

〈特集〉

ごみ焼却プラント運転訓練シミュレータ

Training Simulator for Refuse Incineration Plants

片岡幹彦¹, 林 正人^{1*}, 南部栄一郎²¹川崎重工業株式会社²川重環境エンジニアリング株式会社Mikihiko Kataoka¹, Masato Hayashi^{1*} and Eiichiro Nanbu²¹Kawasaki Heavy Industries, Ltd.²Kawasaki Environmental Plant Engineering Co., Ltd.

Abstract

Refuse incineration plants are required to reduce discharge of toxic substances such as dioxin in the exhaust gas and recover thermal energy from waste gas efficiently. It is very important to keep the combustion stable to realize these items. Therefore, the operators have to keep their operation skills highly. We have completed the development of a training simulator for the stoker-type refuse incineration plants in order to assist the operators skill up effectively. In this paper, we describe the configuration of the training simulator. Furthermore, we report the modeling method of combustion for incineration plants, and field operation simulation based on virtual reality (VR) technology. By using this training simulator, it is possible for operators to train in field operations similar to the real world.

Key Words : refuse incineration plant, training simulator, combustion model, virtual reality

1. はじめに

昨今のごみ焼却プラントでは、ダイオキシン等有害物質の排出低減および高効率な廃熱回収が求められている。そのため制御・自動化システムは高度化され、ごみ焼却プラントの連続運転により起動・停止回数が減少している。また、ごみ焼却プラントの運用は、高度な自動化により手動運転機会が減少する一方、稀ではあるが異常事態発生時には、高度な技術や知識に基づく適切な判断や正確な操作が運転スタッフに求められる傾向にある。このため、ごみ焼却プラントの起動・停止操作さらには異常事態対応操作が可能な運転訓練シミュレータに対するニーズが大きい。本論では、ストーカ式ごみ焼却プラントを対象として開発したごみ焼却プラント運転訓練シミュレータと運転スタッフ訓練への適用について述べる。

2. システム構成と機能

Fig. 1 に運転訓練シミュレータのシステム構成を示す。本シミュレータは、実機と同一感覚での訓練が可能なフ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模擬 PC、中央操作室でのプラント監視・操作機能を模擬するオペレータコンソール、炉内の燃焼状態/ボイラドラム水位および圧力計監視を模擬する画像模擬 PC、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で構成される¹⁾。**Table 1** に主なインストラクタ機能を示す。

3. シミュレーションモデル

シミュレーションモデルは、制御系モデル、プラントモデル、VR (Virtual Reality) モデルで構成されている。

* 〒673-8666 明石市川崎町1番1号
TEL: 078-921-1645 FAX: 078-921-1603
E-mail: mhayashi@tech.khi.co.jp

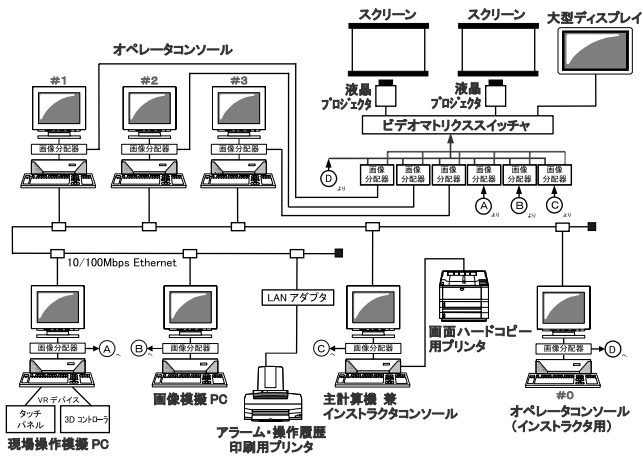


Fig. 1 System Configuration of Training Simulator.

3.1 制御系モデル

制御系モデルは、中央制御装置のコントロールループ、インタロック、起動・停止シーケンス、コントロールセンタ、タービン制御装置など現場制御盤・監視盤等の制御ロジックを、実機の仕様書、制御プログラムに従い忠実に模擬している。

3.2 プラントモデル

プラントモデルは、起動・停止および異常事態発生時

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いる²⁾。Fig. 2 に本シミュレータの模擬範囲を示す。

特に重要な燃焼モデルについては、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。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。ごみ燃焼/乾燥モデルは各段にてごみ性状、ごみ移動、乾燥/燃焼速度を考慮した熱収支、物質収支を考える。ごみ乾燥速度、ごみ燃焼速度は各段のごみ温度およびO₂濃度または水分重量比によるアレニウスの式に従う。以下に第*i*段目の代表式を記述する。

$$(C_r W_{ri} + C_w W_{wi} + C_s W_{si}) \frac{dT_{ri}}{dt} = Q_{hri} + Q_{r(i-1)} + Q_{w(i-1)} + Q_{s(i-1)} + Q_{ai} + Q_{hwi} - Q_{gri} - Q_{fri} - Q_{ri} - Q_{wi} - Q_{si} \quad (1)$$

$$\eta_{ri} = f(T_{ri}, O_{2i}), \quad \eta_{wi} = g(T_{ri}, W_{ri}, W_{wi}, W_{si}) \quad (2)$$

ここで Cr, Cw, Cs : ごみ可燃分/水分/灰分比熱, Wr, Ww, Ws : ごみ可燃分/水分/灰分滞留量, Tr : ごみ層温度, O₂ : 酸素濃度, Q_{hr}, Q_r, Q_w, Q_s, Q_a, Q_{hw}, Q_{gr}, Q_{fr} : 順に一次燃焼発熱量, 可燃分/水分/灰分顕熱, 一次燃焼空気顕熱, 乾燥吸熱量, ごみ層拔出ガス顕熱, 輻

Table 1 General Functional Item of Instructor

機能	内容
訓練選択機能	訓練する対象炉を選択する機能。
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。
バックトラック機能	1～12分前まで、1分間隔で訓練状態に戻る機能。事故時の対処など反復訓練が効果的にできる。
マルチファンクション機能	プラントの異常状態を強制的に発生させる機能。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 停電・復電処理, タービントリップ ・ 送風機, ポンプ, 圧縮機等のサーマルトリップ, 地絡または短絡によるトリップ ・ 熱電対, 流量計, 圧力伝送器等の各検出端の故障 ・ バルブおよびダンパ等の各操作端の故障
シナリオ機能	適切な初期状態、複数のマルチファンクションを任意に組み合わせ登録する。効率的に訓練を実施できる。
システム終了機能	全ての計算機を一括で停止させ、シミュレータ電源を遮断できる状態にする。

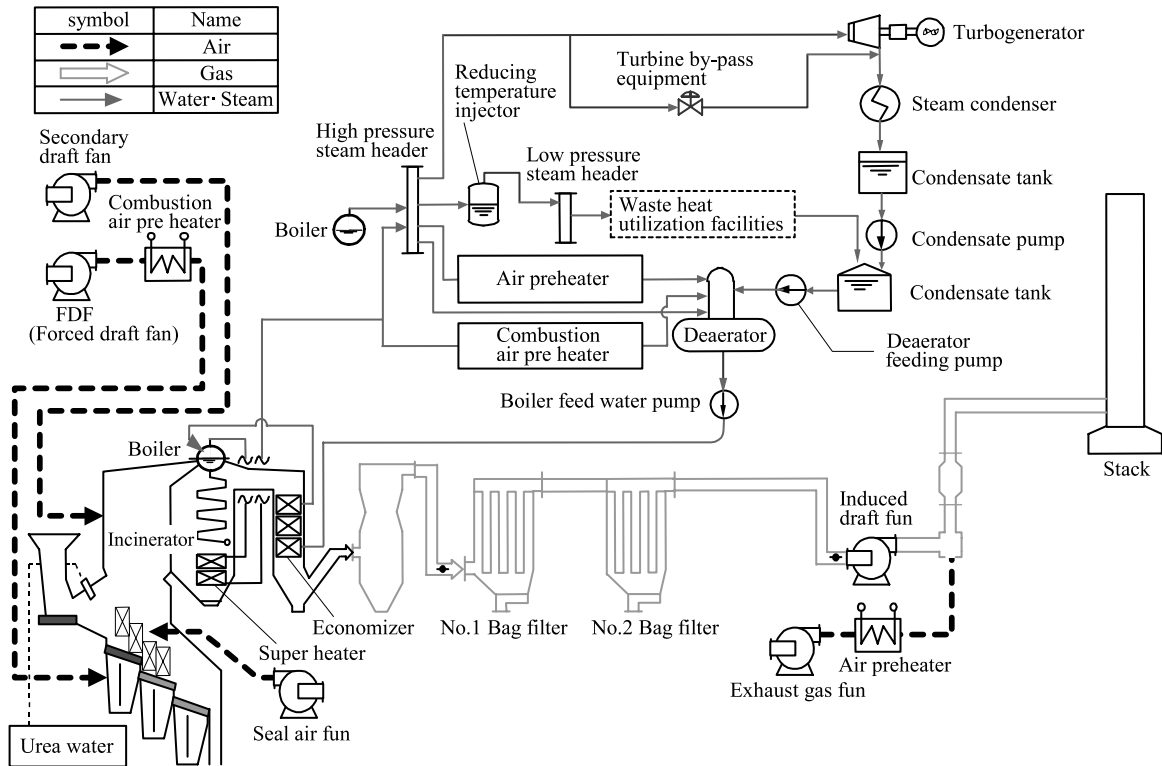


Fig. 2 Range of Simulation.

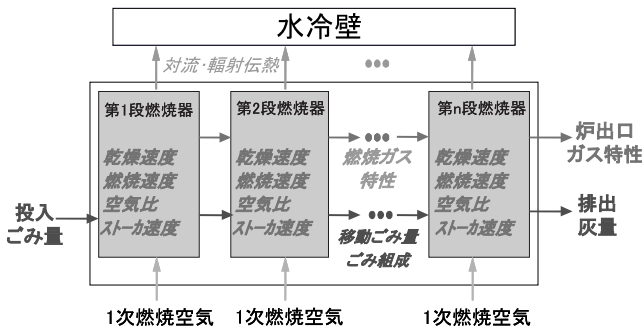


Fig. 3 Combustion Model.

射伝熱量, η_r , η_w : 燃焼速度, 乾燥速度

3.3 VR モデル

従来の運転訓練シミュレータでは、実際に近い環境での訓練が中央操作室に限られており、ボイラ・タービン本体や補機類の現場については、簡易的な環境で代用してきた。しかしながら、現場状態の確認、機器の発停など中央操作室のオペレータコンソールからは操作できないプラントの操作がある。本シミュレータでは、VR を

活用した現場操作模擬により、実機と同様の臨場感で訓練が実施可能である。VR モデルは、仮想空間内での運転スタッフの移動・操作・監視を可能とする。すなわち、現場における異常事態・対応訓練を仮想空間内で実現できること、および現場操作を含めたプラント全体を対象とした訓練ができることが特徴である。また、仮想空間内での移動・操作・監視が容易に行えるよう VR デバイスとして 3D マウス、タッチパネルを装備している。シミュレータの VR モデルは、三次元表示のため VRML (Virtual Reality Modeling Language) により記述した。VR モデルの作成は以下のように実施した。

- (1) 図面および現場写真よりプラントの 3 次元モデルを作成する
- (2) VR デバイスからのユーザ操作を感知するタッチセンサノード、時間経過といったシステムの変化を感知するタイムセンサノードを定義し、VRML ファイルを生成する。
- (3) VR モデルと制御モデル、プラントモデルを連動させるため、(2) で定義したセンサノードと機器スイッチ等の機器操作イベントおよびプラントデータとの対応付けを行う。

これによりリアルタイムに VR 空間内での機器操作入

力検知, プラントモデル・制御モデルからの運転信号変化を検出, VR 表示を行うことが可能となる. 本シミュレータでは, センサノード数すなわち, プラントモデル・制御モデルとのリンクは約 2000 点になる. Fig. 4 に VR 現場模擬の一例を示す.

3.4 モデル精度と強靱性

Fig. 5 に焼却炉およびボイラ系統の本シミュレータ実行結果と実機データの比較結果を, 炉緊急動作試験 (受電および発電停止) の場合について示す. シミュレータ実行結果は, 実機データと精度よく一致していることが解る.

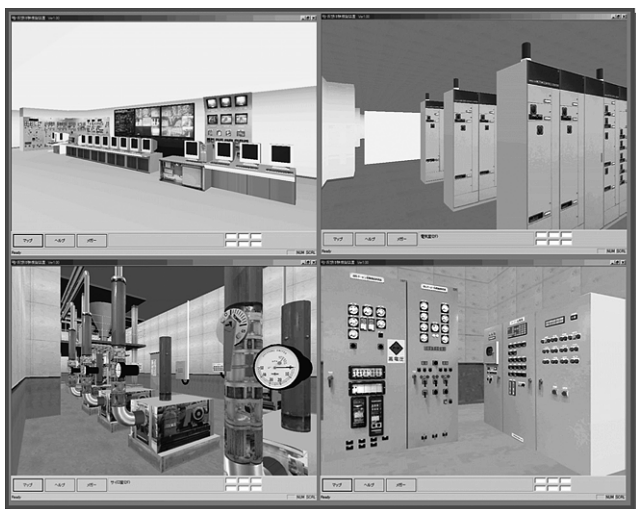


Fig. 4 VR Image of a Plant.

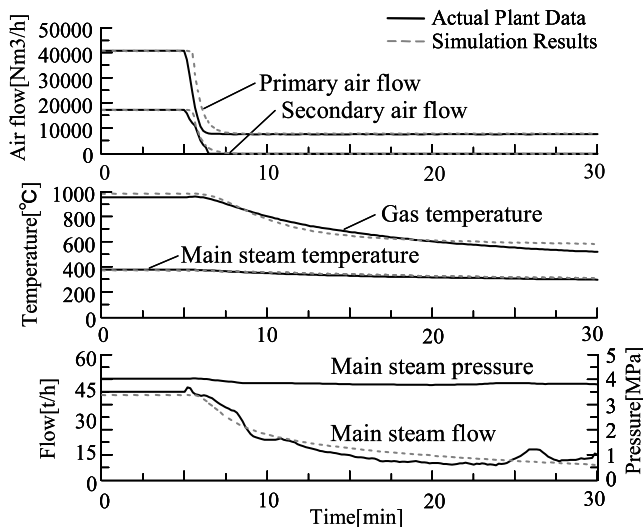


Fig. 5 Comparison Actual Data and Simulation Result.

また, 運転訓練シミュレータでは, モデルの計算精度を向上させ, 実機プラントの挙動と合致していることが重要であるが, 訓練シミュレータの運用を考えた場合, 運転スタッフは, 色々な考え方で手動介入操作を行うため, これらの介入にも耐え得るモデルの強靱性が重要なポイントとなる. よって, 実際の訓練に供するために, 実際の運転に携わっている運転スタッフによる検証を継続的に行い, 運転訓練シミュレータの強靱性の向上を図っている.

4. 運転スタッフ訓練への適用

Fig. 6 は, 運転スタッフ訓練風景である. 訓練は, 中央操作室と現場をそれぞれ担当し 3~5 名で実施される. 比較的運転経験の浅い運転スタッフへの訓練カリキュラムの一例を Table 2 に示す. カリキュラムは, 5 日間に亘り, 起動・停止操作訓練およびシーケンス渋滞や機器故障などの異常発生時対応操作訓練が中心となっている.

また, 訓練終了後のアンケートでは, 「実機で未体験のトラブルを経験しその復旧方法を習得できた. 今後実際に実機で起こった場合に役立つ」, 「現場作業を安全に行う上で基本行動の見直しができた」と言った感想が多く, 本シミュレータが, 運転スタッフの技能向上に寄与できたものとする.

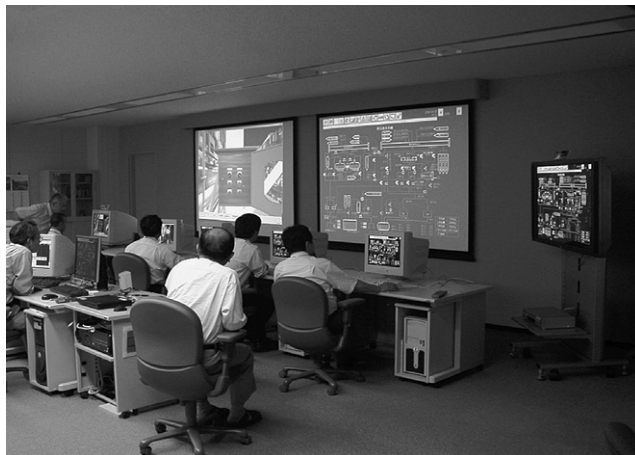


Fig. 6 Training Scene of Training Simulator.

Table 2 Example of Training Curriculum

日	時分	内容
第1日	13:00	集合 (トレーニングセンター)
	13:10	開講 オリエンテーション (講師紹介, 施設説明等)
		運転訓練シミュレータ概要説明 運転シミュレータ装置概要説明 主要構成機器類の目的・機能説明 各設備管理値の説明
	16:30	シミュレータ操作練習
	17:30	第1日終了
第2日	9:00	焼却炉起動停止訓練 焼却炉起動停止に関する説明 1号炉冷缶起動: 1回目 蒸気タービン (ST) スタートアップ/シャット ダウンに関する説明
	13:00	ST スタートアップ/シャットダウン: 1回目 1号炉シャットダウン (全炉停止): 1回目 1号冷缶起動: 2回目 ST スタートアップ/シャットダウン: 2回目 1号炉シャットダウン (全炉停止): 2回目
	17:30	第2日終了

第5日	9:00	異常発生時対応訓練 異常発生時の対応に関する説明と訓練 (その2) ボイラ給水ポンプトリップ ボイラ水位計異常
	11:30	質疑応答, アンケート記入
	12:00	訓練終了, 解散

5. おわりに

現在, 本シミュレータは, 約100名の運転スタッフへの訓練に適用され, 運転スタッフの計画的かつ体系的な訓練が可能となった. 今後, ストーカ炉だけでなくガス化溶融炉, 流動床炉などを対象とした運転訓練シミュレータを開発し, 運転スタッフへの訓練を拡充していく予定である. また, ごみ焼却プラントでは, 熟練運転スタッフの高齢化・減少化により技術ノウハウの伝承が困難な状況にある. 本シミュレータが運転スタッフの訓練だけでなく, 技術ノウハウの伝承に利用できるようユー

ザのニーズを取り入れ, 機能向上を図っていく所存である.

[参考文献]

- 1) 片岡, 宮本, 林, 日限: ごみ焼却プラント運転訓練シミュレータの開発, 日本機械学会「第12回環境工学シンポジウム2002」, 270/272 (2002).
- 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).