

技術解説


 Technical Review

AC アーク炉用次世代操業支援システム E-adjust®

奥村太佑*, 中嶋規勝*, 大脇 智*, 堀 秀幸*

Next-Generation Operation Assist System for AC Electric Arc Furnace E-adjust®

Taisuke OKUMURA, Norikatsu NAKASHIMA, Satoshi OWAKI
and Hideyuki HORI

Synopsis

An automatic system using various process computer systems has spread widely in current arc furnace operation. Thereby, automation and labor saving in arc furnace operation are being pushed forward.

On the other hand, that skill tradition is being delayed by increase in retirees at compulsory retirement age, the lack of young workers, and unevenness due to the operation method of each operation has become problem in the country.

The meltdown judgment system E-adjust® is one of the solution to these problems.

In this paper we introduce the adjustment method of meltdown judgment system and the results of adjusting the meltdown judgment system, as we adjusted the meltdown judgment system according to the operation situation of the introduction of this system.

In addition, because we needed a long time for the adjustment of the meltdown judgment system, we developed a simulation tool for shortening adjustment time.

1. はじめに

現在のアーク炉操業ではさまざまなプロセスコンピュータシステムを利用した自動制御が広く普及しており、大同特殊鋼(株) (以下、当社という) もアーク炉最適電力制御装置“DAIDO・ARMS®” (Automatic Rapid Melting System 以下、ARMS® という) を開発し、自社内のみならず国内外のアーク炉ユーザへ提供している。

しかしながら、国内では少子化による若年層の担い手不足および熟練者の定年退職による技能伝承や、操業班ごとの異なった操業方法による操業のバラつきが課題となっている。

そのため、操業技術レベルの維持および平準化のためにアーク炉の自動制御システムに対して、更なる省力化やスキルフリー化のニーズが高まってきており、さまざまな研究開発が進められている。

当社では、このようなニーズに対応するため、炉内スクラップの溶け落ち時期を自動で判定するシステム“E-adjust®” (Electric arc furnace-automatic dynamic judgment system of meltdown timing) を提供している。

本稿では溶け落ち判定システムの概要を説明すると共に、スクラップの溶け落ち時期の判定だけでなく、操業平準化のための実操業での調整例、さらに、溶け落ち判定システムの設定値調整時間短縮のためのシミュレーションツールについて紹介する。

2017年4月11日 受付

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

2. 溶け落ち判定システムの開発背景

現在一般的なアーク炉自動制御システムはアーク炉の電圧、電流値などを設定した通電パターンをあらかじめ設定しておき、パターンに沿った電力調整を行っている。Fig. 1にアーク炉の通電パターン例を示す。アーク炉操作では複数回(例では3回)の原料装入が考慮され、おのおのの作業時期に効率的に電力が投入できるように電圧、電流が設定されている。

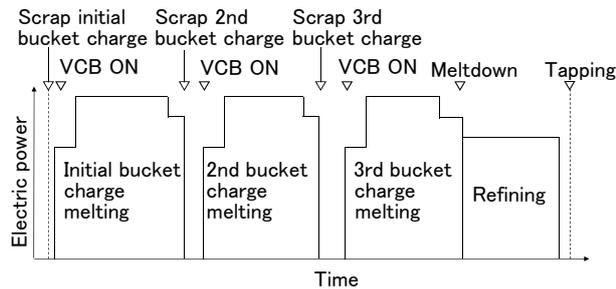


Fig. 1. Example of power input program.

しかしながら、装入する原料スクラップの性状および溶解状況は常に変化するため、あらかじめ設定した通電パターンでは効率的に溶解できない作業状態が発生することがある。

特に、通電パターンを構築する重要なファクターであるスクラップの追加装入の時期や、溶解期から昇温期に移行する溶け落ち時期は、原料スクラップの性状に大きく依存するため、現在はアーク炉オペレータの経験則に基づき判断されている。

Fig. 2にアーク炉内におけるスクラップ装入状況を示す。

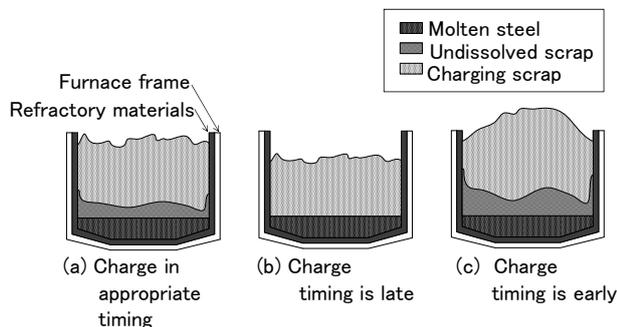


Fig. 2. The scrap charge situation.

スクラップの追加装入は、通常アーク炉内のスクラップすべてが溶解する前に実施され、適切なタイミングで追加装入することにより、アーク炉の耐火物の露出が少なくなる。その結果、放射による耐火物の損耗を抑制することができる。(Fig. 2(a))

一方で、スクラップの装入タイミングが遅すぎた場合は、炉内のスクラップ溶解が進行したことによって露出する炉内耐火物の損耗や、溶鋼面の露出による放散熱を増加させ、更にアークがスクラップに囲まれなくなるために、アークからの放射熱をスクラップに伝熱できなくなる。(Fig. 2(b))

スクラップの装入タイミングが早すぎた場合は、追加装入した原料スクラップが炉内に収まらず炉蓋を閉められない状況となるため、炉からはみ出したスクラップを、クレーンなどを利用して無理に押し込むいわゆる“山押し”作業が必要となる。(Fig. 2(c))

山押し作業は秒刻みで管理されるアーク炉の生産性を著しく阻害するのみでなく、無理にスクラップを炉内に押し込む危険作業であり、なおかつ耐火物および炉殻などの設備を傷める危険性も無視できない。

一方、溶解期から昇温期へ移行する溶け落ち時期では、通常、溶解期の通電パターンから、昇温期に適した低電圧、大電流の通電パターンへ変更して溶鋼を昇温加熱するほうが着熱効率が良い。従って、溶け落ち時期の判断が遅い場合には溶鋼の昇温加熱に余分な時間が必要となり、早い場合には溶け落ちしていないスクラップを溶解するのに余分な時間が必要となる。

以上のように、スクラップの溶解状態の見極めは、アーク炉の操作に大きな影響を与えることとなるが、従来の自動制御システムでは技術的に定量的な判定が困難であった。

このような背景から、スクラップの溶解状態を自動的に判定し、オペレータに通知する制御システムを開発した。

3. 溶け落ち判定システムの装置構成

溶け落ち判定システムはアーク炉から発生する高調波電流および炉内発生音の二つの要素からスクラップの溶解状態を判断する。

まず、アーク炉から発生する高調波については、スクラップの溶解が進行するのに従って減少することは今までも知られていた。そのため、スクラップ溶解進行に伴う高調波の変化を分析した結果、関連性が確認された。

また、オペレータがスクラップの溶解状態を推定する方法の一つとして炉内発生音があることは広く知られている。炉内発生音は溶解初期ではさまざまな形状の原料スクラップにアークが間欠的に放電するため、発生音は断続的な爆発音に似ており、さまざまな周波

数帯域の音が含まれるが、溶解が進行するに従いアークが連続的に放電されるため、炉内発生音も連続的になる。

炉内発生音が連続的になるため、特定の周波数帯域の音が大きくなるのではと仮定し、計測音を高速フーリエ変換（FFT）を用い、周波数分解すると、スクラップ溶解の進行に従い電源周波数の偶数倍帯域が大きくなることが確認された。

以上により、アーク炉から発生する高調波および炉内発生音からスクラップの溶落状態を定量的に判断するシステムの開発に至った。

3. 1 システム構成

Fig. 3 に溶け落ち判定システムの構成を示す。本システムは高調波の計測、炉内発生音の計測および計測した高調波と炉内発生音を解析し、解析結果からスクラップの溶解状態を判定する機能・装置から構成されている。

以下にそれぞれの計測方法について紹介する。

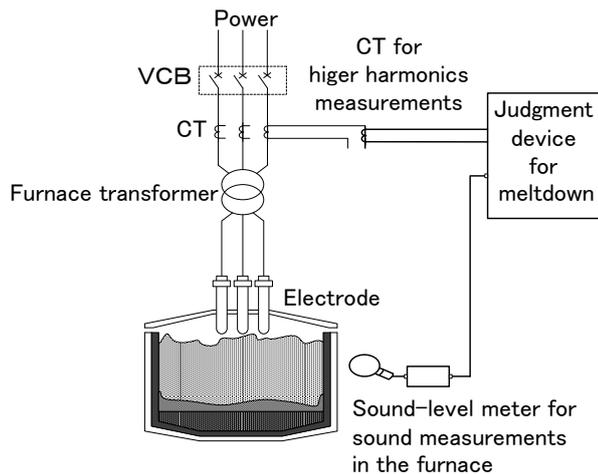


Fig. 3. System constitution.

3. 2 高調波の計測方法

高調波は炉用変圧器 1 次側に設置されている計器用変流器（CT）にて計測する。

計器用 CT にて計測した電流値を溶け落ち判定システム本体にて演算処理し、高調波成分を得る。

3. 3 炉内発生音の計測方法

炉内発生音は騒音計をアーク炉の近傍に設置して計測する。

騒音計にて計測した炉内発生音は溶け落ち判定システム本体にて周波数解析を行う。

なお、騒音計はアーク炉周辺に設置することを考慮してケースに収納し、防塵対策や耐熱対策を行った。

3. 4 溶け落ち判定のアルゴリズム

前述の方法にて計測した高調波と炉内発生音から、溶け落ち判定のアルゴリズムに従い、スクラップの溶解状態の判定を行う。

まず、高調波による溶け落ち判定アルゴリズムを説明する。Fig. 4 の高調波を用いた溶け落ち判定例に示されるように、溶解の進行に合わせて高調波発生量が減少する傾向が認められる。そのため、高調波の時系列値が閾値を下回った場合に溶け落ち判定を出力する。

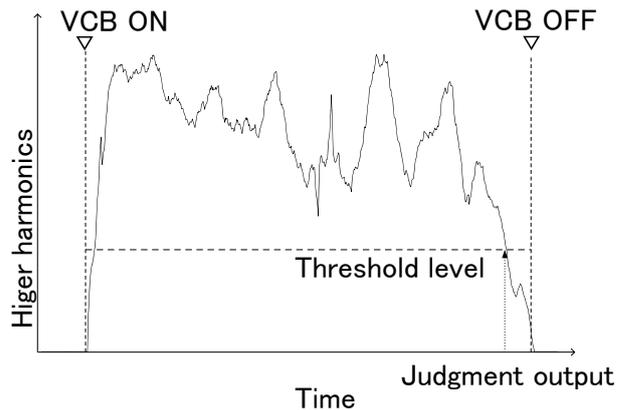


Fig. 4. Judgment example of higher harmonics.

次に炉内発生音の溶け落ち判定アルゴリズムについて説明する。炉内発生音は溶解末期において電源周波数の偶数倍の周波数帯で特徴のある変化を示す。そのため、電源周波数の偶数倍の周波数帯域に判定基準となる特定の閾値を設けることにより炉内発生音での溶け落ち判定を行うことができる。Fig. 5 に炉内発生音を用いた溶け落ち判定例を示す。特定の周波数帯域を計測し、周波数帯域（Fig. 5 中の①）が閾値を上回り、かつ、その他の周波数帯域（Fig. 5 中の②、③）が閾値を下回った場合に溶け落ち判定を出力する。

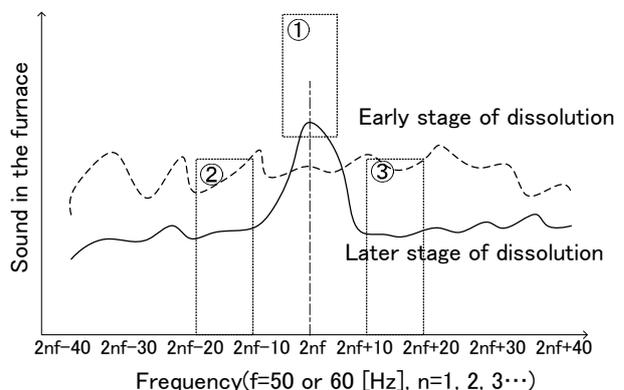


Fig. 5. Judgment example of sound in the furnace.

以上のように、高調波と炉内発生音の二つの判定条件を並行して検討することで、これまで熟練オペレータが判定していた精度に近付けるロジックを採用している。

さらに、溶解初期および中期での湯溜まりが形成される炉内状況で、誤った判定が出力されることを防止するために、あらかじめ設定した使用予定電力量と実績電力量を比較検討することで、より一層の判定精度向上を図っている。

また、スクラップの溶け落ち時期の判定ロジックには追加装入するスクラップの嵩、すなわちスクラップの見掛けの体積を判定する要素の一つとしている。

事前に次の装入原料スクラップの嵩情報が分かっている場合、もしくは、オペレータが目視でスクラップバケットに配合された次スクラップの嵩を大/中/小の3段階にて判別することにより、設定値にスクラップの嵩要素を付与することができる。

3. 5 ARMS[®]との連動

ARMS[®]と溶け落ち判定システムを連動させることで、ARMS[®]で設定した使用予定電力量を溶け落ち判定システムに反映させることができる。また、ARMS[®]にスクラップの嵩情報を他のシステムより取り込むことで、その嵩情報を溶け落ち判定システムに反映させることができる。

4. 判定実績

4. 1 調整方針

今回、C社にて、理想的な溶け落ちタイミングを判断するのではなく、各操業班の操業平準化ベース作成のために、鋼種および操業班を限定して設定値調整を行った。鋼種は操業回数が多いものを選定し、操業班は、溶け残りが少なく操業が安定している班の溶け落ち判断タイミングを目標に設定値を調整した。

実操業におけるスクラップの装入回数は、初装、追装1、追装2の三回装入であり、溶け落ち判定のタイミングは三回あるが、追装2の溶け落ち判断は予定電力量で管理していたため、調整対象から除外し、初装および追装1の設定値を調整した。

4. 2 調整方法

これまで溶け落ち判定システムはスクラップが溶け落ちた時期を判定するように設定値を調整していた。しかし、今回の操業では、次装入のスクラップが炉内に収まる分だけのスクラップを溶かす操業形態であった。そのため、各溶解期のスクラップは溶け落ちまでには至らないことがあった。

そこで、次装入嵩に着目し、調整方法を変更すること

で溶け落ち判定が出力されるように調整した。以下に調整の考え方を示す。

まず、高調波計測値は炉内発生音計測値と比較し、溶け落ち時の特徴が早く表れやすい傾向にある。つまり、次装入の嵩が多い場合は炉内のスクラップを多く溶解する必要があり、溶け落ち時の特徴が遅く表れる炉内発生音に重きを置いて調整すれば良く、一方で、次装入の嵩が少ない場合は溶け落ち時の特徴が早く表れる高調波に重きを置いて調整すれば良いと考え、設定値を調整した。

実操業では、追装1のスクラップ嵩が追装2のスクラップ嵩と比較して大きかったため、初装の溶け落ち判定は炉内発生音に重きを置いて調整し、追装1の溶け落ち判定は高調波に重きを置いて調整した。

上記の調整方法にて調整した結果を下記に示す。

Fig. 6に初装の最後のVCB (Vacuum Circuit Breaker) OFF付近の高調波計測データ例を示す。

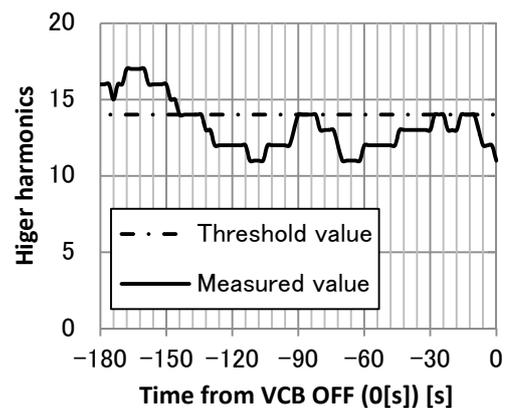


Fig. 6. Example of harmonics measurement data.

溶解が進むに従って、高調波が低減する傾向が見られ、溶解期末期には閾値を下回っていることがわかる。

Fig. 7～9に初装の最後のVCB OFF付近の炉内発生音計測データ例を示す。

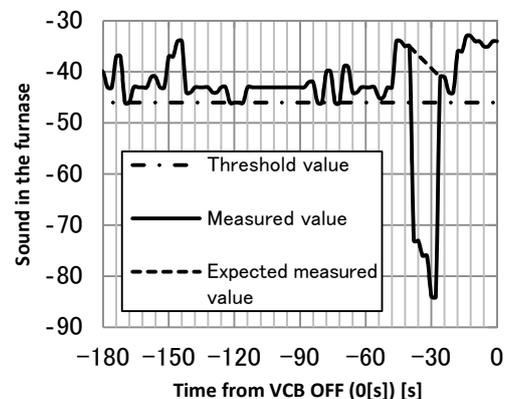


Fig. 7. Example of sound measurement data in furnace.

(① of Fig. 5)

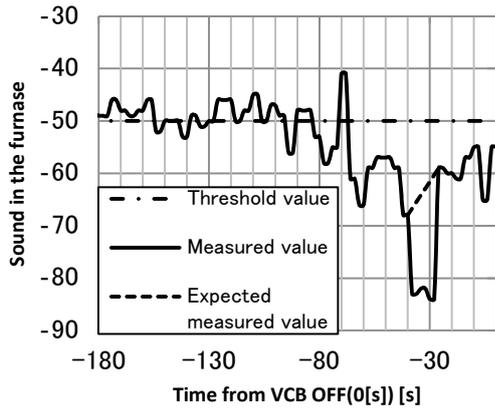


Fig. 8. Example of sound measurement data in furnace.
(② of Fig. 5)

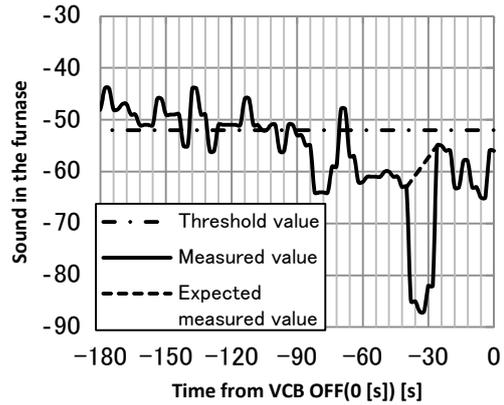


Fig. 9. Example of sound measurement data in furnace.
(③ of Fig. 5)

Fig. 7～9はFig. 5中の周波数帯域①～③の計測値の時系列値推移を表したグラフである。

溶解期末期において、周波数帯域②、③の計測値が低下して閾値を下回り、周波数帯域①は閾値を上回っており、電源周波数の偶数倍の周波数帯に炉内発生音のピークが顕著に表れていることがわかる。

なお、Fig. 7～9の-40秒付近で計測値が低下しているのは、VCBトリップにより、溶解が中断され、溶け落ち時の炉内発生音の特徴が消えたためである。そのため、VCBトリップが発生していなければ、Fig. 7～9の点線のように計測値が推移していたと考えられる。

4. 3 調整結果

次に、目標とする操業班の溶け落ち判断付近で溶け落ち判定システムが溶け落ち判定を出力したかを確認する

ため、2017年1月22日～1月31日までの38チャージについて判定実績を集計した。

各溶解期の最後のVCB OFF前に各判定が出力された確率および各判定出力から各溶解期の最後のVCB OFFまでの平均時間をTable 1に示す。初装と追装1で平均して8割以上の溶け落ち判定出力確率かつ、溶け落ち判定からVCB OFFまでの平均時間が60秒以内となった。(Table 1の背景が灰色の部分)

これにより、操業を平準化するためのベースを設けることができたため、各操業班の操業目安として活用することができる。

また、溶け落ち判定システムはスクラップが溶け落ちるタイミングを出力するのみならず、設定値次第で操業状態に合わせたタイミングで出力するよう調整することが可能であることが確認できた。

Table 1. Judgment result.

		Initial bucket charge	2nd bucket charge	Average of Initial and 2nd bucket charge
Sound in furnace	Judgment probability [%]	79	100	89.5
	Average time between judgment and last VCB OFF of Each charge period [s]	61	70	65.5
Higer harmonics	Judgment probability [%]	95	92	93.5
	Average time between judgment and last VCB OFF of Each charge period [s]	78	64	71
Meltdown	Judgment probability [%]	76	92	84
	Average time between judgment and last VCB OFF of Each charge period [s]	53	61	57

5. 溶け落ちシミュレーション

5. 1 開発目的

溶け落ち判定システム導入先の操業により調整方法を変える必要があり、溶け落ち判定システムの設定値の調整には多大な時間を要していた。また、調整期間中に操業が変化することもあり、設定値の調整時間の短縮が課題となっていた。そのため、過去の計測データの設定値を変更した際に、溶け落ちを仮想判定するシミュレー

ションツールを開発した。

5. 2 検証結果

シミュレーション結果が実際の溶け落ち判定システムと同等の溶け落ち判定を出力するかを確認するため、4章での設定値および集計した計測データを基にシミュレーションを行った。

4章の集計結果とシミュレーション結果を比較した表を Table 2 に示す。

Table 2. Result of simulation.

		Initial bucket charge		2nd bucket charge		Average of Initial and 2nd bucket charge	
		Result of chapter 4	Result of simulation	Result of chapter 4	Result of simulation	Result of chapter 4	Result of simulation
Sound in furnace	Judgment probability [%]	79	89	100	100	89.5	94.5
	Average time between judgment and last VCB OFF of Each charge period [s]	61	61	70	74	65.5	67.5
Higer harmonics	Judgment probability [%]	95	89	92	89	93.5	89
	Average time between judgment and last VCB OFF of Each charge period [s]	78	71	64	59	71	65
Meltdown	Judgment probability [%]	76	82	92	89	84	85.5
	Average time between judgment and last VCB OFF of Each charge period [s]	53	54	61	57	57	55.5

4章の判定実績とシミュレーション結果を比較すると、VCB OFF前に溶け落ち判定が出力された確率は1.5%の差、溶け落ち判定出力～VCB OFFまでの時間は1.5秒の差となり、溶け落ち判定システムと同等の結果となった。(Table 2の背景が灰色の部分)

これまで、設定値の調整では計測データを採取・解析した後、設定値を変更し、再度計測データを採取することをくり返していた。なお、1回の計測データの採取に2週間程必要であった。

シミュレーションツールを使用することにより、1回の計測で設定値の調整がほぼ完了するため、何度も計測データを取り直す必要がなくなる。そのため、溶け落ち判定システムの調整時間を大幅に短縮することが可能となった。

することができ、操業の判断基準の一つである溶け落ち時期を判定することで、これらの課題の解決方法の一つとしてアーク炉ユーザに提供し、アーク炉操業の省力化、スキルフリー化に貢献できる。

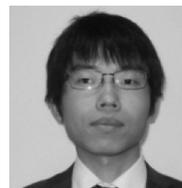
シミュレーションツールを活用することで、溶け落ち判定システムの導入前の検討および導入後の調整期間の短縮が可能となり、より装置としての完成度が向上した。

最後に本稿紙面をお借りして、今回の計測データの提供と、調整期間中に多大な御協力と有益な助言を頂いたC社殿に謹んでお礼を申し上げます。

6. おわりに

アーク炉操業における課題として労働人口の減少および熟練オペレータの退職などによる技能伝承や各操業班の操業方法の違いによる操業のバラつきが課題となっている。

溶け落ち判定システムはさまざまな操業に柔軟に対応



奥村太佑



中嶋規勝



大脇 智



堀 秀幸