

平成 31 年度 環境省委託業務

平成 31 年度中小廃棄物処理施設における
先導的廃棄物処理システム化等評価・検証事業

炭化燃料化技術を活用した
中小廃棄物処理におけるエネルギー
回収評価事業

成 果 報 告 書

令和 2 年 3 月

川崎重工業株式会社

日工株式会社

要約

我が国の廃棄物・リサイクル対策として、2016 年度版の環境白書では、循環型社会の形成に向けて、物質フローの観点から「入口」、「循環」、「出口」という指標に対し、それぞれの数値目標が設定されている。これらの指標に対して、各自治体のごみ処理施設では、ごみの持つエネルギーを高効率に回収する取り組みが積極的に行われている。

エネルギー回収については、国内のごみ処理施設のうち 67%が熱や電気といった形でエネルギー回収をしている。そのうち発電設備を有する施設は全体の 30%程度である。ごみ処理規模別に見ると、100t/日未満の施設では発電はほとんど行われていない。こうした小規模施設数は国内の 48%に相当し、この処理規模におけるエネルギー回収が不可欠である。

こうした状況から、100t/日未満の施設における低コストでの発電技術の開発が期待されるものの、現状においては発電設備に導入する費用が運営期間中の発電による費用低減効果より多いため、直接的にエネルギーとして回収するのではなく、リサイクル資源として定義されているごみ燃料化技術を導入することで、未利用のエネルギーを回収するという観点が重要と考えられる。

そこで本事業では、ごみ炭化燃料化技術（以下、炭化技術）を活用することによりエネルギー回収を図ることを大目的として、一般廃棄物を炭化してエネルギー回収した炭化燃料を化石燃料の代替燃料として利用するために、施設の高性能化と炭化燃料の利用先の拡大を行うことにより CO₂ 削減に貢献する。

炭化技術を利用した施設（以下、炭化施設）は、国内において 2002 年～2006 年に 6 施設が展開された。しかし、

- (1) バッチ運転のため起動用燃料に化石燃料を使うので運営費が高い
- (2) ごみ由来の燃料であるため塩素濃度が高く、ボイラ等利用先の機器への影響が懸念され利用先が少ない
- (3) 利用先へは有価で引き取られていたが、利用先への輸送費を負担する必要があったため、結果として逆有償となる

といった課題のため、それ以降新たな施設は建設されていなかった。

2015 年 7 月に竣工した西海市炭化センター（処理規模：30t/d=15t/d×2 炉）は、上記の課題を解消し国内で始めて発電事業者の発電燃料として利用するシステム（以下、炭化システム）を構築し、順調に運営を続けている。

本施設の運営を通じて、今後炭化システムの普及、炭化燃料の利用促進を図る上では以下の点をクリアすることが重要と考えられる。

<炭化システム普及、炭化燃料の利用促進のために求められる点>

- (1) 施設内での CO₂ 排出削減および更なる燃料費コストダウン：低質ごみ

時の化石燃料使用量低減

(2) 利用先の拡大による他施設での CO₂ 排出削減：炭化燃料の利用先拡大

(3) 燃料の高品質化：炭化燃料の塩素濃度が他のバイオマス燃料と同等

求められる点の(1)(3)を炭化施設の高性能化、(2)を炭化燃料の利用先拡大と位置付けて取り組む。本事業では、炭化施設の普及を通じて中小廃棄物施設のエネルギーを回収し利用することで、CO₂ 排出削減に寄与することが目的であることから、上記(1)(2)を実施し、(3)は本事業の範囲外で実施する。

炭化燃料化技術を活用した中小廃棄物処理施設におけるエネルギー回収

- ◆炭化施設の高性能化(燃料代替利用)
 - ◆炭化燃料利用先の拡大
- ➡ CO₂排出削減技術の活用促進

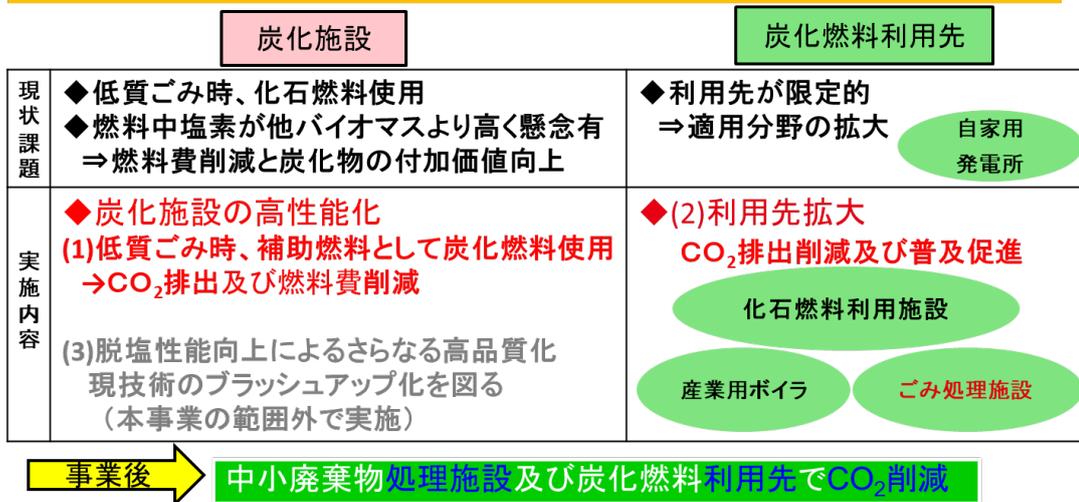


図 本事業の概要

なお、炭化施設で製造された炭化燃料を施設内または施設外において、利用する場合には、炭化燃料をできるだけ前処理工程を少なくして利用できる方法を構築する必要があり、下記の技術課題がある。

<技術課題>

- a.炭化燃料を利用方法に応じて供給可能な供給システムの構築
- b.炭化燃料利用時に施設の排ガス基準を満足する燃焼装置(バーナやその他)の構築

本事業では、上記実施目的および技術課題に対して下記を行うことにより、炭化技術によるエネルギー回収を目指す。

<実施概要>

(1)炭化施設の高性能化

炭化施設の燃焼炉における炭化燃料助燃利用の燃焼解析及び試験設備での燃焼試験

(2)炭化燃料利用先の拡大

ごみ処理施設の焼却炉内における炭化燃料の燃焼シミュレーション、

試験設備での燃焼試験及びごみ処理施設での実証試験

以上の炭化施設および炭化燃料の利用先での有効利用の実証を示す取組みを3年間で行い、「各施設で化石燃料と20%以上混焼利用しCO₂排出量を削減する」という開発目標を達成するため、平成31年度取組んだ成果の概要を以下に示す。

(1)炭化施設の高性能化

- a. 炭化燃料化施設を模擬した試験装置による炭化燃料燃焼試験の実施
- ・施設内で利用を行う予定の直投ノズル型の投入方法にて炭化燃料を試験炉内へ投入し、西海市炭化センター燃焼炉の燃焼ガスの下記項目をそれぞれ同一条件にして試験を行った

1) 燃焼炉内流速 2) 燃焼炉内滞留時間

その結果、1),2)では、排ガス値は、炭化センターの基準値より十分低い値となり、燃焼率（可燃分が燃焼した割合）も95%以上の結果が得られ、炭化燃料化施設における施設内利用で20%以上の混焼を行うという開発目標達成の目処がついた

b. 燃焼炉燃焼解析結果の検証

- ・炭化燃料化施設の燃焼炉における燃焼シミュレーション解析結果は、燃焼状況や燃焼率が同様であることが確認でき、現象との整合性があつたことを確認できた

(2)炭化燃料利用先の拡大

- a. 実証用炭化燃料投入ホッパ供給機と炭化燃料バーナによる炭化燃料燃焼試験の実施

- ・昨年度噴霧試験を行い良好な噴霧特性を得た混焼バーナと吹込バーナの燃焼試験を実施し、下記の結果を得た

1) 混焼バーナ

目標である炭化燃料20%混焼において燃焼率85%以上
排ガス特性として、排ガス規制値内での利用が可能
混焼率（化石燃料と炭化燃料の発熱量の混焼割合）を30%まで上げてても、混焼利用は可能
起動時利用を模擬した場合も、利用可能である。

2) 吹込バーナ

目標である炭化燃料20%混焼において燃焼率95%以上
排ガス特性として、排ガス規制値内での利用が可能
混焼率を50%まで上げてても、混焼利用は可能
起動時利用を模擬した場合も、利用可能である。

b. 予備燃焼炉燃焼解析結果の検証

1) 混焼バーナ

重油専焼、20%混焼の燃焼試験における炉内温度分布、燃焼率で、解析結果と整合性があることを確認できた。

2) 吹込バーナ

重油専焼、20%混焼の燃焼試験における炉内温度分布、燃焼率で、解析結果と整合性があることを確認できた。

c. 実証炉へのバーナ設置検討

1) ごみ焼却施設への設置検討

・選定根拠

ごみ焼却施設では、一般廃棄物の処理を確実にできることが最重要視されるため、施設を改造する必要がなく、排ガスデータもおおむね良いデータを示し、リスクがもっとも低いと考えられる吹込バーナを選定した。

・申請

来年度実証試験が行えるように兵庫県知事に変更申請中である。

・解析

播磨町の焼却炉で混焼を行った場合の解析を行い、良好なデータを得た

d. その他の利用先での利用検討

1) アスファルトプラントにおける重油－炭化燃料混焼検討

アスファルトプラントで骨材の乾燥のために使用する重油の代替燃料として炭化燃料を使用する場合に懸念される腐食の検討のために、化学熱力学解析を行った。解析の結果、炭化燃料がもつナトリウム、カリウム等によって塩素分が塩化物として固定化されるため、腐食性ガスによる腐食が促進される可能性が低く、塩素濃度がある程度高くても利用できる結果が示唆された。

2) 炭化燃料の安全利用のための検討

ごみ固形燃料の安全な取り扱いについては、ごみ炭化燃料適正管理検討会より発行されている。また、下水汚泥の炭化燃料の安全な取り扱いについては下水道事業団より発行されている。平成 15 年度に竣工された西海市炭化センターでは、その取り扱いと比較して問題ない取り扱いがされていることを確認し、利用先でも同様の取り扱いを行えば安全に取り扱えること考えられる。

(3) システム全体

ごみ処理 50t/日の施設規模の場合、提案システムを適用した場合、

- a. CO₂ 排出量を従来の単純焼却システムよりも
年間 4,166t-CO₂ (発電所利用) 2,141t-CO₂(アスファルトプラント
利用)削減できることが試算された。
- b. これらの結果により、事業終了後も水平展開され 2030 年度までに全
国 55 施設 (RDF 施設同等) に炭化燃料化施設が普及し、各施設が炭
化燃料を利用することで年間 229,130t-CO₂ (発電所利用) 117,775 t-
CO₂ (アスファルトプラント利用)削減が可能であることが試算され
た。

Summary

As measures for waste materials and recycling in Japan, the FY2016 White Paper on the Environment takes the viewpoint of the flow of material and sets numerical targets for the indicators of the “Entrance,” “Circulation,” and “Exit” aspects of that flow as preparation for the formation of a recycling-oriented society. As action for these indicators, the waste processing facilities of local governments are actively engaged in efforts to efficiently recover energy from waste.

In this energy recovery, 67% of the waste processing facilities in Japan recover the energy in the form of heat or electricity. About 30% of those facilities have power generation facilities. A breakdown by size shows that almost no power generation occurs at facilities that handle less than 100 t/day. These small-scale facilities account for 48% of Japan's total number of facilities, so energy recovery at this scale is essential.

Due to this situation, there are expectations for the development of low-cost power generation technology for facilities processing less than 100 t/day. However, rather than this direct recovery of the energy, what is thought to be important in the current situation is to recover the unused energy by introducing waste-to-fuel technology, which is defined as a recycled resource.

The purpose of this project is to recover energy by utilizing technology to produce fuel through waste carbonization (hereinafter called “carbonization technology”).

From 2002 to 2006, six facilities using carbonization technology (hereinafter called “carbonization facilities”) were developed in Japan. However;

- (1) The operating costs are high because fossil fuel is used as the starting fuel for batch operation.
- (2) The fuel has a high chlorine concentration because it is derived from waste and this means that there are not many users due to concerns about possible effects on the user equipment such as boilers.
- (3) The fuel was taken by the user for a price, but it was necessary to bear the transportation cost to the user, so it resulted in a reverse situation where compensation was being paid.

As a result of these issues, no new facilities were built after the six.

The Saikai City Carbonization Center which was completed in July 2015 (Processing scale: 30 t/d in two 15 t/d furnaces), solved the issues above and constructed the first system in Japan to produce power generation fuel that is used by a power generation company (hereinafter called the “carbonization system”). This Center has continued to operate smoothly.

In order to use the operation of this facility to promote the spread of carbonization systems from now on, it is thought that it will be important to achieve the following points.

<Requirements for the promotion of carbonization systems>

- (1) Reduction of CO₂ emissions from the facility and further reduction of fuel costs: Reduce fossil fuel consumption for low-quality waste
- (2) Reduction of CO₂ emissions from other facilities by increasing the number of users: Increase the

number of users of carbonized fuels

- (3) Improvement of fuel quality: The chlorine concentration in carbonized fuels must be equivalent to that in other biomass fuels

We will address these with points (1) and (3) positioned as the improvement of the performance of carbonization facilities and point (2) positioned as the expansion of the number of carbonized fuel users. Since the purpose of this project is to contribute to the reduction of CO₂ emissions, the points (1) and (2) will be implemented, and (3) will be implemented outside the scope of this project.

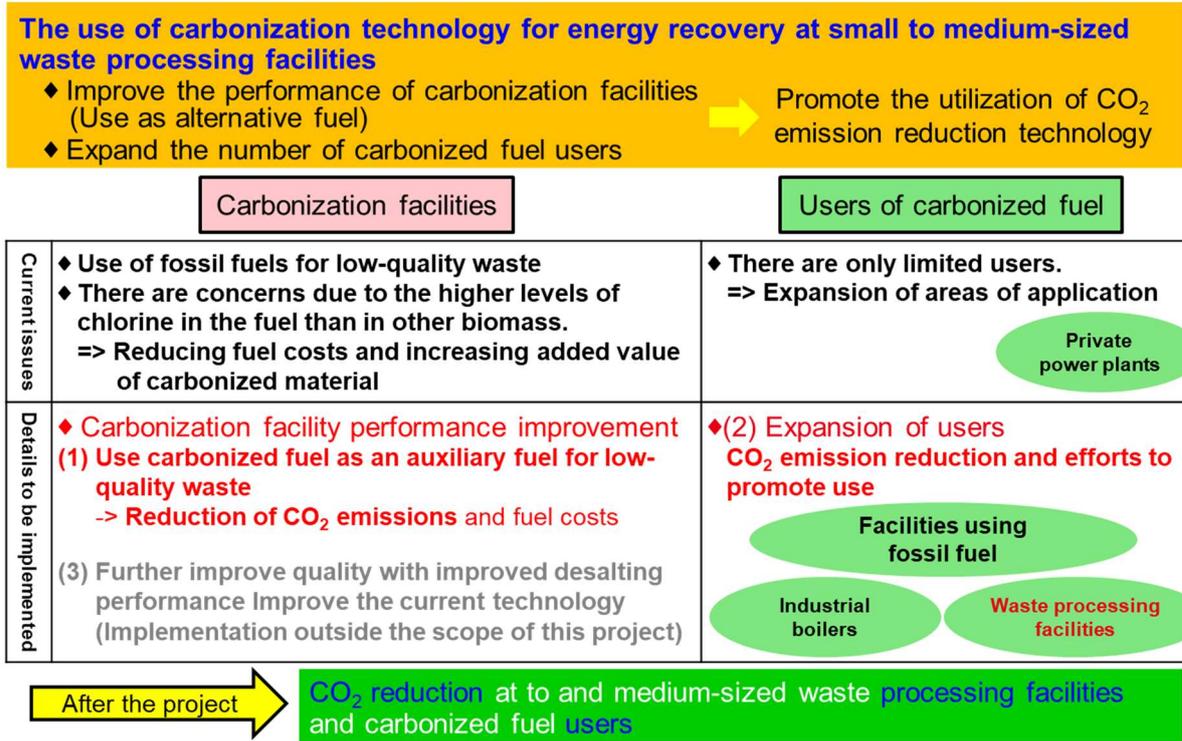


Figure - Outline of this project

When the carbonized fuel produced in a carbonization facility is used either inside or outside the facility, it is necessary to establish a method for using the carbonized fuel with as few pretreatment steps as possible. The following technical issues must therefore be addressed.

<Technical issues>

- The construction of a supply system capable of supplying carbonized fuel according to the method of use
- The construction of combustion equipment (burners, etc.) that satisfies the exhaust gas standards for the facility when carbonized fuel is used.

This project aims to achieve energy recovery using carbonization technology by performing the following to address the purpose of implementation and technical issues described above.

<Implementation outline>

- (1) Improvement of carbonization facility performance

The analysis of the combustion when carbonized fuel is used as an auxiliary fuel in the combustion

furnace of a carbonization facility and the implementation of combustion tests in a test facility.

(2) Expansion of carbonized fuel use

Combustion simulations for the use of carbonized fuel in the incinerator of a waste processing facility, combustion tests in a test facility and demonstration tests in a waste processing facility

The following is an outline of the results achieved in FY 2019 in activities for the achievement of the measures above to demonstrate the effective utilization of carbonization facilities and carbonized fuel within three years.

(1) Improvement of carbonization facility performance

a. Carbonized fuel combustion test using test equipment simulating a carbonized fuel processing facility

- For the test, carbonized fuels were put into the test furnace with the method of a direct injection nozzle to be used in the facility, and the same conditions were applied to each of the following items for the combustion furnace at the Saikai City Carbonization Center.

1) Flux in the combustion furnace 2) Residence time in the combustion furnace

As a result, in 1) and 2), the values of gas emissions were sufficiently lower than the reference value of the Carbonization Center, and the combustion rate was 95% or higher. Thus, there are prospects for achieving the development target of 20% or more mixed combustion in the carbonization facility.

b. Verification on the combustion analysis results of the combustion furnace

- According to the combustion simulation analysis results in the combustion furnace of the carbonization facility, it was confirmed that the combustion conditions and combustion rate were the same, having consistency with the phenomena.

(2) Expansion of carbonized fuel use

a. Carbonized fuel combustion testing using a carbonized fuel injection hopper feeder and carbonized fuel burner for demonstration

- The following results were obtained from the combustion test of mixed and injection burners, which had showed superior spray characteristics in the spray test performed last fiscal year.

1) Mixed burner

The combustion rate is 85% or higher in the case of mixed combustion with 20% of carbonized fuels as a target.

As the emission characteristics, its use within the emission control value is possible. Even if increasing the rate of mixed combustion to 30%, use of mixed combustion is possible.

It also applies to a case simulating its use during startup.

2) Injection burner

The combustion rate is 95% or higher in the case of mixed combustion with 20% of carbonized fuels as a target.

As the emission characteristics, its use within the emission control value is possible. Even if increasing the rate of mixed combustion to 50%, use of mixed combustion is possible.

It also applies to a case simulating its use during startup.

b. Verification on the combustion analysis results of the test fuel furnace

1) Mixed burner

In the combustion tests with heavy oil-only combustion and 20% mixed combustion, it was confirmed that the temperature distribution and combustion rate in the furnace had consistency with the analysis results.

2) Injection burner

In the combustion tests with heavy oil-only combustion and 20% mixed combustion, it was confirmed that the temperature distribution and combustion rate in the furnace had consistency with the analysis results.

c. Consideration of burner installation in demonstration furnaces

1) Consideration of installation in waste incineration facilities

- Basis for selection

Since the most important thing is that government itself makes sure to dispose of general waste in waste incineration facilities, we have selected an injection burner which has no need to modify the facilities and generally shows good emission data, imposing the lowest potential risk.

- Application

An application for the change has been submitted to the governor of Hyogo Prefecture in order to perform the demonstration test in the next fiscal year.

- Analysis

Good data was obtained from the analysis for the case of mixed combustion in the incinerator in Harima Town.

d. Consideration of use in other places

1) Consideration of mixed combustion of heavy oil and carbonized fuel in an asphalt plant

We performed chemical thermodynamics analysis to examine corrosion as a concern for using carbonized fuels in an asphalt plant. As a result of the analysis, since the chlorine content is immobilized as chloride by sodium, potassium, etc. contained in the carbonized fuel, the possibility of promoting corrosion by corrosive gas is low, implying that it can be used even if the chlorine concentration is somewhat high.

2) Consideration for safe use

The Review Committee for Proper Management of Refuse Carbonized Fuel has issued documents on safe handling of RDF. In addition, the Japan Sewage Works Agency has issued documents on safe handling of carbonized fuel from sewage sludge. At the Saikai City Carbonization Center completed in 2003, it was confirmed that there would be no problem with handling compared to that stated in the above guidelines.

(3) Overall system

For a facility that processes 50 tons of waste per day, if the proposed system is used then:

- a. It is estimated that the annual CO₂ emission can be reduced by 4,166 t-CO₂ (use in power plants) and 2,141 t-CO₂ (use in asphalt plants) compared with a conventional simple incineration system.
- b. Based on these results, it is estimated that if there is extension to other facilities after the completion of the project, and the facilities producing carbonized fuel increase to 55 facilities nationwide (RDF facility equivalent) by FY 2030, then the use of carbonized fuel at each facility will make it possible to achieve an annual CO₂ reduction of 229,130 t-CO₂ (use in power plants) and 117,775 t-CO₂ (use in asphalt plants).

目 次

要約	0-1
Summary	0-6
第 1 章 事業概要	1-1
1. 事業概要	1-1
2. 事業目的、目標、実施スケジュール	1-2
2.1 事業目的	1-2
2.2 開発目標	1-5
2.3 実施スケジュール	1-6
3. 事業実施体制	1-6
第 2 章 燃焼試験	2-1
1. 燃焼試験概要	2-1
1.1 概要	2-1
1.2 試験炉設備	2-3
1.2.1 設備フロー	2-3
1.2.2 設備装置名称	2-4
1.2.3 設備計測機器名称	2-5
1.3 排ガスサンプリング	2-6
1.3.1 排ガスサンプリング装置	2-6
1.4 ダストサンプリング	2-7
1.4.1 サンプリング装置	2-7
1.4.2 ダストサンプリング方法	2-8
1.5 燃焼率	2-9
1.5.1 燃焼率の定義	2-9
1.5.2 燃焼率の測定装置	2-9
1.6 試験後灰の回収	2-10
1.6.1 目的	2-10
1.6.2 灰の回収場所	2-10
1.6.3 灰の回収量	2-11
1.6.4 燃焼室付着状況確認	2-12
2. 炭化燃料化施設の高性能化	2-14
2.1 直投ノズル燃焼試験（炭化施設模擬）	2-14

2.2	試験方法・条件	2-15
2.3	試験結果	2-16
2.3.1	温度トレンド	2-16
2.3.2	燃焼状態の確認	2-17
2.3.3	温度分布	2-18
2.3.4	排ガス値	2-19
2.3.5	燃焼率	2-20
2.3.6	まとめ	2-20
3	炭化燃料の利用先拡大	2-21
3.1	混焼バーナ燃焼試験	2-21
3.2	試験条件・結果（定常時）	2-22
3.2.1	高温試験（1,200℃以上：溶融温度以下）	2-22
3.2.2	温度制御試験（1,100℃：灰溶融温度以下）	2-27
3.2.3	ダイオキシン、HCl、ばいじん濃度	2-32
3.2.4	混焼率変化の試験結果	2-33
3.2.5	まとめ 混焼バーナ燃焼試験（定常時）	2-35
3.3	試験条件・結果（起動時）	2-36
3.3.1	試験条件	2-36
3.3.2	試験結果	2-37
3.4	吹込バーナ燃焼試験	2-41
3.5	試験条件・結果（定常時）	2-42
3.5.1	温度トレンド	2-42
3.5.2	燃焼状態の確認	2-43
3.5.3	温度分布	2-44
3.5.4	排ガス値	2-44
3.5.5	燃焼率	2-45
3.5.6	ダイオキシン、HCl、ばいじん濃度	2-46
3.5.7	混焼率変化試験結果	2-46
3.5.8	まとめ 吹込バーナ燃焼試験（定常時）	2-48
3.6	試験条件・結果（起動時）	2-49
3.6.1	試験条件	2-49
3.6.2	試験結果	2-49
3.7	直投ノズル燃焼試験	2-53
3.8	試験条件・結果（定常時）	2-53
3.8.1	温度トレンド	2-54
3.8.2	燃焼状態の確認	2-54

3.8.3	温度分布	2-55
3.8.4	排ガス値	2-56
3.8.5	燃焼率	2-57
3.8.6	ダイオキシン、HCl、ばいじん濃度	2-57
3.8.7	混焼率変化の試験結果	2-58
3.8.8	まとめ 直投ノズル燃焼試験（定常時）	2-59
3.9	試験条件・結果（起動時）	2-60
3.9.1	試験条件	2-60
3.9.2	試験結果	2-60
3.10	各バーナ燃焼試験結果まとめ	2-64
4.	問題点と対応検討まとめ	2-66
4.1	炭化燃料混焼試験における問題点と対応	2-66
4.1.1	混焼バーナのスロート焼損	2-66
4.1.2	混焼バーナスロート内部付着	2-68
4.1.3	炉内熱電対先端破損	2-70
第3章	解析検証	3-1
1.	解析概要	3-1
1.1	解析目的	3-1
1.2	解析モデル	3-2
2.	炭化燃料化施設の高性能化	3-9
2.1	炭化施設における直投ノズル燃焼解析	3-9
2.2	解析条件	3-9
2.3	解析検証	3-11
3.	炭化燃料利用先の拡大	3-13
3.1	混焼バーナ燃焼試験解析	3-13
3.2	解析条件	3-14
3.2.1	壁面条件	3-14
3.2.2	粒度分布	3-15
3.2.3	流量条件	3-15
3.3	解析検証	3-16
3.3.1	検証方法	3-16
3.3.2	検証結果	3-18
3.4	パラメータ比較検討	3-30
3.5	吹込バーナ燃焼試験解析	3-35

3.6	解析条件	3-36
3.7	解析検証	3-37
3.7.1	検証方法	3-37
3.7.2	検証結果	3-38
3.8	パラメータ比較検討	3-47
第4章	実証炉への炭化燃料バーナ設置検討	4-1
1.	ごみ焼却施設設置計画概要	4-1
1.1	設置バーナの選定	4-1
1.2	排ガス測定結果	4-1
1.3	設置計画	4-2
1.4	工事計画	4-5
1.4.1	試験に伴う変更範囲	4-5
1.4.2	兵庫県への届出書関係	4-5
1.4.3	工事スケジュール	4-6
1.5	吹込バーナ・直投ノズル燃焼解析	4-7
1.5.1	吹込バーナ燃焼解析	4-7
1.5.2	直投ノズル燃焼解析	4-10
1.5.3	炭化燃料燃焼率	4-13
2.	ごみ焼却施設設置後の影響検討	4-14
2.1	影響要因の調査	4-14
2.2	確認結果	4-15
2.2.1	変動の要因調査	4-15
2.2.2	変動の低減対策	4-18
2.2.3	ごみ焼却施設での影響検討	4-20
2.2.4	まとめ	4-22
第5章	その他の利用先施設での利用検討	5-1
1.	アスファルトプラントにおける重油-炭化燃料混焼検討	5-1
1.1	検討目的・検討方法	5-1
1.2	化学熱力学解析	5-2
1.3	炭化燃料混焼に伴う装置の腐食に関する検討結果	5-9
1.4	考察	5-13
1.5	まとめ	5-15
2.	安全利用のために	5-16

第 6 章	二酸化炭素排出量削減効果	6-1
1.	単純焼却(従来)と炭化燃料利用(提案システム①、②)の CO ₂ 排出量試算 ...	6-1
第 7 章	事業終了後の横展開の可能性	7-1
1.	本事業終了後に水平展開した場合の CO ₂ 排出量等の削減効果の見込み ..	7-1
第 8 章	成果と課題	8-1
1.	成果と課題	8-1
第 9 章	有識者外部委員会の開催	9-1
第 10 章	平成 31 年度中小廃棄物処理施設における廃棄物エネルギー回収 方策等に係る検討調査委託業務への協力.....	10-1

第1章 事業概要

1. 事業概要

本評価・検証事業は、電気や熱エネルギーの回収が困難な中小処理規模の自治体において、ごみ炭化燃料化技術（以下、炭化技術）を活用することによりエネルギー回収を図ることを大目的として、一般廃棄物を炭化してエネルギー回収した炭化燃料を化石燃料の代替燃料として利用するために、施設の高性能化と炭化燃料の利用先の拡大を行うことにより CO₂ 削減に貢献する。

炭化技術を利用した施設（以下、炭化施設）は、2002年～2006年に6施設が展開されたが、それ以降新たな施設は建設されていなかった。その理由として、論文・報告書等から主に下記の3点があげられる。

＜炭化施設が建設されなかった理由＞

- (1) バッチ運転のため起動用燃料に化石燃料を使うため運営費が高い
- (2) ごみ由来の燃料であるため塩素濃度が高く、ボイラ等利用先の機器への影響が懸念され利用先が少ない
- (3) 利用先へは有価で引き取られていたが、利用先への輸送費を負担する必要があったため、結果として逆有償となる

2015年7月に竣工した西海市炭化センター（処理規模：30t/d=15t/d×2炉）は、上記の課題を解消し国内で初めて自家用の民間発電事業者の発電燃料として利用するシステム（以下、炭化システム）を構築し、順調に運営を続けている。

本施設の運営を通じてわかることは、今後炭化システムの普及、炭化燃料の利用促進を図る上では以下の点をクリアすることが重要と考えられる。

＜炭化システム普及、炭化燃料の利用促進のために求められる点＞

- (1) 炭化施設内での CO₂ 排出削減および更なる燃料費コストダウン：低質ごみ時の化石燃料使用量低減
- (2) 利用先の拡大による他施設での CO₂ 排出削減：炭化燃料の利用先拡大
- (3) 炭化燃料の高品質化：炭化燃料の塩素濃度が他のバイオマス燃料と同等

本事業では、求められる点の(1)(3)を**炭化施設の高性能化**、(2)を**炭化燃料の利用先拡大**と位置付けて取り組む。本事業は、CO₂ 削減に寄与することが目的であることから、上記(1)(2)を実施する。なお、(3)については当社にて研究を継続実施する。本事業の概要（図 1-1）および目的の詳細内容を

示す。

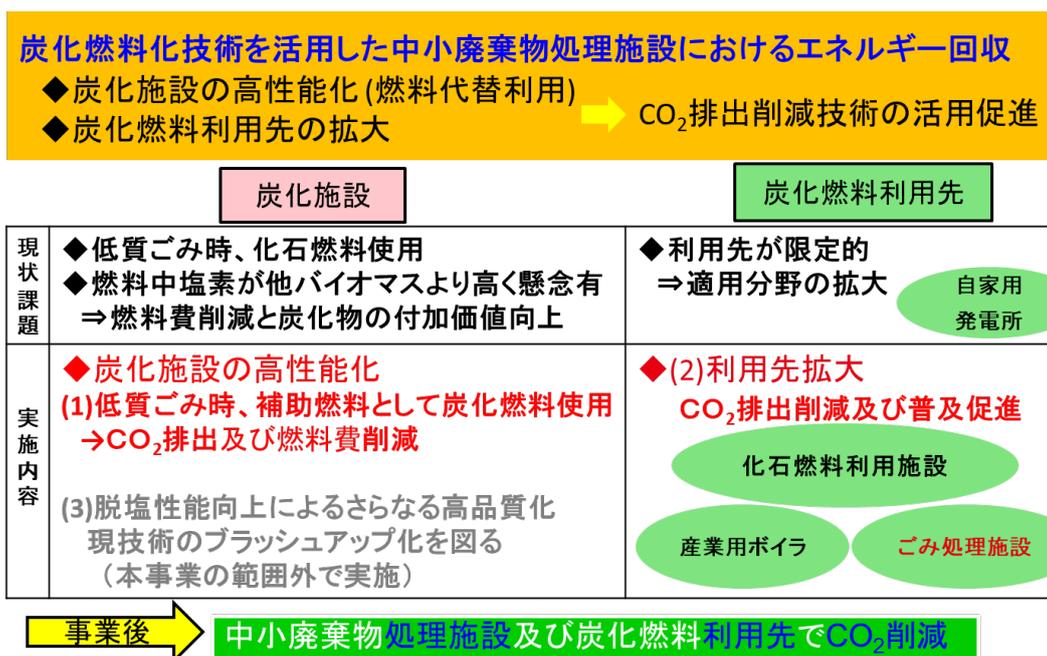


図 1-1 本事業の概要

2. 事業目的、目標、実施スケジュール

2.1 事業目的

本事業では、一般廃棄物を炭化してエネルギー回収した炭化燃料を、化石燃料の代替燃料として利用するために、施設の高性能化と炭化燃料の利用先の拡大を行うことにより CO₂ 削減に貢献する。それぞれについて述べる。

◆炭化施設の高性能化

(1) 炭化施設内での CO₂ 排出と燃料費削減

炭化施設の運転時にごみが低質ごみ側へ変動した際に灯油を使用する場合があります。そこで、その使用燃料を灯油から炭化燃料によって代替し炭化施設の CO₂ 排出量と燃料費を削減する。

◆炭化燃料利用先の拡大

(2) 利用先での CO₂ 排出と燃料費削減

国内の事業用発電所・炭化施設以外のごみ処理施設(以下、ごみ処理施設)・化石燃料を使用する施設において、使用される化石燃料(灯油・石炭等)を炭化燃料によって代替し、各施設における CO₂ 排出量と燃料費を削減する。炭化燃料はごみ由来のバイオマス燃料のため、炭化燃料の利用拡大は低炭素社会構築に大きく貢献できることから本事業を実施する意義は大きい。

なお、炭化施設で製造された炭化燃料を施設内または施設外において、利用する場合には、炭化燃料をできるだけ前処理工程を少なくして利用できる方法を構築する必要があり、下記の技術課題がある。

＜技術課題＞

- (1) 炭化燃料を利用方法に応じて供給可能な供給システムの構築
- (2) 炭化燃料利用時に施設の排ガス基準を満足する燃焼装置(バーナやその他)の構築

本事業では、上記(1)、(2)の実施および技術課題に対して下記を行うことにより、炭化技術によるエネルギー回収を目指す。

＜実施概要＞

- (1) 炭化施設の高性能化

炭化施設の燃焼炉における炭化燃料助燃利用の燃焼解析及び試験設備での燃焼試験

- (2) 炭化燃料利用先の拡大

ごみ処理施設の焼却炉内における炭化燃料の燃焼解析、試験設備での燃焼試験及びごみ処理施設での実証試験

本事業の実施概要を図 2.1-1 に示す。

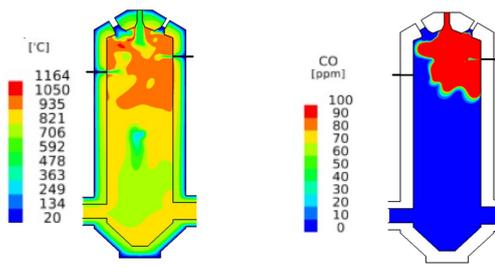
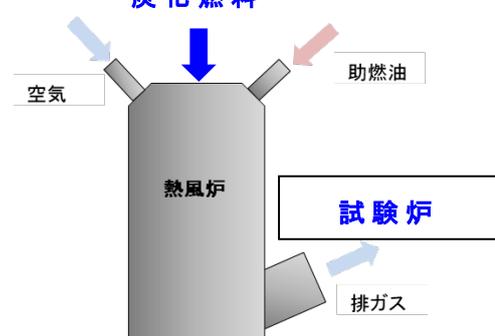
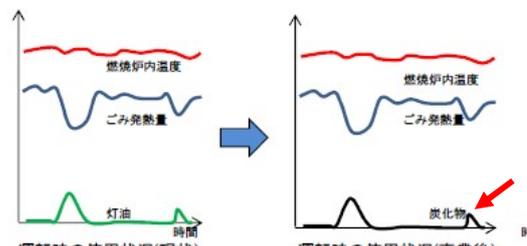
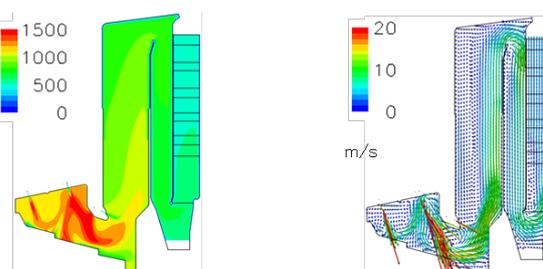
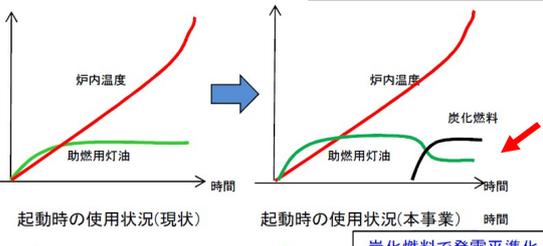
(1) 炭化施設の高性能化	(2) 炭化燃料利用先の拡大
<p>a. 燃焼解析</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 自社試験炉による炭化燃料の燃焼特性の確認 2. 燃焼炉への適応性を判断 燃焼可否確認 3. 燃焼のシミュレーションを実施 <ol style="list-style-type: none"> 1. 温度分布の確認 2. ガス成分、速度分布の確認  <p>燃えきり燃焼可否確認後、燃焼試験へ</p> <p>b. 燃焼試験（試験設備）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 燃え残り有無の確認 ・ 試験設備にて炭化燃料の燃焼方法、燃焼部への燃料供給方法を選定 <p style="text-align: center;">炭化燃料</p>   <p><u>ごみが低質変動時に使用する化石燃料を炭化燃料に代替する。</u></p> <p>※850℃場で利用できることが確認できれば、右記ごみ処理施設における運転中の発電平準化の実現可能性は高くなる。</p>	<p>a. 燃焼解析</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. (1).a.1 と同等の試験を実施 2. ストーカ炉への適応性判断 燃焼可否確認 3. 燃焼のシミュレーションを実施 <ol style="list-style-type: none"> 1. 温度分布の確認 2. ガス成分、速度分布の確認  <p>投入場所・投入方法に違いによる燃焼状況の確認</p> <p>b. 燃焼試験（試験設備）</p> <p>(1)-b と同様</p> <p>c. 実証試験（商用ストーカ炉）</p> <p>試験設備と同様の燃焼状態が得られるか実機で確認</p>   <p><u>ごみ処理施設起動時に使用する化石燃料を代替し、将来的には、炭化燃料で発電の平準化も視野に入れる。</u></p>

図 2.1-1 本事業の実施概要

2.2 開発目標

本事業における、本システムの現状、最終目標、平成31年度の開発目標を表2.2-1に示す。

表 2.2-1 開発目標

	項目	従来	最終目標	平成31年度の目標
	全体目標	15年程前に炭化燃料化技術を活用した処理施設が6施設程設置されたが、エネルギー回収のメリットを活かしきれていない 炭化施設と燃料利用先を組み合わせた全体システムが確立できていない	炭化燃料化技術を活用した中小廃棄物処理施設におけるエネルギー回収とCO ₂ 削減 炭化施設と燃料利用先を組み合わせた全体システムにおいてLCC低減とCO ₂ 削減	炭化施設と燃料利用先を組み合わせるためのシステム検討を行う
(1)	炭化施設の高性能化	低質ごみ時に燃焼炉の温度維持のために化石燃料を使用している	低質ごみ時の化石燃料使用量を20%以上削減する燃焼条件の確認	炭化燃料利用 ・実機を模擬した試験炉による炭化燃料燃焼特性を確認する ・燃焼解析検証を行い、妥当性を確認する
(2)	炭化燃料利用先の拡大	ごみ処理施設において、起動時に化石燃料を利用している	ごみ処理施設において、起動時の助燃量に対し20%以上混焼利用し化石燃料を代替、CO ₂ 削減する実証	ごみ処理施設利用 ・実証用炭化燃料投入ホッパ供給機と炭化燃料バーナによる炭化燃料燃焼試験による炭化燃料燃焼特性を確認する ・予備燃焼炉燃焼解析の検証を行い、妥当性を確認する ・実証炉への炭化燃料バーナ設置検討を行う ・炭化燃料が利用可能な施設について、調査を行い、利用の可能性検討を行う

2.3 実施スケジュール

本事業全体の実施スケジュールを表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 事業実施スケジュール

	平成 30 年度	平成 31 年度	令和 2 年度
採択・事業開始	▼		
システム検討	→		
(1)炭化施設高性能化			
炭化施設利用検討	ラボ試験 解析 →		
燃焼試験(試験場)		準備 試験 →	
(2)炭化燃料利用先拡大			
焼却炉利用検討	ラボ試験 解析 →		
予備燃焼試験		試験 →	
燃焼試験(試験場)		準備 試験 →	
実証試験(播磨町)			手配 工事 試験 →
評価・まとめ		→	→

3.事業実施体制

本事業は、川崎重工業株式会社 エネルギー・環境プラントカンパニーが中心となり、当社技術研究所、共同実施者として日工株式会社とともに実施し、西海市炭化センター（グリーンコール西海）で製造された炭化燃料を使用し・播磨町塵芥処理センターで利用する事業として進めていく。また、外部機関として北海道大学に特に燃料利用技術の取組みについて評価いただく。実施体制を図3.1-1に示す

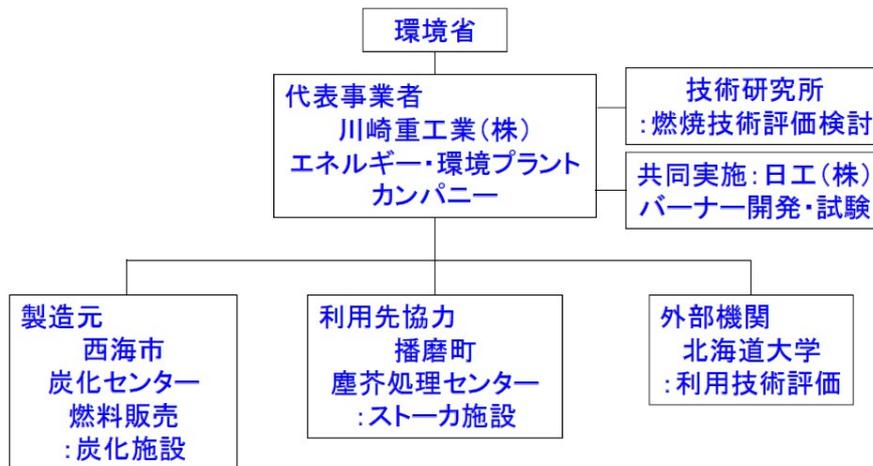


図 3.1-1 実施体制図

第2章 燃焼試験

本試験では、昨年度実施した燃焼特性の把握、供給機の開発、混焼バーナと吹込バーナの搬送特性の成果^[1]を元に、バーナ（後述）を開発するために、燃焼試験を行い、利用先への適応可否の判断を行った。

本章では、炭化燃料利用普及のために今年度行った燃焼試験および試験時の問題点について述べる。

1. 燃焼試験概要

1.1 概要

本試験では、昨年度実施した燃焼特性の把握、供給機の開発、混焼バーナと吹込バーナの搬送特性の成果^[1]を元に、本年度は、実際に試験炉設備で炭化燃料の下記パラメータを変更し、3種類のバーナ（表 1.1.-1）を開発するために、燃焼試験を行い、利用先への適応可否の判断を行った。

〈主要な試験パラメータ〉

- ・含水率：（圧送エアの熱風の有無により変化させる）
- ・粒径：（粉碎の有無により変化させる）
- ・噴射の分散性：（旋回エアの有無により変化させる）
- ・混焼率：（重油の熱量に対する炭化燃料混焼熱量の割合を変化させる）

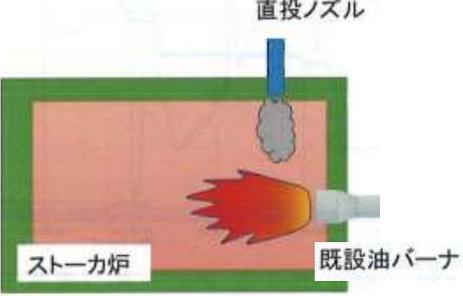
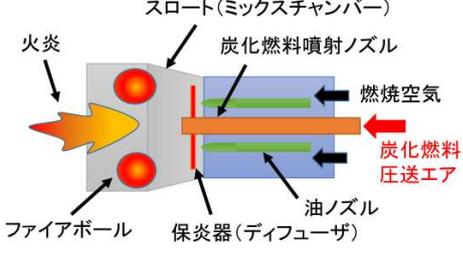
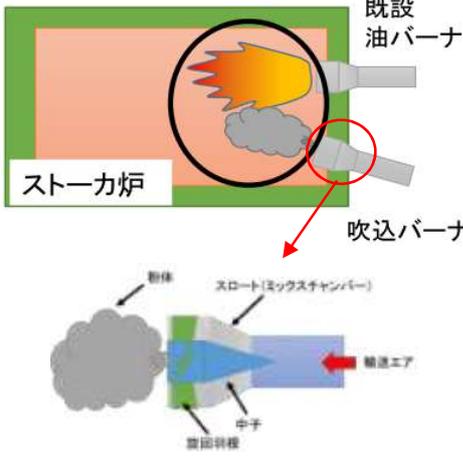
また、燃焼試験で確認した項目を以下に示す。

〈試験の確認項目〉

- ・熱量をベースとした混焼で、炉内温度の維持や温度分布を温度トレンドより評価、確認。
- ・燃焼時の火炎を炉内カメラで撮影して、火炎の状態を確認。
- ・排ガス成分 (O_2 , CO , NO_x , SO_x) を連続で測定し、燃焼炉や焼却炉での利用可否を確認。
- ・ダストサンプリングで採取した試料から灰分を測定し、燃焼率を算出。
- ・試験炉設備から炭化燃料の灰を回収し、各装置での灰量バランスを確認。

本試験は、直投ノズル、混焼バーナ、吹込バーナの3種類の上記確認項目の比較検討を燃焼試験を通して実施した。各バーナの燃焼方式、想定する利用先を表1.1-1にまとめる。

表 1.1-1 各種類の燃焼方式，利用先一覧

種類	燃焼方式	利用先
直投ノズル	 <p>バーナ，直投ノズル分離型 (自由落下)</p>	施設内利用 (別施設にても利用)
混焼バーナ	 <p>バーナ，噴射ノズルー体型 (圧送ファン水平噴射)</p>	別施設にて利用 新設用バーナ
吹込バーナ	 <p>バーナ，噴射ノズル分離型 (圧送ファン水平噴射)</p>	別施設にて利用 既設用バーナ

1.2 試験炉設備

1.2.1 設備フロー

本年度の燃焼試験は、日工株式会社内の試験炉設備で行った。各種の燃焼試験による設備フローを、図 1.2.1-1~4 に示す。

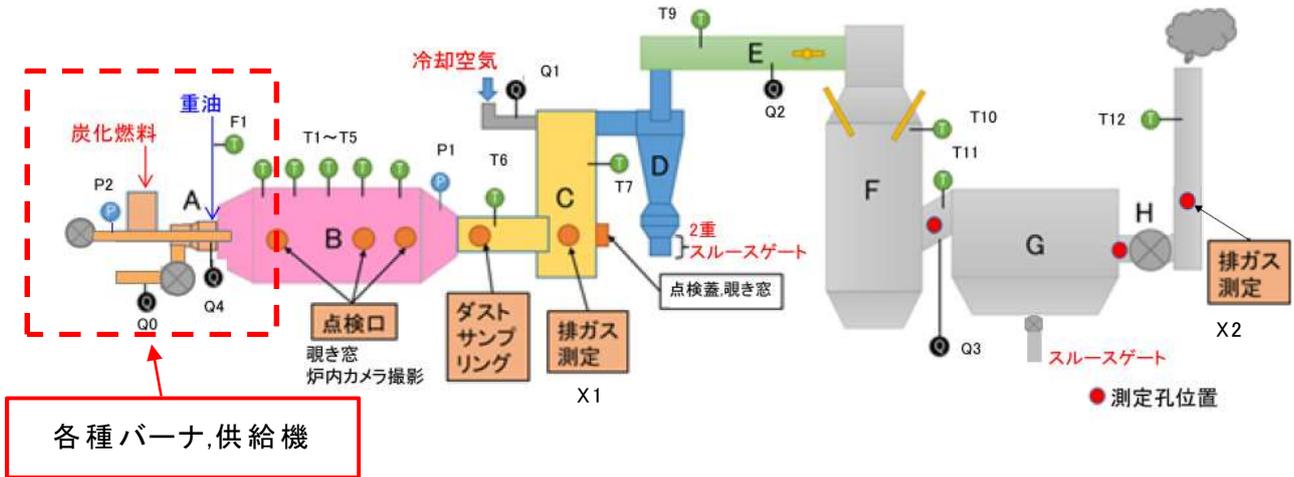


図 1.2.1-1 試験炉設備フロー

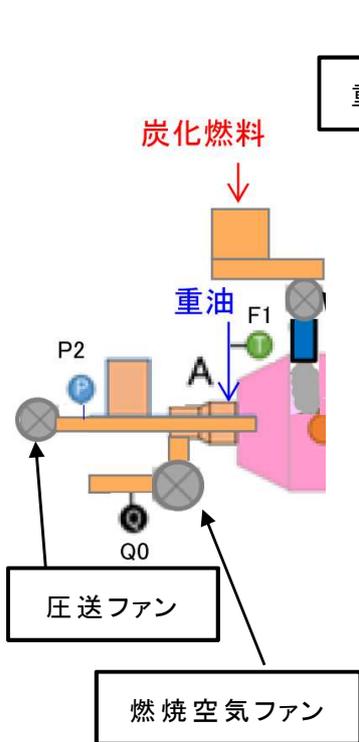


図 1.2.1-2 直投ノズル

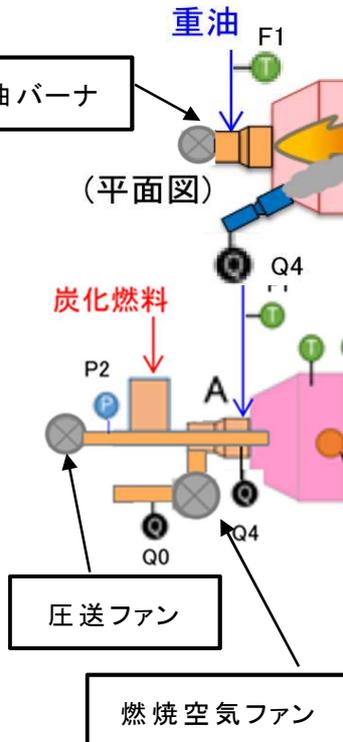


図 1.2.1-3 混焼バーナ

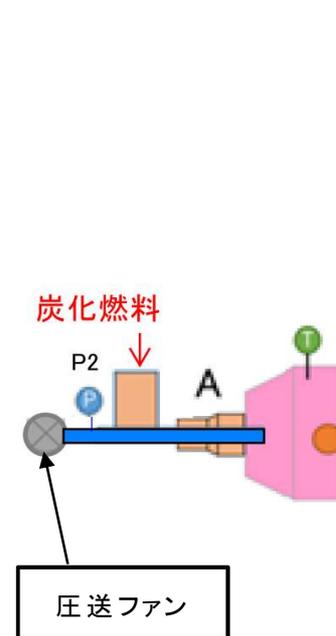


図 1.2.1-4 吹込バーナ

1.2.2 設備装置名称

試験炉設備の装置の名称を表 1.2.2-1 に示す。

表 1.2.2-1 設備装置名称一覧

記号	装置
A	(直投ノズル試験) (混焼バーナ試験) 混焼バーナ
	(吹込バーナ試験) オリンピア製 重油バーナ
	(共通) 圧送ファン(熱風発生装置)
B	燃焼炉 内面キャスト施工
C	第一煙道 (上部)内面セラミック施工 (下部)内面キャスト施工
D	サイクロン
E	第二煙道
F	排ガス冷却塔
G	バグフィルタ
H	排風機

1.2.3 設備計測機器名称

試験炉設備で使用した計測機器の名称を表 1.2.3-1 に示す。

表 1.2.3-1 設備計測機器名称一覧

記号	測定項目
T1	炉内温度1
T2	炉内温度2
T3	炉内温度3
T4	炉内温度4
T5	炉内温度5
T6	熱風温度
T7	サイクロン入口温度
T9	サイクロン出口温度
T10	蒸発塔入口温度
T11	蒸発塔出口温度
T12	排気温度
P1	炉内圧力
P2	圧送ファン動圧 (風速算出用)
Q0	混焼バーナ 燃焼空気ファン風量
Q1	冷却空気動圧 (風量算出用)
Q2	第二煙道風量
Q3	第三煙道風量
Q4	旋回エア風量
F1	重油燃焼量
X1	排ガス4成分 (O ₂ , CO, NO _x , SO _x)
X2	煙突排ガス3成分 (O ₂ , CO, NO _x)

図 1.2.1-1 のフローを基に、計測機器を説明する。温度トレンドを測定するため、燃焼炉に熱電対 T1～T5、第一煙道の水平部に熱電対 T6、後段の煙道に熱電対 T7～T12 を設置した。また、第一煙道 2 箇所 に吸引管を設置して、それぞれ排ガス 4 成分 X1 の測定とダストサンプリングを行った。また、燃焼中の空気比を確認するため、燃焼空気ファン風量 Q0、サイクロン上流に冷却空気風量 Q1、後段の煙道で風量 Q2～Q3 を測定した。また、燃焼炉内の圧力を確認するため、炉内圧力 P1 を測定した。これらの機器にデータロガーを接続し、測定値を連続で記録した。



図 1.2.3-1 試験炉設備外観(平面)



図 1.2.3-2 燃焼炉設備外観(側面)

1.3 排ガスサンプリング

図 1.2.1-1 の設備フロー図に示す位置で、排ガス分析計までガスを吸引するため、排ガスサンプリング装置を使用した。

1.3.1 排ガスサンプリング装置

排ガスサンプリング装置の構成を図 1.3.1-1、機器の仕様を表 1.3.1-1、機器の写真を図 1.3.1-2～5 に示す。

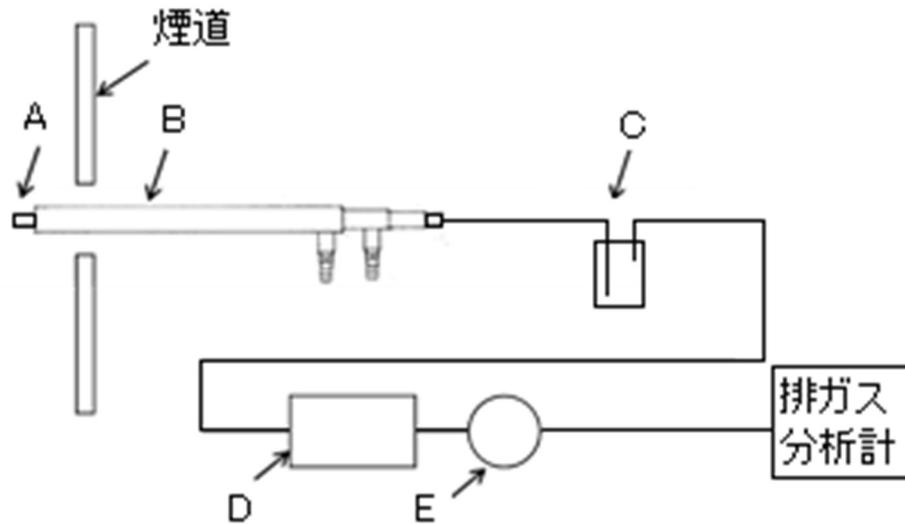


図 1.3.1-1 排ガスサンプリング装置構成図

表 1.3.1-1 排ガスサンプリング機器一覧

記号	装置
A	吸引ノズル
B	冷却プローブ
C	ドレンポット
D	ガスアブソーバ
E	吸引ポンプ

1.4 ダストサンプリング

図 1.2.1-1 の設備フロー図に示す位置で、燃焼炉出口から炭化燃料の灰をサンプリングした。サンプリングした灰は炭化燃料の燃焼率を算出するために使用する。

1.4.1 サンプリング装置

ダストサンプリング装置の構成を図 1.4.1-1 に示す。

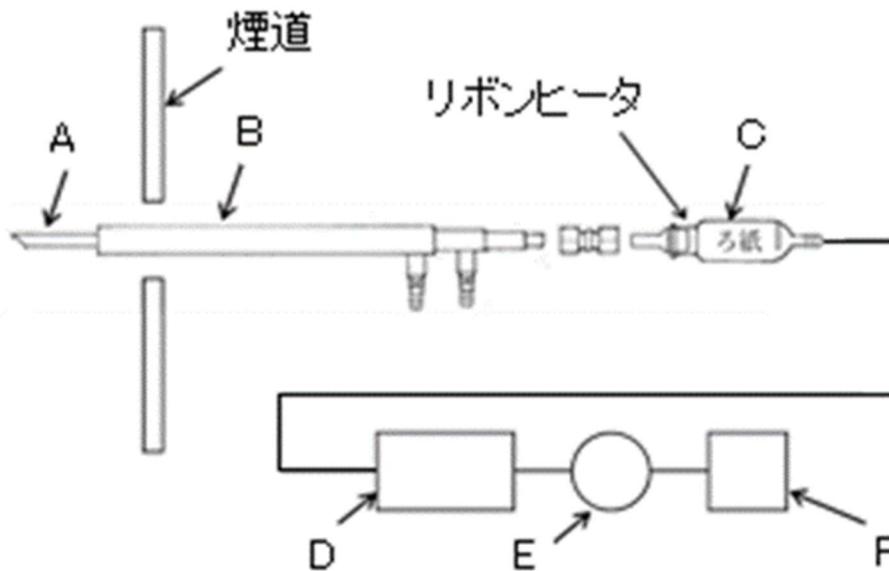


図 1.4.1-1 ダストサンプリング装置構成図

表 1.4.1-1 ダストサンプリング機器一覧

記号	装置
A	吸引ノズル (表 1.3.1-2 と同様)
B	冷却プローブ (表 1.3.1-2 と同様)
C	ろ紙ホルダ, 円筒ろ紙 リボンヒータ
D	ガスアブソーバ (表 1.3.1-2 と同様)
E	吸引ポンプ
F	ガスメータ

1.4.2 ダストサンプリング方法

ダストサンプリング中の吸引ノズルは、先端が冷却プローブより炉内に挿入し常時熱風にさらされることから、連続で吸引を行うとノズル先端部が溶融する。この溶融を防ぐために、2分間吸引し、途中でノズルを引き抜き冷却させる。1回のサンプリングでそれを3セット繰り返すことで、合計6分間行った。

1.5 燃焼率

本試験の評価方法として、燃焼前の炭化燃料と、1.4 ダストサンプリングで採取した灰から、熱分析装置により灰分を測定し、その灰分から燃焼率を算出した。その手法を以下に記載する。

1.5.1 燃焼率の定義

固体燃料である炭化燃料を試験炉で燃焼させた時の燃焼率を検討する。この燃焼率で炭化燃料がどの程度燃焼できているかを示す指標とする。

燃焼前の炭化燃料は、可燃分と灰分の構成とする。燃焼率は、この可燃分が燃焼した割合で定義する。炭化燃料の構成図を図 1.5.1-1 に示す。

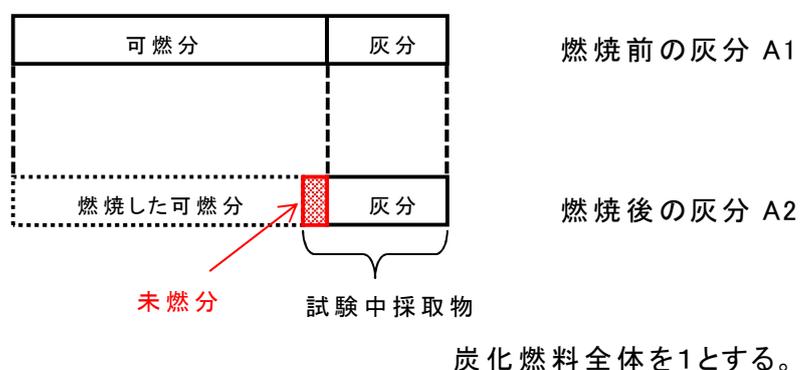


図 1.5.1-1 炭化燃料の構成図

上記定義より燃焼率は、(燃焼した可燃分)/(可燃分)×100 の式で算出される。しかし、実際の試験では燃焼した可燃分は測定できない。そこで、採取可能な灰分の割合で燃焼率を算出できるように、上記の式を変形した。変形した算出式を、式(1.5)に示す。ここで、燃焼率を X[%]、炭化燃料から測定した燃焼前の灰分率を A1、ダストサンプリングで採取した灰から測定した燃焼後の灰分率を A2 とする。

$$X[\%] = (A2 - A1) / \{A2 \times (1 - A1)\} \times 100 \quad \dots (1.5)$$

1.5.2 燃焼率の測定装置

各灰分は、熱分析装置を用いて測定した。この装置は一定温度で昇温させながら、試料の重量変化または各種反応を測定する装置である。装置の仕様を表 1.5.2-1 に、写真を図 1.5.2-1 に示す。

表 1.5.2-1 熱分析装置仕様

測定温度範囲	室温～1,500℃
昇温速度	最大 100℃/min
測定方式	水平差動型 トリプルコイル方式
試料	最大 1g
TG レンジ	500 mg
TG レンジ分解能	0.1 μg
DTA レンジ	2,000 μV



図 1.5.2-1 熱分析装置 TG-DTA(リガク製)

1.6 試験後灰の回収

1.6.1 目的

本章の 2 項から述べる各バーナ試験後の炭化燃料投入量に対する灰量と各回収場所の灰回収量の違いを比較するとともに、灰の機器への付着状況から実運転時の問題点を確認することを目的に灰の回収を行った。

1.6.2 灰の回収場所

燃焼試験後に燃焼室、煙道、サイクロン下、バグフィルタ下の 4 カ所から回収した灰の重量をそれぞれ測定した。図 1.6.2-1 に灰回収場所を模式図で示す。燃

焼室と煙道は側面に設けた点検窓から、サイクロン下とバグフィルタ下は2段の手動カットゲートを設け、灰を回収した。重量測定には図 1.6.2-2 で示すばねばかりと大型バットを用いた。

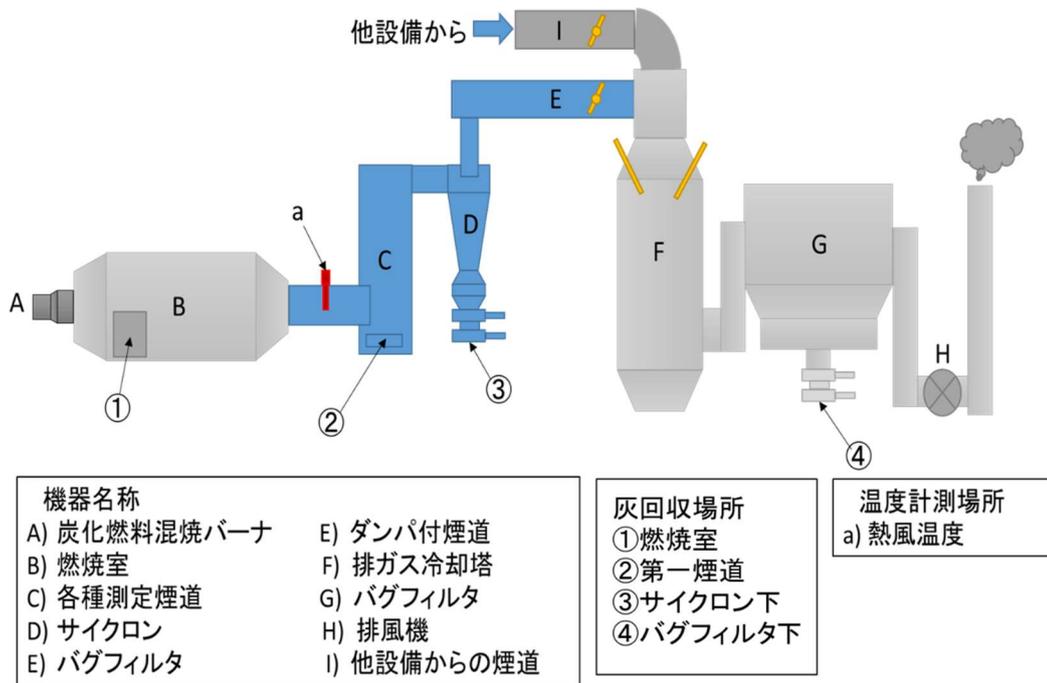


図 1.6.2-1 試験装置全体模式図



図 1.6.2-2 灰重量測定機器

1.6.3 灰の回収量

燃烧試験後に回収した灰重量測定値を表 1.6.3-1 に示す。図 1.6.3-1 は回収率（各所の灰量/灰の全量）を縦軸に回収場所を横軸で示したものである。

図 1.6.3-1 より、試験の温度条件、構造の違いにより、燃烧状態が変化すると考えられる。

表 1.6.3-1 試験後灰回収量と供給量と熱風温度

装置	単位	混焼バーナ 高温試験		混焼バーナ 温度制御試験		吹込バーナ		直投ノズル		直投ノズル (炭化施設模擬)	
		7/1~7/16		10/11~11/5		7/25~9/17		11/12~11/22		11/26~12/4	
燃焼室	[kg]	132.1	45.0%	89.5	33.2%	421.7	53.0%	93.6	46.1%	30.3	46.8%
第一煙道	[kg]	137.4	47.0%	66.6	24.7%	237.9	29.9%	57.8	28.5%	3.1	4.8%
サイクロン	[kg]	9.4	3.0%	12.7	4.7%	97.0	12.2%	19.0	9.4%	14.2	21.9%
バッグ	[kg]	15.8	5.0%	100.5	37.3%	38.8	4.9%	32.5	16.0%	17.2	26.5%
合計	[kg]	294.7	100.0%	269.3	100.0%	795.4	100.0%	202.9	100.0%	64.8	100%
炭化燃料供給量	[kg]	1209		1043		3773		615		170	
灰分割合	[%]	24.4		25.8		21.1		33.0		38.1	
平均熱風温度	[°C]	1212		1081		1089		1100		885	

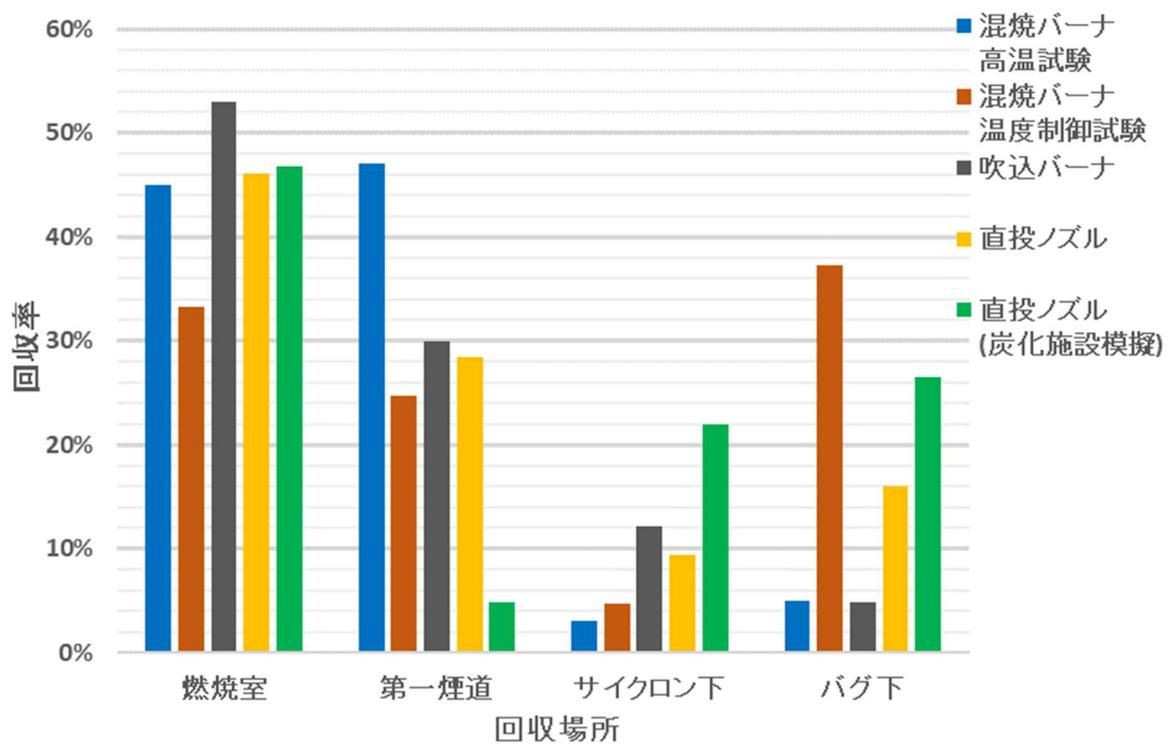


図 1.6.3-1 試験後灰回収率の比較

1.6.4 燃焼室付着状況確認

(1) 各バーナ1日の運転後の状況

各バーナの燃焼試験終了後の付着状況を比較するため、燃焼室内に入って確認を行った。

上述のように付着量の違いはあるものの付着状況は大きな変化はなかった。各バーナでの灰の堆積を図 1.6.4-1~6 に示す。写真は燃焼室後段部(下流側テーパ部)を写している。



図 1.6.4-1 混焼バーナ(供給量 172.0kg) 図 1.6.4-2 混焼バーナ(供給量 284.8kg)

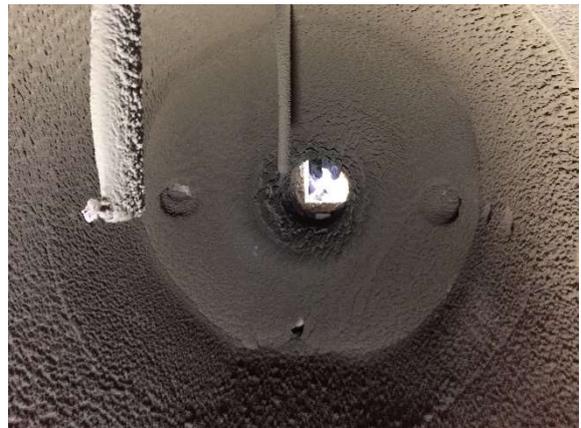


図 1.6.4-3 吹込バーナ(供給量 114.7kg) 図 1.6.4-4 吹込バーナ(供給量 523.3kg)

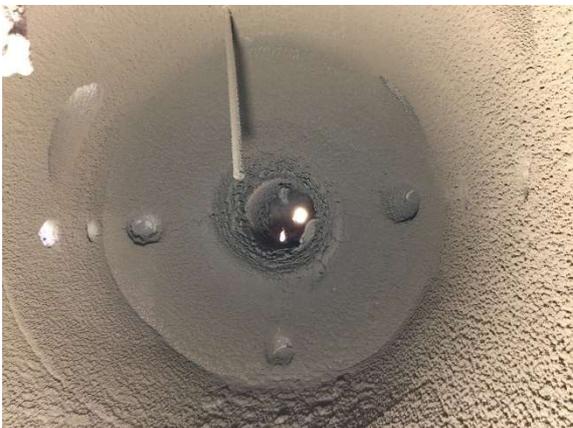


図 1.6.4-5 直投バーナ(供給量 155.0kg) 図 1.6.4-6 直投バーナ(供給量 360.0kg)

2. 炭化燃料化施設の高性能化

本節で述べる試験は、第1章で述べた「炭化燃料化施設の高性能化」を目指して行ったものである。現在の炭化燃料化施設では、低質ごみ燃焼中に燃焼炉の温度維持のために化石燃料を使用している。その化石燃料使用量を削減するため、炭化施設の燃焼状態を模擬した試験炉で、炭化燃料の利用先での適応可否判断を行う事を目的とする。

2.1 直投ノズル燃焼試験(炭化施設模擬)

試験方法として、実機である炭化燃料化施設の燃焼炉内条件を模擬し、日工㈱の本社工場にある試験炉にて確認試験を行った。

試験設備概要を図2.1-1、写真を2.1-2に示す。設備構成は、重油バーナ、炭化燃料供給ホップ、スクリュ、ロータリバルブ、直投ノズル、その他試験設備(第2章1.2試験設備にて説明)で構成される。試験炉へ直投ノズルにて炭化燃料投入を行い、試験炉上部から自由落下させ、炉内で燃焼する構造となっている。模擬する燃焼条件としては、i)炉内温度、ii)炉内ガス流速、iii)炉内ガス滞留時間、iv)空気比とした。これらを炭化施設の運転条件に合わせて試験を行った。

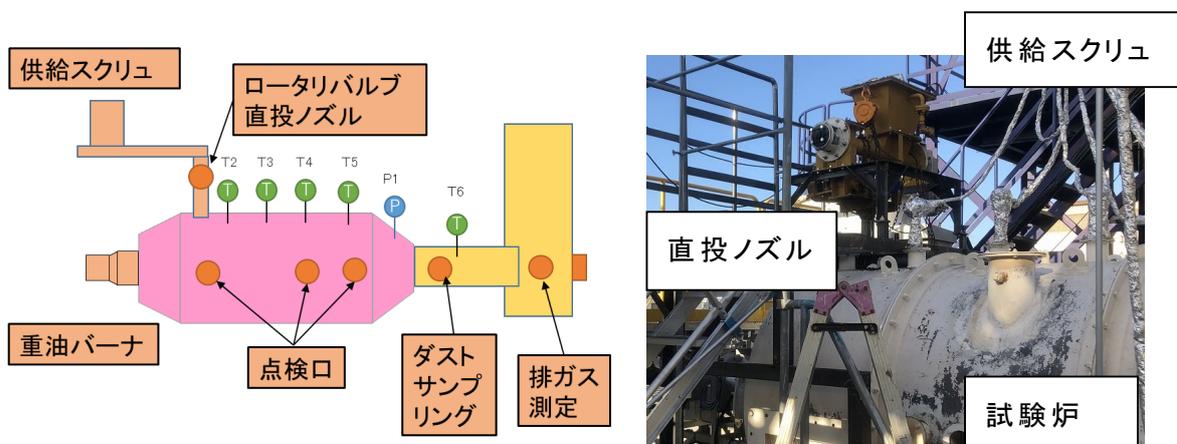
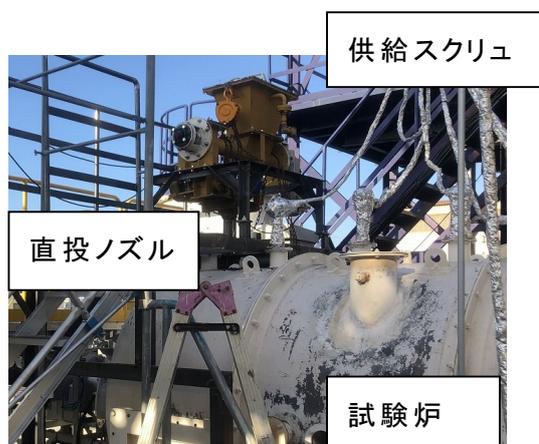


図 2.1-1 試験設備概要図



2.1-2 試験設備

2.2 試験方法・条件

直投試験（炭化施設模擬）は RUN6 として行った。本試験にて、炭化施設の燃焼状態を模擬する条件は、以下の通りである。

- i) 炉内温度 900°C 程度
- ii) 炉内ガス流速 1.78 m/s 程度
- iii) 炉内ガス滞留時間 2 s 以上
- iv) 空気比 1.2

これらの条件の内いずれかを組み合わせ、どの条件が影響を及ぼすかを確認した。表 2.2-1 に模擬した条件を示す。また、それらの条件を満たす主なパラメータとして、重油量、各空気量を変更している。表 2.2-2 は、詳細の運転条件である。なお、RUN6-3 は炉内に水噴霧をすることで、可能な範囲で空気比を下げる対応とした。上記模擬条件と試験時条件の差異については変動等による誤差とし、問題ない範囲である。混焼率を 5~10%としているのは、実機で助燃されている灯油より換算した数値であり、5%以上混焼すれば、低質ごみ時の灯油量が 20%削減可能であるためである。

表 2.2-1 模擬条件

試験条件	RUN6-1	RUN6-2	RUN6-3	RUN6-4
模擬条件	i)炉内温度、 ii)炉内ガス流速	i)炉内温度 iii)滞留時間	i)炉内温度 iv)空気比	i)炉内温度、 ii)炉内ガス流速
炉内温度[°C]	897	910	888	912
ガス流速[m/s]	1.79	1.06	2.02	1.83
滞留時間[s]	1.34	2.26	1.19	1.31
空気比	2.56	2.53	1.45	2.47
重油量[L/h]	91	75	128	90
圧送エア風量 [Nm ³ /min]	6.4	5.0	3.5	6.2
バーナファン風量 [Nm ³ /min]	31.0	21.5	21.0	31.0
水噴霧量[kg/h]	-	-	600kg/h	-

表 2.2-2 詳細試験条件

試験No	重油量 [L/h]	炭化燃料 供給量 [kg/h]	混焼率 [%]	含水率 [%]	粉碎 有無	バーナファン 空気量 [Nm ³ /min]	圧送空気 量 [Nm ³ /min]	旋回空気 量 [Nm ³ /min]	空気比 (一次のみ)	二次空気量 [Nm ³ /min]	空気比 (二次込み)
RUN 6-1	91	0	0.0	-	-	31.0	6.4	-	2.48	6.0	2.78
	85	12	5.1	23.1	有	31.0	6.4	-	2.51	6.0	2.80
	81	24	10.2	23.1	有	31.0	6.4	-	2.48	6.0	2.29
RUN 6-2	75	0	0.0	-	-	22.0	5.0	-	2.20	6.1	2.55
	71	9.2	5.1	18.5	有	21.5	5.0	-	2.20	6.1	2.55
	68	18.4	10.0	18.5	有	21.5	5.0	-	2.18	6.1	2.51
RUN 6-3	128	0	0.0	-	-	21.5	3.5	-	1.14	8.0	1.35
	122	14.6	4.9	15.9	有	21.0	3.5	-	1.15	8.0	1.37
	115	30.2	10.1	15.9	有	21.0	3.5	-	1.15	8.0	1.37
RUN 6-4	90	0	0.0	-	-	31.0	6.2	-	2.50	8.0	2.80
	85	13.1	5.1	28.5	無	31.0	6.2	-	2.50	8.0	2.80
	81	26.2	10.1	28.5	無	31.0	6.2	-	2.47	8.0	2.78

2.3 試験結果

2.3.1 温度トレンド

本試験で得られた温度トレンドの一例 (RUN6-2) を図 2.3.1-1 に示す。縦軸は温度、横軸は時間となる。温度は図 2.1-1 に示す T2～T6 で測定した数値を示す (T1 箇所は炭化燃料の投入口として使用したためデータは無し)。トレンドより、重油専焼状態から一時的に重油量を下げ、その後炭化燃料を投入することで温度の上昇が確認できた。これより、第2章 1 燃焼試験概要でコンセプトとして記載した通り、重油の熱量分を炭化燃料で賄っており、代替燃料として使用出来ていることが確認できた。

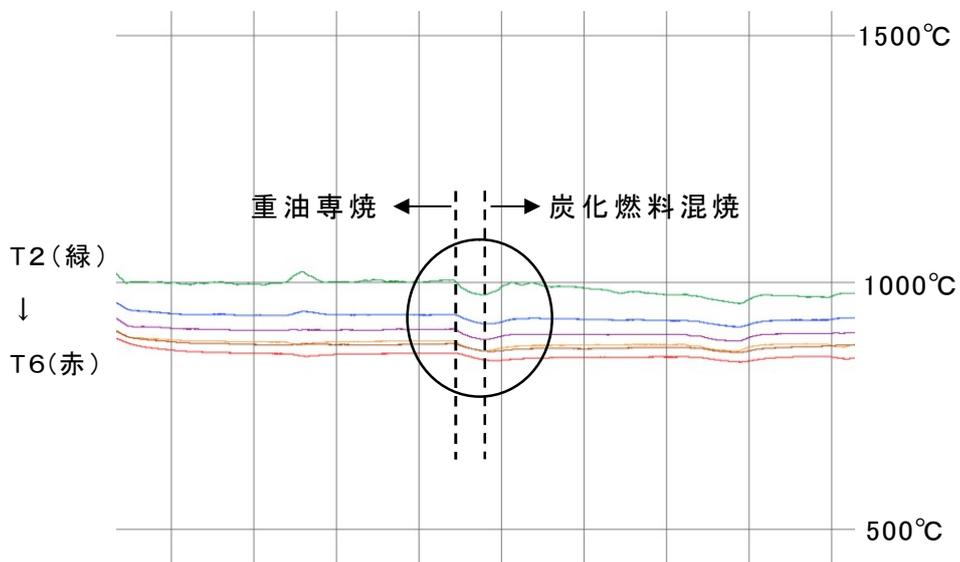


図 2.3.1-1 温度トレンド

2.3.2 燃焼状態の確認

試験中、図 2.3.2-1 に示す撮影位置より火炎の燃焼の様子をカメラにて撮影した。各条件の燃焼の様子を図 2.3.2-2～2.3.2-5 に示す。RUN6-1、6-2 では、炭化燃料が炉内に落下した瞬間燃焼している様子が確認できた。RUN6-3 では、水噴霧の影響で一部炭化燃料に蒸発しきらなかった水が付着し燃焼しないまま炉内壁面に落下している様子が確認された。RUN6-4 においては、炭化燃料の投入の様子は確認出来るが、未粉碎品のためかなり濃い状態で落下してきていることが確認できる。さらに、試験炉の下部に黒くなっている部分があることから、火炎に巻き込まれず落下していることが確認された。

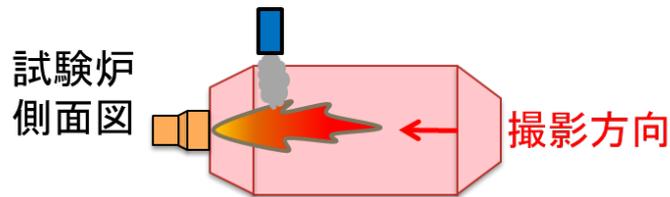


図 2.3.2-1 撮影方向



図 2.3.2-2 RUN6-1 混焼時

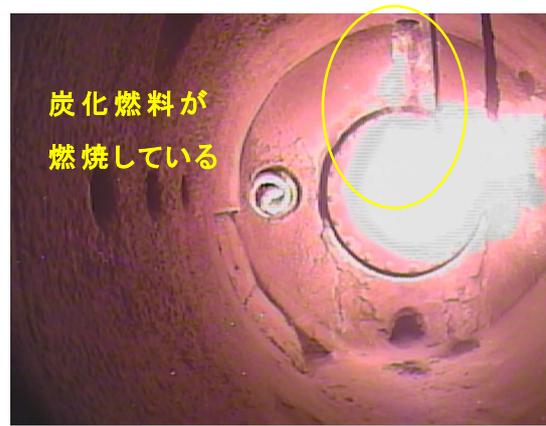


図 2.3.2-3 RUN6-2 混焼時



図 2.3.2-4 RUN6-3 混焼時



図 2.3.2-5 RUN6-4 混焼時

2.3.3 温度分布

試験炉における温度の測定位置を図 2.3.3-1 に、各試験での温度分布を図 2.3.3-2 に示す。本試験では T1 は炭化燃料の投入口として使用しているためデータは無しとする。結果より、専焼時と混焼時で同等の温度分布を示しており、火炎近傍は温度が高く、後段に行くにつれて温度が低くなる傾向にある。但し、炉内温度 4 については、熱電対の位置が壁面に近く、火炎から離れているため低い温度を示している。また、RUN6-3 は水噴霧による影響があり、RUN6-4 については未粉碎による影響が見られる。水噴霧の場合、蒸発が不十分で炭化燃料の燃焼に悪影響を与え、温度が低くなっていると考えられる。未粉碎品の場合、二次粒径が大きい粒子の割合が増えるため燃焼しにくく、粉碎品に比べ温度が低くなる。

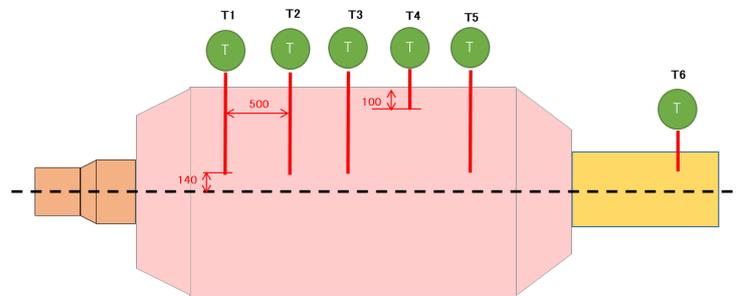


図 2.3.3-1 温度測定位置

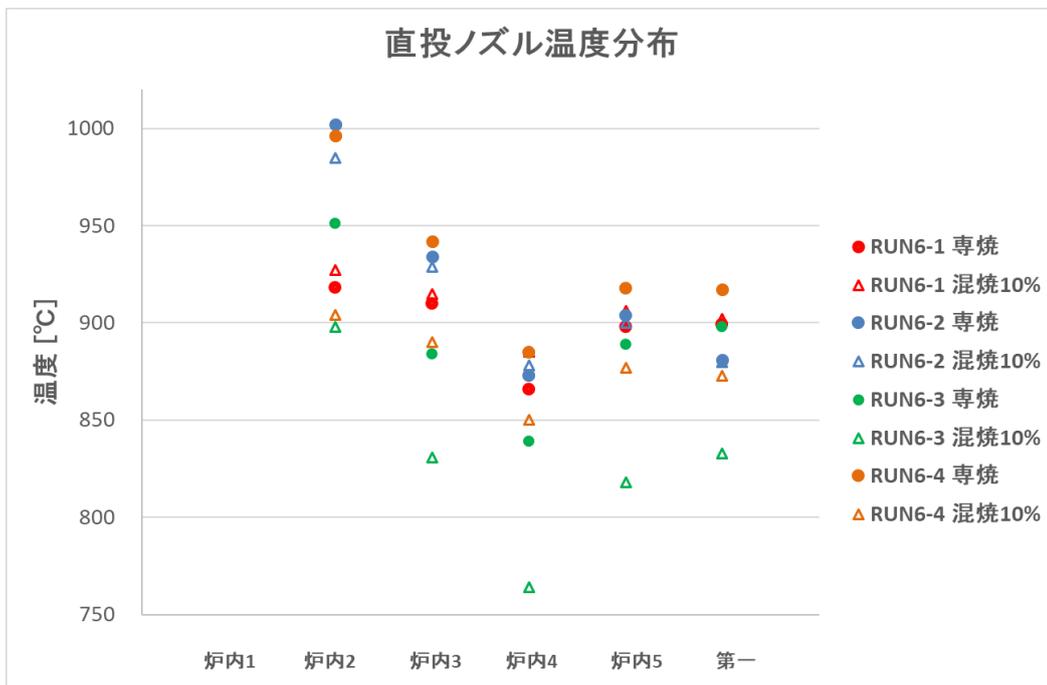


図 2.3.3-2 温度分布

2.3.4 排ガス値

各条件での O₂、CO、NO_x 値をそれぞれ図 2.3.4-1～図 2.3.4-3 に示す。全条件とも CO、NO_x ともに低い値を示していることが確認できる。但し、RUN6-3 については水噴霧により、炭化燃料の燃焼性に悪影響を与えているため、温度が低くなり、NO_x 値も低下していると考えられる。

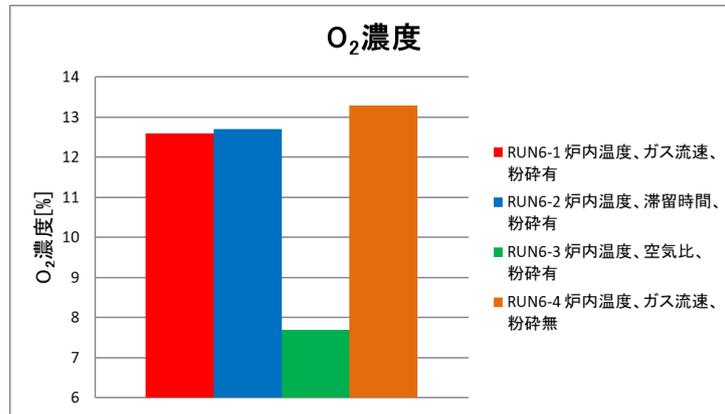


図 2.3.4-1 O₂ 濃度

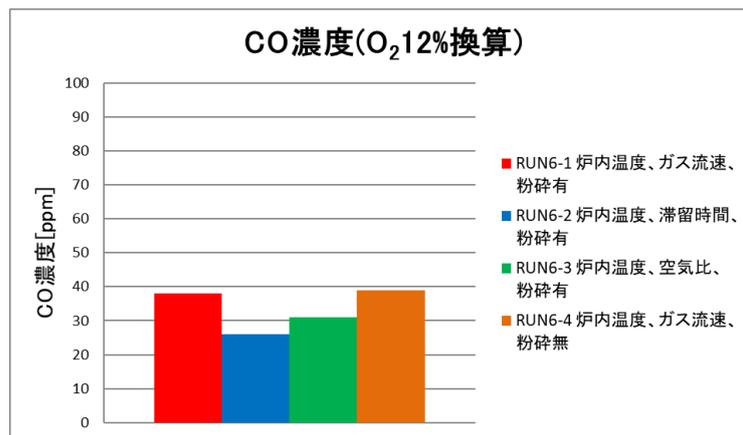


図 2.3.4-2 CO 濃度

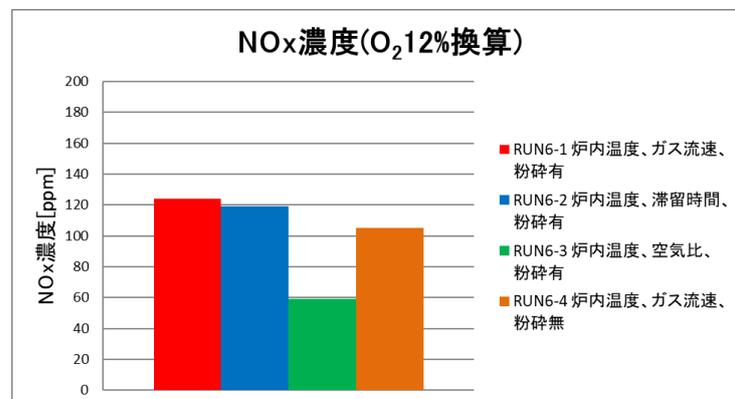


図 2.3.4-3 NO_x 濃度

2.3.5 燃焼率

本試験でサンプルしたダストから算出した燃焼率を図 2.3.5-1 に示す。RUN6-3 は、これまで述べた通り、水噴霧の影響で炭化燃料の燃焼性が悪く、燃焼率も悪化している。また、2.3.2 にて、RUN6-4 では炭化燃料が落下している様子が見られたため、燃焼率は RUN6-1, 6-2 に比べ低い値となっている。

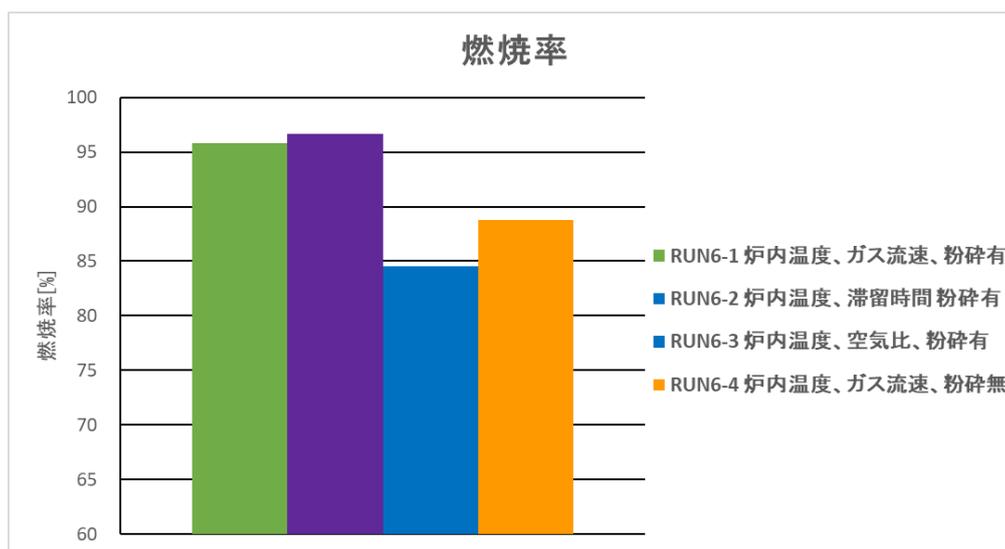


図 2.3.5-1 燃焼率

2.3.6 まとめ

RUN6-3 の空気比の評価は、水噴霧の影響があり、評価ができず、RUN6-4 では火炎に巻き込まれず炉底にたまったものが確認されたため未粉碎の場合は注意が必要である。しかし、RUN6-1、RUN6-2 については、排ガス値も問題なく、燃焼率も高い値となったとともに、炉内の火炎の様子からもこれらの条件において問題なく燃焼していることが確認できた。このことより、炭化燃料の粉碎品を使用した場合、炭化燃料化施設の燃焼炉で炭化燃料を化石燃料の代替燃料として利用することで低質ごみ時の灯油使用量を削減する燃焼模擬の確認が出来た。

3. 炭化燃料の利用先拡大

本項で述べる試験は、第 1 章で述べた「炭化燃料利用先の拡大」を目指して利用先での適応可否の確認を目的に行ったものである。ごみ焼却施設では、それぞれの用途で油バーナやガスバーナが使用されている。特に油バーナの使用が多く、これらに使用する化石燃料を炭化燃料で代替することで、CO₂ 削減とともにコスト削減することが出来れば、炭化燃料化施設の需要が拡大すると考えられる。本項では、炭化燃料の利用先拡大に向け、昨年度開発した 3 種類のバーナの定常時、混焼率アップ時、起動時での燃焼試験を行った結果を示す。

3.1 混焼バーナ燃焼試験

本試験で使用した混焼バーナの機器写真と概要を図 3.1-1～図 3.1-2 に示す。炭化燃料混焼バーナは、アスファルトプラント（以下、AP）用の油燃焼バーナ構造をベースにしている。油燃焼バーナで使用する油噴霧ノズルは戻り流量調整方式のリターンノズルを採用し、バーナ内部には保炎器（ディフューザ）を設置している。燃焼量が多くなり、燃焼用空気も多く供給すると、保炎器によって燃焼空気の流速が上がるため、保炎器近傍には細かい乱流が発生し、油と燃焼空気の接触が良くなりファイアボールを形成する。混焼時のポイントは、このファイアボールの内部に炭化燃料を巻き込み、乾燥、引火、固体燃焼に移行させることである。また、このバーナは油バーナが必要な新設プラントでの設置を前提に開発を行う。

試験設備は、投入ホップ供給機、その他試験設備(第 2 章 1.2 試験設備にて説明)で構成される。本試験では混焼バーナを使用した。試験設備概要を図 3.1-3 に示す。混焼バーナ試験は RUN1 と制御による追従性確認のため、制御盤導入後に RUN4 を行った。制御盤導入についての詳細は、第 2 章 5 制御盤の開発にて述べる。



図 3.1-1 混焼バーナ写真

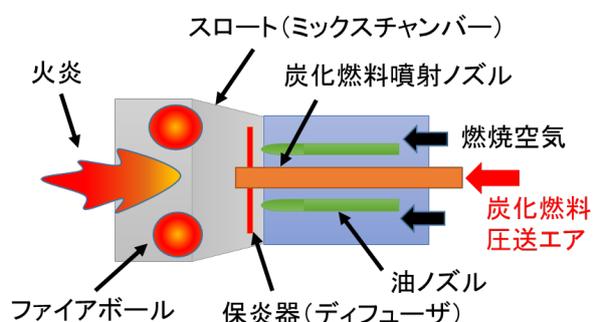


図 3.1-2 混焼バーナ機器概要

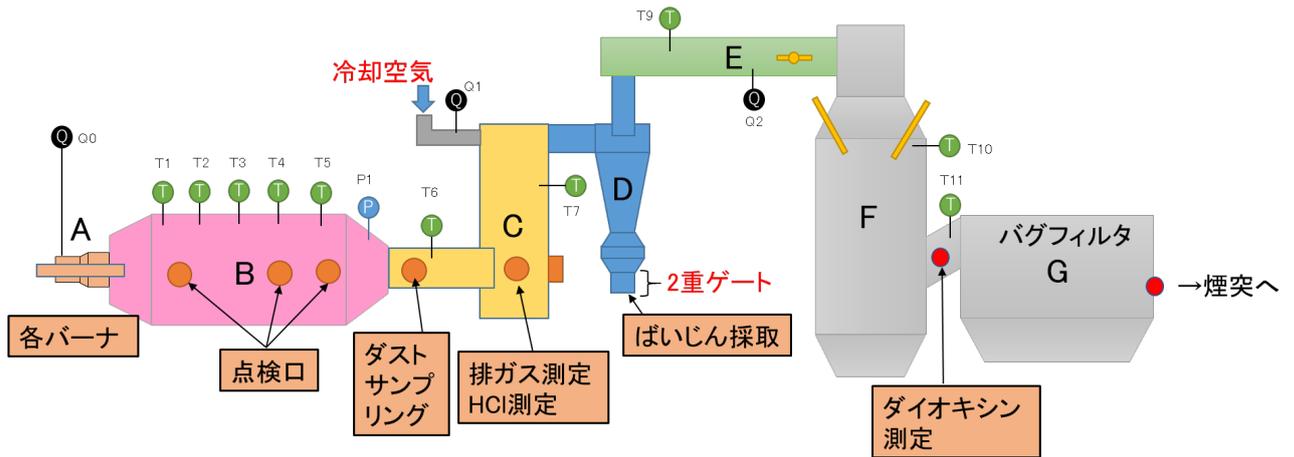


図 3.1-3 試験設備概要

3.2 試験条件・結果(定常時)

3.2.1 高温試験 (1,200℃以上:溶融温度以下)

本試験は RUN1 として行った。主なパラメータとして、炭化燃料混焼率、粉砕有無、熱風有無、旋回エア有無を変更して行った。パラメータは昨年度の噴霧試験を参考とした。必要に応じて、各空気量を調整し空気比も変更している。試験条件を表 3.2-1 に示す。

表 3.2.1-1

試験No	重油量 [L/h]	炭化燃料 供給量 [kg/h]	混焼率 [%]	含水率 [%]	粉砕 有無	熱風 有無	旋回エア 有無	バーナファン 空気量 [Nm ³ /min]	圧送空気 量 [Nm ³ /min]	旋回空気 量 [Nm ³ /min]	空気比 (一次のみ)	二次空気 量 [Nm ³ /min]	空気比 (二次込み)
RUN 1-1	150	-	-	-	-	無	有	44.4	9.9	1.4	2.10	-	-
RUN 1-2	150	-	-	-	-	有	有	35.2	17.4	1.4	2.10	-	-
	120	92	20	-	有	有	35.2	12.8	1.4	1.80	-	-	
RUN 1-3	150	-	-	-	-	無	有	23.5	5.65	1.56	1.49	-	-
	120	92	20.1	22.0	有	無	有	23.5	5.93	1.56	1.43	-	-
RUN 1-4	150	-	-	-	-	有	有	24.4	5.53	1.58	1.50	-	-
	122	92	19.8	22.5	有	有	有	22.8	5.67	1.58	1.36	-	-
RUN 1-5	150	-	-	-	-	無	有	22.6	5.63	1.58	1.48	-	-
	119	92	20.2	22.0	有	無	有	29.0	5.72	1.58	1.44	-	-
	119	92	20.2	22.0	有	有	有	25.4	5.8	1.58	1.50	-	-
RUN 1-6	150	-	-	-	-	無	有	30.4	6.5	1.56	1.46	5.3	1.68
	120	92	20.1	22.6	有	無	有	31.8	7	1.56	1.35	7.4	1.61
	120	92	20.1	22.6	有	有	有	32.9	8.4	1.56	1.39	6.8	1.64
	120	92	20.1	22.6	有	有	無	36.1	8.4	-	1.45	6.8	1.69
RUN 1-7	150	-	-	-	-	無	有	32.6	6.9	1.56	1.56	4.7	1.75
	120	92	20.1	20.3	有	有	有	32.6	8.4	1.58	1.38	6.6	1.62
	120	92	20.1	20.3	有	有	無	35.9	9.1	-	1.46	6.6	1.70
	120	92	20.1	20.3	有	無	有	33.7	7.1	1.58	1.42	6.1	1.64
RUN 1-8	149	-	-	-	-	無	有	32.9	6.5	1.58	1.54	5.3	1.76
	119	92	20.2	20.9	有	有	有	33.4	8	1.58	1.41	6.3	1.65
	119	92	20.2	20.9	有	無	有	36.4	6.8	1.58	1.38	6.2	1.61
	119	92	20.2	20.9	有	無	無	33.7	7.2	-	1.46	6.3	1.69
RUN 1-9	152	-	-	-	-	無	有	29.2	6.1	1.58	1.4	6.5	1.66
	120	92	20.1	19.3	有	無	有	31.2	7.2	1.58	1.31	7.3	1.52
	120	92	20.1	19.3	有	無	無	36.4	6.6	-	1.44	6.5	1.55
RUN 1-10	120	92	20.1	22.5	有	有	有	28.0	6.33	1.56	1.4	7	1.60
RUN 1-11	150	-	-	-	-	有	有	24.0	6.3	1.56	1.17	6.5	1.55
	120	92	20.1	21.6	有	有	有	25.0	6.5	1.56	1.18	8.6	1.47
RUN 1-12	150	-	-	-	-	有	有	30.6	6.4	1.56	1.51	7.1	1.78
	120	92	20.1	30.2	無	有	有	31.2	6.2	1.58	1.37	7.5	1.65
	120	92	20.1	30.2	無	無	有	29.7	6.1	1.58	1.37	8.7	1.69

混焼率 20%のデータについては、代表データとして表の緑枠範囲についてピックアップして考察する。

(1) 温度トレンド

本試験で得られた温度トレンドデータの一例(RUN1-9)を図 3.2.1-2 に示す。縦軸は温度、横軸に時間を示す。温度は図 3.1-1 に示す T1～T6 の数値を示す。専焼状態から一時的に重油量を下げ、その後炭化燃料を投入することで温度の上昇が確認できた。混焼バーナにおいても、第2章1 燃焼試験概要で、コンセプトとして記載した通り、重油の熱量分を炭化燃料で賄えており、代替燃料として使用できていることが確認できた。

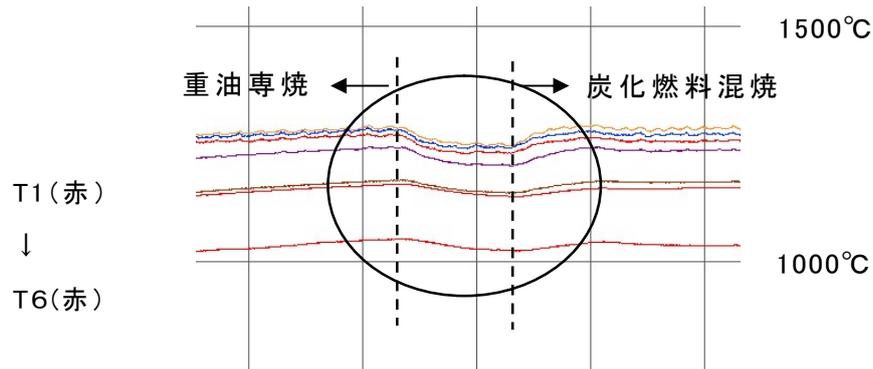


図 3.2.1-2 温度トレンド

(2) 燃焼状態の確認

試験中、図 3.2.1-3 に示す撮影位置より火炎の燃焼の様子をカメラにて撮影した。RUN 1 の燃焼の様子を図 3.2.1-4 ～図 3.2.2-3 に示す。図より、専焼時は安定した火炎形状が確認できる。一方炭化燃料混焼時は黒い模様を確認できるが、火炎形状自体は安定していることが確認できた。

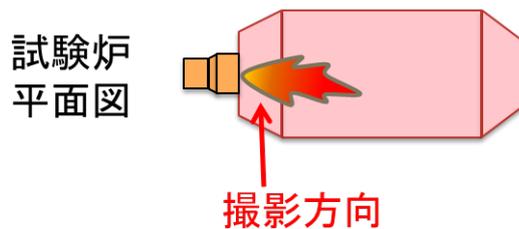


図 3.2.1-3 撮影方向

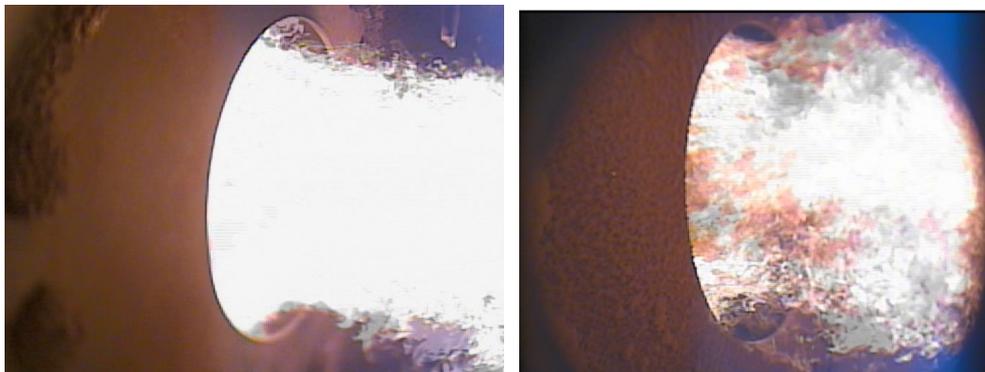


図 3.2.1-4 RUN 1 の燃焼の様子 (左写真: 専焼 右写真: 混焼 20%)

(3) 温度分布

T1～T6の温度は、図3.2.1-5に示す位置で設置した熱電対で測定している。RUN1の各試験での炉内温度分布を図3.2.1-6に示す。結果より、専焼時はバーナ近傍の炉内温度2、3の温度が高い一方で、炭化燃料混焼時はバーナ近傍から試験炉後方になるにつれ、温度が高くなる傾向になることを確認できた。これは、炭化燃料の燃焼が、蒸発時間の影響で後方に推移し、火炎が伸びているためである。また、図3.2.1-5に示す視窓から火炎を確認したところ、専焼時は火炎先端が僅かに確認できる程度であったのに対し、混焼時は火炎先端が十分に確認できたことから、火炎が長くなっていることが分かった。図3.2.1-7、3.2.1-8に視窓から確認された火炎の様子を示す。

T4については、熱電対の位置が壁面に近い位置となり、火炎から離れるため、低めの値を示す。粉碎無しの場合の温度分布が全体的に低い値を示しているが、これは未粉碎品の場合、炭化燃料の平均粒径が高くなるため、蒸発時間が長くなり燃焼性を悪化させるためである。

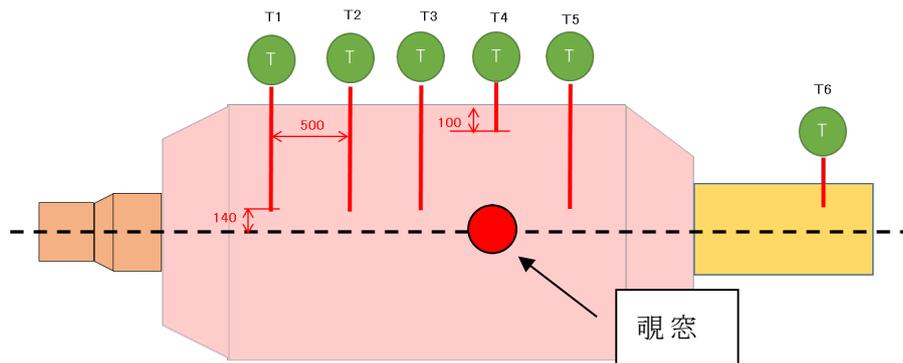


図 3.2.1-5 温度測定位置

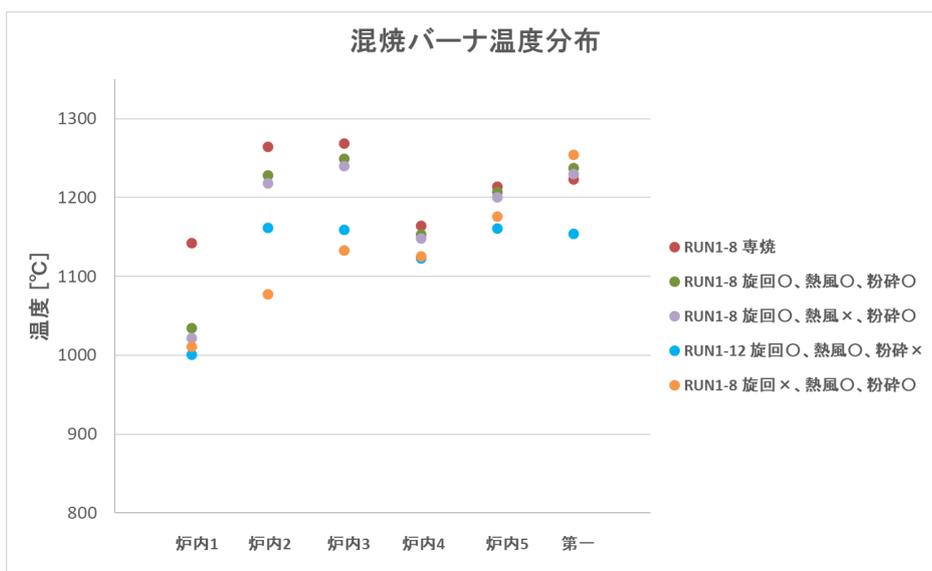


図 3.2.1-6 温度分布



図 3.2.1-7 専焼時の火炎の様子



図 3.2.1-8 混焼時の火炎の様子

また、試験後の炉内の様子を図 3.2.1-9 に示す。炉内温度が $1,200^{\circ}\text{C} \sim 1300^{\circ}\text{C}$ であったため、燃焼した灰が溶融し、炉内に付着する様子が確認された。



図 3.2.1-9 試験後の炉内の様子

(4) 排ガス値

図 3.1-3 に示す燃焼炉出口で排ガス測定を行った。各条件での O_2 、 CO 、 NO_x 値をそれぞれ図 3.2.1-10～図 3.2.1-12 に示す。未粉碎品を使用した条件の場合 CO 濃度が高いことがわかる。前項でも述べた通り、未粉碎品の場合炭化燃料の平均粒径が大きくなるため、蒸発時間が長くなる。そのため、炭化燃料が火炎中に投入されて高温領域に晒されている間に燃焼しなかった場合、不完全燃焼となり、 CO が発生すると考える。 CO と比較して NO_x は条件による大きな違いは見られず 300ppm 程度となった。これは、同じ温度条件下では炭化燃料投入量によって決定するフューエル NO_x による影響が大きく、混焼率が同じ条件であるためである。

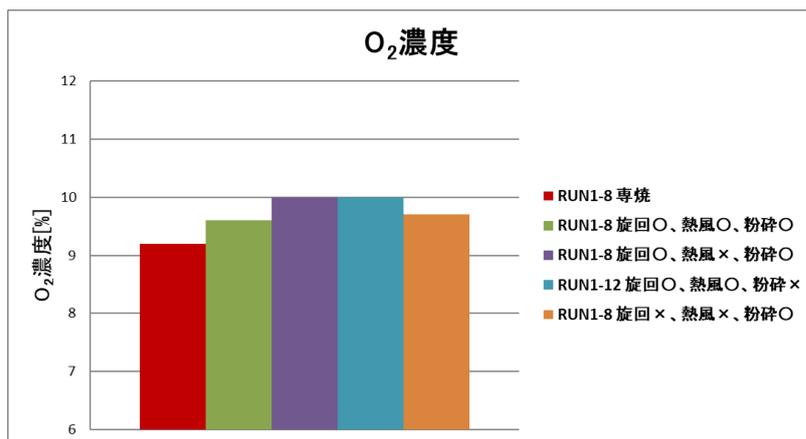


図 3.2.1-10 O₂ 濃度

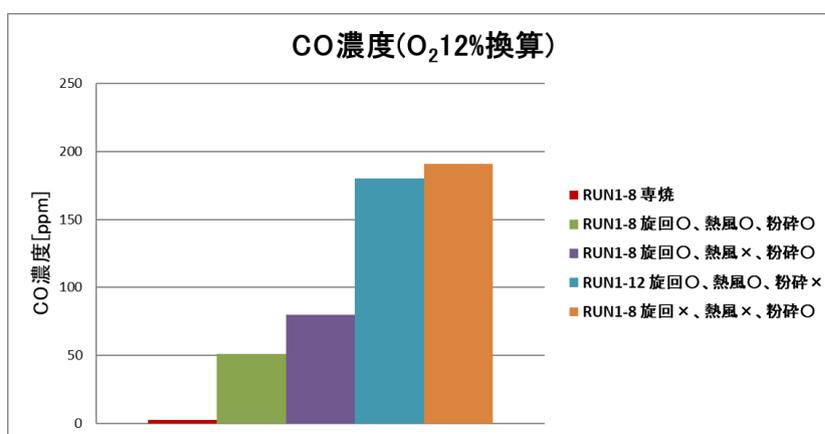


図 3.2.1-11 CO 濃度

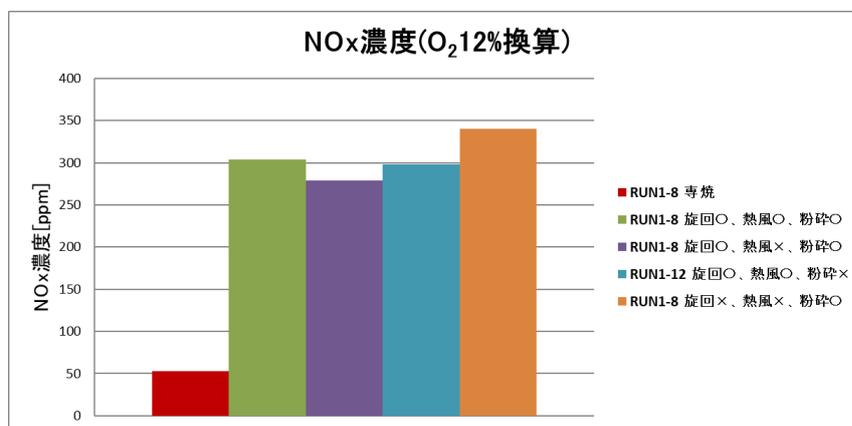


図 3.2.1-12 NO_x 濃度

(5) 燃焼率

サンプルしたダストより算出した燃焼率を図 3.2.1-13 に示す。結果として、50～80%の低い数値が得られた。図 3.2.1-9 で示した通り、本試験では灰の溶融が確認され、灰の溶融が燃焼率に影響することが懸念されるため、RUN 4 にて制御温度を下げてデータの再取得を行った。

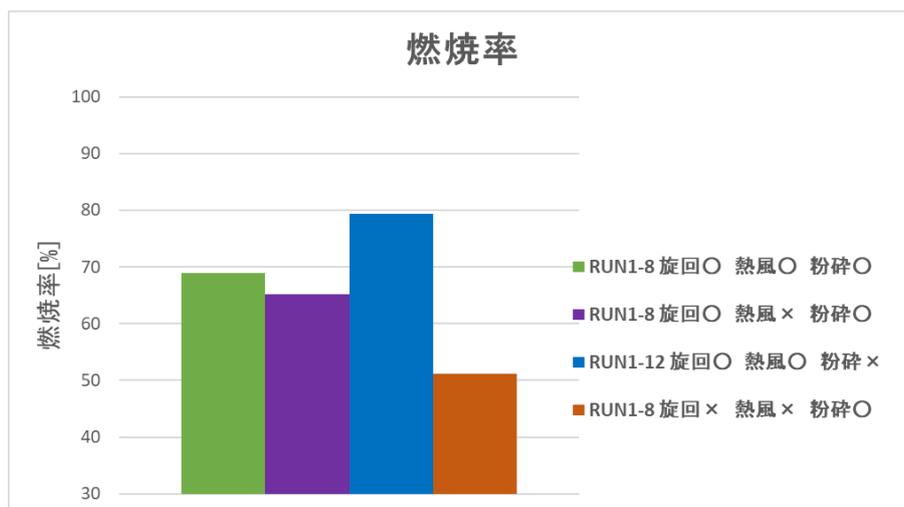


図 3.2.1-13 燃焼率

3.2.2 温度制御試験 (1,100°C:灰溶融温度以下)

本試験では、温度を低下させて運転することによる効果の確認を目的とし、試験を行った。さらに、3.2.1 にて、RUN1 では燃焼温度が高い影響で灰の溶融が発生し、燃焼率が不確かであることがわかった。このため RUN4 では、空気量を調整し、燃焼温度溶融温度以下の 1,100°C程度に下げて試験を行った。試験条件を表 3.2.2-1 に示す。

表 3.2.2-1 試験条件

試験No	重油量 [L/h]	炭化燃料 供給量 [kg/h]	混焼率 [%]	含水率 [%]	粉碎 有無	熱風 有無	旋回エア 有無	バーナフ ン空気量 [Nm ³ /min]	圧送空気 量 [Nm ³ /min]	旋回空気 量 [Nm ³ /min]	空気比 (一次の み)	二次空気 量 [Nm ³ /min]	空気比 (二次込 み)
RUN 4-1													
RUN 4-2					制御盤PID等調整 のためデータ無し								
RUN 4-3													
RUN 4-4													
RUN 4-5													
RUN 4-6	150	-	-	-	-	無	無	49.0	5.8	-	2.20	6.6	2.44
	120	92	23.2	21.0	有	有	有	50.0	5.5	1.43	2.05	6.6	2.26
	75	184	49.2	21.0	有	有	有	53.0	5.5	1.43	2.11	6.6	2.32
RUN 4-7	120	92	23.3	20.8	有	無	有	24.5	5.8	1.43	1.13	7.0	1.40
	120	92	23.3	20.8	有	無	有	42.0	5.7	1.43	1.78	7.2	2.06
	150	-	-	-	-	無	無	30.0	6.8	-	1.52	7.2	1.83
	110	71	20.4	20.8	有	有	有	42.0	5.9	1.43	2.00	7.9	2.33
RUN 4-8	150	-	-	-	-	無	無	44.0	6.6	1.43	2.04	5.9	2.28
	150	-	-	-	-	無	無	45.0	5.8	1.43	2.08	8.0	2.38
RUN 4-9	150	-	-	0.0	-	有	無	43.0	6.6	-	2.00	6.4	2.26
	120	92	23.2	21.0	有	有	有	51.0	5.5	1.43	2.06	6.6	2.30
	120	92	23.2	21.0	有	無	有	50.0	5.3	1.43	2.05	6.6	2.29
	120	92	23.2	21	有	有	有	50.0	5.3	1.43	2.02	6.4	2.25
RUN 4-10	150	-	-	-	-	有	無	43.0	6.6	-	2.00	6.2	2.23
	120	92	23.0	22.0	有	有	有	47.0	5.6	1.30	2.04	6.2	2.26
	120	92	23.0	22.0	有	有	無	47.0	6.3	-	2.07	6.2	2.28
RUN 4-11	150	-	-	-	-	有	無	45.0	6.5	-	2.08	6.2	2.31
	120	92	20.6	30.0	-	有	有	46.0	4.8	1.40	2.04	6.2	2.26
	120	92	20.6	30.0	-	無	有	46.0	4.5	1.40	2.03	6.2	2.25
RUN 4-12	150	-	-	-	-	無	無	46.5	6.7	-	2.15	5.9	2.37
	120	92	23.2	21.0	有	有	有	48.0	5.3	1.40	2.08	5.9	2.28
	120	77	20.2	21.0	有	有	有	43.0	5.5	1.40	1.98	5.9	2.19
	120	92	23.2	21.0	有	有	無	48.0	6.6	-	2.07	5.9	2.28
RUN 4-13	150	-	-	-	-	無	無	44.5	6.7	-	2.07	5.7	2.28
	120	75	20.3	19.0	有	有	有	46.0	5.4	1.40	2.09	5.7	2.30
	120	75	20.3	19.0	有	無	有	47.0	5.4	1.40	2.13	5.7	2.34
RUN 4-14	150	-	-	-	-	無	無	43.0	6.7	-	2.01	5.5	2.23
	120	74	20.2	18.4	有	有	有	42.0	5.5	1.40	1.93	5.5	2.15
	120	74	20.2	18.4	有	有	無	38.0	6.7	1.40	1.82	5.5	2.04

混焼率 20%のデータについては、代表データとして表の緑枠範囲についてピックアップして考察する。

(1) 温度トレンド

本試験で得られた温度トレンドデータの一例(RUN4-14)を図 3.2.2-1 に示す。縦軸は温度、横軸は時間となる。本試験では制御盤による温度一定制御での混焼試験のため RUN1 と波形が異なる。制御ロジック上、重油専焼から混焼開始すると、まず炭化燃料が指定量投入されるため一時的に温度が上昇する。その後、温度を設定温度（本試験では 1,100℃）に保つため重油量を低下させて温度を低下させる。図よりロジック通りの波形を確認できた。よって、炭化燃料を代替燃料として使用できていることがわかる。

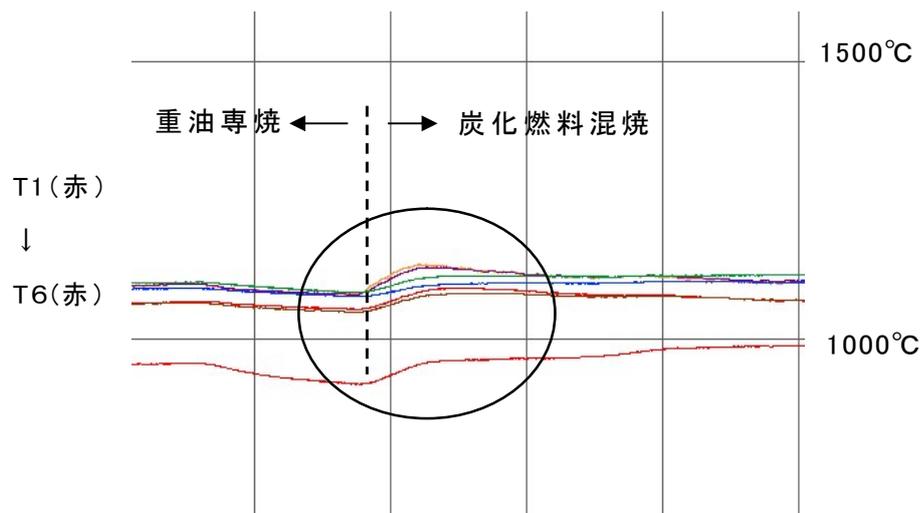


図 3.2.2-1 温度トレンド

(2) 燃焼状態の確認

試験中、図 3.2.2-2 に示す撮影位置より火炎の燃焼の様子をカメラにて撮影した。RUN 4 のそれぞれの燃焼の様子を図 3.2.2-3 に示す。

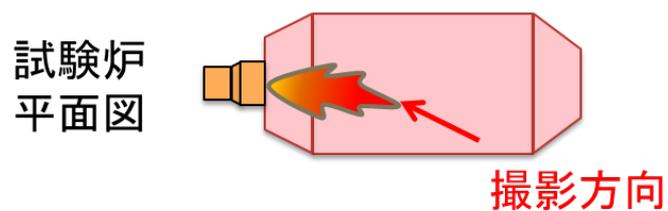


図 3.2.2-2 撮影方向



図 3.2.2-3 RUN 4 の燃焼の様子（左写真：専焼 右写真：混焼 20%）

上記より、専焼時は安定した火炎形状が確認できる。一方炭化燃料混焼時は、試験炉内部に炭化燃料粒子が燃焼しながら飛散している様子が見られた。

(3) 温度分布

図 3.2.1-5 に示す位置で設置した熱電対で測定している。RUN 4 の各試験での炉内温度分布を図 3.2.2-4 に示す。結果より、専焼時も混焼時もバーナ近傍の炉内温度 2、3 の温度が高い一方で、炭化燃料混焼時はバーナ近傍から試験炉後方になるにつれ、温度が高くなる傾向になることを確認できた。専焼時と混焼時で燃焼の仕方が同様であるといえる。

また、T4 については、熱電対の位置が壁面に近い位置となり、火炎から離れるため、若干低めの値を示す。粉碎無しの条件の場合の温度分布が全体的に低い値を示しているが、これは未粉碎品の場合、炭化燃料平均粒径が高くなるため、蒸発時間が長くなり燃焼性を悪化させるためである。

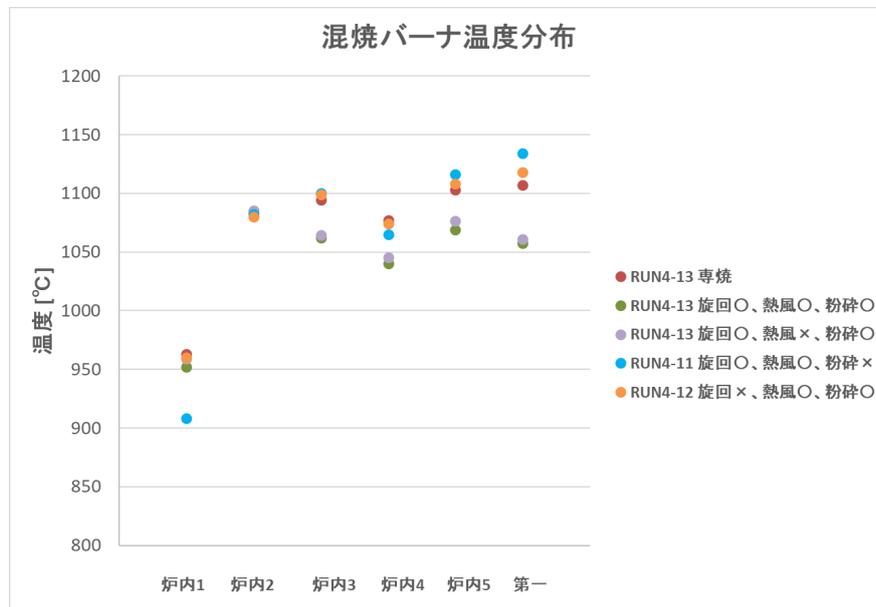


図 3.2.2-4 各条件での温度分布 (RUN 4)

(4) 排ガス値

図 3.1-3 に示す通り RUN 1 と同様排ガス測定を行った。各条件での O₂、CO、NO_x 値をそれぞれ図 3.2.2-5～図 3.2.2-7 に示す。まず排ガス値について未粉碎品、旋回無の場合の場合 CO 濃度が高いことがわかる。前項でも述べた通り、未粉碎品の場合炭化燃料の平均粒径が大きくなるため、蒸発時間が長くなる。そのため、炭化燃料が火炎中に投入されて高温領域に晒されている間に燃焼しなかった場合、不完全燃焼となり、CO が発生すると考える。NO_x については、条件に関わらず 250～350ppm 程度の数値を示すことが確認できた。

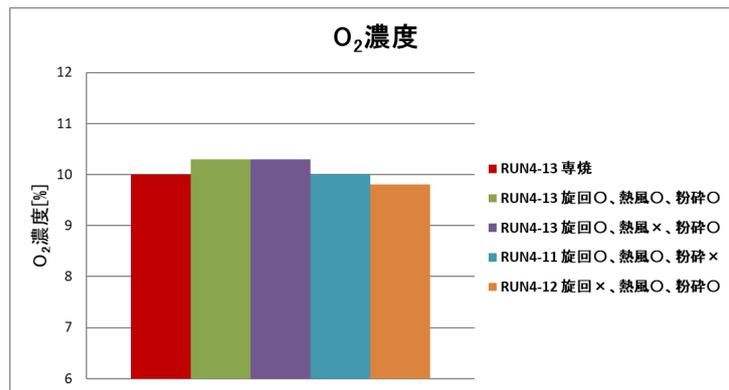


図 3.2.2-5 O₂ 濃度

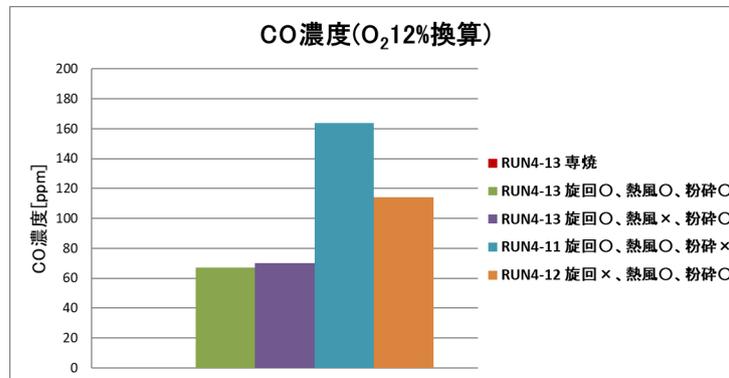


図 3.2.2-6 CO 濃度

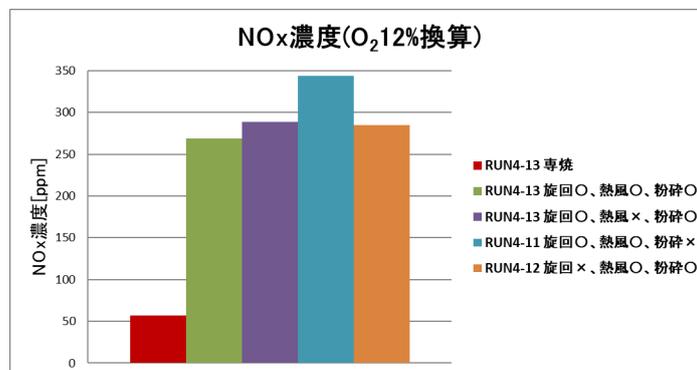


図 3.2.2-7 NO_x 濃度

(5) 燃焼率

サンプルしたダストより算出した燃焼率を図 3.2.2-8 に示す。結果より、未粉碎品の試験結果を除き、85～90%の数値が得られた。未粉碎品については、排ガス値も他条件に比べて高いことから、燃焼性が悪いと考えられる。また、RUN 4 では低い炉内温度で運転したことで、灰の溶融を防ぐことができ、燃焼率に対する影響への懸念を払しょくできた。

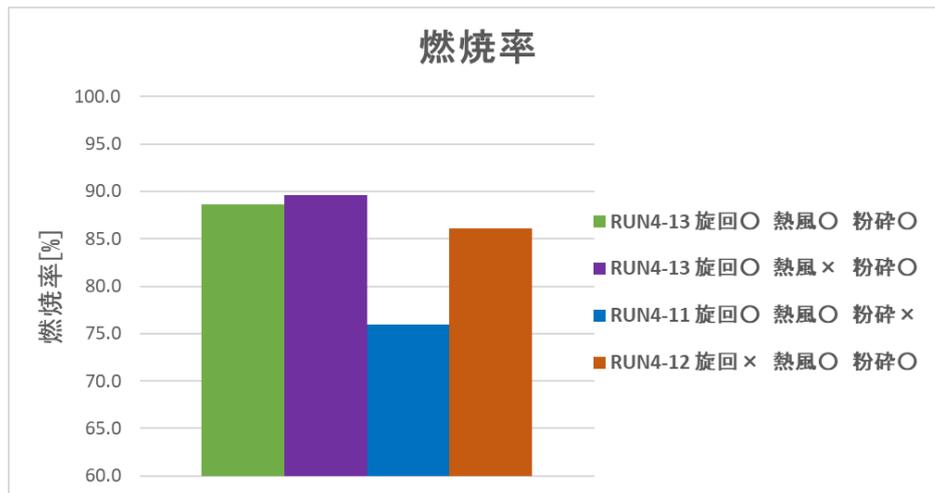


図 3.2.2-8 燃焼率

3.2.3 ダイオキシン、HCl、ばいじん濃度

表 3.2.3-1 に混焼バーナにおける炭化燃料混焼時の HCl とばいじん濃度、灰のダイオキシン濃度の測定結果を示す。また、測定箇所は図 3.1-3 に示す。表より、3 項目とも法規制値よりも低い値となり、問題ないことを確認した。

表 3.2.3-1 燃焼試験における測定結果（混焼バーナ）

	混焼バーナ試験結果	法規制等排出基準
ダイオキシン(排ガス) 毒性等量[ng-TEQ/m ³]	0.58	10
ダイオキシン(焼却残渣) 毒性等量[ng-TEQ/m ³]	0.50	3
HCl [ppm]	0.4 未満	430
※処理前ばいじん濃度 [ppm]	0.20	-

※処理前とは、ばいじんを採取するバグフィルタの前段で測定したばいじん濃度を示す。

3.2.4 混焼率変化の試験結果

これまで、重油量の 20%の炭化燃料混焼については問題ないことを確認した。本試験は、さらに混焼率を上昇し、CO₂ 削減、重油コスト削減を図り利用先の拡大、環境への影響も軽減することを目的として行った。最大 50%の混焼率における燃焼への影響を調査した。試験条件を表 3.2.4-1 に示す。

表 3.2.4-1 試験条件

試験 No.	RUN4-6
重油量[L/h]	150
混焼率[%]	20、50
目標温度[°C]	1,100
粉碎	○
熱風(80°C)	○
旋回エア	○

(1)混焼率ごとの燃焼状態の確認

混焼率ごとに燃焼状態を撮影した写真を図 3.2.4-1、図 3.2.4-2 に示す。混焼率を上昇させると光っている粒子が増加し、粉体が火炎内で多く着火することが確認できた。



図 3.2.4-1 RUN4-6 混焼率 20%

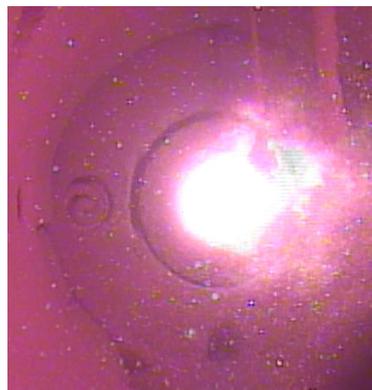


図 3.2.4-2 RUN4-6 混焼率 40%

(2)混焼率ごとの排ガス値・燃焼率の比較

各排ガス値、燃焼率を図 3.2.4-3～図 3.2.4-6 に示す。横軸に混焼率、縦軸に各値を示し、プロット値は、各条件における試験のトレンドから算出した平均値である。微粉炭燃焼時に発生する NO_x は 9 割以上フューエル NO_x が要因であることが知られている。結果より、混焼率の上昇に伴い NO_x 濃度も上昇していることからフューエル NO_x の影響であると考えられる。CO は混焼率 40%まで上昇が見られた。CO は非常に高い値を示すが、試験時の煙突出口 CO はかなり低い値 (10ppm 以下) となっており、実際の運用面では問題ないとする。燃焼率は、混焼率に関わらず 85～90% 程度の値を示した。

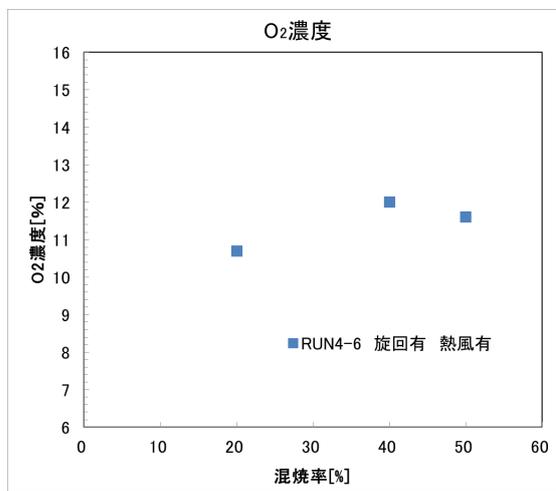


図 3.2.4-3 O₂ 濃度の比較

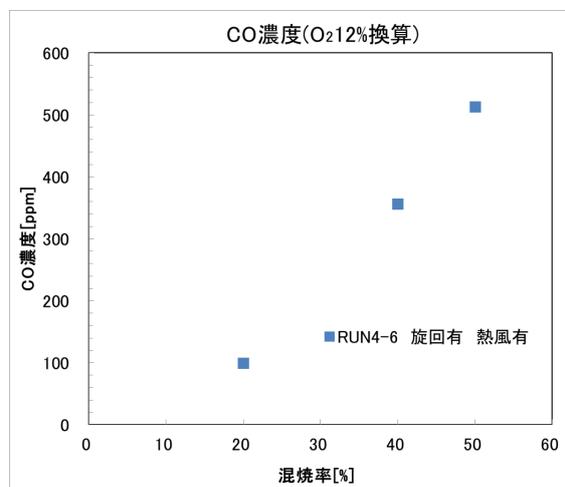


図 3.2.4-4 CO 濃度の比較

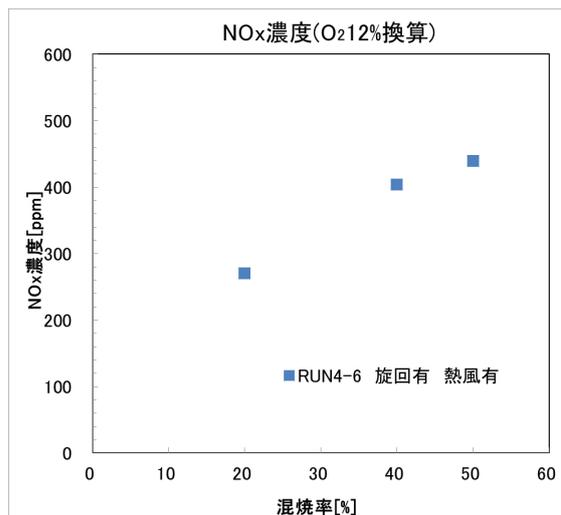


図 3.2.4-5 NO_x 濃度の比較

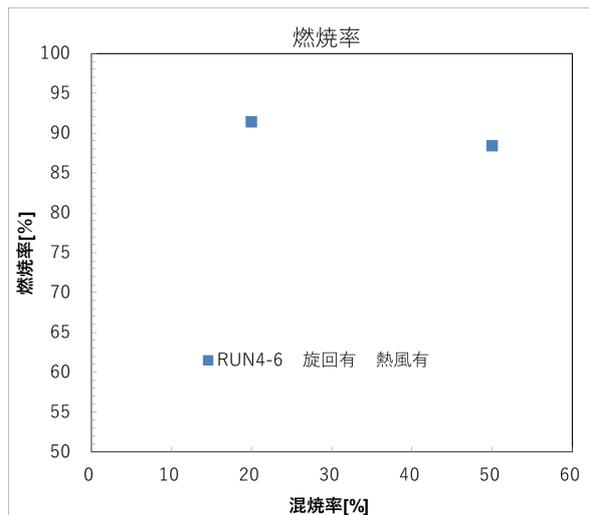


図 3.2.4-6 燃焼率の比較

3.2.5 まとめ 混焼バーナ燃焼試験(定常時)

定常時の混焼バーナ燃焼試験について、重油を利用する施設において、炭化燃料の20%混焼では、温度を1,100℃程度で制御して運転すれば熔融なく燃焼し、85%以上の燃焼率にて利用できることが確認できた。但し、パラメータの中で粉砕無しの場合、燃焼率は低く、COが高い値となった。さらに旋回無しの場合は燃焼率が高い一方でCOが高くなった。以上より、粉砕と旋回の必要であることが確認された。また、NO_xにおいては規制値について地域性があるため、納入する地域によって対策検討が必要であると考え。ダイオキシンの値は規制値を下回っているため、混焼バーナはパラメータ次第で使用可能である。

3.3 試験条件・結果(起動時)

3.3.1 試験条件

ごみ焼却施設では、炉起動時に助燃バーナを使用することでごみが燃焼する温度まで昇温している。本試験では、炉起動時に油バーナ燃料である化石燃料の一部を炭化燃料で代替することが出来るかを確認する。

試験方法としては、最初重油専焼で昇温していき、炉内温度が 350℃になった段階で重油量を 20% 低下させ、その熱量分の炭化燃料を投入し混焼試験を行う。350℃とした根拠を以下に示す。

- ・炭化燃料の発火温度が 270℃程度である。
- ・来年度実証試験を行う播磨町塵芥処理センターにて、昨年度重油専焼による起動時試験をした際、ごみの着火温度が 300℃程度であることを確認した。

以上より、炉内温度が 350℃となれば炭化燃料は問題なく燃焼すると判断した。試験条件を表 3.3.1-1 に示す。パラメータについては 3.3 にて述べた混焼バーナの混焼試験結果を踏まえて決定した。比較のためベース重油量 100L/h についても試験を行った。

表 3.3.1-1 起動時試験条件

試験 No.	RUN4-7	
ベース重油量[L/h]	100	150
混焼率[%]	20	20
粉碎	○	○
熱風(80℃)	×	×
旋回エア	○	○

3.3.2 試験結果

(1) 燃焼状態の確認

炉内の火炎の状態を図 3.3.2-1～3.3.2-3 に示す。図 3.3.2-2 と図 3.3.2-3 より、定常時と同様、起動時混焼でも炭化燃料の粒子が飛散している様子を確認した。実際に燃焼しているかどうかに関しては、後述の排ガス、燃焼率等で考察する。



図 3.3.2-1 重油専焼(重油 150L)



図 3.3.2-2 起動時混焼(重油 150L)

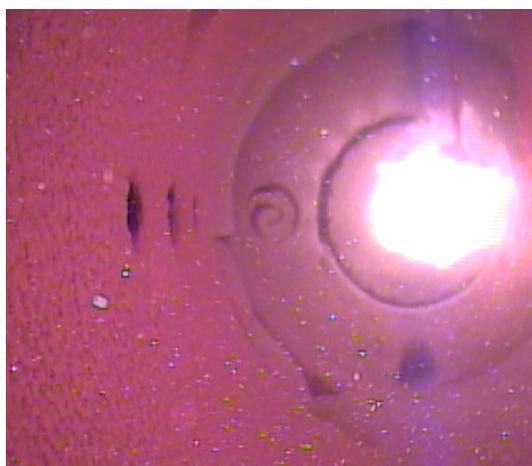


図 3.3.2-3 定常時混焼(重油 150L)

(2)温度分布

起動時混焼と定常時混焼での各測定箇所の温度分布を図 3.3.2-4 に示す。横軸に温度測定位置、縦軸に測定温度を表す。

図 3.3.2-4 より、起動時は全体的に温度が低いものの炉内 4 の温度分布が大きく違う。これは、図 3.2.3-1 に示す通り、炉内 4 にある温度計は他の温度計と異なり火炎から離れた壁面近くに設置しているためである。起動時は、バーナ火炎近傍から温度が上昇していくため、火炎から離れた炉内 4 の温度は最も低く、他の温度も炉壁が冷えているため、定常時混焼と比較して温度が低い。定常時混焼では、炉内 2 から 5 の温度はおおよそ同じ温度になっていることが確認された。このことから、炉全体が温まるまで炉内 4 は他よりも温度が低くなっていると判断できる。

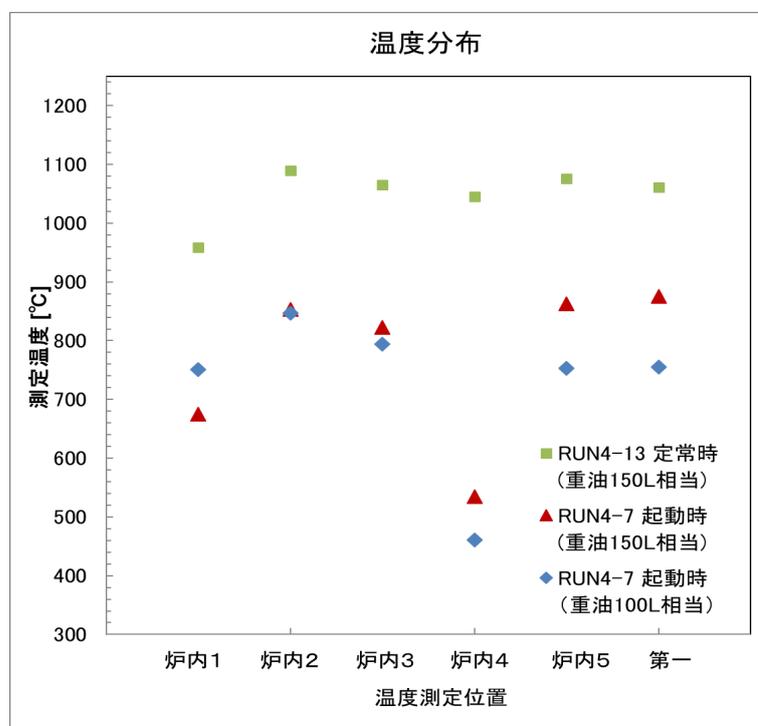


図 3.3.2-4 温度分布比較

(3) 排ガス値・燃焼率

排ガス値・燃焼率を図 3.3.2-5～図 3.3.2-8 に示す。図 3.3.2-6、図 3.3.2-7 より、起動混焼は定常時混焼よりも温度が低いことから、燃焼性が悪く CO 値は高く、NOx 値は低くなる傾向にある。重油 100L/h と 150L/h でも、熱量が違うため同傾向にある。燃焼率は全条件において 85～90%程度の値を示した。ごみ焼却施設では、炉の起動時に排ガス値の規制は設けられていないが、通常運転時の規制値はおおよそ CO:100ppm 以下、NOx:230ppm 以下であることから、炉起動時

の炭化燃料の混焼は問題ないと判断できる。

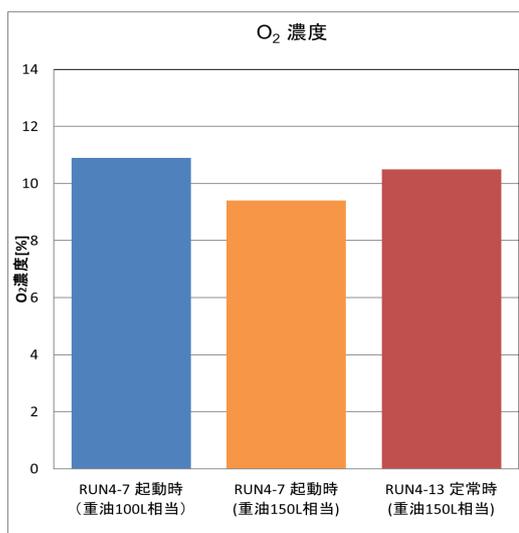


図 3.3.2-5 O₂ 濃度比較

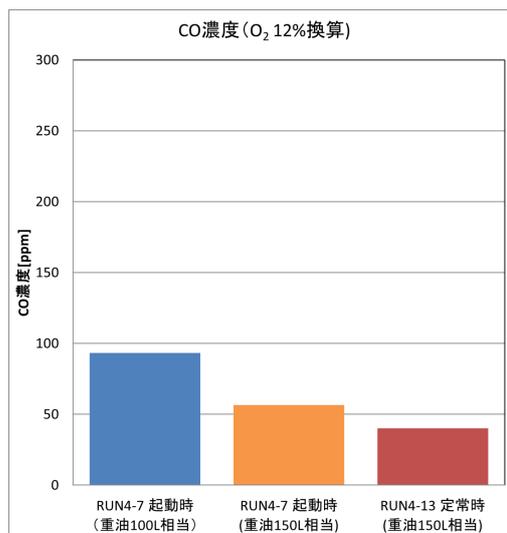


図 3.3.2-6 CO 濃度比較

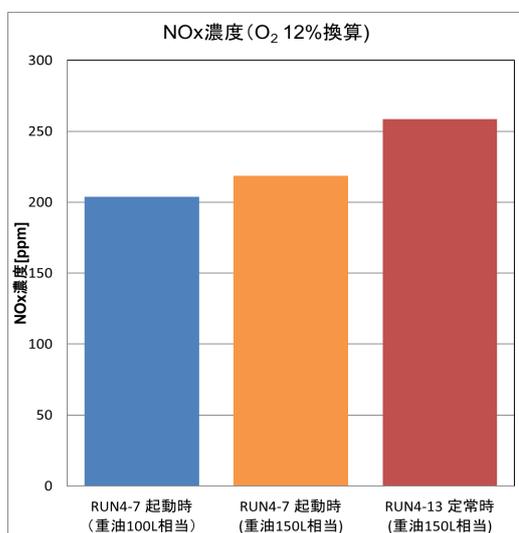


図 3.3.2-7 NO_x 濃度比較

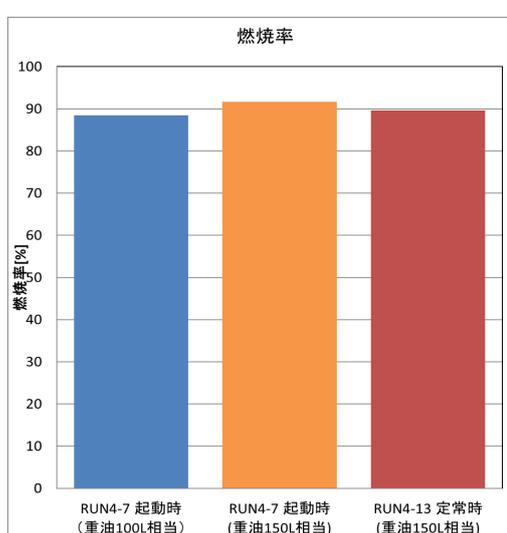


図 3.3.2-8 燃焼率比較

(4) トレンドデータの確認

本試験における排ガスと温度のトレンドデータを図 3.3.2-9、図 3.3.2-10 に示す。バーナ着火時は温度が低いため、重油中の炭素が不完全燃焼してしまい CO が上昇するが、炉内が昇温してくると CO は低下する。炭化燃料供給と共に NO_x は上昇した。また、供給熱量分の温度になると安定することが確認された。

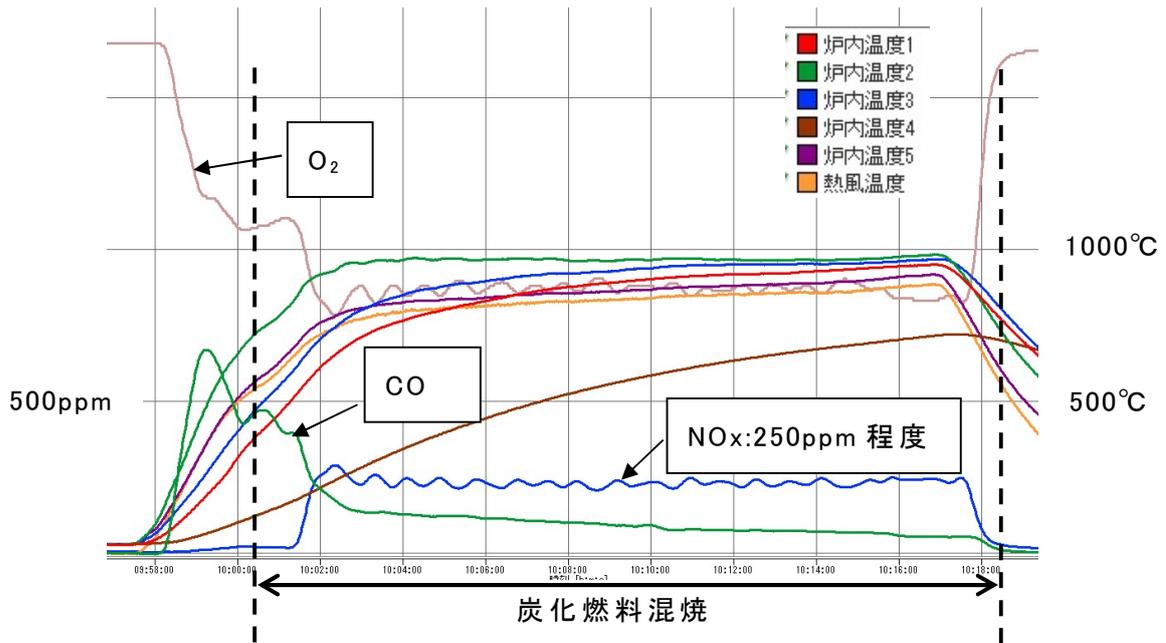


図 3.3.2-9 RUN4-7 起動時混焼トレンド (重油 100L/h)

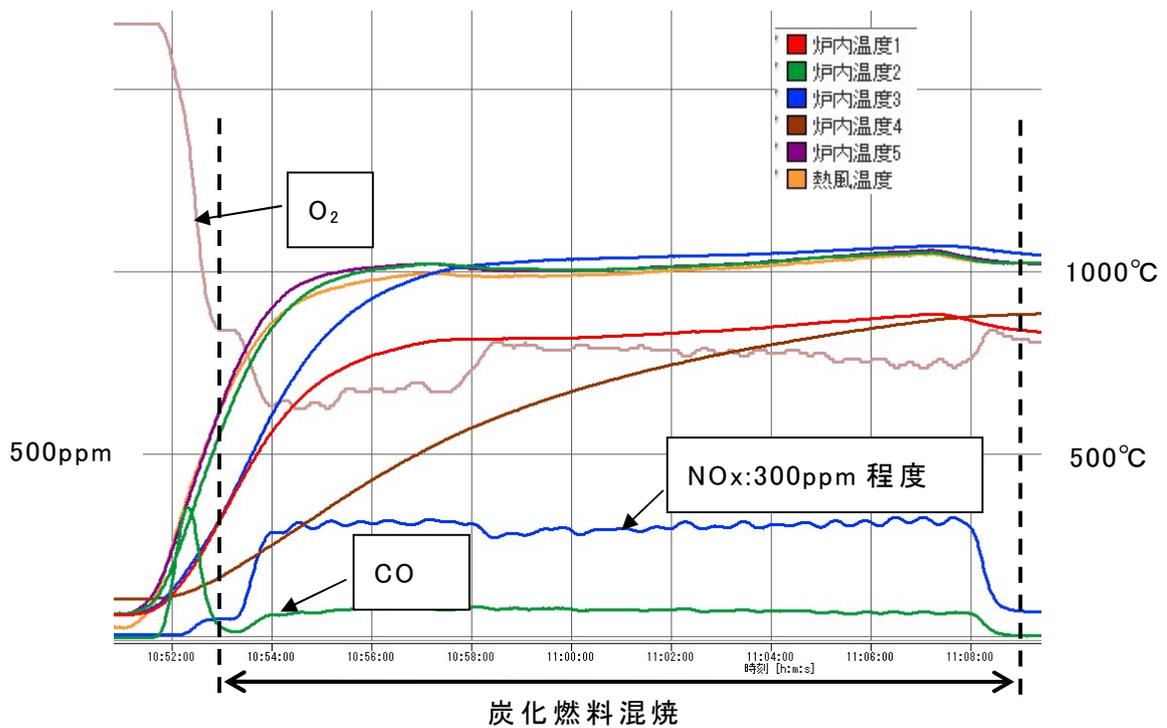


図 3.3.2-10 RUN4-7 起動時混焼トレンド (重油 150L/h)

(5)まとめ 混焼バーナ燃焼試験(起動時)

以上より、起動時の低温領域においても、混焼率 20%時では燃焼率は定常時と差異無く、排ガス値も安定することが確認された。ごみ焼却施設の炉起動時の炭化燃料の混焼は可能であると考ええる。

3.4 吹込バーナ燃焼試験

本試験で使用した吹込バーナの写真、機器概要を図 3.4-1、図 3.4-2 に示す。本バーナは木質バイオマスチップおが屑燃料利用で実績のあるバイオマスバーナの構造をベースにしている。特徴としては、圧送ブロアからの空気で炭化燃料を搬送し、スロート（ミックスチャンバー）内部に取り付けた中子で円錐状に分散し、設置した羽根で回転することにより放射状に分散する。吹込バーナのポイントは炭化燃料を均一に分散し、既設のバーナ火炎中に吹込むことである。図 3.4-3 に示す通り、吹込バーナは既設の油燃焼バーナと別設置とすることで、既設油バーナをそのまま利用できるため、混焼利用の装置導入を行いやすくしている。



図 3.4-1 機器写真

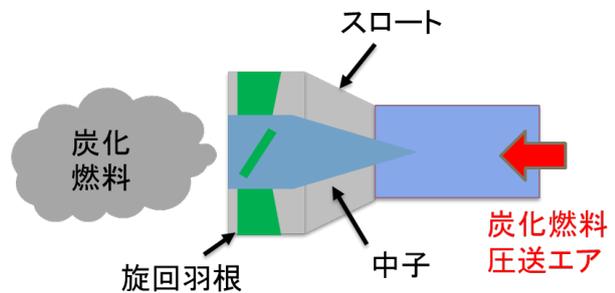


図 3.4-2 機器概要

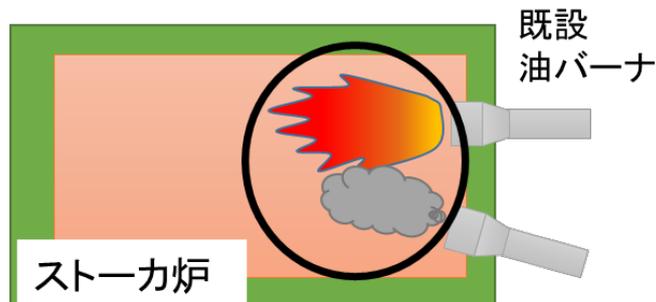


図 3.4-3 設置イメージ（平面図）

3.5 試験条件・結果(定常時)

吹込バーナ試験は RUN 3 として行った。本試験では混焼バーナ同様、主なパラメータとして、混焼率、粉砕有無、熱風有無、旋回エア有無を変更して行った。必要に応じて、各空気量を調整し空気比も変更している。試験条件を表 3.5-1 に示す。

表 3.5-1 試験条件

試験No	重油量 [L/h]	炭化燃料 供給量 [kg/h]	混焼率 [%]	含水率 [%]	粉砕 有無	熱風 有無	旋回エア 有無	バーナファン 空気量 [Nm ³ /min]	空気比 (一次のみ)	圧送空気量 [Nm ³ /min]	旋回空気量 [Nm ³ /min]	二次空気量 [Nm ³ /min]	空気比 (二次込み)
RUN 3-1	120	-	-	-	-	無	有	24.0	1.21	5.9	1.43	9.5	2.03
	96	68	20	22	有	無	有	25.8	1.25	5.9	1.43	8.0	2.56
RUN 3-2	122	-	-	-	-	無	有	22.7	1.12	6.5	1.43	7.9	1.88
	122	82	20	-	有	無	有	26.0	1.05	6.5	1.43	8.0	1.59
RUN 3-3	150	-	-	-	-	無	有	28.6	1.16	6.5	1.43	18.5	2.04
	120	84	20	19.2	有	有	有	24.5	0.95	6.5	1.43	18.5	1.91
RUN 3-4	150	-	-	-	-	無	有	29.4	1.19	6.5	1.43	13.9	2.03
	121	82	20	20.6	有	有	有	25.4	0.98	6.5	1.43	13.9	1.78
RUN 3-5	150	-	-	-	-	無	有	29.5	1.19	6.5	1.43	13.3	2.01
	121	84	20	20.1	有	無	有	26.3	1.03	6.5	1.43	13.3	1.82
RUN 3-6	150	-	-	-	-	無	有	30.2	1.23	6.5	1.43	15.5	2.14
	121	84	20	24.2	有	有	無	27.0	1.07	6.5	-	15.5	1.98
RUN 3-7	150	-	-	-	-	無	有	28.8	1.16	6.5	1.43	14.4	2.08
	121	85	20	24.2	有	無	有	25.2	0.98	6.5	1.43	14.4	1.87
RUN 3-8	150	-	-	-	-	無	有	27.0	1.08	6.5	1.43	15.3	2.09
	120	90	20	-	有	無	有	26.0	1.03	6.5	1.43	15.3	1.90
RUN 3-9	150	-	-	-	-	無	有	28.0	1.20	6.5	1.43	15.5	2.00
	120	89.2	20	27.6	有	無	有	26.0	1.10	6.5	1.43	15.5	1.95
RUN 3-10	150	-	-	-	-	無	有	30.0	1.22	6.6	1.43	15.6	1.99
	120	89.2	20	27.6	有	無	無	26.0	1.03	6.6	-	15.6	1.96
RUN 3-11	150	-	-	-	-	無	有	29.8	1.22	6	1.43	15.5	2.15
	120	93.9	20	31.1	無	有	有	25.0	1.00	6	1.43	15.4	1.88
RUN 3-12	120	93.9	20	31.1	-	無	有	25.9	1.10	6	1.43	15.4	1.92
	150	-	-	-	-	無	有	30.2	1.23	6.5	1.43	15.5	2.14
RUN 3-13	120	83.5	20	-	有	有	-	29.7	1.19	6.5	-	15.5	2.10
	150	-	-	-	-	無	有	28.4	1.15	6.5	1.43	14.1	2.05
	120	83.8	20	22.4	有	有	有	25.7	1.00	6.5	1.43	13.8	1.86

混焼率 20%のデータについては、代表データとして表の緑枠範囲についてピックアップして考察する。

3.5.1 温度トレンド

本試験で得られた温度トレンドデータの一例を図 3.5.1-1 に示す。混焼バーナ同様、炭化燃料の投入により熱量を賄えていることが確認できた。

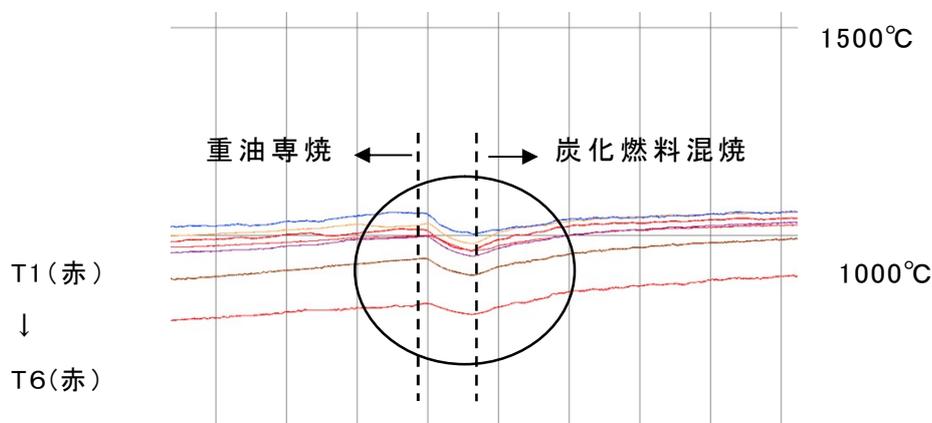


図 3.5.1-1 温度トレンド

3.5.2 燃焼状態の確認

試験中、図 3.5.2-1 に示す撮影位置より火炎の燃焼の様子をカメラにて撮影した。燃焼の様子を図 3.5.2-2 ～図 3.2.2-3 に示す。図 3.5.2-3 より、炭化燃料の投入後燃焼している様子が確認出来た。

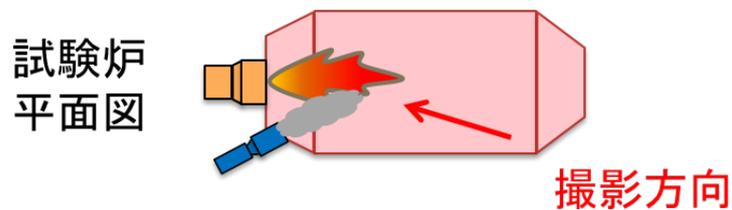


図 3.5.2-1 撮影方向



図 3.5.2-2 RUN 3 の専焼時の燃焼の様子

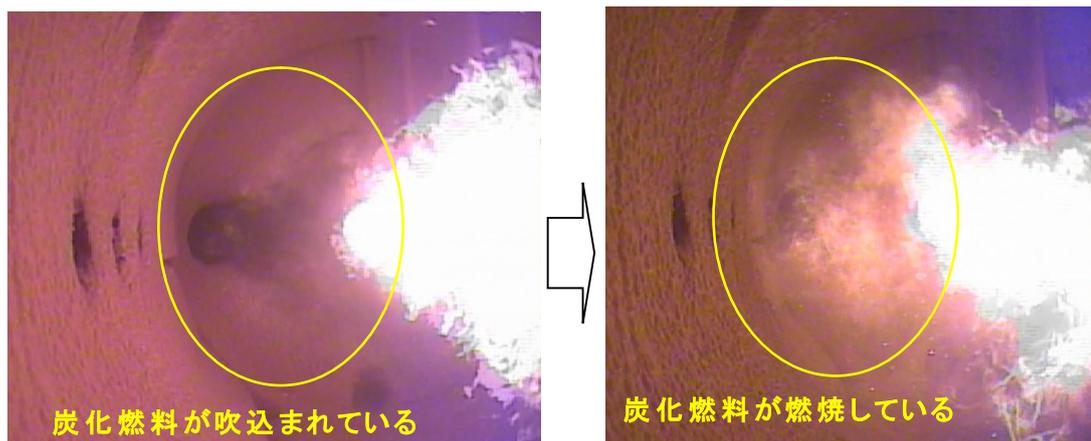


図 3.5.2-3 RUN3 の混焼時の様子

3.5.3 温度分布

各試験での炉内の温度分布を図 3.5.3-1 に示す。専焼、混焼問わず、同等の温度分布が得られた。専焼時が低い温度となっているが、空気比が若干高めとなっているためである。試験としては、後段を含めた全体の温度が 1,100℃ 付近とみなし問題なしとする。

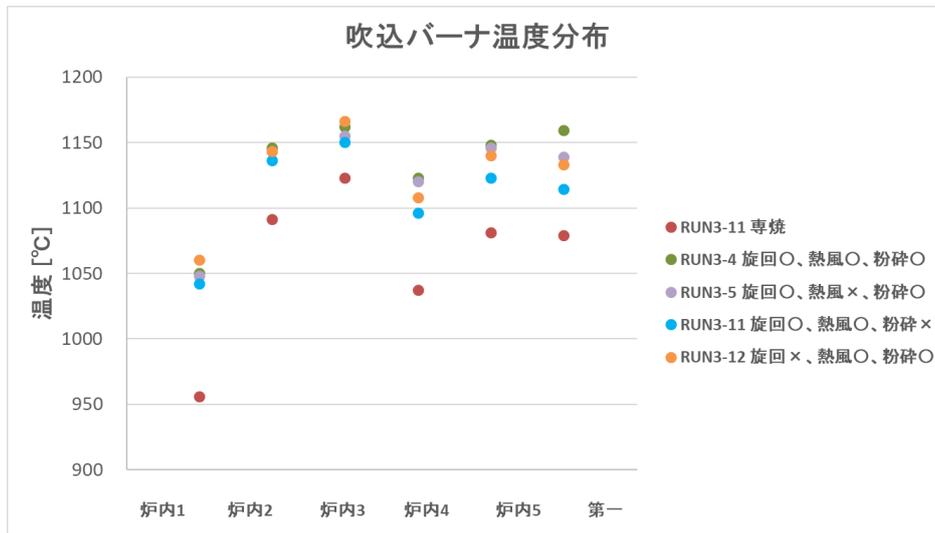


図 3.5.3-1 温度分布

3.5.4 排ガス値

図 3.1.3-1 に示す各所で排ガス測定を行った。各条件での O_2 、 CO 、 NO_x 値をそれぞれ図 3.5.4-1～図 3.5.4-3 に示す。 CO 、 NO_x 値については、旋回有無、熱風有無、粉砕有無の内一つでも条件が欠けると高くなる傾向にあるが、絶対値としては全条件大きな差異は無い。吹込バーナでは、条件に関わらず排ガス値は比較的低い値を示すことが確認できた。

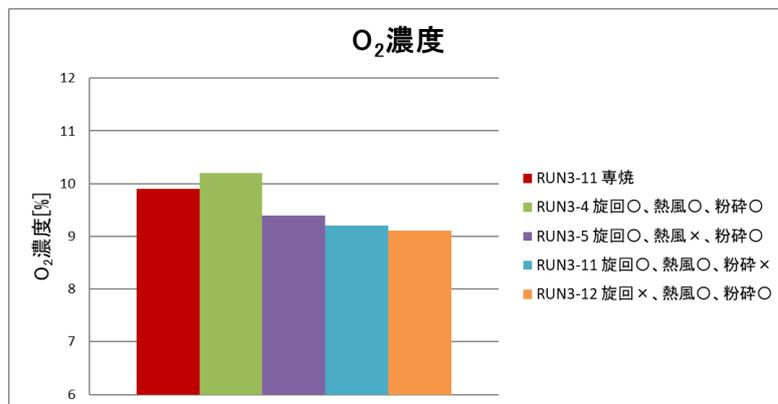


図 3.5.4-1 O₂濃度

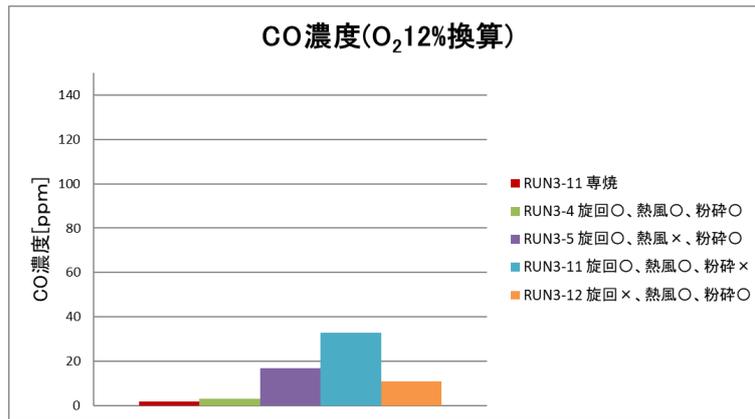


図 3.5.4-2 CO 濃度

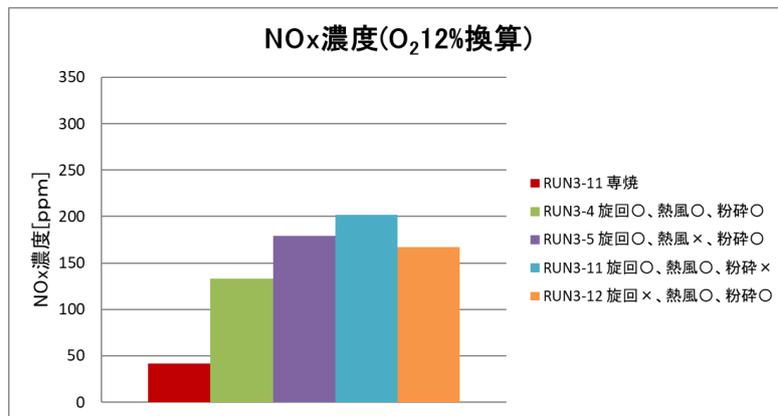


図 3.5.4-3 NOx 濃度

3.5.5 燃焼率

サンプルしたダストより算出した燃焼率を図 3.5.5-1 に示す。吹込バーナの燃焼率は、条件に関わらず 95% 付近の値が得られた。混焼バーナの試験結果では、85~90%であったが、吹込バーナは比較して高い値が得られた。

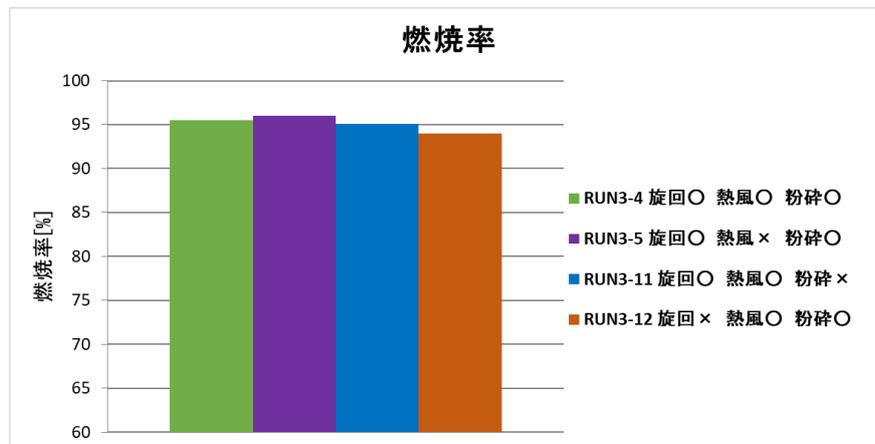


図 3.5.5-1 燃焼率

3.5.6 ダイオキシン、HCl、ばいじん濃度

表 3.5.6-1 に吹込バーナにおける炭化燃料混焼時の HCl とばいじん濃度、灰のダイオキシン濃度の測定結果を示す。測定箇所は図 3.1-3 を参照のこと。表より、混焼バーナ同様 3 項目とも法規制値よりも低い値となり、問題ないことを確認した。

表 3.5.6-1 燃焼試験における測定結果（吹込みバーナ）

	吹込バーナ 試験結果	法規制等排出基準
ダイオキシン(排ガス) 毒性等量[ng-TEQ/m ³]	0.68	10
ダイオキシン(焼却残渣) 毒性等量[ng-TEQ/m ³]	0.27	3
HCl [ppm]	3.30	430
※処理前ばいじん濃度 [ppm]	0.44	-

※処理前とは、ばいじんを採取するバグフィルタまたは電気集じん機の前段で測定したばいじん濃度を示す。

3.5.7 混焼率変化試験結果

3.3 混焼バーナと同様に混焼率を上昇させた際の試験結果についてまとめる。本試験において使用した吹込バーナの条件を表 3.5.7-1 に示す。混焼率 20% 時の試験結果を踏まえ、燃焼率が最も良い熱風無の条件 (RUN3-9) で試験を行った。吹込バーナでは、条件に限らず混焼バーナと比較して高い燃焼率が得られていることから、設備が簡易にできることを考慮し、旋回無の条件についても試験を行った。

表 3.5.7-1 試験条件

	吹込バーナ	
試験 No.	RUN3-9	RUN3-10
重油量[L/h]	150	150
混焼率[%]	20~50	20~40
目標温度[°C]	1,100	1,100
粉碎	○	○
熱風(80°C)	—	—
旋回エア	○	—

(1)混焼率ごとの燃焼状態の確認

混焼率ごとに燃焼状態を撮影した写真を図 3.5.7.1～図 3.5.7-4 に示す。混焼時は炭化燃料の噴霧とともに燃焼していることが確認された。混焼率が 40%、50%と高くなると、底面に落下した炭化燃料が燃焼している様子を確認した。基本的には安定した燃焼が確認されたが、混焼率が高くなるにつれ、火炎の輝度の変化が顕著になった。

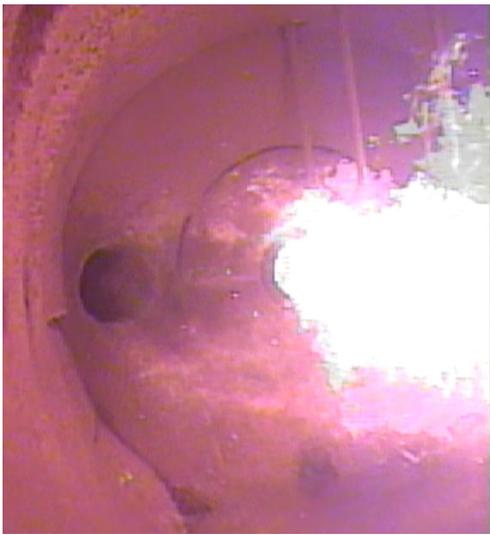


図 3.5.7-1 混焼率 20%



図 3.5.7-2 混焼率 30%

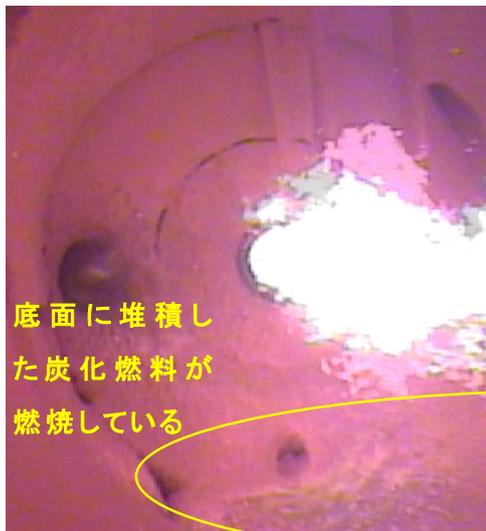


図 3.5.7-3 混焼率 40%



図 3.5.7-4 混焼率 50%

(2)混焼率ごとの排ガス値・燃焼率の比較

横軸に混焼率、縦軸に各排ガスの濃度または燃焼率にてまとめたグラフを図 3.5.7-5～3.5.7-8 に示す。結果より、旋回有の方が CO、NO_x が低く、燃焼率が高いため燃焼性が良いことがわかる。また、混焼率を上昇させた際、CO・NO_x ともに上昇傾向にあるが、混焼率 30%であれば、旋回有の場合環境基準値 (CO : 100ppm、NO_x:200ppm) より低い値となる。よって、ごみ焼却施設での使用が可能であると言える。さらに、燃焼率も混焼率 30%では 90%を超えると想定される。また、ごみ焼却施設では炉起動時の低温域での使用となるため、NO_x はさらに減少する (後述) ため問題ない。

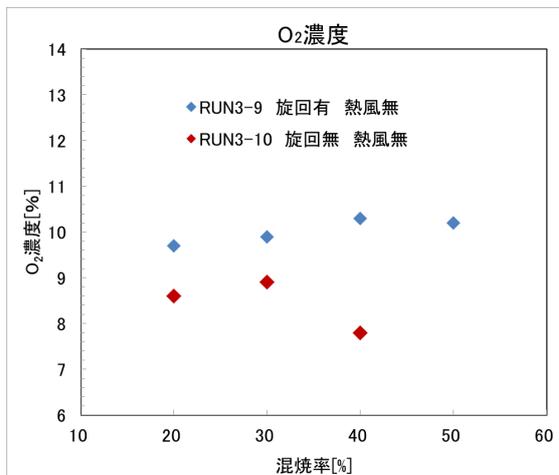


図 3.5.7-5 O₂ 濃度の比較

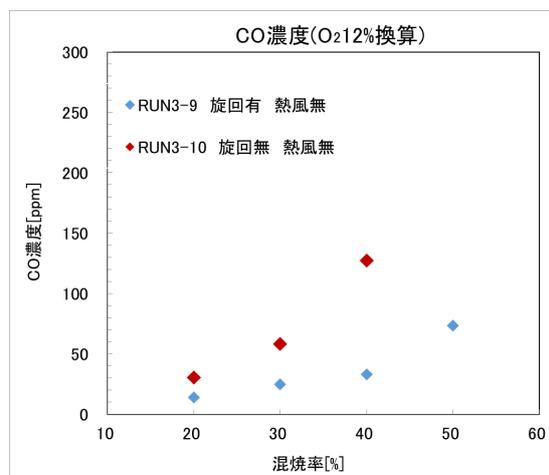


図 3.5.7-6 CO 濃度の比較

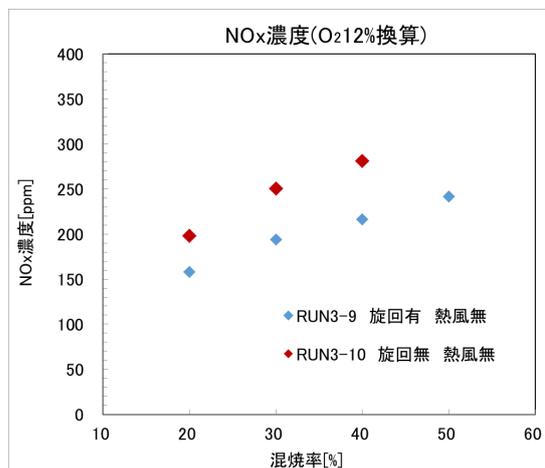


図 3.5.7-7 NO_x 濃度の比較

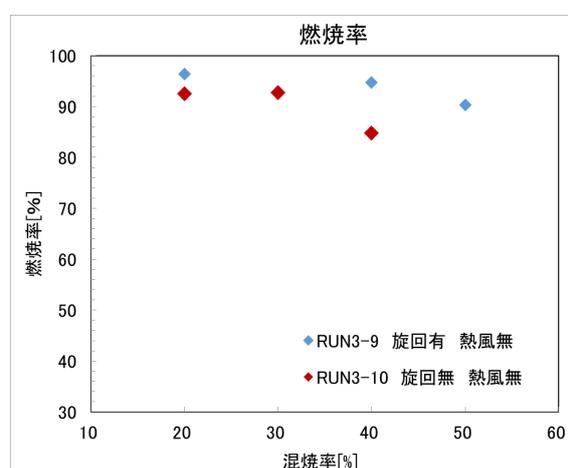


図 3.5.7-8 燃焼率の比較

3.5.8 まとめ 吹込バーナ燃焼試験 (定常時)

定常時の吹込バーナ燃焼試験について、炭化燃料の 20%混焼では、パラメータに限らず混焼バーナと比較して高い燃焼率を得られた。ダイオキシン値も規制値を下回っており、本バーナについても、ごみ焼却施設での使用は問題ないと考

える。

3.6 試験条件・結果(起動時)

3.6.1 試験条件

3.3 にて行った混焼バーナの起動時混焼と同様の目的で試験を行った。但し、吹込バーナにおいてはベース重油量 100L/h のみの試験となっている。試験条件を表 3.6.1-1 に示す。

表 3.6.1-1 吹込バーナ 起動時混焼試験条件

試験 No.	RUN3-10
ベース重油量[L/h]	100
混焼率[%]	20
粉碎	○
熱風(80°C)	×
旋回エア	○

3.6.2 試験結果

(1)燃焼状態の確認

起動時混焼と定常時混焼の燃焼状態を図 3.6.2-1～3.6.2-2 に示す。結果より、起動時混焼時は炉内の温度が低いため炭化燃料が噴霧されて後段で燃焼している粒子が確認された。炉内温度が高い定常時混焼では、噴霧した直後に燃焼している様子が確認できる。



図 3.6.2-1 起動 20%混焼
(重油 100L)

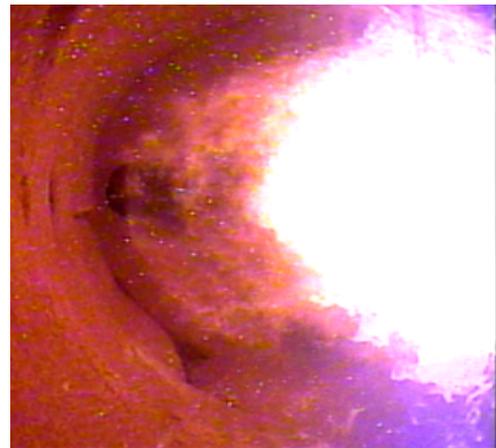


図 3.6.2-2 20%混焼
(重油 150L 定常時)

(2) 温度分布

吹込バーナの起動時混焼と定常時混焼の温度を比較したグラフを図 3.6.2-3 に示す。図 3.6.2-3 より、混焼バーナと同様起動時は炉壁の温度が温まっていないため定常時に比べ温度が低く、炉内4は炉壁近くであるため、その傾向が顕著である。

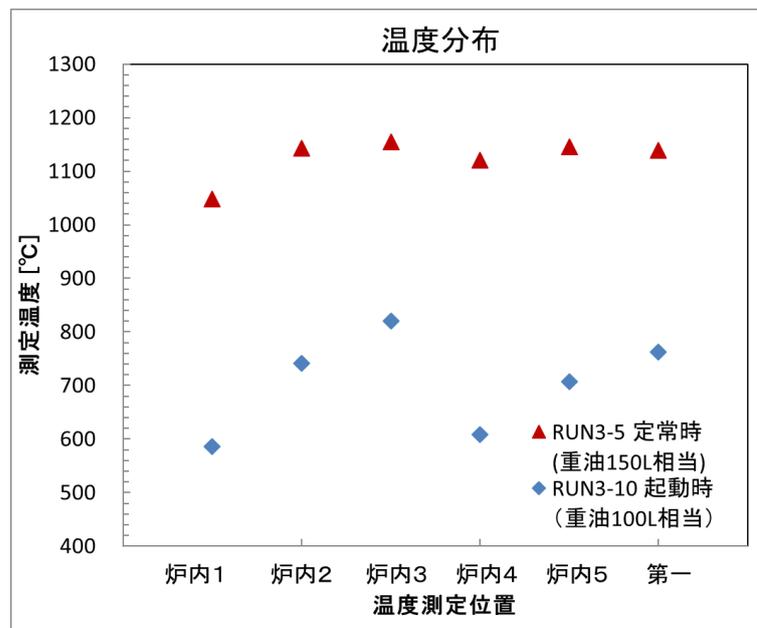


図 3.6.2-3 温度分布比較

(3) 排ガス値・燃焼率

起動時混焼と定常時混焼の排ガス、燃焼率を比較したグラフを図 3.6.2-4～図 3.6.2-7 に示す。結果より、起動時混焼は定常時混焼よりも CO が高く NO_x が低くなった。これは、起動時では低温域となったため不完全燃焼となり CO が増加し、サーマル NO_x の発生が少なかったと考える。但し、煙突出口 CO は低い値 (10ppm 以下) を得られており、運用面では問題ないと考えられる。燃焼率は 90% を超える数値を得た。

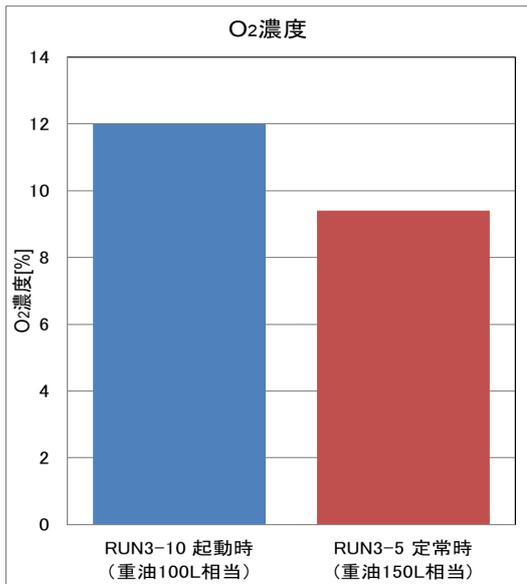


図 3.6.2-4 O₂ 濃度比較

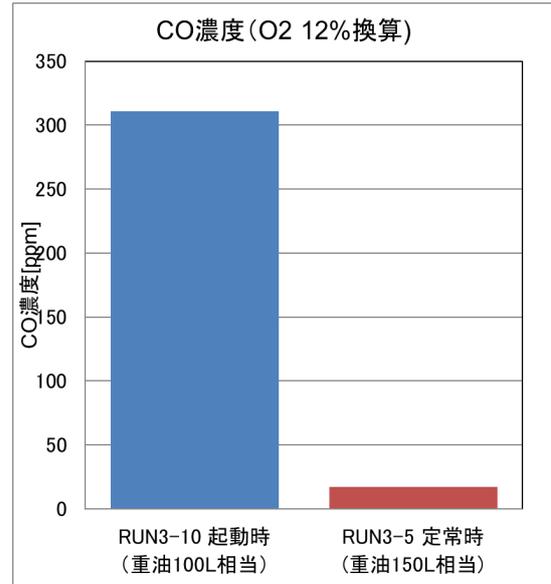


図 3.6.2-5 CO 濃度比較

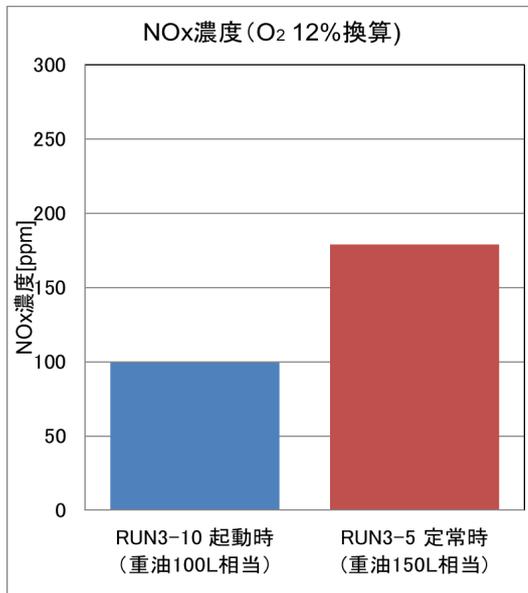


図 3.6.2-6 NO_x 濃度比較

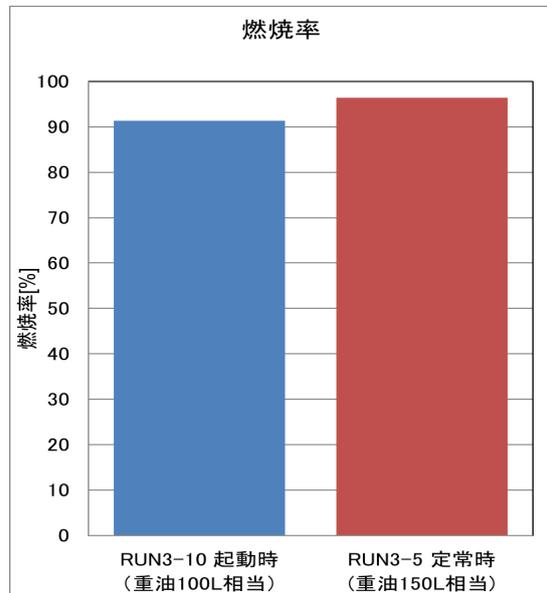


図 3.6.2-7 燃焼率比較

(4) トレンドデータの確認

本試験における排ガス値と温度のトレンドデータを図 3.6.2-8 に示す。着火時の CO の上昇は 3.3 でも述べた通り、低温域における不完全燃焼が要因と考える。これにより、図 3.6.2-3 で示した CO が高い数値となった。混焼バーナと比較して数値が大きくなった理由として、バーナの種類による重油噴霧状況の違いが挙げられる。混焼バーナと吹込バーナでは異なる重油ノズルを使用しており、噴霧粒径・角度も異なる。吹込バーナで使用した重油ノズルの場合、重油量が少ない着火直後は噴霧粒子径が大きく、不完全燃焼となってしまったと考えられる。着

火後重油量が上昇し、炉内温度が上昇してきた段階で CO 減少してきたことを確認しており、これより本現象は一時的なもので問題ないと考える。

混焼を開始して 20 分以上経過すると AP 運転やごみ焼却に関する規制値以下 (CO:100ppm 以下、NOx:230ppm 以下) となった。よって、吹込バーナは起動時の使用が問題ないと判断できる。

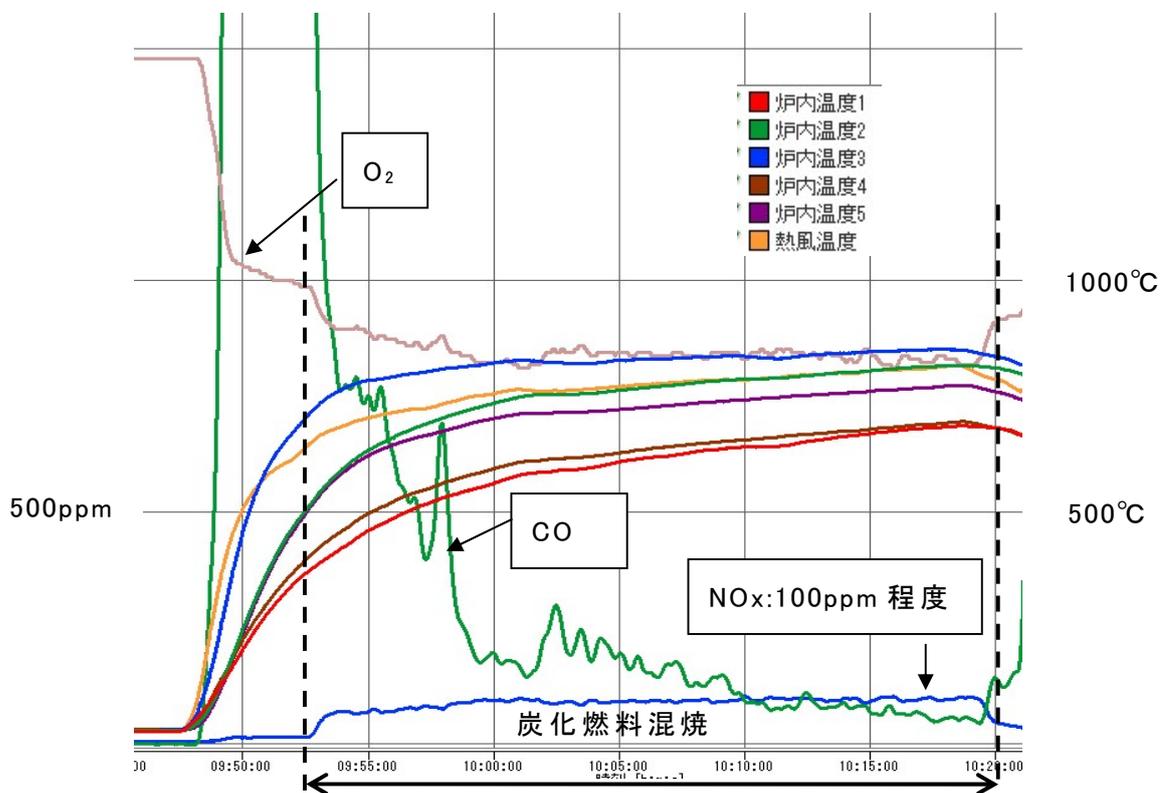


図 3.6.2-8 RUN3-10 起動時混焼 トレンドデータ (重油 100L)

(5) まとめ 吹込バーナ燃焼試験(起動時)

以上より、起動時の低温領域においても、混焼率 20% 時では燃焼率は定常時と差異無く、排ガス値も安定することが確認された。燃焼率、排ガス値ともに問題なく、ごみ焼却施設の炉起動時の炭化燃料の混焼は可能であると考える。

3.7 直投ノズル燃焼試験

直投ノズルは、2.炭化燃料化施設の高性能化で述べた通り、既設バーナの火炎上部から、炭化燃料を自由落下で投入することにより、乾燥・混焼燃焼を行う。吹込バーナと同様、既設の油燃焼バーナは別置きとすることで、既設油バーナをそのまま利用でき、炭化燃料を投入するための機器数を低減できる。そのため、さらに炭化燃料利用の導入が促進できると考えられる。模式図、設備概略を図 3.7-1～3.7-2 に示す。

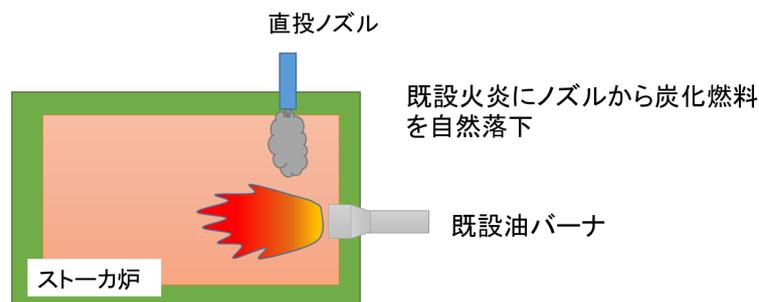


図 3.7-1 直投ノズル模式図（横から見た図）

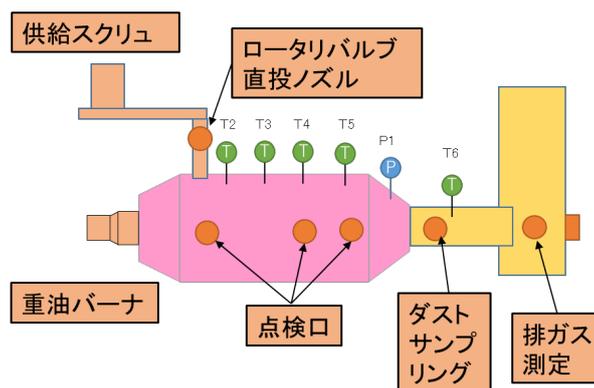


図 3.7-2 試験設備概略図

3.8 試験条件・結果(定常時)

直投ノズル試験は RUN5 として行った。本試験では、主なパラメータとして、混焼率、粉碎有無のみを変更して行った。必要に応じて、各空気量を調整し空気比も変更している。試験条件を表 3.8-1 に示す。

表 3.8-1 試験条件

試験No	重油量 [L/h]	炭化燃料 供給量 [kg/h]	混焼率 [%]	含水率 [%]	粉碎 有無	バーナファン 空気量 [Nm ³ /min]	圧送空気 量 [Nm ³ /min]	旋回空気 量 [Nm ³ /min]	空気比 (一次のみ)	二次空気量 [Nm ³ /min]	空気比 (二次込み)
RUN 5-1	150	0	0.0	0.0	-	43.0	6.3	-	1.99	5.2	2.18
	120	70	20.2	15.0	有	44.0	6.3	-	2.00	5.2	2.19
RUN 5-2	150	0	0.0	0.0	-	44.0	6.7	-	2.05	5.9	2.30
	120	82	20.4	24.0	有	43.0	6.7	-	1.96	5.9	2.20
	105	123	30.6	24.0	有	43.0	6.7	-	1.93	5.9	2.18
RUN 5-3	150	0	0.0	0.0	-	41.0	6.3	-	1.91	4.9	2.13
	120	86.2	20.1	28.1	無	40.0	6.3	-	1.80	4.9	2.01
RUN 5-4	150	0	0.0	-	-	41.0	6.5	-	1.81	6.0	2.07
	120	76	19.9	21.6	有	41.0	6.5	-	1.90	6.0	2.10

3.8.1 温度トレンド

本試験で得られた温度トレンドデータの一例を図 3.8.1-1 に示す。縦軸は温度、横軸は時間となる。本試験では制御盤を導入し温度制御による混焼を行った。制御プログラム上混焼開始後、炭化燃料の投入により一時的に温度が上昇するが、その後温度を一定に保つように重油量を徐々に下げていく流れとなる（炭化燃料投入分重油量を削減するというコンセプトは同様）。温度トレンドよりコンセプト通りとなっていることが確認できた。

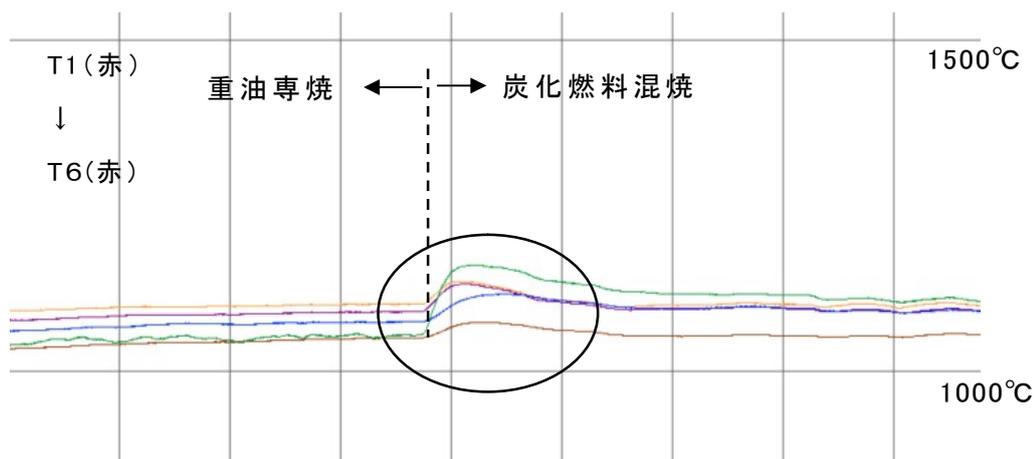


図 3.8.1-1 温度トレンド

3.8.2 燃焼状態の確認

試験中、図 3.8.2-1 に示す撮影位置より火炎の燃焼の様子をカメラにて撮影した。燃焼の様子を図 3.8.2-2 ~図 3.2.2-3 に示す。上部から投入した炭化燃料が燃焼している様子が確認できた。

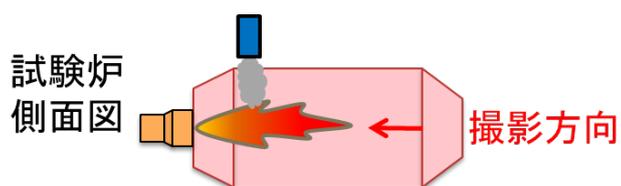


図 3.8.2-1 撮影方向



図 3.8.2-2 専焼時



図 3.8.2-3 混焼時

3.8.3 温度分布

各試験での炉内の温度分布を図 3.8.3-1 に示す。全条件において、温度分布の傾向は同様と考える。粉碎品を使用した場合について、バーナ近傍の温度が高くなっている。前項の写真で確認した通り、炭化燃料を投入した瞬間燃焼していることから、温度が高くなったと考える。

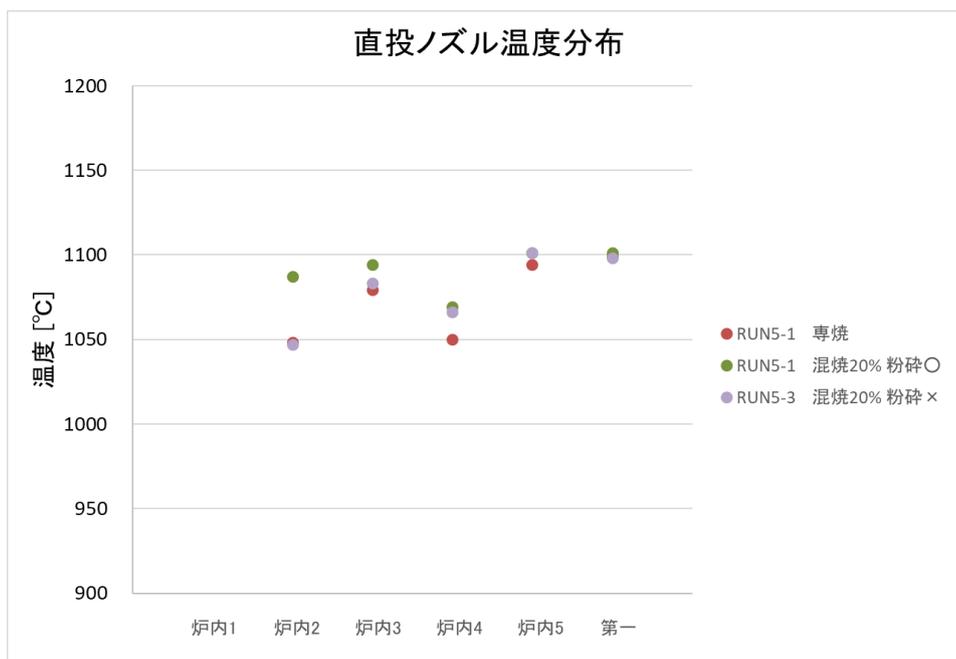


図 3.8.3-1 温度分布

3.8.4 排ガス値

試験炉出口において排ガス測定を行った。各条件での O_2 、CO、 NO_x 値をそれぞれ図 3.8.4-1～図 3.8.4-3 に示す。CO について、未粉砕の条件の方が高い値がでた。平均粒径が大きい未粉砕を使用したため不完全燃焼が起こったためである。また、 NO_x については、粉砕品、未粉砕品ともに同等の数値となっており、フェーエル NO_x の影響であることが確認できた。

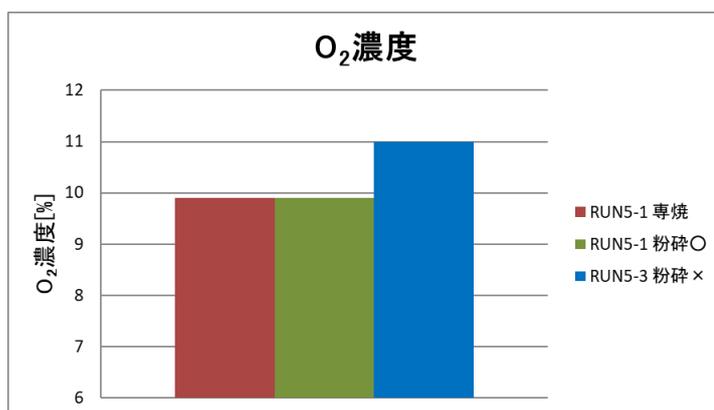


図 3.8.4-1 O₂ 濃度

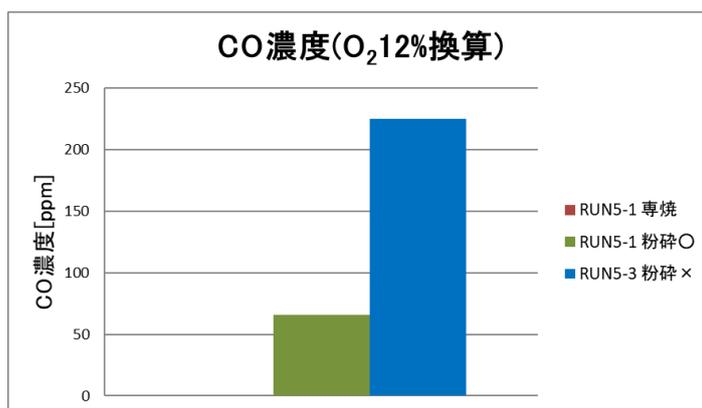


図 3.8.4-2 CO 濃度

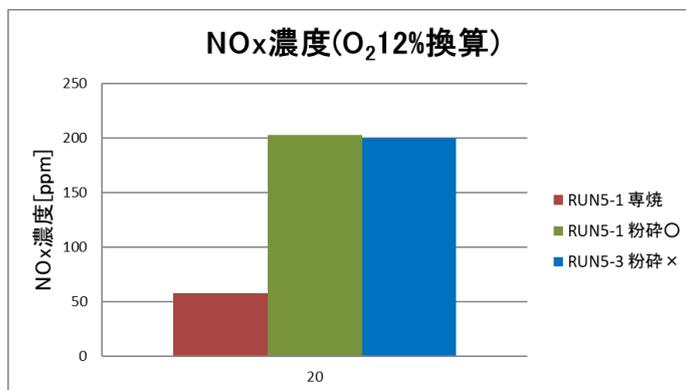


図 3.8.4-3 NO_x 濃度

3.8.5 燃焼率

サンプルしたダストより算出した燃焼率を図 3.8.5-1 に示す。結果より、粉碎有の場合の方が 85%以上となり、粉碎の影響が高いことがわかる。

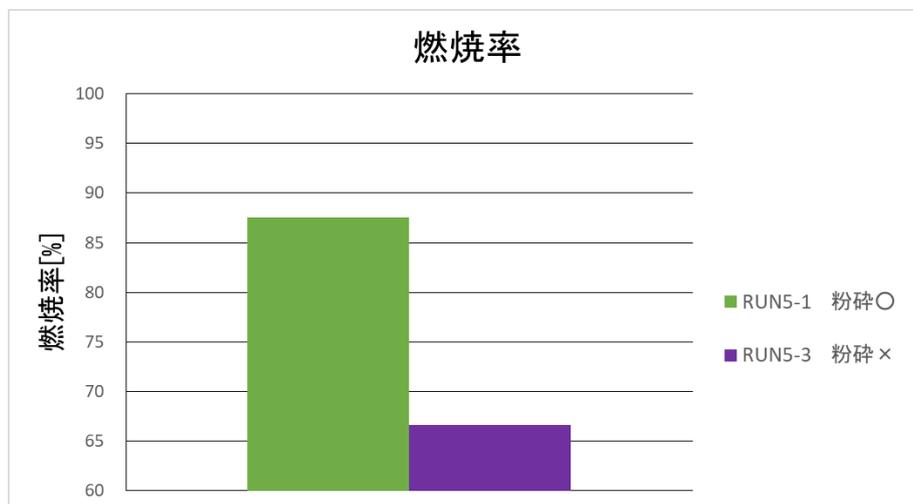


図 3.8.5-1 燃焼率

3.8.6 ダイオキシン、HCl、ばいじん濃度

表 3.8.6-1 に直投ノズルにおける炭化燃料混焼時の HCl とばいじん濃度、灰のダイオキシン濃度の測定結果を示す。測定箇所は図 3.1-3 を参照のこと。表より、混焼バーナ同様 3 項目とも法規制値よりも低い値となり、問題ないことを確認した。

表 3.8.6-1 燃焼試験における測定結果

	直投ノズル試験結果	法規制等排出基準
ダイオキシン(排ガス) 毒性等量[ng-TEQ/m ³]	0.14	10
ダイオキシン(焼却残渣) 毒性等量[ng-TEQ/m ³]	0.04	3
HCl [ppm]	0.70	430
※処理前ばいじん濃度 [ppm]	0.34	-

※処理前とは、ばいじんを採取するバグフィルタまたは電気集じん機の前段で測定したばいじん濃度を示す。

3.8.7 混焼率変化の試験結果

3.3 混焼バーナと同様、直投ノズルを使用した際の混焼率を上昇させた試験結果についてまとめる。直投ノズルでは、燃焼試験パラメータは粉砕のみの条件とする。試験条件を表 3.8.7-1 に示す。

表 3.8.7-1 試験条件

	直投ノズル
RUN No.	5-2
重油量[L/h]	150
混焼率[%]	20、30
粉砕	○
熱風(80°C)	—
旋回エア	—

(1)混焼率ごとの燃焼状態の比較

混焼率ごとに燃焼状態を撮影した写真を図 3.8.7-1、図 3.8.7-2 に示す。混焼率 20% 時、30% 時ともに炭化燃料の投入とともに燃焼していることが確認出来た。但し混焼率 30% では炭化燃料が炉内底面に落下して燃焼している様子が確認された。



図 3.8.7-1 20% 混焼



図 3.8.7-2 30% 混焼

(2)混焼率ごとの排ガス値・燃焼率の比較

燃焼率にてまとめたグラフを図 3.8.7-3～図 3.8.7-6 に示す。結果より、混焼バーナや吹込バーナと同様に CO・NOx とも混焼率の上昇に伴って増加した。また、CO に関しては、他バーナ同様煙突出口では低い値が得られている。NOx については、線形に上昇していることからフューエル NOx が主成分となり、炭化燃料の供給量に依存して上昇していることが考えられる。

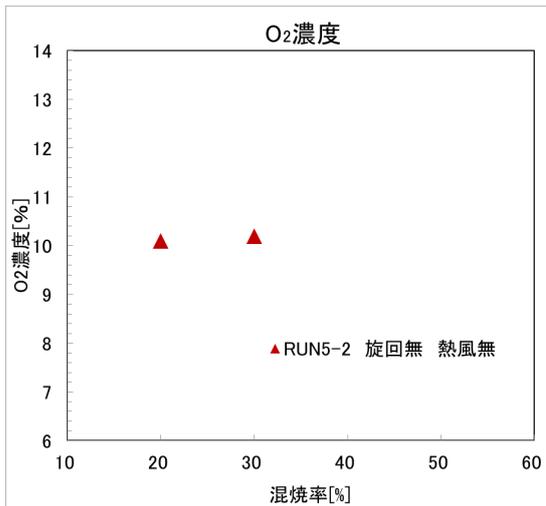


図 3.8.7-3 O₂ 濃度の比較

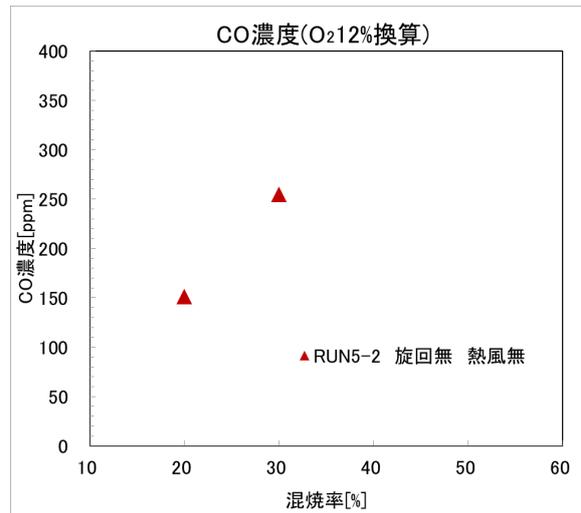


図 3.8.7-4 CO 濃度の比較

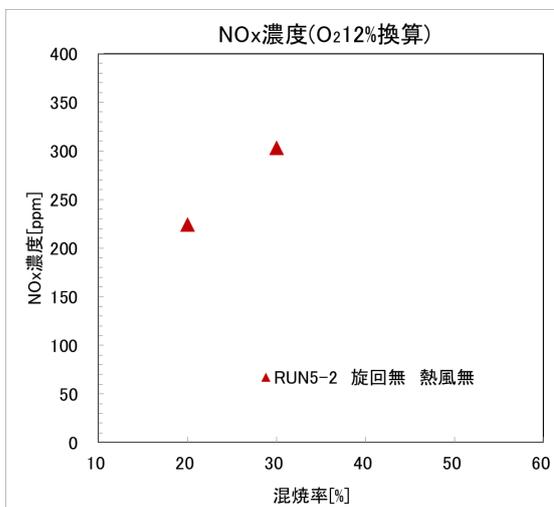


図 3.8.7-5 NO_x 濃度の比較

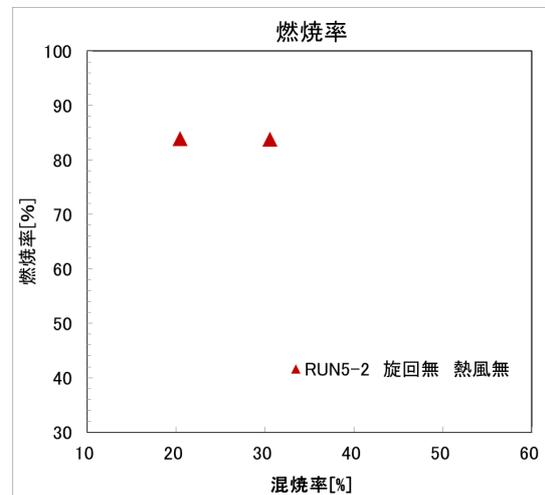


図 3.8.7-6 燃焼率の比較

3.8.8 まとめ 直投ノズル燃焼試験(定常時)

混焼 20%において、粉砕有の場合、高い燃焼率となることを確認できた。NOx については、地域性を考慮して対策を検討する必要がある。また、粉砕の必要性も確認できた。

3.9 試験条件・結果(起動時)

3.9.1 試験条件

直投ノズル試験においても、混焼バーナや吹込バーナと同様に起動時試験を行う。試験条件を表 3.9.1-1 に示す。

表 3.9.1-1 起動時混焼試験条件

試験 No.	RUN5-2
ベース重油量[L/h]	150
混焼率[%]	20
粉砕	○、×
熱風(80°C)	×
旋回エア	×

3.9.2 試験結果

(1) 燃焼状態の確認

起動時混焼（粉砕、未粉砕）と定常時混焼時の炉内の燃焼状態を図 3.9.2-1～図 3.9.2-3 に示す。定常時混焼では、炭化燃料を上部から投入した直後に炭化燃料の燃焼が確認された。一方で起動時混焼では、粉砕・未粉砕の条件に関わらず、投入直後では燃焼が確認できなかった。起動時のため雰囲気温度が低いことによると考えられる。投入直後の燃焼が確認できなかったものの、炭化燃料が燃焼しながら後段に飛散し、燃焼が悪化している様子は確認できなかった。



図 3.9.2-1 定常時混焼 (150L)

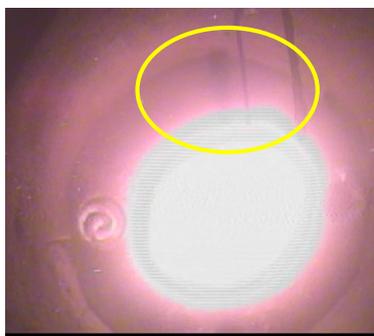


図 3.9.2-2 起動時混焼 粉砕(150L)



図 3.9.2-3 起動時混焼 未粉砕(150L)

(2) 温度分布

直投ノズルの起動 20%混焼と通常の 20%混焼の各温度測定箇所を比較したグラフを図 3.9.2-4 に示す。供給を行う箇所として炉内 1 部分を使用しているため、温度は測定していない。図 3.9.2-4 より、混焼バーナ、吹込バーナと同様な温度であることがわかる。本試験では、未粉碎と粉碎の起動 20%混焼を実施したが温度はほぼ同等であることがわかる。

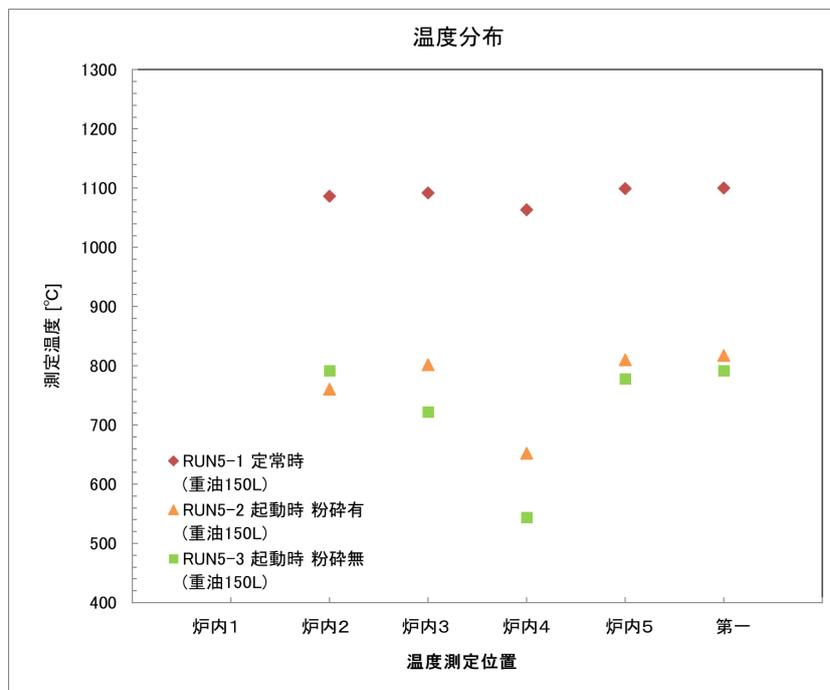


図 3.9.2-4 温度分布比較

(3) 排ガス値・燃焼率

排ガス値と燃焼率を比較したグラフを図 3.9.2-5～3.9.2-8 に示す。結果より、RUN5-1 定常時混焼と RUN5-2 起動時混焼を比較すると、RUN5-2 の方が CO が高く、NO_x が低い結果となった。混焼バーナ、吹込バーナでも同様の傾向がみられており、CO は起動時の低温域により燃焼性が悪く、NO_x は炉内温度が低かったためと考えられる。起動時混焼の粉碎有無について着目すると、RUN5-3 粉碎無に比べ RUN5-2 粉碎有の方が CO、NO_x ともに高い値となった。粉碎無では、大粒径の炭化燃料が燃焼しにくく、図 3.9.2-4 温度分布からもわかる通り温度が低いためサーマル NO_x の発生も抑えられていると考えられる。粉碎無の方が粉碎有に対して燃焼率が高くなっているのは、粉碎無しは、炉底で燃焼するのに対し、粉碎有は粒径が小さく燃焼しやすいため、粒子が火炎内で燃焼しきれずに後段に運ばれているためと考えられる。

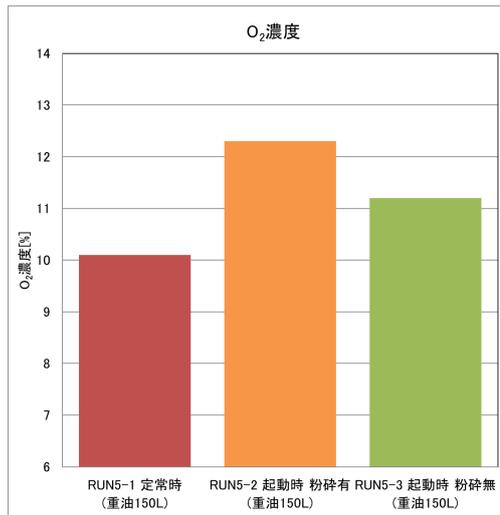


図 3.9.2-5 O₂ 濃度比較

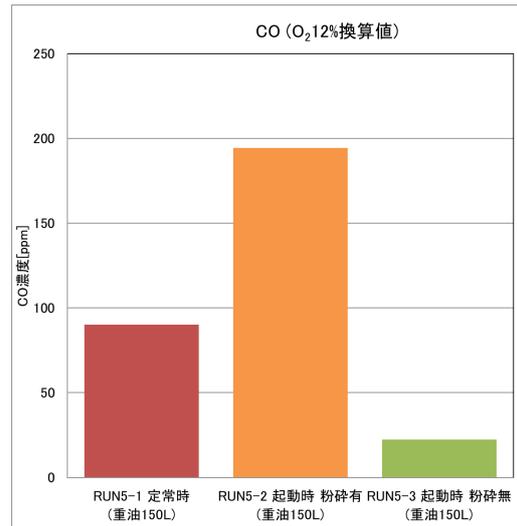


図 3.9.2-6 CO 濃度比較

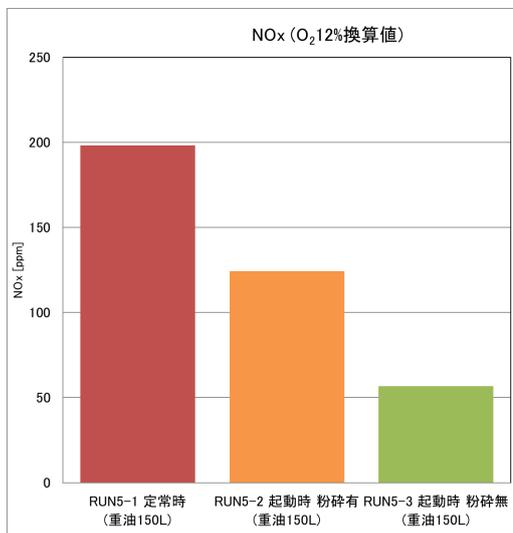


図 3.9.2-7 NO_x 濃度比較

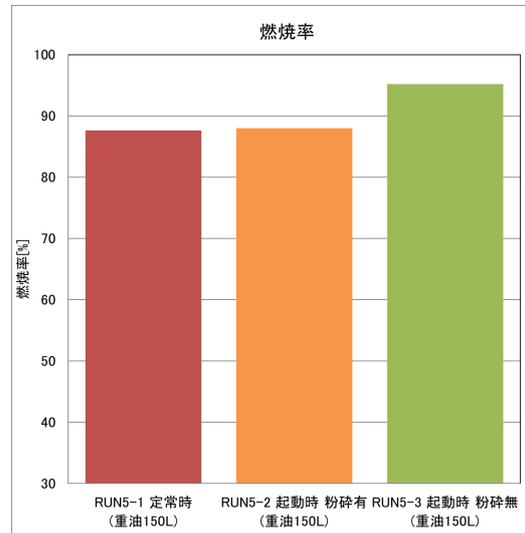


図 3.9.2-8 燃焼率比較

(4) トレンドデータの確認

排ガス値と温度のトレンドデータを図 3.9.2-9～図 3.9.2-10 に示す。結果より、これまで同様に起動時に一時的な CO の上昇が確認出来るが、これは温度による影響と考えられる。前述の通り、粉砕有に比べ粉砕無の方が CO、NO_x 共に低いことが確認出来る。温度が上昇すると CO、NO_x はわずかに変動があるもののほぼ一定であった。

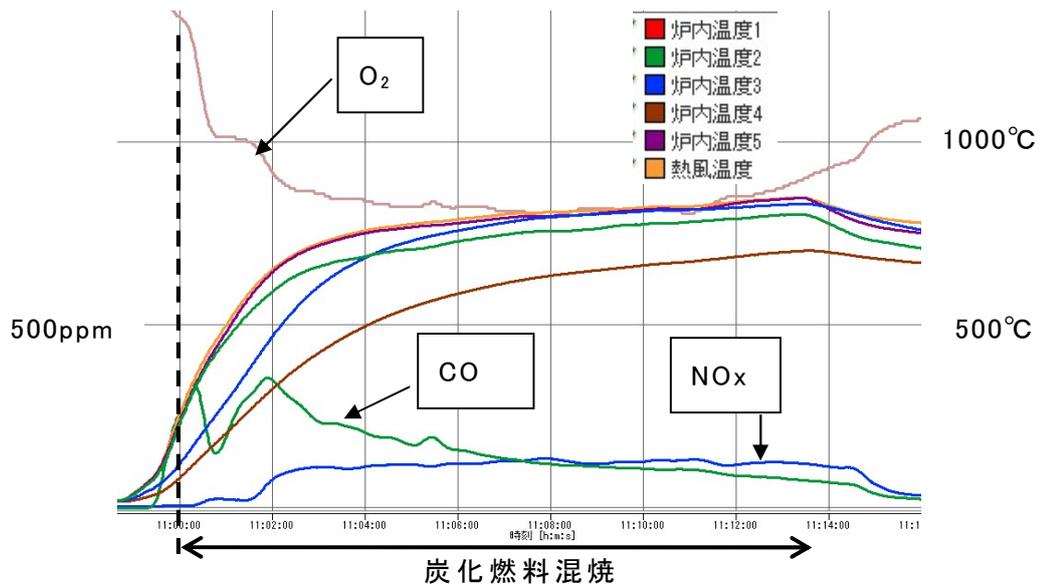


図 3.9.2-9 起動時混焼 粉砕有のトレンドデータ

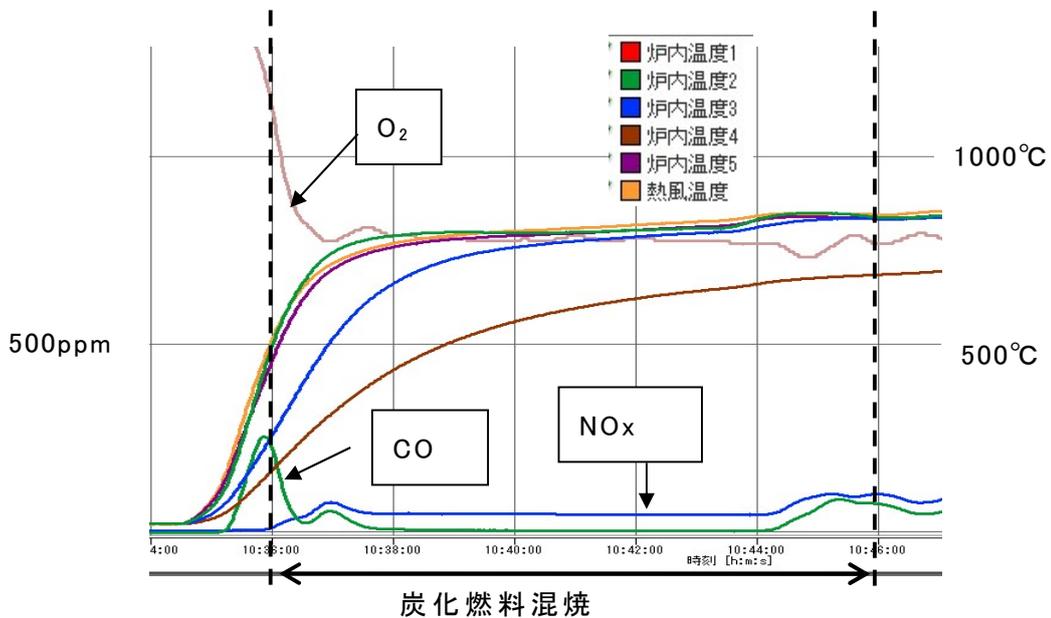


図 3.9.2-10 起動時混焼未粉砕のトレンドデータ

(5) まとめ 直投ノズル燃焼試験(起動時)

以上より、起動時の低温領域において、混焼率 20%時と比べて燃焼率は若干低下するものの高い値を得られた。NOx は定常時よりも低い値を得られており、ごみ焼却施設の炉起動時の炭化燃料の混焼は問題ないと考える。

3.10 各バーナ燃焼試験結果まとめ

各バーナの試験結果をまとめる。パラメータは、旋回エア有無、熱風有無、粉砕有無である。まず混焼率 20%の試験結果を表 3.10-1 に示す。

吹込バーナでは、パラメータの有無に関わらず燃焼率が他と比較して高く、CO、NOx も比較的低い値となった。一方で、混焼バーナは粉砕無しと旋回無しの条件で、直投ノズルは粉砕無しの条件で、燃焼率が他と比較して低く、排ガス値も高い値となった。これより、粉砕と旋回のパラメータの必要性が確認された。粉砕や旋回の有無によるが、3 種のバーナは、条件を選定することで各施設での利用は可能であることを確認した。

表 3.10-1 結果まとめ

バーナ種類		パラメータ条件	燃焼率 [%]	CO [ppm] (煙突出口 CO)	NOx [ppm]
混焼バーナ	起動時	旋○、熱×、紛○	91.7	56.3(5 以下)	219
	定常時	旋○、熱○、紛○	88.6	67(5 以下)	269
		旋○、熱×、紛○	89.6	70(5 以下)	289
		旋○、熱○、紛×	76.0	164(5 以下)	344
		旋×、熱○、紛○	86.1	114(5 以下)	285
吹込バーナ	起動時	旋○、熱×、紛○	96.0	17(5 以下)	179
	定常時	旋○、熱○、紛○	95.5	3(5 以下)	133
		旋○、熱×、紛○	95.9	17(5 以下)	179
		旋○、熱○、紛×	95.0	33(5 以下)	202
		旋×、熱○、紛○	93.9	11(5 以下)	167
直投ノズル	起動時	紛○	88.0	194.4(5 以下)	124
		紛×	85.2	22.2(5 以下)	56.8
	定常時	紛○	87.6	66(5 以下)	203
		紛×	66.6	225(5 以下)	200

※1 CO、NOx は O₂12%換算値である。

※2 パラメータについて、○は有り、×は無しを示す。

各バーナのダイオキシン、HCl、ばいじん濃度の測定値を表 3.10-2 に示す。表より、全バーナにて法規制値を下回っていることがわかる。ごみ焼却施設での使用について問題ないことを確認出来た。

表 3.10-3 燃焼試験における測定結果

	混焼バーナ	吹込バーナ	直投ノズル	法規制等 排出基準
ダイオキシン(排ガス) 毒性等量[ng-TEQ/m ³]	0.58	0.68	0.14	10
ダイオキシン(焼却残渣) 毒性等量[ng-TEQ/m ³]	0.50	0.27	0.04	3
HCl [ppm]	0.4 未満	3.30	0.70	430
※処理前ばいじん濃度 [ppm]	0.20	0.44	0.34	-

4. 問題点と対応検討まとめ

本年度の試験を通じて、炭化燃料利用における問題点が発生し、その対応を行った。本項では代表的な問題点とその対応について示す。

4.1 炭化燃料混焼試験における問題点と対応

4.1.1 混焼バーナのスロート焼損

混焼バーナ(図 4.1.1-1)の燃焼試験でバーナのスロートが焼損した(図 4.1.1-2)。焼損した原因はバーナの空気比を低くすることにより火炎温度が高くなったことと、図 4.1.1-3 のようにスロートを炉内に設置し、スロート外側に外気を取り込めなかったため、断熱されたことによる放散熱の減少であると考えられた。

焼損対策として、スロート外側の鉄皮を冷却するためのテーパフランジを設置し、スロート表面を外気が流れるようにした(図 4.1.1-4)。テーパフランジによる隙間面積と炉内・炉外の静圧差による侵入空気量を試算した結果を表 4.1.1-1 に示す。

スロート表面温度は対策前が約 600℃であったのに対して、対策後は約 400℃程度まで冷却された(表 4.1.1-2)。炉内圧力が約-50Pa のときにテーパフランジからの侵入空気風速は 4~6m/s であり、冷却するために必要な試算範囲内の風量であることを確認した(表 4.1.1-3)。本対応により、その後の試験でスロートの焼損は生じていない。

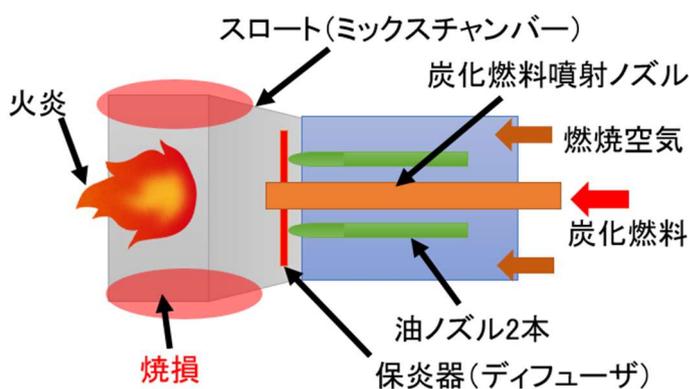


図 4.1.1-1 混焼バーナ概略図



図 4.1.1-2 溶融したスロート



図 4.1.1-3 変更前フランジ



図 4.1.1-4 変更後テーパフランジ

表 4.1.1-1 テーパフランジ侵入空気量試算

炉内圧力(Pa)	風速(m/s)	侵入風量(m ³ /min)
-20	3.46	12.4
-30	4.23	15.2
-40	4.89	17.6
-50	5.47	19.7
-60	5.99	21.6

表 4.1.1-2 対策前後スロート表面温度

	温度[°C]
対策前	600
対策後	400

表 4.1.1-3 対策後侵入空気

炉内静圧	侵入空気風速
[Pa]	[m/s]
-50	4~6

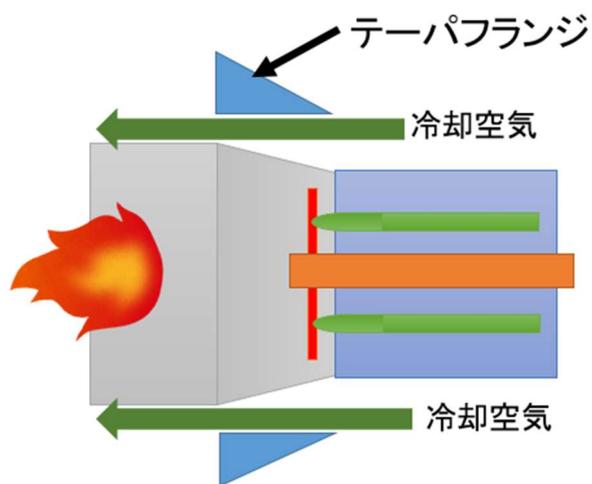


図 4.1.1-5 テーパフランジ概略図

4.1.2 混焼バーナスロート内部付着

混焼バーナによる重油専焼時にバーナスロート内部に付着物が確認された(図 4.1.2-1, 2)。重油専焼時に発生した付着物であり、付着成分を分析するとカーボンが 100% であるので、重油由来であることが分かった。

この原因は、実機の最大使用流量のバーナとするために 160kg/h(186L/h)の重油ノズルを 2 本設置していたが、試験設備の最大使用量より 150L/h(ノズル 1 本で 75L/h×2 本)で燃焼試験を行う必要があったため、ノズルの負荷(最大能力に対する噴霧量)が減少することで重油噴霧角度が増大し、噴霧粒径が大きくなったためと考えられた(図 4.1.2-3)。最大流量では噴霧角度は 60° であるが、試験仕様の最低流量では噴霧角度が 85° まで広がる。この噴霧角度の場合、噴霧油が蒸発するまでにスロート壁面に達して冷却されるため、蒸発や燃焼まで至らず、スロート内壁に油が堆積することにより、完全燃焼しなかったカーボンが付着物として残ったと考えられた。

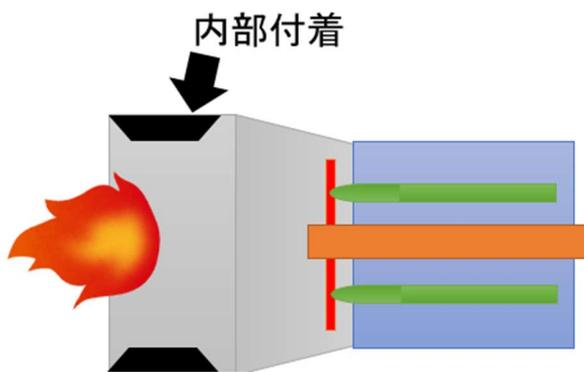


図 4.1.2-1 スロート内部付着概略図

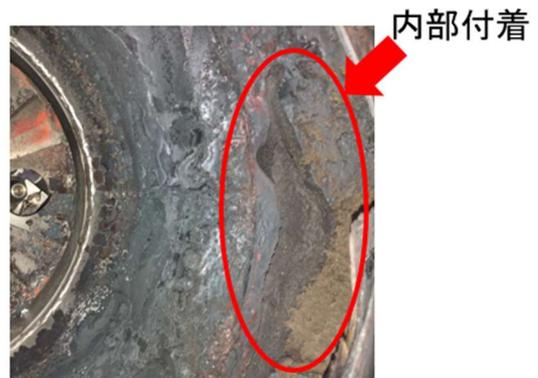


図 4.1.2-2 スロート内部付着物写真

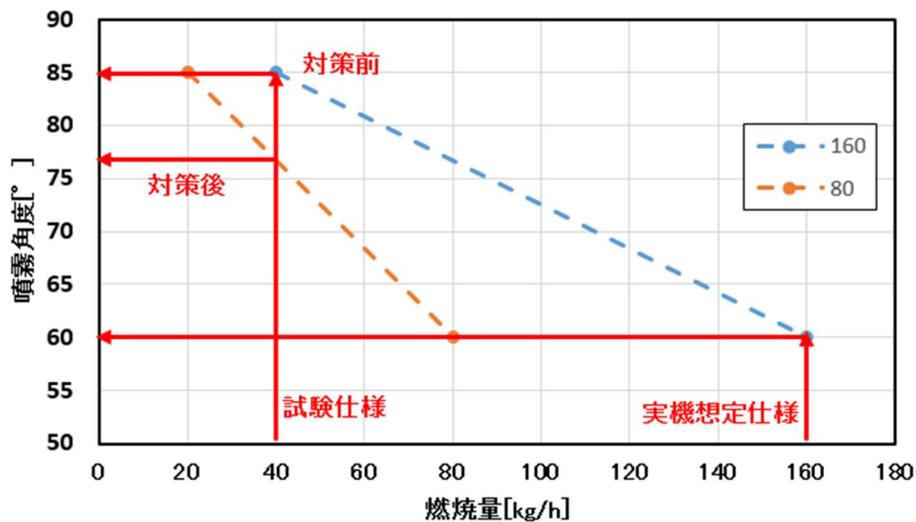


図 4.1.2-3 ノズルチップサイズによる噴霧角度の比較(カタログ値)

付着の対策として、ノズルの最大能力を 160kg/h から 80kg/h に下げて負荷を上げることで噴霧油の粒径を小さくするとともに噴霧角度を小さくした。さらにノズル本体を内側に約 4° 傾けることで噴霧油が壁面へ到達する距離を伸ばした。

80kg/h(重油 93L/h(ノズル 1 本 40kg/h))噴霧を行った場合、この対策により噴霧角度は 85° から約 76° になる(図 4.1.2-3)。対策前は噴霧油のノズルから壁面までの経路は 235mm であったのに対して、対策後は 280mm まで伸びる(図 4.1.2-4)と試算され、試験後のスロート内部の付着が無くなった(図 4.1.2-5)。

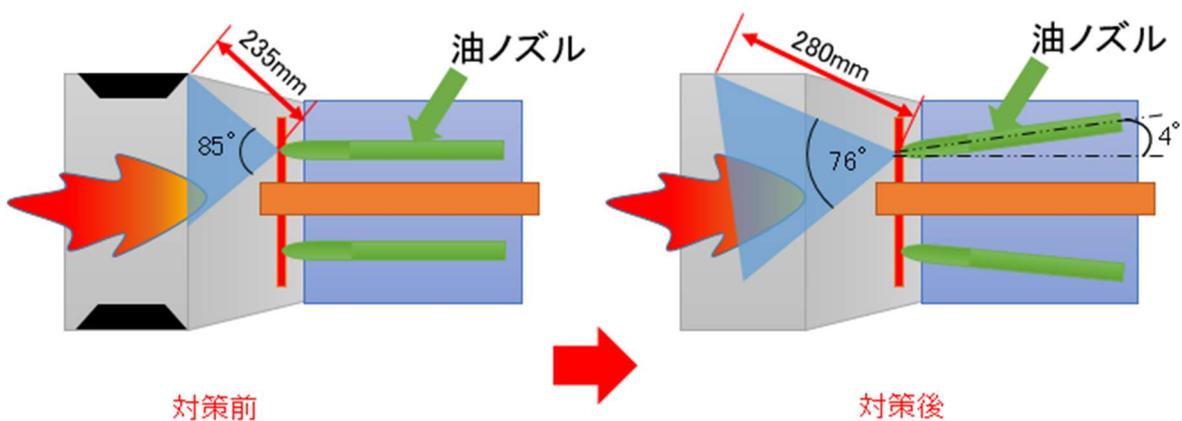


図 4.1.2-4 対策前後の噴霧位置状況



図 4.1.2-5 対策後のスロート内面(試験後)

4.1.3 炉内熱電対先端破損

混焼バーナの燃焼試験後、炉内を点検すると非結晶アルミナ PT-0 の保護管付き R 型熱電対 (図 4.1.3-1) 先端が破損していることが確認された (図 4.1.3-2, 3)。R 型熱電対は最大約 1,700℃ まで測定可能であり、熱電対の先端は炉内の中心に設置している (図 4.1.3-4)。熱電対先端の破損の原因は高温の火炎にさらされることによる溶融と、飛来する炭化燃料による摩耗であると考えられた。破損対策として、火炎温度が最も高く、炭化燃料が最も多く飛来する炉内中心部から熱電対を 150mm 上部に移動した (図 4.1.3.-6)。150mm ずらしても、各条件における比較は可能であり、解析検証上も問題ないことを確認した。その結果、熱電対先端の破損は発生しなくなり、試験継続が可能となった。

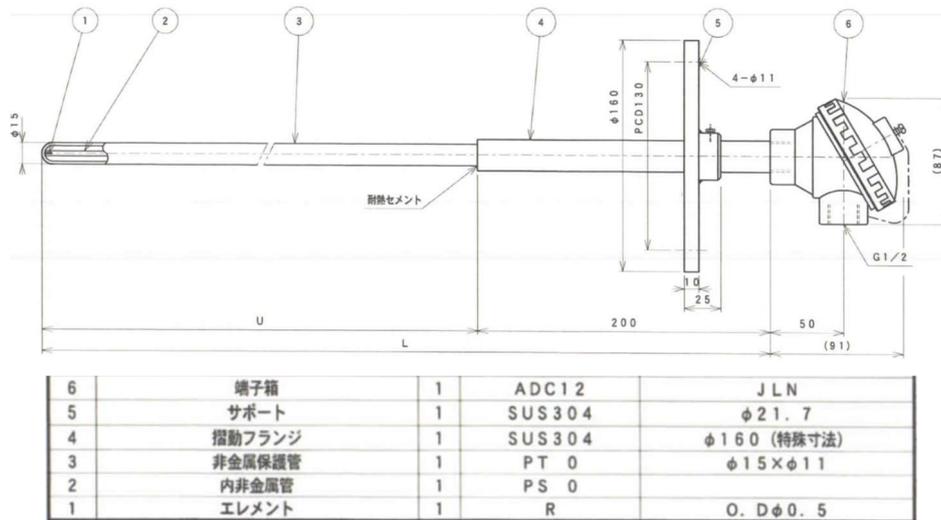


図 4.1.3-1 熱電対外形図



図 4.1.3-2 熱電対先端破損 1



図 4.1.3-3 熱電対先端破損 2

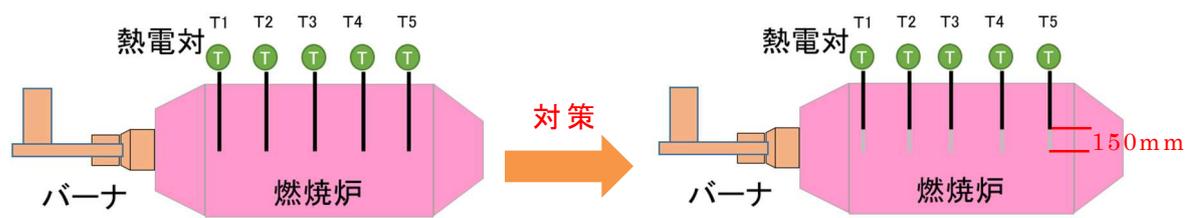


図 4. 1. 3-4 対策前後熱電対設置位置



図 4. 1. 3-6 熱電対設置位置移動後(試験後)

第3章 解析検証

1. 解析概要

1.1 解析目的

本事業では、炭化燃料の利用先拡大を目的として使用方法を検討している。昨年度、炭化燃料の使用方法として想定しているケースに対して、燃焼試験、実証試験に先立って燃焼シミュレーションを実施し、各ケースにおける炭化燃料の燃焼可否判断、構成機器の妥当性の比較検討等を行った。昨年度実施したケースを以下に示す。

(1)炭化施設内利用による高性能化(西海市炭化センター燃焼炉解析)

既設の燃焼炉を対象に、助燃燃料の一部を炭化燃料に変更した際の燃焼状況を検討した。ここでは、炭化燃料をバーナは使用せずに燃焼炉上部より投下した。燃料種三種類(炭化物の取出箇所を変更)に対して検討を実施した。

(2)利用先の拡大：ごみ処理施設での利用(播磨町ストーカ炉解析)

当該既設炉における炭化燃料利用実証試験に先立ち、起動時のバーナ燃料の一部を炭化燃料に変更した際の燃焼状況を検討した。ここでは、ストーカ炉起動時に使用する重油バーナに炭化燃料を吹込む場合と直投する場合の2ケースに対して検討を実施した。

(3)利用先の拡大：新設多様化(炭化燃料混焼バーナ解析)

炭化燃料利用先の更なる拡大のために、バーナの燃焼試験体系にて解析を実施し燃焼状況を検討した。新設炉等に対応した炭化燃料混焼バーナに対して検討を実施した。

解析の結果、炭化燃料の平均粒径を $100\mu\text{m}$ 程度にすることで、いずれのケースにおいても、炭化燃料燃焼率 90%以上の解析結果が得られた。

本章では、第2章で述べた日工株式会社燃焼試験炉における炭化燃料混焼バーナ、炭化燃料吹込バーナ、および、直投ノズルによる燃焼試験結果を基に解析モデルの適用性について検証を実施する。

1.2 解析モデル

解析体系内部のガス流体や液滴粒子、固体粒子についてはCFD(Computational Fluid Dynamics)手法を適用した汎用熱流動解析ソフトウェア ANSYS Fluent ver.19.0 を用いてモデル化し3次元定常解析を実施する。以下に主な計算モデルを示す。

解析ソフト

汎用熱流体解析コード ANSYS Fluent Ver.19.0

物理モデル

- ・乱流モデル：Realizable $k-\varepsilon$ ⁽¹⁾ (工業的によく用いられる $k-\varepsilon$ 2 方程式モデル)
- ・燃焼モデル：高乱流強制対流条件であるため、乱流による燃料ガスと酸化剤の混合律速であるED(Eddy Dissipation)モデルを適用した。また、炭化燃料のチャー燃焼速度は、DTF 試験により別途算出した値を入力している。

重油組成は発熱量がほぼ同等となるよう Fluent に設定されている $C_{10}H_{22}$ を用いた。粒度分布はメーカ設計値としている。炭化燃料成分は、工業分析により求めた炭化水素等の割合から発熱量が等しくなる成分として設定した。
- ・輻射モデル：Discrete Ordinates モデル⁽²⁾を用いた。また CO_2 、 H_2O のガス輻射吸収係数の周波数依存性には、WSGG(Weighted Sum of Gray Gas)モデル⁽³⁾を適用した。
- ・壁面モデル：壁面の境界は滑りなし条件、境界層は標準壁関数モデル、耐火構造物等は伝熱モデルとして模擬した。

液滴粒子、固体粒子は、分散相モデル(Discrete Phase Model)を用いて流れ場中の軌跡を追跡計算している。Fluent のラグランジュ分散相モデルは、オイラー・ラグランジュ法を採用している。流体相は連続体として扱い、ナビエ・ストークス方程式の解を求める。一方の分散相は計算対象の流れ場を通過する代表粒子の飛跡を追跡することで解析する。

以下に、ANSYS FLUENT 理論ガイド⁽⁴⁾から抜粋して、使用している粒子モデルについて説明する。

粒子の飛跡は粒子に作用する力の釣り合いを積分することによって予測する。この力の釣り合いは粒子の慣性と粒子に作用する力の式で表され、次式で表される。

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (1.2.1)$$

ここで、 \vec{F} は追加の加速度(粒子の単位質量当たりの付加的な力)の項、

$\frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$ は粒子の単位質量当たりの抗力であり、次式が成り立つ。

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (1.2.2)$$

ここで、 τ_r は粒子の緩和時間、 \vec{u} は流体相の速度、 \vec{u}_p は粒子の速度、 μ は流体の分子粘度、 ρ は流体の密度、 d_p は粒子の粒径である。また Re は次式で定義される相対レイノルズ数である。

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (1.2.3)$$

次に粒子の燃焼までのプロセスについて述べる。図 1.2-1 に固体燃料燃焼のイメージを示す。固体燃焼粒子は初期状態から周りの輻射熱等の影響により加熱される。炭化燃料のように粒子に水分が含まれている場合は、まず水分の蒸発が始まり、粒子温度が沸点に達すると沸騰状態となる。その後揮発開始温度に達すると脱揮発が始まる。揮発したガスは酸素と混合することで燃焼する。揮発が終了すると粒子に残った固定炭素の表面燃焼(チャー燃焼)が開始される。チャー燃焼が終了すると灰分が残り燃焼は終了し粒子は冷却される。

重油燃料は、微粒化された重油液滴粒子を重油バーナ出口から解析体系に投入している。炉内からの熱輻射等を受けて液滴粒子は昇温・蒸発してガス化したのち、酸化剤(空気中の酸素)と反応して燃焼するモデルとなっている。

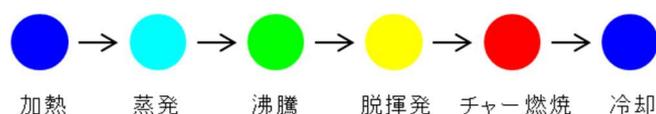


図 1.2-1 固体燃料燃焼のイメージ

図 1.2-2 に固体燃料粒子の燃焼までの過程を粒子の滞留時間と粒子温度で整理したイメージを示す。粒子が燃焼し、灰分に至るまでに法則 1～6 が働いている。その法則について述べる。

・法則 1 / 法則 6 : 不活性加熱および不活性冷却

法則 1 および 6 は、粒子温度が蒸発温度 T_{vap} 未満になっている間、および粒子の揮発成分 $f_{v,0}$ が消費し尽くされた後に適用する。これらの条件は次式で表される。

$$\text{法則 1 : } T_p < T_{vap} \quad (1.2.4)$$

$$\text{法則 6 : } m_p \leq (1 - f_{v,0})m_{p,0} \quad (1.2.5)$$

ここで、 T_p は粒子の温度、 $m_{p,0}$ は粒子の初期の質量、 m_p は粒子の現在の質量である。法則 1 は、粒子が蒸発温度に達するまで有効となる。この温度に達すると粒子は物質移動の法則(法則 2、3、4、5)のいずれかに従うことになり、粒子の揮発成分が消費し尽くされると法則 6 に戻る。法則 1 および 6 は、粒子温度 $T_p(t)$ と、粒子表面における対流伝熱および輻射の吸収・放出との関係を表した熱収支の式を使用する。この式は次式で表される。

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (1.2.6)$$

ここで、 c_p = 粒子の比熱 (J/kgK)

A_p = 粒子の表面積 (m^2)

T_∞ = 連続相の局所温度 (K)

h = 対流熱伝達係数 (W/m^2K)

ε_p = 粒子の放射率

σ = ステファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$)

θ_R = 輻射温度 ($(G/4\sigma)^{1/4}$ (K))

G は入射輻射強度である(単位は W/m^2)。式(1.2.6)では伝熱の内部抵抗は無視できる(即ち粒子温度は全体に一樣)と想定している。法則 1 および 6 の適用時は、粒子と連続相との間で物質移動は起きず、粒子はいかなる化学反応にも関わらない。

・法則 2 : 水分の蒸発

法則 2 は、粒子からの蒸発を予測する法則である。法則 2 の適用は、以下の条件式に示す様に粒子温度が蒸発温度 T_{vap} に達した時から始まり、粒子温度が沸点 T_{bp} に達するか、揮発成分が完全に消費されるまで続く。

$$T_{vap} \leq T_p < T_{bp} \quad (1.2.7)$$

$$m_p > (1 - f_{v,0})m_{p,0} \quad (1.2.8)$$

法則 2 の適用中は、蒸発速度は勾配を持つ拡散によって決定付けられると想定することができる。その場合、気相への蒸気の流束と、粒子表面とバルク気体の蒸気濃度差との関係は次式で表される。

$$N_i = k_c(NC_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (1.2.9)$$

ここで、 N_i = 蒸気のマール流束 (kmol/m²s)

k_c = 物質移動係数 (m/s)

$C_{i,s}$ = 粒子表面の蒸気濃度 (kmol/m³)

$C_{i,\infty}$ = バルク気体中の蒸気濃度 (kmol/m³)

Fluent における蒸発の法則では、 N_i を正の値と想定する。粒子の質量は、次式に従って減少していく。

$$m_p(t + \Delta t) = m_p(t) - N_i A_p M_{w,i} \Delta t \quad (1.2.10)$$

ここで、 $M_{w,i}$ = 化学種 i の分子量 (kg/kmol)

m_p = 粒子の質量 (kg)

A_p = 粒子の表面積 (m²)

最後に、粒子の顕熱の変化と、粒子と連続相との間の対流伝熱および潜熱輸送との関係を表した熱収支の式に従って粒子温度を更新する。この式は次式で表される。

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (1.2.11)$$

ここで、 c_p = 粒子の比熱 (J/kgK)

T_p = 粒子の温度 (K)

h = 対流熱伝達係数 (W/m²K)

T_∞ = 連続相の温度 (K)

$\frac{dm_p}{dt}$ = 蒸発速度 (kg/s)

h_{fg} = 潜熱 (J/kg)

ε_p = 粒子の放射率

σ = ステファン・ボルツマン定数 (5.67×10^{-8} W/m²K⁴)

θ_R = 輻射温度 ($(G/4\sigma)^{1/4}$ (K))

・法則 3：水分の沸騰

法則 3 は、以下の条件式に示す様に、粒子温度が沸点 T_{bp} に達して、しかも粒子の質量 m_p がその中の不揮発成分の質量を上回っている場合に、分散相中の水分の沸騰を予測する法則である。

$$T_p > T_{bp} \quad (1.2.12)$$

$$m_p > (1 - f_{v,0})m_{p,0} \quad (1.2.13)$$

粒子温度が沸点に達した後は、以下の沸騰速度の式を適用する。

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4k_\infty}{\rho_p c_{p,\infty} d_p} (1 + 0.23\sqrt{Re_d}) \ln \left[1 + \frac{c_{p,\infty}(T_\infty - T_p)}{h_{fg}} \right] \quad (1.2.14)$$

ここで、 $c_{p,\infty}$ = 気体の比熱 (J/kgK)

ρ_p = 粒子の密度 (kg/m³)

k_∞ = 気体の熱伝導率 (W/mK)

沸騰速度の定義中は、粒子温度が一定に保たれると想定する。蒸発に必要なエネルギーは気相のエネルギー方程式における負のソース項となる。また蒸発した液体は化学種 i として気相に入る。

・法則 4：脱揮発

法則 4 は、以下の条件式に示す様に、蒸発温度 T_{vap} に達した燃焼粒子に適用する。この法則は粒子の質量 m_p がその中の不揮発成分の質量を上回っている間、有効となる。

$$T_p \geq T_{vap} \text{ and } T_p \geq T_{bp} \quad (1.2.15)$$

$$m_p > (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (1.2.16)$$

ここで、 $f_{w,0}$ は Wet Combustion の場合の蒸発／沸騰物質の質量分率である。本解析では脱揮発モデルとして一定反応速度モデルを適用する。このモデルでは、次式で示す様に揮発成分の放出速度を一定とする⁽⁷⁾。

$$-\frac{1}{f_{v,0}(1-f_{w,0})m_{p,0}} \frac{dm_p}{dt} = A_0 \quad (1.2.17)$$

ここで、 m_p = 粒子の質量 (kg)

$f_{v,0}$ = 粒子中に最初から存在する揮発成分の質量分率

$m_{p,0}$ = 粒子の初期の質量 (kg)

A_0 = 反応速度定数 (s⁻¹)

本解析では $A_0 = 50\text{s}^{-1}$ とした。粒子の揮発成分は気相に入り、気相の化学反応を支配する設定条件に従って反応する。

・ 法則 5 : 表面燃焼

粒子の揮発成分が完全に放出されると、粒子の可燃成分 f_{comb} を消費する表面反応が始まる。法則 5 は、以下の条件式に示す様に、揮発成分の放出後に燃焼粒子に対して適用する。

$$m_p < (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (1.2.18)$$

以下の条件式に示す様に、この法則の適用は可燃成分が消費し尽くされるまで続く。

$$m_p > (1 - f_{v,0} - f_{comb})(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (1.2.19)$$

可燃成分 f_{comb} が法則 5 に従って消費し尽くされた後も、燃料粒子の中に灰が残る。それについては前述の法則 6 を適用する。本解析では表面反応速度モデルとして反応律速／拡散律速表面反応モデルを適用する。このモデルでは、化学反応速度と拡散速度のどちらも表面反応速度に影響すると想定する。拡散速度係数は次式で表される。

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (1.2.20)$$

また化学反応速度は次式で表される。

$$R = C_2 e^{-(E/RT_p)} \quad (1.2.21)$$

この両方に重み付けを施すことにより、チャーの燃焼速度について次式が得られる。

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{0x} \frac{D_0 R}{D_0 + R} \quad (1.2.22)$$

ここで、 A_p は粒子の表面積、 p_{0x} は燃焼粒子周りの気体中の酸化体化学種の分圧である。化学反応速度 R には、チャー粒子の内部表面で起きる化学反応と細孔内拡散の効果が組み込まれている。Fluent では式 (1.2.22) を酸化体の質量分率 Y_{0x} を使用して書き換えた次式を使用する。

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p \frac{\rho R T_\infty Y_{0x}}{M_{w,0x}} \frac{D_0 R}{D_0 + R} \quad (1.2.23)$$

このモデルでは、粒子密度は減少するものの、粒子径は一定に保たれると想定する。表面反応によって、気相中の酸化体の化学種が消費される。即ちその化学種の輸送方程式の計算時に負のソース項が供給される。同様に表面反応は気相中の化学種のソースにもなる。表面反応ではエネルギーの消費や生成も起こり、その量は反応熱によって決定される。表面反応中の粒子の熱収支は次式で表される。

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_{reac} + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (1.2.24)$$

ここで、 H_{reac} は表面反応によって放出される熱量である。

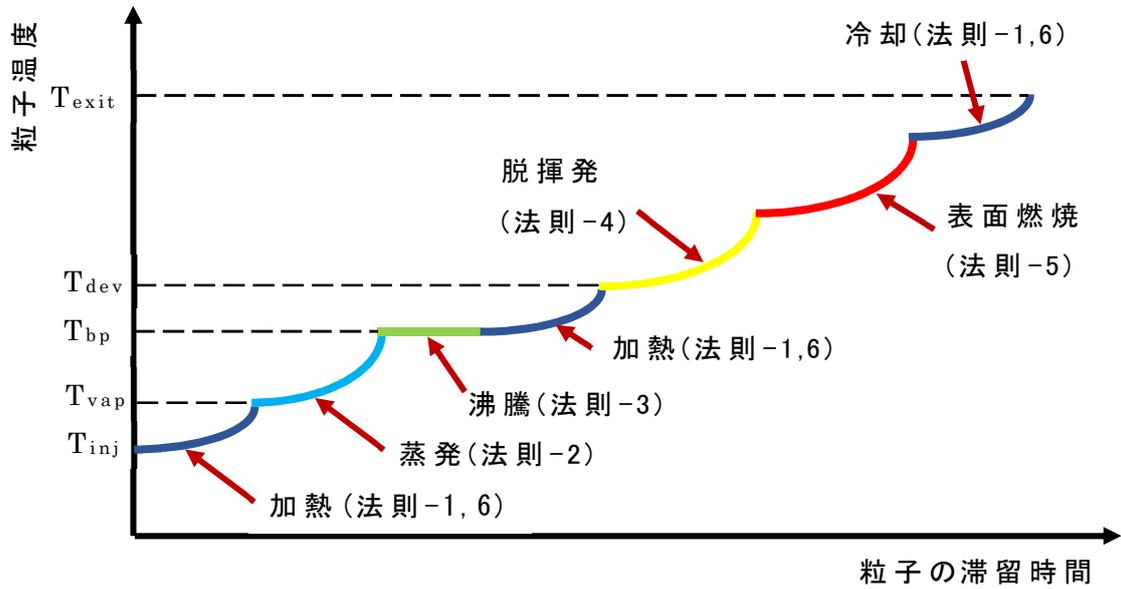


図 1.2-2 固体燃料粒子の燃焼までの過程

解析上の炭化燃料の燃焼率の定義は第2章と同様である。図 1.2-3 に燃焼率の算出方法、式(1.2.25)に算出式を示す。

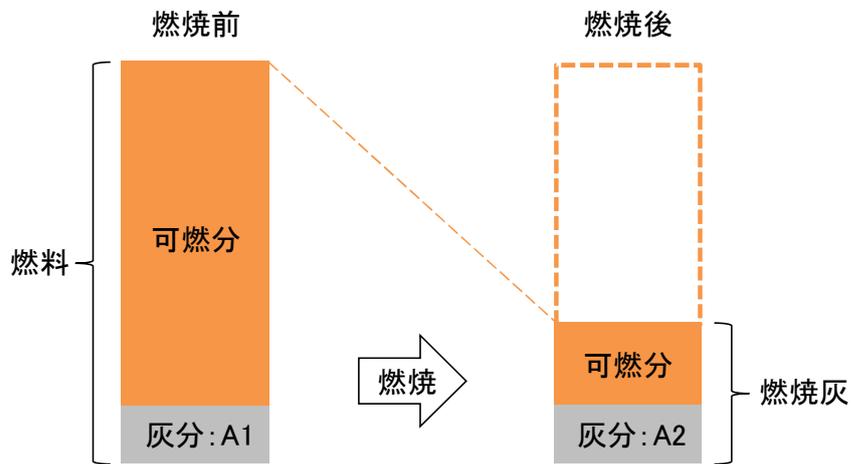


図 1.2-3 炭化燃料の燃焼率算出方法

$$\eta = (A2 - A1) / \{A2 \times (1 - A1)\} \times 100 \quad (1.2.25)$$

2. 炭化燃料化施設の高性能化

炭化燃料施設の高性能化としては、昨年度に西海市炭化センター燃焼炉を対象に助燃燃料の一部を炭化燃料に変更した際の燃焼状況を解析的に検討している。また、今年度は燃焼炉を模擬した試験を実施した（2章）。

ここでは、2章の試験結果をもとに解析モデルの適用性について述べる。

2.1 炭化施設における直投ノズル燃焼解析

図 2.1-1 に示す西海市炭化センター燃焼炉の解析モデルを用いて直投ノズルから投入された炭化燃料の燃焼状況について検討した。

昨年度は、炭化燃料化施設内から得られる炭化燃料の性状（粒径分布や水分含有率等）の違いをパラメータに解析的に検討した。結論として、どの粒子も燃焼率 95% 以上で化石燃料を代替できる見通しを得た⁽⁵⁾。この結果を受けて、今年度は日工(株)の燃焼試験炉にて直投ノズルからの炭化燃料投入試験を実施した。

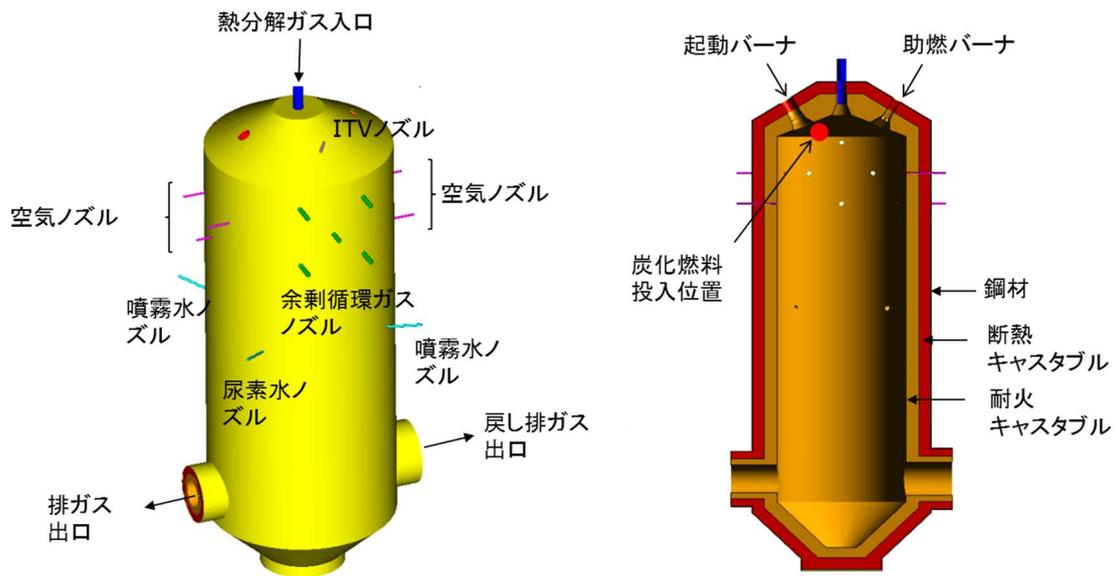


図 2.1-1 西海市炭化センター燃焼炉 解析モデル

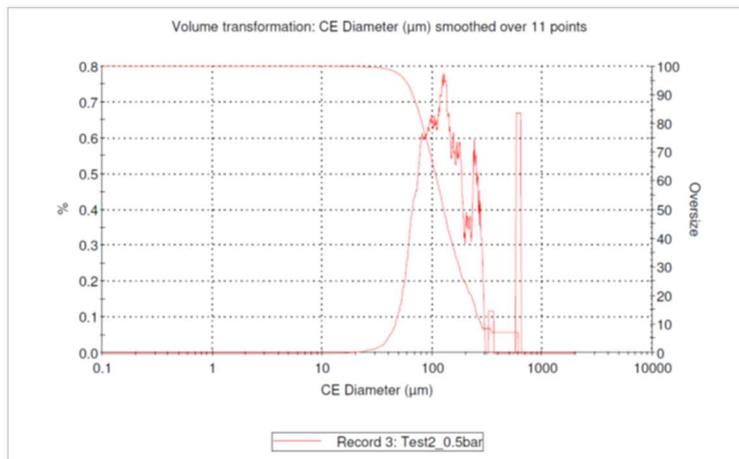
2.2 解析条件

今年度の燃焼試験に対応した解析結果における解析条件を以下に示す。

a. 炭化燃料

炭化燃料の条件に関しては、工業分析および元素分析の結果に基づいて燃焼パラメータを設定している。炭化燃料の密度は 700kg/m^3 とし、投入量

は 15kg/h としている。粒径分布は、粒子画像分析による図 2.2-1 に示す結果をもとにモデル化している。



D50=126.7 μ m
 平均径=171.6 μ m
 最小径=0.54 μ m
 最大径=606.4 μ m

図 2.2-1 炭化燃料粒径分布

b. ガスおよび空気条件

熱分解ガスおよび余剰循環ガスの流量および組成を表 2.1-1 に示す。また、各ノズル等から流入する空気の条件を表 2.1-2 に示す。

表 2.1-1 ガス条件

		単位	熱分解ガス	余剰循環ガス
流量		Nm ³ /h		2601
		kg/h	931	
		kg/s	0.25861	0.84720
ノズル数		個	1	9
流量/ノズル		kg/s	0.25861	0.09413
温度		°C	450	350
組成	CO	wt%	3.27	
	H ₂	wt%	0.02	
	CH ₄	wt%	0.35	
	C ₂ H ₆	wt%	0.32	
	C ₂ H ₄	wt%	0.21	
	C ₃ H ₈	wt%	4.09	
	H ₂ O	wt%	74.79	21.9
	O ₂	wt%	0.24	6.1
	CO ₂	wt%	14.75	13.4
N ₂	wt%	1.96	58.6	

表 2.1-2 空気条件

	単位	助燃バーナ			起動バーナ	
		噴霧ライン	スワラー部	付属機器シール	噴霧ライン	スワラー部
流量	Nm ³ /h	12	455	20	18	250
	kg/s	0.00425	0.16120	0.00709	0.00638	0.08857
ノズル数	個	1	1	2	1	1
流量/ノズル	kg/s	0.00425	0.16120	0.00354	0.00638	0.08857
温度	°C	20	20	20	20	20

噴霧水ノズル パージ部	空気ノズル	尿素水ノズル	ITVノズル
30	460	30	12
0.01063	0.16297	0.01063	0.00425
2	6	2	1
0.00531	0.02716	0.00531	0.00425
20	20	20	20

c. 助燃灯油条件

炭化燃料を使うことで灯油量を削減している。炭化燃料を使用した場合の灯油量は 6L/h である。

d. 壁面条件

燃焼炉の壁面条件を表 2.1-3 に示す。壁面は第 1 層：耐火キャストブル、第 2 層：断熱キャストブル、第 3 層：鋼材（炭素鋼）の三層構造となっており、最外層の鋼材から外部への放熱を考慮した（各構造材の設置状況は図 2.1-1 参照）。なお、耐火キャストブルの内面放射率は 0.8、鋼材外表面の熱伝達率は 8.6w/m²K、外気温は 20°C とした。

表 2.1-3 壁面条件

材料名	厚さ [mm]	熱伝導率 [W/mK]
耐火キャストブル	420	1.35
断熱キャストブル	190	0.21
鋼材（炭素鋼）	9	43

2.3 解析検証

解析結果の温度分布を図 2.3-1 に、炭化燃料粒子挙動を図 2.3-2 にそれぞれ示す。また、解析結果の燃焼炉出口における炭化燃料の燃焼率は、99.5% である。

2 章に示す燃焼試験の結果からは、燃焼率 95% 以上が得られており、解析結果とほぼ一致していることが解る。なお、燃焼試験では、投入位置近傍の着火状況に着目した流速一致条件と炉内の燃焼燃え切り性に着目した滞留時間一致条件の両条件ともに 95% 以上の燃焼率となっており、炭化燃料の

燃焼が概ね投入直後であることが推察される。図 2.3-1、および、図 2.3-2 に示す解析結果では、炭化燃料は投入直後から燃焼しており、試験と同様の現象がみられている。

以上から、西海市炭化センター燃焼炉の解析モデルは、現象再現性において十分な適用性があるものと考えられる。

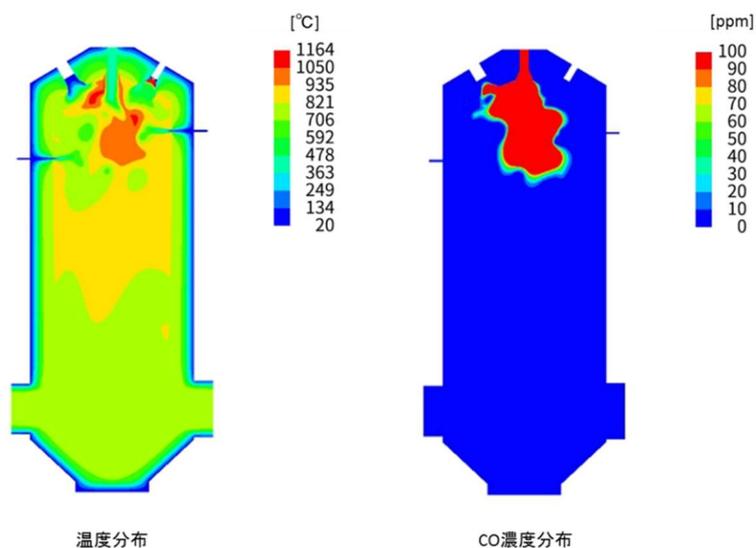


図 2.3-1 温度分布・CO 濃度分布

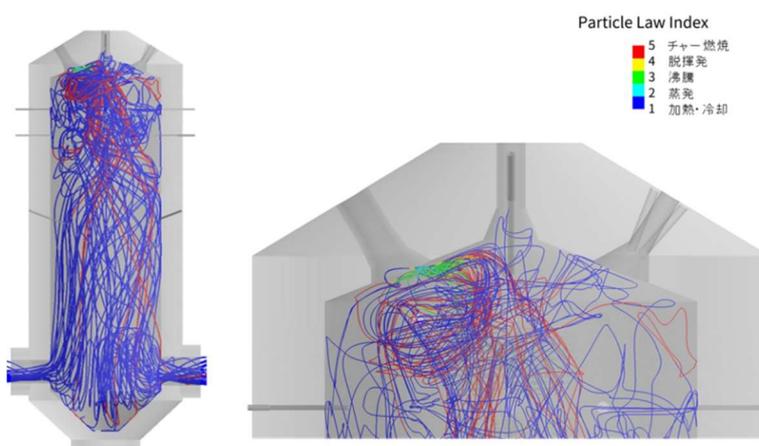


図 2.3-2 炭化燃料粒子挙動

3. 炭化燃料利用先の拡大

3.1 混焼バーナ燃焼試験解析

解析対象とした炭化燃料混焼バーナの3次元モデルを図3.1-1に示す。炭化燃料はロータリーバルブから落下投入された後、バーナ中央の配管内を空気搬送され、途中、旋回用エアにより強い旋回を与えた後に配管出口から噴出する。ディフューザ径は $\phi 290$ とした。また、試験と同様にスロート冷却用の二次空気もモデル化した。噴出された炭化燃料は、形成された重油火炎を通過することで水分蒸発、脱揮発過程を経てチャー燃焼し、混焼火炎を形成する。

解析メッシュは全てポリヘドrameッシュで構成し、総メッシュ数は約600万である。

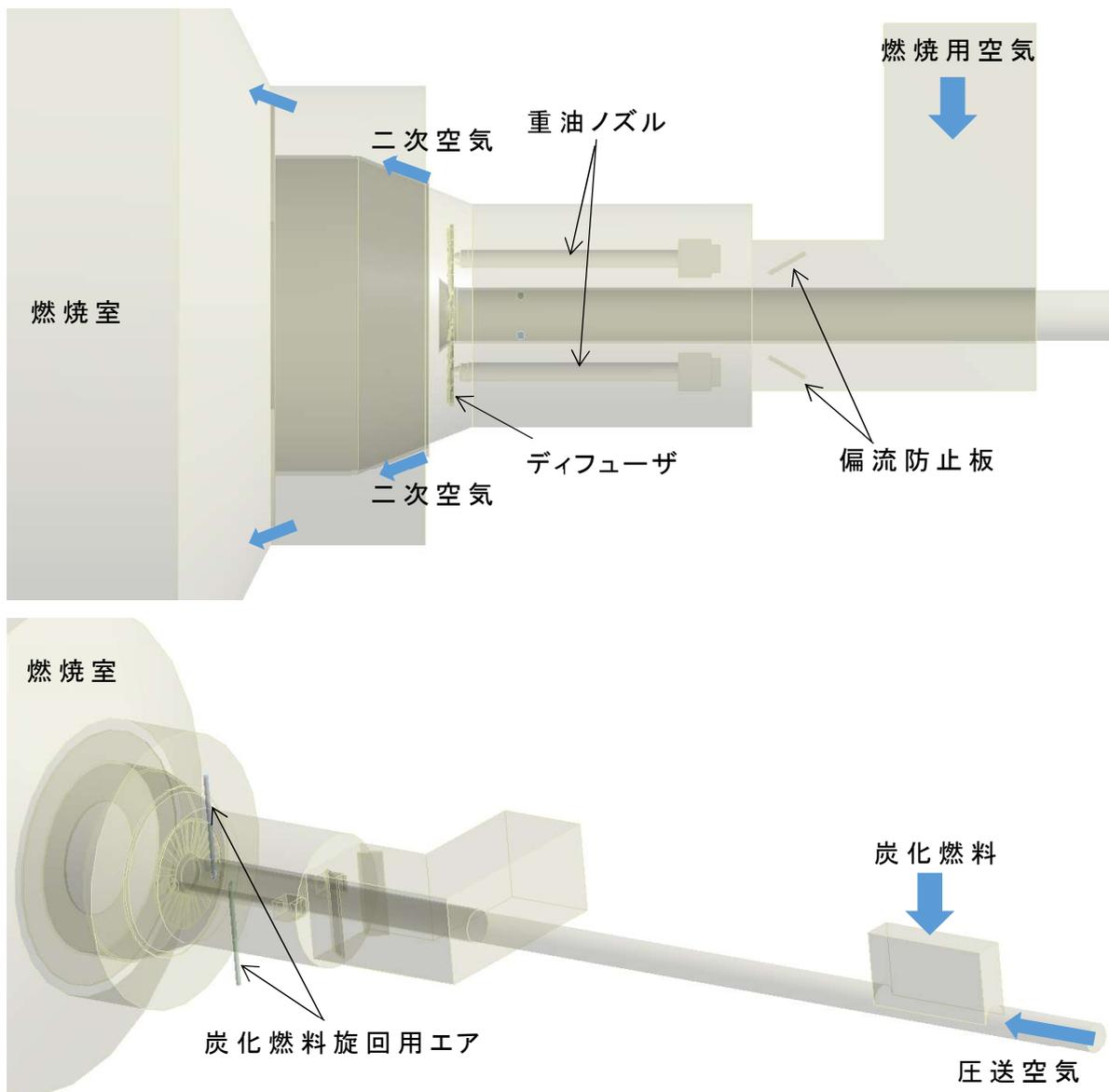


図 3.1-1 解析形状モデル

3.2 解析条件

3.2.1 壁面条件

表 3.2.1-1 に燃焼室の壁面条件を示す。壁面は第1層：キャスト、第2層：ss400 の二層構造とし、燃焼室外部への放熱を考慮した。外部境界温度は試験結果より 200℃とした。

表 3.2.1-1 壁面条件

材料名	厚さ [mm]	熱伝導率 [W/mK]	内面放射率 [-]	外部境界温度 [°C]
キャスト	150	1.5	0.7	200
ss400	9	51.6		

炭化燃料混焼条件の解析をする上で、炉壁の境界条件の設定が重要となる。図 3.2.1-1 に炉壁条件の違いを示す。条件として、Escape と Reflect が一般的によく使われる。

Escape という条件は、粒子が壁面境界に衝突した時点で、その粒子の飛跡計算は終了する。衝突の時点で粒子が燃えていようが、燃えていまいが関係なく計算が打ち切られるため、粒子の燃焼率の下限に相当する。

一方、Reflect という条件は、粒子が壁面境界から跳ね返り、Escape 境界に衝突しない限り飛跡計算は続行される。今回の解析では炉の出口まで到達しない限り、ひたすら計算され続けるため、粒子の燃焼率の上限に相当する。炭化燃料混焼条件では、この2ケースの解析を実施して、炭化燃料の燃焼率の下限値と上限値を算出した。

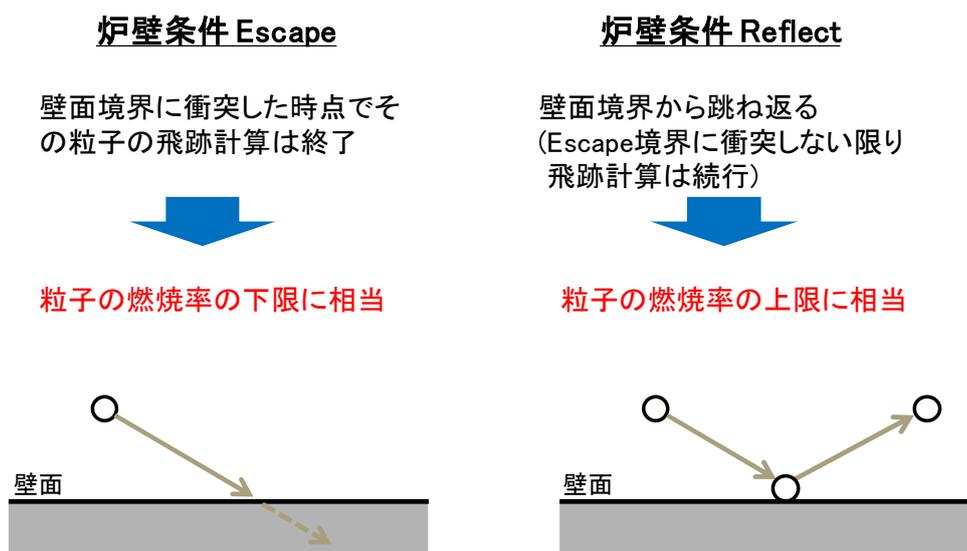


図 3.2.1-1 炉壁条件の違い

3.2.2 粒度分布

図 3.2.2-1 に噴霧試験で得られた炭化燃料粒度分布を示す。炭化燃料混焼条件では、この粒度分布を Rosin-Rammler 分布で与えて計算した。

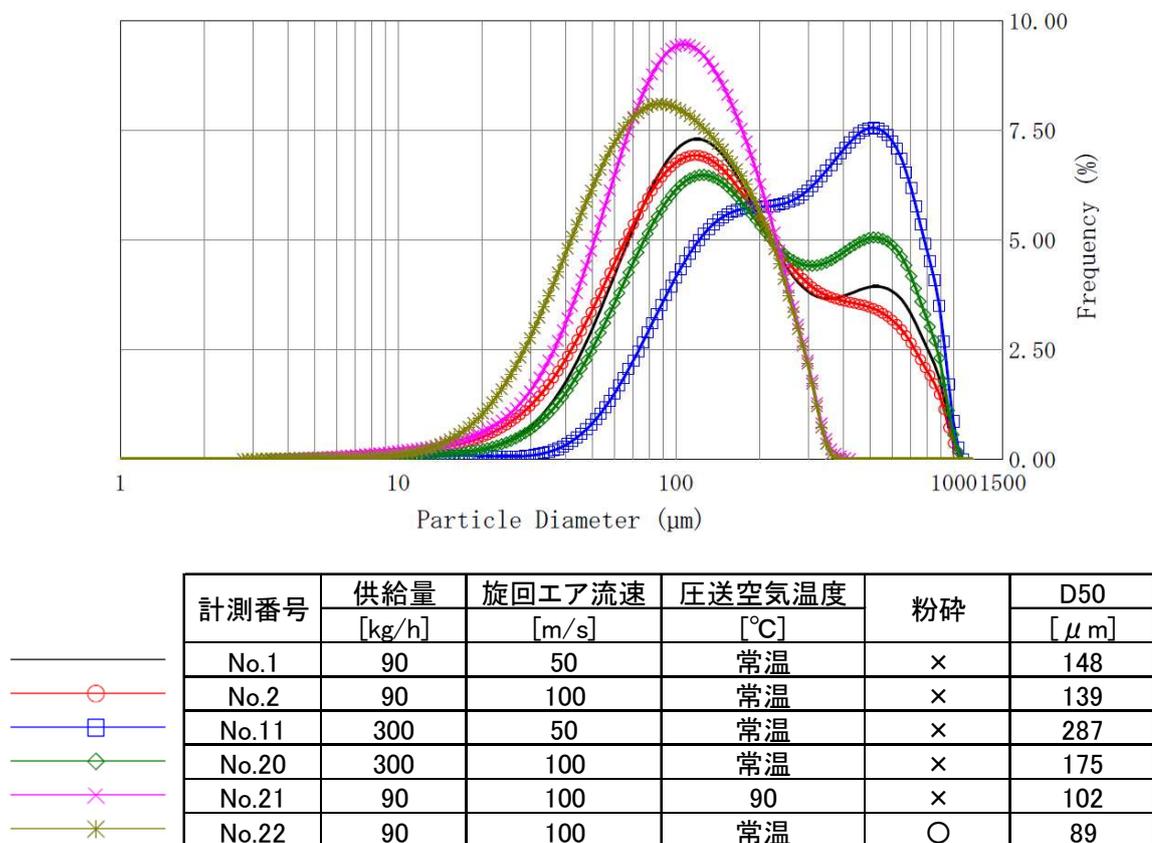


図 3.2.2-1 炭化燃料粒度分布 (噴霧試験)

3.2.3 流量条件

表 3.2.3-1 に解析条件を示す。燃料の投入量や空気流量は試験結果と同様の値を使って解析した。重油専焼条件としては RUN1-8 の試験結果を検証に用いた。また炭化燃料混焼条件としては RUN4-13 の 20%混焼、粉砕あり、熱風なし、巡回ありの試験結果を検証に用いた。

重油組成は発熱量がほぼ同等となるよう Fluent に設定されている $C_{10}H_{22}$ を用いた。燃焼反応は火炎形状、火炎長さの比較検討のため、CO を考慮した二段総括反応とした。

表 3.2.3-1 解析条件

(a) 重油専焼条件

RUN1-8			熱電対計測温度	
重油量	149	L/h	炉内1	1142°C
炭化燃料量	0	kg/h(w.b)	炉内2	1264°C
バーナファン空気量	32.9	m3/min	炉内3	1269°C
圧送空気量	6.5	m3/min	炉内4	1164°C
二次空気量	5.3	m3/min	炉内5	1214°C
旋回空気量	1.58	m3/min	熱風温度	1223°C
圧送空気温度	20	°C		
空気比	1.76	-		

(b) 炭化燃料混焼条件

RUN4-13			熱電対計測温度	
重油量	120	L/h	炉内1	959°C
炭化燃料量	75	kg/h(w.b)	炉内2	1085°C
混焼率	20.3	%	炉内3	1064°C
粉碎	○		炉内4	1045°C
熱風(圧送)	×		炉内5	1076°C
旋回エア	○		熱風温度	1061°C
バーナファン空気量	47.0	Nm3/min		
圧送空気量	5.4	m3/min		
二次空気量	5.7	m3/min		
旋回空気量	1.4	Nm3/min		
圧送空気温度	25	°C		
空気比	2.34	-		

3.3 解析検証

3.3.1 検証方法

解析モデルの適用性検証は、試験で得られた炉内熱電対計測温度、炭化燃料の燃焼率、また実際の火炎形状を基に試験結果との比較検討により実施した。図 3.3.1-1 に熱電対設置位置を示す。上流から順に熱電対 1～5 と呼ぶことにする。熱電対 1 は燃焼室の入口から 157mm に位置し、熱電対間の軸方向の距離は全て 500mm である。また、設置高さは熱電対 1～3 および熱電対 5 はバーナ中心軸から上方向へ 140mm、熱電対 4 は燃焼室内壁から下方向へ 100mm とした。

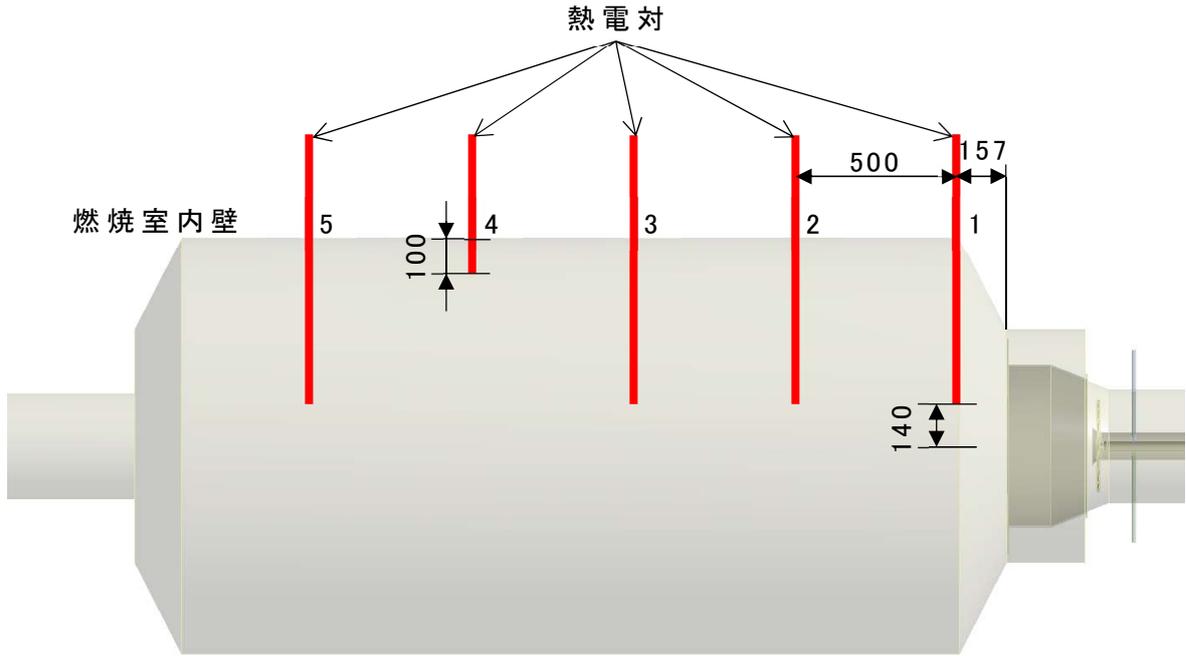


図 3.3.1-1 熱電対設置位置

火炎の形状や火炎の長さを確認するため、図 3.3.1-2 に示すように燃焼室に視窓を設置し、火炎観察を行った。上流から順に視窓 1～4 と呼ぶことにする。それぞれ熱電対 1、2、4、5 と同位置に当たる。



図 3.3.1-2 視窓設置位置

3.3.2 検証結果

(1) 重油専焼条件

図 3.3.2-1 に重油液滴粒子の噴霧軌跡を示す。着色は粒子径を表す。左図はバーナスロート部を斜めから見た様子、右図は真横から見た様子である。解析は一般的な圧力噴霧のモデルを用いて計算した。液滴は噴霧された後、徐々に減径しながらスロート内ではほぼガス化し消滅していることが分かる。また、図 3.3.2-2 にバーナ出口部の酸素濃度分布を示す。酸素が消費されていることから、重油の揮発成分が酸素と反応していることが分かる。

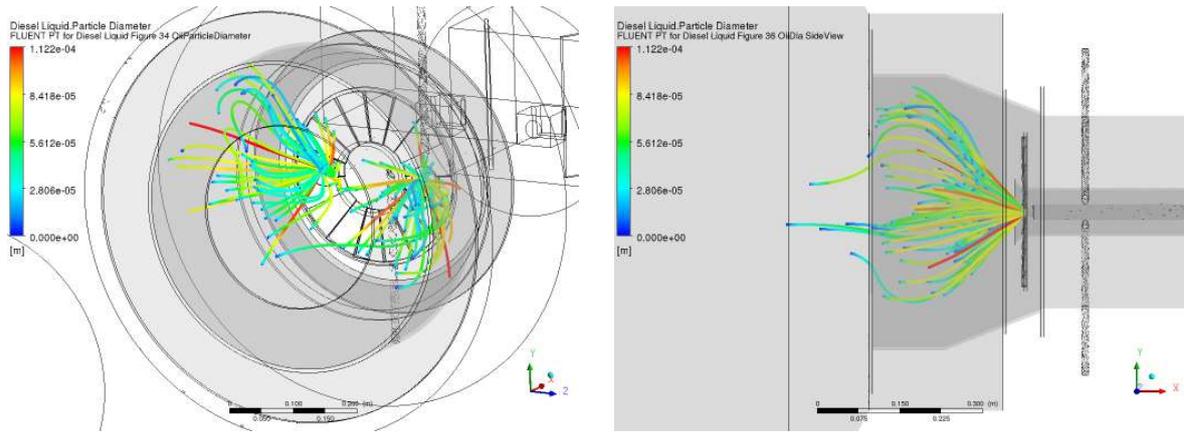


図 3.3.2-1 重油液滴粒子の噴霧軌跡

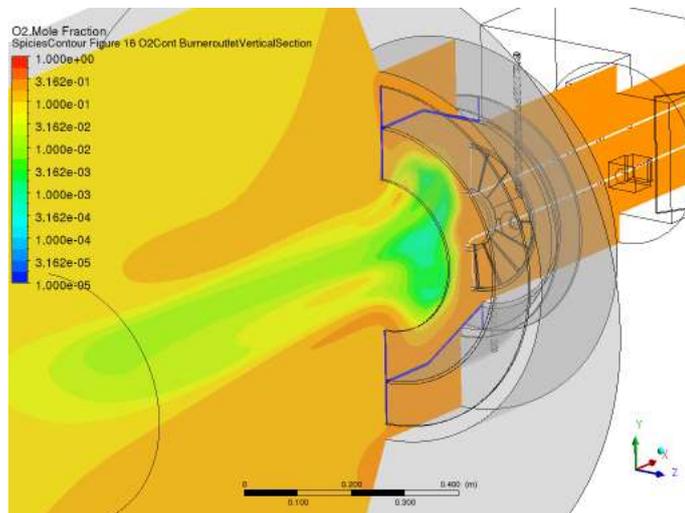


図 3.3.2-2 バーナ出口部の酸素濃度分布

図 3.3.2-3～図 3.3.2-5 にバーナ中心断面の温度分布、CO 濃度分布、速度分布を示す。温度分布を見るとスロートの内側から燃焼反応が始まり、そこから高温のガスが噴き出していることが分かる。また火炎の長さは、例えば CO 濃度 1000ppm を燃え切り位置と考えると、燃焼室の視窓 3 の辺りまで到達していることが分かる。

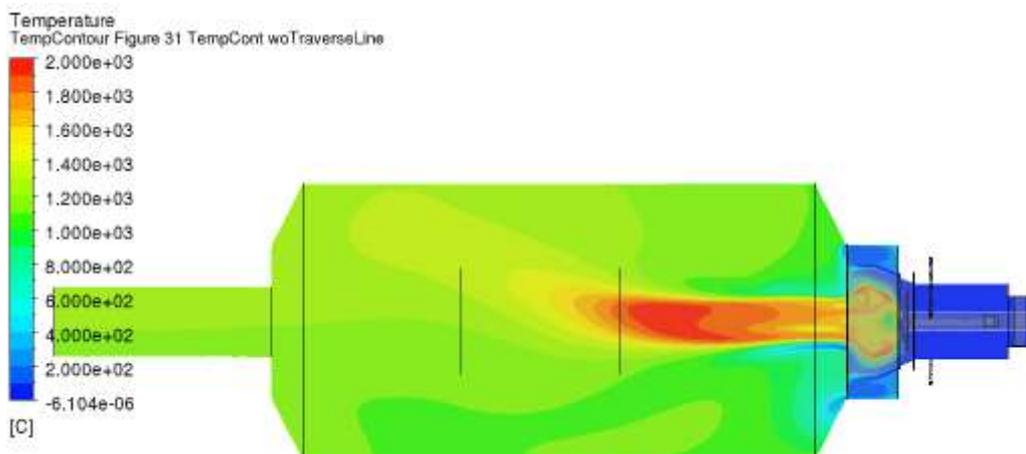


図 3.3.2-3 中心断面の温度分布

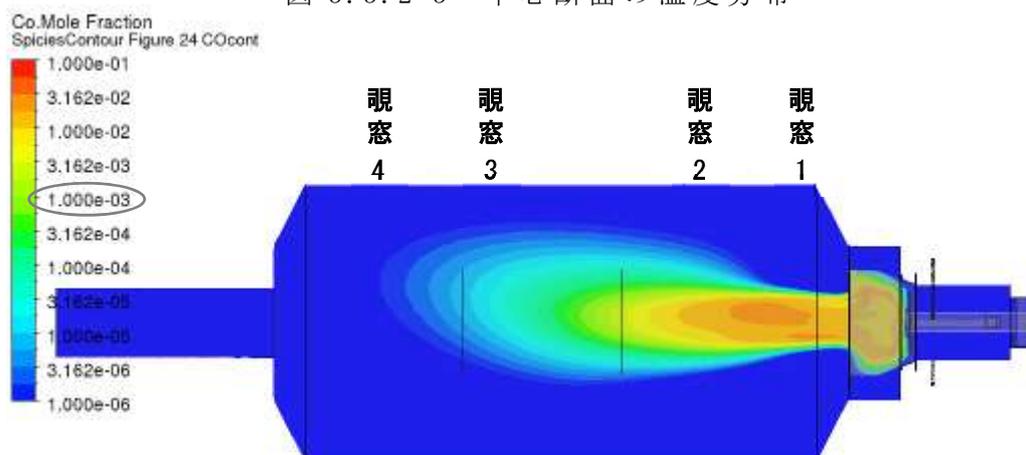


図 3.3.2-4 中心断面の CO 濃度分布

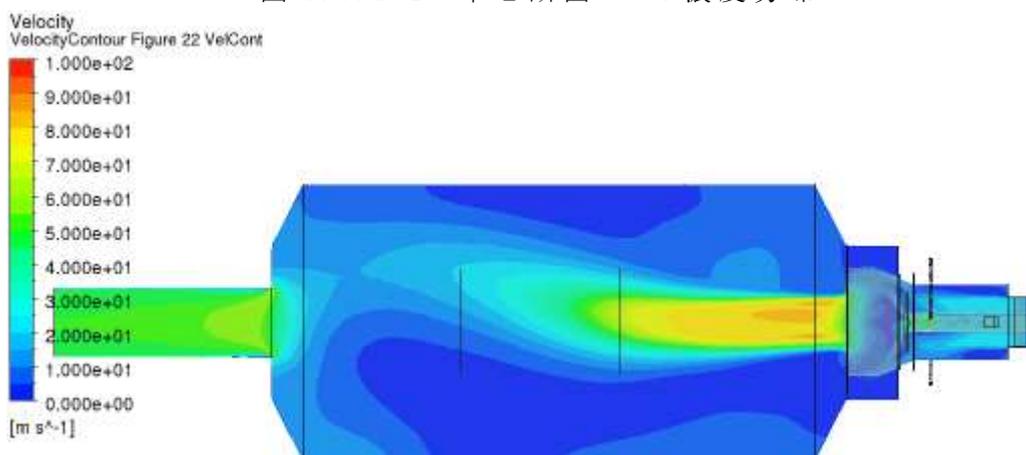


図 3.3.2-5 中心断面の速度分布

この解析結果を実際の燃焼状況と比較する。まず炉内にカメラを差し込み、火炎の根本の様子を観察した。図 3.3.2-6(a)にバーナ出口部の燃焼状況を示す。火炎がバーナ出口から噴出しており、スロートの内側から活発に燃焼していることが分かる。また図 3.3.2-6(b)に視窓から観察された燃焼状況を示す。視窓3の辺りまで火炎が到達しており、視窓4からは火炎が観察できない。この燃焼状況は解析結果と一致しており、スロート内での燃焼状況、火炎の長さ共に実現象をシミュレートできた。



(a) バーナ出口部



(b) 視窓

図 3.3.2-6 燃焼状況

次に試験で得られた熱電対計測温度との比較を行った。図 3.3.2-7 に温度分布比較結果を示す。熱電対 4 は壁面近くにあるため、グラフでは熱電対 3 と 5 の平均値とした。グラフの横軸は、燃焼室の入口を 0 m とした時の試験炉の軸方向の位置で、縦軸は温度を表す。グラフ中の赤プロットは熱電対計測温度、青線は解析結果を示す。試験と解析で± 10%程度の誤差であれば炭化燃料の燃焼率を評価する上で問題ないことが分かっているため、± 10%を目標値とする。両者を比較すると、傾向は概ね一致するものの、解析結果の方が 10%程度高い温度を示していることが分かる。一般的に火炎近傍の燃焼ガス温度計測の誤差は大きいため、この結果も妥当なもの判断できる。

なお、図 3.3.2-8 に赤プロットを取得した時の、温度トレンドを示す。グラフから、炉内温度は完全な定常状態には至っておらず、温度が上昇傾向であったことが分かる。試験が定常状態に至っていなかったことも誤差要因の一つであると考えられる。

以上より、炭化燃料混焼バーナ重油専焼条件にて解析モデルの適用性が検証できた。

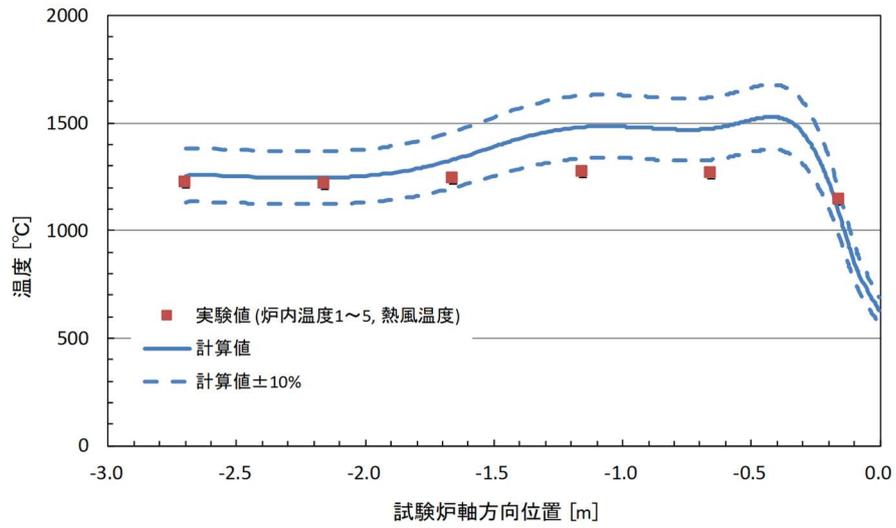


図 3.3.2-7 温度分布比較
(熱電対 4 は熱電対 3 と 5 の平均値とした)

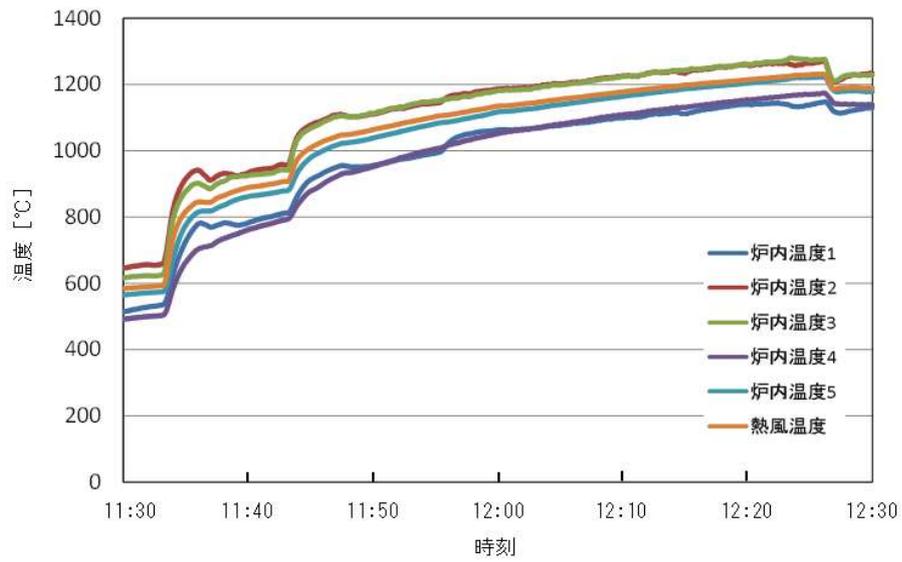


図 3.3.2-8 温度トレンド

(2) 炭化燃料混焼条件

炭化燃料混焼条件について、炉壁条件は Escape、Reflect の 2 ケース実施した。図 3.3.2-9～図 3.3.2-14 にバーナ中心断面の温度分布、CO 濃度分布、速度分布を示す。温度分布を見ると重油専焼条件の時と同様に、スロートの内側から燃烧反応が始まり、高温のガスが噴き出していることが分かる。また火炎の長さは、例えば CO 濃度 1000ppm を燃え切り位置と考えると、炉出口付近まで到達していることが分かる。

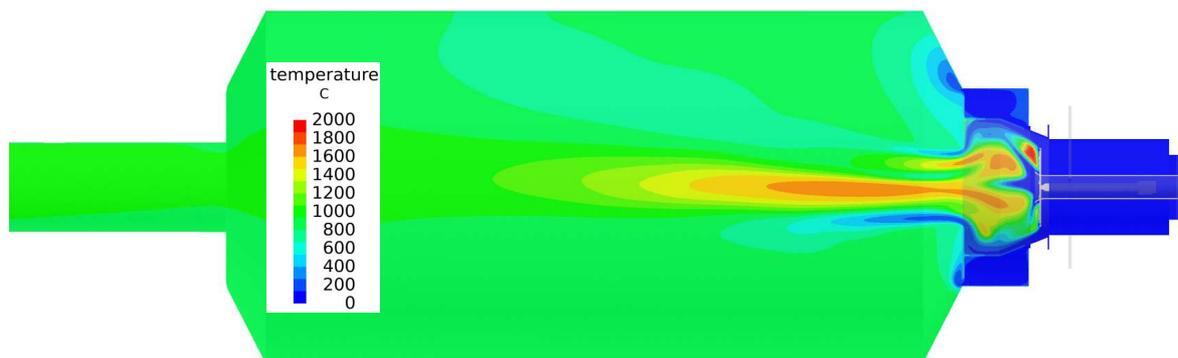


図 3.3.2-9 中心断面の温度分布 (炉壁 Escape)

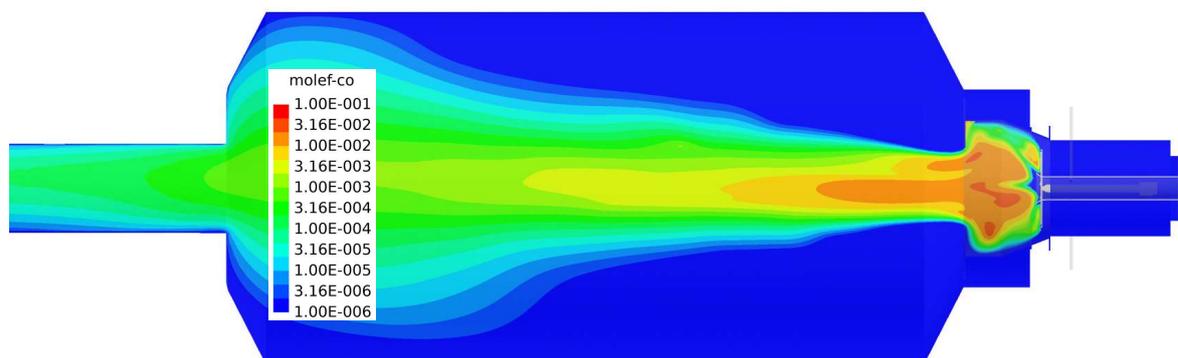


図 3.3.2-10 中心断面の CO 濃度分布 (炉壁 Escape)

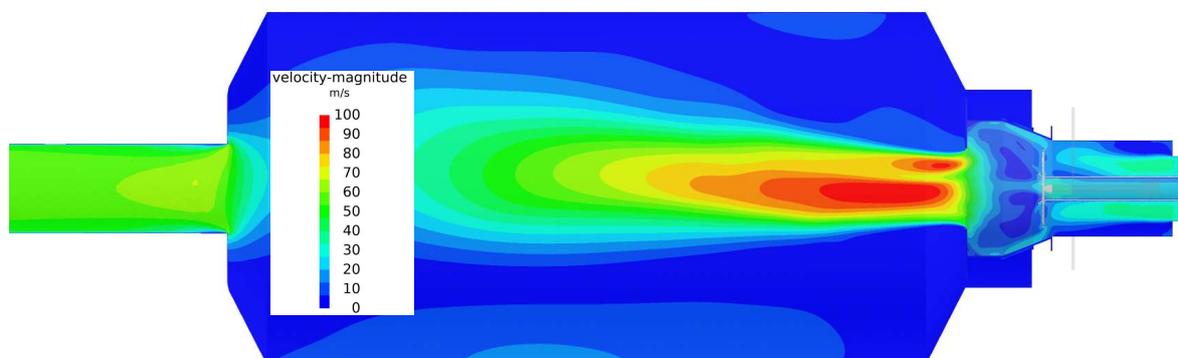


図 3.3.2-11 中心断面の速度分布 (炉壁 Escape)

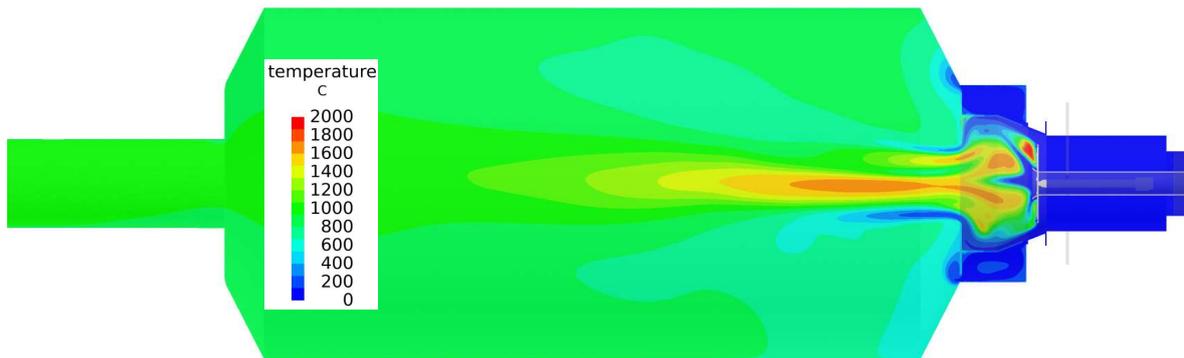


図 3.3.2-12 中心断面の温度分布 (炉壁 Reflect)

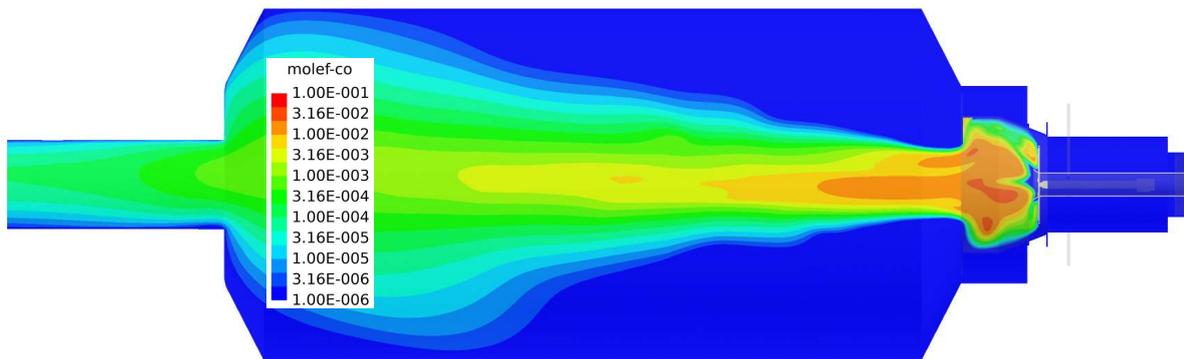


図 3.3.2-13 中心断面の CO 濃度分布 (炉壁 Reflect)

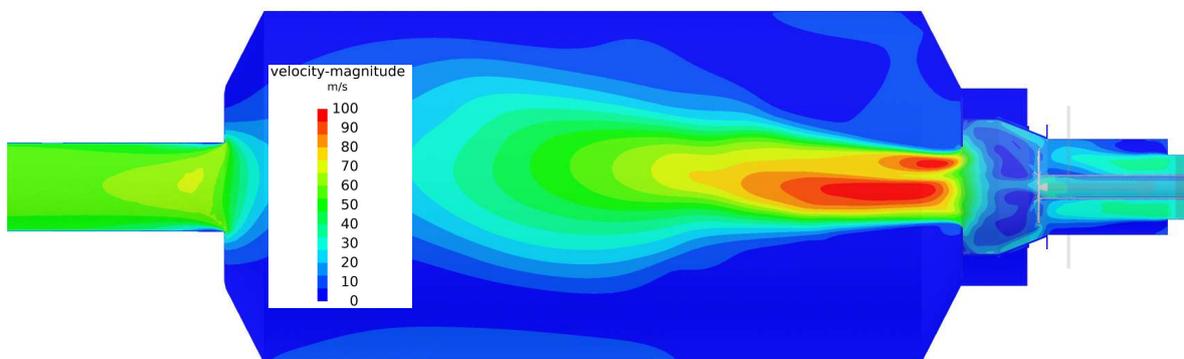


図 3.3.2-14 中心断面の速度分布 (炉壁 Reflect)

この解析結果を実際の燃焼状況と比較する。図 3.3.2-15 に視窓から観察された燃焼状況を示す。重油専焼条件より火炎が伸びており、炉出口付近まで到達していることが分かる。この燃焼状況は解析結果と一致している。



図 3.3.2-15 視窓からの燃焼状況

次に炭化燃料粒子の挙動を確認した。図 3.3.2-16 に粒子径ごとの粒子の軌跡を示す。色は粒子の密度を表す。炉壁条件は Escape のみ示す。本解析では燃焼しても粒子径は変化しないモデルとしたため、燃焼によって密度が変化することになる。赤は燃焼前、黄緑は燃焼開始、青は燃焼が終わり灰になったことを意味する。軌跡を見ると、粒子径の小さいものから順に燃焼していることが分かる。100 μm 以下の粒子径であれば全ての粒子の燃焼が完了し、灰になっている。100~300 μm では燃え残りが生じており、300 μm 以上となるとあまり燃焼していないことが分かる。また 100 μm 以下の粒子径であれば巡回エアの効果で、スロート内で粒子が分散しているものの、粒子径が大きくなるに従って巡回エアの効果が出にくくなっていることが分かる。

図 3.3.2-17 に粒子の温度を示す。この図からも粒子径の小さいものから順に燃焼していることが良く分かる。300 μm 以上の粒子径になると、スロート内でほとんど温度が上がらず、燃焼にとって悪影響であることが分かる。

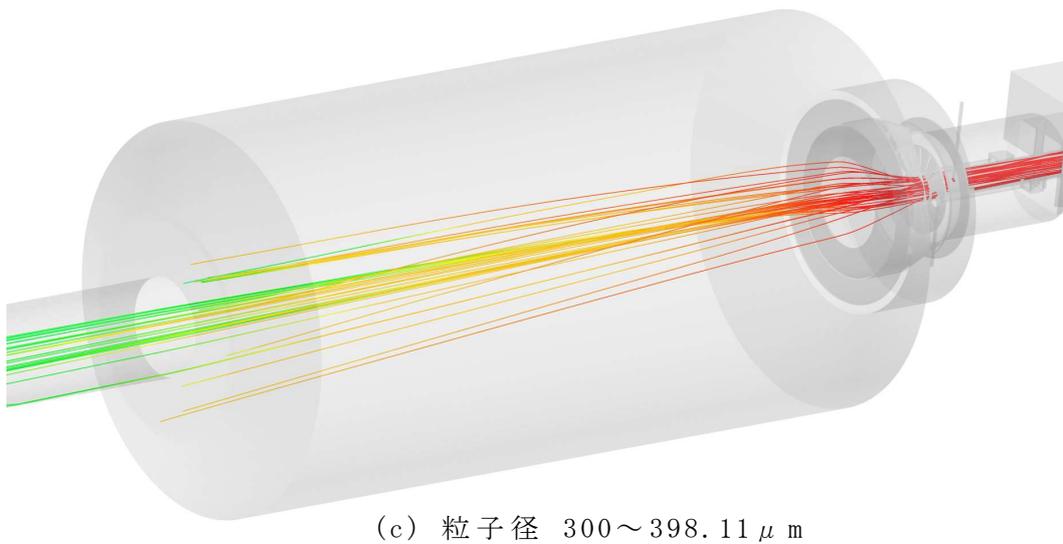
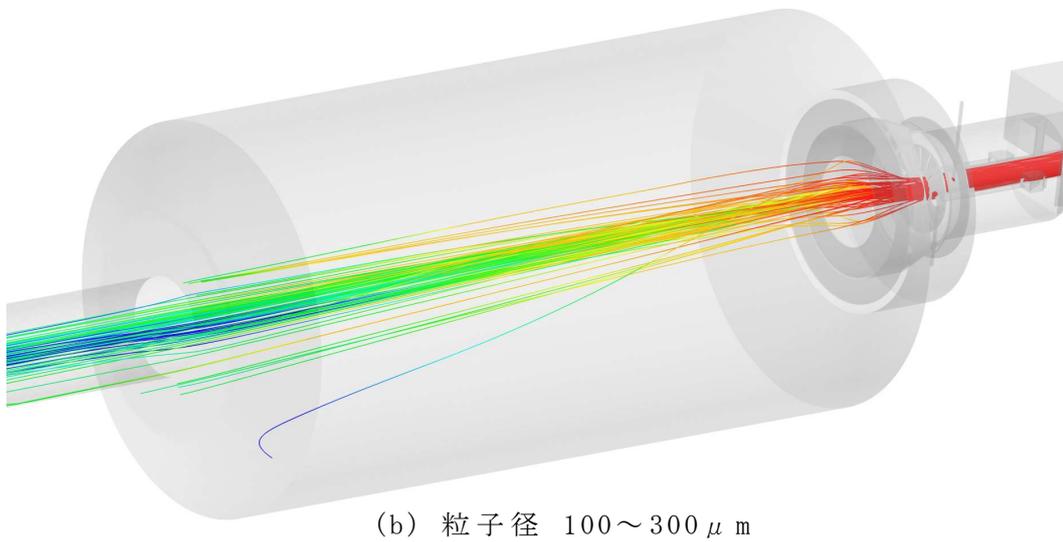
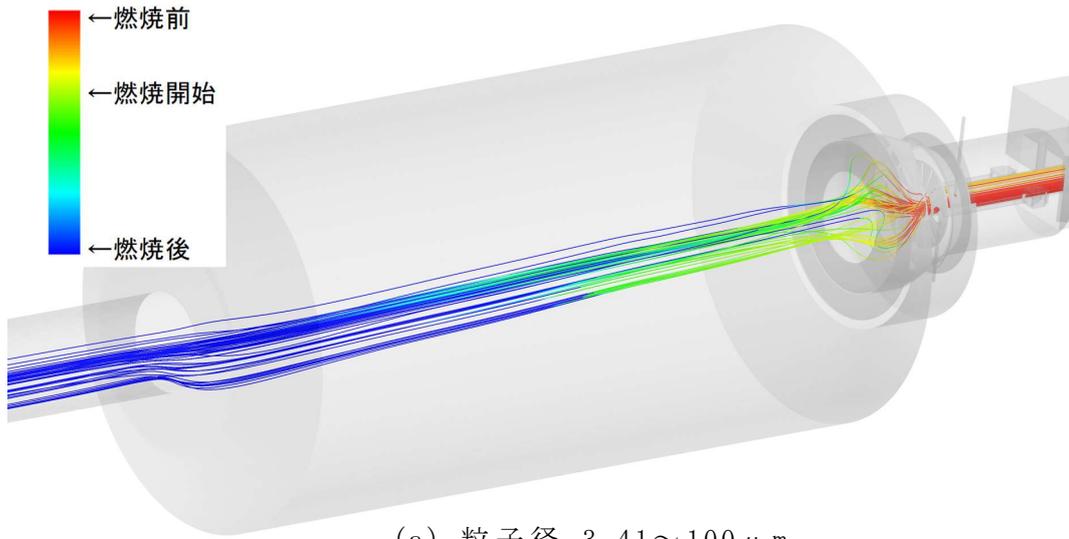


図 3.3.2-16 炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度

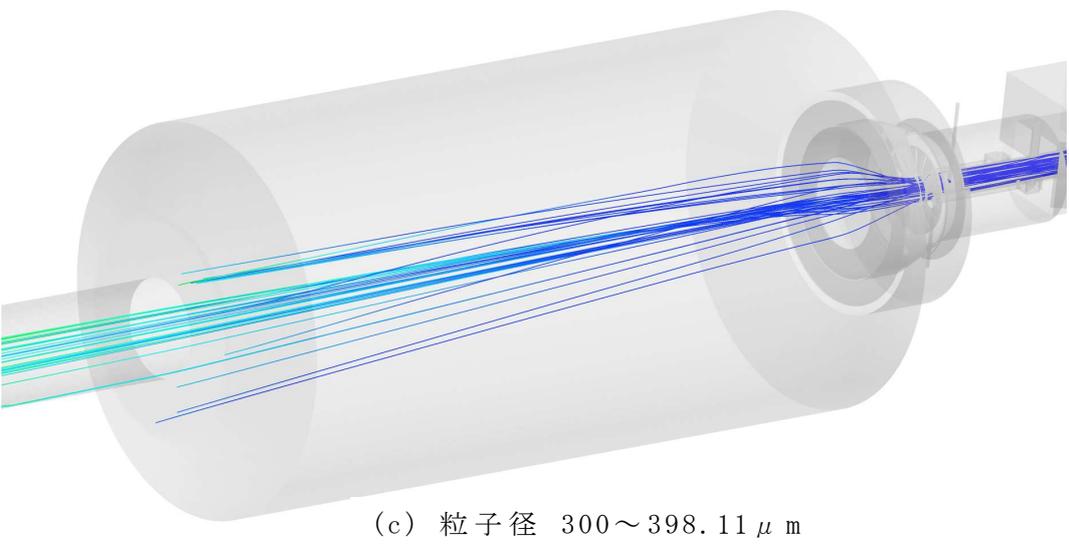
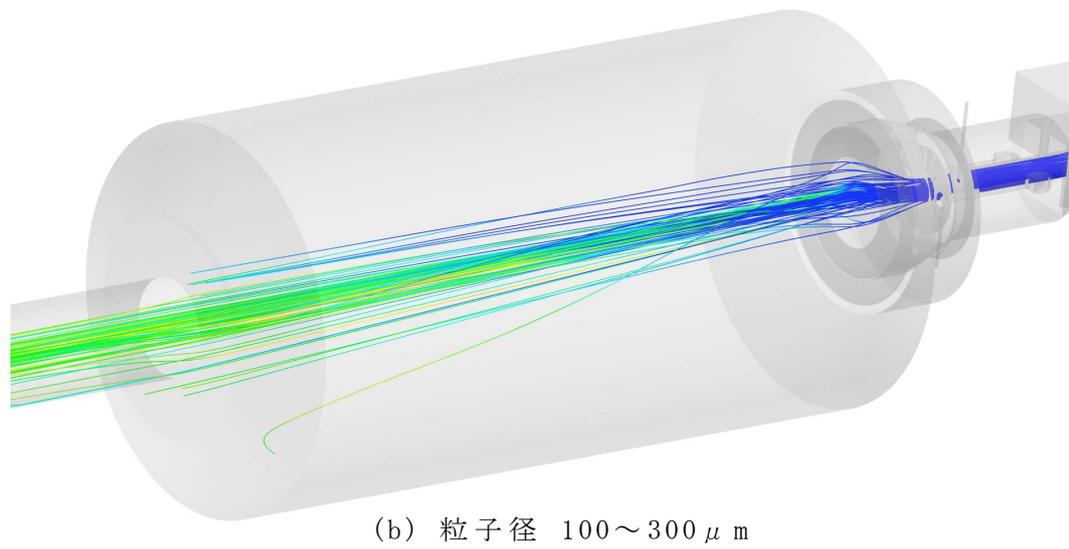
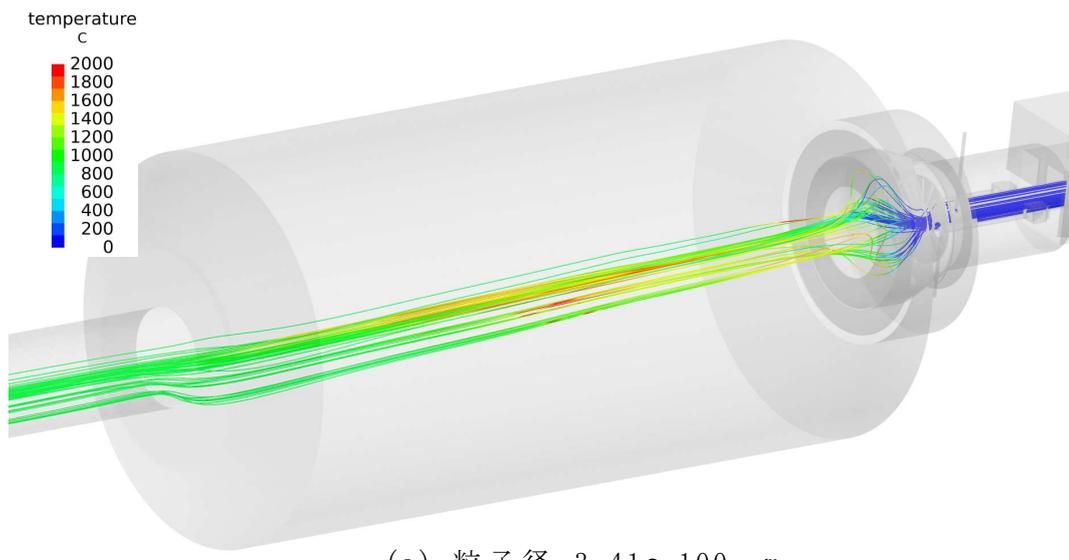


図 3.3.2-17 炭化燃料粒子の軌跡と粒子の温度

表 3.3.2-1 に炭化燃料燃焼率の比較結果を示す。試験結果と比較し、解析結果の方が高い燃焼率を示した。これは炭化燃料の粒度分布や分散性のモデル化に原因があると考えられる。後述するが、炭化燃料吹込バーナでは試験結果と同等の燃焼率が得られている。混焼バーナと吹込バーナの違いとしてスワラの有無がある。スワラが炭化燃料の分散性に与える影響については更なる検討が必要である。

表 3.3.2-1 炭化燃料燃焼率の比較

炉壁条件 Escape	炉壁条件 Reflect	試験結果
94.69%	96.91%	89.6%

最後に試験で得られた熱電対計測温度との比較を行った。図 3.3.2-18 に温度分布比較結果、図 3.3.2-19 に温度トレンドを示す。熱電対 4 は壁面近くにあるため、図 3.3.2-18 では熱電対 3 と 5 の平均値とした。グラフ中の赤プロットは熱電対計測温度、実線は解析結果を示す。両者を比較すると、目標とする±10%の誤差範囲内に概ね収まり、妥当なものと判断できる。

なお、試験結果の方がわずかに高い温度を示した原因として、熱電対下方からの火炎輻射の影響により、熱電対の測温接点部が周囲の燃焼ガス温度以上の温度を示したことが考えられる。

以上のように、炭化燃料混焼バーナ炭化燃料混焼条件にて解析モデルの適用性を検証した結果、燃焼率については課題が残り、更なる検討が必要であることが分かった。

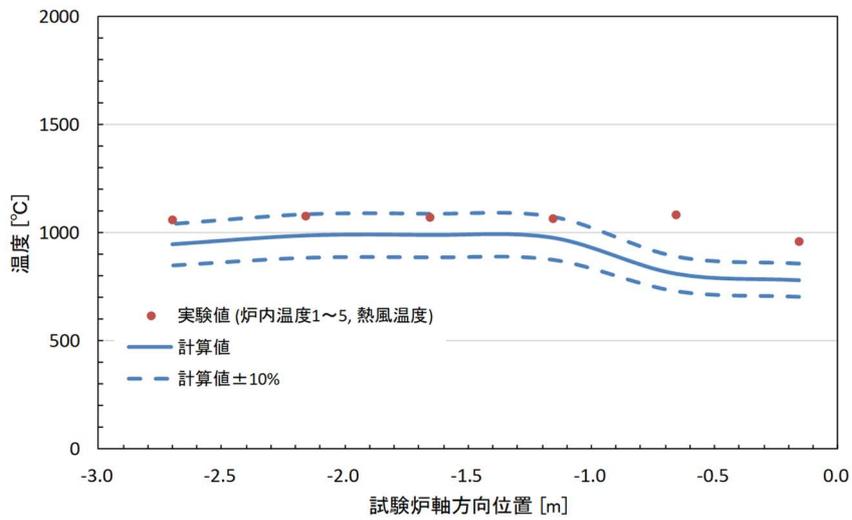
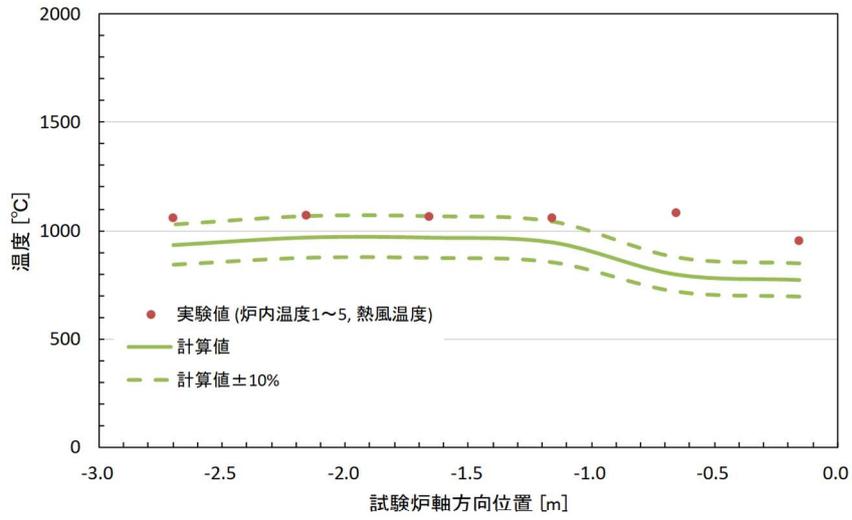


図 3.3.2-18 温度分布比較

(熱電対 4 は熱電対 3 と 5 の平均値とした)

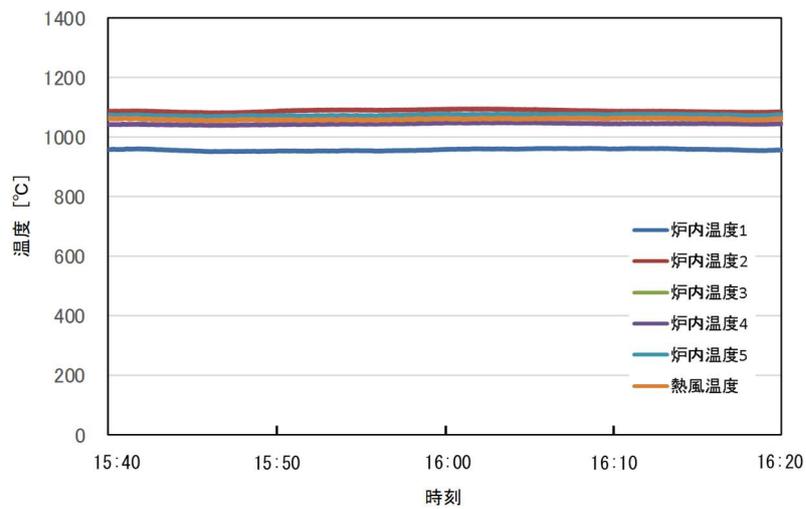


図 3.3.2-19 温度トレンド

3.4 パラメータ比較検討

炭化燃料混焼条件において、燃料粉碎、旋回エア、熱風の影響により、炭化燃料の燃焼率は変化する。それは、図 3.2.2-1 の炭化燃料粒度分布に示すように炭化燃料の塊が分離することで粒度分布が変化するためと考えられる。解析では炭化燃料の塊が途中で分離していくような計算は困難なため、噴霧試験で測定した粒度分布を用いてパラメータ比較検討を行う。粒度分布より比較検討できるのは以下となる。

熱風の影響

No.2 旋回あり・熱風なし・粉碎なし



No.21 旋回あり・熱風あり・粉碎なし

粉碎の影響

No.2 旋回あり・熱風なし・粉碎なし



No.22 旋回あり・熱風なし・粉碎あり

粒度は、No.22 < No.21 < No.2 となる。表 3.4-1 に解析条件を示す。この3ケースについて比較検討を実施した。炉壁条件は Escape、Reflect の2ケースずつとした。また空気比はほぼ同等である。

表 3.4-2 に炭化燃料燃焼率を示す。粒度分布の小さい順に No.22 > No.21 > No.2 となっている。

表 3.4-1 解析条件

No.2
D50 139 μm

RUN4-11		
重油量	120	L/h
炭化燃料量	92	kg/h(w.b)
混焼率	20.6	%
粉碎	×	
熱風(圧送)	×	
旋回エア	○	
バーナファン空気量	46.0	Nm3/min
圧送空気量	4.5	m3/min
二次空気量	6.2	m3/min
旋回空気量	1.4	Nm3/min
圧送空気温度	25	°C
空気比	2.25	-

熱電対計測温度	
炉内1	905°C
炉内2	1078°C
炉内3	1093°C
炉内4	1076°C
炉内5	1114°C
熱風温度	1115°C

No.21
D50 102 μm

RUN4-11		
重油量	120	L/h
炭化燃料量	92	kg/h(w.b)
混焼率	20.6	%
粉碎	×	
熱風(圧送)	○	
旋回エア	○	
バーナファン空気量	46.0	Nm3/min
圧送空気量	4.8	m3/min
二次空気量	6.2	m3/min
旋回空気量	1.4	Nm3/min
圧送空気温度	80	°C
空気比	2.26	-

熱電対計測温度	
炉内1	908°C
炉内2	1082°C
炉内3	1100°C
炉内4	1065°C
炉内5	1116°C
熱風温度	1134°C

No.22
D50 89 μm

RUN4-13		
重油量	120	L/h
炭化燃料量	75	kg/h(w.b)
混焼率	20.3	%
粉碎	○	
熱風(圧送)	×	
旋回エア	○	
バーナファン空気量	47.0	Nm3/min
圧送空気量	5.4	m3/min
二次空気量	5.7	m3/min
旋回空気量	1.4	Nm3/min
圧送空気温度	25	°C
空気比	2.34	-

熱電対計測温度	
炉内1	959°C
炉内2	1085°C
炉内3	1064°C
炉内4	1045°C
炉内5	1076°C
熱風温度	1061°C

表 3.4-2 炭化燃料燃焼率

	粉碎有無		
	熱風有無		
	RUN4-11	RUN4-11	RUN4-13
試験条件	旋回有、熱風無、粉碎無	旋回有、熱風有、粉碎無	旋回有、熱風無、粉碎有
粒度分布	No.2	No.21	No.22
炉壁条件 Escape	70.91%	92.94%	94.69%
炉壁条件 Reflect	79.45%	94.17%	96.91%

結果の比較のため、条件ごとの炭化燃料粒子の燃焼状況を比較した。図 3.4-1、3.4-2 に粒子径ごとの炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度を示す。条件ごとに粒子の表示割合は全て統一したため、流線の多さが流量の多さを意味する。炉壁条件は Escape のみ示す。図 3.3.2-16、3.3.2-17 に示した No.22 と比較すると、粒子径ごとの傾向はほぼ同じであることが分かる。3 ケースを比較すると、 $100\mu\text{m}$ 以下は問題なく燃焼、 $100\sim 300\mu\text{m}$ は燃焼中、 $300\mu\text{m}$ 以上は燃焼前か燃焼し始めという傾向が全ケースで確認できる。また粒子径が大きくなるにつれて、燃焼炉の後壁に衝突する粒子が増えており、巡回エアの効果も出にくくなっている。さらに図 3.2.2-1 から分かるように No.2 では $400\mu\text{m}$ 以上の炭化燃料の塊が存在しており、図 3.4-1 からそれらはほとんど燃焼していない。No.21 熱風や No.22 粉碎により $400\mu\text{m}$ 以上の炭化燃料の塊は分離し存在しなくなるため、燃焼率は大幅に増加したと考えられる。

ある粒度の区間内であれば、条件によらず炭化燃料粒子の燃焼状況に違いがないことから、空気比一定の場合、炭化燃料の燃焼率にはパラメータの有無による燃焼室入口での粒度分布の違いが大きく影響していることが分かる。また本解析により、パラメータ 3 つの内の 2 つのパラメータを無にすると燃焼率が悪くなるが、1 つのパラメータの削減は可能であることが示唆され、燃焼試験でも同様の現象が確認された。

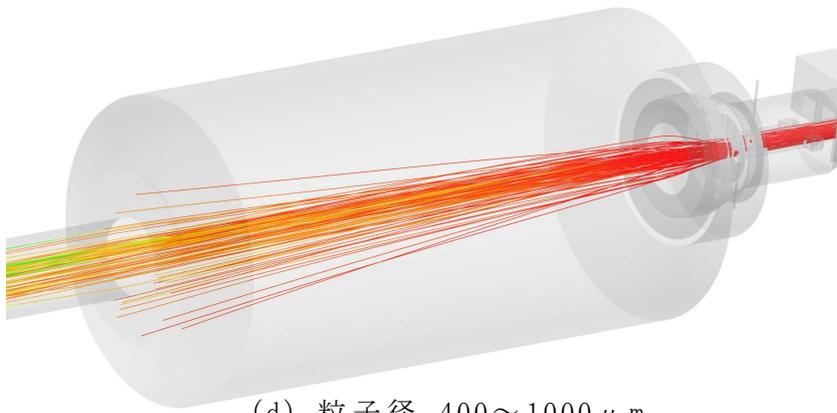
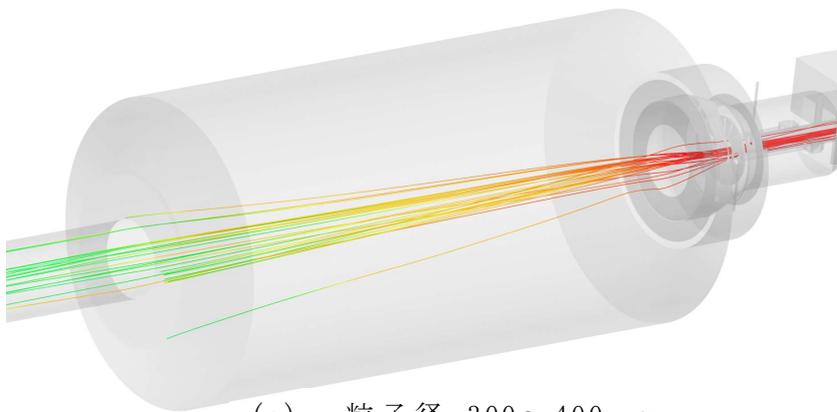
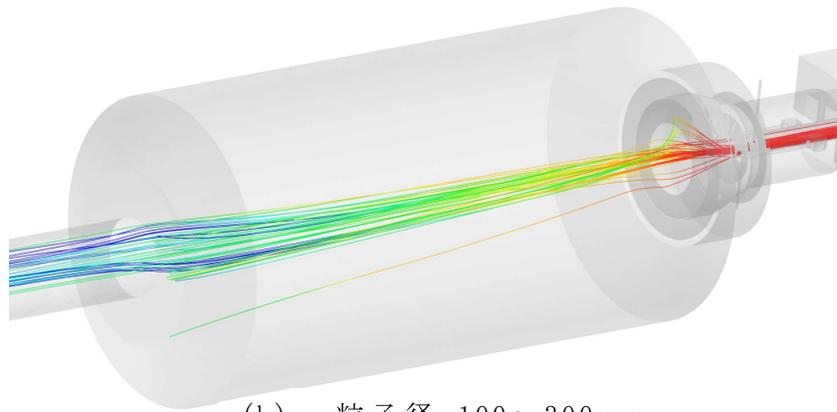
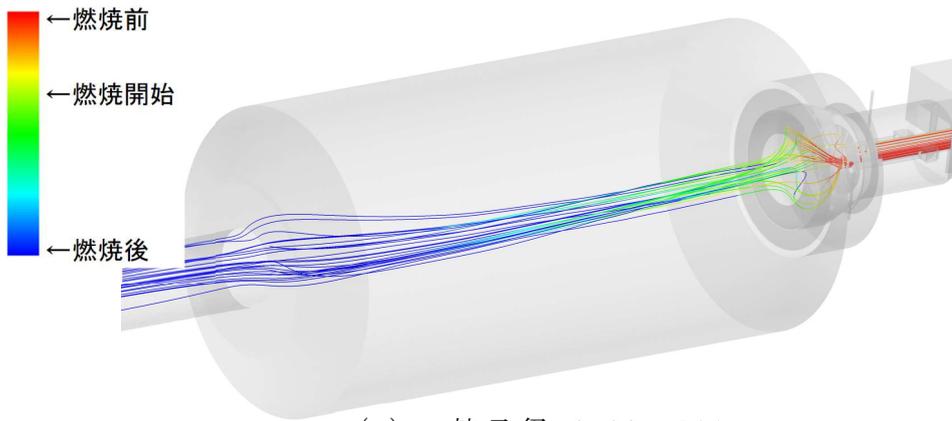
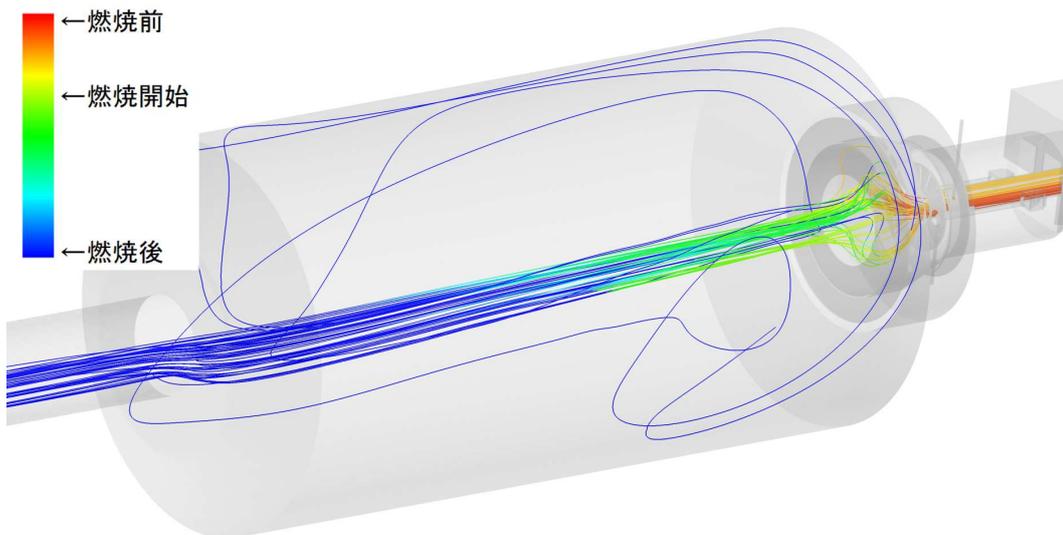
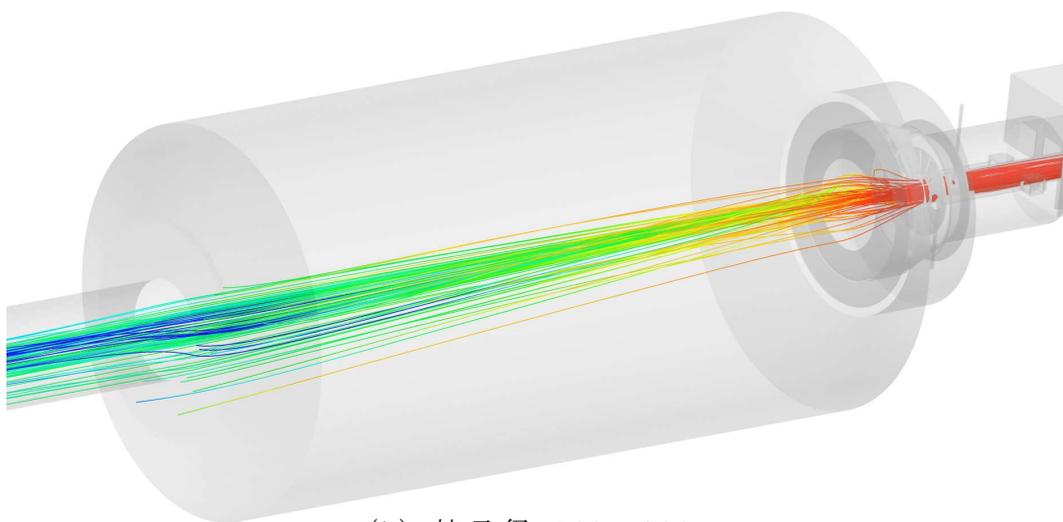


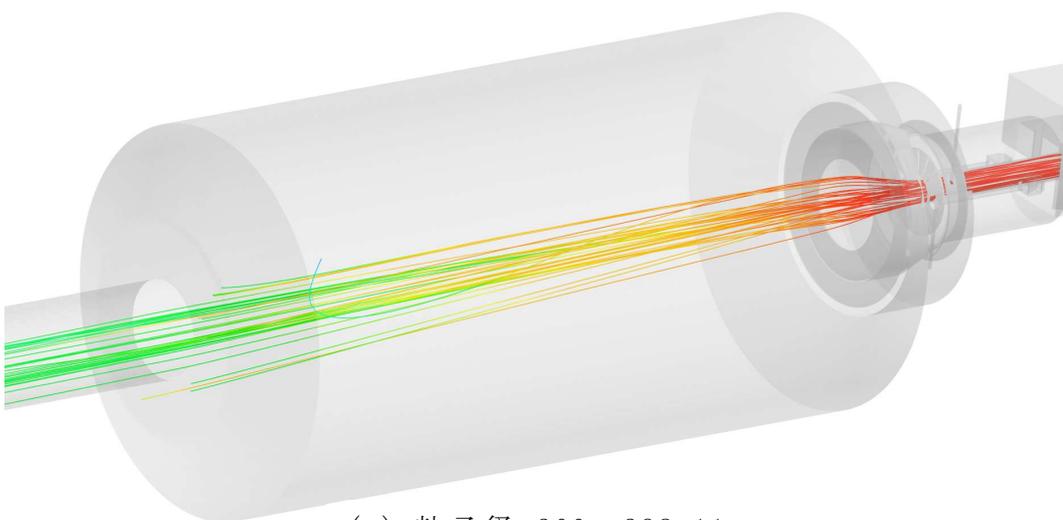
図 3.4-1 炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度 (No.2)



(a) 粒子径 $3.98 \sim 100 \mu\text{m}$



(b) 粒子径 $100 \sim 300 \mu\text{m}$



(c) 粒子径 $300 \sim 398.11 \mu\text{m}$

図 3.4-2 炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度 (No. 21)

3.5 吹込バーナ燃焼試験解析

解析対象とした炭化燃料吹込バーナの3次元モデルを図3.5-1に示す。炭化燃料はロータリーバルブから落下投入された後、圧送配管内を空気搬送され、途中、旋回用エアにより強い旋回を与えた後に吹込ノズル出口に設けられたスワラを通過し、炉内に噴出する。吹込バーナの設置角度は重油バーナに対して 33.6° 傾いている。また、試験と同様にスロート冷却用の二次空気もモデル化した。噴出された炭化燃料は、形成された重油火炎を通過することで水分蒸発、脱揮発過程を経てチャー燃焼し、混焼火炎を形成する。

解析メッシュは全てポリヘドรามメッシュで構成し、総メッシュ数は約600万である。

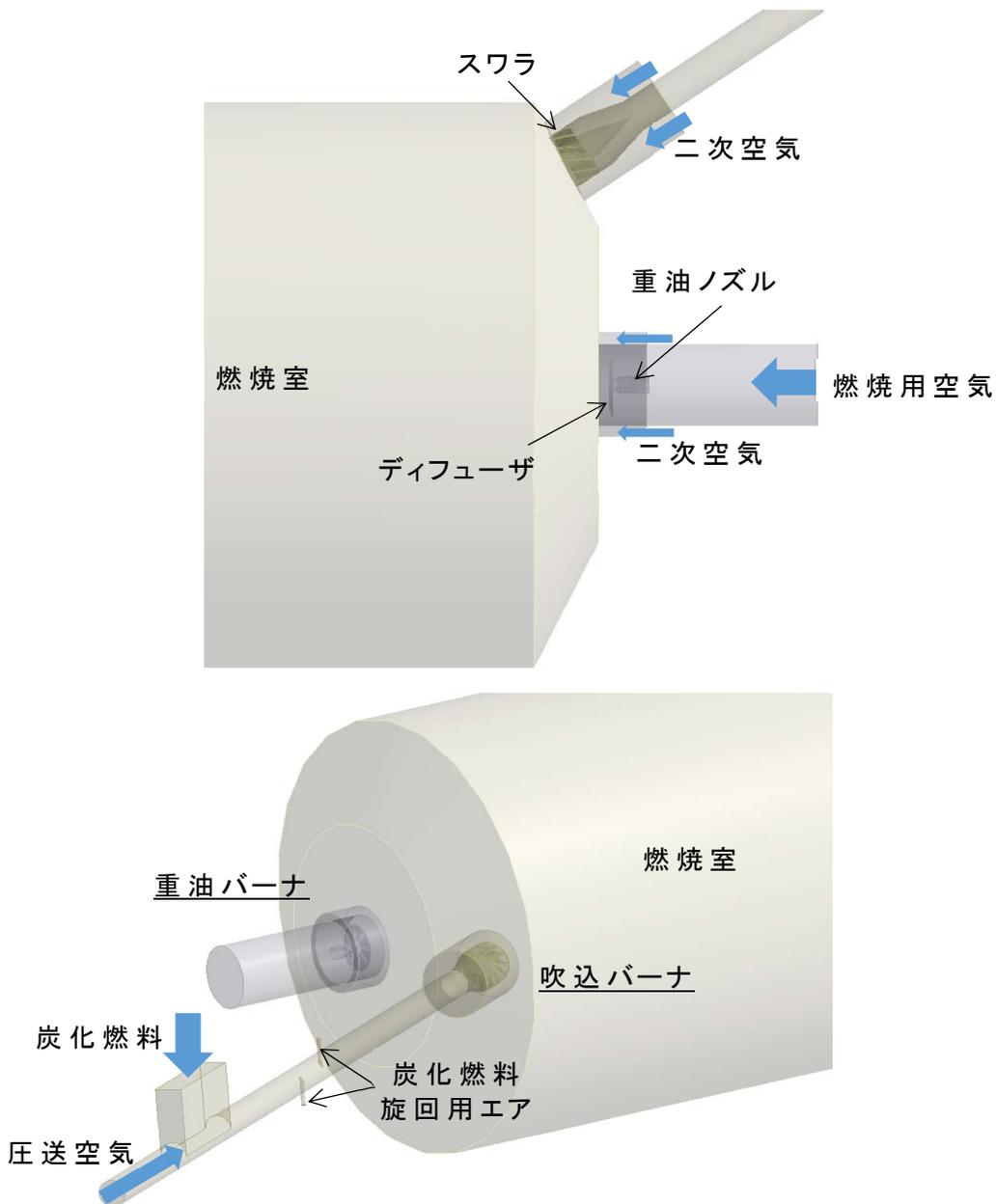


図 3.5-1 解析形状モデル

3.6 解析条件

表 3.6-1 に解析条件を示す。燃料の投入量や空気流量は試験結果と同様の値を使って解析した。重油専焼条件としては RUN3-5 の試験結果を検証に用いた。また炭化燃料混焼条件としては RUN3-11 の 20%混焼、粉碎なし、熱風あり、旋回ありの試験結果を検証に用いた。

重油組成は発熱量がほぼ同等となるよう Fluent に設定されている $C_{10}H_{22}$ を用いた。なお、吹込バーナ用の重油バーナは空気流速が高いため、燃料の燃え切りを早め、バーナ近傍の温度をより詳細に検討する必要がある、燃焼反応は CO を考慮しない一段総括反応とした。

表 3.6-1 解析条件

(a) 重油専焼条件

RUN3-5			熱電対計測温度	
重油量	150	L/h	炉内1	972°C
炭化燃料量	0	kg/h(w.b)	炉内2	1096°C
バーナファン空気量	29.5	Nm ³ /min	炉内3	1144°C
圧送空気量	6.5	m ³ /min	炉内4	1079°C
二次空気量	13.3	m ³ /min	炉内5	1126°C
旋回空気量	1.43	Nm ³ /min	熱風温度	1126°C
圧送空気温度	35	°C		
空気比	2.01	-		

(b) 炭化燃料混焼条件

RUN3-11			熱電対計測温度	
重油量	120	L/h	炉内1	1042°C
炭化燃料量	93.9	kg/h(w.b)	炉内2	1136°C
混焼率	20	%	炉内3	1150°C
粉碎	×		炉内4	1096°C
熱風(圧送)	○		炉内5	1123°C
旋回エア	○		熱風温度	1114°C
バーナファン空気量	25.0	Nm ³ /min		
圧送空気量	6.0	m ³ /min		
二次空気量	15.4	m ³ /min		
旋回空気量	1.43	Nm ³ /min		
圧送空気温度	80	°C		
空気比	1.88	-		

3.7 解析検証

3.7.1 検証方法

解析モデルの適用性検証は、試験で得られた炉内熱電対計測温度、炭化燃料の燃焼率を基に試験結果との比較検討により実施した。図 3.7.1-1 に熱電対設置位置を示す。設置位置は混焼バーナと同様とした。

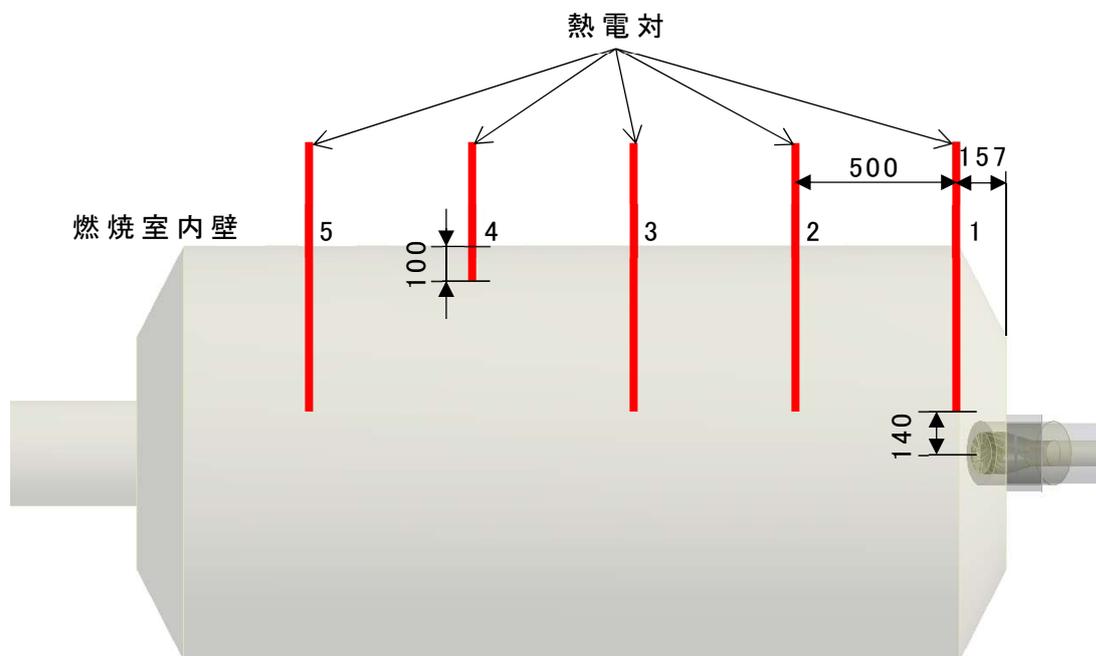


図 3.7.1-1 熱電対設置位置

3.7.2 検証結果

(1) 重油専焼条件

図 3.7.2-1 から図 3.7.2-3 にバーナ中心断面の温度分布、速度分布、重油液滴粒子の噴霧軌跡を示す。混焼バーナと比較すると細長い温度分布となっている。

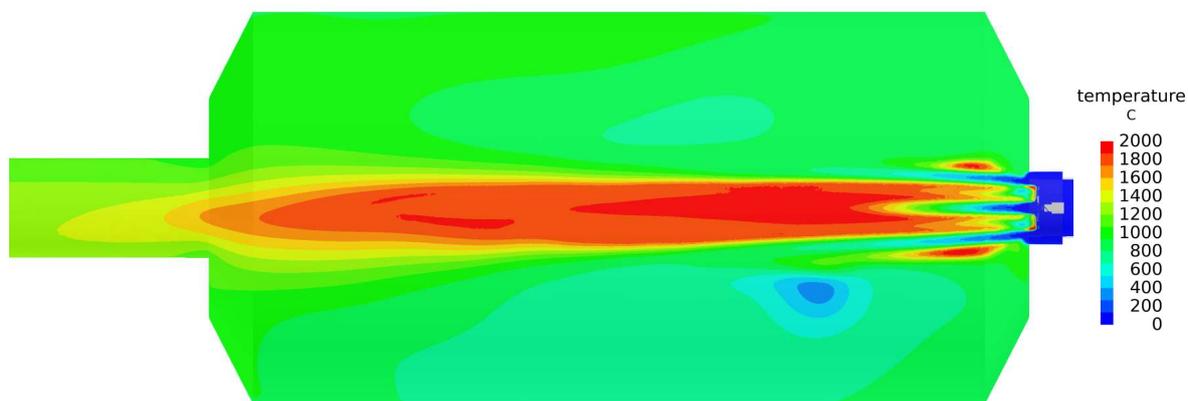


図 3.7.2-1 中心断面の温度分布

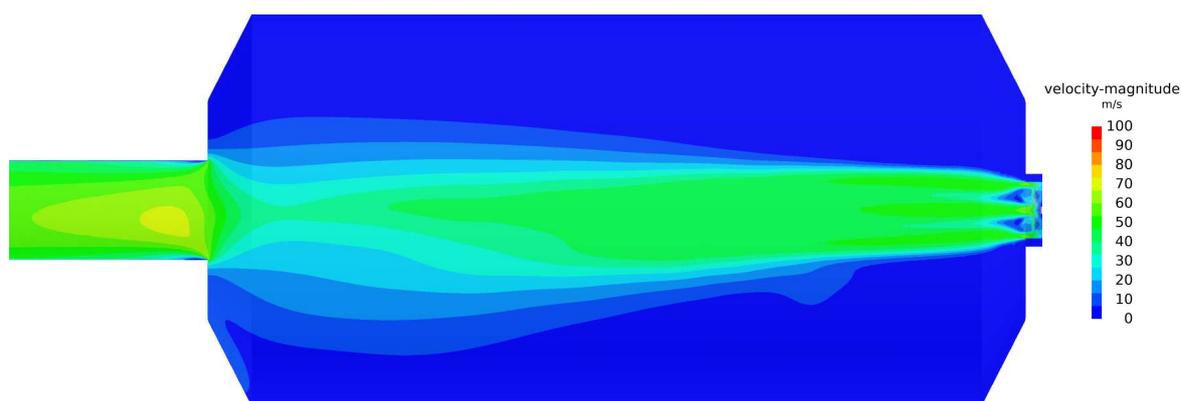


図 3.7.2-2 中心断面の速度分布

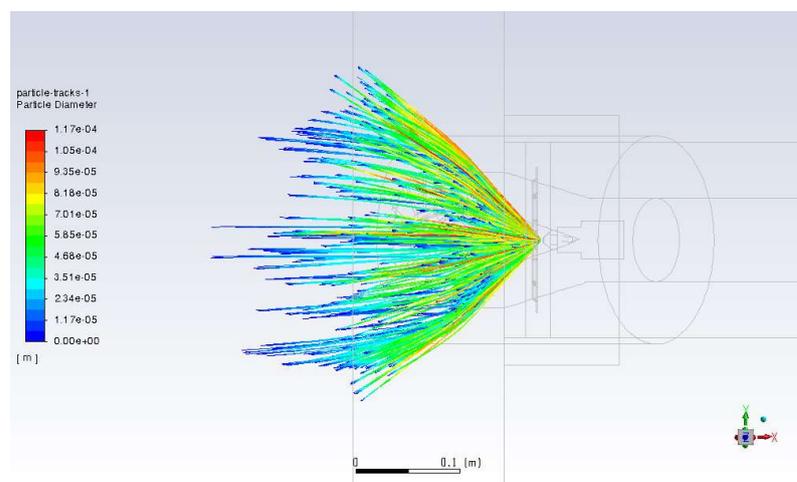


図 3.7.2-3 重油液滴粒子の噴霧軌跡

次に試験で得られた熱電対計測温度との比較を行った。図 3.7.2-4 に温度分布比較結果、図 3.7.2-5 に温度トレンドを示す。熱電対 4 は壁面近くにあるため、図 3.7.2-4 では熱電対 3 と 5 の平均値とした。グラフ中の赤プロットは熱電対計測温度、青線は解析結果を示す。両者を比較すると、目標とする ± 10% の誤差範囲内に概ね収まり、妥当なものと判断できる。

なお、誤差の原因として、熱電対下方からの火炎輻射や上方からの冷輻射の影響が考えられる。

以上より、炭化燃料吹込バーナ重油専焼条件にて解析モデルの適用性が検証できた。

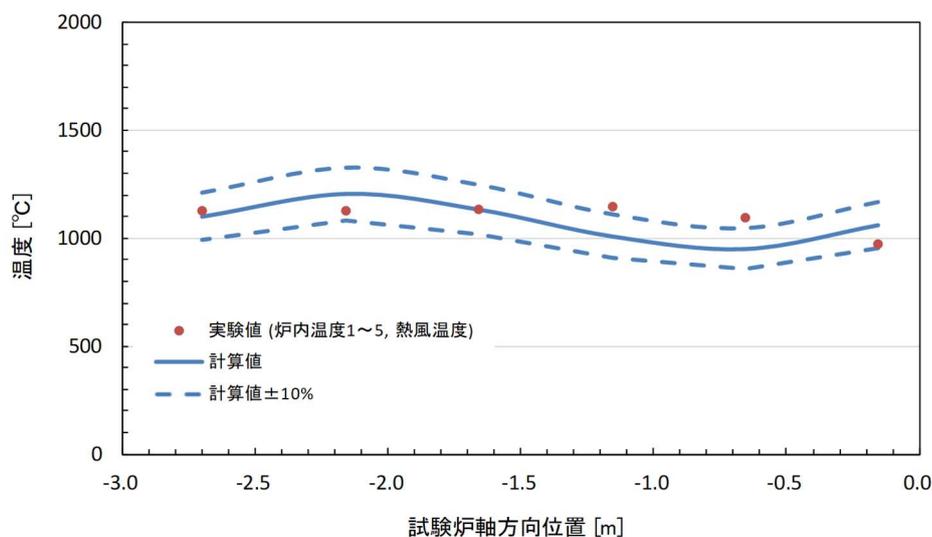


図 3.7.2-4 温度分布比較
(熱電対 4 は熱電対 3 と 5 の平均値とした)

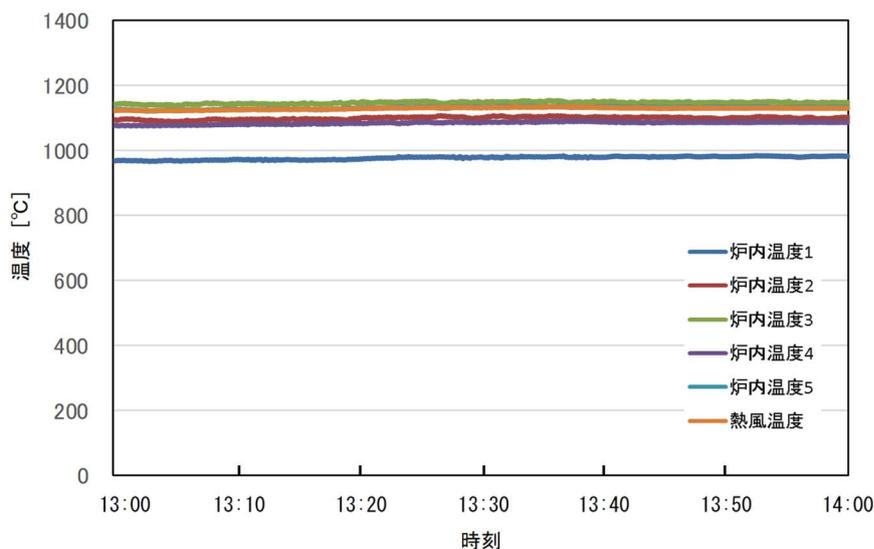


図 3.7.2-5 温度トレンド

(2) 炭化燃料混焼条件

炭化燃料混焼条件について、炉壁条件は Escape、Reflect の 2 ケース実施した。図 3.7.2-6～図 3.7.2-11 にバーナ中心断面の温度分布、速度分布、揮発分濃度分布を示す。重油専焼条件とあまり変化がないことが分かる。また揮発分濃度分布を見ると、スワラと旋回エアの効果により、炭化燃料が炉内に広く分散して燃焼していることが分かる。また、特に下方に揮発分が偏っているのは、スワラの旋回方向が右旋回であることが要因である。

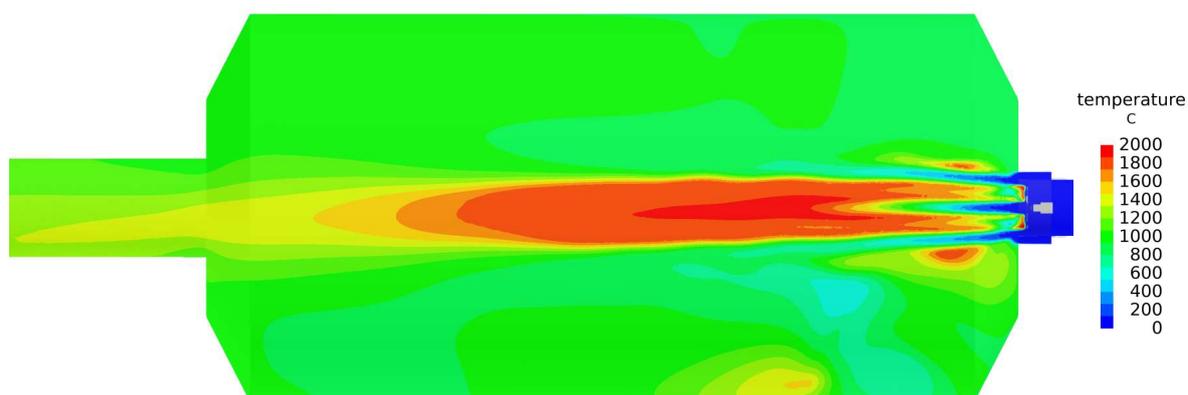


図 3.7.2-6 中心断面の温度分布 (炉壁 Escape)

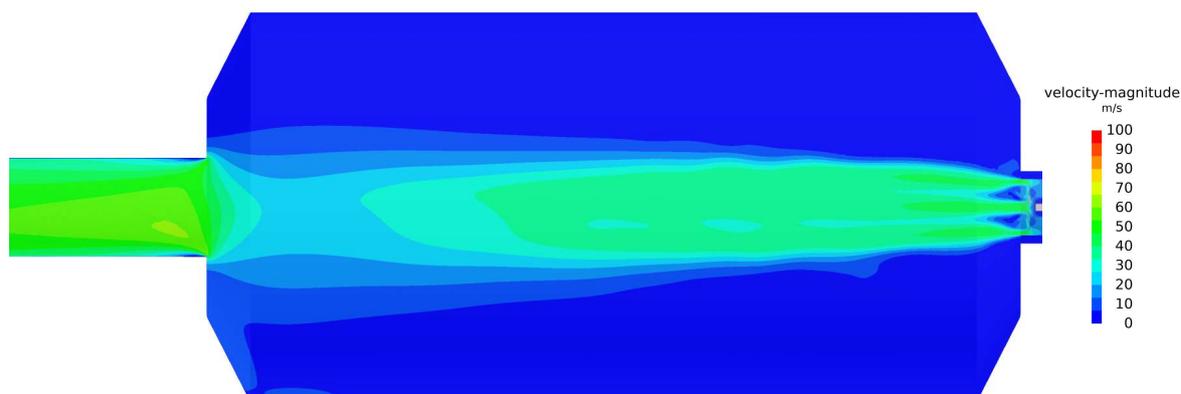


図 3.7.2-7 中心断面の速度分布 (炉壁 Escape)

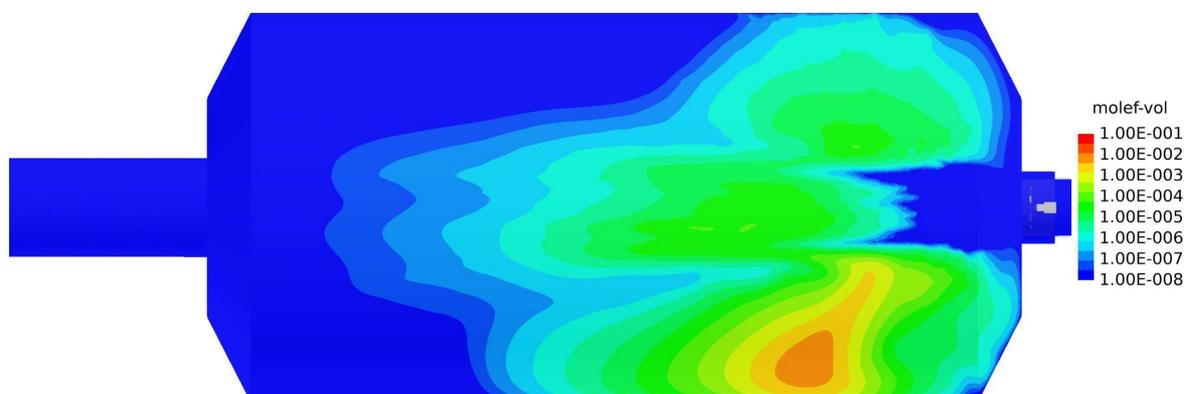


図 3.7.2-8 中心断面の揮発分濃度分布 (炉壁 Escape)

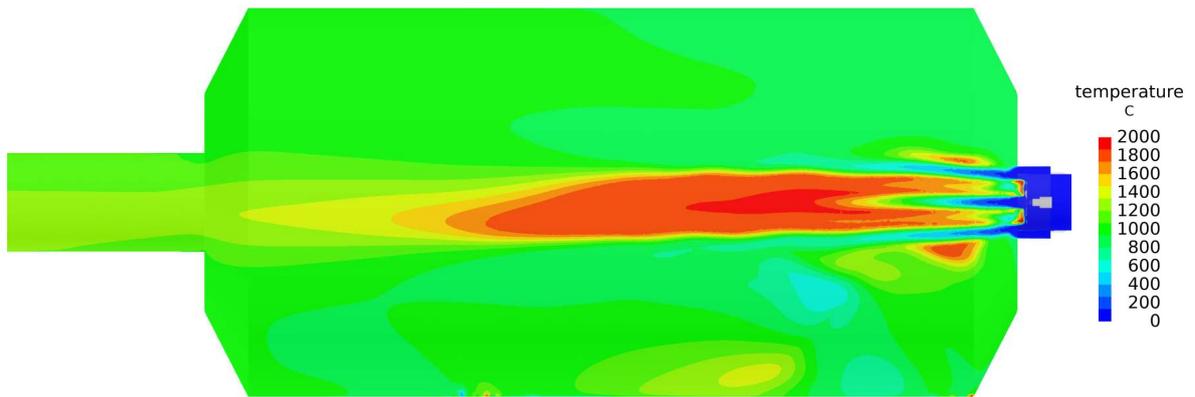


図 3.7.2-9 中心断面の温度分布 (炉壁 Reflect)

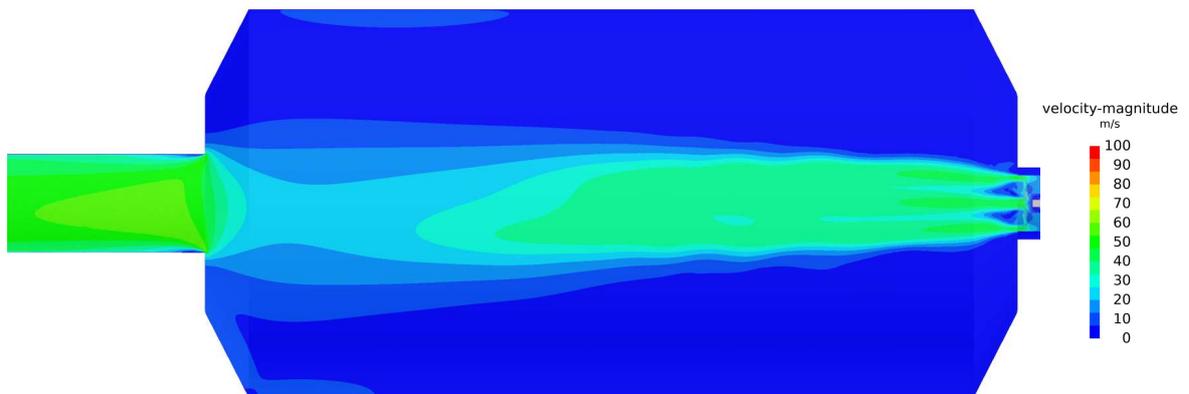


図 3.7.2-10 中心断面の速度分布 (炉壁 Reflect)

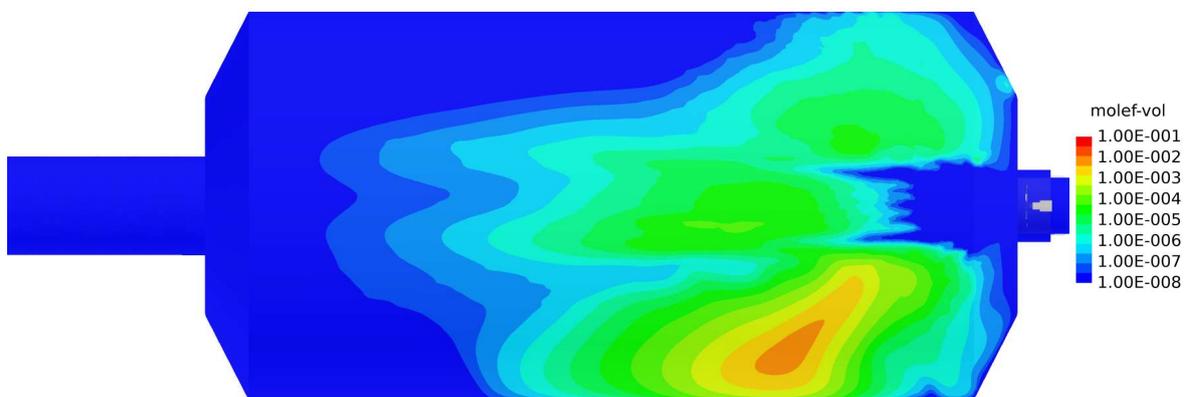
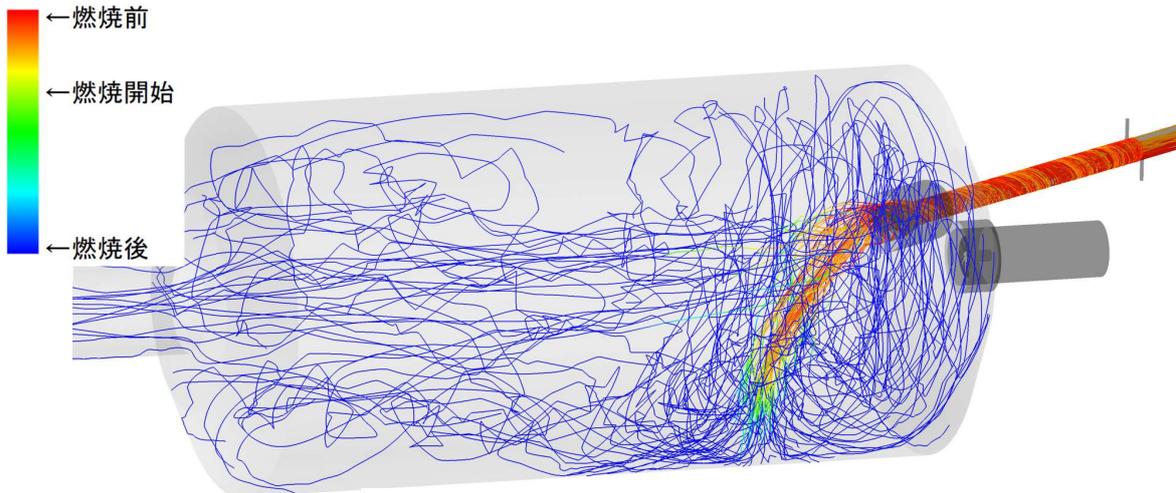
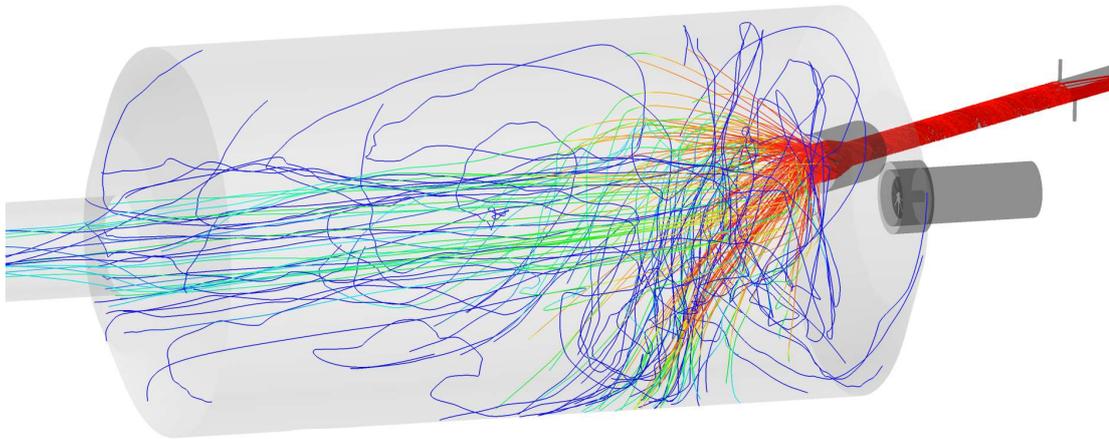


図 3.7.2-11 中心断面の揮発分濃度分布 (炉壁 Reflect)

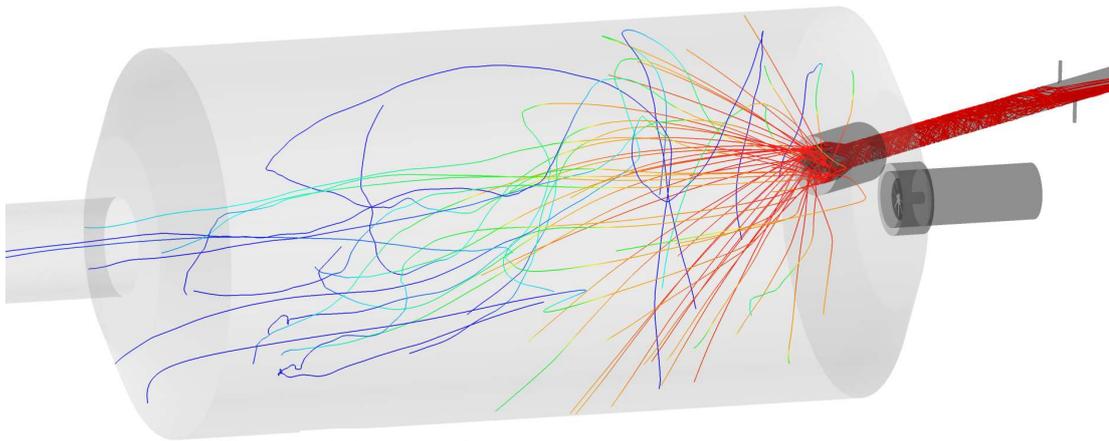
次に炭化燃料粒子の挙動を確認した。図 3.7.2-12、3.7.2-13 に粒子径ごとの炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度を示す。スワラと旋回エアの効果により粒子が炉内によく分散していることが分かる。混焼バーナと比較すると差は明確である。また前述のように、炉の下方方向へ流れる粒子が比較的多いことが分かる。粒子径ごとに見ると $100\ \mu\text{m}$ 以下は問題なく燃焼するものの、 $100\sim 300\ \mu\text{m}$ でかなり燃えが悪くなり燃え残りが生じている。 $300\ \mu\text{m}$ 以上では多くの粒子が壁面に衝突し、炉出口まで到達しにくくなっている。



(a) 粒子径 $3.41 \sim 100 \mu\text{m}$

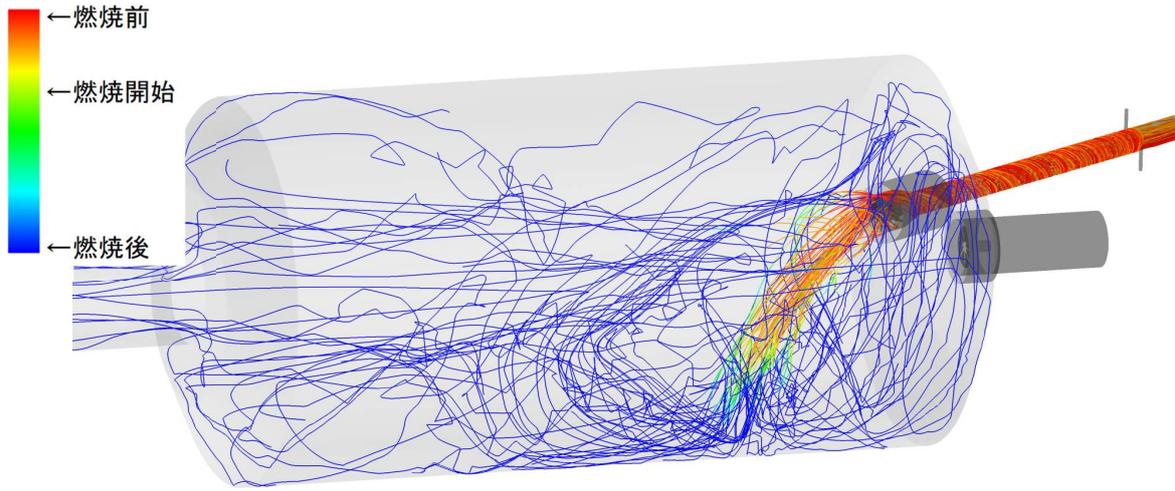


(b) 粒子径 $100 \sim 300 \mu\text{m}$

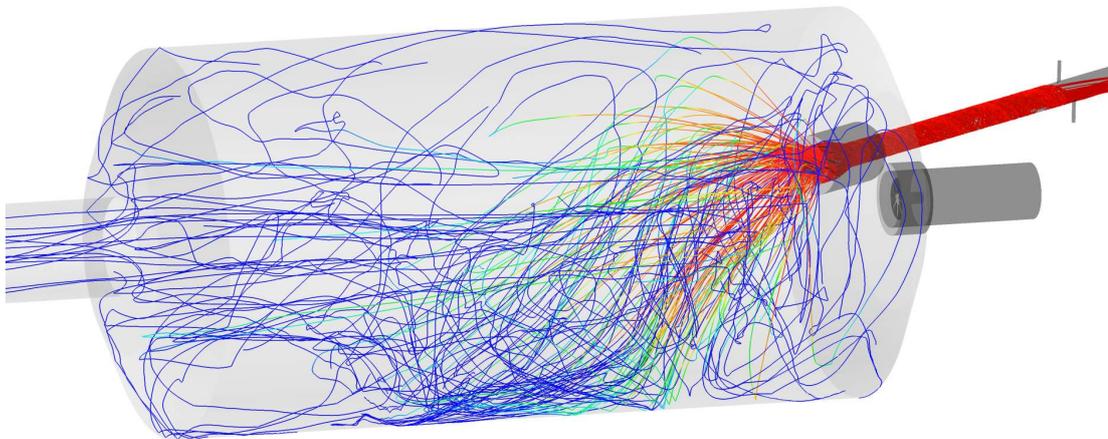


(c) 粒子径 $300 \sim 398.11 \mu\text{m}$

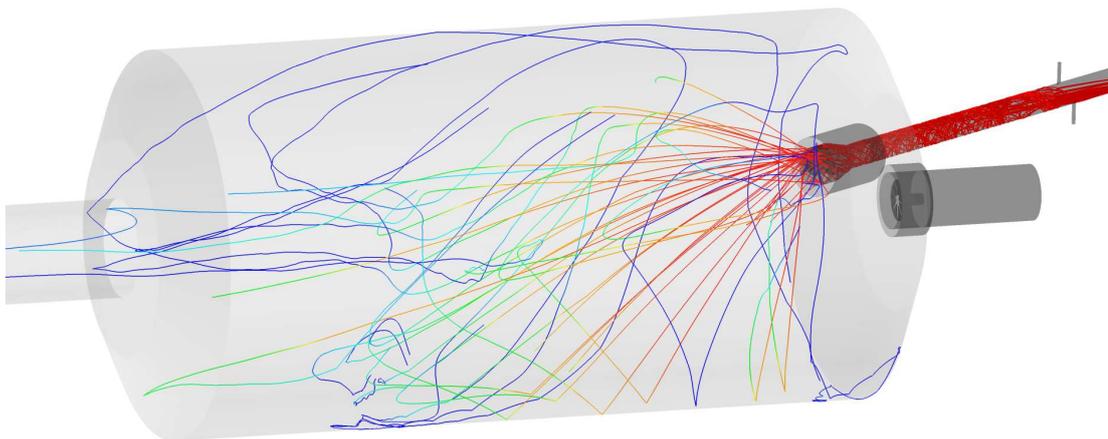
図 3.7.2-12 炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度 (炉壁 Escape)



(a) 粒子径 $3.41 \sim 100 \mu\text{m}$



(b) 粒子径 $100 \sim 300 \mu\text{m}$



(c) 粒子径 $300 \sim 398.11 \mu\text{m}$

図 3.7.2-13 炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度 (炉壁 Reflect)

この解析結果を実際の燃焼状況と比較する。図 3.7.2-14 に炉出口から上流方向を撮影した燃焼状況を示す。炭化燃料は炉内に進入後、すぐに燃焼開始するわけではなく、燃焼前の粒子が黒い筋になって見えている。この燃焼状況は解析結果と一致している。



図 2.7.2-14 燃焼状況

表 3.7.2-1 に炭化燃料燃焼率の比較結果を示す。試験結果と 2 つの解析条件結果平均値で同程度の燃焼率が得られた。

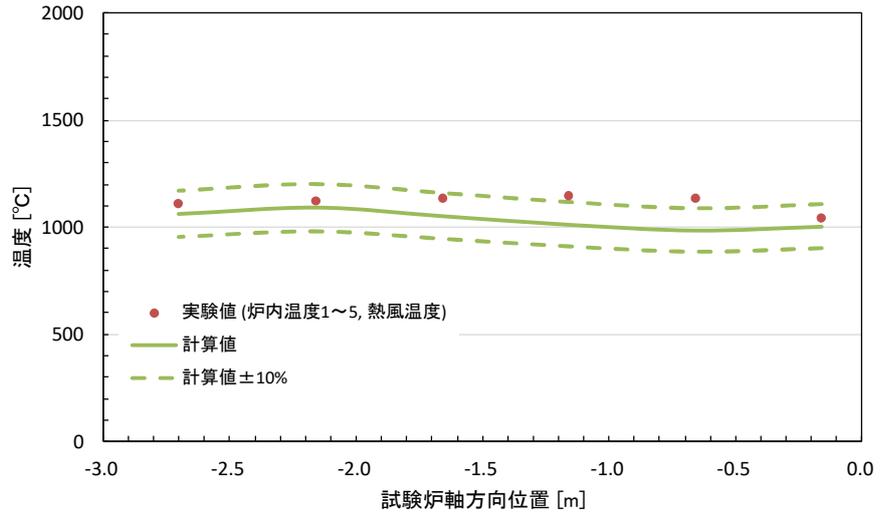
表 3.7.2-1 炭化燃料燃焼率の比較

炉壁条件 Escape	炉壁条件 Reflect	試験結果
91.75%	99.15%	95.0%

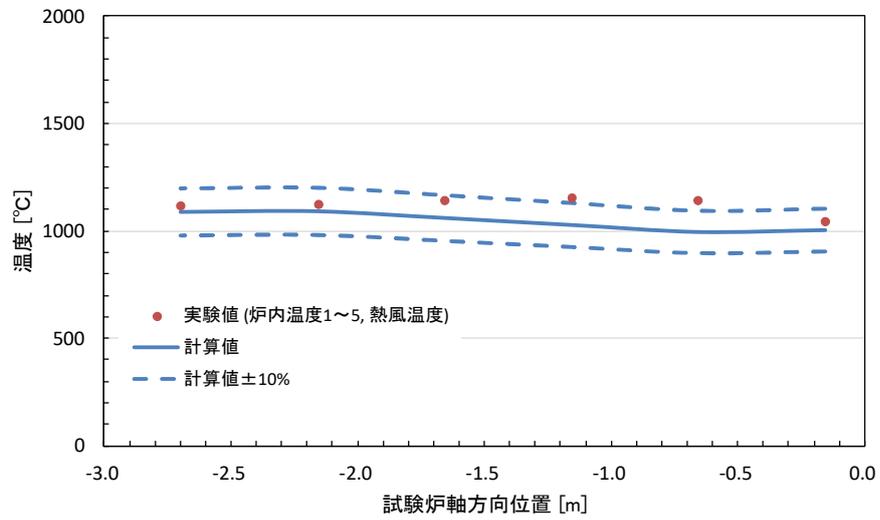
最後に試験で得られた熱電対計測温度との比較を行った。図 3.7.2-15 に温度分布比較結果、図 3.3.2-16 に温度トレンドを示す。熱電対 4 は壁面近くにあるため、図 3.7.2-15 では熱電対 3 と 5 の平均値とした。グラフ中の赤プロットは熱電対計測温度、実線は解析結果を示す。両者を比較すると、目標とする $\pm 10\%$ の誤差範囲内に概ね収まり、妥当なものと判断できる。

なお、誤差の原因として、熱電対下方からの火炎輻射や上方からの冷輻射の影響が考えられる。

以上より炭化燃料吹込バーナ炭化燃料混焼条件にて解析モデルの適用性が検証できた。



(a) 炉壁 Escape



(b) 炉壁 Reflect

図 3.7.2-15 温度分布比較

(熱電対 4 は熱電対 3 と 5 の平均値とした)

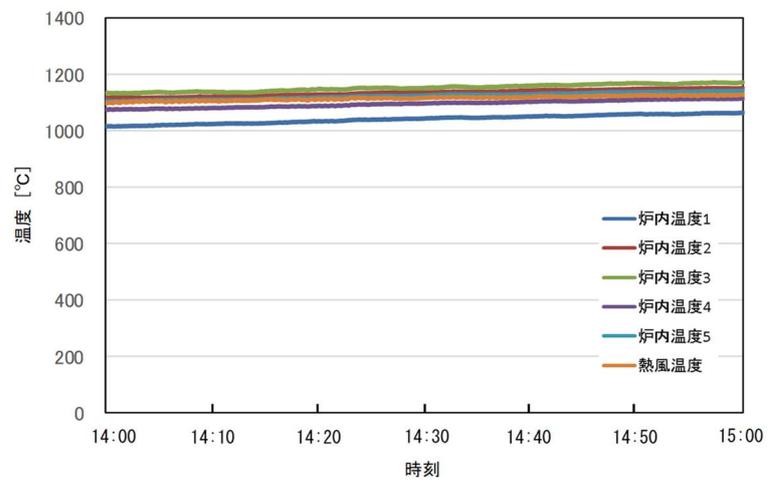


図 3.7.2-16 温度トレンド

3.8 パラメータ比較検討

混焼バーナと同様に、No. 2、No. 21、No. 22 について比較検討を実施した。空気比はほぼ同等である。表 3.8-1 に解析条件、表 3.8-2 に炭化燃料燃焼率を示す。燃焼率は粒度分布の小さい順に $\text{No. 22} > \text{No. 21} > \text{No. 2}$ となっている。

次に条件ごとの炭化燃料粒子の燃焼状況を比較した。図 3.8-1~3.8-4 に粒子径ごとの炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度を示す。図 3.7.2-12、3.7.2-13 に示した No. 21 と比較すると、粒子径ごとの傾向はほぼ同じであることが分かる。No. 2 は、あまり燃焼していない $400 \mu\text{m}$ 以上の粒子が含まれる分、燃焼率は低くなっている。

以上のパラメータ比較検討により、空気比一定の場合、バーナのタイプが異なった場合でも、炭化燃料の燃焼率に与える粉碎有無、熱風有無、旋回有無の影響は、燃焼室入口における粒度分布の違いに帰着させることができる。

表 3.8-1 解析条件

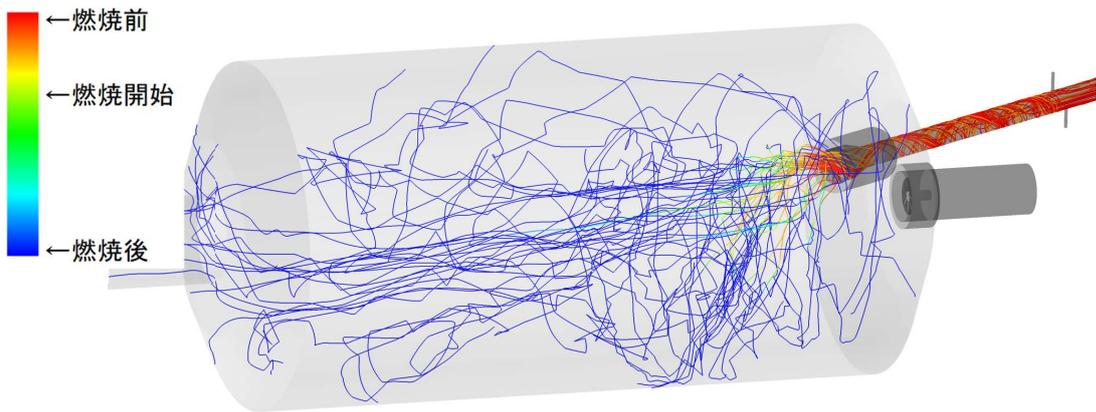
No.2 D50 139 μm	RUN3-11			熱電対計測温度	
	重油量	120	L/h	炉内1	1083°C
炭化燃料量	93.9	kg/h(w.b)	炉内2	1168°C	
混焼率	20	%	炉内3	1192°C	
粉碎	×		炉内4	1126°C	
熱風(圧送)	×		炉内5	1149°C	
旋回エア	○		熱風温度	1137°C	
バーナファン空気量	25.9	Nm3/min			
圧送空気量	6.0	m3/min			
二次空気量	15.4	m3/min			
旋回空気量	1.43	Nm3/min			
圧送空気温度	30	°C			
空気比	1.92	-			

No.21 D50 102 μm	RUN3-11			熱電対計測温度	
	重油量	120	L/h	炉内1	1042°C
炭化燃料量	93.9	kg/h(w.b)	炉内2	1136°C	
混焼率	20	%	炉内3	1150°C	
粉碎	×		炉内4	1096°C	
熱風(圧送)	○		炉内5	1123°C	
旋回エア	○		熱風温度	1114°C	
バーナファン空気量	25.0	Nm3/min			
圧送空気量	6.0	m3/min			
二次空気量	15.4	m3/min			
旋回空気量	1.43	Nm3/min			
圧送空気温度	80	°C			
空気比	1.88	-			

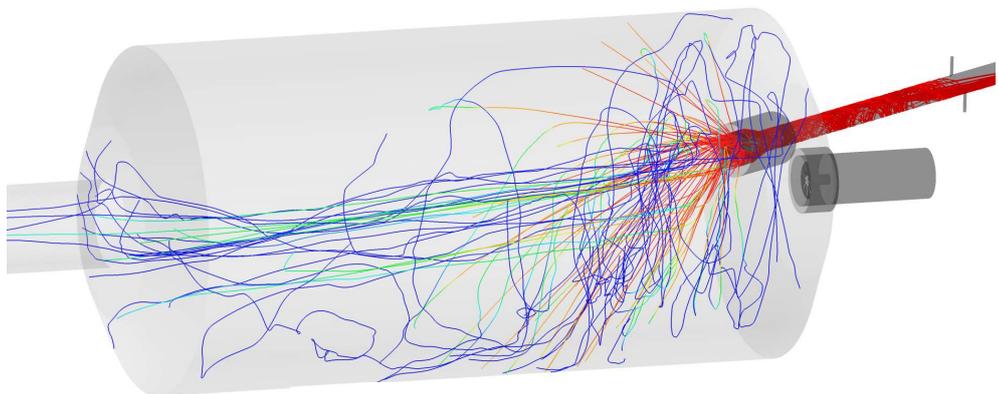
No.22 D50 89 μm	RUN3-9			熱電対計測温度	
	重油量	120	L/h	炉内1	1020°C
炭化燃料量	89.2	kg/h(w.b)	炉内2	1109°C	
混焼率	20	%	炉内3	1128°C	
粉碎	○		炉内4	1083°C	
熱風(圧送)	×		炉内5	1108°C	
旋回エア	○		熱風温度	1115°C	
バーナファン空気量	26.0	Nm3/min			
圧送空気量	6.5	m3/min			
二次空気量	15.5	m3/min			
旋回空気量	1.43	Nm3/min			
圧送空気温度	30	°C			
空気比	1.95	-			

表 3.8-2 炭化燃料混焼燃焼率

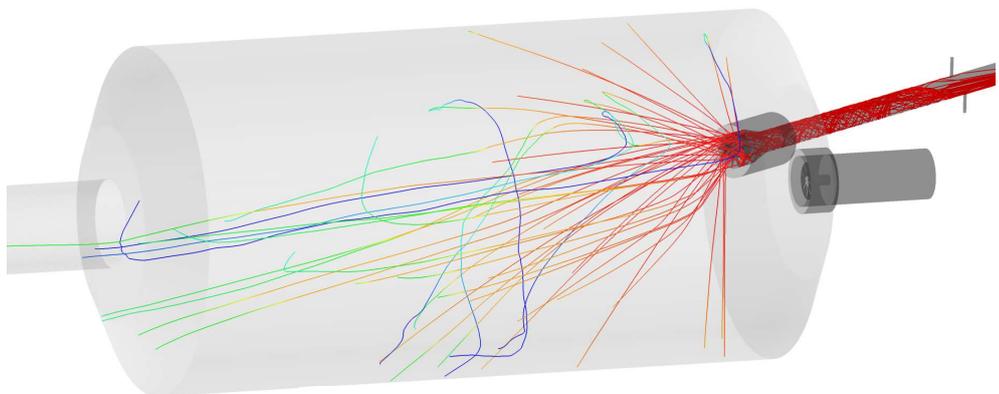
	熱風有無		粉碎有無	
	熱風有	熱風無	粉碎有	粉碎無
試験条件	RUN3-11 旋回有、熱風無、粉碎無	RUN3-11 旋回有、熱風有、粉碎無	RUN3-9 旋回有、熱風無、粉碎有	RUN3-9 旋回有、熱風無、粉碎有
粒度分布	No.2	No.21	No.22	No.22
炉壁条件 Escape	79.93%	91.75%	94.17%	94.17%
炉壁条件 Reflect	97.89%	99.15%	99.14%	99.14%



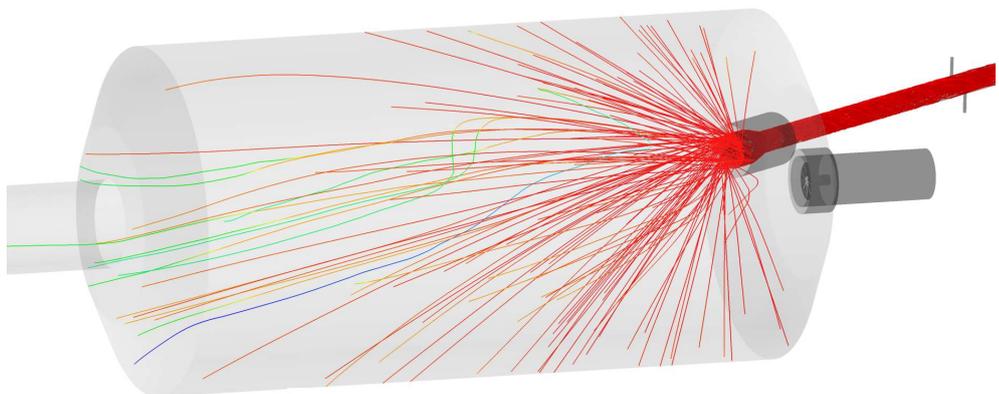
(a) 粒子径 3.98~100 μm



(b) 粒子径 100~300 μm

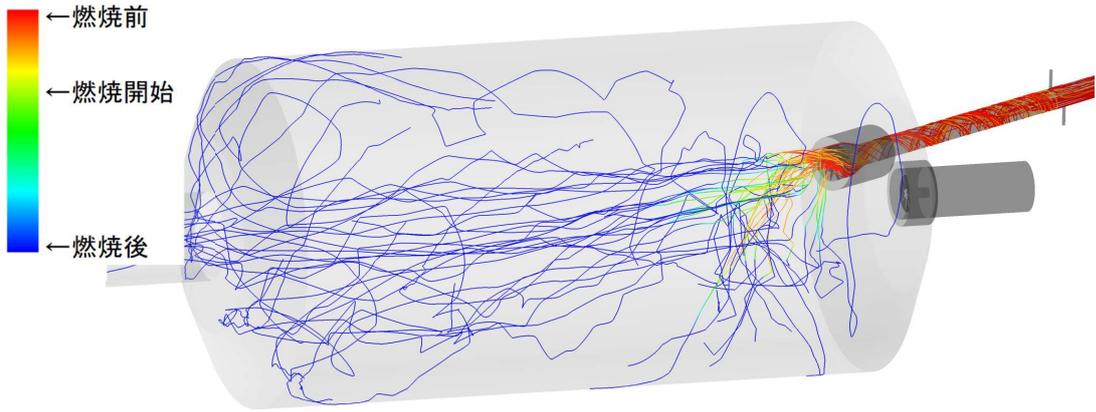


(c) 粒子径 300~400 μm



(d) 粒子径 400~1000 μm

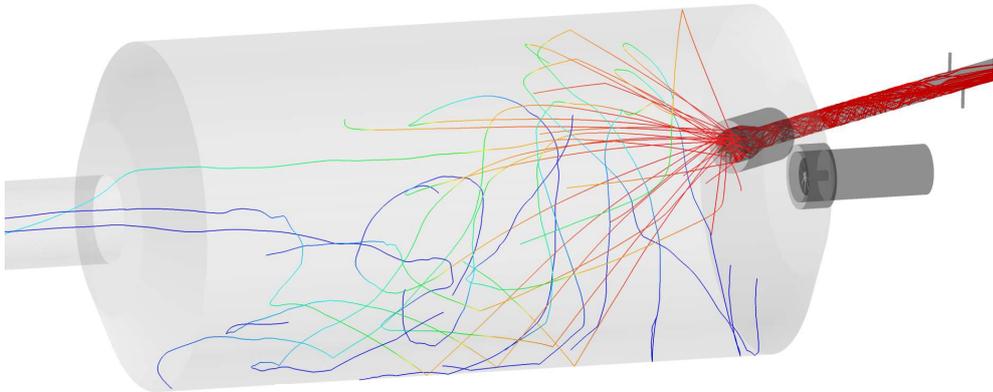
図 3.8-1 炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度 (No.2 炉壁 Escape)



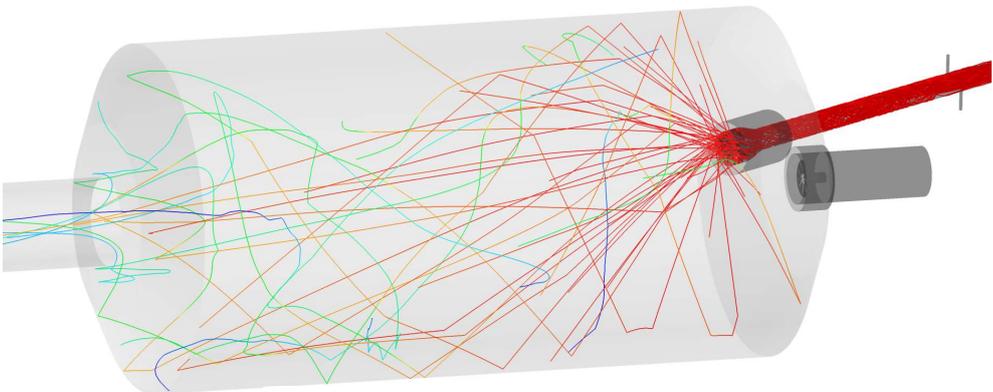
(a) 粒子径 3.98~100 μm



(b) 粒子径 100~300 μm

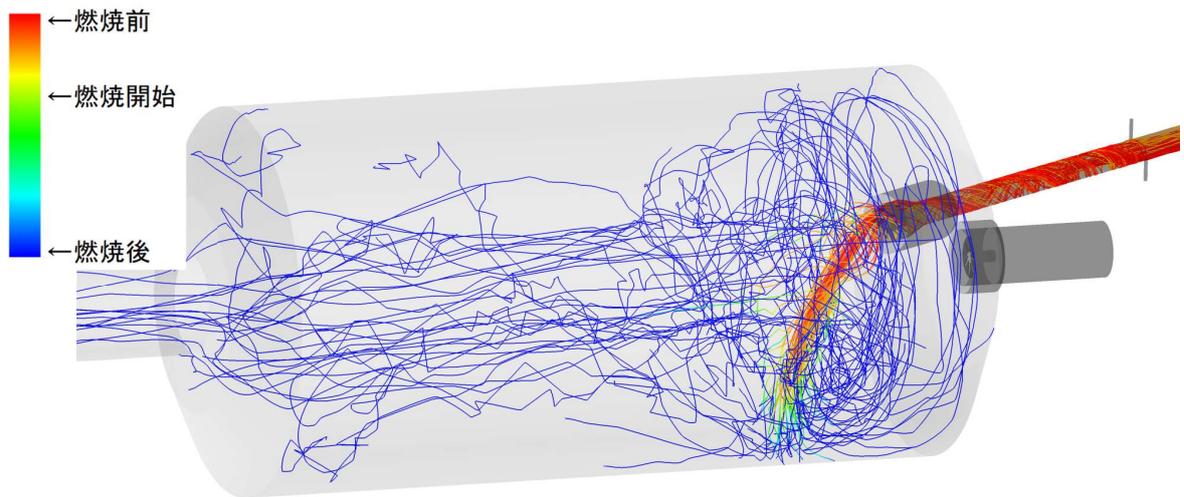


(c) 粒子径 300~400 μm

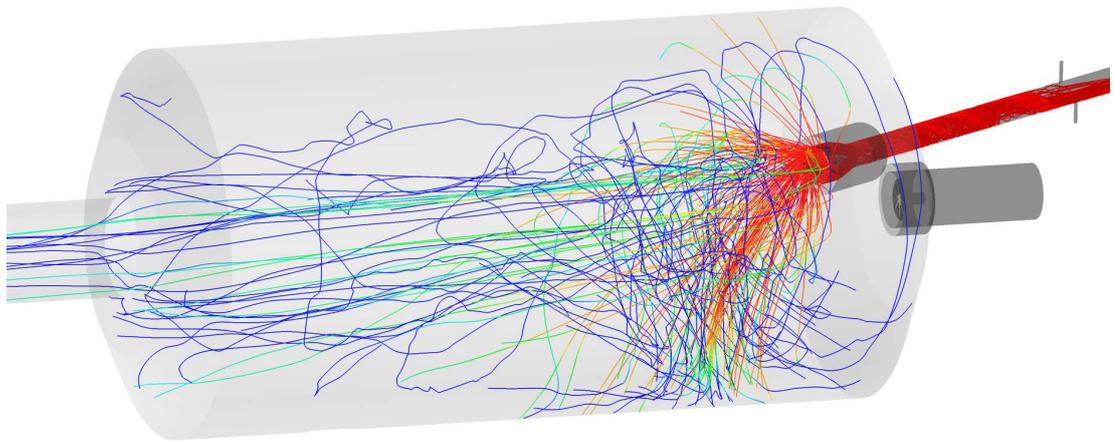


(d) 粒子径 400~1000 μm

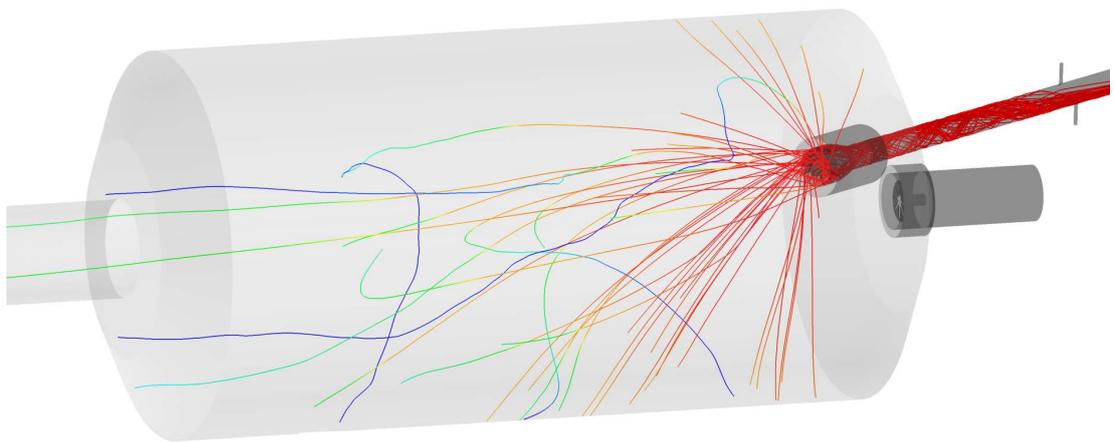
図 3.8-2 炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度 (No.2 炉壁 Reflect)



(a) 粒子径 $3.41 \sim 100 \mu\text{m}$

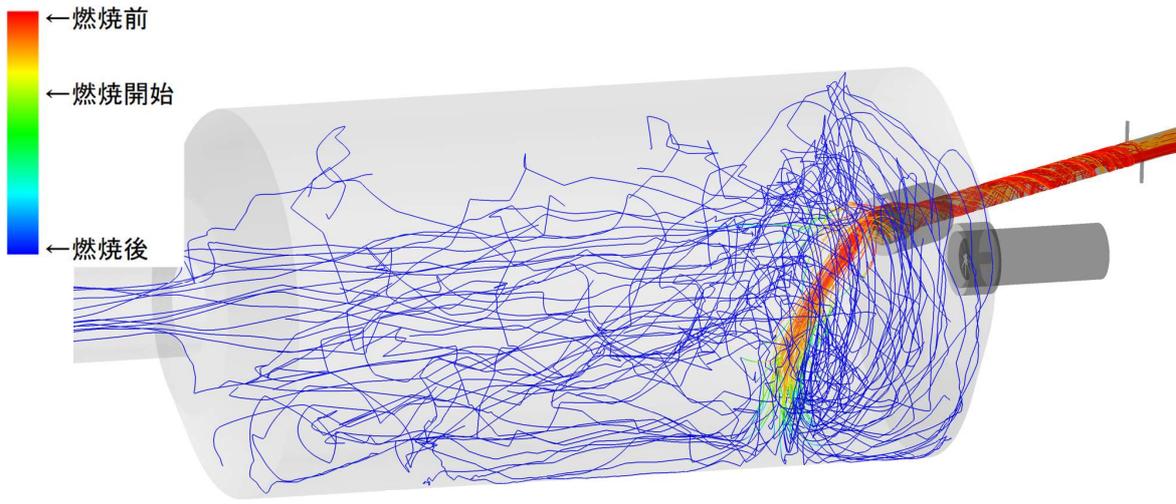


(b) 粒子径 $100 \sim 300 \mu\text{m}$



(c) 粒子径 $300 \sim 398.11 \mu\text{m}$

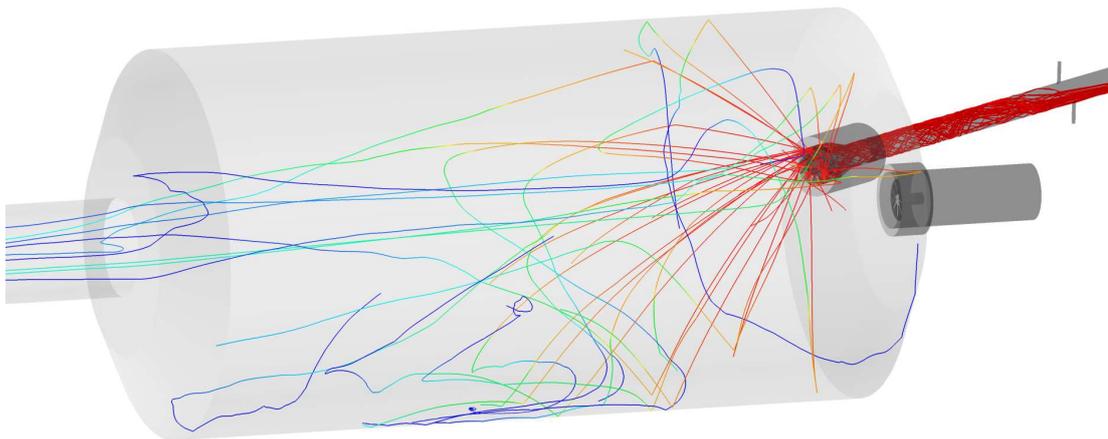
図 3.8-3 炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度 (No.22 炉壁 Escape)



(a) 粒子径 $3.41 \sim 100 \mu\text{m}$



(b) 粒子径 $100 \sim 300 \mu\text{m}$



(c) 粒子径 $300 \sim 398.11 \mu\text{m}$

図 3.8-4 炭化燃料粒子の軌跡と粒子の密度 (No.22 炉壁 Reflect)

第3章 参考文献

- [1] T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu.
A New $k-\epsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number
Turbulent Flows - Model Development and Validation.
Computers Fluids, 24(3):227-238:1995.
- [2] G. D. Raithby and E. H. Chui.
A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in
Enclosures with Participating Media.
J. Heat Transfer, 112:415-423:1990.
- [3] T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman.
Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases
Model.
J. Heat Transfer, 104:602-608:1982.
- [4] ANSYS Fluent 理論ガイド:366-385:2019.
- [5] 川崎重工業(株) 日工(株)
炭化燃料化技術を活用した中小廃棄物処理におけるエネルギー回収評価
事業 成果報告書 2019年

第4章 実証炉への炭化燃料バーナ設置検討

本事業で 2020 年度に計画している実証試験である、播磨町塵芥処理センターにて行う炭化燃料を利用した焼却炉起動試験における検討と計画を行った。本章では炭化燃料バーナ設置計画、工事準備、事前に行った解析結果（播磨町塵芥処理センターのみ）及び炭化燃料バーナ設置後の影響検討について報告する。

1 ごみ焼却施設設置計画概要

1.1 設置バーナの選定

本事業では、混焼バーナと吹込バーナ、直投ノズルの 3 種類のバーナの開発を行った。2020 年度に行う実証試験では、吹込バーナと直投ノズルを使用して炭化燃料を焼却炉起動時に試験を行う計画とした。選定理由 3 点を以下に示す。

- (1) 既設の重油バーナが利用可能で、炭化燃料供給により想定外の不具合が発生しても炭化燃料供給停止することにより、今までと同様の運転ができ、実証試験に協力頂いた播磨町のごみ処理施設運営の停止のリスクを最小限に抑えることが可能であるため
- (2) 上記 2 種類のバーナは、既設のプロセス値を取り込む必要がなく、既設設備に設置するのに最小限の機器のみで構成できるバーナとして開発したため
- (3) 大きな設備の設置が不要で、設置・電気工事による想定外の不具合の発生リスクを抑えることができるため

1.2 排ガス測定結果

表 1.1-1 に 2019 年度に実施した燃焼試験での排ガス測定の結果を示す。本結果より、各排ガス値は、播磨町塵芥処理センターの規制値よりも低いことが分かる。そのため、炭化燃料を播磨町塵芥処理センターにて燃焼させても周辺地域の環境への影響は変わらず問題ないことが想定される。今後、実証試験中に排ガスを測定し、重油バーナで起動する従来の起動方法で発生する排ガス値と比較をすることで問題ないか確認することとする。

表 1.1-1 2019 年度燃焼試験時の排ガス測定結果

バーナの種類	ばいじん濃度 [g/Nm ³] 混焼試験時		SO _x [ppm] 混焼試験時		HCl [ppm] 混焼試験時		NO _x [ppm]		ダイオキシン [ng-TEQ/m ³] [ng-TEQ/g] 混焼試験時	
	試験※ 集じん機 入口	集じん※ 機入口	試験	規制値	試験値	規制値	試験値	規制値	試験値 排ガス 灰	規制値 排ガス 灰
吹込 バーナ	0.44	4.8	26	100	3.3	326	99	200	0.68	10
直投 ノズル	0.34		22		0.7		124		0.14	
								0.04	3	

※ばいじんを採取するバグフィルタまたは電気集じん機の前段で測定したばいじん濃度を示す。

1.3 設置計画

播磨町塵芥処理センターにて実証試験を行うにあたり、開発した吹込バーナ及び直投ノズルの設置計画を行った。両試験ともに1号焼却炉にて行う計画とし、2号焼却炉は通常の運用とする。焼却炉周りのフロー図を図1.3-1に、焼却炉前の配置図を図1.3-2に、計画している試験設備の設置位置と共に示す。試験設備の設置位置として、吹込バーナは、焼却炉前にある既設の重油バーナ横に設置する。直投ノズルは、焼却炉天井にある空気予熱器下ホッパーシュートに付いている既設ノズルより炭化燃料を供給できるように設置する。試験設備設置計画を行う際に以下3点を留意し計画を行った。

- (1) 施設運営の妨げにならないため、通路幅と作業スペースを十分に確保、試験設備をコンパクトにするなどして試験設備を設置することで、既設の設備（バーナ、制御盤など）を作業員が問題なく操作・点検できるよう考慮し計画を行った。
- (2) 炭化燃料利用先の拡大を図るためにも既設施設に導入する設備のイニシャルコストを低減させる必要があることを考慮して簡易的な設備を設置する計画を行った。
- (3) 既設設備の工事を最低限に抑えるように設備配置計画を行った。

図 1.3-3 に吹込バーナの設置計画図を示す。炭化燃料供給機に炭化燃料を投入し、ロータリーバルブを介して搬送ダクトへ落下させる。搬送ダクトに落ちた炭化燃料は炭化燃料圧送ファンにより空気搬送され、コンプレッサエアを利用した旋回ノズルと先端スワラーにて旋回させながら焼却炉内の既設重油バーナ火炎に巻き込ませる計画である。図 1.3-4 に直投ノズル設置計画図を示す。投入シュートに炭化燃料を供給し、ロータリーバルブを介して既設のノズルから投入され、焼却炉内の既設重油バーナ火炎に炭化燃料を巻き込ませる計画である。

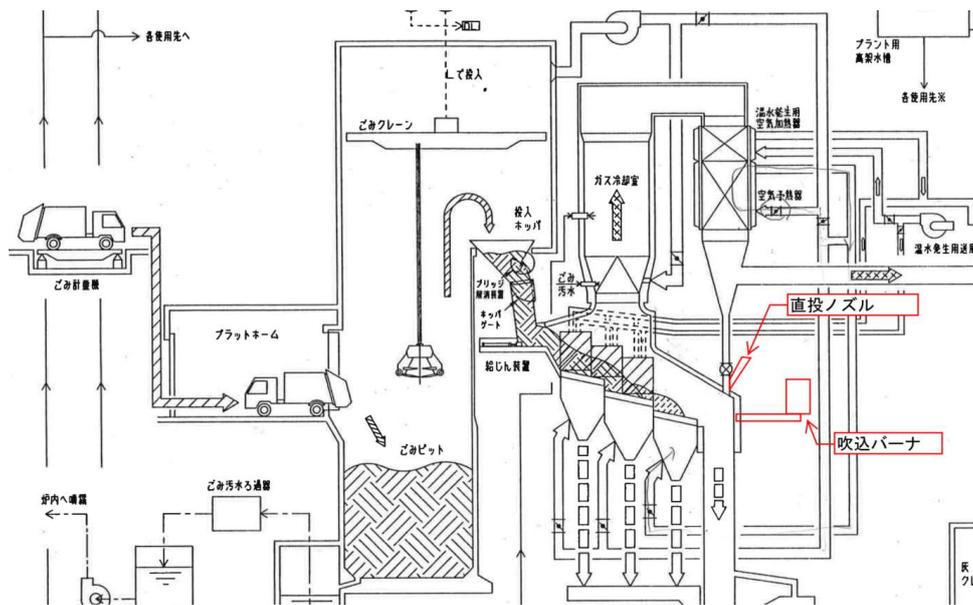


図 1.3-1 播磨町塵芥処理センター焼却炉周りのフロー図

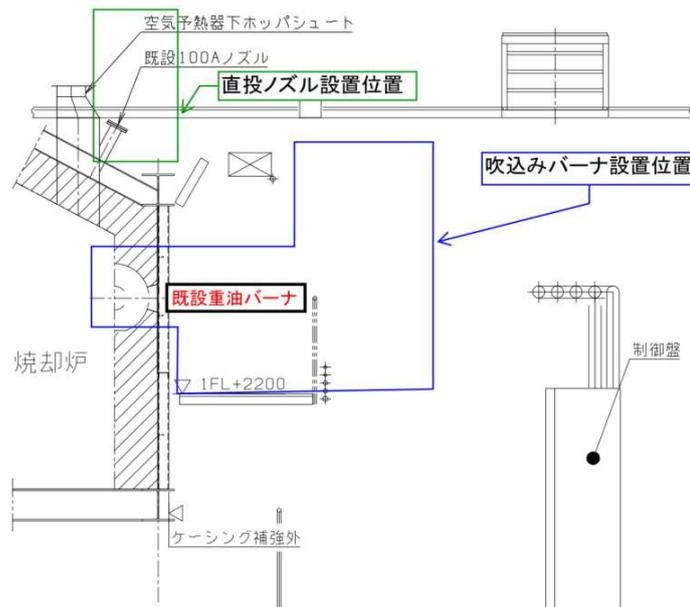


図 1.3-2 1号焼却炉前配置図

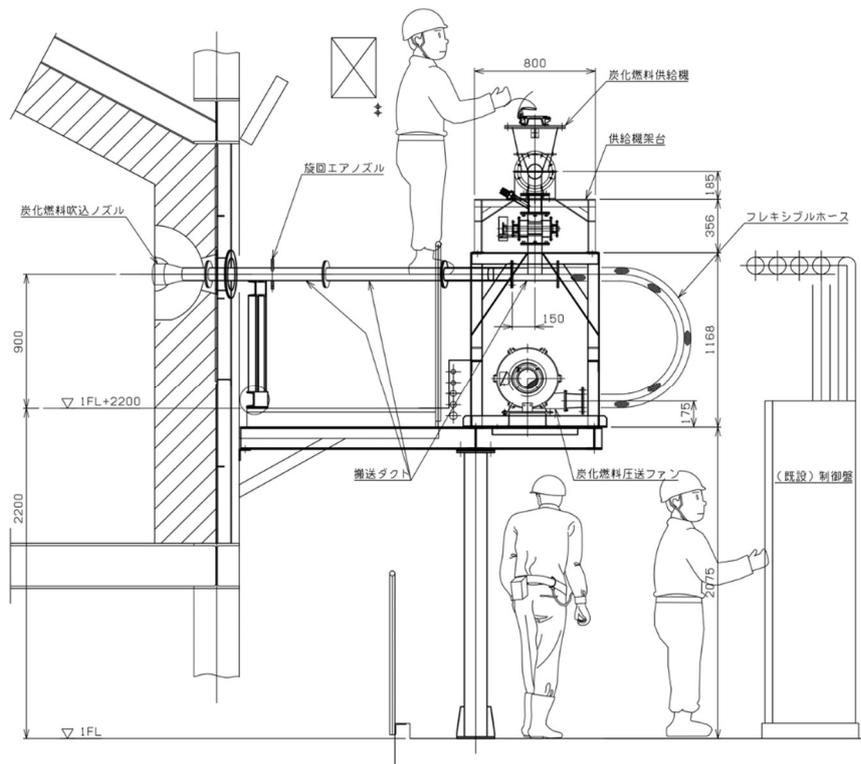


図 1.3-3 吹込バーナ設置計画図

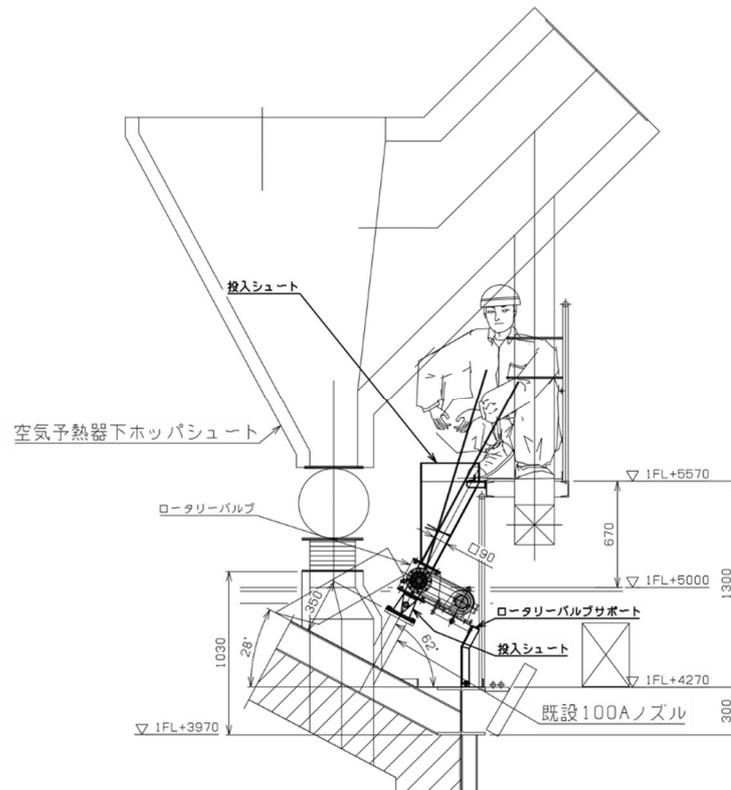


図 1.3-4 直投ノズル設置計画図

1.4 工事計画

1.4.1 試験に伴う変更範囲

前項に示すように試験設備を設置する計画を行う上で、試験に伴う変更範囲を以下に示す。試験終了後に試験前の状態に戻す計画をしている。

- 吹込バーナの焼却炉への吹込み座設置（耐火物工事を含む）
- 試験設備の設置
- 手摺の撤去
- 既設バーナ制御盤の位置をずらす

1.4.2 兵庫県への届出書関係

2020年度の実証試験をするにあたり、兵庫県へ届出書を提出する必要があるため、下記法令に基づき届出書を兵庫県東播磨県民局地域振興室環境課へ播磨町より提出をした。

関連する法律

廃棄物処理及び清掃に関する法律第九条の三第8項「第八条第二項第四号から第七号までに掲げる事項の変更をしようとするときは、環境省令で定める事項記載した書類を添えて、その旨を都道府県知事に届けなければならない。（抜粋）」

- 第八条の二項第6号
「一般廃棄物処理施設の位置、構造等の設置に関する計画」の変更該当する。
- 軽微な変更を除く
施工規則第五条の七項→施工規則第五条の二項の三号のイ
「焼却施設 燃焼室」の変更該当するため、変更申請が必要である。

また、上記法律に準ずる施行規則を確認し、下記提出資料を提出した。

施行規則第五条の八 市町村の設置に係る一般廃棄物施設の変更の届出第1項（予め決められた書式に沿って作成し提出）

- 一 名称及び代表者氏名
- 二 一般廃棄物処理施設の設置場所
- 三 一般廃棄物処理施設の種類
- 四 届出年月日
- 五 変更の内容
- 六 変更の理由
- 七 着工予定年月日と使用開始予定年月日

第 2 項

一 当該変更が周辺地域の生活環境に及ぼす影響についての調査結果を記載した書類

→播磨町にて縦覧する資料であり、周辺地域の生活に影響がないことを調査した報告書を提出。

二 変更後の一般廃棄物処理施設の構造を明らかにする設計計算書

→今回の構造変更部である耐火物は、焼却炉の強度計算上では入っていないため、強度計算上変更はないため、提出不要。

三 最終処分場にあつては、周囲の地形、地質及び地下水の状況を明らかにする書類及び図面

→最終処分場の変更はないため提出不要。

四 当該一般廃棄物の維持管理に関する計画に変更がある場合には、変更後の維持管理に関する計画を記載した書類

→月 1 回 1 時間程度の試験であるため、維持管理に関する計画には変更はないため提出不要。

五 最終処分場以外に一般廃棄物処理施設の維持管理に関する計画に変更がある場合には、変更後の処理工程図

→月 1 回 1 時間程度の試験であるため、維持管理に関する計画には変更はないため提出不要。

1.4.3 工事スケジュール

2020 年度に行う実証試験に伴う、届出書関係と工事スケジュールについて下記に示す。

- 届出書の県への確認 : 2019 年 6 月～
- 実証試験用バーナ決定 : 2019 年 9 月
- 生活環境影響調査報告書作成 : 2019 年 11 月
- 生活環境影響調査報告書縦覧期間 : 2020 年 2 月 13 日～3 月 14 日
- 一般廃棄物処理施設変更届出書提出 : 2020 年 4 月
- 試験設備設置工事 : 2020 年 4 月～5 月
- 実証試験 : 2020 年 6 月～12 月
- 試験設備撤去工事 : 2021 年 1 月～2 月

1.5 吹込バーナ・直投ノズル燃焼解析

播磨町塵芥処理センターの焼却炉の3次元モデルを使用して、2020年度に実施する実証試験で使用する予定の吹込バーナと直投ノズルの燃焼解析を実施した。

1.5.1 吹込バーナ燃焼解析

(1) 解析条件

解析対象とした播磨町塵芥処理センターストーカ炉の吹込バーナの3次元モデルを図1.5.1-1に示す。吹込ノズルの設置角度は重油バーナに対して13.0°傾いている。炉壁の境界条件はストーカ上をEscape、それ以外をReflectに設定した。

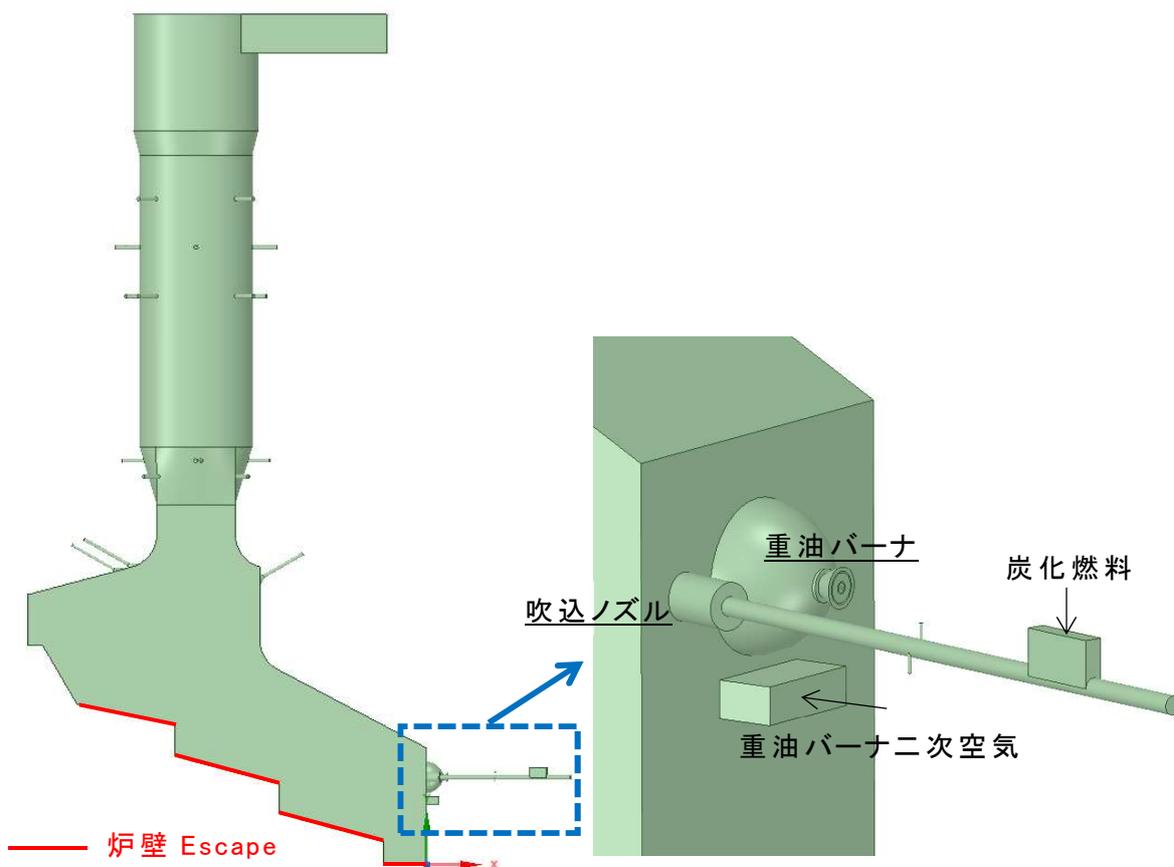


図 1.5.1-1 吹込バーナ解析形状モデル

表 1.5.1-1 に解析条件を示す。また炭化燃料粒度分布には、噴霧試験で得られた第3章の図 2.2.2-1 の No.22 を Rosin-Rammler 分布で与えて計算した。

重油組成は発熱量がほぼ同等となるよう Fluent に設定されている $C_{10}H_{22}$ を用いた。燃焼反応はCOを考慮した二段総括反応とした。これは昨年度、重油専焼でのストーカ炉起動試験データを用いた解析でモデル化の妥当性を確認できているためである。

表 1.5.1-1 解析条件

重油バーナ	重油量	120	L/h	
	比重	0.8	kg/L	
	バーナ空気量	1863	Nm ³ /h	
	1次	242	Nm ³ /h	
	2次	1565	Nm ³ /h	
	3次	56	Nm ³ /h	
	バーナ空気温度	25	°C	
炭化燃料 吹込バーナ	炭化燃料量	92.3	kg/h	
	圧送空気量	6.5	m ³ /min	
	圧送空気温度	80	°C	
	旋回空気量	0	Nm ³ /min	
	漏れ込み空気量	7.3	m/s	
ストーカ空気	1次+2次空気	14000	m ³ /h	
	1次空気	乾燥段	1680	m ³ /h
		燃焼段	1680	m ³ /h
		後燃焼段	840	m ³ /h
	2次空気	燃焼炉出口(ホツパ側)	1960	m ³ /h
		燃焼炉出口(炉前側)	1960	m ³ /h
		ガス冷却室下	5880	m ³ /h

(2) 解析結果

図 1.5.1-2、1.5.1-3 に重油専焼条件のバーナ中心断面の温度分布、CO 濃度分布を示す。吹込バーナからは空気のみを流している。また図 1.5.1-4、1.5.1-5 に炭化燃料混焼条件での結果を示す。重油バーナの燃焼には炭化燃料投入の影響は小さい。混焼による影響として、重油専焼条件では吹込バーナより左側では発熱と CO の生成は起きていないものの、混焼条件では炭化燃料の燃焼に伴う発熱と CO の生成が確認できる。

次に炭化燃料粒子の挙動を確認した。図 1.5.1-6、1.5.1-7 に炭化燃料粒子の軌跡を示す。ストーカ後燃焼段の上方付近で粒子が主に燃焼していることが分かる。一部の大きい粒子がストーカ上に燃焼前に落下してしまうが、大半の粒子が燃焼しながら重油バーナの燃焼ガス流れに乗って炉出口方向へ流れている。炭化燃料の燃焼率は 97.25% となった。

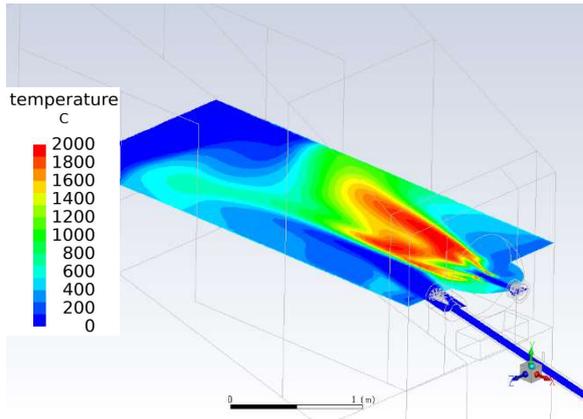


図 1.5.1-2 中心断面の温度分布
(重油専焼)

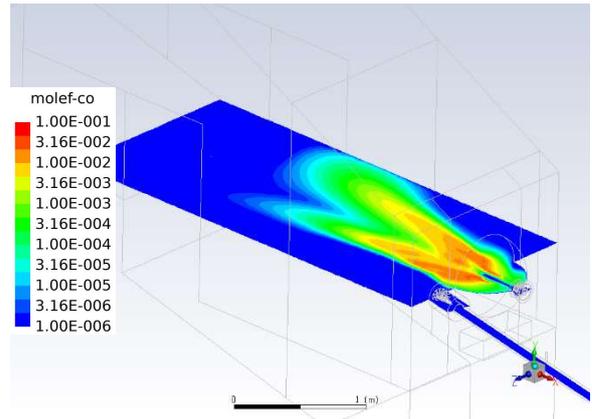


図 1.5.1-3 中心断面の CO 濃度分布
(重油専焼)

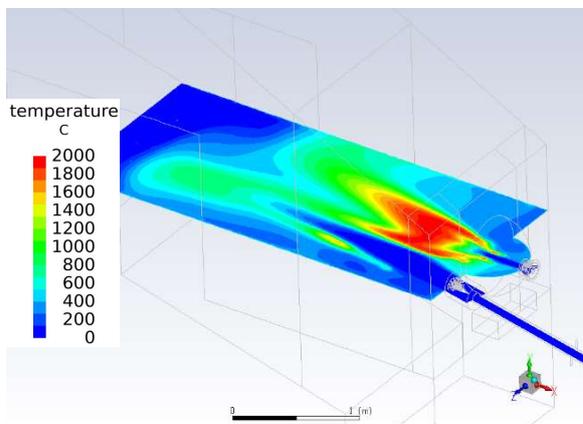


図 1.5.1-4 中心断面の温度分布
(炭化燃料混焼)

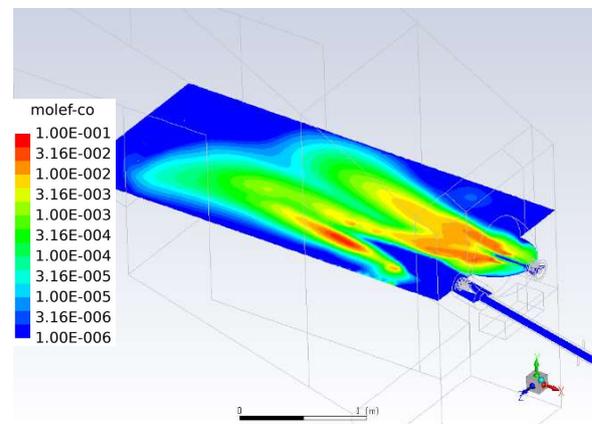


図 1.5.1-5 中心断面の CO 濃度分布
(炭化燃料混焼)

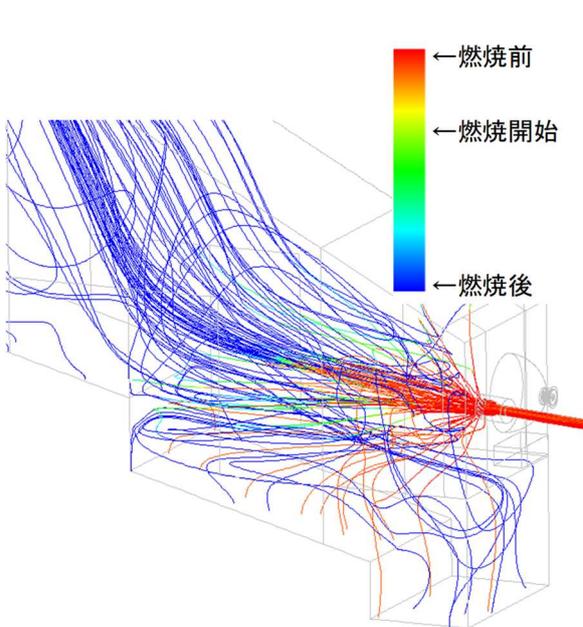


図 1.5.1-6 粒子の軌跡と粒子密度

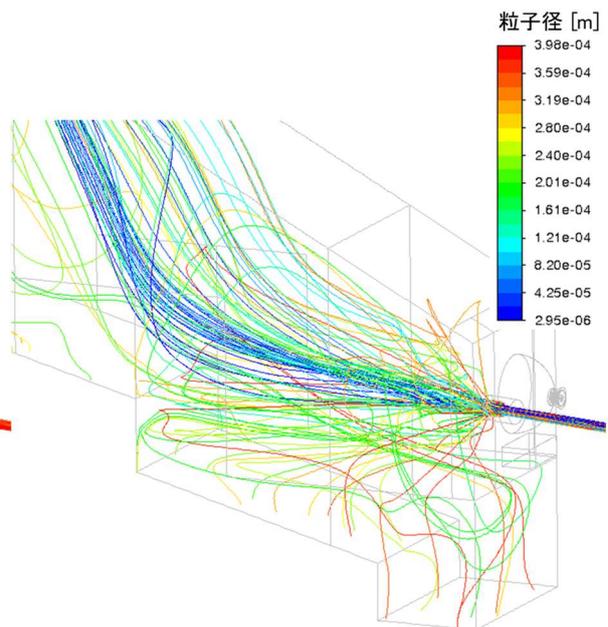


図 1.5.1-7 粒子の軌跡と粒子径

1.5.2 直投ノズル燃焼解析

(1) 解析条件

解析対象とした播磨町塵芥処理センターストーカ炉の直投ノズルの3次元モデルを図 1.5.2-1 に示す。炉壁の境界条件はストーカ上を Escape、それ以外を Reflect に設定した。

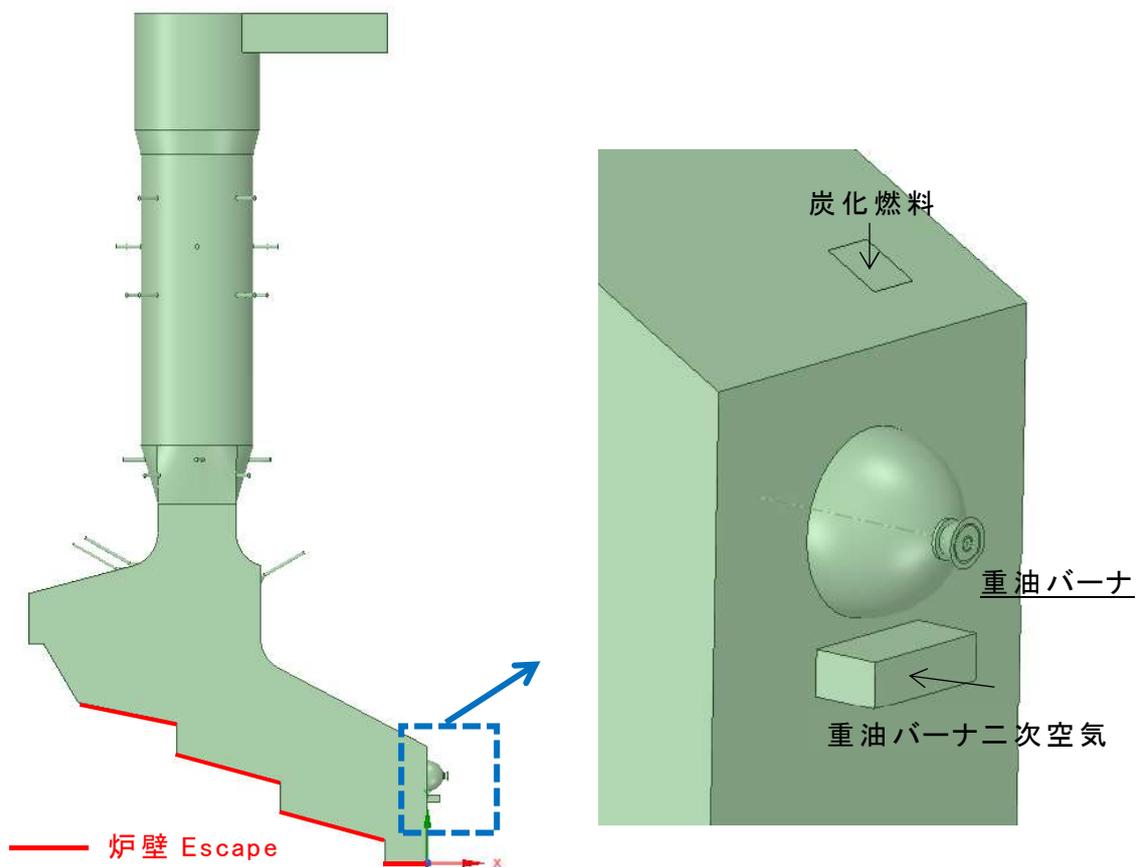


図 1.5.2-1 直投ノズル解析形状モデル

表 1.5.2-1 に解析条件を示す。重油バーナ流量、ストーカ空気流量は吹込バーナ燃焼解析時と同様である。炭化燃料粒子の投入速度は 0 m/s とし、投入口から均一に入るモデルとした。炭化燃料の粒度分布には粒子画像分析により計測したものをを用いた。

表 1.5.2-1 解析条件

重油バーナ		重油量	120	L/h	
		比重	0.8	kg/L	
		バーナ空気量	1863	Nm ³ /h	
		1次	242	Nm ³ /h	
		2次	1565	Nm ³ /h	
		3次	56	Nm ³ /h	
		バーナ空気温度	25	°C	
炭化燃料直投ノズル		炭化燃料量	92.3	kg/h	
		炭化燃料投入速度	0	m/s	
ストーカ空気		1次+2次空気	14000	m ³ /h	
		1次空気	乾燥段	1680	m ³ /h
			燃焼段	1680	m ³ /h
			後燃段	840	m ³ /h
		2次空気	燃焼炉出口(ホツパ側)	1960	m ³ /h
			燃焼炉出口(炉前側)	1960	m ³ /h
			ガス冷却室下	5880	m ³ /h

(2) 解析結果

図 1.5.2-2、1.5.2-3 に重油バーナ中心断面の温度分布、CO 濃度分布を示す。また図 1.5.2-4、1.5.2-5 に直投ノズル中心断面の温度分布、CO 濃度分布を示す。炭化燃料は投入されてすぐ燃焼開始していることが分かる。

次に炭化燃料粒子の挙動を確認した。図 1.5.2-6、1.5.2-7 に炭化燃料粒子の軌跡を示す。一部の大きい粒子がストーカ上に燃焼前に落下したり、重油バーナの根本付近に侵入したりするものの、大半の粒子が燃焼しながら重油バーナの燃焼ガス流れに乗って炉出口方向へ流れている。炭化燃料の燃焼率は 92.19% となった。

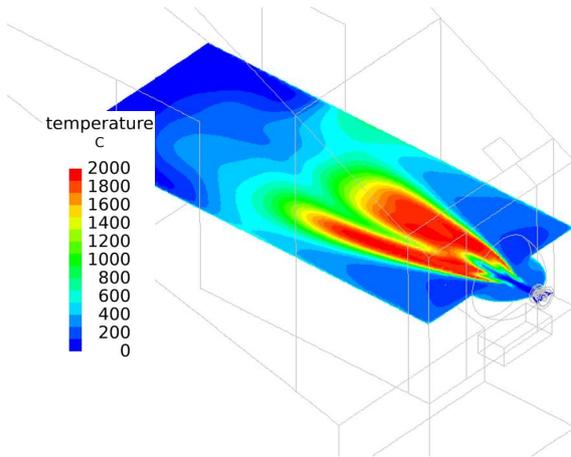


図 1.5.2-2 重油バーナ中心断面の温度分布

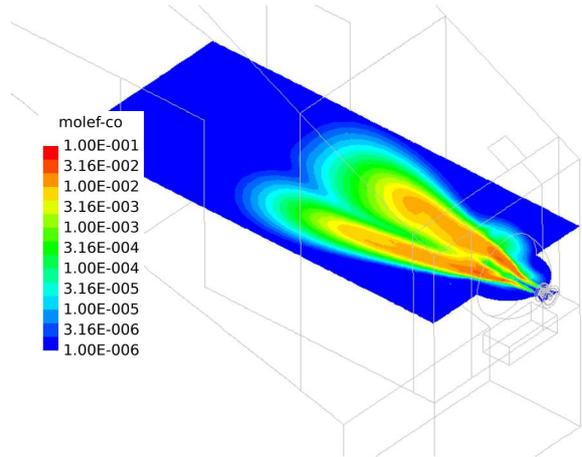


図 1.5.2-3 重油バーナ中心断面のCO濃度分布

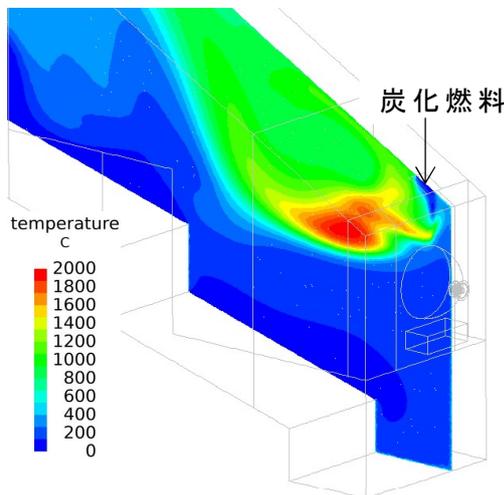


図 1.5.2-4 直投ノズル中心断面の温度分布

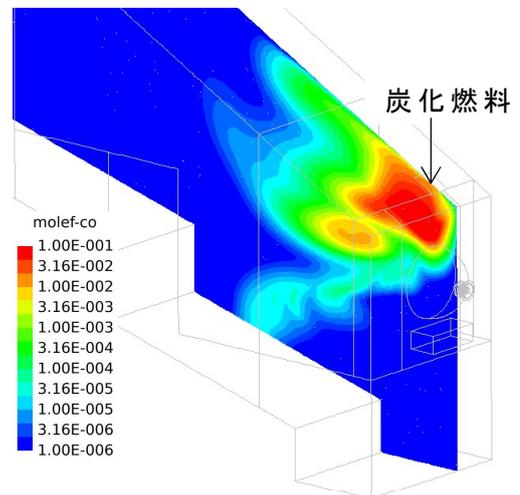


図 1.5.2-5 直投ノズル中心断面のCO濃度分布

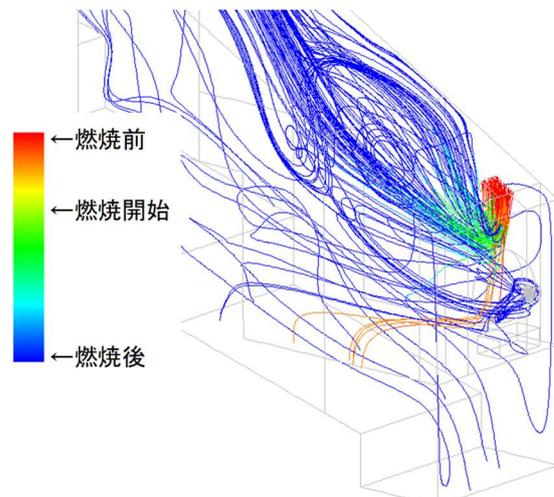


図 1.5.2-6 粒子の軌跡と粒子密度

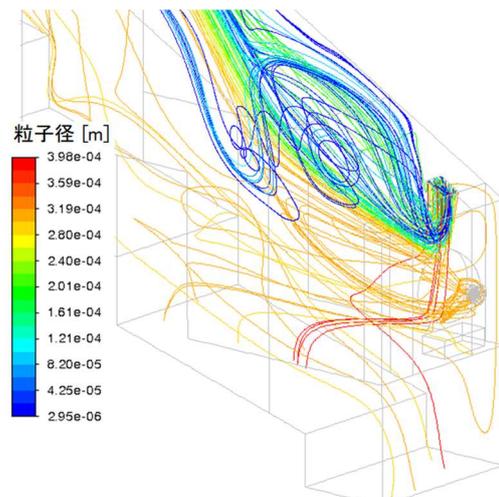


図 1.5.2-7 粒子の軌跡と粒子径

1.5.3 炭化燃料燃焼率

吹込バーナと直投ノズルで炭化燃料燃焼率、排ガス濃度の比較を行った。表 1.5.3-1 に炭化燃料燃焼率の比較を示す。どちらも 90%以上の燃焼率が得られており、ストーカ炉の初期予熱時の使用にも適しているものと考えられる。燃焼率を比較すると吹込バーナの方が高い値を示した。直投ノズルの燃焼率は炭化燃料の投入が均一で理想的に行えた場合の値である。より実証に近い投入条件とした場合、燃焼率の低下が見られるか検証が必要となる。またストーカ炉出口まで到達した粒子の燃焼率は 100%であり、燃え残りはなかった。

表 1.5.3-1 炭化燃料燃焼率の比較

燃料投入方法	燃焼率
吹込バーナ	97.25%
直投ノズル	92.19%

2 ごみ焼却施設設置後の影響検討

2.1 影響要因の調査

2019年度に行った燃焼試験の結果よりごみ焼却施設に炭化燃料バーナを設置した際の影響を調査し、ごみ焼却施設に問題なく炭化燃料バーナを設置できるか検討を実施した。

図 2.1-1 の RUN6-1 燃焼試験時のトレンドデータが示すように炭化燃料を混焼時に炉内圧力などが変動していることが確認できた。図 2.1-2 に示すように重油専焼時はそのような変動が見られないことが分かるため、炭化燃料を供給することで変動が発生することが分かる。このことから、以下の3点を検討目的とし、ごみ焼却施設設置後の影響について下記につき検討を行った。

- (1) 変動がどの機器からの影響を受けているのか発生要因を調査する。
- (2) 変動を低減させることは可能であるかを検討する。
- (3) ごみ焼却施設への炭化燃料バーナの使用により影響がないかを検討する。

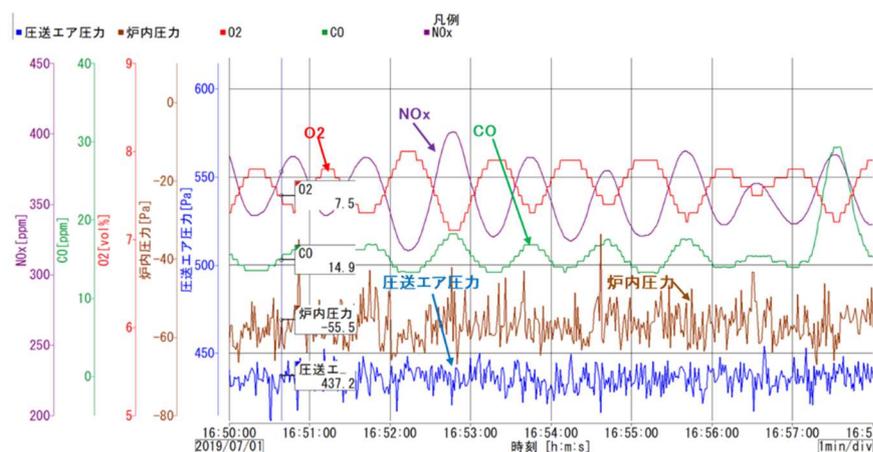


図 2.1-1 炭化燃料混焼時のトレンドデータ (RUN1-6 混焼バーナ)

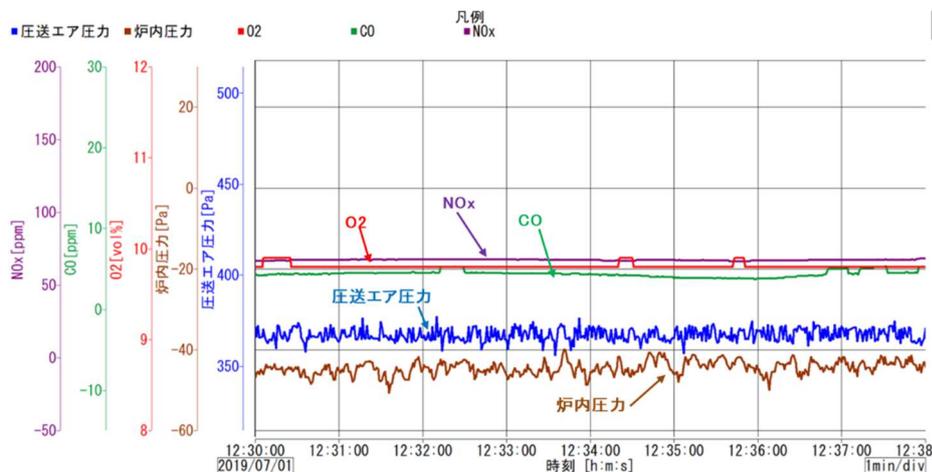


図 2.1-2 重油専焼時のトレンドデータ (RUN1-6 混焼バーナ)

2.2 確認結果

2.2.1 変動の要因調査

上記で示した変動について、要因調査を行った。炭化燃料を混焼した時に変動が発生することから、炭化燃料供給機（図 2.2.1-1）に着目し、炭化燃料供給機を構成する各機器の周期について調査を行った。炭化燃料供給機は、投入ホッパーと 2 軸スクリーコンベヤ、ロータリーバルブで構成されており、2 軸スクリーコンベヤの先端（炭化燃料排出口）には、炭化燃料が詰まりなく供給できるように 4 枚の払い落とし羽根を設置している。本検討では、炭化燃料供給量 92 k g / h 時の試験条件の結果をもとに進めることとした。表 2.2.2-1 に供給機の各機器の周期を示す。表 2.2.1-1 より 92 k g / h の炭化燃料を供給する 2 軸スクリーコンベヤのインバータ周期は 7.9 H z に設定される。その周波数ではスクリーコンベヤの回転数は 1.58 s で周期 38.0 s となる。4 枚の払い落とし羽根を考慮した羽 1 枚当たりの周期は 9.5 s となることが分かる。スクリーコンベヤにて定量供給された炭化燃料は、その後段のロータリーバルブを介して排出される。ロータリーバルブは羽根が 8 枚あり、35 r p m で回転しているため、羽根 1 枚当たりの周期は 0.21 s となる。

この変動が供給機の機器に関連するかどうかを確認するために、変動のトレンドデータを FFT 解析し、変動のピーク周波数から関連する機器を特定することとした。図 2.2-1 でトレンドデータを確認すると、排ガス値である NO_x、O₂、CO は、同周期の変動であるが、NO_x と CO は同位相であり、O₂ は逆位相の変動を示している。代表して NO_x のトレンドデータの FFT 解析を行い、その結果を図 2.2.1-2 に示す。圧送エアと炉内圧力のトレンドを確認すると、同周期で逆位相の変動を示している。代表して炉内圧力の FFT 解析を行いその結果を図 2.2.1-3 に示す。図 2.2.1-2 の結果より、NO_x のピーク周波数は、0.025 H z を示していることが分かり、周期は 40 s / 回となることが確認できた。この周期は、2 軸スクリーコンベヤが 1 回転する周期と同等とであることから、排ガスの変動は 2 軸スクリーコンベヤの影響を受けていることが分かった。図 2.2.1-3 の結果より、0.025 H z、0.076 H z、0.010 H z のピーク周波数を示し、それぞれの周期は 40 s / 回、13 s / 回、10 s / 回となることが分かる。40 s / 回の周期は排ガスの結果同様 2 軸スクリーコンベヤ影響を受けていて、10 s / 回の周期は 2 軸スクリーコンベヤの先端に取り付けている 4 枚の払い落とし羽根の影響を受けていることが確認できた。また、13 s / 回の周期は、供給機の機器との関連性がないため、その他の影響を受けていることが分かるが、その他の機器を調査したところ、関連する機器を判明することができなかった。

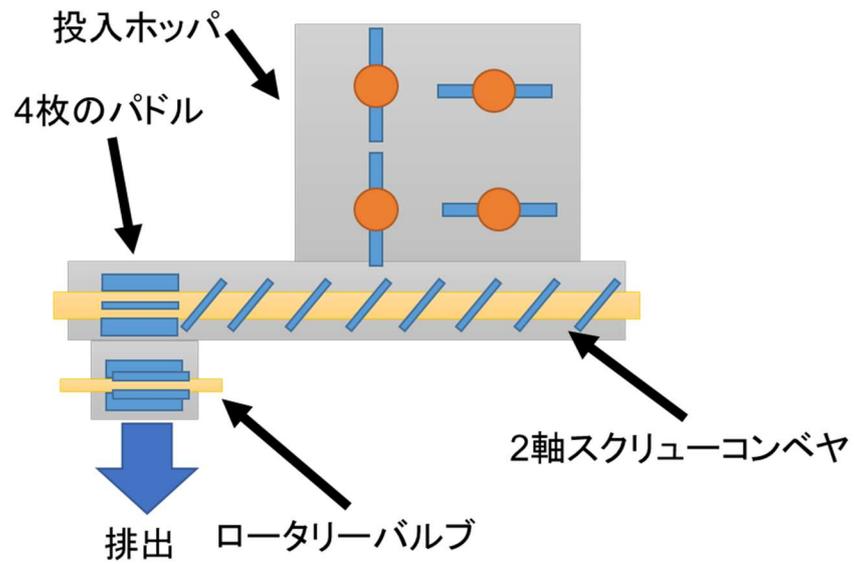


図 2. 2. 1-1 炭化燃料供給機概略図

表 2. 2. 1-1 各機器の周期

供給機	2 軸スクリュウ コンベヤ 60Hz 12rpm	インバータ設定 周波数 [Hz]	7.9
		回転数 [rpm]	1.58
		周期 [s/回]	38.0
	4 枚羽根考慮	周期 [s/回]	9.5
	ロータリーバルブ 35rpm × 羽 8 枚	インバータ設定 周波数 [Hz]	60
		回転数 [回/分]	280
周期 [s/回]		0.21	

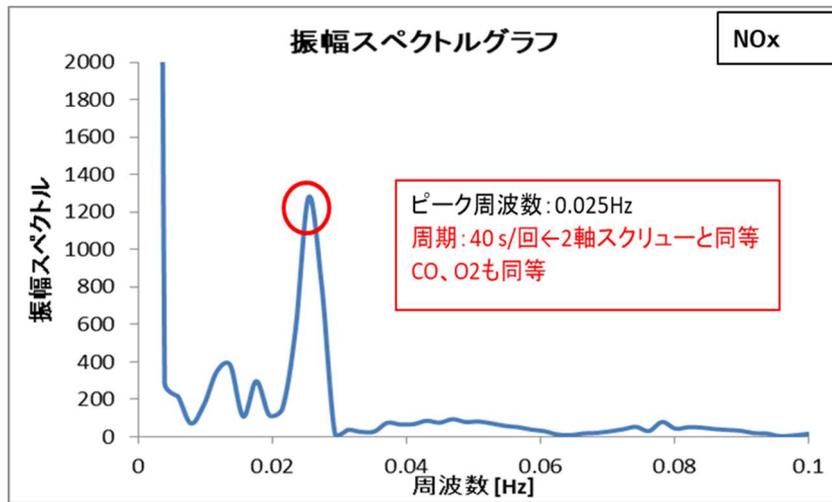


図 2.2.1-2 NOx の FFT 解析結果

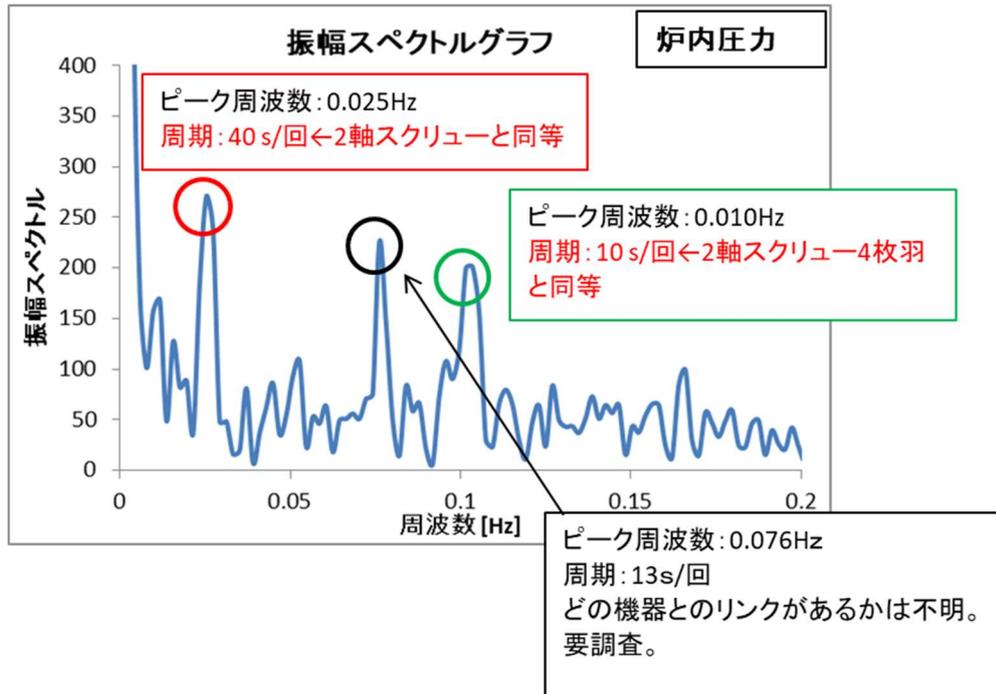


図 2.2.1-3 炉内圧力の FFT 解析結果

2.2.2 変動の低減対策

炭化燃料を供給することで、供給先の燃焼炉に変動を与えることができたため、この変動を低減させる検討を行った。変動の要因調査にて、2軸スクリーコンベヤの影響を受けていることが確認できたことから、2軸スクリーコンベヤに着目して変動低減対策を実施した。

2軸スクリーコンベヤの2本の軸は、対策前は図2.2.2-1に示すように同位相で設置されていた。そこで、図2.2.2-2に示すように2本の軸の位相をずらすことで、変動の低減が可能かを試験にて確かめた。同じ試験条件で行った試験の図2.2.2-3に同位相と、図2.2.2-4に位相をずらしたNO_xとO₂のトレンドデータを示す。対策前後でNO_x、O₂ともに変動は半減され、対策の効果を確認した。2軸スクリーコンベヤの位相をずらすことで、変動の大きさを低減することができた。変動を低減させた後に燃焼試験を行ったトレンドデータを図2.2.2-5に、対策後の炭化燃料混焼時と重油専焼時の各項目の変動の大きさ、変動割合、標準偏差の結果を表2.2.2-1に示す。変動の大きさを低減できたが、重油専焼時と同程度の変動まで抑えることができていない。そこで、炭化燃料を利用する計画である、ごみ焼却施設でこの変動による影響がないか検討する必要がある。

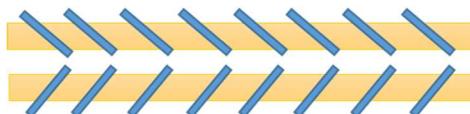


図 2.2.2-1 同位相の2軸スクリーコンベヤ（対策前）

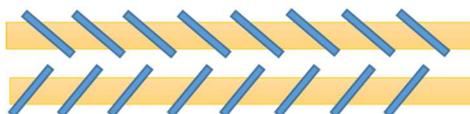


図 2.2.2-2 位相をずらした2軸スクリーコンベヤ（対策後）

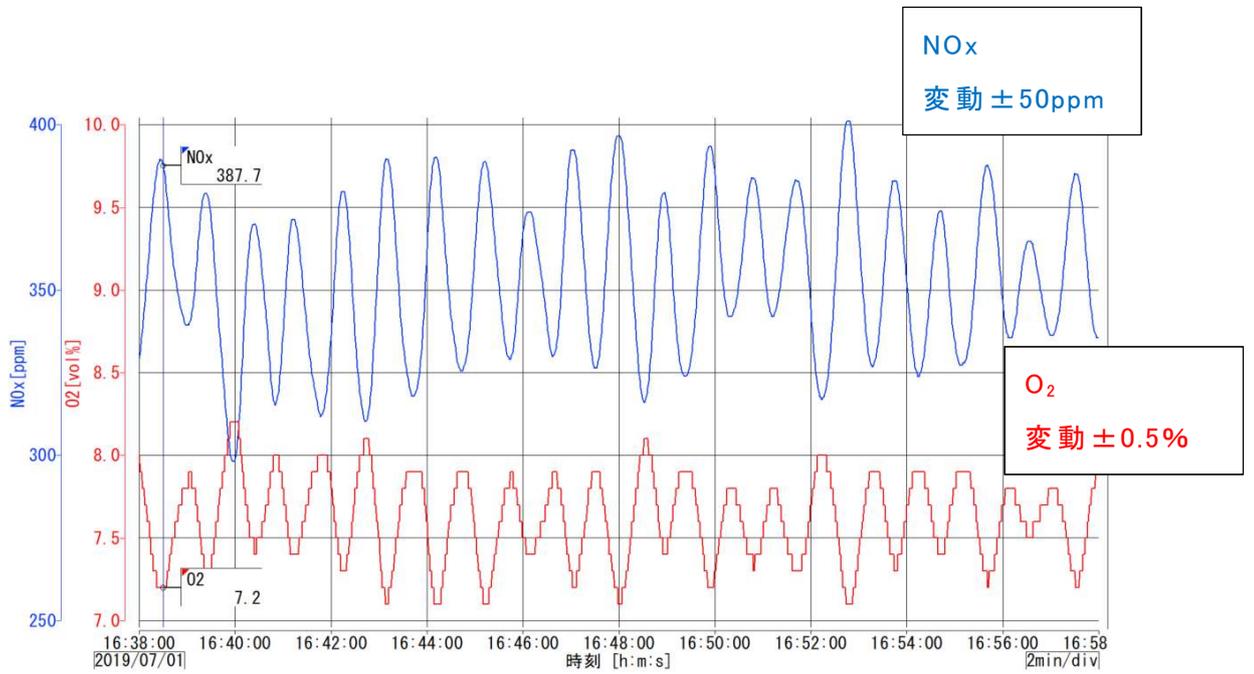


図 2.2.2-3 対策前の NO_x と O₂ のトレンドデータ (RUN1-6 混焼バーナ)

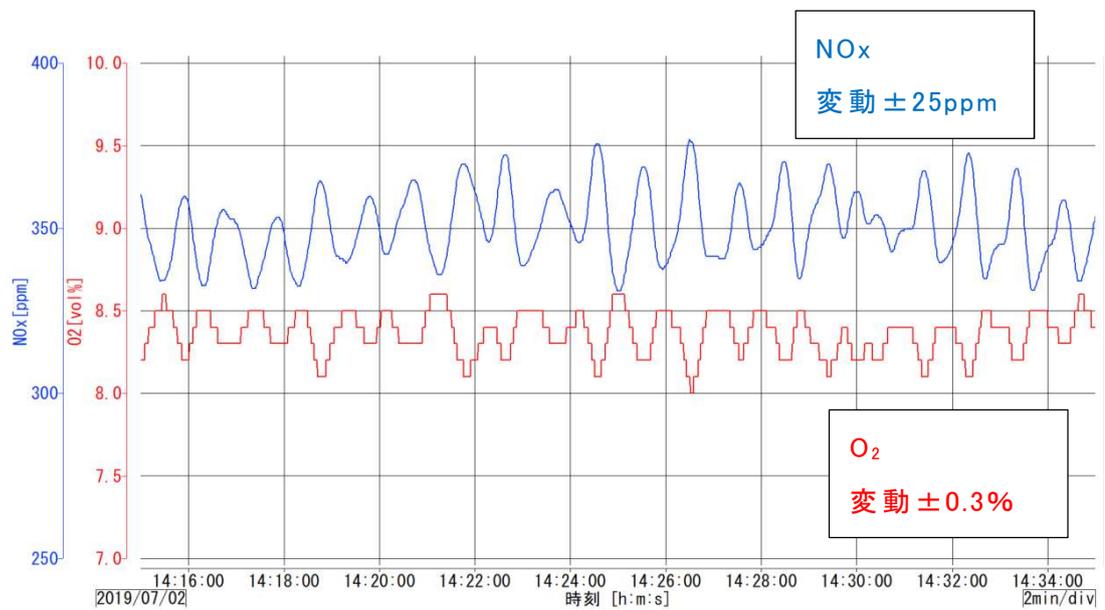


図 2.2.2-4 対策後の NO_x と O₂ のトレンドデータ (RUN1-7 混焼バーナ)

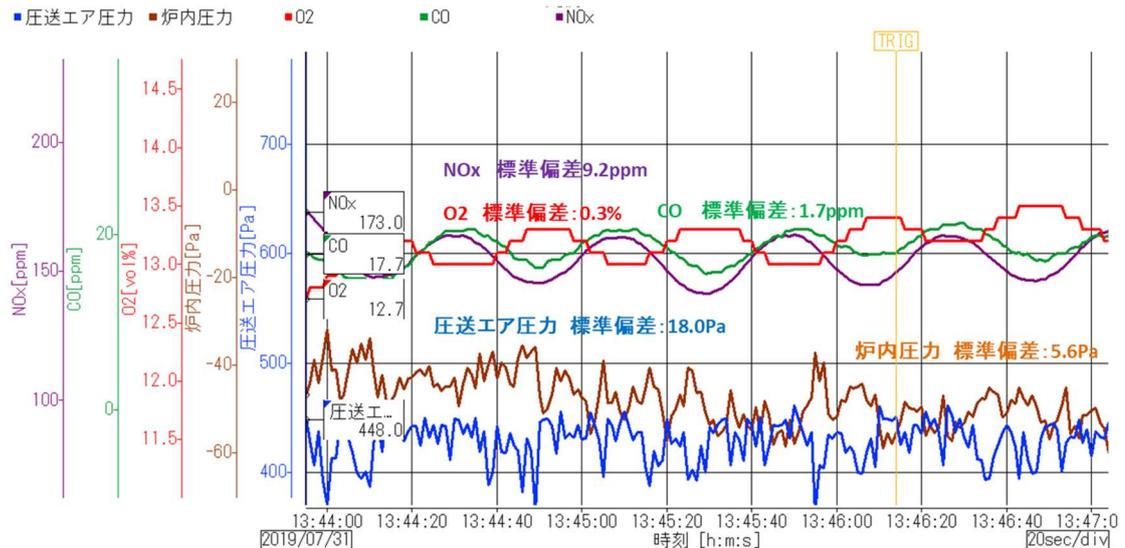


図 2.2.2-5 対策後の炭化燃料混焼時のトレンドデータ (RUN3-3 吹込バーナ)

表 2.2.2-1 各項目の変動について

		O2 [%]	NOx [ppm]	CO [ppm]	炉内圧力 [Pa]	圧送エア圧力 [Pa]
炭化燃料 混焼	変動	±0.3	±15.0	±2.8	±15.2	±49.0
	変動割合	2.3%	9.6%	15.2%	30.4%	11.3%
	標準偏差	0.3	9.2	1.7	5.6	18.0
重油専焼時	変動	±0.1	±0.8	±1.1	±4.5	±12.4
	標準偏差	0.03	0.4	0.6	1.3	3.2

2.2.3 ごみ焼却施設での影響検討

本事業で開発した炭化燃料バーナは、炭化燃料供給による変動が生じることが確認されたため、ごみ焼却施設に導入する前に施設に影響がないかを検討する。この変動は、焼却炉に大きな影響を与える可能性があるため、炉内圧力について検討を行う。前項の表 2.2.2-1 より炭化燃料供給に炉内圧力の変動は、変動の大きさ±15.2 Pa、変動割合 30.4%、標準偏差 5.6 Pa であった。2020 年度に実証試験を行う計画をしている播磨町塵芥処理センターの起動時の炉内圧力のトレンドデータを図 2.2.3-1 に示す。ごみ燃焼が開始した後の炉内圧力の変動を確認すると変動の大きさ±55 Pa、変動割合 68.8%、標準偏差 26.0 Pa であった。この結果より、炭化燃料供給による変動は、従来ごみ焼却時の変動よりも小さいため、焼却炉起動試験にて炭化燃料バーナを利用することは問題ないことが確認

できた。また、当社が設計建設した某市クリーンセンターのストーカ炉の炉内圧力の変動についても調査した。図 2.2.3-2 にごみ焼却時の炉内圧力のトレンドデータを示す。変動の大きさ $\pm 40\text{ Pa}$ 、変動割合 80.0%、標準偏差 15.6 Pa であり、炭化燃料供給による変動は、従来ごみ焼却時の変動よりも小さいため、ストーカ炉で炭化燃料バーナを利用することは問題ないことが確認できた。

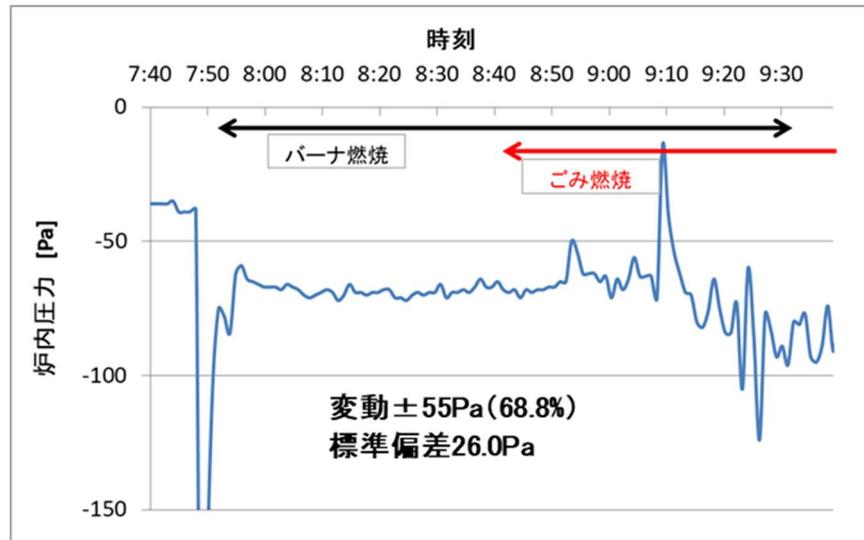


図 2.2.3-1 播磨町塵芥処理センター起動時の炉内圧力トレンドデータ

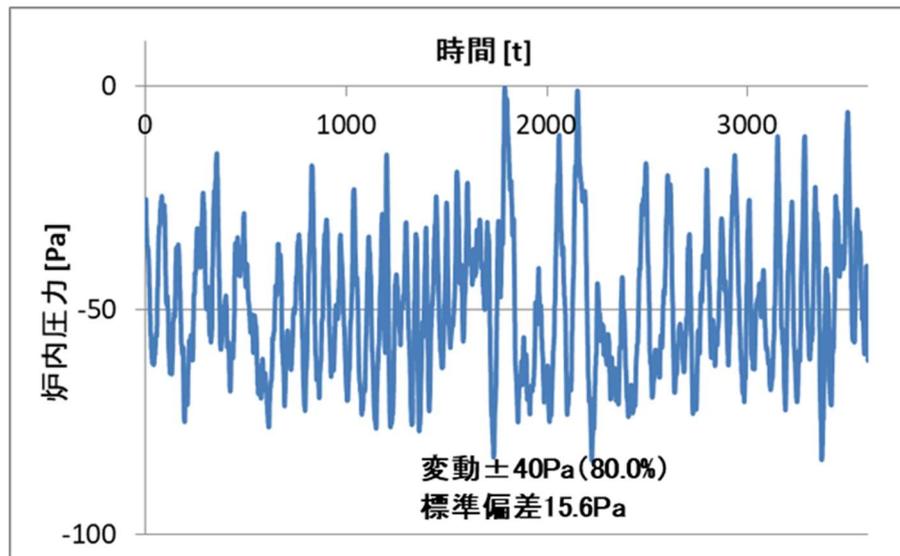


図 2.2.3-2 某市クリーンセンターごみ焼却時炉内圧力トレンドデータ

2.2.4 まとめ

ごみ焼却施設設置後の影響について、検討を行ったところ、炭化燃料を供給による変動が生じ、その要因、変動低減対策及び施設への影響について検討した結果を以下にまとめる。

- 炭化燃料混焼時に変動が生じることを確認し、FFT 解析にて 2 軸スクリーコンベヤの影響を受けていることを確認した。
- 2 軸スクリーコンベヤの位相をずらすことで変動を低減することができた。
- 変動低減対策後も変動はあるが、炭化燃料バーナをごみ焼却施設に導入しても運転可能な範囲であることを確認した。

第5章 その他の利用先施設での利用検討

1. アスファルトプラントにおける重油-炭化燃料混焼検討

1.1 検討目的・検討方法

(1) 背景

炭化燃料の利用先の拡大を目指して、アスファルトプラントでの骨材乾燥用ドライヤの代替燃料として、重油に炭化燃料を混焼することを検討している。しかしながら、炭化燃料は腐食の原因となる硫黄分を重油と同等以上に、塩素分を重油より多く含んでいるため、炭化燃料混焼時には装置の腐食が厳しくなることが懸念される。

そこで、炭化燃料混焼時に想定される腐食機構を検討し、化学熱力学解析を用いて装置の腐食環境についての検討を行った。

(2) 推定される腐食機構

アスファルトプラントの骨材乾燥用ドライヤのライン(図 5.1.1-1)において重油と炭化燃料を混焼した際の装置の腐食機構としてVドライヤ内部における「1) バナジウムアタック」および、「2) 溶融塩腐食」、第1、2煙道における「3) 硫酸露点腐食」および、「4) 塩酸露点腐食」、第2煙道における「5) 塩化物水溶液による湿食」の5つを想定して検討を行った。それぞれの腐食機構の概要を以下に示す。

1) バナジウムアタック

燃焼ガスから金属表面に $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$ 塩が凝縮付着し、溶融することによって生じる腐食である。

2) 溶融塩腐食

燃焼ガスからアルカリ金属塩化物-硫酸塩(最低融点:約 500°C)や、アルカリ金属硫酸塩-重金属硫酸塩(最低融点:約 380°C)が金属表面に凝縮付着し、溶融することによって生じる腐食である。

3) 硫酸露点腐食

燃焼ガス中の SO_3 が水蒸気とともに硫酸露点以下の金属表面に凝縮し、高濃度の硫酸を形成して生じる腐食である。

4) 塩酸露点腐食

燃焼ガス中の HCl が水蒸気とともに塩酸露点以下の金属表面に凝縮し、高濃度の塩酸を形成して生じる腐食である。

5) 塩化物水溶液による湿食

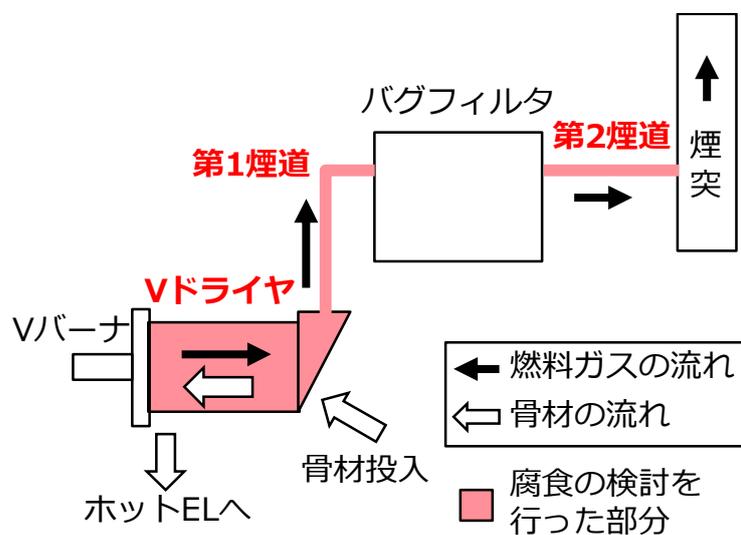
燃焼ガス中の NaCl , KCl 等の塩化物が装置表面に凝縮し、同じく燃焼ガス中から

凝縮した凝縮水中に溶解して塩化物水溶液となり生じる腐食である。

今回の検討では、(i)現状の重油専焼のアスファルトプラントのVドライヤではバナジウムアタックや熔融塩腐食による顕著な腐食は発生していないこと、(ii)バナジウムアタックや熔融塩腐食の原因となる金属表面に凝縮付着した $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$ 塩やその他の熔融塩はVドライヤ内部を移動する骨材によって取り去られると考えられることから、Vドライヤでの「1)バナジウムアタック」や「2)熔融塩腐食」が発生する可能性は低いと推定される。

一方、(iii)重油専焼のアスファルトプラントにおいて硫酸露点腐食が発生していること、(iv)炭化燃料は重油より多くの硫黄、塩素、ナトリウム、カリウムを含んでいることから、炭化燃料の混焼によって「3)硫酸露点腐食」および、「4)塩酸露点腐食」、「5)塩化物水溶液による湿食」が厳しくなることが懸念される。

以上より、第1、2煙道における「3)硫酸露点腐食」および、「4)塩酸露点腐食」、第2煙道における「5)塩化物水溶液による湿食」について検討を行うこととした。



1.2 化学熱力学解析

(1) 熱力学データベース

化学熱力学解析には熱力学データベース (MALT for windows) を使用した。MALT for windows の仕様を表 5.1.2-1 に示す。MALT for windows は系に含まれる元素

の量および、系の温度・圧力を入力値とし、設定した温度での平衡状態での各化学種の気相と凝縮相の量および活量が出力される。一方で本解析では溶体（非化学量論組成）を取り扱わないことに留意する必要がある。MALT for windows を用いた化学熱力学解析の一例として、ごみ焼却プラントの伝熱管表面での腐食性物質の析出傾向などが報告されている（図 5.1.2-1）。

表 5.1.2-1 熱力学データベース (MALT for windows) の仕様

項目	内容
ソフトウェア名	熱力学データベース MALT for windows
製造元	科学技術社
入力値	・系に含まれる元素の量 ・系の温度、圧力
計算方法	ギブズエネルギー最小法による 熱力学的平衡状態の計算
出力	・平衡状態での各化学種の量 ・平衡状態での各化学種の活量
備考	溶体（非化学量論組成）に関するデータは格納されていない。

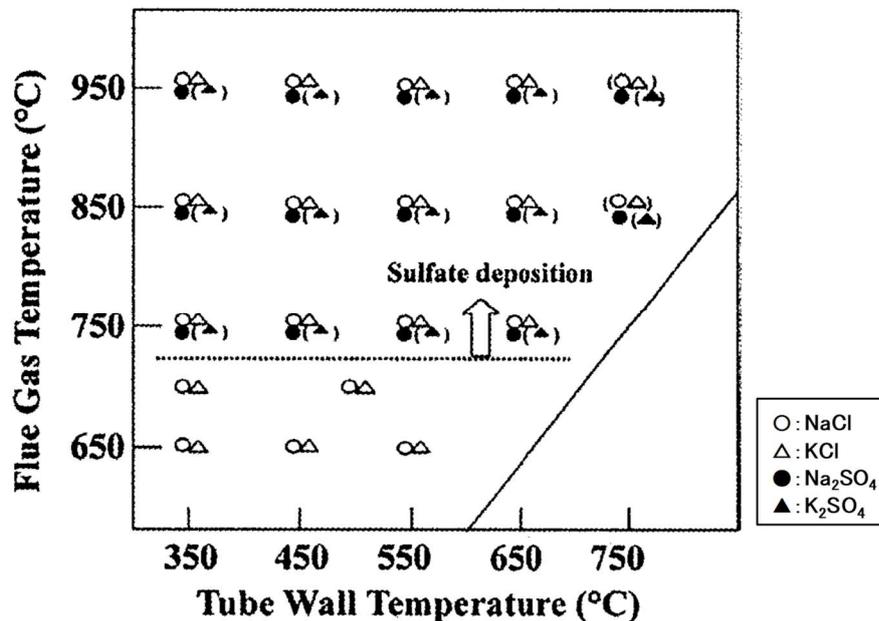


図 5.1.2-1 ごみ焼却プラントの伝熱管表面に析出する腐食性物質の検討例^[1]

(2) 燃料組成

本解析で使用した重油および炭化燃料の組成を表 5.1.2-2 に示す。燃料組成は使用実績のある重油の分析結果および、西海市で製造された炭化燃料の分析結果を参考にして決定した。西海市で製造された炭化燃料には、Na, K が硫黄や塩素に

比べて多く含まれていた。また、燃料中の硫黄を捕捉する Ca と、Ca と反応して酸化物を形成する Al, Si とを比較すると Ca は Al, Si に比べて多く含まれていた。

混合燃料に含まれる単位発熱量当たりの硫黄量および塩素量(図 5.1.2-2)は、炭化燃料混焼率が高くなるほど増加するので、硫酸・塩酸露点腐食および塩化物水溶液による湿食が厳しくなる可能性がある。

一方、図 5.1.2-3 に示す通り、混合燃料中の硫黄に対する Na, K, Ca の比率は炭化燃料混焼率の増加に伴い高くなることから、炭化燃料を混焼することで、燃料中の硫黄が硫酸塩 (Na_2SO_4 , K_2SO_4 , CaSO_4) として凝縮相中に捕捉されるため、硫酸露点腐食の原因である燃焼ガス中の SO_3 濃度が低下して腐食が抑制される可能性がある。

表 5.1.2-2 重油および炭化燃料の燃料組成

wt%		重油	炭化燃料
全水分		0.00	35.10
炭素		84.05	31.35
水素		15.00	1.36
窒素		0.01	1.51
酸素		0.00	6.34
燃焼性硫黄		0.90	0.08
塩素		0.03	0.3
灰分	合計	0.01	23.96
	SiO ₂	-	5.51
	Al ₂ O ₃	-	2.91
	Fe ₂ O ₃	-	2.55
	CaO	-	9.32
	MgO	-	0.84
	Na ₂ O	0.008	1.20
	K ₂ O	0.00198	0.59
	SO ₃	-	0.90
	PbO	-	0.01
	ZnO	-	0.13
V ₂ O ₅	0.00002	-	

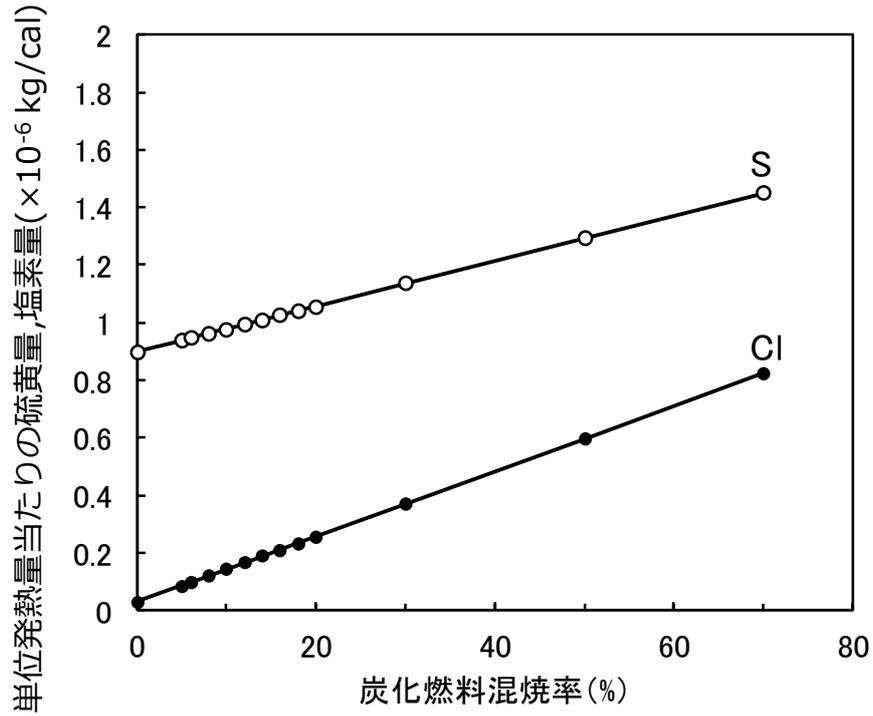


図 5.1.2-2 各炭化燃料混焼率における重油と炭化燃料の混合燃料に含まれる塩素量および硫黄量

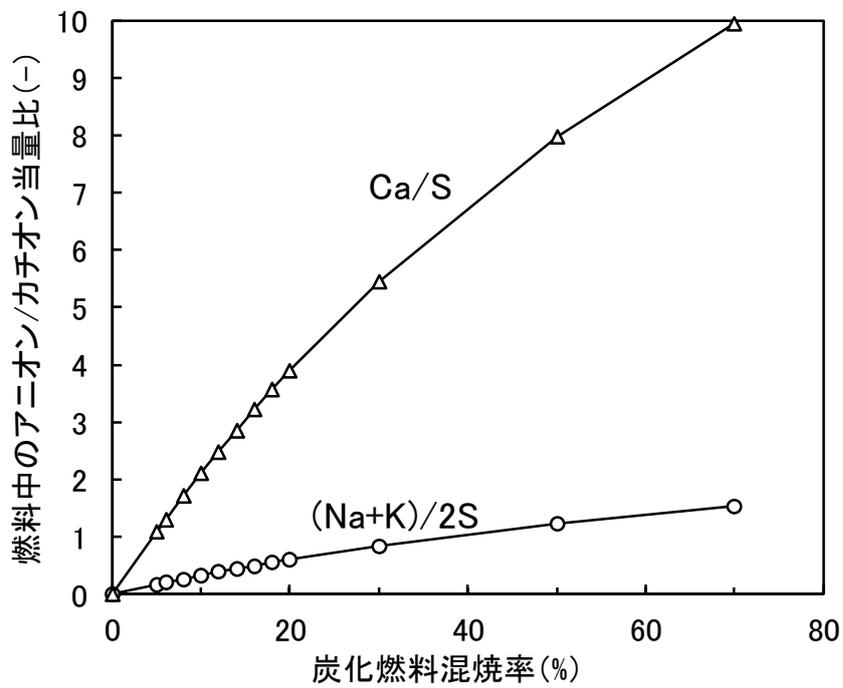


図 5.1.2-3 各炭化燃料混焼率における重油と炭化燃料の混合燃料中のアニオン/カチオン当量比

(2) 解析方法

アスファルトプラントの骨材乾燥用ドライヤの燃焼プロセス(図 5.1.2-4)を参考に、(i)重油と炭化燃料の混合燃料と燃焼空気を燃焼して、(ii)燃焼後のガス相(ガス相 A)をVドライヤ内部の温度まで冷却し、(iii)ガス相 A と骨材から蒸発した水蒸気を混合して、(iv)ガス相 A と骨材投入時の漏れこみ空気を混合するという化学熱力学解析のフローチャート(図 5.1.2-5)を作成し、Vドライヤ出口での燃焼ガス(ガス相 B)中の各種ガス濃度を予測した。

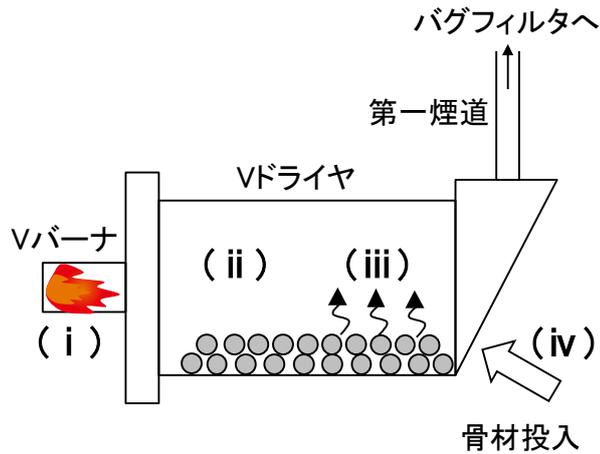


図 5.1.2-4 アスファルトプラントの骨材乾燥用ドライヤ内部のフロー

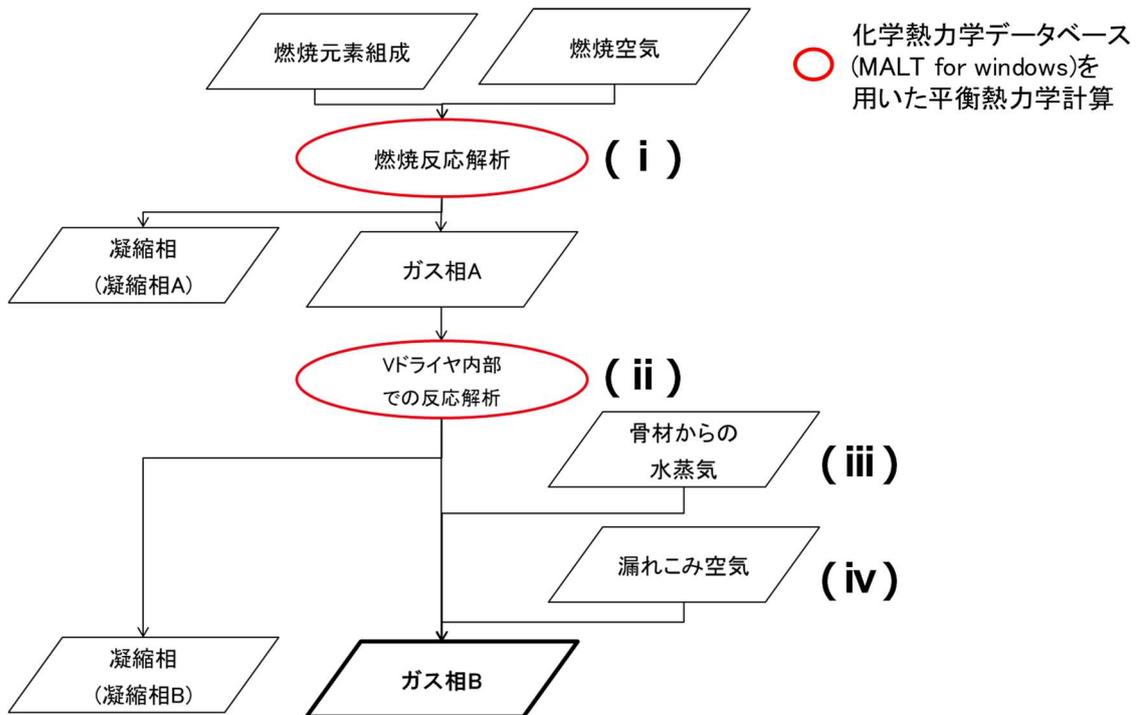


図 5.1.2-5 化学熱力学解析のフローチャート

(3)V ドライヤ内部での反応解析温度の検討

実炉環境に即した解析とするために、「V ドライヤ内部での反応解析」におけるガス相 B 中の各種ガスのうち、今回懸念している腐食機構に寄与する成分である HCl, NaCl, KCl, SO₂, SO₃ の濃度の解析温度依存性を検討した。

図 5.1.2-6 より、ガス相 B 中の HCl, NaCl, KCl 濃度の解析温度による変化は、重油専焼条件では数 ppm 以下であることが分かった。一方、SO₂, SO₃ 濃度は解析温度によって大きく変化することが分かった。

以上の結果より、SO₂, SO₃ に着目して解析条件を定めることとした。

図 5.1.2-6 より、実機の V ドライヤ出口温度 (200℃) で解析を行った場合、実炉でのガス分析結果 (硫黄酸化物 : 86ppm (dry 条件)) と大きく異なり燃焼ガス (ガス相 B) 中に SO₂, SO₃ は存在しないという結果となった。また、硫黄酸化物 (SO₂, SO₃) は 400℃ 以上ではほぼ一定の濃度となるが、温度が高いほどガス相中には SO₂ として存在し、温度が低くなると SO₃ が生成することが分かった。このため、実機では V バーナ温度 (1,500℃) で燃焼ガス相 (ガス相 A) 中に生成した SO₂ の一部がガス温度の低下に伴って、硫酸露点腐食の原因となる SO₃ に転換する^[2]と考えられる。重油専焼条件でのガス相 B 中の SO₂ から SO₃ への転換率 (SO₃ 転換率) の V ドライヤ内部での反応解析温度依存性を図 5.1.2-7 に示す。温度が低くなるほど SO₃ 転換率は上昇した。重油専焼ボイラの煙道での SO₃ 転換率は、平衡熱力学上では 90% 以上であるのに対して実際は数%程度^[2]であると知られている。そこで、煙道ではガス温度よりも高温側の平衡組成のガスが流れていると仮定した。また、硫黄酸化物濃度は 400℃ 以上で一定であったため、SO₃ 転換率の解析結果と文献値とを比較して V ドライヤ内部での反応解析温度を仮決めする方針とした。

重油燃焼ボイラでの SO₃ 転換率は数%程度^[2]とされていることから、今回の解析では硫酸露点腐食の原因物質である SO₃ の転換率を 10% とし、V ドライヤ内部での反応解析温度を 870℃ と仮定した。

今後、実炉のガス分析結果を元に解析の妥当性を検証する。

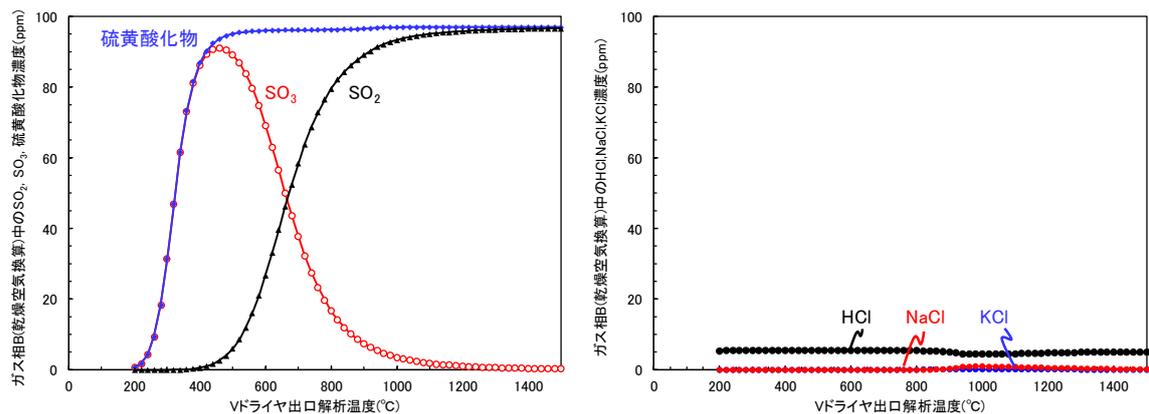


図 5.1.2-6 ガス相 B 中の各腐食性ガス濃度の V ドライヤ内部での反応解析温度依存性

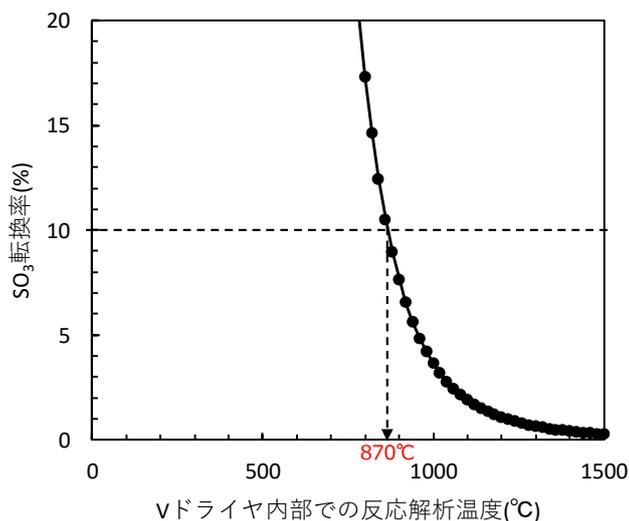


図 5.1.2-7 ガス相 B の SO₃ 転換率の反応解析温度依存性

(4) 混焼条件

化学熱力学解析の混焼率、温度条件および空気量の条件を表 5.1.2-3 に示す。炭化燃料混焼率は 0～70% の範囲とした。なお、実炉での炭化燃料混焼率の目標値は 20% である。空燃比および、骨材からの水蒸気量、漏れこみ空気量は重油専焼の実機条件を参考に決定した。解析温度の燃焼反応解析温度は実機 V バーナでの温度条件 (1,500°C) とし、V ドライヤ内部での反応解析温度は「(3) V ドライヤ内部での反応解析温度の検討」の結果を元に 870°C とした。

表 5.1.2-3 化学熱力学解析の混焼率、温度条件および空気量

条件	内容
炭化燃料混焼率	0%, 5%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%, 18%, 20%, 30%, 50%, 70%
空燃比	1.5(実機条件を参考に決定)
骨材からの水蒸気量	3060kg/hr(実炉条件を参考に決定)
漏れこみ空気量	空燃比 1.5 の燃焼空気量と同量(実機条件を参考に決定)
解析温度	燃焼反応解析温度:1500℃ Vドライヤ内部での反応解析温度:870℃

1.3 炭化燃料混焼に伴う装置の腐食に関する検討結果

化学熱力学解析による V ドライヤ出口の燃焼ガス(ガス相 B)中各種ガス(H₂O, O₂, CO₂, CO, SO₂, SO₃, HCl, NaCl, KCl)の活量の解析結果を図 5.1.3-1、図 5.1.3-2 に示す。ガス相 B 中の水蒸気濃度は炭化燃料混焼率によらず約 20%であった。これは、骨材から蒸発した水蒸気が雰囲気中水蒸気の約 70%を占め、燃料由来の水分子の影響が小さかったためと考えられる。

図 5.1.3-2 より、炭化燃料の混焼率の増加に伴って硫酸露点腐食の原因となる SO₃ ガス濃度が低下し、腐食が抑制されることが示唆された。また、HCl 濃度は炭化燃料混焼率 20%以上で重油専焼の場合よりも低下し、塩酸露点腐食が抑制されることが示唆された。一方、NaCl、KCl ガス濃度が増加したため、塩化物水溶液による湿食が厳しくなることが示唆された。

解析で得られた結果を用いて第 1、2 煙道における硫酸露点腐食、塩酸露点腐食および、塩化物水溶液による湿食について詳細な検討を行った。

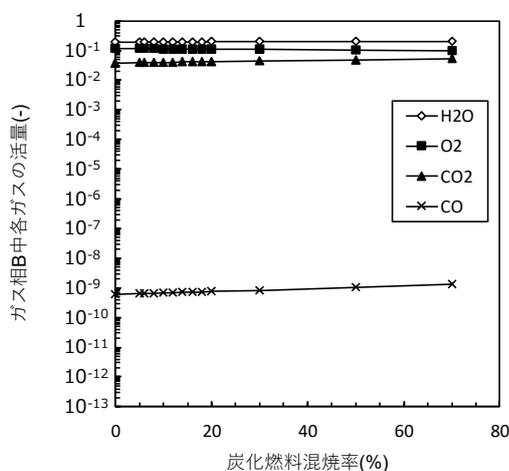


図 5.1.3-1 ガス相 B 中の H₂O, O₂, CO₂, CO の活量

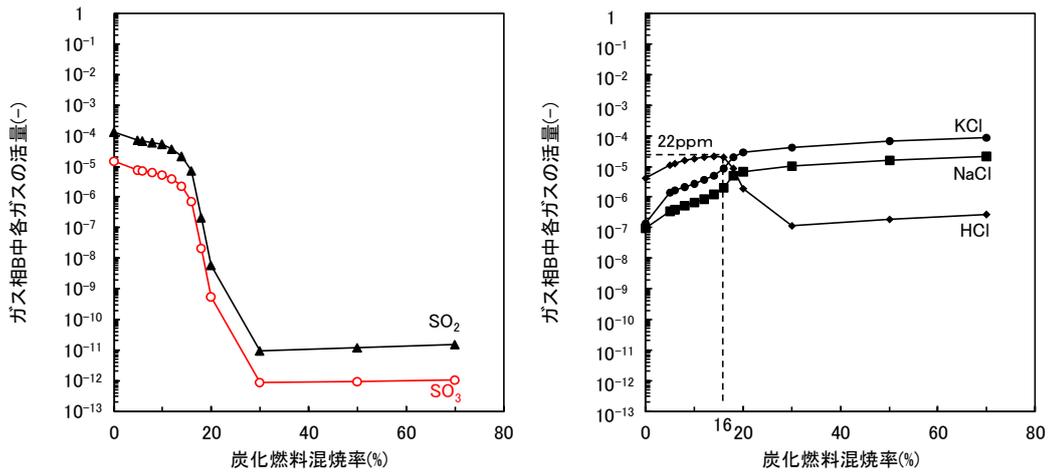


図 5.1.3-2 ガス相 B 中の SO_2 , SO_3 , HCl , NaCl , KCl の活量

(1) 硫酸露点腐食について

ガス中 SO_3 濃度と硫酸露点の関係を図 5.1.3-3 に示す。硫酸露点以下の金属表面では、燃焼ガス中の SO_3 および水蒸気が硫酸として凝縮して腐食が発生する。

今回の解析条件では混焼率によらず水蒸気濃度は 20% であったため、ガス中の SO_3 濃度が第 1 煙道 (100°C) で 8×10^{-2} ppm (ガスの活量: 8×10^{-7}) 未満、第 2 煙道 (80°C) で 1×10^{-3} ppm (ガスの活量: 1×10^{-9}) 未満であれば硫酸露点腐食は発生しないと考えられる。図 5.1.3-4 から、炭化燃料の混焼率を 20% 以上とすれば、第 1 煙道および第 2 煙道で硫酸露点腐食は発生しないと推定される。

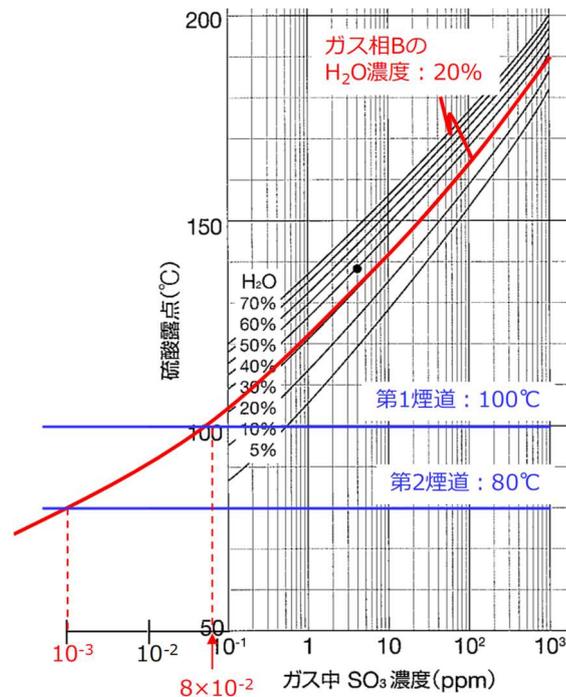


図 5.1.3-3 ガス中 SO_3 濃度と硫酸露点の関係^[3]

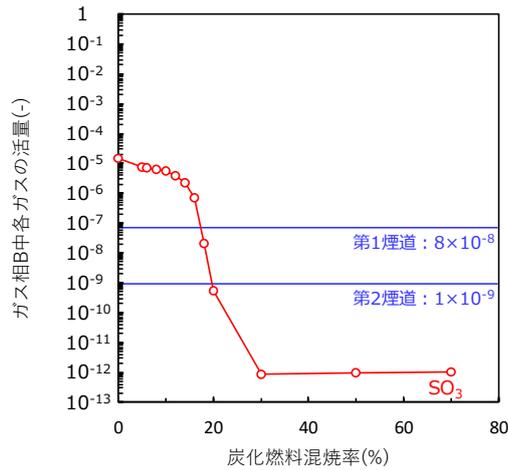


図 5.1.3-4 第 1 煙道および第 2 煙道において硫酸露点腐食が発生しない
ガス相 B 中の SO_3 活量の上限值と解析結果の比較

(2) 塩酸露点腐食

ガス中 HCl 濃度と塩酸露点の関係を図 5.1.3-5 に示す。今回の解析条件において炭化燃料混焼率によらず水蒸気濃度は約 20% で、図 5.1.3-2 より HCl 濃度は最大 22ppm 程度 (炭化燃料混焼率 16%) であり、塩酸露点は約 60°C であった。このため、今回の解析条件において第 1 煙道 (100°C) および、第 2 煙道 (80°C) では塩酸露点腐食は発生しないと推定される。

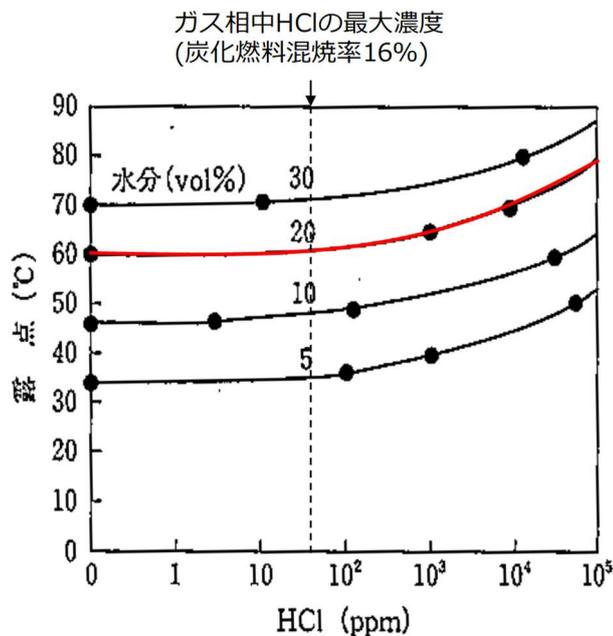


図 5.1.3-5 ガス中の HCl 濃度と塩酸露点の関係^[4]

(3) 塩化物水溶液による湿食について

図 5.1.3-2 でのガス相 B 中の NaCl, KCl 濃度が最も高い炭化燃料混焼率 70% の条件で NaCl, KCl と水蒸気が全て凝縮したと仮定すると、凝縮水は KCl 濃度 0.18wt%, NaCl 濃度 0.03wt% の塩化物水溶液となる。

塩化物水溶液による腐食の温度依存性の例として海水中における温度と腐食速度の関係を図 5.1.3-6 に示す。開放系における海水中 (NaCl: 約 3%) での鋼の腐食速度は約 80°C で最大 0.4mm/y 程度となる。また、図 5.1.3-7 に示す通り、水溶液中の NaCl 濃度による腐食速度の変化は海水濃度 (NaCl: 約 3%) で最大となる。本解析での凝縮する NaCl, KCl 溶液の濃度は 3% に対して十分に低いことから、塩化物水溶液による湿食の腐食速度は 0.4mm/y 以下となると考えられ、塩化物水溶液による湿食は、重油専焼のアスファルトでの硫酸露点腐食 (腐食速度: 数 mm/y) に比べて軽微であると推定される。

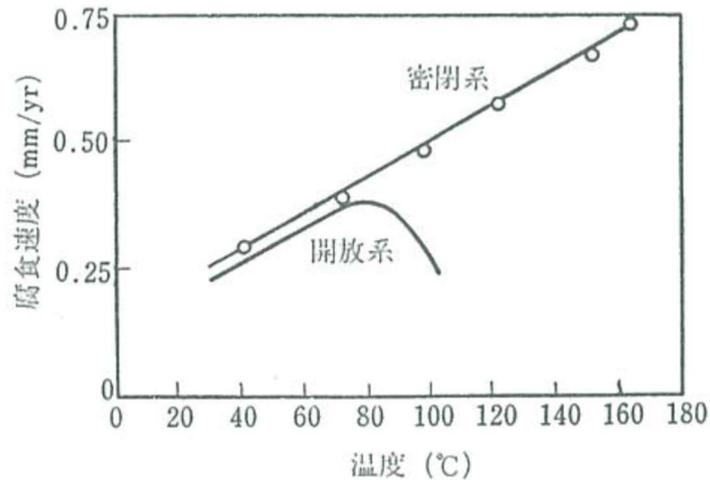


図 5.1.3-6 海水中 (NaCl: 約 3%) における腐食速度の温度依存性^[5]

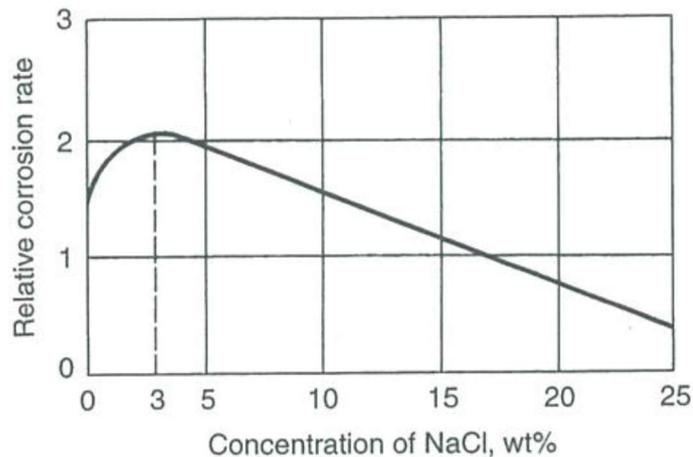


図 5.1.3-7 水溶液中における腐食速度の NaCl 濃度依存性^[6]

1.4 考察

図 5.1.4-2 の重油に炭化燃料を混焼することで HCl, SO₂, SO₃ 濃度が低下するという解析結果が得られた理由を検証するために、炭化燃料の組成を変化させて化学熱力学解析を行った。炭化燃料中の Na, K 濃度を 1/4 にした条件、Ca 濃度を 1/4 にした条件での解析結果を図 5.1.4-1 および図 5.1.4-2 に示す。

図 5.1.4-1 および図 5.1.4-2 から、Na, K が少ないもしくは、Ca が少ない組成の炭化燃料を重油に混焼した場合には、HCl 濃度は増加傾向となり、SO₂, SO₃ 濃度は低下しにくくなることが分かった。また、Na, K よりも Ca の方が SO₂, SO₃ 濃度の低減に効果があることが分かった。

Ca は Al, Si と反応して酸化物を形成するため、Ca によるガス相中の SO₃ 低減効果に対して燃料中の Al, Si が大きく影響すると考えられる。そこで、炭化燃料中の Al, Si 濃度を 4 倍にした条件での化学熱力学解析を行った。解析結果を図 5.1.4-3 に示す。炭化燃料中の Al, Si が多い条件では、HCl 濃度は増加傾向となり、SO₂, SO₃ 濃度は低下しにくくなることが分かった。

以上より、Ca, Na, K が多くかつ、Al, Si が少ない炭化燃料を重油と混焼した場合には、HCl, SO₂, SO₃ 濃度が低下することが期待され、西海市で製造した炭化燃料はこの条件を満たしていると言える。

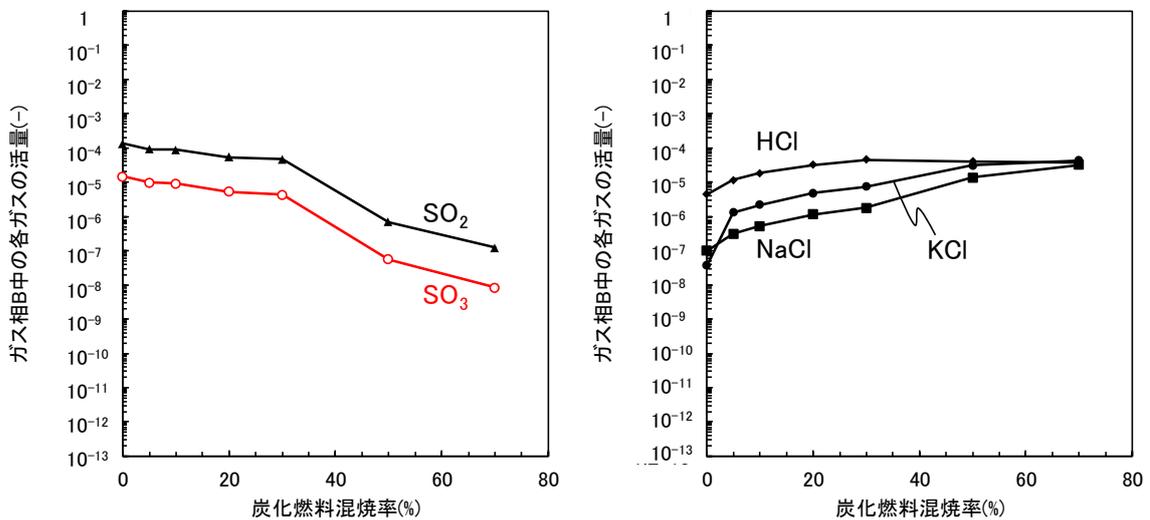


図 5.1.4-1 Na, K 濃度を 1/4 にした炭化燃料を混焼した条件でのガス相 B 中の腐食性ガスの活量

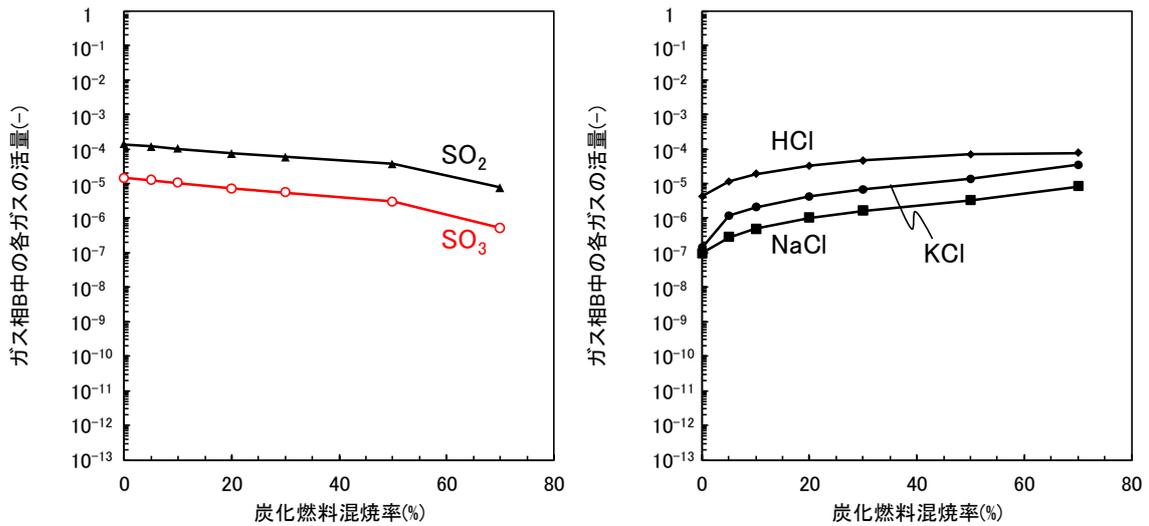


図 5.1.5-2 Ca 濃度を 1/4 にした炭化燃料を混焼した条件でのガス相 B 中の腐食性ガスの活量

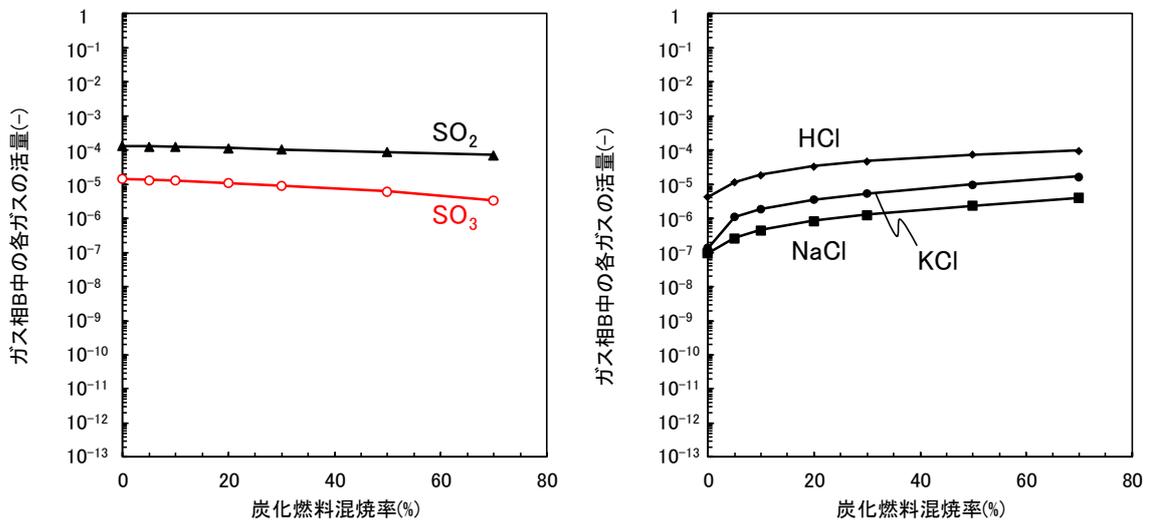


図 5.1.4-3 Al, Si 濃度を 4 倍にした炭化燃料を混焼した条件でのガス相 B 中の腐食性ガスの活量

1.5 まとめ

アスファルトプラントの骨材乾燥用ドライヤにおいて炭化燃料の混焼が装置の腐食に与える影響を検討するために、想定される腐食機構の推定し、化学熱力学解析を行った。

(1) 化学熱力学解析を用いた燃焼雰囲気中の腐食性検討

今回の条件では第 1, 2 煙道における 1) 硫酸露点腐食、2) 塩酸露点腐食および、3) 塩化物水溶液による湿食が発生する可能性が懸念されたため、これら 3 つの腐食機構について化学熱力学解析を用いて評価した。

1) 硫酸露点腐食について

炭化燃料を混焼することで燃焼ガス中の SO_3 濃度は低下すると予測され、炭化燃料の混焼率が 20%以上では第 1 煙道および第 2 煙道で硫酸露点腐食は発生しないと推定される。

2) 塩酸露点腐食について

炭化燃料を混焼した場合の燃焼ガス中の HCl 濃度は最大 22ppm 程度(炭化燃料混焼率 16%)と予測され、そのときの塩酸露点は約 60°C である。このため、今回の解析条件において第 1 煙道 (100°C) および、第 2 煙道 (80°C) では塩酸露点腐食は発生しないと推定される。

3) 塩化物水溶液による湿食について

塩化物水溶液による湿食の腐食速度は 0.4mm/y 以下となると予測され、炭化燃料の混焼が、重油専焼のアスファルトで発生する硫酸露点腐食(腐食速度：数 mm/y) よりも腐食速度が小さくするように作用すると推定される。

なお、今回の解析評価で炭化燃料の組成を変化させ HCl や SO_3 濃度に及ぼす影響を調べたところ Ca , Na , K が多くかつ、 Al , Si が少ない炭化燃料を混焼した場合、 HCl 、 SO_3 濃度の低下傾向が顕著となることが分かった。炭化燃料を重油に混焼することで現状の重油専焼のアスファルトプラントで発生している硫酸・塩酸露点腐食を抑制できる可能性については、炭化燃料の組成に影響されることが示唆された。

2. 安全利用のために

本項では、炭化燃料を安全に利用してもらうため、その取り扱い方法について確認した結果を報告する。

ごみ固形燃料の適正管理方法については、2002年に三重県で発生した RDF 爆発事故の発生によって、事故の原因・調査後、適正管理法の検討が行われた。その結果がごみ固形燃料適正管理検討会により、2003年に「ごみ固形燃料の適正管理方策について」として発行されている。

また、下水汚泥の固形燃料化の取り扱いについては、(財)下水道業務管理センターにより、「下水汚泥固形燃料システムの技術評価に関する報告書」や下水汚泥固形燃料発熱特性評価試験マニュアル」として2008年に発行されている。

上記の2つの文献より、現在炭化燃料化システムとして稼働中の西海市の取り扱い方法を確認し、比較したものをそれぞれ表2-1、表2-2に示す。

確認の結果、稼働中の西海市炭化センターの施設では、それぞれの管理基準を対応できていることがわかる。今後も、固形燃料の取り扱いには細心の注意を払い運営することで固形燃料の普及を図ることが重要である。

表 2-1 ごみ固形燃料適正管理と西海市対応の比較

発行者	ごみ固形燃料適正管理検討会	西海市対応
発行年	平成15年12月25日	
原因	サイロ内でのRDF発熱 発火 爆発	
留意事項	①容量 小さくする方が望ましい	2～3日分貯留用のサイロとし、予備サイロも設置
	②保管期間 先入先出し	サイロ貯留、下部出しにて先入れ先出しを実施
	長期保管時は、入れ替え	長期保管は、フレコンに出して温度管理
	③湿潤防止対策 鋼板性の場合は壁面2重または屋内設置	鋼板まわりに保温施工し結露防止、および屋根付き屋外
	④酸化・蓄熱防止 窒素充填等	窒素注入可能
	⑤計測装置 温度 CO等連続測定	温度、COを連続監視
	⑥消化設備 異常時窒素注入	窒素注入可能

表 2-2 ごみ固形燃料適正管理と西海市対応の比較

発行者	(財)下水業務管理センター	西海市対応
発行年	平成20年3月	
原因	技術評価報告書 試験マニュアル	
留意事項	①消防法施工例遵守	
	1トン以上 消火器	消火器あり
	500トン以上 火災報知	
	750トン以上 屋内消火栓	屋内消火栓あり
	1000トン以上 スプリンクラー	水の注水可能
	②火災予防条例基準遵守	
	1)適切な水分管理	1)毎勤測定
	2)適切な温度	2)連続測定
	3)3日以上の貯留には制限あり	3)貯留は3日以内
	4)温度、可燃ガスの監視	4)連続監視
	③発電用火力発電技術基準遵守	
	1)湿度測定	1)未実施
	2)温度測定装置	2)設置
	3)気体濃度測定	3)設置
	4)燃焼防止装置	4)窒素封入装置設置
	5)消火装置	5)設置
	④水分管理	
1)水分測定	1)毎勤測定	
2)水分侵入防止	2)屋根付き、密閉構造	
⑤温度管理	連続監視	
⑥可燃性ガス濃度管理	CO連続測定	
⑦貯留槽の工夫		
先入先出し、長期保管しない	サイロ貯留、下部出しにて先入れ先出しを実施 3日分の保管	
⑧貯留期間の設定と遵守	利用先、運送会社と連携して実施	
⑨緊急時対策 窒素注入	窒素注入可能	

第5章 参考文献

- [1] Nobuo Otsuka:Corrosion Science 50:P.1627-1636:2008
- [2] 中森正治:ボイラ燃焼ガスによる高温腐食事例とその対策:P.235:2012
- [3] 日鉄住金パンフレット「耐硫酸・塩酸露点腐食鋼 S-TEN 技術資料」:P.4:2012
- [4] 腐食防食協会編:腐食・防食ハンドブック:P.260:2000
- [5] 腐食防食協会編:腐食防食便覧:P.202:1986
- [6] ASM HANDBOOK vol.13C Corrosion Environments and Industries:P.27:2006

第 6 章 二酸化炭素排出量削減効果

1. 単純焼却(従来)と炭化燃料利用(提案システム①、②)の CO₂ 排出量試算

本事業では、炭化施設で得られる炭化燃料を提案システム①では施設内消費および発電所、ごみ処理施設で利用し、提案システム②では、施設内消費およびアスファルトプラント、ごみ処理施設で利用することで、全体システムとして CO₂ 量を削減することを目標としている。本項では、単純焼却における CO₂ の排出量および本事業を行う(提案システム①、②)ことによる CO₂ 排出量を試算した。結果のまとめを図 1-1 に示す。

(試算根拠は、表 1-1, 2 に示す。試算には、炭化施設での灯油使用量や炭化燃料運搬時の CO₂ 排出量増減も考慮した。)

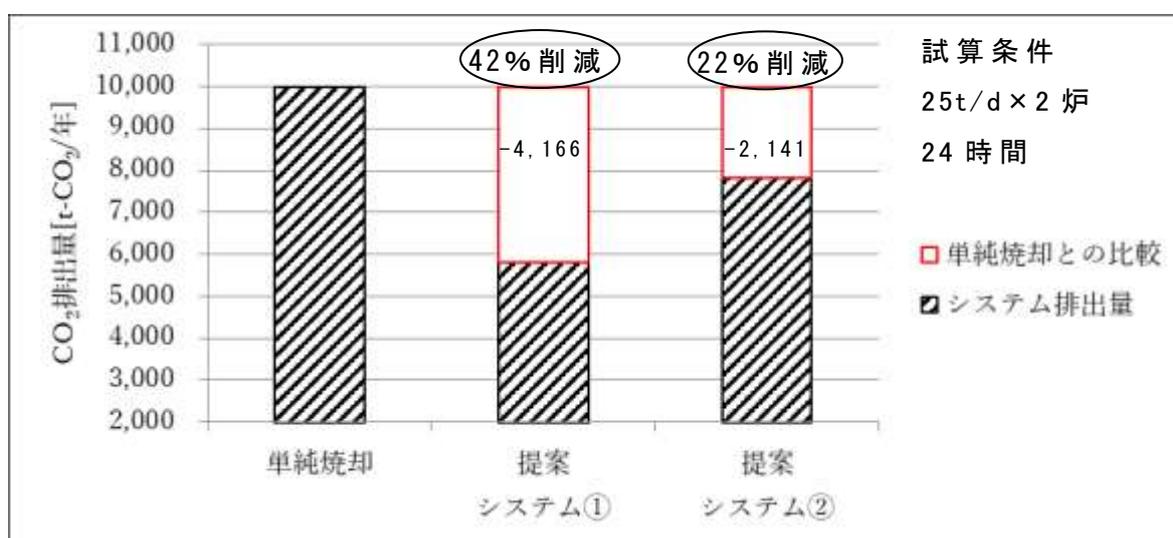


図 1-1 提案システムにおける CO₂ 排出量比較

上記の結果より、提案システム①では、-4,166t-CO₂/年の 42%削減となり、提案システム②では、-2,141 t-CO₂/年の 22%削減となり、本事業が有効であることがわかる。

表 1-1 単純焼却施設 CO₂ 排出量(従来)

基本条件		
環境省ごみ基準		
生ごみ	35%	
紙ごみ	25%	
プラスチック	15%	
プラ焼却に伴うCO ₂ 排出係数	2.77 tCO ₂ /t	
必要電力量	513 kWh/t	H21年度施設台帳より
電力係数	0.579 tCO ₂ /MWh	
ごみ処理量	50t/日	
年間運転日数	280日	
試算結果		
完全燃焼の場合(単純焼却炉)		
① プラ焼却に伴うCO ₂ 発生量		
CO ₂ 日排出量	20.8 t-CO ₂ /日	
CO ₂ 年排出量	5,817 t-CO ₂ /年	
② 施設稼働に伴う電力に伴うCO ₂ 発生量		
CO ₂ 日排出量	14.9 t-CO ₂ /日	
CO ₂ 年排出量	4,158 t-CO ₂ /年	
③ 合計		
CO ₂ 日排出量	35.6 t-CO ₂ /日	
CO ₂ 年排出量	9,975 t-CO ₂ /年	

表 1-2 炭化燃料の利用による CO₂ 排出量(提案システム①②)

基本条件			
	提案①	提案②	
基本ごみ			
ごみ処理量	50	50 t/日	
炭化製造率	18	18%	実績
炭化燃料製造量	9.0	9.0 t/日	
炭化施設で使用する炭化燃料量	1.2	1.2 t/日	
ごみ処理施設で使用する炭化燃料量	0.12	0.12 t/日	
ボイラで炭化燃料使用量	7.7	7.7 t/日	
試算結果			
	提案①	提案②	
1) 利用先への搬送によるCO ₂ 排出量			
利用先	発電所	AP(アスファルトプラント)	
年間運転日数	280	280 日	
15トン車で12トン運搬			実績
輸送月間回数	180	180 回/年	
排出係数	2.58	2.58 kgCO ₂ /Lit	
普通貨物燃費	5.8	5.8 km/Lit	環境省
走行距離	50	50 km(往復)	
軽油使用量	8.6	8.6 Lit/回	
CO ₂ 排出量	22	22 kgCO ₂ /回	
CO ₂ 排出量	4.00	4.00 t-CO ₂ /年	
2) 利用先での利用によるCO ₂ 削減量			
利用先	発電所	AP(アスファルトプラント)	
石炭発熱量	5,375	kcal/kg	
A重油発熱量		9,340 kcal/lit	
炭化物発熱量	3,000	3,000 kcal/kg	
発熱量比	0.56	0.32	
石炭代替量	4.30	t/日	発熱比×使用量
A重油代替量		2.48 klit/日	発熱比×使用量
石炭のCO ₂ 排出係数	3.24	t-CO ₂ /t	
重油のCO ₂ 排出係数		2.71 t-CO ₂ /klit	
CO ₂ 削減量(日)	13.9	6.7 t-CO ₂ /日	
CO ₂ 削減量(年)	3,904	1,879 t-CO ₂ /年	
3) 炭化施設での利用によるCO ₂ 削減量			
灯油発熱量	8,767	8,767 kcal/lit	
炭化物発熱量	3,000	3,000 kcal/kg	
発熱量比	0.34	0.34	
灯油代替量	0.40	0.40 klit/日	発熱比×使用量
灯油のCO ₂ 排出係数	2.58	2.58 t-CO ₂ /t	
CO ₂ 削減量(日)	1.0	1.0 t-CO ₂ /日	
CO ₂ 削減量(年)	289	289 t-CO ₂ /年	
4) 炭化施設稼働に伴う電力に伴うCO ₂ 排出量差			
単純焼却施設必要電力量	513	513 kWh/t	H21年度施設台帳より
炭化施設必要電力量	440	440 kWh/t	実績
電力係数	0.579	0.579 tCO ₂ /MWh	
CO ₂ 削減量(日)	2.1	2.1 t-CO ₂ /日	
CO ₂ 削減量(年)	592	592 t-CO ₂ /年	
5) ごみ処理施設での利用によるCO ₂ 削減量			
重油発熱量	9,340	9,340 kcal/lit	
炭化物発熱量	3,000	3,000 kcal/kg	
発熱量比	0.32	0.32	
灯油代替量	0.04	0.04 lit/日	発熱比×使用量
石炭のCO ₂ 排出係数	3.24	3.24 t-CO ₂ /t	
CO ₂ 削減量(日)	0.12	0.12 t-CO ₂ /日	
CO ₂ 削減量(年)	35	35 t-CO ₂ /年	
6) 低質ごみ時灯油使用によるCO ₂ 発生量			
使用量	18	18 Lit/ごみt	
排出係数	2.58	2.58 kgCO ₂ /Lit	
CO ₂ 排出量	2.3	2.3 t-CO ₂ /日	
CO ₂ 年排出量	650	650 t-CO ₂ /年	
7) 各施設で石炭代替する場合のCO ₂ 削減量			
CO ₂ 削減量(年)	4,166	2,141 t-CO ₂ /年	2)+3)+4)+5)-1)-6)

第 7 章 事業終了後の横展開の可能性

1. 本事業終了後に水平展開した場合の CO₂ 排出量等の削減効果の見込み

本事業後には、ごみ単純焼却施設のみでなくごみ発電施設への利用を広げることによる展開も行う。中大規模ごみ処理施設のボイラ付きストーカ炉でも、起動用に化石燃料が使用されていることから、事業後は、炭化施設から近隣のごみ単純焼却施設やごみ発電施設等 5 施設への炭化燃料供給を行うこととして、試算する。

環境省の一般廃棄物処理事業実態調査(平成 28 年度)^[1]によれば、100t/日以下規模のごみ処理場は全国に 529 組合存在している。例えば、2020 年からの 10 年間でその組合の 10% の 55 施設(RDF 施設数と同程度)が炭化処理施設を建設し、発電所と 275 施設(25km 以内)のごみ処理施設に運ばれると仮定して試算した場合を提案①とし表 1-1 に示す。ここで、発電所の利用施設数としては、複数の炭化施設から 1 つの発電所に持ち込まれることも想定できるが、ここでは、炭化 1 施設に対し利用先は 1 つとして示したため、表中には※印を示した。水平展開後の最終目標(2030 年)としての CO₂ 削減見込み量は、229,130t-CO₂/年となる。なお、炭化燃料化技術の活用による CO₂ 削減コストは、132,000 円/t-CO₂。提案事業の費用対効果は、698t-CO₂/百万円となる。

次に提案②として、発電所以外の利用先としてアスファルトプラント(AP)に納入した場合の試算を表 1-2 に示す。AP の利用施設数としては、炭化施設からの炭化燃料供給量と AP での使用量がバランスするために単価 1 施設に対し利用先は 1 つとして示すことができる。水平展開後の最終目標(2030 年)としての CO₂ 削減見込み量は、117,775t-CO₂/年となる。なお、炭化燃料化技術の活用による CO₂ 削減コストは、257,000 円/t-CO₂。提案事業の費用対効果は、359t-CO₂/百万円となる。

表 1-1 全体システムにおける CO₂ 削減量 (提案① 発電所+ごみ処理施設)

	事業目標	最終目標 (水平展開後)
年度	2020 年度	2030 年度
炭化施設	1 施設 × 1 炉	55 施設
発電所	1 施設	※55 施設
ごみ処理施設	1 施設 (起動用) (45t/日 × 1 炉)	275 施設
搬送距離	25km	25km
CO ₂ 削減効果 t-CO ₂ /年 (a)	4,166	229,130
炭化施設コスト 百万円/20 年 (b)	11,000	605,000
CO ₂ 削減コスト 千円/t-CO ₂ (=b/a × 20)	132	132
提案事業総事業費 百万円/3 年 (d)	328.4	—
提案事業の費用対効果 t-CO ₂ /百万円 (a/d)	—	698

表 1-2 全体システムにおける CO₂ 削減量 (提案② AP+ごみ処理施設)

	事業目標	最終目標 (水平展開後)
年度	2020 年度	2030 年度
炭化施設	1 施設 × 1 炉	55 施設
アスファルトプラント (AP)	1 施設	※55 施設
ごみ処理施設	1 施設 (起動用) (45t/日 × 1 炉)	275 施設
搬送距離	25km	25km
CO ₂ 削減効果 t-CO ₂ /年 (a)	2,141	117,775
炭化施設コスト 百万円/20 年 (b)	11,000	605,000
CO ₂ 削減コスト 千円/t-CO ₂ (=b/a × 20)	257	257
提案事業総事業費 百万円/3 年 (d)	328.4	—
提案事業の費用対効果 t-CO ₂ /百万円 (a/d)	—	359

第 7 章 参考文献

- [1] 環境省 一般廃棄物処理事業実態調査の結果(平成 28 年度)について

第 8 章 成果と課題

1. 成果と課題

本事業における提案システムの開発項目と目標に対する成果を示す。

(1) 炭化施設の高性能化

a. 炭化燃料化施設を模擬した炭化燃料燃焼試験

目標：炭化燃料の燃焼特性（直投燃焼の可否）を確認する。

成果：炭化燃料を直投ノズル型の投入方法にて実機を模擬した試験炉内へ投入し、排ガス値は、炭化センターの基準値より十分低い値となり、燃焼率も 95%以上の結果が得られた。この結果より炭化燃料化施設における施設内利用で 20%以上の混焼が行うという開発目標達成の目処がついた。

b. 燃焼炉内解析結果の検証

目標：燃焼シミュレーション解析結果と模擬燃焼試験結果の比較検証を行い、炉内燃焼状況と燃焼率の整合性を確認する。

成果：炭化燃料化施設の燃焼炉における燃焼シミュレーション解析結果は。燃焼状況や燃焼率が同様であることが確認でき、現象との整合性があることを確認した

(2) 炭化燃料利用先の拡大

a. 炭化燃料燃焼試験の実施

目標：炭化燃料の燃焼性（混焼燃料の可否）を確認する。

成果：＜混焼バーナ＞

目標である炭化燃料 20%混焼において燃焼率 85%以上排ガス特性として、排ガス規制値内での利用が可能
混焼率を 30%まで上げて、混焼利用は可能
起動時利用を模擬した場合も、利用可能である。

＜吹込バーナ＞

目標である炭化燃料 20%混焼において燃焼率 95%以上排ガス特性として、排ガス規制値内での利用が可能
混焼率を 50%まで上げて、混焼利用は可能
起動時利用を模擬した場合も、利用可能である。

b. 予備焼却炉内解析検証

目標：燃焼シミュレーション解析結果と燃焼試験結果の比較検証を行い、炉内温度分布、燃焼率の整合性を確認する。

成果：＜混焼バーナ＞

重油専焼、20%混焼の燃焼試験における炉内温度分布、燃焼率で、解析結果と整合性があることを確認した。

<吹込バーナ>

重油専焼、20%混焼の燃焼試験における炉内温度分布、燃焼率で、解析結果と整合性があることを確認した。

c.実証炉への開発バーナ設置検討

目標：実証炉へ設置するための検討を行う。

成果：播磨町塵芥処理センター実証試験用のバーナとして吹込バーナと直投ノズルを選定し、計画・設計を実施した。

また、設置に必要な申請を行い、来年度実施の目処をつけた。

d.その他利用先での利用検討

目標：アスファルトプラントにおける重油-炭化燃料混焼検討

成果：炭化燃料がもつナトリウム、カリウム等によって塩素分が塩化物として固定化されるため、腐食性ガスによる腐食が促進される可能性が低く、塩素濃度がある程度高くても利用できる結果が示唆された。

目標：安全利用のための検討

成果：ごみ固形燃料については、ごみ炭化燃料適正管理検討会より、また、下水汚泥の炭化燃料については下水道事業団より安全な取り扱いについて発行されており、平成15年に竣工された西海市炭化センターでは、その取り扱いと比較して問題ない取り扱いがされていることがわかった。

(3)システム全体

目標：炭化施設と燃料利用先を組み合わせた全体システムにおいてCO₂削減のためのシステム検討を行う

成果：50トン/日の施設規模の場合、提案システムを適用提案システムを適用した場合、CO₂排出量を従来の単純焼却システムよりも年間4,166t-CO₂(発電所利用)2,141t-CO₂(アスファルトプラント利用)削減できることが試算された。

これらの結果により、事業終了後も水平展開され2030年度までに全国55施設(RDF施設同等)に炭化燃料化施設が普及し、各施設が炭化燃料を利用することで年間229,130t-CO₂(発電所利用)117,775t-CO₂(アスファルトプラント利用)削減が可能であることが試算された。

第9章 有識者外部委員会の開催

表1に示す委員および各社代表者にて行う検証委員会を設置し、本事業の円滑な実施を図った。検証委員会の開催実績を表2に示す。

表1 検証委員会名簿

氏名	所属・役職	出席	
		9/9	2/19
松藤 敏彦	北海道大学 工学研究院 環境創生工学部門 教授	○	○
黄 仁姫	北海道大学 工学研究院 環境創生工学部門 助教	○	○
上田 淳子	播磨町役場 すこやか環境グループ 統括	○	×
中静 靖直	株式会社 グリーンコール西海 執行役員 所長	○	○
大築 貴洋	環境省 環境再生・資源循環局 専門員	○	○
田中 嘉彦	環境省 環境再生・資源循環局 課長補佐	○	○
内田 博之	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 環境プラント総括部環境プラント部 総括部長	○	×
尾藤 俊文	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 環境プラント総括部 部長	○	×
碓永 純也	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 営業本部環境プラント営業部 部長	○	○
谷口 暢子	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 環境プラント総括部環境プラント部装置技術課 課長	○	×
竹田 航哉	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 環境プラント総括部環境プラント部	×	○
清水 正也	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 環境プラント総括部環境プラント部装置技術課 基幹職	○	○
井原 崇之	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 環境プラント総括部環境プラント部装置技術課 基幹職	○	○
横路 尚人	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 環境プラント総括部環境プラント部装置技術課 係員	○	○

氏名	所属・役職	出席	
		9/9	2/19
福永 史樹	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 環境プラント総括部環境プラント部装置技術課 係員	○	○
小澤 奎太	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 環境プラント総括部環境プラント部装置技術課 係員	○	○
戸田 信一	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 技術企画部解析技術課 基幹職	○	○
五十嵐 実	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 技術企画部解析技術課 基幹職	○	○
森永 友一郎	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 技術企画部解析技術課	○	○
武藤 貞行	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー ボイラプラント総括部 基幹職	○	○
谷口 孝二	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー ボイラ総括部火力ボイラプラント部設計一課 基幹職	○	×
高田 康寛	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 技術研究材料究部研究二課	×	○
熊田 憲彦	川崎重工業(株)本社技術開発本部 技術研究所熱システム研究部研究三課 基幹職	○	×
勝野 正也	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 営業部 環境プラント営業部 西部営業課 基幹職	○	×
櫻井 崇晴	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 営業本部環境プラント営業部西部営業課	○	○
中野 宏美	川崎重工業(株)エネルギー・環境プラントカンパニー 環境プラント総括部環境プラント部装置技術課	○	×

氏名	所属・役職	出席	
		9/9	2/19
衣笠 敏文	日工株式会社 技術本部 テクノセンター センター長	○	○
中山 知巳	日工株式会社 事業本部 本部長 事業企画部 部長 AP統括営業部 部長	○	○
蓬萊 秀人	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 副センター長	○	○
川村 克裕	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 開発部 部長	○	○
岡田 徹	日工株式会社 事業本部 AP統括営業部 国内営業部 部長	○	×
田中 隼人	日工株式会社 事業本部 AP総括営業部 国内営業部 営業課 課長	○	○
今田 雄司	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 開発部 開発1課 課長	○	○
下田 勝	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 開発部 開発5課 環境計量事業所 所長	○	○
宇山 伸宏	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 開発部 開発1課	○	○
堀口 諒	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 開発部 開発1課	○	×
北野 裕樹	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 開発部 開発1課	○	○
田中 翔太	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 開発部 開発1課	○	×
木下 亮	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 開発部 開発1課	○	○
宗像 元	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 開発部 開発1課	○	○
浜辺 拓真	日工株式会社 技術本部 テクノセンター 開発部 開発4課	○	×

表 2 検証委員会開催実績

開催日		開催場所	内容
第 3 回	令和元年 9 月 9 日	日工株式会社 神戸本社 会議室	・事業内容紹介 ・事業実施経過報告 ・討議
第 4 回	令和 2 年 2 月 19 日	川崎重工業株式会社 東京本社 会議室	・事業実施報告 ・討議

第 10 章 平成 31 年度中小廃棄物処理施設における廃棄物エネルギー回収方策等に係る検討調査委託業務への協力

環境省が別途実施する「平成 31 年度中小廃棄物処理施設における廃棄物エネルギー回収方策等に係る検討調査委託業務」に係るヒアリングに参加した（表 1）

表 1 平成 31 年度中小廃棄物処理施設における廃棄物エネルギー回収方策等に係る検討調査委託業務参加実績

名称	開催日	開催場所	主催
平成 31 年度中小廃棄物処理施設における廃棄物エネルギー回収方策等に係る検討調査検討会	令和元年 12 月 4 日	航空会館 501 会議室	環境省 日本環境衛生センター パシフィックコンサルタンツ 株式会社