

平成 30 年度 環境省委託業務

平成 30 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

平成 3 1 年 3 月

川崎重工業株式会社

日工株式会社

要約

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

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

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

そこで本事業では、ごみ炭化燃料化技術（以下、炭化技術）を活用することによりエネルギー回収を図ることを目的に実施する。

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

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

といった課題のため、それ以降新たな施設は建設されていなかった。

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

本施設の運営を通じて、今後炭化システムの普及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。

<炭化システム普及のために求められる点>

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

と位置付けて取り組む。本事業では、CO₂排出削減に寄与することが目的であることから、上記(1)(2)を実施し、(3)は本事業の範囲外で実施する。

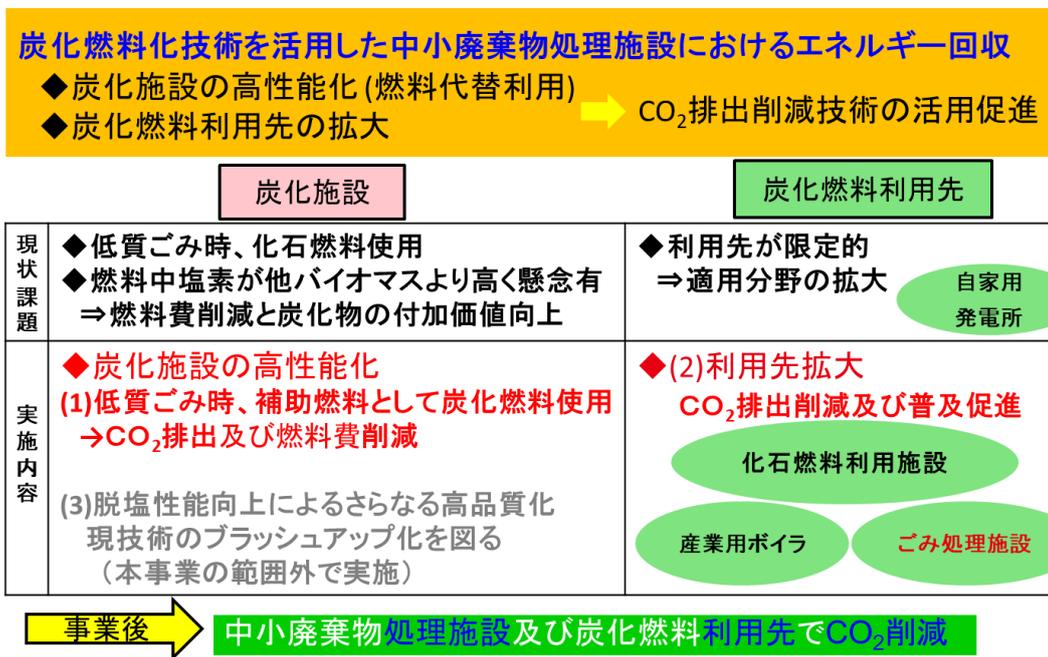


図 本事業の概要

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

＜技術課題＞

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

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

＜実施概要＞

(1)炭化施設の高性能化

炭化施設の燃焼炉における炭化燃料助燃利用の燃焼解析及び試験設備での燃焼試験

(2)炭化燃料利用先の拡大

ごみ処理施設の焼却炉内における炭化燃料の燃焼シミュレーション、試験設備での燃焼試験及びごみ処理施設での実証試験

以上の炭化施設および炭化燃料の利用先での有効利用の実証を示す取組みを3年間で達成するため、平成30年度取組んだ成果の概要を以下に示す。

(1)炭化施設の高性能化

- a. 炭化燃料の燃料特性の把握

- ・炭化燃料の燃焼特性として、発電所等で使用されている亜瀝青炭と同等の反応速度であり、燃料として利用可能であることを示した。
- ・施設内の炭化燃料採取が可能な 3 か所（造粒前、粉碎後、選別後）における炭化燃料の性状と燃焼特性を示した。燃料の燃焼特性として、温度場の違いによる燃焼率が大きく違い、燃焼炉と同等の 850℃場では、650℃場や 350℃場と比較し、燃焼率が大きく改善されることを示した。

b. 燃料炉における 3 か所の炭化燃料の燃焼シミュレーション

- ・3 か所の炭化燃料を西海市炭化センターの燃焼炉に投入した際の燃焼シミュレーション結果より、燃料率がそれぞれ 99.5%、99.0%、97.0%であり、どの採取場所の炭化燃料でも施設内で利用可能であることを示した。

(2) 炭化燃料利用先の拡大

a. 炭化燃料の燃焼特性の把握

- ・上記(1)の特性とともに利用先での利用形態として有力な造粒前の炭化燃料の燃焼特性として、水分を蒸発させてから燃焼させる必要があり、水分が 20%程度の場合、100 μ m 程度の粒径にする必要があることを示した。
- ・100 μ m 程度の粒径を得る方法として最適な粉碎機の試験を実施し、粉碎可能であることを示した。

b. ストーカ炉における炭化燃料の燃焼シミュレーション

- ・造粒前の炭化燃料を粉碎して、新設プラントに導入を検討している混焼バーナ(油と炭化燃料を噴射しミクシングチャンバー内で混合させて乾燥、燃焼させるバーナ)で燃焼室にて燃焼した場合の燃焼シミュレーション結果より燃焼率が 93.4%であり、利用可能であることを示した
- ・播磨町塵芥処理センターのストーカ炉に投入した際の燃料シミュレーション結果より、既設プラントに導入を検討している吹込バーナ(既設油バーナの火炎に炭化燃料用バーナより炭化燃料を噴霧して、混焼させるバーナ)や直投ノズル(既設油バーナの火炎に炭化燃料を直上から落下させて混焼させるノズル)で、それぞれ 93.2%、92.2%の燃焼率があり、利用可能であることを示した。

c. 炭化燃料投入ホッパ供給機と炭化燃料用バーナの製作・試験

- ・炭化燃料投入ホッパおよび混焼バーナ、吹込バーナを製作し、搬送・噴霧試験を行った。
- ・炭化燃料投入ホッパでは、水分が高い燃料であるため長時間運転で供

給不良が発生し、改良が必要となった。

- ・混焼バーナでは、噴霧角度を解析結果上必要とされる 70° にするために旋回エア等を投入することにより、達成できることを示した。
- ・吹込バーナでは、旋回羽根+旋回エアにより理想的な噴霧ができることを示した。

d.実証炉への開発バーナ設置検討

- ・実証試験を予定している播磨町塵芥処理センターにおける供給投入ホッパや混焼・吹込の 2 種類のバーナと直投ノズルの設置検討を行い、供給機の最適な大きさや設置のための搬送配管の長さバーナの大きさを決定し、それをもとに設計・試験を実施した。
- ・播磨町塵芥処理センターにおける起動状況を確認し、実証試験時の投入タイミングを決定した。

(3)システム全体

ごみ処理 50t/日の施設規模の場合、提案システムを適用すれば、

- a.CO₂ 排出量を従来の単純焼却システムよりも年間 4,166t-CO₂ 削減できることが試算された。
- b.炭化燃料を化石燃料の代替燃料として 20 年間各施設で利用した場合
 - ・施設内利用において現状の 30%代替利用で 1 億 1 千 8 百万円削減
 - ・発電所等の利用において 1 億 3 千万円削減
 - ・ごみ処理施設において現状の 30%代替利用で 1 千 5 百万円削減できることが試算された。
- c.これらの結果により、事業終了後も水平展開され 2030 年度までに全国 55 施設 (RDF 施設同等) に炭化燃料化施設が普及し、各施設が炭化燃料を利用することで年間 229,130t-CO₂ 削減が可能であることが試算された

Summary

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

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

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

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

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

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

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

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

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

<Requirements for the promotion of carbonization systems>

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

number of users of carbonized fuels

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

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

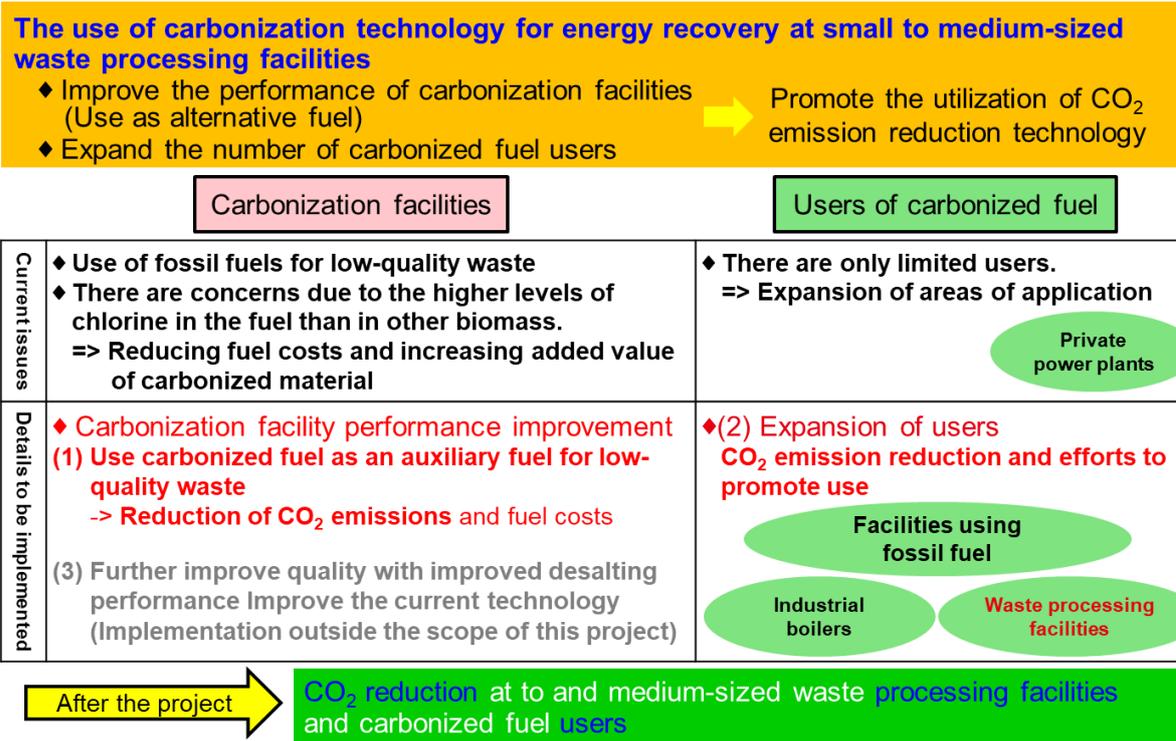


Figure - Outline of this project

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

<Technical issues>

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

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

<Implementation outline>

- (1) Improvement of carbonization facility performance

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

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

(2) Expansion of carbonized fuel use

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

The following is an outline of the results achieved in FY2018 in activities for the achievement of the measures above to demonstrate the effective utilization of carbonization facilities and carbonized fuel within three years.

(1) Improvement of carbonization facility performance

a. Understanding the fuel characteristics of carbonized fuels

- We demonstrated that the combustion characteristics of carbonized fuel mean that its reaction rate is equivalent to that of the sub-bituminous coal used in power plants, etc., and it can be used as a fuel.
- We demonstrated the properties and combustion characteristics of carbonized fuel from the three points where the sampling of the carbonized fuel is possible in the facility (before granulation, after crushing, and after sorting). As a combustion characteristic of the fuel, we demonstrated that there are great differences in the combustion rate due to differences in the temperature field and that, in comparison with the combustion rate in 650°C and 350°C fields, the combustion rate is greatly improved in an 850°C field, which is equivalent to that in a combustion furnace.

b. Combustion simulation for carbonized fuel from three locations in the fuel furnace

- We conducted a combustion simulation for the use of the three carbonized fuel samples in the combustion furnace of the Saikai City Carbonization Center. From the results, the fuel rates were 99.5%, 99.0%, and 97.0%, respectively, indicating that carbonized fuel from any of the sampling points can be used in the facility.

(2) Expansion of carbonized fuel use

a. Understanding the combustion characteristics of carbonized fuels

- In addition to the characteristics described in (1) above, we also examined the combustion characteristics of carbonized fuel before granulation, which is a likely candidate for the form to be used by a user. It is necessary to vaporize the water content before the combustion and we demonstrated that when the water content is about 20%, the particle size must be about 100 μm.
- We implemented testing on a grinding machine as the optimal method for obtaining a particle size of about 100 μm and we showed that grinding was possible.

b. Combustion simulation for carbonized fuel in a stoker furnace

- We conducted a combustion simulation for a mixed combustion burner (a burner that injects

oil and carbonized fuel and mixes it in a mixing chamber for drying and burning), which is under consideration for introduction to newly constructed plants. In the results, we showed that if carbonized fuel before granulation is pulverized and then combusted in the combustion chamber of a mixed combustion burner, then the combustion rate is 93.4% and therefore the use is possible.

- We conducted fuel simulations for the use of carbonized fuel in the stoker furnace of the Harima Town Waste Processing Center, both for an injection burner (a burner in which carbonized fuel is sprayed onto the flame of an existing oil burner from a carbonized fuel burner for mixed combustion) and a direct injection nozzle (a nozzle that drops carbonized fuel from directly above the existing oil burner flame for mixed combustion). These methods are both under consideration for introduction into the existing plant. In the results, the methods had combustion rates of 93.2% and 92.2%, respectively, so the use is possible.
- c. Production and testing of carbonized fuel injection hopper feeder and carbonized fuel burner
- We produced a carbonized fuel injection hopper, mixed combustion burner and injection burner and conducted transportation and spraying tests.
 - For the carbonized fuel injection hopper, improvement was required as the high water content of the fuel led to supply failure after a long period of operation.
 - For the mixed combustion burner, the analysis results had indicated that it is necessary to make the spray angle 70° . We showed that this can be achieved by injecting swirling air, etc.
 - For the injection burner, we showed that the ideal spraying can be achieved by using swirl vanes and swirling air.
- d. Consideration of installation of developed burners in demonstration furnaces
- We considered the installation of equipment at the Harima Town Waste Processing Center where the demonstration testing is planned, including a supply injection hopper, two types of burner for mixed combustion and injection, and a direct injection nozzle. We determined the optimum feeder size, the length of the transfer piping for the installation and the size of the burner and then performed the design and testing based on those details.
 - We checked the status of the startup at the Harima Town Waste Processing Center and decided the injection timing for the demonstration experiment.

(3) Overall system

For a facility that processes 50 t/day, if the proposed system is used then:

- a. It is estimated that the annual CO₂ emission can be reduced by 4,166 t-CO₂ compared with a conventional simple incineration system.
- b. If carbonized fuel is used as an alternative to fossil fuels at each facility for 20 years, then:
 - In use within the facility, there is a 118 million yen reduction with 30% alternative fuel use;
 - In use at a power plant, etc., there is a 130 million yen reduction; and

- In waste processing facilities, there is a 15 million yen reduction with 30% alternative fuel use.
- c. Based on these results, it is estimated that if there is extension to other facilities after the completion of the project so that the facilities producing carbonized fuel increase to 55 facilities nationwide (RDF facility equivalent) by FY2030, then the use of carbonized fuel at each facility will make it possible to achieve an annual CO₂ reduction of 229,130 t-CO₂.

目 次

要約.....	0-1
Abstract	0-5
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
第2章 炭化燃料および燃焼特性の把握.....	2-1
1 燃焼特性の把握.....	2-1
1.1 試験目的.....	2-1
1.2 測定及び試験装置.....	2-3
1.3 DTF 試験.....	2-6
1.3.1 燃焼速度確認試験条件・方法.....	2-6
1.3.2 燃焼速度試験結果.....	2-10
1.3.3 水分含有率影響確認試験条件・方法.....	2-16
1.3.4 水分含有率影響確認試験結果.....	2-17
1.3.5 まとめ.....	2-21
1.4 高温場における炭化燃料の蒸発特性.....	2-22
1.4.1 検討目的.....	2-22
1.4.2 蒸発時間の検討.....	2-22
1.4.3 検討結果.....	2-24
1.4.4 まとめ.....	2-28
2. 炭化物の粒径測定.....	2-29
2.1 レーザー回折・散乱法による粒度分布測定.....	2-29
2.2 ふるい分けによる粒度分布測定.....	2-31
2.2.1 手動ふるい分け.....	2-31
2.2.2 自動ふるい分け.....	2-34
2.2.3 まとめ.....	2-35
2.3 粒子画像分析による粒度分布測定.....	2-36
2.3.1 目的.....	2-36
2.3.2 計測概要.....	2-36
2.3.3 計測結果.....	2-36

2.3.4	まとめ	2-40
2.4	レーザー回折式粒子径分布測定	2-41
2.4.1	目的	2-41
2.4.2	計測概要	2-41
2.4.3	計測結果	2-42
2.4.4	考察	2-44
2.5	まとめ	2-45
3.1	振動ふるいによる粒径調整	2-47
3.1.1	試験概要、目的	2-47
3.1.2	試験方法	2-47
3.1.3	試験結果	2-48
3.2	粉砕による粒径・水分調整	2-52
3.2.1	試験概要、目的	2-52
3.2.2	試験方法	2-52
3.2.3	試験結果	2-53
第3章	供給機および搬送、バーナの構成	3-1
1.	供給機の基本構成	3-1
2.	バーナの基本構成	3-4
2.1	施設内利用による高性能化	3-4
2.1.1	直投ノズル	3-4
2.2	炭化燃料利用先の拡大	3-5
2.2.1	炭化燃料混焼バーナ	3-5
2.2.2	炭化燃料吹込バーナ	3-6
2.2.3	直投ノズル	3-7
第4章	燃焼シミュレーションによる各利用方法の有効性評価	4-1
1	評価手法	4-1
1.1	目的と解析方法	4-1
1.1.1	目的	4-1
1.1.2	解析方法	4-1
1.2	解析手順	4-2
1.2.1	基礎燃焼試験	4-2
1.2.2	既設炉解析（西海市炭化センター燃焼炉、播磨町塵芥センターストーカ）	4-2
1.2.3	炭化燃料バーナ解析	4-2
2	解析結果	4-3

2.1	施設内利用による高性能化.....	4-3
2.1.1	西海市炭化センター燃焼炉解析.....	4-3
2.2	炭化燃料利用先の拡大.....	4-4
2.2.1	播磨塵芥処理センターストーカ炉解析.....	4-14
2.2.2	炭化燃料混焼バーナ解析.....	4-30
第5章 炭化物燃料の供給および搬送特性試験.....		5-1
1	炭化燃料の利用先拡大.....	5-1
1.1.	供給機及びバーナの試験パラメータについて.....	5-1
2.1	予備試験結果.....	5-2
2.1.1	スクリーコンベヤ予備試験.....	5-2
2.1.2.	空気搬送試験.....	5-8
3.1	試作機による供給および搬送試験.....	5-32
3.1.1	投入ホッパ供給機.....	5-32
3.1.2	混焼バーナ.....	5-36
3.1.3	吹込バーナ.....	5-51
第6章 実機への展開検討		
1	炭化施設内利用による高性能化.....	6-1
1.1	炭化施設での利用検討.....	6-1
1.1.1	炭化燃料取得場所ごとの取出、搬送、供給方法.....	6-1
2.	炭化燃料利用先の拡大.....	6-4
2.1	炭化燃料利用先での検討.....	6-4
2.1.1	播磨町塵芥処理センターの状況把握.....	6-4
2.1.2	起動時温度トレンドと炭化燃料供給タイミングの検討.....	6-5
2.1.3	試作機（供給機・バーナ）の設置検討.....	6-7
2.1.4	炭化燃料直投ノズルの検討.....	6-8
2.2	発電設備付ごみ処理施設への適応可能性検討.....	6-8
2.2.1	起動時温度トレンドと炭化燃料供給タイミングの検討.....	6-8
2.3	まとめ.....	6-10
第7章 二酸化炭素排出量削減効果.....		7-1
1.	単純焼却(従来)と炭化燃料利用(提案システム)のCO ₂ 排出量試算.....	7-1
第8章 事業終了後の横展開の可能性.....		8-1

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	8-1
第 9 章 成果と課題	9-1
1 成果と課題	9-1
第 10 章 有識者外部委員会の開催	10-1
第 11 章 平成 30 年度中小廃棄物処理施設	11-1
における廃棄物エネルギー回収方策等に係る検討調査委託業務への協力	

第1章 事業概要

1. 事業概要

本評価・検証事業は、電気や熱エネルギーの回収が困難な中小処理規模の自治体において、ごみ炭化燃料化技術（以下、炭化技術）を活用することによりエネルギー回収を図ることを目的に実施するものである。

本事業で実証試験を行うシステムは、一般廃棄物を炭化してエネルギー回収し、ボイラ用石炭混焼燃料として化石燃料の代替燃料として発電利用等することにより CO₂ 削減に貢献する。

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

＜炭化施設が建設されなかった理由＞

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

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

本施設の運営を通じて、今後炭化システムの普及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。

＜炭化システム普及のために求められる点＞

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

求められる点の(1)(3)を炭化施設の高性能化、(2)を炭化燃料の利用先拡大と位置付けて取り組む。本事業は、CO₂ 削減に寄与することが目的であるこ

とから、上記(1)(2)を実施する。なお、(3)については当社にて研究を継続実施する。本事業の概要（図 1-1）および目的の詳細内容を示す。

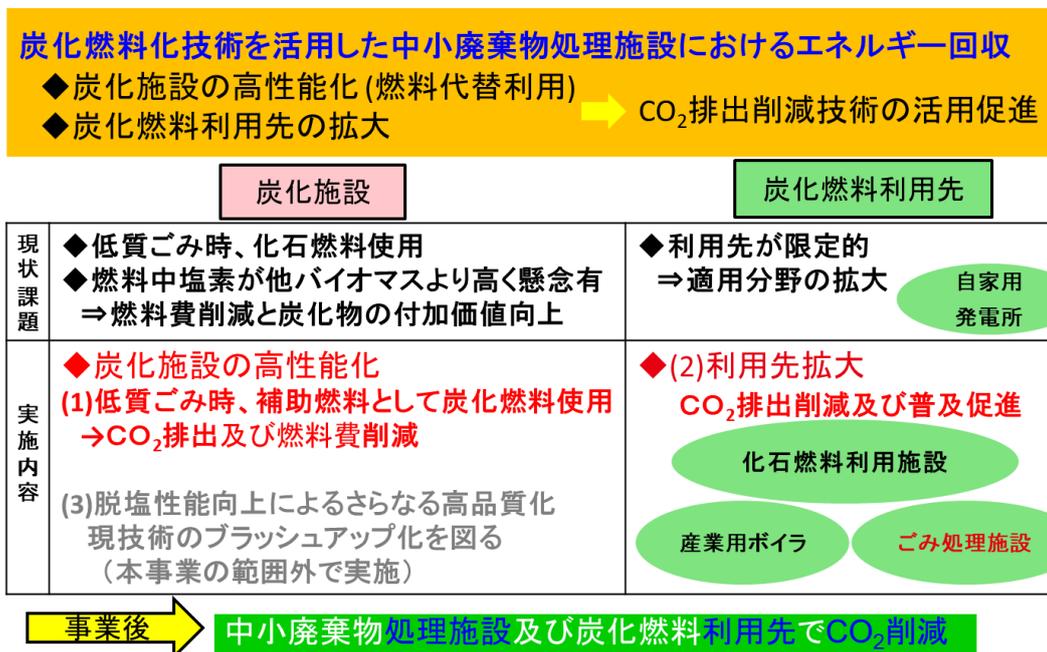


図 1-1 本事業の概要

2. 事業目的、目標、実施スケジュール

2.1 事業目的

本事業では、炭化施設とともに利用先でも CO₂ 削減、燃料費削減を実施することにより、普及促進を行うことを目的としている。

◆炭化施設の高性能化

(1) 炭化施設内での CO₂ 排出と燃料費削減

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

◆炭化燃料利用先の拡大

(2) 利用先での CO₂ 排出と燃料費削減

国内の事業用発電所・炭化施設以外のごみ処理施設（以下、ごみ処理施設）・化石燃料を使用する施設において、使用される化石燃料（灯油・石炭等）を炭化燃料によって代替し、各施設における CO₂ 排出量と燃料費を削減する。

炭化燃料はごみ由来のバイオマス燃料のため、炭化燃料の利用拡大は低炭素社会構築に大きく貢献できることから本事業を実施する意義は大きい。

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

< 技術課題 >

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

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

< 実施概要 >

- (1) 炭化施設の高性能化

炭化施設の燃焼炉における炭化燃料助燃利用の燃焼解析及び試験設備での燃焼試験

- (2) 炭化燃料利用先の拡大

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

本事業の実施概要を図 2.1-1 に示す。

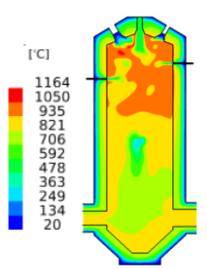
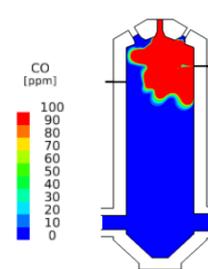
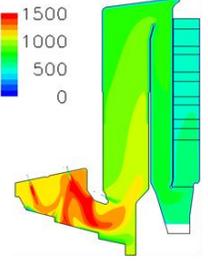
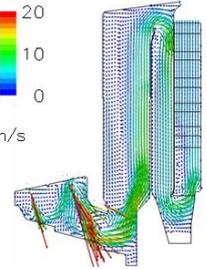
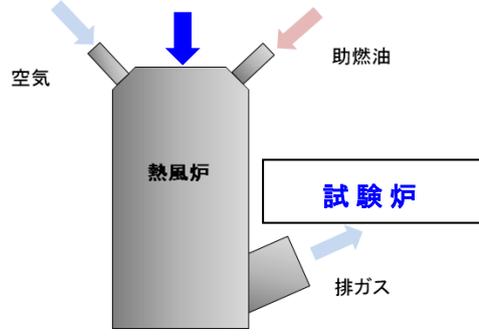
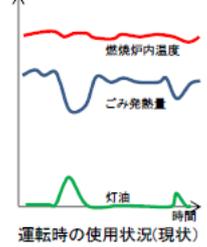
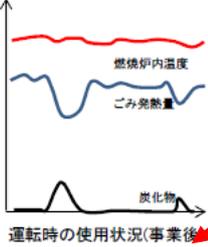
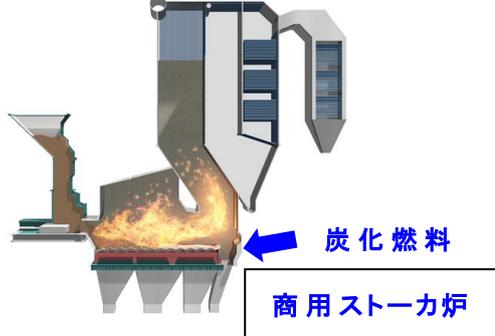
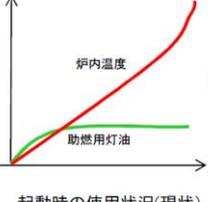
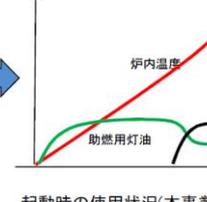
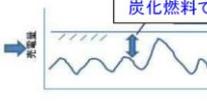
(1) 炭化施設の高性能化	(2) 炭化燃料利用先の拡大
<p>a. 燃焼解析</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 自社試験炉による炭化燃料の燃焼特性の確認 2. 燃焼炉への適応性を判断 燃焼可否確認 <p>↓</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. 燃焼のシミュレーションを実施 <ol style="list-style-type: none"> 1. 温度分布の確認 2. ガス成分、速度分布の確認 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>温度分布</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>CO分布</p> </div> </div>	<p>a. 燃焼解析</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. (1).a.1 と同等の試験を実施 2. ストーカー炉への適応性判断 燃焼可否確認 <p>↓</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. 燃焼のシミュレーションを実施 <ol style="list-style-type: none"> 1. 温度分布の確認 2. ガス成分、速度分布の確認 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>温度分布</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>速度分布</p> </div> </div>
<p>燃えきり燃焼可否確認後、燃焼試験へ</p> <p>b. 燃焼試験（試験設備）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 燃え残り有無の確認 ・ 試験設備にて炭化燃料の燃焼方法、燃焼部への燃料供給方法を選定 <p style="text-align: center;">炭化燃料</p> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>燃焼炉内温度 ごみ発熱量 灯油</p> <p>運転時の使用状況(現状)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>燃焼炉内温度 ごみ発熱量 炭化物</p> <p>運転時の使用状況(事業後)</p> </div> </div> <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℃場で燃え切りが確認できれば、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>投入場所・投入方法に違いによる燃焼状況の確認</p> <p>b. 燃焼試験（試験設備）</p> <p>(1)-bと同様</p> <p>c. 実証試験（商用ストーカー炉）</p> <p>試験設備と同様の燃焼状態が得られるか実機で確認</p> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>炉内温度 助燃用灯油</p> <p>起動時の使用状況(現状)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>炉内温度 助燃用灯油 炭化燃料</p> <p>起動時の使用状況(本事業)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>発電量</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>炭化燃料で発電平準化</p> </div> </div> <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、本システムの現状、最終目標、平成 30 年度の開発目標を

	項目	現状	最終目標	平成30年度の目標
	全体目標	15年程前に炭化燃料化技術を活用した処理施設が7施設程設置されたが、エネルギー回収のメリットを活かしきれていない 炭化施設と燃料利用先を組み合わせた全体システムが確立できていない	炭化燃料化技術を活用した中小廃棄物処理施設におけるエネルギー回収とCO ₂ 削減 炭化施設と燃料利用先を組み合わせた全体システムにおいてLCC低減とCO ₂ 削減	炭化施設と燃料利用先を組み合わせるためのシステム検討を行う
(1)	炭化施設の高性能化	低質ごみ時に燃焼炉の温度維持のために化石燃料を使用している	低質ごみ時の化石燃料使用量を20%以上削減する燃焼状況の確認	・炭化燃料利用 自社試験炉による燃料特性 炭化燃料の燃焼性(直投燃焼の可否)を確認する ・燃焼炉内解析 燃焼炉への炭化燃料投入による炉内温度分布・流動分布等を解析する
(2)	炭化燃料利用先の拡大	ごみ処理施設において、起動時に化石燃料を利用している	ごみ処理施設において、起動時の助燃量に対し20%以上混焼利用し化石燃料を代替、CO ₂ 削減する実証	・ごみ処理施設利用 自社試験炉による燃料特性 炭化燃料の投入場所の違いによる燃焼性(混焼燃焼の可否)を確認する ・焼却炉内解析 焼却炉へ炭化燃料を投入する場合の炉内温度分布、流動分布等を解析する ・供給機およびバーナ製作と試験 炭化燃料を燃焼させるための機器製作、試験を行う。 ・実証炉への設置検討 実証炉へ設置するための検討を行う

表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 開発目標

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。

	平成 30 年度	平成 31 年度	平成 32 年度
採択・事業開始	▼		
システム検討	→		
(1)炭化施設高性能化			
炭化施設利用検討	ラボ試験 解析		
燃焼試験(試験場)		準備 試験	
(2)炭化燃料利用先拡大			
焼却炉利用検討	ラボ試験 解析		
予備燃焼試験		試験	
燃焼試験(試験場)		準備 試験	
実証試験(播磨町)			手配 工事 試験
評価・まとめ		→	→

表 2.3-1 事業実施スケジュール

3.事業実施体制

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

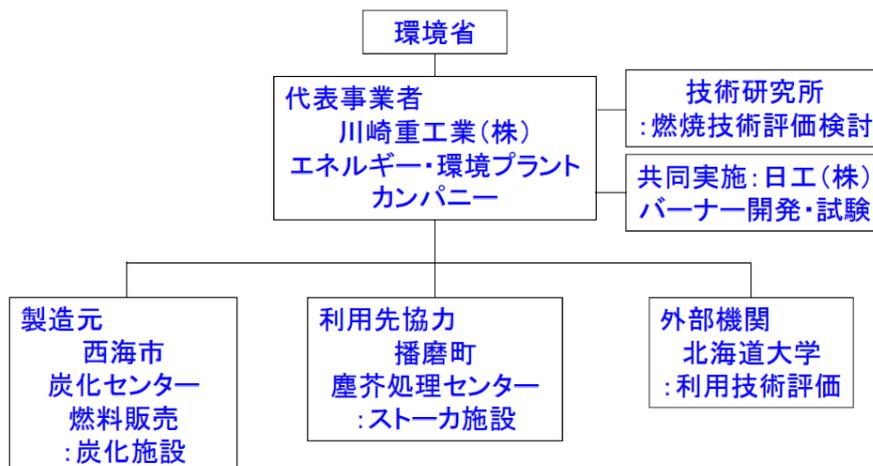


図 3.1-1 実施体制図

第2章 炭化燃料および燃焼特性の把握

1.燃焼特性の把握

1.1.試験目的

本事業では炭化施設内利用の確認として「西海市炭化センターの燃焼炉」と利用先拡大のごみ処理施設利用の確認として「播磨塵芥処理センターストーカ炉」を対象にして炭化燃料の利用手法を検討する。検討手段として燃焼シミュレーションにより、炭化燃料が炉内へ投入された際の粒子挙動、温度履歴等から燃焼率を把握するとともに炉内において適切な燃焼状態となっているか等を確認する必要がある。

固体燃料の燃焼イメージを図 1.1-1 に示す^[1]。固体燃料は炉内へ投入されてから、加熱、水分蒸発、脱揮発、表面燃焼、冷却の順で進行する。まず、火炎部からの輻射により粒子は加熱され、水分の蒸発が行われる。蒸発が終わるとさらに粒子温度が高くなり、ある温度（揮発温度）よりも高くなると粒子に含有されている揮発分が放出（脱揮発）される。その揮発分と酸素が反応しガス燃焼が行われ、火炎を伴った燃焼が起きる。これを着火という。揮発分の排出が終わる間際から固定炭素（チャー）の表面燃焼が行われる。表面燃焼が終わると、含有されていた灰が残り冷却される。

固体燃料は石油等の液体燃料とは違い、精製過程を通すことにより簡単に性状を調節できるわけではないため、基本的にはその性状に応じた最適な利用方法を採用し、実機への適用を検討していく必要がある。固体燃料において上述した各プロセスが装置内部でどのように推移するかについては、燃焼シミュレーションを用いて把握することができる。燃料の性状を定性的に判断する燃料比、燃料種の品位のみでは燃焼率を推定することは不可能である。なお、燃料比は炭素分と水素分の比 C/H のことで、石炭の「炭化度」の一つの指標となるだけであり、未燃率を定量的に判断できるものはない。

特に、固体燃焼装置における「燃焼率」は燃料の表面燃焼の進捗度合い（燃焼速度）に大きく依存する^[2]。表面燃焼の燃焼速度は脱揮発後のチャーの成り立ちによって変わるため、燃料種によって異なり、燃料比のような「炭化度」の指標では推定困難である（同じ燃料比でも燃焼速度は異なる）。そのため、燃焼シミュレーションを実施する上で使用する燃料をモデル化するためには、当該燃料の測定及び試験を実施して燃焼速度を定量的に把握する必要がある。

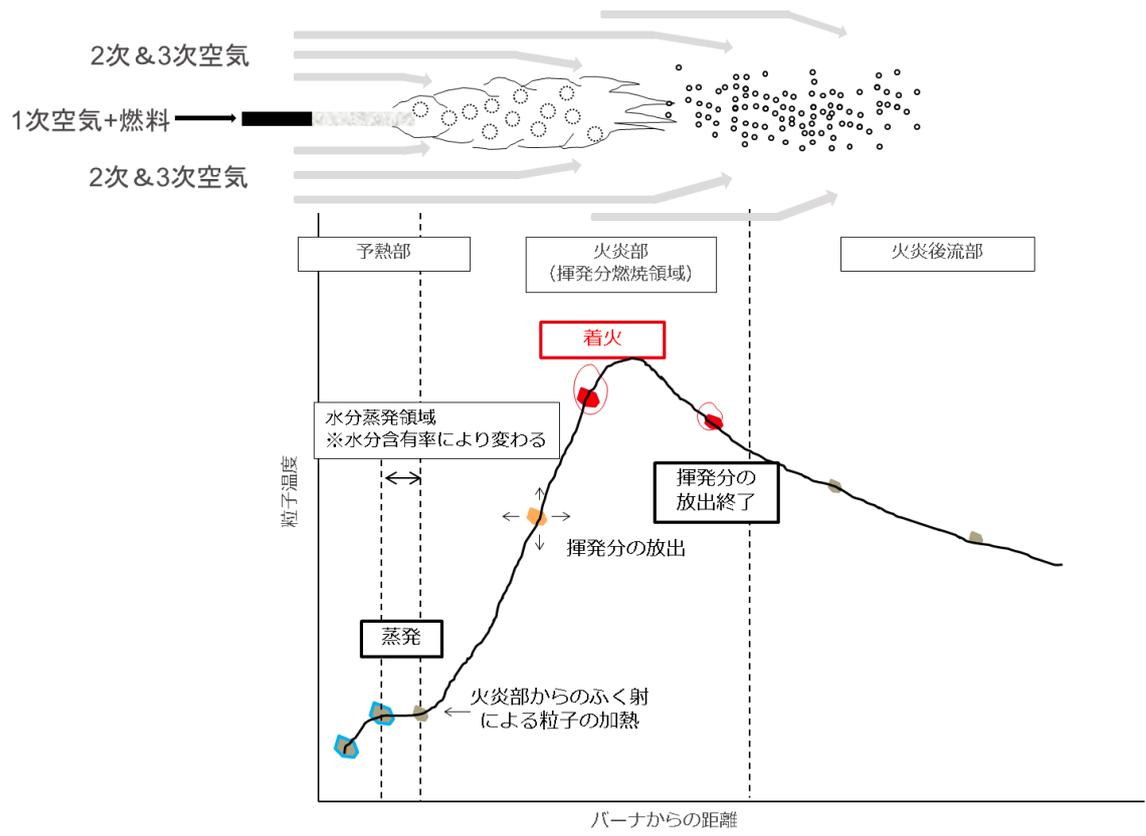


図 1. 1-1 バーナから投入される固体燃料の燃焼イメージ
 (新岡崇ら「燃焼現象の基礎」：オーム社^[1]をもとに作成)

1.2 測定及び試験装置

熱重量分析・示差熱分析（TG-DTA：Thermogravimetry-Differential Thermal Analysis）^[3]は、試料に対して一定温度を連続的に上昇させ、その間の重量変化を縦軸に、横軸に経過時刻をとる TG 曲線を作成する。そのため、温度に対する粒子の重量変化が分かり、燃焼開始温度などの情報が得られる。しかし、昇温速度が遅いため各燃焼状況が実際と異なる。TG-DTA の概要を図 1.2-1 に示す。TG は加熱によって生じる重量の変化を天秤の傾きによって検知するため、加熱炉、ホルダー、検出部から成る。

小型管状電気炉（DTF：Drop Tube Furnace）は急速加熱が可能で昇温速度が速く、滞留時間の設定、気流相中での反応を測定することが可能であり、この点から DTF は実機の炉内に最も近い反応条件下での測定が出来るといえる。そのため、実機条件での燃焼速度などの情報が得られる。DTF は一般に石炭の反応性や石炭灰の挙動の解明に広く用いられている^[4]。DTF 装置の概要を図 1.2-2 に、実際の DTF 装置の写真を図 1.2-3 に示す。DTF 試験装置の使用を表 1.2-1 に示す。DTF は円筒反応管、反応管内を加熱する熱源、および、反応管上部に接続された燃料フィーダー、反応中の燃料を回収するサンプリング装置から成る。DTF では、加熱された電気炉の上部から、スクリーフィーダにて固形燃料を投入する。投入された燃料は電気炉内で昇温され燃焼する。燃焼灰および排ガスを下部から水冷式のサンプリングチューブを挿入して回収する。電気炉内の空気比等は、 N_2 および O_2 の流量をコントロールすることで調整可能である。

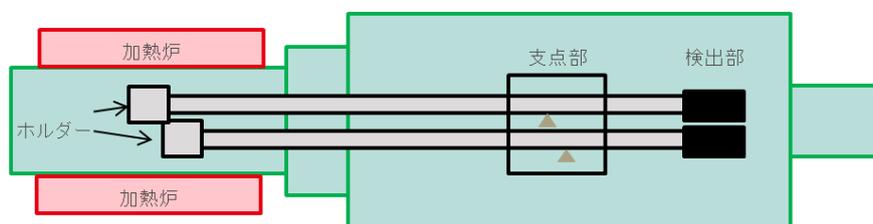


図 1.2-1 熱重量測定（TG-DTA）外略図

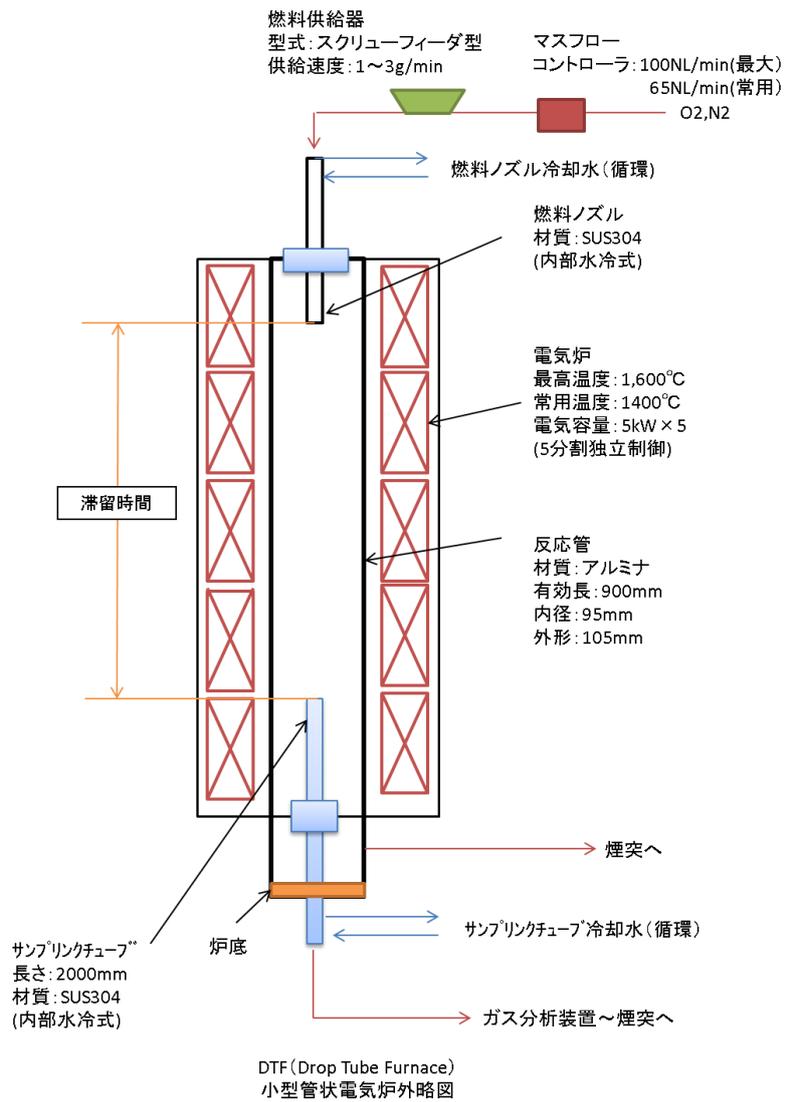


図 1. 2-2 小型管状電気炉外略図

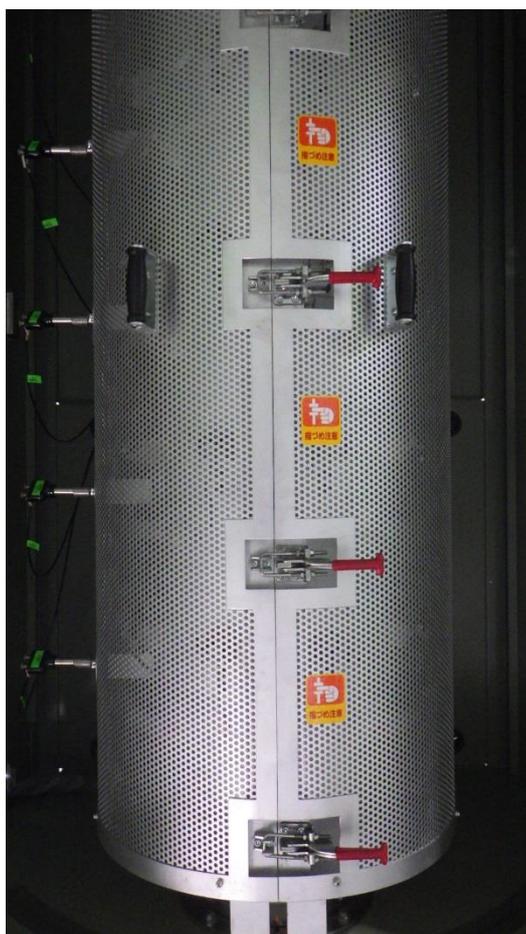


図 1.2-3 DTF 試験装置外観写真

表 1.2-1 DTF 試験装置仕様

最高温度	1600℃
常用温度	1400℃
雰囲気	N ₂ 及び O ₂ 雰囲気
温度制御	プログラム制御方式
ヒーター容量	1 φ 58A 5.0kW×5ゾーン
炉心管	寸法: φ110×φ95×L1900mm 材質: SSA-S

1.3 DTF 試験

1.3.1 燃焼速度確認試験条件・方法

燃焼速度とは「燃焼における（化学）反応速度」のことであり、一般的にアレニウスの式で近似できる^[5]。アレニウスの式（式 1.3.1-1）は活性化エネルギーと温度に依存する。ここで k ：反応速度定数、 A ：頻度因子、 E_a ：活性化エネルギー、 R ：気体定数、 T ：熱力学的温度である。アレニウスの式の対数を取ると、式 1.3.1-2 となる。すなわち、横軸に熱力学的温度の逆数 ($1/T$)、縦軸に速度定数の対数 ($\ln k$) をとり、アレニウスプロットにより図 1.3.1-1 のような回帰直線が得られる。この直線の傾きと切片から活性化エネルギーと頻度因子を求めることができる。試験ではある温度において、チャーが反応する時間を変更し、単位時間当たりの燃焼率の差から反応速度定数を求め、アレニウスプロットから活性化エネルギーと頻度因子を算出する。

図 1.3.1-2 に示すようにチャーの燃焼は気固反応のため複雑であり、温度によって反応速度が変化することが知られている^[6]。高温になるにつれて反応速度は加速するが、チャー粒子の中をガス化剤が拡散する速度が反応速度と同程度か、むしろ遅くなるため、高温でも燃焼が進まない領域が存在する。これを粒子内拡散律速と呼ぶ。さらに高温になると、粒子の内部から粒子外表面へのガス化剤の供給が最も遅い外部拡散律速と呼ばれる領域になる。

本試験では総括的な反応速度定数を試験的に求め、外部拡散律速と粒子内拡散律速の境目の判断は不可能である為、拡散速度定数は総括的に理論式により算出した。総括反応速度定数 k_{all} 、反応速度定数 k_c 、拡散速度定数 k_d の関係から、反応速度定数を算出した。

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (\text{式 1.3.1-1})$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad \therefore \ln k = -\left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right) + \ln A \quad (\text{式 1.3.1-2})$$

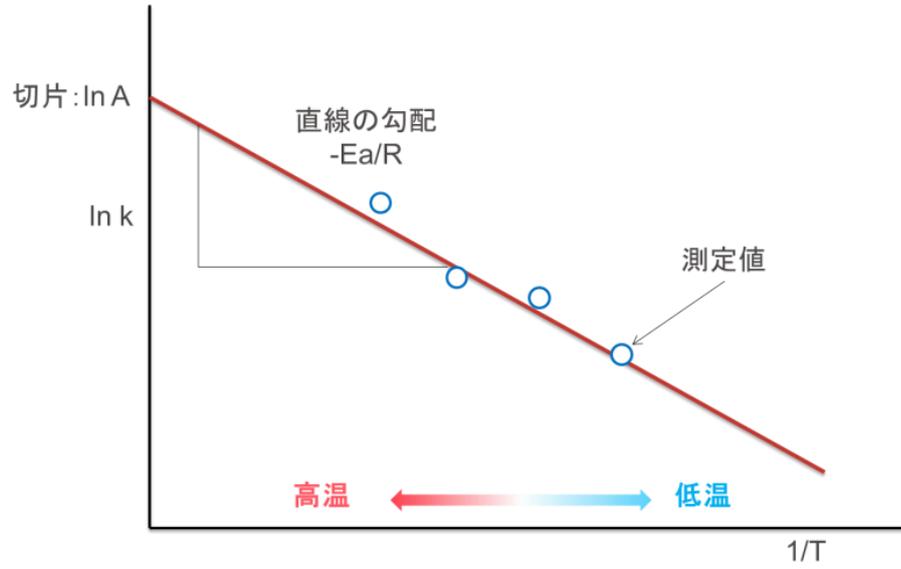


図 1.3.1-1 アレニウスプロットイメージ図

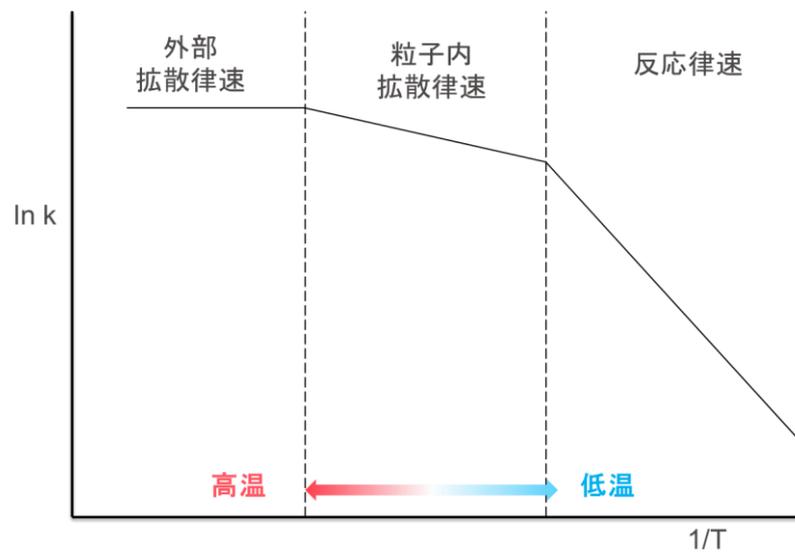


図 1.3.1-2 高温における反応速度の変化

本事業の利用検討となる炭化燃料の採取場所と特徴を図 1.3.1-3、表 1.3.1-1 に、工業分析結果を表 1.3.1-2 に示す。各燃料で固定炭素に大きな差が無いことと、燃料種は変わっていないため各チャーの特性に違いがないと考えられるので、造粒前炭化燃料のみを対象とした。燃焼状態を安定化させるために粒径が $45\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ のもの、また定温乾燥機にて 105°C まで熱し、水分を蒸発させた状態のものを使用した。表 1.3.1-3 に試験条件、表 1.3.1-4 に基本的な運転条件を示す。

炭化物の流れ

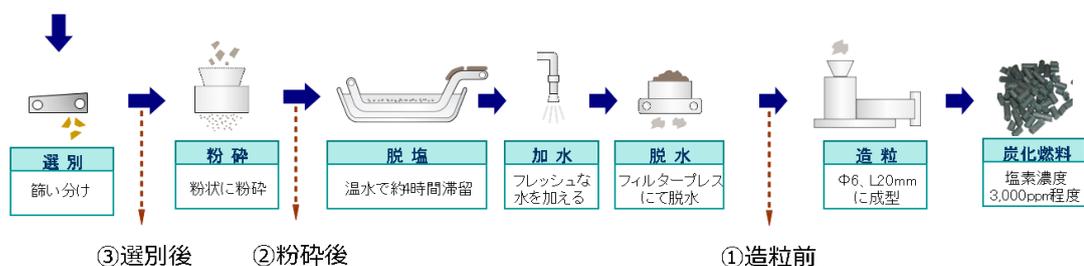


図 1.3.1-3 炭化燃料の流れ

表 1.3.1-1 各燃料種の水分とメリット・デメリット

燃料種	水分	メリット	デメリット
①造粒前	30wt%	脱塩済み	高水分
②粉砕後	ほぼ0wt%	低水分	取出、発火
③選別後	ほぼ0wt%	低水分	粒径不均一、取出、発火

表 1.3.1-2 炭化燃料工業分析結果

		選別後炭化燃料	粉砕後炭化燃料	造粒前炭化燃料
水分	[wt%]	1.8	4.4	2.4
灰分(dry base)	[wt%]	33.1	34.6	39.0
揮発分(dry base)	[wt%]	26.3	25.4	23.5
固定炭素(dry base)	[wt%]	40.6	40.0	37.5

表 1.3.1-3 燃焼速度算出試験条件

ケース名	燃料	温度[°C]	滞留時間[sec]
a-1	造粒前炭化燃料	700	0.67
a-2			1.33
a-3			2.00
a-4		750	0.67
a-5			1.33
a-6			2.00
a-7		800	0.67
a-8			1.33
a-9			2.00
a-10		900	0.67
a-11			1.33
a-12			2.00

表 1.3.1-4 運転条件

燃料供給速度	1g/min
酸素濃度	4%
サンプリングポンプ流量	5ℓ/min
炉内圧	0.005~0.015MPa
目標サンプリング量	1.0g 以上
サンプリング時間	20 分

1.3.2 燃烧速度確認試験結果

表 1.3.2-1 に各温度における滞留時間、灰分量から燃烧率を算出した結果を示す。燃烧率 X は式 (1.3.2-1) を用いて求めた。ここで、A1 は燃烧前の灰分量[%] (気乾ベース)、A2 は燃烧後の灰分量[%] (気乾ベース) である。表 1.3.2-1 の結果より、滞留時間と灰分中の未燃率の関係を図 1.3.2-1 に示す。温度が高い、あるいは滞留時間が長くなるほど未燃率は低下し、燃烧が進行していることが分かる。

$$X = 100 \cdot \left(1 - \left(\frac{A1}{100 - A1} \right) \cdot \left(\frac{100 - A2}{A2} \right) \right) \dots \text{(式 1.3.2-1)}$$

表 1.3.2-1 各温度における滞留時間、灰分量、燃烧率、未燃率

温度[°C]	滞留時間[sec]	A1 燃烧前の灰分量[%]	A2 燃烧後の灰分量[%]	X 燃烧率[%]	(100-X) 未燃率[%]
700	0.67	38.10	38.10	0.00	100.00
	1.33	38.10	38.80	2.91	97.09
	2.00	38.10	40.70	10.32	89.68
750	0.67	38.10	42.00	15.00	85.00
	1.33	38.10	45.80	27.16	72.84
	2.00	38.10	56.70	53.00	47.00
800	0.67	38.10	41.40	12.88	87.12
	1.33	38.10	54.40	48.41	51.59
	2.00	38.10	63.40	64.47	35.53
900	0.67	38.10	59.70	58.45	41.55
	1.33	38.10	73.20	77.46	22.54
	2.00	38.10	79.30	83.93	16.07

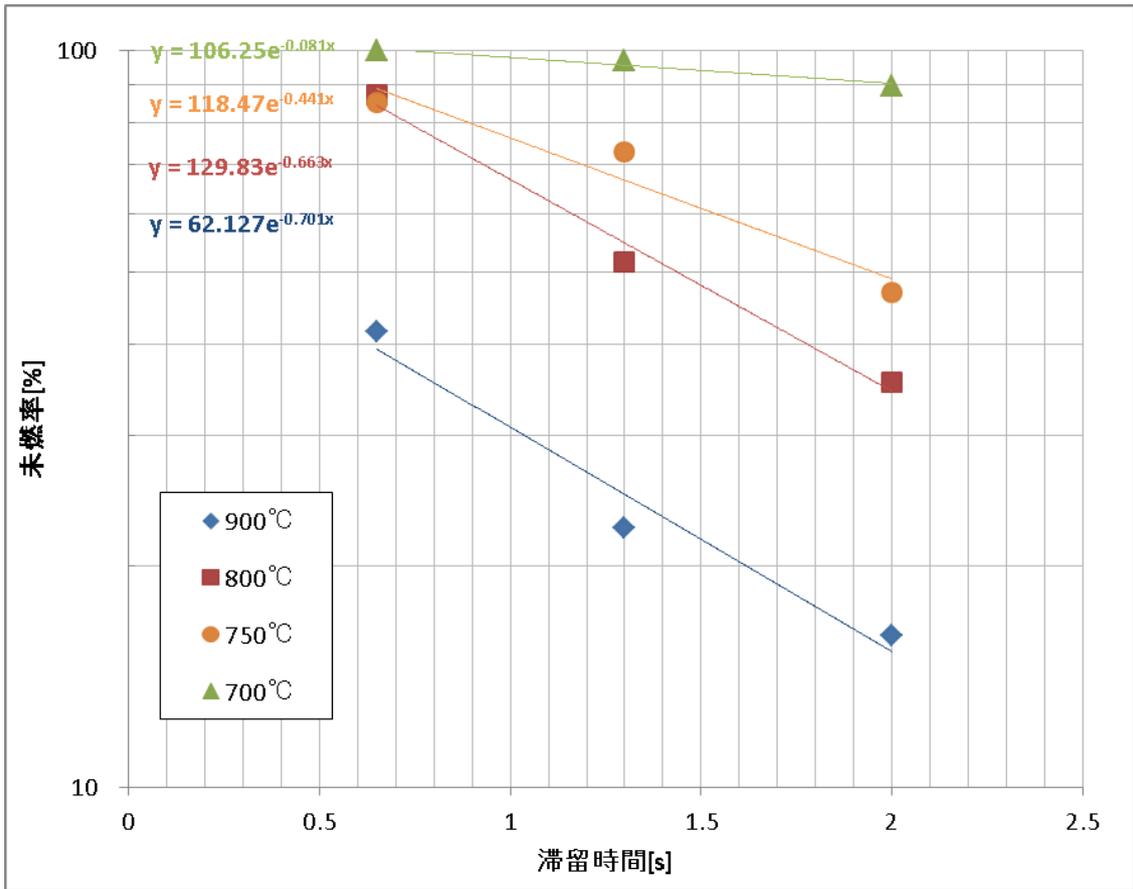


図 1. 3. 2-1 滞留時間と未燃率の関係

総括燃焼速度係数 k_{all} は以下の式(1.3.2-2)で表される^[7]。このとき、各温度で滞留時間が最短のときを $\theta_1=0.65\text{sec}$ 、および最長のときを $\theta_2=2.0\text{sec}$ とした。

$$k_{all} = \frac{-\rho \cdot d_0 \cdot \ln\left(\frac{100-X_2}{100-X_1}\right)}{6 \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot O_p} \dots(\text{式 1.3.2-2})$$

ρ は粒子密度(700[kg/m³]と仮定)、 d_0 は初期平均粒子径(27×10^{-6} [m])、 O_p は酸素分圧 4.052kPa (101.3[kPa] \times 0.04) とすると、各温度での総括燃焼速度係数 k_{all} が求まる。算出結果を表 1.3.2-2 に示す。

表 1.3.2-2 滞留時間における未燃率と総括燃焼速度

温度	700°C	750°C	800°C	900°C
滞留時間 θ_1	0.65	0.65	0.65	0.65
未燃率X1	100.00	85.00	87.12	41.55
滞留時間 θ_2	2.00	2.00	2.00	2.00
未燃率X2	89.68	47.00	64.47	16.07
総括燃焼速度係数 k_{all}	6.27.E-08	3.41.E-07	1.73.E-07	5.47.E-07

総括燃焼速度係数 k_{all} と化学反応速度係数 k_c およびチャー表面への酸素の拡散速度係数 k_d との間には次式(式 1.3.2-3)のような関係がある。

$$\frac{1}{k_{all}} = \frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_d} \dots (\text{式 1.3.2-3})$$

ここで拡散速度係数 k_d は次式(1.3.2-4)のように表される^[8]。

$$k_d = \frac{4.995 \cdot 10^{-12}}{D_p} \left(\frac{T_p + T_g}{2} \right)^{0.75} \dots (\text{式 1.3.2-4})$$

D_p は粒子直径[m]、 T_p は粒子温度[K]、 T_g はガス温度[K]である。ここでは簡略化のため $T_p = T_g$ として取り扱った。これらの式より造粒前炭についての k_d 、 k_c を算出した結果を表 1.3.2-3 に示す。また、各速度係数を $1/T$ に対してプロットしたものを図 1.3.2-2 に示す。図 1.3.2-2 より今回の測定条件では $k_c \ll k_d$ となり、 k_c が支配的になるため化学反応律速領域であることが分かる。アレニウス型の各反応速度係数を求めると次式(1.3.2-5)(1.3.2-6)のようになる。また、今回得られた造粒前炭の頻度因子 A と、活性化エネルギー E を表 1.3.2-4 に示す。

算出したマリノウ炭(亜瀝青炭)の頻度因子 A と活性化エネルギー E を比較したものを表 1.3.2-5 に示す。表 1.3.2-5 を元にマリノウ炭、造粒前炭の総括反応速度係数と $1/T$ との関係を図 1.3.2-3 に示す。これらの結果から造粒前炭の燃焼速度は火力発電所等で使用されている亜瀝青炭と同等であるため、燃料として利用することが可能であると言える。

表 1.3.2-3 温度による各速度係数算出結果

T(°C)	T(K)	1/T	k_{all}	k_d	k_c	$\ln k_{all}$	$\ln k_c$
700	973	0.0010	6.27.E-08	2.97.E-05	6.29.E-08	-16.58	-16.58
750	1023	0.0010	3.41.E-07	3.22.E-05	3.45.E-07	-14.89	-14.88
800	1073.15	0.0009	1.73.E-07	3.47.E-05	1.74.E-07	-15.57	-15.56
900	1173.15	0.0009	5.47.E-07	3.47.E-05	5.56.E-07	-14.42	-14.40

造粒前炭 (総括燃焼速度係数) : $k_{all} = 3.50 \times 10^{-3} \times \exp(-10251/T) \dots (\text{式 1.3.2-5})$

造粒前炭 (化学反応速度係数) : $k_d = 3.76 \times 10^{-3} \times \exp(-10317/T) \dots (\text{式 1.3.2-6})$

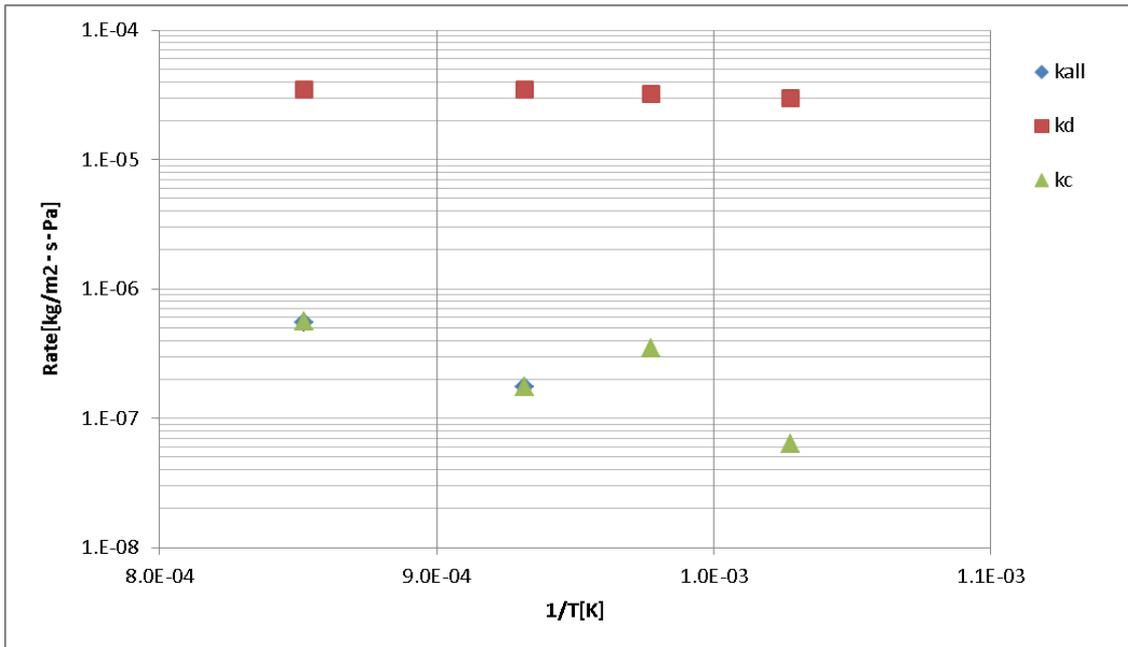


図 1.3.2-2 各速度係数と 1/T との関係

表 1.3.2-4 造粒前炭の頻度因子と活性化エネルギー

		造粒前炭
頻度因子、A	[kg/m2·s·Pa]	3.50×10^{-3}
活性化エネルギー、E	[cal/mol]	10251

表 1.3.2-5 マリノウ炭、造粒前炭の燃焼特性比較

		マリノウ炭	造粒前炭
頻度因子、A	[kg/m2·s·Pa]	1.13×10^{-5}	3.50×10^{-3}
活性化エネルギー、E	[cal/mol]	3452	10251

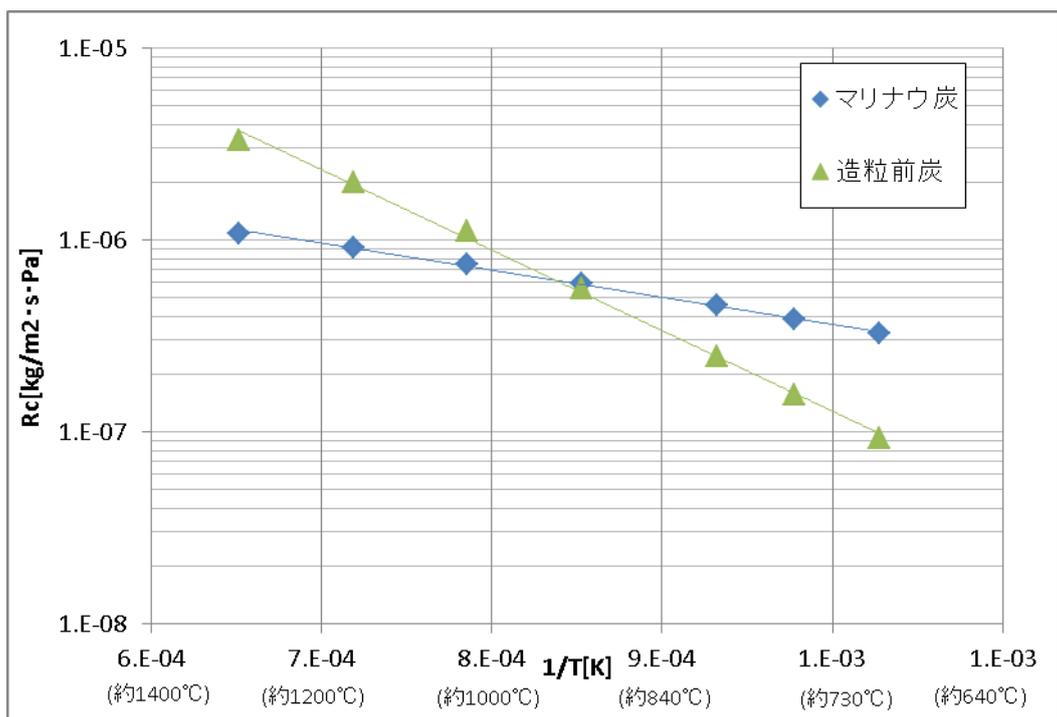


図 1. 3. 2-3 マリノウ炭、造粒前炭の総括反応速度係数と 1/T との関係

1.3.3 水分含有率影響確認試験条件・方法

造粒前炭は到着ベースで約 30wt%と水分含有率が比較的高く、水分の潜熱の影響から短時間での完全燃焼が困難と予想されている。そのため、造粒前炭の水分含有率が燃焼に及ぼす影響を確認するために DTF 試験を実施した。

炭化燃料の利用形態として選別後、粉碎後、造粒前の 3 種類を予定している。今回の試験では 3 種の中で最も水分が高い造粒前炭化燃料を使用した。

本試験では造粒前炭化燃料の到着ベースを使用した。到着ベースの水分は約 30wt%である。試験では、水分の含有率を到着ベース、気乾ベース、絶乾ベースと 3 パターン変更させた。絶乾ベースでは定温乾燥機（105℃2h キープ）を使用して乾燥させた。気乾ベースの水分含有率は測定の結果 20wt%であることが分かった。

試験条件を表 1.3.3-1、表 1.3.3-2 に基本的な装置条件を示す。

表 1.3.3-1 造粒前炭化燃料 水分含有率変更試験条件

ケース名	燃料	温度 [°C]	滞留時間[sec]
1-1	到着ベース (30wt%)	350	3.0
1-2		600	3.0
1-3		850	3.0
2-1	気乾ベース (20wt%)	350	3.0
2-1		600	3.0
2-1		850	3.0
3-1	絶乾ベース (0wt%)	350	3.0
3-2		600	3.0
3-3		850	3.0

表 1.3.3-2 装置条件

燃料供給速度	1g/min
酸素濃度	4%
サンプリングポンプ流量	5ℓ/min
炉内圧	0.005~0.015MPa
目標サンプリング量	1.0g 以上
試験時間	20 分

1.3.4 水分含有率影響確認試験結果

到着ベースの造粒前炭は、水分の影響でフィーダ出口のノズル部にて閉塞し、安定して炉内に燃料が供給出来ないことが判明した。そのため、フィーダによる供給から、炉上の一部を開放し手動で燃料を 1g/min の速度で供給する方法に変更した。この際炉内が正圧になると燃料を供給できない事、また噴出し等の危険性を考慮し、炉内を微負圧に設定した。そのため、周囲から空気を吸い込みながら燃料を搬送することになり、炉内の O₂ 濃度と滞留時間の条件が変更された。変更した条件を表 1.3.4-1 に示す。

表 1.3.4-1 条件の変更点

	変更前	変更後
O ₂ 濃度	4.0%	5.5%
滞留時間	3.0sec	2.8sec

各条件における炉内通過後の回収物の写真を図 1.3.4-1 に示す。350℃条件では水分含有率の違いによる差はほとんど無かった。600℃条件では水分含有率が低くなるにつれて若干白くなる傾向が得られた。850℃では他の温度よりも灰色に近づいていることから、燃焼が進んでいると考えられる。650℃条件と同様に水分含有率が低くなるにつれて、白くなる傾向が得られた。

表 1.3.4-2 に各条件における水分含有率測定結果を示す。各条件においても 1.8～2.9% 程度の含有率であった。水分 0 wt% の絶乾ベースも試験後は水分を含んでいることから、試験中に吸湿していることが考えられる。そのため、水分 30wt%、20wt% のものも 0 wt% の含有率と差がほとんど無いことから、水分は十分に蒸発していると言える。

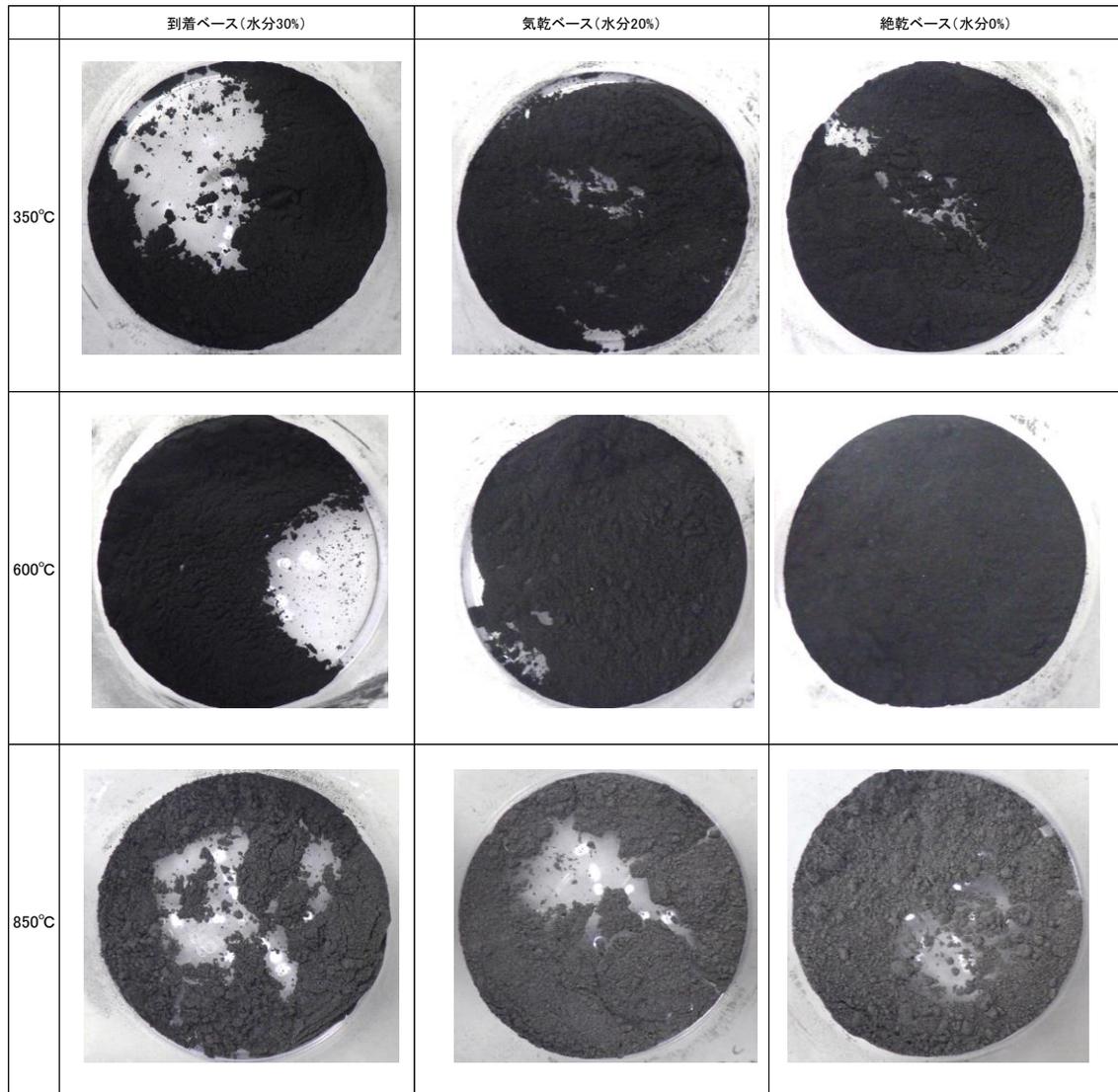


図 1. 3. 4-1 各温度における燃焼率

表 1. 3. 4-2 各条件における水分含有率

試料		350°C	600°C	850°C
水分30%	wt%	2.8	2.9	1.8
水分20%	wt%	2.6	2.4	1.3
水分0%	wt%	2.1	2.9	1.8

表 1.3.4-3 に各条件における灰分割合（気乾ベース）を示す。350℃、600℃条件では灰分割合は 31.9～36.3%とほぼ同じ結果となった。これは、炉内の温度が低く脱揮発温度まで達していないため 350℃、600℃では十分に燃焼が進んでいないということが考えられる。

表 1.3.4-3 灰分割合（気乾ベース）

		350℃	600℃	850℃
水分30%	wt%	34.5	36.3	61.4
水分20%	wt%	32.0	36.1	72.0
水分0%	wt%	31.9	35.8	70.0

表 1.3.4-4 に各温度における滞留時間、灰分量から燃焼率を算出した結果を示す。また、燃焼率 X は式（1.3.4-1）を用いて求めた。ここで、A1 は燃焼前の灰分量[wt%]（気乾ベース）、A2 は燃焼後の灰分量[wt%]（気乾ベース）である。表 1.3.4-4 によると燃焼前の灰分量は気乾ベースで 38.1%であるが、燃焼後の灰分割合ではこの値を下回っている結果も得られた。そこで、図 1.3.4-1 から元の燃料の見た目と変化が無く、燃焼していないと判断し 350℃到着ベースの値（34.5%）を基準値とした。それを下回った場合は基準値を使用し、計算を行った。

図 1.3.4-2 に各温度における燃焼率の関係を示す。350℃条件では燃焼しておらず、600℃を超えると若干燃焼が進んでいる。燃焼率は最高で 79.52%であった。水分含有率 30wt%の場合でも、850℃の高温度場では燃焼している結果となった。

以上の結果から、850℃の温度場である施設内での利用は直投で可能であることが分かる。ただし 650℃以下で使用する場合は、高温場で水分を蒸発させた後燃焼させる必要がある。

$$X = 100 \cdot \left(1 - \left(\frac{A1}{100 - A1} \right) \cdot \left(\frac{100 - A2}{A2} \right) \right) \dots \text{(式 1.3.4-1)}$$

表 1.3.4-4 各温度における滞留時間、灰分量、燃焼率

燃料	温度[℃]	A1	A2	X
		燃焼前の灰分量[wt%]	燃焼後の灰分量[wt%]	燃焼率[%]
水分30%	350	34.50	34.50	0.00
	600	34.50	36.30	7.57
	850	34.50	61.40	66.89
水分20%	350	34.50	34.50	0.00
	600	34.50	36.10	6.77
	850	34.50	72.00	79.52
水分0%	350	34.50	34.50	0.00
	600	34.50	35.80	5.54
	850	34.50	70.00	77.43

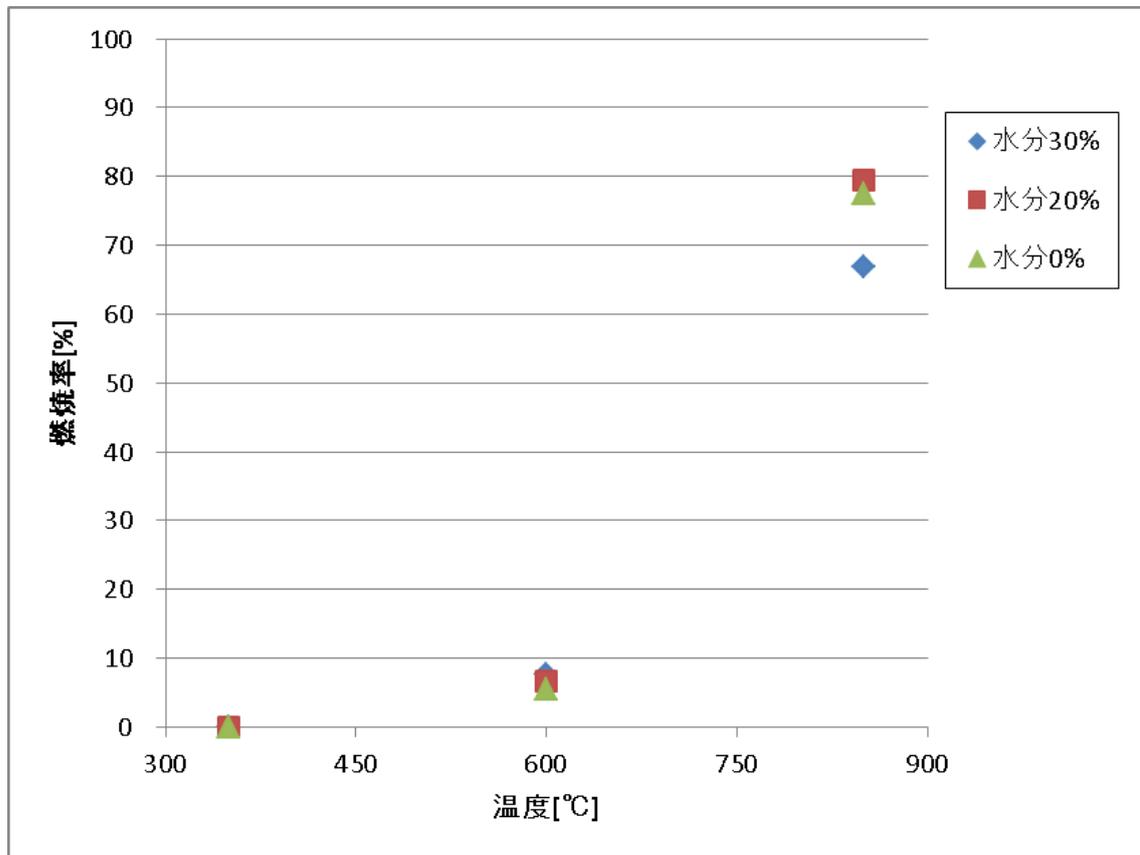


図 1.3.4-2 各温度における燃焼率

1.3.5 まとめ

(1) 燃焼速度確認試験まとめ

炭化燃料の造粒前炭の燃焼挙動を DTF 装置により評価し、以下の結果を得た。また、本実験の温度範囲ではいずれの条件においても化学反応律速であった。造粒前炭の燃焼速度は火力発電所等で使用されている亜瀝青炭と同等であるため、炭化燃料は燃料として利用することが可能であると言える。

- ・ 造粒前炭の頻度因子 A と活性化エネルギー E を以下に示す。

頻度因子 : 3.50×10^{-3} [kg/m²・s・Pa]

活性化エネルギー : 10251 [cal/mol]

(2) 水分含有率影響確認試験まとめ

炭化燃料の水分含有率が燃焼に及ぼす影響を確認するため、水分率を 30wt%、20wt%、0wt%と変更し、それぞれを 350℃、600℃、850℃の温度場で燃焼させ評価したところ、以下の結果が得られた。

- ・ 燃焼後の水分含有率は 1.8～2.9wt%程度であり、滞留時間 2.8 秒で十分蒸発している。
- ・ 350℃、600℃では燃焼後の灰分割合は低く、水分は蒸発しているが燃焼は進んでいない。
- ・ 燃焼率は最高で約 79.52%であった。また、850℃条件において水分含有率が 30wt%の場合、他の含有率と比較して約 10wt%燃焼率は低くなった。これは、水分が蒸発するまでの時間が長くなり、粒子が温まるまでの時間が不足したためと考えられる。

以上のことから、850℃のような高温度では燃焼率は最高で約 67%であった。施設内利用は直投で可能といえる。ただし、650℃以下で使用する場合、高温場で水分を蒸発させた後、燃焼させる必要がある。

1.4 高温場における炭化燃料の蒸発特性

1.4.1 検討目的

造粒前炭は一般的な瀝青炭と比べ水分含有率が 30wt%と高く、水分の潜熱の影響から蒸発が完了するまでの時間を多く要するため、着火性に難がある（着火するのが遅い）と予想される。そこで、蒸発完了時間に最も影響を及ぼすパラメータの推定を行った。

1.4.2.蒸発時間の検討

水分蒸発時間のイメージを図 1.4.2-1 に示す。粒子温度が加熱され、常温から 100℃になった場合、粒子中の表面水分は潜熱を奪いながら蒸発すると考えられるため、水分が蒸発完了するまで、粒子への入熱は全て水分の蒸発に使われると仮定し、蒸発時間の算出を行った。尚、固有水分は 0 wt%と仮定した。

蒸発時間は式 1.4.2-1 に示すように「潜熱分の熱量」を「粒子が単位時間当たり」に受ける熱量」で除して算出した。「粒子が単位時間当たり」に受ける熱量」は式 1.4.2-2 で算出した。式 1.4.2-1 を展開すると最終的に式 1.4.2-3 になり、蒸発完了時間は粒径、水分含有率、雰囲気温度以外は粒子が持つ固有値であるため、3つが主要なパラメータとなる。粒子半径、水分含有率に関する項は 1 乗、輻射に関する項では温度の 4 乗で表される。つまり、大幅に蒸発時間を短くするためには「粒子半径を小さくする」、「水分率を低下させる」よりも 4 乗で効く「雰囲気温度」を上げるほうがより効果的であると言える。

$$\text{蒸発完了時間}[\text{sec}] = \frac{\text{潜熱分の熱量}[\text{J}]}{\text{粒子が単位時間当たり}に受ける熱量[\text{J}/\text{sec}]} \quad (\text{式 1.4.2-1})$$

$$\text{粒子が単位時間}に受ける熱量[\text{J}/\text{sec}] = \text{粒子表面積}[\text{m}^2] \times (\text{対流熱伝達}[\text{W}/\text{m}^2] + \text{輻射}[\text{W}/\text{m}^2])$$

(式 1.4.2-2)

$$\text{蒸発完了時間}[\text{sec}] = \frac{\text{密度}[\text{kg}/\text{m}^3] \times \text{粒子半径}[\text{m}] \times \text{水分含水率}[-] \times \text{潜熱}[\text{J}/\text{kg}]}{\left[\text{熱伝達率} \times (\text{雰囲気温度} - \text{粒子温度}) \right] [\text{W}/\text{m}^2] + \left[\text{放射率} \times \text{輻射定数} \times (\text{雰囲気温度}^4 - \text{粒子温度}^4) \right] [\text{W}/\text{m}^2]}$$

(式 1.4.2-3)

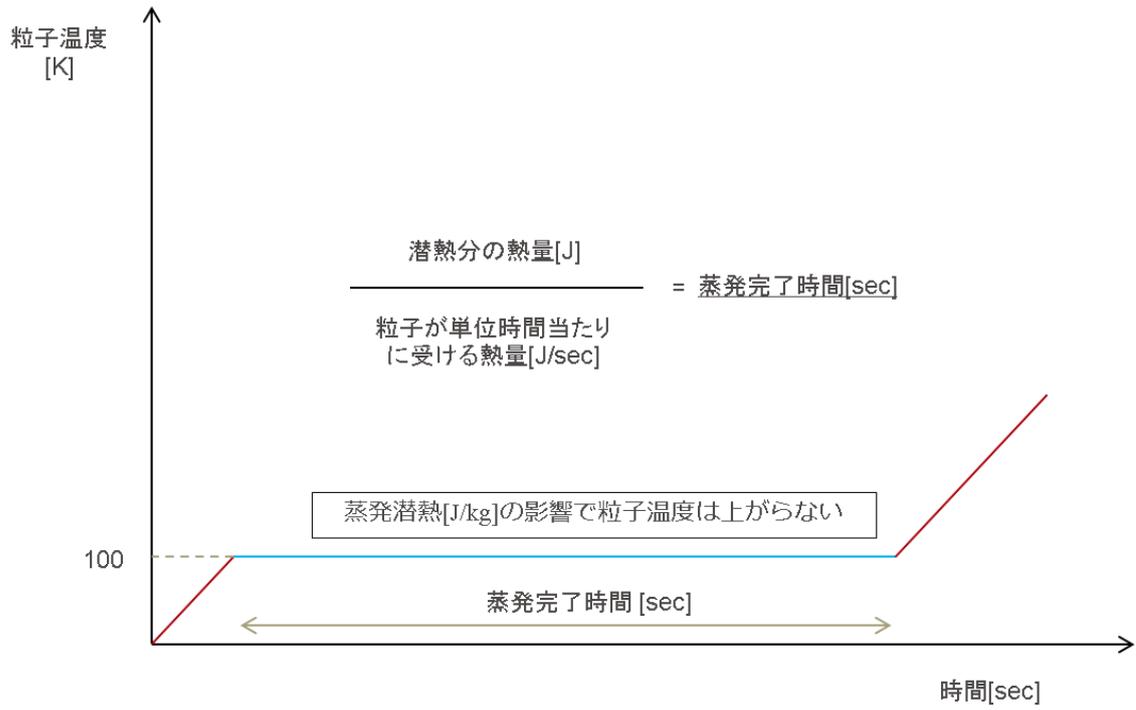


図 1.4.2-1 蒸発完了時間のイメージ

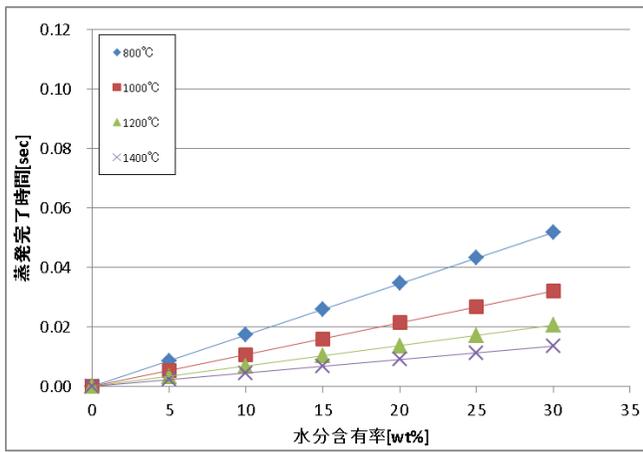
1.4.3 検討結果

図 1.4.3-1 に式 1.4.2-1 から計算した粒径別の蒸発完了時間を示す。水分の含有率と蒸発時間の関係は線形的に表され、水分の含有率が多くなれば蒸発時間も長くなる。同じ水分含有率でも雰囲気温度が高いほうが蒸発時間は短くなる。また、粒径が大きくなるほど蒸発時間は長くなる。

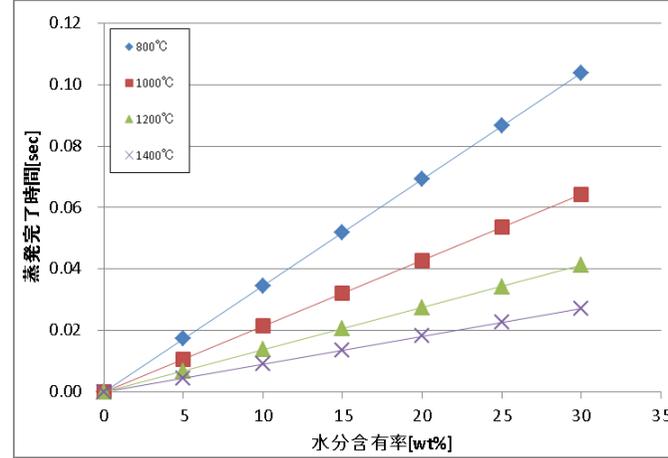
図 1.4.3-2 に蒸発完了時間の主要となるパラメータ（粒径、水分含有率、雰囲気温度）の相関図を示す。横軸に粒径、縦軸に蒸発完了時間を示す。マーカーの色は 800℃、1000℃、1200℃、1400℃と温度別に表している。マーカーの形状は水分率によって 10wt%、20wt%、30wt%と表している。例えば、水分 30%、温度 1200℃の場合、□の青でプロットしており、粒径が 50 μm の場合、蒸発完了時間は約 0.02sec、100 μm の場合、約 0.04sec、200 μm の場合、約 0.08sec である。

電力中央研究所の橋本らは蒸発モデルを数値解析に組み込んでおり、瀝青炭と水分の多い亜瀝青炭の混焼比を変更したときの燃焼率を解析と実験から考察を行っている^[9]。その蒸発完了時間と今回の計算結果を図 1.4.3-3 に比較した。比較した結果、今回実施した計算結果と近似しており、表面水分に関する蒸発時間の推定は今回使用した式で可能であると考えられる。

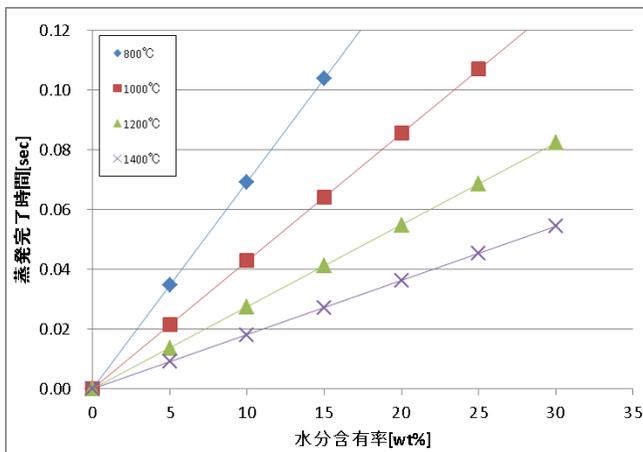
炭化燃料の粒径がレーザー回折法の測定結果である約 27 μm で水分が 30wt%場合、温度が 1200℃以上だと、約 0.02sec 以下の極短時間で水分が蒸発することが分かる。しかし、水分の含有率が多い場合、液架橋現象により粒子同士が結合し、粒径が大きくなることが考えられる。燃焼炉全体の燃焼率を高めるためには、極短時間で水分を蒸発させることが必須となるため、粒径を小さくする、もしくは水分率を低下させる必要がある。また、雰囲気温度を上げるほうが他のパラメータを向上させるよりも効果的であるが、雰囲気温度を上げるのは実績より難しい。そのため、簡易的に粒径を小さくする、水分含有率を低下させる必要がある。



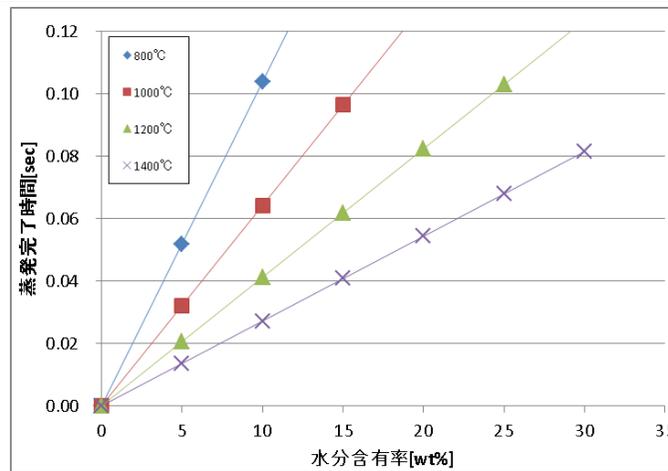
(a) 粒径 50 μ m



(b) 粒径 100 μ m



(c) 粒径 200 μ m



(d) 粒径 300 μ m

図 1. 4. 3-1 各粒径における蒸発完了時間

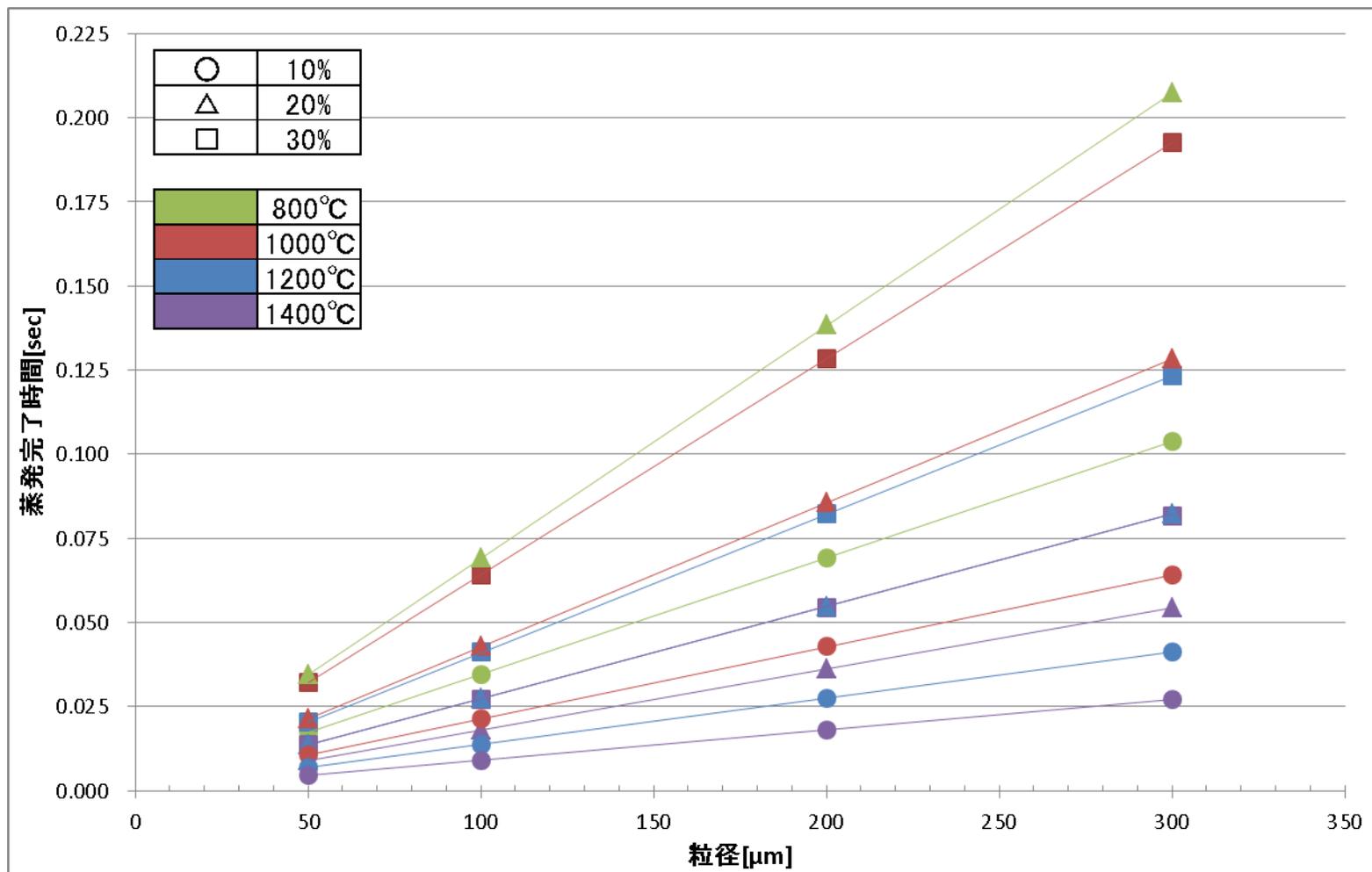


図 1. 4. 3-2 蒸発時間に関する粒径、水分率、温度の相関図

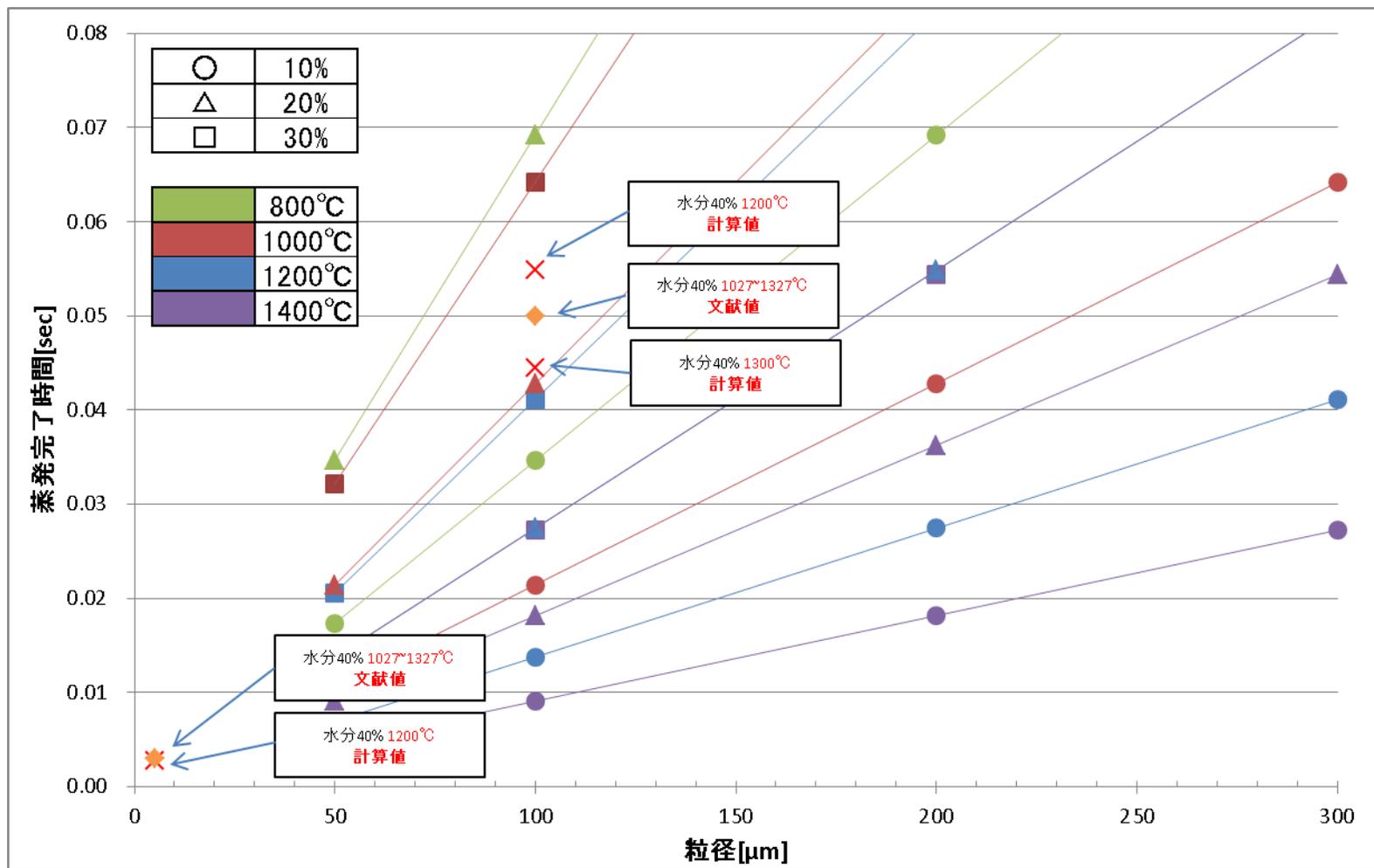


図 1. 4. 3-3 文献値と計算値の比較

1.4.4 まとめ

水分の含有率と蒸発時間の関係は線形的に表され、水分の含有率が多くなれば蒸発時間も長くなり、同じ水分含有率でも雰囲気温度が高いほうが蒸発時間は短くなる。また、粒径が大きくなるほど蒸発時間は長くなることが分かった。また、蒸発完了時間に関する粒径、水分率、温度の相関図によると、水分含有率 30wt%、温度 1200℃の場合、蒸発完了時間は 100 μm の場合、約 0.04sec、200 μm の場合、約 0.08sec である。炭化燃料の粒径がレーザー回折法の測定結果である約 27 μm で水分が 30wt% 場合、温度が 1200℃以上だと、約 0.02sec 以下の極短時間で水分が蒸発することが分かる。

電中研の文献値と今回算出した計算値を比較すると蒸発完了までの時間は近似している結果となった。ただし、今回算出した計算値は表面水分に限ったものであり、固有水分が多くなると計算による推定は困難である。

水分の含有率が多い場合、液架橋現象により粒子同士が結合し、粒径が大きくなることが考えられる。燃焼炉全体の燃焼率を高めるためには、極短時間で水分を蒸発させることが必須となるため、粒径を小さくする、もしくは水分率を低下させる必要がある。また、雰囲気温度を上げるほうが他のパラメータを向上させるよりも効果的であるが、雰囲気温度を上げるのは実績より難しいことが言える。そのため、簡易的に粒径を小さくする、水分含有率を低下させる必要がある。

2. 炭化燃料の粒径測定

前章より粒径が蒸発時間に影響することが分かっており、解析や用途検討する上では、利用する炭化燃料の粒径測定が非常に重要である。本章では、種々ある粒径の測定方法についてその特徴を示し、本事業における粒径測定方法について検討した結果を示す。図 1.3-1 に示すように炭化施設で使用予定の燃料種は 3 箇所から取り出される選別後炭、粉碎後炭、造粒前炭の 3 種類であり、利用先で利用予定の燃料種は造粒前炭である。

2.1 レーザ回折・散乱法による粒径分布測定

炭化燃料 3 種の粒径分布をレーザ回折・散乱法にて求めた。媒体中に分散された粒子にレーザ光を照射すると、レーザ光は粒子により回折現象を引き起こす。この回折光をレンズで集光すると焦点面に回折リングが得られる。この回折リングの径と光の強度分布からフラウンホーファーの光回折式を基本とした解析を行うことにより、粒子一つ一つにおける粒子径分布を求めることができる^[10]。ただし、レーザ回折・散乱法では燃料を媒体中に分散させて粒径分布を測定するため、粒子同士が結合していた場合も、ばらばらになってしまう。そのため、実際にバーナ等で噴射される粒径分布ではないという問題点がある。

表 2.1-1 に粒径分布測定における使用機器、測定方法、測定条件を示す。使用機器の写真を図 2.1-1 に示す。図 2.1-2 に選別後炭、粉碎後炭、造粒前炭の粒径分布を示す。

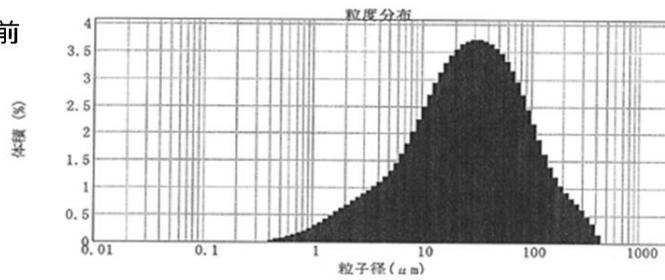
表 2.1-1 粒径分布測定における使用機器、測定方法、測定条件

使用機器	LMS-2000e (株式会社セイシン企業製)
測定方法	1. 分散媒のみでブランク測定を行った。 2. 試料を予め超音波で分散させた。 3. 試料を分散槽に入れ、循環式にて粒径分布測定を行った。
測定条件	測定範囲 : 0.020 ~ 2000.0 μm 使用溶剤 : I. P. A 超音波分散時間 : 1 分



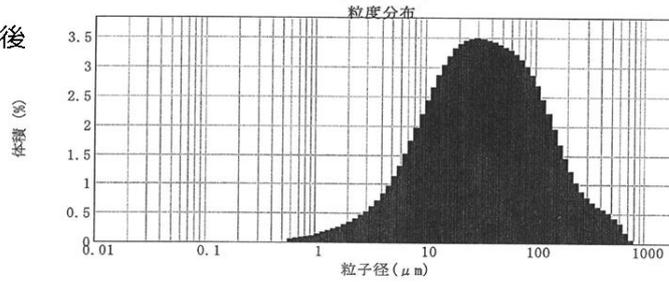
図 2.1-1 LMS-2000e (株式会社セイシン企業製)

①造粒前



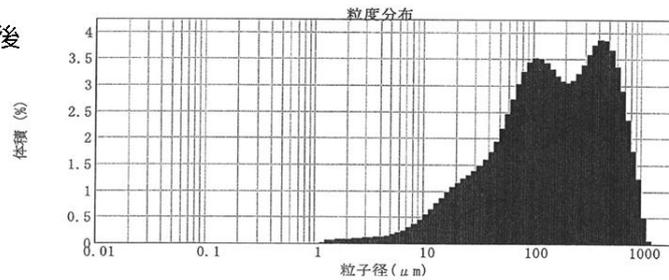
D50=27.9μm
平均径=49.9μm
最小径=0.4μm
最大径=448μm

②粉碎後



D50=34.1μm
平均径=68.1μm
最小径=0.6μm
最大径=893μm

③選別後



D50=157.6μm
平均径=248.1μm
最小径=1.1μm
最大径=1262μm

図 2.1-2 炭化燃料 3 種の粒径分布

2.2 ふるい分けによる粒径分布測定

本事業で用いられる造粒前炭化燃料の粒径分布は、レーザー回折散乱分析等によって調べた結果、炭化燃料の平均粒子径が、 $27.9\mu\text{m}$ 、と非常に細かいことが分かっている。この粒子径は、炭化燃料の一次粒子径に相当すると考えられる。一方で、実際の炭化燃料は、一次粒子が凝集した二次粒子の形で存在し、このような二次粒子の形態における炭化燃料の挙動が燃焼や乾燥では重要になる。試験を行っている中で、炭化燃料の中に目視で確認できるような粗大な粒子が散見されたため、このような大きな粒子がどの程度存在しているか、定量的に把握するため、ふるい分け試験を行った。また、併せてマイクロメートルオーダの二次粒子の量をふるい試験で定量することを試みた。

粉体のふるい分け試験は、JIS 法では、通常、前処理として乾燥工程があり、絶乾のものを評価する。また、凝集性の高い粉体のふるい分けでは、液中で粒子同士を分散させてふるい分けを行うこともある。試験で使用する炭化燃料は含水率 30% の状態で燃料として使用する。従って、水を含んだ状態での、粒径分布が重要である。そのため、炭化燃料の乾燥操作は行わず、乾式ふるいを用いて粒径分布を測定し、目視でも確認されたミリメートルオーダの粗粒を定量的に評価すること、噴霧試験や粉砕試験時の水による凝集性を加味した状態でのマイクロメートルオーダの二次粒子の粒子径を評価することを、目的として試験を行った。手動ふるい分けで効果のあることを確認した後、試験の効率、誤差の極小化を目的として機械による自動ふるい試験を行った。

2.2.1 手動ふるい分け

(1)ミリメートルオーダの粗粒のふるい分け

最初に、ミリメートルオーダの粗粒を定量することを目的として手動によるふるい試験を行った。図 2.2.1-1 に示すふるいを使い、人の手により、フレコンに保存されている西海市の炭化センターで作られた造粒前の炭化燃料を用いて、粒径分布測定を行った。この炭化燃料は、炭化燃料の供給および搬送の予備試験に使われたものと同じロットのものである。本試験に用いたふるいは、目開きが 9.5mm 、 4.75mm 、 2.36mm 、 1.18mm 、 $600\mu\text{m}$ のものである。炭化燃料の量は、粗粒を定量するのに十分な量を確保するために、 300g 程度を一度にまとめてふるった。そして、1 回の試験では 4000g 程度の炭化燃料をふるい、粒径ごとに集めた炭化燃料の重量を測定し、粒径分布を求めた。また、 9.5mm から 4.75mm のふるいは、1 分以内に、 2.36mm のふるいでは 2 分程度で完全にふるわれた。 1.18mm と $600\mu\text{m}$ のふるいでは、5 分程度で、炭化燃料がふるいをほとんど通過し

なくなったため、これをもって、ふるいが完了したとみなした。ふるい試験は3回繰り返し行った。

図 2.2.1-2 は、ふるい試験から得られた炭化燃料の粒径分布である。試験は3回行った。図 2.2.1-3 は、ふるい操作によって分けられた炭化燃料の写真である。炭化燃料には、9.5mm以上の粗粒が5%程度存在し、2.36mm以上のものでは累計で25%程度存在することがわかった。これら2.36mm以上の炭化燃料は、人の手によるふるい試験でも、容易に速やかにふるうことができた。また、試験に用いた炭化燃料は多少の付着性は確認されたが、ふるい上で粒径が成長するような造粒性を示すことはなかったこと、ふるい分けられた粗粒は軽く指で押してもつぶれない程度の硬さがあったことから、炭化燃料がフレコン内に保存されていた時点で存在している粗粒であると考えられる。

(2)マイクロメートルオーダーの二次粒子のふるい分け

上記、試験によって、炭化燃料には2.36mm以上の粗粒が25wt%程度含まれていることが分かった。一方で、1.18mm以下の炭化燃料の粒径分布を見ると、2.1レーザー回折・散乱法の造粒前の分布と比較して、大きな粒径分布になっていることが分かった。そこで、ふるいの条件を検討したところ、含水率30%の炭化燃料では粒体間の付着力が高いため、一度にふるう量が多い場合、1.18mm以上のものと異なり、1.18mm以下のふるいでは、目詰まりがおこり、十分にふるえないが、ふるい量が10g程度であれば、目詰まりを起こすことなく、ふるわれることが確認された(図 2.2.1-4)。そこでマイクロメートルオーダーの二次粒子の粒径分布を評価したい際には、10g程度の重量でふるいを行うことにした。



図 2.2.1-1 試験に使用したふるい

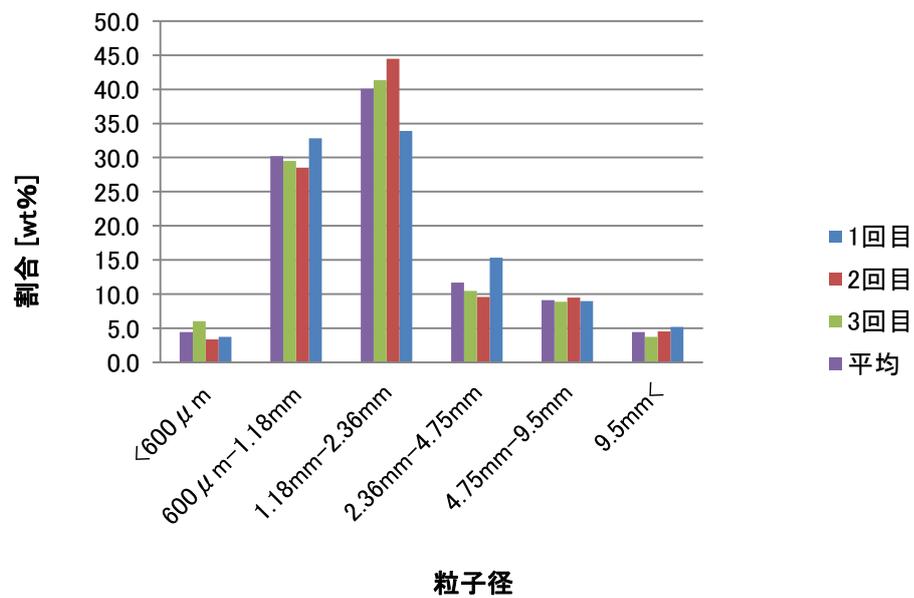
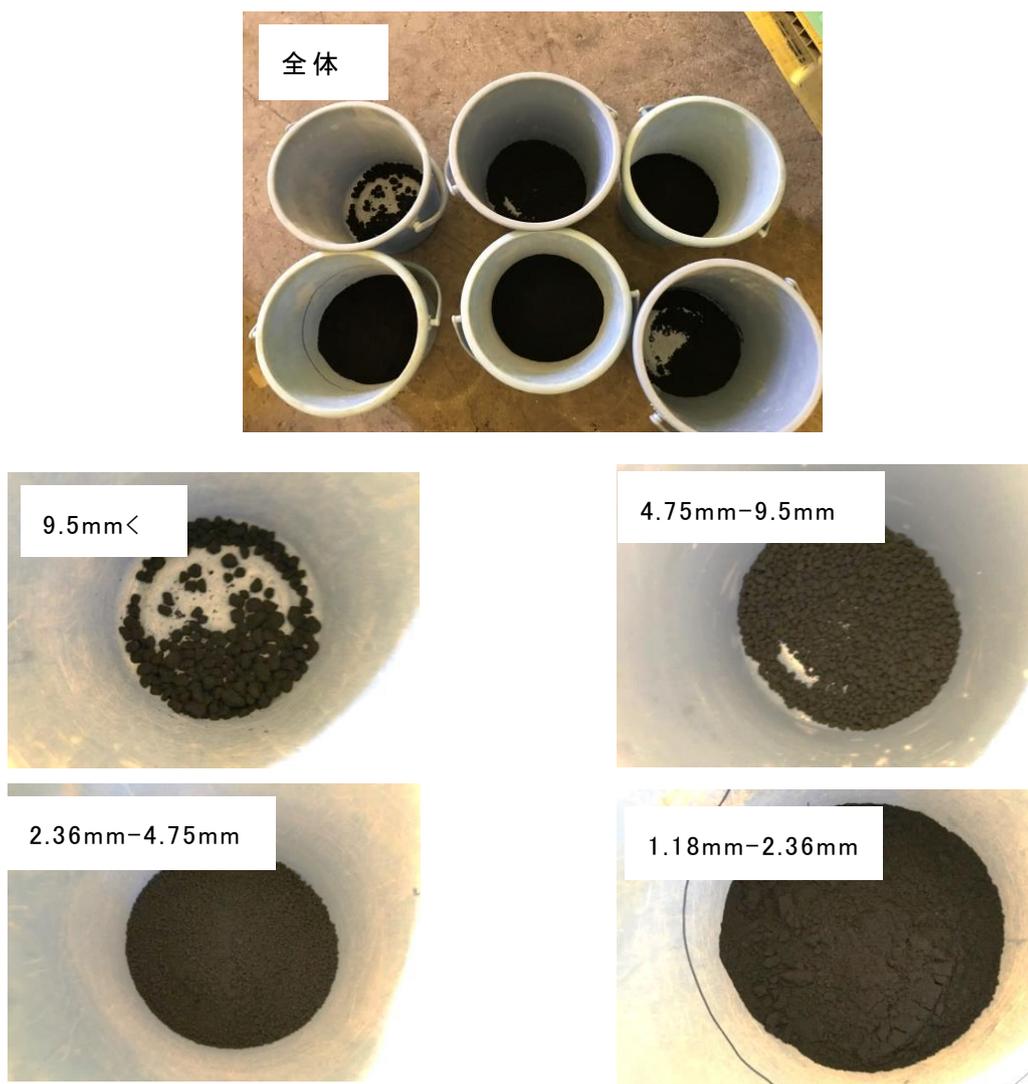


図 2.2.1-2 手動ふるいによる炭化燃料の粒径分布



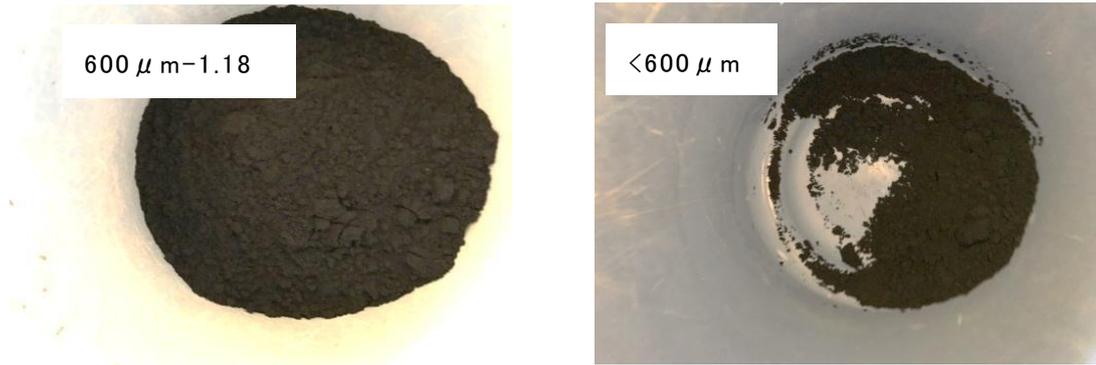


図 2.2.1-3 手動ふるいにより分けられた炭化燃料

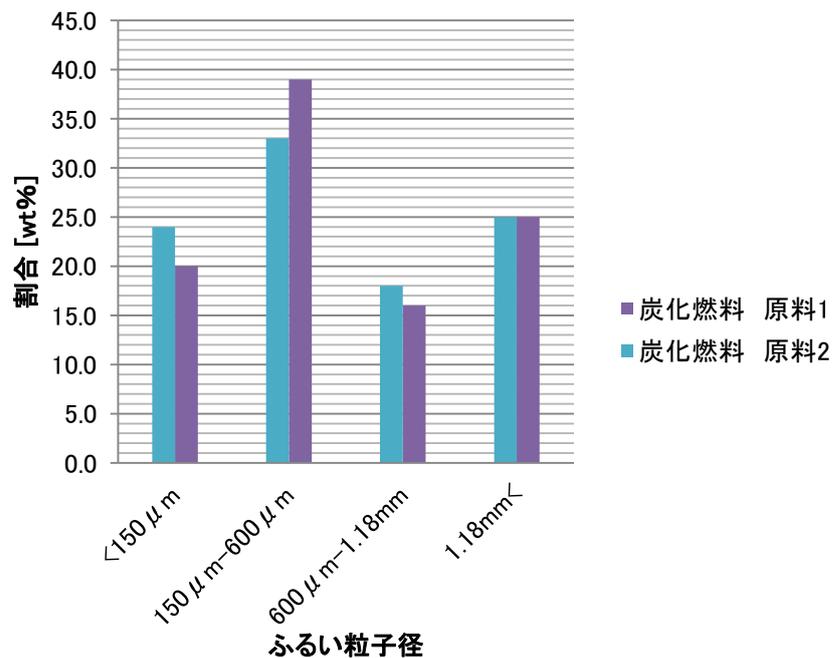


図 2.2.1-4 手動ふるいによる炭化燃料の粒径分布（ふるい重量 10g）

2.2.2 自動ふるい分け

手動ふるい分け試験では、操作に手間がかかるため大量のサンプルを処理することが難しい、また、手動のため個人差による誤差やふるい中の飛散による誤差も生じ得ると考えられる。そこで、炭化燃料の粉砕試験や噴霧搬送試験では、機械による自動ふるい装置を用いた。

試験装置は W. S. TYLER 社製の RX-29 ふるい振盪機である(図 2.2.2-1)。ふるいは 2.36mm、1.18mm、600 μm、150 μm のものを用いた。条件を検討したところ、機械ふるいでも、大量の炭化燃料を一度にふるおうとすると目詰まりをおこしたことから、ふるい重量は 10g、ふるい時間は 20 分とした。粉砕試験等の各種試験における粒径分布の結果と評価については、それらの章に示すため、この節は、炭化燃料の粒径分析の結果と手動ふるいとの違いについて記す。



図 2.2.2-1 W.S. TYLER 社製の RX-29 ふるい振盪機

試験の結果、自動ふるいを採用することで、手動よりもふるい工程が効率化され、多くのサンプルを測定できるようになり、再現性も確認できた。しかし、600 μ m以下の測定値は、後で述べる画像分析やレーザー回折より大きい粒径分布となっており、実際の粒径としては信頼性が低い(図 2.2.2-2)。

2.2.3 まとめ

ふるい試験の結果より、未粉碎の原料には 25wt%の 2.36mmを超える粗粒が含まれていること、それ以下の粒子の大部分は 150 μ m程度の粒子であることが分かった。しかし、含水率が高い炭化燃料は、粒径分布が大きくなる可能性があり、水分による影響も考慮が必要である。

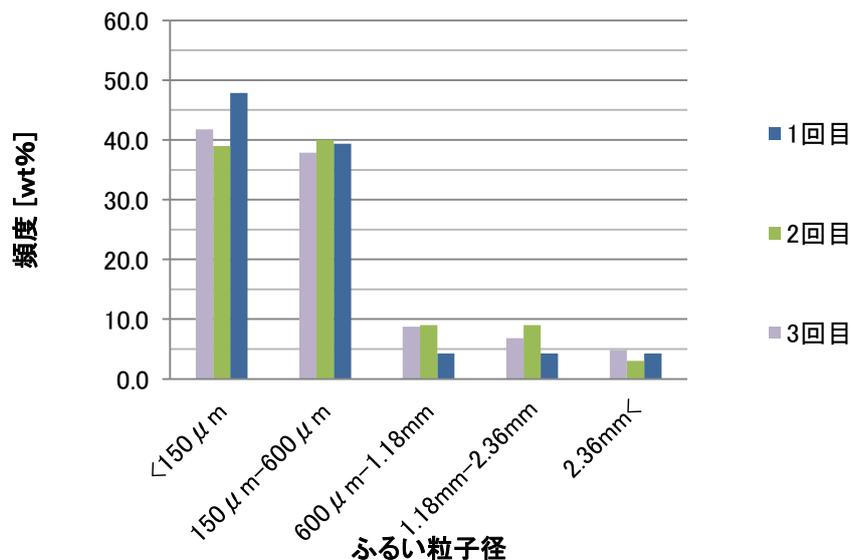


図 2.2.2-2 自動ふるいによる炭化燃料の粒径分布

2.3 粒子画像分析による粒径分布計測

2.3.1 目的

一次粒子径 $30\ \mu\text{m}$ の炭化燃料について凝集状態を把握するため分散圧力 3 条件について粒径分布計測を実施した。またさらに手篩いによる $600\ \mu\text{m}$ 以下、 $600\text{--}1180\ \mu\text{m}$ の 2 サンプルについて粒径分布を計測した。

2.3.2 計測概要

粒子画像分析装置として Malvern 社製 Mophologi G3 (図 2.3.2-1) を用いて、分散圧力 0.5, 1.0, 1.5bar の 3 条件および手篩いによる 2 サンプルの粒径分布計測および計測画像の観察を実施。



測定範囲	0.5 μm – 10mm ※画像解ざむせ機能使用時					
測定項目	個々の粒子の形状パラメータを算出し、それらの分布が表示できます。 円相当径、長軸径、短軸径、周長、面積、アスペクト比、円形度、円形度2*、包絡度(周長)、包絡度(面積)、長短度(1-アスペクト比)、輝度値 ※円形度2=4 π 面積/周長 ²					
光学システム	レンズ倍率	2.5X	5X	10X	20X	50X
	17インチモニタ上のトータル倍率	123X	247X	494X	987X	2468X
	最小粒子径 (μm)	13	6.5	3.5	1.75	0.5
	最大粒子径 (μm)	1000	420	210	100	40
	開口数	0.075	0.15	0.3	0.4	0.55
	焦点深度 (μm)	97.78	24.44	6.11	3.44	1.82
	作動距離 (mm)	8.8	18	15	13	9.8
	光学系	明視野、暗視野の切り替え機構付き顕微鏡				
測定ステージ	180 \times 110 (mm) または 76 \times 26 (mm) 4枚セットの任意選択					
CCDカメラ	ピクセルサイズ: 2.7 μm \times 2.7 μm 、2592 \times 1944 (5 MegaPixel)					
粉体分散ユニット モフォロギ G3SE に内蔵	試料の分散条件(空気圧・噴出時間・静置時間)をSOP(標準操作手順)に設定後、自動で分散操作・測定を実行します。 (180 \times 110 mm測定ステージ選択時) ※別途、圧縮空気源が必要となります。					
トレーサビリティ	21CFR 対応、IQ/OQ対応、NPLにトレーサブルな標準スケールで校正。					

図 2.3.2-1 Malvern 社製 Mophologi G3

2.3.3 計測結果

分散圧力とD50平均粒子径を表2.3.3-1に示す。各粒径プロファイルを図1, 2, 3に示す。分散圧力は最初にプレパートに試料を分散する際の噴霧圧力で標準は1.0bar、最低が0.5bar。結果からは噴霧圧力の凝集への影響は小さく見えるが、画像ファイルをチェックしたところ1.5barには凝集していない $799\ \mu\text{m}$

と576 μm の粒子が1つずつ含まれており、これを除外するとD50は98.3 μm となる。全体的に100 μm 以上になると凝集した粒子が増え、上は300 μm 程度。0.5 barと1 barでは凝集の状態も含め、顕著な差異は見られなかったが、1.5 barでは凝集体は比較的少なかった。

表 2.3.3-1 計測結果

分散圧力 (bar)	D50(μm)
0.5	126.7
1	122.8
1.5	148.7

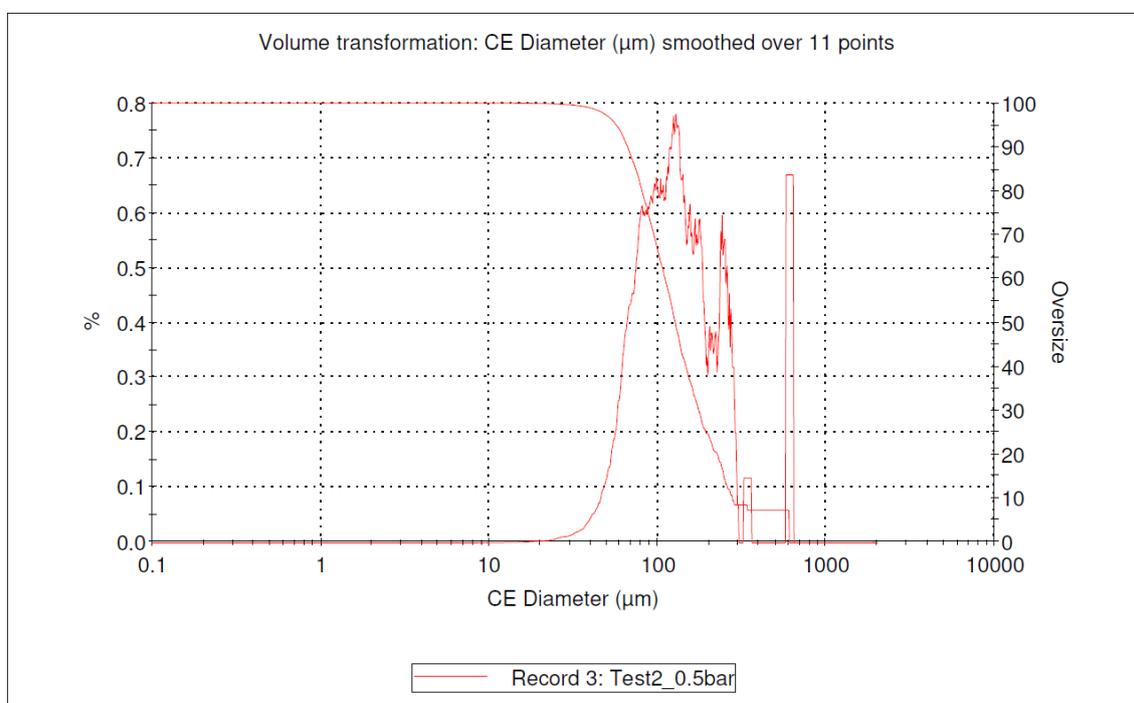


図 2.3.3-1 分散圧力 0.5 bar (D50 : 126.7 μm)

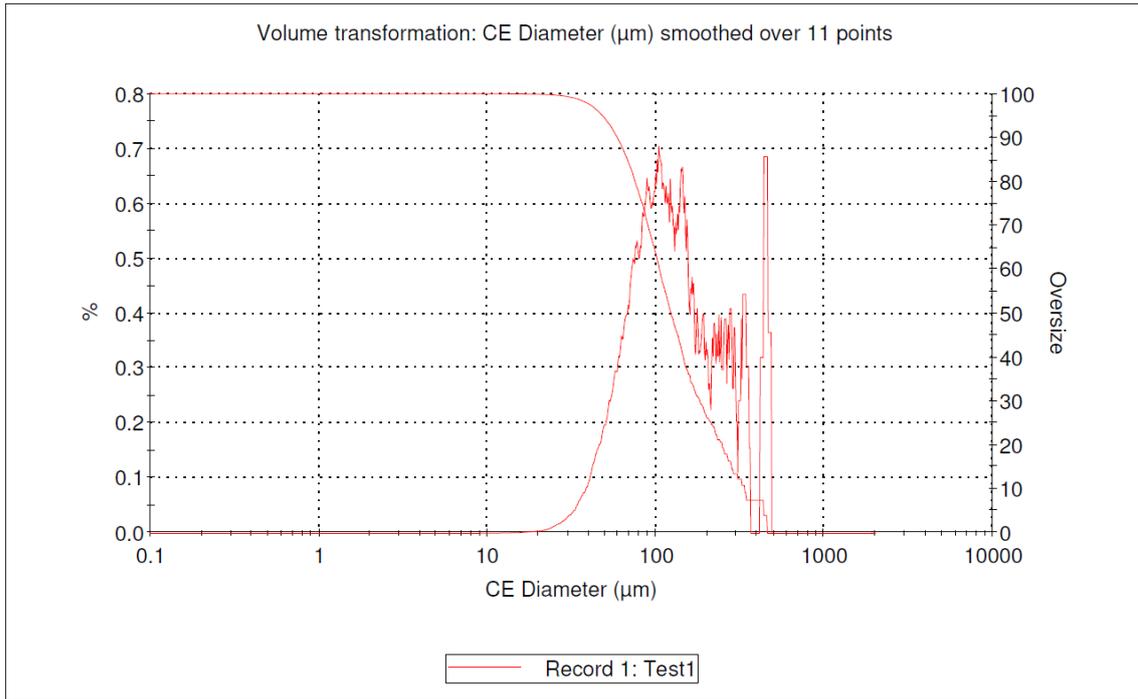


図 2.3.3-2 分散圧力 1.0 b a r (D50 : 122.8 μm)

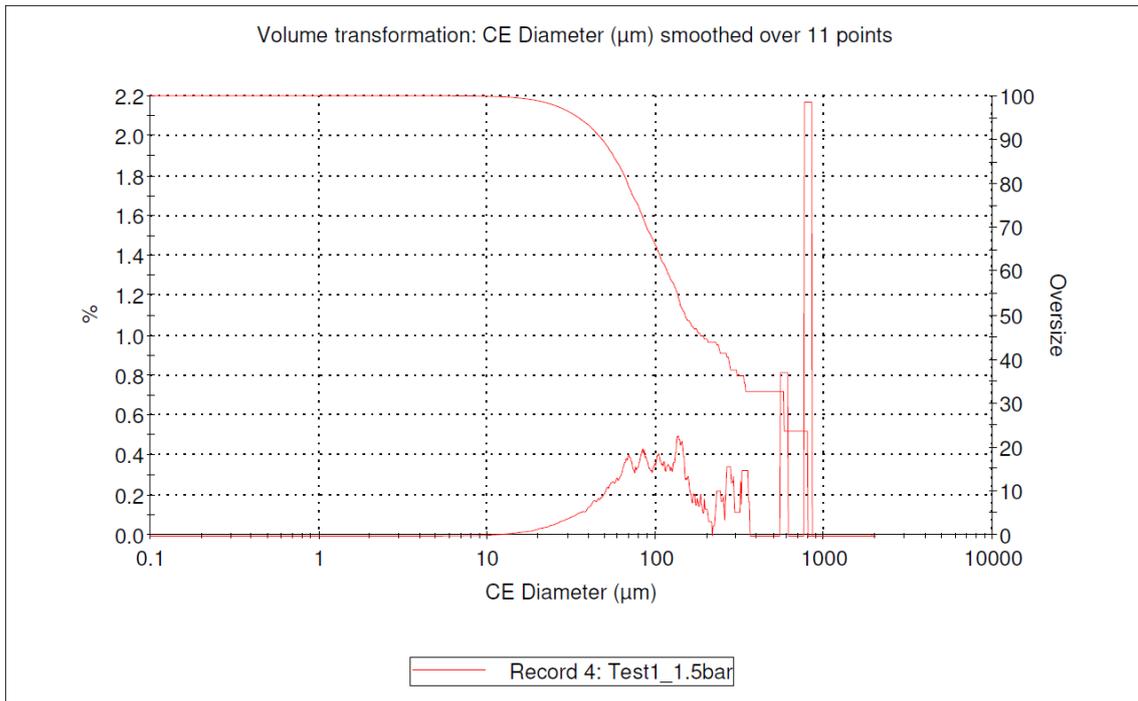


図 2.3.3-3 分散圧力 1.5 b a r (D50 : 148.7 μm)

また手篩い2サンプルのD50平均粒子径を表2.3.3-2に示す。各粒径プロファイルを図2.3.3-4, 図2.3.3-5に示す。分散圧力については前回下げた0.5 b a rと標準の1.0 b a rで顕著な差が見られなかったことから、1.0 b a rとした。600 μm ア

ンダについてはD50が110.2 μm 、最大粒径が598.9 μm で篩目通りの結果となったが、600-1180 μm についてはD50が128.6 μm と600 μm アンダと約20 μm しか変わらない結果となった。

表 2.3.3-2 計測結果

サンプル	D50(μm)
600 μm アンダ	110.2
600-1180 μm	128.6

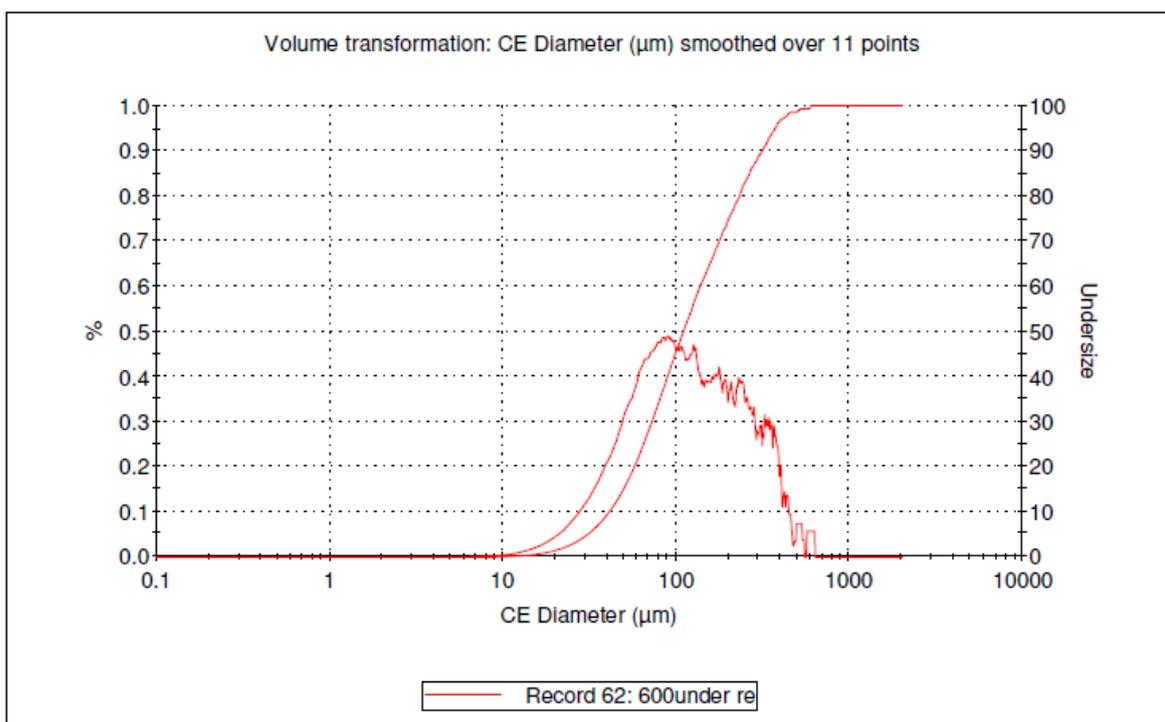


図 2.3.3-4 手篩い 600 μm アンダ

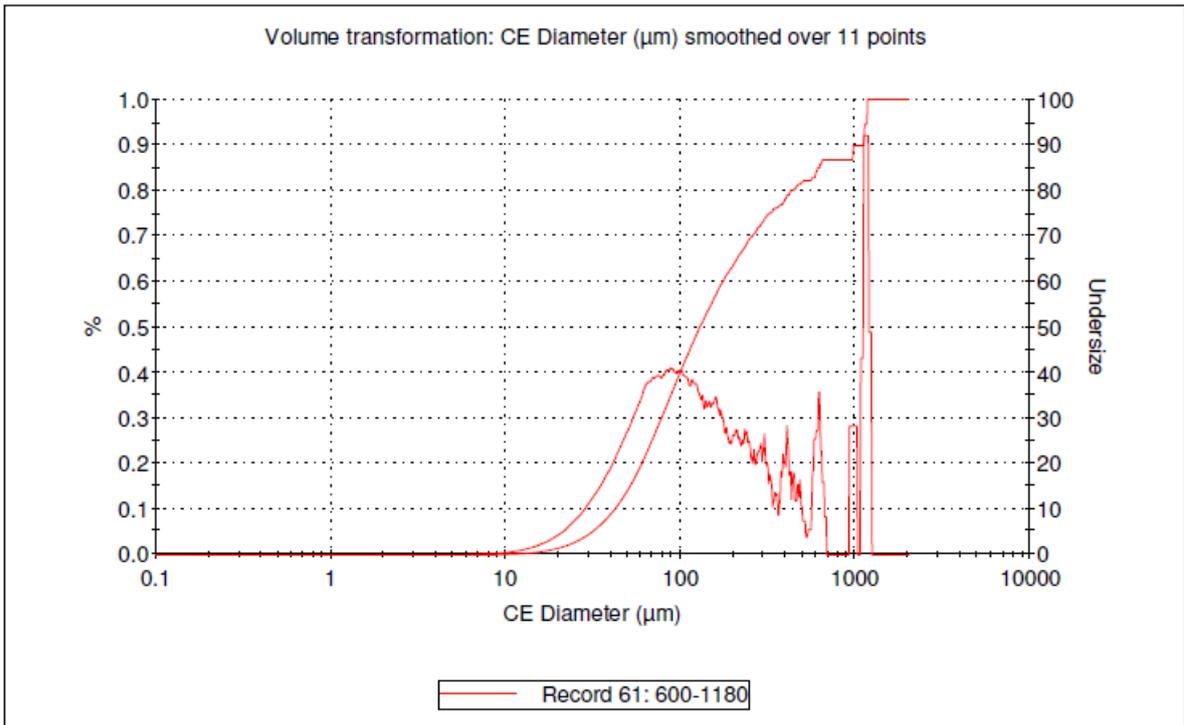


図 2.3.3-5 手篩い 600-1180 μ m

2.3.4 まとめ

燃焼試験に際し気流搬送後のバーナ口での粒径分布予測は困難であるが、今回の圧力範囲内ではピークは何れも100 μ m程度であった。しかしサンプルケースの中には20-30 mmに造粒したものあり、気流搬送中に崩れるのかについては不明である。また1 mm程度の本当に大きな粒子も含まれており、これが一粒入るだけで粒径分布としては大きく変わることになる。付着は表面水分の液架橋力によると考えられるが、乾燥してバラバラになれば燃焼への影響は小さいが、粒子間の水分の蒸発が遅いと燃焼に大きく影響することになる。

また手篩い600-1180 μ mサンプルには600 μ mアンダが83.5%含まれており、サンプル粒子数337698個のうち、600 μ mオーバはわずか7粒子のみである。原因としては液架橋力で凝集して篩い上に残った粒子が大半であったこと、また比較的小さい凝集体であったため乾燥が進みやすく、計測時には凝集が崩れたものと推測する。

粒子画像分析装置は粒子の形状が確認できるため、単体粒子なのか凝集しているのかを目視で確認することができる点でメリットがあるが、炭化燃料のように高水分の粒子の場合、試料のサンプリング方法や保管方法により、サンプリング時と計測時で水分が変化すると計測結果が変わるデメリットがある。

2.4 レーザ回折式連続粒子径分布測定

2.4.1 目的

前述したように高水分の炭化燃料についてバーナ噴霧時の粒径分布が重要であることから、噴射ノズル直後の粒径分布を連続的に測定できるレーザ回折式にて確認するとともに巡回エア風量、圧送エア温度、燃料破砕有無の影響を評価する。

2.4.2 計測概要

Malvern 社製 Spraytec デモ機を用いて、以下の 6 条件についてそれぞれサンプリングレート 1 Hz で、3 分間噴霧粒径を計測した。



測定原理	レーザ回折法 (Mie理論とFraunhofer近似および多重散乱補正機能 (特許))
測定範囲	0.1 μ m-2000 μ m
光学レンズ	300mmレンズ:0.1 μ m-900 μ m 750mmレンズ:2.0 μ m-2000 μ m
ワーキングレンジ	100mm (粒径0.5 μ m時)、1m以上 (粒径10 μ m時)
濃度範囲	最小透過率 5%以上 (試料により異なる)
光源	ヘリウムネオンレーザー 632.8nm 2mW
レーザークラス	Class 3R (IEC60825 : 1993+A1+A2)
光軸調整	自動高速調整
測定速度	連続モード: 1Hz 高速モード: 2.5kHz (標準)、10kHz (オプション)
正確度	1% (Dv50, NISTレーサブル標準ラテックス使用時)
再現性	CV1% (Dv50, NISTレーサブル標準ラテックス使用時)
測定トリガー	内部トリガー:透過光または散乱光レベル 外部トリガー:TTL入力またはスイッチ入力
外部機器との同期	TTL出力ポート (2機)

図 2.4.2-1 Marlvern 社製 SPRAYTEC

表 2.4.2-1 試験条件

試験 No.	時刻	炭化燃料供給量	搬送タ ^ク 外水平長	圧送エア風速	先端からの巡回配管位置	巡回エア風速	搬送タ ^ク 外立ち上げ長さ	熱風エア	備考
		[kg/h]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]	[-]	
No. 13	14:00 頃	90	2400	15	0	50	0	無	-
No. 19	14:27 頃	90	2400	15	0	100	0	無	-
No. 14	14:57 頃	300	2400	20	0	50	0	無	-
No. 20	15:02 頃	300	2400	20	0	100	0	無	-
No. 16	15:41 頃	90	2400	15	0	50	0	有	-
No. 19'	15:55 頃	90	2400	15	0	100	0	無	粉碎燃料

2.4.3 計測結果

図2.4.3-1に各計測条件における3分間の平均粒径分布を示す。また図2.4.3-2に供給量90 k g / h r、図2.4.3-3に300 k g / h r 時の巡回エア風速、図5に炭化燃料の粉碎有無、図6に圧送エア温度のそれぞれと粒径分布の関係をプロットした。

図2.4.3-2、図2.4.3-3より巡回エア増量により、粒径は小さくなる傾向にある。図2.4.3-4より投入前の粒径が噴霧時にも維持されていることもわかった。また図2.4.3-5より圧送エア温度の上昇により400 μ m以上の凝集がほぼなくなることがわかった。

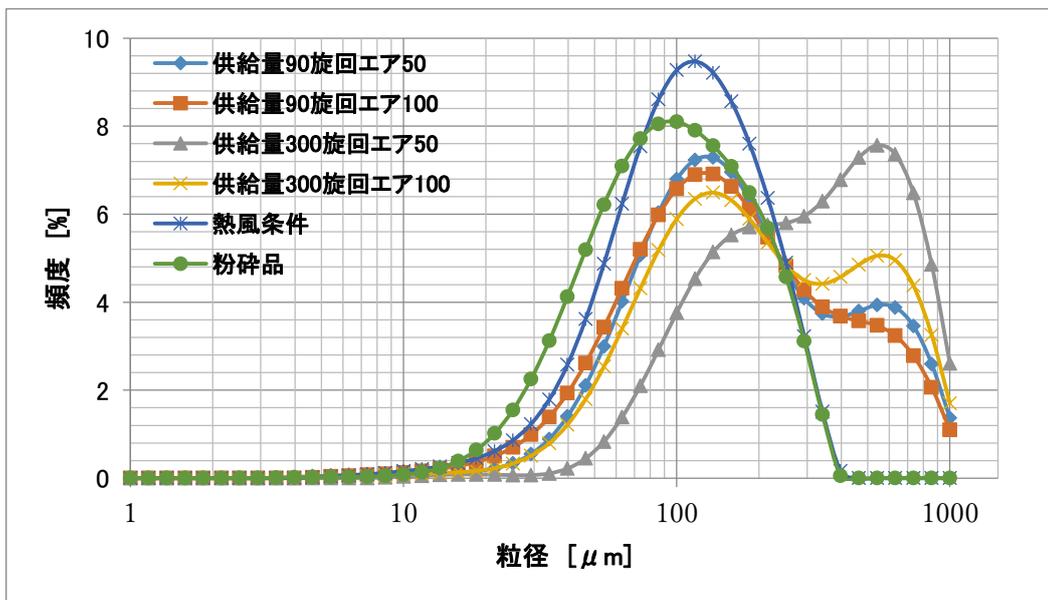


図 2.4.3-1 粒径分布計測結果 (3分間平均)

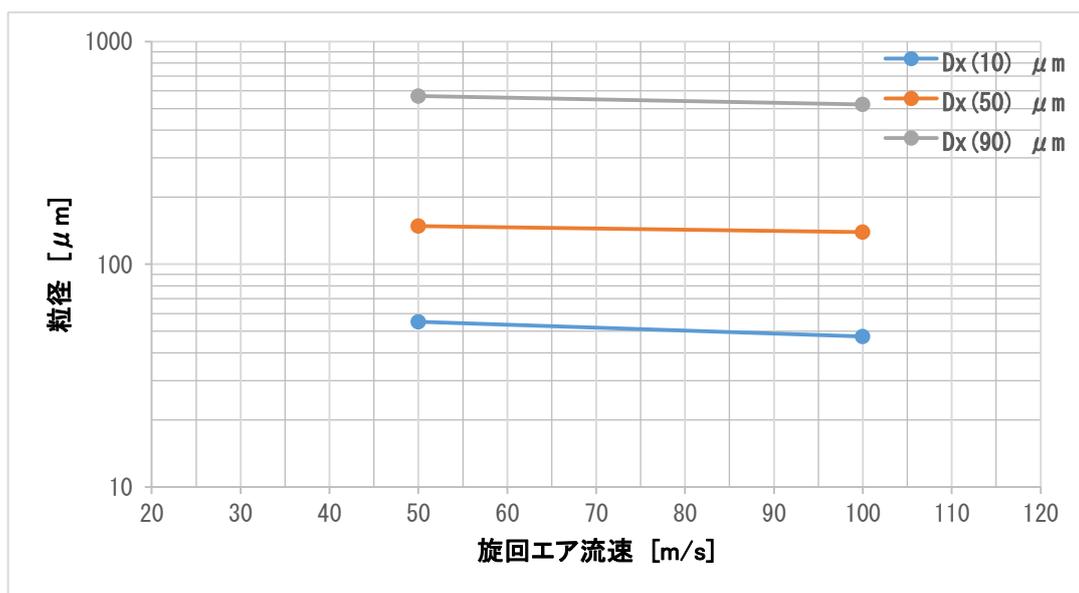


図2.4.3-2 旋回エア風速と粒径の関係 (90 k g / h r)

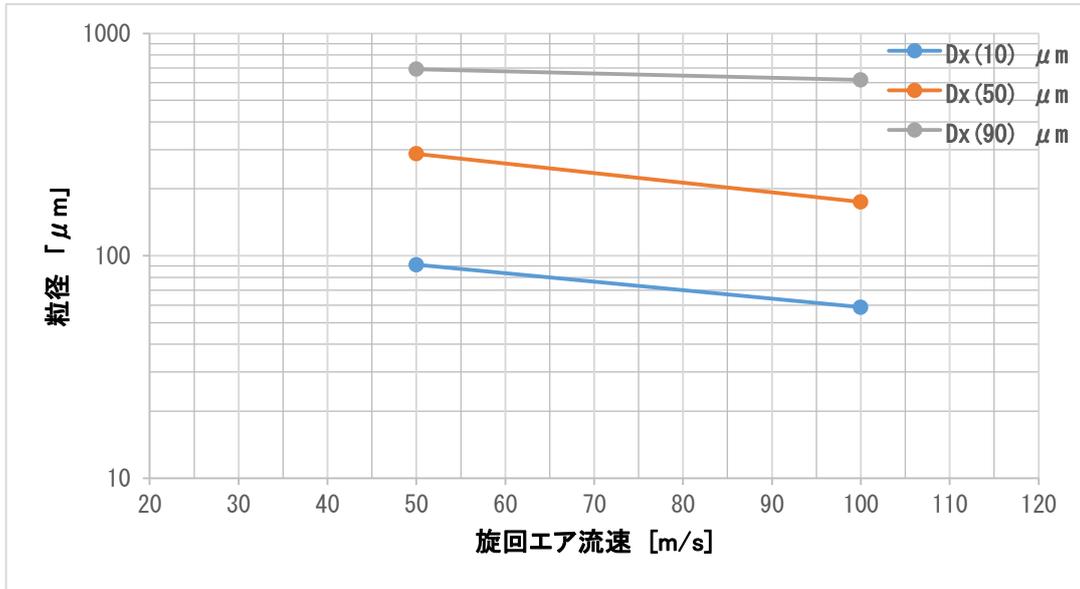


図2.4.3-3 旋回エア風速と粒径の関係 (300 k g / h r)

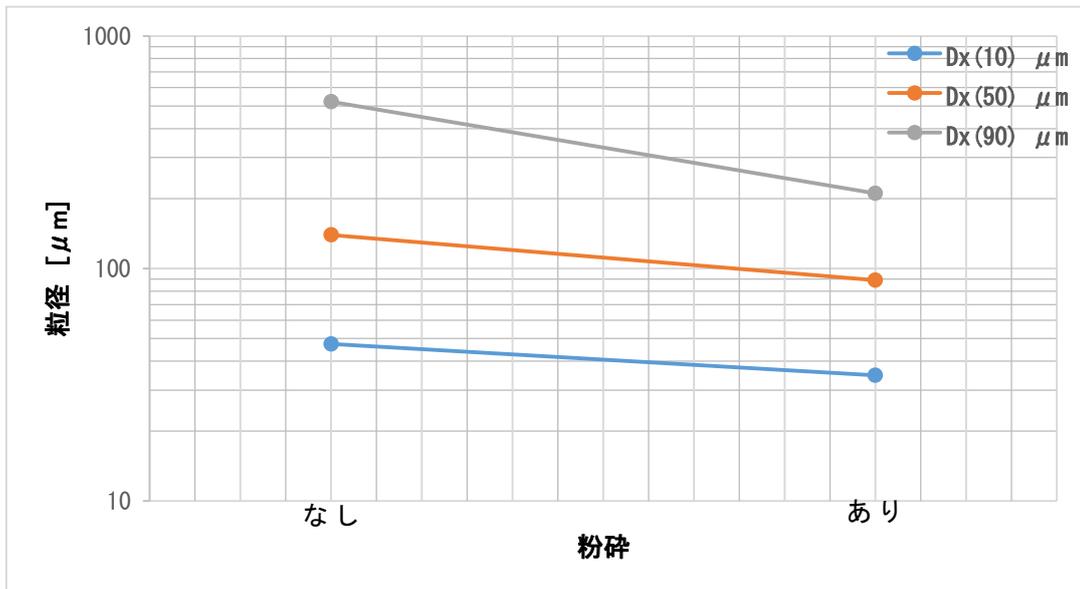


図2.4.3-4 燃料粉砕と粒径の関係

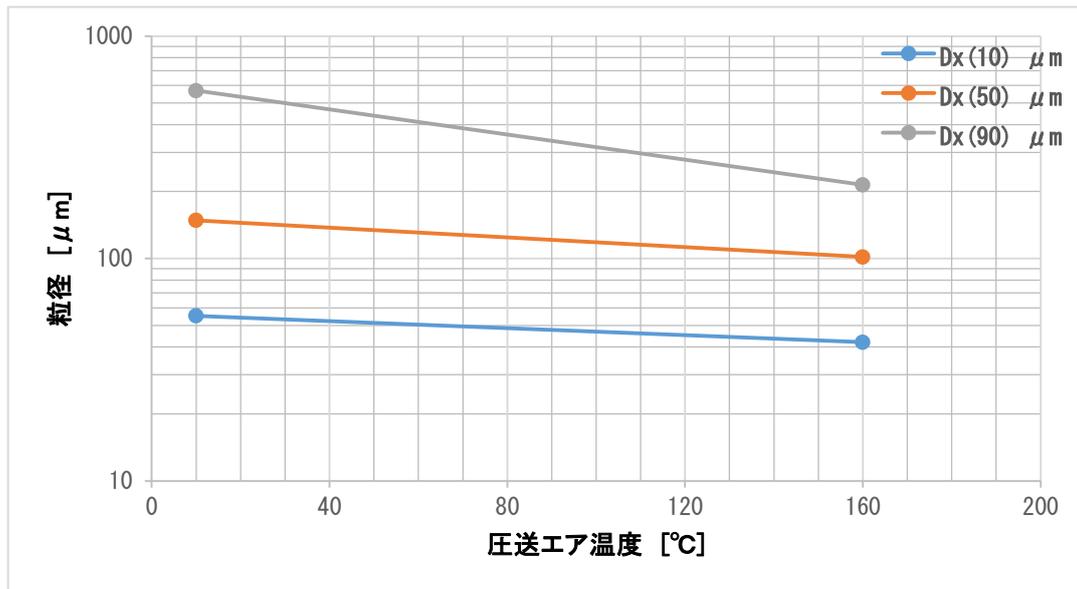


図2.4.3-5 圧送エア温度と粒径の関係

2.4.4 考察

試験では圧送エアの流速は試験開始時に燃料、旋回エアがない状態で、ブローのインバータ周波数により調整して試験を実施している。燃料や旋回エアの供給により圧力損失が増大した分は搬送流量が落ちるため、図2.4.3-3、2.4.3-3で粒径が小さくなるのは大粒径のものが搬送できていない可能性や、旋回エアにより、大粒径のものは外に広がって噴霧するため、中心のみ測定していることで小さくなったように見える可能性もある。また圧送エアの温度を上昇させると搬送管内で気流乾燥により付着水分が減少し、凝集が崩れていると推測される。

今回の計測に使用したSPRAYTECはオンラインで噴霧状態の粒径分布を計測できるため、試験条件による粒径分布への影響を評価できる。レーザ発振部から受光部までの水平方向には最大750mmまで計測できるが、高さ方向は10mm程度の計測幅となるため上下で噴霧に分布がある場合、装置全体を上下に動かすことにより、より精度の高い分布を計測することができる。

2.5 まとめ

これまで、第2章では、炭化燃料噴射時の粒径分布を確認することが重要とし、各粒径測定の方法について述べてきた。それぞれの結論を踏まえ、考察を行う。まず、各測定方法のメリット、デメリットを表2.5.1にまとめる。

表 2.5.1 粒径分布測定方法一覧

装置	メリット	デメリット
2.1 レーザ回折・散乱法による粒径分布測定	粒子一つ一つにおける粒径分布を求めることができる。	燃料を媒体中に分散させて粒径分布を測定するため、粒子同士が結合していた場合も、ばらばらになってしまう。そのため、実際にバーナで噴射される粒径分布とは異なる。
2.2.1 手動ふるい分け	600 μm より大きいサイズの網目でのふるい結果は容易に確認できる。 装置が最も安価である。	作業効率が悪い。 水分の影響により、ふるいの網目に付着がある影響で、小粒径になると、本来の網目サイズの粒子がふるえなくなるため、600 μm 以下のふるい結果は信頼性が低い。
2.2.2 機械ふるい分け	作業効率が良い。 誤差が少ない。 装置が安価である。	上記と同じ。
2.3 粒子画像分析による粒径分布測定	粒子の形状が確認できるため、単体粒子なのか凝集しているのかを目視で確認することができる。 100 μm 付近の小粒径も測定可能。	炭化燃料のように高水分の粒子の場合、試料のサンプリング方法や保管方法により、サンプリング時と計測時で水分が変化すると計測結果が変わる 1180 μm が最大測定可能粒子径であり、測定範囲が狭い。
2.4 レーザ回折式連続粒子径分布測定	オンラインで噴霧状態の粒径分布を連続計測できるため、試験パラメータによる粒度分布への影響を直接評価できる。測定範囲の水平方向は最大750mmまで計測できる。	測定範囲の高さ方向は、10mm程度の計測範囲となるため噴霧に分布がある場合、測定装置全体を上下に動かして計測する必要がある。

2.1 レーザ回折・散乱法による粒径分布測定にて、選別後炭、粉碎後炭・造粒前炭の3種類の炭化燃料について粒径測定を行ったが、水分が最も多い造粒前炭において、最小粒径が測定された。水分が多い場合、凝縮により粒子は大きくなると思われるが、結果から、実際の粒子ではなく、小さい粒子のみを測定してしまっている可能性がある。そのため、他の測定方法についても検討した。表 2.5.1 より、粒径分布の測定結果に関して、2.2.1 手動ふるい分けと2.2.2 機械ふるい分けの結果は同等といえること、2.3 の粒子画像分析と2.4 レーザ回折式連続粒子径分布測定の結果も同等といえることがわかった。

本事業では、バーナ開発のため、噴霧状態での粒径分布が重要なため、2.4 レーザ回折式連続粒子径分布測定が適しているが、測定範囲が狭く、同等の結果を別の測定方法でも得られるため、本事業では、2.2.2 機械ふるい分けと、2.3 の粒子画像分析を各パラメータの測定方法として採用し、レーザ回折式連続粒子径分布測定は、主条件の比較用として取り扱う。

3.1 振動ふるいによる粒径調整

3.1.1 試験概要、目的

第2章の通り、炭化燃料の粒径が蒸発時間に影響することが分かっており、かつ燃焼解析結果にて、粒径 $100\ \mu\text{m}$ 程度であれば高い燃焼率が得られることが分かっている。本節では、炭化燃料の粒径を調整することを目的とし、その方法の一つである振動ふるい機による試験について報告する。

3.1.2 試験方法

図 3.1.2-1 に振動ふるい機概要を示す。試験機は、ホッパー・投入フィーダ・ふるい機で構成しており、ふるい機下に No.1~No.7 の容器を設置し、各所で補修したサンプルの重量を測定した（図 3.1.2-2、3 参照）。また、同時に振動ふるい機下で補修した炭化燃料を一部サンプリングし、用意した各網目サイズのふるいをを使用して、手ふるいによる粒径分布も測定した。本試験では、都合上手ふるいとした。

振動ふるい試験条件を表 3.1.2-1 に示す。炭化燃料の供給時間は 20s 程度で統一した。手ふるい網目サイズを表 3.1.2-2 に示す。ふるい時間は一定として、条件を統一した。

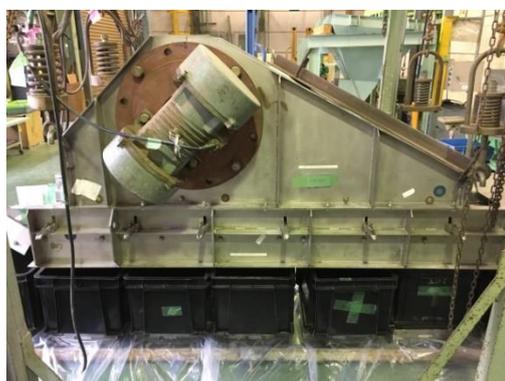
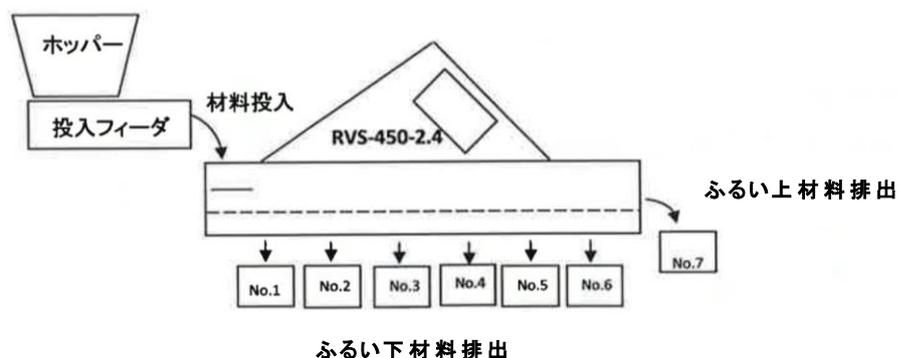


図 3.1.2-2 ふるい機 1



図 3.1.2-3 ふるい機 2

表 3.1.2-1 振動ふるい機試験条件

炭化燃料供給時間(共通)	20s
網目サイズ	2,380 μ m、1,194 μ m、650 μ m
ふるい機振動数	30Hz、(22.5Hz)

表 3.1.2-2 手ふるい試験網目サイズ

網目サイズ	2,360 μ m、1,180 μ m、1,000 μ m、 600 μ m、500 μ m、100 μ m
-------	---

3.1.3 試験結果

表 3.1.3-1 に振動ふるい機試験結果を示し、図 3.1.3-1 に試験の様子を示す。

表 3.1.3-1 振動ふるい機結果

テスト No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
網目(μ m)	2,380			1,194			650			
振動数(Hz)	30			30			30		22.5	
受箱 (kg)	No.1	0.41	0.63	0.43	0.15	0.12	0.12	0.01	0.01	0.01
	No.2	0.70	0.44	0.57	0.41	0.37	0.37	0.04	0.03	0.01
	No.3	0.03	0.06	0.03	0.18	0.21	0.25	0.04	0.03	0.01
	No.4	0.01	0.01	0.01	0.05	0.09	0.17	0.03	0.03	0.01
	No.5	0.01	0.01	0.0	0.01	0.03	0.07	0.04	0.02	0.02
	No.6	0.0	0.01	0.0	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01
	No.7	0.31	0.31	0.28	0.38	0.4	0.52	1.36	1.44	2.71
	(割合)	22%	21%	21%	32%	33%	34%	88%	91%	97%
合計重量(kg)	1.43	1.47	1.32	1.19	1.23	1.52	1.55	1.59	2.78	
目詰まり	無			若干有			有			



図 3.1.3-1 振動ふるいの様子

結果を以下にまとめる。

- ・ 2,380 μm 網目を通過した炭化燃料が 78~79%、1194 μm が 66~68%である。
- ・ 2,380 μm 網目のみ、詰まり無く振るえた。
- ・ 650 μm の網目では、90%以上の炭化燃料をふるうことが出来なかった。

続いて、表 3.1.3-2 に手ふるい試験結果を示し、図 3.1.3-2、3 に試験の様子を示す。また、図表 3.1.3-4、5 に粒子画像分析結果も示す。

表 3.1.3-2 手ふるい結果

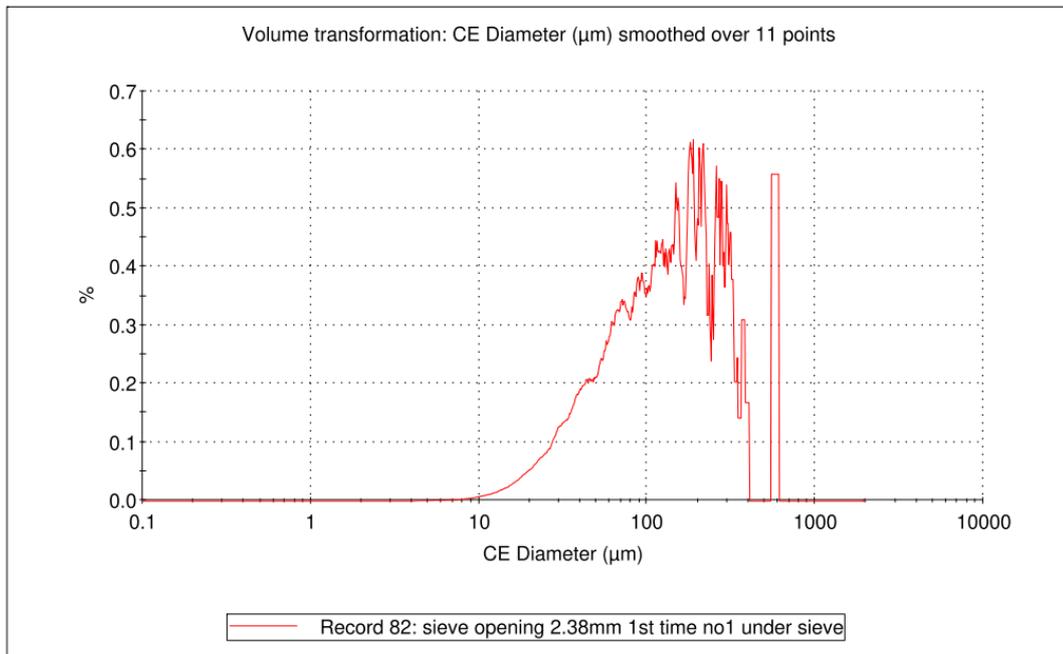
網目 (μm)		2380		1194	
受箱		No.1	No.2	No.1	No.2
ふるい 上重量 (g)	網目				
	2360 μm	0.0	0.0	-	-
	1180 μm	-	-	0.0	0.0
	1000 μm	0.9	2.8	0.0	0.0
	600 μm	0.7	0.5	0.5	0.7
	500 μm	-	-	-	-
	100 μm	6.5	4.3	7.7	7.3
	(割合)	75.6%	52.4%	90.6%	86.9%
100mm 以下(g)		0.5	0.6	0.3	0.4
(割合)		5.8%	7.3%	3.5%	4.8%
合計(g)		8.6	8.2	8.5	8.4



図 3.1.3-2 手ふるい試験 1

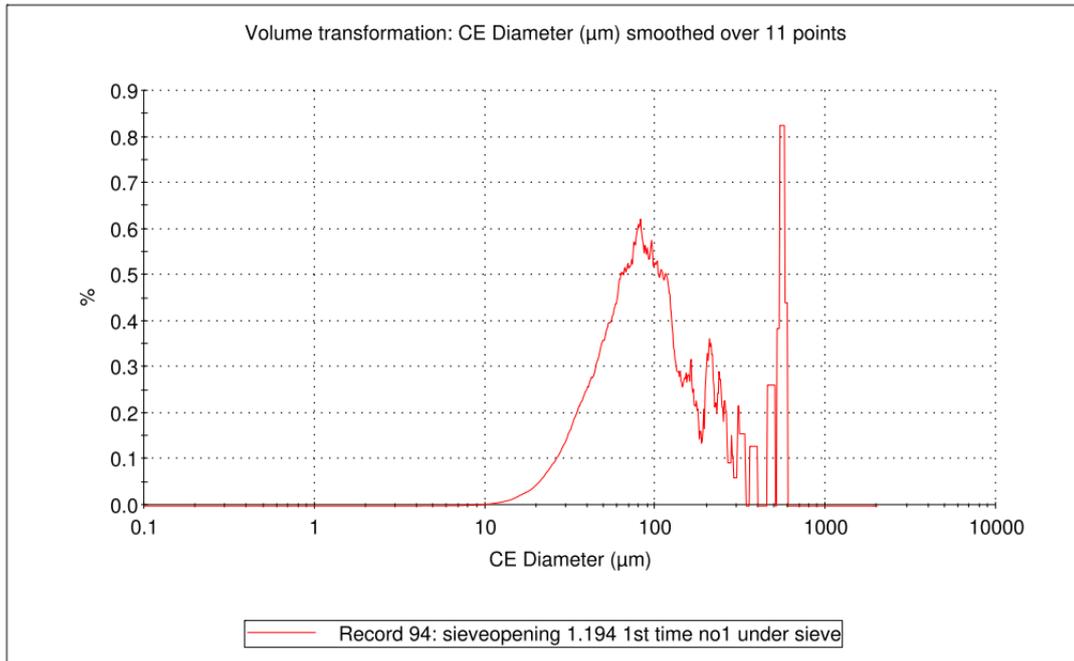


図 3.1.3-3 手ふるい試験 2



Comments:

図 3.1.3-4 網目 2, $380 \mu\text{m}$ にて補修したサンプル



Comments:

図 3.1.3-5 網目 1194 μm にて補修したサンプル

結果を以下にまとめる。

- ・手ふるいにて、100 μm 以下の網目を通過した炭化燃料は 3.5%~7.3%であった。
- ・100 μm ~500 μm の粒径が大半を占めている。
- ・粒子画分析にて、粒径分布を確認したところ、2,380 μm 網目では、200 μm ~300 μm の粒径の粒子が得られたのに対し、1,194 μm 網目では 100 μm 程度の粒子が得られた。

以上より、振動ふるい試験の結論としては、最小粒径を得るためには、1,194 μm 網目の振動ふるいが必要であることが分かったが、20s の試験時間にて 2,380 μm 網目に比べ、詰まりが確認された。得られる粒径が比較的類似しており、詰まりがない条件であることから、最適な振動ふるいの網目は、2,380 μm と考える。

しかし、機器設置のために広いスペースが必要であること、振動ふるい機を炭化施設に導入することによるコストアップが懸念されるため、本事業には適さないと考える。

3.2 粉砕による粒径・水分調整

3.2.1 試験概要、目的

3.1「振動ふるいによる粒径調整」に記載している通り、炭化燃料の粒径は重要なパラメータとなる。さらに、粒子の水分も燃焼に影響するため、粒径と水分を調整することを目的とし、粉砕機による試験を行った。

3.2.2 試験方法

図 3.2.2-1 に粉砕試験機（奈良機械㈱社製）概要を示す。試験機は、ホッパ・粉砕機・モータ・フィルタで構成している。（図 3.2.2-2、図 3.2.2-3 参照）

試験条件（試験パラメータ）を表 3.2.2-1 に示す。試験パラメータは、粉砕機回転数・内部スクリーン孔径、予熱温度、運転時間の4つとしている。各パラメータを変更して試験を行い、各条件における、粒径分布、含水率、機器内部付着量を比較し評価した。なお、試験は運転時間をパラメータとした試験を除き2分間運転で統一した。

また、粒径分布測定は、機械ふるいと粒子画像解析による測定を行った。

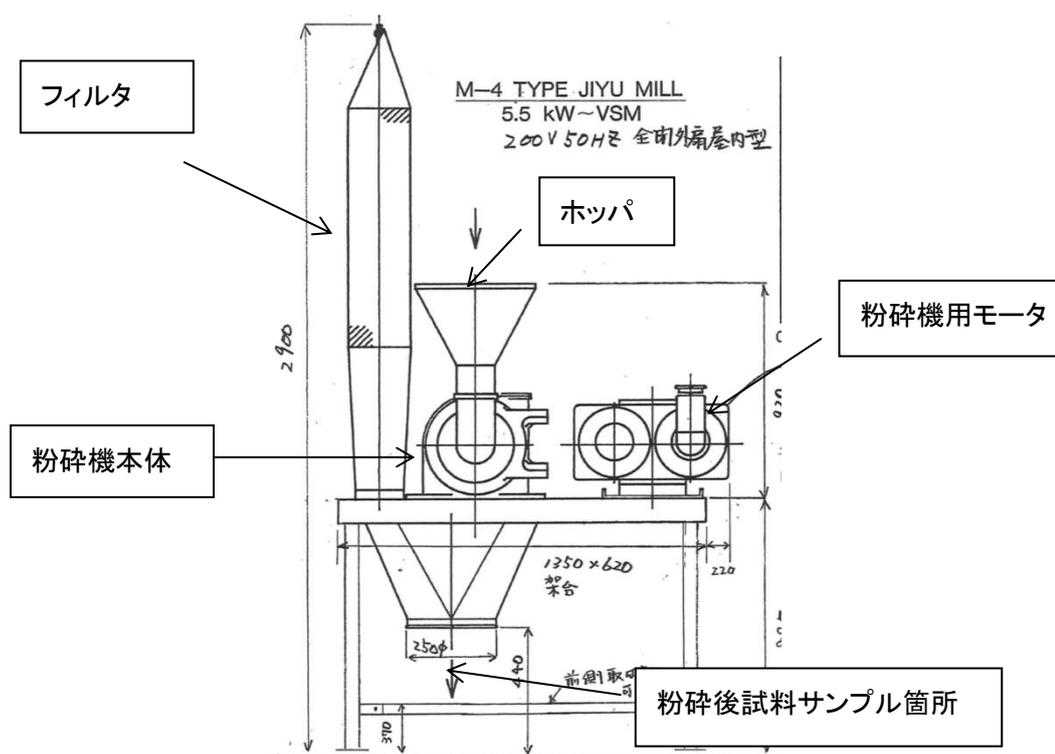


図 3.2.2-1 粉砕試験機概要

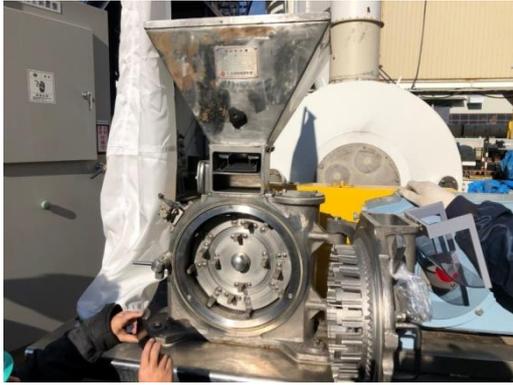


図 3.2.2-2 粉砕機

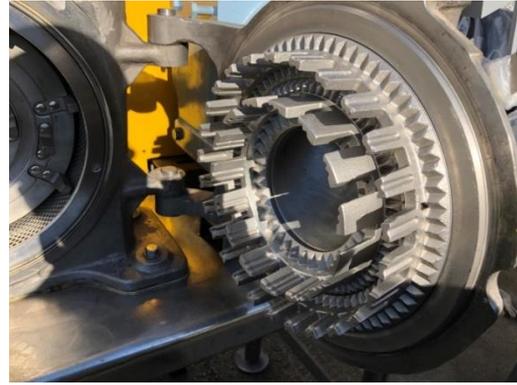


図 3.2.2-3 粉砕機内部

表 3.2.2-1 粉砕機試験条件

粉砕機回転数(rpm)	初期 3000、4000、5000
内部スクリーン	穴径 5mm、スクリーン無
予熱温度	常温、100℃、120℃
運転時間(分)	2、7、11

3.2.3 試験結果

図 3.2.3-1 に粉砕機回転数を変化させた場合の試験結果を示す。棒グラフは機械ふるいによる粒径分布測定結果である。横軸には、補集した各ふるい粒径を示し、縦軸にはその割合を示す。また、表 3.2.3-1 に、含水率と内部付着量も示す。含水率は、粉砕後の数値と () 内には変化量を示している。付着量は、試験用に投入した炭化燃料の全量に対して付着した量の割合を示している。

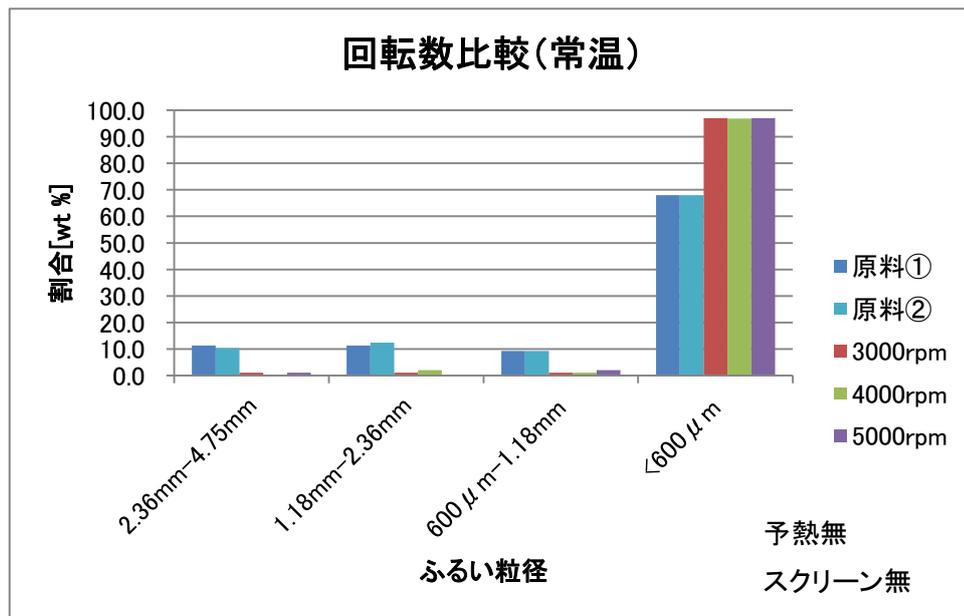


図 3.2.3-1 粒径分布 (回転数比較)

表 3.2.3-1 試験結果（回転数比較）

条件	原料①	原料②	3,000rpm	4,000rpm	5,000rpm
含水率(%)	34.17	32.29	33.01(-1.16)	33.33(-0.84)	33.15(-1.02)
内部付着量(%)	—	—	47.5	37.5	62.5

試験結果より、粉砕機の使用により、600 μ m～4.75mmの粒径分布の割合が合計30%程度からほぼ0%になった。また、回転数の違いによる粒径分布・含水率の違いは見られなかったが、付着量は、回転数が多いほど炭化燃料と歯があたる頻度が多いので増加傾向にあると見られるが、4,000rpmよりも3,000rpmの方が大きいという結果となっており、確認が必要である。

図 3.2.3-2、表 3.2.3-2 にスクリーン有無を変化させた場合の試験結果を示す。

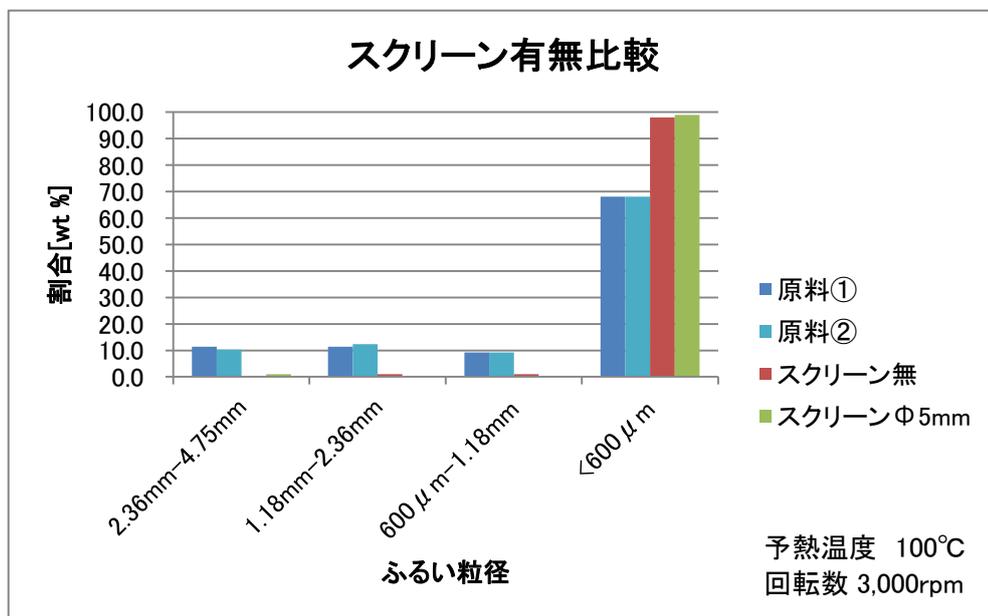


図 3.2.3-2 粒径分布（スクリーン有無比較）

表 3.2.3-2 試験結果（スクリーン有無比較）

条件	原料①	原料②	スクリーン無	スクリーン有
含水率(%)	34.17	32.29	28.68(-5.49)	28.26(-5.91)
内部付着量(%)	—	—	15.0	10.0

試験結果より、スクリーン有無による含水率や粒径分布の違いはあまり見られなかった。ただし、スクリーンφ5mmは目詰まりがみられたため、今後運転時間を伸ばして粉砕量を増やすことを考慮するとスクリーンは無しの方が良い。運転時間を伸ばした場合の結果は後述する。

図 3.2.3-3、表 3.2.3-3 に予熱温度を変化させた場合の試験結果を示す。

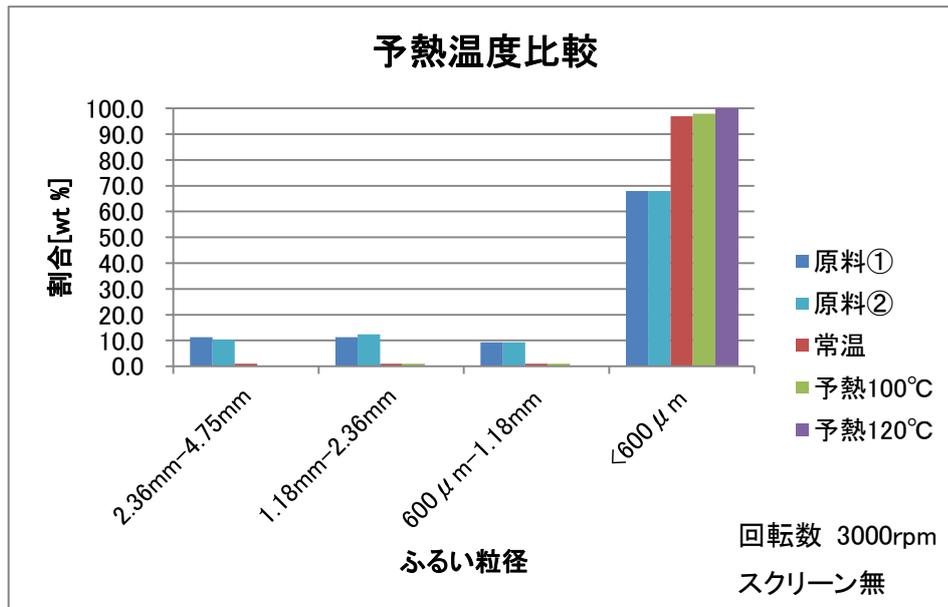


図 3. 2. 3-3 粒径分布（予熱温度比較）

表 3. 2. 3-3 試験結果（予熱温度比較）

条件	原料①	原料②	常温	予熱 100°C	予熱 120°C
含水率(%)	34.17	32.29	33.01(-1.16)	28.68(-5.49)	27.25(-6.92)
内部付着量(%)	—	—	47.5	15.0	5.0

試験結果より、粒子径 600 μ m 以下の割合が 95~98%であることには変わらないが、予熱ありの場合、含水率・内部付着量が減少している。本結果より、予熱を行う事は有効であると判断できる。

図 3. 2. 3-4、表 3. 2. 3-4 に運転時間を変化させた場合の試験結果を示す。

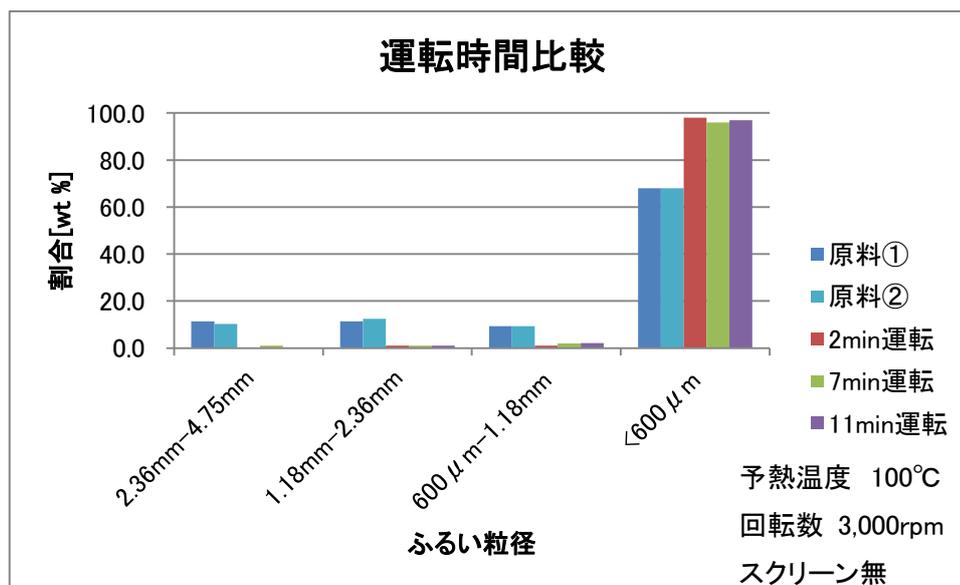


図 3. 2. 3-4 粒径分布（運転時間比較）

表 3.2.3-4 試験結果（運転時間比較）

条件	原料①	原料②	2分運転	7分運転	11分運転
含水率(%)	34.17	32.29	28.68(-5.49)	29.87(-2.42)	29.8(-2.49)
内部付着量(%)	—	—	15.0	18.8	19.1

試験結果より、7～11分で付着量に大きな変化がないことから（図 3.2.3-5）、予熱を行えば、利用先での連続使用計画時間である60分程度の連続運転は問題ない。

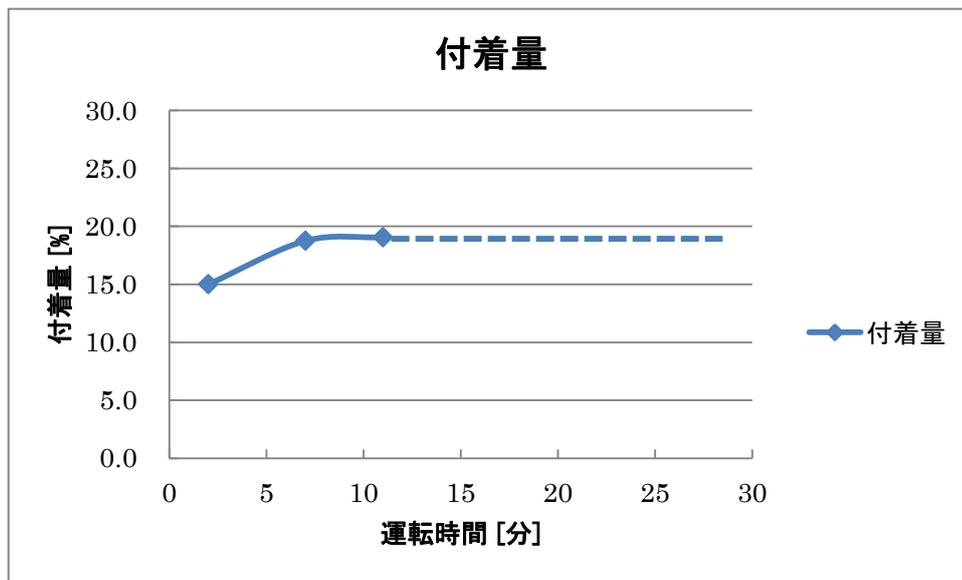


図 3.2.3-5 運転時間による付着量の推移

機器内部の付着状況写真を例として以下に示す。図 3.2.3-6～7に「条件：予熱あり、スクリーン無、3,000rpm」の写真を、図 3.2.3-8に「予熱あり、スクリーンΦ5mm、3,000rpm」の写真を、図 3.2.3-9に「予熱なし、スクリーン無、3,000rpm」の写真を示す。

図 3.2.3-6～7では、粉砕機の歯に付着が見られるが、付着量は本条件が最も少なく、運転時間を伸ばしても、この付着状況は変化なかった。

図 3.2.3-8では、スクリーンの目詰まりが確認できる。長時間運転を行えば、この目詰まりが進行し、粉砕能力の低下が起これと考える。

図 3.2.3-9では、粉砕機の歯のみでなく、ケース内面にも付着が確認できる。こちらに関しても、長時間運転を行えば、この付着が進行し、粉砕能力の低下が起これと考える。



図 3.2.3-6 内部付着状況①



図 3.2.3-7 内部付着状況②



図 3.2.3-8 スクリーンΦ5mm の目詰まり



図 3.2.3-9 ケース内面の付着

続いて、粒子画像解析での粒径分布の測定結果を図 3.2.3-8~10 に示す。結果は、上述の試験で得られたものから3種類抜粋している。横軸は粒径を示す。

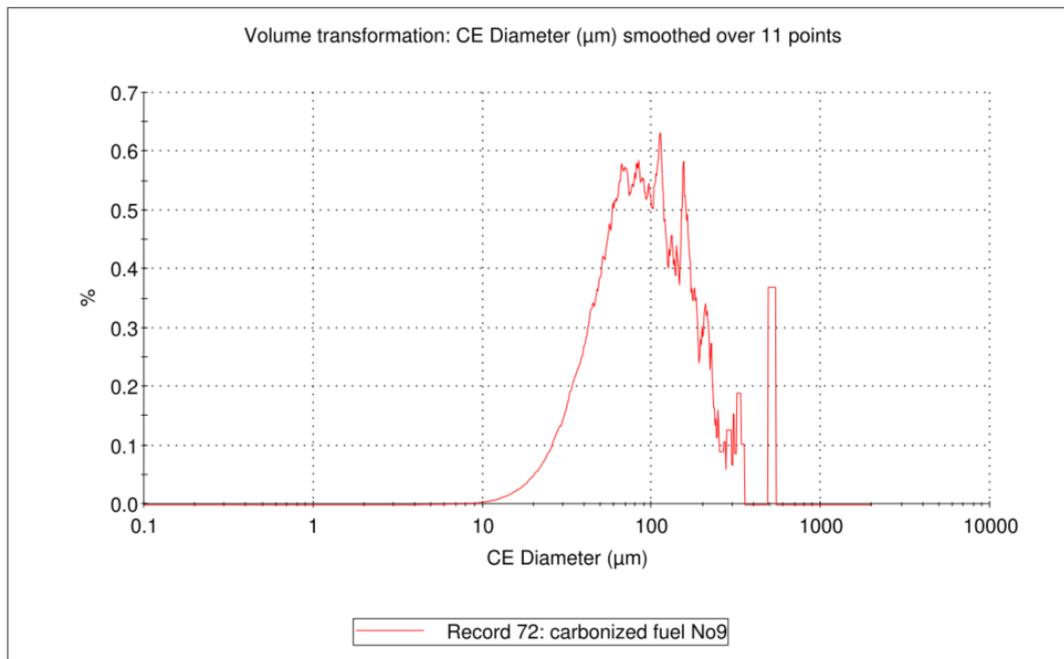
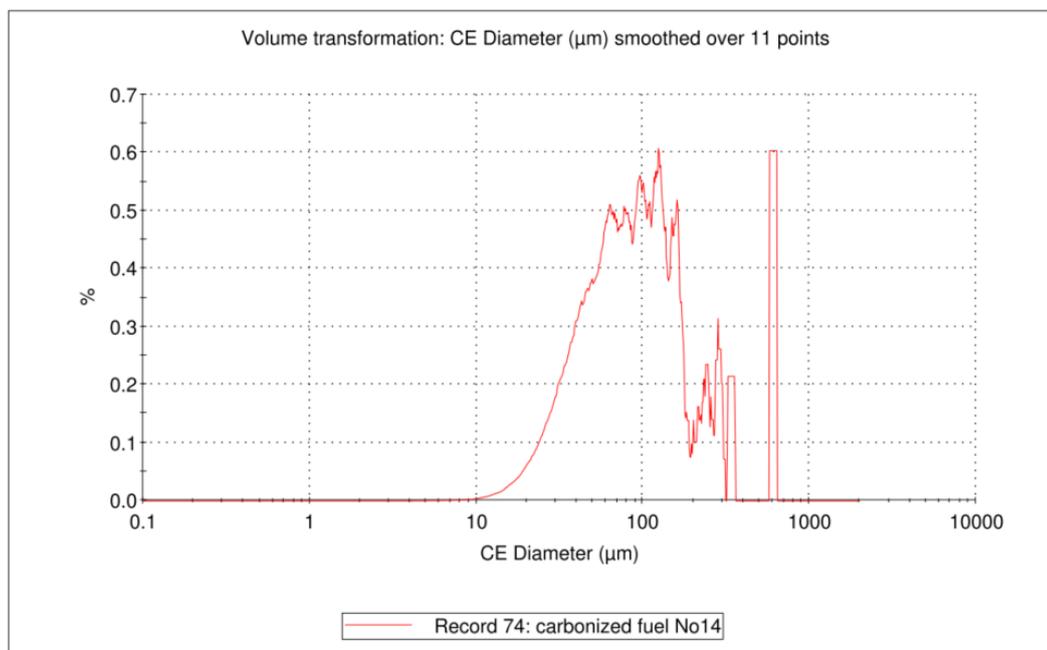
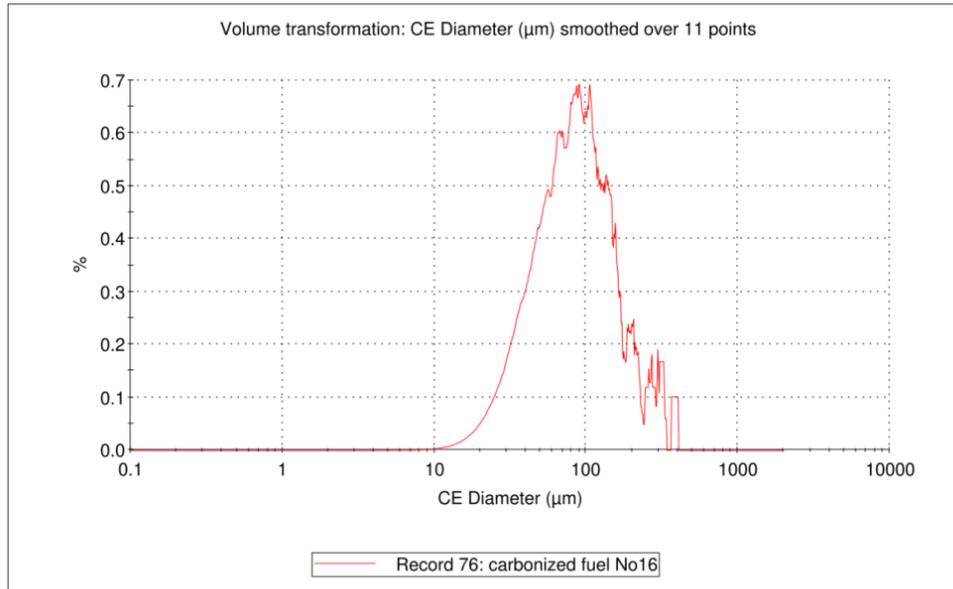


図 3.2.3-8 回転数 3,000rpm、常温、スクリーン無



Comments:

図 3.2.3-9 回転数 3,000rpm、予熱 100°C、スクリーン無



Comments:

図 3.2.3-10 回転数 3,000rpm、予熱 100°C、スクリーンΦ5mm

以上の結果より、機械ふるいの結果では、粉碎後の粒径分布は 600 μm が大半をしめていたが、粒子画像解析でより細かい粒径を測定したところ、100 μm 付近の粒子が多くを占めていることが分かった。

粉碎機試験の結果を以下にまとめる。

- 粉碎することで、1.18mm~4.75mm の粒径分布の割合が合計 30%程度からほぼ 0%になる。さらに、粒径分布は DP50 100 μm の粒子になる。
- スクリーンに関しては、付着による運転停止を考慮して、無とする方が好ましいが、極大粒子が無くなることから検討が必要である。
- 予熱を行うことで、含水率・付着量ともに低減することが出来る。
- 予熱を行うことで、長時間の運転が可能である。

- [1] 新岡 嵩, 河野 通方, 佐藤 順一: 燃焼現象の基礎: : 2001 年
- [2] 神原信志: 微粉炭燃焼性に及ぼす石炭中炭素構造の影響: pp. 147-150: 1997 年
- [3] 日本分析機器工業会: <https://www.jaima.or.jp/jp/analytical/basic/cta/tga/>: 2019/1/10
- [4] 末益猛ら (宇部興産株): 各種石炭燃焼速度の測定と燃焼解析への適用事例: 化学工学会 第 38 回秋季大会: 2006 年
- [5] 牧野敦: 固体燃焼の基礎: pp.94-109: 日本燃焼学会誌第 55 卷 172 号 (2013 年)
- [6] 鈴木ら (電力中央研究所): 酸素吹き噴流床ガス化炉における石炭チャーの CO₂ ガス化反応モデルの確立: pp.6: 2004 年
- [7] 神原信志、講座「燃焼技術の基礎」(V)、日本エネルギー学会誌、76[4]pp.320-330(1997)
- [8] M.A.Field,Rate of combustion of size-graded fractions of char from a low-rank coal between 1200K and 2000K,Combustion and Flame,13,pp.237-252(1969)
- [9] 橋本望ら「微粉炭燃焼場の数値シミュレーション」(電力中央研究所報告書 M10003、2011)
- [10] 古河ら「レーザ回折/散乱式粒径分析装置の粒径試験方法への適用」(土木学会論文集 No. 687、III-56、219-231、2001)