度の良いロードセルシステムにより直接電極重量の変化を測定・演算し、溶解速度を一定とするようにパワーを増減させ、電極位置制御と補完しつつ、均質な鋼塊の積層凝固を可能としている。

4. 品質結果

VARにおいて、アークギャップ及び溶解速度を各々ドリップショートコントロール及びメルトレイトコントロールシステムにより一定に保持することにより **Photo. 3** に示すとおり、電圧制御

方式で溶製した鋼塊と比較して表面欠陥のない極めて良好な鋼塊の溶製が可能となり、高 Nb 含有合金であるインコネル718においても、一般的に $\phi 500$ の鋼塊が限界とされているが、**Photo. 4** に示すとおり $\phi 660$ の鋼塊まで溶製試作し内質を調査した結果、従来散発していたフレックル (freckle) 偏析などの内部欠陥は認められず良好な鋼塊が得られている¹²⁾。

ESRにおいても、既存炉にて極低速溶解を実施する際に散発していたリップル状欠陥のような外観不良は、**Photo. 5** に示すように、精度の高い電極位置制御の達成により解消され、良好な鋼塊肌

Photo. 4. Macrostructure of INCO 718 (Mold dia : $\phi 660$).

Photo. 5. Surface of ESR ingot.

Photo. 6. Macrostructure of INCO 718 (Mold dia: $\phi 700$).

が得られている。Photo. 6にインコネル718を、ESR $\phi 700$ モールドにて溶製した鋼塊の縦断面でのマクロ組織写真を示す。VAR同様フレッケルなどの偏析及び内部欠陥は認められず、良好な結果を得ることができている¹²⁾。

5. 結 言

VAR・ESRの溶解において、共に電極位置及び溶解速度を一定に保持することが必要であるが、VAR・ESR共に電極位置を従来の電圧制御方式にて一定に保持することは困難であった。しかし、VARにおけるドリップショートコントロール、ESRにおけるスイングコントロールの導入により、電極位置を精度良く保持することが可能となり、偏析が無くかつ表面欠陥のない健全な鋼塊の溶製が可能となった。

VAR・ESR共に、その優れた品質改善効果から、航空機、発電機関連分野をはじめ、高品質、高信頼性を要求される材料には不可決の溶解法であり、材料開発の主体になってゆくものと思われる。今回導入した新VAR及びESRは、優れた制御性と解析能力の点で既存炉より優位であることから、造り込み品質の向上が期待できるが今後ますます高くなると推察される品質ニーズへの対応

と、市場開発による拡販を図るべく、積極的に活用していく所存である。

(文 献)

- 1) F. J. Zanner, et al.: Relationship Between 520mm Diameter Inconel 718 Alloy Ingot Pool Profiles and Vacuum Arc Remelting Operational Parameter, 9th I.C.V.M. (1988)
- 2) A. Ballantine, et al.: Proc. 5th Int. Vac. Met. Conf., Munich (1976), 181
- 3) A. Mitchel: White Spots Defect in VAR Superalloy Ingot (1985), Paper presented to the Forgemasters Conf. Sheffield. (1988)
- 4) 大同特殊鋼 社内資料
- 5) 笹山ら：第143,144回 西山記念講座(日本鉄鋼協会), (1992), 221
- 6) 後藤ら：特殊精錬部会報告 2-4-1-1 (1979)
- 7) A. Mitchel Lecture: 大同特殊鋼 (1989)
- 8) A. Mitchel Lecture: 大同特殊鋼 (1990)
- 9) 飯島ら：特殊精錬部会報告 4-2-8 (1979)
- 10) 山西ら：特殊精錬部会報告 5-3-7-1 (1979)
- 11) Leybold 社 技術資料
- 12) 大同特殊鋼 社内資料