

# CFDを用いたバイオマス発電用放射伝熱型熱媒油ボイラの開発（第一報）

## Development of Thermal Oil Boiler of Radiant Heat Transfer Type for Biomass Power Generation with CFD (1st Report)

村田 彬\* 石原 晋\* 丸山祥麻\* 下田浩史\*\* 東元慎吾\*\*\* 塩見洋一\*\*\*\*  
Akira Murata Shin Ishihara Shoma Maruyama Hirofumi Shimoda Shingo Higashimoto Yoichi Shiomi

再生可能エネルギーに対する市場の高まりの中、当社ではバイオマス発電に注目し、特に小規模分散型電源として期待される ORC（有機ランキンサイクル）を用いたバイナリ発電に取り組んでいる。バイナリ発電においては、熱媒油ボイラが必須であるが、国内では放射伝熱部が設置されたような大型のものは実用化されていない。そこで 2MW 以上のバイオマス発電所におけるバイナリ発電設備での実用化を目指し、バイオマス発電用放射伝熱型熱媒油ボイラの開発を実施した。開発に当たり複雑な熱流体現象を取扱うため、CFD (computational fluid dynamics) を活用したボイラ形状の検討を行ったので CFD の有効性を含め報告する。

We are focusing on biomass power generation amid the growing market for renewable energy, and in particular, we are working on binary power generation using the ORC (organic Rankine cycle), which is being anticipated as a small-scale distributed power source. Although thermal oil boilers are essential in binary power generation, large-sized boilers with radiant heat transfer units have not been put to practical use in Japan. Therefore, we developed a radiant heat transfer type thermal oil boiler for biomass power generation to put to practical use in binary power generation facilities at biomass power plants of 2 MW or more. In this paper, we examined the shape of boiler using CFD (computational fluid dynamics) in order to deal with complicated thermal fluid phenomena for the development, and we report on matters including the effectiveness of CFD.

### 1 緒言

#### 1.1 背景

近年、わが国ではエネルギー自給率を高めることを目的とし、CO<sub>2</sub>を増加させず、化石燃料のように有限ではなく枯渇する心配のない再生可能エネルギーに注目が集まっている。

再生可能エネルギーのなかでもバイオマス発電は、他の再生可能エネルギーである太陽光発電、水力発電、風力発電に比べ、天候や気候、地形などの自然条件の影響を受けにくく、また発電量のコントロールが可能な安定電源として評価されており、欧米諸国を中心に多くの稼働実績を有している。

日本国内では、降雨量が豊富で温暖な天候に恵まれているため、潜在的なバイオマス燃料の供給量は高く、また 2012 年に施行された固定価格買取制度（以下 FIT 制度）により、再生可能エネルギーの買取価格が一定期間定額保証されたことで、多数の企業が様々な形式でバイオマス発電への取り組みを進めている。国内におけるバイオマス発電所の建設実績は増加傾向にあり、今後もしばらくはこの状況が継続するものと予想されている。当社では拡大するバイオマス発電市場の中で、小規模分散型電源として期待されるバイナリ発電に取り組んでいる。

### 2 バイナリ発電

#### 2.1 バイナリ発電

バイナリ発電は ORC（有機ランキンサイクル）発電ともいわれ、蒸気タービンを使用する BTG（ボイラガスタービン発電）と同じくランキンサイクルによる発電方式の一種である。ORC では BTG とは異なり熱媒として水ではなく、有機媒体（シリコンオイル等）を利用して、発電を行う方式である。具体的には排熱回収設備で回収された熱源をシリコンオイル等と熱交換し、気化したシリコンオイルの蒸気によりタービンを回転させて発電を行うものである。また、気化したシリコンオイルを液体に凝縮する過程で使用する冷却水は 80～90℃の温水として回収することができ、暖房・給湯用や産業設備の熱源として供給することが可能である。（図 1）

バイナリ発電では、熱源の温度域が BTG に比べると低い。したがって、これまで排気していた温度域の熱を回収し有効利用することが可能であり、バイオマス発電だけでなく、工場低温排熱などを有効活用することも可能なシステムとなっている。

\* 機械システム事業部 産機技術本部 技術 2 部 \*\* 株式会社クリモトビジネスアソシエイツ CAE センター  
\*\*\* 株式会社ダイフレ \*\*\*\* 龍谷大学 理工学部

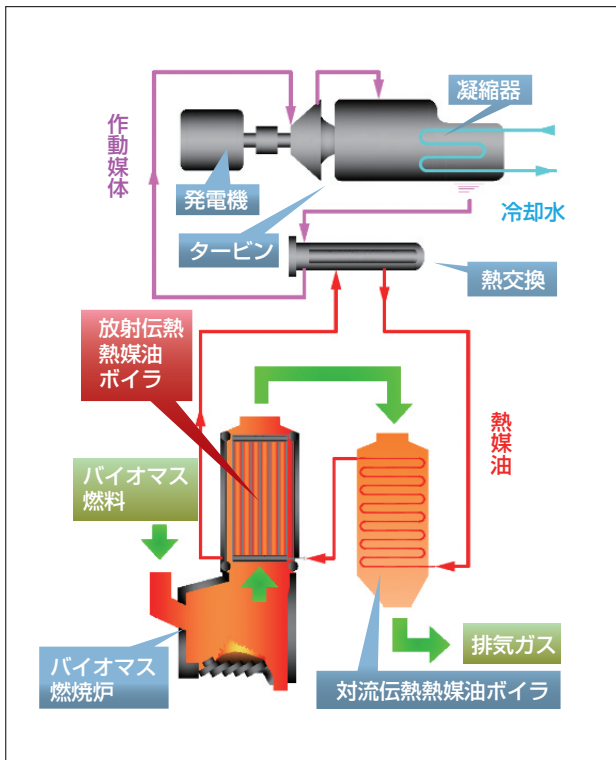


図1 ORCフロー図

バイナリ発電は、熱と電気の二つのエネルギーを供給（熱電供給）することが最大のメリットである。作動媒体の凝縮過程において、温水の形で熱エネルギーが回収されるため、発電+温水利用による総合的な熱利用が成立つ場合は総合熱効率80%以上となり非常に効率の高いシステムとして運用が可能である。回収された熱エネルギーはそのままクリーンな温水として使用する他に木質燃料の乾燥や、暖房設備等に使用することも可能である。

欧州のような寒冷地では、熱利用（温水供給）が盛んであり、この点からバイナリ発電が熱と電気による地域分散型エネルギー供給システムの中核技術として、発展してきた。そのため、国内でも地域分散型電源として運用される規模である2MW規模の発電事業計画で、温水利用が可能な場合、熱電供給型事業の展開が有効であると考えられ、バイナリ発電が選択候補としてあげられる。

火力発電では一般に蒸気ボイラにより高温・高圧蒸気を回収し、この蒸気によりタービン発電機で電力を回収する。廃熱回収用蒸気ボイラのような気体同士（燃焼ガス-蒸気）の熱伝導の場合、熱伝導率が小さいため、伝熱管表面温度は燃焼ガス側に引寄せられ、高温となる。

これに対し、熱媒油による熱交換の場合、気体同士の熱伝導に比べ、液体側の伝熱係数が大きいため、伝熱管表面温度は液体側に引寄せられ、伝熱管の温度も液体側に近似する。腐食要因物質を含む燃焼ガスからの熱回収の場合、伝熱管の温度が高くなると、高温腐食の発生が懸念されるが、熱媒油による熱交換では伝熱管の温度を低く抑えることができることから、高温腐食が発生しにくく、メンテナンス費用を格段におさえることが可能となる。高温腐食の影響を表すグラフを図2に示す。

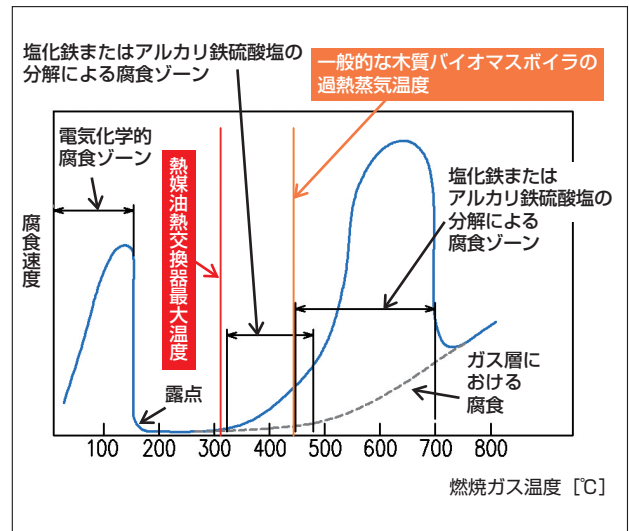


図2 ガス温度と腐食速度の関係<sup>3)</sup>

バイナリ発電を採用する上でのメリットは以下のとおりである。

- a) FIT制度での熱電供給事業の事業採算性を高く見込むことができる。ただし、条件として熱の有効利用を前提とする。
- b) 熱源の回収に使用する熱媒油の加熱温度が低いため、これまで有効利用の難しかった低温の廃熱を回収し発電することが可能である。また熱回収に使用する熱交換器の伝熱管も腐食しにくい環境で使用するため、メンテナンス経費を小さくできる。

当社は2MW規模の地域分散型バイオマス発電市場への参入を目指す上で、これらバイナリ発電の優位性を評価し、バイナリ発電の積極的な市場導入を目指した。

## 2.2 開発概要

バイナリ発電の市場導入を目指す上で、熱回収用の大型熱媒油用熱交換器の技術が不可欠となる。特に、バイオマス燃料を燃焼した燃焼ガスからの熱回収では、高温の燃焼ガスからの熱回収となるため、この高温域（700℃以上）では、伝熱管を直接排ガス中に挿入し、対流伝熱による熱交換をさせることは、材料の熱耐性・経済性等を考慮した場合好ましくなく、高温域では放射伝熱を利用した熱交換が好ましい。

しかし、国内では蒸気ボイラによる熱回収が中心であり、可燃性液体である熱媒油を使用した熱交換器を設計製作するメーカーは限られている。当社は熱媒油ボイラ的设计実績を持ち、今後の熱媒油ボイラの製造販売に積極的な方針であったボイラメーカーである株式会社ダイクレ（以下ダイクレ）と熱媒油ボイラ的设计を進めることとした。しかしながらダイクレには熱媒油での放射伝熱部のボイラ设计実績は無く、今回の设计については、両社にとって新規開発を行うことと同じ工程を踏む必要がある。また理論計算に基づいた设计を行えたとしても、その设计結果に対して信頼性評価ができない状況であり、何らかの手段を用いて信頼性検証が必要となる。

ボイラの性能には、流体の速度、量、温度、物性などの様々な条件が複雑に絡み合い、単純な数値計算と実機での性能の誤差が非常に大きくなる。そのため、実験機を試作し、検証するなどの方法が必要であるが、放射伝熱の特性上、スケールダウンした実験機では、放射伝熱の影響が極めて小さくなり<sup>1),2)</sup>再現性に問題がある。また、大型熱媒油ボイラであるため、実スケールに近いサイズの実験用ボイラ設備を製作することは多大な費用がかかる。それに加えて、ボイラ内部の複雑な高温流体や熱の動き、局所的な熱集中などを測定することは困難である。

そこで今回、CFD (computational fluid dynamics) ソフトウェアを活用することにより、設計したボイラ性能を検証する一つの判断基準とすることとした。

### 3 CFDソフトウェアについて

#### 3.1 CFD の概要

CFD は一般的に熱流体解析とも呼ばれ、流体の流れや熱の移動をコンピュータ上でシミュレーションが可能である。近年では解析技術やコンピュータの性能向上により、解析結果を実際的设计に活かすことも十分に可能である。

一般的な CFD では基礎方程式と呼ばれる以下の3つの式を数値的に解くことによって解を求める。

- ・ナビエ-ストークス方程式
- ・連続の式
- ・エネルギー保存式

これらの方程式を有限体積法で離散化して解くため、解析領域を複数の小さな空間(要素)に分割する。この要素の集合をメッシュと呼ぶ。メッシュ分割により、隣り合う要素同士の境界条件を方程式の形で導き出し、これを連立して解く。仮に、要素数が100のメッシュであった場合、100元の連立一次方程式、つまり100×100の行列式を解くことにより、解を求めることができる。CFD ではこれを反復法と呼ばれる繰り返し計算によって近似的に解く。反復回数が多いほど厳密解に近づき、計算毎の変化量が一定値以下になった時点で打ち切る。この時点で結果を確認し、様々な検証を行い、結果が収束しているかを判断する。収束が観測スケールに対して十分でない場合、もしくは連立方程式が発散してしまった場合、妥当な解が得られない。

#### 3.2 PHOENICS について

流体解析のソフトウェアは多数販売されているが、その中で、気体の放射伝熱を解くことが可能で、過大なPCスペックを必要としない、そして実績があり操作に高度なプログラミング知識を必要としないインターフェースを備えたソフトウェアを選定し、3次元熱流体解析ソフトウェア PHOENICS (Advanced Package) を導入した。

PHOENICS は世界で初めて販売された汎用 CFD ソフトウェアでありながら、最先端の要素分割方式を取られており、比較的 low スペックのコンピュータでも放射伝熱を取扱える。さらに、CFD ソフトウェアの平均的な価格よりも安価という特徴もある。

PHOENICS は放射伝熱を解くとき、Immersol モデルという計算手法を使用する。Immersol モデルは経済的でありながら、複雑な形状でも計算値が実現象に近い結果となることが分かっている。<sup>4),5)</sup>

今回の PHOENICS の導入および運用については、高度な専門知識を必要とすることから、このソフトウェアに精通している龍谷大学の塩見教授に、本研究への適用性の評価を依頼した。その経緯を踏まえ、本研究については龍谷大学との共同研究として取組むこととし、実際のソフトウェアの運用、結果の評価等の協力を委託した。

### 4 熱流体解析

#### 4.1 解析モデル

##### 4.1.1 R1 モデル

設計初期案では円筒型の躯体に、熱媒管をらせん状に配置した形式(図3)を考えていた。

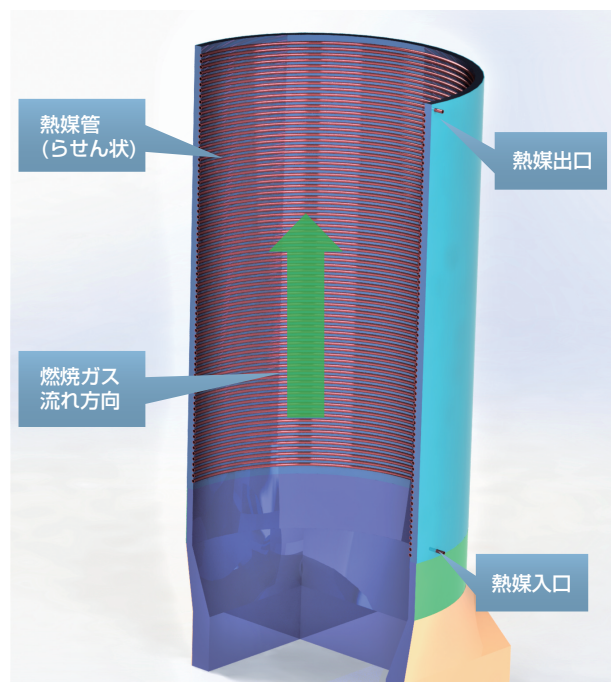


図3 ボイラ初期案断面図

しかし、上記構造ではらせん円環の直径が4mを超え、施工性、搬送性に問題がある。そのため、ダイクレと検討を進め、再設計したR1モデルおよび諸条件を図4、図5および表1に示す。矩形の筒形になっており、ボイラ熱媒管が四面壁にそれぞれ配置されている。熱媒油がボイラ下部に配置された集合管に入りそこからボイラ内を上下に往復しながら出口集合管へと向かう構造である(図6)。燃焼ガスは、空洞になっている躯体中心部

を、ボイラ下部より上部へ通過する。伝熱管は熱媒管と熱媒管の隙間を金属で接合し、プレート状にしたボイラ構造（メンブレン構造）となっており、4枚のパネルに分割して運送することが可能である。熱媒油は松村石油株式会社製、パーレルサーム 300として設計している。CFDにより、R1モデルのボイラ性能および、予測しうる問題点についての検証を行う。

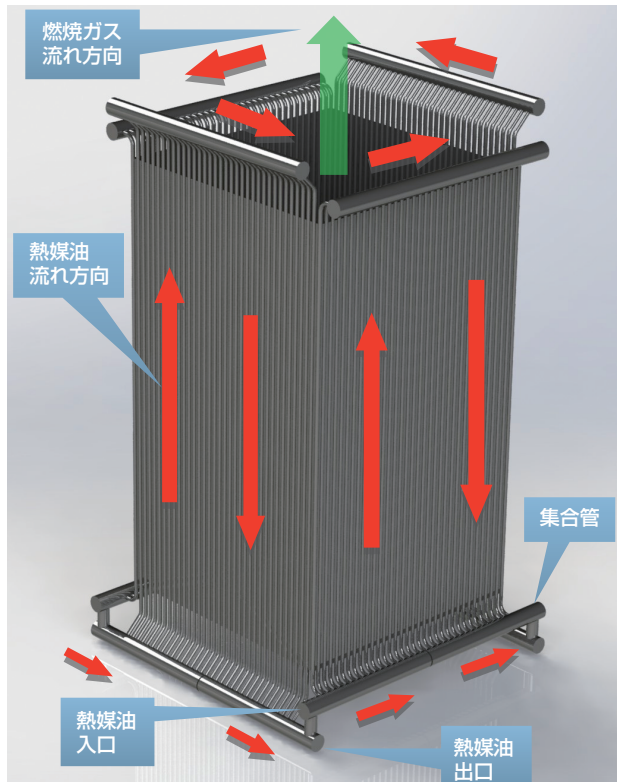


図4 R1モデル全体像

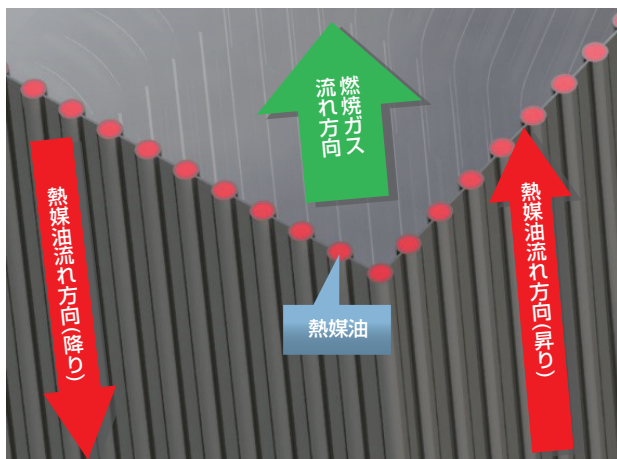


図5 ボイラ壁断面形状

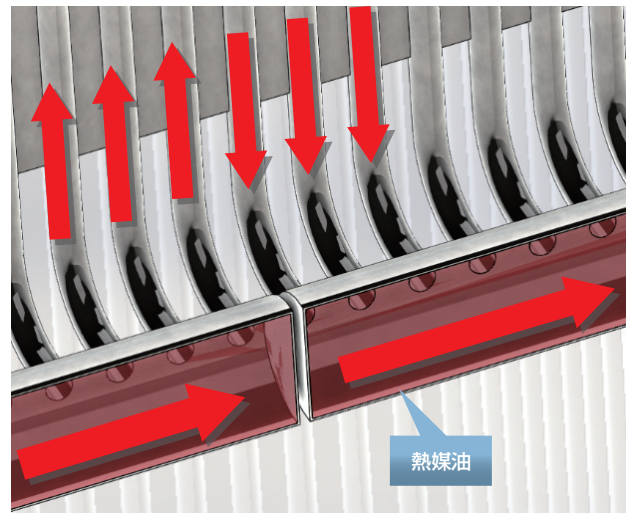


図6 下部集合管断面形状

表1 R1モデル諸条件

ガス側条件	
ガス流量	$3.95 \times 10^4$ [Nm <sup>3</sup> /h]
ガス流速	2.7 [m/s]
ガス入口温度	880.0 [°C]
ガス出口温度	780.0 [°C]
ガス側パス数	1
熱媒油側条件	
熱媒油流量	$2.35 \times 10^5$ [kg/h]
熱媒油流速	2.1 [m/s]
熱媒油入口温度	295.5 [°C]
熱媒油出口温度	305.5 [°C]
熱媒油側パス数	8
伝熱面積	110.0 [m <sup>2</sup> ]

#### 4.1.2 簡易モデル

R1モデルでの解析には長時間の計算時間が予想される。計算を収束させるための適切な解析条件を得るには、条件を変えた計算を何度も実施する必要がある、一回の計算が長時間の場合、収束条件を見つけるまでに膨大な時間がかかってしまう。そのため、前段階として、R1モデルをスケールダウンした簡易モデルにより設定する境界条件、メッシュ分割精度、および計算コントロールの設定を確認した。また、これにより高温状態のガスで放射伝熱による熱交換が妥当に行われる収束条件を探った。簡易モデルおよび諸条件を図7、表2に示す。熱媒油および、燃焼ガスの流れ方向は、R1モデルと同様である。また、熱媒管の太さおよび熱媒油流速もR1と同様である。

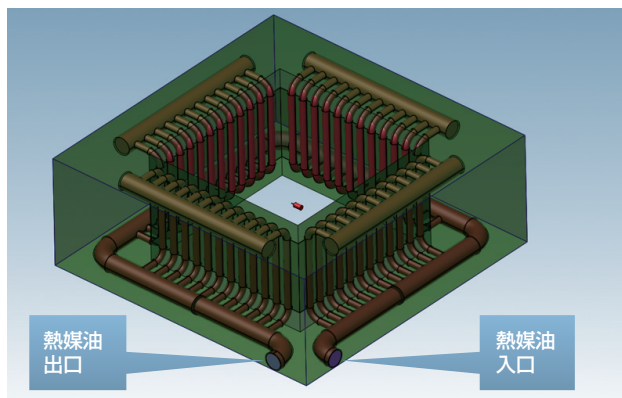


図7 簡易モデル全体像

表2 簡易モデル諸条件

ガス側条件	
ガス流量	11.3 × 10 <sup>4</sup> [Nm <sup>3</sup> /h]
ガス流速	4.0 [m/s]
ガス入口温度	880.0 [°C]
ガス出口温度	780.0 [°C]
ガス側パス数	1
熱媒油側条件	
熱媒油流量	1.18 × 10 <sup>5</sup> [kg/h]
熱媒油流速	2.1 [m/s]
熱媒油入口温度	295.5 [°C]
熱媒油出口温度	305.5 [°C]
熱媒油側パス数	8
伝熱面積	6.5 [m <sup>2</sup> ]

## 4.2 簡易モデルでの解析

### 4.2.1 解析条件

結果が収束した解析条件を表3に示す。

解析は放射伝熱ありの場合と無しの場合の2パターン実施した。放射伝熱無しの解析を T-1、放射伝熱ありの解析を T-2 とする。

表3 簡易モデル解析条件

熱媒油条件	流入量	33.0 [kg/s]
	流入温度	295.0 [°C]
	流入物	パーレルサーム 300
燃焼ガス条件	流入速度	4.0 [m/s]
	流入温度	880.0 [°C]
	流入物	空気
	吸収係数	0.1 [m <sup>-1</sup> ]
熱媒管	材質物性	炭素鋼
	放射率	0.8
放射伝熱モデル		Immersion モデル
反復回数		2000
要素数		298 × 149 × 315 = 13,986,630

吸収係数については、ガス性状によって異なり、実験などでも測定することは難しいため、伝熱工学資料<sup>2)</sup>を参考に、ホッテルらが導き出したグラフなどから想定値を算出している。

### 4.2.2 解析結果

T-1、T-2の計算時間および物質収支バランス、熱収支バランスを表4に示す。

表4 簡易モデル熱収支バランス

モデル名	T-1	T-2	
計算時間 [h]			
	16.1	17.6	
系内外物質収支	流入量 [kg/s]	36.526	36.526
	流出量 [kg/s]	-36.561	-36.566
	流入 + 流出 [kg/s]	-0.035	-0.040
	誤差 [%] (流入量基準)	-0.096	-0.108
	誤差 [%] (流出量基準)	0.096	0.108
系内外熱収支	流入量 [W]	43.003	43.003
	流出量 [W]	-43.106	-43.110
	流入 + 流出 [W]	-0.103	-0.107
	誤差 [%] (流入量基準)	-0.240	-0.240
	誤差 [%] (流出量基準)	0.240	0.239

物質収支、熱収支は流入および流出のバランスより解析誤差 0.3% 以内となっており、こちらも十分収束していると判断できる。

T-1、T-2の圧力、速度、温度のコンター図を図8～13に示す。コンター図とは等値線図とも呼ばれ、変数が同じ値になる部分に線を引き、その線を境界に、色で塗り分けたものである。PHOENICSのコンター図では、変数の値が高い領域ほど赤に近づき、値が低いものほど青に近づく。

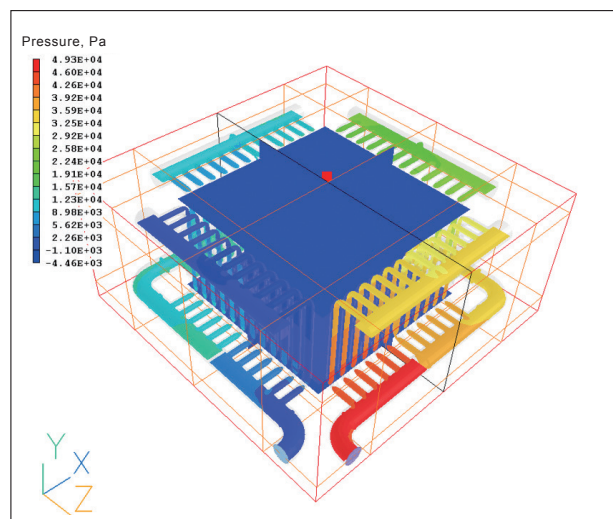


図8 T-1圧力コンター図

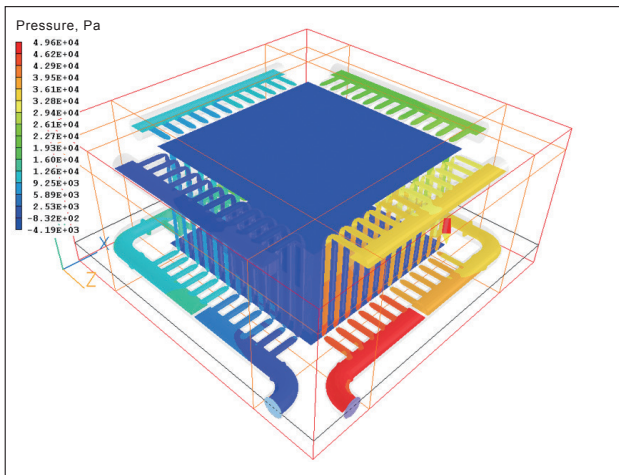


図9 T-2圧力カウンター図

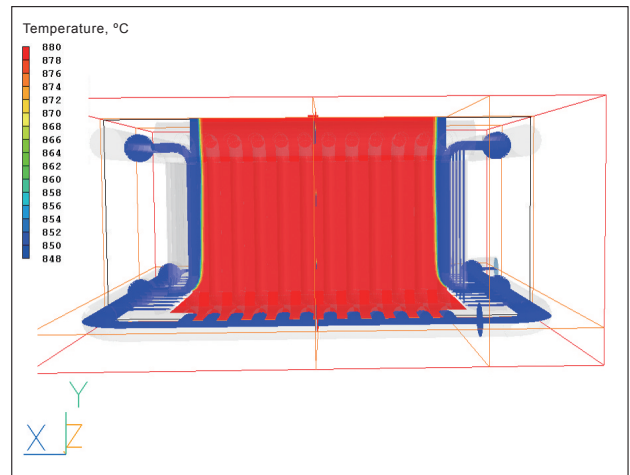


図12 T-1温度カウンター図  
(中心部断面図)

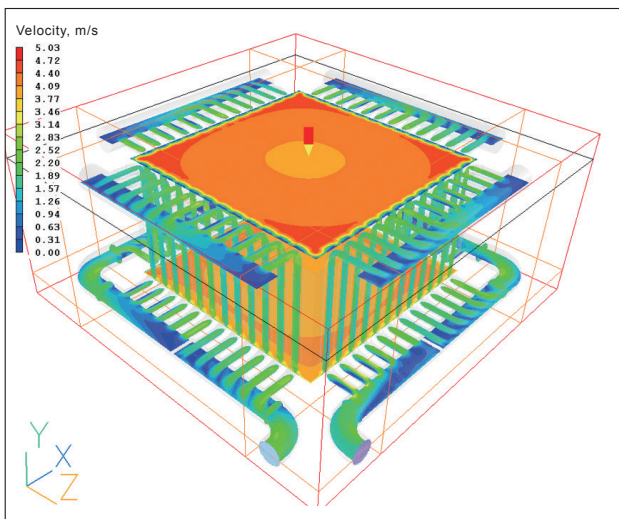


図10 T-1速度カウンター図

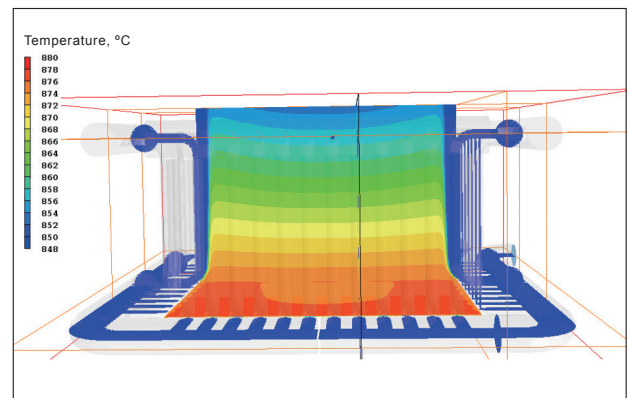


図13 T-2温度カウンター図  
(中心部断面図)

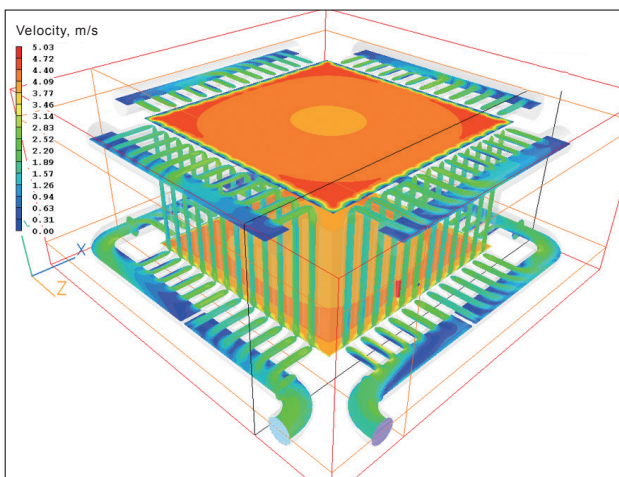


図11 T-2速度カウンター図

図 8, 9, 10, 11 より、圧力、速度共に実現現象に即した状態と考えられる結果が出ており、放射伝熱有り無し共にほとんど同じ結果となっている。しかし図 12,13 より、温度カウンター図に関しては、ガス温度に大きな差が出た。放射伝熱条件以外の条件は全て同様であるので、放射伝熱の影響であることは明らかである。これにより高温状態のガスで、放射伝熱による熱交換が妥当に行われるメッシュ数および設定条件を見極めることができた。

### 4.3 実寸モデルでの解析

#### 4.3.1 解析条件

簡易モデルでの解析により得た知見を反映し、実寸の R1 モデルでの解析条件を表 5 に示す。

表5 R1モデル解析条件

熱媒油条件	流入量	65.5 [kg/s]
	流入温度	295.0 [°C]
	流入物	バーレルサーム 300
燃焼ガス条件	流入速度	2.7 [m/s]
	流入温度	880.0 [°C]
	流入物	空気
	吸収係数	0.1 [m <sup>-1</sup> ]
熱媒管	材質物性	27 [°C] 炭素鋼物性
	放射率	0.8
放射伝熱モデル		Immersol モデル
反復回数		2000
要素数		512 × 743 × 517 = 196,675,072

パイプ部分のメッシュ分割は、簡易モデルと同じサイズ、個数でカットとした。本モデルでは、全体のモデルサイズに対して、配管サイズが小さいため、メッシュが膨大なものとなり、実寸モデルでは約2億の要素数となった。放射伝熱による影響は、簡易モデルでの解析により明らかであるので、実寸モデルでは放射伝熱を設定したもののみ実施した。

4.3.2 解析結果

計算時間および物質収支バランス、熱収支バランスを表6に示す。

表6 R1モデル熱収支バランス

モデル名		R1
計算時間 [h]		286
系内外物質収支	流入量 [kg/s]	79.451
	流出量 [kg/s]	-78.062
	流入 + 流出 [kg/s]	1.389
	誤差 [%] (流入量基準)	1.748
	誤差 [%] (流出量基準)	-1.779
系内外熱収支	流入量 [W]	94.406
	流出量 [W]	-101.040
	流入 + 流出 [W]	-6.634
	誤差 [%] (流入量基準)	-7.028
	誤差 [%] (流出量基準)	6.566

物質収支流入および流出のバランスは誤差2%以内であるが、メッシュ数が膨大であるため、熱収支バランスは7%程度の誤差があり、完全な収束には至っていないと考えられるが、後述のコンター図での収束構造の検証としては十分と判断し、本結果より考察を行う。

圧力、速度、温度のコンター図を図14～16に示す。

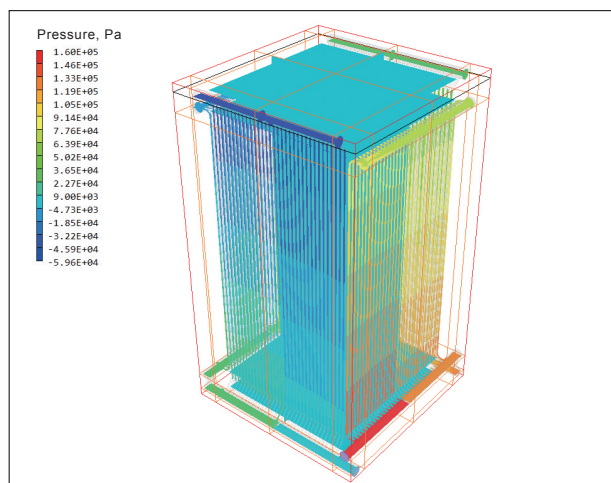


図14 圧力コンター図

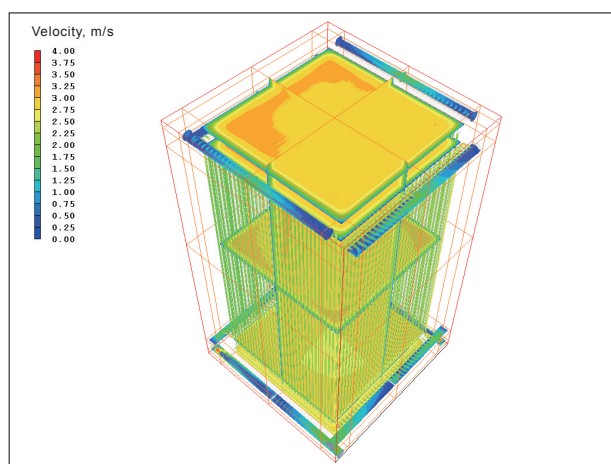


図15 速度コンター図

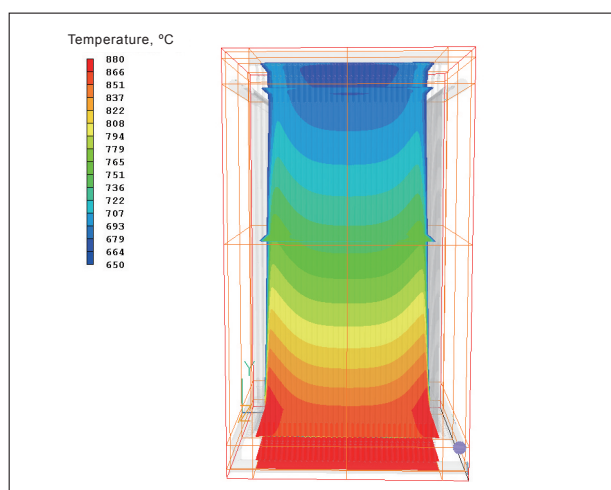


図16 温度コンター図 (中心断面)

コンター図に関しては、圧力、速度共に実現象に即した状態で結果が出ており、収束していると考えられる。収束できていない影響により、一部図15上部ガスに若干の速度の偏りが見られる。

図16より、中心断面温度を見ると、伝熱の影響により中心部ガス温度がボイラ出口に近づくにつれ徐々に低下していることがわかる。

#### 4.4 解析結果と設計計算値の比較

設計時想定していた総括伝熱係数と、解析結果より求められた総括伝熱係数の値を、表7に示す。

表7 総括伝熱係数比較

		解析値		設計計算値	
		ガス	熱媒油	ガス	熱媒油
流量	[kg/s]	14.0	65.5	14.0	65.5
比熱	[kJ/kg°C]	1.170	2.036	1.264	2.036
入口温度	[°C]	880.0	295.5	880.0	295.5
出口温度	[°C]	706.4	316.7	780.0	305.5
入出温度差	[°C]	173.6	-21.2	100.0	-10.0
交換熱量	[MW]	2.83		1.76	
伝熱面積	[m <sup>2</sup> ]	110.4		110.0	
対数平均温度	[°C]	480.5		527.6	
総括伝熱係数	[W/m <sup>2</sup> °C]	53.4		30.4	

設計計算値よりも、解析結果の総括伝熱係数が高く、想定よりもボイラの熱交換効率が大きくなる結果となった。

設計計算はボイラの流体の流れや形状を考慮せず、熱交換面積のみを考えた計算であり、さらに対流伝熱の熱交換量を無視しているため、より実際の条件に近い状態を適用した解析結果と差異が出たと考えられる。しかし、結果の差異が大きいいため、今後さらなる検証が必要である。

#### 5 まとめ

以上の結果より、得られた知見を以下にまとめる。

- CFD ソフト PHOENICS (Advanced Package) を使用して高温ガスから固体面への放射伝熱計算が可能であることを確認した。
- 簡易モデルおよび実寸モデルでの解析結果より、CFD が、実際の放射伝熱型熱媒油ボイラ設計の妥当性を探るための一要素として有効であることが明らかとなった。
- 実寸モデルでの解析では、R1 モデルで、本システムに必要な熱交換量を十分満たす計算結果を確認した。
- 設計計算値と解析結果の総括伝熱係数の差異が大きくなったため、設計計算方法および解析結果のさらなる検証が必要であり、今後の課題となる。

#### 6 結言

本研究により、バイオマス発電用放射伝熱型熱媒油ボイラの基本設計を実施し、その妥当性を CFD により確認できた。解析結果に関しては未収束の部分もあり、さらなる検証が必要であるが、検討および解析の後、本基本設計を元に、詳細設計を実施し、実機製作へ移行する。

今後は、実機運用データより設計および解析へのフィードバックを行い、品質の向上を目指し、製品開発に臨む予定である。

#### 参考文献：

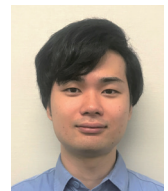
- 一般社団法人機械工学会：伝熱工学資料 改定第5版、一般社団法人機械工学会（2009）、pp.131-164
- 北村 健三・大竹 一友：基礎伝熱工学、共立出版株式会社（1991）、pp.152-153
- V. K. Fassler, H. Leib and H. Spahn : Korrosionen an Müllverbrennungskesseln, Mitteilungen der VGB (1968), Vol.48, pp. 126 - 139
- Arnab Chakrabarty, and Arafat Aloqaily : Using CFD to sdditfacilities comply with themal hazard regulations such as new API RP-752 recomentions, Hazards XXII symposium series, no. 156 (2011), pp.205-212
- Muhammad Arif Budiyanto, Takeshi Shinoda, Nasruddin : Study on the CFD simulation of refrigerated container, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 257 (2017), pp.1-10

#### 執筆者：

村田 彬

2017年入社

プラント設計に従事



石原 晋

1992年入社

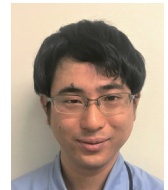
プラント設計に従事



丸山祥麻

2015年入社

プラント設計に従事



下田浩史

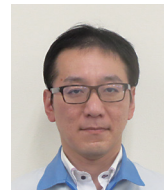
2002年入社

株式会社クリモトビジネス  
アソシエイツにて  
CAE業務に従事



東元慎吾

株式会社ダイクレ



塩見洋一

龍谷大学 理工学部 教授  
博士（工学）

