

TED Plaza

スケールモデルを活用した廃棄物焼却炉の開発



傳田 知広

J F E エンジニアリング株式会社
技術本部 総合研究所
denda-tomohiro@jfe-eng.co.jp

1. はじめに

一般的に技術開発では、そのプロセスにおいてコスト削減や開発期間の短縮が要求される。この要求に応える開発手法の一つとして、スケールモデル（模型）をうまく活用する手法が有効である（日本実験力学学会，2018）。しかしながら、廃棄物焼却炉の開発プロセスでは、この手法の適用がこれまで難しかった。それは、焼却対象である廃棄物の性状・形状が雑多で不均一であるため、廃棄物燃焼のモデリングが難解であったからである。そのため、相似則に沿って処理規模の異なる複数の試験を行い、段階的にスケールアップの影響を確認・検証することが必要で、実機化までには大きなコストと開発期間を要していた。ところが最近では、スケールモデルの一つである数値シミュレーション技術がハード的にもソフト的にも大きな進展を遂げてきている。従って、廃棄物燃焼のモデリングに大胆な仮定を入れてもある程度の予測が可能となってきており、数値シミュレーション技術は有効な開発ツールとなり得る可能性が広がってきている。

本稿では、当社が実施した対向流型焼却炉の開発（渡辺他，2014，Nakayama, et al., 2014，薄木他，2016）を事例として取り上げ、その際に使用した三次元数値シミュレーションのモデリングについて紹介する。また、対向流型焼却炉はスケールアップが容易となる構造となっており、これを利用したパイロット実証試験における工夫点についても述べる。

2. 対向流型焼却炉の開発

2・1 目的と技術的特長

当社の現主力商品であるストーカ式焼却炉は「JFE ハイパー21 ストーカシステム」である。図1に本炉の炉内縦断面図と横断面図を示す。技術的特長は、排ガス再循環技術（EGR: Exhaust Gas Recirculation）とともに高温空気燃焼技術（HiCOT: High-temperature air Combustion Technology）を適用している点にある。吹込んだ高温空気とごみ層からの熱分解ガスの衝突により平面状燃焼領域を形成させ、局所高温領域の回避と熱輻射によるごみ層加熱を行い、燃焼安定化、熱回収率向上と環境負荷低減を実現している（傳田他，2010）。本炉は2009年に初号機が竣工して以来、多数の導入実績を積み重ねている。

一方、最近ではPFI（Private Finance Initiative）志向から、廃棄物焼却施設の発注は建設だけではなく運営までを含めたDBO（Design Build Operate）方式へシフトしつつあり、発電量増加やランニングコスト削減を強く意識した技術開発が必要とされている。このような背景に鑑み、当社ではJFE ハイパー21 ストーカシステムの改良型となる「対向流型焼却炉」の開発を実施した。

対向流型焼却炉の目的は、JFE ハイパー21 ストーカシステム以上のNOx低減を達成し、炉出口において排出規制値を満足させることで、図2に示すように排ガス処理装置である触媒脱硝塔を省略することにある。これにより、排ガス再昇温用の蒸気を発電に使用でき、発電量の増加とともに、建設コストおよびランニングコスト削減に寄与できる。技術的な改良点は、高温空気と再

循環排ガスの吹込み位置を側壁から天井に変更した点にある。図 3 に対向流型焼却炉の炉内縦断面図と横断面図を示す。JFE ハイパー21 ストーカシステムでは高温空気を側壁から吹込むので、炉中央付近では熱分解ガスの吹き抜けが生じる懸念があった。これに対し、天井吹込みはガス同士が正面衝突するのでその懸念がなくなり、燃焼安定化、温度均一化が一層向上し、NO_x 低減に大きな効果が得られる。

また、天井に設置したノズル 1 セットをモジュールとみなすと、このモジュールを炉幅方向に増減させることで処理規模の拡張や縮小が可能となる。すなわち、小型炉から大型炉までの焼却炉設計が容易となる利点も有している。このモジュール化という考え方はパイロットプラントの製作においても活かされており、これについては後述する。

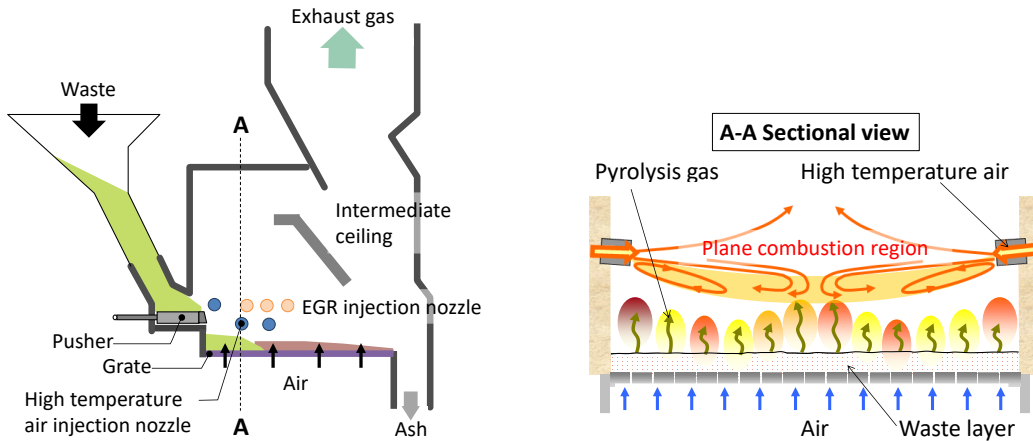


Fig. 1 Stoker type incinerator "Hyper 21 Stoker System"

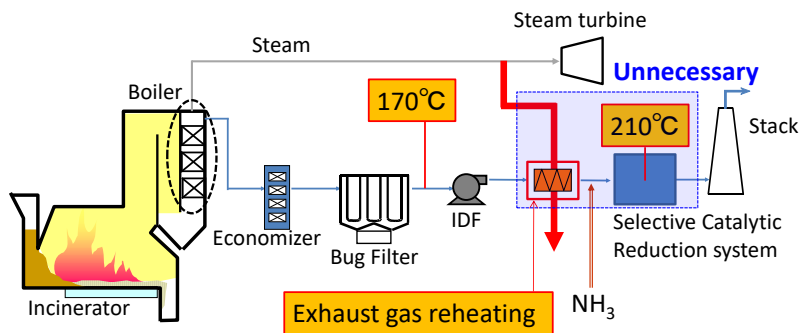


Fig. 2 Flow of waste incineration facility

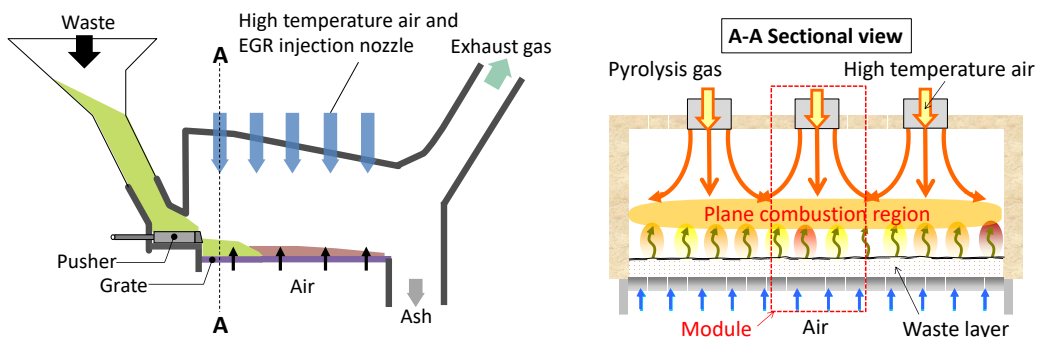


Fig. 3 New stoker type incinerator "Counterflow incinerator"

2・2 性能の比較

対向流型焼却炉の初号機（60 トン/日×2 炉）は 2017 年に竣工した。初号機の運転状況の一例として、O₂、NO_x、CO 各濃度の経時変化を図 4 に示す（狩野他, 2018）。空気比 1.3 相当の安定

燃焼とボイラ出口 NOx 濃度（脱硝なし）の大幅な低減が確認できる。当社では、同規模の JFE ハイパー21 ストーカーシステムと比べ NOx 濃度は約 20%低減でき、売電量に関するコストメリットは 17%増加できると試算している（日本産業機械工業会，2018）。

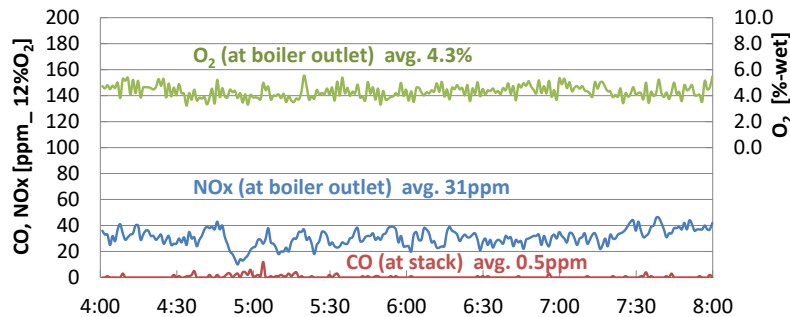


Fig. 4 Trend of O₂, NO_x, CO in actual plant of counterflow incinerator

2・3 開発プロセスの比較

一般的な廃棄物焼却炉の開発プロセスを図 5 に示す。まず、着想したアイデアの実現性をベンチスケール試験（数 kg/日規模）により検証し、パイロット試験（数トン/日規模）および実機試験（数 10～数 100 トン/日規模）によりスケールアップの影響を確認・実証した後、市場投入へと至る。JFE ハイパー21 ストーカーシステムは、アイデア検証段階で一部シミュレーションを取り入れているものの、概ねこのような開発プロセスであった。一方、対向流型焼却炉の場合は、本格的な三次元数値シミュレーションをアイデア検証に使用することで、ベンチスケール試験を省略することができた。更に、上述したモジュール化可能という炉構造上の特長から、パイロット試験のみでスケールアップの影響を確認・実証でき、実機試験も省略することができた。

図 6 に、JFE ハイパー21 ストーカーシステムと対向流型焼却炉の開発プロセスと期間の比較を示す。JFE ハイパー21 ストーカーシステムの開発期間は約 7 年間であるのに対し、対向流型焼却炉はそれに比べて 1～1.5 年ほど短縮することができ、これによって大幅なコスト削減を達成している。



Fig. 5 General development process of an incinerator

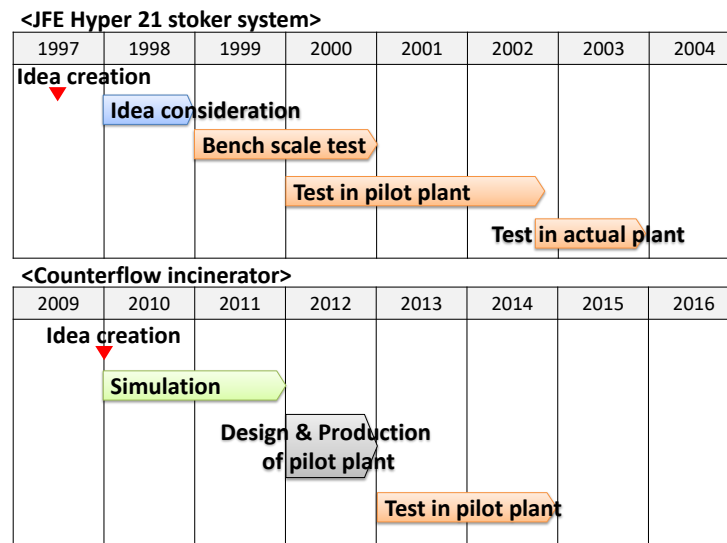


Fig. 6 Comparison of development process

3. 数値シミュレーションにおけるモデリング

本節では、対向流型焼却炉の開発プロセス内で実施した数値シミュレーションのモデリングについて述べる。上述したように廃棄物燃焼はモデリングが難しく、シミュレーションは定性的評価が主となることは否めないが、ある程度の定量的評価も行いたい。そのため三次元メッシュの使用が望ましいが、計算負荷は大きくしたくない。これを解消するべく、ここではモデリング上大きな仮定を行い、難解な廃棄物の乾燥、熱分解・ガス化、チャー燃焼のモデル化を思い切って省略し、ガス燃焼のみを対象とした（傳田他, 2012）。この理由として、評価指標となる炉内温度分布や O_2 、 CO 濃度分布などは、ごみ熱分解特性やチャー燃焼特性よりもガス燃焼特性の影響が大きいと考えたからである。これにより、三次元メッシュの使用でも計算負荷を小さくすることができた。

また、初期条件として与えるごみ熱分解ガスの可燃成分を CO 、 H_2 のみに限定した。これによりガス燃焼では、総括反応式ではなく素反応式数を考慮した $CO-H_2$ 系詳細燃焼反応機構を使用でき、計算負荷を小さくしたまま計算精度の向上も可能となった。ただし、熱分解ガス全体のカロリーは合うように、無視した微量可燃分である CH_4 、 C_2H_4 のカロリー分は、 CO 、 H_2 の組成割合を変更することで調整している。

図 7 に、天井吹き込みのアイデア検証の例として炉幅方向の温度分布を示す。天井に設置したノズルから高温空気を吹込むことで平面状燃焼領域を形成できること、ノズルピッチや高温空気の流速の違いにより、平面状燃焼領域の形成の仕方が違うことが確認できる。図 8 はパイロットプラントにおける試験条件絞込みの結果例である。炉出口横断面の CO 濃度分布は、吹き込み条件により大きく異なることが分かる。

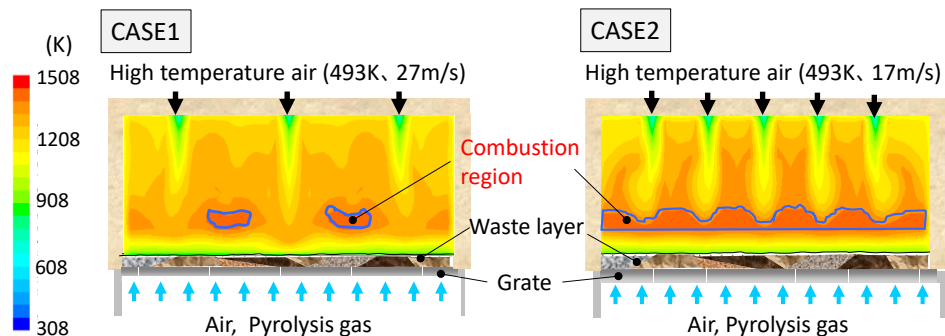


Fig. 7 Difference in formation of plane combustion region

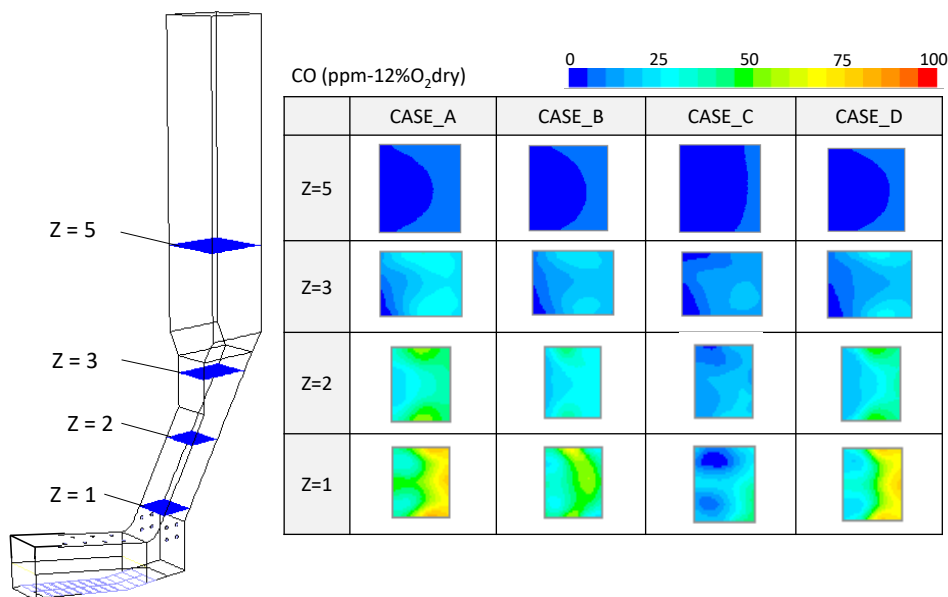


Fig. 8 CO concentration distribution in horizontal section of furnace outlet

4. パイロット実証試験における工夫点

対向流型焼却炉のパイロットプラントの処理規模は、実機での性能が推定できるよう、相似則と設計上の定則を元に3トン/日とした。相似則は“10倍則”と言われるもので、実証済み規模の10倍までは同程度の性能を有すると推定できるという経験則である。これより、本パイロットプラントは30トン/日規模までの性能を推定可能となる。一方、設計上の定則とは、処理規模を拡大する場合、炉長方向ではなく炉幅方向のスケールを大きくするというものである。対向流型焼却炉は炉幅方向にモジュール設計可能という特長を持っており、本パイロットプラントの炉幅を1モジュール分として性能実証できれば、30トン/日以上規模についても性能推定できることになる。このような観点から、結果的に実機実証試験の省略が可能となった。

廃棄物焼却炉では焼却対象がごみであるだけに、燃焼性を左右する空気比の管理が極めて重要である。特にパイロットプラントでは3トン/日という小規模であることから、より厳密な管理が必須となる。そこで本パイロットプラントでは、火格子先端の孔から噴出させる燃焼用空気の供給構造に工夫を施した。すなわち、風箱と呼ぶ燃焼用空気が供給される空間を廃し、図9に示すように中空構造の火格子側面に配管を接続することで、そこから燃焼用空気を供給するようにした。これによって、燃焼用空気の漏れ込みやリークがなくなり、試験炉としてスケールアップの影響確認および実証が可能となった。

試験用燃料には廃棄物固形燃料（RDF: Refuse Derived Fuel）を使用した。そのままでは実際のごみとの低位発熱量の差異が大きいため、水分添加により調整したが、表面がツルツルして水が染み込みづらい特性を持つ。そこで、苗木用保水剤をまぶしたり、野菜くずを混合させたりして、水分を保持する工夫をしている（図10）。

図11の写真において、パイロットプラントの炉天井部と炉内燃焼状況を紹介します。炉天井部には高温空気および再循環排ガスをノズルへ送るダクトがあり、その後方に排ガスが通過する二次燃焼室が見られる。炉内燃焼状況の写真からは、天井吹込みにより火炎が押さえつけられ、平面状燃焼領域が形成されている様子が観察できる。

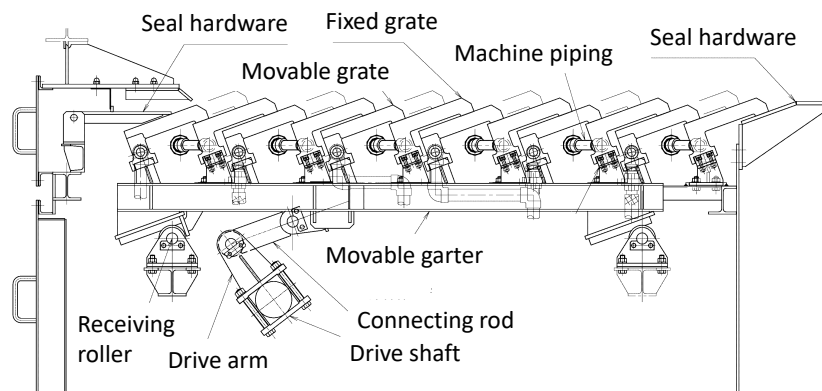


Fig. 9 Structure and photo of grate in pilot plant



Fig. 10 Photo of water retention agent and test fuel



Fig. 11 Ceiling part of pilot plant and burning photo in furnace

5. おわりに

本稿ではスケールモデリングの視点から、当社の対向流型焼却炉の開発プロセスの中で行った数値シミュレーションとパイロット実証試験について紹介した。

ここでの数値シミュレーションにおけるモデリングとその工夫は初歩的なものであり、模擬すべき必要な評価指標がまだまだたくさんある。例えば NOx 濃度であるが、これを定量評価するためには、今回省略したごみ熱分解・ガス化やチャー燃焼をモデル化が必要である。また、燃焼変動を模擬するには、ごみの低位発熱量の変動をうまくモデリングした非定常解析が重要であるし、火格子運動を取り入れたごみ移動モデルの適用も必要である。一方、パイロット実証試験では、燃焼性以外にも耐火物の損傷やクリンカの付着具合などを評価できる工夫がなされるようになれば、更に有用と思われる。

今後、ますます激しくなる社会やニーズの変化、市場のグローバル化などを背景に、技術開発プロセスにおける低コスト化とスピードアップの要求は一段と厳しくなると予想される。それに伴い、スケールモデルの活用が増え、より精緻なモデリングが今以上に重要となる。また、モデリング対象が焼却炉や装置といった単体ものだけでなく、施設やシステム、ネットワーク全体といった広範なものに拡張されていくであろう。そうなれば、AI (Artificial Intelligence) や VR (Virtual Reality) といった進展著しい技術が、新たなスケールモデルとして活用されるようになるはずである。筆者も廃棄物燃焼モデリングの高度化を目指し、励んでいく所存である。

文献

傳田知広, 中山剛, 木ノ下誠二, 中川知紀, 鮎川将, 次世代型ストーカ式焼却炉の運転状況報告, 第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, (2010), pp.351-352.

傳田知広, 中山剛, 内山武, 岩崎敏彦, 鈴木康夫, 小林秀昭 大上泰寛, 奥山昌紀, 数値シミュレーションによるストーカ炉内燃焼挙動解析, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.78, No.789 (2012), pp.1012-1016.

JFE エンジニアリング株式会社, 対向流燃焼方式を適用した廃棄物焼却炉, 第 44 回優秀環境装置表彰 (日本産業機械工業会), (2018), pp.5-11.

狩野真也, 中川知紀, 鈴木康裕, 米田進吾, 中西貴之, 中山剛, 傳田知広, 薄木太一, まほろばクリーンセンターの稼働状況について ~高温空気燃焼技術の改良による低 NOx 運転~, 第 39 回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, (2018), pp.52-54.

Nakayama, T., Denda, T., Watanabe, E. and Kitagawa, T., Improvement of a stoker type incinerator by applying the high temperature air combustion technology, Proceedings of International Workshop on Environment & Engineering 2014 (IWEE2014), (2014), Paper No. 210.

薄木太一, 傳田知広, 中山剛, 対向流燃焼を適用したストーカ式焼却炉の NOx 低減メカニズムに関する考察, 第 54 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2016), Paper No. B332.

渡辺江梨, 中山剛, 傳田知広, 植竹規人, 北川尚男, 横山唯史, 鈴木康夫, 山本浩, 岩崎敏彦, 高温空気燃焼技術を適用したストーカ式焼却炉の性能向上, 日本エネルギー学会第 23 回年次大会, (2014), pp.262-263.

日本実験力学会スケールモデリング分科会ホームページ (online), available from <<http://www.jsem.jp/division/scale-modeling.html>>, (参照日 2018 年 10 月 26 日).