

令和 2 年度 環境省委託業務
令和 2 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 3 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。

ごみ燃料化技術としては、RDF やごみ炭化燃料化技術等がある。

RDF 技術を利用した施設は、2000 年代に 60 施設、RDF 発電施設は 5 施設展開されたが、発火事故および処理費の問題でそれ以後普及が進んでいない。

炭化技術を利用した施設は、国内において 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。

- (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、結果として有償処理となる

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発電事業者の発電燃料として利用するシステムを構築し、順調に運営を続けている。

本事業では、この西海市の取組みをもとに、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ことで、CO₂ 排出削減に貢献することを目的に取組む。

ごみ炭化燃料化施設である西海市炭化センターの運営を通じて報告された文献より、今後ごみ炭化燃料化施設の普及、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

そこで本事業では、求められる点の(1)(3)をごみ炭化燃料化施設の高性能化、(2)を炭化燃料の利用先拡大と位置付け、ごみ炭化燃料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先も含めたシステムを構築することを目的に取組む。本環境省委託事業は、CO₂ 排出削減に寄与することが大目的であることから、上記(1)(2)を本事業範囲内で実施し、(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

- ◆ごみ炭化燃料化施設の高性能化
(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

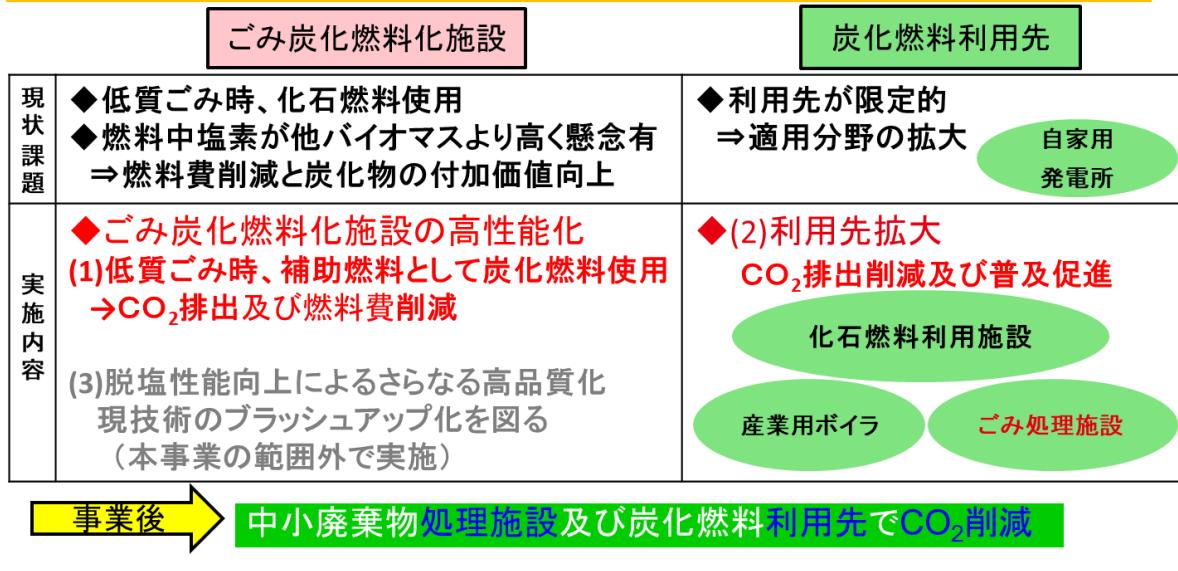


図 本事業の概要

なお、ごみ炭化燃料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) ごみ炭化燃料化施設の高性能化

ごみ炭化燃料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利用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
- ・その他の利用先としてアスファルトプラント利用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アスファルトプラントでの実証試験、アスファルト施工実証試験

以上のごみ炭化燃料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(2030年度に2013年度比削減目標26%に向け)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、令和2年度取組んだ成果の概要を以下に示す。

(1) 炭化燃料利用先の拡大

a. ごみ処理施設実証炉における利用検討

- ・昨年度試験炉にて燃焼試験を行い良好な燃焼特性を得た吹込バーナと直投ノズルを使用して、播磨町塵芥処理センターにて実証試験と解析を実施し、下記の結果を得た。

1) 吹込バーナ利用

起動時の利用において、目標である炭化燃料20%混焼では、燃焼率90%以上で、排ガス特性として、排ガス規制値内の利用が可能である。

通常運転時利用において、ごみ質変動による最大発電量出力のための補助燃料としても利用可能である

2) 直投ノズル利用

起動時の利用において、目標である炭化燃料20%混焼では、燃焼率90%以上で排ガス特性として、排ガス規制値内の利用が可能である。

b. アスファルトプラント(AP)における利用検討

- ・昨年度試験炉にて燃焼試験を行い良好な燃焼特性を得た吹込バーナを使用して、前田道路㈱技術研究所の小型プラントにて実証試験と解析を実施し、下記の結果を得た。

1) 吹込バーナ利用

通常運転時利用において

目標である炭化燃料 20% 混焼において燃焼率 90% 以上

排ガス特性として、排ガス規制値内での利用が可能である

さらに、混焼率を 40% 混焼に上げても、混焼利用は可能である

2) アスファルトプラントにおける重油 - 炭化燃料混焼腐食解析・試験確認

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、炭化燃料中に含まれる塩素分により腐食が懸念されるため、化学熱力学解析を用いて腐食の検討試験による検証を行った。検証の結果、炭化燃料がもつカルシウムによって硫黄分が固定化され S_0_2 、 S_0_3 のガス濃度増加が抑制されるとともに HCl 濃度の影響は小さいため、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。

c. アスファルト施工時の検討

- 炭化燃料をアスファルトプラントで利用した際に燃焼灰がアスファルトに混入した合材への影響について合材強度試験、道路施工実地舗装試験による溶出試験を行い下記の結果を得た。

1) 炭化燃料 + 燃焼灰合材のラボ試験

強度試験等の物理性状試験で基準値をクリアするとともに、溶出試験でも基準値をクリアした

2) 炭化燃料灰含有フィラーとしてのラボ試験

混焼率 40% 以下で強度試験等の物理性状試験で基準値をクリアした

3) 実地舗装試験

舗装直後および舗装後 5 か月経過したサンプルにて強度試験等の物理性状試験で基準値をクリアするとともに、溶出試験でも基準値をクリアした

上記より、利用先のターゲットであるごみ処理施設、アスファルトプラントで炭化燃料が利用できることを確認した。

(2) 利用先も含めての炭化燃料化システム全体 CO_2 削減量の試算

上記の実証試験結果より、各システム利用時の CO_2 削減量を試算した。

前提条件として、炭化燃料化施設の処理規模を 50t / 日として、提案システムを適用した場合、

a. CO_2 排出量を従来の単純焼却よりも

年間 2,682t- CO_2 (アスファルトプラント利用)、2,642t- CO_2 (ごみ処

理施設利用)、4,730t-CO₂ (発電所利用) 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、RDF 施設と同等の伸び率で中小規模の 10% の施設に水平展開された場合 2030 年度までに全国 55 施設に炭化燃料化施設が普及するとして各連携先の CO₂ 削減量を試算すると、各施設が炭化燃料を利用することで年間 148kt-CO₂ (アスファルトプラント利用)、145kt-CO₂ (ごみ処理施設利用)、260kt-CO₂ (発電所利用) 削減が可能であることが試算され、連携による効果が高く、有効なシステムであることを確認した。

(3) システム導入における投資回収年の試算

上記の実証試験結果より、各システム利用時の回収年を試算する。前提条件として、炭化燃料化施設の処理規模を 50t／日として、

- a. 分散利用が可能なアスファルトプラント 2 施設に設置した場合投資回収年は、1.9 年
- b. ごみの広域処理としても採用可能なごみ処理施設 1 施設 2 炉に設置した場合投資回収年は、1.2 年
- c. 大規模利用が可能で、新たな投資が難しいとされる発電所で利用を行う場合は、既設の施設利用が可能なため、0 円

と試算され、炭化燃料化施設で製造された炭化燃料を各利用施設（①アスファルトプラント利用、②ごみ処理施設利用、③発電所利用）で利用するシステムが事業性の高いシステム提案であることを確認した。

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.

The use of carbonization technology for energy recovery at small to medium-sized waste processing facilities

- ◆ Improve the performance of carbonization facilities
(Use as alternative fuel)
- ◆ Expand the number of carbonized fuel users

Promote the utilization of CO₂ emission reduction technology

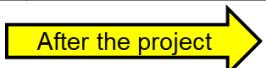
	Carbonization facilities	Users of carbonized fuel
Current issues	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Use of fossil fuels for low-quality waste ◆ There are concerns due to the higher levels of chlorine in the fuel than in other biomass. => Reducing fuel costs and increasing added value of carbonized material 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ There are only limited users. => Expansion of areas of application
Details to be implemented	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Carbonization facility performance improvement (1) Use carbonized fuel as an auxiliary fuel for low-quality waste -> Reduction of CO₂ emissions and fuel costs ◆ (3) Further improve quality with improved desalting performance Improve the current technology (Implementation outside the scope of this project) 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ (2) Expansion of users CO₂ emission reduction and efforts to promote use
 After the project		CO₂ reduction at small to medium-sized waste processing facilities and carbonized fuel users

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>

- a. The construction of a supply system capable of supplying carbonized fuel according to the method of use
- b. 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
- Combustion simulations for the use of carbonized fuel in the asphalt processing facility, combustion tests in a test facility and demonstration tests in asphalt processing facility, asphalt construction verification tests.

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) Expansion of locations using carbonized fuel

- a. Investigation of use at demonstration furnaces in waste treatment facilities
- Blow burners and direct injection nozzles, which demonstrated favorable combustion characteristics during combustion tests conducted at test furnaces last fiscal year, were used to implement verification tests and analysis at the Harima Town Waste Treatment Center, and the following results were obtained.

1) Use of blow burners

When used during startup, the combustion rate was 90% or higher for mixed combustion with a target of 20% carbonized fuel.

In terms of the exhaust gas characteristics, use within the exhaust gas regulation values is possible.

Use under normal operation is also possible for the quantification of fluctuations in waste quality.

2) Use of direct injection nozzles

When used during startup, the combustion rate was 90% or higher for mixed combustion with a target of 20% carbonized fuel.

In terms of the exhaust gas characteristics, use within the exhaust gas regulation values is possible.

b. Investigation of use at asphalt plants (AP)

- Blow burners, which demonstrated favorable combustion characteristics during combustion tests conducted at test furnaces last fiscal year, were used to implement verification tests and analysis at a small-sized plant in the Maeda Road Construction Co., Ltd Technical Research Institute, and the following results were obtained.

1) Use of blow burners

When used during normal operation, the combustion rate was 90% or higher for mixed combustion with a target of 20% carbonized fuel.

In terms of the exhaust gas characteristics, use within the exhaust gas regulation values is possible.

Furthermore, use with mixed combustion is possible even if the mixed combustion rate is increased to a 40% mixture.

2) Corrosion analysis and test confirmation of mixed combustion using heavy oil and carbonized fuel in asphalt plants

Chemical thermodynamic analysis was performed to investigate the issue of corrosion, which is a concern when carbonized fuel is applied as an alternative to heavy oil used for drying aggregate at asphalt plants. The analysis showed that since chlorine content from elements such as sodium and potassium contained in carbonized fuel becomes solidified in the form of chlorides, there is a low possibility for corrosion caused by corrosive gas to be accelerated, and it was suggested that use will be possible even if the chloride concentration is somewhat high.

c. Investigation during asphalt construction work

- Dissolution tests were conducted through composite material strength tests and road construction site pavement tests, to examine the effects on

composite materials when combustion ash becomes mixed into asphalt during the use of carbonized fuel at asphalt plants, and the following results were obtained.

- 1) Laboratory tests of carbonized fuel + combustion ash composite material

The reference value criteria were met in physical property tests such as strength tests, and also in dissolution tests.

- 2) Laboratory tests as filler containing carbonized fuel ash

With a mixed combustion ratio of 40% or less, the reference value criteria were met in physical property tests such as strength tests.

- 3) Site pavement tests

Samples from immediately after paving and from 5 months after paving met the reference value criteria in physical property tests such as strength tests, and also in dissolution tests.

According to the above results, it was confirmed that the use of carbonized fuel is possible at the target locations of waste treatment facilities and asphalt plants.

(2) Estimation of system-wide CO₂ reduction

The amounts of CO₂ reduction that can be achieved when using each system were estimated from the above verification test results. As a prerequisite, the scale of treatment performed at facilities to be converted to use carbonized fuel was set to be 50 t/day, and when the proposed systems were applied, the following results were obtained.

- a. It was estimated that compared to conventional simple incineration systems, the CO₂ emission volume can be reduced annually by 2,682 t-CO₂ for use at asphalt plants, 2,642 t-CO₂ for use at waste treatment facilities, and 4,730 t-CO₂ for use at power plants.
- b. Estimates were made from these results for the situation where after the end of the project, if these systems are deployed horizontally to 10% of small- to medium-sized facilities with a growth rate equivalent to RDF facilities, then facilities converted to use carbonized fuel will spread and their number will increase to 55 facilities across the country by the 2030 fiscal year. These estimates showed that the use of carbonized fuel by each facility can lead to an annual reduction of 148 kt-CO₂ for use at asphalt plants, 145 kt-CO₂ for use at waste treatment facilities, and 260 kt-CO₂ for use at power plants, confirming that these are valid systems

for which coordination and cooperation will be highly effective.

(3) Estimation of investment recovery period after system introduction

The recovery period in years when using each system is estimated as follows from the above verification test results. As a prerequisite, the scale of treatment performed at facilities to be converted to use carbonized fuel was set to be 50 t/day.

- a. For installation at 2 asphalt plants where decentralized use is possible, the investment recovery period is 1.9 years.
- b. For installation of 2 furnaces at 1 waste treatment facility where use is possible as wide area waste treatment, the investment recovery period is 1.2 years.
- c. For use at power plants, where large-scale use is possible but new investment is considered difficult, the investment is estimated to be 0 yen since the use of existing facilities is possible.

It was therefore confirmed that all of the proposed systems are systems with a high degree of feasibility.

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
4 本報告書における単語の定義	1-7
4.1 単語の定義	1-7
第2章 ごみ処理施設における利用検討	2-1
1 ごみ処理施設設置概要	2-1
1.1 設置バーナの選定	2-2
1.2 設置概要	2-3
1.3 工事概要	2-4
2 ごみ処理施設実証試験	2-5
2.1 試験目的、工事概要	2-5
2.2 吹込バーナ実証試験	2-8
2.2.1 燃焼解析	2-8
2.2.2 実証試験設備、試験方法	2-12
2.2.3 実証試験条件	2-14
2.2.4 試験結果・解析との整合性	2-15
2.2.5 試験時に発生した問題点と対策	2-24
2.3 直投ノズル実証試験	2-27
2.3.1 燃焼解析	2-27
2.3.2 実証試験設備・試験方法	2-30
2.3.3 実証試験条件	2-32
2.3.4 試験結果、解析との整合性	2-33
2.4 ごみ処理施設での利用における腐食検討	2-40
2.4.1 想定される腐食機構	2-40
2.4.2 試験結果との比較	2-41

2.5 まとめ	2-42
3 ごみ処理施設設置後の影響検討	2-43
3.1 影響要因の調査	2-43
3.2 確認結果	2-43
3.2.1 炉内耐火物への影響	2-43
3.2.2 ストーカ火格子への影響	2-44
3.2.3 EP(電気集塵機)への影響	2-45
3.2.4 炭化燃料の炉内圧への影響	2-45
3.3 メリット試算	2-48
3.3.1 CO ₂ 削減量	2-48
3.3.2 概算コスト、回収年月	2-50
第3章 アスファルトプラントにおける利用検討	3-1
1 アスファルトプラント設置概要	3-1
1.1 アスファルトプラントでの運用方法	3-1
1.2 設置バーナの選定	3-1
1.3 設置概要	3-3
1.3.1 混焼バーナの設置	3-3
1.3.2 吹込バーナの設置	3-4
1.3.3 ストックヤード	3-5
1.3.4 ストックヤードからの搬送	3-5
1.4 工事概要	3-6
2 アスファルトプラント実証試験結果	3-7
2.1 吹込バーナ実証試験目的・設置概要(日工)	3-7
2.1.1 試験概要	3-7
2.1.2 解析検討	3-8
2.1.3 実証試験設備、試験方法	3-14
2.1.4 実証試験条件	3-16
2.1.5 試験結果、解析との整合性	3-18
2.1.6 まとめ	3-29
3 アスファルトプラント設置後の影響検討	3-30
3.1 影響要因の調査	3-30
3.2 確認結果	3-30
3.2.1 各機器への影響	3-30
3.3 メリット試算	3-32
3.3.1 CO ₂ 削減量	3-32
3.3.2 概算コスト、回収年月	3-34

4	アスファルトプラントでの炭化燃料混焼時における装置材料 の腐食に関する検討	3-35
4.1	検討目的・検討内容	3-35
4.1.1	背景・目的	3-35
4.1.2	昨年度の解析検討結果	3-35
4.1.3	今年度の試験・解析検討内容	3-36
4.1.4	推定される腐食機構	3-37
4.2	化学熱力学解析	3-38
4.2.1	熱力学データベース	3-38
4.2.2	燃料組成	3-39
4.3	炭化燃料混焼時の腐食性ガス(SO ₂ , SO ₃ , HCl) 生成量抑制機構の検討	3-40
4.3.1	解析方法	3-41
4.3.2	解析検討結果	3-42
4.4	DTF 試験による化学熱力学解析の妥当性検証	3-44
4.4.1	試験装置	3-45
4.4.2	解析方法	3-46
4.4.3	解析条件	3-46
4.4.4	解析結果	3-48
4.4.5	DTF 試験でのガス分析結果と解析結果との比較	3-50
4.5	アスファルトプラントでのガス分析結果を用いた 解析条件の最適化	3-53
4.5.1	実炉条件を用いた予備解析	3-53
4.5.2	実炉でのガス分析	3-54
4.5.3	解析結果と分析結果の比較	3-56
4.6	バーナ試験による解析の妥当性検証	3-56
4.6.1	バーナ試験条件	3-57
4.6.2	解析方法	3-58
4.6.3	解析条件	3-59
4.6.4	解析結果	3-60
4.6.5	バーナ試験でのガス分析結果と解析結果との比較	3-61
4.7	未脱塩処理炭化燃料の適用可能性検討	3-62
4.8	炭化燃料混焼による HCl ガス濃度の増加が 装置の腐食に与える影響の検討	3-63
4.9	実炉試験での腐食検討	3-65
4.9.1	試験条件	3-65

4.9.2 実測値を用いた炭化燃料の混焼がプラント機器の 腐食に及ぼす影響の検討	3-67
4.10 まとめ	3-68
第4章 アスファルト合材施工時の検討	4-1
1 燃焼灰および炭化燃料を添加した場合のアスファルト合材 ...	4-2
1.1 試験目的	4-2
1.2 炭化燃料と燃料灰を合材に添加した適用確認試験	4-3
1.2.1 試験方法	4-4
1.2.2 溶出試験結果	4-7
1.2.3 物理性状試験結果	4-8
1.3 フィラー規格への適合検討	4-9
1.3.1 試験方法	4-9
1.3.2 試験結果	4-12
1.4 実地舗装試験	4-15
1.4.1 舗装試験用合材の製造と施工	4-15
1.4.2 舗装試験での試験方法	4-16
1.4.3 試験結果	4-17
1.5 まとめ	4-22
第5章 二酸化炭素排出量削減効果	5-1
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	5-1
第6章 事業終了後の横展開の可能性	6-1
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	6-1
第7章 成果と課題	7-1
1 成果と課題	7-1
第8章 有識者外部委員会の開催	8-1
第9章 令和2年度 シンポジウムへの協力	9-1

第1章 事業概要

1 事業概要

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。

ごみ燃料化技術としては、RDF やごみ炭化燃料化技術等がある。

RDF 技術を利用した施設は、2000 年代に 60 施設、RDF 発電施設は 5 施設展開されたが、発火事故および処理費の問題でそれ以後普及が進んでいない。

炭化技術を利用した施設は、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。

- (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、結果として有償処理となる

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 2 年間利用した後、事業用発電である電源開発の松島火力発電所で利用するシステムを構築し、順調に運営を続けている。

本事業では、この西海市の取組みをもとに、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ことで、CO₂ 排出削減に貢献することを目的に取組む。

ごみ炭化燃料化施設である西海市炭化センターの運営を通じて報告された文献^[1]より、今後ごみ炭化燃料化施設の普及、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) ごみ炭化燃料化施設内での 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

そこで本事業では、求められる点の(1)(3)を**ごみ炭化燃料化施設の高性能化**、(2)を**炭化燃料の利用先拡大**と位置付け、ごみ炭化燃料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先も含めたシステムを構築することを目的に取組む。本環境省委託事業は、CO₂削減に寄与することが大目的であることから、本事業では上記(1)(2)を本事業範囲内実施し、(3)については本事業範囲外で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。

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

- ◆ごみ炭化燃料化施設の高性能化
(燃料代替利用)
- ◆炭化燃料利用先の拡大

The diagram illustrates the relationship between waste treatment facilities and energy recovery through carbonization technology, leading to CO₂ reduction. It shows two main components: 'ごみ炭化燃料化施設' (Waste Carbonization Fuel Treatment Facility) and '炭化燃料利用先' (User of Carbonized Fuel). The facility is highlighted in pink, while the user is in green. A yellow arrow points from the facility to the user, labeled 'CO₂排出削減技術の活用促進' (Promotion of CO₂ reduction technology). Below the facility, a red arrow points to the user, labeled '(1)低質ごみ時、補助燃料として炭化燃料使用 → CO₂排出及び燃料費削減' (When using low-quality waste, use carbonized fuel as auxiliary fuel → Reduce CO₂ emissions and fuel costs). To the right of the user, three green ovals represent potential users: '自家用発電所' (Residential power generation), '化石燃料利用施設' (Facilities using fossil fuels), '産業用ボイラ' (Industrial boiler), and 'ごみ処理施設' (Waste treatment facility).

現状課題	ごみ炭化燃料化施設	炭化燃料利用先
現状課題	<ul style="list-style-type: none"> ◆低質ごみ時、化石燃料使用 ◆燃料中塩素が他バイオマスより高く懸念有 ⇒燃料費削減と炭化物の付加価値向上 	<ul style="list-style-type: none"> ◆利用先が限定的 ⇒適用分野の拡大
実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ◆ごみ炭化燃料化施設の高性能化 (1)低質ごみ時、補助燃料として炭化燃料使用 → CO₂排出及び燃料費削減 (3)脱塩性能向上によるさらなる高品質化 現技術のブラッシュアップ化を図る (本事業の範囲外で実施) 	<ul style="list-style-type: none"> ◆(2)利用先拡大 CO₂排出削減及び普及促進

事業後 中小廃棄物処理施設及び炭化燃料利用先でCO₂削減

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。それについて述べる。

◆ごみ炭化燃料化施設の高性能化

(1) ごみ炭化燃料化施設内での CO₂ 排出と燃料費削減

ごみ炭化燃料化施設の運転時にごみの自己熱のみでは施設の運転ができない程度に低質ごみ側へ変動した際に灯油を使用する場合がある。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ごみ炭化燃料化施設の 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・ごみ炭化燃料化施設以外のごみ処理施設(以下、ごみ処理施設)や化石燃料を使用する施設(アスファルトプラント等)において、使用される化石燃料(灯油・重油・石炭等)を炭化燃料によって代替し、化石燃料使用量を削減することで各施設における 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、ごみ炭化燃料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、炭化燃料が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) ごみ炭化燃料化施設の高性能化

ごみ炭化燃料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やアスファルトプラント燃焼炉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や小型アスファルトプラントでの実証試験

本事業の実施概要を図 2.1-1 に示す。

(1) ごみ炭化燃料化施設の高性能化	(2) 炭化燃料利用先の拡大
<p>a.燃焼解析</p> <p>1.自社試験炉による炭化燃料の燃焼特性の確認</p> <p>2.燃焼炉への適応性を判断</p> <p>3.燃焼のシミュレーションを実施</p> <p>1.温度分布の確認</p> <p>2.ガス成分、速度分布の確認</p> <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>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。</p> <p>※850°C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> <p>1.(1).a.1と同等の試験を実施</p> <p>2.ストーカー炉への適応性判断</p> <p>3)燃焼のシミュレーションを実施</p> <p>1.温度分布の確認</p> <p>2.ガス成分、速度分布の確認</p> <p>温度分布 速度分布</p> <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</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>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。</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、本システムの従来、最終目標、令和2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	本年度の目標
0 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7施設程度設置されたが、エネルギー回収のメリットを活かしきれていない ●ごみ炭化燃料化施設と燃料利用先を組み合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 ●ごみ炭化燃料化施設と燃料利用先を組み合せた全体システムにおいてLCC低減とCO ₂ 削減	ごみ炭化燃料化施設と燃料利用先を組み合せたそれぞれのシステムにおいて 1)システムが成立するか確認する 2)LCC低減とCO ₂ 削減量を実証試験結果をもとに試算し、有効性の判断を行う。
1 ごみ炭化燃料化施設の高性能化	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%以上削減する燃焼状況の確認	炭化燃料の施設内利用 ・炭化燃料を20%以上削減した場合のエネルギー収支とLCC低減およびCO ₂ 削減量を試算し、有効性を判断する。
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 アスファルトプラントにおける通常運転時の重油使用量に対し20%以上混焼利用し化石燃料を代替、CO ₂ 削減する実証 炭化燃料を利用したアスファルトを道路に施工し、規制値をクリアする実証	ごみ処理施設利用 ・ごみ処理場実証炉で炭化燃料バーナによる炭化燃料燃焼試験および解析を行い炭化燃料燃焼特性を確認する ・LCC低減とCO ₂ 削減量を実証試験結果をもとに試算し、有効性の判断を行う その他の利用先での利用 アスファルトプラント利用 ・アスファルトプラント実証炉で炭化燃料バーナによる炭化燃料燃焼試験および解析を行い炭化燃料燃焼特性を確認する。 ・アスファルトへの影響をラボ試験および実地試験分析により確認する ・LCC低減とCO ₂ 削減量を実証試験結果をもとに試算し、有効性の判断を行う

2.3 実施スケジュール

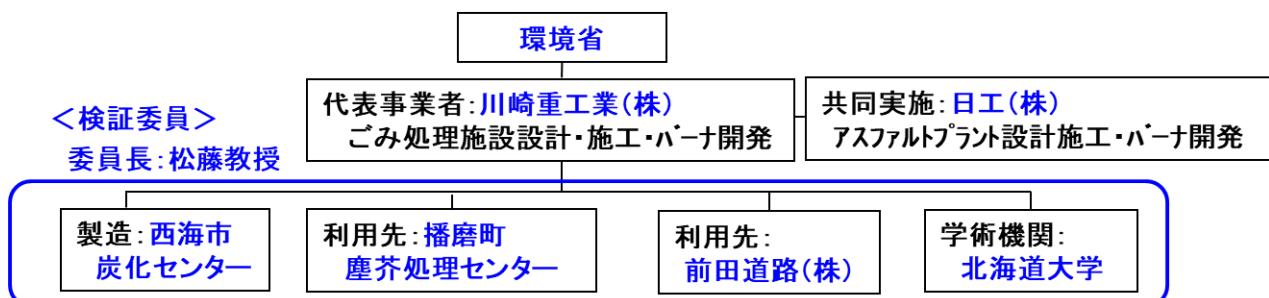
本事業全体の実施スケジュールを表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 事業実施スケジュール

	平成 30 年度 (完了)	平成 31 年度 (完了)	令和 2 年度
採択・事業開始	▼		
システム検討	—		→
① ごみ炭化燃料化施設 高性能化			
ごみ炭化燃料化施設利 用検討	ラボ試験 解析	準備 試験 →	
燃焼試験(試験場)			
② 炭化燃料利用先拡大			展開 検討 →
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)	試験 →	準備 試験 →	
実証試験(播磨町)		手配	工事 試験 →
アスファルトプラント利用検討			
実証試験(前田道路)			工事 試験 →
アスファルト合材ラボ試験		→	
アスファルト実地試験			→
アスファルトプラント腐食解析			→
評価・まとめ	→	→	→

3 事業実施体制

本事業は、代表事業者を川崎重工業株式会社、共同実施者を日工株式会社として実施する。炭化燃料製造側の西海市炭化センター（グリーンコール西海）利用側とし、播磨町塵芥処理センターおよび前田道路株式会社で利用する事業として進めていく。事業の進捗/成果/検証状況を製造・利用のそれぞれの立場および研究の方法を学術機関である北海道大学に評価・検証いただくことで、一つの立場に偏らない評価・検証を行うこととする。実施体制を図 3.1-1 に示す



4 本報告書における単語の定義

本報告書で使用している単語を以下のように定義した。

4.1 単語の定義

- ・専焼

油(灯油やA重油)のみでバーナ燃焼した場合を示す。

- ・混焼

ごみ処理施設、アスファルトプラント：油と炭化燃料をバーナで燃焼した場合を示す。

火力発電プラント：石炭と炭化燃料をバーナで燃焼した場合を示す。

- ・混焼率

起動や通常運転時に投入する燃料(灯油、A重油、石炭、炭化燃料)の総発熱量に対し、投入する炭化燃料発熱量の割合を(1.1)式で定義する。

$$\text{混焼率}[\%] = \frac{\text{投入炭化燃料発熱量}}{\text{総投入発熱量(主燃料+炭化燃料)}} \cdots (1.1)$$

- ・添加(添加率)

アスファルトプラント試験用の合材に、意図的に炭化燃料燃焼灰を(再生)材料として混ぜることを、添加と表現する。

- ・混入(混入率)

アスファルトプラントにて炭化燃料を燃料として利用した際に、意図せず、燃焼灰が

骨材及び合材に混ざることを、混入と表現する。

- ・燃焼率

炭化燃料がどの程度燃焼したかの判断指標として、炭化燃料燃焼前後の灰分割合より算出する。燃焼前炭化燃料の灰分割合をA1、燃焼後のサンプリングされた炭化燃料の灰分割合をA2とし、(1.2)で定義する。

$$\text{燃焼率}[\%] = (A2 - A1) / [A2 \times (1 - A1)] \times 100 \cdots (1.2)$$

- ・粉碎品(粉碎)、解碎品(解碎)、未粉碎

粉碎品：粉碎機にて粉碎後の炭化燃料

解碎品：解碎供給装置にて解碎後の炭化燃料

未粉碎：ごみ炭化燃料化施設から搬出された炭化燃料

参考文献

- [1] 日本エネルギー学会誌 一般廃棄物炭化燃料化施設によるリサイクルと
エネルギー回収 第97卷 第8号 (252~260) 清水ら

第2章 ごみ処理施設における利用検討

1 ごみ処理施設設置概要

昨年度、本事業では炭化燃料を補助燃料とした開発バーナの燃焼試験を実施した。試験結果より、開発した3種類のバーナ(表1.1-1)は、排ガス値がごみ処理施設やアスファルトプラント等の規制値をクリアしており、各施設で利用可能であることを報告した^[1]。

ごみ処理施設では、図1-1に示す通り炉起動・停止時に油バーナにて化石燃料が使用されるため、その代替燃料として炭化燃料を利用することができる。さらに、ごみ処理施設では図1-2に示す通り、通常運転中ごみ投入発熱量の変化に伴い、炉内温度⇒発生蒸気量⇒発電量へと影響を及ぼすため、ごみの投入発熱量の変動を抑え、安定させるとともに、タービン最大発電量で発電することで、発電メリットを得るために炭化燃料を利用することができる。

本章では、ごみ処理施設で上記の様な思想で炭化燃料が化石燃料の代替燃料として利用可能である事を喧嘩するために、バーナの選定条件、実証試験結果、解析を実施した結果を示す。

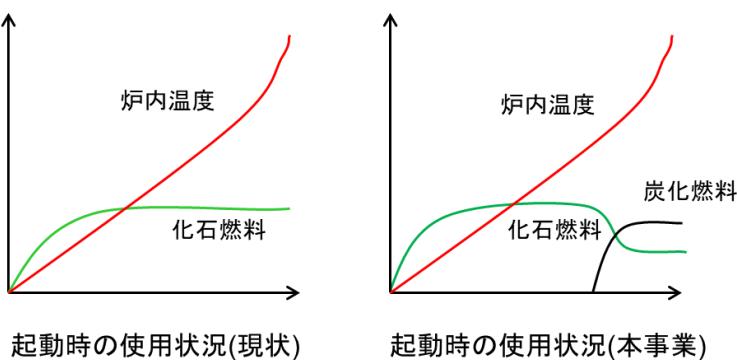


図1-1 炉起動時の炉内温度と燃料利用状況

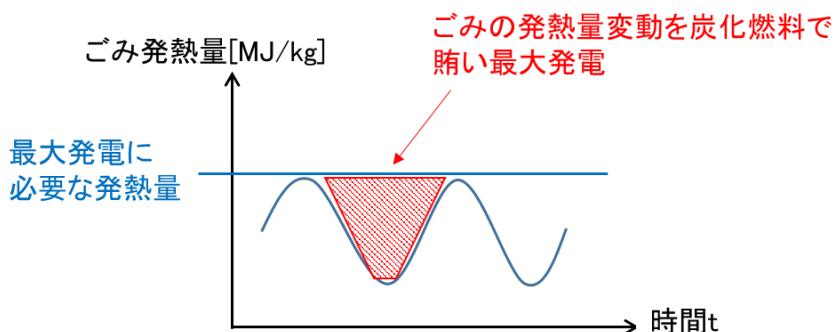


図1-2 炉通常運転時のごみ投入発熱量変化

1.1 設置バーナの選定

昨年度開発した炭化燃料用バーナは、表 1.1-1 に示す通り、新設用の混焼バーナ、追設用の吹込バーナ、高温燃焼場用の直投ノズルの 3 種類である。ごみ処理施設では、表 1.1-2 の通り、吹込バーナと直投ノズルが適していると考え選定した。その選定理由を以下に示す。

- (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、焼却炉の停止リスクを最小限に抑えることが可能である。
- (2)選定した 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である。
- (3)大規模な設備が不要で、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。

表 1.1-1 炭化燃料用バーナ一覧

形式	用途	機器本体	機器概要
混焼バーナ	新設用		
吹込バーナ	既設改造用		
直投ノズル	既設改造用 (高温燃焼場用)		

表 1.1-2 ごみ処理施設でのバーナ選定

	混焼バーナ	吹込バーナ	直投ノズル	備考
ごみ処理新設	×	◎	○	
ごみ処理既設	×	◎	○	耐火物工事が必要。

1.2 設置概要

ごみ処理施設で炭化燃料用バーナを使用する上で設置計画を行う。炭化燃料用バーナの機器構成は図 1.2-1 に示す通り、吹込バーナは、吹込ノズル・圧送配管・炭化燃料供給装置（ロータリバルブ（以下、RV）、供給スクリュ、投入ホッパ）から構成される。直投ノズルの場合は、先端ノズル、炭化燃料供給装置（RV、投入ホッパ）で構成される。

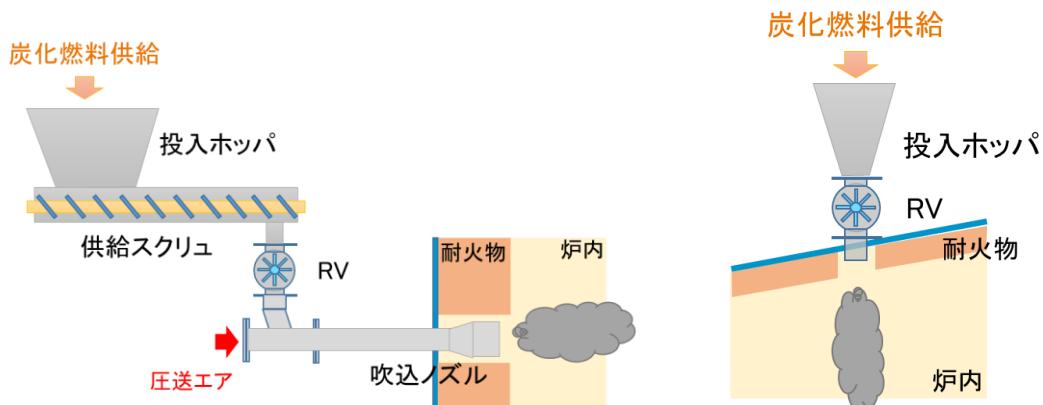


図 1.2-1 機器構成図

近年多く納入されている焼却炉形式の場合、バーナは主に焼却炉の側面に設置している。そのため、吹込バーナ、直投ノズルはその付近に設置する。但し、施設によっては、バーナ位置が炉側面ではなく、炉前に設置されている場合もあるため、その際は検討が必要である。追設の際は、機器の設置に加え、耐火物、ケーシングにノズル用の開口を追加で設ける必要がある（新設の場合は、予め開口を設けておく）。

1.3 工事概要

図 1.3-1 に追設の場合の工事スケジュールを示す。機器点数が多い吹込バーナを想定した。機器設置工事は、既設の改造(手摺改造等)も含む。試運転では、機器の運転確認と炭化燃料供給量のキャリブレーションを実施する。予備日を考慮しても、12 日程度で工事は完了すると想定している。ごみ処理施設の場合、炉が停止している期間が限られているため、なるべく短期間で工事する必要があるが、前述の日数であれば、工事完了可能と考えられる。直投ノズルの場合は、機器点数が吹込バーナよりも少なく単純な構造のため、より短い工程で工事可能である。一方、新設の場合、ノズル用の開口は設計の段階で設置でき、工事自体は本設の機械工事に含まれるため、炭化燃料用バーナのために追加検討項目は不要である。但し、試運転は必要のため、従来の項目に追加となる。

	1 日	2 日	3 日	4 日	5 日	6 日	7 日	8 日	9 日	10 日	11 日
部材搬入	↔										
工事準備 養生		↔									
開口工事 コア抜き			↔								
機器設置				↔							
操作盤設置					↔						
電気工事						↔					
試運転								↔			
片付け										↔	

図 1.3-1 工事スケジュール (バーナ追設)

2 ごみ処理施設実証試験

2.1 試験目的、工事概要

今年度は、ごみ処理施設での開発バーナ利用可否を判断することを目的とし、播磨町塵芥処理センターにて実証試験を行った。本試験では、炉の起動時（昇温中）に使用する助燃燃料を減らし、炭化燃料を投入することでその代替燃料として炭化燃料が利用可能であることを解析結果と共に確認した。確認項目としては、燃焼室出口温度トレンド、煙突排ガス値、ばいじん中の灰量から得られる燃焼率を測定する。温度トレンドは、化石燃料の熱量代替が可能かと、重油のみでの焼却炉通常起動時と同等の昇温が可能かどうかを確認する。排ガス値については、施設届出値以下となっているかを確認し、燃焼率は昨年度燃焼試験と比較する。本試験で使用するバーナは、1.1で選定した通り、吹込バーナと直投ノズルの2種類とした。

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。播磨町塵芥処理センターでは、バーナ位置は1.2で述べた炉の側面とは異なり、炉前に設置されている。そのため、吹込バーナは炉前の既設の重油バーナの横に設置し、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位置に設置した。図2.1-1に播磨町塵芥処理センターのフロー図を示す。さらに、設置計画を行う際に以下3点を留意し計画を行った。

- (1) 通路幅と作業スペースを十分に確保し、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する。
- (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。
- (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する。

なお、施設内配置上、2号炉前が通路となっていること、機器搬入扉があり試験設備設置が不可であることを踏まえ、試験は1号焼却炉にて実施することとした。

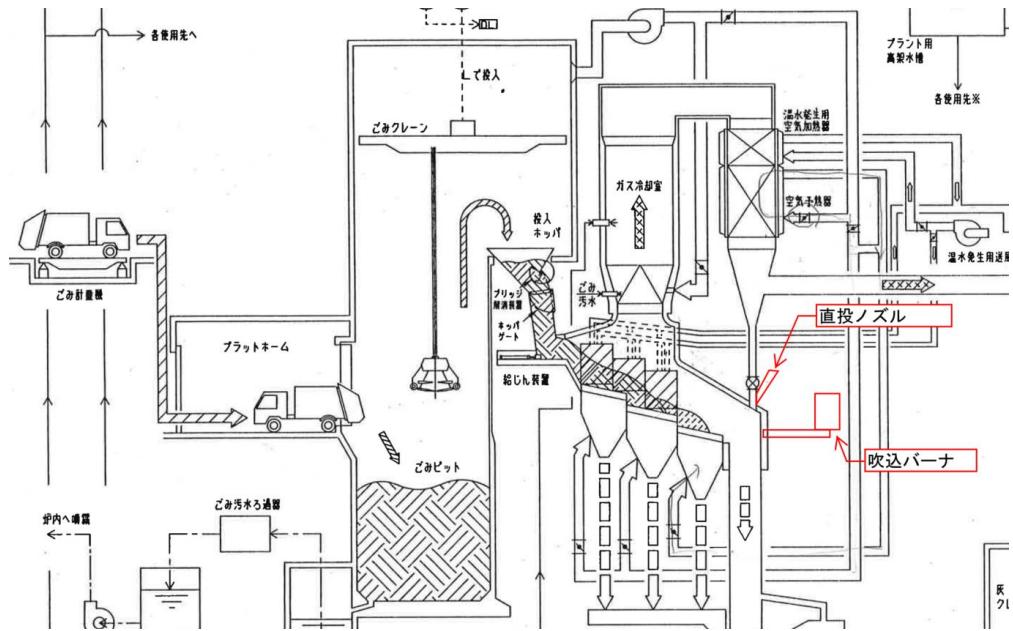


図 2.1-1 播磨町塵芥処理センターフロー図

機械工事について、設置は約2週間、解体は約4日間で完了した（図2.1-2）。本試験では、吹込バーナと直投ノズルの2種類の機器設置が必要であり、1.3で想定した期間よりも長くなっている。図2.1-3～図2.1-4に工事前後の写真を示す。吹込バーナを設置する炉前には、電気集塵機（以下、EP）用の操作盤が設置されているため、運転員の通常時メンテナンスが行えるよう作業スペース確保できるよう考慮し、よりコンパクトな設置を心掛けた。吹込バーナ用の設置機器としては、炭化燃料供給機、操作盤、圧送配管、吹込ノズル、圧送配管となる。直投ノズルは、炭化燃料供給装置（投入ホッパとRV）のみとなっている。

年月	2020年								2021年	
	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
環境省委託事業実証試験										
現地工事			機器設置							
実証試験			電気計装	★	★	★	★	★	★	撤去復旧

図 2.1-2 工事スケジュール



図 2.1-3 機器設置前



図 2.1-4 機器設置後

2.2 吹込バーナ実証試験

2.2.1 燃焼解析

実証炉での試験により炉の運転が継続できなくなるリスクを最小限にするため、播磨町塵芥処理センターでの実証試験前に解析を実施し、炭化燃料が重油との混焼利用可能であることを確認した後、実証試験を実施した。本項では、その解析結果および実証試験結果を示す。

(1) 解析条件

昨年度までに燃焼試験と類似した結果を示した解析手法であるCFD(Computational Fluid Dynamics)手法を焼却炉の3次元モデルに適用し、吹込バーナによる燃焼解析を実施することで、炭化燃料の燃焼状況を事前確認した。解析対象とした播磨町塵芥処理センターストーカ炉の3次元モデルを図2.2.1-1に示す。炉壁の境界条件はストーカ上をEscape(粒子が炉壁面に衝突すると計算終了)、それ以外をReflect(粒子が炉壁面に衝突すると跳ね返って計算続行)に設定した。

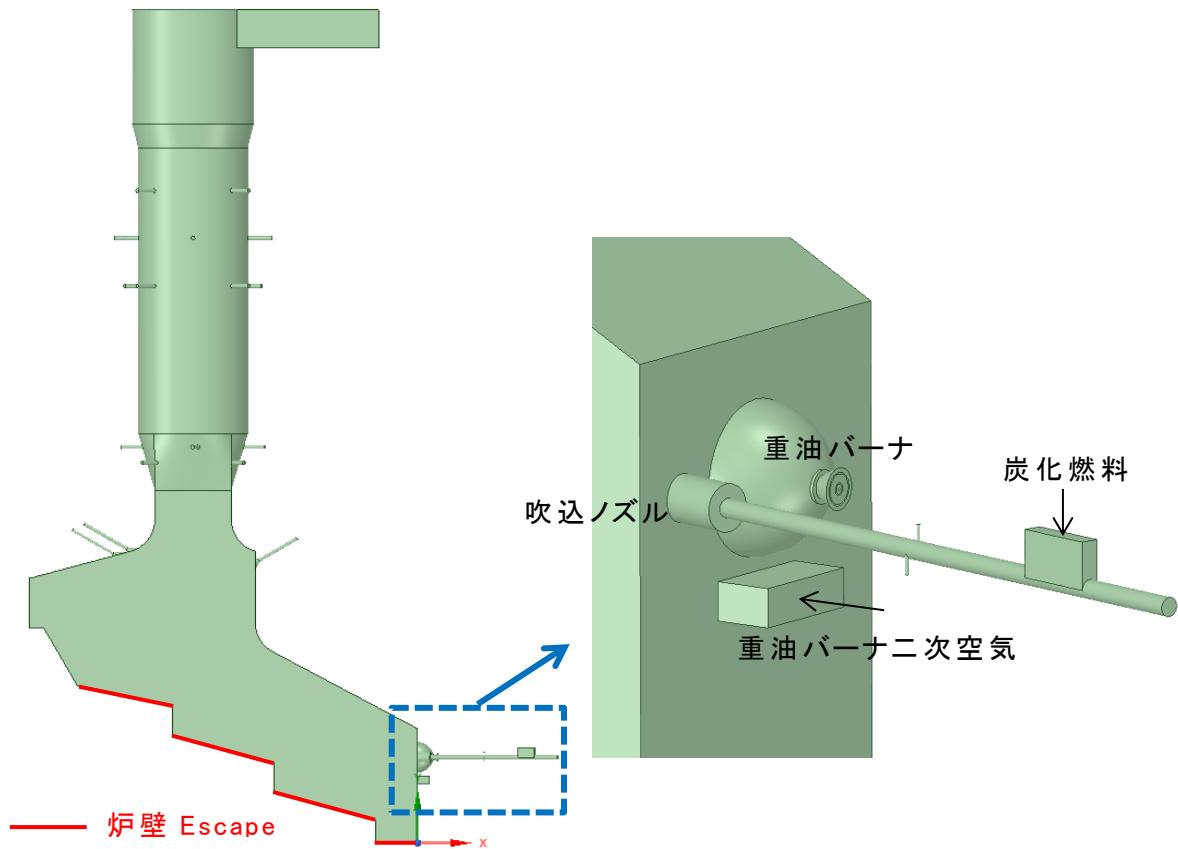


図2.2.1-1 吹込バーナ解析形状モデル

表 2.2.1-1 に実証試験前に既設の運転を測定して得られた解析条件を示す。炭化燃料の混焼率は 20%とした。炭化燃料の粒度分布には、噴霧試験で得られた粉碎品 (D50:89 μm) の粒度分布を Rosin-Rammler 分布^[2]で与えて計算した。

重油は C、H、O、N、S、灰分により構成されているが、その大半は C、H である。そこで、計算負荷の低減のため O、N、S、灰分をモデル化せず、理論空気量、発熱量がほぼ同等となるよう C₁₀H₂₂ を用いた。燃焼反応は CO を考慮した二段総括反応とした。

表 2.2.1-1 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	m ³ N/h
	1次	242	m ³ N/h
	2次	1565	m ³ N/h
	3次	56	m ³ N/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	25	°C
	旋回空気量	1.43	m ³ N/min
	漏れ込み空気量	7.3	m/s
ストーク空気	1次 + 2次空気	14000	m ³ /h
	乾燥段	1680	m ³ /h
	燃焼段	1680	m ³ /h
	後燃段	840	m ³ /h
	燃焼炉出口(ホツッパ側)	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 2.2.1-2、2.2.1-3 に基準となる重油専焼条件、図 2.2.1-4、2.2.1-5 に炭化燃料粉碎品の混焼条件のバーナ中心断面の温度分布、CO 濃度分布を示す。専焼条件と比較し、混焼条件では、炭化燃料は炉内に吹込まれた直後から重油火炎により温められることで燃焼しており、特に炉壁付近で顕著に燃焼していることが温度分布と CO の生成から確認できる。

図 2.2.1-6、2.2.1-7 に示す炭化燃料粒子の軌跡より、炭化燃料粒子の挙動を確認した。図より、ストーカ後燃焼段の上方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未燃のまま落下してしまうが、大部分の粒子は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。本解析における炭化燃料の燃焼率は 96.9% となった。解析結果から、起動用重油バーナへの炭化燃料の混焼利用は可能であると考えられる。

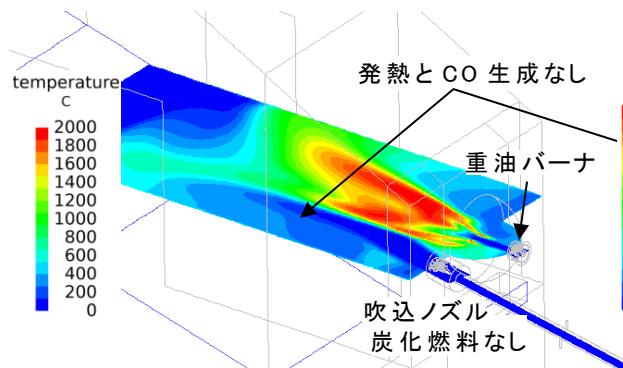


図 2.2.1-2 中心断面の温度分布
(重油専焼)

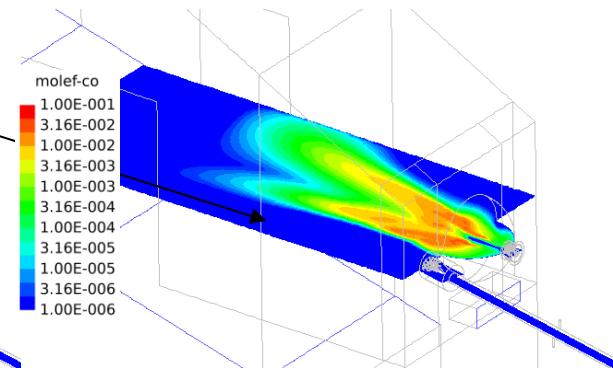


図 2.2.1-3 中心断面のCO濃度分布
(重油専焼)

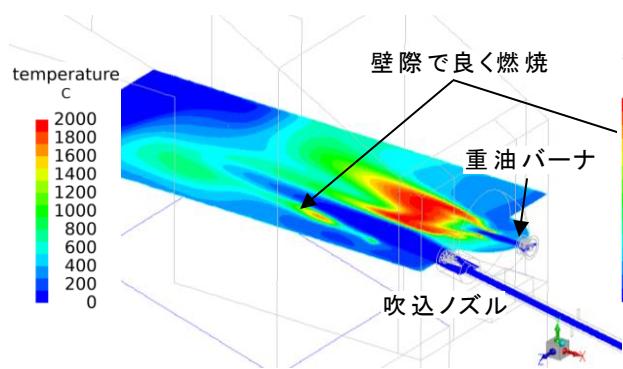


図 2.2.1-4 中心断面の温度分布
(炭化燃料混焼)

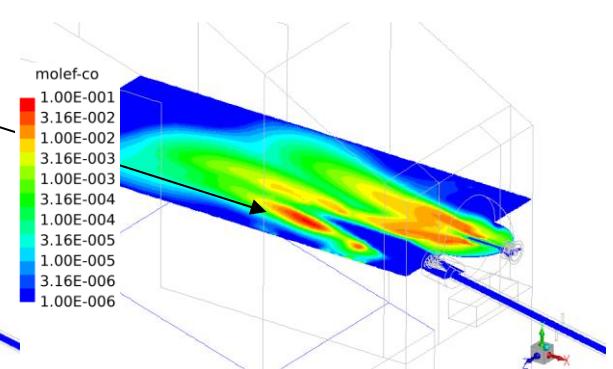


図 2.2.1-5 中心断面のCO濃度分布
(炭化燃料混焼)

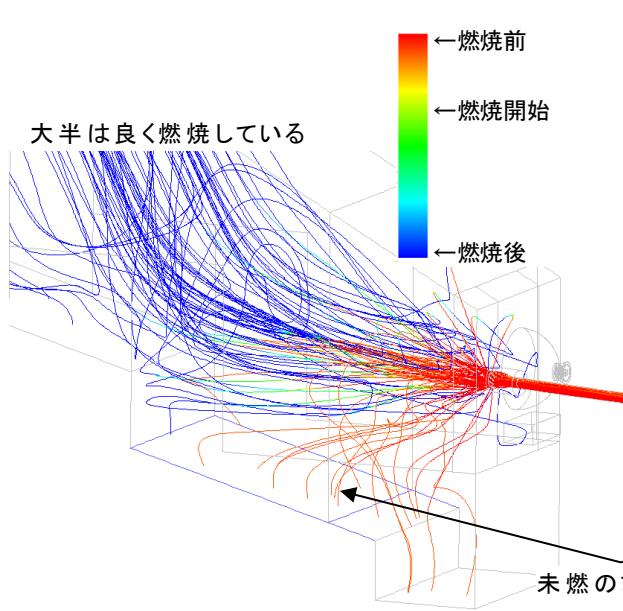


図 2.2.1-6 粒子の軌跡(粒子の状態)

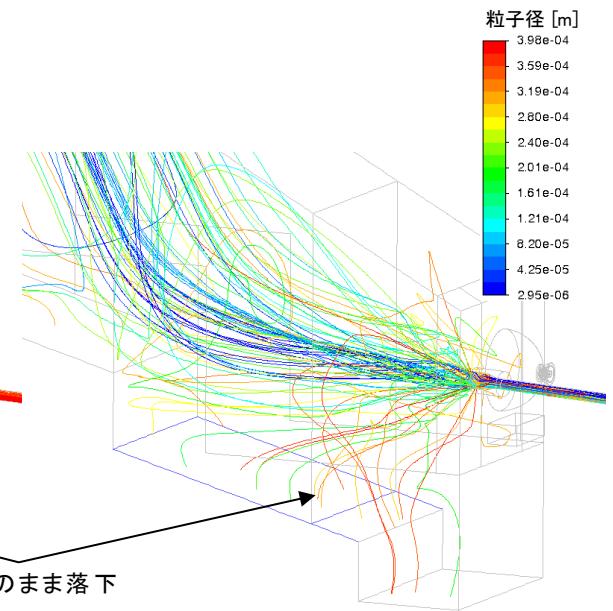


図 2.2.1-7 粒子の軌跡(粒子径)

2.2.2 実証試験設備・試験方法

試験設備概要を図 2.2.2-1 に示す。機器は A)～M)で構成されており、試験用に E)、F)について一部設備を改造している。燃焼室出口で温度測定を行い、EP 前と煙突にて排ガス測定を行った。煙突排ガスについては、定められた届出値をクリアできているかを確認すると共に、通常運転時との比較を行った。

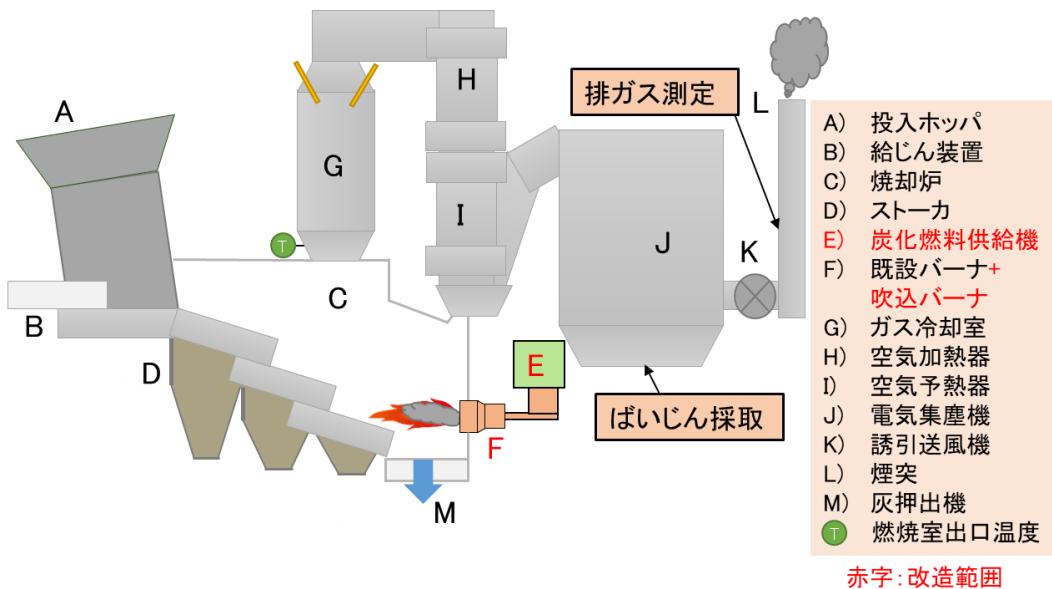


図 2.2.2-1 試験設備概要(吹込バーナ)

試験は焼却炉の起動時にを行い、播磨町塵芥処理センター 1 号炉を使用した。近年のごみ焼却施設では起動時、ストーカ上は何も無い状態でバーナのみで炉内を昇温していく、所定温度(600～850℃)になった段階でごみを投入する方法をとっている。本試験では、近年の施設で行われる起動方法に合わせた試験を行うこととする。

試験の流れとして、バーナのみで重油専焼起動の場合、バーナ着火後重油量 150L/h(MAX)で運転し、燃焼室出口ガス温度 PV 値が約 300℃となった段階でごみを投入し、ごみの燃焼開始に伴って炉を 900℃程度まで昇温し、バーナを消火して通常運転に入る。この流れをベースとし、炭化燃料混焼起動の場合は、同じくバーナ着火後重油量 150L/h(MAX)で運転し、燃焼室出口ガス温度 PV 値が約 250℃となった段階で重油量を段階的に混焼率 10%、20% と同等となるよう 120L/h まで減少させ、同時に炭化燃料を約 45kg/h(混焼率 10%)、90kg/h(混焼率 20%)の量を投入して、継続して昇温を行う。その後、燃焼室出口ガス温度が 300℃となったらごみを投入し、900℃付近まで上昇した段階で炭化燃料の供給とバーナの運転を停止し、消火した段階で試験を終了する。

試験中に測定するデータとしては、先に述べた温度測定、排ガス測定に加え、燃焼率、中央制御室で測定しているトレンドデータを取得する。燃焼率についてのみ、EP下にて採取を行った。排ガス測定の項目と分析方法は、表2.2.2-1の通りである。本項で示す排ガス値はO₂12%換算を行っており、ばいじん濃度は標準状態で記している。

表2.2.2-1 排ガス測定項目と分析方法

測定項目	分析方法
硫黄酸化物濃度	JIS-K-0103 7.1 イオンクロマトグラフ法
塩化水素濃度	JIS-K-0107 7.1 イオンクロマトグラフ法
窒素酸化物濃度	JIS-K-0104 B-7982 化学発光方式
二酸化硫黄濃度	JIS-B-7952
酸素濃度	JIS-B-7983
温度	JIS-Z-8808 6
水分	JIS-Z-8808 7

2.2.3 実証試験条件

試験条件は昨年度の燃焼試験と同様、重油量 150L/h 相当とし、炭化燃料は目標 20% 混焼率となるよう供給する。試験パラメータは、旋回エアの有無、炭化燃料は粉碎品、解碎品とした。吹込バーナ実証試験の試験条件一覧を表 2.2.3-1 に示す。試験イメージは図 2.2.3-1 の通りで、上から見た平面図の様に、吹込ノズルを既設バーナ横に設置し、炭化燃料は既設バーナ火炎の斜め方向から吹込む。試験機器の設置写真を図 2.2.3-2 に示す。機器は、炭化燃料供給機(投入ホッパ、RV)、圧送配管(旋回エアノズル付き)、圧送配管、吹込ノズルから構成される。

表 2.2.3-1 試験条件

	第 1 回	第 2 回	第 3 回	第 4 回	第 5 回	第 6 回
RUN	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
重油量 [L/h]	120	←	←	120	120	←
混焼率 [%]	20	←	←	20	20	←
炭化燃料供給量 [kg/h]	粉碎品 92	←	←	解碎品 92	粉碎品 92	←
RV 周波数 [Hz]	60	←	←	←	←	←
圧送風量 [Nm ³ /min]	6.5	←	←	←	←	←
旋回エア風量 [Nm ³ /min]	86	86	86→×	×	←	←

※ × は無し。

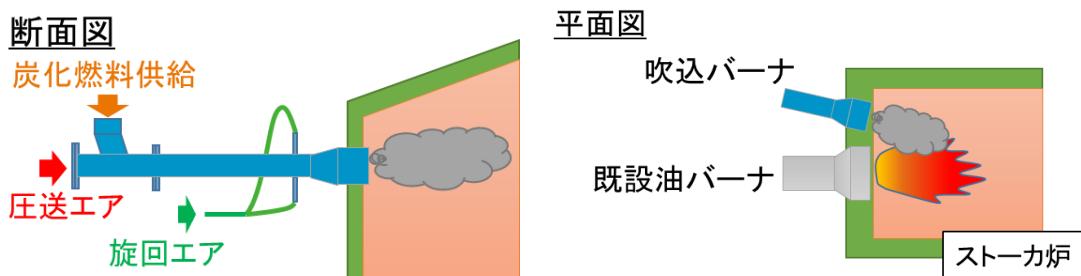


図 2.2.3-1 試験機器



図 2.2.3-2 試験機器

2.2.4 試験結果、解析との整合性

燃焼状態、温度トレンド、排ガス値、燃焼率等の結果を示す。

(1) 燃焼状態の確認

炭化燃料混焼時の燃焼の様子を確認するため、灰押出機上の点検口と炉前の覗き窓より炉内を撮影した。撮影は図 2.2.4-1 の箇所より行った。図 2.2.4-2～図 2.2.4-3 に重油専焼時、炭化燃料混焼時の様子を示す。左上から炭化燃料が吹込まれている様子が確認でき、火炎に近づいたところで燃焼している様子も見られた。また、炉前から火の粉も確認できた。解析結果同様、燃焼の様子が確認出来た。

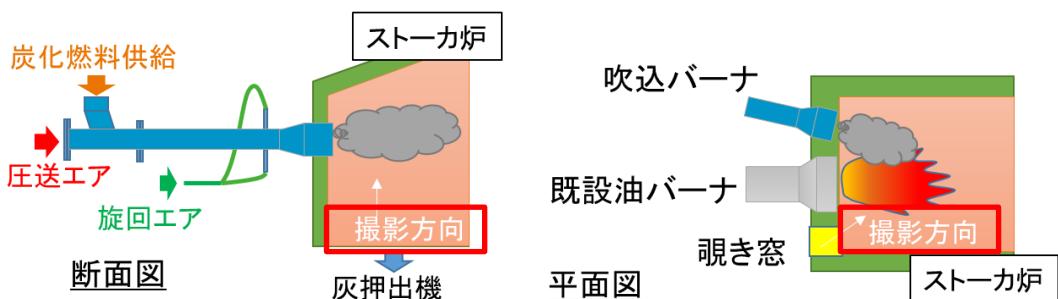


図 2.2.4-1 焼却炉内撮影箇所

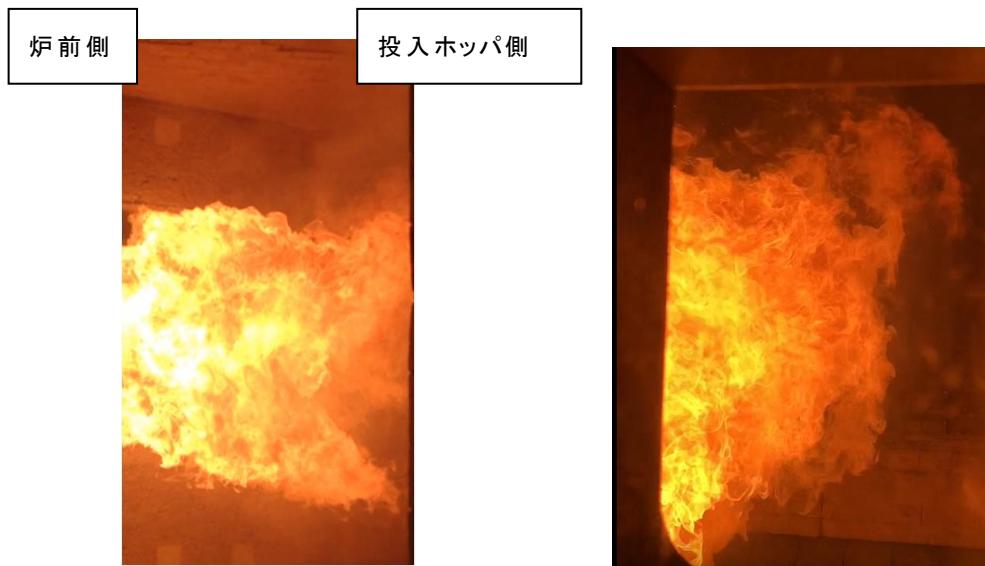


図 2.2.4-2 重油専焼時の火炎の様子（左：灰押出機上撮影 右：炉前）

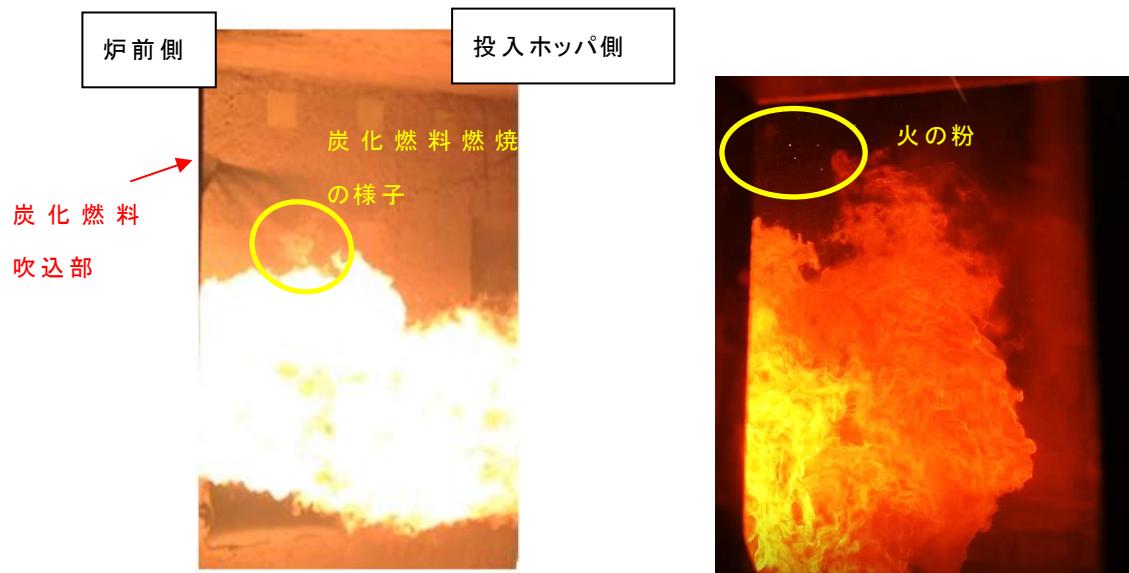


図 2.2.4-3 炭化燃料混焼時の火炎の様子（左：灰押出機上撮影 右：炉前）

(2) 温度トレンド

図 2.2.4-4 に試験開始から終了までの燃焼室出口温度トレンドを示す。重油のみの起動時は 300°C を超えた段階でごみを投入し、直後から温度が急上昇していることがわかる。炭化燃料混焼時は、重油専焼後 250°C 程度となった段階で炭化燃料を混焼し、排ガス測定のため運転を維持した。その後、同様にごみを投入し、直後から温度が急上昇していることが確認できた。

炭化燃料粉碎品を使用した第 2 回試験 (RUN1-2) のごみ投入前の温度トレンドを図 2.2.4-5 に示す。重油量 150L/h を 120L/h に変更し温度が低下するのを確認し

た後、炭化燃料の混焼を開始した。混焼後、温度の上昇が見られ、さらに供給量を増加した後再度温度が上昇していることから、炭化燃料が燃焼し重油の代替燃料として熱量を補填していることが確認出来た。

続いて、炭化燃料解碎品を使用した第4回試験(RUN1-4)のごみ投入前の温度トレンドを図2.2.4-6に示す。本結果より、解碎品を供給しても粉碎品と同じような温度の上昇が見られなかったが、供給周波数を増加させることで焼却炉内の温度が上昇した。試験後のバーナ内部確認でも、供給機内及びバーナ部での詰まりが確認できたことから、供給量が不足していたと考えられる。このことから、解碎品を使用するためには、さらなる供給機の性能向上が必要である。

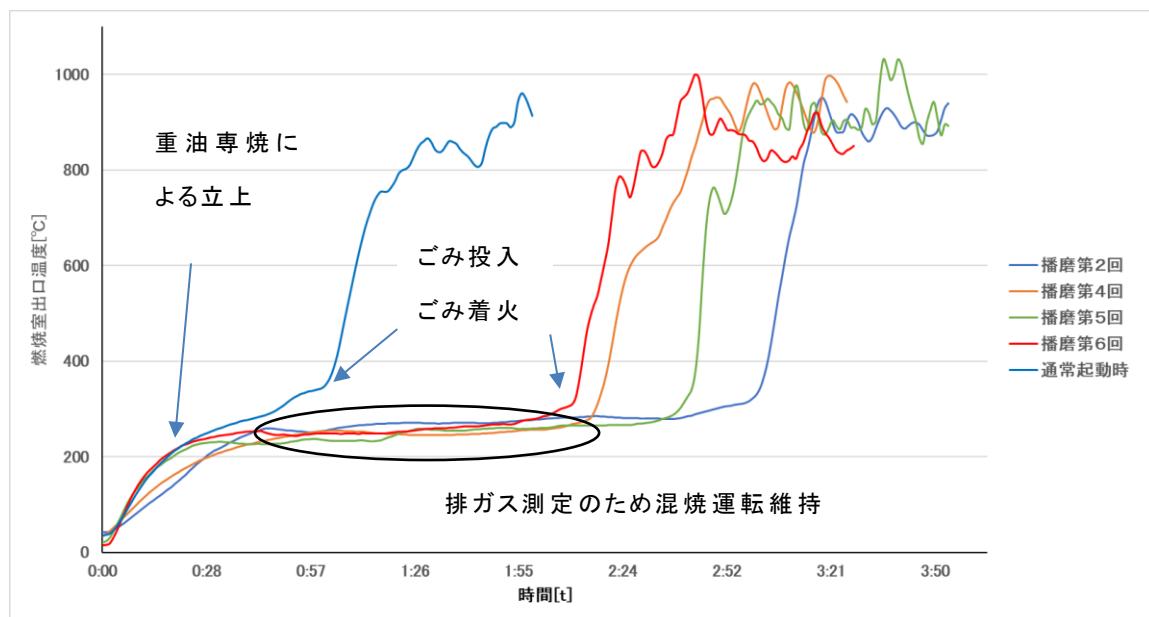


図2.2.4-4 燃焼室出口温度トレンド(全体)

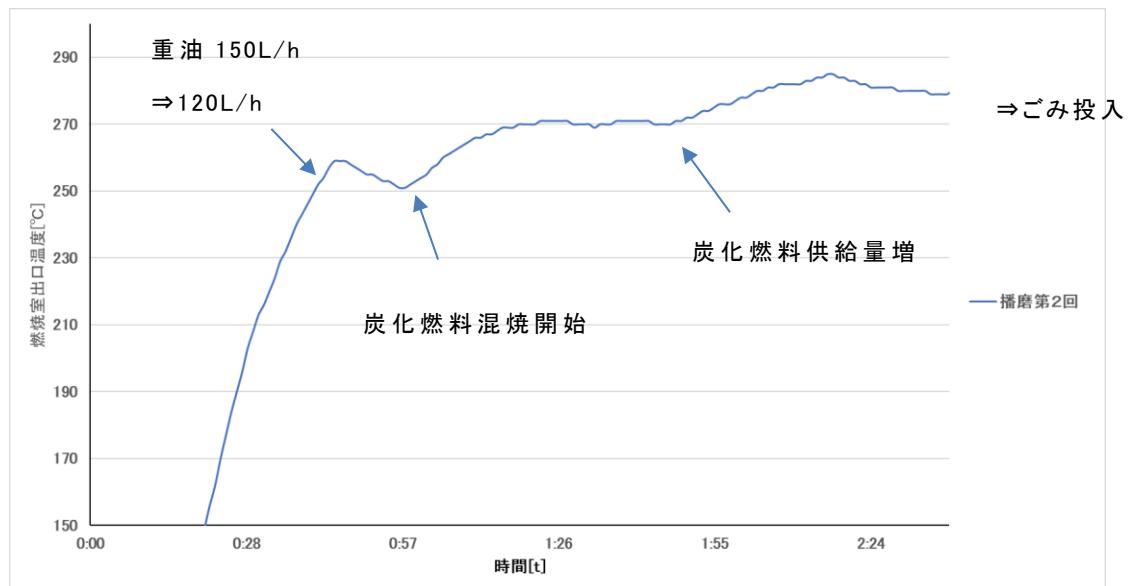


図2.2.4-5 炭化燃料粉碎品混焼時のごみ投入前温度トレンド(RUN1-2)

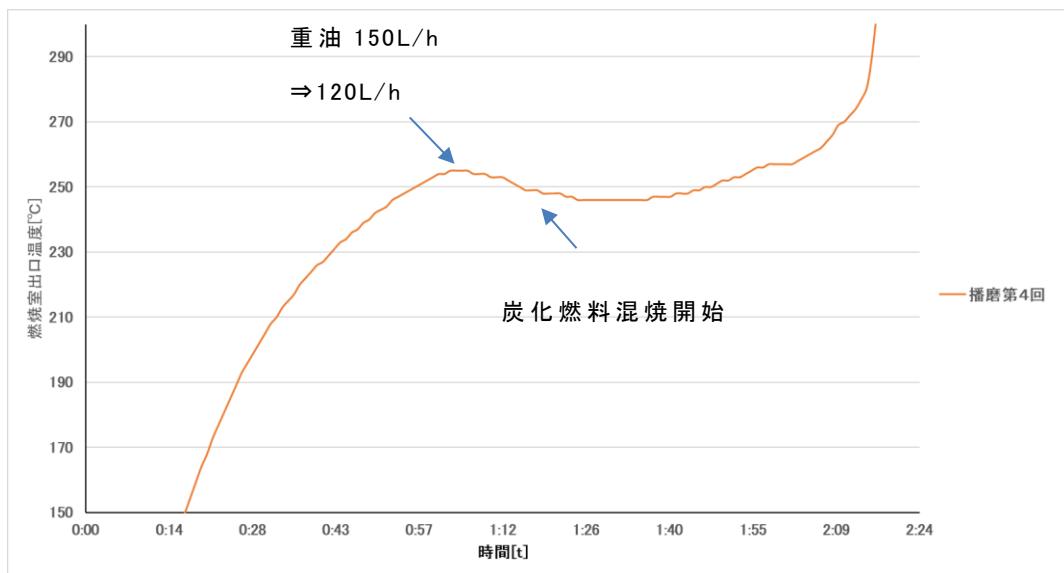


図 2.2.4-6 炭化燃料解碎品混焼時のごみ投入前温度トレンド (RUN1-4)

図 2.2.4-7 に第 5 回試験 (RUN1-5) の温度トレンドを示す。RUN1-2 では、炭化燃料の混焼が可能かどうか確認するために、重油の変化に伴う温度低下を確認しながら段階的混焼率を変化させた。RUN1-5 では、温度を一定に保つように、重油を減らすと同時に炭化燃料を供給し、変動を抑えながら昇温可能であることが確認できた。

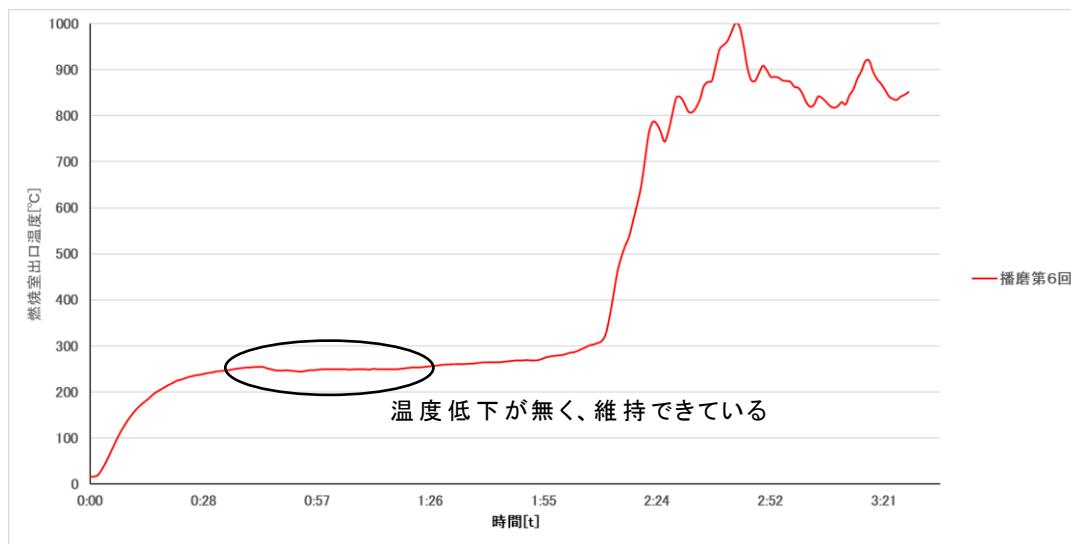


図 2.2.4-7 炭化燃料混焼時の温度トレンド (RUN1-5)

(3) 排ガス 燃焼率

排ガス値、燃焼率の測定結果を示す。排ガス測定は、EP 前と煙突の 2 箇所で行った。測定区間は 2 パターンとし、①炭化燃料混焼開始～ごみ投入まで、②ごみ投入・着火～バーナ消火(燃焼室出口温度 900°C)の区間で測定した(図 2.2.4-8)。数値はその区間の平均値とし、0.12%換算値としている。表 2.2.4-1 に示す試験条件の各データを比較した結果をそれぞれ示す。播磨町塵芥処理センターの届出値はグラフで四角に囲っている。

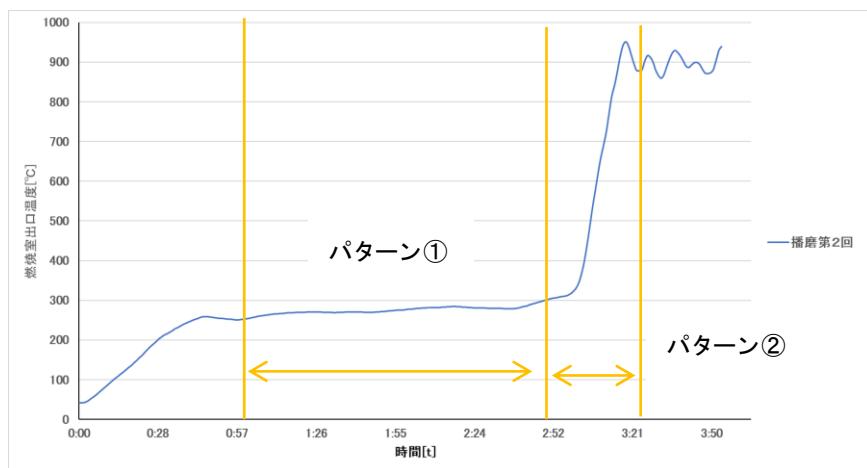


図 2.2.4-8 測定パターン

表 2.2.4-1 試験条件

	パターン① 炭化燃料混焼開始～ ごみ投入		パターン② ごみ投入・着火～ バーナ消火(900°C)
A	重油起動時(予備試験)	A'	重油起動時(予備試験)
B	第 5 回 (粉碎品)	B'	第 5 回 (粉碎品)
C	第 6 回 (粉碎品)	C'	第 6 回 (粉碎品)
D	第 4 回 (解碎品)	D'	第 4 回 (解碎品)

図 2.2.4-9 にパターン①、図 2.2.4-10 にパターン②の O_2 濃度をそれぞれ示す。いずれの試験でも酸素濃度が同等であることから、同条件の空気比で試験を実施したことが確認できた。また、ごみ投入後の O_2 濃度が 4 ~ 5 ポイント低くなっていること、炭化燃料の燃焼では消費されなかった炉内の空気が、ごみの燃焼時に消費されていることがわかる。届出値は□で示す。

A、A'	重油起動時(予備試験)
B、B'	第 5 回 (粉碎品)
C、C'	第 6 回 (粉碎品)
D、D'	第 4 回 (解碎品)

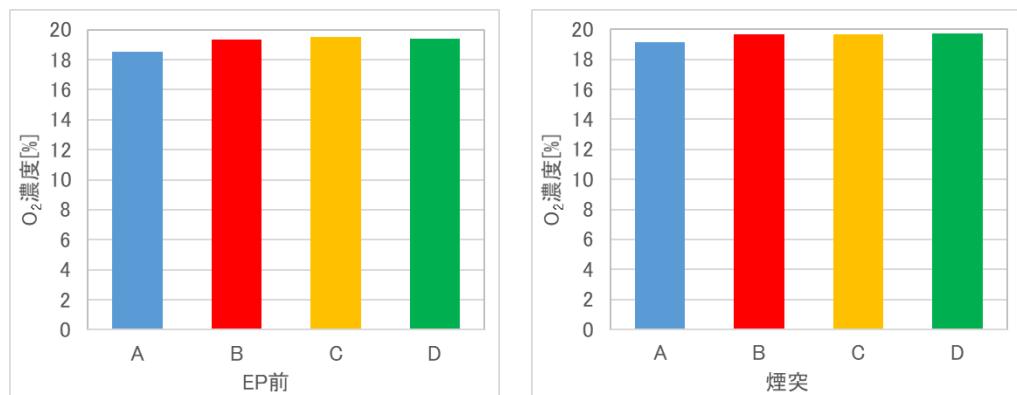


図 2.2.4-9 パターン① O_2 濃度

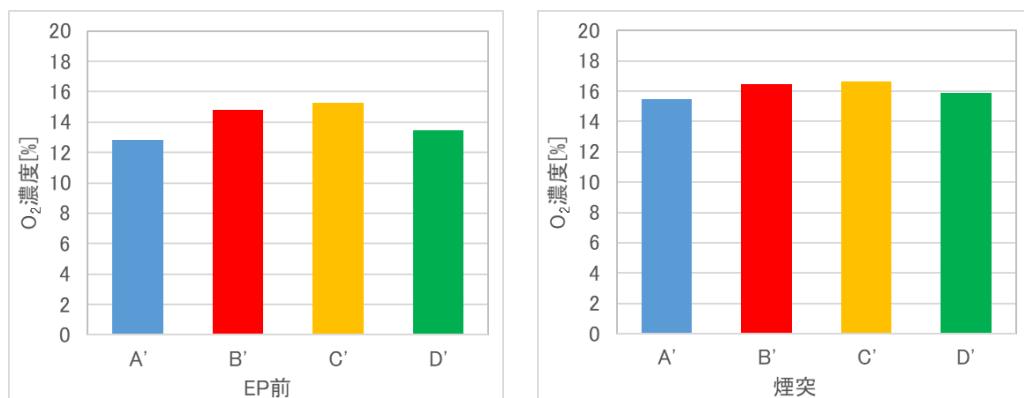


図 2.2.4-10 パターン② O_2 濃度

図 2.2.4-11 にパターン①、図 2.2.4-12 にパターン②の NO_x 濃度をそれぞれ示す。重油専焼時と比較し、炭化燃料の混焼により NO_x 値が増加した。昨年度の燃焼試験でも炭化燃料の投入により NO_x 値が上昇したことが確認出来ており、同様の事象が確認できた。しかし、ごみの投入・燃焼段階は NO_x 値への大きな影響は見られなかった。また、解碎品は NO_x が低いことから、燃焼性が低いと考えられる。届出値は□で示す。

A、A'	重油起動時(予備試験)
B、B'	第 5 回 (粉碎品)
C、C'	第 6 回 (粉碎品)
D、D'	第 4 回 (解碎品)

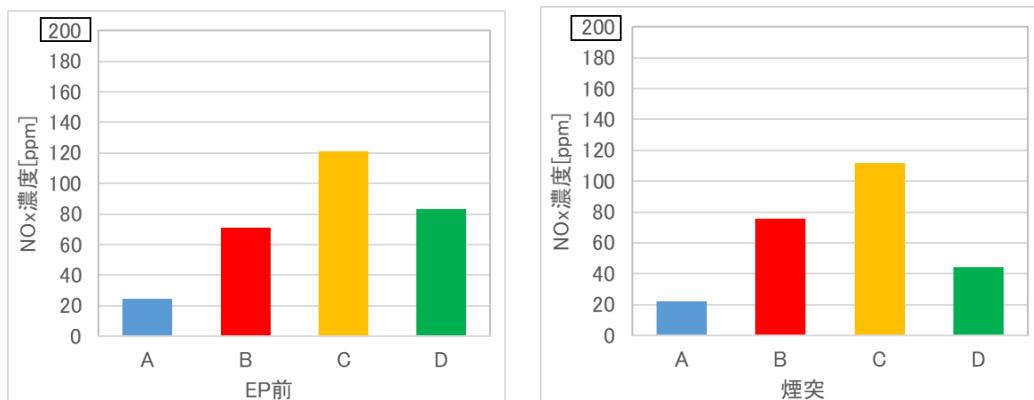


図 2.2.4-11 パターン① NO_x 濃度 (O₂12% 換算値)

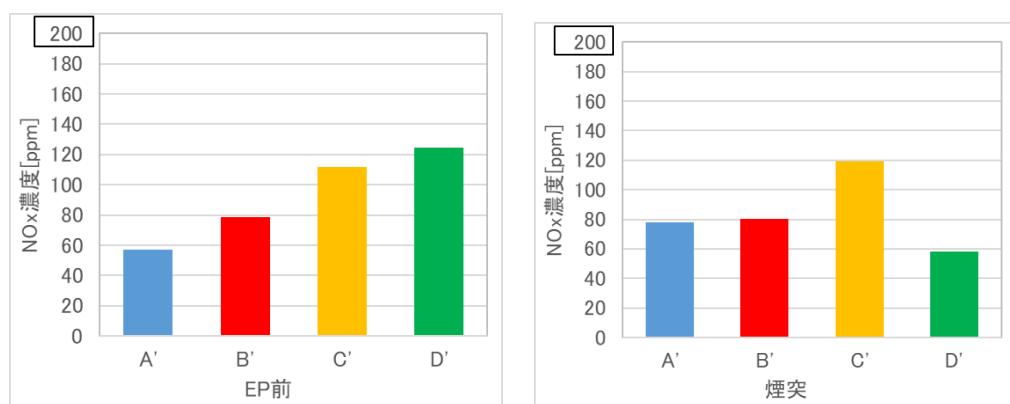


図 2.2.4-12 パターン② NO_x 濃度 (O₂12% 換算値)

図 2.2.4-13 にパターン①、図 2.2.4-14 にパターン②の SO_x 濃度をそれぞれ示す。重油専焼時、炭化燃料混焼時で数値に差がないが、ごみを混焼させた際には B' で高い値が得られた。パターン①では低い値であったことから、炭化燃料の影響ではなく、ごみの影響によるものと考えられる。施設の届出値は下回る結果となった。届出値は□で示す。

A、A'	重油起動時(予備試験)
B、B'	第 5 回 (粉碎品)
C、C'	第 6 回 (粉碎品)
D、D'	第 4 回 (解碎品)

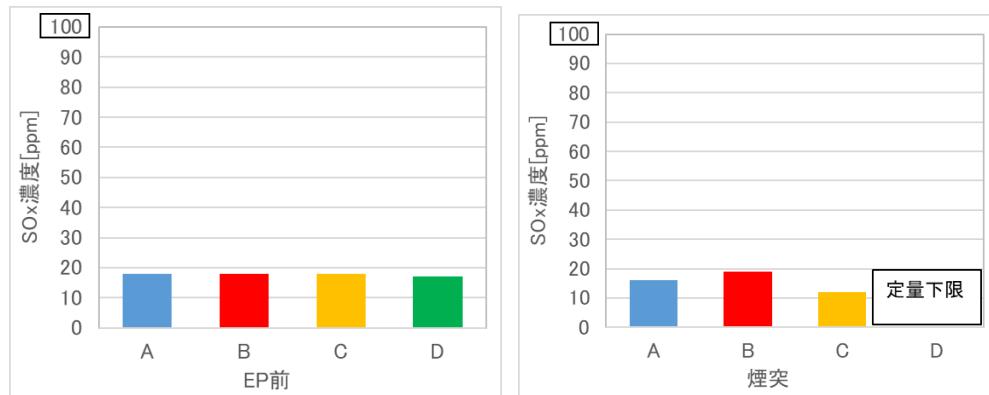


図 2.2.4-13 パターン① SO_x 濃度 (O₂12% 換算値)

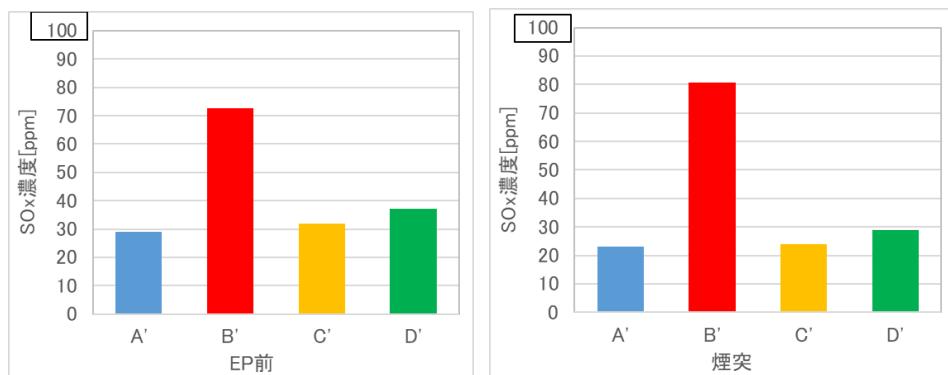


図 2.2.4-14 パターン② SO_x 濃度 (O₂12% 換算値)

図 2.2.4-15 にパターン①、図 2.2.4-16 にパターン② HC1 濃度をそれぞれ示す。煙突では重油専焼時に HC1 が検出された。前段の EP 前で検出されていないことから、EP 中又は EP 後の煙道内部の未燃分の影響による等の特異点と考えている。炭化燃料の混焼時は定量下限であったため、HC1 は検出されないことがわかる。ごみ燃焼中については、ごみに混入する C1 分が燃焼したため検出されたと考えられる。HC1 について、施設の届出値を大きく下回る結果であった。届出値は□で示す。

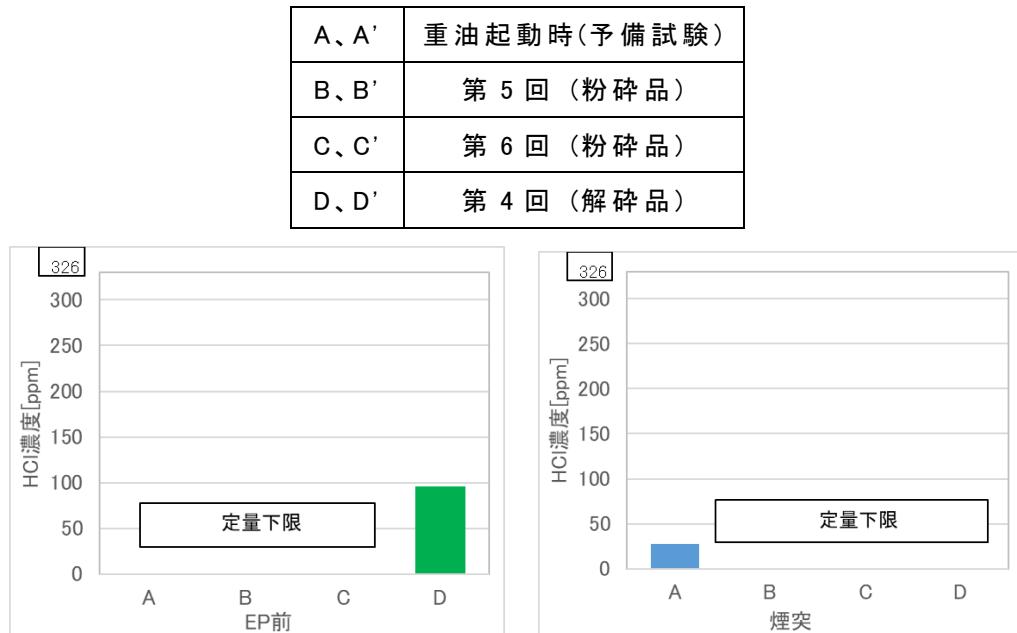


図 2.2.4-15 パターン① HC1 濃度 (O_2 12% 換算値)

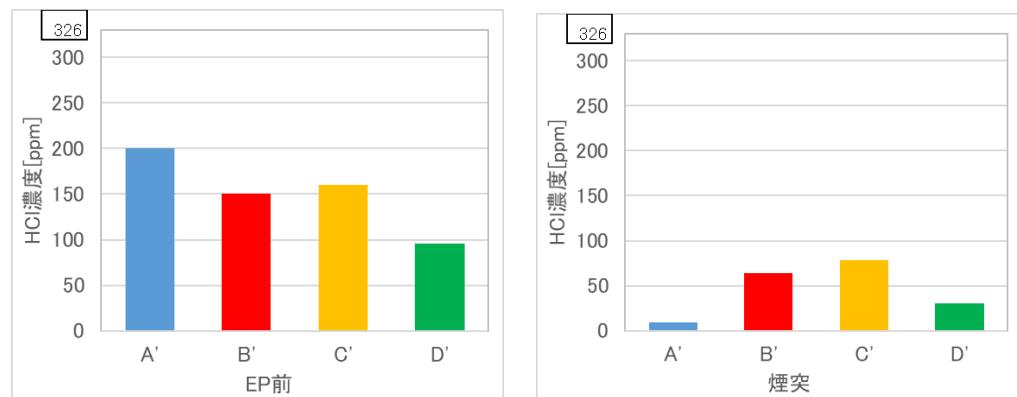


図 2.2.4-16 パターン② HC1 濃度 (O_2 12% 換算値)

(4) 燃焼率

EP 下のダストの燃焼率について、粉碎品で 93.2%、解碎品は 87.8% であった。粒径が大きい解碎品で 80% 台となる結果であったが、粒径の小さい粉碎品であれば 90% 以上の燃焼率が得られた。

2.2.5 試験時に発生した問題点と対策

(1)既設バーナ火炎角度

第1回試験では、炭化燃料を混焼しても温度上昇が見られなかった。要因としては、火炎が上向きとなっており、炭化燃料との混焼領域が少なくなっていたためと考えられる。図2.2.5-1の左に示すように、本施設では、バーナ直下より燃焼用二次空気を取り込んでいるが、取込口の炉内側前方に平板(図2.2.5-2)が設置されており、二次空気が上向きに供給される構造となっている。そのため、空気が火炎を押上げ、炭化燃料との混焼領域が少なくなっていた。目視でも上向きの火炎は確認できている。

図2.2.5-3に昨年度の吹込バーナ事前解析結果を示す。解析においても、炉内のガス流れの影響で火炎が上向きであることは把握していたものの、二次空気の向きまで考慮できず、想定以上の火炎角度となっていたと思われる。

これに対する対策としては、二次空気量を減らし、火炎の押上げを低減させた。炭化燃料の圧送エア投入により、空気量が増加していることを踏まえ、その分の二次空気量を低減させ、空気比が一定となるように調整を行った。これにより、火炎角度に改善がみられ、混焼が可能となった。

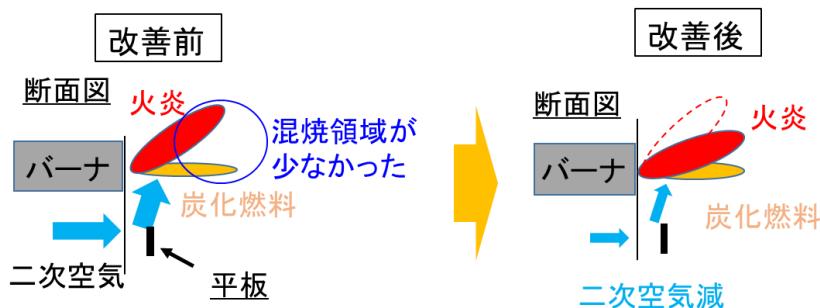


図2.2.5-1 バーナ火炎角度の問題点概要



図2.2.5-2 炉内平板写真

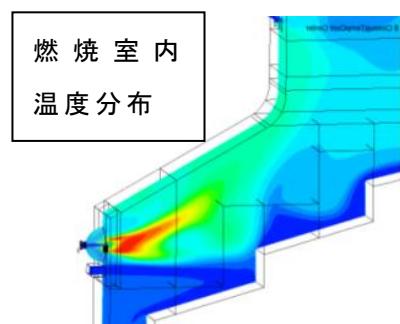


図2.2.5-3 解析結果

(2) 炭化燃料吹込角度

炭化燃料吹込ノズルは、初期設計において配置制約上バーナ火炎に対して、 13° の角度で設置していた（図 2.2.5-4）。炭化燃料と火炎の混焼部分で燃焼の様子が確認出来た一方で、一部の炭化燃料が火炎方向ではなく、火炎と平行もしくは側壁に吹込まれている様子が確認できた。ガスの流れの影響から、想定よりも炭化燃料への混焼が不十分であったと考える。吹込角度 13° で温度の上昇は確認でき、排ガス値は届出値以下となっていたが、更なる燃焼改善を図るため、角度を 33° （昨年度燃焼試験と同様）に変更した（図 2.2.5-5）。改造後試験を行った所、改造前に比べ、排ガス値、燃焼率に改善が見られた。改善前後の炉内の様子を図 2.2.5-6 に示すが、吹込角度の改善が目視でも確認出来る。

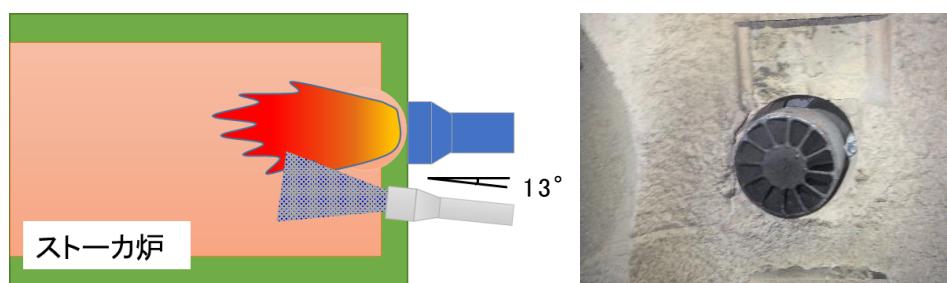


図 2.2.5-4 吹込ノズル角度変更前

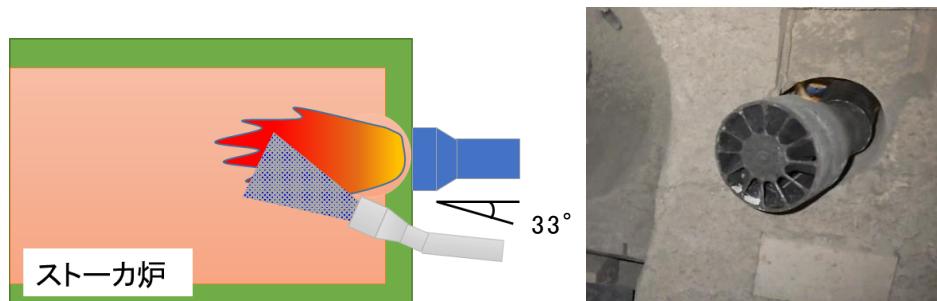


図 2.2.5-5 吹込ノズル角度変更後

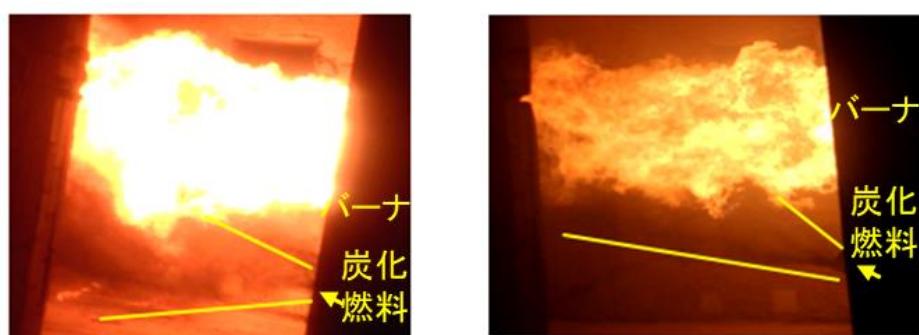


図 2.2.5-6 炉内の燃焼の様子（左：変更前、右：変更後）

(3) 炭化燃料供給量について

試験中、炭化燃料を必要分供給出来ず、混焼率が目標の 20%に達していないという事象があった。図 2.2.5-7 に示す様に供給系は、炭化燃料供給スクリュー、RV、圧送配管の構成からなる。本事象は、青矢印で示す圧送エアの噴上げが、RV の羽根～ケーシング間の隙間と、戻り側の RV 羽根間を通ってスクリューまで上がり、その影響で供給スクリュー ⇒ 供給ホッパへの逆流が多かったことが要因と考えられる。また、スクリュー一周波数が高いほど、逆流量は増加するため、今回、事前のキャリブレーション値から算出した必要設定周波数まで上げることが出来なかった。改善策として、隙間調整と空気抜きバルブの設置を行い、噴上げの影響を低減した所、供給量の増加が可能となり、混焼率 20% の試験が実施可能となった。

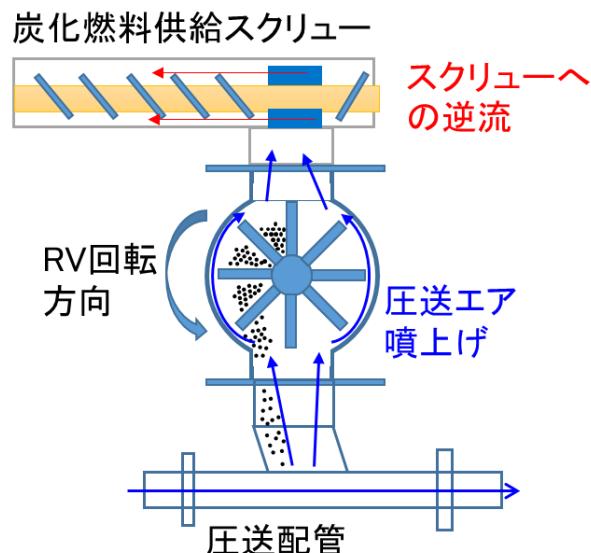


図 2.2.5-7 発生事象イメージ図



図 2.2.5-8 空気抜きバルブ

2.3 直投ノズル実証試験

2.3.1 燃焼解析

実証炉での試験により炉の運転が継続できなくなるリスクを最小限にするため、播磨町塵芥処理センターでの実証試験前に解析を実施し、炭化燃料が重油との混焼利用可能であることを確認し、実証試験を実施した。本項では、その解析結果および実証試験結果を示す。

(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2.3.1-1に示す。炉壁の境界条件はストーカ上をEscape(粒子が炉壁面に衝突すると計算終了)、それ以外をReflect(粒子が炉壁面に衝突すると跳ね返って計算続行)に設定した。

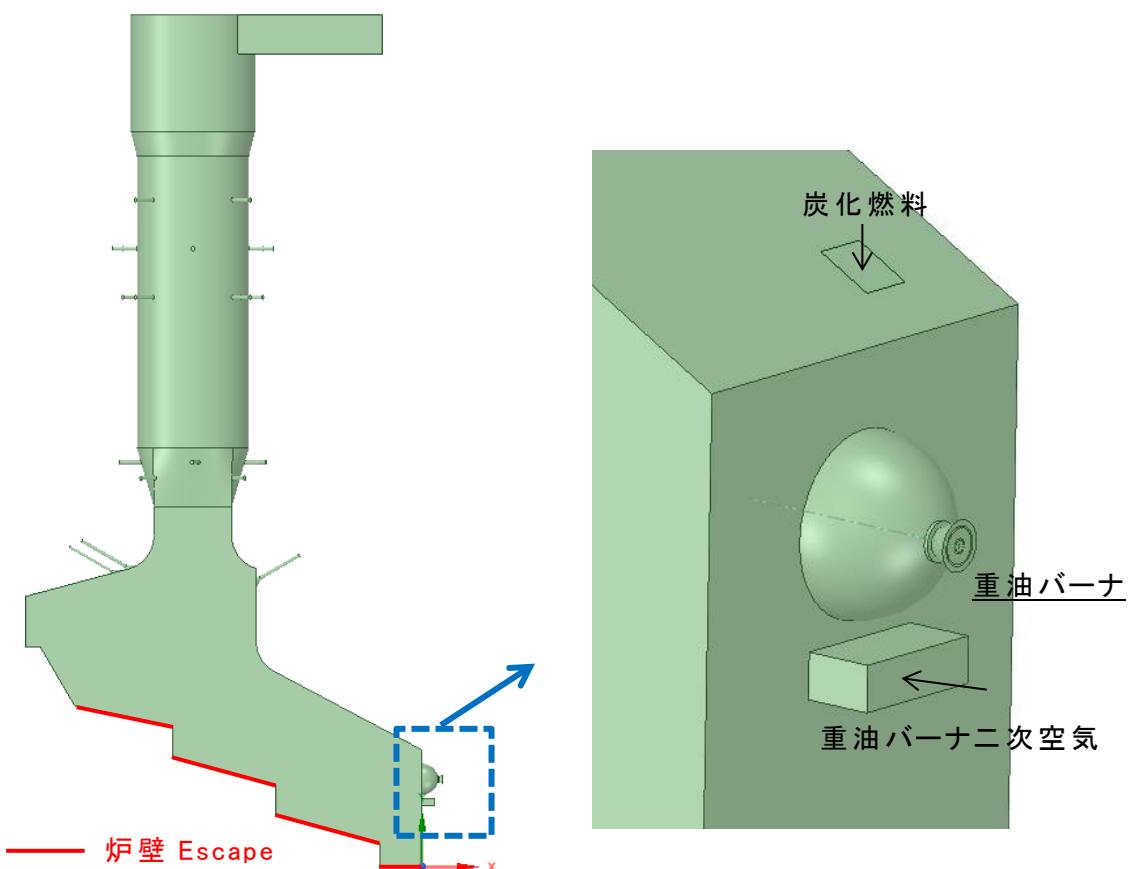


図2.3.1-1 直投ノズル解析形状モデル

表2.3.1-1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用いた。

表 2.3.1-1 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	m ³ N/h
	1次	242	m ³ N/h
	2次	1565	m ³ N/h
	3次	56	m ³ N/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
	乾燥段	1680	m ³ /h
	燃焼段	1680	m ³ /h
	後燃段	840	m ³ /h
	燃焼炉出口(ホッパ側)	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 2.3.1-2、2.3.1-3 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 2.3.1-4、2.3.1-5 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 2.3.1-6、2.3.1-7 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 92.29% となつた。

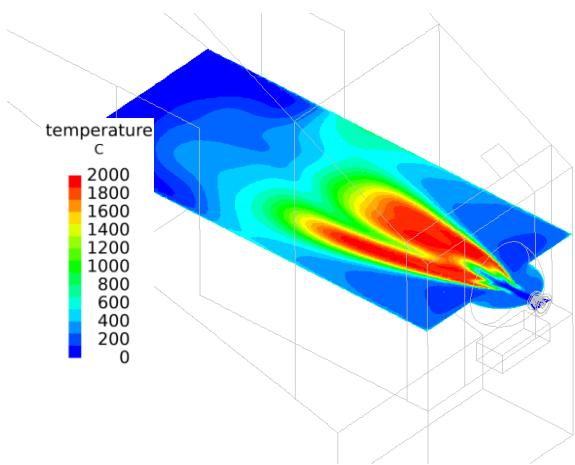


図 2.3.1-2 重油バーナ中心断面の温度分布

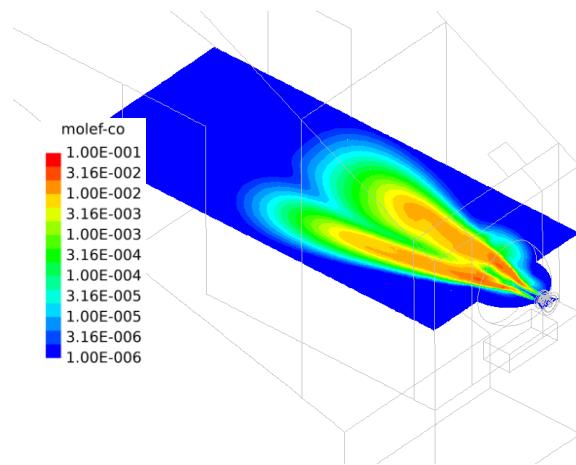


図 2.3.1-3 重油バーナ中心断面のCO濃度分布

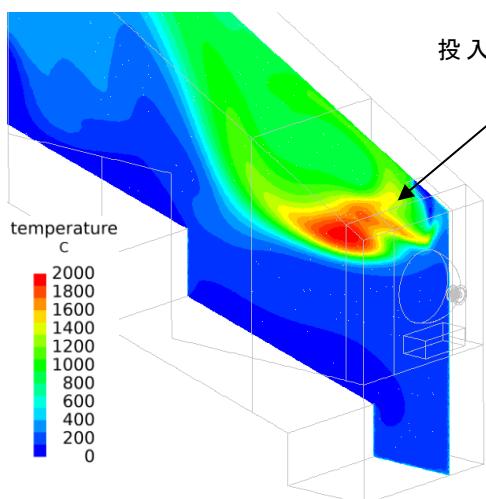


図 2.3.1-4 直投ノズル中心断面の温度分布

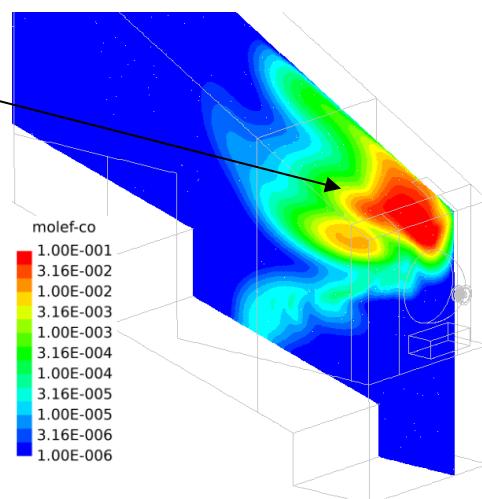


図 2.3.1-5 直投ノズル中心断面のCO濃度分布

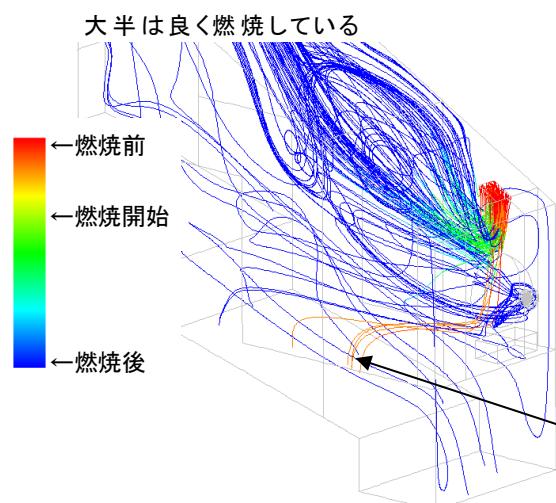


図 2.3.1-6 粒子の軌跡(粒子の状態)

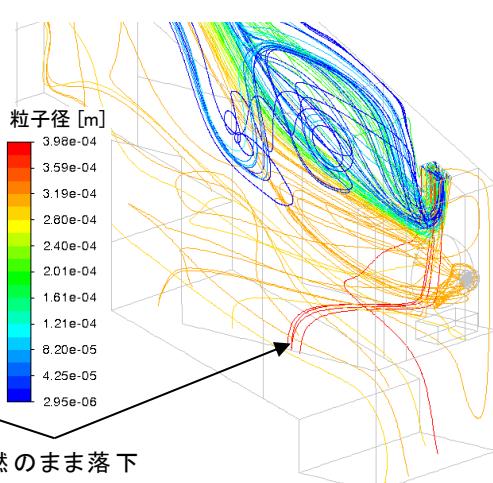


図 2.3.1-7 粒子の軌跡(粒子径)

2.3.2 実証試験設備・試験方法

試験設備概要を図 2.3.2-1 に示す。機器は 2.3 吹込バーナ燃焼実証試験とほぼ同様となっており、N)に直投ノズルを設置している。直投ノズルは既設のガス冷却室下のノズルを利用して、炉天井から炉内に炭化燃料を自然落下させる。

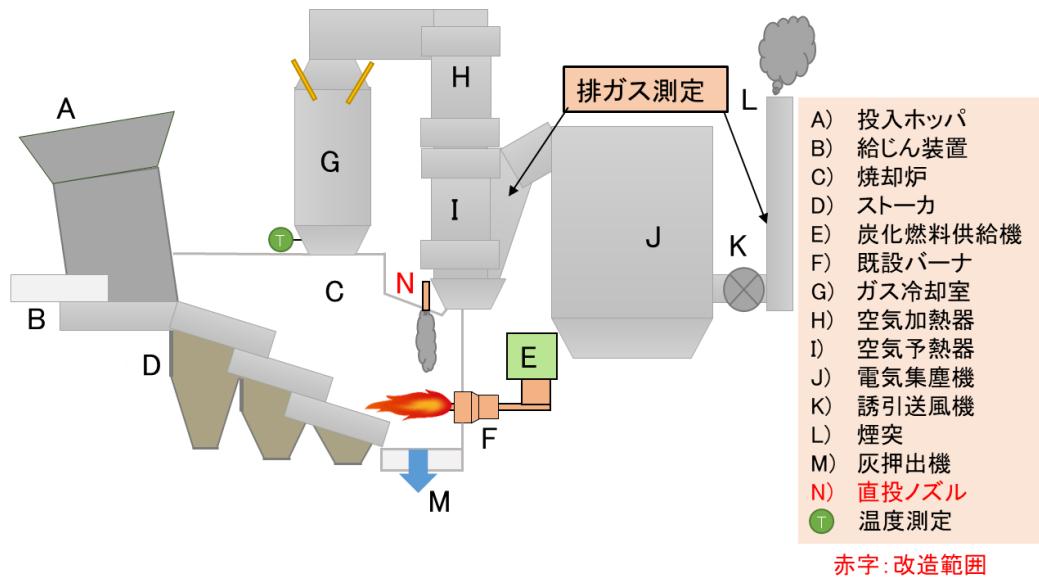


図 2.3.2-1 試験設備概要(直投ノズル)

試験は焼却炉の起動時に行い、播磨町塵芥処理センター 1 号炉を使用した。起動方法は、吹込バーナ同様、近年のごみ焼却施設で行われる起動方法に合わせた。

試験の流れとして、バーナのみで重油専焼起動の場合、バーナ着火後重油量 150L/h(MAX)で運転し、燃焼室出口ガス温度 PV 値が約 300°C となった段階でごみを投入し、ごみの燃焼開始に伴って炉を 900°C 程度まで昇温し、バーナを消火して通常運転に入る。この流れをベースとし、炭化燃料混焼起動を行った。バーナ着火後重油量 150L/h(MAX)で運転し、燃焼室出口ガス温度 PV 値が約 250°C となった段階で重油量を段階的に混焼率 5%、10%、20% と同等となるよう 120L/h まで減少させ、同時に炭化燃料を約 2.4kg/h(混焼率 5%)、45kg/h(混焼率 10%)、90kg/h(混焼率 20%) の量を投入して、継続して昇温を行う。直投ノズルについては、吹込バーナと異なり、初期混焼率を 5% とし、試験が問題なく実施できることを確認した後、継続して混焼率を上げた。その後、必要な測定を完了し、燃焼室出口ガス温度が 300°C となったらごみを投入し、900°C 付近まで上昇した段階で炭化燃料の供給とバーナの運転を停止し、消火した段階で試験を終了する。

試験中に測定するデータとしては、温度測定、排ガス測定に加え、燃焼率、中央制御室で測定しているトレンドデータを取得する。燃焼率についてのみ、EP 下

にて採取を行った。排ガス測定の項目と分析方法は、表 2.3.2.2 の通りである。本項で示す排ガス値は O₂12%換算を行っており、ばいじん濃度は標準状態で記している。

表 2.3.2-1 排ガス測定項目と分析方法

測定項目	分析方法
硫黄酸化物濃度	JIS-K-0103 7.1 イオンクロマトグラフ法
塩化水素濃度	JIS-K-0107 7.1 イオンクロマトグラフ法
窒素酸化物濃度	JIS-K-0104 B-7982 化学発光方式
二酸化硫黄濃度	JIS-B-7952
酸素濃度	JIS-B-7983
温度	JIS-Z-8808 6
水分	JIS-Z-8808 7

2.3.3 実証試験条件

試験条件を表 2.3.3-1 に示す。重油量 150L/h 相当とし、炭化燃料は重油の 20% 混焼率となるよう供給する。炭化燃料は粉碎品を使用した。試験イメージは図 2.3.3-1 の通りで、炭化燃料は、炉天井にある既設のノズルを介して既設バーナ火炎の上部から自然落下により供給する。試験機器の設置写真を図 2.3.3-2 に示す。機器は、投入ホッパ、RV(以下 RV) で構成される。

表 2.3.3-1 試験条件

	第 7 回
RUN	2.2
重油量 [L/h]	120
混焼率 [%]	20
炭化燃料 供給量 [kg/h]	粉碎品 92
RV 周波数 [Hz]	60

断面図

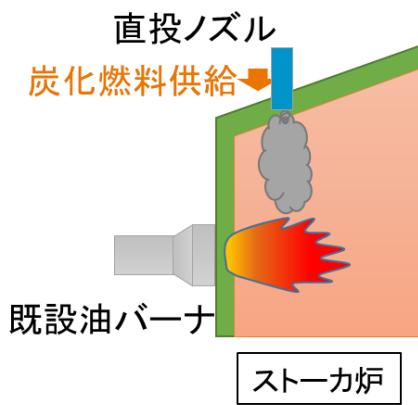


図 2.3.3-1 試験イメージ



図 2.3.3-2 試験機器

2.3.4 試験結果、解析との整合性

燃焼状態、温度トレンド、排ガス値、燃焼率等の結果を示す。

(1) 燃焼状態の確認

炭化燃料混焼時の燃焼の様子を確認するため、炉前の覗き窓より炉内を撮影した(図 2.3.4-1)。今回、吹込バーナ試験時に撮影した灰押出機上の点検口からは、燃焼した炭化燃料が落下してくるため撮影困難であった。図 2.3.4-2～図 2.3.4-3 に、重油専焼時と炭化燃料混焼時の様子を示す。炭化燃料混焼時、火炎上部から炭化燃料が落下して火炎に巻き込まれている様子が確認出来た。

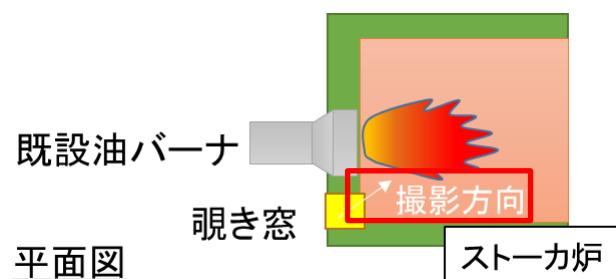


図 2.3.4-1 焼却炉内撮影箇所



図 2.3.4-3 炭化燃料混焼時の火炎の様子

(2) 温度トレンド

図 2.3.4-4 に第 7 回 (RUN2.2) 試験の試験開始から終了までの燃焼室出口温度トレンドを示す。吹込バーナ同様、炭化燃料混焼時は、重油専焼後 250°C 程度となった段階で炭化燃料を混焼し、排ガス測定のため運転を維持した。その後、同様にごみを投入し、直後から温度が急上昇していることが確認出来た。

第 7 回試験ごみ投入前の温度トレンドを図 2.3.4-5 に示す。まず重油のみで昇温し、250°C 付近となった段階で、重油量 150L/h を段階的に 120L/h まで低下させ、同時に炭化燃料の供給を開始、増加させていった。混焼率 5% では、炭化燃料投入による温度上昇が見られなかったが、混焼率を 10%、20% とした段階では温度上昇を確認した。混焼率 5% では、供給量が少なかったためか、温度への影響は無かったと考える。

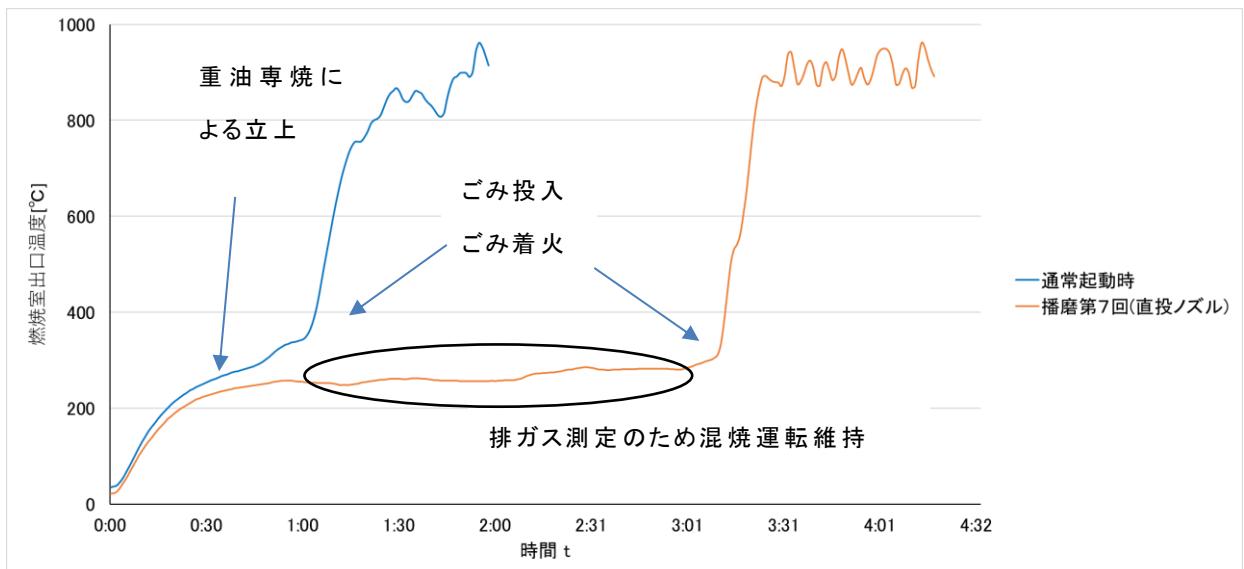


図 2.3.4-4 燃焼室出口温度トレンド (全体)

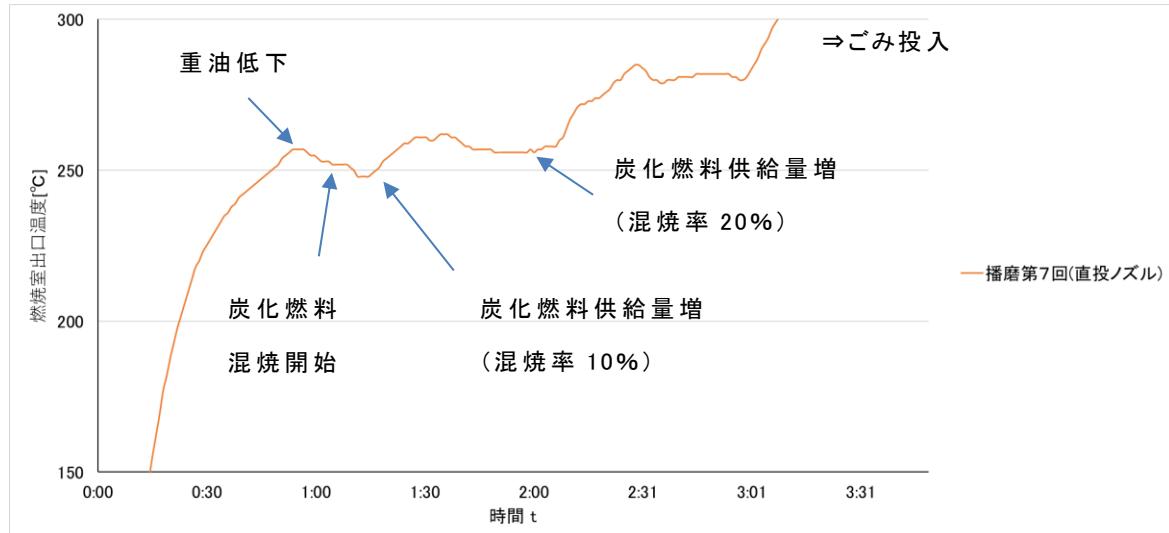


図 2.3.4-5 炭化燃料粉碎品混焼時のごみ投入前温度トレンド (RUN2.2)

(3) 排ガス 燃焼率

排ガス値、燃焼率の測定結果を示す。排ガス測定は、吹込バーナ同様 EP 前と煙突の 2箇所で行い、図 2.3.4-6 の様に測定区間は 2パターンとしている。数値はその区間の平均値とし、 O_2 12%換算値換算値としている。表 2.2.4-1 に示す試験条件の各データを比較した結果をそれぞれ示す。播磨町塵芥処理センターの届出値はグラフで四角に囲っている。

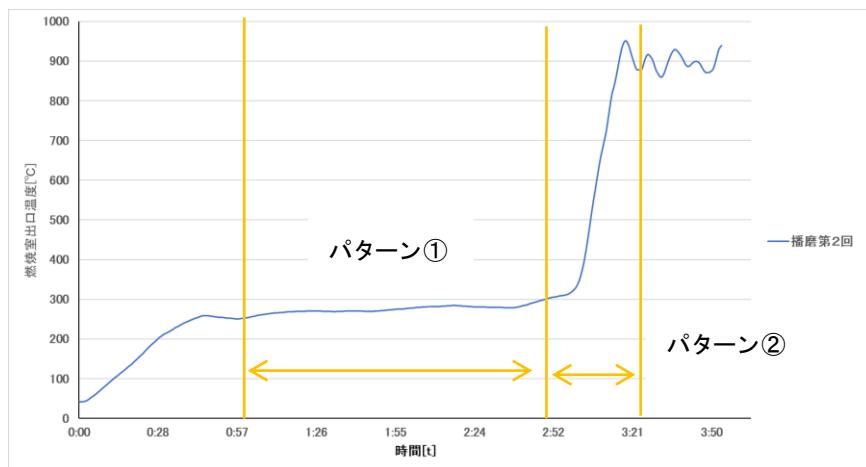


図 2.3.4-6 測定パターン

表 2.3.4-1 試験条件

	パターン① 炭化燃料混焼開始～ ごみ投入		パターン② ごみ投入・着火～ バーナ消火(900°C)
A	重油起動時(予備試験)	A'	重油起動時(予備試験)
B	第7回	B'	第7回

図 2.3.4-7 にパターン①、図 2.3.4-8 にパターン②の O_2 濃度をそれぞれ示す。いずれの試験でも酸素濃度が同等であることから、同条件の空気比で試験できたことが確認できた。また、ごみ投入後の O_2 濃度が 4 ~ 5 ポイント低くなっていること、炭化燃料の燃焼では消費されなかった炉内の空気が、ごみの燃焼時に消費されていることがわかる。届出値は□で示す。

A、A'	重油起動時(予備試験)
B、B'	第 7 回

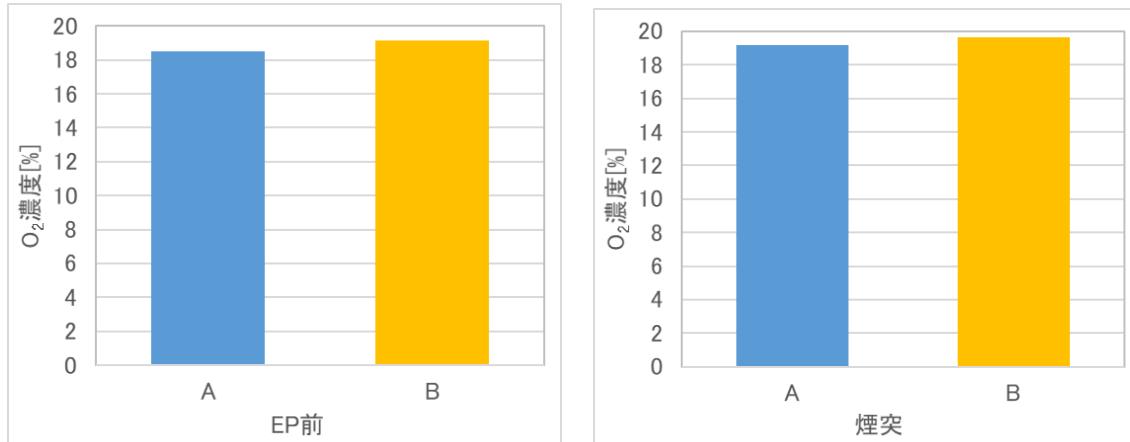


図 2.3.4-7 パターン① O_2 濃度

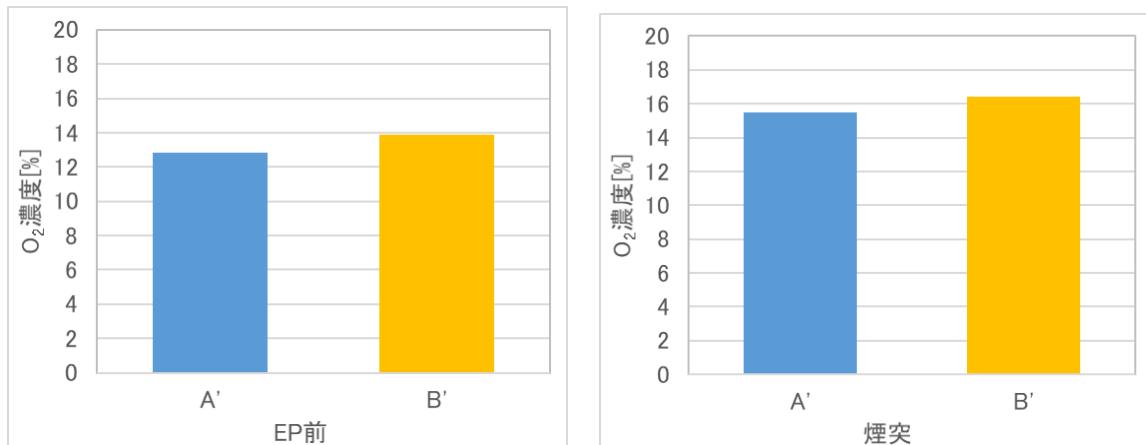


図 2.3.4-8 パターン② O_2 濃度

図 2.3.4-9 にパターン①、図 2.3.4-10 にパターン②の NO_x 濃度をそれぞれ示す。重油専焼時と比較し、炭化燃料の混焼により NO_x 値が増加した。吹込バーナと同様、昨年度の燃焼試験の様な NO_x 値が上昇したことが確認出来ており、炭化燃料の燃焼が確認出来た。吹込バーナに比べ、若干数値が低いことから、燃焼性が直投ノズルの方が低いと思われるが、数値は施設の届出値以下となっており問題ないと考える。届出値は□で示す。

A、A'	重油起動時(予備試験)
B、B'	第7回

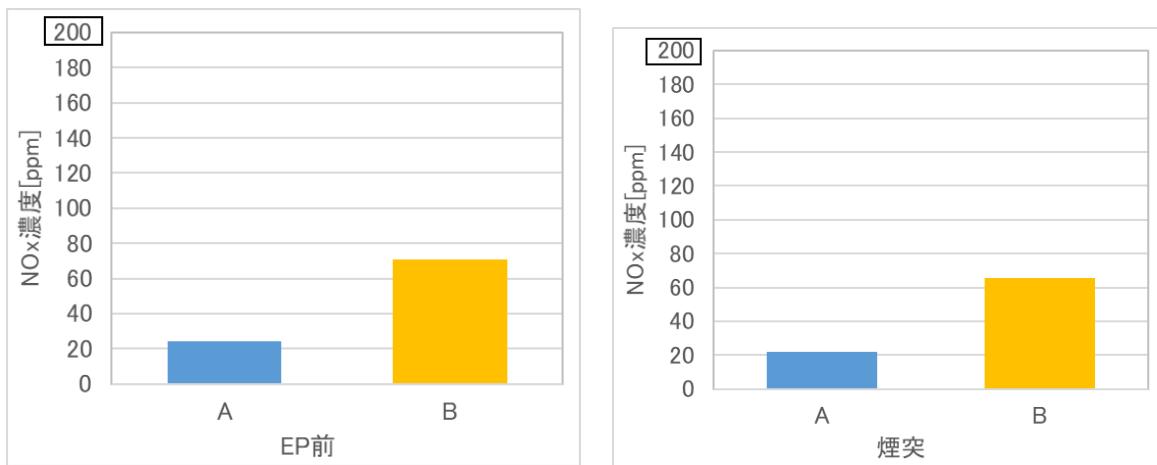


図 2.3.4-9 パターン① NO_x 濃度 (0₂12% 換算値)

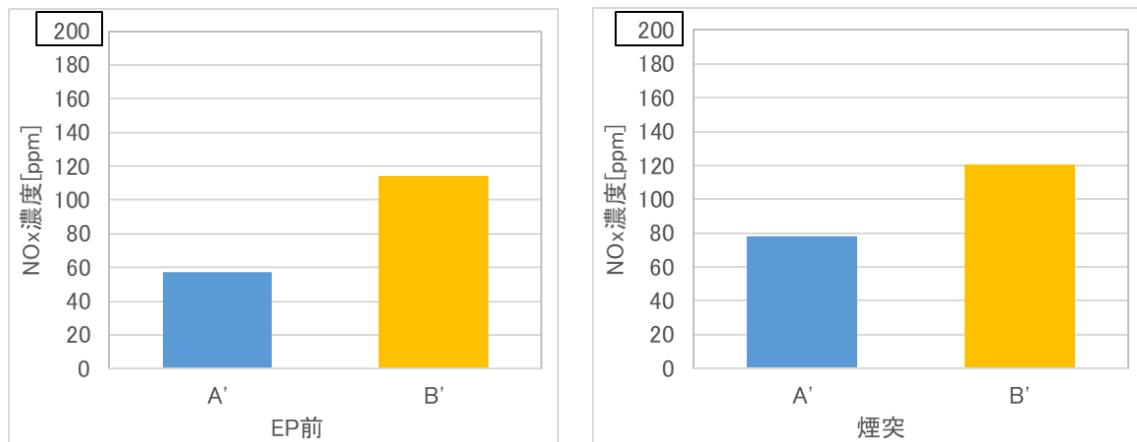


図 2.3.4-10 パターン② NO_x 濃度 (0₂12% 換算値)

図 2.3.4-11 にパターン①、図 2.3.4-12 にパターン②の SO_x 濃度をそれぞれ示す。重油専焼時、炭化燃料混焼時で数値に差がなく、ごみを混焼させた際にも炭化燃料の有無で大きな差がないことが確認された。SO_xについて、施設の届出値を大幅に下回る結果となった。届出値は□で示す。

A、A'	重油起動時(予備試験)
B、B'	第 7 回

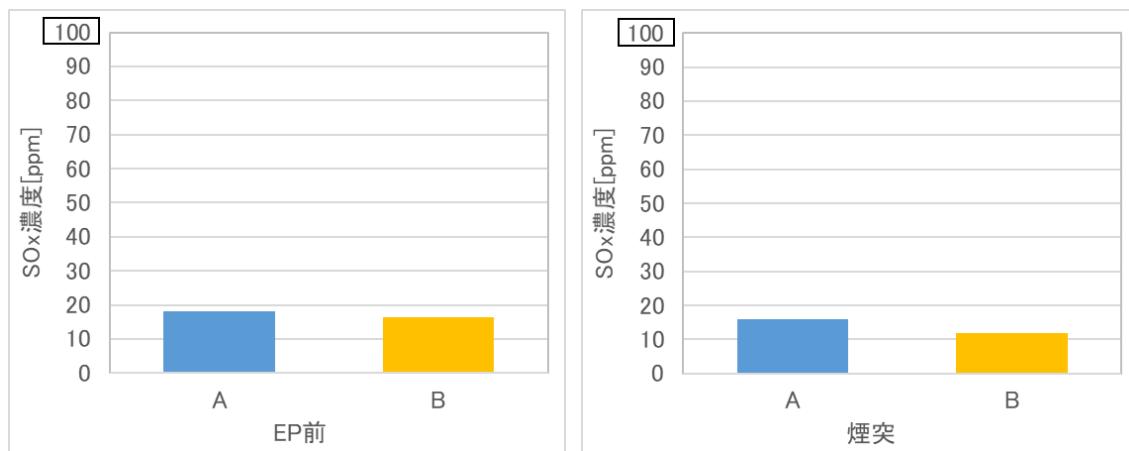


図 2.3.4-11 パターン① SO_x 濃度 (O₂12% 換算値)

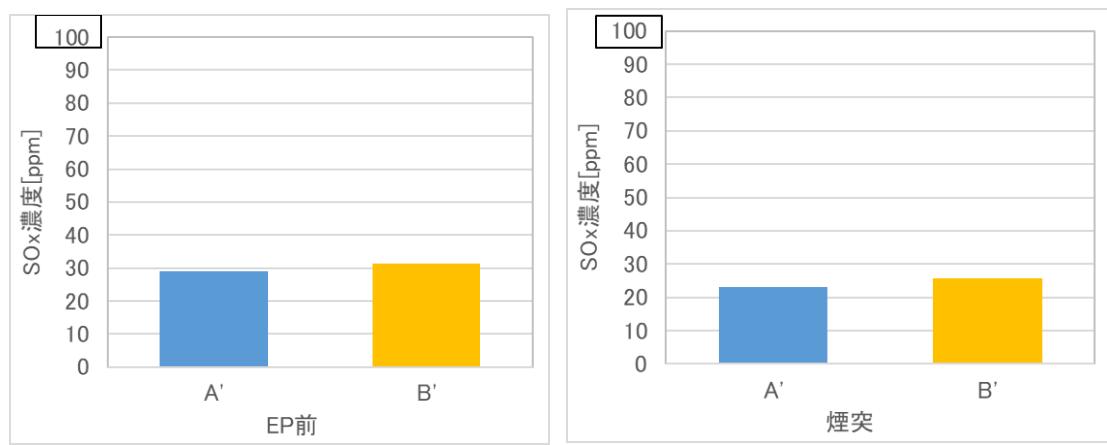


図 2.3.4-12 パターン② SO_x 濃度 (O₂12% 換算値)

図 2.3.4-13 にパターン①、図 2.3.4-14 にパターン② HCl 濃度をそれぞれ示す。煙突で重油専焼時に検出された件については、EP 中のばいじんの一部が吸引時に混入した特異点と考えられる。吹込バーナ同様、炭化燃料の混焼時は定量下限で検出されなかったため、HCl は検出されないことがわかる。ごみ燃焼中については、ごみに混入する C1 分が燃焼したため検出されたと考えられる。HCl について、施設の届出値を大きく下回る結果であった。届出値は□で示す。

A、A'	重油起動時(予備試験)
B、B'	第 7 回

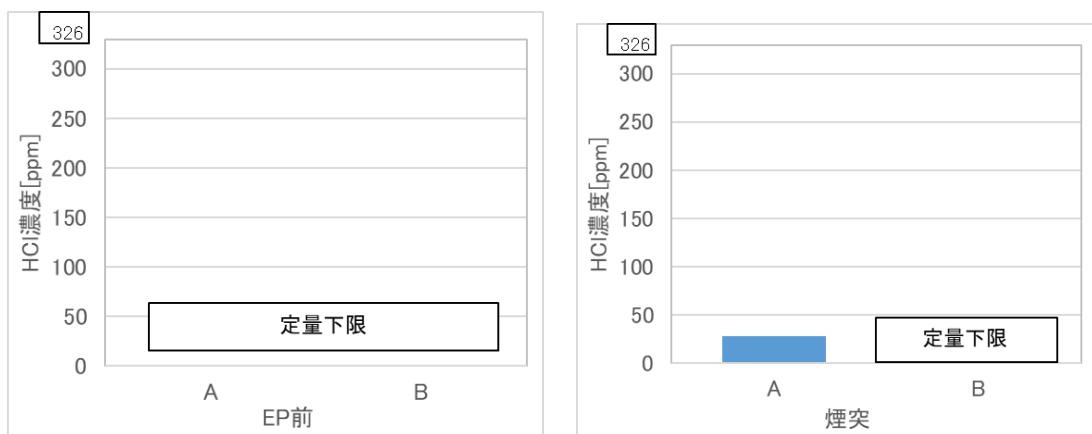


図 2.3.4-13 パターン① HCl 濃度 (O_2 12% 換算値)

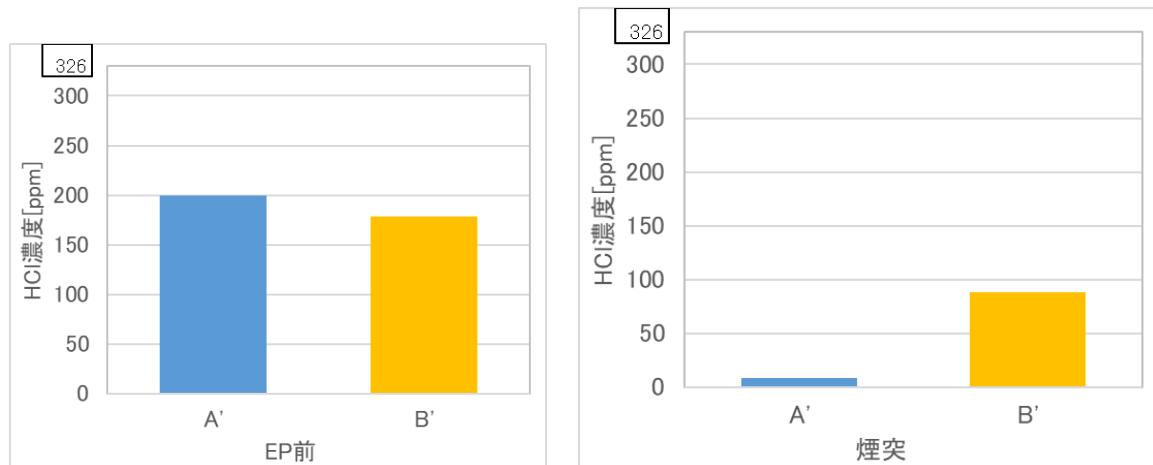


図 2.3.4-14 パターン② HCl 濃度 (O_2 12% 換算値)

(4) 燃焼率

直投ノズル試験で得られた燃焼率は、93.6%であった。吹込バーナと同等の数値となっており、炭化燃料と火炎の混焼が十分行われていると言える。

2.4 ごみ処理施設での利用における腐食検討

2.4.1 想定される腐食機構

ごみ処理施設の煙道での腐食機構としては、酸露点腐食が想定される。酸露点腐食は、燃焼ガス中の SO_3 や HCl が水蒸気とともに酸露点以下の金属表面に凝縮して形成された高濃度の硫酸や塩酸によって生じる腐食である。硫酸露点の燃焼ガス中の SO_3 濃度および H_2O 濃度依存性を図 2.4.1-1^[3] に示す。図のように SO_3 濃度と H_2O 濃度が高くなるほど硫酸露点は高くなる。また、塩酸露点の燃焼ガス中の HCl 濃度および H_2O 濃度依存性を図 2.4.1-2^[4] に示す。図のように HCl 濃度と H_2O 濃度が高くなるほど塩酸露点は高くなる。

ごみ処理施設の煙道では、 HCl 濃度は数百 ppm 程度、 SO_x 濃度は数十 ppm 程度である^[3]。このような条件下では、 SO_3 の方が HCl に比べて露点が高く、凝縮しやすいと推定され、煙道表面に凝縮した硫酸中に HCl ガスが溶け込んで混酸を形成して腐食が発生すると考えられる。

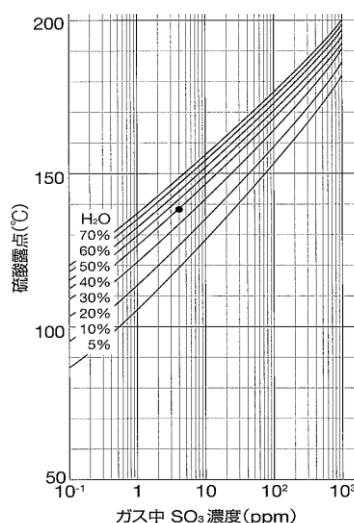


図 2.4.1-1 硫酸露点の H_2O , SO_3 濃度依存性^[1]

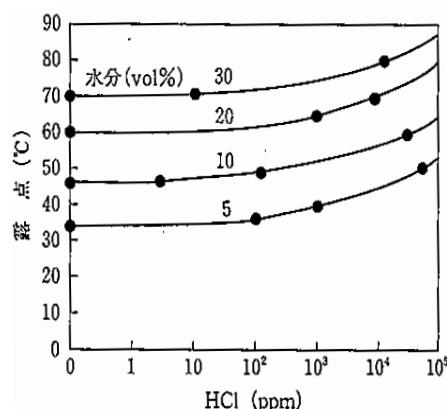


図 2.4.1-2 塩酸露点の H_2O , HCl 濃度依存性^[2]

2.4.2 試験結果との比較

炭化燃料用混焼バーナでの炭化燃料の混焼が煙道の腐食に与える影響を検討するために、播磨町塵芥処理センターで重油を専焼した場合と、炭化燃料を混焼した場合の電気集塵機前(EP前)でのガス濃度を分析した。SO₂濃度は連続分析計で、SO_xとHCl濃度は手分析で分析した。

重油専焼時と炭化燃料混焼時のSO₂とSO_x、HClガス濃度の分析結果を図2.4.2-1に示す。SO₂、SO_x濃度とHCl濃度について、重油専焼時と炭化燃料混焼時で大きな差異は見られなかった。このことから、炭化燃料混焼時の装置の腐食は、重油専用時と同程度と推定された。ただし、今回の試験では、通常実炉では数十 ppm程度であると想定されるSO₂濃度が数 ppm程度であり、正しく計測できていなかつた可能性があるため、より詳細に炭化燃料混焼が煙道の腐食に与える影響を検討するには、直接SO₃濃度を計測する必要がある。

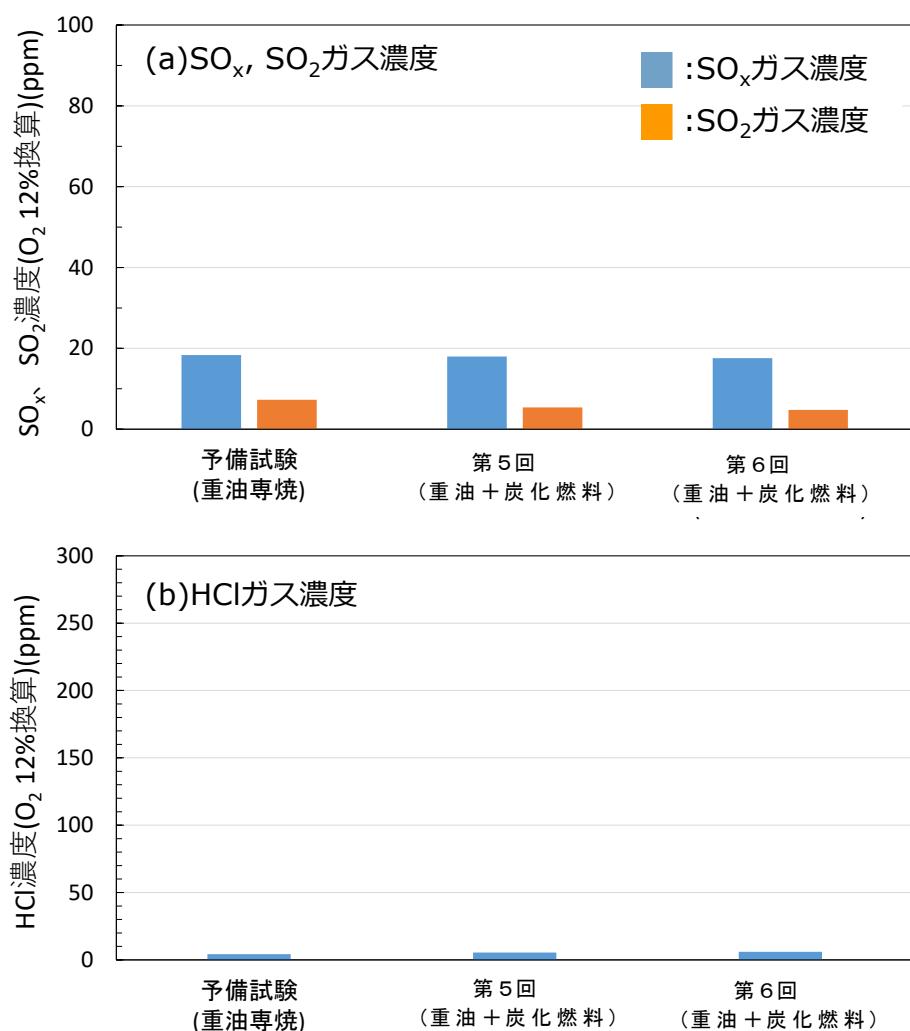


図 2.4.2-1 重油専焼時および、炭化燃料混焼時の EP 前での SO_x, SO₂ ガス濃度 (a)
および、HCl ガス濃度 (b)

2.5 まとめ

試験結果をまとめる。まず温度トレンドについては、吹込バーナ、直投ノズル共に温度上昇を確認し、化石燃料の代替が可能であることを確認した。燃焼の様子は、解析結果と類似の結果が得られた。また、表 2.5-1 にパターン①のごみ投入前の煙突排ガス値結果をまとめる。吹込バーナ、直投ノズルとともに、届出値以下となっており、問題ないことを確認した。腐食検討について、炭化燃料の使用により、腐食要因となる SO₂、SOx、HCl ガス濃度は、重油専焼時と同程度と推定された。以上より、ごみ処理施設での炭化燃料使用が問題ないことを示すことができた。

表 2.5-1 試験結果まとめ

項目	NOx[ppm]	HCl[ppm]	SOx[ppm]	燃焼率[%]
吹込バーナ (粉碎品)	76	定量下限以下	19	93.2
吹込バーナ (解碎品)	44	定量下限以下	定量下限以下	87.8
直投ノズル	65	12	定量下限以下	93.6
播磨町塵芥 処理センター 届出値	200	326	100	-
関係法令	(大)	(大)	(大)	(大)

※(大)→大気汚染防止法

3 ごみ処理施設設置後の影響検討

前節まで、今年度実施した播磨町塵芥処理センターにおける実証試験結果を示した。本説では、炭化燃料の使用によるごみ処理施設への影響の検討結果を示す。

3.1 影響要因の調査

以下に示す炭化燃料の使用による施設へ及ぼす影響要因項目を確認した。

- ①炉内耐火物への影響
- ②ストーカ火格子への影響
- ③EP（電気集じん機）への影響
- ④炭化燃料供給量の炉内圧への影響⇒2019年度成果報告書にて報告の内容

3.2 確認結果

3.2.1 炉内耐火物への影響

試験開始前の写真と試験終了後の写真を図 3.2.1-1～図 3.2.1-4 に示す。確認した箇所は、バーナ・炭化燃料吹込ノズルを設置している炉前、炉左右壁面、炉天井とした。炭化燃料の使用により、黒く変色、もしくは耐火物の破損が促進されていないか確認した。写真より、試験前と試験終了後で大きな損傷は無く、影響無いことを確認した。



図 3.2.1-1 炉前（左：試験開始前 右：試験終了後）



図 3.2.1-2 炉右壁面（左：試験開始前 右：試験終了後）



図 3.2.1-3 炉左壁面（左：試験開始前 右：試験終了後）



図 3.2.1-4 炉天井（左：試験開始前 右：試験終了後）

3.2.2 ストーカ火格子への影響

試験開始前の写真と第6回試験終了後の写真を図3.2.2-1に示す。火格子表面の状態について試験前後で変化なく、影響無いことを確認した。



図 3.2.2-1 ストーカ火格子（上：試験開始前 下：試験終了後）

3.2.3 EP(電気集塵機)への影響

試験開始前の写真と試験終了後の写真を図 3.2.3-1 に示す。内部に炭化燃料の黒い粒子や穴あき等は確認されず、影響が無いことを確認した。



図 3.2.3-1 EP 内部（上：試験前 下：試験終了後）

3.2.4 炭化燃料の炉内圧への影響

昨年度、燃焼試験にて、重油専焼時には見られなかった変動が炭化燃料混焼時は炉内圧力や排ガス値で見られたことを報告書で以下の様に示した。（図 3.2.4-1～3.2.4-2）

〈検討 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。

⇒ 炭化燃料供給機は 2 軸スクリューコンベヤとロータリバルブ（以下、RV）で構成されており、FFT 解析にてその羽根周期による供給量の変動が影響を与えていることが分かった。

〈検討 2〉 変動を低減させることは可能であるかを検討する。

⇒ 2 軸スクリューの位相をずらすことで、変動の低減が見られた。

〈検討 3〉 この変動がごみ焼却施設へ影響が無いかを検討する。

⇒ 炉内圧への影響として、炭化燃料供給による変動影響は、従来ごみ焼却時の炉内圧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ーを利用することは問題ないことを確認した。

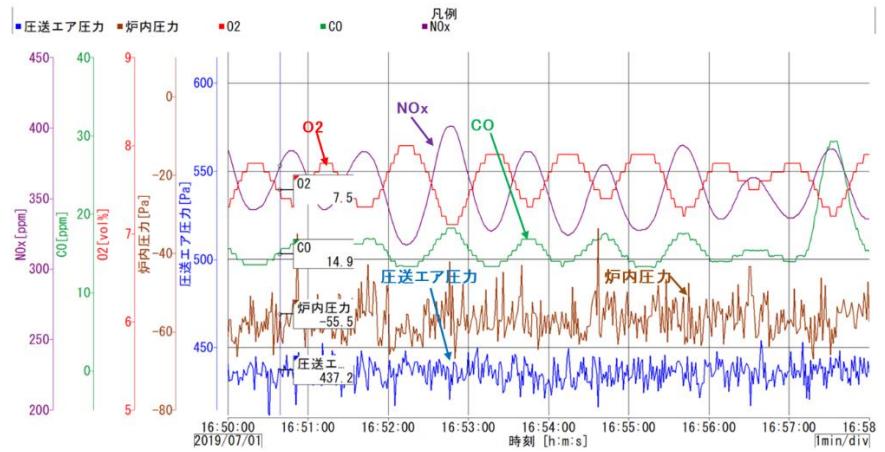


図 3.2.4-1 炭化燃料混焼時のトレンドデータ(燃焼試験混焼バーナ)

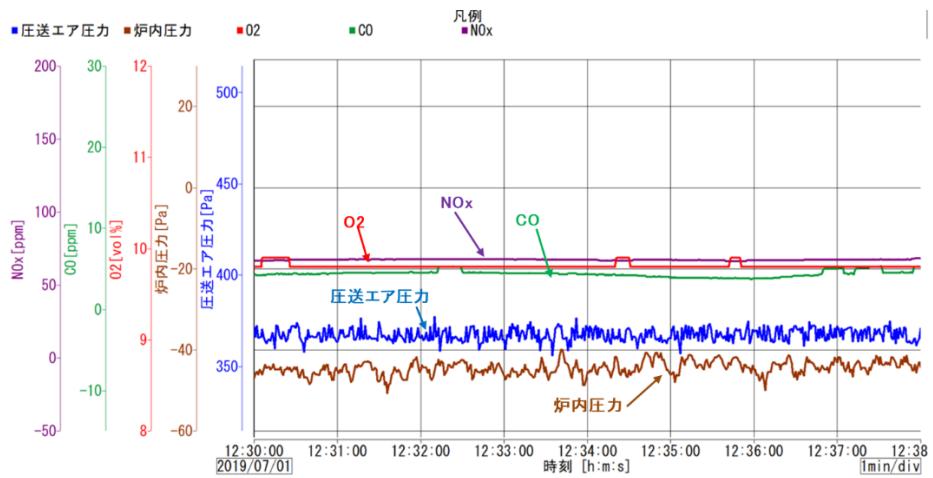


図 3.2.4-2 重油専焼時のトレンドデータ(燃焼試験混焼バーナ)

以上を踏まえ、実証試験を実施し、炭化燃料の供給が炉内圧へ影響を与えるか確認を行った。図 3.2.4-3 に炉起動時（バーナ着火～ごみ投入前まで）の炉内圧力トレンドを示す。重油専焼時に比べ、炭化燃料混焼後、変動が大きくなっているが、負圧を保っており、運転自体には問題ないと言える。また、図 3.2.4-4 に通常運転時（炭化燃料無し）の炉内圧力トレンドを示すが、変動幅が $\pm 0.04\text{kPa}$ 程度となっている。ごみの燃焼に起因すると考えられるが、通常運転時の変動幅に対し、起動時の炭化燃料混焼時は変動幅が $\pm 0.03\text{kPa}$ 程度と低い数値となっており、炭化燃料のごみ処理施設への影響は無いことを確認した。

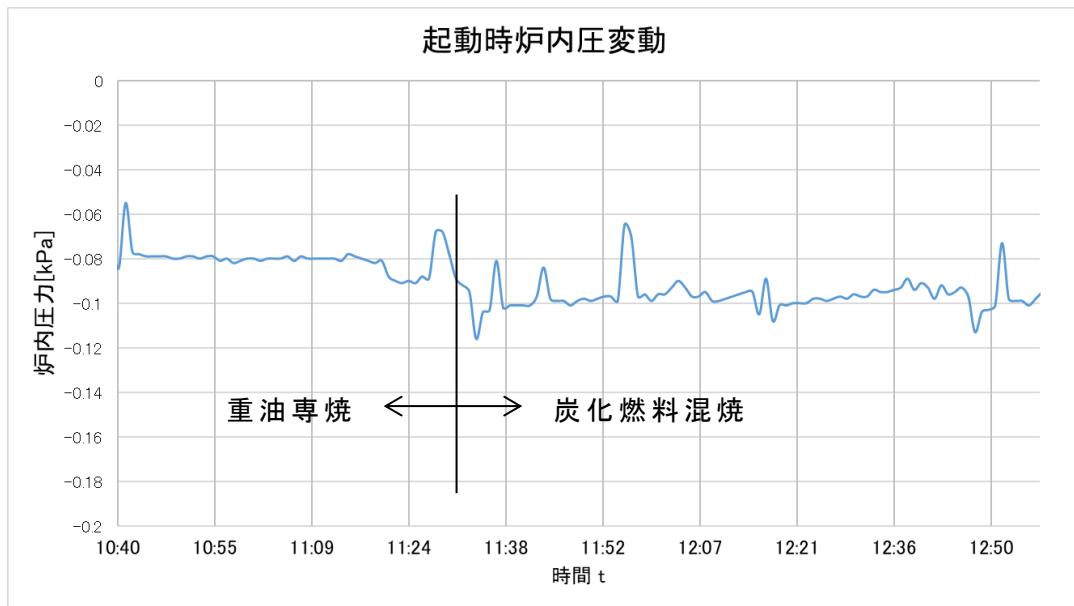


図 3.2.4-3 炉起動時の炉内圧力トレンド

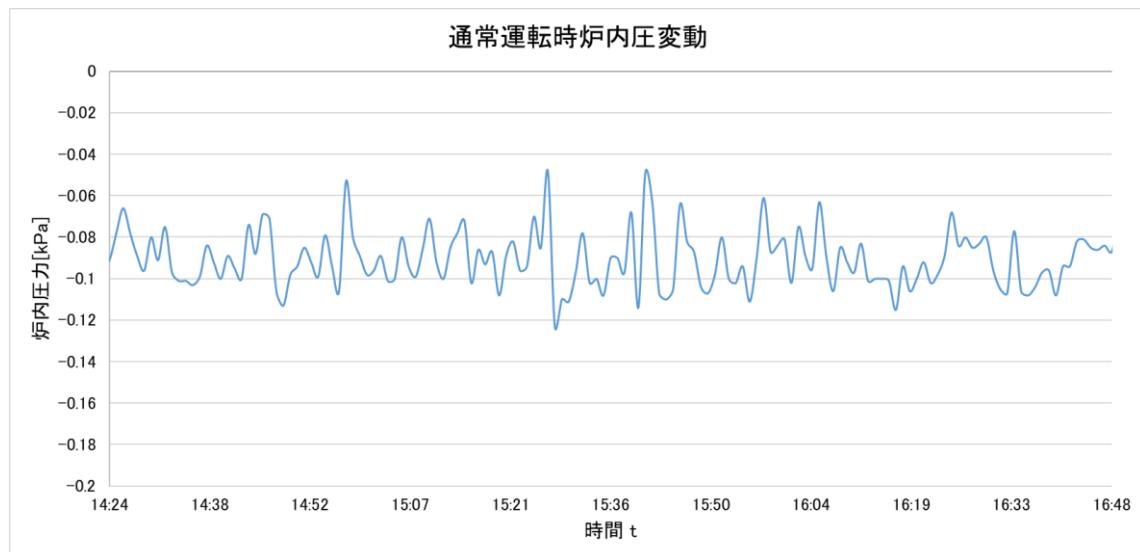


図 3.2.4-4 通常運転時の炉内圧力トレンド(炭化燃料無し)

3.3 メリット試算

本事業では、炭化燃料を使用することで従来の化石燃料のみ使用時に比べ運転に問題が無いことを確認したが、本事業の目的である CO₂ 排出量が削減されるとともに、普及促進を行う上では、コストメリットが出ることが利用者への展開要因として重要である。

3.3.1 CO₂ 削減量

本項では、単純焼却における CO₂ の排出量および本事業の提案システムを採用することによる CO₂ 排出量を試算し、比較することでその有効性を示した。図 3.3.1-1 に炭化燃料システムと単純焼却での CO₂ 排出(赤字)、削減(青字)のイメージ図を示す。炭化燃料 CO₂ の排出量として、①炭化燃料を炭化燃料化施設からごみ処理施設へ搬送時と、⑤炭化燃料化施設内で助燃燃料使用時が挙げられる。一方、削減量としては、②ごみ処理施設での炭化燃料利用時、③炭化施設での炭化燃料利用時、④施設稼働電力差(ごみ処理施設 > 炭化燃料化施設)による削減が挙げられる。基本条件は表 3.3.1-1 の通りとし、結果より、年間 2,642t-CO₂/年の削減が可能であると試算した。各数値の詳細の計算結果を表 3.3.1-1 に示す。

続いて、表 3.3.1-2 に炭化燃料使用の場合の機器設置のイニシャルコスト、図 3.3.1-3 にランニングコストを示す。20 年間の CO₂ の削減コストは吹込みバーナで 0.61k 円/t-CO₂、直投ノズルで 0.55k 円/t-CO₂ となる。

$$\text{※20 年間の CO}_2 \text{ の削減コスト} = (\text{イニシャルコスト} + 20 \text{ 年ランニングコスト}) / \text{CO}_2 \text{ 削減量}/20$$

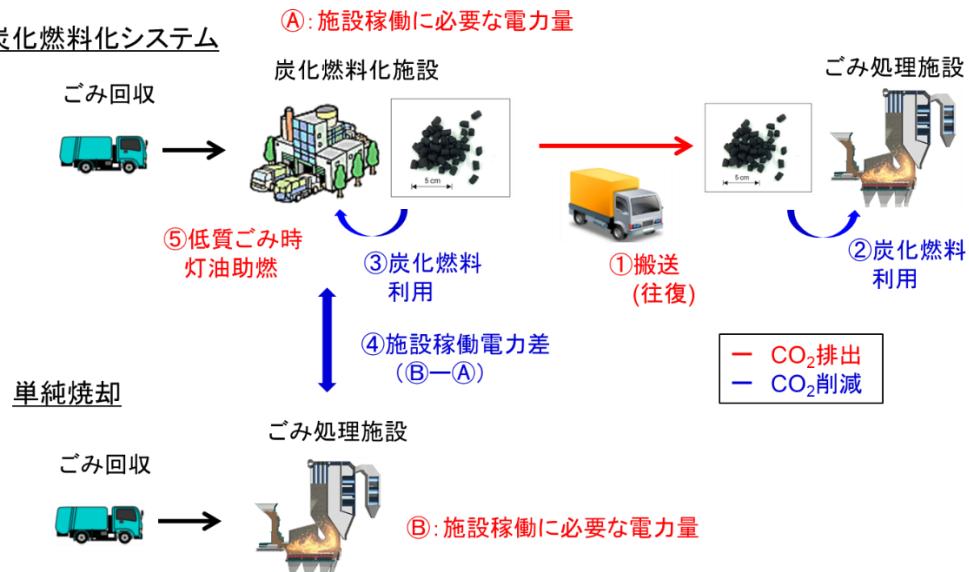


図 3.3.1-1 CO₂ 排出量、削減量の試算イメージ図

表 3.3.1-1 計算結果

環境省 評価事業 参考資料

炭化燃料の利用によるCO₂削減量（本事業）

処理条件 (焼却, ごみ炭化燃料化施設共通)	ごみ処理量	50 t/日
	年間運転日数	280 日

焼却施設	必要電力量	513 kWh/t
	プラスチック割合	15 %

ごみ炭化燃料化施設	年間運転日数	280 日
	ごみ処理量	50 t/日
	炭化燃料製造量	9.0 t/日
	内、施設内利用	1.2 t/日
	所外利用	7.8 t/日
	ごみ炭化燃料化施設必要電力量	440 kWh/t
	ごみ低質時灯油使用	18.5 L/ごみt

H21年度施設台帳より

製造率18%

利用施設への輸送	普通貨物燃費（軽油	5.8 km/L
	走行距離	50 km (往復)
	軽油CO ₂ 排出係数	2.58 t-CO ₂ /kL
	輸送回数	0.65 回/日

1回12トン輸送

物質収支（1日あたり）

図記号	○:排出 ▲:削減	焼却	ごみ処理利用
焼却	○ プラスチック焼却量t/日	7.5	7.5
	B ○ 焼却消費電力 MWh/日	25.65	
利用施設への輸送	① ○ 軽油使用量 kL/日		0.0056
ごみ炭化燃料化施設	A ○ 必要電力量 MWh/日		22.0
炭化物1.2t/日利用	③ ▲ 灯油代替 kL/日		0.41
利用施設削減量（炭化物7.8t/日）	② ▲ 灯油 kL/日		2.67

CO ₂ 排出係数	
プラスチック焼却	2.77 t-CO ₂ /t
	0.488 t-CO ₂ /MWh
軽油	2.58 t-CO ₂ /kL
電力	0.488 t-CO ₂ /MWh
灯油	2.49 t-CO ₂ /kL
灯油	2.49 t-CO ₂ /kL
	8,767 kcal/L
炭化物	3,000 kcal/kg

CO₂排出量 t-CO₂/日

図記号	○:排出 ▲:削減	焼却	ごみ処理利用
焼却施設	○ プラスチック焼却量	20.8	20.8
	B ○ 焼却消費電力	12.5	
利用施設への輸送	① ○ 軽油使用量		0.014
ごみ炭化燃料化施設	A ○ 必要電力量		10.74
炭化物1.2t/日利用	③ ▲ 灯油代替		1.02
利用施設削減量（炭化物7.8t/日）	② ▲ 灯油		6.6

提案システム導入によるメリット

プラスチック排出を考慮	排出計 t-CO ₂ /日	33.3	23.9
	排出計 t-CO ₂ /年	9322	6680
	削減量 t-CO ₂ /年		2642
	削減率		28%

表 3.3.1-2 機器設置イニシャルコスト(2炉分)

	本体	供給機 ※1	ふるい	制御盤 工事費	機械 工事費	合計
吹込バーナ	849	1,210	1,000	1,000	2,100	12,318
直投ノズル	含む⇒	600	1,000	1,000	1,800	8,800

[k 円 / 年]

※1 吹込バーナについては、一軸スクリューの供給装置とする。

表 3.3.1-3 ランニングコスト

	1年間	20年間
ランニングコスト	1,000	20,000

[k 円 / 年]

3.3.2 概算コスト、回収年月

ごみ処理施設での使用時のコストメリットについて、播磨町で実証試験を実施した吹込バーナと直投ノズルの実績をもとに検討を行った。まず、利用方法①：実証試験と同様に炉起動時に炭化燃料を使用した場合のイメージ図とコストメリットを図 3.3.2-1 と表 3.3.2-1 に示す。現状の化石燃料のみを使用した場合の燃料費に対して、化石燃料の一部を炭化燃料で代替することで、2,298k 円 / 年のメリットが出ると試算した。

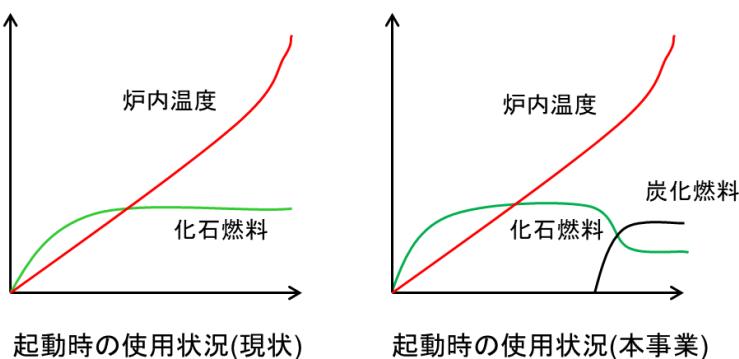


図 3.3.2-1 起動時の燃料使用イメージ

表 3.3.2-1 炭化燃料起動時使用のコストメリット

利用方法① 炭化燃料を起動時利用とし、化石燃料の代替をする。		
	コスト k 円/年	思想
現状： 化石燃料のみ	3,138	化石燃料(灯油)のみ使用時の燃料費 (計算式) = 灯油使用量 47.9[kL/年] × 灯油発熱量 8767[Mcal/L] × 灯油コスト 8[円/Mcal]/1000 × 燃 焼率 93.4[%]/100
提案①： 炭化燃料使用	840	上記化石燃料を炭化燃料で代替した場合の燃料費 (燃料の 20%の熱量を炭化燃料で代替する) (計算式) = 炭化燃料使用量 0.5[t/d] × 炭化燃料発熱量 3000[Mcal/t] × 炭化燃料コスト 2[円/Mcal]/1000 × 280[日]
コストメリット	2,298	

※炭化燃料コスト 2[円/Mcal]は、灰処理費込み。

次に、利用方法②：焼却炉通常運転時に炭化燃料を常時使用の場合のイメージ図とコストメリットを図 3.3.2-2 と表 3.3.2-2 に示す。一般廃棄物のみの場合、図 3.3.2-2 に示すよう、ごみ処理施設ではごみの投入発熱量が変動し、その変動が、発生蒸気量・発電量に影響を与える。この発熱量変動を、炭化燃料を投入することで補填し、発電量を貯う思想とする。この場合、一般廃棄物のみの通常運転時にごみ質低下により、最大発電量の 10%を損失した場合(必要発熱量の 10%分ごみ質低下による)のコストに対して、その分の発熱量を補填し、発電量を貯うのに必要な炭化燃料費より、8,568k 円/年のメリットがでると試算した。

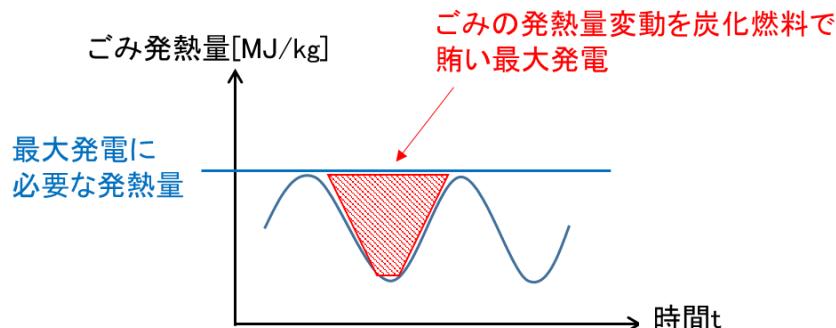


図 3.3.2-2 通常時の燃料使用イメージ

表 3.3.2-2 炭化燃料通常運転時使用のコストメリット

利用方法②:炭化燃料を常時使用とし、ごみ質低下による発電量損失を賄う。		
	コスト k 円/年	思想
現状： ごみ質低下により損失している売電	22,848	50t/d × 2 爐の処理施設の最大発電量を 2000kW と想定し、ごみ質低下によりその 10%分損失している場合の売電コスト (計算式) = 最大発電量 2000[kW] × 10[%]/1000 × 24[h] ×稼働日数 280[日] × 売電価格 17[円/kWh]/1000
提案②： 炭化燃料使用により、発電をした場合のコスト	14,280	上記のごみ質低下分を炭化燃料で補填する場合の必要燃料コスト (計算式) = 炭化燃料使用量 8.5[t/d] × 炭化燃料発熱量 3000[Mcal/t] × 炭化燃料コスト 2[円/Mcal] × 280[日]/1000
コストメリット	8,568	

前節に記載した機器設置のイニシャルコスト(表 3.3.1-3)とランニングコスト(表 3.3.1-4)より、表 3.3.2-3 に投資回収年月の検討結果を示す。合計のコストメリットは、10,866k 円/年となり、回収年度は吹込バーナで 1.2 年、直投ノズルで 0.9 年と試算できる。ごみ処理施設は、一般的に 20 年間の運用となるため、短期間での回収が可能であることから、炭化燃料利用の事業性は高いと言える。

表 3.3.2-3 炭化燃料使用時の投資回収年月

	利用①: 炭化燃料起動時使用	利用②: 炭化燃料常時使用	合計
コストメリット	2,298k 円/年	8,568k 円/年	10,866k 円/年
回収年月(吹込)	5.8 年	1.6 年	1.2 年
回収年月(直投)	4.3 年	1.2 年	0.9 年

※回収年 = (イニシャルコスト + 1 年間ランニングコスト)/ コストメリット

参考文献

- [1] 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 2020 年
- [2] 春日 Rosin-Rammler 分布
http://penguinitis.g1.xrea.com/study/note/rosin_rammler.pdf
202.2 年 2 月 3 日
- [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

第3章 アスファルトプラントにおける利用検討

1 アスファルトプラント設置概要

1.1 アスファルトプラントでの運用方法

昨年度、本事業では炭化燃料を補助燃料とした開発バーナの燃焼試験を実施した。試験結果より、開発した3種類のバーナ(表1.1-1)は、排ガス値がごみ処理施設やアスファルトプラント等の規制値をクリアしており、各施設で利用可能であることを報告した。

APでの混焼起動と停止は、図1.1-1に示したイメージで行う。起動時には、重油専焼を行い骨材温度が設定温度(例:180°C)に達したら混焼燃焼を開始する。停止するときには、重油専焼で運用してから停止する。運転中に混焼率を変える場合には、骨材温度のハンチングを避けるため骨材の温度変化と重油バーナの開度変動が小さくなつてから、混焼率を±10%の範囲で設定値変更し炭化燃料の混焼率変更を行う。

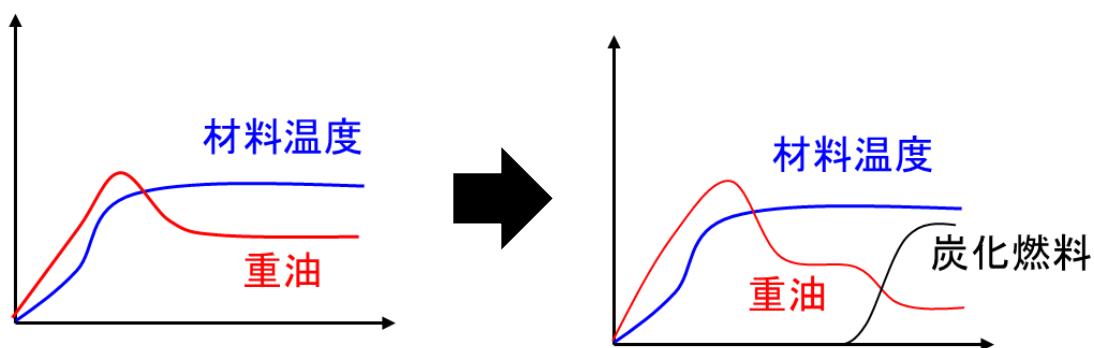


図1.1-1 APでの炭化燃料使用イメージ

1.2 設置バーナの選定

アスファルトプラント(以下、AP)は碎石と砂利の水分を除去するVドライヤと道路舗装材を再度加熱するRドライヤで構成される。既存APの基本仕様はVドライヤの場合にはバーナのみ設置、Rドライヤの場合には、バーナのみの場合とバーナの火炎形成部分に燃焼室を設置する2パターンがある。

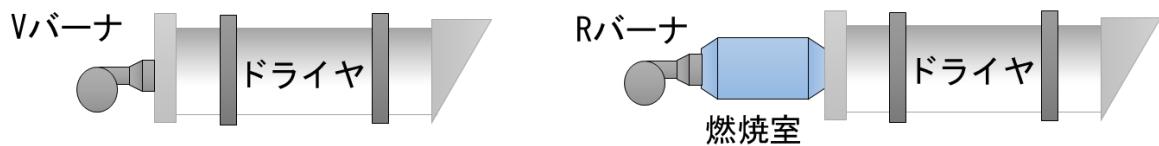


図 1.2-1 V ドライヤ（左）と R ドライヤ（右）

本事業で開発したバーナは、供給機などの設置スペースの確認は必要であるが、基本的には、表 1.2-1 に示すように①「既存バーナを利用する」か、②「燃焼室が設置されているか」によって選択する。基本仕様は、V ドライヤも R ドライヤも混焼バーナの設置で考える。ドライヤは基本的に燃焼室が無いが、R ドライヤの場合には燃焼室とバーナの組み合わせで利用しているプラントも多数存在し、その場合には、既存の設備に吹込バーナを設置する。また、混焼バーナと吹込バーナの概要を表 1.2-2 に示す。

表 1.2-1 各種バーナの設置組合せ

使用用途	既存バーナ	燃焼室	混焼バーナ	吹込バーナ	備考
Vドライヤ	不使用	なし	○	-	
	使用	あり	-	○	吹込バーナは燃焼室必要
Rドライヤ	使用	あり	-	○	燃焼室必要
	不使用		○	-	燃焼室必要

表 1.2-2 各種類の燃焼方式、利用先一覧

種類	燃焼方式	利用先	要求性能
混焼バーナ		新設用バーナ	<ul style="list-style-type: none"> ・熱風温度制御 (目標 1,000°C) ・混焼率(熱量 30%以上)
吹込バーナ		既設用バーナ (新設も可能)	<ul style="list-style-type: none"> ・設置スペース ・熱風温度制御 (目標 1,000°C) ・混焼率(熱量 30%)

1.3 設置概要

本事業で開発した炭化燃料混焼用バーナは、バーナ本体、炭化燃料供給装置、炭化燃料のストックヤード、炭化燃料の搬送設備からなる。供給ホッパへの炭化燃料搬送は、ストックヤードの設置位置で搬送距離が変わるために搬送方法は特定できないが、基本仕様はホッパフィーダとベルトコンベアとする。

1.3.1 混焼バーナの設置

混焼バーナを AP のドライヤへ設置する場合、図 1.3.1-1 のようにバーナとドライヤの間に燃焼炉が設置される。また、混焼バーナの炭化燃料供給経路は、燃焼室のありなしに関わらず、図 1.3.1-1 のような機器構成とする。

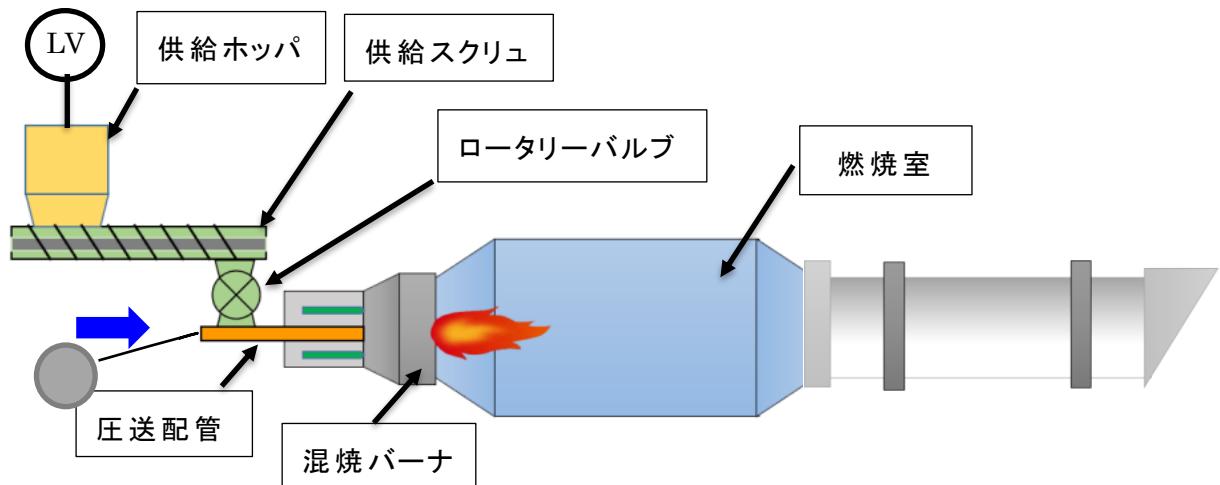


図 1.3.1-1 AP での設置模式図（燃焼室あり）

1.3.2 吹込バーナの設置

吹込バーナプラントの場合、図 1.3.2-1 に示すように既存の油バーナを利用する。燃焼室が無い場合には、燃焼室を設置して図のような位置に吹込バーナを設置する。炭化燃料の供給系統は混焼バーナと同じ機器（図 1.3.2-2）を使用する。

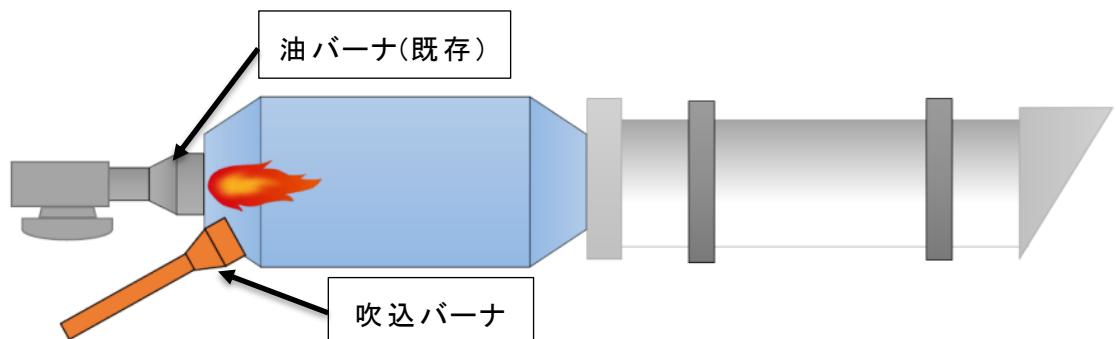


図 1.3.2-1 吹込バーナ設置模式図 1 (平面図)

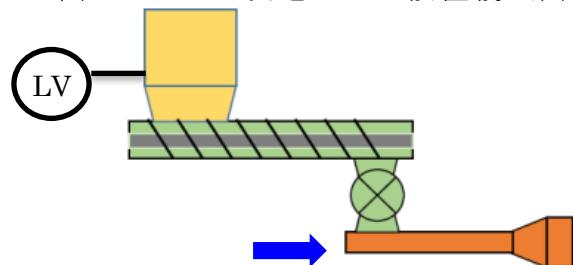


図 1.3.2-2 吹込バーナ供給系設置模式図 2

1.3.3 ストックヤード

炭化燃料の AP 工場への荷下ろしはダンプアップで行うことを想定している。基本含水率が 30%あるため飛散はしにくいが、微粒分は乾燥し易いため飛散する可能性が高いので、保管には注意が必要である。そのため、ストックヤードは 3 面を囲う構造とする。また、保管中に天気により含水率が 30%以上になることを避けるために屋根付き、シャッター付き（図 1.3.3-1）で全面を囲う。

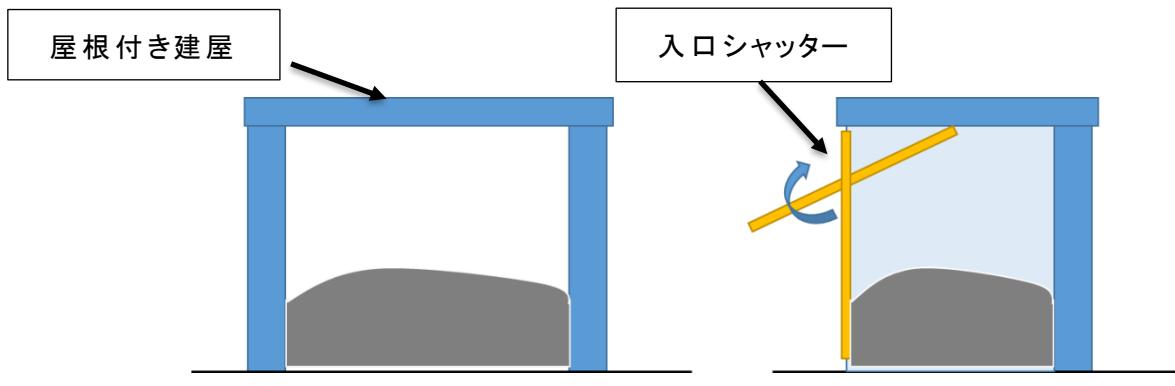


図 1.3.3-1 ストックヤードイメージ図(左:正面図, 右:側面図)

1.3.4 ストックヤードからの搬送

ストックヤードから各供給機ホッパへの搬送は図 1.3.4-1 のような供給フィーダで搬送する。R ドライヤの場合には高所に設置されている場合もあり、プラント機種によっては搬送方法の検討が必要になる。AP シリーズの最も高い R ドライヤの位置は地面より約 35m の場所にあるため、そのような場合には垂直エレベータなどの搬送方法の検討が必要である。

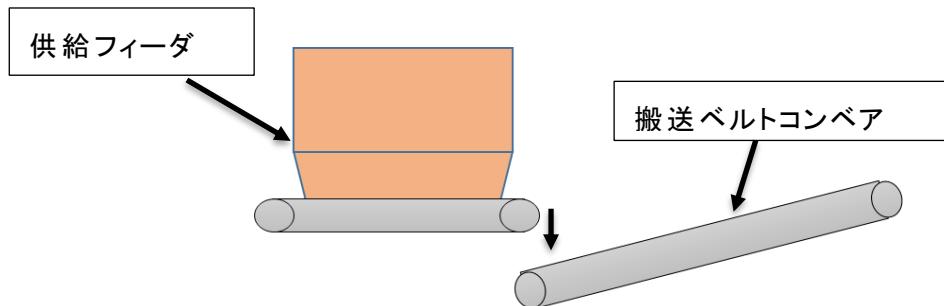


図 1.3.4-1 供給機までの搬送装置

1.4 工事概要

既存の重油バーナを従来のバーナに入れ替える時のスケジュールを図 1.4-1 に示す。社内燃焼テスト後に出荷するため、AP 設置後のバーナ調整の工程は少なく、燃油ポンプの圧力チェックとバーナ操作時のバーナ開度と流量関係のチェックのみを行う。その場合、5 日間で工事が完了する。

本事業で開発した炭化燃料混焼用バーナを AP に設置する新設改造時の工事スケジュールは図 1.4-2 のようになる。従来のバーナの工事に加え、供給装置、燃料の搬送ベルトコンベア、ストックヤードの建屋設置工事がある。しかし、ストックヤードは、バーナ工事日程とは別日に工事を行うことができるため、運転停止に影響する入替工事期間は重油バーナの入替えと同様予備日を含んでも 10 日あれば、入替から運転開始までの工程を完了可能である。

工事項目	日数							
	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	8日
バーナ撤去	■							
架台設置		■						
バーナ・燃焼装置設置			■					
細部工事				■				
燃焼チェック					■			
運転チェック						■		
操作盤工事			■	■				

図 1.4-1 重油バーナのみの入替スケジュール

工事項目	日数							
	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	8日
バーナ撤去	■							
(燃焼室設置)		■						
油バーナ機器設置			■					
炭化燃料供給装置設置				■				
吹込バーナ設置					■			
供給フィーダ設置					■			
搬送ベルトコンベア設置					■			
ストックヤード				■	■			
キャリブレーション						■		
燃焼チェック							■	
運転チェック								■
操作盤工事			■	■				

図 1.4-2 炭化燃料バーナ入替スケジュール

2 アスファルトプラント実証試験

2.1 吹込バーナ実証試験目的・設置概要(日工)

2.1.1 試験概要

昨年度にバーナ燃焼試験は完了した為、アスファルトプラント(以下、AP)における利用可否の検証を行うことを目的に、前田道路㈱の技術研究所に設置されている小型プラントで、実証試験を行った。

(1) 試験目的

APでの炭化燃料利用可否を判断する為に、以下項目について確認する。

- ・炭化燃料混焼での骨材の昇温と温度制御
- ・混焼での重油使用量削減効果の実証
- ・骨材・バグフィルタへの火の粉飛散有無の確認
- ・混焼におけるプラント機器への影響確認
- ・炭化燃料燃焼灰の骨材・バグダストへの混入挙動
- ・混焼中のNOx値挙動
- ・その他設備への付着や懸念点の確認

(2) 設置概要

既設のプラントに吹込バーナ、燃焼室、炭化燃料供給機、圧送ファン、リターンガスダクトを増設し燃焼試験を行った。図2.1.1-1に増設した模式図を示す。

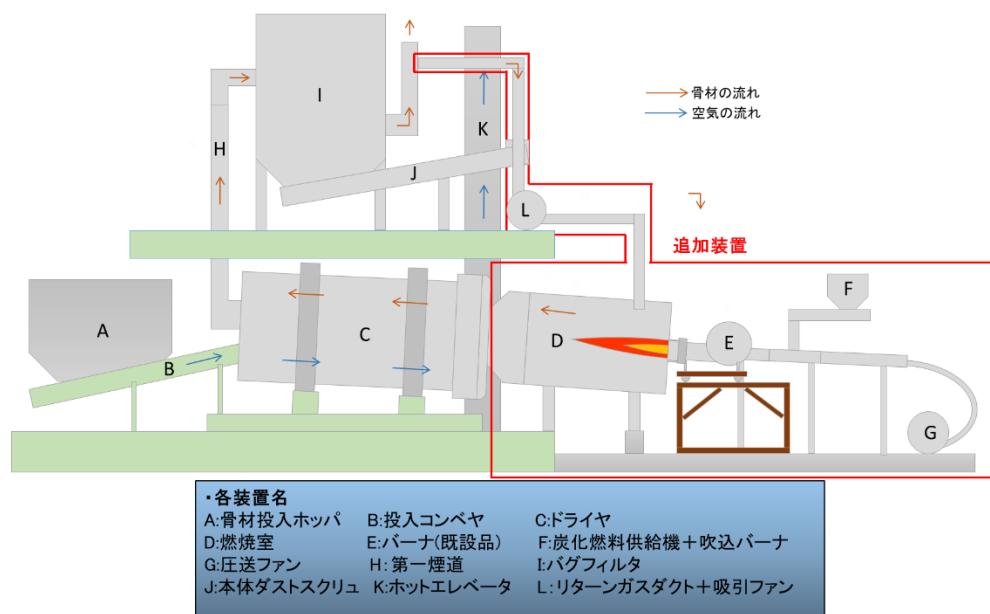


図2.1.1-1 小型プラント模式図

2.1.2 解析検討

(1) 解析条件

アスファルトプラント実証試験の事前検討として、CFD(Computational Fluid Dynamics)シミュレーションにより炭化燃料の燃焼状況を確認した。図 2.1.2-1 に示すように実証試験に用いるバーナおよび燃焼室をモデル化した。燃焼室は 2° 傾斜しているが、モデルでは 0° とし、重力の方向を調整することで、同様な条件になるようにした。

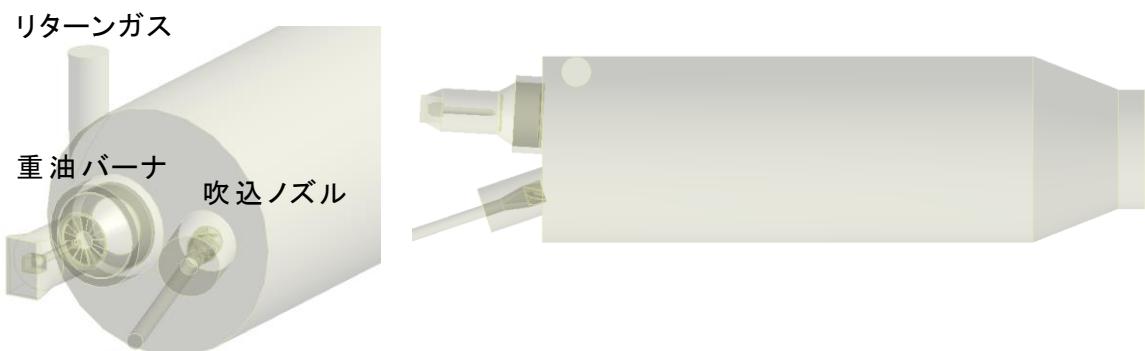


図 2.1.2-1 解析形状モデル

表 2.1.2-1 に解析条件を示す。混焼率 30% の条件にてリターンガス無、有で解析を実施した。リターンガスの目的は燃焼室の保護と熱風温度の調整である。リターンガスダクトの口径は 90A とし、 $5\text{Nm}^3/\text{min}$ 、 80°C 、酸素濃度 16.3% とした。空気比は 2.0 になるよう、酸素濃度を基準にバーナファン空気量で調整した。

炭化燃料の粒度分布には、噴射試験で計測した未粉碎品 ($D_{50}:139\mu\text{m}$) の粒度分布に Rosin-Rammler 分布を与えて計算した。また壁面での境界条件は Escape(粒子が壁面に衝突すると計算終了)と Reflect(粒子が壁面に衝突すると跳ね返っても計算継続)の 2 ケース実施した。

表 2.1.2-1 解析条件

(a) リターンガス無		(b) リターンガス有	
バーナファン空気量	5.3 Nm ³ /min	バーナファン空気量	5.9 Nm ³ /min
圧送エア風量	2.6 Nm ³ /min	圧送エア風量	2.6 Nm ³ /min
漏れ込み(重油バーナ)	2.5 Nm ³ /min	漏れ込み(重油バーナ)	2.5 Nm ³ /min
漏れ込み(吹込バーナ)	2.5 Nm ³ /min	漏れ込み(吹込バーナ)	2.5 Nm ³ /min
リターンガス流量	0 Nm ³ /min	リターンガス流量	5 Nm ³ /min
空気温度	10 °C	リターンガス温度	80 °C
重油量	26.5 L/h	リターンガス酸素濃度	16.3 %
炭化燃料量	31.4 kg/h	空気温度	10 °C
		重油量	35.7 L/h
		炭化燃料量	42.3 kg/h

(2) 解析結果（混焼率 30% リターンガス無）

図2.1.2-2～2.1.2-5にバーナ中心断面の温度、揮発分濃度、CO濃度分布を示す。解析結果より炭化燃料は壁際や重油火炎付近で揮発分の燃焼が起きており、その後、図2.1.1-6のようにチャー燃焼していることが分かる。炭化燃料の燃焼率はEscape: 84.5%、Reflect: 99.5%と平均すると90%以上の高い値が得られ、燃焼性に関して問題ないことが確認できた。

図2.1.2-2の温度分布結果より、吹込バーナノズル先端で温度が上昇しているのが確認できる。図2.1.2-3の揮発成分濃度分布でも吹込バーナ先端での揮発成分が高濃度になっている。図2.1.2-4と図2.1.2-5のCO濃度分布でも吹込バーナ先端から燃焼室内に入った時点で、濃度が高くなっていることから炉内に入ったらすぐに炭化燃料に引火している。これらの解析結果より、炭化燃料が燃焼室内に噴射された時点から火炎を形成していることが確認できる。

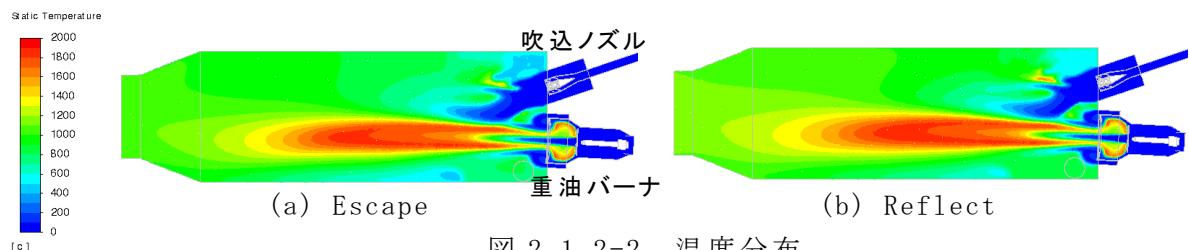


図 2.1.2-2 温度分布

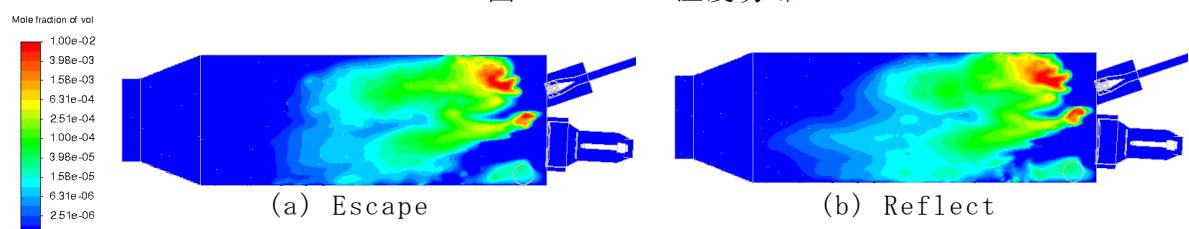


図 2.1.2-3 炭化燃料の揮発分濃度分布

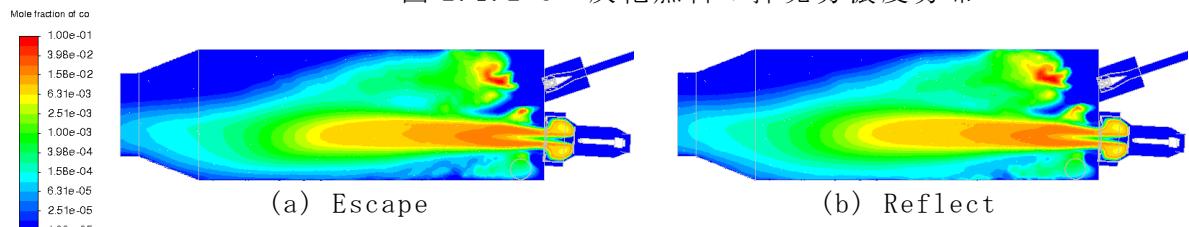


図 2.1.2-4 CO 濃度分布 水平面

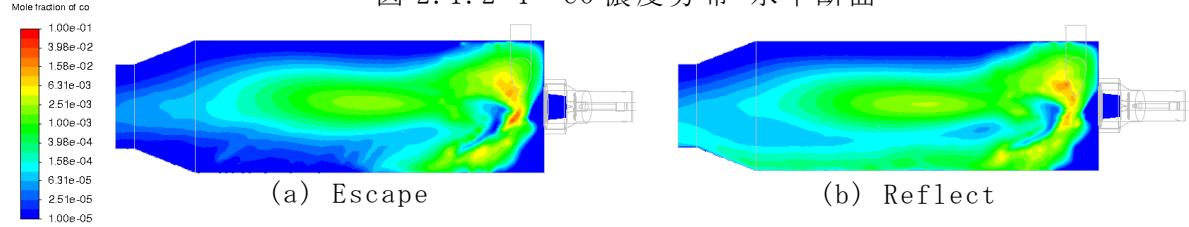


図 2.1.2-5 CO 濃度分布 鉛直断面

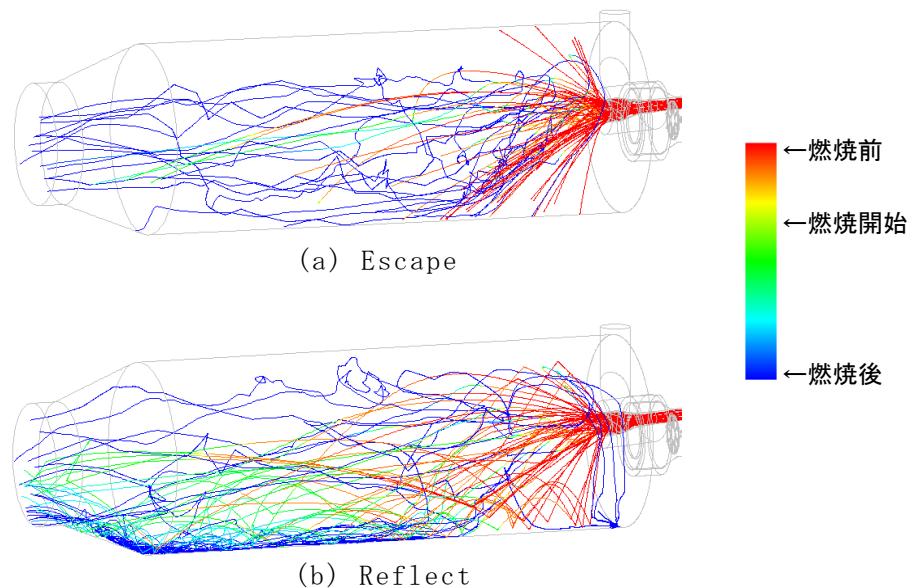


図 2.1.2-6 炭化燃料の軌跡

(3) 解析結果（混焼率 30% リターンガス有）

図 2.1.2-7～2.1.2-10 にバーナ中心断面の温度、揮発分濃度、CO 濃度分布を示す。図 2.1.2-11 のリターンガスにより炉内に旋回流が生じており、粒子は壁面に衝突しやすくなる。その影響で、図 2.1.2-12 の粒子の軌跡を見ると Escape では燃焼性が悪くなっている。センター図からも、吹込バーナ先端では、リターン無しの結果のようにすぐに燃焼していないことが分かる。Reflect ではリターンガスの流れに乗った粒子の一部が壁面付近で燃焼している。解析の結果、炭化燃料の燃焼率は Escape: 35.5%、Reflect: 99.2% となり、燃焼室内全体で燃焼していることが分かった。Reflect では高い燃焼率が得られているが、図 2.1.2-2(b) と図 2.1.2-7(b) を比較するとバーナ近傍の壁面温度は低くなるが、燃焼室後半の壁面温度が高温になることが確認できた。バーナの火炎が大きくふく射熱を強く受ける場合のバーナ近傍の保護には有効であるが、空気比 2.0 の高空気比で燃やす場合には、炭化燃料の燃焼率が悪くなるので不要である。Escape のようにかなり低い燃焼率になる可能性もあるため、リターンガスを入れることにより、CO 濃度が高くなり、燃焼性も悪くなる解析結果になった。本試験でのリターンの効果は、重油バーナの火炎からの輻射熱により燃焼室の損傷を防止する目的であるため、この効果に対しては有効である結果となった。

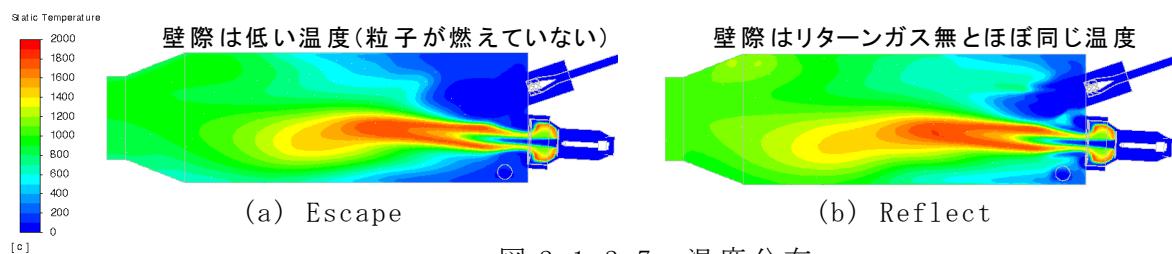


図 2.1.2-7 温度分布

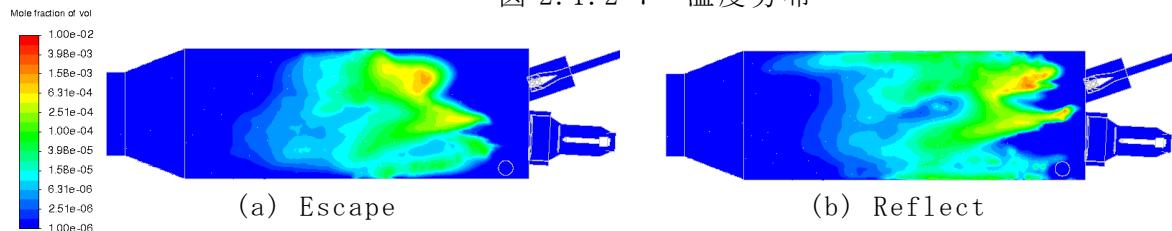


図 2.1.2-8 炭化燃料の揮発分濃度分布

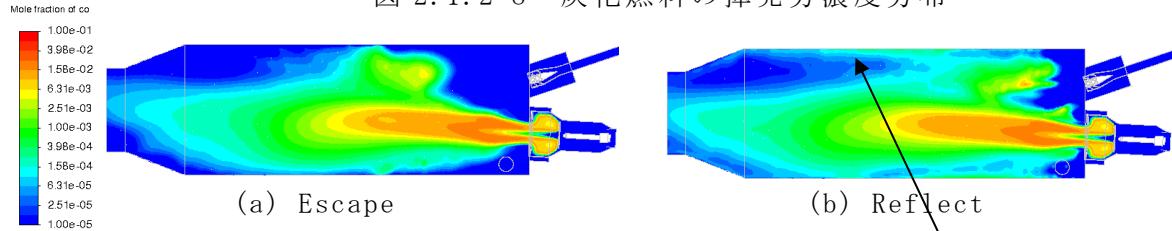


図 2.1.2-9 CO 濃度分布 水平面

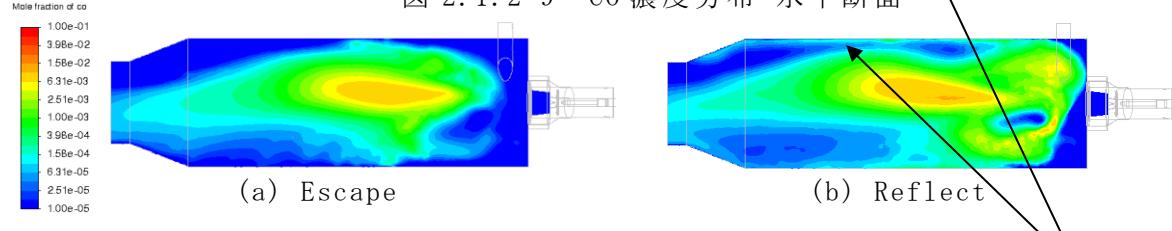


図 2.1.2-10 CO 濃度分布 鉛直断面

壁際で良好燃焼

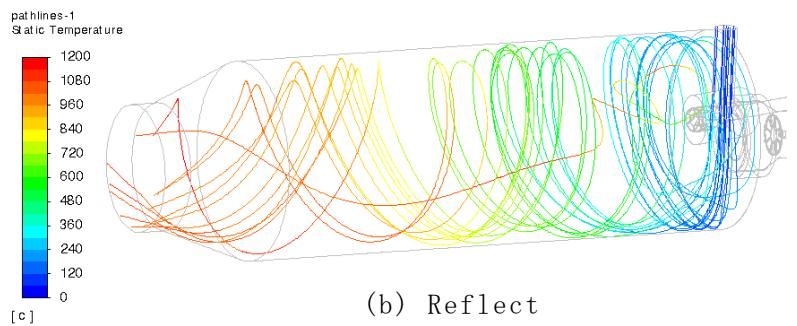
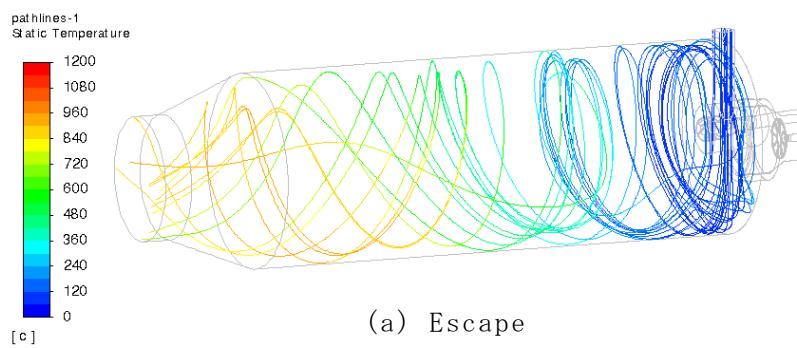


図 2.1.1-11 リターンガスの流線

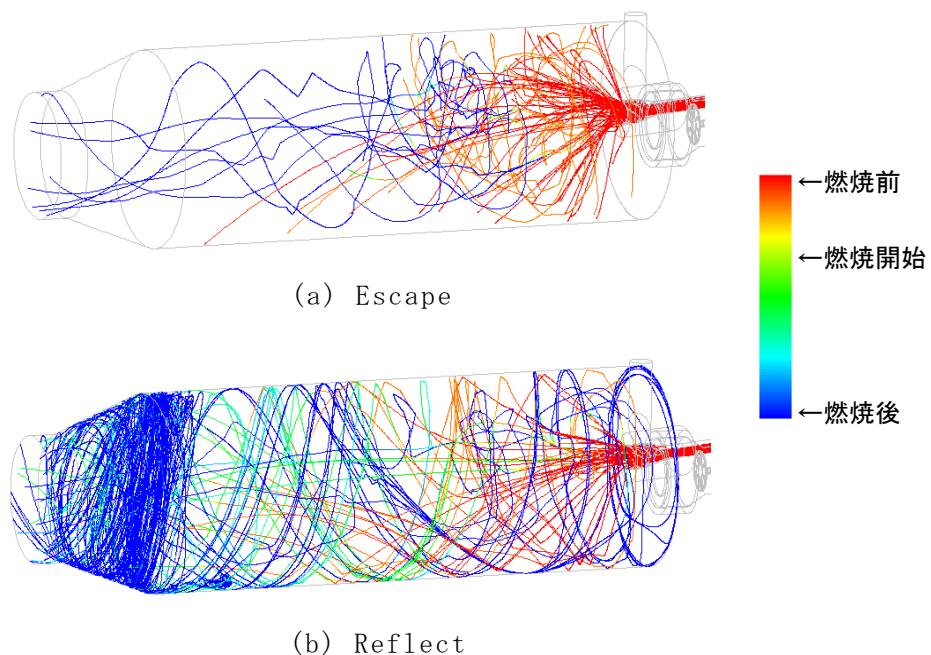


図 2.1.1-12 炭化燃料粒子の軌跡

2.1.3 実証試験設備・試験方法

アスファルトプラント実証試験は、前田道路(株)内の小型プラントを利用して実施した。設備フローを図 2.1.3-1、設置状況写真を図 2.1.3-2、2.1.3-3 に示す。フロー中に赤線で示す熱風経路、黒線で示す骨材経路について説明する。

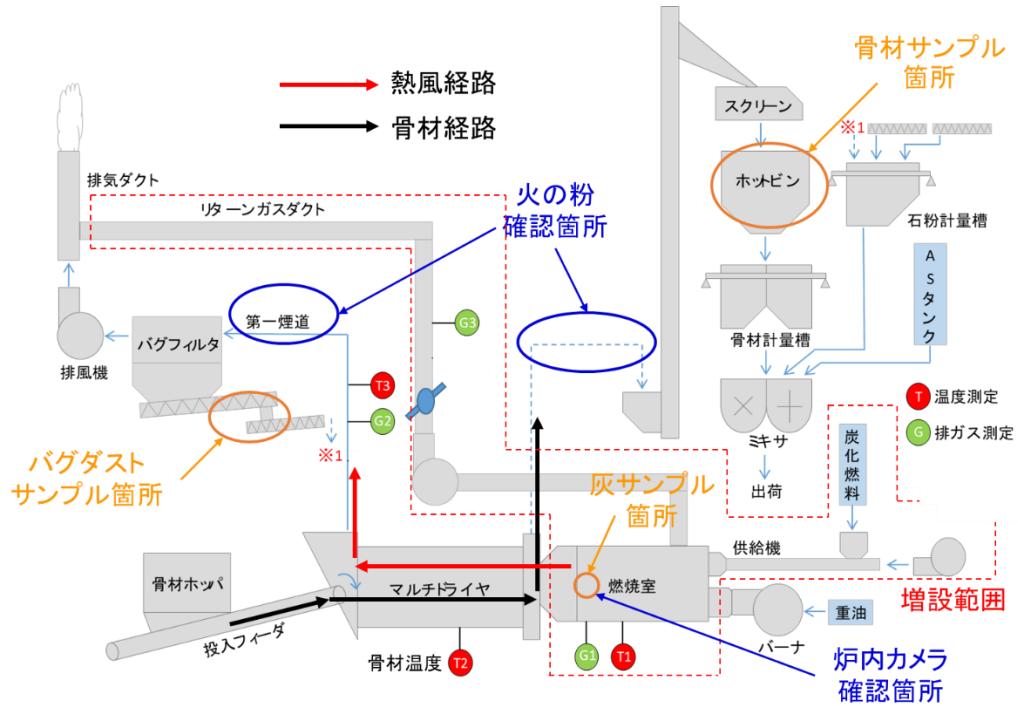


図 2.1.3-1 小型プラントフロー図



図 2.1.3-2 小型プラント全景

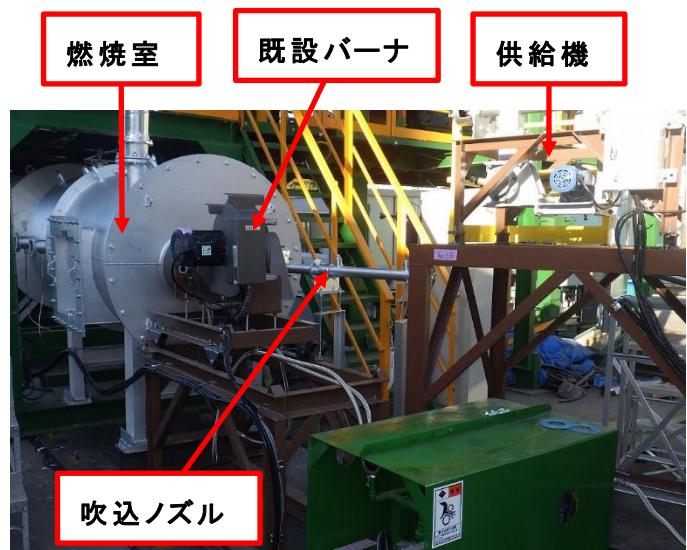


図 2.1.3-3 燃焼室周辺

(1) 熱風経路

油および吹込バーナによって燃焼室内で生成した熱風は、ドライヤ内部で形成された骨材ベールと熱交換して、第一煙道を通過し、バグフィルタ（以下、バグ）へと流れる。バグ内で集塵された排ガスは、排風機を通過して大気に排気される。骨材ベールとは、ドライヤ内でかき上げられた骨材が落下することができる層である。図 2.1.3-4 にドライヤを輪切りにした断面の模式図を示す。図のピンクの範囲で骨材ベールと熱風が接することで熱交換を行う。

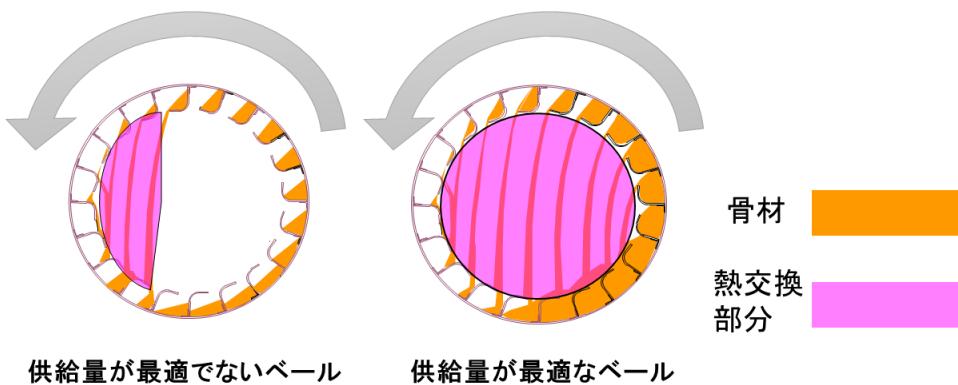


図 2.1.3-4 ドライヤ断面模式図(骨材ベール)

(2) 骨材経路

骨材ホッパに投入された骨材は、投入フィーダで切り出すことによりドライヤ内に搬送される。ドライヤ内に搬送された骨材は、バーナの熱風で乾燥される。乾燥後、ホットエレベータで持ち上げられ、スクリーンで分級された後、それぞれのホット bin に分けられて貯蔵される。その後、骨材計量槽で配合されてからミキサに投入され、アスファルトを添加しミキサで混練され、合材として出荷される。

(3) 試験方法

重油専焼の場合、通常の AP の起動と同様、バーナ着火後、ドライヤ内を昇温し、バグ入口温度が所定温度(70°C)で骨材の投入を開始した。その後、30分程度で骨材温度が設定温度 180°C になり、温度推移が安定してから各測定を開始した。バーナの制御は、骨材温度が設定温度になるように、重油燃焼量を増減させた。

炭化燃料混焼の場合は、最初に重油専焼で温度が安定するまで昇温し、想定した混焼率になるように、一定の炭化燃料供給量を決めて供給スクリュの周波数を設定した。変動する骨材温度は、重油燃焼量を制御して安定させた。重油専焼時と同様、骨材温度が安定してから測定を開始した。

試験中に測定するデータとしては、ドライヤ出口の骨材温度、第一煙道のバグ入口温度、燃焼室出口ダストの燃焼率、操作室で計測しているトレンドデータである。排ガス測定の項目と分析方法は、表 2.1.3-1 の通りである。本項で示す排ガス測定値は O₂ 濃度 16% 換算で記載している。ばいじん濃度は標準状態に換算して記載している。

今回の試験ではバグフィルタを使用しており、耐熱温度が 200°C であるため、バグ入口温度に注意して試験を実施した。また、バグの損傷が懸念されるため、第一煙道で火の粉を目視確認した。

表 2.1.3-1 排ガス測定項目と分析方法

測定項目	分析方法
窒素酸化物濃度	JIS-K-0104(2011)-8 化学発光法

2.1.4 実証試験条件

試験パラメータは、骨材供給量、混焼率(炭化燃料供給量)、燃焼室へのリターンガスの有無、炭化燃料は粉碎品、解碎品とした。各試験での目的を下記に示す。

RUN 1 : A 重油専焼運転	A 重油専焼での基礎となるデータの取得
RUN 2 : 粉碎品混焼運転	粉碎品での火の粉飛散状況の確認 混焼で運転可能かを確認
RUN 3 : 解碎品混焼運転	解碎品での火の粉飛散状況の確認 混焼で運転可能かを確認
RUN 4 : 粉碎品長時間運転	AP 同様の実運転時間で高混焼率運転を確認
RUN 5 : 粉碎品混焼運転(測定)	運転中の排ガス成分を測定業者にて測定、確認

アスファルトプラント（以下 AP）で使用される重油バーナは、定格出力で空気比が 1.4 になるように燃焼空気量を調整している。そのため、炭化燃料を利用するときの懸念点は、炭化燃料を燃やす適正な燃焼空気量（空気比 2.0）の確保である。AP は、バーナ定格出力に対して 6 割程度の負荷率で運用される頻度が高く、その時のバーナ空気比は 1.7～2.0 の範囲にある。混焼率を 50% 以下とすることで、空気比を適正な範囲で運用することができる。目標混焼率を表 2.1.4-1 に示す。AP での最低目標としている 30% と、最高目標としている 50% を設定した。RUN 4 では、目標値以上の混焼率を確認することを目的とした。試験条件を表 2.1.4-2 に示す。

表 2.1.4-1 目標混焼率

	目標混焼率 [%]
RUN2	30, 50
RUN3	30, 50
RUN4	50 以上
RUN5	30, 50

表 2.1.4-2 試験条件

RUN NO.	骨材供給量 [t/h]	炭化燃料種類	燃焼量 [L/h]	炭化燃料供給量 [kg/h]	混焼率 [%]	リターンガス風速 [m/sec]
1-1	3.5	-	0	0	0	0
1-2	5.0					6.2～6.4
1-3						
2-1	5.0	粉碎品	—	—	—	0
2-2			36	38.3～40.0	25.5～26.3	
2-3			24～38	56.3	32.2～43.0	
3-1	5.0	解碎品	—	0	0	0
3-2			40	30.0	19.4	
3-3			26～29	42.9～50.0	32.2～38.2	
4-1	5.0	粉碎品	—	0	0	0
4-2			26～37	53.6～69.8	33.6～46.1	6.2
4-3			17～31	69.7～150	43.7～73.9	0
4-4			36	34.9～37.5	23.7～25.1	9.0
4-5						

2.1.5 試験結果、解析との整合性

燃焼状態、温度トレンド、火の粉の確認、骨材・バグダストへの灰混入による品質の影響、排ガス値、燃焼率等の結果を示す。

(1) 燃焼状態の確認

炭化燃料混焼時の燃焼の様子を確認するため、燃焼室出口側の覗き窓から炉内カメラを挿入し、炉内を撮影した。図 2.1.5-1、2.1.5-2 にバーナ正面の写真を示す。図 2.1.5-2 では重油専焼時と比較して燃焼室全体で燃焼しているのが確認でき、2.1.2 で示した解析結果と類似の現象となったことを確認した。図 2.1.5-2 で一部黒く見えるのは噴出した炭化燃料である。

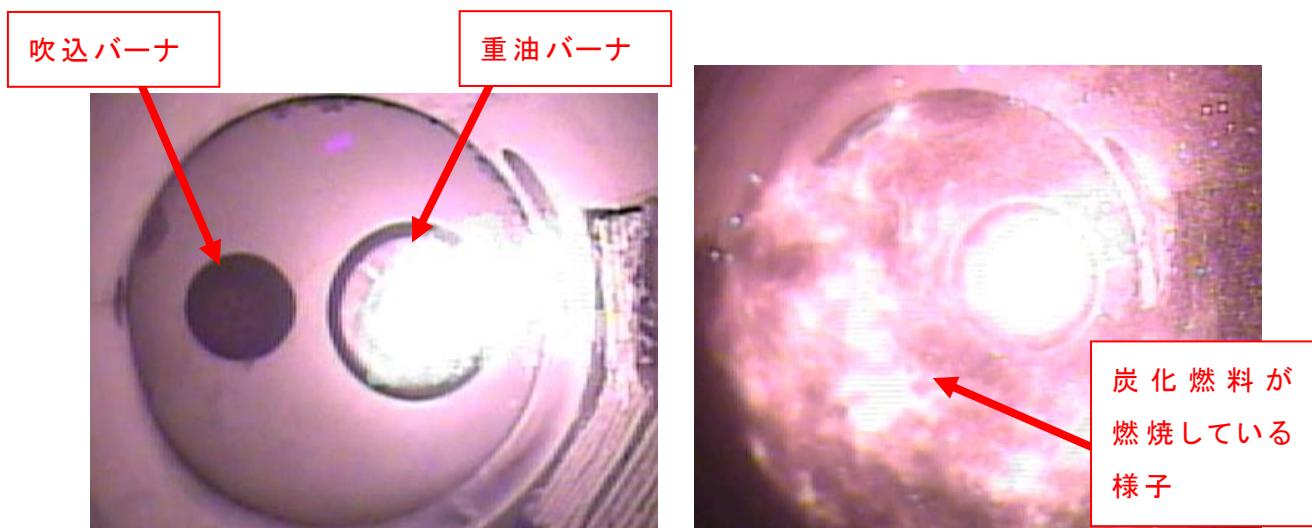


図 2.1.5-1 バーナ正面(重油専焼時)

図 2.1.5-2 バーナ正面(混焼時)

(2) 温度トレンドと重油燃焼量トレンド

RUN 1 では重油専焼で安定運転可能な条件を確認した。図 2.1.5-3、2.1.5-4 に温度トレンドを示す。

RUN1-1 では骨材供給量が 3.5t/h で、バグ入口温度が最大で約 180°C まで上がっている。RUN1-2, 1-3 では骨材供給量が 5.0t/h で、バグ入口温度が 140°C 前後で推移している。供給量を 3.5t/h にすると、ドライヤ内の骨材が 2.1.3(1) に示す最適なベル形状になつてないために熱交換率が悪く排ガス温度が上昇し、骨材温度上昇に想定よりも過剰な熱量を必要とする。

RUN1-2 以降では骨材供給量を 5.0t/h とした。重油専焼でのリターンガス無し (RUN1-2) とリターンガス有り (RUN1-3) では特に大きな変化は見られなかった。

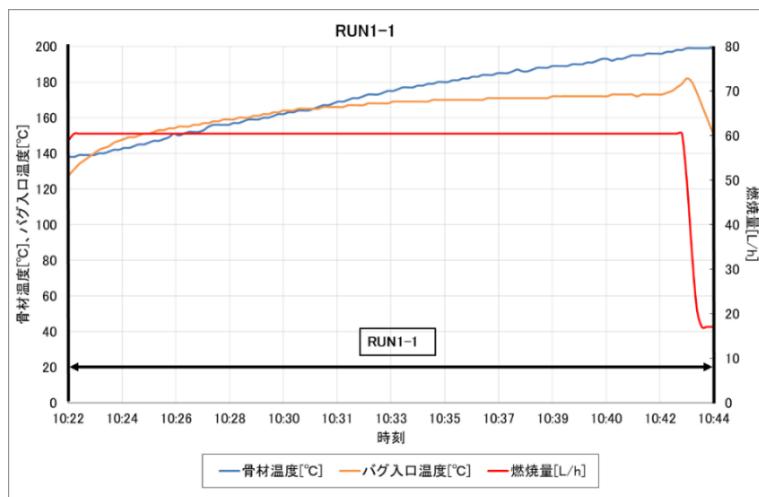


図 2.1.5-3 RUN1-1 の温度トレンド

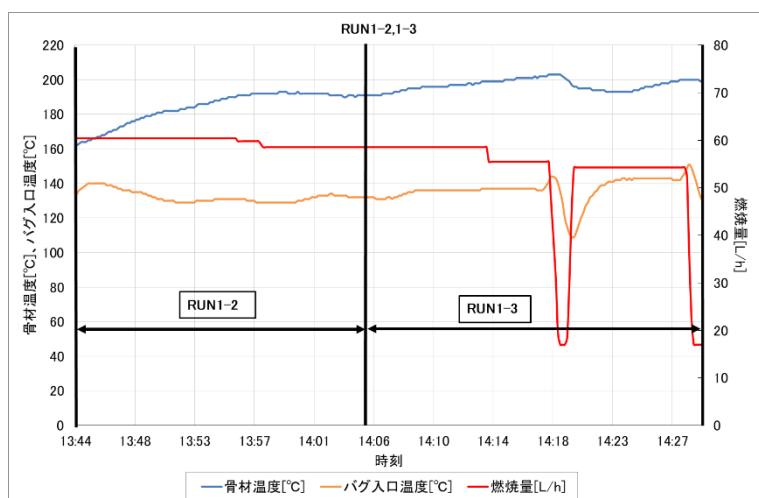


図 2.1.5-4 RUN1-2, 1-3 の温度トレンド

RUN 2 では炭化燃料粉碎品の混焼を実施した。図 2.1.5-5 と図 2.1.5-6 に RUN2-2 と RUN2-3 の温度トレンドと燃焼量、供給機周波数、炭化燃料供給量、混焼率を表 2.2.5-2 に示す。バグ入口温度は 200°C 以下で推移しており、骨材温度も設定温度 180°C の土約 10% の 160~200°C の間にいるため問題はない。表 2.1.5-1 の混焼率は以下の式によって算出しており、炭化燃料発熱量は 3,000kcal/kg、A 重油発熱量は 9,340kcal/L を使用している。

$$\frac{\text{炭化燃料投入発熱量 [kcal/h]}(\text{w.b.})}{\text{炭化燃料投入発熱量 [kcal/h]} + \text{A 重油投入発熱量 [kcal/h]}} \times 100 = \text{混焼率 [%]}$$

RUN2-3 で最大混焼率は 43.0% となっており、重油専焼時の平均燃焼量に対して、炭化燃料混焼による重油削減効果を確認した。

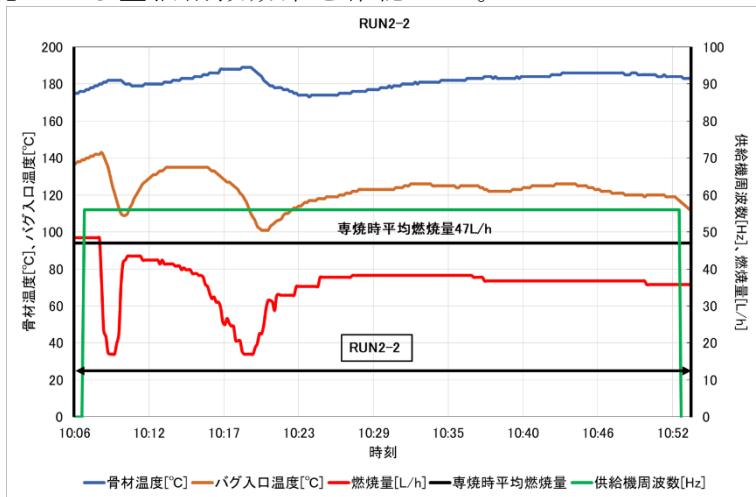


図 2.1.5-5 RUN2-2 の温度トレンド

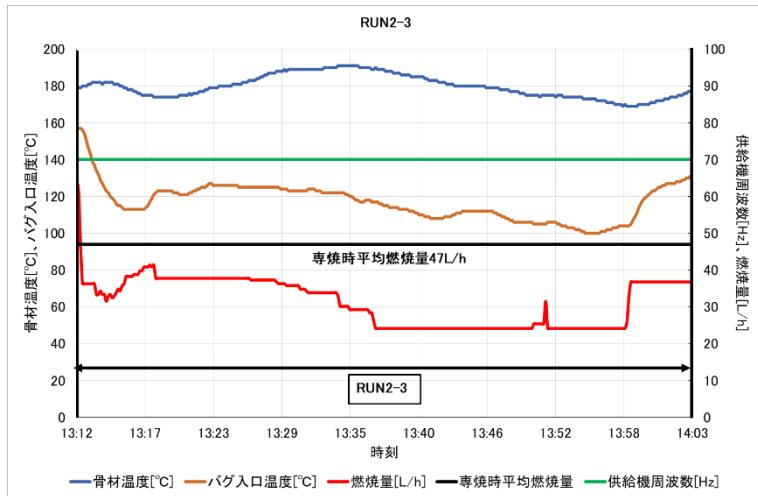


図 2.1.5-6 RUN2-3 の温度トレンド

表 2.1.5-1 RUN2-2, 2-3 燃焼量、供給機周波数、供給量、混焼率まとめ

RUN NO.	燃焼量[L/h]	供給機周波数[Hz]	炭化燃料供給量[kg/h]	混焼率[%]
2-2	36	56	38.3~40.0	25.5~26.3
2-3	24~38	70	56.3	32.2~43.0

RUN 3 では解碎品の混焼を実施した。図 2.1.5-7 と図 2.1.5-8 に RUN 2 と RUN 3 の温度トレンドと燃焼量、供給機周波数、炭化燃料供給量と混焼率を 2.1.5-2 に示す。骨材温度とバグ入口温度は RUN 2 の粉碎品と同様に問題ない温度で推移した。炭化燃料供給量を見ると RUN 3 の解碎品の方が低い供給量になる傾向が見られた。解碎品は、粉碎品に比べ粒径が大きく、供給装置内部での堆積・付着が少量だが確認されたため、供給量が低下したと考えられる。

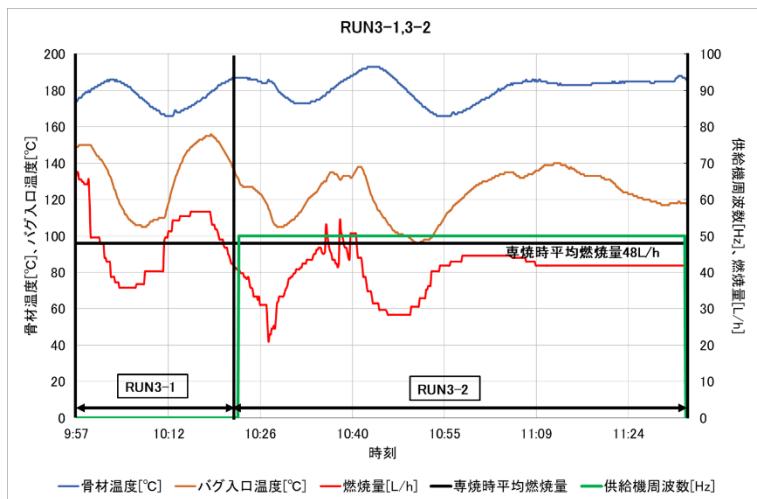


図 2.1.5-7 RUN3-1、3-2 の温度トレンド

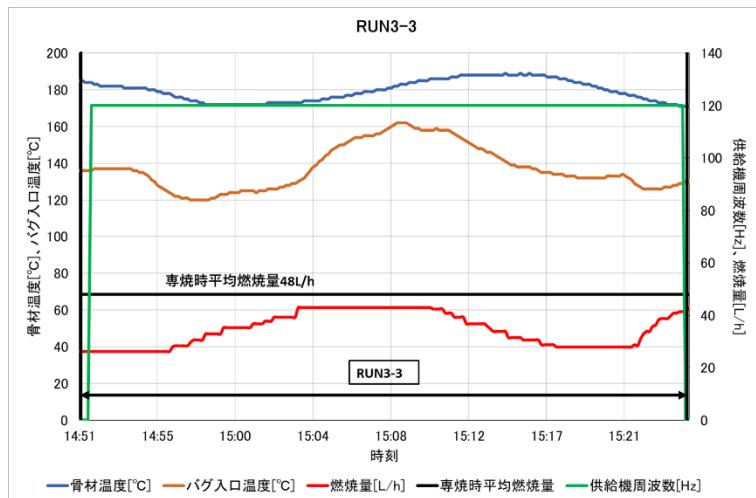


図 2.1.5-8 RUN3-3 の温度トレンド

表 2.1.5-2 RUN 2 と RUN 3 燃焼量、供給機周波数、供給量、混焼率まとめ

RUN NO.	燃焼量[L/h]	供給機周波数[Hz]	炭化燃料供給量[kg/h]	混焼率[%]
2-2	36	56	38.3~40.0	25.5~26.3
2-3	24~38	70	56.3	32.2~43.0
3-2	40	50	30.0	19.4
3-3	26~29	120	42.9~50.0	32.2~38.2

RUN 4 での温度トレンドを図 2.1.5-9 に、炭化燃料混焼をした RUN4-3~4-5 の平均燃焼量と供給機周波数と炭化燃料供給量と混焼率をまとめたものを表 2.1.5-3 に示す。重油専焼での RUN4-1 (リターンガス無し) と RUN4-2 (リターンガス有り) を比較すると、温度トレンドには特に大きな違いは無かった。混焼時では RUN4-4 (リターンガス無し) よりも RUN4-5 (リターンガス有り) の方が、燃焼量増加と炭化燃料供給量の低下により混焼率が大きく下がった。リターンガスを投入することにより吹込ノズルからの圧送空気が燃焼室内に入りにくくなり、供給機の周波数が同じでも炭化燃料の供給量が低下して混焼率が下がったと考えられる。

炭化燃料の混焼率は RUN4-3 と RUN4-4 で大きく異なるが、温度トレンドから骨材温度とバグ入口温度に大きな変動はなく、混焼率に関係なく温度制御ができると考えられる。

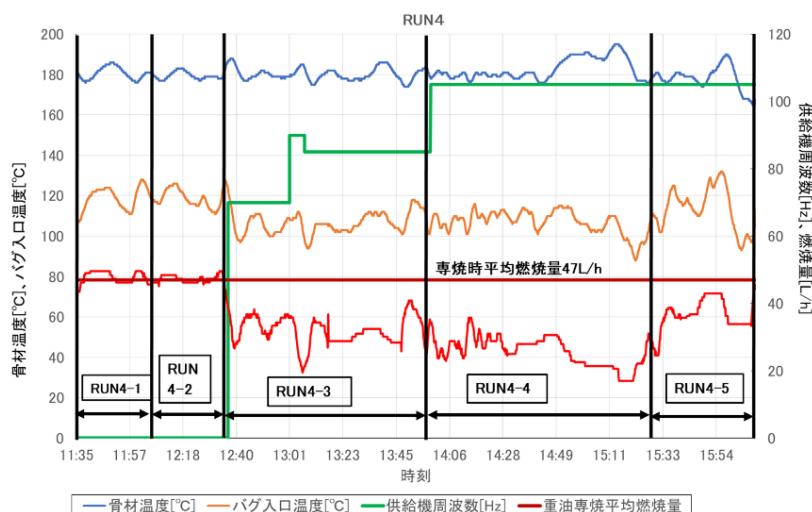


図 2.1.5-9 RUN 4 の温度トレンド

表 2.1.5-3 RUN4-3~4-5 燃焼量、供給機周波数、供給量、混焼率まとめ

RUN NO.	燃焼量[L/h]	供給機周波数[Hz]	炭化燃料供給量[kg/h]	混焼率[%]
4-3	26~37	70~90	53.6~69.8	33.6~46.1
4-4	17~31	105	69.7~150	43.7~73.9
4-5	36	105	34.9~37.5	23.7~25.1

(3) 火の粉の確認

炭化燃料を混焼することで、重油専焼時には見られなかった大量の火の粉が、燃焼室からドライヤ内部へ混入していることが確認できたが、その後の第一煙道では見られなかった。これは火の粉がドライヤ内部の羽根によってかき上げられた骨材に巻き込まれることによって飛散を阻害し、冷骨材で消火されたことによるものだと思われる。第一煙道やドライヤから排出される材料には火の粉は見られなかったことから、ドライヤ内で消火されていることが分かる。実証試験では機器には影響がないことが分かった。図 2.1.5-10 に燃焼室の火の粉を図 2.1.5-11 にドライヤ内の火の粉を写した写真を示す。

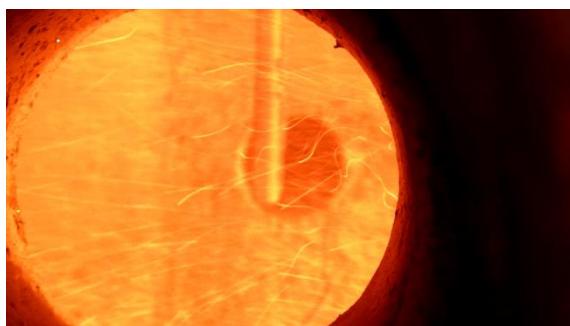


図 2.1.5-10 燃焼室内の火の粉

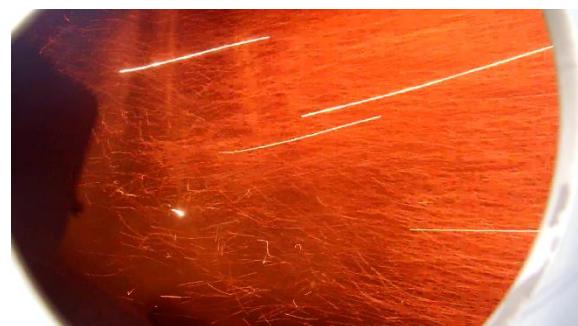
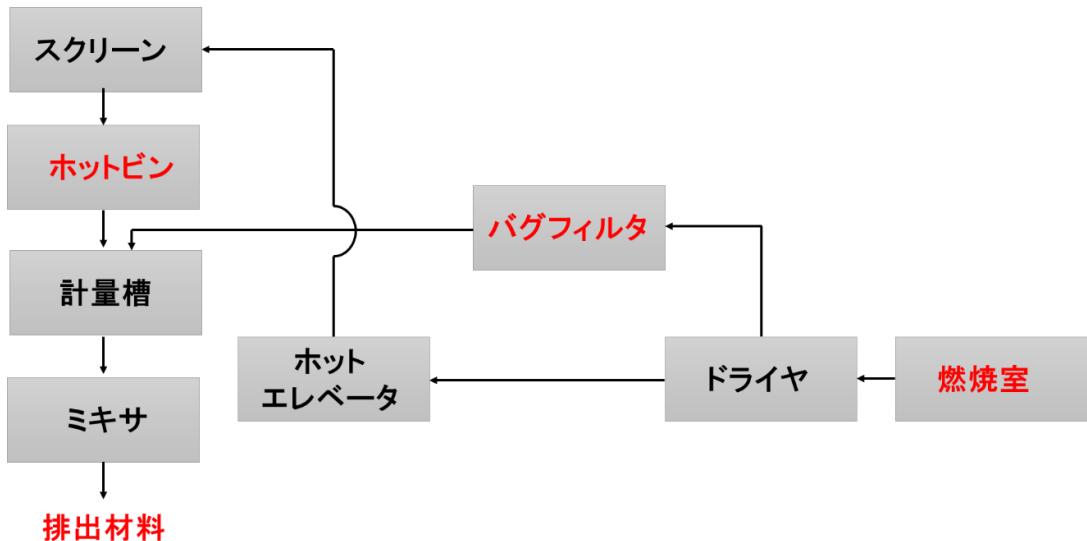


図 2.1.5-11 ドライヤ内の火の粉

(4) 灰の混入

炭化燃料バーナを使用する上で炭化燃料を燃焼させると灰が発生する。図2.1.5-12に実証試験で灰が移動する経路のフロー図を示す。燃焼室、バグフィルタ、ホットビンでサンプルを回収し、本試験で発生した灰の各機器への混入率を調査した。



※赤字はダストや骨材をサンプリングした場所

図2.1.5-12 灰のフロー図

実証試験中に使用した炭化燃料の量から発生した灰量の推算値を表2.1.5-4に示す。各試験後に燃焼室内に堆積している灰の重量を測定し、残りの灰はドライヤ内に入り、骨材と混合してホットエレベータとスクリーンを経由してホットビンに混入するか、熱風に飛ばされてバグフィルタで補集され、バグダストに混入するかの経路とした。表2.1.5-4に使用した炭化燃料、発生した灰量、燃焼室内の灰量、残りの灰量、混焼中に使用した骨材量と骨材に混入した灰の割合を示す。表より骨材量から考えると、骨材に混入した炭化燃料燃焼灰の割合は1%に満たないことが分かる。

表2.1.5-4 実証試験で使用した炭化燃料と発生した灰量

RUN NO.	使用した 炭化燃料 [kg](w.b.)	使用した 炭化燃料 [kg](d.b.)	発生する 灰量 [kg]	燃焼室の 灰量 [kg]	燃焼室の 堆積割合 [%]	残りの 灰量 [kg]	混焼中に使用した 骨材量 [kg]	骨材内に混入した 灰の割合 [%]
2	100	97.4	19.5	8.3	42.6	11.2	8833	0.13
3	70	68.4	13.7	5.2	38.0	8.5	8417	0.10
4	285	277.3	55.5	14.9	26.9	40.6	18667	0.22
5	76	72.4	14.5	6.7	46.3	7.8	15667	0.05
			↑ 灰量(d.b) × 0.2					

燃焼室堆積分以外の灰がホットбинとバグフィルタにどれだけ混入するかを調べるため、重油専焼時と炭化燃料混焼時のホットбинとバグフィルタのサンプルを回収し、元素分析を行い、Ca割合より灰の混入率を求めた。元素分析の結果を表2.1.5-5に示す。表2.1.5-6より専焼時のホットбинの骨材やバグフィルタのダストに比べて燃焼室の灰はCaが多いことが分かる。Caの割合より、炭化燃料混焼時のホットбинとバグフィルタへの燃焼室の灰の混入率Xを下記の式①、②を用いて推算した。表2.1.5-6に燃焼灰の混入率を示す。燃焼灰が混ざることで合材のCaの割合が増えてしまうが、APで使用しているフィラーの一部である石粉はCaであるため、問題ない。

$$\frac{57.2 \times X}{100} + \frac{6.6 \times (100 - X)}{100} = \text{Ca割合(ビン 骨材)} \quad \text{---①}$$

$$\frac{57.2 \times X}{100} + \frac{7.8 \times (100 - X)}{100} = \text{Ca割合(バグダスト)} \quad \text{---②}$$

表2.1.5-5 元素分析

サンプル	SUM [wt%]	3元素相対強度			合計 [%]
		Si [%]	Al [%]	Ca [%]	
燃焼室灰	26.44	29.0	13.8	57.2	100
重油専焼 バグフィルタ	20.73	68.7	23.5	7.8	100
RUN4-3 バグフィルタ	10.03	64.9	23.8	11.3	100
RUN4-4 バグフィルタ	20.76	59.1	24.4	16.5	100
重油専焼 ホットбин	25.48	73.2	20.2	6.6	100
RUN4-3 ホットбин	28.09	70.1	21.6	8.3	100
RUN4-4 ホットбин	13.07	67.9	17.2	14.9	100

表 2.1.5-6 燃焼室灰混入率

サンプル	X	混焼率
	[%]	[%]
RUN4-3 バグフィルタ ダスト	7.0	33.6～46.1
RUN4-3 ホットбин 骨材	3.3	
RUN4-4 バグフィルタ ダスト	17.6	43.7～73.9
RUN4-4 ホットбин 骨材	16.4	

表 2.1.5-6 より RUN4-3 ではバグフィルタには 7.0%、ホットбинには 3.3%、RUN4-4 ではバグフィルタに 17.6%、ホットбинには 16.4% 含まれている結果となり、バグフィルタとホットбинどちらにも灰が到達していることが分かった。RUN4-3 と RUN4-4 では混焼率が異なり、混焼率の違いによりバグフィルタとホットбинへの混入率が変わると考えられる。

(5) 灰の溶出成分

燃焼室灰とプラントから出てきた排出材料の溶出試験の結果を表 2.1.5-7 に示す。

表 2.1.5-7 燃焼室灰の溶出試験結果

分析の対象及び単位		燃焼室	排出材料 RUN4-4	定量下限	基準値
カドミウム及びその化合物	mg/L	検出せず	検出せず	0.001	0.01
六価クロム	mg/L	0.027	検出せず	0.005	0.05
シアン化合物	mg/L	検出せず	検出せず	0.1	検出されないこと
水銀及びその化合物	mg/L	検出せず	検出せず	0.0005	0.0005
アルキル水銀化合物	mg/L	検出せず	検出せず	0.0005	検出されないこと
セレン及びその化合物	mg/L	0.001	検出せず	0.001	0.01
鉛及びその化合物	mg/L	0.25	検出せず	0.001	0.01
ふつ素及びその化合物	mg/L	0.19	検出せず	0.08	0.8
ほう素及びその化合物	mg/L	検出せず	検出せず	0.1	1

表 2.1.5-7 より燃焼室灰からは「六価クロム」と「セレン及びその化合物」と「鉛及びその化合物」と「ふつ素及びその化合物」が検出され、「鉛及びその化合物」は基準値を超えていたが、ミキサから出てきた排出材料では重金属は検出下限以下となっていた。フィラーが骨材に混入する割合は合材重量の 6 %で、フィラー内の灰の割合は最大でも 1 %である。そのため、灰の重量は骨材重量の 6.0×10^{-4} 倍と非常に少ない割合となり、製品に対して特に影響がなく、問題ないと考える。

(6) 排ガス

AP で炭化燃料を利用するには大気汚染防止法（以下、大防法）の排ガス規制値以下で運用する必要がある。炭化燃料は窒素を含有しているため、燃料由来の NO_x は必ず発生する。実証試験では、運用時にどれくらいの NO_x 値になるかを測定し確認した。図 2.1.5-13 に粉碎品で混焼した際に測定した第一煙道の NO_x 濃度を示す。RUN4-1～RUN4-2 は重油専焼、RUN4-3～RUN4-5 は炭化燃料混焼の結果である。

第一煙道ではどの条件も大防法の基準値 230ppm (O₂ 濃度 16% 換算) 以下になつており、AP での使用に関して問題ないことが確認できた。

RUN NO.	骨材供給量 [t/h]	炭化燃料種類	混焼率 [%]
4-1	5.0	-	0
4-2			
4-3		粉碎品	33.6～46.1
4-4			43.7～73.9
4-5			19.9～21.1

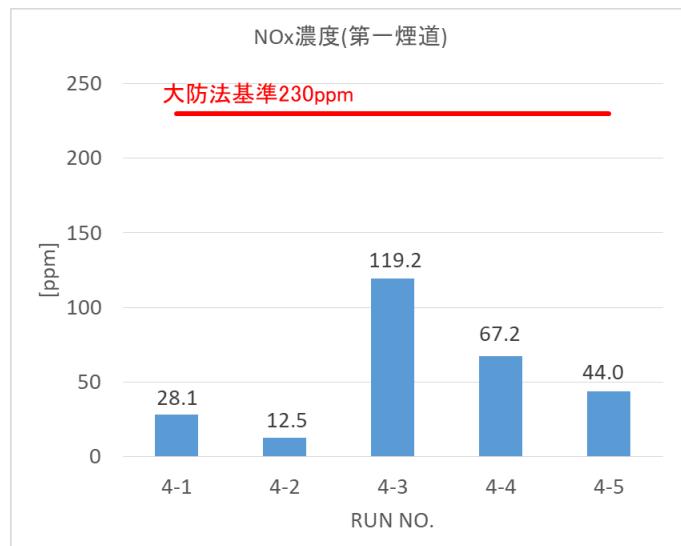


図 2.1.5-13 第一煙道 NO_x 濃度 (O₂ 16% 換算値)

(7) 燃焼率

図 2.1.5-14 に燃焼室出口で採取したサンプリング灰の燃焼率を示す。リターンガス無しの粉碎品の燃焼率の平均は 92.0% であった。リターンガス無しの粉碎品と解碎品の燃焼率を比べると粉碎品の方が約 6~7 ポイント高くなかった。また、リターンガスの有無で燃焼率を比べるとリターンガス無しの方が約 23 ポイント高くなり、炭化燃料の燃焼性は良好であった。

また、表 2.1.5-8 に社内燃焼試験(吹込バーナ試験)と AP 実証試験での混焼率と燃焼率を示す。社内燃焼試験と AP 実証試験で燃焼率を比較すると 2~4 ポイントの違いはあるが、混焼率が約 20~30% であれば平均 90% の燃焼率になることが実証試験でも確認できた。

リターンの効果として、バーナ近傍の燃焼室損傷の保護を目的としているが、燃焼室の損傷は見られず、リターン無の方が燃焼率は高いため、リターン無しで運用することが適切であることが分かった。

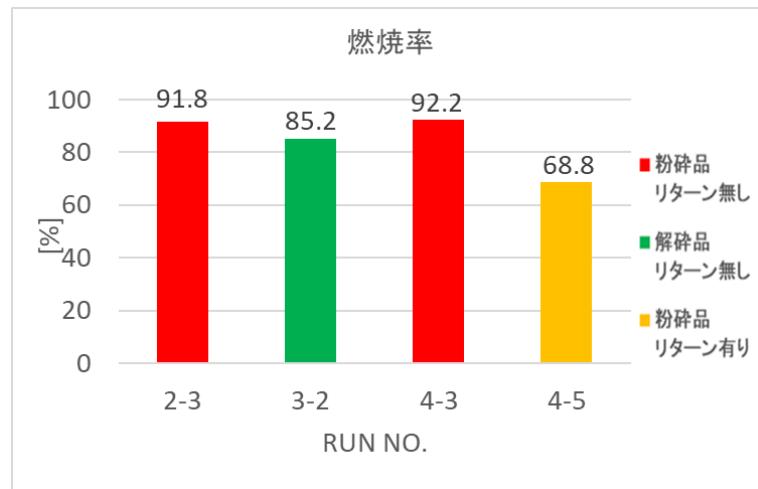


図 2.1.5-14 燃焼率

表 2.1.5-8 社内燃焼試験の燃焼率

社内燃焼試験	
混焼率 [%]	燃焼率 [%]
20	92.5
30	92.7

2.1.6 まとめ

今回、AP の実プラントで炭化燃料を燃焼させ、合材に使用される骨材を供給しての運用を行い、実運用を行った。その結果、以下の点が確認できた。

- ・炭化燃料混焼での骨材の昇温と温度制御は可能である。
- ・重油専焼時の重油量に対して、炭化燃料混焼することで重油量削減効果が確認できた。
- ・ドライヤ内部に入った火の粉は骨材ベールで消火されているため、バグフィルタ・排出骨材への火の粉の影響は無い。
- ・炭化燃料燃焼灰は骨材とバグダストのどちらにも混入しているが、合材としての品質には問題がない。
- ・混焼でも NOx 値は大防法の規制値以下であり、AP で運用は問題ない。
- ・炭化燃料の混焼率が 65.8% でも AP を運用することができた。
- ・粉碎品と解碎品では燃焼率に 5 % の違いはあるが、どちらも骨材の昇温と乾燥ができた。AP での運用ではどちらも使用可能である。
- ・燃焼室にリターンを導入しなくても炭化燃料の混焼は問題なく行うことが可能である。

実運用時の改善案として、炭化燃料の供給を安定させるために供給機は二軸スクリュを設置する。更に、火の粉に対する安全対策として、ドライヤ内の骨材の量や羽根形状は十分検討することで、より安心して AP で利用することができる。

3 アスファルトプラント設置後の影響検討

前節までで、今年度行った前田道路機械センターにおける実証試験結果を示した。本節では、炭化燃料の使用によるAPへの影響の検討結果を示す。

3.1 影響要因の調査

炭化燃料の使用による施設へ及ぼす影響要因を確認した。各機器への影響を調べた。

3.2 確認結果

3.2.1 各機器への影響

炭化燃料の使用による各機器への影響を確認するため、試験後のプラントの清掃・点検を行った。図3.2.1-1～3.2.1-11にRUN5試験後とRUN2試験後(炭化燃料使用前)の機器の写真を示す。



図3.2.1-1 RUN5後燃焼室(バーナ側)



図3.2.1-2 RUN5後燃焼室(ドライヤ側)



図3.2.1-3 RUN2後燃焼室(バーナ側)



図3.2.1-4 RUN2後燃焼室(ドライヤ側)



図 3.2.1-5 RUN 5 後 ドライヤ内部



図 3.2.1-6 RUN 5 後 ドライヤ羽根



図 3.2.1-7 RUN 2 後 ドライヤ内部



図 3.2.1-8 RUN 5 後 バグ内部



図 3.2.1-9 RUN 2 後 バグ内部



図 3.2.1-10 RUN 5 後 吹込ノズル先端



図 3.2.1-11 RUN 2 後 吹込ノズル先端

燃焼室内部に灰は堆積していたが昨年度燃焼試験のように溶融はしていなかった。その為、清掃に関してはハツリ作業は必要なく、APで使用した場合も同様に清掃が容易である。その他にもドライヤ内部、バグフィルタ内部、吹込バーナ先端ノズルを確認したが焼損はなく、火の粉の痕跡もなく、少し骨材の砂分が付着しているのみで従来のAPで重油燃焼した時の状況と同様であった。

3.3 メリット試算

本事業では、炭化燃料を使用することで化石燃料使用量とCO₂排出量が削減され、運転に問題が無いことを確認するとともに、普及促進を行う上では、コストメリットが出ることで利用者への展開要因として重要である。

3.3.1 CO₂削減量

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ことによりCO₂排出量を試算した。結果のまとめを図3.3.1-1に示す。結果より年間2,682t-CO₂/年の削減が可能であると試算した。

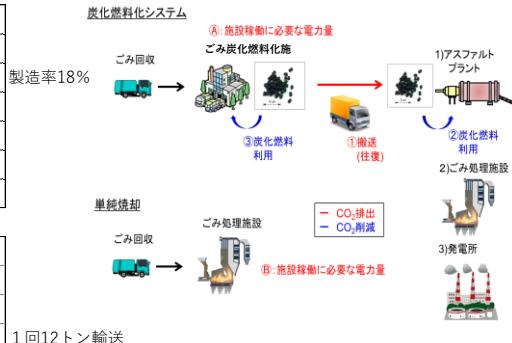
炭化燃料の利用によるCO₂削減量（本事業）

処理条件 (焼却, ごみ炭化燃料化施設共通)	ごみ処理量	50 t/日
	年間運転日数	280 日

焼却施設	必要電力量	513 kWh/t
	プラスチック割合	15 %

H21年度施設台帳より

ごみ炭化燃料化施設	年間運転日数	280 日
	ごみ処理量	50 t/日
	炭化燃料製造量	9.0 t/日
	内、施設内利用	1.2 t/日
	所外利用	7.8 t/日
	ごみ炭化燃料化施設必要電力量	440 kWh/t
	ごみ低質時灯油使用	18.5 L/ごみt



利用施設への輸送	普通貨物燃費（軽油）	5.8 km/L
	走行距離	50 km (往復)
	軽油CO ₂ 排出係数	2.58 t-CO ₂ /kL
	輸送回数	0.65 回/日

1回12トン輸送

物質収支（1日あたり）

図記号	○:排出 ▲:削減	焼却	AP利用	CO ₂ 排出係数	
				プラスチック焼却	0.488 t-CO ₂ /MWh
焼却	○ プラスチック焼却量t/日	7.5	7.5	2.77 t-CO ₂ /t	
	B ○ 焼却消費電力 MWh/日	25.65		0.488 t-CO ₂ /MWh	
利用施設への輸送	① ○ 軽油使用量 kL/日		0.0056	軽油	2.58 t-CO ₂ /kL
ごみ炭化燃料化施設	A ○ 必要電力量 MWh/日		22.0	電力	0.488 t-CO ₂ /MWh
炭化物1.2t/日利用	③ ▲ 灯油代替 kL/日		0.41	灯油	2.49 t-CO ₂ /kL
利用施設削減量（炭化物7.8t/日）	② ▲ 石炭 t/日			石炭	3.24 t-CO ₂ /t
	② ▲ A重油 kL/日		2.51	A重油	2.71 t-CO ₂ /kL
	② ▲ 灯油 kL/日			灯油	2.49 t-CO ₂ /kL
				炭化物	5,375 kcal/kg
					9,340 kcal/L
					8,767 kcal/L
					3,000 kcal/kg

CO₂排出量 t-CO₂/日

図記号	○:排出 ▲:削減	焼却	AP利用	CO ₂ 排出係数	
				20.78	12.52
焼却施設	○ プラスチック焼却量t/日	20.78			
	B ○ 焼却消費電力 MWh/日	12.52			
利用施設への輸送	① ○ 軽油使用量 kL/日			0.014	
ごみ炭化燃料化施設	A ○ 必要電力量 MWh/日			10.74	
炭化物1.2t/日利用	③ ▲ 灯油代替 kL/日			1.02	
利用施設	② ▲ 石炭 t/日				
炭化物7.8t/日利用	② ▲ A重油 kL/日			6.8	
	② ▲ 灯油 kL/日				

提案システム導入によるメリット

排出を考慮	排出計 t-CO ₂ /日	33.29	23.7	
	削減量 t-CO ₂ /日		9.6	2682
	削減率		29%	

図 3.3.1-1 CO₂ 削減量試算

3.3.2 概算コスト、回収年月

概算コストと回収年月を試算した。表 3.3.2-1 にまとめたものを示す。今回は 9t/day 生産できる炭化施設 1 施設に対して 2 施設の AP で利用した場合で試算した。AP で利用した場合、1.9 年で回収できることが分かり、非常に事業性の高い提案システムである事が分かる。

表 3.3.2-1 概算コスト、回収年月試算

試算結果			
利用者のコスト試算			
バーナ導入費用			
1) イニシャルコスト			
適応バーナ本体	混焼バーナ		
バーナ本体	8,640 千円		
供給機	3,590 千円		
解碎機	2,390 千円		
燃焼室	4,160 千円		
電装工事費	3,000 千円		
設置工事費	3,740 千円		
ヤード等	10,000 千円		
イニシャルコスト合計(1機)	35,520 千円		
必要バーナ数	2 機		
2施設に納入			
イニシャルコスト合計(モデル)	71,040 千円		
CO2削減量	2,682 t-CO2/年	図3.3.1-1より	
CO2削減コスト(利用側より)	26 千円/t-CO2	イニシャルコスト合計(モデル) ÷ CO2削減量(年)	
2) ランニングコスト			
点検・メンテ	1,200 千円/年		
3) バーナ導入コスト計(年・機)	36,720 千円/年		
4) バーナ導入コスト計(年/モデル)	73,440 千円/年		
燃料費用 (添付③より)			
炭化燃料価格(灰処理費不要)	0.5 円/Mcal		
A重油価格	6.2 円/Mcal		
炭化燃料利用量 (日)	9 t/日		
炭化燃料利用量 (年)	2,520 t/年		
炭化燃料未利用時燃料費 (a)	43,216 千円/年	A重油価格 × A重油発熱量 × 炭化燃料利用量(年) ÷ 1000	
炭化燃料利用時燃料費 (b)	3,780 千円/年	炭化燃料価格 × A重油発熱量 × 炭化燃料利用量(年) ÷ 1000	
燃焼率	92 %		
燃料削減費(年)	39,436 千円/年		
コスト回収年月 (利用先)	1.9 年	バーナ導入コスト計(年/モデル) ÷ 燃料削減費(年)	

4 アスファルトプラントでの炭化燃料混焼における装置材料の腐食に関する検討

4.1 検討目的・検討内容

4.1.1 背景・目的

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および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プラント構成機器の腐食が促進されてプラント寿命が短くなることが懸念される。

そこで、アスファルトプラントでの重油と炭化燃料の混焼がプラント構成機器の腐食に与える影響について化学熱力学解析を用いて検討を行った。

4.1.2 昨年度の解析検討結果

昨年度、炭化燃料混焼時に想定される腐食機構の解析検討を報告した^[1]。利用に際し、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。解析検討の結果、炭化燃料を混焼した場合には上記(1)～(3)の腐食は発生しにくくなると推定された。

4.1.3 今年度の試験・解析検討内容

今年度の試験・解析検討のフローを図 4.1.3-1 に示す。昨年度の解析検討結果を受けて今年度は、炭化燃料混焼によって腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) 濃度が燃料中の硫黄分や塩素分から想定した濃度に比べて大幅に低くなる機構について検討を行った。この機構を示す解析結果の妥当性を検証するために、燃料を完全燃焼でき、かつ試験条件を容易に変更できる DTF(Drop Tube Furnace) を用いた燃焼試験でガス分析を行い、実測値と解析結果を比較した。また、実炉環境に即した解析を行うために、実炉での分析を行い、最適な解析条件を決定した。

そして、実炉条件における解析結果の妥当性を検証するために、実炉の燃焼状況を模擬したバーナを用いた燃焼試験でガス分析を実施して、実測値と解析結果を比較した。また、炭化燃料の製造コストを抑えることができる未脱塩処理炭化燃料が使用可能かについても検討を行った。

さらに、実炉運用時の漏れこみ空気等の条件まで含めて炭化燃料の混焼がプラント構成機器の腐食に与える影響を検討するため、小型アスファルトプラントで実炉試験を行った。

なお、昨年度の解析検討では、腐食性ガスが多く発生する観点から解析では高硫黄重油を用いたが、多くの実炉では低硫黄重油が使用されている。そこで、実炉での使用環境を模擬するためのバーナ燃焼試験では、低硫黄重油に炭化燃料を使用した。

DTF試験 (ラボ試験)	特徴 ・燃料の完全燃焼が容易 ・試験条件の変更が容易	検証内容 ・腐食性ガス生成量抑制機構の妥当性検証 ・脱塩処理済み/未脱塩処理炭化燃料と高硫黄重油 混焼時の腐食性ガス濃度の低下傾向の検証
↓		
バーナ燃焼試験	特徴 ・実炉の燃焼状況を模擬可能 ・実炉試験に比べて試験条件の 変更が容易	検証内容 ・脱塩処理済み/未脱塩処理炭化燃料+低硫黄重油 混焼時の腐食性ガス濃度の低下傾向
↓		
小型アスファルトプラントを 用いた実炉試験	特徴 ・実炉運用時の条件で検討可能	検証内容 ・炭化燃料の混焼がアスファルトプラントの 構成機器の腐食に与える影響の検証

図 4.1.3-1 今年度の試験・解析検討のフロー

4.1.4 推定される腐食機構

昨年度、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 4.1.4-1)において重油と炭化燃料を混焼利用した際のプラント構成機器の腐食機構を想定した。その結果、第1,2煙道における「(1)硫酸露点腐食」および、「(2)塩酸露点腐食」、第2煙道における「(3)塩化物水溶液による湿食」の3つについて検討する必要があることが分かった。それぞれの腐食機構の概要を以下に示す。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

昨年度の解析検討結果から(2)はアスファルトプラントでは発生しないと想定された。また、(3)による腐食は重油専焼時に生じる硫酸露点腐食に比べて小さく、影響は少ないと考えられた。

一方、(1)は煙道の燃焼ガス中の SO_3 濃度と H_2O 濃度によっては発生する可能性があると考えられる。昨年度のアスファルトプラントの条件を想定した解析では問題ないと判断したが、より詳細に検討を行う必要があると考えた。そこで今年度、実機での分析結果を基に解析条件を最適化したうえで、第1,2煙道における「(1)硫酸露点腐食」について再検討を行った。

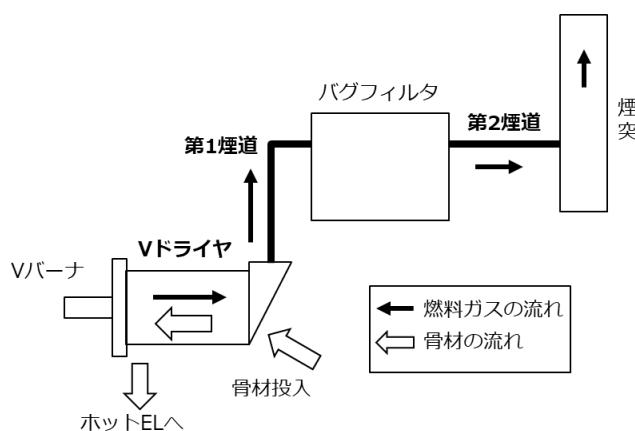


図 4.1.4-1 アスファルトプラントの骨材乾燥用ドライヤの模式図

4.2 化学熱力学解析

4.2.1 热力学データベース

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 4.2.1-1 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 output 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 4.2.1-1）。

表 4.2.1-1 热力学データベース (MALT for windows) の仕様

項目	内容
ソフトウェア名	热力学データベース 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 热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。

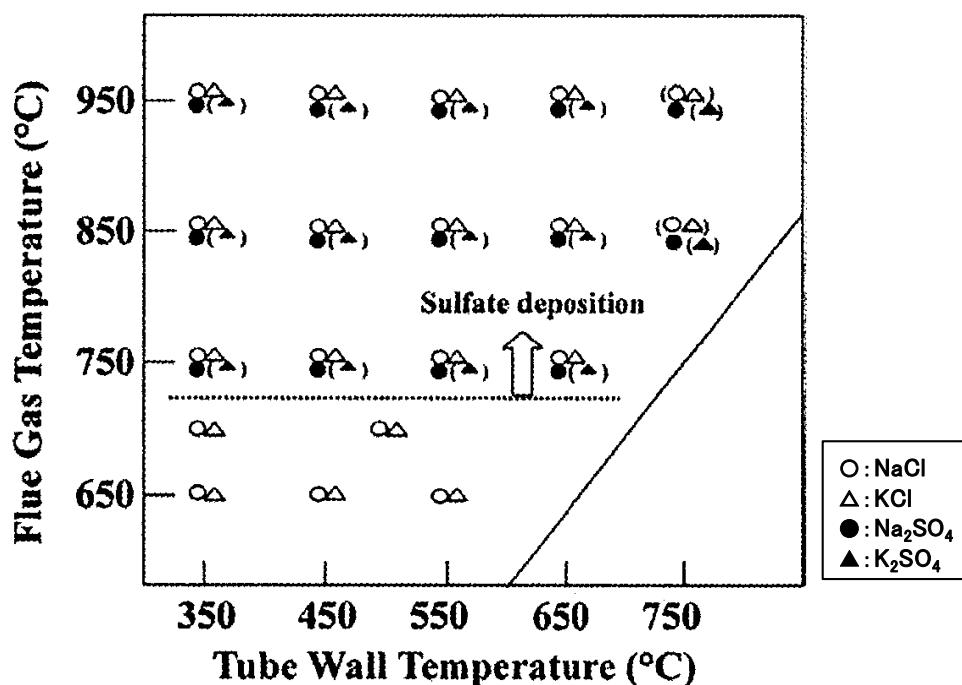


図 4.2.1-1 ごみ焼却プラントの伝熱管表面に析出する腐食性物質の検討例^[2]

4.2.2 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 4.2.2-1 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、西海市炭化センター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。

表 4.2.2-1 重油および炭化燃料の燃料組成 (wt%)

	重油		炭化燃料	
	低硫黄重油	高硫黄重油	脱塩処理済み	未脱塩
全水分	0.00	0.00	30.40	5.00
炭素	84.88	84.05	38.11	46.10
水素	15.00	15.00	1.50	1.90
窒素	0.01	0.01	1.83	1.80
酸素	0.00	0.00	8.69	9.59
全硫黄	0.07	0.90	0.09	0.16
塩素	0.00	0.03	0.27	2.25
灰分	合計	0.01	0.01	29.26
	SiO ₂	0.00	0.00	7.00
	Al ₂ O ₃	0.00	0.00	3.31
	Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	1.16
	CaO	0.00	0.00	9.80
	CaSO ₄	0.00	0.00	0.00
	MgO	0.00	0.00	0.77
	Na ₂ O	0.01	0.01	0.65
	K ₂ O	0.00	0.00	0.39
	PbO	0.00	0.00	0.00
	ZnO	0.00	0.00	0.01

4.3 炭化燃料混焼時の腐食性ガス(SO_2 , SO_3 , HCl)生成量抑制機構の検討

昨年度の検討では、炭化燃料混焼率が高くなるほど燃料中の硫黄と塩素量は増加しており(図 4.3-1 (a))、炭化燃料の混焼によって腐食性ガス(SO_2 , SO_3 , HCl)濃度が大幅に上昇して腐食が厳しくなると想定された。しかし、解析の結果(図 4.3-1 (b))、炭化燃料の混焼によって腐食性ガス濃度は低下または、若干上昇する程度であり、腐食は厳しくならないと推定された。上記の検討結果を受けて今年度、炭化燃料を混焼した際に腐食性ガスの生成量が抑制される機構について検討を行った。

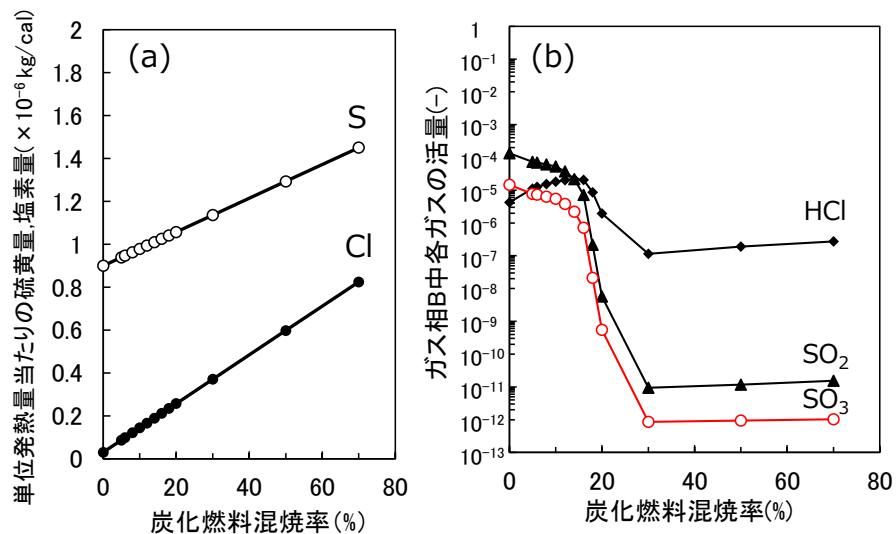


図 4.3-1 昨年度の検討における炭化燃料混焼時の燃料中硫黄、塩素量(a)
および、炭化燃料混焼時の腐食性ガス濃度の解析結果(b)

4.3.1 解析方法

本解析では、昨年度の解析検討と同様に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 4.3.1-1)を参考にした。具体的には、(1)重油と炭化燃料の混合燃料と燃焼空気を燃焼して、(2)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、(3)ガス相 A と骨材から蒸発した水蒸気を混合して、(4)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 4.3.1-2)を作成した。図 4.3.1-2 のフローチャート中の黒太枠で示した V ドライヤ出口燃焼ガス(ガス相 B)および、ばいじん(凝縮相 A, B)の中に含まれる化学成分を推定し、炭化燃料混焼に伴って腐食性ガス(SO_2 , SO_3 , HCl)生成量が抑制される機構について解析検討した。

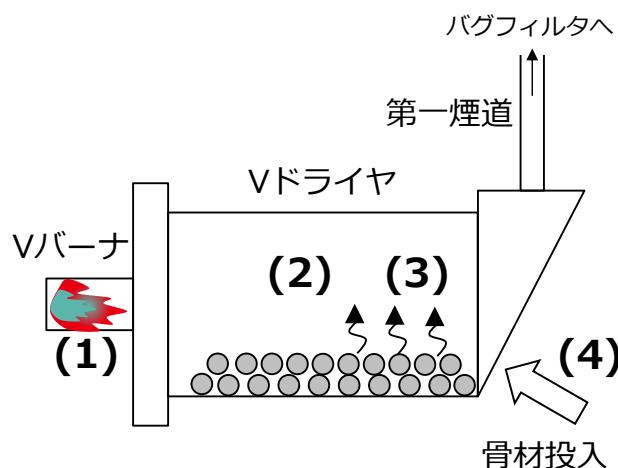


図 4.3.1-1 アスファルトプラントの骨材乾燥用ドライヤ内部のフロー

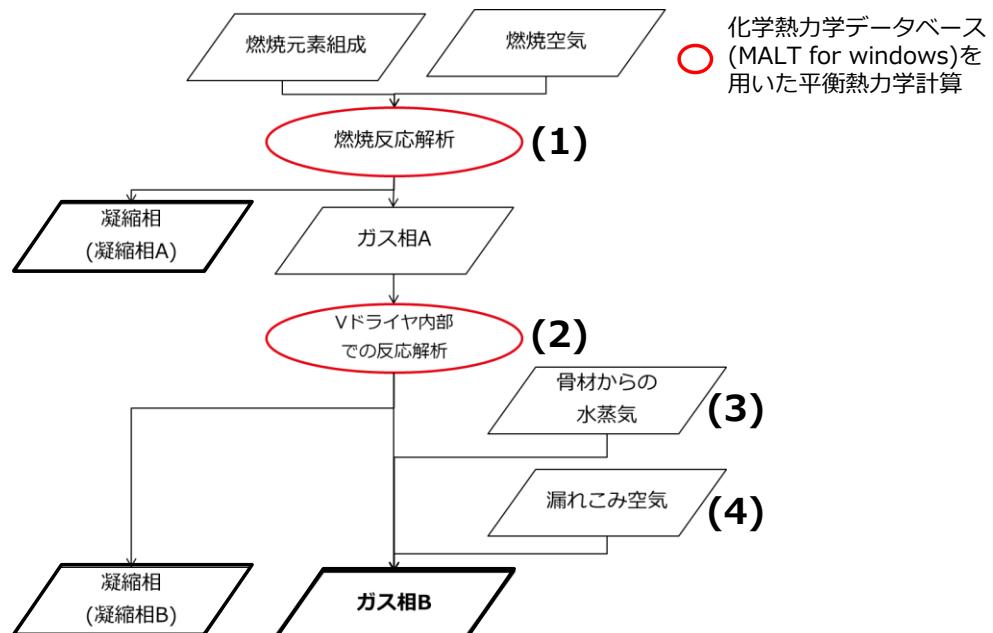


図 4.3.1-2 アスファルトプラントでの燃焼フローを参考にした

化学熱力学解析のフローチャート

4.3.2 解析検討結果

各炭化燃料混焼率における凝縮相 A、B および、ガス相 B 中の硫黄分および塩素分の化合物形態を推定した解析結果を図 4.3.2-1 に示す。炭化燃料の混焼率が低い場合には、燃料中の硫黄分と塩素分は、それぞれ腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) としてガス相 B(燃焼ガス)中に生成した。一方、混焼率が高い場合、燃料中の硫黄は、カルシウム(Ca)やナトリウム(Na)、カリウム(K)と反応して硫酸塩として凝縮相 A,B(ばいじん)中に生成した。この時、燃料中の塩素分は、Na や K と反応して塩化物としてガス相 B 中に生成した。燃料中の塩素分と硫黄分が、それぞれ塩化物と硫酸塩としてばいじん中に生成したことで、腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) の生成量が大幅に減少した。

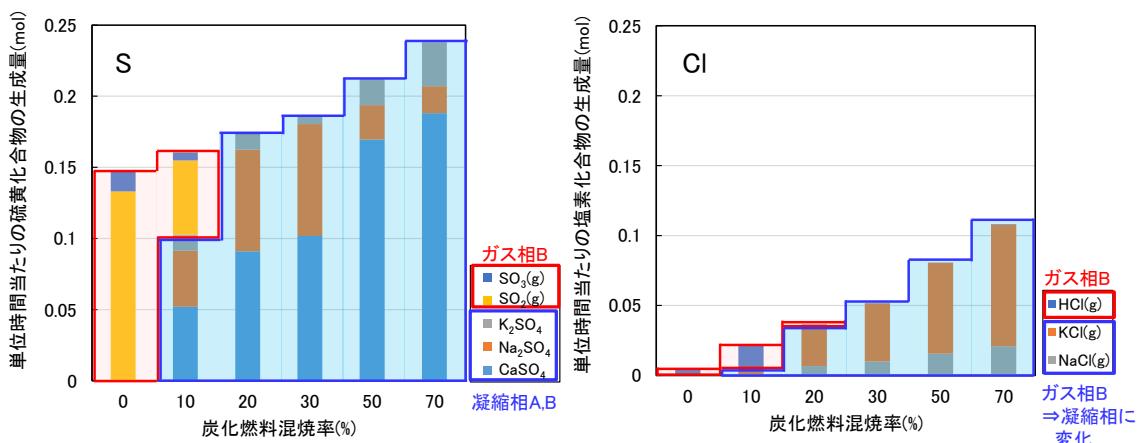


図 4.3.2-1 炭化燃料混焼時の燃料中硫黄分、塩素分の化合物形態の解析結果

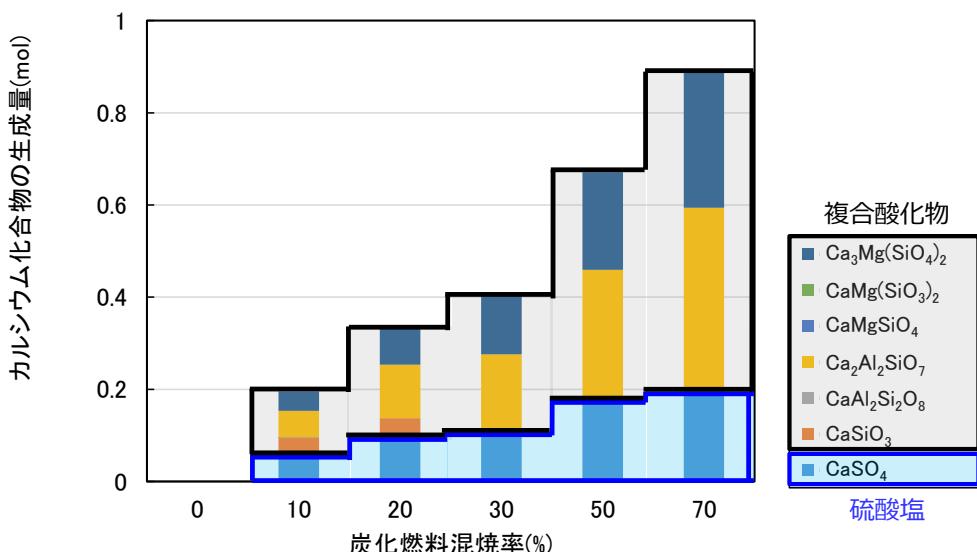


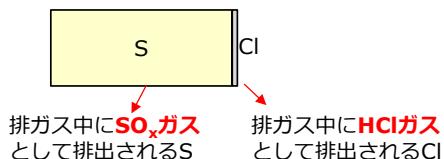
図 4.3.2-2 炭化燃料混焼時の燃料中カルシウムの化合物形態の解析結果

また、燃料中硫黄分の多くが反応した凝縮相 A 中の Ca 化合物の形態を推定した解析結果(図 4.3.2-2)から、Ca は硫酸塩だけでなく、シリコン(Si)やアルミ(Al)と複合酸化物を形成することが分かった。

以上の結果から、炭化燃料を混焼した場合には図 4.3.2-2 に示す機構で腐食性ガスの生成が抑制されたと考えられる。重油専焼の場合には、ほぼ全ての燃料中の硫黄分と塩素分は腐食性ガス(SO_2 , SO_3 , HCl)としてガス相 B(燃焼ガス)中に生成すると考えられる。一方、炭化燃料を混焼した場合には、燃料中の硫黄分は硫黄分と反応する Ca(有効 Ca)や Na、K と硫酸塩として凝縮相 A、B 中に生成し、余った硫黄分が SO_2 , SO_3 ガスとしてガス相 B 中に生成すると考えられる。さらに、燃料中の塩素は硫酸塩を形成しなかった Na や K と塩化物としてガス相 B(燃焼ガス)中に生成し、余った塩素分が HCl ガスとしてガス相 B 中に生成すると考えられる。

すなわち、図 4.3.2-3 のような機構で燃料中の硫黄分や塩素分が有効 Ca や Na、K と硫酸塩、塩化物を形成してばいじん中に移行するため、炭化燃料を混焼した際に腐食性ガス(SO_2 , SO_3 , HCl)濃度が大幅に低くなつたと考えられる。

重油専焼の場合



炭化燃料混焼の場合

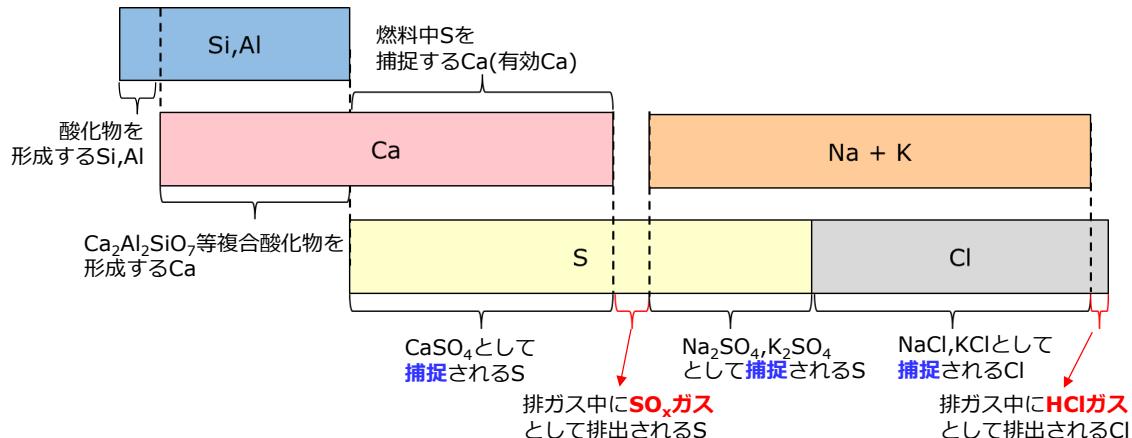


図 4.3.2-3 重油に炭化燃料を混焼した際の腐食性ガス生成量抑制機構の模式図

4.4 DTF 試験による化学熱力学解析の妥当性検証

4.3 で検討した腐食性ガスの生成抑制機構の妥当性を検討するために、重油に Ca 濃度を調整していない炭化燃料と調整した炭化燃料を混焼した際の腐食性ガス濃度の変化の解析検討を行った。さらに、燃料を完全燃焼でき、かつ試験条件を容易に変更できる DTF(Drop Tube Furnace)を用いたラボ燃焼試験でのガス分析の実測値と解析結果を比較して機構の妥当性を検証した。

解析の結果(図 4.3-1)から SO_3 は SO_2 と同様の挙動を示し、 SO_3 濃度は SO_2 濃度に比べて 2 衍程度低くなることが分かっている。このように、DTF を用いたラボ燃焼試験時のガス分析では SO_3 濃度が低くなり、ガス分析時に検出下限以下となる可能性が懸念される。そこで、試験の実測値と解析結果の SO_2 濃度の変化を比較検証した。

4.4.1 試験装置

DTF(Drop Tube Furnace)の模式図および外観写真を図 4.4.1-1 に示す。DTF は、燃料の燃焼・ガス化反応メカニズムの解明等に用いられる装置で、燃料供給部、ガス供給部、管状炉、サンプリング部から構成される。装置上部から供給した燃料と燃焼用ガスを管状炉で加熱して反応させる。燃料は落下しながら反応が進み、任意の位置でガス排出部側からガスと燃料残渣をサンプリングすることで燃料の燃焼過程での組成の変化を分析することができる。

本試験では、ガス温度が低下して SO_2 から SO_3 に転換したガスを硫酸露点以上の温度で採取する必要があるため、管状炉のヒーター下部にサンプリング孔を設けることとした。また、DTF では固体のみ燃焼可能であるため、石炭と硫黄の混合物で重油模擬試料を作製して炭化燃料と混焼した。

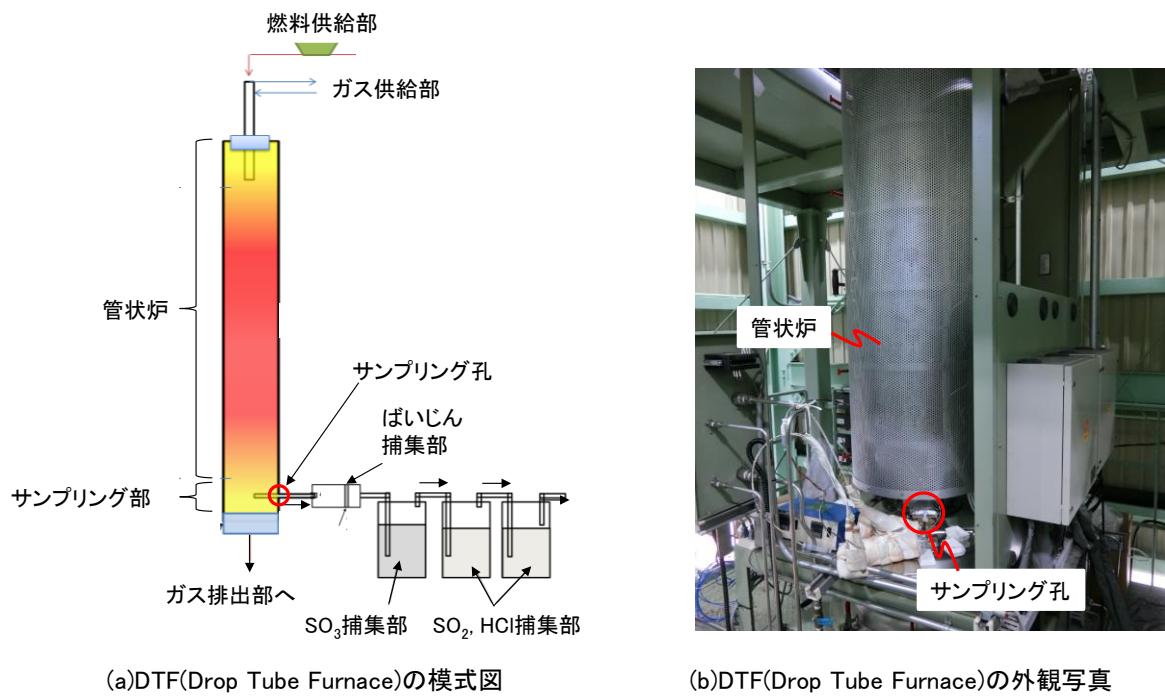


図 4.4.1-1 DTF (Drop Tube Furnace) の模式図 (a) および、外観写真 (b)

4.4.2 解析方法

DTF での燃焼フローを参考にした化学熱力学解析のフローを図 4.4.2-1 に示す。炭化燃料を混焼した際の燃焼ガス(ガス相 B)中の腐食性ガス(SO_2 , HCl)濃度の変化を解析検討した。

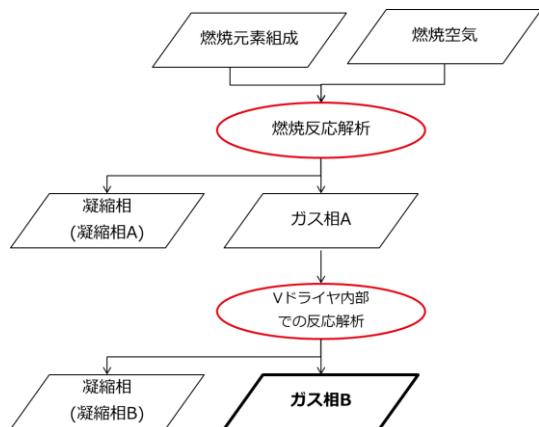


図 4.4.2-1 DTF 試験の燃焼フローを参考にした化学熱力学解析フロー

4.4.3 解析条件

解析に用いた燃料の組成を表 4.4.3-1 に示す。DTF では固体のみ燃焼可能であるため、Ca に対して余剰となる硫黄分が重油と同程度になるように硫黄を石炭に添加した重油模擬試料を使用した。なお、ガス分析結果の腐食性ガス濃度の変化を見やすくするために、重油模擬試料は高硫黄重油の組成を参考にした。解析では、DTF を用いた燃焼試験条件を参考にして重油模擬試料と炭化燃料を使用した。また、図 4.3.2-3 から、炭化燃料混焼によって腐食性ガス濃度が低下するためには、炭化燃料中に硫黄分と反応する Ca(以後、有効 Ca)が十分に含まれている必要があると考えられたため、有効 Ca 濃度を調整した炭化燃料を混焼した際の腐食性ガス濃度の変化についても検討を行った。さらに、有効 Ca 濃度を調整した未脱塩処理炭化燃料の混焼についても検討を行った。

解析条件を表 4.4.3-2 に示す。DTF での燃焼試験条件を参考にして燃焼温度は 1,500°C、V ドライヤでの反応解析温度は 900~1,500°C、空燃比を 3.0 として炭化燃料混焼率 0%, 20%, 40%, 60% について検討した。

表 4.4.3-1 DTF 試験での化学熱力学解析で使用した燃料組成 (wt%)

	重油模擬試料	炭化燃料		
		脱塩処理済み	未脱塩	
有効 Ca 濃度の調	—	なし	あり	あり
全水分	0.00	4.30	4.30	5.00
炭素	65.99	48.30	48.30	46.10
水素	4.70	1.90	1.90	1.90
窒素	1.10	2.32	2.32	1.80
酸素	23.99	11.02	11.02	9.59
全硫黄	1.28	0.44	0.44	0.16
塩素	0.00	0.34	0.34	2.25
灰分	SiO ₂	1.08	8.88	8.49
	Al ₂ O ₃	0.58	4.20	3.81
	Fe ₂ O ₃	0.67	1.48	1.44
	CaO	0.40	12.42	14.87
	CaSO ₄	0.00	0.00	0.00
	MgO	0.11	0.98	0.99
	Na ₂ O	0.05	0.83	2.19
	K ₂ O	0.04	0.49	0.94
	PbO	0.00	0.00	0.00
	ZnO	0.00	0.00	0.01

表 4.4.3-2 DTF 試験の燃焼反応に関する化学熱力学解析条件

燃焼温度	1,500°C
V ドライヤ内部での反応解析温度	900～1,500°C
空燃比	3.0
炭化燃料混焼率	0%, 20%, 40%, 60%

4.4.4 解析結果

重油模擬試料に対して炭化燃料を混焼した場合の腐食性ガス濃度の解析結果を図 4.4.4-1 に示す。図 4.4.4-1(a) の結果から、有効 Ca 濃度を調整していない炭化燃料を混焼した場合、 SO_2 濃度は燃料中の硫黄分が全て SO_2 になると仮定した濃度の半分から同程度となり、解析温度の影響を受けることが分かった。また、 HCl 濃度は重油専焼時に比べて高くなるものの、燃料中の塩素分が全て HCl になると仮定した濃度に比べて低くなかった。

一方、図 4.4.4-1 (b) の結果から、有効 Ca 濃度を調整した炭化燃料を混焼した場合、 SO_2 濃度が燃料中の硫黄分が全て SO_2 となったと仮定した濃度に比べて 1/5 ~ 1/2 程度に低下した。また、 HCl 濃度は重油専焼時に比べて高くなるものの、燃料中の塩素分が全て HCl になると仮定した濃度に比べて低くなかった。

以上の結果から、高硫黄重油に有効 Ca 濃度を調整した炭化燃料を混焼することで燃焼ガス中の SO_2 濃度を大幅に低下させて腐食を低減できると考えられる。

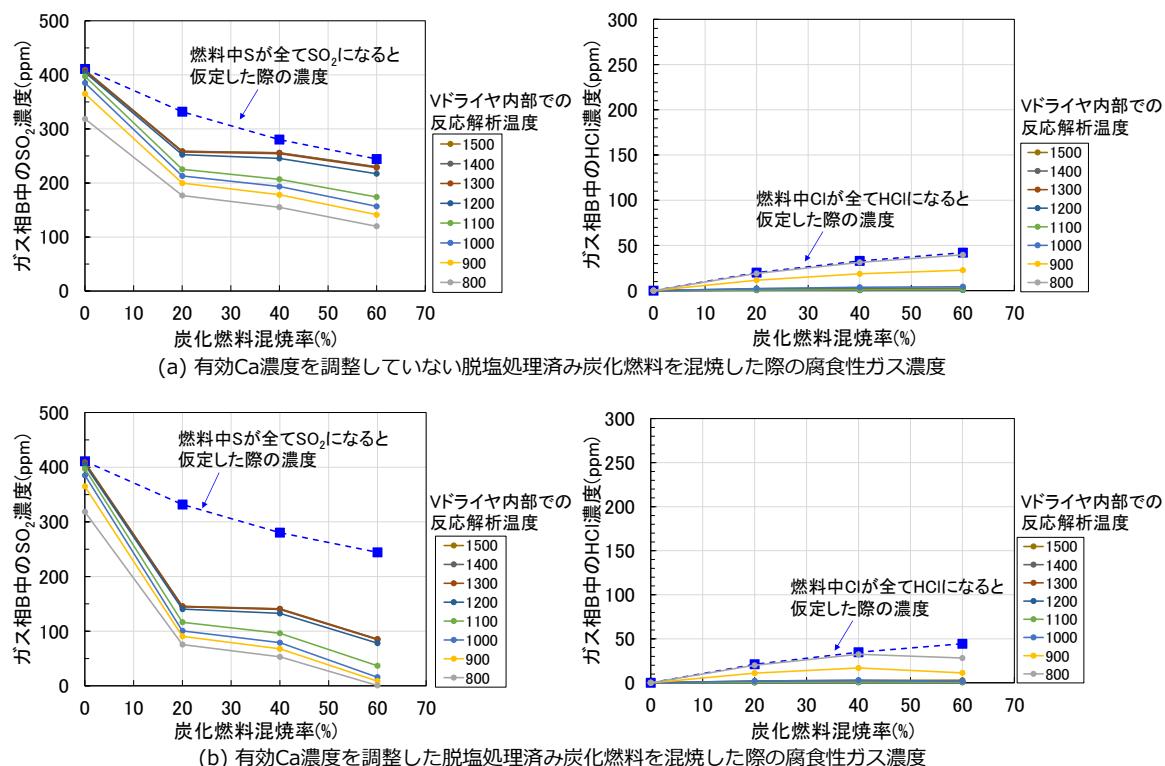


図 4.4.4-1 高硫黄重油に炭化燃料を混焼した際の腐食性ガス濃度の解析結果

さらに、有効 Ca 濃度を調整した未脱塩処理炭化燃料を重油に混焼した際の解析結果を図 4.4.4-2 に示す。図 4.4.4-1 (b) と図 4.4.4-2 の比較から、有効 Ca 濃度を調整した未脱塩処理炭化燃料を混焼した場合の SO₂ 濃度は、有効 Ca 濃度を調整した脱塩処理済み炭化燃料を混焼した場合と同程度であった。また、HCl 濃度は脱塩処理済み炭化燃料を混焼した場合に比べて高くなるものの、燃料中の塩素分が全て HCl になると仮定した濃度に比べて半分以下となつた。

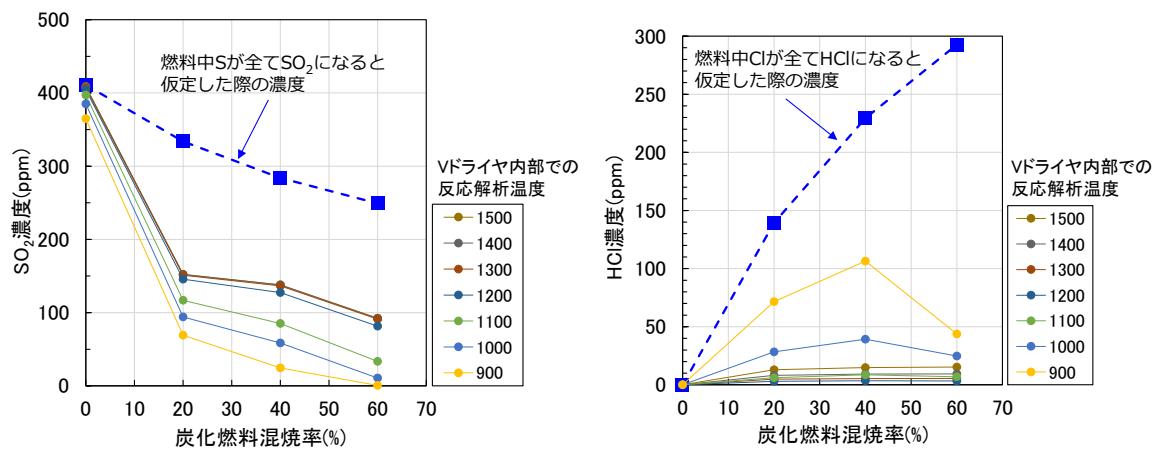


図 4.4.4-2 高硫黄重油に有効 Ca 濃度を調整した未脱塩処理炭化燃料を混焼した際の腐食性ガス濃度の解析結果

4.4.5 DTF 試験でのガス分析結果と解析結果との比較

解析結果および腐食性ガス生成量抑制機構の妥当性を検証するために、重油模擬試料と有効 Ca 濃度を調整した未脱塩処理炭化燃料を混焼した DTF 試験でのガス分析を実施し、実測値と解析結果を比較した。試験条件を表 4.4.5-1 に、分析条件を表 4.4.5-2 に示す。燃焼温度は 1,500°C、空燃比は 3.0 で燃料を燃焼して SO₂, HCl 濃度の分析を行った。また、炭化燃料および燃焼後の炉底灰中に含まれる化合物の形態を X 線回折(XRD)で分析した。

表 4.4.5-1 DTF 試験での燃焼条件

燃焼温度	1,500°C
炭化燃料混焼率	0%, 40%, 60%(発熱量ベース)
空燃比	3.0
滞留時間	3s
ガスサンプリング量	30L(1L/min × 30min)

表 4.4.5-2 DTF 試験でのガス分析条件

ガス分析	分析ガス種: SO ₂ , HCl
結晶相の同定(XRD)	試験前の未脱塩処理炭化燃料、 炉底灰(炭化燃料混焼率 40%, 60%)

ガス分析の実測値と解析結果の比較を図 4.4.5-1 に示す。実測値では、有効 Ca 濃度を調整した炭化燃料を混焼した場合、SO₂ 濃度が燃料中の硫黄分が全て SO₂ となつたと仮定した濃度に比べて 1/5 程度に低下し、HCl 濃度は燃料中の塩素分が全て HCl になると仮定した濃度に比べて低くなつた。これらの傾向は解析結果と一致した。

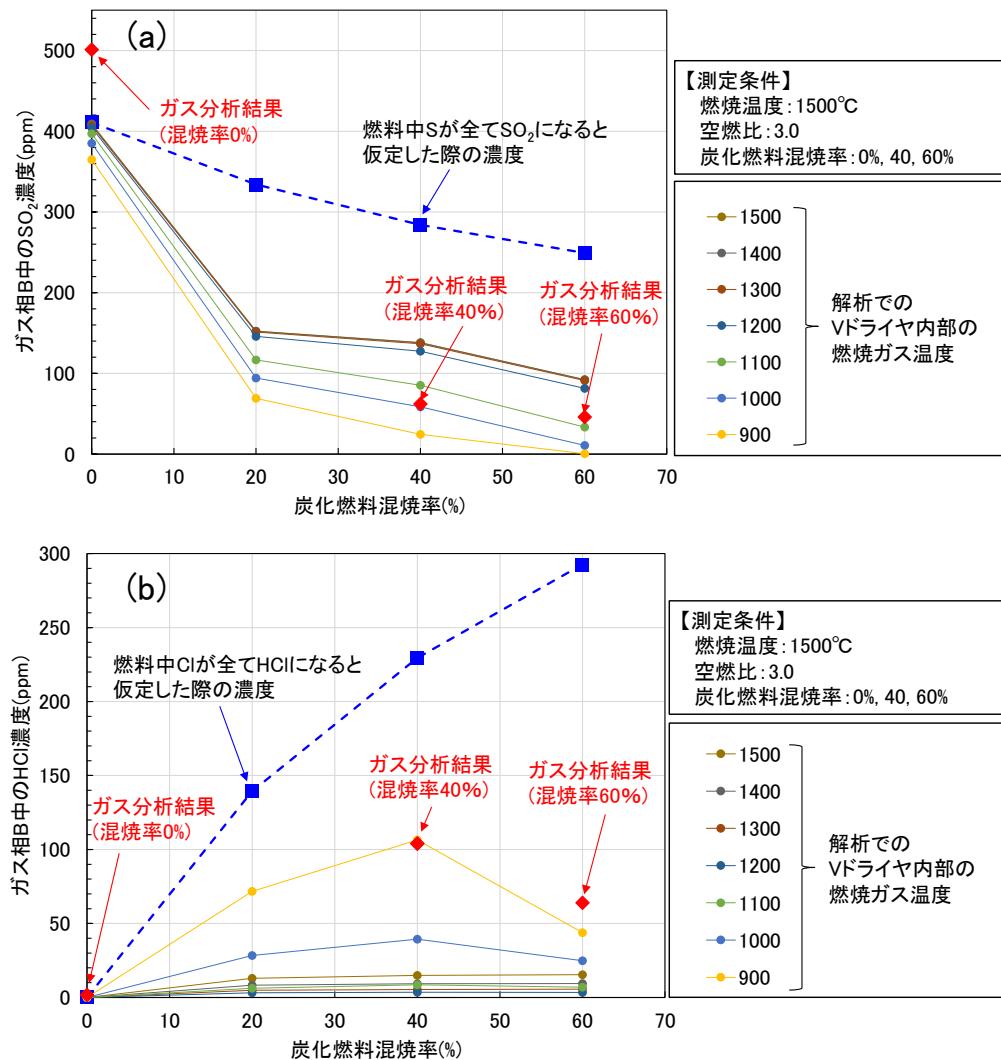


図 4.4.5-1 高硫黄重油に有効 Ca 濃度を調整した未脱塩処理炭化燃料を
混焼した際の腐食性ガス濃度の解析結果とバーナ試験結果の比較
((a) SO₂, (b) HCl)

X線回折の分析結果(図 4.4.5-2)から、炉底灰中には燃焼前の炭化燃料には見られない NaCl , KCl , Na_2SO_4 , K_2SO_4 の結晶相が見られた。このことから、炭化燃料を混焼することで燃料中の硫黄分や塩素分が硫酸塩、塩化物としてばいじん中に移行することが分かった。

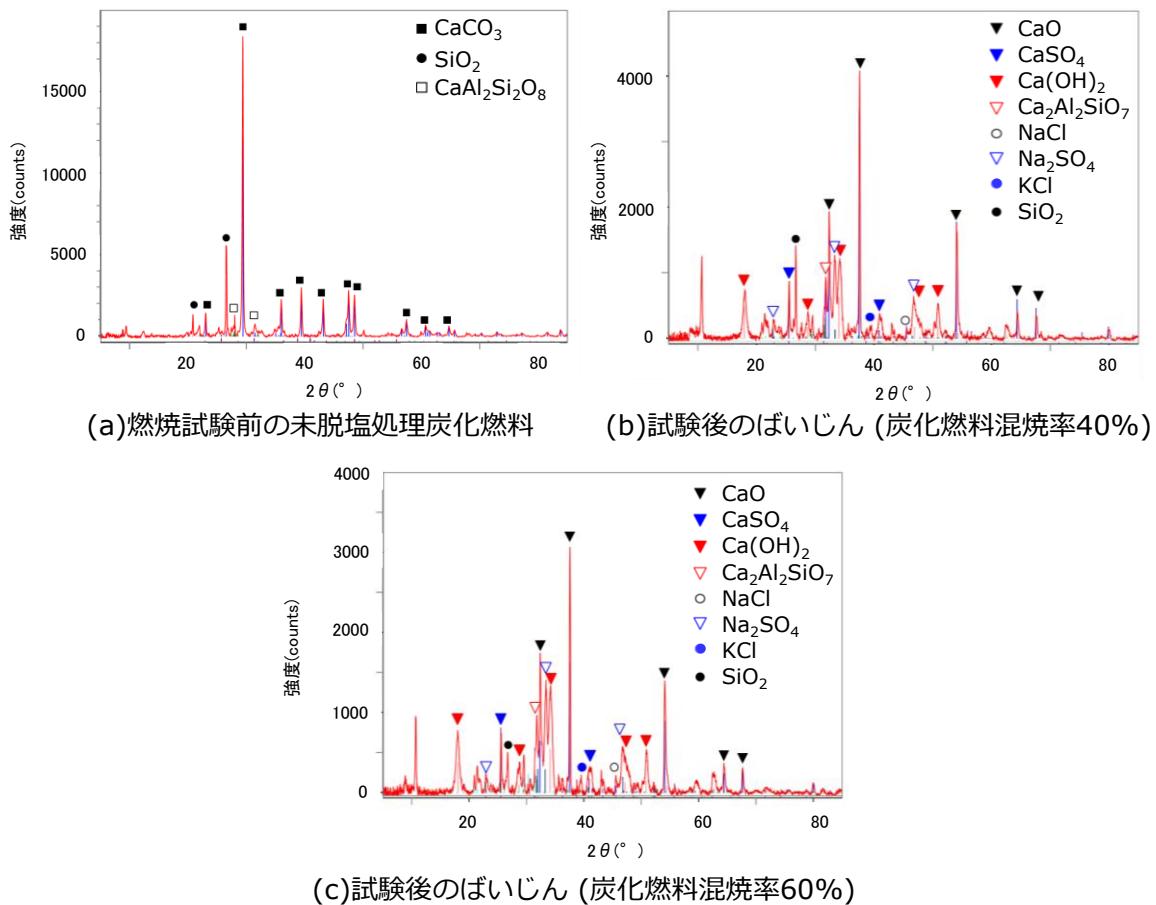


図 4.4.5-2 DTF 試験前の未脱塩処理炭化燃料(a)および、
試験後のばいじん(b, c)の X 線回折の分析結果

以上の検討結果より、炭化燃料を混焼することで燃料中の硫黄分や塩素分が硫酸塩、塩化物としてばいじん中に移行するため、腐食性ガス(SO_2 , SO_3 , HCl)濃度が燃料中の硫黄分や塩素分が全て腐食性ガスになると想定した濃度に比べて大幅に低くなるという腐食性ガス(SO_2 , SO_3 , HCl)生成量抑制機構の妥当性を検証することができた。

また、重油模擬試料は高硫黄重油相当の組成であったため、有効 Ca 濃度を調整した炭化燃料と高硫黄重油を混焼した場合には、 SO_2 , SO_3 濃度の増加を抑制でき、 HCl 濃度は燃料中の塩素分が全て HCl になると仮定した濃度に比べて低くできる可能性があることも分かった。

4.5 アスファルトプラントでのガス分析結果を用いた解析条件の最適化

アスファルトプラントの V ドライヤ出口温度(200°C)で解析を行った場合、実機でのガス分析結果と大きく異なり燃焼ガス中に SO₃ ガスは存在しないという結果となる。これは、実炉の燃焼ガスは、V ドライヤ出口よりも高温の組成で下流に流れているためと考えられる。そこで、昨年度の解析では、文献値を参考に複数の温度条件を仮定して解析を行った。一方、今年度は、より実炉環境に即した解析を行うために、実炉でガス分析を実施して実測値から最適な解析条件を決定した。

4.5.1 実炉条件を用いた予備解析

4.3 と同様に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 4.3.1-1)を参考にした化学熱力学フローチャート(図 4.3.1-2)を作成し、重油専焼時の 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。なお、燃料組成は実機で多く使用されている低硫黄重油の組成を使用した。

解析条件を表 4.5.1-1 に、解析結果のガス相 B 中の SO₂ および SO₃ 濃度を図 4.5.1-1 に示す。これにより、硫黄酸化物は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 に転換して存在することが分かった。

表 4.5.1-1 アスファルトプラントでの化学熱力学解析条件

燃料元素組成	重油の分析結果を元に決定(表 4.2.2-1 参照)
空気量 水蒸気量	空燃比 1.5(実炉条件を元に決定) 骨材からの水蒸気量 3600kg/hr(実機条件を元に決定) 漏れこみ空気量 実機条件を元に決定
解析温度	燃焼反応解析: 1,500°C V ドライヤ内部での反応解析: 200~1,500°C

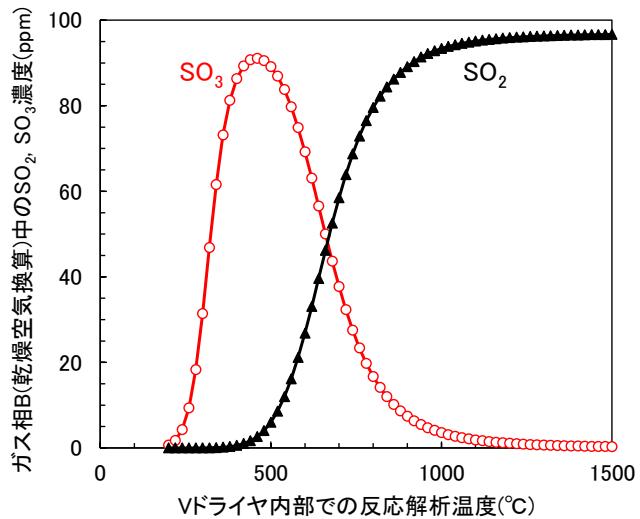


図 4.5.1-1 ガス相 B 中 SO₂, SO₃ 濃度の V ドライヤ内部での反応解析温度依存性

4.5.2 実炉でのガス分析

実炉でのガス分析条件を表 4.5.2-1 に示す。ガス分析はプラント A とプラント B の第 1 煙道で実施した。なお、硫黄酸化物 (SO_x) 濃度と SO₃ 濃度の差から SO₂ 濃度を算定した。

分析結果を表 4.5.2-2 に示す。プラント B での SO₃ 転換率は、プラント A に比べて 1 桁高くなり、施設によって SO₃ 転換率が大きく異なることが分かった。

表 4.5.2-1 実炉でのガス分析条件

サンプリング位置	第 1 煙道入口サンプリング座
分析項目	O ₂ , CO ₂ , CO, H ₂ O, NO _x , SO _x , SO ₃ , HCl, ばいじん



図 4.5.2-1 ガス分析を実施したアスファルト合材プラントの外観写真

表 4.5.2-2 実炉でのガス分析結果

			プラント A	プラント B
ガス温度		°C	95	92
乾きガス	CO ₂	vol%	3.0	4.7
	O ₂	vol%	17.7	13.5
	N ₂	vol%	79.3	81.8
	CO	vol ppm	300	200
実測値	H ₂ O	vol%	9.6	17.4
	ばいじん	g/m ³	32	33
	SO _x	vol ppm	27	7.7
連続測定	NO _x	vol ppm	10	33
実測値	HCl	vol ppm	3.1	0.4
	SO ₃	vol ppm	0.05	0.22
	SO ₂	vol ppm	27	7.5
SO ₃ 転換率		%	0.19	2.93

4.5.3 解析結果と分析結果の比較

解析結果から得られたガス相 B での SO_3 転換率の V ドライヤ内部での反応解析温度依存性と分析結果の比較を図 4.5.3-1 に示す。V ドライヤ内部での反応解析温度は、プラント A と同程度の SO_3 転換率とする場合には $1,500^\circ\text{C}$ 、プラント B と同程度とする場合には $1,100^\circ\text{C}$ とする必要があることが分かった。

解析では、硫酸露点腐食の原因となる SO_3 濃度が高い条件で検討する必要があるため、V ドライヤ内部での反応解析温度は $1,100^\circ\text{C}$ が適していると考えられる。

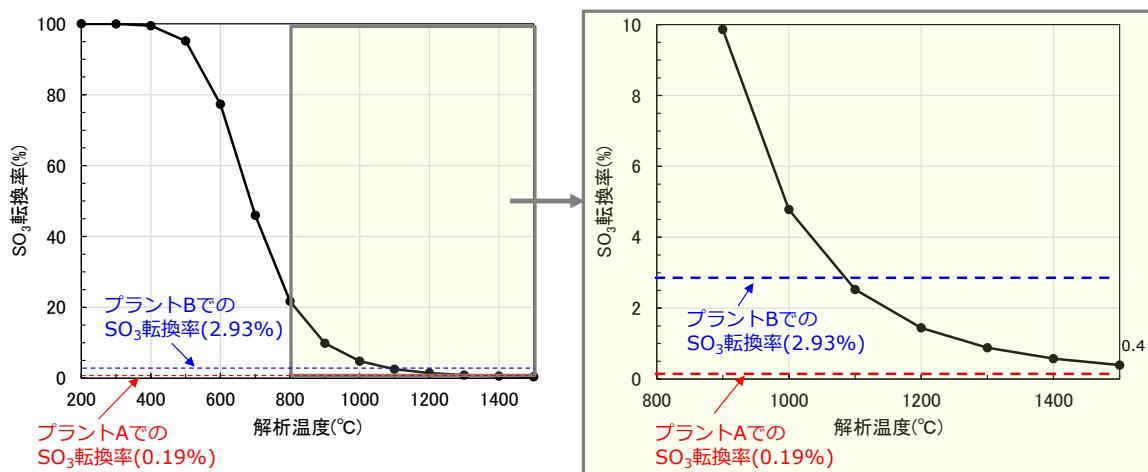


図 4.5.3-1 SO_3 転換率の解析温度依存性(解析結果)と分析結果の比較

4.6 バーナ試験による解析の妥当性検証

実炉での解析の妥当性を検証するために、実炉での燃焼を模擬したバーナ試験の燃焼フローを参考に解析を実施し、バーナ試験でのガス分析の実測値と解析結果を比較した。

なお、昨年度は、腐食性ガスが多く発生する観点から解析では高硫黄重油を用いたが、多くの実炉では低硫黄重油が使用されている。そこで、実炉での使用環境を模擬するためにバーナ試験とそれを模擬した解析では、低硫黄重油を使用した。

また、同様の検討を未脱塩処理炭化燃料についても実施して未脱塩処理炭化燃料の適用可能性の検討を行った。

4.6.1 バーナ試験条件

バーナ試験条件を表 4.6.1-1 に、分析位置を図 4.6.1-1 に示す。バーナ試験では、炭化燃料混焼率 0% (重油専焼)、24%、40%について試験を行い、装置の第2煙道でガスおよびばいじんの分析を行った。分析条件を表 4.6.1-2 に示す。分析では、腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) 濃度の分析および、ばいじん中に含まれる結晶相の同定を行った。

表 4.6.4-1 バーナ試験条件

使用燃料	低硫黄重油 脱塩処理済み炭化燃料 未脱塩処理炭化燃料
炭化燃料混焼率 (発熱量ベース)	0% (重油専焼)、24%、 40%

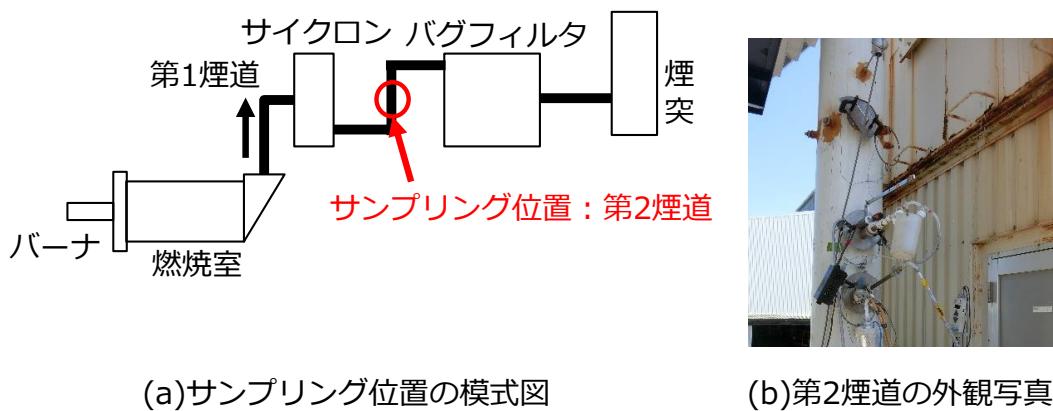


図 4.6.4-1 バーナ試験でのサンプリング位置の模式図および外観写真

表 4.6.4-1 バーナ試験での分析条件

サンプリング位置	第2煙道計測座
分析項目	ガス濃度: SO_2 , SO_3 , HCl , H_2O , O_2 , CO_2 , CO , N_2 , NO_x ばいじん: 結晶相(XRD)

4.6.2 解析方法

バーナ試験の燃焼フローを参考にした化学熱力学解析のフローを図 4.6.2-1 に示す。バーナ試験では実機の漏れこみ空気や骨材からの水蒸気がないため、アスファルトプラントでの燃焼を参考にしたフローチャート(図 4.3.1-2)からそれらを除外した解析を行った。

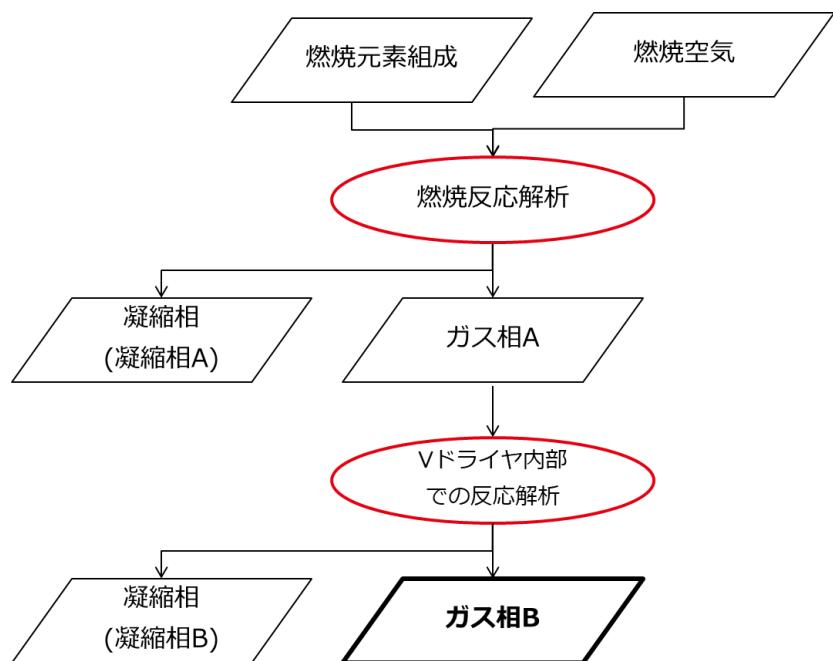


図 4.6.2-1 バーナ試験の燃焼フローを参考にした化学熱力学解析フロー

4.6.3 解析条件

解析条件を表 4.6.3-1 に示す。バーナ試験で重油専焼でのガス分析を実施して SO_3 転換率を算定し、4.5.3 と同様の検討を実施して解析条件の最適化を行った。

バーナ試験での重油専焼条件のガス分析結果から算定した SO_3 転換率と解析結果を比較した結果を図 4.6.3-1 に示す。解析では、硫酸露点腐食の原因となる SO_3 濃度が高い条件で検討する必要があるため、バーナ試験での V ドライヤ内部での反応解析温度は 1,100°C とした。

表 4.6.3-1 バーナ試験条件での解析条件

条件	内容
炭化燃料混焼率	0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 24%, 40%
空燃比	1.5(バーナ試験条件を参考に決定)
解析温度	燃焼反応解析温度 : 1,100°C(バーナ試験条件を参考に決定) V ドライヤ内部での反応解析温度 : 1,100°C (図 4.6.3-1 の結果から決定)

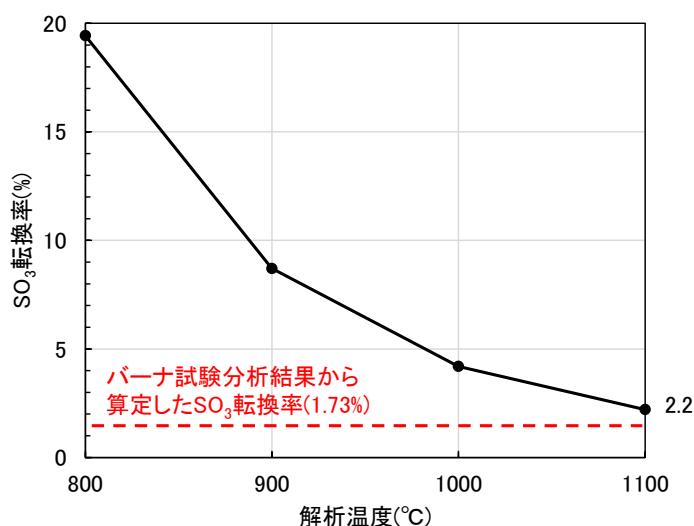


図 4.6.3-1 バーナ試験での SO_3 転換率の解析温度依存性(解析結果)と分析結果の比較

4.6.4 解析結果

重油に脱塩処理済みの炭化燃料を混焼した際の解析結果を図 4.6.4-1 に示す。N₂, O₂, CO₂, H₂O 濃度は炭化燃料混焼率によらずほぼ一定となった。また、腐食性ガスである SO₂, SO₃ 濃度は炭化燃料を混焼することで低下し、HCl 濃度は炭化燃料を混焼することで若干高くなかった。この傾向は昨年度の解析結果の傾向と一致した。

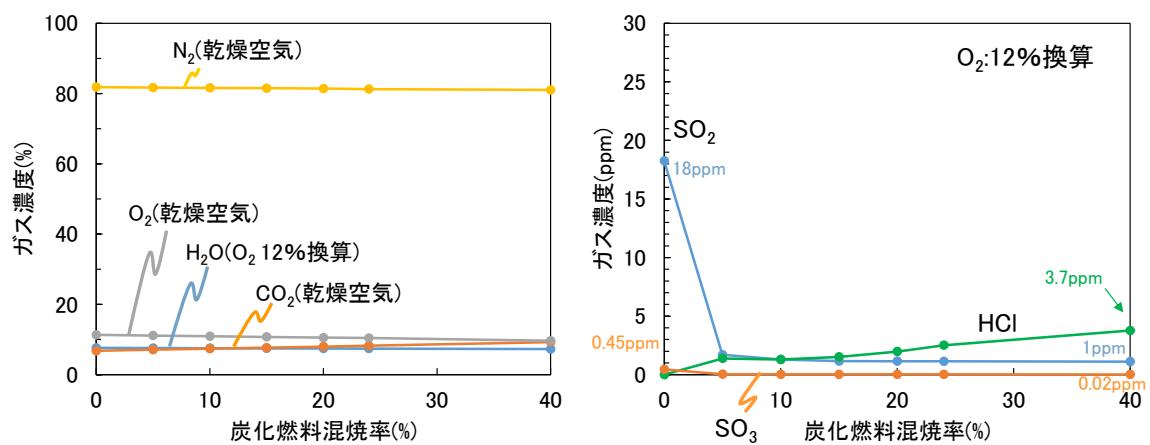


図 4.6.4-1 脱塩処理済み炭化燃料を用いたバーナ試験で炭化燃料を
混焼した際のガス濃度の変化(解析結果)

4.6.5 バーナ試験でのガス分析結果と解析結果との比較

解析結果の妥当性を検証するためにバーナ試験での実測値と解析結果を比較した結果を図 4.6.5-1 に示す。分析結果(赤点)では、炭化燃料を混焼することで SO_2 , SO_3 濃度が低下し、 HCl 濃度は若干高くなかった。この傾向は解析結果(緑線)と一致していたことから、本検討の解析結果は妥当であると考えられる。

炭化燃料の混焼によって SO_3 濃度が低下するという分析結果が得られたことから、解析での想定通り、炭化燃料を混焼することで硫酸露点腐食のリスクは低減されると考えられる。ただし、炭化燃料の混焼によって HCl ガス濃度が増加しているため、もし煙道が硫酸露点温度以下になった場合には、塩酸と硫酸の混酸による腐食が発生する可能性がある。

炭化燃料混焼に伴う HCl ガス濃度の増加が装置の腐食に与える影響については、4.8 にて検討を行う。

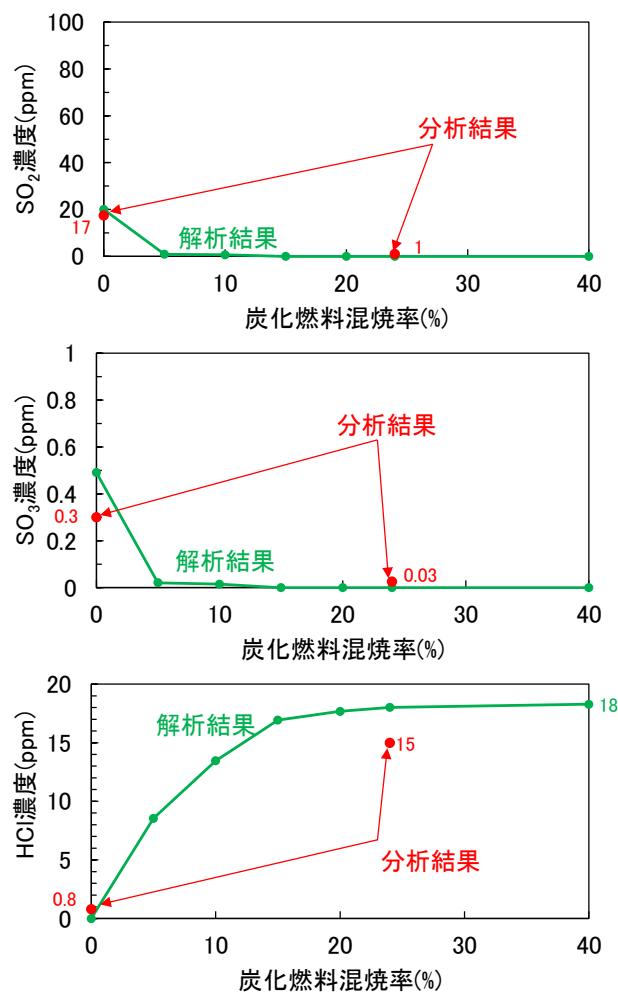


図 4.6.5-1 脱塩処理済み炭化燃料を用いたバーナ試験での分析結果と
解析結果との比較

4.7 未脱塩処理炭化燃料の適用可能性検討

未脱塩処理炭化燃料の適用可能性を検討するために、未脱塩処理炭化燃料を用いて4.6と同様にバーナ試験条件での解析および、バーナ試験でのガス分析を行い、解析結果と分析結果を比較した。

分析結果と解析結果を比較した結果(図4.7-1)から、未脱塩処理炭化燃料を混焼した場合、 SO_2 , SO_3 濃度は低下した。一方、 HCl 濃度は未脱塩処理炭化燃料を混焼することで若干增加了。上記の傾向は、分析結果と解析結果で一致し、脱塩処理済みの炭化燃料混焼時の傾向とも一致した。

以上の解析検討結果から、未脱塩処理炭化燃料を低硫黄重油と混焼した際の挙動は脱塩処理済みの炭化燃料と同様であり、アスファルトプラントにおいて未脱塩処理炭化燃料を重油の代替として適用できる可能性があると考えられる。ただし、炭化燃料の混焼によって HCl 濃度が增加しているため、もし煙道が硫酸露点温度以下になった場合には、塩酸と硫酸の混酸による腐食が発生する可能性がある。炭化燃料混焼に伴う HCl 濃度の増加が装置の腐食に与える影響については、4.8にて検討を行う。

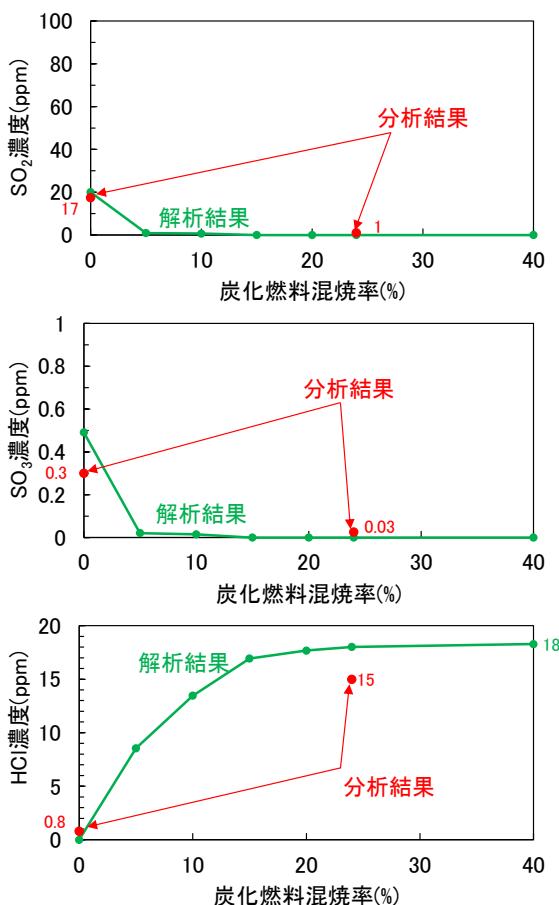


図4.7-1 未脱塩処理炭化燃料を用いたバーナ試験での分析結果と
解析結果との比較

4.8 炭化燃料混焼による HCl ガス濃度の増加が装置の腐食に与える影響の検討

バーナ試験での検討の結果、重油に炭化燃料を混焼することで燃焼ガス中の HCl 濃度が若干高くなることが分かった。そこで、炭化燃料混焼によって生じた HCl 濃度の増加が装置の腐食に与える影響について検討した。

煙道が硫酸露点以下となり、煙道表面に硫酸が結露した場合、煙道表面に結露した硫酸中に燃焼ガス中の HCl ガスの一部が溶解して塩酸と硫酸の混酸を形成して煙道が腐食するという機構を想定した。このときの塩酸濃度を HCl ガスの分圧と凝縮水中の塩酸濃度の関係^[3](図 4.8-1)から推定した。バーナ試験で脱塩処理済みの炭化燃料を 40% 混焼した際の HCl 濃度の実測値は 18ppm であった(図 4.6.4-1)。また、未脱塩処理炭化燃料を 40% 混焼した場合の HCl 濃度の解析結果も 18ppm であった(図 4.7-1)。HCl 濃度 18ppm は、大気圧下で HCl 分圧 1.8×10^{-6} atm に相当し、図 4.8-1 から、その場合の凝縮水中の塩酸濃度は 1vol% 程度と推定される。

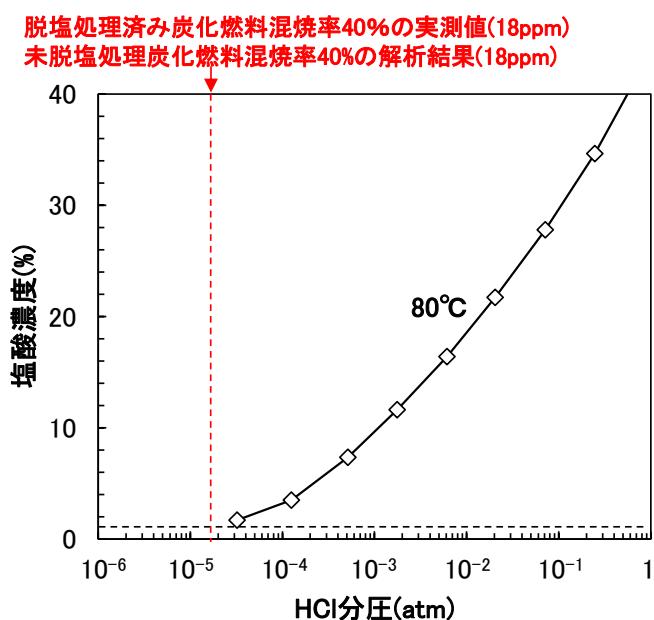


図 4.8-1 HCl ガスの分圧と凝縮水中の塩酸濃度の関係^[3]

表 4.8-1 混酸を用いたラボ腐食試験の文献での試験条件^[4]

溶液濃度	硫酸 : 16.7 vol%
	塩酸 : 0.35, 1, 4, 10 vol%
溶液温度	60°C
浸漬時間	6 時間、24 時間

塩酸と硫酸の混酸による腐食量の塩酸濃度依存性については文献値^[4]を参考に検討を行った。文献では、表 4.8-1 に示す通り、硫酸濃度が 16.7 vol% の条件下で、60°C の塩酸と硫酸の混酸中の腐食減肉量の塩酸濃度依存性を検討していた。文献での混酸による腐食量の塩酸濃度依存性を図 4.8-2 に示す。試験した材質(表 4.8-2)の中で最も炭素鋼に近い SPHC の腐食減肉量の塩酸濃度依存性(赤線)から、塩酸濃度 1, 4 vol% の混酸の腐食減肉量は、塩酸濃度 0.35 vol% の場合に比べて同等以下であった。このことから、硫酸と塩酸の混酸において塩酸濃度 4 vol% 以下の混酸の腐食性は硫酸と同程度であると推定され、炭化燃料混焼時に生じる可能性がある混酸(塩酸 1 vol% 程度)の腐食性は硫酸と同程度と考えられる。

以上の検討結果から、今回の検討では炭化燃料の混焼に伴う HCl ガス濃度の増加が腐食に与える影響は小さいと推定される。

表 4.8-2 混酸を用いた腐食試験の文献で用いた試験片の材質^[4]

Specimen	Composition (wt%)						
	C	P	S	Cu	Ni	Cr	Co+Sb+W
ANCOR-S	< 0.10	< 0.01	< 0.01	< 0.35	< 0.20	< 0.01	< 0.2
SPHC	0.035	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	0.03	< 0.01
STS 409L	0.006	< 0.03	< 0.01	< 0.01	0.12	11.0	< 0.01

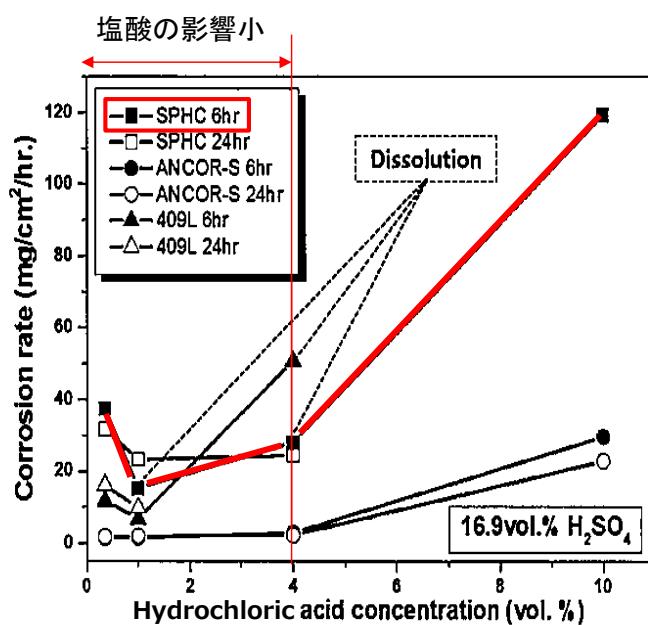


図 4.8-2 塩酸と硫酸の混酸中における塩酸濃度と腐食量の関係^[4]

4.9 実炉試験での腐食検討

実炉での解析検討結果の妥当性を検証するために、小型アスファルトプラントでの重油と炭化燃料の混焼試験でガス分析を実施し、実測値を用いて腐食検討を実施した。

4.9.1 試験条件

前田道路株式会社が保有する小型のアスファルトプラント(図 4.9.1-1)で炭化燃料の混焼実証試験を行った(3.2 参照)。試験条件を表 4.9.1-1 に示す。燃料は低硫黄重油と脱塩処理済み炭化燃料を使用し、炭化燃料混焼率は 0% (重油専焼)、21.8%、23.6%とした。

分析条件を表 4.9.1-2 に示す。各炭化燃料混焼率での燃焼試験において腐食性ガスである硫黄酸化物, SO_3 , HCl ガス濃度を第 1 煙道入口(図 4.9.1-2)で分析し、硫黄酸化物と SO_3 ガス濃度の差から SO_2 ガス濃度を算定した。なお、第 2 煙道でも連続分析計を用いて SO_2 濃度の分析を実施した。



図 4.9.1-1 小型アスファルトプラントの外観写真

表 4.9.1-1 実炉試験条件

燃焼温度	1,500°C
使用燃焼	低硫黄重油 脱塩処理済み炭化燃料
炭化燃料混焼率 (発熱量ベース)	0% (重油専焼)、21.8%、 23.6%

表 4.9.1-2 ガス分析条件

分析位置	第1煙道入口(図4.9.1-1)
分析項目	SO ₂ (※1), SO ₃ , HCl, NO _x O ₂ , CO ₂ , CO, N ₂ , H ₂ O
炭化燃料混焼率 (発熱量ベース)	0 % (重油専焼)、21.8 %、 23.6 %

※1 : SO₂のみ第2煙道で連続分析計での計測も実施した。

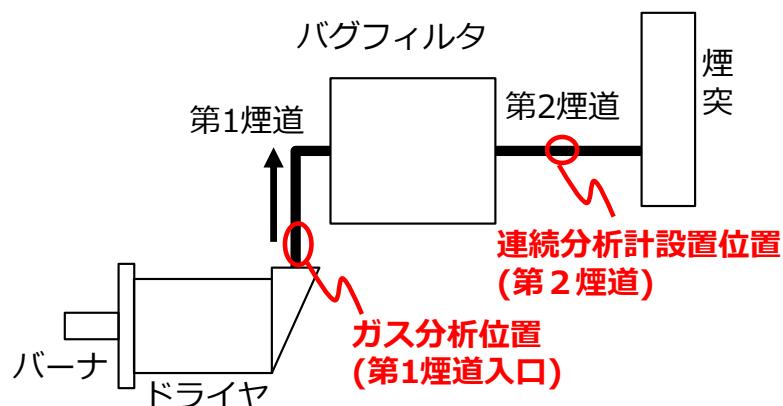


図 4.9.1-2 ガス分析位置

4.9.2 実測値を用いた炭化燃料の混焼がプラント機器の腐食に及ぼす影響の検討

腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) 濃度の炭化燃料混焼率依存性を図 4.9.2-1 に示す。腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) 濃度は炭化燃料の混焼率によらずほぼ一定であった。一方、第 2 煙道に設置した連続分析計の SO_2 ガス濃度(図 4.9.2-2)は、重油専焼時には 0.5~2 ppm であり、炭化燃料混焼時には 0.1 ppm 未満であった。このことは、炭化燃料混焼時の SO_2 濃度は重油専焼時以下となっている可能性を示唆している。

以上の検討結果より、炭化燃料混焼時の腐食性ガス濃度は、重油専焼時と同等以下であり、炭化燃料混焼時のプラント構成機器の腐食は、重油専焼時と同等以下であると推定される。

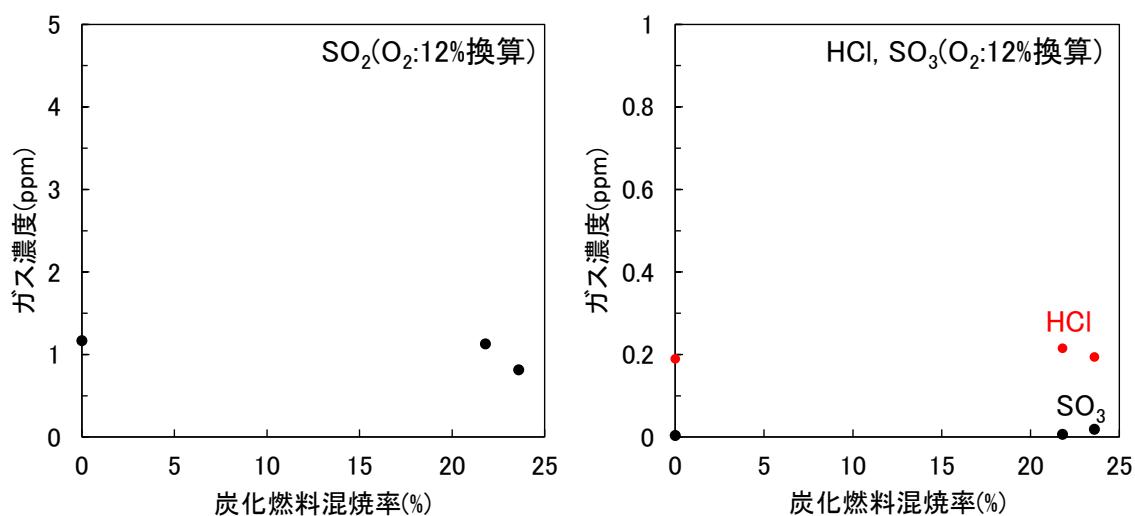


図 4.9.2-1 腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) 濃度の炭化燃料混焼率依存性

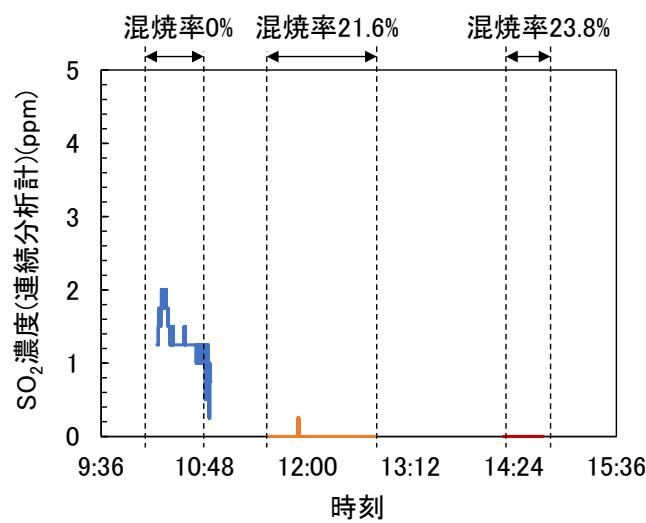


図 4.9.2-2 連続分析計による SO_2 ガス濃度の分析結果

4.10 まとめ

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重油と炭化燃料の混焼がプラント構成機器の腐食に与える影響について化学熱力学解析を用いて検討を行った。

昨年度の検討結果を受けて今年度は、(1)炭化燃料混焼によって腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) の生成量が抑制される機構の検討、(2)脱塩処理済み炭化燃料の使用可能性の検討、(3)製造コストを抑えることができる未脱塩処理炭化燃料が使用可能かの検討、(4)炭化燃料混焼に伴う HCl ガス濃度の増加が装置の腐食に与える影響の検討、(5)実炉試験での腐食検討を行った。

(1)炭化燃料混焼時の腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) 生成量抑制機構の検討と解析検証
炭化燃料混焼に伴い腐食性ガス濃度が低下する機構の検討と、DTF を用いた燃焼試験でのガス分析結果と解析結果を比較して解析の妥当性を検証した。

- (a) 炭化燃料混焼時の腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) 生成量抑制機構の検討
 - ・燃料中の硫黄分や塩素分が Ca や Na, K と硫酸塩、塩化物を形成してばいじん中に移行するため、炭化燃料を混焼した際に腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) 濃度が燃料中の硫黄分や塩素分から想定した濃度に比べて大幅に低くなつたと考えられる。
- (b) DTF を用いた燃焼試験でのガス分析による解析の妥当性検証
 - ・炭化燃料を混焼した際に腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) 濃度が燃料中の硫黄分や塩素分から想定した濃度に比べて大幅に低くなることが分かった。さらに、ばいじんの分析結果から、炉底灰中には炭化燃料にはない塩化物と硫酸塩がみられた。以上の結果は解析から推定した機構と一致しており、想定した機構は妥当であると考えられる。
 - ・重油模擬試料は高硫黄重油相当の組成であったため、有効 Ca 濃度を調整した炭化燃料と高硫黄重油を混焼することで、 SO_2 , SO_3 ガス濃度の増加を抑制でき、 HCl 濃度は燃料中の塩素分が全て HCl になると仮定した濃度に比べて低くできる可能性があることも分かった。

(2) 脱塩処理済み炭化燃料の使用可能性検討

- ・実機の燃焼を模擬したバーナ試験の燃焼フローを参考に化学熱力学解析を実施してバーナ試験でのガス分析結果と解析結果を比較した。
- ・ガス分析結果は、炭化燃料を混焼することで SO_2 , SO_3 濃度が低下し、 HCl 濃度は若干高くなった。この傾向は解析結果と一致しており、本検討の化学熱力学解析結果は妥当であると考えられる。
- ・炭化燃料の混焼によって SO_3 濃度が低下するという分析結果が得られたことから、解析での想定通り炭化燃料を混焼することで硫酸露点腐食のリスクは低減されると考えられる。ただし、炭化燃料の混焼によって HCl ガス濃度が増加しているため、もし煙道が硫酸露点温度以下になった場合には、塩酸と硫酸の混酸による腐食が発生する可能性がある。このため、炭化燃料混焼に伴う HCl ガス濃度の増加が装置の腐食に与える影響について検討する必要があり、(4)で検討を行った。

(3) 未脱塩処理炭化燃料の使用可能性検討

- ・未脱塩処理の炭化燃料が使用可能か確認するために、(2)と同様の検討を行った。
- ・検討結果、未脱塩処理炭化燃料を低硫黄重油に混焼した際の挙動は脱塩処理済みの炭化燃料と同様であり、アスファルトプラントにおいて未脱塩処理炭化燃料を重油の代替として適用できる可能性があると考えられた。ただし、脱塩処理済み炭化燃料混焼時と同様に、炭化燃料混焼に伴う HCl ガス濃度の増加が装置の腐食に与える影響について検討する必要がある。

(4) 炭化燃料混焼に伴う HCl ガス濃度の増加が装置の腐食に与える影響

- ・バーナ試験での検討の結果、重油に炭化燃料を混焼することで燃焼ガス中の HCl ガス濃度が若干高くなることが分かった。そこで、炭化燃料混焼によって生じた HCl ガス濃度の増加が装置の腐食に与える影響について検討した。
- ・煙道が硫酸露点以下となって煙道表面に硫酸が結露した場合には、硫酸中に HCl ガスの一部が溶解して塩酸と硫酸の混酸を形成すると推定され、その際の塩酸濃度は 1vol%程度と予測された。硫酸と塩酸の混酸中の塩酸濃度と腐食速度に関する文献から、塩酸濃度が 4vol%以下の混酸の腐食性は、硫酸のみの場合と同程度であると考えられるため、炭化燃料の混焼に伴う HCl ガス濃度の増加が腐食に与える影響は小さいと推定された。

(5) 実炉試験での腐食検討

- ・小型アスファルトプラントを用いた燃焼試験でガス分析を行い、実炉での炭化燃料に伴うプラント構成機器の腐食について検討した。
- ・炭化燃料混焼時の腐食性ガス (SO_2 , SO_3 , HCl) 濃度は、重油専焼時と同等以下であると推定された。

(1)～(5)の検討結果から、硫黄と反応する有効 Ca 量が硫黄含有量よりも多い炭化燃料を混焼した場合、プラント構成材料の腐食は、重油専焼時と同等以下となると考えられる。また、今回検討で用いた炭化燃料は上記の条件を満たしていると考えられる。

参考文献

- [1] https://www2.env.go.jp/library/opac/Holding_list?rgtn=225628
- [2] Nobuo Otsuka: Corrosion Science 50: P. 1627 - 1636: 2008
- [3] (社)化学工業会編: 化学工学便覧 改訂 6 版: P. 81: 1999
- [4] Byoung Ho Lee et.al.: Material Science Forum: Vol. 941, P. 1705-1709: 2018

第4章 アスファルト合材施行時の検討

アスファルトプラント(以下、AP)で炭化燃料を燃料として利用する場合、炭化燃料の未燃炭と燃焼灰がキルン内にて骨材に混入することが考えられる(図 1-1)。そこで、炭化燃料の未燃炭と燃焼灰がアスファルトに混入した際の、アスファルト合材の利用可能性を評価するために、炭化燃料の未燃炭と燃焼灰を添加したアスファルト合材の化学的性状、物理的性状試験を実施した。加えて、合材材料のフィラーの調査項目である化学的性状、物理的性状試験および、舗装試験による耐久性、溶出性調査を実施した結果を報告する。

本章では、AP にて炭化燃料を燃料として利用した際に、意図せず、未燃炭や燃焼灰が骨材及び合材に混ざることを、混入と表現する。一方で、試験用の合材に、意図的に未燃炭や燃焼灰を(再生)材料として混ぜることを、添加と表現する。

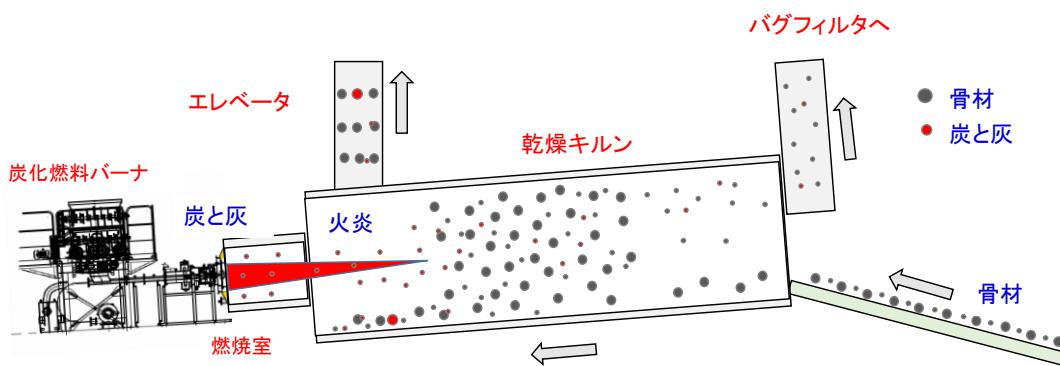


図 1-1 キルン内での炭化燃料と燃焼灰の混入と移動経路の模式図

1 燃焼灰および炭化燃料を添加したアスファルト合材

1.1 試験目的

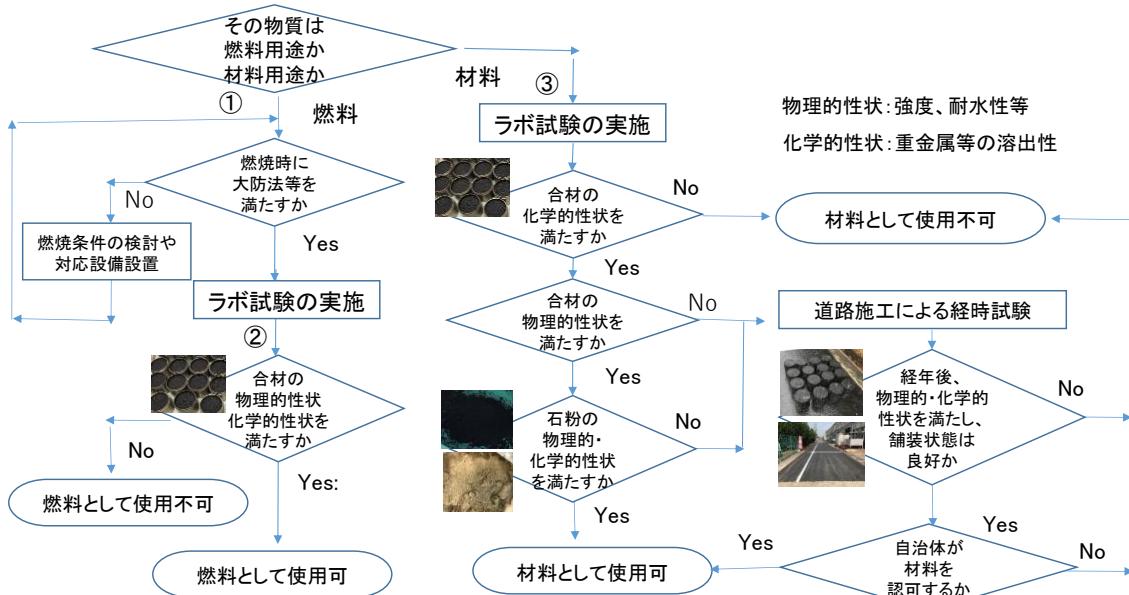
APにおいて、燃料を新規に採用する場合、燃料に対する法律として、プラントにおける燃焼排ガスが大気汚染防止法(以下、大防法)を満たす必要がある。大防法の排ガス規制値をクリアできれば、炭化燃料は法律上の燃料の要件を満たし、燃料としての取り扱えると判断できる。

しかし、炭化燃料混焼用バーナは、APにおける骨材乾燥に適用する際には直接加熱方式であり、炭化燃料の燃焼灰と未燃炭が骨材に混入する。その際、合材中の混入率は、表 1.1-1 に示すように、材料として添加した際のおよそ 1/10 倍である。ただし、炭化燃料は、グリセリンのような灰分の多い液体燃料よりも灰分率が高いため、合材中の混入率もグリセリン燃料と比べて、約 10 倍高い。炭化燃料を AP で利用するためには、未燃炭や燃焼灰が混入した場合にもアスファルト合材が規格と品質を満たす必要がある。そこで、本試験では、炭化燃料の未燃炭や燃焼灰を添加したアスファルト合材が、合材の物理的性状と化学的性状の基準をクリアすることで利用可能か確認する。過去に AP で採用された廃油燃料やグリセリン燃料は、これらの基準値を調査することで採用の判断がなされている。

表 1.1-1 各種燃料の灰分率と混入率および再生材料の添加率の比較

燃料	灰分率	混入率	出典・備考
	[%]	[%]	
A 重油	<0.05	0.0002	重油の JIS 規格 (JIS K 2205-1991 から抜粋)
副生グリセリン	5.6	0.029	三浦誠ら、『秋田県北地域における BDF 副生成グリセリンの活用 －コンクリート型枠離型剤の検討』技能と技術、2010 年 2 号 p23 ^[1]
炭化燃料	36.2	0.234～0.390	社内試験分析結果、混入率は A 重油混焼率 30-50%cal.b.を想定
燃焼灰(再生材料)	100	2～6	再生材料として石粉を代替する場合

また、炭化燃料や、下水汚泥、石炭等の燃焼灰をアスファルト合材の構成要素であるフィラーとしてみなす場合は、フィラー基準での規格を満たす必要がある。炭化燃料を安心して利用するために、再生材料の調査手続きに従って、炭化燃料を添加した合材およびフィラーを作成し、材料基準での試験を実施し、炭化燃料の利用可能性の評価を行った。(図 1.1-1)



*炭化燃料の燃料利用の観点からは、①②の試験は炭化燃料と炭化燃料を利用して製造された合材が燃料及び合材としての法的な基準を満たすかの利用可否に関する試験である。

③の試験結果は燃料用途の場合は法的な規制を受けないが、炭化燃料を添加した合材とフィラーの影響を調査することで、炭化燃料のAPにおける燃料としての適用可能性を評価するための付加的な試験として実施した。

図 1.1-1 燃料及び材料の利用可否の調査フロー

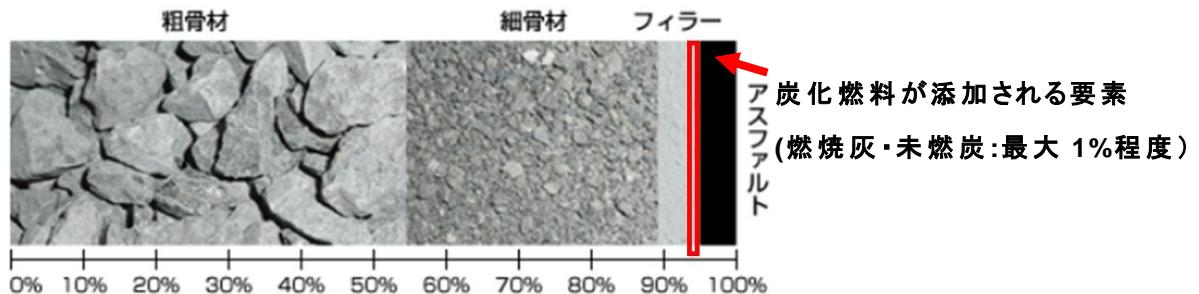


図 1.1-2 アスファルト合材の利用可否の構成要素について

1.2 炭化燃料を合材に添加した適用確認試験

合材の適用確認は、化学的性状と物理的性状の2種類がある。

化学的性状は、環境に対する安全性を判断するものであり、道路材料は野外において地面の上に敷かれることから、土壤基準の溶出試験と含有試験により適用可否が判断される。舗装試験はラボ試験で規格を満たさない限り、実施することはできない。

物理的性状については、合材の強度や耐水性等に関するものであり、供試体が規格を満たせば、道路舗装をした際に、アスファルト合材として利用できる材料であると判断できる。

1.2.1 試験方法

(1)燃焼灰と未燃炭の添加率

本試験での合材は、密粒度アスファルト混合物(13)となる骨材の規格を採用した(表 1.2.1-1)^[2]。この規格は、交通量が少ない一般道で利用されるグレードで、再生材料が広く適用されている規格である。炭化燃料の未燃炭と燃焼灰を骨材に対する添加割合は、混焼率と燃費から計算した^[3]。未燃炭と燃焼灰を添加した分だけ、石粉(炭酸カルシウム)の量を減らしフィラーの量を一定としている。ここで、炭化燃料燃焼灰の粒度分布から、炭化燃料はフィラーに対応する材料として取り扱った。

表 1.2.1-1 試験で作成した合材の配合割合

	材料名	配合割合[wt%]
骨材	6号碎石	36.0
	7号碎石	20.0
	碎砂	19.0
	細砂	19.0
	フィラー(石粉+炭化燃料燃焼灰)	6.0
	アスファルト	5.5

試験条件となる合材の配合組成は表 1.2.1-2 に示す 6 条件である。この試験条件は以下のように決定した。

本事業での炭化燃料混焼率の目標は 20% と設定しているが、AP で利用する場合のメリットを考えると、混焼率は 30~100% の範囲で使用することが望ましい。そこで、混焼率については 20, 50, 100% の 3 パターンとした。

燃焼率は、昨年度実施の燃焼試験結果である 90% と、実際の AP では燃焼率の低い炭化燃料が部分的に混入する可能性を考え、燃焼率 50% を模擬した条件の試験を実施した。燃焼灰は、燃焼試験後の炉内から採取された燃焼灰(燃焼率 100%)と燃焼前の炭化燃料(未燃炭、燃焼率 0 %)を、燃焼率が同様になる比率で加えることで、設定した燃焼率(燃焼率 90% および 50%)を模擬することとした。燃焼前の炭化燃料が解碎処理を行った微粒の状態で骨材に混入することを想定し、開口径 $600 \mu\text{m}$ のふるいで振るい、通過したものを使用した。ただし、炭化燃料の一部に粗粒が含まれた場合の影響も調べるために、炭化燃料を振るわずに添加したパターンと炭化燃料を添加しない(以下、無添加)の試験パターンも比較した。

表 1.2.1-2 合材ラボ試験の試験パターン

試験 No.	サンプル名	燃焼灰	炭化燃料	石粉	炭化燃料
		添加率 [wt%]	添加率 [wt%]	[wt%]	前処理条件
①	混 20% 燃 90% 模擬	0.133	0.041	5.826	解碎 600 μm ふるい下
②	混 20% 燃 50% 模擬	0.074	0.204	5.722	解碎 600 μm ふるい下
③	混 50% 燃 90% 模擬	0.333	0.102	5.565	解碎 600 μm ふるい下
④	混 100% 燃 90% 模擬	0.665	0.204	5.130	解碎 600 μm ふるい下
⑤	混 20% 燃 90% 模擬未ふるい	0.133	0.041	5.826	解碎未ふるい
⑥	無添加	0	0	6.000	-

※混焼率:混 燃焼率:燃と表記する。

(2)合材の試験方法

本試験は、炭化燃料燃焼灰の混入の影響を調査するための試験であり、試験用の供試体の製造方法および試験方法は表 1.2-3 の通りである。評価方法は、フィラーに炭化燃料燃焼灰を添加していない、石粉(炭酸カルシウム)のみで構成されている合材を基準とした相対比較と基準値を満たすかどうかで判断する。合材の溶出試験は、締固め前の段階で取り出し、骨材がアスファルトでコーティングされているが、骨材同士が密着し一体化していない供試体を用いて試験を行った。各試験の写真を図 1.2.1-1～1.2.1-3 に示す。

本試験において、炭化燃料燃焼灰を添加した合材の試験結果が規格値から外れていっても、基準となる無添加の合材の試験結果も規格値から外れていた場合は、無添加の合材と燃焼灰を添加した合材の分析値が誤差の範囲にあり、相対的に悪影響を与えていければ、炭化燃料の混入の影響はないと判断する。

表 1.2.1-3 合材ラボ試験における試験用供試体の製造方法と試験方法

試験項目	試験方法
アスファルト混合物製造	舗装調査・試験法便覧(B001&B003)
マーシャル安定度試験用供試体作成	舗装調査・試験法便覧(B001)
マーシャル安定度試験	舗装調査・試験法便覧(B001)
水浸マーシャル安定度試験	舗装調査・試験法便覧(B001)
ホイールトラッキング試験用供試体作成	舗装調査・試験法便覧(B003)
ホイールトラッキング試験	舗装調査・試験法便覧(B003)
水浸ホイールトラッキング試験	舗装調査・試験法便覧(B004)
第二種特定有害物質溶出試験	JIS K 0125 5.2



図 1.2.1-1 マーシャル安定度試験（左：供試体の 60℃での水浴、右：安定度試験機）



図 1.2.1-2 ホイールトラッキング試験（左：試験の様子、右：試験後の供試体）



図 1.2.1-3 水浸ホイールトラッキング試験（左：試験の様子、右：供試体の剥離の様子）

1.2.2 溶出試験結果

試験結果を表 1.2.2-1 に示す。表には合材と材料単体の結果について載せていく。合材の溶出試験ではすべての項目が検出下限以下であった。材料単体としての溶出試験では、炭化燃料燃焼灰は鉛と六価クロムの基準値を満たしていないが、合材にすることで全ての項目で検出限界以下となり、合材の製造過程で重金属を溶出しなくなったことが分かる。これは、骨材とフィラーにアスファルトがコーティングされ、溶出を防ぐためと考えられる。

表 1.2.2-1 ラボ試験合材供試体の溶出試験結果

項目＼試験 No.	合材供試体						材料単体		検出下限	環境基準
	① 混 20%	② 燃 90%	③ 混 20%	④ 燃 50%	⑤ 混 100%	⑥ 燃 90%	炭化 燃料	炭化 燃料		
	燃 90%	燃 50%	燃 90%	燃 90%	燃 90%	未ふるい	燃焼	未燃		
						加	灰	炭		
カドミウム mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	0.01
六価クロム mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.7	-	0.005	0.05
シアン mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	-	0.1	検出 されないこと
水銀 mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.0005	0.0005
セレン mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	0.01
鉛 mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.014	N.D.	0.001	0.01
ヒ素 mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	0.01
フッ素 mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.08	0.8
ホウ素 mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.9.	0.1	1

赤字は基準値を超えたもの

混 燃 率:混 燃 燃率:燃と表記する

1.2.3 物理性状試験結果

試験結果を表 1.2.3-1 に示す。ラボ試験の試験結果から、混焼率 20～100% の範囲で、アスファルト合材の供試体は、全ての試験項目で基準値を満たすことが確認された。

また、水浸マーシャル安定度試験および水浸ホイールトラッキング試験では、炭化燃料の燃焼灰および未燃炭を添加した合材が無添加の供試体の結果と変わらないことから、耐水性について問題がないことが確認された。同様にして、混焼率50%のパターン及び、未ふるいのパターンについても、全ての試験項目で基準値を満たし、耐水性に問題がないことが確認された。

項目＼試験 No.		①	②	③	④	⑤	⑥	環境 基準値
		混 20%	混 20%	混 50%	混 100%	混 20%	無	
		燃 90%	燃 50%	燃 90%	燃 90%	燃 90%	添 加	
理 論 密 度 (g/cm ³)		2.496	2.494	2.495	2.494	2.496	2.496	-
マ ラ	密度 (g/cm ³)	2.402	2.408	2.402	2.400	2.403	2.404	-
シ ル	標準 安定度 (kN)	10.30	10.37	9.92	9.91	9.68	10.27	4.90 以上
シ ル	フロー (1/100cm)	30	29	28	26	31	30	20-40
ヤ ル	水 浸 安定度 (kN)	2.407	2.402	2.403	2.402	2.406	2.405	-
試 験	残 留 安定度 (%)	98.7	93.7	96.4	93.2	94.6	90.6	75 以上
W T	標 準 動的 安定度 (回/mm)	2.407	2.406	2.403	2.406	2.403	2.404	-
試 験	水 浸 密 度 (g/cm ³)	2.408	2.405	2.405	2.408	2.405	2.404	-
試 験	剥離率 (%)	7.5	6.0	6.4	6.4	12.6	7.1	-

表 1.2.3-1 ラボ試験合材の物理的性状に関する試験結果

1.3 フィラー規格への適合検討

再生材料の適合性を確認するためには、再生材料を用いた合材が合材としての規格を満たすと共に、再生材料自身がフィラーとしての規格に適合している必要がある。そこで、炭化燃料の未燃炭と燃焼灰について、単体のみでフィラーとした場合と石粉に添加してフィラーとした場合で試験を行った。

1.3.1 試験方法

(1)燃焼灰と炭化燃料の添加率

フィラーの規格適合確認試験のパターンを表 1.3-1.1 に示す。本試験におけるフィラーの配合に関する混焼率と燃焼率の考え方は、1.2.1(1)の合材試験の場合と同様である。フィラー規格適合確認試験では、炭化燃料未燃炭および燃焼灰単体と、これらに石粉を添加したフィラーで試験を行った。本試験を行う理由は、AP で骨材に混入する炭化燃料の未燃炭と燃焼灰の比率は、混焼率 100% でも、フィラーの 15% 程度であるためである。試験用のフィラーは、混焼率 50%、100% で燃焼率 90% を模擬する条件で試験をした。加えて、混焼率 100% の結果を内挿値にするため、混焼率 100% の 2 倍にあたる添加率 30% でも試験を行った。今回は添加率 30% の条件で、解碎品を用いた試験も実施した。

表 1.3.1-1 フィラーの規格適合確認試験パターン

試験 No.	サンプル名	燃焼灰	未燃炭	石粉	炭化燃料 前処理条件	備考
		比率 [wt%]	比率 [wt%]	比率 [wt%]		
1	炭化燃料燃焼灰	100	0	0	-	
2	炭化燃料(解碎品)	0	100	0	解碎未ふるい	
3	炭化燃料(解碎ふるい品)	0	100	0	解碎 600 μ m ふるい下	
4	石粉(炭酸カルシウム)	0	0	100	-	1-3 参照用
5	混焼率 50% 燃焼率 90%模擬	5.545	1.702	92.754	解碎 600 μ m ふるい下	
6	混焼率 100% 燃焼率 90%模擬	11.029	3.404	85.507	解碎 600 μ m ふるい下	
7	添加率 30% 燃焼率 90%模擬	22.955	7.046	70	解碎 600 μ m ふるい下	
8	添加率 30% 燃焼率 90%未ふるい	22.955	7.046	70	解碎未ふるい	
9	石粉(炭酸カルシウム)	0	0	100	-	5-8 参照用
10	混焼率 20% 燃焼率 90%模擬	2.218	0.681	97.101	解碎 600 μ m ふるい下	水浸膨張試験 のみ
11	混焼率 30% 燃焼率 90%模擬	3.327	1.021	95.652	解碎 600 μ m ふるい下	水浸膨張試験 のみ
12	混焼率 40% 燃焼率 90%模擬	4.436	1.361	94.203	解碎 600 μ m ふるい下	水浸膨張試験 のみ
13	石粉(炭酸カルシウム)	0	0	100	-	10-12 参照用

(2)フィラーの試験方法

フィラーの規格に関する試験方法は、表 1.3.1-2 の通りである。試験の様子を図 1.3.1-1 に示す。

表 1.3.1-2 フィラーの試験における試験方法

試験項目	試験方法
石粉の粒度試験	舗装調査・試験法便覧(A009)
石粉の密度試験	舗装調査・試験法便覧(A010)
石粉のフロー試験	舗装調査・試験法便覧(A016)
石粉の吸水膨張率試験	舗装調査・試験法便覧(A013)
石粉の剥離抵抗性試験	舗装調査・試験法便覧(A014)
石粉の塑性指数試験	舗装調査・試験法便覧(A011)
第二種特定有害物質溶出量試験	JIS K 0125 5.2

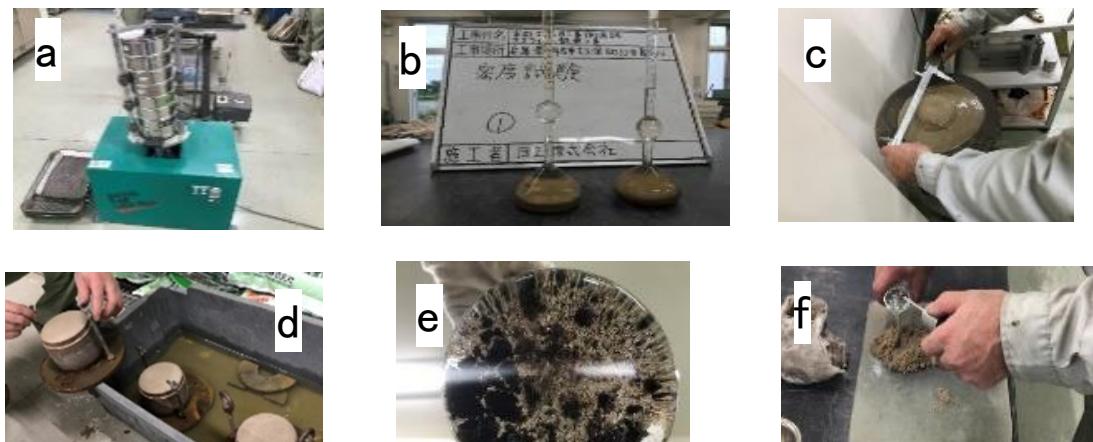


図 1.3.1-1 フィラー試験の様子 (a : 粒度測定、 b : 密度測定、 c : フロー値測定、 d : 吸水膨張試験、 e : 剥離抵抗性試験、 f : 塑性指数試験)

1.3.2 試験結果

(1)燃焼灰と炭化燃料単体の試験結果

炭化燃料燃焼灰と未燃炭の材料単体での試験結果を表 1.3.2-1 に示す。燃焼灰単体では、粒度、フロー値、吸水膨張率が基準を満たさなかった。未燃炭単体では、密度とフロー値が基準を満たさなかった。同様に、未ふるいの未燃炭単体では、粒度と密度フロー値が基準を満たさなかった。以上の結果から、炭化燃料未燃炭と燃焼灰は、単体としては、フィラーとしての規格を満たすことはできなかった。

表 1.3.2-1 フィラーの試験における燃焼灰と炭化燃料単体の試験結果

項目＼サンプル名		炭化燃料		炭化燃料		
		燃焼灰	未燃炭	未燃炭	無添加	基準値
			(未ふるい)			
粒度	1.18mm			100		
	600 μ m	100	100	98.8		100
	300 μ m	88.4	98.4	95.0	100	-
	150 μ m	62.1	90.8	85.1	98.2	90-100
		75 μ m	36.7	80.7	70.6	70-100
密度(g/cm^3)		2.735	1.748	1.951	2.723	2.60 以上
フロー値(%)		91.8	102.1	111.3	31.3	50 以下
吸水膨張率		3.6	0.9	1.8	0.6	3 以下
剥離抵抗		合格	合格	合格	合格	1/4 以下
PI(塑性指数)		NP	NP	NP	NP	4 以下

(2)燃焼灰と炭化燃料を添加したフィラーの試験結果

燃焼灰と炭化燃料を添加したフィラーの試験結果を表 1.3.2-2 に示す。試験結果から、混焼率 50%, 100% では、吸水膨張率を除いて、各項目の基準値を満たした。添加率 30% では粒度、密度、吸水膨張率で基準値を超えたことから、混焼率 100% までが密度と粒度の基準値を満たすための条件と考えられる。

表 1.3.2-2 燃焼灰と炭化燃料を添加したフィラーの試験結果

項目＼試験 No..		混焼率 50%	混焼率 100%	添加率 30%	⑧		基準値
					⑤	⑥	
					未ふるい		
粒度 質量通過百分率(%)	1.18mm	-	-	-	100.0	-	
	600 μ m	100.0	100.0	100.0	99.9	-	100
	300 μ m	99.4	98.8	97.1	97.4	100.0	-
	150 μ m	96.1	94.1	89.2	89.8	97.9	90-100
	75 μ m	85.6	84.0	77.0	77.6	88.2	70-100
密度(g/cm ³)		2.675	2.609	2.568	2.506	2.713	2.60 以上
フロー値(%)		33.7	34.5	39.3	39.7	32.1	50 以下
吸水膨張率		3.5	3.8	4.0	4.0	0.2	3 以下
剥離抵抗		合格	合格	合格	合格	合格	1/4 以下
PI(塑性指數)		NP	0.4	1.6	3.1	NP	4 以下

赤字は基準値を超えたもの

吸水膨張率が基準値を超えていたことから混焼率 40%以下について確認試験を行った。結果、混焼率 20%、30%、40%のパターンは全ての基準値を満たした（図 1.3.2-1）。従って、混焼率 40%までの炭化燃料と燃焼灰を添加したフィラーは、材料としての基準をすべて満たす。

混焼率 40%を超えたフィラーの耐水性に関しては、フィラーとしての規格値を満たしていないが、1.2.3 に記載の合材のラボ試験において、混焼率 100%の条件下で、水浸マーシャル安定度試験および水浸ホイールトラッキング試験をクリアしていることを加味すると、混焼率 100%まで合材としての耐水性に問題はないと考えられる。

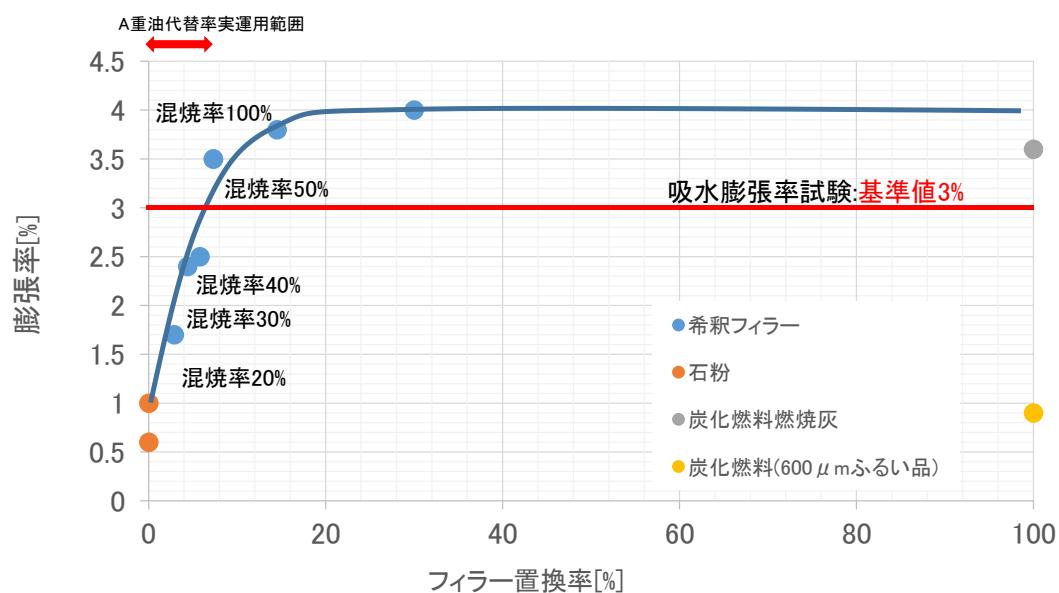


図 1.3.2-1 吸水膨張試験の結果

1.4 実地舗装試験

再生材料の適用可否の調査において、合材のラボ試験において物理的性状と化学的性状の規格を満たし、フィラーの規格を満たす場合は、再生材料として適用可能であると判定される。ただし、再生材料の場合、全ての規格を厳密に満たすことが難しい場合があるため、採用可否を判断するのに 2~3 年の経時試験を実施する。これは、一般的な道路は耐用年数 10 年で設計されているため、2~3 年は追跡調査を行わなければ、耐久性の判断がつかないためである。

先述のように炭化燃料の未燃炭及び燃焼灰は、合材としてのラボ試験では規格を満たしているが、燃焼灰単体としては、溶出試験およびフィラーの規格適合確認試験の規格を満たしていない。そこで、日工社内の道路の一部を実地舗装し、炭化燃料を添加した合材に問題がないか耐久性の追跡調査をすることにした。

1.4.1 舗装試験用合材の製造と施工

合材は、前田道路株式会社の神戸合材工場にて製造した。舗装試験の試験パターンは 1.2.1(1) の合材の試験パターンと同様である。ただし、AP で合材を製造する場合、バグダストが加わることを考慮し、石粉は 1 % 少ない量を計測して投入した。この時、炭化燃料未燃炭と燃焼灰および石粉の計量はプラントに備え付けられた量りでは、精度が出ないため、AP ではフィラーを除く骨材のみを計量し、フィラーは事前に重量を測定し小分けしたものを、手投入した(図 1.4.1-1)。

このように製造された試験用合材を、日工明石本社社内の道路に試験用区画を作り舗装した(図 1.4.1-2)。



図 1.4.1-1 AP での燃焼灰の手投入の様子



図 1.4.1-2 舗装後の試験用道路

1.4.2 舗装試験での試験方法

試験方法を表 1.4.2-1 に示す。本試験は経時試験であり、本年度は舗装直後と、舗装後 5 カ月後にサンプリングを行い、試験を行った。実地舗装試験においても 1.2.1(2) と同じく無添加の合材との相対比較で評価を行った。

表 1.4.2-1 舗装試験の試験項目と試験補法

試験項目	試験方法
マーシャル安定度試験	舗装調査・試験法便覧(B001)
水浸マーシャル安定度試験	舗装調査・試験法便覧(B001)
アスファルトの回収試験(アブソン法)	舗装調査・試験法便覧(G029)
アスファルト針入度試験	舗装調査・試験法便覧(A041)
混合物の抽出ふるい分け試験(遠心分離)	舗装調査・試験法便覧(G028)
第二種特定有害物質(重金属等)溶出試験	JISK 0125 5.2

1.4.3 試験結果

(1)舗装直後にサンプリングした供試体の試験結果

試験結果を表 1.4.3-1～1.4.3-4 に示す。試験の結果、舗装直後のマーシャル安定度試験では、全体的に値が低い傾向にあったが、基準となる無添加の供試体も同様に低いため、他の項目も含めて、炭化燃料と燃焼灰の添加の影響はないと判断できる。舗装直後の針入度の値は、時間経過後の試験での劣化具合を判断する基準となる。抽出ふるい分け試験、溶出試験の結果も基準値を満たした。目視確認で、道路の表面はわだちやひび割れがなく、問題は見られなかった。従って、道路舗装直後の炭化燃料の未燃炭や燃焼灰が添加された合材は、添加していない合材と同等であると考えられ、問題なく使用できる。

表 1.4.3-1 切取供試体によるマーシャル安定度試験結果（舗装直後）

項目＼試験 No.	① 混 20% 燃 90%	② 混 20% 燃 50%	③ 混 50% 燃 90%	④ 混 100% 燃 90%	⑤ 混 20% 燃 90% 未ふるい		⑥ 環境 無添加 基準値
					未ふるい	無添加 基準値	
理論密度(g/cm ³)	2.496	2.494	2.495	2.494	2.496	2.496	-
マ 標 密度(g/cm ³)	2.353	2.348	2.346	2.368	2.447	2.348	-
I 標 標準安定度(kN)	5.61	5.70	4.82	4.83	4.81	5.01	4.90 以上
シ 準 フロー(1/100cm)	31	37	34	37	29	36	20-40
ヤ 水 密度(g/cm ³)	2.35	2.348	2.345	2.362	2.346	2.347	-
ル 浸 水浸安定度(kN)	5.56	5.47	4.85	4.81	4.78	4.92	-
試 験 残留安定度(%)	99.1	96	100.6	99.6	99.4	98.2	75 以上

赤字は基準値を超えたもの 混焼率:混 燃焼率:燃と表記する

表 1.4.3-2 アスファルト混合物抽出ふるい分け結果（舗装直後）

項目＼試験 No.		①	②	③	④	⑤ 混 20%	⑥ 無添加	粒度範囲
		混 20%	混 20%	混 50%	混 100%	燃 90%		
抽出試験結果 (%)	アスファルト量(%)	5.65	5.45	5.61	5.25	5.59	5.16	-
	26.5	100	100	100	100	100	100	100
	19	100	100	100	100	100	100	100
	通	13.2	98.9	99.3	99.6	99.8	99.6	99.1
	過	4.75	67.8	63.2	68.9	63.6	66.1	64.6
	百	2.36	47.1	44.5	48.8	44.7	46.5	43.7
	分	0.6	26.7	25.6	27.8	25.4	25.9	24.1
	率	0.3	16.8	16.4	17.6	16.3	16.5	15.5
(%)		0.15	9.9	9.9	10.4	9.9	9.9	9.5
		0.075	7.3	7.4	7.6	7.3	7.4	7.2
								8-4

混焼率:混 燃焼率:燃と表記する

表 1.4.3-3 切取供試体の溶出試験結果（舗装直後）

項目＼試験 No.		①	②	③	④	⑤ 混 20%	⑥ 無添加	検出 下限	環境 基準値
		混 20%	混 20%	混 50%	混 100%	燃 90%			
カドミウム	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	0.01
六価クロム	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.005	0.05
シアノ	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	検出され ないこと
水銀	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.0005	0.0005
セレン	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	0.01
鉛	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	0.01
ヒ素	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	0.01
フッ素	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.08	0.8
ホウ素	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1	1

混焼率:混 燃焼率:燃と表記する

表 1.4.3-4 針入度試験の結果（舗装直後）

試験 No. / 模擬条件	針入度(1/10mm)
①混焼率 20%燃焼率 90%	53
②混焼率 20%燃焼率 50%	43
③混焼率 50%燃焼率 90%	40
④混焼率 100%燃焼率 90%	49
⑤混焼率 20%燃焼率 90%未ふるい	43
⑥無添加	43

(2)舗装後5ヵ月後にサンプリングした供試体の試験結果

試験結果を図 1.4.3-1 および表 1.4.3-5～1.4.3-8 に示す。試験の結果、舗装後 5 カ月経過後の供試体は、マーシャル安定度試験および水浸マーシャル安定度試験で基準を満足しており、合材の強度および耐水性に関しては問題がないことが分かった。針入度試験の結果は、舗装直後と差が見られた。しかし、アブソン法におけるアスファルトの回収および蒸留による誤差の範囲であり、文献では針入度が 20(1/10mm)以下で合材の強度が顕著に落ち、劣化したと判断されているため^{[5][6]}、劣化はしていないと考えられる。道路の表面はわだちやひび割れがなく、問題は見られなかった。抽出ふるい分け試験は、無添加の供試体の測定値と比較して差異はなく、添加の影響はないと考えられる。また、溶出試験の結果も基準値を満たしている。以上から、炭化燃料を添加した実地舗装における舗装後 5 カ月までの、耐久性(物理的強度、耐水性および環境に対する安全性の保持能力)が確認できた。



図 1.4.3-1 舗装後 5 カ月経過した試験用道路

表 1.4.3-5 切取供試体によるマーシャル安定度試験結果（舗装後 5 カ月）

項目＼試験 No.		①	②	③	④	⑤ 混 20%	⑥ 環境 無添加	基準値
		混 20%	混 20%	混 50%	混 100%	燃 90%		
		燃 90%	燃 50%	燃 90%	燃 90%	未ふるい		
理 論 密 度(g/cm ³)		2.496	2.494	2.495	2.494	2.496	2.496	-
マ	密度(g/cm ³)	2.389	2.423	2.416	2.409	2.411	2.405	-
I	標 準 安定度(kN)	6.02	7.07	6.63	6.24	5.68	5.15	4.90 以上
シ	フロ一(1/100cm)	31	36	34	33	35	36	20-40
ヤ	水 浸 密 度(g/cm ³)	2.389	2.433	2.416	2.411	2.413	2.405	-
ル	水 浸 安定度(kN)	5.67	6.64	6.27	5.58	5.43	4.60	-
試 験	残 留 安定度(%)	94.2	93.9	94.6	89.4	95.5	89.3	75 以上

混 燃 率:混 燃 燃率:燃と表記する

表 1.4.3-6 切取供試体の溶出試験結果（舗装後 5 カ月）

項目＼ 試験 No.		①	②	③	④	⑤ 混 20%	⑥ 検出 下限	環境 基準値
		混 20%	混 20%	混 50%	混 100%	燃 90%		
カドミウム	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001 0.01
六価クロム	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.005 0.05
シアン	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1 検出され ないこと
水銀	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.0005 0.0005
セレン	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001 0.01
鉛	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001 0.01
ヒ素	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001 0.01
フッ素	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.08 0.8
ホウ素	mg/L	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.1 1

混 燃 率:混 燃 燃率:燃と表記する

表 1.4.3-7 アスファルト混合物抽出ふるい分け効果（舗装後 5 カ月）

項目＼試験 No.		①	②	③	④	⑤ 混 20%	粒度範囲 無添加	
		混 20%	混 20%	混 50%	混 100%	燃 90%		
		燃 90%	燃 50%	燃 90%	燃 90%	未ふるい		
抽出試験結果	アスファルト量(%)	5.18	5.26	5.54	5.53	5.47	5.52	-
	通	26.5	100	100	100	100	100	100
	過	19	100	100	100	100	100	100
	百	13.2	100	99.6	99.6	100	99.7	100
	分	4.75	62.2	66.8	68.2	67.8	67.6	70-55
	率	2.36	44.1	47.3	49.4	47.5	47.6	50-35
	(%)	0.6	25.4	27.2	28.0	26.4	26.0	30-18
		0.3	16.4	17.8	18.0	17.2	16.8	21-10
		0.15	10.1	11.2	11.1	10.8	10.5	16-6
		0.075	7.6	8.7	8.5	8.3	8.1	8-4

赤字は基準値を超えたもの

混焼率:混 燃焼率:燃と表記する

表 1.4.3-8 針入度試験の結果（舗装後 5 カ月）

試験 No. / 模擬条件	針入度(1/10mm)
① 混焼率 20% 燃焼率 90%	38
② 混焼率 20% 燃焼率 50%	40
③ 混焼率 50% 燃焼率 90%	31
④ 混焼率 100% 燃焼率 90%	40
⑤ 混焼率 20% 燃焼率 90% 未ふるい	40
⑥ 無添加	40

1.5 まとめ

本年度及び昨年度のバーナ燃焼試験や本年度の小型 AP での燃焼試験の結果は、大防法の基準をクリアしているため、炭化燃料は燃料としての規格を満足している。ラボ試験の結果、合材の化学的性状と物理的性状の基準値を満たしていることが確認できた。従って、炭化燃料は燃料としての法律上の要件を満たしていることが確認された。

また、材料基準の調査を行ったところ、フィラーの物理的性状は、混焼率 40% 相当の混入率まで、全ての規格値を満たしている。混焼率 40% を超えると吸水膨張率試験のみ、規格を満足しないが、混焼率 100% 相当の試験条件で、ラボ試験の水浸マーシャル安定度試験と水浸ホイールトラッキング試験および、舗装試験での水浸マーシャル安定度試験をクリアしており、合材にした場合の耐水性に関しては問題ないと考えられる。舗装試験の結果、舗装後 5 カ月経過後も、路面性状は良好であり、マーシャル安定度試験、水浸マーシャル安定度試験、溶出試験の規格値を満足していたことから、現時点では耐久性にも問題がない結果となっている。

以上より、炭化燃料は、AP における燃料としての法的な基準を満たし、試験的に製造された炭化燃料の未燃炭と燃焼灰を添加した合材は、混焼率 100% に相当する燃焼灰の添加率であっても、耐久性、物理的強度、耐水性、環境安全性に問題はみられず、炭化燃料の AP における燃料としての利用可能性は高いと考えられる。

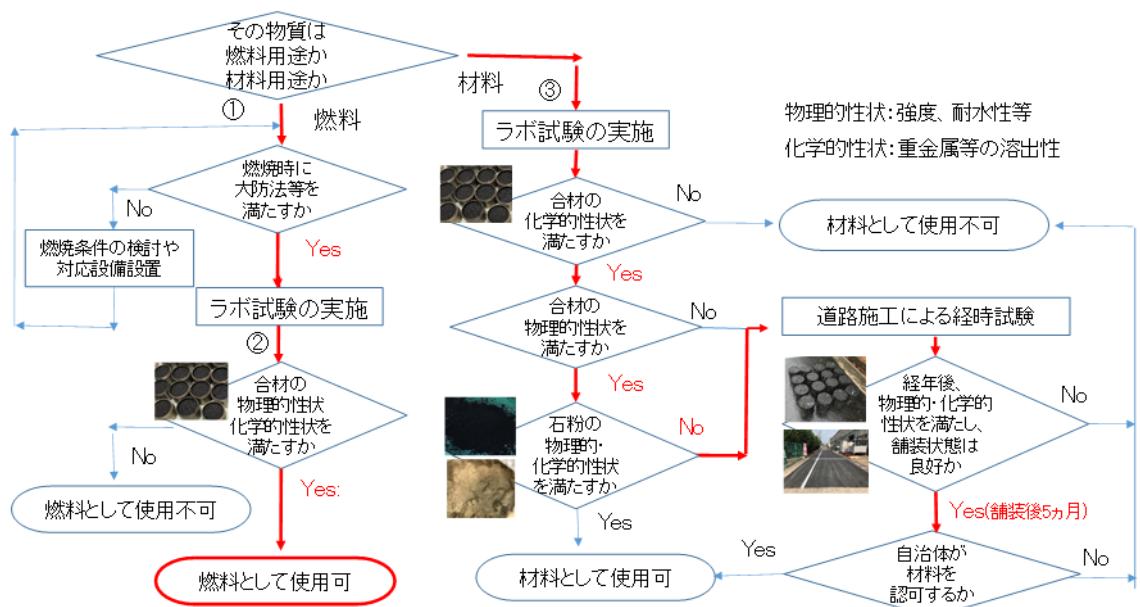


図 1.5-1 炭化燃料の燃料及び材料利用可否調査フローによる調査結果

参考文献

- [1] 三浦誠ら、『コンクリート型枠離型剤の検討』技能と技術、2010年2号 p23
- [2] 『炭化燃料化技術を活用した中小廃棄物処理における回収評価事業成果報告書(平成31年度)』、
- [3] 『アスファルト舗装要綱』、(社)日本道路協会
- [4] 『舗装調査・試験法便覧』、(社)日本道路協会
- [5] 西崎倒ら、『劣化アスファルト舗装の再利用に関する研究(2)』、土木研究所成果報告書、2009年
- [6] 本間圭一ら『アスファルト及び混合物の劣化性状に関する2,3の実験』、第13回北陸道路舗装会議技報集、2015年

第5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、③)の CO₂ 排出量試算

本事業では、ごみ炭化燃料化施設で得られる炭化燃料を提案システム①は施設内利用+アスファルトプラント、提案システム②は施設内利用+ごみ処理施設、提案③は施設内利用+発電所で利用することで、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、③)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 に示す。試算には、炭化燃料運搬時の CO₂ 排出量増減も考慮した。)

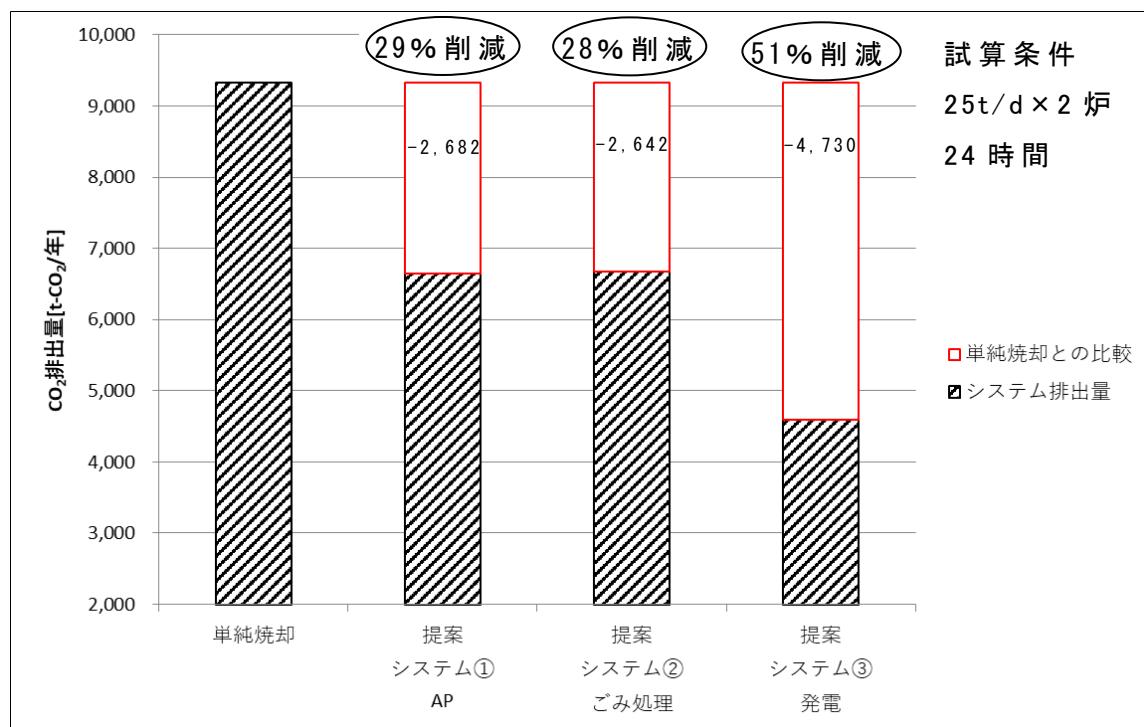


図 1-1 提案システムにおける CO₂ 排出量比較

上記の結果より、提案システム①では、-2,682 t-CO₂/年の 29% 削減となり、提案システム②では、-2,642 t-CO₂/年の 28% 削減、提案システム③では、-4,730 t-CO₂/年の 51% 削減となり本事業が有効であることがわかる。

表 1-1 単純焼却と炭化燃料の利用による CO₂排出量比較

炭化燃料の利用によるCO₂削減量（本事業）

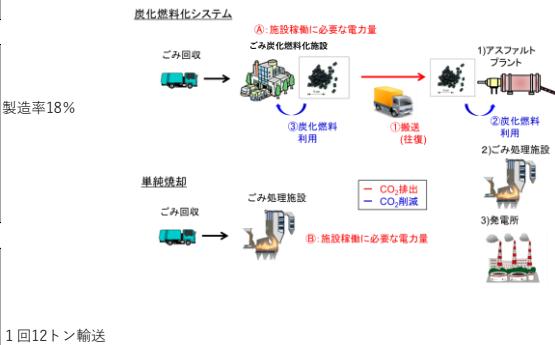
処理条件 (焼却、ごみ炭化燃料化施設共通)	ごみ処理量 50 t/日
	年間運転日数 280 日

焼却施設	必要電力量 513 kWh/t
	プラスチック割合 15 %

ごみ炭化燃料化施設	年間運転日数 280 日
	ごみ処理量 50 t/日
	炭化燃料製造量 9.0 t/日
	内、施設内利用 1.2 t/日
	所外利用 7.8 t/日
	ごみ炭化燃料化施設必要電力量 440 kWh/t
	ごみ低質時灯油使用 18.5 L/ごみt

利用施設への輸送	普通貨物燃費（軽油 5.8 km/L）
	走行距離 50 km（往復）
	軽油CO ₂ 排出係数 2.58 t-CO ₂ /kL
	輸送回数 0.65 回/日

H21年度施設台帳より



1回12トン輸送

物質収支（1日あたり）

図記号	○:排出 ▲:削減	焼却	1)AP利用	2)ごみ処理	3)発電所	CO ₂ 排出係数	
						プラスチック焼却	0.488 t-CO ₂ /MWh
焼却	○ プラスチック焼却量t/日 B ○ 焚却消費電力 MWh/日	7.5 25.65	7.5	7.5	7.5	2.77 t-CO ₂ /t	
利用施設への輸送	① ○ 軽油使用量 kL/日		0.0056	0.0056	0.0056	2.58 t-CO ₂ /kL	
ごみ炭化燃料化施設	A ○ 必要電力量 MWh/日 炭化物1.2t/日利用		22.0 0.41	22.0 0.41	22.0 0.41	電力 灯油	0.488 t-CO ₂ /MWh 2.49 t-CO ₂ /kL
利用施設削減量（炭化物7.8t/日）	② ▲ 石炭 t/日 ② ▲ A重油 kL/日 ② ▲ 灯油 kL/日			4.35 2.51 2.67	石炭 A重油 灯油	3.24 t-CO ₂ /t 2.71 t-CO ₂ /kL 2.49 t-CO ₂ /kL	5,375 kcal/kg 9,340 kcal/L 8,767 kcal/L
					炭化物		3,000 kcal/kg

CO₂排出量 t-CO₂/日

図記号	○:排出 ▲:削減	焼却施設	20.78 12.52			CO ₂ 排出係数	
						2.77 t-CO ₂ /t 0.488 t-CO ₂ /MWh	5,375 kcal/kg 9,340 kcal/L 8,767 kcal/L 3,000 kcal/kg
利用施設への輸送	① ○ 軽油使用量 kL/日			0.014	0.014	0.014	
ごみ炭化燃料化施設	A ○ 必要電力量 MWh/日 炭化物1.2t/日利用			10.74 1.02	10.74 1.02	10.74 1.02	
利用施設	② ▲ 石炭 t/日 炭化物7.8t/日利用					14.1	
	② ▲ A重油 kL/日			6.8			
	② ▲ 灯油 kL/日			6.6			

提案システム導入によるメリット

排出計 t-CO ₂ /日	33.29	23.7	23.9	16.4
削減量 t-CO ₂ /日		9.6	9.4	16.9
削減率		29%	28%	51%

第6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、利用先として提案①アスファルトプラント(AP)、提案②ごみ処理施設、提案③発電所への展開が考えられる。

環境省の一般廃棄物処理事業実態調査(平成30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、25km以内のAP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。ここでは、利用量のバランスから炭化1施設に対しAPの利用先は2施設として試算した。試算より、炭化燃料の利用により燃料削減費が年間約40百万円程度(第3章参照)であり、20年間で670百万円程度利用メリットがあり、コスト回収が2年程度であることが示唆された。水平展開後の最終目標(2030年)としてのCO₂削減見込み量は、147,510t-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、158,000円/t-CO₂。提案事業の費用対効果は、535t-CO₂/百万円となる。

次に提案②として、25km以内のごみ処理施設に納入した場合の試算を表1-2に示す。ごみ処理施設の利用施設数としては、ごみ炭化燃料化施設からの炭化燃料供給量と2000kW発電能力を持つごみ処理施設の起動用、通常運転時に最大で発電するための使用量がバランスするために炭化1施設に対し利用先は1施設2炉分として試算する。試算より、炭化燃料の利用により燃料削減費が年間11百万円程度(第2章参照)であり、20年間で185百万円程度コストメリットがあり、コスト回収が1.2年程度であることがわかった。水平展開後の最終目標(2030年)としてのCO₂削減見込み量は、145,310t-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、158,000円/t-CO₂。提案事業の費用対効果は、527t-CO₂/百万円となる。

最後に提案③として、西海市でも実績のある発電所に納入した場合の試算を表1-2に示す。発電所の利用施設としては、炭化1施設に対し利用先を1施設として試算する。ここで、発電所の利用施設数としては、複数のごみ炭化燃料化施設から1つの発電所に最大30施設のごみ炭化燃料化施設から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。試算より、炭化燃料の利用により年間約76万円程度のコストメリットがあることがわかった。水平展開後の最終目標(2030年)としてのCO₂削減見込み量は、260,150t-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、発電所利用の場合は、西海市実績をもとに既設のバイオマス利用設備を流用可能であるとして試算を行ったためごみ炭化燃料化施設のみのコストとなり88,000円/t-CO₂。提

案事業の費用対効果は、943t-CO₂/百万円となる。

上記より、本事業における提案システムは、事業後の横展開に期待ができる提案となっていることがわかる。

表 1-1 全体システムにおける CO₂削減量
(提案①施設内利用+AP)

	事業目標	最終目標 (水平展開後)
年度	2021 年度	2030 年度
ごみ炭化燃料化施設	1 施設 × 1 炉	55 施設
アスファルトプラント (AP)	2 施設	110 施設
搬送距離	25km	25km
CO ₂ 削減効果 t-CO ₂ /年 (a)	2,682	147,510,
AP バーナ導入コスト 百万円/20年 (b)	119	13,090
AP 利用メリット (千円)20年	669,680	—
コスト回収年	1.9	—
CO ₂ 削減コスト 千円/t-CO ₂ (=(b+b')/a × 20)	158	1,855
提案事業総事業費 百万円/3年 (d)	276	—
提案事業の費用対効果 t-CO ₂ /百万円 (a/d)	—	535

表 1-2 全体システムにおける CO₂削減量

(提案②施設内利用+ごみ処理施設)

	事業目標	最終目標 (水平展開後)
年度	2021 年度	2030 年度
ごみ炭化燃料化施設	1 施設 × 1 炉	55 施設
ごみ処理施設	1 施設 × 2 炉	55 施設 × 2 炉
搬送距離	25km	25km
CO ₂ 削減効果 t-CO ₂ /年 (a)	2,642	145,310
バーナ導入コスト 百万円/20年 (b)	33	1,815
ごみ処理施設メリット (千円)20年	185,007	—
コスト回収年	1.2	—
CO ₂ 削減コスト 千円/t-CO ₂ (=(b+b')/a × 20)	158	1,855
提案事業総事業費 百万円/3年 (d)	276	—
提案事業の費用対効果 t-CO ₂ /百万円 (a/d)	—	527

表 1-3 全体システムにおける CO₂削減量

(提案③施設内利用+発電所)

	事業目標	最終目標 (水平展開後)
年度	2021 年度	2030 年度
ごみ炭化燃料化施設	1 施設 × 1 炉	55 施設
発電所	1 施設	※ 55 施設
搬送距離	25km	25km
CO ₂ 削減効果 t-CO ₂ /年 (a)	4,730	260,150
バーナ導入コスト 百万円/20年 (b)	0 既設利用のため	0
発電所メリット 千円 20年	151,200	-
コスト回収年	0	-
ごみ炭化燃料化施設コ スト 百万円/20年 (b') <施設 1/3 補助>	8,333	458,315
CO ₂ 削減コスト 千円/t-CO ₂ (=(b+b')/a × 20)	88	88
提案事業総事業費 百万円/3年 (d)	276	-
提案事業の費用対効果 t-CO ₂ /百万円 (a/d)	-	943

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30年度)について

第7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)ごみ炭化燃料化施設の高性能化

a. 炭化燃料化施設を模擬した炭化燃料燃焼試験

目標：炭化燃料化施設において炭化燃料が 20% 混焼利用可能であることを確認する。

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 90% 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低質ごみ時に化石燃料の利用を 20% 以上削減するという開発目標達成が可能であることを確認した。

上記により、ごみ炭化燃料化施設において炭化燃料が有効に利用できることを確認した。炭化燃料化システムとしての CO₂ 削減メリット等は全体システムとして示す。

(2) 炭化燃料利用先の拡大

a. ごみ処理施設実証炉における利用検討

目標：ごみ処理施設において炭化燃料が 20% 混焼利用可能であることを確認する。

成果：<吹込バーナ利用>

起動時の利用において目標である炭化燃料 20% 混焼では、燃焼率 90% 以上で排ガス特性として、排ガス規制値内の利用が可能であることを確認した。

通常運転時利用において、ごみ質変動による最大発電量出力のための補助燃料としても利用可能であることを確認した。

<直投ノズル利用>

起動時の利用において、目標である炭化燃料 20% 混焼において燃焼率 90% 以上で排ガス特性として、排ガス規制値内の利用が可能であることを確認した。

b.その他利用先：アスファルトプラント(AP)における利用検討

目標：アスファルトプラントにおいて炭化燃料が 20% 混焼利用可能であることを確認する。

成果：<吹込バーナ利用>

通常運転時利用において目標である炭化燃料 20% 混焼では、燃焼率 90% 以上で排ガス特性として、排ガス規制値内での利用が可能である。さらに、混焼率を 40% 混焼に上げても、混焼利用は可能であることを確認した。

目標：重油－炭化燃料混焼腐食解析・試験確認を行い、腐食が促進されないことを確認する。

成果：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・試験確認を行った。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炭化燃料が利用できることが示唆された。

c.アスファルト施工時の検討

目標：炭化燃料をアスファルトプラントで利用した際に燃焼灰がアスファルトに混入した合材への影響ないことを確認する。

成果：1) 炭化燃料 + 燃焼灰合材のラボ試験

強度試験等の物理性状試験で基準値をクリアするとともに、溶出試験でも基準値をクリアした。

2) 炭化燃料灰含有フィラーとしてのラボ試験

混焼率 40% 以下で強度試験等の物理性状試験で基準値をクリアした。

3) 実地舗装試験

舗装直後および舗装後 5 カ月経過したサンプルにて強度試験等の物理性状試験で基準値をクリアするとともに、溶出試験でも基準値をクリアした。

上記より、利用先のターゲットであるごみ処理施設、アスファルトプラントで炭化燃料が利用できることを確認した。炭化燃料化システムとしての CO₂ 削減メリット等は全体システムとして示す。

(3) システム全体

目標：ごみ炭化燃料化施設と燃料利用先を組み合せた全体システムにおいて LCC の低減と CO₂ 削減試算を行い、有効性の判断を行う。

成果：炭化燃料化施設の処理規模を 50 トン／日として、提案システムを適用した場合、炭化燃料の分散利用が期待できるアスファルトプラントとの連携では、投資回収年が 1.9 年で CO₂ 排出量を従来の単純焼却よりも年間 2,682t-CO₂ 削減できることを確認した。

また、ごみ処理の広域処理モデルとなるごみ処理施設との連携では、投資回収年が 1.2 年で CO₂ 排出量を従来の単純焼却よりも年間 2,642t-CO₂ 削減できることを確認した。

大規模利用が可能な火力発電所との連携では、西海市の実績をもとにバイオマス利用設備の既存施設が利用可能として、投資が不要で CO₂ 排出量を従来の単純焼却よりも年間 4,730t-CO₂ 削減できることが試算された。

これらの結果より事業終了後、RDF 施設と同等の伸び率で中小規模の 10% の施設に水平展開された場合、2030 年度までに全国 55 施設に炭化燃料化施設が普及するとして各連携先の CO₂ 削減量を試算すると、各施設が炭化燃料を利用することで年間 148kt-CO₂ (アスファルトプラント利用)、145kt-CO₂ (ごみ処理施設利用)、260kt-CO₂ (発電所利用) 削減が可能であることが試算され、連携による効果が高いシステムであることを確認した。

第8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	
		10/13	2/22
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	○	○
佐伯 謙作	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	○	○
山下 晋仁	前田道路株式会社 課長	○	○
高橋 知	前田道路株式会社 課長代理	○	○
田中 嘉彦	環境省 環境再生・資源循環局 課長補佐	○	○
村上 栄司	環境省 環境再生・資源循環局 専門員	○	○

内田 博之	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 環境プラント総括部 総括部長	×	○
尾藤 俊文	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 環境プラント総括部 環境プラント部 部長	○	○
碓永 純也	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 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)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 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)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 環境プラント総括部 環境プラント部 基幹職	×	○
清水 正也	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 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)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 環境プラント総括部 環境プラント部 装置技術課 基幹職	○	○
利弘 淳	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 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)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 環境プラント総括部 環境プラント部 装置技術課	○	○
福永 史樹	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 環境プラント総括部 環境プラント部 装置技術課	○	○
小澤 奎太	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 環境プラント総括部 環境プラント部 装置技術課	○	○
戸田 信一	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 技術企画部 解析技術課 基幹職	○	○
五十嵐 実	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 技術企画部 解析技術課 基幹職	○	○
小川 祐司	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 技術企画部 解析技術課	○	×
森永 友一郎	川崎重工業(株)エルギー・環境プラントカンパニー プラントティビジョン 技術企画部 解析技術課	○	○

下村 育生	川崎重工業(株)技術開発本部 技術研究所 技術研究材料究部 研究二課	○	×
高田 康寛	川崎重工業(株)技術開発本部 技術研究所 技術研究材料究部 研究二課	○	○
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 プラントティビーション 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 プラントティビーション 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	
		10/13	2/22
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 理事	○	○
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統括営業部 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3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 謙	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	○	○
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	×	○

表 2 検証委員会開催実績

開催日		開催場所	内容
第 5 回	令和 2 年 10 月 13 日	川崎重工業株式会社 播磨工場 会議室	・事業内容紹介 ・事業実施経過報告 ・討議
第 6 回	令和 3 年 2 月 22 日	WEB 開催	・事業実施報告 ・討議

第9章 令和2年度 シンポジウムへの協力

環境省が別途実施する「令和2年度第3回シンポジウム地域循環共生圈形成における廃棄物エネルギー利用施設の果たす役割と可能性」に係るヒアリングに参加した（表1）

表1 令和2年度 シンポジウム参加実績

名称	開催日	開催場所	主催
令和2年度第3回シンポジウム 地域循環共生圈形成における廃棄物エネルギー利用施設の果たす役割と可能性	令和2年 3月3日	WEB開催	環境省、 廃棄物資源循環学会

