

技術資料

Technical Data

プレミアム STC® 炉 (第2世代) の開発

森 雅史*, 江口健司*

Development of Premium STC® Furnace (2nd Generation)

Masafumi MORI and Kenji EGUCHI

Synopsis

The STC® furnace has been on the market for 42 years and has become the de facto standard in the secondary steel processing industry. In January 2022, the Machinery Division combined recent technological developments and design studies to release the Premium STC® Furnace (2nd generation) as a new brand. This technical document describes each of these elements: DINCS®, NO_x buster, fully non-water-cooled furnace shell, precision furnace pressure control, constant burner exhaust gas monitoring system, and new instrumentation system.

1. 緒言

STC® 炉¹⁾ の名称で知られるバッチ式熱処理炉は 1980 年に初めて販売してから 42 年が経過し、製作中のものを含めると 2022 年 7 月時点で累計 353 基を受注している。鋼材 2 次加工業界では高いシェアを誇り、幾つかのユーザーは、企業のホームページの保有設備欄に「STC® 炉」を明記しており、デファクトスタンダードとなっている。

STC® は Short Time Cycle の略であり、1970 年代主流であったバル型炉に比べて 1 バッチの処理が短時間に行うことができるという意味で名づけられたものである。実際、バル型炉は垂直方向に積んだ処理品に鐘型のインナーカバー、アウターカバーを被せた状態で熱処理を行うため、熱処理後のカバーの取り外しに相当な時間を要していた。そこで、炉形状を箱型に変更し、炉床にローラーを配置することで、カバーの取り外し作業を省くことができるようにした。それにより、副次的効果として、「処理品を積載テーブルにストックしておけば自動

的に炉内へ装入し、熱処理を行うことを連続的に行える全自動バッチ式炉」として製品化に成功した。オペレータが常時監視していなくても決められたヒートパターンに従って炉温と雰囲気ガスの PF 値 $((CO\%)^2/CO_2\%)$ で計算され、雰囲気鋼に対する脱浸炭の傾向を表す量を制御し、異常が発生した場合も安全に停止処理を行うことができる。

STC® 炉の対象になる処理品形状は線材コイル、冷間鍛造品、薄板コイル、パイプ、棒鋼であり、熱処理目的としては球状化焼なまし、軟化焼なまし、完全焼なまし、焼準、復炭である。

1980 年の販売後も幾つかのマイナーチェンジを行い現在の完成形に至った特筆すべき内容を列挙する。

1983年：従来 7セグメント表示器であったインターフェースを CRT (Cathode Ray Tube: ブラウン管) 表示に変更

1985年：ヒートパターンの表現形式を変更し、自由なヒートパターンが組めるようになる

1988年：DAMIC (DAido Micro-Computer: 自社開発の専用コンピュータ) から PLC (Programmable Logic Controller:

2022年 10月 3日 受付

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

電機 / 計装メーカーが生産するシーケンスコントローラと汎用コンピュータで構成したシステムに変更
 2008年: JIS B 8415(工業用燃焼炉の安全通則)の改訂に伴い、日本ガス協会発行のガイドライン“工業用ガス燃焼設備の安全技術指標(2008年)”に則した燃焼機構に再設計

2016年: DINCS[®](Daido Innovative NeoCombustion System)を発売し、DINCS[®]搭載基をプレミアムSTC[®]炉としてリリース

上記のように、STC[®]炉は長きにわたって改良が重ねられてきた歴史がある。今回、プレミアムSTC[®]炉(第2世代)と称して近年行ってきた複数の技術開発および設計検討を融合させ、ブランド化を図った。次章では技術開発項目ごとに説明する。

2. 技術開発

2. 1 DINCS[®]

DINCS[®]はプレミアムSTC[®]炉(第1世代)に搭載された高効率燃焼システムである。リリース後もユーザーには好評だったこともあり、プレミアムSTC[®]炉(第2世代)にも引き続き標準搭載される。Fig. 1に従来のパーキュレータ[®]システムを示し、Fig. 2にDINCS[®]のシステム構成を示す²⁾。

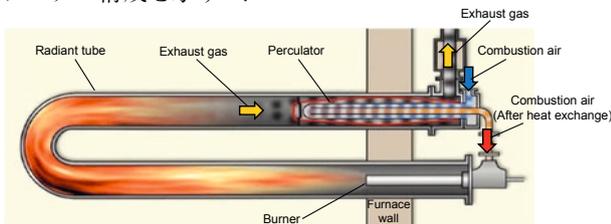


Fig. 1. Perculator System.

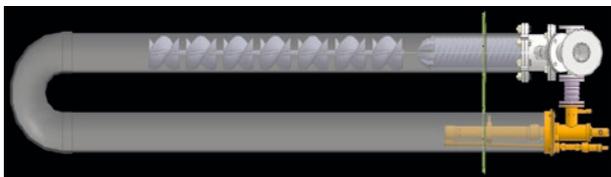


Fig. 2. DINCS[®] System.

従来のパーキュレータ[®]システムも、ラジアントチューブと呼ばれる耐熱鋳鋼製の管内の排気側に内蔵することで、外部取り付けタイプの熱交換器よりも放熱による熱ロスを抑えつつ、交換やメンテナンスが容易という特徴があった。

DINCS[®]はその特徴を継承しつつ、3Dプリンティング技術を用いて成形した炭化ケイ素を、高効率熱交換

器および高輻射材に用いており、従来よりも熱交換面積、熱伝導率、熱衝撃性の点で優れている。また、パーキュレータ[®]システムと配管、ラジアントチューブの位置関係を継承することで、パーキュレータ[®]システムからDINCS[®]への置き換えが容易というメリットもある。

Fig. 3に冷風バーナを基準とした各燃焼システムの有効熱量割合を示す²⁾。横軸を炉温、縦軸を有効熱量割合とし、各燃焼システムの測定結果をプロットしたものである。有効熱量割合の定義を式(1)に示す。

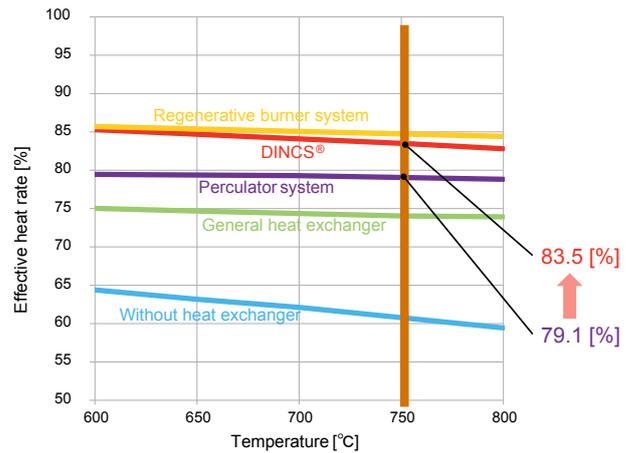


Fig. 3. Temperature [°C]-Effective heat rate [%] plot.

$$\text{Effective heat rate [\%]} = \frac{\text{Effective calorific value [J/h]}}{\text{Combustion volume [J/h]}} \times 100$$

$$= \frac{\text{Combustion volume [J/h]} - \text{Exhaust gas sensible calorific value [J/h]}}{\text{Combustion volume [J/h]}} \times 100 \quad (1)$$

Fig. 3で示すように球状化焼なましの代表温度である炉温750°Cで比較すると、パーキュレータ[®]システムが79.1%と一般的なレキュペレータよりも高い省エネ性能を示しているが、DINCS[®]はそれを上回り83.5%と、最も省エネ性能が高い燃焼システムであるリジェネレイティブバーナシステムに肉薄する性能であることを示している。

2. 2 NO_xバスター

高温で燃焼する際に発生する窒素酸化物を総称してNO_xといい、その発生量は火炎温度に比例して多くなる。NO_xは人体呼吸器への影響や、光化学スモッグ、酸性雨の原因とされており、施設の種類・規模に応じた排出基準が大気汚染防止法において定められている。

一方で、燃焼に関する省エネは高効率熱交換器に代表されるような、燃焼空気を予熱し燃焼温度を高くする手法が主であるため、省エネ率は高くなるが、NO_x発生量も高くなってしまいう課題があった。

NO_x バスターはその課題解決の一助となる機器である。Fig. 4で示すようにバーナ先端が円筒状のNO_x バスター中心に位置するよう設置する。これによって、燃焼ガスの一部がNO_x バスター外周を回って円筒内に再循環し、酸素濃度と火炎温度を低下させ、NO_x を抑えることができる。

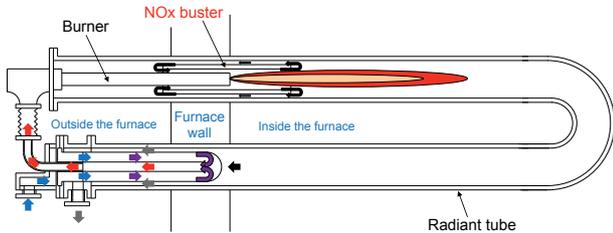


Fig. 4. NO_x Buster System.

Fig. 5にNO_x バスター取り付けによるNO_x 値の低減率を示す。測定条件は、プロパン/ブタンミックスガスを燃焼させ、排ガスO₂ 濃度11%換算である。NO_x バスターにより、球状化焼なましの代表温度域である750℃では約55%のNO_x 発生量低減に寄与している。

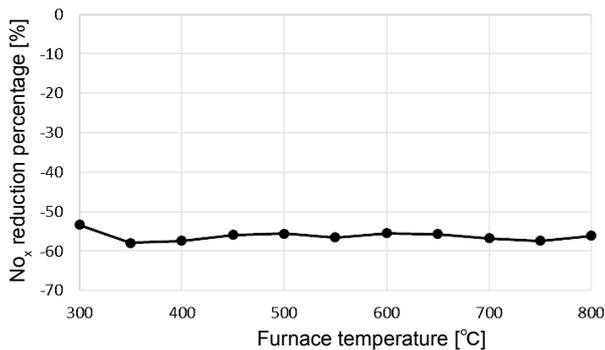


Fig. 5. NO_x reduction effect of NO_x Buster.

2. 3 完全非水冷炉殻

従来までのSTC® 炉では冷却水は扉および攪拌扇軸受を炉内の熱から保護するために必須のものであった。しかしながら、冷却水循環に伴う設備管理および水道代、炉体熱ロスの増加、水冷部付近の温度低下による炉内温度ムラなど、冷却水使用によるデメリットが大きな問題であった。今回、幾つかの構造を見直すことにより、扉冷却部および攪拌扇水冷部を削除することができ、検証試験においても良好な結果が得られたため、完全非水冷炉殻をリリースできるに至った。

2. 3. 1 軸受非水冷の課題と対応

従来では攪拌扇軸受け部の水冷を行っていた。これは軸受部の耐熱温度が120℃であり、軸部からの伝熱によりそれ以上の温度となってしまうためである。空冷攪拌

扇では、軸受部の位置を従来よりも上部に配置し、断熱材からの離隔距離をとり入熱量を抑えつつ、空冷を行うことで軸受温度の最高温度が120℃以下となるように設計を行った。Fig. 6に水冷攪拌扇と空冷攪拌扇の断面図を示す。

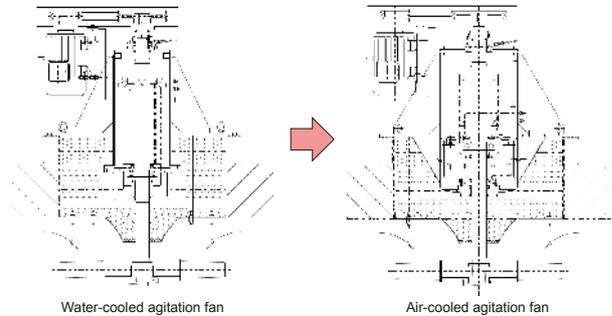


Fig. 6. Water-cooled and air-cooled agitation fans.

2. 3. 2 扉非水冷の課題と対応

扉も水冷を行っている箇所である。扉縁部には炉の気密性を保つためのパッキンが取り付けられており、このパッキンは耐熱温度が500℃である。一般的な球状化焼なまし処理の温度が750℃のため、パッキンの耐熱温度を超えないように熱から守る必要がある。

Fig. 7に水冷扉および水冷ジャケット部の断面図を示す。この水色部は冷却水が流れている部分であり、パッキンは扉が閉まった際に、この水冷部に挟まれるように配置されている。

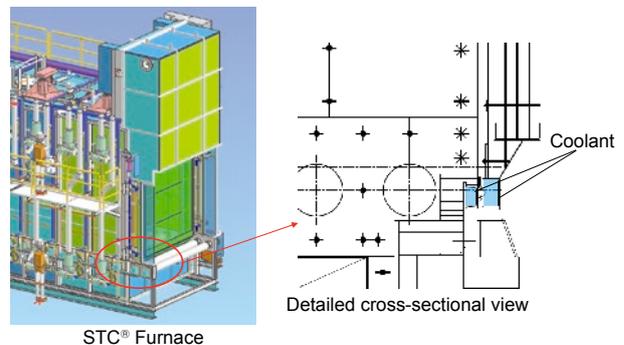


Fig. 7. Water-cooled door and water-cooled jacket cross section.

この扉部の断熱材は従来熱伝導率が600℃において、0.2 W/(m・K)のものを使用していたが、0.04 W/(m・K)の超低熱伝導率材料に変更することで従来の熱伝導率の1/5程度となり、冷却水を使用しなくても十分な温度を保てるようになった。

2. 3. 3 完全非水冷炉殻による効果

従来のデメリットであった水冷部付近の炉内温度ムラは、扉の非水冷化によって Fig. 8 に示すように 8.1 ~ 9.2 °C 幅から 6.6 °C 幅に改善することができた。

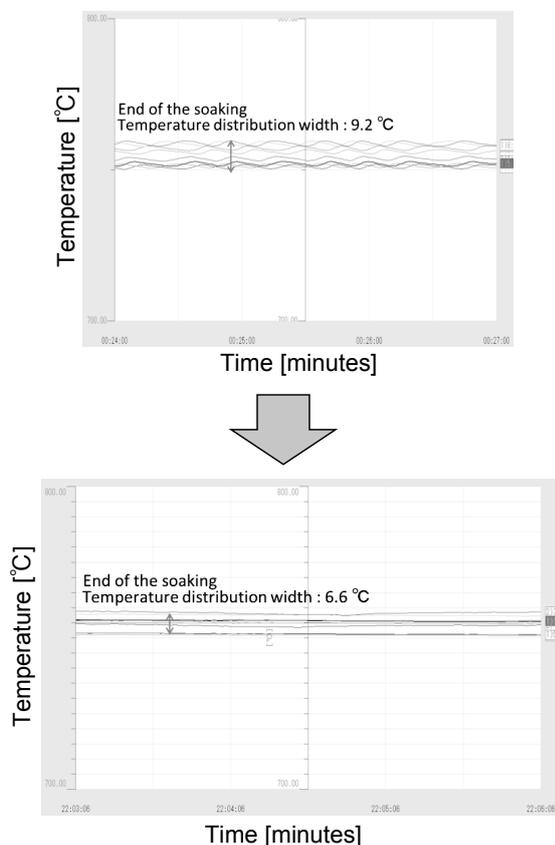


Fig. 8. Improvement of temperature distribution.

これによって、処理品の品質に影響する均熱温度のムラを低減でき、品質の安定化に大きく寄与する効果が期待できる。

2. 4 精密炉圧制御

STC® 炉は雰囲気熱処理炉であるため、熱処理中に炉内へ大気が侵入することを防がなければならない。大気が侵入した場合、1. 雰囲気ガス成分の乱れ、2. 炉内における異常燃焼の発生、などの熱処理設備において非常にリスクの高い事象に至る可能性も考えられる。従来の STC® 炉では熱処理中に一定の N₂ を流し続けることで炉圧を正圧に保ち、それらのリスク回避を担保していた。しかしながら、N₂ もコストの掛かるガスであり、この使用量を削減できればユーザーの利益に繋がると考えたことが開発のきっかけである。精密炉圧制御機能は幾つかの実証試験を行い、Fig. 9 に示すシステムで構成した。

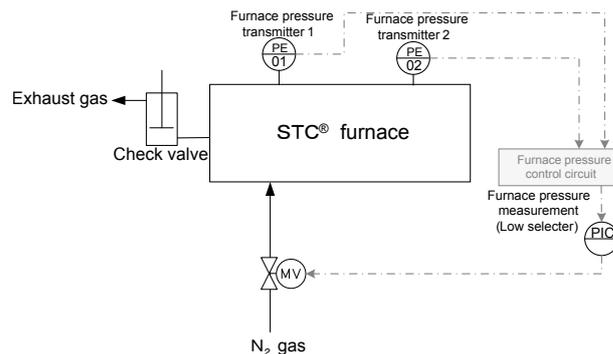


Fig. 9. Furnace pressure precision control system configuration.

精密炉圧制御による N₂ 低減効果は一般的な球状化焼なまし処理において約 35 % であった。さらに、副次的効果として、N₂ 送気量が減少したことで炉内ガスの希釈を防ぐことができ、RX ガス（吸熱型変成ガス）の約 16 % の削減、PF 待ち（RX ガス送気開始から十分な PF 値に至るまでの待ち）時間短縮による処理時間が約 10 % 短縮などの効果も得られた。

先に述べたように、N₂ の一定量送気を止める制御をするため、安全性に配慮する必要がある。そのための措置として、炉圧センサの二重化を標準としている。これは片方のセンサが故障したことを検出し、精密炉圧制御を停止して通常の N₂ 定量送気モードに戻る目的である。

2. 5 常時バーナ排ガス監視システム

2. 5. 1 排ガス測定の意味

STC® 炉は 1 つの加熱室に複数の燃焼区間（ゾーン）を持っており、各ゾーンにおいて複数のバーナを制御する構造となっている。Fig. 10 に STC® 炉の 1 つのゾーンの燃焼システムを記載する。

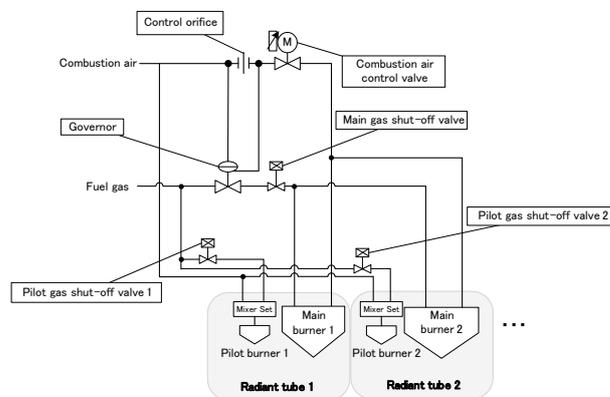


Fig. 10. STC® Furnace combustion system.

STC® 炉では各ゾーンが目標の温度となるように、メインバーナの空気流量およびガス流量を制御する。炉温を下げたい場合は、メインバーナ用ガスを遮断し、燃焼空気のみを送気して冷却を行う。パイロットバーナは基本的に燃焼したままとなる。空気とガス流量比（空気比）はブースタガバナおよび各バーナへの分配量で決まる。空気比は式（2）で示すような排ガス中の酸素濃度によって調べることができ、一般的に最適燃焼領域は、高い熱効率と黒煙の発生を抑えることができる領域である 1.13 程度が好ましいとされる。

$$\text{Air ratio [\%]} = \frac{21 [\%]}{21 [\%] - \text{Exhaust gas oxygen concentration [\%]}} \times 100 \quad (2)$$

2. 5. 2 システムの構成と測定データの見方

常時バーナ排ガス監視システムでは、Fig. 11 に示すような排ガス酸素センサを各ラジアントチューブ排気筒に設置し、HMI（ヒューマンマシンインターフェース）に排ガスに含まれる酸素濃度を表示する。

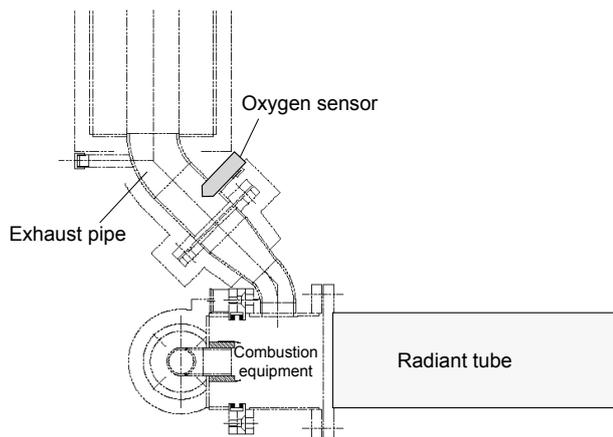


Fig. 11. Exhaust gas oxygen sensor.

Fig. 12 に 1 つのラジアントチューブに着目した排ガス酸素濃度の時系列データを示す。

Fig. 12 から分かるように、冷却と加熱を繰り返し、パイロットバーナが常時燃焼しているシステムにおいては、時系列データを確認しても良否判定をすることは容易でない。一方で、同じ燃焼状態（燃焼空気弁開度 = 最大、炉温 = 500 ~ 600 °C）における各バーナの排ガス

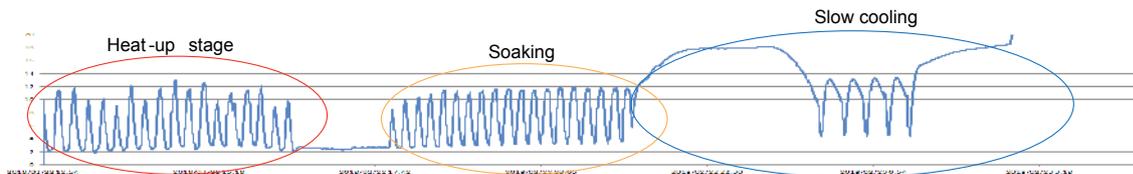


Fig. 12. Exhaust gas oxygen concentration time series data.

酸素濃度を測定し、ゾーンごとに 1 年 3 か月に渡って測定したデータが Fig. 13 である。実線は最小二乗法による近似直線である。また、分散の大きいゾーン 3 をバーナごとに色分けしたものが Fig. 14 である。

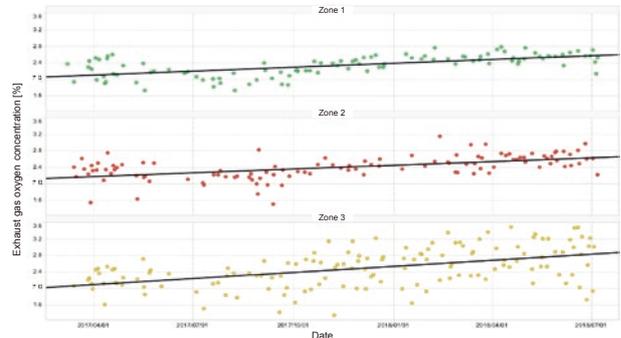


Fig. 13. Exhaust gas oxygen concentration in each zone.

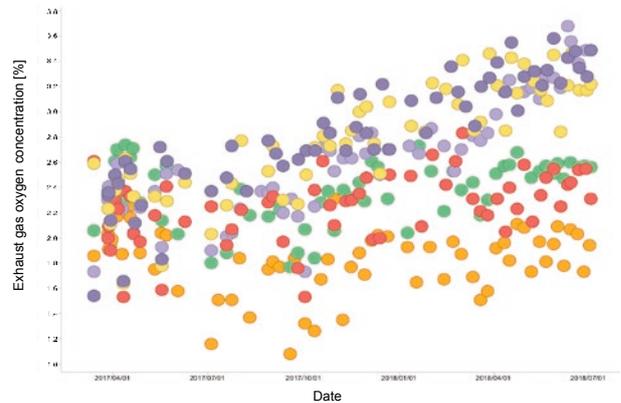


Fig. 14. Exhaust gas oxygen concentration for each burner in Zone 3.

Fig. 13, 14 から以下のことが分かる。

1. 酸素濃度は 3 か月や半年単位で比較すると差異が見られてくる。
2. 燃焼状態が悪化しやすいバーナと燃焼状態があまり変化しないバーナなど個体差が大きいため、ゾーンで平均化してもあまり有効なデータは得られない。

これらの知見からプレミアム STC® 炉（第2世代）ではヒストリカルトレンド画面に工夫が加えられている。

Fig. 15 に第2世代のヒストリカルトレンド画面を示す。



Fig. 15. Historical trend screen.

ヒストリカルトレンド画面において、炉温と燃焼空気弁開度の2要素の設定範囲を指定すると、非該当の要素が除外され、意味のある排ガス酸素濃度グラフにすることが出来る。

2. 6 新計装システム

第2世代を開発するにあたって、1988年のDAMICからPLCに移行後、ほとんど変更が施されていないシステムのアーキテクチャに大幅な変更を加えた。以下にそれらを記述する。

第1の変化は、制御盤の括りを従来の「動力制御盤」、 「計装制御盤」から「炉外搬送制御盤」、 「炉制御盤」に変更したことである。動力制御盤、計装制御盤は機器本位の考え方で、現場保全担当者の担当する機器をアクチュエータ類と計装類に明確に分離できることなどがメリットとして挙げられる。一方で、近年増えつつある複数炉構成などでは、炉外搬送はどの動力制御盤が制御を行うのか分かりにくいことや、インバータなどの動力機器がデジタル通信を当たり前のように行っていく中で、動力制御盤と計装制御盤の括りが曖昧になっていることなど課題があった。今回、炉外搬送制御盤と炉制御盤に分けることで、炉外搬送機器を複数炉で共有している設備の増設工事においても炉外搬送制御盤の改造のみで済ますことができ、既設炉の熱処理を継続することも可能である。これによって設備投資のハードルを下げることができる。

第2の変化は、HMIの統一化と冗長化である。従来のSTC[®]炉の一般的なシステム構成と、第2世代におけるシステム構成をFig. 16, Fig. 17に示す。

Fig. 16と17との主な違いの1つ目は、制御盤盤面のランプ、スイッチ類を廃し、ハードボタンについては非常停止ボタンのみとした。基本的なすべての操作はSCADA (Supervisory Control And Data Acquisition: 監視制御とデータ取得装置) のモニタを通して行う。これには3つのメリットがある。

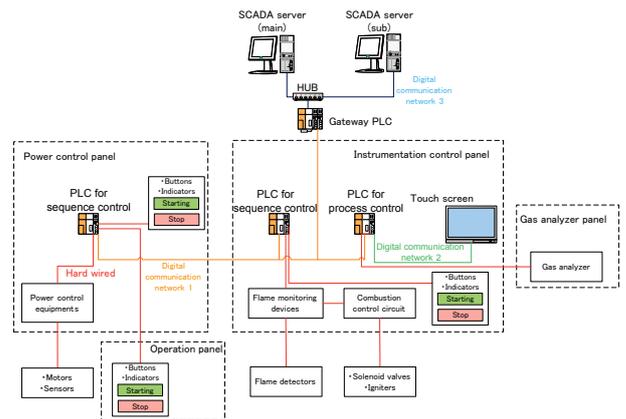


Fig. 16. Typical conventional STC[®] furnace system configuration.

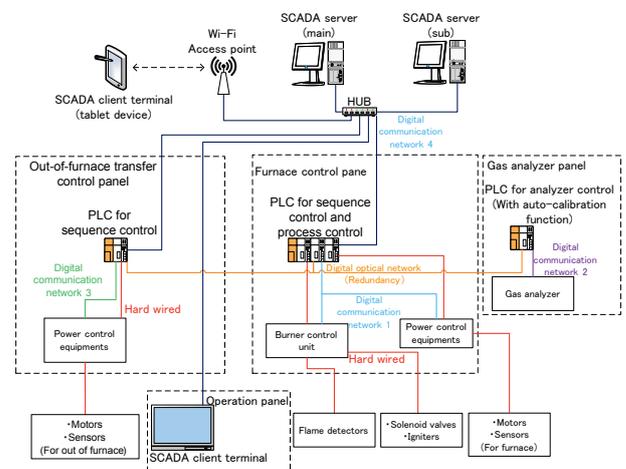


Fig. 17. System configuration of the second generation.

1. 操作がビジュアル化されるため、経験が浅いオペレータでも操作に迷いにくく、誤操作が減らせる。
2. 従来では、操作ボタンがあるために、電気室のような、STC[®]炉が直接確認できない場所に置くことが難しかったが、第2世代では制御盤を自由な場所に設置可能になった。
3. 従来は、計画外の増設がある場合は、盤面の加工や取替など、多くの工事作業が必要であったが、SCADAの場合、ソフトの変更で済むため、改造による設備休止時間を最小限にすることができる。

従来システムとの違いの2つ目は、冗長化である。操作源をSCADAに統一し、SCADAサーバ2台体制を標準化することで、個別操作源の故障による設備の運転不能リスクを最小限にすることができる。また、PLCの二重化電源ユニットの採用や、直流電源装置の二重化、PLC間ネットワークの二重化など、費用対効果の高い冗長化対応を行っている。

従来システムとの違いの3つ目は、バーナコントロー

ラの採用である。2008年のJIS B 8415改訂により燃焼回路をハードリレーでの構成を基本方針として、ソフトウェア誤動作やソフトウェアの安易な変更による異常燃焼の防止を行ってきた。しかしながら、ハードリレーでも故障確率はゼロではなく、複雑なリレー回路が原因で設備復旧に長い時間を要す問題もあった。バーナコントローラは欧州製品安全規格の一つであるGAD (Gas Appliances Directive) の認証を受けており、高い安全性と高度な情報ネットワーク機能がある。異常燃焼の発生防止や、トラブル時の迅速な事態把握に役立てることができる。

2. 7 タブレット機能

プレミアム STC® 炉（第2世代）はタブレット端末も標準機能とした。これにより、設備周囲のWi-Fi通信可能範囲内であれば、SCADAサーバとほぼ同等の情報閲覧やヒートパターンの登録を行うことができ、設備周囲にしながらさまざまな情報を取得できる。例えば、2.5節の常時バーナ排ガス監視システムと組み合わせることで、排ガスの酸素濃度を画面で見ながら燃焼調整もできるようになるなど、大幅にきめ細かい設備保全が可能となる。

3. 結 言

STC® 炉は42年におよんで多くの自動車部品、産業用機械部品を熱処理し、産業界を陰ながら支えてきた。その中で、ユーザーの利便性を追求する技術者の姿勢によりさまざまな進化を遂げてきた。

昨今、半導体やIT分野を筆頭に研究開発の期間が著しく短縮され、次世代の商品が瞬く間に売り出されている。そして、旧世代の商品は直ぐにコモディティ化の道を辿る。この現象は、先端技術分野だけに止まらず、あらゆる分野にも通ずるものである。無論、鉄鋼業界においても、同様のことが言える。STC® 炉をユーザーに選び続けてもらうためには、STC® 炉をより良く進化させ続けなければならない。一方で、古い概念でも現代に通用するものは多く存在する。すべてを解決する絶対的な答えは無く、「不易流行」の心持ちで悩みながら進めるしかないのだ。プレミアム STC® 炉（第2世代）はそのような姿勢があってこそ昇華して生み出すことができた製品と捉えている。

これからも我々は多くの技術を STC® 炉に注ぎ込んでゆく。それがユーザーの喜びに繋がることを願ってやまない。

(文 献)

- 1) 今泉正：電気製鋼，62(1991)，204.
- 2) 神谷祐樹：電気製鋼，89(2018)，47.



森 雅史



江口健司