

〈特集〉

ごみ焼却プラント・シミュレータの運転員訓練への適用

上田 達夫¹⁾*, 林 正人²⁾*, 神鳥 哲達¹⁾

¹⁾ KEE 環境サービス(株) 技術サポート部

(〒532-0003 大阪市淀川区宮原3丁目3番31号 *E-mail: ueda_t-kee@corp.khi.co.jp)

²⁾ 川崎重工業(株) システム技術開発センター 機電システム開発部

(〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1番1号 *E-mail: hayashi_masato@khi.co.jp)

概要

ストーカ式焼却炉を対象とした燃焼調整訓練シミュレータを開発・導入して運転員訓練に利用してきた。訓練対象の炉は発電設備付き焼却炉と水噴霧式焼却炉である。シミュレータは分割集中化した非線形数式モデルをリアルタイムで計算していく、実機と同じ感覚の訓練が可能なフルスケール型である。訓練は現地の中央操作室にあるオペレータコンソールを模擬したものを利用するもので、炉内燃焼状態を数値表示する燃焼調整訓練用の専用画面も有する。インストラクタが設定したごみ発熱量やごみ投入量の急変に対して、燃焼用空気・二次空気・ストーカ速度などに手動介入して燃焼の維持を図る。

キーワード：ごみ焼却，訓練シミュレータ，数式モデル，燃焼調整，炉内燃焼状態表示

原稿受付 2012.5.10

EICA: 17(1) 22-26

1. はじめに

殆ど停止することなく連続運転されるボイラ・タービン・発電機を装備したごみ焼却プラントが一般的になって久しい。このごみ焼却プラントの起動停止や、補機の故障などの異常事態への対応能力を高めるため、川崎重工業の本社部門と環境部門、並びにその関係会社でプラントの委託運転を担当する KEE 環境サービスでは運転訓練シミュレータを開発・導入して運転員訓練に利用してきたことは既に報告している¹⁾。このシミュレータが対象としたのは発電設備付きのストーカ式焼却炉であったが、運転員訓練の過程で、当初の目的であった起動停止・異常事態対応訓練の他に、ごみ発熱量や炉内へのごみ投入量の急変に対して、焼却炉の燃焼を如何に維持継続させるかの燃焼調整についても訓練して欲しいとの要望が出てきた。本論では既に報告したシミュレータの燃焼調整訓練への機能拡張の過程を説明して、実際にどのように利用しているかの適用事例を中心に述べる。

2. システム構成と機能

Fig. 1 に運転訓練シミュレータの構成を示す。

本シミュレータは実機と同一感覚の訓練が可能なフ

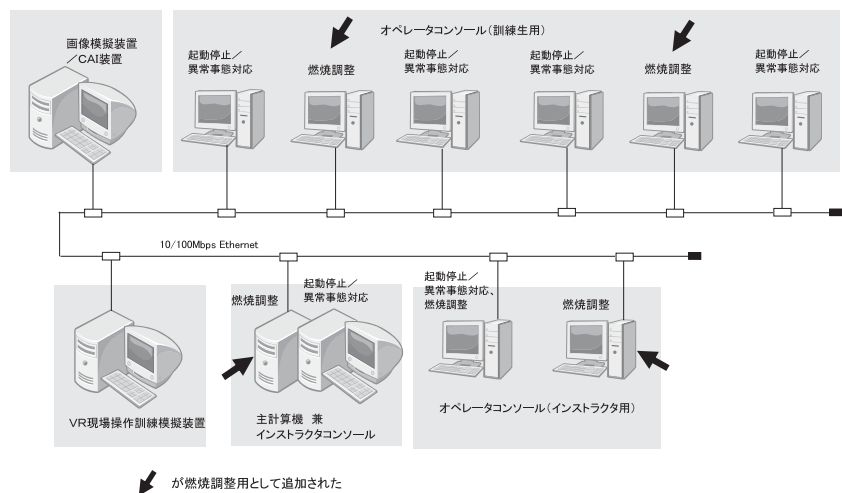


Fig. 1 System configuration of training simulator

ルスケール型であり、シミュレーションモデルをリアルタイムで演算する主計算機を中心に、実機操作盤を模擬する現場操作訓練模擬装置、中央操作室におけるプラント監視・操作機能を模擬するオペレータコンソールや、インストラクタがシミュレータを操作するインストラクタコンソールなどで構成される。

Fig. 1 で燃焼調整訓練用主計算機が従来からあった起動停止・異常事態対応訓練用計算機に追加され、また燃焼調整訓練専用のオペレータコンソールが訓練生用とインストラクタ用に追加された。Photo. 1 がシミュレータの全景で、Table 1 に燃焼調整訓練用としてよく利用するインストラクタ機能を示す。



Photo. 1 Full view of training simulator

Table 1 Indispensable functional item of instructor

機能	内容
初期状態設定・保存機能	プラント状態を選択する機能。訓練中今後の訓練に必要なプラント状態を任意に保存する機能。プラントモデルの入出力状態、制御系モデルの操作器出力、制御モード、補機運転状態等を保存する。
フリーズ・ラン機能	訓練の中断・再開を行う機能。プラントモデル、制御系モデルの積分動作、タイマ、カウンタ等の停止、再開を行う。
倍速機能	訓練に不必要な時間を短縮するために、シミュレーション速度をリアルタイムより速くする機能。5倍速、10倍速が可能。

3. シミュレーションモデル

燃焼調整訓練用のシミュレーションモデルの中核はプラントモデルであり、その他にシミュレータを構成するための制御系モデル、VR (Virtual Reality) モデルで成り立っている。プラントモデルはストーカ式焼却炉を対象としており、排ガス温度を冷却するボイラと、このボイラから発生した蒸気で発電する設備を有する炉で、ボイラ冷却方式と呼ばれるものである。

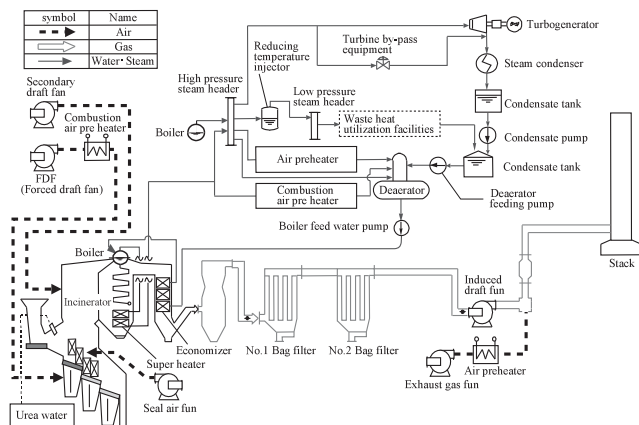


Fig. 2 Cover range of simulator

運転中のプラント特性を忠実に模擬できるように、燃焼系統・通風系統・排ガス処理系統・蒸気系統およびタービン発電機系統のエネルギーバランス、マスバランスを中心とした非線形数式モデルで構成しており、基本的には従来からの起動停止・異常事態対応訓練用と同じものである。ただしプラントのシーケンス・インターロック主体の動きがより重要であった従来のものと違って、燃焼調整訓練ではモデルで計算したプロセス値の結果そのものが重要な意味を有するので、4.2で述べる遠隔監視装置による収集データも参照しながら、モデルパラメータをより慎重に決めていった。Fig. 2に本シミュレータの模擬範囲を示すが、内容的には既に報告したもの¹⁾と基本的には同じである。

プラントモデルの中でも特に重要なのは燃焼モデルであり、Fig. 3に示すようにごみ移動方向に沿って炉内を複数段に分割し、各段でごみ層およびガス層を考える分割集中化モデルとした。実際の計算においては、モデル化のベースとした実機炉の仕様を考慮してごみ移動方向に沿って6段に分割しているが、現在まで殆ど違和感を覚えることなく運用してきている。各層では燃焼過程における発熱反応、吸熱反応、および輻射・対流伝熱を考え、ごみ層は可燃分・水分・灰分から構成されると仮定した。ごみ乾燥/燃焼モデルは各段でごみ性状、ごみ移動、乾燥/燃焼速度 η を考慮した熱収支・物質収支 Q, W, G を考える。ごみ乾燥速度、ごみ燃焼速度は各段のごみ温度 T および O_2 濃度 O_2 または水分重量比によるアレニウスの式に従うとした。

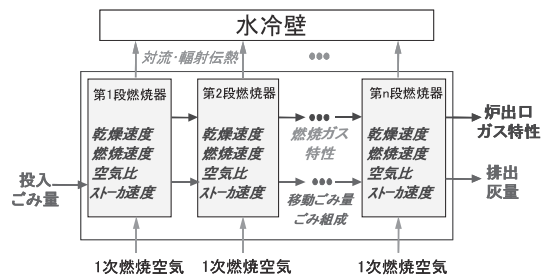


Fig. 3 Combustion model

以下、第 i 段目についてのモデル式を示す²⁾。なお実際の炉は、燃焼ガスが炉内の一部ではごみ移動方向と並行に流れ、その他の部分では対向に流れるものや、燃焼ガスがごみ移動方向と並行に流れるものもあるが、Fig. 3と下記(1)式~(9)式では燃焼ガスの流れは一般化してごみ移動方向と並行であるものとして示す。

3.1 乾燥, 燃焼モデル

$$\eta_{vi} = A_{nv} \times e^{-E_{nv}/R(T_{ri}+273)} \quad (1)$$

$$\eta_{ci} = \frac{\eta_{cci}\eta_{cdi}}{\eta_{cci} + \eta_{cdi}} \times \frac{O_{2i}}{100} \quad (2)$$

$$\eta_{cci} = A_{nc} \times e^{-E_{nc}/R(T_{ri}+273)} \quad (3)$$

$$\eta_{cdi} = K_{cda} \times (T_{gi} + 273)^{K_{cdb}} \quad (4)$$

3.2 ごみ層モデル

$$(C_v W_{vi} + C_c W_{ci} + C_w W_{wi} + C_s W_{si}) \frac{dT_{ri}}{dt} \\ = Q_{hci} + Q_{v(i-1)} + Q_{c(i-1)} + Q_{w(i-1)} + Q_{s(i-1)} \\ + Q_{ali} + Q_{fgri} + Q_{hgri} - Q_{hdi} - Q_{hwi} - Q_{vi} - Q_{ci} \\ - Q_{wi} - Q_{si} - Q_{gri} - Q_{frbi} \quad (5)$$

$$\frac{dW_{vi}}{dt} = G_{v(i-1)} - G_{vi} - \eta_{vi} W_{vi} \quad (6)$$

$$\frac{dW_{ci}}{dt} = G_{c(i-1)} - G_{ci} - \eta_{ci} W_{ci} \quad (7)$$

3.3 ガス層モデル

$$C_{pg} V_i \frac{dT_{gi}}{dt} = Q_{hvi} + Q_{g(i-1)} + Q_{gri} + Q_{a2i} - Q_{gi} \\ - Q_{fgbi} - Q_{fgri} - Q_{hgbi} - Q_{hgri} \quad (8)$$

$$C_{gi} = G_{g(i-1)} + G_{gri} + G_{a2i} \\ + K_{vi}(G_{gv(i-1)} + G_{gri})(L_{vg} - L_{va}) \quad (9)$$

4. 燃焼調整訓練

4.1 シミュレータ開発過程と訓練の方法

この訓練の目的は、ごみ発熱量や炉内へのごみ投入量の急変などの外乱によって起こる燃焼状態変化の把握と、手動介入による燃焼状態の維持である。Fig. 4 はモデルの対象としたボイラ冷却方式ストーカ炉の訓

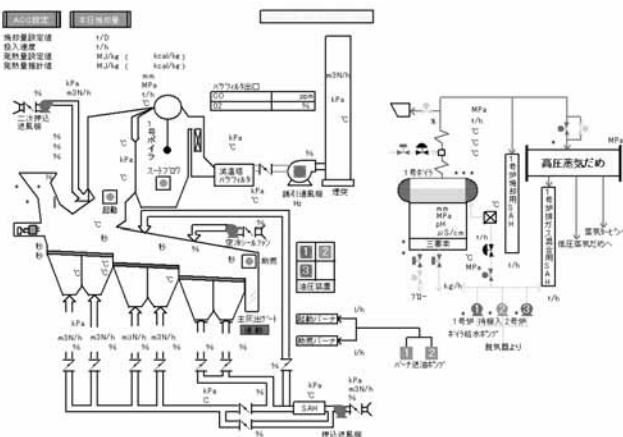


Fig. 4 Plant flow of combustion control training Boiler type gas cooling incinerator

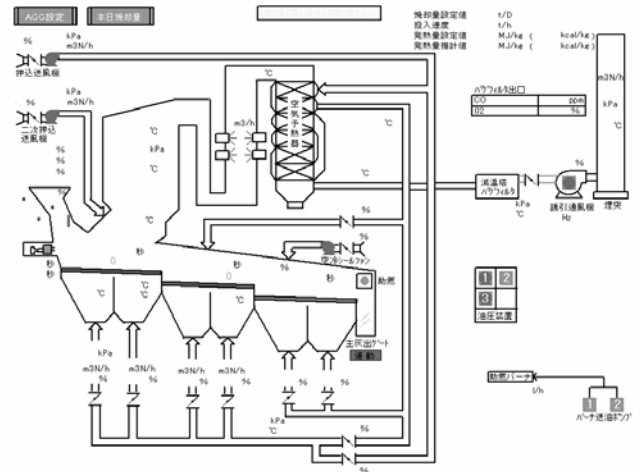


Fig. 5 Plant flow of combustion control training Water spray type gas cooling incinerator

練用プラントフローを示すが、訓練を燃焼に特化しているため、Fig. 2 で示した模擬範囲の内、排ガス系とボイラ蒸気系はフロー表示を簡略化している³⁾。

一方で、現在運転されているストーカ式焼却炉には、排ガス冷却装置としてボイラを設けず、冷却用の水を噴霧して排ガスを冷却する水噴霧方式焼却炉もある。訓練の目的である燃焼調整という観点では、排ガスの冷却にボイラを使うか水を使うかは関係ない。よって、本燃焼調整訓練では Fig. 3 の水冷壁の部分の伝熱を水噴霧による潜熱冷却のモデル式に置き換えることで水噴霧方式焼却炉の運転員訓練にも利用できるようにした。Fig. 5 は水噴霧方式焼却炉における訓練用プラントフローを示す。訓練の内容は同じであるが、水噴霧方式の炉の運転員には日頃からの慣れを優先して Fig. 5 のフロー図を設けることとした。

訓練生はインストラクタが設定したごみ投入量の急変などの外乱に対して燃焼がどのように変化していくかを把握しながら、燃焼用空気、二次空気、ストーカ速度などに介入して燃焼を持続させる。訓練は Fig. 4 または Fig. 5 のプラントフロー図で表示される各種状態値と、これを時間軸展開した Fig. 7 のようなトレンドグラフを見ながら操作介入していくことを基本としている。ただしこれだけではストーカ上での滞留だけでも2時間を越える焼却炉において、ごみの動きを炉長方向に追いかけて、どんなタイミングで何処をどれだけ操作すれば良いかを理解させるには充分でなく、別途 Fig. 6 に示す炉内状態表示画面を設けた³⁾。

Fig. 6 は焼却炉に関する各種プロセス値だけでなく、シミュレータが演算している内部変数も画面上に表示したものである。現場では、運転員は通常は中央操作室において炉内燃焼状態をテレビモニタ画像で見ながら凡その状態を把握し、詳細が知りたい時は炉前に行つてのぞき窓から炉内を覗いて炎の色や勢い、あるいは

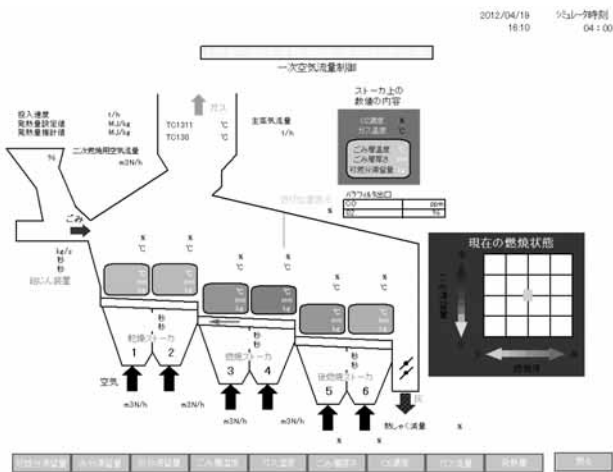


Fig. 6 Internal incineration status

ごみの量や燃え切り点といったものを知ることができる。シミュレータでも最初は炉内燃焼モニタ画像でそれらを表現しようとしたが、プラントに設置されている映像機器によって個々に色合いが微妙に異なってくるため、色々な事業所から訓練を受けに来る運転員に横断的に適用することは困難であることが判り、燃焼モニタ画像による方法を諦め Fig. 6 に示すような画面を使う方法とした。

実際の焼却炉には該当するモニタ画面は存在しないが、訓練生は本図を見ることで、炉内における水分量、可燃分量、ごみ層厚さなどの場所的・時間的变化を理論的に理解し、自らの経験と照合させることでより理解を深めることができる。結果的には炉内燃焼画像のようなアナログ的方法よりは Fig. 6 を用いる方が、燃焼のメカニズムを理解してもらうための教材としては良かったと判断しており、訓練生にも好評であった。

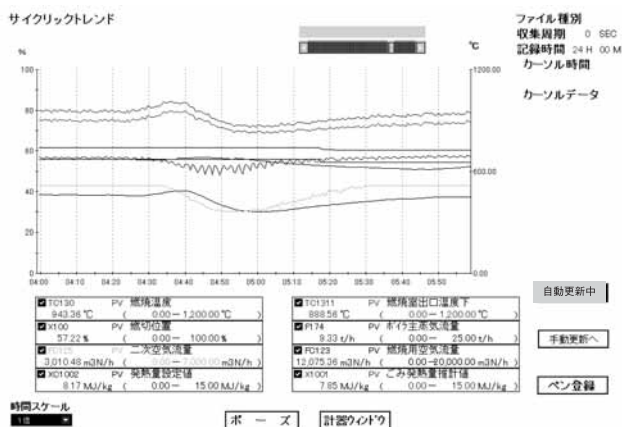


Fig. 7 Example of trend graph for combustion

Fig. 7 はインストラクタが設定したごみホップのブリッジによって、ストーカ上へのごみ投入が10分間途絶えた時の応答例である。訓練生はトレンドの動き

を見ながらホップブリッジの発生を察知して対応の手動介入を行って燃焼の維持を図っていく。

シミュレータは同じ外乱に対して1号炉、2号炉で個別に訓練できるように製作しており、訓練生が1号炉、2号炉に別れてそれぞれ独立して介入し、その結果についてインストラクタを含めて議論を行なわせるようにしている。自分の操作と他人の操作を比べながらお互いに議論することで、自分の操作を理論的に解釈したり、気のつかなかった事柄を思い知ったりにより理解を深めることができるようにしている。即ち、訓練する側からの一方的お仕着せではなく訓練生自らが納得し理解できる訓練環境作りに努めている。

4.2 訓練モデルの精度の維持

我々は本論で述べたシミュレータとは別に、通信回線経由で遠隔地にある現場の運転データを継続的に収集監視する遠隔監視装置も設置して、運転スキルの向上につながるデータの集積を図っている。燃焼調整訓練シミュレータの開発に際しては、製作を完了して実際の訓練に供するようになった段階でも、モデルで計算した結果と実際の現場データとを随時比較してシミュレータが当初の機能を満足し、相応の精度を保持していることが確認できるようなシステムであることが必要と考えた。起動停止・異常事態対応訓練用としては何種類かのモデルを有するが、燃焼調整訓練用に目的を限定すると、シミュレータモデルの対象とする炉は遠隔監視装置で運転データを随時収集できるものに限定されることになり、Fig. 2 に示したものとなった訳である。必要によって燃焼調整訓練シミュレータによる結果と遠隔監視装置から抜き取った実データを比較しながら訓練することもある。

5. おわりに

現在までに、本シミュレータは燃焼調整だけで100名を超える運転員訓練に適用され、起動停止・異常事態対応訓練を含めると400人を超えている。

また現在のシミュレータは現地の中央操作室に設けられたオペレータコンソールから操作・監視できる範囲、即ちポンプやファンや、電気・油圧・空気圧の介添え手段を具備した自動弁や検出器がカバーしているところだけを対象にしており、機側で配管へ流れる流体の音を聞きながら手動弁を人力で回して立上げ準備を行うなどのマンツーマンでしか指導出来ない機側作業をカバーしていない。現在、これら機側作業もビデオ映像に取込み、現有シミュレータと連携させる開発計画を進行中であり、数年先には実現させる予定である。

一方、燃焼ガスの観点でみると、以上説明してきた

燃焼調整訓練モデルは Fig. 4~Fig. 6 に示す通り、燃焼ガスが一部ではごみ移動方向と並行、一部では対向に流れる炉を対象としているが、最近の炉は並行流れに変わってきている。この並行流の炉に関する起動停止・異常事態対応訓練シミュレータも既に出来ているが、燃焼調整訓練への機能拡張についても検討を要する時期となっている。我々がこの並行流の炉を委託で運転する事例はまだ少ないが、数年後に現行モデルの見直しも必要ではないかと考えている。

参考文献

- 1) 片岡幹彦, 林 正人, 南部栄一郎: ごみ焼却プラント運転訓練シミュレータ, EICA 環境システム計測制御学会, Vol.9, No. 3, pp.37-41 (2004)
- 2) M. Hayashi, Y. Miyamoto, M. Kataoka, K. Higuma and E. Kuribayashi : Development of Training Simulator for Refuse Incineration Plants for Using Virtual Reality, Proceedings of the ICOPE-03, 3-389/394 (2003)
- 3) 南部栄一郎, 深田英夫, 上田達夫: ごみ焼却プラント運転訓練シミュレータ, 第 28 回全国都市清掃研究・事例発表会 (2007)