

特集記事・9

我が国のエネルギーを支える鉄鋼技術
【使う】

交流電気炉用次世代操業支援システム

溶け落ち判定システム“E-adjust”

Next-Generation Operation Assist System for Ac Electric Arc Furnace

Automatic Meltdown Judgment System “E-adjust”

大同特殊鋼(株) 機械事業部

大橋隆宏

Takahiro Ohashi

大同特殊鋼(株) 機械事業部
副主席部員

亀島隆俊

Takatoshi Kameshima

大同特殊鋼(株) 機械事業部
設計部長

松井宏司

Hiroshi Matsui

大同特殊鋼(株) 機械事業部
技術統括室長

北林庄治

Shoji Kitabayashi

大同特殊鋼(株) 機械事業部
溶融設備設計室長

松尾国雄

Kunio Matsuo

1 はじめに

現在のアーク炉操業では様々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“ARMS”(Automatic Rapid Melting System)を開発し、自社内のみならず国内外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や、熟練者の定年退職による人材不足が顕在化して来ており、操業技術レベル維持のため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おり、様々な研究・開発が進められている。

海外においても、炉壁に設置する助燃バーナのノズル内にレーザ距離計を搭載し、未溶解スクラップの位置を計測することで助燃バーナの燃焼量を調整するシステム¹⁾や、投入電流の値と炉殻から発生する振動よりスラグの状態を推定し、スラグフォーミングの最適化を図るシステム²⁾等が提案されており、既存のアイデアにとどまらないユニークな自動制御システムの開発が進められている。

当社はこの度、アーク炉の自動制御機能の一つとして、炉内原料スクラップの溶け落ち時期を自動的に判定する技術を開発したので、その概要をここに述べる。

2 溶け落ち判定システム開発の背景

現在の一般的なアーク炉自動制御システムはアーク炉の電圧、電流値等を設定した通電パターンを予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。図1にアーク炉の通電パターン例を示す。アーク炉操業では複数回(例では3回)

の原料装入が考慮され、各々の操業時期に効率的に電力が投入できる様に電圧、電流が設定されている。

しかしながら、装入する原料スクラップの性状及び溶解状況は常に変化するため、予め設定した通電パターンでは効率的に溶解できない操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。

図2にアーク炉内におけるスクラップ装入状況を示す。

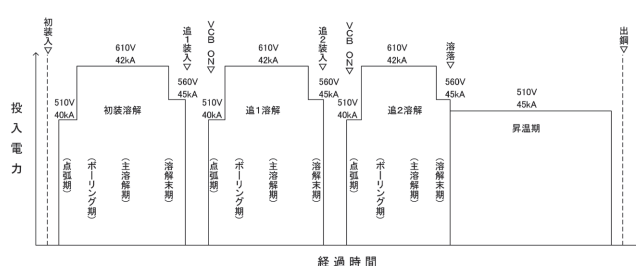


図1 アーク炉の通電パターン例

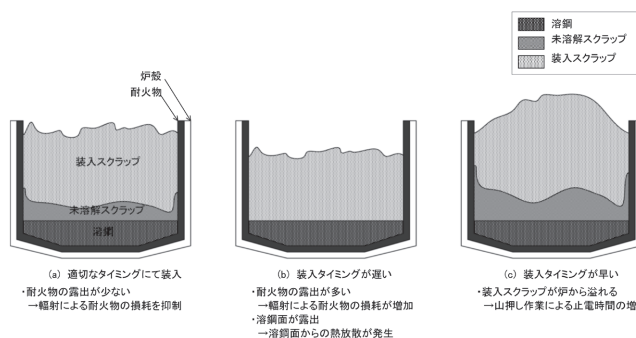


図2 スクラップ装入状況

スクラップの追加装入は、通常アーク炉内のスクラップ全てが溶解する前に実施されるが、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、アークからの輻射熱をスクラップに伝熱できなくなる。

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（図2 (c)）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。

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、なおかつ耐火物及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。

以上の様に、スクラップの溶解状態の見極めは、アーク炉の操業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の開発に着手した。

3 実施構成

溶け落ち判定システムでは主に、アーク炉から発生する高調波電流（若しくは高調波電圧）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。

アーク炉から発生する高調波が、スクラップの溶解が進行するのに従い減少することはこれまでも知られていたが、従来は電源系統へ与える“ノイズ”として扱われており、スクラップの溶解状態を判断する要素として利用されることは稀であった。炉内のスクラップ溶解が進行するのに従い、高調波の値がどのように変化するのか注意深く観察した。

一方、スクラップの溶解状態を推定する方法の一つとして、従来からオペレータが炉からの発生音を聞いて溶解状況を推定していたため、炉内発生音を注意深く検討すれば、溶け落ち時期の判定ができるのではないかと考えた。しかしながら、アーク炉からの発生音を測定する場合、バーナやクレー

ンなどアーク炉周囲の付帯設備から発生する音も同時に測定してしまい、炉内発生音だけを評価できない懸念があった。

炉内発生音は溶解初期では様々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、様々な周波数帯域の音が含まれるが、溶解が進行するのに従いアークが連続的に放電されるため、発生音も連続的となり、特定の周波数帯域の音が大きくなるのではないかと仮定した。そこで計測音を高速フーリエ変換（FFT：Fast Fourier Transform）を用いて周波数分解し、溶解期における電源周波数の偶数倍帯域のデータに着目することにより処理・解析を行った。

炉内発生音の周波数解析結果を時系列で比較すると、予想どおり溶解の進行にしたがい特定の周波数帯域、すなわち電源周波数の偶数倍帯域が大きくなることが確認できた。

この音質の特徴が熟練オペレータに聞こえる音の違いであり、定量評価が可能なシステム化への実現に至った。

3.1 システム構成

図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。

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

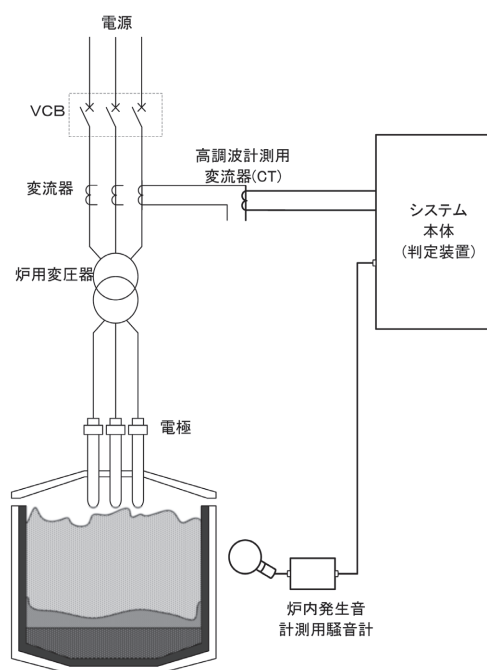


図3 システム構成

(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を溶け落ち判定システム本体にて周波数解析を行う。

尚、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設計

上記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。

はじめに高調波について検討した。高調波は溶解の進行に合わせて発生量が減少する傾向が認められるため、高調波の時系列値の変化に着目して操業データを解析することにより、判定基準となる特定の閾値を設けることができた。図4に高調波を用いた溶け落ち判定例を示す。溶解期末期における特定の閾値を下回った場合に溶け落ち判定出力を行う。

次に炉内発生音について検討した。溶解期末期において電源周波数の偶数倍の周波数帯に着目すると、特長のある変化を示す事が認められたため、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ができた。図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(図中①)が閾値を上回り、かつ、その他の周波数帯域(図中②、③)が閾値を下回った場合に判定出力を行う。

以上の様に、高調波と炉内発生音の二つの判定条件を並行して検討し、これまで熟練オペレータが判定していた精度に近づけるロジックを採用した。

更に、溶解初期及び中期での湯溜まりが形成される炉内状況において、誤った判定が出力されることを防止するために、予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により一層の判定精度向上を図った。

3.5 スクラップ嵩補正

スクラップの追加装入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。

嵩比重の小さなスクラップ(ドライ粉など)が次装入スクラップに多量に配合されている場合はスクラップの嵩が増加するため、通常よりスクラップの溶解を進行させてアーク炉内にスクラップ装入が可能となる空間を確保することが必要となる。

そこで、スクラップの装入時期を判定する際に、スクラップの嵩による補正を行うロジックを付与した。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装入スクラップの嵩を数段階(例えば、大/中/小の3段階)にて判別することにより、判定条件にスクラップの嵩要素を付与することができる。

4 実施結果

溶け落ち判定システムの機能評価のため、合同製鐵株式会社船橋製造所殿にて、溶け落ち判定システムの実証試験を行った。図6に1チャージ分の高調波実測データ例を示す。

溶解期末期に高調波発生量が低減する傾向が見られる。

図7に1チャージ分の炉内発生音実測データ例を示す。溶解初期では幅広い周波数帯の音が発生しているが「図7(a)」、溶解後期では電源周波数の偶数倍の周波数帯に発生音のピークが顕著に現れている「図7(b)」。

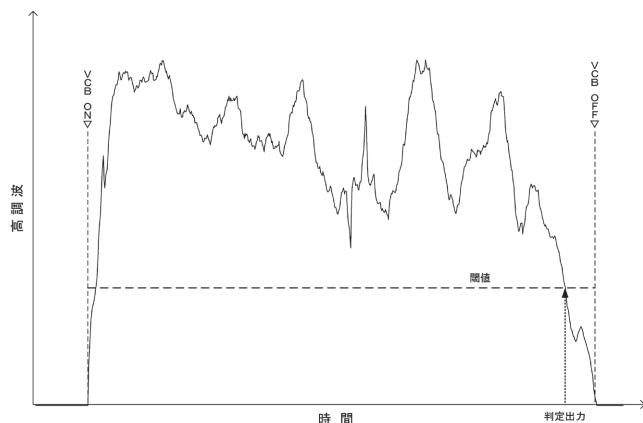


図4 高調波による判定例

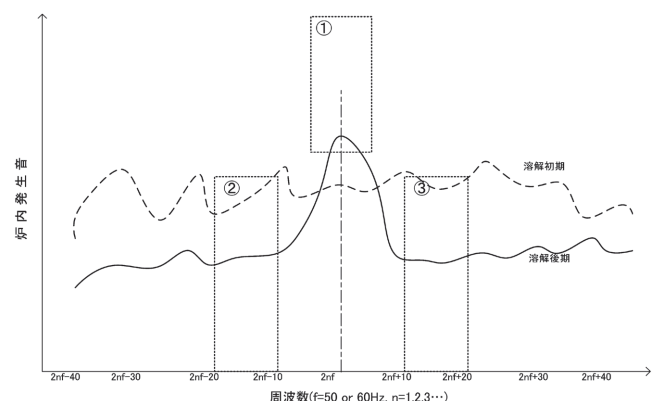


図5 炉内発生音による判定例

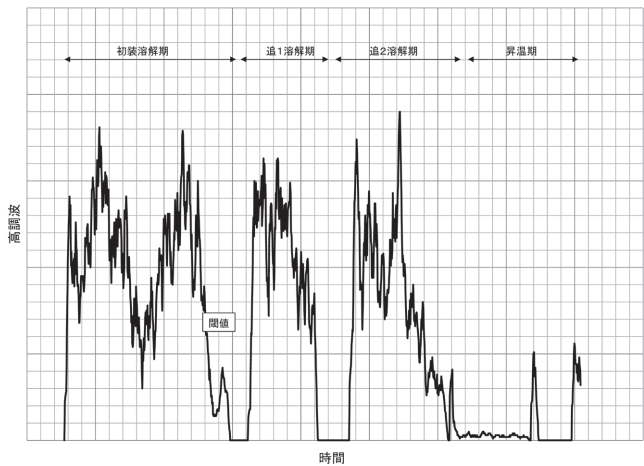


図6 高調波実測データ例

表1 システム導入による操作変化例

	電力原単位 [kWh/CHT]	作業時間 [min.]
システム導入前	370.1	46.7
システム導入後	363.0	46.3
導入効果	7.1	0.4

継続して長期間の実測データを収集しつつ、熟練オペレータの判断と溶け落ちシステムの判定を比較検討した。

表1に溶け落ち判定システム導入前後の一ヶ月の作業諸元値変化を示す。

導入前後を比較すると月平均で7.1kWh/CHTの電力原単位が低減し、作業時間が0.4分短縮されている。これは、オペレータの習熟差による作業のバラツキが、溶け落ち判定システムを用いて平準化されたことにより、使用電力量の無駄が省かれた効果である。

また、実証試験期間に寄せられた熟練オペレータの要望を取り入れ、原料スクラップの条件変化に柔軟に追従できるよう、装入毎に溶け落ち判定基準値となる閾値を設定可能とするなど、各種の修正機能を付与でき、使い易さも向上できた。

5 結言

少子高齢化によって労働人口の減少や熟練者の減少は深刻化しており、アーク炉操業の省力化、スキルフリー化は喫緊の課題となっている。これは日本のみならず、世界の先進各国においても今後深刻化していく問題であろう。

また、東日本大震災に端を発した昨今の電力価格の高騰などにより、電気炉業界の電力削減ニーズは更に高まると考えられる。

当社は本稿にて紹介した溶け落ち判定システムを“E-adjust

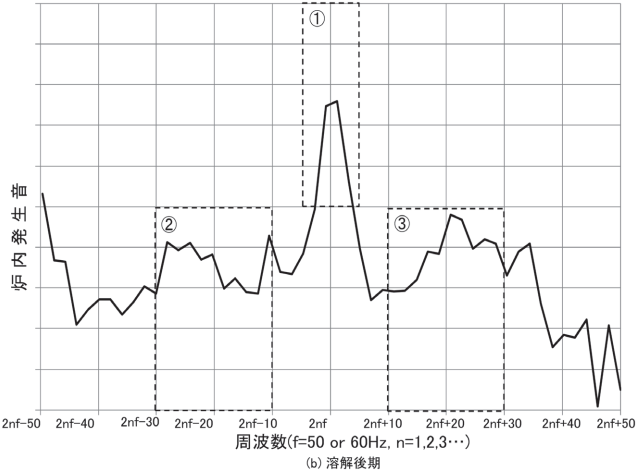
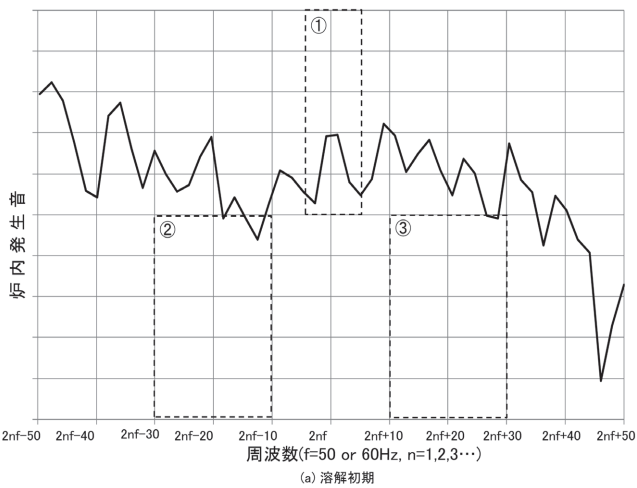


図7 炉内発生音実測データ例

(Electronic arc furnace-Automatic Dynamic Judgment System of scrap meltdown Timing)”と命名し、国内外のアーク炉ユーザーに提供することで、アーク炉操業の省力化、スキルフリー化に貢献する所存である。今後もアーク炉の操業・設備技術改善を継続し、省電力、高生産性に寄与できる、より高品質なシステムを広範囲に提供していきたいと考えている。“E-adjust”の機能に関する特許を現在申請中である。

最後に本稿紙面をお借りして、今回の開発にあたり、多大な御協力と有益な助言を戴いた合同製鉄株式会社殿に謹んでお礼を申し上げます。

参考文献

1) C.Mathy, P.Nyssen, M.Brimmeyer, D.Gualtieri, D.Rigoni and J.C.Baumert : Archives of Metallurgy and Material, 53 (2008) , Issue 2, 469.
2) T.Matschullat, D.Reger, K.Krüger and A.Döbbeler : Archives of Metallurgy and Material, 53 (2008) , Issue 2, 399.

(2013年9月2日受付)