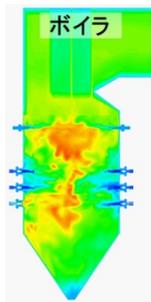
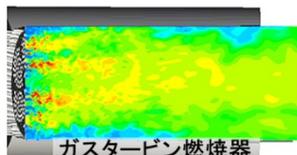


火力発電設備のエネルギー転換を支える 高精度燃焼解析技術

High-precision Combustion Simulation Technology to Support Energy Transition in Thermal Power Plants



高精度CFD燃焼解析



ガスタービン燃焼器

張 志*1
Zhi Zhang

高山 明正*2
Akimasa Takayama

青木 虹造*1
Kozo Aoki

田中 優佑*2
Yusuke Tanaka

斉藤 圭司郎*3
Keijiro Saito

松本 啓吾*4
Keigo Matsumoto

三菱重工業株式会社(以下、当社)では、カーボンニュートラル社会の達成に向け、カーボンフリー燃料(水素、アンモニアなど)に対応可能な火力発電設備の開発を進めている。新燃料への対応に向けては、燃焼機器(ガスタービン燃焼器、ボイラなど)の開発が重要となる。実機的设计に要素バーナや実燃焼機器を用いた燃焼試験に加え、高精度な燃焼解析技術を活用している。本報では、火力発電設備のエネルギー転換を支える高精度燃焼解析技術の概要と検証・適用事例について紹介する。

1. はじめに

当社では、カーボンニュートラル社会の達成に向け、火力発電設備のエネルギー転換を進めており、図1に示すロードマップを策定している。具体的には、水素やアンモニアを混焼・専焼可能なガスタービン、およびアンモニアを混焼可能なボイラを開発中である。燃焼速度等の燃焼性が既往の化石燃料と大きく異なるため、脱炭素への燃料転換には、高信頼性と低エミッションを両立させた燃焼機器の設計が必要となる。燃焼試験を中心とした開発は、検証にコスト・時間がかかるうえ、十分な現象把握が困難である。そのため、天然ガス焼きガスタービン燃焼器や石炭焼きボイラへの適用に向けて開発・検証された高精度燃焼解析技術を、燃料種の特性に応じて更に改良/拡張し、カーボンフリー燃料に対応可能な燃焼機器の設計支援に活用している。

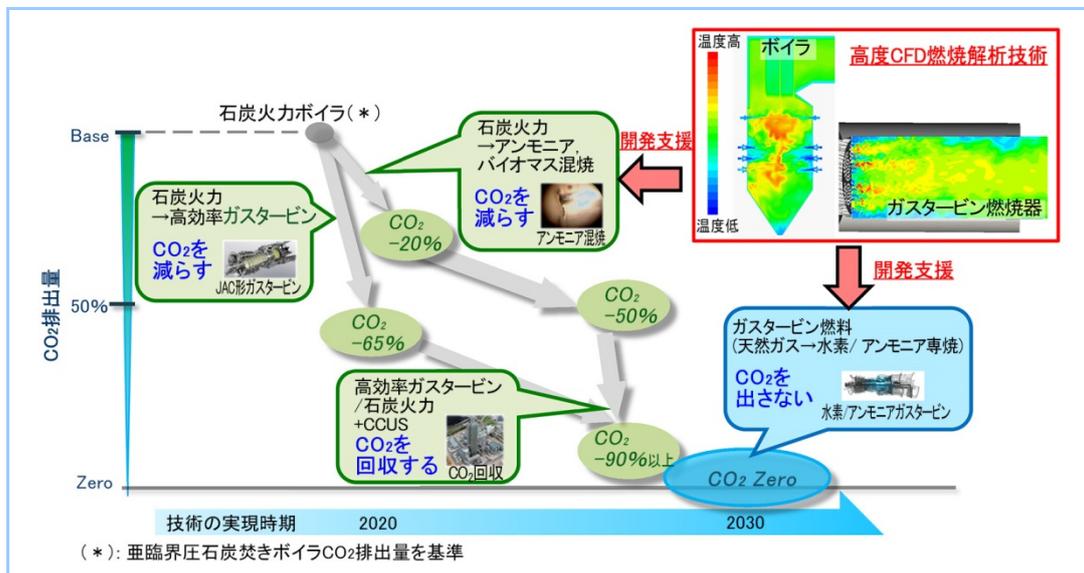


図1 火力発電のエネルギー転換ロードマップ

*1 総合研究所 燃焼研究部 博士(工学)

*2 総合研究所 燃焼研究部

*3 総合研究所 燃焼研究部 次長 技術士

*4 総合研究所 燃焼研究部 次長 博士(環境学)

本報では、当該燃焼解析技術の概要と検証・適用事例について紹介する。

2. ガスタービン燃焼器の燃焼解析技術

ガスタービン複合発電(GTCC:Gas Turbine Combined Cycle)は、化石燃料を使用する最もクリーンな発電設備として、燃料消費の低減とエミッション低減の両面で貢献している。現在の発電用ガスタービンでは、天然ガスの使用が主流であり、近年カーボンニュートラル社会の達成に向けて、水素・アンモニアへの燃料転換が要求されている。燃焼速度等の燃焼性が異なるが、ガスタービン燃焼器開発に重要となる評価項目は安定燃焼の確保とエミッションの低減の観点では共通している。高信頼性・低エミッションを両立する燃焼器開発においては、最適な設計パラメータの探索が必要となる。燃焼試験による性能検証では、設計・製作・試験のサイクルに多大な時間を要するため、高精度な燃焼解析による設計支援へのニーズが高まっている。本章では、ガスタービン燃焼器へ適用している燃焼解析技術の概要と検証・適用事例について紹介する。

ガスタービン燃焼器の解析では、[図2](#)に示す Flamelet アプローチを採用している。Flamelet アプローチでは、Computational Fluid Dynamics(CFD)解析で直接計算した火炎構造を特徴づけるパラメータ(混合分率, 反応進行度など)を用いて、詳細化学反応機構によるデータベースを参照することで、反応速度, 温度, 質量分率などの物理量を取得する。詳細反応の計算を簡略化することにより、Flamelet アプローチは低計算コストかつ高精度を両立させる燃焼解析モデルと考えられる⁽¹⁾。

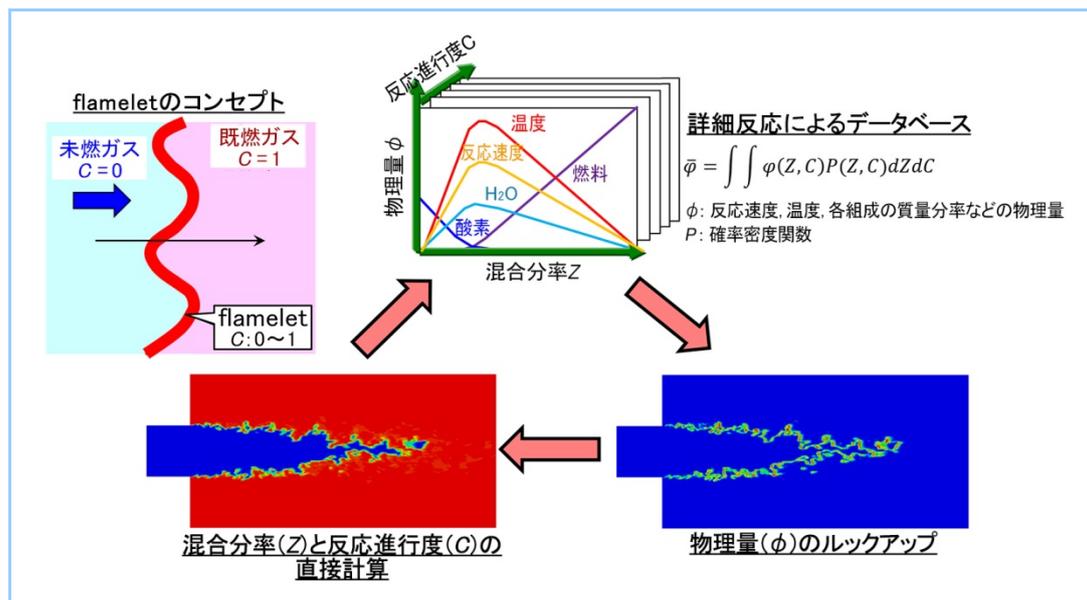


図2 ガスタービン燃焼器に適用している Flamelet アプローチ

2.1 天然ガス燃焼の解析技術

当社の最新鋭の JAC 形ガスタービンでは、タービン入口温度 1650°C 級で世界最大・最高効率を達成した。JAC 形ガスタービンにおける天然ガス燃焼の Dry Low NO_x(DLN) 燃焼器の概要を [図3](#)に示す。本燃焼器は、旋回流を利用して、燃料と空気を予め混合してから燃焼させる予混合燃焼方式を採用している。

実燃焼器(高温, 高圧, 高レイノルズ数)における非定常な乱流挙動によって生じる燃焼状態を高精度で予測するために、数値解析にはラージエディシミュレーション(LES: Large Eddy Simulation)乱流モデルを採用している。メッシュ幅, 時間刻み, 数値離散化スキームなどの具体的な解析設定は流速分布, 濃度分布, 温度分布などの実測値をベースに最適化している。

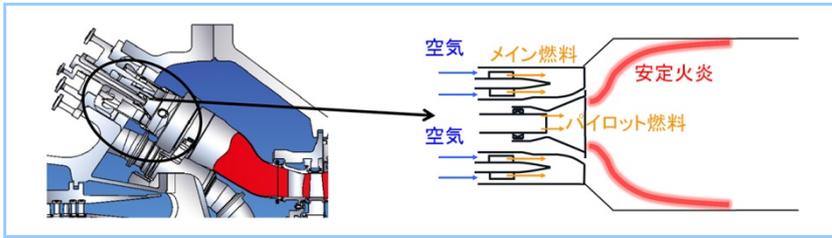


図3 JAC 形ガスタービンにおける DLN 燃焼器の概要

天然ガス焚きの燃焼器を対象とした燃焼 CFD 解析結果を図4に示す。火炎位置(水酸基ラジカル OH*自発光強度のピーク位置, 図4下左)や温度分布(図4下中)の実測値を精度良く再現できていることが分かる⁽²⁾。さらに, 燃焼 CFD 解析は燃料ノズルの設計変更による窒素酸化物 (NOx) 排出量の変化傾向を再現(図4下右)できている, 現在, 低 NOx 天然ガス焚き燃焼器の設計ツールとして活用中である。

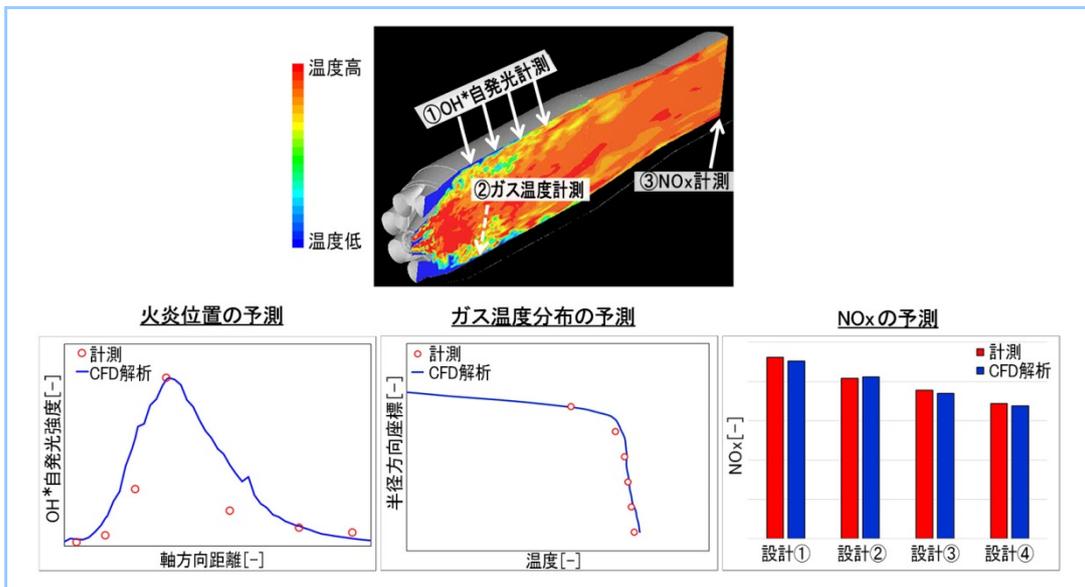


図4 天然ガス燃焼の高精度解析

2.2 水素燃焼の解析技術

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の支援を受け, 幅広い水素濃度 (0~100%) に対応可能なガスタービン燃焼器を開発中である。水素は天然ガスよりも燃焼速度が約8倍と非常に速いため, 逆火の発生リスクが高くなる。このため, 水素焚き用の燃焼器開発では逆火防止を確保しながら, 低 NOx 化や燃焼安定化を図る必要がある。水素焚きの燃焼器は, 図5に示す“マルチクラスタ”というコンセプトを採用している⁽³⁾。マルチクラスタ燃焼器では, 混合に旋回流を利用せず, より小さなスケールで空気と水素を混合することで, 高信頼性・低エミッション性の両立を目指している。

水素の分子量が軽いため, 熱伝導に対し, 燃料の物質拡散速度は非常に速い。天然ガス燃料のレイス数 (熱と物質の移動速度の比) は約1であるが, 高水素濃度条件では1からかなり小さくなる。図6に示すよう, レイス数効果を考慮しないと, 水素の層流火炎速度 (燃焼速度) の計算精度を確保できない。そのため水素の燃焼解析では, レイス数効果を Flamelet アプローチに組み込んでいる。

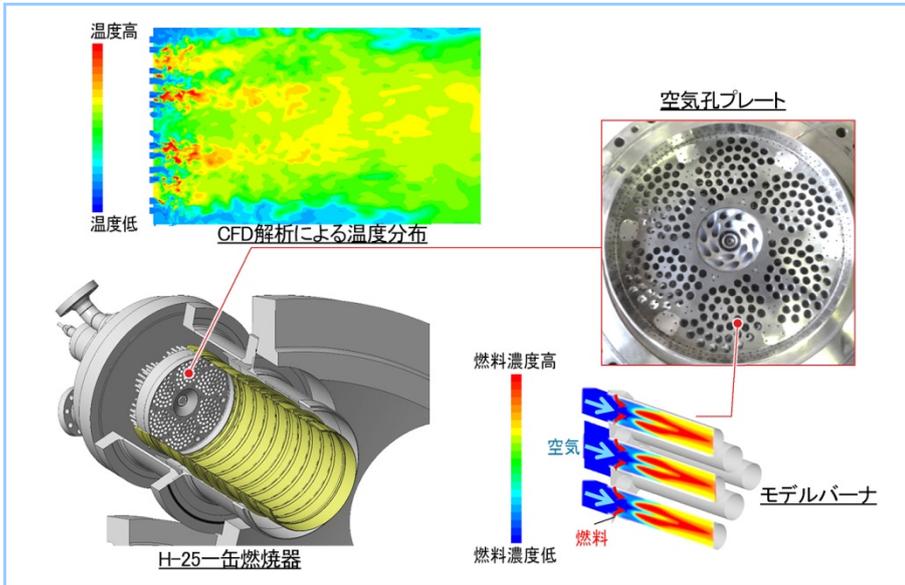


図5 マルチクラス DLN 燃焼器(水素 0~100%)

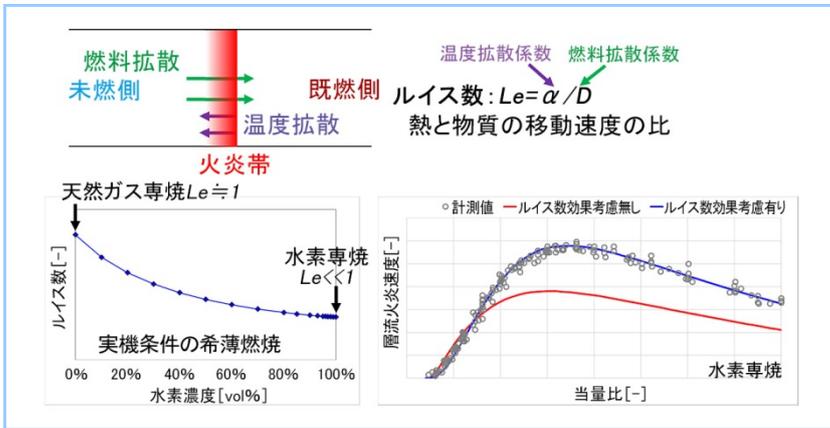


図6 水素燃焼におけるルイス数効果

水素燃焼器を切り出したモデルバーナを対象とした燃焼 CFD 解析結果を図7と図8に示す。天然ガス燃焼と同じく、火炎位置を精度良く再現できていることが分かる。加えて、燃焼 CFD 解析は運転条件や設計パラメータの変更による NOx 排出量の変化傾向を高精度で再現できており、設計支援ツールとする可能性があることを確認している。

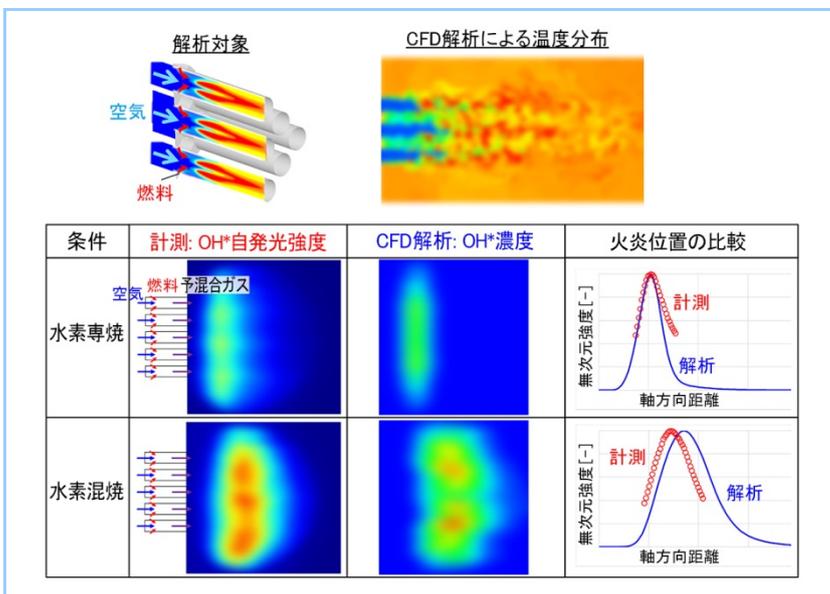


図7 水素燃焼における火炎位置の高精度予測

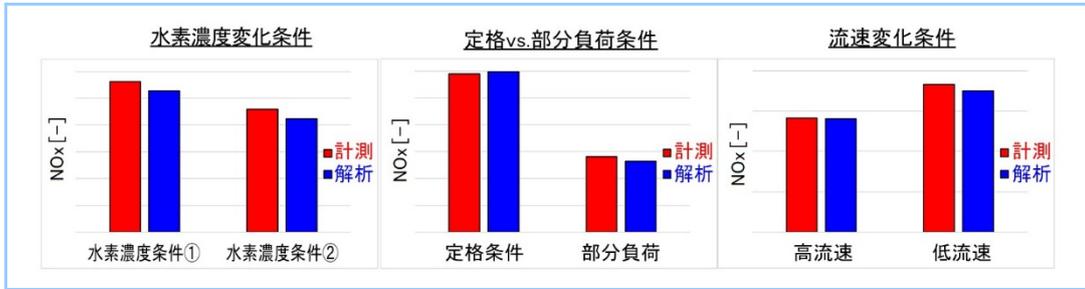


図8 水素燃焼におけるNOxの高精度予測

2.3 アンモニア燃焼の解析技術

アンモニアを専焼できる中小型ガスタービンシステムの開発に着手している。アンモニアは、天然ガスの主成分であるメタンと比べて燃焼速度が約 1/5 と遅いため、保炎性を確保するのが難しい。また、壁面に衝突する噴流や、渦の存在によって、火炎が引き延ばされる(伸長する)場合、燃焼速度は更に低下する。伸長が強まると、火炎が引きちぎられることで局所消炎が発生し、火炎の吹き飛びにつながる恐れがある。大気圧において、アンモニア火炎はメタン火炎の約 1/20 の伸長率で消炎するため⁽⁴⁾、安定保炎に火炎の伸長が及ぼす影響は大きい。保炎の難しさに加えて、アンモニア直接燃焼では、NOxの抑制も課題となる。NOx 排出量は、適切な燃料濃度範囲でアンモニアを燃焼させれば抑制可能であるため、燃料ノズルの最適化や二次空気の投入などによって、燃焼器の低 NOx 化を図ることができる。燃焼器最適化のフェーズにおいて、燃焼の安定性や NOx 等のエミッションを燃焼解析で高精度に予測できれば、燃焼器設計の加速につながる。

アンモニア燃焼の安定性と出口エミッション予測のため、火炎伸長効果を考慮したアンモニア向け燃焼解析技術を開発した。図9は燃焼解析技術の概要である。本技術では、火炎の伸長に伴って燃焼速度(反応速度)が変化する効果⁽⁵⁾を補正係数として Flamelet アプローチに組み込んでいる。火炎伸長効果を考慮した CFD 燃焼解析を文献モデルバーナ⁽⁶⁾にて検証を進めており、今後実機設計に展開する。

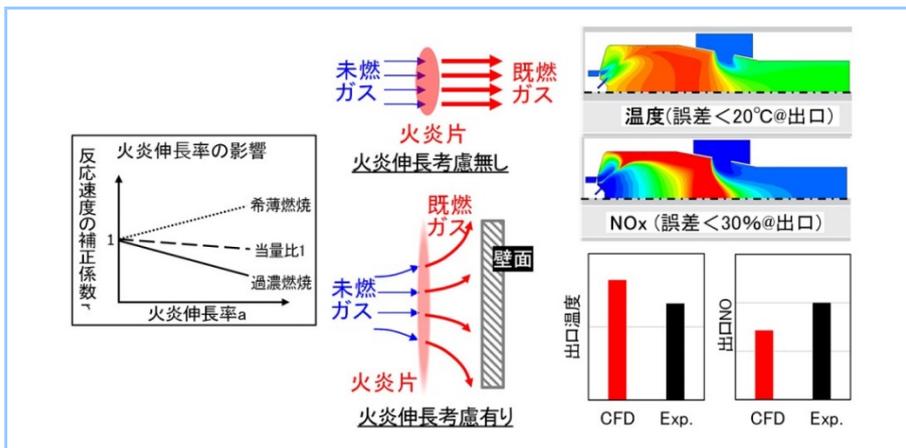


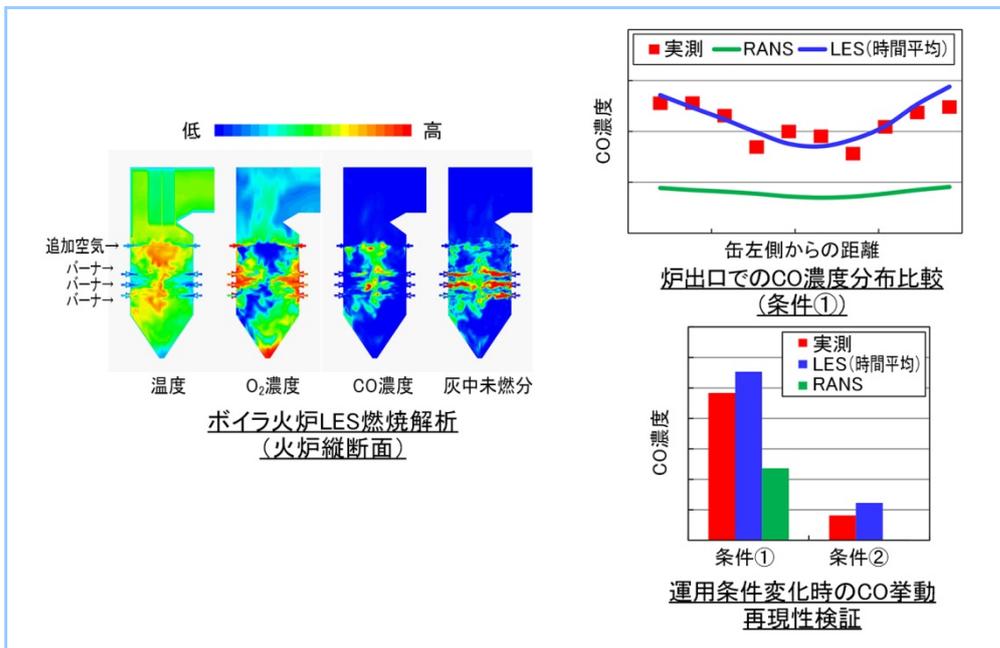
図9 火炎伸長効果を考慮したアンモニア燃焼解析

3. ボイラの燃焼解析技術

ボイラでは、バーナ・空気ポートの改良や運用条件の適正化による排ガス性能向上に向けて、炉内の燃焼状況を詳細に把握し、その効果を正確に評価する必要がある。それらに伴う各部メタル温度の特性を把握することも信頼性向上において重要である。当社では、お客様の有する様々なボイラにおいて、各種改造による効果を事前評価することを狙いとして高精度のボイラ燃焼解析技術を開発してきた。本章では、ボイラへと適用している燃焼解析技術の検証・適用事例について紹介する。

3.1 石炭焚きボイラの解析技術

ボイラの燃焼解析では、微粉炭挙動や輻射伝熱等のサブモデルを組み込む必要があること、計算対象の火炉が巨大であることから計算負荷が高い。そのため、通常のパフォーマンス評価には、計算負荷が低く、時間平均場を仮定したレイノルズ平均ナビエ-ストークス (RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 解析を用いることが多い。一方、RANS で予測が難しいことの1つとして一酸化炭素 (CO) 濃度の予測がある。CO は、微粉炭と空気の非定常的な混合の不均一性が要因の1つであり、RANS では予測精度に限界がある。ここでは、非定常挙動が解析可能である LES による CO 濃度予測事例を紹介する。図 10 に実機ボイラの LES 解析の事例を示す。LES では、炉出口での CO 濃度が実測と分布も含めてより高精度に予測できる。条件①から②は、空気配分を変化させたケースであるが、条件変化による CO 濃度の変化挙動もより高精度に再現でき、RANS よりも精度向上が可能である。本技術は、空気ノズル改造等の未燃分低減方法の開発へと展開が可能である。



次に、燃焼解析による信頼性評価に向けた取組みについて説明する。ボイラ火炉上部の過熱器は多数の伝熱管により構成され、そのメタル温度は燃焼ガスの偏りや、管内の蒸気流量等により左右される。メタル温度の適正管理は、クリープ寿命管理のため重要であるが、熱電対等による計測的なアプローチは、コスト、耐久性等の点から現実的ではない。そこで、燃焼ガスと管内蒸気との伝熱連成解析により、伝熱管のメタル温度の予測手法を開発した。管1本1本を流れる蒸気への熱伝達を管外の燃焼ガス流動と同時に解析することで、局所メタル温度の予測が可能である。NEDO 委託事業にて実機過熱器でのメタル温度データを取得し、予測精度を検証した事例を図 11 に示す。解析は、管断面での周方向メタル温度分布を示す。計測点の中でメタル温度が最高となるのは、実測、解析ともに(a)点であり、実測+14.2℃の誤差で予測できた。計測点間におけるメタル温度高低の序列も、実測と解析で一致し、本技術の有効性を確認した。本技術によりボイラ各部のメタル温度が予測可能であり、ボイラの更なる信頼性向上へと展開する。

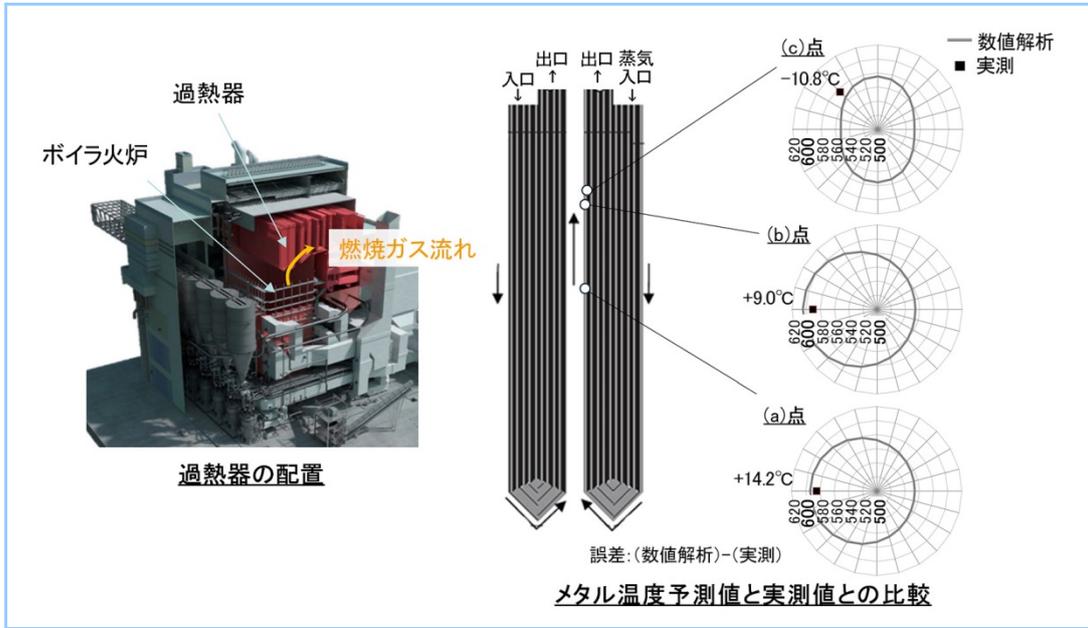


図 11 伝熱管加熱部のメタル温度の高精度予測

3.2 石炭-アンモニア混焼の解析技術

近年、石炭-アンモニア混焼による低炭素化が求められており、混焼時におけるNO_x 評価技術が必要である。図 12 に示す二段 Drop Tube Furnace⁽⁷⁾ (DTF) は、燃料を空気不足環境で還元燃焼させる上段と、追加空気を投入し完全燃焼させる下段で構成され、実機での二段燃焼挙動を模擬可能である。本装置にて実機でのアンモニア混焼を想定した燃焼試験を行い、燃焼特性データを取得した。石炭用 NO_x モデル⁽⁸⁾へアンモニアの酸化、熱分解、NO_x 生成、還元モデルを組み込み、石炭-アンモニア混焼におけるNO_x モデルを開発した。二段 DTF でのモデル検証結果を図 12 に示す。アンモニア混焼や専焼においてもNO_x 特性を良好に予測可能であることを確認した。

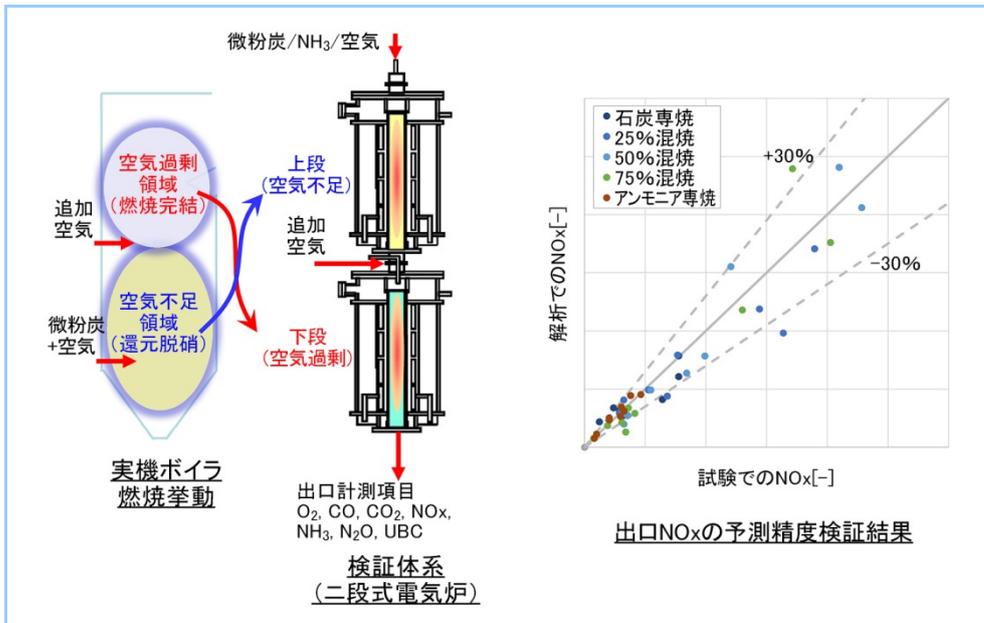


図 12 石炭-アンモニア混焼時の NO_x 特性データの取得と予測モデル検証

次に、小型バーナアンモニア混焼試験での検証事例を紹介する(図 13)。試験では、石炭とアンモニアは各々専用のバーナを設置し、混焼させている。解析から、アンモニアバーナ付近で多量にNO_x を生成するが、その後還元が進展し、追加空気投入までに、バーナ部で生成したNO_x がほぼ消失することが分かる。炉出口NO_x 予測値の比較を示す通り、解析では試験でのNO_x 挙

動を良好に再現できた。アンモニア混焼の条件①と条件②では、バーナへの空気量を変化させているが、条件①では、石炭専焼と同等の NOx レベルに抑制することができ、試験と解析にて一致する結果が得られた。空気量の適正化が、混焼時における NOx レベル抑制に重要と考えられる。今後、大型のバーナ燃焼試験にてデータを取得し、更なるモデル改良・精度向上を進めていき、実機改造時における性能評価に展開していく。

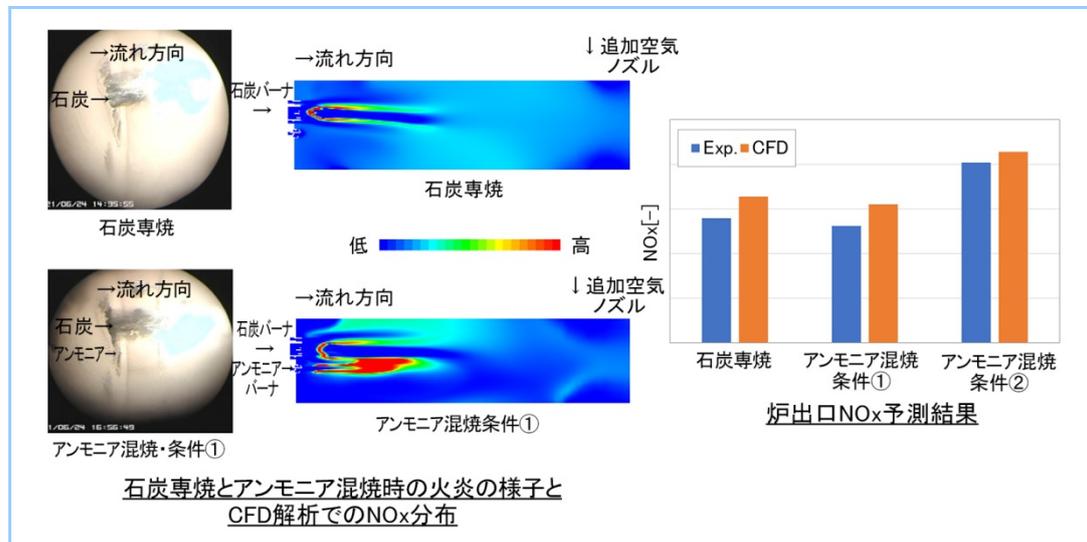


図 13 石炭-アンモニア混焼時の火炎の様子と精度検証

4. まとめ

本報では、火力発電設備のエネルギー転換を支える高精度燃焼解析技術の概要と検証・適用事例について紹介した。ガスタービンについては、天然ガス燃焼の実燃焼器で検証された解析技術を、カーボンフリー燃料の特性に応じて更に改良し、水素やアンモニア燃焼の火炎位置や NOx エミッションを精度良く再現することができた。ボイラについては、石炭燃焼の実機で検証された解析技術を、アンモニア燃焼の基礎データをもとに更に拡張し、アンモニア混焼や専焼の NOx エミッションを精度良く再現することができた。今後、これらの技術を燃焼機器の開発に活用することで、エネルギー転換の加速に貢献していく。

(謝辞) 本報に掲載された実験データの一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託・助成事業 (JPNP16002, JPNP14026) の結果得られたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) J.A. van Oijen. et al. State-of-the-art in premixed combustion modeling using flamelet generated manifolds. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 57 (2016) p.30-74.
- (2) 藤尾一祐ほか, ガスタービン燃焼器内火炎の3次元形状可視化技術, 三菱重工技報. Vol.60, No.1 (2023) p.1-6.
- (3) S. Fukuba. et al. Development of hydrogen-fired gas turbine combustor. IGTC 2021.
- (4) S, Colson. et al. Extinction characteristics of ammonia/air counterflow premixed flames at various pressures, Journal of Thermal Science and Technology. Vol.11, No.3 (2016).
- (5) Reo Kai. et al. Effects of preferential diffusion and flame stretch on FGM method for numerical simulations of ammonia/air premixed combustion, submitted.
- (6) E. C. Okafor. et al. Towards the development of an efficient low-NOx ammonia combustor for a micro gas turbine, Proceedings of the Combustion Institute. Vol. 37, Issue 4 (2019) p.4597-4606.
- (7) 山本研二ほか, 石炭燃焼ボイラ向け燃焼装置開発に寄与する高精度燃焼シミュレーションの取り組み, 三菱重工技報. Vol.52, No.2 (2015) p.67-71.
- (8) M. Taniguchi. et al., A reduced NOx reaction model for pulverized coal combustion under fuel-rich conditions, Fuel. Vol. 81, No 3 (2002), p. 363-371.