

JAERI-M

9 4 5 7

放射性廃棄物焼却装置の性能試験

1981年4月

阿部 崑義・関口 善利^{*}・大内 優

進士 義正・三戸 規生

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

放射性廃棄物焼却装置の性能試験

日本原子力研究所大洗研究所管理部

阿部 昌義・関口 善利^{*}・大内 優

進士 義正・三戸 規生

(1981年3月27日受理)

高温フィルタを備えた放射性廃棄物焼却装置について模擬廃棄物（非放射性）を用いて燃焼特性試験及び排ガス浄化系の除染性能試験を行った。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 灰の炉内残留率は95%程度である。
- (2) 高温フィルタの除じん率は約99%である。
- (3) 高温フィルタの昇温に多少時間を要する。
- (4) 炉及び高温フィルタの組合せ除染係数(DF)は使用した化学トレーサに対して、概ね 10^4 以上が得られる。

* 外来研究員：日立造船(株)

Test Operation Results of Radioactive Solid Waste Incinerator

Masayoshi ABE, Yoshitoshi SEKIGUCHI*, Masaru OUCHI,
Yoshimasa SHINJI and Norio MITO

Division of Administrative, Services,
Oarai Research Establishment, JAERI

(Received March 27, 1981)

Test operation of radioactive solid waste incinerator, which is composed of furnace, high temperature filter and other off-gas treatment equipments, has been performed in Oarai, JAERI, with non-active wastes and chemical tracer such as Co, Sr and Cs. As a result of this test operation, following characteristics on combustion and off-gas cleaning of the incinerator are obtained;

- (1) Ash accumulation ratio in the furnace is nearly 95 %.
- (2) Dust collecting ratio of the High Temperature Filter is 99 %.
- (3) Heating-up time of the High Temperature Filter are some length.
- (4) Decontamination factor (DF) of combined furnace and High Temperature Filter is 10^4 or more for such chemical tracer.

Keywords; Radioactive Solid Waste Incinerator, Furnace, High Temperature Filter, Chemical Tracer, Ash Accumulation, Dust Collecting Ratio, Decontamination Factor, Performance Tests, Off-gas Cleaning

* On leave from HITACHI ZOSEN

目 次

1. 緒 言	1
2. α 焼却装置の概要	1
2.1 全体概要	1
2.2 焼却炉本体	1
2.3 廃棄物投入系および焼却灰回収系	2
2.4 排ガス浄化系	3
2.5 送排風機	3
2.6 排気筒	3
3. 試験目的	8
4. コールド試料による焼却装置の燃焼特性	8
4.1 試験方法	8
4.2 模擬廃棄物試料	9
4.3 排ガスの分析方法	9
4.4 試験結果および考察	9
5. 除じん性能試験	21
5.1 高温フィルタの構造	21
5.2 プレコート材の充填方法	21
5.3 試験方法	22
5.3.1 DOP 試験	22
5.3.2 炉運転排ガス中のダスト濃度の測定	22
5.4 測定結果および考察	23
6. 除染性能試験 (コールド試料によるトレーサ試験)	32
6.1 試験方法	33
6.2 試 料	33
6.3 トレーサの分析方法	33
6.4 試験結果および考察	33
7. 結 言	41
引用文献	41

CONTENTS

1.	INTRODUCTION	1
2.	DESCRIPTION OF INCINERATOR	1
3.	PURPOSE OF TEST OPERATION	8
4.	COMBUSTION CHARACTERISTICS OF FURNACE	8
4.1	TEST METHODES	8
4.2	WASTE CONDITIONING (NON-ACTIVE)	9
4.3	OFF-GAS ANALYSIS METHODES	9
4.4	RESULTS AND DISCUSSION	9
5.	DUST FILTRATION EFFECT OF HIGH TEMPERATURE FILTER	21
5.1	STRUCTURE OF HIGH TEMPERATURE FILTER	21
5.2	PREPARATION OF HIGH TEMPERATURE FILTER	21
5.3	TEST METHODES	22
5.3.1	DOP PENETRATION TEST	22
5.3.2	DUST CONCENTRATION IN FLUE-GAS	22
5.4	RESULTS AND DISCUSSION	23
6.	CHEMICAL TRACER BALANCING TEST	32
6.1	TEST METHODES	33
6.2	WASTE AND CHEMICAL TRACER CONDITIONING (NON-ACTIVE)	33
6.3	CHEMICAL TRACER ANALYSIS METHODES	33
6.4	RESULTS AND DISCUSSION	33
7.	CONCLUSION	41
	Reference	41

List of Tables

Table 4.2.1	Characteristics of Modified Refuse
Table 4.4.1	Experimental Results
Table 4.4.2	Components of Flue Gas
Table 5.4.1	Results of D.O.P. Test
Table 5.4.2	Experimental Results
Table 5.4.3	Analysis of Ash
Table 6.1	Substances used Tracer
Table 6.2	Properties of Substances
Table 6.4.1	Experimental Results
Table 6.4.2	Recovery Ratio in the Primary Chamber

List of Figures

Fig. 2.1.1	Low active α -waste Incineration Process
Fig. 2.1.2	Plot Plan of α -incinerator
Fig. 2.1.3	α -incinerator Installation
Fig. 2.2.1	View of Furnace of Incinerator
Fig. 4.2.1	Photograph of Specimens Modified Refuse
Fig. 4.3.1	Schematic Diagram of Sampling Nozzle (Outlet Side)
Fig. 4.4.1	Photograph of Grate
Fig. 4.4.2	Sequence of Specimens Burning (Feed Rate 16 Kg/h)
Fig. 4.4.3	Time History of Temperature Profile
Fig. 4.4.4	Flue Gas Composition (I)
Fig. 4.4.5	Flue Gas Composition (II)
Fig. 4.4.6	Pressure Drop
Fig. 5.1.1	Structure of High Temperature Filter
Fig. 5.3.1	Schematic Diagram of Dust Sampling Apparatus
Fig. 5.3.2	Photograph of Dust Sampling Apparatus
Fig. 5.3.3	Schematic Diagram of Sampling Nozzle (Inlet Side)
Fig. 5.3.4	View of Dust Sampler
Fig. 5.4.1	Particle Size Distribution of Ash (I)
Fig. 5.4.2	Particle Size Distribution of Ash (II)
Fig. 6.1	Vapor Pressure and Melting Point
Fig. 6.2	DF Value Calculated from Vapor Pressure
Fig. 6.4.1	Results of Thermogravimetric Analysis
Fig. 6.4.2	Particle Size Distribution of Ash

1. 緒 言

大洗研究所では、大洗地区^{※1}で発生する α 固体廃棄物のうち低レベルのものを処理するための設備の一つとして、 α 焼却装置を設置し、1977年5月に完成した。これは、焼却炉本体および排ガス浄化系の主要部に仏国原子力庁および仏国CEC社^{※2}が協同開発した方式のものを採用しており、同型のものとして、わが国では、動力炉・核燃料開発事業団東海事業所プルトニウム燃料部のPu汚染廃棄物処理用に設置した装置に次いで2基目である。

本 α 焼却装置については、完成後、放射性物質を含まない模擬廃棄物（以下「コールド試料」という。）を用いて試運転を行ない、これによって装置の運転および保守に係る種々の特性を調査してきたが、今回、コールド試料中に化学トレーサを加えて焼却し、系内におけるトレーサのマスバランスを調査した、いわゆる除染性能試験を最後に、一連のコールド試運転を終結させた。本報告書は、このコールド試運転によって確認された α 焼却装置の燃焼特性、排ガス浄化系の除じん性能および除染性能などについて述べるものであり、今後の実廃棄物による運転に対してはもちろんのこと、同型の焼却装置の運転管理に必要な情報を提供するものである。

2. α 焼却装置の概要

2.1 全体概要

本装置は動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターの高速実験炉「常陽」およびその関連ホットラボFMF（照射燃料集合体試験施設）、AGF（照射燃料試験施設）並びに原研大洗研究所Pu燃料研究棟などを主な発生元とする低レベル α 固体廃棄物のうちの可燃物を焼却減容処理するために設置したもので、焼却炉本体を軸に、廃棄物投入系、焼却灰回収系、排ガス浄化系並びに制御・計装系により構成される。装置の系統図をFig. 2.1.1に、配置をFig. 2.1.2及びFig. 2.1.3に示す。

2.2 焼却炉本体

焼却炉本体の概略構造をFig. 2.2.1に示す。焼却炉本体の設計仕様は次の通りである。

- (1) 型式：蓄熱型密閉炉
- (2) 構造：鋼板による2重外壁（ただし底部を除く。）
 - 内部は耐火レンガ組積構造
 - 炉内は2室に区分

*1 日本原子力研究所大洗研究所および動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター

*2 CARBONISATION ENTREPRISE ET CERAMIQUE

1. 緒 言

大洗研究所では、大洗地区^{*1}で発生する α 固体廃棄物のうち低レベルのものを処理するための設備の一つとして、 α 焼却装置を設置し、1977年5月に完成した。これは、焼却炉本体および排ガス浄化系の主要部に仏国原子力序および仏国CEC社^{*2}が協同開発した方式のものを採用しており、同型のものとして、わが国では、動力炉・核燃料開発事業団東海事業所プルトニウム燃料部のPu汚染廃棄物処理用に設置した装置に次いで2基目である。

本 α 焼却装置については、完成後、放射性物質を含まない模擬廃棄物（以下「コールド試料」という。）を用いて試運転を行ない、これによって装置の運転および保守に係る種々の特性を調査してきたが、今回、コールド試料中に化学トレーサを加えて焼却し、系内におけるトレーサのマスバランスを調査した、いわゆる除染性能試験を最後に、一連のコールド試運転を終結させた。本報告書は、このコールド試運転によって確認された α 焼却装置の燃焼特性、排ガス浄化系の除じん性能および除染性能などについて述べるものであり、今後の実廃棄物による運転に対してはもちろんのこと、同型の焼却装置の運転管理に必要な情報を提供するものである。

2. α 焼却装置の概要

2.1 全体概要

本装置は動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターの高速実験炉「常陽」およびその関連ホットラボFMF（照射燃料集合体試験施設）、AGF（照射燃料試験施設）並びに原研大洗研究所Pu燃料研究棟などを主な発生元とする低レベル α 固体廃棄物のうちの可燃物を焼却減容処理するために設置したもので、焼却炉本体を軸に、廃棄物投入系、焼却灰回収系、排ガス浄化系並びに制御・計装系により構成される。装置の系統図をFig. 2.1.1に、配置をFig. 2.1.2及びFig. 2.1.3に示す。

2.2 焼却炉本体

焼却炉本体の概略構造をFig. 2.2.1に示す。焼却炉本体の設計仕様は次の通りである。

- (1) 型式：蓄熱型密閉炉
- (2) 構造：鋼板による2重外壁（ただし底部を除く。）
 - 内部は耐火レンガ組積構造
 - 炉内は2室に区分

*1 日本原子力研究所大洗研究所および動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター

*2 CARBONISATION ENTREPRISE ET CERAMIQUE

1次室底部は2分割方式駆動ロストル(耐熱鋼製)取付け

2次室内は炭化硅素系のろ過材充填

(3) 外型寸法: 2.4 m × 2.3 m (一部 1.54 m) × 2.5 mH

(4) 能力: 15 kg/h

ただし、焼却対象物の基準組成は次の通り

ポリエチレン: 47.5 ± 5 wt/o

布, ポール紙: 27.5 ± 3 wt/o

木 片: 16.5 ± 1.7 wt/o

紙 : 3.0 ± 0.3 wt/o

ゴム類: 4.0 ± 0.4 wt/o

塩ビ製品: 1.5 ± 0.2 wt/o

(5) 運転時炉内負圧: 15 ~ 20 mm H₂O

(6) 運転時炉内温度: 1次室 500 ~ 800 °C

2次室 800 ~ 1000 °C

(7) 付属機器

i) バーナユニット: LPG バーナ 10 kg/h 用 2 基

ii) のぞき窓: 2 箇所

iii) 炉内攪拌棒: 2 本 (常設)

2.3 廃棄物投入系および焼却灰回収系

2.3.1 廃棄物投入系

(1) 型式: ハーフボディスーツ型気密ボックス

(2) 外形寸法: 1.6 m × 1.8 m × 1.7 mH

(3) 付属機器

i) 廃棄物搬入用エアロック

ii) 可燃物投入シート (焼却炉 1次室直結 2重扉)

iii) 不燃物投入シート (α ホール直結)

iv) ハーフボディスーツ 4人分

v) グローブポート 4対

2.3.2 焼却灰回収系

(1) 型式: グローブボックス型

(2) 外形寸法: 1.2 m × 2.8 m × 2.5 mH

(3) 付属機器

i) 灰回収シートおよびダンパ (焼却炉 1次室直結)

ii) 灰搬出用エアロック

iii) グローブポート 18 対

2.4 排ガス浄化系

2.4.1 高温フィルタ

- (1) 型式：キャンドル型ろ材プレコート式
- (2) 構造：鋼板外壁、内面耐火レンガ組積
- (3) 外形寸法： $1.53\text{ m}\phi \times 2.2\text{ mH}$ （本体部）
- (4) 処理風量：max $600\text{ Nm}^3/\text{h}$
- (5) 運転温度： $500 \sim 800^\circ\text{C}$
- (6) 付属機器
 - i) プレコート材交換作業用フード
 - ii) プレコート材抜取機および粉碎・充填機
 - iii) 本体上蓋吊上げ用 ウィンチ

2.4.2 空気混合冷却器

- (1) 型式：円筒横型・外気導入稀釈方式
- (2) 外形寸法： $0.5\text{ m}\phi - 0.8\text{ m}\phi \times 2\text{ mL}$
- (3) 冷却能力：入口温度 750°C のとき出口温度 150°C 以下
- (4) 冷却空気量：max $4,400\text{ Nm}^3/\text{h}$

2.4.3 フィルタユニット

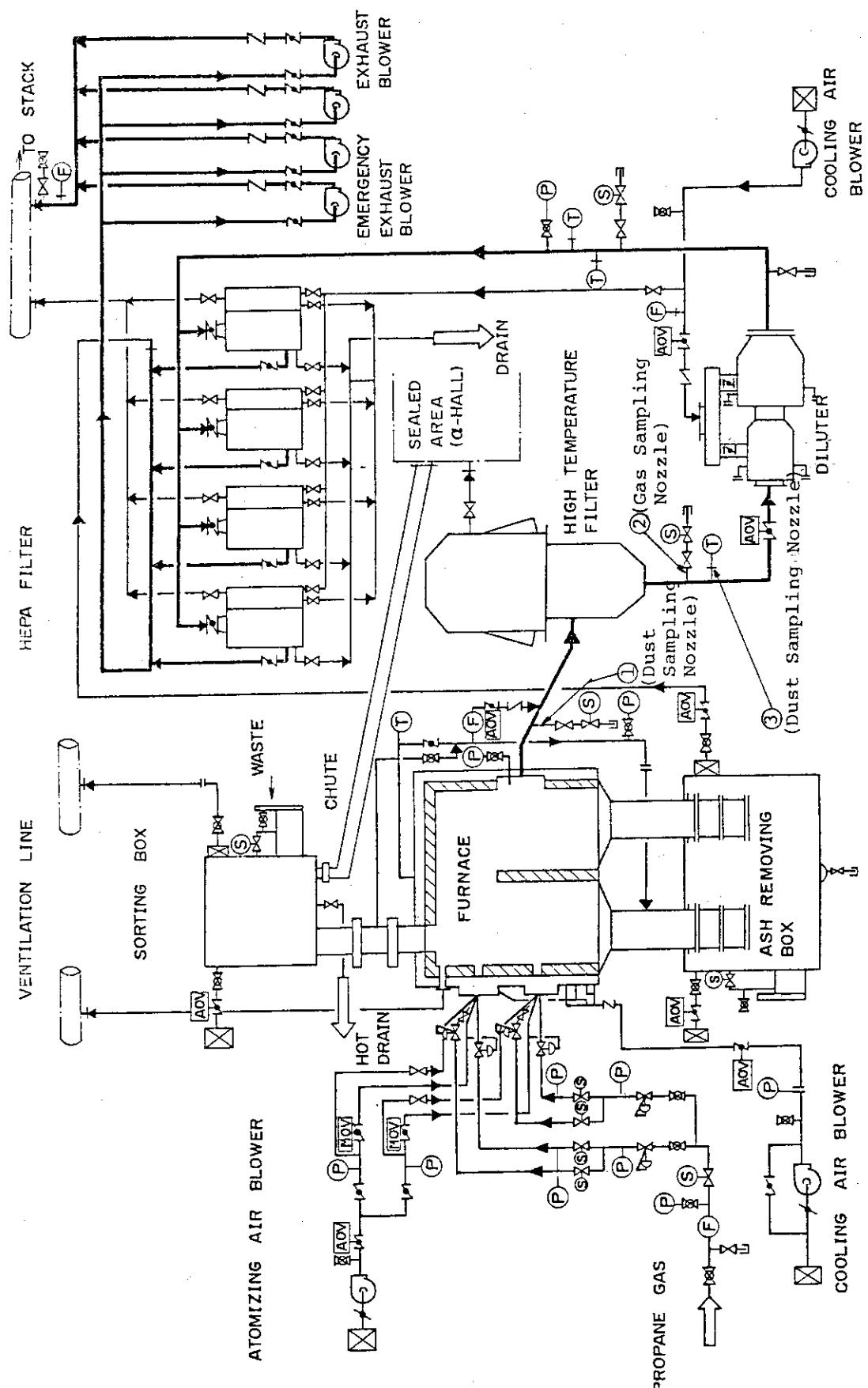
- (1) 型式：縦型直列式
- (2) 構成：プレフィルタ 1段
HEPA フィルタ 2段
- (3) 数量：4基
- (4) 処理風量：max $7,200\text{ m}^3/\text{h}$
- (5) 最高使用温度： 150°C

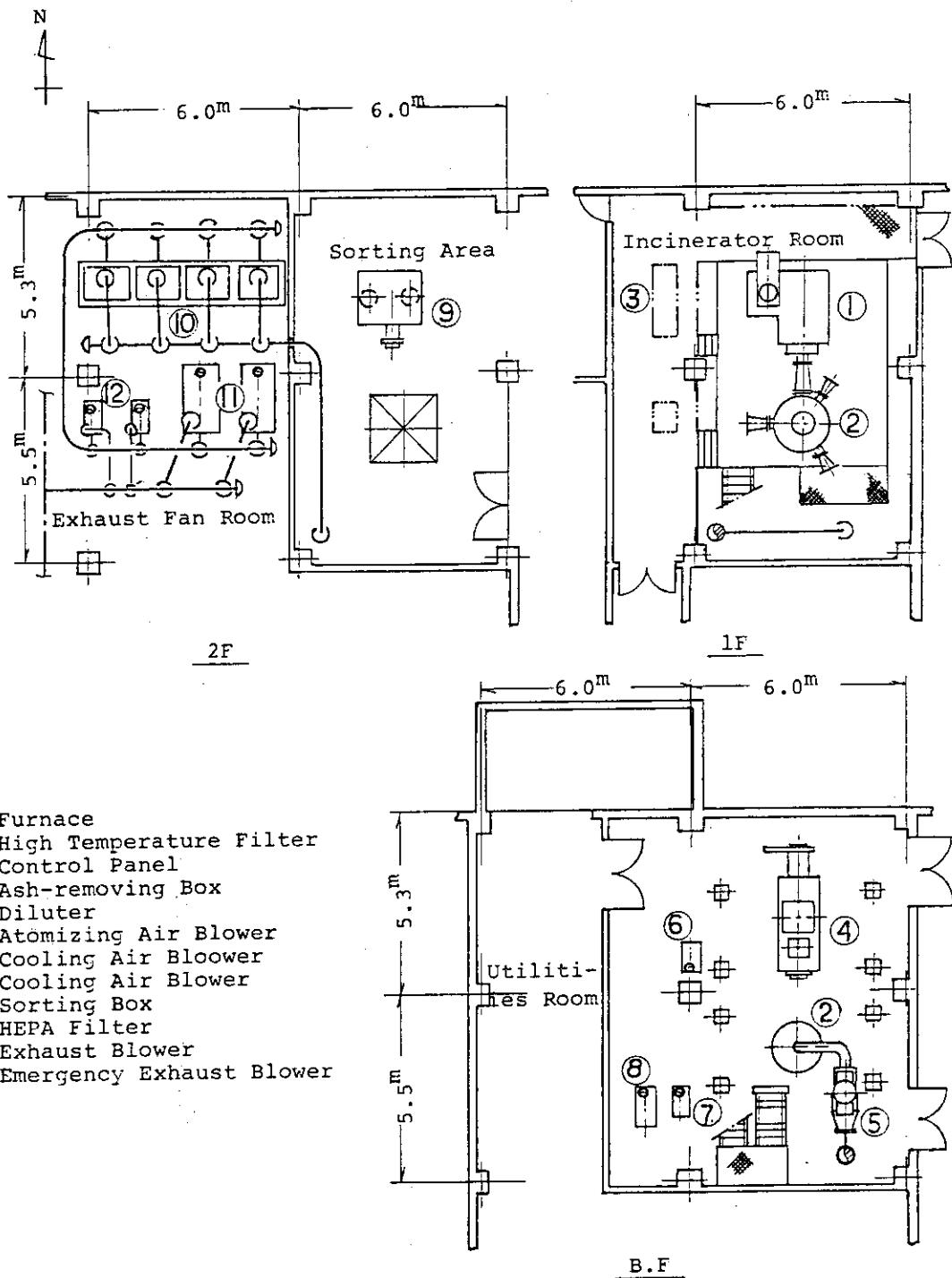
2.5 送排風機

- (1) バーナ給気プロワ： $600\text{ Nm}^3/\text{h} \times 600\text{ mmH}_2\text{O} \times 3.7\text{ KW} \times 1$ 台
- (2) 燃焼室給気プロワ： $600\text{ Nm}^3/\text{h} \times 100\text{ mmH}_2\text{O} \times 0.75\text{ KW} \times 1$ 台
- (3) 冷却用プロワ： $5,000\text{ Nm}^3/\text{h} \times 50\text{ mmH}_2\text{O} \times 2.2\text{ KW} \times 1$ 台
- (4) 主排気プロワ： $5,600\text{ Nm}^3/\text{h} \times 500\text{ mmH}_2\text{O} \times 37\text{ KW} \times 2$ 台
- (5) 緊急用排気プロワ： $15\text{ Nm}^3/\text{h} \times 100\text{ mmH}_2\text{O} \times 0.4\text{ KW} \times 2$ 台

2.6 排気筒

- (1) 構造：鉄筋コンクリート造
- (2) 主要寸法：先端内径 $1.5\text{ m}\phi \times 40\text{ mH}$ （地上高）
- (3) 建家排気系（約 $40,000\text{ m}^3/\text{h}$ ）と共に用

Fig. 2.1.1 Low Active α -waste Incineration Process

Fig. 2.1.2 Plot Plan of α -incinerator

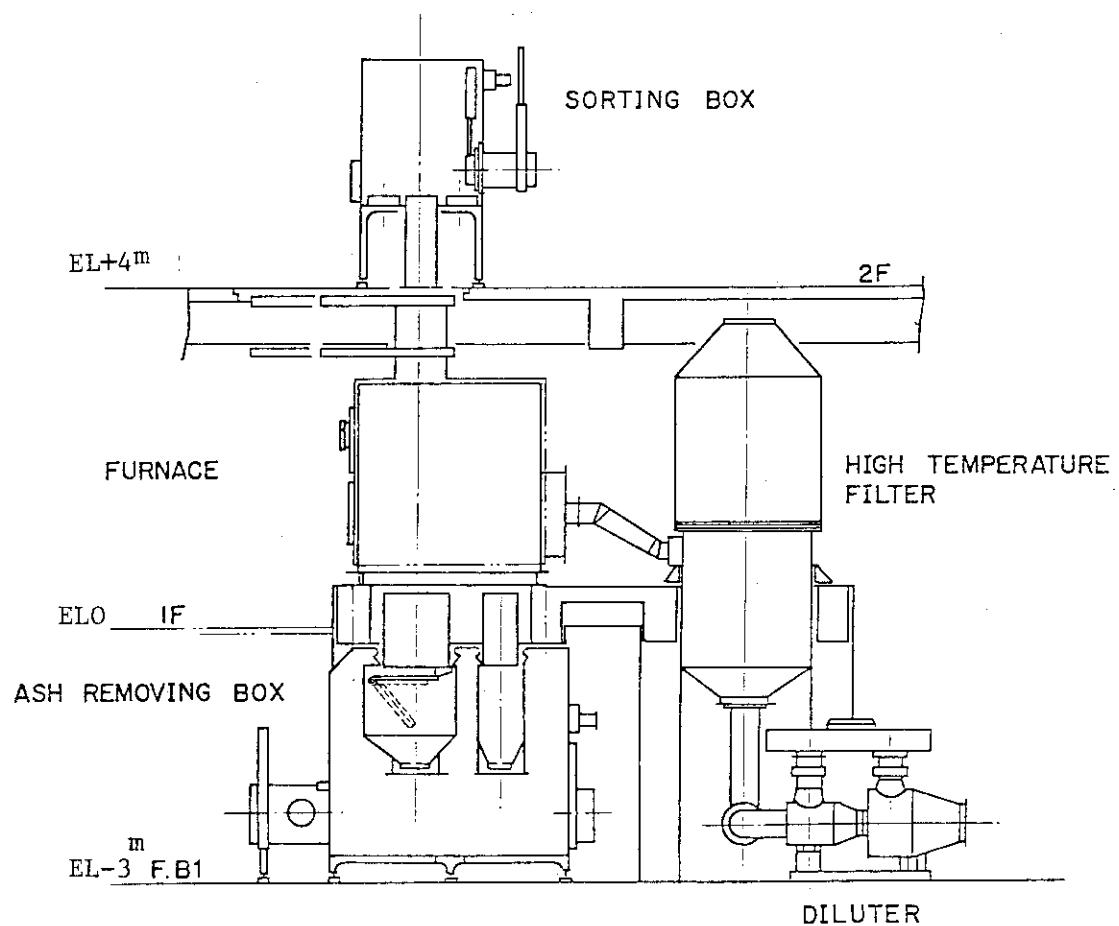


Fig. 2.1.3 α-INCINERATOR INSTALLATION

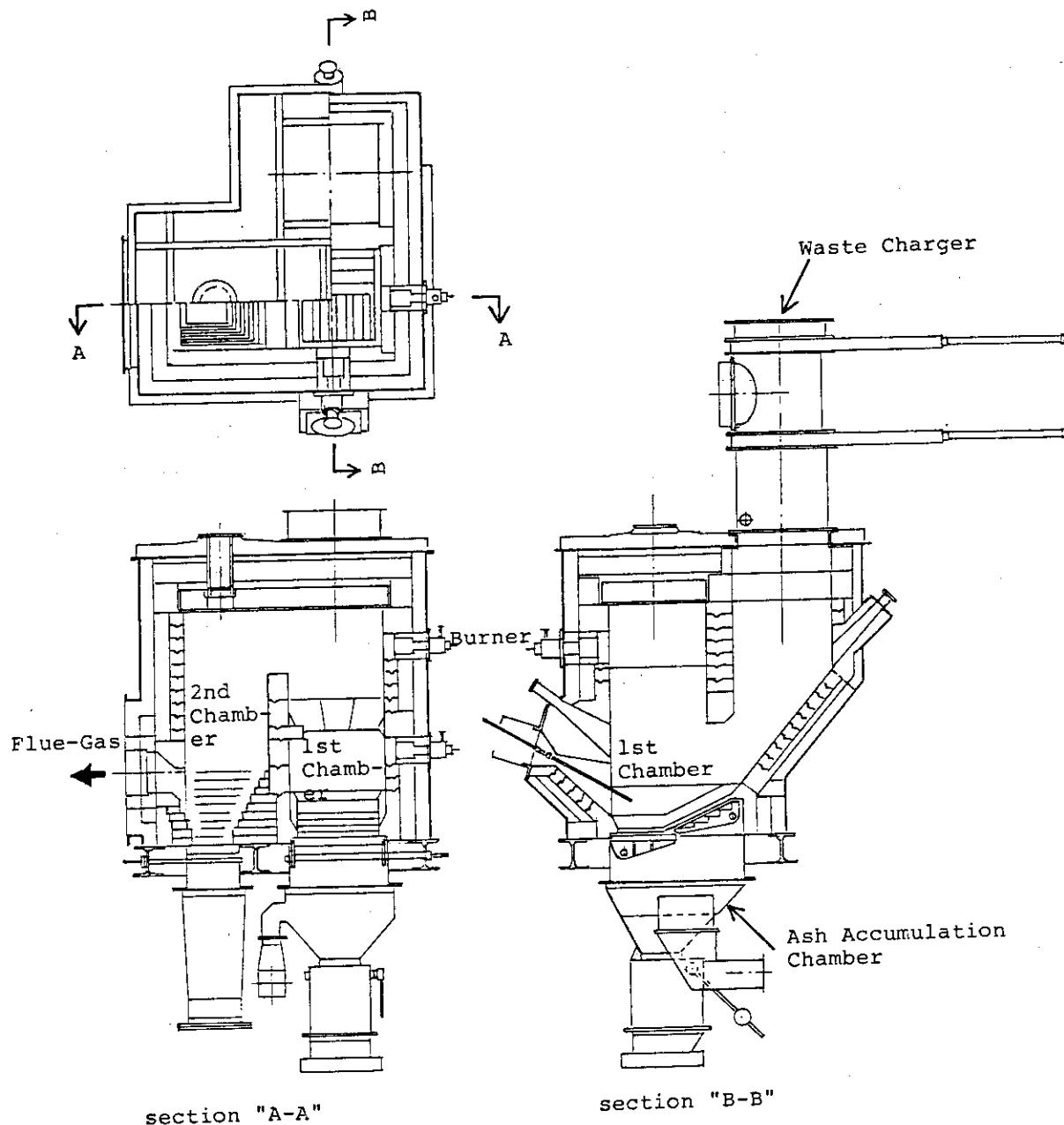


Fig. 2.2.1 View of Furnace of Incinerator

3. 試験目的

本装置による焼却処理対象物は、主に原子炉運転系および照射後燃料試験研究系から排出される雑固体廃棄物であり、その組成は種々にわたる。また汚染核種もプルトニウムを主体とする α 核種のほか、核分裂生成物および腐食生成物としての β - γ 核種も含まれる。このような条件の廃棄物を焼却処理するにあたり、明らかにしておくべき装置の特性として次の3点について試験することとした。

- (1) 焼却装置の燃焼特性
- (2) 排ガス浄化系の除じん性能
- (3) 排ガス浄化系の除染性能

4. コールド試料による焼却装置の燃焼特性

本装置が完成後現在までの間にすでに数多くの焼却試験を実施したが、これらの試験はいずれも被焼却物試料として紙類のみを使用したものである。しかしながら実廃棄物中には通常プラスチックスがかなり含まれている。したがって廃棄物中にプラスチックスが含まれる場合の本装置の燃焼特性を把握する必要がある。

そこで今回プラスチックスを含む模擬廃棄物試料を作成し、プラスチックスと紙類の混焼試験を実施した。

4.1 試験方法

試験に際しては、あらかじめ2基の補助バーナにより2次燃焼室および高温フィルタ内温度がそれぞれ所定の800°Cおよび500°Cに達するまで予燃焼を行なう。

助燃料としては、市販のプロパンガスを用いた。

それぞれが所定の温度に達し安定した後、模擬廃棄物試料投入を開始する。投入開始後は、下段の1次燃焼室の補助バーナを停止し上段の2次燃焼室入口の補助バーナのみ燃焼させる。この際他の測定を容易にするためにプロパンおよび空気の供給量はできるだけ一定に保持した。

試料の投入終了後は再度下段バーナを点火し火格子上に残留する未燃の炭化物の燃焼がほぼ完了するまで補助バーナによる後燃焼を行なった。

炉の運転中は常時流量、温度、圧力などを操作盤上および現場指示計で監視すると同時にそれらの測定結果を記録した。

試料の燃焼状態は二つの覗き窓から目視により観察した。

試料投入速度の適否は、燃焼状況の観察、燃焼温度、後燃焼時間の長さなどから判断した。

3. 試験目的

本装置による焼却処理対象物は、主に原子炉運転系および照射後燃料試験研究系から排出される雑固体廃棄物であり、その組成は種々にわたる。また汚染核種もプルトニウムを主体とする α 核種のほか、核分裂生成物および腐食生成物としての β - γ 核種も含まれる。このような条件の廃棄物を焼却処理するにあたり、明らかにしておくべき装置の特性として次の3点について試験することとした。

- (1) 焼却装置の燃焼特性
- (2) 排ガス浄化系の除じん性能
- (3) 排ガス浄化系の除染性能

4. コールド試料による焼却装置の燃焼特性

本装置が完成後現在までの間にすでに数多くの焼却試験を実施したが、これらの試験はいずれも被焼却物試料として紙類のみを使用したものである。しかしながら実廃棄物中には通常プラスチックスがかなり含まれている。したがって廃棄物中にプラスチックスが含まれる場合の本装置の燃焼特性を把握する必要がある。

そこで今回プラスチックスを含む模擬廃棄物試料を作成し、プラスチックスと紙類の混焼試験を実施した。

4.1 試験方法

試験に際しては、あらかじめ2基の補助バーナにより2次燃焼室および高温フィルタ内温度がそれぞれ所定の800°Cおよび500°Cに達するまで予燃焼を行なう。

助燃料としては、市販のプロパンガスを用いた。

それぞれが所定の温度に達し安定した後、模擬廃棄物試料投入を開始する。投入開始後は、下段の1次燃焼室の補助バーナを停止し上段の2次燃焼室入口の補助バーナのみ燃焼させる。この際他の測定を容易にするためにプロパンおよび空気の供給量はできるだけ一定に保持した。

試料の投入終了後は再度下段バーナを点火し火格子上に残留する未燃の炭化物の燃焼がほぼ完了するまで補助バーナによる後燃焼を行なった。

炉の運転中は常時流量、温度、圧力などを操作盤上および現場指示計で監視すると同時にそれらの測定結果を記録した。

試料の燃焼状態は二つの覗き窓から目視により観察した。

試料投入速度の適否は、燃焼状況の観察、燃焼温度、後燃焼時間の長さなどから判断した。

4.2 模擬廃棄物試料

可燃物試料として比較的均一な試料が容易に入手できることから紙類に紙タオルおよびティッシュペーパーを、プラスチックスとしてポリエチレンシートを使用した。これらをおよそ 6 cm²～16 cm²の大きさに切り、均一に混合した後容積 20 l の紙製のカートンボックスに詰め総重量 2 kg の模擬廃棄物試料とした。

試料の組成は平均的には紙タオル 20.5 %, ティッシュペーパー 20.5 %, ポリエチレン 50 %, カートンボックス 9 %である。

Fig. 4.2.1 に模擬廃棄物試料の外観を写真で示す。Table 4.2.1 に試料の分析結果を示す。

4.3 排ガスの分析方法

排ガスの組成分析は次の方法で行なった。排ガスのサンプリング孔は高温フィルタ出口側煙道に設けた。その位置およびサンプリングノズルの概略を Fig. 2.1.1 および Fig. 4.3.1 に示す。

小型のダイヤフラム式吸引ポンプで排ガスサンプリング孔から排ガスを 5 l/min の速度で吸引し途中凝縮した水分をドレン分離器で除去した後、それぞれの分析計に供給する。

CO₂ および CO は、島津製作所(株) C.G.T-100 形非分散形赤外線ガス分析計で、O₂ は島津製作所製 MAG-2 形磁気式酸素分析計で、NO_x は、柳本製作所(株)製 ECL-300 形化学発光式窒素酸化物分析計でそれぞれ連続測定した。SO_x は、試料ガスを過酸化水素溶液に吸収させ SO₂ を H₂SO₄ に酸化した後、JISK0103 による比濁法により測定した。⁽¹⁾ この際、途中吸引管内部で硫酸および水蒸気の凝縮が起こらないようできる限り配管を短かくするとともに配管をリボンヒータで加熱した。

4.4 試験結果および考察

最初にポリエチレンを 50 %含む模擬廃棄物について本装置の焼却能力を把握するために投入速度を変えた試験を行なった。その結果、Table 4.4.1 に示すように、投入速度 20 kg/h では後燃焼時間が約 2 時間かかりさらに溶融したポリエチレンの一部が火格子上からオーバーフローし炉底に流れ落ちるなどの現象が生じた。その状況を Fig. 4.4.1 に示す。したがって本試料のようにプラスチックスを多く含み、発熱量が高い場合は、投入速度が 20 kg/h では安定燃焼の面から炉の焼却能力を越えていることがわかった。そこで次に投入速度を 16 kg/h で試験を行なった結果、ポリエチレンの流れ落ちも無く後燃焼時間も 1 時間程度と大幅に短縮された。この結果現在の炉の運転条件では、プラスチックスが 50 %程度混入した廃棄物の焼却能力は、20～16 kg/h の間であることがわかった。したがって以後の試験は投入速度を 16 kg/h で行なった。燃焼状況の 1 例を Fig. 4.4.2 に示す。

温度の測定結果の 1 例を Fig. 4.4.3 に、排ガスの分析結果を Fig. 4.4.4, 4.4.5 に示す。

図中に示されるように 1 次燃焼室および 2 次燃焼室は比較的早く昇温し所定の温度に達するが高温フィルタは補助バーナを持たないため昇温が遅く模擬廃棄物試料の投入終了時点でもまだ上昇

傾向を示していることがわかる。

一方排ガス組成は、試料投入開始と同時にO₂濃度は徐々に減少し逆にCO₂濃度は増加しどちらも投入開始後約90分で安定する。これは火格子上に累積する未燃物の量が投入開始後90分程度で平衡に達するためと考えられる。

COは投入開始後しばらくの間比較的多く発生しその後減少している。この原因は1次燃焼室で投入模擬廃棄物試料が熱分解する際かなり多量のCOが発生しそのほとんどが1次および2次燃焼室内で酸化されCO₂になるものと考えられるが、投入開始と同時に補助バーナを測定の都合上1基停止するためFig. 4.4.3に見られるように一時的に炉内温度が低下し発生したCOの酸化が遅れることによるものと考えられる。

NO_xについては、炉内温度の影響をあまり受けておらず試料の投入間隔に対応した濃度変化を周期的に繰り返している。一般に燃料中に含まれるN分から生成するNO_xはFuel NO_xと呼ばれN分のNO_xへの転換率は空気比の影響を強く受けるが雰囲気温度にはあまり影響されない。一方Thermal NO_xと呼ばれ高温下で空気中のN₂とO₂の反応によって生成するNO_xは温度による影響が大きい。⁽²⁾⁽³⁾これらのことから本試験でのNO_xは、試料中のNから発生するFuel NO_xがほとんどを占めているものと考えられる。

Table 4.2.1の模擬廃棄物の分析結果と平均的な空気およびプロパンの供給量から排ガスの組成を計算した結果をTable 4.4.2に示す。

ただし紙類のH/Cの値は、カートンボックスが0.149、ペーパータオル0.144、ティッシュペーパー0.146といずれもセルローズ((C₆H₁₀O₅))のH/Cの値0.139に近いのでセルローズと近似しポリエチレンは(CH₂)_nと近似した。また空気中の湿度は表中に示すように気温32°Cで相対湿度70%と仮定した。

この結果は、湿り基準でO₂11.0%，CO₂5.8%，H₂O9.81%である。これを乾基準で表わせばO₂12.1%，CO₂6.43%である。これらの値はいづれも測定結果と比較的良く一致する。

減容比については比較的大きな値が得られたがこれは試料の灰分含有量が少ないためであって灰の見掛け密度、真密度は一般の焼却灰と大差のないことがわかる。

ダストが堆積した状態での圧力損失△P(mm H₂O)は一般的に次式で示めされる。⁽⁴⁾

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_d \quad \dots \quad (4-1)$$

ここに、△P₀:充填層あるいはフィルタ層の初期圧力損失(mm H₂O)

△P_d:ダストの堆積により増加した圧力損失(mm H₂O)

ダストは、充填層あるいはフィルタ層表面に均一に堆積しているものとすればダスト堆積層での圧力損失△P_dは(4-2)式のCarman-Kozenyの式で表わされる。

$$\Delta P_d = \frac{K \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu \cdot S^2 v}{g_c \cdot \varepsilon^3} \cdot L \cdot u \quad \dots \quad (4-2)^{(5)}$$

ここにK: Kozeny定数(=)

ε:ダストの空隙率(=)

μ:粘度(kg/m·s)

S_v:粉体基準の比表面積(m²/m³)

L : 堆積層厚さ (m)

u : 充填層あるいはフィルタ層の見掛け通過流速 (m/s)

 g_c : 重力換算係数 ($\frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \cdot \text{Kgf}}$)

ここで模擬廃棄物および焼却炉の運転条件はほぼ一定であるから生成する灰の特性値である比表面積 S_v および炉床からの灰の飛散率、充填層およびフィルタ層でのフライアッシュの捕集効率は一定と考えられる。さらに ΔP_d は比較的小さいので空隙率 ϵ も変わらないと仮定すれば、

$$L = \frac{\eta \cdot f \cdot W_a}{(1 - \epsilon) \cdot \rho_a \cdot S_f} \quad \dots \dots \dots \quad (4-3)$$

と表わせる。

ここに η : 充填層あるいはフィルタの捕集効率 (-)

f : 灰の飛散率 (-)

Wa : 灰の生成量 (kg)

 ρ_a : 灰の密度 (kg/m³)S_f : 充填層断面積あるいはフィルタ表面積 (m²)

ここで (4-2), (4-3) 式を (4-1) 式に代入すれば (4-4) 式が得られる。

$$\Delta P = \Delta P_0 + \frac{K \cdot (1 - \epsilon) \cdot \mu \cdot S_v^2}{g_c \cdot \rho_a \cdot \epsilon^3 \cdot S_f} \cdot \eta \cdot f \cdot u \cdot W_a \quad \dots \dots \dots \quad (4-4)$$

したがって (4-4) 式から圧力損失 ΔP と灰の生成量 W_a とは直線関係にあることがわかる。Fig. 4.4.6 に ΔP の測定値を W_a に対してプロットした結果を示す。

高温フィルタは今回の試験回数範囲内ではダストの堆積量が少なく圧力損失の増加はほとんど見られなかったが 2 次燃焼室の圧力損失の増加は図に示すように W_a に比例しており (4-4) 式が成り立っていることがわかる。また高温フィルタの圧力損失の増加が見られなかったことから炉からの灰の飛散は非常に少ないものと推定される。

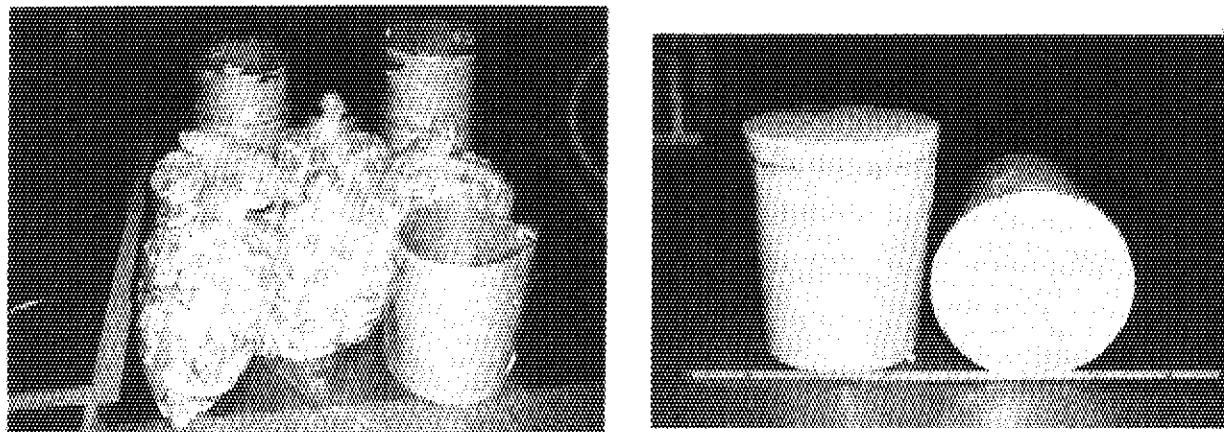


Fig. 4.2.1 Photograph of Specimens Modified Refuse

Table 4.2.1 Characteristics of Modified Refuse

	Carton Box	Paper Towel	Tissue Paper	Polyethylene	Average
Weight (g)	180	410	410	1000	2000
Moisture (wt%)	7.5	7.1	6.2	<0.1	3.40 ₂
Ash (wt%)	12.4	0.6	6.9	<0.1	2.65 ₄
Combustible (wt%)	80.2	92.3	86.8	100	93.94
Ultimate Composition					
C (wt%) *	36.9	42.3	38.4	84.7	63.00
H " *	5.5	6.1	5.6	12.8	9.41 ₇
N " *	0.3	<0.2	<0.2	0.4	0.22 ₅
Heating value (kcal/kg)	3700	3900	3600	10700	7220

* Moisture free Basis

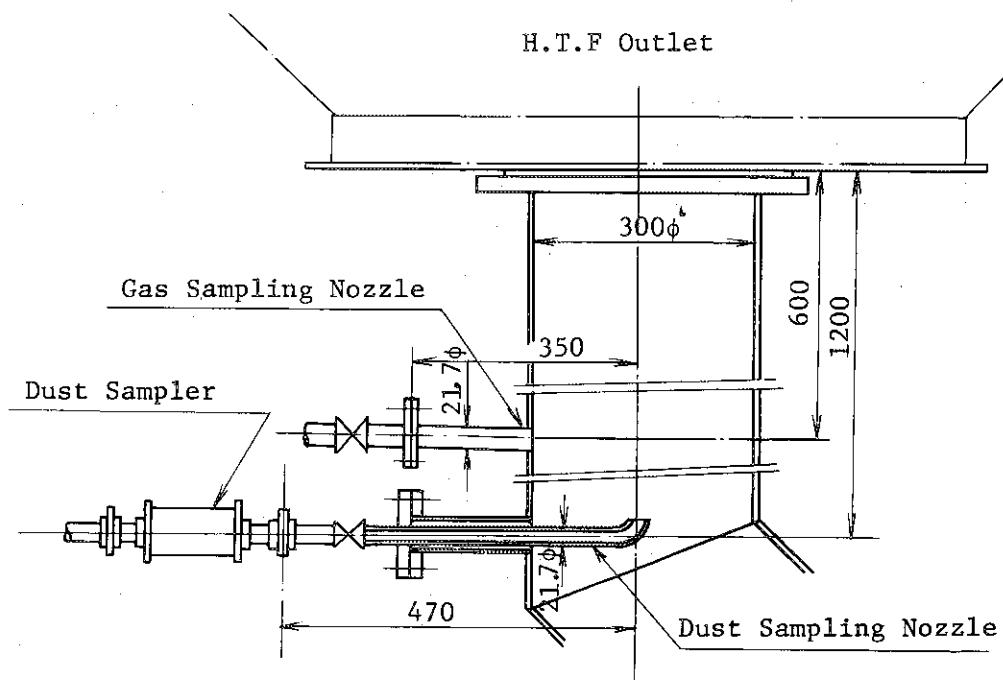


Fig. 4.3.1 Schematic diagram of sampling nozzle
(Outlet Side)

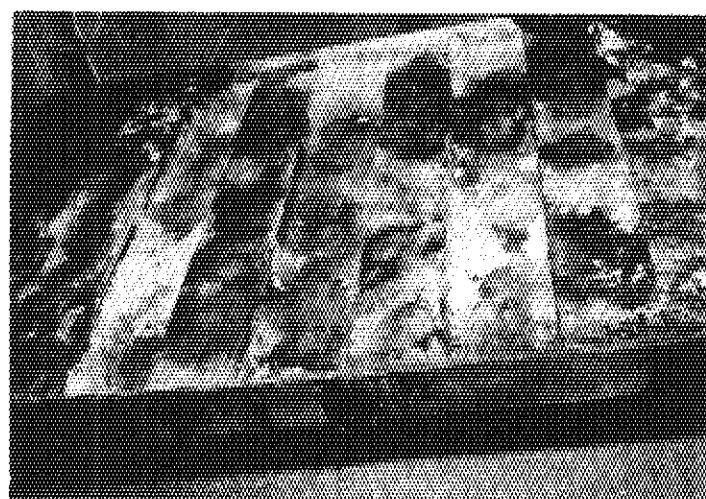


Fig. 4.4.1 Photograph of Grate

Table 4.4.1 Experimental Results

	Run No	B G 1	B G 2	B G 3	B G 4	B G 5	B G 6	B G 7	B G 8
実験日時(試料投入時間)		54.724 13:00~15:30	54.730 13:00~15:00	54.731 13:00~15:00	54.10.1 13:00~15:00	54.10.2 13:00~15:00	54.10.3 13:00~15:00	54.10.4 13:00~14:30	54.10.5 13:00~15:00
供給量	試料投入速度 kg/h Nm ³ /h Nm ³ /h Nm ³ /h Nm ³ /h Nm ³ /h Nm ³ /h Nm ³ /h mmH ₂ O mmH ₂ O mmH ₂ O	20 270 280 4850 5.1 — — — — 58 12	16 284 280 5000 6.6 — — — 55 11	16 280 280 4950 5.3 — — — 56 11	16 265.2 280 4680 5.1 — — — 54 11	16 29.05 280 4750 5.4 — — — 56 15.4	16 287.9 280 4740 5.2 — — — 58 15.9	16 284.4 280 >5000 5.2 — — — 58 14.9	16 281.3 280 4640 5.3 — — — 58 16
圧力	1 次燃焼室圧力 2 次燃焼室圧差 高温フィルタ差圧	mmH ₂ O mmH ₂ O mmH ₂ O	—20 58 12	—20 55 11	—20 56 11	—20 54 11	—20 56 11	—20 58 11	—20 58 11
温度	大気 1 次燃焼室 2 次燃焼室 高温フィルタ ダライヤータ出口 温度	°C °C °C °C °C	32 605 892 630 102	32 54.6 84.7 56.3 94	33 56.2 85.9 60.9 96	28.6 57.7 84.3 54.5 92	34.9 53.4 83.8 59.4 94	33.5 57.4 70.5 60.8 94	33.9 51.5 84.8 59.7 96
水分	水分量(Wet Base) 炉床残灰量 灰分 その他	Vol % g g/cm ³ g/cm ³ %	14.7 692 0.24 2.58 1.11 — — — — 110	10.4 20.2 0.23 2.67 1.15 — — — — 50	12.7 59.8 0.29 2.62 0.915 — — — — 43	9.52 48.2 0.30 2.46 0.885 — — — — 80	11.5 54.2 0.246 2.63 1.08 — — — — 62	10.8 53.8 0.231 2.67 1.15 — — — — 64	11.2 35.6 0.252 2.62 1.05 — — — — 43
								0.796	68

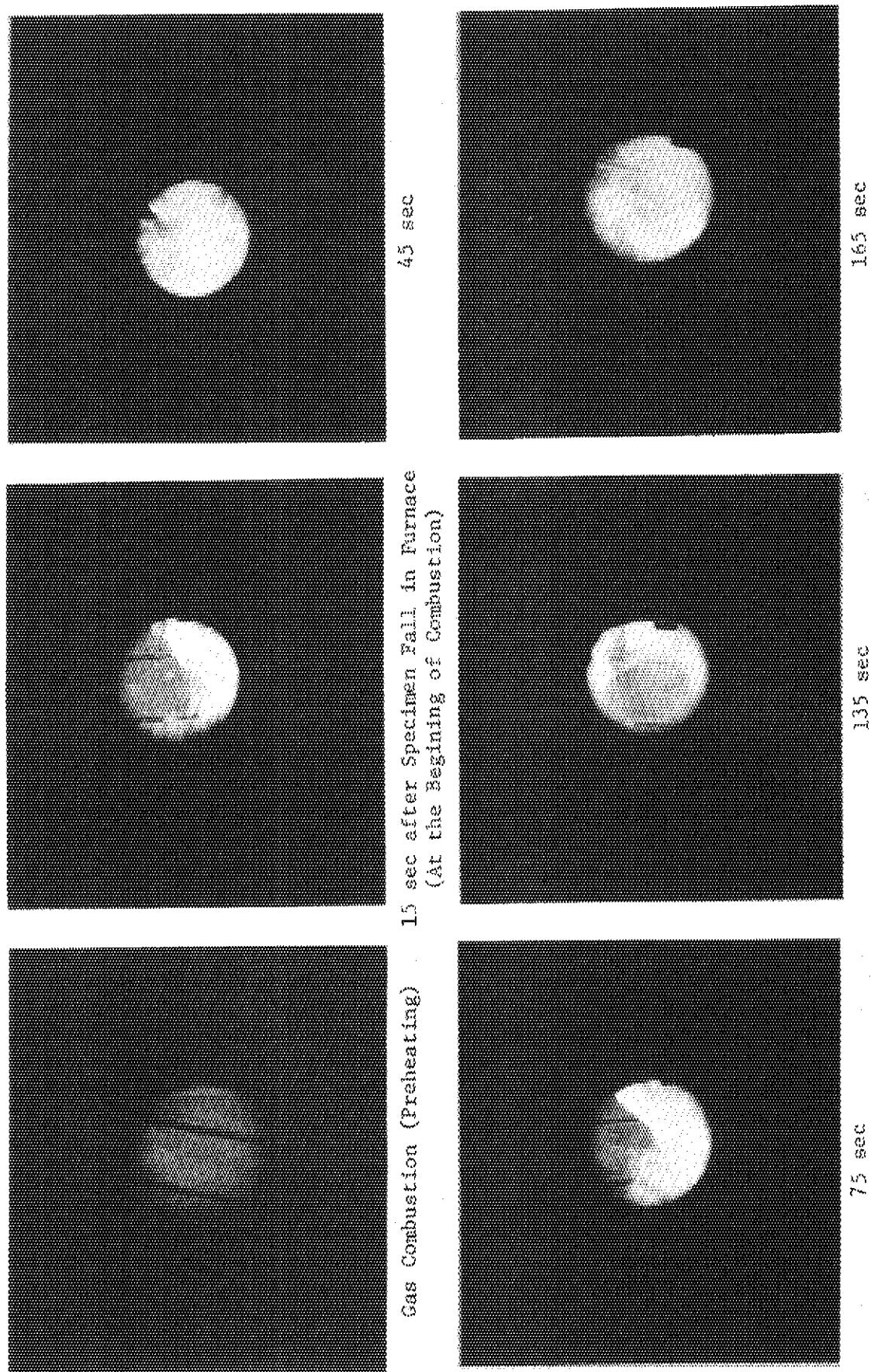
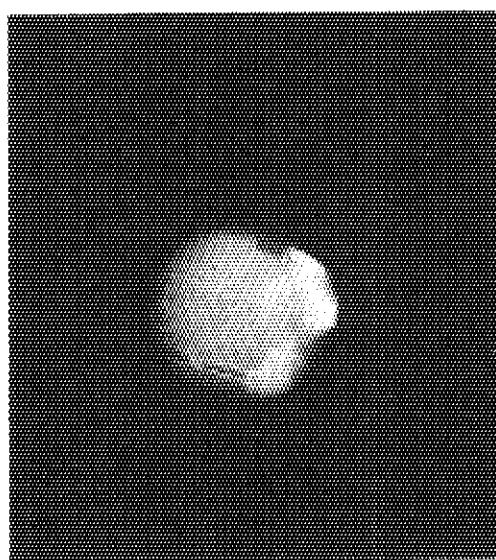
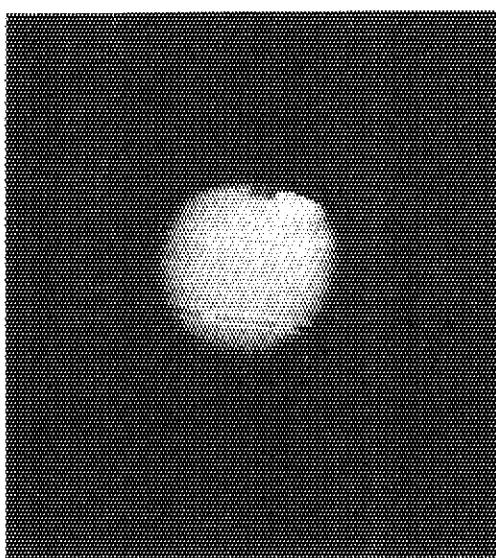


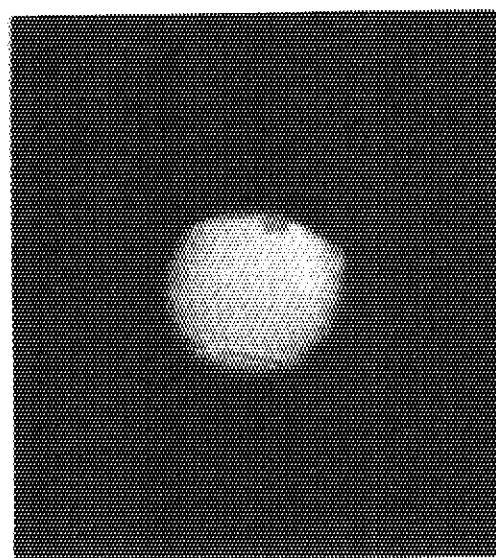
Fig. 4.4.2(1) Sequence of Specimens Burning (Feed Rate 16 kg/n). (1)



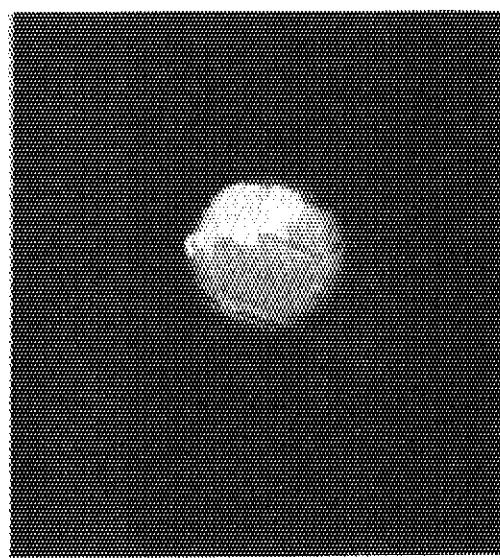
6 min



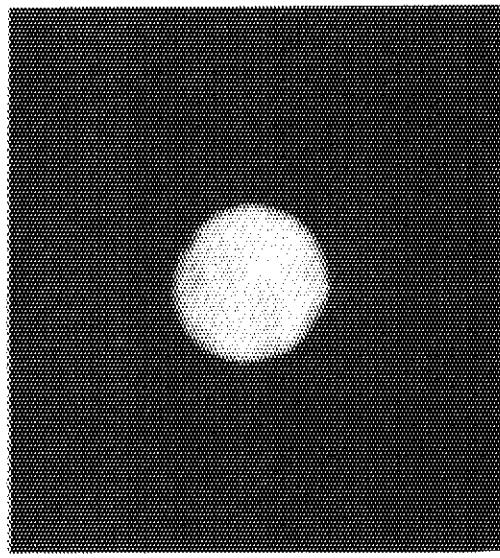
5 min



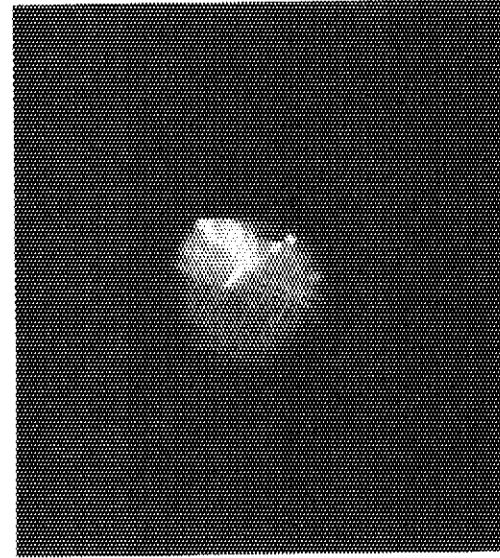
3 min



15 min (3 times Fall in)



7.5 min (Next Specimen Fall in)



7 min

Fig. 4.4.2(II)
Fig. 4.4.2(I)
Fig. 4.4.2(III)

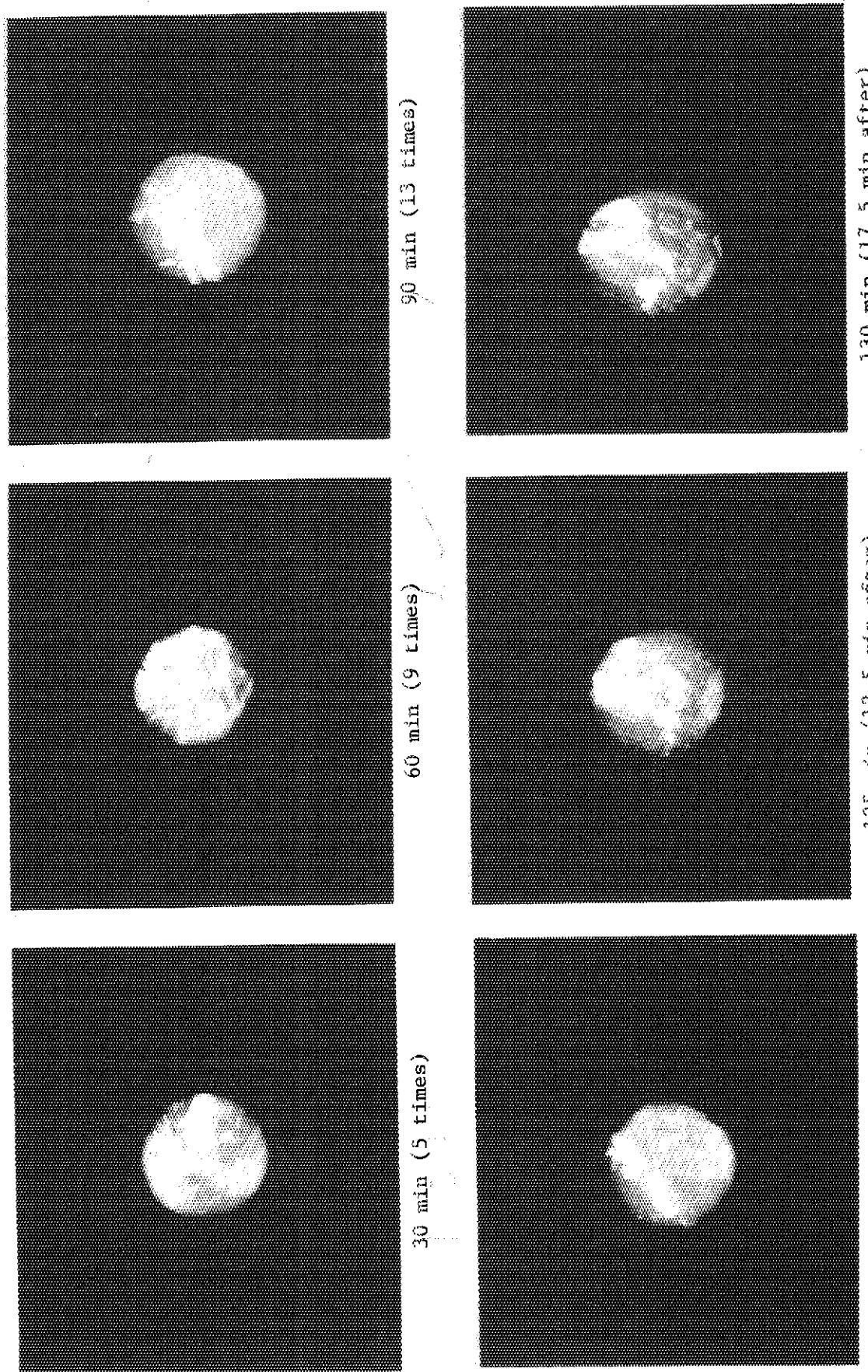


Fig. 4.4.2(III)

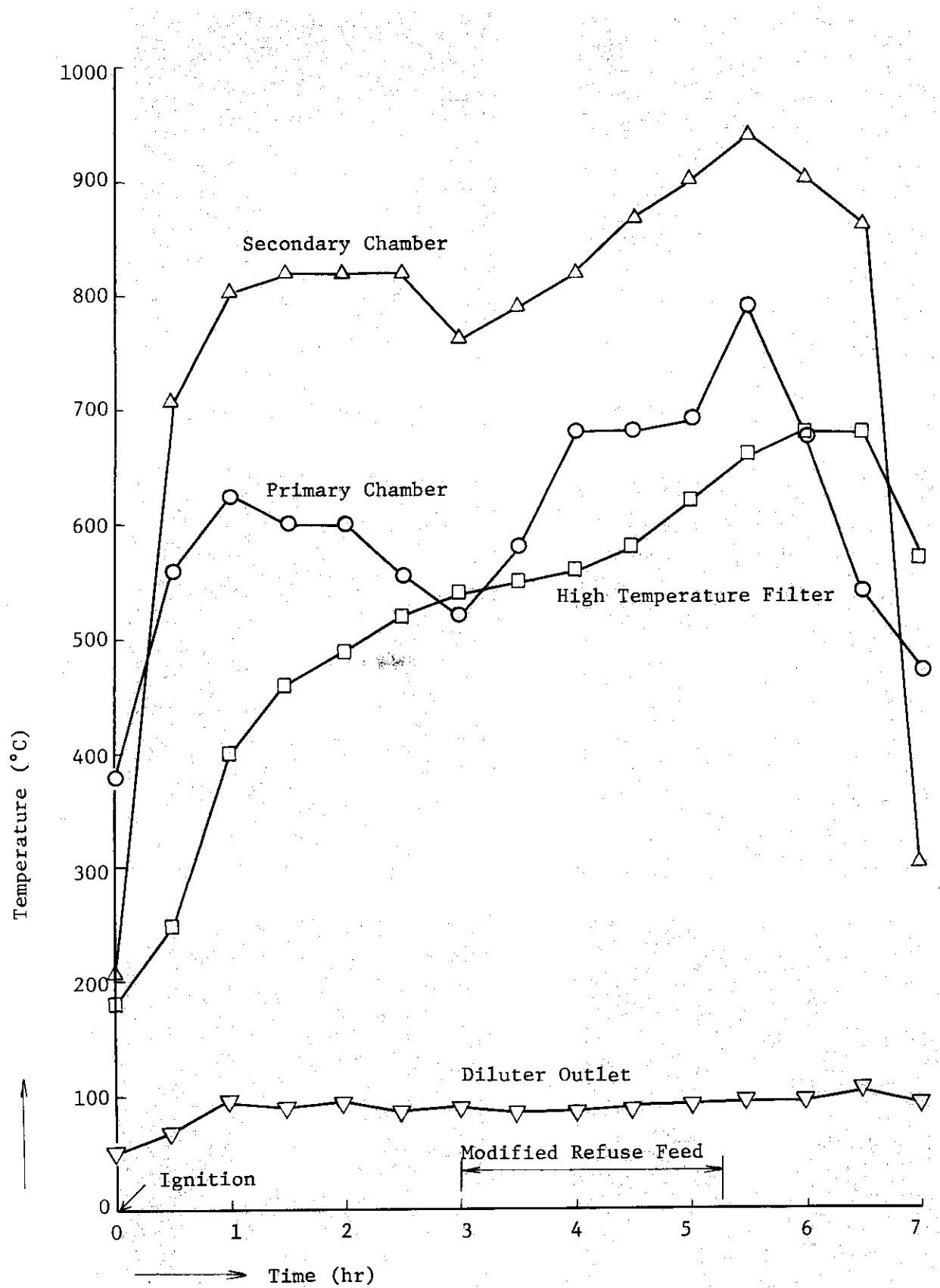


Fig. 4.4.3 Time history of temperature profile

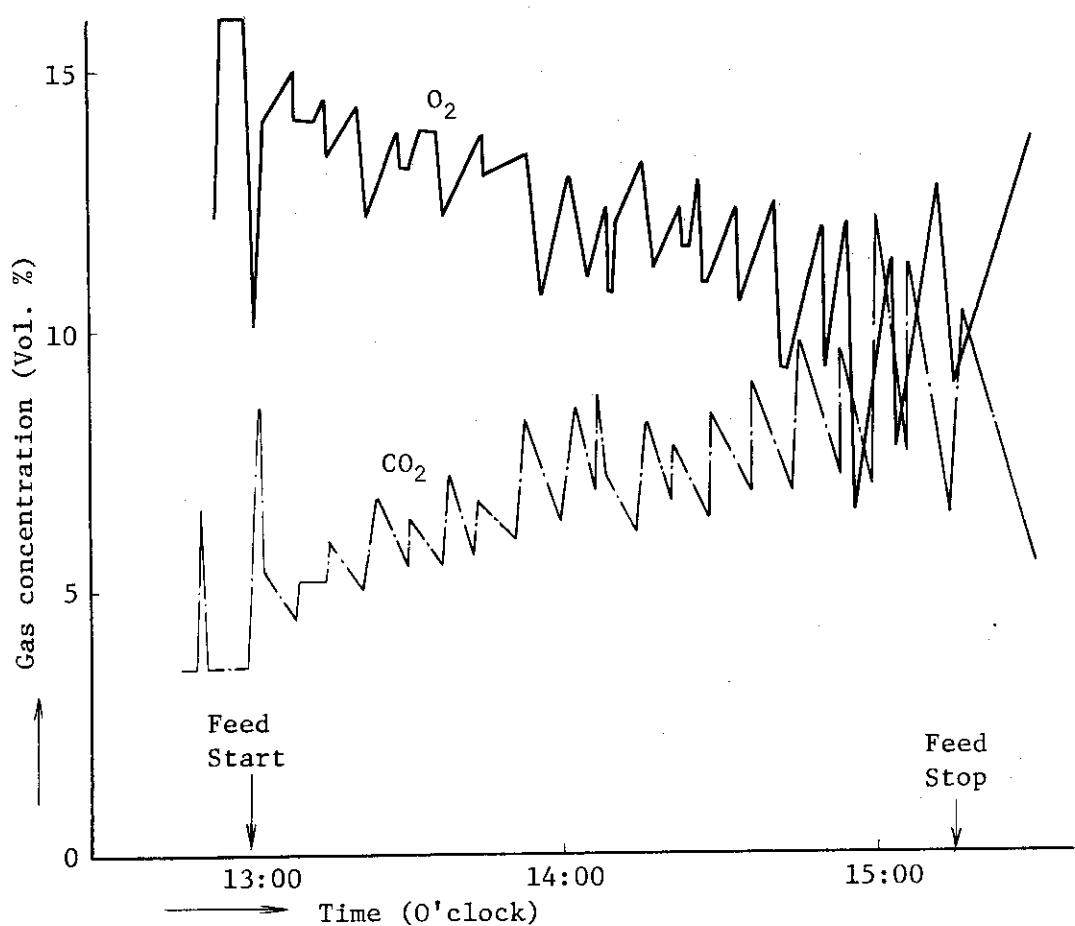


Fig. 4.4.4 Flue gas composition (I)

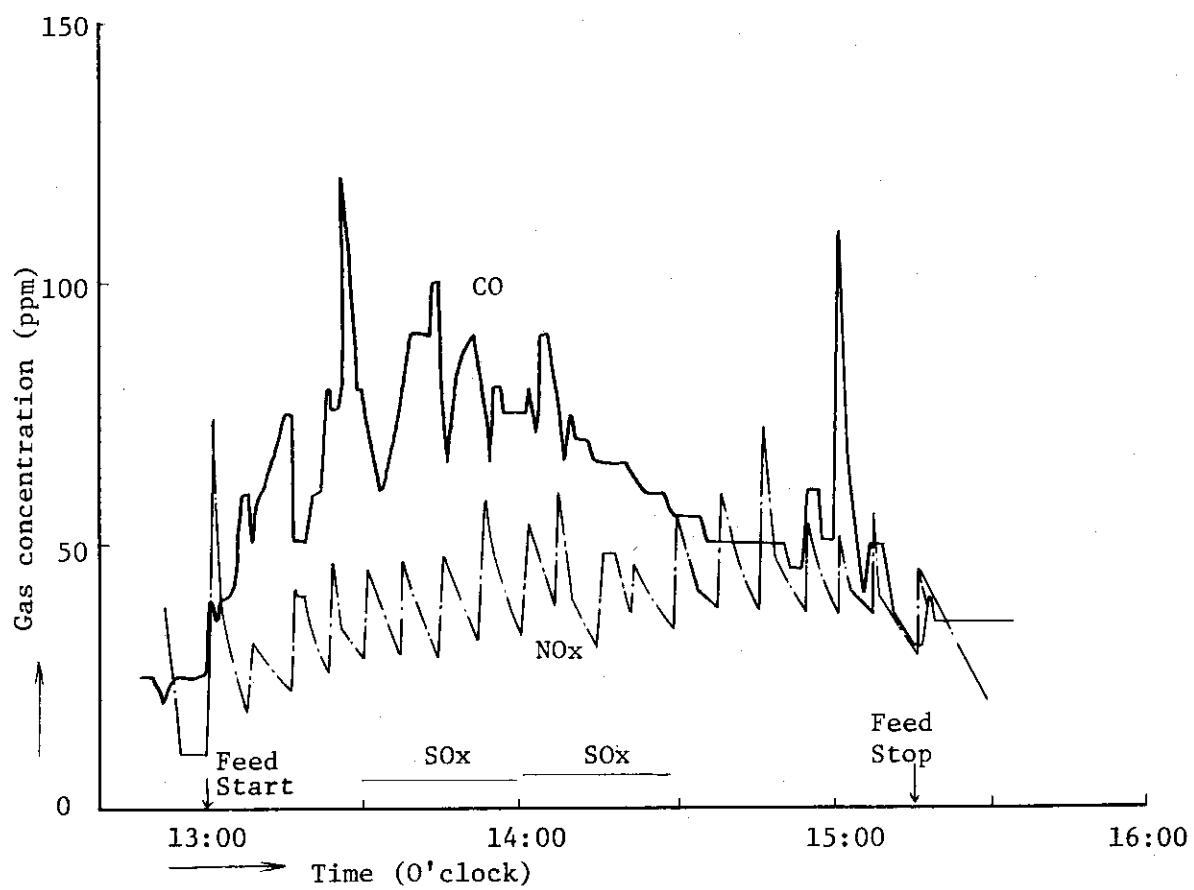


Fig. 4.4.5 Flue gas composition (II)

Table 4.4.2 Components of Flue Gas

	Air	Modified Refuse	Propane	Sum	Composition %
Feed Rate	560 Nm ³ /h	16 kg/h	5.2 Nm ³ /h	—	—
N ₂ Nm ³ /h	427.9	0.03	0	427.93	73.4
Theoretical O ₂ Nm ³ /h	—	23.91	26.0	49.91	—
Residual O ₂ Nm ³ /h	63.83	—	—	63.83	11.0
CO ₂ Nm ³ /h	0	18.17	15.60	33.77	5.80
H ₂ O Nm ³ /h	18.39 *	from Moisture 1.67 from Combustion 16.30	20.80	57.16	9.81
Sum	510.12	36.17	36.40	582.7	100

* For calculations assumed that relative humidity is 70 % at 32 °C.

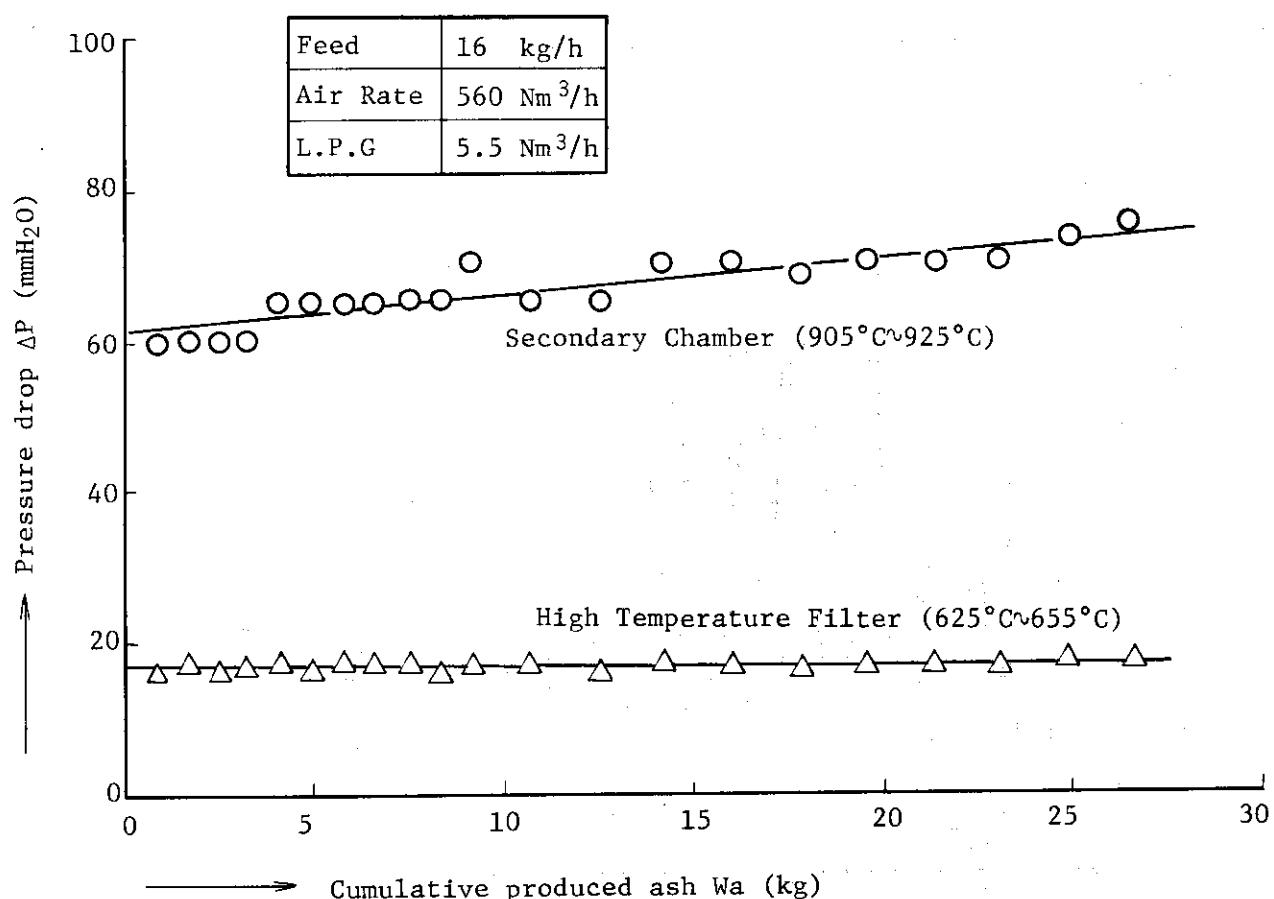


Fig. 4.4.6 Pressure Drop

5. 除じん性能試験

5.1 高温フィルタの構造

高温フィルタの構造をFig. 5.1.1に示す。高温フィルタは上部に位置するプレコート材交換操作用フードと下部のフィルタ本体部とから構成されており、円筒状になっている。本体部は鋼板外壁の内面に耐火レンガおよび断熱材を内貼りして蓄熱性能を持たせ、内部にブラケットによって支持されている管板と、それに取付けられた222本のキャンドルを収納している。キャンドルは内径42mm ϕ 、有効長さ約850mmの耐熱鋼製で、多数の微細な孔を有しており、管板の中心に対して同心円上に配列されている。排ガスは本体側面上部に位置する入口から入り、キャンドル内部から外へ抜けて本体底部の出口へ流れる。このとき、キャンドル内部には数mm長さの纖維状に特殊加工したアスペストファイバーがあらかじめコーティングされており、これによって排ガス中のダストを集じんする。また運転中は、熱遮蔽を兼ねた密閉用上蓋が本体上部に取付けられる。

プレコート材交換操作用フードは鋼板製で、プレコート材抜取り用ノズル、同充填用ノズル、作業用固定スツツ、給気フィルタ、本体上蓋操作用ウィンチなどが取付けられている。

5.2 プレコート材の充填方法

使用済プレコート材は、抜取り用ノズルを介して個々のキャンドルからアスピレータによって除去する。その後、新たにプレコート材を充填するとき、予め次の方法で前処理を行っておく。

- (1) アスペストファイバーを乾燥する。
- (2) 乾燥したアスペストファイバーを300g単位で粉碎・充填機により粉碎する。
- (3) 粉碎は300g×7回+120g（計2,220g）について2回繰返す。

前処理を終えたアスペストファイバーを次の方法でキャンドル内にコーティングする。

- (1) 炉内負圧を20mmH₂O程度に維持しながら高温フィルタ本体上蓋を開き、次いで炉給気系、空気混合冷却器の冷却空気系を閉じ、高温フィルタ上部フードの給気系を開く。
- (2) 高温フィルタ通過風量を30～40m³/minに調整する。
- (3) 充填用ノズルのフード内側にアスペスト吹出しノズル（L字型）を取付ける。
- (4) 充填用ノズルのフード外側に粉碎・充填機の出口ホースを取付ける。
- (5) 粉碎・充填機にアスペストファイバー300gを投入し、起動する。
- (6) アスペストファイバーを300g×7回充填し、最後に120gを追加する。
- (7) 高温フィルタ差圧が5～10mmH₂Oになっていることを確認したら、上蓋を閉じ復帰する。このようにして、アスペストファイバーは気流によってキャンドル内に送り込み、コーティング層を形成させる。最後のコーティング層厚みは2mm程度になる。

5.3 試験方法

高性能な集塵装置の除塵性能を測定する方法の一つとしてDOP試験法がある。この方法は常温で行なえ取り扱いが比較的簡単で精度が高く高性能集塵装置の標準的試験方法になっている。そこで今回も高温フィルタおよびHEPAフィルタの除塵性能を把握するためにまずDOP試験を行なった。しかしながら本焼却炉の高温フィルタのように炉からの高温排ガス用の集塵装置として用いられる場合、ダストとして一般のフライアッシュの他に昇華し易い物質のヒュームや、可燃物の不完全燃焼によって生じるスートなどが含まれその除塵性能も炉の運転時と常温時のそれは異なるものと考えられる。

そこでDOP試験の次に炉運転時におけるダストの補集効率を測定しそれぞれの条件下での除塵性能の比較検討を行なった。

5.3.1 DOP試験

DOP発生器で発生させたDOPエアロゾルをアトマイジング空気用送風機の吸引側ダクト内へ供給しエアロゾルと空気とを送風機内部で均一に混合させた後炉内へ送りDOP濃度が定常になった後測定を行なう。

DOPの濃度測定は、高温フィルタ、HEPAフィルタのそれぞれ入口側、出口側の煙道側壁に設けられたサンプリングノズルから排ガスを吸引し、倍率器を用い適当なDOP濃度まで清浄空気で希釈後、ダストカウンタでDOP粒子を測定する。測定器はDAN-Industry社製のPM-730-D₃-P形ダストカウンタを使用した。

5.3.2 炉運転排ガス中のダスト濃度の測定

炉運転中の高温排ガス中のダスト濃度の測定はJIS Z 8808に準じて行なった。⁽⁶⁾

焼却炉の運転条件は、模擬廃棄物の投入速度が16 kg/hであり他は4.1節で述べたとおりである。

測定装置の概略をFig.5.3.1に示し、その外観をFig.5.3.2に示す。煙道内に挿入したダストサンプリングノズルから真空ポンプで含塵排ガスを吸引し、ダスト捕集器へ導きダストをろ紙で捕集した後凝縮器で水分を凝縮分離する。次に吸引ガスの温度、圧力、吸引速度、ガス吸引量の測定を行ないダスト濃度、排ガス中の水分量を求めた。ダスト測定孔からダスト捕集器の間の配管はアスベスト布による保温を行ない水分の凝縮を防いだ。

サンプリングノズルの構造は入口側がFig.5.3.3に、出口側がFig.4.3.1に示したとおりである。入口側は図に示すように実装置上の制約からJISの方法どおりに吸引ノズル孔を煙道中心部に流れに対向するよう挿入できず、やむを得ず煙道側壁から排ガスを吸引した。^{注2}

注1 DOP(Dicetyl-phthalate)を圧縮空気で微粒化すると容易に安定で比較的均一なサブミクロン粒子を発生させることができるので高性能集塵装置の性能試験用標準粒子としてDOPエアロゾルが良く用いられる。

注2 粒径が大きく慣性力の大きい粒子ほど捕集されにくいため測定値は常に真のダスト濃度より低い値が得られる。^{注1}

排ガスの吸引速度は 30 l/min とした。この吸引速度は出口側ノズルでの等速吸引速度にはほぼ等しい。ダストの補集は円筒ろ紙で行なった。補集器の構造および寸法を Fig. 5.3.4 に示す。使用した円筒ろ紙は排ガス温度が高温であることからシリカ繊維製円筒ろ紙をさらに電気炉で 3 時間 800°C で焼成したものを使用した。ダストの補集後ろ紙はただちに乾燥器で所定時間乾燥しデシケータ内で放冷した後秤量した。乾燥は 145°C で 1 時間行なった。

灰の粒度分布の測定は、炉床残留灰については、標準フルイで行なった。2 次燃焼室内で補集された灰は、採取された量が少なくフルイでの測定は困難であったので目開き $63\text{ }\mu\text{m}$ のフルイ (Tyler No. 250) でふるい分け $63\text{ }\mu\text{m}$ 以下の粒径のものについてのみ光透過法で測定した。^{注3}

ダスト中の未燃カーボン量は、ダスト補集後のろ紙をプラズマによる低温灰化装置で 3 時間照射しその減量により算出した。

5.4 測定結果および考察

DOP 試験の結果を Table 5.4.1 に示す。

高温フィルタの捕集効率は 97 % 以上、HEPA フィルタのそれは 99.97 % 以上あり DOP 試験の結果はどちらも十分満足すべき性能を有していることがわかった。ことに高温フィルタはその構造の簡単さと低圧力損失の面から考えて非常にユニークで性能の優れたフィルタといえる。

次に Table 5.4.2 に炉運転時の除塵性能試験結果を示す。

この結果、炉内への灰の残留率は 94 % 以上である。さらに炉出口排ガスのダスト中未燃カーボンが 90 % 以上を占めていることからサンプリングノズルの横向き吸引によりダスト濃度は常に過少な値が得られることを考慮しても灰の炉内残留率は 95 % を越えているものと思われ灰の飛散が非常に少なく RI 廃棄物焼却炉に要求される性能を有しているといえる。

高温フィルタの捕集効率は平均値で 99.6 % と DOP 捕集効率に比べ非常に高い値が得られたがこれは第 1 飛散ダストの平均粒径が DOP 粒子より大きいためと考えられるが他に出口側の捕集ダスト量が平均 0.4 mg と少なくろ紙のダスト捕集時の高温による減量の影響を受けているためとも考えられる。そこでろ紙の減量を LPG 予燃焼時の予備テストにおけるろ紙の減量の平均値 0.4 mg に等しいとしてダスト捕集効率を補正すれば、 $\eta = 99.3\%$ が得られる。したがって炉運転時の捕集効率は DOP 粒子の捕集効率より若干高い値が得られる。この原因は先にも述べたように粒径の違いによるものと考えられる。

以上の結果から焼却灰のマスバランスは、燃焼室で 95 %、高温フィルタで約 5 % が捕集され排出量は 0.05 % 以下ということがわかった。

焼却灰の分析結果の 1 例を Table 5.4.3 に示す。未燃炭素分が少なくほぼ完全に燃焼していることがわかる。

生成した灰の累積粒度分布を Fig. 5.4.1 に、その頻度分布を Fig. 5.4.2 に示す。これから明らかのように炉床上の灰は平均粒径が $70\text{ }\mu\text{m}$ である。一方 2 次燃焼室内の充填物上の捕集ダストは $70\text{ }\mu\text{m}$ 以下は非常に少ない。したがって 2 次燃焼室内では $70\text{ }\mu\text{m}$ 以下の粒子はほとんど捕集でき

注 3 粒度分布の測定は日本新金属(株)環境分析センターに依頼した。

ないことがわかった。

また Fig. 5.4.1 中炉床上の灰の分布が一つの直線とならず $100 \mu\text{m}$ のところで急に折れ曲ったようになっているが、これはカートンボックスに使われている金具が灰中に含まれていたための影響である。

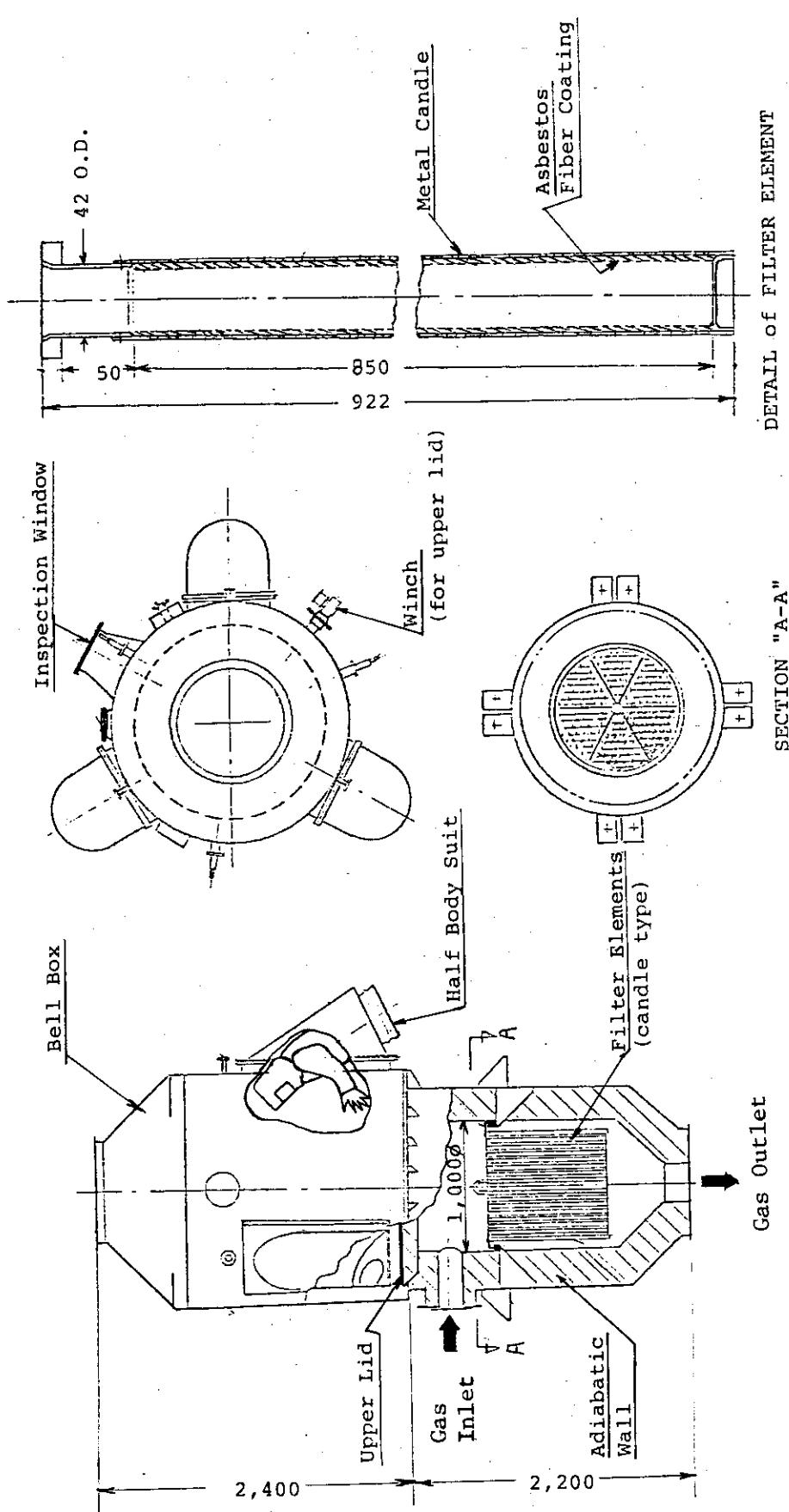


Fig. 5.1.1 Structure of High Temperature Filter (Unit; mm)

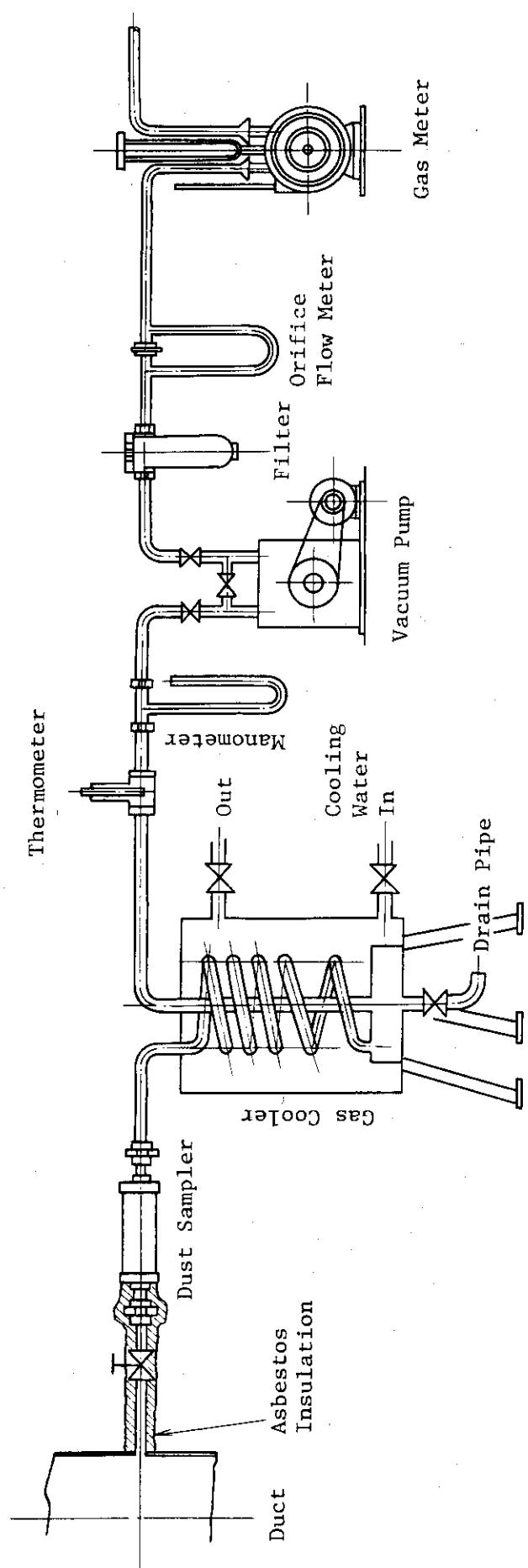
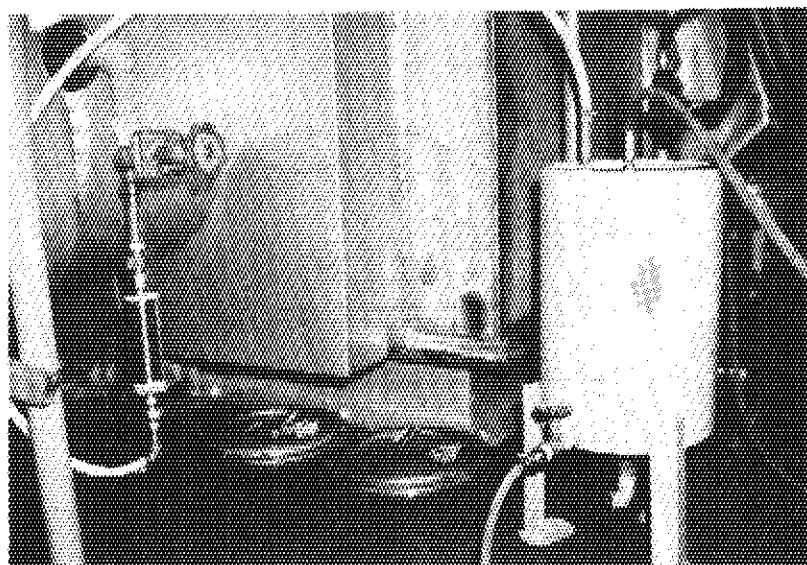
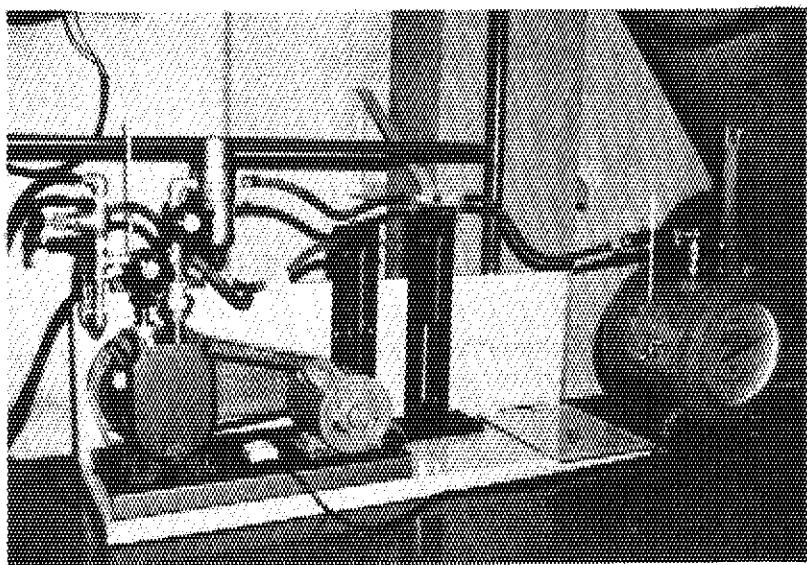


Fig. 5.3.1 Schematic diagram of dust sampling apparatus



Sampling Nozzle and Gas Cooler



Vacuum Pump and Gas meter

Fig. 5.3.2 Photograph of Dust Sampling Apparatus

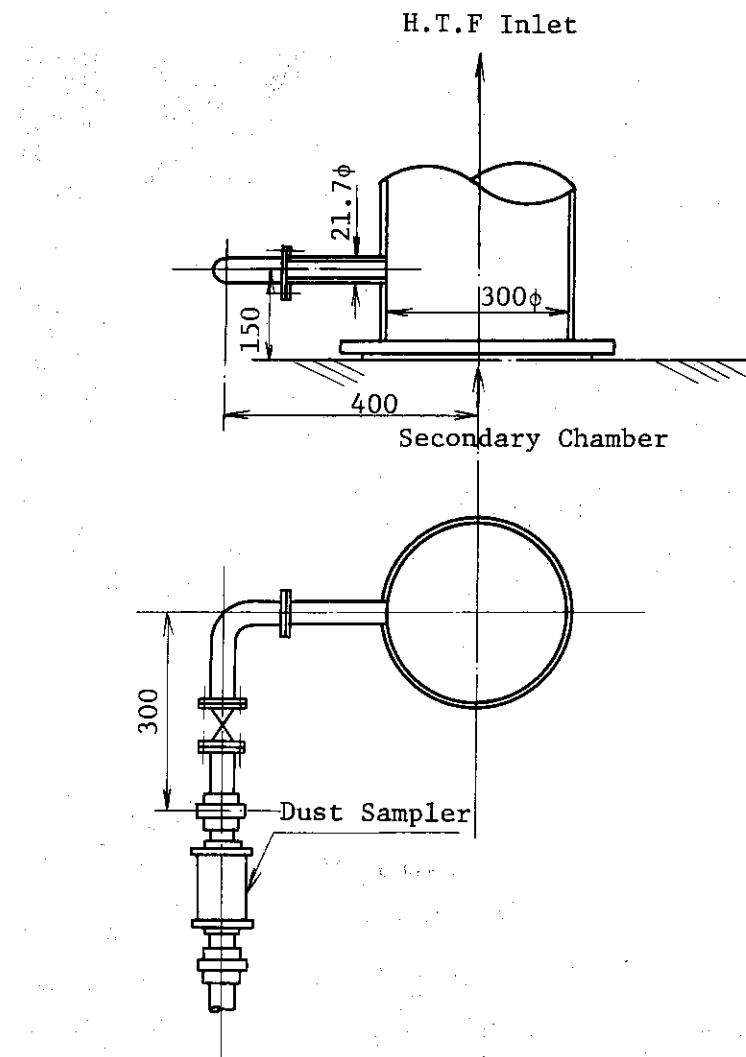
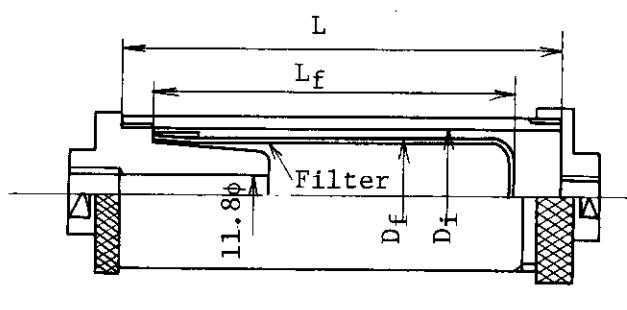


Fig. 5.3.3 Schematic diagram of sampling nozzle
(Inlet side)



	Inlet side	Outlet side
L	145	125
D_i	43.5ϕ	29.5ϕ
L_f	120	90
D_f	35ϕ	25ϕ

Fig. 5.3.4 View of Dust Sampler

Table 5.4.1 Results of D.O.P Test

1. High Temperature Filter

粒径 μm	測定値 (Particles/100cm³)				DOP濃度 (P/100cm³)		捕集効率 %
	H T F 入口 $\times 100$	H T F 入口 $B G \times 100$	H T F 出口 $\times 100$	H T F 出口 $B G \times 100$	H T F 入口 $\times 100$	H T F 出口 $\times 100$	
0.3(T)	5167.4±64.4	20.0±4.2	127.8±17.3	5.0±1.26	5147.4±64.5	122.8±17.3	97.6±0.3
0.4	4109.0±42.0	10.2±2.4	98.0±13.2	3.6±0.80	4098.8±42.1	94.4±13.2	97.7±0.3
0.5	2688.0±16.5	3.6±0.8	57.7±3.8	1.2±0.75	2684.4±16.5	56.5±3.9	97.9±0.1
0.6	1612.8±29.9	1.6±1.2	28.7±4.3	0.8±0.75	1611.2±29.9	27.9±4.4	98.3±0.3
0.8	1031.6±23.3	1.6±1.2	23.5±5.6	0.8±0.75	1030.0±23.3	22.7±5.7	97.8±0.6
1.0	576.2±23.7	0.4±0.49	14.0±4.8	0.2±0.40	575.8±23.7	13.8±4.8	97.6±0.8
0.35(S)	1058.4±76.9	9.8±4.8	29.8±21.8	1.4±1.49	1048.6±77.0	28.4±21.9	97.3±2.1
0.45	1421.0±45.1	6.6±2.5	40.3±13.7	2.4±1.10	1414.4±45.2	37.9±13.7	97.3±1.0
0.55	1075.2±34.2	2.0±1.4	29.0±5.7	0.4±1.06	1073.2±34.2	28.6±5.8	97.3±0.5
0.70	581.2±37.9	0±1.7	5.2±7.1	0.0±1.06	581.2±37.9	5.2±7.2	99.1±1.2
0.90	455.4±33.2	1.2±1.3	9.0±7.4	0.6±0.85	454.2±33.2	8.4±7.4	98.2±1.6

2. HEPA Filter

フィルタ I	粒径 $\mu\text{m}'$	測定値 (P/100cm³)				DOP濃度 (P/100cm³)		捕集効率 %
		HEPA入口 $\times 100$	HEPA入口 $B G \times 100$	HEPA出口 $\times 1$	HEPA出口 $B G \times 1$	HEPA入口 $\times 100$	HEPA出口 $\times 1$	
F1	0.3	8352.2±122.9	35.3±4.24	102.8±6.05	0.55±0.66	8316.9±123.0	102.3±6.09	99.988±1
	A 0.5	4493.4±39.6	7.82±1.47	42.0±7.13	0.091±0.29	4485.6±39.6	41.9±7.14	99.991±2
F1	0.3	8246.0±141.1	30.8±3.79	10.8±2.54	0	8215.2±141.2	10.8±2.54	99.999±0
	B 0.5	4480.6±50.5	7.50±1.69	4.67±3.25	0	4473.1±50.5	4.67±3.25	99.999±1
F1	0.3	8381.4±187.3	33.8±5.25	115.2±8.4	0	8347.6±187.4	115.2±8.4	99.986±1
	C 0.5	4496.4±122.6	7.20±2.04	43.3±8.2	0	4489.2±122.6	43.3±8.2	99.990±2
F1	0.3	8314.4±80.0	31.9±5.03	227.8±20.8	0.20±0.4	8282.5±80.2	227.6±20.8	99.973±3
	D 0.5	4448.0±46.5	5.90±2.12	88.8±7.93	0	4442.1±46.5	88.8±7.93	99.980±2

Table 5.4.2 Experimental Results

	Run No	吸引ガス量	BG 4	BG 5	BG 6	BG 7	BG 8	平均値
H.T.F 入 口 側	吸捕集ダスト量	ℓ mg	946.78 58.3	1363.67 76.9	2317.80 92.6	2230.36 84.4	3001.35 1174	
	低温灰化減量	ℓ mg	55.3	74.3	100	82.0	1182	
	ダスト濃度	mg/Nm ³	61.6	56.4	40.0	37.9	39.1	47.0
	ダスト排出量	g/h	3.24	2.97	21.0	19.9	20.6	24.7
ダスト中の炭素含有率		-	0.95	0.97	0.97	0.97	0.963	
H.T.F 出 口 側	吸引ガス量	ℓ mg	2500.30	2517.18	2361.56	2187.34	2943.30	
	吸捕集ダスト量	ℓ mg	0.8	0.4	0.4	0.3	0.1	0.4
	低温灰化減量	ℓ mg	0	0	0	0	0	
	ダスト濃度	mg/Nm ³	0.32	0.16	0.17	0.14	0.03	0.164
ダスト中の炭素含有率		-	0.168	0.0842	0.0894	0.0736	0.0158	0.0862
1 次・2 次室内灰残留率		-	0	0	0	0	0	0
H.T.F ダスト捕集効率		-	0.924	0.930	0.951	0.953	0.951	0.942
燃焼炉 + H.T.F 捕集効率		-	0.395	0.997	0.996	0.996	0.9992	0.9966
D.F 値		-	0.99960	0.99980	0.99979	0.99983	0.99996	0.99980
D.F 上限		2.53×10 ³	5.04×10 ³	4.75×10 ³	5.77×10 ³	2.69×10 ⁴	9.00×10 ³	

Table 5.4.3 Analysis of Ash

Ultimate Analyses	Sample		BG 2	
	Si	Unit	Value	Unit
	Mg		19.7	
	Ca		8.27	
	Na		3.84	
	K	wt%	1.56	
	Fe		0.31	
	S		1.40	
	C1		0.12	
	C		0.16	
	Density	g/cm ³	1.45	
			2.67	

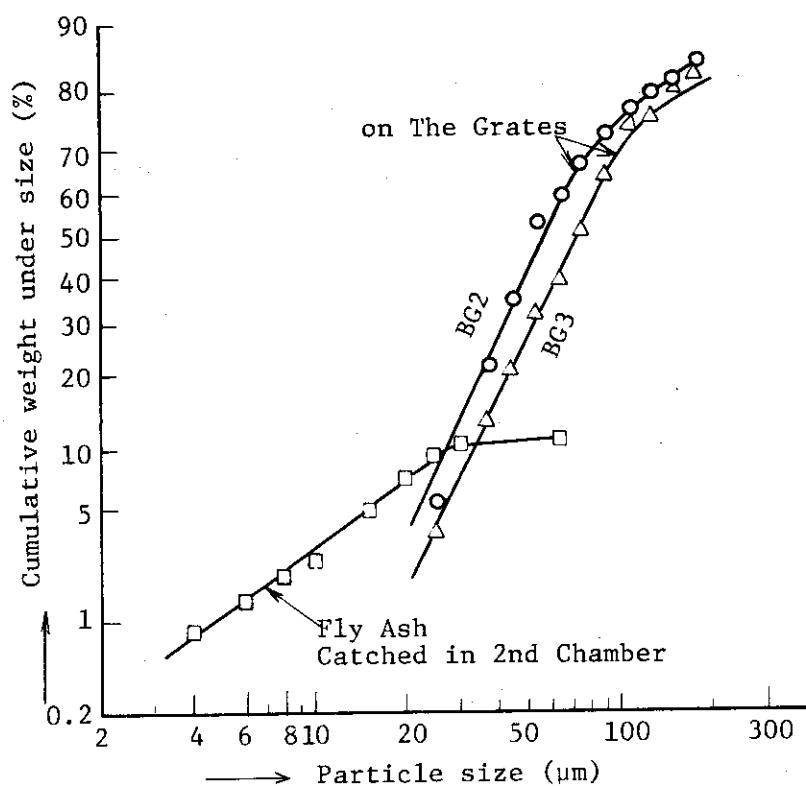


Fig. 5.4.1 Particle size distribution of ash

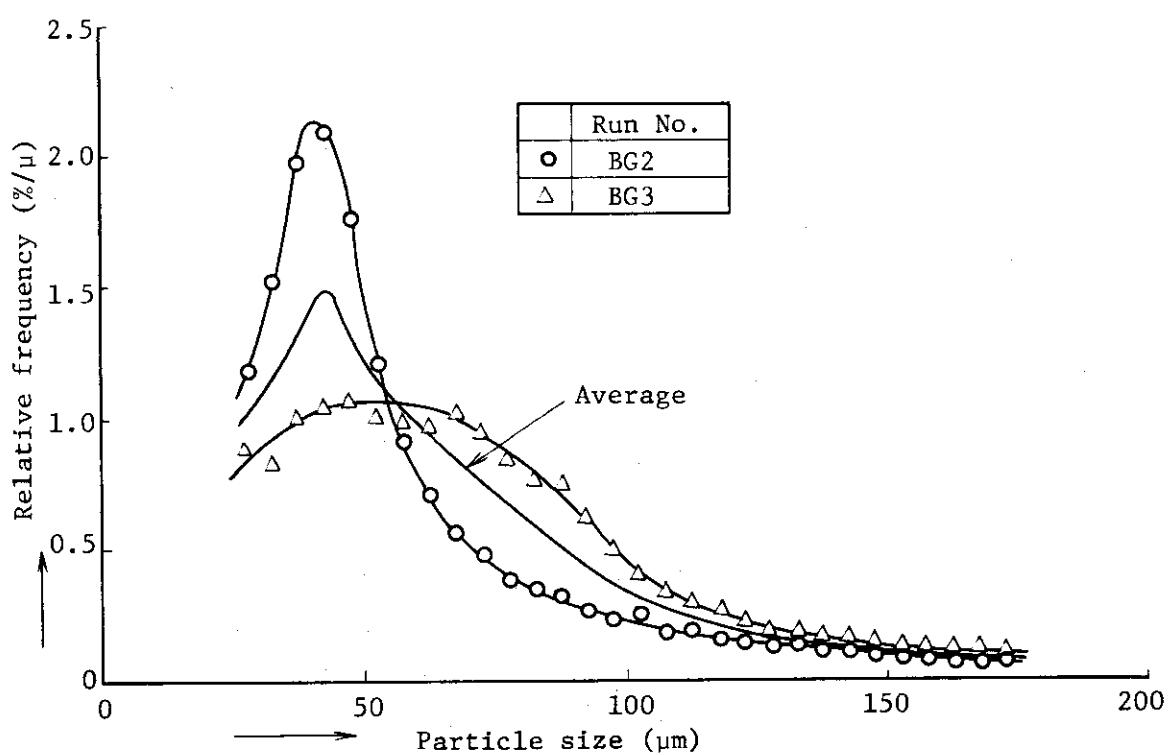


Fig. 5.4.2 Particle size distribution of ash

6. 除染性能試験（コールド試料によるトレーサ試験）

先の除塵性能試験の結果、本焼却炉の性能は、焼却能力および除塵性能のいずれも仕様を十分満足するものであった。そこで次に非放射性のアイソトープをトレーザに用い除染性能のコールド試験を実施した。

トレーザには比較的揮発性の高い元素としてPおよびCsを、不揮発性の元素としてCo, Srを選んだ。さらにこれらの元素の化合物の中でも揮発性が高い塩化物と比較的低温で熱分解し安定な酸化物に変化する硝酸塩あるいは水酸化物とによる同一元素の化学的性状の違いによる除染性能の差の有無について調べることにした。

使用したトレーザ物質をTable 6.1に示し、Table 6.2にそれら、およびそれらが炉内で変わり得るであろうと思われる化合物の物性値を示す。^{(7), (8)}

これらのなかで融点および沸点の低い物質は蒸気圧も高く揮発しやすいものと思われる。したがってその除染係数もかなり小さいものと考えられる。

今揮発性物質の蒸気圧をP_v(mmHg)、炉内圧力をP₀(mmHg)とし燃焼排ガスの流量をG(Nm³/h)とする。

燃焼排ガス中の揮発性物質の濃度は平衡に達しているものとする。したがってその分圧P_t(mmHg)はP_vに等しいとすれば排ガス中の濃度C_t(g/m³)は次のようになる。

$$C_t = \frac{A_t \cdot P_v}{22.4 P_0} \quad \dots \quad (6-1)$$

ただし A_t : 物質の原子量

気化した物質はフィルタでは全く除去できないとすれば排出量はC_t・Gであるからその物質の除染係数D_{Ft}は

$$D_{Ft} = \frac{F_t}{C_t \cdot G} = \frac{22.4 P_0 \cdot F_t}{A_t \cdot P_v \cdot G} \quad \dots \quad (6-2)$$

ただし F_t : 物質の供給量(g/h)

一般的に物質の気化速度は沸点以下の温度ではあまり早くないので排ガス中の蒸気圧P_tはP_vよりもかなり小さいと考えられる。したがって(6-2)式で得られる値は除染係数の下限値を与える。

Fig. 6.1に揮発性のトレーザ物質の温度と蒸気圧との関係を示す。^{(7), (8)} Fig. 6.2にFig. 6.1に示す蒸気圧P_vを用い(6-2)式によって求めたDF_{min}と雰囲気温度との関係を示す。ただし G=583 m³/hとした。

この結果、揮発性物質であるH₃PO₄, CsCl, CoCl₂のDF_{min}値は雰囲気温度が高くなるにしたがって指数関数的に急激に減少し 550 °C以上の温度ではほぼDF_{min}は1となる。これは供給量のほぼ全量が気化し系外へ排出してしまうことを示す。実際には気化速度が遅く得られるDF値はこの計算結果よりも大きいと考えられるがこれらの物質が灰中に単体として存在するような場合

500 °C以上の雰囲気温度では、これらの揮発性物質のDF値はそう大きな値は得られないものと予想される。

6.1 試験方法

炉の運転方法および試料の焼却条件は4.1節に述べた燃焼特性試験方法と同じである。

排ガス中のトレーサの捕集装置および捕集方法も5.3.2項に述べた排ガス中のダスト濃度測定装置および捕集方法と同様である。

6.2 試 料

被焼却物試料には、先の試験で使用した模擬廃棄物と同じものを調整しこれを用いた。この模擬廃棄物へトレーサの水溶液を一定量できるだけ均一に散布しこれを投入試料とした。トレーサに用いた試薬は市販の特級試薬をそのまま用いこれを蒸留水に溶解し所定の濃度のトレーサ溶液とした。

6.3 トレーサの分析方法

最初に次の操作の前処理を行ない分析用試料を作成した。

ダストおよびトレーサを捕集したシリカ繊維製円筒ろ紙を145 °Cで1時間乾燥後秤量し捕集ダスト量を求める。次にろ紙をフッ酸で溶解した後塩酸および硝酸を加えトレーサおよびダストを完全に溶解する。さらに過塩素酸を加え白煙処理を行なってシリカ分を除去後蒸留水で希釈しこれを分析用試料とした。

分析は、精度、分析方法の容易さなどを考慮し、Pは吸光光度法⁽⁹⁾で、C₆は原子吸光法⁽¹⁰⁾で、Srは放射化分析および炎光光度法で、Csは放射化分析で行なった。^{注4}

使用した分析機器は、International Plasma Corporation製プラズマ低温灰化装置、エルマ光学(株)製LS-7型光電分光光度計、島津製作所(株)製AA-620型原子吸光／フレーム分光光度計、柳本製作所製MT-2型C,H,Nコーダである。

6.4 試験結果および考察

試験結果をTable 6.4.1に示す。

この結果を見ると焼却炉のDF値がいずれの核種についても非常に大きい。一方高温フィルタのDF値が10²以下と逆に非常に小さくなっている。これは先の除塵性能試験の結果と矛盾した結果を示している。

この原因は、5.4節で触れたように高温フィルタ入口側のサンプリングノズルがガス流れに対

注4 試料の放射化分析は日本検査(株)に依頼した。

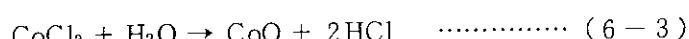
して横向き吸引しているため金属酸化物のように比重が大きく慣性力の大きいダストは比重の小さい未燃カーボン等に比べ捕集されにくく高温フィルタ入口側のトレーサ濃度が見掛け上非常に低くなっているためと考えられる (Table 6.2, 6.4.2 参照)。

揮発性のP, CsのDF値が不揮発性のCo, SrのDF値に比べ炉内では小さく高温フィルタにおいては逆に大きくなっていることも先と同じ原因によるものと考えられる。

炉と高温フィルタを組合せた全系のDF値は平均値で不揮発性のCoが 10^5 , Srが $10^4 \sim 10^5$, 挥発性のP, Csが 10^4 であった。

先に述べたように事前の検討ではトレーサ元素の化合物の物性の違いによる差があるものと予想されたが今回の試験では塩化物と酸化物との差を見い出すことができなかった。また揮発性物質のDF値も思ったほど小さいものではなかった。この原因について検討した結果、蒸気圧の高いPは、灰中に含まれるNa, K等のアルカリ金属, Ca, Mg等のアルカリ土類金属, Fe等と反応し種々のリン酸塩 ($M_3^{II}PO_4$, $M_3^{II}(PO_4)_2$, M^{I} : 1価の金属, M^{II} : 2価の金属) やピロリン酸塩 ($M_4^{I}P_2O_7$, $M_2^{II}P_2O_7$), リン化鉄 (Fe_3P) 等多くの不揮発性化合物を作るためと考えられ

$CoCl_2$ は、高温において

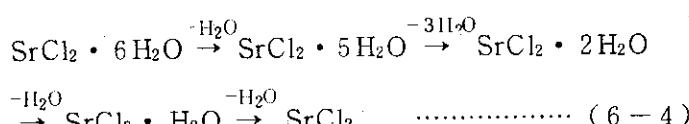


の反応により不揮発性の安定な CoO に変化するためと考えられる。

一方 $CsCl$ や Cs_2O は溶触するとすぐ灰分中へ拡散し、灰中に吸着されたり固溶体を形成し $CsCl$, Cs_2O 単体として存在せずその蒸気圧を大巾に下げているためと思われる。

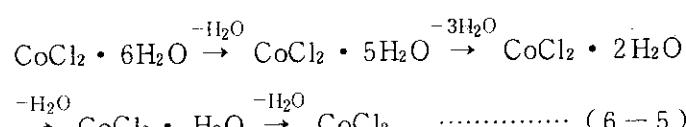
これらの考えを確認するために使用したトレーサ物質の熱天秤による分析を行なった。熱天秤は理学電機(株)製示差熱天秤を使用した。その測定結果をFig. 6.4.1に示す。

この結果 $SrCl_2 \cdot 6H_2O$ は



と段階的に脱水し最終的には無水の $SrCl_2$ になりそれ以後はほとんど重量変化がない。したがって炉の操作温度範囲では $SrCl_2$ はほとんど気化しないものと考えられる。

一方 $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ は $SrCl_2 \cdot 6H_2O$ とほぼ同様に



(6-5)式のような過程で脱水し $170^{\circ}C$ で無水の塩化コバルトに変わる。その後しばらく変化がないが、約 $400^{\circ}C$ から(6-3)式の反応が開始し $640^{\circ}C$ で完結していることがわかった。

$CsNO_3$ は $650^{\circ}C$ から



の反応が起きるがその減量は $CsNO_3 \rightarrow Cs_2O$ への変化によって生じる $CsNO_3$ の重量減少比率である27.7%を大巾に越えた重量減少を示す。したがって(6-6)の反応と同時に生成した Cs_2O の一部の気化が並行して起きているものと考えられる。

$CsCl$ は $700^{\circ}C$ から減量が検出されるようになり、その後温度の上昇とともに急激に減少量が

増大する。したがって Cs_2O , CsCl いずれも単体として存在する限りその D F 値は大きい値になり得ないことがわかった。以上のようにトレーサ物質の熱分析の結果、トレーサの挙動についての先の推定はほぼ妥当であることがわかった。

灰の炉床残留率およびトレーサの残留率を Table 6.4.2 に示す。

揮発し易さを示す比残留率は P が若干高く Sr が低くなっているがこの差は分析精度によって生じたものと考えられトレーサの炉内残留率は灰の残留率にはほぼ等しいといえる。したがって灰中取り込まれたトレーサの挙動はほぼ灰の挙動に一致する。

灰中の炭素含有率は先の除塵性能試験の結果に比べかなり多く、特に塩化物の試験の場合が多い。これは、トレーサに用いたリン酸および塩化物は一般的に可燃物の燃焼の抑制作用があるためである。

Fig. 6.4.2 に炉床残留灰の粒度分布を示す。先の結果に比べ粒径が非常に大きくなっている。これはリン酸がリン酸塩やビロリン酸塩、リン化物を作る際や、 CsCl や Cs_2O が溶融し灰と固溶体を作る際灰のバインダーとして働き灰の粒径が大きくなるためと考えられる。

全ダストの D F 値は当然ながら、先の除塵性能試験の結果とほぼ一致した。

これらの結果から、実際の放射性廃棄物を処理した場合は、放射性廃棄物中の放射性物質の量が本試験でのトレーサ投入量に比べ非常に少ないとから、放射性物質が灰中に単体として存在することはほとんど無く、焼却灰と反応あるいは吸着され種々の不揮発性の物質を形成し灰中に存在しているものと考えられ、D F 値はさらに向上するものと思われる。また、燃焼ガス温度を低下させた後、HEPA フィルタによる除染を行なうことは、揮発性物質の蒸気圧は温度の低下により指数関数的に低下することから揮発性物質の D F 値を向上させる上で絶対に必要なものと考えられる。

Table 6.1 Substances used Tracer

Nuclide	Chloride	Oxide
P	H_3PO_4	H_3PO_4
Co	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Sr	$\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Sr}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Cs	CsCl	CsNO_3

Table 6.2 Properties of Substances

Substance	Molecular Weight	Density 15°C (g/cm ³)	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Decomposition
P ₂ O ₅ (P ₄ O ₁₀)	141.94	2.387	569	600	
CoCl ₂ ·6H ₂ O	237.93	1.924	86	—	-6H ₂ O 110°C
CoCl ₂	129.84	3.356	735	1025	
Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	291.02	1.883	<100	—	
CoO	74.94	5.68	1800	—	
SrCl ₂ ·6H ₂ O	266.64	1.933 ^{17°C}	—	—	-4H ₂ O 60°C -6H ₂ O 100°C
SrCl ₂	158.54	3.052	873	—	
Sr(OH) ₂ ·8H ₂ O	265.77	1.90	—	—	-7H ₂ O
SrO	103.63	4.7	2430	—	
SrCO ₃	147.64	3.7	at 60atm CO ₂ 1497	—	-CO ₂ 1340°C
CsCl	168.36	3.983 ^{25°C}	645	1289	
CsNO ₃	194.91	3.687 ^{28°C}	414	—	
Cs ₂ O	281.81	4.36	490	—	

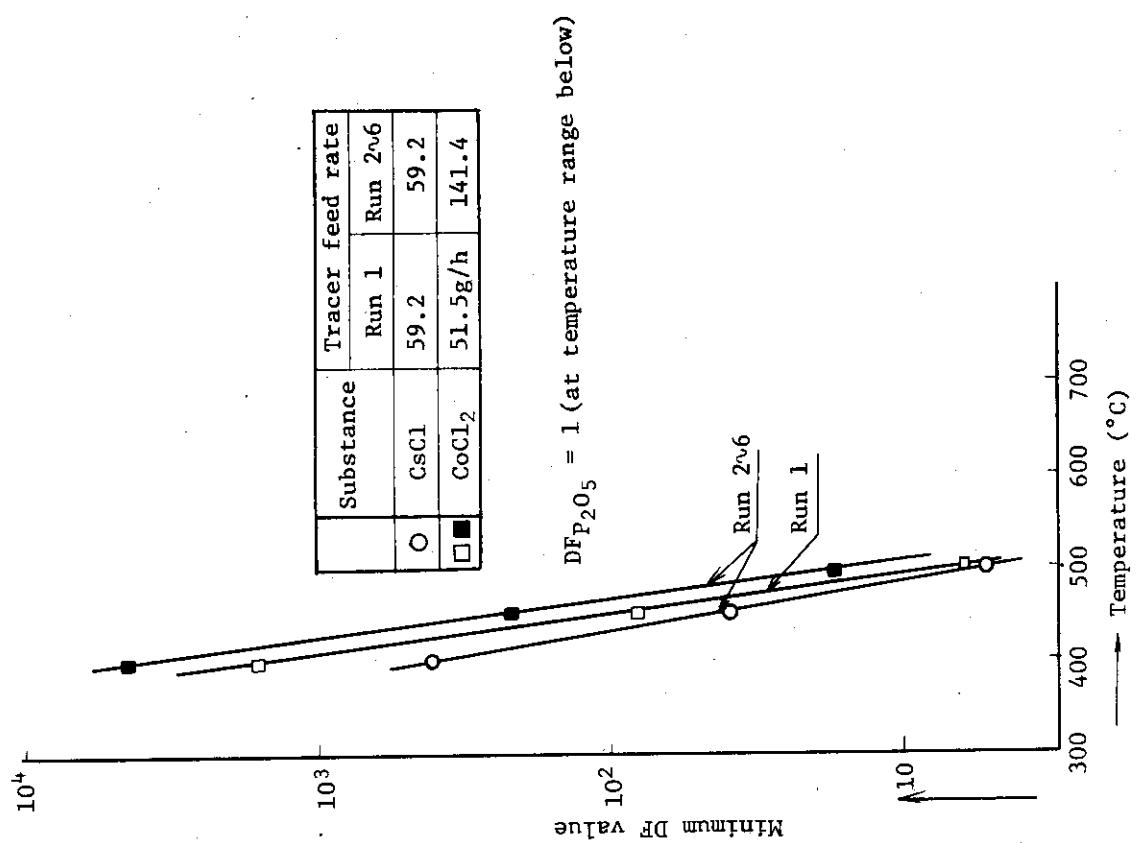
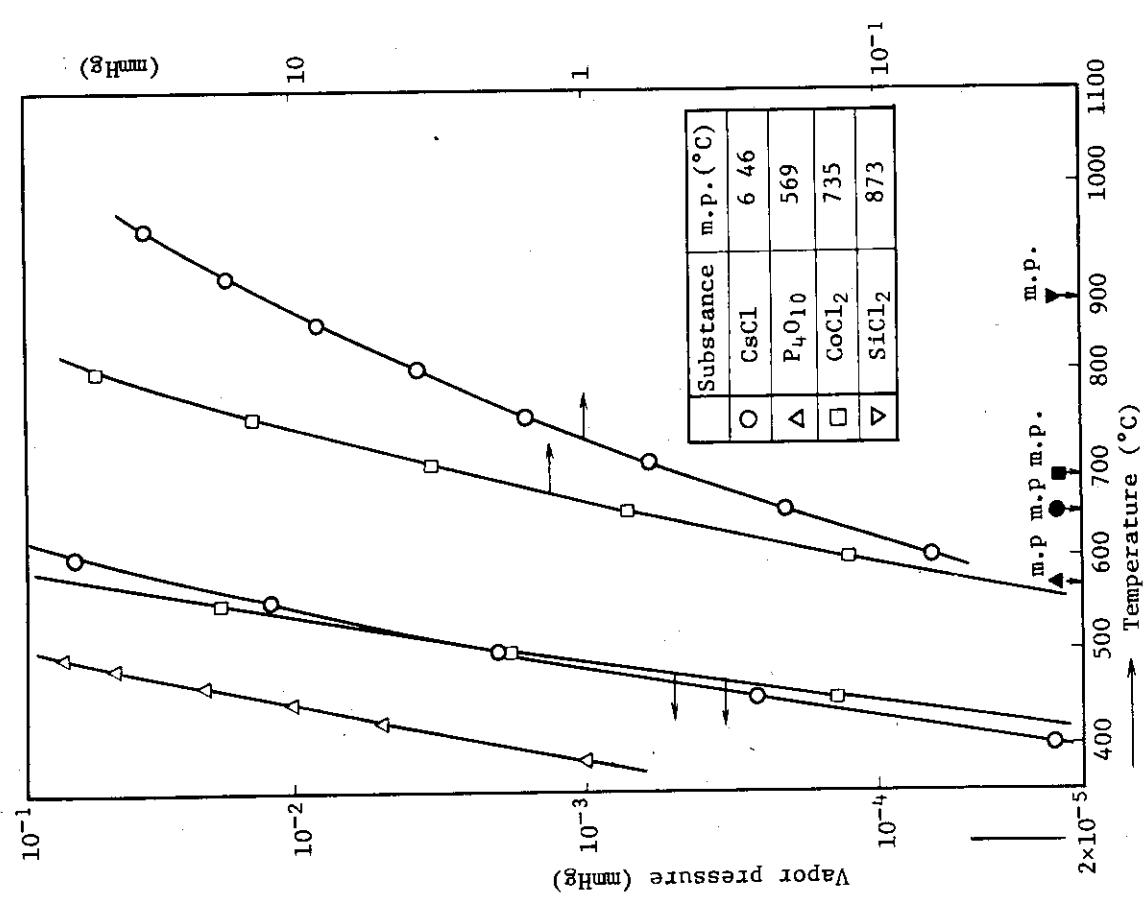


Fig. 6.1 Vapor pressure and melting point

Fig. 6.2 DF value calculated from vapor pressure

Table 6.4.1 Experimental Results

Run No		塩化物						平均値	7	8	9	10	11	物質均値	
		1	2	3	4	5	6								
ト レ段 1人 サ量	P Co Sr Cs	g/h g/h g/h g/h	35.04 23.38 1.17 46.74	87.6 64.2 32.1 46.74	87.6 64.2 32.1 46.74	87.6 64.2 32.1 46.74	87.6 64.2 32.1 46.74	70.08 46.66 23.34 93.28	87.6 64.2 32.1 128.2	87.6 64.2 32.1 128.2	87.6 64.2 32.1 128.2	87.6 64.2 32.1 128.2	87.6 64.2 32.1 128.2	87.6 64.2 32.1 128.2	
HTF 入 口	P Co Sr Cs	$\mu g/Nm^3$ $\mu g/Nm^3$ $\mu g/Nm^3$ $\mu g/Nm^3$	146 2.32 3.20 156.4	42.6 1.92 2.03 209.7	74.0 42.8 3.77 210.4	81.2 2.28 2.35 312.2	68.6 1.48 2.39 618.8	82.5 1.77 2.28 2.75	106 1.25 2.10 335.3	165 1.76 2.14 420.8	253 1.76 2.14 579.3	159 2.03 2.14 473.6	129 1.51 2.35 456.7	162 1.66 2.26 453.1	
ト レ 濃 度 1出 サ量	P Co Sr Cs	mg/h mg/h mg/h mg/h	76.8 1.22 1.68 82.3	22.4 1.01 1.07 110.3	38.9 12.9 1.98 110.7	42.7 22.5 1.24 164.2	36.1 1.20 1.26 325.5	43.4 7.78 1.45 158.6	55.8 0.931 1.20 176.4	86.8 0.658 1.20 221.3	133.1 0.926 1.105 304.7	83.6 1.068 1.13 304.7	67.9 0.794 1.13 249.1	85.2 0.873 1.19 240.2	
HTF 出 口	P Co Sr Cs	$\mu g/Nm^3$ $\mu g/Nm^3$ $\mu g/Nm^3$ $\mu g/Nm^3$	6.07 0.32 1.31 3.67	3.61 — 1.68 13.5	5.33 0.344 1.34 37.3	5.97 0.341 1.26 38.5	0.857 0.343 1.17 82.2	4.37 0.337 1.35 29.3	11.6 0.343 0.171 13.2	2.81 0.343 0.702 12.7	5.28 0.105 0.458 40.0	24.2 0.258 0.491 44.3	11.8 1.84 1.24 238.3	11.1 0.549 0.483 26.7	
ト レ 濃 度 1出 サ量	P Co Sr Cs	mg/h mg/h mg/h mg/h	3.19 0.168 0.689 0.344	1.90 — 0.884 1.93	2.80 0.181 0.705 7.10	3.14 0.179 0.663 19.6	0.451 0.180 0.177 20.3	2.30 0.180 0.177 43.2	6.10 0.369 0.0899 15.4	1.48 0.369 0.369 6.94	2.78 0.241 0.241 6.68	12.73 0.185 0.258 21.04	6.21 0.968 0.289 23.30	5.84 0.289 0.254 12.36	
燃 却 炉	P Co Sr Cs	— — — —	1.14×10 ³ 2.25×10 ³ 4.98×10 ³ 5.68×10 ²	3.91×10 ³ 2.05×10 ³ 6.36×10 ³ 4.24×10 ²	2.43×10 ³ 2.36×10 ³ 5.35×10 ³ 4.22×10 ²	2.43×10 ³ 2.36×10 ³ 3.55×10 ³ 2.85×10 ²	1.26×10 ³ 5.01×10 ³ 9.76×10 ³ 1.44×10 ²	1.01×10 ³ 6.93×10 ³ 2.90×10 ⁴ 3.69×10 ²	6.58×10 ² 5.01×10 ⁴ 2.90×10 ⁴ 5.29×10 ²	1.05×10 ³ 6.93×10 ⁴ 2.53×10 ⁴ 5.79×10 ²	1.05×10 ³ 6.01×10 ⁴ 2.84×10 ⁴ 4.21×10 ²	1.29×10 ³ 8.09×10 ⁴ 2.84×10 ⁴ 5.15×10 ²	1.05×10 ³ 7.16×10 ⁴ 2.59×10 ⁴ 5.34×10 ²	1.05×10 ³ 7.16×10 ⁴ 2.56×10 ⁴ 5.16×10 ²	
D	H T F	P Co Sr Cs	— — — —	— 2.41 — 2.44	— 11.8 — 1.21	— 13.9 — 1.87	— 13.6 — 2.04	— 80.0 — 2.07	28.7 9.14 — 13.3	— 5.16 — 2.99	47.9 58.7 — 13.3	6.57 16.6 — 5.26	10.9 10.7 — 4.36	26.6 8.05 — 3.98	
F	H T F	P Co Sr Cs	— — — —	— 24.1 — 2.44	— 11.8 — 1.21	— 13.9 — 1.87	— 13.6 — 2.04	— 8.11 — 2.07	— 7.53 — 1.08×10 ³	— 15.9 — 2.88×10 ⁴	— 25.4 — 1.35×10 ⁴	— 33.1 — 1.92×10 ⁴	— 14.5 — 6.1×10 ³	— 10.7 — 5.51×10 ³	— 19.4 — 1.04×10 ⁴
燃 却 炉 値	H T F	P Co Sr Cs	— — — —	— 2.74×10 ⁴ 3.82×10 ⁵ 4.66×10 ⁴	— 4.61×10 ⁴ — 3.64×10 ⁴	— 2.79×10 ⁴ 3.55×10 ⁵ 4.55×10 ⁴	— 1.94×10 ⁵ 3.56×10 ⁵ 5.24×10 ⁴	— 6.53×10 ⁴ 3.63×10 ⁵ 4.59×10 ⁴	— 2.59×10 ⁵ 8.69×10 ⁵ 1.92×10 ⁴	— 1.16×10 ⁵ 8.69×10 ⁵ 1.92×10 ⁴	— 3.15×10 ⁴ 3.48×10 ⁵ 1.33×10 ⁵	— 11.5×10 ⁵ 1.24×10 ⁵ 6.1×10 ³	— 1.41×10 ⁴ 6.63×10 ⁵ 1.03×10 ⁵	— 2.46×10 ⁴ 5.97×10 ⁵ 1.41×10 ⁵	
ダ ス	燃 却 炉 H.T.F.D.F. 値 燃 却 炉 H.T.F.D.F. 値 燃 却 炉 H.T.F.D.F. 値	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	
									38.9 83.8 3.26×10 ³	78.2 119 5.23×10 ³	80.8 64.7 4.78×10 ³	69.1 69.1 3.22×10 ³	57.3 56.2 5.16×10 ³	64.9 78.6 5.16×10 ³	

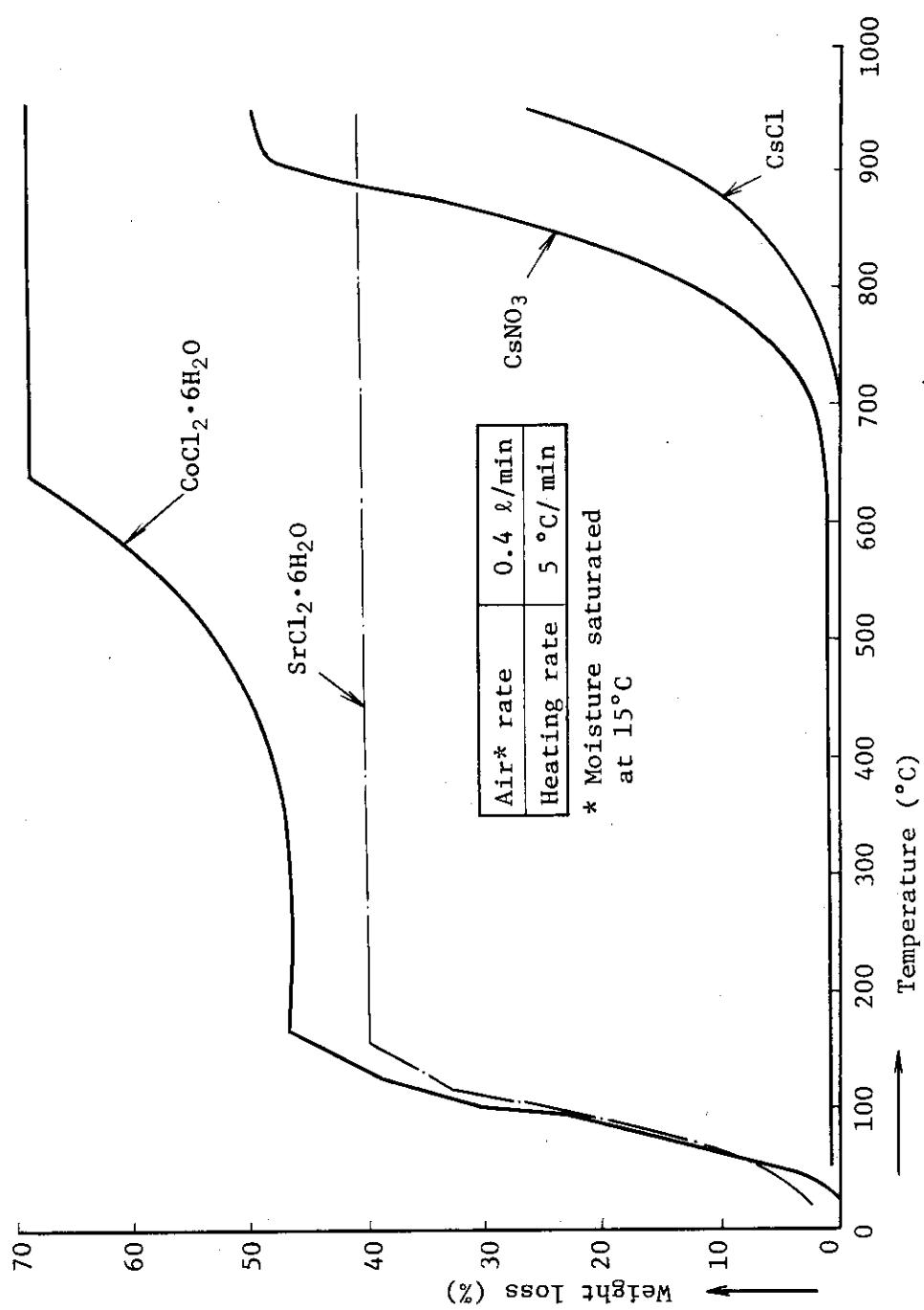


Fig. 6.4.1 Results of thermogravimetric analysis

Table 6.4.2 Recovery Ratio in Primary Chamber

Kinds		Chlorides		Oxides
Ash		-	0.831	0.800
Tracer	P	-	0.919	0.874
	Co		0.864	0.796
	Sr		0.724	0.739
	Cs		0.825	0.822
Relative Recovery Ratio / Ash	P	-	1.106	1.093
	Co		1.040	0.995
	Sr		0.871	0.924
	Cs		0.993	1.028
Ash Density		g/cm ³	2.59	3.18
Carbon Content		wt%	3.86	2.95

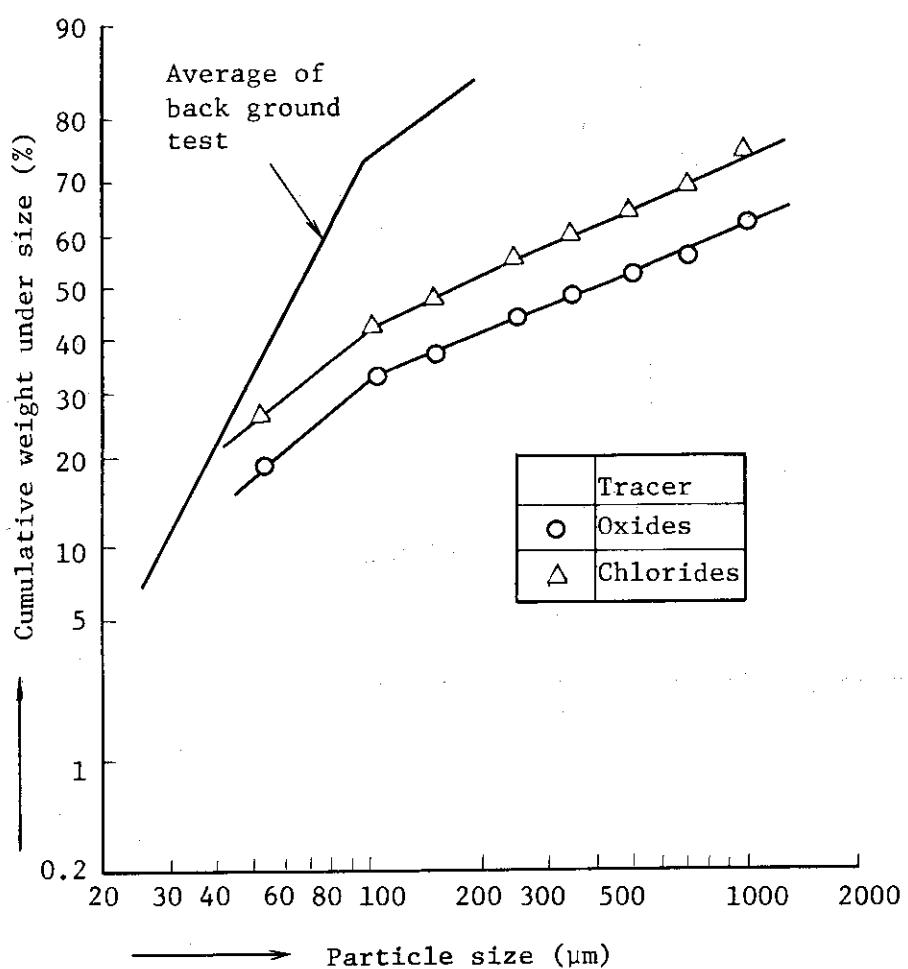


Fig. 6.4.2 Particle size distribution of ash

7. 結 言

紙類 50 %, ポリエチレン 50 % の組成の模擬廃棄物試料を用いて焼却炉の性能確認試験を行なった結果、次のことが明らかになった。

1. 炉の焼却能力は 16 kg/h から 20 kg/h の間にある。
2. 灰の炉内残留率は 95 % と非常に高く灰の飛散の少ない炉といえる。
3. 高温フィルタのダスト捕集効率は 99.3 % 以上あり DOP 粒子の捕集効率 97 % よりやや高い値を示す。この差は主として粒径の違いによるものと考えられる。
4. 連転時の圧力損失は 2 次燃焼室で 60 mm H₂O, 高温フィルタで 17 mm H₂O と小さく、とりわけ高温フィルタの圧力損失は小さい。
5. 高温フィルタの昇温に若干時間がかかる。

この結果、本焼却炉はその仕様を充分満足していることがわかったので次に非放射性の元素 P, Co, Sr, Cs を用いてコールドでの除染性能試験を行ない次のことがわかった。

1. 炉と高温フィルタを合わせた全系の除染係数は、不揮発性の Co, Sr で $10^5 \sim 10^4$ あり揮発性の P, Cs で 10^4 である。
2. トレーサの炉内残留率は灰の炉内残留率にほぼ一致する。

終りに、本試運転の実施に当り、本装置の建設・整備を担当された日揮株式会社の原子力事業部 阪田貞弘氏、並びに田島雅博氏を始めとする関係諸氏からよせられた深い御理解と御助言に対し、深く感謝の意を表するものである。あわせて、試料調整に御助言、御助力を賜った大洗研究所放射性廃棄物処理課液体係長 勝山和夫氏ほか関係諸氏、並びに試料分析に御助言、御尽力を下さった日立造船株式会社関係諸氏に、深く感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 1) JIS K0103
- 2) 佐野他 2 名 日本機械学会論文集, 38(313) P.2366 ('72-9)
- 3) 加藤他 3 名 日本機械学会論文集, 42(354) P.582 ('76-2)
- 4) 化学工学便覧 P.1238 化学工学協会編 '78年発行 丸善
- 5) 粒度測定技術 P.283 粉体工学研究会編 '75年発行 日刊工業
- 6) JIS Z 8808
- 7) Chemical Engineers HandBook John H.Perry 編 '63年発行 McGRAW-Hill
- 8) 金属データブック 日本国金属学会編 '74年発行 丸善
- 9) JIS K0102
- 10) JIS K0121
- 11) 集塵装置 P.105, 井伊谷鋼一編 '72年発行 日刊工業

7. 結 言

紙類 50 %, ポリエチレン 50 % の組成の模擬廃棄物試料を用いて焼却炉の性能確認試験を行なった結果、次のことが明らかになった。

1. 炉の焼却能力は 16 kg/h から 20 kg/h の間にある。
 2. 灰の炉内残留率は 95 % と非常に高く灰の飛散の少ない炉といえる。
 3. 高温フィルタのダスト捕集効率は 99.3 % 以上あり DOP 粒子の捕集効率 97 % よりやや高い値を示す。この差は主として粒径の違いによるものと考えられる。
 4. 運転時の圧力損失は 2 次燃焼室で 60 mm H₂O, 高温フィルタで 17 mm H₂O と小さく、とりわけ高温フィルタの圧力損失は小さい。
 5. 高温フィルタの昇温に若干時間がかかる。
- この結果、本焼却炉はその仕様を充分満足していることがわかったので次に非放射性の元素 P, Co, Sr, Cs を用いてコールドでの除染性能試験を行ない次のことがわかった。
1. 炉と高温フィルタを合わせた全系の除染係数は、不揮発性の Co, Sr で $10^5 \sim 10^4$ あり揮発性の P, Cs で 10^4 である。
 2. トレーサの炉内残留率は灰の炉内残留率にほぼ一致する。

終りに、本試運転の実施に当り、本装置の建設・整備を担当された日揮株式会社の原子力事業部 阪田貞弘氏、並びに田島雅博氏を始めとする関係諸氏からよせられた深い御理解と御助言に対し、深く感謝の意を表するものである。あわせて、試料調整に御助言、御助力を賜った大洗研究所放射性廃棄物処理課液体係長 勝山和夫氏ほか関係諸氏、並びに試料分析に御助言、御尽力を下さった日立造船株式会社関係諸氏に、深く感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 1) JIS K0103
- 2) 佐野他 2 名 日本機械学会論文集, 38(313) P.2366 ('72-9)
- 3) 加藤他 3 名 日本機械学会論文集, 42(354) P.582 ('76-2)
- 4) 化学工学便覧 P.1238 化学工学協会編 '78年発行 丸善
- 5) 粒度測定技術 P.283 粉体工学研究会編 '75年発行 日刊工業
- 6) JIS Z 8808
- 7) Chemical Engineers HandBook John H.Perry 編 '63年発行 McGRAW-Hill
- 8) 金属データブック 日本国金属学会編 '74年発行 丸善
- 9) JIS K0102
- 10) JIS K0121
- 11) 集塵装置 P.105, 井伊谷鋼一編 '72年発行 日刊工業